

行政院環境保護署

「104 年土壤及地下水污染整治基金補助研究及模場試驗
專案」

以能源作物向日葵整治重金屬鎘污染 土壤之研析

期末報告(修正稿)

主 辦 單 位 :  行政院環境保護署

計 畫 執 行 單 位 : 國立高雄大學／土木與環境工程系所

計 畫 主 持 人 : 葉琮裕 教授

計 畫 執 行 期 間 : 103 年 12 月 1 日起至

104 年 11 月 30 日

中 華 民 國 104 年 11 月 印製

「104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」

☒修正計畫書 ☐期中報告 ☐期末報告 審查意見回覆對照表

計畫年度	104 年度	專案類型	☒ 研究計畫 ☐ 模場試驗
計畫主持人	葉琮裕	研究類別	☐ 調查 ☒ 整治 ☐ 評估 ☐ 底泥
計畫名稱	以能源作物向日葵整治重金屬鎘污染土壤之研析		
專案連絡人	葉琮裕	連絡專線	07-5919536
政策性審查意見		計畫單位回覆	
經費無違規編列項目。		無。	
技術性審查意見		計畫單位回覆	
委員 1 主持人曾執行土基會 102 年度補助計畫「整合性植生復育提升能源作物向日葵整治重金屬之研究」，以前之研究主要探討 Cu、Zn、Pb、Ni，其結果及成效在計畫書中均未提及。今年申請之計畫只是改變探討之重金屬為 Cd，其餘之內容均大同小異，並無值得再補助之正當性。		針對委員意見本計畫會針對於重金屬Cd去做重金屬吸收成果討論與後續效益，並探討未來應用於實場之可行性。	
委員 2 1.主持人曾參與相關計畫,其經驗可勝任本計畫之執行。此外，本計畫之執行本土之綠色整治技術之發展應有貢獻。 2.在現行制度下本計畫之成果有其應用上之限制，未來亦須將應用之花費和效益作分析，並說明推動之方向和策略。 3.研究方法之可行性，惟在現有技術評估及研究方法之完整性仍有加強空間。		1. 感謝委員指教。 2. 感謝委員指教，本計畫將會遵照辦理。 3. 感謝委員指教，會在本計畫執行期間針對結果成效分析中探討此研究方法的完整性並改進。	
委員 3 1.本案擬以向日葵植生配合生長激素及螯合劑，探討提升植生復育成效之可行性，係綠色整治技術開發之一環。 2.研究探討培養土外添加鎘配置污染土壤，應		1.感謝委員指教。 2.感謝委員指教，本計畫會針對於培養土外添加鎘配置污染土壤進行整合螯合劑與生長激素於向日葵吸收重金屬鎘成果作探討，評估	

亦採取國內受鎘污染土壤為對象，進行比較以增實用性。 3.耗材費用高估，酌宜減半。	未來於受鎘污染土壤實場之可行性。 3.感謝委員指教，本計畫將會遵照辦理。
委員 4 1.此題目已執行過（盆栽試驗），成果不好。 2.盆栽試驗設計及研究內容未針對計畫目的，成果難預期。 3.試驗成果宜朝作物吸收鎘及生質能使用之效益與政策考量來評估其可行性。	1.感謝委員指教，會在執行本計畫期間針對於盆栽實驗中改進，已達到盆栽實驗最大效益，進行探討。 2.感謝委員指教，已修正計畫書中盆栽試驗設計及研究內容。 3.感謝委員指教，本計畫將會遵照辦理。
委員 5 1.研究成果對未來實場應用未具體說明，如何與既有的整治系統（例如：傳統的物理整治後再植生？傳統的化學（例如酸洗法）整治後再植生？直接採取植生復育？...）配合？國內相關植生復育的研究所得的限制因子建議先加以評估，既有成果於實場推動執行的限制因子為何？該限制因子如何於本計畫中修整或改善?...建議說明。 2.文獻蒐集：建議彙整國內既有經驗（尤其是實場執行的困難與限制）。 3.國內既有的研究成果的實場應用的限制條件為何？評估已知的限制因子應是本計畫的基礎，如此才能評估生長激素的必要性，建議討論。 4.專案經費編列尚合理。 5.本計畫與國科會（科技部）計畫的相關性建議說明。	1.感謝委員指教，因國內研究所得植生復育限制因子為土壤重金屬濃度及時間成本，若重金屬濃度太高時會造成植體毒性，因此會在未來實場上先確認此實場之重金屬污染濃度後，再評估是否進行植生復育，所以該限制因子會因與傳統之物理整治進行後才能改善。 2.感謝委員指教，已補上修正計畫書之內容中。 3.感謝委員指教，因國內實場研究所得植生復育限制因子主要為土壤重金屬濃度及時間成本考慮，因此本計畫執行期間將會探討植體整合於生長激素後對重金屬鎘之吸收成果加以探討生長激素之必要性。 4.感謝委員指教。 5.感謝委員指教，此計畫與國科會計畫相關性建議說明可包括探討植體整合生長激素對不同重金屬的吸收效果、以及後續植體再利用評估。
綜合性審查意見	計畫單位回覆
1.原則同意所送計畫，請依審查意見提送修正計畫書。 2.審查結果確認會議意見如下： 說明：計畫名稱應與內容相符，請修正計畫名稱；此外，歷年執行計畫研究成果不佳且	1.已修正計畫書內容。 2.已對應計畫書內容修改計畫名稱，並遵照綜合性審查意見在計畫執行期間檢討執行問題及解決方式並請益園藝相關領域專家進行研究。

缺乏問題研析與探討，本屆計畫應檢討歷年執行問題及找出解決方式，務必結合園藝相關領域專家學者協同研究。	

行政院環境保護署土壤及地下水污染整治基金管理會

104 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

修正計畫書審查意見彙整表

核定序號	30	專案類型	☒ 研究專案 ☐ 模場試驗
專案主持人	葉琮裕	專案主題	☐ 調查 ☒ 整治 ☐ 評估 ☐ 底泥
專案名稱	以能源作物向日葵整治重金屬鎘污染土壤之研析		
審查意見說明			
委員意見	請依修正計畫書規劃內容執行。		
本署 審查意見	經費無違規編列項目。		

**行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究及模場試驗專案」
期中報告初審意見對照表**

計畫年度	104 年度	計畫類型	■ 研究計畫 □ 現地試驗
計畫類別	□ 調查 ■ 整治復育 □ 評估 □ 底泥	主持人：葉琮裕 NO：30	
計畫名稱	以能源作物向日葵整治重金屬鎘污染土壤之研析		
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員一 1.研究之材料及方法撰寫太過簡略，應詳細描述補充內容，例如：所使用之向日葵為何品種？Cd如何添加至土壤中？（是否經過aging之程序）？EDDs如何添加至土壤中？GA₃如何噴灑？ 2.向日葵之生長情形，除測定株高外也需測量乾重。 3.後續之盆栽試驗，建議應有一未添加Cd處理之對照組，以供比較並證明盆栽試驗栽培向日葵之可靠性。 4.向日葵生長情形結果之呈現建議能以數據呈現，（15天之生長數據？），而不是以照片來呈現。 5.應執行添加EDDs對於土壤中Cd鍵結型態之影響的試驗，以了解添加EDDs對於向日葵吸收Cd之影響機制。		1.謝謝委員建議，遵照辦理。 (1)向日葵之品種為太陽向日葵。 (2)土壤重金屬之配製為，將土壤進行初步篩選，把枯枝、枯葉及石塊撿拾，將篩選過後之土壤加入適量之去離子水攪拌使其呈黏稠狀後，再以配製所需之重金屬濃度，本實驗鎘配製濃度為 20 mg/kg，為法規標準，將配置完成之土壤攪拌均勻置於戶外等其乾燥，詳見報告書中 p23。 (3)於重金屬添加完成後，使其乾燥再添加 500 umol/kg 的 EDD_s，將配置完成之土壤攪拌均勻置於戶外等其乾燥。 (4)配製 10⁻⁸ mol/kg 的 GA₃，於早晚澆花時來回三次噴灑在植體上。 2.謝謝委員建議，期末將針對乾重進行測量。 3.謝謝委員建議，遵照辦理。 4.謝謝委員建議，已於報告書中 p29 將數據補上。 5.謝謝委員建議，本實驗目前暫無此規劃，後續如有機會將針對此部分進行探討。	
委員二 1. 本計畫對能源作物向日葵進行土壤重金屬鎘之改善研析。探討整合植物生長激素與螯合劑植生復育受重金屬污染土壤，並進一步評估能源作物向日葵復育受重金屬污染土壤操作方式暨相關環境因子擬定。 2. 主要成果符合計畫書之內容，可針對相關數據做較完整之討論及分析。 3. 中英文摘要需再修正。		1.謝謝委員建議。 2.謝謝委員建議，遵照辦理。 3.謝謝委員建議，遵照辦理。 4.謝謝委員建議，植生復育於實場之應用主要用於後期的修飾步驟 (polishing step)，可接續在前期高濃度處理單元後面，或是單獨應用於整治低濃度污染場址。後續希望透過完整的數據提供，以便政府機關研訂農地污染管理政策之參考依	

4. 建議後續工作可補充如何進行實場應用，如何將成果與管理政策結合。 5. 建議針對操作成本進行評估，並和目前常用之方法進行比較，並說明使用之限制。	據，並作為與農業主管機關後續協商之重要憑據。 5.謝謝委員建議，操作成本之比較及操作方法之優缺點，詳見報告書中 p2 及 p3。植生復育法主要限制如下：(1)整治場址之水文條件及氣候可能影響植物生長。(2)高濃度毒性物質對植物生長造成傷害。(3)植物根部長度限制整治深度。(4)比其他之處理技術需要更長的時間。
委員四 1. 大致依計畫項目執行。 2. 未完成期中查核點（土壤與向日葵植體中重金屬分析，請補充相關數據與評估）。 3. 後續半年宜依期中報告結果及其預期目標執行。	1.謝謝委員建議。 2.謝謝委員建議，由於計畫執行期間遭逢原子吸收光譜儀故障維修，以致無法如期完成，此次分析結果將於期末報告中一併呈現，請見諒。 3.謝謝委員建議，遵照辦理。
委員五 1. 執行現況、流程及方法的說明具體詳盡。 2. 計畫後續執行工作項目及內容已於第6章簡要說明。 3. 計畫執行進度與預定進度相符，已有初步的成果。 4. 未來於實際現場的設置&操作方式與成效評估方式（如何評估實際的成效？）建議討論。 5. 如何驗證本計畫的試驗結果？建議說明。 6. 環境條件的影響與適用條件…等等建議討論（如：土壤質地…等等）。 7. 單位成本（含後續處置）建議評估。 8. 添加物的殘留（宿命）與效應，建議評估。 9. 本計畫為延續性計畫，本計畫與前期計畫的關係建議討論。	1.謝謝委員建議。 2.謝謝委員建議。 3.謝謝委員建議。 4. 謝謝委員，根據此次盆栽實驗顯示，在環保署土壤管制標準一倍內之鎘土壤環境下：(1)向日葵存活率為 80%，生長速率為1.3 cm-Height/Day。(2)預估每單位重金屬污染土壤面積下收成日葵 200~250g/m²。(3)預估每單位重金屬污染土壤面積下可去除實驗土壤中重金屬鎘濃度20~30%。 5.謝謝委員建議，將針對實驗結果進行數據量化進行評估，例如向日葵存活率、重金屬去除率等。 6.謝謝委員建議，植生復育可能受水文條件及氣候等因素影響，例如降雨會影響土壤中 pH，若 pH 過低可能會導致重金屬溶出影響植生復育效果；此外土壤顆粒大小可能影響透水性，對植體之生長造成影響。植生復育之主要適用條件為，低濃度之污染，由於污染濃度過高會造成植體毒害，導致植體無法生長。 7.謝謝委員建議，粗略估計單位成本約為 1640

	元/噸，後續植體采焚化處理約 1858 元/噸，所以預估採用整合型植生復育所需成本約為 3498 元/噸。 8.謝謝委員建議，螯合劑 EDD_s 為生物降解螯合劑，半衰期為 2.5 天，這表示殘存在土壤中的 EDD_s 將隨時間而迅速減少，這可降低重金屬污染地下水之機會。 9. 謝謝委員建議，前期計畫確立植生復育最佳操作參數，後續以此參數針對鎘污染土壤進行評估。
本署意見 請檢附缺失項目自評表	謝謝委員建議，於報告書中將檢附缺失項目自評表。

行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究及模場試驗專案」
期中報告複審意見對照表

計畫年度	104 年度	計畫類型	☒ 研究計畫 ☐ 現地試驗
計畫類別	☐ 調查 ☒ 整治復育 ☐ 評估 ☐ 底泥	主持人：葉琮裕 NO：30	
計畫名稱	以能源作物向日葵整治重金屬鎘污染土壤之研析		
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員一 無補充說明。		謝謝委員指教。	
委員二 無補充說明。		謝謝委員指教。	
委員四 無補充說明。		謝謝委員指教。	
委員五 宜與國內既有成果比較（期末）。		謝謝委員建議，將於期末報告中補充國內既有之成果。	

行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究及模場試驗專案」

期末報告初審意見對照表

計畫年度	104 年度	計畫類型	■ 研究計畫 □ 現地試驗
計畫類別	□ 調查 ■ 整治復育 □ 評估 □ 底泥		主持人：葉琮裕 NO：30
計畫名稱	以能源作物向日葵整治重金屬鎘污染土壤之研析		
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員一 1. 表 11~15 請整理成一個表，並使用統計檢定處理是否有效應，各處理間是否有顯著差異。 2. 植生萃取之一大條件是植物必須能耐重金屬之毒害，向日葵是否能耐受 20 mg/kg 之 Cd，請提供 Cd 處理和未添加 Cd 處理向日葵生長情形之比較資料。 3. 圖 11~13，縱軸之單位 (kg/mg) 有誤，請修正為 (mg/kg)。 4. 表 16~20 之資料和圖 11~14 重複，建議可刪除。 5. 表 21 各組重金屬累積總量，如何得到？請詳細說明。 6. 結論中所述「向日葵對於 Cd 之向上傳輸能力較波斯菊佳」，請提供佐證資料。 7. 結論中所述「添加生長激素可緩解螯合劑對於植體產生毒害」，請提供佐證資料。 8. 結果與討論太過簡略，請再補強。		1. 謝謝委員建議，已將表 11~15 請整理成表 16，並將數據進行 ANOVA 單因子變異數分析，於各組重金屬累積量上具有顯著差異 (p < 0.05)。 2. 謝謝委員建議，已於報告中增列 Control，以便進行比較。 3. 謝謝委員指教，已於圖 11~13 進行修正。 4. 謝謝委員建議，因期中有委員建議除圖片外，應將所得之數據一併呈上，故圖表均選擇保留。 5. 謝謝委員指教，表 21 所得之各組重金屬總量，為分析後各組根、莖、葉、花、種子之數據相加所得，由於一組共 4 株，將其所得之總量進行平均再加上正負標準差，即可得到。 6. 謝謝委員指教，波斯菊之 TF 值範圍介於 0.6~0.8，向日葵之 TF 則介於 4.2~2.3 之間，而 TF 值為 Cshoot/Croot，因此 TF 值越大代表向上傳輸能力越佳。 7. 謝謝委員指教，經由添加螯合劑與螯合劑加植物生長激素之組別進行比較，發現添加植物生長激素之組別植物生長高度略高。 8. 謝謝委員建議，遵照辦理。	

