

行政院環境保護署

102 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

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 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：101年12月10日起至

102年12月09日

中華民國 102 年 12 月 印製

土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案 成果自評表

請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況、研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）、是否適合在學術期刊發表或申請專利、主要發現或其他有關價值等，作一綜合評估。

1. 請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況作一綜合評估

- 達成目標
- 未達成目標（請說明，以 100 字為限）
- 實驗失敗
 - 因故實驗中斷
 - 其他原因

說明：

本計畫原擬以電動力法+離子交換樹脂移除農地中污染鉛，但經整治 100 天，整治期間發現鉛去除率無法提升，經不斷調整操作參數，最後發現失敗原因為離子交換樹脂的使用。經移除離子交換樹脂的使用並整治 20 天後，鉛去除效率約達 33%（土壤鉛濃度由 5,800mg/kg 降低至 3,800mg/kg）。此電動力法移除土壤鉛的速率與前 2 年計劃試驗結果一致。

2. 研究成果在學術期刊發表或申請專利等情形：

- 論文： 已發表 未發表之文稿 撰寫中 無
- 專利： 已獲得 申請中 無
- 技轉： 已技轉 洽談中 無
- 其他：（以 100 字為限）

3. 請依學術成就、技術創新、社會影響等方面，評估研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）（以 500 字為限）

本計畫擬建構一組 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。同時可以有效去除土壤重金屬污染，並利用離子交換樹脂回收重金屬，試驗具體成果包括：

1. 本計畫確實建構 CEEK 可重複使用的密閉式不透水渠道。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
2. 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。
3. 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。
4. 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。
5. 本試驗經過 100 天污染土壤整治，土壤鉛的去除率僅約 2%，歸因其最可能的失敗原因為離子交換樹脂的使用，經移除離子交換樹脂的使用整治 20 天後，鉛去除效率約達 33%(土壤鉛濃度由 5,800mg/kg 降低至 3,800mg/kg)。

依據上列說明，本計畫建構的 CEEK 技術可以有效去除土壤重金屬污染，並可穩定操作、初設及操作成本低廉，雖然無法整合離子交換樹脂技術，但若搭配化學混凝處理技術，應仍具有實際應用價值。

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，特別是現地污染整治的試驗更顯得重要。本研究以循環式之電動力法(Circulation-Enhanced Electrokinetics, CEEK)整治南投市某處鉛污染土壤，本計畫依據去年的成果進行 CEEK 系統改進，企盼藉由本計畫建構更具市場性的現地電動力法技術。

本試驗經過 100 天的鉛污染土壤整治，結果與計畫目標對應後可以歸納以下若干結論：

- 1.本計畫確實建構一組 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。
- 2.本計畫確實建構 CEEK 可重複使用的密閉式不透水渠道。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
- 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。
- 6.本試驗經過 100 天污染土壤整治，土壤鉛的去除率僅約 2%，歸因其最可能的失敗原因為離子交換樹脂的使用，經移除離子交換樹脂的使用整治 20 天後，鉛去除效率約達 33%(土壤鉛濃度由 5,800mg/kg 降低至 3,800mg/kg)。

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) to clean the lead contaminated soils in Nantou City. This project was proposed to improve the CEEK system based on the results from last year. We hope to establish the CEEK technique to meet the market requirements.

After 100-day remediation for lead contaminated soils by the CEEK, several conclusions can be drawn:

1. A closing and uninfiltated channel for the CEEK was constructed successfully, which avoids the weather effect and deformation problem during the long-term operation.
2. A reusable channel for the CEEK was constructed, which can be reused and save the initial cost.
3. The pH and electrical conductivity of soils could maintain neutral and stable situation, which indicated the little impact on soils under such CEEK process.
4. 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.
5. The fertilizerbility of the treated soils was slightly less than that of the untreated soils. This means the addition of fertilizer is necessary
6. After 100-day remediation, the lead removal efficiency was around 2%. The most possible factor of the failure is the application of ion exchange resins. After removing the ion exchange resins and treating 20 days, the removal efficiency could reach 33% (from 5,800mg/kg to 3,800mg/kg) °

第一章、計畫緣起與目的

由於過去缺乏環保意識，同時在廢棄物處理設備與最終處理廠不足情況下，未經處理的廢棄物恣意傾倒或掩埋，土壤就成為污染物在自然界中傳輸的終點。而污染的土壤經人們接觸或吸入方式逐漸威脅人體健康，污染的土壤亦破壞自然生態系統，因此，土壤污染已是世界各先進國家關注的重要環保問題之一。以台灣而言，各類工廠含重金屬廢水排放至地表造成土壤污染。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。因此，快速有效整治重金屬污染農地的方式具有極高研究及應用價值，此外，農民較保守及保護原有農田土壤的心態，現地整治顯得更具可行性，換言之，模場規模的現地污染整治的研究更顯得迫切及重要。

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。

本計畫研究團隊於 100 年及 101 年分別獲得環保署補助「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」計畫及「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，分別針對台中縣及南投縣某鉛污染農地進行

電動力法整治試驗，在 100 年的計畫中，本團隊採用的現地規模電動力法(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 7190 mg/Kg 降至約 2050 mg/Kg，平均去除鉛污染效率約高達 72%。在 101 年的計畫中，試驗規模放大至 5.0mL 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 7246 mg/Kg 降至約 2612 mg/Kg，平均去除鉛污染效率約約達 64%。結果顯示循環加強式電動力法(CEEK)處理鉛污染農地土壤具有相當的整治效率，同時具有實際的可行性。但電動力法 CEEK 在推廣上仍有強化的必要，例如：操作液的穩定性及污染鉛電鍍於極板的改良，此外，電動力法 CEEK 技術經兩年實地試驗，本團隊認為已有必要申請國內外專利，以利未來推廣至其他國家。有鑑於前述理由，本計畫擬建構自動化及專利化之實場規模現地電動力系統，並將其應用於整治鉛污染農地，進一步探討相關 CEEK 實際運用的問題及成本。

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，並獲得中華民國電動力法專利[17]，以上述成果為基礎，本團隊已進行模場及近實場試驗，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)

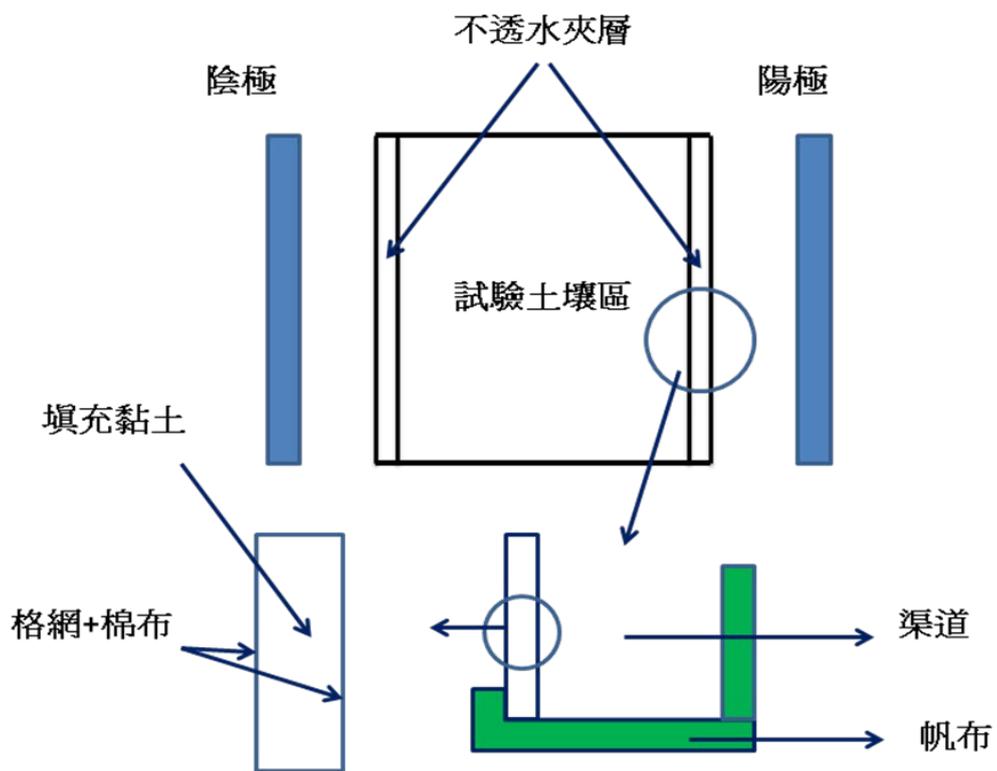


圖 1.3 電動力法(CEEK)現場不透水夾層安裝示意圖

模場電動力法(CEEK)整治鉛污染農地成果

圖 1.4 為污染土壤 pH 及導電度隨操作時間變化圖，本試驗處理時間進行 56 天，分別採集待處理重金屬污染土壤 9 個點的土壤進行分析。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。土壤的導電度亦維持穩定值約 $600 \mu\text{S cm}^{-1}$ 。其結果符合預期。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。即使試驗規模由實驗室放大到模場規模，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，本系統的 pH 穩定於中性左右。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。

