



行政院環境保護署

111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： 111 年 5 月 20 日起至
112 年 4 月 30 日止

中 華 民 國 112 年 5 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 審查意見回復對照表

計畫年度	111年度	計畫類型	☐ 先導型 ☐ 研究型 ☒ 模場型
計畫類別	☐ 調查 ☒ 整治 ☐ 其它	主持人：章日行 NO：A3	
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	
(一) 蔡俊鴻委員 1. 本計畫目標5項，唯相關內容並未對稱具體展現各項目標之達成績效，需請補正。 2. 場地範圍之地下水特徵、污染物濃度分佈等，請以3D圖完整呈現，俾供模場實驗不同階段/條件測試之改善效果解析比對。 3. 實驗/處理參數、操控範圍與水質變化關聯性，請完整解析，以供評估本項技術對不同污染物處理有效性(3-2-2節)。 4. 三項污染物濃度於不同取樣井之變化趨勢具差異性，請檢視本項技術之有效性。 5. 請說明本項技術開發於學術/產業/政策面之具體績效。		1. 感謝委員意見。有關本計畫目標與對應的達成績效已經修正，目前內容已呼應。 2. 感謝委員意見。由於本計畫場址於過去環保署所進行的地質、地下水特徵及污染濃度調查資料有限，故本計畫僅著重於探討本整合技術對現地污染場址含氯污染物整治之成效，未來仍需進行較縝密的場址調查方能以3D圖完整呈現。 3. 感謝委員意見。本整合技術以第一年計畫最佳操作參數進行試驗，係先以共溶劑乙醇進行整治，後續接續電動力驅動及抽水移除。針對水質變化大部分保持穩定狀態，含氯污染物皆隨著操作時間顯著下降，對不同含氯污染物皆能有效進行移除。 4. 感謝委員意見。由於不同取樣井之土壤地質及地下水特徵略有差異，其導致不同含氯污染濃度變化趨勢可能不盡相同，但經一段操作時間下皆能有效移除，故本計畫之處理技術仍具有整治含氯污染物之可行性。 5. 感謝委員意見。本項技術於學術具體成效已將部分計畫成果投稿至環工年會研討會及國際期刊 ES&T 進行審查；產業具體成效為可移轉產業技術為一件，且促成與台灣中油的實質合作；於政策具體成效則可達到降低約40%的整治成本。	



(二) 江康鈺委員 1. 本計畫利用共溶劑及電動力技術將含氯有機物降解，並結合電觸媒廢水處理，將地下水可達迴流循環之目的;據此，本計畫規劃之迴流循環地下水水質之預設目標值為何? 2. 有關共溶劑之污染物移除之效果評析基準為何?此外，乙醇通入對於環境中之微生物菌及友善度評析結果為何?	1. 感謝委員意見。本計畫將陰極端抽除的水經由電觸媒廢水處理後迴流至陽極端，其主要設定以迴流槽暫存水不同含氯污染物濃度符合地下水監測標準為迴流目標。待確定濃度符合預設目標後進行迴流。 2. 感謝委員意見。 1. 本計畫乙醇共溶劑添加後會協助黏土層土壤孔隙含氯污染物的溶解釋出，故添加後含氯污染物濃度將有上升趨勢，藉此觀察乙醇共溶劑之效能。 2. 乙醇共溶劑添加後對於地下水體不會造成不良的影響，且能生成有利於降解含氯污染物之菌種，例如 <i>Methanospirillum</i>、<i>Clostridium</i>、<i>Sulfurospirillum</i> 及 <i>Geobacter</i> 等微生物。根據檢測結果，本整治工法不僅能有效降解含氯污染物，亦屬於綠色且環境友善之處理技術。
(三) 盧至人委員 1. 本模場試驗計畫期末報告已說明計畫的執行成果，也已說明計畫的執行流程及試驗方法。 2. 本模場試驗計畫期末報告已於 P.65&66 說明後續可繼續執行的研究項目。 3. 計畫執行進度與預定進度相符。 4. 研究內容與原訂計畫目的相符。 5. 本模場試驗計畫期末報告已依據研究結果提出適當的討論與建議，此建議對於實場的實際應用性尚待進一步確認。 6. 本模場試驗計畫的整體研究成果符合預期的研究目標。 7. 本計畫的執行可以培育土壤/地下水領域的人才。 8. 本模場試驗計畫的研究成果:申請專利未說明。技術轉移(已擬投稿、已與中油公司洽談合作)。 9. 本模場試驗計畫符合國內土水污染技術研發的政策，對國內土水領域(整治工程)的發展有所助益。 10. 建議說明	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。 5. 感謝委員肯定。本計畫已補充建議事項，未來可透過更多實場整治推廣進行驗證。 6. 感謝委員肯定。 7. 感謝委員肯定。 8. 感謝委員意見。本計畫未有申請專利之規劃，其主要須達成目標如學術/產業/政策面之具體績效均已達成。 9. 感謝委員肯定。 10. 感謝委員建議。



(1)由顧問公司協助完成的項目(或是實際參與的項目)。 (2)最適操作條件(或地質條件...等)與限制條件。 (3)實務上於實場設計規劃的原則。 (4)本場址所測得的微生物菌相與一般含氯污染場址不同(表 3.7，未 DHC)，建議說明關鍵原因。 (5)建議說明表 3.7 中有 Dechloromonas，值得重視。 (6)建議說明關鍵機制。	(1)中油公司主要協助地下水流速流向量測，以定位場址可能的污染熱點；同時，協助微生物菌相檢測工作，以確認乙醇共溶劑添加後之水體微生物生長情形。 (2)本技術以第一年計畫之最佳操作參數進行試驗，於本年度操作下仍可有效整治本污染場址含氯污染物，無顯著之限制條件。未來若能獲土基會補助針對其他縣市污染場址進行測試，可更廣泛瞭解場址條件對本技術影響。 (3)由於每個場址的地質、水文及污染物濃度及深度皆不同，須依據整治目標、期程及整治費用進行設計規劃。 (4)本計畫添加乙醇共溶劑提升含氯污染物於地下水的溶解性及額外產生微生物效應。推測應為原地下水體含氯污染物濃度高及添加之營養源(本計畫為乙醇)不同導致微生物菌相之差異。 (5)本計畫係以乙醇共溶劑、電動力及抽水處理進行整治，著重於物化處理方式，攸關微生物菌相扮演之功能需另以其他研究進行深入探討。 (6)本技術以添加共溶劑乙醇提升黏土層土壤孔隙之含氯污染物的溶解，再透過電動力驅動及抽水移除達到含氯污染物的有效整治。故本計畫透過地下水流速流向量測找出可能的污染熱點及深度，再透過本計畫處理技術操作達到有效的污染整治。
(四)劉沛宏委員 1. 依 1.5 所述，結果與討論未見場址總有機碳監測數據。 2. 是否有評估抽除井的影響範圍。	1. 感謝委員意見。本計畫依據表 2.2 第二年土壤地下水及放流水檢測項目規劃進行操作，監測水質主要包括 pH、電導度、溶氧及氧化還原電位之變化。監測總有機碳將視水質變化較顯著時才會進行，故於結果與討論未有其相關監測數據。 2. 感謝委員意見。本計畫除設置整治井外，亦於整治井旁設置監測井觀察含氯污染物濃度變化，根據濃度變化推測陰極抽除井之影響半徑約為 2 公尺。



3. 系統具實用性，適用之水文地質條件及操作參數是否已建立。	3. 感謝委員肯定。本年度計畫依據第一年之最佳操作參數進行試驗，適用於本場址之污染整治。其他場址水文條件及污染濃度等適用操作參數仍需未來進行測試確認。
(五) 許正一委員(書面意見) 1. 場址水文與地質條件應是決定成敗的關鍵之一，建議多加論述。	1. 感謝委員建議。目前本計畫已針對現有的水文及地質條件與本技術工法進行討論，亦補充相關說明於結果與討論內容中。



行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☐申請計畫書 ☒期中報告

☐修正計畫書 ☐期末報告

審查意見回復對照表

計畫年度	111 年度	計畫類型	☐ 先導型 ☐ 研究型 ☒ 模場型
計畫類別	☐ 調查 ☒ 整治 ☐ 其它	主持人：章日行 NO：A3	
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. 對原計畫書的建議已回覆說明。 2. 本期中報告已說明計畫的執行狀況與試驗流程，研究方法也已具體說明(Chap.3)。 3. 本計畫含自籌款(顧問公司共同參與)。 4. 本次報告為期中報告，計畫後續的執行工作項目已於 P.53 中簡要說明(建議:條列說明)。 5. 計畫進度已經說明，並無明顯落後(對後續擬執行工作項目及內容已有具體規劃)。 6. 期中報告所說明的研究內容與原計畫目的符合。對模場中污染物去除的機制建議多加討論(尤其本場址已經經過不同工法的整治)。 7. 本報告為期中報告，已提出初步的研究成果，建議期末報告能依研究內容提出在實務上的應用潛力，以及實務上適用的情境(例如:表 3.6，檢測值的意義?建議討論)。 8. 期中報告所提出的研究成果尚符合預期。 9. 建議討論 GSR。 10. 共溶劑在國外已有實場整治經驗。		1. 感謝委員肯定。 2. 感謝委員指導。 3. 感謝委員意見。本計畫並無自籌款。 4. 感謝委員指導。後續計畫執行將改正為條列說明。 5. 感謝委員肯定。 6. 感謝委員意見。本計畫原場址為停滯場址，過去未有任何整治操作。本計畫污染整治工法之主要移除機制已於期中報告進行說明。 7. 感謝委員意見。期末報告已於結論與建議提出本計畫未來可應用潛力及實務上可行的應用操作。表 3.6 為本計畫污染場址整治前之全場污染濃度分布，作為後續觀察整治成效之依據。 8. 感謝委員肯定。 9. 感謝委員意見。結論與建議已進行 GSR 的探討。 10. 感謝委員意見。共溶劑在國外的實場整治經驗已作為本計畫執行的參考依據。	
委員二 1. 符合期中規劃進度。 2. 是否有共溶劑(乙醇)分布範圍的檢測資料。		1. 感謝委員肯定。 2. 感謝委員意見。本計畫目前尚無共溶劑分布範圍的檢測資料。	
委員三 1. 本計畫三個主要單元:單井流速流向量測、共溶劑添加與電動力法，現場操作的參數建議能有這三者交叉改變變因的		1. 感謝委員意見。單井流速流向量測為整治前之執行項目，主要作為後續整治操作規劃之參考，藉以瞭解場址的水文條	



操作方式與結果，以利於說明整治成效的技術理由。 2. 操作不複雜，實場推廣可行。	件；共溶劑與電動力法為本計畫主要之整治工法，計畫主持人之前已有相關研究成果，因此本計畫以最佳之操作參數進行探討。 2. 感謝委員肯定。
委員四 1. 有關計畫中放置之廢水處理設施，除以濃度變化趨勢，逐時呈現數據之變動外，建議宜進一步檢討廢水處理設施各單元之功能特性。 2. 本計畫對於含氯有機物於廢水處理設施轉化機制，以及含氯有機物之總去除效果，未來是否有進一步驗證之規劃？ 3. 本計畫場址之土壤特性，是否會影響後續乙醇共溶劑應用之技術？宜有後續進一步評析與檢討說明。	1. 感謝委員意見。本計畫已補充廢水處理設施各單元之功能特性。 2. 感謝委員意見。由於本場址含氯污染物濃度較高，故本計畫規劃於地下水整治前，先測試整套廢水處理設施是否能有效將移除的高濃度含氯污染物地下水進行降解，待確認其處理效能達符合法規後，即開始進行本場址地下水之污染整治。 3. 感謝委員意見。本計畫場址之土壤特性是作為乙醇添加後擴散情況的參考依據，對於後續整治操作進行調整。
委員五 1. 本計畫經費(耗材)甚高，應請說明土壤地質調查、水質調查之工作負荷/樣品數目，並檢視與原規劃之差異性。 2. 地下水質監測僅 8/26 數據，請檢視其潛在代表性與變異潛勢。 3. 水質處理後之數據亦皆僅 6 小時(或以下)變化；請補充處理操作條件、濃度變化(去除效率)關聯性。	1. 感謝委員意見。由於整治系統與操作的設定需要完整掌握場址的土壤地質條件及地下水的污染濃度，才能有效進行整治系統的設置。而整治系統操作期間，需要掌握地下水及處理廢水的污染濃度變化以調整系統操作參數，因此定期的水質檢測實屬必要。有鑑於此，計畫執行期間皆依據原訂定的採樣與檢測計畫進行。同時，採樣與檢測方式以環保署訂定之標準規範施作。 2. 地下水 8/26 檢測數據是作為處理效能的起始數據，後續已持續監測其地下水濃度。 3. 廢水處理設施已經適當補充處理操作條件及污染濃度變化。



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	111 年度	計畫類型	☐ 先導型 ☐ 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（第二年）		
審查意見		執行單位回覆	
委員一 1. 請補充說明本計畫具體之量化查核指標，例如含氯有機物之去除效率、地下水水質特性或電動力設施之操作功能等。 2. 請補充說明乙醇共溶劑應用技術之限制條件，以及場址應用之特性條件；同時對於乙醇與含氯有機物之殘餘量，宜進一步評估分析。 3. 有關成本效益分析，除考量電費需求外，宜全面針對初設或成本及操作維護成本		1. 感謝委員意見。本計畫修訂稿已於研究進度及預期完成之工作項目（甘特圖）第二年規劃中補充 4 項查核點。其補充內容如下：查核點 1 為設置相關整治井及監測井；查核點 2 為四氯乙烯濃度降至 0.30 mg/L 以下；查核點 3 為四氯乙烯濃度降至 0.10 mg/L 以下；查核點 4 為計畫期程後降至管制標準(0.05 mg/L) 以下。 2. 感謝委員意見。根據文獻及本團隊的研究成果顯示，乙醇共溶劑適用於地下水層中流動性較慢之粉土-黏土層(此為含氯污染物停留的位置)，對於含氯污染物於土壤層的溶解釋出成效較為明顯，再透過本計畫規劃之電動力技術予以驅動移除。有關乙醇與含氯有機物濃度之關聯，未來將進一步評估分析。 3. 感謝委員建議。第一年已針對全場操作成本進行預估，費用粗估為 1,400 萬元。第二年計畫執行完成後將進行較全面的成本評估。	
委員二 1. 本計畫擬以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。 2. 建議評估共溶劑乙醇對於生物反應降解含氯有機物之影響。		1. 感謝委員肯定。 2. 感謝委員意見。未來計畫執行過程中，會持續監測共溶劑乙醇濃度隨時間之變化，並以 RLU 數值瞭解其微生物的相對數量，而微生物基因定序則是判別地下水體中的微生物優勢菌種。第二年計畫執行期間將持續透過以上相關資訊評估乙醇共溶劑對	



