

行政院環境保護署

「100 年度土壤及地下水污染研究與技術提昇計畫」

以近實場規模之現地電動力技術整治鉛污染農地之研究 究 期末報告

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：100 年11 月26 日起至

101 年11 月25 日

中華民國 101年10 月 印製

計畫成果中文摘要（簡要版）

重金屬污染農地快速有效的整治方式具有極高研究及應用價值，特別是模場現地污染整治的試驗更顯得重要。本研究以近實場規模之電動力法 (Circulation-Enhanced Electrokinetics, CEEK) 整治南投市某處鉛污染土壤，企盼藉由本計畫了解近實場規模之電動力法技術的關鍵因子，進而掌握最具去除效益的操作參數，最後獲得此技術的成本效益。

本計畫進行 63 天污染土壤整治及颱風淹水，主要發現及結論如下：

- 本試驗污染土壤中鉛去除率可達約 64%，平均土壤鉛濃度可從 7,246 mg/Kg 降至約 2,612 mg/Kg，成果與過去在模場及其他鉛污染場址的去除效率非常接近，充分說明本技術 CEEK 在現地整治的應用潛力。從土壤中移除的鉛可藉由電鍍作用，將鉛電鍍於陰極板上。
- 本系統 CEEK 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 6.55 元，此數據與過去模場試驗的 8.82 元頗為接近。
- 本電動力系統 CEEK 在近實場規模操作下，土壤的 pH 值及導電度維持在中性及穩定的狀態，呈現本系統對土壤衝擊低。
- 本電動力系統 CEEK 在近實場規模操作下，系統電流及電壓維持在穩定的狀態。同時，系統溫度接近大氣氣溫，呈現本系統的穩定性佳。
- 本電動力整治方法處理後的土壤肥力略降，需要添加適當肥料方能回復肥力。
- 近實場規模計畫中，以木板及防水漆製作的循環渠道，受土壓及試驗期間的踐踏，逐漸變形而發生操作液的滲漏。未來應採用抗壓的循環水管改善之。
- 由於鉛與 EDTA 的錯化物須經較高的電壓及較長時間電鍍，才能將土壤中的鉛電鍍於陰極板的表面。若電鍍效果不佳，應增設廢水處理設備。

計畫成果英文摘要（簡要版）

The fast and effective remediation techniques for cleaning agricultural lands contaminated by heavy-metals are with high potential to be studied. The investigation of the in-situ remediation in pilot scale is especially important. This work applied the Circulation-Enhanced Electrokinetics (CEEK) in near-real scale to clean the lead contaminated soils in Nantou City. We hope to find out the critical factors of the CEEK technique in near-real scale. To obtain the appropriate operational parameters makes the CEEK technique cost-effective.

After 63-day treatment, several conclusions and suggestions can be drawn:

- The lead removal efficiency was about 64%; the average lead concentration was decreased from 7,246 mg/Kg to 2,612 mg/Kg. This result was close to the previous that in pilot scale and in other contaminated site, which demonstrates the high potential application of CEEK. The removed lead could be electroplated on the cathode.
- The operational cost of electricity for removing 1% lead was 6.55 NT dollars in the area of 1.0 m², which was close to that in pilot scale (8.82 NT dollars) °.
- The pH and electrical conductivity of soils could maintain neutral and stable situation, which indicated the little impact on soils under such CEEK process.
- The electrical current and voltage could maintain stable situation, which presented the great stability of the CEEK process. In addition, the temperature of operational solution was close to atmospheric temperature.
- The fertilizerbility of the treated soils was slightly less than that of the untreated soils. This means the addition of fertilizer is necessary.
- The wooden circulation channel was gradually cracking due to the soil pressure, which resulted in the leakage of working solution containing lead. The circulation pipes against high pressure are suggested to use in the future.
- If the removed lead was electroplated on the cathode with low electricity efficiency, it is necessary to integrate a wastewater treatment plant with EK system.

第一章、計畫緣起與目的

土壤污染已是世界各先進國家關注的重要環保問題之一，由於過去在廢棄物處理設備不足與最終處理廠缺乏情況下，土壤經常成為污染物在自然界中傳輸的終點，由土壤輾轉污染傳輸逐漸威脅人體健康及生態環境。而其污染來源複雜且繁多：如工廠廢棄物隨意傾倒，經降雨後廢水中的污染物被土壤吸附，加油站儲槽洩漏造成油品污染土壤及地下水，各類工廠含重金屬廢水排放至地表造成土壤污染。以台灣而言，當土壤中的重金屬含量過高時，動植物與微生物的生長受到抑制，土壤肥力無法發揮作用，而導致作物受到毒害而產量減少或死亡；重金屬污染直接威脅台灣農業土地的有效利用，或者，農作物依然持續生長，但重金屬被作物吸收後，經由人畜食用後產生中毒或是各種病變的現象。故重金屬污染土壤問題長期受到重視，因此，重金屬污染農地快速有效的整治方式具有極高研究及應用價值，特別是模場現地污染整治的試驗更顯得重要。本計畫研究團隊於 100 年獲得環保署補助「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，針對台中縣某鉛污染農地進行電動力法整治試驗，本團隊採用的現地規模電動力法(CEEK)處理鉛污染農地土壤，經過 21 天處理，平均土壤鉛濃度可從 7190 mg/Kg 降至約 3683mg/Kg，去除效率約可達 50%。延長處理時間至 2 個月，平均去除鉛污染效率約高達 80%。結果顯示電動力法(CEEK)處理鉛污染農地土壤具有極高的應用價值，為了確認 CEEK 對於鉛污染農地的整治效能，本計畫擬擴大試驗至近實場規模，進一步釐清相關影響因子、實際運用的問題及成本。

目前對於重金屬污染農地整治方式主要採翻堆及酸洗法，前者將深層土壤與表面重金屬污染土壤進行混合稀釋，整體污染濃度降低但重金屬仍留存於農地中，而酸洗法不僅產生酸廢液須再處理，土壤酸化後的問題仍受爭議，上述兩方法皆對農地耕種功能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。在眾多整治技術中，現地處理技術因其在經濟及對場址低破壞性一直受到很高的期望，若於時間允許及適當的環境條件下，生物性現地整治技術應為最佳選擇，然而實際上，時間經常是技術選擇之限制因子，所以屬於現地型的物化或生

物處理技術亦常受採用，其中，屬於現地型物化處理技術的電動力法(Electrokinetics, EK)為一具有潛力的現地物化處理技術，其諸多優點包括設備簡單、操作成本低及可適用多種污染物，甚至能適用於黏質土層，此外，並可結合其他整治技術如氧化法及生物分解法等[1]，成為一複合且多功能的處理技術。

基於以上說明，本研究擬依據前次計畫成果擴大試驗規模，以近實場規模之現地電動力 CEEK 技術整治鉛污染農地，企盼建立適用於台灣的實場規模之電動力法技術並獲取其整治效率及成本。

1.1 電動力法的國內外發展及可行性

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年成果，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[2]；Hansen et al.則針對多種重金屬污染的土壤進行研究[3]；Sah and Chen 的研究中則針對人工植入 Cd 和 Pb 污染的土壤進行整治復育二組皆獲得不錯之結果[4]。國內亦有許多有價值的電動力法研究，例如：楊金鐘教授等利用不同酸及萃取劑針對鉛污染土壤進行處理[5]；袁菁教授等運用電動力法去除土壤中的砷污染[6]；翁志煌教授等研究電動力法去除土壤中的六價鉻污染[7]，上述研究針對電動力法對不同重金屬污染土壤的去除效率及去除機制各有其豐碩研究成果，但其試驗樣品皆為人工配置污染土壤且僅有實驗室規模，在實際應用上，仍有許多待了解與克服的問題存在。即使國際上已有公司進行實地試驗，如 Geokinetics (The Netherlands)及 Electrokinetics, Inc., (Baton Rouge, LA) [8]，但由於重金屬成分與土壤性質各地差異極大，技術直接輸入常導致失敗，仍無法直接運用於台灣的污染場址。因此，電動力復育技術的在地化更顯得重要。