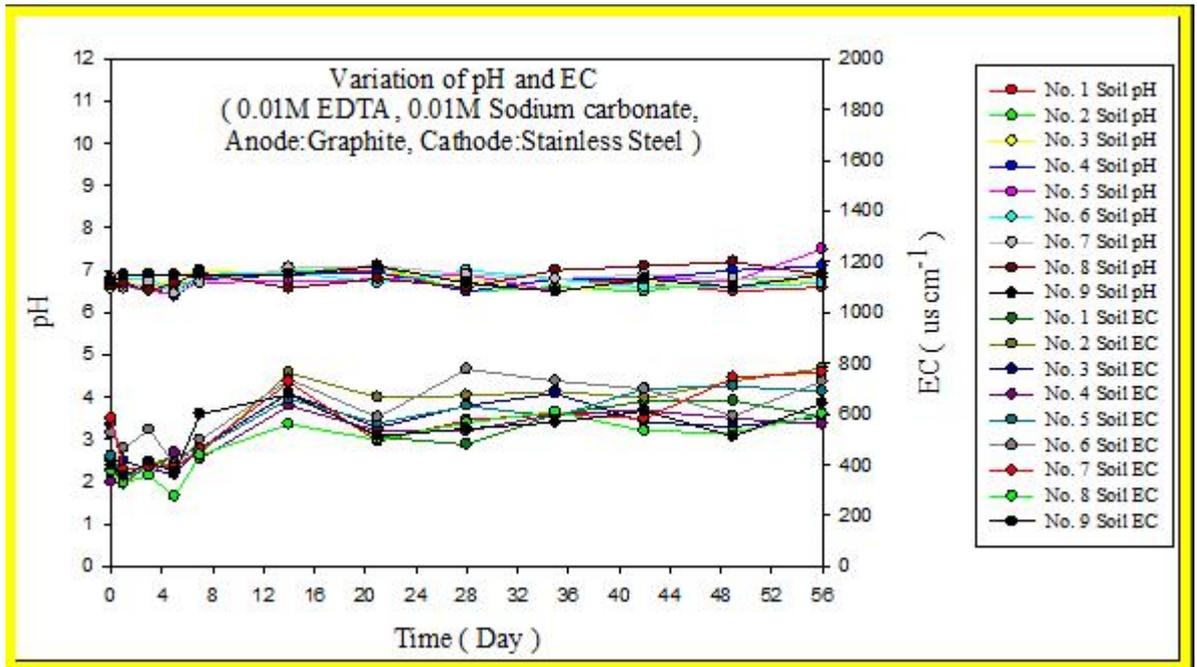


圖 1.4 污染土壤 pH 及導電度隨操作時間變化圖

圖 1.5 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快速降低，經過 56 天處理，平均 9 個點的土壤鉛濃度去除效率約可達 72%。值得注意的是，處理 1 天後，編號 7、8、9 的土壤鉛濃度平均去除效率約可達 25%。隨著處理時間增加，去除效率則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，其可能是操作液不斷循環，將移出土壤的鉛部分迴流至陽極區所導致。由圖 1.6 可見，操作液鉛濃度於第 14 天即上升至約 42 mg L^{-1} ，其顯示土壤中鉛確實已移除至 EDTA 操作液中，之後逐漸降低的原因應為鉛電鍍至陰極板上或迴流至系統中。

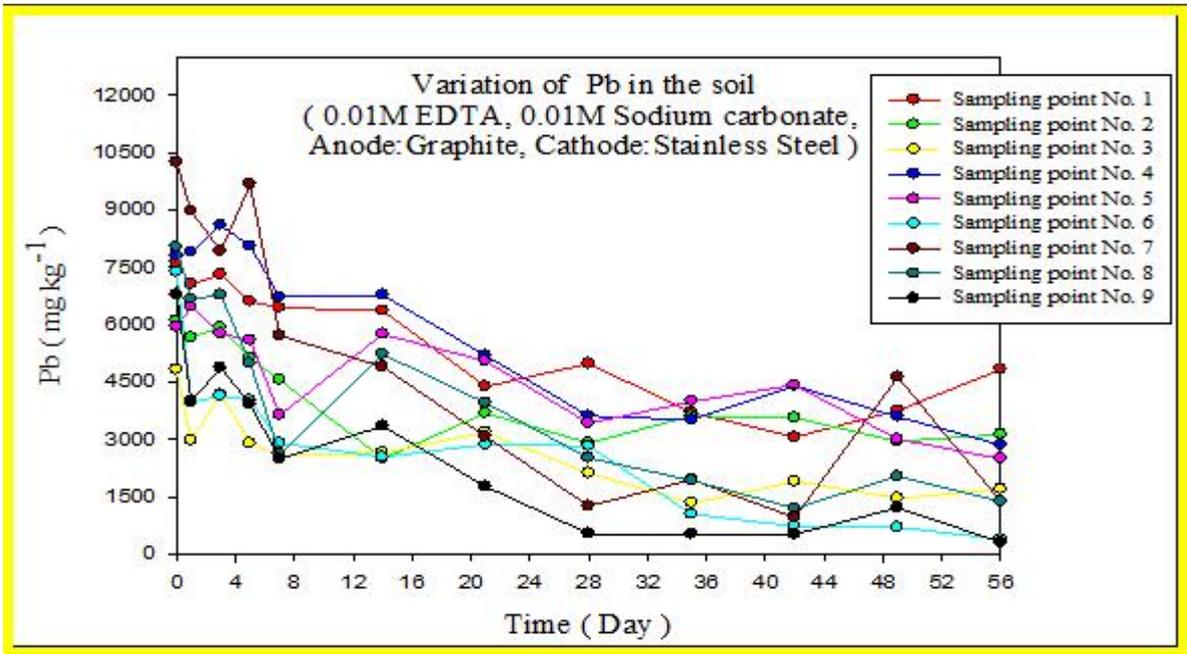


圖 1.5 電動力法整治鉛污染土壤濃度變化圖

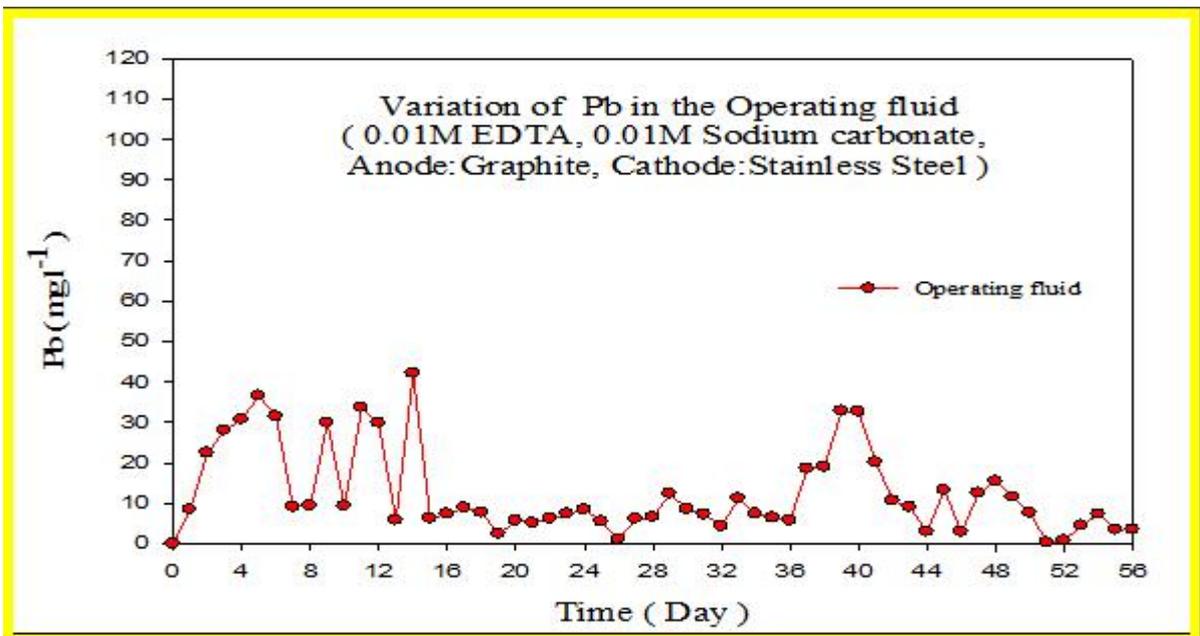


圖 1.6 電動力法操作液的鉛濃度變化圖

圖 1.7 為系統電壓電流的變化圖，由圖可見，本試驗電動力系統初始以固定電壓 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。電壓上升顯示電阻隨之增加。其可能原因是電解質流失、電極板導電性降低或其他原因。電流隨著操作時間到第 7 天降至約 0.7A。試驗 56 天的用電量估算如下：平均電壓約為 90 V，平均電流約為 1.5A，電功率 $90 \times 1.5 = 135$ W，56 天共計用電 $135 \times 56 \times 24 \times 10^{-3} = 181.44$ KW-Hr(仟瓦小時)1 度電為 1.0 KW-Hr，1 度電以 3.5 元計，56 天操作電費為 $181.44 \times 3.5 = 635.04$ 元，換言之，56 天鉛去除率約為 72%，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)。由圖 1.8 可見系統中操作液的溫度介於 29-37°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。本系統 56 天中操作液溫度與氣溫相當，其顯示本 CEEK 系統的穩定性。

