

行政院環境保護署

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

應用電動力技術整治雲林虎尾含鎘及鉛 污染土壤之研究

期末報告（定稿）

主辦單位



行政院環境保護署

計畫執行單位：朝陽科技大學／環境工程與管理系

計畫主持人：章日行 教授

計畫執行期間：103 年 12 月 01 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	<input checked="" type="checkbox"/> 研究計畫 <input type="checkbox"/> 模場試驗
計畫主持人	章日行	研究類別	<input type="checkbox"/> 調查 <input checked="" type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 評估 <input type="checkbox"/> 底泥
計畫名稱	應用電動力技術整治雲林虎尾含鎘及鉛污染土壤之研究		
專案連絡人	沈善鎰	連絡專線	0931-670517
政策性審查意見		計畫單位回覆	
<p>1. 延續性計畫，但看不到其創新性及持續發展之必要性。</p> <p>2. 「消耗性器材及主要費用」項下「電腦耗材費」應於雜項費用列支並依計畫需求覈實編列。</p> <p>3. 車輛租賃費用超出編列基準。(9 人座以下每小時 300 元為限)</p> <p>4. 依中華民國 103 年 7 月 7 日修正之國內出差旅費報支要點第五項規定「駕駛自用汽(機)車出差者，其交通費得按同路段公民營客運汽車最高等級之票價報支。但不得另行報支油料、過路(橋)、停車等費用；如發生事故，不得以公款支付修理費用及對第三者之損害賠償。」</p>		<p>感謝委員寶貴意見。</p> <p>1. 在過去所執行的計畫中，本團隊研發的 CEEK 電動力技術係僅針對單一污染重金屬物種進行整治處理，有其良好之處理效率與成效。而實際污染農地常含有多種重金屬，且農地土壤特性的不同也影響電動力法的處理效能。在污染來源不同且含兩種以上重金屬污染物的情況下，其整治效率與上述因子的關聯性仍有待研究釐清，此外，本計畫冀透過此計畫能獲得元素金屬電鍍之最佳操作參數，以達到污染物資源化之目標。本處理技術在實務上仍有進步空間，並需要持續發展才能進入市場。</p> <p>2. 有關電腦耗材費的編列已改列於雜項費用中，且已將預計使用到之商品編列於此項目中。</p> <p>3. 此部分之金額已根據編列基準進行調整，符合計畫所規範之費用。</p> <p>4. 此部分之編列已符合規定。</p>	

技術性審查意見	計畫單位回覆
<p>委員 1</p> <p>1. 土基會已補助主持人執行三個年度以電動力法整治鉛污染之農地的計畫，今年申請之計畫只是擬將此技術應用於鎘及鉛污染之土壤。計畫內容並未說明除了探討之重金屬增加鎘外，和以往之計畫有何不同之處。</p> <p>2. 若只是增加應用於處理同時含鎘及鉛之污染土壤，計畫內容並無新意。</p>	<p>感謝委員寶貴意見。</p> <p>1. 本計畫內容與往年不同之處，除了污染重金屬種類增加外，也採用不同地區的污染土壤，此因，在土壤性質不同及污染來源差異的情況下，過去 CEEK 技術雖對於僅受鉛污染之土壤有良好的處理經驗，但於多種污染物及不同土壤特性下，污染物間的競爭性和電化學反應理論仍須探討，且過去成果顯示污染土壤重金屬的垂直移動造成回收率偏低，因此，電動力法於實務應用上仍有研究及強化之需要；本計畫重點也著重於 CEEK 模場改良以提高回收率及污染金屬電鍍效率的成效上，企圖持續提高本技術的實用性。</p> <p>2. 本計畫除了針對鎘及鉛污染土壤進行整治以達法規標準外，另外於陰極電鍍回收污染金屬元素、提升系統電流效率、降低操作成本及建構一操作液自動添加系統皆為本計畫之研究重點，這些改進攸關於操作成本及處理效益，對於未來市場化有所助益。</p>
<p>委員 2</p> <p>1. 本計畫以建置雲林虎尾受鎘及鉛污染土壤之實驗室處理模場，並評估電動力技術對於鎘及鉛現場土壤的處理效益。本計畫亦將建構一操作液自動添加系統，能保持操作液的循環量外，亦可降低人力之操作。計畫中亦將尋求最佳操作電壓及電流，提升本技術的電流效率，以降低使用電量及操作成本。</p> <p>2. 主持人曾參與土壤整治及電動力研究計畫，其經驗可勝任本計畫之執行。本計畫可發展本土之土壤整治技術，對未來重金屬污染場址之整治應有貢獻，研究方法具可行性。</p> <p>3. 所測試之電動力技術在國內已有與多試驗，亦已建立初步流程。而各場址地質環境不同，現地電動力技術是否具有實驗場址之成效需再評估。</p>	<p>感謝委員寶貴意見。</p> <p>1. 此為本計畫主要之研究內容及目標。</p> <p>2. 感謝委員肯定。</p> <p>3. 委員提到“現地電動力技術是否具有實驗場址之成效需再評估”正是本團隊長期研究的重點。本研究團隊過去利用現地電動力技術整治台中烏日和南投地區受鉛污染場址</p>

	<p>已有良好成效，操作成本雖較其他物化處理技術低，但仍遠高於目前整治採用的翻堆法。此外，本計畫研發之 CEEK 電動力法不同於其他電動力技術，許多他人的研究成果並不是用於本技術，因此，需要試驗多種重金屬及不同土壤，以徹底理解本 CEEK 技術的整治效益。</p>
<p>委員 3</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 本案擬應用電動力技術整治受 Cd 及 Pb 污染之農地，探討其移除及陰極電鍍回收之能力，係為實際受重金屬污染農地土壤之整治研究，具研發價值。 2. 本案主持人在此領域已進行數年之探討，並曾以 CEEK 技術處理鉛污染農地土壤，已有近 70% 移除效率。此案以 Cd 及 Pb 為主並同時監測 Zn 之移除效率及條件，惟僅以縮小尺寸 26cm*11cm*11cm 槽體進行實驗，應至少使用 5.0m*1.0m*0.2m 之模槽試作，以提高成果之可用性。 	<p>感謝委員寶貴意見。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝委員肯定。 2. 過去成果顯示污染土壤重金屬的垂直移動造成回收率偏低，也就是電滲透流無法完全將重金屬移除至陰極槽，部分重金屬移動至深層土壤，因此，本計畫於實驗室規模下以 26 cm *11 cm* 11 cm 之槽體進行測試，透過測試多種透水材料，找到最佳的污染水平移動的操作條件，因此，本次計畫一方面能降低試驗設備之成本，一方面能快速取得試驗成果。未來可將試驗範圍予以擴大，提高現地電動力法的可行性。
<p>委員 4</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 申請人過去已執行 2 年，此技術整治效果不彰，有許多因素未克服，最重要是無法達土壤污染管制目標值。 2. 土壤特性、污染濃度及整治目標未列為研究重點，在計畫中均未提出，降低濃度不應為考量效益之目標。 	<p>感謝委員寶貴意見。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 過去本團隊使用現地規模電動力處理兩地區鉛污染農地土壤，經過 2 個月處理，平均土壤鉛濃度可從 7,190 mg kg⁻¹ 降至約 2,050 mg kg⁻¹，平均去除鉛污染效率達 72%；以及由 7,246 mg kg⁻¹ 降至約 2,612 mg kg⁻¹，平均去除效率約可達 64%。其兩地區鉛濃度已接近管制標準 2,000 mg kg⁻¹，且土壤中的污染物呈現持續下降的趨勢，相信若延長處理時間便能符合管制標準值。 2. 關於本計畫試驗之土壤特性和重金屬污染濃度已在修正計畫書中補充說明，且將整治重點增列於研究目標中。

<p>3. 加入EDTA後在土壤中如何反應？超音波震盪可行嗎？</p> <p>4. 請評估經濟效益。</p>	<p>3. 計畫中所添加之 EDTA 屬螯合劑，此 EDTA 會與金屬污染物進行螯合作用而鍵結，污染物將從吸附的土壤表面中移除，再透過電動力法之電透滲流及離子遷移的機制將污染物移出土壤，此 EDTA 主要功用已於修正計畫書中補充說明。根據之前的研究顯示，超音波震盪能提升陰極電鍍的效率，因此本計畫初步設計以此設備來增進金屬元素的回收，未來實際應用若限於系統設備的影響，則將考慮以其他方式替代。</p> <p>4. 進行經濟效益評估可幫助了解本系統電動力法處理技術處理污染物的可行性與經濟性。然而，因本試驗為實驗室測試階段，其參數設定將隨操作過程變化進行調整，目前此部分估算無法準確評估其經濟效益，相關的操作成本已於修正計畫書中的預期成果中進行估算。</p>
<p>委員 5</p> <p>1. 研究成果對未來實場應用未具體說明，是與既有的系統配合（例如：在主持人已開發完成的系統上再精進？或是建立實場的操作參數？或試驗證主持人已完成技術？）是否需有可靠的 SOP？</p> <p>2. 建議計畫主持人宜多評估本計畫與既有的研究成果間的關係與差異？尤其是實場應用的潛力為何？計畫主持人已執行類似的計畫多年（含科技部與 EPA），建議評估此技術的實場應用性。</p>	<p>感謝委員寶貴意見。</p> <p>1. 此計畫研究成果可提供了解不同質地環境污染土壤之整治效率，其探討之參數及影響因子皆可對未來實場應用有參考的價值，例如當整治兩種以上重金屬污染物之污染場址時，此試驗之最佳操作參數即可作為實場應用之初步設定，也可透過此計畫嘗試尋求最適合之不透水層，以及建構一組操作液自動添加系統，將原本處理系統進一步改良，更符合未來實場應用之方便性。此部分已於修正計畫書中補充說明。</p> <p>2. 本團隊過去 2 年度已針對實場受鉛污染之農地進行整治，其結果顯示對於鉛污染濃度有良好的移除效率，是具有現地處理潛力的技術之一；然而為了使此技術的應用性提升，操作液的損失和陰極電鍍的效率問題仍須克服。本計畫之執行內容預計將原本模場進行改良，降低電解液損失和人為添加的不便。除了欲達到污染物濃度符</p>

<p>3. 主持人已有相關的經驗（部分是實地的模廠，以前的研究是鉛污染場址，本計畫是鎘與鉛污染），既有的模廠經驗如何應用於本計畫？本計畫與既有成果間的關係?...等等，建議說明。</p> <p>4. 預期成果評估與應用建議多加說明。建議以既有的經驗（執行EPA計畫的成果）評估此技術實務應用時的限制因子，本計畫擬克服的項目為何？計畫書中建議具體說明。</p> <p>5. 本技術適用條件與限制條件（例如不同土壤物化的限制？其他離子的干擾?...）建議討論，其驗證方式也建議說明。</p>	<p>合法規標準外，元素金屬的陰極電鍍亦為本研究欲突破的重點，相信於本試驗完成後，對於未來評估此處理技術的實場應用性能有更充足的數據予以佐證。</p> <p>3. 本計畫將過去整治鉛污染的成功經驗，應用整治於含兩種以上重金屬污染農地之土壤，並根據過去執行遇到之問題進而改良電動力系統，以增加本技術的實用性。同時，針對過去試驗所產生的重金屬廢液部分，係以陰極電鍍法處理取代過去的離子交換樹脂法，相信能充分改善含重金屬廢液的後續處理問題及操作成本。此部分於修正計畫書中已補充說明。</p> <p>4. 本計畫之執行重點在於釐清不同土壤性質、污染物種和操作條件對於本系統-循環加強電動力法 CEEK 的效率影響。根據過去執行現地整治所獲得的經驗，處理效率之影響因子包括操作液的循環量受天候影響，以及現地回收金屬於陰極板的電鍍條件仍須進一步釐清；寄望透過本計畫的執行，建構操作液自動添加系統，使本技術更具市場競爭力，並透過陰極電鍍法的測試，以克服金屬回收的問題，使此技術更具資源化之功效。此部分說明已於修正計畫書中補充。</p> <p>5. 根據文獻顯示，電動力法處理技術適用對於重金屬、有機污染物、輻射核種及具毒性陰離子等污染物處理，同時具有可與其他整治方法結合之特性。然而，不同金屬污染物與土壤間的鍵結型態，將顯著影響此系統的處理成效及設定之操作參數；而金屬離子彼此間的競爭作用及經螯合劑反應形成的錯化物的移除，皆須研究釐清之。另外，溫度、電場強度及操作時間等皆會影響此技術操作。此影響因子於修正計畫書中有補充說明。</p>
---	--

綜合性審查意見	計畫單位回覆
<p>1. 原則同意所送計畫，請依審查意見提送修正計畫書。</p> <p>2. 審查結果確認會議意見如下： 說明：已補助此計畫進行三年模場試驗，仍有許多困難點未克服，請依審查意見詳細評估修訂，檢討歷年執行遇到之問題，修正問題且找出正確合適之研究方法。</p>	<p>感謝委員寶貴意見。</p> <p>1. 感謝委員肯定。</p> <p>2. 此修正計畫書係根據審查委員提出之寶貴意見進行修正，從歷年執行計畫遇到之問題為本計畫首要克服的目標，並嘗試透過相對合適的研究方法進行測試，以獲得最佳處理效率並作為未來持續研究的依據。</p>
委員複審意見	計畫單位回覆
<p>1. 建議在既有的研究成果上，討論此技術的實場應用條件。</p>	<p>感謝委員寶貴意見。</p> <p>1. 本團隊過去使用 CEEK 對於實場受鉛污染的土壤整治有良好的處理成效，除了有效降低重金屬濃度外，更能維持操作系統之酸鹼值、導電度和溫度的變化，降低對原始土壤的破壞。為了使此技術能廣泛應用於不同污染的實場整治，不同質地環境之污染土壤和污染物的種類多寡，其整治效率和相關因子的關聯性仍需釐清；同時，從過去研究顯示，操作液的損失和污染土壤重金屬的垂直移動導致回收率不佳的情況仍須深入研究予以改善。冀望透過本計畫之執行，重新模場的改良設計及透過陰極電鍍法的操作使用，改善過去研究所遇到之困難，並透過最佳參數的獲得，提高本技術未來實場應用的實用性。</p>
本署複審意見	計畫單位回覆
<p>1. 〔貴重儀器使用含維護費〕項下之編列項目未於備註欄中說明使用費計算公式。</p> <p>2. 〔雜項費用〕項下之電腦耗材費-電腦螢幕非本署補助項目，原則不得編列。</p> <p>3. 〔雜項費用〕項下之團險費用請補充說明用途，並於核銷時檢具受保人員清冊、出差報告表等相關佐證資料。</p>	<p>感謝委員寶貴意見。</p> <p>1. 有關〔貴重儀器使用含維護費〕的編列項目，已根據科技部貴儀分析費用進行編列，並於備註欄中補充說明。</p> <p>2. 已將雜項費用中的電腦耗材費-電腦螢幕的編列部分刪除。</p> <p>3. 考量本計畫執行主要於實驗室中完成，因此團險費用的編列部分已從項目中刪除。</p>

行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究及模場試驗專案」

期中報告初審意見對照表

計畫年度	104 年度	計畫類型	<input checked="" type="checkbox"/> 研究計畫 <input type="checkbox"/> 現地試驗
計畫類別	<input type="checkbox"/> 調查 <input checked="" type="checkbox"/> 整治復育 <input type="checkbox"/> 評估 <input type="checkbox"/> 底泥	主持人：章日行 NO：28	
計畫名稱	應用電動力技術整治雲林虎尾含鎘及鉛污染土壤之研究		
委員 1 審查意見		計畫單位回覆	
1. 已達預定之工作進度與目標。		感謝委員寶貴意見。	
2. 測試之土壤為磨碎、過篩及再裝填至處理系統中，其為destructive sample，若採用non-destructive土壤樣品，其處理效果是否會一樣，建議也能一試。		1. 感謝委員肯定。	
		2. 目前系統處理之污染土壤係經過前處理後才進行試驗，未來計畫執行中會直接將採集回來的污染土壤於最佳條件下進行一組測試，並將試驗結果呈現於期末報告中，探討兩者之差異，以驗證本處理系統的實用性。	
委員 2 審查意見		計畫單位回覆	
1. 本計畫運用循環加強式電動力法整治重金屬污染農地，並回收移除後之重金屬。本計畫將CEEK 縮小規模建置於實驗室中，整治同時含鎘及鉛污染農地之現場土壤，進一步探討相關處理效率。		感謝委員寶貴意見。	
2. 主要成果符合計畫書之內容，目前進度並無落後情形。		1. 此為本計畫主要之研究內容及目標。	
3. 本報告文獻收集及相關資料收集完整，成果具相當實用性和應用價值。		2. 感謝委員肯定。	
4. 建議後續工作可補充如何進行實場應用。		3. 感謝委員肯定。	
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。		4. 本研究後續之主要工作為不透水夾層的製作及試驗，以獲得最適當之不透水材質及透水係數，再參照之前對於實場處理的成功經驗，提升本系統實場應用的效果。	
		5. 目前期中報告已針對本試驗處理重金屬之成本進行初步估算，待試驗完成不透水夾層的測試後，將再次針對處理重金屬及電鍍成效所耗費之成本進行評估，並與常用之重金屬處理方法如翻土法、客土法、及稀釋法等方法之處理成本進行比較，並呈現於期末報告中。	

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(續前頁)

計畫年度	104 年度	計畫類型	<input checked="" type="checkbox"/> 研究計畫 <input type="checkbox"/> 現地試驗
計畫類別	<input type="checkbox"/> 調查 <input checked="" type="checkbox"/> 整治復育 <input type="checkbox"/> 評估 <input type="checkbox"/> 底泥	主持人：章日行 NO：28	
計畫名稱	應用電動力技術整治雲林虎尾含鎘及鉛污染土壤之研究		
委員 4 審查意見		計畫單位回覆	
1. 已依計畫項目執行。 2. 初步結果顯示污染區土壤Cd（156mg／kg）與鉛2,105mg／kg之回收率分別達85％與70％，請評估其實際之效果，尤其在實場狀況。 3. 已提出後續工作重點。		感謝委員寶貴意見。 1. 感謝委員肯定。 2. 從過去實場應用的處理經驗發現，不透水夾層對於陰極電鍍成效及操作液的散失有明顯影響。透過本年度研究計畫的執行，將不透水夾層的問題予以改善，即能提升未來實場應用的穩定操作，亦能達到陰極電鍍的顯著成效。 3. 感謝委員肯定。	
委員 5 審查意見		計畫單位回覆	
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3.5節簡要說明。 3. 計畫執行進度與預定進度相符，已有初步的成果。 4. 如何量化本計畫的試驗結果？被移除的重金屬回收後的形態與分離方式？建議說明。		感謝委員寶貴意見。 1. 感謝委員肯定。 2. 感謝委員肯定。 3. 感謝委員肯定。 4. 於試驗完成後將進行重金屬污染物移除與消耗電能之成本估算，即可獲得每去除一定程度之重金屬濃度所耗費之時間及操作成本；加上透過操作液和陰極電鍍重金屬濃度的分析結果，可有效掌握重金屬移除之處理機制。當重金屬有效電鍍於陰極電極後，可利用硝酸或硫酸的浸泡將重金屬溶出，以達到分離的成效，而產生之硝酸鉛及硝酸鎘之液體，也可作為後續工業之用途，達到再利用之目的。針對電鍍於陰極之重金屬型態部分，未來將利用能量散步光譜儀(EDS)、X 光繞射分析儀(XRD)及 化學分析電子能譜儀(ESCA)等貴重儀器進行分析檢測，以了解金屬電鍍之結晶型態。	

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(續前頁)

計畫年度	104 年度	計畫類型	<input checked="" type="checkbox"/> 研究計畫 <input type="checkbox"/> 現地試驗
計畫類別	<input type="checkbox"/> 調查 <input checked="" type="checkbox"/> 整治復育 <input type="checkbox"/> 評估 <input type="checkbox"/> 底泥	主持人：章日行 NO：28	
計畫名稱	應用電動力技術整治雲林虎尾含鎘及鉛污染土壤之研究		
委員 5 審查意見		計畫單位回覆	
5. 關鍵性的現地因子為何？建議討論。		5. 根據過去現地處理的具體經驗，影響電動力技術之因子包括土壤性質、操作液的特性、電極種類、電壓強度、不透水夾層及溫度等。然而，於過去研究中已探討不同條件間的差異並得到相關數據成果，而從結果發現，本系統之不透水夾層的影響將是現地處理的主要關鍵因子之一，惟能有效改善此問題的干擾，再透過適當電壓強度之操作下，相信即可廣泛應用於現地處理不同重金屬污染之土壤，以達整治之功效。	
6. 成果具體（專利）。		6. 本技術循環加強式電動力法(CEEK)已證實具有實務的去除功能和有效性，為了將本技術推廣至其他地區，目前已委託冠德國際專利商標事務所進行大陸地區之發明型專利申請，目前為資料送件及審查中階段。	
本署意見		計畫單位回覆	
1. 請檢附缺失項目自評表。		感謝委員寶貴意見。 1. 缺失項目自評表已經於期中報告(修訂版)中檢附。	

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	<input checked="" type="checkbox"/> 研究計畫 <input type="checkbox"/> 現地試驗
計畫類別	<input type="checkbox"/> 調查 <input checked="" type="checkbox"/> 整治復育 <input type="checkbox"/> 評估 <input type="checkbox"/> 底泥	主持人：章日行 NO：28	
計畫名稱	應用電動力技術整治雲林虎尾含鎘及鉛污染土壤之研究		
委員 1 審查意見		計畫單位回覆	
1. 已完成預定之工作項目。 2. 期末報告撰寫完整。		感謝委員寶貴意見。 1. 感謝委員肯定。 2. 感謝委員肯定。	
委員 2 審查意見		計畫單位回覆	
1. 本計畫運用 CEEK 電動力系統整治實際重金屬污染農地，並嘗試回收移除後之重金屬，電動力系統 CEEK 在近實場鉛污染農地規模操作下，已證實具有高去除率及穩定 pH 中性狀態。本電動力系統 CEEK 的操作費用遠低於其他物化技術，僅高於土壤翻堆法，針對不適用重金屬稀釋法的污染場址，本技術具有高應用性。 2. 整體研究成果符合預期。 3. 主要成果符合計畫書內容，進度無落後情形。 4. 計畫執行良好，文獻及方法說明具體詳盡，執行成效佳。		感謝委員寶貴意見。 1. 感謝委員肯定。本 CEEK 技術未來若應用於高濃度重金屬污染或不適用稀釋法之場址時，相信能有效且快速的移除重金屬污染物，並降低本技術之操作成本。 2. 感謝委員肯定。 3. 感謝委員肯定。 4. 感謝委員肯定。	
委員 4 審查意見		計畫單位回覆	
1. 期末報告格式均依規定撰寫，符合規定。 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。本電動力系統 CEEK 經不斷改良下，系統具有簡便、組裝容易、運送輕便及可重複使用性，有利未來推展與實際進行，已提出申請專利。 4. 污染土壤鎘及鉛金屬於電動力系統下，鎘及鉛濃度皆能符合土壤監測標準；鉛濃度更能低於食用作物農地之監測基準。本電動力技術對於鎘及鉛金屬的回收率最高可分別達到 85%和 70%，能有效使金屬電鍍於陰極電極表面上。不織布夾層對於未來現地整治應用提供一個好的選擇，能促使金屬污染物資源化的目標予以落實。		感謝委員寶貴意見。 1. 感謝委員肯定。 2. 感謝委員肯定。 3. 感謝委員肯定。 4. 感謝委員肯定。此為本年度計畫之研究成果，冀望藉此成效應用於實際現地污染整治上，以作為下年度現地污染場址研究之重要依據參考。	

5. 未來可依初步成果應用於污染實場之操作試驗之可行性。	5. 下年度將根據本年度所獲得的相關試驗參數進行實場試驗，提高實場污染整治應用之可行性，並藉此評估本電動力技術 CEEK 實場應用之潛力。
委員 5 審查意見	計畫單位回覆
<p>1. 本研究屬於初期研究階段(雖然已有多年的試驗)，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，本計畫仍未提出實務上具體可行的工程作為 (主要是工程尺度的問題與操作程序的問題)。</p> <p>2. 不織布夾層：為一重要的技術應用，建議進一步研究 (頗有意義的做法)。</p>	<p>感謝委員寶貴意見。</p> <p>1. 過去多年本研究團隊針對烏日及南投受鉛污染之場址進行整治，在不同範圍大小區塊中進行試驗。於重金屬去除效率上已具有一定之移除成效，皆能達到約 70% 去除，已接近管制標準值；然而，過去現地處理試驗結果顯示，污染物垂直移動導致金屬離子滲透至底部，造成操作液的損失，及影響陰極電鍍之效果。本年度計畫目的即是為了改善此問題，並釐清不同地區之土壤性質、污染物種和操作條件對於本技術-循環加強電動力法 CEEK 的效率影響。為了探討各項參數的影響，因此初期試驗將縮小規模於實驗室中建置一組 CEEK 處理系統，待得到本年度相關試驗結果後，再將規模放大應用至實場整治上。根據試驗結果顯示，對於土壤中含有兩種重金屬污染物仍具有相當的去除效果，且經由貴儀分析結果得知，所移除之重金屬大部分電鍍於陰極電極表面；不織布的運用對於實場整治也提供一個選擇，相信對於未來實場運用能顯著提升本技術之應用性。</p> <p>2. 本研究透過不織布夾層的應用，雖然因較慢之電滲透流影響污染物的去除效率，但對於實場應用則可提升金屬離子平行移動至陰極電極上，未來將進一步研究此夾層的影響。</p>

<p>3. 如同期初與其中審查意見：關鍵的限制因子與適用條件為何？建議具體說明(尤其是工程尺度)，如此，本計畫的成果才具應用性（例如：配合水分的監控與自動添加調整系統...等等）。</p> <p>4. 已提出專利申請，極有意義。</p> <p>5. 計畫執行進度與預定進度相符。</p> <p>6. 進度並無落後。</p> <p>7. 執行現況、研究流程及方法說明具體。</p>	<p>3. 根據現地處理的經驗得知，電動力技術之影響因子為土壤性質、操作液的特性、電極種類、電壓強度、不透水夾層及溫度等。過去幾年本團隊執行現地整治時發現，操作液以及現地回收金屬於陰極板的電鍍條件仍須進一步釐清。因此，本系統之不透水夾層的影響是現地處理的主要關鍵因子之一，惟有效改善此問題的干擾，再透過適當電壓強度之操作下，相信即可廣泛應用於現地處理不同重金屬污染之土壤，克服金屬回收的問題，以達整治之功效。透過本年度計畫執行，選擇適當之不透水夾層，相信對於未來實場應用能減少操作液的損失，並提升此技術應用之可行性。</p> <p>4. 感謝委員肯定。目前為送件審查階段，此專利申請有利於未來進一步推廣本技術至其他國家。</p> <p>5. 感謝委員肯定。</p> <p>6. 感謝委員肯定。</p> <p>7. 感謝委員肯定。</p>
本署意見	計畫單位回覆
<p>1. 請檢附缺失項目自評表。</p>	<p>感謝委員寶貴意見。</p> <p>1. 缺失項目自評表已經於期末報告(修訂版)中檢附。</p>

專案基本資料表

專案性質		<input checked="" type="checkbox"/> 實驗性質 <input type="checkbox"/> 非實驗性質		專案類別(單選)		<input checked="" type="checkbox"/> 研究專案 <input type="checkbox"/> 模場試驗		
研究主題		<input type="checkbox"/> 調查 <input checked="" type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 評估 <input type="checkbox"/> 底泥						
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						
專案主持人		章日行		職等／職稱		教授		
協同主持人				職等／職稱				
專案 名稱	中文	應用電動力技術整治雲林虎尾含鎘及鉛污染土壤之研究						
	英文	The study on electrokinetic technique for remediating the Cd and Pb contaminated soil in Huwei, Yunlin						
	關鍵字	電動力技術、鎘污染土壤、鉛污染土壤、土壤整治						
執行期程		自 民 國 1 0 3 年 1 2 月 0 1 日 起 至 民 國 1 0 4 年 1 1 月 3 0 日 止						
專案主持人		姓名：章日行		E-mail： changjh@cyut.edu.tw		專線：04-23323000#4210 手機：0919-968026		
專任助理		姓名：沈善鎰		E-mail： shanyi0226@gmail.com		專線：04-23323000#4592 手機：0931-670517		
經費 分析 表		專 案 預 估 經 費		金 額		編 列 說 明		
		1.	人事費用		414,075		(1~5 項相加之 50% 為限)	
		2.	貴重儀器使用含維護費		10,800		(與計畫實驗相關)	
		3.	消耗性器材與主要費用		396,657		(與計畫主體相關)	
		4.	其它研究相關費用		0		(差旅與租賃費用)	
		5.	雜項費用		12,574		(1~6 項相加之 5% 為限)	
		6.	行政管理費		65,894		(1~5 項相加之 10% 為限)	
		專案計畫申請總金額		900,000				

專案主持人：

日期：104/11/20

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 11 月 20 日

專案性質	<input checked="" type="checkbox"/> 實驗性質 <input type="checkbox"/> 非實驗性質	專案類別	<input checked="" type="checkbox"/> 研究專案 <input type="checkbox"/> 模場試驗
研究主題	<input type="checkbox"/> 調查 <input checked="" type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 評估 <input type="checkbox"/> 底泥		
申請機構系所	朝陽科技大學	計畫主持人	章日行
專案名稱	應用電動力技術整治雲林虎尾含鎘及鉛污染土壤之研究		
專案執行期程	<input type="checkbox"/> 申請階段 <input type="checkbox"/> 期中 <input checked="" type="checkbox"/> 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)研討會論文	1	0	1	100	
	2.國外投稿 (篇數)	(1)期刊論文	1	0	1	100	
		(2)研討會論文					
	3.報告 (篇數)	(1)技術報告	1	0	1	100	
		(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					
		(2)博士	1	1	1	100	
	8.研究團隊 (個數)	(1)跨領域團隊					
		(2)跨國團隊					
		(3)跨機構團隊					
		(4)形成研究中心					
		(5)形成實驗室					
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 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			1	100	
			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)						
6.其他指標 (請自行命名)		(請自填)						

(三) 政策面

項目 \ 目標達成程度			申請預 估數	期中 達成數	期末 達成數	結案 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	2	0	1	100	
		收入(仟元)	100	0	120	100	
	2.諮詢服務	次數					
		收入(仟元)					
B 支 援 合 作	3.協助政府 制定 (件數)	(1)政策					
		(2)法規					
		(3)規範					
		(4)標準					
4.其他指標 (請自行命名)		(請自填)					

三、請依學術成就、技術創新、經濟效益、社會影響等方面，評估研究成果對現況或本署之學術或應用價值。（簡述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性，500 字為限）

本計畫擬運用 CEEK 電動力系統整治實際重金屬污染農地，並嘗試回收移除後之重金屬，其研究成果效益包括：

1. 本實際重金屬污染農地的試驗數據，在國際學術中極為少見，本成果應會獲得國際土壤污染整治學術界的重視，可提升台灣的學術曝光度。
2. 本電動力系統 CEEK 在近實場鉛污染農地規模操作下，已證實具有高去除率及穩定 pH 中性狀態，若能證實有效去除其他種類重金屬，則更提高本 CEEK 技術的實用性。
3. 本電動力系統 CEEK 的操作費用遠低於其他物化技術，僅高於土壤翻堆法，針對不適用重金屬稀釋法的污染場址，本技術具有高應用性。
4. 本計畫擬回收污染土壤移除後之重金屬，成果若符合預期，更提昇本 CEEK 技術的市場性。
5. 依據過去本團隊實場試驗成果，本 CEEK 技術是污染土壤物化整治法的可行技術之一(並已擁有中華民國發明專利)，值得後續推廣至其他亞洲國家。

研究成果中文摘要

循環加強式電動力法(Circulation-Enhanced Electrokinetics, CEEK)對鉛污染物整治已有很好的成效，為了未來能將本技術廣泛應用於各地污染場址，整治並獲得其他重金屬之處理效率有其必要性。透過本研究計畫之執行，若能證實 CEEK 技術可有效去除多種重金屬並達到污染物資源化之目標，則更提高本技術的實用性。本計畫將 CEEK 縮小規模建置於實驗室中，整治同時含鎘及鉛污染農地之現場土壤，進一步探討相關處理效率、問題及成本，並評估本技術對於鎘及鉛現場土壤的處理效益。

本計畫實驗按照計畫書執行內容進行，目前已完成污染土壤的物化特性分析、重金屬的移除效率、陰極電鍍回收、不透水層材料測試及部分中國大陸的專利申請，試驗結果可以歸納如下：

- 本電動力系統 CEEK 經不斷改良下，系統具有簡便、組裝容易、運送輕便及可重複使用性，有利未來推展與實際進行。
- 污染土壤鎘及鉛金屬於電動力系統下，鎘及鉛濃度皆能符合土壤監測標準；鉛濃度更能低於食用作物農地之監測基準。
- 本電動力技術對於鎘及鉛金屬的回收率最高可分別達到 85% 和 70%，能有效使金屬電鍍於陰極電極表面上。
- 不織布夾層對於未來現地整治應用提供一個好的選擇，能促使金屬污染物資源化的目標予以落實。

研究成果英文摘要

The Circulation-Enhanced Electrokinetics (CEEK) effectively remediation the Pb contaminated soil. In order to this technique can be widely used around the contaminated sites, it is necessary for remediating and getting the removal efficiency of various heavy-metal contaminated. In this study, the CEEK was constructed in the laboratory for remediating the Cd and Pb contaminated soil, to further explore the treatment efficiency, problems and operation cost. To obtain the appropriate operational parameters makes the CEEK technique cost-effective.

