



## 行政院環境保護署

111年度土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案

# 油污染土壤綠色整治及 創造循環經濟效益（第二年）

期末報告書（定稿）

主辦單位：  行政院環境保護署  
專案執行單位： 朝陽科技大學／環境工程與管理系所  
專案主持人： 程淑芬 教授  
專案執行期間： 111 年 05 月 20 日起至  
112 年 04 月 30 日止

中 華 民 國 112 年 5 月 印製



# 111年度土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗申請計畫

申請編號：S2-6

## 一、專案基本資料表

|              |                                                                         |                                                                                       |                              |                                                                                                |                                      |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| 專案性質         | <input checked="" type="checkbox"/> 實驗性質 <input type="checkbox"/> 非實驗性質 |                                                                                       | 專案技術編碼                       | LAB-S-R-H1/C2-M                                                                                |                                      |
| 專案類別(單選)     | <input type="checkbox"/> 研究型 <input checked="" type="checkbox"/> 模場型    |                                                                                       | 研究主題                         | <input checked="" type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 調查 <input type="checkbox"/> 其他 |                                      |
| 申請機構系所       | 朝陽科技大學環境工程與管理系                                                          |                                                                                       |                              |                                                                                                |                                      |
| 機構地址         | 台中市霧峰區吉峰東路168號環境工程與管理系                                                  |                                                                                       |                              |                                                                                                |                                      |
| 專案主持人        | 程淑芬                                                                     |                                                                                       | 職等／職稱                        | 教授                                                                                             |                                      |
| 協同主持人        | 蕭因秀                                                                     |                                                                                       | 職等／職稱                        | 中油公司探採研究所研究員                                                                                   |                                      |
| 協同主持人        | 葉春爐                                                                     |                                                                                       | 職等／職稱                        | 中華輕質骨材協會理事長                                                                                    |                                      |
| 專案名稱         | 中文                                                                      | 油污染土壤綠色整治及創造循環經濟效益(第二年)                                                               |                              |                                                                                                |                                      |
|              | 英文                                                                      | Green Remediation of TPH-Contaminated Soil and Creation of Circular Economic Benefits |                              |                                                                                                |                                      |
|              | 關鍵字                                                                     | bioremediation; phytoremediation; TPH; arsenic; groundwater                           |                              |                                                                                                |                                      |
| 執行期程         | 自民國 111 年 05 月 20 日起<br>至民國 112 年 04 月 30 日止                            |                                                                                       |                              |                                                                                                |                                      |
| 專案主持人        | 姓名：程淑芬                                                                  |                                                                                       | E-mail：shufen@cyut.edu.tw    |                                                                                                | 專線：04-23323000-4237<br>手機：0952601977 |
| 專/兼任人員       | 姓名：林旻秀                                                                  |                                                                                       | E-mail：minsiou.lin@gmail.com |                                                                                                | 專線：04-23323000-4237<br>手機：0932714207 |
| 經費分析總表       | 專案預估<br>總經費                                                             |                                                                                       | 第一年<br>申請金額                  | 第二年<br>申請金額                                                                                    | 編列說明                                 |
|              | 1.                                                                      | 人事費用                                                                                  | 489,160                      | 462,003                                                                                        | (1~5項相加之50%為限)                       |
|              | 2.                                                                      | 貴重儀器使用含維護費                                                                            | 6,500                        | 0                                                                                              | (與計畫實驗相關)                            |
|              | 3.                                                                      | 消耗性器材與主要費用                                                                            | 1,955,840                    | 1,788,745                                                                                      | (與計畫主體相關)                            |
|              | 4.                                                                      | 其它研究相關費用                                                                              | 137,500                      | 187,552                                                                                        | (含差旅與租賃費用)                           |
|              | 5.                                                                      | 雜項費用                                                                                  | 37,000                       | 23,800                                                                                         | (1~6項相加之5%為限)                        |
|              | 6.                                                                      | 行政管理費                                                                                 | 254,000                      | 237,900                                                                                        | (1~5項相加之10%為限)                       |
|              | 7.                                                                      | 自籌款                                                                                   | 2,000,000                    | 2,000,000                                                                                      | (申請單位自行籌備款項)                         |
| 申請補助金額(1~6項) |                                                                         | 2,880,000                                                                             | 2,700,000                    | 總金額：5,580,000                                                                                  |                                      |
| 計畫總金額(1~7項)  |                                                                         | 4,880,000                                                                             | 4,700,000                    | 總金額：9,580,000                                                                                  |                                      |

專案主持人：

日期：112.05.11





# 土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案

## 111 年度專案成果績效自評表

二、成果績效自評表：「計畫總預估數」應與計畫審查核定值相符，請執行單位依實際達成之量化成果填寫於欄位中。

### (一) 學術面

| 項目 \ 目標達成程度          |                |              | 申請<br>預估數 | 期中<br>達成數 | 期末<br>達成數 | 結案後半<br>年<br>達成率 | 備註<br>(說明未達成原因或學術<br>產出發表名稱)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|----------------------|----------------|--------------|-----------|-----------|-----------|------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| A<br>學術產<br>出及活<br>動 | 1.國內投稿<br>(篇數) | (1)論文        |           |           |           |                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|                      |                | (2)研討會論文     | 1         | 0         | 1         |                  | 111 年 11 月 19 日發表於中華民國環境工程學會 2022 土壤與地下水研討會                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|                      | 2.國外投稿<br>(篇數) | (1)期刊論文      | 1         | 0         | 3         |                  | 111 年 10 月發表於 Agronomy 國際期刊，篇名 Green Remediation Technology for Total Petroleum Hydrocarbon-Contaminated Soil. Agronomy 12, 2759. 111 年 12 月投稿於 sustainability 國際期刊，篇名 Increased Benefits of Remediation of Petroleum-contaminated Soil by Phytoremediation 111 年 12 月投稿於國際期刊 Engineering Proceedings，篇名 Phytoremediation Efficiency of Weathered Petroleum-contaminated Soils by Vetiveria zizanioides and Cymbopogon nardus。 |
|                      |                | (2)國際研討會論文發表 | 1         | 0         | 1         |                  | 發表於 111 年 12 月 10 日 IEEE ICACEH 2022 研討會                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|                      | 3.報告           | (1)技術報告      |           |           |           |                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |



| 項目 \ 目標達成程度       |                  |           | 申請<br>預估數 | 期中<br>達成數 | 期末<br>達成數 | 結案後半<br>年<br>達成率 | 備註<br>(說明未達成原因或學術<br>產出發表名稱) |
|-------------------|------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------------|------------------------------|
|                   | (篇數)             | (2)研究報告   | 1         | 0         | 1         |                  | 期末成果報告                       |
|                   | 4.專著 (本數)        |           |           |           |           |                  |                              |
|                   | 5.辦理學術<br>會議(場數) | (1)研討/說明會 |           |           |           |                  |                              |
|                   |                  | (2)成果發表會  |           |           |           |                  |                              |
|                   |                  | (3)論壇     |           |           |           |                  |                              |
|                   | 6.研發改良<br>技術(項數) | (1)已開發技術  | 1         | 0         | 1         |                  |                              |
|                   |                  | (2)技術平台   |           |           |           |                  |                              |
| B<br>人才<br>培育     | 7.研發人員<br>(人數)   | (1)碩士     | 3         | 3         | 3         |                  |                              |
|                   |                  | (2)博士     | 1         | 1         | 1         |                  |                              |
|                   | 8.研究團隊<br>(個數)   | (1)跨領域團隊  |           |           |           |                  |                              |
|                   |                  | (2)跨機構團隊  |           |           |           |                  |                              |
|                   |                  | (3)形成研究中心 |           |           |           |                  |                              |
|                   |                  | (4)形成實驗室  |           |           |           |                  |                              |
| 9.其他指標<br>(請自行命名) |                  | (請自填)     |           |           |           |                  |                              |



## (二) 產業面

| 項目 \ 目標達成程度       |                  |                   | 申請<br>預估數 | 期中<br>達成數 | 期末<br>達成數 | 結案後半年<br>達成率 | 備註<br>(說明未達成原因或專利、技術轉移相關詳細資料) |
|-------------------|------------------|-------------------|-----------|-----------|-----------|--------------|-------------------------------|
| A 智慧<br>財產權       | 1.專利<br>(件數)     | 已核<br>准           | 發明        |           |           |              |                               |
|                   |                  |                   | 新型/設計     |           |           |              |                               |
|                   |                  |                   | 合計        |           |           |              |                               |
|                   |                  | 申<br>請<br>中       | 發明        |           |           |              |                               |
|                   |                  |                   | 新型/設計     |           |           |              |                               |
|                   |                  |                   | 合計        |           |           |              |                               |
| B 研發<br>技術轉<br>移  | 2.先期技術<br>成果移轉   | 件數                |           |           |           |              |                               |
|                   |                  | 授權金(仟元)           |           |           |           |              |                               |
|                   |                  | 衍 生 利 益 金<br>(仟元) |           |           |           |              |                               |
|                   | 3.技術移轉<br>(專利)   | 件數                |           |           |           |              |                               |
|                   |                  | 授權金(仟元)           |           |           |           |              |                               |
|                   |                  | 衍生利益金<br>(仟元)     |           |           |           |              |                               |
|                   | 4.技術移轉<br>(應用技術) | 件數                |           |           |           |              |                               |
|                   |                  | 授權金(仟元)           |           |           |           |              |                               |
|                   |                  | 衍 生 利 益 金<br>(仟元) |           |           |           |              |                               |
|                   | 5.可移轉<br>產業技術    | (1)技術(件數)         |           |           |           |              |                               |
|                   |                  | (2)品種/系<br>(件數)   |           |           |           |              |                               |
|                   | C 產學研<br>合作      | 6.促成合作<br>研究      | 件數        |           |           |              |                               |
| 金額(仟元)            |                  |                   |           |           |           |              |                               |
| 7.促成投資            |                  | 件數                |           |           |           |              |                               |
|                   |                  | 投資金額<br>(仟元)      |           |           |           |              |                               |
| 8.促成取得<br>業界科專    |                  | 件數                |           |           |           |              |                               |
|                   |                  | 業界投資金額<br>(仟元)    |           |           |           |              |                               |
| 9.其他指標<br>(請自行命名) |                  | (請自填)             |           |           |           |              |                               |



## (三) 政策面

| 項目                |                  | 目標達成程度 | 申請預估數 | 期中達成數 | 期末達成數 | 結案後半年達成率 | 備註<br>(說明未達成原因或其他詳細資料) |
|-------------------|------------------|--------|-------|-------|-------|----------|------------------------|
| A<br>服務<br>便民     | 1.技術服務           | 次數     |       |       |       |          |                        |
|                   |                  | 收入(仟元) |       |       |       |          |                        |
|                   | 2.諮詢服務           | 次數     |       |       |       |          |                        |
|                   |                  | 收入(仟元) |       |       |       |          |                        |
| B<br>政策<br>推動     | 3.協助政府推動<br>(件數) | (1)政策  |       |       |       |          |                        |
|                   |                  | (2)法規  |       |       |       |          |                        |
| C<br>技術<br>效益     | 4.整治技術提升(%)      |        | 30    | 30    | 30    |          |                        |
|                   | 5.整治成本降低(%)      |        | 20    | 20    | 20    |          |                        |
|                   | 6.提升能源效率(%)      |        | 30    | 30    | 30    |          |                        |
| 7.其他指標<br>(請自行命名) |                  | (請自填)  |       |       |       |          |                        |

三、請依前述學術面、產業面、政策面等預期量化成果，具體敘明研究成果對本署政策推動之助益。(200 字為限)

## 學術面(如國內外研討會、期刊投稿件數、或人才培育碩博士生說明)

本計畫在學術面探討植生技術對油污染土壤之整治成效，確認植生復育在促進油污染土壤分解之貢獻，相關研究成果已經整理撰寫成 3 篇英文論文；1 篇中文論文。3 篇英文論文已投稿於國際期刊，其中 1 篇發表於國際學術研討會。中文論文發表於中華民國環境工程學會 2022 土壤與地下水研討會，相關資料如下所示。

本計畫共計有 5 名碩士學生；1 名博士學生以及 16 名大學專題生參與，有助於國內土壤地下水污染整治人才之培育。

## 1. 投稿國際期刊 3 篇：

111 年 10 月發表於 Agronomy 國際期刊，篇名 Green Remediation Technology for Total Petroleum Hydrocarbon-Contaminated Soil. Agronomy 12, 2759.

111 年 12 月投稿於 sustainability 國際期刊，篇名 Increased Benefits of Remediation of Petroleum-contaminated Soil by Phytoremediation.

111 年 12 月投稿於 Engineering Proceedings 國際期刊，篇名 Phytoremediation Efficiency of Weathered Petroleum-contaminated Soils by Vetiveria zizanioides and Cymbopogon nardus.

## 2. 參與國際研討會發表論文 1 篇：

Increasing treatment benefits of weathered oil-contaminated soils through phytoremediation. 4th 2022 IEEE International Conference on Architecture, Construction, Environment and Hydraulics, Taichung, Taiwan, December 9-11, 2022.

## 3. 國內研討會 1 篇：

篇名：油污染土壤之綠色整治技術，111 年 11 月 19 日發表於中華民國環境工程學會 2022 土壤與地下水研討會

## 4. 培育 5 名碩士生(陳嘉禎、廖麗芸、林幸潔、胡育誠、林柏志)、1 名博士生(林旻秀)。

## 產業面(如合作研發產業、申請專利、洽談技術移轉廠商件數說明)



本計畫研究成果獲得技術包括植生整治技術、生物炭應用技術、培地茅提取技術，以及對砷具移除能力之輕質骨材。開發培地茅結合生物炭做為油污染土壤之整治技術，可提供國內油污染土壤整治應用，具有低碳、低耗能、低花費，並具有資源循環之經濟效益。成功將培地茅提煉出精油，具有高經濟價值。在輕質骨材方面開發出對砷具有高移除能力之陶粒，可做為地下水除砷技術，對於地下水富砷區域提供一種水源除砷技術。

1.申請新型專利 0 件。

2.洽談產業合作開發 1 件：植生復育整治。

**政策面(如整治費用降低、特定污染物整治效益提升、或提供政府作為監測/管制標準、污場址管理等政策及法規研訂之參考)**

1. 油污染土壤以培地茅搭配生物炭進行植生復育，不僅可加速土壤 TPH 分解效率，亦可固碳的作用，植體可做為芳香精油的製備原料，也可提供生質能。為具經濟效益、資源減碳的綠色永續整治技術。
2. 添加生物炭所燒結之陶粒，對砷有很高的吸附能力，可做為地下水除砷技術，對於地下域提供一種水源除砷技術。





行政院環境保護署土壤及地下水污染整治基金管理會

111年度土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案

☐申請計畫書   ☐期中報告   ☒修正計畫書   ☐期末報告   **審查意見回覆對照表**

| 計畫年度                                                       | 111 年度                                                                                         | 計畫類型                                                                           | <input type="checkbox"/> 研究型 <input checked="" type="checkbox"/> 模場型 |
|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| 計畫類別                                                       | <input checked="" type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 調查 <input type="checkbox"/> 其它 | 主持人：程淑芬                                                                        | NO：S2-6                                                              |
| 計畫名稱                                                       | 油污染土壤綠色整治及創造循環經濟效益(第二年)                                                                        |                                                                                |                                                                      |
| 委員審查意見                                                     |                                                                                                | 計畫單位回覆                                                                         |                                                                      |
| 委員一                                                        |                                                                                                |                                                                                |                                                                      |
| 1. 本年度計畫針對生物整治技術之盆栽試驗，宜考量相關環境因子影響，以及選用妥適之統計分析方法，評估生物復育之成效。 |                                                                                                | 1. 感謝委員指教，遵照委員指導辦理。盆栽試驗在試驗設計方面有進行對照組進行比較，讓環境因子一致，避免造成試驗影響。                     |                                                                      |
| 2. 有關應用結圈石作為地下水砷之吸附材料，宜綜合評估整體之成本效益，以及後續應用之可行性。             |                                                                                                | 2. 感謝委員指導，本年度成果會針對結圈石應用之成本效益及實務應用之可行性做評估。                                      |                                                                      |
| 3. 本計畫主題提及”創造循環經濟效益”，宜於本年度計畫完成時，具體量化說明計畫主題之成效。             |                                                                                                | 3. 感謝委員指導，遵照委員的指導，本計畫成果報告會針對計畫主題內容作具體的成效說明。                                    |                                                                      |
| 委員二                                                        |                                                                                                |                                                                                |                                                                      |
| 1. 本案擬進行油污染土壤綠色整治及創造循環經濟效益。                                |                                                                                                | 1. 感謝委員指導與肯定。                                                                  |                                                                      |
| 2. 建議於模場試驗時，探討土壤中其他物質對於多孔性資材對砷的吸附能力的影響。                    |                                                                                                | 2. 感謝委員指導。本計畫多孔性資材對砷的吸附主要應用於地下水砷的移除。本計畫會比較試劑水與地下水含砷溶液在處理效率及應用上的差異，以了解地下水基質之影響。 |                                                                      |
| 3. 建議模場試驗時，砷的吸附機制應更明確探討，飽和吸附的時間應進一步探討。                     |                                                                                                | 3. 感謝委員指導。本計畫會確認結圈石的飽和吸附容量及時間。在去除機制方面會盡力嘗試，期待能夠釐清。                             |                                                                      |
| 4. 建議模場試驗時考量在高鹽基及高氯土壤，加上地下水受海水影響區域種植生的可行性。                 |                                                                                                | 4. 感謝委員指導。本計畫場址之土壤是否具有高鹽基及高氯鹽，後續會先分析確                                          |                                                                      |





|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>5. 建議模場試驗時，評估處理後砷的最低殘留量。</p> <p>6. 建議於模場試驗時，評估吸附材料如何從整治土壤中移除。</p> <p>7. 建議於計畫完成後，評估本技術的成本。</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | <p>認，若屬高鹽基、高氯鹽，本研究會遵照委員建議，了解其對植物生長之影響。</p> <p>5. 感謝委員建議，遵照辦理。</p> <p>6. 本計畫添加於土壤中之生物炭，主要功能在增加土壤的通氣性，不在吸附土壤中之 TPH，因此未有移除的需要性。</p> <p>7. 感謝委員建議，本計畫會將技術的成本評估納入計畫成果。</p>                                                                                                                                                                                                                                                    |
| <p>委員三</p> <p>1. 本計畫提出兩項技術包括「油污土壤植生復育技術」及「油污土壤再生多孔性材料處理富砷地下水技術」，建議是否能針對專一技術進行研發，將有限經費集中於一項技術進行研發方能獲得具體成果。</p> <p>2. 有關油污土壤植生復育技術，國內外已有相當多文獻針對此一技術進行研究探討，建議應說明本計畫所欲開發之技術與其他研究的差異為何？另外也應說明本計畫所欲處理之油污土壤 TPH 的主要成分為何？建議應釐清本計畫技術去除 TPH 的機制及貢獻，包括物理性、植物或微生物反應等以及何種微生物之貢獻。</p> <p>3. 有關油污土壤再生多孔性材料處理富砷地下水技術，國內外已有相當多文獻針對類似技術進行研究探討，建議應說明本計畫所欲開發之技術與其他研究的差異為何？</p> <p>4. P29-30 因本計畫補助申請為模場試驗，建議應針對模場規模試驗規劃說明清楚。</p> | <p>1. 感謝委員的指導與建議。審視本計畫之內容確實較繁多，在研究經費有限下，為了讓研究成果更聚焦，本計畫重點工作項目會著力於植生復育技術去除 TPH 及結圈石除砷技術之驗證。</p> <p>2. 感謝委員指導。針對油污染土壤植生復育技術在國內外皆有相當多的研究，本研究在這議題上的研究目的不在於開發新的技術，主要目的在於本土技術的驗證，釐清自然衰減、植物、微生物在 TPH 分解過程中的貢獻，釐清 TPH 污染土壤整治技術的作用機制。本計畫場址污染土壤主要為 TPH-d，碳數在 C10-C40 之間，分為風化及未風化二種，相關內容已補充於申請書中。</p> <p>3. 國內外研究相當多吸附砷的材料，但評估結果顯示，處理成本相當的高，難具有實用性。本研究所探討的結圈石是一種廢棄物，若能有效的移除砷，其具有低成本的優勢，會較具有實務應用之可行性。</p> <p>4. 感謝委員指導，已將模場試驗內容補充</p> |





|                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 於修正計畫書中。                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| <p>委員四</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 植生復育方法具減碳效益，其利用培地茅，香茅產製精油，碳足跡是否一併計算。</li> <li>2. 結圈石吸附砷後的處理或再利用方式，只研究吸附能力，是否有脫附後再使用的可能。</li> <li>3. 分析用氣體有乙炔，用途應說明。</li> </ol>                                                                                                                           | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 感謝委員指導，碳足跡的計算確實相當重要，本計畫遵照委員的建議將碳足跡納如評估。</li> <li>2. 感謝委員指導。本計畫期望吸附砷後的結圈石透過熱脫付能夠達到再利用於砷吸附的功能。另外，吸附砷後的結圈石也可再利用作為輕質粒料。</li> <li>3. 氣體乙炔主要應用在原子吸收光譜儀分析重金屬。</li> </ol>                                                                                                                                                  |
| <p>委員五</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 設定試驗場址之污染特徵，地質特徵應完整掌握，並檢視預定種植作物之合宜性；研究之前評析應強化，才能以學理基礎探討具潛在績效工作等系統。</li> <li>2. 規劃九個試驗組之學理基礎(土壤特徵、污染特徵、植作特徵)、影響效果因素(天候、維護)應完整考量；避免以試誤法獲得無從系統解析之數據。</li> <li>3. 旋轉窯結圈石測試亦應以影響參數，學理基礎規劃測試工作；此項研究亦應建立明確執行方法與預期成果。</li> <li>4. 耗材編列未對稱工作項目、數量編列說明。</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 感謝委員指導。本計畫試驗場址之土壤特性、污染物特性在試驗前會分析確定。所種植的植物培地茅在國內中油公司已有多年的研究經驗，證實對油污染土壤具有分解成效，透過本研究完整的試驗計畫成效的驗證。</li> <li>2. 感謝委員的指導。在有限的經費下為了讓研究成果更具體，本計畫將聚焦於培地茅的植生復育成效驗證。試驗設計對照組，進行比對，避免受環境因子的影響。</li> <li>3. 感謝委員指導。結圈石的試驗將聚焦於結圈石對砷的吸附容量與除砷技術的建立。</li> <li>4. 本計畫耗材經費遠低於計畫編列原則所需之經費，難以對稱工作項目與數量編列，僅能以實際實驗室所需使用之耗材項目編列。</li> </ol> |
| <p>委員六</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. P.4，有關油污染土壤生物復育法，國</li> </ol>                                                                                                                                                                                                                            | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 感謝委員的指導。國內對於油品污染土</li> </ol>                                                                                                                                                                                                                                                                                       |



|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>外已有相關整治技術及控管標準作為發展依據，故建議可補充國內外土壤油品污染之管制標準及控管情形，以作為後續技術改善之參考依據。</p> <p>2. P.28，有關污染整治方法規劃，建議宜針對模場試驗設置規劃進行補充說明，透過瞭解模場相關試驗參數之設置進而掌握現地處理情形，有助於提升技術未來應用性及可信度。</p> <p>3. P.52，有關研究經費之人事費用配置，臨時工資經費編列之合計項目疑似有誤，建議宜重新檢視並進行修正。</p>                                                                                                                        | <p>壤訂有管制標準，本計畫對於改善目標已有將國內土壤管制標準納入參考依據。</p> <p>2. 感謝委員建議。修正稿已遵照委員的指導，將模場試驗設計做詳細補充說明。</p> <p>3. 感謝委員指正。人事費臨時工資部分已重新檢視修正。</p>                                                                                                                                                                                           |
| <p>委員七</p> <p>1. 本計畫包括兩部份，其一為油污染土壤生物復育技術，擬以培地茅、香茅與咸豐草進行，並利用植物殘體製成生物炭做為固碳以增加碳匯功能，本計畫擬以台中供油中心場地做為實驗場域。生物復育在土壤整治原就扮演重要角色，生物炭之運用可為碳中和過程提供另一選擇。</p> <p>2. 本計畫另一為探討污染場址處理富砷地下水之技術，地下水富砷問題在國際上廣受重視，台灣早期發展中亦甚受其害，發展處理地下水富砷技術具有其意義。本計畫擬以雲林與嘉義地區做為實驗場域。</p> <p>3. 本計畫申請費用約為 444 萬元，消耗性器材費用約 273 萬元，約占 61%，主要為土壤快篩、整地工程與地下水砷移除。</p> <p>4. 本計畫執行過程宜收集與建立成本分</p> | <p>1. 感謝委員指導。在植生復育試驗的部分，在有限的經費下為了使研究結果更具體，遵照委員三的建議，將聚焦於培地茅進行植生栽種試驗。</p> <p>2. 感謝委員肯定。結圈石是旋轉窯所產生的廢棄物，對於水中所含的砷具有良好的移除能力。透過本研究希望開發出處理地下水富砷的技術，創造廢棄物循環再利用的目標。</p> <p>3. 感謝委員指導。經修正後申請費用約為 270 萬元，消耗性器材費用約 173 萬元，約占 64%。因土壤快篩試劑較貴，在有限的經費下，本研究調減快篩經費，改以實驗室分析方式，節省快篩試劑經費。</p> <p>4. 感謝委員指導，本計畫遵照委員指導，計畫執行成果會將成本分析納入報告。</p> |



|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>析資料，俾能做為效益成本分析之基礎。</p> <p>5. 本計畫合作人員除了中油探採所外，另有明春窯業人員參與，這家公司資本額 2800 萬元，自 98 年營運至今。</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | <p>5. 感謝委員指導。明春窯業參與本計畫，本要協助指導陶粒製作技術，縮短本計畫學習陶粒製作的時程。</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| <p>委員八</p> <p>1. 本計畫以油污染土壤為主軸，開發包括植生復育技術、植物體再利用、以及土壤材料化應用技術，前者包括盆栽及現地栽種實驗，植體利用包括生物碳製備及精油開發，後者包括砷吸附劑開發及砷地下水處理應用。計畫整合三項子計畫，各項子題有其重要性。</p> <p>2. 由圖 3.3-3 結果看起來，除 E1 及 E2 外，結圈石對砷吸附能力並非很大，建議應該與市面上常用的吸附劑作比較，說明其優勢。</p> <p>3. 3.5.1 建議說明選擇的 TPH 組成為何？</p> <p>4. 3.5.2 中的管柱吸附實驗顯示，目前測試的材料，其吸附能力均低，此部分是否持續進行後續測試建議評估。</p> <p>5. 計畫中原先規劃植體生物碳製備及精油開發，其中精油部分看不出目前成果及後續如何執行，建議補充說明。</p> <p>6. 主持人在此領域經驗豐富，執行多項相關計畫，據執行計畫能力。</p> | <p>1. 感謝委員的肯定。本計畫針對三項主題盡力研究產出具體成果。</p> <p>2. 感謝委員指導。圖 3.3-3 中，E1 及 E2 為結圈石。其他編號除 K 及 L 為研究團隊自行製備之生物炭外，其餘皆為市售之陶粒材料。從圖 3.3-3 可以明顯看到結圈石對砷的去除效率遠高於市售陶粒商品。結圈石為廢棄物，具有創造廢棄物循環再利用之效益。</p> <p>3. 本研究所使用台中供油中心的污染土，其 TPH 主要為碳數 C10~C40 之高碳數污染油品。</p> <p>4. 感謝委員指導。誠如委員所言，目前自行燒製之陶粒對砷之吸附能力均低，競爭力遠不如結圈石。在有限的經費下，本年度將聚焦於結圈石操作參數之建立及除砷作用機制的探討，使成果更具體。</p> <p>5. 感謝委員指導。精油提煉部分中油公司正積極開發萃取技術及品質的分析，在今年度應該會有具體成果展現。</p> <p>6. 感謝委員肯定。本計畫感謝環保署的經費支持，會積極完成所有計畫內容。</p> |
| <p>本署業務單位</p> <p>1. 請依本署補助上限經費及 111 年度土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案徵求書規定調整本計畫經費分析表。</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | <p>1. 感謝業務單位指導，本計畫遵照指示依 111 年度徵求書規定調整計畫經費。</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |



# 行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

□構想書 □申請計畫書 ■期中報告  
□修正計畫書 □期末報告

## 審查意見回覆對照表

|                                                            |                                                                                                |                                                                            |                                                                                                   |
|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 計畫年度                                                       | 111 年度                                                                                         | 計畫類型                                                                       | <input type="checkbox"/> 先導型 <input type="checkbox"/> 研究型 <input checked="" type="checkbox"/> 模場型 |
| 計畫類別                                                       | <input type="checkbox"/> 調查 <input checked="" type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 其他 |                                                                            | 主持人：程淑芬 NO：A6                                                                                     |
| 計畫名稱                                                       | 油污染土壤綠色整治及創造循環經濟效益(第 2 年)                                                                      |                                                                            |                                                                                                   |
| 審查意見                                                       |                                                                                                | 執行單位回覆                                                                     |                                                                                                   |
| 委員一                                                        |                                                                                                |                                                                            |                                                                                                   |
| 1. 對原計畫書的建議已回覆說明。                                          |                                                                                                | 1. 感謝委員指導與肯定。                                                              |                                                                                                   |
| 2. 本計畫為第二年度的延續性計畫。                                         |                                                                                                | 2. 是，本計畫為第二年度延續性計畫。                                                        |                                                                                                   |
| 3. 本期中報告已說明計畫的執行狀況與試驗流程，研究方法也已具體說明(Chap. 3)。               |                                                                                                | 3. 感謝委員肯定。                                                                 |                                                                                                   |
| 4. 本計畫未說明是否有自籌款。                                           |                                                                                                | 4. 本計畫合作單位中油公司協助部分樣品的分析，做為自籌款。                                             |                                                                                                   |
| 5. 本次報告為期中報告，計畫後續的執行工作項目已於 P.5.1 中簡要說明。                    |                                                                                                | 5. 感謝委員肯定。                                                                 |                                                                                                   |
| 6. 計畫進度已經說明，並無明顯落後(對後續擬執行工作項目及內容已有具體規劃)。                   |                                                                                                | 6. 感謝委員肯定。                                                                 |                                                                                                   |
| 7. 期中報告所說明的研究內容與原計畫目的符合。                                   |                                                                                                | 7. 感謝委員肯定。                                                                 |                                                                                                   |
| 8. 本報告為期中報告，已提出初步的研究成果，建議期末報告能依研究內容提出在實務上的應用潛力，以及實務上適用的情境。 |                                                                                                | 8. 感謝委員肯定，期末報告會依試驗成果，說明其在實務上應用的潛力與方法。                                      |                                                                                                   |
| 9. 期中報告所提出的研究成果尚符合預期。                                      |                                                                                                | 9. 感謝委員肯定。                                                                 |                                                                                                   |
| 委員二                                                        |                                                                                                |                                                                            |                                                                                                   |
| 1. 期中進度符合。                                                 |                                                                                                | 1. 感謝委員肯定。                                                                 |                                                                                                   |
| 2. 修剪植物是否計量？                                               |                                                                                                | 2. 植物栽種期間，若出現植物生長已出現老化，便會著手進行植體修剪採收。每次採收前均有量測植體高度，以及量秤採收植體之生質量。            |                                                                                                   |
| 委員三                                                        |                                                                                                |                                                                            |                                                                                                   |
| 1. 主題發散、係多個已知技術結合的試驗，不易從執行成果做後續推廣。                         |                                                                                                | 1. 感謝委員指導。本計畫重點工作項目著力於植生復育技術去除 TPH 以及評估多孔性資材對砷之去除能力。目前已有初步成效，後續應有推廣應用的可行性。 |                                                                                                   |
| 2. 地下水管柱淋洗結圈石之設計，建議改採孔隙體積的方式，日後較好應用。                       |                                                                                                | 2. 感謝委員建議。本研究目前先著力於開發出具處理砷能力之資材。待產品之吸附能                                    |                                                                                                   |
| 3. 循環經濟的概念模式宜說明清楚。                                         |                                                                                                |                                                                            |                                                                                                   |





|                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>4. 盆栽試驗宜在控制條件下的溫室或人工氣候室進行，否則成果很難被科學界所接受。</p>                                                                                                                                                                                                                          | <p>力足以作為實務應用時，會將資材之處理能力依委員建議採用孔隙體積方式呈現。</p> <p>3. 感謝委員建議，期末報告會將整個技術之資源零廢棄循環利用進一步說明。</p> <p>4. 感謝委員建議，盆栽試驗在溫室或人工氣候室進行，在撰寫論文時確實較容易被科學界所接受。但，在溫室或人工氣候室種植之植物，生長情況與現地會有很大的差異，在現地應用可能較不具代表性。</p>                                                                                              |
| <p><b>委員四</b></p> <p>1. 本計畫後續宜進一步評析添加生物類(不同比例)對 TPH 攝取之影響，以及微生物菌相改變與生物類添加與否之關聯，以利釐清生物類之作用。</p> <p>2. 請補充說明植栽試驗雖經種植數週以上之測試，亦應將天氣狀況(含日照、雨量)及栽養條件(如灑水量、添加生物類比例等)等外在可能影響植栽生長之因素，予以敘明比較，以利瞭解生長狀況之差異，係由生物類添加比例之貢獻度。</p> <p>3. 有關結圈石對於砷之飽和吸附量試驗成果為何?後續是否試驗規劃 recyclability?</p> | <p>1. 感謝委員的指導與建議。本研究受限於經費及時間，目前先聚焦於培地茅及香茅之植生成效探討。</p> <p>2. 感謝委員的指導。本計畫之植生復育試驗皆有設計對照組。可以很清楚的釐清植生的成效。</p> <p>3. 感謝委員建議，吸附容量是決定資材是否適合作為砷吸附材料的重要參數，本計畫會針對結圈石以及本研究所燒結之輕質骨材進行砷之飽和吸附量評估。本研究亦會針對吸附後的資材是否具有再生能力進行試驗。目前初步試驗結果顯示，在 105℃ 烘烤 48 小時後，資材對砷之吸附能力可以回復 70% 以上，未來若再精進，應可再提升再生資材之處理能力。</p> |
| <p><b>委員五</b></p> <p>1. 消耗性器材費用甚高，應請說明原規劃實驗參數/實驗組合與實際執行之差異性。</p> <p>2. 植物試驗生長受環境條件影響；本年度實驗期間之環境條件是否呈變化致潛在影響實驗結果?</p> <p>3. 單位植物吸附量變化之潛在影響因素請掌握解析。</p>                                                                                                                    | <p>1. 感謝委員的指導。本計畫消耗性耗材費用有部分費用要支援中油公司的試驗耗材。中油公司在進行菌液培養、精油萃取、菌項分析方面之耗材費用較高，由本計畫支援，所以耗材費用尚屬合理。此外，現地模場試驗之規模不小，整個模場建置工程耗費較高。本計畫大致都依原規劃試驗內容進行。在多孔性除砷資材的開發方面，因添加氧化鐵、二氧化錳方面因所製備之資材對砷之吸附量並未有顯著提升，所以未針對其特性進行分析。在計畫後期，發現添加生物炭之多孔性資材對砷具有相當高的吸附能力，但因計畫執行期限已屆，</p>                                    |



|  |                                                                                                                                                                                                           |
|--|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | <p>在本次計劃期間還無法探討其最佳配比及特性。</p> <p>2. 感謝委員建議。本試驗有同步進行對照組試驗，對於環境條件之影響可排除。另本次試驗期間，整個環境條件並無特殊狀況發生，應無此疑慮。</p> <p>3. 感謝委員建議。植生復育對土壤 TPH 之降解機制相當多元，植物吸附並非植生復育對 TPH 去除之主要機制。因 TPH 降解機制相當多元，因此本試驗設計對照組來釐清各項影響因素。</p> |
|--|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|



# 行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

□構想書 □申請計畫書 □期中報告  
□修正計畫書 ■期末報告

## 審查意見回覆對照表

|                                                                                                                                                                                                                                                               |                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| 計畫年度                                                                                                                                                                                                                                                          | 111 年度                    | 計畫類型                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | □先導型 □研究型 ■模場型 |
| 計畫類別                                                                                                                                                                                                                                                          | □調查 ■整治 □其他               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 主持人：程淑芬 NO：A6  |
| 計畫名稱                                                                                                                                                                                                                                                          | 油污染土壤綠色整治及創造循環經濟效益(第 2 年) |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                |
| 審查意見                                                                                                                                                                                                                                                          |                           | 執行單位回覆                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                |
| 委員一：蔡俊鴻委員                                                                                                                                                                                                                                                     |                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                |
| <div>1. 本年度(第二年)計畫目標「再生多孔性材料」之製作條件、材料性質/效能之測試程序、再現性，請補充說明。</div> <div>2. 現場試驗/4.2-2 相關測試數據之變異度、測試實驗值之可靠度控管、請補充解析(多組測試之變化範圍甚大；表 4.2.3-4、表 4.2.3-5)。</div> <div>3. 現地吸附地下水砷之測試，請檢視與吸收理論之切合性；應可提供後續應用推估飽和吸附量/吸附率去除效率參考。</div> <div>4. 計畫之學術/產業/政策面績效請補充展現。</div> |                           | <div>1. 本年度再生多孔性材料之研究重點主要聚焦於提升材料對砷之吸附容量。感謝委員的指正，已將多孔性材料製作條件、性質分析及測試程序等內容補充於 3.2 節。</div> <div>2. 感謝委員指導。現場試驗土方為場址開挖出之污染土方，濃度變異度會比較高。雖然在試驗前已試圖將其混拌均勻，但能夠混拌均勻的能力有限。以現地污染土壤，差異在 1000 mg/kg 以內應該算是合理。因此，本計畫在不同試驗組間 TPH 分解效率之比較主要透過盆栽試驗來探討，盆栽試驗土方量較少，土壤 TPH 比較容易掌握。現地試驗土方量較大，植物生長較不受限制，可以生長較好，主要用來探討植物生長情況的差異。</div> <div>3. 感謝委員指導。本研究發現，結圈石、添加氧化鐵、二氧化錳所燒結之輕質材料雖然對砷有相當高之移除能力，但其持續時間相當短，顯示飽和吸附容量不高，不具實際應用價值。但，添加生物炭所燒結之輕質材料，對砷之移除效率不僅接近 100%，且持續時間相當長，在本計畫所測試的 90 分鐘時間內皆未有衰減現象，具有應用價值，未來可再延長試驗時間，探討其飽和吸附容量，評估其實際應用之可行性。</div> <div>4. 感謝委員指導。在學術/產業/政策面之績效已在成果績效自評表中補充。</div> |                |
| 委員二：江康鈺委員                                                                                                                                                                                                                                                     |                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                |
| <div>1. 有關培地茅製備精油之試驗，相關精油化合物組成為何？後續超臨界萃取後反應相</div>                                                                                                                                                                                                            |                           | <div>1. 本計畫針對培地茅植體及所提取之精油皆有進行 TPH 成分分析，結果濃度皆低於偵測極限。</div>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                |





|                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>產物是否受到黏滯度及組成特性而影響後續之應用？建議宜須進一步評析。</p> <p>2. 自製陶粒添加 <math>\text{Fe}_2\text{O}_3</math> 及 <math>\text{MnO}_2</math> 之試驗中，如何驗證添加之比例，能均勻附著於陶粒？此外，砷吸附量之試驗結果，是否得到陶粒吸附砷之飽和吸附能力？此外，熱脫附陶粒後，雖可說其再使用特性，然砷脫附後仍須再進一吸附處理，本計畫最終目標為何？</p> <p>3. 本計畫所提出之循環經濟效益，建議仍須進一步予以釐清與評析。</p> | <p>推測 TPH 分子較大，無法直接被植物所吸收。至於是否會有 TPH 分解衍生產物殘留而影響產品的應用價值，後續計畫可再持續探討。目前超臨界萃取產物並未有黏滯度問題，後續會再留意。</p> <p>2. 感謝委員指導，本計畫製作陶粒之原料經過混拌、混煉，所添加之 <math>\text{Fe}_2\text{O}_3</math> 及 <math>\text{MnO}_2</math> 應可均勻分布於陶粒之中。陶粒燒結溫度達 <math>1200^\circ\text{C}</math> 以上，已達熔融狀態，所添加之 <math>\text{Fe}_2\text{O}_3</math> 及 <math>\text{MnO}_2</math>，理論上應可與土壤基質緊密結合。未來可再透過電子顯微鏡了解其分布情況。本計畫透過管柱吸附試驗計算各種陶粒對砷之飽和吸附容量。添加生物炭之陶粒，其在本計畫試驗範圍尚未達飽和吸附容量，未來可再延長管柱吸附試驗時間，評估其飽和吸附量。砷不會分解，陶粒熱脫附後透過空氣污染防治措施，收集至飛灰之中，只能達到污染減積的目標。</p> <p>3. 感謝委員指導。本計畫以植生復育取代傳統的物理化學整治，為較經濟的綠色永續整治技術。產生的植體透過製備生物炭可再利用於場址整治，提升整治成效，亦可提供其它再利用方式，可減少植體處置的經費，亦可發揮生物炭的價值。另外培地茅植體可提取精油，為具高經濟價值的產品。本計畫所研究之植生復育技術，整治過程不僅可減少經費，從綠色整治過程亦可讓原本的廢棄物循環再利用，符合循環經濟效益。</p> |
| <p>委員三：劉沛宏委員</p> <p>1. 植生試驗土壤的厚度與培地茅根系的生長關係，是否會影響。</p> <p>2. 利用培地茅與香茅的植生試驗，其優先分解油品中的物種是否有所不同或與原生菌、添加油分解菌比較，未來可加以探討。</p> <p>3. 油品分解後藉由排水系統排出的可能性，對排出水可再檢測探討水中有機物的種類。</p> <p>4. 垂直相的土壤中 TPH 濃度是否也可比較。</p> <p>5. 土壤油污染不均質性的影響結果，以統計方式呈現仍可看出趨勢。</p>                      | <p>1. 感謝委員的指導。土壤的厚度越充足，培地茅的根系發展會更廣，植株會長得更茂盛。</p> <p>2. 感謝委員提供的建議，委員的建議是一個相當有趣的課題，本計畫會納入未來研究的議題。</p> <p>3. 感謝委員指導。本計畫之滲出水直接收集至廠區之廢水處理系統，因此沒有特別分析其 TPH 殘留情形。未來會遵照委員建議，了解 TPH 隨滲出水滲出情形。</p> <p>4. 感謝委員指導，遵照辦理。</p> <p>5. 感謝委員指導，本計畫原先確實規劃利用統計的方式來比較不同試驗組之間的差異。但可能因土壤 TPH 濃度皆已相當低，統計分析結果並沒有顯著差異。</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |



|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>6. 精油提煉出後其成份組成是否應與非種植於非污染土收成煉製成精油的組成相同。</p> <p>7. 添加氧化鐵、氧化錳燒結後的化學型態?</p> <p>8. 皆有達成設定目標，並兼具實用性。</p> <p>9. 請補充說明減碳效益及估算碳足跡。</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | <p>6. 感謝委員建議。遵照委員建議納入未來試驗設計，以做為油污染土壤種植培地茅其萃取精油之安全性評估。</p> <p>7. 感謝委員的建議。因添加氧化鐵、氧化錳所燒結之陶粒其對砷之吸附能力無法持久，評估其不具實際應用效益，所以未分析其燒結後之化學型態。目前較具發展潛力為添加生物炭所燒結之陶粒，後續將對其特性進一步分析。</p> <p>8. 感謝委員肯定。</p> <p>9. 目前本計畫僅能先針對種植培地茅以及土壤添加生物炭所能固碳、儲碳量進行評估，至於整體的減碳效益以及碳足跡，需等後續有較明確的處理情境，並收集更充足的碳排放係數才能更精準計算。</p>                                                             |
| <p><b>委員四：盧至人委員</b></p> <p>1. 本模場試驗計畫期末報告已說明計畫的執行成果，也已說明計畫的執行流程及試驗方法。</p> <p>2. 本模場試驗計畫期末報告已於 P.5.3 說明後續可繼續執行的研究項目。</p> <p>3. 計畫執行進度預定進度相符。</p> <p>4. 研究內容與原訂計畫目的相符。</p> <p>5. 本模場試驗計畫期末報告已依據研究結果提出適當的討論與建議，此建議對於實場的實際應用性尚待進一步確認。</p> <p>6. 本模場試驗計畫的整體研究成果符合預期的研究目標。</p> <p>7. 本計畫的執行可以培育土壤/地下水領域的人才。</p> <p>8. 本模場試驗計畫的研究成果：已有論文發表。</p> <p>9. 本模場試驗計畫符合國內土水污染技術研發的政策，對國內土水領域(整治工程)的展有所助益。</p> <p>10. 建議說明</p> <p>(1) 由顧問公司協助完成的項目(或是實際參與的項目)。</p> <p>(2) 本技術的限制條件(或不適用情境)。</p> <p>(3) 本技術與傳統整治技術(例如：喬木...等植生復育...等)的比較。</p> | <p>1. 感謝委員肯定。</p> <p>2. 感謝委員肯定。</p> <p>3. 感謝委員肯定。</p> <p>4. 感謝委員肯定。</p> <p>5. 感謝委員肯定。後續會依委員的建議針對實場的應用做進一步評估確認。</p> <p>6. 感謝委員肯定。</p> <p>7. 感謝委員肯定。</p> <p>8. 感謝委員肯定。</p> <p>9. 感謝委員肯定。</p> <p>10. 感謝委員的指導。本計畫感謝瑞昶公司的協助。瑞昶公司在本計畫主要協助現地污染土壤的挖填，以及試驗模廠的建置。其餘工作由本計畫團隊朝陽科大及中油公司完成。植生復育必須要植物根圈範圍能接觸到才能發揮功效，因此不適用於污染深度太深的土壤地下水。此外，TPH 濃度太高、新鮮污染土壤恐會抑制植物生</p> |



|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>(4) 執行本工法後，生質材料的後續處理。</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                             | <p>長，此部分後續須進一步確認。傳統物理化學處理技術需要耗費較多的能源、藥品，對土壤特性也會有較多影響，整治費用較高。植生復育相對低耗能、對環境友善、費用較低，且可達到減碳、固碳效益。相較於喬木，以培地茅進行植生復育，生長速度較快，且植體可行再利用，具經濟價值。植生復育所產生的生質材料後續之處理方式，最簡單的方法是做成燃料，亦可如本計畫做成生物炭做為土壤改良劑。而培地茅還可用來提煉精油，可再利用的效益更高。</p>                                                                                                                                                                |
| <p>委員五：許正一委員</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 植株高度與重量建議記錄至個位數即可，但請統一有效數字。</li> <li>2. 何謂土壤原生菌？其功能如何解釋？可否確定不含有油分解菌？</li> <li>3. 各處理之間雖有進行重覆試驗，但無顯著性差異測驗，如何能知道處理間確實效果不同？</li> <li>4. 種植培地茅的固碳量估算過於樂觀，這不是淨的固碳量，宜多考慮。</li> <li>5. 結圈石的去砷效果可在下一期做更深入的探討。</li> <li>6. 提醒 PI，勿過度發表於快速審查、公開取閱、流於型式審查的期刊。</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 感謝委員指導。</li> <li>2. 土壤原生菌在本計畫中的定義是指原本存在土壤中的菌種。經過本計畫的檢測鑑定結果顯示，土壤中原本存在的菌種包含有油分解菌，因此原生菌試驗組土壤之 TPH 也有一定的分解效率。</li> <li>3. 感謝委員指導。本計畫進行重複試驗，透過統計分析，評估不同試驗組別之結果是否有差異。</li> <li>4. 感謝委員指導。本計畫依據質量守恆定律，從培地茅生質產量以及培地茅植體之含碳量計算種植培地茅之固碳量。這是目前常用來計算種植植物固碳量之評估方式。後續會再參考其他理論，精進固碳量之評估方法。</li> <li>5. 感謝委員指導，遵照辦理。</li> <li>6. 感謝委員指導，遵照辦理。</li> </ol> |



---

## 中文摘要

本計畫主要包括二個部分。第一部分為『油污染土壤生物復育技術』的成效驗證；第二部分為『油污染土壤再生多孔性材料處理富砷地下水源技術』的開發。

在油污染土壤生物復育技術方面，本計畫結合國內最主要的油品生產公司中油公司採採所及油銷部共同合作，透過模場試驗驗證油品污染之生物整治技術成效，並建立操作參數。本計畫生物整治技術涵蓋微生物整治及植生復育整治。首先透過盆栽試驗設計，分為原生菌種試驗組、油分解菌試驗組、植生試驗組、油分解菌結合植生試驗組。此外生物炭具有提高土壤透氣性，促進植物根系發展的功能，是土壤生物復育所需要的元素，因此將其結合生物整治進行試驗。本計畫選擇培地茅、香茅兩種植物進行植生復育試驗。藉由試驗結果評估各種處理技術之改善成效。釐清植生復育中植物種植對改善成效之貢獻。透過盆栽試驗結果篩選最可行有效之改善方法，進行現地試驗，驗證生物復育技術之實場成效。此外，透過植生復育產品再利用用途之開發，使植生復育在土壤污染整治之外，創造循環經濟效益。

在油污染土壤再生多孔性材料處理富砷地下水源技術開發方面，研究團隊過去研究發現旋轉窯結圈石對砷有很強的吸附去除能力。因此，本計畫進行各種結圈石粒徑之砷吸附試驗，探討其對砷之移除能力。並模擬結圈石之燒結條件，調整原料配比，燒結對砷具有較高移除能力之多孔性材料，做為富砷地區地下水源除砷資材。

盆栽試驗結果顯示，種植培地茅可增加 TPH 降解率達20%~30%。在種植培地茅植生復育下大部分生物容易分解的 TPH 在6個月內可以分解。在現地試驗結果顯示，土壤中 TPH 風化程度會影響培地茅生長。風化土壤區培地茅的生質產量是新鮮土壤區的4.7倍。添加生物炭有助於培地茅的生長，新鮮土壤區添加生物炭之培地茅產量是沒有添加生物炭的1.63倍；風化土壤區是1.56倍。以培地茅進行 TPH 污染土壤之植生復育，每公頃每年生產之培地茅植體可以捕捉29.12公噸的碳元素，相當於106.8公噸二氧化碳。土壤添加2.5%生物炭，施用一次每公頃可儲存206.25公噸的二氧化碳。以培地茅植體萃取精油或做為燃料，每年每公頃之培地茅可提取1.16公噸精油，若作為燃料使用，可提供1160.43 GJ 熱能。

添加生物炭對陶粒吸附砷的能力有很大的增強作用，不僅吸附力強，吸附容量也增加。後續可持續探討其最佳配比以及特性，並進行模場試驗，評估其實場應用之可行性。

關鍵字：生物復育；植生復育；總石油碳氫化合物；砷

---





---

## Abstract

This project mainly includes two parts. The first part is "TPH-contaminated soil biological remediation technology"; The second part is "TPH-contaminated soil regenerating porous material to treat arsenic-rich groundwater technology development".

In terms of the biological remediation technology of TPH-contaminated soil, this project will cooperate with CPC Corporation, Taiwan, the most important oil production company in Taiwan. Establish bio-remediation technology for TPH pollution through field tests and verify its effectiveness. The biological remediation technology of this project covers microbial remediation and phytoremediation. First, through the pot experiments, including the native bacteria test group, the TPH decomposing bacteria test group, the phytoremediation test group and the oil decomposing bacteria combined phytoremediation test group. Evaluate the improvement effects of various processing technologies based on the test results. Clarify the contribution of plant cultivation to improving the effectiveness of phytoremediation. Screen the most cost-effective and effective improvement methods based on the results of pot experiments, conduct field trials to verify the field effectiveness of the biological remediation technology, and establish local operating parameters. In this project, two plants, Vetiver and Lemongrass, will selected for planting experiments. Among them, cultivated field grass and citronella have the feasibility of extracting essential oils. For the remaining plant residues, this plan will prepare it into biochar. Biochar has the function of improving soil permeability and promoting the development of plant roots. It is an element required for soil biological remediation. Therefore, its application in biological remediation should have the potential to improve the effectiveness of biological remediation. Through the development of reuse of phytoremediation products, phytoremediation can be achieved in addition to soil remediation and create circular economic benefits.

Regarding the development of technology development for regenerating porous materials from oil-contaminated soil to treat arsenic-rich groundwater sources. In the past, the research team tested the adsorption capacity of various porous materials for arsenic and found that the rotary kiln ring stone has a strong adsorption and removal capacity for arsenic. Therefore, this project analyzes the characteristics of ring stones and analyzes the mechanism of arsenic removal by ring stones, and through the field



---

test, select arsenic-rich areas and groundwater wells for arsenic removal test. Evaluate the removal capacity, adsorption capacity. Assess the feasibility of using ring stones as arsenic removal technology of groundwater source. In addition, this project simulates the sintering conditions of ring stones and prepares porous recycled materials with oil-contaminated soil. Develop porous materials with the ability to remove arsenic as a technology for removing arsenic from groundwater sources in arsenic-rich areas.

The results from the pot experiment showed that the cultivation of vetiver could increase the degradation rate of TPH by 20%~30%, and most of the biodegradable TPH could be decomposed within 6 months under the planting of vetiver. For the field test, the results showed that fresh TPH-contaminated soil would inhibit the growth of vetiver. The biomass production of vetiver in weathered soil was 4.7 times that in the fresh soil area. In the fresh soil area, the yield of vetiver biomass in biochar added soil was 1.63 times than that without adding biochar, and it was 1.56 times in the weathered soil area, indicating that the addition of biochar promoted the growth of vetiver. Planting vetiver after applying 2.5% biochar to the weathered soil, about 72.8 tons of vetiver could be produced per hectare per year. According to the content calculation, 29.12 tons/yr/ha of carbon could be captured by planting vetiver, which was equivalent to 106.8 tons/yr/ha of carbon dioxide. As a raw material of essential oil, 1.16 metric tons of essential oil could be extracted; and as for fuel, 1160.43 GJ of heat energy could be provided. The carbon dioxide storage capacity of the soil could be increased by 206.25 tons/ha through adding 2.5% biochar to the soil per application. It was worthwhile to continue studying the stability of biochar in soil and evaluate the application frequency of biochar in the future.

The addition of biochar can greatly enhance the ability of porous materials to adsorb arsenic, which not only has a strong adsorption capacity, but also increases the adsorption capacity. The follow-up will continue to discuss its optimal ratio and characteristics, and conduct field tests to evaluate the feasibility of its field application.

Keywords: bioremediation; phytoremediation; TPH; arsenic





## 目 錄

專案基本資料表

專案成果績效自評表

計畫書審查意見回覆對照表

期中報告審查意見回覆對照表

研究成果中英文摘要

|                                      |      |
|--------------------------------------|------|
| 第一章 前言.....                          | 1-1  |
| 1.1 計畫背景.....                        | 1-1  |
| 1.2 計畫目的.....                        | 1-4  |
| 第二章 背景資料.....                        | 2-1  |
| 2.1 植生復育.....                        | 2-1  |
| 2.2 生物炭特性及對作物生長之影響.....              | 2-2  |
| 2.3 多孔性材料對砷的吸附能力.....                | 2-5  |
| 2.4 模場試驗場址背景資料.....                  | 2-7  |
| 第三章 研究內容與方法.....                     | 3-1  |
| 3.1 油污染土壤生物復育技術.....                 | 3-1  |
| 3.2 油污染土壤再生多孔性材料應用於富砷地下水源處理技術開發..... | 3-9  |
| 第四章 執行成果.....                        | 4-1  |
| 4.1 盆栽試驗成果.....                      | 4-1  |
| 4.1.1 試驗種植情形.....                    | 4-1  |
| 4.1.2 植物生長情形.....                    | 4-3  |
| 4.1.3 培地茅在各試驗組植體生質量產量差異.....         | 4-31 |
| 4.1.4 培地茅在各試驗組植株生長高度差異.....          | 4-41 |



|                                     |       |
|-------------------------------------|-------|
| 4.1.5 各試驗組根圈土壤 TPH 濃度變化.....        | 4-45  |
| 4.1.6 各試驗組根圈土壤 TPH 去除率.....         | 4-55  |
| 4.2 植生復育現地模場試驗.....                 | 4-61  |
| 4.2.1 現地栽種試驗土壤基本特性分析.....           | 4-61  |
| 4.2.2 現地試驗培地茅生長情形.....              | 4-62  |
| 4.2.3 現地試驗土壤基本性質變化.....             | 4-78  |
| 4.2.4 現地試驗根圈土壤 TPH 濃度變化.....        | 4-83  |
| 4.2.5 各試驗根圈土壤 TPH 濃度變化.....         | 4-87  |
| 4.3 培地茅植體再利用效益開發.....               | 4-94  |
| 4.3.1 製備生物炭.....                    | 4-94  |
| 4.3.2 精油提煉技術開發.....                 | 4-96  |
| 4.4 油污染土壤再生多孔性材料處理富砷地下水源處理技術開發..... | 4-97  |
| 4.4.1 不同批次旋轉窯結圈石對砷去除效率.....         | 4-97  |
| 4.4.2 現地地下水砷移除試驗.....               | 4-108 |
| 4.4.3 自製陶粒對水中砷去除之影響.....            | 4-114 |
| 4.4.3.1 陶粒製備.....                   | 4-114 |
| 4.4.3.2 陶粒添加氧化鐵、氧化錳及有機質.....        | 4-116 |
| 4.4.3.3 氧化鐵添加率對砷之去除效率.....          | 4-121 |
| 4.4.3.4 二氧化錳添加率對砷之去除效率.....         | 4-123 |
| 4.4.3.5 生物炭添加率對砷之去除效率.....          | 4-125 |
| 4.4.3.6 熱脫附再生陶粒對砷之去除效率.....         | 4-127 |
| 4.5 循環經濟效益.....                     | 4-129 |
| 第五章 結論與建議.....                      | 5-1   |



目錄

油污染土壤綠色整治及創造循環經濟效益

---

|                                       |     |
|---------------------------------------|-----|
| 5.1 油污染土壤生物復育技術.....                  | 5-1 |
| 5.2 油污染土壤再生多孔性材料應用於富砷地下水源處理技術開發 ..... | 5-2 |
| 5.3 執行進度表.....                        | 5-4 |
| 第六章 參考文獻.....                         | 6-1 |



## 圖 目 錄

|                                                              |      |
|--------------------------------------------------------------|------|
| 圖 1.1-1 地下水富砷潛勢地區 .....                                      | 1-2  |
| 圖 2.2-1 青江菜不同生物炭施用率之根系長度與質量 .....                            | 2-5  |
| 圖 2.3-1 砷移除試驗之各種多孔性資材 .....                                  | 2-6  |
| 圖 2.3-2 不同資材對砷的吸附移除能力 .....                                  | 2-7  |
| 圖 3.1-1 本計畫植生復育所篩選的二種植物 .....                                | 3-2  |
| 圖 3.1-2 TPH 污染土壤之 GC-FID 分析圖譜 .....                          | 3-2  |
| 圖 3.1-3 現地模場試驗場址設置情形 .....                                   | 3-4  |
| 圖 3.1-4 現地模場試驗場址設置情形 .....                                   | 3-5  |
| 圖 3.1-5 現地模場試驗組合分配情形 .....                                   | 3-6  |
| 圖 3.1-6 現地模場試驗植物種植情形 .....                                   | 3-7  |
| 圖 3.1-7 現地模場試驗植物種植情形 (111.05.20) .....                       | 3-8  |
| 圖 3.1-8 管柱砷移除試驗 .....                                        | 3-9  |
| 圖 4.1.1-1 微生物分解試驗情形-試驗第 40 週 (111.02.25) .....               | 4-2  |
| 圖 4.1.1-2 植生復育及其加強技術盆栽試驗-試驗種植第 40 週 (111.02.25) .....        | 4-2  |
| 圖 4.1.2-1 植生復育及其加強技術盆栽試驗植物生長情形 .....                         | 4-3  |
| 圖 4.1.2-2 【培地茅】試驗組植株平均高度變化(第二輪 110/11/4~111/7/25) ....       | 4-6  |
| 圖 4.1.2-3 【培地茅】試驗組植株平均高度變化(第三輪 111/7/25~112/1/5) .....       | 4-7  |
| 圖 4.1.2-4 【培地茅】三種濃度試驗生長情形(1/3) .....                         | 4-8  |
| 圖 4.1.2-4 【培地茅】三種濃度試驗生長情形(2/3) .....                         | 4-9  |
| 圖 4.1.2-4 【培地茅】三種濃度試驗生長情形(3/3) .....                         | 4-10 |
| 圖 4.1.2-5 【培地茅+油分解菌】試驗組植株平均高度變化(第二輪 110/11/4~111/7/25) ..... | 4-13 |
| 圖 4.1.2-6 【培地茅+油分解菌】試驗組植株平均高度變化(第三輪 111/7/25~                |      |



|                                                                  |      |
|------------------------------------------------------------------|------|
| 112/1/5) .....                                                   | 4-14 |
| 圖 4.1.2-7 【培地茅+油分解菌】三種濃度試驗生長情形(1/3).....                         | 4-15 |
| 圖 4.1.2-7 【培地茅+油分解菌】三種濃度試驗生長情形(2/3).....                         | 4-16 |
| 圖 4.1.2-7 【培地茅+油分解菌】三種濃度試驗生長情形(3/3).....                         | 4-17 |
| 圖 4.1.2-8 【培地茅+生物炭 2.5%】試驗組植株平均高度變化(第二輪 110/11/4~111/7/25) ..... | 4-20 |
| 圖 4.1.2-9 【培地茅+生物炭 2.5%】試驗組植株平均高度變化(第三輪 111/7/25~112/1/5) .....  | 4-21 |
| 圖 4.1.2-10 【培地茅+生物炭 2.5%】三種濃度試驗生長情形(1/3).....                    | 4-22 |
| 圖 4.1.2-10 【培地茅+生物炭 2.5%】三種濃度試驗生長情形(2/3).....                    | 4-23 |
| 圖 4.1.2-10 【培地茅+生物炭 2.5%】三種濃度試驗生長情形(3/3).....                    | 4-24 |
| 圖 4.1.2-11 【香茅】試驗組植株平均高度變化(第三輪 111/1/14~111/7/25).....           | 4-27 |
| 圖 4.1.2-12 【香茅】試驗組植株平均高度變化(第四輪 111/7/25~112/1/5) .....           | 4-27 |
| 圖 4.1.2-13 【香茅】三種濃度試驗生長情形(1/3) .....                             | 4-28 |
| 圖 4.1.2-13 【香茅】三種濃度試驗生長情形(2/3) .....                             | 4-29 |
| 圖 4.1.2-13 【香茅】三種濃度試驗生長情形(3/3) .....                             | 4-30 |
| 圖 4.1.3-1 培地茅植體生質量(第二次修剪-第二輪生長 37 週).....                        | 4-33 |
| 圖 4.1.3-2 培地茅植體生質量(採收地上部-第三輪生長 24 週).....                        | 4-34 |
| 圖 4.1.3-3 培地茅植體生質量(地下部根-累計生長 86 週).....                          | 4-35 |
| 圖 4.1.3-4 培地茅植物根系比較照片(相同濃度，不同試驗組) .....                          | 4-36 |
| 圖 4.1.3-5 培地茅植物根系比較照片(相同試驗組，不同濃度) .....                          | 4-37 |
| 圖 4.1.3-6 香茅植體生質量(第三次修剪及採收) .....                                | 4-39 |
| 圖 4.1.3-7 香茅植體生質量(地下部根-累計生長 86 週).....                           | 4-40 |
| 圖 4.1.3-8 香茅植物根系比較照片 .....                                       | 4-40 |





|                                                                     |      |
|---------------------------------------------------------------------|------|
| 圖 4.1.4-1 【試驗濃度 2000 mg/kg】培地茅植株平均高度變化(第二輪 110/11/4~111/7/25) ..... | 4-42 |
| 圖 4.1.4-2 【試驗濃度 2000 mg/kg】培地茅植株平均高度變化(第三輪 111/7/25~112/1/5) .....  | 4-42 |
| 圖 4.1.4-3 【試驗濃度 5000 mg/kg】培地茅植株平均高度變化(第二輪 110/11/4~111/7/25) ..... | 4-43 |
| 圖 4.1.4-4 【試驗濃度 5000 mg/kg】培地茅植株平均高度變化(第三輪 111/7/25~112/1/5) .....  | 4-43 |
| 圖 4.1.4-5 【試驗濃度 8000 mg/kg】培地茅植株平均高度變化(第二輪 110/11/4~111/7/25) ..... | 4-44 |
| 圖 4.1.4-6 【試驗濃度 8000 mg/kg】培地茅植株平均高度變化(第三輪 111/7/25~112/1/5) .....  | 4-44 |
| 圖 4.1.5-1 【原生菌】根圈土壤 TPH 濃度變化.....                                   | 4-46 |
| 圖 4.1.5-2 【油分解菌】根圈土壤 TPH 濃度變化.....                                  | 4-48 |
| 圖 4.1.5-3 【培地茅】根圈土壤 TPH 濃度變化.....                                   | 4-50 |
| 圖 4.1.5-4 【培地茅+油分解菌】根圈土壤 TPH 濃度變化 .....                             | 4-51 |
| 圖 4.1.5-5 【培地茅+生物炭 2.5%】根圈土壤 TPH 濃度變化 .....                         | 4-53 |
| 圖 4.1.5-6 【香茅】根圈土壤 TPH 濃度變化.....                                    | 4-54 |
| 圖 4.1.6-1 【試驗濃度 2000 mg/kg】微生物分解試驗組 TPH 濃度變化.....                   | 4-57 |
| 圖 4.1.6-2 【試驗濃度 5000 mg/kg】微生物分解試驗組 TPH 濃度變化.....                   | 4-57 |
| 圖 4.1.6-3 【試驗濃度 8000 mg/kg】微生物分解試驗組 TPH 濃度變化.....                   | 4-58 |
| 圖 4.1.6-4 【試驗濃度 2000 mg/kg】植生復育及其加強技術組 TPH 濃度變化 .....               | 4-59 |
| 圖 4.1.6-5 【試驗濃度 5000 mg/kg】植生復育及其加強技術組 TPH 濃度變化 .....               | 4-59 |
| 圖 4.1.6-6 【試驗濃度 8000 mg/kg】植生復育及其加強技術組 TPH 濃度變化 .....               |      |



|                                                      |      |
|------------------------------------------------------|------|
| .....                                                | 4-60 |
| 圖 4.2.2-1 現地栽種整體植物生長情形 .....                         | 4-63 |
| 圖 4.2.2-2 各試驗組植株平均高度變化(第一輪 111/05/20~111/11/25)..... | 4-65 |
| 圖 4.2.2-3 各試驗組植株平均高度變化(第二輪 111/11/25~112/03/03)..... | 4-65 |
| 圖 4.2.2-4 【低風化區】培地茅生長情形(1/3) .....                   | 4-72 |
| 圖 4.2.2-4 【低風化區】培地茅生長情形(2/3) .....                   | 4-73 |
| 圖 4.2.2-4 【低風化區】培地茅生長情形(3/3) .....                   | 4-74 |
| 圖 4.2.2-5 【高風化區】培地茅生長情形(1/3) .....                   | 4-75 |
| 圖 4.2.2-5 【高風化區】培地茅生長情形(2/3) .....                   | 4-76 |
| 圖 4.2.2-5 【高風化區】培地茅生長情形(3/3) .....                   | 4-77 |
| 圖 4.2.3-1 【低風化區】試驗五個月土壤 pH 值變化.....                  | 4-80 |
| 圖 4.2.3-2 【高風化區】試驗五個月土壤 pH 值變化.....                  | 4-80 |
| 圖 4.2.3-3 【低風化區】試驗五個月土壤導電度變化.....                    | 4-81 |
| 圖 4.2.3-4 【高風化區】試驗五個月土壤導電度變化.....                    | 4-81 |
| 圖 4.2.3-5 【低風化區】試驗五個月土壤有機質變化.....                    | 4-82 |
| 圖 4.2.3-6 【高風化區】試驗五個月土壤有機質變化.....                    | 4-82 |
| 圖 4.2.5-1 低風化區【培地茅+生物炭 2.5%】根圈土壤 TPH 濃度變化 .....      | 4-90 |
| 圖 4.2.5-2 低風化區【培地茅】根圈土壤 TPH 濃度變化.....                | 4-90 |
| 圖 4.2.5-3 低風化區【對照組+生物炭 2.5%】根圈土壤 TPH 濃度變化 .....      | 4-91 |
| 圖 4.2.5-4 低風化區【對照組】根圈土壤 TPH 濃度變化.....                | 4-91 |
| 圖 4.2.5-5 高風化區【培地茅+生物炭 2.5%】根圈土壤 TPH 濃度變化 .....      | 4-92 |
| 圖 4.2.5-6 高風化區【培地茅】根圈土壤 TPH 濃度變化.....                | 4-92 |
| 圖 4.2.5-7 高風化區【對照組+生物炭 2.5%】根圈土壤 TPH 濃度變化 .....      | 4-93 |



|                                                      |       |
|------------------------------------------------------|-------|
| 圖 4.2.5-8 高風化區【對照組】根圈土壤 TPH 濃度變化.....                | 4-93  |
| 圖 4.3.1-1 生物炭製備照片 .....                              | 4-95  |
| 圖 4.4.1-1 管柱所使用之旋轉窯結圈石照片 .....                       | 4-98  |
| 圖 4.4.1-2 實驗型管柱砷移除試驗操作照片 .....                       | 4-99  |
| 圖 4.4.1-3 111 年第一批次結圈石(粗顆粒)對砷之移除濃度變化.....            | 4-100 |
| 圖 4.4.1-4 111 年第一批次結圈石(粗顆粒)對砷之去除率.....               | 4-100 |
| 圖 4.4.1-5 111 年第一批次結圈石(粗顆粒)對砷之累積吸附量.....             | 4-101 |
| 圖 4.4.1-6 111 年第一批次結圈石(細顆粒)對砷之移除濃度變化.....            | 4-102 |
| 圖 4.4.1-7 111 年第一批次結圈石(細顆粒)對砷之去除率.....               | 4-102 |
| 圖 4.4.1-8 111 年第一批次結圈石(細顆粒)對砷之累積吸附量.....             | 4-103 |
| 圖 4.4.1-9 111 年第二批次結圈石對砷之移除濃度變化(流速 80.2 mL/min)...   | 4-104 |
| 圖 4.4.1-10 111 年第二批次結圈石對砷之去除率(流速 80.2 mL/min).....   | 4-104 |
| 圖 4.4.1-11 111 年第二批次結圈石對砷之累積吸附量(流速 80.2 mL/min)..... | 4-105 |
| 圖 4.4.1-12 111 年第三批次結圈石對砷之移除濃度變化(流速 80.2 mL/min).    | 4-106 |
| 圖 4.4.1-13 111 年第三批次結圈石對砷之去除率(流速 80.2 mL/min).....   | 4-106 |
| 圖 4.4.1-14 111 年第三批次結圈石對砷之累積吸附量(流速 80.2 mL/min)..... | 4-107 |
| 圖 4.4.2-1 現地使用結圈石外觀 .....                            | 4-108 |
| 圖 4.4.2-2 現地管柱砷移除試驗操作照片 .....                        | 4-109 |
| 圖 4.4.2-3 現地第一批次結圈石(粗顆粒)對砷之移除濃度變化 .....              | 4-110 |
| 圖 4.4.2-4 現地第一批次結圈石(粗顆粒)對砷之去除率 .....                 | 4-110 |
| 圖 4.4.2-5 現地第一批次結圈石(粗顆粒)對砷之累積吸附量 .....               | 4-111 |
| 圖 4.4.2-6 現地第一批次結圈石(細顆粒)對砷之移除濃度變化 .....              | 4-112 |
| 圖 4.4.2-7 現地第一批次結圈石(細顆粒)對砷之去除率 .....                 | 4-112 |



|                                          |       |
|------------------------------------------|-------|
| 圖 4.4.2-8 現地第一批次結圈石(細顆粒)對砷之累積吸附量 .....   | 4-113 |
| 圖 4.4.3.1-1 陶粒製備流程 .....                 | 4-115 |
| 圖 4.4.3.2-1 不同氧化鐵添加比例燒結之陶粒外觀(1/2) .....  | 4-116 |
| 圖 4.4.3.2-1 不同氧化鐵添加比例燒結之陶粒外觀(2/2) .....  | 4-117 |
| 圖 4.4.3.2-2 不同氧化錳添加比例燒結之陶粒外觀(1/2) .....  | 4-118 |
| 圖 4.4.3.2-2 不同二氧化錳添加比例燒結之陶粒外觀(2/2) ..... | 4-119 |
| 圖 4.4.3.2-3 不同生物炭添加比例燒結之陶粒外觀(1/2) .....  | 4-119 |
| 圖 4.4.3.2-3 不同生物炭添加比例燒結之陶粒外觀(2/2) .....  | 4-120 |
| 圖 4.4.3.3-1 不同氧化鐵添加比例之陶粒對砷之移除濃度變化 .....  | 4-121 |
| 圖 4.4.3.3-2 不同氧化鐵添加比例之陶粒對砷之去除率 .....     | 4-122 |
| 圖 4.4.3.3-3 不同氧化鐵添加比例之陶粒對砷之累積吸附量 .....   | 4-122 |
| 圖 4.4.3.4-1 不同二氧化錳添加比例之陶粒對砷之移除濃度變化 ..... | 4-123 |
| 圖 4.4.3.4-2 不同二氧化錳添加比例之陶粒對砷之去除率 .....    | 4-124 |
| 圖 4.4.3.4-3 不同二氧化錳添加比例之陶粒對砷之累積吸附量 .....  | 4-124 |
| 圖 4.4.3.5-1 不同生物炭添加比例之陶粒對砷之移除濃度變化 .....  | 4-125 |
| 圖 4.4.3.5-2 不同生物炭添加比例之陶粒對砷之去除率 .....     | 4-126 |
| 圖 4.4.3.5-3 不同生物炭添加比例之陶粒對砷之累積吸附量 .....   | 4-126 |
| 圖 4.4.3.6-1 熱脫附再生陶粒對砷之移除濃度變化 .....       | 4-127 |
| 圖 4.4.3.6-2 熱脫附再生之陶粒對砷之去除率 .....         | 4-128 |
| 圖 4.4.3.6-3 熱脫附再生陶粒對砷之累積吸附量 .....        | 4-128 |