一般而言，去除污染物的機制主要為：電滲透流(electro-osmotic flow)；即土壤層中滲透水流動，離子遷移(ion electro-migration)；即離子受電力而移動，藉由上述機制電動力法即可清除土壤中的重金屬污染物。國外許多研究團隊甚至導入螯合劑，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[9,10]，其研究成果相當符合預期效益。然而，此技術仍有於陽極因電解水而產生酸液，酸經滲透流進入土壤造成酸化，為了研究改善土壤酸化問題，計畫主持人研發一組 pH 中性環境操作之電動力系統，並已釐清系統的操作參數對電滲透流量的影響[11,12]；進而開始將此循環改良式電動力法(circulation-enhanced electrokinetics, CEEK)於實驗室復育鎘與鉛污染之土壤[13,14]，該試驗採集之土壤為環保署於 91 年公告之污染土壤，受鎘污染之場址位於雲林縣虎尾鎮，鉛污染場址位於台中市東區振興段，在去除污染土壤實驗中發現，此系統之 pH 值、導電度及電流皆保持穩定狀態。本系統於處理 21 天後之鎘去除效率可達 76.74%，另外，當利用不同 EDTA 之鈉鹽去除含鉛污染土壤，其中，以 EDTA-Na₂ 及 EDTA-Na₄ 為電解液時，於處理 21 天後去除率分別為 63.26% 與 59.85 %。此外，本研究團隊以 CEEK 搭配 EDTA-Na₄ 電解液及其他化學試劑整治實地銅污染土壤，去除結果亦令人滿意[15,16]。基於上列說明，計畫主持人已進行創新之電動力法並瞭解其電化學反應機制、現地重金屬復育研究等一系列研究，累積了豐碩的研究成果，並獲得電動力法專利[17]，以上述成果為基礎，本團隊已進行模場試驗，成果呈現本技術及高應用價值，說明詳如下節。

1.2 模場電動力法 CEEK 整治鉛污染農地的試驗成果及可行性

儘管 CEEK 技術實驗室規模成果令人滿意，但如同許多技術發展，當放大規模時常因空間變異及其他因素導致失敗，因此，模場規模試驗可徹底研究規模放大後各操作參數與整治效率的關係，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。

模場電動力法(CEEK)整治鉛污染農地設備組裝

圖 1.1 與 1.2 為電動力法(CEEK)模場組裝的上視圖及側視圖，圖 3.1 為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，溝渠內鋪設不透水布，目標土壤上共計 9 個採樣口，每處理一段時間即採樣土壤進行必要的分析。值得注

意的是，本團隊設計一不透水夾層如圖 1.3 所示。本設計採用一 PP 材料製成的板框，以棉布包覆透水性低的土壤(陶土+農地土壤)，一方面可降低透水性以維持電動力系統長時間操作，另一方面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(一)



圖 1.2 電動力法(CEEK)現場不透水夾層施工圖(二)

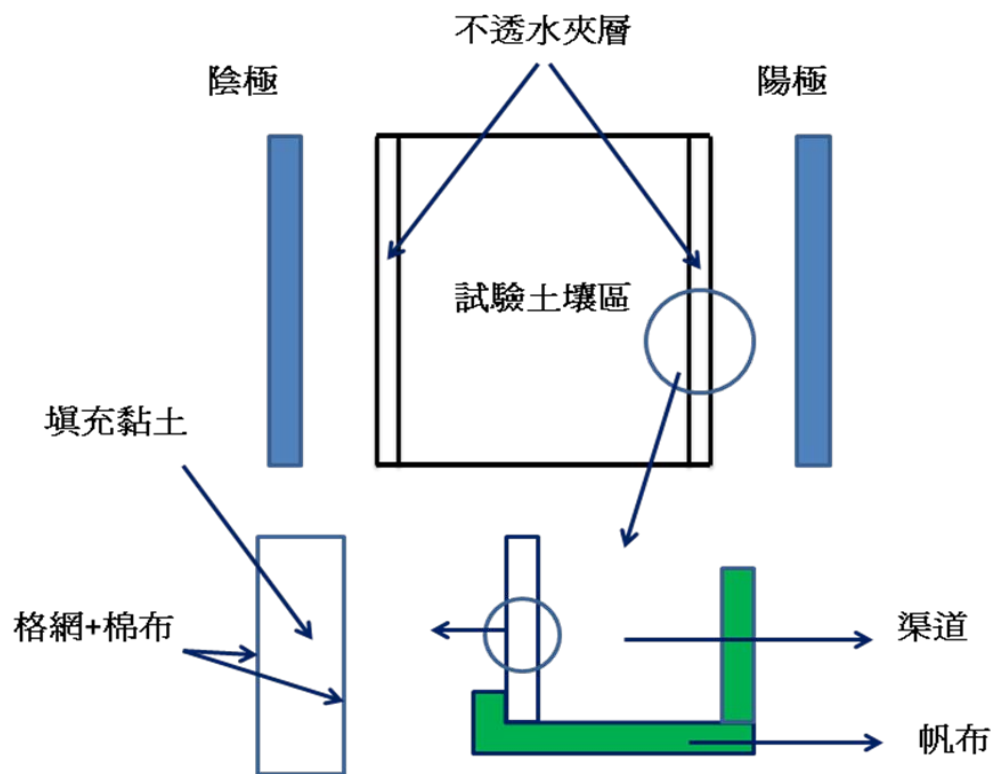


圖 1.3 電動力法(CEEK)現場不透水夾層安裝示意圖

模場電動力法(CEEK)整治鉛污染農地成果

表 1-1 土壤鉛污染 9 個採樣點的鉛濃度及其去除率，由表中可知，本區塊的鉛濃度皆超果管制標準 $2,000 \text{ mg Kg}^{-1}$ 且其分佈範圍頗大，最高濃度約為 $10,246 \text{ mg Kg}^{-1}$ ，本區塊平均鉛濃度約為 $7,190 \text{ mg Kg}^{-1}$ 。而每一採樣點的鉛濃度皆隨操作時間增加而逐漸降低，操作時間 1 天、3 天、5 天、7 天、14 天及 21 天的平均鉛去除率分別為 17%、14%、21%、42%、38%及 49%。其中第 9 採樣點的鉛濃度已由 $6,783 \text{ mg Kg}^{-1}$ 降低 $1,767 \text{ mg Kg}^{-1}$ (低於管制標準)，其去除率約為 74%。試驗結果顯示，CEEK 電動力法整治鉛污染土壤具有極高的應用性。目前，本試驗持續至 2 個月，其鉛處除效率約達 80%。此外，土壤 pH 約可維持在中性範圍。

表 1-1.土壤鉛污染 9 個採樣點鉛濃度及其去除率

Pb (mg kg^{-1})											
編號	1	2	3	4	5	6	7	8	9	平均	去除
初始	7618	6100	4822	7791	5938	7379	10246	8030	6783	7190	-
Day 1	7062	5661	2969	7896	6471	3973	8967	6670	4000	5963	17%
Day 3	7313	5927	4176	8600	5765	4136	7928	6781	4871	6166	14%
Day 5	6610	5131	2906	8051	5589	4021	9617	4996	3922	5649	21%
Day 7	6440	4554	2574	6725	3639	2904	5714	2629	2493	4186	42%
Day14	6365	2499	2650	6776	5753	2542	4904	5227	3349	4452	38%
Day21	4381	3685	3182	5194	5046	2864	3072	3953	1767	3683	49%

本試驗電動力系統是以固定電壓 80V 為操作參數，隨著操作天數增加電壓有增加的趨勢，約達 100V 左右。電壓降低顯示電阻隨之增加。其可能原因是電解質流失、電極板導電性降低或其他原因，確定原因仍有待深入研究探討。電流隨著操作時間到第 7 天降至約 0.7A，推測可能是因為氣候因素如：下雨、日照蒸散等影響，使電流有下降的趨勢，確定原因亦有待深入研究探討。試驗 21 天的用電量估算如下：

