



行政院環境保護署
110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

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： 110 年 03 月 19 日起至
111 年 02 月 28 日止

中 華 民 國 111 年 02 月 印製



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」

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

計畫年度	110 年度	計畫類型	☐ 研究型 ☒ 模場型
計畫類別	☒ 整治 ☐ 調查 ☐ 其它	主持人：程淑芬 NO：B8	
計畫名稱	油污染土壤綠色整治及創造循環經濟效益		
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員一：江康鈺委員 1. 本計畫針對生物炭與油分解菌添加與否，評估受油污染土壤之植生復育可行性，其中生物炭添加2.5%對於高濃度受油污染土壤之植物生長有較佳之影響，其原因係因生物炭之影響，抑或是環境生長條件之影響？宜有完整之說明。 2. 製備輕質化陶粒應用於含砷地下水之試驗，其中陶粒之材料特性，以及吸附砷之相關吸附特性，均宜予以建立，以利後續應用之參考。 3. 對於吸附砷後之陶粒，後續處理處置或再利用特性，建議宜進一步評估分析。		1. 感謝委員指導。本研究為探討各試驗因子之影響，各試驗組之生長環境及管理方式皆在相同的條件下操作。添加 2.5% 生物炭之培地茅植生復育組與純粹種植培地茅植生復育試驗組之土壤油分解效率差異應屬於受添加生物炭之影響。 2. 感謝委員指導，本研究透過各項試驗逐步建立不同材料配比、燒結條件之陶粒特性差異，以及對砷之吸附能力相關性。 3. 感謝委員指導，本研究後續評估結果，若確定陶粒或結圈石具有做為地下水除砷技術之可行性，將進一步探討陶粒、結圈石砷吸附後之再生技術，目前規劃探討熱脫附再生之可行性。	
委員二：李俊福委員 1. 期末報告針對一、油污染土壤生物復育技術。二、油污染土壤再生多孔性材料吸附砷，等二研究主軸撰寫，期末報告內容大致完整，成果具體，符合計畫預期目標。 2. 期末報告修正”預定”、”將”等用辭，模場場址要確定(P.2-7)(以臺中為優先)。 3. 圖 3.1 整體研究架構圖建議區分為第一年與第二年(或以虛線區隔)。 4. 請補充油分解菌來源，生物炭種類及理化特性。 5. 旋轉窯結圈石(P.3-5)，陶粒(P.4-63)與油污染土壤三者不易分辨(P.3-5~3-7 不對稱)。		1. 感謝委員肯定。 2. 感謝委員指導。遵照委員指導修正。 3. 感謝委員指導。已將研究架構圖中第一年尚未研究部分以紅色字體標示區分。 4. 感謝委員指導。本計畫所使用之油分解菌為 <i>Acinetobacter venetianus</i> (簡稱 A.V. 菌)，由中油公司培養提供本計畫使用。生物炭由本計畫採取中油高廠過去所種植的培地茅自行燒製。理化特性後續再補充分析。 5. 感謝委員指導。結圈石旋轉窯燒結過程自然形成的。陶粒是人工製備的。將在本文中再清楚區分說明。	



6. 對砷吸附機制的探討是否於第二年中進行？種培地茅為什麼可加速生物分解？	6. 感謝委員指導。第一年先比較各種材料對砷的吸附能力。第二年會嘗試分析材料對砷的吸附機制。從目前試驗結果顯示，種植植物對特定菌屬有明顯生長優勢，種植植物對土壤中菌相分布具有影響，推測植物能促使土壤微生物形成特殊菌叢。此外，根據優勢菌中的嗜酸、嗜鹼菌含量狀況，推測植物具有穩定土壤中 pH 值效果。
委員三：李有豐委員 1. 文獻回顧圖表來源應標明出處，團隊過去之研究成果亦須載明出處。 2. 就過去之土壤地下水污染調查顯示，NAPLs 容易隨著土壤滲透性、地下水位改變，但其滯留區一般不一定會在地表淺層，草本植物植生復育有其根系發展限制，現地根系深度是否足以應付污染場址需求仍有待釐清，或是需要先將需復育之土壤挖起，異地植生復育？ 3. 原計畫申請書應有提及芒草之使用，但方法敘述中未見實驗安排，請說明。此外，僅培地茅有三種實驗參數，香茅與芒草均缺，是否會有補充試驗請說明。 4. 對於試驗之植體高度有系列測量，但對於根系分布之量測可以加強補充。 5. 植生過程有強降雨淋洗，是否有未種植之空白對照組可以了解同樣環境之揮發、光反應降解、淋溶作用等造成 TPH 濃度下降之情形，以釐清植生復育效率。 6. 對於植生後續經濟價值，如提煉精油應規劃量測是否有毒性物質殘留之疑慮，若有殘留則應視為事業廢棄物對待，並進行適當之處置處理規劃。 7. 研究團隊為何選擇鐵粉添加是否有相應之文獻回顧，請補充。此外，有機質經碳化後應稱之為生物碳材料，在陶粒燒結過程中碳燒失量應做量測計算。 8. 由於結圈石比表面積不高，即使破碎後	1. 感謝委員指導，遵照委員指導修正，已備註參考文獻。 2. 感謝委員指導，植生復育整治污染土壤必須在植物根系所能分布的範圍才能發揮作用。中油團隊過去的研究經驗顯示培地茅的根系可以生長到 1 公尺深度。對於深度較深的污染土壤，本研究仍建議以挖出異地植生復育，改善成效會較均勻。 3. 本計畫執行期程為二年，原規劃芒草(或咸豐草)安排在第二年進行試驗。針對添加生物炭試驗的部分原規劃在第二年挑選第一年生長情況較佳之植物進行試驗。因剛好中油公司高雄煉油廠已有種植好的培地茅植物可提供使用，因此第一年提前以培地茅製備生物炭進行試驗。 4. 感謝委員指導，植生復育定期採收植體地上部，地下部(根部)仍持續生長，因此目前還未採收。後續待試驗完成，整株植物採收，屆時會量測植物根系生長情形。 5. 感謝委員指導，本計畫原生菌試驗組即為未種植植物之空白對照組，提供各種試驗參數組之比對。 6. 感謝委員指導，後續會針對植物以及所提煉的精油產品進行油品及其分解產物之分析，確認是否有毒性物質殘留。 7. 依據本研究團隊明春窯業多年製備輕質骨材的經驗，鐵及有機質含量是影響輕質骨材膨脹性及孔隙率最主要的因素。因此本研究先選擇鐵及有機質含量二個參數進行研究。生物炭在本研究中主要是做為補充有機質使用。因燒結過程是耗氧燃燒，生物炭皆會燒失氣化。



小時即顯著飽和並開始破出，連續式處理含砷地下水無法長時間吸附，吸附總量仍待加強。建議後續可將生物炭材料活性化形程活性碳材料並添加胺基改質提升砷去除效率。 9. 後續建議對於吸附後之結圈石進行溶出試驗，分析其吸附總量是否能與水樣濃度達到質量守恒，確保實驗品質。 10. 政策推動與整治技術提升部分請提出具體成果與效益評估。	8. 感謝委員指導。過去本研究團隊有進行生物炭改質吸附砷的試驗，確實可有效提升生物炭對砷的吸附性。本計畫目前生物炭的用途單純做為增加有機質含量。未來若利用生物炭吸附除砷，會參考委員的建議，採用不同活化技術增加生物炭對砷的吸附能力。 9. 感謝委員指導。後續確定結圈石具有應用之可行性，會遵照委員的建議進行確認。 10. 感謝委員指導。完整計畫執行完成時，會遵照委員的建議提出具體成果、校評估與建議方案。
委員四：吳一民委員 1. 計畫執行進度及成果佳，符合預期規劃。 2. 請將預定查核點工項一併寫入「5.3 執行進度表」甘特圖工作項目中，以利查核。 3. 本計畫研究目標兼具綠色整治及循環經濟之成效，是很好的研究方向，且已有初步成果，感謝辛勞。 4. 建議可加入成本效益分析，以利評估實地運用之可行性，例如：結圈石對砷去除效果大於陶粒，且因結圈石屬廢棄物成本較低，應有較佳之成本效益，為何仍規劃進行陶粒各項加工開發製成砷吸附劑？ 5. 生物炭似有不錯除油效果，建議後續可探討其除油之機制。	1. 感謝委員肯定。 2. 感謝委員指導，遵照辦理。 3. 感謝委員肯定。 4. 感謝委員指導。成本效益分析在第二年試驗結果確定除砷技術可行後會依委員建議進行評估。結圈石是廢棄物，若能做為除砷技術再利用，確實是最具經濟效益。研究人工製作陶麗，一方面想藉此探究結圈石之除砷機制，另一方面希望能掌握材料供給的穩定性。 5. 生物炭提升除油效率目前研究結果推測應是提升土壤通氣性，加速生物分解效率。



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」

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

計畫年度	110 年度	計畫類型	☐ 研究型 ☒ 模場型
計畫類別	☒ 整治 ☐ 調查 ☐ 其它	主持人：程淑芬 NO：B8	
計畫名稱	油污染土壤綠色整治及創造循環經濟效益		
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員一 1. 本計畫利用培地茅分別與油分解菌及生物炭添加，評估受油污染土壤之植生復育可行性，請以妥適之統計分析方法，歸納評估生物炭添加對試驗植物之生長狀況影響；其中受油污染程度不同之土壤影響性，亦應具體評估。 2. 請評估說明植物生長情況之量測，是否有進行重複分析？影響植物生長之因素，除試驗添加之菌種或生物炭外，其他因素(如環境因子)是否亦應考量？ 3. 本計畫陶粒之製備，係以手工搓圓方式製成 1cm 粒徑大小之陶粒，未來實際應用或量產之規劃為何？ 4. 輕質化陶粒之強度是否足夠？其中孔隙率達 50%-60%其強度是否會受到影響？未來應用時，是否會有崩解之虞。 5. 輕質化陶粒之比表面積約小於 18m²/g，未來應用於砷之吸附去除，其飽和吸附量為何？其中吸附係屬物理性或化學性之吸附？重複利用性之評估為何？		1. 感謝委員的建議，本計畫針對不同試驗組別對土壤 TPH 之分解效率及植物生長情形，將透過統計方法 T 檢定分析其差異之顯著性。 2. 感謝委員的建議，本研究每種試驗均有進行三重複。植物生長情況之量測、土壤 TPH 濃度均有進行三重複分析，計算平均值。各種試驗組皆控制在相同生長環境，以及相同的管理條件，包括施肥量及澆灌水量。 3. 陶粒在實場製作上會採用造粒機進行造粒。 4. 感謝委員之建議，目前燒製陶粒之溫度高達 1200℃ 以上，強度相當扎實，未有崩解的現象。後續若確定其具有應用可行性，會再針對其強度進行測定。 5. 感謝委員指導，本研究針對各種製備之陶粒進行試驗，若其對砷之吸附能力能與結圈石相當或優於結圈石，才具有應用潛力。會再進一步探討其吸附機制及再生方法。本研究後續會先針對結圈石的砷吸附機制及再生能力進行探討。	



委員二 1. 本計畫探討內容區分為二大主軸，其一為與中油合作結合植生復育和微生物整治技術透過模場試驗驗證油品污染土壤的整治成效。另一大項研究為探討油品污染土壤製備成多孔性吸附材料對地下水中砷的吸附。本計畫期中報告內容撰述大致完整，國內外文獻資料蒐集完備，期中成果已完成盆栽栽種，土壤、結圈石基本理化特性分析與結圈石對砷之吸附容量評估，符合 5.3 節所列之執行進度。第一年之計畫應補充說明： (a) 盆栽、輕質骨材所添加之生物炭是否相同，特性如何？ (b) 新竹、台中土壤所含有機質是否主要來自油污？ (c) 原生及添加菌種特性說明較少。 (d) 結圈石特性分析是否持續(比表面積、孔徑、表面官能基、結晶構造…)	1. 感謝委員肯定。 (a) 盆栽試驗所添加之生物炭，因希望未來植生復育所產出之培地茅植體能循環再利用，因此選用培地茅生物炭。培地茅來源為中油公司高雄煉油廠過去所種植，生長 1-2 年之培地茅地上部。輕質骨材所添加之生物炭目的是要增加有機質含量，增加陶粒之孔隙，使用稻殼製備之生物炭。 (b) 從土壤外觀及土壤有機質含量變化情形，推測土壤有機質大部分應來自油污污染。 (c) 原生菌即未添加任何菌種。添加之油分解菌為 <i>Acinetobacter venetianus</i> (威尼斯不動桿菌)，文獻指出對於柴油具有良好的分解效率。 (d) 針對結圈石特性目前分析其比表面積、密度、孔隙率及吸水率等特性。後續會再針對其官能基等特性持續進行分析，了解其對砷的去除機制。
委員三 1. 為何選用培地茅、香茅及芒草三種植物進行植生復育試驗？也請注意它適合的生長環境與條件。請參考{香茅是禾本科香茅屬（學名：<i>Cymbopogon</i>）約 55 種芳香性植物的統稱，也叫香麻，為常見的香草之一。最適種植於海拔 50 至 500 公尺，排水良好之山坡地。 (https://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%A6%99%E8%8C%85)} 2. 題目有“循環經濟”，但是報告裡沒有針對循環經濟進行說明與評估如何進行？ 3. 計畫選擇國內不同富砷地區、不同砷濃度之地下水井進行砷移除試驗，做為地下水源砷去除技術之可行性。請問吸附後的富砷結圈石最終如何處理？	1. 感謝委員指導，選用培地茅、香茅因相關文獻證實其具有植生復育成效，另因其植體可提煉精油，具經濟價值。選用芒草，因過去本團隊研究結果顯示芒草具有綿密的根系以及相當高的生質產量，具有做為植生復育植物的潛力。 2. 感謝委員指導，本研究“循環經濟”主要係指藉由植生復育所產出之植體進行再利用；以污染土製作陶粒；以及利用廢棄物結圈石做為除砷材料，廢棄物再利用具循環經濟價值。待整體研究成果具可行性時，會進一步評估其經濟循環效益。 3. 感謝委員指導。吸附後的富砷結圈石後續將再研究其送回旋轉窯加熱脫附



4. 實際進度符合預期進度。	再生之可行性。若無法再生，將依其目前處理方式做為粒料再利用。 4. 感謝委員肯定。
委員四 1. 計畫針對陶粒添加不同物質及旋轉窯結圈石對地下水砷之去除率的試驗，已有具體成果。後續對富砷地下水之試驗仍待進行。	感謝委員肯定。目前已在現地試驗不同粒徑結圈石對地下水砷之移除效率評估，初步結果顯示粗顆粒未過篩之結圈石對砷之去除效果相當好，管柱在通水 40 分鐘時砷去除效率可達 100%。未來將持續再以不同條件進行試驗，找出最適合之應用條件。此外並進一步試驗自製之陶粒對地下水砷之去除效率。
委員五 1. 專案基本資料表未簽名蓋章。 2. P.4-14,「土壤 TPH 濃度 5000 mg/kg 組種植培地茅初始高度…；兩週後生長至 67cm~“71.1cm”；…」，似與表 4.1.3-3 之數據（最高達 79.5cm）不一致，請確認。 3. P.4-18 文字第二行，「土壤 TPH 濃度 2000mg/kg 組種植”培地茅”初始高度…」應為”香茅”，請修正；第二行末端「兩週後生長至 74.8cm~”85.5cm”；…」，與表 4.1.3-4 之數據（最高達 85.8cm）不一致；第四行末端「兩週後生長至” 74.6cm”~83.7cm ；…」，與表 4.1.3-4 之數據（76.4cm）不一致，請確認。 4. P.4-36 圖 4.3.2-1 標題為「不同生物炭添加比例之陶粒對砷之移除濃度變化」，惟實際顯示之圖縱軸為去除率，請修正。	感謝委員指導，皆已遵照建議完成修正。



行政院環境保護署土壤及地下水污染整治基金管理會
110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 **審查意見回復對照表**

計畫年度	110 年度	計畫類型	☐ 研究型 ☒ 模場型
計畫類別	☒ 整治 ☐ 調查 ☐ 其它	主持人：程淑芬 NO：B8	
計畫名稱	油污染土壤綠色整治及創造循環經濟效益		
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員一			
無		感謝委員肯定。	
委員二			
可應用技術之掌控需檢核。		感謝委員肯定。	
委員三			
一、主持人與計畫執行團隊 1. 主持人(協同主持人)與執行團隊的研究及技術研究發展績效良好。 2. 主持人與執行團隊的研究能力及技術發展能力佳，足以勝任本計畫。 二、本專案對土水污染及整治的潛在價值與意義 1. 本專案計畫對國內土壤整治工作的發展具有貢獻。 2. 本計畫書撰寫具體，對研究方法的說明完整，研究方法與試驗流程具可行性。 3. 本計畫的實場應用性，期末時建議多加說明。 4. 主持人與執行團隊曾執行過土污基金會的模場(或研究)研究計畫，之前的專案執行績效佳。如果已有實務應用案例，建議多加說明。		1. 感謝委員肯定。 2. 感謝委員肯定。 3. 國內對 TPH 污染土壤處理技術需求量大，生物整治具有成本低的優勢，但技術操作條件須建立規範，成效必須獲得驗證。感謝委員的肯定與支持。 2. 感謝委員肯定。 3. 感謝委員指導。透過本計畫將針對生物整治，包括微生物及植物對 TPH 的分解，確定成效，建立操作參數。 4. 感謝委員指導。過去執行土基會模場研究計畫開發多硫化鈣製備技術及應用研究，目前已有場址諮詢並接受輔	



5. 建議說明本計畫成果實務應用的適用情境(例如：土壤質地、污染物濃度…等等)與應用的限制條件。(例如：純相的影響…等等) 6. 建議說明本計畫成果實務應用的適用情境及該情境下與其他可行整治工法的成本效益比較。	導。但因現地實場整治所需藥劑量體大、大陸藥劑便宜，多建議直接購買大陸產品。目前大陸產品應用結果有一定成效，但對環境背景條件之影響遠高於本團隊所開發之藥劑。後續式改善成效結果再評估量產開發藥劑之必要性。 5. 感謝委員指導。本計畫將針對不同 TPH 污染濃度、不同植物、微生物搭配方式進行 TPH 分解成效探討。試驗成效可作為未來實務設計應用之參考。 6. 感謝委員指導。本計畫主要針對生物整治技術進行成效驗證並建立技術規範，相同情境下其他可行整治工法之成本效益恐難取得完整且具參考性之資料。委員的意見相當寶貴及重要，本計畫盡量嘗試看看。
委員四	
本案分成兩大工項，油污染土壤生物復育技術及油污染土壤再生多孔性材料處理富砷地下水，雖然計劃書對研究架構清楚羅列，但仍停留在實驗室階段，和模場試驗有段距離。	油污染生物整治技術分為離地處理及現地處理。本計畫初期先透過離地處理方式較容易控制並區分不同操作條件之成效。地下水砷去除技術為抽出處理技術。二大工項都是現地試驗，因是離地處理方式，讓委員感覺像是實驗室階段。
委員五	
無	感謝委員肯定。
委員六	
綠色思考值得鼓勵，但是效果呈現面仍需客觀數據支持。	感謝委員肯定。效果呈現會遵照委員建議。
委員七	
本專案對未來土壤及地下水污染整治貢	感謝委員肯定。



獻度佳。	
委員八	
1. 範圍廣大，其研究野心企圖，可再稍聚焦。 2. 自評成果宜再提升。	1. 感謝委員指導。遵照委員指導將研究範圍再聚焦於生物整治成效的驗證與規範建立；以及結圈石對地下水除砷的應用。 2. 感謝委員指導。已針對研究成果之績效再行檢討修正。
委員九	
1. 考量預算有限及計畫執行期程建議 p.41(一)人事費：以編列 11 個月為上限、協同主持人月支酬金統一酌調為 10,000 元/月。 2. p.51(四)其他相關研究費-車輛租賃費依中央政府各機關學校購置及租賃公務車輛作業要點，請修正為 12,500 元/月，計 11 個月。 3. p.53(五)雜項費用 (1) 報告書印刷編列上限建議為 40 本(300 元/本)共 12,000 元。 (2) 辦公室文具及雜項費用建議以 5,000 元為限、其他耗材(如碳粉匣等)以 10,000 元為上限。 (3) 保險費編列建議參酌現行產險商品以每人每年 2,000 元為限。	感謝委員指導，針對經費編列建議皆已遵照建議完成修正。



110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：D5

一、專案基本資料表

專案性質		☒ 實驗性質 ☐ 非實驗性質		專案技術編碼		LAB-S-R-H1/C2-M	
專案類別(單選)		☐ 研究型 ☒ 模場型		研究主題		☒ 整治 ☐ 調查 ☐ 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					
	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 110 年 03 月 01 日起 至民國 111 年 02 月 28 日止					
專案主持人		姓名：程淑芬 E-mail：shufen@cyut.edu.tw		專線：04-23323000-4237 手機：0952-601977			
專/兼任人員		姓名：林旻秀 E-mail：minsiou.lin@gmail.com		專線：04-23323000-4237 手機：0932-714207			
經費分析總表	專案預估總經費		第一年申請金額	第二年申請金額	編列說明		
	1.	人事費用	489,160	1,032,000	(1~5項相加之50%為限)		
	2.	貴重儀器使用含維護費	6,500	200,000	(與計畫實驗相關)		
	3.	消耗性器材與主要費用	1,955,840	2,200,000	(與計畫主體相關)		
	4.	其它研究相關費用	137,500	500,000	(含差旅與租賃費用)		
	5.	雜項費用	37,000	100,000	(1~6項相加之5%為限)		
	6.	行政管理費	254,000	403,200	(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	4,435,200	總金額：7,315,200		
計畫總金額(1~7項)		4,880,000	6,435,200	總金額：11,315,200			

專案主持人：

程淑芬



日期：111.02.14



土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案

110 年度專案成果績效自評表

填表日期：111 年 1 月 5 日

一、專案基本資料

專案性質	☒ 實驗性質 ☐ 非實驗性質	專案類別	☐ 研究型 ☒ 模場型
研究主題	☒ 整治 ☐ 調查 ☐ 其他		
執行機構	朝陽科技大學	專案主持人	程淑芬
專案名稱	油污染土壤綠色整治及創造循環經濟效益		
專案執行期程	☐ 申請階段 ☐ 期中 ☒ 期末		

二、成果績效自評

「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 預估數	期中 達成數	期末 達成數	結案後半年 達成率	備註 (說明未達成 原因或學術產 出發表名稱)
A 學 術 產 出 及 活 動	1.國內投稿 (篇數)	(1)論文					
		(2)研討會論文	1	0	1	1	
	2.國外投稿 (篇數)	(1)期刊論文	1	0	0	1	
		(2)研討會論文	1	0	0	1	
	3.報告 (篇數)	(1)技術報告					
		(2)研究報告					
	4.專著 (本數)						
	5.辦理學術 會議(場數)	(1)研討/說明會					
		(2)成果發表會					
		(3)論壇					
6.研發改良 技術(項數)	(1)已開發技術						
	(2)技術平台						
B 人 才 培 育	7.研發人員 (人數)	(1)碩士	5			5	
		(2)博士					
	8.研究團隊 (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	1	1	1	1	
9.其他指標 (請自行命名)		(請自填)					



(二) 產業面

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 (說明未達成原因或專利、技術轉移相關詳細資料)
A 智慧 財產權	1.專利 (件數)	已 核 准	發明					
			新型/設計					
			合計					
		申 請 中	發明					
			新型/設計					
			合計					
B 研發 技術轉 移	2.先期技術 成果移轉	件數						
		授權金(仟元)						
		衍 生 利 益 金 (仟元)						
	3.技術移轉 (專利)	件數						
		授權金(仟元)						
		衍生利益金 (仟元)						
	4.技術移轉 (應用技術)	件數						
		授權金(仟元)						
		衍 生 利 益 金 (仟元)						
	5.可移轉 產業技術	(1)技術(件數)						
		(2)品種/系 (件數)						
	C 產學研 合作	6.促成合作 研究	件數					
金額(仟元)								
7.促成投資		件數						
		投資金額 (仟元)						
8.促成取得 業界科專		件數						
		業界投資金額 (仟元)						
9.其他指標 (請自行命名)		(請自填)						



(三) 政策面

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 (說明未達成原因或其他詳細資料)
項目							
A 服務 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 政策 推動	3.協助政府推動 (件數)	(1)政策	1	0	0	1	
		(2)法規					
C 技術 效益	4.整治技術提升(%)		30%	0	0	30%	
	5.整治成本降低(%)		30%	0	0	30%	
	6.提升能源效率(%)						
7.其他指標		(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) 本計畫第一年執行成果已發表於國內研討會論文一篇、，並規劃於6個月內投稿國際研討會及國際期刊論文各一篇，執行期間有5位碩士生參與。除協同主持人與顧問外，另外有業界約12人參與研究工作。
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) 旋轉窯結圈石是輕質骨材製造過程中所產生的廢棄物，本研究將結圈石應用於地下水除砷技術，將廢棄物循環再利用，創造經濟價值，提升產業廢棄物的價值。也為國內地下水除砷開發新技術。
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、污染址管理等政策及法規研訂之參考) 油品是國內土壤最主要污染物之一，生物復育法具有成本低、對土壤特性破壞小，為環境友善的整治技術。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，透過本計畫進行成效驗證並建立本土操作參數，建立國內技術規範，提升生物整治成效。 開發地下水除砷技術不僅可以提供國內富砷地區一個備用水源處理技術，也可以協助世界其他地區解決飲用水富砷的問題，符合聯合國永續發展的目標。



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、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、香茅及芒草三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，並建立本土操作參數。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，本計畫透過結圈石特性的分析，解析結圈石對砷的去除機制，並透過模場現地試驗，選擇國內不同富砷地區、不同砷濃度之地下水井進行砷移除試驗，評估結圈石對不同地區地下水砷之去除能力，吸附容量、成本效益，以及做為地下水源砷去除技術之可行性。此外，本計畫模擬結圈石之燒結條件以油污染土壤進行多孔性再生材料之製備，開發對砷具有移除能力之多孔性材料，做為富砷地區地下水源除砷資材。

試驗結果顯示，種植培地茅及香茅都可顯著提升土壤中 TPH 之分解效率，但香茅對於高濃度 TPH 之耐受性較低。添加油分解菌之促進成效較不顯著，建議可以不用添加。生物炭在高濃度土壤可增加植物的生長，亦有增加 TPH 分解的成效。另外，施用生物炭有土壤碳封存的作用，可進一步進行現地試驗，建立現地應用技術及評估碳封存能力。

目前研究結果顯示鐵粉的添加對陶粒吸水率、孔隙率、膨脹率及密度有很大的改變。鐵粉添加率15%時，陶粒之吸水率可增加至2.2倍；孔隙率增加為1.6倍；膨脹率增加為將近4倍；密度減少一半以上。生物炭添加對陶粒比表面積則有相當顯著的提升。添加15%鐵粉及15%生物炭之陶粒比表面積大約為原始土壤陶粒



的13倍。旋轉窯結圈石具有良好的吸附特性，吸水率為18.18%；孔隙率為41.1%；密度0.89 g/cm³；比表面積高達35.18 m²/g。在結圈石管柱迴流168小時後，砷去除率70%。自製陶粒對砷之去除率可達結圈石之85%。

現地初步試驗結果顯示，未粒徑分選之結圈石能有效去除地水砷，最佳去除效率可達100%，後續可再進一步建立應用方法。

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. It takes a long time for phytoremediation. If the planted plants do not have economic benefits or cannot be reused, the phytoremediation is difficult to sustain. In this project, three plants, Digress, Lemongrass and Miscanthus, 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. Affected by natural geological factors, more than 70 countries around the world are facing the problem of arsenic-rich groundwater. 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 different arsenic-rich areas and groundwater wells with different arsenic concentrations for arsenic removal test. Evaluate the removal capacity, adsorption capacity and cost-effectiveness of groundwater arsenic in different areas. 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 test results showed that both the planting of Digress and Lemongrass could significantly improve the decomposition efficiency of TPH in the soil, but the tolerance of Lemongrass to high concentrations of TPH was low. The effect of adding oil-decomposing bacteria is not significant, so it is recommended not to add it. Biochar can increase the growth of plants in high-concentration soil, and also has the effect of increasing the decomposition of TPH. In addition, the application of biochar has the effect of carbon sequestration in soil, and further field experiments can be carried out to establish field application technologies and evaluate carbon sequestration capacity.

The current research results show that the addition of iron powder greatly changes the water absorption, porosity, expansion rate and density of ceramsite. When the iron powder addition rate is 15%, the water absorption rate of the ceramsite can be increased to 2.2 times; the porosity is increased to 1.6 times; the expansion rate is increased to nearly 4 times; the density is reduced by more than half. The addition of biochar has a significant increase in the specific surface area of ceramsite. The specific surface area of the ceramsite with 15% iron powder and 15% biochar is about 13 times that of the original soil ceramsite. Rotary kiln ring stone has good adsorption characteristics, water absorption is 18.18%; porosity is 41.1%; density is 0.89 g/cm³; specific surface area is as high as 35.18 m²/g. The arsenic removal rate was 70% after refluxing the ring stone column for 168 hours. The arsenic removal rate of homemade ceramsite can reach 85% of that of ring stones.

Preliminary test results in the field show that the arsenic in the groundwater can be effectively removed from the ring stone without particle size sorting, and the optimal removal efficiency can reach 100%. The application method can be further established in the follow-up.



Keywords: bioremediation; phytoremediation; TPH; arsenic



目 錄

期末報告審查意見回復對照表

期中報告審查意見回復對照表

計畫書審查意見回復對照表

專案基本資料表

專案成果績效自評表

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.....	3-2
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.....	3-5
第四章 執行成果.....	4-1
4.1 油污染土壤生物復育技術.....	4-1
4.1.1 試驗土壤基本特性分析.....	4-1
4.1.2 盆栽試驗種植情形.....	4-4
4.1.3 植物生長情形.....	4-7



4.1.4 培地茅在各試驗組植體生質量產量差異	4-32
4.1.5 培地茅在各試驗組植株生長高度差異	4-35
4.1.6 試驗六個月土壤基本性質變化	4-39
4.1.7 各試驗組根圈土壤 TPH 濃度變化	4-44
4.1.8 各試驗組根圈土壤 TPH 去除率	4-53
4.1.9 根圈土壤菌相分析	4-59
4.2 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	4-67
4.2.1 陶粒製備	4-67
4.2.2 陶粒添加鐵粉及有機質	4-68
4.2.3 陶粒特性分析	4-73
4.2.3.1 吸水率	4-73
4.2.3.2 孔隙率	4-74
4.2.3.3 膨脹率	4-76
4.2.3.4 密度	4-77
4.2.3.5 比表面積	4-78
4.3 不同成份陶粒對砷之去除效率	4-79
4.3.1 鐵粉添加率對陶粒去除砷之影響	4-80
4.3.2 生物炭添加率對陶粒去除砷之影響	4-82
4.3.3 燒製陶粒與旋轉窯結圈石對砷之去除效率	4-84
4.3.4 不同粒徑之陶粒對砷去除效率	4-89
4.3.5 現地地下水砷移除試驗	4-98
第五章 結論及後續工作說明	5-1
5.1 結論	5-1



5.1.1 油污染土壤生物復育技術	5-1
5.1.2 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	5-3
5.2 後續工作重點說明	5-4
5.2.1 油污染土壤生物復育技術	5-4
5.2.2 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	5-6
5.3 執行進度表	5-7
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 研究架構圖	3-1
圖 3.1-1 本計畫植生復育所篩選的 3 種植物	3-3
圖 4.1.2-1 微生物分解試驗情形 (110.05.25)	4-5
圖 4.1.2-2 植生復育及其加強技術盆栽試驗 (110.05.25)	4-5
圖 4.1.3-1 【培地茅】試驗組植株平均高度變化(第一輪 5/27~11/4)	4-9
圖 4.1.3-2 【培地茅】試驗組植株平均高度變化(第二輪 11/4~1/25)	4-9
圖 4.1.3-3 【培地茅】三種濃度試驗生長情形(1/3)	4-10
圖 4.1.3-3 【培地茅】三種濃度試驗生長情形(2/3)	4-11
圖 4.1.3-3 【培地茅】三種濃度試驗生長情形(3/3)	4-12
圖 4.1.3-4 【培地茅+油分解菌】試驗組植株平均高度變化(第一輪 5/27~11/4)	4-15
圖 4.1.3-5 【培地茅+油分解菌】試驗組植株平均高度變化(第二輪 11/4~1/25)	4-15
圖 4.1.3-6 【培地茅+油分解菌】三種濃度試驗生長情形(1/3)	4-16
圖 4.1.3-6 【培地茅+油分解菌】三種濃度試驗生長情形(2/3)	4-17
圖 4.1.3-6 【培地茅+油分解菌】三種濃度試驗生長情形(3/3)	4-18
圖 4.1.3-7 【培地茅+生物炭 2.5%】試驗組植株平均高度變化(第一輪 5/27~11/4)	4-21
圖 4.1.3-8 【培地茅+生物炭 2.5%】試驗組植株平均高度變化(第二輪 11/4~1/25)	4-21



圖 4.1.3-9 【培地茅+生物炭 2.5%】三種濃度試驗生長情形(1/3).....	4-22
圖 4.1.3-9 【培地茅+生物炭 2.5%】三種濃度試驗生長情形(2/3).....	4-23
圖 4.1.3-9 【培地茅+生物炭 2.5%】三種濃度試驗生長情形(3/3).....	4-24
圖 4.1.3-10 【香茅】試驗組植株平均高度變化(第一輪 5/27~9/2).....	4-27
圖 4.1.3-11 【香茅】試驗組植株平均高度變化(第二輪 9/2~1/14).....	4-28
圖 4.1.3-12 【香茅】試驗組植株平均高度變化(第三輪 1/14~1/25).....	4-28
圖 4.1.3-13 【香茅】三種濃度試驗生長情形(1/3)	4-29
圖 4.1.3-13 【香茅】三種濃度試驗生長情形(2/3)	4-30
圖 4.1.3-13 【香茅】三種濃度試驗生長情形(3/3)	4-31
圖 4.1.4-1 培地茅植體生質量(第一次修剪)	4-34
圖 4.1.4-1 香茅植體生質量(第一、二次修剪)	4-34
圖 4.1.5-1 【試驗濃度 2000 mg/kg】培地茅植株平均高度變化(第一輪 5/27~11/4)	4-36
圖 4.1.5-2 【試驗濃度 2000 mg/kg】培地茅植株平均高度變化(第二輪 11/4~1/25)	4-36
圖 4.1.5-3 【試驗濃度 5000 mg/kg】培地茅植株平均高度變化(第一輪 5/27~11/4)	4-37
圖 4.1.5-4 【試驗濃度 5000 mg/kg】培地茅植株平均高度變化(第二輪 11/4~1/25)	4-37
圖 4.1.5-5 【試驗濃度 8000 mg/kg】培地茅植株平均高度變化(第一輪 5/27~11/4)	4-38
圖 4.1.5-6 【試驗濃度 8000 mg/kg】培地茅植株平均高度變化(第二輪 11/4~1/25)	4-38
圖 4.1.6-1 試驗六個月土壤 pH 變化.....	4-42
圖 4.1.6-2 試驗六個月土壤導電度變化.....	4-42



圖 4.1.6-3 試驗六個月土壤含水率變化	4-43
圖 4.1.6-4 試驗六個月土壤有機質變化	4-43
圖 4.1.7-1 【原生菌】根圈土壤 TPH 濃度變化	4-45
圖 4.1.7-2 【油分解菌】根圈土壤 TPH 濃度變化	4-46
圖 4.1.7-3 【培地茅】根圈土壤 TPH 濃度變化	4-48
圖 4.1.7-4 【培地茅+油分解菌】根圈土壤 TPH 濃度變化	4-49
圖 4.1.7-5 【培地茅+生物炭 2.5%】根圈土壤 TPH 濃度變化	4-51
圖 4.1.7-6 【香茅】根圈土壤 TPH 濃度變化	4-52
圖 4.1.8-1 【試驗濃度 2000 mg/kg】微生物分解試驗組 TPH 濃度變化	4-54
圖 4.1.8-2 【試驗濃度 5000 mg/kg】微生物分解試驗組 TPH 濃度變化	4-55
圖 4.1.8-3 【試驗濃度 8000 mg/kg】微生物分解試驗組 TPH 濃度變化	4-55
圖 4.1.8-4 【試驗濃度 2000 mg/kg】植生復育及其加強技術組 TPH 濃度變化 .4-57	
圖 4.1.8-5 【試驗濃度 5000 mg/kg】植生復育及其加強技術組 TPH 濃度變化	4-57
圖 4.1.8-6 【試驗濃度 8000 mg/kg】植生復育及其加強技術組 TPH 濃度變化	4-58
圖 4.1.9-1 各濃度土壤初始之優勢菌屬	4-59
圖 4.1.9-2 【試驗濃度 2000 mg/kg】試驗五個月土壤之優勢菌屬	4-61
圖 4.1.9-3 【試驗濃度 5000 mg/kg】試驗五個月土壤之優勢菌屬	4-62
圖 4.1.9-4 【試驗濃度 8000 mg/kg】試驗五個月土壤之優勢菌屬	4-63
圖 4.1.9-5 Acinetobacter 菌屬在土壤中含量變化	4-64
圖 4.1.9-6 Pseudomonas 菌屬在土壤中含量變化	4-65
圖 4.1.9-7 HB2-32-21 菌屬在土壤中含量變化	4-66



圖 4.2.2-1 不同鐵粉添加比例燒結之陶粒外觀(1/2)	4-69
圖 4.2.2-1 不同鐵粉添加比例燒結之陶粒外觀(2/2)	4-70
圖 4.2.2-2 不同生物炭添加比例燒結之陶粒外觀(1/2)	4-71
圖 4.2.2-2 不同生物炭添加比例燒結之陶粒外觀(2/2)	4-72
圖 4.2.3.1-1 鐵粉含量對陶粒吸水率之影響	4-73
圖 4.2.3.1-2 生物炭添加率對陶粒吸水率之影響	4-74
圖 4.2.3.2-1 鐵粉添加率對陶粒孔隙率之影響	4-75
圖 4.2.3.2-2 生物炭添加率對陶粒孔隙率之影響	4-75
圖 4.2.3.3-1 鐵粉添加率對陶粒膨脹率之影響	4-76
圖 4.2.3.3-2 生物炭添加對陶粒膨脹率之影響	4-77
圖 4.3-1 批次流動式管柱砷吸附試驗配置圖	4-79
圖 4.3.1-1 不同鐵粉添加比例之陶粒對砷之移除濃度變化	4-80
圖 4.3.1-2 不同鐵粉添加比例之陶粒對砷之去除率	4-81
圖 4.3.1-3 不同鐵粉添加比例之陶粒對砷之累積吸附量	4-81
圖 4.3.2-1 不同生物炭添加比例之陶粒對砷之移除濃度變化	4-82
圖 4.3.2-2 不同生物炭添加比例之陶粒對砷之去除率	4-83
圖 4.3.2-3 不同生物炭添加比例之陶粒對砷之累積吸附量	4-83
圖 4.3.3-1 旋轉窯結圈石外觀	4-85
圖 4.3.3-2 自製陶粒與旋轉窯結圈石對砷移除濃度變化(未破碎)	4-85
圖 4.3.3-3 自製陶粒與與旋轉窯結圈石對砷之移除率(未破碎)	4-86
圖 4.3.3-4 自製與陶粒與與旋轉窯結圈石對砷之累積吸附量(未破碎)	4-86
圖 4.3.3-5 自製陶粒與旋轉窯結圈石對砷之移除濃度變化(已破碎)	4-87
圖 4.3.3-6 自製陶粒與旋轉窯結圈石對砷之去除率(已破碎)	4-88



圖 4.3.3-7 自製陶粒與旋轉窯結圈石對砷之累積吸附量(已破碎)	4-88
圖 4.3.4-1 不同粒徑結圈石(第一批)對砷之移除濃度變化(流速 5.3 mL/min) ..	4-90
圖 4.3.4-2 不同粒徑結圈石(第一批)對砷之去除率(流速 5.3 mL/min)	4-90
圖 4.3.4-3 不同粒徑結圈石(第一批)對砷之累積吸附量(流速 5.3 mL/min)	4-91
圖 4.3.4-4 不同粒徑結圈石(第一批)對砷之移除濃度變化(流速 30.5 mL/min)	4-92
圖 4.3.4-5 不同粒徑結圈石(第一批)對砷之去除率(流速 30.5 mL/min)	4-92
圖 4.3.4-6 不同粒徑結圈石(第一批)對砷之累積吸附量(流速 30.5 mL/min)	4-93
圖 4.3.4-7 不同粒徑結圈石(第二批)對砷之移除濃度變化(流速 10.2 mL/min)	4-94
圖 4.3.4-8 不同粒徑結圈石(第二批)對砷之去除率(流速 10.2 mL/min)	4-94
圖 4.3.4-9 不同粒徑結圈石(第二批)對砷之累積吸附量(流速 10.2 mL/min)	4-95
圖 4.3.4-10 不同粒徑浮料對砷之移除濃度變化(流速 10.2 mL/min)	4-96
圖 4.3.4-11 不同粒徑浮料對砷之去除率(流速 10.2 mL/min)	4-96
圖 4.3.4-12 不同粒徑浮料對砷之累積吸附量(流速 10.2 mL/min)	4-97
圖 4.3.5-1 現地使用結圈石外觀	4-98
圖 4.3.5-2 現地管柱砷移除試驗配置示意圖	4-99
圖 4.3.5-3 現地管柱砷移除試驗操作照片	4-99
圖 4.3.5-4 不同粒徑結圈石對砷之移除濃度變化	4-101
圖 4.3.5-5 不同粒徑結圈石對砷之去除率	4-101



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-新竹供油服務中心 ..	2-7
表 2.4-2. 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 ..	2-8
表 2.4-3. 富砷地下水砷移除試驗場址資料	2-8
表 4.1.1-1 新竹及台中供油中心土壤基本性質	4-1
表 4.1.1-2 新竹及台中供油中心土壤肥力分析	4-1
表 4.1.1-3 新竹及台中供油中心土壤 TPH 濃度	4-2
表 4.1.1-4 盆栽試驗土壤基本性質	4-2
表 4.1.1-5 盆栽試驗土壤肥力分析	4-3
表 4.1.6-4 土壤 TPH 濃度	4-3
表 4.1.2-1 盆栽試驗期程	4-6
表 4.1.3-1 【培地茅】試驗組植株高度(第一輪 5/27~11/4)	4-8
表 4.1.3-2 【培地茅】試驗組植株高度(第二輪 11/4~1/25)	4-8
表 4.1.3-3 【培地茅+油分解菌】試驗植株高度(第一輪 5/27~11/4)	4-14
表 4.1.3-4 【培地茅+油分解菌】試驗植株高度(第二輪 11/4~1/25)	4-14
表 4.1.3-5 【培地茅+生物炭 2.5%】試驗植體高度(第一輪 5/27~11/4)	4-20
表 4.1.3-6 【培地茅+生物炭 2.5%】試驗植體高度(第二輪 11/4~1/25)	4-20
表 4.1.3-7 【香茅】試驗植體高度(第一輪 5/27~9/2)	4-26
表 4.1.3-8 【香茅】試驗植體高度(第二輪 9/2~1/14)	4-26
表 4.1.3-9 【香茅】試驗植體高度(第三輪 1/14~1/25)	4-27
表 4.1.4-1 培地茅植體生質量(第一次修剪)	4-33
表 4.1.4-2 香茅植體生質量(第一、二次修剪)	4-33
表 4.1.6-1 試驗六個月土壤基本性質(1/3)	4-39



表 4.1.6-1 試驗六個月土壤基本性質(2/3)	4-40
表 4.1.6-1 試驗六個月土壤基本性質(3/3)	4-41
表 4.1.7-1 【原生菌】試驗根圈土壤 TPH 濃度	4-44
表 4.1.7-2 【油分解菌】試驗根圈土壤 TPH 濃度	4-46
表 4.1.7-3 【培地茅】試驗根圈土壤 TPH 濃度	4-47
表 4.1.7-4 【培地茅+油分解菌】試驗根圈土壤 TPH 濃度	4-49
表 4.1.7-5 【培地茅+生物炭 2.5%】試驗根圈土壤 TPH 濃度	4-50
表 4.1.7-6 【香茅】試驗根圈土壤 TPH 濃度	4-52
表 4.1.8-1 各試驗組根圈土壤 TPH 平均濃度	4-53
表 4.1.8-2 各試驗根圈土壤 TPH 去除率	4-53
表 4.2.3.4-1 各種組成陶粒之顆粒密度	4-78
表 4.2.3.5-1 各種組成陶粒之比表面積	4-78
表 4.3.3-1 旋轉窯結圈石特性	4-84
表 4.3.4-1 實驗型管柱所使用之陶粒	4-89
表 4.3.5-1 各粒徑結圈石去除地下水砷最佳去除效果	4-100



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、及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、香茅及咸豐草為對油污染土壤具高耐受性及高分解能力的植物，因此本計畫選擇此三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。

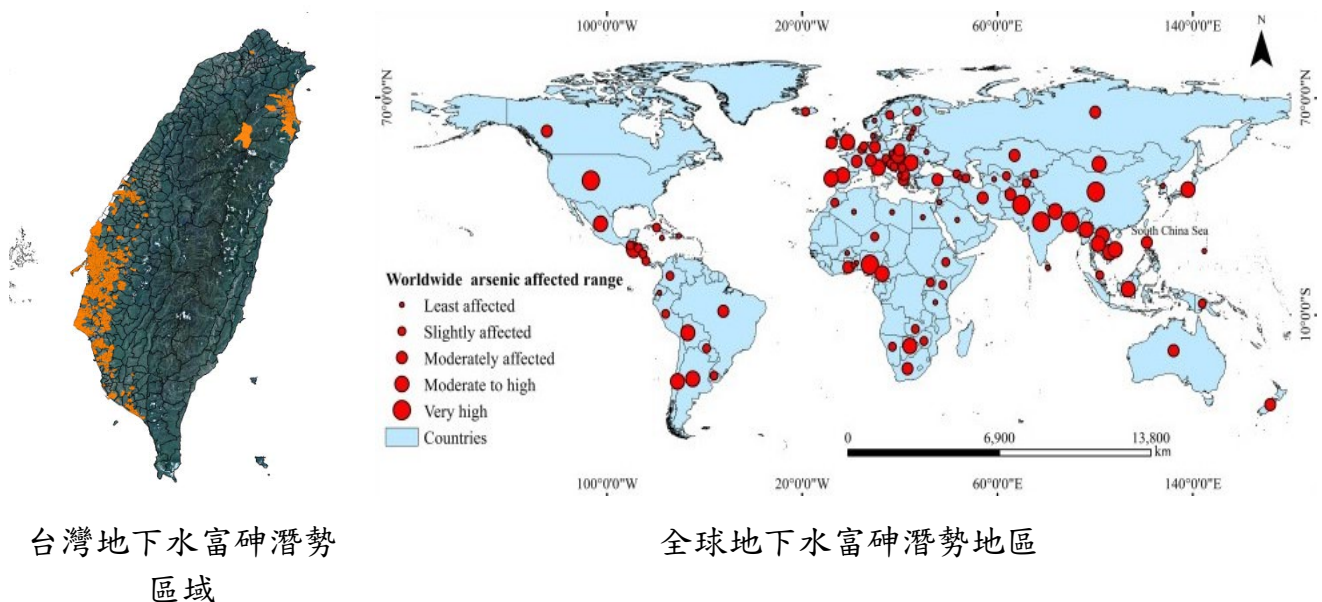


圖1.1-1 地下水富砷潛勢地區



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。開發地下水除砷技術不僅可以提供國內富砷地區一個備用水源處理技術，也可以協助世界其它地區解決飲用水富砷的問題。