The execution of experimental program according to the previous plans, the analysis of physical-chemical characterization of soil, removal efficiency of heavy metal, cathode plating recycling, impermeable layer of material testing and apply the patents in mainland China have been obtained. Several conclusions and suggestions can be drawn:

- After continuous improvement, the CEEK system possesses some features such as: more concise, easy construction, easy transport, and reusable. These features are beneficial to promote in the future.
- The concentration of Cd and Pb contaminated soil conform with law standards under the CEEK operation, specially the concentration of Pb less than the standard for monitoring of food crop agricultural land.
- The recovery efficiency of Cd and Pb in the CEEK was about 85% and 70%, respectively. The metal ions could effective plating on the cathode electrode surface.
- In order to obtain the element Cd and Pb, the non-woven can offer a good choice in-site treatment, which to enhance the effectiveness of cathode plating.

目次

第一章、計畫緣起與目的	1
1.1 電動力原理及國內外發展及可行性	3
1.2 模場規模電動力法整治鉛污染農地的試驗成果	6
1.3 近實場電動力法 CEEK 整治鉛污染農地的試驗成果	11
1.4 計畫目的	17
第二章、研究方法及過程	19
2.1 電動力法(CEEK)整治鎘及鉛重金屬模場實驗方法	19
2.2 鉛及鎘重金屬之電鍍效率提升方法	22
2.3 電動力法(CEEK)整治鎘及鉛重金屬實驗室系統組裝	23
2.4 計畫進度與檢核說明	26
第三章、結果與討論	28
3.1 現場污染土壤物化特性及重金屬污染濃度	28
3.2 電動力法(CEEK)整治鎘及鉛重金屬污染土壤試驗成果	29
3.3 本技術專利申請	69
3.4 結論與建議	70
第四章、參考文獻	71

圖次

圖 1.1 電動力法(CEEK)現場不透水夾層施工圖(左)側視圖(右).....	7
圖 1.2 電動力法整治重金屬污染土壤採樣位置示意圖	7
圖 1.3 電動力法(CEEK)現場不透水夾層安裝示意圖	7
圖 1.4 污染土壤 pH 值及導電度隨操作時間變化	8
圖 1.5 電動力法整治鉛污染土壤濃度變化圖	9
圖 1.6 電動力法操作液的鉛濃度變化圖	9
圖 1.7 電動力法系統的電壓及電流變化圖	10
圖 1.8 電動力法系統中操作液溫度變化圖	10
圖 1.9 CEEK 整治鉛污染農地現場安裝示意圖	12
圖 1.10 電動力整治鉛污染農地現場系統圖	13
圖 1.11 污染土壤 pH 及導電度隨操作時間變化圖	14
圖 1.12 電動力法整治鉛污染土壤濃度變化圖	14
圖 1.13 pH 3 及 pH 5 之銅濃度變化圖	15
圖 1.14 pH 7 之銅濃度變化圖	16
圖 2.1 電動力法整治重金屬污染土壤實驗室規模裝置示意圖	20
圖 2.2 雲林虎尾污染場址取回之土壤	24
圖 2.3 污染土壤之實驗模場	24
圖 2.4 電動力系統之電極與多孔夾層(陽極、陰極與 PVC 夾層).....	25
圖 2.5 電動力技術之實驗裝置	25
圖 3.1 電壓梯度 1 V cm^{-1} 之 pH 值變化趨勢圖	31
圖 3.2 電壓梯度 2 V cm^{-1} 之 pH 值變化趨勢圖	31
圖 3.3 電壓梯度 3 V cm^{-1} 之 pH 值變化趨勢圖	32
圖 3.4 電壓梯度 4 V cm^{-1} 之 pH 值變化趨勢圖	32
圖 3.5 電壓梯度 1 V cm^{-1} 之導電度變化趨勢圖	33
圖 3.6 電壓梯度 2 V cm^{-1} 之導電度變化趨勢圖	34
圖 3.7 電壓梯度 3 V cm^{-1} 之導電度變化趨勢圖	34
圖 3.8 電壓梯度 4 V cm^{-1} 之導電度變化趨勢圖	35
圖 3.9 電壓梯度 1 V cm^{-1} 之鎘濃度變化圖	36
圖 3.10 電壓梯度 2 V cm^{-1} 之鎘濃度變化圖	37
圖 3.11 電壓梯度 3 V cm^{-1} 之鎘濃度變化圖	37
圖 3.12 電壓梯度 4 V cm^{-1} 之鎘濃度變化圖	38
圖 3.13 電壓梯度 1 V cm^{-1} 之鉛濃度變化圖	39
圖 3.14 電壓梯度 2 V cm^{-1} 之鉛濃度變化圖	40
圖 3.15 電壓梯度 3 V cm^{-1} 之鉛濃度變化圖	40
圖 3.16 電壓梯度 4 V cm^{-1} 之鉛濃度變化圖	41
圖 3.17 電壓梯度 1 V cm^{-1} 之含水率變化圖	42
圖 3.18 電壓梯度 2 V cm^{-1} 之含水率變化圖	42

圖 3.19 電壓梯度 3 V cm^{-1} 之含水率變化圖	43
圖 3.20 電壓梯度 4 V cm^{-1} 之含水率變化圖	43
圖 3.21 電解液中重金屬濃度之變化	44
圖 3.22 不銹鋼電極使用前之表面形貌圖	46
圖 3.23 不銹鋼電極試驗後之表面形貌圖	46
圖 3.24 不銹鋼電極使用前之元素分析圖	47
圖 3.25 不銹鋼電極試驗後之元素分析圖	47
圖 3.26 不銹鋼電極使用前之 XRD 分析圖	48
圖 3.27 不銹鋼電極試驗後之 XRD 分析圖	48
圖 3.28 不同電壓梯度之電流變化圖	50
圖 3.29 原始土壤之 pH 值變化趨勢圖	52
圖 3.30 原始土壤之導電度變化趨勢圖	52
圖 3.31 原始土壤之鎘濃度變化圖	54
圖 3.32 原始土壤之鉛濃度變化圖	54
圖 3.33 原始土壤之含水率變化圖	55
圖 3.34 原始土壤之電流變化圖	56
圖 3.35 黏土夾層之外觀結構圖	57
圖 3.36 黏土夾層之 pH 值變化趨勢圖	58
圖 3.37 不織布夾層之 pH 值變化趨勢圖	58
圖 3.38 黏土夾層之導電度變化趨勢圖	59
圖 3.39 不織布夾層之導電度變化趨勢圖	59
圖 3.40 黏土夾層之鎘濃度變化圖	61
圖 3.41 不織布夾層之鎘濃度變化圖	61
圖 3.42 黏土夾層之鉛濃度變化圖	62
圖 3.43 不織布夾層之鉛濃度變化圖	62
圖 3.44 黏土夾層之含水率變化圖	63
圖 3.45 不織布夾層之含水率變化圖	64
圖 3.46 黏土夾層之電流變化圖	64
圖 3.47 不織布夾層之電流變化圖	65
圖 3.48 電解液中重金屬濃度之變化-黏土夾層	66
圖 3.49 電解液中重金屬濃度之變化-不織布夾層	67
圖 3.50 陰極板使用後之外貌-黏土夾層	68
圖 3.51 陰極板使用後之外貌-不織布夾層	68
圖 3.52 發明型專利申請流程圖	69

表次

表 1.1 不同金屬與 EDTA 之錯合穩定常數	4
表 2.1 計畫進度與檢核表	26
表 3.1 土壤基本性質分析	28
表 3.2 陰極電鍍金屬之回收率	45
表 3.3 施加不同電壓梯度之總電壓及平均電流	50
表 3.4 不同電壓梯度移除 100 mg kg^{-1} 重金屬所需用電量之費用估算 (元)	50
表 3.5 陰極電鍍金屬之回收率-黏土夾層	67
表 3.6 陰極電鍍金屬之回收率-不織布夾層	67

第一章、計畫緣起與目的

土壤由天然礦物質和有機成份所組成的，提供無數微生物保護和棲息的場所，是植物生長主要的介質，也是農業耕作的基礎，所有人類食品和動物飼料都取決於土壤。當土壤中特定區域受到有害物質的滲透污染，破壞原本土壤品質使它不適合再繼續使用則可稱為土壤污染。其主要因過去環保意識缺乏及處理設施不足等情況下，許多人為產生的廢棄物進入到土壤中導致土壤污染，而污染來源為農業化學品使用、金屬冶煉、生活垃圾的傾倒，以及未經處理的污水和工業廢棄物等。這些未經處理的廢棄物恣意傾倒或掩埋，即造成污染物吸附、滲透及累積於土壤中。當有害物質如有機物、無機物及重金屬經由人類吸入或接觸時，不僅會逐漸危害人體健康，也會造成環境生態的破壞，因此，土壤污染為世界各先進國家主要關注的重要環境問題之一。

在台灣，許多工業廢水中含有大量的重金屬物質，在未經處理或不符合排放標準下任意排放至地表造成土壤污染。重金屬若進入土壤中會長期殘留於土壤，其常見的重金屬污染種類有鎘、鉻、鉛、鎳及砷等。當土壤中含高濃度重金屬時，會使得動植物和微生物的生長受到抑制，土壤肥力無法有效發揮作用，導致作物受到毒害使產量減少或死亡。重金屬污染之土壤直接影響到台灣農業土地的有效使用，會降低微生物於土壤中之分解能力，也會因滲入地層導致地下水污染，或由作物吸收後再經由食物鏈影響到人體健康，產生中毒及各種病變的現象。因此，快速且有效整治重金屬污染農地的方式具有很高研究及應用價值。

對於重金屬污染農地整治方法目前主要採取翻堆及酸洗法，翻堆是將受重金屬污染之表土與深層未受污染的土壤充分混合均勻稀釋，以降低表面整體污染濃度，此方法時間短且費用低，表土中重金屬濃度雖符合標準，但重金屬仍未移出於土壤系統外；而酸洗法是以加入酸的方式造成土壤基質酸化，利用 pH 值下降使重金屬轉變為溶解態進而達到重金屬溶出效果，此方法不僅造成土壤酸化無法使用，產生之酸廢液仍需進行二次處理。上述兩種方法對農地耕種功能會造成相當程度負面影響，更完善的整治方法實有推展的必要。在許多整治技術中，現地處理技術在經濟和對場址低破壞性的考量下，受到很多關注及高度期望。其中，具有現地物化處理技術之電動力法

(Electrokinetics, EK)是一項有潛力的處理方法，其優點包括設備簡易、操作費用低、適用於各種污染土壤（細質砂土、淤泥或黏土等低滲透性之土壤），甚至適用於重金屬、有機污染物、輻射核種及具毒性陰離子等污染物處理，同時具有可與其他整治方法結合之特性，如結合 Fenton、零價鐵金屬及生物性方法等[1-3]，成為一複合且多功能性的處理技術。

本計畫研究團隊於 100~102 年度獲得環保署經費補助整治受鉛污染之農地。於 100 年執行「以模場規模之電動力法及植生技術復育現地鉛污染土壤之研究」計畫；101 年執行「以近實場規模之現地電動力技術整治鉛污染農地之研究」計畫；而 102 年則執行「建構自動化及專利化之實場規模現地電動力系統-應用於整治鉛污染農地」計畫，100 年度以台中縣為主，而 101 年度和 102 年度均以南投縣某鉛污染農地進行電動力法整治試驗。在 100 年度的計畫中，本團隊使用現地規模電動力(CEEK)處理 1.0mL x 1.0mW x 0.2mD 鉛污染農地土壤，經過 2 個月處理，平均土壤鉛濃度可從 7,190 mg kg⁻¹降至約 2,050 mg kg⁻¹，平均去除鉛污染效率約高達 72%。在 101 年度的計畫中，將試驗規模放大至 5.0mL x 1.0mW x 0.2mD 鉛污染農地土壤，經由 2 個月處理，平均土壤鉛濃度可從 7,246 mg kg⁻¹降至約 2,612 mg kg⁻¹，平均去除鉛污染效率約達 64%，其兩地區鉛濃度已接近管制標準值 2,000 mg kg⁻¹，且土壤中的污染物呈現持續下降的趨勢。在 102 年度的計畫中，已建構一組 CEEK 專用的密閉式不透水渠道，克服操作液的循環量受天候影響的問題，同時避免長久操作渠道變形問題；此渠道可於整治後重複再使用，以利未來實際工程上節省初設成本。研究結果顯示，循環加強式電動力法(CEEK)處理鉛污染農地土壤不僅具有相當的整治效率，同時更具有實際的可行性。

過去的研究係針對單一污染物種進行整治處理，有其良好之處理效率與成效，而本計畫之執行重點在於處理不同地區受重金屬污染之土壤，在污染來源不同且含兩種以上重金屬污染物的情況下，其整治效率及關聯性仍有待研究釐清。因此，為了未來能將本技術廣泛應用於各地污染場址，整治並獲得其他重金屬之處理效率有其必要性。由於不同重金屬成份與土壤性質各地差異甚大、電解液的穩定性及污染物電鍍效率方面，電動力法於實務應用上仍有研究及強化之需要；相信透過本研究計畫之執行，若能證實可有效去除

多種重金屬並達到污染物資源化之目標，則更提高本 CEEK 技術的實用性。基於前述理由，本計畫擬「應用電動力技術整治雲林虎尾含鎘及鉛污染土壤之研究」，將本技術 CEEK 縮小規模建置於實驗室中，用於同時整治含鎘及鉛污染農地之現場土壤，進一步探討相關處理效率、問題及成本，同時於計畫期間提出其他國家專利申請，以利未來能進一步推廣本技術至其他國家。

1.1 電動力原理及國內外發展及可行性

對電動力而言，去除污染物主要機制為電滲透流(Electroosmosis)及離子遷移(Ion migration)。電滲透流是在電場作用下，電解質溶液相對於靜止的帶電固體表面之運動現象稱為電滲透流，意即土壤層中滲透之流動；離子遷移為電動力系統中帶電離子在電場作用下，會依據自己本身所帶的電性，與相反電性之陰陽電極相互吸引，其污染物於污泥的孔隙中遷移的現象就稱為離子遷移，藉由以上機制去除土壤中的重金屬污染物。國內外也有許多研究團隊將有機螯合劑導入系統中，例如本系統所添加之 EDTA 螯合劑，能與土壤中重金屬產生錯合作用形成穩定的錯合物，再經由電滲透流或離子遷移機制攜出而達到高去除效率[4,5]，其研究成果相當符合預期成效。利用電動力法整治污染物其研究成果相當符合預期效益，然而，電動力法進行時，除了電滲透流以及離子遷移之外，電極端也會伴隨水的電解反應，陽極氧化產生氫離子及氧氣，陰極還原產生氫氧根離子及氯氣，陽極室操作液因陽極電解水反應而產生酸液，酸經由滲透流進入土壤造成土壤酸化情形。有鑑於此，為有效改善土壤酸化的現象，計畫主持人已經研發一組可控制 pH 於中性環境操作的電動力處理系統-循環加強式電動力法 (Circulation-Enhanced Electrokinetics, CEEK)，且透過不同操作參數的測試下釐清對電滲透流量之影響[6,7]。

為有效使電動力系統於整治復育應用上發揮最大效果，掌握此技術在操作過程中可能影響之因子必須的，其影響因子包括受污染土壤之物化特性及其污染物種類、操作液之特性、電場強度、電極種類、溫度及操作時間等。

1. 土壤物化特性

土壤的物化特性對電動力操作有其影響，當系統通電後在土壤中產生電場，而土壤會因電場作用產生吸附/脫附及氧化/還原等反應。文獻指出，土

壤中碳酸鹽含量高於 35% 時，將阻礙酸鋒之形成，導致電動力處理效率降低；當土壤中石灰質之含量大於 12% 時，金屬與石灰質所產生的沉澱物於 pH 值較高的情形下容易被分解，使處理效率提升[8]；當土壤中的緩衝能力或陽離子交換能力愈大時，將使處理效率受到影響[9]；腐植質及含水矽酸鹽含量較多之土壤，其緩衝能力較強，因此對於金屬離子有較強的鍵結能力，較不易打斷，使系統處理效率降低[10]。

2. 操作液特性

一般而言，系統使用之操作液常被用來作為土壤的清洗溶液，對土壤中的污染物進行沖洗之程序。當所使用的操作液為有機螯合試劑時(如 EDTA)，螯合劑會與土壤顆粒上的金屬接觸，有機螯合試劑會與鍵結力較弱或少量鍵結力較強之金屬錯和；或者溶解含有部分微量金屬之礦物並與游離的金屬錯合；亦或與土壤溶液中之金屬錯合[11]。當系統加入有機螯合試劑處理重金屬時，其複合物之穩定常數愈大，即愈容易形成複合物，如表 1.1 所示。表中顯示其本計畫之污染物種鉛及鎘穩定常數分別為 18.04 和 16.46，容易與 EDTA 形成錯合物。

表 1.1 不同金屬與 EDTA 之錯合穩定常數

金屬離子	穩定常數 (logK)	金屬離子	穩定常數 (logK)
Ag ⁺	7.32	Cd ²⁺	16.46
Ba ²⁺	7.76	Zn ²⁺	16.50
Sr ²⁺	8.63	Pb ²⁺	18.04
Mg ²⁺	8.69	Ni ²⁺	18.62
Ca ²⁺	10.70	Cu ²⁺	18.80
Mn ²⁺	13.79	Hg ²⁺	21.80
Fe ²⁺	14.33	Th ⁴⁺	23.2
Al ³⁺	16.13	Fe ³⁺	25.1
Co ²⁺	16.31	V ³⁺	25.9

*穩定常數測定條件為 20°C、離子強度 0.1 M

3. 電場強度

文獻指出，當所操作之電場強度愈大其電流密度愈大，則電滲透流率相對提高，同時可減少酸鋒由陽極至陰極的時間。

4. 溫度

相較於實驗室，溫度對於現地處理影響較大，因其所提供電流能量較大。在現地處理時，溫度影響可分內部溫度的變化，其為離子傳輸過程中將損失的能量轉換成焦耳熱能，造成溫度上升，其二為外部溫度的影響，如日照等。文獻指出，於恆定 pH 值條件下，探討在 20°C 及 40°C 條件下溫度對離子傳輸之影響，結果顯示溫度升高可使離子遷移速度增加。

國內外對於電動力法去除土壤中重金屬污染物的研究已有多數成果，在國外方面如：Li et al.研究團隊証實電動力法針對 Pb, Cd 和 Cr 在砂質土壤中的移除效率十分良好[12]；Gao et al.針對污泥中多種重金屬污染（Cd、Ni 及 Zn）進行研究[13]；Lu et al.的研究中是針對 Cr 和 Cd 污染的土壤進行整治復育，其結果顯示二種污染物皆獲得很好之處理成效[14]；Zhou et al.的研究中針對含 Cu-Zn 污染物之紅土（red soil）進行處理，經處理後其污染物皆可達 60% 以上去除率且達到當地法規標準[15]；Kin et al.則針對發電廠附近受 Ni 及 Zn 之土壤進行處理[16]；Ryu et al.在電解液的改變和前處理下，以電動力技術整治污染的土壤，其 As、Cu 及 Pb 都有其不錯之處理成效[17]。國內亦有許多有價值的電動力法研究，例如：楊金鐘教授等應用不同酸及萃取劑對鉛污染土壤進行處理[18]；袁菁教授等運用電動力法去除土壤中的砷污染[19]；翁誌煌教授等研究電動力法去除土壤中的六價鉻污染[20]。上述研究以電動力法對不同重金屬之去除效率及去除機制各有其豐碩研究成果，但其試驗樣品大部分為人工配製的污染土壤，面對污染現場的真實土壤及實際應用上，仍有許多待了解與克服的問題存在。

然而，因重金屬成分與土壤性質各地差異極大，不同重金屬以何種鍵結形態存在於土壤中更會直接影響到整體的去除效率。根據 Tessier 等人研究中指出，一般重金屬會以五種鍵結形態存在於土壤中，分別為可交換態、碳酸鹽態、鐵錳氧化態、有機物態及殘留態五種，其中以可交換態吸附能量低、鍵結力弱，即改變水中離子濃度時，此型態金屬可能會有脫附-吸附現象發生，而殘留態則需以強酸破壞礦物晶格構造，否則難以釋出[21,22]。本研究之目標污染物為鎘和鉛，根據文獻指出[17]，鉛較高比例為有機物態（約 60%），其主要特性為重金屬鍵結於生物體、碎屑及覆蓋於礦物顆粒等多樣之有機物質，與有機物進行複合或螯合反應將重金屬累積在生物體內，其他主要特性如下所列：

- 鎘金屬

通常於土壤表層 15 cm 以內進行累積，土壤中的鎘大都以 CdCO_3 、 $\text{Cd}_3(\text{PO}_4)_2$ 和 $\text{Cd}(\text{OH})_2$ 型態存在，鹼性土壤中並以 CdCO_3 為主要。土壤對鎘的吸附率約在 80~85% 之間，而鎘吸附量多寡與土壤中膠體性質有關。

- 鉛金屬

鉛係以 $\text{Pb}(\text{OH})_2$ 、 PbCO_3 和 PbSO_4 固態型式存在於土壤中，而鉛在土壤溶液中其可溶性鉛含量很低，土壤中的鉛遷移性弱。另外，土壤氧化還原電位的升高，使土壤中可溶性鉛與高價鐵、錳氧化物結合，降低鉛的可溶性遷移。另外，當土壤的 pH 值提升，鉛的可溶性和移動性會因此降低，減少植物對鉛的吸收能力；土壤若為酸性情形時，其土壤中固定的鉛，尤其是 PbCO_3 容易釋放出來，使土壤中水溶性鉛含量增加，其可幫助土壤中鉛的移動。

因此，此技術直接整治於本計畫中鎘及鉛污染物時，除可獲得不同質地環境污染土壤之整治效率外，也可同時觀察重金屬的形態和電動力技術處理效率間之影響，以釐清電動力技術處理重金屬物種的主要優勢，其探討之參數及影響因子皆可對未來實場應用有參考的價值。由以上國內外學者研究成果及改良式電動力法的突破，證實電動力法處理技術對於重金屬污染之土壤整治具有實務應用之潛力；同時，本計畫主持人已經建置創新的電動力法並了解電化學反應機制及不同重金屬整治復育等許多研究，累積及提供豐碩的研究成果，並獲得中國民國電動力專利的認證[23]，其結果顯示本技術具有高應用之潛力及價值，成果於下節詳細呈現。

1.2 模場規模電動力法整治鉛污染農地的試驗成果

本研究應用循環加強式電動力法(CEEK)處理受污染之土壤有良好之成效，以下將介紹研究之相關成果。圖 1.1 為 CEEK 模場組裝的上視圖及側視圖，依據設計圖挖掘一環繞區域(1 公尺 x 1 公尺之正方形)的現況，並於溝渠內鋪設不透水布，目標污染物土壤上共計 9 個採樣口(圖 1.2)，於處理一段時間後採樣土壤並進行分析。於此模場設備當中，本團隊特別設計一不透水夾層，如圖 1.3 所呈現。利用一 PP 材質製成的板框，以棉布包覆透水性低的土壤(陶土+農地土壤)，主要功能除了可降低透水性以維持電動力系統長時間操作外，另一方面也能促使電滲透流順利穿過土樣區，同時讓土樣區的電場分佈均勻。



圖 1.1 電動力法(CEEK)現場不透水夾層施工圖(左)側視圖(右)

陰 極 板	7	4	1	陽 極 板
	8	5	2	
	9	6	3	

圖 1.2 電動力法整治重金屬污染土壤採樣位置示意圖

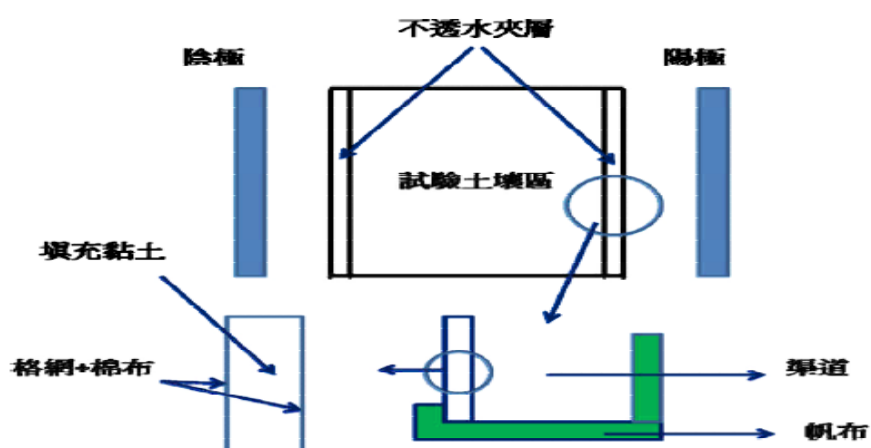


圖 1.3 電動力法(CEEK)現場不透水夾層安裝示意圖

模場電動力法(CEEK)整治鉛污染農地成果

圖 1.4 為鉛污染土壤於模場電動力法整治下，pH 值及導電度隨操作時間之變化圖，本試驗處理時間為 56 天，採集待處理重金屬污染土壤共 9 個點的土壤進行分析。由圖可清楚得知，運用電動力法 CEEK 處理可保持土壤之 pH 值介於 6~7，於中性範圍內，並未有土壤酸化的情形發生。pH 值能保持穩定的主要因為本試驗之操作液的高 pH 緩衝能力，以及設計的循環系統所貢獻的結果，以至於即使放大至模場規模下，亦能保有 pH 值穩定的情況。由於系統操作液主要為 0.01 M 碳酸鈉溶液所配製，少量的酸或鹼的加入對系統整體 pH 值影響不大；加上在電動力法之電解水反應下，雖然陽極端和陰極端分別會產生大量的酸及鹼，但本系統 CEEK 藉由陽極和陰極儲槽的連通，並透過循環輸送泵將其中和。因此，於本系統設計下能使 pH 值穩定保持於中性範圍。至於導電度的變化則呈現穩定的狀態，其主要因有穩定的 pH 值即有穩定的導電度。

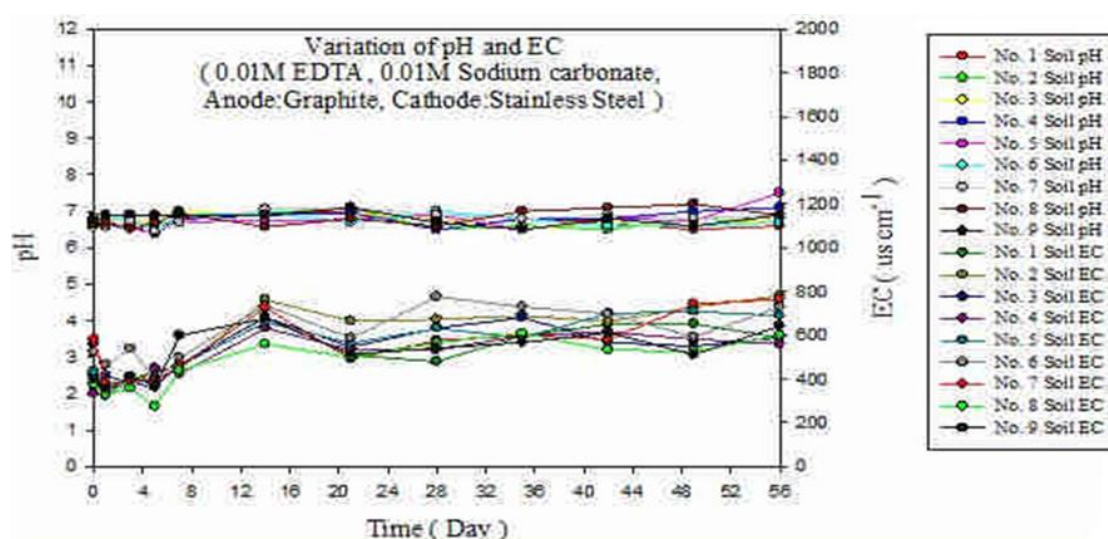


圖 1.4 污染土壤 pH 值及導電度隨操作時間變化

圖 1.5 為電動力法整治鉛污染土壤濃度變化趨勢圖。從圖觀察到，污染土壤中鉛濃度隨著處理時間增加而快速降低，於 56 天處理時間下，9 個點的土壤鉛濃度平均去除效率約可達 72%。較特別的地方是在處理 1 天後，編號 7、8 及 9 區域的土壤鉛濃度平均去除效率可達 25%，但隨著處理時間的增加，去除效率卻呈現逐漸下降的趨勢。靠近陽極的土壤鉛濃度大致較靠近陰極的土壤鉛濃度高，其原因可能因操作液不斷地循環，從土壤中移除鉛的

部分再迴流至陽極區所導致的結果。同時經圖 1.6 顯示，操作液中鉛濃度於處理時間 14 天即上升至 42 mg L^{-1} ，其結果顯示土壤中的鉛金屬確實已經移除至 EDTA 操作液中，而後再經電鍍於陰極上或迴流至系統中降低其濃度。

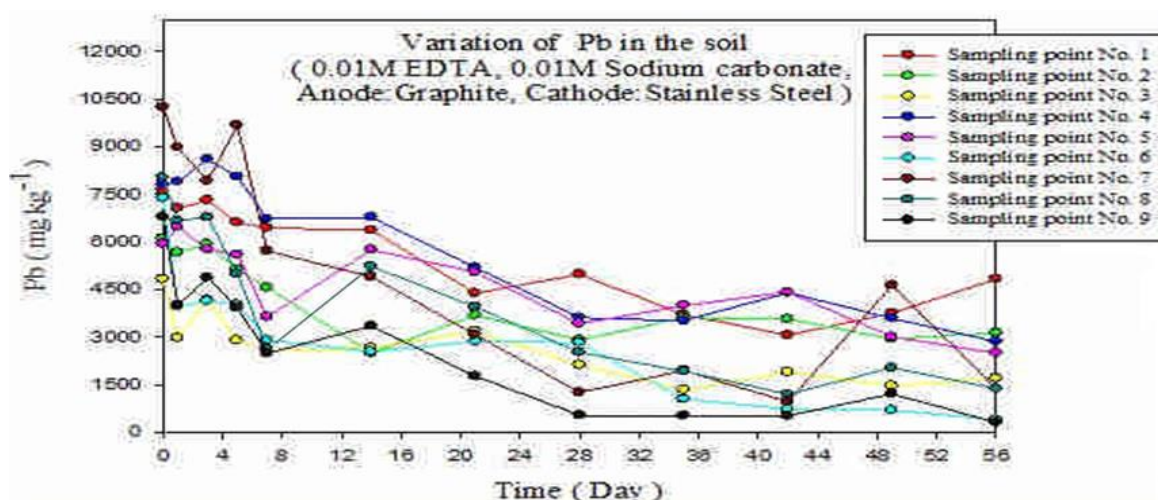


圖 1.5 電動力法整治鉛污染土壤濃度變化圖

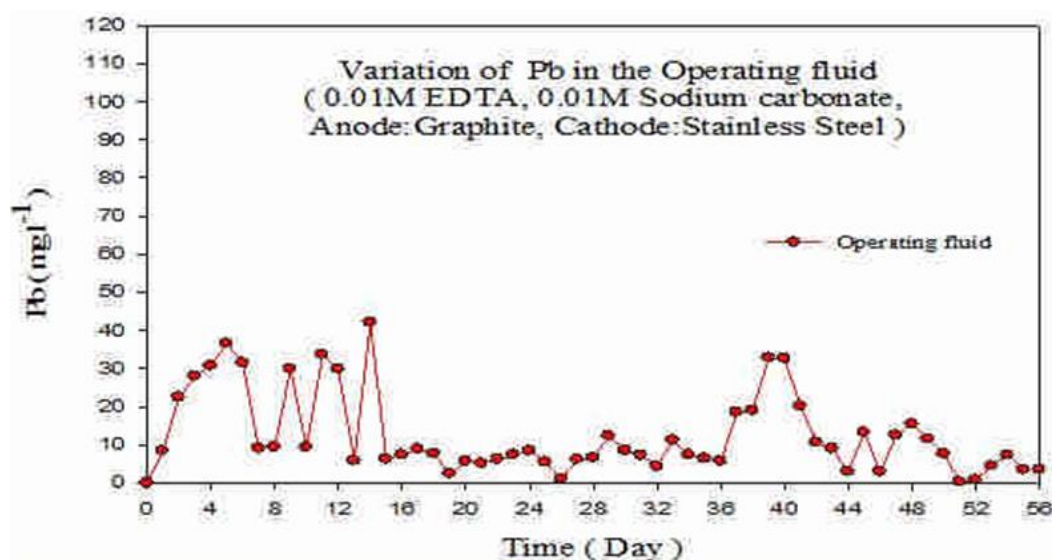


圖 1.6 電動力法操作液的鉛濃度變化圖

圖 1.7 為電動力法處理土壤之系統電壓電流變化趨勢，由圖可見，本試驗電動力系統初始以固定電壓 80 V 進行操作，而隨著操作天數增加，電壓有逐漸增加趨勢，約達至 100 V 左右。電壓上升顯示系統之電阻有增加趨勢，導致電阻提升可能原因為操作液流失、電極板導電性降低或其他原因。