委員二 1. 本計畫對能源作物向日葵進行土壤重金屬鎘之改善研析，探討整合植物生長激素與螯合劑植生復育受重金屬污染土壤，並進一步評估能源作物向日葵復育受重金屬污染土壤操作方式暨相關環境因子擬定。 2. 整體研究成果符合預期。 3. 主要成果符合計畫書之內容，進度並無落後情形。	1. 謝謝委員指教。 2. 謝謝委員指教。 3. 謝謝委員指教。
委員四 1. 期末報告格式未完全依規定撰寫，請修改。 2. 研究項目及進度符合計畫內容，已達到計畫目標。 3. 初步成果已達預期。本計畫針對能源作物向日葵進行土壤重金屬鎘污染之整治與研析，探討整合植物生長激素與螯合劑植生復育受重金屬污染土壤，並進一步評估能源作物向日葵復育受重金屬污染土壤操作方式暨相關環境因子擬定。 4. 研究結果與討論部份目前呈現方面較簡單，建議在研究結果之數據提供與結果之討論方面可再補充加強。 5. 建議在”結論與建議”部份可再修改與補充。	1. 謝謝委員指教，遵照辦理。 2. 謝謝委員指教。 3. 謝謝委員指教。 4. 謝謝委員指教，遵照辦理。 5. 謝謝委員指教，遵照辦理。
委員五 1. 本研究屬於初期的實驗室研究階段，研究內容&討論與建議仍屬初期的討論，就研究成果的實務應用性而言，仍未具有實務可行性，尤其未對國內的現況(植生復育)加以檢討討論（主要的關鍵性的配合條件為何？主要的限制因子為何？適用於國內的特性條件為何？(必要條件?)...等等）。 2. 添加其他物質(生長激素 或 螯合劑)對植生復育的重金屬吸收有所助益，成本與添加方式？該類添加劑的環境宿命為何？主要機制為何？建議說明。	1. 謝謝委員指教，因農地經各級環保機關調查有受污染情形，需進行休耕，且農地完成整治並解除列管後，後續需進行休養生息復育，一搬物化整治費用較高，且有可能會影響到土壤的肥沃性，故針對此方面可選擇植生復育法進行整治。植生復育之主要適用條件為，低濃度之污染，由於污染濃度過高會造成植體毒害，導致植體無法生長，故高濃度之污染因先進行前處理，降低濃度後再以植生復育法整治。 2. 謝謝委員指教，由於 EDDs 及 GA₃ 添加之劑量非常低，粗略估計其成本為 1400 元/噸。

3. GA₃ & EDD_s 同時添加的成效並不比單獨添加 EDD_s 為佳，原因？機制？建議討論。 4. 因添加其他物質所導致的土壤物化特性變化為何？此變化有助於植生復育或是不利？建議討論。 5. 計畫執行進度與預定進度相符。 6. 進度並無落後。 7. 執行現況、研究流程及方法說明具體。	EDD_s 添加方式為，於重金屬添加完成後，使其乾燥再添加 500 umol/kg 的 EDD_s，將配置完成之土壤攪拌均勻置於戶外等其乾燥。GA₃ 之添加為配製 10⁻⁸ mol/kg 的 GA₃，於早晚澆花時來回三次噴灑在植體上。EDD_s 為生物降解螯合劑，半衰期為 2.5 天，這表示殘存在土壤中的 EDD_s 將隨時間而迅速減少，這可降低重金屬污染地下水之機會。藉由螯合劑溶出及錯合重金屬之能力，可達到增加重金屬移動性以及提升重金屬於根部與地上收割部位之傳輸，被錯合之重金屬，可被根部累積且有效傳輸至植物之地上部位。GA₃ 之作用類似於肥料，目前於種稻時也會添加，以幫助稻作之生長。 3. 謝謝委員建議，此部分可能由於實驗上之誤差所導致，或為 GA₃ 對 Cd 之向上傳輸能力有限，故導致實驗結果所得之數字不如預期。 4. 謝謝委員建議，螯合劑可溶出及錯合重金屬，達到增加重金屬移動性以及提升重金屬於根部與地上收割部位之傳輸，以增加植生復育之效果，但螯合劑於使用上需注意二次污染之問題。 5. 謝謝委員指教。 6. 謝謝委員指教。 7. 謝謝委員指教，遵照辦理。
本署審查意見 無意見	謝謝委員。

專案基本資料表

專案性質		☒ 實驗性質 ☐ 非實驗性質		專案類別(單選)		☒ 研究專案 ☐ 模場試驗	
研究主題		☐ 調查 ☒ 整治 ☐ 評估 ☐ 底泥					
申請機構系所		國立高雄大學土木與環境工程學系					
機構地址		高雄市楠梓區高雄大學路 700 號					
計畫主持人		葉 琮 裕		職等／職稱		教 授	
協同主持人				職等／職稱			
專案 名稱	中文	以能源作物向日葵整治重金屬污染土壤之研析					
	英文	Remediation of Cadmium contaminated soil using energy plant sunflower-full scale study					
	關鍵字	Cadmium, energy plant, full scale study, absorption, immoization					
執行期程		自 民 國 1 0 3 年 1 2 月 1 日 起 至 民 國 1 0 4 年 1 1 月 3 0 日 止					
計畫主持人		姓名：葉琮裕 Email: tyeh@unk.edu.tw 專線：07-5919536 手機：0933893201					
專任助理		姓名： Email： 專線： 手機：					
經費 分 析 表		專 案 預 估 經 費		金 額		編列說明	
		1.	人事費用	192,000		(1~5 項相加之 50%為限)	
		2.	貴重儀器使用含維護費	200,000		(與計畫實驗相關)	
		3.	消耗性器材與主要費用	115,960		(與計畫主體相關)	
		4.	其它研究相關費用	13,040		(差旅與租賃費用)	
		5.	雜項費用	29,000		(1~6 項相加之 5%為限)	
		6.	行政管理費	50,000		(1~5 項相加之 10%為限)	
		專案計畫申請總金額		600,000			

專案主持人：_____ 日期：_____

專案執行績效審核－自評表

項次	類別	缺失點數	自評項目	執行單位 檢核		本署 審核
				是	否	
一	計畫書 核定修正	1 點	依規定期限內備文提送	☒	☐	
		1 點	書面資料完整且無補件情況	☒	☐	
		1 點	報告依格式規定撰寫	☒	☐	
		1 點	依規定期限內繳交電子檔	☒	☐	
		1 點	系統資料依規定期限內登錄且資料登錄完整(含 GRB 系統與本署專案系統)	☒	☐	
二	期中及期末	1 點	依規定期限內備文提送	☒	☐	
		1 點	書面資料完整且無補件情況	☒	☐	
		1 點	報告依格式規定撰寫	☒	☐	
		1 點	依規定期限內繳交電子檔	☒	☐	
		1 點	系統資料依規定期限內登錄且資料登錄完整(含 GRB 系統與本署專案系統)	☒	☐	
三	結案及核銷	1 點	依規定期限內備文提送	☐	☐	
		4 點	結案提送原始憑證清冊及相關資料完整且無補件情況	☐	☐	
四	其他	3 點	計畫主持人配合出席本專案成果發表活動(或指定代理人如協同主持人、同專業且為助理研究員以上職等,備文經本署同意者)	☐	☐	
		1 點	發表期刊論文、專利、技轉等,註明補助單位及中英文致謝,備文副知本署。	☐	☐	
		1 點	計畫執行者於執行期間與單位內各處室溝通良好,行政作業效率良好。	☐	☐	
合計		20 點				

行政院環境保護署土壤及地下水污染整治基金管理會

土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案

104年度專案成果績效自評表

一、專案基本資料

填表日期：104 年 5 月 25 日

專案性質	☒ 實驗性質 ☐ 非實驗性質	專案類別	☒ 研究專案 ☐ 模場試驗
研究主題	☐ 調查 ☒ 整治 ☐ 評估 ☐ 底泥		
申請機構系所	國立高雄大學土木與環境工程學系	計畫主持人	葉 琮 裕
專案名稱	以能源作物向日葵整治重金屬污染土壤之研析		
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「結案達成數」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 達成率	備註 (說明未達成原因或學術 產出發表日期、發表處、發 表名稱、影響指數等)
A 學 術 產 出 及 活 動	1.國內投稿 (篇數)	(1)論文	2	0	0		
		(2)研討會論文	0	0	0		
	2.國外投稿 (篇數)	(1)期刊論文	2	0	1		
		(2)研討會論文	0	0	0		
	3.報告 (篇數)	(1)技術報告	0	0	0		
		(2)研究報告	0	0	0		
	4.專著 (本數)		0	0	0		
	5.辦理學術 會議(場數)	(1)研討/說明會	0	0	0		
		(2)成果發表會	0	0	0		
		(3)論壇	0	0	0		
6.研發改良 技術(項數)	(1)已開發技術	0	0	0			
	(2)技術平台	0	0	0			
B 人 才 培 育	7.研發人員 (人數)	(1)碩士	0	0	0		
		(2)博士	0	0	0		
	8.研究團隊 (個數)	(1)跨領域團隊	0	0	0		
		(2)跨國團隊	0	0	0		
		(3)跨機構團隊	0	0	0		

目標達成程度			申請 預估數	期中 達成 數	期末 達成數	結案 達成率	備註 (說明未達成原因或學術 產出發表日期、發表處、發 表名稱、影響指數等)
項目							
		(4)形成研究中心	0	0	0		
		(5)形成實驗室	0	0	0		
9.其他指標 (請自行命名)			0	0	0		

(二) 產業面

目標達成程度				申請 預估數	期中 達成數	期末 達成數	結案 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)
項目								
A 智慧 財產 權	1.專利 (件數)	已 核 准	發明	0	0	0		
			新型/設計	0	0	0		
			合計	0	0	0		
		申 請 中	發明	0	0	0		
			新型/設計	0	0	0		
			合計	0	0	0		
B 研 發 技 術 轉 移	2.先期技術 成果移轉	件數		0	0	0		
		授權金(仟元)		0	0	0		
		衍生利益金(仟元)		0	0	0		
	3.技術移轉 (專利)	件數		0	0	0		
		授權金(仟元)		0	0	0		
		衍生利益金 (仟元)		0	0	0		
	4.技術移轉 (應用技 術)	件數		0	0	0		
		授權金(仟元)		0	0	0		
		衍生利益金(仟元)		0	0	0		
	5.可移轉 產業技術	(1)技術(件數)		0	0	0		
		(2)品種/系(件數)		0	0	0		
6.其他指標 (請自行命名)		(請自填)		0	0	0		

(三) 政策面

項目 \ 目標達成程度			申請預 估數	期中 達成數	期末 達成數	結案 達成率	備註 (說明未達成原因或 其他詳細資料)
A 服 務 便 民	1.技術服務	次數	0	0	0		
		收入(仟元)	0	0	0		
	2.諮詢服務	次數	0	0	0		
		收入(仟元)	0	0	0		
B 支 援 合 作	3.協助政府 制定 (件數)	(1)政策	0	0	0		
		(2)法規	0	0	0		
		(3)規範	0	0	0		
		(4)標準	0	0	0		
4.其他指標 (請自行命名)		(請自填)	0	0	0		

研究成果摘要

中文摘要：本計畫將對能源作物向日葵進行土壤重金屬鎘之改善研析，探討整合植物生長激素與螯合劑植生復育受重金屬污染土壤，並進一步評估能源作物向日葵復育受重金屬污染土壤操作方式暨相關環境因子擬定。並藉由實驗探討植物生長激素與重金屬鎘對植體生長情形（植體形態分析）。實驗結果證明，GA₃ 可以提升植物的生長速率：單純添加重金屬組的平均生長高度為 18.9 公分；Cd+GA₃ 組的平均生長高度為 19.5 公分；Cd+EDD₅ 組的平均生長高度為 19.0 公分；Cd+GA₃+EDD₅ 組的平均生長高度為 20.4 公分。實驗結果證明，EDD₅ 能增加重金屬在土壤中的流動性且增加整體植生復育的效果：單純添加重金屬組的植體累積濃度為 7.635±0.14 mg/kg；Cd+GA₃ 組的植體累積濃度為10.522±0.212 mg/kg；Cd+EDD₅ 組的植體累積濃度為17.037±0.637 mg/kg；Cd+GA₃+EDD₅ 組的植體累積濃度為16.216±1.503 mg/kg。相較於傳統植生復育，整合型植生復育能有效地促進植物生長。

英文摘要： This project will be carried out to improve energy crops Sunflower Research and Analysis of heavy metals in the soil . Explore the integration of plant growth hormones and chelating vegetation restoration soils contaminated with heavy metals and further assessment of energy crops Sunflower heavy-metal contamination of soil remediation operation -cum- related environmental factors intended . By experiment and explore plant growth hormones and heavy metals on the growth scenario explants (explants morphological analysis). The experiment's results indicate that GA₃ can increase the growth rate of the plant : The average increment of the heavy-metal-added-only group is 18.89 cm; the average increment of the GA₃-added group is 19.5 cm; the average increment of the EDD₅-added group is 19.0 cm; the average increment of the GA₃+EDD₅-added group is 20.4 cm. The experiment's results indicate that EDD₅ can increase the solubility of heavy metals in soil and enhance phytoextraction : the plant accumulates a concentration of the heavy-metal-added-only group is 7.635±0.14 mg/kg; the plant accumulates a concentration of the GA₃-added group is 10.522±0.212 mg/kg; the plant accumulates a concentration of the EDD₅-added group is 17.037±0.637 mg/kg; the plant accumulates a concentration of the GA₃+EDD₅-added group is 16.216±1.503 mg/kg. Compared with the conventional methods of phytoremediation, these integrated measures can actually spur the growth of

plants .

