



行政院環境保護署

110年度土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案

共溶劑及電動力技術實場整治 含氯有機物污染之土壤與地下水 期末報告(定稿)

主辦單位：  行政院環境保護署
專案執行單位： 朝陽科技大學／環境工程與管理系所
專案主持人： 章日行 教授
專案執行期間： 110 年 3 月 19 日起至
111 年 2 月 28 日止

中華民國 111 年 2 月 印製



行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☐申請計畫書 ☐期中報告
☐修正計畫書 ☒期末報告

審查意見回覆對照表

計畫年度	110年度	計畫類型	☐ 研究型 ☒ 模場型
計畫類別	☒ 整治 ☐ 調查 ☐ 其他	主持人：章日行 NO：A9	
計畫名稱	共溶劑及電動力技術實場整治含氯有機物污染之土壤與地下水		
委員審查意見		計畫單位回覆	
張尊國委員 1. 本計畫成果豐碩，包含有專利、技術研發與轉移、產學合作以及論文發表。 2. 本計畫透過單井流速流向量測、共溶劑、電動力法及廢水處理設施建構一套完整處理地下水含氯有機物污染之整治系統。 3. 經過四個月的操作整治之下，所有含氯污染物皆降至低於監測標準以下，顯示整治技術對於含氯污染物的效果良好。 4. 本計畫雖然是模場形式，但實際操作規模與實場整治無異，處理結果優異可以達到實場整治效果如果朝解列方向推進，可作為模場計畫之標竿與典範。		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。未來第二年整治計畫將持續務實進行本場址污染整治工作，整治成效朝場址解列方向努力。	
曾昭衡委員 1. 灌注乙醇後，會促進降解含氯污染物優勢菌種的生成。灌注其他生物基質促進優勢菌種生成是否也可達到相當的污染移除效果？共溶劑電動力技術的主要目的為移動抽除污染物，促進降解氯優勢菌種的主要目的為現地分解整治。建議比較兩者之優劣及成本。本模場實驗之成果，污染物移動及微生物分解之比例，二者大致為何？		1. 感謝委員意見。 (1) 從本計畫結果得知，乙醇添加後優勢菌種的生成為本試驗附加發現之成果。從文獻得知，醇類常作為共溶劑使用，然不同醇類對於優勢菌種的生成及污染移除成效則需進一步研究探討。 (2) 乙醇共溶劑的主要功用為提升含氯污染物於地下水之溶解性，協助含氯污染物的溶解釋出，另優勢菌種的生成為附加效應；電動力操作是移動污染物的主要關鍵。根據本團隊之前的研究顯示，四氯乙烯於4個月乙醇共溶劑整治後約達26%去除率；於共溶劑搭配電動力操作下，四氯乙烯可增加約40%，整體去除率可提升至約66%。	



2. 監測井 mw03 非常靠近抽除 b4 及注藥井 a4，在先導試驗及熱區整治兩個階段監測井 mw03 污染濃度皆並無顯著的變化和降低，監測井 mw01 與抽除 b1 及注藥井 a1 的情況亦同。本技術有效的整治範圍似乎非常局限，請說明如何應用在大範圍的污染場址？ 3. 模場實驗專案宜提供成本分析供後續應用參考。但期末報告的成本資料僅簡略描述可降低傳統處理方法 40% 的操作成本，而無其他細節。宜補充未來應用時，單位面積需用的合理設備，人力，分析，耗材等，估算符合實際應用情境的成本分析。	(3) 有關本計畫整治污染場址之操作成本，已初步估算於章節3.2.2。 2. 感謝委員意見。本計畫整治過程中，監測井(MW03及 MW01)濃度並無顯著變化。由於本計畫注藥井及抽除井的間距為2公尺，故推測本技術操作整治的影響半徑應為2公尺內。未來應用在大範圍的污染場址，需先掌握污染熱區及低污染潛勢區，針對污染熱區進行較緻密的設井規劃；同時於整治井(注藥井及抽除井)及監測井的操作上可更為彈性變化，以因應大範圍污染整治。 3. 感謝委員意見。目前本年度計畫之操作方式為長2 m x 寬2 m為單元(1口注藥井及1口抽除井)進行整治，並設置1對電極(鈦管陽極及不銹鋼陰極)及1個抽水泵，並視情況設置監測井進行污染監測。目前已將電力使用情形進行補充，待第二年計畫完成即可較完整的進行各項成本分析，作為未來實際整治的參考。
李育明委員 1. 請補充說明「單井流速流向」量測之執行成果，並釐清協同主持人及其所屬公司在本計畫之角色扮演。 2. 由於共溶劑屬額外注入之藥劑，請釐清操作條件(每月灌注 100L)之設定依據，並建議考量規劃共溶劑殘留之監測計畫。	1. 感謝委員意見。有關單井流速流向的量測結果已補充於章節3.2。另協同主持人於本計畫協助工作已補充於章節2.2。 2. 感謝委員意見。於共溶劑操作部份，每次於注藥井灌注乙醇100公升，每月灌注一次，灌注後可使乙醇於地下水體維持約2%~5%之乙醇濃度，使共溶劑與含氯污染物產生共溶反應，此部份已補充於章節2.1。未來亦將針對共溶劑殘留情形進行監測及探討。
鄭明典委員 1. 務實的系統規劃，進度合理，數據完整，可持續第二年計畫。	1. 感謝委員肯定。第二年計畫本團隊將持續務實的進行污染整治規劃及工作。
鄒燦陽委員 1. 專案基本資料表請補英文關鍵字。	1. 感謝委員意見。專案基本資料表已補充英文關鍵字。



2. 研究成果中文摘要及英文摘要請補關鍵字。 3. 本案所擬整治技術可降低傳統處理方法40%的操作成本，值得肯定。 4. 期末報告請依署規定格式編寫。 5. 請說明本年度執行期間是否有需檢討之事項，及下年度執行前之精進及創新作為？採用乙醇不會造成二次污染。另成本分析及效益亦請列入下年度之評估參考。 6. 目前的用電情形為何？未來電力改以太陽能發電之可行性？	2. 感謝委員意見。研究成果中英文摘要之關鍵字已於專案基本資料表進行補充。 3. 感謝委員肯定。 4. 感謝委員意見。期末報告已依署規定格式編寫。 5. 感謝委員意見。 (1) 本年度計畫執行期間，因每口井滲透性的差異，其主要需特別控制放流水迴流速度，以防滲水不足導致滿出的情形發生。 (2) 未來污染場址整治工作可朝半自動化或自動化的方向精進，透過電動力、陰極抽水、廢水處理設施及放流水迴流等自動控制，減少人力以達創新的污染整治操作。 (3) 有關本年度之成本分析及效益將作為第二年的評估參考。 6. 根據統計，本年度用電度數約為 4,000 度，於 8 個月整治下，平均每天約耗費 17 度。因使用電數較低，對於不便接通電力設備的污染場址，電力以太陽能發電應可作為選項。
--	---



行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☐申請計畫書 ☒期中報告
☐修正計畫書 ☐期末報告

審查意見回覆對照表

計畫年度	110年度		計畫類型	☐ 研究型 ☒ 模場型
計畫類別	☒ 整治 ☐ 調查 ☐ 其他		主持人：章日行 NO：A9	
計畫名稱	共溶劑及電動力技術實場整治含氯有機物污染之土壤與地下水			
委員審查意見			計畫單位回覆	
委員一 1. 成果績效自評表格當中對於技術移轉產業技術，其中已達成一件，應說明接受轉移方為何？另外技術效益對於整治成本降低的表達方式為%不是1或0件。 2. 文獻回顧當中對於共溶劑整治在美國密西根環保局使用的案例當中濃度是由 100 mg/L 降為 1.0 mg/L，電動力技術的文獻回顧是美國杜邦公司案例，其起始濃度高達 225 mg/kg，本計畫污染場址含氯化化合物起始濃度皆小於 1 mg/L，因此處理技術的合適性與功效的達成率，應該多找一些類似的案例評析。 3. 本場址根據過去的污染調查的濃度與本次現場試驗所設的井檢測採樣水質比對濃度現在僅存十分之一左右，是否有前期或者是其他的整治改善工程已經在本場實施過，應予說明。			1. 感謝委員指導。 (1) 目前本計畫之研究成果持續進行廠商技術輔導，待後續成果商業化後再進行技術移轉。因此，此計畫研究成果目前歸屬於可移轉產業技術，達成數為一件。 (2) 技術效益對於整治成本降低已修正為 40%，其估算結果已呈現於期末報告。 2. 感謝委員建議。期末報告已增加以共溶劑或電動力法之相關研究文獻，其研究顯示兩技術對於整治含氯污染物之可行性及有效性。 3. 感謝委員意見。本場址過去未進行任何的整治改善工程，此部份已於場址基本現況中進行補充說明。另外，污染物檢測濃度之差異主要推測是受到氣候以及是否有污染熱區擾動等因素影響。根據本計畫研究顯示，當污染熱區於共溶劑及電動力整治後，其污染濃度於整治初期有大幅提升的現象，顯示污染源尚未移除，其後污染濃度隨整治時間顯著降低。因此，持續監測污染物濃度之變化較為客觀，亦可觀察污染物是否發生濃度回升(Rebound)的現象。	



4. 本計畫之設井與電動力法整治設備已經架設完成，期中以後會有更多的觀測數據產生出來驗證工法之有效性。	4. 感謝委員肯定。期末報告已呈現本場址水質及含氯污染物濃度整治成效。根據整治成果得知，所有整治井含氯污染物濃度皆低於地下水監測標準，證實本整治工法快速移除含氯污染物之可行性。
委員二 1. 模場實驗部分目前期中已完成現場整治設備安裝、廢水處理設施及電力配置。已完成執行現場整治井及監測及地下基本水質特徵分析，已開始執行廢水處理設施實驗。 2. 期中報告初步測試結果數據顯示有達成原先預期。執行內容符合原規劃進度。	1. 感謝委員肯定 2. 感謝委員肯定
委員三 1. 請補充說明何以直接選定乙醇為共溶劑。 2. 建議增加探討共溶劑及電動力技術之個別整治成效貢獻度，而非僅研究其「共同效果」，若個別成效之加總低於「共同效果」，二項技術之結合將更具推廣價值。	1. 感謝委員意見。乙醇為常使用之共溶劑，其成本相對較低且於自然環境條件下可自然揮發，對環境衝擊相對較小；且過去研究已顯示乙醇具有良好的污染物共溶成效。因此，本計畫選定乙醇作為共溶劑使用。 2. 感謝委員意見。根據之前的研究顯示，PCE 於4個月共溶劑整治後約可達26%去除率；於電動力法搭配下，PCE 可提升約40%，整體去除率可達約66%，此部份成果已發表至本屆環工年會會議上。因此，本計畫直接以共溶劑結合電動力法進行污染整治。
委員四 1. 設施到位，也附初步監測數據，進度符合。 2. 期末請加強說明，整治成效是否符合預期？	1. 感謝委員肯定。 2. 感謝委員意見。期末報告已呈現本場址水質及含氯污染物濃度整治成效。根據目前整治成果得知，場址含氯污染物濃度皆符合地下水監測標準，整治成效符合預期。
委員五 1. 期中報告有依委員意見參採執行。 2. 研究進度符合預定進程，期待期末報告時能提供未來土水有機污染物整治的技術。	1. 感謝委員肯定。 2. 感謝委員肯定。根據目前整治成效得知，於整治期間其污染濃度已顯著下降，已符合地下水監測標準；待第二年整治計畫執行後將可建立一個完整的污染整治計畫，提供未來土水有機污染物整治技術的重要選擇。



行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☒申請計畫書 ☐期中報告
☐修正計畫書 ☐期末報告

審查意見回覆對照表

計畫年度	110年度	計畫類型	☐ 研究型 ☒ 模場型
計畫類別	☐ 調查 ☒ 整治 ☐ 其他	主持人：章日行 NO：	
計畫名稱	共溶劑及電動力技術實場整治含氯有機物污染之土壤與地下水		
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員一 1. 本計畫現場施做之材料與設備佔比甚高，必須考量計畫執行2年後，這些器材的去處。		1. 感謝委員建議。本計畫現場所使用之材料與設備，若計畫執行後仍保持原有功能性，將考量用於學術研究或其他污染整治場址使用。	
委員二 1. 可擴散應用技術仍待檢核。		1. 感謝委員意見。本計畫執行過程將先以模場先導試驗進行測試，掌握整治工法對污染物之影響，以獲得較佳之操作參數後，再放大規模於整場污染整治，以期建立一套快速、精準且多功能處理土水含氯有機物整治技術。未來再應用於其他污染場址，解決土壤及地下水有機污染物的環境問題。	
委員三 一、主持人與計畫執行團隊 1. 主持人(協同主持人)與執行團隊的研究及技術研究發展績效良好。 2. 主持人與執行團隊的研究能力及技術發展能力佳，足以勝任本計畫。 二、本專案對土水污染及整治的潛在價值與意義 1. 本專案計畫對國內地下水污染整治工作的發展具有貢獻。 2. 本計畫書撰寫具體，對研究方法的說明完整，研究方法與試驗流程具可行性。		一、主持人與計畫執行團隊 1. 感謝委員肯定。計畫主持人(協同主持人)與執行團隊將分工合作達成本計畫之整治目標。 2. 感謝委員肯定。計畫主持人與執行團隊將努力達成污染物整治之控制目標。 二、本專案對土水污染及整治的潛在價值與意義 1. 感謝委員肯定。本計畫成果期待能作為未來實場有機污染物整治之技術參考。 2. 感謝委員肯定。本計畫將依照計畫書規劃與流程進行整治。 3. 感謝委員肯定。期待本計畫成果未來可應用於其他污染場址的實場整治。	



3. 本計畫的成果具有潛在的實場應用性。 4. 主持人與執行團隊曾執行過土污基金會的模場(或研究)研究計畫，之前的專案執行績效佳。 5. 建議說明本計畫成果實務應用的適用情境(例如：土壤質地、顯著分層的因應...等等)與應用的限制條件。(例如：純相的影響...等等)。 6. 建議說明本計畫成果實務應用的適用情境及該情境下與其他可行整治工法的成本效益比較。(原計畫書中說明：“...本年度計畫結合單井流速流向量測、共溶劑及電動力技術處理含氯有機物污染土壤及地下水，尋求最佳操作參數及成本，使此技術能有效應用於含氯有機污染的實場整治，建立此經濟有效率的方法達到污染土壤及地下水整治的目標，具有可現地處理、低成本及適用於大範圍整治等優勢，提高未來其他整治場址應用的實用性...”，因此，建議期末時能提供不同情境操作 SOP...等操作模式供參考)。	4. 感謝委員肯定。承蒙環保署土污基管會經費補助，計畫主持人已獲得對土壤及地下水重金屬與有機污染物之整治成果及經驗。 5. 感謝委員建議。 (1)本計畫透過單井流速流向量測掌握可能殘留的含氯溶劑污染源位置；再透過共溶劑及電動力促進污染物之溶解及移動，最後藉由地下水抽除即可有效移除土壤及地下水之含氯有機物。此整治成果未來可適用於不同土壤質地、地質顯著分層及高污染濃度的污染場址。 (2)本技術應用之限制條件為污染場址需具備電源設備，且污染物深度應低於10公尺內，以有利電動力技術操作。目前本計畫整治之污染場址符合本技術應用之範疇。 6. 感謝委員建議。 (1)因目前電動力電力操作及共溶劑藥劑添加為初步規劃階段，將視實際情況進行微調，因此目前評估成本效益尚不完整，待本計畫整治完成後將進行整場成本效應評估，並與其他整治技術進行比較，以顯示本技術工法之可行性及市場實用性。 (2)由於每個污染場址具有獨特性，包括土壤質地、污染濃度及水文特徵等。因此，本計畫將依照本場址特性進行整治參數的調整，並於期末報告提供不同條件之影響，以及適合本場址之最佳操作參數。
委員四 1. 構想書審查意見，計畫書均已完整答覆，並包括在計畫書內。	1. 感謝委員肯定。有關計畫書修訂稿已依據委員審查意見進行修正及補充。
委員五 1. 未就過去研究與本年度差異作論述。	1. 感謝委員意見。計畫主持人過去研究著重於電動力結合零價金屬整治含氯有機物之探討且為實驗室規模研究，此部份成果已補充於



2. 未見五年內之成就說明。 3. 本研究有中油公司之參與，其實務性較為可行。	修訂稿。本年度計畫主要特色在於創新技術的整合，以結合單井流速流向量測、共溶劑及電動力技術實場整治含氯有機物污染之地下水，將過去整治成果及經驗應用於實場整治，以改善實場含氯有機物污染土壤及地下水的問題。 2. 感謝委員意見。計畫主持人五年內成果主要包括現地重金屬污染土壤整治及實驗室規模之含氯有機污染物處理。與本年度計畫相關的含氯有機物整治成果已補充於修訂稿，以提供委員審閱。 3. 感謝委員肯定。計畫主持人於實場含氯有機物的整治規劃及污染控制的實務經驗，再搭配中油公司的協助參與，相信可勝任本計畫的執行。
委員六 1. 複雜環境，實際效益評估最好有對照組。	1. 感謝委員建議。計畫主持人在過去現地整治過程已有整治工法的對照比較，其結果顯示整合共溶劑+電動力整治技術相較於單純共溶劑處理可大幅提升約40%的四氯乙烯去除率。因此，本計畫將以過去最佳操作參數進行測試，並先為期4個月之模場先導試驗，視整治情況進行參數微調，最後再應用於整場污染整治。
委員七 1. 本專案對未來土壤及地下水污染整治貢獻度佳。	1. 感謝委員肯定。期待透過本計畫執行提供未來土壤及地下水有機污染物整治的技術選項。
委員八 1. 具實場操作之可行性，未來也將申請專利，值得支持計畫。 2. 與中油之合作可再提出清楚分工說明。	1. 感謝委員肯定。本計畫按照過去現地整治經驗進行規劃，未來會依據整治成果提出專利申請。 2. 感謝委員建議。於本計畫執行過程中，中油公司主要負責兩項重要工作。首先，採用單井流速流向量測技術，取得污染場址詳細的地下水流場，透過流場分析找到場址局部存在的不透水層，進而有利掌握可能殘留的含氯溶劑污染源位置，進而進行精準現地整治；其二，協助檢測本整治工法施作後地下水中微生物菌落及含氯有機物之衍生物量測工作。此部分已於修訂稿進行補充說明。

**委員九**

- | | |
|---|--|
| <p>1. 未編頁碼，請於修正稿補充。</p> <p>2. 考量預算有限及計畫執行期程建議以編列11個月為上限、計畫主持人月支酬金統一酌調為15,000元/月。</p> <p>3.(五)雜項費用：</p> <p>(1)報告書印刷編列上限建議為40本(300元/本)共12,000元。</p> <p>(2)文具費用建議最高編列5,000元。</p> | <p>1. 感謝委員意見。計畫書修訂稿已增加頁碼，以提供委員審閱。</p> <p>2. 感謝委員建議。計畫主持人月支酬金已酌調為15,000元/月。</p> <p>3. 感謝委員建議。</p> <p>(1)報告書印刷費用已修正為40本(300元/本)共12,000元。</p> <p>(2)本計畫的文具費用已修正為3,995元。</p> |
|---|--|



專案基本資料表

專案性質		☒ 實驗性質 ☐ 非實驗性質		專案類別(單選)		☐ 研究型 ☒ 模場型	
研究主題		☐ 調查 ☒ 整治 ☐ 其他					
申請機構系所		朝陽科技大學環境工程與管理系					
機構地址		台中市霧峰區吉峰東路168號					
專案主持人		章日行		職等／職稱		教授	
協同主持人		林舜隆、朱正文、陳鴻國		職等／職稱		研究員、研究員、總經理	
專案 名稱	中文	共溶劑及電動力技術實場整治含氯有機物污染之土壤與地下水					
	英文	A study of real-field remediation for chlorinated organic contaminated soils and groundwater by the co-solvent and electrokinetics technique					
	關鍵字	共溶劑 (Co-solvent)、電動力 (Electrokinetics)、實場整治 (Real-field remediation)、含氯有機物 (Chlorinated organic)、單井流速流向儀 (Single-well velocity and flow direction meter)					
執行期程		自民國 110 年 3 月 19 日起 至民國 111 年 2 月 28 日止					
專案主持人		姓名：章日行		Email：changjh@cyut.edu.tw		專線：04-23323000#7481 手機：0919968026	
專兼任人員		姓名：		Email：		專線： 手機：	
經費 分析 總 表 (僅模場試驗專 案需填寫兩年 度金額)	專 案 預 估 經 費			第一年 金額	第二年 金額	編列說明	
	1.	人事費用		615,560	731,520	(1~5項相加之50%為限)	
	2.	貴重儀器使用含維護費		0	0	(與計畫實驗相關)	
	3.	消耗性器材與主要費用		2,665,000	1,980,000	(與計畫主體相關)	
	4.	其它研究相關費用		40,500	45,000	(含差旅與租賃費用)	
	5.	雜支費用		24,395	26,900	(1~6項相加之5%為限)	
	6.	行政管理費		334,545	278,342	(1~5項相加之10%為限)	
	7.	自籌款		0	0	(自行籌備款項)	
	申請補助金額(1~6項)			3,680,000	3,061,762	總金額：6,741,762	
	計畫總金額(1~7項)			3,680,000	3,061,762	總金額：6,741,762	

專案主持人(簽名及蓋章)：

日期： 111. 2. 15



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

110年度專案成果績效自評表

一、專案基本資料

填表日期：111 年 2 月 14 日

專案性質	☒ 實驗性質 ☐ 非實驗性質	專案類別	☐ 研究型 ☒ 模場型
研究主題	☒ 整治 ☐ 調查 ☐ 其他		
申請機構系所	陽科技大學環境工程與管理系	專案主持人	章日行
專案名稱	共溶劑及電動力技術實場整治含氯有機物污染之土壤與地下水		
專案執行期程	☐ 申請階段 ☐ 期中 ☒ 期末		

二、成果績效自評

「計畫總預估數」應與計畫審查核定值相符，請執行單位依實際達成之量化成果填寫於欄位中。

(一) 學術面

項目			目標達成程度	申請 預估數	期中 達成數	期末 達成數	結案後半年 達成率	備註 (說明未達成 原因或學術產 出發表名稱)
A 學術產出及活動	1.國內投稿 (篇數)	(1)論文						已發表至 環工年會
		(2)研討會論文	1	0	1			
	2.國外投稿 (篇數)	(1)期刊論文	1	0	1		已投稿	
		(2)研討會論文						
	3.報告 (篇數)	(1)技術報告						
		(2)研究報告	1	1	1			
	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	4	4	4			
		(2)博士						
	8.研究團隊 (個數)	(1)跨領域團隊	2	2	2			
		(2)跨機構團隊						
		(3)形成研究中心						
		(4)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	結案後半年 達成率	備註 (說明未達成原因 或專利、技術轉移 相關詳細資料)
A 智慧財產權	1.專利 (件數)	已核准	發明					
			新型/設計					
			合計					
		申請中	發明	1	1	1		
			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)	1	1	1			
		(2)品種/系(件數)						
	C 產學研合作	6.促成合作 研究	件數	1	1	1		與台灣中油探採研究所合作
金額(仟元)								
7.促成投資		件數						
		投資金額(仟元)						
8.促成取得 業界科專		件數						
		業界投資金額(仟元)						
9.其他指標 (請自行命名)		(請自填)						



(三) 政策面

目標達成程度			申請預估數	期中達成數	期末達成數	結案後半年達成率	備註 (說明未達成原因或其他詳細資料)
項目							
A 服務 便民	1.技術服務	次數					
		收入(仟元)					
	2.諮詢服務	次數					
		收入(仟元)					
B 政策 推動	3.協助政府推動 (件數)	(1)政策					
		(2)法規					
C 技術 效益	4.整治技術提升(%)						
	5.整治成本降低(%)		40	0	40		
	6.提升能源效率(%)						
7.其他指標 (請自行命名)		(請自填)					

三、請依前述學術面、產業面、政策面等預期量化成果，具體敘明研究成果對本署政策推動之助益。(200字為限)

學術面(如國內外研討會、期刊投稿件數、或人才培育碩博士生說明) 本計畫研究成果預計可產出1篇國內研討會及1篇國際期刊，並於計畫執行中培育4位碩士研究人員及2件跨領域的研究團隊進行合作。
產業面(如合作研發產業、申請專利、洽談技術移轉廠商件數說明) 本計畫執行後預估可移轉產業技術1件，並依據整治成果提出1件國內發明專利申請。另外，本計畫亦促成與台灣中油公司的產學合作，共同執行本計畫。
政策面(如整治費用降低、特定污染物整治效益提升、或提供政府作為監測/管制標準、污染查核、場址管理等政策及法規研訂之參考) 本計畫整治工法僅需要設備安裝及電費需求，相較於傳統整治方法(如客排土法、抽水法、生物處理法)較為省時且低成本，其實際整治費用將於期末報告呈現，預估可降低約30%以上之整治費用。



研究成果中文摘要

本計畫新穎性為結合單井流速流向量測、共溶劑及電動力技術實場整治含氯有機物污染之土壤與地下水的創新複合技術。創新技術主軸為採用單井流速流向量測技術取得場址中詳細的地下水流場，進而有利掌握可能殘留的含氯溶劑污染源位置；同時，共溶劑(乙醇)添加至地下水中，提升地下水對於含氯有機物的溶解能力，共溶劑乙醇亦可產生生物反應降解含氯有機物；最後，電滲透流促進此溶解相污染物於土壤層及地下水層之移動，藉由地下水抽除即可有效移除土壤及地下水之含氯有機物。此外，低濃度的含氯有機物可透過共溶劑及電動力法產生之生物反應降解含氯有機物，最終使污染場址的地下水質符合國家管制標準；抽除的地下水再經設置之廢水處理設施處理後迴流，建立一套完整的土壤及地下水整治系統。透過一系列試驗後，可有效釐清結合單井流速流向量測、共溶劑及電動力技術處理含氯有機物污染土壤及地下水的處理效率及操作參數問題，最後探討在此整合技術下的整治效果及本技術所需的整治費用。

本計畫整治設備安裝及期程符合計畫進度，污染改善工程、定期監測與成效評估皆按照計畫書規劃項目執行，其整治內容、檢測項目與期程皆符合計畫進度。截至目前，期末報告成果可以歸納如下：

- 本計畫透過單井流速流向量測、共溶劑、電動力法及廢水處理設施已建立一套完整現地含氯有機物於土壤及地下水之整治系統。經整治後其地下水之 pH 和電導度能維持穩定狀態。
- 根據污染場址監測井不同深度量測結果顯示，地下水不同深度平均流速約介於 13 cm/day~25 cm/day，可推測本場址應為透水性良好之地形結構。
- 經模場先導試驗整治後，四氯乙烯濃度已為 N.D；三氯乙烯濃度平均去除率可達 95%；順-1,2-二氯乙烯及氯乙烯濃度皆已降至地下水監測標準。
- 污染場址熱區於 4 個月整治下，所有含氯污染物濃度皆低於監測標準，且主要污染範圍已大幅縮減，顯示本整治技術對於含氯污染物整治的有效性。
- 本場址地下水之微生物菌種基因檢測，其分析顯示水體中包含 Geobacter、Dechloromonas 及 Sulfurospirillum 等優勢菌，應可協助含氯污染物的降解。
- 本計畫地下水與放流水中重金屬含量的檢測，經檢測證實電動力法操作下不會造成場址地下水及放流水重金屬的污染，可持續進行後續整治操作。
- 廢水處理設施處理後之放流水含氯污染物濃度皆低於監測標準，可迴流至注藥井(陽極端)達到地下水循環的目標，證實本整治工法設計的可行性。
- 針對本場址含氯污染物的整治成本，本整治技術約可降低傳統處理方法(土壤挖除法)40%的操作成本，其證實具有實場應用的競爭力。



研究成果英文摘要

The novel of this project is an innovative composite technique that combines single-well velocity flow vector measurement, co-solvent, and electrokinetics technique for in-situ treatment of contaminated soil and groundwater by chlorinated organic matter. The main innovative technique is the use of a single-well velocity flow vector measurement technique to obtain a detailed groundwater flow field in the site, which is beneficial to grasp the location of possible residual chlorinated solvent pollution sources; co-solvent (ethanol) is added to groundwater to improve groundwater's dissolved capacity to chlorinated organic matter. The co-solvent ethanol can also produce a biological reaction to degrade chlorinated organic matter; finally, the electro-osmotic flow promotes the movement of the dissolved phase pollutants in the soil and groundwater layer, and the groundwater pumping can effectively remove the soil and groundwater with chlorine organics.