## 表 目 錄

|                                                                 |      |
|-----------------------------------------------------------------|------|
| 表 2.4-1. 油品污染生物整治技術模場試驗場址基本資料-台中供油服務中心 ..                       | 2-7  |
| 表 4.1.2-1 【培地茅】試驗組植株高度(第二輪 110/11/4~111/7/25).....              | 4-5  |
| 表 4.1.2-2 【培地茅】試驗組植株高度(第三輪 111/7/25~112/1/5) .....              | 4-6  |
| 表 4.1.2-3 【培地茅+油分解菌】試驗組植株高度(第二輪 110/11/4~111/7/25)              | 4-12 |
| 表 4.1.2-4 【培地茅+油分解菌】試驗組植株高度(第三輪 111/7/25~112/1/5) ..            | 4-13 |
| 表 4.1.2-5 【培地茅+生物炭 2.5%】試驗組植株高度(第二輪 110/11/4~111/7/25)<br>..... | 4-19 |
| 表 4.1.2-6 【培地茅+生物炭 2.5%】試驗組植株高度(第三輪 111/7/25~112/1/5)<br>.....  | 4-20 |
| 表 4.1.2-7 【香茅】試驗組植株高度(第三輪 111/1/14~111/7/25).....               | 4-26 |
| 表 4.1.2-8 【香茅】試驗組植株高度(第四輪 111/7/25~112/1/5) .....               | 4-26 |
| 表 4.1.3-1 培地茅植體生質量(第二次修剪-第二輪生長 37 週).....                       | 4-33 |
| 表 4.1.3-2 培地茅植體生質量(採收地上部-第三輪生長 24 週).....                       | 4-34 |
| 表 4.1.3-3 培地茅植體生質量(地下部根-累計生長 86 週).....                         | 4-35 |
| 表 4.1.3-4 香茅植體地上部及地下部生質量(第三次修剪及採收) .....                        | 4-39 |
| 表 4.1.5-1 【原生菌】試驗根圈土壤 TPH 濃度.....                               | 4-46 |
| 表 4.1.5-2 【油分解菌】試驗根圈土壤 TPH 濃度.....                              | 4-47 |
| 表 4.1.5-3 【培地茅】試驗根圈土壤 TPH 濃度.....                               | 4-49 |
| 表 4.1.5-4 【培地茅+油分解菌】試驗根圈土壤 TPH 濃度 .....                         | 4-51 |
| 表 4.1.5-5 【培地茅+生物炭 2.5%】試驗根圈土壤 TPH 濃度 .....                     | 4-52 |
| 表 4.1.5-6 【香茅】試驗根圈土壤 TPH 濃度.....                                | 4-54 |
| 表 4.1.6-1 各試驗組根圈土壤 TPH 平均濃度.....                                | 4-55 |
| 表 4.1.6-2 各試驗組根圈土壤 TPH 去除率.....                                 | 4-56 |



|                                                                     |      |
|---------------------------------------------------------------------|------|
| 表 4.2.1-1 高、低風化土壤基本性質 .....                                         | 4-61 |
| 表 4.2.1-2 高、低風化土壤肥力分析 .....                                         | 4-61 |
| 表 4.2.1-3 高、低風化土壤 TPH 濃度及風化程度 .....                                 | 4-62 |
| 表 4.2.2-1 【低風化區-培地茅+生物炭 2.5%】試驗組植株高度(第一輪 111/05/20~111/11/25) ..... | 4-66 |
| 表 4.2.2-2 【低風化區-培地茅】試驗組植株高度(第一輪 111/05/20~111/11/25) .....          | 4-67 |
| 表 4.2.2-3 【高風化區-培地茅+生物炭 2.5%】試驗組植株高度(第一輪 111/05/20~111/11/25) ..... | 4-68 |
| 表 4.2.2-4 【高風化區-培地茅】試驗組植株高度(第一輪 111/05/20~111/11/25) .....          | 4-69 |
| 表 4.2.2-5 【低風化區-培地茅+生物炭 2.5%】試驗組植株高度(第二輪 111/11/25~112/02/15) ..... | 4-70 |
| 表 4.2.2-6 【低風化區-培地茅】試驗組植株高度(第二輪 111/11/25~112/02/15) .....          | 4-70 |
| 表 4.2.2-7 【高風化區-培地茅+生物炭 2.5%】試驗組植株高度(第二輪 111/11/25~112/02/15) ..... | 4-71 |
| 表 4.2.2-8 【高風化區-培地茅】試驗組植株高度(第二輪 111/11/25~112/02/15) .....          | 4-71 |
| 表 4.2.3-1 試驗五個月土壤基本性質-pH 值 .....                                    | 4-78 |
| 表 4.2.3-2 試驗五個月土壤基本性質-導電度( $\mu$ S/cm) .....                        | 4-79 |
| 表 4.2.3-3 試驗五個月土壤基本性質-有機質(%) .....                                  | 4-79 |
| 表 4.2.3-4 現地試驗五週時根圈土壤 TPH 濃度 .....                                  | 4-85 |
| 表 4.2.3-5 現地試驗十四週時根圈土壤 TPH 濃度 .....                                 | 4-86 |
| 表 4.2.5-1 低風化區根圈土壤 TPH 濃度 .....                                     | 4-88 |
| 表 4.2.5-2 高風化區根圈土壤 TPH 濃度 .....                                     | 4-89 |





| 目錄                           | 油污染土壤綠色整治及創造循環經濟效益 |
|------------------------------|--------------------|
| 表 4.3.2-1 培地茅精油萃取率 .....     | 4-96               |
| 表 4.4.1-1 管柱所使用之旋轉窯結圈石 ..... | 4-97               |



## 第一章 前言

### 1.1 計畫背景

油品是國內土壤最主要污染物之一，主要來源包括油庫、加油站及各類工廠之儲油設施、輸油管線的洩漏。對於高揮發性油品的污染如汽油的污染，普遍採用物理性的方法如土壤蒸氣萃取法(SVE)、空氣注入法(AS)進行整治；對於低揮發性油品的污染如柴油、重油的污染，依其特性適合採用化學、生物或熱處理的方式進行整治處理。

生物復育法(Bioremediation) 具有成本低、對土壤特性破壞小，為環境友善的整治技術。在國外已廣泛應用於油污染土壤復育長達數十年之久，且證實為經濟、有效之處理技術之一。生物復育法包括微生物處理以及植物處理技術。以微生物進行處理常見的工法如土耕法、生物通氣法等，雖然目前在國內普遍應用於油品污染土壤場址的整治，但改善成效良莠不一，有待操作參數的建立，提供給場址改善規劃設計之參考，並將改善成效進行驗證，提供給環保單位對於整治/控制計畫審核及查核之依據。以植物進行整治稱為植生復育(phytoremediation)，是一種結合了陽光、植物及自然界微生物特性的整治技術，作用機制複雜，包括植生萃取(phytoextraction)、植生分解(phytodegradation)、植生揮發(phytovolatilization)以及根圈微生物的分解作用(Rhizodegradation)等。植生復育整治成本低，且能同時擁有綠色景觀與污染整治功效，為社會大眾較容易接納之整治技術。近幾十年在歐美國家針對此一技術在不同污染物與不同環境條件下的應用進行大量的研究，尤其在油污染土壤之復育應用上，不論是植物品種之篩選、分解機制的探討、操作模式的建立及技術參數控制的最佳化等皆有所進展。但，植物復育技術的應用具有地域性及本土性，國外的研究成果直接應用於國內環境會有相當大的差異。目前國內之研究及應用仍處於萌芽階段，現地應用之實證更是缺乏。

生物整治為環境友善之綠色整治技術，符合未來整治技術發展的趨勢。因此本計畫結合國內最主要的油品生產公司中油公司探採所及油銷部共同合作，透過模場試驗建立油品污染之生物整治技術，並驗證其成效。本計畫生物整治技術涵蓋微生物整治及植生復育整治。首先透過盆栽試驗設計，分為原生菌種試驗組、油分解菌試驗組、植生試驗組，以及油分解菌結合植生試驗組，藉由試驗結果評估各種處理技術之改善成效。釐清植生復育中植物種植對改善成效之貢獻。透過盆栽試驗結果篩選最經濟有效之改善方法，進行現地試驗，驗證生物復育技術之實場成效，並建立本土操作參數。



植生復育所需時間較長，若所種植的植物沒有經濟效益或可再利用用途，則植生復育難以永續。依據國內外文獻指出培地茅、香茅等為對油污染土壤具高耐受性及高分解能力的植物，因此本計畫選擇培地茅、香茅二種植物進行植生復育試驗。其中培地茅、香茅具有提煉精油的可行性，為了使植生復育能夠創造經濟價值，本計畫團隊進一步開發植生復育產品之經濟效益，以培地茅、香茅進行精油提煉技術開發。針對剩餘的植物殘體，本計畫將其製備成生物炭，生物炭具有提高土壤透氣性，促進植物根系發展的功能，此功能正是土壤生物復育所需要的元素，因此將其應用於生物整治，應具有提升生物整治成效的潛力。透過植生復育產品再利用用途之開發，使植生復育在土壤污染整治之外，創造循環經濟效益。

受到自然地質因素的影響全世界許多國家面臨地下水富含砷的問題，據聯合國兒童基金會調查報告，目前全球有70多個國家和地區都有地下水高濃度砷分布情形，包括印度、孟加拉、柬埔寨、中國、越南、緬甸、美國等國家如圖1.1-1所示，其影響的人口達1.4億，且呈現出升高的趨勢。國內許多地區包括蘭陽平原、關渡平原、嘉南平原以及屏東平原地區，甚至有更多未調查區域皆有地下水富含砷的問題。

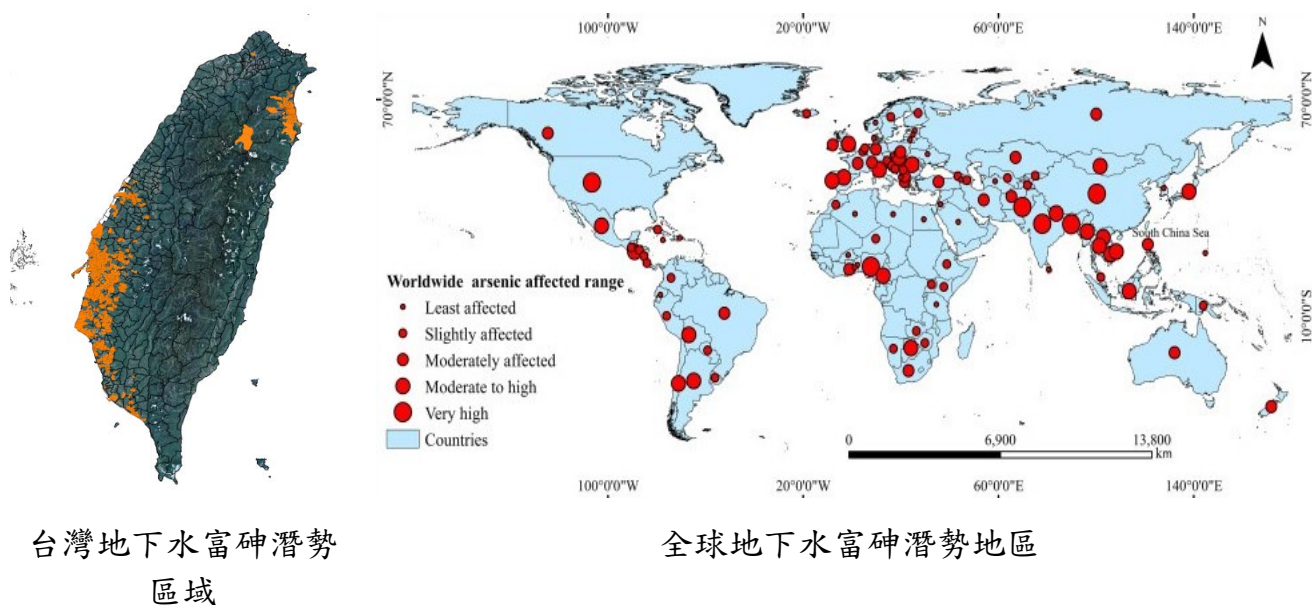


圖1.1-1 地下水富砷潛勢地區



富砷地下水影響著人類和野生動物的健康，長期飲用富砷地下水會導致人體出現皮膚色素異常、角質化、皮膚癌、內臟癌症等慢性砷中毒。國內過去曾有長期飲用含砷的水源導致烏腳病的案例。雖然國內自來水普及率相當高，許多富砷地區皆已提供自來水源，飲用富砷地下水的情形較少。但，面對極端氣候，確保地下水源的飲用安全性，才能在乾旱時提供一安全備用水源。依據聯合國永續發展目標(SDGs)第6項，確保所有的人都能享有水及衛生及其永續管理，倡議在西元2030年以前，讓全球的每一個人都有公平的管道可以取得安全且負擔得起的飲用水。因此，對於富砷地區提供地下水除砷技術，符合聯合國永續發展的目標。近年國內受極端氣候影響，乾旱發生頻率越來越高。地下水做為備用水源的需要性與重要性也確實正在發生。對於富砷地區如何讓抽出之地下水源透過簡單、經濟且有效的方法達到除砷作用，提供國內富砷地區一個安全衛生的備用水源，解決飲用水富砷的問題是當前重要課題。

研究團隊過去曾經試驗各種多孔性資材對砷的吸附能力，發現燒結土壤的旋轉窯其結圈石，對砷有很強的去除能力。因此，本計畫透過試驗評估結圈石做為地下水除砷資材之可行性。並模擬結圈石之形成程序，透過調整原料配比，研究對砷更具吸附能力之多孔性資材。本研究將結圈石及所研發製備之多孔性材料，以實驗室配置之含砷水樣進行試驗，並以國內富砷地區嘉義縣溪口鄉之富砷地下水進行現地模廠試驗，評估結圈石及本研究所製備之多孔性材料做為地下水源砷去除技術之可行性。

多孔性材料之燒結具有相當高的專業性，本計畫邀請明春窯業股份有限公司董事長陳長照先生擔任顧問，執行長葉春爐先生，目前也是中華輕質骨材協會理事長擔任協同主持人，指導土壤燒結輕質骨材技術，共同開發對砷具有高移除能力之多孔性材料，做為富砷地區地下水源除砷資材。



## 1.2 計畫目的

本計畫主要包括二個部分。第一部分為『油污染土壤生物復育技術』的成效驗證；第二部分為『油污染土壤再生多孔性材料處理富砷地下水源技術』的開發。

在油污染土壤生物復育技術方面，本計畫結合國內最主要的油品生產公司中油公司探採所及油銷部共同合作，透過模場試驗驗證油品污染之生物整治技術成效，並建立操作參數。本計畫生物整治技術涵蓋微生物整治及植生復育整治。首先透過盆栽試驗設計，分為原生菌種試驗組、油分解菌試驗組、植生試驗組及油分解菌結合植生組及生物炭結合植生試驗組，藉由試驗結果評估各種處理技術之改善成效。釐清植生復育中植物種植對改善成效之貢獻。透過盆栽試驗結果篩選最可行有效之改善方法，進行現地試驗，驗證生物復育技術之實場成效，並建立本土操作參數。植生復育若所種植的植物沒有經濟效益或可再利用用途，則植生復育難以永續。本計畫選擇培地茅及香茅二種植物進行植生復育試驗。培地茅、香茅具有提煉精油的可行性。針對剩餘的植物殘體，本計畫將其製備成生物炭，生物炭具有提高土壤透氣性，促進植物根系發展的功能，是土壤生物復育所需要的元素，因此將其應用於生物整治，應具有提升生物整治成效的潛力。透過植生復育產品再利用用途之開發，使植生復育在土壤污染整治之外，創造循環經濟效益。

在油污染土壤再生多孔性材料處理富砷地下水源技術開發方面，本計畫研究結圈石的形成條件以及對砷的去除機制，透過調整原料配比，製備對砷更具吸附能力之多孔性資。透過實驗室及現地模廠試驗，評估結圈石及所製備之多孔性資材對砷之去除技能力，評估做為富砷地區地下水源除砷資之實用性。





## 第二章 背景資料

### 2.1 植生復育

生物復育法(Bioremediation)具有成本低、對土壤特性破壞小，為環境友善的整治技術。在國外已廣泛應用於油污染土壤復育長達數十年之久，且證實為經濟、有效之處理技術之一。生物復育法包括微生物處理以及植物處理技術。以微生物進行處理常見的工法如土耕法、生物通氣法等。植物復育技術(phytoremediation)簡稱植生技術，屬於生物復育技術的一種，主要利用植物生長代謝過程，去除土壤中污染物質。植生復育技術近年來在國外受到相當廣泛的研究及重視，Saifullah et al. (2009)指出植生復育技術相較於傳統工程的整治技術是一個相當有發展性及經濟性的替代技術。Ma et al. (2001)也指出植生復育是一個有經濟效益，可以長久使用並具有美觀的整治技術，除此之外植生復育技術具有不會破壞土壤特性，是一個綠色的、環境友善的整治技術。

植生復育技術進行污染土壤的整治，主要作用機制包括(1).植物可以將所攝入到植物體內的污染物，經由植物體內的代謝作用機制，將其轉換、分解或合成植物細胞組成的作用過程，稱為植物轉換(phytotransformation)或植物分解(phytodegradation)；(2).植物的根部會釋放出低分子量有機酸，可以改變根圈污染物之溶解度或提供根圈土壤中的微生物做為碳源或營養源，促進根圈微生物的生長，並進一步藉由根圈微生物對污染物產生吸收、穩定、溶解及分解去除等作用，稱為植物根圈微生物的促進作用(rhizosphere bioremediation)；(3).植物根部對土壤的抓力，可以降低污染物在土壤中的移動性，稱為植物穩定作用(phytostabilization)；(4).植物自土壤中吸收水分及營養成份的過程，將土壤中污染物一併吸收、累積於植物體之根、莖及葉各部位，稱為植物萃取作用(phytoextraction)；(5).植物根部吸收水分造成污染物濃縮或吸持於根部，稱為植物根部濾過作用(rhizofiltration)；(6).藉由植物葉面的蒸發散作用使污染物蒸發至大氣，稱為植物蒸發作用(phytovolatilisation)等(Evanko and Dzombak, 1997; Miller, 1996)。對於受油品污染土壤的整治，植生復育的各種作用機制幾乎都有貢獻，但一般認為植物根圈微生物的促進作用、植物分解作用應是最主要的作用機制。

植物復育技術之優點包括：所需之整治經費少，可以增進景觀綠化美觀，對環境及生態之破壞及衝擊小，可以算是最符合環境保護的整治技術。而植物復育之缺點主要在於植物之栽種生長所需之時間較長，因此其所需之復育期程較長；對於高濃度污染土壤，植物無法生長；除此之外，植物的栽種及照護需要有專業





的經驗，才能達到預期之成效。依據美國 Groundwater remediation technology analysis center 之研究分析結果顯示，植物復育所需之經費為最低，每立方米土壤之整治經費大概只需要15至40塊美金之間，而其它物化方法的整治技術大概都需要在90至500塊美金之間，顯示植物處理技術確實較經濟。但其整治所需花費的時間大概是物化處理技術的3至6倍左右(Evanko and Dzombak, 1997)。因此如何促進植物對污染物的去除速率，是植物復育技術仍需努力研究的方向。

## 2.2 生物炭特性及對作物生長之影響

生物炭(biochar)為生物質材料在無氧或缺氧的條件下，經過高溫裂解形成的物質(Deal et al., 2012)。生物炭是近年來學術界熱門研究的課題，生物炭不是一種新興材料，早期研究主要偏重在生質能源方面之研究，因為生質物在高溫熱解過程可以產生一些揮發性有機物質，可以做為生質能源。近年，生物炭之應用逐漸轉移到土壤改良之研究。文獻指出(張和王，2012)生物炭應用於土壤改良，起源自巴西亞馬遜河流域生活的居民長期使用一種特殊的肥料，當地人稱它為亞馬遜黑土。這種肥料具有恢復貧脊土壤肥力的功效。以碳測定方式進行亞馬遜黑土之年代測定，證實亞馬遜黑土是在西元前2500年，甚至6000年以前，由生活在當地的居民以人為方式製造而成。研究顯示生物炭具有改變土壤特性，增加土壤之通氣性、保水能力、孔隙率及酸鹼度，並可以促進植物生長，具有保水、保肥和促進作物產量增長的作用。近年研究更發現，生物炭具有穩定的碳結構，在土壤中可存在數百年，甚至上千年不會被分解，具有碳捕捉封存的作用(Deal et al., 2012; Uras et al., 2012; 張和王，2012)。因此，因應國際間溫室氣體減量的需求，生物炭成為碳捕捉封存的可行技術，在氣候變遷溫室氣體減量方面也興起研究熱潮。

生物炭的特性與製備生物炭的生物質材料特性、熱解的溫度，以及熱解的時間有關(Duku et al., 2011; Jung et al., 2016)。在生物質材料特性之影響方面，研究指出以木本植物作為原料，所製備之生物炭其含碳量較高，礦物質養份含量較少。以草本植物作為原料所製備之生物炭，其碳含量較少，但含有較多的礦物質元素。Mukherjee et al. (2011)比較橡木、松木以及草本植物製成之生物炭，結果顯示木本植物製成之生物炭其比表面積較草本植物高，而 CEC 及灰份則以草本植物較高。熱解溫度和熱解時間是決定生物炭特性的主要因素(Ghani et al., 2013)，熱解溫度和時間決定熱解過程碳的損失及碳的組成。生物炭的主要組成包括無定形碳、芳香族碳(aromatic compound)以及灰份(Ghani et al., 2013)。在熱解過程中，生物質中的纖維素與半纖維素不斷的分解，隨著熱解溫度越高，生物炭中碳、氮熱解揮發比例越高，含量越少。在較低溫度或較短時間條件下進行熱解所形成的生物炭，



其所含易分解和易揮發的碳成分較多，這種生質炭含有較高比例之無定形的碳，穩定性較低。高溫熱解所產生之生質炭，原料中組成分的化學鍵斷裂並重組，產生較高比例之難分解的多芳香烴碳(Ghani et al., 2013)。由於芳香族碳之化學穩定性強，因此生物炭可以在土壤中存留相當長的時間，使生物炭具有封存碳的作用。Ghani et al. (2013)研究指出，熱解溫度低於550 °C 以下時，生物炭會吸收5%左右的水分，因此木質素不會轉換成疏水性的多環芳香烴碳氫化合物。在高於650 °C 以上熱解所產生之生物炭，其穩定性及疏水性高，主要因產生芳香烴化合物。Masek et al. (2013)研究以350~550 °C 溫度進行熱解，研究結果顯示，增加熱解溫度可以增加生物炭的穩定性，且生物炭之穩定性與熱解溫度呈現線性相關。從文獻顯示，生物炭製備之熱解溫度範圍主要介於350~700 °C 之間 (Masek et al., 2013; Mukherjee and Zimmerman, 2013; Cantrell et al., 2012; Hossain et al., 2011)。Ghani et al. (2013)研究顯示，生物炭的含碳量可以高達85%以上，含碳量比例隨熱解溫度上升而增加。熱解溫度越高生物炭的產量越低 (Masek et al., 2013; Hossain et al., 2011)。生物炭的含碳量及總磷含量會隨著熱裂解溫度升高而增加，但氫、氧、氮、硫元素在熱裂解過程中會汽化揮發，因此含量隨著溫度升高而減少 (Masek et al., 2013; Jung et al., 2015; Yuan et al., 2011)。Zhao et al. (2013)在溫度200~650°C 條件下製備生物炭，顯示熱裂解溫度越高生物炭比表面積、pH 值、灰分含量、CEC 值有增加的趨勢。Jeong et al. (2016)將甘蔗葉、甘蔗渣、稻草在450°C、550°C、650 °C 及750°C 四個溫度下熱裂解，結果顯示生物炭的 pH 值、灰分同樣有隨著溫度升高而增加的趨勢，但 CEC 值4種生物炭皆在550°C 的製備溫度下有最大的 CEC 值。Song and Guo (2012)指出，小麥桔桿及家禽糞便製成生物炭的 CEC 值隨著溫度上升而成逐漸下降的趨勢。不同文獻顯示，製備溫度對於生炭碳 CEC 之影響沒有一定的趨勢。Ghani et al. (2013)指出，在450~650 °C 熱解產生之生物炭，對於 CO<sub>2</sub> 之吸收效果隨熱解溫度上升而增加，超過650 °C 時，效果反而較差。熱解時間對生物炭的影響和熱解溫度類似，熱解時間越長生物炭的碳含量越高，穩定性越大，目前文獻中生物炭製備之熱解時間多以1小時居多(Masek et al., 2013; Uras et al., 2012)，Quilliam et al. (2012)製備生物炭則在450 °C 下熱解48小時。

生物質中含有的有機酸使生物質通常呈酸性，但在生物炭製備過程中，有機酸會逐漸裂解，同時並產生灰分，因此使生物炭一般呈現鹼性。生物炭的 pH 值大小和製備生物炭的原料有關，pH 值大小也和熱解溫度及熱解時間有關，一般 pH 值大小隨熱解溫度越高以及熱解時間越長而越高。一般生物炭的 pH 值範圍約在8.2~13.0之間。

初製備完成之生物炭，其具有之陽離子交換容量較低，當施用於土壤後，表面官能基會逐漸被氧化，經氧化後之生物炭具有較高之 CEC 值。生物炭的元素組



成主要為碳，含量約在60%以上，其次為氫、氧、氮及硫等元素。主要官能基包括：甲烷基、芳香結構、carboxyl group、酚羥基、羰基、酯類、酮類及酸酐等(Uras et al., 2012)，使生物炭具有大量的表面負電荷，有良好的吸附特性，因此可以吸附一些陽離子性的重金屬離子(Jiang et al., 2012)。

生物炭具有高的比表面積，高孔隙率，使得生物炭的密度小(Beesley et al., 2011)。Ghani et al. (2013)以木屑製成之生物炭比表面積範圍在10~200 m<sup>2</sup>/g。當生物炭施用於土壤時可以降低土壤密度，使土壤具有更大的孔隙度，增加通氣效果，保持更多的水分及養分，增加土壤之保水、保肥能力。生物炭的多孔結構雖有助於增加土壤的保水能力，但未經氧化的生物炭本身具有疏水性，只有在表面氧化後才具有吸水及保水特性。生物炭的添加提升土壤的含水量，有助於土壤中礦物質及營養元素的溶解，有助於作物的吸收利用，促進作物的生長，也同時促進土壤微生物的生長。Quilliam et al. (2012)以每公頃0、25及50公噸的劑量施用生物炭進行作物的栽種。經過三年施用時間後，檢測土壤中營養素含量、微生物生長、真菌類菌落以及雜草的生長情形等，結果顯示，三種施用劑量的土壤並未有顯著的差異。後續再進行第二次的施用，結果發現有進行生物炭追加施用的土壤在磷酸鹽、鉀、鈣、溶解性有機碳、土壤濕度、有機質、導電度、微生物及真菌菌絲生長方面都顯著的增加，而雜草的生長受到抑制。生物炭添加除了可以減少土壤密度外，亦有減少土壤的抗張力強度，抗張力強度減少可以促進種子的發芽，作物根系的生長發展。研究團隊曾經以青江菜進行生物炭施用試驗，生物炭施用率分為0%、2.5%及5%三組，各試驗組種植青江菜40株，生長情形如圖2.2-1所示(萬幼之，2022)。從採收的青江菜植體發現，施用生物炭試驗組之青江菜根系比較粗壯也比較長，生物炭施用率0%，根系平均長度為5.6公分；施用率2.5%，根系平均長度為8.1公分；施用率5%，根系平均長度為10.5公分。生物炭施用率0%，根系每株鮮重質量平均為3.5公克；施用率2.5%，根系鮮重質量平均為5.8公克；施用率5%，根系鮮重質量平均為6.2公克。





圖2.2-1 青江菜不同生物炭施用率之根系長度與質量

## 2.3 多孔性材料對砷的吸附能力

研究團隊過去收集各種多孔性材料如圖2.3-1所示進行砷的吸附試驗(程培正, 2018)。共十二種資材，編號 A 與 B 均為中國製造之陶粒，經 XRF 篩測砷濃度分別為203、211 mg/kg。編號 C 為荷蘭製造之陶粒，砷濃度為20 mg/kg；編號 D 為台灣製造之陶粒，砷濃度<10 mg/kg；編號 E 為台灣旋轉窯廢棄物結圈石，經 XRF 篩測砷濃度為<11 mg/kg。E1為原始塊狀；E2為經破碎後粉末狀；編號 F、G 及 H 為台灣製造之陶粒，三種陶粒差異在於塑型大小，經 XRF 篩測砷濃度均為<10 mg/kg；編號 I 為中國製造之陶粒，經 XRF 篩測砷濃度為14 mg/kg；編號 J 為石英砂，經 XRF 篩測砷濃度為<5 mg/kg；編號 K、L 分別為一般炭化生物炭與改質生物炭，經 XRF 篩測砷濃度均<6 mg/kg。



採取地下水以砷標準液配製1 ppm 及0.25 ppm 的砷水溶液，以固液之重量比1：5進行混合，而生物炭之固液重量比為1：10進行混合，配置好之樣品置於25°C 的恆溫震盪器中，震盪1小時後，過濾收集濾液，分析水溶液中砷濃度，結果如圖2.3-2所示(程培正，2018)。試驗結果 E-1及 E-2在不同濃度砷水溶液幾乎皆可去除所有砷濃度。編號 E-1、E-2分別為編號 E 結園石原狀及破碎後粉狀。編號 K 為一般稻殼炭化生物炭，吸附後水溶液砷濃度仍高達865 ug/L，顯示一般生物炭對砷之吸附能力不佳。編號 L 為改質生物炭，吸附後砷溶液濃度剩下385 ug/L，去除率約61.5%。顯示結園石對砷有相當好的去除能力，具有應用於處理富砷地下水源的潛力。



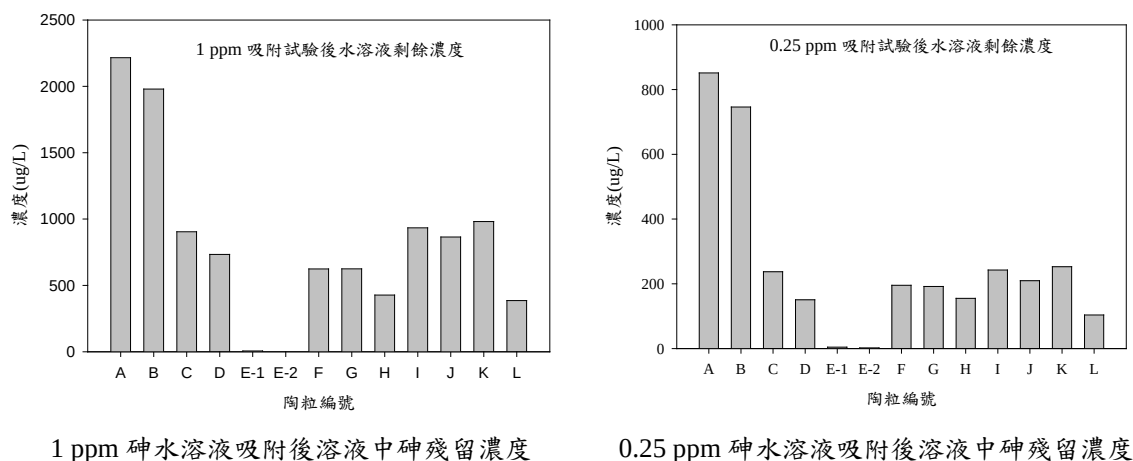
圖2.3-1 砷移除試驗之各種多孔性資材





## 第二章 背景資料

## 油污染土壤綠色整治及創造循環經濟效益



1 ppm 砷水溶液吸附後溶液中砷殘留濃度

0.25 ppm 砷水溶液吸附後溶液中砷殘留濃度

圖2.3-2 不同資材對砷的吸附移除能力

## 2.4 模場試驗場址背景資料

本計畫油品污染生物整治技術模場試驗以台灣中油股份有限公司台中供油公司做為試驗場址，相關資料如表2.4-1所示。富砷地下水砷移除試驗模場參考環保署『建構富砷地下水及農地土壤砷濃度預警管理機制計畫』，選擇嘉義縣溪口鄉地下水富砷水井進行模場試驗。

表2.4-1. 油品污染生物整治技術模場試驗場址基本資料-台中供油服務中心

|        |                           |
|--------|---------------------------|
| 場址名稱   | 台灣中油股份有限公司油品行銷事業部台中供油服務中心 |
| 主管機關   | 臺中市政府環境保護局                |
| 場址座標   | X：203629，Y：2688246        |
| 場址地址   | 臺中市清水區海口南路599號            |
| 場址地號   | 臺中市清水區海濱段臨港小段0005-0000地號  |
| 場址種類   | 儲槽                        |
| 場址面積   | 145,483 (m <sup>2</sup> ) |
| 場址列管狀態 | 土壤及地下水污染控制場址              |
| 土壤污染物  | 總石油碳氫化合物最高濃度：42,200 mg/kg |
| 地下水污染物 | 總石油碳氫化合物最高濃度：53.6 mg/L    |



## 第三章 研究內容與方法

本計畫主要包括二個部分。第一部分為『油污染土壤生物復育技術』；第二部分為『油污染土壤再生多孔性材料處理富砷地下水源技術開發』，以下針對二部分之研究方法詳細說明如下：

### 3.1 油污染土壤生物復育技術

#### 1. 植生復育盆栽試驗

本計畫從中油公司台中供油服務中心及新竹供油中心採取 TPH 污染土壤，透過土壤簡易分析方法(TPH test kit)，篩選不同 TPH 污染濃度土壤進行混合，調配 TPH 大約2000 mg/kg、5000 mg/kg 及8000 mg/kg 的試驗土壤。盆栽試驗每一盆所需土壤約60公斤，估算每一種濃度土壤約需1500公斤。選擇培地茅、香茅如圖3.1-1所示，搭配土壤原生菌、油分解菌及生物炭，共分成下列六種試驗組，以盆栽方式進行試驗，每一試驗組別進行三重複試驗，共計54盆。

- (1) 無-土壤原生菌種
- (2) 油分解菌 (*Acinetobacter venetianus*)
- (3) 培地茅
- (4) 培地茅+油分解菌
- (5) 香茅
- (6) 培地茅+生物炭(2.5%)

第一年(110年)試驗結果，低濃度2000 mg/kg、5000 mg/kg 試驗土壤有部分試驗組別土壤 TPH 濃度已低於管制標準1000 mg/kg；部分低濃度及所有高濃度8000 mg/kg 試驗組別，土壤 TPH 濃度還未低於管制標準。因此本年度(111年度)將持續操作管理，監測土壤 TPH 後續降解速率。為方便盆栽管理，盆栽試驗種植於朝陽科技大學。土壤特性分析項目包括土壤質地、pH、土壤肥力、TPH 濃度及微生物菌相等。依各種植物之生長習性進行盆栽管理，包括水分的澆灌及肥力的添加。

試驗初期每2個月採集土壤，進行土壤 TPH 圖譜及濃度分析，評估 TPH 分解速率及 TPH 組成化合物之濃度變化。第二年約每3個月採集土壤分析 TPH 濃度。植物種植前、後，採集根圈土壤，進行土壤菌相豐度及密度分析，剖析不同試驗組別菌相差異。



圖3.1-1 本計畫植生復育所篩選的二種植物

## 2. 生物整治技術現地試驗成效驗證及操作參數建立

依據110年度盆栽試驗結果，現地試驗選擇原生菌搭配培地茅及生物炭進行試驗。現地栽種試驗場址選定台中供油中心進行試驗。台中供油中心 TPH 污染土壤，TPH 主要成分為高碳數 C10~C40之油品，其 GC-FID 分析結果圖譜如下：

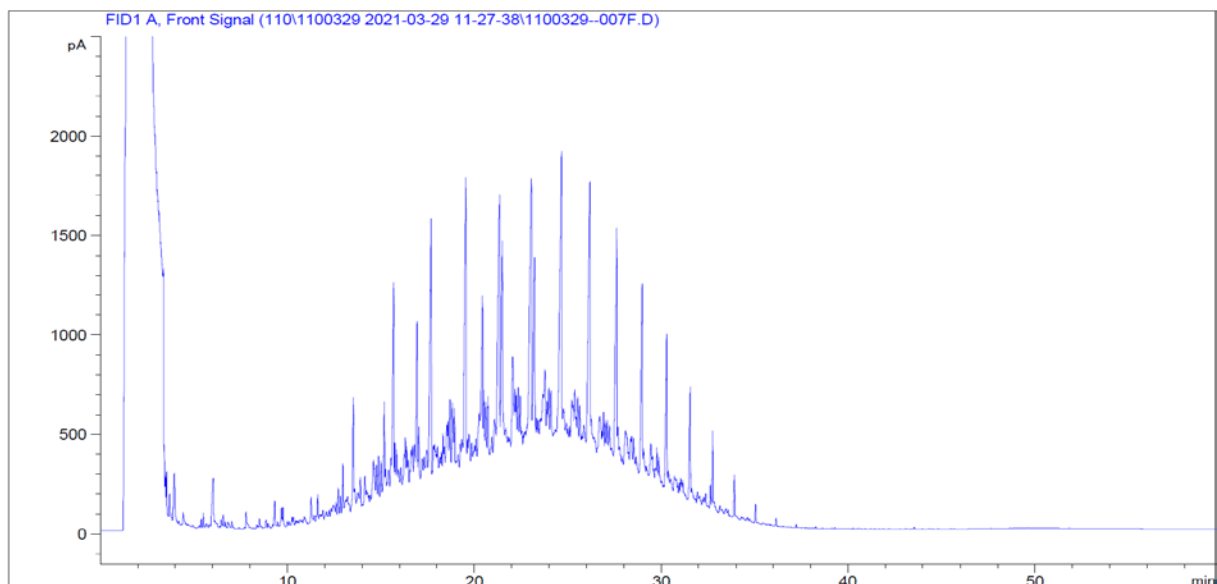


圖3.1-2 TPH 污染土壤之 GC-FID 分析圖譜



本計畫試驗土壤分為開挖較久已風化以及新挖出未風化二種土壤。模場試驗場址總面積為 10 公尺 × 10 公尺，合計為 100 平方公尺，平均分為 2 個區塊，底部鋪設 30 公分左右之卵礫石，以利排水。一塊填入開挖較久已風化之污染土壤，為高風化區；一塊填入剛開挖未風化之污染土壤，為低風化區，土層深度約 70 公分，現地模場設置情形如圖 3.1-3，配備自動灑水設施，於 5 月初設置完成，如圖 3.1-4 所示，。

二種土壤各分別分為下列四種試驗組別：

- (1) 無-土壤原生菌種
- (2) 無-土壤原生菌種+生物炭(2.5%)
- (3) 培地茅
- (4) 培地茅+生物炭(2.5%)

將試驗區域劃分為 1.25 m × 1 m 的方格，每 1 方格為 1 試驗區塊，並給予每區塊編號。四種試驗組別之試驗分配如圖 3.1-5 所示。

- (1) 對照組：即土壤原生菌種試驗組，每一種土壤分配 4 個區塊。
- (2) 對照組+生物炭 2.5%：即土壤原生菌種+生物炭(2.5%)試驗組，每一種土壤分配 4 個區塊。
- (3) 培地茅：種植 16 個區塊，每區塊種植 22 叢。
- (4) 培地茅+生物炭 2.5%：種植 16 個區塊，每區塊種植 22 叢。

現地模場試驗植物種植情形如圖 3.1-6，於 111 年 5 月 20 日已完成種植，如圖 3.1-7 所示。初期每天早、晚各澆水一次，後續視植物生長情形以及氣溫變化情形再調整灑水頻率。每 2 個星期量測一次植株高度變化。預計半年收割一次植體，量測收割質量。依土壤 TPH 分析結果，選擇不同 TPH 濃度土壤之植株，進行根圈土壤 TPH 濃度變化監測，以每 2-3 個月採樣分析一次為原則。評估 TPH 分解速率及各種碳數 TPH 濃度變化。植物種植前及種植過程，採集根圈土壤，分析菌相變化。

植體產量及品質評估，植物採收時量測植物之株高、生質量，以及根、莖、葉質量。分析植體 TPH 及其分解產物殘留濃度。評估油污染土壤植物／微生物復育成效，建立油污染土壤生物復育技術操作參數。





圖3.1-3 現地模場試驗場址設置情形





圖3.1-4 現地模場試驗場址設置情形

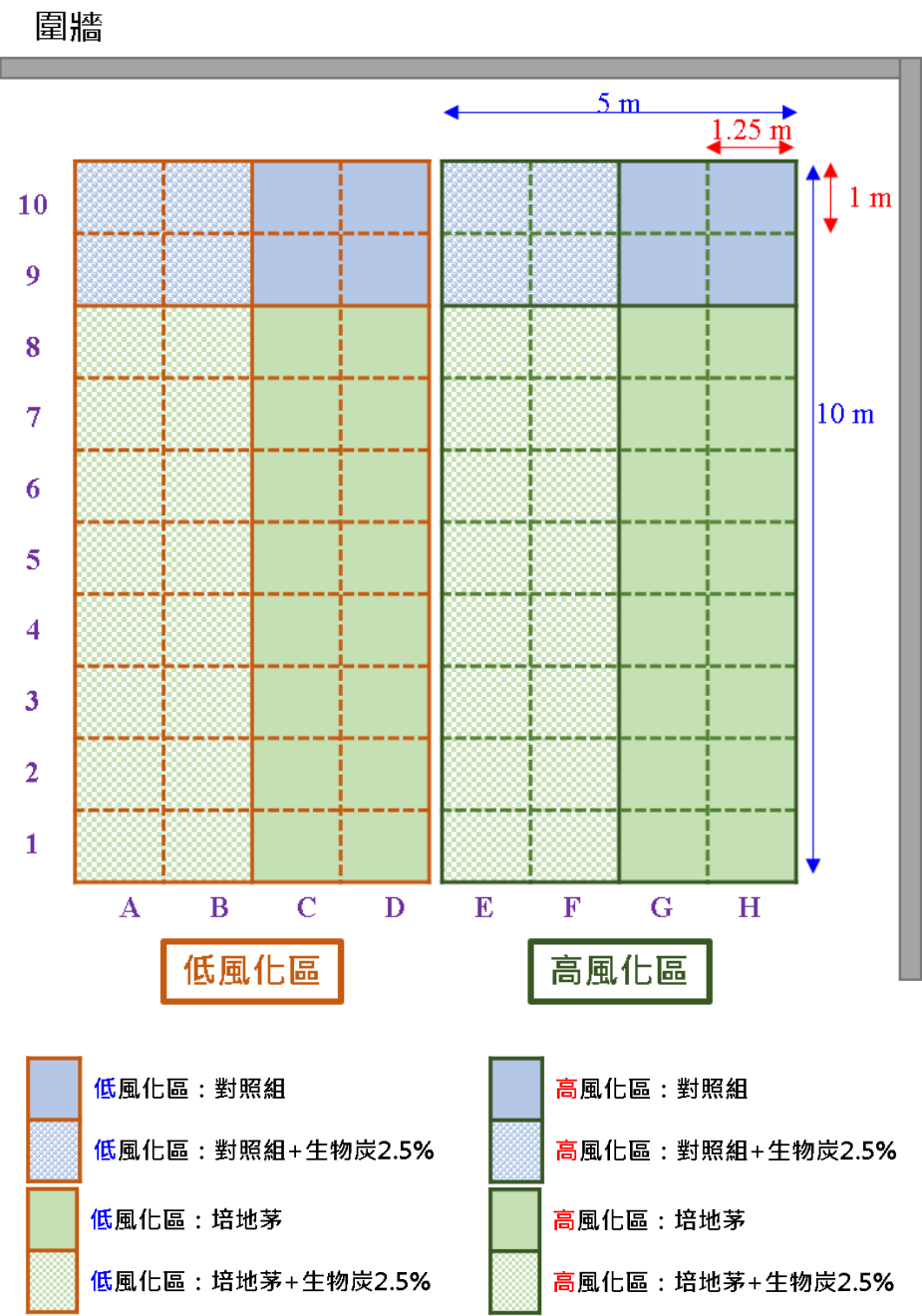


圖3.1-5 現地模場試驗組合分配情形





圖3.1-6 現地模場試驗植物種植情形





圖3.1-7 現地模場試驗植物種植情形 (111.05.20)

#### 4. 植生復育植體再利用效益開發

植生復育所生產之植物體應用，培地茅植體提煉精油技術建立及精油品質分析。植生試驗其它剩餘植體生物炭製備及生物炭應用對植物／微生物復育油污染土壤之效益評估。生物炭施用於土壤對土壤儲碳效益評估。油污染土壤植生復育衍生經濟效益及節能減碳效益評估。



## 3.2 油污染土壤再生多孔性材料應用於富砷地下水源處理技術開發

### 1. 旋轉窯結圈石砷吸附能力評估

- 旋轉窯結圈石以管柱貫穿試驗，評估結圈石砷飽和吸附容量以及處理水質變化。
- 地下水水質特性對結圈石吸附砷容量之影響評估。採集嘉義縣富砷地區之地下水，分析地下水之一般基本特性。透過批次試驗比較地下水與試劑水對結圈石吸附砷能力之影響。
- 管柱採用壓克力材質製成，內徑為5 cm、高50 cm，將配置好之含砷水溶液裝入儲水槽內，以蠕動幫浦控制進樣流速，將含砷水溶液由管線以向上流動的方式進入管柱內吸附後流出，並在管柱上方取樣口取樣以利後續實驗分析。



圖3.1-8 管柱砷移除試驗

### 2. 旋轉窯結圈石移除地下水砷現地模場試驗

- 選擇富砷地下水井進行砷移除現地試驗。
- 將地下水抽出後先存放在500公升的儲留桶內。
- 將結圈石破碎後填充於圓柱管柱中。





- 將儲留桶內的地下水流經結圈石填充管柱。量測流經水量，並監測進、出流水之基本特性，包括 pH、ORP、EC..等，以及砷的濃度。
- 評估單位體積(或重量)之結圈石能處理之水量，進行處理系統及操作參數修正優化。
- 建立結圈石處理富砷地下水之設計參數，並進行成效驗證。
- 評估以結圈石做為地下水飲用水源除砷技術之可行性及成本效益。

### 3. 鐵、錳及有機質含量對陶粒特性及砷吸附能力探討

- 陶粒原料配比試驗：
  - 土壤添加不同比例氧化鐵，分為0%、3%、5%、10%及15%共五種比例，探討添加不同比例氧化鐵所燒結出之陶粒對砷之吸附能力。
  - 土壤添加二氧化錳，分為0%、3%、5%、10%及15%共五種比例，探討添加不同比例二氧化錳所燒結出之陶粒對砷之吸附能力。
  - 土壤添加生物炭，分為0%、3%、5%、10%及15%共五種比例，探討添加不同比例生物炭所燒結出之陶粒對砷之吸附能力。
  - 土壤先進行均化並挑除雜質，放入烘箱內以105°C烘乾至恆重，烘乾後取出並放於平衡箱待其冷卻至室溫。
  - 冷卻至室溫之土壤破碎研磨至能以孔徑100 mesh 不鏽鋼篩網過篩之粒徑，放至密封袋中儲存備用。
  - 秤取適量乾燥之土壤，再依設計之輕質骨材配比，分別添加設計比例之氧化鐵、二氧化錳及培地茅生物炭，將各粉末混合均勻。將均化之土樣添加30%的去離子水，混合均勻，並搓揉捏合成球狀，放入密閉式乾燥器皿中，避免水分散失或接觸空氣中的水氣，靜置沉放12小時，使其內裡水分均勻分布。
  - 以手工搓圓方式將其捏合成粒徑大小1公分之生料球。完成後放入烘箱內乾燥至恆重，烘乾後取出並放於平衡箱待其冷卻至室溫，冷卻後放置密閉乾燥皿中保存備用。
- 陶粒燒結程序：
  - 輕質骨材採用兩台高溫爐進行兩段式高溫培燒，培燒前先將氧化鎂鉢置於預熱高溫爐及培燒高溫爐內預熱。預熱高溫爐升溫速率以每分鐘升溫10°C，升溫至200°C，預熱時間設定為8分鐘。
  - 待預熱高溫爐和培燒高溫爐都達至設定之溫度值，使用坩鍋夾將生料



球夾至已預熱之氧化鎂鉢，快速地放入預熱高溫爐內，並計時。

- 當預熱之生料球到達設定之時間後，以坩鍋夾迅速將預熱好的生料球夾至已培燒的氧化鎂鉢中，並迅速放進培燒高溫爐內進行燒結。
- 培燒高溫爐升溫速率以每分鐘升溫10℃，溫度1200℃，培燒時間設定為12分鐘。
- 培燒時間到後將燒製完成的輕質骨材夾至室溫氧化鎂鉢內，待其自然冷卻至室溫，收入密閉乾燥皿中保存備用。

➤ 輕質骨材特性分析

- 膨脹係數：體積膨脹係數係指固體在溫度改變時，其體積變化和它在原溫度時原體積的比值。其結果計算如下：

$$\text{膨脹率 (\%)} = \frac{V_2}{V_1} \times 100\%$$

$V_1$ ：燒製前體積 (cm<sup>3</sup>)

$V_2$ ：燒製後體積 (cm<sup>3</sup>)

- 吸水率：吸水率係指在一定時間，材料浸泡於水中，通過其孔隙吸收並保持其水分的性質，但不包括附著在材料表面之水分。依據 CNS-487 細粒料比重及吸水率試驗法，其步驟如下：

1. 將輕質骨材置於烘箱，以 105℃-115℃ 烘乾至恆重，待其自然冷卻至室溫。
2. 秤取其乾重。
3. 將細骨材浸入室溫水中約 24 小時。
4. 取出後以乾布拭去其表面水分，在表面乾燥內飽和狀態下秤得 24 小時濕重。量測過程中需動作迅速，以避免骨材內部水分蒸發。

結果計算如下：

$$\text{吸水率 (\%)} = \frac{S-D}{D} \times 100\%$$

S：表面乾燥內飽和之骨材重量 (g)

D：乾燥後重量 (g)

- 孔隙率：孔隙率係指指材料內部孔隙體積佔其總體積的百分率，採用沸騰法進行測定，其步驟如下：

  1. 將輕質骨材放入烘箱內烘乾至恆重。



2. 將其至於沸水中 12 小時，冷卻 12 小時後測量輕質骨材在水中重量及表面乾燥，內部飽和之重量。

結果計算如下：

$$\text{孔隙率 (\%)} = \frac{S-D}{W-D} \times 100\%$$

S：表面乾燥內部飽和之重量 (g)

D：乾燥後重量 (g)

W：輕質骨材水中重量 (g)

- 顆粒密度：將燒製後之輕質骨材放入裝水之量筒中，測量其水位上升幅度，即為輕骨材體積 (V)，再以 105°C 烘箱乾燥至恆重秤其重量 (W)，與先前計算之體積相除即為顆粒密度。

計算公式如下：

$$\text{顆粒密度 (P)} = \frac{W}{V}$$

W：乾燥之輕質骨材重量 (g)

V：輕質骨材體積 (g)



## 第四章 執行成果

### 4.1 盆栽試驗成果

#### 4.1.1 試驗種植情形

110年度盆栽試驗種植培地茅及香茅，土壤分為三種 TPH 濃度，分別為 TPH 平均濃度約2000 mg/kg、5000 mg/kg 及8000 mg/kg，搭配土壤原生菌、油分解菌及生物炭，分為下列六種試驗組別，每一試驗組別進行三重複試驗，共計 $3(\text{TPH 濃度}) \times 3(\text{重複}) \times 6(\text{組別}) = 54$ 盆。

- (1) 無-土壤原生菌種
- (2) 油分解菌 (*Acinetobacter venetianus*)
- (3) 培地茅
- (4) 培地茅+油分解菌
- (5) 培地茅+生物炭(2.5%)
- (6) 香茅

其中【土壤原生菌種】組及【油分解菌】組為微生物分解試驗組，亦屬植生復育對照組，不種植植物，111年度試驗情形如圖4.1.1-1。其餘四組【培地茅】組、【培地茅+油分解菌】組、【培地茅+生物炭2.5%】組、【香茅】，【培地茅】組及【香茅】組為植生復育；【培地茅+油分解菌】組及【培地茅+生物炭2.5%】組為【培地茅】組之加強技術試驗組，111年度種植情形如圖4.1.1-2。

經過110年度種植36週之試驗，部分低濃度及所有高濃度8000 mg/kg 試驗組別，土壤 TPH 濃度還未低於管制標準，因此111年度將持續操作管理，定期量測植體高度及監測土壤 TPH 後續降解速率。

111年度於7月25日修剪培地茅及香茅，量測植體地上部約30~40公分處進行修剪，將每盆修剪至相同高度，保留地下部及部分地上部植體繼續種植試驗。本計畫盆栽試驗種植時間為110年5月25日至112年1月5日止，累計種植達1年7個月，約86週，於栽種試驗結束後，採收整株植體，量測根、葉生質量。





圖4.1.1-1 微生物分解試驗情形-試驗第40週 (111.02.25)



圖4.1.1-2 植生復育及其加強技術盆栽試驗-試驗種植第40週 (111.02.25)





### 4.1.2 植物生長情形

第一年度試驗於110年5月25日開始種植培地茅及香茅，統計至111年1月28日，種植時間約36週，此種植期間由於植體開始有枝葉枯黃情形，培地茅於111年11月4日進行第一次修剪，香茅則於111年9月4日及1月14日進行第一、二次修剪，修剪前後均量測植體高度，並針對修剪下來的植體秤重計算生質量。

第二年度一樣約每兩週量一次植株高度，每盆以最高之植體為量測對象。培地茅於111年7月25日種植約61週時，進行第二次修剪，修剪後開始第三輪生長；香茅亦於7月25日種植約61週進行第三次修剪，修剪後重新開始第四輪生長，修剪時均保留30至40公分植物體繼續進行盆栽試驗。植物生長情形如圖4.1.2-1，各試驗組植物生長情形分別說明如下：



圖4.1.2-1 植生復育及其加強技術盆栽試驗植物生長情形



### 1. 【培地茅】試驗組

【培地茅】試驗組高度紀錄如表4.1.2-1及表4.1.2-2，不同試驗組別植株平均生長高度如圖4.1.2-2及圖4.1.2-3所示。

在110年5月27日開始第一輪種植，於110年11月4日進行第一次修剪後，開始第二輪生長，其第二輪植株生長高度，土壤 TPH 濃度2000 mg/kg 組種植培地茅修剪後平均高度為40 cm；七週後生長至58 cm；十六週時68 cm；二十五週時83 cm；三十一週時114 cm；第三十七週修剪前為135 cm。土壤 TPH 濃度5000 mg/kg 組種植培地茅修剪後平均高度為36 cm；七週後生長至67 cm；十六週時77 cm；二十五週時98 cm；三十一週時126 cm；第三十七週修剪前為138 cm。土壤 TPH 濃度8000 mg/kg 組種植培地茅修剪後平均高度為34 cm；七週後生長至70 cm；十六週時77 cm；二十五週時103 cm；三十一週時132 cm；第三十七週修剪前為140 cm。

第二年度於111年7月25日修剪，開始第三輪生長，種植至112年1月5日，將培地茅整株植體採收。此期間，土壤 TPH 濃度2000 mg/kg 組種植培地茅修剪後平均高度為30 cm；三週後生長至87 cm；五週時113 cm；九週時138 cm；十四週時126 cm；十八週時123 cm；二十四週時112 cm。土壤 TPH 濃度5000 mg/kg 組種植培地茅修剪後平均高度為28 cm；三週後生長至92 cm；五週時114 cm；九週時139 cm；十四週時138 cm；十八週時117 cm；二十四週時107 cm。土壤 TPH 濃度8000 mg/kg 組種植培地茅修剪後平均高度為29 cm；三週後生長至97 cm；五週時113 cm；九週時平均高度123 cm；十四週時177 cm；十八週時112 cm；二十四週時122 cm。

培地茅此兩輪中，植株在 TPH 濃度5000 mg/kg 及8000 mg/kg 土壤平均生長高度差異不大，於土壤 TPH 濃度2000 mg/kg 下生長高度較低。但由於第二輪生長正值冬季，天氣較寒冷，前期植物生長緩慢，在111年4月29日，生長25週後較有大幅增長，培地茅生長有超過100公分。第三輪重新生長為夏季，生長初期培地茅生長速度快速，五週後生長高度即超過100公分，14週即達到與第二輪生長37週之差不多的高度。圖4.1.2-4為【培地茅】在三種 TPH 濃度土壤生長情形。



## 第四章 執行成果

## 油污染土壤綠色整治及創造循環經濟效益

表4.1.2-1 【培地茅】試驗組植株高度(第二輪110/11/4~111/7/25)

| 組別<br>時間/生長週數 |      | TPH 濃度 2000 mg/kg |     |     |     | TPH 濃度 5000 mg/kg |     |     |     | TPH 濃度 8000 mg/kg |     |     |     |
|---------------|------|-------------------|-----|-----|-----|-------------------|-----|-----|-----|-------------------|-----|-----|-----|
|               |      | 植株高度( cm)         |     |     | 平均  | 植株高度( cm)         |     |     | 平均  | 植株高度( cm)         |     |     | 平均  |
| 11月4日         | 0 W  | 38                | 45  | 37  | 40  | 37                | 35  | 35  | 36  | 37                | 33  | 33  | 34  |
| 11月18日        | 2 W  | 44                | 40  | 50  | 45  | 58                | 47  | 54  | 53  | 50                | 47  | 43  | 47  |
| 11月24日        | 3 W  | 48                | 53  | 50  | 50  | 65                | 55  | 50  | 57  | 55                | 50  | 46  | 50  |
| 12月10日        | 5 W  | 51                | 62  | 52  | 55  | 65                | 57  | 62  | 61  | 68                | 50  | 56  | 58  |
| 12月24日        | 7 W  | 56                | 63  | 56  | 58  | 73                | 59  | 68  | 67  | 63                | 62  | 85  | 70  |
| 1月7日          | 9 W  | 59                | 66  | 61  | 62  | 73                | 67  | 75  | 72  | 72                | 66  | 85  | 74  |
| 1月21日         | 11 W | 60                | 64  | 66  | 63  | 77                | 68  | 77  | 74  | 69                | 67  | 70  | 68  |
| 1月25日         | 12 W | 62                | 63  | 66  | 64  | 80                | 77  | 77  | 78  | 78                | 68  | 68  | 71  |
| 2月11日         | 14 W | 63                | 69  | 67  | 66  | 82                | 77  | 78  | 79  | 81                | 74  | 70  | 75  |
| 2月25日         | 16 W | 64                | 71  | 70  | 68  | 83                | 70  | 77  | 77  | 80                | 76  | 73  | 77  |
| 3月11日         | 18 W | 63                | 72  | 73  | 69  | 89                | 70  | 79  | 79  | 88                | 78  | 76  | 80  |
| 3月25日         | 20 W | 62                | 76  | 76  | 71  | 81                | 70  | 77  | 76  | 83                | 79  | 77  | 80  |
| 4月15日         | 23 W | 60                | 71  | 80  | 70  | 100               | 71  | 80  | 84  | 91                | 91  | 80  | 87  |
| 4月29日         | 25 W | 73                | 85  | 91  | 83  | 103               | 91  | 100 | 98  | 105               | 101 | 103 | 103 |
| 5月10日         | 27 W | 83                | 105 | 102 | 97  | 106               | 104 | 113 | 108 | 111               | 115 | 105 | 110 |
| 5月27日         | 29 W | 90                | 105 | 110 | 101 | 117               | 120 | 121 | 119 | 116               | 125 | 111 | 117 |
| 6月10日         | 31 W | 98                | 114 | 130 | 114 | 130               | 120 | 128 | 126 | 134               | 130 | 131 | 132 |
| 6月24日         | 33 W | 106               | 123 | 126 | 118 | 134               | 130 | 132 | 132 | 137               | 138 | 130 | 135 |
| 7月8日          | 35 W | 115               | 130 | 125 | 123 | 140               | 140 | 145 | 142 | 145               | 148 | 130 | 141 |
| 7月25日         | 37 W | 121               | 137 | 148 | 135 | 131               | 140 | 143 | 138 | 140               | 141 | 140 | 140 |





表4.1.2-2 【培地茅】試驗組植株高度(第三輪111/7/25~112/1/5)

| 組別<br>時間/生長週數 |      | TPH 濃度 2000 mg/kg |     |     |     | TPH 濃度 5000 mg/kg |     |     |     | TPH 濃度 8000 mg/kg |     |     |     |
|---------------|------|-------------------|-----|-----|-----|-------------------|-----|-----|-----|-------------------|-----|-----|-----|
|               |      | 植株高度( cm)         |     |     | 平均  | 植株高度( cm)         |     |     | 平均  | 植株高度( cm)         |     |     | 平均  |
| 7月25日         | 0 W  | 32                | 28  | 30  | 30  | 30                | 31  | 24  | 28  | 28                | 30  | 30  | 29  |
| 8月12日         | 3 W  | 90                | 89  | 83  | 87  | 90                | 90  | 95  | 92  | 95                | 97  | 99  | 97  |
| 8月26日         | 5 W  | 105               | 124 | 110 | 113 | 108               | 119 | 115 | 114 | 112               | 120 | 106 | 113 |
| 9月8日          | 7 W  | 113               | 140 | 131 | 128 | 127               | 140 | 130 | 132 | 134               | 140 | 120 | 131 |
| 9月23日         | 9 W  | 130               | 140 | 144 | 138 | 142               | 145 | 130 | 139 | 130               | 120 | 120 | 123 |
| 10月7日         | 11 W | 114               | 127 | 130 | 124 | 130               | 145 | 136 | 137 | 135               | 140 | 143 | 139 |
| 10月28日        | 14 W | 115               | 130 | 133 | 126 | 133               | 145 | 137 | 138 | 136               | 142 | 144 | 141 |
| 11月8日         | 16 W | 110               | 130 | 120 | 120 | 125               | 127 | 110 | 121 | 120               | 115 | 113 | 116 |
| 11月22日        | 18 W | 110               | 133 | 125 | 123 | 124               | 120 | 108 | 117 | 112               | 113 | 110 | 112 |
| 12月8日         | 20 W | 110               | 120 | 126 | 119 | 120               | 115 | 110 | 115 | 109               | 110 | 105 | 108 |
| 12月22日        | 22 W | 95                | 106 | 113 | 105 | 125               | 105 | 106 | 112 | 110               | 120 | 108 | 113 |
| 1月5日          | 24 W | 106               | 105 | 125 | 112 | 108               | 108 | 106 | 107 | 110               | 138 | 117 | 122 |

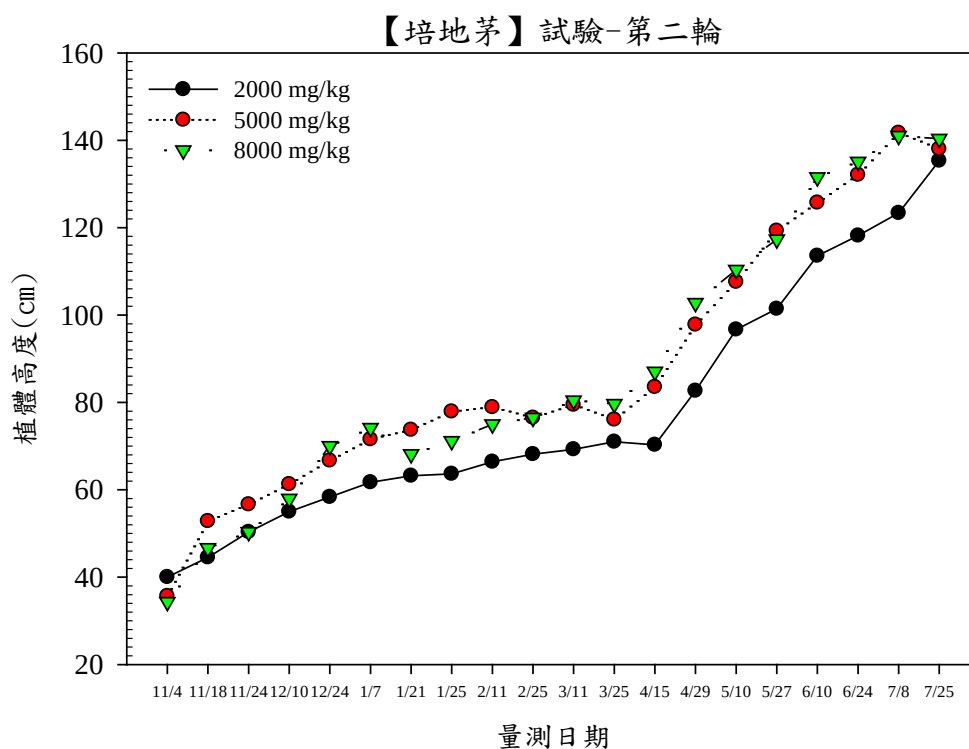


圖4.1.2-2 【培地茅】試驗組植株平均高度變化(第二輪110/11/4~111/7/25)

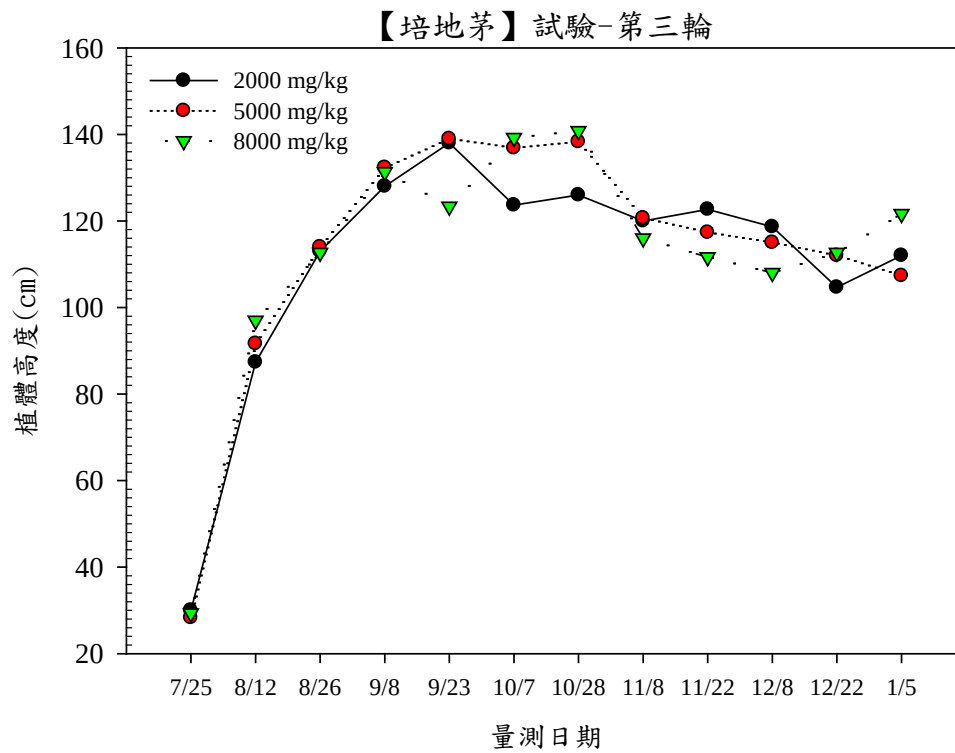


圖4.1.2-3 【培地茅】試驗組植株平均高度變化(第三輪111/7/25~112/1/5)