目錄

第一章 前言.....	1
第二章 研究目的.....	4
第三章 文獻探討.....	5
3.1 綠色整治技術植生復育.....	5
3.1.1 植生復育有效係數.....	9
3.1.2 能源作物之選擇(向日葵).....	10
3.2 重金屬簡介.....	12
3.4 土壤重金屬鍵結形態與植生復育關係.....	15
3.5 可生物降解螯合劑.....	15
3.6 植物生長激素的應用.....	17
3.7 國內植生復育研究之回顧.....	18
第四章 研究方法與過程.....	19
第五章 結果與討論.....	29
5.1 盆栽實驗不同操作條件下之差異.....	29
5.2 不同操作條件下向日葵生長情形之探討.....	29
5.2.1 不同條件下對於重金屬在向日葵體內吸收量與累積量差異之探討.....	34
5.2.2 不同操作參數對於向日葵植生復育效率之探討.....	39
5.3 植生復育之可行性評估.....	41
第六章 結論.....	43
第七章 參考文獻.....	44

圖目錄

圖 1. 重金屬鎘污染分佈圖.....	1
圖 2. 土壤污染整治技術之經費比較.....	2
圖 3. 計畫概念示意圖	18
圖 4. 研究總流程圖	19
圖 5. 盆栽實驗示意圖	22
圖 6. 盆栽實驗 CD 組前後生長差異圖.....	30
圖 7. 盆栽實驗 CD + GA ₃ 組前後生長差異圖.....	30
圖 8. 盆栽實驗 CD + EDDS 組前後生長差異圖	30
圖 9. 盆栽實驗 CD + GA ₃ + EDDS 組前後生長差異圖.....	31
圖 10. 盆栽實驗第 30 天各組向日葵生長情形之箱型圖	31
圖 11. 各組根部重金屬累積濃度.....	35
圖 12. 各組莖部重金屬累積濃度.....	36
圖 13. 各組葉部重金屬累積濃度.....	36
圖 14. 各組花部重金屬累積濃度.....	37
圖 14. 各組種子重金屬累積濃度.....	37

表目錄

表 1. 土壤污染整治技術之分類.....	2
表 2. 天然植生復育法與化學藥劑添加強化植生復育法差異之比較.....	8
表 3. 四種作物(棉、向日葵、大豆、油菜)產量、含油量與石油產量比較....	12
表 4. 各種重金屬經由不同人為方式排放至環境中的過程	13
表 5. 不同重金屬對人體造成的傷害.....	14
表 6. GA ₃ 相關物化特性暨其應用表	20
表 7. 本研究所探討之 EDDs 之相關資料	21
表 8. 實驗土壤背景參數表.....	23
表 9. 盆栽實驗操作條件表	23
表 10. 微波消化儀參數設定.....	25
表 11. CD 組向日葵生長情形.....	31
表 12. CD+GA ₃ 組向日葵生長情形	32
表 13. CD+EDDs 組向日葵生長情形.....	32
表 14. CD+GA ₃ +EDDs 組向日葵生長情形	32
表 15. CONTROL 組向日葵生長情形	33
表 16. 各組向日葵生長情形.....	33
表 17. 盆栽實驗各組平均生長高度.....	33
表 18. 各組根部重金屬累積濃度.....	35
表 19. 各組莖部重金屬累積濃度.....	38
表 20. 各組葉部重金屬累積濃度.....	38
表 21. 各組花部重金屬累積濃度.....	38
表 22. 各組種子重金屬累積濃度.....	38

表 23. 各組重金屬累積量總量.....	39
表 24. 各組 BCF、TF 及 PEF 值.....	41

第一章 前言

近年來因高科技及重工業快速蓬勃發展，延伸出來的污染物問題，為各國家所擔憂之主要問題之一，以亞洲來講，中國境內因近年來的快速經濟發展，設立了許多的高科技及工業代工工廠，但由於生產大量產品為主，導致所排放之污染物也相對也比周遭國家的多，尤其是以重金屬無經由處理直接排放至土地中造成農作物受到重金屬污染累積問題最為嚴重，中國的土地面積大，相對解決的困難度及花費也相對的提高許多，如何去解決受污染問題成為了重大的課題。

下圖一為中國長江流域周遭主要城市地區土地重金屬鎘污染分佈圖：

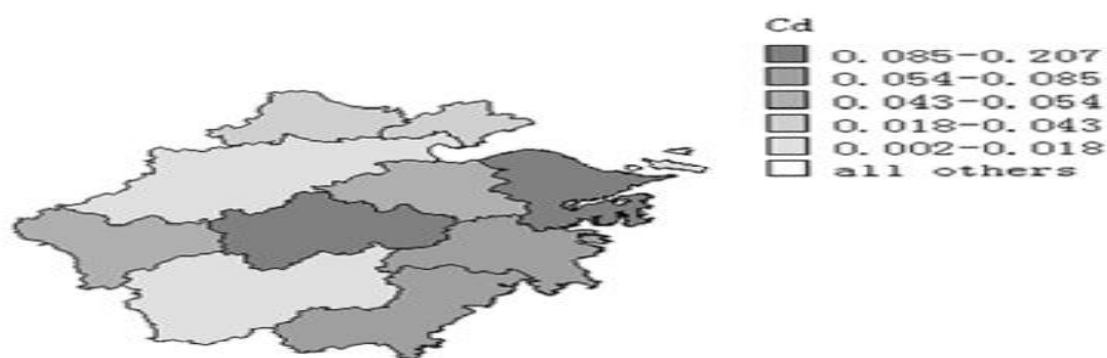


圖 1.(Huang et al., 2013)

除了中國以外台灣地區早年因為工商業發達，其相關產業產生之廢棄物或廢水，造成土壤不同程度的重金屬污染，使土壤污染狀況嚴重。行政院環保署統計全台灣有828個場址為公告控制場址，其中有502個場址為農地、84個場址為加油站及儲槽、53個場址為工廠、2個為非法棄置場2個及其他14個場址，由統計結果，控制場址中農地污染場址數量為最大宗，且以重金屬為主要污染物。其中以受重金屬銅污染場址最多，有181處場址；受重金屬鎘污染場址次之，有129處場址；其次為受重金屬鋅、鎘及鉻分別有66、56及52處場址，但以受重金屬鉛及砷之場址最少，僅只有17及1處場址受到污染。由於高雄屬重工業場所之區域，近來最嚴重之污染事件則為高雄日月光半導體公司所產生之廢水，未經處理而排放至高雄市楠梓區後勁溪中，造成高雄市橋頭、梓官區農田首當其衝，此地區農民灌溉農田所使用之水源是引用後勁溪之溪水，故受影響農地面積逾940公頃，遭受重金屬鎘的污染。在土壤污染整治技術上則有分為下列三大項：分別為化學處理、工程技術與生物處理如表一所示。

土壤整治

表 1.土壤污染整治技術之分類

類別	處理方法	處理技術說明
化學處理	萃取法	現場處理(稀酸或螯合劑溶液)
	安定化/固化法	現場安定化(吸附、離子交換、沉澱)
		現地安定化(沉澱、螯合、高分子化)
		現場固化
	還原法	六價鉻之還原
工程技術	排土客土法	移除上層之污染土壤，回填其它乾淨土壤
	現地土壤淋洗法	水、酸/鹼、螯合劑
	現地電熔法	
生物處理	植生復育法	花卉、苗木、百慕達草

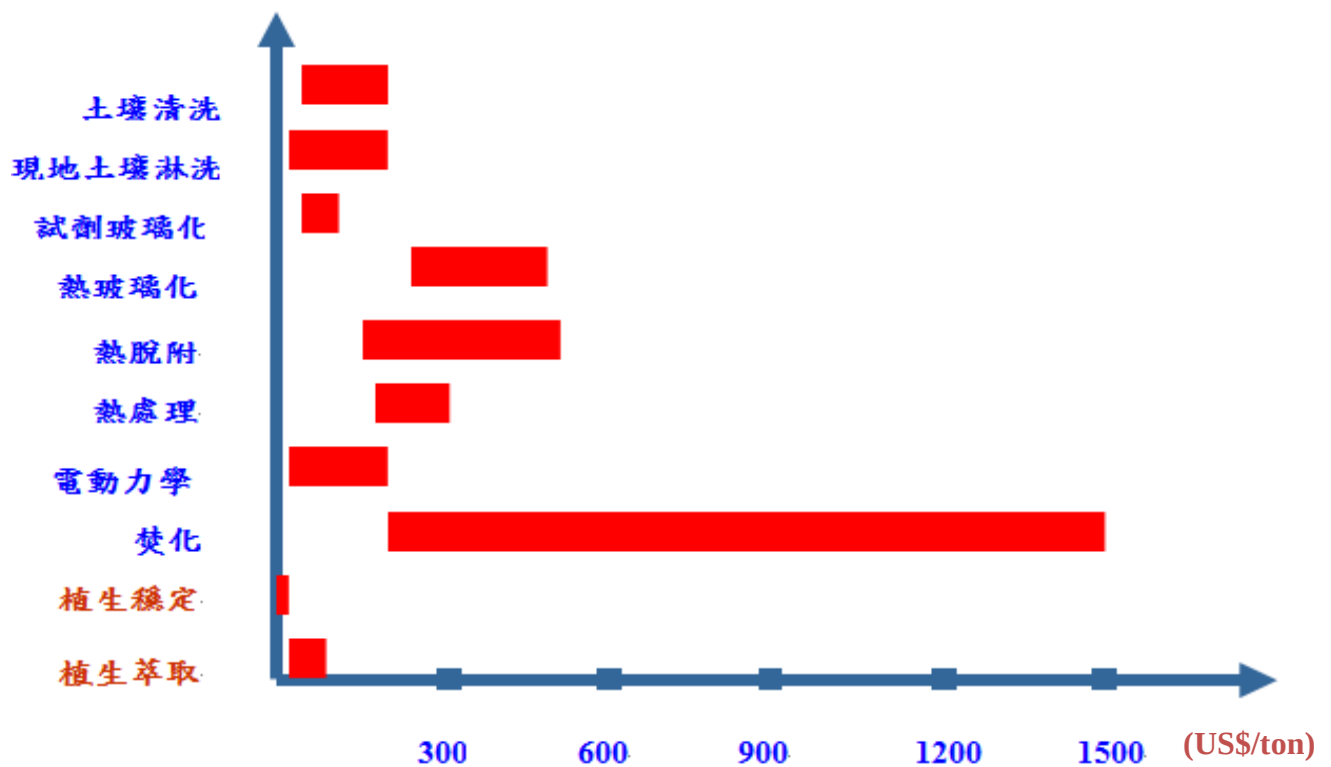


圖 2. 土壤污染整治技術之經費比較

而國內針對受重金屬污染土壤整治技術，現今主要採行技術包含有：土壤翻轉稀釋法、土壤酸洗法、排土客土法等。首先從國內土壤整治常用的翻轉稀釋法上來看，其在每公頃之處理費用為15~20萬，此技術之優點包括：(1)在土層厚度夠深情形下，易將表土重金屬濃度依翻土深度而將重金屬濃度在及短時間及最少工程費用下降低至法規標準值以下(2)標準操作步驟(SOP)易建立及操作，因此施工之期程、效果及時間、成本均易掌握，可在有限時間內完成整治(3)整治費用相較於酸洗法來說是較為便宜(4)可在同一污染區多點同時操作整治。接著是缺點：(1)依土壤重金屬濃度分部及土層深度，依計算公式無法將濃度降低至污染管制濃度下時，此方法勢必不可行(2)雖有(SOP)，但在田間操作時如何確實混合使得整塊農地各點的濃度均勻是困難的，其整治結果仍有未達法規值以下之風險(3)如在紅土地區的下層剖面，常有鐵網紋及鐵錳結合物值的存在，一但翻動至表土層並乾燥變為硬塊，對後續農業使用造成極大影響(4)表土30公分之重金屬濃度符合法規標準，但土壤中原有的重金屬總量則是平均被分配至各土層，其重金屬總量並未改變且重金屬並未被移出土壤，故有些環保人士不接受此整治方法。

第二章 研究目的

本研究主要方向為針對螯合劑 (EDDs) 與生物激素 (GA_3) 對提升向日葵植生復育受重金屬鎘污染土壤之研究、評估澆灌與暴雨對重金屬再釋出至地下環境之衝擊與植物激素應用於植生整治復育之研析。

研究目的：

(1).評估生物激素 (GA_3) 與可生物降解之螯合劑 (EDDs) 提升向日葵重金屬植生復育效益研析。

(2).整合型植物復育技術應用於處理受重金屬污染土壤效益評估。

本研究計畫包含以下步驟：

(1).評估生物激素暨可生物降解之螯合劑對能源作物向日葵植生復育之效益暨植體累積傳輸機制。

(2).評估螯合劑添加對土壤重金屬鎘鍵結形態及傳輸情形。

(3).評估植生復育對重金屬鎘之整治情形並評估未來實場之可行性。

第三章 文獻探討

3.1 綠色整治技術植生復育

傳統的整治方法中，常見的有翻轉稀釋法、酸洗法、排土客土法等等，以翻轉稀釋法最常利用於土壤整治，但其整治方法是以下層重金屬濃度較低之土壤與上層重金屬濃度較高之土壤進行相互攪拌混合，使土壤重金屬均勻分布，使得上層污染濃度得以降低，不過此方法在國外專家學者眼中，並不算一種整治，因為土壤中重金屬並沒有去除，只是將上層高污染之土壤平均分布至土壤各層中，無法恢復土壤原始環境的狀態。接著酸洗法，雖然其作用過程快速，能將重金屬從土壤中去除，不過化學藥劑的添加會造成土壤酸化且要讓土壤恢復成能種植蔬果的肥沃力需花上許久的時間，故農民極為反對，且費用昂貴。最後排土客土法，將重金屬污染土壤直接從現地挖除，並回填乾淨之土方，的確能有效整治污染之場址，但是其挖除之污染土壤，則需送去焚化或固化，喪失了土壤原本的功用，並不是個永續環境的方法。相對於使用生物整治中的植生復育法，是一項綠色整治技術，利用植物減少土壤中的污染物濃度或毒性，達到環境的無害化(Greipsson, 2011)。而植生復育法，有以下幾項優點，第一適合用於有機或無機污染的土壤上，第二整治過程中不會破壞土壤本身的質地，第三整治費用較為低廉，最後則是可以美化景觀且整治場址附近居民接受度較高。所以植生復育是一項能永續環境的整治技術。

植生復育法包含了下列幾項，分別為植生萃取法、植物穩定化法、根部濾除法、植物過濾法、植物揮發法、植物分解法、植物脫鹽法 (Alkorta et al., 2004)。

- (1) 植生萃取法：由植物根部吸收土壤中污染物（重金屬及有機物），將污染物經由植物的木質部傳輸至植體各部位累積，經過一段時間吸收後，將植體移除處理，移除後之植體一般以焚化或掩埋為主，避免污染物又回到環境中。在整治期間需評估植物生長速率及收割時間，避免植體死亡，造成重金屬再釋出環境 (Sekara et al., 2005 ; Yoon et al., 2006 ; Rafati et al., 2011)。

土壤整治

- (2) 植物穩定化法：係透過植物根部組織作用，將污染物（有機物及重金屬）濃縮、吸附於根部等。以減少污染物之生物有效性（bioavailability）及傳輸性，使污染物可進一步在環境中分解（ Barceló and Poschenrieder, 2003 ; Ghosh and Singh, 2005 ; Yoon et al., 2006 ; Wuana and Okieimen, 2011 ）。
- (3) 根部濾除法：係利用植體根部吸收、濃縮界質中之重金屬。根部過濾效果最為明顯係禾本科植物，其根部具有快速生長及擁有較大之表面積（ Mukhopadhyay and Maiti, 2010 ）。
- (4) 植物過濾法：利用水生植物對於污染的地表水進行污染物的吸收或吸附，以控制污染物在水中的流動性，並且對污染物移除，達到整治復育的效果（ Mukhopadhyay and Maiti, 2010 ）。
- (5) 植物揮發法：由植物吸收土壤中的污染物，將污染物轉為易揮發的型式，揮發至空氣中藉以移除土壤中的污染物。但是此方法備受爭議，因為此方法只是將污染物由土壤中移除但相對卻儲存於大氣中（ Padmavathiamma and Li, 2007 ）。
- (6) 植物分解法：利用植物體內的酶來對污染物進行作用，但此方法對於污染物的去除有限，且只對有機污染物有效，相對的無機污染則不適用此方法（ Vishnoi and Srivastava, 2008 ）。
- (7) 植物脫鹽法：利用耐高鹽分土壤生長的植物對受鹽化污染的土壤進行整治（ Manousaki and Kalogerakis, 2011 ; Sakai et al., 2012 ）。