In addition, low-concentration chlorinated organics can degrade chlorinated organics through biological reactions generated by co-solvents and electrodynamic methods. Finally, to make the groundwater quality of contaminated sites meet national control standards. The pumped groundwater is treated by the wastewater treatment facility and then returned to anodes. Based on the above description, this research project is to establish a treatment technology with rapid, accurate, multi-functional, and economically efficient chlorinated organic matter, which is believed to be an important technical reference for treating contaminated soil and groundwater in the future. After a series of tests, it can effectively clarify the efficiency and operating parameters of the combined single-well velocity flow vector measurement, co-solvent, and electrokinetics technique to treat contaminated soil and groundwater by chlorinated organic matter, such as pollutant range determination, ethanol injection concentration, and frequency, the influence of various electrochemical reactions produced by electrokinetic on the groundwater layer, the influence of biological effects and the control of operation time and so on. Finally, to discuss the remediation effect under this integrated technique and the remediation cost.

The experiment of this project is carried out in accordance with the schedule of the plan. At present, the installation of pollution remediation equipment, engineering,



regular monitoring, and efficiency evaluation had been completed. The remediation equipment includes remediation wells and monitoring wells, electrodes, power equipment, pumps, and wastewater treatment facilities, and so on. The equipment installation is in line with the planned schedule; the pollution improvement project, regular monitoring, and efficiency evaluation are all implemented in accordance with the plan. Until now, the results of the report can be summarized as follows:

- This project has established a complete in-situ remediation system for chlorinated organic matter in soil and groundwater through single-well velocity flow vector measurement, co-solvent, electrokinetic and wastewater treatment facility. After remediation, the pH and conductivity of the groundwater can be maintained in a stable state.
- After the model test, the concentration of PCE has reached N.D; the average removal efficiency was 95%; the concentrations of cis-1,2-DCE and VC have dropped to the groundwater monitoring standard.
- According to the measurement results of monitoring wells at different depths of the contaminated site, the average flow rate of groundwater is about 13 cm/day~25 cm/day. It can be understood that the site is a topographic structure with good water permeability.
- After 4 months of remediation in the hot area of the polluted site, the concentration of all chlorine-containing pollutants is lower than the monitoring standard, and the main pollution area has been greatly reduced.
- The genetic testing of microbial strains in the groundwater shows that the water contains dominant bacteria such as Geobacter, Dechloromonas and Sulfurospirillum, which should assist in the degradation of pollutants.
- The detection of heavy metal content in groundwater and discharge water of this project has confirmed that the operation of the remediation technique has no heavy metal pollution to the groundwater and discharge water.
- The groundwater of the cathode can be effectively degraded after-treatment of the wastewater treatment facility, and all the concentrations of chlorine-containing were below the monitoring standard. The discharged water can be returned to the injection well (anode end) to achieve the goal of groundwater circulation.
- For the remediation cost of chlorine-containing pollutants at this site, this remediation technique can reduce the operating cost of the traditional treatment method (soil excavation method) by about 40%, which proves to be a competition for in-field application.



目次

第一章、計畫緣起與目的	1
1.1 共溶劑技術.....	4
1.2 電動力技術.....	6
1.3 電動力法研究成果及可行性	8
1.4 實場電動力結合共溶劑整治含氯污染物地下水的試驗成果	11
1.5 計畫目的.....	13
第二章、研究方法及過程	15
2.1 整合技術處理含氯有機物試驗方法 (含模場先導試驗).....	17
2.2 廢水處理設施	19
2.3 計畫進度與檢核說明	22
第三章、結果與討論	24
3.1 整治設備安裝.....	24
3.1.1 整治井與監測井設置	24
3.1.2 電極設置	27
3.1.3 抽水馬達安裝	28
3.1.4 電力設備安裝	29
3.1.5 廢水處理設施	31
3.2 共溶劑結合電動力整治含氯污染物試驗成果	33
3.2.1 模場先導試驗整治成效	37
3.2.2 污染場址熱區整治成效	45
3.2.3 微生物菌相檢測	59
3.2.4 重金屬檢測	60
3.3 放流水檢測.....	61
3.4 結論與建議.....	62
3.5 後續工作.....	63
第四章、參考文獻	64



圖次

圖 1.1 本計畫整合技術之研究構想.....	3
圖 1.2 Michigan 環保局整治 PCE 污染場址案例.....	5
圖 1.3 含氯有機化合物厭氧還原脫氯降解程序示意圖.....	5
圖 1.4 電動力法操作示意圖.....	6
圖 1.5 電滲透流移除土壤污染物示意圖.....	7
圖 1.6 孔隙水中 PCE 去除效率.....	9
圖 1.7 土壤中 PCE 去除效率.....	9
圖 1.8 大型模場土壤中 PCE 去除效率圖.....	10
圖 1.9 大型模場孔隙水中 PCE 去除效率圖.....	10
圖 1.10 土壤中 TCE 不同整治深度去除效率.....	11
圖 1.11 計畫主持人實場整治含氯有機物之成效.....	12
圖 1.12 實場整治微生物生長趨勢圖.....	12
圖 2.1 建構「整合技術去除含氯有機物污染土壤及地下水」研究流程圖.....	15
圖 2.2 本計畫污染場址主要範圍.....	16
圖 2.3 本計畫整治操作示意圖.....	17
圖 2.4 電觸媒廢水處理技術之模場示意圖.....	20
圖 2.5 本計畫第一年整治井規劃示意圖.....	20
圖 3.1 污染整治區鑿井整地圖.....	25
圖 3.2 污染整治區鑿井施工圖.....	25
圖 3.3 污染整治區鑿井完工圖.....	26
圖 3.4 電動力法之電極材料 (鈦管).....	27
圖 3.5 抽水馬達安裝完工圖.....	28
圖 3.6 電力設備安裝完工圖-1.....	29
圖 3.7 電力設備安裝完工圖-2.....	29
圖 3.8 電力設備安裝完工圖-3.....	30
圖 3.9 廢水反應槽.....	31
圖 3.10 廢水處理設施管線施工圖.....	31
圖 3.11 廢水處理設施管線完工圖.....	32
圖 3.12 廢水處理設施抽水馬達完工圖.....	32
圖 3.13 廢水處理設施鼓風機設備完工.....	32
圖 3.14 模場先導試驗之地下水 pH 值變化.....	37
圖 3.15 模場先導試驗之地下水電導度值變化.....	38
圖 3.16 模場先導試驗之地下水溶氧值變化.....	39
圖 3.17 模場先導試驗之地下水氧化還原電位變化.....	40
圖 3.18 模場先導試驗之地下水四氯乙烯變化.....	41
圖 3.19 模場先導試驗之地下水三氯乙烯變化.....	42
圖 3.20 模場先導試驗之地下水順-1,2-二氯乙烯變化.....	44
圖 3.21 模場先導試驗之地下水氯乙烯變化.....	44



圖 3.22 污染場址熱區之地下水 pH 值變化-注藥井.....	46
圖 3.23 污染場址熱區之地下水 pH 值變化-抽除井.....	46
圖 3.24 污染場址熱區之地下水電導度變化-注藥井.....	47
圖 3.25 污染場址熱區之地下水電導度變化-抽除井.....	47
圖 3.26 污染場址熱區之地下水溶氧變化-注藥井.....	49
圖 3.27 污染場址熱區之地下水溶氧變化-抽除井.....	49
圖 3.28 污染場址熱區之地下水氧化還原電位變化-注藥井.....	50
圖 3.29 污染場址熱區之地下水氧化還原電位變化-抽除井.....	50
圖 3.30 污染場址熱區之地下水四氯乙烯濃度變化.....	52
圖 3.31 污染場址熱區之地下水三氯乙烯濃度變化.....	54
圖 3.32 污染場址熱區之地下水二氯乙烯濃度變化.....	56
圖 3.33 污染場址熱區之地下水氯乙烯濃度變化.....	57
圖 3.34 本場址整治後含氯污染物污染範圍.....	58



表次

表 2.1 本計畫模場先導試驗操作條件.....	18
表 2.2 第一年土壤地下水及放流水檢測項目規劃表.....	18
表 2.3 本計畫協同主持人資料表.....	21
表 2.4 計畫進度與檢核表.....	22
表 3.1 整治井及監測井材料數量及規格.....	24
表 3.2 電極材料數量及規格.....	27
表 3.3 抽水裝置材料數量及規格.....	28
表 3.4 本場址整治井及監測井地下水質量測結果.....	34
表 3.5 地下水含氯有機物檢測結果.....	36
表 3.6 採樣井主要菌種檢測 (110.8.23 檢測).....	59
表 3.7 場址地下水主要優勢菌(佔比5%以上)菌相分析.....	59
表 3.8 地下水重金屬檢測 (110.07.28 檢測)	60
表 3.9 本計畫定期放流水水質檢測結果.....	61



第一章、計畫緣起與目的

土壤污染於近幾年受到高度關注，其所遭受污染的種類包含重金屬、有機溶劑及油品污染等，這些污染物會沉積、累積在土壤中而不易去除。此外，由於土壤具有複雜之物化特性及非均勻性，一旦遭受外來污染，則復育不易且所費不低。過去，環保署針對台灣地區加油站進行洩漏測試，發現許多疑似油槽洩漏事件，突顯土壤與地下水遭受污染的嚴重性；重金屬及有機溶劑污染大多因工業廢水隨意排放，因不肖業者隨意棄置毒性有機溶劑亦導致土壤污染，其中，有機溶劑中以四氯乙烯及三氯乙烯所造成的污染最普遍。含氯有機化合物的特性為低黏滯性、高揮發性、比重大於 1，因此，當其被釋放到地層下，會形成可移動之 DNAPL (Dense Non-Aqueous Phase Liquid) 污染團，並不斷溶解於地下水中，因此對於地下水資源造成極大的衝擊。

含氯有機化合物具有高溶解力、低可燃或可爆性、高密度蒸氣、化學安定性、低沸點及高蒸氣壓等特殊性質，廣泛地應用於許多工業，典型的用途包括乾洗、脫脂、金屬零件與電子元件清洗、塗料等，以及做為醫藥、紡織等製程的產品原料或中間原料[1]。當含氯有機化合物的不當處理、不完善的處置技術或意外的滲漏等，皆會造成土壤及地下水受此類污染物所污染；四氯乙烯自污染源釋出並侵入地下後，需先穿過所謂之通氣層土壤，此層土壤中水份不飽和，亦即土壤空隙中有水也有空氣。四氯乙烯滲流經過通氣層時一部份揮發成氣相，一部份微溶於水中，其餘的則受重力影響向下沈陷。碰到地下水位面後，因其比水重，則會穿透地下水位面進入飽和含水層，繼續向下沈陷。在飽和層中土壤空隙為水所充滿沒有空氣存在，所以四氯乙烯無法揮發成氣相。當四氯乙烯向下沈陷時，若碰到顆粒較細的土壤時，可能會無法穿透這些細質土層，而堆積其上形成停滯的污染團[2,3]，由上述四氯乙烯的特性可知，四氯乙烯在地層下的分佈相當複雜，且移動行為不易預測及模擬。

根據土壤及地下水污染整治網統計至 109 年 12 月資料顯示，國內土壤及地下水受含氯有機污染物公告之列管場址共 101 處，其中，52 處為整治場址，49 處為控制場址，其他存在若干已污染但尚未被列管之場址；這些受含氯有機物污染的場址整治時間冗長，甚至無法完成整治目標，實務面上導致污染場址解列困難且耗費巨大整治經費，因此，企需短時間有效兼具市場效益的含氯有機物污染場址整治技術。本計畫擬以“結合單井流速流向量測、共溶劑及電動力技術”實場整治彰化某工廠受到含氯有機物污染的土壤及地下水(停滯場址)，整治試驗為期 2 年，計畫目標為有效降低該場址土壤及地下水中含氯有機物。



本計畫欲整治之污染場址位於彰化縣彰化市某廢棄工廠，以各種電氣器材製造加工為主要營業項目，場址面積約為 1,970 平方公尺。推估污染原因為早期使用含氯溶劑過程因設備管線及槽體銜接處有洩漏情況發生，洩漏至地面後再沿地面裂縫入滲至地表下所導致的污染。本場址於民國 102 年 07 月 29 日因地下水中含氯有機物超過地下水污染管制標準，因此公告為控制場址並劃定為地下水污染管制區。後經初步評估場址污染影響潛勢評估總分 TOL 值為 5,990 分(達 1,200 分)，故於民國 104 年 06 月 02 日公告為整治場址。目前本場址已停止營運，廠房皆已拆除，僅存一棟原宿舍，其餘皆為平地，因污染行為人年事已高，故未進行調查及改善，目前由地主及其親戚負責管理。

依據過去環保局污染場址調查得知污染物為高濃度含氯有機物，包含順-二氯乙烯 2.37 mg/L、三氯乙烯 2 mg/L 及四氯乙烯 0.861 mg/L，污染範圍涉及土壤及地下水層。對於場址地質，地表下 1~6 公尺為粉土質黏土與黏土質粉土互層，地表下 6~10 公尺主要為砂土層，地表 10 公尺處有一不易透水或黏土地層；地下水流向為南向北(西北)流，且地下水位約為 3.5 公尺；含氯有機物污染深度約為 6~8 公尺。當位於透水性差之黏土層中的含氯有機物污染源，若選擇單一技術(生物處理、抽除處理)進行整治並無法有效將黏土層之含氯有機物移除，進而造成整治失敗或整治時間冗長的問題。因此，本計畫擬“結合單井流速流向量測、共溶劑及電動力技術實場整治含氯有機物污染之土壤與地下水”，主要技術構想如圖 1.1 所示。本計畫企圖透過單井流速流向量測技術，取得場址中詳細的地下水流場，進而有利掌握不透水層及含氯溶劑污染源的位置，整治井即設置於污染源上方，於整治井中設置電極及抽取地下水的設備，施加直流電之前先行添加共溶劑，以提升含氯溶劑於地下水的溶解度，當電動力驅動黏土層中含氯溶劑快速移出並溶解於地下水中後，將其抽出至地表設置之廢水處理設備(採用電觸媒廢水處理技術)，處理後進行回收再利用。

本計畫的新穎性為“結合單井流速流向量測、共溶劑及電動力技術實場整治含氯有機物污染之土壤與地下水”的創新複合技術，創新技術主軸之一為採用單井流速流向量測技術，取得場址中詳細的地下水流場，透過流場分析找到場址局部存在的不透水層，進而有利掌握可能殘留的含氯溶劑污染源位置，進而進行精準現地整治。創新技術主軸之二是將共溶劑(乙醇)添加至地下水中，提升地下水對於含氯有機物的溶解能力，共溶劑乙醇可產生生物反應降解含氯有機物；創新技術主軸之三是電動力技術，其透過電滲透流可將共溶劑帶入黏土層土壤孔隙後，將黏土層中的殘留相含氯有機污染物有效溶解於地下水中，並促進此溶解相



第一章、計畫緣起與目的

污染物於土壤層及地下水層之移動，藉由地下水抽除即可有效移除土壤及地下水之含氯有機物。此外，低濃度的含氯有機物可透過共溶劑及電動力法產生之生物反應降解含氯有機物，最終使污染場址的地下水質符合國家管制標準。

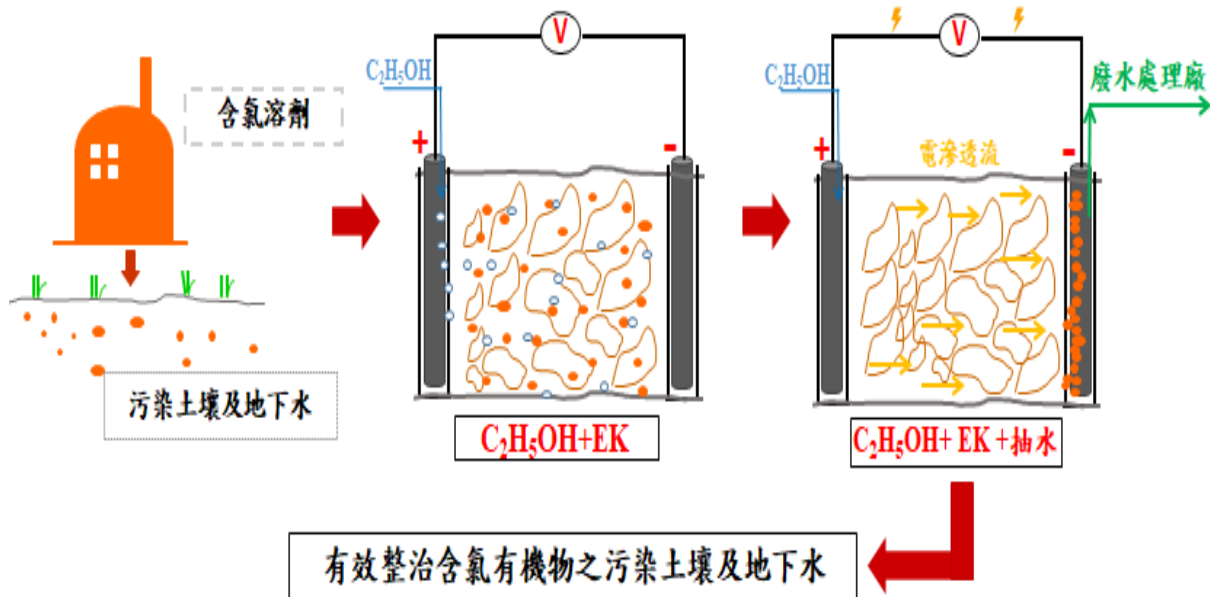


圖 1.1 本計畫整合技術之研究構想

土壤及地下水所遭受污染的種類相當繁多，主要包含重金屬、有機溶劑及油品污染等，其中，DNAPL 包括四氯乙烯(PCE)及三氯乙烯(TCE)等含氯有機物，因比水重及溶出緩慢等特性導致難以尋得其污染來源，簡言之，純相(Pure Phase)含氯有機物(含氯有機溶劑)在含水層中會以殘留相(不具流動性)或是自由相(具流動性)的方式存在。以自由相存在之污染物易於處理，而殘留相污染物只能透過長時間作用下緩慢釋出於水體，若無法確切得知污染場址的污染來源，於實場整治上會增加其處理難度。有效去除含氯有機物污染場址的殘留相即為本計畫的整治目標。

為了快速釐清場址內可能的殘留相污染源，過去許多案例採用非破壞檢測方式(例如地電阻法)嘗試精確掌握污染熱點(hot spot)，但是由於土壤及地下水層非均質性高且成分複雜，同時污染場址結構物或設備亦會產生訊號干擾，實務上常常造成誤判。然而，熱流式單井流速流向儀(heat-pulse flowmeter)藉由探測棒中心的加熱器以及周圍以圓形排列的溫度感應計，在地下水流經後，藉由不同方位溫度感測計之溫差及升溫速率的差異性，來判斷地下水流速及流向。其相較傳統作



法，得知小區域地下水流速及流向，擁有較快速，準確及成本低等優點，同時，其可量測井篩內不同深度之地下水流速，可獲得污染場址水文資料之細部資訊，進行有助判斷地下水層中局部不透水區域(極有可能為污染熱點)，進而有助進行精準現地整治。

1.1 共溶劑技術

由於四氯乙烯水溶解性低，為了加速四氯乙烯於地下水體之移除速率，過去文獻以添加醇類共溶劑提升污染物的溶解性來達到此目標，例如乙醇、異丙醇及叔丁醇等共溶劑[4]，其中，乙醇為常用之共溶劑，是相對價廉且容易獲得的工業產品。研究顯示，當添加不同重量濃度乙醇時，可逐漸增加PCE溶解能力及界面活性劑之黏性，同時使溶液密度從 1.002 降至 0.986 g/cm³[5]。有研究指出，使用濃度 95%的乙醇進行PCE溶出試驗，其PCE於 40 天操作下去除率達 64%[6]；另有研究顯示，於 65%的乙醇含量和低沖洗速度下，DNAPL去除率最高可達約 92%[7]。於共溶劑實場整治的應用上(如圖 1.2)，美國Michigan環保局採用共溶劑方法整治地下水中PCE，濃度可由 100 mg/L降為 1.0 mg/L，去除率可達 99%[8]。經研究證實，共溶劑技術用於現地修復非水相液體污染的含水層比傳統的抽水處理方法更有效[9]。因此，本計畫採用乙醇擔任共溶劑角色，透過乙醇降低水的表面張力，不僅能提高四氯乙烯的溶解度，也能增加孔隙水的移動性，進而加速移除土壤及地下水層的四氯乙烯。

經過適當稀釋的乙醇以適當的速度灌注於整易井中，可緩慢釋出於地下水體中，當乙醇與污染物接觸後可快速溶出四氯乙烯污染團，進而達到移除之成效。由於本場址污染深度約位於地下 3-8 公尺，地表下 4 公尺即為透水性佳的均質砂層，因此，有利乙醇的擴散與溶解。為防止因共溶提升移動性並導致污染向下的情形發生，操作時會先將乙醇以適當速度加入於注藥井中，待乙醇完全注入後，接著進行電動力法操作，確保操作安全及降低污染情形，且有利將溶解的含氯有機物抽除。同時，土壤中的含氯有機物可透過處理井的開篩口傳輸進入土壤，經與污染團接觸後帶出污染進入地下水層，進而抽除之。乙醇能提高污染物的溶解、增加土壤孔隙溶液的移動性及加速土壤中污染物的移除。此外，乙醇為自然界可自行分解的物質，對環境無危害，同時於後續整治上可被微生物應用並協助污染物降解，是綠色及永續型的整治方法。