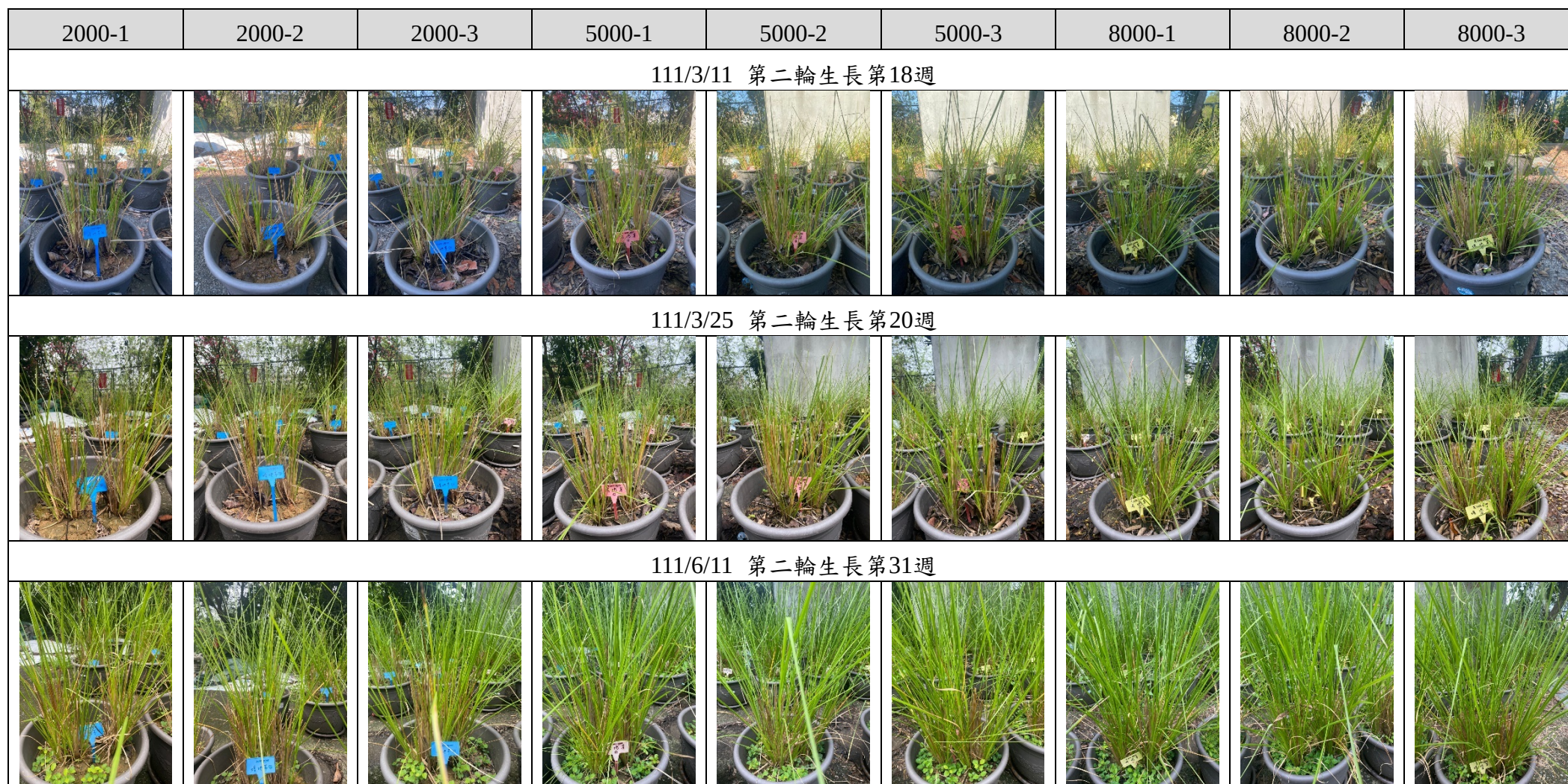


圖4.1.2-4 【培地茅】三種濃度試驗生長情形(1/3)



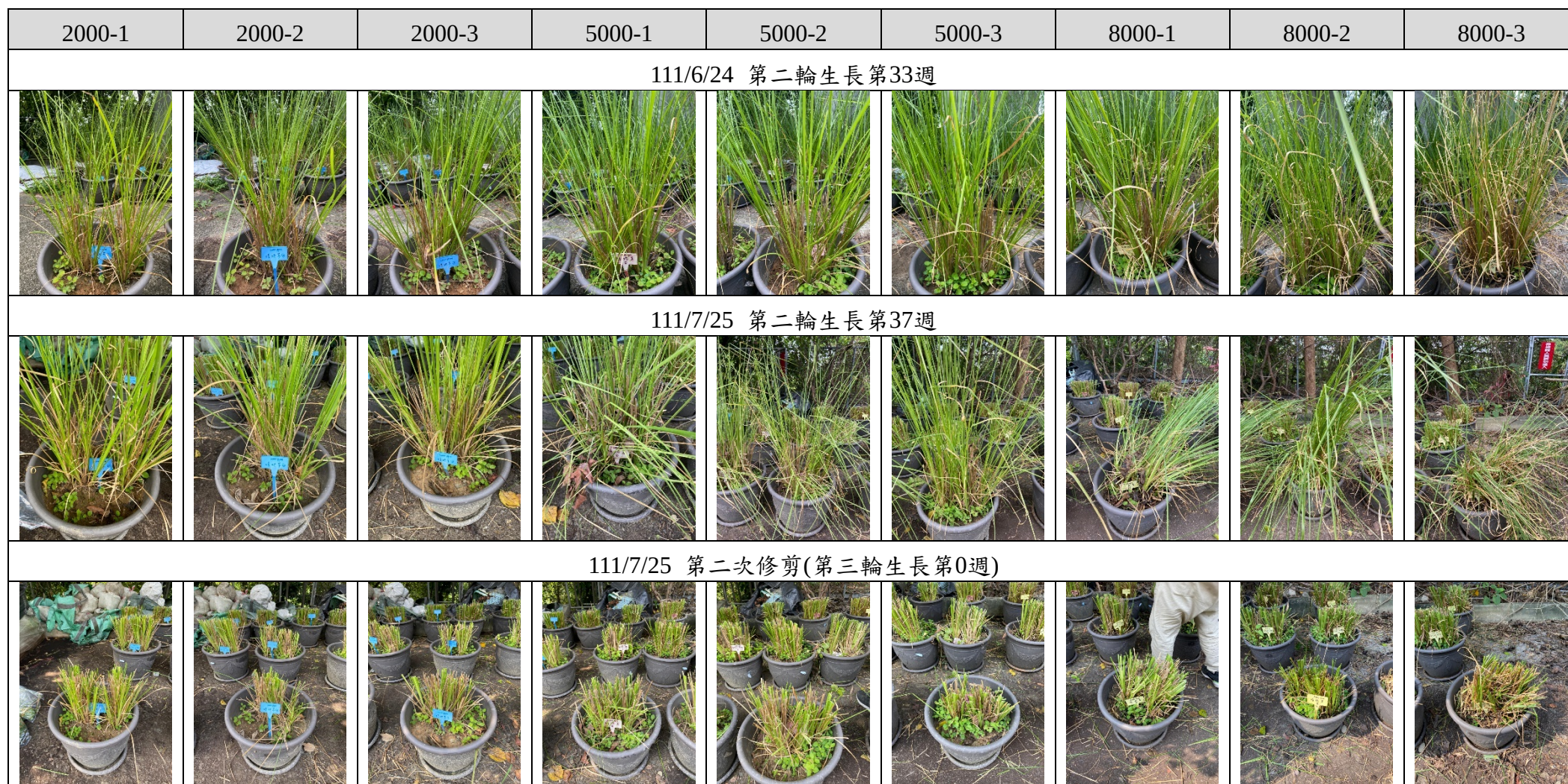


圖4.1.2-4 【培地茅】三種濃度試驗生長情形(2/3)



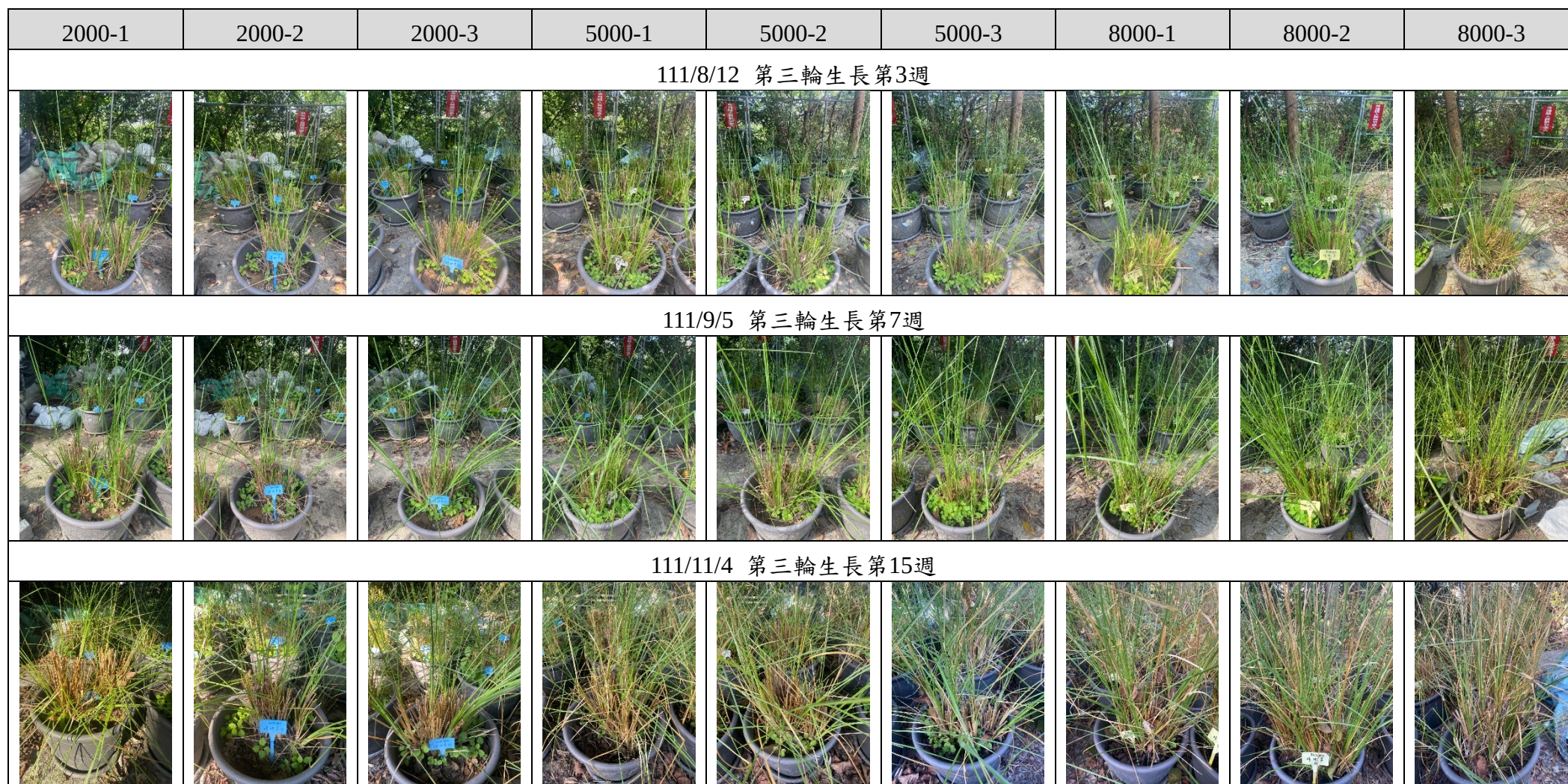


圖4.1.2-4 【培地茅】三種濃度試驗生長情形(3/3)





## 2. 【培地茅+油分解菌】試驗組

【培地茅+油分解菌】試驗組高度紀錄如表4.1.2-3及表4.1.2-4，不同試驗組別植株平均生長高度如圖4.1.2-5及圖4.1.2-6所示。

在110年5月27日開始第一輪種植，於110年11月4日進行第一次修剪後，開始第二輪生長，其第二輪植株生長高度，土壤 TPH 濃度2000 mg/kg 組種植培地茅修剪後平均高度為31 cm；七週後生長至79 cm；十六週時98 cm；二十五週時108 cm；三十一週時145 cm；第三十七週修剪前為148 cm。土壤 TPH 濃度5000 mg/kg 組種植培地茅修剪後平均高度為34 cm；七週後生長86 cm；十六週時97 cm；二十五週時113 cm；三十一週時149 cm；第三十七週修剪前為161 cm。土壤 TPH 濃度8000 mg/kg 組種植培地茅修剪後平均高度為31 cm；七週後生長至103 cm；十六週時97 cm；二十五週時112 cm；三十一週時147 cm；第三十七週修剪前為149 cm。

培地茅於111年7月25日進行第二次修剪，開始第三輪生長，至112年1月5日期間，土壤 TPH 濃度2000 mg/kg 組種植培地茅修剪後平均高度為29 cm；三週後生長至100 cm；五週時111 cm；九週時137 cm；十四週時146 cm；十八週時122 cm；二十四週時136 cm。土壤 TPH 濃度5000 mg/kg 組種植培地茅修剪後平均高度為29 cm；三週後生長至97 cm；五週時111 cm；九週時138 cm；十四週時118 cm；十八週時120 cm；二十四週時131 cm。土壤 TPH 濃度8000 mg/kg 組種植培地茅修剪後平均高度為30 cm；三週後生長至99 cm；五週時116 cm；九週時平均高度136 cm；十四週時122 cm；十八週時117 cm；二十四週時120 cm。

培地茅在三種 TPH 濃度土壤平均生長高度，第二輪以5000 mg/kg > 8000 mg/kg > 2000 mg/kg，第三輪初期，培地茅在三種濃度下，生長差異不大，在10月7日後5000 mg/kg 及8000 mg/kg 高度不增反降，且下降約25公分，是由於高濃度之盆栽放置於較靠近施工側，影響到培地茅生長。圖4.1.2-7為【培地茅+油分解菌】在三種 TPH 濃度土壤生長情形。



## 第四章 執行成果

## 油污染土壤綠色整治及創造循環經濟效益

表4.1.2-3 【培地茅+油分解菌】試驗組植株高度(第二輪110/11/4~111/7/25)

| 組別<br>時間/生長週數 |      | TPH 濃度 2000 mg/kg |     |     |     | TPH 濃度 5000 mg/kg |     |     |     | TPH 濃度 8000 mg/kg |     |     |     |
|---------------|------|-------------------|-----|-----|-----|-------------------|-----|-----|-----|-------------------|-----|-----|-----|
|               |      | 植株高度( cm)         |     |     | 平均  | 植株高度( cm)         |     |     | 平均  | 植株高度( cm)         |     |     | 平均  |
| 11月4日         | 0 W  | 30                | 32  | 32  | 31  | 35                | 33  | 33  | 34  | 34                | 33  | 25  | 31  |
| 11月18日        | 2 W  | 49                | 49  | 52  | 50  | 59                | 53  | 51  | 54  | 64                | 72  | 59  | 65  |
| 11月24日        | 3 W  | 59                | 52  | 59  | 57  | 64                | 61  | 59  | 61  | 74                | 68  | 69  | 70  |
| 12月10日        | 5 W  | 70                | 65  | 68  | 68  | 90                | 75  | 65  | 77  | 90                | 103 | 80  | 91  |
| 12月24日        | 7 W  | 85                | 80  | 73  | 79  | 92                | 98  | 68  | 86  | 101               | 107 | 100 | 103 |
| 1月7日          | 9 W  | 87                | 83  | 76  | 82  | 97                | 103 | 70  | 90  | 107               | 108 | 108 | 108 |
| 1月21日         | 11 W | 79                | 95  | 80  | 85  | 107               | 105 | 75  | 96  | 103               | 105 | 106 | 105 |
| 1月25日         | 12 W | 88                | 91  | 81  | 87  | 103               | 105 | 75  | 94  | 101               | 107 | 106 | 105 |
| 2月11日         | 14 W | 90                | 98  | 82  | 90  | 110               | 105 | 80  | 98  | 102               | 109 | 105 | 105 |
| 2月25日         | 16 W | 91                | 107 | 96  | 98  | 103               | 107 | 82  | 97  | 102               | 107 | 82  | 97  |
| 3月11日         | 18 W | 90                | 114 | 85  | 96  | 100               | 99  | 80  | 93  | 90                | 97  | 90  | 92  |
| 3月25日         | 20 W | 73                | 106 | 88  | 89  | 103               | 103 | 99  | 102 | 90                | 95  | 89  | 91  |
| 4月15日         | 23 W | 90                | 110 | 81  | 94  | 101               | 101 | 91  | 97  | 100               | 101 | 90  | 97  |
| 4月29日         | 25 W | 105               | 119 | 101 | 108 | 121               | 111 | 106 | 113 | 113               | 115 | 108 | 112 |
| 5月10日         | 27 W | 112               | 130 | 112 | 118 | 138               | 127 | 128 | 131 | 130               | 132 | 120 | 127 |
| 5月27日         | 29 W | 124               | 133 | 136 | 131 | 151               | 143 | 137 | 143 | 139               | 151 | 139 | 143 |
| 6月10日         | 31 W | 158               | 138 | 140 | 145 | 155               | 153 | 139 | 149 | 146               | 150 | 146 | 147 |
| 6月24日         | 33 W | 136               | 139 | 144 | 140 | 165               | 160 | 164 | 163 | 159               | 158 | 140 | 152 |
| 7月8日          | 35 W | 140               | 142 | 150 | 144 | 165               | 158 | 162 | 162 | 154               | 155 | 142 | 150 |
| 7月25日         | 37 W | 155               | 150 | 140 | 148 | 170               | 173 | 140 | 161 | 146               | 160 | 140 | 149 |



表4.1.2-4 【培地茅+油分解菌】試驗組植株高度(第三輪111/7/25~112/1/5)

| 時間/生長週數 | 組別   | TPH 濃度 2000 mg/kg |     |     |     | TPH 濃度 5000 mg/kg |     |     |     | TPH 濃度 8000 mg/kg |     |     |     |
|---------|------|-------------------|-----|-----|-----|-------------------|-----|-----|-----|-------------------|-----|-----|-----|
|         |      | 植株高度( cm)         |     |     | 平均  | 植株高度( cm)         |     |     | 平均  | 植株高度( cm)         |     |     | 平均  |
| 7月25日   | 0 W  | 30                | 28  | 30  | 29  | 28                | 30  | 30  | 29  | 30                | 30  | 30  | 30  |
| 8月12日   | 3 W  | 102               | 99  | 100 | 100 | 104               | 88  | 99  | 97  | 101               | 100 | 97  | 99  |
| 8月26日   | 5 W  | 112               | 113 | 109 | 111 | 115               | 105 | 114 | 111 | 118               | 112 | 119 | 116 |
| 9月8日    | 7 W  | 125               | 126 | 130 | 127 | 125               | 130 | 130 | 128 | 125               | 130 | 121 | 125 |
| 9月23日   | 9 W  | 130               | 134 | 148 | 137 | 142               | 129 | 144 | 138 | 148               | 130 | 130 | 136 |
| 10月7日   | 11 W | 140               | 130 | 155 | 142 | 116               | 132 | 97  | 115 | 115               | 120 | 100 | 112 |
| 10月28日  | 14 W | 146               | 134 | 159 | 146 | 118               | 137 | 100 | 118 | 117               | 128 | 120 | 122 |
| 11月8日   | 16 W | 137               | 138 | 133 | 136 | 125               | 122 | 125 | 124 | 120               | 115 | 110 | 115 |
| 11月22日  | 18 W | 127               | 125 | 115 | 122 | 130               | 121 | 108 | 120 | 131               | 113 | 108 | 117 |
| 12月8日   | 20 W | 120               | 126 | 133 | 126 | 130               | 120 | 126 | 125 | 110               | 110 | 105 | 108 |
| 12月22日  | 22 W | 126               | 125 | 127 | 126 | 133               | 116 | 130 | 126 | 110               | 102 | 105 | 106 |
| 1月5日    | 24 W | 130               | 137 | 140 | 136 | 139               | 132 | 123 | 131 | 113               | 120 | 128 | 120 |

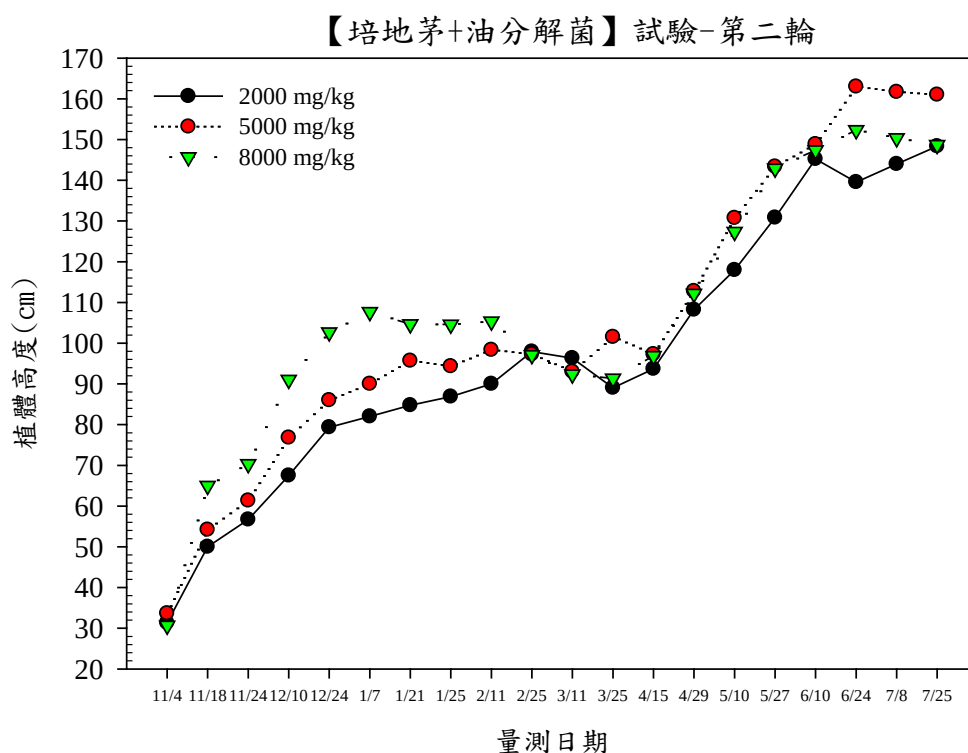


圖4.1.2-5 【培地茅+油分解菌】試驗組植株平均高度變化(第二輪 110/11/4~111/7/25)



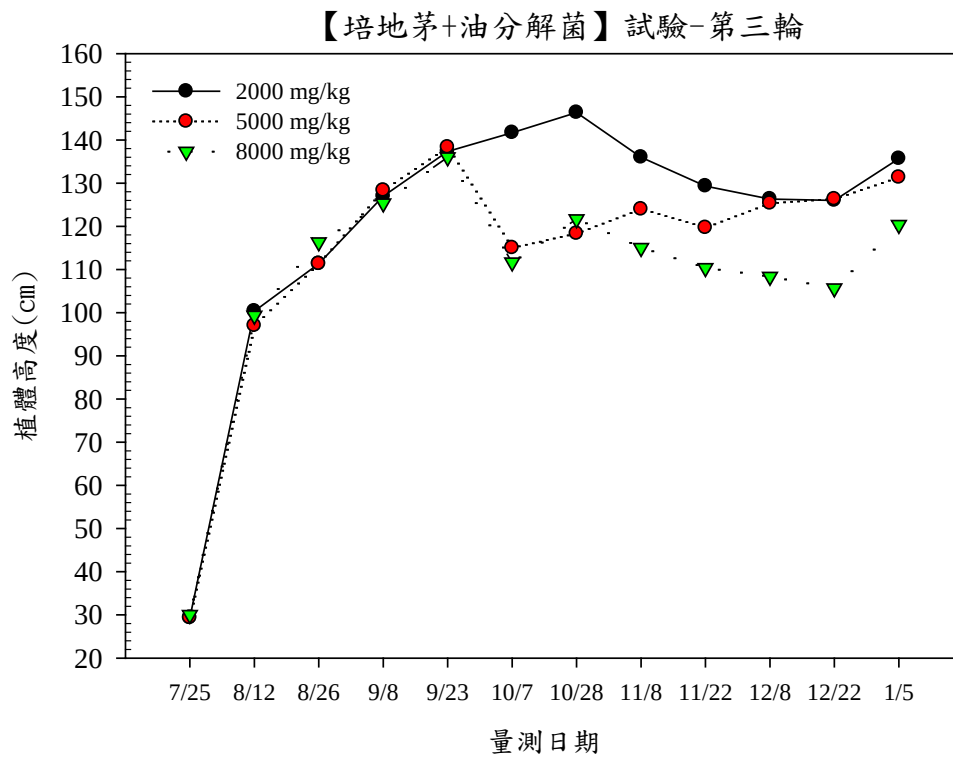


圖4.1.2-6 【培地茅+油分解菌】試驗組植株平均高度變化(第三輪  
111/7/25~112/1/5)

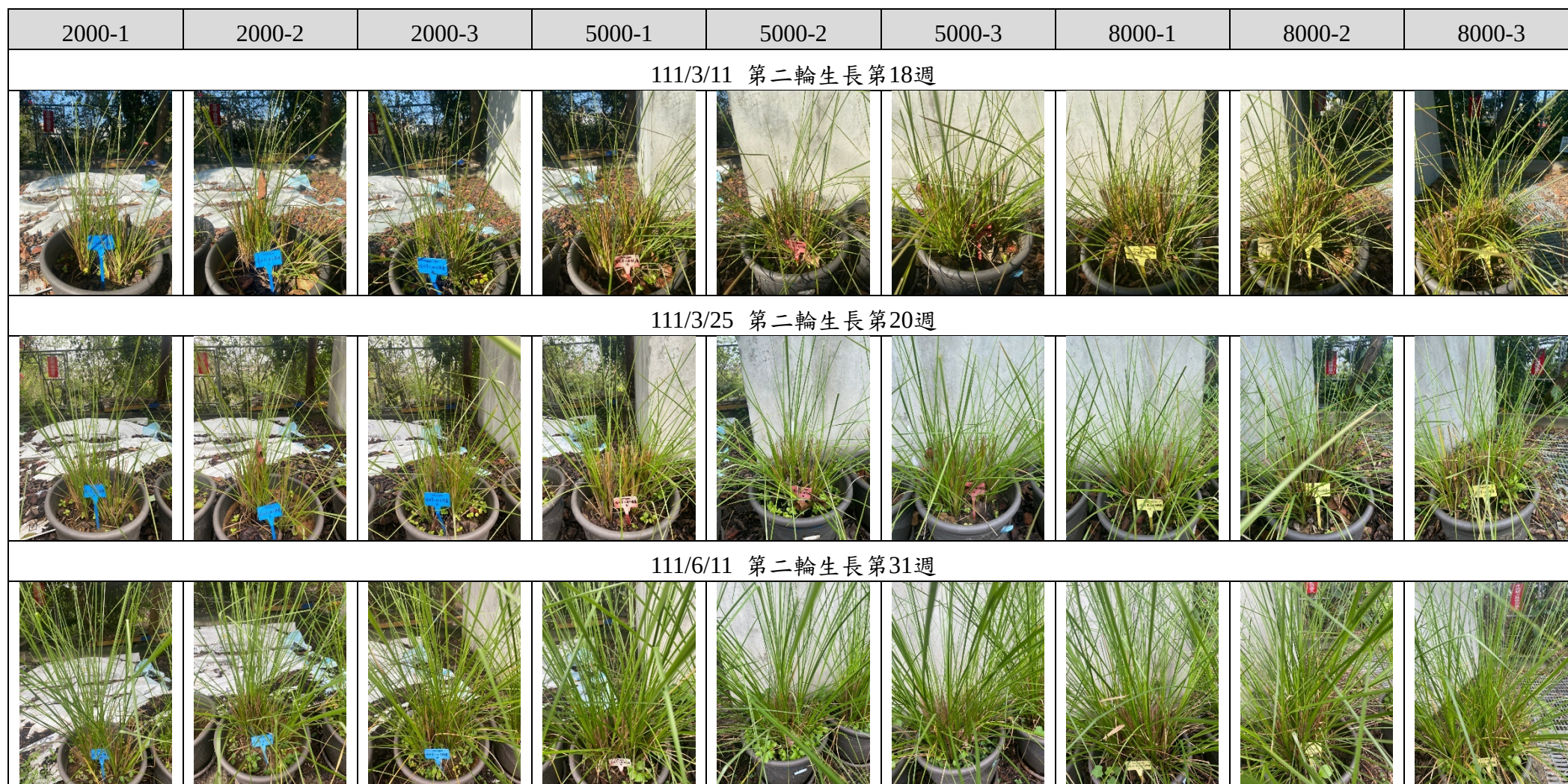


圖4.1.2-7 【培地茅+油分解菌】三種濃度試驗生長情形(1/3)



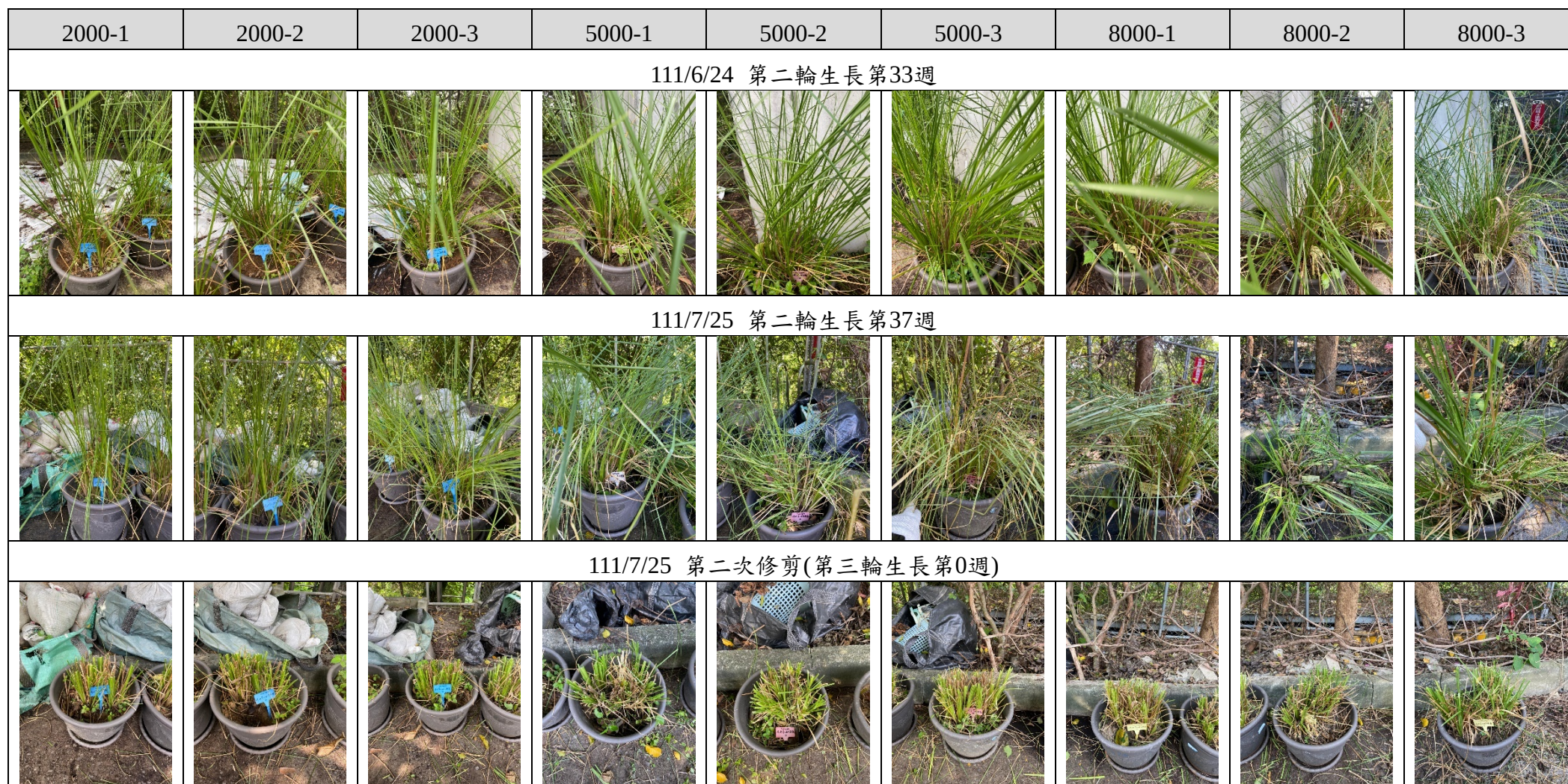


圖4.1.2-7 【培地茅+油分解菌】三種濃度試驗生長情形(2/3)



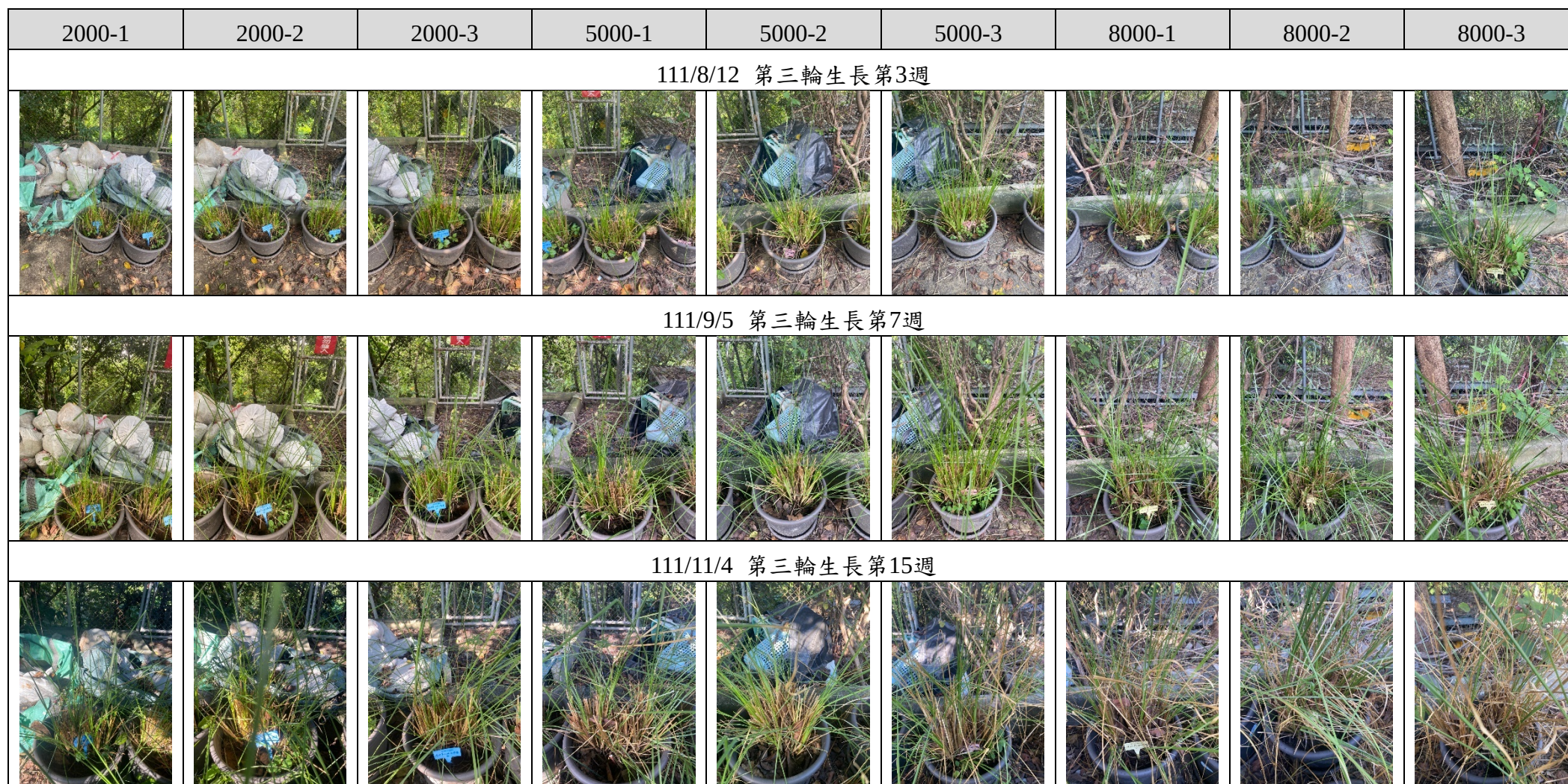


圖4.1.2-7 【培地茅+油分解菌】三種濃度試驗生長情形(3/3)





### 3. 【培地茅+生物炭2.5%】

【培地茅+生物炭2.5%】試驗植株高度紀錄如表4.1.2-5及表4.1.2-6，不同試驗組別植株平均生長高度如圖4.1.2-8及圖4.1.2-9所示。

在110年5月27日開始第一輪種植，於110年11月4日進行第一次修剪後，開始第二輪生長，其第二輪植株生長高度，土壤 TPH 濃度2000 mg/kg 組種植培地茅修剪後平均高度為40 cm；七週後生長至64 cm；十六週時74 cm；二十五週時91 cm；三十一週時118 cm；第三十七週修剪前為142 cm。土壤 TPH 濃度5000 mg/kg 組種植培地茅修剪後平均高度為38 cm；七週後生長至77 cm；十六週時85 cm；二十五週時104 cm；三十一週時141 cm；第三十七週修剪前為161 cm。土壤 TPH 濃度8000 mg/kg 組種植培地茅修剪後平均高度為31 cm；七週後生長至72 cm；十六週時83 cm；二十五週時103 cm；三十一週時144 cm；第三十七週修剪前為160 cm。

培地茅於111年7月25日進行第二次修剪，開始第三輪生長，至112年1月5日期間，土壤 TPH 濃度2000 mg/kg 組種植培地茅修剪後平均高度為30 cm；三週後生長至93 cm；五週時106 cm；九週時137 cm；十四週時167 cm；十八週時136 cm；二十四週時131 cm。土壤 TPH 濃度5000 mg/kg 組種植培地茅修剪後平均高度為29 cm；三週後生長至94 cm；五週時118 cm；九週時127 cm；十四週時154 cm；十八週時131 cm；二十四週時135 cm。土壤 TPH 濃度8000 mg/kg 組種植培地茅修剪後平均高度為28 cm；三週後生長至91 cm；五週時110 cm；九週時平均高度137 cm；十四週時157 cm；十八週時123 cm；二十四週時117 cm。

培地茅在三種 TPH 濃度土壤平均生長高度，第一輪植株在 TPH 濃度5000 mg/kg 及8000 mg/kg 土壤平均生長高度差異不大，於土壤 TPH 濃度2000 mg/kg 下生長高度較低。在第二輪至目前為止，此三種濃度之培地茅生長高度相近，以土壤 TPH 濃度2000 mg/kg 略高於8000 mg/kg 及5000 mg/kg。圖4.1.2-10為【培地茅+生物炭2.5%】在三種 TPH 濃度土壤生長情形。



## 第四章 執行成果

## 油污染土壤綠色整治及創造循環經濟效益

表4.1.2-5 【培地茅+生物炭2.5%】試驗組植株高度(第二輪110/11/4~111/7/25)

| 組別<br>時間/生長週數 |      | TPH 濃度 2000 mg/kg |     |     |     | TPH 濃度 5000 mg/kg |     |     |     | TPH 濃度 8000 mg/kg |     |     |     |
|---------------|------|-------------------|-----|-----|-----|-------------------|-----|-----|-----|-------------------|-----|-----|-----|
|               |      | 植株高度( cm)         |     |     | 平均  | 植株高度( cm)         |     |     | 平均  | 植株高度( cm)         |     |     | 平均  |
| 11月4日         | 0 W  | 39                | 44  | 37  | 40  | 37                | 38  | 40  | 38  | 33                | 30  | 31  | 31  |
| 11月18日        | 2 W  | 46                | 51  | 39  | 45  | 46                | 48  | 44  | 46  | 54                | 47  | 45  | 49  |
| 11月24日        | 3 W  | 50                | 53  | 47  | 50  | 62                | 56  | 53  | 57  | 59                | 51  | 51  | 54  |
| 12月10日        | 5 W  | 59                | 57  | 58  | 58  | 78                | 69  | 69  | 72  | 67                | 61  | 65  | 64  |
| 12月24日        | 7 W  | 68                | 60  | 65  | 64  | 89                | 68  | 74  | 77  | 75                | 69  | 72  | 72  |
| 1月7日          | 9 W  | 65                | 66  | 68  | 67  | 95                | 75  | 80  | 83  | 77                | 77  | 80  | 78  |
| 1月21日         | 11 W | 71                | 70  | 68  | 70  | 105               | 78  | 84  | 89  | 80                | 86  | 75  | 80  |
| 1月25日         | 12 W | 70                | 70  | 70  | 70  | 107               | 83  | 84  | 91  | 89                | 89  | 85  | 88  |
| 2月11日         | 14 W | 70                | 72  | 73  | 72  | 107               | 83  | 84  | 91  | 90                | 94  | 89  | 91  |
| 2月25日         | 16 W | 73                | 73  | 75  | 74  | 90                | 80  | 86  | 85  | 86                | 77  | 86  | 83  |
| 3月11日         | 18 W | 78                | 76  | 77  | 77  | 110               | 79  | 81  | 90  | 90                | 80  | 80  | 83  |
| 3月25日         | 20 W | 85                | 76  | 84  | 81  | 95                | 87  | 80  | 87  | 95                | 88  | 84  | 89  |
| 4月15日         | 23 W | 80                | 71  | 80  | 77  | 100               | 81  | 90  | 90  | 91                | 90  | 90  | 90  |
| 4月29日         | 25 W | 104               | 80  | 90  | 91  | 111               | 101 | 102 | 104 | 105               | 103 | 101 | 103 |
| 5月10日         | 27 W | 105               | 95  | 99  | 99  | 125               | 123 | 111 | 120 | 118               | 116 | 118 | 117 |
| 5月27日         | 29 W | 114               | 112 | 101 | 109 | 127               | 131 | 134 | 130 | 127               | 130 | 137 | 131 |
| 6月10日         | 31 W | 122               | 118 | 113 | 118 | 142               | 134 | 148 | 141 | 152               | 136 | 145 | 144 |
| 6月24日         | 33 W | 126               | 130 | 134 | 130 | 158               | 151 | 161 | 157 | 155               | 148 | 148 | 150 |
| 7月8日          | 35 W | 135               | 142 | 143 | 140 | 160               | 160 | 162 | 161 | 160               | 155 | 150 | 155 |
| 7月25日         | 37 W | 147               | 134 | 146 | 142 | 165               | 157 | 160 | 161 | 160               | 161 | 158 | 160 |



## 第四章 執行成果

## 油污染土壤綠色整治及創造循環經濟效益

表4.1.2-6 【培地茅+生物炭2.5%】試驗組植株高度(第三輪111/7/25~112/1/5)

| 時間/生長週數 | 組別   | TPH 濃度 2000 mg/kg |     |     |     | TPH 濃度 5000 mg/kg |     |     |     | TPH 濃度 8000 mg/kg |     |     |     |
|---------|------|-------------------|-----|-----|-----|-------------------|-----|-----|-----|-------------------|-----|-----|-----|
|         |      | 植株高度( cm)         |     |     | 平均  | 植株高度( cm)         |     |     | 平均  | 植株高度( cm)         |     |     | 平均  |
| 7月25日   | 0 W  | 31                | 28  | 30  | 30  | 30                | 31  | 25  | 29  | 28                | 30  | 27  | 28  |
| 8月12日   | 3 W  | 101               | 99  | 78  | 93  | 99                | 86  | 98  | 94  | 91                | 84  | 99  | 91  |
| 8月26日   | 5 W  | 113               | 102 | 104 | 106 | 115               | 120 | 118 | 118 | 109               | 105 | 116 | 110 |
| 9月8日    | 7 W  | 130               | 115 | 120 | 122 | 120               | 129 | 120 | 123 | 130               | 125 | 135 | 130 |
| 9月23日   | 9 W  | 140               | 130 | 142 | 137 | 123               | 135 | 123 | 127 | 144               | 130 | 136 | 137 |
| 10月7日   | 11 W | 156               | 166 | 158 | 160 | 150               | 145 | 147 | 147 | 140               | 155 | 167 | 154 |
| 10月28日  | 14 W | 158               | 168 | 156 | 161 | 155               | 160 | 148 | 154 | 145               | 157 | 169 | 157 |
| 11月8日   | 16 W | 147               | 144 | 150 | 147 | 140               | 130 | 138 | 136 | 140               | 132 | 130 | 134 |
| 11月22日  | 18 W | 135               | 130 | 142 | 136 | 130               | 132 | 132 | 131 | 133               | 121 | 115 | 123 |
| 12月8日   | 20 W | 120               | 125 | 136 | 127 | 125               | 135 | 130 | 130 | 120               | 110 | 100 | 110 |
| 12月22日  | 22 W | 130               | 122 | 140 | 131 | 134               | 132 | 135 | 134 | 126               | 110 | 110 | 115 |
| 1月5日    | 24 W | 135               | 122 | 135 | 131 | 130               | 136 | 138 | 135 | 119               | 122 | 111 | 117 |

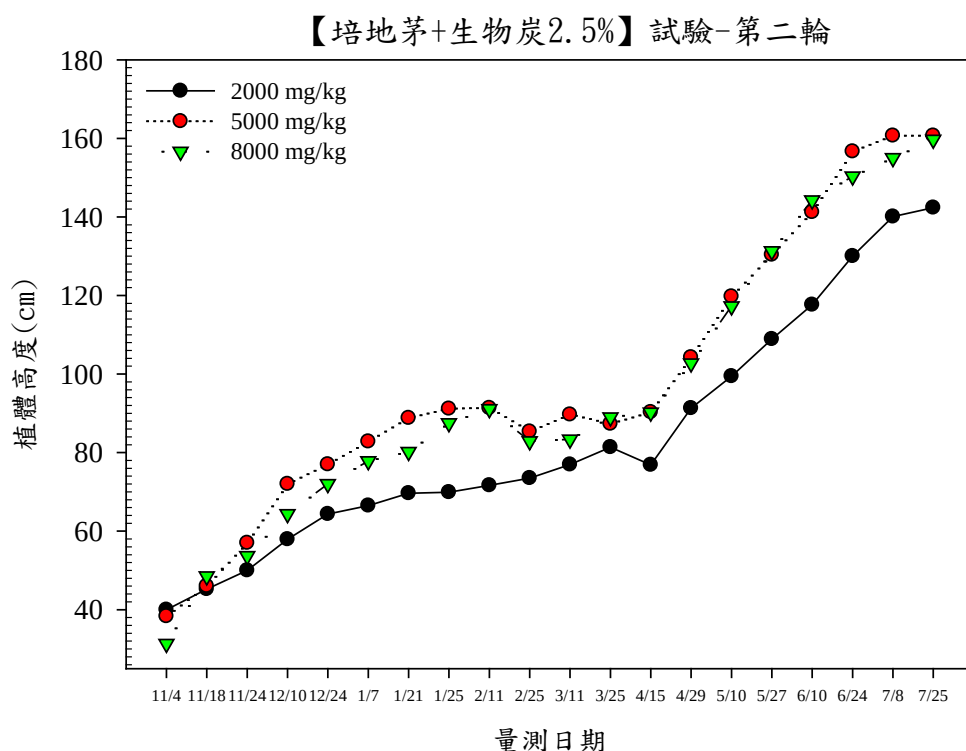
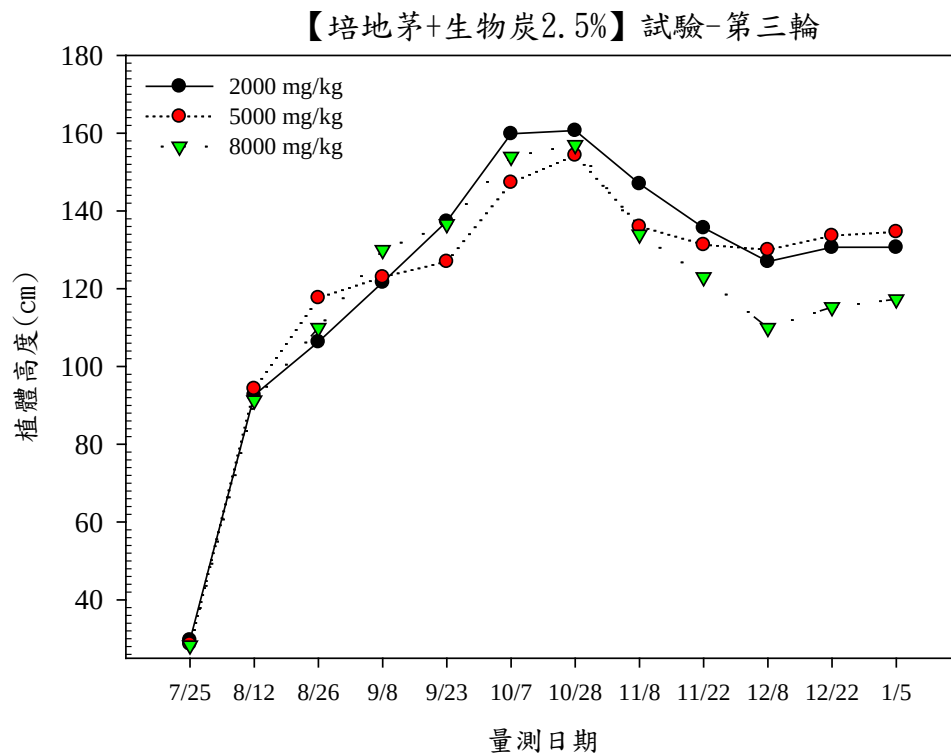


圖4.1.2-8 【培地茅+生物炭2.5%】試驗組植株平均高度變化(第二輪 110/11/4~111/7/25)





**圖4.1.2-9 【培地茅+生物炭2.5%】試驗組植株平均高度變化(第三輪  
111/7/25~112/1/5)**

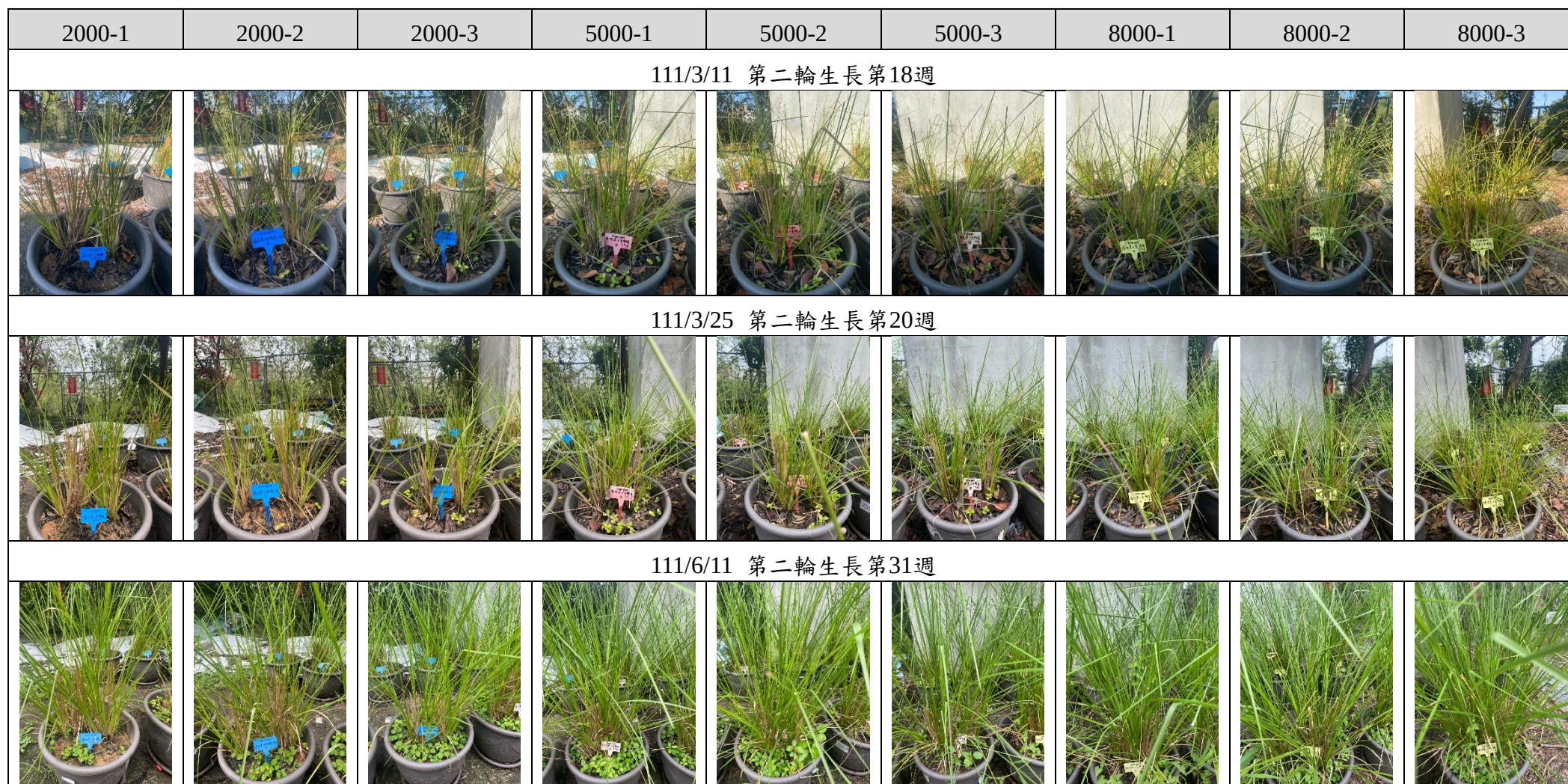


圖4.1.2-10 【培地茅+生物炭2.5%】三種濃度試驗生長情形(1/3)



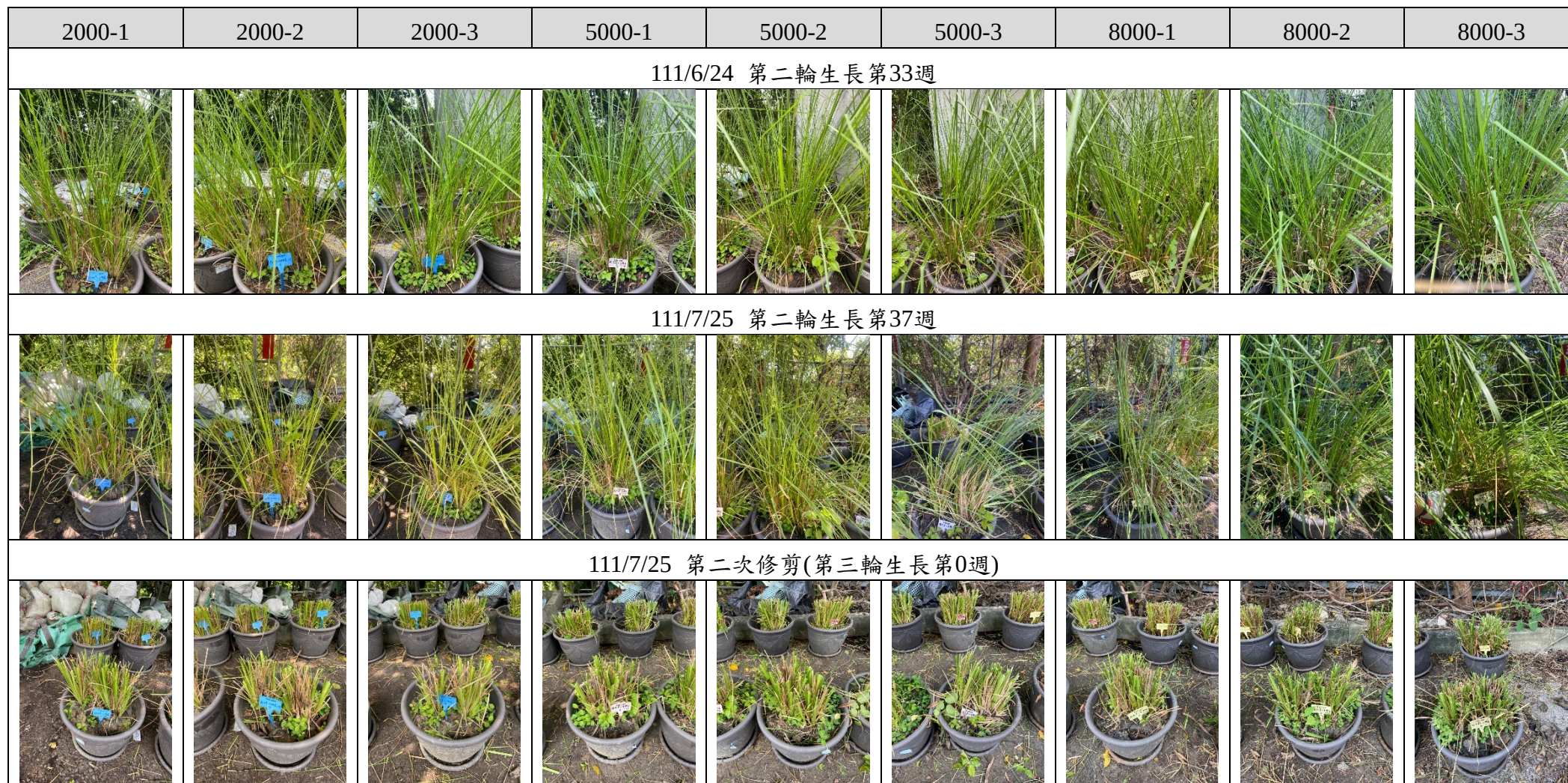


圖4.1.2-10 【培地茅+生物炭2.5%】三種濃度試驗生長情形(2/3)



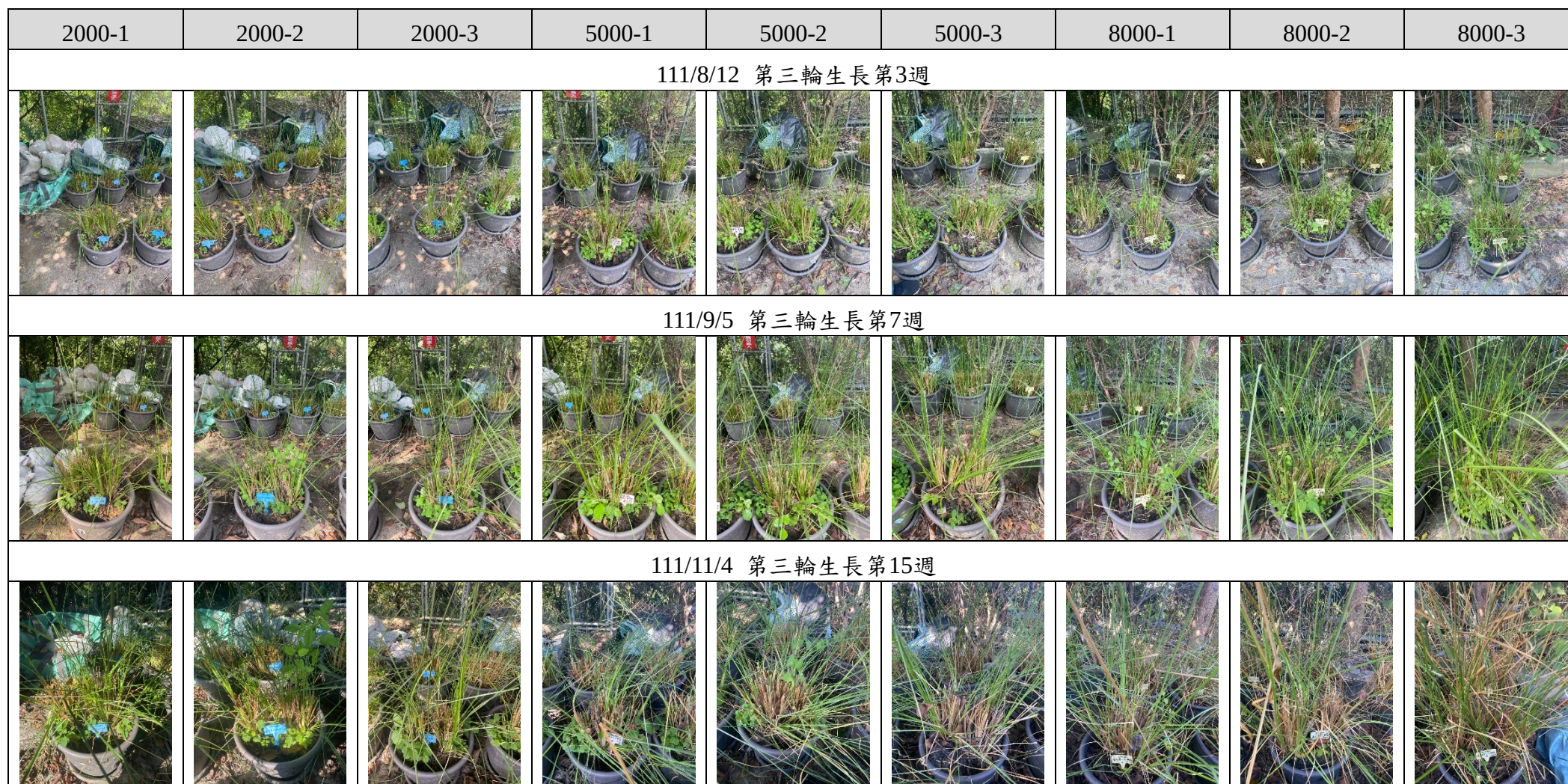


圖4.1.2-10 【培地茅+生物炭2.5%】三種濃度試驗生長情形(3/3)





#### 4. 試驗組別【香茅】

【香茅】試驗植株高度紀錄如表4.1.2-7及表4.1.2-8，不同試驗組別植株平均生長高度變化如圖4.1.2-11及圖4.1.2-12所示。

在110年5月27日開始第一輪種植，於110年9月2日進行第一次修剪後，開始第二輪生長；於111年1月14日進行第二次修剪後，開始第三輪生長，其第三輪植株生長高度，土壤 TPH 濃度2000 mg/kg 組種植香茅初始平均高度為29 cm；四週後生長至47 cm；八週時56 cm；十五週時63 cm；二十一週時86 cm；第二十七週修剪前為113 cm。土壤 TPH 濃度5000 mg/kg 組種植香茅初始平均高度為29 cm；四週後生長至43 cm；八週時49 cm；十五週時70 cm；二十一週時90 cm；第二十七週修剪前為112 cm。土壤 TPH 濃度8000 mg/kg 組種植香茅初始平均高度為29 cm；四週後生長至41 cm；八週時43 cm；十五週時80 cm；二十一週時105 cm；第二十七週修剪前為113 cm。

香茅在111年7月25日第三次修剪後，開始第四輪生長，至112年1月5日期間，土壤 TPH 濃度2000 mg/kg 組種植香茅修剪後平均高度為28 cm；三週後生長至83 cm；五週時100 cm；九週時122 cm；十四週時127 cm；十八週時98 cm；二十四週時89 cm。土壤 TPH 濃度5000 mg/kg 組種植香茅修剪後平均高度為33 cm；三週後生長至85 cm；五週時101 cm；九週時127 cm；十四週時122 cm；十八週時87 cm；二十四週時87 cm。土壤 TPH 濃度8000 mg/kg 組種植香茅修剪後平均高度為29 cm；三週後生長至94 cm；五週時107 cm；九週時平均高度120 cm；十四週時126 cm；十八週時91 cm；二十四週時80 cm。

香茅在三種 TPH 濃度土壤生長狀況第三輪前期為2000 mg/kg > 5000 mg/kg > 8000 mg/kg，到後期反而為8000 mg/kg > 5000 mg/kg > 2000 mg/kg；第四輪為到目前則相差不大。圖4.1.2-13為【香茅】在三種濃度生長情形。



## 第四章 執行成果

## 油污染土壤綠色整治及創造循環經濟效益

表4.1.2-7 【香茅】試驗組植株高度(第三輪111/1/14~111/7/25)

| 組別<br>時間/生長週數 |      | TPH 濃度 2000 mg/kg |     |     |     | TPH 濃度 5000 mg/kg |     |     |     | TPH 濃度 8000 mg/kg |     |     |     |
|---------------|------|-------------------|-----|-----|-----|-------------------|-----|-----|-----|-------------------|-----|-----|-----|
|               |      | 植株高度( cm)         |     |     | 平均  | 植株高度( cm)         |     |     | 平均  | 植株高度( cm)         |     |     | 平均  |
| 1月14日         | 0 W  | 29                | 30  | 28  | 29  | 28                | 28  | 30  | 29  | 29                | 28  | 30  | 29  |
| 1月21日         | 1 W  | 32                | 30  | 35  | 32  | 32                | 31  | 33  | 32  | 30                | 27  | 28  | 28  |
| 1月25日         | 2 W  | 35                | 31  | 40  | 35  | 36                | 34  | 35  | 35  | 34                | 31  | 30  | 31  |
| 2月11日         | 4 W  | 55                | 42  | 44  | 47  | 41                | 45  | 44  | 43  | 42                | 42  | 40  | 41  |
| 2月25日         | 6 W  | 62                | 41  | 47  | 50  | 50                | 50  | 46  | 48  | 47                | 44  | 41  | 44  |
| 3月11日         | 8 W  | 72                | 45  | 50  | 56  | 50                | 56  | 42  | 49  | 45                | 43  | 42  | 43  |
| 3月25日         | 10 W | 78                | 50  | 57  | 62  | 52                | 58  | 57  | 56  | 57                | 61  | 60  | 59  |
| 4月15日         | 13 W | 71                | 50  | 60  | 60  | 70                | 70  | 65  | 68  | 71                | 81  | 80  | 77  |
| 4月29日         | 15 W | 70                | 55  | 63  | 63  | 72                | 70  | 67  | 70  | 75                | 85  | 80  | 80  |
| 5月10日         | 17 W | 70                | 60  | 70  | 67  | 76                | 73  | 69  | 73  | 76                | 90  | 80  | 82  |
| 5月27日         | 19 W | 70                | 78  | 80  | 76  | 92                | 80  | 78  | 83  | 81                | 98  | 94  | 91  |
| 6月10日         | 21 W | 80                | 93  | 86  | 86  | 97                | 90  | 84  | 90  | 98                | 113 | 105 | 105 |
| 6月24日         | 23 W | 84                | 91  | 97  | 91  | 101               | 100 | 99  | 100 | 105               | 110 | 110 | 108 |
| 7月8日          | 25 W | 114               | 120 | 116 | 117 | 110               | 110 | 105 | 108 | 127               | 130 | 120 | 126 |
| 7月25日         | 27 W | 130               | 100 | 110 | 113 | 120               | 110 | 106 | 112 | 115               | 115 | 110 | 113 |

表4.1.2-8 【香茅】試驗組植株高度(第四輪111/7/25~112/1/5)

| 組別<br>時間/生長週數 |      | TPH 濃度 2000 mg/kg |     |     |     | TPH 濃度 5000 mg/kg |     |     |     | TPH 濃度 8000 mg/kg |     |     |     |
|---------------|------|-------------------|-----|-----|-----|-------------------|-----|-----|-----|-------------------|-----|-----|-----|
|               |      | 植株高度( cm)         |     |     | 平均  | 植株高度( cm)         |     |     | 平均  | 植株高度( cm)         |     |     | 平均  |
| 7月25日         | 0 W  | 29                | 25  | 30  | 28  | 33                | 33  | 33  | 33  | 30                | 26  | 30  | 29  |
| 8月12日         | 3 W  | 80                | 87  | 74  | 80  | 94                | 82  | 80  | 85  | 89                | 94  | 100 | 94  |
| 8月26日         | 5 W  | 100               | 101 | 98  | 100 | 102               | 102 | 100 | 101 | 105               | 111 | 106 | 107 |
| 9月8日          | 7 W  | 120               | 120 | 110 | 117 | 120               | 110 | 110 | 113 | 120               | 112 | 110 | 114 |
| 9月23日         | 9 W  | 126               | 120 | 120 | 122 | 125               | 120 | 136 | 127 | 128               | 115 | 118 | 120 |
| 10月7日         | 11 W | 120               | 121 | 115 | 119 | 120               | 115 | 124 | 120 | 130               | 115 | 116 | 120 |
| 10月28日        | 14 W | 143               | 123 | 116 | 127 | 122               | 118 | 125 | 122 | 140               | 120 | 119 | 126 |
| 11月8日         | 16 W | 102               | 110 | 100 | 104 | 110               | 90  | 95  | 98  | 100               | 95  | 90  | 95  |
| 11月22日        | 18 W | 98                | 100 | 95  | 98  | 100               | 75  | 85  | 87  | 92                | 90  | 90  | 91  |
| 12月8日         | 20 W | 80                | 92  | 70  | 81  | 90                | 69  | 77  | 79  | 86                | 80  | 90  | 85  |
| 12月22日        | 22 W | 90                | 90  | 85  | 88  | 80                | 75  | 78  | 78  | 76                | 66  | 60  | 67  |
| 1月5日          | 24 W | 86                | 82  | 100 | 89  | 90                | 75  | 97  | 87  | 106               | 51  | 84  | 80  |



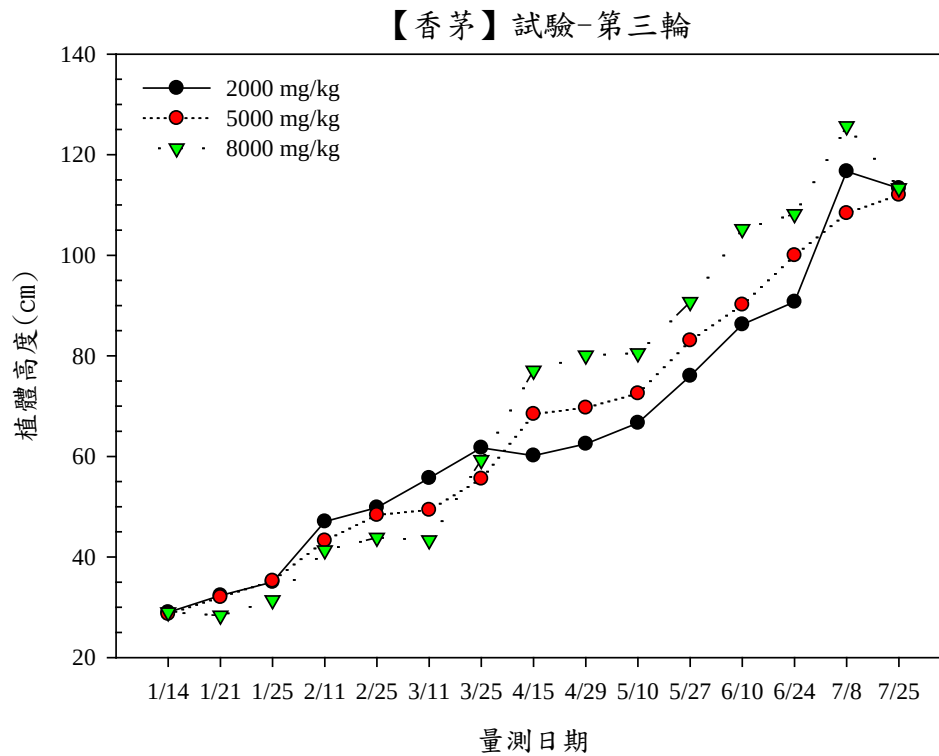


圖4.1.2-11 【香茅】試驗組植株平均高度變化(第三輪111/1/14~111/7/25)