電流隨著操作時間至第 7 天降至約 0.7 A，將試驗 56 天的用電量進行估算：操作之平均電壓約為 90 V，平均電流約為 1.5 A，電功率 $90 \times 1.5 = 135 \text{ W}$ ，56 天用電量為 $135 \times 56 \times 24 \times 10^{-3} = 181.44 \text{ KW-Hr}$ (仟瓦小時)，1 度電為 1.0 KW-Hr，1 度電以 3.5 元計算，56 天操作下電費為 $181.44 \times 3.5 = 635.04$ 元。處理 56 天鉛去除率約為 72%，此結果意謂著本系統對於 1.0 平方公尺的鉛污染土壤每去除 1% 所需的操作電費約為 8.82 元 ($635.04 / 72 = 8.82$ 元)。至於電動力操作下溫度變化從圖 1.8 顯示，可觀察到系統中操作液的溫度約介於 $29\text{--}37^\circ\text{C}$ 之間，溫度也是影響電流的因素之一。當電動力系統放大規模後，其溫度變化可能因電流放大而產生過高的情形，甚至導致危險發生。本系統 56 天中操作液溫度與氣溫相當，可顯示本 CEEK 系統操作的穩定性。

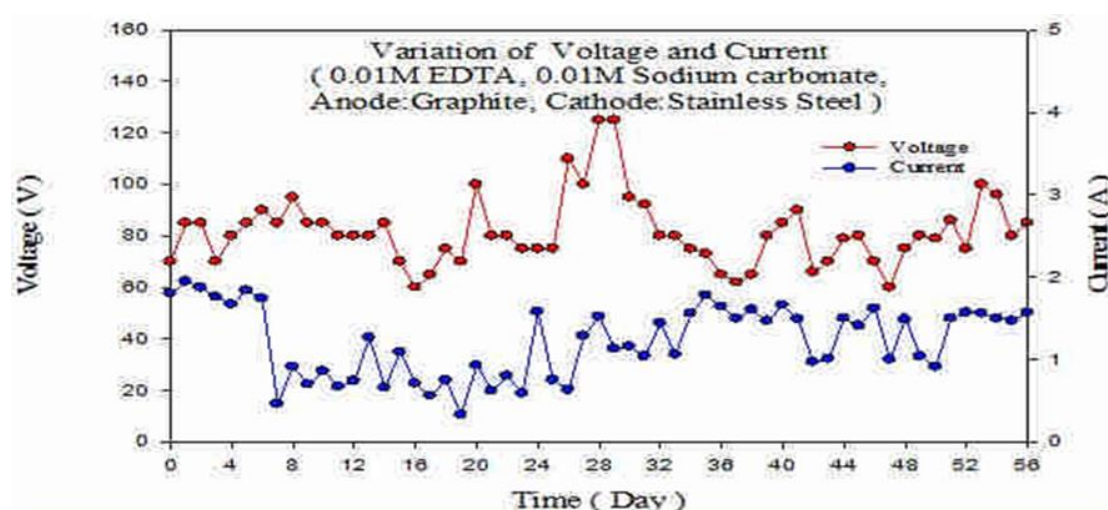


圖 1.7 電動力法系統的電壓及電流變化圖

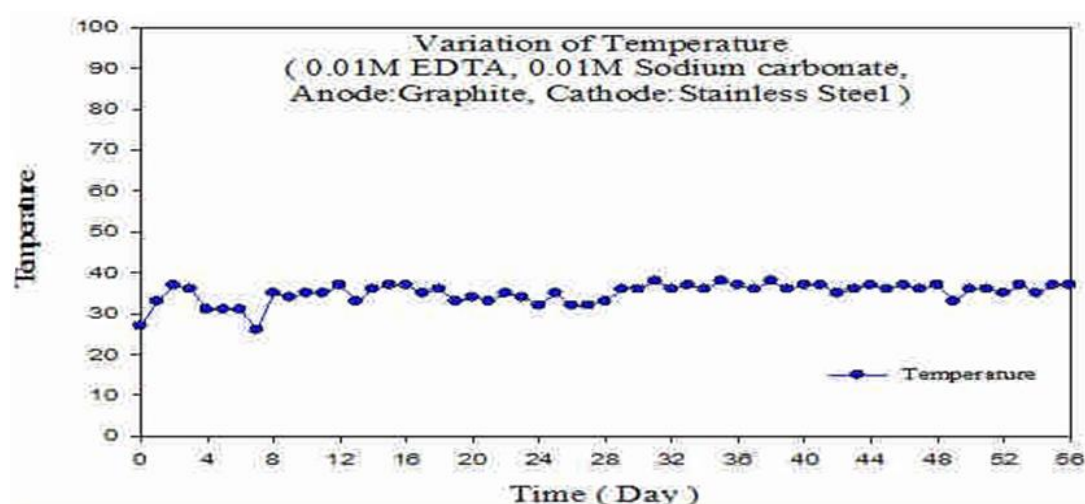


圖 1.8 電動力法系統中操作液溫度變化圖

1.3 近實場電動力法 CEEK 整治鉛污染農地的試驗成果

儘管 CEEK 技術模場規模試驗成果令人滿意，但擴大整治規模的各操作參數與整治效率的關係仍有許多不確定性，例如操作液的 pH、溫度、螯合劑及系統的電流效率等對土壤環境的影響。此外，土壤肥力受 CEEK 的影響也須了解，以便未來回覆農用時有所依循。因此，近實場規模試驗不僅探討鉛污染去除效率，而且量測土壤肥力對於不同 CEEK 處理時間的變化。

近實場電動力法(CEEK)整治鉛污染農地設備組裝

圖 1.9 為電動力法整治受鉛金屬污染農地之現場安裝示意圖，而圖 1.10 為電動力法系統裝配完成的完工情形，圖中顯示於污染現地挖掘 5 座環繞區域，每一座尺寸皆為 1 公尺 x 1 公尺之正方形。由於鉛污染的深度約為 20 公分以內，因此，現地處理深度以 25 公分為原則；每一區塊外圍挖掘一環繞區域的渠道寬為 20 公分，作為操作液儲存區，係含螯合劑之緩衝溶液注入儲區，即為濃度 0.01M 碳酸鈉與 0.01M EDTA-2 鈉鹽電解質。其中兩對邊分別為陽極(石墨電極)與陰極(不銹鋼電極)區交互安置，將電極懸置於儲存區並連接電源供應器，並以輸送泵將陽極區操作液抽送至陰極區，形成一 pH 中和之循環系統；再利用隔水材料覆於儲區周邊及底層，使操作液不會洩漏。最後，再以隔水材料覆於儲區頂部以減少操作液的蒸散量。本團隊試驗條件係以之前模場實驗數據得到之最佳參數進行操作，進而隨時調整之，並於試驗期間記錄天氣情況外，並分析監測土壤中鉛污染物濃度、土壤溫度、操作液中鉛污染物和螯合劑濃度、操作液 pH 值、土壤 pH 值、土壤含水率及電流等，並依照上述數據評估電動力處理鉛去除污染之效益。

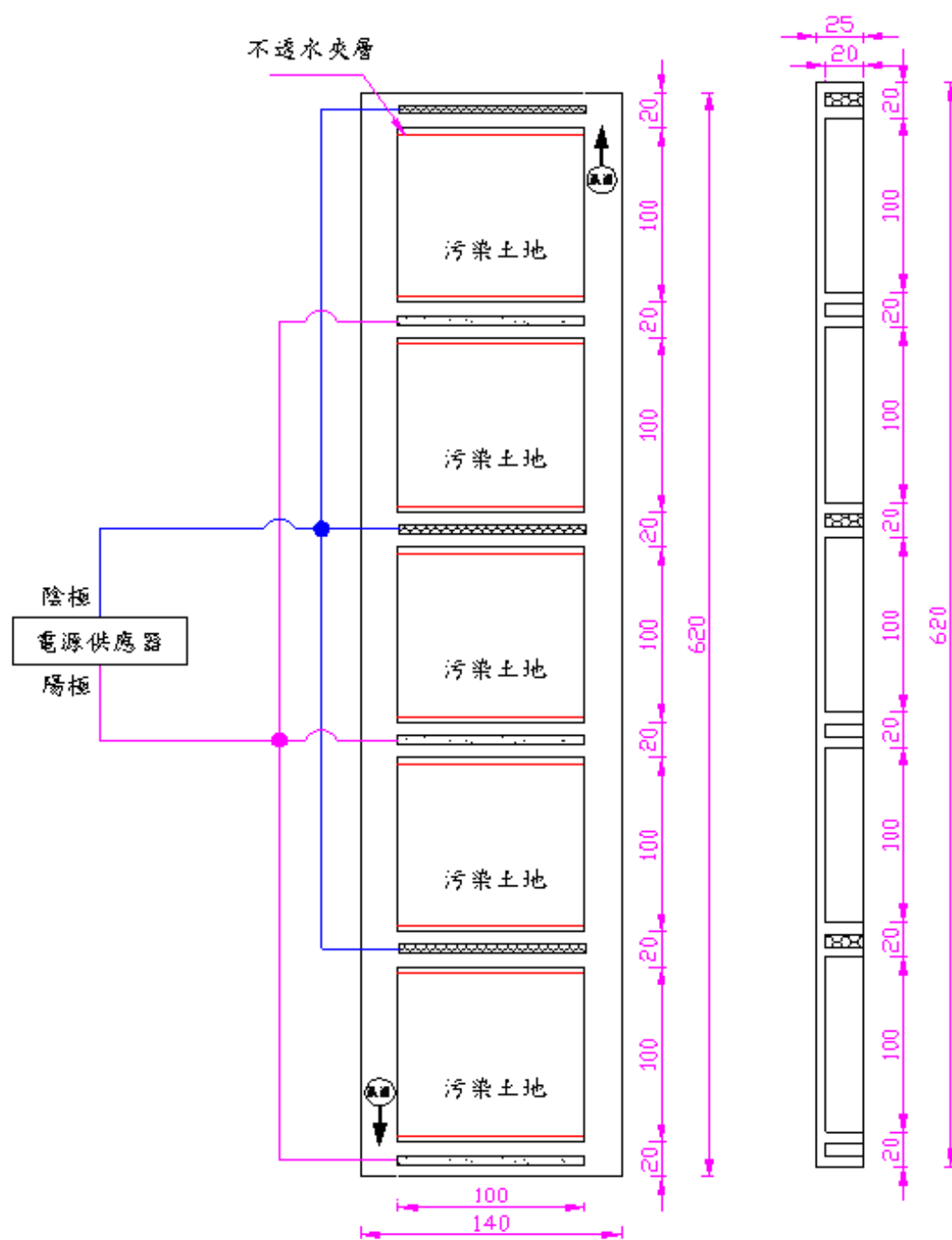


圖 1.9 CEEK 整治鉛污染農地現場安裝示意圖



圖 1.10 電動力整治鉛污染農地現場系統圖

近實場電動力法(CEEK)整治鉛污染農地成果

圖 1.11 為鉛污染土壤於近實場規模電動力法整治下，pH 值及導電度隨操作時間之變化圖。本近實場試驗於電動力法 CEEK 操作下，隨著操作時間土壤之 pH 值可保持於中性範圍，並沒有土壤酸化的情況發生。能使 pH 值保持穩定主歸因於操作液高 pH 值緩衝能力及循環系統，其 pH 值變化與模場試驗相同。至於土壤的導電度約介於 $600\sim 1,000\ \mu\text{S cm}^{-1}$ 。

圖 1.12 為電動力法整治鉛污染土壤濃度之變化圖，從圖顯示，土壤中鉛濃度隨處理時間而快速降低，經過 63 天處理，平均土壤鉛濃度可從 $7,246\ \text{mg kg}^{-1}$ 降至約 $2,612\ \text{mg kg}^{-1}$ ，平均去除效率可約達 64%。同時可從濃度變化清楚發現，隨著處理時間增加，去除效率呈現穩定增加之趨勢。因此，處理時間的延長應可持續增加鉛金屬之去除效率。以此數據估計，本系統對於 1.0 平方公尺的鉛污染土壤每去除 1% 所需的操作電費約為 9.83 元，此數據與模場試驗的 8.82 元極為接近。說明此電動力法系統進行模場規模與近實場規模試驗皆具有實務應用之效益。根據兩規模試驗數據得知，雖然試驗污染場址的地點不同，但可能因兩場址均為水稻田，兩者之土壤物化特性較為類似，故其去除效率較為接近。由以上得到之重要結論是，模場試驗雖放大 5 倍為近實場規模後，除能維持 pH 值於中性下操作，且兩場址的鉛去除速率也十分接近。

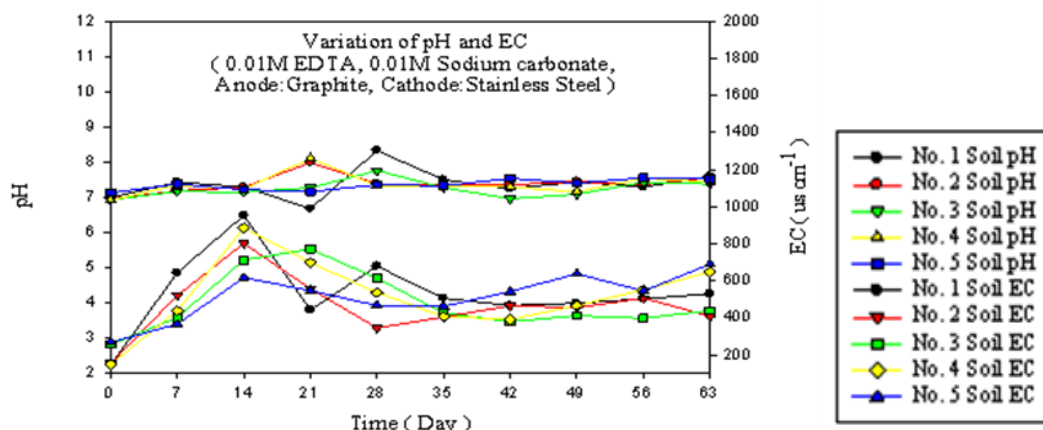


圖 1.11 污染土壤 pH 及導電度隨操作時間變化圖

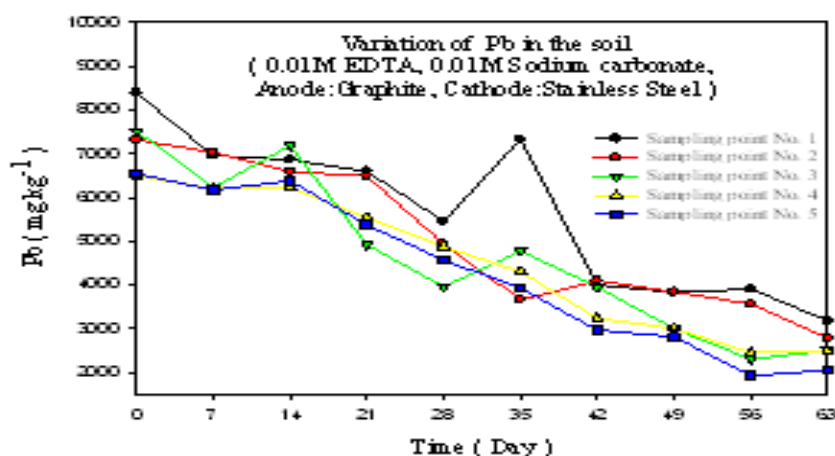
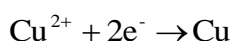


圖 1.12 電動力法整治鉛污染土壤濃度變化圖

本團隊過去 2 年利用電動力法在整治受鉛污染之農地時，其結果顯示對於鉛污染濃度有良好的移除效率，是具有現地處理潛力的技術之一。然而，為了使此技術的應用性提升，操作液的損失和陰極電鍍的效率問題仍須克服；同時，當處理受到多種重金屬污染之土壤時，各污染物的去除效率以及相互間競爭關係仍有待釐清。另外，雖然大部分能將鉛從污染土壤中移出，但移出之鉛大部分停留於操作液中，電鍍於陰極板上的金屬元素所佔比例並不明顯，相信未來於實驗室中同時處理兩種污染物時，陰極電鍍的成效也成為主要的關鍵及挑戰，為本研究欲突破之重點。相信於本試驗完成後，對於未來評估此處理技術的實場應用性能有更充足的數據予以佐證。

因此，未來將規劃以間歇方式提高電壓來增加金屬的電鍍效果，改善操作液中金屬殘留的問題，以提升本計畫目標污染物鎘及鉛的陰極電鍍部份，藉以提高本技術資源化的能力。根據之前的研究[24]，於實驗室下模擬螯合性含銅廢水試驗以獲得螯合性含銅廢水的去除效率，進而得知金屬電鍍之成效。試驗中以不同 pH 值（pH 3、pH 5 與 pH 7）和電壓梯度（0.5、1.0、1.5 及 2.0 V cm⁻¹）為主要操作參數，藉以了解不同 pH 值下螯合劑與重金屬存在之型態，以及操作電壓大小與反應速率快慢的關係。

圖 1.13 及 1.14 為不同 pH 值，在 0.5、1.0、1.5 以及 2.0 V cm⁻¹ 四種電壓梯度下廢液中銅濃度的變化圖。由圖 1.13 可見經 220 分鐘操作後，電壓梯度為 0.5、1.0、1.5 以及 2.0 V cm⁻¹ 時，於 pH 3 時銅濃度由原先約 120 mg L⁻¹ 分別降至 57.8、22.9、9.5 與 3.07 mg L⁻¹；於 pH 5 時銅濃度的變化圖發現，電壓梯度為 0.5、1.0、1.5 以及 2.0 V cm⁻¹ 時，銅濃度由原先約 110 mg L⁻¹ 分別降至 86.4、23.6、10.3 以及 7.64 mg L⁻¹；圖 4.14 為 pH 7 時銅濃度的變化圖，電壓梯度為 0.5、1.0、1.5 以及 2.0 V cm⁻¹ 時，銅濃度由原先約 110 mg L⁻¹ 分別降至 82.6、48.3、6.8 以及 3.3 mg L⁻¹。由上述圖 4.13 及圖 4.14 可發現，銅濃度降解速率一開始快速，而後逐漸趨於平緩的現象，當操作電壓梯度提高，銅離子濃度下降更為迅速，即銅離子的還原有正比的現象。對於銅的還原反應而言，增加電壓即是增加反應的驅動力（Driving force），亦即銅還原反應式加速往右邊進行，如式(4-1)，加大施加電壓，即在陰極附近積聚的电子量越多，使得銅的還原加速進行。



$$E^0 = 0.34 \text{ V} \quad (4-1)$$

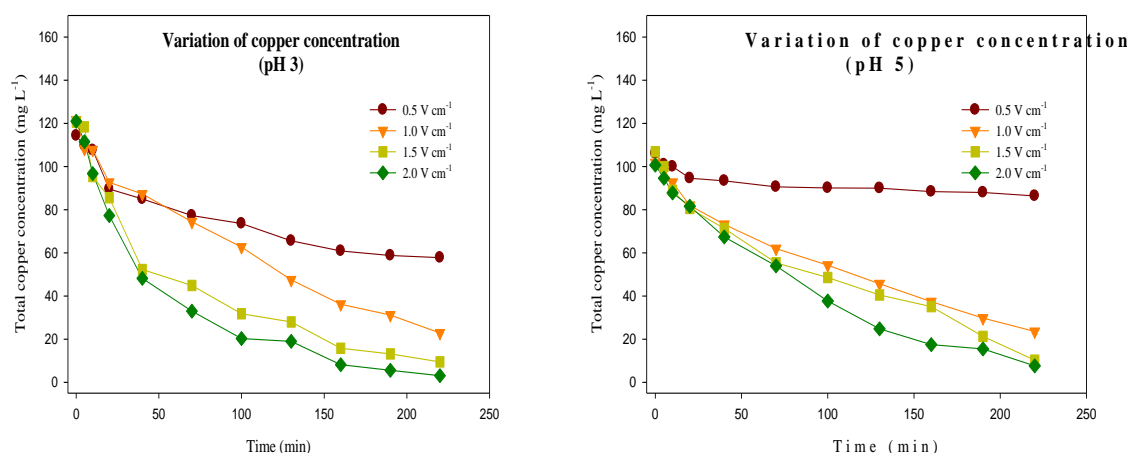


圖 1.13 pH 3 及 pH 5 之銅濃度變化圖

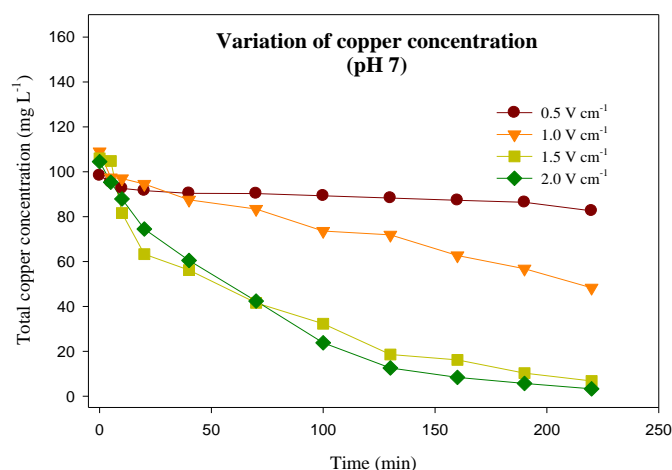


圖 1.14 pH 7 之銅濃度變化圖

試驗結果顯示，在反應 220 分鐘後，不同 pH 值操作之去除銅效率為 pH 3 > pH 5 > pH 7。此可歸因於在 pH 3 時 EDTA 的配位基多半與 H^+ 結合，以 H_4EDTA 與 H_3EDTA^- 的型態為主，使銅離子與 EDTA 產生螯合物種的能力降低，故在 pH 3 時銅多數以自由離子的型態存在，有利銅離子於陰極電鍍析出。而在 pH 5 時，EDTA 則多以 H_2EDTA^{2-} 型態；pH 7 為 $HEDTA^{3-}$ 等型態為主，由此可知，pH 值近中性時，EDTA 所空出的配位基也就越多，容易與銅離子產生鍵結而形成螯合銅物種，較不利電鍍反應進行。如果要讓銅離子能夠還原鍍上陰極，則必須先以電場作用破壞此結構，銅離子才進入陰極表面還原[25,26]。雖然在 pH 值為酸性條件下電鍍效果較明顯，但此 pH 值的影響於低電壓梯度 ($0.5 V cm^{-1}$) 下影響較大，但當提高至 $1.5 V cm^{-1}$ 與 $2.0 V cm^{-1}$ ，pH 值的影響就不甚明顯。由此可知，在較高的電壓操作下，可迅速的破壞銅與 EDTA 所形成的螯合物種，使廢水中的銅離子濃度還原反應迅速。

另計算不同 pH 值下，不同電壓梯度對銅去除的反應動力得知，當 pH 3 時，電壓梯度為 0.5 、 1.0 、 1.5 與 $2.0 V cm^{-1}$ 時，反應速率常數 k 值分別為 0.0031 、 0.0071 、 0.0113 與 $0.0160 min^{-1}$ ，其 k 值隨操作電壓梯度增加而成正比加倍，其意味著此時反應主要是電遷移機制所控制。pH 5 反應速率常數 k 值分別為 0.0007 、 0.0063 、 0.0088 與 $0.0110 min^{-1}$ ；pH 7 時反應速率常數 k 值則為 0.0006 、 0.0032 、 0.0119 以及 $0.0157 min^{-1}$ ，可發現在 $0.5 V cm^{-1}$ 時， k 值僅只有 0.0007 以及 0.0006 ，可說明此時電場強度不夠將螯合性銅物種分離進而使銅還原，以致於反應速率常數 k 值較小。當提高操作電壓梯度時，反應速率常數 k 值均有增加的現象。當操作電壓梯度為 1.5 與 $2.0 V cm^{-1}$ 時，

pH 值的影響就很小，在 1.5 V cm^{-1} 時，pH 3 的反應速率常數 k 值為 0.0113 min^{-1} ，pH 5 時則為 0.0088 min^{-1} ，pH 7 時為 0.0119 min^{-1} ；當操作電壓梯度為 2.0 V cm^{-1} 時，pH 值為 3 時，反應速率常數 k 值為 0.0160 min^{-1} ，pH 5 時為 0.0110 min^{-1} ，pH 7 時則為 0.0157 min^{-1} ，由此可知，當電壓梯度在 1.5 以及 2.0 V cm^{-1} 時，已不受 pH 值所影響，意謂著螯合性銅物種斷鍵的速率已遠大於銅離子擴散至陰極電極表面速率，以至於在不同 pH 值下，反應速率常數約略相等。

從過去研究中可知，雖然 pH 值於酸性條件下電鍍效果較佳，但當電壓梯度提升時 pH 值的影響則可降低；意味著，未來在含有螯合物 EDTA 之電動力系統下，其本研究計畫中所產生的含鎘及鉛螯合性操作液的部分，可透過電壓梯度的提升，相信對於整體的陰極電鍍效果會有明顯改善的情形，進而建構更具市場性的現地電動力法技術。其詳細內容於研究方法中介紹。

1.4 計畫目的

本計畫係以建置雲林虎尾含鎘及鉛污染土壤之實驗室處理模場、符合法規標準（管制標準及監測標準）及申請國際專利為主要目的，並進一步評估本技術對於鎘及鉛現場污染土壤的處理效益。本技術目前對於台中烏日及南投兩重金屬農地具有顯著的去除效率，操作成本也相當低廉，但仍有持續研究及推廣的必要，其主要包括：

1. 重金屬成分與土壤性質各地差異大：由於不同重金屬與土壤間的吸附特性有所差異，且各地土質狀況也不盡相同，需釐清不同土壤與重金屬移除效率之關聯。
2. 操作液損失：日照蒸散或模場設計等因素導致操作液損失，使得每天需另外補充之，影響處理效率及造成實際應用的不便。
3. 回收元素鎘及鉛於陰極板的電鍍條件：由於鎘及鉛與 EDTA 的錯化物，需耗費多少電壓及時間才能有效電鍍於陰極上，相關操作條件仍需研究測試。
4. 電極排列方式：根據過去研究近實場規模與模場試驗結果顯示，不同電極排列方式將造成影響。

5. 國際專利申請：本技術循環加強式電動力法(CEEK)已證實具有實務的去除功能和有效性，有別於國際上其他的電動力法，並已於台灣取得專利，未來應可在歐美、大陸及其他具有市場潛力的地區申請專利。

根據上述論點，本計畫研究目標涵括：

- 於實驗室建置一組電動力系統處理雲林虎尾受鎘及鉛污染之現場土壤，進行模場污染整治研究，並以符合法規標準為整治目標。
- 試驗模場的設計改良，嘗試以不同的不透水層進行測試，尋求最適合本污染土壤的不透水夾層；以及建構一操作液自動添加系統，能保持操作液的循環量外，亦可降低人力之操作，使本技術推廣上更具市場競爭力。
- 釐清本技術對鎘及鉛回收的操作參數，以獲取元素鎘及鉛於陰極板表面，使本技術更具資源化之能力。
- 釐清本系統電極排放方式，進而尋求最佳操作電壓及電流，提升本技術的電流效率，以降低使用電量及操作成本。
- 擬將本技術推廣至其他地區，預計於美國及大陸地區申請國際專利。

第二章、研究方法及過程

本研究污染土壤的場址是位於雲林縣虎尾鎮，採用土壤的農地地號為北平段 837，農地面積為 3,335 m²，其主要是受到重金屬鎘及鉛的污染。根據調查資料顯示，7 個不同採樣區分析結果，鎘受污染之濃度為 3.06~161 mg kg⁻¹，平均濃度為 40.7 mg kg⁻¹；其中有 4 個採樣區濃度超過管制標準（20 mg kg⁻¹）、1 個採樣區超過食用作物農地污染管制標準及 2 個採樣區超過食用作物農地污染監測標準。鉛受污染濃度為 313~2,110 mg kg⁻¹，平均濃度為 854.7 mg kg⁻¹；其中有 1 個採樣區濃度超過管制標準（2,000 mg kg⁻¹）、3 個採樣區超過食用作物農地污染管制標準及 2 個採樣區超過食用作物農地污染監測標準。鋅最高濃度為 382 及 582 mg kg⁻¹，此 2 個採樣區超過食用作物農地污染監測標準。

本試驗以電動力技術整治含鎘及鉛污染之現場土壤，藉此探討鎘及鉛污染土壤之去除效率。在試驗一開始，首先採集場址的土壤，經過前處理風乾、破碎、過篩後以環保署公告之標準方法分析場址土壤的基本物化特性包括：土壤組成(黏土、粉土及砂土)、有機質含量、土壤含水率、土壤 pH 值及土壤陽離子交換能力等基本特性。

2.1 電動力法(CEEK)整治鎘及鉛重金屬模場實驗方法

本研究設計一電動力技術之系統反應槽，如圖 2.1 所示。本電動力處理系統槽體以聚氯乙烯製作，規格為長 26 cm × 寬 11 cm × 高 11cm (內徑)，槽體中以 PVC 隔板將樣品儲槽分隔，規格為長 15 cm × 寬 15 cm × 高 6 cm (內徑)，土樣槽體兩側的操作液儲槽中分別有凹槽，以放置陽極板及陰極板。電動力系統反應由直流電源供應器供應直流電，在極板與污泥樣品之間以紗布包覆多孔 PVC 板作為間隔，填入受污染土壤後，於操作液儲槽中注入電解液，並以泵浦將操作液從陰極端迴流至陽極端，並以泵浦將陽極區操作液抽送至陰極區，形成一 pH 中和之循環系統，最後以定電壓通以直流電進行實驗。從過去的研究結果顯示，所移除的金屬污染物主要存在於操作液中，為了避免未來操作液直接滲漏於現地土壤的地底下，不僅需額外補充大量操

作液，也因而降低陰極電鍍的成效。因此，本計畫特地將試驗模場中裝置污染土壤的底部挖空，並於下方裝設滲透液儲槽以觀察操作液的流失情形，嘗試調整參數使電動力法之電滲透流及離子遷移達到最佳之橫向移動，提升污染物的整治效果。圖 2.1 為污染場址建置模場規模之縮小尺寸，目的為測試改良後之電動力系統對於雲林虎尾受鎘及鉛污染土壤的移除效率，進而未來將試驗之操作因子運用於實場上，以提升現地模場試驗的成效。

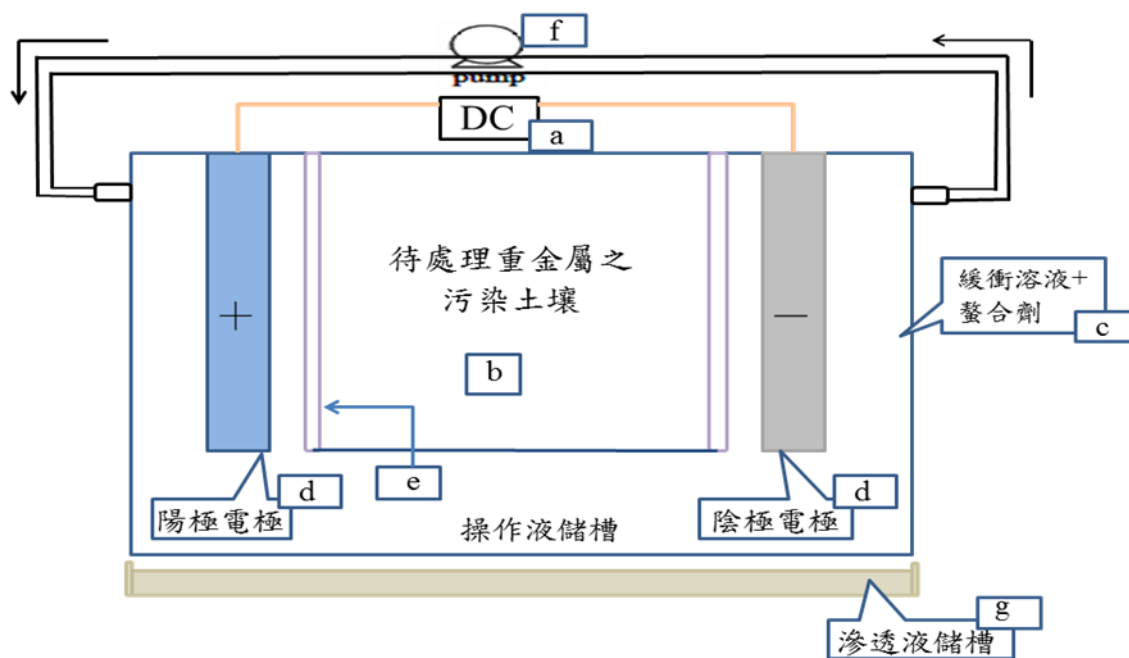


圖 2.1 電動力法整治重金屬污染土壤試驗室規模裝置示意圖

- a. 直流電源供應器：供應系統之直流電，可設定定電壓(0~100 V)方式或定電流(0~200 mA)方式進行操作。本研究初步以電壓梯度 1.0 V cm^{-1} 進行實驗，以電線及鱷魚夾和實驗電極板相連接。
- b. 土壤樣品儲槽：將受鎘及鉛污染土壤放置於槽體隔間，尺寸為長 14 cm × 寬 10.5 cm × 高 6 cm。
- c. 操作液儲槽：配製濃度 0.01M EDTA-2Na 及 0.01M Na_2CO_3 電解液，注入此區作為系統之操作液，槽體上方呈現連通狀態，配合幫浦來循環迴流，目的是為了使陽極產生的酸性及陰極產生的鹼性能混合均勻。
- d. 電極板：陽極以多孔之 DSA 電極及陰極為多孔不鏽鋼板，尺寸為長 10.5 cm × 寬 5 cm × 厚 0.5 cm。