3. 建議評估含氯有機物在共溶劑中的溶解度。 4. 建議評估共溶劑注入土壤方式的影響。 5. 建議於計畫完成後，評估本技術的成本。	生物反應降解之影響。 3. 感謝委員意見。根據文獻得知，當水體中添加不同重量濃度乙醇時，可逐漸增加 PCE 溶解能力，同時使溶液密度從 1.002 降至 0.986 g/cm³。從文獻結果證實其共溶劑提升含氯有機物溶解於地下水的可行性，未來將持續觀察共溶劑對於含氯有機物的影響。 4. 感謝委員意見。從文獻得知，以 65%乙醇含量和低沖洗速度條件下模擬 DNAPL 的移動情況，結果顯示，DNAPL 去除率最高可達約 92%。因此，參照文獻結果，本計畫乙醇共溶劑注入以幫浦輔助進行，以約 1.0 L/min 的低速率注入於本場址設定之深度位置，其相關內容已適當補充於研究方法與步驟中。 5. 感謝委員建議。第二年計畫執行完成後將進行較全面的成本評估。
委員三 1. 本計畫提出以共溶劑(乙醇)添加結合電動力法進行土壤地下水含氯有機物整治成果佳，可將抽除井 PCE、TCE、DCE 及 VC 降至 ND。 2. P.11 針對圖 3.11 的說明並不是很清楚，為何 PCE、TCE、DCE 及 VC 無法降至 ND？本計畫之技術是否因污染場址不同而成果有差異？ 3. P.12 針對圖 3.12，根據此圖之資料是否能更明確說明生物降解含氯有機物是在好氧或厭氧條件？ 4. 建議能釐清本技術去除含氯有機物之機制為物理、化學或生物反應。	1. 感謝委員肯定。 2. 感謝委員意見。圖 3.11 為本團隊於之前實際污染場址進行模場先導實驗 84 天的整治成果，主要探討共溶劑搭配電動力整治含氯污染物之可行性。於 84 天的整治下已可達到約 65%的去除率。推測延長整治時間可將所有含氯污染物濃度降至 N.D。 3. 感謝委員意見。根據圖 3.12 RLU 數值檢測結果，其結果僅顯示本計畫整合技術共溶劑+電動力不會破壞地下水體微生物生長環境，且能促進微生物的生長。針對降解含氯有機物於好氧或厭氧條件則必須深入探討以釐清。 4. 感謝委員意見。根據本團隊之前的模場試驗得知，單純共溶劑產生的共溶現象(物理)及微生物反應(生物)於整治時間 84 天，PCE 可達到約 25%降解，然而，於電動力



5. 有關抽除井地下水中的乙醇濃度為何？後續利用廢水處理設備會不會主要是在處理乙醇？	(化學)結合共溶劑(物理+生物)條件下，其PCE可提升至65%，其顯示本整治技術電動力(化學)為移除含氯污染物之主要貢獻，共溶劑(物理+生物)則為輔助移除。 5. 感謝委員意見。抽除井地下水中之乙醇濃度約介於2%左右。由於本計畫透過乙醇添加促進含氯污染物溶解於地下水體中，故抽除的地下水含有乙醇及含氯污染物，再透過廢水處理設施予以處理。本計畫檢測廢水處理設施之進流水及放流水濃度得知，放流水之含氯污染物濃度已降至監測標準，顯示含氯污染物經廢水處理設施可有效被分解，可循環迴流至地下水層。
委員四 1. 注入乙醇經抽出後，其回收率是否於計畫中會評估。	1. 感謝委員意見。本計畫主要是透過乙醇注入提升土壤層中含氯污染物溶解釋出的成效。有關乙醇抽出濃度的回收率部份會適當地進行觀察。
委員五 1. 第一年掌握設定場址之地下水污染濃度三維分佈應掌握呈現，以確認111年規劃實場試驗條件之合理性。 2. 計畫目標/預期成果應設定明確量化指標(KPI)以供檢核。 3. 第二年工作方法甚籠統，應請重新提列，包括：現場作業地點、援用設備、操作參數及範圍、測試次數等，以供評析達成預期目標可行性。	1. 感謝委員意見。本計畫111年整治規劃係透過第一年的單井流速流向量測掌握不透水層及含氯溶劑污染源的位置，並瞭解其地下水之流速(13 cm/day~25 cm/day)及流向(南向北(西北)流)；同時，根據土壤地質(1~6公尺為粉土質黏土與黏土質粉土互層)與污染物深度(5~8公尺)進行規劃。根據以上之相關資訊進行第二年的污染整治規劃，如整治井設置之位置、採樣深度、抽除井流量及乙醇注入頻率等參考。 2. 感謝委員意見。修訂稿已在研究進度及預期完成之工作項目(甘特圖)第二年規劃中補充4項查核點，以確認本計畫執行之達成成效，並提供檢核。 3. 感謝委員意見。針對工作方法已於研究方法及步驟章節進行補充。其主要內容如第



4. 人力配置應檢核。 5. 實場地質、地下水其之污染物成分是否適用本技術(乙醇共溶劑/電動力)，應請檢核確認。	二年作業地點之整治區域範圍如圖 4.4，整治操作參數彙整於表 4.1。於共溶劑操作部份，透過幫浦使乙醇定速(1.0 L/min)緩慢注入至設定深度位置，每月注入一次，共添加 8 次為操作原則。 4. 感謝委員意見。為使本計畫順利執行，特委請協同主持人協助執行。中油公司林舜隆及朱正文研究員協助單井流速流向量測及微生物菌落檢測，立誠公司陳鴻國博士協助電力設備、電線配置及資訊設備控制等工程，大葉大學沈善鎰博士協助本計畫整治設計檢討及規劃、整治數據探討及未來實場整治應用之綜合性評估。另有臨時工協助試驗執行、採樣檢測、數據分析、行政文書及報告撰寫等工作，整體人力配置應屬合適。 5. 感謝委員意見。根據場址地質分布得知，含氯污染物主要深度介於地表下 5~8 公尺，此為黏土/砂土層地質，本整合技術(乙醇共溶劑/電動力)適用於此土壤地質結構，且根據第一年的整治成效得知，對於污染場址之所有含氯污染物皆能有效整治，證實本整治技術的可行性。
委員六 1. P.17，本計畫主要針對含氯污染地下水進行整治，掌握污染場址土壤及地下水各項水質參數及含氯有機物濃度，建議宜說明第二年預期監測項目中總有機碳 TOC 濃度之必要性，以利瞭解污染場址地下水基本物化特性之關聯性。 2. P.21，有關共溶劑技術處理含氯有機物試驗方法，建議可說明第二年是否進行乙醇操作條件及參數之調整，助於瞭解該技術之成效變化，以作為未來實際應用之參考。	1. 感謝委員建議。本計畫以注入乙醇提升含氯污染物於地下水之溶解性，為了觀察是否會對原地下水層水質的影響，除了量測酸鹼值、電導度、溶氧及氧化還原電位外，也會視情況進行總有機碳的檢測，以觀察對水體水質的影響。 2. 感謝委員意見。有關乙醇操作條件及參數已補充至研究方法及步驟之內文及表 4.1 中，並將依據現場實際情況進行調整，以作為未來實際應用之依據。



3. 有關消耗性器材主要費用，其鑿井工程及乙醇化學共溶劑僅供 5 口注藥井使用，與本計畫污染場址整治原規劃相異，建議宜說明其原因，有助於瞭解該研究經費運用及其項目編列方式。	3. 感謝委員意見。本計畫第二年執行期間將進行整場污染整治，乙醇共溶劑之研究經費運用已修正為整場注藥井使用，共計 1 年使用量。
委員七 1. 本計畫擬以乙醇溶劑添加至地下水，另以電動力技術將有機物溶解並以彰化強新工廠污染場址進行整治實驗分析，計畫目的明確。 2. 本計畫申請費用約為 331 萬元，主要經費為消耗性器材費用，包括於電極材料、乙醇與檢驗耗材，合計約 217 萬元，約占總經費的 66%。 3. 本計畫成本效益評估僅以耗損電費計算，建議執行作業中廣泛收集各項資料，包括人力、資本設備折舊與中間材料損耗等，始能有效評估成本效益。 4. 本計畫無合作廠商，但有兩位中油公司探採研究所研究員參與。	1. 感謝委員肯定。 2. 感謝委員意見。目前經費已按照核定金額修正為 290 萬元，消耗性器材費用修正為約 184 萬元，約占總經費的 63%。 3. 感謝委員意見。第二年計畫完成後將全面進行成本分析，其包括設置成本、人力費、電力費、設備折舊與中間材料損耗等費用，以利評估未來實際應用之可行性。 4. 感謝委員意見。本計畫執行後將媒合其他廠商進行技術合作，以利推廣本技術處理現地受含氯污染物污染之土壤及地下水。
委員八 1. 本計畫是擬研究結合共溶劑(乙醇)與電動力學法，應用於整治低透水污染場址中 TCE 汙染。共溶劑及電動力學兩項技術，個別上已經有許多研究及應用案例，理論也較清楚，但合併使用加上考慮生物作用，則應用案例較少，因此研究主題有實務應用價值。 2. 研究第一年已經有初步成果，其中單井流速流向測試技術，國內顧問公司已經有許多應用案例，雖然較多位於透水性含水層中，本技術偏向低透水性含水層應用；共溶劑結合電動力法、以及生物整治，相對較新穎。預期第二年會有更明顯成效。	1. 感謝委員肯定。 2. 感謝委員肯定。



3. 計畫主持人在此研究領域，已經累積相當經驗，過去持續主持科技部計畫，發表文章中、也屬領域不錯等級；團隊中有各有明顯專長及分工，團隊具執行本計畫能力。 4. 本計畫重點在於確認整治可行性、成本，其中包括整治時間、以及停止操作後，其回彈情形，建議說明，並與相近技術比較。	3. 感謝委員肯定。 4. 感謝委員建議。本計畫第二年主要進行全場污染整治，除了新設整治井之污染整治外，亦包括第一年整治區域濃度的持續監測，以釐清本整合技術現地污染整治之可行性。直至目前，經由停止操作 4 個月後，其污染濃度未有明顯回升情形。同時，本計畫完成後將評估本場址整場之整治成本，並與其他技術進行比較，以客觀瞭解本整治技術之優勢及未來實場應用之經濟效益。
本署業務單位 請依本署補助上限經費及 111 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徵求書規定調整本計畫經費分析表。	感謝委員意見。目前本計畫經費已修正為 290 萬元整，其各項經費編列已按照模場試驗專案徵求書進行調整。



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)		☐ 先導型 ☐ 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、沈善鎰		職等／職稱		研究員、研究員、總經理、助理教授	
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 111 年 5 月 20 日起 至民國 112 年 4 月 30 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	646,520	(1~6項相加之50%為限)		
	2.	設備使用含維護費	0	0	(與計畫實驗相關)		
	3.	耗材與主要費用	2,665,000	1,894,402	(與計畫主體相關)		
	4.	其它研究相關費用	40,500	75,600	(含差旅與租賃費用)		
	5.	雜支費用	24,395	19,842	(1~6項相加之5%為限)		
	6.	行政管理費	334,545	263,636	(1~6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	2,900,000	總金額：6,580,000		
	計畫總金額(1~7項)		3,680,000	2,900,000	總金額：6,580,000		

專案主持人(簽名及蓋章)：

日期： 112. 5. 12



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

111年度專案成果績效自評表

一、專案基本資料

填表日期：112 年 5 月 12 日

專案性質	☒ 實驗性質 ☐ 非實驗性質	專案類別	☐ 先導型 ☐ 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						
		(2)研討會論文	1	1	1		已投至環工年會	
	2.國外投稿 (篇數)	(1)期刊論文	1	0	1		已投至 ES&T	
		(2)國際研討會 論文發表						
	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					
			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，並持續與台灣中油公司進行產學合作，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40%以上之整治費用。



四、主要研究人力

請依照「專案主持人」、「協同主持人」、「專任人員」、「兼任人員」及「臨時工」等類別之順序分別填寫。

姓名	服務機構/系所	職稱	在本研究專案內擔任之具體工作性質、項目及範圍	執行時間
章日行	朝陽科技大學/ 環境工程與管理系	教授	主導實場試驗設計、執行、進度管控、學理分析及可行性評估	111 年 5 月 ~112 年 4 月
林舜隆	台灣中油公司探採 研究所	研究員	分析水文條件、微生物菌落檢測及含氯有機物之衍生物量測	111 年 5 月 ~112 年 4 月
朱正文	台灣中油公司探採 研究所	研究員	分析水文條件、微生物菌落檢測及含氯有機物之衍生物量測	111 年 5 月 ~112 年 4 月
陳鴻國	立誠電腦資訊 有限公司	總經理	污染整治操作之電力設備、電線配置及資訊設備控制等工程	111 年 5 月 ~112 年 4 月
沈善鎰	大葉大學/ 環境工程學系	助理教授	實驗設計檢討及規劃、整治數據探討及未來實場整治應用之綜合性評估等工作	111 年 5 月 ~112 年 4 月
張偉釗	朝陽科技大學/ 環境工程與管理系	臨時工	試驗執行、採樣檢測、數據分析、行政文書等工作	111 年 8、10 月
黃尹廷	朝陽科技大學/ 環境工程與管理系	臨時工	試驗執行、採樣檢測、數據分析、行政文書等工作	111 年 8、10 月
鄭祐宗	朝陽科技大學/ 環境工程與管理系	臨時工	試驗執行、採樣檢測、數據分析、行政文書等工作	111 年 8、10 月
曾方佑	朝陽科技大學/ 環境工程與管理系	臨時工	試驗執行、採樣檢測、數據分析、行政文書等工作	111 年 8、10 月
林律穎	朝陽科技大學/ 環境工程與管理系	臨時工	試驗執行、採樣檢測、數據分析、行政文書等工作	111 年 8、10 月
周慶輝	朝陽科技大學/ 環境工程與管理系	臨時工	試驗執行、採樣檢測、數據分析、行政文書等工作	111 年 8、10 月