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，對砷有很強的吸附去除能力。因此，本計畫透過結圈石特性的分析，解析結圈石對砷的去除機制，並透過模場現地試驗，選擇國內不同富砷地區、不同砷濃度之地下水井進行砷移除試驗，評估結圈石對不同地區地下水砷之去除能力，吸附容量、成本效益，以及做為地下水源砷去除技術之可行性。

透過結圈石生成條件的探討以及其特性了解，本計畫模擬結圈石之燒結條件以油污染土壤進行多孔性再生材料之製備，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、香茅及咸豐草三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。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，本計畫透過結圈石特性的分析，解析結圈石對砷的去除機制，並透過模場現地試驗，選擇國內不同富砷地區、不同砷濃度之地下水井進行砷移除試驗，評估結圈石對不同地區地下水砷之去除能力，吸附容量、成本效益，以及做為地下水源砷去除技術之可行性。此外，本計畫模擬結圈石之燒結條件以油污染土壤進行多孔性再生材料之製備，開發對砷具有移除能力之多孔性材料，做為富砷地區地下水源除砷資材。



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氮化合物。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 CO₂ 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 m²/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 結圈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%。顯示結圈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

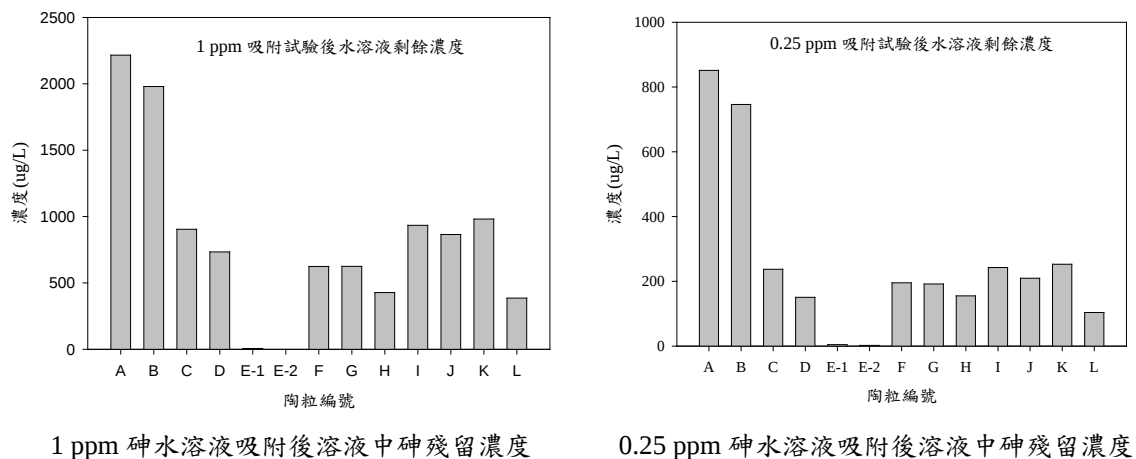


圖2.3-2 不同資材對砷的吸附移除能力

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預定以台灣中油股份有限公司新竹供油服務中心控制場址或台中供油公司為預定場址。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』篩選出雲林縣地下水富砷水井進行模場試驗。場址資料如下所示：

表2.4-1. 油品污染生物整治技術模場試驗場址基本資料-新竹供油服務中心

場址名稱	台灣中油股份有限公司竹苗營業處新竹供油服務中心
主管機關	新竹市政府
場址座標	(X):249534, (Y):2744140
場址地址	新竹市東區公道五路二段426號
場址地號	新竹市東明段13的號
場址種類	儲槽
場址面積	54,531 (m ²)
場址列管狀態	控制場址
土壤污染物	苯最高濃度：9.52 mg/kg 總石油碳氫化合物最高濃度：33,000 mg/kg
地下水污染物	總石油碳氫化合物最高濃度：76.6 mg/L 甲基第三丁基醚最高濃度：1.59 mg/L 苯最高濃度：0.172 mg/L



表2.4-2. 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 ²)
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

表2.4-3. 富砷地下水砷移除試驗場址資料

雲林縣	地 號	地下水砷濃度(mg/L)
大埤鄉	舊庄段2111地號	0.71
	舊庄段2112地號	0.74
	舊庄段2125地號	0.30
	舊庄段2131地號	0.30
四湖鄉	溪尾段新溪小段163地號	0.71
	安慶段271地號	0.71
	成功段1426地號	0.74
水林鄉	西鹿段254地號	0.09
	西井段1340地號	0.13
	灣東段168地號	0.14

參考資料：建構富砷地下水及農地土壤砷濃度預警管理機制計畫，期末報告，環保署



第三章 研究內容與方法

本計畫『油污染土壤綠色整治及創造循環經濟效益』研究架構如圖3-1所示。
圖中紅色字體部分為第二年開始執行的部分。

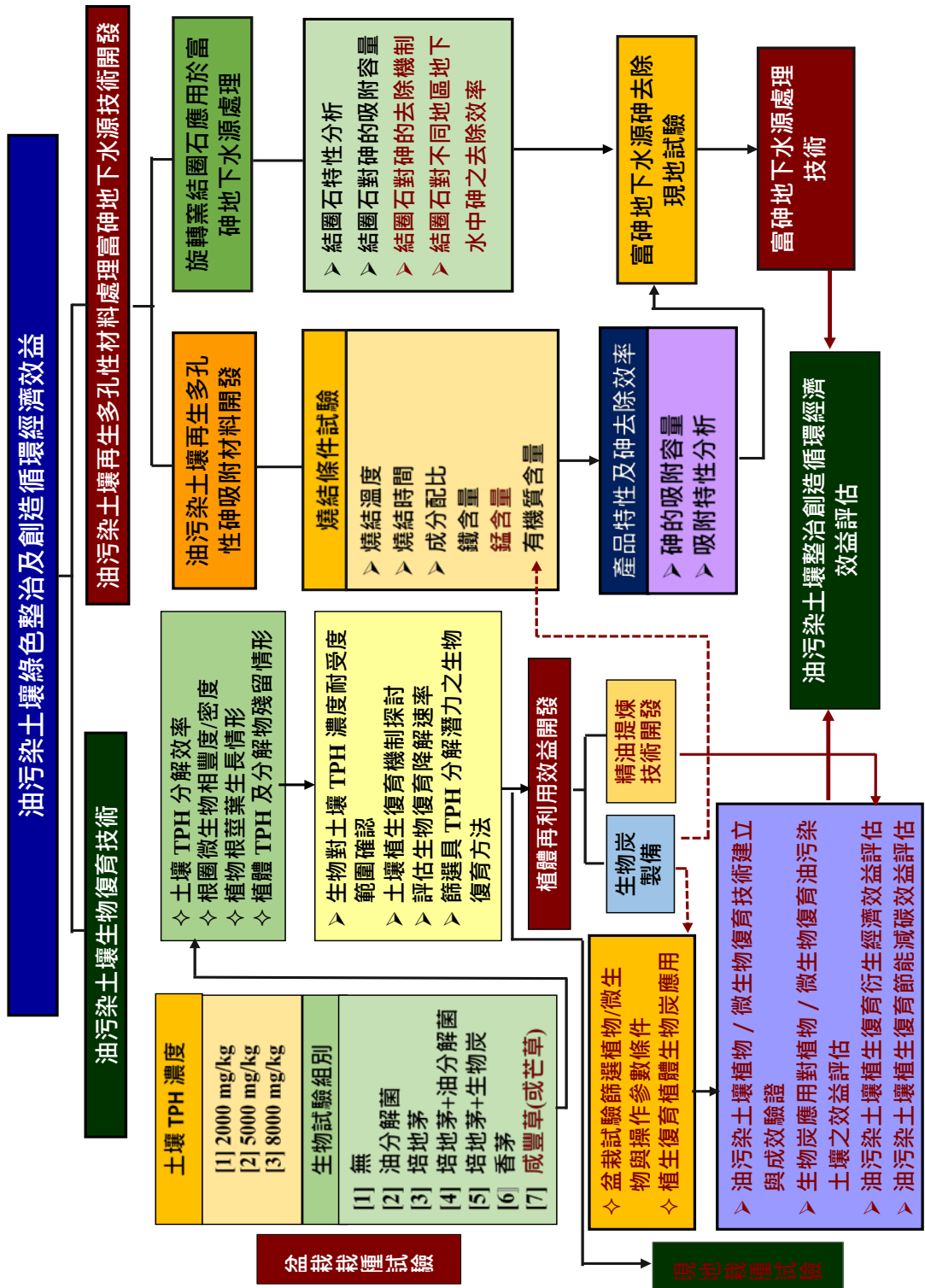


圖3.1 研究架構圖



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

【第一年】

1. 具降解油污染濃度潛力之生物整治技術篩選

- 本計畫選擇培地茅、香茅及芒草三種植物如圖3.1-1所示，搭配土壤原生菌、油分解菌及生物炭，先以盆栽方式進行試驗。第一年先針對下列六種試驗組別，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) 培地茅+生物炭(2.5%)
- (6) 香茅

- 試驗土壤準備：從高碳數油品污染場址中以土壤簡易分析方法(TPH test kit)篩選不同 TPH 污染濃度土壤進行試驗，規劃分為三種濃度，分別為 TPH 平均濃度約2000 mg/kg、5000 mg/kg 及8000 mg/kg。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。高濃度油品污染土壤取自中油台中供油服務中心；低濃度土壤取自中油新竹供油中心污染土壤，透過高濃度與低濃度土壤的混合，調配 TPH 大約2000 mg/kg、5000 mg/kg 及8000 mg/kg 的試驗土壤。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。



- 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。
- 植物種植前、中及採收前，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。



培地茅



香茅



五節芒

圖3.1-1 本計畫植生復育所篩選的3種植物

- 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。
- 評估不同試驗組植物對土壤 TPH 濃度耐受度範圍。
- 比較不同試驗組別 TPH 分解效率，探討植生復育降解 TPH 之作用機制。
- 篩選具 TPH 分解潛力之生物復育方法，評估生物復育降解速率及建立操作參數。

【第二年】

1. 具降解油污染濃度潛力之生物整治技術篩選

- 本年度針對第一年度之試驗組持續進行試驗，確認植物、微生物對 TPH 污



染土壤之分解效率。另外再選擇咸豐草(或芒草)進行試驗。搭配土壤原生菌及生物炭，以盆栽方式進行試驗，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54盆。

(1) 無-土壤原生菌種

(2) 咸豐草(或芒草)

(3) 咸豐草(或芒草)+生物炭

(4) 第一年試驗組持續分解效率試驗

- 試驗土壤準備：高濃度油品污染土壤取自中油台中供油服務中心；低濃度土壤取自中油新竹供油中心污染土壤，透過高濃度與低濃度土壤的混合，調配 TPH 大約2000 mg/kg、5000 mg/kg 及8000 mg/kg 的試驗土壤。為方便盆栽管理，盆栽試驗規劃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。
- 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。
- 植物種植前、中及採收前，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。

2. 生物整治技術現地試驗成效驗證及操作參數建立

- 依據盆栽試驗結果篩選至少2種具有降解油污染濃度潛力之生物整治方法、操作條件進行現地栽種試驗。現地栽種試驗選擇台中供油中心為試驗場址，以豐德油庫作為備用場址。
- 每一試驗組種植3個坵塊，每一坵塊面積約2 m×3 m。試驗面積依試驗組別及可供試驗土壤量體做調整。
- 依各種植物之生長習性進行水分及肥力管理。
- 每2個月採集土壤，進行土壤 TPH 圖譜及濃度分析，評估 TPH 分解速率及各種化合物濃度變化。



- 植物種植前及採收前，採集根圈土壤，進行土壤菌相豐度及密度分析，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。
- 驗證油污染土壤植物／微生物復育成效，建立油污染土壤生物復育技術操作參數。

3. 植生復育植體再利用效益開發

- 培地茅、香茅植體精油提煉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特性分析。
- 生物炭搭配生物整治成效試驗。依第一年盆栽試驗結果所篩選具有潛力之生物整治技術進行試驗。生物炭施用率分為三種比例：0%、2.5%及5%，每一試驗組別進行三重複試驗。
- 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。

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

【第一年】

1. 旋轉窯結圈石基本特性分析及砷吸附能力評估

- 旋轉窯結圈石特性分析，包括：孔隙率、比表面積、表面官能基、結晶構造等。
- 等溫吸附批次試驗、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。採集嘉義富砷地區之地下水，分析地下水之一般基本特性。透過管柱吸附試驗評估地下水特性對結圈石吸附砷能力之影響。

2. 旋轉窯結圈石移除地下水砷現地模場試驗

- 選擇至少1處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，圓柱管柱之直徑及長度依據飽和吸附容量評估結果決定。
- 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。
- 評估以結圈石做為地下水飲用水源除砷技術之可行性。

3. 油污染土壤再生多孔性砷吸附材料技術開發

- 模擬結圈石在旋轉窯內之形成過程，利用油污染土壤燒結多孔性材料。多孔性材料之特性主要受燒結溫度、燒結時間、成分配比之影響。其中成分配比主要關鍵成分包括鐵以及有機質含量。
- 本年度探討因子為燒結溫度、燒結時間對產品特性及砷吸附特性之影響。燒結溫度範圍選擇900°C~1300°C之間三種以上不同溫度。燒結時間在10分鐘~1小時之間進行測試。
- 高溫爐之溫度必須能加熱至1300°C以上。先以高溫爐進行試燒，確定各項操作條件參數在合適的範圍。
- 以實驗室方法進行多孔性材料製備。
- 進行產品特性分析，包括孔隙率、比表面積、表面官能基、結晶構造等。
- 以批次等溫吸附試驗、管柱貫穿試驗，進行產品砷吸附試驗。評估產品對砷飽和吸附容量。



- 篩選最佳燒結溫度、燒結時間。

【第二年】

1. 旋轉窯結圈石移除地下水砷現地模場試驗

- 選擇至少2處不同區域之地下水井進行砷移除現地試驗。
- 依據第一年試驗結果，進行處理系統及操作參數修正優化。
- 評估不同地區地下水質特性對結圈石砷移除能力之影響。
- 建立結圈石處理富砷地下水之設計參數，並進行成效驗證。
- 技術應用可行性及經濟效益評估。

2. 油污染土壤再生多孔性砷吸附材料技術開發

- 鐵、錳以及有機質含量對燒結多孔性吸附產品特性及砷吸附特性之影響。
- 鐵、錳、有機質含量範圍規劃在1~10%之間，搭配不同燒結溫度、燒結時間。
- 有機質來源包括生物炭及其他有機資材。
- 進行各種配比產品之特性分析及砷吸附能力試驗。
- 建立油污染土壤再生多孔性砷吸附材料技術。



第四章 執行成果

4.1 油污染土壤生物復育技術

4.1.1 試驗土壤基本特性分析

盆栽試驗之土壤取自新竹供油中心及台中供油中心兩處之污染土壤，兩處土壤之基本性質、肥力及 TPH 濃度如表4.1.1-1至表4.1.1-3所示。

二處土壤質地均為砂土，主要皆受高碳數油品污染，新竹供油中心 $\text{TPH}_{\text{C}_{10}\sim\text{C}_{40}}$ 濃度平均92.8 mg/kg，台中供油中心 $\text{TPH}_{\text{C}_{10}\sim\text{C}_{40}}$ 濃度平均11286 mg/kg。

表4.1.1-1 新竹及台中供油中心土壤基本性質

樣品	粒徑分布(%)			土壤質地	含水率 (%)	pH	導電度 ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	有機質 (%)
	砂粒	粉粒	黏粒					
新竹	97.96	2.02	0.02	砂土	2.37	6.82	134.0	6.87
台中	97.99	2.00	0.01	砂土	0.76	7.55	176.3	8.63

表4.1.1-2 新竹及台中供油中心土壤肥力分析

樣品	Ca	Cu	Mg	P	K	Fe	Mn	Zn
	(mg/kg)							
新竹	192.47	0.57	41.07	69.35	0.67	4.87	1.13	0.08
台中	195.23	0.17	27.00	67.31	0.72	7.73	0.83	0.14



表4.1.1-3 新竹及台中供油中心土壤 TPH 濃度

樣品名稱	MTBE (mg/kg)	BETX (mg/kg)	TPHC _{6~C9} (mg/kg)	TPHC _{10~C40} (mg/kg)
新竹供油中心-1	ND	ND	ND	ND
新竹供油中心-2	ND	ND	ND	152.7
新竹供油中心-3	ND	ND	ND	125.7
新竹供油中心-平均	--	--	--	92.8
台中供油中心 A-1	ND	ND	2.12	10040
台中供油中心 A-2	ND	ND	9.11	11810
台中供油中心 A-3	ND	ND	8.35	9390
台中供油中心 B-1	--	--	--	14910
台中供油中心 B-2	--	--	--	10280
台中供油中心-平均	--	--	--	11286

將兩處之土壤混和調配成 TPH 濃度 2000 mg/kg、5000 mg/kg、8000 mg/kg 三種濃度，混和後土壤基本性質如表 4.1.1-4，肥力分析結果如表 4.1.1-5，土壤 TPH 濃度如表 4.1.1-4。

2000 mg/kg 分析之土壤 TPH_{C10~C40} 濃度平均 3029 mg/kg，5000 mg/kg 分析之土壤 TPH_{C10~C40} 濃度平均 4617 mg/kg，8000 mg/kg 分析之土壤 TPH_{C10~C40} 濃度平均 7865 mg/kg。

表4.1.1-4 盆栽試驗土壤基本性質

樣品	粒徑分布(%)			土壤質地	含水率 (%)	pH	導電度 (μ S/cm)	有機質 (%)
	砂粒	粉粒	黏粒					
2000	97.96	2.02	0.02	砂土	1.75	6.97	171.2	7.43
5000	97.97	2.01	0.02	砂土	1.38	7.39	169.8	7.90
8000	97.98	2.01	0.01	砂土	0.57	7.60	167.7	8.67



表4.1.1-5 盆栽試驗土壤肥力分析

樣品	Ca	Cu	Mg	P	K	Fe	Mn	Zn
	(mg/kg)							
2000	150.10	0.63	31.80	88.63	0.82	6.68	1.17	0.11
5000	151.37	0.67	29.90	104.50	0.50	4.45	0.72	0.09
8000	103.70	0.63	19.47	90.46	0.59	4.25	0.64	0.09

表4.1.6-4 土壤 TPH 濃度

樣品	TPH _{C10-C40} (mg/kg)
2000-1	3265
2000-2	2027
2000-3	3796
2000-平均	3029
5000-1	4799
5000-2	5122
5000-3	3930
5000-平均	4617
8000-1	9431
8000-2	6611
8000-3	7553
8000-平均	7865



4.1.2 盆栽試驗種植情形

本年度盆栽試驗種植培地茅及香茅，土壤分為三種 TPH 濃度，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

盆栽試驗期程如表4.1.2-1，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，試驗情形如圖4.1.2-1。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，種植情形如圖4.1.2-2。

調配 TPH 濃度約2000 mg/kg、5000 mg/kg 及8000 mg/kg 三種濃度土壤，進行盆栽分裝，每盆土壤約30公斤。針對【油分解菌】組及【培地茅+油分解菌】組之油分解菌於植物種植前約1星期(110年5月19日)添加第一次菌液，每盆添加1公升原液，以澆灌植物之自來水1:1稀釋。於6月10日追加第二次菌液，每盆亦添加1公升原液，以澆灌植物之自來水1:1稀釋。油分解菌組別所添加之菌株為 *Acinetobacter venetianus*，為中油公司培養提供。【培地茅+生物炭2.5%】試驗組於5月24日添加生物炭2.5%，約加入750克進行混拌。生物炭以培地茅植體製作，培地茅植體取自中油公司高雄煉油廠污染場址所種植，生長於 TPH 污染土地約1-2年時間，採取培地茅地上部，待植物體風乾後再放入高溫爐以550度燒製1小時。

於110年5月25日進行培地茅及香茅種植。培地茅每盆種植2叢；香茅種植3叢。依盆栽試驗規劃期程(表4.1.2-1)進行栽種試驗。每兩週量測植體高度，每兩個月分析土壤 TPH 濃度，在種植試驗前及種植後5個月採取植物根圈土壤分析菌相。原規劃種植六個月進行植體採收，分析植體 TPH 濃度，但因栽種過程中發現植



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

體生長一段時間後會出現枝葉枯黃情形。因此，本研究針對枯黃的植體先進行採收。種植約三個月時修剪香茅；種植約五個月時修剪培地茅，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。



圖4.1.2-1 微生物分解試驗情形 (110.05.25)



圖4.1.2-2 植生復育及其加強技術盆栽試驗 (110.05.25)



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 盆栽試驗期程

日期	加菌液	加生物炭	種植植物	量植株高度	土壤 TPH 檢測	土壤菌相檢測	備註
110/05/19	●				●	●	盆栽種植前準備
110/05/24		●					
110/05/25			●				植物種植
110/05/27				●(初始)			
110/06/10	●						加菌液後連日大雨
110/06/11				●			
110/06/25				●			種植一個月
110/07/09				●			
110/07/23				●	●		種植二個月
110/08/05				●			
110/08/20				●			
110/08/27				●			種植三個月
110/09/02				修剪香茅			
110/09/10				●			
110/09/24				●	●		種植四個月
110/10/08				●			
110/10/22				●		●	種植五個月
110/11/04				● 修剪 培地茅茅			
110/11/18				●			
110/11/24				●	●		種植六個月
110/12/10				●			
110/12/24				●			種植七個月
111/01/07				●			
111/01/21				●			
111/01/28				●	●		種植八個月



4.1.3 植物生長情形

110年5月25日種植培地茅及香茅，統計至12月24日種植時間約七個月。5月27日量測植體初始高度，為方便後續觀察生長情形及量測植株高度，將每盆培地茅及香茅剪短至相同高度，每兩週量一次植株高度，每盆以最高之植體為量測對象。但因栽種過程中發現植體生長一段時間後會出現枝葉枯黃情形。因此，本研究針對枯黃的植體先進行採收。於9月2日種植約三個月時修剪香茅，在11月4日種植約五個月時修剪培地茅，均保留30至40公分植物體繼續進行盆栽試驗，各試驗組植物生長情形分別說明如下：

1. 【培地茅】試驗組

【培地茅】試驗植體高度紀錄如表4.1.3-1及表4.1.3-2，不同試驗組別植株平均生長高度如圖4.1.3-1及圖4.1.3-2所示。

在第一輪5月27日開始種植至11月4日進行修剪期間，土壤 TPH 濃度2000 mg/kg 組培地茅初始平均高度為35.33 cm；兩週後生長至70.63 cm；四週時88.97 cm；八週時104.33 cm；十二週時106.07 cm；十六週時生長至100.93 cm；滿二十週修剪前為107.67 cm。土壤 TPH 濃度5000 mg/kg 組植培地茅初始平均高度為36.0 cm；兩週後生長至75.43 cm；四週時94.8 cm；八週時111.0 cm；十二週時109.83 cm；十六週時生長至112.2 cm；滿二十週修剪前為116 cm。土壤 TPH 濃度8000 mg/kg 組培地茅初始平均高度為35.33 cm；兩週後生長至66.83 cm；四週時84.77 cm；八週時106.33 cm；十二週時99.73 cm；十六週時生長至103.2 cm；滿二十週修剪前為112.67 cm。

在第二輪11月4日修剪後至111年1月25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40.0 cm；兩週後生長至44.5 cm；四週時50.33 cm；八週時58.33 cm；十週時61.70 cm；十二週時63.20 cm。土壤 TPH 濃度5000 mg/kg 組種植培地茅修剪後平均高度為35.67 cm；兩週後生長至52.83 cm；四週時56.67 cm；八週時66.67 cm；十週時71.53 cm；十二週時73.73 cm。土壤 TPH 濃度8000 mg/kg 組種植培地茅修剪後平均高度為34.33 cm；兩週後生長至46.67 cm；四週時50.33 cm；八週時平均高度70.0 cm；十週時74.17 cm；十二週時68.17 cm。

培地茅在三種 TPH 濃度土壤平均生長高度第一輪及第二輪以5000 mg/kg > 8000 mg/kg > 2000 mg/kg，但在第一輪三種濃度土壤之培地茅生長高度差異不大，



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

第二輪在土壤濃度2000 mg/kg 所生長的培地茅植株高度顯著低於8000 mg/kg 及 5000 mg/kg 試驗組。圖4.1.3-3為【培地茅】在三種 TPH 濃度土壤生長情形。

表4.1.3-1 【培地茅】試驗組植株高度(第一輪5/27~11/4)

組別 時間	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
5月27日	36	35	35	35.33	38	35	35	36.00	36	36	34	35.33
6月11日	74.2	68.2	69.5	70.63	75.6	68.2	82.5	75.43	69.5	68.5	62.5	66.83
6月25日	91.5	80.2	95.2	88.97	96.7	94.5	93.2	94.80	86.5	85.5	82.3	84.77
7月9日	100	101.2	96.5	99.23	108.2	106.2	103.5	105.97	95.5	85.5	100.5	93.83
7月23日	108	105	100	104.33	112	111	110	111.00	108	105	106	106.33
8月5日	108	106.2	100	104.73	113.5	111	110.1	111.53	108	105.2	106.1	106.43
8月20日	108	106.8	109.8	108.20	117.1	104.4	109.9	110.47	99.1	93.1	102.9	98.37
8月27日	106.5	104.2	107.5	106.07	122.2	102.2	105.1	109.83	97.6	95.5	106.1	99.73
9月10日	95.5	102.5	105	101.00	122	104.5	109.1	111.87	93	91.5	98.5	94.33
9月24日	84.6	107.7	110.5	100.93	122.5	103.5	110.6	112.20	99	101.4	109.2	103.20
10月8日	95.1	105	105.5	101.87	120	110	111.6	113.87	100	108.3	109.1	105.80
10月22日	98	112	116	108.67	123	112	114	116.33	110	109	115	111.33
11月4日	98	111	114	107.67	125	107	116	116.00	114	113	111	112.67

表4.1.3-2 【培地茅】試驗組植株高度(第二輪11/4~1/25)

組別 時間	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	38	45	37	40.00	37	35	35	35.67	37	33	33	34.33
11月18日	43.5	40	50	44.50	57.5	47	54	52.83	50	47	43	46.67
11月24日	48	53	50	50.33	65	55	50	56.67	55	50	46	50.33
12月10日	51	62	52	55.00	65	57	61.8	61.27	68	49.9	56	57.97
12月24日	56	63	56	58.33	73	59	68	66.67	63	62	85	70.00
1月7日	59	65.6	60.5	61.70	73.1	66.5	75	71.53	72	65.5	85	74.17
1月21日	60	64	65.6	63.20	76.5	67.5	77.2	73.73	68.5	66.5	69.5	68.17
1月25日	62	63	65.9	63.63	79.5	77.1	77.1	77.90	78	68	67.5	71.17

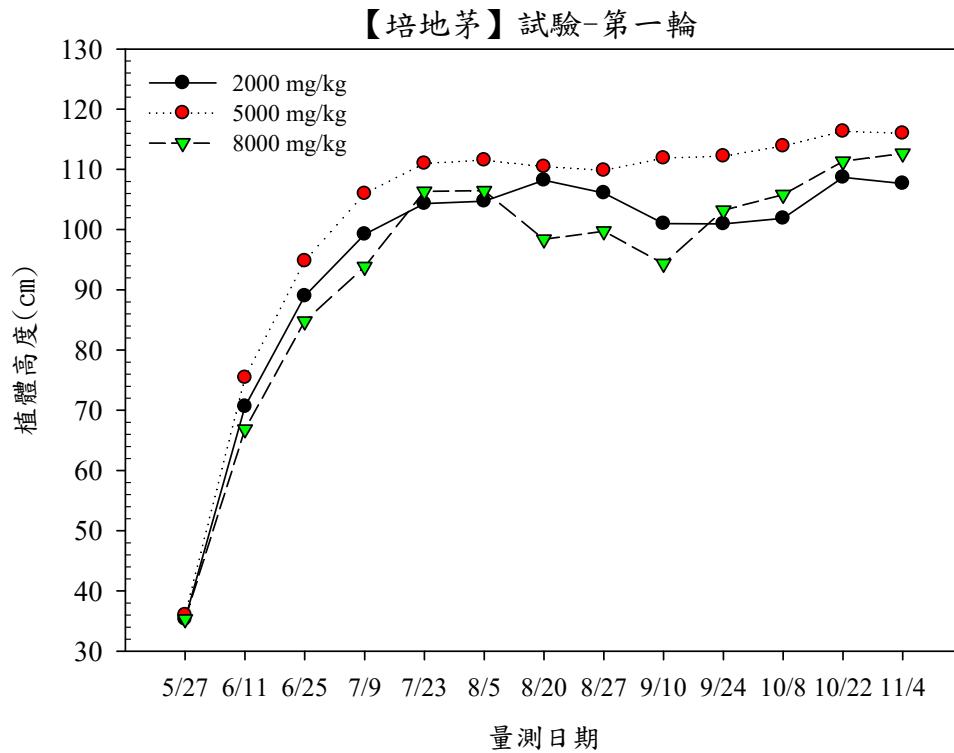


圖4.1.3-1 【培地茅】試驗組植株平均高度變化(第一輪5/27~11/4)

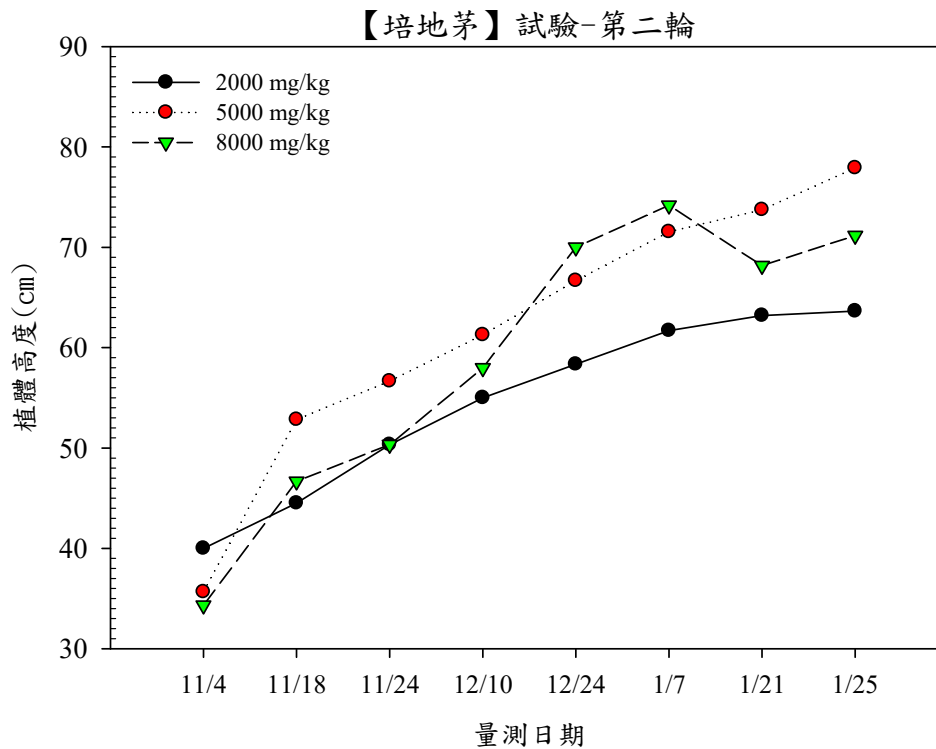


圖4.1.3-2 【培地茅】試驗組植株平均高度變化(第二輪11/4~1/25)

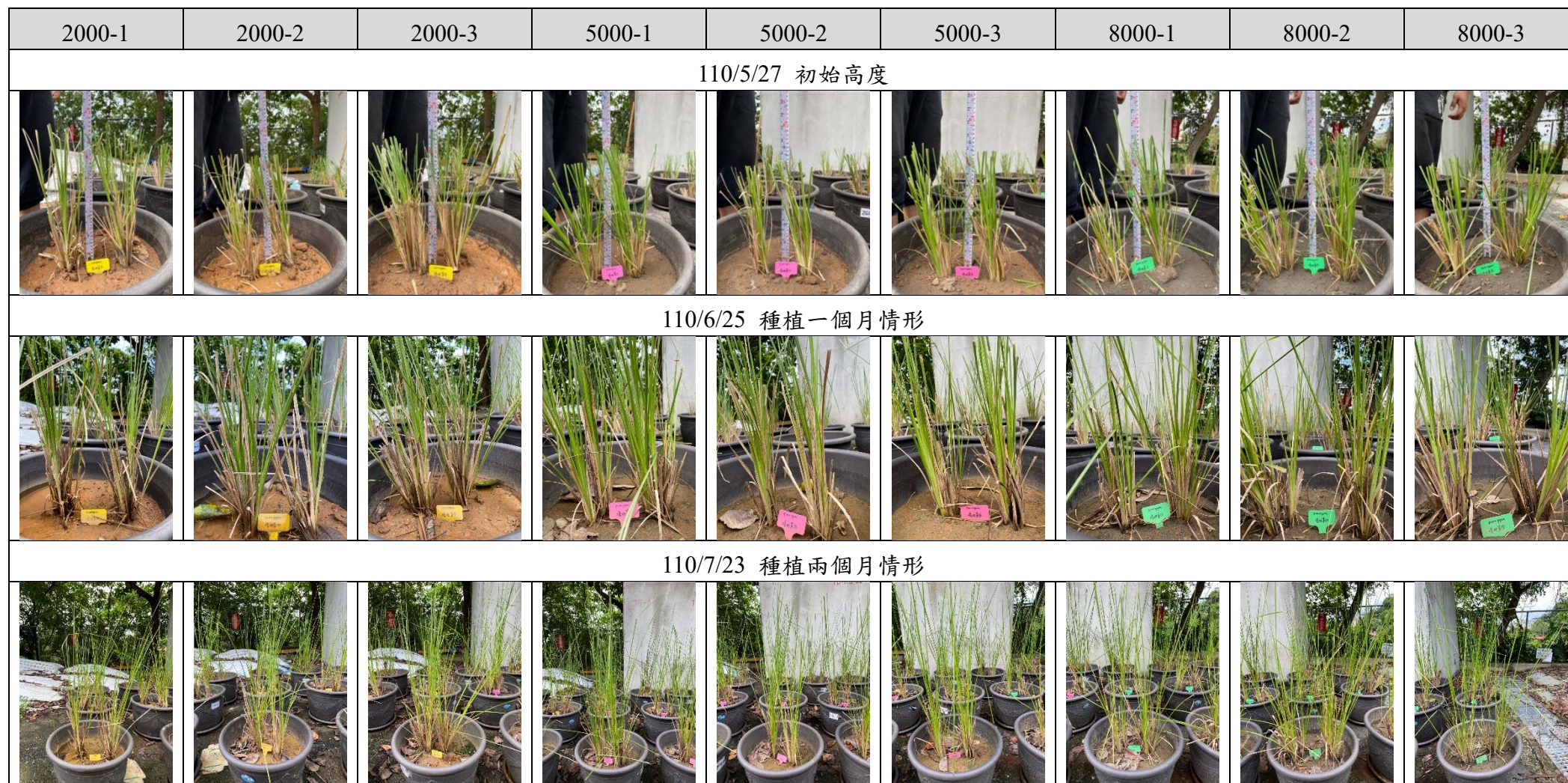


圖4.1.3-3 【培地茅】三種濃度試驗生長情形(1/3)

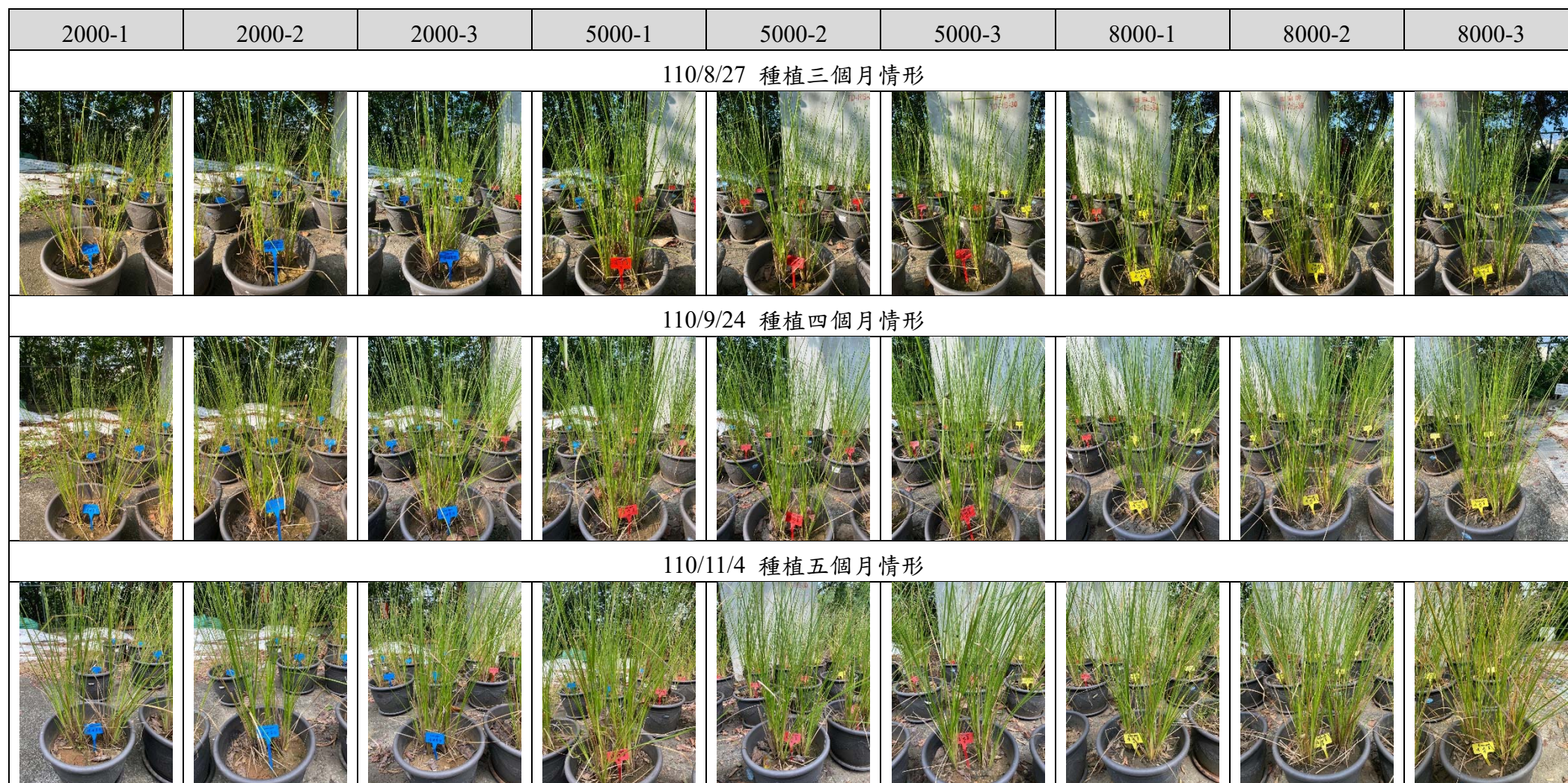


圖4.1.3-3 【培地茅】三種濃度試驗生長情形(2/3)

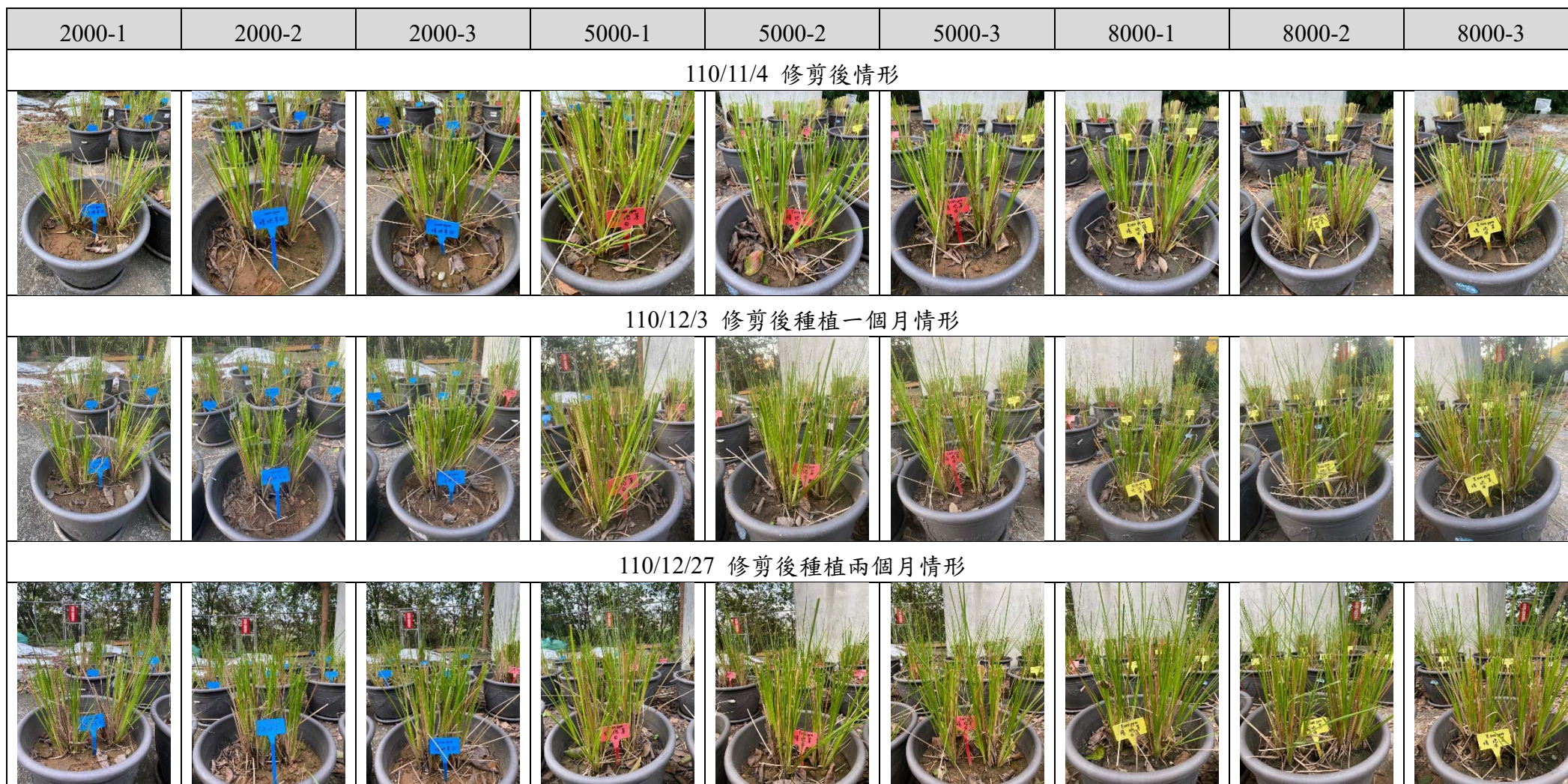


圖4.1.3-3 【培地茅】三種濃度試驗生長情形(3/3)



2. 【培地茅+油分解菌】試驗組

【培地茅+油分解菌】試驗組植株高度紀錄如表4.1.3-3及表4.1.3-4，不同試驗組別植株生長高度變化如圖4.1.3-4及圖4.1.3-5所示。

在第一輪5月27日開始種植至11月4日修剪期間，土壤 TPH 濃度2000 mg/kg 組培地茅初始平均高度為36.67 cm；兩週後生長至67.73 cm；四週時84.23 cm；八週時106.67 cm；十二週時114.03 cm；十六週時119.4 cm；滿二十週修剪前為115.67 cm。土壤 TPH 濃度5000 mg/kg 組種植培地茅初始平均高度為34.0 cm；兩週後生長至65.8 cm；四週時92.3 cm；八週時112.0 cm；十二週時124.17 cm；十六週時133.33 cm；滿二十週修剪前為137.33 cm。土壤 TPH 濃度8000 mg/kg 組種植培地茅初始平均高度為34.33 cm；兩週後生長至70.57 cm；四週時98.9 cm；八週時115.67 cm；十二週時131.17 cm；十六週時141.27 cm；滿二十週修剪前為142.33 cm。

在第二輪11月4日修剪後至111年1月25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31.33 cm；兩週後生長至50.0 cm；四週後56.67 cm；八週後平均為79.33 cm；十週時82.0 cm；十二週時84.73 cm。土壤 TPH 濃度5000 mg/kg 組種植培地茅修剪後平均高度為33.67 cm；兩週後生長至54.17 cm；四週時76.8 cm；八週時平均高度為86 cm；十週時90.0 cm；十二週時95.67 cm。土壤 TPH 濃度8000 mg/kg 組種植培地茅修剪後平均高度30.67為 cm；兩週後生長至65.0 cm；四週時70.33 cm；八週時平均高度為102.67 cm；十週時107.67 cm；十二週時104.67 cm。

培地茅在三種 TPH 濃度土壤平均生長高度第一輪以及第二輪皆為8000 mg/kg > 5000 mg/kg > 2000 mg/kg。圖4.1.3-6為【培地茅+油分解菌】在三種濃度生長情形。從目前兩輪結果顯示土壤 TPH 濃度越高，培地茅生長狀況越好。



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4.1.3-3 【培地茅+油分解菌】試驗植株高度(第一輪5/27~11/4)