第一章、計畫緣起與目的

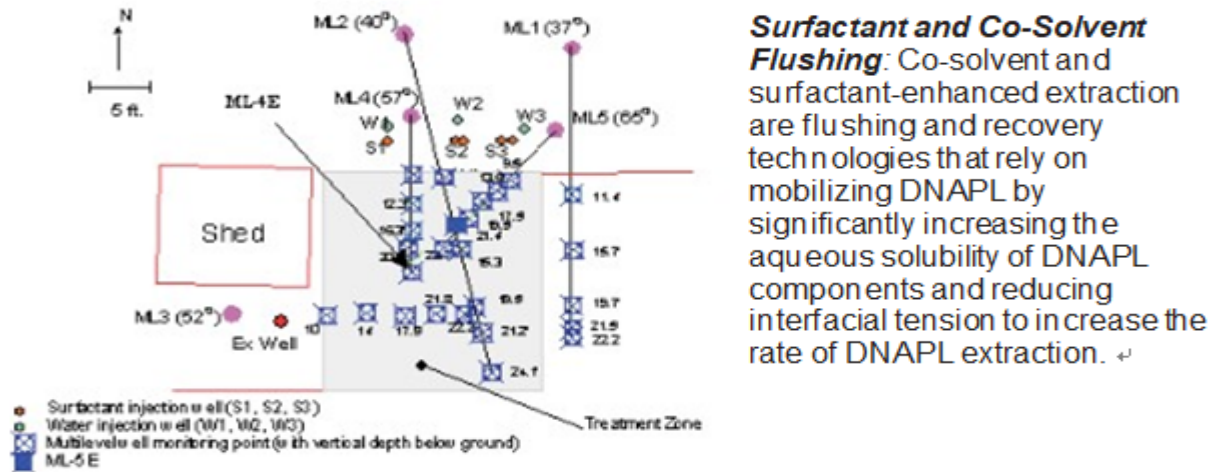


圖 1.2 Michigan 環保局整治 PCE 污染場址案例

另外，當灌注乙醇共溶劑後，地下水層可能產生額外的微生物降解效應。由於添加外在碳源或氮源等營養源於受污染的土壤或地下水體，可使存在於地下環境中之具毒性之污染物因自然界微生物代謝反應產生降解，轉為無害的物質。在直接還原脫氯反應中，微生物直接利用三氯乙烯和氯乙烯作為電子接受者，驅動氧化還原反應的發生；在共代謝還原脫氯反應中，微生物利用其他物質作為電子接受者，驅動氧化還原反應的發生；在厭氧狀況下，微生物利用還原脫氯作用降解含氯有機化合物，還原脫氯作用依序以氫原子置換氯原子，也就是將四氯乙烯先轉換為三氯乙烯後，再由三氯乙烯轉換為二氯乙烯，依此類推，如圖 1.3 降解程序示意圖。

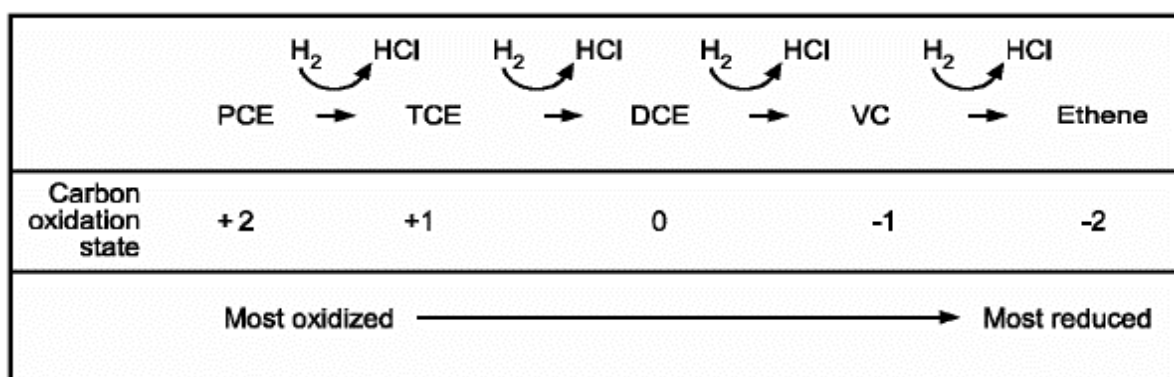


圖 1.3 含氯有機化合物厭氧還原脫氯降解程序示意圖



土壤與地下水的污染問題經常相伴產生且互有因果關係，應一併考慮且同時解決，因此，整合土壤與地下水技術應是未來的趨勢，一高去除效率、低設置成本且低操作成本的污染整治技術為本計畫研究之目標。在眾多復育技術中，現地（In-Situ）污染整治技術為具有非破壞性、低設置成本的優點，尤其在環保相關規定日趨嚴格、技術成本不斷提高的情況下，現地處理技術更顯出其優點，而成為目前具有潛力的技術之一。

1.2 電動力技術

在早期的時候，電動力技術大都運用電滲透現象去除黏土顆粒的水分，因為電滲透作用在大部分的狀況下，會使土壤顆粒中的孔隙水往陰極方向移動，因此可快速地將土壤中水分去除並將土壤壓密。爾後，將電動力學原理應於土壤及地下水污染防治方面至今發展也將近 20 年[10,11]，研究主要是探討電滲透程序中所發生的電化學反應及污染物在土壤顆粒的吸附/脫附現象。目前電動力法(Electrokinetic Method)被視為一經濟且有效之現地土壤/地下水整治技術，在美國環保署也已被列為整治地下黏質土壤受 DNAPLs(Dense Non Aqueous-Phase Liquids)相污染之可行技術之一。圖 1.4 為電動力法操作的示意圖，電動力處理技術的施作方式為在受污染的土壤區域插入正負電極，施加直流電後，藉由正負電極之間所產生的電場，使帶正電荷之離子往陰極移動；同時，帶負電荷之離子往陽極移動。此外，藉由電滲透之傳輸，引導土壤中電解質溶液流動，將污染物去除或濃縮至有限的範圍，以方便後續之處理，達到去除污染物的目的[12]。

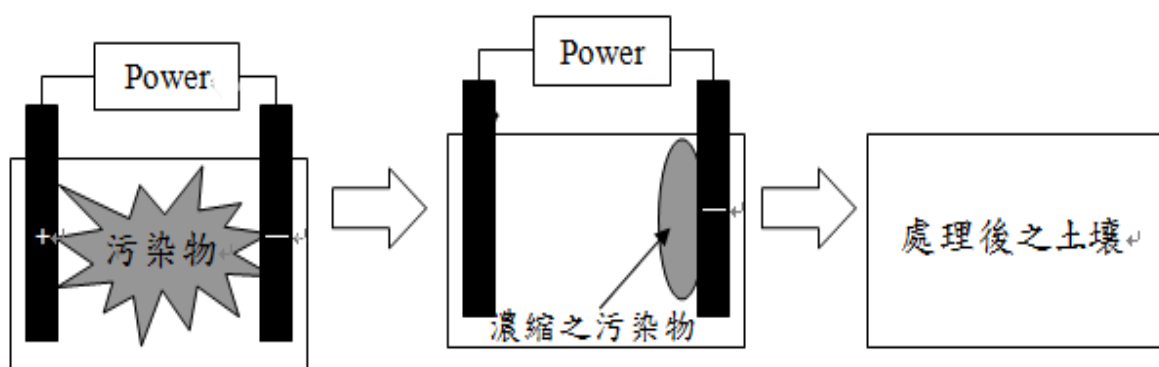


圖 1.4 電動力法操作示意圖



在現地處理技術中，電動力法(Electrokinetics, EK)為高潛力的整治技術，其主要是利用電場所造成離子遷移及電滲透流等作用，將土壤中離子性物質或溶解態物質移除。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；另外，由於土壤的表面大多帶負電荷，依據土壤顆粒電雙層理論，在帶負電荷之土壤顆粒電雙層中的正離子會比負離子多，當施加電場時，土壤中電解質溶液在帶負電的固體表面電雙層內存在有過剩的正離子，正離子又會與數個水分子經由水合(hydration)作用形成水合離子，又因土壤是一種多孔性介質，土壤孔隙的每一條路徑都可以假想為一根毛細管，故當這些正離子受到外加電場的作用而朝負極方向運動可驅動土壤孔隙水的流動，稱為電滲透流(electroosmosis)，如圖 1.5 所示。由於黏土表面負電荷密度較其他種類土壤高，且質地具有更細密的毛細現象，因此，電動力技術具有整治污染黏土的極佳優勢。

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氫氣，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-循環改良式電動力法(Circulation-Enhanced Electrokinetics, CEEK)，且透過不同操作參數釐清對電滲透流量之影響[13,14]。

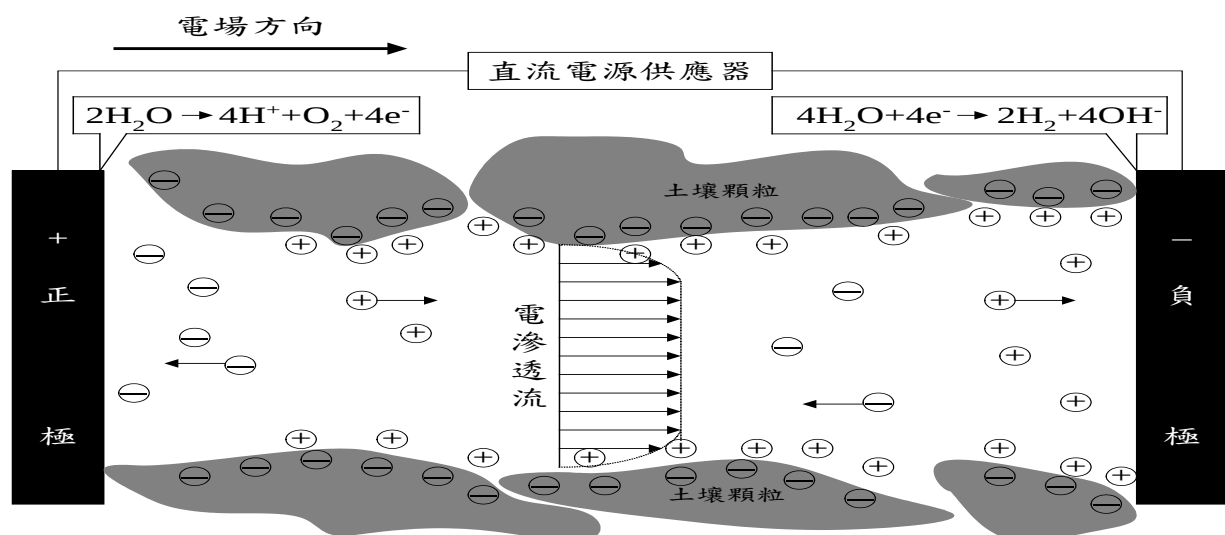


圖 1.5 電滲透流移除土壤污染物示意圖



1.3 電動力法研究成果及可行性

電動力技術在近年來除了可單獨應用在污染物的整治工作上，也可結合其他技術來整治受污染的土壤及地下水。電動力技術在現地整治上具有下列優點：

- 1.適用於各種污染土壤；除了細質砂土外，在低滲水性的淤泥、黏土等介質該技術亦十分有效。
- 2.整治種類廣泛，除了一般污染物重金屬外，輻射核種、有機污染物及毒性陰離子亦適用。
- 3.能同時應用於飽和及非飽和層土壤。
- 4.耗用經費較傳統技術為低。

近來電動力法技術也應用在有機物、含氯有機物及苯環有機物污染土壤上，證實其電動力法整治的可行性。Bruell et al.研究證實在電動力作用下，苯(Benzeue)、甲苯(Tolueue)、乙烯(Ethylene)、二甲苯(Xylene)及TCE等有機物能在高嶺土介質中受電場作用向陰極移動，並且可有效的去除[15]。楊和劉探討電動力-Fenton法現地處理三氯乙烯及 4-氯酚污染土壤之最佳操作條件，從結果可得知，添加鐵粉的型態及劑量會影響總破壞去除率及處理機制[16]。Rabbi et al.利用電動力法探討以傳輸碳源進行代謝作用，以增進生物分解TCE，其實驗結果證明了此方法的可行性，尤其是對於低滲透性土壤介質而言[17]。袁菁教授以複合界面活性劑為操作流質時，PCE去除率隨電壓梯度的增加而提高，可達 58.1%-86.3% [18]。翁誌煌教授探討串聯式電動力技術復育受三氯乙烯污染黏質的移除效率，從實驗結果可得知，以 2 V cm^{-1} 電壓經三天處理後，去除率可達 91% [19]。Chang and Cheng結合電動力和零價金屬整治四氯乙烯 (PCE) 污染土壤，經由 0.01 M 碳酸鈉及 1.0 V cm^{-1} 操作下，操作溶液的pH值可維持於中性範圍避免土壤酸化的現象，並穩定系統之電力消耗[20]。

本研究團隊過去於實驗室以電動力法結合零價鐵的方式進行四氯乙烯的小規模試驗，依據最佳操作條件之試驗結果證實，此處理系統不僅能明顯改善電動力的酸化問題及零價金屬還原脫氯的鹼化問題，並且有助於維持整合系統中pH值、電導度、電流等各項電化學操作參數的穩定，且當控制pH於中性亦可維持穩定電滲透流率，有助於節省操作成本。經由 10 天的操作過程後，PCE在孔隙水中有 99%去除效率，土壤中PCE亦有 90%的去除效率(圖 1.6 及圖 1.7)，反應速率最高達到 $k = 0.7657 \text{ hr}^{-1}$ 。本研究團隊曾於 107 年獲得環保署經費補助以“**整合零價金屬與電動力法整治四氯乙烯污染土壤及地下水**”，其藉由電動力法使土壤層中滲透水流動(電滲透流；electro-osmotic flow)，有效驅動土壤中的有機污染物，將污染物流經一零價金屬處理區時，藉由還原作用分解有機污染物，可同時針對不



第一章、計畫緣起與目的

飽和層及飽和層的有機污染物進行處理，有效整治土壤及地下水。此計畫主要特點為放大模場規模至長 150 cm × 寬 63 cm × 高 63 cm 以模擬現地整治情形。於 120 小時試驗下，土壤中 PCE 濃度平均去除效率可達約 80%，而孔隙水中 PCE 去除效率平均亦可達約 82% (圖 1.8 及圖 1.9)，顯示電動力法產生之電滲透流可使土壤層中滲透水流動，有效驅動土壤及孔隙水中的有機污染物。

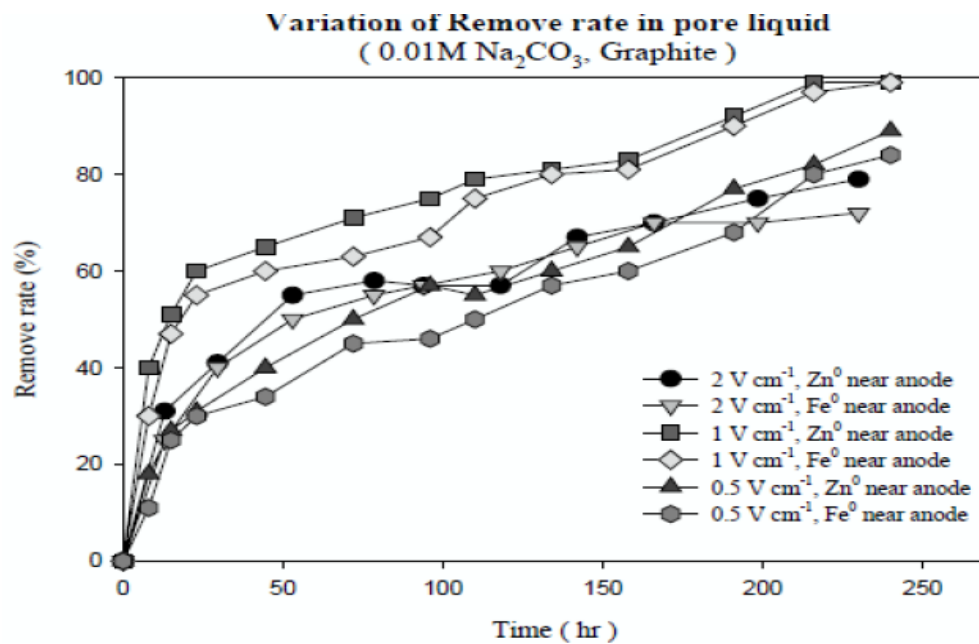


圖 1.6 孔隙水中 PCE 去除效率

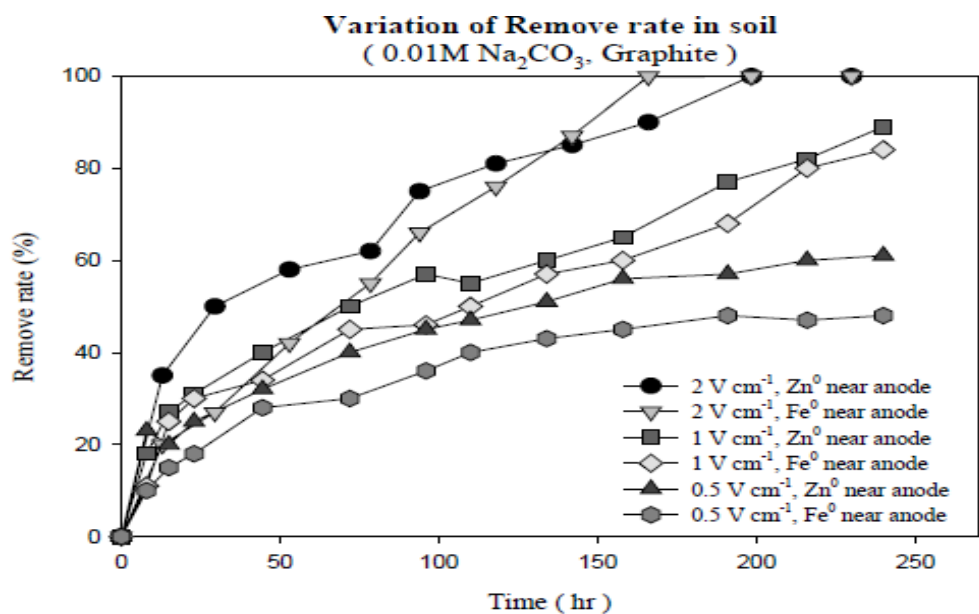


圖 1.7 土壤中 PCE 去除效率



共溶劑及電動力技術實場整治含氯有機物污染之土壤與地下水

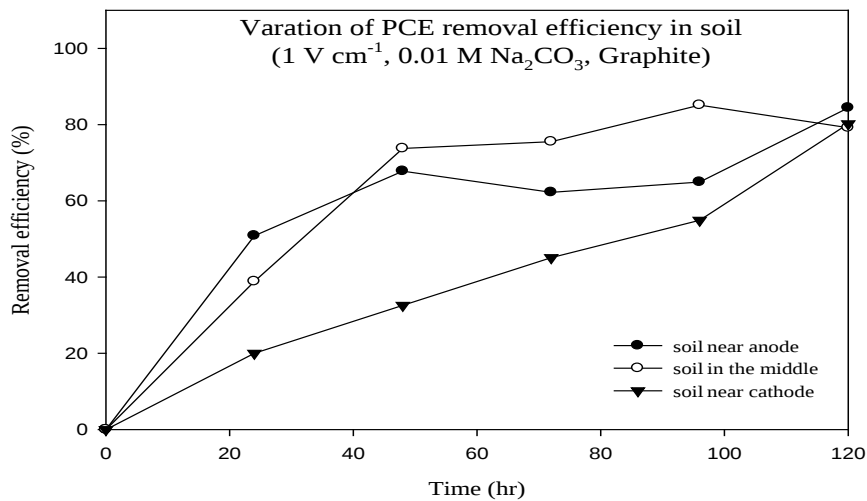


圖 1.8 大型模場土壤中 PCE 去除效率圖

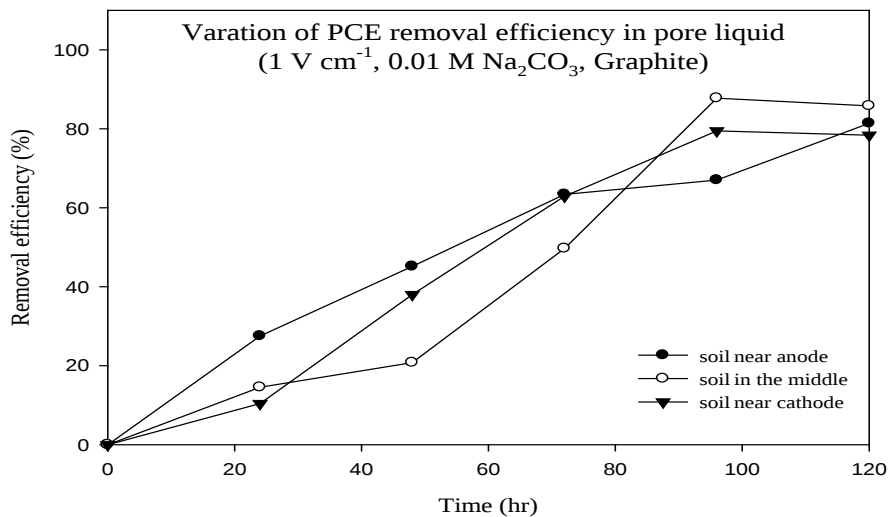


圖 1.9 大型模場孔隙水中 PCE 去除效率圖

電動力法在整治污染土壤及地下水已有實際成功案例，例如美國 Lasagna 公司以電動力法處理杜邦公司 TCE 污染土壤，超過 98%TCE 可被有效去除，初始濃度約 225 mg/kg，經過 3 個 pore volume 的電滲透流，TCE 濃度可大幅降至 1 mg/kg，結果指出電滲透流可有效地將 TCE 污染物傳輸至處理區域進行整治[21]。圖 1.10 為土壤深度 4 英尺到 15 英尺的 TCE 去除效率，由圖顯示電動力法可有效去除土壤中的 TCE。此外，美國能源部亦有採用電動力法整治 TCE 污染土壤的成功案例。主要於電壓梯度 0.25 V/cm 電動力操作下，並以速率 0.43 cm/day 移動水，總去除效率可達 99.7%；荷蘭 Holland Environment 也採用電動力法成功整治諸多重金屬及多環芳香化合物的污染場址。對於不同重金屬、氰化物及 PHA



去除效率最高可達 97%[22]。以上相關成功案例顯示以電動力法整治現地污染場址含氯污染物及其他污染物(重金屬等)整治的可行性及有效性。

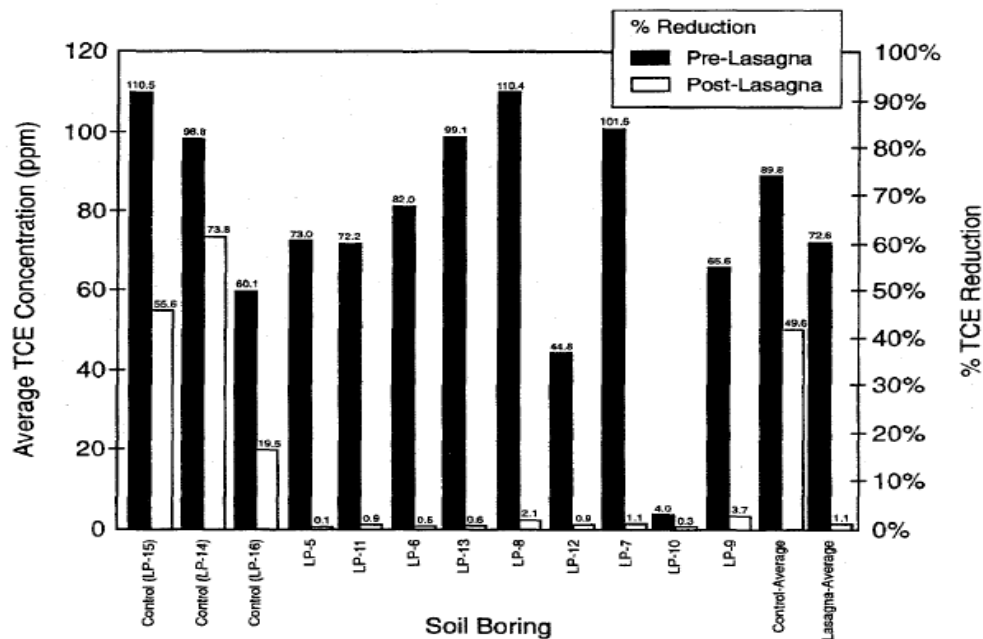


圖 1.10 土壤中 TCE 不同整治深度去除效率

1.4 實場電動力結合共溶劑整治含氯污染物地下水的試驗成果

於整治實務上，計畫主持人已針對國內實場四氯乙烯污染場址進行規劃及整治，並獲得四氯乙烯及衍生物之處理成效及整治經驗。本團隊結合乙醇共溶劑搭配電動力法的方式整治四氯乙烯污染之地下水，於模場先導試驗成果中，乙醇共溶劑添加後，電動力法產生之電滲透流可將共溶劑深入脫附土壤層中的四氯乙烯，進而於短時間內大幅降低地下水中的四氯乙烯濃度。整治過程得知，乙醇共溶劑可提升四氯乙烯溶解，使污染土壤表層的四氯乙烯溶解釋出，而接續電動力法產生均勻之電滲透流亦可快速將溶解於土壤孔隙水中的四氯乙烯進行移動，使污染物有效移出因而導致污染濃度的上升。經過一段整治後，含氯污染物被移動至抽除井，加上微生物輔助降解四氯乙烯進而有效降低污染濃度，如圖 1.11 所示。地下水四氯乙烯濃度從 0.328 mg/L 降至 0.112 mg/L，去除率約為 65%，相較於單純乙醇共溶劑整治成效約可提升 40%去除效率；三氯乙烯濃度從 0.091 mg/L 降至 0.043 mg/L，去除效率約 53%；順-1,2-二氯乙烯濃度從 0.0818 mg/L 降至 0.0434 mg/L，氯乙烯濃度從 0.0035 mg/L 降至 0.0027 mg/L。另外，抽除的地下水經由廢水處理廠處理後不會造成污染，能有效處理含氯有機物，證實本技術整治規劃的可行性。