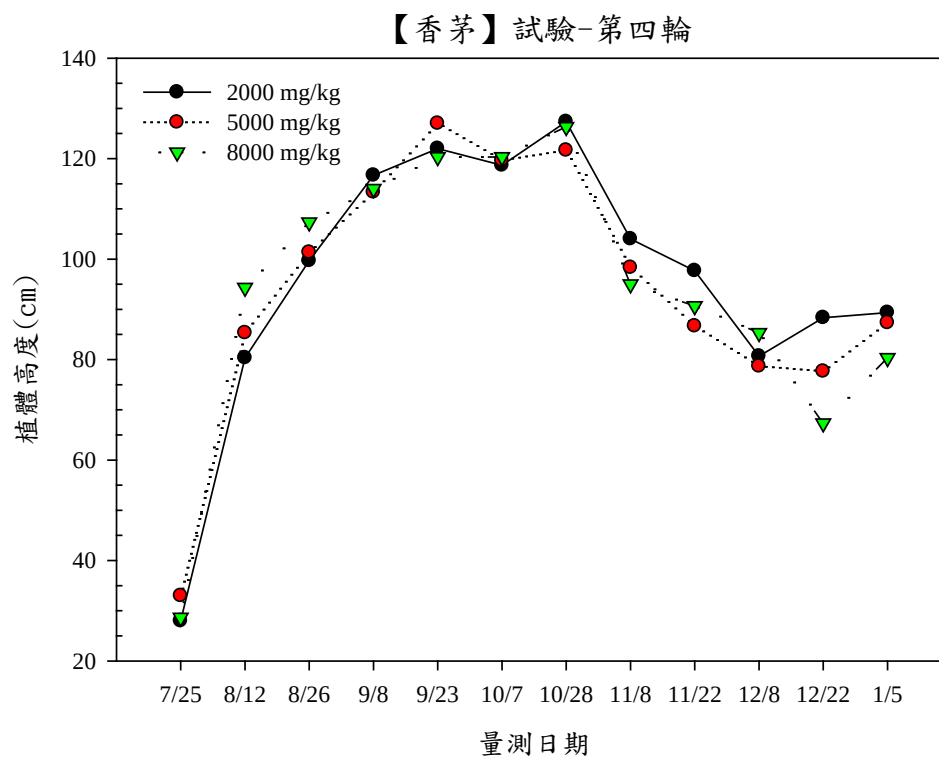


圖4.1.2-12 【香茅】試驗組植株平均高度變化(第四輪111/7/25~112/1/5)

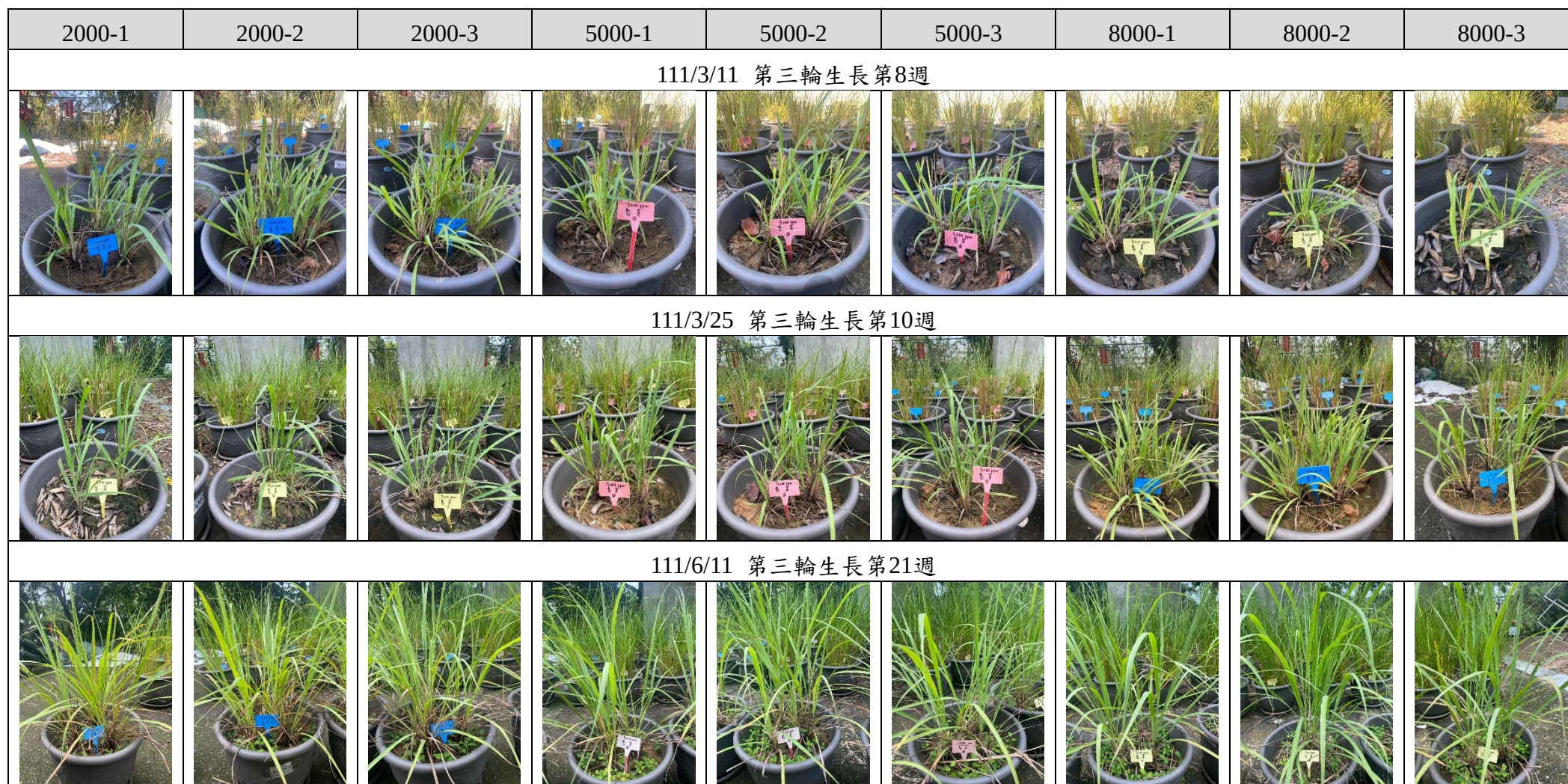


圖4.1.2-13 【香茅】三種濃度試驗生長情形(1/3)



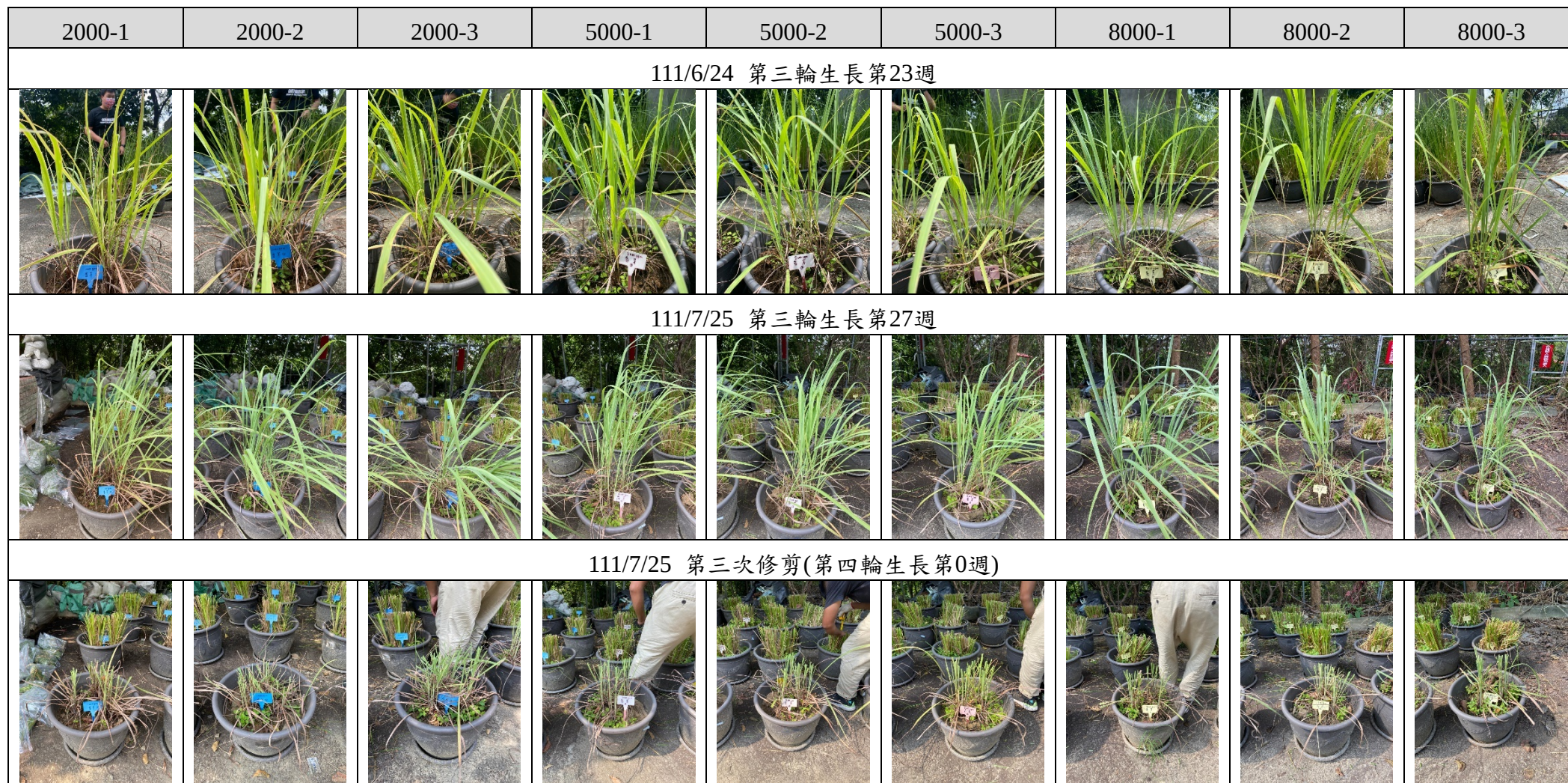


圖4.1.2-13 【香茅】三種濃度試驗生長情形(2/3)



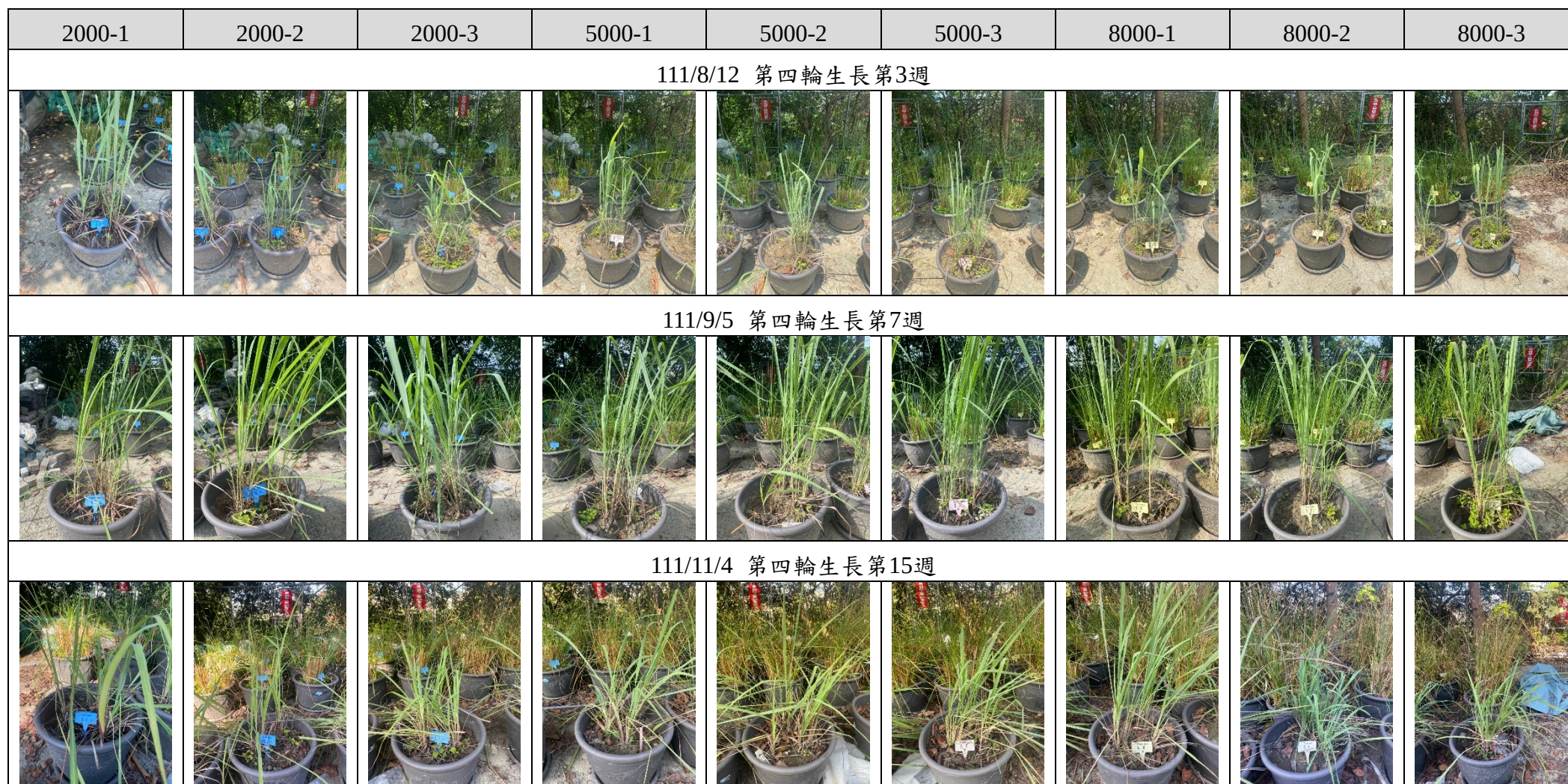


圖4.1.2-13 【香茅】三種濃度試驗生長情形(3/3)





### 4.1.3 培地茅在各試驗組植體生質量產量差異

本計畫依植體生長狀況，110年度培地茅已進行過一次修剪，香茅進行過兩次修剪，修剪時保留植體約30-40公分繼續種植試驗。111年度則均於7月25日進行植體修剪，此次修剪其培地茅第二輪生長約37週，香茅第三輪生長約27週；於112年1月5日進行整株植體採收，此輪培地茅為第三輪，生長約24週，香茅為第四輪生長約24週。

培地茅第二輪生長37週，其植體地上部生質量如表4.1.3-1及圖4.1.3-1，在土壤 TPH 濃度2000 mg/kg，【培地茅】組平均採收生質量為133.17 g，【培地茅+油分解菌】組平均採收生質量為191.00 g，【培地茅+生物炭2.5%】組平均採收生質量為152 g。添加油分解菌使培地茅生質量增加1.43倍；添加生物炭使培地茅生質量增加約1.14倍。在土壤 TPH 濃度5000 mg/kg，【培地茅】組採收生質量為149 g，【培地茅+油分解菌】組採收生質量為277 g，【培地茅+生物炭2.5%】組採收生質量為146 g。添加生物炭組與單純種植培地茅組沒有顯著差異，在土壤 TPH 濃度5000 mg/kg 添加油分解菌使培地茅生質量增加1.86倍。在土壤 TPH 濃度8000 mg/kg，【培地茅】組採收生質量為156 g，【培地茅+油分解菌】組採收生質量為263 g，【培地茅+生物炭2.5%】組採收生質量為288 g。添加油分解菌及生物炭使培地茅生質量分別增加1.85倍及1.68倍。

於112年1月5日進行整株培地茅採收，培地茅第三輪生長24週，其植體地上部生質量如表4.1.3-2及圖4.1.3-2，在土壤 TPH 濃度2000 mg/kg，【培地茅】組平均採收生質量為70 g，【培地茅+油分解菌】組平均採收生質量為126 g，【培地茅+生物炭2.5%】組平均採收生質量為122 g。添加油分解菌使培地茅生質量增加1.81倍；添加生物炭使培地茅生質量增加約1.76倍。在土壤 TPH 濃度5000 mg/kg，【培地茅】組採收生質量為118 g，【培地茅+油分解菌】組採收生質量為150 g，【培地茅+生物炭2.5%】組採收生質量為148 g。添加油分解菌使培地茅生質量增加1.27倍；添加生物炭組使培地茅生質量增加1.25倍。在土壤 TPH 濃度8000 mg/kg，【培地茅】組採收生質量為128 g，【培地茅+油分解菌】組採收生質量為146 g，【培地茅+生物炭2.5%】組採收生質量為146 g。添加油分解菌或添加生物炭使培地茅生質量增加1.14倍。

從110年5月27日至112年1月5日止，培地茅總累計種植了1年7個月，約86週，盆栽試驗一開始是統一於每個盆栽種植兩樣培地茅，而在112年1月5日採收其根部時，由於根系茂密，會緊緊抓住土壤，採收過程會有根部斷裂之情形，不易將



完整根系採收下來，其根之生質量如表4.1.3-3及圖4.1.3-3，根系比較照片如圖4.1.3-4及圖4.1.3-5。在土壤 TPH 濃度2000 mg/kg，【培地茅】組平均採收根生質量為606 g，【培地茅+油分解菌】組平均採收生質量為376 g，【培地茅+生物炭2.5%】組平均採收生質量為490 g。在土壤 TPH 濃度5000 mg/kg，【培地茅】組平均採收根生質量為857 g，【培地茅+油分解菌】組平均採收生質量為550 g，【培地茅+生物炭2.5%】組平均採收生質量為432 g。在土壤 TPH 濃度8000 mg/kg，【培地茅】組平均採收根生質量為508 g，【培地茅+油分解菌】組平均採收生質量為669 g，【培地茅+生物炭2.5%】組平均採收生質量為506 g。

由培地茅種植結果顯示，添加油分解菌組之培地茅地上部生質量增加，推測原因包括：1.油分解菌促進油分解，增加培地茅所能吸收的養分；2.所添加的油分解菌液中的營養成分增加了土壤肥分。此外，研究結果顯示，添加生物炭在土壤 TPH 越高濃度下，對植物生長之促進效果越顯著，在第二輪土壤 TPH 濃度8000 mg/kg 下，施用生物炭組之植體收穫量約為未施用生物炭組1.85倍。推測在高濃度下，生物炭可增加土壤通氣性，可提供足夠的空氣。





表4.1.3-1 培地茅植體生質量(第二次修剪-第二輪生長37週)

| 樣品 \ 試驗 | 培地茅    | 培地茅+油分解菌 | 培地茅+生物炭 2.5% |
|---------|--------|----------|--------------|
|         | 鮮重 (g) |          |              |
| 2000-1  | 165    | 223      | 105          |
| 2000-2  | 171    | 132      | 159          |
| 2000-3  | 64     | 219      | 193          |
| 2000-平均 | 133    | 191      | 152          |
| 5000-1  | 90     | 359      | 89           |
| 5000-2  | 100    | 196      | 152          |
| 5000-3  | 257    | 275      | 197          |
| 5000-平均 | 149    | 277      | 146          |
| 8000-1  | 164    | 162      | 188          |
| 8000-2  | 95     | 382      | 253          |
| 8000-3  | 210    | 244      | 424          |
| 8000-平均 | 156    | 263      | 288          |

第二次修剪(37W)

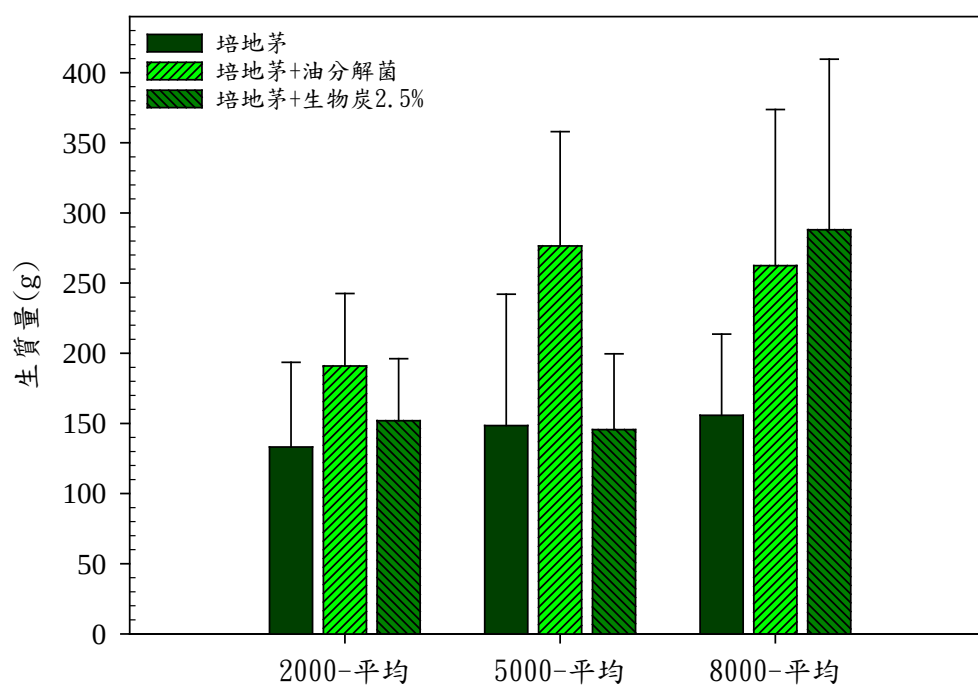


圖4.1.3-1 培地茅植體生質量(第二次修剪-第二輪生長37週)



表4.1.3-2 培地茅植體生質量(採收地上部-第三輪生長24週)

| 樣品 \ 試驗 | 培地茅    | 培地茅+油分解菌 | 培地茅+生物炭 2.5% |
|---------|--------|----------|--------------|
|         | 鮮重 (g) |          |              |
| 2000-1  | 69     | 118      | 144          |
| 2000-2  | 60     | 112      | 94           |
| 2000-3  | 80     | 148      | 130          |
| 2000-平均 | 70     | 126      | 122          |
| 5000-1  | 125    | 153      | 152          |
| 5000-2  | 129    | 131      | 147          |
| 5000-3  | 100    | 167      | 144          |
| 5000-平均 | 118    | 150      | 148          |
| 8000-1  | 130    | 159      | 138          |
| 8000-2  | 133    | 159      | 134          |
| 8000-3  | 122    | 120      | 167          |
| 8000-平均 | 128    | 146      | 146          |

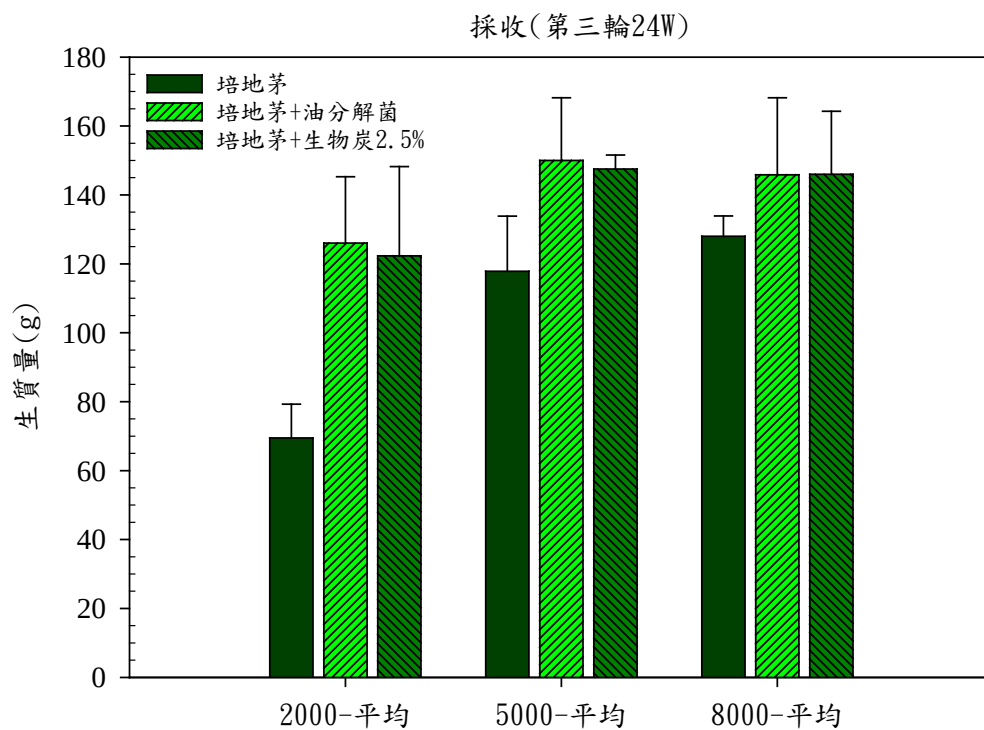


圖4.1.3-2 培地茅植體生質量(採收地上部-第三輪生長24週)



表4.1.3-3 培地茅植體生質量(地下部根-累計生長86週)

| 樣品 \ 試驗 | 培地茅    | 培地茅+油分解菌 | 培地茅+生物炭 2.5% |
|---------|--------|----------|--------------|
|         | 鮮重 (g) |          |              |
| 2000-1  | 788    | 280      | 507          |
| 2000-2  | 501    | 285      | 402          |
| 2000-3  | 529    | 563      | 562          |
| 2000-平均 | 606    | 376      | 490          |
| 5000-1  | 755    | 524      | 574          |
| 5000-2  | 877    | 617      | 309          |
| 5000-3  | 941    | 510      | 413          |
| 5000-平均 | 857    | 550      | 432          |
| 8000-1  | 442    | 825      | 357          |
| 8000-2  | 800    | 630      | 322          |
| 8000-3  | 284    | 553      | 839          |
| 8000-平均 | 508    | 669      | 506          |

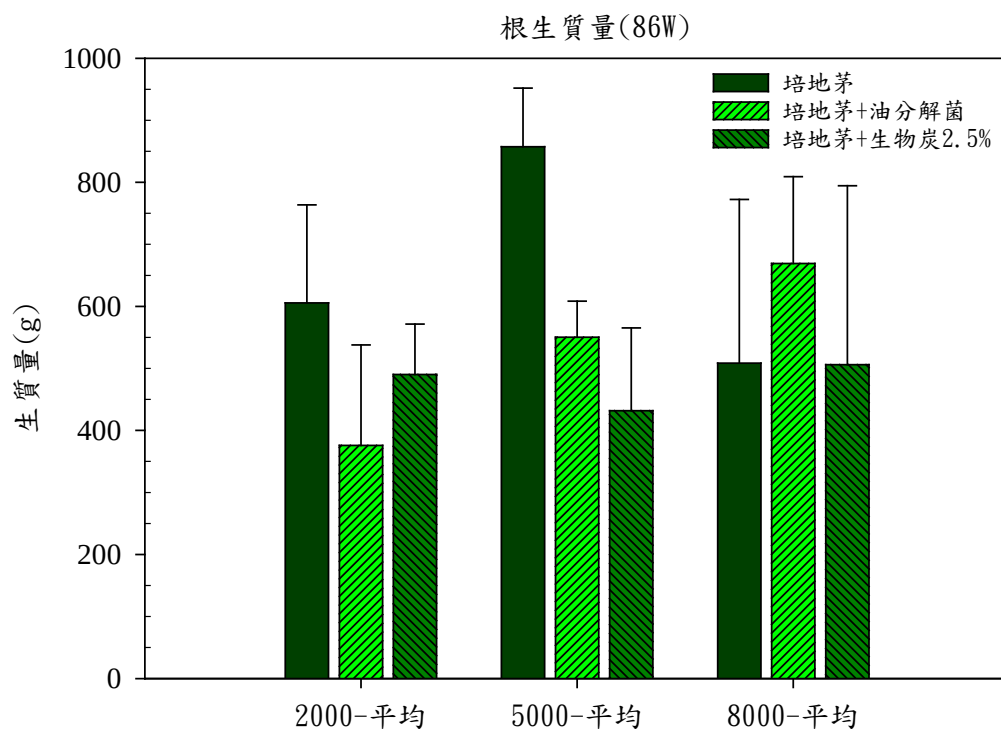


圖4.1.3-3 培地茅植體生質量(地下部根-累計生長86週)



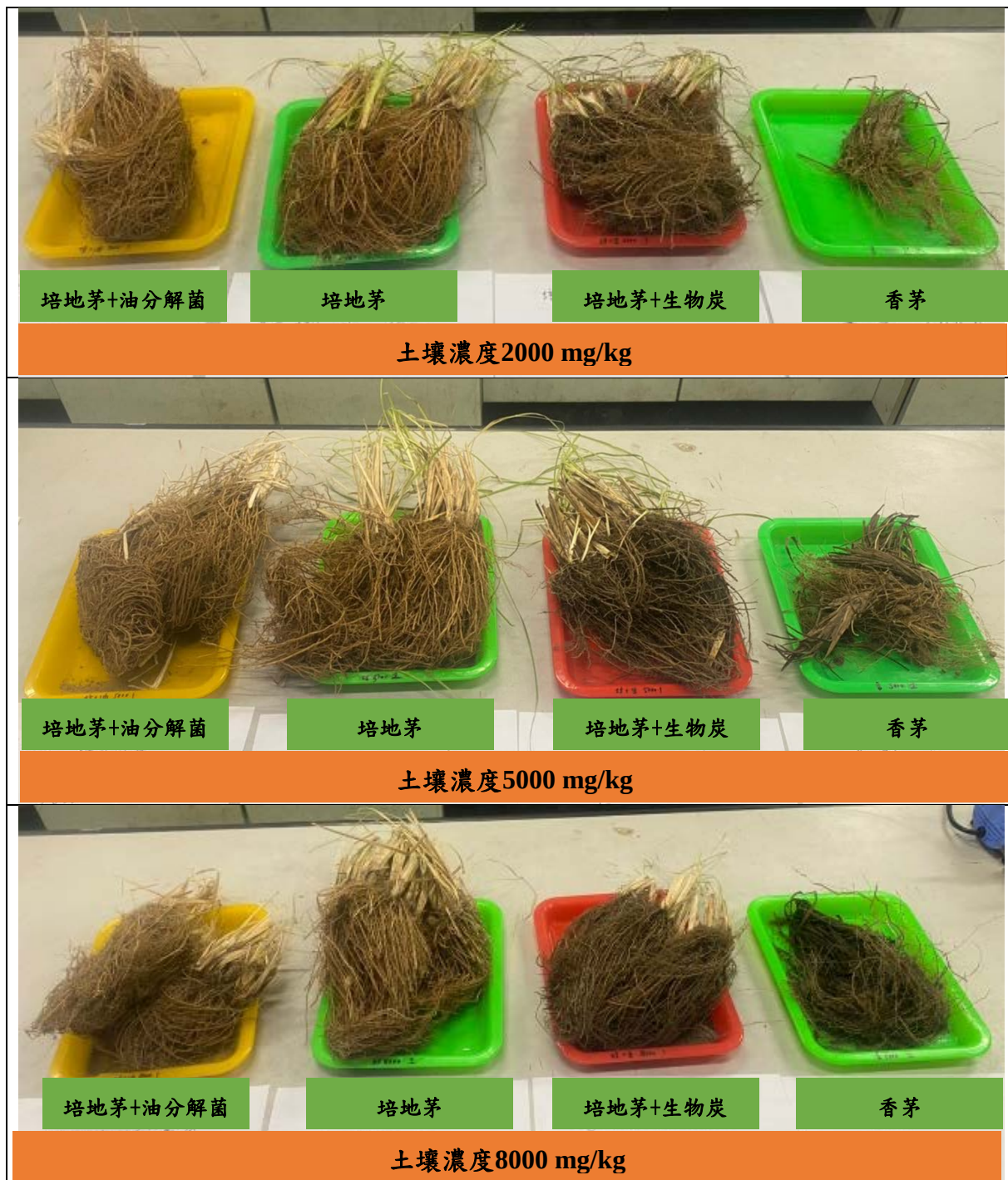


圖4.1.3-4 培地茅植物根系比較照片(相同濃度，不同試驗組)

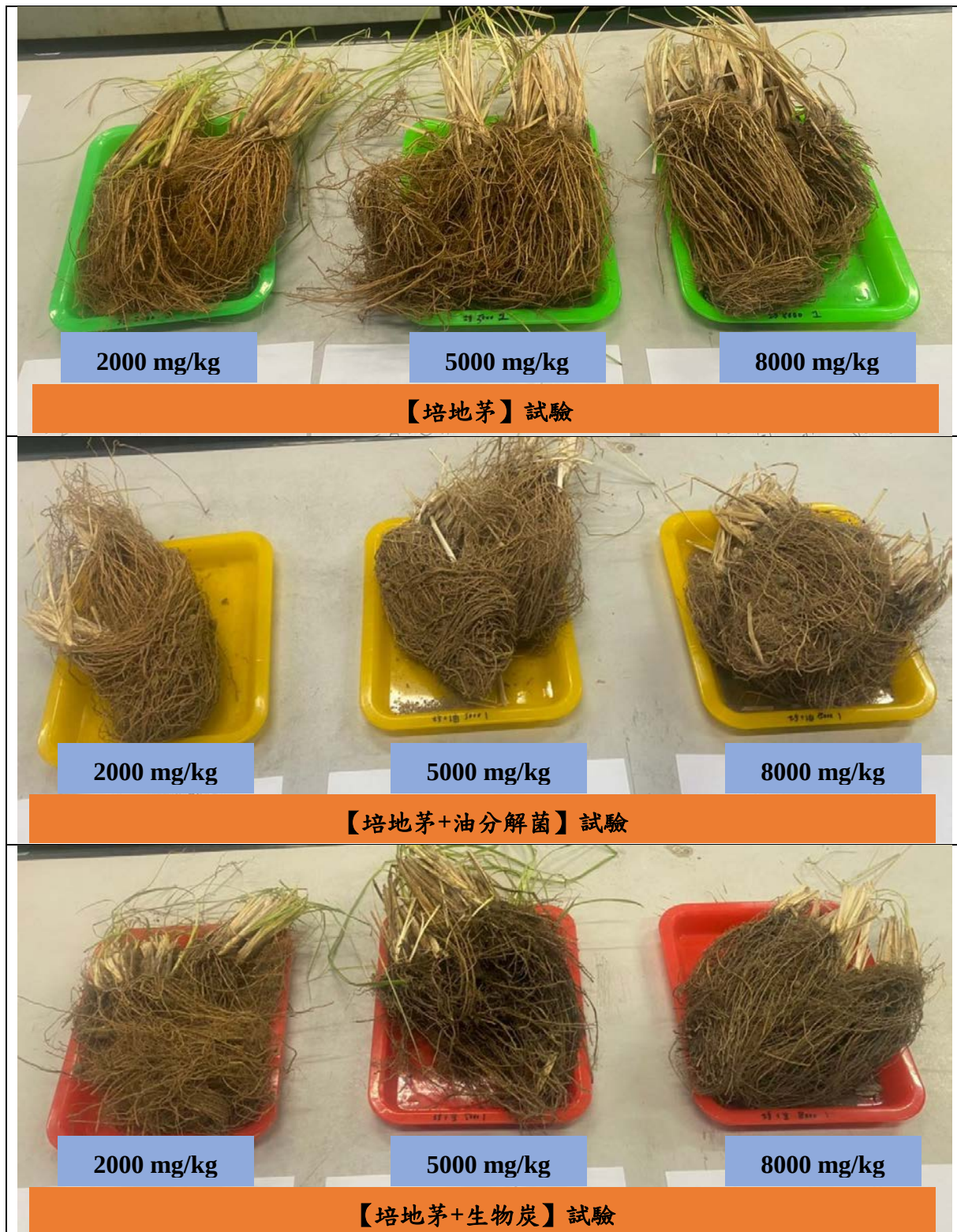


圖4.1.3-5 培地茅植物根系比較照片(相同試驗組，不同濃度)





香茅修剪或採收之植體地上部及地下部根生質量如表4.1.3-4、圖4.1.3-6及圖4.1.3-7所示，根系比較照片如圖4.1.3-8。香茅第三輪生長27週，在土壤 TPH 濃度 2000 mg/kg 生質量為45 g，在土壤 TPH 濃度5000 mg/kg 生質量為45 g，在土壤 TPH 濃度8000 mg/kg 生質量為66 g。前兩輪香茅在高濃度8000 mg/kg 植體產量均較差，在第三輪生長於高濃度8000 mg/kg 香茅反而高於濃度2000 mg/kg 及5000 mg/kg。

於112年1月5日進行整株香茅採收，香茅第四輪生長24週，在土壤 TPH 濃度 2000 mg/kg 生質量為44 g，在土壤 TPH 濃度5000 mg/kg 生質量為61 g，在土壤 TPH 濃度8000 mg/kg 生質量為65 g。在第四輪生長於低濃度2000 mg/kg 香茅低於高濃度8000 mg/kg 及5000 mg/kg。

從110年5月27日至112年1月5日止，香茅總累計種植了1年7個月，約86週，盆栽試驗一開始是統一於每個盆栽種植三樣香茅。在土壤 TPH 濃度2000 mg/kg，香茅平均採收根生質量為96 g，在土壤 TPH 濃度5000 mg/kg，香茅平均採收根生質量為335 g，在土壤 TPH 濃度8000 mg/kg，香茅平均採收根生質量為240 g。





表4.1.3-4 香茅植體地上部及地下部生質量(第三次修剪及採收)

| 樣品      | 試驗 | 香茅                    |                       |                       |
|---------|----|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|         |    | 鮮重 (g)                |                       |                       |
|         |    | 第三次修剪<br>(第三輪生長 27 週) | 採收地上部<br>(第四輪生長 24 週) | 採收地下部-根<br>(總生長 86 週) |
| 2000-1  |    | 45                    | 48                    | 62                    |
| 2000-2  |    | 46                    | 29                    | 113                   |
| 2000-3  |    | 46                    | 54                    | 114                   |
| 2000-平均 |    | 45                    | 44                    | 96                    |
| 5000-1  |    | 48                    | 51                    | 232                   |
| 5000-2  |    | 42                    | 62                    | 434                   |
| 5000-3  |    | 45                    | 69                    | 341                   |
| 5000-平均 |    | 45                    | 61                    | 335                   |
| 8000-1  |    | 65                    | 53                    | 404                   |
| 8000-2  |    | 60                    | 60                    | 155                   |
| 8000-3  |    | 75                    | 84                    | 161                   |
| 8000-平均 |    | 66                    | 65                    | 240                   |

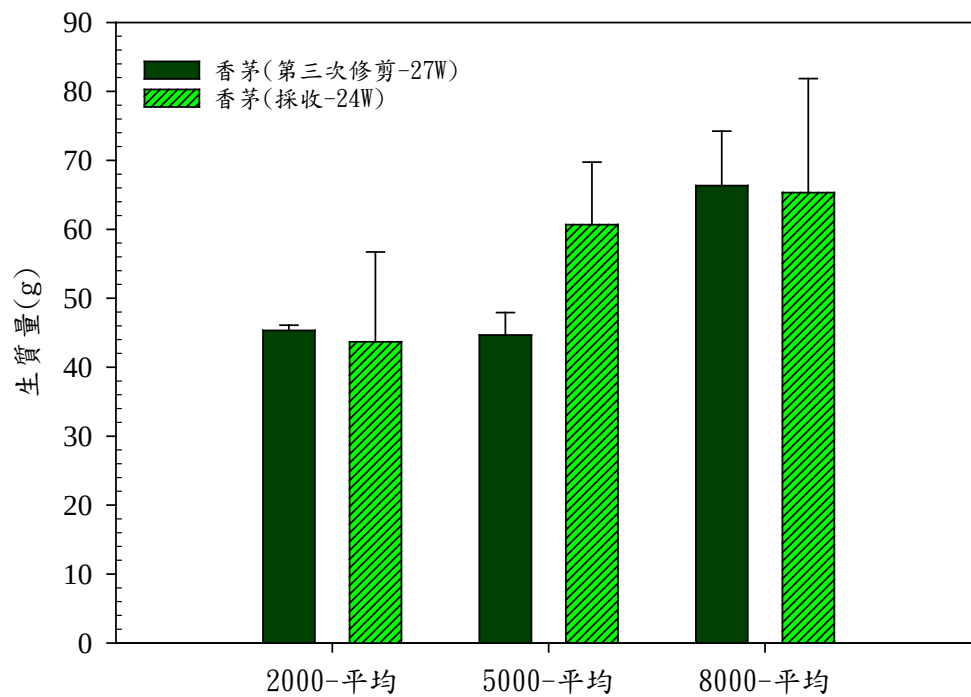


圖4.1.3-6 香茅植體生質量(第三次修剪及採收)

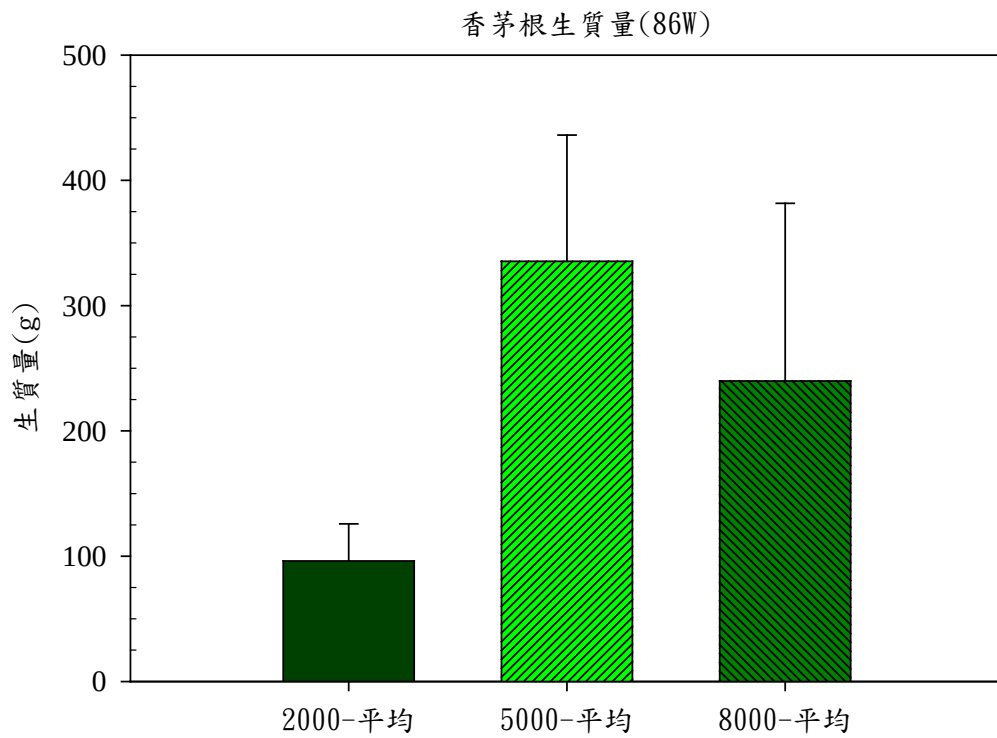


圖4.1.3-7 香茅植體生質量(地下部根-累計生長86週)



圖4.1.3-8 香茅植物根系比較照片



#### 4.1.4 培地茅在各試驗組植株生長高度差異

在110年度執行時，培地茅植體於110年11月4日進行第一次修剪後，開始第二輪生長，而111年度則延續繼續第二輪生長，直至111年7月25日進行第二次修剪，培地茅植體第二輪在不同試驗組別植株生長高度如圖4.1.4-1至圖4.1.4-6所示。在土壤 TPH 濃度2000 mg/kg，第二次修剪前各試驗組培地茅最高高度為【培地茅】組135 cm；【培地茅+油分解菌】組為148 cm；【培地茅+生物炭2.5%】組為142 cm。在土壤 TPH 濃度5000 mg/kg，第二次修剪前各試驗組培地茅最高高度分別為【培地茅】組142 cm；【培地茅+油分解菌】組為163 cm；【培地茅+生物炭2.5%】組為161 cm。在土壤 TPH 濃度8000 mg/kg，第二次修剪前各試驗組培地茅最高高度分別為【培地茅】組141 cm；【培地茅+油分解菌】組為152 cm；【培地茅+生物炭2.5%】組為160 cm。

在111年7月25日第二次修剪後，開始第三輪生長，種植至112年1月5日，進行整株植體採收，在土壤 TPH 濃度2000 mg/kg，各試驗組培地茅最高高度為【培地茅】組138 cm；【培地茅+油分解菌】組為146 cm；【培地茅+生物炭2.5%】組為161 cm。在土壤 TPH 濃度5000 mg/kg，各試驗組培地茅最高高度分別為【培地茅】組139 cm；【培地茅+油分解菌】組為138 cm；【培地茅+生物炭2.5%】組為154 cm。在土壤 TPH 濃度8000 mg/kg，各試驗組培地茅最高高度分別為【培地茅】組141 cm；【培地茅+油分解菌】組為136 cm；【培地茅+生物炭2.5%】組為157 cm。

在三種試驗濃度下，培地茅生長高度第二輪與110年度執行之第一輪結果相同，均為【培地茅+油分解菌】>【培地茅+生物炭2.5%】>【培地茅】，顯示未添加任何加強技術的【培地茅】試驗組生長較差。添加油分解菌與生物炭有助於促進培地茅生長。第二輪則因於111年暑假開始，盆栽周邊有工程在進行，三試驗濃度之【培地茅+油分解菌】組為鄰近施工處，被堆置施工廢棄物或被樹木壓傷，及冬天天氣寒冷，影響植體高度，導致後面月份量測之高度下降。



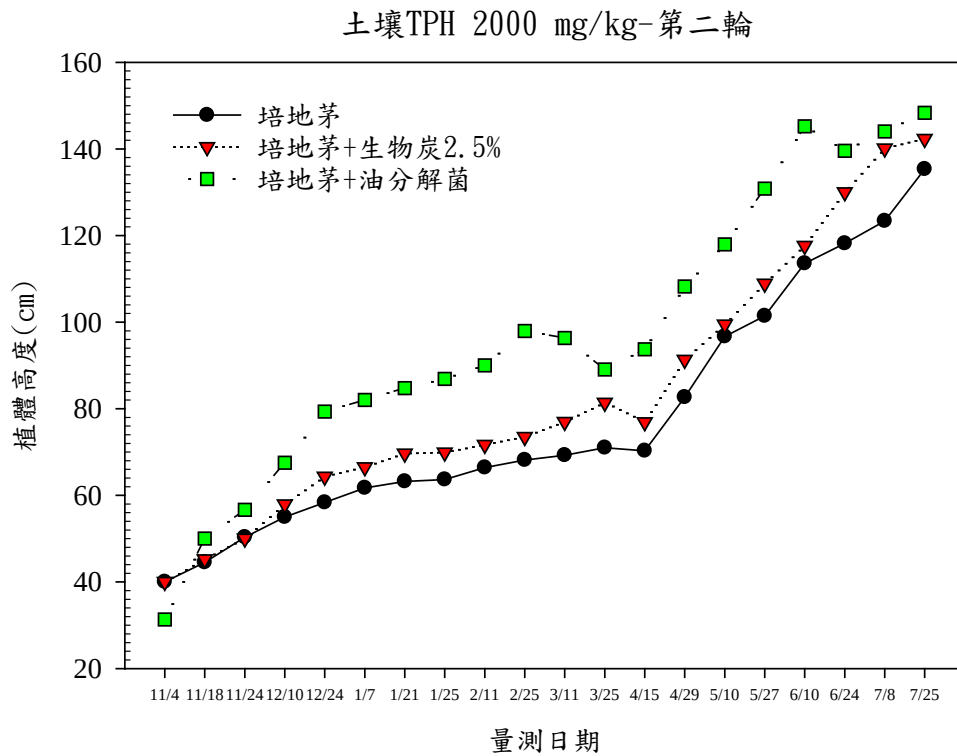


圖4.1.4-1 【試驗濃度2000 mg/kg】培地茅植株平均高度變化(第二輪  
110/11/4~111/7/25)

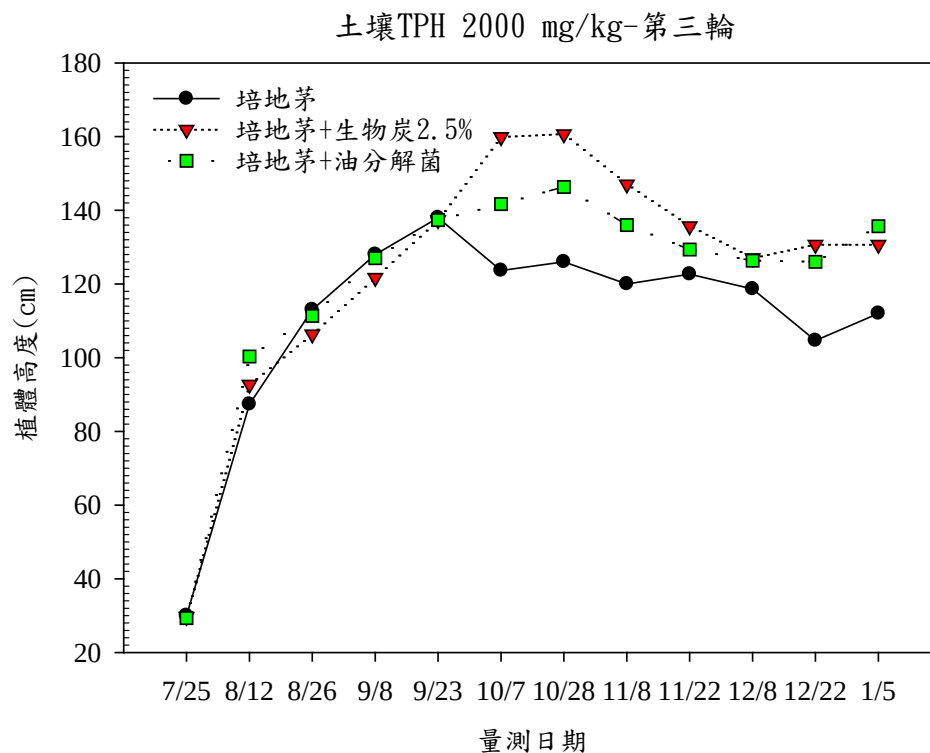


圖4.1.4-2 【試驗濃度2000 mg/kg】培地茅植株平均高度變化(第三輪  
111/7/25~112/1/5)

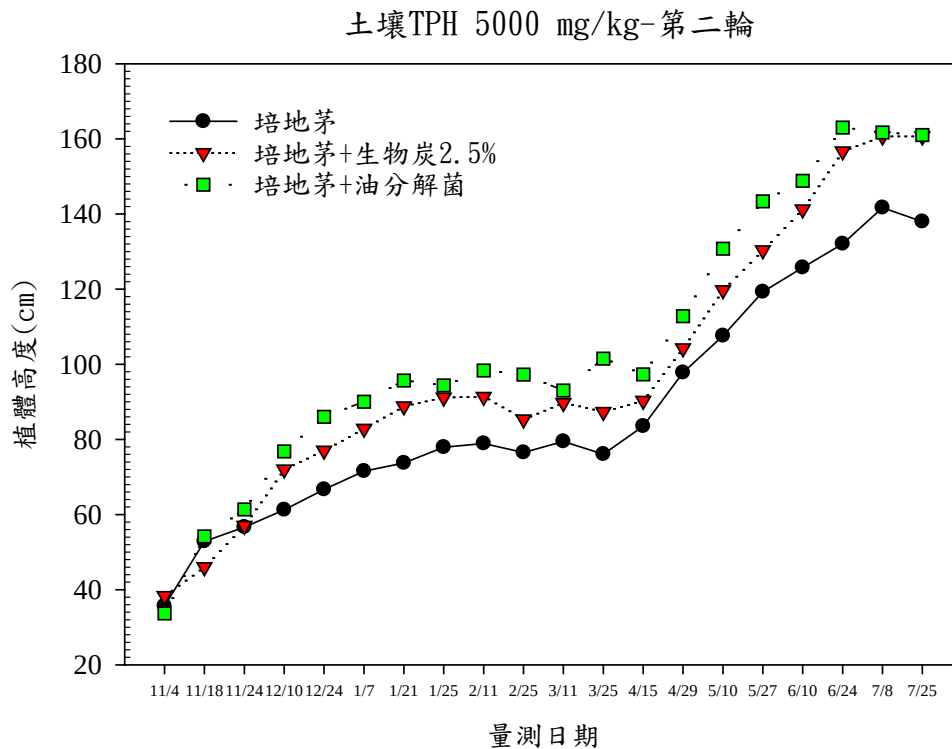


圖4.1.4-3 【試驗濃度5000 mg/kg】培地茅植株平均高度變化(第二輪  
110/11/4~111/7/25)

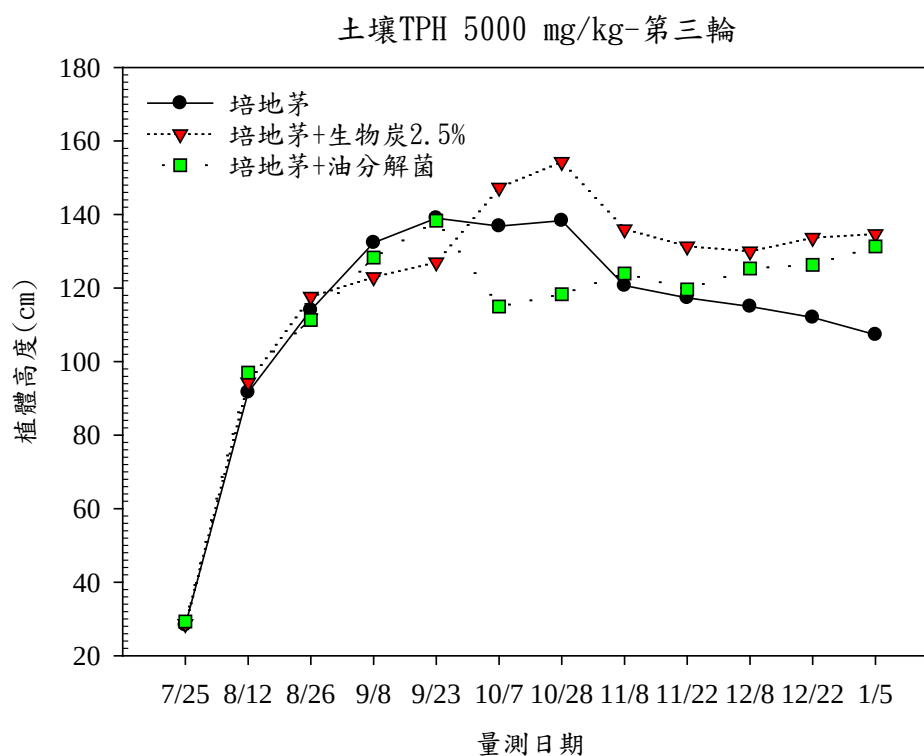


圖4.1.4-4 【試驗濃度5000 mg/kg】培地茅植株平均高度變化(第三輪  
111/7/25~112/1/5)

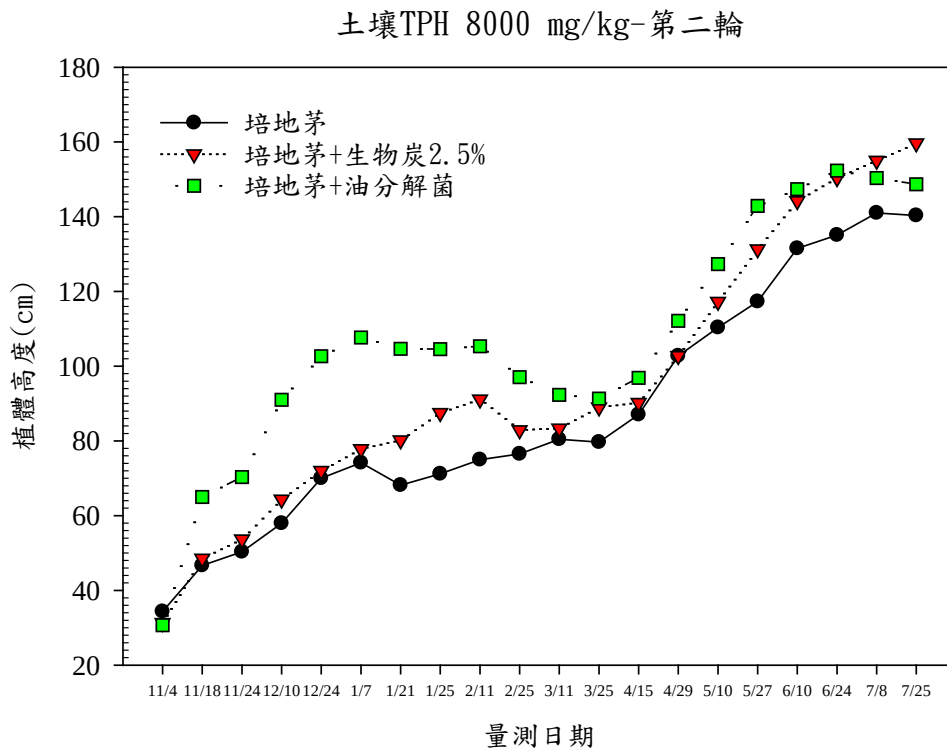


圖4.1.4-5 【試驗濃度8000 mg/kg】培地茅植株平均高度變化(第二輪  
110/11/4~111/7/25)

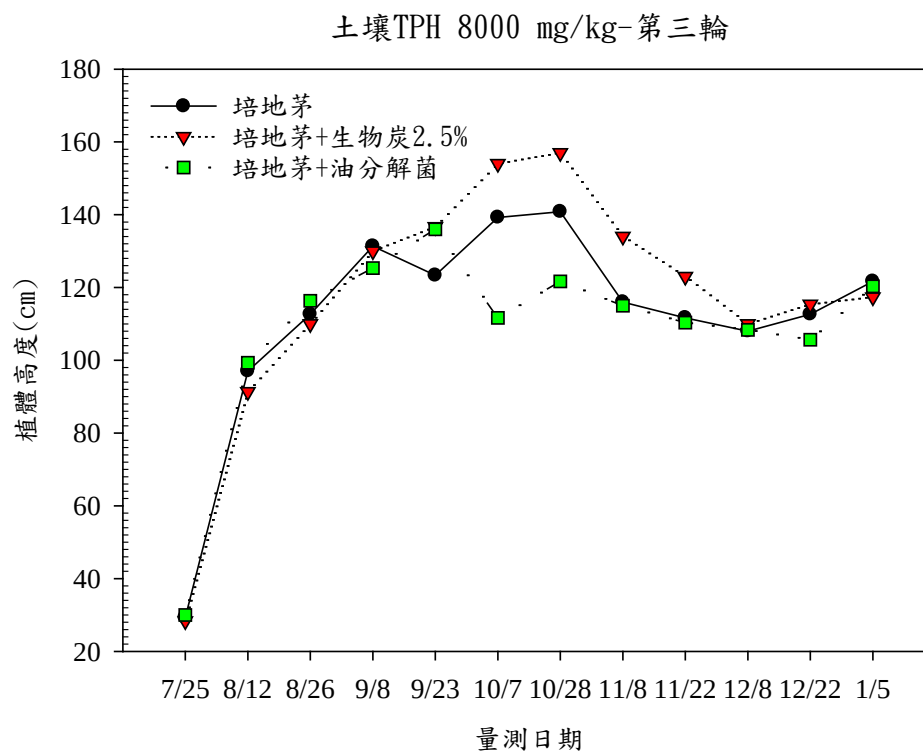


圖4.1.4-6 【試驗濃度8000 mg/kg】培地茅植株平均高度變化(第三輪  
111/7/25~112/1/5)





### 4.1.5 各試驗組根圈土壤 TPH 濃度變化

本研究在110年度，在種植植物兩個月、四個月及六個月時已分析根圈土壤 TPH 濃度，依第一年試驗結果，低濃度2000 mg/kg、5000 mg/kg 試驗組別有部分濃度已低於管制標準1000 mg/kg；部分低濃度及所有高濃度8000 mg/kg 試驗組別，土壤 TPH 濃度還未低於管制標準。因此111年度將持續追蹤監測土壤 TPH 濃度變化。各試驗根圈土壤 TPH 平均濃度變化如圖4.1.5-1至圖4.1.5-6，其111年度分析結果分述如下：

【原生菌】試驗根圈土壤 TPH 濃度如表4.1.5-1，TPH 平均濃度變化如圖4.1.5-1。在 TPH 濃度2000 mg/kg 土壤，111年度分析種植約9個月時根圈土壤 TPH 平均濃度為1382.7 mg/kg，降解率為54.35%，濃度反而較六個月分析時提升；十三個月時土壤 TPH 平均濃度為639.7 mg/kg，降解率為78.88%；經過十五個月試驗後，土壤 TPH 平均濃度為826.5 mg/kg，降解率為72.72%。在 TPH 濃度5000 mg/kg 土壤，約9個月時根圈土壤 TPH 平均濃度為2044.0 mg/kg，降解率為55.73%，濃度與六個月時相差不大；十三個月時土壤 TPH 平均濃度為1078.1 mg/kg，降解率為76.65%；經過十五個月試驗後，土壤 TPH 平均濃度為1109.2 mg/kg，降解率為75.98%。在 TPH 濃度8000 mg/kg 土壤，約9個月時根圈土壤 TPH 平均濃度為4502.0 mg/kg，降解率為42.76%；十三個月時土壤 TPH 平均濃度為1679.5 mg/kg，降解率為78.65%；經過十五個月試驗後，土壤 TPH 平均濃度為1285.3 mg/kg，降解率為83.66%。



表4.1.5-1 【原生菌】試驗根圈土壤 TPH 濃度

| 樣品 \ 日期 | 110/5/24<br>(初始)               | 110/7/23<br>(2M) | 110/9/24<br>(4M) | 110/11/24<br>(6M) | 111/2/11<br>(約 9M) | 111/6/23<br>(13M) | 111/8/25<br>(15M) |
|---------|--------------------------------|------------------|------------------|-------------------|--------------------|-------------------|-------------------|
|         | TPH <sub>C10~C40</sub> (mg/kg) |                  |                  |                   |                    |                   |                   |
| 2000-1  | 3265                           | 1526             | 675              | 829               | 823                | 401               | 922               |
| 2000-2  | 2027                           | 1638             | 1168             | 777               | 1592               | 831               | 873               |
| 2000-3  | 3796                           | 1202             | 636              | 1108              | 1733               | 687               | 684               |
| 2000-平均 | 3029                           | 1455.3           | 826.3            | 904.7             | 1382.7             | 639.7             | 826.5             |
| 5000-1  | 4799                           | 2684             | 1775             | 1923              | 2188               | 939               | 975               |
| 5000-2  | 5122                           | 2630             | 1723             | 2097              | 1665               | 1086              | 1014              |
| 5000-3  | 3930                           | 2284             | 1673             | 1979              | 2279               | 1208              | 1338              |
| 5000-平均 | 4617                           | 2532.7           | 1723.7           | 1999.7            | 2044.0             | 1078.1            | 1109.2            |
| 8000-1  | 9431                           | 4139             | 4091             | 3813              | 4364               | 1363              | 1137              |
| 8000-2  | 6611                           | 5784             | 4436             | 4217              | 4977               | 1513              | 1719              |
| 8000-3  | 7553                           | 5454             | 4203             | 3649              | 4165               | 2163              | 999               |
| 8000-平均 | 7865                           | 5125.7           | 4243.3           | 3893.0            | 4502.0             | 1679.5            | 1285.3            |

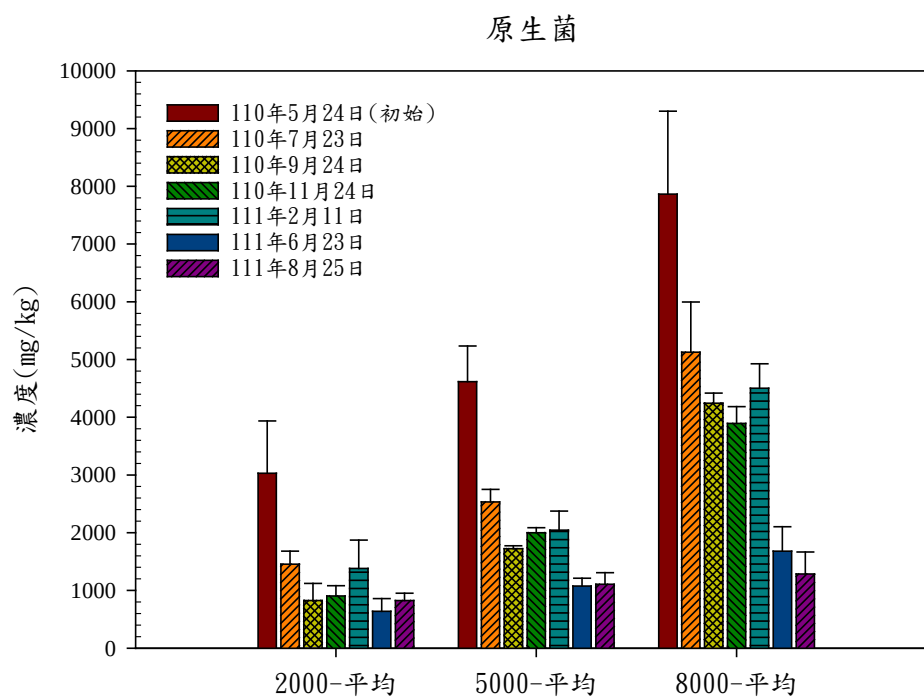


圖4.1.5-1 【原生菌】根圈土壤 TPH 濃度變化



【油分解菌】試驗根圈土壤 TPH 濃度如表4.1.5-2，TPH 平均濃度變化如圖4.1.5-2。在 TPH 濃度2000 mg/kg 土壤，111年度分析種植約9個月時根圈土壤 TPH 平均濃度為1629.7 mg/kg，降解率為46.20%，濃度反而較六個月分析時提升；十三個月時土壤 TPH 平均濃度為804.8 mg/kg，降解率為73.43%；經過十五個月試驗後，土壤 TPH 平均濃度為996.9 mg/kg，降解率為67.09%。在 TPH 濃度5000 mg/kg 土壤，約9個月時根圈土壤 TPH 平均濃度為1599.0 mg/kg，降解率為65.37%；十三個月時土壤 TPH 平均濃度為610.5 mg/kg，降解率為86.78%；經過十五個月試驗後，土壤 TPH 平均濃度為607.5 mg/kg，降解率為86.84%。在 TPH 濃度8000 mg/kg 土壤，約9個月時根圈土壤 TPH 平均濃度為2810.0 mg/kg，降解率為64.27%；十三個月時土壤 TPH 平均濃度為1323.5 mg/kg，降解率為83.17%；經過十五個月試驗後，土壤 TPH 平均濃度為858.9 mg/kg，降解率為89.08%。

表4.1.5-2 【油分解菌】試驗根圈土壤 TPH 濃度

| 日期<br>樣品 | 110/5/24<br>(初始)               | 110/7/23<br>(2M) | 110/9/24<br>(4M) | 110/11/24<br>(6M) | 111/2/11<br>(約 9M) | 111/6/23<br>(13M) | 111/8/25<br>(15M) |
|----------|--------------------------------|------------------|------------------|-------------------|--------------------|-------------------|-------------------|
|          | TPH <sub>C10~C40</sub> (mg/kg) |                  |                  |                   |                    |                   |                   |
| 2000-1   | 3265                           | 1742             | 1199             | 798               | 1426               | 1003              | 1186              |
| 2000-2   | 2027                           | 1425             | 2161             | 746               | 1920               | 862               | 1041              |
| 2000-3   | 3796                           | 2129             | 1984             | 1091              | 1543               | 550               | 764               |
| 2000-平均  | 3029                           | 1765.3           | 1781.3           | 878.3             | 1629.7             | 804.8             | 996.9             |
| 5000-1   | 4799                           | 2174             | 1664             | 1788              | 1817               | 773               | 739               |
| 5000-2   | 5122                           | 2261             | 1786             | 2075              | 1359               | 720               | 637               |
| 5000-3   | 3930                           | 1646             | 1072             | 1822              | 1621               | 339               | 447               |
| 5000-平均  | 4617                           | 2027             | 1507.3           | 1895.0            | 1599.0             | 610.5             | 607.5             |
| 8000-1   | 9431                           | 3414             | 3815             | 3250              | 2915               | 1165              | 756               |
| 8000-2   | 6611                           | 3525             | 3166             | 4226              | 3078               | 1671              | 897               |
| 8000-3   | 7553                           | 3500             | 2826             | 3519              | 2437               | 1135              | 923               |
| 8000-平均  | 7865                           | 3479.7           | 3269.0           | 3665.0            | 2810.0             | 1323.5            | 858.9             |



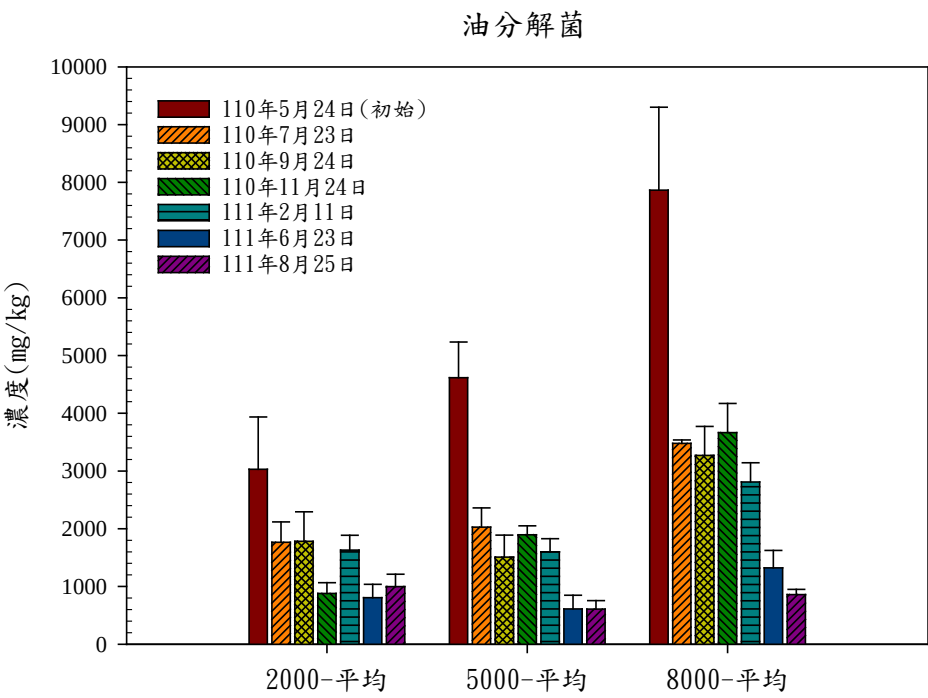


圖4.1.5-2 【油分解菌】根圈土壤 TPH 濃度變化



【培地茅】試驗根圈土壤 TPH 濃度如表4.1.5-3，TPH 平均濃度變化如圖4.1.5-3。在 TPH 濃度2000 mg/kg 土壤，111年度分析種植約9個月時根圈土壤 TPH 平均濃度為302.3 mg/kg，降解率為90.02%；十三個月時土壤 TPH 平均濃度為609.6 mg/kg，降解率為79.88%；經過十五個月試驗後，土壤 TPH 平均濃度為513.4 mg/kg，降解率為83.05%。在 TPH 濃度5000 mg/kg 土壤，約9個月時根圈土壤 TPH 平均濃度為1011.3 mg/kg，降解率為78.10%；十三個月時土壤 TPH 平均濃度為793.2 mg/kg，降解率為82.82%；經過十五個月試驗後，土壤 TPH 平均濃度為527.8 mg/kg，降解率為88.57%。在 TPH 濃度8000 mg/kg 土壤，約9個月時根圈土壤 TPH 平均濃度為1998.7 mg/kg，降解率為74.59%；十三個月時土壤 TPH 平均濃度為1464.6 mg/kg，降解率為81.38%；經過十五個月試驗後，土壤 TPH 平均濃度為927.1 mg/kg，降解率為88.21%。