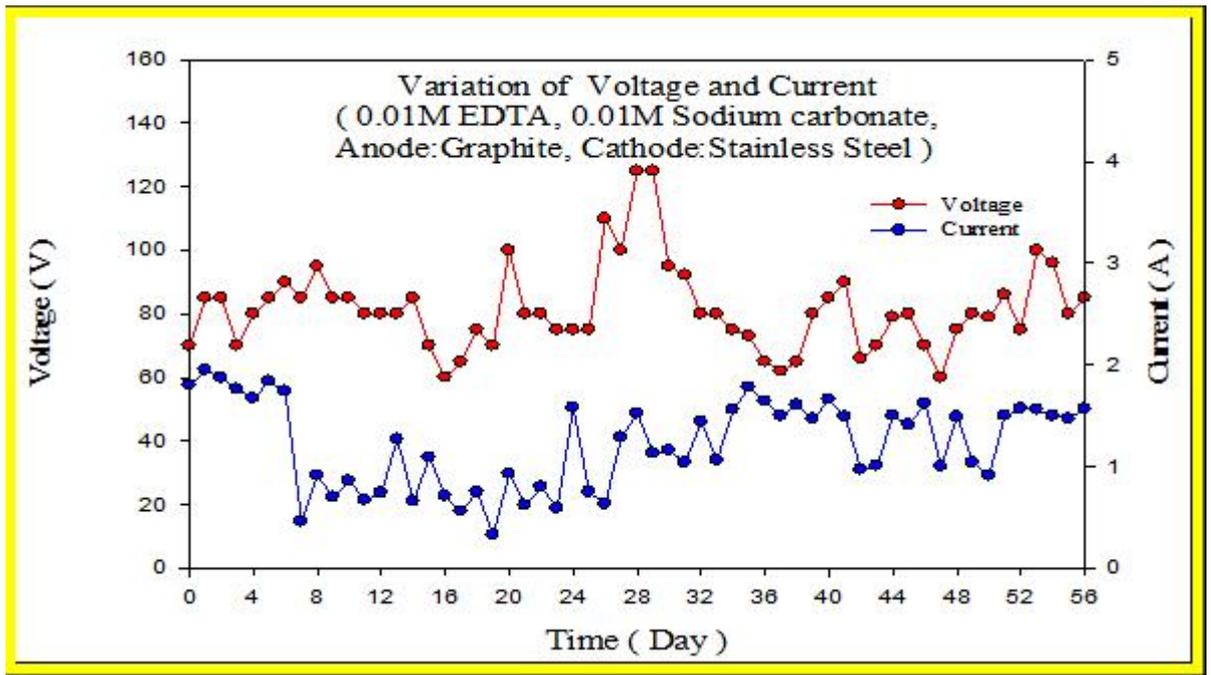


圖 1.7 電動力法系統的電壓及電流變化圖

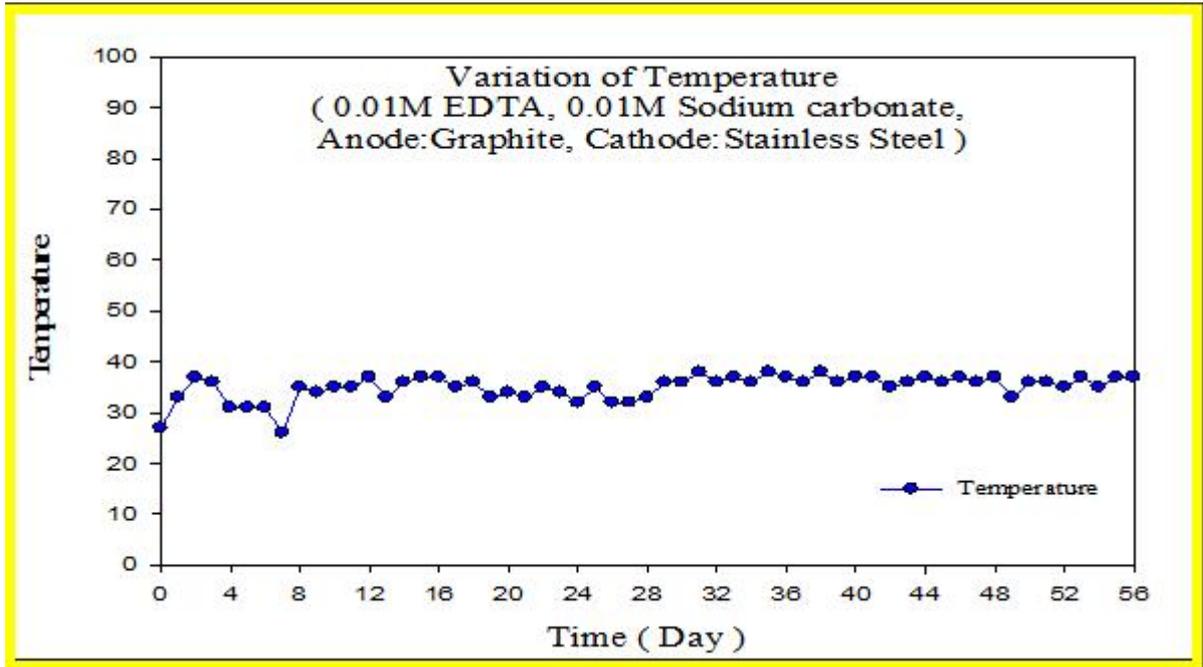


圖 1.8 電動力法系統中操作液溫度變化圖

1.3 近實場電動力法 CEEK 整治鉛污染農地的試驗成果及可行性

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(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 1.10 為電動力法(CEEK)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。

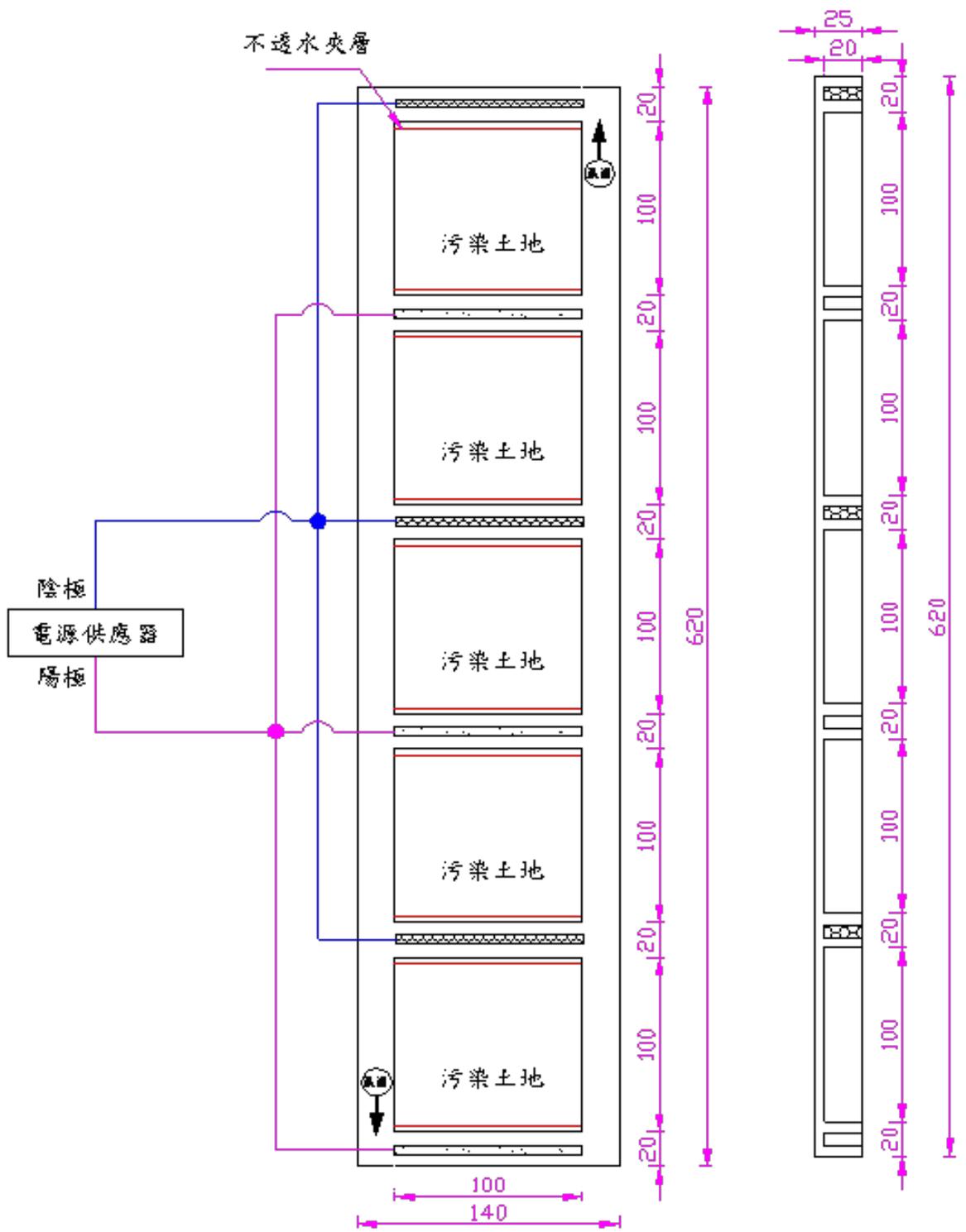


圖 1.9 電動力法(CEEK)現場不透水夾層施工圖



圖 1.10 電動力法(CEEK)系統裝配完成的完工情形

近實場電動力法(CEEK)整治鉛污染農地成果

本近實場試驗隨著處理時間，在運用電動力法 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。其穩定的原因與模場試驗相同，可歸因於操作液的高 pH 緩衝能力及循環系統。土壤的導電度約介於 600-1000 $\mu\text{S cm}^{-1}$ 。

圖 1.11 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快速降低，經過 63 天處理，平均土壤鉛濃度可從 7246 mg/Kg 降至約 2612 mg/Kg，平均去除鉛污染效率約約達 64%。值得注意的是，隨著處理時間增加，去除效率則呈現穩定逐漸下降的趨勢。因此，延長處理時間應可持續增加鉛去除效率。目前本計畫仍持續進行中，以目前數據估計，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 9.3 元，此數據與模場試驗的 8.82 元極為接近。

由近實場與模場試驗數據可知，雖然兩試驗污染場址的地點不同，但可能由於兩地同為水稻田，兩者土壤物化特性因而類似，故其去除效率接近。值得注意的是，模場試驗經放大 5 倍為近實場規模後，仍能維持 pH 中性的操作，且兩場址的去鉛速率也非常接近。

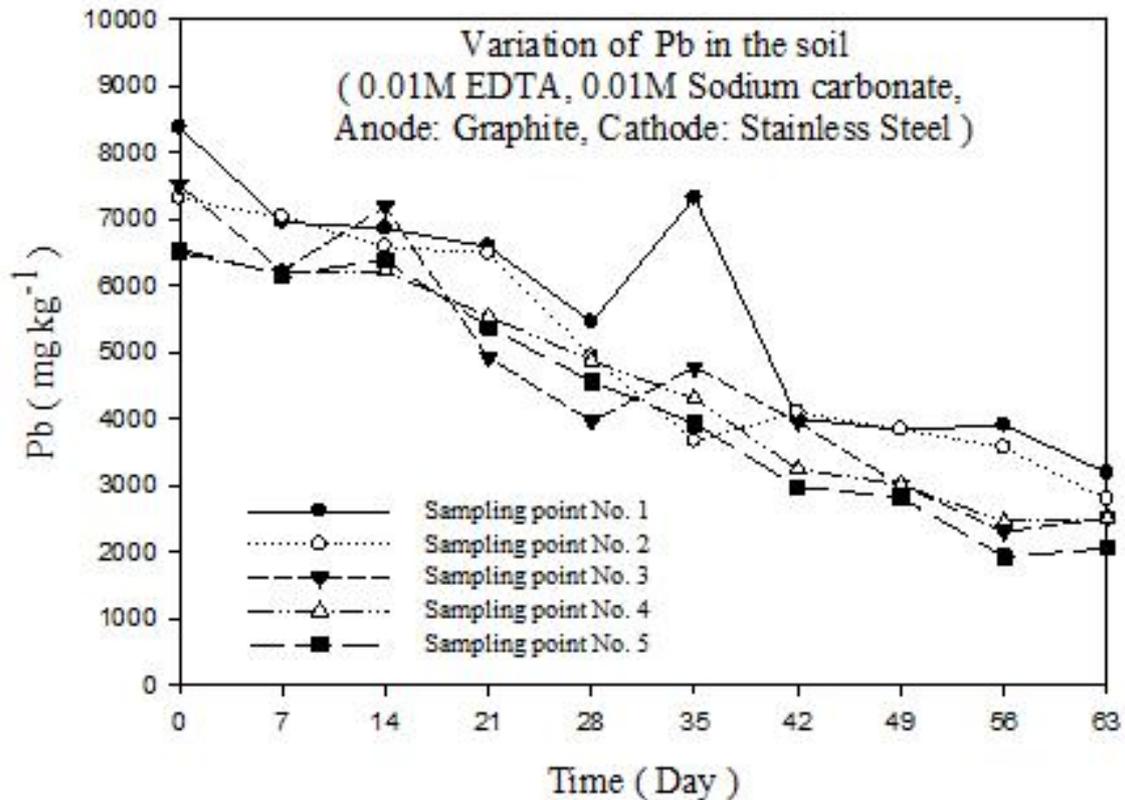


圖 1.11 電動力法整治鉛污染土壤濃度變化圖

土壤肥力分析試驗

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。表 1-1 為本試驗土壤於處理前後的肥力元素含量，由表可見，所有肥力元素皆略微降低，金屬元素除 Na 之外，降幅大約 20%-30%左右，本試驗因添加 Na_2CO_3 造成土壤中 Na 濃度增加。其他元素 F、P、OM 降幅約 10%。對照土壤養分分級表(表 1-2)，土壤處理前的肥力分級為：過量 (Ca、Mg、K、F、OM)，適量 (Mn)，