- e. 擋土板：此為 PVC 材質的多孔擋土板，目的為防止土壤儲槽中之土壤流至電解儲槽中，尺寸為長 11cm×寬 6 cm×厚 0.5 cm。
- f. 循環幫浦：利用循環裝置將陰極端產生的鹼性迴流至陽極端產生的酸性，藉此來抑制系統所產生的酸化現象。循環速率約為 180 L hr⁻¹。
- g. 滲透液儲槽：主要功能為觀察操作液的滲漏情形，使用可滲透材質測試污染物的水平傳輸現象，並隨時調整參數以獲得最理想之處理成效。

採集回來的土樣經過風乾，除去土壤中之雜草、石頭等雜物，以陶瓷材質之研磨器磨碎，再經過 100 mesh (0.15 mm) 之篩網過篩後，以夾鏈袋儲存供作後續實驗使用。土壤分析項目包括土壤粒徑分佈、含水率、有機質含量、pH 值、導電度、以及土壤中鎘及鉛污染濃度。在實驗進行過程中，每隔一段時間量測操作液之 pH 值、導電度、電流變化、鎘及鉛濃度，並同時分別挖取土樣中靠近電動力系統之陽極端、中間端、及陰極端之土樣分析含水率、有機質含量、pH 值、導電度、重金屬濃度(Cd 及 Pb)。其分析方法分述如下：

1. 含水率測定方法

取乾淨之坩鍋並將坩鍋秤重後，裝入約 10 克的土樣，同時紀錄烘乾前之重量，蓋上鍋蓋後放入 105°C 烘箱烘乾 24 小時，而後取出烘箱使坩鍋溫度恆溫後利用電子天平紀錄其烘乾後之重量。土樣在烘乾前後所減少之重量百分比即為土樣之含水率。

2. 土壤有機質含量測定方法

首先將乾淨之坩鍋秤重，取經 105°C 烘乾去除水分之土樣乾基約 10 克置於坩鍋秤重，放入 500°C 高溫爐加熱 4 小時，而後取出放入乾燥箱內待冷卻後秤重。土樣經高溫爐前後所減少之重量百分比即為土樣之有機質含量。

3. 土壤 pH 值及導電度值分析方法

取 20 g 土壤樣品於燒杯中，並加入 20 ml 的去離子水，經過攪拌均勻混合 5 分鐘後，靜置約 1 小時，使土壤沉澱於燒杯底部，測其懸浮液之 pH 值、導電度值。

4. 土壤污染濃度之分析

取靠近陽極端、中間端及陰極端 3 個點之土樣，經烘乾去除水分後，取約 3g 的土樣作王水消化法 (NIEA S321.63B) 萃取重金屬，將萃取液利用濾紙抽氣過濾，並且稀釋萃取液，以火焰式原子吸收光譜儀 (AA) 分析土樣中鎘及鉛濃度。

2.2 鉛及鎘重金屬之電鍍效率提升方法

從過去現地整治研究中可知，利用電動力法在整治重金屬污染物時，能將重金屬污染物從污染土壤中移出，但移出之金屬大部分停留於操作液中，電鍍於陰極板上的金屬元素所佔比例並不明顯，雖然嘗試透過搭配離子交換樹脂法來改善試驗所產生的重金屬廢液，但效果仍無法顯著提升；相信未來於實驗室中同時處理兩種金屬污染物時，陰極電鍍的成效也成為主要的關鍵及挑戰。不過，從過去的研究中顯示，廢水 pH 值將影響陰極板之電鍍效果，但當透過電壓梯度的改變即可克服 pH 值的影響程度。因此，透過陰極電鍍法來提升本年度目標污染物鎘及鉛的陰極電鍍效率，藉以提高資源化的能力，也是本計畫研究之重點，冀望能因此改善含重金屬廢液的後續處理問題及操作成本。

本研究計畫之電動力系統，是導入 EDTA 螯合劑使其與土壤中重金屬形成溶解性錯合物後，經電滲透流或離子遷移機制攜出而達到高去除效率，所施加的電壓梯度係按照過去實驗所得之最佳參數所設定，以 1.0 V cm^{-1} 操作為主；然而，為有效將含有螯合劑之鎘及鉛操作液中的金屬離子有效電鍍於陰極，試驗過程中將以改變操作條件的方式進行測試，其試驗方法如下：

改變電壓梯度下：

1. 於每天操作中，前 22 hrs 以電壓梯度 1.0 V cm^{-1} 進行操作，將土壤中重金屬污染物透過電滲透流或離子遷移移出土壤表面；其餘的 2 hrs，將改變電壓梯度 1.5 V cm^{-1} 進行操作，以提升陰極電鍍效果。

2. 於每天操作中，前 23 hrs 以電壓梯度 1.0 V cm^{-1} 進行操作；其餘的 1 hrs，將改變電壓梯度 2.0 V cm^{-1} 進行操作，以提升陰極電鍍效果。

增加超音波震盪裝置下：

1. 於每天操作中，前 22 hrs 以電壓梯度 1.0 V cm^{-1} 進行操作；其餘的 2 hrs，除改變電壓梯度 1.5 V cm^{-1} 進行操作外，並配合超音波震盪的使用，以輸出功率 250 watts 共同試驗，冀望藉由超音波震盪下，使得陰極板附近擴散層厚度變薄，以提高陰極電鍍速率。
2. 於每天操作中，前 23 hrs 以電壓梯度 1.0 V cm^{-1} 進行操作；其餘的 1 hrs，除改變電壓梯度 2.0 V cm^{-1} 進行操作外，並配合超音波震盪的使用，以輸出功率 300 watts 共同試驗。

本研究計畫期待能於實驗室中，透過循環增強式電動力技術的應用將含有鎘及鉛污染之現場土壤有效整治，冀望透過試驗模場的改良，設計最為適當的不透水層，以減少操作液的損失並提升整治效果；再透過操作條件的變化，改變電壓梯度和增設超音波震盪裝置，進而提升金屬陰極電鍍效果，以達到去除重金屬和金屬還原的雙重功效。以上操作條件之設定會隨著實際實驗情況進行微調，以達到本研究最佳化之參數。此計畫之研究成果和相關數據將有利於未來實場污染場址應用之參考，其有研究之必要性。

2.3 電動力法(CEEK)整治鎘及鉛重金屬實驗室系統組裝

圖 2.2~圖 2.5 為本系統電動力法(CEEK)於實驗室規模下，處理含鎘及鉛污染土壤之實驗裝置圖。圖 2.2 為從雲林虎尾污染現場取回之土壤，經由去掉雜物、石頭等大顆粒物質後，再經由過篩（100 mech）程序後放置於實驗盤上，每次土壤重量取 5 kg 進行前處理，經前處理後之土壤再分批進行實驗。圖 2.3 為處理污染土壤之實驗模場，模場中以 DSA 電極為陽極板，陰極為不銹鋼電極，中間為污染土壤之電動力處理位置，左右兩邊隔板為 PVC 材質的多孔擋土板，目的為防止土壤儲槽中之土壤流至電解儲槽中，模場左右兩側鑽孔並裝有迴流裝置的水管，以達到循環式電動力的操作過程。陽極 DSA 電極尺寸為 $10.5 \text{ cm} * 6.5 \text{ cm} * 0.1 \text{ cm}$ (長*寬*高)，而陰極不銹鋼

電極與 PVC 多孔夾層尺寸皆為 10.5 cm * 6.5 cm * 0.5 cm (長*寬*高)，其主要顯示於圖 2.4 所示。同時，圖 2.5 為本計畫電動力技術於試驗室規模下的實驗裝置，有一污染物試驗模場、供應電動力電場之電源供應器、電解液迴流幫浦裝置及攪拌系統等設備。



圖 2.2 雲林虎尾污染場址取回之土壤



圖 2.3 污染土壤之實驗模場

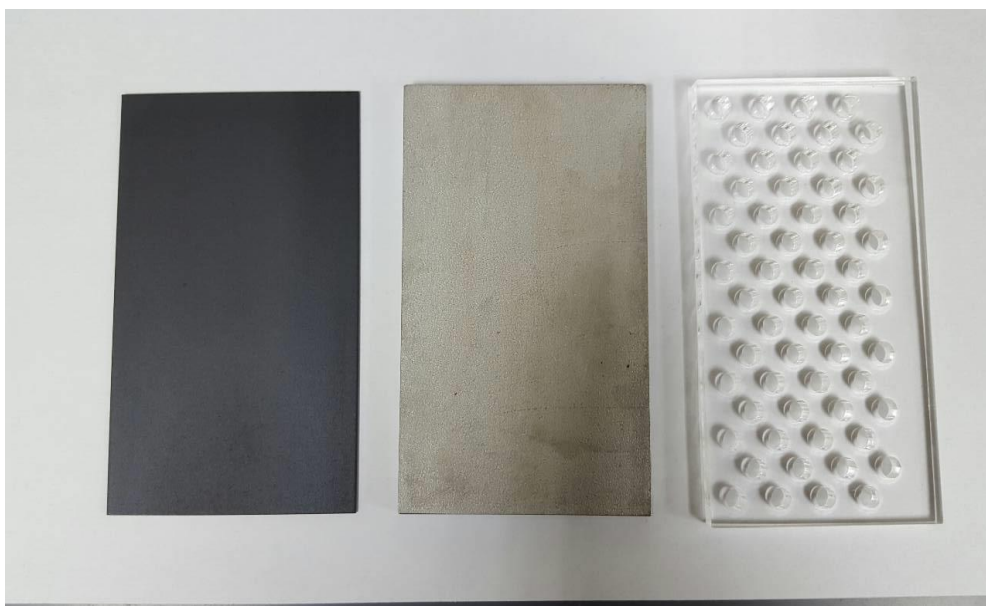


圖 2.4 電動力系統之電極與多孔夾層(陽極、陰極與 PVC 夾層)



圖 2.5 電動力技術之實驗裝置

2.4 計畫進度與檢核說明

表 2.1 為本研究計畫進度與檢核表，表中預定期末報告前須完成土壤物化特性分析、電動力法設備架設，完成電動力法(CEEK)整治鎘及鉛重金屬模場試驗、污染質量平衡及回收及電動力系統電壓及電流監測，目前計畫符合所預定之進度。

表 2.1 計畫進度與檢核表

年月 工作項目	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	備 註
土壤物化特性分析			※										
電動力法實驗室 設備架設			※										
電動力系統之自 動操作液自動添 加系統													
電動力法(CEEK) 整治鎘及鉛重金 屬試驗							※						
鎘及鉛污染質量 平衡及回收測試							※						
電動力系統電壓 及電流監測							※						
CEEK國際專利的 申請													
探討 CEEK 整治 鉛及鉛污染土壤 的可行性及去除 效率											※		
成果報告撰寫												※	

工作進度估計百分比 (累 積 數)	5%	10%	15%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%	
預定查核點	第 1 季 104/3	第1季：完成土壤物化特性分析、電動力法實驗室設備架設及自動操作液添加系統完成。											
	期中 104/6	期中：完成40%電動力法(CEEK)整治鎘及鉛重金屬土壤試驗並完成40%回收量測，以及完成部分國際專利申請。											
	第 3 季 104/9	第3季：完成80%電動力法(CEEK)整治鎘及鉛重金屬試驗並完成80%回收量測，同時完成國際專利申請。											
	期末 104/11	期末：完成探討兩種不同污染物共同處理之可行性、鎘及鉛去除效率、金屬回收率及成果報告撰寫。											
<p>說明：</p> <p>1、 工作項目請視專案性質及需要自行訂定。預定進度以粗線表示其起迄日期。</p> <p>2、 「工作進度百分比」欄係為配合管考作業所需，累積百分比請視工作性質就以下因素擇一估計訂定：(1) 工作天數，(2) 經費之分配，(3) 工作量之比重，(4) 擬達成目標之具體數字。</p> <p>3、 「預定查核點」，請在條形圖上標明※符號，並在「預定查核點」欄具體註明關鍵性工作要項。</p>													

第三章、結果與討論

本計畫推展至今，研究進度符合原訂進程。主要完成土壤基本物化性質分析、重金屬電動力試驗、重金屬回收測試、不透水層材料試驗及部分大陸專利申請。目前，茲就已完成的主要發現與結論說明如下：

3.1 現場污染土壤物化特性及重金屬污染濃度

本計畫試驗之污染土壤採自雲林虎尾農地地號為北平段 837，其主要受到重金屬鎘及鉛的污染之土壤。採集回來之土壤樣品先進行前處理，將樣品鋪平並於室溫下風乾至少 24 小時，除去土壤中紙屑、礫石及雜草等雜質後，以陶瓷材質之研磨器具破碎並通過 ASTM 100 號 (0.15 mm) 之標準篩網，以作為後續試驗使用。依標準方法對土壤進行基本性質分析，各項土壤基本性質分析方法依據及結果列於表 3-1。本研究污染土壤樣品之 pH 值為 6.59、土壤導電度值為 6.33 mS cm⁻¹、陽離子交換容量為 2,260 meq/100g、有機質含量為 2.63%，重金屬鎘濃度約為 120 mg kg⁻¹、鉛濃度約為 1,700 mg kg⁻¹，其餘重金屬濃度如鋅、鎳、銅及鉻濃度顯示於表 3-1。另外，針對土壤粒徑分析結果顯示，其中 33.67% 為砂粒、59.92 為粉粒及 6.41 為黏粒，土壤質地為粉質土壤。

表 3.1 土壤基本性質分析

分析項目		結果	分析方法
土壤 pH 值		6.59	NIEA R208.04C, 2009
導電度 (mS cm ⁻¹)		6.33	NIEA R213.21C, 2009
陽離子交換容量 (meq/100g)		2,260	NIEA S202.60A
重 金 屬 濃 度 (mg kg ⁻¹)	鎘 (Cd)	120±5.00	NIEA S321.63B, 2003
	鉛 (Pb)	1700±50.0	
	鋅 (Zn)	120±10.0	
	銅 (Cu)	ND < 28	
	鉻 (Cr)	83	
	鎳 (Ni)	ND < 34	

電動力技術試驗流程部分，首先，進行土壤的前處理及基本物理化學特性分析，包括土壤的 pH 值、含水率、有機質含量及重金屬濃度之全量分析，將土壤樣品放置於模場之樣品儲槽中（約 450 g 污泥），並將含有 0.01 M EDTA 和碳酸鈉電解液注入電解液儲存槽周圍，配合不同操作電壓梯度（ $1 \text{ V cm}^{-1} \sim 4 \text{ V cm}^{-1}$ ）進行試驗，目的為尋找出較理想的操作電壓作為系統之操作參數；選定其操作效果較佳之電壓後，再以不同材質之不透水夾層進行試驗，以獲得污染物陰極電鍍最佳之系統設置。

試驗期間每日記錄系統電壓、電流之變化並測量電解液的 pH 值、導電度，每日亦需注入適量的電解液。此外，每日採取土壤樣品一次（約 3 g），採集點分別為靠近陽極端、儲槽中央及靠近陰極端三處，採取土壤樣品經烘乾後，得以進行土壤之重金屬含量分析。經由找出電動力技術處理系統之適當參數的程序，對系統中所發生的電化學反應傳輸機制進行更深入之探討。

3.2 電動力法(CEEK)整治鎘及鉛重金屬污染土壤試驗成果

本研究以循環加強式電動力技術(CEEK)為主軸，以不同電壓梯度（ 1.0 V cm^{-1} 、 2.0 V cm^{-1} 、 3.0 V cm^{-1} 及 4.0 V cm^{-1} ）進行重金屬土壤去除效率試驗。根據文獻指出，碳酸根鹽類為水體天然存在之緩衝機制，對自然環境較無害且緩衝能力亦十分良好，且碳酸鈉的 pKa 值較接近中性，可維持長時間的穩定性，且其濃度介於 0.01~0.03 M 時，對於其電動力操作系統較穩定（廖盈智，2003）。因此，本研究除了選用 EDTA 螯合劑為電解液之外，同時添加 0.01 M 碳酸鈉作為電解液。於電動力操作試驗期間，將每日分別採集靠近系統陽極段、中間段及陰極段之土壤，以及陽極端與陰極端之操作液進行分析。試驗過程針對不同的操作參數對電動力技術處理含重金屬土壤之去除效果進行探討，獲得適當的電動力技術之操作因子，並估算其操作之經濟效益。

不同電壓梯度之電解液中 pH 值及導電度變化

圖 3.1~圖 3.4 為不同操作電壓梯度 (1.0 V cm^{-1} 、 2.0 V cm^{-1} 、 3.0 V cm^{-1} 及 4.0 V cm^{-1}) 以電動力技術處理之電解液 pH 值變化圖。從圖可以明顯發現，無論是何種操作電壓之電解液 pH 值都維持在 pH 9 至 pH 10.5 之間，pH 值的變化相當穩定。由於污染土壤浸泡於電解液中 ($0.01 \text{ M EDTA} + \text{Na}_2\text{CO}_3$) 之初始 pH 值約為 9，於鹼性的範圍，在試驗第一天有些微上升外，爾後變化則趨於平緩的狀態，此變化趨勢於四個不同電壓梯度中都有發現。另外，從陽極端或陰極端電解液之 pH 值可以發現，兩者位置的 pH 值變化相當一致。一般來說，電動力系統經通電後，陽極電極板表面會因電解水作用而產生氫離子 (H^+)，陰極則產生氫氧根離子 (OH^-)，而氫離子因電滲透流等現象導致其移動速率較氫氧根離子移動速快，形成一股酸峰往陰極方向移動的趨勢，因此在陽極端的 pH 值會偏低，陰極端之 pH 值會先有些許的上升，在逐漸下降於弱酸性（高於陽極端），進而使處理系統操作後之 pH 值維持在酸性狀態。然而，本系統 pH 值能保持穩定的主要原因為添加之操作液的高 pH 緩衝能力，以及設計的循環系統所貢獻的結果。本系統 CEEK 藉由陽極和陰極儲槽的連通，並透過循環輸送泵將其中和，因此，於本系統設計下能使 pH 值保持穩定。

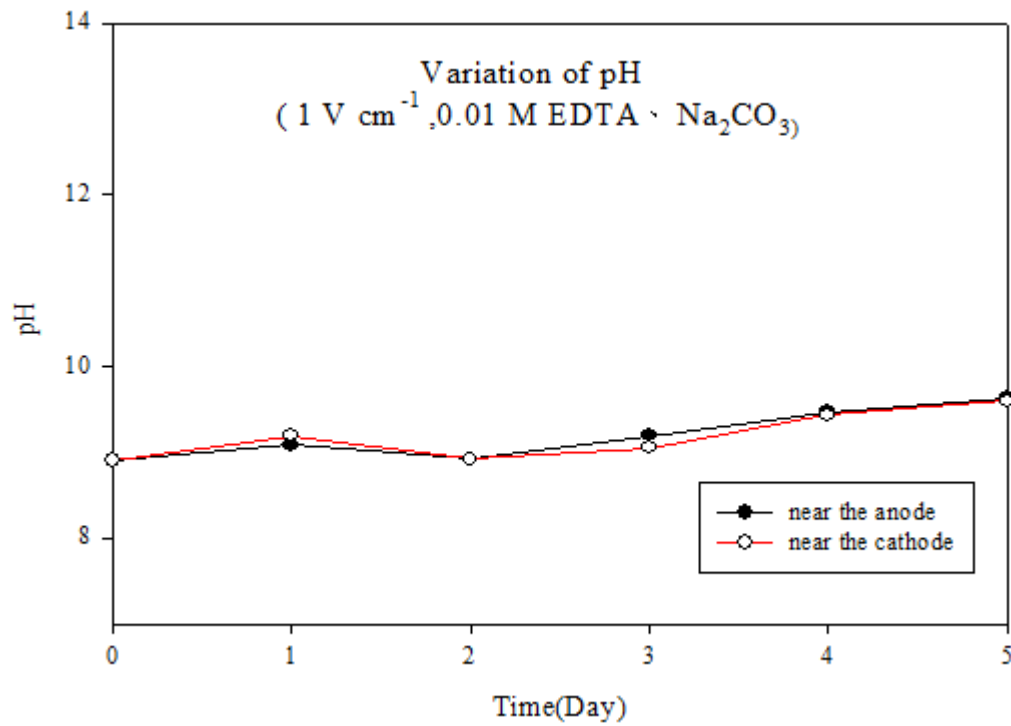


圖 3.1 電壓梯度 1 V cm^{-1} 之 pH 值變化趨勢圖

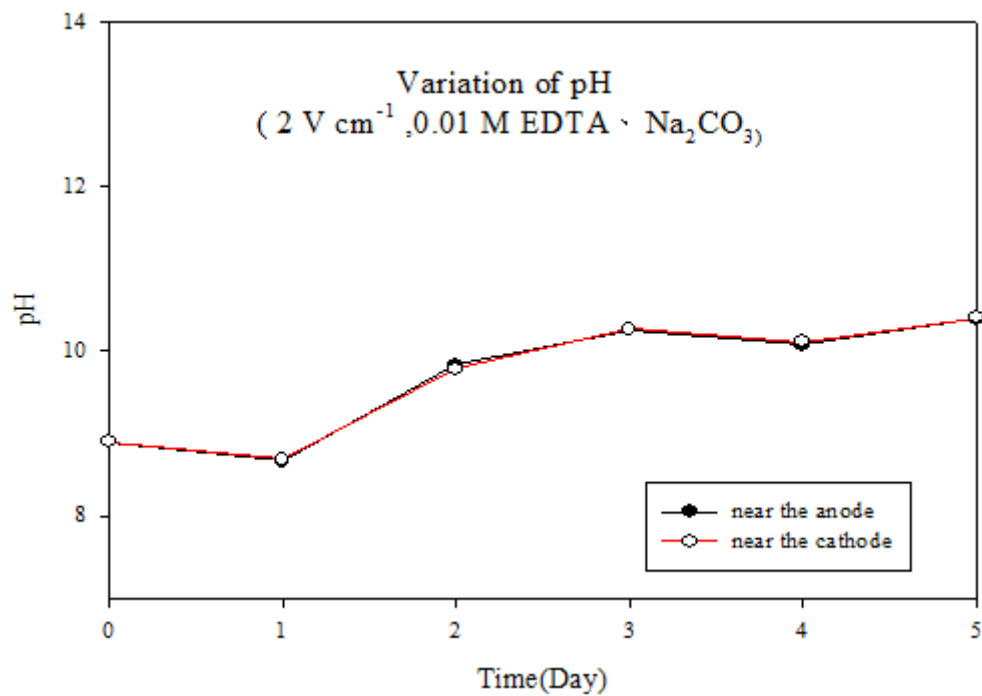


圖 3.2 電壓梯度 2 V cm^{-1} 之 pH 值變化趨勢圖

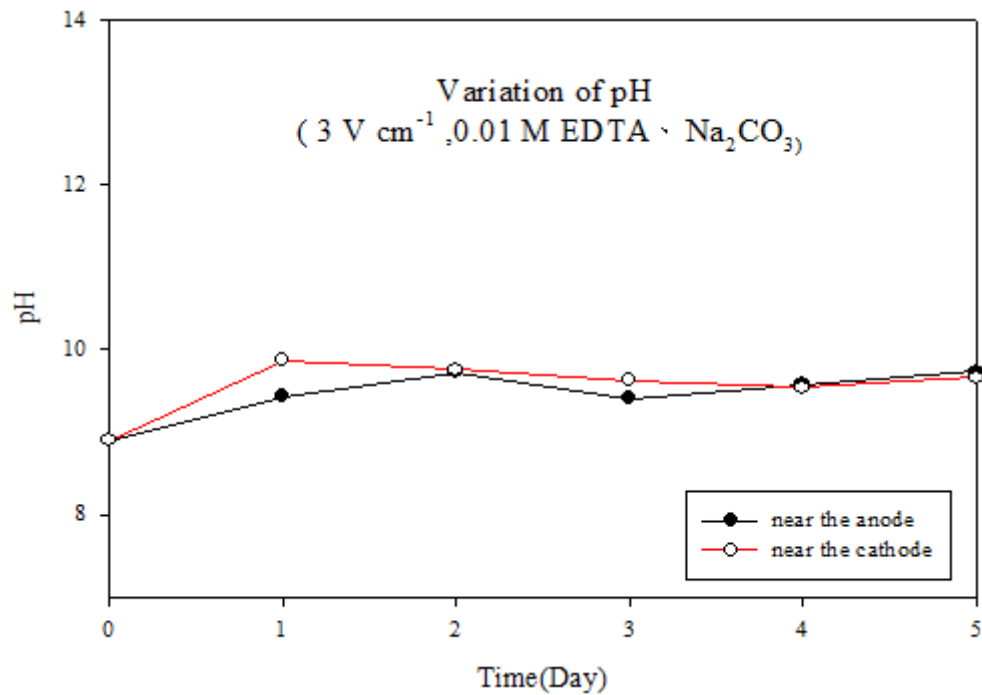


圖 3.3 電壓梯度 3 V cm^{-1} 之 pH 值變化趨勢圖

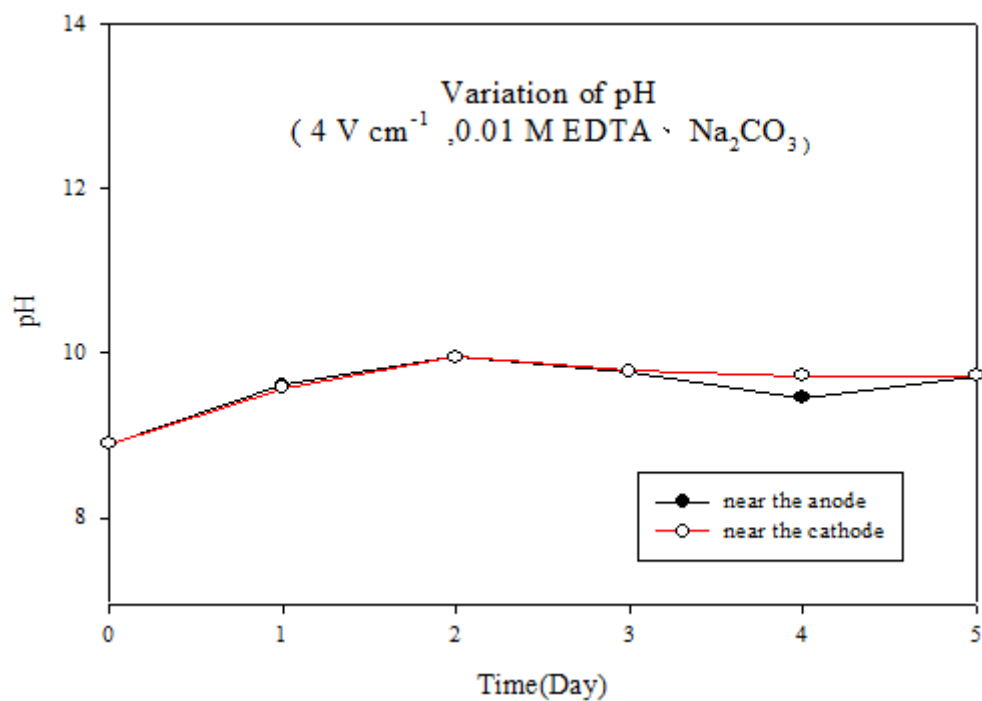


圖 3.4 電壓梯度 4 V cm^{-1} 之 pH 值變化趨勢圖

圖 3.5~圖 3.8 為改變不同操作電壓梯度進行電動力試驗其時間與導電度變化圖。導電度表示水傳導電流的能力，通常導電度愈高，表示水中電解質含量較多。導電度的變化與水中離子總濃度、移動性、價數、相對濃度、pH 值及水溫等有著密不可分之關係。由導電度變化圖可以看出，不同電壓梯度之導電度的變化都有上升的趨勢，在電壓梯度為 1.0 V cm^{-1} 時，導電度上升幅度較小，然而當電壓梯度提升時，導電度顯著的提升，特別是在電壓梯度為 4.0 V cm^{-1} 時，從實驗初始 3 mS cm^{-1} 上升至 16 mS cm^{-1} ，其主要是當操作於 4.0 V cm^{-1} 時，系統電解液溫度顯著提升，推測其導電度上升的主要因為溫度上升所影響。根據溫度的變化趨勢發現，當電壓梯度 4.0 V cm^{-1} 時，溫度的變化從初始實驗前 20°C 左右持續上升至實驗第五天約 90°C ，推測溫度的劇烈變化導致導電度的改變。另外，不管於陰極端或陽極端導電度皆有上升趨勢，且變化趨勢十分相似，其主要為本系統電動力技術迴流系統的影響。