余品嫻	朝陽科技大學/ 環境工程與管理系	臨時工	試驗執行、採樣檢測、數據分析、行政文書等工作	111 年 8、10月
張宥程	朝陽科技大學/ 環境工程與管理系	臨時工	試驗執行、採樣檢測、數據分析、行政文書等工作	111 年 8、10月
林承佑	朝陽科技大學/ 環境工程與管理系	臨時工	試驗執行、採樣檢測、數據分析、行政文書等工作	111 年 8、10月
郭旻璋	朝陽科技大學/ 環境工程與管理系	臨時工	試驗執行、採樣檢測、數據分析、行政文書等工作	111 年 8、10月

五、產業界資源投入表

專案執行若有與產業界合作，請執行單位依實際量化成果填寫於欄位中。

投入資源類別	數量	說明
1.自籌款	元	
2.人力	人月	
3.設備		
4.其他資源 (請自行增列)	(請自填	





研究成果中文摘要

本計畫第一年已成功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，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，已建立一套完整的土壤及地下水整治技術。經第一年污染場址熱區整治後，四氯乙烯濃度已從 0.254 mg/L~2.15 mg/L 降至 0.006 mg/L 以下，三氯乙烯濃度從 0.032 mg/L~0.175 mg/L 降為 N.D，二氯乙烯及氯乙烯濃度皆已低於監測標準，且於停止操作後其污染物濃度未有回升的現象，顯示本整治技術對於含氯污染物整治的有效性。

本年度第二年研究計畫持續以快速、精準、多功能且高經濟效益的處理技術整治全場含氯污染物地下水，相信研究成果可作為未來國內土壤及地下水處理技術的重要參考。透過本年度第二年污染場址的重新鑿井，並持續監控第一年整治後之整治井的污染濃度，擴大整治範圍以釐清此整合技術處理全場含氯有機物污染土壤及地下水的處理效率及相關操作參數問題。最後，探討在此整合技術下全場的整治效果及評估本整合技術所需的整治費用。

本計畫實驗按照計畫書執行內容進行，計畫符合預定期程，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、土壤質地調查、廢水處理設施處理成效及含氯污染物整治操作。截至目前，期末報告試驗結果可以歸納如下：

- 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。
- 本場址地下水水質及含氯污染物濃度皆已掌握，且土壤質地調查亦已完成，可作為含氯污染物整治之探討依據。
- 本年度污染場址整治井 A5~A8 及 B5~B8 含氯污染物於 6 個月整治下，濃度皆已低於管制標準，顯示本計畫整治工法可有效處理地下水含氯污染物。
- 上一年度整治井 A1~A4 及 B1~B4 已整治完成，但因本年度新整治井鑿井過程導致 A1 及 A2 濃度升高，但經過一段時間後即降至法規以下，且後續未有濃度回升的情形發生。
- 本計畫污染場址之監測井 MW01~MW09 污染濃度大部分已符合法規，僅少



部分監測井仍高於管制標準。

- 根據整治成效得知，本計畫已將整場污染場址含氯污染物濃度降至約 90%，未來僅有少數區域需要持續整治即可達到完全處理。
- 經廢水處理設置處理後，地下水四氯乙烯濃度從 2.82 mg/L 降至 ND；三氯乙烯濃度從 1.83 mg/L 降至 ND；順-1,2-二氯乙烯濃度從 1.66 mg/L 降至 ND。顯示本廢水處理設施能有效將抽除的地下水進行降解，使迴流水符合法規標準，達到地下水循環的目標。
- 經由微生物菌相檢測得知，本場址於整治工法操作下，地下水體中仍含有許多微生物物種存在，顯示本整治工法(共溶劑結合電動力法)是具綠色及環境友善之整治技術。



研究成果英文摘要

The first year program has been successfully adopted 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. Final, 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. After the remediation of the model test and hot spot of the contaminated site, the concentration of PCE from 0.254 mg/L~ 2.15 mg/L has dropped below 0.006 mg/L, while TCE has decreased from 0.032 mg/L~0.175 mg/L has reduced to ND, the concentration of dichloroethylene and vinyl chloride is lower than the monitoring standard. The pollutant concentration has not rebound after the operation is stopped, which shows the effectiveness of this remediation technology for the remediation of chlorine-containing pollutants. It can be returned to the injection well (anode end) to achieve the goal of groundwater circulation, which proves the feasibility of the design of this remediation method.

The second year's research plan will continue to use fast, accurate, multi-functional, and highly economical treatment technology to remediate the groundwater containing chlorine pollutants in the whole site. It is believed that the research results can be used as domestic soil in the future. and an important reference for groundwater treatment technology. Through the re-drilling of the polluted site in the second year, and the continuous monitoring of the remediation wells after the first year of remediation, the scope of remediation was expanded to clarify the treatment efficiency of this integrated technology in treating the soil and groundwater



contaminated by chlorinated organic compounds in the full site. The operating parameters, such as the scope of remediation, the efficacy of ethanol injection, the impact of various electrochemical reactions generated by electrokinetics on groundwater, the treatment efficiency of the electrocatalytic technique, and the control of operation time have been studied. Finally, to discuss under this integrated technology the remediation efficiency of the full field and the remediation cost required to evaluate the integration technology. In view of the foregoing arguments, the research objectives of this project include:

This experiment of this project is carried out in accordance with the schedule of the plan. At present, the analysis of the physical and chemical characteristics of soil and groundwater, the setting of remediation wells and monitoring wells, the installation of ethanol co-solvent and electrokinetics technique equipment, flow rate and flow direction of a single well have been completed, soil texture survey, treatment effectiveness of wastewater treatment facilities, and chlorine-containing pollutant remediation operations. Until now, the results of the report can be summarized as follows:

- This plan has established a complete in-situ remediation system of chlorinated organics in soil and groundwater through single well flow velocity measurement, co-solvent, electrokinetics method and wastewater treatment facilities.
- The groundwater quality and concentration of chlorine-containing pollutants at this contaminated site have been mastered, and the survey of soil texture has also been completed, which can be used as a basis for discussion on the remediation of chlorine-containing pollutants.
- The concentration of chlorine-containing pollutants in wells A5~A8 and B5-B8 of the contaminated site remediation has been lower than the control standard after 6 months of remediation, which shows that the remediation method of this plan can effectively treat chlorine-containing pollutants in groundwater.
- Remediation wells A1~A4 and B1~B4 have been remediated in the last year, but the concentration of A1 and A2 increased due to the sinking process of the new remediation well this year, but fell below the regulations after a period of time, and there was no subsequent concentration rebound situation occurs.
- Most of the pollution concentrations of monitoring wells MW01~MW09 in the polluted sites have complied with the regulations, and only a small number of monitoring wells are still higher than the control standards.



- According to the remediation performance, this plan has reduced the concentration of chlorine-containing pollutants in the entire polluted site to about 90%, and only a few areas will need continuous remediation in the future to achieve complete treatment.
- After being treated by wastewater treatment equipment, the concentration of PCE in groundwater decreased from 2.82 mg/L to N.D; the concentration of TCE decreased from 1.83 mg/L to N.D; the concentration of cis-1,2-DCE decreased from 1.66 mg/L to N.D. It shows that the wastewater treatment facility can effectively degrade the pumped groundwater, make the returned water meet the legal standards, and achieve the goal of groundwater circulation.
- Through the detection of microbial colonies and bacterial phases, it is known that under the operation of the remediation method on this site, there are still many microbial species in the groundwater body, which shows that this remediation method (co-solvent combined with the electrokinetics method) is a green and environmentally friendly remediation technology.



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.....	18
第二章、研究方法及過程	20
2.1 整合技術處理含氯有機物試驗方法 (全場污染整治).....	22
2.2 廢水處理設施	24
2.3 計畫進度與檢核說明	28
第三章、結果與討論	30
3.1 整治設備安裝.....	30
3.1.1 整治井與監測井設置	30
3.1.2 電極設置	33
3.1.3 抽水馬達安裝	34
3.1.4 電力設備安裝	35
3.1.5 廢水處理設施	36
3.2 共溶劑結合電動力整治含氯污染物試驗成果	38
3.2.1 電觸媒廢水處理系統成果	44
3.2.2 污染場址地下水整治成效	51
3.2.3 微生物菌相檢測	63
3.3 結論與建議.....	65
第四章、參考文獻	67



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.....	13
圖 1.13 污染場址熱區之地下水 pH 值變化.....	14
圖 1.14 污染場址熱區之地下水電導度變化-注藥井.....	14
圖 1.15 污染場址熱區之地下水溶氧變化-注藥井.....	15
圖 1.16 污染場址熱區之地下水地下水四氯乙烯濃度變化.....	16
圖 1.17 污染場址熱區之地下水三氯乙烯濃度變化.....	17
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.....	20
圖 2.2 本計畫污染場址主要範圍.....	21
圖 2.3 本計畫整治操作示意圖.....	22
圖 2.4 本計畫污染場址全場整治規劃示意圖.....	23
圖 2.5 本計畫廢水處理設施.....	25
圖 3.1 污染整治區鑿井施工圖.....	31
圖 3.2 污染整治區鑿井完工圖.....	32
圖 3.3 電動力法之電極材料 (鈦管)	33
圖 3.4 抽水馬達安裝完工圖.....	34
圖 3.5 電力設備安裝施工圖.....	35
圖 3.6 電力設備安裝完工圖.....	35
圖 3.7 本計畫廢水處理反應槽.....	36
圖 3.8 廢水處理設施管線施工圖-1.....	36
圖 3.9 廢水處理設施管線施工圖-2.....	37
圖 3.10 廢水處理設施鼓風機設備完工.....	37
圖 3.11 單井地下水流向流速量測過程.....	39
圖 3.12 場址土壤地質分類過程.....	40
圖 3.13 廢水處理設施曝氣槽(a)pH 值及(b)導電度之變化.....	45
圖 3.14 廢水處理設施曝氣槽(a)溶氧及(b)氧化還原電位之變化.....	46
圖 3.15 廢水處理設施之不同含氯污染物濃度變化.....	49
圖 3.16 廢水處理設施不同槽體之含氯污染物濃度變化.....	50



圖 3.17 高濃度污染區域之地下水 pH 值變化-注藥井.....	52
圖 3.18 高濃度污染區域之地下水 pH 值變化-抽除井.....	52
圖 3.19 高濃度污染區域之地下水電導度值變化-注藥井.....	53
圖 3.20 高濃度污染區域之地下水電導度值變化-抽除井.....	53
圖 3.21 高濃度污染區域之地下水溶值變化-注藥井.....	55
圖 3.22 高濃度污染區域之地下水溶值變化-抽除井.....	55
圖 3.23 高濃度污染區域之地下水氧化還原電位變化-注藥井.....	56
圖 3.24 高濃度污染區域之地下水氧化還原電位變化-抽除井.....	56
圖 3.25 高濃度污染區域之地下水四氯乙烯變化.....	58
圖 3.26 高濃度污染區域之地下水三氯乙烯變化.....	60
圖 3.27 高濃度污染區域之地下水順-1,2-二氯乙烯變化.....	61



表次

表 2.1 本計畫整場污染整治操作條件.....	23
表 2.2 第二年土壤地下水及放流水檢測項目規劃表.....	24
表 2.3 本計畫定期放流水水質檢測結果.....	26
表 2.4 本計畫廢水處理設施之效能測試.....	26
表 2.5 本計畫協同主持人資料表.....	27
表 2.6 計畫進度與檢核表.....	28
表 3.1 整治井及監測井材料數量及規格.....	30
表 3.2 電極材料數量及規格.....	33
表 3.3 抽水裝置材料數量及規格.....	34
表 3.4 場址土壤地質統計結果.....	40
表 3.5 本場址整治井及監測井地下水質量測結果-111 年 8 月.....	41
表 3.6 地下水含氯有機物檢測結果- 111 年 8 月.....	43
表 3.7 本場址主要菌種檢測 (111.8 檢測)	64
表 3.8 本場址主要菌種檢測 (111.12 檢測)	64