共溶劑及電動力技術實場整治含氯有機物污染之土壤與地下水

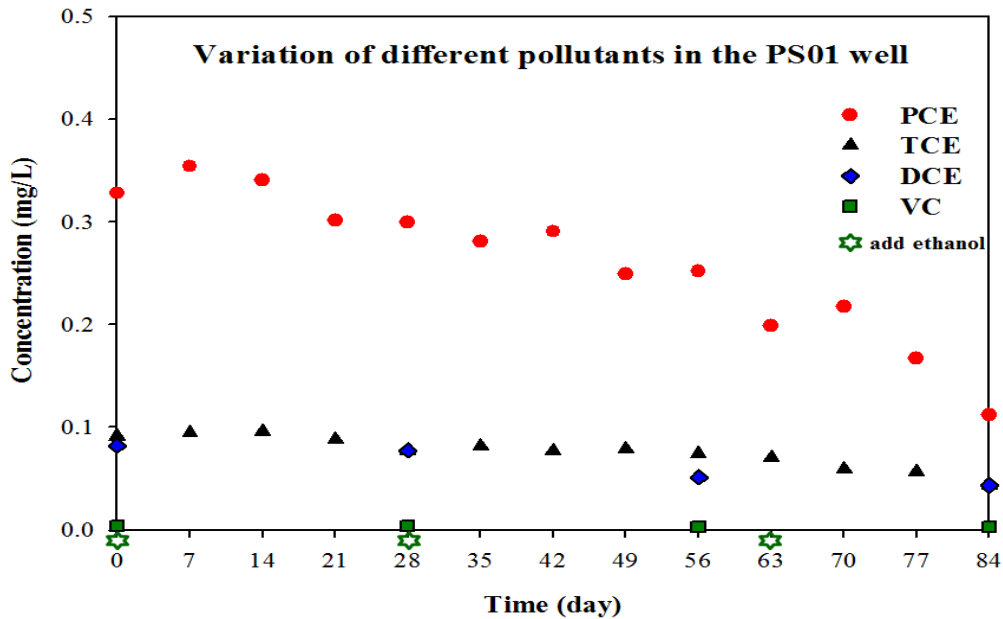


圖 1.11 計畫主持人實場整治含氯有機物之成效

本研究團隊以共溶劑技術整治得知，乙醇可供給微生物生長之營養源，使地下水中微生物數量顯著增加，如圖 1.12 所示。RLU (Relative Light Unit)數值可表示微生物 ATP 濃度及反映地下水微生物的相對數量，高 RLU 值代表水體中有較多的微生物，有助於含氯污染物的降解。同時，經由共溶劑及電動力法整治後，地下水體之水質參數如氧化還原電位(-150~200 mV)、pH 值 (6~7)及溶氧(0.3~1.1 mg/L)等，是適合微生物生長及進行生物降解含氯有機物之環境。以上成果證實計畫主持人對於實場含氯有機物的整治規劃及污染控制具有實務經驗，再搭配協同主持人的協助參與，相信可勝任本計畫的執行。

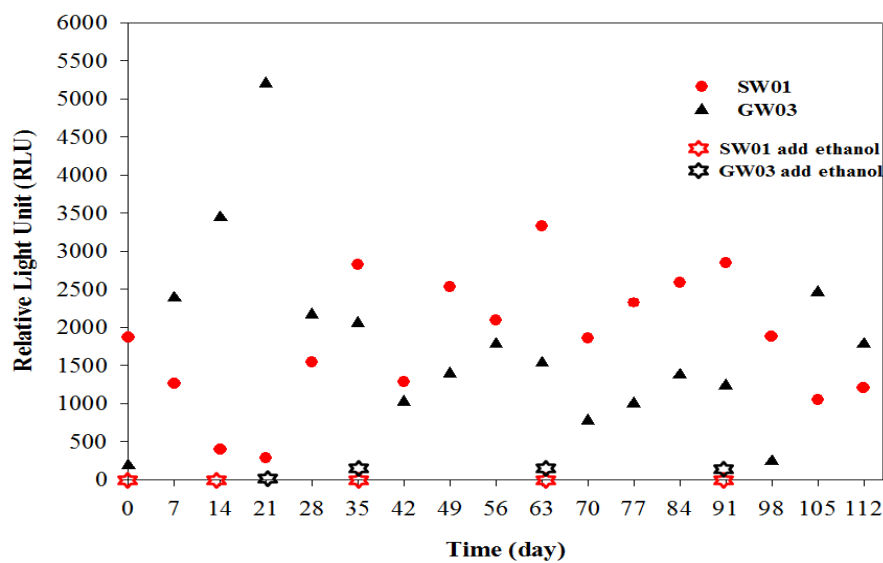


圖 1.12 實場整治微生物生長趨勢圖



台灣中油探採研究所對於運用單井流速流向儀判斷地下水流速及流向，判斷小區域地下水流速及流向及獲得污染場址水文資料之細部資訊已有多年豐富經驗。此外，台灣中油探採研究所將協助本計畫地下水菌落檢測及含氯有機物衍生物的濃度檢測。探採研究所加入本團隊，大幅提升本計畫的可行性。

綜合以上所述，“結合單井流速流向量測、共溶劑及電動力技術實場整治含氯有機物污染之土壤與地下水”的各項技術皆已接近成熟，執行團隊亦有多年研發及實務經驗，無論在整治理論的掌握、技術操作參數的運作及現場實務的應變能力皆已完整。此外，本整治技術因設備簡單、安裝容易、操作簡便、整治期程大幅縮短，整治費用較其他整治方法大幅降低。因此，本計畫不僅具備高度的技術可行性，同時具有市場化的可行性。

“結合單井流速流向量測、共溶劑及電動力技術實場整治含氯有機物污染之土壤與地下水”複合整治技術在經過本計畫驗證可行後，未來可積極推廣以解決含氯有機物污染的土壤及地下水。此外，本技術也具有高潛力用於整治其他有機污染場址，特別是需要現地整治的工廠、加油站及其他仍需運轉經營的事業。對於海外市場的開發，本技術可透過參加國際發明展，尋求國際合作機會。

1.5 計畫目的

根據前述試驗結果為依據，本年度研究計畫以**建立快速、精準、多功能且達到高經濟效益的含氯有機物處理技術**，相信可作為未來國內土壤及地下水處理技術的重要參考。透過一系列試驗後，可有效釐清結合單井流速流向量測、共溶劑及電動力技術處理含氯有機物污染土壤及地下水的處理效率及操作參數問題，如污染物範圍判定、乙醇注入濃度及頻率、電動力產生之各種電化學反應對地下水層的影響、生物效應的影響及操作時間控制等，最後探討在此整合技術下的整治效果及本技術所需的整治費用。為達成上述的研究目的，主要研究內容如下：

1. 調查土壤及地下水各項物化特性，如 pH、導電度、氧化還原電位、溶氧、總有機碳及不同含氯有機物濃度。
2. 完成單井流速流向量測對污染場址的流場分析，定位可能的黏土層或不透水層以掌握污染熱點。
3. 針對高濃度污染熱點建構共溶劑及電動力法整合系統進行模場先導試驗，並設置小型廢水處理廠。



共溶劑及電動力技術實場整治含氯有機物污染之土壤與地下水

4. 探討地下水之 pH 值、電導度、系統電流及各污染物濃度隨時間之變化，以其找出適當之操作參數，並設置擴大整治範圍的共溶劑及電動力法整合系統。
5. 全面監測複合技術整治污染土壤及地下水之含氯有機物濃度之變化，以證實本技術對實場整治含氯有機物場址的有效性。
6. 完成整治工程設置成本及操作成本的估算，以瞭解市場的競爭力。

根據上述論點，本計畫研究目標涵括：

1. 獲得本計畫場址土壤及地下水各項水質參數及含氯有機物濃度，作為本計畫污染整治之背景數值。
2. 透過單井流速流向量測、共溶劑及電動力法建立一套完整現地含氯有機物於土壤及地下水之整治系統。
3. 透過本整合技術於短時間操作下，大幅降低土壤及地下水中含氯有機物濃度。
4. 隨操作時間變化之各項地下水水質可有效掌握，並獲得本系統最佳之試驗參數。
5. 經由本技術整治後，污染場址之地下水含氯有機物濃度低於管制標準。
6. 完成整治工程設置成本及操作成本的估算，以瞭解市場的競爭力。



第二章、研究方法及過程

本研究計畫以結合不同處理技術的方式進行，探討整合技術對含氯有機物污染土壤及地下水的去除效率，整治時間共計兩年，其研究方法及架構如圖 2.1 所示。首先，進行相關文獻彙集與回顧瞭解共溶劑、電動力技術之理論背景及土壤及地下水法規規範，並委請協同主持人(台灣中油與立誠電腦團隊)共同參與本計畫執行；接著設置整治井與監測井進行場址水文調查、採集並檢測土壤及地下水污染濃度及建置本計畫相關整治設備，整治技術包括單井流速流向量測、共溶劑及電動力法。

首先，根據污染場址濃度調查選定高污染熱點進行為期 4 個月的模場先導試驗，以獲得單井流速流向量測、共溶劑及電動力技術最佳之控制參數，待完成後逐年針對場址內其中污染區域進行污染整治。整治期間，將定期監測土壤及地下水含氯有機物濃度及各項水質參數，以符合土壤及地下水管制標準，並針對廢水處理設施處理後之放流水進行檢測，以證實本整治技術規劃的可行性，最後將符合規範之放流水迴流至陽極予以排放。

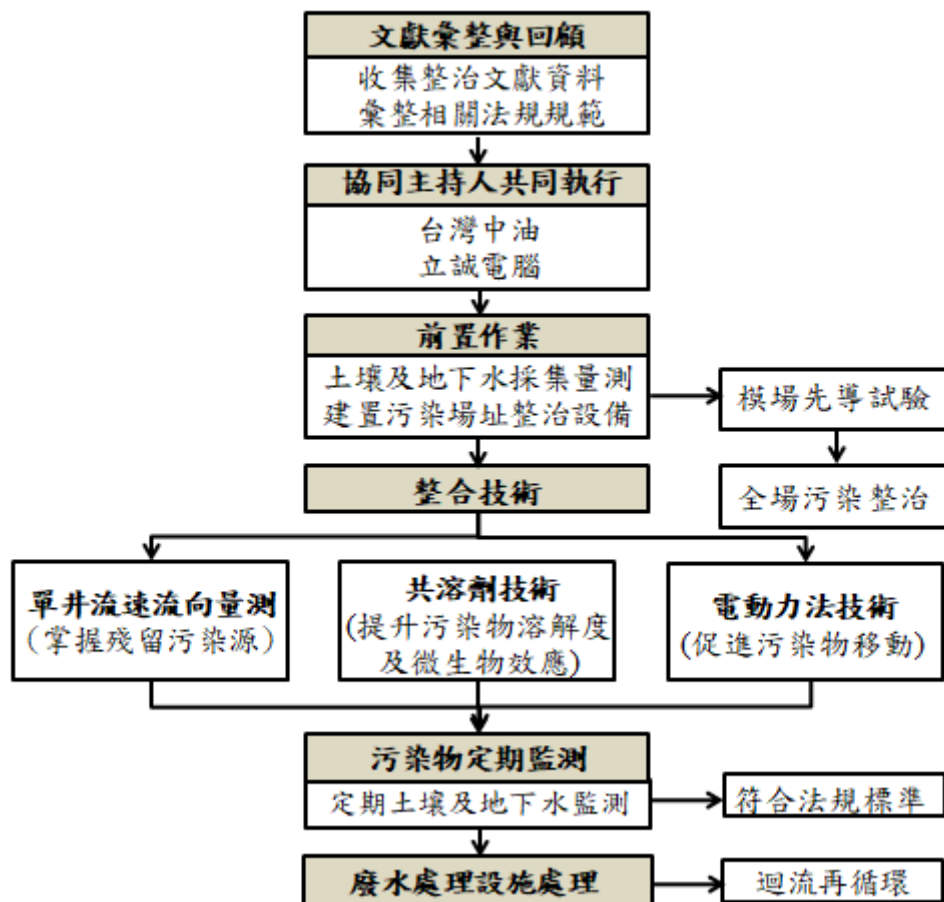


圖 2.1 建構「整合技術去除含氯有機物污染土壤及地下水」研究流程圖



本研究污染場址是位於彰化縣彰化市莿桐段 1503 地號，場址座標：X：200593，Y：2661057，場址面積為 1,970 m²，其場址範圍如圖 2.2 所示。污染場址過去以各種電氣器材製造加工為主要營業項目，推估污染原因可能為早期使用含氯溶劑過程因設備管線及槽體銜接處有洩漏情況發生，洩漏至地面後再沿地面裂縫入滲至地表下所導致的污染，目前場址列管狀態為地下水污染整治場址，且場址過去未進行任何的整治改善工程。根據過去調查資料顯示，其主要是受到含氯有機物的污染，地下水順-1,2-二氯乙烯污染濃度為 2.37 mg/L，三氯乙烯為 2.0 mg/L，四氯乙烯為 0.861 mg/L，污染範圍涉及土壤及地下水層。對於場址地質，地表下 1~6 公尺為粉土質黏土與黏土質粉土互層，地表下 6~10 公尺主要為砂土層，地表 10 公尺處有一不易透水或黏土地層；地下水流向為南向北(西北)流，且地下水位約為 1.8 公尺；含氯有機物污染深度約為地表下 5~8 公尺。

本研究以單井流速流向量測、共溶劑及電動力技術實場整治含氯有機物污染之土壤及地下水，藉此探討整合技術對含氯有機物之去除效率，並同時觀察廢水處理設施放流水之各項水質參數，最後評估此結合技術地實用性和經濟性。在試驗一開始，首先於場址內設置相關整治井及監測井以採集場址地下水，採集之水樣會經過標準前處理過程並以環保署公告之標準方法分析基本物化特性，其包括：pH 值、電導度、溶氧、氧化還原電位、含氯有機污染物(氯乙烯、順-1,2-二氯乙烯、三氯乙烯及四氯乙烯)濃度等，以瞭解污染場址地下水基本物化特性，作為後續試驗數據探討之依據。



圖 2.2 本計畫污染場址主要範圍



2.1 整合技術處理含氯污染物試驗方法 (含模場先導試驗)

本複合整治技術主要操作模式如圖 2.3 所示。本技術的整治單元為 1 個注藥井及 1 個抽除井，根據場址水文流向南向北(西北)流，將於上游處設置注藥井，下游處設置抽除井，兩整治井間距為 2 公尺，將 1 對電極置入前述的 2 井中，於注藥井放置陽極電極，抽除井放置陰極電極，此設置可使電滲透流與地下水流流向一致，有利移除土壤層中的污染物。將共溶劑以適當速度灌注於整治井，待共溶劑完全注入後接續進行電動力操作，同時，藉由抽除井抽除含氯有機物的地下水，被抽除的地下水經現場設置的廢水處理設施處理後進行迴流。依污染場址範圍及污染熱點規劃設置注藥井、抽除井及監測井。本計畫第一年共設置 4 口注藥井、4 口抽除井及 4 口監測井，並先以 1 口注藥井(A4)、1 口抽除井(B4)及 1 口監測井(MW03)進行 4 個月的模場先導試驗，操作參數於表 2.1。於共溶劑操作部份，每次將於注藥井灌注濃度為 50% 乙醇 100 公升，每月注入一次，共添加四次為操作原則，每次灌注後可使乙醇於地下水體維持約 2%~5% 之乙醇濃度，使乙醇共溶劑與含氯污染物產生共溶反應。電動力法操作以影響半徑 2 m 設置，以施加總電壓 100 V 進行，換算後電壓梯度為 0.5 V/cm，以每週三天進行間歇 6 小時電動力法操作，陰極抽除井抽水則以 1.0 L/min 設定之流量不間斷進行抽除。

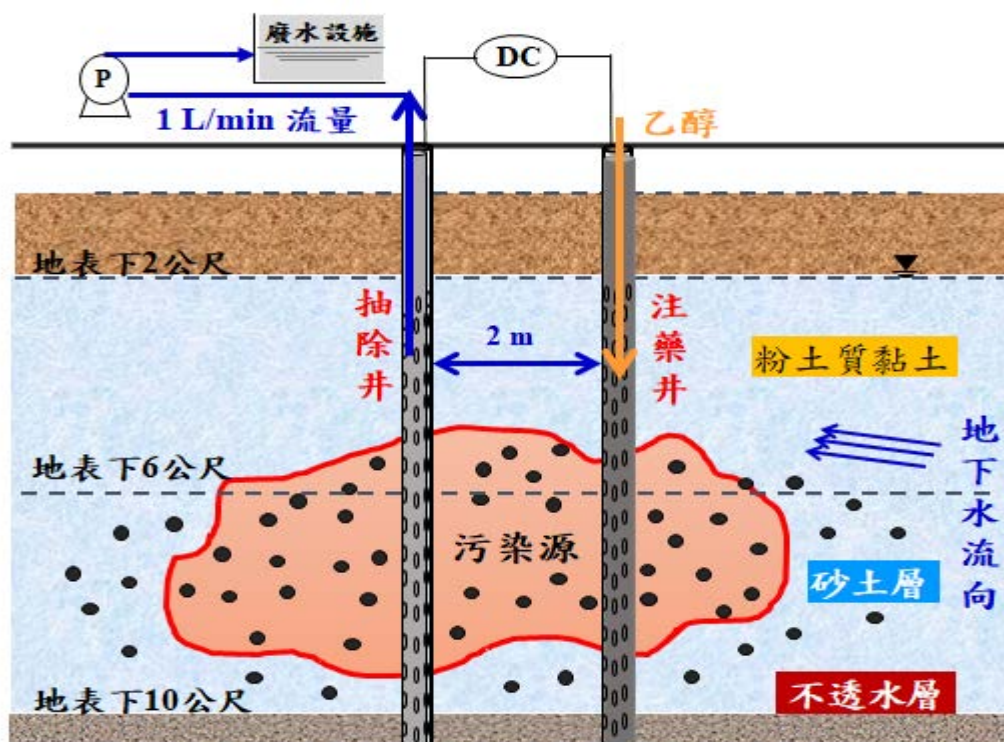


圖 2.3 本計畫整治操作示意圖



表 2.1 本計畫模場先導試驗操作條件

整理工法	操作條件
共溶劑技術	乙醇濃度 50%
	每月 1 次灌注 100 公升
電動力法技術	整治井間距 2 公尺
	電壓梯度 0.5 V/cm
	每週三天間歇通電 6 小時
抽水抽除法	抽除井流量 1.0 L/min

本計畫電動力法系統設置部份，選用具有耐酸鹼及抗腐蝕性質之鈦管作為陰極及陽極，分別於注藥井及抽除井中置入，並以整流器通入直流電進行電動力法整治。依據本計畫場址污染深度 5~8 公尺，陽極電極與陰極電極長度設定為 8 公尺 (由 4 支 2 公尺連接)、直徑 1.0 英吋，再以吊掛方式置入井內指定深度中。注藥井與抽除井直徑均為 3 英寸，深度 8 m，開篩深度為 2~8 m。整治期間，將定期量測含氯污染物濃度及各項水質參數之變化，如表 2.2 之規劃項目。主要檢測含氯污染物(四氯乙烯、三氯乙烯、順-1,2-二氯乙烯及氯乙烯)濃度及地下水 pH、電導度、溶氧及氧化還原電位等變化趨勢；另檢測總有機碳、重金屬、微生物菌落及放流水水質數據等綜合評估。

表 2.2 第一年土壤地下水及放流水檢測項目規劃表

監測點位	監測項目	監測深度	頻率
監測井及 整治井	污染物濃度：PCE、TCE、1,2-DCE、VC、 總有機碳、乙酸、重金屬、微生物菌落	6 m	每月一次
	水質：pH、電導度、溶氧及氧化還原電位	6 m	每周一次
放流水	PCE、TCE、1,2-DCE、VC、真色色度、BOD、 COD、SS	放流水池	每月一次



2.2 廢水處理設施

本計畫將含氯有機物地下水抽除至現場設置的小型廢水處理設施進行處理，不會造成環境的二次污染。廢水處理設施主要核心係以電觸媒廢水處理技術設置，電觸媒廢水處理技術是屬於高級氧化方法的一種，對於處理不同難分解物質之廢水具有高度潛力，其主要利用施加電場於觸媒電極表面以產生強氧化劑(如氫氧自由基)。電觸媒廢水技術可處理之廢水種類多樣化，無須特別添加化學品，設備簡單，可在室溫及常壓下操作，能快速降解有機污染物且不會產生污泥等特點，不僅有效處理含氯有機物，亦可同時達到廢水殺菌及溶氧提升之功效[14]，係屬於綠色及永續型之廢水處理技術。

廢水處理設施主要分為四個反應槽，槽體皆為聚乙烯(Polyethene, PE)材質組成，第一槽為抽除地下水後之廢水暫存槽，可容納之廢水量為 1 噸；第二槽為廢水曝氣槽，廢水量為 6 噸；第三槽為廢水電解槽，廢水量為 3 噸；第四槽為放流水暫存槽，廢水量為 1 噸。廢水處理設施主要操作程序為地下水抽除於廢水暫存槽後，當達一定水位以抽水馬達自動抽至第二槽曝氣槽進行曝氣，第二槽及第三槽則以重力流方式分別進入廢水電解槽及放流水迴流暫存槽，當放流水之含氯污染物濃度符合地下水監測標準後，再以抽水馬達迴流至注藥井(陽極端)，其主要設計如圖 2.4 所示。本計畫抽除井(陰極端)地下水抽除流量約為 1.0 L/min，以 4 口抽除井每天 6 小時抽除流量進行估算，每天抽除的地下水約 2 噸，抽至廢水處理設施之地下水預計停留 1 天後進行迴流，以達地下水循環的目標。

在廢水處理設施之電解槽中裝設多對純鈦電極，並利用槽底曝氣方式達到廢水均勻混合的狀態。陰極與陽極擺設之間距設定約為 60 cm，極板放置平行後通以直流電，並以固定電壓梯度 1.5 V/cm 進行操作，總電壓為 90 V。



共溶劑及電動力技術實場整治含氯有機物污染之土壤與地下水

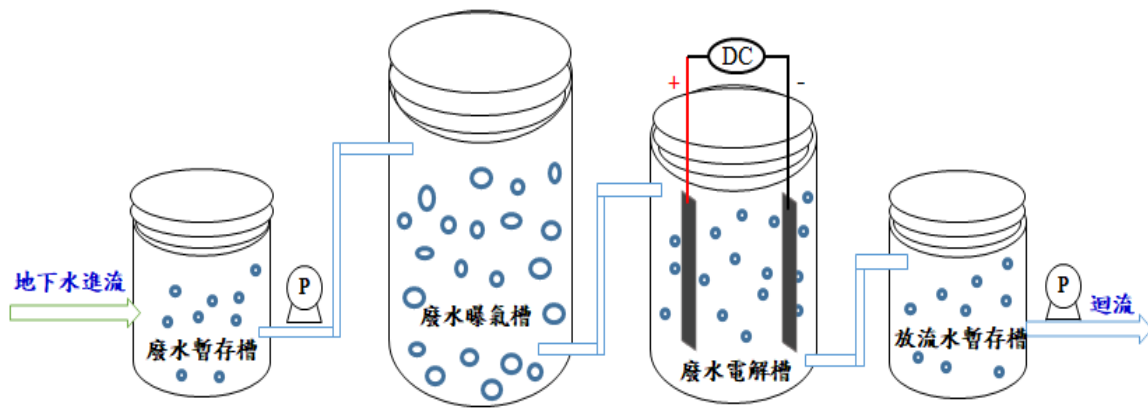


圖 2.4 電觸媒廢水處理技術之模場示意圖

經模場先導試驗完成後可獲得初步整治成果及最佳操作條件，再接續第一年規劃設置之 3 口注藥井(A1~A3)及 3 口抽除井(B1~B3)進行污染場址熱區為期 5 個月的污染整治，如圖 2.5 規劃所示，並同時觀察 4 口監測井(MW01、MW04、MW06 及 MW07)之濃度，以全面監測場址污染物濃度之變化。於共溶劑部份，本團隊每月將於注藥井灌注濃度為 50%乙醇 100 公升，第一年的使用量約為 2~3 噸，視含氯有機物四氯乙烯濃度分析結果機動性調整，當四氯乙烯濃度穩定不變的時候，將再添加共溶劑，以確保整治作業持續進行；電動力法操作及陰極抽水部份，則以模場先導試驗最佳參數予以設定，以達本計畫整治目標。