缺乏 (P、CEC)。經過目前的整治處理：土壤中過量的元素為 (Mg、F、Mn、OM)，適量的元素為 (Ca、K)，已缺乏的元素為 (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 1-1 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	F mg kg ⁻¹	Mn mg kg ⁻¹
初始	1795.25	317.7	146.25	88.88	1058	138.49
處理後	1225.6	228.05	110.05	225.21	1013.55	141.59
---	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	
處理後	5.70	9.51	12.36	3.01	6.4	

表 1-2 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：土壤肥力因子之分級標準彙集，行政院農委會，82 年

1.4 計畫目的

本計畫為「以近實場規模之現地電動力技術整治鉛污染農地之研究」的成果延伸，本次以克服工程上操作問題及申請國際專利為主，同時再次驗證本技術對於鉛污染農地的效益。雖然本技術目前對於台中及南投兩處鉛污染農地具有顯著的去除效率，操作成本也相當低廉。但仍有需要強化的空間，其包括：

- 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。
- 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。
- 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，相關條件仍須釐清。
- 4.極板排列方式：近實場規模計畫中，為節省電極板材料用量，其極板排列方式有別於模場試驗的排列方式，結果顯示不同極板排列方式會造成影響。

有鑑於前述論點，本計畫的研究目標涵括：

- 建構 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。
- 建構 CEEK 可重複使用的密閉式不透水渠道。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。
- 建構 CEEK 操作液自動添加系統，其可自動保持操作液的循環量，進而降低人力操作，有效降低操作成本，使本技術更具市場競爭力。
- 釐清 CEEK 鉛回收的操作參數，其可獲取元素鉛於極板表面，使本技術具有資源化的能力。
- 釐清 CEEK 極板排列方式，進而尋求最佳操作電壓及電流，提昇本技術的電流效率，也就降低使用電量及降低操作成本。

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(建構「自動化及專利化之實場規模現地電動力系統」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, 砂土, 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，研究團隊將過去近實場研究成果之電動力系統(循環式電動力系統)進行建置，同時建構 1 組自動添加操作液系統，1 組 PVC 密閉渠道循環系統，藉由過去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家已再次試驗。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。同時透過文獻及試驗經驗提出現地土壤的適用與限制條件的評估。

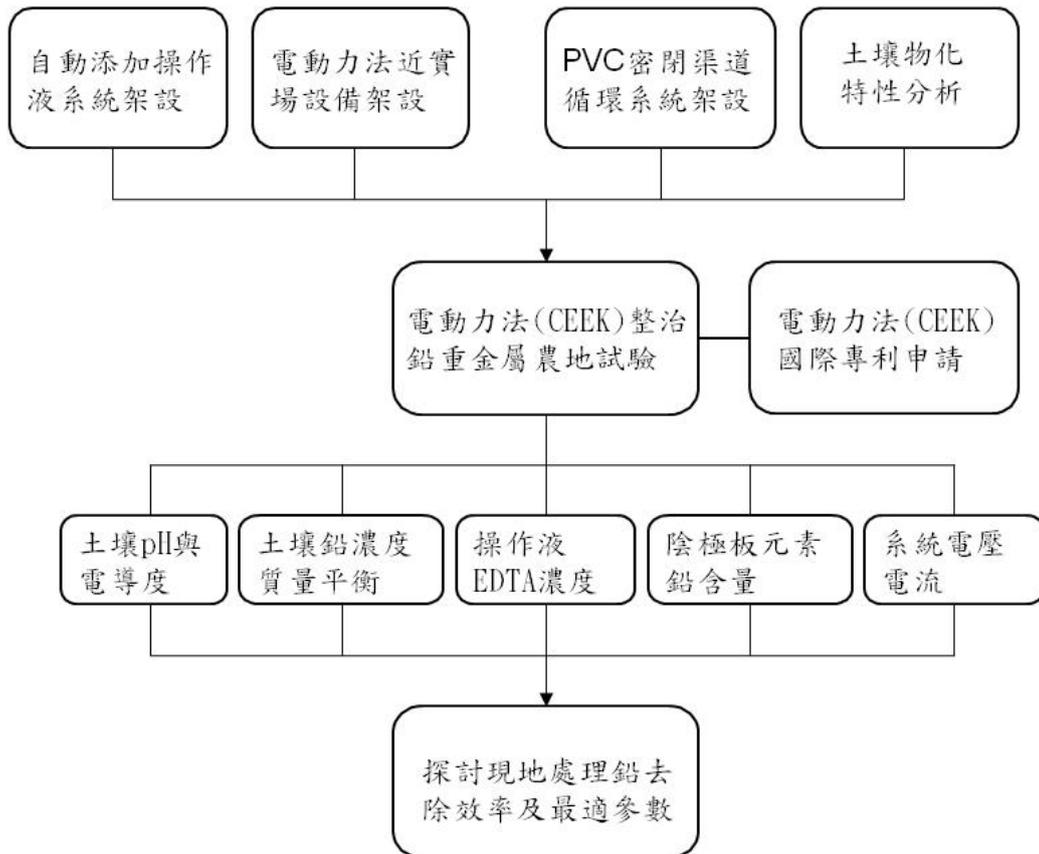


圖 2.1 建構「自動化及專利化之實場規模現地電動力系統」研究流程圖

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。

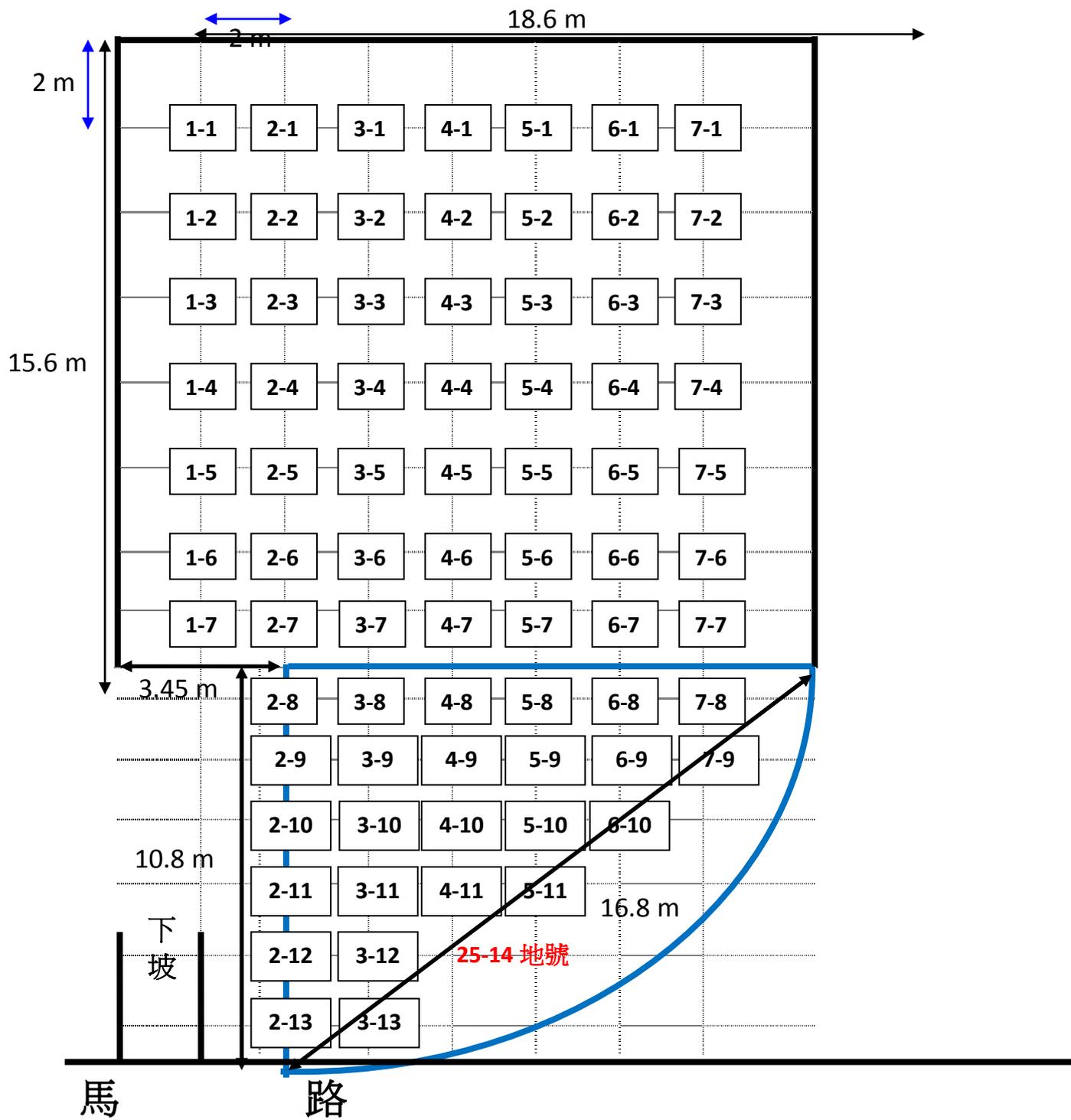


圖 2.2 污染場址平面及採樣示意圖

表 2.1 農地重金屬鉛污染濃度

編號	濃度 mg/kg	編號	濃度 mg/kg	編號	濃度 mg/kg	編號	濃度 mg/kg	編號	濃度 mg/kg	編號	濃度 mg/kg	編號	濃度 mg/kg
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 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(以 PVC 材料進行黏合成一密閉管道，使得操作液不致洩漏，也不受天氣影響)，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。

本團隊設計一不透水夾層同前計畫。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。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)之鉛去除污染效益並進行鉛質量平衡的評估。