表4.1.5-3 【培地茅】試驗根圈土壤 TPH 濃度

| 日期<br>樣品 | 110/5/24<br>(初始)               | 110/7/23<br>(2M) | 110/9/24<br>(4M) | 110/11/24<br>(6M) | 111/2/11<br>(約 9M) | 111/6/23<br>(13M) | 111/8/25<br>(15M) |
|----------|--------------------------------|------------------|------------------|-------------------|--------------------|-------------------|-------------------|
|          | TPH <sub>C10~C40</sub> (mg/kg) |                  |                  |                   |                    |                   |                   |
| 2000-1   | 3265                           | 1423             | 495              | 309               | 357                | 542               | 525               |
| 2000-2   | 2027                           | 670.8            | 993              | 242               | 284                | 527               | 666               |
| 2000-3   | 3796                           | 597.9            | 586              | 283               | 266                | 760               | 349               |
| 2000-平均  | 3029                           | 897.2            | 691.3            | 278.0             | 302.3              | 609.6             | 513.4             |
| 5000-1   | 4799                           | 2300             | 1111             | 608               | 919                | 751               | 623               |
| 5000-2   | 5122                           | 1364             | 1703             | 704               | 1173               | 750               | 606               |
| 5000-3   | 3930                           | 628.2            | 1566             | 423               | 942                | 878               | 354               |
| 5000-平均  | 4617                           | 1430.7           | 1460.0           | 578.3             | 1011.3             | 793.2             | 527.8             |
| 8000-1   | 9431                           | 4666             | 2767             | 1467              | 2122               | 1485              | 674               |
| 8000-2   | 6611                           | 3451             | 3561             | 2525              | 2031               | 1331              | 859               |
| 8000-3   | 7553                           | 5318             | 3047             | 855               | 1843               | 1578              | 1248              |
| 8000-平均  | 7865                           | 4478.3           | 3125.0           | 1615.7            | 1998.7             | 1464.6            | 927.1             |

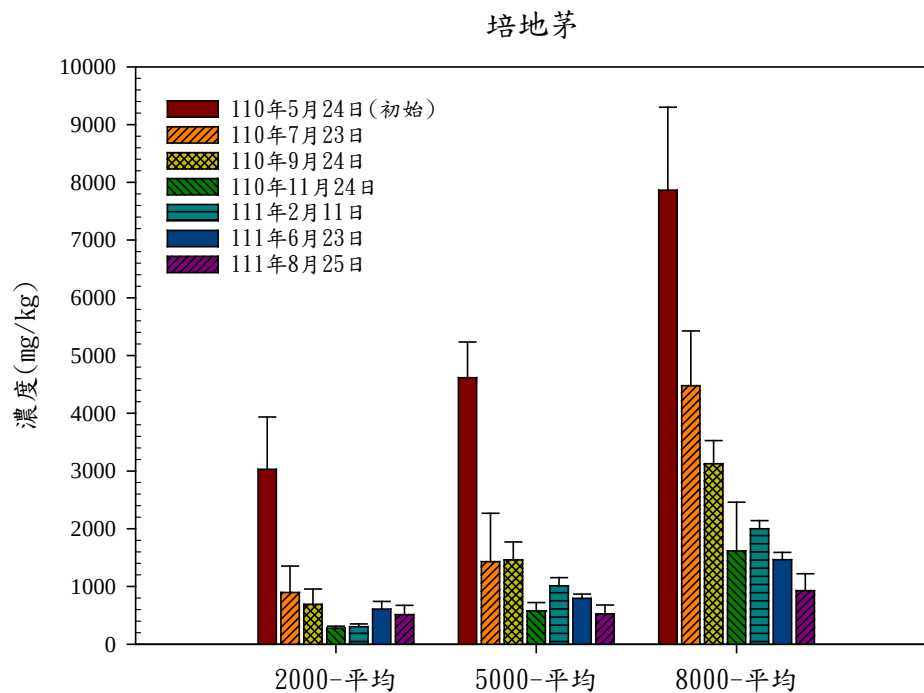


圖4.1.5-3 【培地茅】根圈土壤 TPH 濃度變化

【培地茅+油分解菌】試驗根圈土壤 TPH 濃度如表4.1.5-4，TPH 平均濃度變化如圖4.1.5-4。在 TPH 濃度2000 mg/kg 土壤，111年度分析種植約9個月時根圈土壤 TPH 平均濃度為321.0 mg/kg，降解率為89.40%；十三個月時土壤 TPH 平均濃度為660.8 mg/kg，降解率為78.18%；經過十五個月試驗後，土壤 TPH 平均濃度為282.4 mg/kg，降解率為90.68%。在 TPH 濃度5000 mg/kg 土壤，約9個月時根圈土壤 TPH 平均濃度為580.0 mg/kg，降解率為87.44%；十三個月時土壤 TPH 平均濃度為568.2 mg/kg，降解率為87.69%；經過十五個月試驗後，土壤 TPH 平均濃度為540.7 mg/kg，降解率為88.29%。在 TPH 濃度8000 mg/kg 土壤，約9個月時根圈土壤 TPH 平均濃度為1329.3 mg/kg，降解率為83.10%；十三個月時土壤 TPH 平均濃度為620.8 mg/kg，降解率為92.11%；經過十五個月試驗後，土壤 TPH 平均濃度為761.3 mg/kg，降解率為90.32%。





表4.1.5-4 【培地茅+油分解菌】試驗根圈土壤 TPH 濃度

| 樣品 \ 日期 | 110/5/24<br>(初始)               | 110/7/23<br>(2M) | 110/9/24<br>(4M) | 110/11/24<br>(6M) | 111/2/11<br>(約 9M) | 111/6/23<br>(13M) | 111/8/25<br>(15M) |
|---------|--------------------------------|------------------|------------------|-------------------|--------------------|-------------------|-------------------|
|         | TPH <sub>C10~C40</sub> (mg/kg) |                  |                  |                   |                    |                   |                   |
| 2000-1  | 3265                           | 726.8            | 206              | 374               | 191                | 702               | 254               |
| 2000-2  | 2027                           | 919.1            | 1103             | 171               | 301                | 818               | 431               |
| 2000-3  | 3796                           | 324.9            | 286              | 244               | 471                | 462               | 162               |
| 2000-平均 | 3029                           | 656.9            | 531.7            | 263.0             | 321.0              | 660.8             | 282.4             |
| 5000-1  | 4799                           | 783.8            | 1190             | 567               | 678                | 560               | 734               |
| 5000-2  | 5122                           | 1104             | 585              | 1193              | 443                | 566               | 328               |
| 5000-3  | 3930                           | 1204             | 992              | 1132              | 619                | 579               | 560               |
| 5000-平均 | 4617                           | 1030.6           | 922.3            | 964.0             | 580.0              | 568.2             | 540.7             |
| 8000-1  | 9431                           | 4785             | 2252             | 1300              | 1190               | 834               | 687               |
| 8000-2  | 6611                           | 2921             | 2886             | 2101              | 1564               | 421               | 567               |
| 8000-3  | 7553                           | 4083             | 2158             | 1005              | 1234               | 608               | 1030              |
| 8000-平均 | 7865                           | 3929.7           | 2432.0           | 1468.7            | 1329.3             | 620.8             | 761.3             |

培地茅+油分解菌

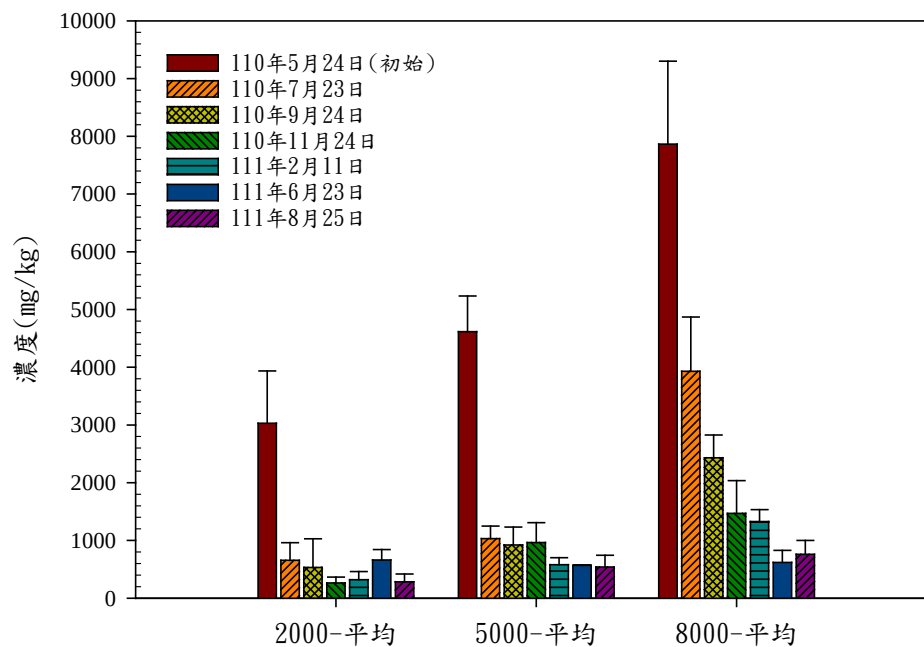


圖4.1.5-4 【培地茅+油分解菌】根圈土壤 TPH 濃度變化



【培地茅+生物炭】試驗根圈土壤 TPH 濃度如表4.1.5-5，TPH 平均濃度變化如圖4.1.5-5。在 TPH 濃度2000 mg/kg 土壤，111年度分析種植約9個月時根圈土壤 TPH 平均濃度為165.7 mg/kg，降解率為94.53%；十三個月時土壤 TPH 平均濃度為547.9 mg/kg，降解率為81.91%；經過十五個月試驗後，土壤 TPH 平均濃度為377.6 mg/kg，降解率為87.53%。在 TPH 濃度5000 mg/kg 土壤，約9個月時根圈土壤 TPH 平均濃度為684.3 mg/kg，降解率為85.18%；十三個月時土壤 TPH 平均濃度為445.1 mg/kg，降解率為90.36%；經過十五個月試驗後，土壤 TPH 平均濃度為480.5 mg/kg，降解率為89.59%。在 TPH 濃度8000 mg/kg 土壤，約9個月時根圈土壤 TPH 平均濃度為1610.7 mg/kg，降解率為79.52%；十三個月時土壤 TPH 平均濃度為955.6 mg/kg，降解率為87.85%；經過十五個月試驗後，土壤 TPH 平均濃度為949.5 mg/kg，降解率為87.93%。

表4.1.5-5 【培地茅+生物炭2.5%】試驗根圈土壤 TPH 濃度

| 日期<br>樣品 | 110/5/24<br>(初始)               | 110/7/23<br>(2M) | 110/9/24<br>(4M) | 110/11/24<br>(6M) | 111/2/11<br>(約 9M) | 111/6/23<br>(13M) | 111/8/25<br>(15M) |
|----------|--------------------------------|------------------|------------------|-------------------|--------------------|-------------------|-------------------|
|          | TPH <sub>C10~C40</sub> (mg/kg) |                  |                  |                   |                    |                   |                   |
| 2000-1   | 3265                           | 702.1            | 969              | 102               | 99                 | 693               | 395               |
| 2000-2   | 2027                           | 241.9            | 638              | 139               | 245                | 526               | 519               |
| 2000-3   | 3796                           | 365.3            | 532              | 145               | 153                | 424               | 219               |
| 2000-平均  | 3029                           | 436.4            | 713.0            | 128.7             | 165.7              | 547.9             | 377.6             |
| 5000-1   | 4799                           | 1420             | 1267             | 535               | 574                | 520               | 723               |
| 5000-2   | 5122                           | 1228             | 1501             | 888               | 641                | 398               | 264               |
| 5000-3   | 3930                           | 1235             | 699              | 852               | 838                | 417               | 454               |
| 5000-平均  | 4617                           | 1294.3           | 1155.7           | 758.3             | 684.3              | 445.1             | 480.5             |
| 8000-1   | 9431                           | 2864             | 2222             | 1803              | 1151               | 493               | 853               |
| 8000-2   | 6611                           | 1913             | 2007             | 1139              | 1549               | 1216              | 996               |
| 8000-3   | 7553                           | 3409             | 3098             | 1823              | 2132               | 1158              | 1000              |
| 8000-平均  | 7865                           | 2728.7           | 2442.3           | 1588.3            | 1610.7             | 955.6             | 949.5             |

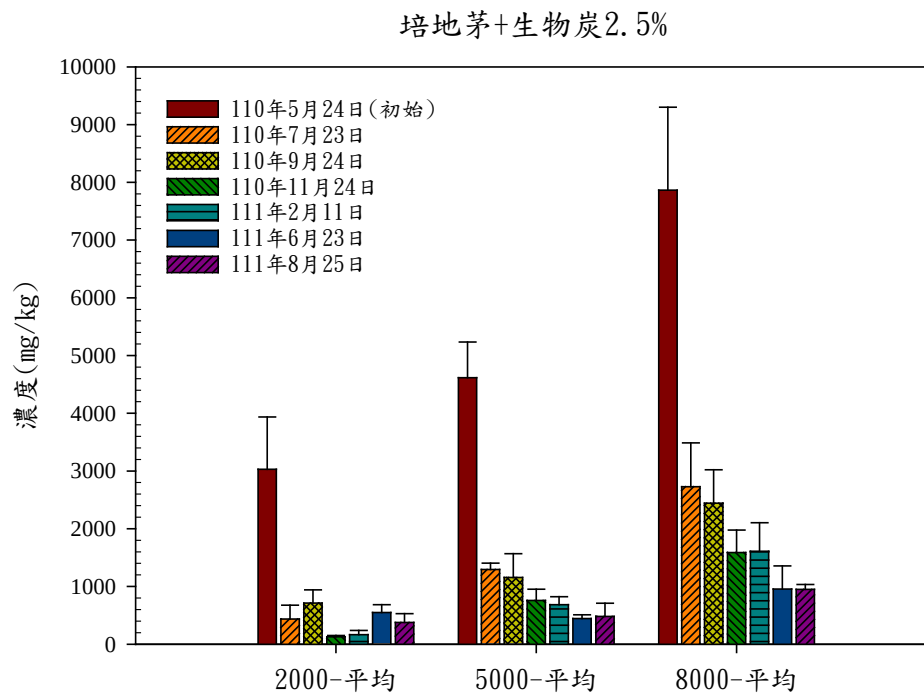


圖4.1.5-5 【培地茅+生物炭2.5%】根圈土壤 TPH 濃度變化

【香茅】試驗根圈土壤 TPH 濃度如表4.1.5-6，TPH 平均濃度變化如圖4.1.5-6。在 TPH 濃度2000 mg/kg 土壤，111年度分析種植約9個月時根圈土壤 TPH 平均濃度為361.3 mg/kg，降解率為88.07%；十三個月時土壤 TPH 平均濃度為505.0 mg/kg，降解率為83.33%；經過十五個月試驗後，土壤 TPH 平均濃度為383.0 mg/kg，降解率為87.36%。在 TPH 濃度5000 mg/kg 土壤，約9個月時根圈土壤 TPH 平均濃度為690.7 mg/kg，降解率為85.04%；十三個月時土壤 TPH 平均濃度為700.1 mg/kg，降解率為84.84%；經過十五個月試驗後，土壤 TPH 平均濃度為644.4 mg/kg，降解率為86.04%。在 TPH 濃度8000 mg/kg 土壤，約9個月時根圈土壤 TPH 平均濃度為1786.7 mg/kg，降解率為77.28%；十三個月時土壤 TPH 平均濃度為1377.9 mg/kg，降解率為82.48%；經過十五個月試驗後，土壤 TPH 平均濃度為1125.7 mg/kg，降解率為85.69%。





表4.1.5-6 【香茅】試驗根圈土壤 TPH 濃度

| 日期<br>樣品 | 110/5/24<br>(初始)               | 110/7/23<br>(2M) | 110/9/24<br>(4M) | 110/11/24<br>(6M) | 111/2/11<br>(約 9M) | 111/6/23<br>(13M) | 111/8/25<br>(15M) |
|----------|--------------------------------|------------------|------------------|-------------------|--------------------|-------------------|-------------------|
|          | TPH <sub>C10~C40</sub> (mg/kg) |                  |                  |                   |                    |                   |                   |
| 2000-1   | 3265                           | 397.3            | 597              | 245               | 357                | 626               | 397               |
| 2000-2   | 2027                           | 838.8            | 821              | 311               | 408                | 368               | 468               |
| 2000-3   | 3796                           | 769.6            | 1227             | 233               | 319                | 521               | 284               |
| 2000-平均  | 3029                           | 668.6            | 881.7            | 263.0             | 361.3              | 505.0             | 383.0             |
| 5000-1   | 4799                           | 1693             | 1256             | 951               | 549                | 623               | 724               |
| 5000-2   | 5122                           | 706.3            | 908              | 506               | 504                | 697               | 812               |
| 5000-3   | 3930                           | 646.0            | 1479             | 304               | 1019               | 780               | 397               |
| 5000-平均  | 4617                           | 1015.1           | 1214.3           | 587.0             | 690.7              | 700.1             | 644.4             |
| 8000-1   | 9431                           | 3889             | 3052             | 2310              | 911                | 1099              | 1287              |
| 8000-2   | 6611                           | 2771             | 3151             | 1787              | 1532               | 1303              | 1294              |
| 8000-3   | 7553                           | 4347             | 3047             | 2637              | 2917               | 1732              | 796               |
| 8000-平均  | 7865                           | 3669.0           | 3083.3           | 2244.7            | 1786.7             | 1377.9            | 1125.7            |

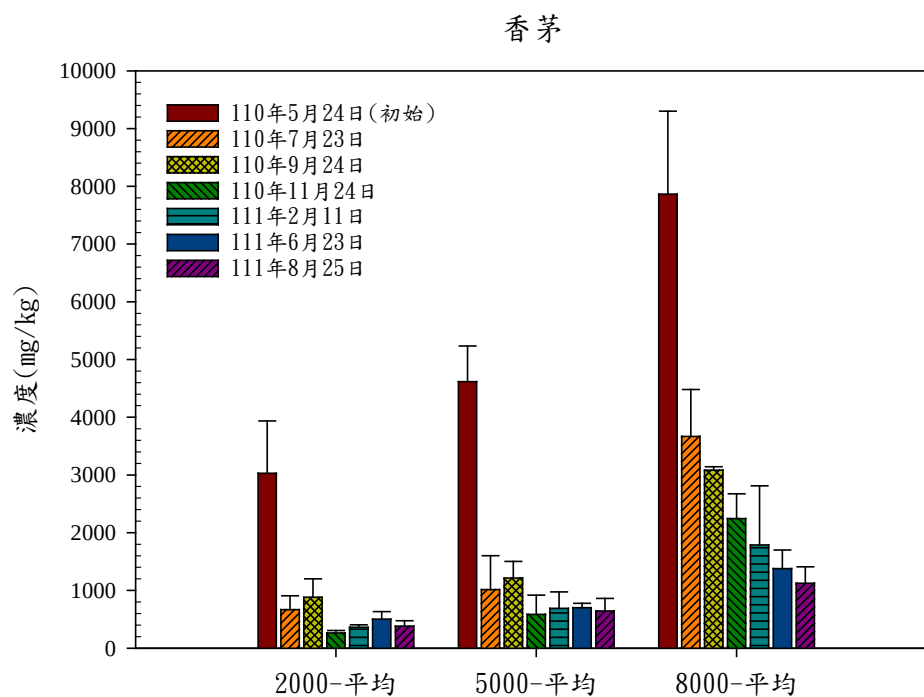


圖4.1.5-6 【香茅】根圈土壤 TPH 濃度變化



#### 4.1.6 各試驗組根圈土壤 TPH 去除率

各試驗根圈土壤 TPH 平均濃度如表4.1.6-1，去除率如表4.1.6-2所示，依照微生物試驗組與植生復育及其加強技術試驗組分述如後。

表4.1.6-1 各試驗組根圈土壤 TPH 平均濃度

| 試驗<br>樣品 |                 | 原生菌                            | 油分解菌         | 培地茅          | 培地茅+<br>油分解菌 | 培地茅+<br>生物炭 2.5% | 香茅            |
|----------|-----------------|--------------------------------|--------------|--------------|--------------|------------------|---------------|
|          |                 | TPH <sub>C10~C40</sub> (mg/kg) |              |              |              |                  |               |
| 2000-平均  | 110/5/24        | 3029                           | 3029         | 3029         | 3029         | 3029             | 3029          |
|          | 110/7/23        | 1455.3                         | 1765.3       | 897.2        | 656.9        | 436.4            | 668.6         |
|          | 110/9/24        | 826.3                          | 1781.3       | 691.3        | 531.7        | 713.0            | 881.7         |
|          | 110/11/24       | 904.7                          | 878.3        | 278.0        | 263.0        | 128.7            | 263.0         |
|          | 111/2/11        | 1382.7                         | 1629.7       | 302.3        | 321.0        | 165.7            | 361.3         |
|          | 111/6/23        | 639.7                          | 804.8        | 609.6        | 660.8        | 547.9            | 505.0         |
|          | <b>111/8/25</b> | <b>826.5</b>                   | <b>996.9</b> | <b>513.4</b> | <b>282.4</b> | <b>377.6</b>     | <b>383.0</b>  |
| 5000-平均  | 110/5/24        | 4617                           | 4617         | 4617         | 4617         | 4617             | 4617          |
|          | 110/7/23        | 2532.7                         | 2027         | 1430.7       | 1030.6       | 1294.3           | 1015.1        |
|          | 110/9/24        | 1723.7                         | 1507.3       | 1460.0       | 922.3        | 1155.7           | 1214.3        |
|          | 110/11/24       | 1999.7                         | 1895.0       | 578.3        | 964.0        | 758.3            | 587.0         |
|          | 111/2/11        | 2044.0                         | 1599.0       | 1011.3       | 580.0        | 684.3            | 690.7         |
|          | 111/6/23        | 1078.1                         | 610.5        | 793.2        | 568.2        | 445.1            | 700.1         |
|          | <b>111/8/25</b> | <b>1109.2</b>                  | <b>607.5</b> | <b>527.8</b> | <b>540.7</b> | <b>480.5</b>     | <b>644.4</b>  |
| 8000-平均  | 110/5/24        | 7865                           | 7865         | 7865         | 7865         | 7865             | 7865          |
|          | 110/7/23        | 5125.7                         | 3479.7       | 4478.3       | 3929.7       | 2728.7           | 3669.0        |
|          | 110/9/24        | 4243.3                         | 3269.0       | 3125.0       | 2432.0       | 2442.3           | 3083.3        |
|          | 110/11/24       | 3893.0                         | 3665.0       | 1615.7       | 1468.7       | 1588.3           | 2244.7        |
|          | 111/2/11        | 4502.0                         | 2810.0       | 1998.7       | 1329.3       | 1610.7           | 1786.7        |
|          | 111/6/23        | 1679.5                         | 1323.5       | 1464.6       | 620.8        | 955.6            | 1377.9        |
|          | <b>111/8/25</b> | <b>1285.3</b>                  | <b>858.9</b> | <b>927.1</b> | <b>761.3</b> | <b>949.5</b>     | <b>1125.7</b> |



表4.1.6-2 各試驗根圈土壤 TPH 去除率

| 樣品      | 試驗              | 原生菌          | 油分解菌         | 培地茅          | 培地茅+<br>油分解菌 | 培地茅+<br>生物炭 2.5% | 香茅           |
|---------|-----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|------------------|--------------|
|         |                 | TPH 去除率(%)   |              |              |              |                  |              |
| 2000-平均 | 110/7/23        | 51.95        | 41.72        | 70.38        | 78.31        | 85.59            | 77.93        |
|         | 110/9/24        | 72.72        | 41.19        | 77.18        | 82.45        | 76.46            | 70.89        |
|         | 110/11/24       | 70.13        | 71.00        | 90.82        | 91.32        | 95.75            | 91.32        |
|         | 111/2/11        | 54.35        | 46.20        | 90.02        | 89.40        | 94.53            | 88.07        |
|         | 111/6/23        | 78.88        | 73.43        | 79.88        | 78.18        | 81.91            | 83.33        |
|         | <b>111/8/25</b> | <b>72.72</b> | <b>67.09</b> | <b>83.05</b> | <b>90.68</b> | <b>87.53</b>     | <b>87.36</b> |
| 5000-平均 | 110/7/23        | 45.14        | 56.10        | 69.01        | 77.68        | 71.97            | 78.01        |
|         | 110/9/24        | 62.67        | 67.35        | 68.38        | 80.02        | 74.97            | 73.70        |
|         | 110/11/24       | 56.69        | 58.96        | 87.47        | 79.12        | 83.58            | 87.29        |
|         | 111/2/11        | 55.73        | 65.37        | 78.10        | 87.44        | 85.18            | 85.04        |
|         | 111/6/23        | 76.65        | 86.78        | 82.82        | 87.69        | 90.36            | 84.84        |
|         | <b>111/8/25</b> | <b>75.98</b> | <b>86.84</b> | <b>88.57</b> | <b>88.29</b> | <b>89.59</b>     | <b>86.04</b> |
| 8000-平均 | 110/7/23        | 34.83        | 55.76        | 43.06        | 50.04        | 65.31            | 53.35        |
|         | 110/9/24        | 46.05        | 58.44        | 60.27        | 69.08        | 68.95            | 60.80        |
|         | 110/11/24       | 50.50        | 53.40        | 79.46        | 81.33        | 79.81            | 71.46        |
|         | 111/2/11        | 42.76        | 64.27        | 74.59        | 83.10        | 79.52            | 77.28        |
|         | 111/6/23        | 78.65        | 83.17        | 81.38        | 92.11        | 87.85            | 82.48        |
|         | <b>111/8/25</b> | <b>83.66</b> | <b>89.08</b> | <b>88.21</b> | <b>90.32</b> | <b>87.93</b>     | <b>85.69</b> |

圖4.1.6-1至圖4.1.6-3分別為2000 mg/kg、5000 mg/kg 及8000 mg/kg 三種濃度之 TPH 土壤，在不同之微生物分解試驗組別【原生菌】、【油分解菌】、【培地茅+油分解菌】，土壤 TPH 濃度變化情形。圖4.1.6-1為土壤 TPH 濃度2000 mg/kg，進行試驗十五個月後，根圈土壤 TPH 去除率，【原生菌】組去除效率72.72%、【油分解菌】組去除效率67.09%，【培地茅+油分解菌】組去除效率90.68%。圖4.1.6-2為土壤 TPH 濃度5000 mg/kg，進行試驗十五個月後，根圈土壤 TPH 去除率，【原生菌】組去除效率75.98%、【油分解菌】組去除效率86.84%，【培地茅+油分解菌】組去除效率88.29%。圖4.1.6-3為土壤 TPH 濃度8000 mg/kg，進行試驗十五個月後，根圈土壤 TPH 去除率，【原生菌】組去除效率83.66%、【油分解菌】組去除效率89.08%，【培地茅+油分解菌】組去除效率90.32%。在低濃度2000 mg/kg 是試驗下，【培地茅+油分解菌】組之去除效率明顯高於另兩組；但越往較高濃度試驗，三者之去除效率則越相近。



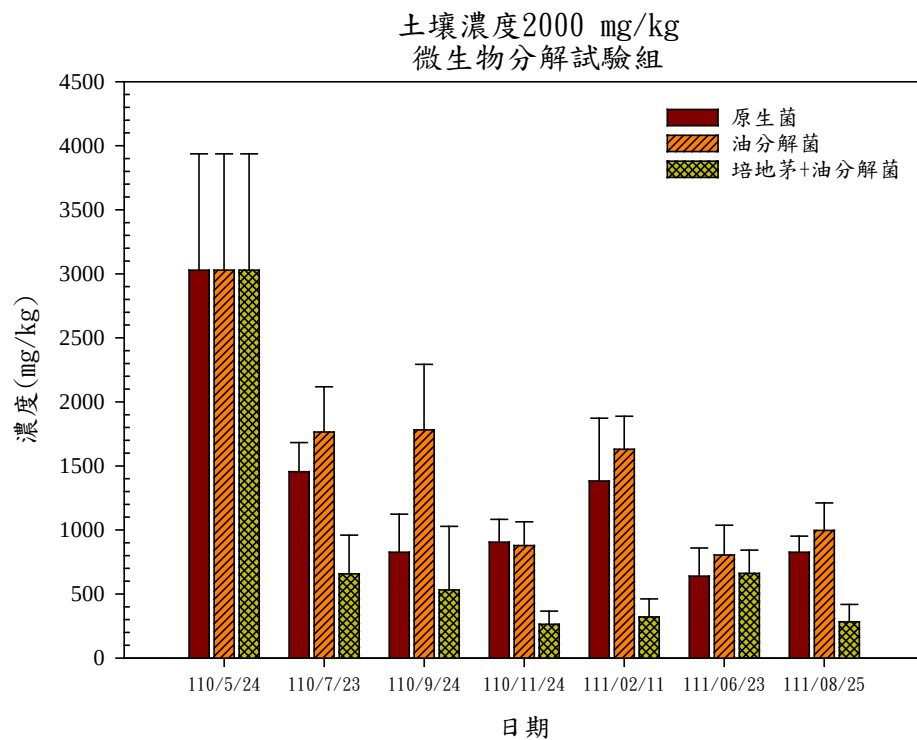


圖4.1.6-1 【試驗濃度2000 mg/kg】微生物分解試驗組 TPH 濃度變化

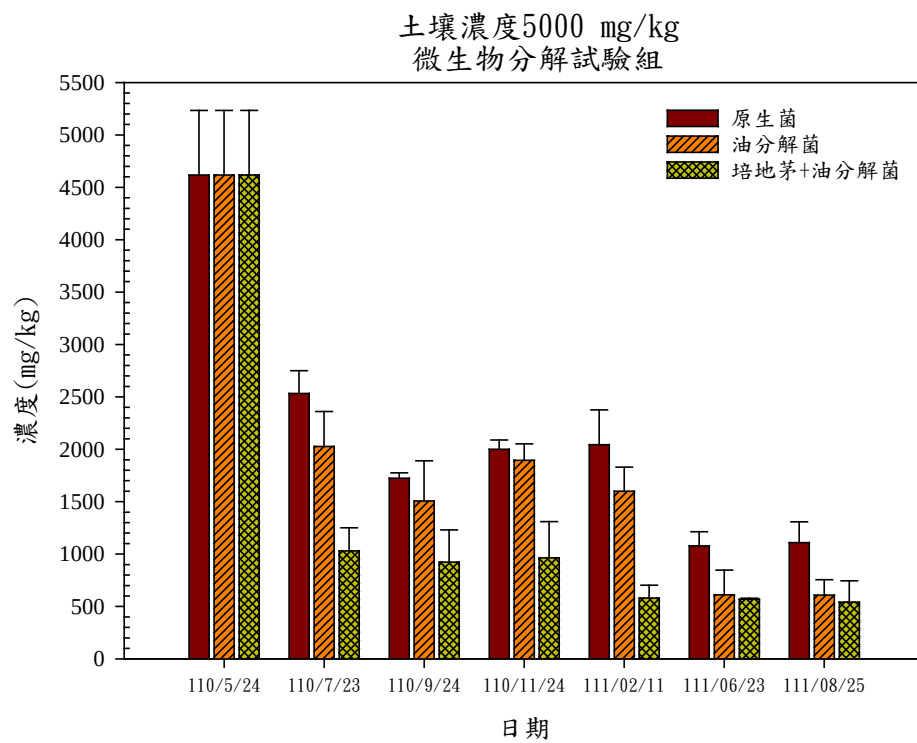


圖4.1.6-2 【試驗濃度5000 mg/kg】微生物分解試驗組 TPH 濃度變化

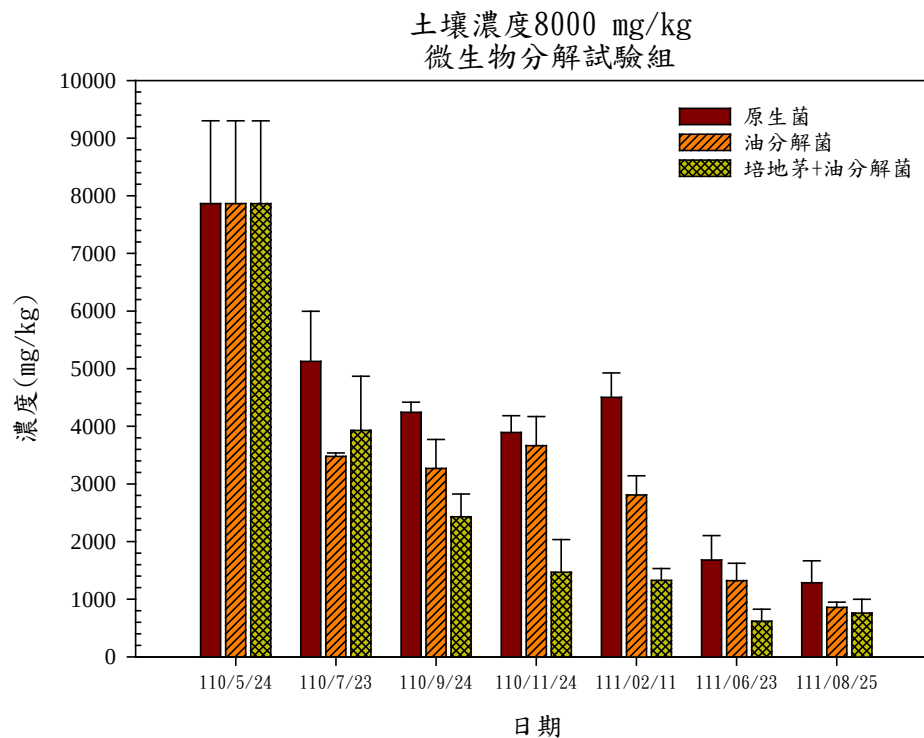


圖4.1.6-3 【試驗濃度8000 mg/kg】微生物分解試驗組 TPH 濃度變化

圖4.1.6-4至圖4.1.6-6分別為2000 mg/kg、5000 mg/kg及8000 mg/kg三種濃度之TPH土壤，在植生復育及其加強技術組別【原生菌】、【培地茅】、【培地茅+油分解菌】、【培地茅+生物炭】、【香茅】五種試驗之結果比較。圖4.1.6-4為土壤TPH濃度2000 mg/kg，進行試驗十五個月後，根圈土壤TPH去除效率，【原生菌】組去除效率72.72%；【培地茅】組去除效率83.05%；【培地茅+油分解菌】組去除效率90.68%；【培地茅+生物炭】組去除效率87.53%；【香茅】組去除效率87.36%。圖4.1.6-5為土壤TPH濃度5000 mg/kg，進行試驗十五個月後，根圈土壤TPH去除效率，【原生菌】組去除效率75.98%；【培地茅】組去除效率88.57%；【培地茅+油分解菌】組去除效率88.29%；【培地茅+生物炭】組去除效率89.59%；【香茅】組去除效率86.04%。圖4.1.6-6為土壤TPH濃度8000 mg/kg，進行試驗十五個月後，根圈土壤TPH去除效率，【原生菌】組去除效率83.66%；【培地茅】組去除效率88.21%；【培地茅+油分解菌】組去除效率90.32%；【培地茅+生物炭】組去除效率87.93%；【香茅】組去除效率85.69%。在三種濃度試驗下，種植植物及添加油分解菌、生物炭均較未種植植物【原生菌】試驗能提高根圈土壤去除效率，但在植生復育各試驗之去除效率差不多。

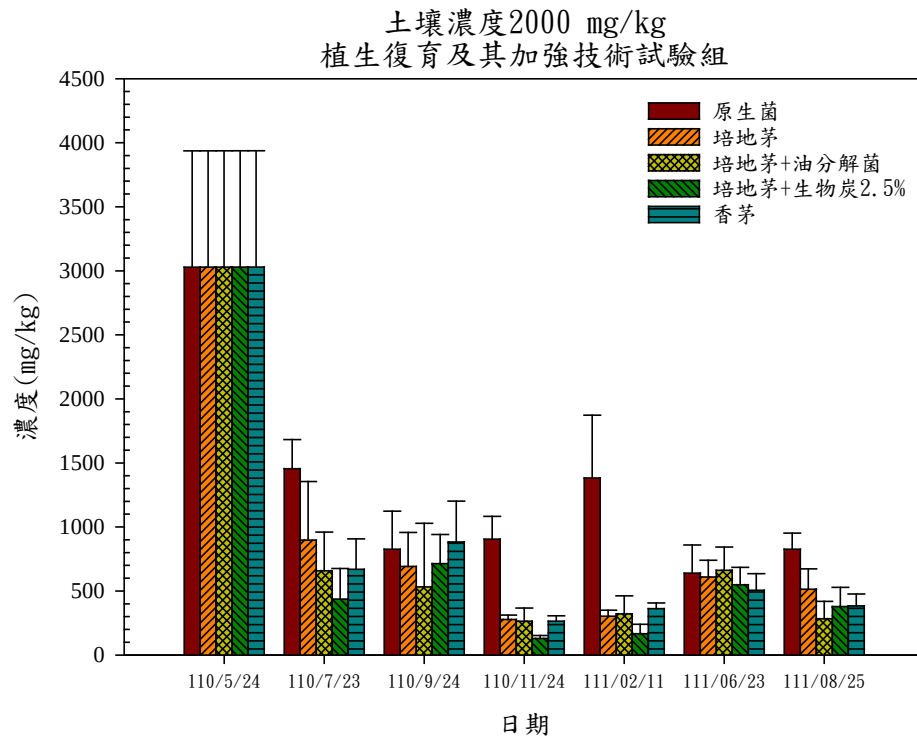


圖4.1.6-4 【試驗濃度2000 mg/kg】植生復育及其加強技術組 TPH 濃度變化

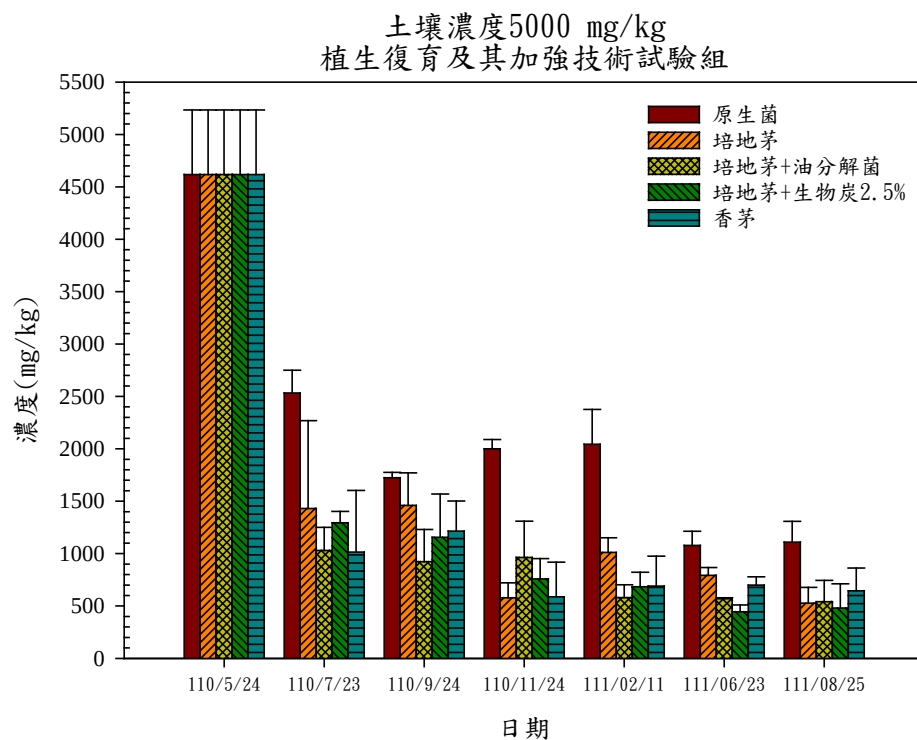


圖4.1.6-5 【試驗濃度5000 mg/kg】植生復育及其加強技術組 TPH 濃度變化



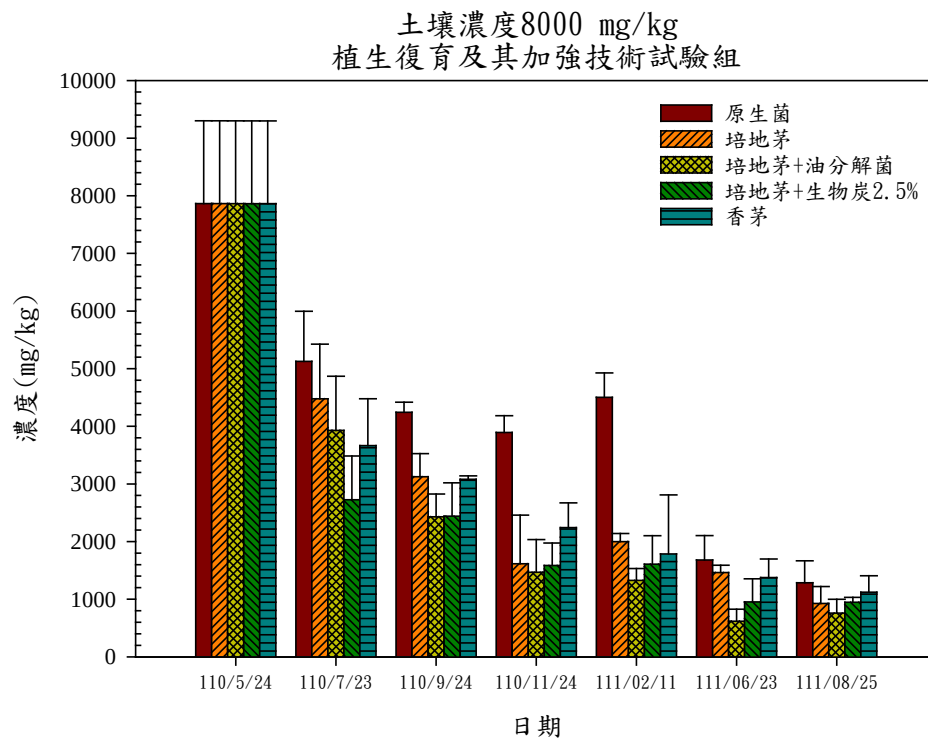


圖4.1.6-6 【試驗濃度8000 mg/kg】植生復育及其加強技術組 TPH 濃度變化



## 4.2 植生復育現地模場試驗

### 4.2.1 現地栽種試驗土壤基本特性分析

現地栽種試驗場址位於中油公司台中供油中心，場址設置情形如第三章內容。試驗土壤分為開挖較久已風化以及新挖出未風化二種土壤，以高、低風化區分兩種土壤，此兩種土壤之基本性質、肥力分析及 TPH 濃度如表4.2.1-1至表4.2.1-3所示。高、低風化兩區土壤質地均為砂土，主要皆受高碳數油品污染，低風化區 TPH<sub>C10~C40</sub>濃度平均1792.12 mg/kg；高風化區 TPH<sub>C10~C40</sub>濃度平均2188.28 mg/kg。基本性質相比而言，高風化土壤 pH 值略高於低風化土壤，導電度及有機質則均低於低風化土壤。

姥鯨烷(Pristane)與植烷(Phytane)是石油中常見的成分，特性穩定不易隨時間改變，常做為油源鑑定的指標。將油品中17個碳與18個碳的飽和烴含量分別與 pristane 及 phytane 的含量計算飽和烴比值 C17/Pr、C18/Ph，可用來判斷油品的風化程度。新鮮油品飽和烴比值高；風化時間越久，因飽和烴易被風化分解，C17/Pr、C18/Ph 比值會降低。經分析結果低風化區 C17/Pr 值為1.311；C18/Ph 值為0.941，Pr/Ph 為0.735。高風化區 C17/Pr 值為0.776；C18/Ph 值為0.579，Pr/Ph 為0.745。低風化區之 C17/Pr、C18/Ph 確實高於高風化區，顯示為較新鮮的土壤。

表4.2.1-1 高、低風化土壤基本性質

| 樣品  | 粒徑分布(%) |    |    | 土壤質地 | 含水率<br>(%) | pH   | 導電度<br>( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) | 有機質<br>(%) |
|-----|---------|----|----|------|------------|------|------------------------------------|------------|
|     | 砂粒      | 黏粒 | 粉粒 |      |            |      |                                    |            |
| 低風化 | 99      | 1  | 0  | 砂土   | 1.75       | 8.20 | 178.67                             | 0.62       |
| 高風化 | 99      | 1  | 0  | 砂土   | 1.38       | 8.42 | 105.43                             | 0.23       |

表4.2.1-2 高、低風化土壤肥力分析

| 樣品  | P       | K    | Ca    | Mg   | Fe    | Mn   | Cu    | Zn   |
|-----|---------|------|-------|------|-------|------|-------|------|
|     | (mg/kg) |      |       |      |       |      |       |      |
| 低風化 | 9.48    | 2.06 | 28.89 | 4.39 | 10.11 | 4.10 | 22.76 | 0.24 |
| 高風化 | 9.38    | 2.69 | 29.04 | 5.23 | 7.52  | 3.06 | 16.82 | 0.15 |



表4.2.1-3 高、低風化土壤 TPH 濃度及風化程度

| 樣品名稱   |     | TPH <sub>C10~C40</sub><br>(mg/kg) | C17/Pr | C18/Ph | Pr/Ph |
|--------|-----|-----------------------------------|--------|--------|-------|
| 低風化區土壤 | 1   | 1569.97                           | 1.311  | 0.941  | 0.735 |
|        | 2   | 1322.52                           |        |        |       |
|        | 3   | 1850.98                           |        |        |       |
|        | 4   | 1611.45                           |        |        |       |
|        | 5   | 2605.68                           |        |        |       |
|        | 平均  | 1792.12                           | --     | --     | --    |
|        | 標準差 | 491.90                            | --     | --     | --    |
| 高風化區土壤 | 1   | 2334.55                           | 0.776  | 0.579  | 0.745 |
|        | 2   | 2200.92                           |        |        |       |
|        | 3   | 2397.53                           |        |        |       |
|        | 4   | 2516.53                           |        |        |       |
|        | 5   | 1489.87                           |        |        |       |
|        | 平均  | 2188.28                           | --     | --     | --    |
|        | 標準差 | 406.49                            | --     | --     | --    |

## 4.2.2 現地試驗培地茅生長情形

於111年5月20日完成現地培地茅種值並量測植株初始高度，每兩週量測一次植株高度，每區塊以最高之植體為量測對象，統計至112年3月10日種植時間已滿42週。

整體植物生長情形如圖4.2.2-1，因冬天天氣寒冷較不利培地茅生長，觀察到已有較多枯黃的植體，且植體高度亦有停滯或降低之現象，於111年12月25日進行培地茅植體地上部修剪，修剪時均保留約30至40公分植體繼續進行現地栽種試驗，並於修剪前後，量測植株高度，及修剪之植體生質量。在修剪前可明顯看出高風化區培地茅生長優於低風化區，植體生長高度較高且較茂盛翠綠；土壤有添加生物炭之區域培地茅生長情形優於未添加生物炭之區域。



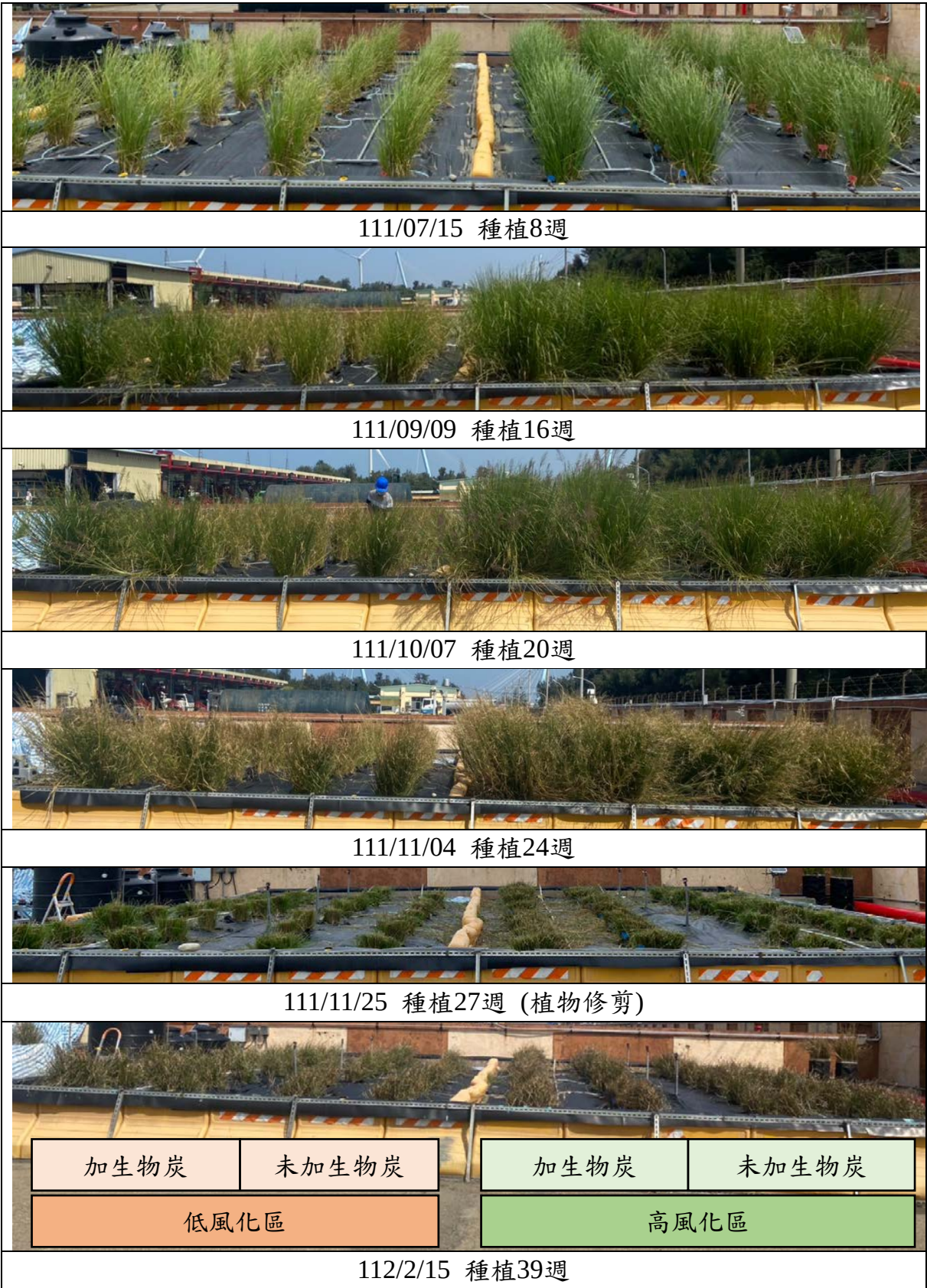


圖4.2.2-1 現地栽種整體植物生長情形



現地種植培地茅之試驗組有【低風化區-培地茅+生物炭2.5%】、【低風化區-培地茅】、【高風化區-培地茅+生物炭2.5%】及【高風化區-培地茅】四種試驗組。各試驗組培地茅植株高度紀錄，第一輪如表4.2.2-1至表4.2.2-4，第二輪如表4.2.2-5至表4.2.2-8，植株平均生長高度如圖4.2.2-2及圖4.2.2-3所示，低風化區植體生長情形如圖4.2.2-4，高風化區植體生長情形如圖4.2.2-5。

【低風化區-培地茅+生物炭2.5%】試驗組，在5月20日開始種植至11月4日期間，培地茅初始平均高度為55 cm，兩週後生長至89 cm，四週時109 cm，八週時130 cm，十二週時140 cm，十六週時131 cm，二十週時140 cm，滿二十四週時138 cm。【低風化區-培地茅】試驗組，培地茅初始平均高度為54 cm，兩週後生長至90 cm，四週時110 cm，八週時131 cm，十二週時133 cm，十六週時122 cm，二十週時129 cm，滿二十四週時121 cm。

【高風化區-培地茅+生物炭2.5%】試驗組，在5月20日開始種植至11月4日期間，培地茅初始平均高度為52 cm，兩週後生長至89 cm，四週時116 cm，八週時147 cm，十二週時169 cm，十六週時180 cm，二十週時180 cm，滿二十四週時182 cm。【高風化區-培地茅】試驗組，培地茅初始平均高度為51 cm，兩週後生長至81 cm，四週時120 cm，八週時144 cm，十二週時153 cm，十六週時161 cm，二十週時164 cm，滿二十四週時162 cm。

至目前培地茅生長期間，在各試驗組之植體最高平均高度分別為【低風化區-培地茅+生物炭2.5%】組140 cm，【低風化區-培地茅】組為137 cm，【高風化區-培地茅+生物炭2.5%】組為181 cm，【高風化區-培地茅】組為172 cm。培地茅生長高度為【高風化區-培地茅+生物炭2.5%】>【高風化區-培地茅】>【低風化區-培地茅+生物炭2.5%】>【低風化區-培地茅】。比較高、低風化兩區之【培地茅+生物炭2.5%】試驗組，兩區所生長之培地茅高度相差41 cm；高、低風化兩區之【培地茅】試驗組，兩區所生長之培地茅高度相差35 cm。其結果顯示低風化之 TPH 污染土壤較不利植物生長，而不論在高、低風化區，土壤添加生物炭所種植之培地茅，生長高度都較未添加生物炭高，顯示添加生物炭有利於植體生長。

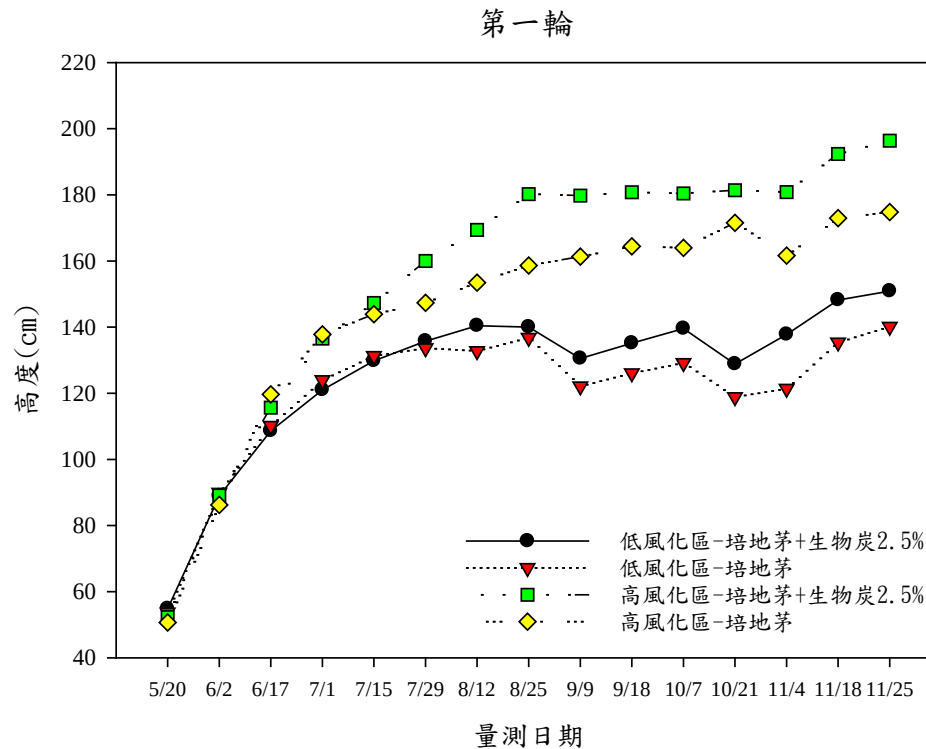


圖4.2.2-2 各試驗組植株平均高度變化(第一輪111/05/20~111/11/25)

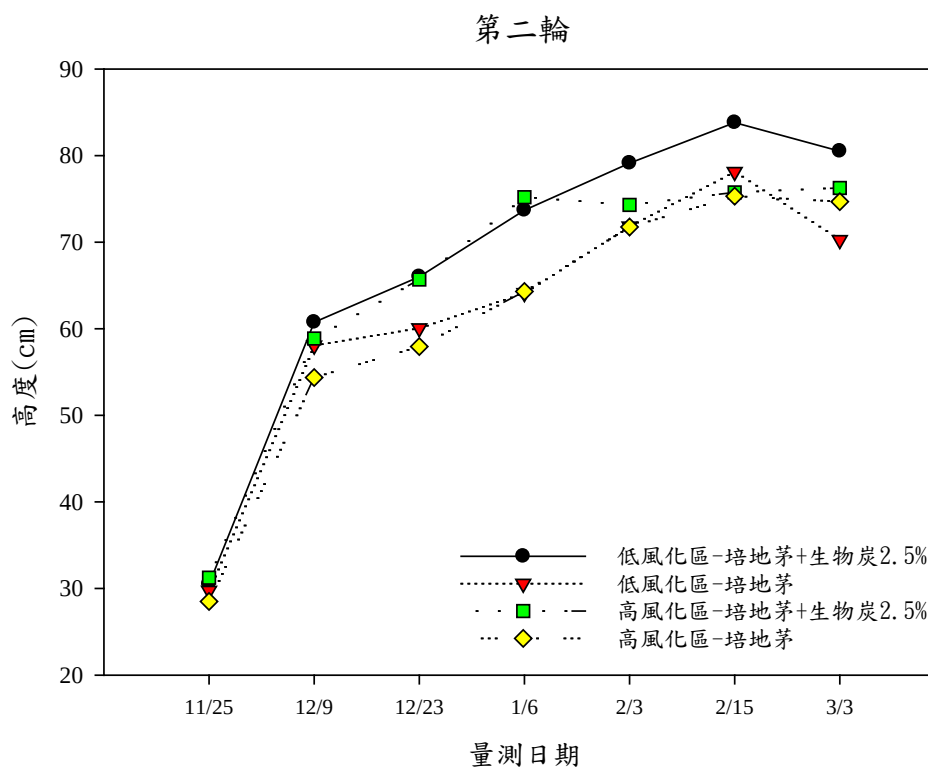


圖4.2.2-3 各試驗組植株平均高度變化(第二輪111/11/25~112/03/03)



表4.2.2-1 【低風化區-培地茅+生物炭2.5%】試驗組植株高度(第一輪111/05/20~111/11/25)

| 日期/生長週數   |     | 【低風化區-培地茅+生物炭 2.5%】植株高度(cm) |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |       |
|-----------|-----|-----------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|
|           |     | A-1                         | A-2 | A-3 | A-4 | A-5 | A-6 | A-7 | A-8 | B-1 | B-2 | B-3 | B-4 | B-5 | B-6 | B-7 | B-8 | 平均  | 標準差   |
| 111/05/20 | 初始  | 63                          | 65  | 64  | 59  | 55  | 52  | 56  | 51  | 49  | 52  | 46  | 53  | 50  | 53  | 58  | 51  | 55  | 5.48  |
| 111/06/02 | 2W  | 89                          | 92  | 85  | 95  | 96  | 87  | 87  | 90  | 89  | 92  | 83  | 90  | 83  | 85  | 93  | 88  | 89  | 4.06  |
| 111/06/17 | 4W  | 103                         | 105 | 106 | 110 | 110 | 110 | 112 | 114 | 110 | 108 | 107 | 111 | 111 | 113 | 103 | 105 | 109 | 3.48  |
| 111/07/01 | 6W  | 117                         | 119 | 117 | 120 | 118 | 112 | 118 | 120 | 128 | 120 | 120 | 121 | 127 | 128 | 126 | 127 | 121 | 4.59  |
| 111/07/15 | 8W  | 128                         | 130 | 130 | 130 | 135 | 128 | 128 | 123 | 135 | 125 | 134 | 124 | 131 | 127 | 135 | 134 | 130 | 3.99  |
| 111/07/29 | 10W | 140                         | 142 | 137 | 135 | 150 | 140 | 133 | 120 | 140 | 130 | 140 | 130 | 140 | 135 | 130 | 130 | 136 | 6.94  |
| 111/08/12 | 12W | 155                         | 140 | 142 | 140 | 150 | 140 | 132 | 130 | 155 | 130 | 140 | 137 | 140 | 139 | 147 | 130 | 140 | 8.06  |
| 111/08/25 | 14W | 162                         | 147 | 144 | 140 | 165 | 127 | 128 | 120 | 166 | 125 | 135 | 133 | 146 | 140 | 142 | 120 | 140 | 14.84 |
| 111/09/09 | 16W | 155                         | 130 | 138 | 120 | 130 | 114 | 130 | 110 | 160 | 109 | 124 | 113 | 140 | 140 | 140 | 135 | 131 | 15.13 |
| 111/09/18 | 18W | 160                         | 138 | 147 | 127 | 140 | 120 | 130 | 120 | 164 | 110 | 132 | 110 | 142 | 149 | 150 | 123 | 135 | 16.44 |
| 111/10/07 | 20W | 176                         | 156 | 140 | 150 | 140 | 130 | 145 | 135 | 155 | 115 | 110 | 110 | 147 | 148 | 156 | 120 | 140 | 18.65 |
| 111/10/21 | 22W | 177                         | 163 | 130 | 120 | 130 | 110 | 120 | 110 | 166 | 120 | 110 | 110 | 136 | 139 | 120 | 100 | 129 | 22.49 |
| 111/11/04 | 24W | 175                         | 150 | 140 | 130 | 138 | 120 | 136 | 123 | 175 | 119 | 130 | 130 | 140 | 152 | 126 | 120 | 138 | 17.62 |
| 111/11/18 | 26W | 180                         | 161 | 162 | 157 | 163 | 116 | 157 | 136 | 173 | 115 | 155 | 120 | 139 | 150 | 160 | 127 | 148 | 20.27 |
| 111/11/25 | 27W | 180                         | 163 | 160 | 150 | 157 | 135 | 152 | 145 | 160 | 130 | 165 | 130 | 145 | 160 | 152 | 130 | 151 | 14.41 |

表4.2.2-2 【低風化區-培地茅】試驗組植株高度(第一輪111/05/20~111/11/25)

| 編號<br>日期/生長週數 |     | 【低風化區-培地茅】植株高度(cm) |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |       |
|---------------|-----|--------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|
|               |     | C-1                | C-2 | C-3 | C-4 | C-5 | C-6 | C-7 | C-8 | D-1 | D-2 | D-3 | D-4 | D-5 | D-6 | D-7 | D-8 | 平均  | 標準差   |
| 111/05/20     | 初始  | 54                 | 53  | 55  | 55  | 51  | 55  | 60  | 60  | 55  | 50  | 48  | 57  | 50  | 52  | 58  | 49  | 54  | 3.74  |
| 111/06/02     | 2W  | 93                 | 86  | 89  | 92  | 90  | 94  | 93  | 89  | 86  | 87  | 90  | 93  | 89  | 87  | 92  | 90  | 90  | 2.69  |
| 111/06/17     | 4W  | 112                | 110 | 110 | 110 | 110 | 107 | 106 | 110 | 110 | 110 | 113 | 113 | 112 | 110 | 108 | 111 | 110 | 1.93  |
| 111/07/01     | 6W  | 121                | 110 | 113 | 123 | 125 | 120 | 127 | 129 | 124 | 120 | 128 | 130 | 129 | 130 | 128 | 127 | 124 | 5.93  |
| 111/07/15     | 8W  | 133                | 110 | 120 | 132 | 133 | 130 | 133 | 133 | 135 | 133 | 136 | 135 | 135 | 131 | 136 | 135 | 131 | 6.82  |
| 111/07/29     | 10W | 134                | 110 | 120 | 130 | 135 | 133 | 137 | 137 | 138 | 137 | 138 | 138 | 137 | 136 | 138 | 140 | 134 | 7.86  |
| 111/08/12     | 12W | 132                | 115 | 130 | 130 | 132 | 134 | 142 | 135 | 135 | 132 | 134 | 130 | 130 | 140 | 135 | 138 | 133 | 5.95  |
| 111/08/25     | 14W | 137                | 120 | 133 | 140 | 139 | 137 | 144 | 122 | 150 | 140 | 142 | 140 | 132 | 136 | 134 | 142 | 137 | 7.59  |
| 111/09/09     | 16W | 120                | 90  | 110 | 105 | 120 | 120 | 124 | 135 | 147 | 128 | 124 | 120 | 120 | 130 | 140 | 120 | 122 | 13.43 |
| 111/09/18     | 18W | 145                | 108 | 120 | 115 | 114 | 126 | 136 | 110 | 150 | 125 | 137 | 123 | 120 | 130 | 138 | 120 | 126 | 12.33 |
| 111/10/07     | 20W | 150                | 110 | 117 | 120 | 110 | 150 | 149 | 130 | 150 | 140 | 120 | 110 | 128 | 130 | 132 | 120 | 129 | 14.89 |
| 111/10/21     | 22W | 120                | 95  | 120 | 100 | 110 | 120 | 120 | 106 | 140 | 140 | 136 | 124 | 120 | 120 | 120 | 110 | 119 | 12.83 |
| 111/11/04     | 24W | 132                | 116 | 120 | 104 | 120 | 118 | 125 | 112 | 139 | 133 | 133 | 128 | 120 | 120 | 105 | 117 | 121 | 9.92  |
| 111/11/18     | 26W | 150                | 110 | 120 | 122 | 125 | 146 | 148 | 130 | 150 | 155 | 138 | 114 | 157 | 145 | 135 | 120 | 135 | 15.37 |
| 111/11/25     | 27W | 148                | 120 | 135 | 128 | 130 | 142 | 153 | 130 | 174 | 157 | 135 | 130 | 130 | 143 | 142 | 145 | 140 | 13.45 |

表4.2.2-3 【高風化區-培地茅+生物炭2.5%】試驗組植株高度(第一輪111/05/20~111/11/25)

| 編號<br>日期/生長週數 |     | 【高風化區-培地茅+生物炭 2.5%】植株高度(cm) |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |       |
|---------------|-----|-----------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|
|               |     | E-1                         | E-2 | E-3 | E-4 | E-5 | E-6 | E-7 | E-8 | F-1 | F-2 | F-3 | F-4 | F-5 | F-6 | F-7 | F-8 | 平均  | 標準差   |
| 111/05/20     | 初始  | 51                          | 48  | 50  | 58  | 48  | 52  | 53  | 55  | 57  | 57  | 50  | 53  | 54  | 50  | 48  | 56  | 52  | 3.44  |
| 111/06/02     | 2W  | 82                          | 84  | 89  | 90  | 92  | 90  | 94  | 87  | 88  | 90  | 90  | 89  | 91  | 92  | 88  | 90  | 89  | 2.95  |
| 111/06/17     | 4W  | 115                         | 105 | 110 | 107 | 120 | 120 | 120 | 120 | 118 | 110 | 120 | 115 | 115 | 120 | 120 | 115 | 116 | 5.11  |
| 111/07/01     | 6W  | 135                         | 137 | 135 | 140 | 141 | 140 | 136 | 140 | 135 | 133 | 138 | 140 | 136 | 135 | 130 | 133 | 137 | 3.14  |
| 111/07/15     | 8W  | 145                         | 144 | 150 | 150 | 150 | 147 | 137 | 153 | 143 | 144 | 148 | 155 | 146 | 149 | 150 | 145 | 147 | 4.34  |
| 111/07/29     | 10W | 168                         | 160 | 170 | 172 | 168 | 160 | 150 | 160 | 148 | 150 | 150 | 170 | 155 | 160 | 170 | 149 | 160 | 8.80  |
| 111/08/12     | 12W | 180                         | 170 | 178 | 182 | 180 | 170 | 164 | 178 | 160 | 150 | 160 | 180 | 160 | 160 | 188 | 150 | 169 | 11.90 |
| 111/08/25     | 14W | 190                         | 180 | 190 | 190 | 185 | 180 | 176 | 190 | 175 | 160 | 173 | 185 | 174 | 180 | 185 | 170 | 180 | 8.57  |
| 111/09/09     | 16W | 195                         | 180 | 195 | 193 | 188 | 170 | 183 | 183 | 180 | 164 | 177 | 174 | 180 | 170 | 180 | 164 | 180 | 9.86  |
| 111/09/18     | 18W | 189                         | 189 | 174 | 190 | 175 | 170 | 190 | 182 | 175 | 175 | 180 | 180 | 176 | 190 | 185 | 172 | 181 | 7.18  |
| 111/10/07     | 20W | 185                         | 182 | 176 | 180 | 185 | 175 | 190 | 185 | 180 | 180 | 170 | 178 | 180 | 182 | 180 | 178 | 180 | 4.69  |
| 111/10/21     | 22W | 178                         | 190 | 180 | 190 | 190 | 170 | 180 | 186 | 195 | 180 | 180 | 168 | 190 | 170 | 185 | 170 | 181 | 8.58  |
| 111/11/04     | 24W | 190                         | 190 | 170 | 190 | 185 | 170 | 195 | 190 | 186 | 162 | 173 | 172 | 176 | 179 | 180 | 185 | 181 | 9.50  |
| 111/11/18     | 26W | 200                         | 198 | 195 | 196 | 190 | 180 | 188 | 196 | 195 | 192 | 190 | 197 | 190 | 190 | 200 | 180 | 192 | 6.10  |
| 111/11/25     | 27W | 207                         | 202 | 191 | 211 | 183 | 185 | 213 | 200 | 200 | 190 | 208 | 193 | 184 | 198 | 193 | 184 | 196 | 10.02 |



表4.2.2-4 【高風化區-培地茅】試驗組植株高度(第一輪111/05/20~111/11/25)

| 編號<br>日期/生長週數 |     | 【高風化區-培地茅】植株高度(cm) |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |       |
|---------------|-----|--------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|
|               |     | G-1                | G-2 | G-3 | G-4 | G-5 | G-6 | G-7 | G-8 | H-1 | H-2 | H-3 | H-4 | H-5 | H-6 | H-7 | H-8 | 平均  | 標準差   |
| 111/05/20     | 初始  | 51                 | 57  | 50  | 47  | 48  | 47  | 50  | 52  | 50  | 50  | 49  | 54  | 54  | 50  | 53  | 50  | 51  | 2.69  |
| 111/06/02     | 2W  | 90                 | 87  | 78  | 89  | 83  | 85  | 86  | 85  | 90  | 91  | 86  | 80  | 90  | 88  | 86  | 87  | 86  | 3.71  |
| 111/06/17     | 4W  | 120                | 110 | 114 | 120 | 120 | 124 | 120 | 120 | 124 | 122 | 124 | 116 | 125 | 110 | 125 | 120 | 120 | 4.84  |
| 111/07/01     | 6W  | 136                | 135 | 137 | 137 | 170 | 133 | 137 | 137 | 140 | 137 | 134 | 133 | 140 | 130 | 132 | 136 | 138 | 9.01  |
| 111/07/15     | 8W  | 143                | 140 | 147 | 143 | 143 | 140 | 145 | 143 | 146 | 148 | 144 | 140 | 146 | 145 | 142 | 147 | 144 | 2.58  |
| 111/07/29     | 10W | 146                | 143 | 152 | 148 | 147 | 140 | 145 | 140 | 150 | 160 | 148 | 143 | 150 | 150 | 145 | 150 | 147 | 4.96  |
| 111/08/12     | 12W | 150                | 140 | 159 | 142 | 160 | 142 | 153 | 155 | 166 | 167 | 148 | 146 | 160 | 150 | 150 | 167 | 153 | 8.97  |
| 111/08/25     | 14W | 157                | 142 | 164 | 148 | 163 | 155 | 154 | 150 | 165 | 170 | 159 | 156 | 170 | 165 | 155 | 165 | 159 | 7.96  |
| 111/09/09     | 16W | 168                | 150 | 164 | 150 | 150 | 160 | 146 | 150 | 170 | 175 | 160 | 160 | 176 | 168 | 170 | 164 | 161 | 9.69  |
| 111/09/18     | 18W | 168                | 153 | 165 | 158 | 162 | 160 | 159 | 164 | 174 | 167 | 167 | 169 | 170 | 163 | 164 | 167 | 164 | 5.20  |
| 111/10/07     | 20W | 160                | 165 | 168 | 166 | 160 | 165 | 160 | 162 | 160 | 160 | 170 | 167 | 170 | 166 | 160 | 164 | 164 | 3.71  |
| 111/10/21     | 22W | 160                | 176 | 175 | 177 | 170 | 160 | 169 | 156 | 174 | 190 | 179 | 156 | 172 | 178 | 175 | 177 | 172 | 9.33  |
| 111/11/04     | 24W | 156                | 157 | 167 | 155 | 159 | 147 | 160 | 148 | 180 | 163 | 174 | 158 | 170 | 163 | 164 | 165 | 162 | 8.68  |
| 111/11/18     | 26W | 180                | 174 | 170 | 180 | 180 | 175 | 170 | 175 | 177 | 167 | 166 | 177 | 162 | 170 | 168 | 176 | 173 | 5.51  |
| 111/11/25     | 27W | 170                | 177 | 166 | 190 | 164 | 167 | 156 | 178 | 181 | 163 | 182 | 175 | 196 | 168 | 175 | 188 | 175 | 10.88 |