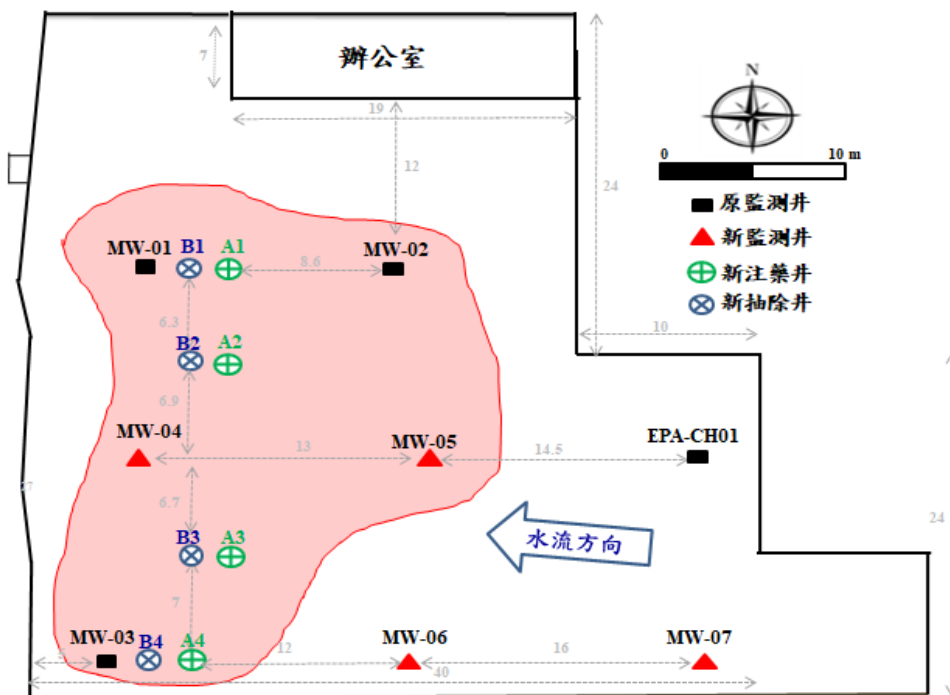


圖 2.5 本計畫第一年整治井規劃示意圖



為使本計畫順利執行，特委請台灣中油公司林舜隆、朱正文研究員及立誠電腦資訊有限公司陳鴻國博士擔任計畫協同主持人，其協同主持人資料於表 2.3。其中，林舜隆及朱正文研究員採用單井流速流向量測技術掌握可能殘留的含氯溶劑污染源位置，進而進行精準現地整治，並協助分析微生物菌落檢測及含氯有機物之衍生物量測，以利未來將本計畫整合技術應用於加油站之油品污染整治。陳鴻國博士則協助有關電動力法操作之電力設備、電線配置及資訊設備控制等工程，有利完善電動力工程技術。

表 2.3 本計畫協同主持人資料表。

姓名	現職單位	學經歷	專長
林舜隆	台灣中油公司探採研究所研究員	中山大學環境工程研究所碩士班畢業	土壤及地下水污染整治技術 地下水文調查分析
朱正文	台灣中油公司探採研究所研究員	1.台大地質科學系畢業 2.高考應用地質技師合格	水文地質
陳鴻國	立誠電腦資訊有限公司	中興大學電機系博士班	1.資訊工程 2.電機工程

本研究計畫期待能以單井流速流向量測對污染場址的流場分析，定位可能的黏土層或不透水層以掌握污染熱點，冀望透過精準的污染源定位提升整治效果和減少處理時間；再透過乙醇共溶劑的輔助下，將原本吸附於土壤層中之殘留相含氯溶劑污染源溶解釋出，再經由電動力之電滲透流快速移除含氯溶劑，最後再抽至廢水處理設施處理後迴流，以達到去除含氯溶劑和兼顧環境友善的雙重功效。以上操作條件之設定會隨著實際實驗情況進行微調，以達到本計畫最佳化之參數。此計畫之研究成果和相關數據將有利於未來其他實場污染場址應用之參考，其有研究之必要性。



2.3 計畫進度與檢核說明

表 2.4 為本研究計畫進度與檢核表，目前計畫成果符合所預定之進度，表中預定期末報告須完成土壤及地下水物化特性分析、整治井及監測井設置、乙醇共溶劑及電動力法設備架設、廢水處理設施設置、單井流速流向量測、模場先導試驗及污染場址熱區整治、地下水及放流水水質監測等工作事項，規劃內容皆符合計畫期程。

表 2.4 計畫進度與檢核表

工作項目 \ 年月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	備註
土壤及地下水物化特性分析												
設置整治井及監測井												
乙醇共溶劑及電動力法設備架設												
廢水處理廠設置												
熱流式單井流速流向儀量測												
模場先導試驗測試												
探討整合技術整治含氯有機物之可行性及去除效率												
放流水水質監測												
成果報告撰寫												
工作進度估計百分比 (累 積 數)	5%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%	



第二章、研究方法及過程

預定查核點	期中	完成土壤及地下水物化特性分析、設置整治井及監測井、乙醇共溶劑及電動力法設備架設及廢水處理廠設置；完成熱流式單井流速流向儀量測及部分模場先導試驗並尋找本場址較佳之操作參數。
	期末	完成乙醇共溶劑結合電動力法整治含氯有機物試驗；完成探討整合技術處理含氯有機物之去除效率及可行性、放流水水質監測及成果報告撰寫。



第三章、結果與討論

本計畫推展至今，研究進度符合所預定進程。主要完成土壤及地下水物化特性分析、整治井及監測井設置、乙醇共溶劑及電動力法設備架設、單井流速流向量測、廢水處理設施及含氯污染物模場先導試驗與污染場址熱區整治。目前，茲就已完成的發現與結論說明如下：

3.1 整治設備安裝

本場址污染整治設備安裝包括整治井及監測井設置、電極材料、抽水馬達安裝、電力設備及廢水處理設施設置，說明如下。

3.1.1 整治井與監測井設置

第一年整治規劃需於本場址設置整治井與監測井，其規劃設置如圖 2-5。目前在整治井部份已如期設置完成，總計設置 8 口(A1~A4, B1~B4)整治井；在監測井部份亦符合進度，除了原監測井外(MW01~ MW03)，新設置 4 口(MW04~ MW07)監測井。本團隊先於場址內進行整地工程，接著在欲設井的位置進行點位標示，再以鑽堡進行設井，施工情形如圖 3.1~3.3。同時，依據之前的調查研究顯示，含氯污染物以 5~8 公尺深度為主要污染區域，因此，本計畫整治井直徑為 3 英寸，設井深度 8 m，開篩深度為 2~8 m，兩井間距設為 2 m；監測井直徑為 3 英寸，深度 8 m，開篩深度為 2~8 m，主要規格及數量顯示於表 3.1。

表 3.1 整治井及監測井材料數量及規格

整治井試驗材料/設備	數量	規格
整治井	8 口	--
整治井管長/管徑	--	8 公尺/3 英吋
監測井	4 口	--
監測井管長/管徑	--	8 公尺/3 英吋
整治井開篩深度	8	2~8 公尺
整治井間距	--	2.0 公尺
監測井開篩深度	7	2~8 公尺
監測井間距	--	--



第三章、結果與討論



圖 3.1 污染整治區鑿井整地圖



圖 3.2 污染整治區鑿井施工圖



共溶劑及電動力技術實場整治含氯有機物污染之土壤與地下水



圖 3.3 污染整治區鑿井完工圖



3.1.2 電極設置

電極設置是作為電動力操作之用途，電極材料如圖 3.4。考量到電極需長期放置於地下水體，須具有抗腐蝕及酸鹼的特性，因此陽極與陰極材料選擇純鈦電極。本計畫電極材料之總長度為 8 公尺，電極管徑為 1 英吋，有關電極材料之數量及規格如表 3.2。現地電動力之特點為操作之電極材料可重複使用，節省整治過程的設備成本。為達到電極重複使用及拆裝便利的目的，本計畫電極設置過程以人工組裝方式進行，以每支 2.0 公尺電極進行銜接，陽極與陰極分別各連接 4 支置於地表下，電極間以電極套管連接，套管材質與陽極及陰極相同，為純鈦材質，依序放入整治井中，電極設置完成整治井將以防水袋包覆，以防止雜物不慎進入。



圖 3.4 電動力法之電極材料 (鈦管)

表 3.2 電極材料數量及規格

電極材料/設備	數量	規格
陽極純鈦電極	4 組	8 公尺 (2.0 公尺 x 4)
陰極純鈦電極	4 組	8 公尺 (2.0 公尺 x 4)
電極管徑	--	1 英吋
電極連接套管	32 個	陽極、陰極各 16 個



3.1.3 抽水馬達安裝

為有效將陰極端抽除井抽除的含氯污染物地下水抽至增設的廢水處理設施，於每個陰極端(B1~B4)設置抽水馬達裝置，如圖 3.5。將抽水馬達固定於本場址後，一端以抽水管材連接陰極端(抽除井)，另一端則連接至廢水處理設施之廢水暫存槽；同時加裝浮子流量計達到每天持續穩定流量的抽除含氯污染物之地下水，而抽水馬達裝置之相關材料數量及規格如表 3.3。



圖 3.5 抽水馬達安裝完工圖

表 3.3 抽水裝置材料數量及規格

抽水泵材料/設備	數量	規格
抽水馬達 (陰極抽水)	4 台	0.5HP 0.37 KW
浮子流量計	4 台	最大流量 1.0 噸/小時
抽除水出水管長	--	8 公尺
抽除水出水管徑	--	1 英吋



3.1.4 電力設備安裝

本計畫場址整治技術為共溶劑+電動力進行整治，電動力所施加之電壓梯度為 0.5 V/cm，總電壓為 100 V。為避免電動力操作對彰化原場址內電力需求過大造成的電力供應不穩定情形，特別設置獨立電力系統，包括電箱、浮水流量計開關、鼓風機開關、放流水開關、原水開關、電源插座、電錶及電線配置等，以順利進行後續污染整治之電動力及抽水操作，且有效掌握本計畫污染場址之電力消耗。其主要施工情形如圖 3.6~圖 3.8。



圖 3.6 電力設備安裝完工圖-1



圖 3.7 電力設備安裝完工圖-2



共溶劑及電動力技術實場整治含氣有機物污染之土壤與地下水



圖 3.8 電力設備安裝完工圖-3



3.1.5 廢水處理設施

本計畫將場址內所有陰極端抽除井抽除的含氯污染物地下水抽至增設之廢水處理設施，4 個廢水反應槽最大可容納依序為 1 噸、6 噸、3 噸及 1 噸，如圖 3.9。當抽除的地下水達一定水量後，透過抽水馬達及重力方式移至下個廢水反應槽處理。同時，為有效獲得場址地下水抽至廢水處理設施之總水量，加裝獨立水錶以方便統計。廢水處理設施施工情形如圖 3.9~圖 3.13。



圖 3.9 廢水反應槽



圖 3.10 廢水處理設施管線施工圖



共溶劑及電動力技術實場整治含氯有機物污染之土壤與地下水



圖 3.11 廢水處理設施管線完工圖



圖 3.12 廢水處理設施抽水馬達完工圖



圖 3.13 廢水處理設施鼓風機設備完工



3.2 共溶劑結合電動力整治含氯污染物試驗成果

本計畫期末報告已完成本場址地下水流速流向、地下水水質及含氯有機物濃度調查、模場先導試驗與污染場址熱區整治操作及成效評估，定期監測地下水水質及含氯有機污染物隨時間之變化，並同時進行地下水微生物菌相及廢水處理設施放流水水質及重金屬濃度檢測，主要成果說明如下。

地下水流速流向量測

本計畫針對場址不同位置及深度進行單井流速流向量測，以場址內監測井 MW01、MW02 及 MW03 為量測點位，並於地表深度 4.5 公尺及 7.5 公尺位置進行流速流向量測。根據 3 口監測井不同深度流速量測結果顯示，監測井 MW01 於深度 4.5 公尺為 10 cm/day、深度 7.5 公尺為 26 cm/day；監測井 MW02 於深度 4.5 公尺為 12 cm/day、深度 7.5 公尺為 19 cm/day；監測井 MW03 於深度 4.5 公尺為 18 cm/day，深度 7.5 公尺為 31 cm/day。本場址地下水不同深度之平均流速約介於 13 cm/day~25 cm/day，可推測本場址應為透水性良好之地形結構。於地下水流向方面，於深度 4.5 公尺位置，地下水流以南南東向北北西方向流、深度 7.5 公尺位置以東北向西南方向流。此地下水流向量測結果將作為後續整治井設置之重要參考。

另外，經流速量測結果及污染濃度調查推測，目前場址內低溶解性的含氯污染物大部份存於矽質黏土層，由於土壤間高度的不均質性，含氯污染物極有可能附著於土壤團塊中，難以透過地下水流或抽水處理法移除。因此，地下水中仍有超標的污染濃度。本計畫使用之電動力法搭配共溶劑法，有效將存在於土壤團塊間的污染物溶解並移出團塊後，再透過適當抽水設計抽除地下水之污染物。



共溶劑及電動力技術實場整治含氯有機物污染之土壤與地下水

場址水質及污染調查

本計畫於場址污染整治前，於 110 年 6 月針對目前場址內整治井(A1~A4 及 B1~B4)及監測井(MW01~MW07)進行地下水基本水質特性分析，其包括pH值、電導度、溫度及水位等。根據表 3.4 量測結果，地下水pH值約介於 6.7~7.4，電導度約介於 369~2,104 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 之間，地下水溫度低於 30°C，地下水水位則介於 1.67~1.93 m。

表 3.4 本場址整治井及監測井地下水質量測結果

採樣井編號		A1	A2	A3	A4	B1
採樣日期		6/25	6/25	6/25	6/25	6/25
檢測項目	管制	量測結果				
pH	-	7.32	7.41	7.22	7.3	7.18
導電度($\mu\text{S}/\text{cm}$)	-	420	369	517	1,106	392
水溫($^{\circ}\text{C}$)	-	28.7	28.3	28.1	27.6	27.5
水位(m)		1.74	1.70	1.74	1.75	1.72
採樣井編號		B2	B3	B4	MW01	MW02
採樣日期		6/25	6/25	6/25	6/25	6/25
檢測項目	管制	量測結果				
pH	-	7.47	6.93	7.02	6.8	7.6
導電度($\mu\text{S}/\text{cm}$)	-	378	520	498	467	453
水溫($^{\circ}\text{C}$)	-	28	29.5	29.4	29.2	29.7
水位(m)		1.75	1.81	1.67	1.70	1.85
採樣井編號		MW03	MW04	MW05	MW06	MW07
採樣日期		6/25	6/25	6/25	6/25	6/25
檢測項目	管制	量測結果				
pH	-	7.4	6.9	7.09	6.74	6.67
導電度($\mu\text{S}/\text{cm}$)	-	403	668	449	2,104	1,940
水溫($^{\circ}\text{C}$)	-	28.7	28.3	28.1	27.6	27.5
水位(m)		1.60	1.71	1.93	1.85	1.92



表 3.5 為 110 年 6 月本場址地下水含氯污染物調查結果彙整表。表中顯示本場址超過地下水第二類污染管制標準之關切物質主要為四氯乙烯及三氯乙烯，其他有部份採樣井之順-1,2-二氯乙烯及氯乙烯濃度超標。以下茲就各關切污染物分布情形說明。

1. 四氯乙烯

四氯乙烯部分，本場址整治井以 A1~A3 及 B2~B4 濃度高於監測及管制標準，介於 0.046~0.140 mg/L 之間，顯示場址靠近馬路之地下水下游處為四氯乙烯主要污染區域；另外，監測井 MW02~MW04 四氯乙烯濃度介於 0.105 mg/L 及 0.500 mg/L。

2. 三氯乙烯

本場址地下水中三氯乙烯部分，整治井以 A1~A3 及 B2~B4 濃度高於監測及管制標準，濃度介於 0.025~0.260 mg/L 之間；監測井 MW01~MW06 三氯乙烯濃度介於 0.041~0.420 mg/L 之間。與四氯乙烯相同，仍以靠近馬路之地下水下游處為三氯乙烯主要污染區域。

3. 順-1,2-二氯乙烯

本場址地下水中順-1,2-二氯乙烯，僅有整治井 A1 及 B1 高於監測標準(0.35 mg/L)，濃度為 0.401 及 0.522 mg/L，其餘整治井濃度介於 0.025 及 0.084 mg/L 之間；監測井部份以 MW01 超過管制標準(0.70 mg/L)，其濃度為 2.50 mg/L。

4. 氯乙烯

根據本計畫調查結果，發現本場址地下水氯乙烯污染濃度大部分為未檢出，僅有監測井 MW01 超過管制標準，污染濃度為 0.057 mg/L。



共溶劑及電動力技術實場整治含氯有機物污染之土壤與地下水

表 3.5 地下水含氯有機物檢測結果

採樣井編號			A1	A2	A3	A4	B1
採樣日期			6/25	6/25	6/25	6/25	6/25
檢測項目	監測	管制	檢測結果				
氯乙烯	0.01	0.02	ND	ND	ND	0.005	ND
順-二氯乙烯	0.35	0.7	0.522	0.032	ND	0.085	0.401
三氯乙烯	0.025	0.05	0.129	0.027	0.175	0.025	0.021
四氯乙烯	0.025	0.05	0.078	0.046	0.125	0.015	0.022
採樣井編號			B2	B3	B4	MW01	MW02
採樣日期			6/25	6/25	6/25	6/25	6/25
檢測項目	監測	管制	檢測結果				
氯乙烯	0.01	0.02	ND	ND	0.006	0.057	ND
順-二氯乙烯	0.35	0.7	0.039	0.027	0.025	2.500	0.250
三氯乙烯	0.025	0.05	0.060	0.260	0.160	0.420	0.120
四氯乙烯	0.025	0.05	0.140	0.080	0.060	0.120	0.105
採樣井編號			MW03	MW04	MW05	MW06	MW07
採樣日期			6/25	6/25	6/25	6/25	6/25
檢測項目	監測	管制	檢測結果				
氯乙烯	0.01	0.02	0.007	ND	ND	ND	ND
順-二氯乙烯	0.35	0.7	0.069	0.253	0.010	ND	ND
三氯乙烯	0.025	0.05	0.101	0.260	0.058	0.041	ND
四氯乙烯	0.025	0.05	0.107	0.500	0.019	0.010	ND

MDL：0.005 mg/L



3.2.1 模場先導試驗整治成果

3.2.1.1 場址水質變化

由場址污染調查顯示，整治井 A4 及 B4 檢測出四種含氯污染物，因此模場先導試驗以 A4(注藥井)、B4(抽除井)及 MW03(監測井)進行 4 個月的整治。圖 3.14 為本計畫整治工法整治地下水注藥井(陽極端)、抽除井(陰極端)及監測井 pH 值之變化，整治期間為 6/25 至 9/28。本場址模場先導試驗之地下水 pH 值初始約為 7.02~7.40 之間，從變化趨勢發現，注藥井(A4)的 pH 值在整治期間僅有些微下降，顯示乙醇共溶劑添加下未對地下水水體 pH 值造成顯著影響，隨著共溶劑搭配電動力整治下 pH 值約介於 6.68~7.57 之間，pH 值變化趨於穩定；pH 值能保持穩定之主要原因為放流水迴流至注藥井所導致的結果；至於抽除井(B4)pH 值之變化，整治初期有微上升的情況，主要推測為電動力電解反應下，陰極端產生氫氧根離子所造成的現象，但因整治過程陰極端持續抽水，降低地下水 pH 值的變化幅度，隨整治時間 pH 值變化已趨於穩定，最後 pH 值約介於 6.89~7.67；至於監測井(MW03)的 pH 變化於整治期間幾乎保持穩定。經整治結果顯示，本場址地下水於本計畫整治工法下不會造成地下水 pH 值顯著的變化。

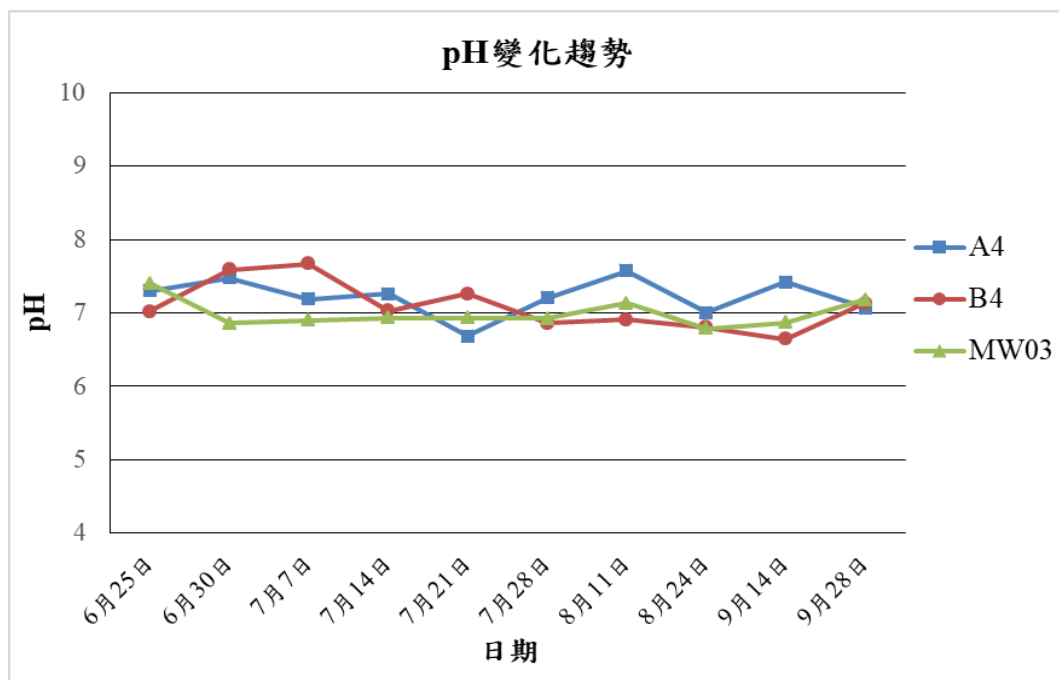


圖 3.14 模場先導試驗之地下水 pH 值變化



共溶劑及電動力技術實場整治含氯有機物污染之土壤與地下水

圖 3.15 為本計畫整治工法整治地下水注藥井(陽極端)、抽除井(陰極端)及監測井電導度之變化趨勢。本場址模場先導試驗之地下水電導度值初始約為 403 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ~1,106 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 之間。於乙醇共溶劑搭配電動力整治下觀察注藥井(A4)地下水電導度變化發現，於整治過程電導度隨時間逐漸下降，爾後則趨於平緩。由於電導度會因 pH 值的變化而改變，而本計畫因放流水迴流至陽極端降低 pH 值的變化，使後期的電導度變化趨於平穩，其最後導電度為 575 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ；至於抽除井(B4)電導度係隨著處理時間有些微上升趨勢，主要推測為注藥井乙醇共溶劑注入後，部份乙醇降解為其他中間產物，並往下游處抽除井移動，因此導致整治初期抽除井電導度有上升現象，然而因抽除井持續的抽除地下水，最後電導度已趨於平穩，其電導度為 752 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。監測井(MW03)之電導度於處理期間保持於穩定的狀態。經整治結果顯示，本場址整治井(注藥井及抽除井)於放流水迴流及陰極抽水的作用下能穩定地下水中之電導度值，未發生顯著變化。

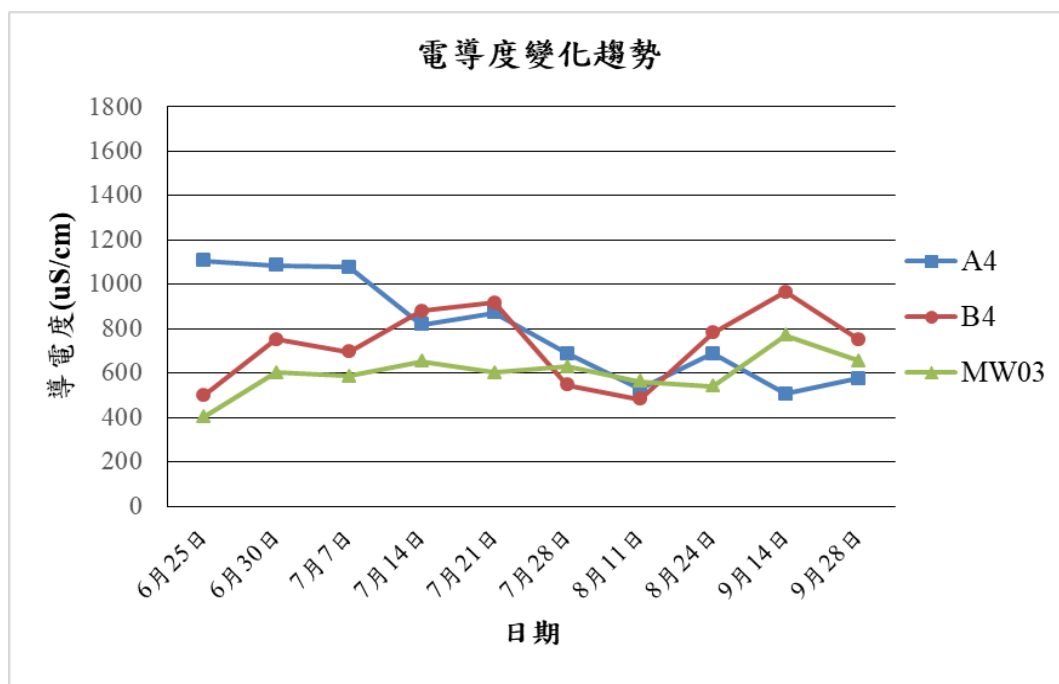


圖 3.15 模場先導試驗之地下水電導度值變化



圖 3.16 為本計畫整治工法整治地下水注藥井(陽極端)、抽除井(陰極端)及監測井溶氧之變化。本場址模場先導試驗之地下水溶氧值初始約為 1.77 mg/L~2.70 mg/L 之間。於乙醇共溶劑搭配電動力整治下觀察注藥井(A4)地下水溶氧變化發現，於整治過程溶氧隨整治時間有些微上升趨勢。其主要為電動力操作下，陽極端會生成氧氣產物，進而導致地下水中的溶氧值升高；另外，經過曝氣之放流水迴流至陽極端也將提升溶氧值。經整治後，地下水之溶氧值約介於 2.20 mg/L~4.10 mg/L，相較於整治初始已有升高趨勢。至於抽除井(B4)之溶氧變化則較為穩定，整治過程變化約介於 2.50 mg/L~3.21 mg/L 之間。監測井(MW03)於整治過程變化約介於 1.77 mg/L~2.29 mg/L 之間，未有顯著變化。