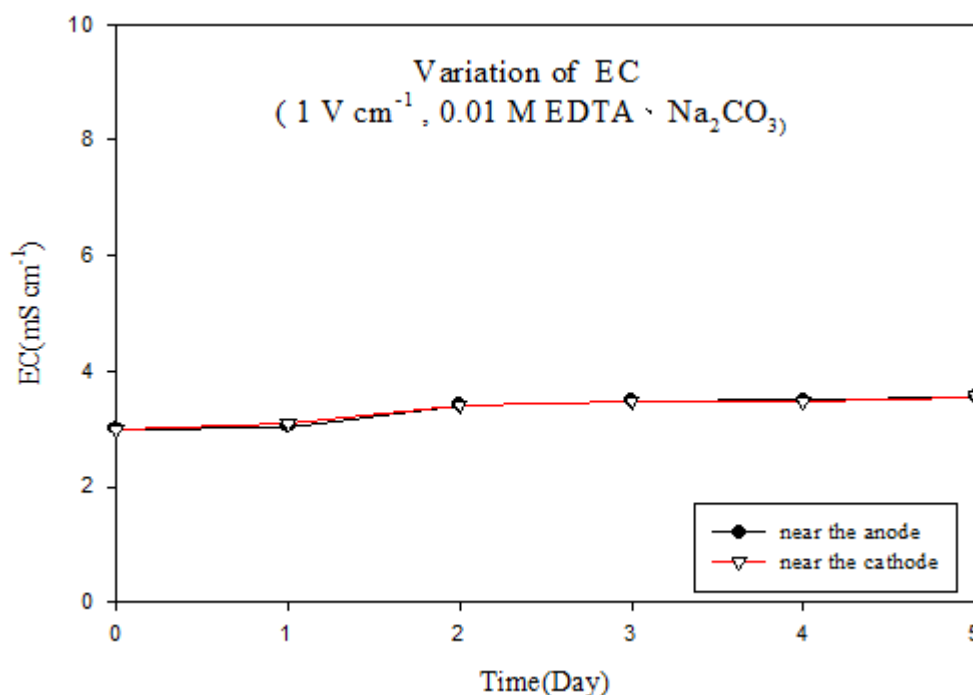


圖 3.5 電壓梯度 1 V cm^{-1} 之導電度變化趨勢圖

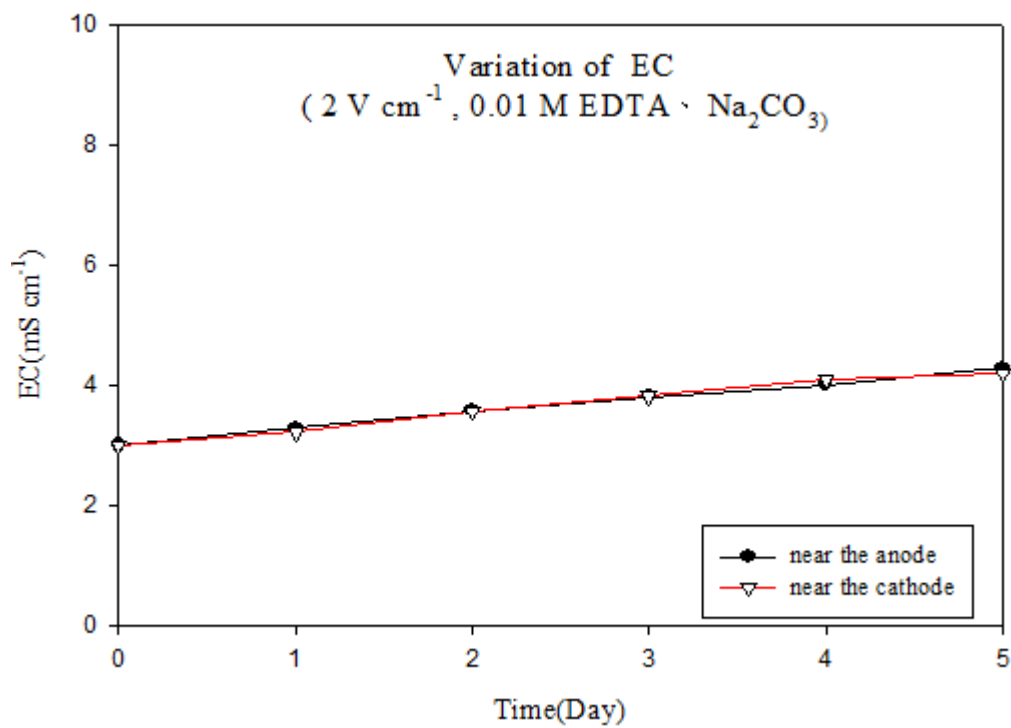


圖 3.6 電壓梯度 2 V cm^{-1} 之導電度變化趨勢圖

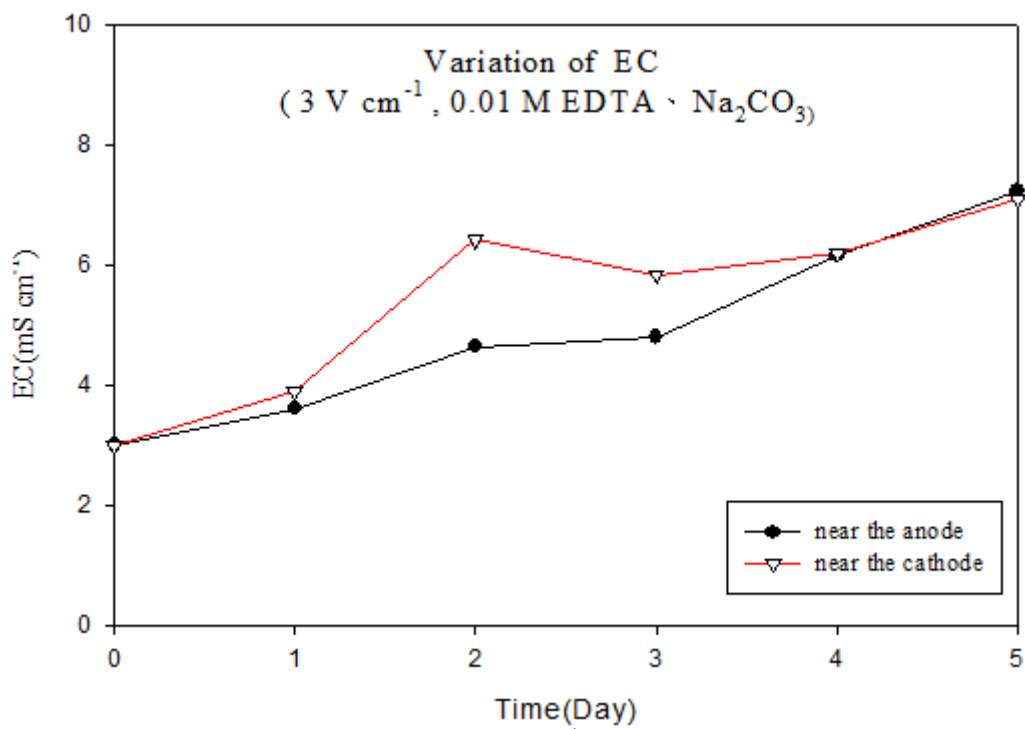


圖 3.7 電壓梯度 3 V cm^{-1} 之導電度變化趨勢圖

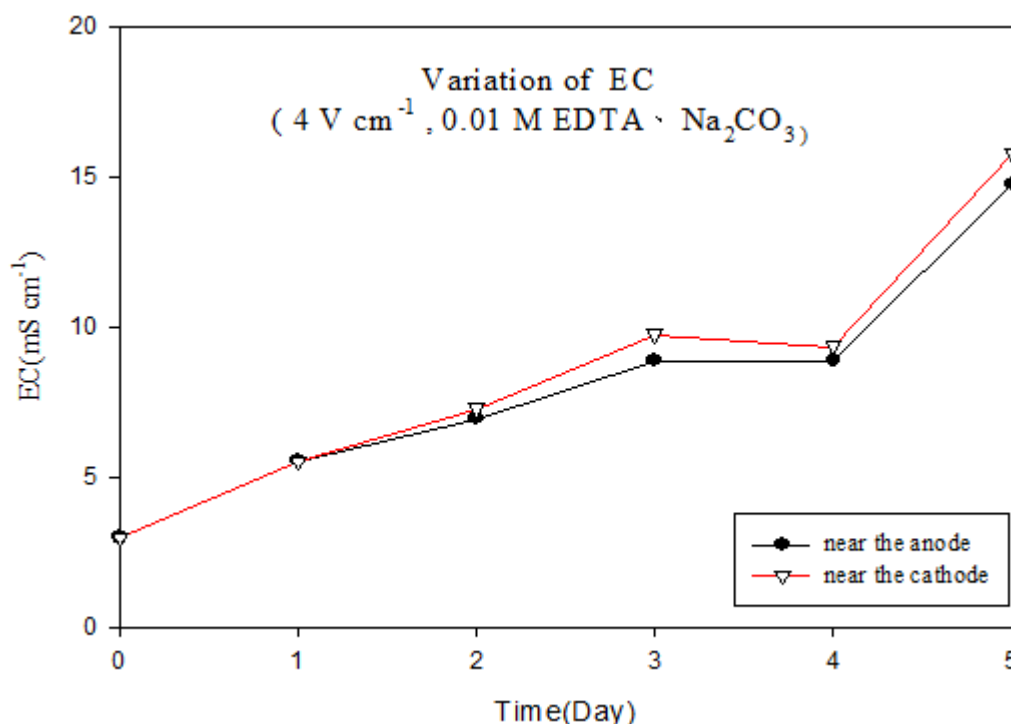


圖 3.8 電壓梯度 4 V cm^{-1} 之導電度變化趨勢圖

不同電壓梯度之土壤中重金屬鎘與鉛濃度變化

圖 3.9~圖 3.12 為不同電壓梯度以電動力技術去除土壤中鎘濃度之去除成效變化圖。以整體趨勢而言，鎘濃度於各種電壓梯度條件下皆有下降之趨勢。當電壓梯度為 1.0 V cm^{-1} 時，第一天的試驗下，三個不同位置（陰極端、中間端與陽極端）皆可達到約 60% 以上的去除效率，從原始約 120 mg kg^{-1} 降至約 50 mg kg^{-1} 以下，然而於第一天之後直到試驗第五天結束皆呈現較平緩狀態，第五天結束後以靠近陰極端的去除率最佳，達到約 79% 的去除，其次為中間端 73%，陽極端為 58%，鎘濃度總平均去除率為 70%。當提高電壓梯度為 2.0 V cm^{-1} 時，在第一天的試驗下，靠近陰極端位置的鎘濃度去除即可達 80%，於五天試驗結束後鎘濃度平均去除效率可提升達 86%，同樣以靠近陰極端的 93% 為最高，其次為中間端，效率較差為靠近陽極端位置。

當電壓梯度為 1.0 V cm^{-1} 及 2.0 V cm^{-1} 時發現，靠近陽極端於第五天鎘濃度有略上升的趨勢，主要推測為本系統為迴流系統裝置，當污染物被電滲透流驅動至陰極端時，由於電壓梯度較小的緣故，無法完全順利電鍍於陰極電極上，而被迴

流裝置又帶回陽極端，導致陽極端的濃度有上升的趨勢。然而，當電壓梯度提升為 3.0 V cm^{-1} 時，不管於陽極端、中間端及陰極端，鎘平均去除效率可達 91%，濃度皆可從約 122 mg kg^{-1} 降至 12 mg kg^{-1} 以下，效果十分顯著；不過，當再提升至電壓梯度 4.0 V cm^{-1} 時，鎘金屬平均去除效率雖可達 93%，但與電壓梯度 3.0 V cm^{-1} 差異不大。根據結果顯示，提升電壓梯度能有效提升鎘污染物的去除，當電壓梯度為 1.0 V cm^{-1} 、 2.0 V cm^{-1} 、 3.0 V cm^{-1} 及 4.0 V cm^{-1} 時，鎘最終濃度分別為 36 mg kg^{-1} 、 17 mg kg^{-1} 、 10 mg kg^{-1} 及 10 mg kg^{-1} ，其平均去除率為 79%、86%、91% 及 93%。從四個不同電壓梯度發現，不同位置的重金屬污染物濃度去除部分，皆是以靠近陰極端去除的重金屬濃度較為顯著，且濃度去除變化最明顯的皆發生於實驗第一天的情況下，爾後則逐漸的去除。根據鎘濃度的下降結果得知，除了在電壓梯度 1 V cm^{-1} 沒有達到法規標準的要求外，電壓梯度 2.0 V cm^{-1} 可符合管制標準 20 mg kg^{-1} ，而 3.0 V cm^{-1} 及 4.0 V cm^{-1} 更能符合監測標準 10 mg kg^{-1} 的要求，顯示電壓梯度能有效將鎘金屬從土壤中移除，並達到法規之要求。

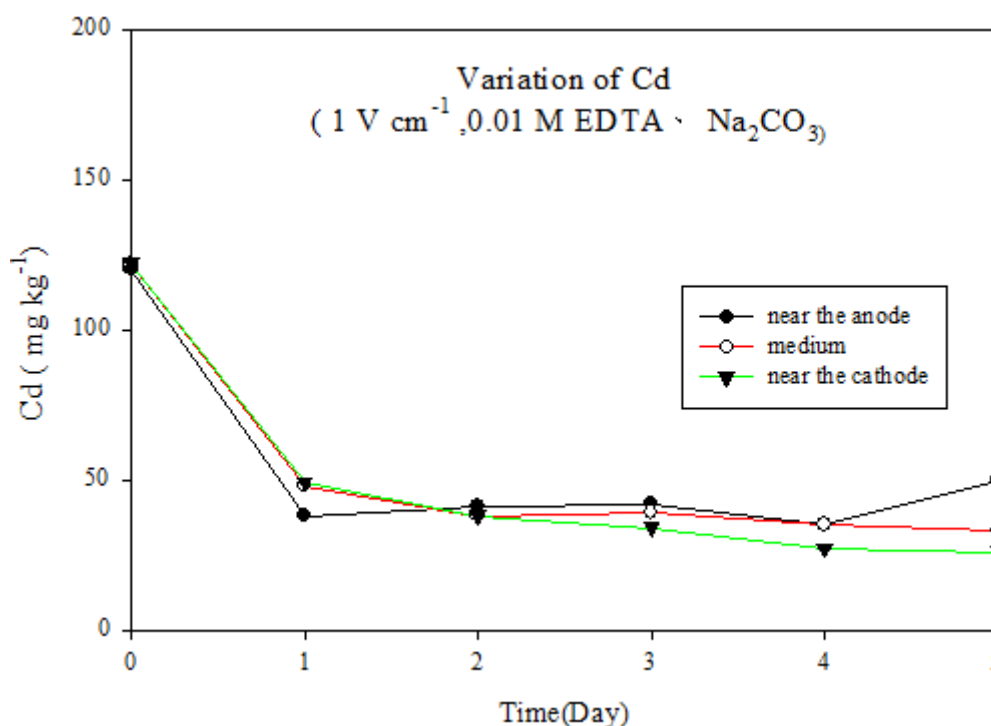


圖 3.9 電壓梯度 1 V cm^{-1} 之鎘濃度變化圖

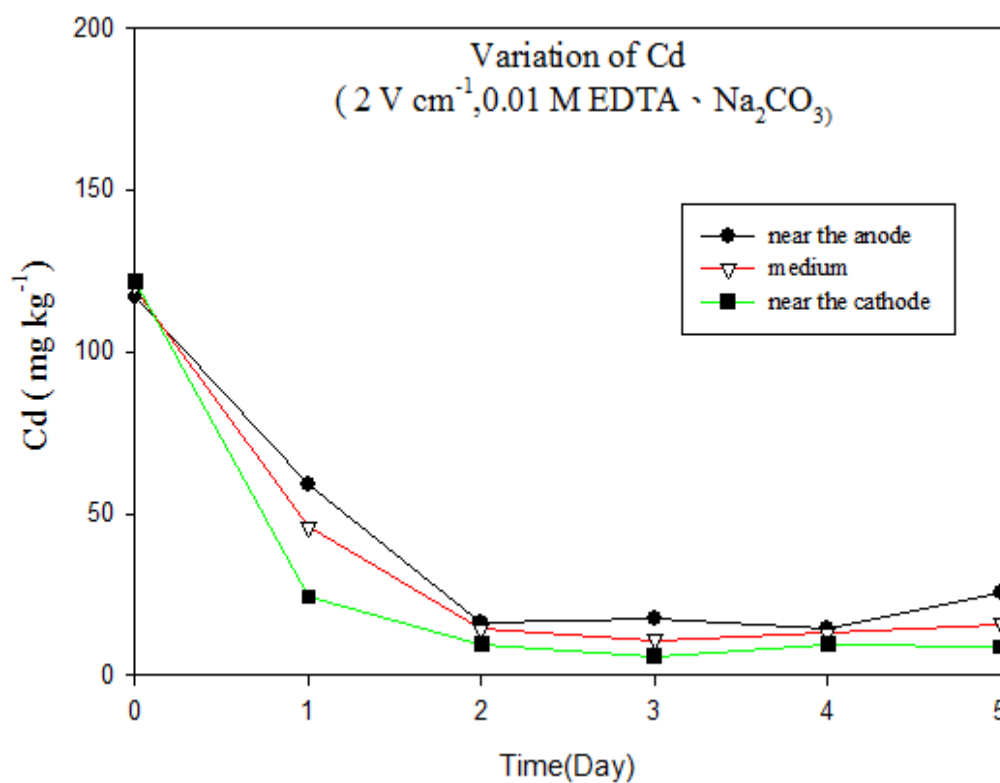


圖 3.10 電壓梯度 2 V cm^{-1} 之鎘濃度變化圖

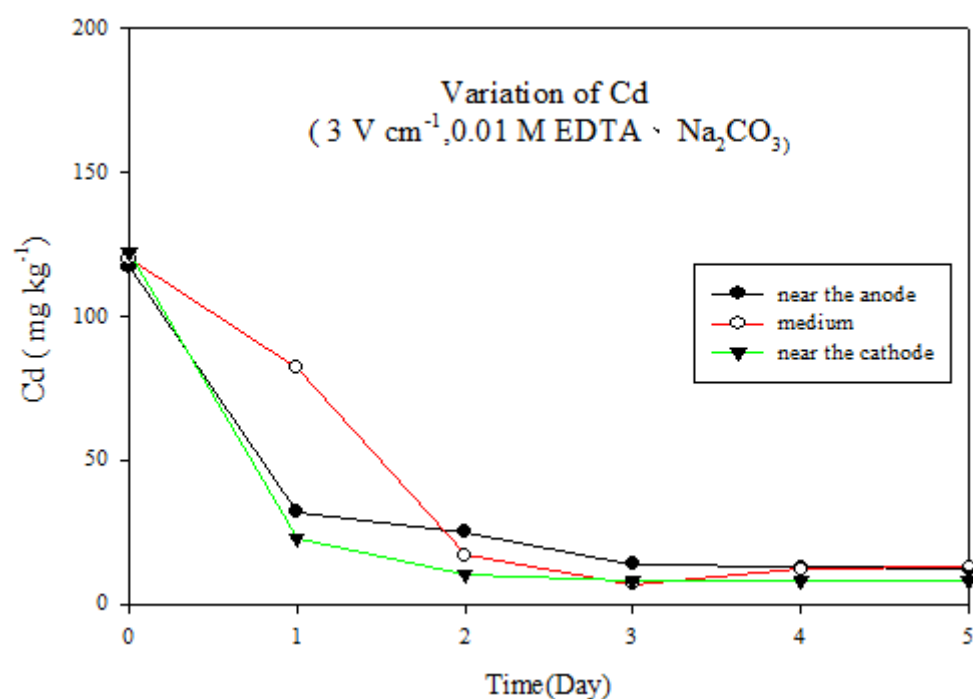


圖 3.11 電壓梯度 3 V cm^{-1} 之鎘濃度變化圖

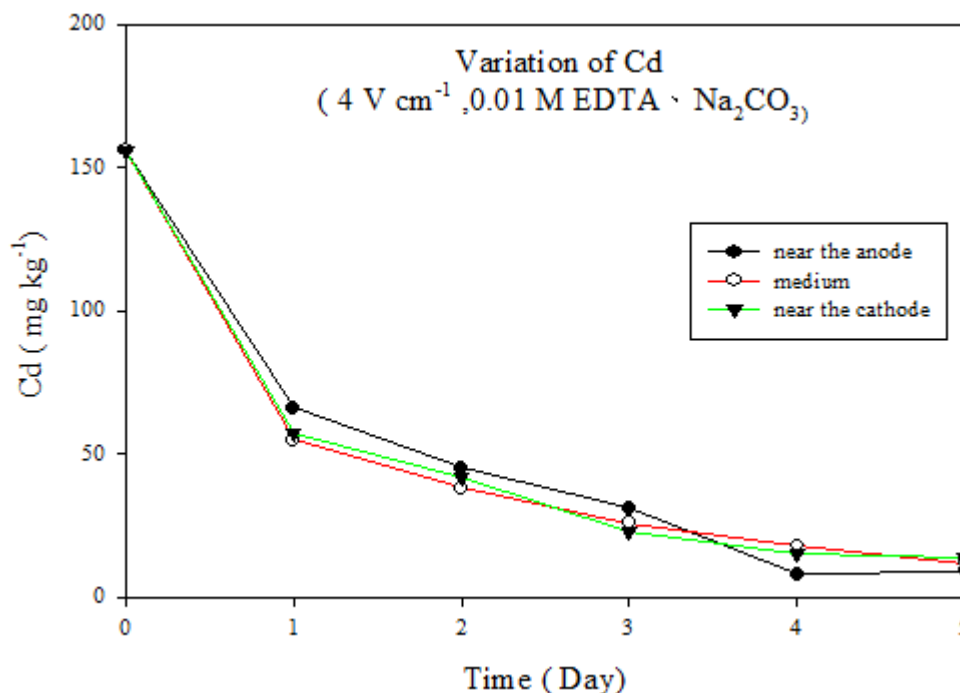


圖 3.12 電壓梯度 4 V cm^{-1} 之鎘濃度變化圖

圖 3.13~圖 3.16 為鉛於不同電壓梯度下之濃度變化趨勢圖。由圖可以看出不同電壓梯度進行電動力系統操作第 1 天時，鉛濃度達到平均 32%~62% 的去除效率，其中皆以靠近陰極端處理效果最佳。當系統操作於電壓梯度 1.0 V cm^{-1} ，鉛濃度於不同位置分別為陽極端 69%、中間端 91% 及陰極端 93%，平均去除效率為 84%，並可從濃度 $1,750 \text{ mg kg}^{-1}$ 降至 270 mg kg^{-1} 。當電壓梯度為 2.0 V cm^{-1} 以及 3.0 V cm^{-1} 時，在第一天的試驗下，仍然以靠近陰極端位置的鉛濃度達最佳的去除約 73% 和 75%，於五天試驗結束後鎘濃度平均去除效率達 80% 和 83%，兩者的差異並不大。然而，從圖中同發現，當電壓梯度於 1.0 V cm^{-1} 及 2.0 V cm^{-1} 時，於最後一天處理後之鉛濃度有些微上升的現象，其推論與鎘濃度上升的原因相同，主要受到迴流之影響，將污染物帶往陽極端造成濃度上升的現象。

當持續提升電壓梯度到 4.0 V cm^{-1} 時，除了陽極端外，中間端和陰極端位置的濃度去除可達到 75%，平均效率可達到 60% 去除，當試驗於第五天時，鉛濃度平均去除率更可達到 97%。從結果顯示，當電壓梯度操作於 $1.0 \text{ V cm}^{-1} \sim 3.0 \text{ V cm}^{-1}$ 時，對於鉛濃度的變化沒有明顯提升，但當提升至 4.0 V cm^{-1} 時，整體的去除效率皆可有效提升，濃度可從約 $2,105 \text{ mg kg}^{-1}$ 降至 80 mg kg^{-1} 以下。同樣，從不同電壓梯度中發現，重金屬污染物濃度去除部分仍是以靠近陰極端去除的重金屬濃度較為顯著。

根據鉛濃度的變化可得知，當操作為電壓梯度 1.0 V cm^{-1} ，第五天之平均濃度為 270 mg kg^{-1} ，即可達到食用作物農地之監測基準值 300 mg kg^{-1} ；當操作電壓梯度為 4.0 V cm^{-1} ，平均濃度為 52 mg kg^{-1} ，遠低於食用作物農地之監測基準值，此結果顯示符合本計畫之預期目標。於電動力系統操作程序中，施加電壓可使系統產生的電滲透流與離子遷移等作用，其可有效的將重金屬離子鎘與鉛遷移至陰極板上，當電壓梯度為 1.0 V cm^{-1} 時，不管對於鎘及鉛金屬最後去除可達約 80%。當施加的電壓梯度越高時，金屬鎘離子遷移的速度越迅速，進而可提高其去除效率，因此重金屬鎘去除率與電壓梯度呈正相關性。然而，鉛金屬則需當電壓梯度提升至 4.0 V cm^{-1} 時才有明顯增加趨勢，其主要推測因土壤中含有兩種金屬污染物，彼此間可能會產生競爭的作用，進而需要較大之電場進行處理。不過，經由五天的處理下，本系統對於土壤中同時含有兩種重金屬(鎘及鉛)污染物具有顯著的去除成效，結果證實本技術能有效移除鎘及鉛金屬之污染土壤。

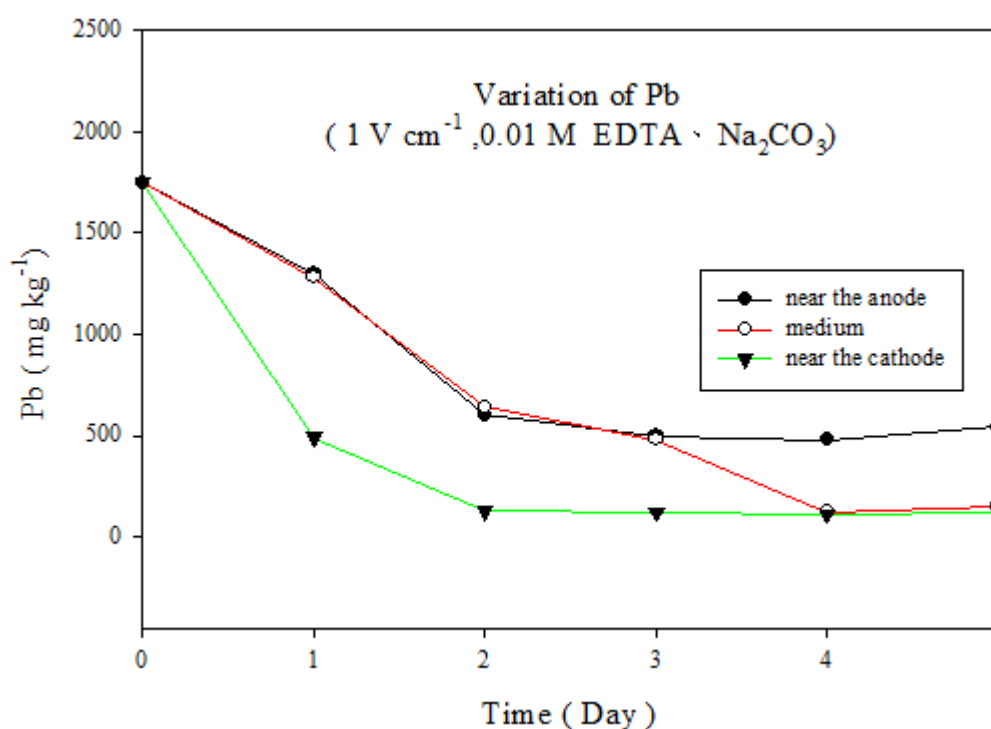


圖 3.13 電壓梯度 1 V cm^{-1} 之鉛濃度變化圖

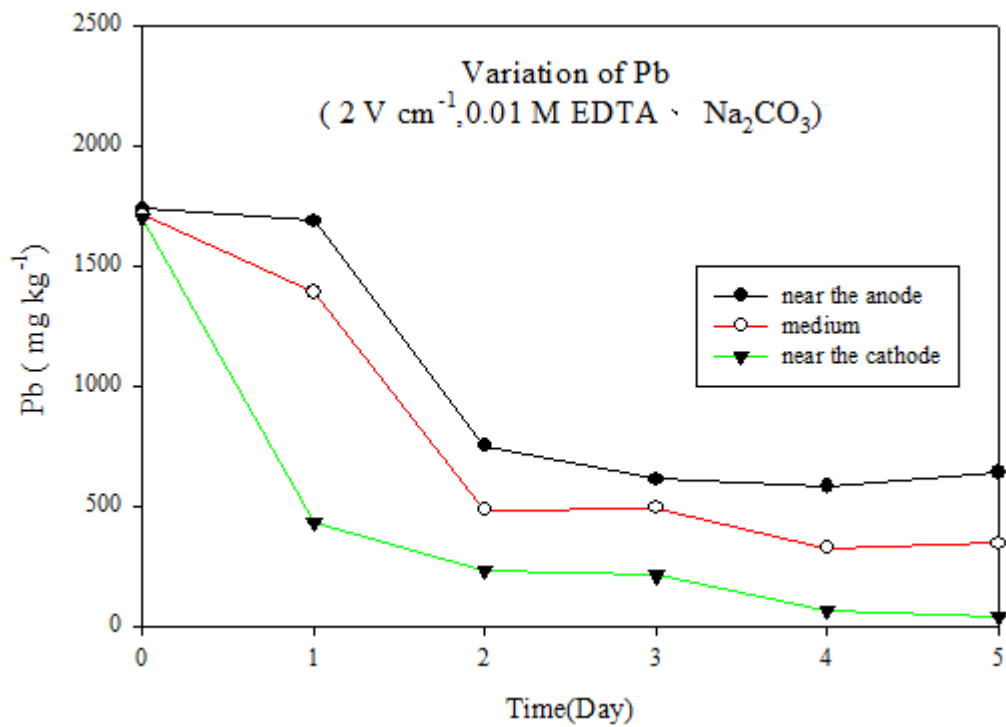


圖 3.14 電壓梯度 2 V cm^{-1} 之鉛濃度變化圖

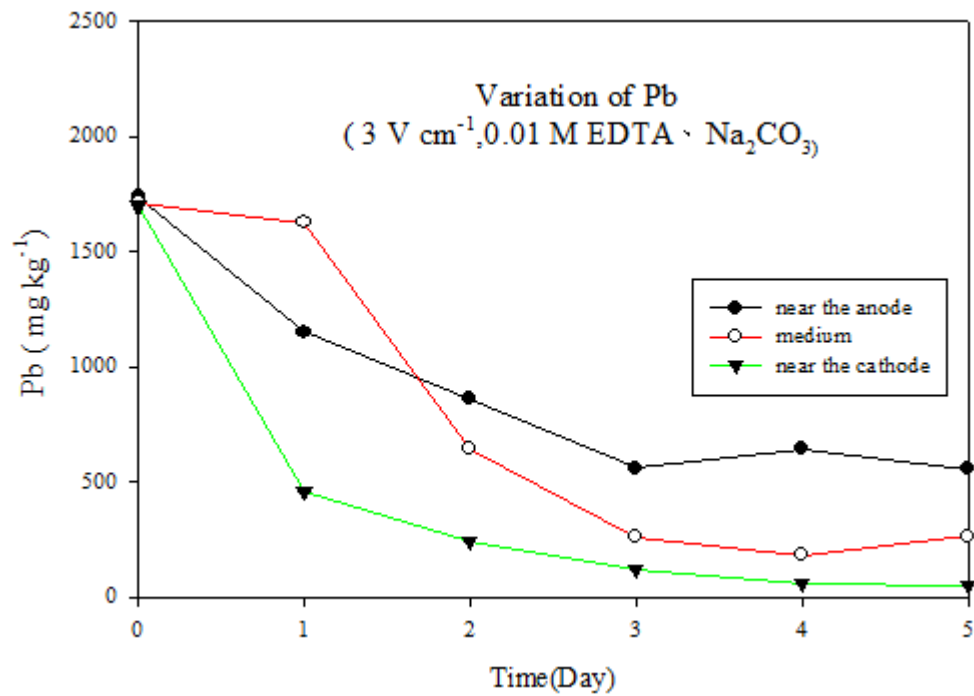


圖 3.15 電壓梯度 3 V cm^{-1} 之鉛濃度變化圖

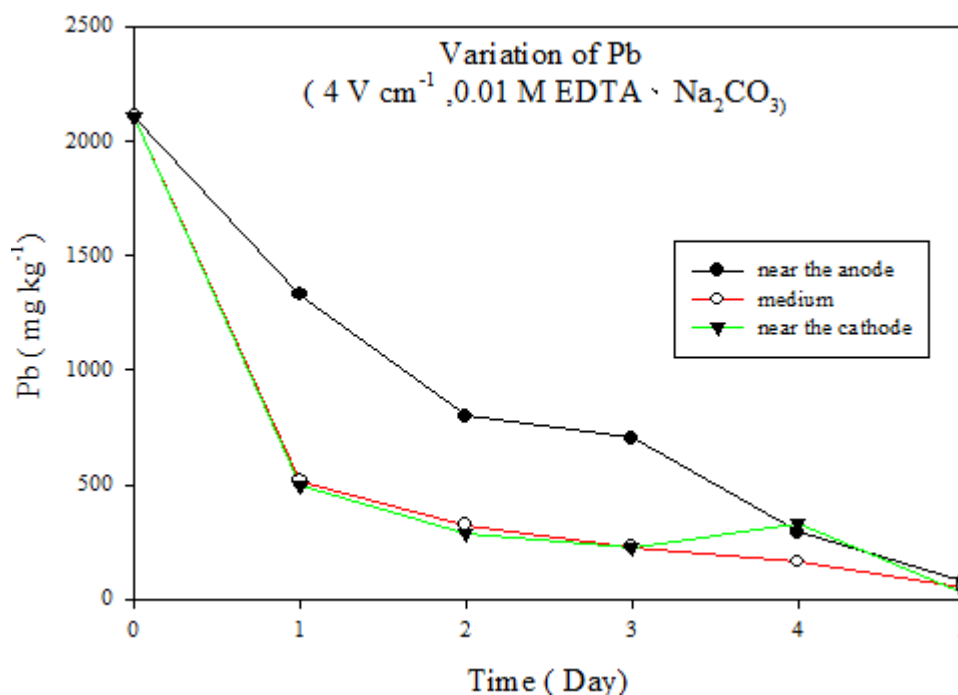


圖 3.16 電壓梯度 4 V cm^{-1} 之鉛濃度變化圖

土壤的含水率是影響處理效果之一，一般而言，土壤在高含水率的情況下，其系統對於污染物的處理效果良好。圖3.17~圖3.20為不同電壓梯度下之系統含水率的趨勢圖，從圖中可以顯示，四個電壓梯度的含水率約介於30%~40%之間，且隨著操作時間變化不顯著。其主要原因為當系統操作下，電解液會因電場驅動的關係而有溢散的狀況，須適時補充土壤的含水率以達到穩定去除的狀態，更能因此有效達到電滲透流及離子遷移的效果。經由本系統添加電解液的情況下，使含水率趨近於穩定的狀態，因此對於鎘及鉛金屬的去除具有很好的成效。