組別 時間	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
5月27日	35	35	40	36.67	34	32	36	34.00	35	34	34	34.33
6月11日	67.5	64.2	71.5	67.73	66.5	61.4	69.5	65.80	76.2	63.5	72	70.57
6月25日	83.1	89.6	80	84.23	89.5	93.2	94.2	92.30	98.2	99.5	99	98.90
7月9日	87.1	95.9	99.5	94.17	107.1	95.1	106.1	102.77	103.2	110	109.6	107.60
7月23日	98	110	112	106.67	112	114	110	112.00	113	119	115	115.67
8月5日	103.1	110.5	114.5	109.37	113.1	114.2	115.1	114.13	113.5	120.1	117	116.87
8月20日	104.6	113.1	124.6	114.10	119.3	122.2	115.7	119.07	132.8	133.6	130.3	132.23
8月27日	103.6	114.5	124	114.03	130	122.5	120	124.17	133.5	132	128	131.17
9月10日	104	112.1	128	114.70	137.5	124.1	128	129.87	137	136	138	137.00
9月24日	125.1	110	123.1	119.40	135	132.5	132.5	133.33	140	145.3	138.5	141.27
10月8日	116.1	122	121.5	119.87	133	135	133.5	133.83	139	145.5	136	140.17
10月22日	118	112	122	117.33	138	138	133	136.33	140	152	139	143.67
11月4日	119	112	116	115.67	140	139	133	137.33	140	150	137	142.33

表4.1.3-4 【培地茅+油分解菌】試驗植株高度(第二輪11/4~1/25)

組別 時間	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	30	32	32	31.33	35	33	33	33.67	34	33	25	30.67
11月18日	49	49	52	50.00	59	53	50.5	54.17	64	72	59	65.00
11月24日	59	52	59	56.67	64	61	59	61.33	74	68	69	70.33
12月10日	70	64.5	68	67.50	90.2	75	65.2	76.80	90	103	80	91.00
12月24日	85	80	73	79.33	92	98	68	86.00	101	107	100	102.67
1月7日	87	83	76	82.00	97	103	70	90.00	107	108	108	107.67
1月21日	79.2	95	80	84.73	107	105	75	95.67	103	105	106	104.67
1月25日	88.2	91.2	81.2	86.87	103	105	75	94.33	101.2	106.5	106	104.57

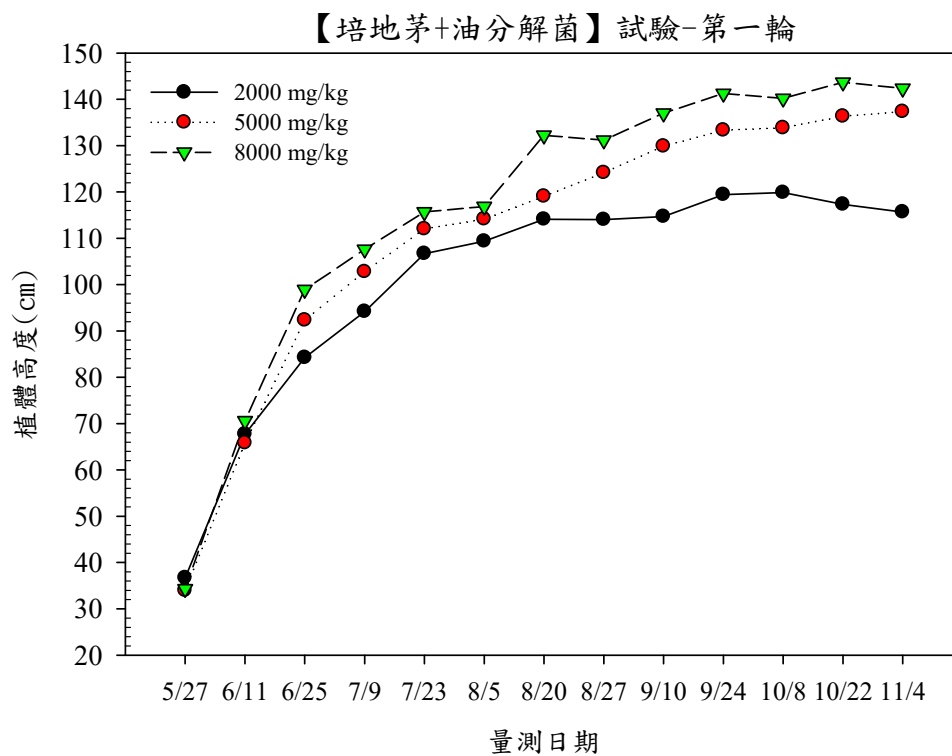


圖4.1.3-4 【培地茅+油分解菌】試驗組植株平均高度變化(第一輪5/27~11/4)

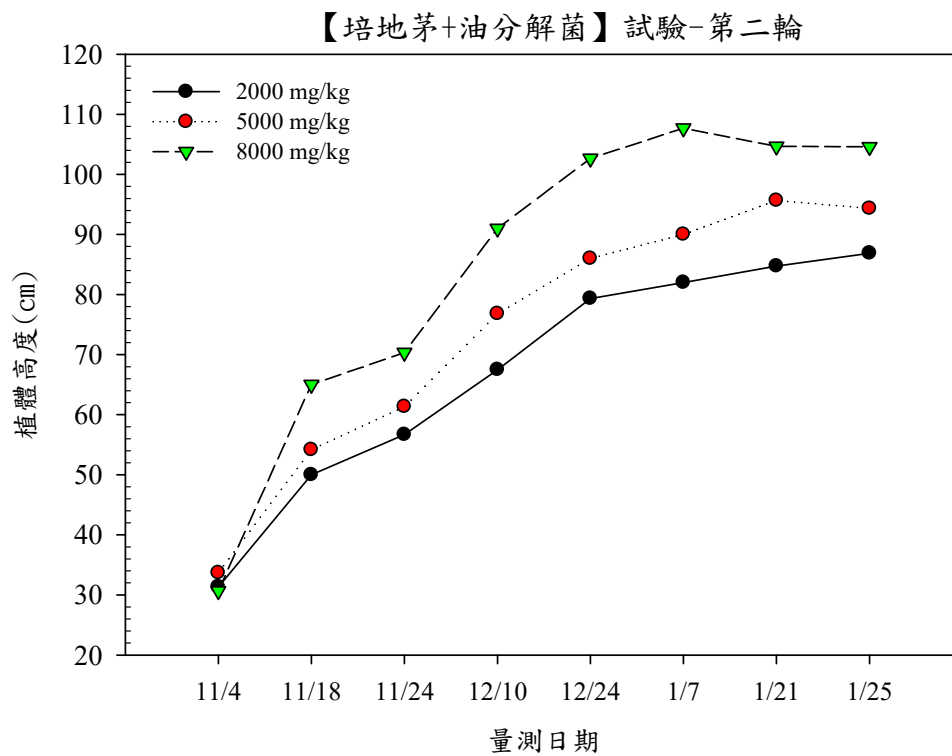


圖4.1.3-5 【培地茅+油分解菌】試驗組植株平均高度變化(第二輪11/4~1/25)

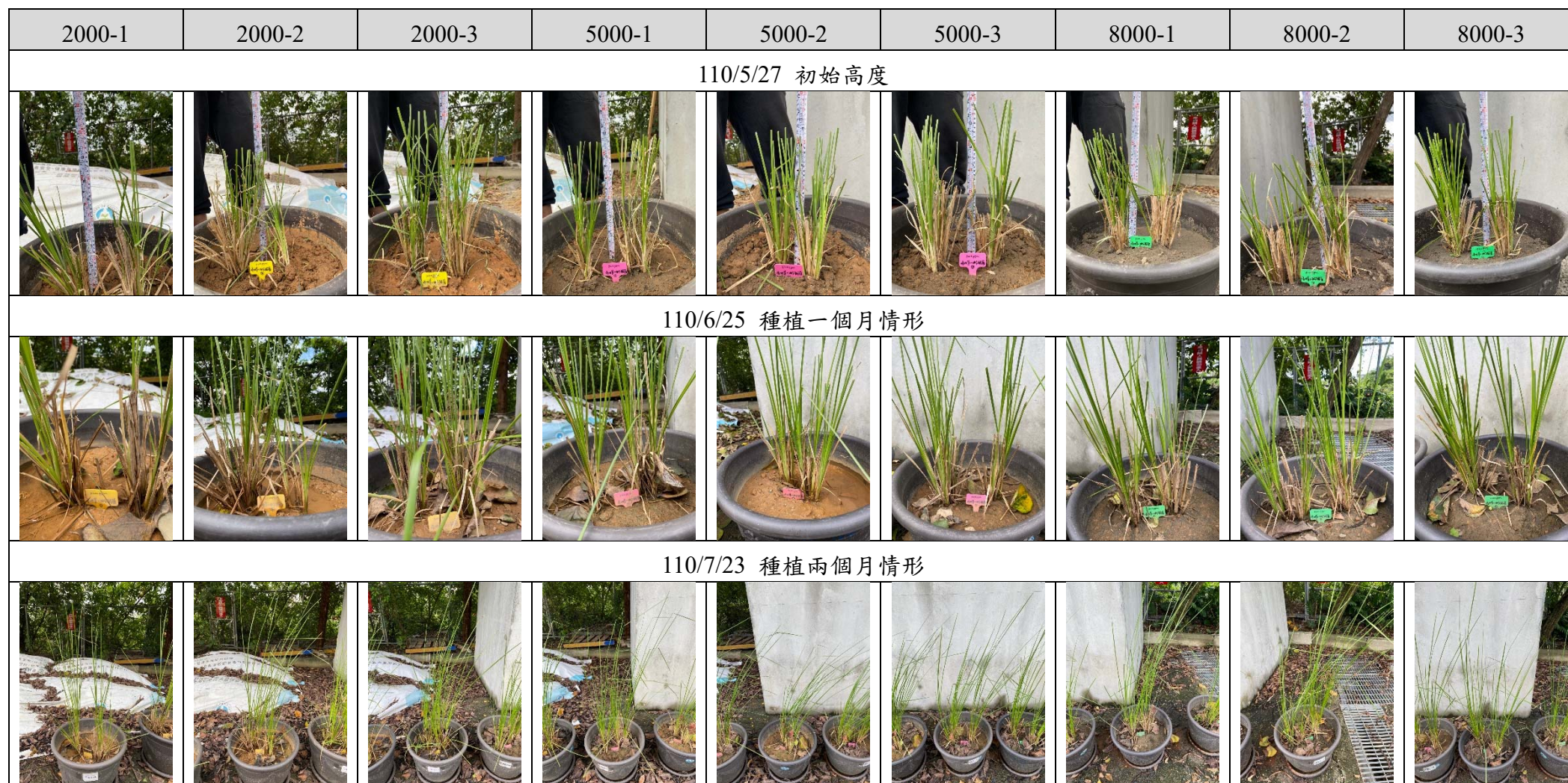


圖4.1.3-6 【培地茅+油分解菌】三種濃度試驗生長情形(1/3)

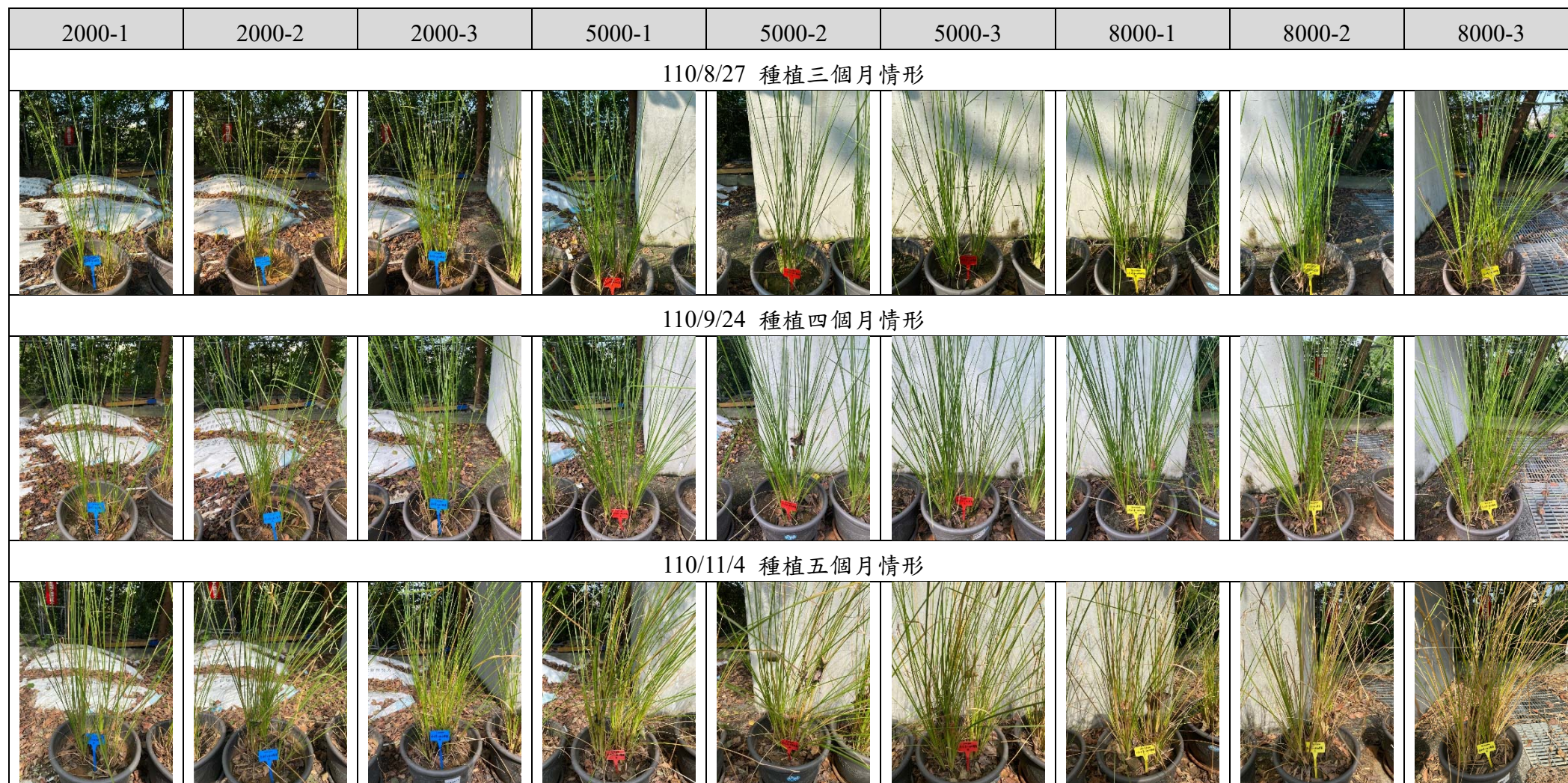


圖4.1.3-6 【培地茅+油分解菌】三種濃度試驗生長情形(2/3)

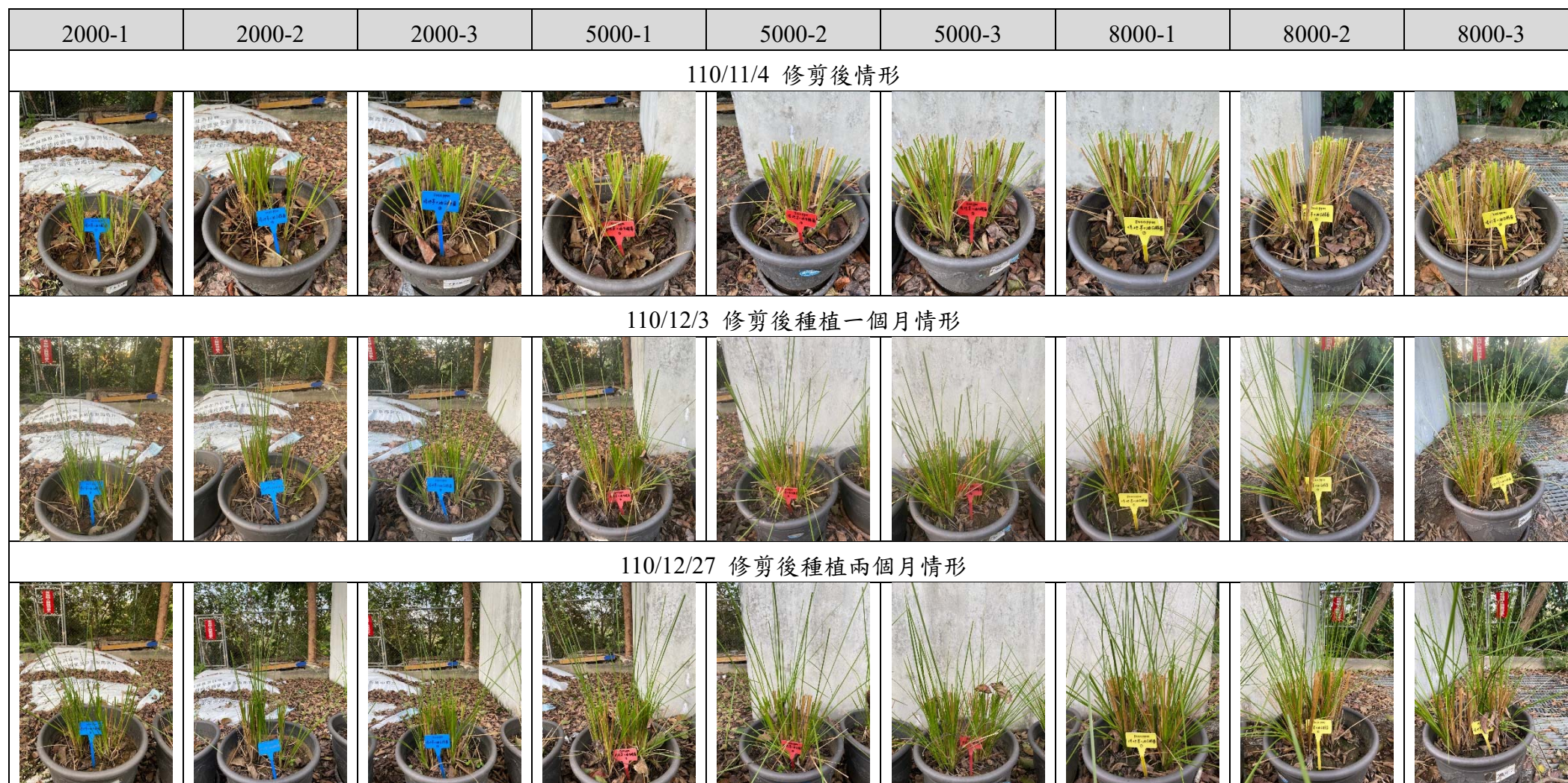


圖4.1.3-6 【培地茅+油分解菌】三種濃度試驗生長情形(3/3)



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4.1.3-5及表4.1.3-6，不同試驗組別植株平均生長高度如圖4.1.3-7及圖4.1.3-8所示。

在第一輪5月27日開始種植至11月4日修剪期間，土壤 TPH 濃度2000 mg/kg 組培地茅初始平均高度為33.33 cm；兩週後生長至66.53 cm；四週時88.83 cm；八週時108.0 cm；十二週時103.2 cm；十六週時105.47 cm；滿二十週修剪前為111.67 cm。土壤 TPH 濃度5000 mg/kg 組種植培地茅初始平均高度為30.67 cm；兩週後生長至72.53 cm；四週時93.92 cm；八週時117.33 cm；十二週時114.0 cm；十六週時122.2 cm；滿二十週修剪前為125.67 cm。土壤 TPH 濃度8000 mg/kg 組種植培地茅初始平均高度為29.0 cm；兩週後生長至65.5 cm；四週時84.77 cm；八週時112.33 cm；十二週時117.17 cm；十六週時127.77 cm；滿二十週修剪前為130.33 cm。

在第二輪11月4日修剪後至111年1月25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40.0 cm；兩週後生長至45.23 cm；四週時50.0 cm；八週時64.33 cm；十週時66.50 cm；十二週時69.67 cm。土壤 TPH 濃度5000 mg/kg 組種植培地茅修剪後平均高度為38.33 cm；兩週後生長至46.0 cm；四週時57.0 cm；八週時77.0 cm；十週時82.83 cm；十二週時88.80 cm。土壤 TPH 濃度8000 mg/kg 組種植培地茅修剪後平均高度為31.33 cm；兩週後生長至48.5 cm；四週時53.67 cm；八週時72.0 cm；十週時77.83 cm；十二週時80.17 cm。

培地茅在三種 TPH 濃度土壤平均生長高度第一輪為8000 mg/kg > 5000 mg/kg > 2000 mg/kg；第二輪為5000 mg/kg > 8000 mg/kg > 2000 mg/kg。從目前兩輪結果，種植在土壤 TPH 濃度2000 mg/kg 之培地茅，生長狀況均較差。圖4.1.3-9為【培地茅+生物炭2.5%】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4.1.3-5 【培地茅+生物炭2.5%】試驗植體高度(第一輪5/27~11/4)

組別 時間	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
5月27日	34	34	32	33.33	30	32	30	30.67	27	30	30	29.00
6月11日	74.2	61.2	64.2	66.53	79.5	71.1	67	72.53	62.5	60.5	73.5	65.50
6月25日	91.2	84.5	90.8	88.83	93	95.5	93.2	93.92	86.5	85.5	82.3	84.77
7月9日	106.5	86.2	110	100.90	109.2	103	111.2	107.80	90	92.9	110.2	97.70
7月23日	113	95	116	108.00	123	107	122	117.33	113	100	124	112.33
8月5日	113	100	116	109.67	124.1	110.2	122.5	118.93	113.2	101.3	125.2	113.23
8月20日	114.5	102.1	105.1	107.23	121.5	114	117	117.50	125.6	101.3	130.7	119.20
8月27日	104.1	103	102.5	103.20	116.5	108.2	117.3	114.00	124.5	100	127	117.17
9月10日	105	110.5	108	107.83	127	120	119	122.00	128	107	131.1	122.03
9月24日	98.3	109.2	108.9	105.47	125.1	120.2	121.3	122.20	131	121.3	131	127.77
10月8日	100	110.5	109.5	106.67	122.1	122.1	123	122.40	131	125.9	132	129.63
10月22日	101	111	111	107.67	131	124	125	126.67	132	127	133	130.67
11月4日	114	111	110	111.67	131	123	123	125.67	131	127	133	130.33

表4.1.3-6 【培地茅+生物炭2.5%】試驗植體高度(第二輪11/4~1/25)

組別 時間	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	39	44	37	40.00	37	38	40	38.33	33	30	31	31.33
11月18日	46	50.7	39	45.23	46	48	44	46.00	54	47	44.5	48.50
11月24日	50	53	47	50.00	62	56	53	57.00	59	51	51	53.67
12月10日	59	56.8	58	57.93	78	69	69	72.00	67	61	65	64.33
12月24日	68	60	65	64.33	89	68	74	77.00	75	69	72	72.00
1月7日	65.1	66.2	68.2	66.50	94.5	74.5	79.5	82.83	77	77	79.5	77.83
1月21日	71	70	68	69.67	104.9	78	83.5	88.80	80	85.5	75	80.17
1月25日	70.2	70	69.5	69.90	107	82.5	84	91.17	88.5	89	85	87.50

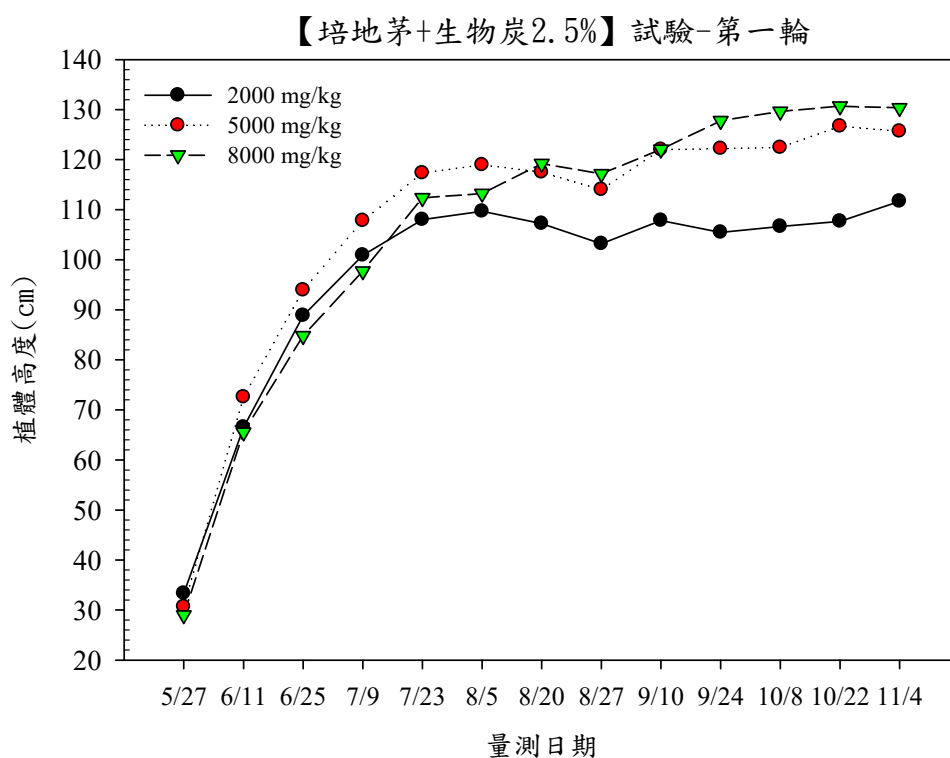


圖4.1.3-7 【培地茅+生物炭2.5%】試驗組植株平均高度變化(第一輪5/27~11/4)

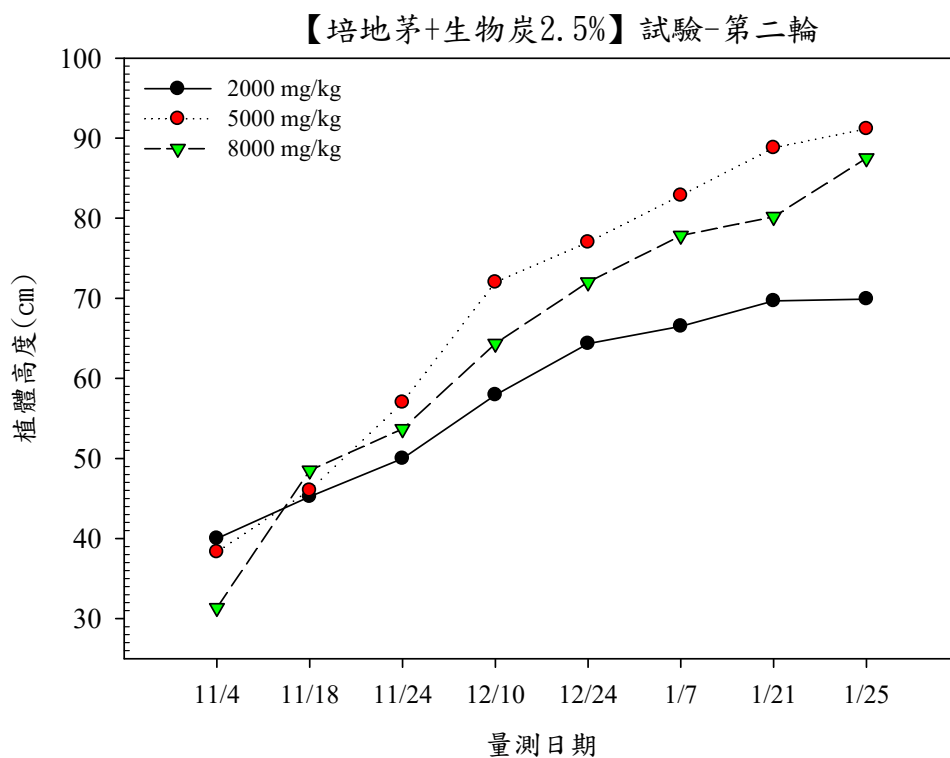


圖4.1.3-8 【培地茅+生物炭2.5%】試驗組植株平均高度變化(第二輪11/4~1/25)

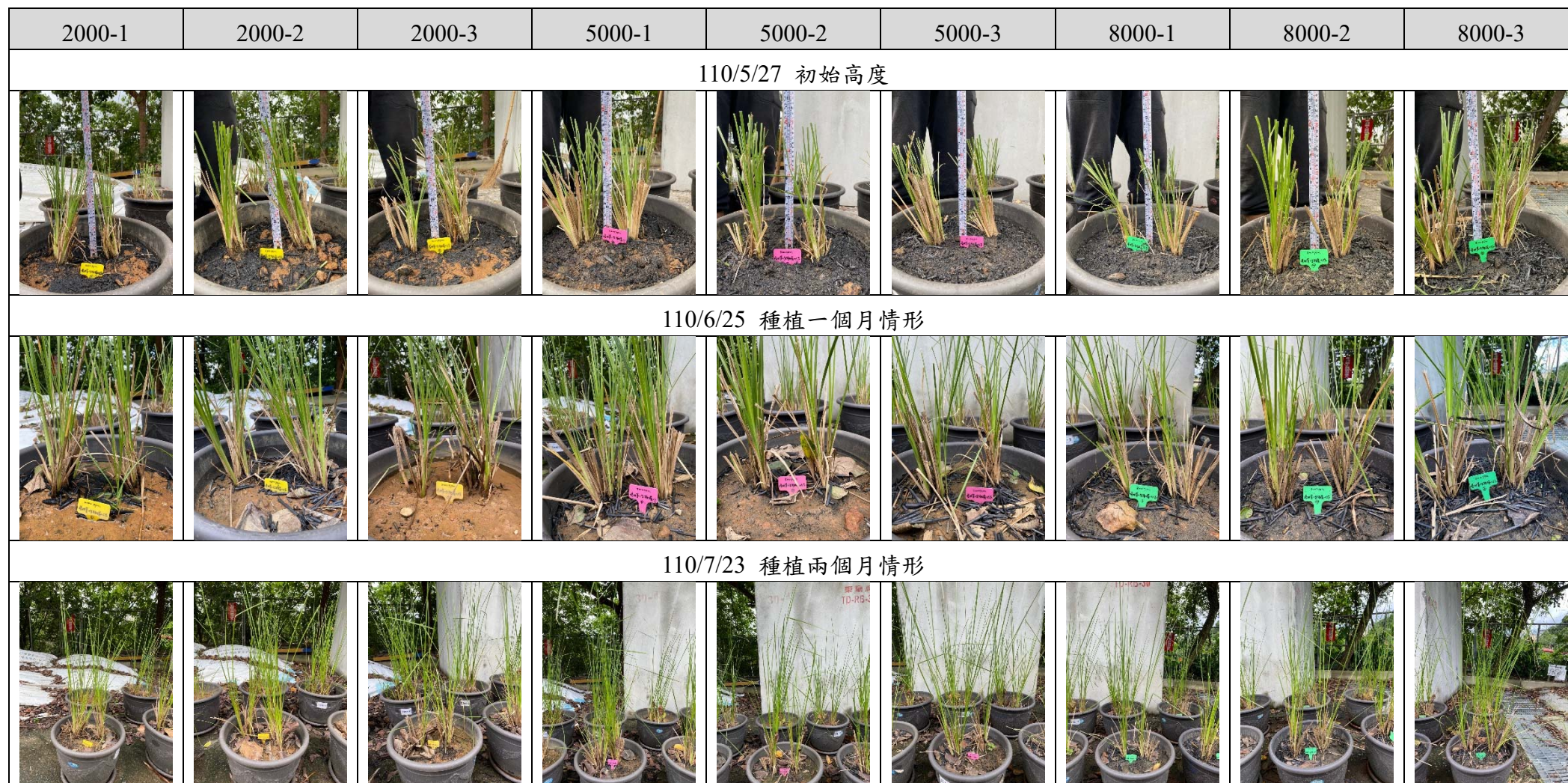


圖4.1.3-9 【培地茅+生物炭2.5%】三種濃度試驗生長情形(1/3)

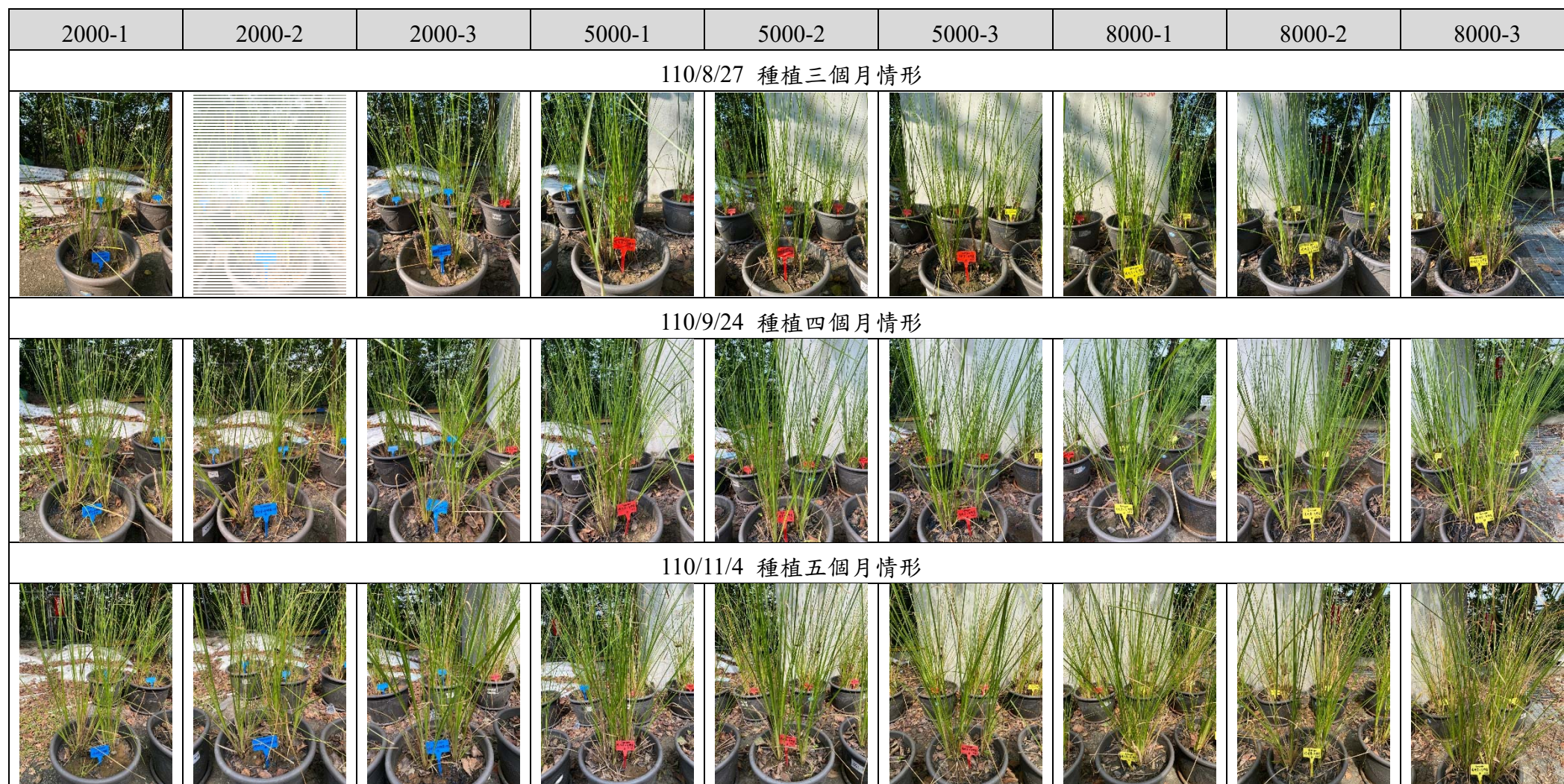


圖4.1.3-9 【培地茅+生物炭2.5%】三種濃度試驗生長情形(2/3)

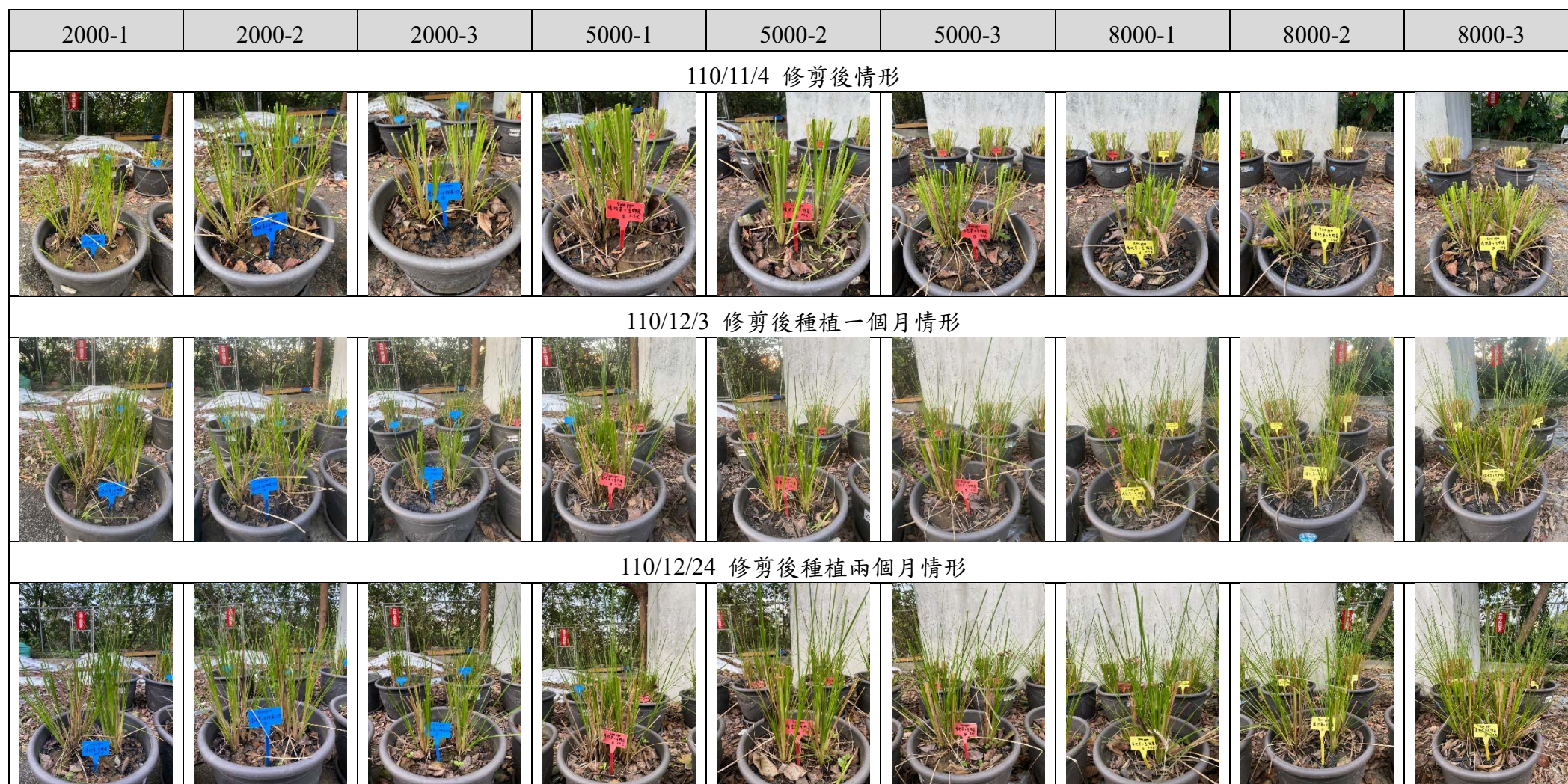


圖4.1.3-9 【培地茅+生物炭2.5%】三種濃度試驗生長情形(3/3)



4. 試驗組別【香茅】

【香茅】試驗植株高度紀錄如表4.1.3-7及表4.1.3-9，不同試驗組別植株平均生長高度變化如圖4.1.3-10及圖4.1.3-12所示。

在第一輪5月27日開始種植至9月2日修剪期間，土壤 TPH 濃度2000 mg/kg 組種植香茅初始平均高度為33 cm；兩週後生長至82.0 cm；四週時93.27 cm；八週時114.0 cm；十二週時105.6 cm。土壤 TPH 濃度5000 mg/kg 組種植香茅初始平均高度為34 cm；兩週後生長至80.03 cm；四週時100.33 cm；八週時106.67 cm；十二週時98.17 cm。土壤 TPH 濃度8000 mg/kg 組種植香茅初始平均高度為32.0 cm；兩週後生長至70.80 cm；四週時92.43 cm；八週時108.33 cm；十二週時85.5 cm。

在第二輪9月2日修剪後至111年1月14日期間，土壤 TPH 濃度2000 mg/kg 組種植香茅修剪後平均高度為38.17 cm；三週後生長至103.77cm；九週時113.3 cm；十二週時111.0 cm；十六週時105.33；十九週修剪前103.67 cm。土壤 TPH 濃度5000 mg/kg 組種植香茅修剪後平均高度為38.0 cm；三週後生長至107.47 cm；九週時113 cm；十二週時114.33 cm；十六週時113.33 cm；十九週修剪前111.33 cm。土壤 TPH 濃度8000 mg/kg 組種植香茅修剪後平均高度為37.33 cm；三週後生長至91.67 cm；九週時93.33 cm；十二週時93.33 cm；十六週時92.33 cm；十九週修剪前89.0 cm。

在第三輪111年1月14日修剪後至1月25日期間，土壤 TPH 濃度2000 mg/kg 組種植香茅修剪後平均高度為29 cm；一週後高度32.33 cm。土壤 TPH 濃度5000 mg/kg 組種植香茅修剪後平均高度為28.67 cm；一週後生長至32.0 cm。土壤 TPH 濃度8000 mg/kg 組種植香茅修剪後平均高度為29.0 cm；一週後生長至28.33 cm；

香茅在三種 TPH 濃度土壤生長狀況第一輪為為2000 mg/kg > 5000 mg/kg > 8000 mg/kg；第二輪為5000 mg/kg > 2000 mg/kg > 8000 mg/kg。從目前兩輪結果，香茅種植在土壤 TPH 濃度8000 mg/kg 之生長狀況均有較差情形，與培地茅情不同，推測香茅較無法忍受 TPH 含量較高的土壤。圖4.1.3-13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4.1.3-7 【香茅】試驗植體高度(第一輪5/27~9/2)

組別 時間	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
5月27日	33	33	33	33.00	34	34	34	34.00	34	32	30	32.00
6月11日	85.4	85.8	74.8	82.00	80	83.7	76.4	80.03	78.9	74.3	59.2	70.80
6月25日	93.2	93.4	93.2	93.27	100.8	99.2	101	100.33	95.1	96.2	86	92.43
7月9日	110.8	112.8	106.8	110.13	100.2	102.5	107.5	103.40	100.2	102.5	107.5	103.40
7月23日	115	117	110	114.00	104	106	110	106.67	110	103	112	108.33
8月5日	109.4	112.1	110.2	110.57	104.5	107	110	107.17	110	103	112	108.33
8月20日	108.8	113.2	113.6	111.87	104.5	98.8	111.1	104.80	106.2	100.2	85.1	97.17
8月27日	104.1	106.2	106.5	105.60	100.2	92.2	102.1	98.17	103.1	80.2	73.2	85.50

表4.1.3-8 【香茅】試驗植體高度(第二輪9/2~1/14)

組別 時間	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
9月2日	41	35.5	38	38.17	37	39	38	38.00	37	38	37	37.33
9月10日	85.4	65.1	67	72.50	66.2	72	73.2	70.47	62.7	61.7	60.5	61.63
9月24日	105.4	108.7	97.2	103.77	106.7	104.8	110.9	107.47	96.5	90.5	88	91.67
10月8日	127.5	110	102	113.17	119	110	109	112.67	104	90	81	91.67
10月22日	122	112	106.5	113.50	123	109	111	114.33	104	92	84	93.33
11月4日	120	106	113	113.00	118	109	112	113.00	103	93	84	93.33
11月18日	111	99	101	103.67	123	102	111	112.00	98	89	78	88.33
11月24日	120	104	109	111.00	123	108	112	114.33	104	93	83	93.33
12月10日	113	105	100	106.00	113.3	109	110	110.77	99	82	84	88.33
12月24日	112	106	98	105.33	119	110	111	113.33	104	89	84	92.33
1月7日	113	97	103	104.33	110	112	112.5	111.50	102	89	80	90.33
1月14日	111.5	101.5	98	103.67	123	104	107	111.33	100	87	80	89.00



表4.1.3-9 【香茅】試驗植體高度(第三輪1/14~1/25)

組別 時間	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	29	30	28	29.00	28	28	30	28.67	29	28	30	29.00
1月21日	32	30	35	32.33	32	31	33	32.00	30	27	28	28.33
1月25日	34.8	30.5	39.8	35.03	36.1	34.3	35.4	35.27	33.5	31.2	29.5	31.40

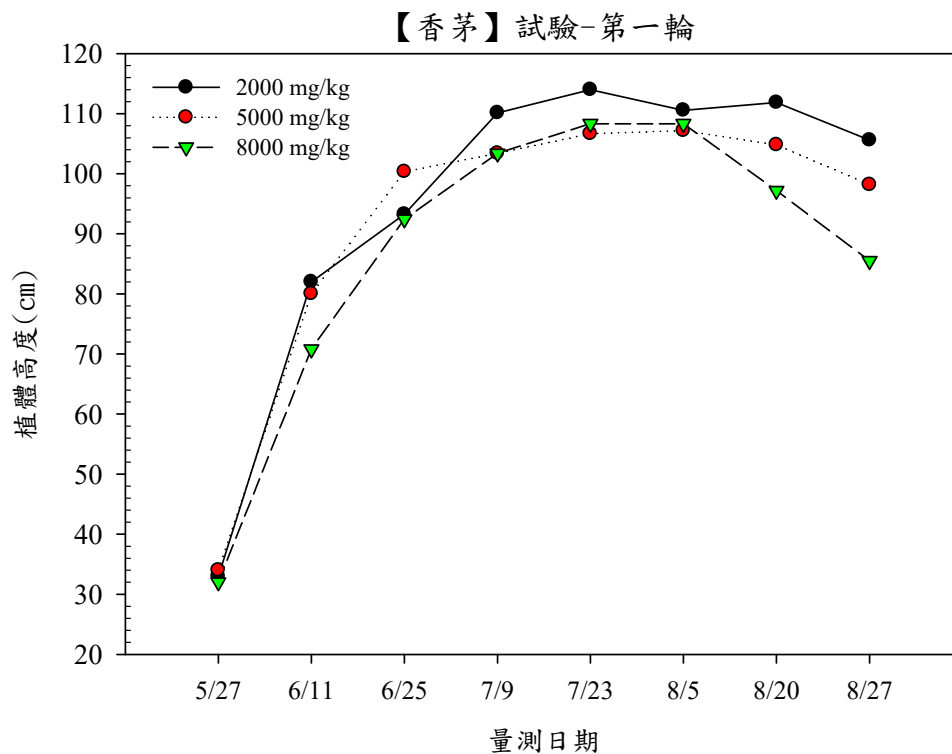


圖4.1.3-10 【香茅】試驗組植株平均高度變化(第一輪5/27~9/2)