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



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。

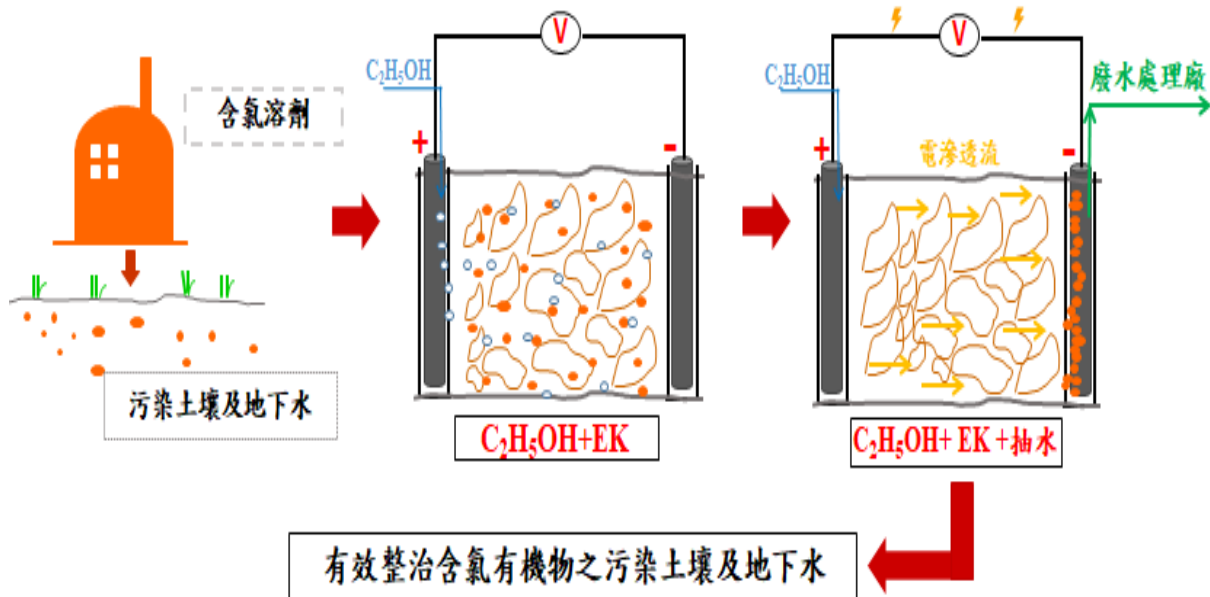


圖 1.1 本計畫整合技術之研究構想

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。

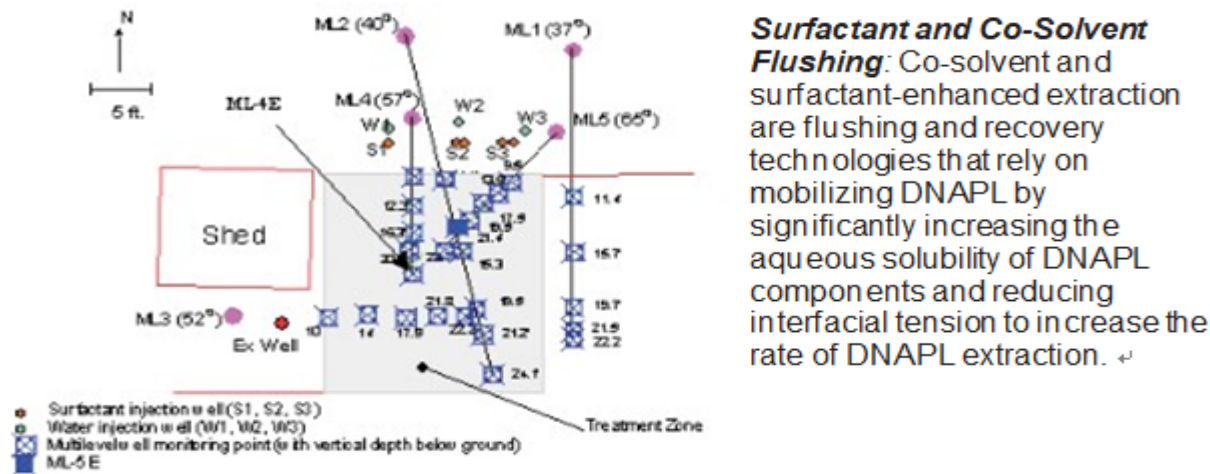


圖 1.2 Michigan 環保局整治 PCE 污染場址案例

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。

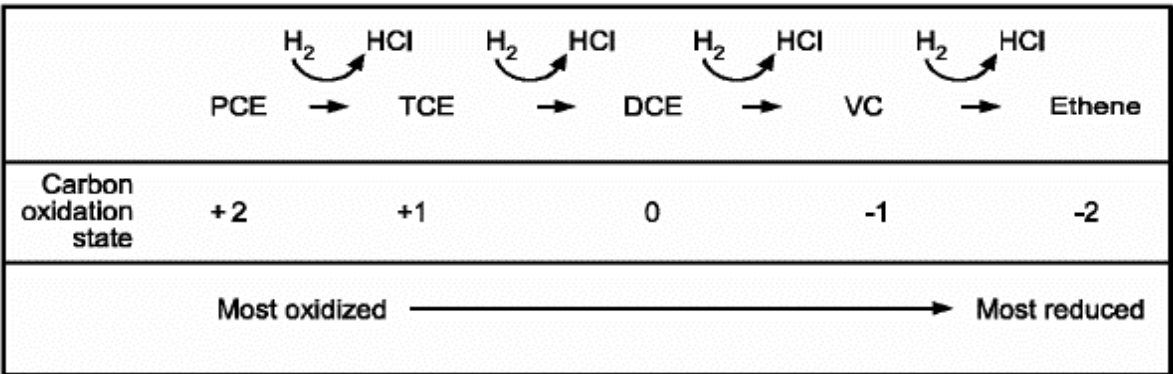


圖 1.3 含氯有機化合物厭氧還原脫氯降解程序示意圖



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]。

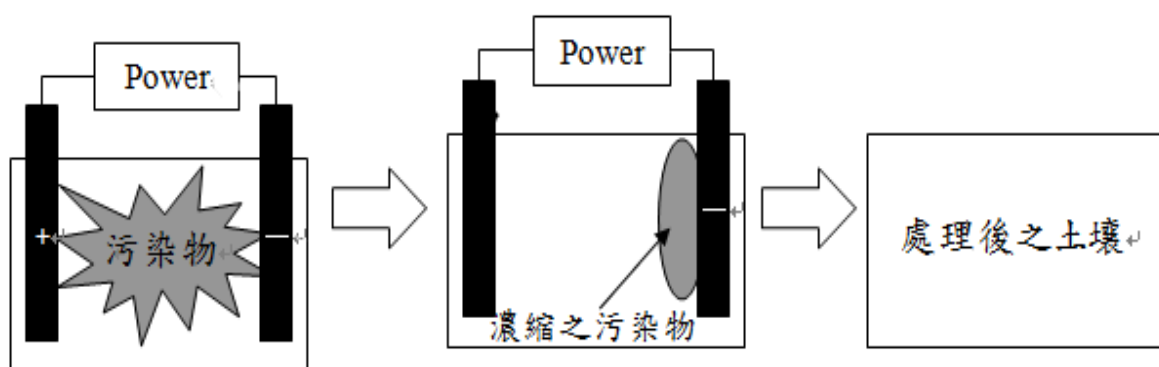


圖 1.4 電動力法操作示意圖



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]。

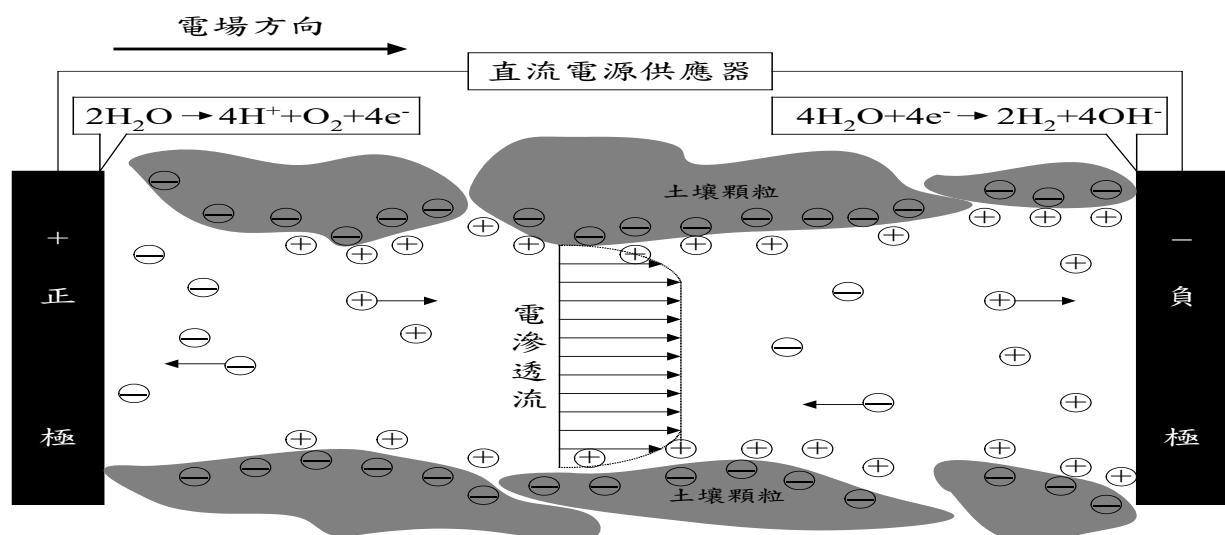


圖 1.5 電滲透流移除土壤污染物示意圖



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



第一章、計畫緣起與目的

針對不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。

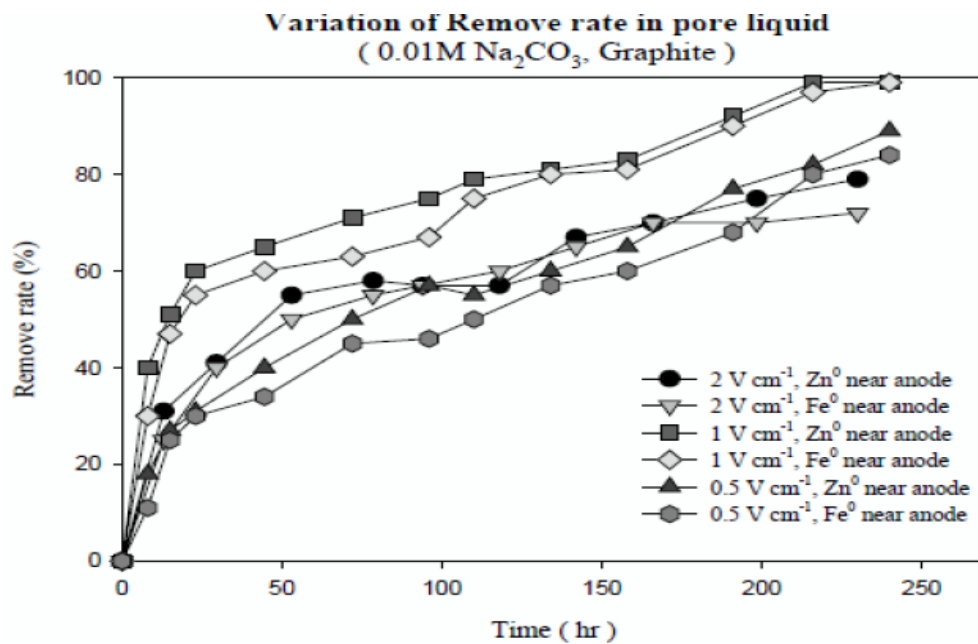


圖 1.6 孔隙水中 PCE 去除效率

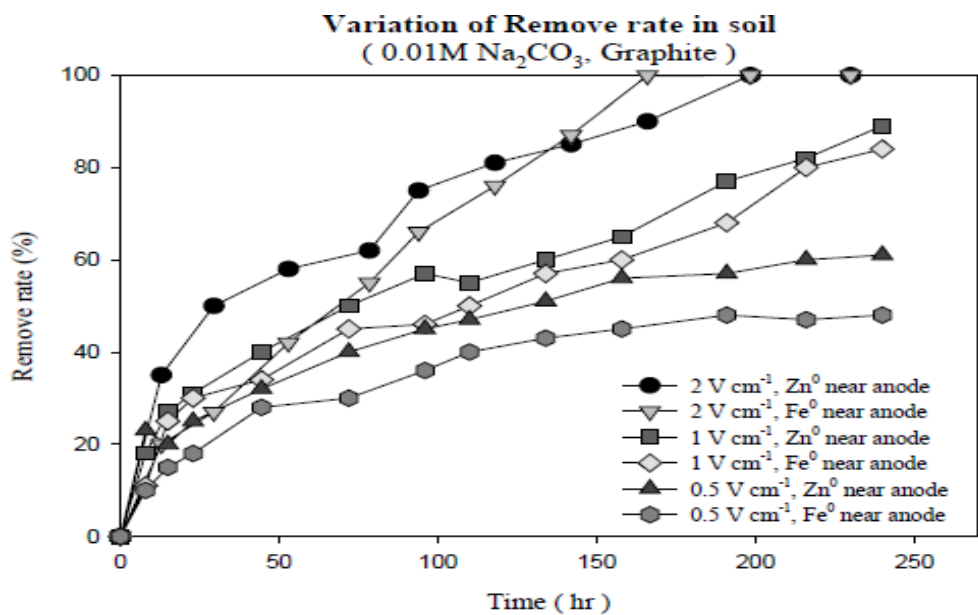


圖 1.7 土壤中 PCE 去除效率



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

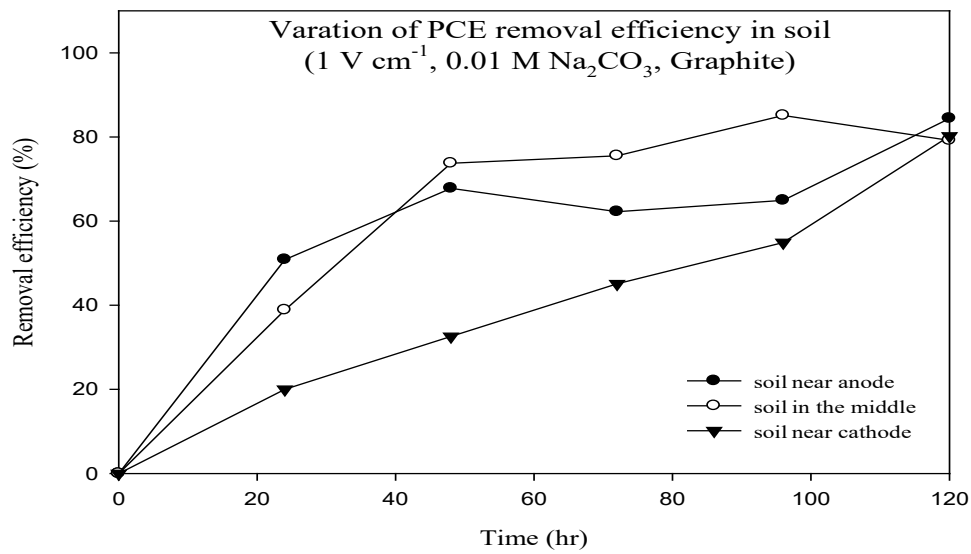


圖 1.8 大型模場土壤中 PCE 去除效率圖

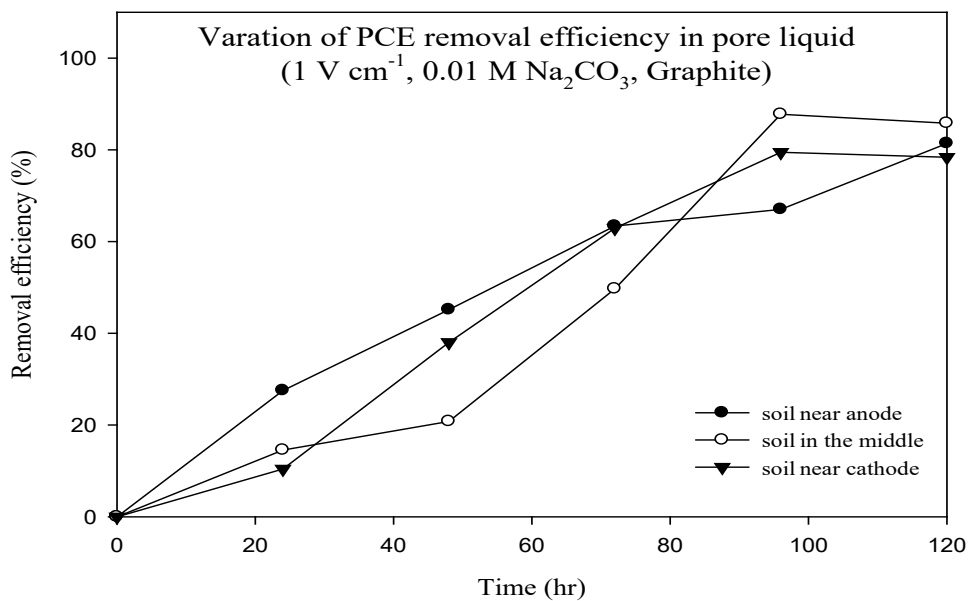


圖 1.9 大型模場孔隙水中 PCE 去除效率圖



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。

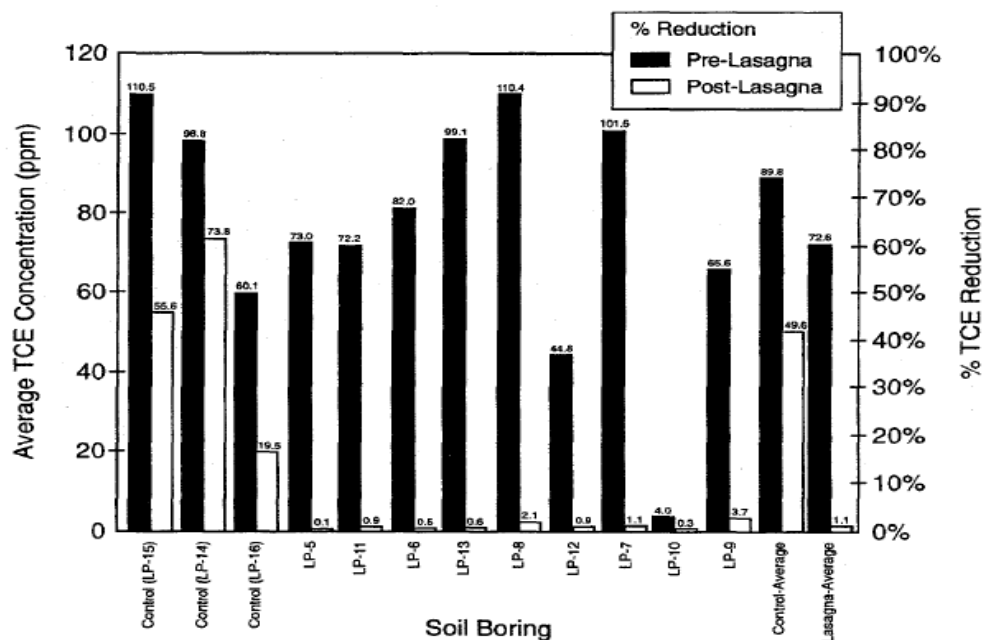


圖 1.10 土壤中 TCE 不同整治深度去除效率

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