平均電壓約為 90 V，平均電流約為 1.5 A，電功率 $90 \times 1.5 = 135 \text{ W}$

21 天共計用電 $135 \times 21 \times 24 \times 10^{-3} = 68.04 \text{ KW-Hr}$ (仟瓦小時)

1 度電為 1.0 KW-Hr，1 度電以 3.5 元計

21 天操作電費為 $68.04 \times 3.5 = 238.14 \text{ 元}$

換言之，21 天鉛去除率約為 50%，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 4.76 元 ($238.14/50 = 4.76 \text{ 元}$)，操作成本低廉。其他設置成本另計。

綜合以上試驗經驗及成果，本工法實場應用的限制條件可能包括：1.處理土壤的透水性不宜過高、2.目前僅對重金屬鉛及鋅有較佳的去除效率、3.現地須有適當的水電供應。其可能適用的條件包括：1.處理土壤透水性低、2.僅單一鉛或鋅污染土壤、3.於短時間即須整治完成。未來將更加釐清本工法相關的限制條件及適用的條件。

1.3 計畫目的

本計畫為「模場規模電動力系統(CEEK)整治鉛重金屬污染土壤」的成果延伸，本次進一步將其應用至近實場規模，同時驗證本技術對於其他鉛污染農地的效益。雖然本技術目前對於台中某鉛污染農地具有顯著的去除效率，操作成本也相當低廉。但並不保證適用其他所有的污染農地，此外，當規模放大後，將面臨更複雜的工程問題，許多操作參數對處理效能勢必有所影響，因此，本計畫的研究目標涵括：

- 驗證本技術對於其他鉛污染農地的效益及可能產生的問題。
- 釐清供應電壓放大，去除效率是否等比例提昇。
- 瞭解高電壓處理下土壤溫度是否過高、電流負荷是否過大(甚至造成工安問題)。
- 尋求適當的操作時間及估算近實場規模 CEEK 的成本效益。

上述問題皆有待進一步釐清，進而有效評估本技術的可行性。

第二章、研究方法及過程

本計畫研究工作的進行如圖 2.1 所示(近實場規模之電動力法整治鉛污染農地研究流程圖)。在試驗開始之前，首先分析現地土壤各項物化特性包括：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 CEC。

在電動力法整治現地鉛污染土壤方面，研究團隊將過去模場研究成果之電動力系統(循環式電動力系統)進行放大規模建置，藉由過去批次模場試驗估算近實場試驗之各項變數包括：外加電場強度、溶液之 pH 值、土壤含水率、及螯合劑之添加量等。試驗期間量測土壤中 pH、土壤中鉛濃度變化、操作液中鉛濃度變化，並據以分析鉛質量平衡，確認土壤移除的鉛可順利電鍍於陰極板上。此外，操作液中螯合劑 EDTA 濃度、操作液 pH 值、土壤含水率及電流等亦每隔一段處理時間進行量測，藉以分析本系統去除鉛污染效率及相關操作成本。

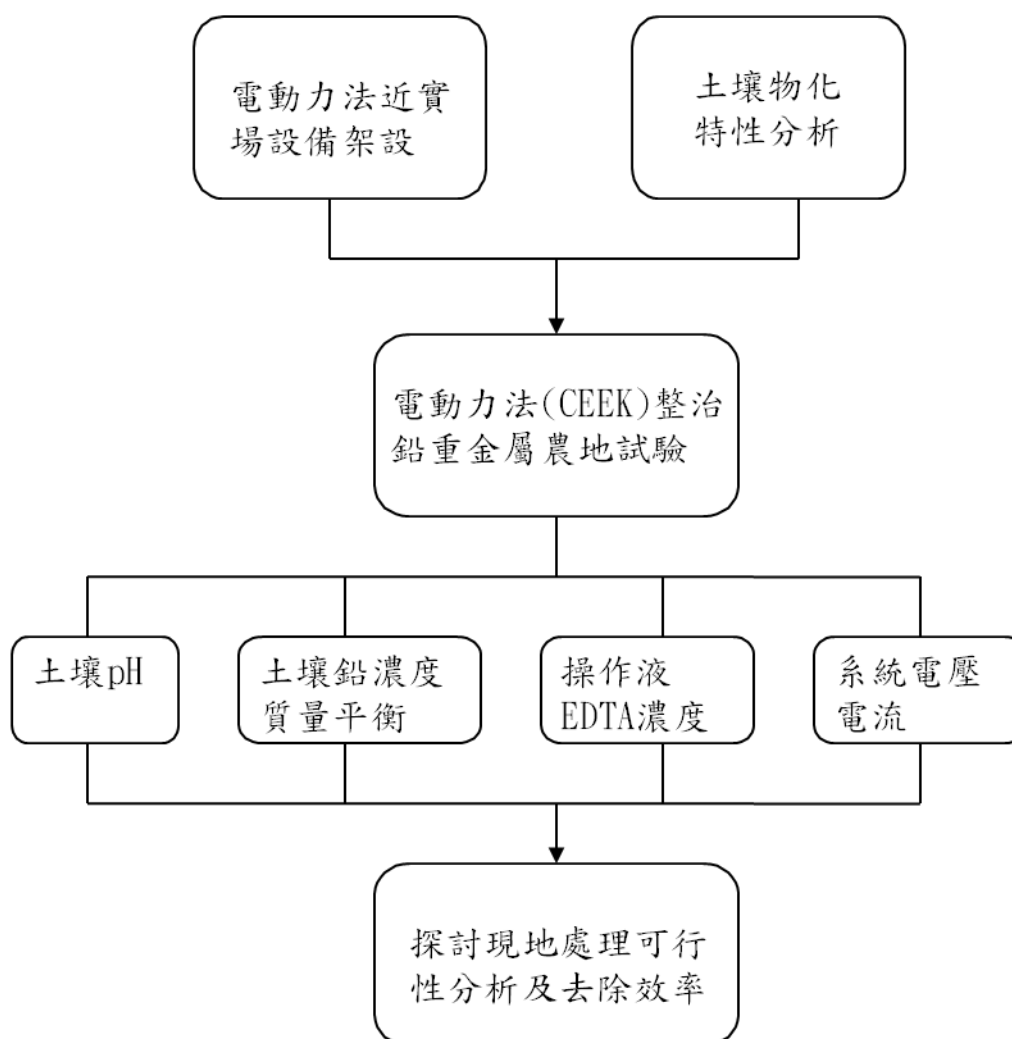


圖 2.1 近實場規模之電動力法整治鉛污染農地研究流程圖

2.1 現地鉛污染農地場址及物化特性

本次試驗場址位於南投縣南投市牛運堀段，圖 2.2 為污染場址平面及採樣示意圖。本計畫採用的農地地號為牛運堀段 25-14，於圖中下半部呈 1/4 圓的區域。為了確認本污染農地的鉛濃度適用於本計畫，研究團隊已於現場採樣並以 XRF 儀器進行檢測。基本上以網格法進行採樣，每個採樣點間隔 2 公尺，採樣深度約 5 公分。地號 25-14 試驗區塊的採樣編號為 2-8~2-11、3-8~3-11、4-8~4-11、5-8~5-11、6-8~6-10、7-8~7-9，其土壤鉛污染濃度如表 2-1 所示。由表可知，鉛污染濃度分佈約為 5,600-8,300 mg/Kg。