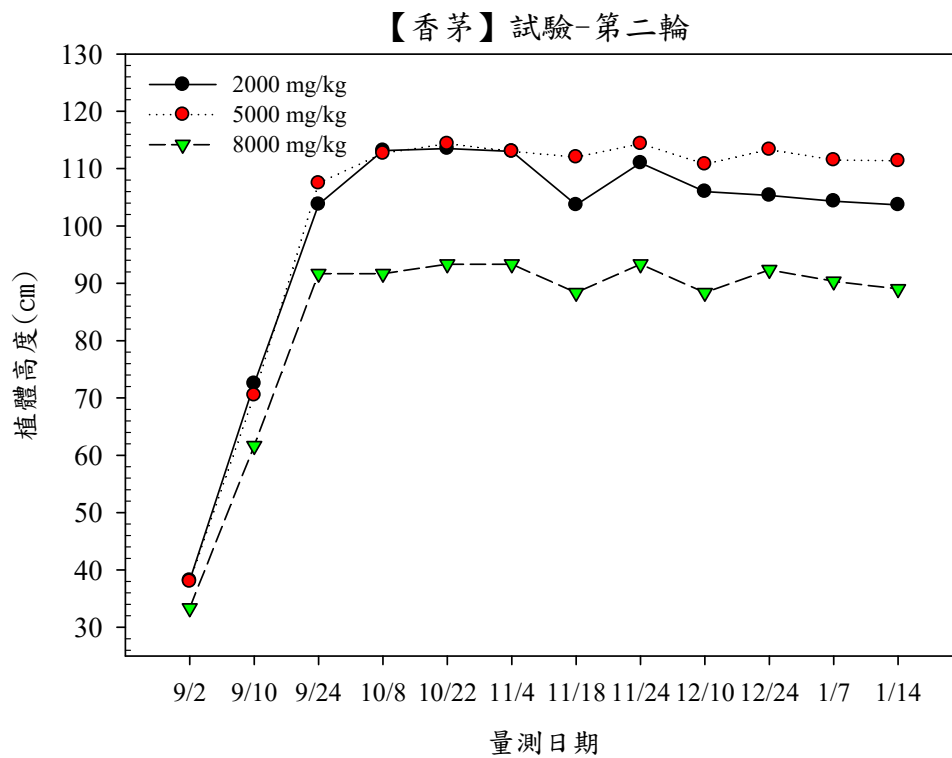


圖4.1.3-11 【香茅】試驗組植株平均高度變化(第二輪9/2~1/14)

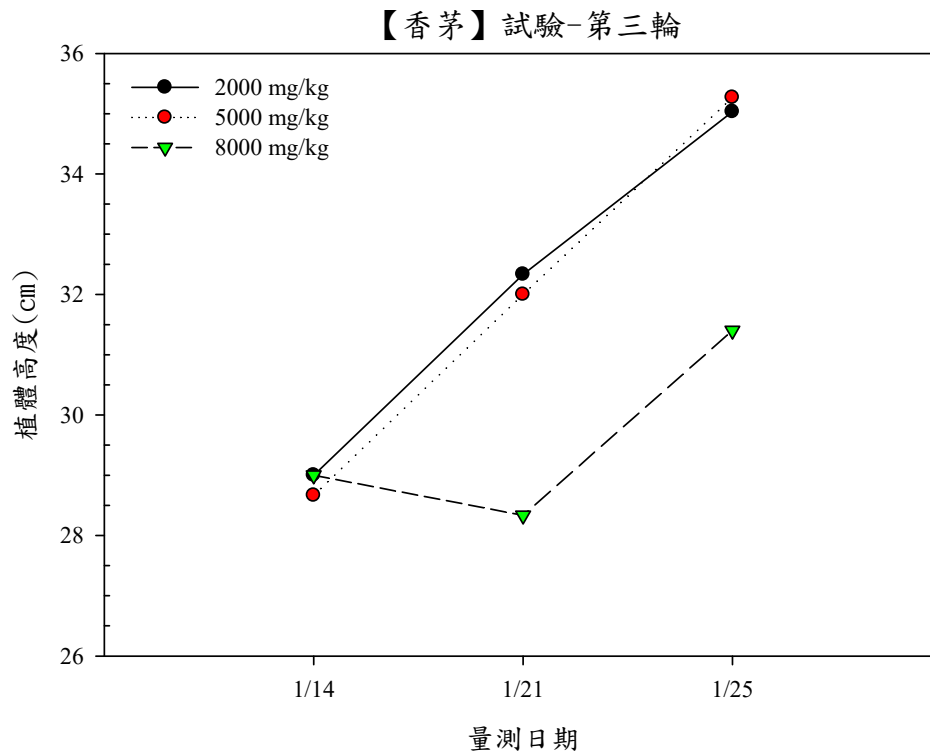


圖4.1.3-12 【香茅】試驗組植株平均高度變化(第三輪1/14~1/25)

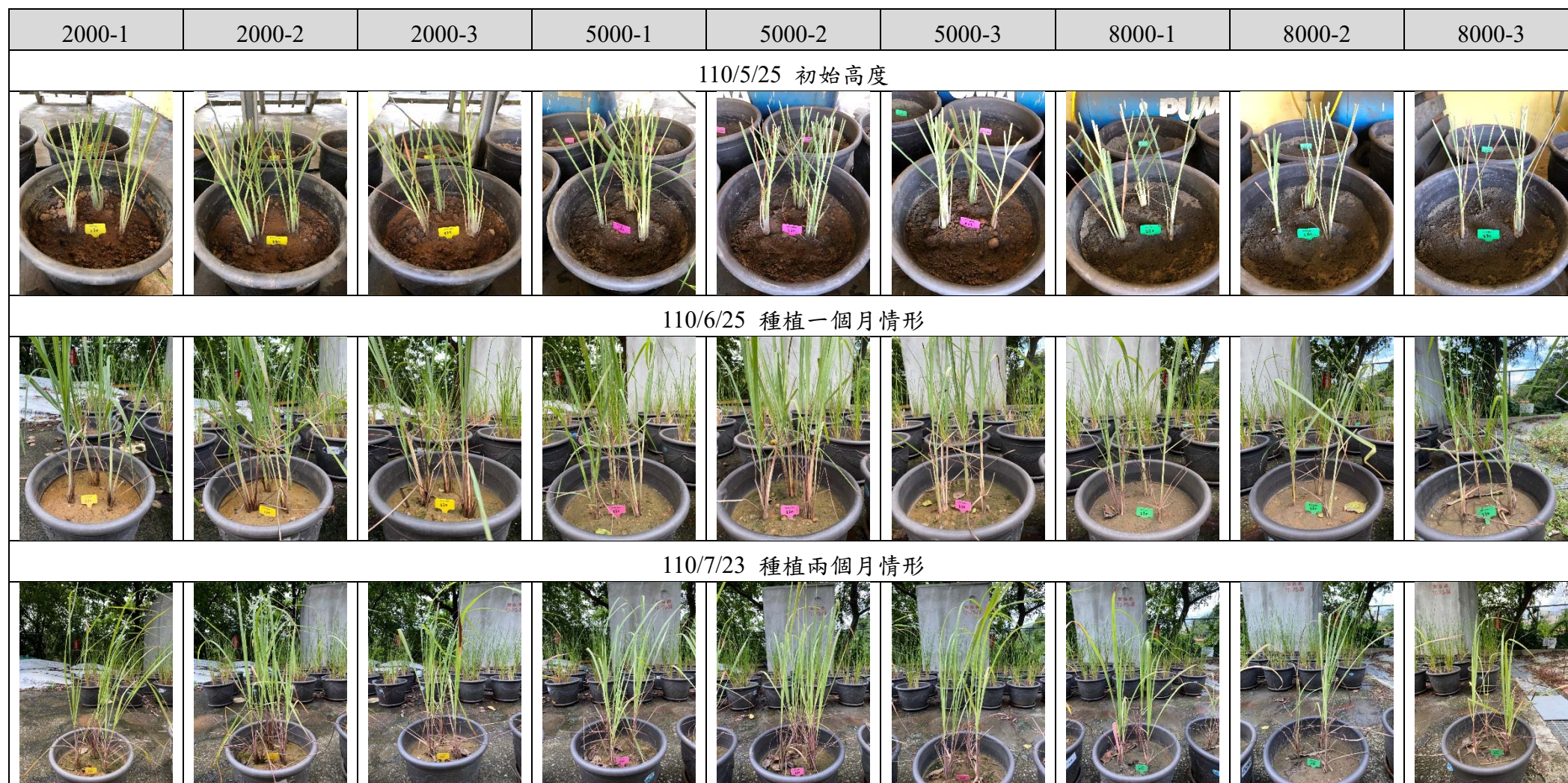


圖4.1.3-13 【香茅】三種濃度試驗生長情形(1/3)

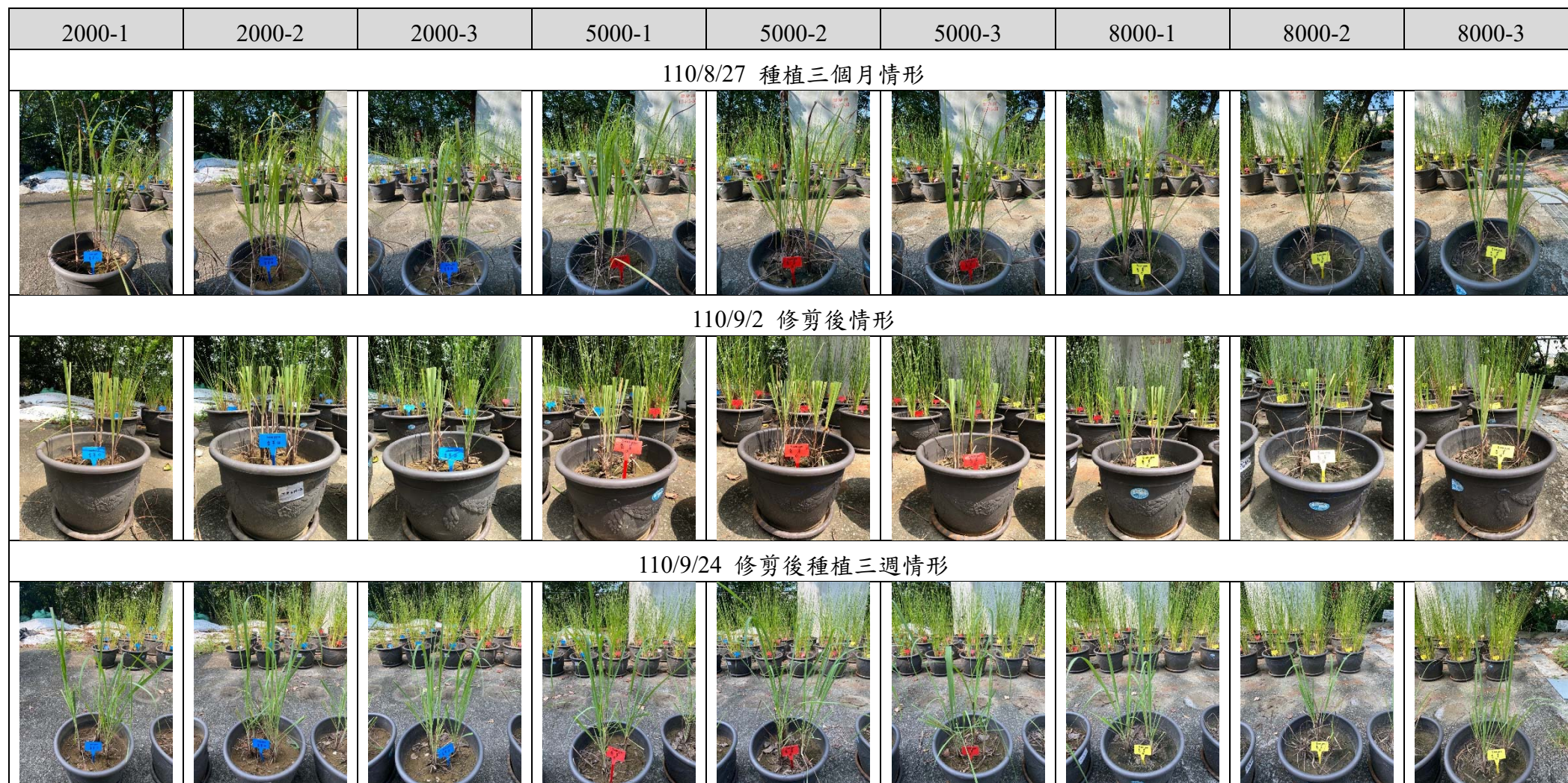


圖4.1.3-13 【香茅】三種濃度試驗生長情形(2/3)

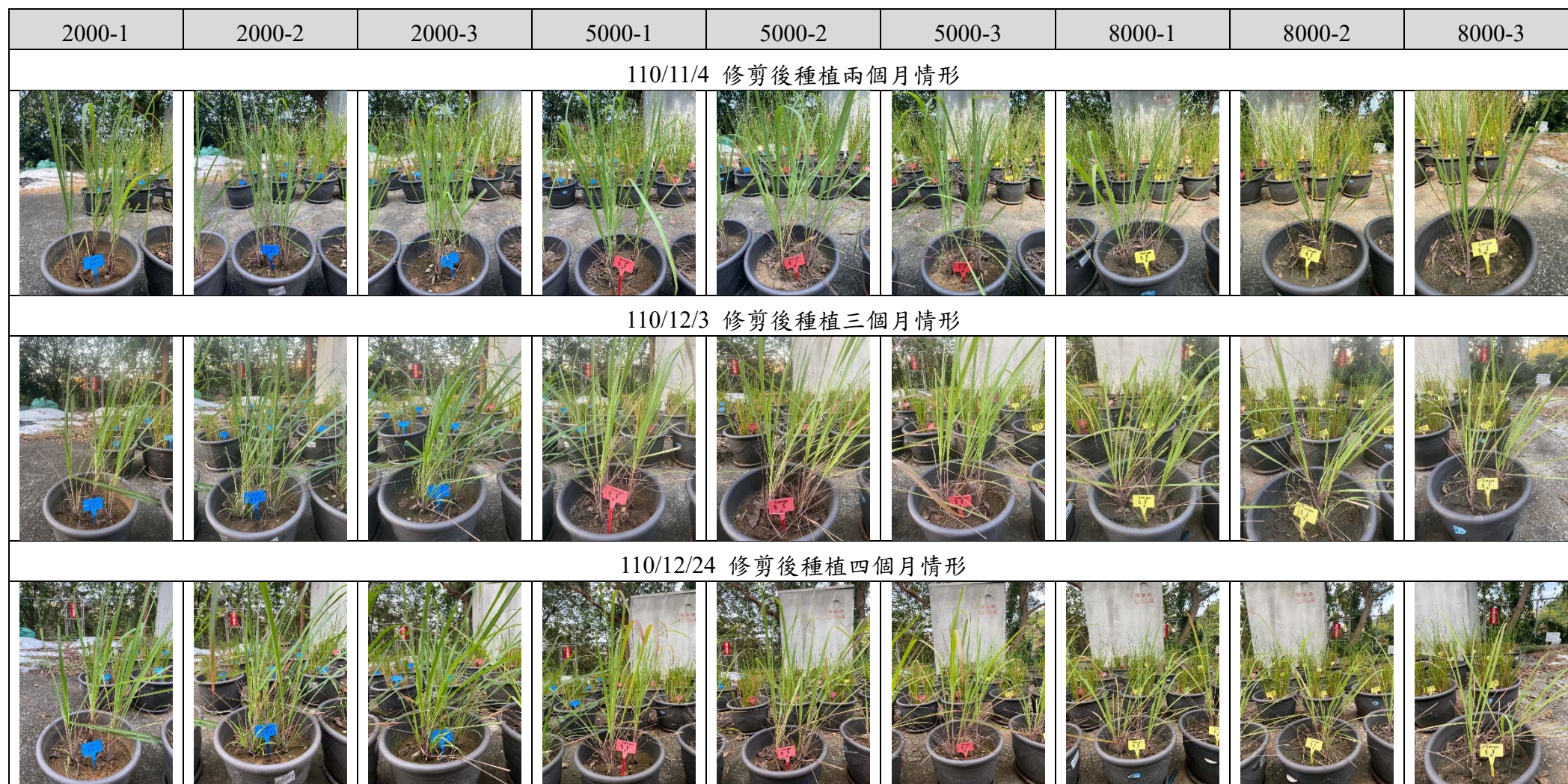


圖4.1.3-13 【香茅】三種濃度試驗生長情形(3/3)



4.1.4 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，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，培地茅約種植23週(11月4日)時進行修剪，香茅約種植14週(9月2日)及第二輪的第19週(1月14日)進行修剪，修剪所採收之植體生質量如表4.1.4-1、表4.1.4-2及圖4.1.4-1、圖4.1.4-2所示。

培地茅種植23週，在土壤 TPH 濃度2000 mg/kg，【培地茅】組平均採收生質量為26.78 g，【培地茅+油分解菌】組平均採收生質量為46.22 g，【培地茅+生物炭2.5%】組平均採收生質量為26.11 g。添加生物炭組與單純種植培地茅組沒有顯著差異；添加油分解菌使培地茅生質量增加1.73倍。在土壤 TPH 濃度5000 mg/kg，【培地茅】組採收生質量為47.96 g，【培地茅+油分解菌】組採收生質量為80.09 g，【培地茅+生物炭2.5%】組採收生質量為52.50 g。在土壤 TPH 濃度5000 mg/kg 添加油分解菌使培地茅生質量增加1.67倍；添加生物炭使培地茅生質量增加約1.1倍。在土壤 TPH 濃度8000 mg/kg，【培地茅】組採收生質量為39.47 g，【培地茅+油分解菌】組採收生質量為69.96 g，【培地茅+生物炭2.5%】組採收生質量為78.38 g。添加生物炭及油分解菌使培地茅生質量分別增加1.98倍及1.77倍。結果顯示，添加油分解菌組之培地茅生質量增加，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2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。

香茅第一輪種植14週，在土壤 TPH 濃度2000 mg/kg 生質量為19.78 g，在土壤 TPH 濃度5000 mg/kg 生質量為20.83 g，在土壤 TPH 濃度8000 mg/kg 生質量為8.64 g。第二輪種植19週，在土壤 TPH 濃度2000 mg/kg 生質量為41.48 g，在土壤 TPH 濃度5000 mg/kg 生質量為35.61 g，在土壤 TPH 濃度8000 mg/kg 生質量為13.52 g。其兩輪結果顯示，香茅在高濃度8000 mg/kg 植體產量較差，推測香茅較無法忍受 TPH 含量較高的土壤。

利用 T 檢定，比較三種濃度油品污染土壤添加油分解菌及生物炭對培地茅收穫生質量之影響，其分析結果顯示，【培地茅+油分解菌】試驗組別，在土壤 TPH 濃度8000 mg/kg 及5000 mg/kg 有顯著差異($P < 0.05$)，2000 mg/kg 則無顯著差異($P > 0.05$)；在【培地茅+生物炭】試驗組別，在土壤 TPH 濃度8000 mg/kg 有顯著差



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

異($P < 0.05$)，5000 mg/kg 及2000 mg/kg 則無顯著差異($P > 0.05$)。

表4.1.4-1 培地茅植體生質量(第一次修剪)

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	24.64	34.50	26.77
2000-2	24.27	46.42	16.47
2000-3	31.45	57.75	35.10
2000-平均	26.78	46.22	26.11
5000-1	63.10	91.75	72.38
5000-2	35.71	71.18	43.02
5000-3	45.06	77.36	42.11
5000-平均	47.96	80.09	52.50
8000-1	34.00	62.72	83.45
8000-2	40.07	63.59	62.51
8000-3	44.34	83.59	89.18
8000-平均	39.47	69.96	78.38

單位：公克

表4.1.4-2 香茅植體生質量(第一、二次修剪)

樣品 \ 試驗	香茅 第一次修剪	香茅 第二次修剪
	鮮重 (g)	
2000-1	17.66	39.31
2000-2	26.22	37.87
2000-3	15.46	47.26
2000-平均	19.78	41.48
5000-1	20.77	36.47
5000-2	22.94	37.17
5000-3	18.78	33.19
5000-平均	20.83	35.61
8000-1	12.83	18.93
8000-2	7.26	10.32
8000-3	5.85	11.33
8000-平均	8.64	13.52

單位：公克

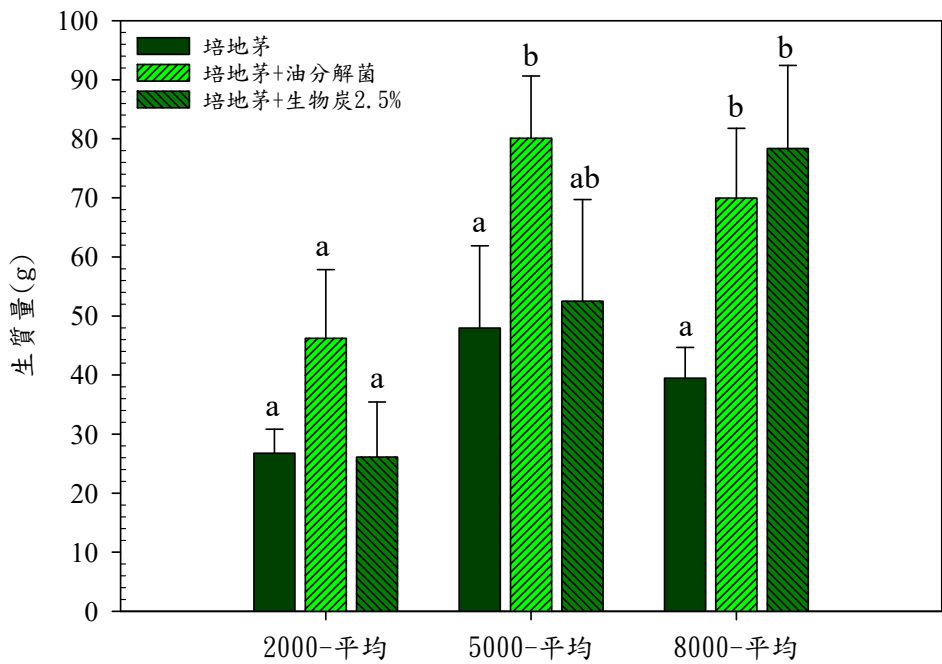


圖4.1.4-1 培地茅植體生質量(第一次修剪)

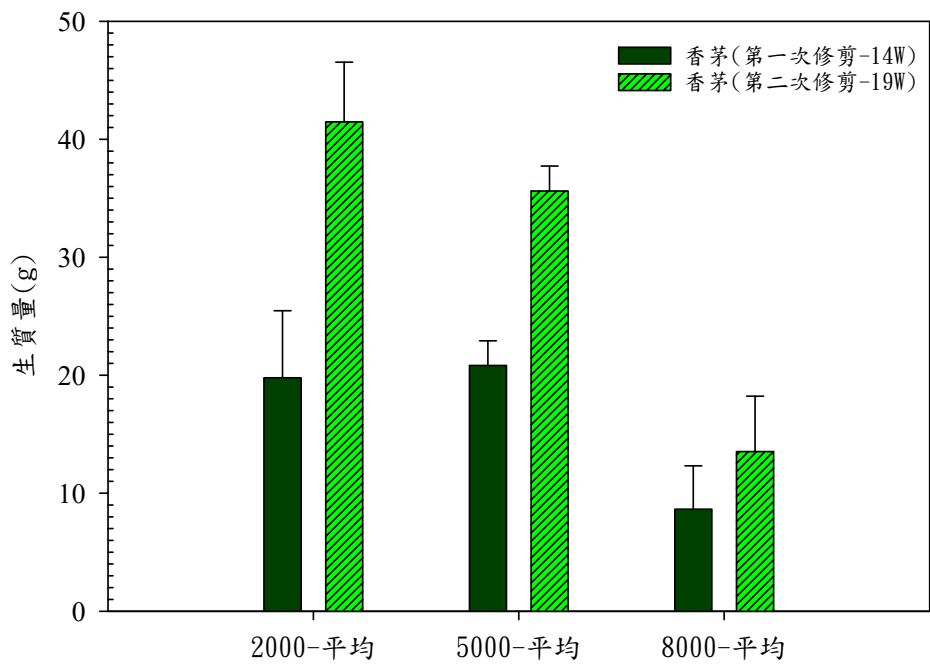


圖4.1.4-1 香茅植體生質量(第一、二次修剪)



4.1.5 培地茅在各試驗組植株生長高度差異

培地茅植體在不同試驗組別植株生長高度如圖4.1.5-1至圖4.1.5-6所示。在土壤 TPH 濃度2000 mg/kg，第一次修剪前培地茅最高高度分別為【培地茅】組108.67 cm；【培地茅+油分解菌】組為119.40 cm；【培地茅+生物炭】組為111.67 cm。在土壤 TPH 濃度5000 mg/kg，第一次修剪前培地茅最高高度分別為【培地茅】組116.33 cm；【培地茅+油分解菌】組為137.33 cm；【培地茅+生物炭】組為126.67 cm。在土壤 TPH 濃度8000 mg/kg，第一次修剪前培地茅最高高度分別為【培地茅】組112.67 cm；【培地茅+油分解菌】組為143.67 cm；【培地茅+生物炭】組為130.67 cm。在三種試驗濃度下，培地茅生長高度均為【培地茅+油分解菌】>【培地茅+生物炭】>【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。

利用 T 檢定，比較三種濃度油品污染土壤添加油分解菌及生物炭對培地茅生長高度之影響，其分析結果顯示，【培地茅+油分解菌】試驗組別，在土壤 TPH 濃度8000 mg/kg 及5000 mg/kg 有顯著差異($P<0.01$)，2000 mg/kg 則無顯著差異($P>0.05$)；在【培地茅+生物炭】試驗組別，在土壤 TPH 濃度8000 mg/kg 有顯著差異($P<0.01$)，5000 mg/kg 及2000 mg/kg 則無顯著差異($P>0.05$)。添加油分解菌及生物炭對培地茅生長高度之影響與對生質量產量之影響相似。

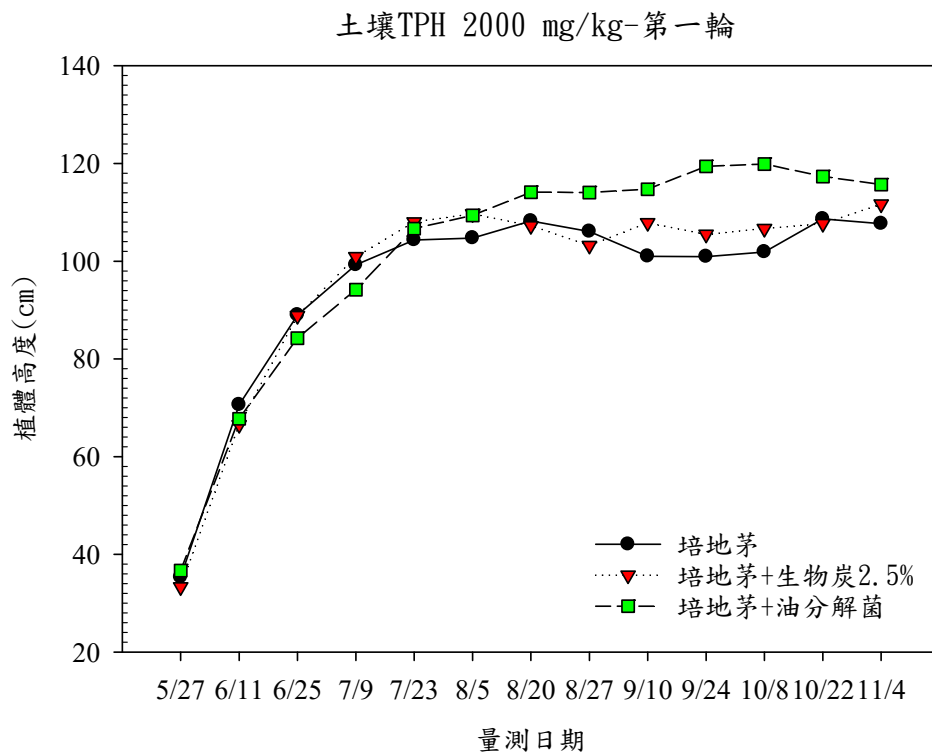


圖4.1.5-1 【試驗濃度2000 mg/kg】培地茅植株平均高度變化(第一輪5/27~11/4)

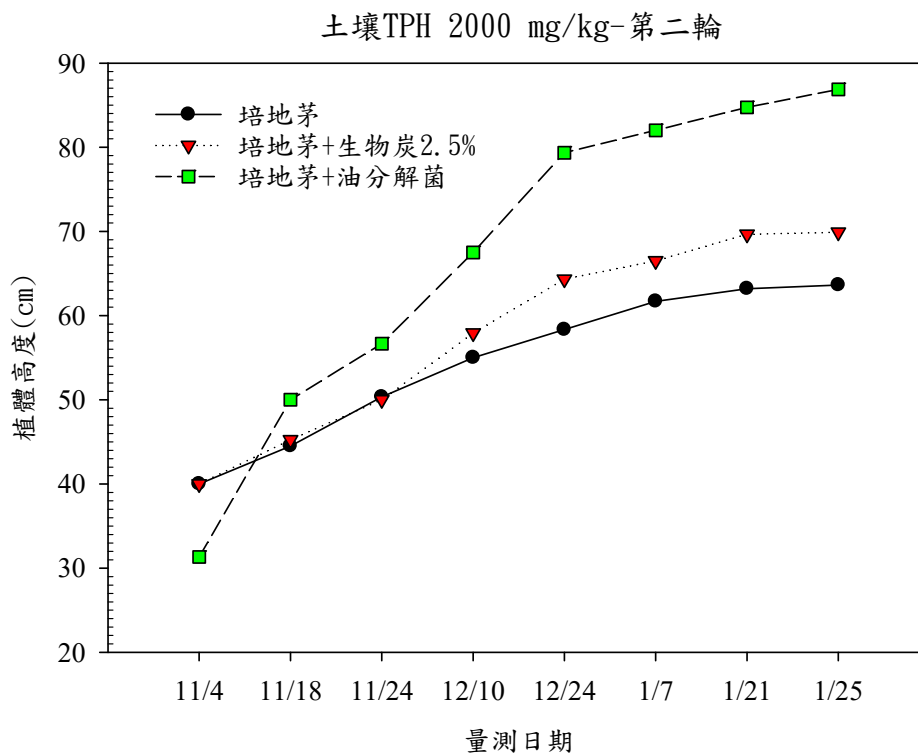


圖4.1.5-2 【試驗濃度2000 mg/kg】培地茅植株平均高度變化(第二輪11/4~1/25)

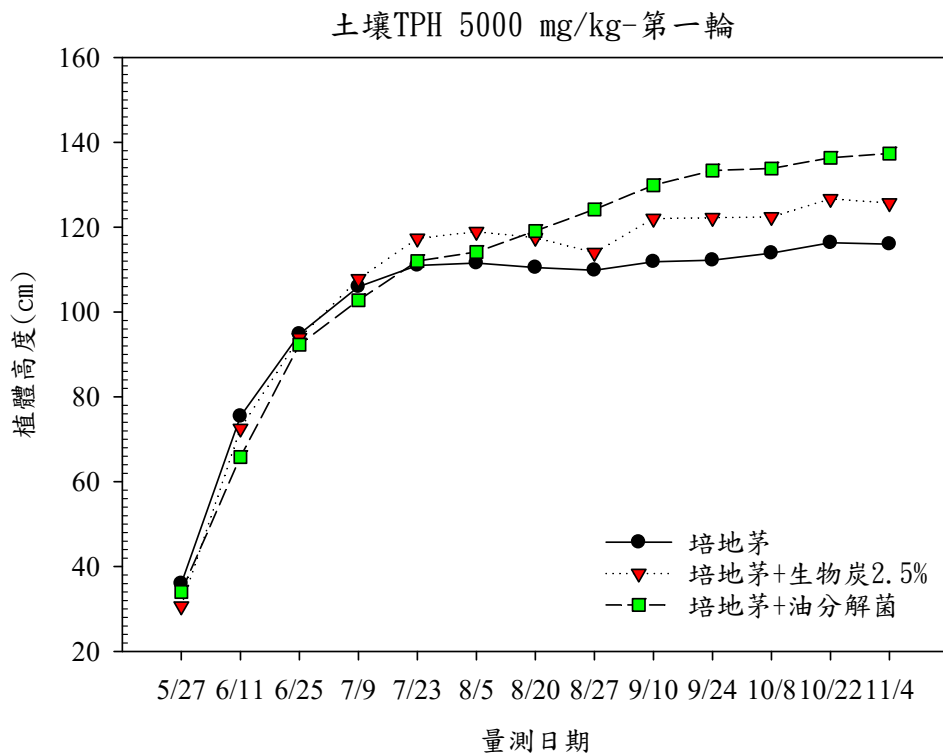


圖4.1.5-3 【試驗濃度5000 mg/kg】培地茅植株平均高度變化(第一輪5/27~11/4)

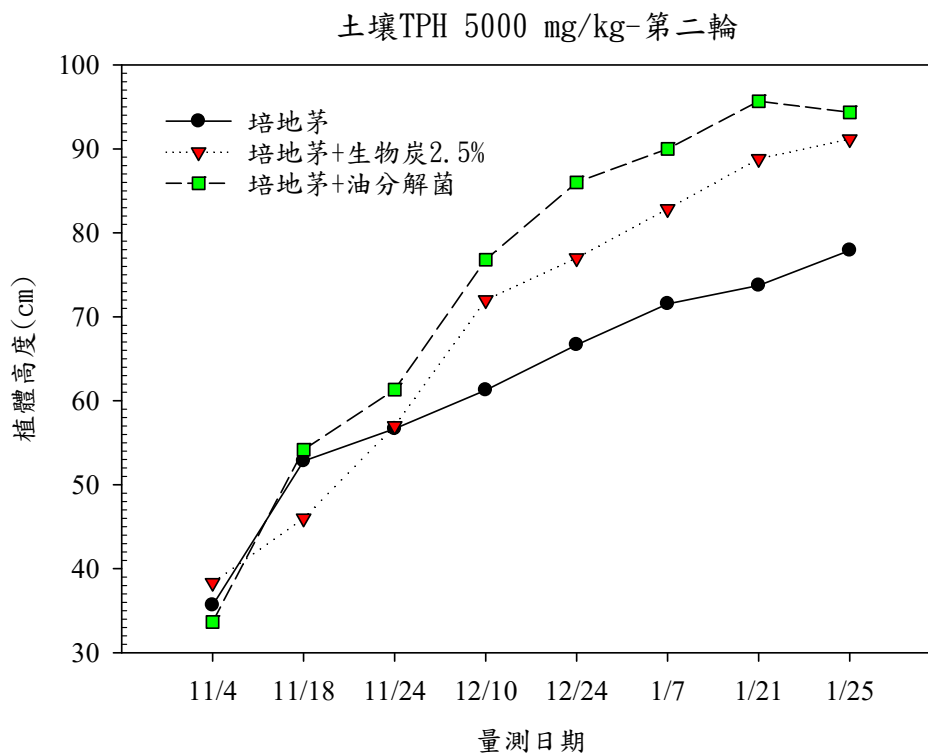


圖4.1.5-4 【試驗濃度5000 mg/kg】培地茅植株平均高度變化(第二輪11/4~1/25)

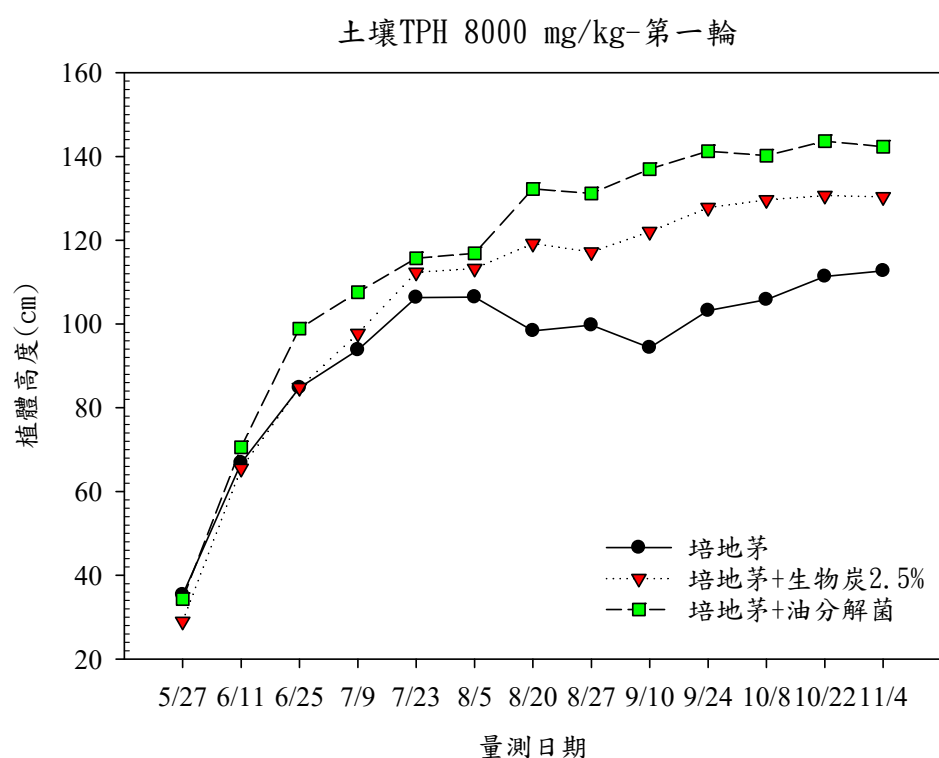


圖4.1.5-5 【試驗濃度8000 mg/kg】培地茅植株平均高度變化(第一輪5/27~11/4)

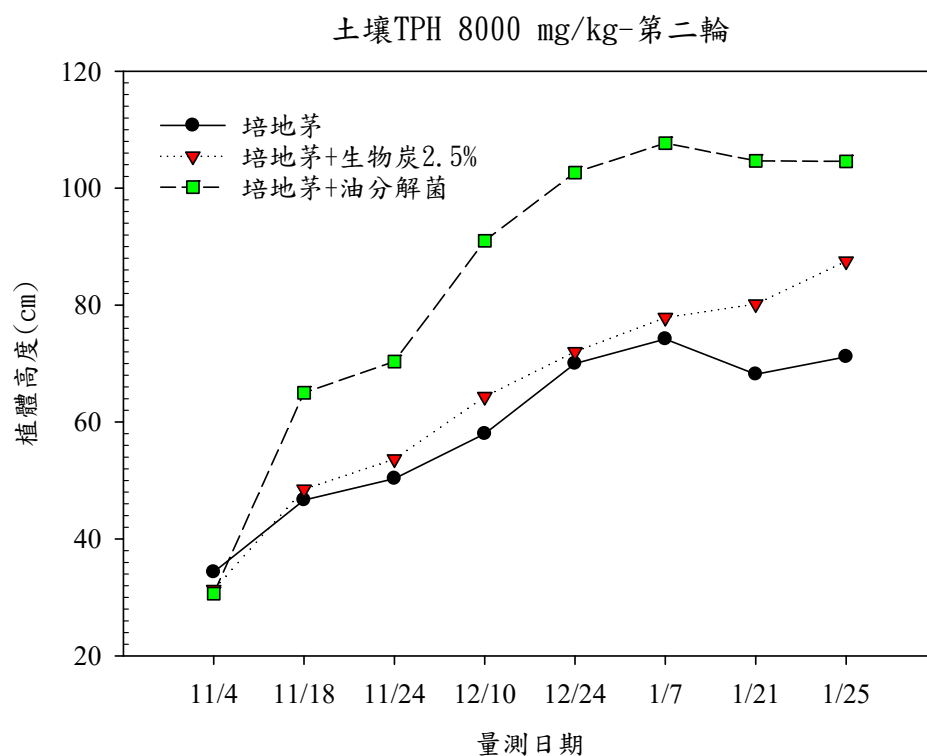


圖4.1.5-6 【試驗濃度8000 mg/kg】培地茅植株平均高度變化(第二輪11/4~1/25)



4.1.6 試驗六個月土壤基本性質變化

TPH 污染土壤，在經過本研究各種試驗組試驗後土壤基本性質之變化，如表 4.1.6-1 及圖 4.1.6-1 至圖 4.1.6-4 所示。土壤 pH 值初始為 6.97~7.60 中性，經過六個月試驗後，土壤為偏鹼性；土壤導電度初始為 167.7~171.2 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ，經過六個月試驗後，土壤導電度均上升，其【油分解菌】及【培地茅+生物炭 2.5%】試驗上升最多；土壤有機質初始為 7.43~8.67%，經過六個月試驗後，有機質降至 0.12~1.68%。

表 4.1.6-1 試驗六個月土壤基本性質(1/3)

試驗名稱	樣品	pH	導電度 ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	含水率 (%)	有機質 (%)
原生菌	2000-1	8.10	271.00	1.17	0.98
	2000-2	8.19	300.00	1.57	1.22
	2000-3	8.25	308.00	1.29	0.93
	2000-平均	8.18	293.00	1.34	1.04
	5000-1	8.43	277.00	0.86	0.98
	5000-2	8.63	284.00	0.87	0.87
	5000-3	8.50	303.00	1.25	0.35
	5000-平均	8.52	288.00	0.99	0.73
	8000-1	8.96	322.00	0.49	1.22
	8000-2	8.66	268.00	0.51	1.45
	8000-3	8.62	264.00	0.53	1.33
	8000-平均	8.75	284.67	0.51	1.33
油分解菌	2000-1	8.30	337.00	1.53	1.16
	2000-2	8.04	332.00	1.38	1.22
	2000-3	8.04	404.00	1.39	0.81
	2000-平均	8.13	357.67	1.43	1.06
	5000-1	8.08	389.00	1.20	1.74
	5000-2	8.30	497.00	1.47	1.10
	5000-3	8.19	478.00	1.36	1.27
	5000-平均	8.19	454.67	1.34	1.37
	8000-1	9.30	376.00	0.45	0.87
	8000-2	9.13	351.00	0.47	1.16
	8000-3	8.85	283.00	0.45	1.68
	8000-平均	9.09	336.67	0.46	1.24



表4.1.6-1 試驗六個月土壤基本性質(2/3)

試驗名稱	樣品	pH	導電度 (us/cm)	含水率 (%)	有機質 (%)
培地茅	2000-1	7.93	221.00	1.43	0.64
	2000-2	8.00	242.00	1.57	0.64
	2000-3	7.64	218.00	1.46	1.04
	2000-平均	7.86	227.00	1.49	0.77
	5000-1	8.10	223.00	0.85	1.16
	5000-2	8.17	218.00	0.73	1.04
	5000-3	8.25	210.00	1.14	1.04
	5000-平均	8.17	217.00	0.91	1.08
	8000-1	8.15	234.00	0.41	0.81
	8000-2	8.14	226.00	0.49	0.81
	8000-3	8.22	270.00	0.40	0.58
	8000-平均	8.17	243.33	0.43	0.73
培地茅+油分解菌	2000-1	7.84	245.00	1.40	0.75
	2000-2	7.74	228.00	0.95	0.87
	2000-3	7.65	356.00	1.32	0.52
	2000-平均	7.74	276.33	1.22	0.71
	5000-1	8.17	300.00	0.65	1.33
	5000-2	8.14	289.00	0.83	1.45
	5000-3	8.12	270.00	0.66	1.04
	5000-平均	8.14	286.33	0.71	1.27
	8000-1	8.24	248.00	0.30	0.98
	8000-2	8.35	277.00	0.33	0.98
	8000-3	8.27	244.00	0.34	0.29
	8000-平均	8.29	256.33	0.32	0.75



表4.1.6-1 試驗六個月土壤基本性質(3/3)

試驗名稱	樣品	pH	導電度 (us/cm)	含水率 (%)	有機質 (%)
培地茅+生物炭2.5%	2000-1	7.53	428.00	1.43	0.41
	2000-2	7.53	364.00	1.30	0.58
	2000-3	7.64	357.00	1.43	0.52
	2000-平均	7.57	383.00	1.39	0.50
	5000-1	7.79	295.00	0.85	0.17
	5000-2	8.34	388.00	0.69	0.29
	5000-3	7.73	357.00	0.99	0.12
	5000-平均	7.95	346.67	0.84	0.19
	8000-1	7.98	344.00	0.41	1.22
	8000-2	7.94	386.00	0.44	0.29
	8000-3	8.31	382.00	0.51	0.93
	8000-平均	8.08	370.67	0.45	0.81
香茅	2000-1	8.07	263.00	1.33	1.27
	2000-2	7.98	335.00	1.50	0.58
	2000-3	7.98	225.00	1.39	1.16
	2000-平均	8.01	274.33	1.41	1.00
	5000-1	8.25	234.00	1.15	1.45
	5000-2	8.24	248.00	1.23	1.45
	5000-3	8.37	282.00	1.25	1.22
	5000-平均	8.29	254.67	1.21	1.37
	8000-1	8.78	290.00	0.56	1.62
	8000-2	8.54	244.00	0.40	1.56
	8000-3	8.49	212.00	0.45	0.87
	8000-平均	8.60	248.67	0.47	1.35