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

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。

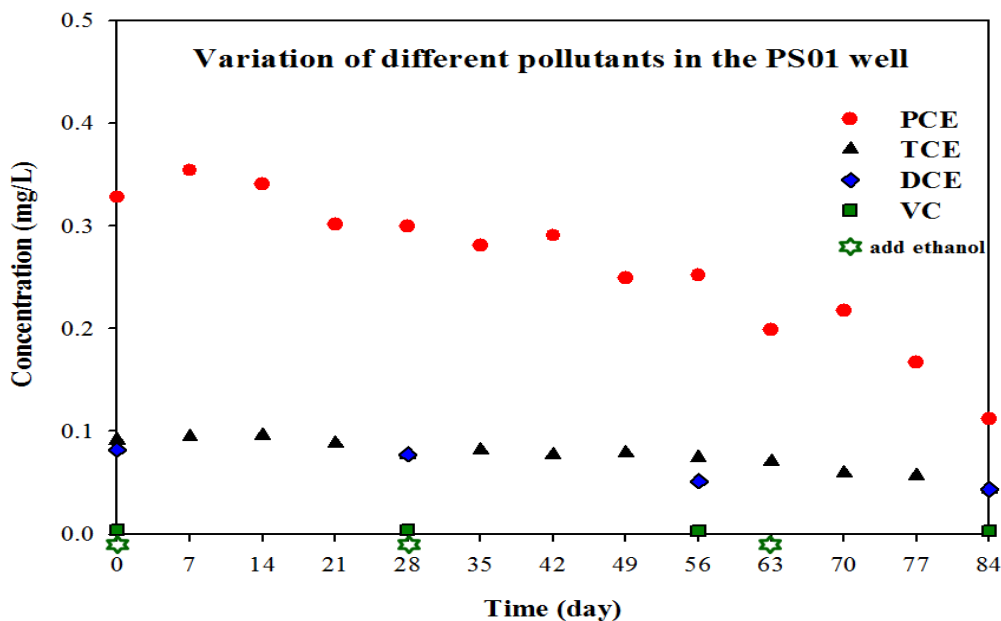


圖 1.11 計畫主持人實場整治含氯有機物之成效

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。



第一章、計畫緣起與目的

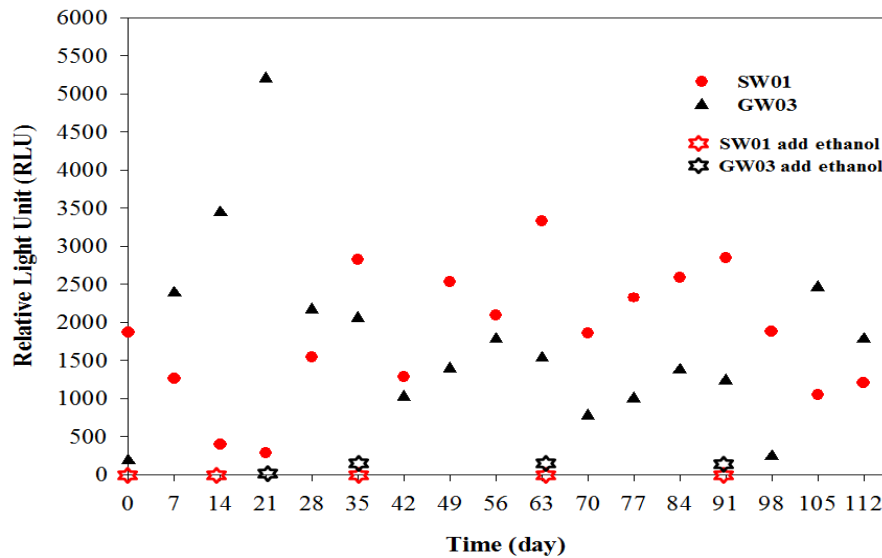


圖 1.12 實場整治微生物生長趨勢圖

本研究團隊於本計畫第一年的執行成果顯著，對於地下水質能有效掌握，且能顯著降低污染場址之所有含氯污染物濃度。在地下水質部分，圖 1.13 為本計畫整治下污染場址熱區地下水注藥井之 pH 值變化。從結果顯示，污染場址熱區之地下水 pH 值初始介於 7.21~7.35 之間，在整治後其注藥井的 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 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。至於抽除井 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。

圖 1.14 為本計畫整治下污染場址熱區地下水注藥井電導度之變化。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。



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

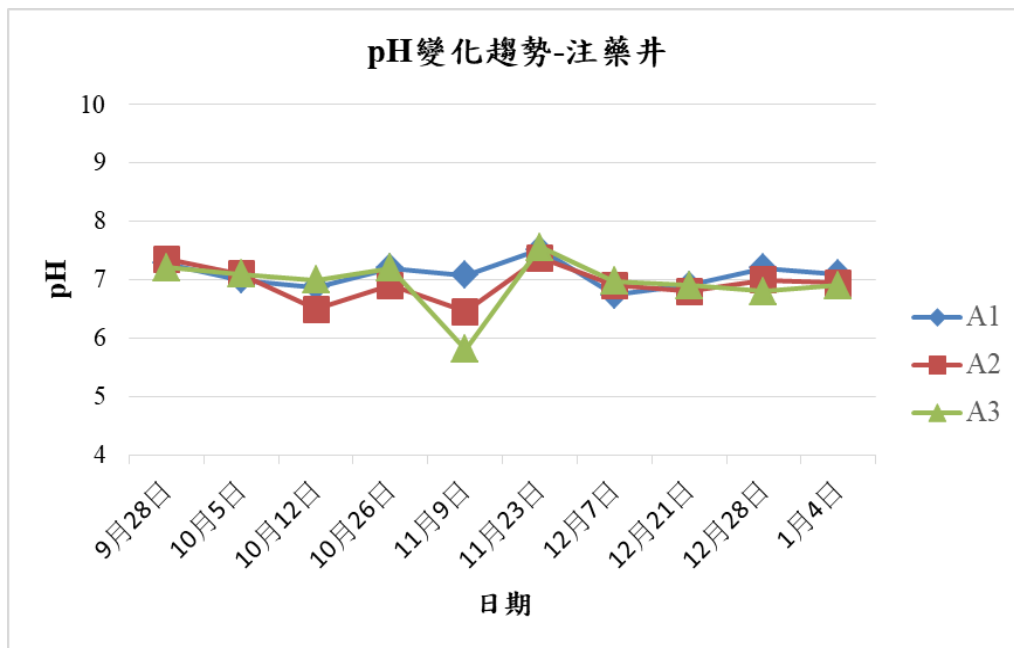


圖 1.13 污染場址熱區之地下水 pH 值變化

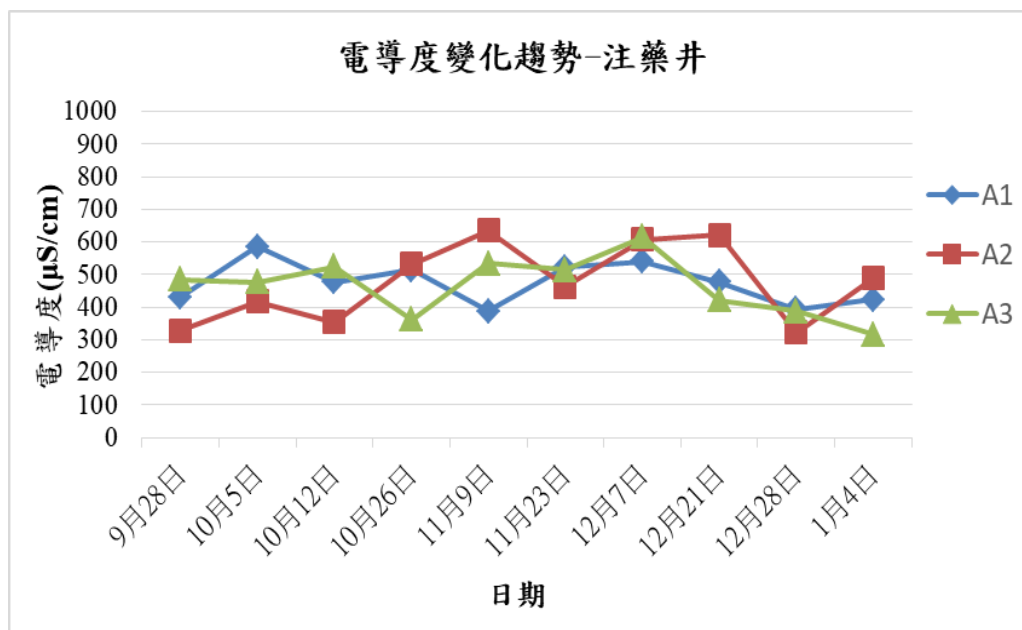


圖 1.14 污染場址熱區之地下水電導度變化-注藥井



圖 1.15 為本計畫整治下污染場址熱區地下水注藥井之溶氧變化。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。

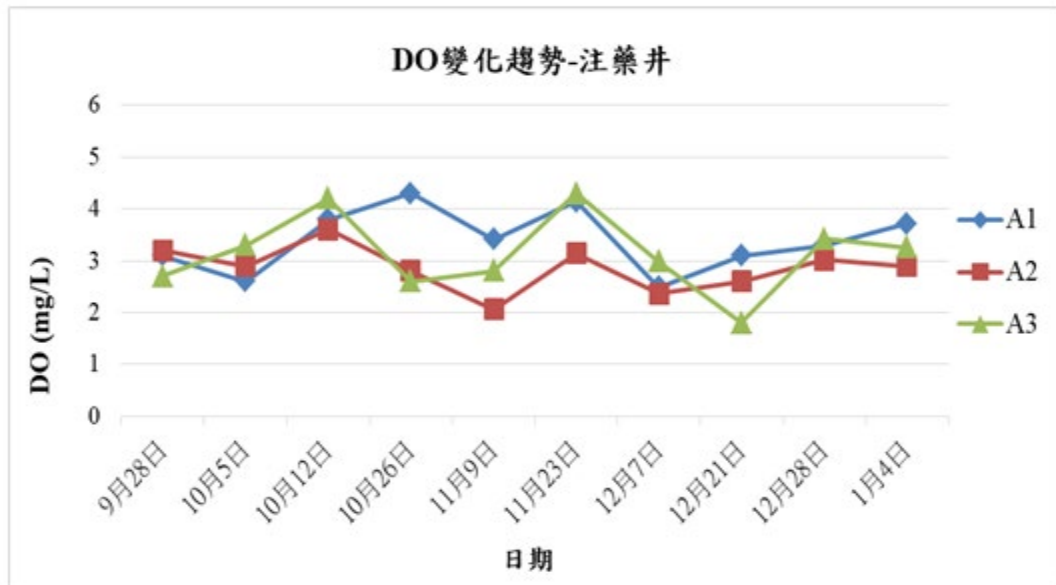


圖 1.15 污染場址熱區之地下水溶氧變化-注藥井

在含氯污染物降解部分，圖 1.16 為本計畫整治下污染場址熱區注藥井及抽除井地下水四氯乙烯濃度變化。注藥井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，其整治後目前皆已符合地下水監測標準。至於抽除井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)。另從場址內監測井濃度得知，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