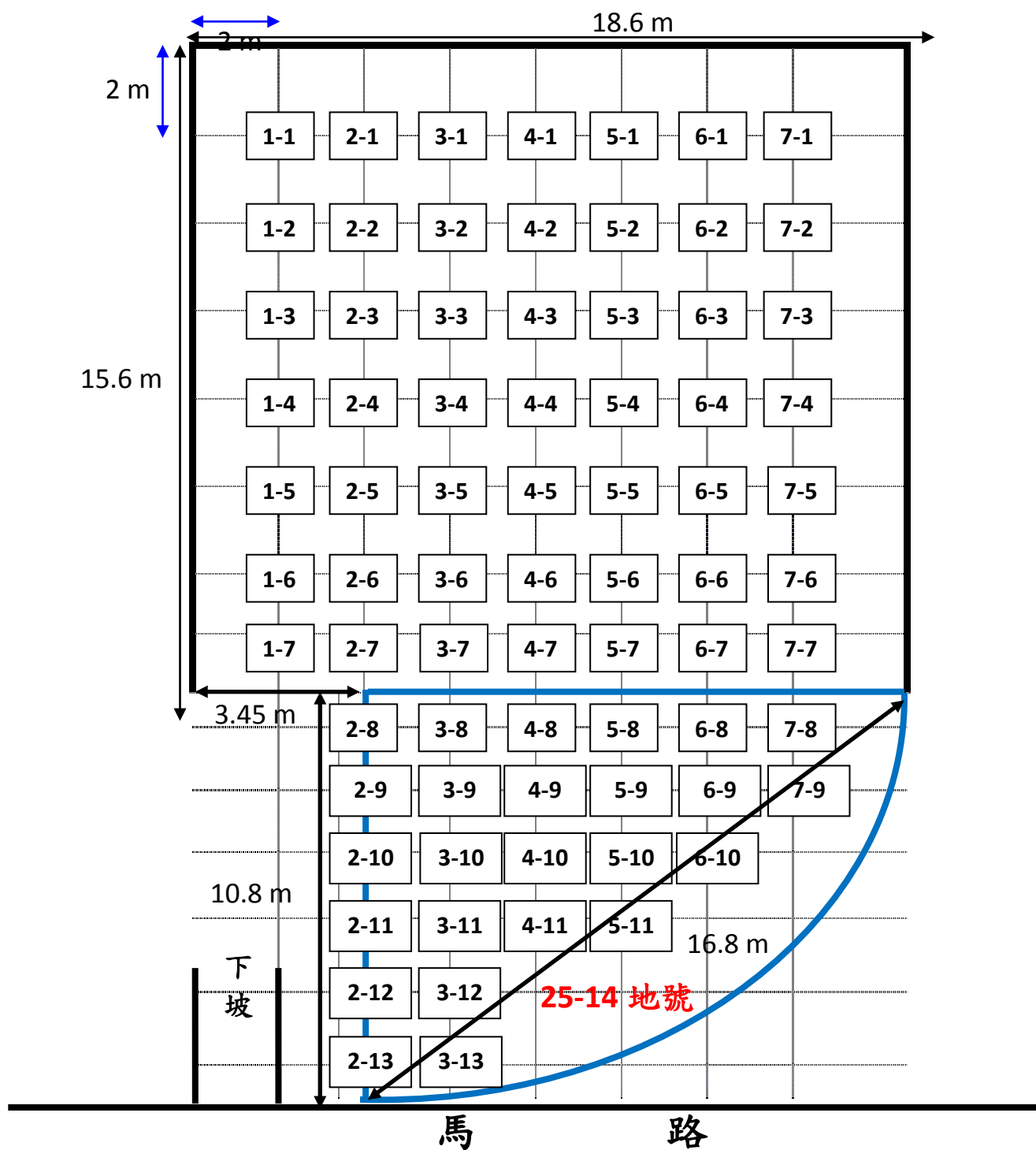


圖 2.2 污染場址平面及採樣示意圖

表 2-1.農地重金屬鉛污染濃度

編號	濃度 mg/L	編號	濃度 mg/L	編號	濃度 mg/L	編號	濃度 mg/L	編號	濃度 mg/L	編號	濃度 mg/L	編號	濃度 mg/L
1-1	6017	2-1	6004	3-1	6551	4-1	6616	5-1	6754	6-1	7015	7-1	7289
1-2	5822	2-2	6118	3-2	6579	4-2	6420	5-2	7197	6-2	7009	7-2	7213
1-3	6045	2-3	5966	3-3	6222	4-3	6645	5-3	6607	6-3	7107	7-3	7604
1-4	5376	2-4	5985	3-4	6013	4-4	6309	5-4	6875	6-4	7007	7-4	7238
1-5	5753	2-5	5678	3-5	6024	4-5	6466	5-5	6811	6-5	6990	7-5	7539
1-6	5604	2-6	5512	3-6	6071	4-6	6766	5-6	7106	6-6	7379	7-6	7687
1-7	5525	2-7	5664	3-7	6001	4-7	6969	5-7	7206	6-7	7492	7-7	8351
		2-8	5609	3-8	5931	4-8	6912	5-8	7465	6-8	7616	7-8	7756
		2-9	5636	3-9	5903	4-9	6792	5-9	7654	6-9	7939	7-9	8373
		2-10	5920	3-10	6173	4-10	6783	5-10	7032	6-10	8215		
		2-11	6146	3-11	6310	4-11	7500	5-11	6818				
		2-12	6310	3-12	6148								
		2-13	6154	3-13	6320								

2.2 近實場電動力法(CEEK)整治鉛重金屬現地試驗方法

圖 2.3 為電動力法(CEEK)整治鉛污染農地現場安裝示意圖，其包含俯視圖及側視圖。圖中顯示於污染現地挖掘 5 座環繞區域（每一座皆為 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(如側視圖所示)。每一區塊外圍挖掘一環繞區域的渠道寬為 20 公分，其作為操作液儲存區(含螯合劑之緩衝溶液注入儲區，即電解質的濃度為 0.01M 碳酸鈉與 0.01M EDTA- 2 鈉鹽)，以其中兩對邊分別為陽極(石墨)與陰極(不銹鋼)區交互安置，將電極懸置於儲區並連接電源供應器，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，再利用隔水材料覆於儲區周邊及底層，使得操作液不致洩漏，最後，再以隔水材料覆於儲區頂部以減少操作液的蒸散量。試驗條件以過去本團隊模場實驗數據分析後之最佳操作參數為初始實驗值(例如：電壓梯度為 1.0

volt/cm)，進而隨時調整之，試驗期間除紀錄天候情況外，監測資料包括：量測土壤中鉛污染物濃度、土壤溫度、操作液中鉛污染物濃度、操作液中螯合劑濃度、操作液 pH 值、土壤 pH 值、土壤含水率及電流等，進而依上列數據分析電動力法(CEEK)之鉛去除污染效益。