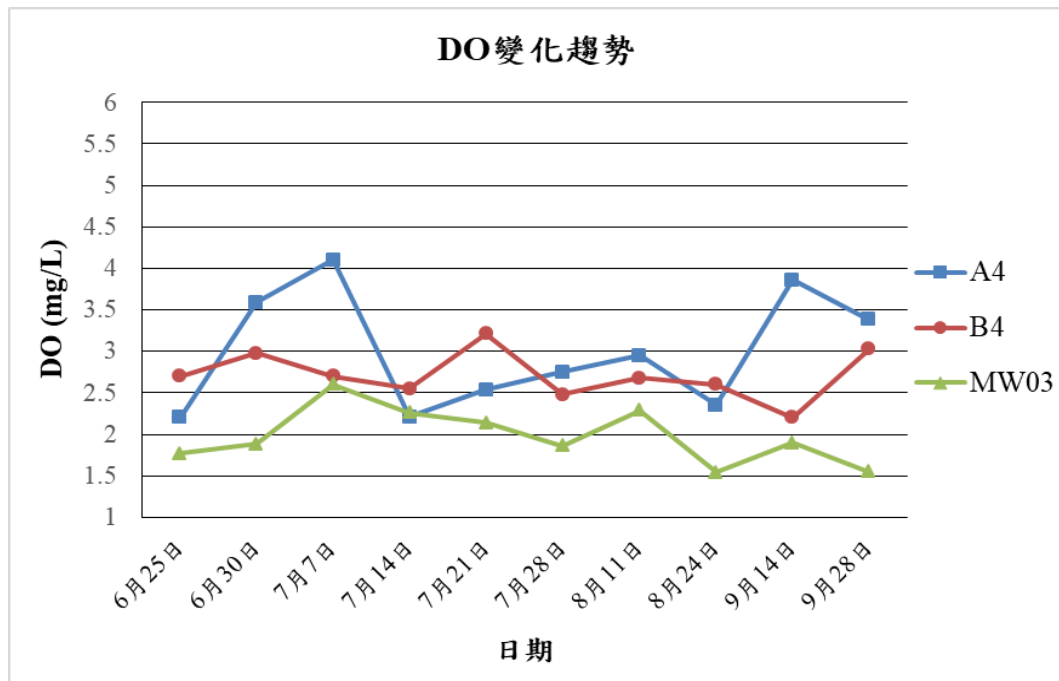


圖 3.16 模場先導試驗之地下水溶氧值變化



共溶劑及電動力技術實場整治含氯有機物污染之土壤與地下水

圖 3.17 為本計畫整治工法整治下注藥井(陽極端)、抽除井(陰極端)及監測井地下水氧化還原電位之變化趨勢，用以反映地下水體氧化還原能力的狀態。從圖得知，本場址模場先導試驗之地下水氧化還原電位初始約為 147 mV ~ 169 mV，屬正電位狀態。從注藥井(A4)地下水氧化還原電位之變化得知，氧化還原電位隨著整治時間有微上升的趨勢，主要推測為操作電動力法產生的電解效應導致氧化還原電位上升的原因。在整治時間約介於 107 mV ~ 182 mV 之間，相較於整治初期已有上升趨勢。至於抽除井(B4)地下水氧化還原電位之變化趨勢，從圖發現，在本計畫整治工法操作下，抽除井之地下水氧化還原電位呈現持續下降趨勢，經整治後，氧化還原電位已從 165 mV 降至 -69 mV，已從正電位明顯改變為還原電位。整體而言，經本整治工法整治下地下水水質於注藥井呈現正電位，有利陽極端直接氧化污染物，於抽除井屬於易還原之狀態，此部份推測可輔助微生物降解含氯污染物。監測井(MW03)部份，推測受到抽除井的影響導致氧化還原電位有些微下降趨勢，但仍處於正電位的狀態。

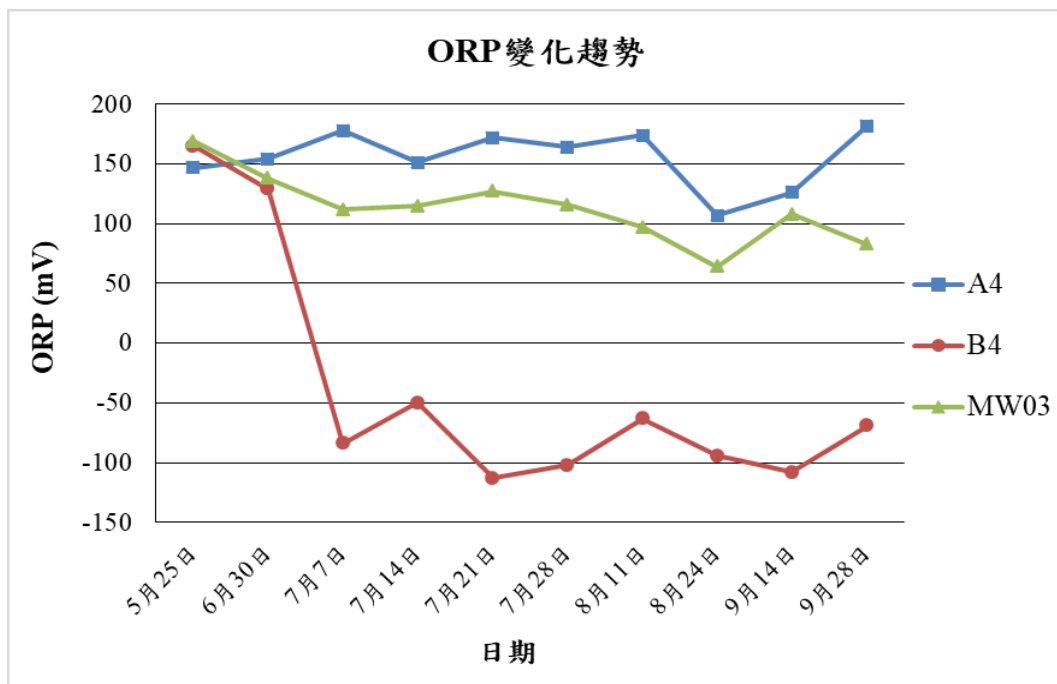


圖 3.17 模場先導試驗之地下水氧化還原電位變化



3.2.1.2 含氯污染物濃度變化

本場址模場先導試驗整治以定期檢測含氯污染物濃度，觀察本計畫整治成效。圖 3.18 為注藥井、抽除井及監測井地下水四氯乙烯濃度變化。注藥井(A4)四氯乙烯初始濃度為 0.015 mg/L，當乙醇注入後，污染濃度大幅上升至 0.12 mg/L，其主要為乙醇添加後大幅提升土壤中殘留的四氯乙烯溶解釋出，故造成四氯乙烯濃度顯著上升；後續透過電動力法產生之電滲透流驅動下，將溶解於地下水之四氯乙烯往抽除井方向移動，另外微生物效應也可協助污染物的降解，導致四氯乙烯於整治後期有效降低其濃度，其整治後濃度已為 N.D。

至於抽除井(B4)四氯乙烯的濃度變化，抽除井地下水之四氯乙烯初始濃度約 0.06 mg/L，於乙醇搭配電動力操作下，溶解之四氯乙烯污染物將從注藥井往抽除井方向移動，導致在整治初期四氯乙烯濃度亦有明顯上升現象；整治後期於抽除井持續的抽水及污染物陰極還原反應下，使四氯乙烯污染物有效移除，經整治後濃度已為 N.D。另外，監測井(MW03)四氯乙烯初始濃度約 0.10 mg/L，在整治過程中濃度變化保持平緩的狀態，最後濃度約 0.11 mg/L，其四氯乙烯濃度與整治初期相近。從監測井濃度得知，本整治工法操作下不僅有效降解四氯乙烯污染物，且將污染物控制在污染區域內，並未導致污染擴散的情形發生。整治井(A4 及 B4)持續進行污染監測後得知，其四氯乙烯濃度未有回升的現象發生，顯示本整治技術的有效性。

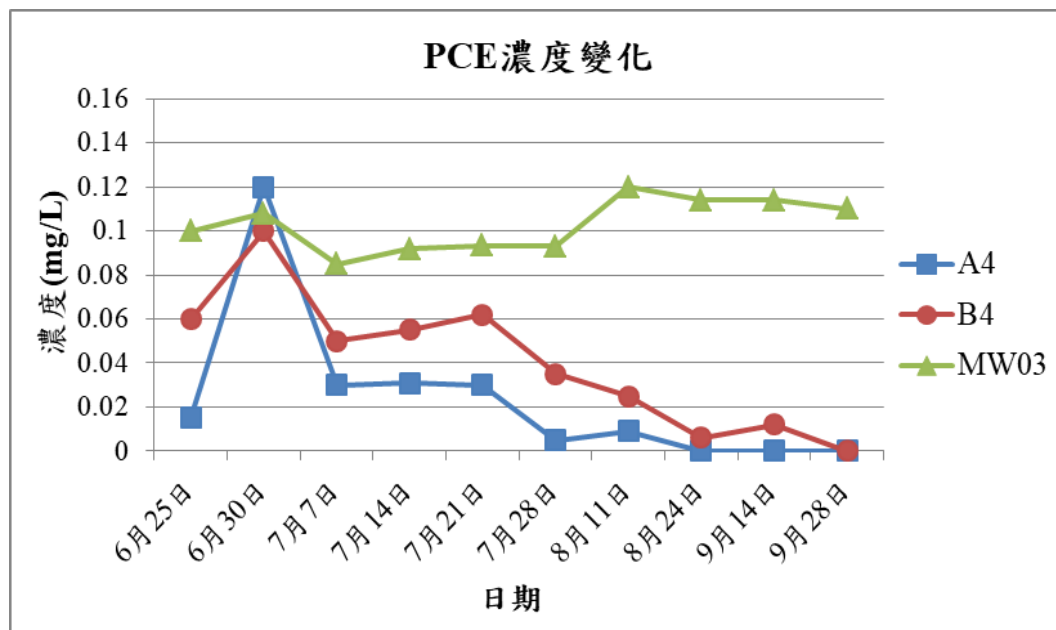


圖 3.18 模場先導試驗之地下水四氯乙烯變化



共溶劑及電動力技術實場整治含氯有機物污染之土壤與地下水

圖 3.19 為注藥井、抽除井及監測井地下水三氯乙烯濃度變化。從注藥井(A4)初始值得知，三氯乙烯濃度約 0.025 mg/L，經乙醇注入後，三氯乙烯濃度於整治初期亦有上升的現象，其濃度上升主要推測為乙醇添加後協助三氯乙烯污染物的釋出及四氯乙烯降解產物所導致的結果。然而，隨著整治時間，三氯乙烯污染物濃度持續下降，目前濃度已為 N.D。至於抽除井(B4)三氯乙烯的濃度變化，抽除井地下水三氯乙烯濃度初始約 0.16 mg/L，整治初期有上升現象，爾後隨處理時間逐步下降，目前三氯乙烯濃度為 0.017 mg/L，去除效率約 89%，已低於地下水監測標準(0.025 mg/L)；同時，觀察監測井(MW03)三氯乙烯濃度變化得知，監測井三氯乙烯濃度變化保持平緩，濃度介於 0.078 mg/L 至 0.12 mg/L 之間，顯示三氯乙烯污染物仍侷限於污染整治區域內，未有污染擴散的情形發生。

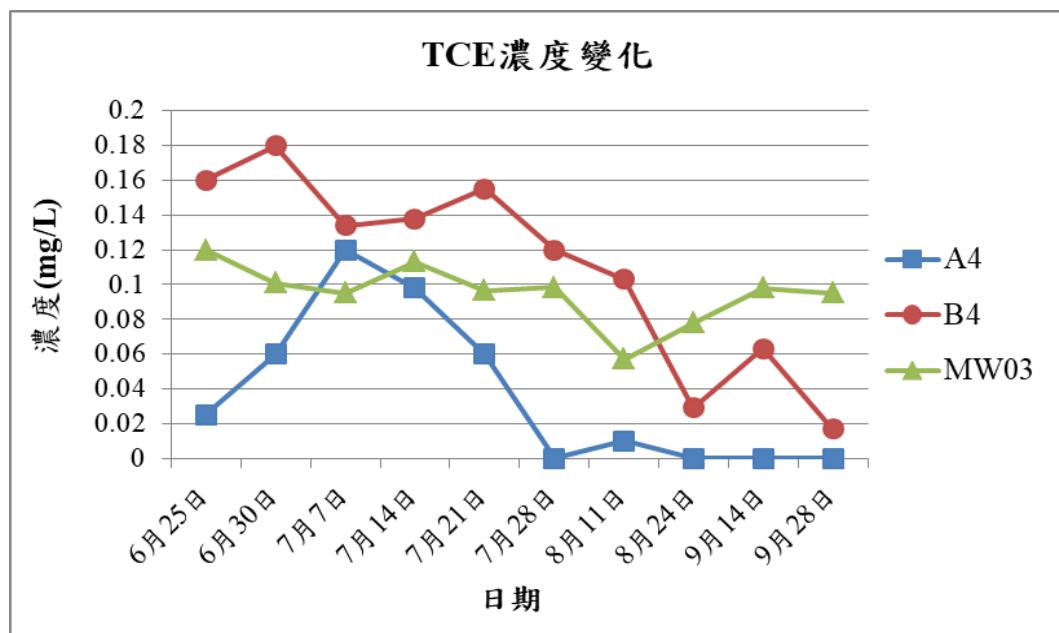


圖 3.19 模場先導試驗之地下水三氯乙烯變化



圖 3.20 為注藥井、抽除井及監測井地下水順-1,2-二氯乙烯濃度變化。從注藥井(A4)初始值得知，注藥井順-1,2-二氯乙烯濃度為 0.085 mg/L，低於監測標準(0.35 mg/L)。經乙醇共溶劑搭配電動力操作後，整治初期注藥井地下水順-1,2-二氯乙烯濃度有些微上升趨勢，其濃度提升主要推測為三氯乙烯降解產物所導致的結果。然而，隨著整治時間注藥井地下水順-1,2-二氯乙烯濃度已明顯下降，最後濃度為 0.022 mg/L。至於抽除井(B4)順-1,2-二氯乙烯的濃度變化，抽除井地下水初始濃度為 0.025 mg/L，於整治期間濃度變化呈現微上升的趨勢，但其濃度仍遠低於地下水監測標準；檢測本場監測井(MW03)地下水順-1,2-二氯乙烯濃度得知，監測井順-1,2-二氯乙烯濃度變化保持平緩的狀態。

圖 3.21 為注藥井、抽除井及監測井地下水氯乙烯濃度變化。從注藥井(A4)初始值得知，注藥井氯乙烯濃度約 0.005 mg/L。經乙醇共溶劑搭配電動力操作後，注藥井地下水氯乙烯濃度於整治初期有微上升趨勢，之後再隨著整治時間逐漸下降，目前濃度已為 N.D。至於抽除井(B4)氯乙烯的濃度變化，與注藥井相似，濃度皆有先上升再下降的趨勢，目前濃度皆低於地下水監測標準(0.01 mg/L)。另外，監測井(MW03)地下水氯乙烯濃度變化較為平緩，濃度亦低於監測標準。



共溶劑及電動力技術實場整治含氯有機物污染之土壤與地下水

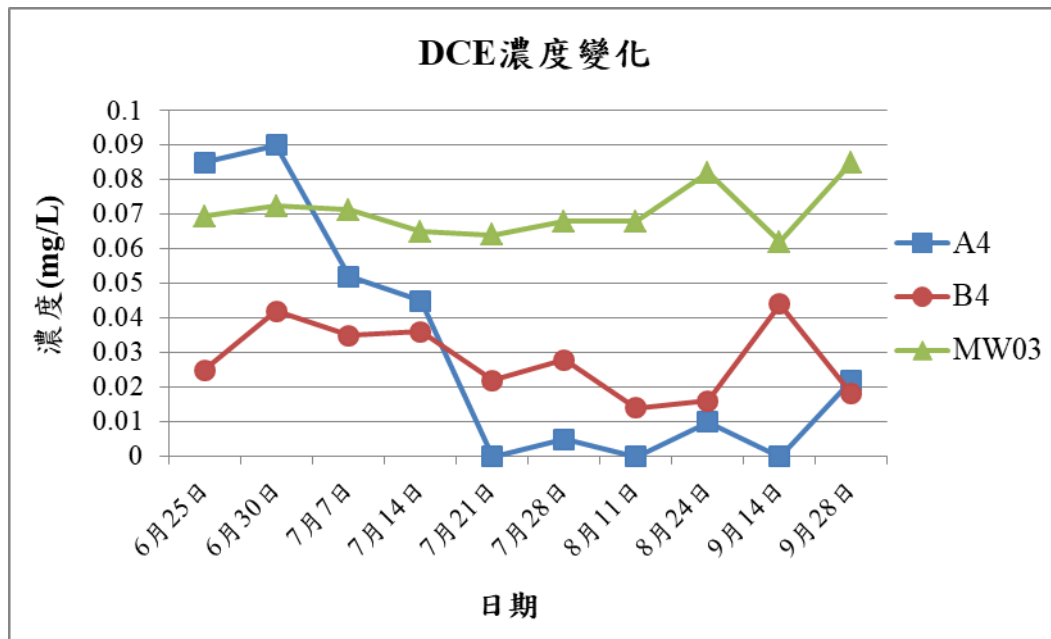


圖 3.20 模場先導試驗之地下水順-1,2-二氯乙烯變化

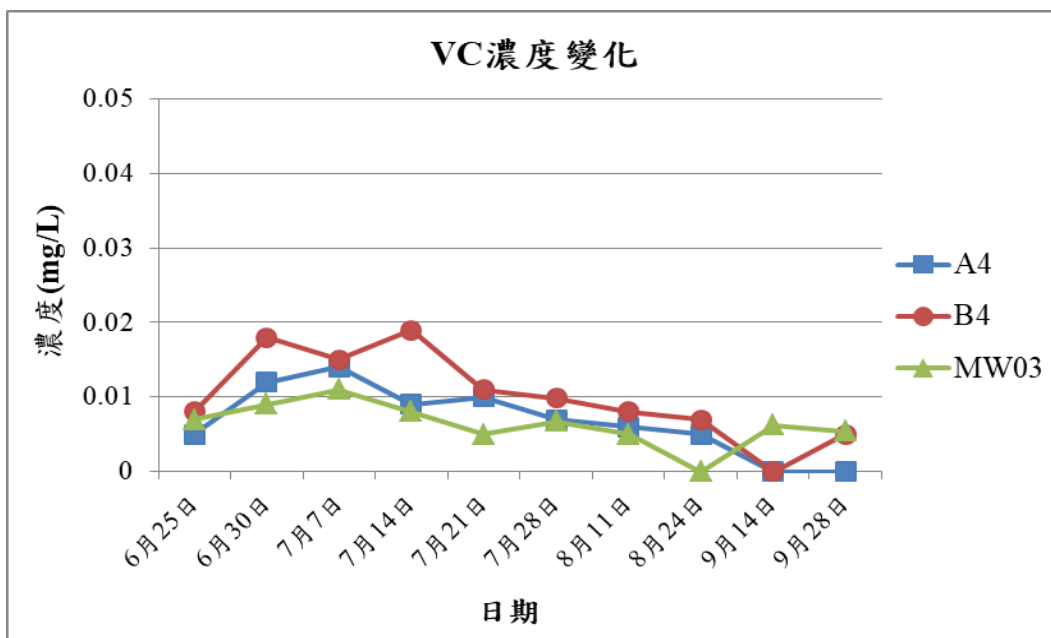


圖 3.21 模場先導試驗之地下水氯乙烯變化



3.2.2 污染場址熱區整治成效

3.2.2.1 場址水質變化

經 4 個月模場先導試驗整治後，其場址水質能保持於穩定狀態，且含氯污染物可有效移除。因此，污染場址熱區整治將參照模場先導試驗參數進行操作，以觀察調整整治範圍下其水質變化及含氯污染物之整治效率。

圖 3.22 及圖 3.23 為本計畫整治下污染場址熱區地下水注藥井(陽極端)及抽除井(陰極端)之 pH 值變化，整治期間為 9/28 至 1/4。污染場址熱區之地下水 pH 值初始介於 7.21~7.35 之間，從變化趨勢發現，注藥井(A1~A3)的 pH 值在整治期間保持平穩狀態，隨著共溶劑搭配電動力整治下最終 pH 值約介於 6.9~7.1 之間，pH 值因放流水迴流的條件下保持穩定；至於抽除井(B1~B3)pH 值之變化，整治過程因陰極端持續抽水，降低地下水 pH 值的變化幅度，最終 pH 值約介於 6.98~7.2。監測井的 pH 變化於整治期間幾乎保持穩定。

圖 3.24 及圖 3.25 為本計畫整治下污染場址熱區地下水注藥井(A1~A3)及抽除井(B1~B3)電導度之變化。污染場址熱區之地下水電導度值初始約為 329 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ~485 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 之間。於乙醇共溶劑搭配電動力法整治下發現，注藥井(A1~A3)地下水電導度於整治期間大致上保持平穩，電導度介於 300~600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 之間，其最終電導度約為 316 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ~488 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 之間；至於抽除井(B1~B3)電導度係隨著處理時間有些微上升趨勢，然而因持續的抽除地下水，最終電導度變化已趨於平緩，介於 412 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ~606 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 之間。根據整治結果顯示，將試驗範圍調整至污染場址熱區整治下，地下水 pH 值及電導度仍可保持穩定狀態，後續可依照此操作條件進行第二年污染整治工作。