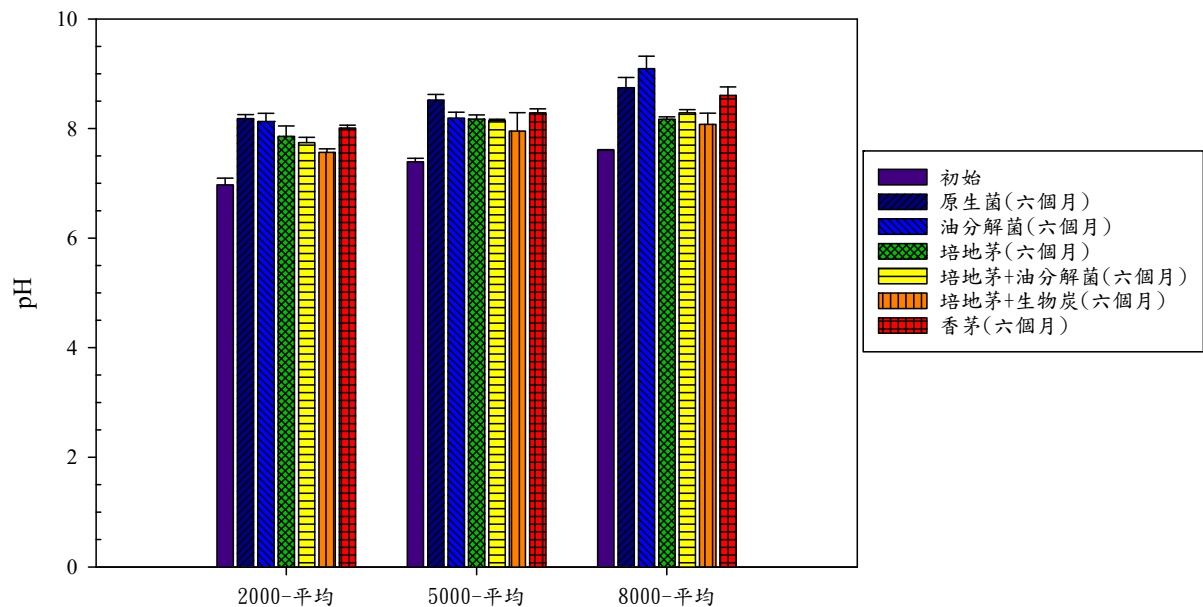


圖4.1.6-1 試驗六個月土壤 pH 變化

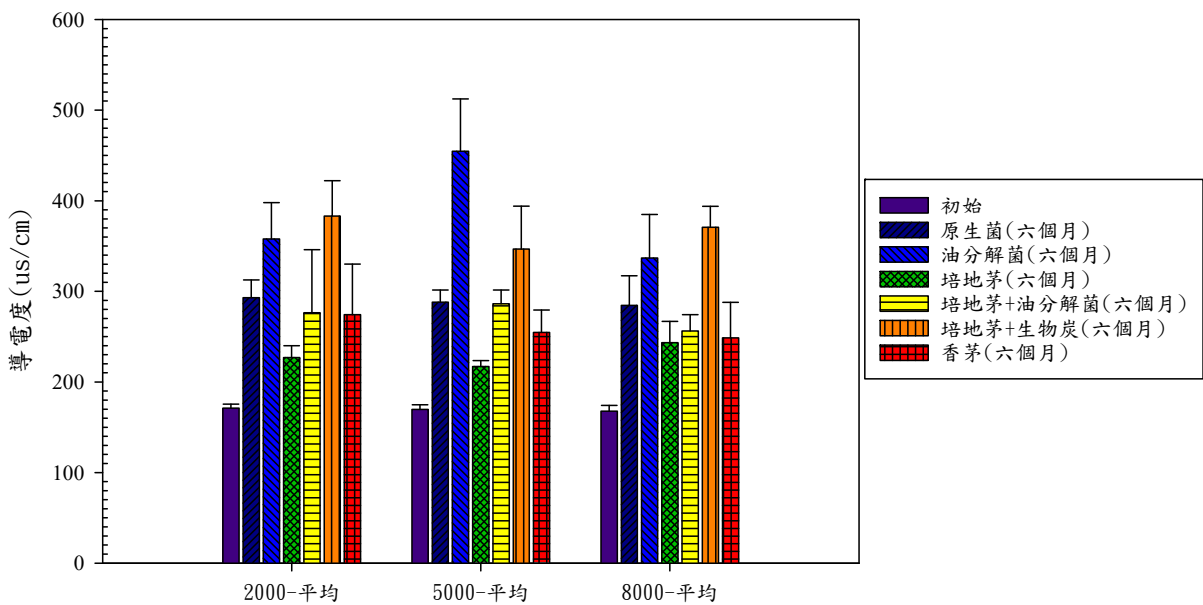


圖4.1.6-2 試驗六個月土壤導電度變化

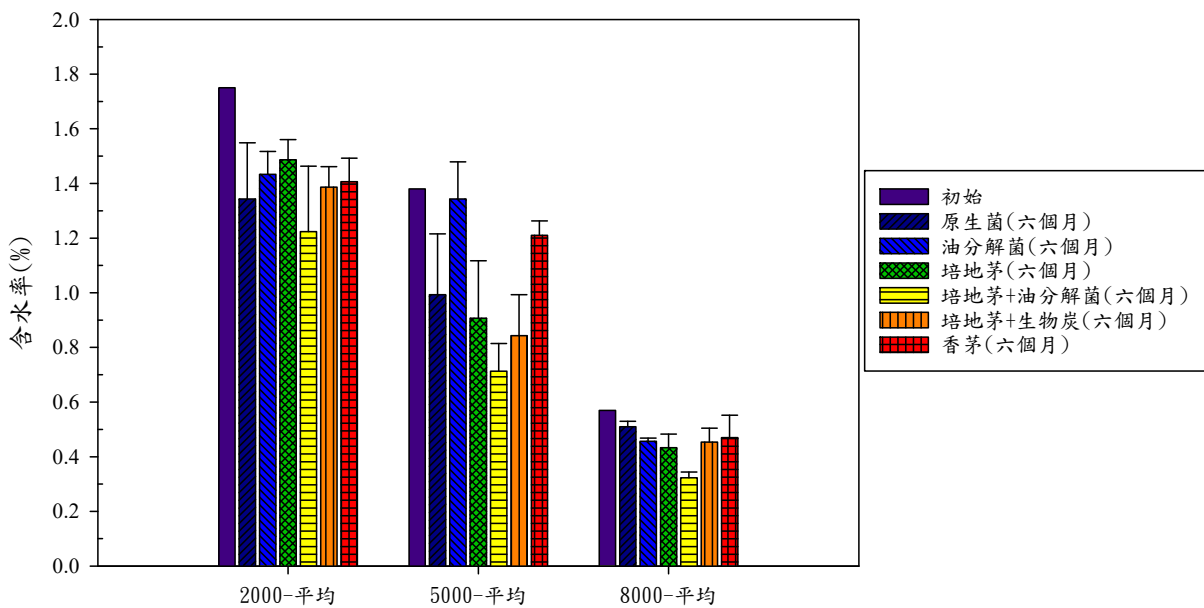


圖4.1.6-3 試驗六個月土壤含水率變化

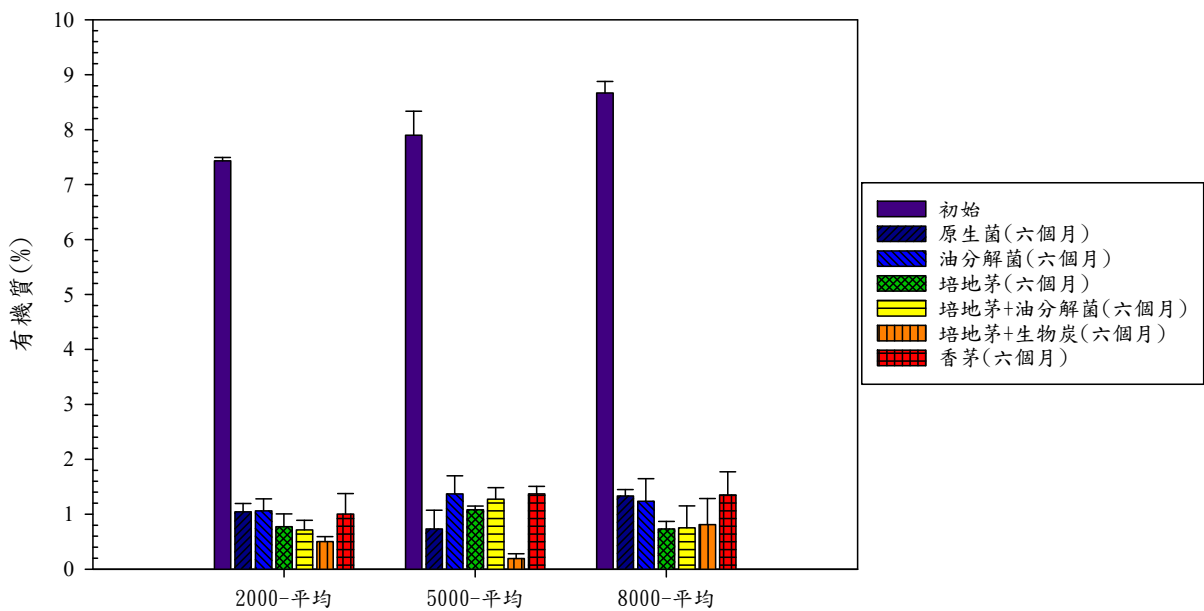


圖4.1.6-4 試驗六個月土壤有機質變化



4.1.7 各試驗組根圈土壤 TPH 濃度變化

本研究係將台中供油中心及新竹供油中心兩處之土壤混和調配成 TPH 濃度 2000 mg/kg、5000 mg/kg、8000 mg/kg 三種濃度，【試驗濃度2000 mk/kg】初始濃度平均為3029 mg/kg，【試驗濃度5000 mk/kg】初始濃度平均為4617 mg/kg，【試驗濃度8000 mk/kg】初始濃度平均為7865 mg/kg。再將各個濃度分成六盆，分別進行六種試驗，每種試驗三重複，在種植植物兩個月、四個月及六個月時挖取根圈土壤分析土壤 TPH 濃度。各試驗根圈土壤 TPH 平均濃度變化如圖4.1.7-1至圖4.1.7-6。

【原生菌】試驗根圈土壤 TPH 濃度如表4.1.7-1，TPH 平均濃度變化如圖4.1.7-1。在 TPH 濃度2000 mg/kg 土壤，兩個月時根圈土壤 TPH 平均濃度為1455.3 mg/kg，降解率為51.95%；四個月時土壤 TPH 平均濃度為826.3 mg/kg，降解率為72.72%；經過六個月試驗後，土壤 TPH 平均濃度為904.7 mg/kg，降解率為70.13%。在 TPH 濃度5000 mg/kg 土壤，兩個月時土壤 TPH 平均濃度為2532.7 mg/kg，降解率為45.14%；四個月時土壤 TPH 平均濃度為1723.7 mg/kg，降解率為62.67%；經過六個月試驗後，土壤 TPH 平均濃度為1999.7 mg/kg，降解率為56.69%。在 TPH 濃度8000 mg/kg 土壤，兩個月時土壤 TPH 平均濃度為5125.7 mg/kg，降解率為34.83%；四個月時土壤 TPH 平均濃度為4243.3 mg/kg，降解率為46.05%，經過六個月試驗後，土壤 TPH 平均濃度為3893 mg/kg，降解率為50.50%。

表4.1.7-1 【原生菌】試驗根圈土壤 TPH 濃度

日期	110/5/24(初始)	110/7/23	110/9/24	110/11/24
樣品	TPHC _{10~C40} (mg/kg)			
2000-1	3265	1526	675	829
2000-2	2027	1638	1168	777
2000-3	3796	1202	636	1108
2000-平均	3029	1455.3	826.3	904.7
5000-1	4799	2684	1775	1923
5000-2	5122	2630	1723	2097
5000-3	3930	2284	1673	1979
5000-平均	4617	2532.7	1723.7	1999.7
8000-1	9431	4139	4091	3813
8000-2	6611	5784	4436	4217
8000-3	7553	5454	4203	3649
8000-平均	7865	5125.7	4243.3	3893

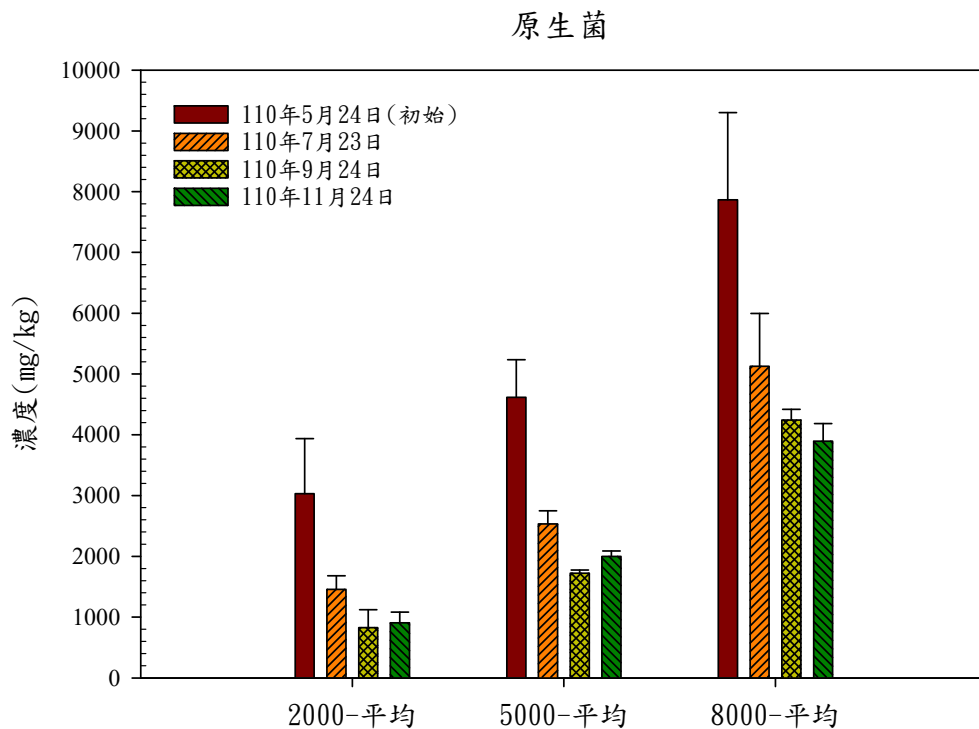


圖4.1.7-1 【原生菌】根圈土壤 TPH 濃度變化

【油分解菌】試驗根圈土壤 TPH 濃度如表4.1.7-2，TPH 平均濃度變化如圖4.1.7-2。在 TPH 濃度2000 mg/kg 土壤，兩個月時根圈土壤 TPH 平均濃度為1765.3 mg/kg，降解率為41.72%；四個月時土壤 TPH 平均濃度為1781.3 mg/kg，降解率為41.19%；經過六個月試驗後，土壤 TPH 平均濃度為878.3 mg/kg，降解率為71.0%。在 TPH 濃度5000 mg/kg 土壤，兩個月時土壤 TPH 平均濃度為2027 mg/kg，降解率為56.10%；四個月時土壤 TPH 平均濃度為1507.3 mg/kg，降解率為67.35%；經過六個月試驗後，土壤 TPH 平均濃度為1895 mg/kg，降解率為58.96%。在 TPH 濃度8000 mg/kg 土壤，兩個月時土壤 TPH 平均濃度為3479.7 mg/kg，降解率為55.76%；四個月時土壤 TPH 平均濃度為3269 mg/kg，降解率為58.44%；經過六個月試驗後，土壤 TPH 平均濃度為3665 mg/kg，降解率為53.40%。



表4.1.7-2 【油分解菌】試驗根圈土壤 TPH 濃度

樣品 \ 日期	110/5/24(初始)	110/7/23	110/9/24	110/11/24
	TPHC _{10~C40} (mg/kg)			
2000-1	3265	1742	1199	798
2000-2	2027	1425	2161	746
2000-3	3796	2129	1984	1091
2000-平均	3029	1765.3	1781.3	878.3
5000-1	4799	2174	1664	1788
5000-2	5122	2261	1786	2075
5000-3	3930	1646	1072	1822
5000-平均	4617	2027	1507.3	1895
8000-1	9431	3414	3815	3250
8000-2	6611	3525	3166	4226
8000-3	7553	3500	2826	3519
8000-平均	7865	3479.7	3269	3665

油分解菌

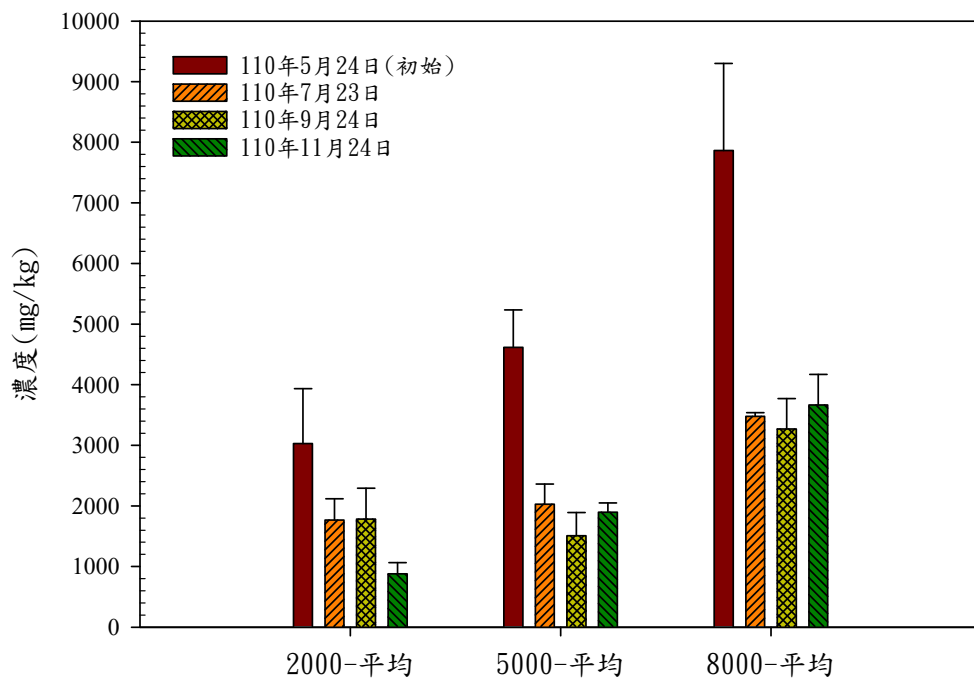


圖4.1.7-2 【油分解菌】根圈土壤 TPH 濃度變化



【培地茅】試驗根圈土壤 TPH 濃度如表4.1.7-3，TPH 平均濃度變化如圖4.1.7-3。在 TPH 濃度2000 mg/kg 土壤，兩個月時根圈土壤 TPH 平均濃度為897.2 mg/kg，降解率為70.38%；四個月時土壤 TPH 平均濃度為691.3 mg/kg，降解率為77.18%；經過六個月試驗後，土壤 TPH 平均濃度為278 mg/kg，降解率為90.82%。在 TPH 濃度5000 mg/kg 土壤，兩個月時土壤 TPH 平均濃度為1430.7 mg/kg，降解率為69.01%；四個月時土壤 TPH 平均濃度為1460 mg/kg，降解率為68.38%；經過六個月試驗後，土壤 TPH 平均濃度為578.3 mg/kg，降解率為87.47%。在 TPH 濃度8000 mg/kg 土壤，兩個月時土壤 TPH 平均濃度為4478.3 mg/kg，降解率為43.06%；四個月時土壤 TPH 平均濃度為3125 mg/kg，降解率為60.27%；經過六個月試驗後，土壤 TPH 平均濃度為1615.7 mg/kg，降解率為79.46%。

表4.1.7-3 【培地茅】試驗根圈土壤 TPH 濃度

日期	110/5/24(初始)	110/7/23	110/9/24	110/11/24
樣品	TPHC _{10~C40} (mg/kg)			
2000-1	3265	1423	495	309
2000-2	2027	670.8	993	242
2000-3	3796	597.9	586	283
2000-平均	3029	897.2	691.3	278
5000-1	4799	2300	1111	608
5000-2	5122	1364	1703	704
5000-3	3930	628.2	1566	423
5000-平均	4617	1430.7	1460	578.3
8000-1	9431	4666	2767	1467
8000-2	6611	3451	3561	2525
8000-3	7553	5318	3047	855
8000-平均	7865	4478.3	3125	1615.7

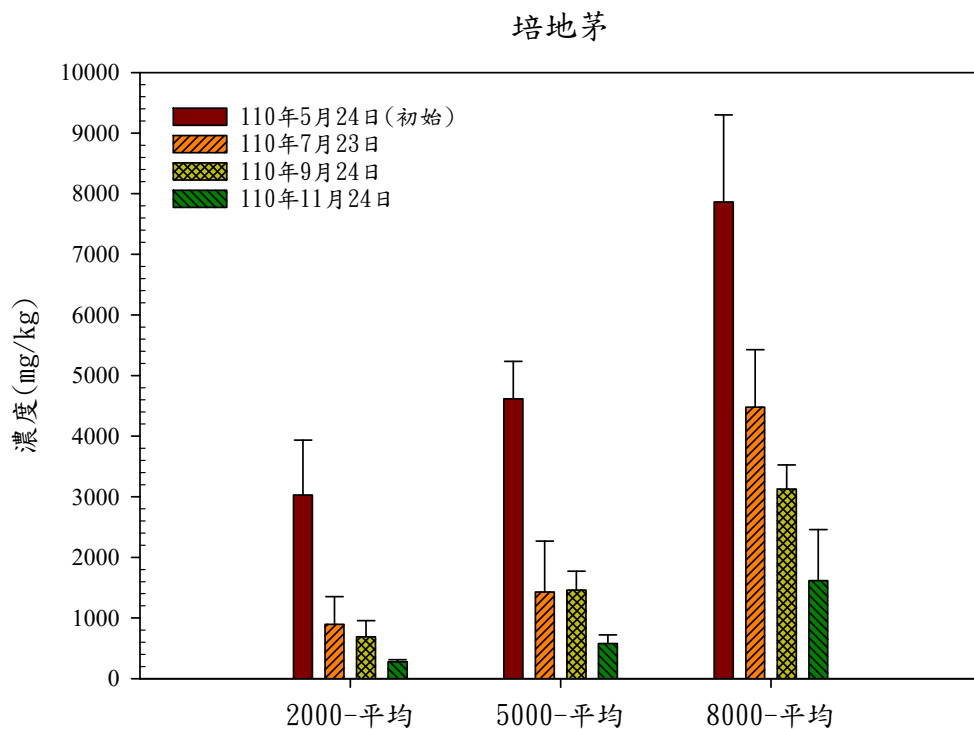


圖4.1.7-3 【培地茅】根圈土壤 TPH 濃度變化

【培地茅+油分解菌】試驗根圈土壤 TPH 濃度如表4.1.7-4，TPH 平均濃度變化如圖4.1.7-4。在 TPH 濃度2000 mg/kg 土壤，兩個月時根圈土壤 TPH 平均濃度為656.9 mg/kg，降解率為78.31%；四個月時土壤 TPH 平均濃度為531.7 mg/kg，降解率為82.45%；經過六個月試驗後，土壤 TPH 平均濃度為263 mg/kg，降解率為91.32%；在 TPH 濃度5000 mg/kg 土壤，兩個月時土壤 TPH 平均濃度為1030.6 mg/kg，降解率為77.68%；四個月時土壤 TPH 平均濃度為922.3 mg/kg，降解率為80.02%；經過六個月試驗後，土壤 TPH 平均濃度為964 mg/kg，降解率為79.12%。在 TPH 濃度8000 mg/kg 土壤，兩個月時土壤 TPH 平均濃度為3929.7 mg/kg，降解率為50.04%；四個月時土壤 TPH 平均濃度為2432 mg/kg，降解率為69.08%；經過六個月試驗後，土壤 TPH 平均平均濃度為1468.7 mg/kg，降解率為81.33%。



表4.1.7-4 【培地茅+油分解菌】試驗根圈土壤 TPH 濃度

樣品 \ 日期	110/5/24(初始)	110/7/23	110/9/24	110/11/24
	TPHC _{10~C40} (mg/kg)			
2000-1	3265	726.8	206	374
2000-2	2027	919.1	1103	171
2000-3	3796	324.9	286	244
2000-平均	3029	656.9	531.7	263
5000-1	4799	783.8	1190	567
5000-2	5122	1104	585	1193
5000-3	3930	1204	992	1132
5000-平均	4617	1030.6	922.3	964
8000-1	9431	4785	2252	1300
8000-2	6611	2921	2886	2101
8000-3	7553	4083	2158	1005
8000-平均	7865	3929.7	2432	1468.7

培地茅+油分解菌

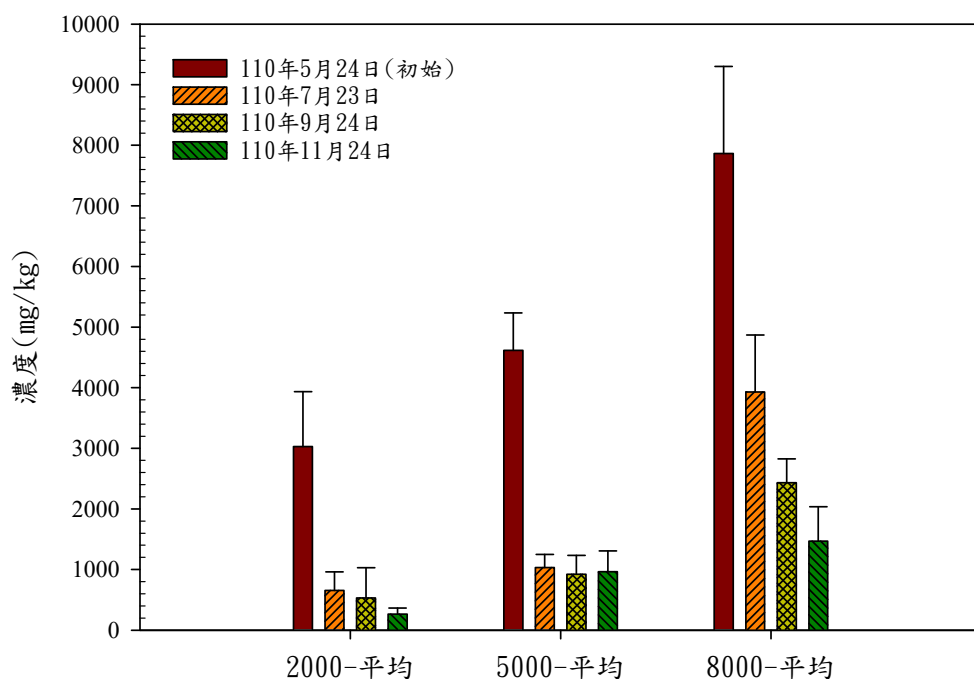


圖4.1.7-4 【培地茅+油分解菌】根圈土壤 TPH 濃度變化



【培地茅+生物炭】試驗根圈土壤 TPH 濃度如表4.1.7-5，TPH 平均濃度變化如圖4.1.7-5。在 TPH 濃度2000 mg/kg 土壤，兩個月時根圈土壤 TPH 平均濃度為436.4 mg/kg，降解率為85.59%；四個月時土壤 TPH 平均濃度為713 mg/kg，降解率為76.46%；經過六個月試驗後，土壤 TPH 平均濃度為128.7 mg/kg，降解率為95.75%。在 TPH 濃度5000 mg/kg 土壤，兩個月時土壤 TPH 平均濃度為1294.3 mg/kg，降解率為71.97%；四個月時土壤 TPH 平均濃度為1155.7 mg/kg，降解率為74.97%；經過六個月試驗後，土壤 TPH 平均濃度為758.3 mg/kg，降解率為83.58%。在 TPH 濃度8000 mg/kg 土壤，兩個月時土壤 TPH 平均濃度為2728.7 mg/kg，降解率為65.31%；四個月時土壤 TPH 平均濃度為2442.3 mg/kg，降解率為68.95%；經過六個月試驗後，土壤 TPH 平均濃度為1588.3 mg/kg，降解率為79.81%。

表4.1.7-5 【培地茅+生物炭2.5%】試驗根圈土壤 TPH 濃度

日期	110/5/24(初始)	110/7/23	110/9/24	110/11/24
樣品	TPHC _{10~C40} (mg/kg)			
2000-1	3265	702.1	969	102
2000-2	2027	241.9	638	139
2000-3	3796	365.3	532	145
2000-平均	3029	436.4	713	128.7
5000-1	4799	1420	1267	535
5000-2	5122	1228	1501	888
5000-3	3930	1235	699	852
5000-平均	4617	1294.3	1155.7	758.3
8000-1	9431	2864	2222	1803
8000-2	6611	1913	2007	1139
8000-3	7553	3409	3098	1823
8000-平均	7865	2728.7	2442.3	1588.3

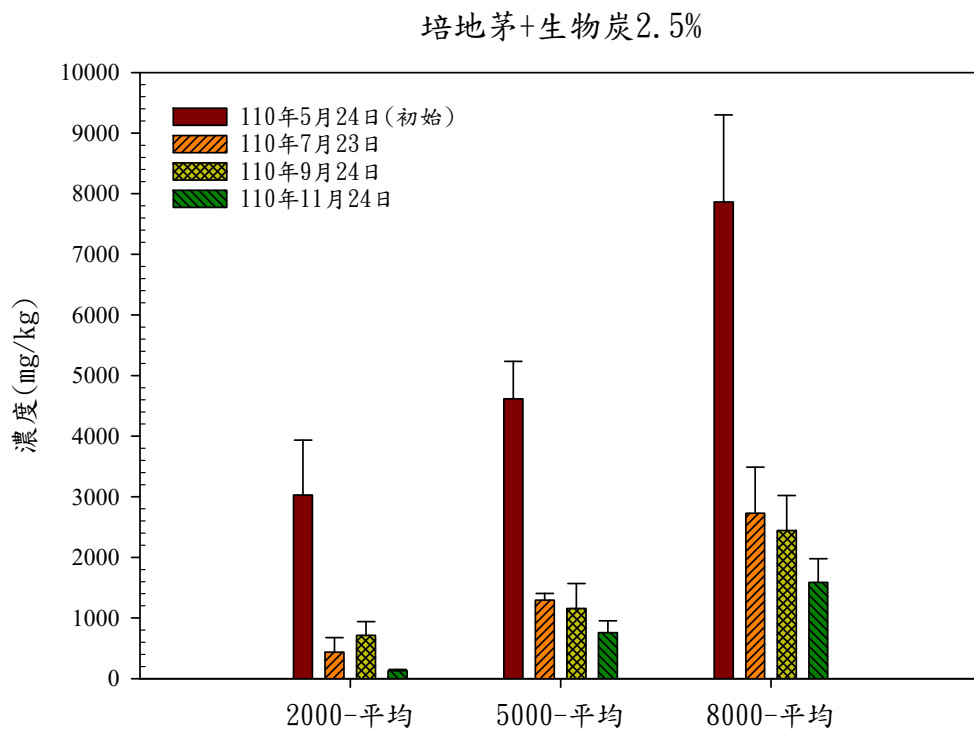


圖4.1.7-5 【培地茅+生物炭2.5%】根圈土壤 TPH 濃度變化

【香茅】試驗根圈土壤 TPH 濃度如表4.1.7-6，TPH 平均濃度變化如圖4.1.7-6。在 TPH 濃度2000 mg/kg 土壤，兩個月時根圈土壤 TPH 平均濃度為668.6 mg/kg，降解率為77.93%；四個月時土壤 TPH 平均濃度為881.7 mg/kg，降解率為70.89%；經過六個月試驗後，土壤 TPH 平均濃度為263 mg/kg，降解率為91.32%。在 TPH 濃度5000 mg/kg 土壤，兩個月時土壤 TPH 平均濃度為1015.1 mg/kg，降解率為78.01%；四個月時土壤 TPH 平均濃度為1214.3 mg/kg，降解率為73.70%；經過六個月試驗後，土壤 TPH 平均濃度為587 mg/kg，降解率為87.29%。在 TPH 濃度8000 mg/kg 土壤，兩個月時土壤 TPH 平均濃度為3669 mg/kg，降解率為53.35%；四個月時土壤 TPH 平均濃度為3083.3 mg/kg，降解率為60.80%；經過六個月試驗後，土壤 TPH 平均濃度為2244.7 mg/kg，降解率為71.46%。



表4.1.7-6 【香茅】試驗根圈土壤 TPH 濃度

樣品 \ 日期	110/5/24(初始)	110/7/23	110/9/24	110/11/24
	TPHC _{10~C40} (mg/kg)			
2000-1	3265	397.3	597	245
2000-2	2027	838.8	821	311
2000-3	3796	769.6	1227	233
2000-平均	3029	668.6	881.7	263
5000-1	4799	1693	1256	951
5000-2	5122	706.3	908	506
5000-3	3930	646.0	1479	304
5000-平均	4617	1015.1	1214.3	587
8000-1	9431	3889	3052	2310
8000-2	6611	2771	3151	1787
8000-3	7553	4347	3047	2637
8000-平均	7865	3669	3083.3	2244.7

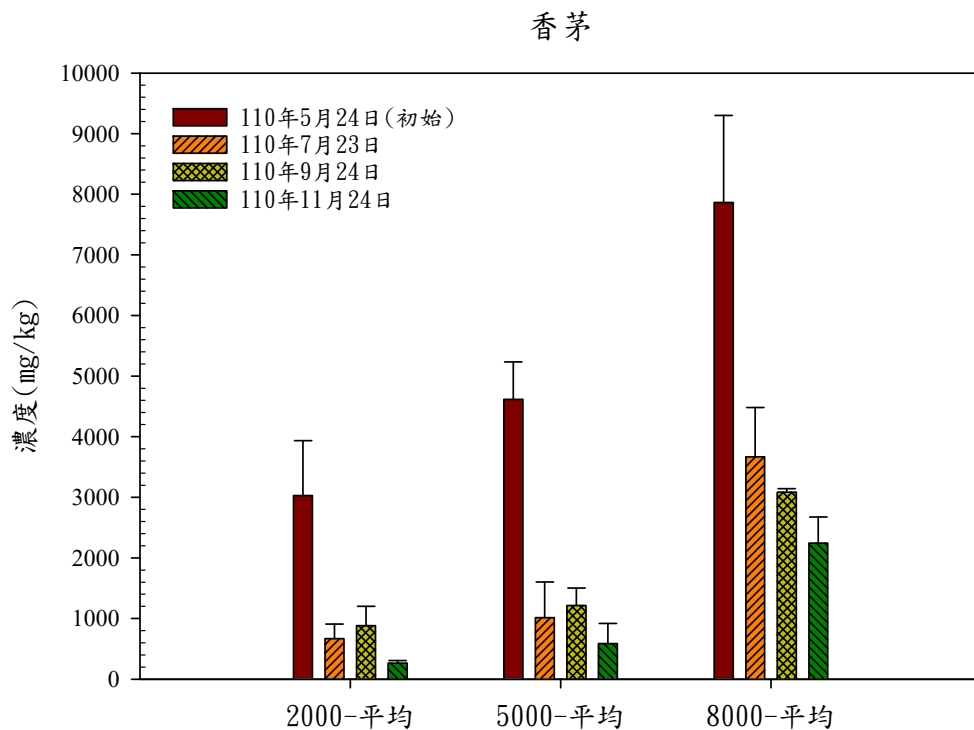


圖4.1.7-6 【香茅】根圈土壤 TPH 濃度變化



4.1.8 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4.1.8-1，去除率如表4.1.8-2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4.1.8-1 各試驗組根圈土壤 TPH 平均濃度

試驗 樣品		原生菌	油分解菌	培地茅	培地茅+ 油分解菌	培地茅+ 生物炭 2.5%	香茅
		TPH _{C10~C40} (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.	881.7
	110/11/24	904.7	878.3	278	263	128.7	263
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	922.3	1155.7	1214.3
	110/11/24	1999.7	1895	578.3	964	758.3	587
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
	110/9/24	4243.3	3269	3125	2432.	2442.3	3083.3
	110/11/24	3893	3665	1615.7	1468.7	1588.3	2244.7

表4.1.8-2 各試驗組根圈土壤 TPH 去除率

試驗 樣品		原生菌	油分解菌	培地茅	培地茅+ 油分解菌	培地茅+ 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
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
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



圖4.1.8-1至圖4.1.8-3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4.1.8-1為土壤 TPH 濃度2000 mg/kg，進行試驗六個月後，根圈土壤 TPH 去除率，【原生菌】組去除效率70.13%、【油分解菌】組去除效率71%，【培地茅+油分解菌】組去除效率91.32%。圖4.1.8-2為土壤 TPH 濃度5000 mg/kg，進行試驗六個月後，根圈土壤 TPH 去除率，【原生菌】組去除效率56.69%、【油分解菌】組去除效率58.96%，【培地茅+油分解菌】組去除效率79.12%。圖4.1.8-3為土壤 TPH 濃度8000 mg/kg，進行試驗六個月後，根圈土壤 TPH 去除率，【原生菌】組去除效率50.5%、【油分解菌】組去除效率53.4%，【培地茅+油分解菌】組去除效率81.33%。在三種濃度試驗下，均以【培地茅+油分解菌】去除效果較佳，【原生菌】及【油分解菌】去除效果差不多。

利用 T 檢定，比較添加油分解菌，及種植培地茅並添加油分解菌與未額外添加菌液或種植植物之對照組比較去除土壤 TPH 效果，在三種試驗濃度，統計結果均為添加油分解菌對去除 TPH 無顯著差異($P>0.05$)，種植培地茅並添加油分解菌對去除 TPH 有顯著差異($P<0.01$)。

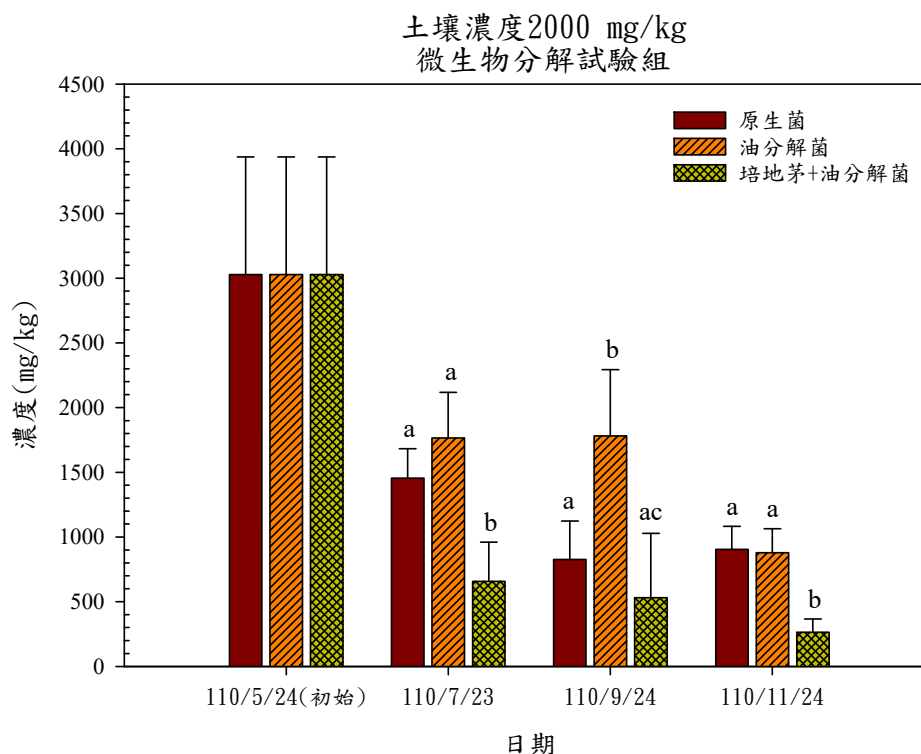


圖4.1.8-1 【試驗濃度2000 mg/kg】微生物分解試驗組 TPH 濃度變化

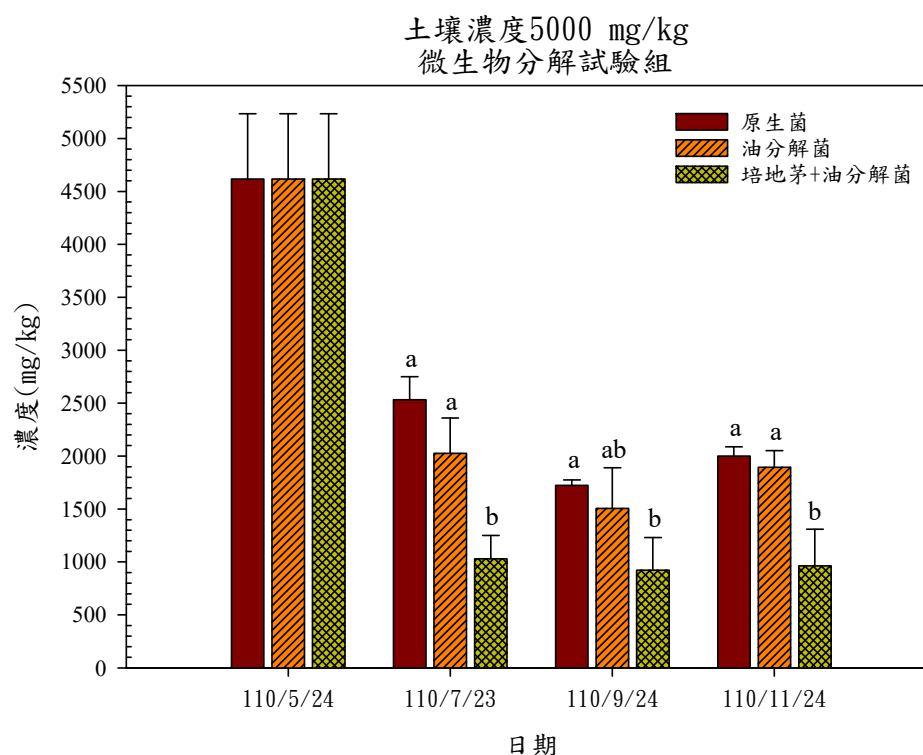


圖4.1.8-2 【試驗濃度5000 mg/kg】微生物分解試驗組 TPH 濃度變化

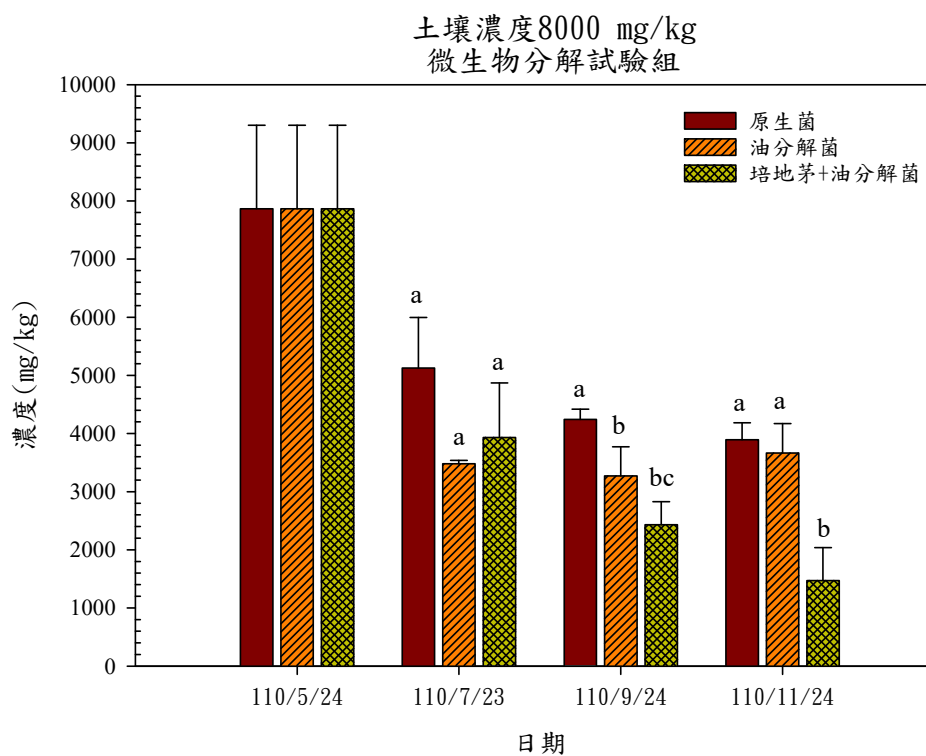


圖4.1.8-3 【試驗濃度8000 mg/kg】微生物分解試驗組 TPH 濃度變化



圖4.1.8-4至圖4.1.8-6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4.1.8-4為土壤TPH濃度2000 mg/kg，進行試驗六個月後，根圈土壤TPH去除效率，【原生菌】組去除效率70.13%；【培地茅】組去除效率90.82%；【培地茅+油分解菌】組去除效率91.32%；【培地茅+生物炭】組去除效率95.75%；【香茅】組去除效率91.32%。圖4.1.8-5為土壤TPH濃度5000 mg/kg，進行試驗六個月後，根圈土壤TPH去除效率，【原生菌】組去除效率56.69%；【培地茅】組去除效率87.47%；【培地茅+油分解菌】組去除效率79.12%；【培地茅+生物炭】組去除效率83.58%；【香茅】組去除效率87.29%。圖4.1.8-6為土壤TPH濃度8000 mg/kg，進行試驗六個月後，根圈土壤TPH去除效率，【原生菌】組去除效率50.5%；【培地茅】組去除效率79.46%；【培地茅+油分解菌】組去除效率81.33%；【培地茅+生物炭】組去除效率79.81%；【香茅】組去除效率71.46%。

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】試驗明顯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。

利用T檢定，比較種植植物，及再添加油分解菌或生物炭與未額外添加菌液或種植植物之對照組比較去除土壤TPH效果，在試驗濃度2000 mg/kg，【培地茅+生物炭】試驗有顯著差異($P<0.05$)，【培地茅】、【培地茅+油分解菌】及【香茅】試驗有顯著差異($P<0.01$)。在試驗濃度5000 mg/kg，【培地茅】、【培地茅+油分解菌】、【培地茅+生物炭】及【香茅】試驗均有顯著差異($P<0.01$)。在試驗濃度8000 mg/kg，【培地茅】試驗有顯著差異($P<0.05$)，【培地茅+油分解菌】、【培地茅+生物炭】及【香茅】試驗均有顯著差異($P<0.01$)。