在傳統為了提升植生復育處理重金屬污染之效率，故植栽選擇上，需選擇對重金屬有高吸收率且能有效將重金屬累積於植體各部位，最後則是能生長迅速並具有高生物量之植體。Salt et al. (1998) 指出植生復育技術之發展有基本兩大類，第一種是利用超量累積植體，第二種為藉由化學螯合劑添加增強植體對於污染物吸收之效益。而超量累積植物是指當植體其地上部位（莖、葉、花）重金屬累積量高於特定濃度，例如可吸收重金屬 Cd 100 mg/kg，但是植體累積的 Cd 含量超過 100 mg/kg 且不會死亡，那此植物就為 Cd 的超量累積植物 (Schmidt, 2003)，但植栽種類屬於超量累積植物通常生長緩慢且生物量較小 (Baker and Brooks, 1989 ; Brown et al., 1994)，故無法於短時間內快速移除污染物；相對的添加螯合劑能有效增加土壤中重金屬移動性，提升植物對於土壤中重金屬的吸收效率。雖然利用大面積種植超量累積植物可以克服低生物量問題，但其只對特定重金屬累積量較佳，於複合重金屬污染之土壤上，會影響超量累積植物整體植生復育效率。所以使用能快速生長及生物量大之植物可能較為適合，雖其對於重金屬之吸收效率沒有超量累積植物來的好，不過可經由螯合劑的添加，增加植物對重金屬之吸收及傳輸效率。螯合劑提升植生復育法有兩項主要用途，第一增加土壤中重金屬之移動性及傳輸性，第二則是提升植物對金屬-螯合劑錯合物之吸收與轉移效率。添加螯合劑改善植體萃取之效率，提升植物吸收重金屬效率及植體根部制地上部傳輸性。關於植生復育與藉由化學藥劑添加強化植生復育法比較如下表 2 所示。

土壤整治

表 2. 天然植生復育法與化學藥劑添加強化植生復育法差異之比較

方法 差異分析	天然植生復育法 (Naturally phytoextraction)	添加化學藥劑強化植物萃取法 (Chemical assisted phytoextraction)
植物選擇	採用超量累積植物	無植物種類上限制
生長速率	生長緩慢與低生物質量增生量	快速增長與高生物質量增生量
萃取途徑	藉由植體自身萃取能力進行土壤重金屬之萃取	藉由化學螯合劑及有機酸添加以增進植物萃取效果
傳輸效率	植體能有效地將重金屬由根部傳輸至莖/葉部	藉由化學藥劑之添加可有效改善重金屬於植體內部之傳輸效果
金屬耐受性	植體能有效地吸收重金屬，並於高金屬濃度之情形下仍能存活	植體對重金屬耐受性較低，當過多之重金屬累積於植體時，將會導致死亡
二次污染的產生	可藉由改善操作條件而增進處理效果	金屬與螯合劑產生之錯合物可能造成地下環境污染之風險
重金屬之吸收	惟至今尚未有一能超量累積重金屬鉛之植體	幾乎對所有重金屬都可有效處理

資料來源：Meers et al. (2007)

3.1.1 植生復育有效係數

為了評估植生復育技術應用於受重金屬污染土壤之整治效益，我們會利用下列三種有效係數來進行比較，分別為植物生物濃縮係數 (Bioconcentration factor, BCF)、植物傳輸係數 (Translocation factor, TF) 及植生復育有效係數 (Phytoremediation efficiency factor, PEF) 評析，其係數分述如下：

$$BCF = \frac{C_{root}}{C_{soil}}$$

$$TF = \frac{C_{shoot}}{C_{root}}$$

$$PEF = \frac{C_{shoot}}{C_{soil}} = BCF \times TF$$

其中， C_{soil} 代表為土壤重金屬濃度， C_{root} 則是植體地下部位（根部）重金屬濃度， C_{shoot} 為植體地上部位（莖、葉及花部位）重金屬濃度。

植物生物濃縮係數 (Bioconcentration factor, BCF)：主要是植體根部重金屬累積量及土壤重金屬含量相比較，BCF 值越高表示植物根部對於土壤重金屬吸收效益越好。植生復育需搭配適切收割植體方能將重金屬污染物由污染土壤移除，故當植體具有良好之傳輸能力即將重金屬傳送於莖葉部位，有助於植生復育之後續收割，因而植體莖葉部位生物質量重金屬累積越大，收割可除之重金屬越大量。

土壤整治

植物傳輸係數 (Translocation factor, TF)：將植體地上部 (莖、葉及花部位)及植體地下部 (根部) 重金屬含量相比較，探討植體重金屬由根至地上部傳輸性，TF 值越大表示植物對於重金屬之由根至地上部傳輸能力越佳。

植生復育有效係數 (Phytoremediation efficiency factor, PEF)：其主要是由植物生物濃縮係數 (Bioconcentration factor, BCF) 與植物傳輸係數 (Translocation factor, TF) 兩者之乘積，其 PEF 值越大則表示植生復育整體效果越佳。

3.1.2 能源作物之選擇(向日葵)

在 (古, 2008) 目前最常用來生產生質柴油的油脂來源有大豆、花生、棉子、蓖麻子、紅花子、葵花子、油菜籽，椰子與油棕等。除了棉子與蓖麻子之外，其餘都是重要的食用作物，大都產量低生產成本高，做為生質柴油原料勢將影響到糧食之供應。大豆生育期短 (90-120 天)，含油量 20%。向日葵生育期也不長 (120 天)，但含油量可達 35%。椰子與油棕在東南亞的最適宜生長條件下，每公頃產油量可分別達到 2500 與 5000 公升，在熱帶地區極有潛力。但椰子與油棕屬木本科植物，生長期長無法使用植生復育中的植生萃取技術，植生萃取利用植物在生長期從幼苗至開花過程中能大量吸取土壤中重金屬，並於生長期結束後移除再重新種植新作物，以增加植生復育的效率，故只考慮草本科的植物。

而生質柴油的來源主要從天然植物油、動物脂肪與食用或工業所產生之廢油提煉得來。生質柴油有許多優點，首先因其燃燒特性與化石柴油相似，可與化石柴油以任意比例混合使用，甚至完全取代化石柴油做為柴油汽車之燃料，柴油汽

車引擎不須進行任何改造，也可與汽油搭配使用。接著是生質柴油，其閃火點 (118°C) 較傳統石化柴油 (52°C) 來的高，所以在運輸過程與儲存上安全性也較高。最後，生質柴油成分中含氧量高，濃度差不多為 11% 左右，故有助於使其作用過程中達到完全燃燒，代表使用生質柴油再排放廢氣時，其所含燃燒不完全物質(如一氧化碳) 較低，與化石柴油比較，生質柴油可減少一氧化碳排放量 50% 、懸浮微粒 70% 、碳氫化合物 40% ，且生質柴油的硫含量趨近於零，廢氣中不含硫。因此生質柴油之使用可以減少從化石燃料所釋放的有毒物質，更進一步減少由一氧化氮及碳氫化合物所造成的溫室效應。因此生質柴油是一種符合環保、永續、容易生產、可生物分解的低污染再生能源。

由於傳統植生復育過程中，當植物種植於土壤進行復育一個時段後，會將植物地上部份 (莖及葉部) 收割並利用焚化將植體燃燒，避免植體之重金屬再次轉移至環境中，對於環境造成二次危害。而為了使植體在去除後還能有後續再利用的用途，於是選擇了能源作物 (向日葵) 來進行植生復育，不僅能達到整治重金屬的效果，且能再利用，生產出再生能源生質柴油。

在 Skoulou, V et al. (2011) 研究種植向日葵、油菜、大豆、棉四種作物，來比較植體收成後提煉之生質柴油之含量，其結果如下表 3 所示。

土壤整治

表 3. 四種作物(棉、向日葵、大豆、油菜)產量、含油量與石油產量比較

作物	產量(噸/公頃)	含油量(%)	石油產量(噸/公頃)
棉	9.93	14.79	5.9
向日葵	7.2	42.46	10.46
大豆	13.2	20.9	7.58
油菜	7.2	42.6	8.52

所以最後在於生質柴油之產量上，最高為向日葵，次之是油菜，最後則分別為大豆與棉，故向日葵以經濟效益來說較適合用來製成生質柴油，且能有效整治污染土壤並於植體去除後達到再利用之效益。

3.2 重金屬簡介

在環境中原本就存在重金屬，但其濃度不至於影響人體健康對環境造成污染。重金屬主要分為以下八種，分別為銅、鋅、鉛、鉻、鎘、汞、鎳、砷。且有部分重金屬是生物體內所需要的。而也有重金屬是環境中不需要對生物體有傷害的，例如：鎘，鉛，砷，汞，鉻，當重金屬濃度過高時，首先影響的是土壤中微生物的活性（Khan et al., 2010），接著種植作物會經由植體根部吸收將重金屬累積至植體，當人們將植體食入身體，會於體內進行累積，會影響身體機能的正常運作，造成身體的病變嚴重點會造成死亡。

重金屬要累積至環境中，有分為自然造成和人為兩種，自然造成則是有礦物質風化、火山爆發等等，而人為的來源包括電鍍廢液、農藥、農業肥料、污泥傾倒、工業廢水排放、大氣沉降等等。

下表 4 則為各種重金屬經由不同人為方式排放至環境中的過程。

表 4.各種重金屬經由不同人為方式排放至環境中的過程

重金屬	來源	參考文獻
銅	農藥和肥料	Thangavel Subbhuraam,2004
鉛	含鉛汽油、電池製造、除草劑和殺蟲劑	Salem et al., 2000 and Pulford and Watson, 2003
鉻	皮革和鋼鐵生產	Khan et al.,2007
鎘	油漆和顏料、塑料穩定劑、電鍍鎘、焚燒塑料物質和磷肥	Khan et al.,2007
鎳	工業廢水排放和電池製造	Memon et al., 2001, Wuana and Okieimen, 2011 and Rodrigues et al., 2012
汞	煤燃燒過程排放和醫療廢棄物	Tariq et al.,2006
砷	農藥和木材防腐劑	Thangavel and Subbhuraam, 2004, Wuana and Okieimen, 2011

表 5.不同重金屬對人體造成的傷害

重金 屬	對人體影響	參考文獻
銅	導致腦，腎損害，肝硬化和慢性貧血，胃腸道刺激	Salem et al., 2000 and Wuana and Okieimen, 2011
鋅	引起頭暈和疲勞	Salem et al., 2000, Padmavathiamma and Li, 2007, Wuana and Okieimen, 2011 and Iqbal, 2012
鉛	導致發育受損，智力降低，短期記憶喪失，學習障礙和協調問題，腎功能衰竭；心血管疾病的風險增加。	Hess and Schmid (2002)
鎘	致癌，致突變，致畸形，內分泌失調，腎功能衰竭和慢性貧血	Degraeve, 1981, Salem et al., 2000 and Awofolu, 2005
鎳	被稱為鎳癢的過敏性皮膚炎，吸入後可引起肺、鼻、鼻竇、咽喉和胃癌，神經毒性，遺傳毒性，肺炎，腎和肝病變，脫髮	Salem et al., 2000, Khan et al., 2007, Das et al., 2008, Duda-Chodak and Baszczyk, 2008 and Mishra et al., 2010

3.4 土壤重金屬鍵結形態與植生復育關係

植生復育處理土壤中之重金屬，與土壤中之有機物含量相關，有機物常與重金屬錯合影響植物之吸收效率，土壤中之陽離子交換容量 (cation exchange capacity, CEC) 及有機物含量，影響重金屬於介質中之生物有效性。土壤與重金屬之鍵結關係，即重金屬於土壤介質之生物有效性，亦影響植生復育之效益，化學序列萃取程序 (chemical sequential extraction procedure) 為一可瞭解土壤重金屬鍵結形態之方式。一般而言，以 Tessier et al. (1979) 建立方法最為常用，主要將土壤與重金屬鍵結分為五個部分，分別為吸附與可置換態、碳酸鹽鍵結、鐵和錳氧化物鍵結、有機鍵結及殘餘態。在土壤與重金屬鍵結型態裡面，其中吸附態與可置換態可用來評估重金屬對於環境之衝擊，而鐵/錳鍵結及有機鍵結則為土壤中重金屬主要鍵結型態，具潛在移動性，而殘留態則為最穩定之鍵結型態，在土壤與重金屬鍵結型態中再釋出之可行性最小。土壤背景性質，包括電子提供者濃度、土壤吸附性、pH、有機質成分，皆影響吸收重金屬之特性，及重金屬釋出環境之潛勢。

3.5 可生物降解螯合劑

傳統植生復育過程是單純栽種植栽對污染土壤進行污染物的吸收、整治，故所使用的植物為超量累積植物，但污染源並非為同種重金屬，超量累積植物針對的重金屬只有單一種，其效果為最好，但為複合（兩種以上）重金屬污染下，其植生復育效果有限。為了能提升植生復育的效率，近幾年研究經由螯合劑的添加，可增加土壤中重金屬流動性並且提升植物對重金屬之吸收及傳輸效果。在 Tassi et al (2008) 指出所謂促進植生萃取法 (assisted phytoextraction) 為一藉由化學藥劑添加於土壤以增加收割作物重金屬累積量之程序。Nowack et al. (2006) 指出藉由螯合劑強化植生復育法有兩項主要機制，一為增強土壤重金屬之移動性及傳輸性，二為植物植體對金屬-螯合劑錯合物之吸收與轉移。添加螯合劑改善植體萃取之效率，提昇植物吸收重金屬效率及植體根莖部位傳輸性。螯合劑溶出及錯合重金屬之能力，可達到增加重金屬移動性以及提升重金屬於根部與地上收割部位之傳輸，被錯合之重金屬，可被根部累積且有效傳輸至植物之地上部位。在螯合劑有分為兩大類，分別為不可被生物降解與可被生物降解兩種。首先是不可被生物降解之螯合劑 EDTA (ethylenediaminetetraacetic acid, $C_{10}H_{16}N_2O_8$)，為最廣泛應用於強化植生復育之螯合劑，其強錯合力被廣泛應用於土壤整治，雖能有效的增加重金屬移動力，但其不易生物分解之特性，可能造成地下水污染之衍生問題。此

土壤整治

外，為提升植生復育整治成效，植種選擇及重金屬土壤鍵結型態之改變為重要取決要件。植栽能耐重金屬所造成之毒害、並且能大量吸收重金屬及生物質量之增生率大等特性為植生復育選擇植體之必要條件。螯合劑添加對土壤中重金屬鍵結之影響，亦係植生復育效率之一重要因子，整治過程期間可添加生物可分解性螯合劑或有機酸以改變重金屬與土壤間鍵結型態，進而提升植生復育之處理效益及達到防止地下水遭受二次污染之衍生性問題。