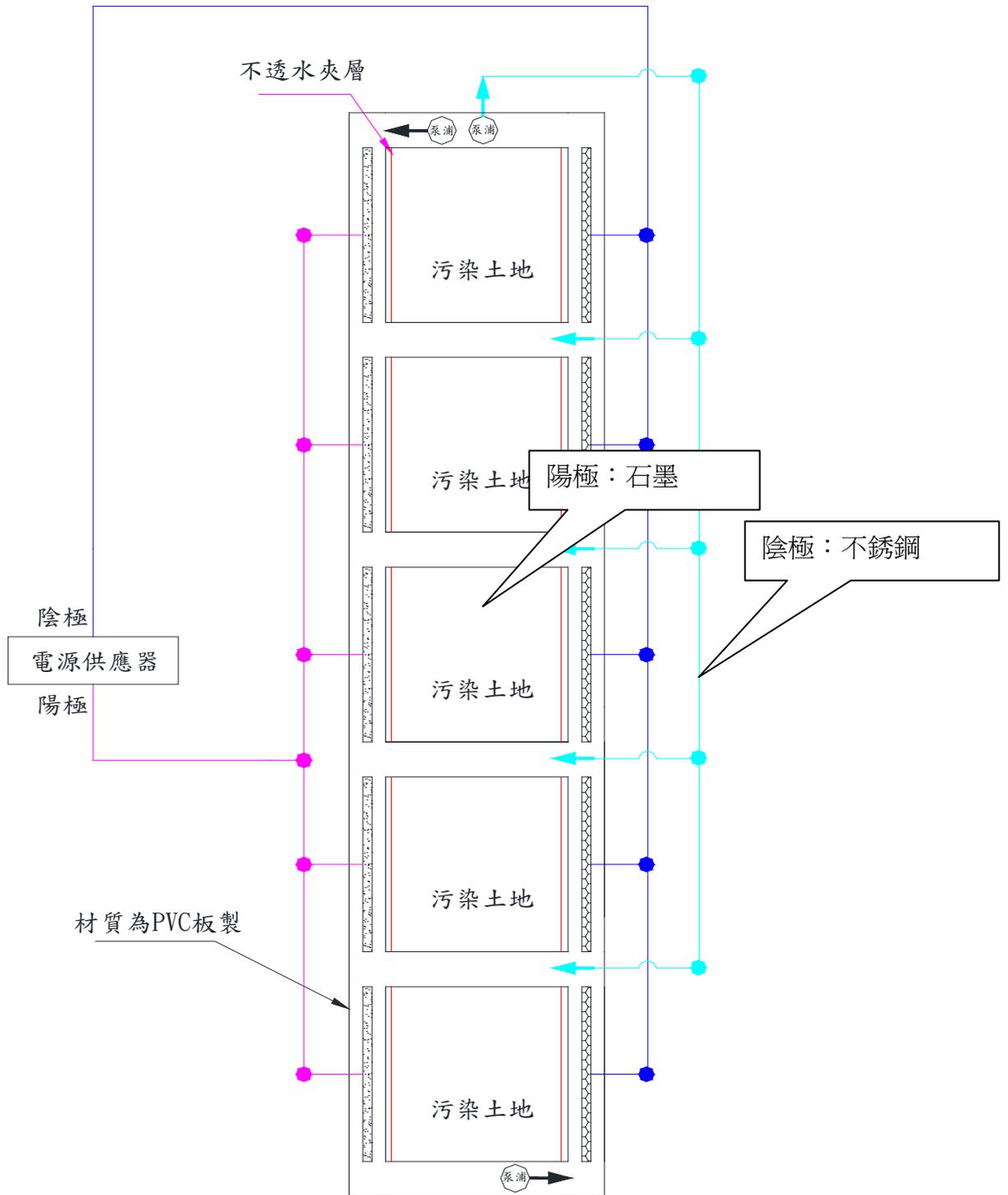


圖 2.3 電動力法(CEEK)整治鉛污染農地現場安裝示意圖

2.3 電動力法(CEEK)整治鉛重金屬現地試驗組裝過程

圖 2.4-2.8 為一系列電動力法(CEEK)現場施工圖，圖 2.4 為本次試驗場址選定位置，其位於本研究計畫告示牌之後。圖 2.5 為依據設計圖挖掘一環繞區域 (5 區 1 公尺 x 1 公尺之正方形)及電動力設備設置情形，圖 2.6 顯示每一區(1 公尺 x 1 公尺之正方形)電動力處理單元，處理單元中隔板的鑽孔部分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。



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 2.10-2.11 為電動力法(CEEK)單元中低滲透水的隔層，本隔層油棉布包裹低滲透黏土所構成，其可以有效維持土壤中電滲透流的穩定。圖 2.12 為沉水式迴流幫浦裝置，共使用三台。



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。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

圖 3.1 為本次電動力試驗場址平面及採樣示意圖，場址分為 5 區，每一區的面積為 1.0 平方公尺，其中分別挖取靠近陽極與陰極處的污染土壤進行物化特性與鉛污染分析，例如：編號 1-1 的樣品由圖中標示 1-1 處的三點混樣而成，各點取樣約 50 公克，混樣重量約為 150 公克。樣品依據環保署相關檢測方法進行檢測。土壤物化特性及鉛污染濃度如表 3.1 所示。由表可知，鉛污染濃度分佈約為 3,000-4,200 mg/Kg，pH 值約為 6.3，有機質約介於 2.2%-4.6%。此外，為了比較電動力處理前後的肥力變化，本場址土壤的肥力元素含量如表 3.2 所示。其中，鈣、鎂、鉀、鈉的含量約分別介於 1,100-1,500 mg/Kg、120-150 mg/Kg、80-260 mg/Kg、950-2,700 mg/Kg，鈣與鎂的含量較均勻，鉀與鈉的變動較大。

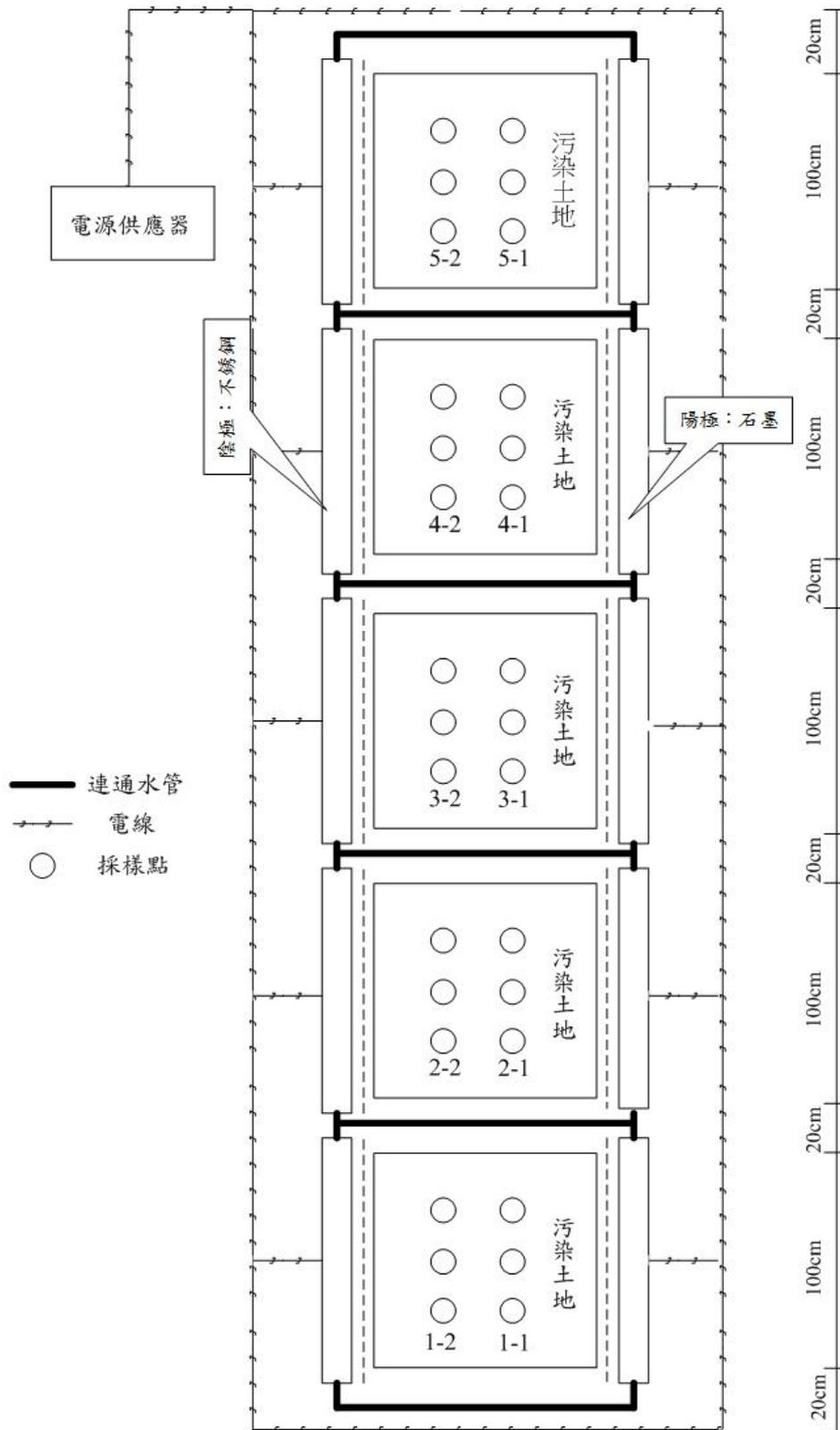


圖 3.1 污染場址平面及採樣示意圖

表 3.1 現地模場採樣位置土壤物化特性及鉛污染濃度

採樣點 編號	有機質 (%)	pH	EC ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	Pb (mg kg^{-1})	CEC (cmol kg^{-1})
1-1	4.6	6.39	249	3131.7	544.75
1-2	4.1	6.42	226	3470.0	420.47
2-1	4.1	6.31	210	3008.3	520.83
2-2	4.0	6.29	226	3531.7	489.67
3-1	4.3	6.32	129.3	3558.3	401.63
3-2	4.3	6.3	141.8	3680.0	422.10
4-1	3.7	6.43	221	4225.0	454.17
4-2	3.8	6.34	119	3925.0	510.69
5-1	3.1	6.32	187.4	3873.3	662.50
5-2	2.2	6.33	227	3700.0	630.07