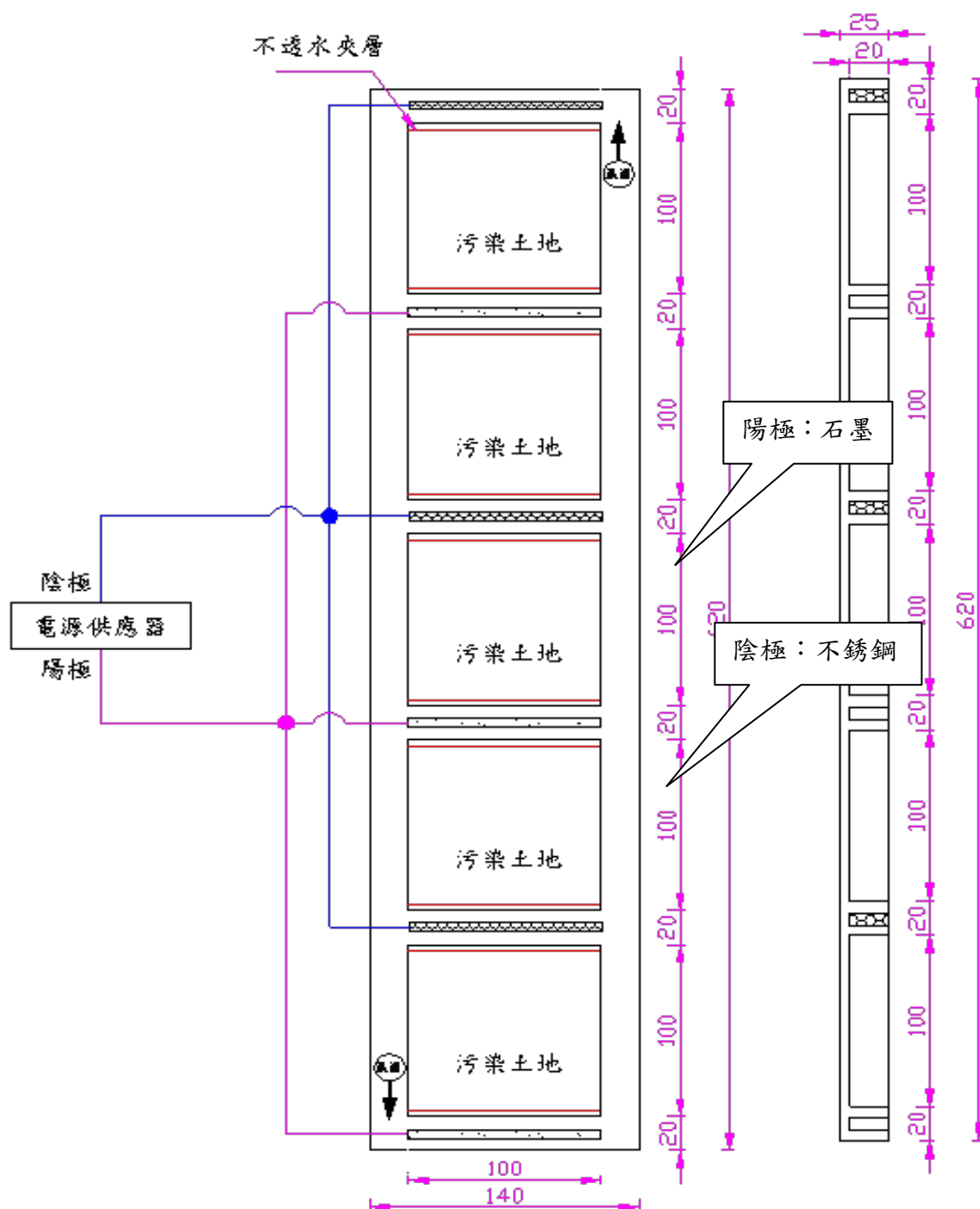


圖 2.3 電動力法(CEEK)整治鉛污染農地現場安裝示意圖

2.3 電動力法(CEEK)整治鉛重金屬模場試驗組裝過程

圖 2.4-2.8 為一系列電動力法(CEEK)現場施工圖，圖 2.4 為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，圖 2.5 為電動力模場設置情形，圖 2.6 顯示電動力模場鑽孔情形使電解液能滲透至土壤。圖 2.7 及 2.8 為電動力法(CEEK)系統裝配完成的完工情形。特別注意的是，圖 2.6 中電動力模場以穿孔方式連通操作液區及處理樣區，進而促進電滲透流移除土壤中鉛。



圖 2.4 電動力法(CEEK)現場施工圖(一)



圖 2.5 電動力法(CEEK)現場施工圖(二)



圖 2.6 電動力法(CEEK)現場施工圖(三)



圖 2.7 電動力法(CEEK)現場施工圖(四)



圖 2.8 電動力法(CEEK)現場施工圖(五)

圖 2.9 為電動力模場現場設置之保險箱，保險箱中有配置一台電源供應器、瓦時計、散熱風扇、電源總開關及延長線，圖 2.10-2.12 為一系列電動力法(CEEK)現場操作情形，圖 2.10 為將 1200 公升的水加入並進行通電情形，圖 2.11 為沉水式迴流幫浦裝置，共使用三台，圖 2.12 為電動力模場中陰極板及陽極板設置情形。



圖 2.9 電動力法(CEEK)現場施工圖(六)



圖 2.10 電動力法(CEEK)現場施工圖(七)



圖 2.11 電動力法(CEEK)現場施工圖(八)



圖 2.12 電動力法(CEEK)現場施工圖(九)

第三章、主要發現與結論

本計畫推展至今，研究進度符合原訂進程。期間發現若干執行困難及問題，已修正或持續進行改良。目前，茲就已完成的主要發現與結論說明如下：

3.1 現地鉛污染土壤物化特性及鉛污染濃度

本次 CEEK 試驗在編號 7-8、6-9、5-10、4-11、3-12 試驗區開挖設置電動力裝置。電動力法試驗前先進行採樣位置土壤的物化特性及鉛污染濃度全量分析如表 3-1。由表可知，土壤 pH 值趨近於中性(介於 6.9-7.1 之間)、土壤有機質約為 6-7%，而鉛污染濃度分佈為 6,488-8,378 mg Kg⁻¹。陽離子交換能力約介於 3.0-3.08 cmol Kg⁻¹。後續施作電動力法後，每隔一段時間即進行土壤採樣以進行分析比較。

表 3-1. 現地模場採樣位置土壤物化特性及鉛污染濃度

編號	含水率 (%)	有機質 (%)	pH	EC ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	Pb (mg kg^{-1})	CEC (cmol kg^{-1})
7-8	36	7	7	146	8378	3.01
6-9	34	6	7	155	7312	3.0
5-10	34	7	6.9	257	7508	3.0
4-11	31	6	6.9	149	6488	3.08
3-12	30	7	7.1	269	6543	2.97

3.2 電動力法(CEEK)整治鉛重金屬模場試驗 63 天成果

圖 3.1 為污染土壤 pH 及導電度隨操作時間變化圖，本試驗隨著時間進行 63 天，分別於每周採取 5 個區域的污染土壤進行分析(採集方式為每 1 處理區採集 1 組混樣土壤)。由圖可知，運用電動力法 CEEK 可保持處理土壤之 pH 於中性範圍(pH 6-7)，並沒有土壤酸化的情況。其穩定的原因可歸因於操作液的高 pH 緩衝能力及循環系統。由於操作液主要為 0.01M 碳酸鈉所調製，因此少量的酸鹼量加入對 pH 的影響不大。此外，電動力法的陽極端通常因電解水產生大量的酸(H⁺)，陰極端通常因電解水產生大量的鹼(OH⁻)，本系統 CEEK 藉由連通陽極與陰極儲槽，並採用循環輸送泵將其酸鹼中和。因此，即使試驗規模由實驗室放大到模場規模，本系統的 pH 仍可穩定於中性範圍。

土壤的導電度有一開始有上升的趨勢，隨著操作時間增加而維持穩定，約在 300-600 $\mu\text{S cm}^{-1}$ 。此結果與實驗室規模試驗及過去模場試驗結果相符。同時由於 pH 對於導電度的影響甚鉅，穩定的 pH 即有穩定的導電度。