接下來生物可分解螯合劑 EDD_s (ethylenediaminedisuccinic acid, C₁₀H₁₃N₂O₈) 於近期受到關注，EDD_s 易被土壤分解也產生較少有害副產物，其與重金屬 (如 Cr、Fe、Pb、Cd、Na、Cu、Ni) 之錯合物皆可被生物分解，惟 Hg-EDDS 錯合物由於具毒性而不被微生物所分解 (Vandevivere et al., 2001)。Meers et al. (2007) 利用五種柳樹復育受重金屬 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 及 Zn 污染土壤之可行性，添加 EDD_s 針對三種不同污染程度土壤進行植生復育整治實驗，結果顯示植體對於 Cd 及 Zn 有較高之吸收效果，在高濃度重金屬土壤中，添加 EDD_s 與控制組相較下，植體莖部重金屬鎘之含量可提升 60%、葉部則可提升 35%。於廢礦場土壤中，莖葉則能分別提升 97 及 45%。而添加 EDD_s 無法增加植體質量，推測其原因可能係重金屬吸收過多造成生物毒害性。Evangelou et al. (2007) 研究菸草吸收重金屬之效益，結果顯示添加過量的 EDD_s 對於菸草具有其毒害性。實驗使用螯合劑濃度為 1.5-50 mmol/kg，惟當添加 3.125 mmol EDD_s 時之可發現其對植體之毒害現象。在低濃度組土壤實驗中，添加 EDD_s 對於植物吸收重金屬 Cu 具成效，且重金屬主要累積於根部，EDD_s 及 EDTA (濃度均 1.5 mmol/kg) 添加對於植體 Cu 之吸收量可提升 7 倍及 12 倍，但對 Cd 則無顯著提升。對於受多種重金屬污染之土壤，添加螯合劑並非能提升植物吸收重金屬，添加螯合劑 EDD_s 及 EDTA 對重金屬 Cu 有良好之累積效果，對 Cd 卻無顯著之提升。EDD_s 是屬於易生物分解螯合劑，有學者研究指出 EDDS 於土壤半衰期為 2.5 天，即殘存於土壤中的 EDD_s 將隨時間而迅速減少 (Luo et al., 2005)。多種螯合劑混合添加相較於單一使用 EDTA 及 EDD_s 效果佳，且具提升植生復育之功能，亦可減少萃取出之重金屬滲入深層土壤或地下水層，避免二次污染及污染擴大。

3.6植物生長激素的應用

在以往添加螯合劑的植生復育中，有文獻指出螯合劑 (如 EDTA、EDD_s 等) 可增加重金屬於土壤之生物有效性，然而其所促使之高土壤重金屬移動性反而可能使植體之生長受到阻礙，進而可能導致植生復育效益減低 (Bruno-Fernando et al., 2007)。因此，如何使植體能夠有效生長，以達到長期植生復育之目的則為一重要議題。植物激素廣泛用於協助植物生長並增進植物植體之生物質量 (Tassi et al., 2008)，因此若整合生物激素與螯合劑應用於強化植生復育受重金屬污染土壤應具有良好成效。一般而言植物生物激素可分為生長素 (例如 Indole-3-acetic acid, IAA、Indole-3-butyric acid, IBA 等)、吉貝素 (文獻指出約有 70 幾種，其中最常見者為 Gibberellic acid, GA₃)、細胞分裂素 (cytokinins, CK) 等。Liphadzi et al. (2006) 將向日葵植栽受中度及高度重金屬污染之土壤，結果顯示於中度污染之土壤加入 IAA 可以有效提高植體根部之生物質量，但於高污染之土壤則無改變，其進一步指出 IAA 可減低重金屬對於植體之危害。針對常見之 IAA、GA₃ 與 CK，將其相關特性整理於表 1。López et al. (2005) 以水耕實驗探討 IAA 與 EDTA 對 *Medicago sativa* 吸收重金屬 Pb 之影響，研究結果指出當結合 100 μM IAA/0.2 mM EDTA 可有效提升植體葉部重金屬 Pb 之累積量 (分別為控制組以及僅添加 EDTA 者的 28 及 6 倍)。而 Liu et al. (2007) 以探討整合 IAA 與 EDTA 對提升東南景天(*Sedum alfredii* Hance) 攝取重金屬 Pb 之研究，結果顯示 IAA 與 EDTA 之協同作用 (synergistic effect) 可有效提升 Pb 之攝取以及植體內部之傳輸。此外，Israr et al. (2008) 亦指出 100 μM IAA 可提升 *Sesbania drummondii* 地上部位重金屬 Pb 之累積，高於控制組之 6 倍，且結合 EDTA 可再進一步提高地上部位對 Pb 之累積 (約 10 倍)。Fässler et al. (2010) 結合 IAA 與 EDD_s，探討其減低重金屬 Pb 及 Zn 對向日葵毒性之研究，結果顯示 IAA 可有效減低重金屬 Pb 及 Zn 對植體之毒害 (例如減低其幼芽及根部之乾重、根部長度、根部體積及表面積等)，且 EDD_s 可增進植體之萃取成效。Hadi et al. (2010) 研究指出藉由噴灑 GA₃ 與 IAA 於 *Zea mays* L. 葉部可有效提升植體累積重金屬 Pb 之能力。此外，結合 GA₃ 或 IAA 與 EDTA 可以有效提升植體累積重金屬之能力。且 GA₃ 對於提升植體重金屬 Pb 之傳輸作用較 IAA 為佳。亦有學者利用整合 CK 與 EDTA 促進植生復育法處理受重金屬 Pb 與 Zn 污染之廢棄場址，其使用之植物為向日葵 (*Helianthus annuus*)。其研究結果指出整合 EDTA 與 CK 有效增進植體吸收重金屬 Pb 及 Zn 之效率。其指出，CK 可有助於植生復育提升植體生物質量、金屬於地上部位之累積以及植體之蒸散作用 (Tassi et al., 2008)。

土壤整治

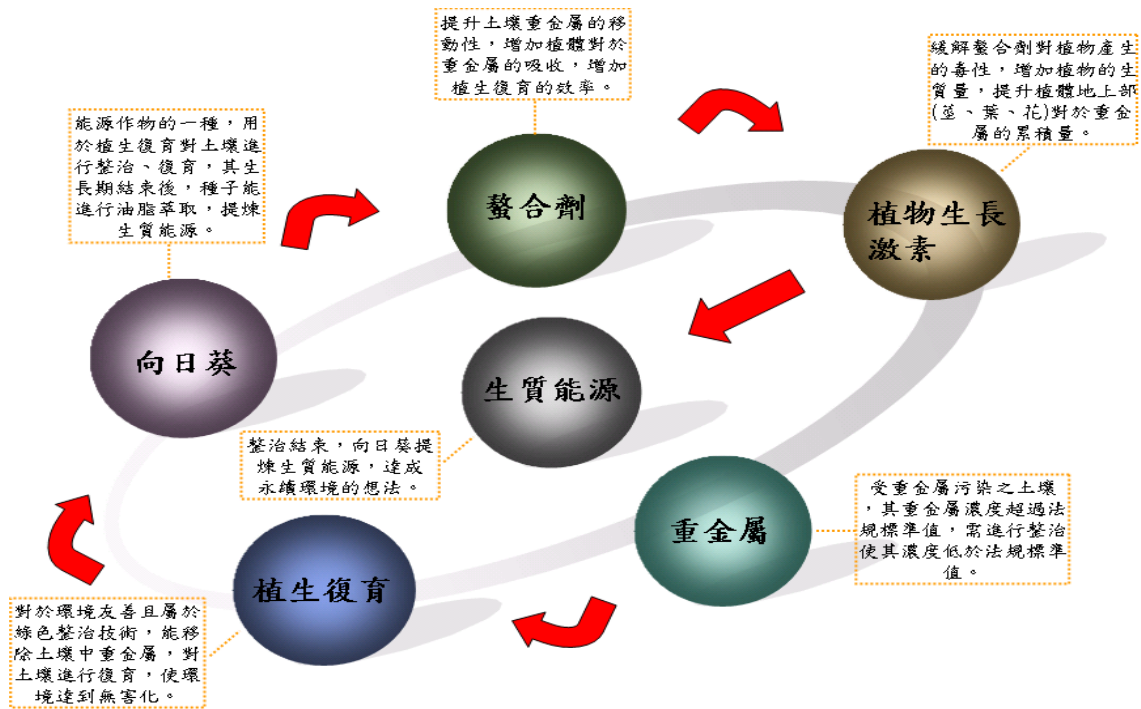


圖 3.計畫概念示意圖

3.7國內植生復育研究之回顧

國內目前僅有極少數植生復育之試驗於污染現地進行，多數之研究仍為實驗室階段，在植生復育研究的污染物種類方面以重金屬較多，有機污染物則較少。陳等人(2006)於中部多種重金屬污染區進行植生復育大面積試驗，利用現地小面積篩選試驗，由中部花卉市場常見之 33 種植物中篩選出 12 種植物，進行兩次之大面積試驗(總面積 1.3 公頃，每種植物各種植 0.1 公頃)，以評估不同植物對重金屬之累積能力及植生復育之可行性。試驗結果顯示，在此銅-鉻-鎳-鋅污染土壤中面積種植約一個月後，不同植物根部對重金屬之累積濃度高於地上部，與種植前之植物比較，植物累積之重金屬濃度及對重金屬之總移除量皆呈現增加之趨勢，12 種植物對於不同重金屬之累積能力亦不相同。若以理想條件及試驗條件估算，以植生復育技術將此場址現有土壤重金屬濃度降至土壤污染監測基準以下，所需之時間約需 4-70 年，由於土地不再休耕，且在此復育期間由水稻改為種植花卉植物，可以達到增加農民之收益、減少水資源浪費及土地再利用之目的，此研究結果也顯示植生復育重金屬污染土壤之可行性，但仍須注意農民之種植意願、種植技術、雜草控制、植物殘枝分佈及植物銷售等問題。

第四章 研究方法與過程

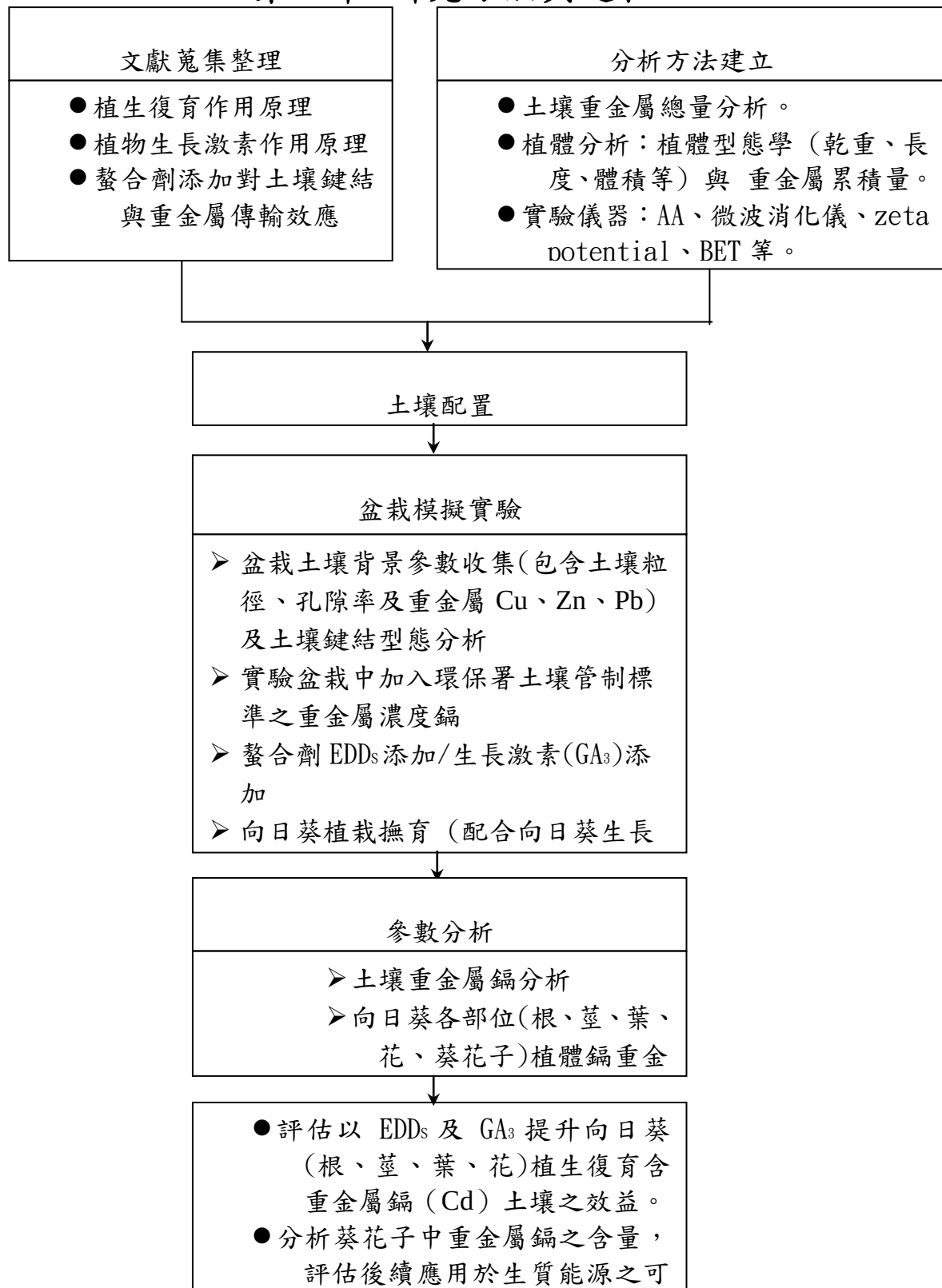


圖 4. 研究總流程圖

土壤整治

(1)向日葵植體培養

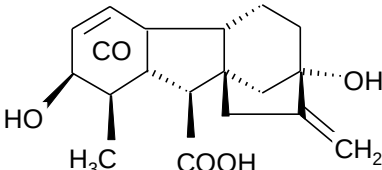
本研究所使用之向日葵係來自於普遍市售之向日葵幼株，品種為太陽向日葵，先利用市售培養土進行培養，培養過程光照採用 16 h/8 h day/night cycle，溫度約控制於 25 °C，預期可使植物之生長年齡相當。培養 2-3 週後，選擇大小相近之植株移植欲實驗場地中。

(2)植體基本參數分析

進行向日葵植體根部相關型態參數包含根長度、重量等進行分析，並進一步探討其與植體重金屬累積之相關性。此外，植體之乾重 (dry biomass) 則將植體分為根、莖、葉及花後，以 104 °C 烘乾後降至室溫再進行秤重。