表4.2.2-5 【低風化區-培地茅+生物炭2.5%】試驗組植株高度(第二輪111/11/25~112/02/15)

| 日期/生長週數   |     | 【低風化區-培地茅+生物炭 2.5%】植株高度(cm) |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |    |       |
|-----------|-----|-----------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-------|
|           |     | A-1                         | A-2 | A-3 | A-4 | A-5 | A-6 | A-7 | A-8 | B-1 | B-2 | B-3 | B-4 | B-5 | B-6 | B-7 | B-8 | 平均 | 標準差   |
| 111/11/25 | 初始  | 33                          | 28  | 38  | 35  | 28  | 27  | 30  | 29  | 33  | 27  | 31  | 29  | 30  | 31  | 30  | 29  | 31 | 2.99  |
| 111/12/09 | 2W  | 61                          | 58  | 65  | 57  | 56  | 46  | 51  | 65  | 68  | 60  | 62  | 57  | 67  | 72  | 65  | 62  | 61 | 6.57  |
| 111/12/23 | 4W  | 68                          | 51  | 70  | 62  | 64  | 62  | 63  | 67  | 73  | 69  | 67  | 62  | 63  | 72  | 72  | 71  | 66 | 5.61  |
| 112/01/06 | 6W  | 89                          | 70  | 85  | 65  | 67  | 75  | 74  | 69  | 82  | 65  | 66  | 70  | 76  | 79  | 75  | 72  | 74 | 7.19  |
| 112/02/03 | 10W | 95                          | 80  | 84  | 82  | 78  | 80  | 85  | 79  | 72  | 63  | 62  | 71  | 68  | 87  | 112 | 68  | 79 | 12.60 |
| 112/02/15 | 12W | 85                          | 91  | 88  | 86  | 85  | 71  | 79  | 87  | 93  | 85  | 80  | 80  | 85  | 82  | 77  | 87  | 84 | 5.48  |
| 112/03/03 | 14W | 80                          | 94  | 91  | 80  | 70  | 60  | 85  | 90  | 99  | 82  | 86  | 74  | 70  | 78  | 79  | 70  | 81 | 10.26 |

表4.2.2-6 【低風化區-培地茅】試驗組植株高度(第二輪111/11/25~112/02/15)

| 編號<br>日期/生長週數 |     | 【低風化區-培地茅】植株高度(cm) |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |    |      |
|---------------|-----|--------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|------|
|               |     | C-1                | C-2 | C-3 | C-4 | C-5 | C-6 | C-7 | C-8 | D-1 | D-2 | D-3 | D-4 | D-5 | D-6 | D-7 | D-8 | 平均 | 標準差  |
| 111/11/25     | 初始  | 29                 | 29  | 30  | 29  | 30  | 33  | 30  | 32  | 30  | 32  | 27  | 26  | 30  | 30  | 29  | 30  | 30 | 1.73 |
| 111/12/09     | 2W  | 65                 | 58  | 52  | 55  | 65  | 64  | 64  | 62  | 57  | 55  | 54  | 55  | 50  | 50  | 63  | 60  | 58 | 5.31 |
| 111/12/23     | 4W  | 61                 | 60  | 50  | 60  | 60  | 65  | 69  | 62  | 67  | 60  | 52  | 53  | 56  | 58  | 70  | 58  | 60 | 5.76 |
| 112/01/06     | 6W  | 67                 | 50  | 56  | 60  | 70  | 70  | 75  | 70  | 60  | 60  | 65  | 66  | 60  | 58  | 70  | 69  | 64 | 6.65 |
| 112/02/03     | 10W | 75                 | 70  | 66  | 62  | 70  | 71  | 84  | 74  | 68  | 78  | 66  | 70  | 64  | 76  | 82  | 73  | 72 | 6.19 |
| 112/02/15     | 12W | 87                 | 74  | 70  | 66  | 79  | 84  | 91  | 92  | 85  | 75  | 75  | 72  | 67  | 78  | 70  | 85  | 78 | 8.34 |
| 112/03/03     | 14W | 68                 | 60  | 60  | 55  | 69  | 70  | 72  | 87  | 67  | 70  | 69  | 73  | 65  | 90  | 85  | 64  | 70 | 9.75 |

表4.2.2-7 【高風化區-培地茅+生物炭2.5%】試驗組植株高度(第二輪111/11/25~112/02/15)

| 日期/生長週數   |     | 【高風化區-培地茅+生物炭 2.5%】植株高度(cm) |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |    |       |
|-----------|-----|-----------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-------|
|           |     | E-1                         | E-2 | E-3 | E-4 | E-5 | E-6 | E-7 | E-8 | F-1 | F-2 | F-3 | F-4 | F-5 | F-6 | F-7 | F-8 | 平均 | 標準差   |
| 111/11/25 | 初始  | 35                          | 28  | 30  | 28  | 33  | 30  | 37  | 35  | 29  | 30  | 30  | 35  | 30  | 30  | 30  | 30  | 31 | 2.79  |
| 111/12/09 | 2W  | 65                          | 55  | 56  | 55  | 57  | 58  | 65  | 70  | 57  | 54  | 60  | 55  | 58  | 59  | 60  | 58  | 59 | 4.38  |
| 111/12/23 | 4W  | 74                          | 66  | 56  | 66  | 57  | 71  | 73  | 77  | 64  | 62  | 66  | 60  | 64  | 63  | 65  | 67  | 66 | 5.83  |
| 112/01/06 | 6W  | 80                          | 75  | 74  | 77  | 63  | 70  | 75  | 88  | 69  | 60  | 73  | 81  | 68  | 84  | 88  | 78  | 75 | 8.07  |
| 112/02/03 | 10W | 73                          | 68  | 64  | 60  | 63  | 67  | 79  | 99  | 57  | 56  | 69  | 69  | 79  | 69  | 113 | 104 | 74 | 16.90 |
| 112/02/15 | 12W | 87                          | 75  | 74  | 70  | 69  | 65  | 83  | 93  | 72  | 61  | 79  | 80  | 73  | 69  | 77  | 85  | 76 | 8.47  |
| 112/03/03 | 14W | 75                          | 68  | 72  | 68  | 66  | 100 | 100 | 84  | 69  | 62  | 75  | 80  | 70  | 67  | 86  | 78  | 76 | 11.38 |

表4.2.2-8 【高風化區-培地茅】試驗組植株高度(第二輪111/11/25~112/02/15)

| 編號<br>日期/生長週數 |     | 【高風化區-培地茅】植株高度(cm) |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |    |       |
|---------------|-----|--------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-------|
|               |     | G-1                | G-2 | G-3 | G-4 | G-5 | G-6 | G-7 | G-8 | H-1 | H-2 | H-3 | H-4 | H-5 | H-6 | H-7 | H-8 | 平均 | 標準差   |
| 111/11/25     | 初始  | 26                 | 22  | 22  | 30  | 26  | 30  | 28  | 30  | 31  | 29  | 31  | 30  | 30  | 32  | 29  | 30  | 29 | 3.01  |
| 111/12/09     | 2W  | 54                 | 46  | 46  | 55  | 53  | 58  | 56  | 57  | 60  | 54  | 55  | 57  | 54  | 50  | 60  | 55  | 54 | 4.13  |
| 111/12/23     | 4W  | 51                 | 49  | 56  | 55  | 58  | 68  | 63  | 58  | 57  | 62  | 59  | 63  | 56  | 56  | 60  | 56  | 58 | 4.67  |
| 112/01/06     | 6W  | 55                 | 58  | 53  | 60  | 60  | 65  | 63  | 58  | 59  | 78  | 69  | 70  | 67  | 73  | 69  | 72  | 64 | 7.15  |
| 112/02/03     | 10W | 54                 | 64  | 75  | 67  | 67  | 74  | 74  | 75  | 79  | 68  | 70  | 69  | 70  | 80  | 92  | 70  | 72 | 8.22  |
| 112/02/15     | 12W | 75                 | 54  | 65  | 71  | 66  | 80  | 68  | 90  | 82  | 85  | 77  | 66  | 88  | 78  | 80  | 80  | 75 | 9.65  |
| 112/03/03     | 14W | 93                 | 58  | 70  | 73  | 71  | 67  | 73  | 100 | 85  | 76  | 75  | 67  | 65  | 74  | 70  | 78  | 75 | 10.49 |



#### 第四章 執行成果

#### 油污染土壤綠色整治及創造循環經濟效益

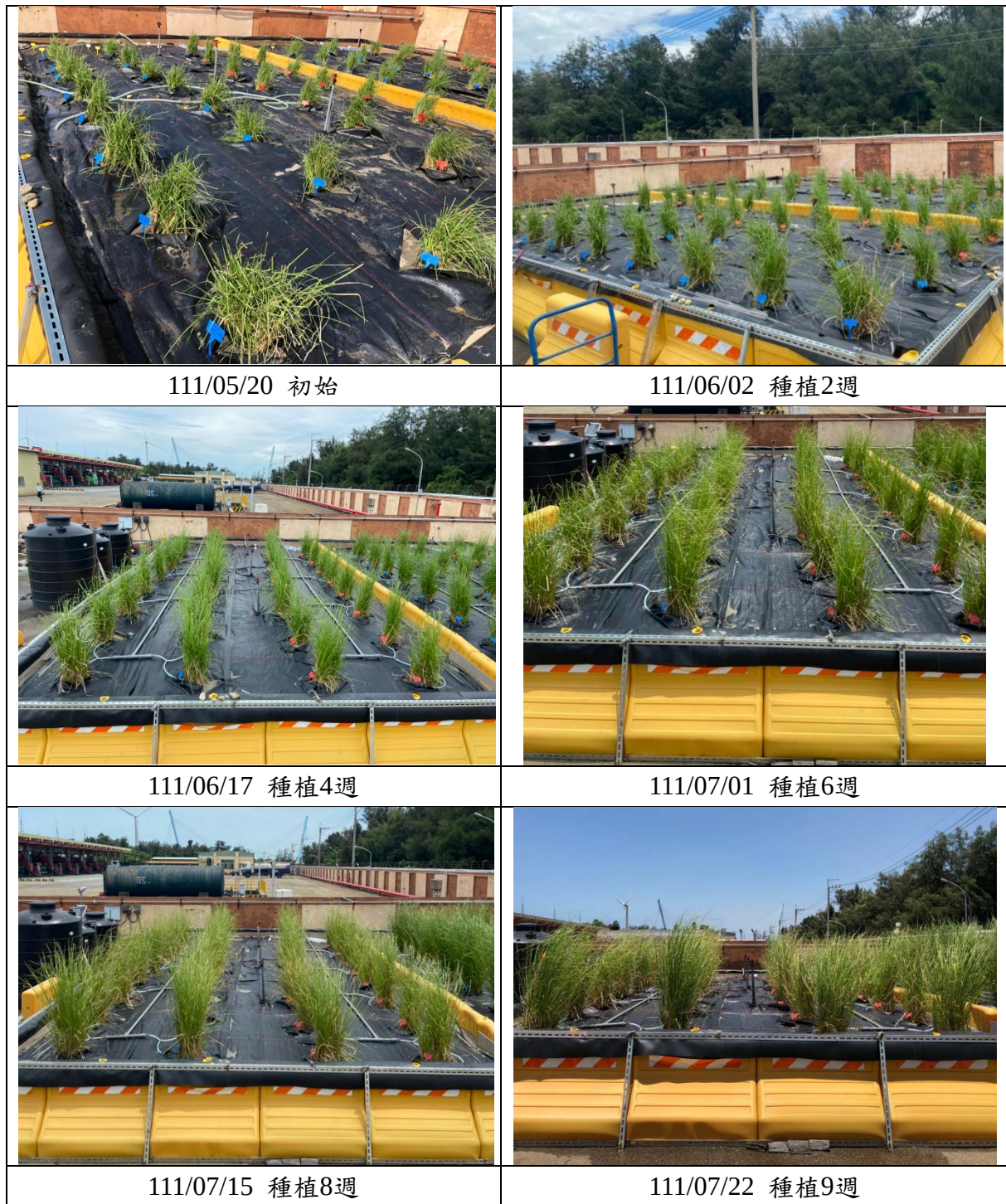


圖4.2.2-4 【低風化區】培地茅生長情形(1/3)





#### 第四章 執行成果

#### 油污染土壤綠色整治及創造循環經濟效益

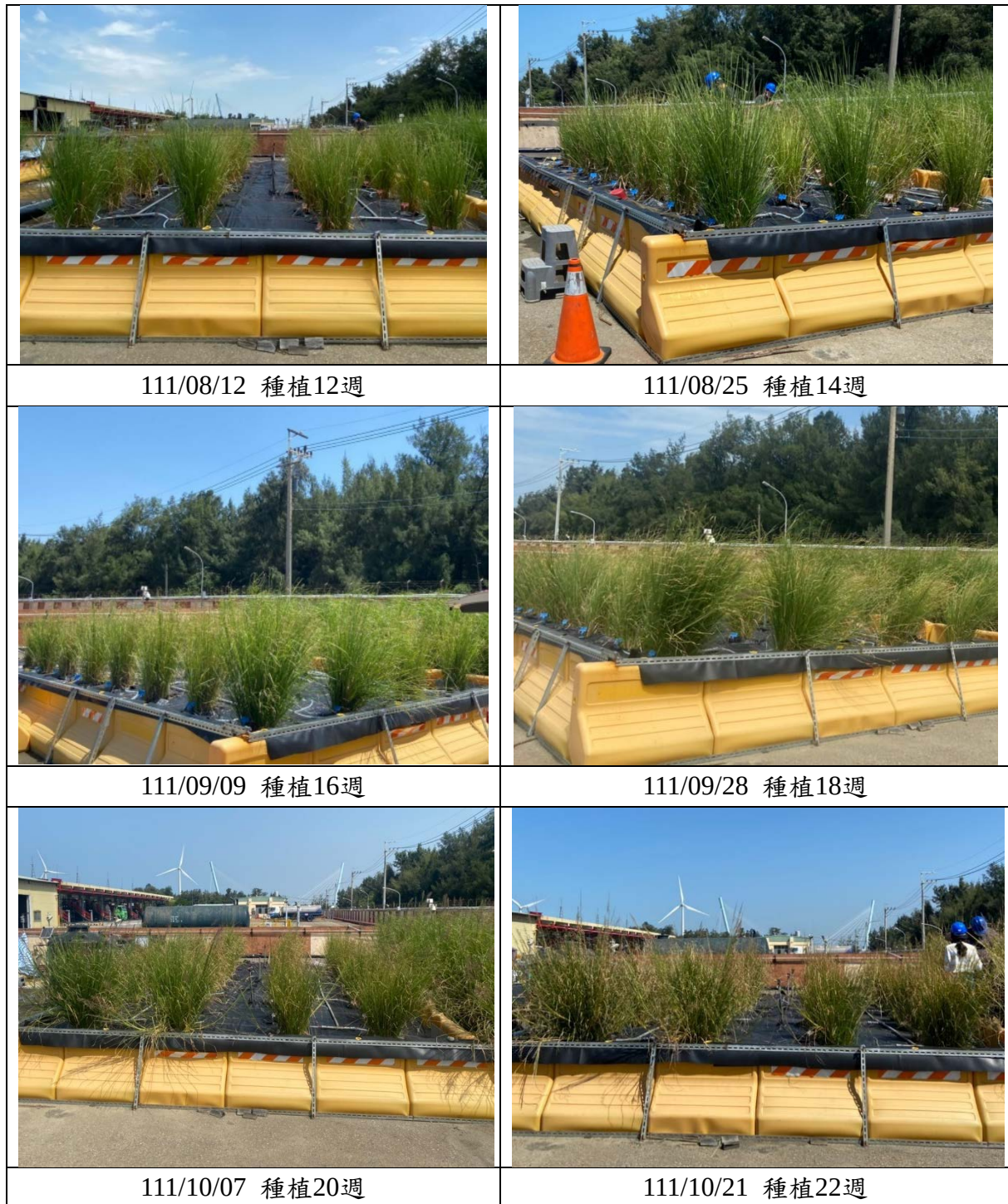


圖4.2.2-4 【低風化區】培地茅生長情形(2/3)





#### 第四章 執行成果

#### 油污染土壤綠色整治及創造循環經濟效益

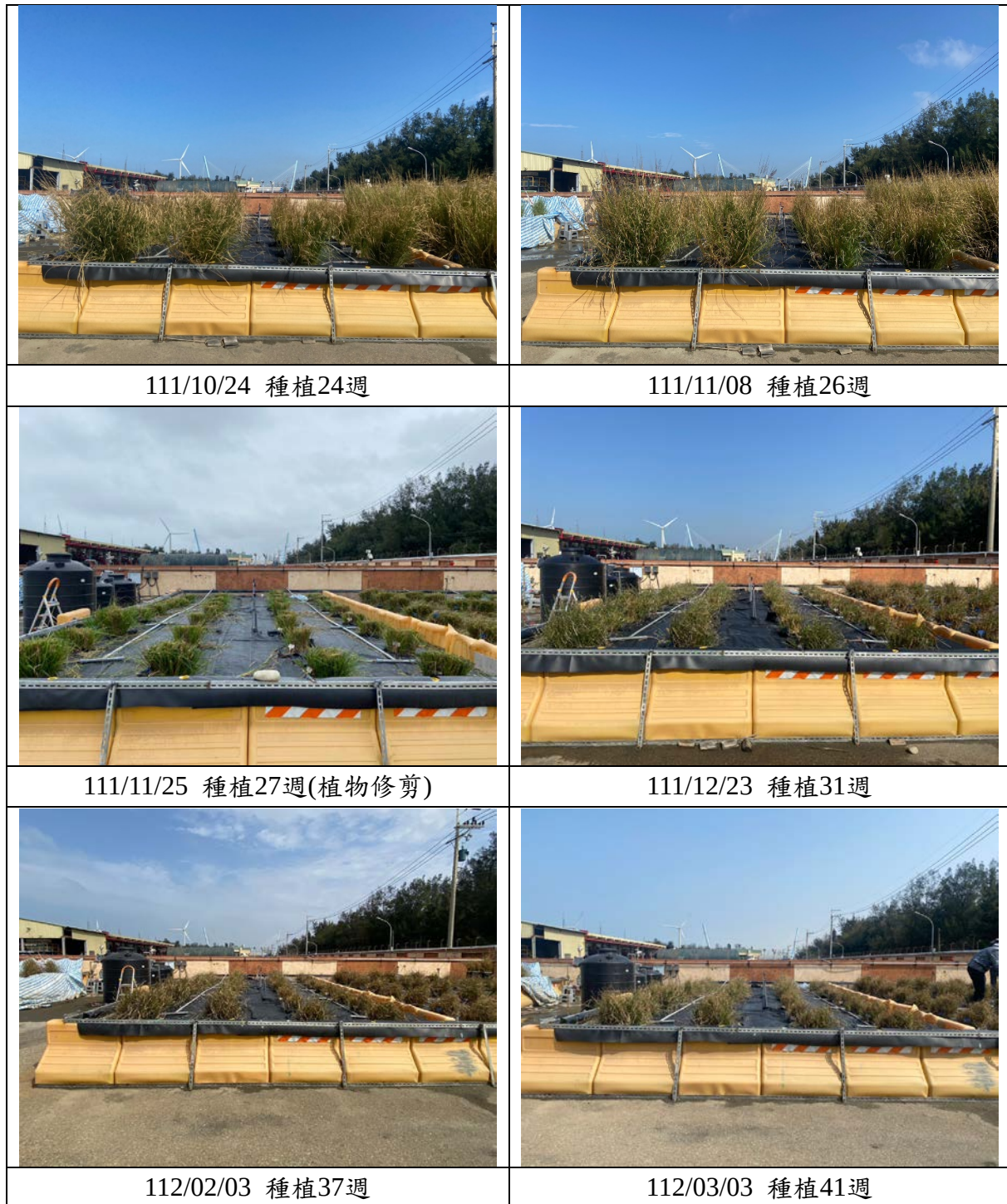


圖4.2.2-4 【低風化區】培地茅生長情形(3/3)





## 第四章 執行成果

## 油污染土壤綠色整治及創造循環經濟效益

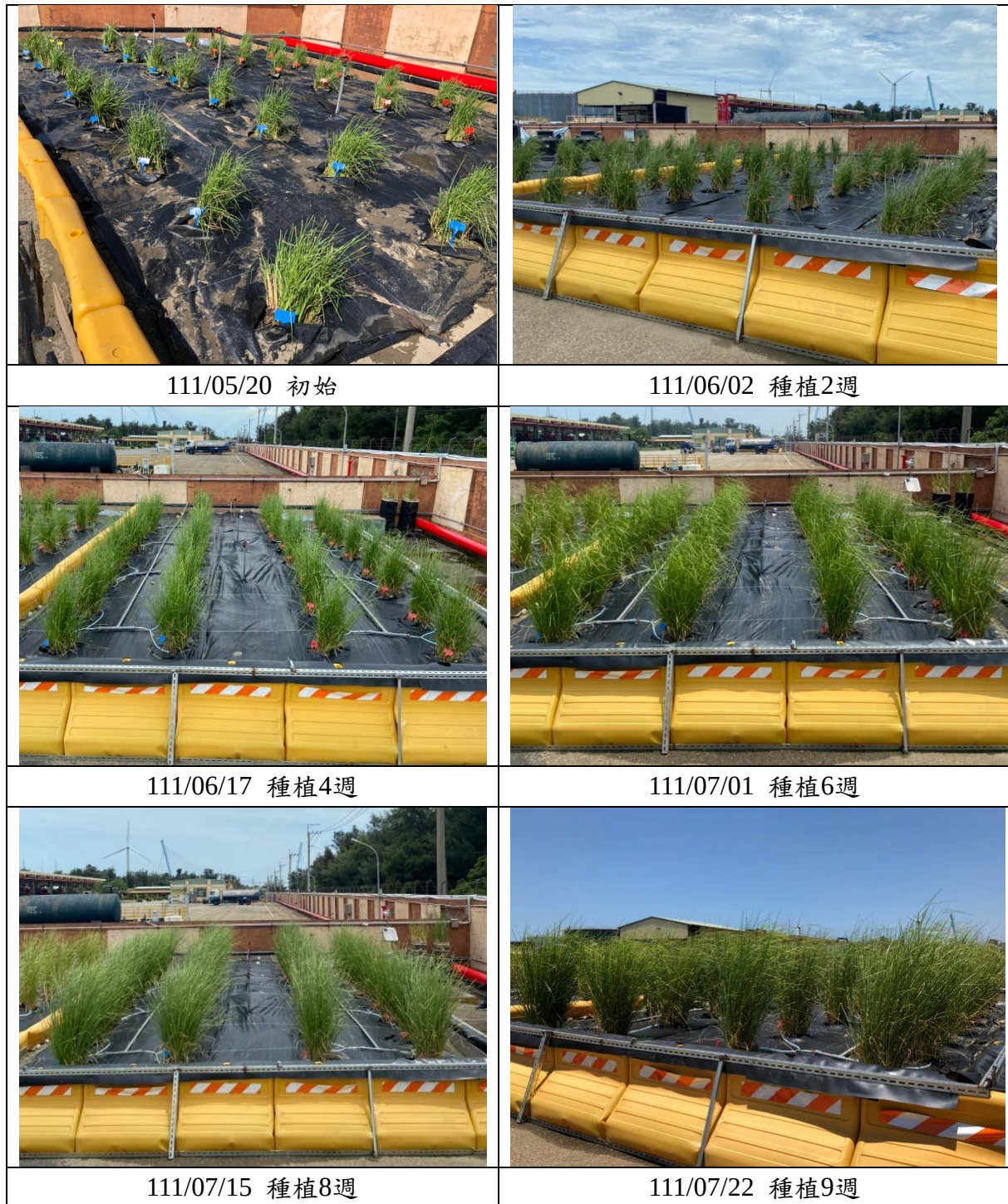


圖4.2.2-5 【高風化區】培地茅生長情形(1/3)





#### 第四章 執行成果

#### 油污染土壤綠色整治及創造循環經濟效益

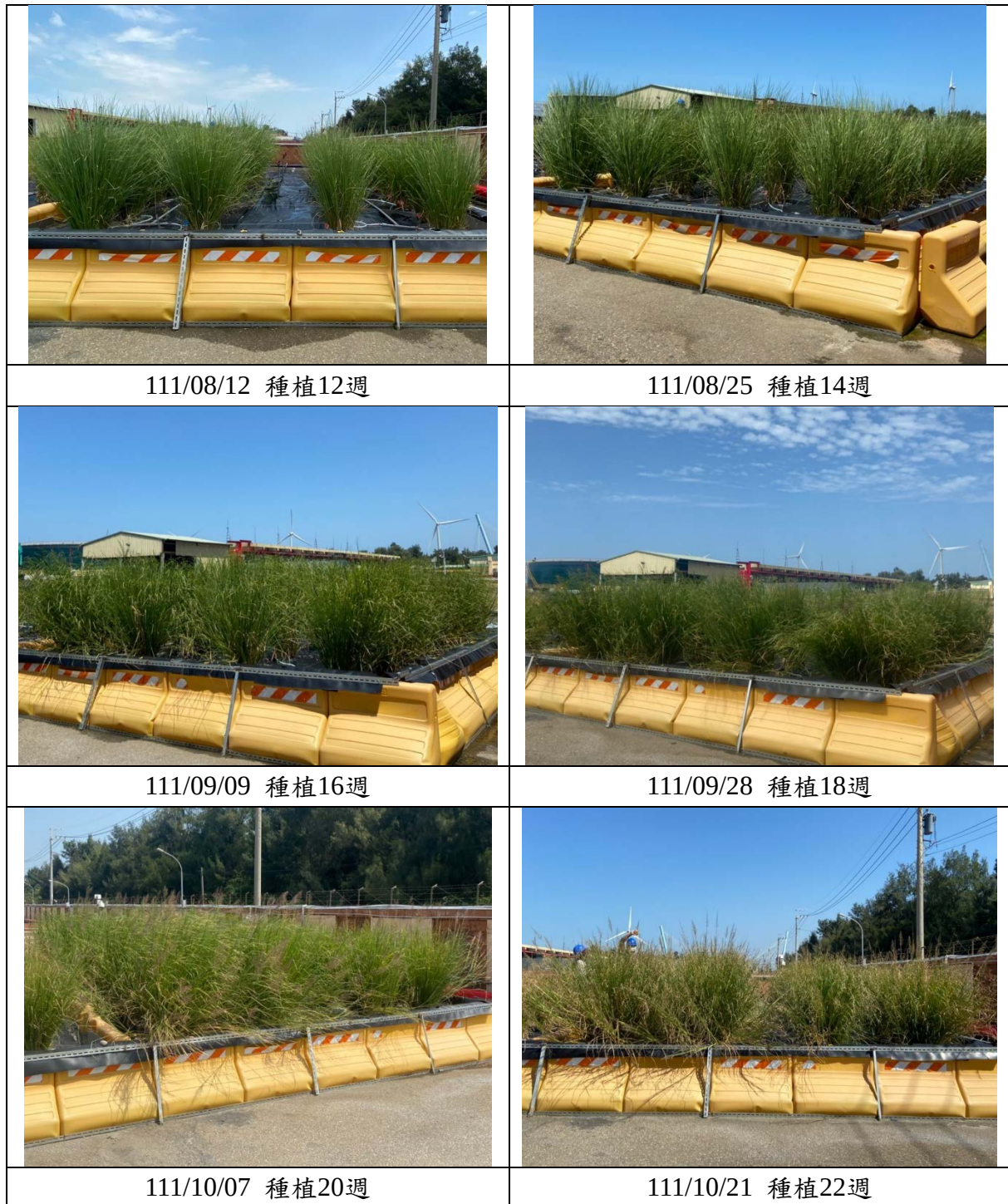


圖4.2.2-5 【高風化區】培地茅生長情形(2/3)





第四章 執行成果

油污染土壤綠色整治及創造循環經濟效益

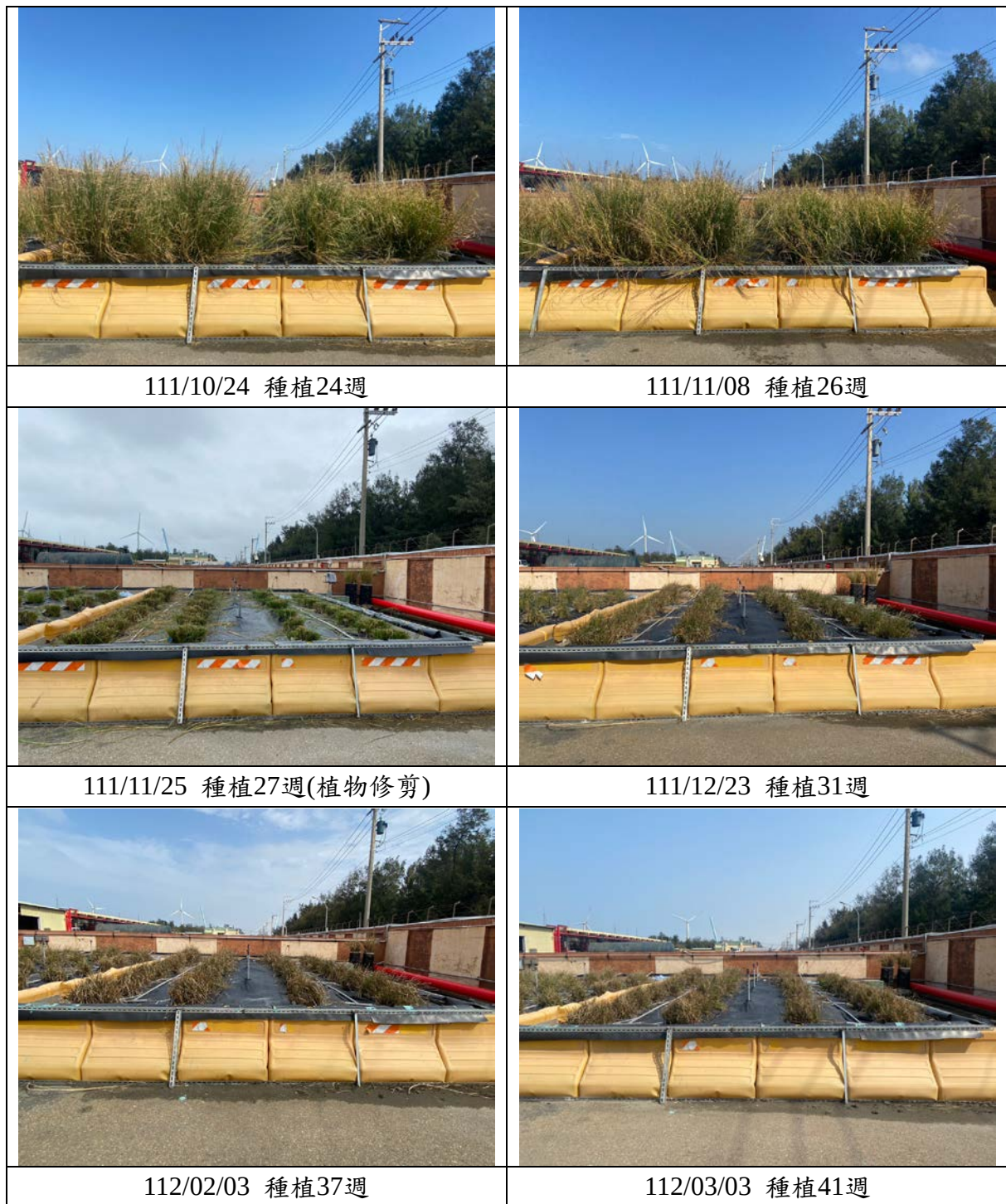


圖4.2.2-5 【高風化區】培地茅生長情形(3/3)



### 4.2.3 現地試驗土壤基本性質變化

現地 TPH 污染土壤，在經過本計畫種植培地茅及添加生物炭試驗後之土壤基本性質變化，如表4.2.3-1至表4.2.3-3，及圖4.2.3-1至圖4.2.3-6所示。土壤 pH 值初始為偏鹼性8.20~8.42，在經過五個月試驗過程，所有試驗組別之土壤 pH 值皆出現降低情形。低風化土壤導電度初始為178.67  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ，經過五個月試驗後，土壤導電度均下降，以未種植培地茅及未添加生物炭之【對照組】下降最多；高風化土壤導電度初始為105.43  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ，經過五個月試驗後，土壤導電度均上升。低風化土壤有機質初始為0.62，經過五個月試驗後，有機質上升0.04~0.44；高風化土壤有機質初始為0.23，經過五個月試驗後，有機質上升0.25~0.45；均以【對照組+生物炭】上升幅度最小，【培地茅】上升幅度最大。

表4.2.3-1 試驗五個月土壤基本性質-pH 值

| 試驗名稱 |                 | 111/05/20 | 111/06/23 | 111/08/25 | 111/10/21 |
|------|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|      |                 | 初始        | 一個月       | 三個月       | 五個月       |
| 低風化  | 培地茅+ 生物炭 2.5%   | 8.20      | 8.21      | 7.58      | 7.26      |
|      | 培地茅             |           | 8.31      | 7.58      | 7.31      |
|      | 對照組+生物炭         |           | 8.20      | 7.63      | 7.35      |
|      | 對照組             |           | 8.33      | 7.86      | 7.37      |
| 高風化  | 培地茅+ 生物炭        | 8.42      | 8.02      | 7.91      | 7.21      |
|      | 培地茅             |           | 8.00      | 7.59      | 7.42      |
|      | 對照組+生物炭生物炭 2.5% |           | 8.01      | 7.71      | 7.37      |
|      | 對照組             |           | 8.05      | 7.56      | 7.57      |

表4.2.3-2 試驗五個月土壤基本性質-導電度( $\mu\text{S/cm}$ )

| 試驗名稱 |                 | 111/05/20 | 111/06/23 | 111/08/25 | 111/10/21 |
|------|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|      |                 | 初始        | 一個月       | 三個月       | 五個月       |
| 低風化  | 培地茅+ 生物炭 2.5%   | 178.67    | 178.33    | 120.97    | 112.17    |
|      | 培地茅             |           | 82.27     | 100.97    | 107.97    |
|      | 對照組+生物炭         |           | 145.30    | 201.67    | 103.43    |
|      | 對照組             |           | 88.23     | 123.10    | 86.23     |
| 高風化  | 培地茅+ 生物炭        | 105.43    | 152.37    | 233.80    | 232.00    |
|      | 培地茅             |           | 105.33    | 172.93    | 173.97    |
|      | 對照組+生物炭生物炭 2.5% |           | 127.03    | 233.80    | 151.40    |
|      | 對照組             |           | 120.00    | 424.33    | 314.67    |

表4.2.3-3 試驗五個月土壤基本性質-有機質(%)

| 試驗名稱 |                 | 111/05/20 | 111/06/23 | 111/08/25 | 111/10/21 |
|------|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|      |                 | 初始        | 一個月       | 三個月       | 五個月       |
| 低風化  | 培地茅+ 生物炭 2.5%   | 0.62      | 0.37      | 0.15      | 0.73      |
|      | 培地茅             |           | 0.44      | 0.31      | 1.06      |
|      | 對照組+生物炭         |           | 0.41      | 0.17      | 0.66      |
|      | 對照組             |           | 0.38      | 0.29      | 0.93      |
| 高風化  | 培地茅+ 生物炭        | 0.23      | 0.79      | 0.97      | 0.54      |
|      | 培地茅             |           | 0.66      | 2.03      | 0.68      |
|      | 對照組+生物炭生物炭 2.5% |           | 0.44      | 2.03      | 0.48      |
|      | 對照組             |           | 0.29      | 1.45      | 0.62      |



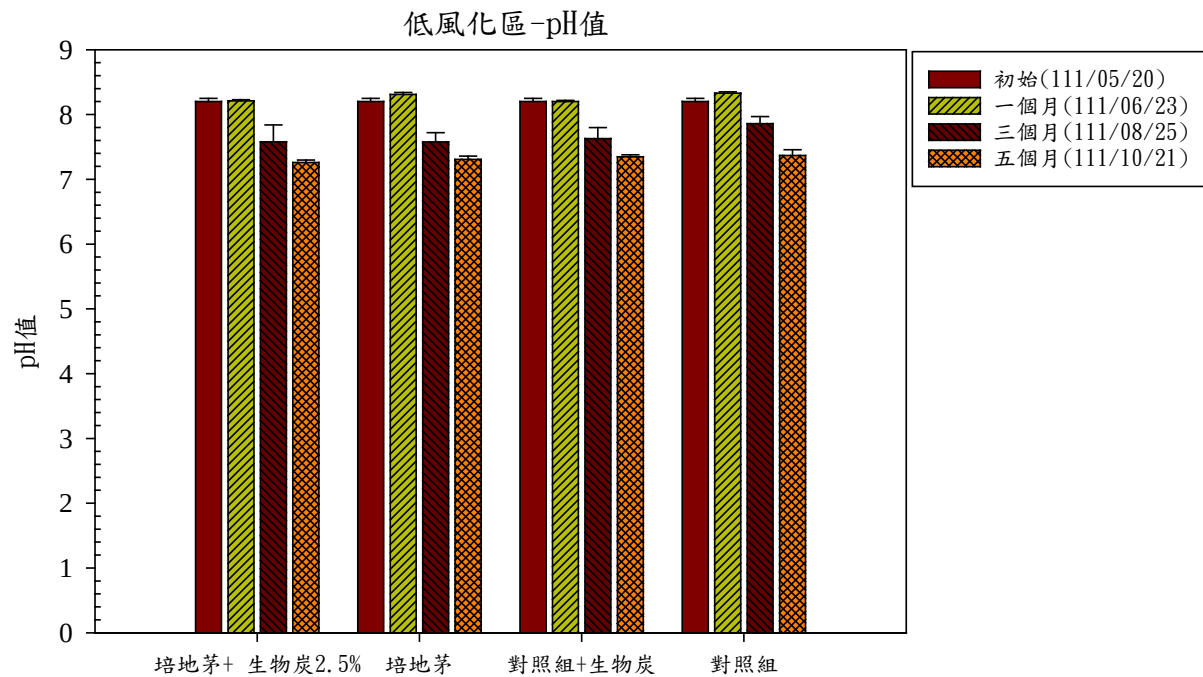


圖4.2.3-1 【低風化區】試驗五個月土壤 pH 值變化

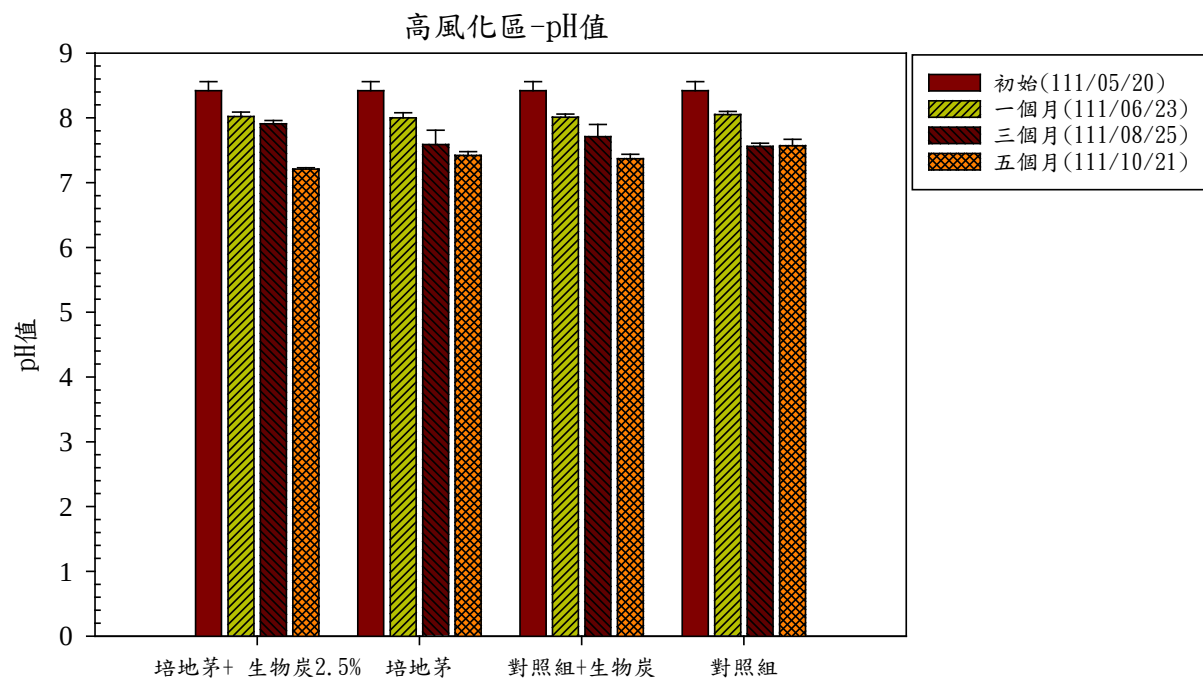


圖4.2.3-2 【高風化區】試驗五個月土壤 pH 值變化



## 第四章 執行成果

## 油污染土壤綠色整治及創造循環經濟效益

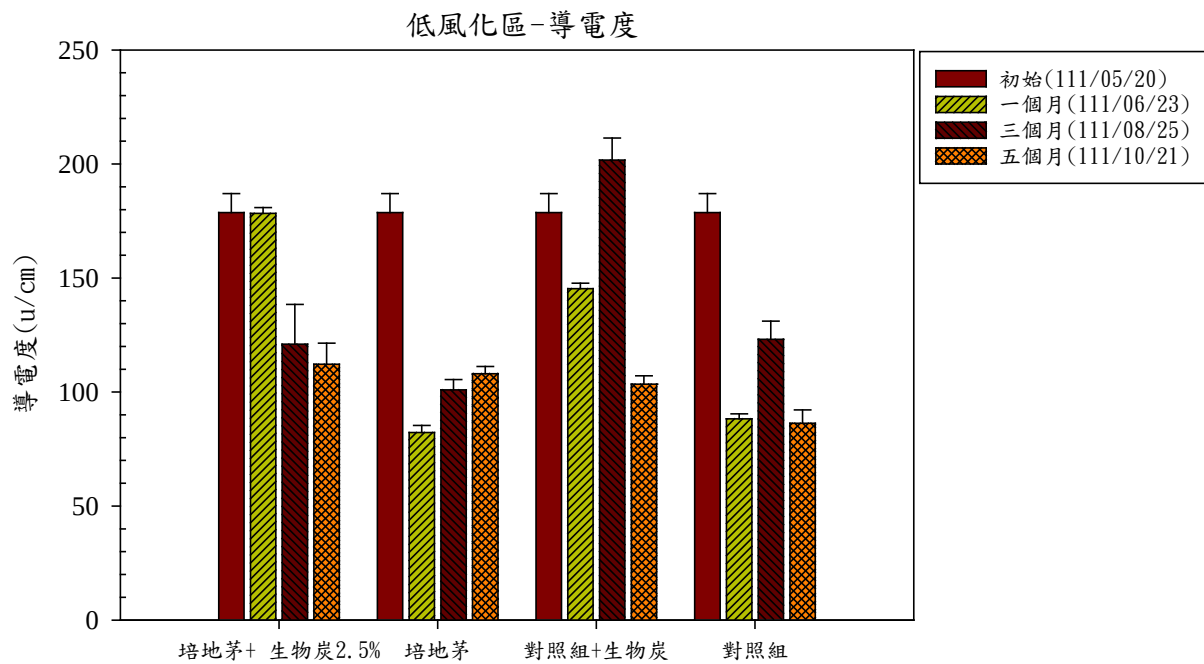


圖4.2.3-3 【低風化區】試驗五個月土壤導電度變化

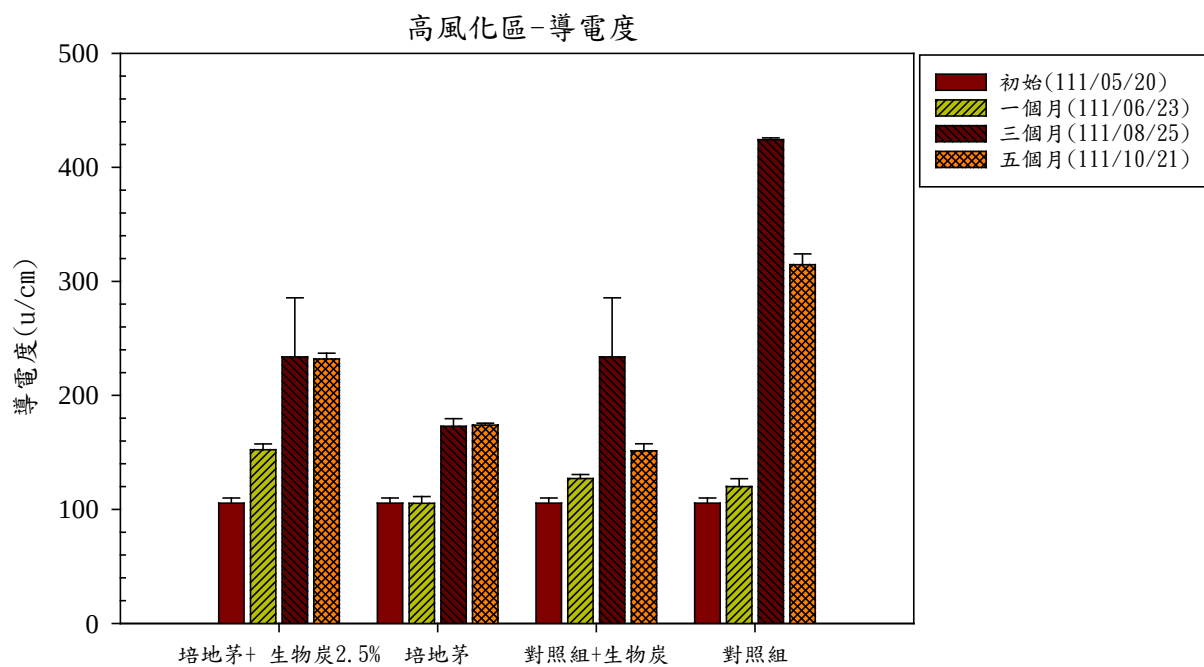


圖4.2.3-4 【高風化區】試驗五個月土壤導電度變化

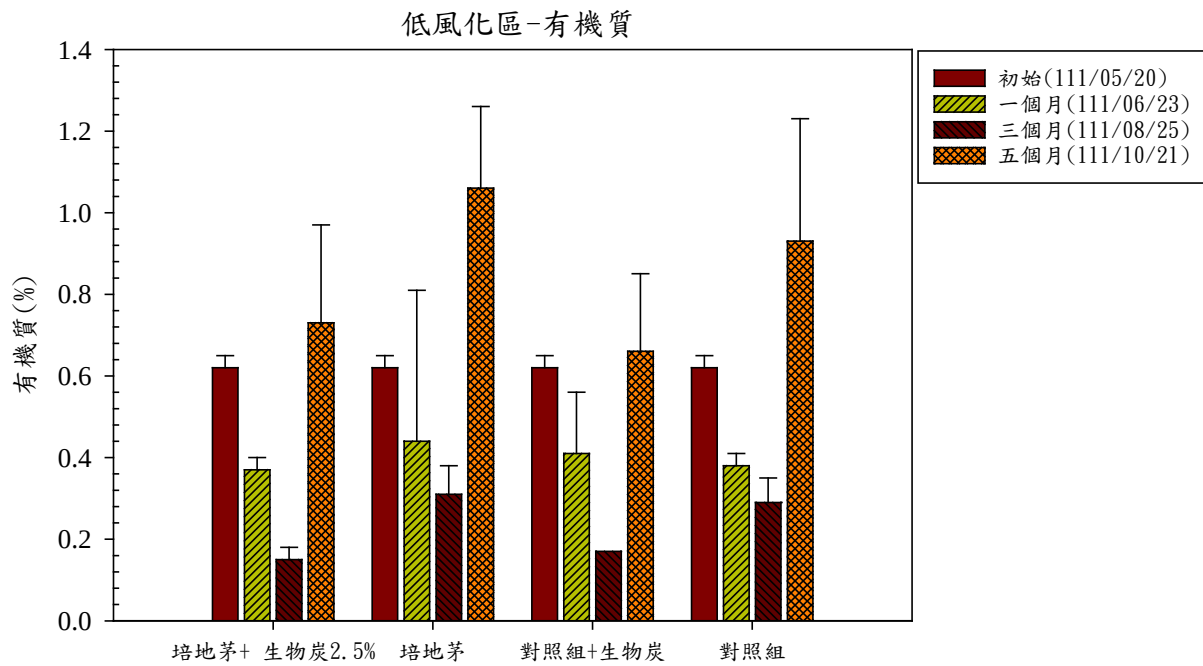


圖4.2.3-5 【低風化區】試驗五個月土壤有機質變化

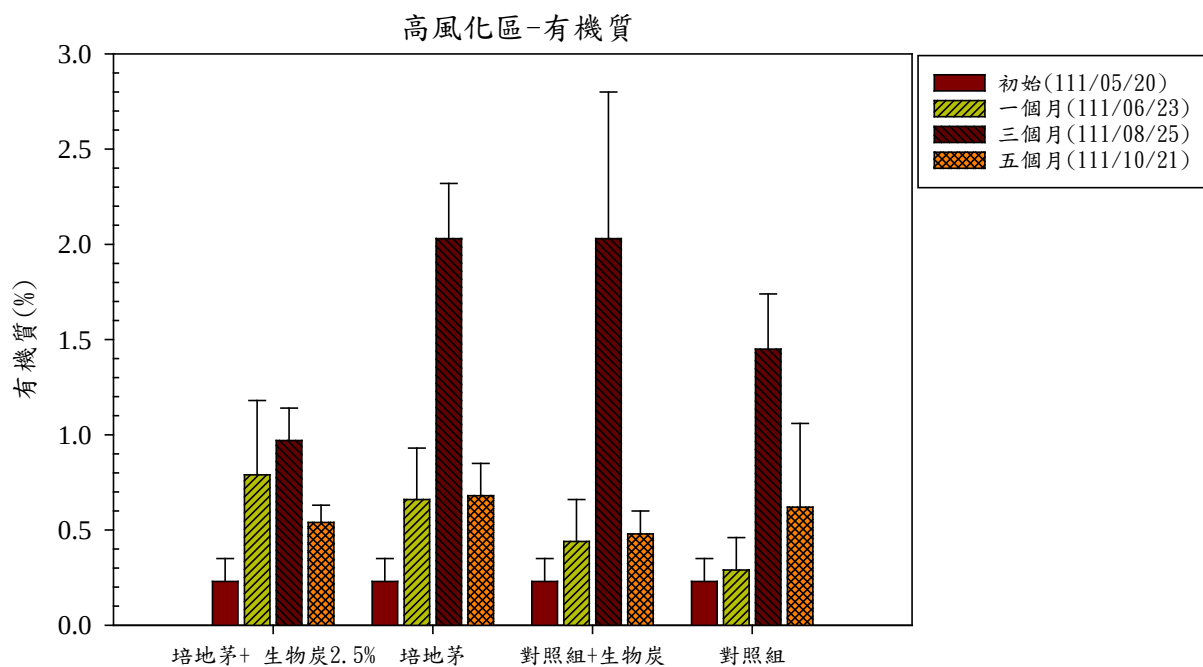


圖4.2.3-6 【高風化區】試驗五個月土壤有機質變化





#### 4.2.4 現地試驗根圈土壤 TPH 濃度變化

本計畫現地栽種試驗是取開挖較久之高風化土壤及新開挖之低風化土壤，試驗前分析兩種土壤濃度，低風化區土壤試驗前 TPH 平均濃度為1792.12 mg/kg，高風化區土壤試驗前 TPH 平均濃度為2188.28 mg/kg。分別將此兩種土壤填入試驗區，將試驗區域劃分為1.25 m×1 m 的方格，每1方格為1試驗區塊，並給予每區塊編號，【低風化區-培地茅+生物炭2.5%】組共種植16個區塊，為編號 A1~A8及 B1~B8；【低風化區-培地茅】組共種植16個區塊，為編號 C1~C8及 D1~D8；【低風化區-對照組+生物炭2.5%】組分配4個區塊，為編號 A9~A10及 B9~B10；【低風化區-對照組】組分配4個區塊，為編號 C9~C10及 D9~D10，【高風化區-培地茅+生物炭2.5%】組共種植16個區塊，為編號 E1~E8及 F1~F8；【高風化區-培地茅】組共種植16個區塊，為編號 G1~G8及 H1~H8；【高風化區-對照組+生物炭2.5%】組分配4個區塊，為編號 E9~E10及 F9~F10；【高風化區-對照組】組分配4個區塊，為編號 G9~G10及 H9~H10。

試驗於111年6月23日種植5週時進行根圈土壤採樣，分析各區塊之 TPH 濃度，分析結果如表4.2.4-1，各區塊間濃度略有差異，顯示土壤間仍有相當的不均質性。【低風化區-培地茅+生物炭2.5%】組最低濃度為84.29 mg/kg，最高濃度為1461.24 mg/kg，平均濃度為930.77 mg/kg；【低風化區-培地茅】最低濃度為152.74 mg/kg，最高濃度為1545.36 mg/kg，平均濃度為882.00 mg/kg；【低風化區-對照組+生物炭2.5%】組最低濃度為786.74 mg/kg，最高濃度為973.04 mg/kg，平均濃度為856.77 mg/kg；【低風化區-對照組】組最低濃度為327.124 mg/kg，最高濃度為1011.69 mg/kg，平均濃度為720.54 mg/kg；【高風化區-培地茅+生物炭2.5%】組最低濃度為399.63 mg/kg，最高濃度為1612.61 mg/kg，平均濃度為1023.45 mg/kg；【高風化區-培地茅】最低濃度為648.47 mg/kg，最高濃度為2190.98 mg/kg，平均濃度為1148.42 mg/kg；【高風化區-對照組+生物炭2.5%】組最低濃度為745.71 mg/kg，最高濃度為1338.44 mg/kg，平均濃度為1040.33 mg/kg；【高風化區-對照組】組最低濃度為1077.65 mg/kg，最高濃度為1575.16 mg/kg，平均濃度為1340.59 mg/kg。

試驗於111年8月25日種植14週時進行根圈土壤採樣，分析各區塊之 TPH 濃度，分析結果如表4.2.4-2。同樣顯示各區塊間濃度略有差異，顯示土壤間仍有相當的不均質性。【低風化區-培地茅+生物炭2.5%】組最低濃度為440.65 mg/kg，最高濃度為1185.38 mg/kg，平均濃度為846.34 mg/kg；【低風化區-培地茅】最低濃度



為510.35 mg/kg，最高濃度為1409.33 mg/kg，平均濃度為740.65 mg/kg；【低風化區-對照組+生物炭2.5%】組最低濃度為771.82 mg/kg，最高濃度為929.76 mg/kg，平均濃度為829.08 mg/kg；【低風化區-對照組】組最低濃度為359.37 mg/kg，最高濃度為846.65 mg/kg，平均濃度為578.41 mg/kg；【高風化區-培地茅+生物炭2.5%】組最低濃度為793.05 mg/kg，最高濃度為1260.46 mg/kg，平均濃度為1043.73 mg/kg；【高風化區-培地茅】最低濃度為842.46 mg/kg，最高濃度為1421.20 mg/kg，平均濃度為1143.69 mg/kg；【高風化區-對照組+生物炭2.5%】組最低濃度為1099.08 mg/kg，最高濃度為1161.96 mg/kg，平均濃度為1129.36 mg/kg；；【高風化區-對照組】組最低濃度為812.59 mg/kg，最高濃度為1038.08 mg/kg，平均濃度為917.86 mg/kg。

表4.2.3-4 現地試驗五週時根圈土壤 TPH 濃度

| 低風化區             |         |     |         |                  |        |      |         | 高風化區             |         |     |         |                  |         |      |         |
|------------------|---------|-----|---------|------------------|--------|------|---------|------------------|---------|-----|---------|------------------|---------|------|---------|
| 培地茅<br>+生物炭 2.5% |         | 培地茅 |         | 對照組<br>+生物炭 2.5% |        | 對照組  |         | 培地茅<br>+生物炭 2.5% |         | 培地茅 |         | 對照組<br>+生物炭 2.5% |         | 對照組  |         |
| 編號               | 濃度      | 編號  | 濃度      | 編號               | 濃度     | 編號   | 濃度      | 編號               | 濃度      | 編號  | 濃度      | 編號               | 濃度      | 編號   | 濃度      |
| A-1              | 84.29   | C-1 | 496.88  | A-9              | 768.74 | C-9  | 747.06  | E-1              | 1187.87 | G-1 | 938.02  | E-9              | 1338.44 | G-9  | 1183.44 |
| A-2              | 790.56  | C-2 | 1545.36 | A-10             | 913.49 | C-10 | 327.12  | E-2              | 1425.45 | G-2 | 1023.93 | E-10             | 745.74  | G-10 | 1575.16 |
| A-3              | 450.44  | C-3 | 1453.48 | B-9              | 973.04 | D-9  | 1011.69 | E-3              | 990.36  | G-3 | 1226.26 | F-9              | 755.23  | H-9  | 1077.65 |
| A-4              | 1406.26 | C-4 | 295.63  | B-10             | 771.79 | D-10 | 796.30  | E-4              | 399.63  | G-4 | 648.47  | F-10             | 1321.92 | H-10 | 1526.09 |
| A-5              | 598.32  | C-5 | 837.01  |                  |        |      |         | E-5              | 989.79  | G-5 | 1102.51 |                  |         |      |         |
| A-6              | 1152.10 | C-6 | 293.04  |                  |        |      |         | E-6              | 720.38  | G-6 | 2190.98 |                  |         |      |         |
| A-7              | 1029.70 | C-7 | 1034.86 |                  |        |      |         | E-7              | 874.39  | G-7 | 1283.21 |                  |         |      |         |
| A-8              | 1158.75 | C-8 | 983.18  |                  |        |      |         | E-8              | 667.96  | G-8 | 895.41  |                  |         |      |         |
| B-1              | 520.33  | D-1 | 152.74  |                  |        |      |         | F-1              | 938.95  | H-1 | 1386.35 |                  |         |      |         |
| B-2              | 650.00  | D-2 | 618.36  |                  |        |      |         | F-2              | 1287.74 | H-2 | 1310.90 |                  |         |      |         |
| B-3              | 470.27  | D-3 | 650.76  |                  |        |      |         | F-3              | 1232.95 | H-3 | 1791.25 |                  |         |      |         |
| B-4              | 1587.32 | D-4 | 607.73  |                  |        |      |         | F-4              | 769.06  | H-4 | 1562.05 |                  |         |      |         |
| B-5              | 995.16  | D-5 | 1245.93 |                  |        |      |         | F-5              | 1080.53 | H-5 | 848.99  |                  |         |      |         |
| B-6              | 1107.33 | D-6 | 1258.76 |                  |        |      |         | F-6              | 844.31  | H-6 | 438.92  |                  |         |      |         |
| B-7              | 1430.17 | D-7 | 1357.35 |                  |        |      |         | F-7              | 1353.26 | H-7 | 801.66  |                  |         |      |         |
| B-8              | 1461.24 | D-8 | 1280.86 |                  |        |      |         | F-8              | 1612.61 | H-8 | 925.85  |                  |         |      |         |
| 平均               | 930.77  | 平均  | 882.00  | 平均               | 856.77 | 平均   | 720.54  | 平均               | 1023.45 | 平均  | 1148.42 | 平均               | 1040.33 | 平均   | 1340.59 |

註：TPH 濃度單位：mg/kg



表4.2.3-5 現地試驗十四週時根圈土壤 TPH 濃度

| 低風化區             |         |     |         |                  |        |      |        | 高風化區             |         |     |         |                  |         |      |         |
|------------------|---------|-----|---------|------------------|--------|------|--------|------------------|---------|-----|---------|------------------|---------|------|---------|
| 培地茅<br>+生物炭 2.5% |         | 培地茅 |         | 對照組<br>+生物炭 2.5% |        | 對照組  |        | 培地茅<br>+生物炭 2.5% |         | 培地茅 |         | 對照組<br>+生物炭 2.5% |         | 對照組  |         |
| 編號               | 濃度      | 編號  | 濃度      | 編號               | 濃度     | 編號   | 濃度     | 編號               | 濃度      | 編號  | 濃度      | 編號               | 濃度      | 編號   | 濃度      |
| A-1              | 440.65  | C-1 | 655.29  | A-9              | 929.76 | C-9  | 486.68 | E-1              | 886.91  | G-1 | 1012.90 | E-9              | 1155.27 | G-9  | 1038.08 |
| A-2              | 991.52  | C-2 | 1409.33 | A-10             | 818.55 | C-10 | 846.65 | E-2              | 908.37  | G-2 | 1076.28 | E-10             | 1161.96 | G-10 | 885.53  |
| A-3              | 1023.31 | C-3 | 892.73  | B-9              | 771.82 | D-9  | 359.37 | E-3              | 1132.59 | G-3 | 1251.91 | F-9              | 1099.08 | H-9  | 812.59  |
| A-4              | 855.48  | C-4 | 775.61  | B-10             | 796.18 | D-10 | 620.95 | E-4              | 998.79  | G-4 | 1275.26 | F-10             | 1101.12 | H-10 | 935.22  |
| A-5              | 1185.38 | C-5 | 879.31  |                  |        |      |        | E-5              | 1165.91 | G-5 | 1219.99 |                  |         |      |         |
| A-6              | 1005.44 | C-6 | 902.42  |                  |        |      |        | E-6              | 905.34  | G-6 | 1163.94 |                  |         |      |         |
| A-7              | 1044.47 | C-7 | 548.36  |                  |        |      |        | E-7              | 1066.36 | G-7 | 1134.83 |                  |         |      |         |
| A-8              | 839.55  | C-8 | 523.51  |                  |        |      |        | E-8              | 1132.74 | G-8 | 1086.44 |                  |         |      |         |
| B-1              | 519.64  | D-1 | 510.35  |                  |        |      |        | F-1              | 1096.92 | H-1 | 1116.62 |                  |         |      |         |
| B-2              | 541.29  | D-2 | 743.73  |                  |        |      |        | F-2              | 793.05  | H-2 | 1277.30 |                  |         |      |         |
| B-3              | 895.88  | D-3 | 511.44  |                  |        |      |        | F-3              | 924.57  | H-3 | 1421.20 |                  |         |      |         |
| B-4              | 1157.31 | D-4 | 429.77  |                  |        |      |        | F-4              | 1265.40 | H-4 | 1358.73 |                  |         |      |         |
| B-5              | 568.61  | D-5 | 938.41  |                  |        |      |        | F-5              | 950.17  | H-5 | 984.92  |                  |         |      |         |
| B-6              | 800.86  | D-6 | 592.29  |                  |        |      |        | F-6              | 1182.58 | H-6 | 1230.18 |                  |         |      |         |
| B-7              | 734.69  | D-7 | 798.30  |                  |        |      |        | F-7              | 1260.46 | H-7 | 842.46  |                  |         |      |         |
| B-8              | 937.30  | D-8 | 739.57  |                  |        |      |        | F-8              | 1029.46 | H-8 | 846.05  |                  |         |      |         |
| 平均               | 846.34  | 平均  | 740.65  | 平均               | 829.08 | 平均   | 578.41 | 平均               | 1043.73 | 平均  | 1143.69 | 平均               | 1129.36 | 平均   | 917.86  |

註：TPH 濃度單位：mg/kg



### 4.2.5 各試驗根圈土壤 TPH 濃度變化

依據種植第5週及第14週之土壤 TPH 檢測數據顯示，土壤雖然在試驗前已經篩選過，但 TPH 濃度之不均質性仍相當高，又因試驗土壤濃度不是很高，受 TPH 不均質性影響，濃度變化差異不太容易釐清。為了降低空間不均質性的因素，本計畫針對各試驗組，依據前二次分析結果，各試驗組各選擇高中低濃度分布不同的三個區塊進行根圈土壤的監測。

低風化區各試驗根圈土壤 TPH 濃度如表4.2.5-1及圖4.2.5-1至圖4.2.5-4。低風化區的【培地茅+生物炭2.5%】試驗組，土壤初始平均濃度為778.76 mg/kg，三個月時根圈土壤 TPH 平均濃度為624.39 mg/kg，降解率為19.51%，七個月時土壤 TPH 平均濃度為428.49 mg/kg，降解率為44.77%。【培地茅】試驗組土壤初始平均濃度為874.64 mg/kg，三個月時根圈土壤 TPH 平均濃度為658.90 mg/kg，降解率為24.67%，七個月時土壤 TPH 平均濃度為560.97 mg/kg，降解率為35.86%。【對照組+生物炭2.5】試驗組土壤初始平均濃度為832.15 mg/kg，三個月時根圈土壤 TPH 平均濃度為621.38 mg/kg，降解率為25.33%，七個月時土壤 TPH 平均濃度為482.48 mg/kg，降解率為42.02%。【對照組】試驗組土壤初始平均濃度為838.65 mg/kg，三個月時根圈土壤 TPH 平均濃度為610.15 mg/kg，降解率為37.70%，七個月時土壤 TPH 平均濃度為353.02 mg/kg，降解率為63.95%。

高風化區各試驗根圈土壤 TPH 濃度如表4.2.5-2及圖4.2.5-5至圖4.2.5-8。低風化區的【培地茅+生物炭2.5%】試驗組，土壤初始平均濃度為1521.75 mg/kg，三個月時根圈土壤 TPH 平均濃度為791.21 mg/kg，降解率為48.01%，七個月時土壤 TPH 平均濃度為881.45 mg/kg，降解率為42.08%。【培地茅】試驗組土壤初始平均濃度為1558.22 mg/kg，三個月時根圈土壤 TPH 平均濃度為814.46 mg/kg，降解率為47.73%，七個月時土壤 TPH 平均濃度為1153.90 mg/kg，降解率為29.95%。【對照組+生物炭2.5】試驗組土壤初始平均濃度為1138.37 mg/kg，三個月時根圈土壤 TPH 平均濃度為864.18 mg/kg，降解率為24.09%，七個月時土壤 TPH 平均濃度為805.01 mg/kg，降解率為29.28%。【對照組】試驗組土壤初始平均濃度為1277.04 mg/kg，三個月時根圈土壤 TPH 平均濃度為844.33 mg/kg，降解率為33.88%，七個月時土壤 TPH 平均濃度為1003.23 mg/kg，降解率為21.44%。



表4.2.5-1 低風化區根圈土壤 TPH 濃度

| 試驗組  |              | 編號  | TPHd (mg/kg) |           |           |           |           |
|------|--------------|-----|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|      |              |     | 111/05/20    | 111/06/23 | 111/08/25 | 111/10/21 | 111/12/23 |
| 低風化區 | 培地茅+生物炭 2.5% | A1  | 396.62       | 323.37    | 216.33    | 211.92    | 211.57    |
|      |              | A5  | 704.00       | 728.28    | 970.57    | 502.30    | 469.93    |
|      |              | B8  | 1226.67      | 637.98    | 686.26    | 609.17    | 603.97    |
|      |              | 平均  | 775.76       | 563.21    | 624.39    | 441.13    | 428.49    |
|      | 培地茅          | C2  | 916.03       | 959.32    | 1162.89   | 1171.90   | 1180.62   |
|      |              | C5  | 837.03       | 845.09    | 520.58    | 470.82    | 340.47    |
|      |              | D1  | 870.87       | 318.71    | 293.24    | 263.66    | 161.81    |
|      |              | 平均  | 874.64       | 707.71    | 658.90    | 635.46    | 560.97    |
|      | 對照組+生物炭 2.5% | A9  | 839.22       | 625.78    | 575.22    | 594.75    | 535.33    |
|      |              | B9  | 969.73       | 643.90    | 673.44    | 471.74    | 500.63    |
|      |              | B10 | 687.49       | 758.89    | 615.48    | 473.37    | 411.49    |
|      |              | 平均  | 832.15       | 676.19    | 621.38    | 513.29    | 482.48    |
|      | 對照組          | C10 | 979.35       | 785.04    | 916.22    | 795.15    | 493.73    |
|      |              | D9  | 783.61       | 625.49    | 240.48    | 511.70    | 322.42    |
|      |              | D10 | 752.98       | 502.92    | 673.74    | 422.51    | 242.90    |
|      |              | 平均  | 838.65       | 637.82    | 610.15    | 576.45    | 353.02    |



表4.2.5-2 高風化區根圈土壤 TPH 濃度

| 試驗組  |              | 編號  | TPHd (mg/kg) |           |           |           |           |
|------|--------------|-----|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|      |              |     | 111/05/20    | 111/06/23 | 111/08/25 | 111/10/21 | 111/12/23 |
| 高風化區 | 培地茅+生物炭 2.5% | E8  | 1195.45      | 3719.01   | 1071.14   | 873.07    | 780.23    |
|      |              | F5  | 2094.34      | 986.19    | 755.45    | 785.00    | 792.99    |
|      |              | F8  | 1275.45      | 961.07    | 547.04    | 708.95    | 1071.14   |
|      |              | 平均  | 1521.75      | 1888.76   | 791.21    | 789.01    | 881.45    |
|      | 培地茅          | G4  | 1156.78      | 893.88    | 702.35    | 452.31    | 565.33    |
|      |              | G6  | 1528.53      | 1783.03   | 909.94    | 859.98    | 1087.66   |
|      |              | H1  | 1989.36      | 932.04    | 831.08    | 1057.09   | 1808.72   |
|      |              | 平均  | 1558.22      | 1202.98   | 814.46    | 789.79    | 1153.90   |
|      | 對照組+生物炭 2.5% | E9  | 1123.88      | 771.16    | 925.13    | 943.95    | 561.18    |
|      |              | F9  | 1153.86      | 869.78    | 778.19    | 848.12    | 840.84    |
|      |              | F10 | 1137.36      | 1132.42   | 889.21    | 986.24    | 1013.01   |
|      |              | 平均  | 1138.37      | 924.45    | 864.18    | 926.10    | 805.01    |
|      | 對照組          | G10 | 1183.56      | 866.21    | 645.12    | 823.70    | 917.04    |
|      |              | H9  | 1219.50      | 821.66    | 959.14    | 966.99    | 1323.62   |
|      |              | H10 | 1428.06      | 913.91    | 928.73    | 960.06    | 769.02    |
|      |              | 平均  | 1277.04      | 867.26    | 844.33    | 916.92    | 1003.23   |