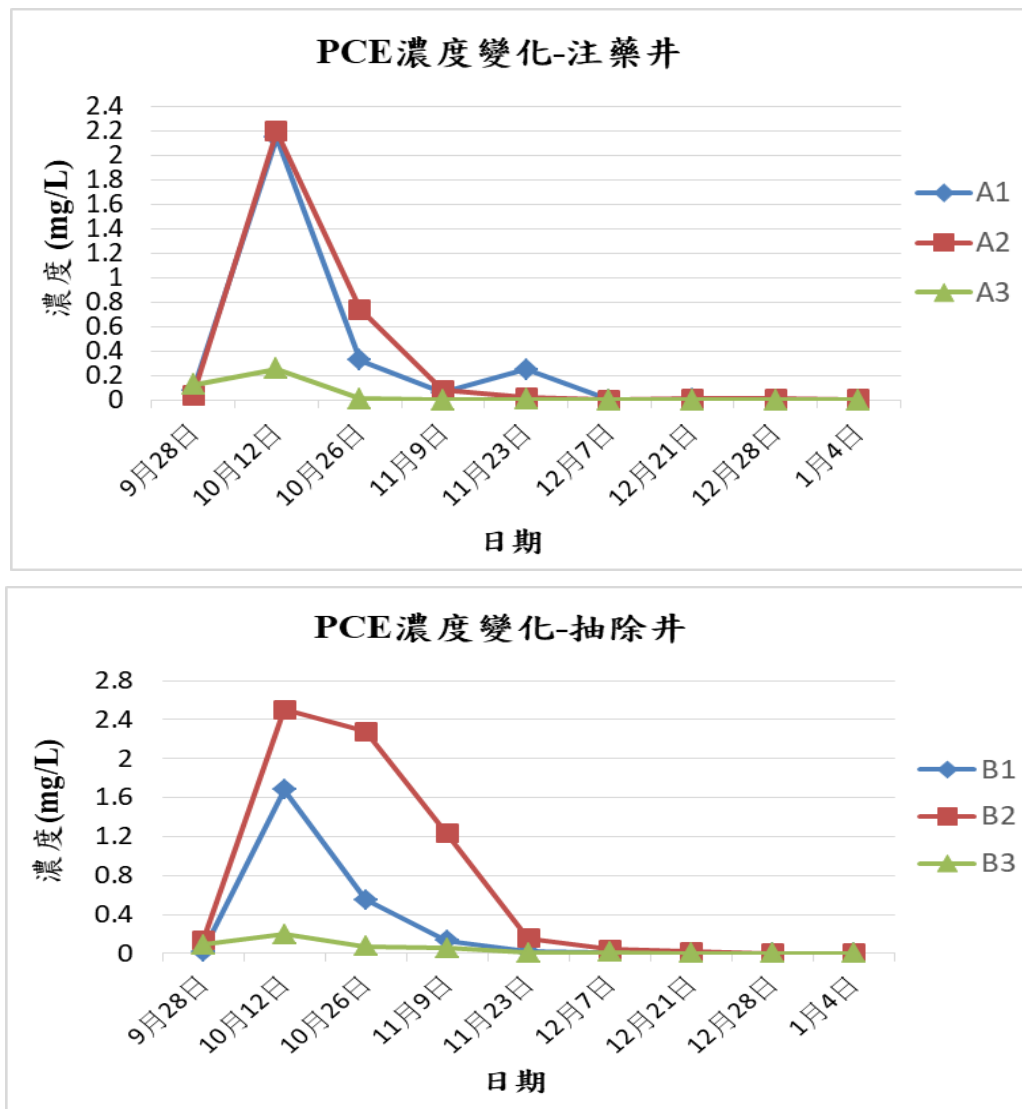


圖 1.16 污染場址熱區之地下水地下水四氯乙烯濃度變化



第一章、計畫緣起與目的

圖 1.17 為注藥井及抽除井地下水三氯乙烯濃度變化。從注藥井初始值得知，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，大部份監測井 MW01 及 MW04 三氯乙烯濃度變化保持平緩，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。

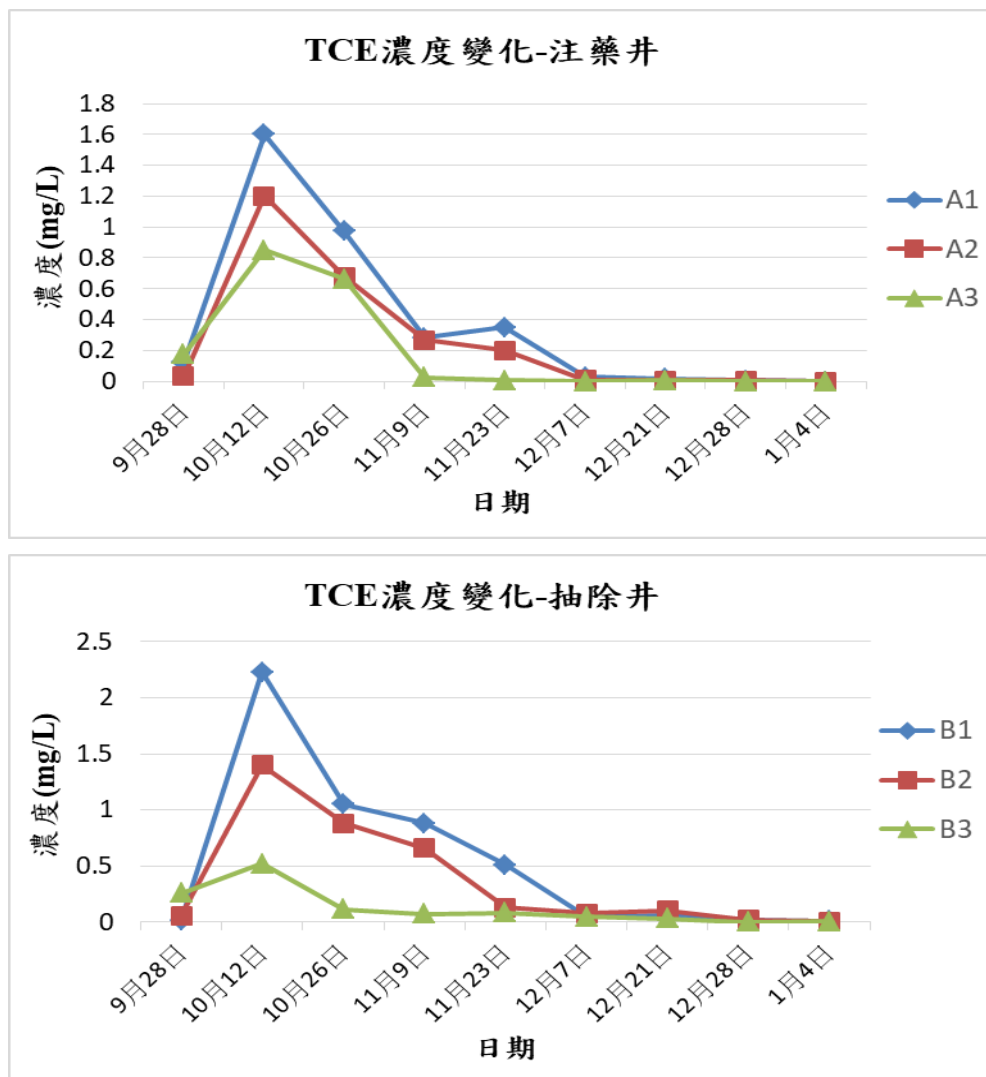


圖 1.17 污染場址熱區之地下水三氯乙烯濃度變化



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。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

根據前述及第一年研究成果為依據，本年度第二年研究計畫持續以**快速、精準、多功能且高經濟效益的處理技術**整治全場含氯污染物地下水，相信研究成果可作為未來國內土壤及地下水處理技術的重要參考。透過本年度第二年污染場址的重新鑿井，並持續監控第一年整治後之整治井的污染濃度，擴大整治範圍以釐清此整合技術處理全場含氯有機物污染土壤及地下水的處理效率及相關操作參數問題，如整治影響範圍、乙醇注入的功效、電動力產生之各種電化學反應對地下水層的影響、電觸媒廢水處理設施處理成效及操作時間控制等。最後，探討在此整合技術下全場的整治效果及評估本整合技術所需的整治費用。

1. 調查全場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，定位場址可能的黏土層或不透水層以掌握全場污染熱點。
3. 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。



第一章、計畫緣起與目的

4. 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。
5. 計算全場整治工程設置成本及操作成本，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. 獲得本計畫污染場址全場土壤及地下水各項水質參數(如 pH、導電度、氧化還原電位、溶氧等)及含氯有機物濃度，作為本計畫污染整治之背景數值。
2. 以單井流速流向量測獲得污染場址的流場分析，據以掌握全場污染熱點；同時結合共溶劑及電動力法之完整現地處理系統整治全場含氯有機物污染之土壤及地下水。
3. 隨操作時間變化之各項地下水水質(如 pH、導電度、氧化還原電位、溶氧等)可有效掌握，並獲得本整治系統處理全場污染場址之最佳試驗參數。
4. 透過本整合技術於短時間操作及污染濃度監控下，有效降低全場土壤及地下水中含氯有機物濃度，使全場地下水含氯有機物濃度皆低於或接近管制標準，證實本技術整治含氯有機物場址的有效性。
5. 完成全場整治工程設置成本及操作成本的估算，瞭解市場的競爭力及潛力。



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 1 年，其研究方法及架構如圖 2.1 所示。首先，持續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、立誠電腦公司及大葉大學團隊)共同參與本計畫執行；接著設置整治井及監測井進行場址水文調查(如進行微水試驗獲得水力傳導係數)、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。

根據第一年計畫整治後之目前污染範圍規劃設置相關整治井及監測井，並進行為期 1 年的污染整治工作，且持續監控全場含氯污染物濃度之變化，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。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，並持續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以達到循環之目標。

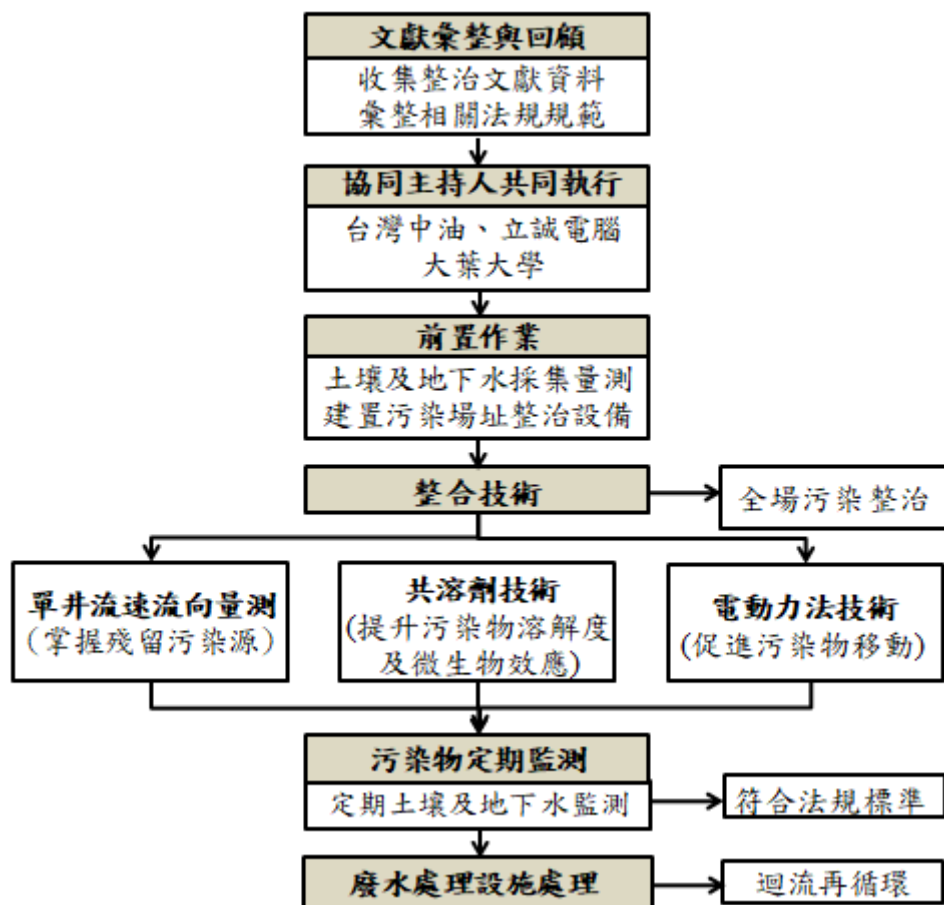


圖 2.1 建構「整合技術去除含氯有機物污染土壤及地下水」研究流程圖



本研究污染場址是位於彰化縣彰化市荊桐段 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 4.0~4.5 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，並持續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 (全場污染整治)