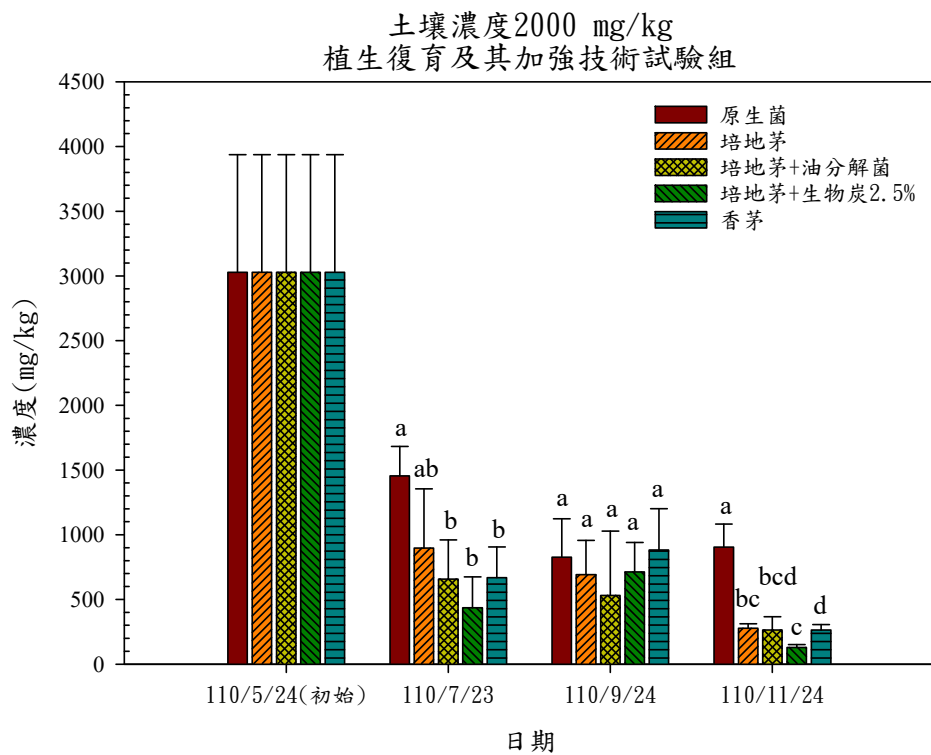


圖4.1.8-4 【試驗濃度2000 mg/kg】植生復育及其加強技術組 TPH 濃度變化

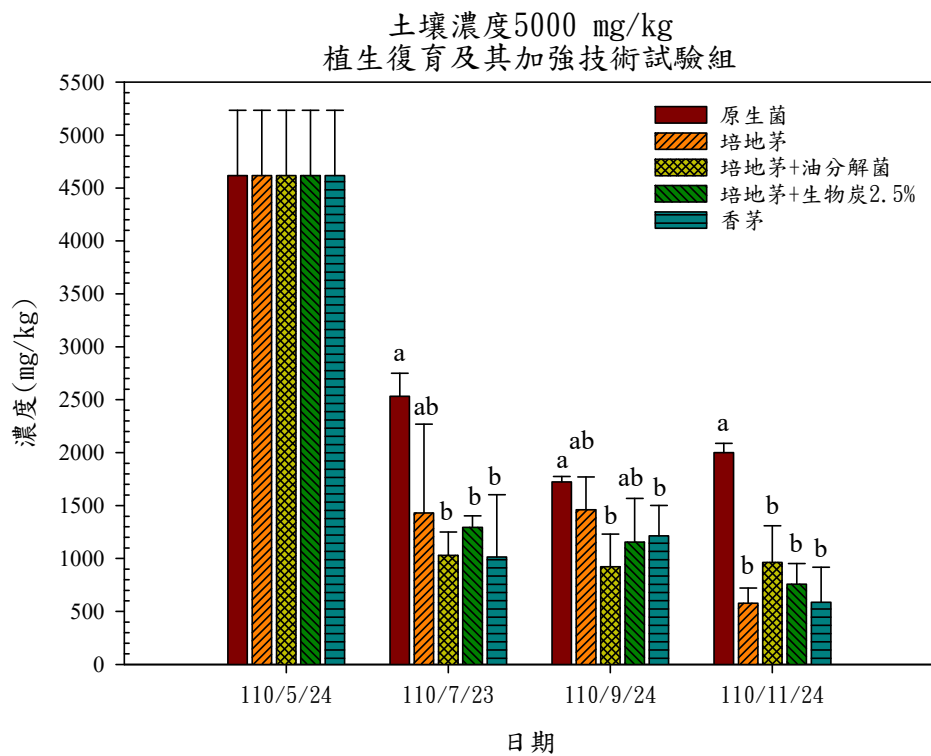


圖4.1.8-5 【試驗濃度5000 mg/kg】植生復育及其加強技術組 TPH 濃度變化

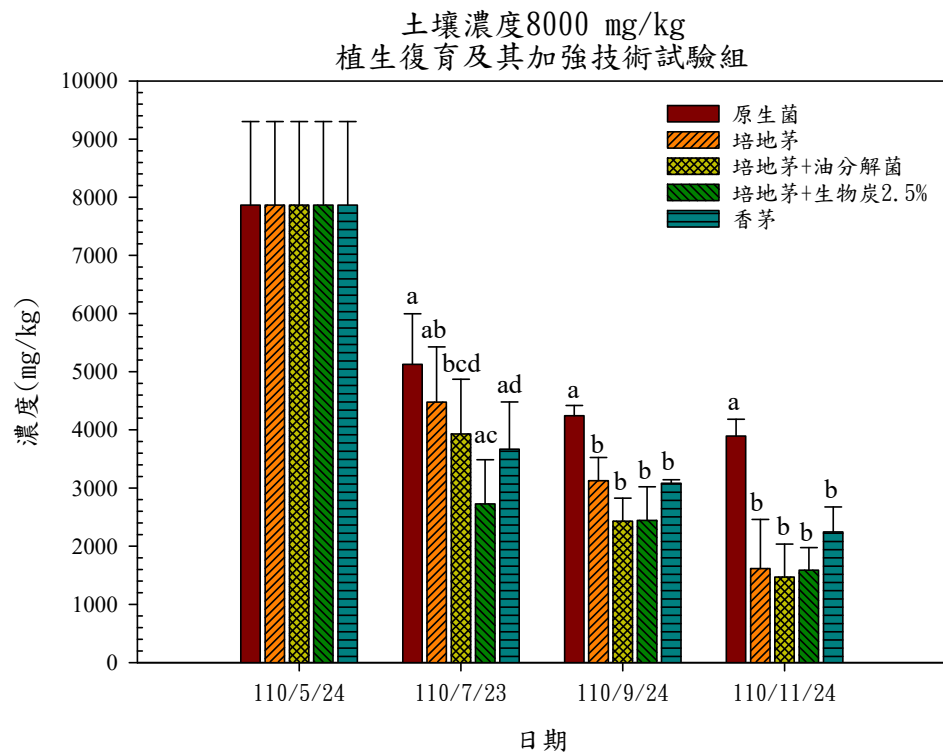


圖4.1.8-6 【試驗濃度8000 mg/kg】植生復育及其加強技術組 TPH 濃度變化



4.1.9 根圈土壤菌相分析

植生復育試驗開始前，針對所調配之 TPH 濃度2000 mg/kg、5000 mg/kg 及 8000 mg/kg 三種濃度土壤，以 NGS 做土壤微生物之菌相分析，分析結果如圖4.1.9-1所示，發現土壤中優勢菌屬歸類為 unclassified 之比例偏高，顯示土壤中仍有許多尚未被充分研究的現地微生物，而己知優勢菌之比例與 TPH 濃度，即原新竹供油中心污染土調配劑量呈正相關性，如 TPH 濃度高，則原污染土中優勢菌，例如 Hydcarboniphaga、Pseudoxanthomonas、Leuconostoc 等，其比例就相對較高；由於試驗初始土壤是由兩種不同來源土，調配而成三種濃度，不同來源土調配比例是造成試驗開始前優勢菌的比例不同的主要原因。

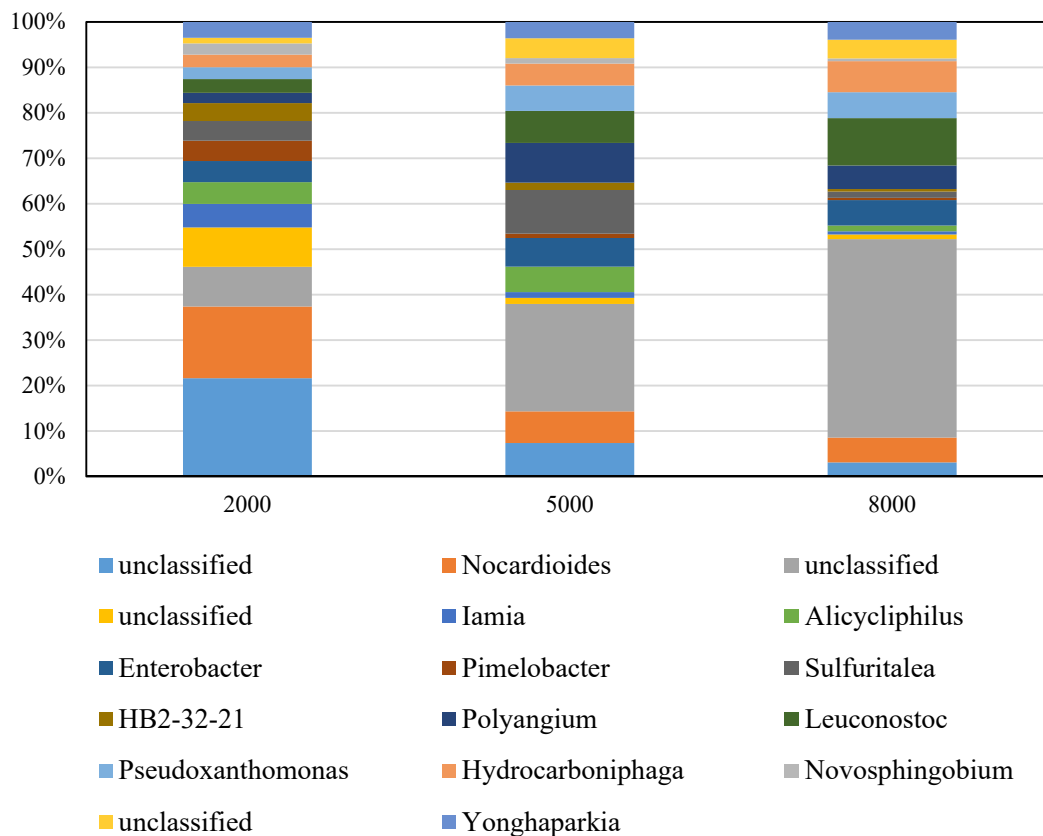
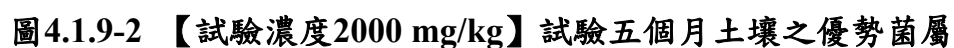
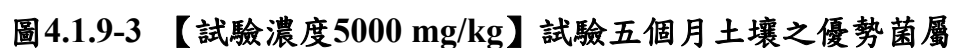


圖4.1.9-1 各濃度土壤初始之優勢菌屬



試驗進行五個月時，採集各試驗根圈土壤，以 NGS 做土壤微生物之菌相分析，分析結果如圖4.1.9-2、圖4.1.9-3、圖4.1.9-4所示，發現特定菌屬在種有植物之試驗組中，有明顯生長優勢，如綠絲菌屬(*Chloronema*)，其在未種植植物之【原生菌】及【油分解菌】試驗組中，含量只占約0.1~1%，而在種有香茅與培地茅之試驗組中佔比達2~13%；另外，許多仍未被發表的未知菌種也有相同情形，例如基因分析為綠彎菌目(*Chloroflexales*)、FFCH7168科，其分類為未知屬種菌，但在種有植物之試驗組中有明顯生長優勢，在【香茅】試驗土壤 TPH 濃度2000 mg/kg 中甚至佔比高達23%，雖未知其更細的物種分類，然此科菌株被發現在闊葉林土壤中；NGS 主要優勢菌分析結果顯示無論污染濃度高低，植物對土壤中菌相分布具有一定影響，推測植物能促使土壤微生物形成特殊菌叢，此外，根據優勢菌中的嗜酸、嗜鹼菌含量狀況，推測植物具有穩定土壤中 pH 值效果，且對比油污染土壤之 TPH 降解結果，顯示種植植物之試驗組皆有較佳的降解率，推測由植物促生之特殊菌叢可能有助於石油碳氫化物之降解。





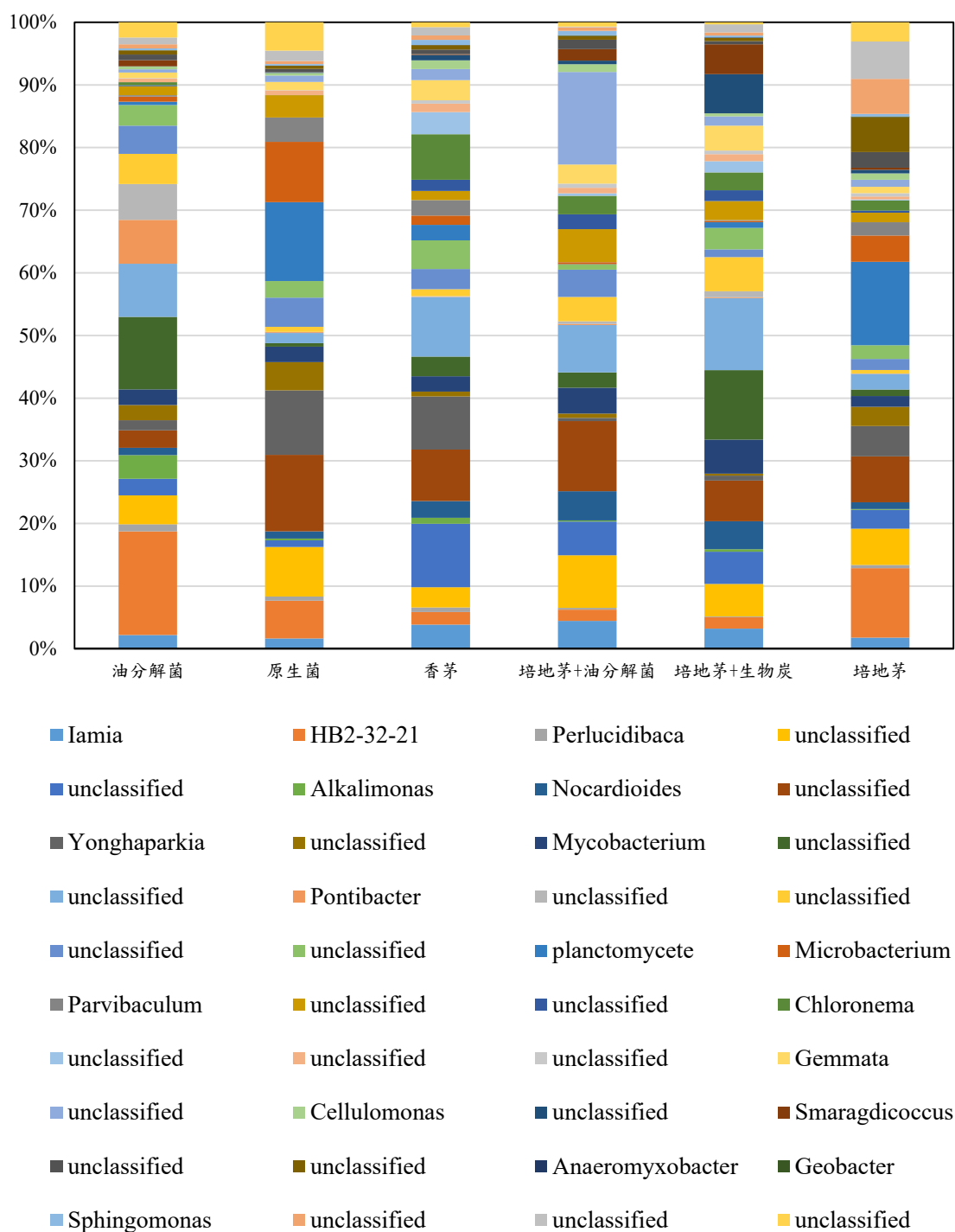


圖4.1.9-4 【試驗濃度8000 mg/kg】試驗五個月土壤之優勢菌屬



在個別微生物的探討方面，油分解菌組別所添加之菌株為 *Acinetobacter venetianus* (以下簡稱為 A.V.菌)，分析結果如圖4.1.9-5所示，發現試驗前土壤中即含有約0.24~0.28%之 A.V.菌，而試驗五個月後油分解菌組(額外添加 A.V.菌株組)雖相對量較高，但所有試驗組土壤中之 A.V.菌含量皆較初期有明顯降低，且隨污染濃度越高，A.V.菌含量越低，推測高濃度的污染物不利於 A.V.菌株的生長。另外，在培地茅加 A.V.菌株之組別，試驗五個月後其 A.V.菌含量已與原生菌組無明顯差異，顯示培地茅加 A.V.菌株的組別，雖然有相對較佳的降解成效，然推測其降解效果主要來自於植物，油分解菌的添加未觀察到對於植物降解污染物有明顯助益。

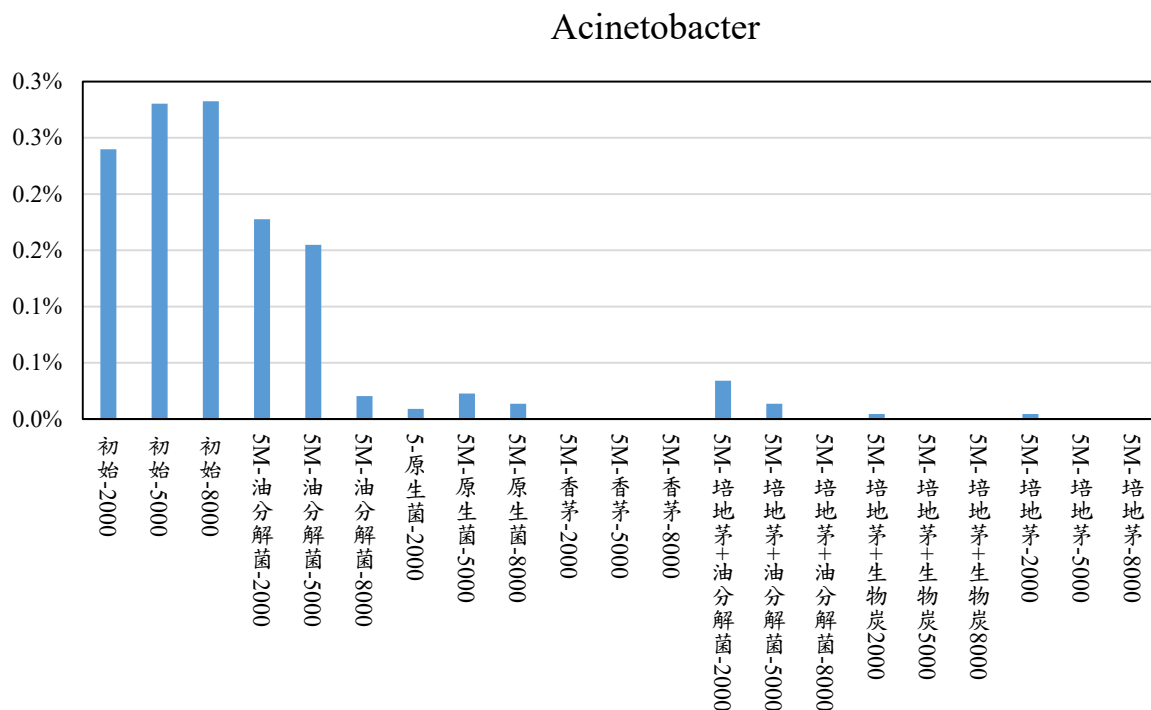


圖4.1.9-5 *Acinetobacter* 菌屬在土壤中含量變化



文獻指出油污染場址常會出現綠膿桿菌(*Pseudomonas*)，其於無污染的土壤中微生物約占1%以下，然而在一旦發生油品洩漏，三個月內就會迅速增長達到5~20%含量，且隨著較易利用的直鏈烷分解後，六個月後即可能下降含量至2%以下。綠膿桿菌之分析結果如圖4.1.9-6，試驗開始前土壤中綠膿桿菌含量約1~2%，較一般無污染的土壤略多一些，試驗五個月後其含量降低至0.1%以下，並無出現漏油場址中明顯量增之過程，推測因本批試驗土壤中的油污已屬於風化油品，使綠膿桿菌不利於生長成為優勢菌種。

由於 A.V.菌與綠膿桿菌已被證實是能分解碳氫化合物之嗜油菌，然而在本次試驗中皆未如預期增長，反而呈現下降趨勢，推測試驗因土壤屬風化油品，而 A.V.菌及綠膿桿菌應屬於對新鮮油品有效分解之菌株，因此在本試驗屬中未觀察到其對於降解污染物有明顯助益。

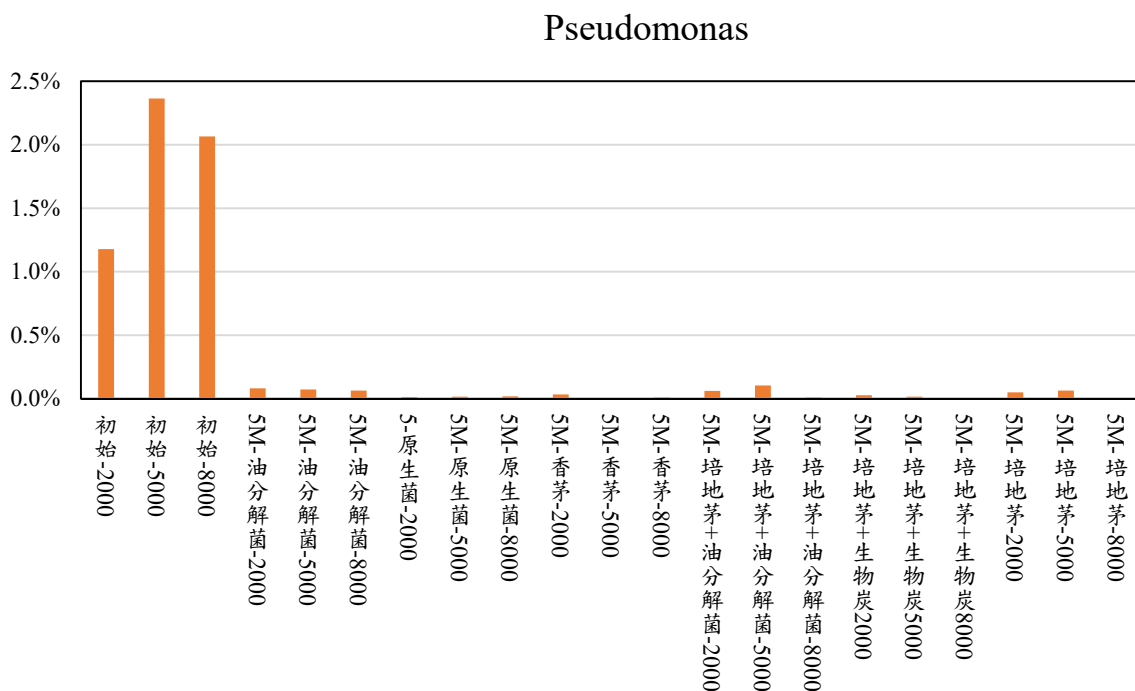


圖4.1.9-6 *Pseudomonas* 菌屬在土壤中含量變化



HB2-32-21菌屬於交替單胞菌科(Alteromonadaceae)，前人研究指出其為碳氫化合物降解能力重要貢獻菌株之一(Arghya et al ,2016)。HB2-32-21菌屬之分析結果如圖4.1.9-7，在試驗開始前土壤中即有0.32~2%的存在，隨著試驗開始後各組別TPH濃度降低超過一半後，HB2-32-21菌屬含量普遍上升，其中也包含原生菌組，顯示利用土壤中的原生菌也能促進油分解菌的生長，而加入油分解菌之試驗組，則可能因其A.V.菌培養基裡含有豐富營養鹽，因此促進土壤中HB2-32-21生長趨勢明顯。值得一提的是，培地茅試驗組亦觀察有明顯促使HB2-32-21生長之效果，而香茅則無。

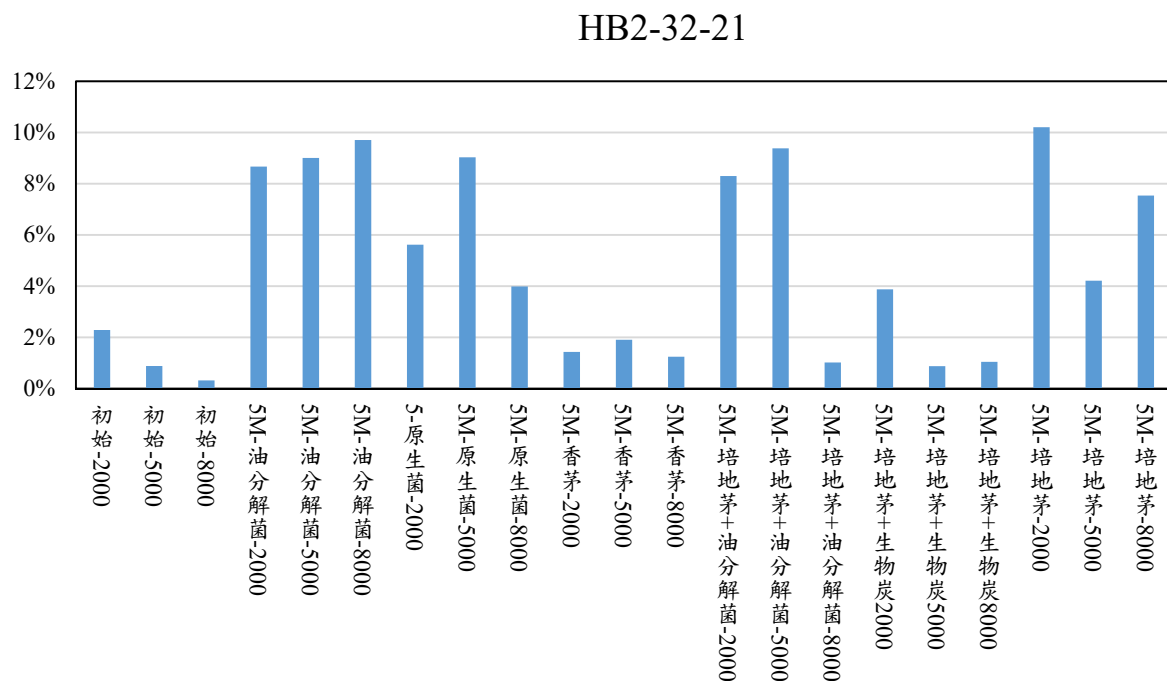


圖4.1.9-7 HB2-32-21菌屬在土壤中含量變化



4.2 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

4.2.1 陶粒製備

人造輕質骨材(或稱陶粒)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呈褐色，堆積密度小於 $1,200\text{ kg/m}^3$ 的矽酸鹽多孔陶質粒狀物。

本研究針對鐵粉、有機質含量對陶粒特性及砷吸附能力進行探討。首先透過文獻探討，以及協同主持人葉春爐理事長的指導，建立陶粒燒結程序如下：

(一) 土壤前處理

1. 土壤採集後先進行均化處理，置於室溫自然風乾並從中挑除雜質，再放入烘箱內以 105°C 烘乾至恆重，待從烘箱取出後放置室溫自然冷卻。
2. 將土樣磨細，以孔徑大小為 100 mesh 之不銹鋼篩網研磨過篩。

(二) 生料球製備

1. 秤取適當乾燥研磨土樣，再依照所規劃之比例，分別添加不同比例鐵粉及稻殼生物炭，添加去離子水比例 30%至已混和均勻之土壤樣品內，進行搓揉混練。
2. 將混練好之土壤放入密閉式乾燥皿中，避免內含水分散失及接觸空氣中水氣，靜置沉化 12 小時，使之水分均勻分布，再以手工搓圓方式製備成粒徑大小 1 公分之生料球。
3. 捏合完成之生料球放入烘箱內乾燥至恆重，放置密閉乾燥皿中保存。

(三) 陶粒燒製

1. 陶粒燒結方式採用二台高溫爐分預熱、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。
2. 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 $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ，溫度 200°C ，預熱時間設定為 16 分鐘。



3. 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 $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ，溫度 1200°C ，焙燒時間設定為 12 分鐘。
4. 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。

4.2.2 陶粒添加鐵粉及有機質

為探討鐵粉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，添加使用島久藥品株式會社所生產，純度99%之鐵粉，添加鐵粉含量為0%、3%、5%、10%及15%共五種比例，圖4.2.2-1為不同鐵粉比例所燒結出之陶粒。

添加的有機質係以稻殼製備之生物炭作為代表，稻殼來源為雲林縣玉山碾米行，稻殼經前處理後，利用高溫爐在無氧環境下以 350°C 進行熱裂解1小時，分析其有機質含量為41.01%。以鐵粉含量15%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4.2.2-2為不同生物炭含量所燒結之陶粒。

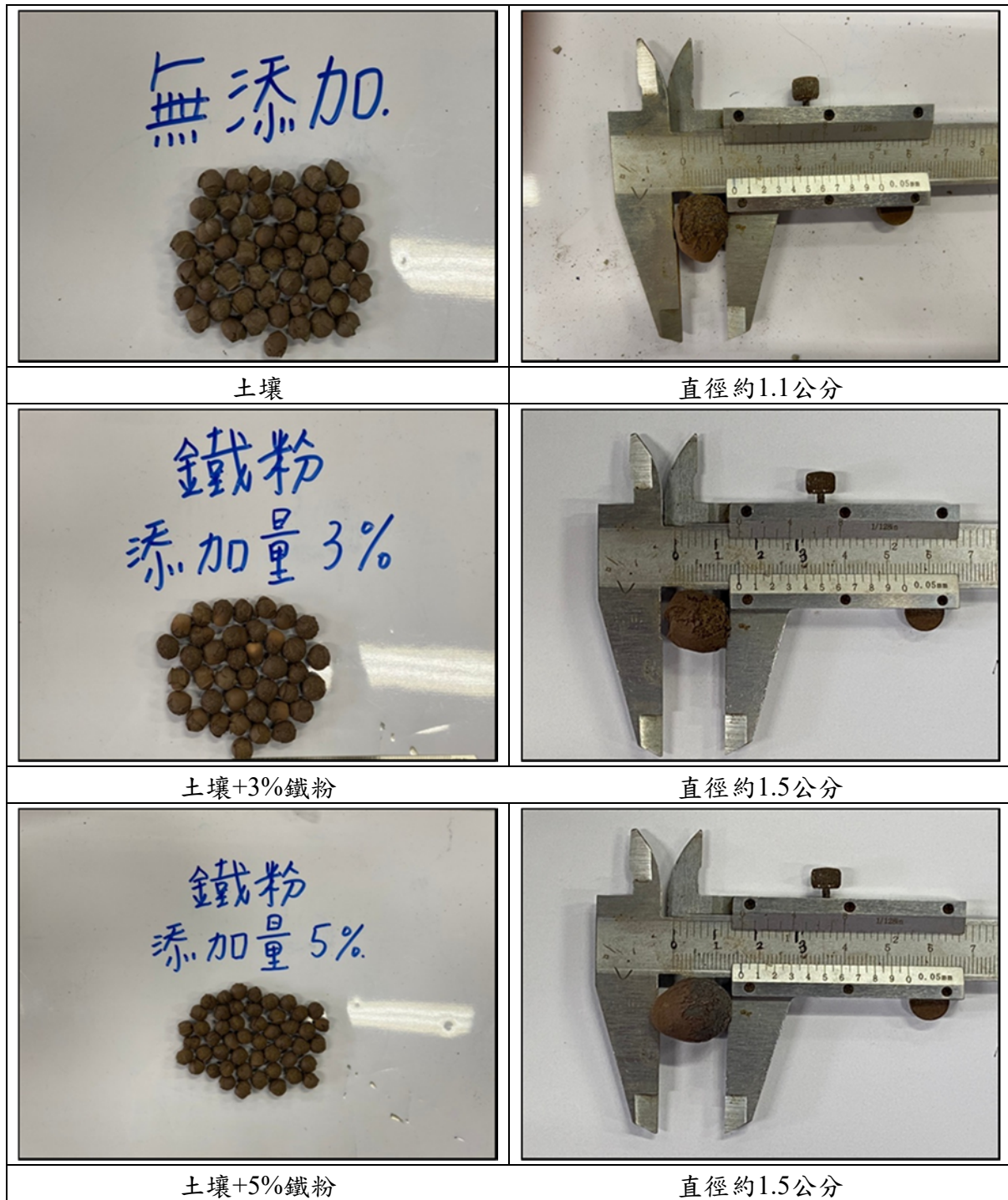


圖4.2.2-1 不同鐵粉添加比例燒結之陶粒外觀(1/2)

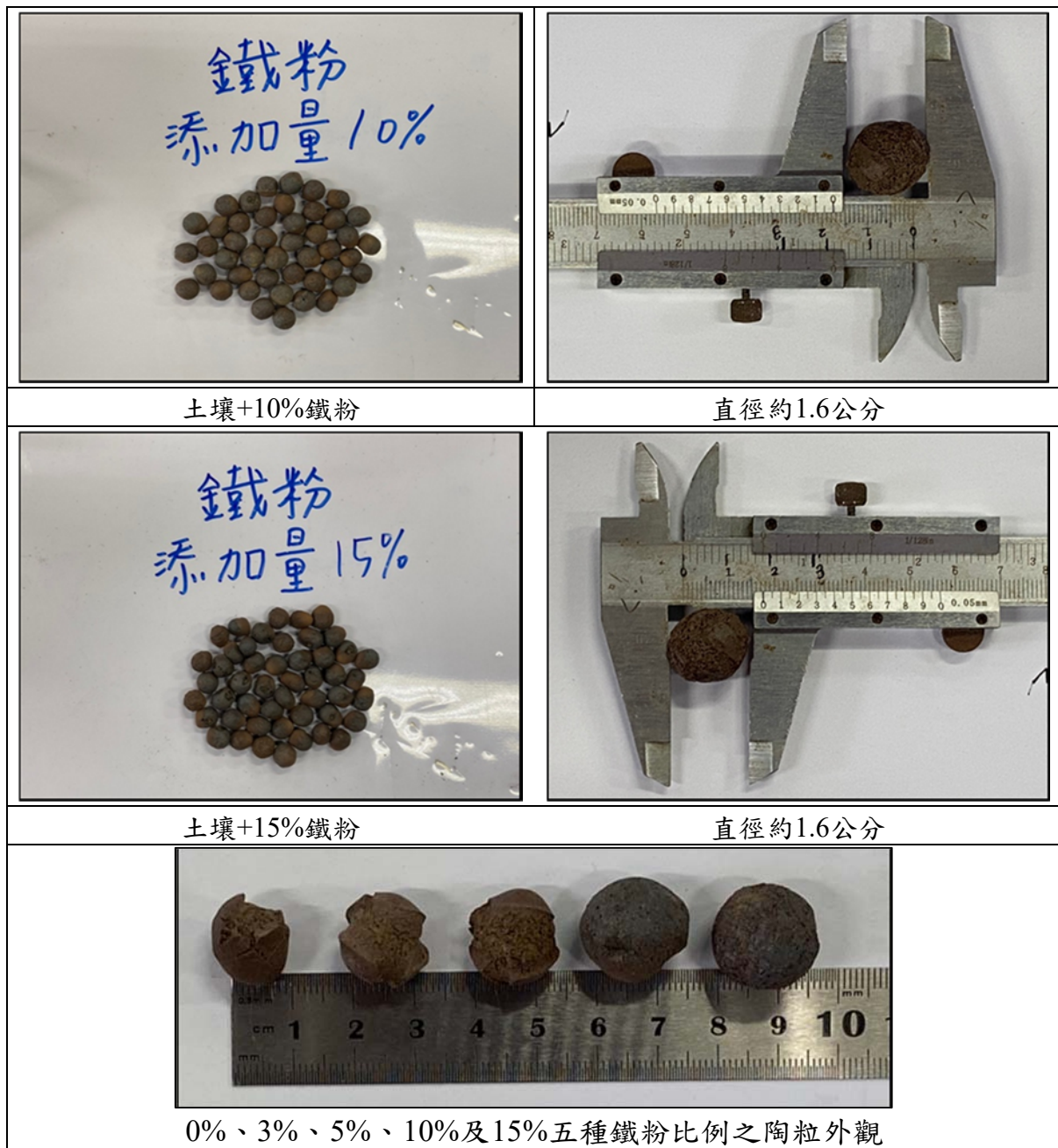


圖4.2.2-1 不同鐵粉添加比例燒結之陶粒外觀(2/2)

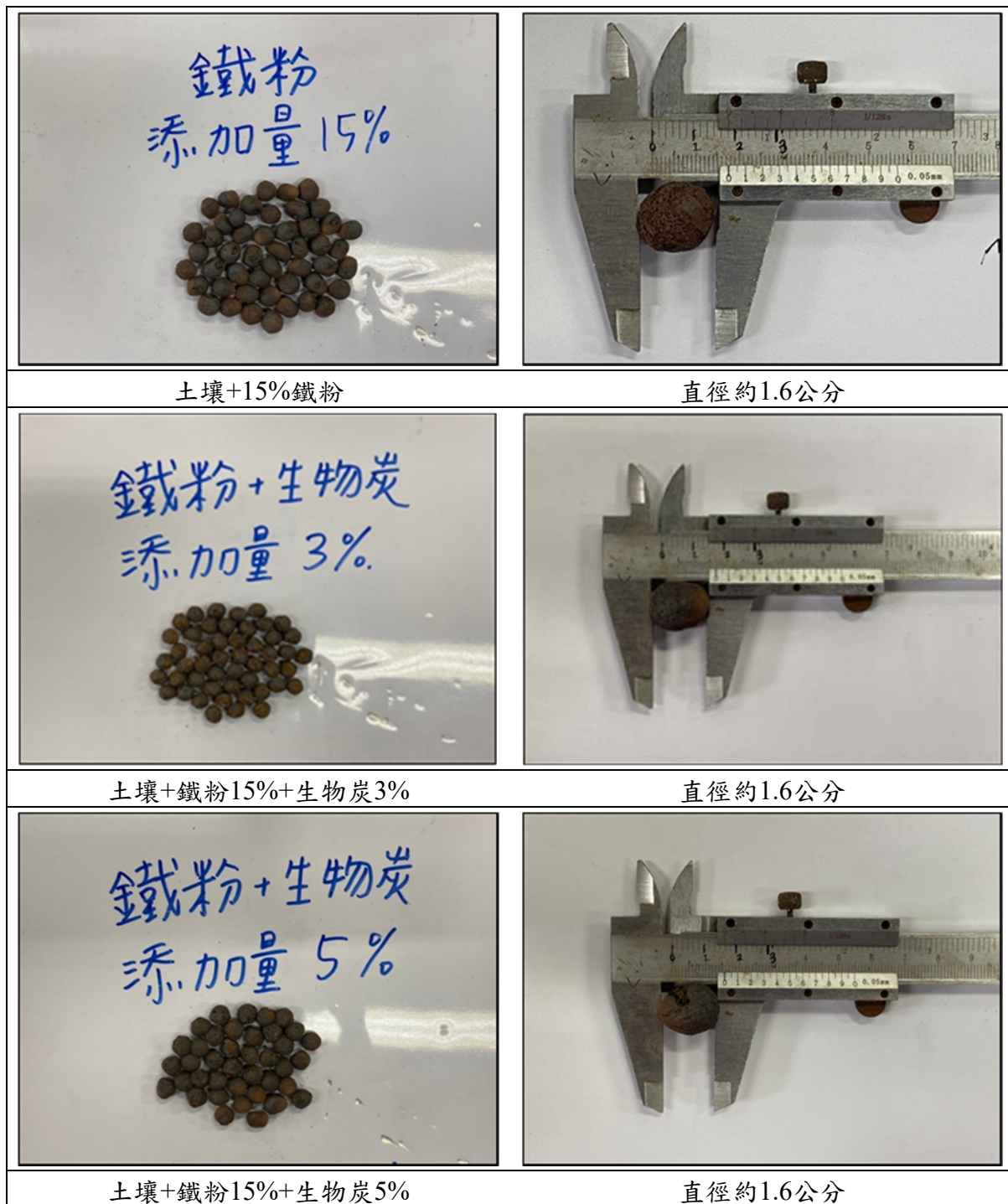


圖4.2.2-2 不同生物炭添加比例燒結之陶粒外觀(1/2)

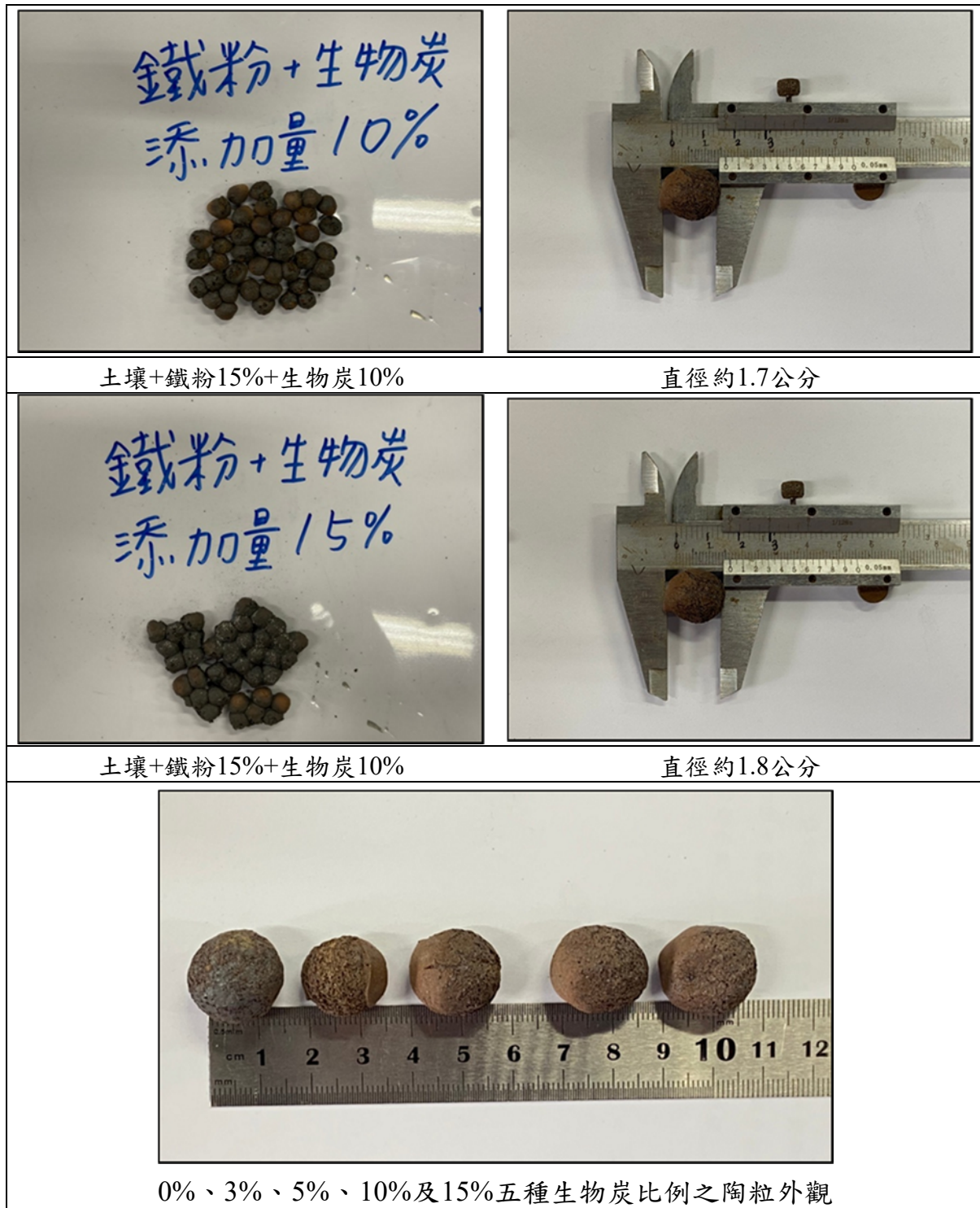


圖4.2.2-2 不同生物炭添加比例燒結之陶粒外觀(2/2)



4.2.3 陶粒特性分析

鐵粉含量、有機質含量對燒結陶粒物理特性之影響，本研究量測陶粒之吸水率、孔隙率、膨脹率、密度及比表面積等特性，結果如下：

4.2.3.1 吸水率

吸水率為水份滲入陶粒內之孔隙，所增加之質量。圖4.2.3.1-1為土壤中添加不同鐵粉含量所燒結之陶粒之吸水率變化。原始土壤之吸水率為6.2%，隨著鐵粉添加比例增加吸水率逐漸增加，鐵粉添加率15%時，骨材吸水率最高約為13.9%。

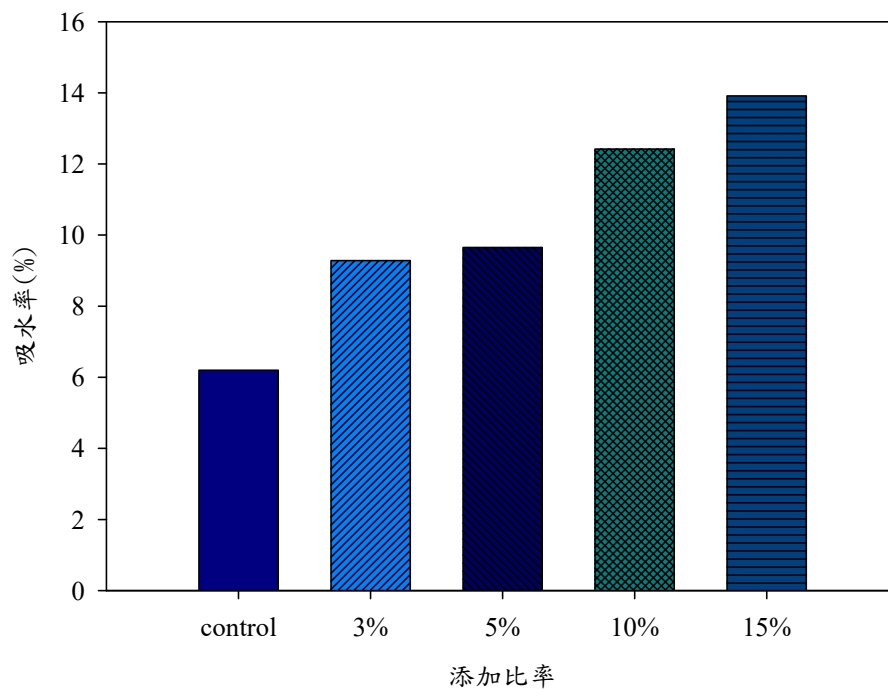


圖4.2.3.1-1 鐵粉含量對陶粒吸水率之影響



本研究以生物炭代表有機質，有機質在高溫燒結時會產生氣化有助於提高陶粒之孔隙率並提高吸水率。本研究在15%鐵粉添加率下，比較不同生物炭添加率對陶粒吸水率之影響，結果如圖4.2.3.1-2所示。生物炭添加比例為3%、5% 時其吸水率與沒有添加生物炭的並無明顯差異，吸水率大約接近14%；添加比例為10% 時吸水率為15.9%；添加比例為15% 時吸水率為17.8%。

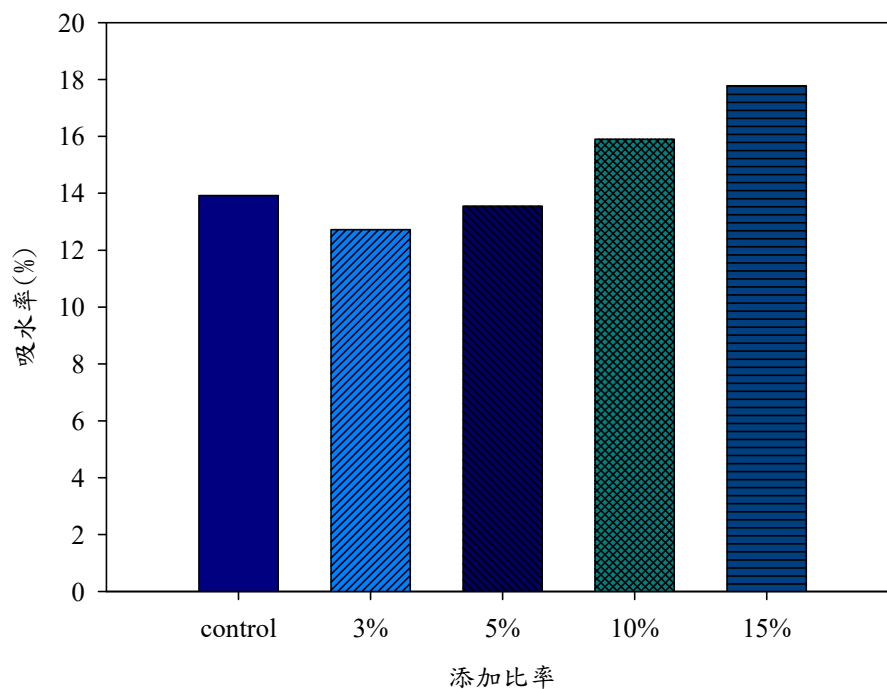


圖4.2.3.1-2 生物炭添加率對陶粒吸水率之影響

4.2.3.2 孔隙率

圖 4.2.3.2-1 為不同鐵粉添加率對陶粒孔隙率之影響，未添加鐵粉之孔隙率平均為 37.3%，隨著鐵粉添加率增加，孔隙率也隨著增加。鐵粉添加率 15%之孔隙率接近 60%。圖 4.2.3.2-2 為不同生物炭加率對陶粒孔隙率之影響。隨生物炭添加率增加孔隙率有增加情形，但增加幅度較小，生物炭添加率 15%，孔隙率大約 69%。