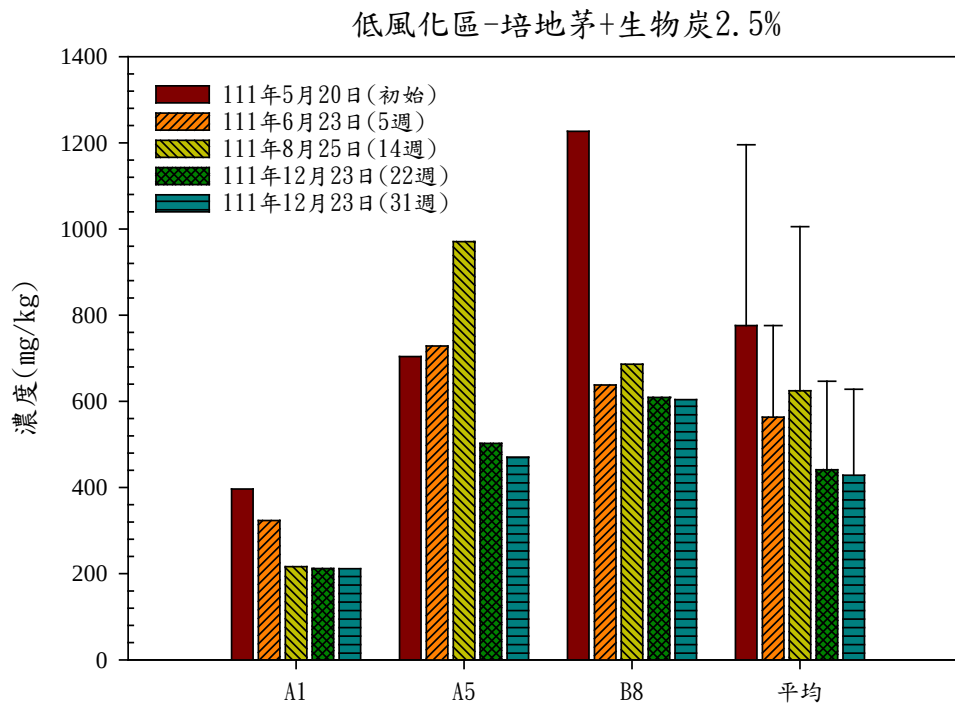


圖4.2.5-1 低風化區【培地茅+生物炭2.5%】根圈土壤 TPH 濃度變化

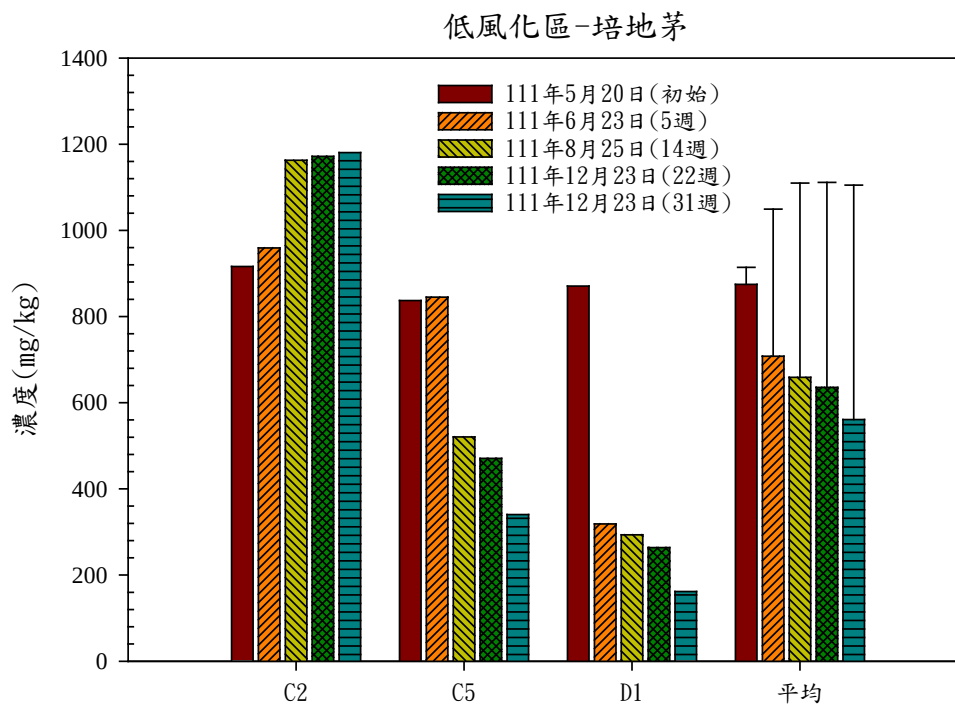


圖4.2.5-2 低風化區【培地茅】根圈土壤 TPH 濃度變化

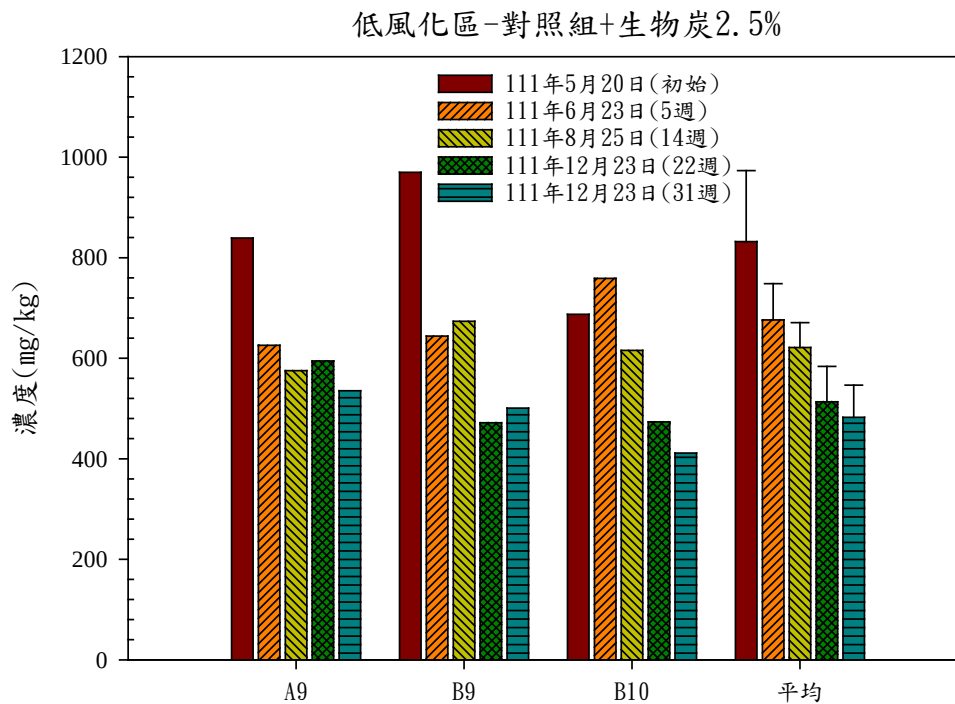


圖4.2.5-3 低風化區【對照組+生物炭2.5%】根圈土壤 TPH 濃度變化

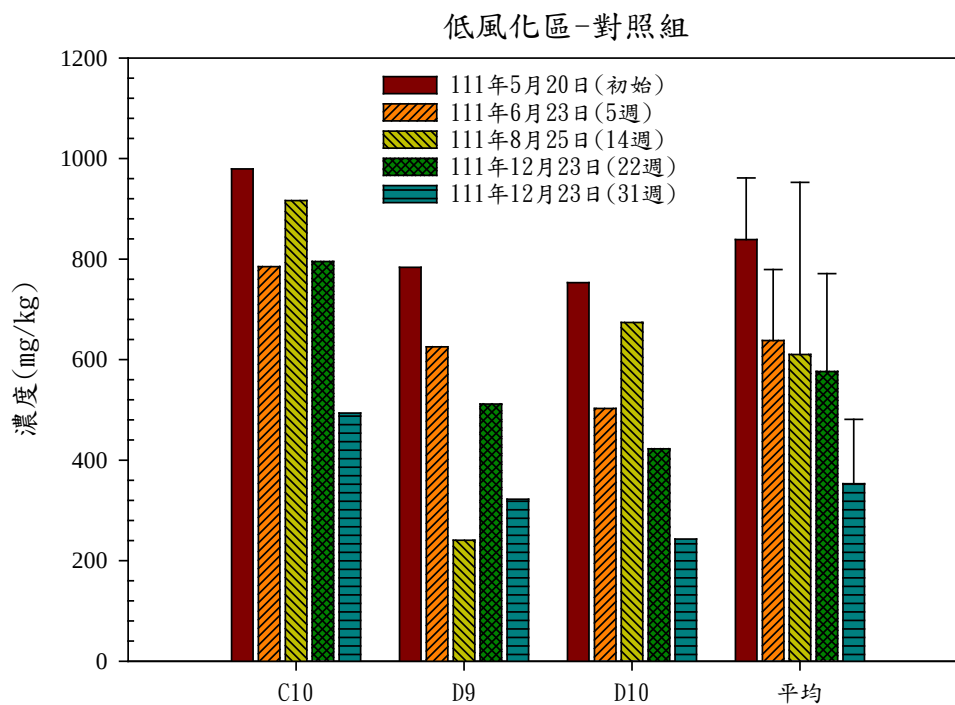


圖4.2.5-4 低風化區【對照組】根圈土壤 TPH 濃度變化

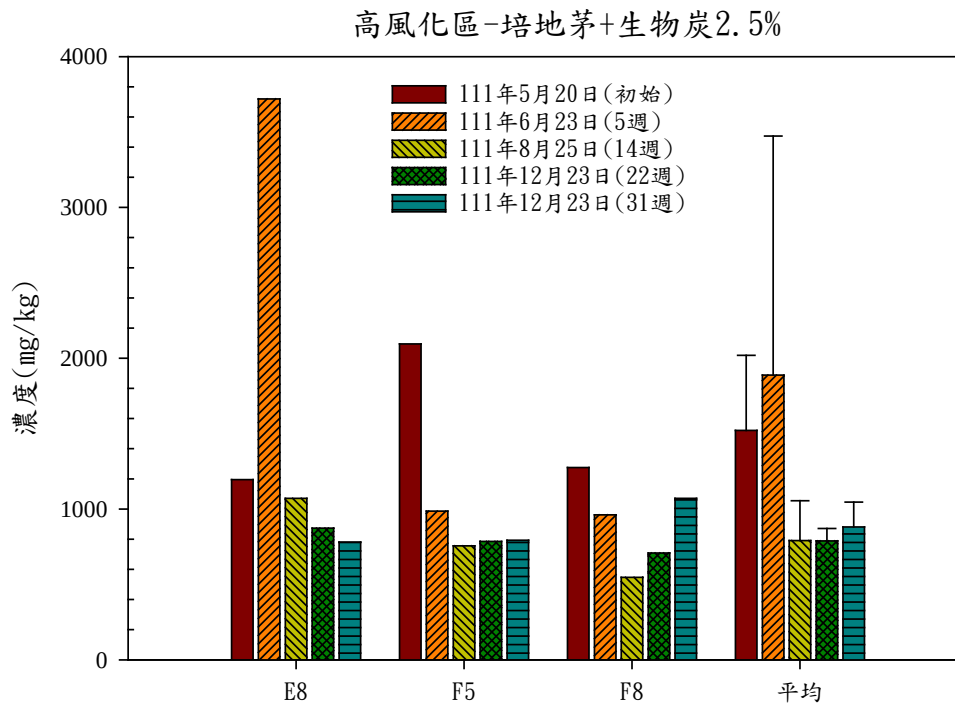


圖4.2.5-5 高風化區【培地茅+生物炭2.5%】根圈土壤 TPH 濃度變化

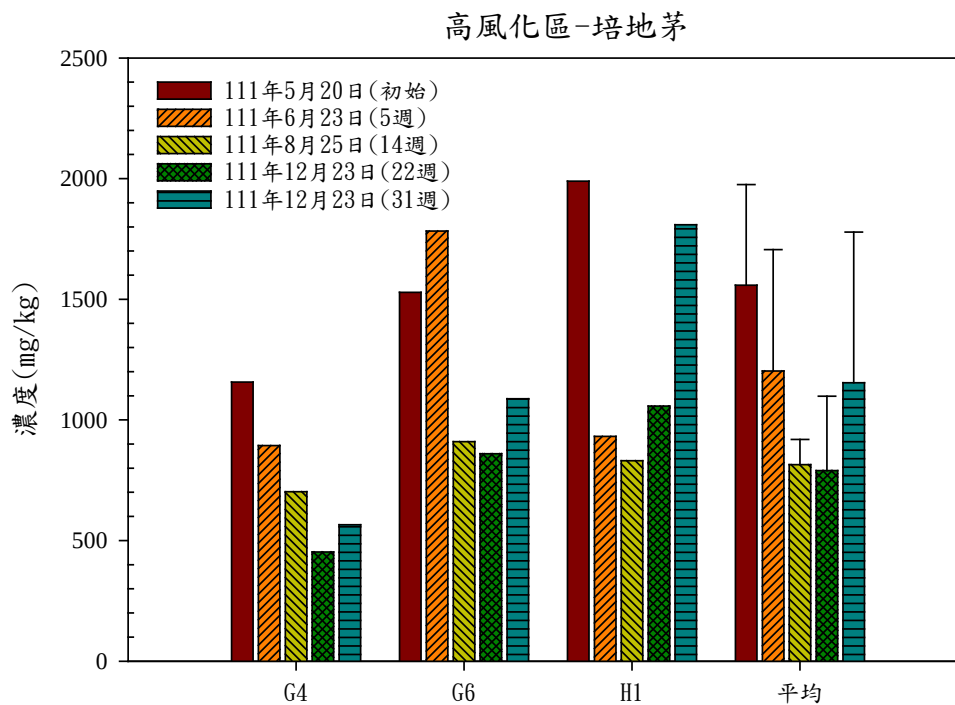


圖4.2.5-6 高風化區【培地茅】根圈土壤 TPH 濃度變化

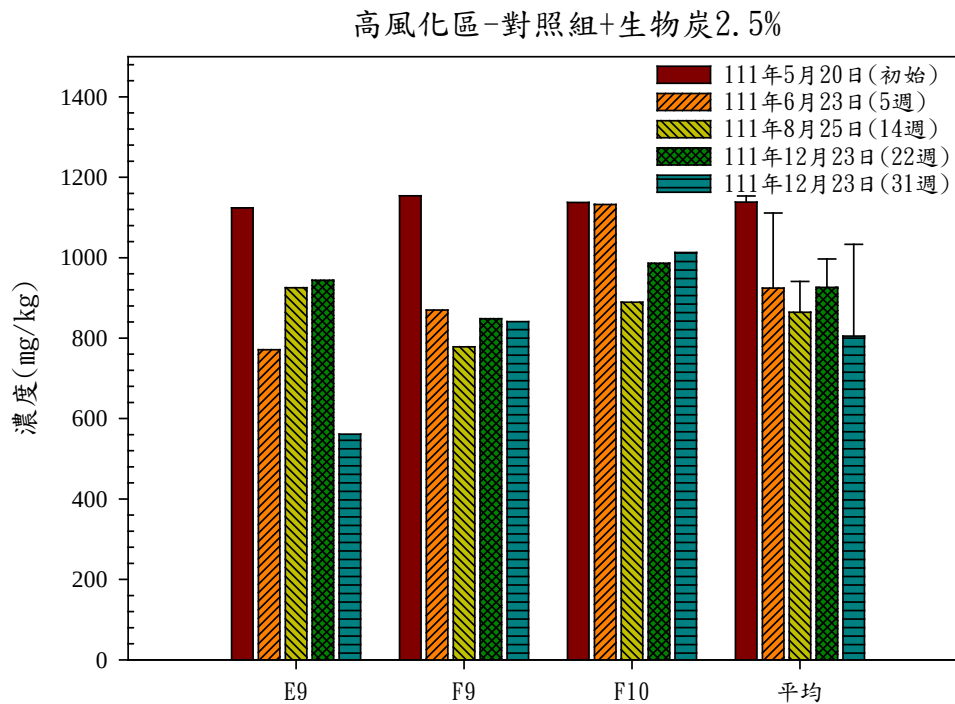


圖4.2.5-7 高風化區【對照組+生物炭2.5%】根圈土壤 TPH 濃度變化

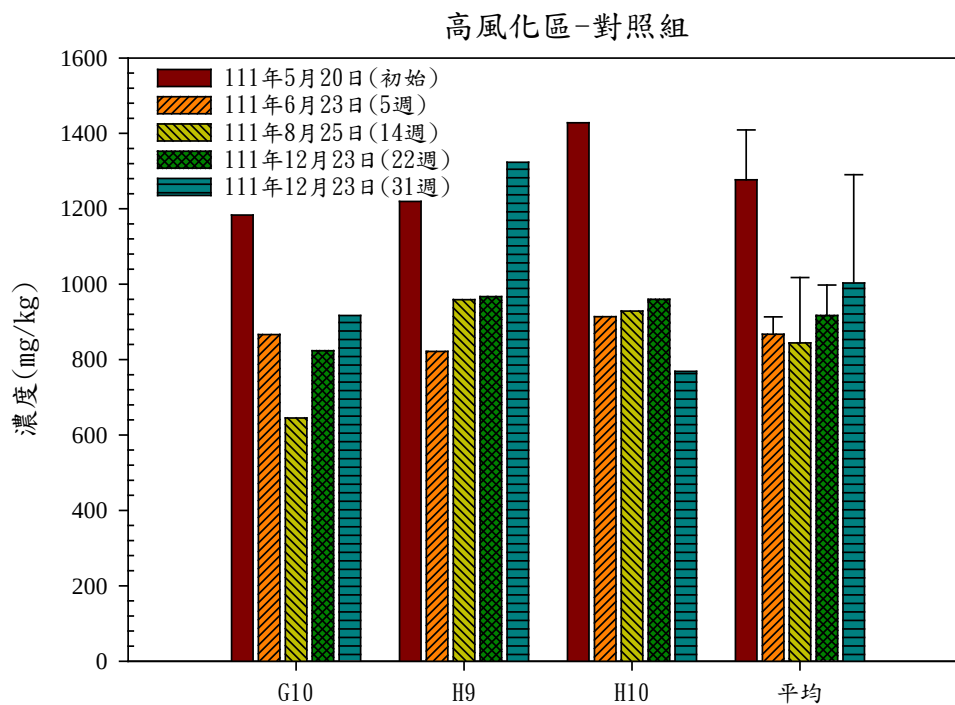


圖4.2.5-8 高風化區【對照組】根圈土壤 TPH 濃度變化





### 4.3 培地茅植體再利用效益開發

為達資源循環零廢棄目的，本研究將培地茅植體地上部以高溫裂解燒製生炭，培地茅地下部根的部分，則以超臨界萃取方式萃取精油，評估其再利用效益，兩者分別敘述如下：

#### 4.3.1 製備生物炭

本研究使用培地茅製備生物炭，培地茅來源為生長於中油公司高雄煉油廠兩年之培地茅植體地上部，利用高溫爐在無氧環境下以550°C 進行熱裂解1小時，製備照片如圖4.3.1-1。2公斤乾基培地茅，約可產出600公克生物炭，產率約三成。

以本計畫培地茅之種植密度，每平方公尺1叢，以及風化土壤添加2.5%生物炭，每平方米每半年生產培地茅3.64公斤計算，每公頃土地每年可生產培地茅植體72.8公噸。本研究以元素分析儀量測培地茅之碳元素含量，培地茅植體碳元素含量約佔40%。依此含量計算，TPH 污染場址種植培地茅，培地茅植體每年可以捕捉29.12公噸的碳元素，相當於106.8公噸二氧化碳。土壤添加2.5%生物炭，假設生物炭之碳含量佔50%；土壤添加生物炭深度為30公分，土壤密度以1.5 ton/m<sup>3</sup>計算， $10000\text{ m}^2/\text{ha} \times 0.3\text{ m} \times 1.5\text{ ton}/\text{m}^3 \times 2.5\% \times 50\% \times 44/12 = 206.25\text{ ton CO}_2$ ，經計算結果，每公頃土地土壤每次生物炭添加2.5%，可儲存206.25公噸的二氧化碳。土壤添加生物炭可促進 TPH 分解，可增加培地茅產量，又可達到農業廢棄物循環利用及碳儲存之作用，具有多重效益。至於生物炭在土壤中之穩定性，以及生物炭施用頻率，後續可持續探討。

本計畫以熱卡計測量培地茅之燃燒熱值。試驗結果，培地茅燃燒熱值約為15.94 kJ/g。依本研究試驗結果計算，每年每公頃之培地茅若作為燃料使用，可提供1160.43 GJ 熱能。



#### 第四章 執行成果

#### 油污染土壤綠色整治及創造循環經濟效益

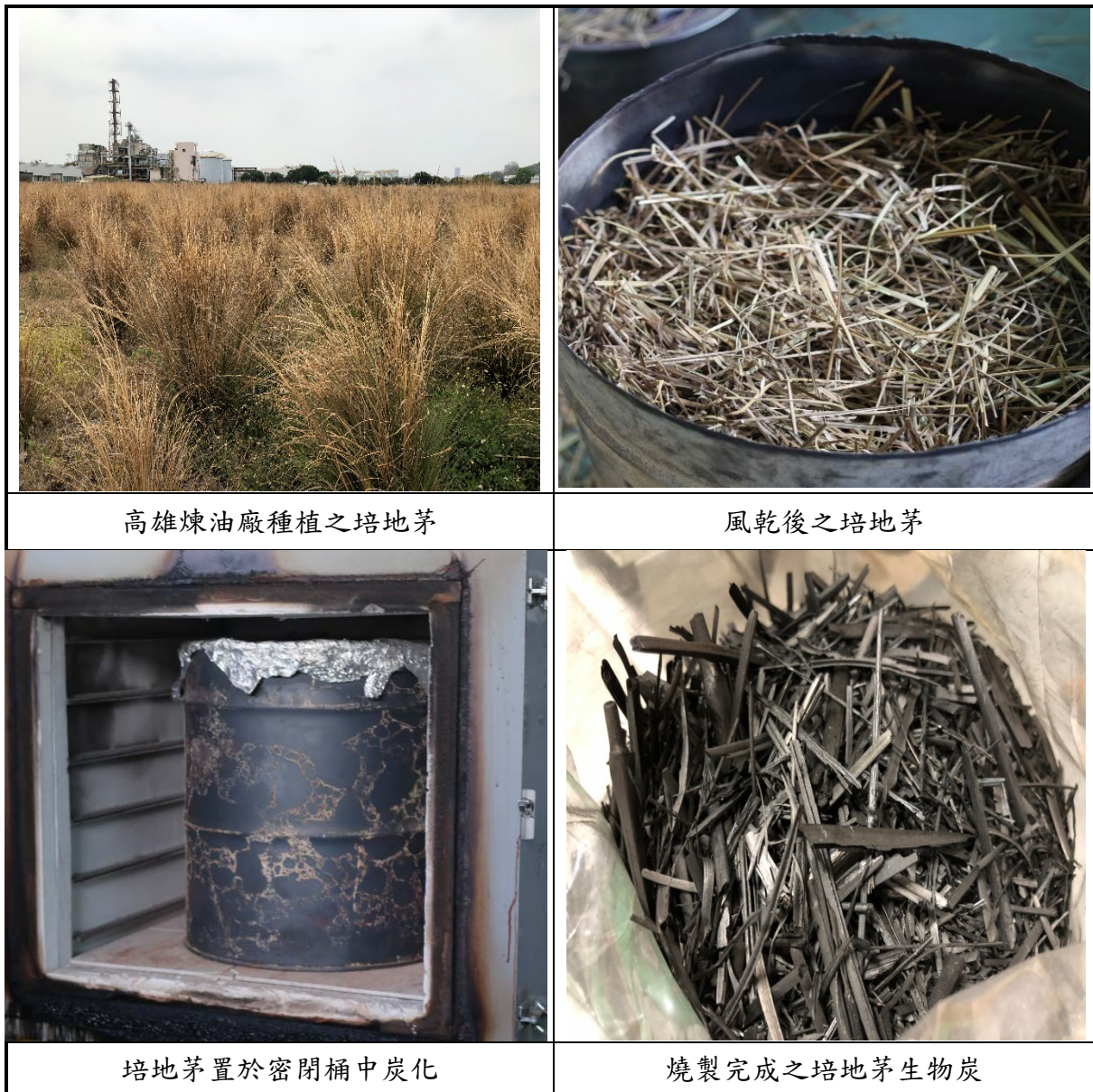


圖4.3.1-1 生物炭製備照片



### 4.3.2 精油提煉技術開發

本計畫利用超臨界萃取方式進行培地茅精油萃取，總共試驗9批次，結果如表4.3.2-1，培地茅精油萃取率最低為0.75%；最高可達1.64%。依本研究試驗結果計算，每年每公頃之培地茅可提取約1.16公噸精油。

表4.3.2-1 培地茅精油萃取率

| 批次             | 1       | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8      | 9    |
|----------------|---------|------|------|------|------|------|------|--------|------|
| 樣品重<br>(g 粉碎前) | 1905    | 2275 | 1850 | 2745 | 1800 | 2405 | 2190 | 3340   | 1700 |
| 樣品重<br>(g 粉碎後) | 1750    | 1950 | 1650 | 2300 | 1700 | 1900 | 1800 | 2284.4 | 1600 |
| 萃取溫度           | 70 °C   |      |      |      |      |      |      |        |      |
| 萃取壓力           | 270 psi |      |      |      |      |      |      |        |      |
| 萃取時間           | 16 hrs  |      |      |      |      |      |      |        |      |
| 萃餘料<br>樣品重(g)  | 1580    | 1800 | 1480 | 2100 | 1650 | 1800 | 1650 | 2000   | 1500 |
| 精油量(g)         | 18.3    | 24.4 | 12.4 | 26.2 | 27.5 | 28.1 | 22.5 | 37.5   | 25   |
| 萃取率(%)         | 1.05    | 1.25 | 0.75 | 1.14 | 1.62 | 1.48 | 1.25 | 1.64   | 1.56 |



## 4.4 油污染土壤再生多孔性材料處理富砷地下水源處理技術開發

### 4.4.1 不同批次旋轉窯結圈石對砷去除效率

從110年度研究結果顯示，陶粒及結圈石經破碎後再填充於管柱有助於提升砷之去除效率。在現地模場，使用不同粒徑之結圈石探討粒徑大小對砷去除率之影響，結果顯示，未過篩-粗粒徑之結圈石能較快且有效去除地水砷，在第40分鐘即達到最佳去除效率100%，111年度規劃將再分析不同粒徑結圈石特性，並進行地下水砷移除重複試驗，及確認使用未過篩之粗粒徑結圈石即可有效去除砷，節省因篩選粒徑所耗人力及時間。

111年度由磚窯廠再取回不同批次旋轉窯產生之結圈石，如表4.4.1-1及圖4.4.1-1所示，其結圈石磚窯廠已有初略破碎篩分成幾種顆粒大小，為考量後續實際應用及節省篩選粒徑時間，這些結圈石帶回實驗室後不再進行粒徑篩選。實驗為在管柱中填入結圈石300 g，以蠕動幫浦控制砷溶液進流速度，由砷標準液所配製之0.5 mg/L 砷溶液由管柱下方進樣，由上端出水，透過蠕動幫浦持續進樣，不回流，每隔一段時間採取水樣進行砷濃度分析，計算去除效率，管柱操作照片如圖4.4.1-2。

表4.4.1-1 管柱所使用之旋轉窯結圈石

| 批次   | 尺寸                                        | 取回時間           |
|------|-------------------------------------------|----------------|
| 第一批次 | 粗顆粒<br>細顆粒                                | 111 年 4 月 27 日 |
| 第二批次 | 顆粒約 0~5 mm<br>顆粒約 5~10 mm                 | 111 年 4 月 27 日 |
| 第三批次 | 顆粒約 0~5 mm<br>顆粒約 5~10 mm<br>顆粒約 10 mm 以上 | 111 年 9 月 15 日 |





第四章 執行成果

油污染土壤綠色整治及創造循環經濟效益

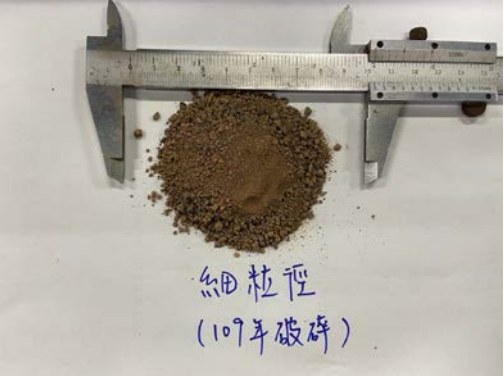
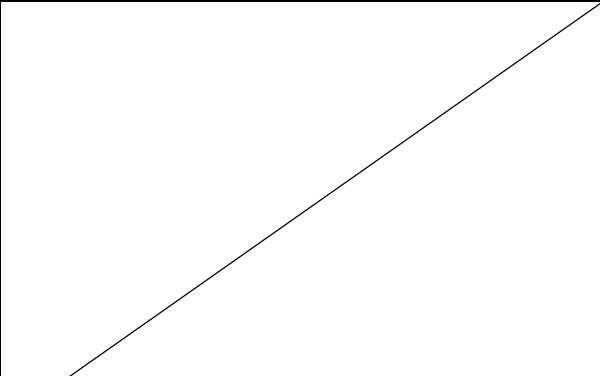
|                                                                                                                  |                                                                                                                    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  <p>粗粒徑<br/>(109年破碎)</p>        |  <p>細粒徑<br/>(109年破碎)</p>         |
| <p>第一批次-粗顆粒</p>                                                                                                  | <p>第一批次-細顆粒</p>                                                                                                    |
|  <p>5 mm 以下<br/>(110年破碎)</p>   |  <p>5 - 10 mm<br/>(110年破碎)</p>  |
| <p>第二批次-5 mm 以下</p>                                                                                              | <p>第二批次-5~10 mm</p>                                                                                                |
|  <p>5 mm 以下<br/>(110年破碎)</p>  |  <p>5 - 10 mm<br/>(110年破碎)</p> |
| <p>第三批次-5 mm 以下</p>                                                                                              | <p>第三批次-5~10 mm</p>                                                                                                |
|  <p>10 mm 以上<br/>(110年破碎)</p> |                                |
| <p>第三批次-10 mm 以上</p>                                                                                             |                                                                                                                    |

圖4.4.1-1 管柱所使用之旋轉窯結圖石照片



圖4.4.1-2 實驗型管柱砷移除試驗操作照片

圖4.4.1-3、圖4.4.1-4為111年第一批次取回之結圈石-粗顆粒，在不同流速下之試驗結果。水樣砷濃度大約在0.4~0.6 mg/L。在流速60.3 mL/min 下，初始砷之去除效率約62.66%；流速80.2 mL/min，砷初始去除效率69.11%；流速100 mL/min，砷初始去除效率44.11%；流速200 mL/min，砷初始去除效率38.80%；流速300 mL/min，砷初始之去除效率約30.05%；流速500 mL/min，砷初始去除效率41.90%。圖4.4.1-5為各種流速下結圈石所累積吸附之砷量。以流速80.2 mL/min 所能移除之砷量最高，每公克結圈石約可移除4.2 mg 的砷。

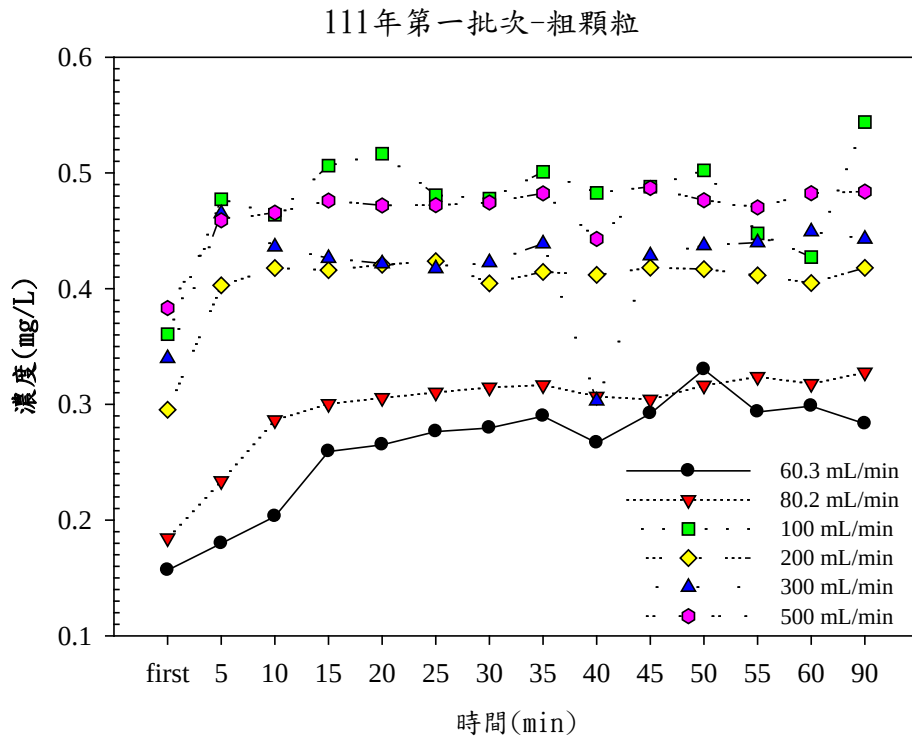


圖4.4.1-3 111年第一批次結圈石(粗顆粒)對砷之移除濃度變化

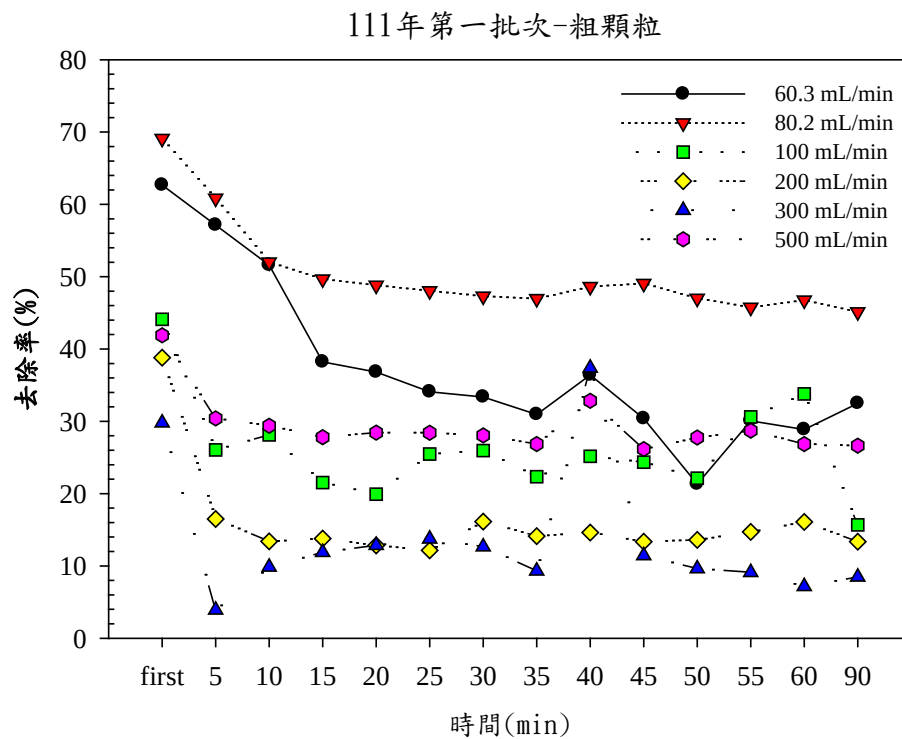


圖4.4.1-4 111年第一批次結圈石(粗顆粒)對砷之去除率

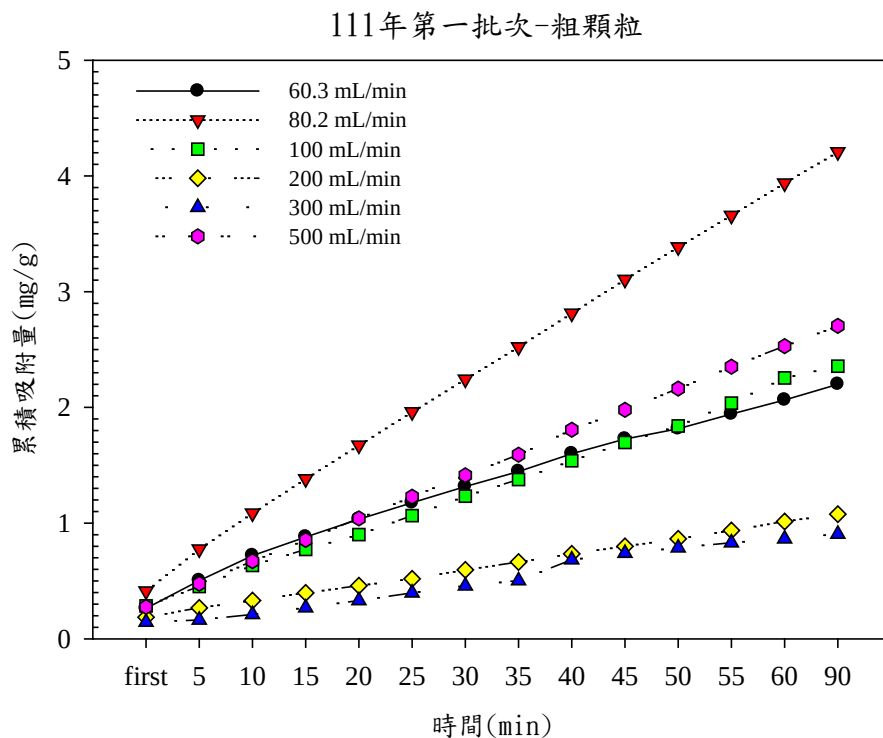


圖4.4.1-5 111年第一批次結圈石(粗顆粒)對砷之累積吸附量

圖4.4.1-6、圖4.4.1-7為111年第一批次取回之結圈石-細顆粒，在不同流速下之試驗結果。水樣砷濃度大約在0.5 mg/L。在流速60.3 mL/min 下，初始去除效率87.81%；在流速80.2 mL/min 下，初始去除效率83.63%；在流速100 mL/min 下，在第5分鐘達到最佳去除效率51.94%；在流速200 mL/min 下，初始去除效率59.57%；在流速500 mL/min 下，初始去除效率44.32%。圖4.4.1-8為各種流速下結圈石所累積吸附之砷量。以流速60.3 mL/min 所能移除之砷量最高。細顆粒結圈石每公克可移除的砷量約4.2 mg，與粗顆粒結圈石相近。



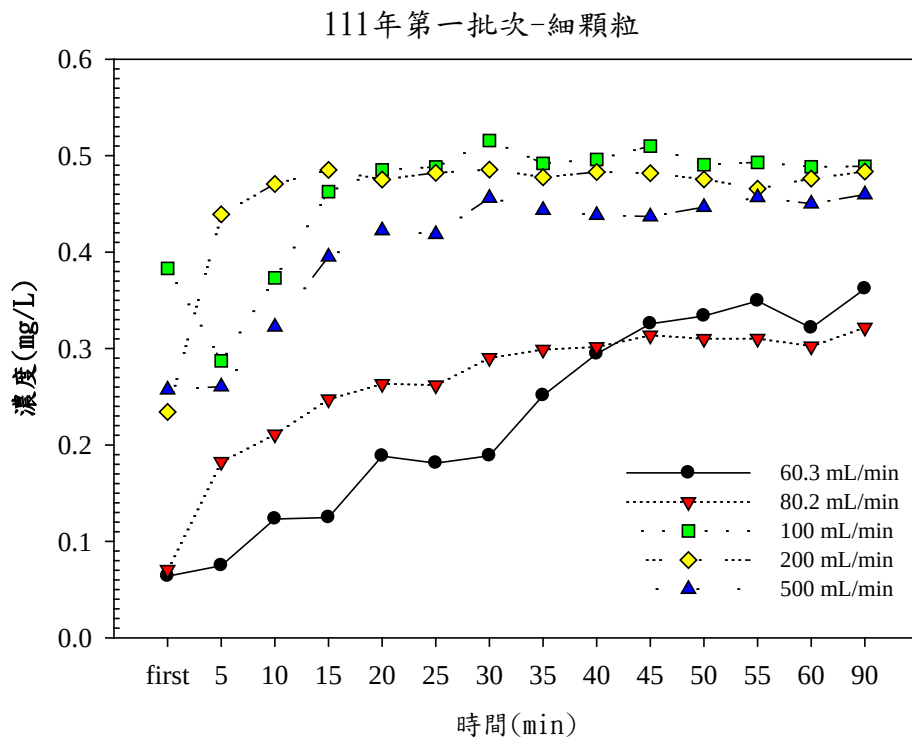


圖4.4.1-6 111年第一批次結圈石(細顆粒)對砷之移除濃度變化

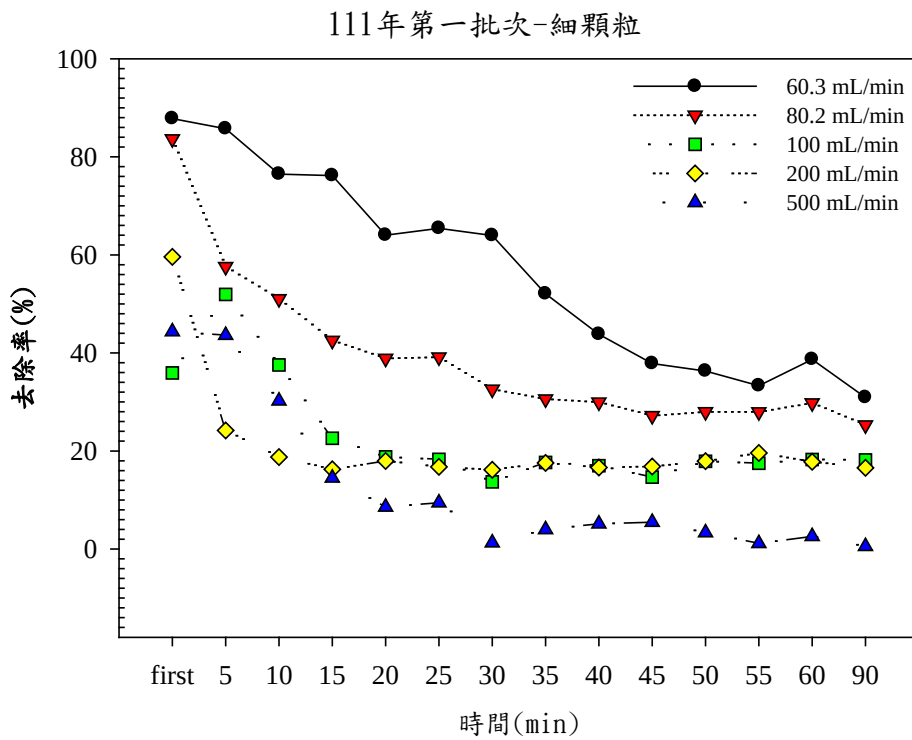


圖4.4.1-7 111年第一批次結圈石(細顆粒)對砷之去除率

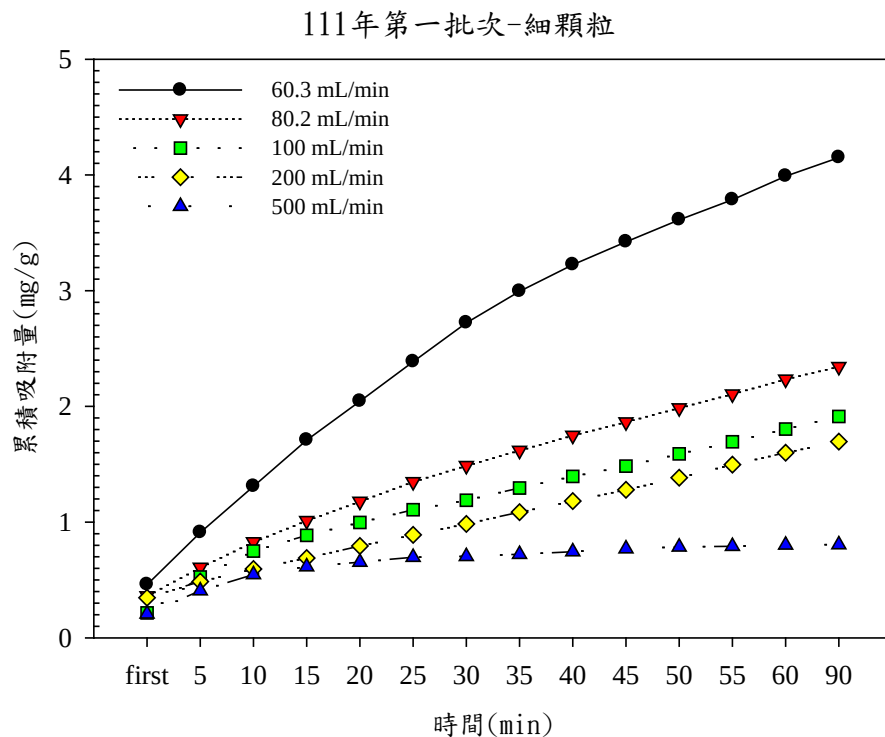


圖4.4.1-8 111年第一批次結圈石(細顆粒)對砷之累積吸附量

依照第一批次粗細顆粒結圈石在不同流速下之去除砷之結果，流速80.2 mL/min 在粗細顆粒均有較佳之去除效果，第二批次之結圈石以流速80.2 mL/min 先行試驗，其試驗結果如圖4.4.1-9、圖4.4.1-10及圖4.4.1-11。在顆粒大小約5 mm，砷水樣濃度初始去除效率75.08%；在顆粒大小約5~10 mm 下，砷初始去除效率38.99%。

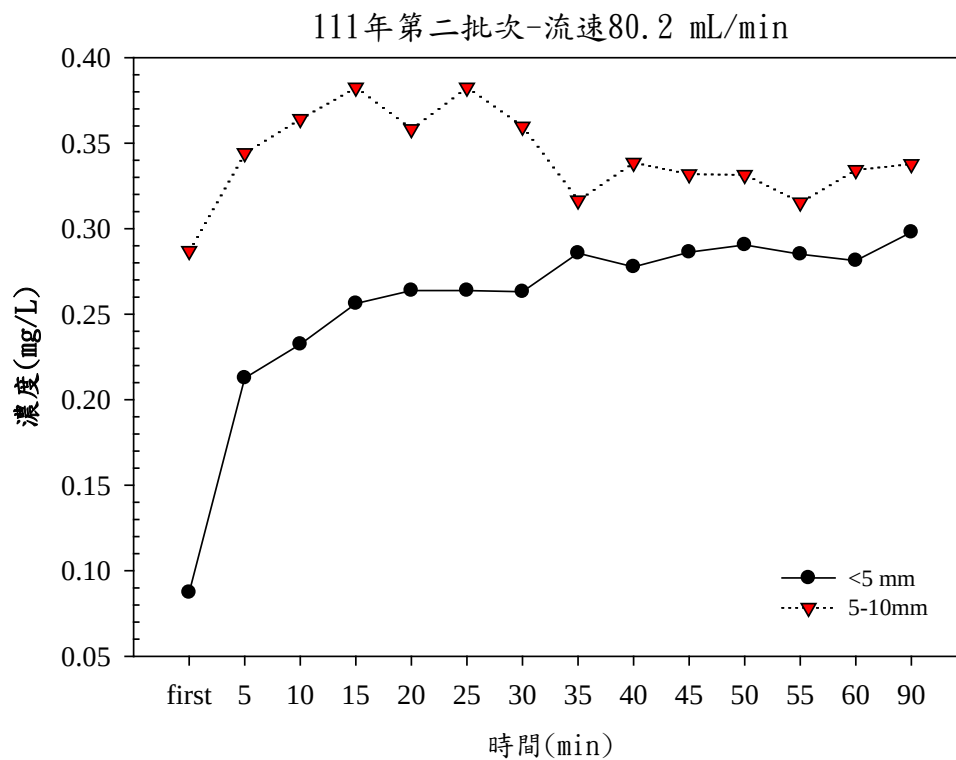


圖4.4.1-9 111年第二批次結圈石對砷之移除濃度變化(流速80.2 mL/min)

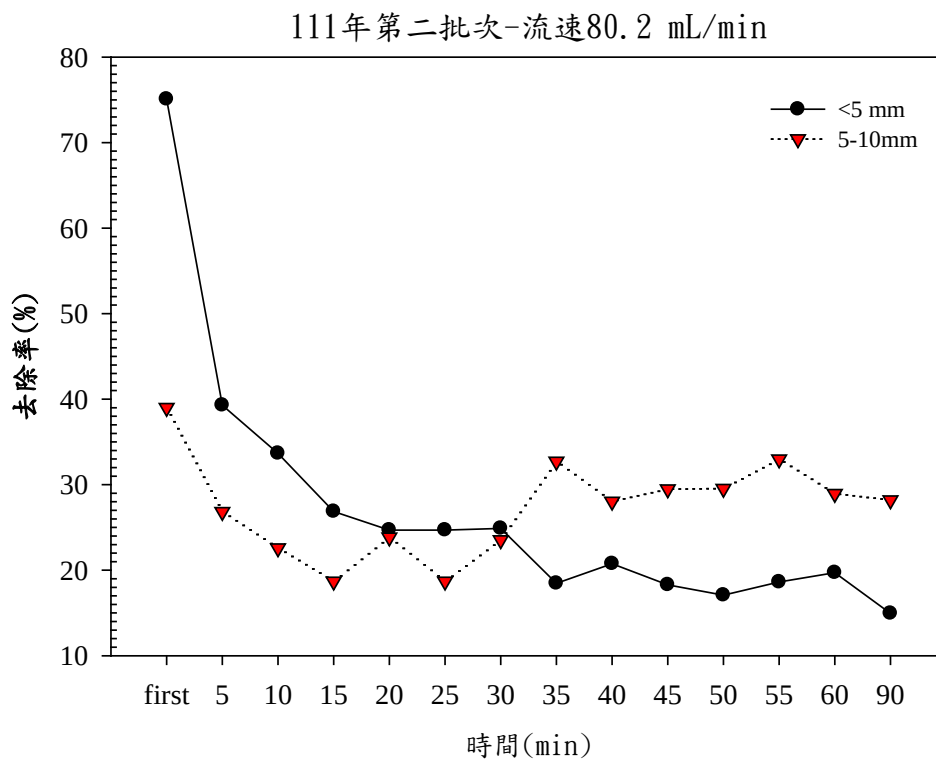


圖4.4.1-10 111年第二批次結圈石對砷之去除率(流速80.2 mL/min)

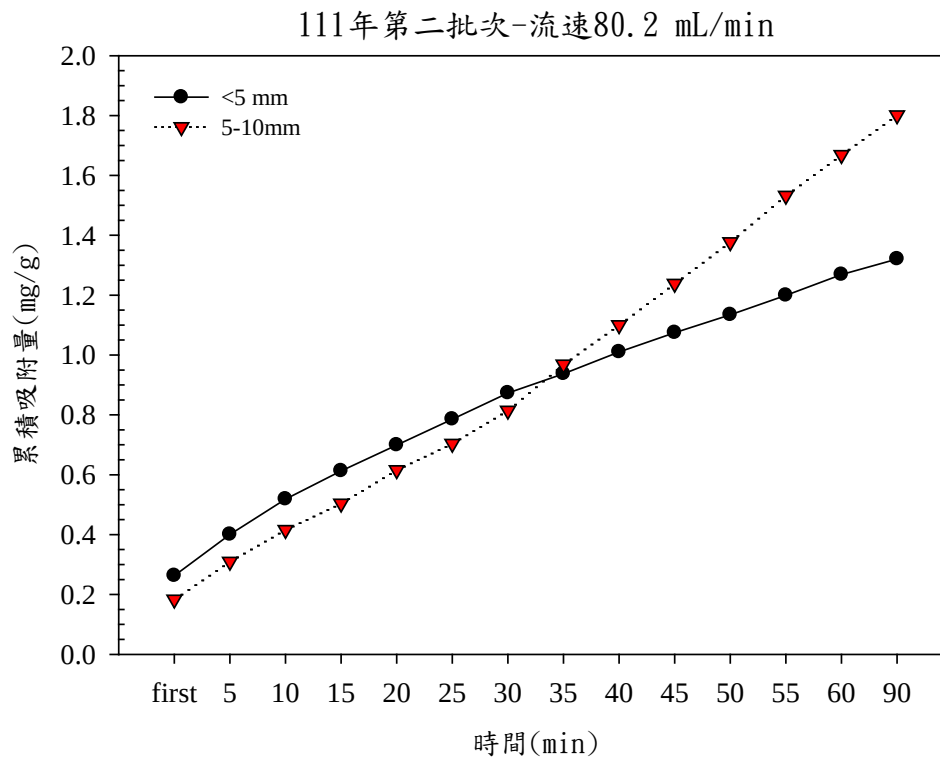


圖4.4.1-11 111年第二批次結圓石對砷之累積吸附量(流速80.2 mL/min)

第三批次之結圓石一樣以流速80.2 mL/min 進行試驗，其試驗結果如圖4.4.1-12、圖4.4.1-13及圖4.4.1-14。試驗水樣砷濃度大約在0.5 mg/L 左右。在顆粒大小0~5 mm 試驗，初始砷去除效率可達92.12%；在顆粒大小約5~10 mm 下，初始去除效率38.20%；在顆粒大小10 mm 以上，砷初始去除效率僅約18.15%。顯示粒徑越小，砷去除效率越高。



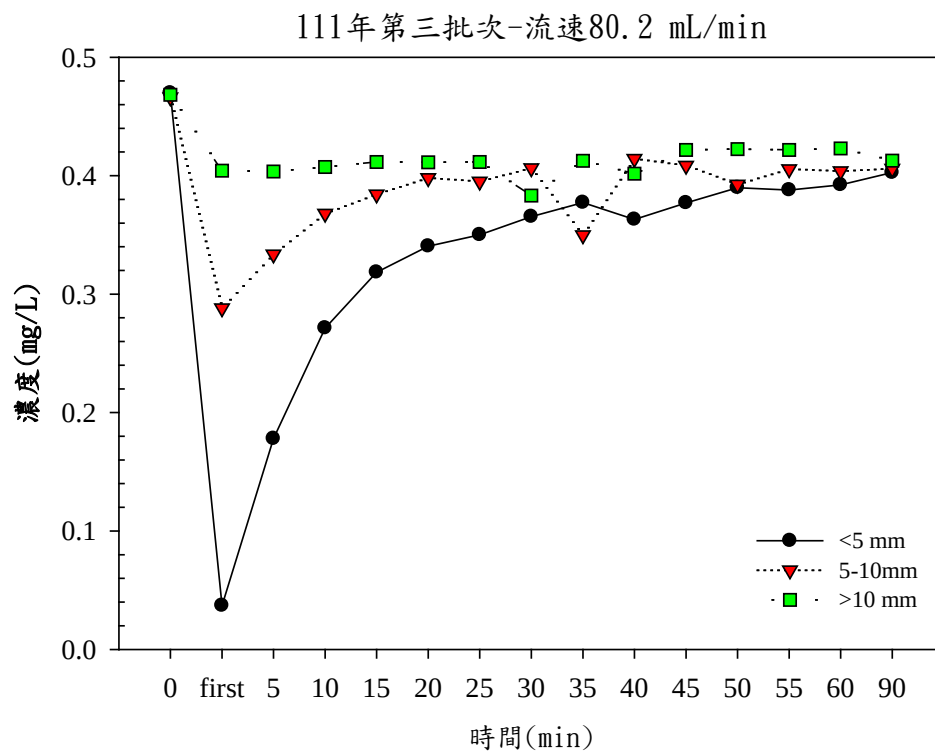


圖4.4.1-12 111年第三批次結圓石對砷之移除濃度變化(流速80.2 mL/min)

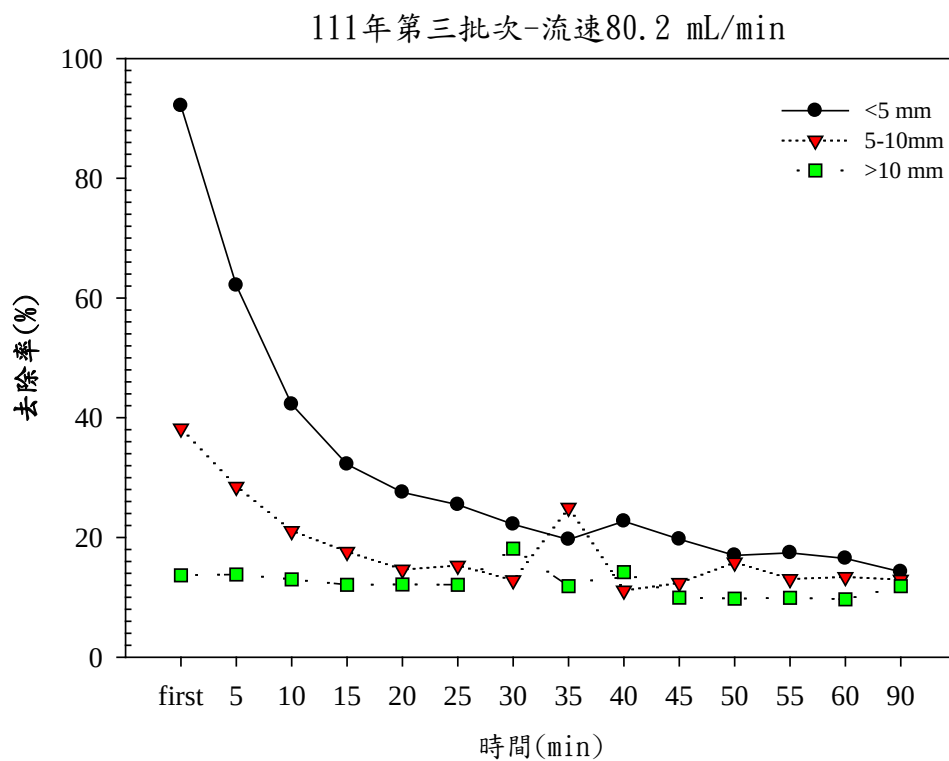


圖4.4.1-13 111年第三批次結圓石對砷之去除率(流速80.2 mL/min)

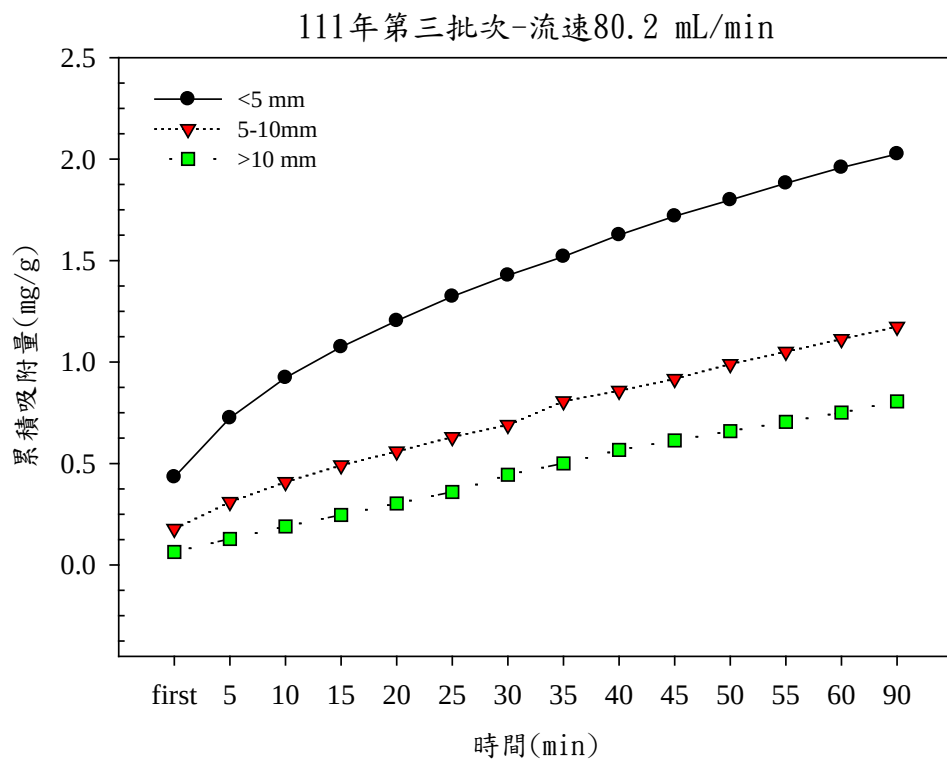


圖4.4.1-14 111年第三批次結圈石對砷之累積吸附量(流速80.2 mL/min)



#### 4.4.2 現地地下水砷移除試驗

本研究先使用111年度4月27日由磚窯廠取回之第一批次結圈石進行現地地下水砷移除試驗，結圈石以外觀區分分為粗顆粒及細顆粒兩種，外觀如圖4.4.2-1。以流速100 mL/min、200 mL/min、301 mL/min 及500 mL/min 進行試驗，以嘉義縣溪口鄉之地下水進行試驗。

現地所使用管柱為內徑10公分，高100公分之壓克力材料，上下均填充玻璃珠及石英砂以防止結圈石跟著水流流出，中間填充約3公斤結圈石，總操作時間180分鐘至240分鐘，前90分鐘，每5分鐘取樣一次，之後每10分鐘取樣一次，進行砷濃度分析，現場操作照片如圖4.4.2-2。

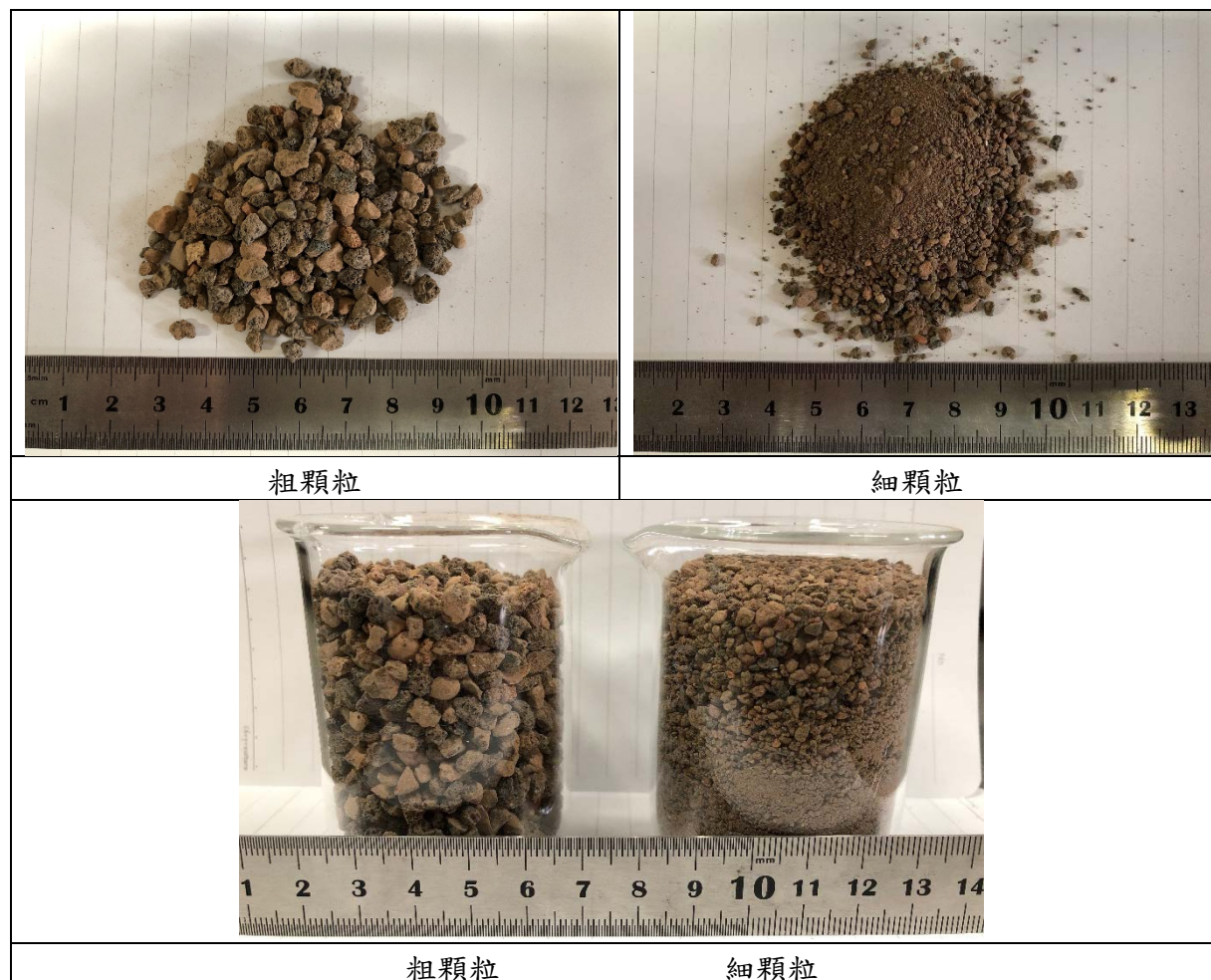


圖4.4.2-1 現地使用結圈石外觀



圖4.4.2-2 現地管柱砷移除試驗操作照片

粗顆粒之結圈石在不同流速下，出流水砷濃度隨時間之變化如圖4.4.2-3所示。地下水砷濃度大約在0.03 mg/L 左右。在試驗的240分鐘期間，各流速試驗條件下，各試驗之出流水砷濃度隨時間呈現逐漸降低的趨勢。顯示在240分鐘內，粗顆粒之結圈石對砷的移除能力還未達飽和，且隨著時間去除率持續增加，如圖4.4.2-4所示。圖4.4.2-5為隨著時間砷之累積吸附情形，因地下水中砷含量較低，因此在240分鐘試驗期間累積吸附的砷量最多每公克約0.35 mg，與實驗室管柱比較顯示，確實還未達飽和吸附容量。





## 第四章 執行成果

## 油污染土壤綠色整治及創造循環經濟效益

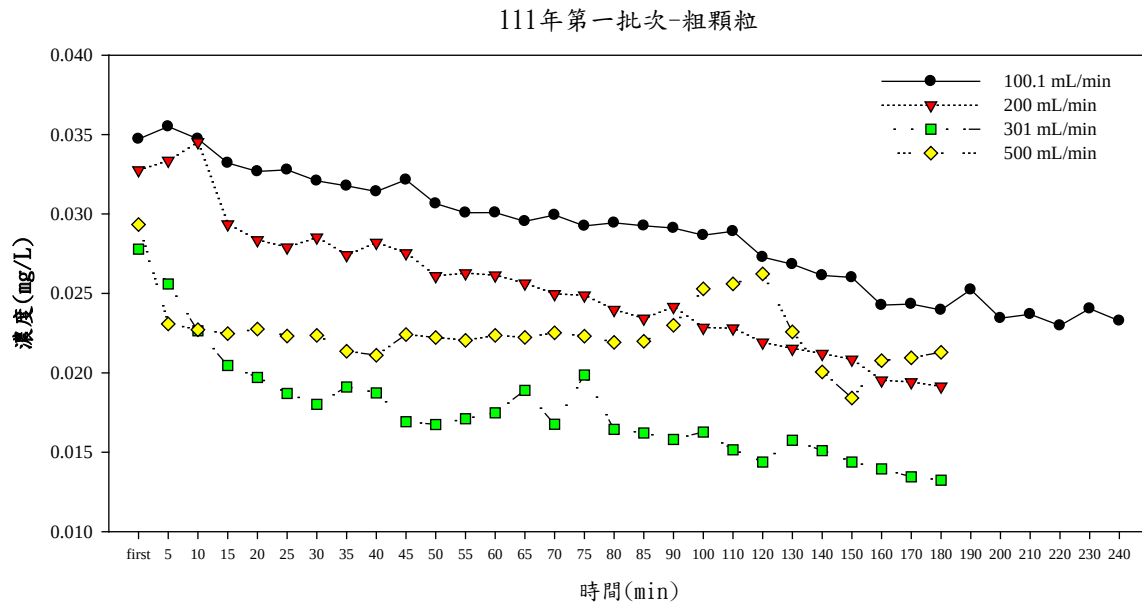


圖4.4.2-3 現地第一批次結圈石(粗顆粒)對砷之移除濃度變化

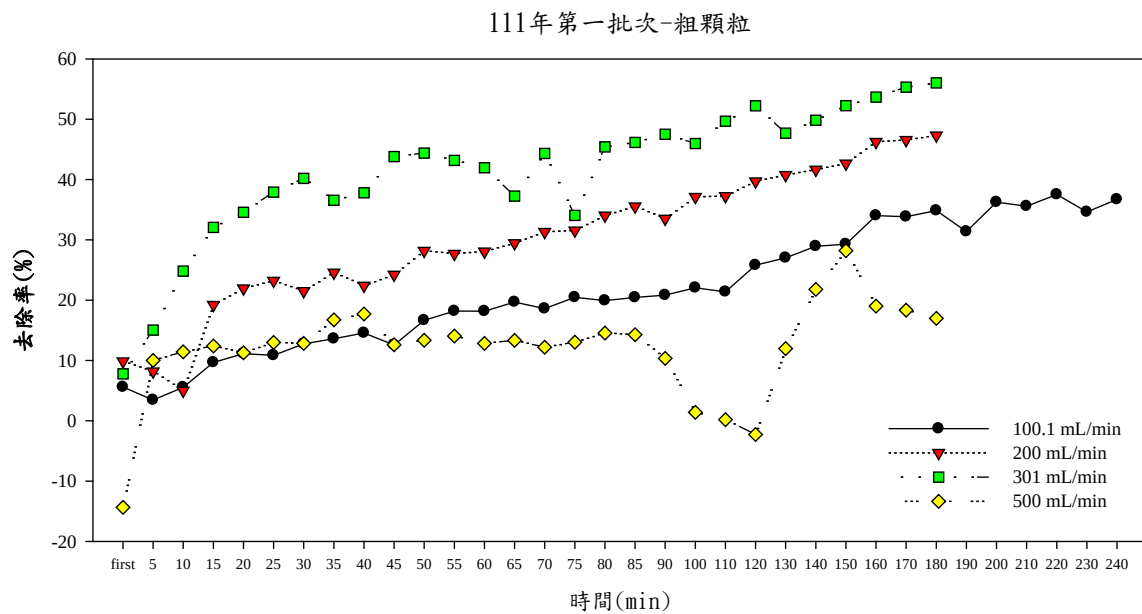


圖4.4.2-4 現地第一批次結圈石(粗顆粒)對砷之去除率

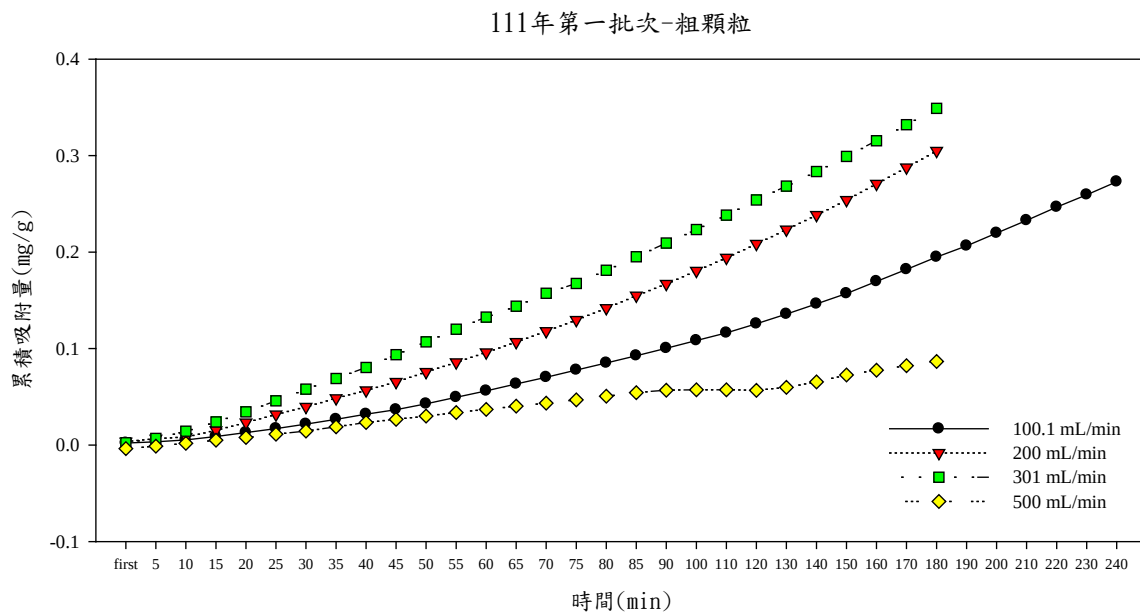


圖4.4.2-5 現地第一批次結圈石(粗顆粒)對砷之累積吸附量

細顆粒之結圈石試驗結果出流水砷濃度及去除效率如圖4.3.2-6及圖4.3.2-7所示。地下水砷濃度約在0.03 mg/L 左右。從圖中可以發現流速300 mL/min 之試驗，出流水砷濃度上下震盪，顯示水質並未穩定，可能管柱填充時沒有壓實，出現短流情形。流速100 mL/min 時，在第5分鐘達到最佳去除效率50.25%；流速200 mL/min 時，在第110分鐘出現最佳去除效率29.45%；流速301 mL/min 時，在第70分鐘達到最佳去除效率55.18%；流速500 mL/min 時，在第40分鐘達到最佳去除效率60.26%。圖4.4.2-8為隨著時間砷之累積吸附情形，在240分鐘試驗期間累積吸附的砷量持續上升，還未達飽和狀態，最多每公克約0.63 mg，確實還未達飽和吸附容量。