共溶劑及電動力技術實場整治含氯有機物污染之土壤與地下水

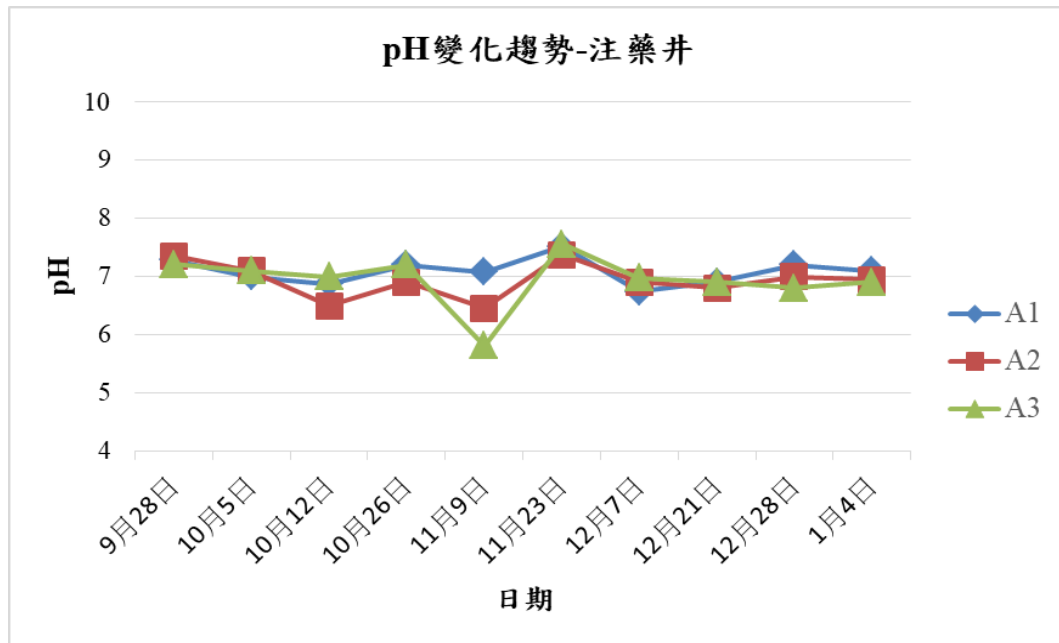


圖 3.22 污染場址熱區之地下水 pH 值變化-注藥井

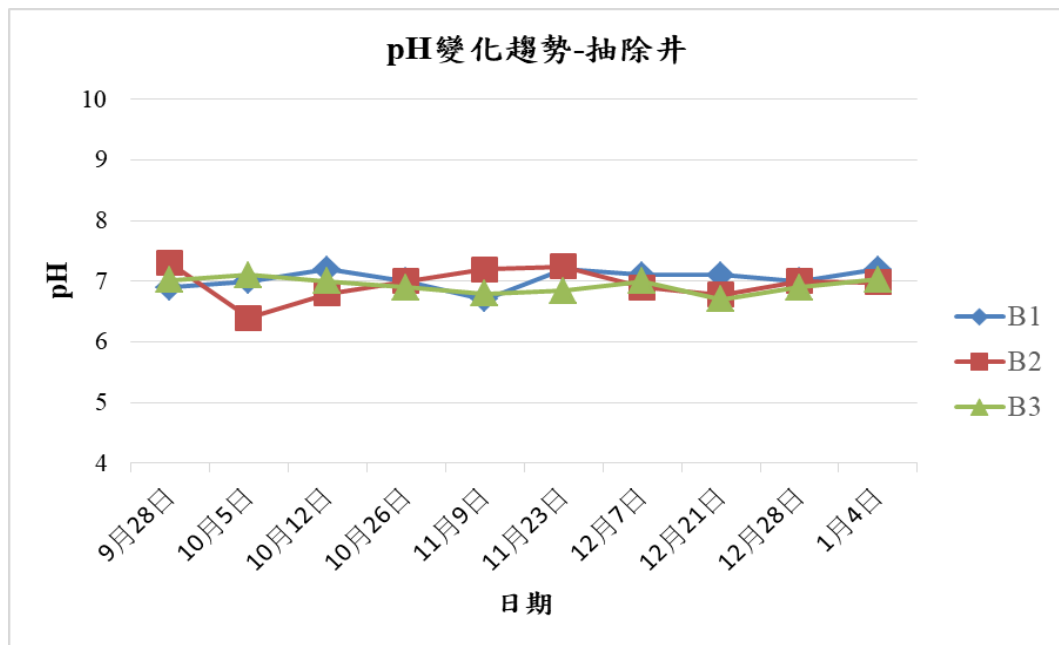


圖 3.23 污染場址熱區之地下水 pH 值變化-抽除井

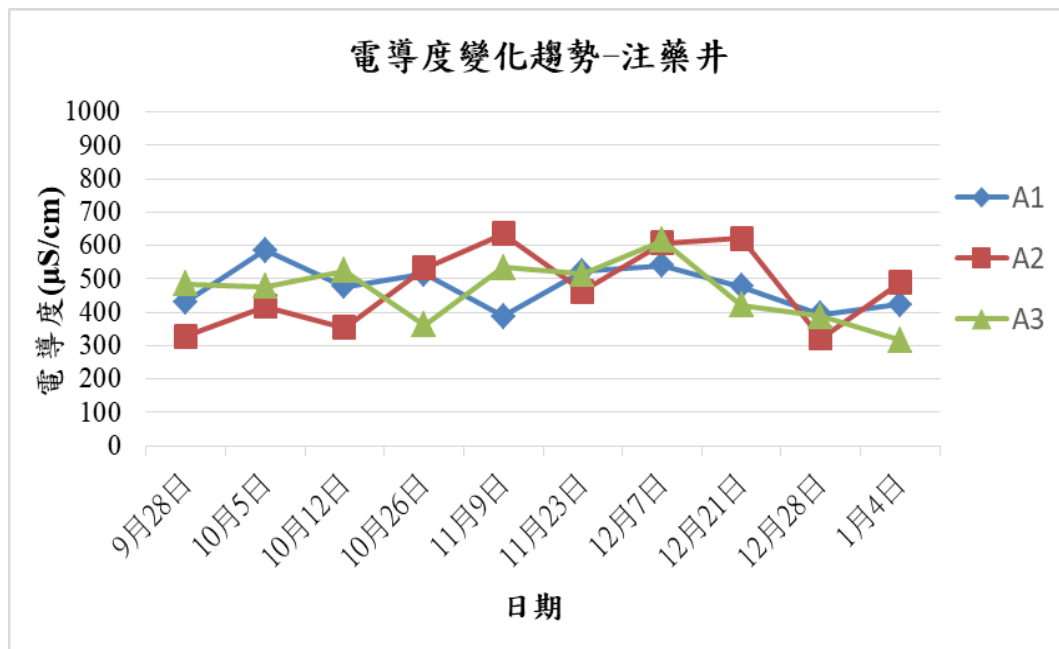


圖 3.24 污染場址熱區之地下水電導度變化-注藥井

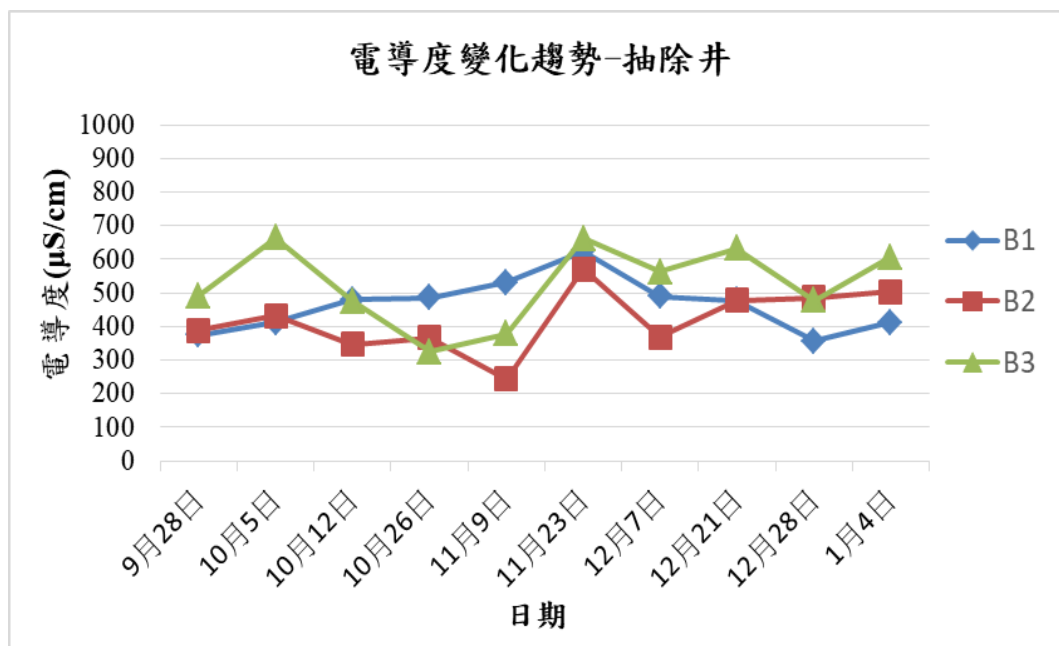


圖 3.25 污染場址熱區之地下水電導度變化-抽除井



圖 3.26 及圖 3.27 為本計畫整治下污染場址熱區地下水注藥井(A1~A3)及抽除井(B1~B3)之溶氧變化。污染場址熱區之注藥井地下水溶氧值初始約為 2.7 mg/L~3.2 mg/L 之間。於乙醇共溶劑搭配電動力整治下發現，地下水溶氧於整治期間隨時間有上升的趨勢，經整治後，地下水之溶氧值約介於 2.9 mg/L~3.72 mg/L。至於抽除井之溶氧變化則較為穩定，整治過程變化維持於 1.5 mg/L~3.5 mg/L 之間，未有明顯的變化趨勢，整治後其地下水之溶氧值約介於 1.96 mg/L~2.78 mg/L，相較於整治前未有明顯變化。

圖 3.28 及圖 3.29 為本計畫整治下污染場址熱區地下水注藥井(A1~A3)及抽除井(B1~B3)之氧化還原電位變化。污染場址熱區地下水之氧化還原電位初始值約為 89 mV~152 mV。從注藥井(A1~A3)地下水氧化還原電位之變化得知，氧化還原電位隨著整治時間有微上升的趨勢，其整治後介於 142 mV~186 mV 之間，相較於整治初期已有上升。至於抽除井(B1~B3)地下水氧化還原電位之變化，從趨勢圖發現，在本計畫整治工法操作下，抽除井之地下水氧化還原電位呈現下降趨勢，爾後趨於平緩。經整治後，氧化還原電位介於-83 mV~-128 mV。整體而言，經本整治工法整治下，地下水氧化還原電位於注藥井呈現正電位，抽除井則趨向負電位。

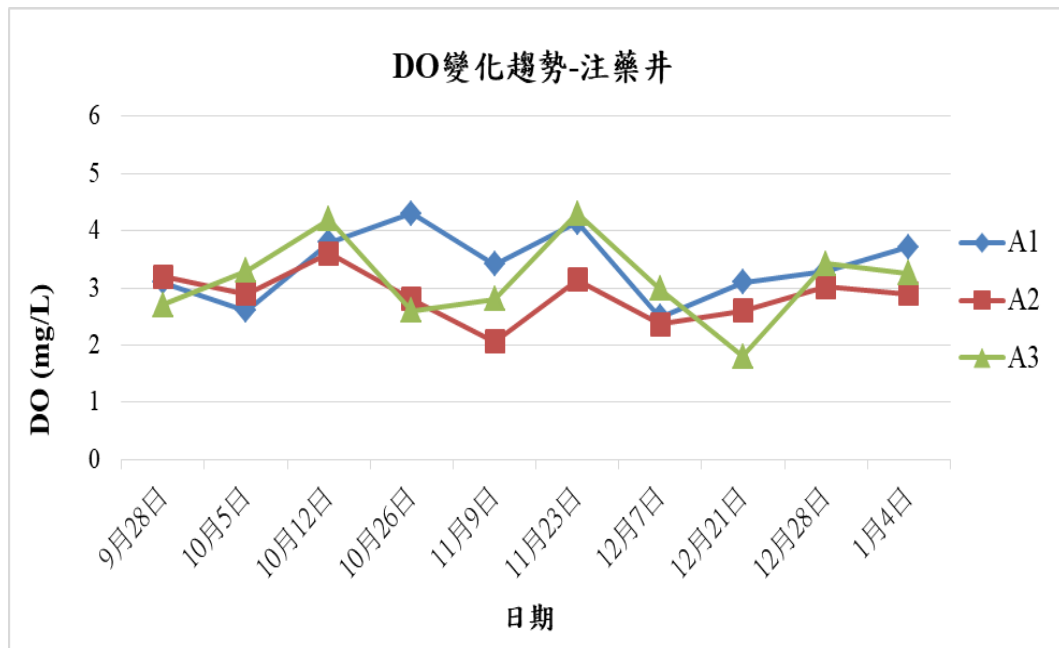


圖 3.26 污染場址熱區之地下水溶氧變化-注藥井

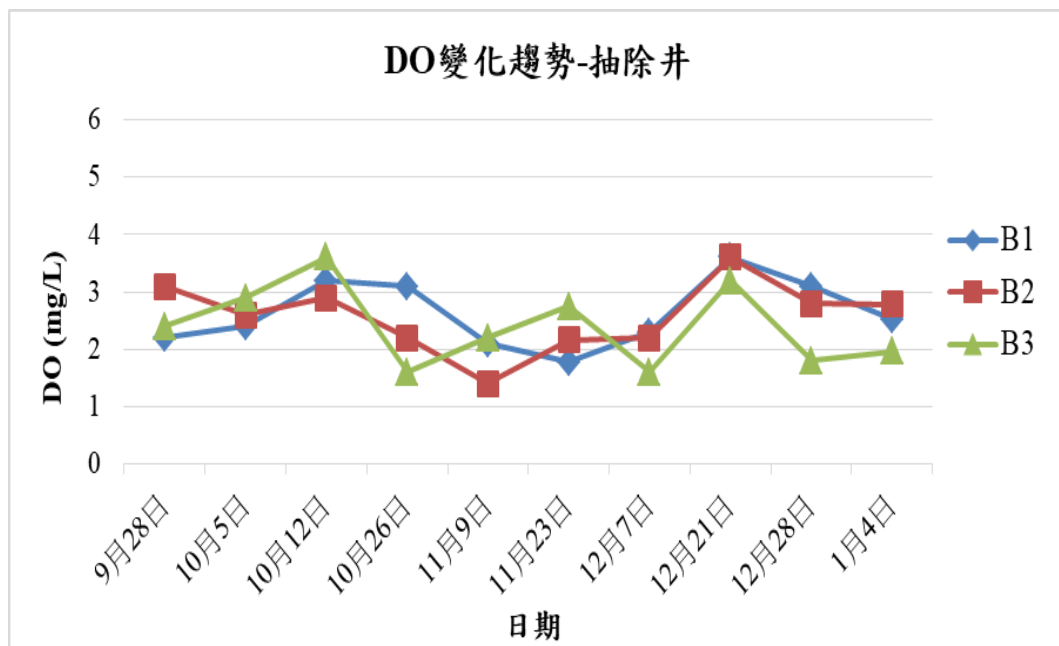


圖 3.27 污染場址熱區之地下水溶氧變化-抽除井



共溶劑及電動力技術實場整治含氯有機物污染之土壤與地下水

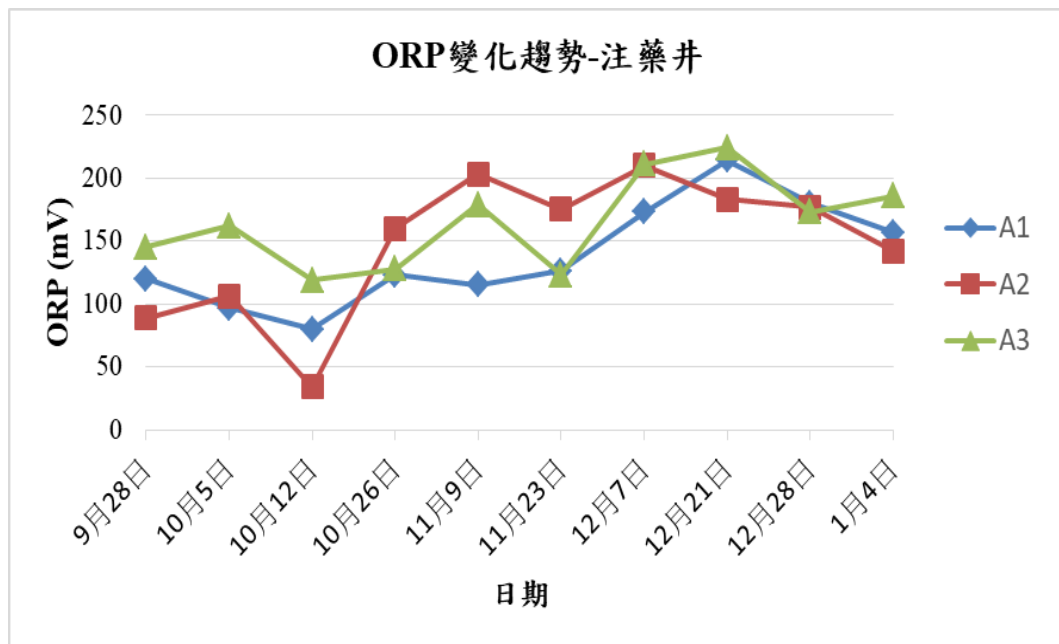


圖 3.28 污染場址熱區之地下水氧化還原電位變化-注藥井

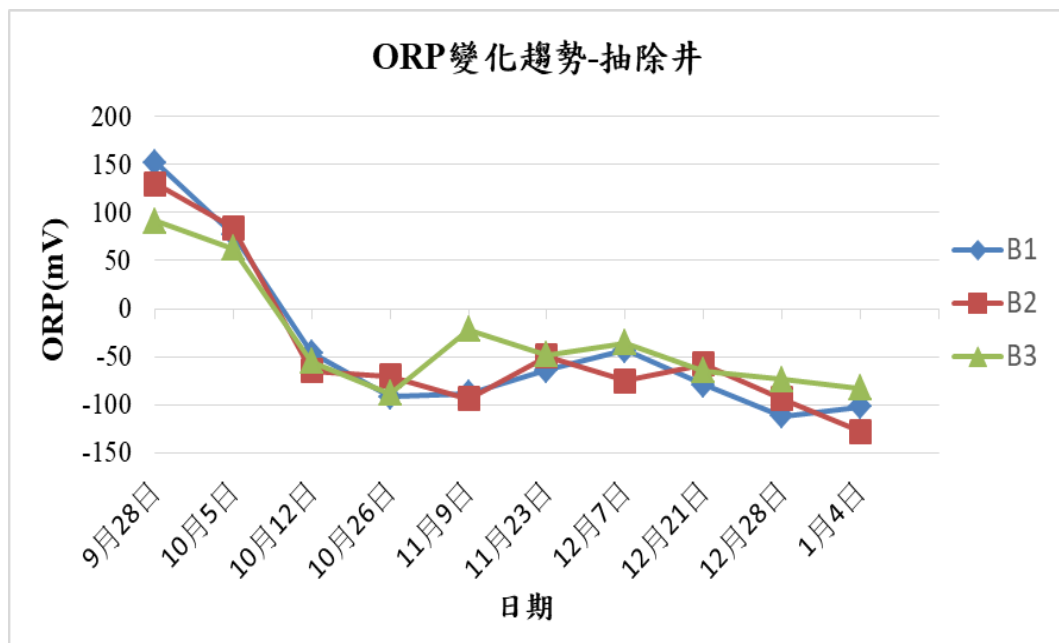


圖 3.29 污染場址熱區之地下水氧化還原電位變化-抽除井



3.2.2.2 含氯污染物濃度變化

污染場址熱區整治以每兩周定期檢測含氯污染物濃度，觀察污染整治成效。圖 3.30 為注藥井、抽除井及監測井地下水四氯乙烯濃度變化。注藥井(A1~A3)四氯乙烯初始濃度介於 0.042 mg/L ~0.125 mg/L，當乙醇注入後，污染濃度大幅上升至 0.254 mg/L ~2.15 mg/L，其主要因乙醇添加後促進土壤中殘留的四氯乙烯快速溶解釋出，故造成四氯乙烯濃度顯著上升；後續透過均勻的電滲透流驅動下，將溶解於地下水之四氯乙烯快速往抽除井方向移動，另外微生物效應也可協助污染物的降解，導致四氯乙烯於整治期間能有效降低濃度，其整治後 A1 及 A3 注藥井濃度已為 N.D，而 A2 注藥井為 0.006 mg/L，目前皆已符合地下水監測標準。

至於抽除井(B1~B3)四氯乙烯的濃度變化，抽除井地下水之四氯乙烯初始濃度約 0.02 mg/L~0.13 mg/L，於乙醇搭配電動力操作下，溶解之四氯乙烯污染物將從注藥井往抽除井方向移動，導致在整治初期四氯乙烯濃度亦有明顯上升現象；整治期間因抽除井持續的抽水及污染物陰極還原反應下，使四氯乙烯污染物有效移除，目前抽除井濃度亦符合地下水監測標準(0.025 mg/L)。另外，監測井 MW01 及 MW04 四氯乙烯初始濃度為 0.12 mg/L 及 0.5 mg/L，在整治過程中濃度變化保持相對平緩狀態，最終濃度為 0.105 mg/L 及 0.488 mg/L，其四氯乙烯濃度與整治初期相近；監測井 MW06 及 MW07 於整治過程濃度則維持於 N.D。從監測井濃度得知，本整治工法操作下可有效降解四氯乙烯污染物，且污染物仍侷限於污染區域內，未有污染擴散的情形發生。



共溶劑及電動力技術實場整治含氯有機物污染之土壤與地下水

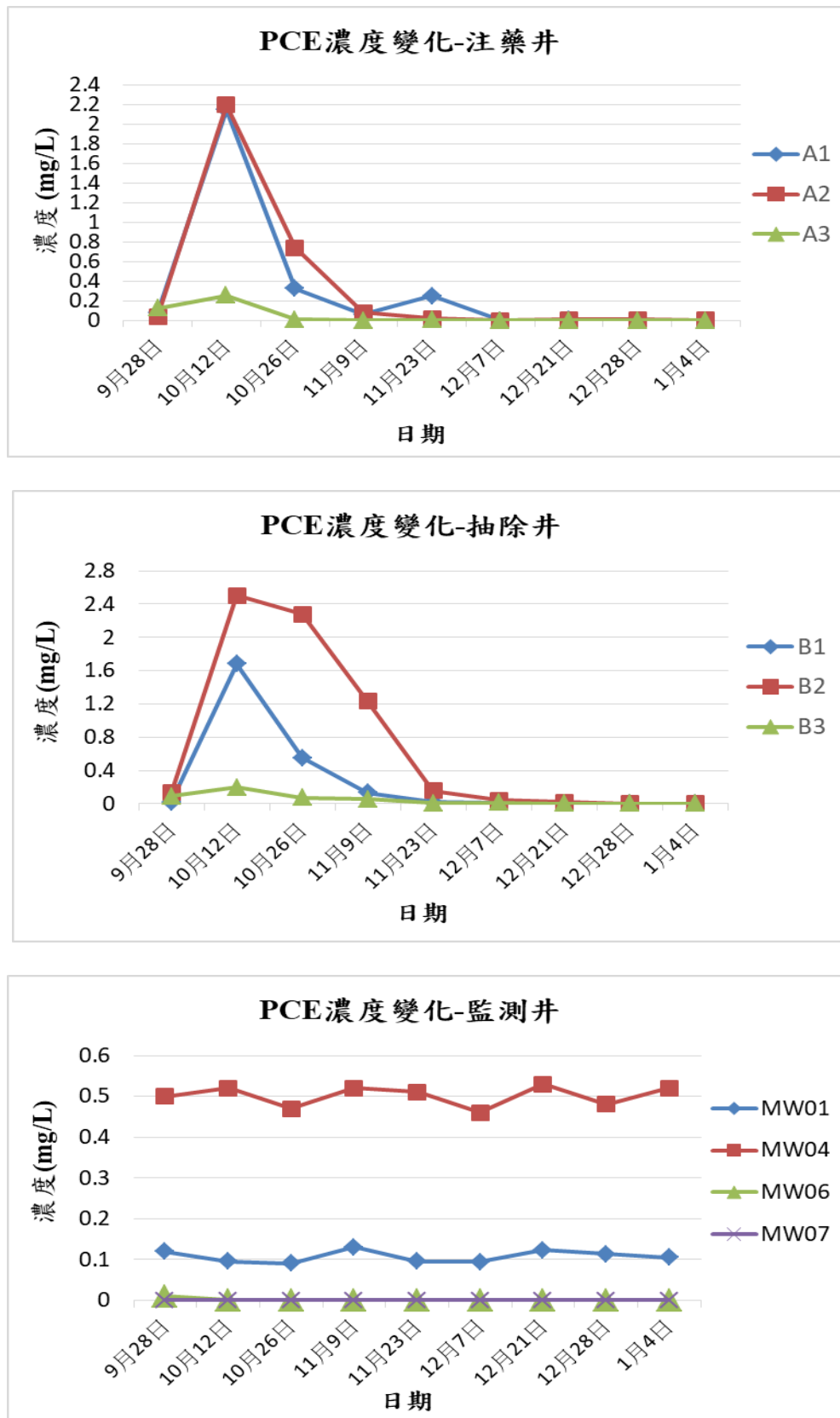


圖 3.30 污染場址熱區之地下水四氯乙烯濃度變化



圖 3.31 為注藥井、抽除井及監測井地下水三氯乙烯濃度變化。從注藥井(A1~A3)初始值得知，三氯乙烯濃度約 0.032 mg/L~0.175 mg/L，經乙醇注入後，三氯乙烯濃度於整治初期亦有顯著上升，其主要推測為乙醇添加後協助土壤孔隙中三氯乙烯污染物的釋出及四氯乙烯降解產物所導致的結果。然而，隨著整治時間，三氯乙烯污染物濃度持續下降，目前濃度已為 N.D。

至於抽除井(B1~B3)三氯乙烯的濃度變化，抽除井地下水三氯乙烯濃度初始約 0.02 mg/L~0.26 mg/L，與注藥井有相同的變化趨勢，整治初期濃度有明顯上升現象，爾後隨處理時間有效降低，目前三氯乙烯濃度為 0.005 mg/L~0.012 mg/L，相較於初始濃度，去除效率可達約 75%，已低於地下水監測標準(0.025 mg/L)；同時，觀察監測井三氯乙烯濃度變化得知，監測井 MW01 及 MW04 三氯乙烯濃度變化同樣保持平緩，MW06 及 MW07 濃度為 N.D，顯示地下水三氯乙烯污染物可有效移除且未造成其他區域之污染。



共溶劑及電動力技術實場整治含氯有機物污染之土壤與地下水

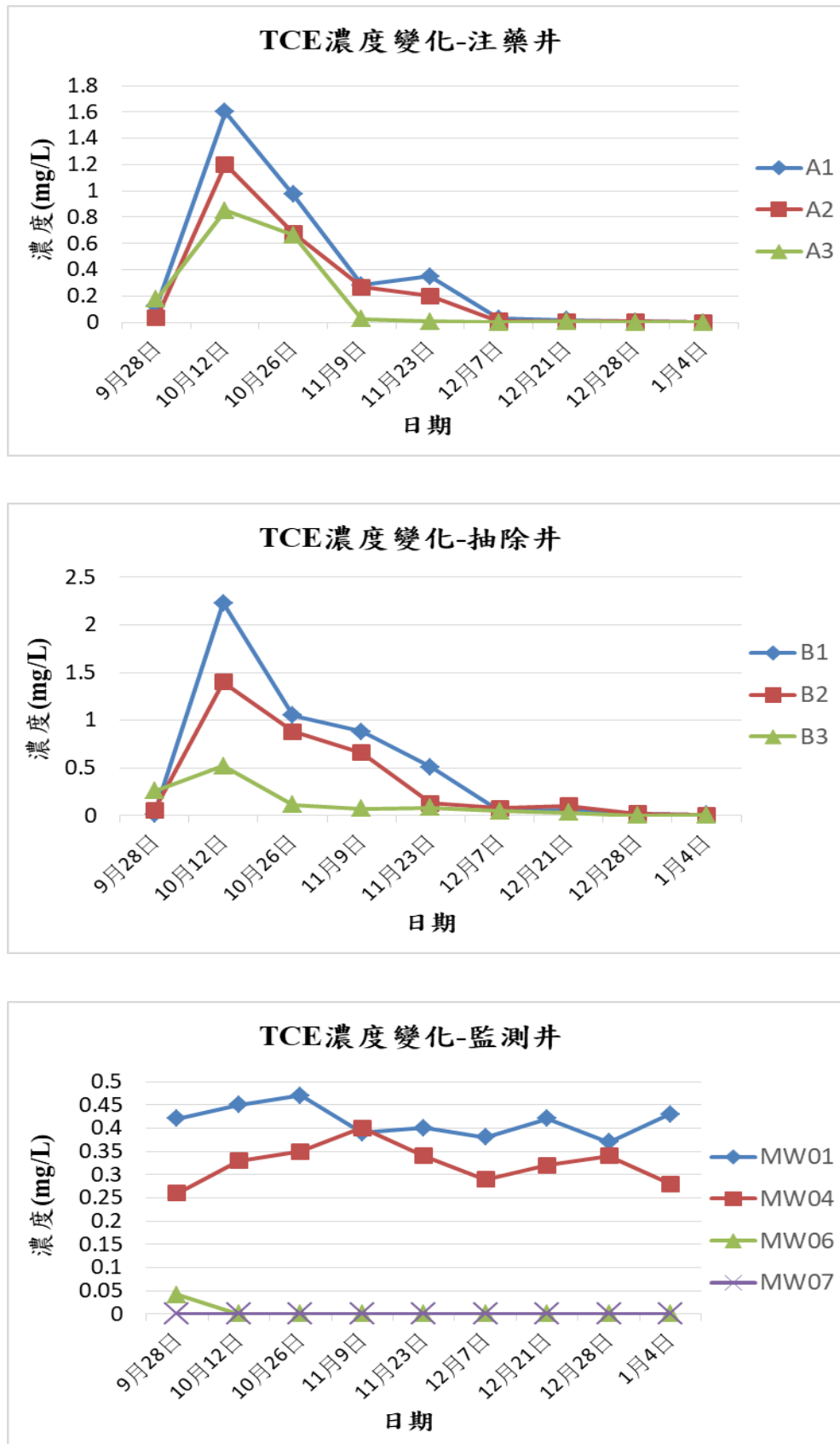


圖 3.31 污染場址熱區之地下水三氯乙烯濃度變化



圖 3.32 為注藥井、抽除井及監測井地下水順-1,2-二氯乙烯濃度變化。從注藥井(A1~A3)初始值得知，注藥井順-1,2-二氯乙烯濃度介於 0.03 mg/L ~0.522 mg/L，低於管制標準(0.70 mg/L)。經乙醇共溶劑搭配電動力操作下，整治初期注藥井地下水順-1,2-二氯乙烯濃度有明顯上升趨勢，其濃度提升主要推測為三氯乙烯降解產物所導致的結果。然而，隨著整治時間注藥井地下水順-1,2-二氯乙烯濃度已明顯下降，最終濃度介於 0.01 mg/L~0.025 mg/L，目前已低於監測標準(0.35 mg/L)。至於抽除井(B1~B3)順-1,2-二氯乙烯的濃度變化，抽除井地下水初始濃度為 0.035 mg/L~0.42 mg/L，於整治初期濃度呈現顯著上升趨勢，爾後隨處理時間降低，目前皆低於地下水監測標準；檢測監測井(MW01、MW04、MW06 及 MW07)地下水順-1,2-二氯乙烯濃度得知，監測井順-1,2-二氯乙烯濃度變化保持平緩狀態。