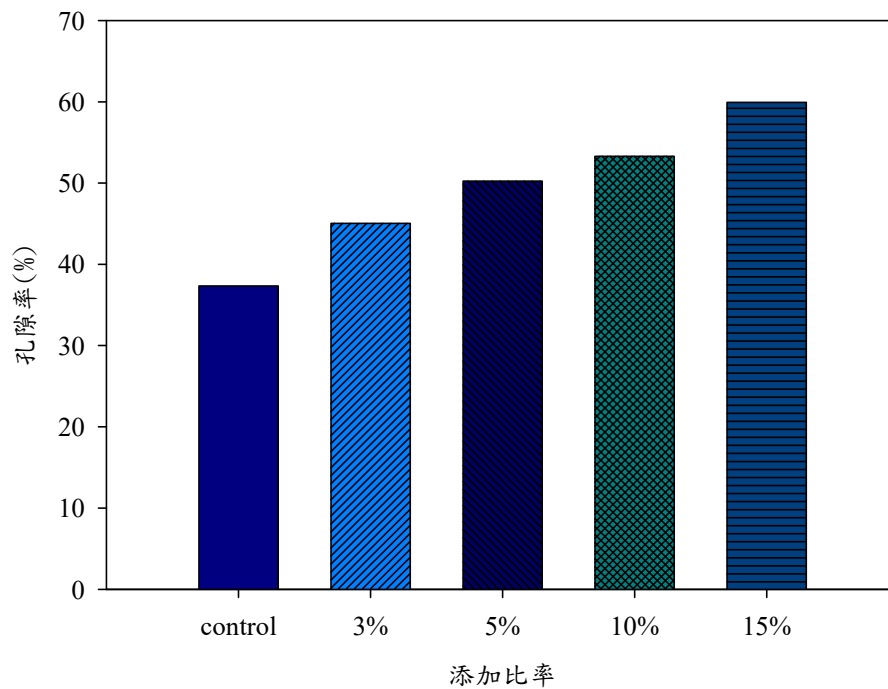


圖4.2.3.2-1 鐵粉添加率對陶粒孔隙率之影響

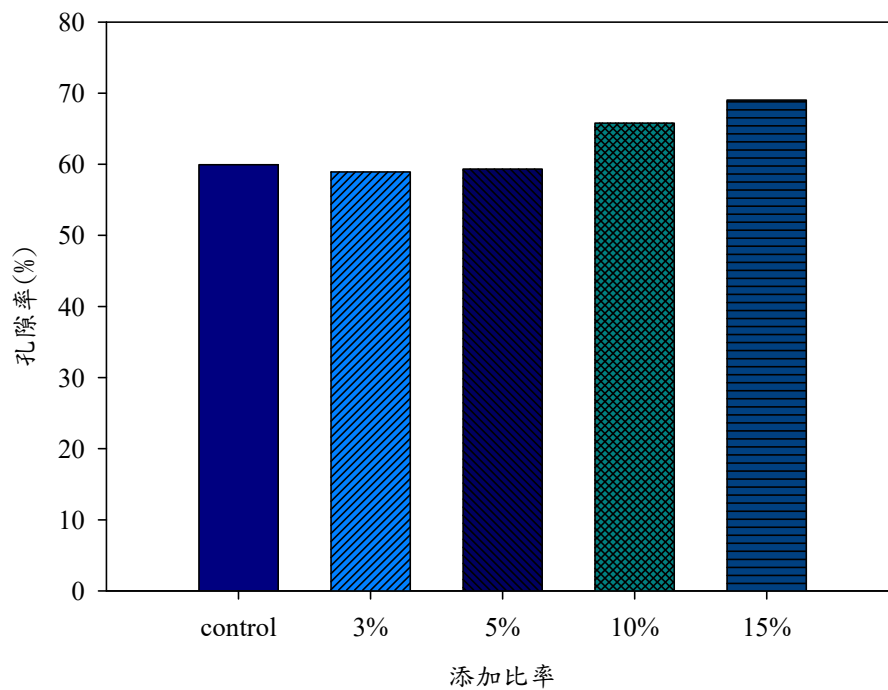


圖4.2.3.2-2 生物炭添加率對陶粒孔隙率之影響



4.2.3.3 膨脹率

添加鐵粉對陶粒膨脹率之影響如圖4.2.3.3-1所示，膨脹率隨著鐵粉添加比例增加顯著增加。未添加鐵粉之膨脹率平均為37.5%；添加3%鐵粉膨脹率平均為82.2%；添加5%鐵粉膨脹率平均為113.3%；添加10%鐵粉膨脹率平均為126.7%；添加15%鐵粉膨脹率平均高達為146.7%。鐵粉在高溫下氧化成 Fe_2O_4 並產生 O_2 、 CO_2 ，因此添加鐵粉對膨脹率有相當大的影響。

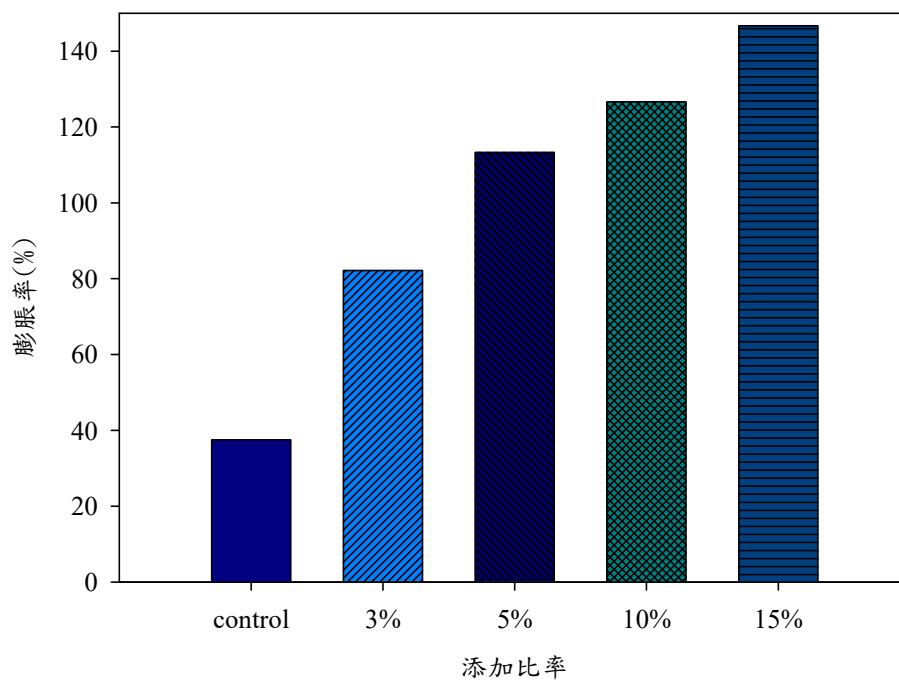


圖4.2.3.3-1 鐵粉添加率對陶粒膨脹率之影響

添加不同比例生物炭對陶粒膨脹率之影響，結果如圖4.2.3.3-2所示。添加15%鐵粉未添加生物炭之陶粒膨脹率平均為146.7%。添加3%、5%對陶粒膨脹率之影響不顯著，添加高比例生物炭雖然陶粒之膨脹率有增加情形，但增加比例較小。添加10%生物炭膨脹率平均為161.7%；添加15%生物炭膨脹率平均為170.0%。

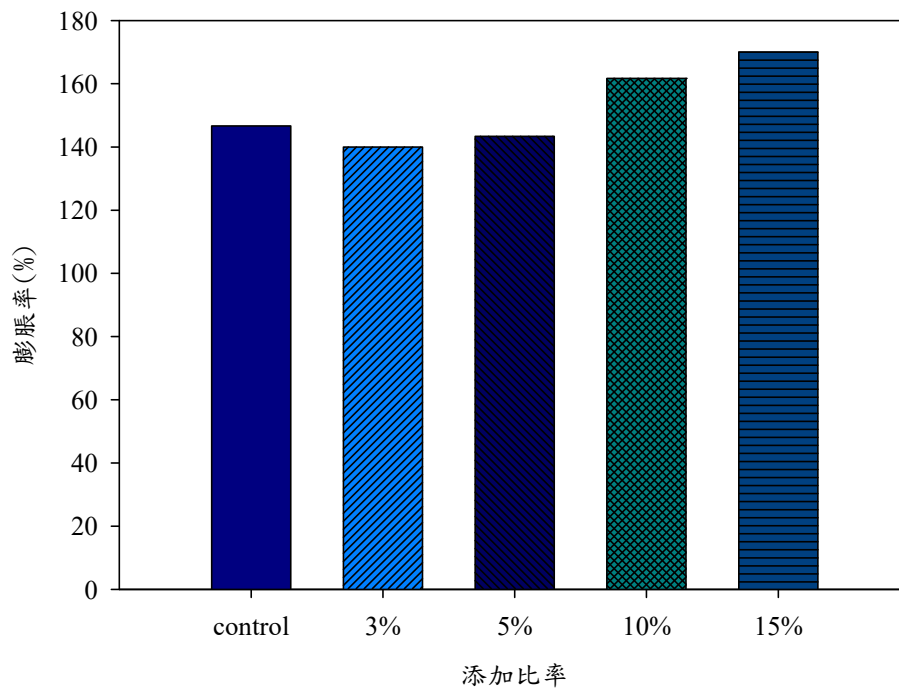


圖4.2.3.3-2 生物炭添加對陶粒膨脹率之影響

4.2.3.4 密度

顆粒密度為陶粒有無發泡之依據，陶粒之標準顆粒密度需小於 2.0 g/cm^3 ，密度與孔隙率成反比。添加不同比例鐵粉、生物炭之陶粒顆粒密度檢測結果如表4.2.3.4-1所示。隨著鐵粉添加比例增加，陶粒密度顯著減少。未添加鐵粉之密度為 1.47 g/cm^3 ；添加3%鐵粉密度為 1.24 g/cm^3 ；添加5%鐵粉密度為 1.10 g/cm^3 ；添加10%鐵粉密度為 0.87 g/cm^3 ；添加15%鐵粉密度為 0.70 g/cm^3 。添加鐵粉對密度降低影響相當顯著，添加15%鐵粉密度降低可達一半以上。相對的，各種比例生物炭之陶粒，顆粒密度範圍落於 $0.71 \sim 0.78 \text{ g/cm}^3$ 之間，添加生物炭對陶粒密度的影響則較不顯著。



表4.2.3.4-1 各種組成陶粒之顆粒密度

	無添加	3%	5%	10%	15%
鐵粉	1.47	1.24	1.10	0.87	0.70
鐵粉15%與 各比例生物炭	0.71	0.78	0.77	0.75	0.72

單位：g/cm³

4.2.3.5 比表面積

比表面積為單位質量陶粒之表面面積，表 4.2.3.5-1 為各種比例鐵粉、生物炭添加比例下陶粒之比表面積。原始土壤所燒結的陶粒平均比表面積為 1.39 m²/g；添加 15%鐵粉之比表面積為 2.9 m²/g，增加 1 倍以上。添加生物炭對陶粒比表面積的影響相當顯著，添加 3%時比表面積為 10.16 m²/g；添加 15%時比表面積可提升到 18.1 m²/g。

表4.2.3.5-1 各種組成陶粒之比表面積

	無添加	3%	5%	10%	15%
鐵粉	1.39	1.03	1.97	2.5	2.9
鐵粉15%與 各比例生物炭	2.9	10.16	13.52	15.17	18.1

單位：m²/g



4.3 不同成份陶粒對砷之去除效率

本研究針對所燒製之不同鐵粉、有機質添加量之陶粒，以及旋轉窯結圈石，以批次流動式管柱進行砷吸附試驗，探討鐵、有機質含量對陶粒吸附砷能力之影響，並與旋轉窯結圈石進行比較。

試驗所使用之管柱為內徑 5 公分，高 50 公分壓克力材料，在管柱中填入陶粒 100 g，浸泡於由砷標準液配製成 0.25 mg/L 之砷溶液 300 ml，以陶粒與水溶液之重量比為一比三的比例在室溫下進行吸附，並以蠕動幫浦控制砷溶液進流速度為 10 mL/min，由管柱下方進樣，由上端出水，透過蠕動幫浦再將水樣回流，每隔一段時間採取水樣進行砷濃度分析，計算去除效率，試驗配置如圖 4.3-1 所示。



圖4.3-1 批次流動式管柱砷吸附試驗配置圖



4.3.1 鐵粉添加率對陶粒去除砷之影響

流動式管柱試驗操作時間共 168 小時，砷初始濃度為 0.25 mg/L。圖 4.3.1-1 為砷溶液在不同比例鐵粉所燒製之陶粒管柱中砷濃度之變化情形；圖 4.3.1-2 為砷之去除率；圖 4.3.1-3 為陶粒中砷之累積吸附量。操作 168 小時後，無添加鐵粉之陶粒管柱砷濃度為 0.193 mg/L；砷去除率為 22.8%；陶粒累積吸附砷量為 0.057 mg/g。鐵粉添加 3% 之陶粒管柱砷濃度為 0.192 mg/L；砷去除率為 23.2%；陶粒累積吸附砷量為 0.057 mg/g。鐵粉添加 5% 之陶粒管柱砷濃度為 0.166 mg/L；砷去除率為 33.6%；陶粒累積吸附砷量為 0.082 mg/g。鐵粉添加 10% 之陶粒管柱，砷濃度為 0.143 mg/L；砷去除率為 42.8%；管柱累積吸附砷量為 0.107 mg/g。鐵粉添加 15% 之陶粒管柱，砷濃度為 0.125 mg/L；砷去除率約 50%；陶粒累積吸附砷量為 0.125 mg/g。隨鐵粉添加率增加，陶粒對砷之移除率及吸附量亦增加。

實驗結果顯示，雖然隨著鐵粉添加比例增加砷去除率增加，但鐵粉添加率 15% 之陶粒對砷之移除率大約只有 50%，去除率偏低。推測應為管柱試驗中所使用之陶粒為未經破碎，直徑約 1.5 公分之球狀顆粒，顆粒與顆粒之間之空隙大，陶粒未能有效攔截吸附砷，因此降低砷之吸附去除效果。後續試驗再將陶粒破碎，探討填充不同粒徑陶粒碎粒對砷之去除效率。

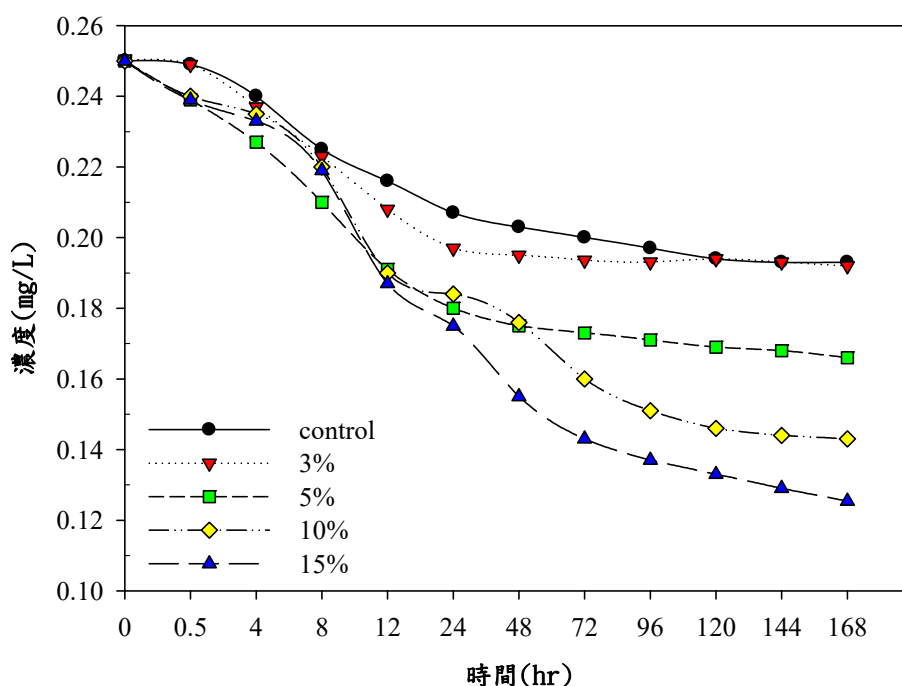


圖4.3.1-1 不同鐵粉添加比例之陶粒對砷之移除濃度變化

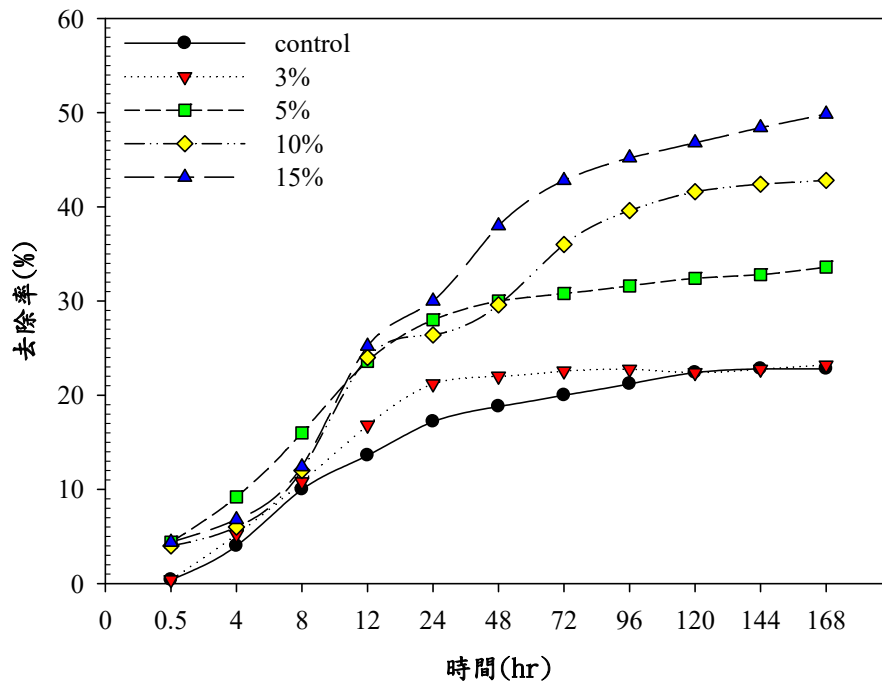


圖4.3.1-2 不同鐵粉添加比例之陶粒對砷之去除率

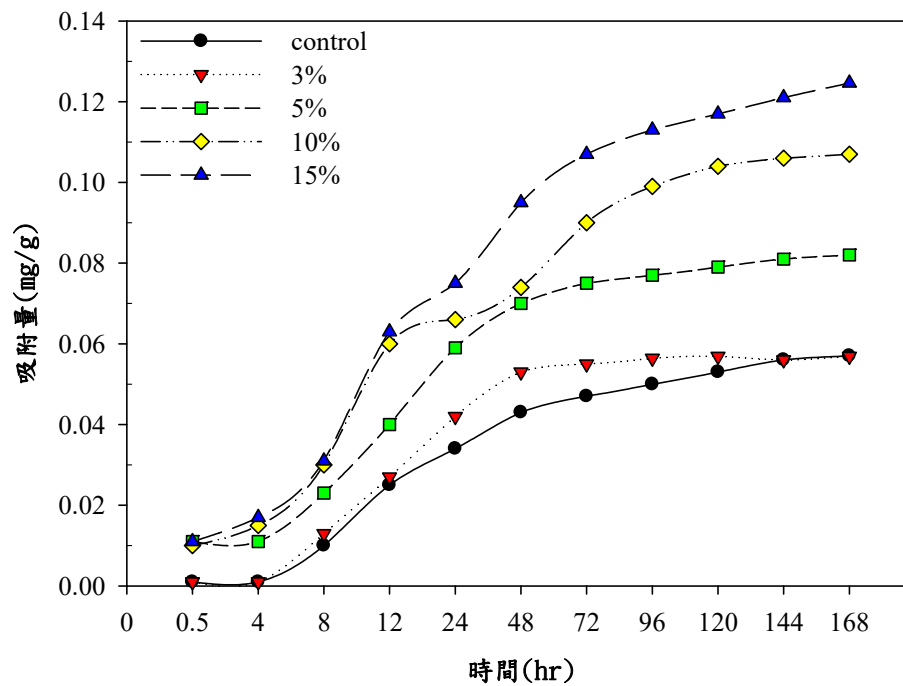


圖4.3.1-3 不同鐵粉添加比例之陶粒對砷之累積吸附量



4.3.2 生物炭添加率對陶粒去除砷之影響

鐵粉添加比例為 15%，加上不同生物炭添加比例所燒製之陶粒對砷之吸附試驗結果如圖 4.3.2-1、圖 4.3.2-2 及圖 4.3.2-3 所示。從結果顯示，添加不同比例生物炭之陶粒管柱對砷之移除率都相當接近，差異在 10% 內。溶液中砷初始濃度為 0.25 mg/L，在 168 小時回流後，無添加生物炭之陶粒管柱砷濃度為 0.125 mg/L；砷去除率為 49.8%；陶粒累積吸附砷量為 0.125 mg/g。添加 3% 生物炭之陶粒管柱，砷濃度為 0.130 mg/L；砷去除率為 48%；陶粒累積吸附砷量為 0.12 mg/g。添加 5% 生物炭陶粒管柱，砷濃度為 0.126 mg/L；砷去除率為 49.6%；陶粒累積吸附砷量為 0.124 mg/g。添加 10% 生物炭陶粒管柱，砷濃度為 0.123 mg/L；砷去除率為 50.8%；陶粒累積吸附砷量為 0.127 mg/g。添加 15% 生物炭陶粒管柱，砷濃度為 0.111 mg/L；砷去除率為 55.6%；陶粒累積吸附砷量為 0.139 mg/g。

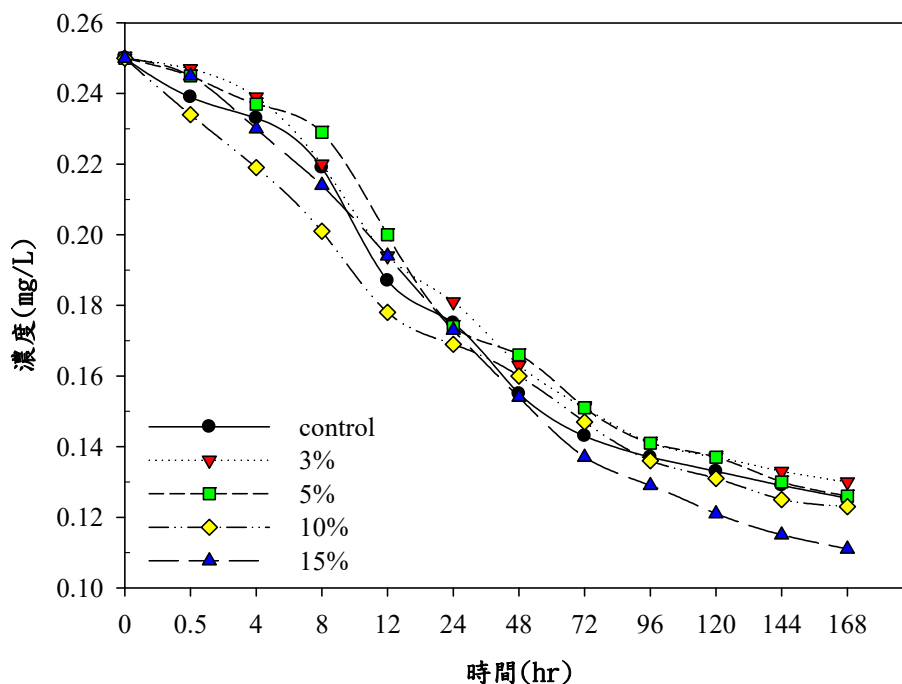


圖4.3.2-1 不同生物炭添加比例之陶粒對砷之移除濃度變化

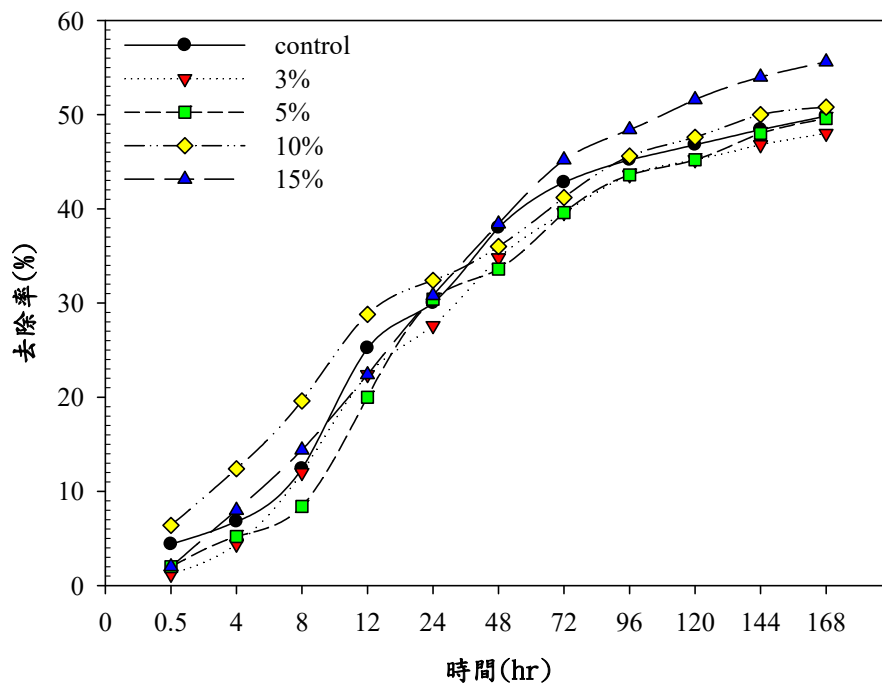


圖4.3.2-2 不同生物炭添加比例之陶粒對砷之去除率

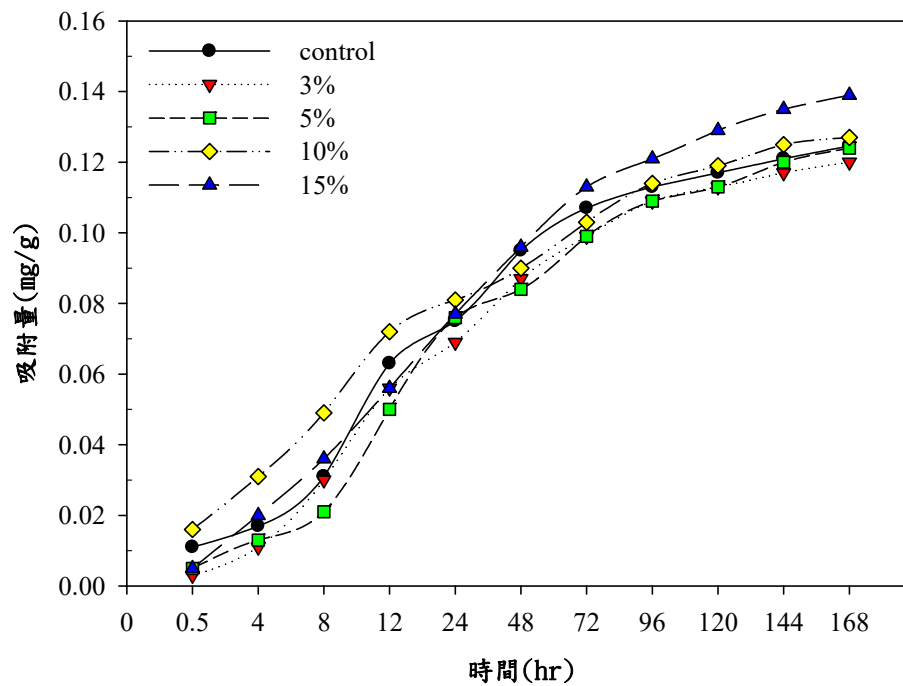


圖4.3.2-3 不同生物炭添加比例之陶粒對砷之累積吸附量



4.3.3 燒製陶粒與旋轉窯結圈石對砷之去除效率

本研究針對旋轉窯結圈石進行特性分析包括吸水率、孔隙率、密度及比表面積，結果如表4.3.3-1所列，吸水率為18.18%；孔隙率為41.1%；密度0.89 g/cm³；比表面積高達35.18 m²/g。旋轉窯結圈石外觀如圖4.3.3-1所示。本研究將所製備具有最佳砷吸附能力之陶粒，包括鐵粉添加率15%，以及鐵粉、生物炭各15%之陶粒與旋轉窯所產生之結圈石進行砷吸附能力比較。

圖4.3.3-2、圖4.3.3-3及圖4.3.3-4為未經破碎之陶粒及結圈石試驗結果。在回流168小時後，填充添加15%鐵粉之陶粒管柱，砷濃度為0.125 mg/L；砷去除率為49.8%，陶粒砷累積吸附量為0.125 mg/g；填充添加鐵粉與生物炭各15%之陶粒管柱，砷濃度為0.111 mg/L；砷去除率為55.6%；陶粒累積砷吸附量為0.139 mg/g。在相同操作時間下，填充結圈石管柱，砷濃度為0.088 mg/L；砷去除率達到64.8%；結圈石累積吸附砷量為0.162 mg/g。

表4.3.3-1 旋轉窯結圈石特性

	吸水率(%)	孔隙率(%)	密度(g/cm ³)	比表面積(m ² /g)
磚窯廠燒製	18.18	41.1%	0.89	35.18



圖4.3.3-1 旋轉窯結圈石外觀

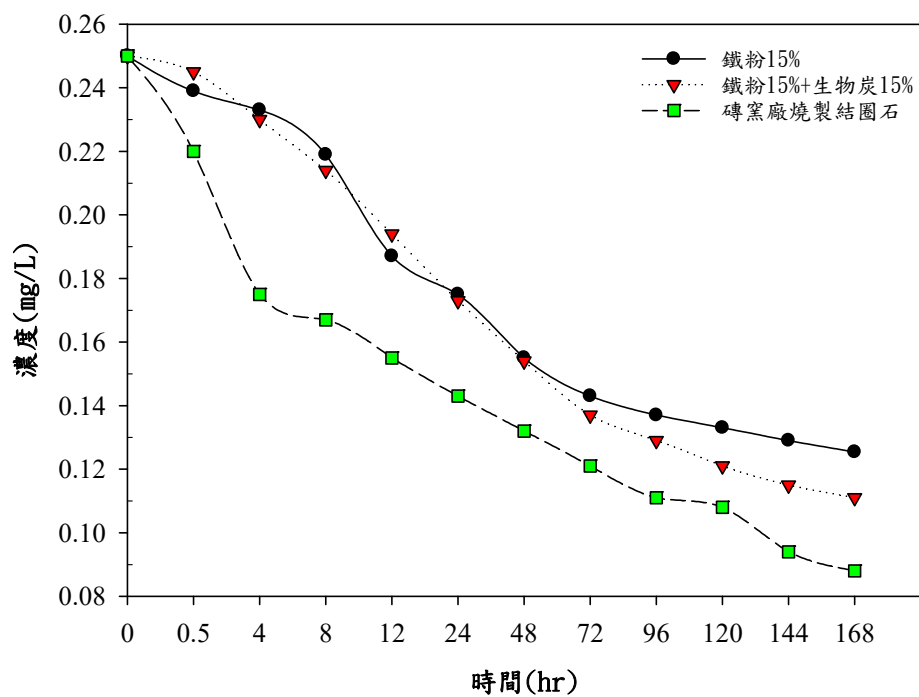


圖4.3.3-2 自製陶粒與旋轉窯結圈石對砷移除濃度變化(未破碎)

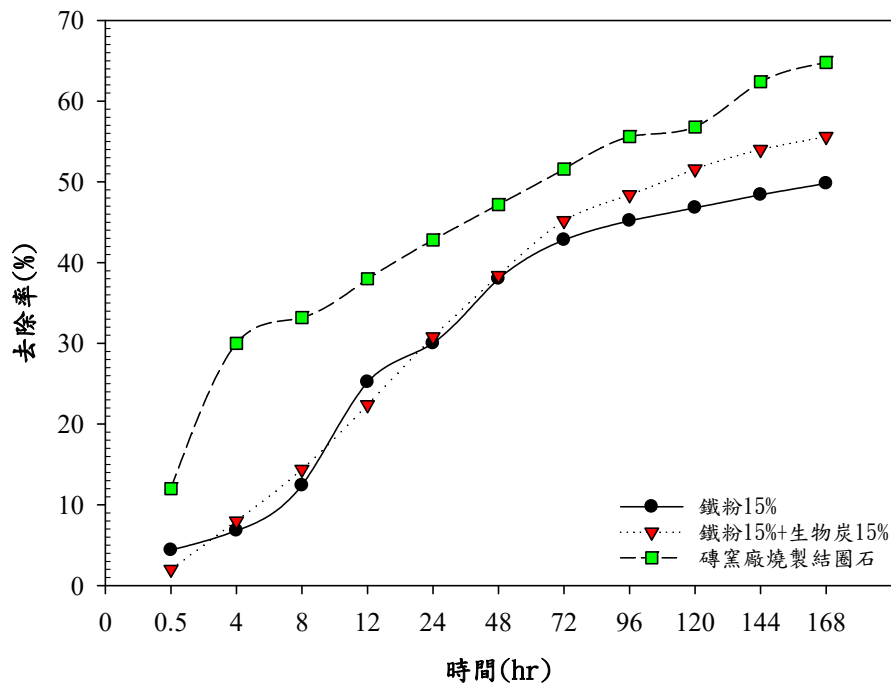


圖4.3.3-3 自製陶粒與與旋轉窯結圈石對砷之移除率(未破碎)

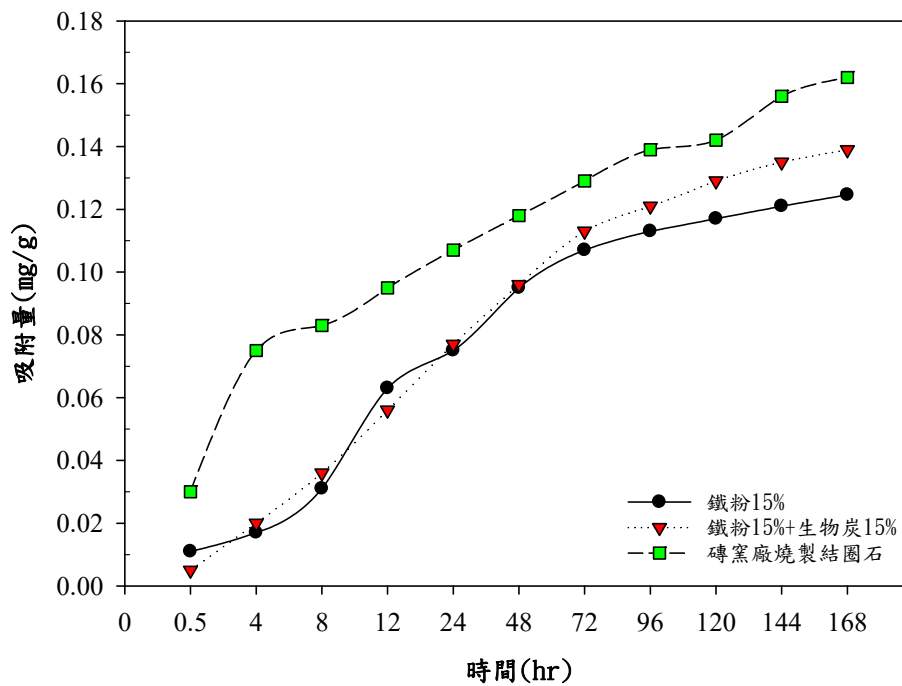


圖4.3.3-4 自製與陶粒與與旋轉窯結圈石對砷之累積吸附量(未破碎)



自製之陶粒粒徑大約在1.5公分左右，未經破碎填充於管柱時，顆粒間縫隙大，無法有效攔截水樣中的砷，降低砷去除率。圖4.3.3-5、圖4.3.3-6及圖4.3.3-7為經破碎處理之陶粒及結圈石填充管柱試驗結果。在操作168小時後，添加15%鐵粉之陶粒管柱，砷濃度為0.117 mg/L；砷去除率為53.2%；陶粒累積砷吸附量為0.133 mg/g。添加鐵粉與生物炭各15%之陶粒管柱，砷濃度為0.116 mg/L；砷去除率為53.6%；陶粒累積砷吸附量為0.134 mg/g。由旋轉窯結圈石所填充的管柱，砷濃度為0.76 mg/L；砷去除率接近70%；陶粒累積砷吸附量為0.174 mg/g。

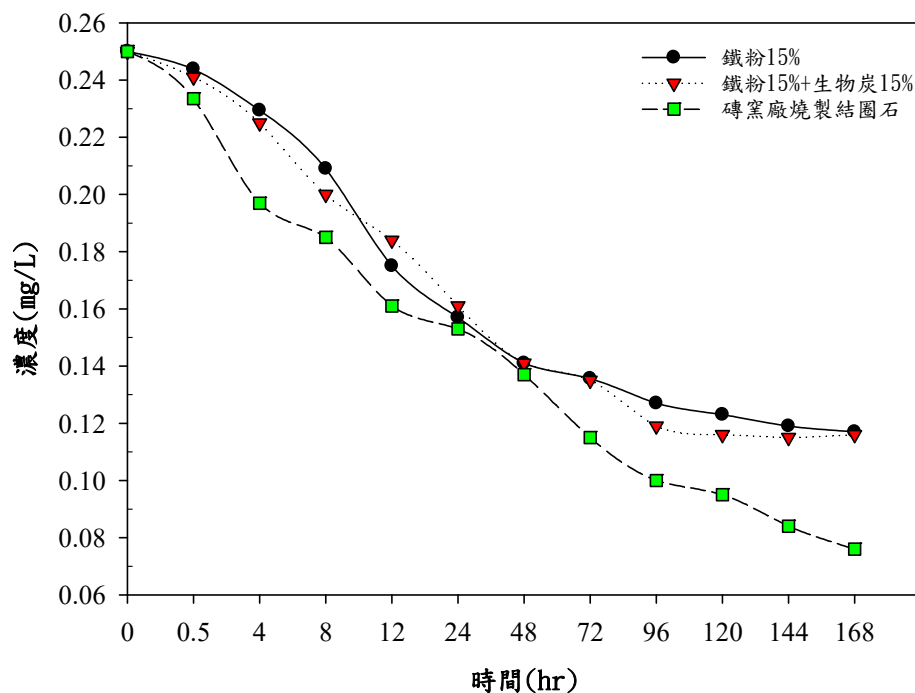


圖4.3.3-5 自製陶粒與旋轉窯結圈石對砷之移除濃度變化(已破碎)

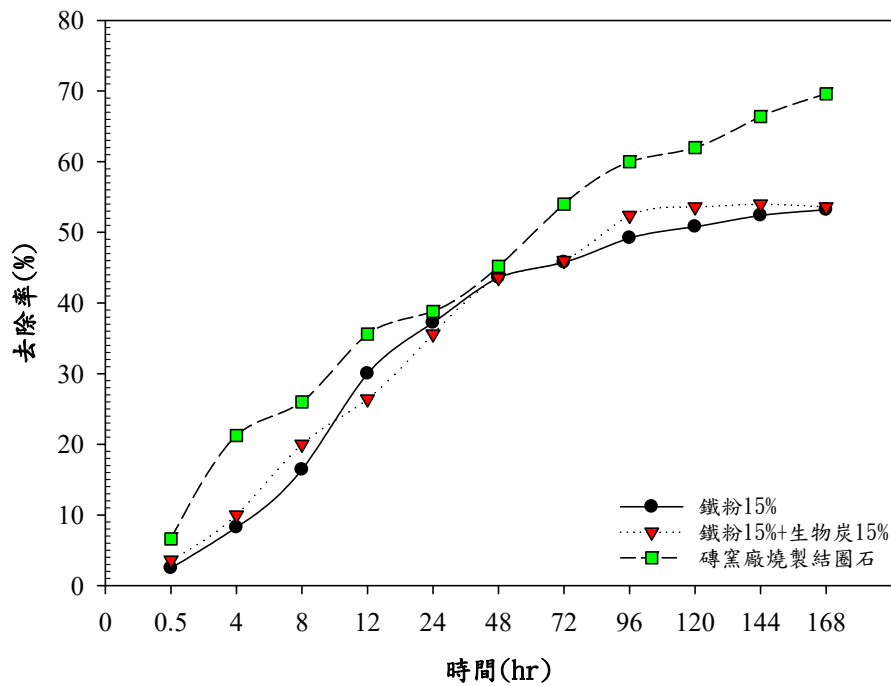


圖4.3.3-6 自製陶粒與旋轉窯結圈石對砷之去除率(已破碎)

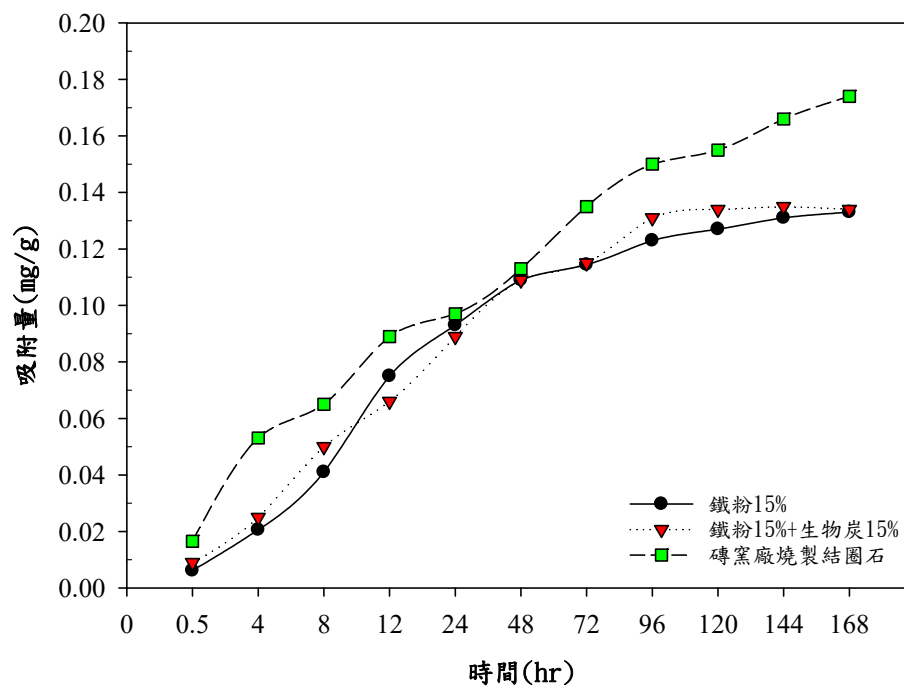


圖4.3.3-7 自製陶粒與旋轉窯結圈石對砷之累積吸附量(已破碎)



4.3.4 不同粒徑之陶粒對砷去除效率

由前一章節可知管柱內填充經破碎後的陶粒及結圈石有助於提升砷之去除效率，因此，本研究再探討不同粒徑之陶粒對砷去除效率之影響。

此試驗所使用磚窯廠燒製之陶粒如表4.3.4-1所示，主要依照不同密度等級區分。實驗為在管柱中填入陶粒150 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。

表4.3.4-1 實驗型管柱所使用之陶粒

陶粒	密度等級	取回時間
旋轉窯結圈石(第一批)	200-500	109 年
旋轉窯結圈石(第二批)	200-500	110 年 7 月 21 日
浮料	500	110 年 7 月 21 日

圖4.3.4-1、圖4.3.4-2及圖4.3.4-3為使用109年取回之結圈石，不同粒徑下在流速5.3 mL/min 之試驗結果。粒徑1.7~4 mm 之結圈石在第1小時達到最佳去除效率92.08%，吸附量為0.4604 mg/g；粒徑0.25~1.7 mm 之結圈石在第3小時達到最佳去除效率99.68%，吸附量為0.4984 mg/g；粒徑小於0.25 mm 之結圈石在第1小時達到最佳去除效率95.24%，吸附量為0.4762 mg/g。

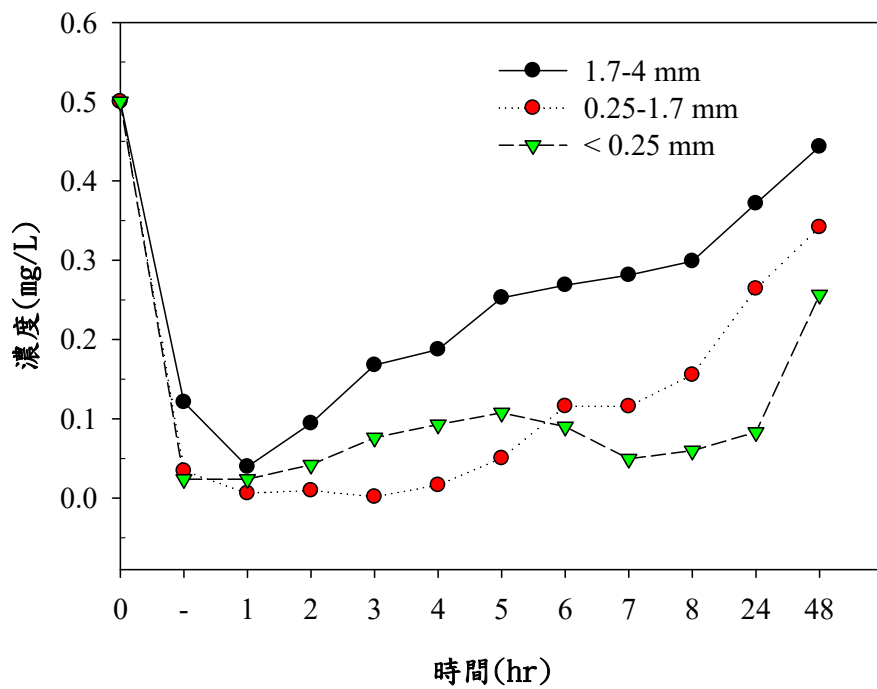


圖4.3.4-1 不同粒徑結圈石(第一批)對砷之移除濃度變化(流速5.3 mL/min)