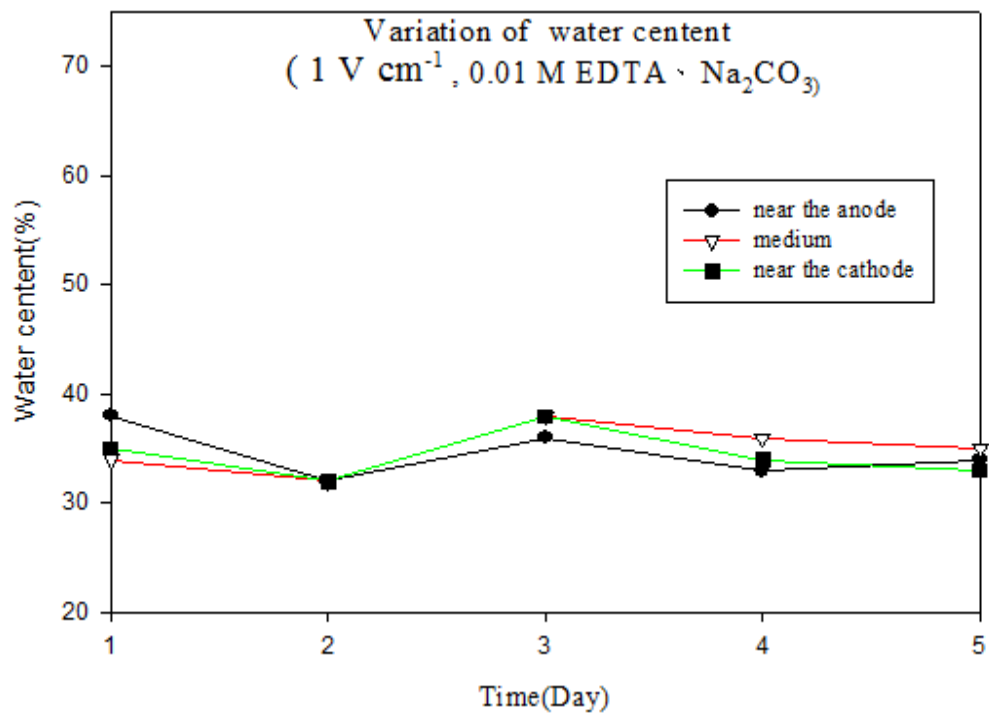


圖 3.17 電壓梯度 1 V cm^{-1} 之含水率變化圖

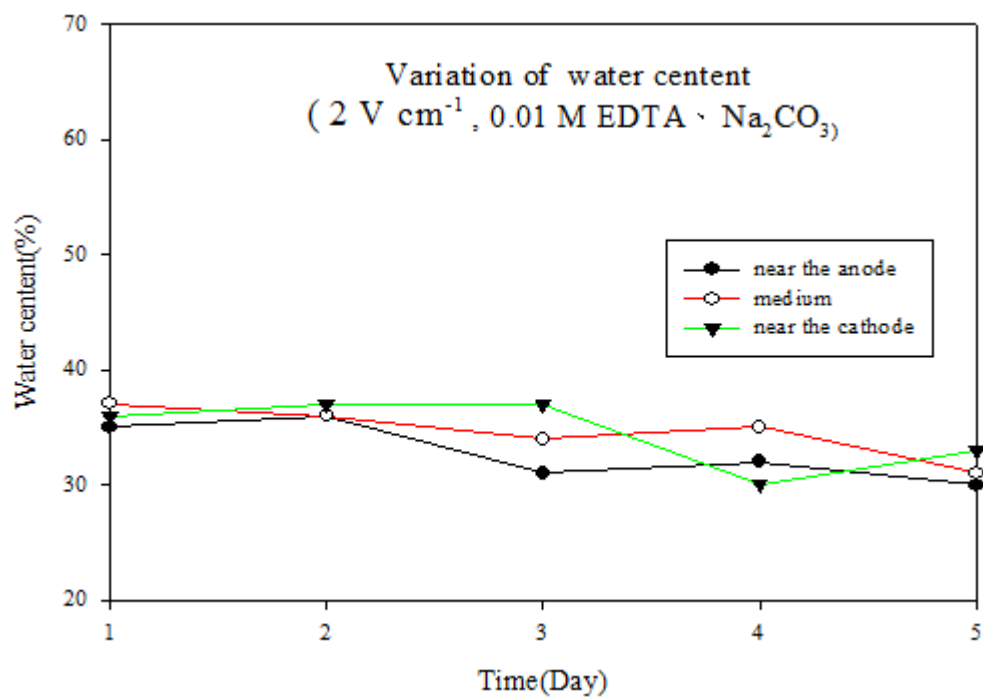
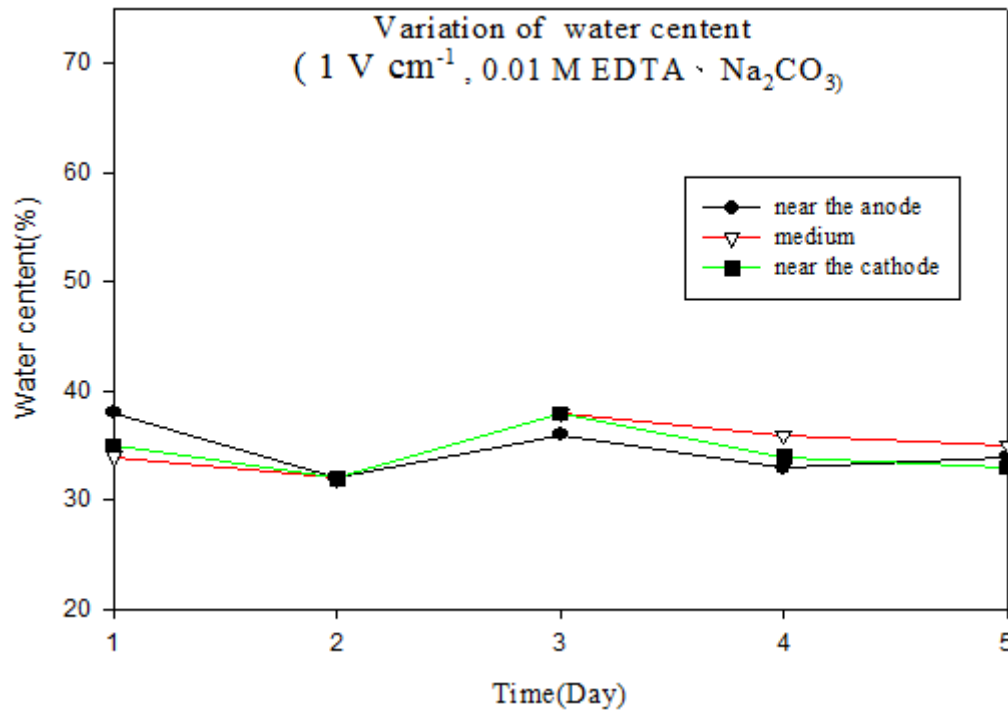
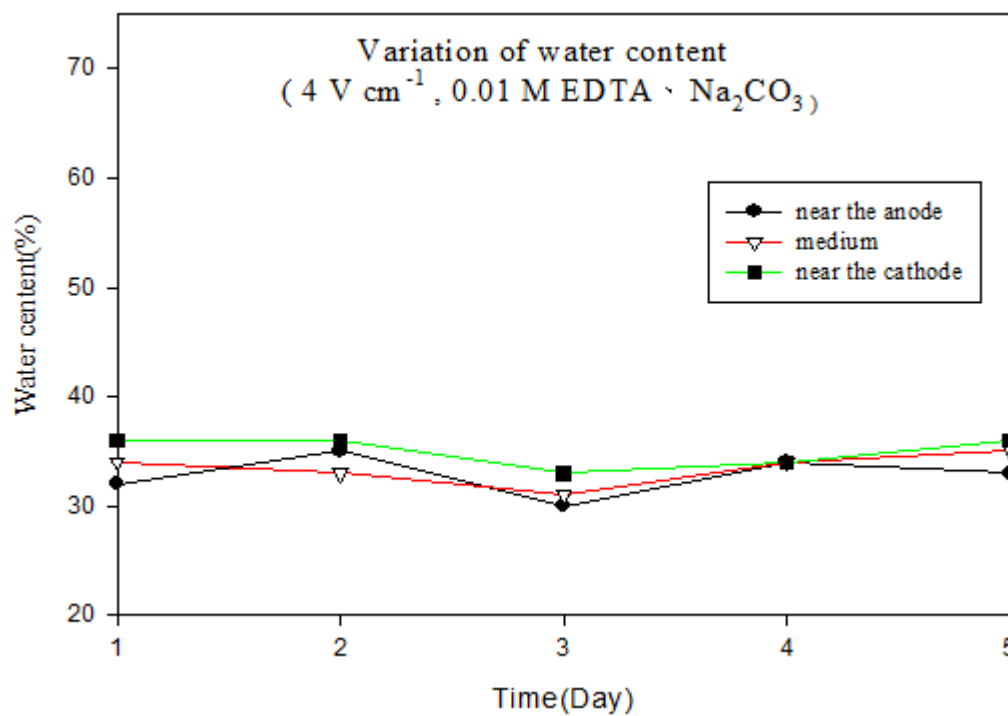


圖 3.18 電壓梯度 2 V cm^{-1} 之含水率變化圖

圖 3.19 電壓梯度 1 V cm^{-1} 之含水率變化圖圖 3.20 電壓梯度 4 V cm^{-1} 之含水率變化圖

土壤中重金屬鎘與鉛陰極電鍍之成效

為了有效得知重金屬污染物從土壤移除後是殘留於電解液中，抑或者是直接電鍍於陰極電極上，故將針對電解液中重金屬和陰極電極上之重金屬進行分析，以獲得相關數據，瞭解重金屬陰極電鍍之成效並估算及金屬回收率。陰極電鍍金屬之分析方法是將電動力處理五天後之陰極電極浸泡於 0.01 M 硝酸 10 分鐘後，將水樣過濾並定量，隨後進行火焰式原子吸收光譜儀 (AA) 分析樣品之重金屬濃度。圖 3.21 為電解液中重金屬之濃度變化圖，從圖中顯示，試驗第一天電解液中之鉛濃度較高 (約 122 mg L^{-1})，之後持續下降，到試驗於第五天後電解液中濃度降為 17 mg L^{-1} ，顯示電解液中殘留之重金屬隨著處理時間而下降。另外，陰極電極上所電鍍之重金屬濃度部分則顯示於表 3.2，其中包括污染土壤重金屬初始濃度、電鍍於陰極電極上之重金屬濃度以及試驗五天後之重金屬回收率。鎘金屬初始濃度為 156 mg kg^{-1} ，處理五天後陰極板電鍍金屬濃度為 132 mg kg^{-1} ，顯示於五天的操作時間下，能將土壤中重金屬有效電鍍於陰極板的比例達到 85%，鉛金屬於五天的操作時間下能達到 70% 的電鍍成效。顯示於本系統電壓梯度 3 V cm^{-1} 操作下，於五天的試驗時間下，能有效將大部分之金屬電鍍於陰極電極上。

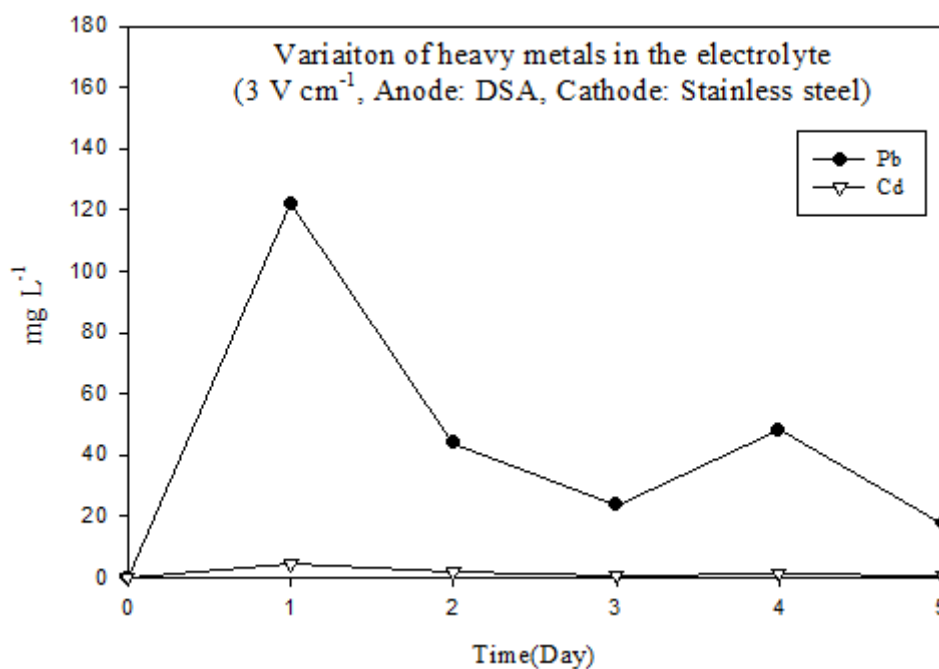


圖 3.21 電解液中重金屬濃度之變化

表 3.2 陰極電鍍金屬之回收率

項目	鎘	鉛
土壤重金屬(mg kg^{-1})	156	2105
陰極板電鍍金屬(mg kg^{-1})	132	1483
回收率(%)	85	70

為進一步確認本研究所移除之重金屬，是否有效電鍍於陰極電極上，特別將陰極電極不銹鋼表面進行不同貴重儀器分析，主要分析項目包括場發射電子顯微鏡(Field Emission Scanning Electron Microscope, FESEM)、X 光能量散佈分析儀(X-ray energy dispersive spectrometer, EDS)和 X 光繞射分析儀(X-ray diffractometer, XRD)，以確認電極表面型態、元素組成及化合物之種類。圖 3.22 及圖 3.23 為本研究利用 FESEM 觀察陰極不銹鋼電極使用前與經電動力操作後表面形貌之情形。由於陰極電極為一般市售的不銹鋼板，且因特定尺寸須由廠商進行切割，因此表面有小部分刮痕，但整體觀察，基材仍為平整且無任何物質存在之表面結構。不過，經由電動力操作下發現，表面結構與使用前明顯不同，主要呈現明顯層層堆疊之結構，其主要為重金屬污染物於陰極電鍍所造成表面型態的改變。

另外，本研究利用 EDS 進行電極表面之元素分析，以確定電極中之元素種類，結果如圖 3.24 及圖 3.25。從元素分析結果得知，不銹鋼電極表面以 Fe、Ni 及 Cr 元素為主，當五天電動力操作下，除了原本不銹鋼基材元素之外，另出現其 Cd 及 Pb 元素，初步證實土壤中重金屬污染物於電動力試驗下能電鍍於陰極表面。最後，確定表面所電鍍之化合物之種類判定部分，則利用 X 光繞射分析儀進行定性分析。經由分析圖譜顯示，以及透過電腦軟體自動比對 JCPDS 資料庫卡號中各個波峰相對應之標準圖譜，鑑定出每個波峰所代表之物質。圖 3.26 為使用前不銹鋼電極之 XRD 圖譜，經由 XRD 分析證實，其中明顯波峰對應為 $\text{Fe}_{0.64}\text{Ni}_{0.36}$ 及 Fe-Cr 化合物，可證實為不銹鋼材質；圖 3.27 為不銹鋼電極使用後之圖譜，其中明顯波峰對應到相關化合物為 PbO_2 及 $\text{Cd}(\text{OH})_2$ ，經由以上分析證實鉛及鎘金屬能有效電鍍於陰極電極表面。

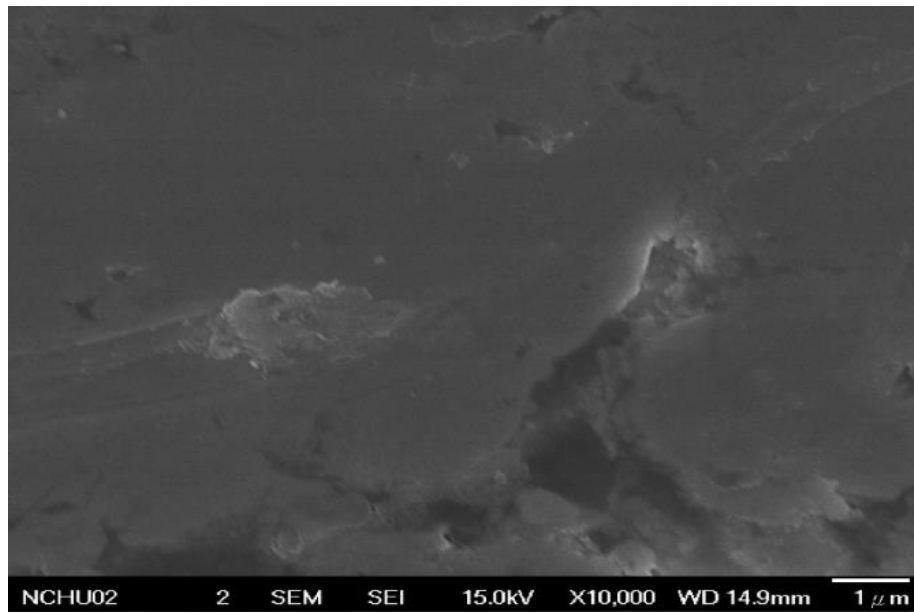


圖 3.22 不銹鋼電極使用前之表面形貌圖

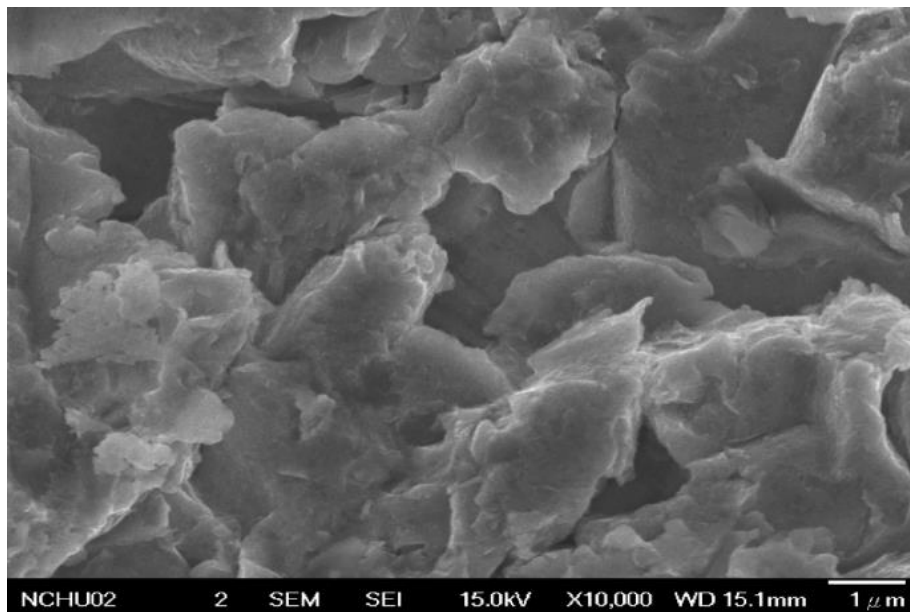


圖 3.23 不銹鋼電極試驗後之表面形貌圖

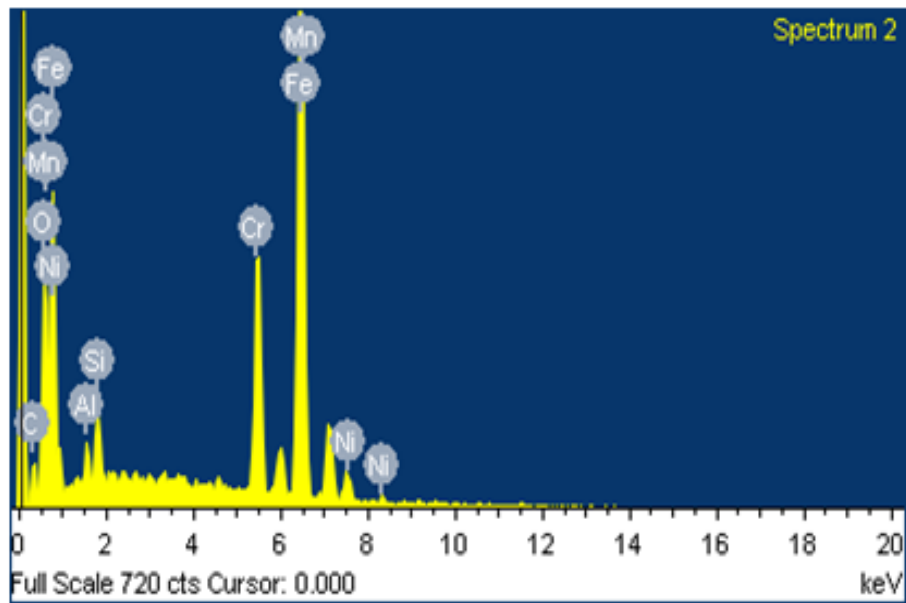


圖 3.24 不銹鋼電極使用前之元素分析圖

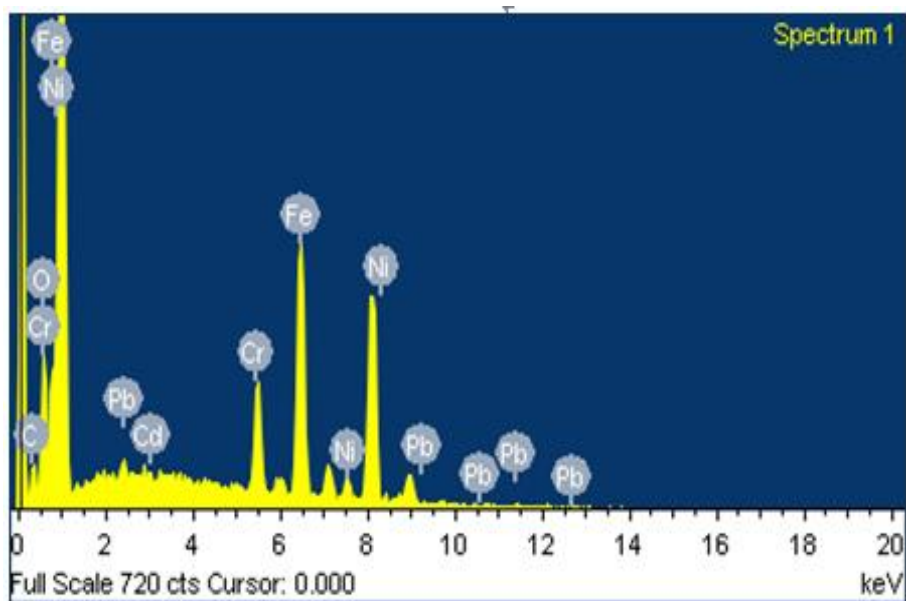


圖 3.25 不銹鋼電極試驗後之元素分析圖

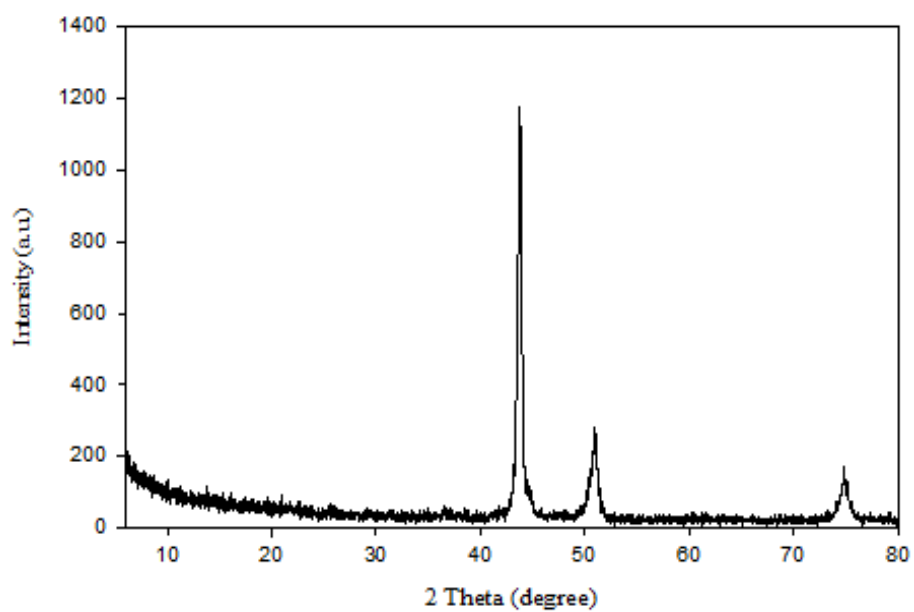


圖 3.26 不銹鋼電極使用前之 XRD 分析圖

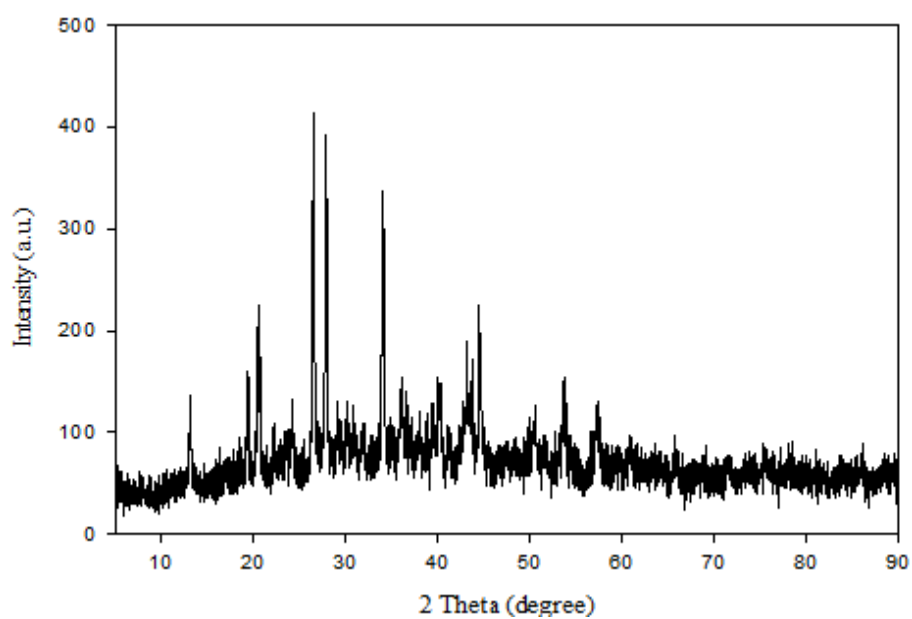


圖 3.27 不銹鋼電極試驗後之 XRD 分析圖

不同電壓梯度之電動力系統中電壓及電流變化

圖 3.28 為施加不同電壓梯度進行電動力系統操作電流與時間之變化圖。由圖可發現，各組試驗電流與操作電壓梯度的關係，當操作電壓梯度越大電流也越大，反之電流則越小。此外也可得知，系統經過 5 天的操作時間，電流的變化皆隨著操作時間的增加電流有上升的趨勢，且以電壓梯度 3.0 V cm^{-1} 及 4.0 V cm^{-1} 更為明顯。推測原因可能是試驗中為避免每日採取之電解質及污染土壤之樣品，而使得系統之操作液液面降低與極板接觸面積因此減少，進而影響其重金屬之去除效果，因此每日皆有添加其操作液以維持系統中液面之固定高度，然而每日添加之操作液形成系統中電解質的增加，造成其電流會有上升的情形，且因電壓梯度 3.0 V cm^{-1} 及 4.0 V cm^{-1} 操作下電解液散失較快速，添加的電解質越多，導致電流顯著提升。

根據表 3.3 之電壓及電流，即可估算以不同電壓梯度以電動力技術處理 450 克之污染土壤 5 天之用電量。計算電量公式如下：

電功率（瓦特，W）= 電壓（V）× 電流（A）；

台灣電費之單位為度，1 度電為 1 仟瓦小時，每度電以 3.5 元計。

電動力技術操作 5 天，所需電費為：電壓梯度 1.0 V cm^{-1} 時，使用電量為 $22 \times 0.18 \times 10^{-3} \times 5 \times 24 \div 0.45 \times 3.5 = 3.696$ 元；電壓梯度 2.0 V cm^{-1} 時，使用之電量 $2.0 \times 22 \times 0.59 \times 10^{-3} \times 5 \times 24 \div 0.45 \times 3.5 = 24.2$ 元；電壓梯度 3.0 V cm^{-1} 時，使用之電量 $3.0 \times 22 \times 1 \times 10^{-3} \times 5 \times 24 \div 0.45 \times 3.5 = 69.3$ 元；電壓梯度 4.0 V cm^{-1} 時，使用之電量 $4.0 \times 22 \times 2.74 \times 10^{-3} \times 5 \times 24 \div 0.45 \times 3.5 = 225$ 元。

根據上面電費之估算，以不同電壓梯度進行電動力技術處理污染土壤之重金屬，於不同電壓梯度的試驗下，若以電動力技術處理 1 天後，估算以移除 100 mg kg^{-1} 重金屬所需用電量之費用估算。當電壓梯度 1.0 V cm^{-1} 時，鎘所需之用電量 $(22 \times 0.17 \times 10^{-3} \times 1 \times 24 \div 0.45 \times 3.5) \div (121 - 45) \times 100 = 0.92$ 元，不同重金屬及電壓梯度所需之用電量如表 3.4 所示。

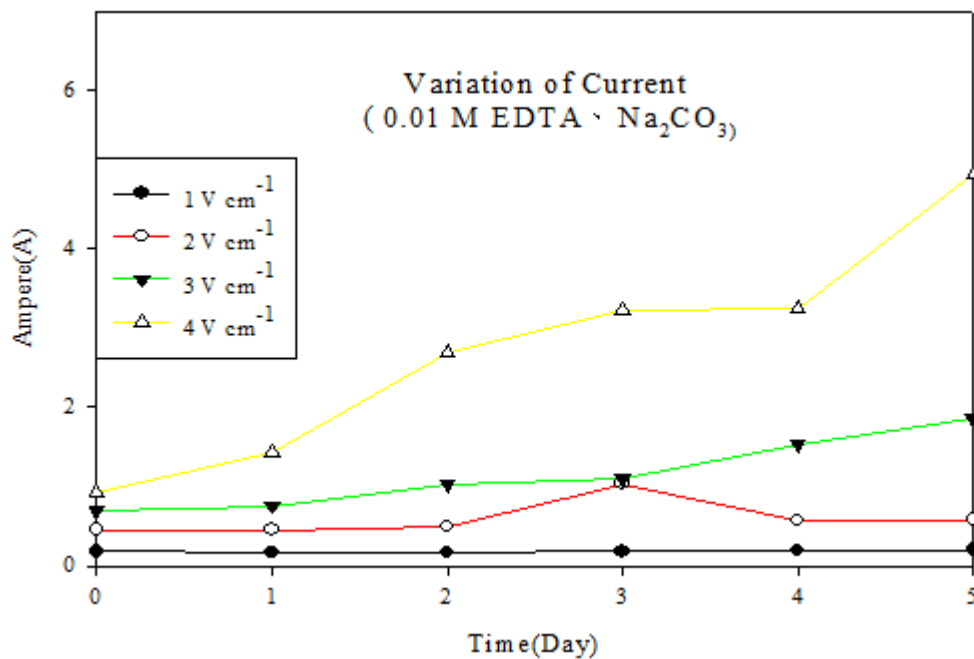


圖 3.28 不同電壓梯度之電流變化圖

表 3.3 施加不同電壓梯度之總電壓及平均電流

操作之電壓梯度 (V cm ⁻¹)	施加之總電壓 (V)	初始電流 (A)	平均電流 (A)
1.0	22	0.18	0.18
2.0	44	0.45	0.59
3.0	66	0.70	1.00
4.0	88	0.90	2.74

表 3.4 不同電壓梯度移除 100 mg kg⁻¹重金屬所需用電量之費用估算 (元)

電壓梯度 (V cm ⁻¹)	重金屬	
	鎘	鉛
1.0	0.92	0.10
2.0	4.80	0.67
3.0	12.4	1.47
4.0	24.2	1.77

污染土壤於未經前處理下之電動力試驗

經由不同電壓梯度的操作下，其結果顯示能有效處理同時含有鉛及鎘污染物之土壤；不過，由於從雲林縣虎尾鎮污染場址所取回之現場土壤，於電動力試驗前，係經過一系列之前處理，將採集回來的土樣經過風乾，除去土壤中之雜草、石頭等雜物，以陶瓷材質之研磨器磨碎，再經過100 mesh (0.15 mm) 之篩網過篩後，以夾鏈袋儲存供作後續實驗使用，以利後續試驗及分析之用。因此，此測試之土壤是經過磨碎、過篩及再裝填至處理系統中，為了解未來實際應用於現地污染場址土壤的處理效率，在未經過前處理的處置下，其處理效果能否一致，此部分也將一併的探討。

圖 3.29 為未經過前處理下(未過篩及研磨過程)之重金屬污染土壤，於電壓梯度 3.0 V cm^{-1} 電動力技術處理下電解液 pH 值變化圖。從圖可以明顯發現，操作電壓之電解液 pH 值維持在 pH 9 至 pH 10.8 之間，pH 值的變化相對穩定。由於污染土壤浸泡於電解液中 ($0.01 \text{ M EDTA} + \text{Na}_2\text{CO}_3$) 之初始 pH 值約為 9，於鹼性的範圍，在試驗前兩天變化相對平穩，爾後變化有些微上升的趨勢。另外，從陽極端或陰極端電解液之 pH 值可以發現，兩者位置的 pH 值變化並不顯著，這結果與經過前處理的土壤之 pH 值變化差異不大。雖然污染土壤未經過前處理下即進行試驗，是屬於未經破壞之原始土壤，然而本系統 pH 值仍能保持穩定的主要原因為系統添加之操作液的高 pH 緩衝能力，以及設計的循環系統所貢獻的結果。本系統 CEEK 藉由陽極和陰極儲槽的連通，並透過循環輸送泵將其中和，因此，於本系統設計下，不管於經由前處理下之污染土壤，或者是現地採集回來的原始土壤，於本系統下皆能使 pH 值保持穩定的狀態，此部分也有助於未來實際應用於現地整治之污染土壤。

圖 3.30 為原始土壤於 3.0 V cm^{-1} 電壓梯度下進行電動力試驗其時間與導電度變化圖。由導電度變化圖可以看出，電解液之導電度的變化有持續上升的趨勢，從實驗初始 3 mS cm^{-1} 上升至 7.8 mS cm^{-1} ，其主要是當操作於 3.0 V cm^{-1} 時，系統電解液溫度的提升，推測其導電度上升的主要原因為溫度上升所影響。另外，不管於陰極端或陽極端導電度皆有上升趨勢，且變化趨勢十分相似，此導電度的變化趨勢與土壤經由前處理後相較下，兩者的變化十分類似，未有明顯的差異產生。