(3)生長激素物化特性介紹

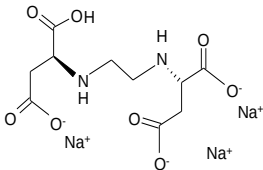
表 6. GA₃ 相關物化特性暨其應用表

GA ₃ ^b	
結構式	
全名	Gibberellic acid
CAS No.	77-06-5
中文名	勃激素 A3
稱	
分子式	C ₁₉ H ₂₂ O ₆
分子量	346.4
(g/mol)	
溶解度	5 g/L (20 °C)
(H ₂ O)	
logKow	0.24
農業用途	為一植物生長激素，能促進莖、葉的生長，提早抽苔生花，促進種子、塊根、塊莖發芽，刺激果實生長，增加結果率或形成無籽果實等。

^a 資料來源：http://en.wikipedia.org/wiki/Indole-3-acetic_acid

^b 資料來源：¹http://en.wikipedia.org/wiki/Gibberellic_acid; ² 行政院農委會動植物防疫檢疫局提供之物質安全資料表 (<http://pesticide.baphiq.gov.tw/ghs/link.aspx>)

表 7. 本研究所探討之 EDD_s 之相關資料

EDD _s	
結構式	
全名	ethylenediaminedisuccinic acid
中文名稱	二乙胺琥珀酸
分子式	C ₁₀ H ₁₃ N ₂ Na ₃ O ₈
分子量 (g/mol)	292.24
pka	2.4*, 3.9, 6.8, 9.8
logk (with Pb ²⁺)	12.88
Biodegradation	t _{1/2} = 4.1-8.5 day ^a

* 資料來源：<http://en.wikipedia.org/wiki/EDDS>；

** 資料來源：http://en.wikipedia.org/wiki/Ethylenediaminetetraacetic_acid；

^a 資料來源：Wang et al. (2007)；

^b 資料來源：Oviedo and Rodríguez (2003)；

土壤整治

(4)盆栽實驗

1.執行方法

(1)以市售培養土進行向日葵幼株培養，俟較為穩定後移植於實驗盆栽中。

(2)向日葵撫育（預定每批次實驗2個月一組【配合向日葵生長期】），並於實驗期間中加入土壤管制標準之重金屬鎘至實驗盆栽中並添加生物可分解之螯合劑 EDD₅ 及固定噴灑生長激素 GA₃，記錄重金屬鎘整合螯合劑與生長激素之向日葵生長情形。

(3)每批次兩個月收割時進行土壤及植體各部位分析植體各部位對土壤重金屬鎘吸收量情形。

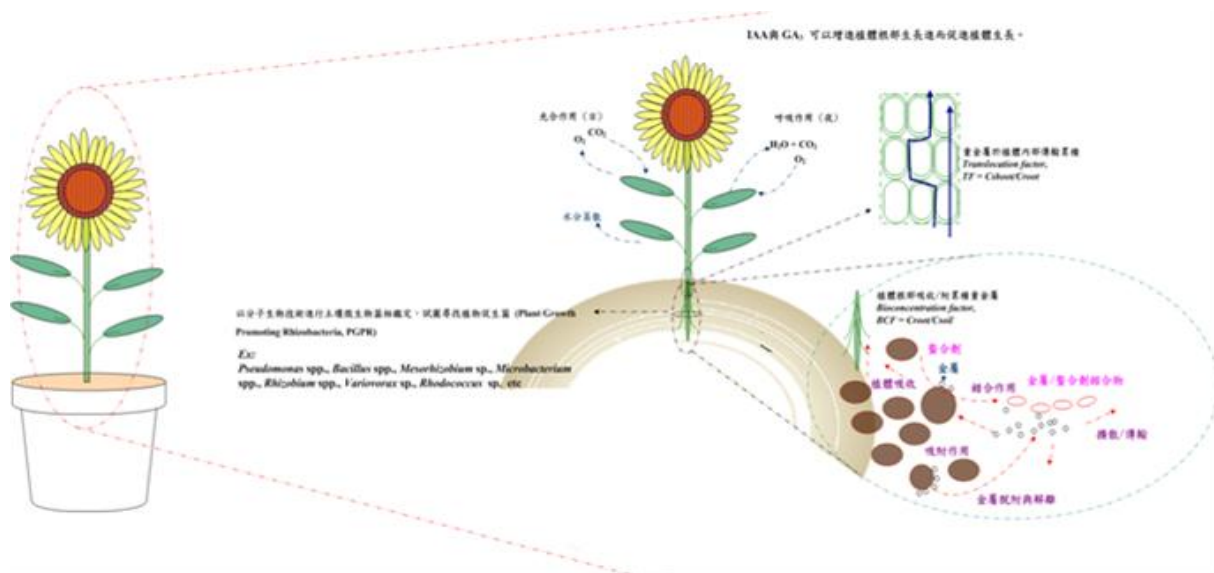


圖 5. 盆栽實驗示意圖

表 8. 實驗土壤背景參數表

土壤參數	低有機質土壤
pH (H ₂ O)	6.58 ± 0.44
有機物 (%)	4.16 ± 0.27 %
粘粒 (%) < 2μm	15.19 %
粉粒 (%) 2-50μm	78.69 %
砂粒 (%) 50-2000μm	6.12 %

表 9. 盆栽實驗操作條件表

參數項目	實驗條件
植栽	向日葵 (<i>Helianthus annuus</i> L.)
重金屬	Cd
GA ₃ 濃度	10 ⁻⁸ mol/kg
EDD ₅ 濃度	500 μmol/kg
pH 值	7
光照	16 h/8 h day/night cycle
操作時間	30 天

土壤整治

(5)土壤重金屬配製

將土壤進行初步篩選，把枯枝、枯葉及石塊撿拾，將篩選過後之土壤加入適量之去離子水攪拌使其呈黏稠狀後，再以配製所需之重金屬濃度，本實驗鎘配製濃度為 20 mg/kg，為法規標準，將配置完成之土壤攪拌均勻置於戶外等其乾燥。於乾燥期間需不停攪拌，使其重金屬與土壤混拌均勻。為使所添加之重金屬與土壤達到穩定及平衡狀態，因此人為添加重金屬之土壤需進行 3 次乾濕的交替孵育(陳,2005)。

(6)螯合劑之添加

於重金屬添加完成後，使其乾燥再添加 500 $\mu\text{mol/kg}$ 的 EDD_s，將配置完成之土壤攪拌均勻置於戶外等其乾燥。

(7)植物生長激素之噴灑

配製 10^{-8} mol/kg 的 GA₃，於早晚澆花時來回三次噴灑在植體上。

(8)重金屬鎘分析

A.土壤總量分析:

將土壤以烘箱 104°C 烘乾，經 20 號篩過篩後，取過篩後之土壤 0.5 g 以濃硝酸及濃鹽酸體積分別為 3.0 mL 及 9.0 mL 混合利用微波消化儀(MarsX microwave) 進行微波消化，再以 AA 分析。

B.土壤重金屬鍵結型態分析:

土壤以烘箱 104°C 烘乾，經 20 號篩過篩後，取過篩後之土壤 2.5 g 加入萃取液 50 mL 震盪 16 小時後，以離心方式達固液分離取上層液，再以 AA 分析。離心後土壤再加入下階段萃取試劑，再進行實驗。萃取液分別為 1.0M KNO₃、0.5M KF、0.1M Na₄P₂O₇、0.1M EDTA、HNO₃ 分別代表可置換態、吸附態、與有機物鍵結、與碳酸鹽鍵結、金屬硫化物鍵結等型態，其中硫化物鍵結係以微波方式進行萃取。

C. 植體重金屬鎘分析

將區分為根、莖、葉、花之向日葵植體以烘箱 104°C 烘乾 24 小時，再將其研磨細碎，取 0.5 g 植體添加濃硝酸及濃鹽酸體積分別為 5.5 mL 及 0.5 mL，以微波消化儀進行萃取後，再以 AA 分析。微波輔助消化之參數設定如表 9 所示。

表 10. 微波消化儀參數設定

	Power (W)	Ramp (min)	Temperature (°C)	Hold time (min)
土壤全量萃取	1600 (75%)	15:00	200	15:00
序列萃取(末段)	1600 (75%)	15:00	200	15:00
植體萃取	1600 (75%)	15:00	200	15:00

* () 內數值表示微波消化儀之實際輸出功率；此外，當其升溫至 200 °C，維持 15 min，便開始降溫。

D. 數據分析

以土壤重金屬濃度及植體累積濃度，評析植體傳輸係數（Translocation factor，簡稱 TF， $TF = C_{shoots}/C_{roots}$ ）、生物累積常數（Bioaccumulation factor，簡稱 BCF， $BCF = C_{roots}/C_{soil}$ ）及植生復育有效係數（Phytoremediation efficiency factor，簡稱 PEF， $PEF = C_{shoots}/C_{soil}$ ）；其中 C 代表濃度（mg/kg）。針對兩組以上數據可藉由 ANOVA 單因子變異數分析，比較數據間是否有顯著性之差異，當分析結果 p 值小於 0.05，即表示處理間具有顯著性差異。

(9) 研究預期效益及績效指標 (Key Performance Indicator, KPI)

(一) 預期完成之工作項目及成果：

1. 藉由盆栽實驗評估植物生長激素、可生物分解之螯合劑與重金屬鎘對向日葵植體生長情形之影響暨植體各部位重金屬鎘吸收效益與傳輸，並評估未來應用於實場之相關操作參數。

土壤整治

- 2.在應用未來實場中將會先確認實場重金屬污染濃度後，進行是否整合傳統物理整治後再進行植生復育整治去達到最大效益。

(二) 本研究預期之貢獻:

- 1.進行整合植物生長激素與螯合劑，促進向日葵植生復育法處理，受重金屬污染土壤效益分析暨處理機制探討，可做為後續實場整治之依據。
- 2.評估利用能源作物向日葵，作為復育植栽選擇之處理效能暨後續再利用之效益。

(三) 對於參與之工作人員，預期可獲之訓練:

1. 分析儀器操作 (AA 、微波消化儀、 BET 等)。
2. 土壤與植體重金屬傳輸累積機制探討。
3. 植生復育之基礎理論與實際應用研析。
4. 論文撰寫。

(10) 研究進度及預期完成之工作項目（甘特圖）

年月 工作項目	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	備 註
相關文獻、資料之搜集與彙整													
植生復育模擬評估實驗 (添加螯合劑與生長激素)													
評估整合植物生長激素與螯合劑對土壤及植體的影響													
報告撰寫													
工作進度估計百分比 (累積數)	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	95%	100%	5%	10%	

土壤整治

預定查核點	期中	1.第一期向日葵植體重金屬分析 2.土壤中重金屬分析
	期末	植生復育模擬評估實驗總成果實驗報告

(11) 執行現況

本次實驗只單純探討螯合劑及植物生長激素對整體植生復育之效益，但於執行過程中因考慮更多因素如 pH、ORP、照度及日照長短等因素，於未來將針對此部分進行探討。

另於植體再利用方面，也將針對整治後之植體進行 TCLP (毒性溶出試驗)，評估其作為生質柴油之可行性，於油質萃取之部分也須尋找適合之操作參數，後續也將針對所得之油品進行成分分析。

第五章 結果與討論

5.1 盆栽實驗不同操作條件下之差異

藉由之前研究所得到的整合型植生復育最佳操作參數，植物生長激素 GA_3 及螯合劑 EDDs，分別在濃度為 10^{-8} mol/kg 及 500 μ mol/kg 下，能有效提升植株生長高度與重金屬從植物根部轉移至地上部的累積量，因此本實驗採用此最佳參作參數進行探討。

模擬受重金屬鎘污染之盆栽實驗，共分為四組，分別為添加重金屬 Cd 組、添加 Cd + GA_3 組、添加 Cd + EDDs 組、添加 Cd + GA_3 + EDDs 組，分別觀察其第 1 天、第 15 天、第 30 天之生長情形，並於收割後評估其植體重金屬累積量及吸收量。

5.2 不同操作條件下向日葵生長情形之探討

圖 5.~圖 8.為在重金屬鎘土壤下生長的向日葵，由左至右分別為向日葵生長第 1 天、第 15 天、第 30 天生長情形，圖 9.為 30 天後向日葵生長高度之箱型圖，先由植株高度來看如下表 16. 單純添加重金屬組平均增加 18.9 cm、Cd+ GA_3 組平均增加 19.5cm、Cd+EDDs 組平均增加 19cm、Cd+ GA_3 +EDDs 組平均增加 20.5cm、Control 組平均增加 19.1cm。

可看出 30 天後添加 Cd 組之生長高度較 Control 組來得低，Cd 為植物體內非必須的重金屬，植物一旦吸收過量的非必須重金屬，便會造成毒害，其原因主要是高濃度重金屬會刺激細胞，產生活化氧族及自由基，使得細胞處於氧化逆境，進而抑制植物的生長；添加 Cd + GA_3 組及添加 Cd + GA_3 + EDDs 組之生長高度較高，添加 Cd + EDDs 組生長高度則較矮，證明生長激素 GA_3 的添加，可以改善 EDDs 對於向日葵生長情形之影響；雖然添加重金屬 Cd 組之生長高度最矮，但其中位數與添加 Cd + EDDs 組相同，且其生長高度較為一致，不像添加 Cd + EDDs 組參差不齊，由此可看出添加螯合劑 EDDs 對於向日葵生長高度是有影響的。

土壤整治



第1天

第 15 天

第 30 天

圖 6.盆栽實驗 Cd 組前後生長差異圖



第1天

第 15 天

第 30 天

圖 7.盆栽實驗 Cd + GA₃ 組前後生長差異圖



第1天

第 15 天

第 30 天

圖 8.盆栽實驗 Cd + EDDs 組前後生長差異圖



第1天

第 15 天

第 30 天

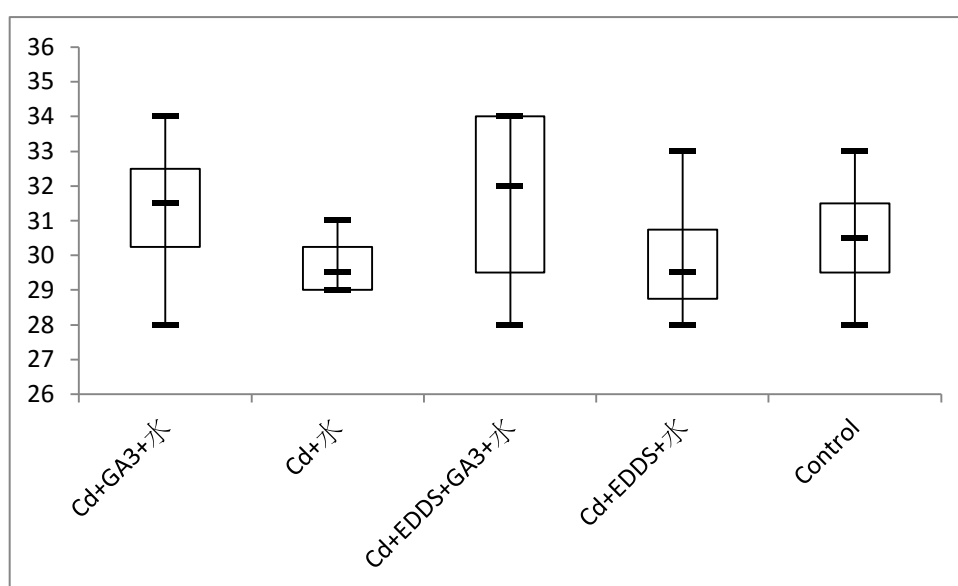
圖 9.盆栽實驗 Cd + GA₃ + EDDs 組前後生長差異圖

圖 10.盆栽實驗第 30 天各組向日葵生長情形之箱型圖

表 11. Cd 組向日葵生長情形

高度(cm) 植株	第 1 天	第 15 天	第 30 天
第 1 株	10.8	25.0	29.0
第 2 株	12.0	27.0	30.0
第 3 株	10.2	25.0	31.0