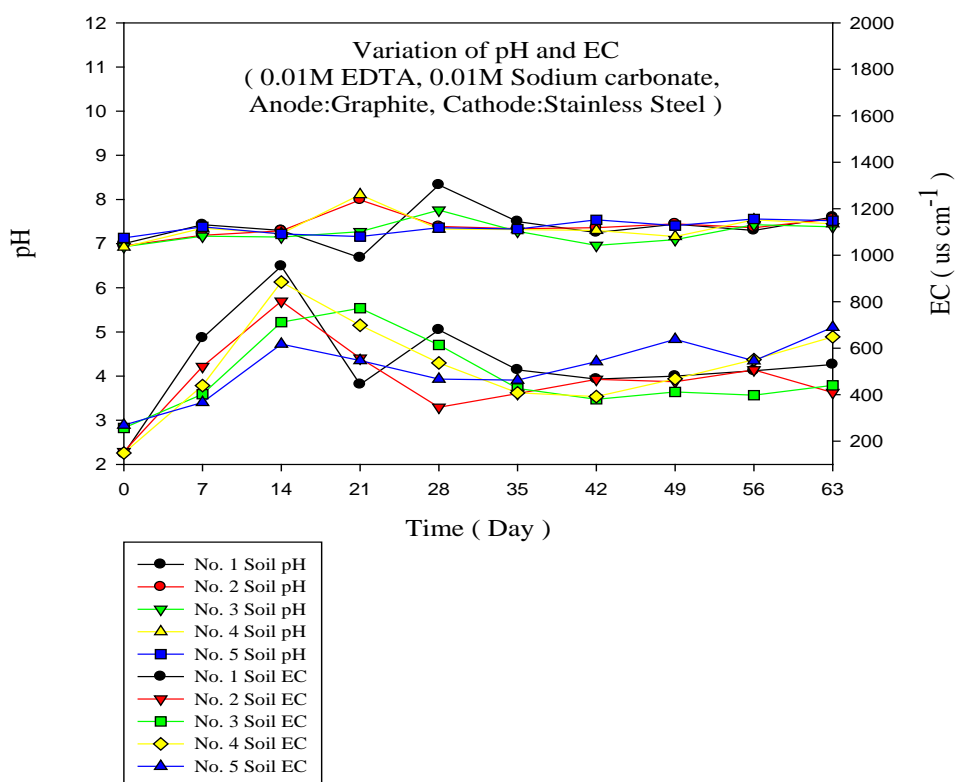


圖 3.1 污染土壤 pH 及導電度隨操作時間變化圖

圖 3.2 為電動力法整治鉛污染土壤濃度變化圖，由圖可見，土壤中鉛濃度隨著處理時間增加而降低，經過 63 天處理，5 個區的土壤鉛濃度平均去除效率約可達 64% (由 7246mg Kg⁻¹ 降至約 2612mg Kg⁻¹)，土壤中的污染物呈現持續下降的趨勢，目前鉛濃度已接近管制標準 2000mg Kg⁻¹。

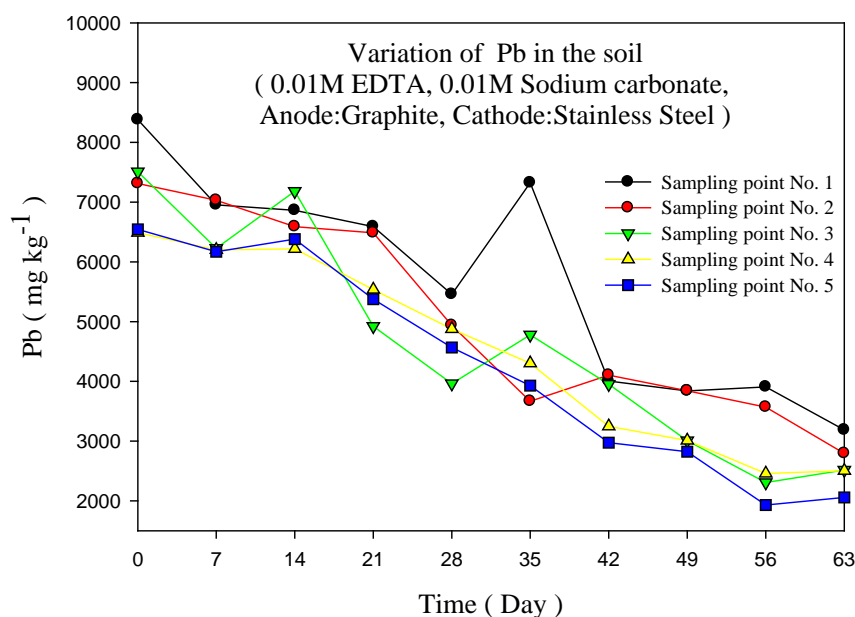


圖 3.2 電動力法整治鉛污染土壤濃度變化圖

表 3-2 土壤鉛污染 5 個採樣點的鉛濃度及其去除率，由表中可知，本區塊的鉛濃度皆超過管制標準 2,000 mg Kg⁻¹ 且其分佈範圍頗大，最高濃度約為 8,378 mg Kg⁻¹，本區塊平均鉛濃度約為 7,246 mg Kg⁻¹。而每一採樣點的鉛濃度皆隨操作時間增加而逐漸降低，操作時間 63 天的平均鉛去除率可達 64%。

表 3-2. 土壤鉛污染 5 個樣區鉛濃度及其去除率

Pb (mg kg ⁻¹)							
編號	1	2	3	4	5	平均	去除率(%)
初始	8378	7312	7508	6488	6543	7246	--
Day7	6955	7032	6228	6202	6170	6517	10.06 %
Day14	6863	6590	7183	6218	6380	6647	8.27 %
Day 21	6590	6487	4922	5537	5377	5782	20.20 %
Day 28	5457	4937	3963	4877	4567	4760	34.31 %
Day 35	7323	3668	4778	4303	3930	4801	33.75 %
Day 42	4005	4103	3953	3247	2975	3657	49.54 %
Day 49	3840	3843	3007	3010	2823	3305	54.39 %
Day 56	3907	3568	2308	2458	1930	2834	60.88 %

Day 63	3187	2795	2517	2505	2058	2612	63.95 %
--------	------	------	------	------	------	------	---------

圖 3.3 為 CEEK 電動力法操作液的 pH 與導電度變化圖，由圖 3.3 可見，操作液 pH 保持接近中性偏鹼的狀態(介於 7.7-8.5 之間)，由此可知電動力系統中幫浦迴流效果良好，能使系統中偏酸的陽極及偏鹼的陰極混和均勻。導電度亦維持穩定。

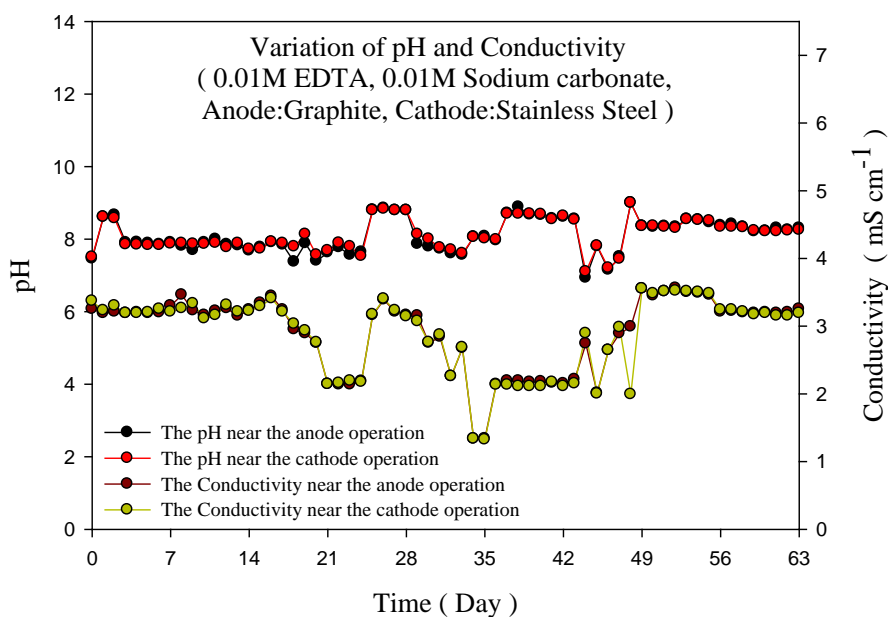


圖 3.3 電動力法操作液的 pH 及導電度變化圖

圖 3.4 及 3.5 分別為系統電壓電流及溫度的變化圖，由圖 3.4 可見，本試驗電動力系統是以固定電流 10A 為操作參數，隨著操作天數增加電壓有逐漸增加的趨勢，最後約達 60V 左右。電壓上升顯示電阻隨之增加。其可能原因是電解質流失(降雨影響)、電極板導電性降低或其他原因，確定原因仍有待深入研究探討。試驗 63 天的用電量估算如下：

平均電壓約為 59.49 V，平均電流為 10A，電功率 $59.49 \times 10 = 594.9 \text{ W}$

63 天共計用電 $594.9 \times 63 \times 24 \times 10^{-3} = 899.49 \text{ KW-Hr}$ (仟瓦小時)