表 3.2 土壤於電動力處理前的肥力元素含量

---	Ca mg kg ⁻¹	Mg mg kg ⁻¹	K mg kg ⁻¹	Na mg kg ⁻¹	Fe mg kg ⁻¹	Mn mg kg ⁻¹
1-1	1299.75	142.25	196.25	1392.50	62.23	8.678
1-2	1391.00	138.00	177.75	1935.25	77.08	8.673
2-1	1314.25	126.75	90.25	1161.00	77.85	8.563
2-2	1398.75	138.00	165.00	956.25	67.13	7.126
3-1	1565.75	153.75	264.50	1424.75	83.95	9.266
3-2	1231.50	128.75	129.25	1960.00	66.68	6.48
4-1	1258.50	128.75	193.25	1401.50	70.60	8.982
4-2	1300.25	130.75	176.25	1562.00	76.50	7.81
5-1	1139.50	122.50	85.75	1222.75	74.13	9.181
5-2	1362.75	137.25	127.25	2750.00	78.30	8.661
---	Cu mg kg ⁻¹	Zn mg kg ⁻¹	P mg kg ⁻¹	CEC cmol kg ⁻¹	OM %	
1-1	0.485	1.204	7.70	544.75	4.6	
1-2	0.484	1.351	7.73	420.47	4.1	
2-1	0.461	1.162	6.99	520.83	4.1	
2-2	0.376	0.975	6.32	489.67	4.0	
3-1	0.507	1.302	9.29	401.63	4.3	
3-2	0.402	0.822	6.99	422.10	4.3	
4-1	0.473	1.325	6.86	454.17	3.7	
4-2	0.498	1.308	7.51	510.69	3.8	
5-1	0.487	0.827	6.76	662.50	3.1	
5-2	0.501	1.231	6.88	630.07	2.2	

3.2 電動力法(CEEK) 現地整治鉛重金屬污染場址試驗成果

3.2.1 電動力法(CEEK) 現地整治設施組裝與操作問題

圖 3.2 為電動力法(CEEK) 現地整治鉛重金屬污染場址圖，本試驗開始先進行滲漏測試，測試期間發現，試驗單元中的操作液迅速流失，操作液經過 1 天的置放，於隔天即流失約 3/5 的操作液。多次測試皆發生同樣情形。圖 3.3 為電動力法(CEEK) 現地操作單元操作液流失狀況圖，由圖可知，CEEK 不透水夾層必然出現滲漏現象。經過原因探討與簡易黏土之透水性試驗，操作液的流失應該是包覆不透水黏土的棉布所導致。由於棉布吸收操作液，經過土壤毛細作用傳送至試驗區土壤，因此而流失。有鑑於此，本團隊重新組裝不透水夾層，經過改善後已大幅改善操作液流失情形至每天約 100 公升。



圖 3.2 電動力法(CEEK) 現地整治鉛重金屬污染場址圖



圖 3.3 電動力法(CEEK) 現地操作單元操作液流失狀況圖

圖 3.4 為電動力法(CEEK) 整合離子交換樹脂法整治圖，土壤中移除的鉛雖然部分能夠電鍍於陰極板。但是依據去年度試驗結果發現，主要移除的鉛仍留存於操

作液之中，其可能於循環系統中再次進入土壤區，進而降低土壤鉛濃度的去除效率。在去年度試驗中，於處理時間至第七天時，確實土壤中的污染物有下降的趨勢，但隨著操作時間至第 14 天，第 3 區土壤中的污染物有稍為上升的趨勢，其可能是操作液不斷循環，將部分移出土壤的鉛重新迴流進入污染土壤中所導致。有鑑於此，本年度計畫將 CEEK 結合離子交換樹脂法以提升鉛的去除效率，同時有利計算鉛的質量平衡，進而確定本系統的去除效率。



圖 3.4 電動力法(CEEK) 整合離子交換樹脂法整治圖

以上 CEEK 系統經過約 4 個月的試驗，試驗期間仍需不斷添加操作液，其顯示本系統雖然達到若干目標，但仍有改進空間。這些目標包括：1. 建構 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。2. 建構 CEEK 可重複使用的密閉式不透水渠道。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。檢視本 CEEK 系統與計畫目標可得知，本系統雖然達到"密閉式不透水渠道"的目標，但仍有操作液滲漏到土壤中，同時循環蒸發水量可能相當可觀，其造成每天仍需添加約 100 公升的操作液。但是，與去年的系統比較(每天添加約 300 公升)，本 CEEK 系統已大幅改善。此外，本 CEEK 系統經試驗後，整體外觀皆無破損狀況，應可重複使用。

3.2.2 電動力法(CEEK)整治鉛重金屬模場試驗 100 天成果

圖 3.5(a)為污染土壤 pH 隨操作時間變化圖，本試驗隨著時間進行 100 天，分別於每周採取靠近陽極與陰極區域的污染土壤進行分析。由圖可知，運用電動力法 CEEK 可保持處理土壤之 pH 約於中性範圍(pH 8-9)，並沒有一般電動力整治法土壤酸化的情況。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。如此的操作情況與前兩年的土壤 pH 變化一致。

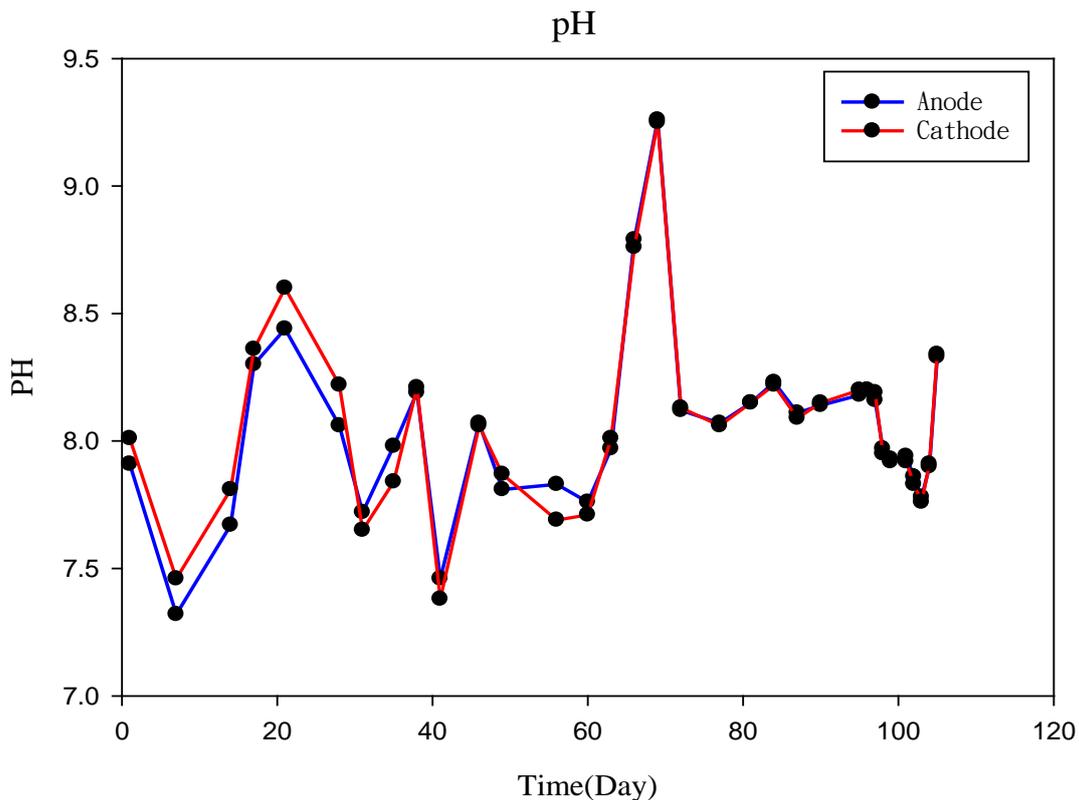


圖 3.5(a)污染土壤 pH 隨操作時間變化圖

圖 3.5(b)為污染土壤導電度隨操作時間變化圖，對於土壤的導電度一開始尚稱穩定，無論靠近陽極或陰極土壤皆逐步上升的趨勢(約達 $3,000\mu\text{S}/\text{cm}$)。此現象與過去兩年的情況不同(過去的數據顯示：隨著操作時間增加而維持穩定，約在 $300\text{-}600\mu\text{S cm}^{-1}$)。在 pH 穩定的情況下，土壤導電度增加應可歸因於土壤中含水率的增加。圖 3.6(a)(b)污染土壤含水率度隨操作時間變化圖，圖中顯示污染土壤含水率一開始約控制在 10%左右，但是由於污染鉛濃度並未逐步降低，我們懷疑電滲透流不足所導致，故持續增加土壤含水率(在污染土壤表面直接澆上操作液)，透過增加土壤含水率可增加電滲透流，進而增加鉛去除率。因此，污染土壤含水率持續增加至 50%，也因為土壤中含水率增加，其土壤孔隙水實際上為高濃度操作液(0.01M 的碳酸鈉)，因而導致污染土壤的導電度逐步上升。