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回收再迴流至陽極端達到循環的目標。

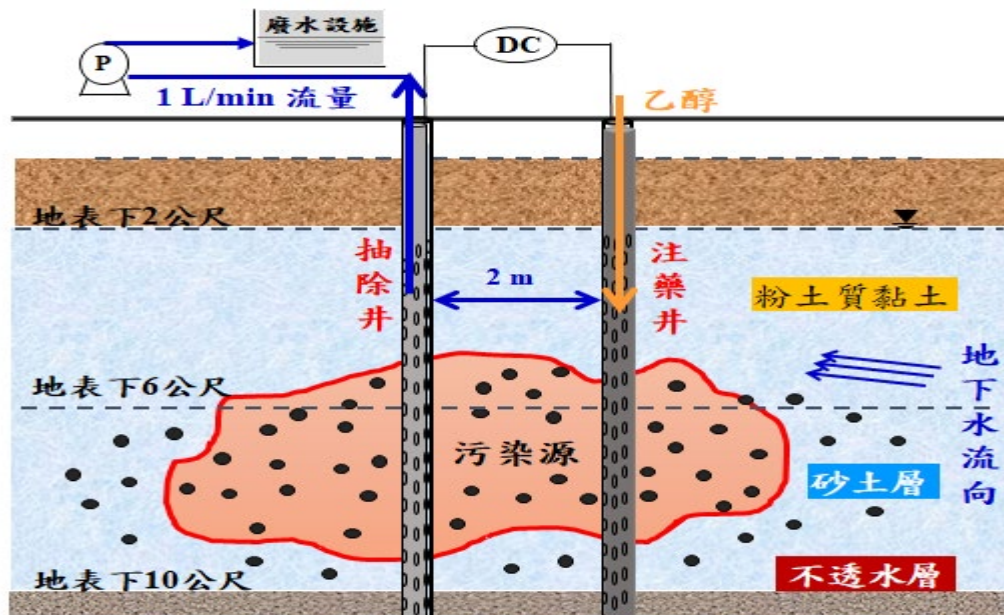


圖 2.3 本計畫整治操作示意圖

依據第一年度計畫整治成效，其本場址污染範圍已經顯著縮減，本計畫第二年度需進行整治區域為場址左側及場址中間區域，其主要污染範圍如圖 2.4 (紅色範圍內)。依目前污染場址範圍可能之污染熱點規劃設置注藥井、抽除井及監測井。本計畫第二年新設置 4 口注藥井(A5~A8)、4 口抽除井(B5~B8)及 2 口監測井(MW08 及 MW09)，連同第一年共計設置 8 口注藥井、8 口抽除井及 9 口監測井(原場址另有 3 口)，進行為期 1 年的全場污染整治，其操作參數彙整於表 2.1。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，每月注入一次，共添加 8 次為操作原則，每次注入後可使乙醇於地下水體維持約 2%~5% 之濃度，使乙醇共溶劑與含氯污染物產生共溶反應，預計第二年乙醇的使用量約為 8 噸。



第二章、研究方法及過程

根據第一年整治成果得知，目前監測井 MW01、MW03 及 MW04 之四氯乙烯濃度尚高於管制標準，故第二年計畫將針對其三口監測井進行污染整治。將 MW01、MW03 及 MW04 作為陰極抽除井，並以鄰近的 B1、B4 及 B3 作為陽極注藥井，持續進行污染整治工作，以期有效降解地下水之含氯污染物濃度。

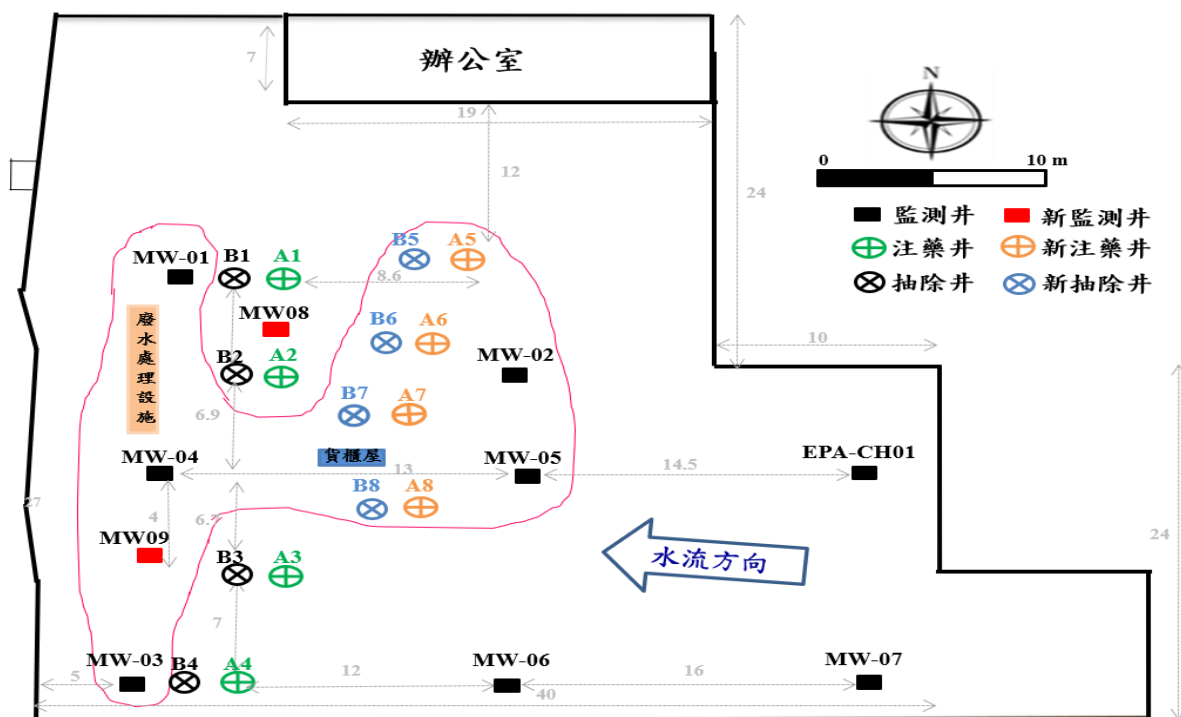


圖 2.4 本計畫污染場址全場整治規劃示意圖

表 2.1 本計畫整場污染整治操作條件

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



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

本計畫電動力法系統設置部份，於注藥井中置入鈦管作為陽極，抽除井置入不銹鋼管作為陰極，以整流器通入直流電進行電動力法整治。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。依據本計畫場址污染深度 3~8 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 2 英寸，深度 8 m，開篩深度為 2~8 m。整治期間，將定期量測地下水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。主要分析含氯污染物(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 第二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	監測位置	頻率
整治井及 監測井- 地下水	污染物濃度：PCE、TCE、1,2-DCE、VC、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
廢水處理 設施- 放流水	PCE、TCE、1,2-DCE、VC、真色色度、BOD、COD、SS	迴流槽	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[20]，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 5 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，容納廢水量為 6 噸；第三槽為廢水電解槽，容納廢水量為 3 噸；第四槽為暫存槽，容納廢水量為 1 噸；第五槽為放流水迴流槽，容納廢水量為 6 噸。廢水處理設施主要操作程序為將地下水抽至第一槽廢水暫存槽後，當達一定水位後以抽水馬達自動抽至第二槽曝氣槽進行曝氣，接著以重力流方式分別進入第三槽廢水電解槽及第四槽廢水暫存槽，當第四槽達一定水位後以抽水馬達自動抽至第五槽放流水迴流槽。當放流水之含氯污染物濃度符合地下水監測標準，再以重力流方式迴流至注藥井(陽極端)，其主要處理設施如圖 2.5 所示。



圖 2.5 本計畫廢水處理設施

在廢水處理設施之第四槽廢水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。根據第一年計畫廢水處理設施處理成效得知(表 2.3)，放流水水質檢測項目如真色、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)，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。本年度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，同時額外加裝一台鼓風機裝置，提升每一槽體之曝氣量以達更快速及有效的進行地下水處理，並將處理後之放流水予以迴流至注藥井(陽極端)。



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 2.3 本計畫定期放流水水質檢測結果

檢測項目	110/7/28	110/8/25	110/9/29	110/10/26	110/11/24	110/12/28
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

由於本計畫污染場址之四氯乙烯污染物最高濃度高於管制標準(0.05 mg/L)達 50 倍，故本年度第二年計畫額外加裝一台鼓風機裝置，提升廢水處理設施每一槽體之曝氣量，以達更快速及有效的處理高濃度含氯污染物之地下水。因此，在整治井進行污染整治前，將先進行高濃度含氯污染物地下水降解測試，以獲得廢水處理設施的處理成效。根據廢水處理設施每個槽體可容量之水量，設計一組實驗進行操作，其每一槽體之操作及採樣時間如表 2.4 所示。廢水處理設施操作時間設定為 8 小時，第三槽電觸媒廢水處理系統以施加總電壓 90 V 進行操作，其餘槽體皆為曝氣操作，並依照不同時間進行採樣檢測含氯污染物濃度。

表 2.4 本計畫廢水處理設施之效能測試

時間	第一槽	第二槽	第三槽	第四槽	第五槽
8:30	每 10 分鐘 採樣檢測				
9:30					
10:30					
11:30		每 30 分鐘 採樣檢測	每 30 分鐘 採樣檢測	每 30 分鐘 採樣檢測	每 30 分鐘 採樣檢測
12:30					
13:30					
14:30					
15:30					
16:30					



為使本計畫順利執行，特委請台灣中油公司林舜隆及朱正文研究員、立誠電腦資訊有限公司陳鴻國博士及大葉大學環工系助理教授沈善鎰博士擔任計畫協同主持人，其協同主持人資料於表 2.5。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。大葉大學環工系助理教授沈善鎰博士協助其實驗設計檢討及規劃、整治數據探討及未來實場整治應用之綜合性評估等工作。

表 2.5 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
沈善鎰	大葉大學環境工程學系助理教授	中興大學環境工程系博士班畢業	環境工程 環境污染整治

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進行處理，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，以達到本研究最佳化之參數。此計畫之研究成果和相關數據將有利於未來其他實場污染場址應用之參考，其有研究之必要性。



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

2.3 計畫進度與檢核說明

表 2.6 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、電觸媒廢水處理系統成效、污染場址整場整治、微生物菌項檢測、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 2.6 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	12	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	■	■	■										
熱流式單井流速流向儀量測			■										
乙醇共溶劑結合電動力法整治含氯有機物試驗				■	■	■	■	■	■	■	■		
探討整合技術整治含氯有機物去除效率及成本分析				■	■	■	■	■	■	■	■		
污染物質質量平衡及反應動力、電動力系統電壓及電流監測							■	■	■	■	■		
放流水水質監測				■	■	■	■	■	■	■	■		
成果報告撰寫											■	■	



第二章、研究方法及過程

工作進度估計百分比 (累 積 數)	5%	10%	15%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%	
預定查核點	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、土壤質地調查、乙醇共溶劑及電動力法設備架設；完成熱流式單井流速流向儀量測、廢水處理設施處理效能及乙醇共溶劑結合電動力法整治含氯有機物操作試驗。										
	期末		完成探討整合技術處理含氯有機物之去除效率及及成本分析、污染物質質量平衡及反應動力、電動力系統電壓及電流監測、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

第二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 2-4。目前整治井部份已如期設置完成，總計設置 8 口(A5~A8, B5~B8)整治井；在監測井部份亦如期完成，除了原監測井外(MW01~MW07)，新設置 2 口(MW08 及 MW09)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 及圖 3.2。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	2 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

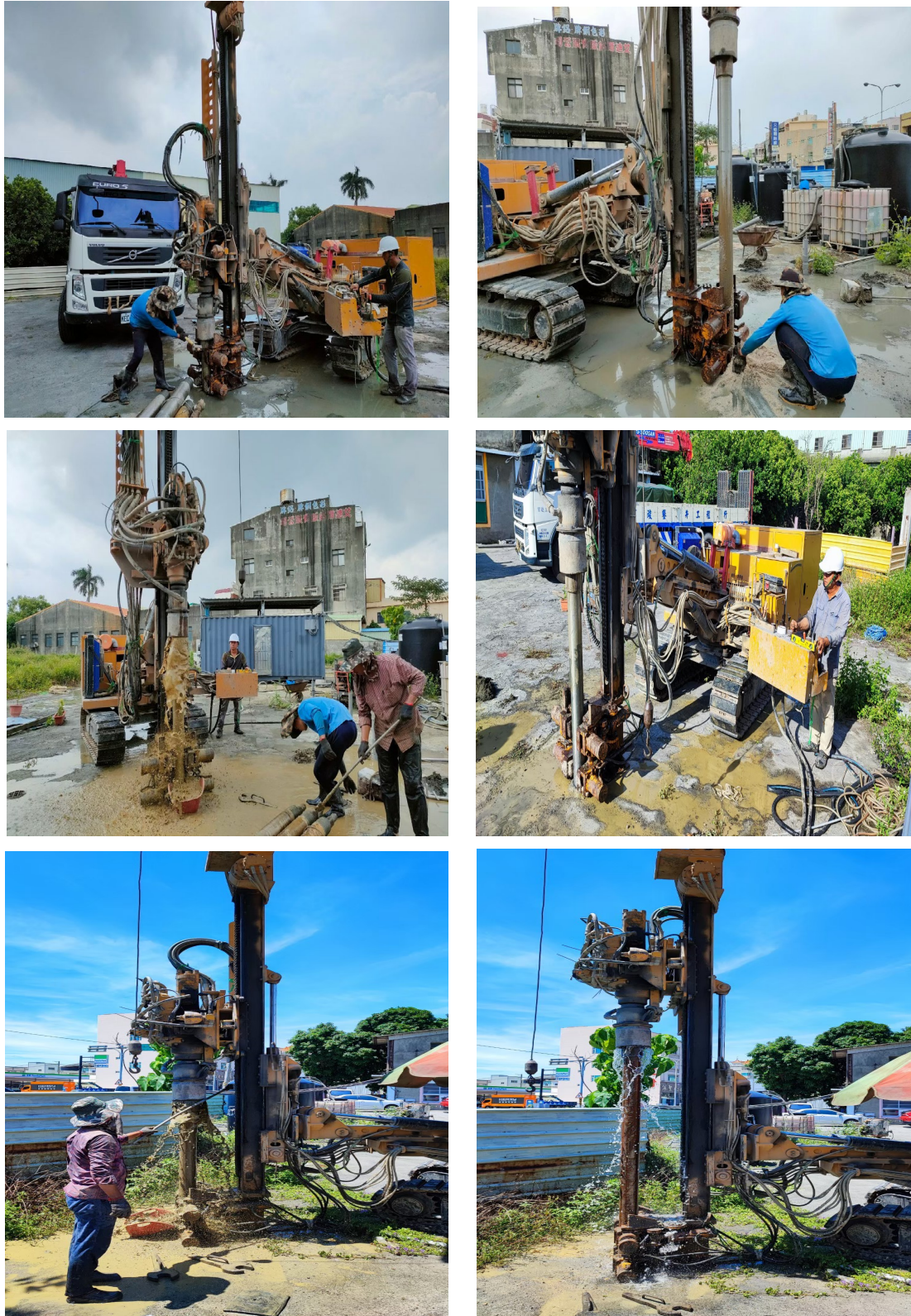


圖 3.1 污染整治區鑿井施工圖



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 3.2 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 3.3。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 3.3 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