圖 3.33 為注藥井、抽除井及監測井地下水氯乙烯濃度變化。經乙醇共溶劑搭配電動力操作後，注藥井(A1~A3)地下水氯乙烯濃度於整治初期有微上升趨勢，之後再隨著整治時間逐漸下降，目前濃度已為 N.D。至於抽除井(B1~B3)氯乙烯的濃度變化亦與注藥井變化相近，整治期間濃度先上升再下降，目前濃度皆低於地下水監測標準(0.01 mg/L)。另外，監測井地下水氯乙烯濃度變化較為平緩，濃度亦低於 0.006 mg/L 以下，符合地下水監測標準。



共溶劑及電動力技術實場整治含氯有機物污染之土壤與地下水

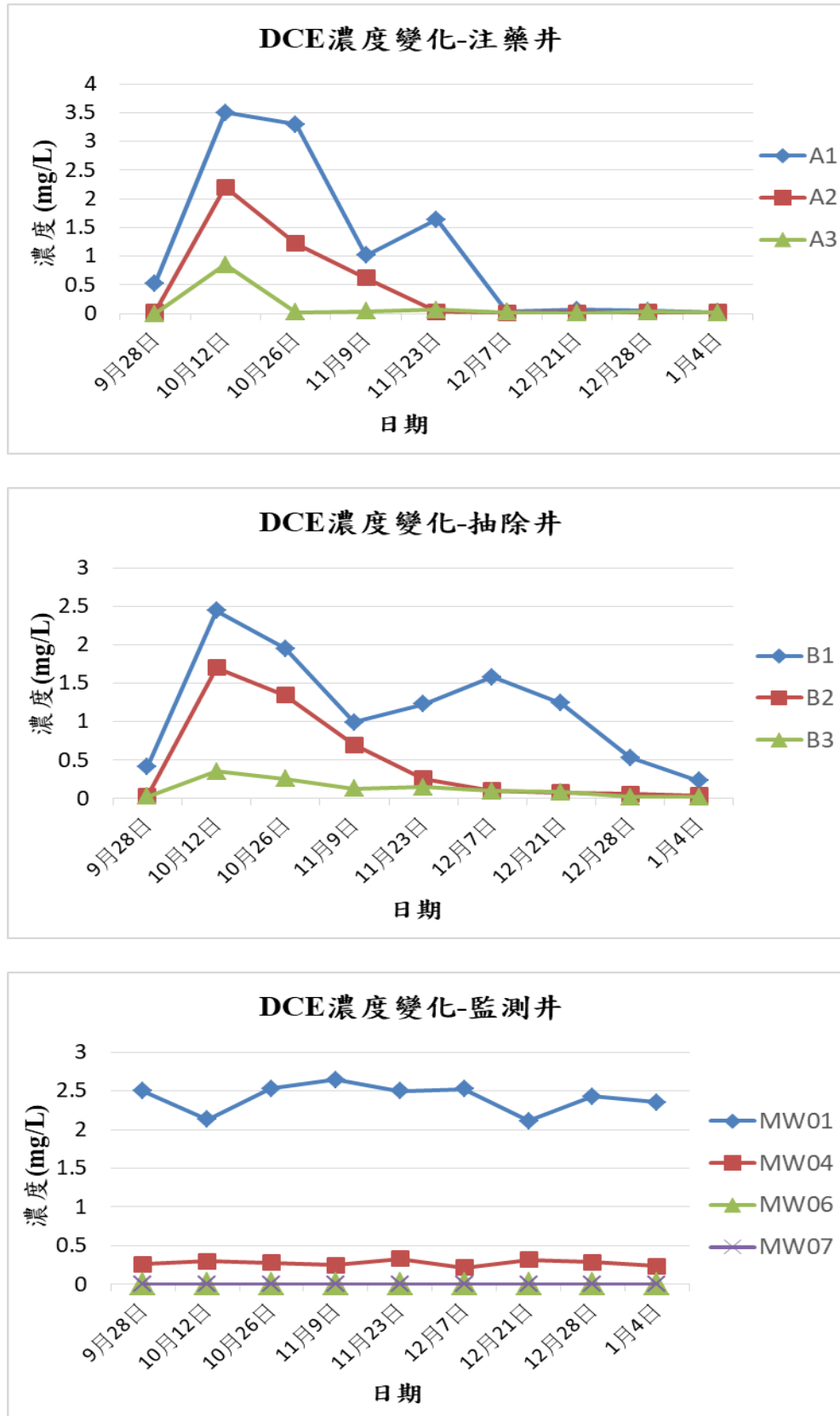


圖 3.32 污染場址熱區之地下水二氯乙烯濃度變化

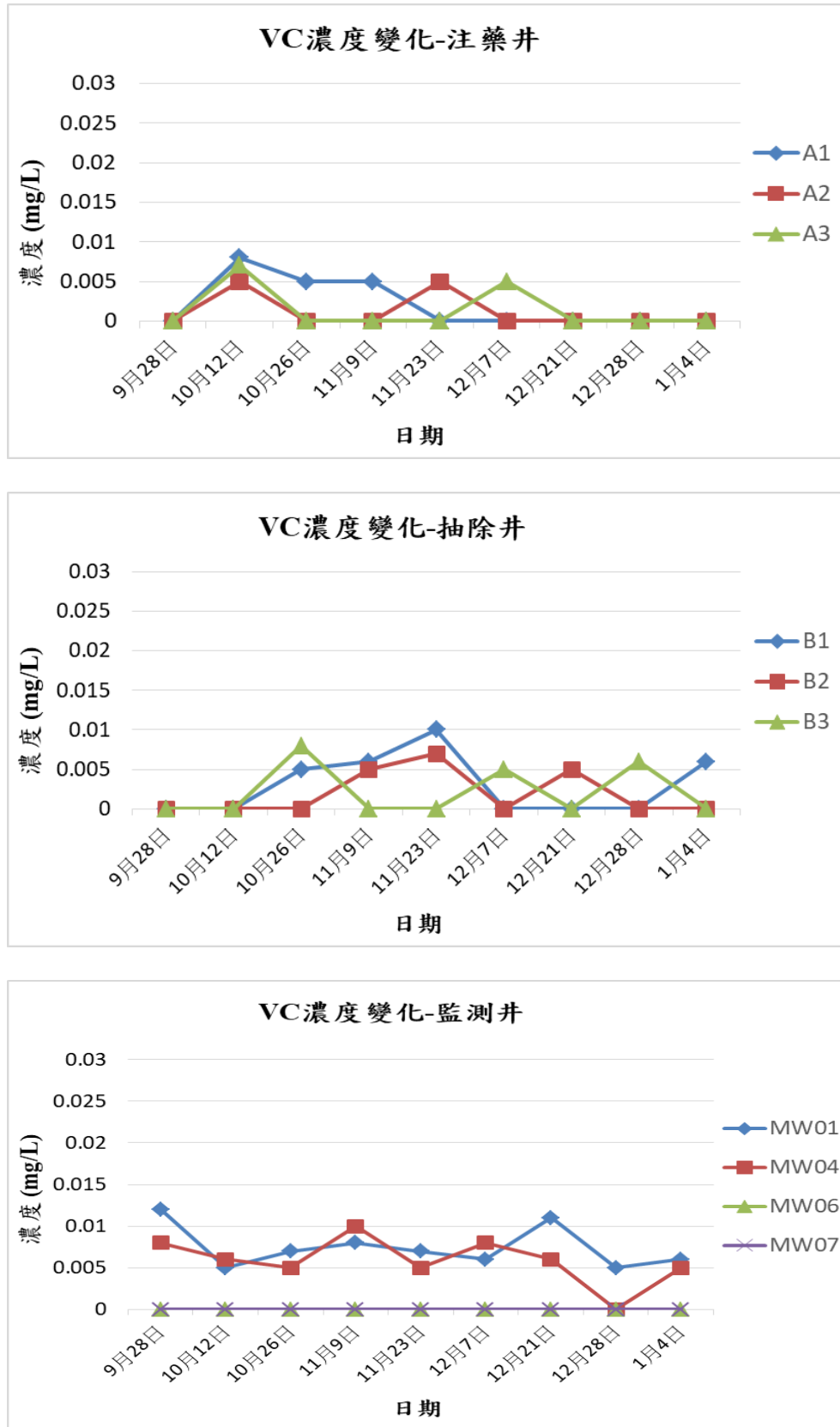


圖 3.33 污染場址熱區之地下水氯乙烯濃度變化

58



3.2.3 微生物菌相檢測

為了瞭解本場址地下水中主要的微生物菌種，因此進行微生物基因定序檢測，以釐清地下水中是否存在協助降解含氯污染物的優勢菌。表 3.6 為整治井 A4、B4 及監測井 MW03 之地下水中前 5 大之微生物菌種。於 A4 整治井中，以 *Geobacter* 為主要優勢菌(46.27%)，在 A3 整治井中也是優勢菌種之一(10.51%)，其為脫氯相關的微生物；B4 整治井中，以 *Dechloromonas*(26.8%)及 *Sulfurospirillum*(19.19%)為主要優勢菌，*Dechloromonas* 為降解 TCE 相關微生物，*Sulfurospirillum* 亦有文獻指出能產生還原脫氯酵素降解三氯乙烯污染物；在 MW03 監測井中，以 *Pseudogulbenkiania*(81.51%)為優勢菌屬，其為鐵氧化菌，然在整治井 A4 及 B4 中數量不多，顯示在整治井中添加乙醇後可促進降解含氯污染物優勢菌種的生成。表 3.7 為場址 3 口井主要優勢菌之菌相分析，其 *Geobacter*、*Dechloromonas* 及 *Sulfurospirillum* 為佔比較高之優勢菌，同時也是與含氯有機物降解有關的菌屬。從檢測結果顯示，於乙醇添加後及目前的水體環境下可促進微生物生長，其主要優勢菌應可協助含氯污染物的降解。

表 3.6 採樣井主要菌種檢測 (110.8.23 檢測)

A4	B4	MW03
<i>Geobacter</i> (46.27%)	<i>Dechloromonas</i> (26.8%)	<i>Pseudogulbenkiania</i> (81.5%)
<i>Croceibacter</i> (8.8%)	<i>Sulfurospirillum</i> (19.19%)	<i>Azoarcus</i> (4.1%)
<i>Rubrivivax</i> (2.53%)	<i>Geobacter</i> (10.51)	<i>Vogesella</i> (3.76)
<i>Treponema</i> (2.48%)	<i>Azoarcus</i> (2.57%)	<i>Dechloromonas</i> (2.96%)
Unclassified (1.9%)	Blvii28 (2%)	<i>Denitromonas</i> (0.77%)

表 3.7 場址地下水主要優勢菌(佔比 5%以上)菌相分析

微生物菌種	A4	B4	MW03
<i>Geobacter</i>	79.28%	17.84%	0.32%
<i>Croceibacter</i>	15.21%	0.98%	0.04%
<i>Dechloromonas</i>	2.51%	45.51%	3.48%
<i>Sulfurospirillum</i>	1.01%	32.59%	0.17%
<i>Pseudogulbenkiania</i>	1.99%	3.08%	95.99%



共溶劑及電動力技術實場整治含氯有機物污染之土壤與地下水

3.2.4 重金屬檢測

為確認電動力法操作過程中，陽極電極因重金屬釋出導致地下水重金屬的污染，故採集電動力法操作後之地下水進行檢測，檢測結果彙整於表 3.8。主要針對地下水 6 項重金屬(銅、鋅、鎳、鎘、鉻、鉛)進行檢測，且因電動力法操作陽極材質為鈦管，故同時檢測鈦金屬濃度。經檢測結果顯示，於電動力法操作後，注藥井、抽除井及監測井之各項重金屬濃度皆遠低地下水管制及監測標準；同時，針對場址內廢水處理設施之放流水進行檢測，其放流水重金屬濃度亦低於法規標準，證實本整治技術操作下未造成地下水重金屬水質的污染。未來將持續以共溶劑搭配電動力法技術進行整場污染整治工作。

表 3.8 地下水重金屬檢測 (110.07.28 檢測)

整治井編號			A4	B4	MW03	放流水
檢測項目	監測標準 (mg/L)	管制標準 (mg/L)	檢測結果			
銅 (Cu)	5	10	N.D	N.D	0.004	N.D
鋅 (Zn)	25	50	0.032	0.021	0.001	0.020
鎳 (Ni)	0.5	1	0.003	0.001	0.005	0.002
鎘 (Cd)	0.025	0.05	N.D	N.D	0.002	0.001
鉻 (Cr)	0.25	0.5	0.005	0.003	0.004	0.002
鉛 (Pb)	0.05	0.1	0.004	N.D	0.004	0.003
鈦 (Ti)	--	--	0.043	0.028	0.018	0.017



3.3 放流水檢測

本場址經本計畫整治技術操作後，會將移除的含氯污染物地下水抽至設置之廢水處理設施處理，並定期每月採樣及檢測放流水水質。放流水基本檢測項目如真色色度、BOD、COD 及 SS，含氯有機物則包括氯乙烯、順-1,2-二氯乙烯、三氯乙烯及四氯乙烯。表 3.9 為定期檢測廢水處理設施放流水的檢測結果。根據定期放流水水質檢測結果得知，檢測項目如真色色度、BOD、COD 及 SS 之濃度皆低於一般放流水管制標準；另本計畫主要關注的含氯有機物濃度也皆為 N.D (<0.005 mg/L)。根據檢測放流水基本水質及含氯有機物濃度皆遠低於法規標準，顯示本計畫設置之廢水處理設施能有效處理所抽除的含氯有機物地下水，證實本整治工法設計的可行性。第二年計畫將持續採用廢水處理設施處理抽除井抽除的地下水，並將處理後之放流水予以迴流至注藥井(陽極端)。

表 3.9 本計畫定期放流水水質檢測結果

檢測項目	7/28	8/25	9/29	10/26	11/24	12/28
生化需氧量(mg/L)	9	20	6	12	15	11
化學需氧量(mg/L)	78	95	63	85	77	92
懸浮固體(mg/L)	1.4	12	1.2	3	8	7
真色色度--	7	25	9	12	10	14
氯乙烯(mg/L)	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
順-1,2-二氯乙烯(mg/L)	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
三氯乙烯(mg/L)	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
四氯乙烯(mg/L)	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D



3.4 結論與建議

本計畫實驗按照計畫書執行內容進行，目前已完成土壤及地下水物化特性分析、整治井及監測井設置、乙醇共溶劑及電動力法設備架設、單井流速流向量測及含氯污染物模場先導試驗及污染場址熱區整治，試驗成果可以歸納如下：

1. 本計畫透過單井流速流向量測、共溶劑、電動力法及廢水處理設施已建立一套完整現地含氯有機物於土壤及地下水之整治系統。經整治後其地下水之 pH 和電導度能維持穩定狀態。
2. 根據污染場址監測井不同深度量測結果顯示，地下水不同深度平均流速約介於 13 cm/day~25 cm/day，可推測本場址應為透水性良好之地形結構。
3. 經模場先導試驗整治後，四氯乙烯濃度已為 N.D；三氯乙烯濃度平均去除率可達 95%；順-1,2-二氯乙烯及氯乙烯濃度皆已降至地下水監測標準。
4. 污染場址熱區於 4 個月整治下，所有含氯污染物濃度皆低於監測標準，且主要污染範圍已大幅縮減，顯示本整治技術對於含氯污染物整治的有效性。
5. 本場址地下水之微生物菌種基因檢測，其分析顯示水體中包含 *Geobacter*、*Dechloromonas* 及 *Sulfurospirillum* 等優勢菌，應可協助含氯污染物的降解。
6. 本計畫地下水與放流水中重金屬含量的檢測，經檢測證實電動力法操作下不會造成場址地下水及放流水重金屬的污染，可持續進行後續整治操作。
7. 廢水處理設施處理後之放流水含氯污染物濃度皆低於監測標準，可迴流至注藥井(陽極端)達到地下水循環的目標，證實本整治工法設計的可行性。
8. 針對本場址含氯污染物的整治成本，本整治技術約可降低傳統處理方法(土壤挖除法)40%的操作成本，其證實具有實場應用的競爭力。

本年度研究透過單井流速流向量測、共溶劑、電動力法及廢水處理設施整合系統可快速有效移除所有含氯污染物，於模場先導試驗及污染場址熱區整治下皆可達到本計畫整治目標。未來第二年於污染場址的整治規劃建議如下：

1. 目前污染場址熱區含氯污染物濃度皆已符合地下水監測標準，未來須持續監測其濃度變化，以觀察污染濃度是否發生回升(Rebound)情形。
2. 從監測井濃度變化得知，抽除井(陰極端)的整治操作對監測井地下水的影響並不顯著，未來可深入探討其整治工法之影響半徑，使整治規劃更為完善。
3. 依據微生物菌相檢測得知乙醇添加後可促進優勢菌種的生成，後續可持續追蹤其優勢菌種的存活率，以更清楚微生物效應於整治過程的變化。



3.5 後續工作

直至今日為止，本計畫符合預定進度，本計畫已經完成土壤及地下水物化特性分析、乙醇共溶劑及電動力法整治設備架設、單井流速流向量測及含氯污染物模場先導試驗及污染場址熱區整治，初步瞭解含氯污染物的去除效率，以及處理過程中其他水質參數的變化也予以掌握；同時，檢測乙醇共溶劑產生的微生物優勢菌種也已完成，可協助本計畫釐清污染物實際降解機制，提升本結合技術之可行性及實用性。有鑑於此，後續第二年計畫的整治操作條件將參照第一年的方式進行，並依照實際整治情況予以適當調整，以更實際且快速的降解污染場址之含氯污染物。透過本年度整合單井流速流向、共溶劑及電動力技術計畫之執行，深入探討此結合技術對於實場含氯污染物場址的整治成效，相信所獲得的處理成果可作為第二年計畫參考之依據，待完成第二年計畫後，亦可提供完整的成果報告，作為其他污染場址現地整治的重要參考。

本計畫第二年預計設置 4 口注藥井(A5~A8)及 4 口抽除井(B5~B8)，其相對位置將參照圖 3.34 進行規劃，連同第一年共計設置 8 口注藥井及 8 口抽除井，進行為期 1 年的全場污染整治。於共溶劑操作部份，本團隊每次將於注藥井灌注濃度為 50%乙醇 100 公升，平均每月注入一次為原則，每次注入後可使乙醇於地下水體維持約 2%~5%之濃度；電動力法與陰極抽水則以整治第一年之最佳參數進行設定。電動力法系統設置部份，注藥井及抽除井同樣為鈦管與不銹鋼管，並以整流器通入直流電進行電動力法整治；電極長度及直徑、注藥井與抽除井直徑與開篩深度皆與第一年設置相同。



第四章、參考文獻

- [1] Cookson, J. T., “Bioremediation Engineering: Design and Application,” McGraw-Hill, Inc., New York (1995).
- [2] Palmer, C. J., and R. L. Johnson, “Physical Processes Controlling the Transport of Non-aqueous Phase Liquids in the Subsurface”, Seminar Publication: Transport and Fate of Contaminants in the Subsurface, Chapter 3, EPA/625/ 4-89/019, pp. 23-28 (1989).
- [3] Fountain, J. C., “Technology for Dense Nonaqueous Phase Liquid Source Zone Remediation”, Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center, TE-98-02 (1998).
- [4] Laddaa, T.I., Lee, C.M., Coates, J.T., Falta Jr, R.W. Cosolvent effects of alcohols on the Henry’s law constant and aqueous solubility of tetrachloroethylene (PCE). Chemosphere. 44, pp.1137-1143 (2011).
- [5] Taylor, T.P., Rathfelder, K.M., Pennell, K.D., Abriola, L.M. Effects of ethanol addition on micellar solubilization and plume migration during surfactant enhanced recovery of tetrachloroethene. Journal of Contaminant Hydrology. 69, pp. 73-99 (2004).
- [6] Brooks, M.C. Annable, M.D. Rao, P.S.C. Hatfield, K. Jawitz, J.W. Wise, W.R. Wood, A.L. and Enfield. C.G. Controlled release, blind test of DNAPL remediation by ethanol flushing, Journal of Contaminant Hydrology, Vol. 69, pp. 281-297 (2004).
- [7] Alazaiza, M.Y.D. Copty, N.K. and Abunada, Z. “Experimental investigation of cosolvent flushing of DNAPL in double-porosity soil using light transmission visualization,” Journal of Hydrology, Vol. 584, Article 124659 (2020).
- [8] Choukér, Methodische and theoretische Untersuchungen for geophysikalischen Grundwasser Erkundung, 1971.
- [9] Chen, X., Farajtabar, A., Jia, W., Zhao, H. Solvent effect on solubility and preferential solvation analysis of buprofen dissolved in aqueous co-solvent mixtures of N,N-dimethylformamide, ethanol, acetonitrile and isopropanol. The Journal of Chemical Thermodynamics. 138, pp. 179-188 (2019).



- [10] Acar, Y. B., Gale, R. J., G, and Hamed J., “Electrochemical Processing of Soils : Its Potential Use in Environmental Geotechnology and Significance of pH Gradients,” 2nd International Symposium on Environmental Geotechnology, Shanghai, China, May 14-17, Envo Publishing, Bethlehem, PA Vol.1, pp.25-38 (1989).
- [11] Khan L. I., Pamukcu S., Kugelman I., “Electro-osmosis in Fine-grained Soil”, 2nd International Symposium on Environmental Geotechnology, Shanghai, China, May 14-17, Envo Publishing, Bethlehem, PA Vol.1, pp.39-47 (1989).
- [12] Acar, Y. B. and Alshawabkeh, A. N., “Principles of Electrokinetic Remediation”, Environmental Science & Technology, Vol. 27, No. 13, pp. 2638-2647 (1993).
- [13] 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).
- [14] 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, Vol. 778, pp. 247-266 (2000).
- [15] Bruell, C. J., Segall, B. A., and Walsh, M. T., “Electroosmotic Removal of Gasoline Hydrocarbons and from Clay”, Journal of Environmental Engineering, Vol. 118, pp. 68-83 (2000).
- [16] 楊金鐘，林舜隆，「土壤污染電化學處理法-電動力整治技術」，經濟部工業局工業技術人才培育計畫講義-事業廢棄物處理技術講習訓練班(第二階段)，高雄市，pp.315-349 (1995).
- [17] Rabbi, M. F., and Clark, B. “In Situ TCE Bioremediation Study Using Electrokinetic Cometabolite Injection”, Waste Management, Vol. 20, pp. 279-286 (2000).
- [18] 袁菁，翁誌煌，「電動力復育技術之介紹」，環保訓練園地，行政院環保署環境保護人員訓練所，第 58 期 (2001)。
- [19] 翁誌煌，涂宏旭，袁菁，「串聯式電動力法復育受三氯乙烯污染黏質土壤之研究」，第七屆土壤污染整治研討會論文集 (2001)。



- [20] 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).
- [21] LasagnaTM Soil Remediation, Innovative technology summary report, U.S. Department of energy cylinder drop test area, Paducah gaseous diffusion plant Paducah, Kentucky. 1996.
- [22] Electrokinetic Remediation in Practice Experiences with Field Applications, Reinout Lageman, Lambda Consult Wiebe Pool, Holland Environment, 2011.



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」。