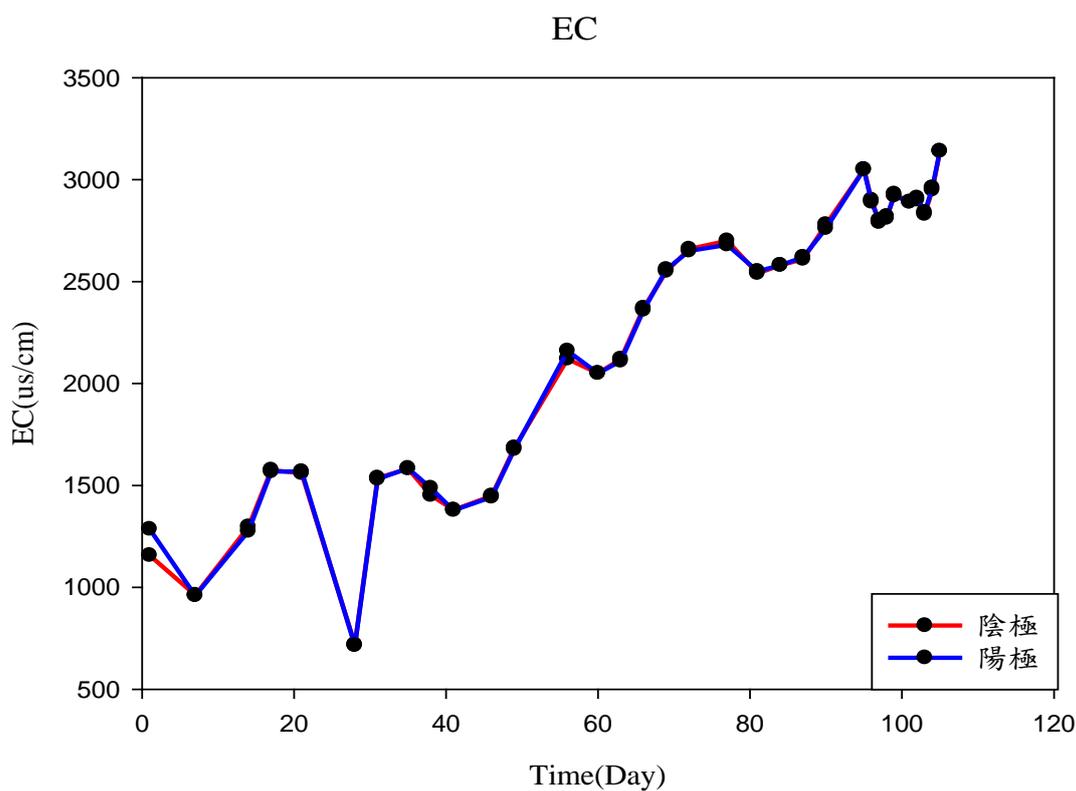


圖 3.5(b)污染土壤導電度隨操作時間變化圖

water contentv

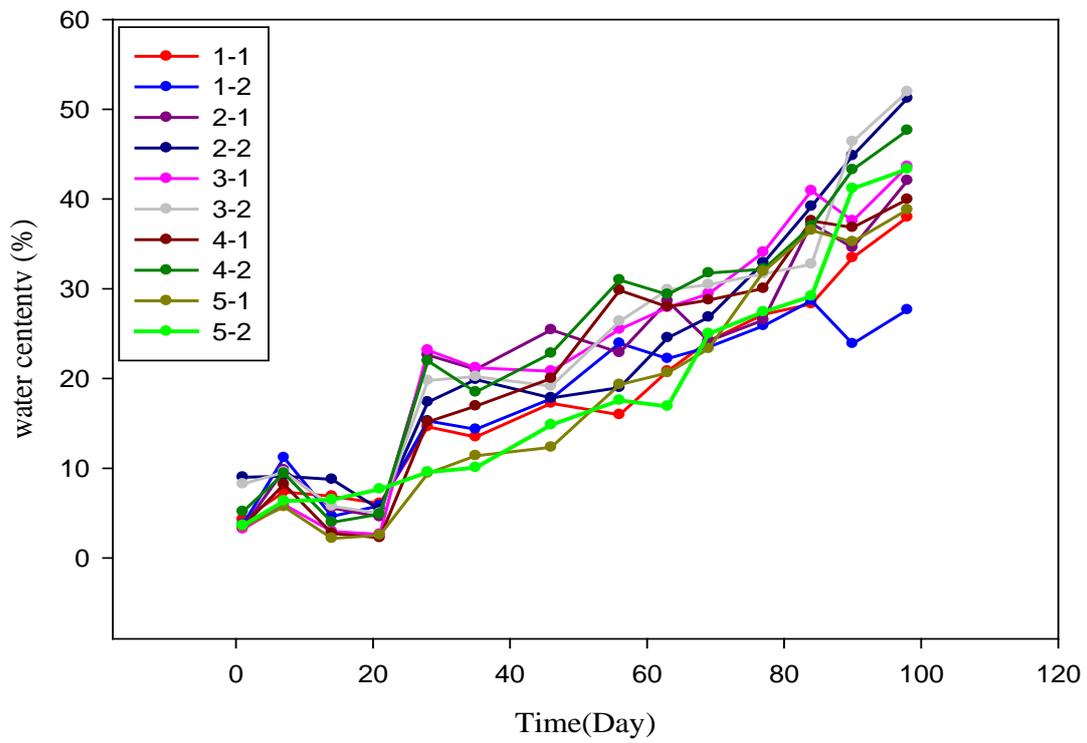


圖 3.6(a)污染土壤含水率度隨操作時間變化圖



圖 3.6(b)污染土壤高含水率的情況

圖 3.7 為電動力法整治鉛污染土壤 100 天的濃度變化圖，由圖可見，土壤中鉛濃度並未隨著處理時間增加而降低，經過 100 天處理，5 個區的土壤鉛濃度平均去除效率皆無變化。以去年計劃結果比較，去年 63 天的整治約可達 64% (由 7,246 mg Kg⁻¹ 降至約 2,612 mg Kg⁻¹)，土壤中的污染物呈現持續下降的趨勢，該鉛濃度已接近管制標準 2,000 mg Kg⁻¹。但是今年的鉛整治試驗，就去除率而言是失敗的。本系統與去年不同之處在於新增 1 座陽離子交換樹脂桶，計畫預期從土壤移除的鉛能夠交換留存於樹脂中，進而探討鉛於系統中質量平衡的狀況。實際上，在初期操作發現鉛去除不佳時，團隊先是增加土壤含水率，效果仍不明顯，繼而增加電壓梯度，甚至調整不透水層，最後仍無功而返。目前，傾向離子交換樹脂可能吸收 EDTA 導致操作液失去螯合土壤鉛的機會，造成無去除效果。基於上述原因，目前將離子交換樹脂移除，經移除離子交換樹脂的使用整治 20 天後，鉛去除效率約達 33% (土壤鉛濃度由 5,800 mg Kg⁻¹ 降低至 3,800 mg Kg⁻¹)。其鉛去除速率與過去 2 年計畫一致。

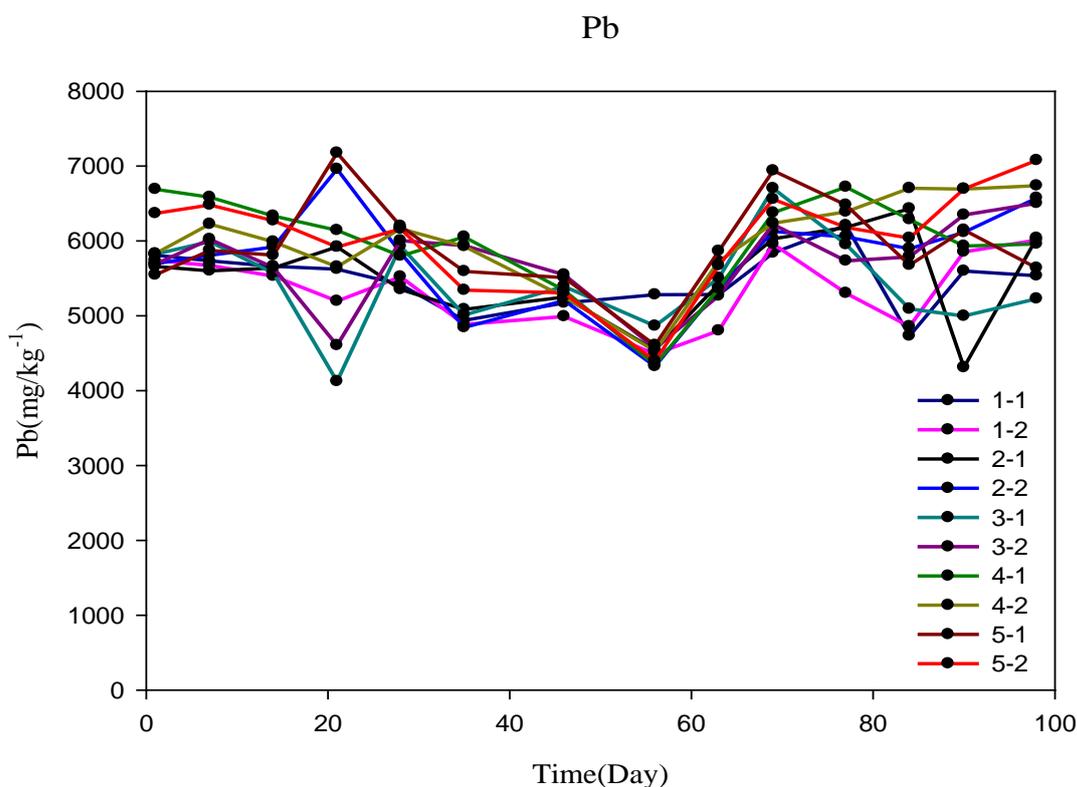


圖 3.7 電動力法整治鉛污染土壤濃度變化圖

圖 3.8(a)(b)分別為 CEEK 電動力法操作液添加前後的 pH 與導電度變化圖，由

圖 3.8(a)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(介於 2,600-3,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$)。圖中亦顯示，添加前後的操作液 pH 及導電度皆穩定。上列現象與前 2 年計劃結果一致。