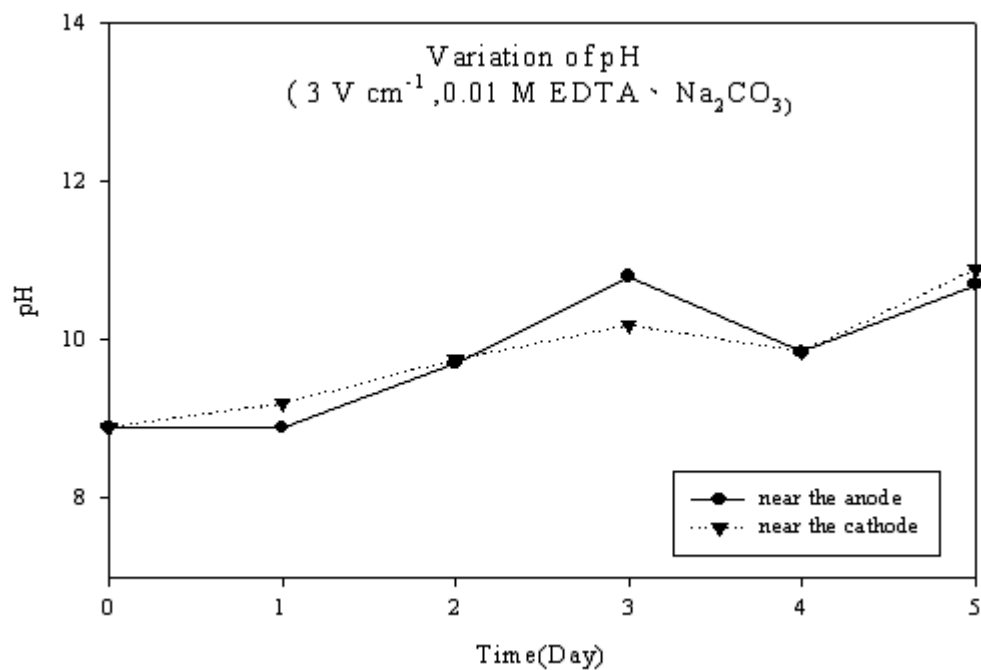


圖 3.29 原始土壤之 pH 值變化趨勢圖

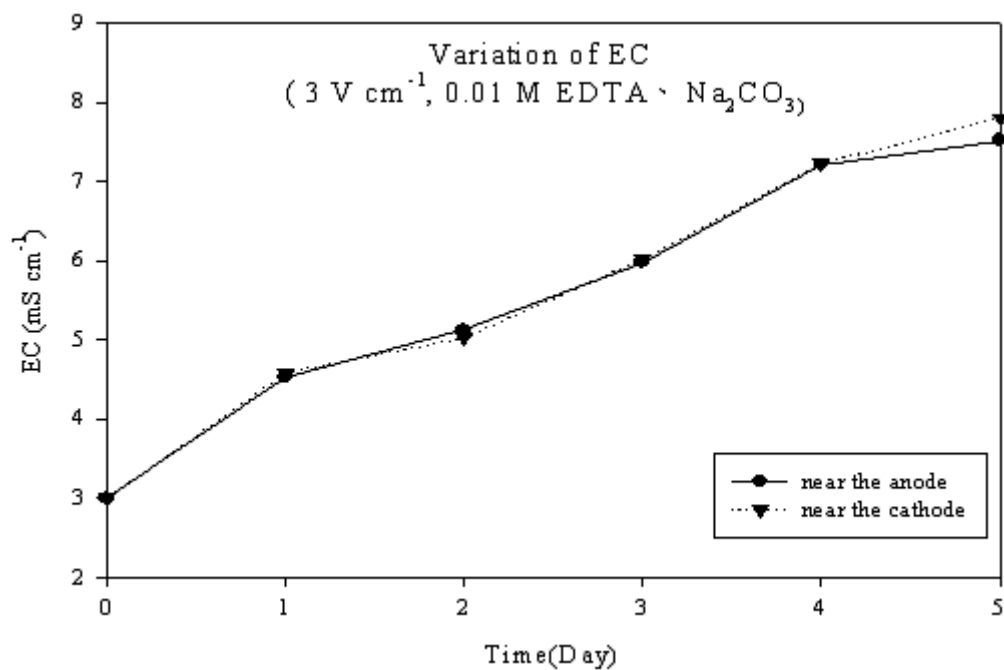


圖 3.30 原始土壤之導電度變化趨勢圖

圖 3.31 為 3.0 V cm^{-1} 電壓梯度以電動力技術去除原始土壤中鎘濃度之去除成效變化圖。以整體變化趨勢而言，鎘濃度於第一天的試驗下，三個不同位置（陰極端、中間端與陽極端）之平均去除效率達到約 63%，從原始約 155 mg kg^{-1} 降至約 57 mg kg^{-1} 以下，然而於第一天之後直到試驗第五天結束皆呈現較平緩狀態，第五天結束後以靠近陽極端與陰極端的去除率最佳，平均可達到約 90% 的去除，而中間端為 73% 去除效率，鎘濃度總平均去除率為 83%。此部分之效率與經由前處理下之土壤效率進行比較後發現，當於相同操作條件下，經由研磨及過篩後之鎘金屬去除效率平均為 91%，比未處理的鎘去除效率提升約 8%；造成此去除效率的差異主要推測為土壤顆粒尺寸的影響。由於未過篩的土壤顆粒尺寸分佈較廣，且同時散佈於靠近陰極端、陽極端與中間端位置，然而電動力技術重金屬移除機制為電滲透流及離子遷移，當系統有許多大小不均一的污染土壤時，使得電滲透流及離子遷移較為緩慢，影響鎘金屬的移除效率。然而，由於本系統所施加之電壓梯度 3.0 V cm^{-1} 已為足夠之能量，因此，雖然污染土壤未經過前處理下，仍可以達到 83% 的移除效率，並符合管制標準 20 mg kg^{-1} 的要求。

圖 3.32 為鉛於 3.0 V cm^{-1} 電壓梯度之鉛濃度變化趨勢圖。由圖可以看出電動力系統操作第 1 天時，鉛濃度以靠近陰極端 68% 的去除效率為最高，並可從濃度 $2,105 \text{ mg kg}^{-1}$ 降至 665 mg kg^{-1} ，而靠近陽極端及中間位置之去除效率並不明顯，於五天試驗結束後鉛濃度平均去除效率達 74%。相較於經由研磨及過篩後之鉛金屬去除效率平均為 83%，比土壤未處理的鉛去除效率提升約 9%；造成此去除效率的差異主要推測仍為土壤顆粒尺寸的影響。從圖中變化趨勢可以發現，有別於以往的結果，鉛濃度變化於第一天除了陰極端效果明顯之外，其餘位置移除效率並不顯著，但不均一的土壤顆粒經由持續的電動力試驗下，電滲透流的提升，使去除效率隨著處理時間逐步上升，最後平均去除效率仍可達到 74%。於電動力系統操作程序中，施加電壓可使系統產生的電滲透流與離子遷移等作用，能有效將重金屬離子鎘與鉛遷移至陰極板上。未來針對現地污染土壤的整治部分，只要系統能施加足夠之電場能量及提供適當之處理時間，仍可有效地移除含有重金屬鎘及鉛之污染土壤。

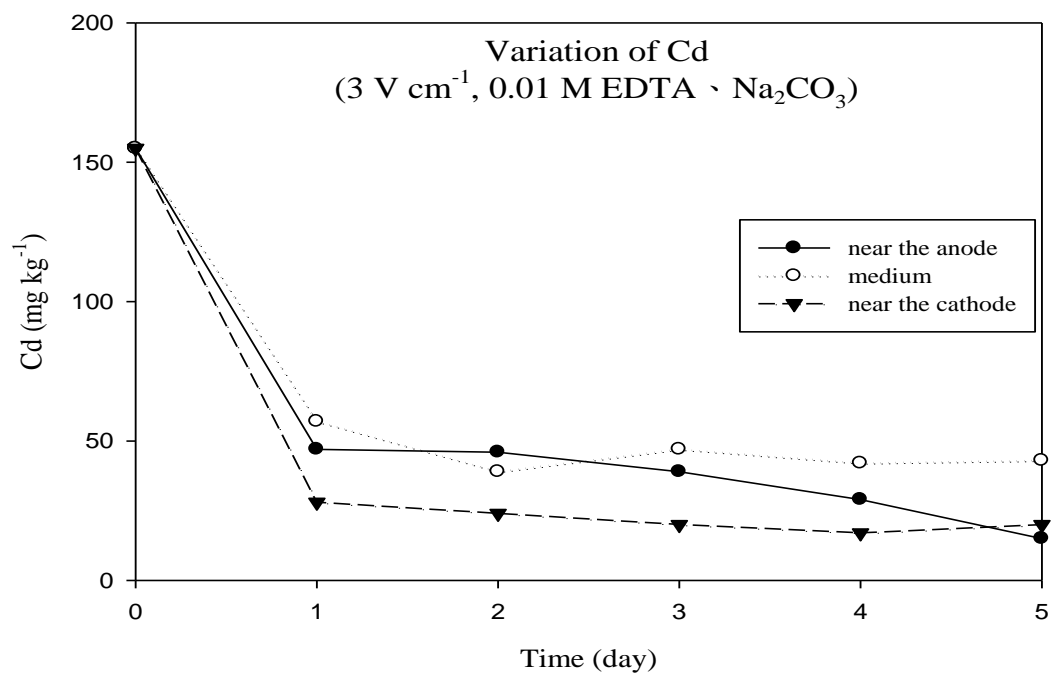


圖 3.31 原始土壤之鎘濃度變化圖

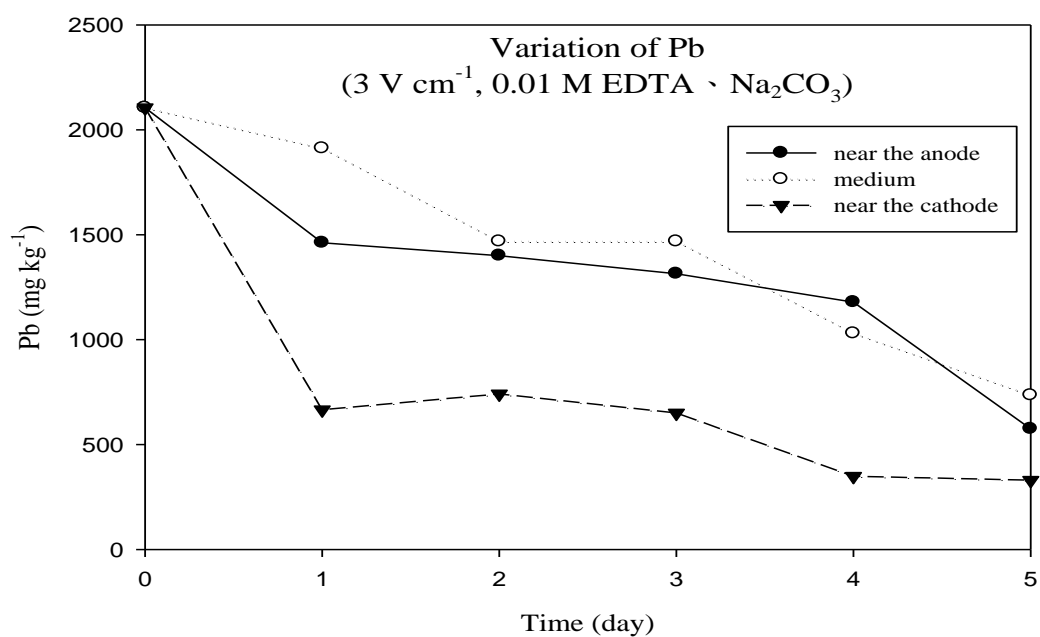


圖 3.32 原始土壤之鉛濃度變化圖

土壤的含水率亦是影響處理效果的其中因素，通常高含水率的情況下對於污染物的處理效果良好。圖3.33為原始土壤之電動力系統含水率的趨勢圖，從圖中可以顯示，系統含水率約介於30%~40%之間，且隨著操作時間變化不顯著。由於系統電解液因電場驅動而有溢散的情況，須適時補充土壤的含水率達到穩定去除的狀態，更能發揮電滲透流及離子遷移的效果。本系統於添加電解液的情況下，使系統之含水率趨近於穩定狀態，對於鎘及鉛金屬的去除具有良好之成效。

圖 3.34 為原始土壤進行電動力系統操作電流與時間之變化圖。由圖可發現，系統經過 5 天的操作時間，電流的變化皆隨著操作時間的增加電流有上升的趨勢。推測原因可能是每日添加之操作液形成系統中電解質的增加，造成其電流會有上升的情形，且因於電壓梯度 3.0 V cm^{-1} 操作下電解液散失較快速，添加的電解質越多，因而導致系統電流的提升。

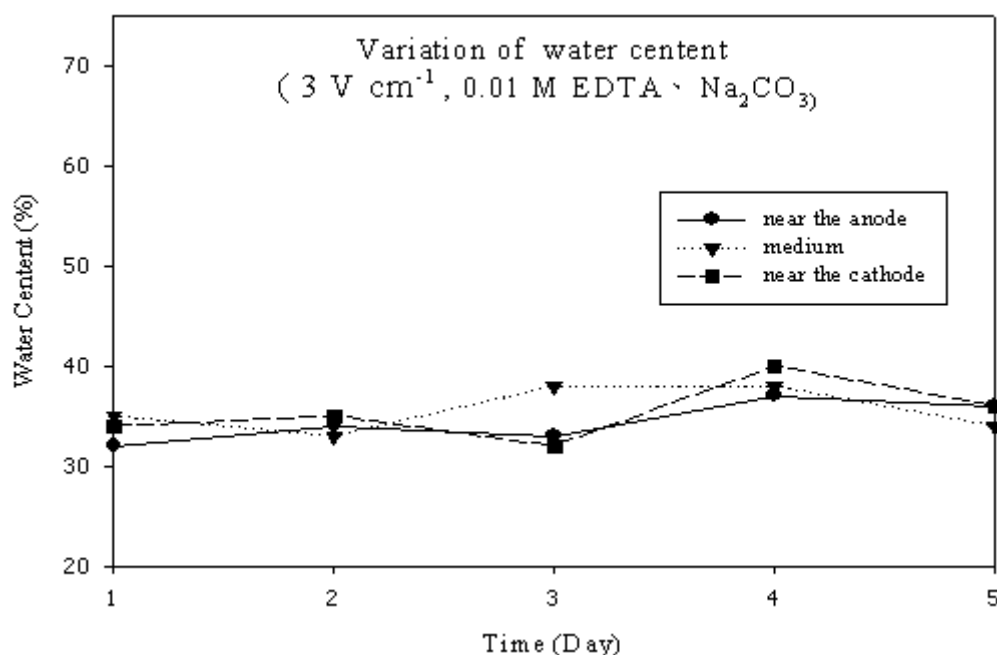


圖 3.33 原始土壤之含水率變化圖

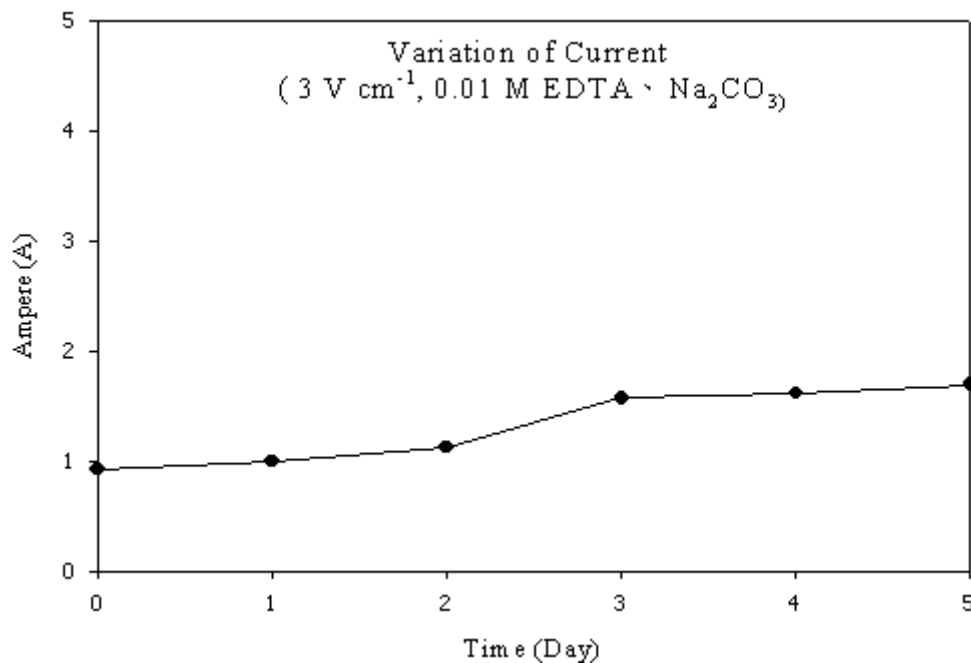


圖 3.34 原始土壤之電流變化圖

不同不透水材質之電解液中 pH 值及導電度變化

從過去實場試驗成果顯示，操作液的損失和污染土壤重金屬的垂直移動造成回收率較低，使得電滲透流無法完全將重金屬移除至陰極槽，部分重金屬移動至深層土壤。因此，本計畫於實驗室規模下以系統槽體進行測試，透過測試兩種不透水材料，以獲得最佳的污染水平移動的操作條件。本試驗不透水層材料除了原本之 PVC 材質之外，另選定以黏土夾層(高密度海綿+黏土+高密度海綿)以及不織布材質包覆 PVC 板進行測試，以評估不同不透水材質之實用性；黏土夾層之主要構造主要顯示圖 3.35。此部分之研究探討係以電動力技術於電壓梯度 3.0 V cm⁻¹下進行不同不透水材質的電動力試驗。



圖 3.35 黏土夾層之外觀結構圖

圖 3.36 及圖 3.37 為不同之不透水夾層（黏土夾層和不織布夾層）以電動力技術處理之電解液 pH 值變化圖。從圖可以明顯發現，無論是以何種不透水夾層之電解液 pH 值都維持在約 pH 9.0 至 pH 10.65 之間，pH 值的變化相當穩定；黏土夾層之 pH 值變化趨勢為從初始 pH 9.0 至試驗第五天 pH 10.65；不織布夾層之 pH 值變化趨勢則為試驗第五天的 pH 10.1。從兩個不同夾層的 pH 值變化趨勢發現，隨著操作時間 pH 值有緩慢上升的趨勢，爾後變化則趨於平緩的狀態，此變化趨勢於 2 種夾層中都有發現。另外，從陽極端或陰極端電解液之 pH 值可以發現，兩者位置的 pH 值變化相當一致。

圖 3.38 及圖 3.39 為不同之不透水夾層於 3.0 V cm^{-1} 電壓梯度下進行電動力試驗其時間與導電度變化圖。由導電度變化圖可以看出，兩者不透水夾層電解液之導電度的變化有持續上升的趨勢，從實驗初始約 3 mS cm^{-1} 上升至 8.1 及 9.6 mS cm^{-1} 。另外，不管於陰極端或陽極端導電度皆有上升趨勢，且變化趨勢十分相似，此導電度的變化趨勢於兩者不同夾層材料相較下，兩者未有明顯的差異產生。

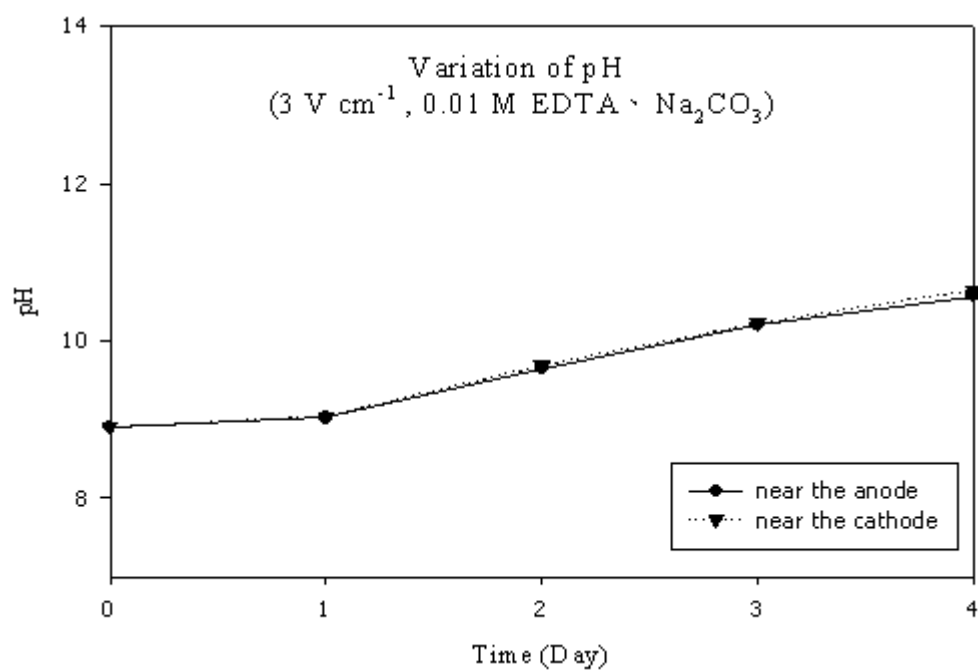


圖 3.36 黏土夾層之 pH 值變化趨勢圖

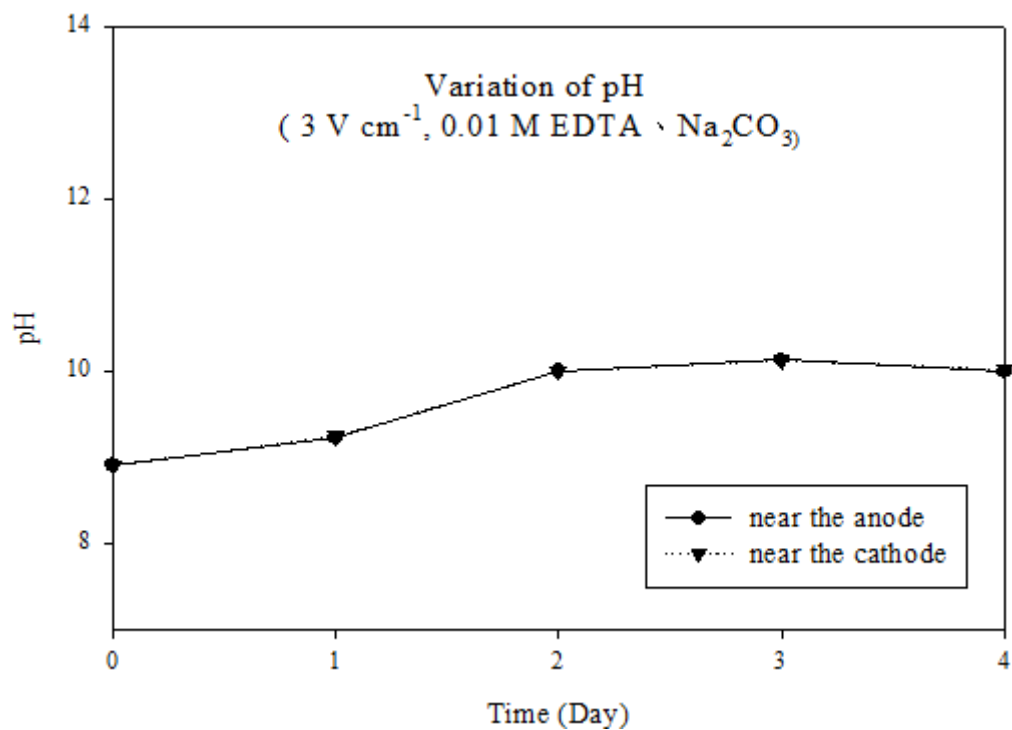


圖 3.37 不織布夾層之 pH 值變化趨勢圖

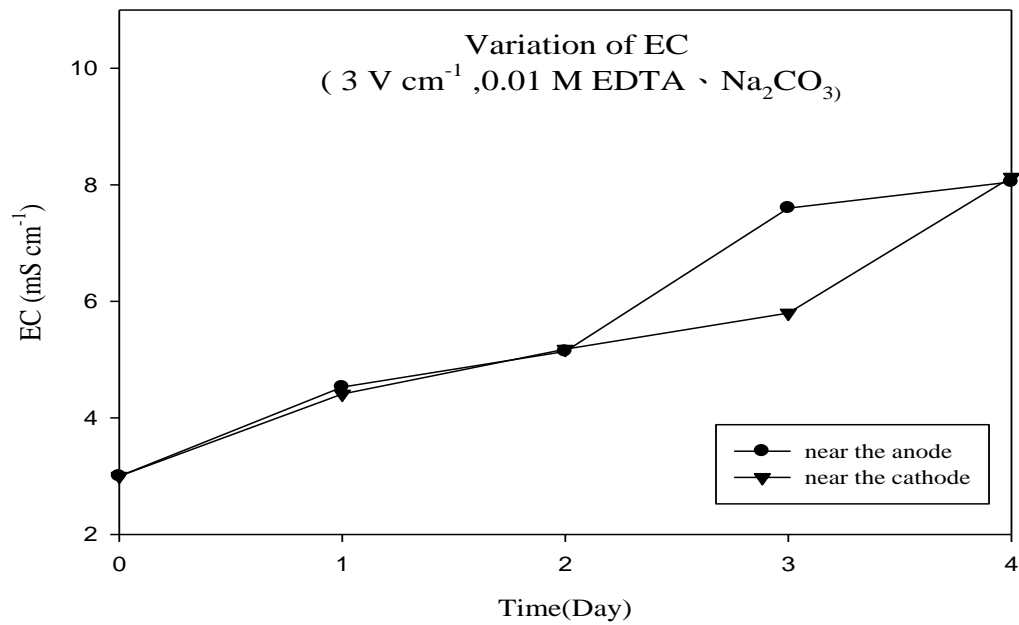


圖 3.38 黏土夾層之導電度變化趨勢圖

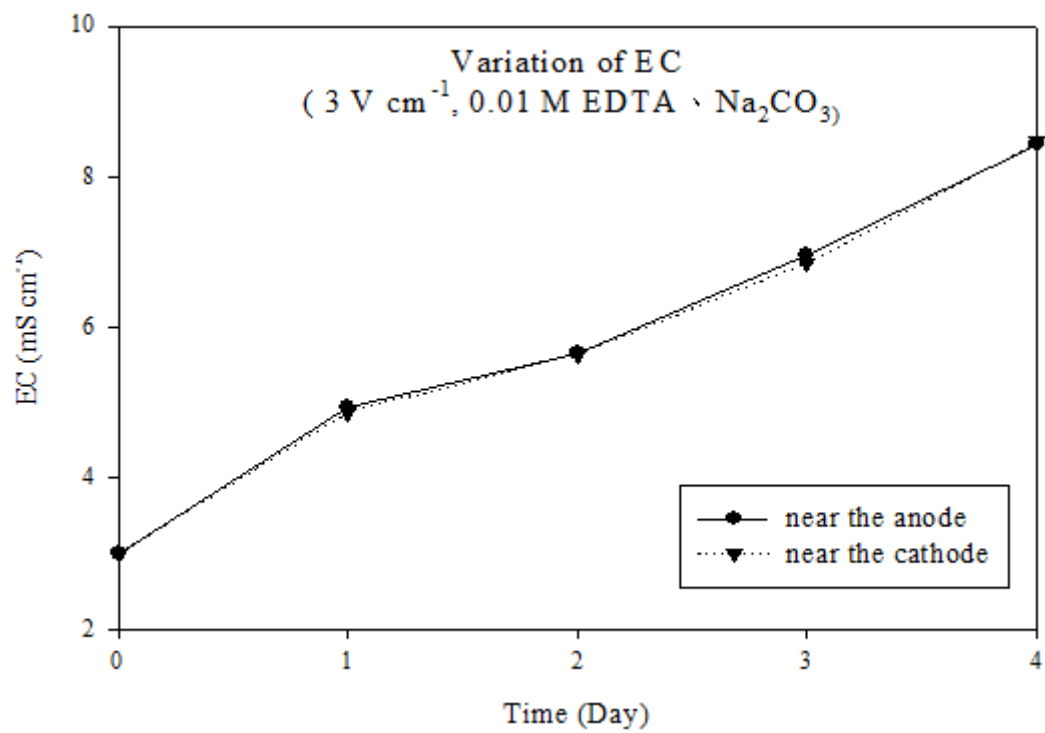


圖 3.39 不織布夾層之導電度變化趨勢圖

不同電壓梯度之土壤中重金屬鎘與鉛濃度變化

圖 3.40 及圖 3.41 為不同夾層以電動力技術去除土壤中鎘濃度之去除成效變化圖。以黏土夾層整體變化趨勢而言，鎘濃度於第一天的試驗下，三個不同位置（陰極端、中間端與陽極端）之平均去除效率達到約 68%，從原始約 155 mg kg^{-1} 降至約 66 mg kg^{-1} 以下，然而於第一天之後直到試驗第五天結束皆呈現較平緩狀態，第五天結束後以靠近陰極端的去除率最佳，去除效率可達到 93%，其次為靠近中間端的 91%，最後為靠近陽極端的 83%，鎘濃度總平均去除率為 87%。另外，觀察不織布夾層整體鎘濃度變化趨勢發現，鎘濃度於同樣於第一天去除較為顯著，於第一天的試驗下，三個不同位置（陰極端、中間端與陽極端）之平均去除效率達到約 62%，從原始約 155 mg kg^{-1} 降至約 78 mg kg^{-1} 以下，然而直到試驗第五天結束皆呈現較平緩狀態，第五天結束後同樣以靠近陰極端的去除率最佳，去除效率可達到 89%，鎘濃度總平均去除率為 82%。觀察兩種不透水材質之鎘濃度變化發現，其去除效率以黏土材質高於不織布夾層。

圖 3.42 及圖 3.43 為不同夾層之鉛濃度變化趨勢圖。由圖可以看出電動力系統操作第 1 天時，黏土夾層之鉛濃度以靠近陰極端 80% 的去除效率為最高，並可從濃度 $2,105 \text{ mg kg}^{-1}$ 降至 415 mg kg^{-1} ，而靠近陽極端及中間位置之去除效率並不明顯。黏土夾層於五天試驗結束後鉛濃度平均去除效率達 79%。另外，觀察不織布夾層整體鉛濃度變化趨勢發現，鎘濃度同樣於第一天去除較為顯著，於第一天的試驗下，以靠近陰極端的 70% 去除效率為最高，從原始約 155 mg kg^{-1} 降至約 620 mg kg^{-1} ，然而除了靠近陰極端之外，中間端及靠近陽極端位置於第一天直到試驗第五天結束皆呈現持續下降的狀態，第五天結束後同樣以靠近陰極端的去除率最佳，去除效率可達到 88%，鉛濃度總平均去除率為 73%。觀察兩種不透水材質之鉛濃度變化發現，其去除效率仍以黏土夾層高於不織布夾層。