1 度電為 1.0 KW-Hr，1 度電以 3.5 元計

63 天操作電費為 $899.49 \times 3.5 = 2098.22 \text{ 元}$

以處理土壤 5.0m² 計算，每單位面積操作電費為 $2098.22 / 5 = 419.64 \text{ 元}$

$419.64 / 64 = 6.55 \text{ 元}$

本系統 CEEK 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 6.55 元，此數據與過去模場試驗的 8.82 元頗為接近。其他設置成本另計。

由圖 3.5 可見系統中操作液的溫度介於 30 - 40°C 之間，是影響電流的因素之一。電動力系統放大規模後，其溫度可能因電流放大而產生過高的現象，甚至造成危險。但本系統 63 天中操作液溫度與氣溫相當，其顯示本 CEEK 系統的穩定性。

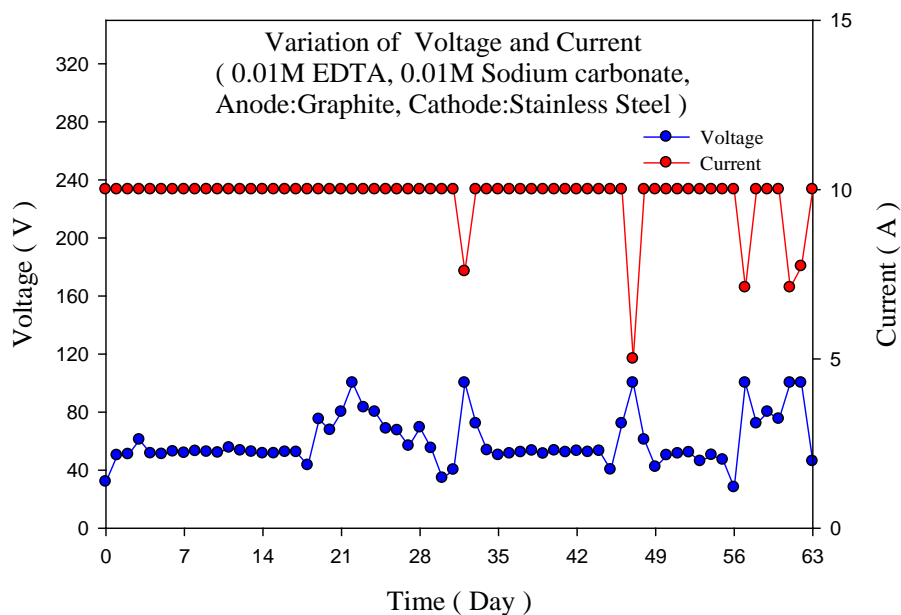


圖 3.4 電動力法系統的電壓及電流變化圖

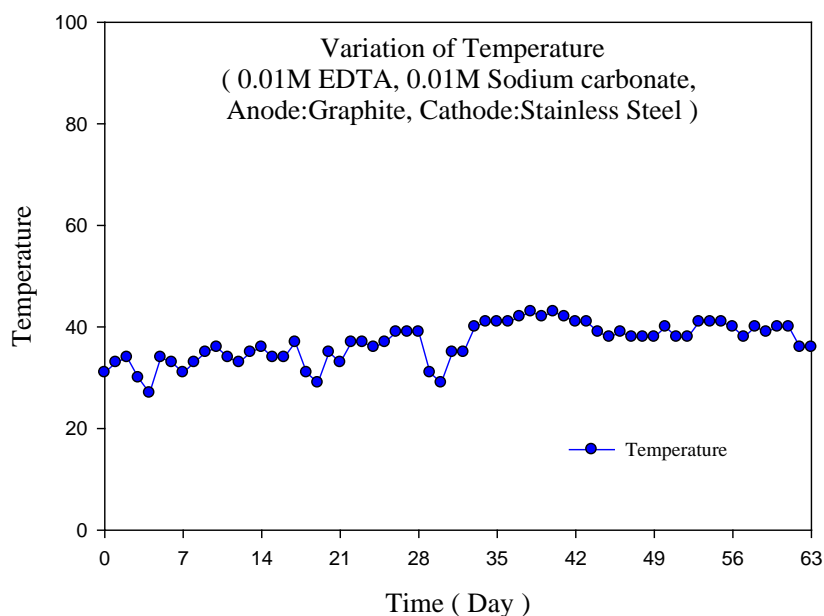


圖 3.5 電動力法系統中操作液溫度變化圖

3.3 土壤肥力試驗分析

由於本試驗土壤屬於農地，保持土壤肥力亦為本試驗重點之一。雖然本電動力法已盡量降低對土壤肥力的衝擊，但土壤經整治後必然導致土壤肥力改變，因此本試驗針對處理後土壤進行肥力試驗分析，藉以瞭解本系統對土壤肥力之影響。其分析的項目包括：交換性陽離子(K, Ca, Mg, Na)、微量元素 (Fe, Mn, Zn, Cu)、有效磷。對照土壤養分分級表(表 3-4)，土壤處理前的肥力分級為：過量 (Ca、Mg、K、Fe、OM)，適量 (Mn)，缺乏 (P、CEC)。經過 63 天的處理：過量 (Mg、K、Fe、Mn、OM)，缺乏 (Ca、P、CEC)。由以上數據可見，本電動力整治方法處理後的土壤肥力略降，需要添加適當肥料方能回復原有肥力。

表 3-3. 土壤於處理前後的肥力元素含量

---	Ca mg kg ⁻¹	Mg mg kg ⁻¹	K mg kg ⁻¹	Na mg kg ⁻¹	Fe mg kg ⁻¹	Mn mg kg ⁻¹
初始	1795.25	317.7	146.25	88.88	1058	138.49
Day63	250.21	312.65	228.81	1767.75	3111.00	173.86
---	Cu mg kg ⁻¹	Zn mg kg ⁻¹	P mg kg ⁻¹	CEC cmol kg ⁻¹	OM %	
初始	6.16	10.03	13.09	3.01	7.8	
Day63	8.76	8.825	0.122	30.1	4.4	

表 3-4. 土壤養分分級表

項目	單位	適用土壤	肥力分級		
			缺乏(d)	適量(p)	過量(e)
OM	%	所有土壤	< 1	1-3	> 3
CEC	cmol kg ⁻¹	所有土壤	< 6	6-12	> 12
有效性磷	mg kg ⁻¹	水田土壤	< 20	20	> 20
交換性鈣	mg kg ⁻¹	所有土壤	< 800	800-1600	> 1600
交換性鎂	mg kg ⁻¹	所有土壤	< 30	30-60	> 60
交換性鉀	mg kg ⁻¹	所有土壤	< 67	67-125	> 125
鐵	mg kg ⁻¹	所有土壤	< 50	50-300	> 300
錳	mg kg ⁻¹	所有土壤	< 20	20-140	> 140

資料來源：陳仁炫、林正劫、郭思千，「土壤肥力因子之分級標準彙集」，行政院農委會，82 年

3.4 土壤鉛質量平衡與蘇拉颱風之影響

土壤鉛質量平衡

為了確實瞭解土壤鉛移除的效果及掌握鉛在系統內的傳輸現象，應透過土壤鉛質量平衡的計算進行之，計算包括：土壤移除鉛的總質量、系統中陰極板電鍍鉛質量及操作溶液中的鉛含量，鉛質量平衡應符合下列方程式，茲計算如下。

土壤移除鉛的總質量=系統中陰極板電鍍鉛質量+操作溶液中的鉛含量

1. 土壤移除鉛的總質量

每公斤土壤鉛移除濃度 $7246 \times 64\% = 4,637.44 \text{ mg/kg}$

整治土壤總質量 $100 \times 100 \times 25 \times 1.5 (\text{總體密度}) \times 5 / 1,000 = 1,875 \text{ kg}$

土壤移除鉛的總質量 $4,637.44 \text{ mg/kg} \times 1,875 \text{ kg} / 1000 = 8,695.2 \text{ g}$