土壤整治

第 4 株	10.6	24.0	29.0
-------	------	------	------

表 12. Cd+GA₃ 組向日葵生長情形

高度(cm) 植株	第 1 天	第 15 天	第 30 天
第 1 株	12.7	26.0	31.0
第 2 株	12.0	29.0	32.0
第 3 株	10.9	25.0	34.0
第 4 株	11.5	26.0	28.0

表 13. Cd+EDD₅ 組向日葵生長情形

高度(cm) 植株	第 1 天	第 15 天	第 30 天
第 1 株	11.9	29.0	29.0
第 2 株	11.0	24.0	30.0
第 3 株	10.6	20.0	33.3
第 4 株	10.3	27.0	28.0

表 14. Cd+GA₃+EDD₅ 組向日葵生長情形

高度(cm) 植株	第 1 天	第 15 天	第 30 天
第 1 株	12.0	25.0	30.0
第 2 株	11.7	24.0	34.0

第 3 株	10.0	24.0	34.0
第 4 株	10.5	25.0	28.0

表 15. Control 組向日葵生長情形

高度(cm) 植株	第 1 天	第 15 天	第 30 天
第 1 株	10.7	26.0	30.0
第 2 株	12.0	28.0	31.0
第 3 株	11.2	27.0	33.0
第 4 株	11.6	26.0	28.0

表 16. 各組向日葵生長情形

高度(cm) 組別	第 1 天	第 15 天	第 30 天
Cd	10.90±0.77	25.25±1.26	29.75±0.96
Cd+GA ₃	11.78±0.76	26.5±1.73	31.25±2.50
Cd+EDD ₅	10.95±0.70	25.00±3.92	30.08±2.30
Cd+GA ₃ + EDD ₅	11.05±0.95	24.50±0.58	31.50±3.00
Control	11.38±0.56	26.75±0.96	30.50±2.08

表 17. 盆栽實驗各組平均生長高度

	平均生長高度
Cd	18.9cm

土壤整治

Cd+GA ₃	19.5 cm
Cd+EDD ₅	19.0cm
Cd+GA ₃ + EDD ₅	20.5cm
Control	19.1cm

5.2.1不同條件下對於重金屬在向日葵體內吸收量與累積量差異之探討

繼植體生長高度後，接下來評估在螯合劑及植物生長激素添加的狀況下，向日葵對於吸收土壤重金屬於植體根部和地上部(莖、葉、花及種子)累積濃度差異分析。

由下圖 11 及表 18 為盆栽試驗在添加螯合劑及植物生長激素下，各組根部重金屬累積濃度，單純添加重金屬 Cd 組根部重金屬累積濃度為 2.298 ± 0.147 mg/kg、Cd + GA₃ 組根部重金屬累積濃度為 1.987 ± 0.163 mg/kg、Cd+GA₃+EDD₅ 組根部重金屬累積濃度為 3.072 ± 0.915 mg/kg、Cd+EDD₅ 組根部重金屬累積濃度為 4.551 ± 0.425 mg/kg，統計分析顯示各組間植物根部累積濃度具有顯著差異 ($p < 0.05$)，表示添加螯合劑及植物生長激素對於植物根部累積濃度確實有影響，由實驗結果可看出有添加 EDD₅ 之組別根部重金屬累積濃度較高，由此可知螯合劑確實有助於提高重金屬於土壤中的流動性，增加植物根部對於重金屬的累積量。

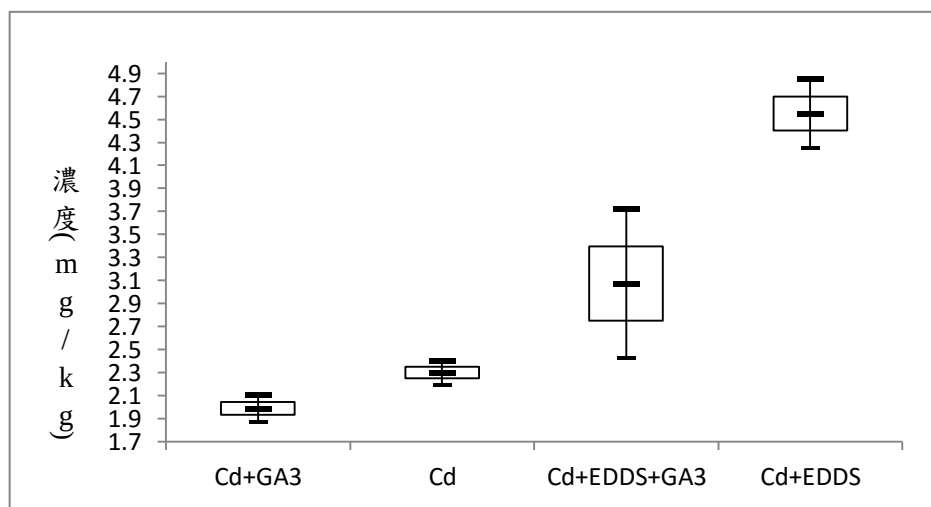


圖 11. 各組根部重金屬累積濃度

表 18. 各組根部重金屬累積濃度

	根
Cd + GA ₃	1.987±0.163 mg/kg
Cd	2.298±0.147 mg/kg
Cd+GA ₃ +EDD ₅	3.072±0.915 mg/kg
Cd+EDD ₅	4.551±0.425 mg/kg

觀察完根部後，接下來則是地上部（莖、葉、花及種子）在添加植物生長激素及螯合劑下，各部位之植體重金屬累積濃度。

由圖 12~15 及表 19~22 所得之結果，與 Zhou et al. (2007) 文獻中所提植物生長激素有助於提升植體生長速率，增加植物根部對於土壤樣分的吸收，並經由木質部傳送至植體地上部累積，刺激植體地上部的生長。觀察 Cd 組及 Cd+GA₃ 組，發現有添加植物生長激素組植體地上部重金屬累積濃度，明顯較 Cd 組高，由此可知添加植物生長激素確實能提升植生復育之效果，亦能緩解螯合劑對植體產生的毒害；比較添加螯合劑之組別及未添加螯合劑之組別，發現有添加螯合劑組植體地上部重金屬累積濃度，明顯較其他兩組高，由此可知螯合劑能增加土壤中重金屬的流動性，及提升整體植生復育之效果。從表 23 可以看出添加螯合劑之組別整體重金屬累積量，較其他未添加螯合劑組別高，且經由統計分析發現添加螯合劑對於植體重金屬累積量有顯著之提升（ $p < 0.05$ ），表示螯合劑的添加確實有助於提升整體植生復育之效果。

土壤整治

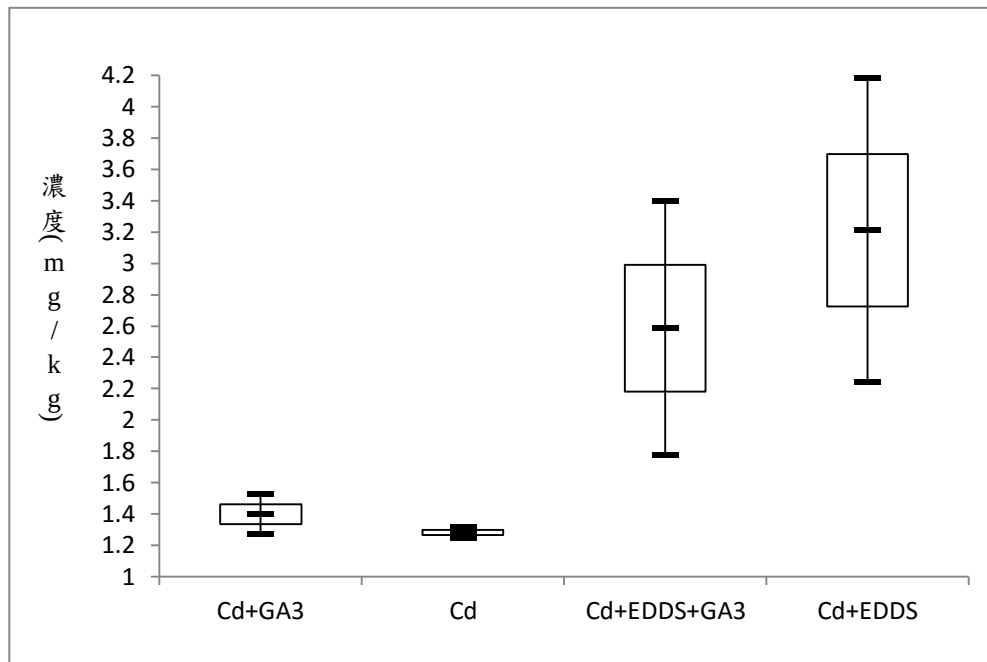


圖 12. 各組莖部重金屬累積濃度

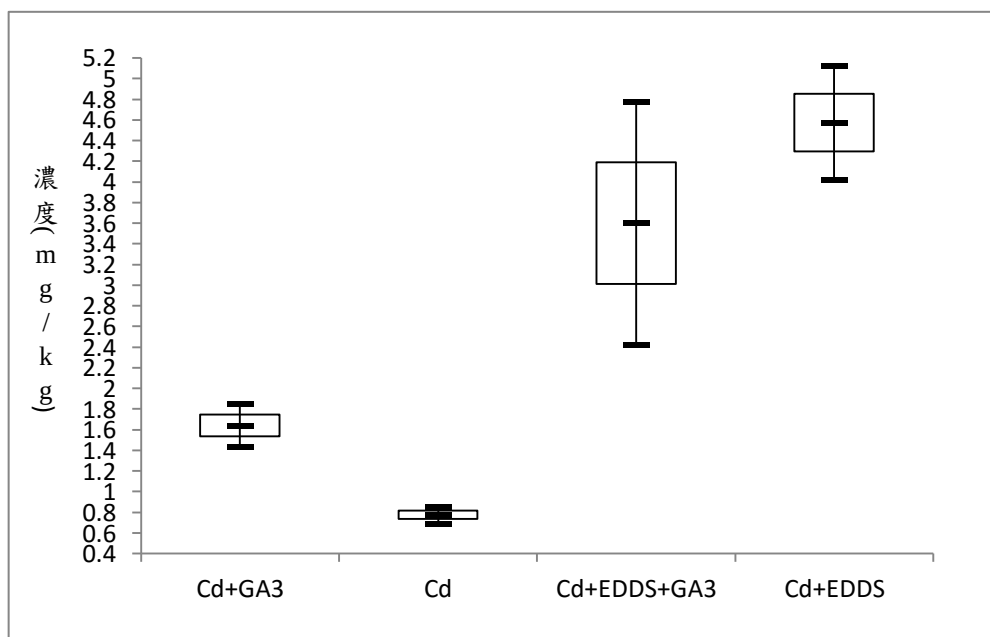


圖 13. 各組葉部重金屬累積濃度

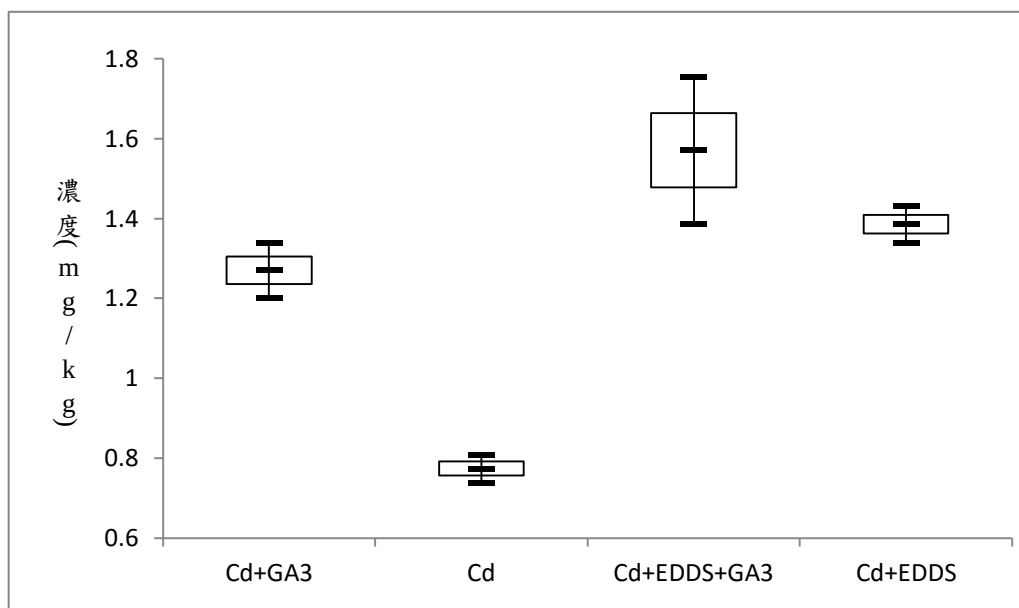


圖 14. 各組花部重金屬累積濃度

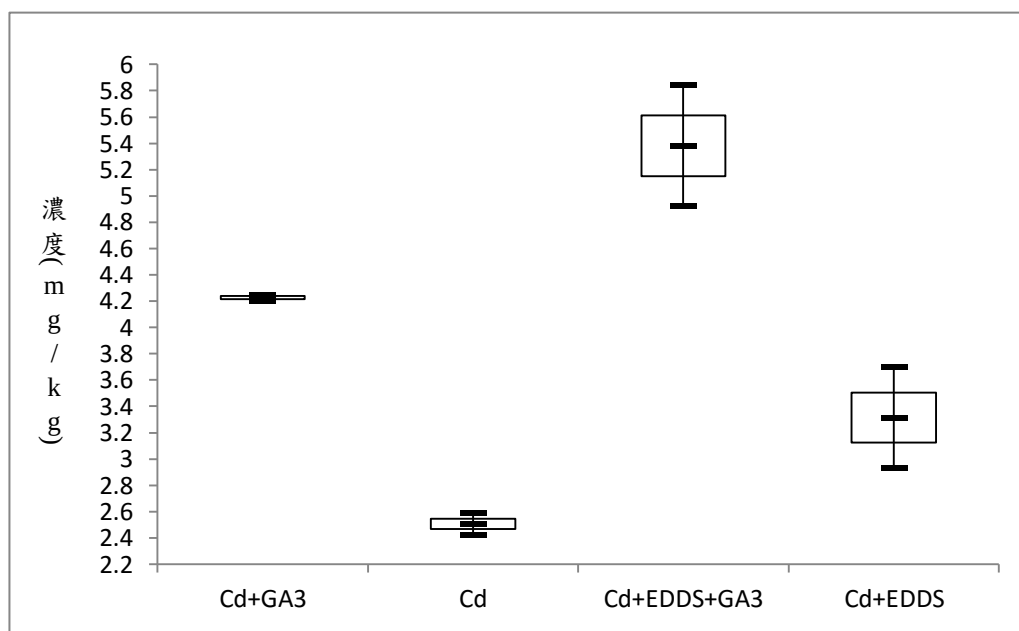


圖 15. 各組種子重金屬累積濃度

土壤整治

表 19. 各組莖部重金屬累積濃度

	莖
Cd + GA ₃	1.398±0.180 mg/kg
Cd	1.282±0.049 mg/kg
Cd+GA ₃ +EDD ₅	2.587±1.143 mg/kg
Cd+EDD ₅	3.211±1.372 mg/kg