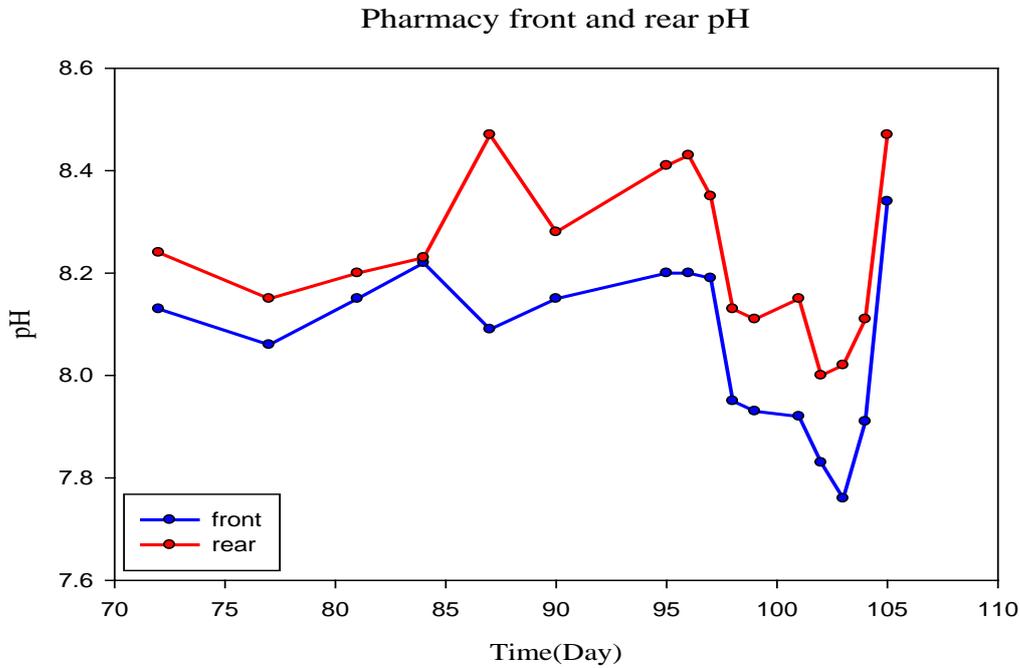


圖 3.8(a)電動力法操作液的 pH 變化圖

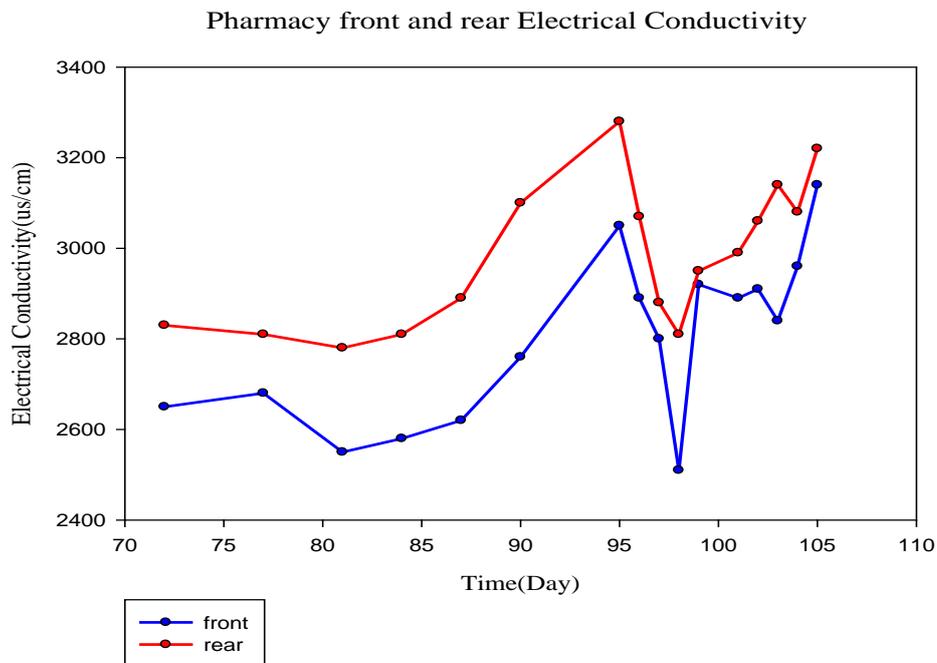


圖 3.8(b)電動力法操作液的導電度變化圖

圖 3.9 電動力法系統的電流變化，每日操作液添加前的電流以紅色曲線表示，每日操作液添加後的電流以藍色曲線表示，由圖 3.9 可見，本試驗電動力系統是以固定電壓約 100V 為操作參數，隨著操作天數增加，電流有逐漸增加的趨勢，最後約達 9A 左右。與去年計劃比較，去年操作電壓於 60V 左右，即有近 10A 的電流產生。如前述，我們懷疑土壤含水率不足，因此導致電流偏低。由於電流偏低意味著電滲透流偏低，確定原因仍有待深入研究探討。此外，本系統 100 天中操作液溫度與氣溫相當，操作液的溫度介於 30 - 40°C 之間，其顯示本 CEEK 系統的穩定性。

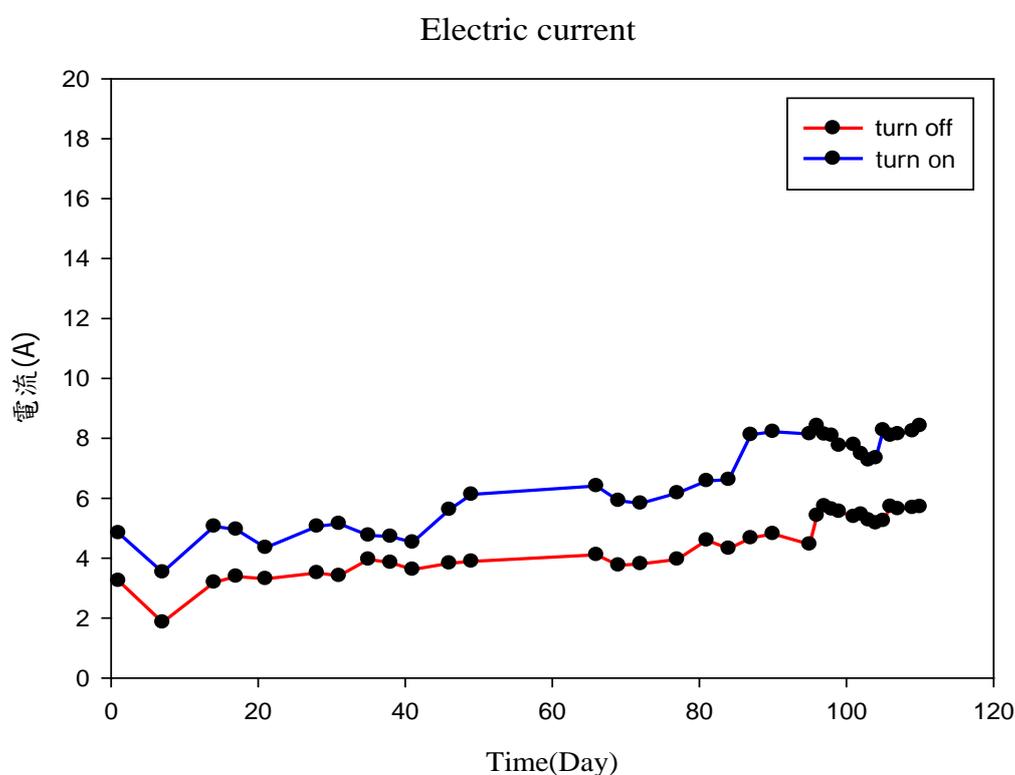


圖 3.9 電動力法系統的電流變化圖

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 3-3)，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 100 天的處理：過量（Mg、K、Fe、Mn、OM），缺乏（Ca、P、CEC）。以上數據與去年計畫成果類似，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、郭患千，「土壤肥力因子之分級標準彙集」，行政院農委會，82 年

土壤鉛質量平衡

爲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，除了污染土壤中鉛濃度需要掌握，操作溶液中的鉛含量亦需檢測。圖 3.10 爲電動力法系統操作液的鉛濃度變化圖，圖中顯示操作液中鉛濃度約維持於一穩定範圍(介於 20-80 mg/L)，此說明本系統的離子交換樹脂無法吸收操作液中鉛，操作溶液的鉛可能持續回到污染土壤中，故導致污染土壤的鉛無法去除。比較前 2 年計畫成果，過去的系統操作液滲漏量較多，鉛與操作液隨之滲漏到系統外，因此鉛的移除量也就較佳。反之，本系統滲漏量較低，在離子交換樹脂無法發揮作用的情況下，污染土壤中的鉛一直於本 CEEK 系統中循環。

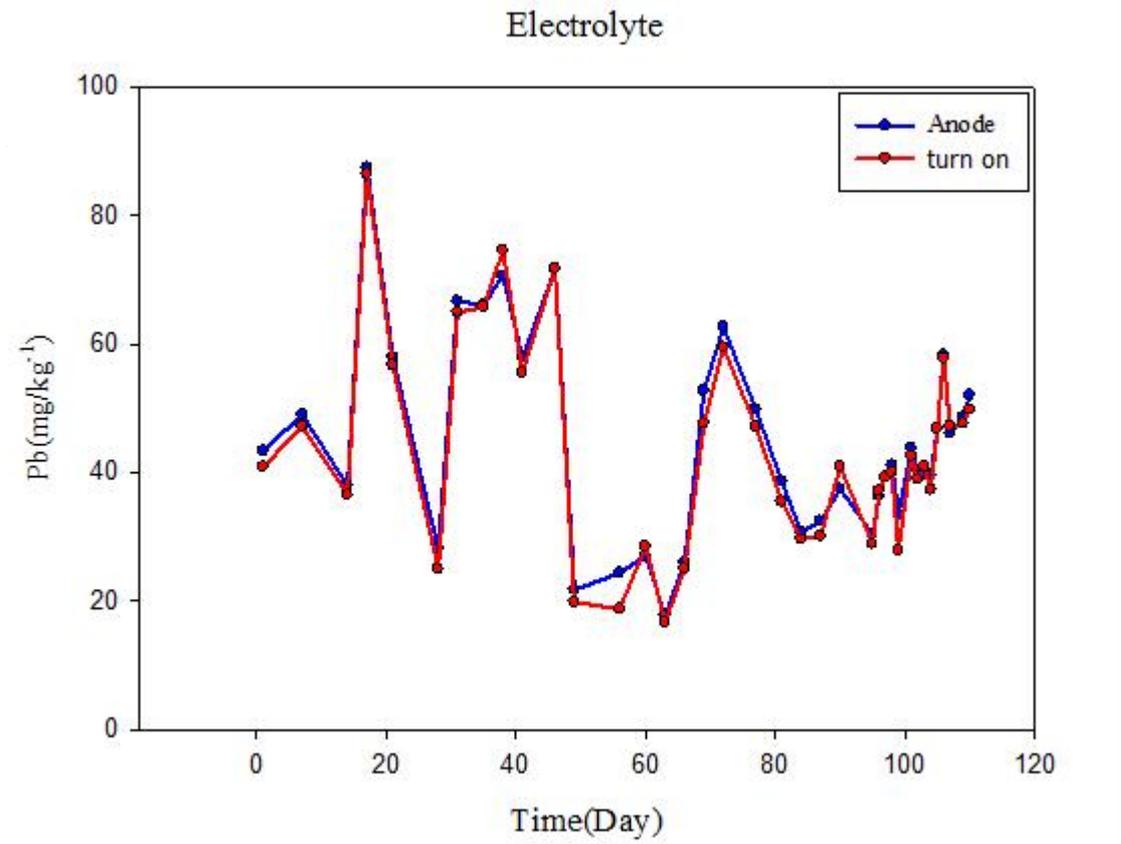


圖 3.10 電動力法系統操作液的鉛濃度變化圖

3.4 結論與建議

本試驗經過 100 天污染土壤整治，結果可以歸納以下若干結論：

1. 本計畫確實建構一組 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。
2. 本計畫確實建構 CEEK 可重複使用的密閉式不透水渠道。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
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，呈現本系統的操作穩定性佳。
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。
6. 本試驗經過 100 天污染土壤整治，土壤鉛的去除率僅約 2%，歸因其最可能的失

敗原因為離子交換樹脂的使用，經移除離子交換樹脂的使用整治 20 天後，鉛去除效率約達 33%(土壤鉛濃度由 5,800mg/kg 降低至 3,800mg/kg)。

本計畫執行後立即可行建議如下：

1. CEEK 移除鉛後的含鉛操作液需要另外的重金屬廢水處理系統處理之，才能有效去除土壤中污染鉛。例如，增設重金屬混凝沉澱設施。
2. 不透水層為 CEEK 另一關鍵，其攸關滲漏速度及整治效率，建議尋找最適土壤(最適當的透水係數)作為 CEEK 的不透水層，例如：1:1 的黏土與砂土。

本計畫執行後中長期建議如下：

1. 由於現地設施需兼顧功能及耐受度，並確定不透水層的透水係數，CEEK 與土木相關的施工法應請求營建工程專業協助，進而建構更適當的 CEEK 整治系統。
2. 應將本 CEEK 系統運用於其他種類的污染土壤(包括不同重金屬種類，不同場址)，以擴大整治應用面。

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 Technology 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 remediation," *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 Pb(II) 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」。