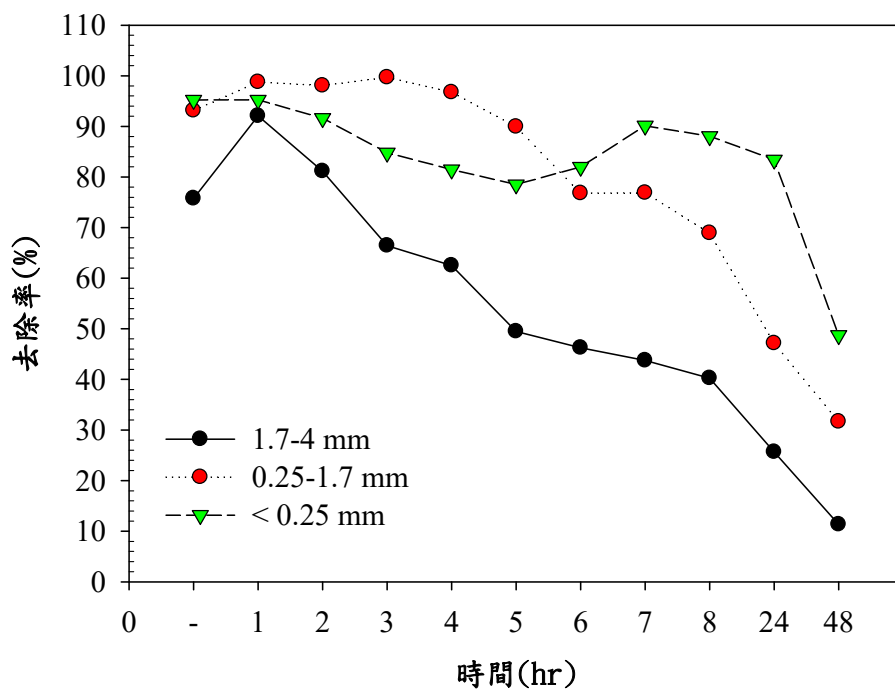


圖4.3.4-2 不同粒徑結圈石(第一批)對砷之去除率(流速5.3 mL/min)

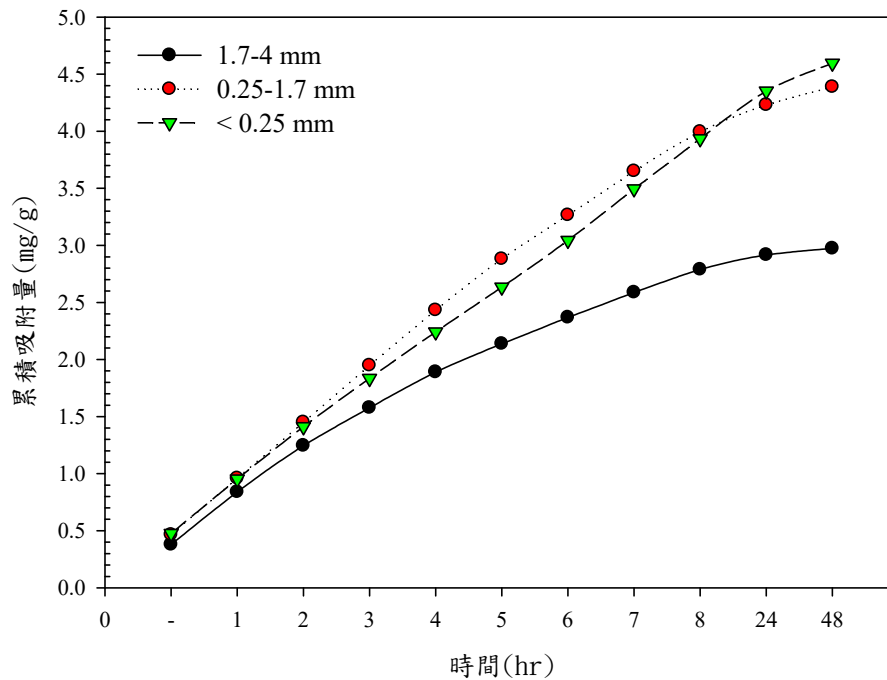


圖4.3.4-3 不同粒徑結圈石(第一批)對砷之累積吸附量(流速5.3 mL/min)

圖4.3.4-4、圖4.3.4-5及圖4.3.4-5為使用109年取回之第一批結圈石，不同粒徑下在流速30.5 mL/min 之試驗結果。粒徑0.25~1.7 mm 之結圈石在水樣剛從管柱上方流出時達到最佳去除效率96.04%，吸附量為0.4802 mg/g；粒徑小於0.25 mm 之結圈石亦為在水樣剛從管柱上方流出時達到最佳去除效率96.76%，吸附量為0.4838 mg/g。

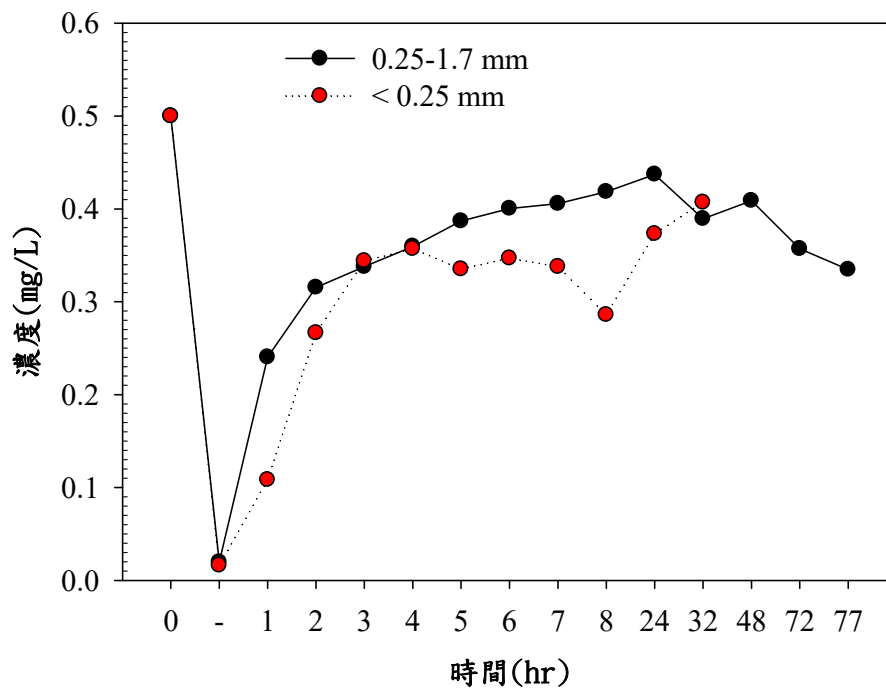


圖4.3.4-4 不同粒徑結圈石(第一批)對砷之移除濃度變化(流速30.5 mL/min)

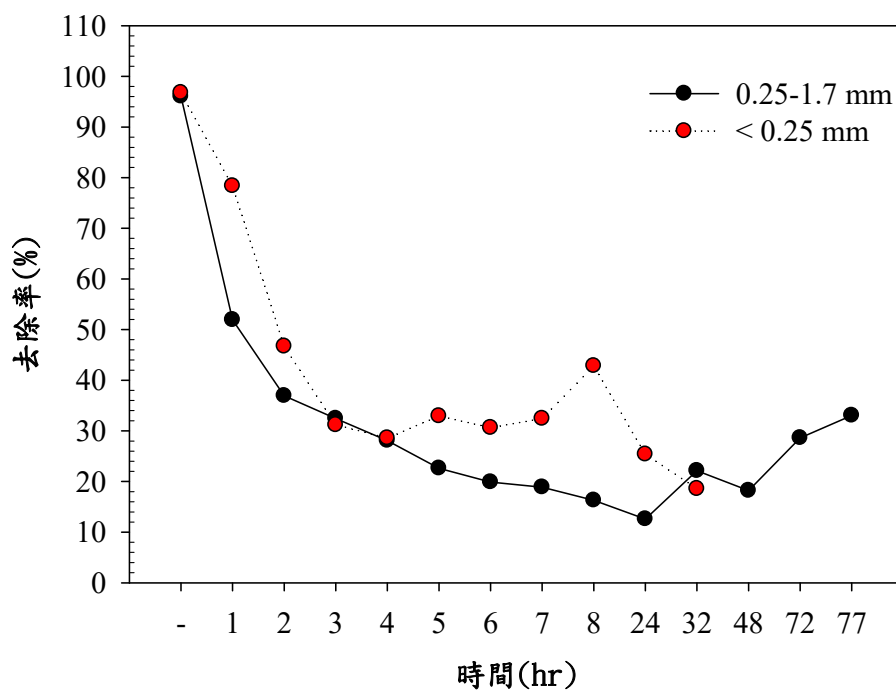


圖4.3.4-5 不同粒徑結圈石(第一批)對砷之去除率(流速30.5 mL/min)

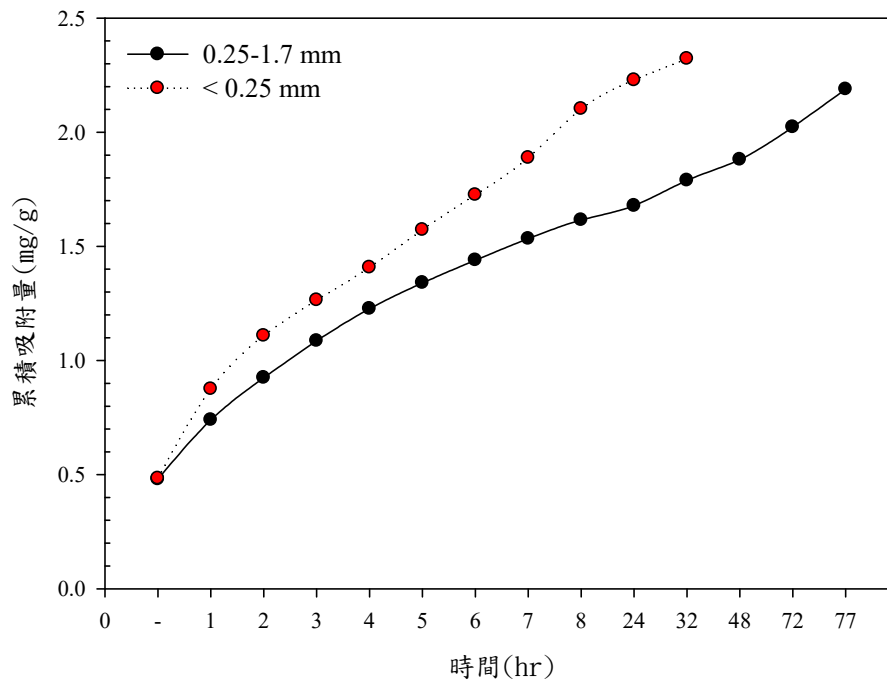


圖4.3.4-6 不同粒徑結圈石(第一批)對砷之累積吸附量(流速30.5 mL/min)

圖4.3.4-7、圖4.3.4-8及圖4.3.4-9為使用110年取回之第二批結圈石，不同粒徑下在流速10.2 mL/min 之試驗結果。粒徑0.55~1.7 mm 之結圈石在第八小時達到最佳去除效38.36%，吸附量為0.1918 mg/g；粒徑小於0.55 mm 之結圈石在第八小時達到最佳去除效率64.68%，吸附量為0.3234 mg/g。

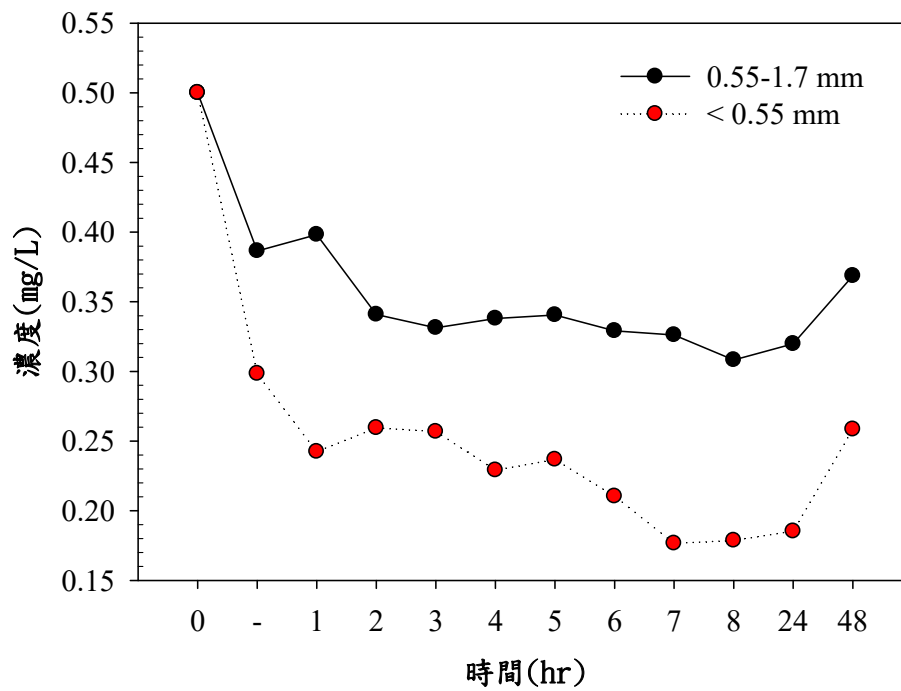


圖4.3.4-7 不同粒徑結圈石(第二批)對砷之移除濃度變化(流速10.2 mL/min)

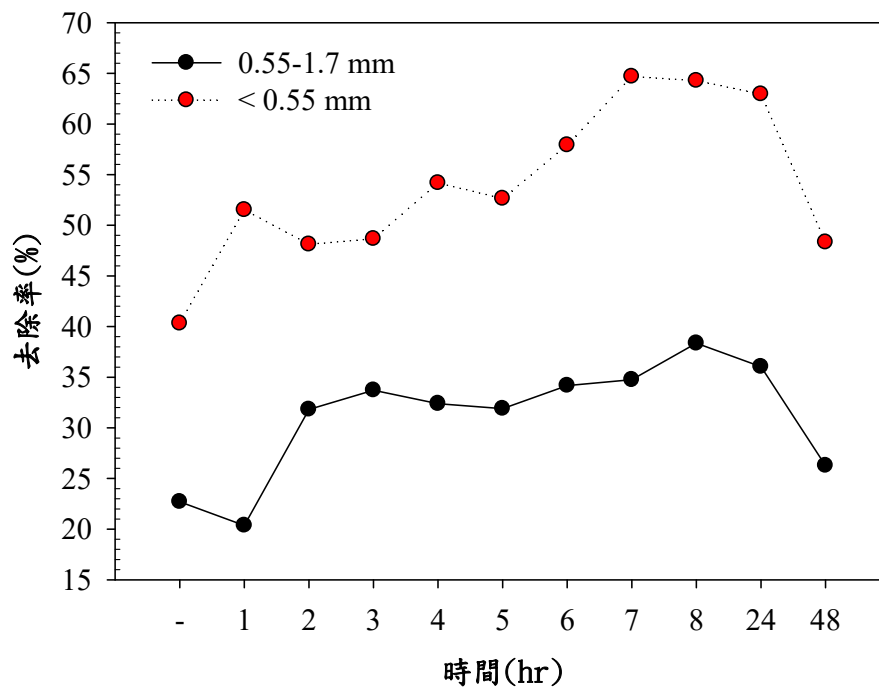


圖4.3.4-8 不同粒徑結圈石(第二批)對砷之去除率(流速10.2 mL/min)

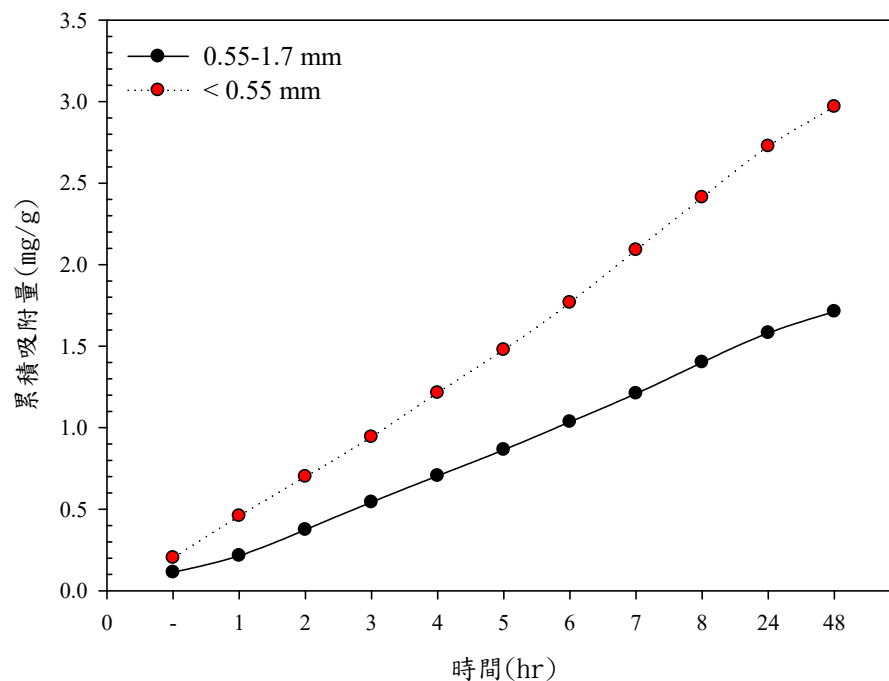


圖4.3.4-9 不同粒徑結圈石(第二批)對砷之累積吸附量(流速10.2 mL/min)

圖4.3.4-10、圖4.3.4-11及圖4.3.4-12為不同粒徑浮料在流速10.2 mL/min 之試驗結果。未過篩之浮料在第8小時達到最佳去除效率為88.28%，吸附量為0.4414 mg/g；粒徑1.7~4 mm 之浮料在第3小時達到最佳去除效率57.4%，吸附量為0.287 mg/g；粒徑0.25~1.7 mm 之浮料在第8小時達到最佳去除效率92.1%，吸附量為0.4605 mg/g；粒徑小於0.25 mm 之浮料在砷水樣剛由上端出水時，即達到最佳去除效率76.3%，吸附量為0.3815 mg/g。

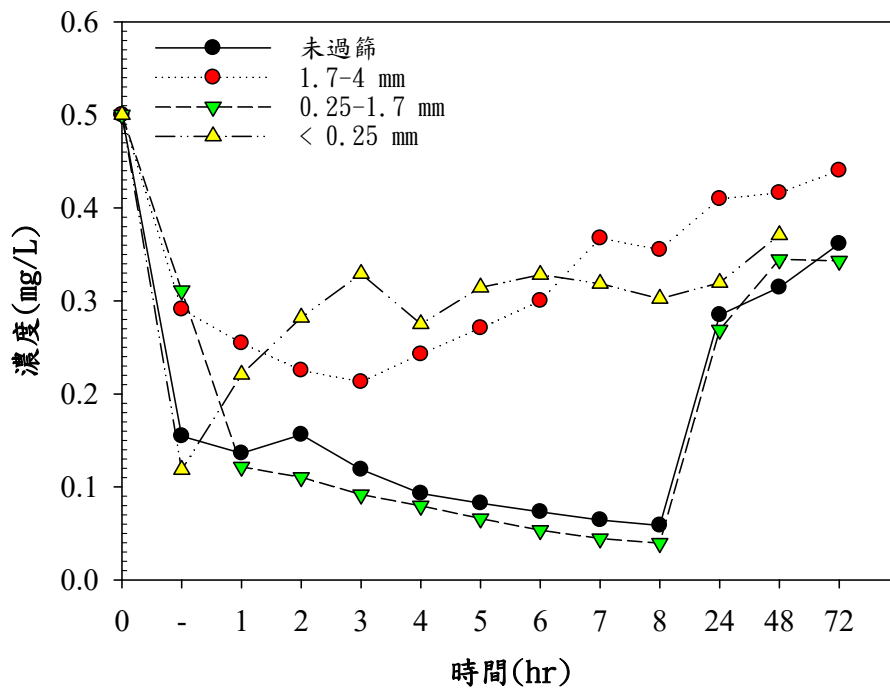


圖4.3.4-10 不同粒徑浮料對砷之移除濃度變化(流速10.2 mL/min)

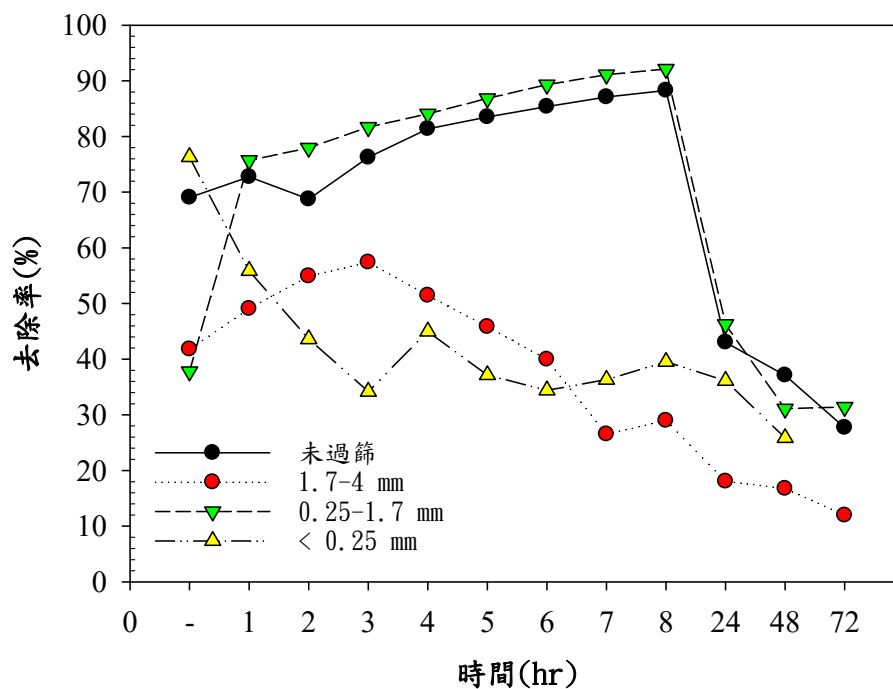


圖4.3.4-11 不同粒徑浮料對砷之去除率(流速10.2 mL/min)

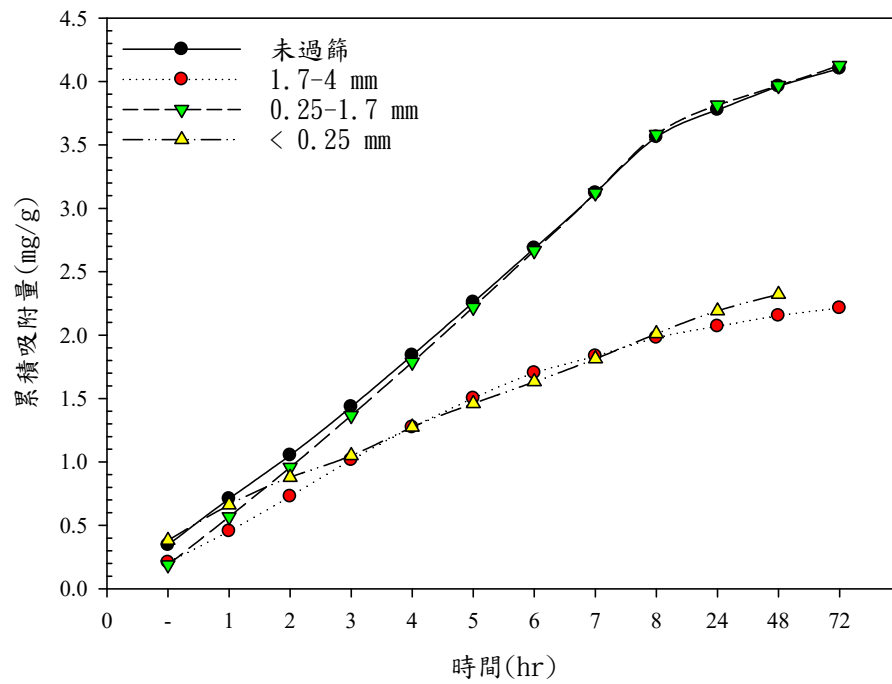


圖4.3.4-12 不同粒徑浮料對砷之累積吸附量(流速10.2 mL/min)



4.3.5 現地地下水砷移除試驗

本研究先選定結圈石進行現地地下水砷移除試驗，現地所使用結圈石為110年9月及11月由磚窯廠取回，以外觀區分分為粗顆粒及細顆粒兩種，外觀如圖4.3.5-1，再將此兩種通過5、10及30 mesh 篩網，經由過篩之顆粒大小分別為1.7~4 mm、0.55~1.7 mm 及小於0.55 mm，現地試驗分別使用未過篩及已過篩結圈石，總共進行五種不同粒徑之試驗。

現地所使用管柱為內徑11公分，高80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，流速設定為0.5 L/min，總操作時間3小時，每10分鐘取樣一次進行砷濃度分析，現地管柱配置示意圖如圖4.3.5-1，現場操作照片如圖4.3.5-2。

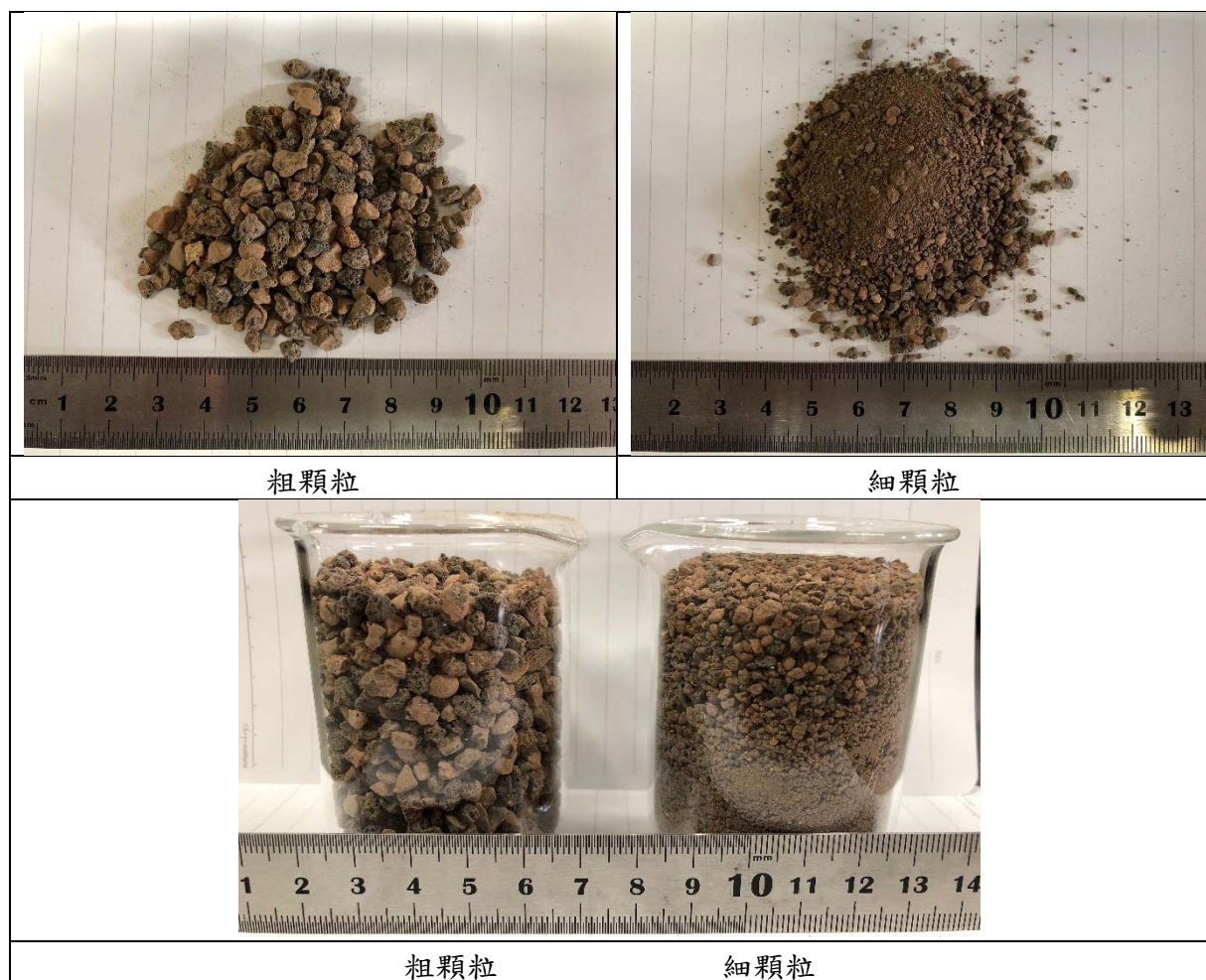


圖4.3.5-1 現地使用結圈石外觀

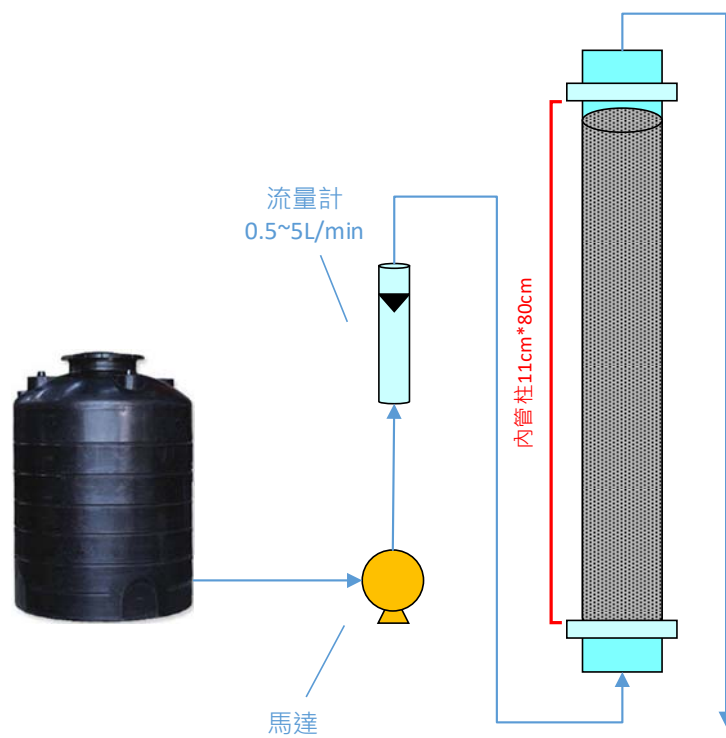


圖4.3.5-2 現地管柱砷移除試驗配置示意圖



圖4.3.5-3 現地管柱砷移除試驗操作照片



現地試驗所使用之結圈石粒徑大小為未過篩-細顆粒、未過篩-粗顆粒、1.7~4 mm、0.55~1.7 mm 及小於0.55 mm 五種，試驗結果如圖4.3.5-4、圖4.3.5-5所示。其各粒徑結圈石之最佳去除效率統計如表4.3.5-1，未過篩-細顆粒之結圈石初始地下水砷濃度為0.0487 mg/L，在第170分鐘達到最佳去除效率53.77%，吸附量為0.0262 mg/g；未過篩-粗顆粒之結圈石初始地下水砷濃度為0.0371 mg/L，在第40分鐘達到最佳去除效率100%，吸附量為0.0371 mg/g；粒徑1.7~4 mm 之結圈石初始地下水砷濃度為0.0310 mg/L，在第170分鐘達到最佳去除效率56.82%，吸附量為0.0176 mg/g；粒徑0.55~1.7 mm 之結圈石初始地下水砷濃度為0.0496 mg/L，在第50分鐘達到最佳去除效率65.16%，吸附量為0.0323 mg/g；粒徑小於0.55 mm 之結圈石初始地下水砷濃度為0.0449 mg/L，在第10分鐘達到最佳去除效率86.42%，吸附量為0.0388 mg/g；其結果顯示未過篩-粗顆粒之結圈石能較快且有效去除地下水砷。

表4.3.5-1 各粒徑結圈石去除地下水砷最佳去除效果

粒徑大小 (mm)	砷初始濃度 (mg/L)	最佳去除效果			
		時間 (min)	砷濃度 (mg/L)	去除率 (%)	砷吸附量 (mg/L)
細顆粒	0.0487	170	0.0225	53.77	0.0262
粗顆粒	0.0371	40	0	100	0.0371
1.7~4	0.0310	170	0.0134	56.82	0.0176
0.55~1.7	0.0496	50	0.0173	65.16	0.0323
< 0.55	0.0449	10	0.0061	86.42	0.0388

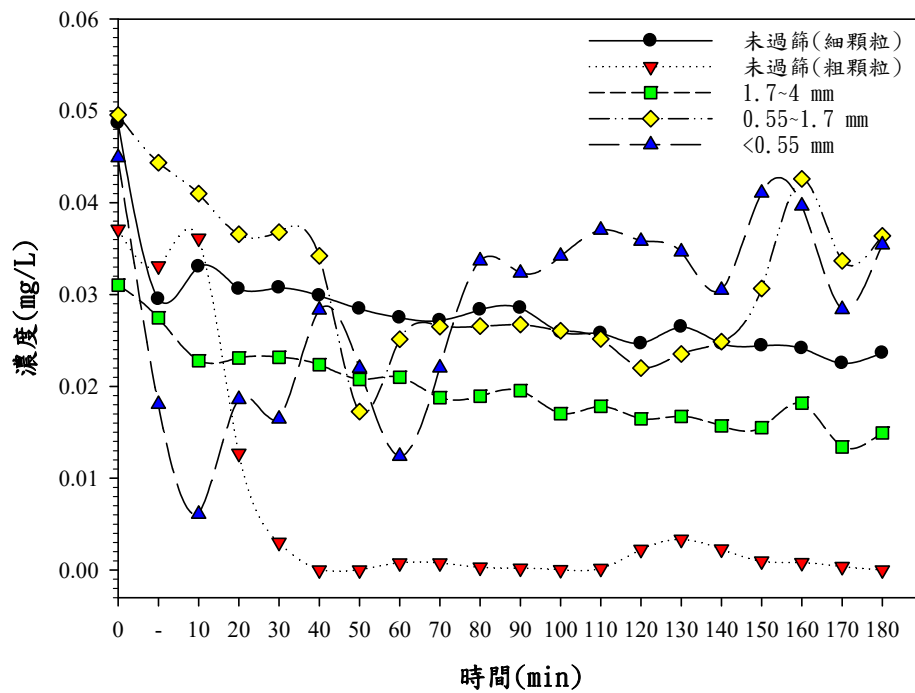


圖4.3.5-4 不同粒徑結圈石對砷之移除濃度變化

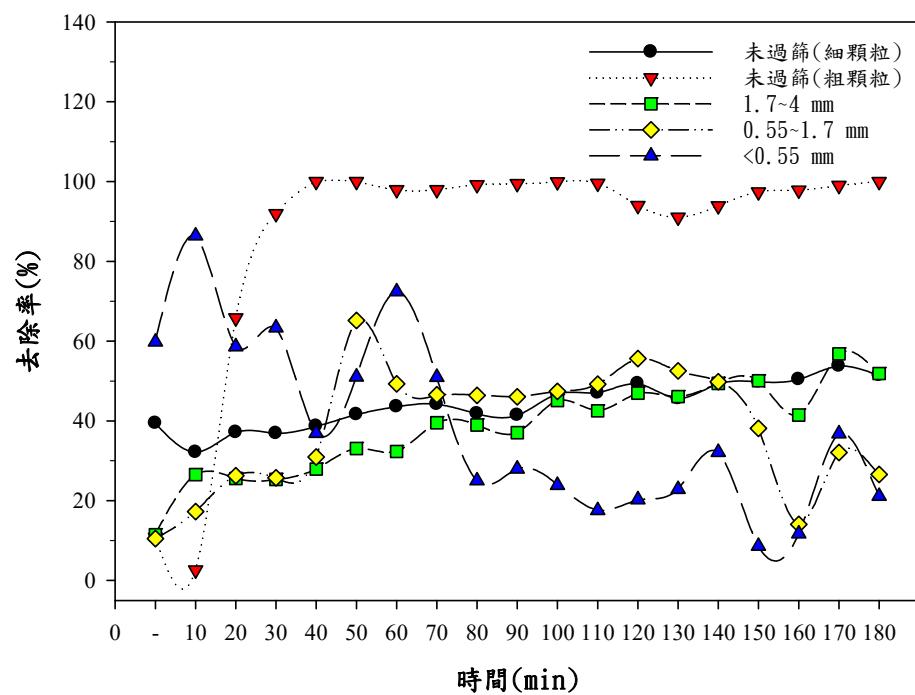


圖4.3.5-5 不同粒徑結圈石對砷之去除率



第五章 結論及後續工作說明

5.1 結論

5.1.1 油污染土壤生物復育技術

本研究盆栽試驗植株生長已超過七個月，在培地茅生長方面，土壤 TPH 濃度 2000 mg/kg 試驗組，植體平均採收生質量，添加生物炭組與單純種植培地茅組沒有顯著差異；添加油分解菌使培地茅生質量增加1.73倍。土壤 TPH 濃度5000 mg/kg，添加油分解菌使培地茅生質量增加1.67倍；添加生物炭使培地茅生質量增加約1.1倍。土壤 TPH 濃度8000 mg/kg，添加生物炭及油分解菌使培地茅生質量分別增加1.98倍及1.77倍。結果顯示，添加油分解菌組之培地茅生質量在各種土壤 TPH 濃度均顯著增加。在植株生長高度方面，不同組別之差異與植株生質量產量情況相似，三種濃度土壤大致都是以添加油分解菌之培地茅生長高度最高；其次為添加生物炭，顯示添加油分解菌及生物炭皆有促進植生復育之植物生長。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。研究結果亦顯示，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2倍，也高於添加油分解菌組。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，有助於培地茅生長。從研究結果也顯示，培地茅對土壤中之 TPH 有相當高的耐受力，且在2000~8000 mg/kg 的試驗濃度範圍呈現土壤 TPH 濃度越高植株生長高度及植體生質量增長越多情形。相對的，香茅對 TPH 之耐受性較差，在2000~8000 mg/kg 的試驗濃度範圍呈現土壤 TPH 濃度越高植體生質量增長越少情形。

土壤經過六個月植生復育後，TPH 濃度2000 mg/kg 土壤在六種試驗組中以【培地茅+生物炭】試驗組之 TPH 去除率最高，可達95.75%；其次為【培地茅+油分解菌】組及【香茅】組去除率約91.32%；單純種植，【培地茅】TPH 去除率90.82%。顯示添加生物炭有促進植生復育之成效。【油分解菌】試驗組之去除率為71.0%，未添加任何菌種及種植植物之【原生菌】試驗組之 TPH 去除率最低，約70.13%。從結果顯示單獨添加油分解菌對土壤 TPH 之分解成效並沒有太大促進作用，推測【培地茅+油分解菌】之 TPH 分解效率，油分解菌主要作用應在於提供菌液中的營養成分。在土壤 TPH 濃度5000 mg/kg 試驗中，【原生菌】及【油分解菌】試驗組之 TPH 平均去除率分別為56.69%及58.96%，差異不大。【培地茅】、



【香茅】及【培地茅+生物炭】之平均去除率在87.47%~83.58%之間；【培地茅+油分解菌】試驗組之分解率79.12%有略低於其他植生復育組，可能是土壤不均質上的差異。在 TPH 濃度8000 mg/kg 土壤，【原生菌】及【油分解菌】試驗組之 TPH 平均去除率分別為50.50%及53.40%；【培地茅】、【培地茅+油分解菌】及【培地茅+生物炭】之平均去除率大約都在80%左右；【香茅】組之去除率大約71.46%。

從試驗結果顯示，種植培地茅及香茅都可顯著提升土壤中 TPH 之分解效率。單獨添加油分解菌之促進成效較不顯著。【培地茅+油分解菌】試驗組與【培地茅】試驗組之去除效率雖略有增加，但並不是差異很大，推測可能是菌液中的營養成份的作用，因油分解菌所增加的去除效率不大，從經濟效益上建議可以不用添加。生物炭在高濃度土壤可增加植物的生長，亦有增加 TPH 分解的成效。另外，施用生物炭有土壤碳封存的作用，可透過後續現地試驗進一步確認其整治成效及碳封存能力。

針對各種試驗組土壤，以 NGS 做土壤微生物之菌相分析。試驗前優勢菌之比例與 TPH 濃度呈正相關性。試驗進行四個月時，發現特定菌屬在種有植物之試驗組中，有明顯生長優勢，如綠絲菌屬(Chloronema)，其在未種植植物之【原生菌】及【油分解菌】試驗組中，含量只占約0.1~1%，而在種有香茅與培地茅之試驗組中佔比達2~13%。結果顯示無論污染土壤濃度高低，植物對土壤中菌相分布具有一定影響，推測植物能促使土壤微生物形成特殊菌叢，此外，根據優勢菌中的嗜酸、嗜鹼菌含量狀況，推測植物具有穩定土壤中 pH 值效果，且對比油污染土壤之 TPH 降解結果，顯示種植植物之試驗組皆有較佳的降解率，推測由植物促生之特殊菌叢可能有助於石油碳氫化物之降解。



5.1.2 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

在地下水除砷技術開發方面，目前已完成不同鐵粉、有機質添加量之陶粒燒製，並進行吸水率、孔隙率、膨脹率、密度及比表面積之分析。結果顯示鐵粉的添加對陶粒吸水率、孔隙率、膨脹率及密度有很大的改變。鐵粉添加率越高吸水率、孔隙率及膨脹率越大。鐵粉添加率15%時，陶粒之吸水率可增加至2.2倍；孔隙率增加為1.6倍；膨脹率增加為將近4倍。鐵粉添加率越高陶粒密度越小，不添加鐵粉之陶粒密度平均約 1.47 g/cm^3 ；添加15%鐵粉之陶粒密度平均不到 0.7 g/cm^3 ，密度減少一半以上。在鐵粉添加率15%下再添加生物炭，結果顯示，生物炭添加率對陶粒吸水率、孔隙率、膨脹率及密度影響不大，但對於比表面積則有相當顯著的提升。單純土壤所燒製之陶粒比表面積為 $1.39 \text{ m}^2/\text{g}$ ；添加15%鐵粉之陶粒比表面積為 $2.9 \text{ m}^2/\text{g}$ ，大約為沒有添加鐵粉陶粒的2.1倍；添加15%鐵粉及15%生物炭之陶粒比表面積為 $18.1 \text{ m}^2/\text{g}$ ，大約為原始土壤陶粒的13倍。顯示鐵粉及生物炭的添加有助於增加陶粒的吸附特性。結圈石之吸水率為18.18%；孔隙率為41.1%；密度 0.89 g/cm^3 ；比表面積高達 $35.18 \text{ m}^2/\text{g}$ 。

本研究所製備之陶粒對砷之去除效率，添加鐵粉15%之陶粒，在迴流168小時後砷之去除率為53.2%。添加鐵粉與生物炭各15%之陶粒，在168小時迴流後，砷去除率為53.6%。結圈石在168小時迴流後，砷去除率70%。自製陶粒對砷之去除率可達結圈石之85%。

從目前研究結果顯示，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%，爾後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，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。



5.2 後續工作重點說明

5.2.1 油污染土壤生物復育技術

1. 具降解油污染濃度潛力之生物整治技術篩選

- 本計畫111年度篩選110年度試驗結果 TPH 分解成效較佳之試驗組再持續進一步試驗，確認相關參數。第一年研究結果顯示種植培地茅、香茅對於土壤 TPH 之分解皆有相當高的去除率，但香茅之生質產量較差，且對於高濃度 TPH 污染土壤其耐受性較差，因此，111年度選擇培地茅進行試驗。110年度試驗結果顯示，添加生物炭有促進高濃度 TPH 污染土壤之生物分解成效，因此111年度持續探討生物炭應用之最佳條件。而110年度試驗結果顯示，油分解菌之貢獻不大，因此本年度計畫不再添加油分解菌。另外，本年度將再選擇芒草進行試驗。因此111年度之盆栽試驗規劃分為下列六種試驗組別，每一試驗組別進行三種 TPH 濃度土壤、三重複試驗， $3(\text{TPH 濃度}) \times 3(\text{重複}) \times 8(\text{試驗組})$ ，共計72盆。

- (1) 無植物-對照組
- (2) 無植物-加2.5%生物炭
- (3) 無植物-加5%生物炭
- (4) 培地茅
- (5) 培地茅-加2.5%生物炭
- (6) 培地茅-加5%生物炭
- (7) 芒草
- (8) 芒草+2.5%生物炭

2. 生物整治技術現地試驗成效驗證及操作參數建立

- 依據盆栽試驗結果篩選培地茅及添加生物炭進行現地試驗。現地栽種試驗場址規劃以台中供油中心為優先，以豐德油庫作為備用場址。包括下列六種試驗組別：

- (1) 無植物-對照組



(2) 無植物-加2.5%生物炭

(3) 無植物-加5%生物炭

(4) 培地茅

(5) 培地茅-加2.5%生物炭

(6) 培地茅-加5%生物炭

- 每一試驗組種植3個坵塊，每一坵塊面積至少1 m × 2 m。試驗面積依試驗組別及可供試驗土壤量體做調整。

3. 植生復育植體再利用效益開發

- 培地茅、香茅植體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。
- 生物炭應用對於土壤固碳成效，對於淨零碳排之效益及可行性評估。
- 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。



5.2.2 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. 旋轉窯結圈石移除地下水砷現地模廠試驗

- 選擇至少2處不同區域之地下水井進行砷移除現地試驗。
- 依據第一年試驗結果，進行處理系統及操作參數優化。
- 評估不同地區地下水質特性對結圈石砷移除能力之影響。
- 建立結圈石處理富砷地下水之設計參數，並進行成效驗證。
- 技術應用可行性及經濟效益評估。

2. 油污染土壤再生多孔性砷吸附材料技術開發

- 結圈石對砷之吸附、去除機制。
- 結圈石、陶粒再生之可行性。
- 鐵、錳以及有機質含量、燒結溫度、燒結時間對燒結多孔性吸附產品特性及砷吸附特性之影響試驗。
- 建立以輕質骨材做為地下水除砷之技術。



5.3 執行進度表

110-111年月	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	備註
工作項目													
油污土壤植物/生物復育技術54盆盆栽試驗													
54盆植物/生物復育盆栽試驗成效評估													
旋轉窯結圈石基本特性分析													
評估結圈石對砷之吸附容量													
期中報告													
1處地下水水質特性對結圈石吸附砷容量之影響評估試驗													
再生多孔性砷吸附材料最佳燒結溫度、時間試驗													
期末報告撰寫													
工作進度估計百分比 (累 積 數)	5%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	95%	100%	
預定查核點	期中 *完成54盆盆栽栽種 *完成盆栽試驗土壤基本特性、土壤背景濃度及菌相分析 *完成結圈石基本特性分析 *完成結圈石對砷之吸附容量評估 *完成期中報告												
	期末 *完成54盆盆栽栽種試驗植體採收及試驗結果評估報告 *完成至少一處結圈石現地處理地下水試驗，並評估其效益 *再生多孔性砷吸附材料最佳燒結溫度、時間試驗 *完成期末報告												
規劃進度													
執行進度													



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.