表 20. 各組葉部重金屬累積濃度

	葉
Cd + GA ₃	1.640±0.294 mg/kg
Cd	0.774±0.114 mg/kg
Cd+GA ₃ +EDD ₅	3.604±1.666 mg/kg
Cd+EDD ₅	4.574±0.784 mg/kg

表 21. 各組花部重金屬累積濃度

	花
Cd + GA ₃	1.270±0.098 mg/kg
Cd	0.774±0.049 mg/kg
Cd+GA ₃ +EDD ₅	1.571±0.261 mg/kg
Cd+EDD ₅	1.386±0.065 mg/kg

表 22. 各組種子重金屬累積濃度

	種子
Cd + GA ₃	4.227±0.033 mg/kg

Cd	2.506±0.144 mg/kg
Cd+GA ₃ +EDD ₅	5.380±0.653 mg/kg
Cd+EDD ₅	3.315±0.539 mg/kg

表 23. 各組重金屬累積量總量

	重金屬累積總量
Cd + GA ₃	10.522±0.212 mg/kg
Cd	7.635±0.147 mg/kg
Cd+GA ₃ +EDD ₅	16.216±1.503 mg/kg
Cd+EDD ₅	17.037±0.637 mg/kg

5.2.2 不同操作參數對於向日葵植生復育效率之探討

為了評估植生復育技術應用於受重金屬污染土壤之整治效益，除從植體總重金屬累積濃度來看，還需證明螯合劑 (EDD₅) 與添加植物生長激素 (GA₃) 對於整體植生復育的幫助，則利用植物生物濃縮係數 (Bioconcentration factor, BCF)、植物傳輸係數 (Translocation factor, TF) 及植生復育有效係數 (phytoremediation efficiency factor, PEF) 來評估。

首先是 BCF 值，如下表 23，主要是比較植體根部重金屬累積量及土壤重金屬含量，BCF 值越高表示植物對於土壤重金屬吸收效益越佳，故我們從單純添加重金屬的組別與添加螯合劑 (EDD₅) 組別之 BCF 值進行比較。其結果在重金屬鎘下，單純添加重金屬組 BCF 值為 0.186 低於添加螯合劑 (EDD₅) 組 0.819 與添加。說

土壤整治

明了添加螯合劑 (EDD_S) 增加土壤重金屬流動性，進而提升植物對重金屬的吸收量與根部重金屬累積量。

接著 TF 值也就是將植體莖葉部份及根系部分重金屬含量做比較，探討其植體重金屬由根至地上部（莖、葉、花、種子）表面可收割部分之傳輸性，TF 值越大表示植物對於重金屬由根至莖、葉、花到種子傳輸能力越佳，由於植物生長激素功用為促進植物地上部的生長，代表植體會將許多養份從根部傳送至植物地上部進行累積，故我們為了確認植物生長激素使用下過程中是否也會使重金屬隨著養份一同傳送至地上部累積。由下表 23 分別為添加螯合劑 (EDD_S) 組與添加植物生長激素 (GA₃) + 螯合劑 (EDD_S) 組進行比較。在重金屬鎘下，其添加螯合劑 (EDD_S) 組 TF 值為 2.746 低於添加植物生長激素 (GA₃) + 螯合劑 (EDD_S) 組之 4.279。代表添加植物生長激素，不僅可以增加植物的生長，其重金屬也能隨著養份經由木質部向地上部累積，提升整體植物對於重金屬的累積量。而添加螯合劑雖仍增加土壤中重金屬的流動性，提升整體植生復育之效果，但對於重金屬向上傳輸之能力較植物生長激素差。

王等人 (2009) 探討重金屬對波斯菊累積濃度之影響，發現波斯菊對鎘之 BCF 範圍為 1.0~2.1，而本研究盆栽實驗所得之各組 BCF 值則為 0.8~1.6，比較二者可得，波斯菊對於土壤中鎘吸收效益較向日葵佳，接著比較二者 TF 值，波斯菊 TF 值範圍為 0.6~0.8，向日葵之 TF 則介於 4.2~2.3 之間，故由此可知波斯菊雖然對於土壤中鎘之吸收能力較強，但對於重金屬至根部向上傳輸能力則較差。

最後則是 PEF 值，也就是整體植生復育效果的比較，如下表 24，在重金屬鎘污染下，添加螯合劑之 (EDD_S) 組別 PEF 值為 4.218 是高於其他組別的，故選擇螯合劑 (EDD_S) 使用於重金屬鎘污染下進行植生復育較為合適。

表 24. 各組 BCF、TF 及 PEF 值

	BCF	TF	PEF
Cd + GA ₃	0.210	4.295	0.902
Cd	0.186	2.322	0.432
Cd+GA ₃ +EDD _S	0.819	4.279	3.505
Cd+EDD _S	1.536	2.746	4.218

5.3 植生復育之可行性評估

於我國根據土壤及地下水污染整治法，農地一旦經環保署公告列管控制場址，則需進行休耕，若以國內常用之翻轉稀釋、土壤酸洗及排土客土等技術進行整治所需費用龐大。針對此些場址多為農地以風險為考量之綠色整治技術 (Green remediation)，為未來可行之策略。向日葵植生控制 (phytoattenuation)，在有效之必要風險評估後之阻絕及監測規劃，應可取代目前常用之土壤整治技術。植生復育於實場之應用主要用於後期的修飾步驟 (polishing step)，可接續在前期高濃度處理單元後面，或是單獨應用於整治低濃度污染場址，植生復育適用於低至中度重金屬污染場址，適合植物生長之環境，且其可同時處理受重金屬及有機物污染之土壤，由於植生復育為現地處理之技術，因此可避免因開挖所造成的地質及結構的破壞，不會影響土壤的肥沃力，民眾接受度也較高。

目前植生復育法已漸趨普遍，於技術使用上也已成熟穩定，現今植生復育法也已突破傳統以超量攝取植物之方法，結合螯合劑及植物生長激素，提升植生復

土壤整治

育之效率，對於植體後續之處理，也不限於以往焚化或掩埋，而是針對植體進行再利用，例如：生質能源之開發或作為生物吸附劑等用途，預期於未來將可透過植生復育法進行污染整治，同時也可將植體進行再利用，創造新產值。

第六章 結論

經由盆栽實驗，得知螯合劑的添加有助於提升重金屬在土壤中的流動性，增加植體對重金屬的吸收，但會減緩植體的生長，故添加植物生長激素以緩解螯合劑對植體產生之毒害，且植物生長激素可提升重金屬至根部向上傳輸之能力，經由盆栽實驗之操作亦證明，整合型植生復育之效果較傳統植生復育佳。

比較國內之文獻發現，向日葵對於土壤中鎘金屬之吸收能力較波斯菊差，但波斯菊之各組 TF 值皆小於 1，而 TF 值越大表示植物對於重金屬由根至莖、葉、花到種子傳輸能力越佳，波斯菊之 TF 值皆小於 1，說明其所吸收之重金屬大部分累積於根部，並無向上傳輸，而本實驗向日葵鎘植生復育中，所得之 BCF 值皆大於 1，由此可看出向日葵對於鎘金屬之向上傳輸能力較波斯菊佳。

第七章 參考文獻

1. Abou-Shanab R, A.I., Delorme, T.A., Angle, J.S., Chaney, R.L., Ghanem, K., Moawad, H., Ghazlan, H.A. (2003) Phenotypic characterization of microbes in the rhizosphere of *Alyssum murale*. *Int. J. Pharm.* 5, 367-379.
2. Atlas, S.M. (1981) Microbial degradation of petroleum hydrocarbons: an environment perspective. *Microbiological Review* 45(1), 180-209.
3. Baker, A.J.M., Brooks, R.R. (1989) Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements—a review of their distribution, ecology and phytochemistry. *Biorecovery* 1(2), 81–126.
4. Barcelo, J., Poschenrieder, C. (2003) Phytoremediation: principles and perspectives. *Contrib. Mineral. Petrol.* 2, 333–344.
5. Bastianoni, S., Coppola, F., Tiezzi, E., Colacevich, A., Borghini, F., Focardi, S. (2008) Biofuel potential production from the Orbetello lagoon macroalgae: A comparison with sunflower feedstock. *Biomass and Bioenergy* 32(7), 619-628.
6. Belimov, A.A., Hontzeas, N., Safronva, V.I., Demchinskaya, S.V., Piluzza, G., Bullitta, S., Glick, B.R. (2005) Cadmium-tolerant plant growth-promoting bacteria associated with the roots of Indian mustard (*Brassica juncea* L. Czern). *Soil Biology and Biochemistry* 37(2), 241-250.
7. Brown, S.L., Chaney, R.L., Angle, J.S., Baker, A.J.M. (1994) Phytoremediation potential of *Thlaspi caerulescens* and bladder campion for zinc- and cadmium-contaminated soil. *Journal of Environment Quality* 23(6), 1151– 1157.
8. Bruno-Fernando, F.P., Cleide-Aparecida, A., Solange, R., Ana-Maria, M.A.L., Antonio, P.G. (2007) Pb-phytoextraction by maize in a Pb-EDTA treated soil. *Scien-tia Agricola* 64(1), 52-60.
9. Cempel, M., Nikel, G. (2006) Nickel: a review of its sources and environmental toxicology. *Polish J. of Environ. Stud.* 15, 375–382.
10. Chehregani, A., Malayeri, B.E. (2007) Removal of heavy metals by native accumulator plants. *Int. J. Agrci. Biol.* 9, 462–465.

- 11.Dabonne, S., Koffi, B., Kouadio, E., Koffi, A.,Due, E., Kouame, L. (2010)
Traditional utensils: Potential sources of poisoning by heavy metals. *Br. J. Pharm. Toxicol.* 1, 90–92.
- 12.Davis, T.A., Volesky, B., Mucci, A. (2003) A review of the biochemistry of heavy metal biosorption by brown algae. *Water Research* 37(18), 4311-4330.
- 13.Delaune, R.D., Gamgrell, R.P., Pardue, J.H., Patrick, W.H.J. (1990) Fate of petroleum hydrocarbons and toxic organics in Louisiana coastal environment. *Estuaries and Coasts* 13(1), 72-80.
- 14.Evangelou, M.W.H., Bauer, U., Ebel, M., and Schaeffer, A. (2007) The influence of EDDS and EDTA on the uptake of heavy metals of Cd and Cu from soil with to-bacco *Nicotiana tabacum*. *Chemosphere* 68(2), 345-353.
15. Evangelou, M.W.H., Ebel, M. and Schaeffer, A. (2007) Chelate assisted phytoextraction of heavy metals from soil. Effect, mechanism, toxicity, and fate of chelating agents. *Chemosphere*. 68, 989-1003.
- 16.Fässler, E., Evangelou, M.W., Robinson, B.H., Schulin, R. (2010) Effect of in-dole-3-acetic acid (IAA) on sunflower growth and heavy metal uptake in combi-nation with ethylene diamine disuccinic acid (EDDS). *Chemosphere* 80(8), 901-907.
- 17.Garbisu, C., Alkorta, I. (2001) Phytoextraction: a cost-effective plant-based technology for the removal of metals from the environment. *Bioresource Technology* 77(3), 229-236.
- 18.Glick, B., karaturović, D., Newell, P. (1995) A novel procedure for rapid isolation of plant growth promoting *Pseudomonas*. *Canadian Journal of Microbiology* 41, 533-536.
- 19.Glick, B., Patten, C., Jolguin, G., Penrose, D. (1999) Biochemical and genetic mechanisms used by plant growth promoting bacteria. Imperial College Press, London, England.

土壤整治

- 20.Hadi, F., Bano, A., Fuller, M.P. (2010) The improved phytoremediation of lead (Pb) and the growth of maize (*Zea mays* L.): the role of plant growth regulators (GA3 and IAA) and EDTA alone and in combinations. *Chemosphere* 80(4), 457-462.
- 21.Huang Z, Pan X-D, Wu P-G, Han J-L, Chen Q (2013) Health Risk Assessment of Heavy Metals in Rice to the Population in Zhejiang, China. *PLoS ONE* 8(9):e75007. doi:10.1371/journal.pone.0075007
22. Iqbal, M.P. (2012) Lead pollution—a risk factor for cardiovascular disease in Asian developing countries. *Pak. J. Pharm. Sci.* 25, 289–294.
- 21.Koo, S.Y., Cho, K.S. (2009) Isolation and characterization of a plant growth-promoting rhizobacterium, *Serratia* sp. SY5. *Journal of Microbiology and Biotechnology* 19(11), 1431-1438.
- 22.Liu, D., Li, T., Islam, E., Jin, X., Mahmood, Q. (2007) Enhanced lead uptake by hyperaccumulator plant species *Sedum alfredii* Hance using EDTA and IAA. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicity* 78(3-4), 280-283.
- 23.Lucy, M., Reed, E., Glick, B.R. (2004) Applications of free living plant growth-promoting rhizobacteria. *Antonie Van Leeuwenhoek* 86(1), 1-25.
- 24.Luo, C.L., Shen, Z.G., Li, X.D. (2005) Enhanced phytoextraction of Cu, Pb, Zn and Cd with EDTA and EDDS. *Chemosphere* 59(1), 1-11.
- 25.López, M.L., Peralta-Videa, J.R., Benitez, T., Gardea-Torresdey, J.L. (2005) Enhancement of lead uptake by alfalfa (*Medicago sativa*) using EDTA and a plant growth promoter. *Chemosphere* 64(4), 595-598.
- 26.Salt, D.E., Smith, R.D., Raskin, I. (1998) Phytoremediation. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* 49, 643-668.
- 27.Tassi, E., Pouget, J., Petruzzelli, G., Barbafieri, M. (2008) The effects of exogenous plant growth regulators in the phytoextraction of heavy metals. *Chemosphere* 71(1), 66-73.

28. 陳尊賢，李達源，賴朝明，鍾仁賜，陳建得，莊愷瑋，陳柏青，賴鴻裕。(2006)。彰化縣農地污染控制場址現地植生復育重金屬污染土壤之可行性評估計畫。行政院環境保護署委託計畫 (計畫編號：EPA-94-GA12-03-A212)。期末報告。408 頁。
29. 古森文 (2008) 生質能源作物之開發與潛力，農業生技產業季刊，46-53