## 第四章 執行成果

## 油污染土壤綠色整治及創造循環經濟效益

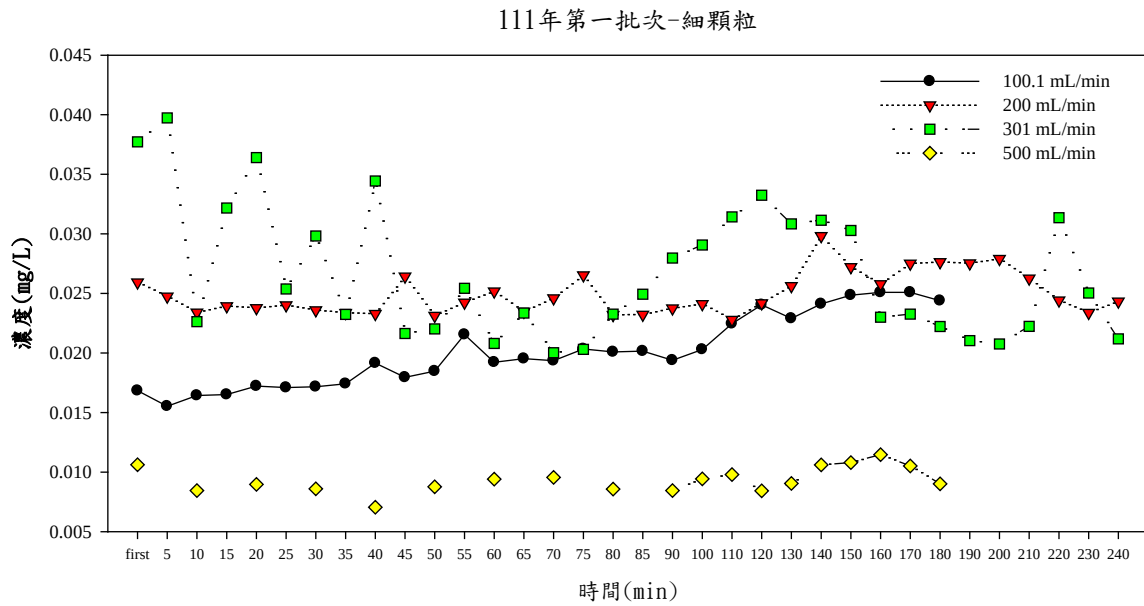


圖4.4.2-6 現地第一批次結圈石(細顆粒)對砷之移除濃度變化

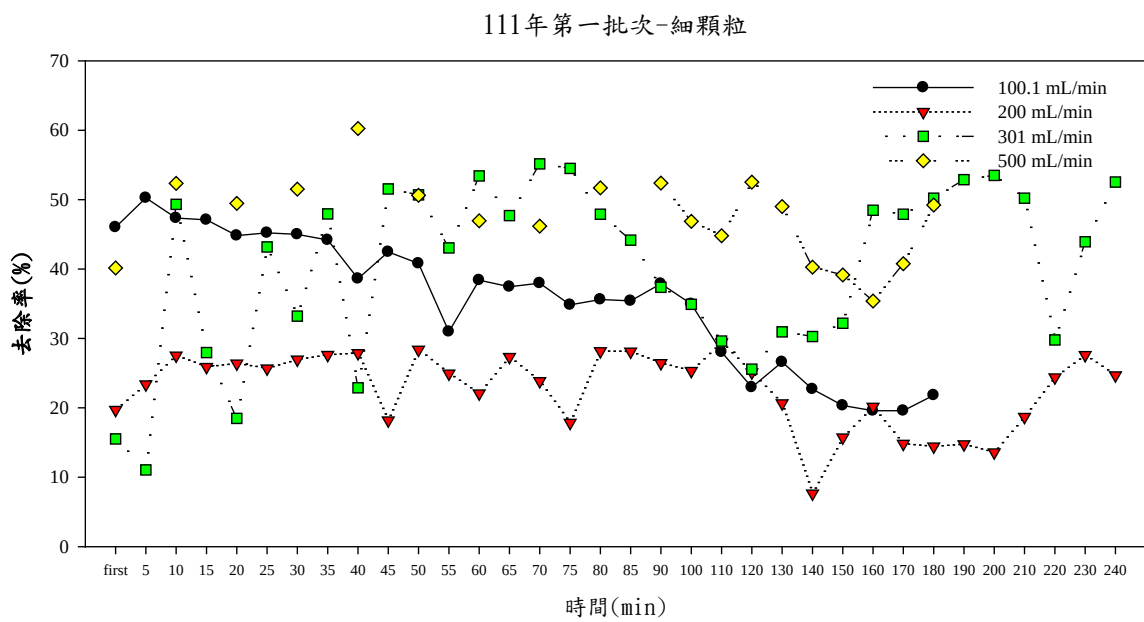


圖4.4.2-7 現地第一批次結圈石(細顆粒)對砷之去除率

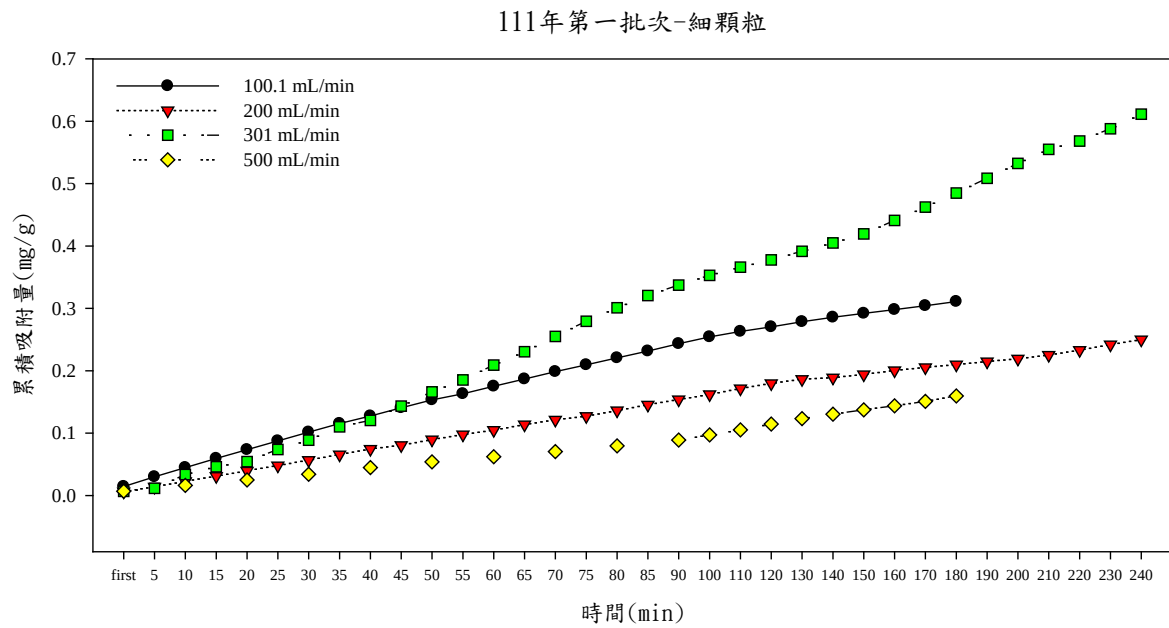


圖4.4.2-8 現地第一批次結圈石(細顆粒)對砷之累積吸附量





### 4.4.3 自製陶粒對水中砷去除之影響

#### 4.4.3.1 陶粒製備

人造輕質骨材(簡稱陶粒)是以黏土、頁岩、板岩、珍珠岩、煤矸石、粉煤灰等無機物為主要原料，經加工製粒或粉磨成球，再進入旋轉窯內，以 $1,100 \sim 1,200^{\circ}\text{C}$ 高溫快速焙燒膨脹而形成的一種外殼緻密堅硬、褐色，堆積密度小於 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 的矽酸鹽多孔陶質粒狀物。製備程序如圖4.4.3.1-1所示。陶粒燒製採用二台高溫爐，分別進行預熱、燒結二段式進行焙燒。焙燒前先將氧化鎂鉢置入預熱高溫爐內。待預熱高溫爐及焙燒高溫爐達到設定溫度值，使用坩堝夾將生料球放至已預熱之氧化鎂鉢並快速的放入預熱高溫爐內。高溫爐升溫速率為 $10^{\circ}\text{C/min}$ ，溫度 $200^{\circ}\text{C}$ ，預熱時間設定為16分鐘。完成預熱加熱後，再以坩堝夾迅速將氧化鎂鉢移至焙燒高溫爐內進行燒結。設定高溫爐升溫速率 $10^{\circ}\text{C/min}$ ，溫度 $1200^{\circ}\text{C}$ ，焙燒時間設定為12分鐘。焙燒結束則將已燒製完成之陶粒放入室溫氧化鎂鉢內，待其自然冷卻至室溫收入乾燥皿中保存。



第四章 執行成果

油污染土壤綠色整治及創造循環經濟效益



圖4.4.3.1-1 陶粒製備流程



#### 4.4.3.2 陶粒添加氧化鐵、二氧化錳及有機質

為探討鐵、錳及有機質含量對陶粒特性及砷吸附能力，本研究於生料球製備階段，添加氧化鐵或二氧化錳含量為0%、3%、5%、10%及15%共五種比例，圖4.4.3.2-1及圖4.4.3.2-2為不同氧化鐵、二氧化錳比例所燒結出之陶粒。

添加的有機質係以培地茅製備之生物炭作為代表，培地茅來源為中油公司高雄煉油廠生長兩年之培地茅植體地上部，經自然風乾後，利用高溫爐在無氧環境下以550°C 進行熱裂解1小時。再以鐵、錳含量各5%進行不同生物炭添加比例試驗，生物炭添加率分為0%、3%、5%、10%、15%共五種比例，圖4.4.3.2-3為不同生物炭含量所燒結之陶粒。

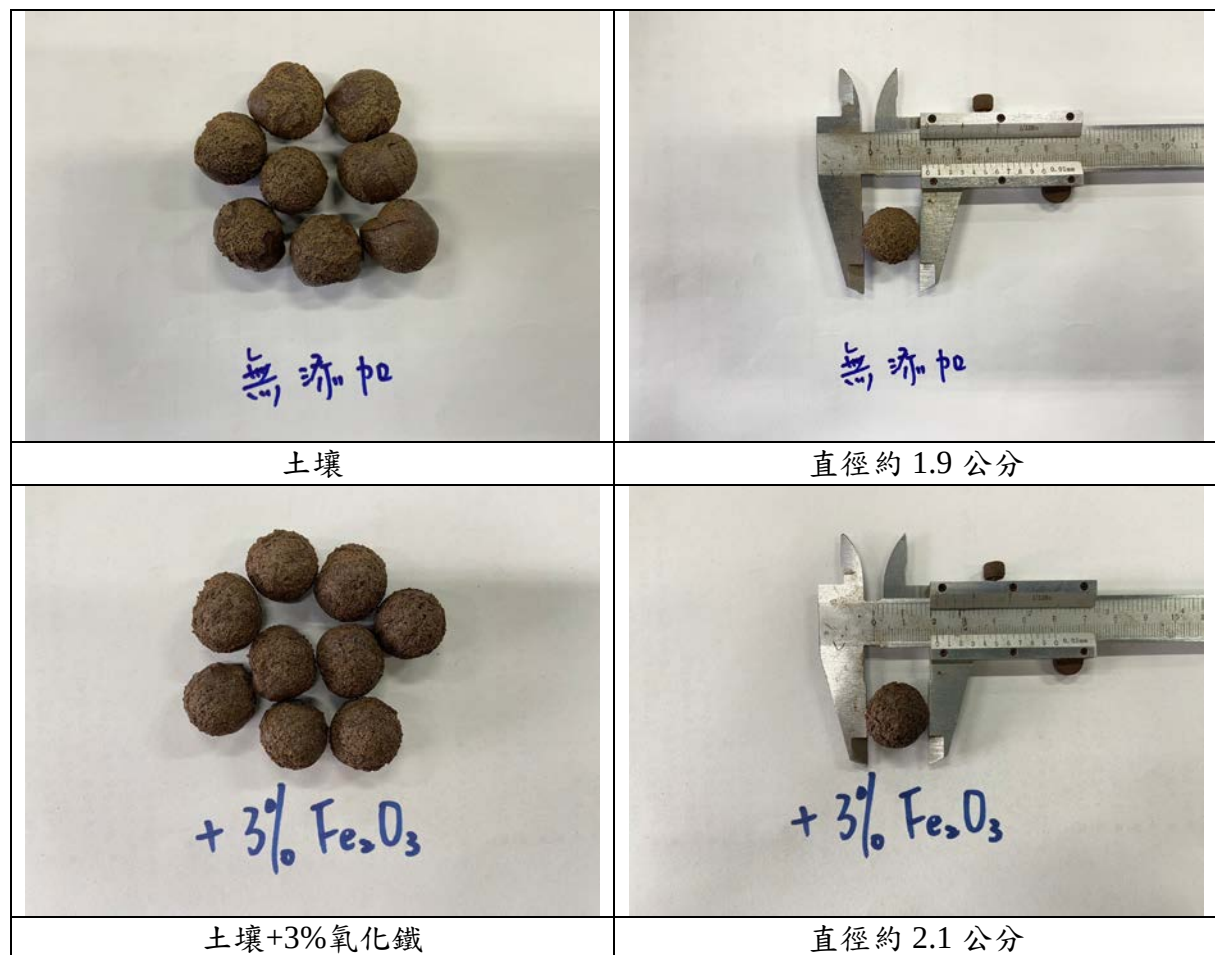


圖4.4.3.2-1 不同氧化鐵添加比例燒結之陶粒外觀(1/2)





## 第四章 執行成果

## 油污染土壤綠色整治及創造循環經濟效益

|                                                                                                                          |                                                                                                                         |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  <p>+ 5% <math>Fe_2O_3</math></p>       |  <p>+ 5% <math>Fe_2O_3</math></p>    |
| 土壤+5%氧化鐵                                                                                                                 | 直徑約 2.1 公分                                                                                                              |
|  <p>+ 10% <math>Fe_2O_3</math></p>      |  <p>+ 10% <math>Fe_2O_3</math></p>    |
| 土壤+10%氧化鐵                                                                                                                | 直徑約 2.2 公分                                                                                                              |
|  <p>+ 15% <math>Fe_2O_3</math></p>    |  <p>+ 15% <math>Fe_2O_3</math></p> |
| 土壤+15%氧化鐵                                                                                                                | 直徑約 1.8 公分                                                                                                              |
|  <p>3%      5%      10%      15%</p> |                                                                                                                         |
| 3%、5%、10%、15%，不同氧化鐵比例之陶粒外觀                                                                                               |                                                                                                                         |

圖4.4.3.2-1 不同氧化鐵添加比例燒結之陶粒外觀(2/2)





|                                                                                                                     |                                                                                                                       |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  <p>+ 3% <math>MnO_2</math></p>    |  <p>+ 3% <math>MnO_2</math></p>    |
| 土壤+3%二氧化錳                                                                                                           | 直徑約 2.1 公分                                                                                                            |
|  <p>+ 5% <math>MnO_2</math></p>   |  <p>+ 5% <math>MnO_2</math></p>   |
| 土壤+5%二氧化錳                                                                                                           | 直徑約 1.9 公分                                                                                                            |
|  <p>+ 10% <math>MnO_2</math></p> |  <p>+ 10% <math>MnO_2</math></p> |
| 土壤+10%二氧化錳                                                                                                          | 直徑約 1.7 公分                                                                                                            |

圖4.4.3.2-2 不同氧化錳添加比例燒結之陶粒外觀(1/2)

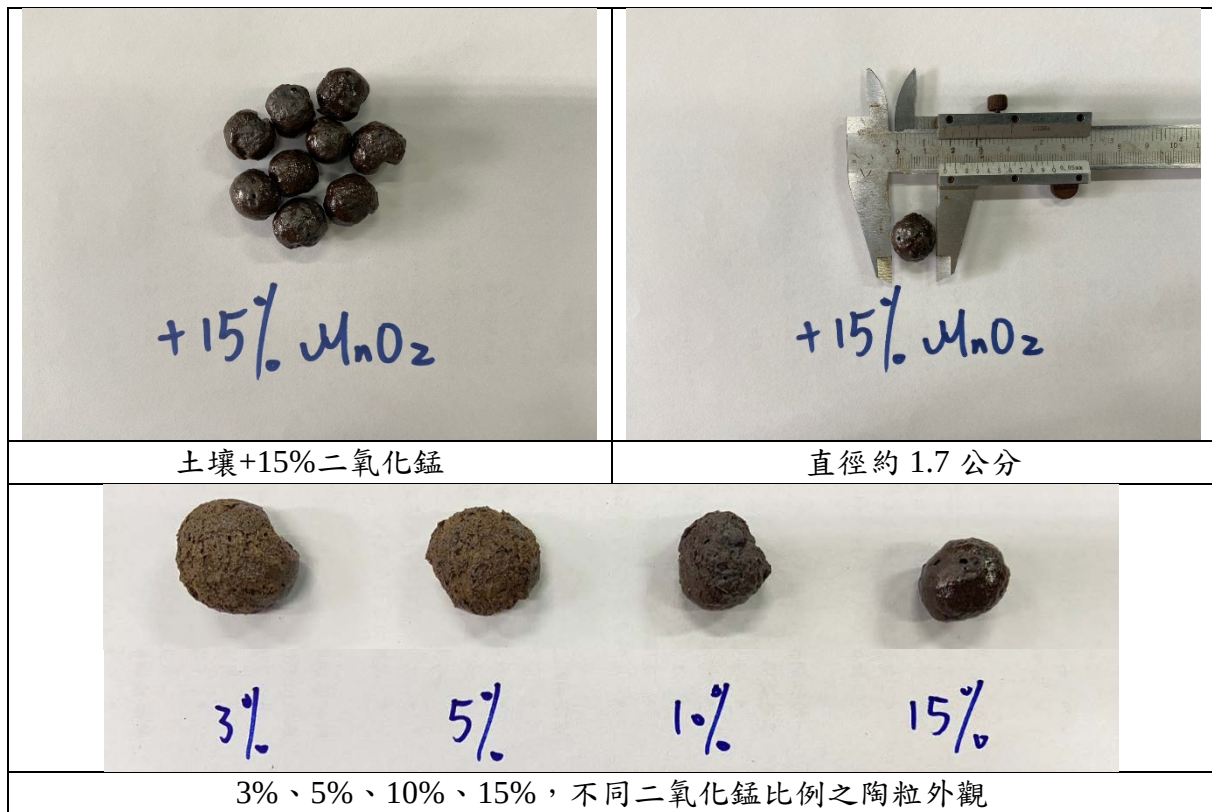


圖4.4.3.2-2 不同二氧化錳添加比例燒結之陶粒外觀(2/2)

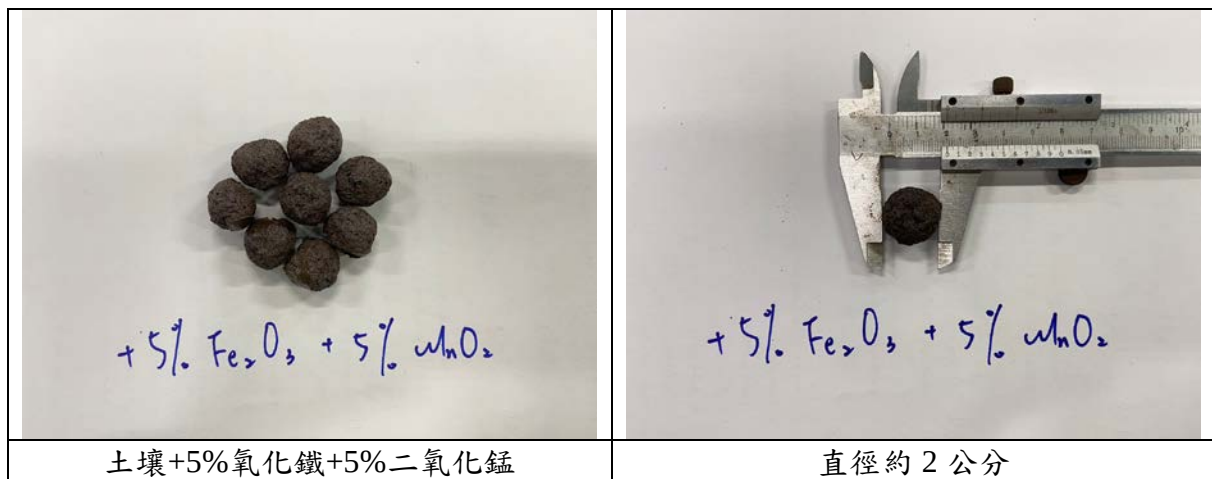


圖4.4.3.2-3 不同生物炭添加比例燒結之陶粒外觀(1/2)



## 第四章 執行成果

## 油污染土壤綠色整治及創造循環經濟效益

|                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                   |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  <p>+ 3% 生物炭<br/>+ 5% <math>\text{Fe}_2\text{O}_3</math> + 5% <math>\text{MnO}_2</math></p>    |  <p>+ 3% 生物炭<br/>+ 5% <math>\text{Fe}_2\text{O}_3</math> + 5% <math>\text{MnO}_2</math></p>    |
| 土壤+5%氧化鐵+5%二氧化錳+3%生物炭                                                                                                                                                           | 直徑約 2 公分                                                                                                                                                                          |
|  <p>+ 5% 生物炭 + 5% <math>\text{MnO}_2</math><br/>+ 5% <math>\text{Fe}_2\text{O}_3</math></p>    |  <p>+ 5% 生物炭 + 5% <math>\text{MnO}_2</math><br/>+ 5% <math>\text{Fe}_2\text{O}_3</math></p>    |
| 土壤+5%氧化鐵+5%二氧化錳+5%生物炭                                                                                                                                                           | 直徑約 2 公分                                                                                                                                                                          |
|  <p>+ 10% 生物炭 + 5% <math>\text{MnO}_2</math><br/>+ 5% <math>\text{Fe}_2\text{O}_3</math></p> |  <p>+ 10% 生物炭 + 5% <math>\text{MnO}_2</math><br/>+ 5% <math>\text{Fe}_2\text{O}_3</math></p> |
| 土壤+5%氧化鐵+5%二氧化錳+10%生物炭                                                                                                                                                          | 直徑約 1.4 公分                                                                                                                                                                        |
|  <p>+ 15% 生物炭 + 5% <math>\text{MnO}_2</math><br/>+ 5% <math>\text{Fe}_2\text{O}_3</math></p> |  <p>+ 15% 生物炭 + 5% <math>\text{MnO}_2</math><br/>+ 5% <math>\text{Fe}_2\text{O}_3</math></p> |
| 土壤+5%氧化鐵+5%二氧化錳+15%生物炭                                                                                                                                                          | 直徑約 1.2 公分                                                                                                                                                                        |

圖4.4.3.2-3 不同生物炭添加比例燒結之陶粒外觀(2/2)





### 4.4.3.3 氧化鐵添加率對砷之去除效率

使用自製陶粒去除水中砷方法與第4.4.1節相同，實驗為在管柱中填入自製陶粒300 g，以蠕動幫浦控制砷溶液進流速度，由砷標準液所配製之0.5 mg/L 砷溶液由管柱下方進樣，由上端出水，透過蠕動幫浦持續進樣，不回流，每隔一段時間採取水樣進行砷濃度分析，計算去除效率。

不同氧化鐵添加比例之陶粒，試驗結果如圖4.4.3.4-1至圖4.4.3.4-2所示。未添加氧化鐵之陶粒，初始去除效率可達93.53%；添加氧化鐵3%之陶粒，初始有最佳去除效率78.34%；添加氧化鐵5%之陶粒，初始有最佳去除效率96.42%；添加氧化鐵10%之陶粒，初始之去除效率91.08%；添加氧化鐵15%之陶粒，初始之去除效率63.27%。各種氧化鐵添加比例之陶粒在初始使用時對砷有最佳去除效率，隨著操作時間去除效率逐漸降低。整體而言，以未添加氧化鐵以及添加5%氧化鐵之陶粒對砷之去除效率最高。在流速80.2 mL/min 條件下，處理90分鐘的時間中，每公克累積吸附之砷量約有2.7 mg。

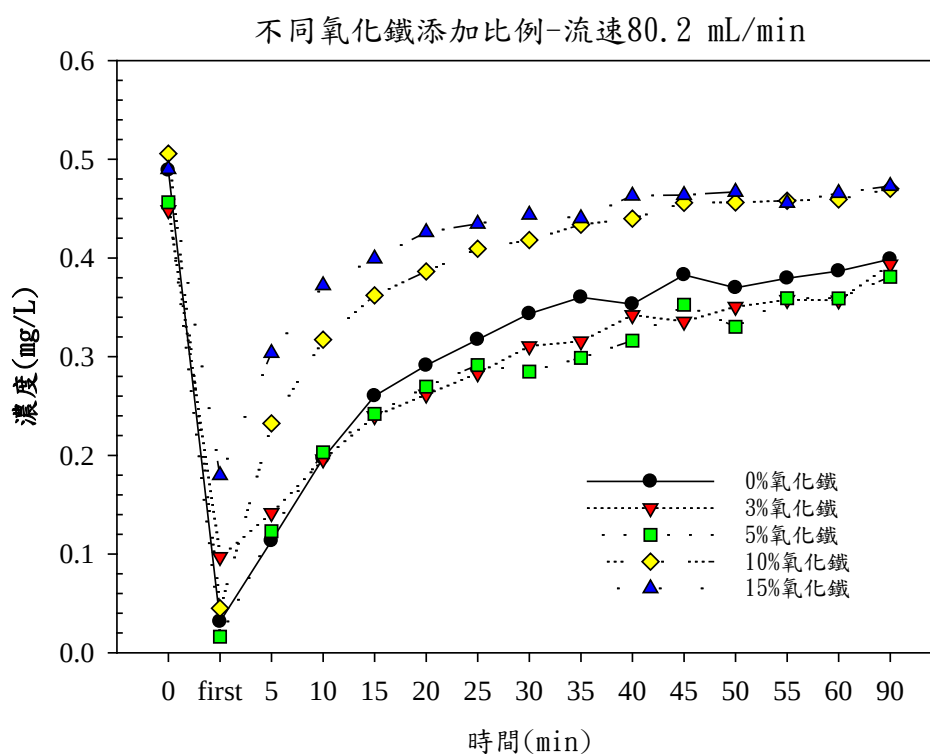


圖4.4.3.3-1 不同氧化鐵添加比例之陶粒對砷之移除濃度變化



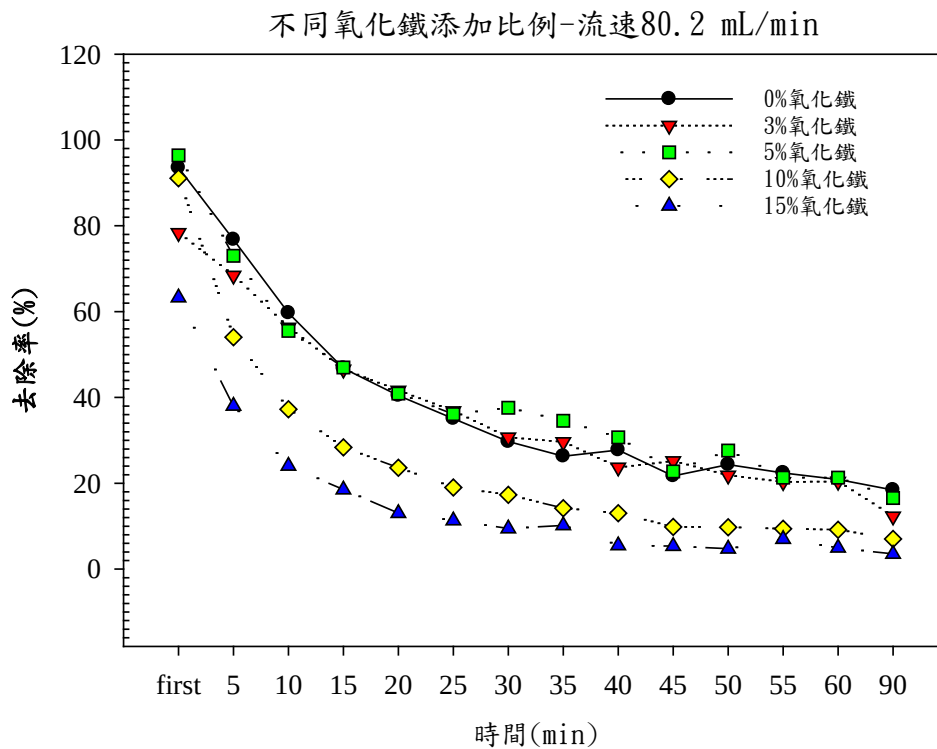


圖4.4.3.3-2 不同氧化鐵添加比例之陶粒對砷之去除率

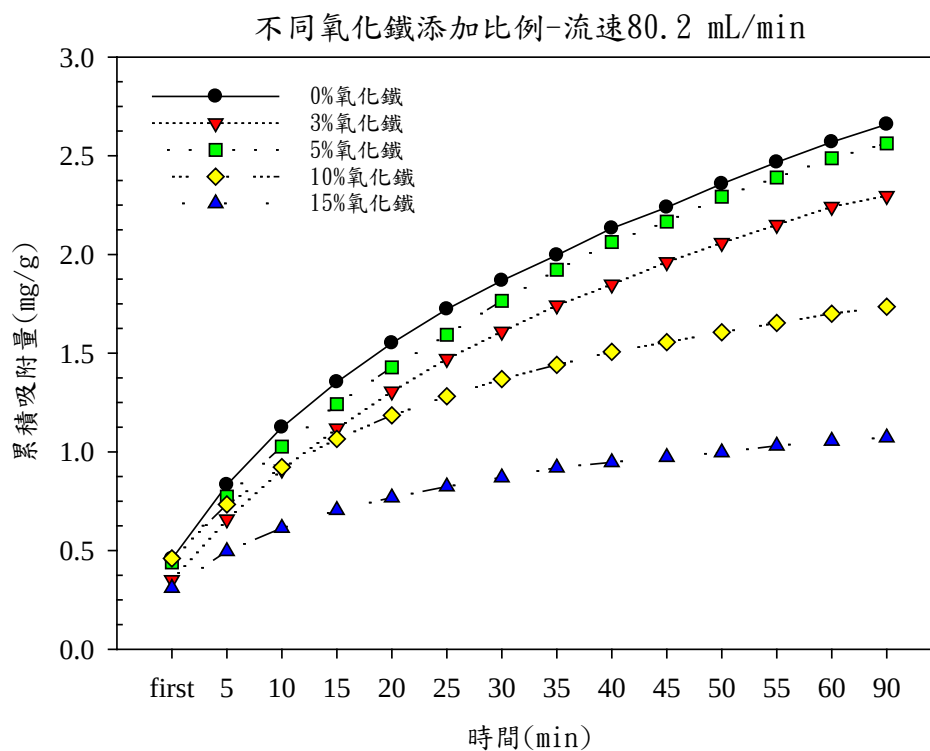


圖4.4.3.3-3 不同氧化鐵添加比例之陶粒對砷之累積吸附量



#### 4.4.3.4 二氧化錳添加率對砷之去除效率

不同二氧化錳添加比例之陶粒，試驗結果如圖4.4.3.5-1至圖4.4.5.4-2所示。初始地下水砷濃度大約在0.5 mg/L 左右。未添加二氧化錳之陶粒，在初始去除效率93.53%；添加二氧化錳3%之陶粒，初始去除效率87.15%；添加二氧化錳5%之陶粒，初始去除效率95.53%；添加二氧化錳10%之陶粒，初始去除效率90.94%；添加二氧化錳15%之陶粒，初始去除效率84.21%。從試驗結果顯示，單獨添加二氧化錳對陶粒吸附砷的能力似乎沒有提升作用。

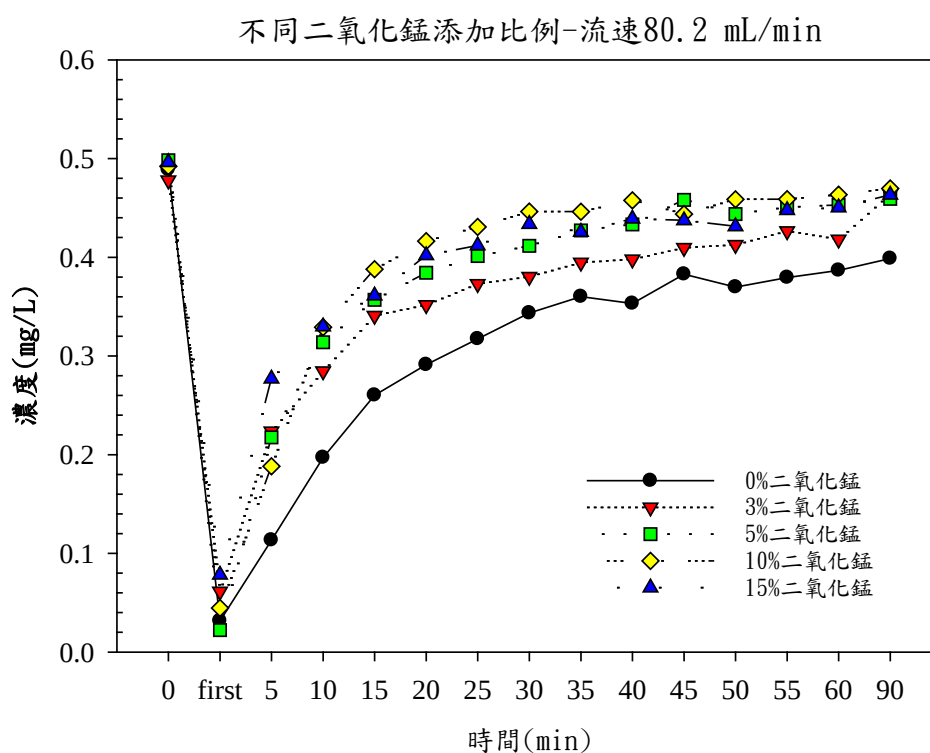


圖4.4.3.4-1 不同二氧化錳添加比例之陶粒對砷之移除濃度變化

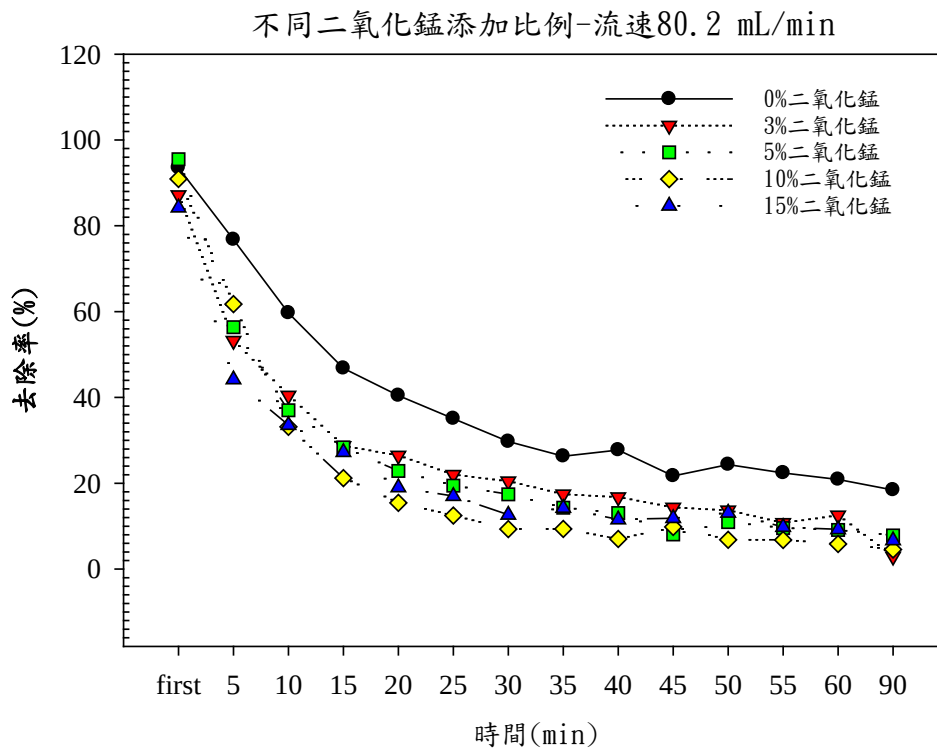


圖4.4.3.4-2 不同二氧化錳添加比例之陶粒對砷之去除率

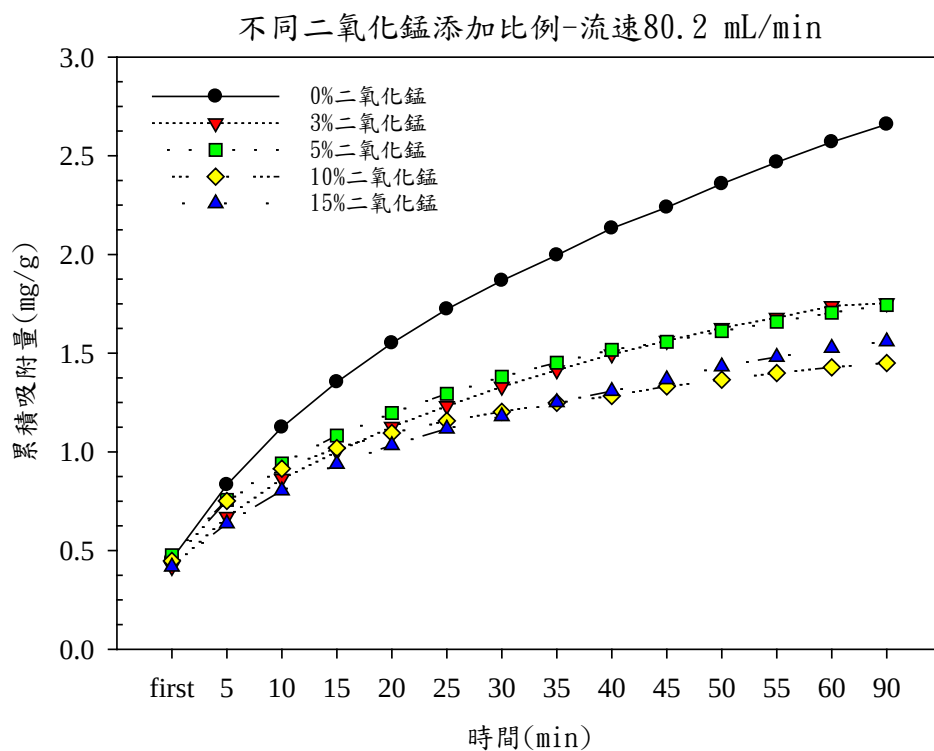


圖4.4.3.4-3 不同二氧化錳添加比例之陶粒對砷之累積吸附量



#### 4.4.3.5 生物炭添加率對砷之去除效率

不同生物炭添加比例之陶粒，試驗結果如圖4.4.3.5-1至圖4.4.3.5-2所示。初始地下水砷濃度大約在0.45 mg/L 左右，僅添加氧化鐵5%+二氧化錳5%之陶粒，在初始時砷有最佳之去除效，約58.693%。添加氧化鐵5%及二氧化錳5%外再添加生物炭之陶粒，生物炭添加比例從3%到15%，都顯著的增加對砷的吸附去除作用，砷的去除效率幾乎都可達到100%。且在流速80.2 mL/min 條件下，處理90分鐘的時間中，陶粒對砷的移除率幾乎都還是維持在100%左右。圖4.4.3.5-3為陶粒累積吸附的砷量，在處理90分鐘累積吸附量已超過6 mg/g，且還未達飽和情況。添加生物炭所燒結之陶粒，對砷有很高的吸附能力，具有進一步開發潛力。

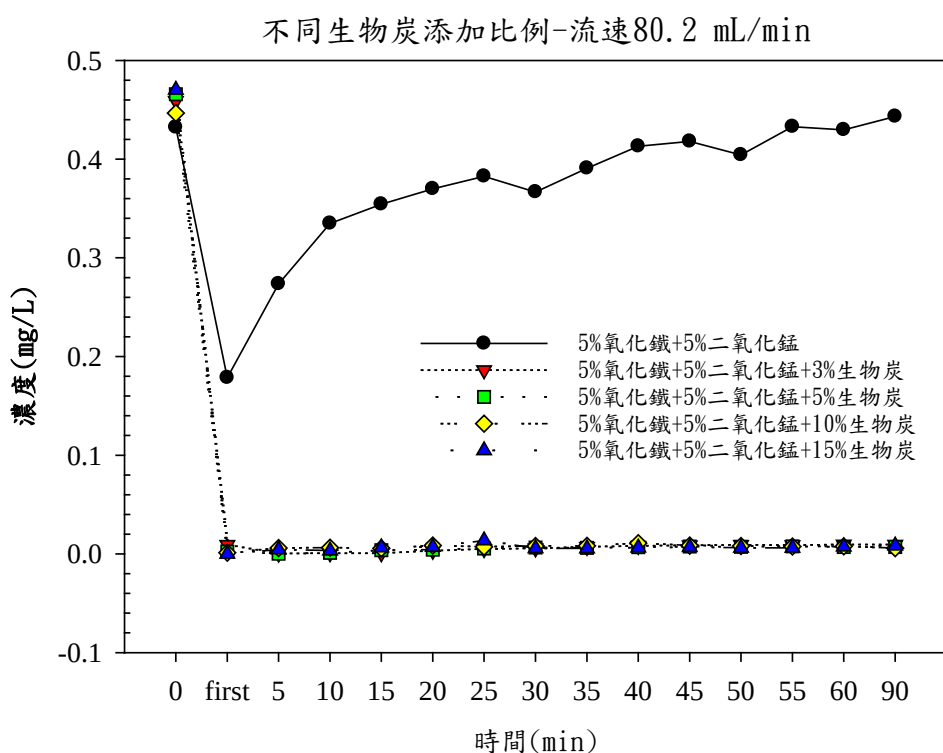


圖4.4.3.5-1 不同生物炭添加比例之陶粒對砷之移除濃度變化



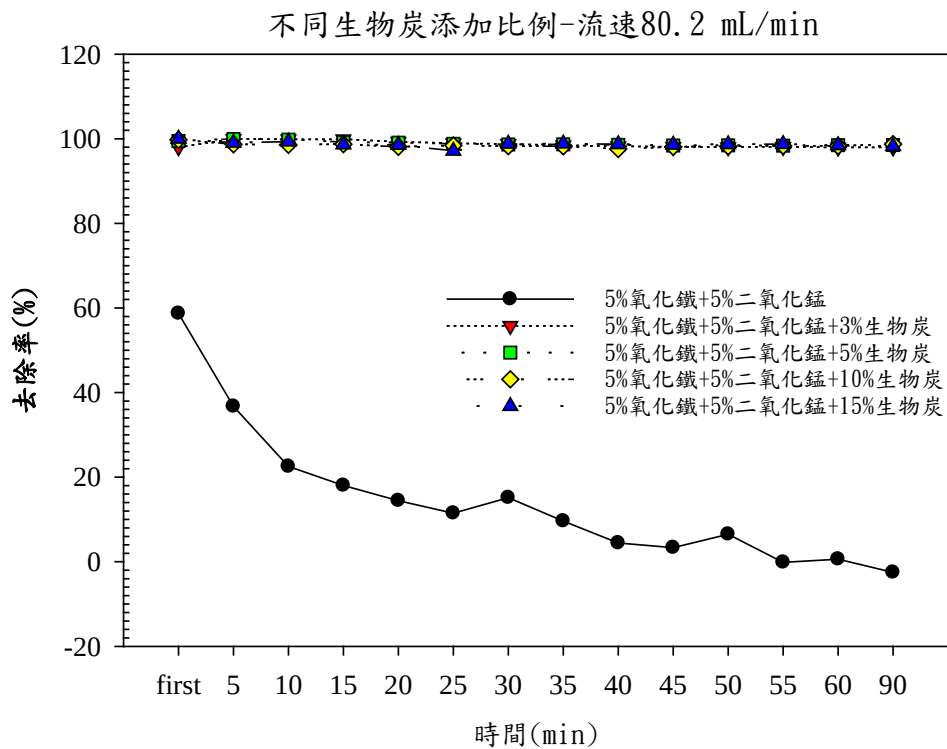


圖4.4.3.5-2 不同生物炭添加比例之陶粒對砷之去除率

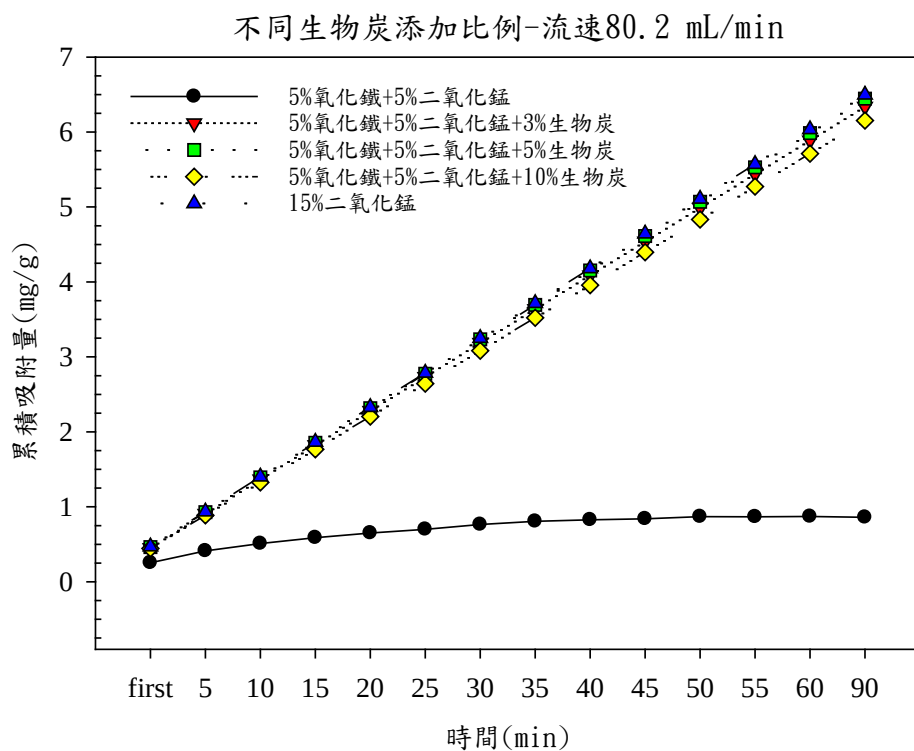


圖4.4.3.5-3 不同生物炭添加比例之陶粒對砷之累積吸附量



#### 4.4.3.6 熱脫附再生陶粒對砷之去除效率

將已進行地下水砷移除試驗之自製陶粒，挑選吸附效果達95%以上陶粒，以添加氧化鐵3%、二氧化錳5%這兩種，以加熱105℃，48小時進行熱脫附，探討藉由簡單熱脫附方式是否可讓陶粒吸附能力再生。將熱脫附後之再生陶粒以第4.4.1節方法，評估再生之陶粒對砷之去除效率。

其試驗結果如圖4.4.3.6-1至圖4.4.3.6-2所示。添加氧化鐵5%之陶粒，初始砷的去除率約66.03%；添加二氧化錳5%之陶粒，初始砷去除效率約74.00%。經過簡單的熱脫，陶粒對砷的吸附能力可以回到初始的70%左右。後續可以再進一步探討最佳之陶粒再生條件。

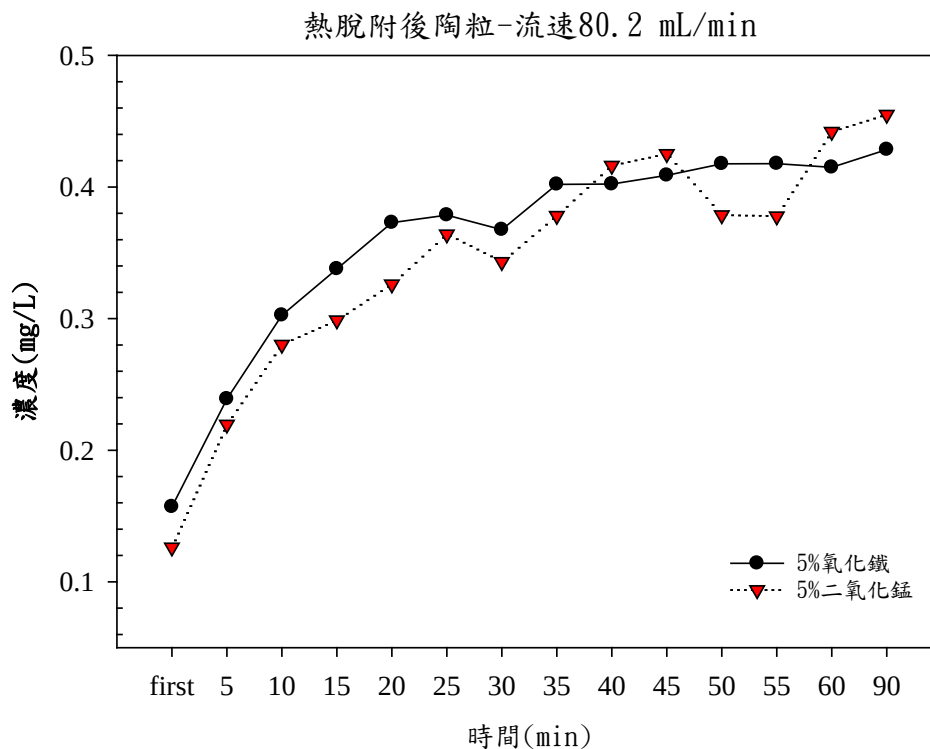


圖4.4.3.6-1 熱脫附再生陶粒對砷之移除濃度變化

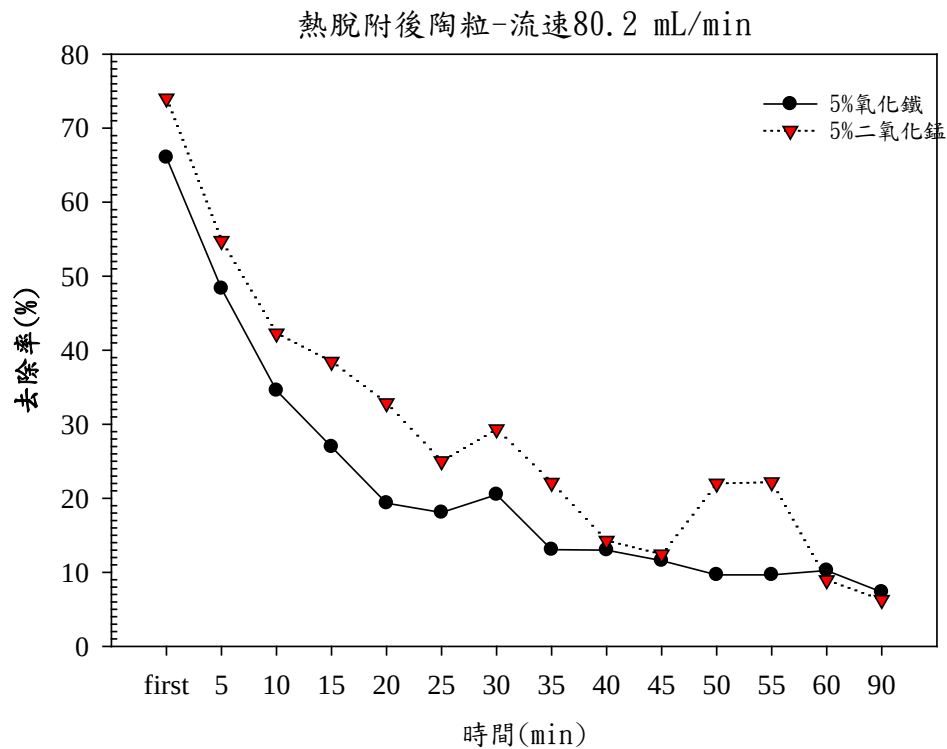


圖4.4.3.6-2 熱脫附再生之陶粒對砷之去除率

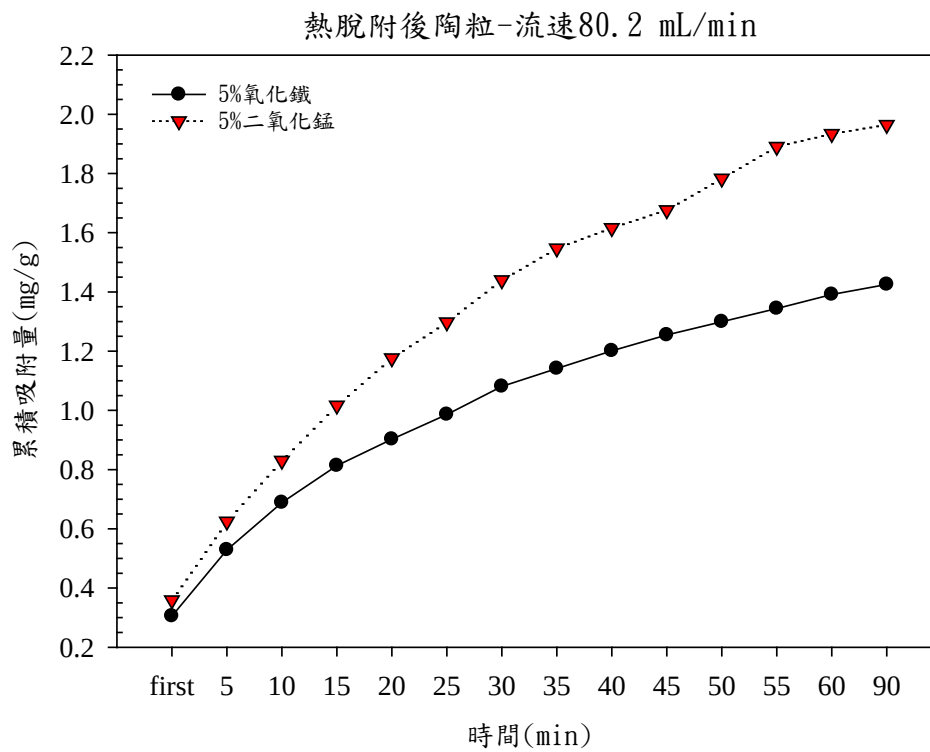


圖4.4.3.6-3 熱脫附再生陶粒對砷之累積吸附量



## 4.5 循環經濟效益

為減少廢棄物產生，減少對環境的負擔，將廢棄物變資源，使資源可以更有效率地循環再利用，並在進行綠色整治同時兼顧環境永續發展及創造循環經濟。

進行植生復育後之植體，通常於收割後須利用焚化方式再行處理。本研究於計畫開始，挑選植物除需適合生長於油污染土壤，亦需符合具有可再利用價值之植物，因此選定培地茅作為植生復育植物。培地茅可再利用製作成精油，提煉精油後的植體經過無氧高溫熱裂解，可製作成生物炭，生物炭可添加於土壤中，當作土壤改良劑或作為植生復育增強物，並達到固炭作用。也可將生物炭添加於自製陶粒中，提升陶粒吸附能力，有助於提升水中砷之移除效率。試驗結果顯示，油污染場址種植培地茅，每公頃土地每年可生產培地茅植體72.8公噸；可以捕捉29.12公噸的碳元素，相當於106.8公噸二氧化碳。土壤添加2.5%生物炭，可儲存206.25公噸的二氧化碳。每年每公頃之培地茅可提取1.16公噸精油，若作為燃料使用，可提供1160.43 GJ 熱能。油污染土壤添加生物炭進行植生復育，可促進 TPH 分解，可生產生質能，又可達到碳儲存之作用，具有多重效益。





## 第五章 結論與建議

### 5.1 油污染土壤生物復育技術

從盆栽試驗結果顯示，在沒有種植培地茅的對照組，低濃度土壤(TPH 濃度 2000 mg/kg)，6個月後 TPH 的降解率大約只有70%；中高濃度土壤(TPH 濃度5000 mg/kg、8000 mg/kg)之降解率大約只有50%。但有種植培地茅試驗組，低濃度土壤之降解率可達到90%；中高濃度土壤可達80%。顯示種植培地茅可增加 TPH 降解率達20%~30%。對於種植培地茅試驗組，在6個月至15個月試驗期間，TPH 的降解率變化較趨緩，顯示在種植培地茅植生復育下大部分的 TPH 在6個月內可以分解。在15個月時 TPH 的降解率大約維持在90%左右，顯示土壤中容易被生物分解之 TPH 大約占90%左右。雖然土壤添加生物炭試驗組之菌相豐度較單純種植培地茅試驗組低，但添加生物炭試驗組之 TPH 分解率仍略高於單純種植培地茅試驗組。顯示，土壤添加生物炭確實有其特別的作用，促進土壤 TPH 的分解。

場址模場試驗新鮮土壤區土壤 TPH 濃度分布在1322.5 ~2605.0 mg/kg 之間，平均濃度為 $1792.1 \pm 491.9$  mg/kg。風化土壤區 TPH 濃度分布在1489.9~ 2516.5 mg/kg 之間，平均濃度為 $2188.3 \pm 406.5$  mg/kg。現地試驗結果種植培地茅與施用生物炭對 TPH 的降解效率乎沒有較優於對照組，推測原因包括：(1)試驗土壤濃度較低，經過一個多月後大部分的土壤都已低於管制準，濃度低又受土壤不均質性影響，試驗結果較難顯示種植培地茅與施用生物炭的功效。(2)台中供油中心位於台中港，日照強烈風速較大，對照組土壤沒有培地茅覆蓋，蒸發散作用強，可能讓土壤中的 TPH 揮發較快。

風化區土壤 TPH 平均濃度略高於新鮮土壤區。但試驗結果顯示，新鮮土壤區之培地茅生質產量平均每樣為0.49公斤；風化土壤區為2.32公斤，風化土壤區培地茅的生質產量是新鮮土壤區的4.7倍，顯示新鮮的 TPH 污染土壤會抑制培地茅的生長。土壤添加2.5%生物炭組，新鮮土壤區培地茅的生質產量平均每樣為0.80公斤；風化土壤區平均為3.64公斤。在新鮮土壤區添加生物炭之培地茅產量是沒有添加生物炭的1.63倍；在風化土壤區是1.56倍，顯示添加生物炭有助於培地茅的生長。從現地試驗結果顯示，現地培地茅之生長情況、生質產量要高出盆栽很多，在做植物生長評估時，仍需藉由現地試驗才能較符合實際情況。



以本計畫培地茅之種植密度，每平方公尺1株，以及風化土壤添加2.5%生物炭，每平方米每半年生產培地茅3.64公斤計算，每公頃土地每年可生產培地茅植體72.8公噸。本研究以元素分析儀量測培地茅之碳元素含量，培地茅植體碳元素含量約佔40%。依此含量計算，TPH 污染場址種植培地茅，培地茅植體每年可以捕捉29.12公噸的碳元素，相當於106.8公噸二氧化碳。土壤添加2.5%生物炭，假設生物炭之碳含量佔50%；土壤添加生物炭深度為30公分，土壤密度以 $1.5 \text{ ton/m}^3$ 計算， $10000 \text{ m}^2/\text{ha} \times 0.3 \text{ m} \times 1.5 \text{ ton/m}^3 \times 2.5\% \times 50\% \times 44/12 = 206.25 \text{ ton CO}_2$ ，經計算結果，土壤生物炭添加可儲存206.25公噸的二氧化碳。土壤添加生物炭可促進 TPH 分解，可增加培地茅產量，又可達到農業廢棄物循環利用及碳儲存之作用，具有多重效益。至於生物炭在土壤中之穩定性，以及生物炭施用頻率，後續可持續探討。

培地茅具有多種用途，可提取精油；亦可當作燃料，具經濟價值。本計畫利用超臨界萃取方式進行培地茅精油萃取，試驗結果，培地茅精油萃取率可達1.6%；本計畫也以熱卡計測量培地茅之燃燒熱值。燃燒熱值約為15.94 kJ/g。依本研究試驗結果計算，每年每公頃之培地茅可提取1.16公噸精油，若作為燃料使用，可提供1160.43 GJ 熱能。

石油污染土壤添加生物炭搭配培地茅進行植生復育，不僅可加速土壤 TPH 分解效率，亦可達到減碳固碳的作用，植體可做為芳香精油的製備原料，也可提供生質能。為具經濟效益、資源循環、固碳減碳的綠色永續整治技術。

## 5.2 油污染土壤再生多孔性材料應用於富砷地下水源處理技術開發

旋轉窯結圈石移除地下水砷現地模場試驗，以嘉義縣溪口鄉之地下水進行試驗，現地地下水砷濃度大約在0.03 mg/L 左右。試驗時間每次進行240分鐘，以流速100 mL/min、200 mL/min、300 mL/min 及500 mL/min 進行試驗，各試驗之出流水砷濃度隨時間呈現逐漸降低的趨勢。顯示在240分鐘內，粗顆粒之結圈石對砷的移除能力還未達飽和，且隨著時間去除率持續增加。因地下水中砷含量較低，因此在240分鐘試驗期間累積吸附的砷量最多每公克約0.35 mg，與實驗室管柱比較顯示，確實還未達飽和吸附容量。未來需再延長試驗時間。



透過結圈石之形成條件探討，本研究模擬結圈石燒結條件，調整原料配比包括添加不同比例的氧化鐵、二氧化錳以及生物炭燒結陶粒。試驗結果顯示添加氧化鐵及二氧化錳對陶粒吸附砷的能力並未有太大影響。但添加生物炭對陶粒吸附砷的能力有很大的增強作用，不僅吸附力強，吸附容量也增加。本研究以流速80.2 mL/min 條件下，處理90分鐘的時間中，陶粒對砷的移除率幾乎都還是維持在100%，累積吸附量已超過6 mg/g，且還未出現飽和情況。添加生物炭所燒結之陶粒，對砷有很高的吸附能力，具有進一步開發潛力。因添加生物炭之結圈石在執行期程之後段製備，較晚才發現其對砷的高吸附能力，因此尚未進行相關之特性分析，了解其作用機制，後續可持續探討其最佳配比以及特性，並進行模場試驗，評估其實場化之可行性。



## 5.3 執行進度表

| 年月<br>工作項目                | 111年                                                                                                                |     |     |     |     |     |     |     | 112年 |     |     |      | 備<br>註 |
|---------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|------|--------|
|                           | 5                                                                                                                   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  | 1    | 2   | 3   | 4    |        |
| 第二年                       |                                                                                                                     |     |     |     |     |     |     |     |      |     |     |      |        |
| 油污染土壤植物/生物復育技術現地栽種試驗      |                                                                                                                     |     |     |     |     |     |     |     |      |     |     |      |        |
| 植物/生物復育試驗成效評估             |                                                                                                                     |     |     |     |     |     |     |     |      |     |     |      |        |
| 建立植物/生物復育技術參數與規範          |                                                                                                                     |     |     |     |     |     |     |     |      |     |     |      |        |
| 精油提煉技術建立及精油品質分析           |                                                                                                                     |     |     |     |     |     |     |     |      |     |     |      |        |
| 生物炭應用對植物／微生物復育油污染土壤之效益評估  |                                                                                                                     |     |     |     |     |     |     |     |      |     |     |      |        |
| 油污染土壤植生復育衍生經濟效益評估         |                                                                                                                     |     |     |     |     |     |     |     |      |     |     |      |        |
| 油污染土壤植生復育節能減碳效益評估         |                                                                                                                     |     |     |     |     |     |     |     |      |     |     |      |        |
| 2處地下水水質特性對結圈石吸附砷容量之影響評估試驗 |                                                                                                                     |     |     |     |     |     |     |     |      |     |     |      |        |
| 結圈石除砷技術應用可行性評估            |                                                                                                                     |     |     |     |     |     |     |     |      |     |     |      |        |
| 工作進度估計百分比<br>( 累 積 數 )    | 5%                                                                                                                  | 10% | 20% | 30% | 40% | 50% | 60% | 70% | 80%  | 90% | 95% | 100% |        |
| 預定查核點                     | 期中<br>*完成現地試驗植物種植<br>*完成現地試驗土壤基本特性、土壤背景濃度及菌相分析<br>*完成至少1處結圈石現地處理地下水試驗，並評估其效益<br>*完成錳含量對燒結陶粒產品特性及砷吸附特性之影響<br>*完成期中報告 |     |     |     |     |     |     |     |      |     |     |      |        |
|                           | 期末<br>*完成現地栽種試驗植體採收及試驗結果評估報告<br>*完成現地處理地下水試驗，並評估其效益<br>*完成鐵、錳、有機質含量比例對產品特性及砷吸附特性之影響試驗<br>*完成期末報告                    |     |     |     |     |     |     |     |      |     |     |      |        |





## 第六章 參考文獻

張千丰、王光華，2012。生物碳理化性質及對土壤改良效果的研究進展，土壤與作物，1(4)，219-226。

程培正，富砷土壤作物砷含量及降低地下水砷方法之研究，朝陽科大碩士論文，2018。

萬幼之，以生物炭形式進行土壤碳封存對作物生長及生理特性之影響，朝陽科大碩士論文，2022。

Beesley, L., Moreno-Jiménez, E., Gomez-Eyles, J.L., Harris, E., Robinson, B., Sizmur, T., 2011. A review of biochars' potential role in the remediation, revegetation and restoration of contaminated soils. *Environmental Pollution*, 159, 3269-3282.

Beesley, L. and Marmiroli, M., 2011. The immobilisation and retention of soluble arsenic, cadmium and zinc by biochar. *Environmental Pollution*, 159, 474-480.

Cantrell, K.B., Hunt, P.G. Uchimiya, M., Novak, J.M., Ro, K.S., 2012. Impact of pyrolysis temperature and manure source on physicochemical characteristics of biochar. *Bioresource Technology*, 107, 419–428.

Deal, C., Brewer, C.E., Brown, R.C., Okure, M.A.E., Amoding, A., 2012. Comparison of kiln-derived and gasifier-derived biochars as soil amendments in the humid tropics. *Biomass and Bioenergy*, 161-168.

Evanko, C.R. and Dzombak, D.A., Remediation of metals-contaminated soils and groundwater. Technology Evaluation Report, TE-97-01, Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center, pp. 23-24, 1997.

Ghani, W.A.W.A.K., Mohd, A., Silva, G., Bachmann, R.T., Taufiq-Yap, Y.H., Rashid, U., Al-Muhtaseb, A.H., 2013. Biochar production from waste rubber-wood-sawdust and its potential use in C sequestration: Chemical and physical characterization. *Industrial Crops and Products*, 44, 18– 24.

Hossain, M.K., Strezov, V., Chan, K.Y., Ziolkowski, A., Nelson, P.F., 2011. Influence of pyrolysis temperature on production and nutrient properties of wastewater sludge biochar. *Journal of Environmental Management* 92, 223-228.

Jiang, J., Xu, R.K., Jiang, T.Y., Li, Z., 2012. Immobilization of Cu(II), Pb(II) and Cd(II)



by the addition of rice straw derived biochar to a simulated polluted Ultisol. *Journal of Hazardous Materials*, 229– 230, 145– 150.

Jeong, C.Y., Dodla, S.K., Wang, J.J., 2016. Fundamental and molecular composition characteristics of biochars produced from sugarcane and rice crop residues and by-products. *Chemosphere*, 142, 4-13.

Duku, M.H., Gu, S., Hagan, E.B., 2011. Biochar production potential in Ghana—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 3539–3551.

Jiang, S., Huang, L.B., Nguyen, T.A.H., Ok, Y.S., Rudolph, V., Yang, H., Zhang, D., 2016. Copper and zinc adsorption by softwood and hardwood biochars under elevated sulphate-induced salinity and acidic pH conditions. *Chemosphere*, 142, 64-71.

Jung, K.W., Kim, K., Jeong, T.U., Ahn, K.H., 2016. Influence of pyrolysis temperature on characteristics and phosphate adsorption capability of biochar derived from waste-marine macroalgae (*Undaria pinnatifida* roots). *Bioresource Technology*, 200, 1024-1028.

Ma, L.Q., Komar, K.M., Tu, C., Zhang, W., A fern that hyperaccumulates arsenic, *Nature*, 409-579, 2001.

Mašek, O., Brownsort, P., Cross, A., Sohi, S., 2013. Influence of production conditions on the yield and environmental stability of biochar. *Fuel* 103, 151–155.

Mendez, A., Gomez, A., Paz-Ferreiro, J., Gasco, G., 2012. Effects of sewage sludge biochar on plant metal availability after application to a Mediterranean soil. *Chemosphere* 89, 1354 – 1359.

Miller, R.R., Phytoremediation. *Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center. (GWRTAC)-Technology Overview Report TO-96-03, GWRTACO- series, University of Pittsburgh, Pittsburgh, 1996.*

Mukherjee, A. and Zimmerman, A.R., 2013. Organic carbon and nutrient release from a range of

Quilliam, R.S., Marsden, K.A., Gertler, C., Rousk, J., DeLuca, T.H., Jones, D.L., 2012. Nutrient dynamics, microbial growth and weed emergence in biochar amended soil are influenced by time since application and reapplication rate. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 158, 192– 199.



---

Saifullah, E. Meers, M. Qadir, P. de Caritat, F.M.G. Tack, G. Du Laing, M.H. Zia, EDTA-assisted Pb phytoextraction, *Chemosphere* 74, 1279–1291, 2009.

Uras, U., Carrier, M., Hardie, A.G., Knoetze, J.H., 2012. Physico-chemical characterization of biochars from vacuum pyrolysis of South African agricultural wastes for application as soil amendments. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 98, 207–213.

Yang, G. and Jiang, H., 2014. Amino modification of biochar for enhanced adsorption of copper ions from synthetic wastewater. *Water Research* 48, 396-405.