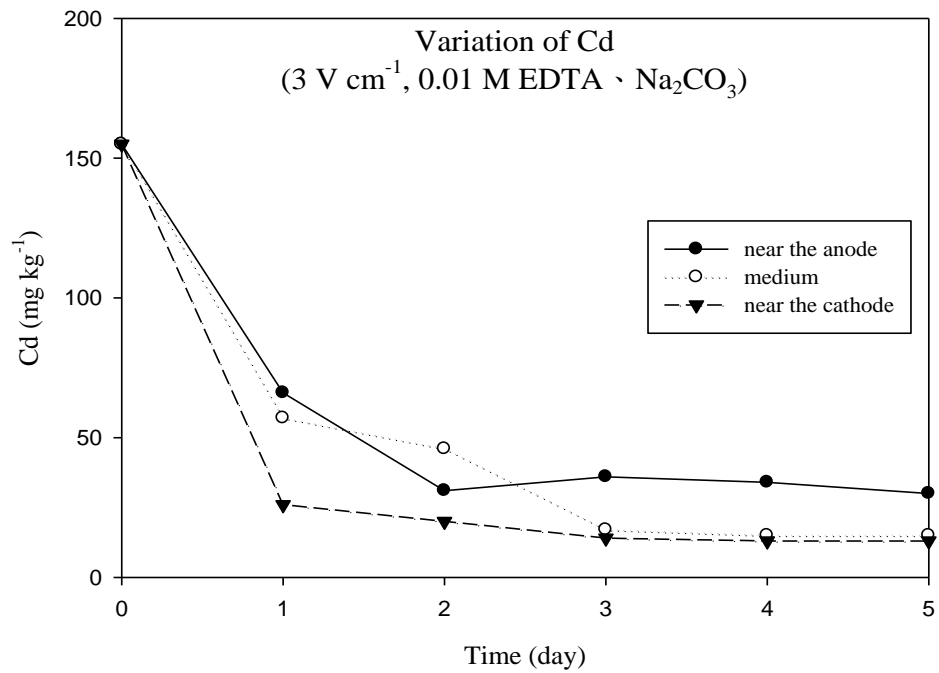


圖 3.40 黏土夾層之鎘濃度變化圖

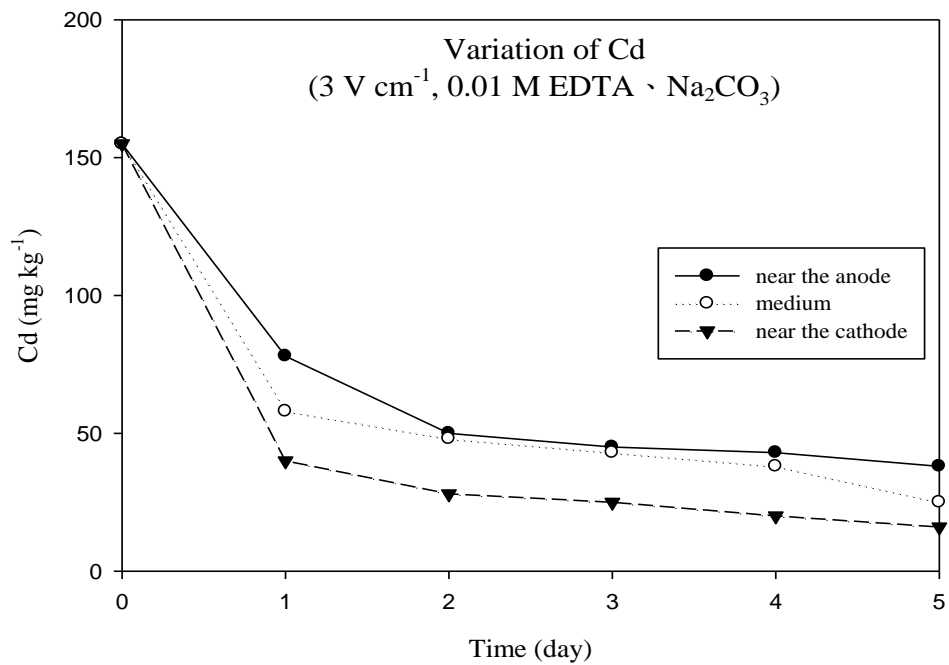


圖 3.41 不織布夾層之鎘濃度變化圖

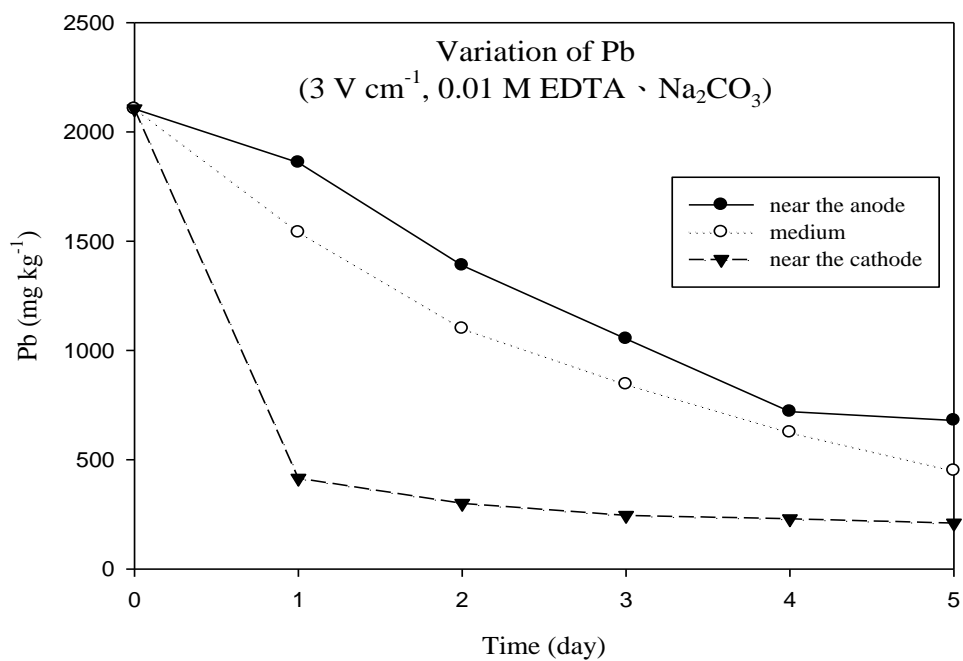


圖 3.42 黏土夾層之鉛濃度變化圖

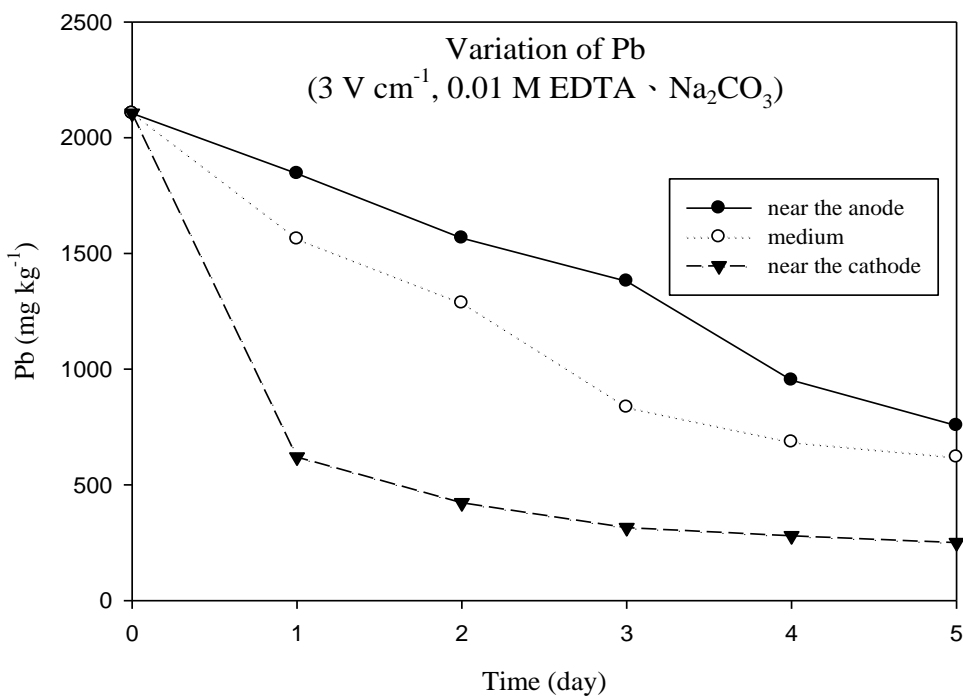


圖 3.43 不織布夾層之鉛濃度變化圖

圖 3.44 及圖 3.45 為不同夾層之系統含水率的趨勢圖，從圖中可以顯示，兩種夾層的含水率約介於 30%~40% 之間，且隨著操作時間變化不顯著。由於電動力系統操作下，電解液會因電場驅動導致溢散的狀況，須適時補充土壤的含水率以達到穩定去除的狀態，及有效達到電滲透流及離子遷移的效果。圖 3.46 及圖 3.47 為不同夾層進行電動力系統操作電流與時間之變化圖。由圖可發現，系統經過 5 天的操作時間，電流的變化皆隨著操作時間的增加電流持續上升的趨勢。主要原因推測是系統中電解質的增加，造成其電流會有上升的情形，且因於電動力操作下電解液的散失，添加的電解質越多，因而導致系統電流的提升。

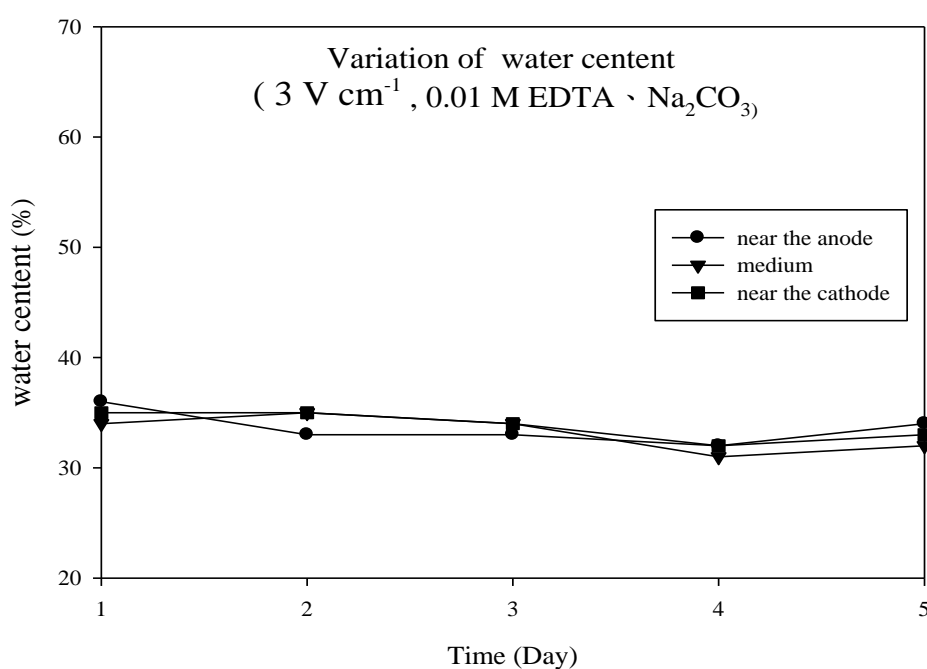


圖 3.44 黏土夾層之含水率變化圖

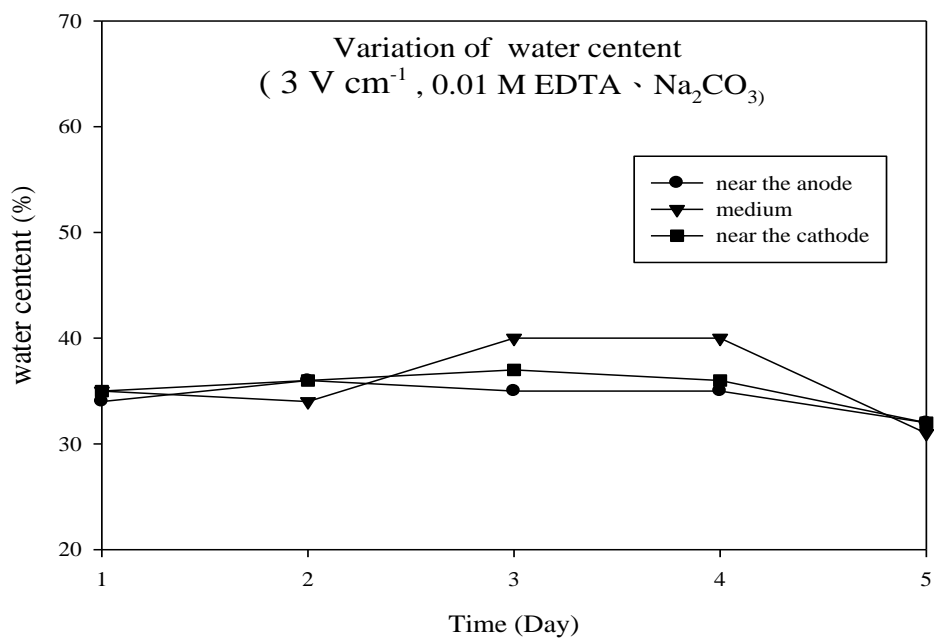


圖 3.45 不織布夾層之含水率變化圖

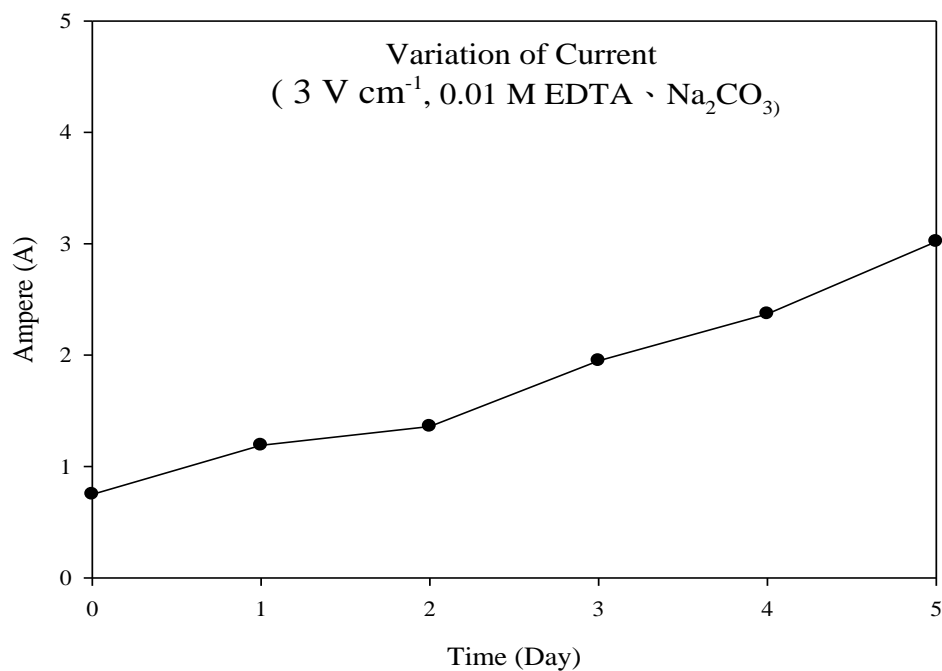


圖 3.46 黏土夾層之電流變化圖

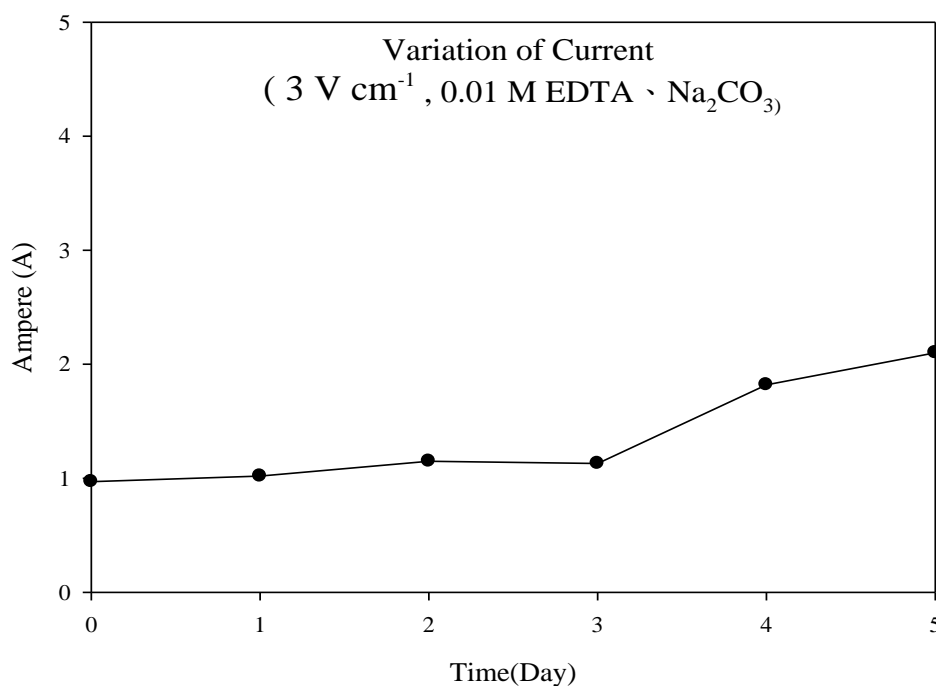


圖 3.47 不織布夾層之電流變化圖

不同夾層之重金屬鎘與鉛陰極電鍍成效

為了有效得知在不同夾層材料的使用下，對於重金屬污染物從土壤移除後能否直接電鍍於陰極電極上，故將針對電解液中重金屬和陰極電極上之重金屬進行分析，以獲得重金屬陰極電鍍之成效並估算及金屬回收率。陰極電鍍金屬之分析方法是將處理五天後之陰極電極浸泡於 0.01 M 硝酸 10 分鐘後，將水樣過濾並定量，隨後進行分析樣品之重金屬濃度。圖 3.48 為以黏土夾層為材料，電解液中重金屬之濃度變化圖，從圖中顯示，試驗第一天電解液中之鉛濃度較高（約 101 mg L^{-1} ），之後變化較為平緩，到試驗於第五天後電解液中濃度降為 50 mg L^{-1} ，顯示電解液中殘留之鉛重金屬隨著處理時間而下降，而鎘濃度於試驗過程中則介於 $10 \sim 17 \text{ mg L}^{-1}$ ，未有明顯之變化。另外，圖 3.49 係以不織布為材料觀察電解液中重金屬之濃度變化圖。同樣為第一天較高之鉛金屬濃度，約為 146 mg L^{-1} ，爾後有下降趨勢，試驗第五天降為 68 mg L^{-1} ，而鎘濃度於試驗中則介於 $6 \sim 14 \text{ mg L}^{-1}$ 。

另外，陰極電極上所電鍍之重金屬濃度部分則顯示於表 3.5 及表 3.6，其中包括污染土壤重金屬初始濃度、電鍍於陰極電極上之重金屬濃度以及試驗五天後之重金屬回收率。以黏土夾層觀察到，鎘金屬初始濃度為 156 mg kg^{-1} ，處理五天後陰極板電鍍金屬濃度為 93 mg kg^{-1} ，顯示於五天的操作時間下，能將土壤中重金屬有效電鍍於陰極板的比例約 60%，鉛金屬於五天的操作時間下能達到 67% 的電鍍成效。另外，以不織布夾層觀察到，鎘金屬處理五天後陰極板電鍍金屬濃度為 75 mg kg^{-1} ，顯示於五天的操作時間下，能將土壤中重金屬有效電鍍於陰極板的比例約 48%，鉛金屬於五天的操作時間下能達到 60% 的電鍍成效。其結果顯示，黏土夾層的鎘金屬及鉛金屬回收率皆高於不織布夾層。不織布夾層的回收效果相較於黏土夾層較差，其代表以不織布夾層之電滲透流相對較慢，其導致往陰極電鍍的成效有所降低；不過，未來實際應用於現地整治的污染土壤時，不織布夾層的應用將更有利於金屬離子的平行移動，能使金屬離子因較緩慢的電滲透流有效電鍍於陰極板上，降低往深層土壤滲透之可能性。其結果推測未來於實場應用下，包覆不織布夾層的應用對於金屬離子回收率不佳的情況能有效改善，將大部分之金屬電鍍於陰極電極上。另外，圖 3.50 及圖 3.51 為兩種不透水夾層試驗後，其陰極電鍍後之外觀形貌。

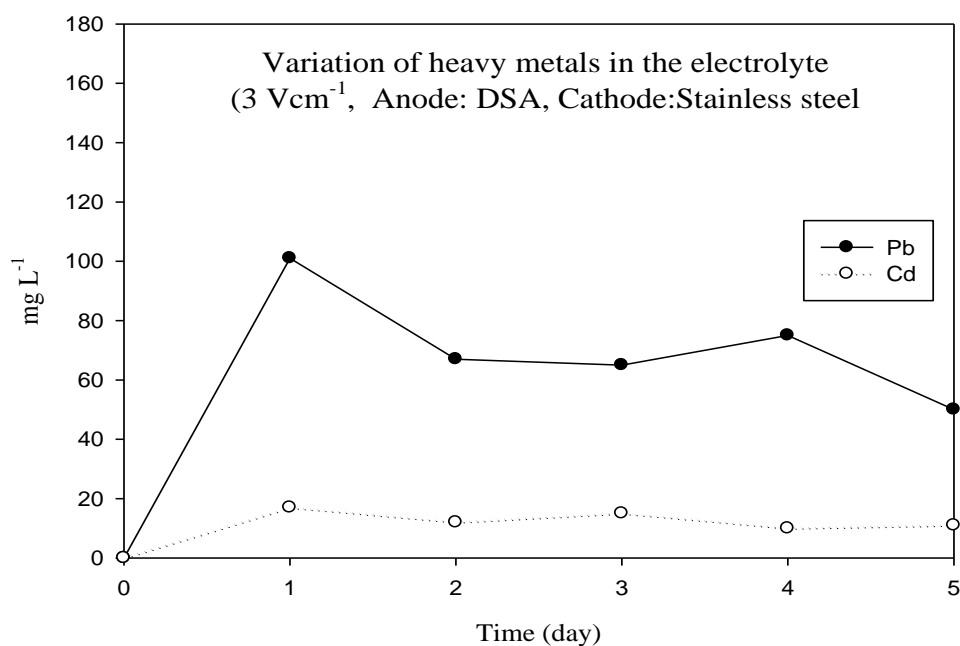


圖 3.48 電解液中重金屬濃度之變化-黏土夾層

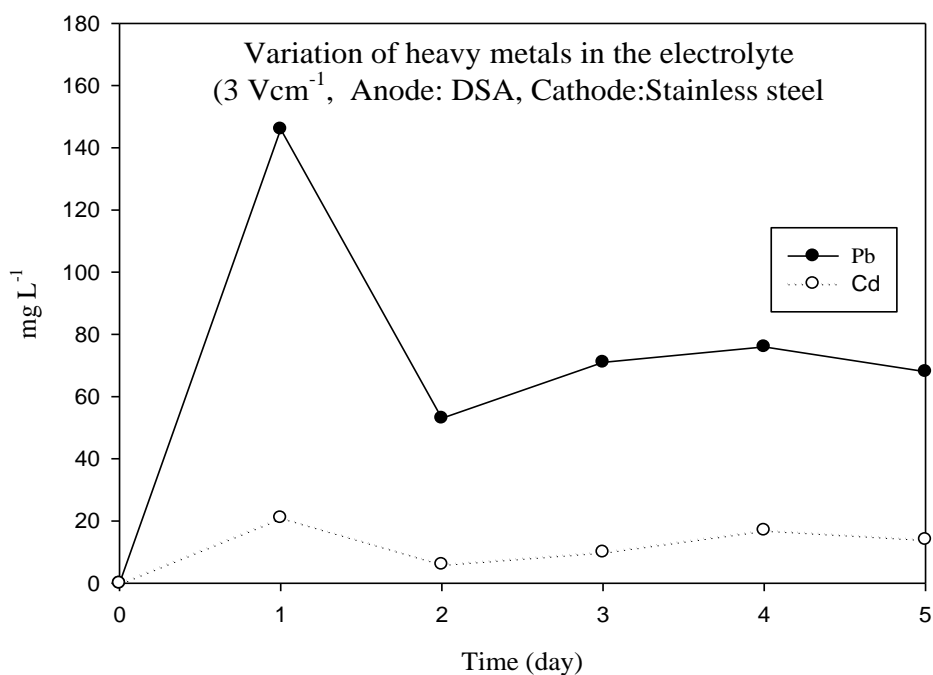


圖 3.49 電解液中重金屬濃度之變化-不織布夾層

表 3.5 陰極電鍍金屬之回收率-黏土夾層

項目	鎘	鉛
土壤重金屬(mg kg ⁻¹)	156	2105
陰極板電鍍金屬(mg kg ⁻¹)	93	1412
回收率(%)	60	67

表 3.6 陰極電鍍金屬之回收率-不織布夾層

項目	鎘	鉛
土壤重金屬(mg kg ⁻¹)	156	2105
陰極板電鍍金屬(mg kg ⁻¹)	75	1259
回收率(%)	48	60

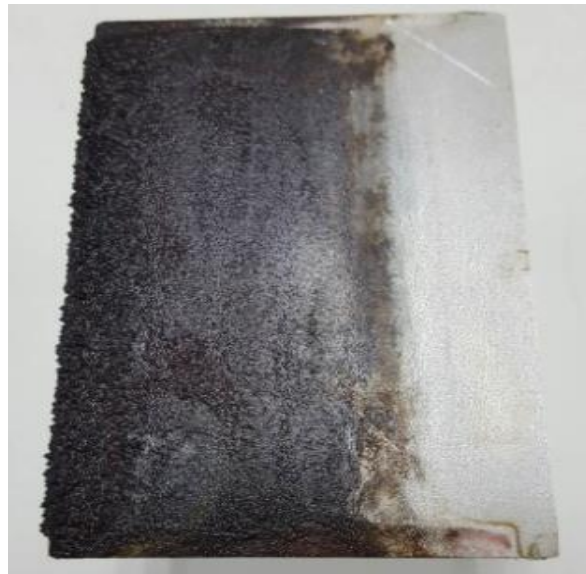


圖 3.50 陰極板使用後之外貌-黏土夾層

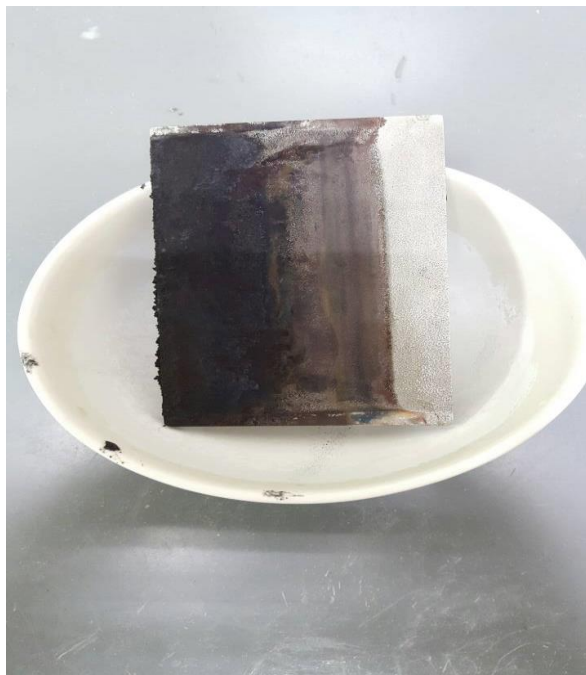


圖 3.51 陰極板使用後之外貌-不織布夾層

3.3 本技術專利申請

本技術循環加強式電動力法(CEEK)已證實具有實務的去除功能和有效性，有別於國際上其他的電動力法，並已於台灣取得專利。為了將本技術推廣至其他地區，已委託冠德國際專利商標事務所進行大陸地區申請國際專利，其主要種類為發明型專利申請，審查時間為 14 至 30 個月，其主要優點為專利權較長、可直接取締和無賠償問題，目前為資料送件並審查中階段。有關專利申請的流程及步驟由圖 3.52 所示。

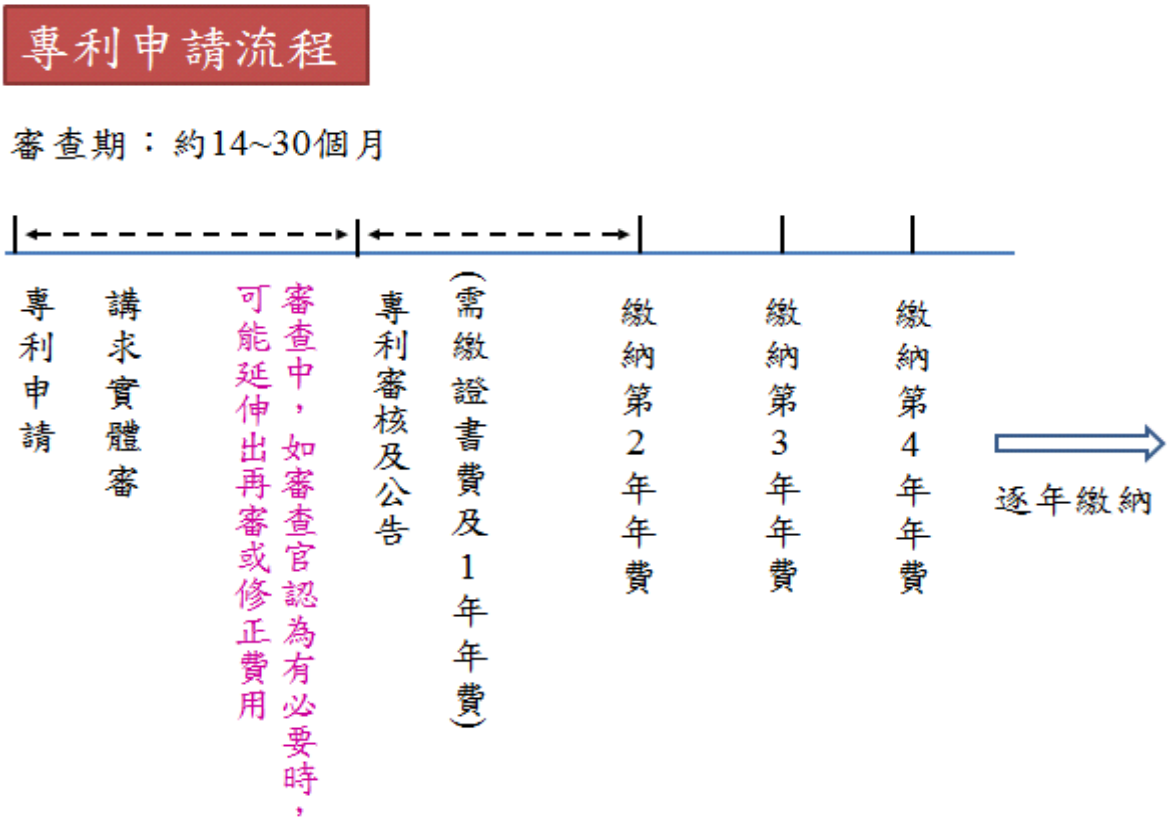


圖 3.52 發明型專利申請流程圖

3.4 結論與建議

本計畫實驗按照計畫書執行內容進行，目前已完成污染土壤的物化特性分析、重金屬的移除效率、陰極電鍍回收、不透水層材料測試及部分中國大陸的專利申請，試驗結果可以歸納如下：

1. 本電動力系統 CEEK 經不斷改良下，系統具有簡便、組裝容易、運送輕便及可重複使用性，有利未來推展與實際進行。
2. 污染土壤鎘及鉛金屬於電動力系統下，鎘及鉛濃度皆能符合土壤監測標準；鉛濃度更能低於食用作物農地之監測基準值。
3. 本電動力技術對於鎘及鉛金屬的回收率最高可分別達到 85% 和 70%，能有效使金屬電鍍於陰極電極表面上。
4. 不織布夾層對於未來現地整治應用提供一個好的選擇，能促使金屬污染物資源化的目標予以落實。

第四章、參考文獻

1. Pazos, M., Iglesias, O., Gomez, J., Rosales, E., and Sanroman, M. A., "Remediation of contaminated marine sediment using electrokinetic-Fenton technology," *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, Vol. 19, pp. 932-937 (2013).
2. Chang, J. H., and Cheng, S. F., "The remediation performance of a specific electrokinetics integrated with zero-valent metals for perchloroethylene contaminated soils," *Journal of Hazardous Materials*, Vol. B131, pp. 153-162 (2006).
3. Peng, G., Tian, G., Liu, J., Bao, Q., and Zang, L., "Removal of heavy metals from sewage sludge with a combination of bioleaching and electrokinetic remediation technology," *Desalination*, Vol. 271, pp. 100-104 (2011).
4. Ottosen, L. M., Hansen, H. K., Ribeiro, A. B., and Villumsen, A., "Removal of Cu, Pb and Zn in an applied electric field in calcareous and non-calcareous soils", *Journal of hazardous materials*, B85, pp. 291-299 (2001).
5. Reedy, B. E., Carriere, P. C., and Moore, R., "Flushing of a PbII contaminated soil using HCl, EDTA, and CaCl₂," *J. Environ. Eng*, Vol. 122, pp. 48-50 (1996).
6. Chang, J. H., and Liao, Y.C., "The effect of critical operational parameters on the circulation-enhanced electrokinetics" *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 129(1-3), pp. 186-193 (2006).
7. Chang, J. H., Qiang, Z., and Huang, C. P., and Cha, D., "Electroosmotic flow rate: A Semi-empirical Approach" Ch. 5 in *nuclear Site Remediation*, Eds. P. Gary Eller and W. R. Heineman, ACS Symposium Series 778, 247-266, 2000.
8. Ottosen, L. M., Hansen, H. K., Ribeiro, A. B., and Villumsen, A., "Removal of Cu, Pb and Zn in an applied electric field in calcareous and non-calcareous soils," *Journal of hazardous materials*, Vol. B85, pp. 291-299 (2001).
9. Kim, S. O., and Kim, K. W., "Monitoring of electrokinetic removal of heavy metals in tailing-soils using sequential extraction analysis," *Journal of*

- Hazardous Materials*, Vol. B85, pp. 195-211 (2001).
10. Darmawan, and Wada, S. I., "Effect of clay mineralogy on the feasibility of electrokinetic soil decontamination technology," *Applied clay science*, Vol. 20, pp. 283-293 (2002).
 11. Tejowulan, R. S., and Hendershot, W. H., "Removal of Trace Metals form Contaminated Soils Using EDTA Incorporating Resin Trapping Techniques," *Environmental Pollution*, Vol. 103, pp. 135-142 (1998).
 12. Li, Z., Yu, J. W., and Neretnieks, I., "Removel of Pb(II), Cd(II), and Cr(III) from sand by Electromigration," *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 55, pp. 295-304 (1997).
 13. Gao, J., Luo, Q. S., Zhu, J., Zhang, C. B., and Li, B. Z., "Effects of electrokinetic treatment of contaminated sludge on migration and transformation of Cd, Ni and Zn in various bonding states," *Chemosphere*, Vol.93, pp. 2869-2876 (2013).
 14. Lu, P., Feng, Q., Meng, Q., and Yuan, T., "Electrokinetic remediation of chromium- and cadmium-contaminated soil from abandoned industrial site," *Separation and Purification Technology*, Vol. 98, pp. 216-220 (2012).
 15. Zhou, D. M., Deng, C. F., Cang, L., Alshawabkeh, A., "Electrokinetic remediation of a Cu-Zn contaminated red soil by controlling the voltage and conditioning catholyte pH," *Chemosphere*, Vol. 61, pp. 519-527 (2005).
 16. Kim, D. H., Ryu, B. G., Park, S. W., Seo, C. I., and Baek, K., "Electrokinetic remediation of Zn and Ni-contaminated soil," *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 165, pp. 501-505 (2009).
 17. Ryu, B. G., Park, G. Y., Yang, J. W., and Baek, K., "Electrolyte conditioning for electrokinetic remediation of As, Cu, and Pb-contaminated soil," *Separation and Purification Technology*, Vol. 79, pp. 170-176 (2011).
 18. Yang, C. C. G., and Lin, S. L., "Removal of lead from a silt loam soil by electrokinetic remediaton," *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 58, pp. 285-299(1998).
 19. Yuan, C., and Chiang, T. S., "The mechanisms of arsenic removal from soil

- by electrokinetic process coupled with iron permeable reaction barrier,"*
Chemosphere, Vol. 67, pp. 1533-1542(2007).
20. Weng, C. H., Lin, Y. T., Lin, T. Y., and Kao, C. M., "Enhancement of electrokinetic remediation of hyper-Cr(VI) contaminated clay by zero-valent iron," *Journal of Hazardous Materials, Vol. 149, pp. 292-302(2007).*
21. Tessier, A., and Campbell, P. G. C., "Partitioning of Trace Metals in Sediments." *pp: 183-199 (1988).*
22. Tessier, A., Campbell, P. G. C., and Bisson, M., "Sequential Extraction Procedure for the Speciation of Particulate Trace Metals." *Analytical Chemistry, Vol. 51, pp. 844-851 (1979)*
23. 章日行,改善土壤(污泥)鉛、銅含量之方法。專利證書號碼:發明第I 280952 號。
24. 章日行,周志豪,2005,“利用超音波及電鍍技術處理螯合性含銅廢水”,
中華民國環境工程學會2005廢水處理技術研討會,台南。
25. Oldham, K. B., and Myland, J. C., *Fundamentals of Electrochemical Science, Academic, San Diego(1994).*
26. Juang, R. S. and Wang, S. W., "Electrolytic Recovery of Binary Metals and EDTA from Strong Complexed Solutions," *Water Research, Vol. 34, pp.3179-3185 (2000).*

背面

統一編號：78951384

*「本報告僅係受託單位或個人之意見，僅供環保署施政之參考」。

*「本報告之著作財產權屬環保署所有，非經環保署同意，任何人均不得重製、
仿製或為其他之侵害」。