2. 系統中陰極板電鍍鉛質量

本團隊以渦電流膜厚計量測各陰極板的電鍍鉛厚度，其厚度單位為微米(μm)，量測情形如下圖所示。量測結果呈現於表 3.5。由表中可見，各陰極板的鉛膜厚並不均勻，膜厚介於 $0.5 \sim 25.1 \mu\text{m}$ ，其顯示電鍍效率不高，且陰極板表面特性差異極大。電鍍鉛質量計算如下。



圖 3.6 渦電流膜厚計量測陰極板電鍍鉛的情形

表 3-5. 陰極板鉛膜之厚度(μm)

量測項次	1 號陰極板	2 號陰極板	3 號陰極板	4 號陰極板	5 號陰極板
1	11.0	3.5	10.7	11.0	3.2
2	7.0	4.8	18.9	6.6	0.5
3	4.7	1.6	25.1	5.1	4.2
4	4.5	11.3	6.3	8.3	3.7
5	8.4	6.2	12.6	12.3	4.3
平均膜厚	7.1	5.5	14.7	8.7	3.2
總平均膜厚	7.832				

系統中陰極板電鍍鉛膜的總體積 $100*20*5*7.832/10000=7.832\text{cm}^3$

鉛密度 10.66g/cm^3

陰極板電鍍鉛質量 $7.832*10.66=83.5\text{g}$

3.操作溶液中的鉛含量

操作溶液體積為 1,500 公升

操作溶液的平均含鉛濃度 30.0mg/L

溶液中含鉛量 $1,500\text{ L} * 30.0\text{mg/L} / 1000 = 45\text{g}$

陰極板電鍍鉛質量+操作溶液中的鉛含量 = $83.5+45=128.5\text{g}$

綜合以上計算結果，土壤移除鉛的總質量 $8,695.2\text{g}$ 遠大於陰極板電鍍鉛質量+操作溶液中的鉛含量 128.5g ，換言之，去除的鉛必然傳輸至系統之外，本系統並非一密閉系統(closed system)。其原因是：當土壤鉛被 EK 移除致操作溶液中，但輸送操作溶液的渠道受土壓施力而破裂，使得含鉛的操作溶液逐漸滲漏致系統外，其導致的問題包括：操作溶液的持續添加及含鉛溶液流出系統。

蘇拉颱風之影響

101 年 8 月蘇拉颱風侵襲台灣，其造成本試驗模場淹水，其淹水情況如圖 3.7 所示。將此圖與試驗開挖的照片比對，可發現淹水高度接近 1.0 公尺，已將 EK 系統完全淹沒，1 台電源供應器遭淹沒後短路毀損，無法修復。



圖 3.7 101 年 8 月蘇拉颱風造成場址淹水的情形



圖 3.8 近實場試驗 EK 系統開挖情形

圖 3.9 蘇拉颱風後輸送渠道毀損的情形，由圖可見輸送操作溶液的渠道受土壓施力而破裂，使得含鉛的操作溶液逐漸滲漏致系統外。因此，輸送循環操作溶液的工程設施，需要進一步改良。

特別值得注意的是，場址整治過後的鉛污染土壤在颱風淹水過後大幅提升，土壤鉛濃度由整治試驗 63 天後的約 2,000mg/kg，增加到 6,000 mg/kg 左右。其可能是被移除至系統外的鉛污染，於淹水期間又傳輸被再度吸附於土壤中。



圖 3.9 蘇拉颱風後輸送渠道毀損的情形

3.5 結論與建議

本試驗經過 63 天污染土壤整治及颱風淹水，結果可以歸納以下若干結論：

1. 本試驗污染土壤中鉛去除率可達約 64%，平均土壤鉛濃度可從 7,246 mg/Kg 降至約 2,612 mg/Kg，成果與過去在模場及其他鉛污染場址的去除效率非常接近，充分說明本技術 CEEK 在現地整治的應用潛力。從土壤中移除的鉛可藉由電鍍作用，將鉛電鍍於陰極板上。
2. 本系統 CEEK 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 6.55 元，此數據與過去模場試驗的 8.82 元頗為接近。
3. 本電動力系統 CEEK 在近實場規模操作下，土壤的 pH 值及導電度維持在中性及穩定的狀態，呈現本系統對土壤衝擊低。
4. 本電動力系統 CEEK 在近實場規模操作下，系統電流及電壓維持在穩定的狀態。同時，系統溫度接近大氣氣溫，呈現本系統的穩定性佳。
5. 本電動力整治方法處理後的土壤肥力略降，需要添加適當肥料方能回復肥力。

本試驗執行中的問題及建議如下：

1. 操作液的循環量受天候影響甚鉅：日照蒸散 CEEK 的操作液，使得每天須派人補充之，造成實際應用的不便。而雨天會稀釋操作液的濃度，即使加蓋塑膠帆布仍受大雨或颱風影響。建議未來設計完全密閉的循環水管改善之。
2. 循環渠道日久變形：近實場規模計畫中，以木板及防水漆製作的循環渠道，受土壓及試驗期間的踐踏，逐漸變形而發生操作液的滲漏。建議未來採用抗壓的循環水管改善之。
3. 回收鉛於陰極板的電鍍條件：由於鉛與 EDTA 的錯化物須經較高的電壓及較長時間電鍍，才能將土壤中的鉛電鍍於陰極板的表面。若電鍍效果不佳，應增設廢水處理設備。

第四章、參考文獻

1. Westrick, J. J, J. W. Mills, and R. F. Thomas, 1983, *The Ground Water Supply Survey: Summary of Volatile Organic Contaminant Occurrence Data*, U. S. EPA, Office of Drinking Water, Cincinnati, OH.
2. Li, Z., Yu, J. W., and Neretnieks, I., "Removal of Pb(II), Cd(II), and Cr(III) from sand by Electromigration," *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 55, No. 1-3, pp. 295-304 (1997).
3. Hansen, H. K., Ottosen, L. M., Laursen, S. and Villumsen, A., "Electrodialytic Remediation of Soils Polluted with Cu, Cr, Hg, Pb, and Zn," *Journal of Chemical Trchnology and Biotechnology*, Vol. 77, No. 1, pp. 67-73(1997).
4. Sah, J. G., and Chen, J. Y., "Study of the Electrokinetic Process on Cd and Pb Spiked Soils," *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 58, pp. 301-315(1998).
5. 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).
6. 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).
7. Weng, C.H., Y.T. Lin, T.Y. Lin 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).
8. Wang, J., Tian, Blu, C., Olsen, C., and Yarnitzky, K., 1999, *Analytical Chim. Acta*, 358, 429-436.
9. 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).
10. Reedy B. E., Carriere P. C., Moore R., "Flushing of a PbII contaminated soil using HCl, EDTA, and CaCl₂," *J. Environ. Eng*, Vol. 122, pp. 48-50 (1996).
11. J.H. Chang and Y.C. Liao, "The effect of critical operational parameters on the circulation-enhanced electrokinetics" *Journal of Hazardous Materials*, 129(1-3): 186-193, 2006 (SCI, IF 2.975).
12. Jih-Hsing Chang, Zhimin Qiang, Chin Pao Huang, and Daniel Cha, "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. (SCI)
13. 章日行、唐政宏、黃明正、盧建宏、鍾秉倫，2004,11月，"循環改良式電動力法復育鎘與鉛污染之土壤"，第二屆土壤與地下水研討會，台南。
14. 章日行，2006,12月4日，"循環改良式電動力法整治重金屬、含氯有機溶劑及油品污染土壤之研究"，第三屆海峽兩岸土壤及地下水污染整治研討會，台北。
15. 章日行，施彥鴻，2007,11月24日，"應用 EDTA 與電動力法整治實場銅污染土壤"，中華民國環境工程學會 2007 土壤與地下水研討會，高雄。
16. Jih-Hsing Chang, Yan-Hsong Shi, Cheng-Hung Tung, "Stepwise addition of chemical

reagents for enhancing electrokinetic removal of copper from real site contaminated soils” Journal of Applied Electrochemistry (SCI, IF 1.540, in press, 2010).

17. 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

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」。