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

3.1.3 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(B4~B8)設置抽水馬達裝置，如圖 3.4。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 3.4 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 。由於本年度第二年計畫新增 4 對整治井(A5~A8，B5~B8)，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，除了第一年計畫之原有電力設備外，新設置一組電力系統，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，並有效掌握本計畫污染場址之電力消耗。其主要施工及完工如圖 3.5 及圖 3.6。



圖 3.5 電力設備施工圖



圖 3.6 電力設備完工圖



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

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，5個廢水反應槽可容納廢水依序為1噸、6噸、3噸、1噸及6噸，如圖 3.7。由於第二年計畫主要整治整場污染場址地下水，為使本計畫設置之廢水處理設施能達到有效及快速的地下水含氯污染物處理，除原有的一台鼓風機外，另新設一台鼓風機設施，使廢水處理設施每個槽體可達到均勻且足夠的曝氣量。廢水處理設施之鼓風機施工情形如圖 3.8~圖 3.10。



圖 3.7 本計畫廢水處理反應槽



圖 3.8 廢水處理設施鼓風機管線施工圖-1



圖 3.9 廢水處理設施鼓風機管線施工圖-2



圖 3.10 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

本計畫期中報告已完成本場址地下水流速流向、土壤地質、地下水水質及含氯有機物濃度調查、廢水處理設施處理成效與污染場址整治操作，定期監測地下水質及含氯有機物濃度隨時間之變化，並持續監測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 MW08 與 MW09 及整治井 A5~A7 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，其量測過程如圖 3.11。根據 5 口監測井不同深度流速量測結果顯示，監測井 MW08 於深度 4.5 公尺為 91 cm/day、深度 7.5 公尺為 118 cm/day；監測井 MW09 於深度 4.5 公尺為 36 cm/day、深度 7.5 公尺為 49 cm/day；整治井 A5 於深度 4.5 公尺為 91 cm/day，深度 7.5 公尺為 36 cm/day；整治井 A6 於深度 4.5 公尺為 76 cm/day，深度 7.5 公尺為 67 cm/day；整治井 A7 於深度 4.5 公尺為 21 cm/day，深度 7.5 公尺為 27 cm/day。本場址地下水不同深度之平均流速約介於 21 cm/day~118 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，地下水流向為東南東向西北西方向、深度 7.5 公尺位置則為東向西方向為主。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砂質黏土層，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。



圖 3.11 單井地下水流向流速量測過程



土壤地質調查

土壤地質將影響含氯污染物的濃度分佈及地下水之流速，本計畫除了針對地下水流速流向量測外，亦同時針對土壤地質進行調查。主要針對場址內新設置的監測井 MW08 與 MW09 及 4 對整治井(A5~A7 及 B5~B8)為調查井口，並以每 1.5 公尺為間隔進行分類，從地表至地底下 7.5 公尺進行調查。圖 3.12 及表 3.4 為場址不同井口之土壤地質分類過程及統計結果。從 10 口井調查結果得知，從地表至 1.5 公尺，主要以 RC 結構為主，包含水泥、礫石及部份砂粒，地表至地表下 4.5 公尺以內，以黏粒及砂粒土壤為主，地表下 4.5 公尺以下大部分為砂粒土壤，僅有少數井如 A5、B5、A6、A8 及 B8 為黏粒土壤，顯示其土壤地質有些許差異，後續將與含氯污染物濃度變化進行討論。

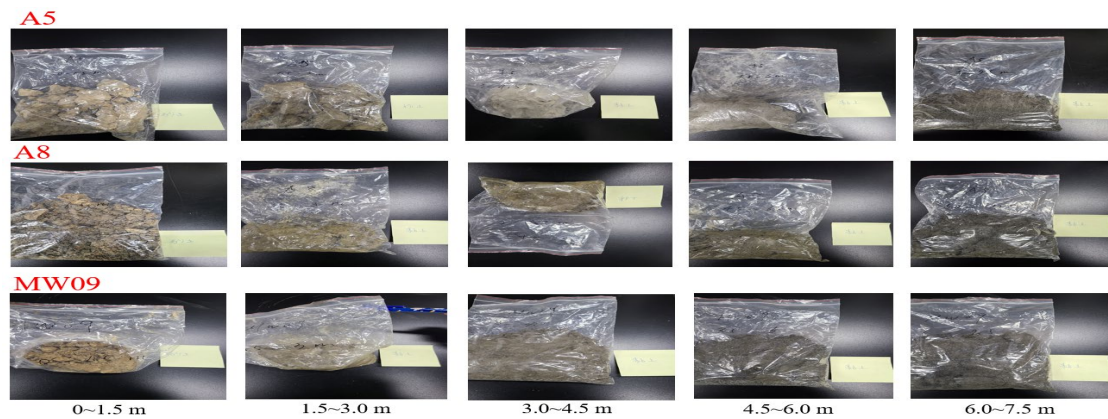


圖 3.12 場址土壤地質分類過程

表 3.4 場址土壤地質統計結果

深度	A5	B5	A6	B6	A7	B7	A8	B8	MW08	MW09
0~1.5 m	礫石	礫石	礫石	礫石	砂土	礫石	砂土	砂土	砂土	砂土
1.5~3.0 m	粉土	砂土	粉土	粉土	粉土	粉土	黏土	黏土	粉土	黏土
3.0~4.5 m	黏土	黏土	黏土	黏土	黏土	黏土	黏土	黏土	黏土	粉土
4.5~6.0 m	黏土	黏土	黏土	砂土	砂土	砂土	黏土	黏土	砂土	砂土
6.0~7.5 m	砂土	砂土	砂土	砂土	砂土	砂土	砂土	砂土	砂土	砂土



場址水質及污染調查

本計畫於場址污染整治前，於 111 年 8 月針對目前場址內所有整治井(A1~A8 及 B1~B8)及監測井(MW01~MW09)進行地下水基本水質特性分析，其包括 pH 值、電導度、溶氧及氧化還原電位等。根據表 3.5 量測結果，地下水 pH 值約介於 6.18~7.48，電導度約介於 179~ 922 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 之間，地下水溶氧約介於 1.4~3.62 mg/L ，地下水 ORP 則介於-136~253 mV 。

表 3.5 本場址整治井及監測井地下水質量測結果- 111 年 8 月

採樣井編號		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
採樣日期		8/12	8/12	8/12	8/12	8/12	8/12	8/12
檢測項目	管制	量測結果						
pH	-	6.99	7.17	7.24	6.18	6.87	7.05	6.84
導電度($\mu\text{S}/\text{cm}$)	-	589	686	443	922	721	425	518
溶氧(mg/L)	-	1.4	1.63	1.45	1.82	2.0	2.56	1.81
ORP(mV)		-83	-136	-82	-39	65	253	235
採樣井編號		A8	B1	B2	B3	B4	B5	B6
採樣日期		8/12	8/12	8/12	8/12	8/12	8/12	8/12
檢測項目	管制	量測結果						
pH	-	6.84	7.34	7.32	7.39	7.48	6.76	7.32
導電度($\mu\text{S}/\text{cm}$)	-	722	381	386	338	352	568	335
溶氧(mg/L)	-	3.4	2.29	3.62	1.88	2.88	2.84	3.5
ORP(mV)		65	-58	-126	-106	247	211	249
採樣井編號		B7	B8	MW01	MW02	MW03	MW04	MW05
採樣日期		8/12	8/12	8/12	8/12	8/12	8/12	8/12
檢測項目	管制	量測結果						
pH	-	6.87	6.87	6.69	6.66	7.0	6.95	7.01
導電度($\mu\text{S}/\text{cm}$)	-	483	506	447	306	674	649	842
溶氧(mg/L)	-	3.16	3.28	2.43	2.98	3.36	3.03	2.69
ORP(mV)		225	29	56	57	-7.9	-99	35
採樣井編號		MW06	MW07	MW08	MW09			
採樣日期		8/12	8/12	8/12	8/12			
檢測項目	管制	量測結果						
pH	-	6.67	6.82	6.78	6.85			
導電度($\mu\text{S}/\text{cm}$)	-	179	682	762	597			
溶氧(mg/L)	-	2.46	1.86	2.1	2.69			
ORP(mV)		62.3	65	35	101			



表 3.6 為 111 年 8 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-1,2-二氯乙烯濃度超標。以下茲就各關切污染物分佈情形說明。

1. 四氯乙烯

四氯乙烯部分，本場址新設置整治井 A5~A8 及 B5~B8 濃度高於管制標準，介於 0.14~1.50 mg/L 之間，顯示靠近場址中間位置為目前四氯乙烯主要污染區域且為主要污染熱區，另靠近馬路邊之 A1~A2 及 B1~B2 因鄰近污染熱區，於污染擴散的情況下濃度尚高於監測標準及管制標準，至於 A3~A4 及 B3~B4 整治井於第一年計畫整治下，污染濃度已大幅降低；於監測井部份，MW08 四氯乙烯濃度為最高，濃度達 2.82 mg/L。

2. 三氯乙烯

地下水三氯乙烯部分，新設置整治井 A5~A8 及 B5~B8 濃度高於管制標準，濃度介於 0.28~1.46 mg/L 之間；監測井 MW01~MW09 三氯乙烯濃度介於 0.006~1.83 mg/L 之間，以監測井 MW08 最高。與四氯乙烯相同，仍以靠近場址中間位置之地下水為目前污染區域。

3. 順-1,2-二氯乙烯

本場址地下水中順-1,2-二氯乙烯，新設置整治井 A5、A8 及 B5 濃度高於管制標準(0.70 mg/L)，A6、B6 及 B7 濃度高於監測標準(0.35 mg/L)，濃度介於 0.22~1.52 mg/L 之間；監測井部份以 MW08 濃度為最高，超過管制標準(0.70 mg/L)，其濃度為 1.66 mg/L。



表 3.6 地下水含氯有機物檢測結果- 111 年 8 月

採樣井編號			A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
採樣日期			8/26	8/26	8/26	8/26	8/26	8/26	8/26
檢測項目	監測	管制	檢測結果						
順-二氯乙烯	0.35	0.70	1.42	0.88	0.005	0.008	1.52	0.42	0.25
三氯乙烯	0.025	0.05	ND	0.034	ND	ND	1.26	0.68	0.52
四氯乙烯	0.025	0.05	0.076	0.16	ND	0.005	1.43	0.88	0.70
採樣井編號			A8	B1	B2	B3	B4	B5	B6
採樣日期			8/26	8/26	8/26	8/26	8/26	8/26	8/26
檢測項目	監測	管制	檢測結果						
順-二氯乙烯	0.35	0.70	0.43	0.40	0.22	0.12	0.06	1.92	0.55
三氯乙烯	0.025	0.05	0.28	0.16	0.01	0.02	0.04	1.46	0.14
四氯乙烯	0.025	0.05	0.43	0.22	0.04	0.01	0.014	1.50	0.38
採樣井編號			B7	B8	MW01	MW02	MW03	MW04	MW05
採樣日期			8/26	8/26	8/26	8/26	8/26	8/26	8/26
檢測項目	監測	管制	檢測結果						
順-二氯乙烯	0.35	0.70	0.45	0.22	1.31	0.41	0.33	1.42	0.11
三氯乙烯	0.025	0.05	0.55	0.36	0.48	0.26	0.06	0.45	0.62
四氯乙烯	0.025	0.05	1.30	0.14	0.30	0.85	0.94	0.70	0.03
採樣井編號			MW06	MW07	MW08	MW09			
採樣日期			8/26	8/26	8/26	8/26			
檢測項目	監測	管制	檢測結果						
順-二氯乙烯	0.35	0.70	ND	ND	1.66	0.22			
三氯乙烯	0.025	0.05	ND	ND	1.83	0.07			
四氯乙烯	0.025	0.05	0.006	ND	2.82	0.08			

MDL：0.005 mg/L; ND：< 0.005 mg/L



3.2.1 電觸媒廢水處理系統成果

3.2.1.1 廢水處理水質變化

由場址污染調查顯示，因監測井 MW08 之順-二氯乙烯、三氯乙烯及四氯乙烯污染濃度為最高，因此先將監測井 MW08 之地下水以抽水馬達抽至廢水處理設施處理，以測試本計畫設置之廢水處理設施之處理效能；若能證實本計畫設置之廢水處理設施可有效及快速地處理高濃度含氯污染物地下水，後續將各種含氯污染物地下水抽至廢水處理設施即可有效處理，且處理後進行回收可再迴流至陽極端達到循環的目標。

圖 3.13(a)為監測井 MW08 地下水抽至廢水處理設施處理於第二槽曝氣槽 pH 值之變化。本場址 MW08 地下水 pH 值初始約為 6.79，從變化趨勢發現，MW08 地下水進入第一槽原水槽後提升至 pH 7.49，之後進入第二槽初始雖有上升趨勢，但爾後保持平穩狀態，最終 pH 值約為 8.61，接著 MW08 地下水進入第三槽至第五槽仍保持平穩，且 pH 值變化趨勢十分接近。圖 3.13(b)為監測井 MW08 地下水抽至廢水處理設施處理於第二槽曝氣槽導電度值之變化。本場址 MW08 地下水 pH 值初始約為 390 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ，從變化得知，當 MW08 地下水進入第二槽曝氣槽後，導電度值逐漸下降，從 456 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 降至約 304 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ，與初始值接近，至於其他槽體的導電度變化亦保持穩定。

圖 3.14(a)為監測井 MW08 地下水抽至廢水處理設施處理於第二槽曝氣槽溶氧之變化。本場址 MW08 地下水 pH 值初始約為 0.77 mg/L，進入第二槽曝氣槽後溶氧隨著操作時間顯著上升，溶氧值從 3.60 上升至 6.07 mg/L。其主要因曝氣槽之充足的曝氣量使地下水之溶氧顯著提升，且經由第三槽至第五槽後，溶氧值仍保持於 5.14 mg/L，可協助降解含氯污染物濃度。圖 3.14(b)為監測井 MW08 地下水抽至廢水處理設施處理於第二槽曝氣槽氧化還原電位之變化。本場址 MW08 地下水氧化還原電位初始值約為 47 mV，屬氧化電位，當 MW08 地下水進入第二槽曝氣槽後氧化還原電位顯著上升至 266 mV，氧化還原電位升高其主要為曝氣槽曝氣使溶氧值升高所導致的結果。其他槽體的氧化還原電位相近，且有相同的變化趨勢。

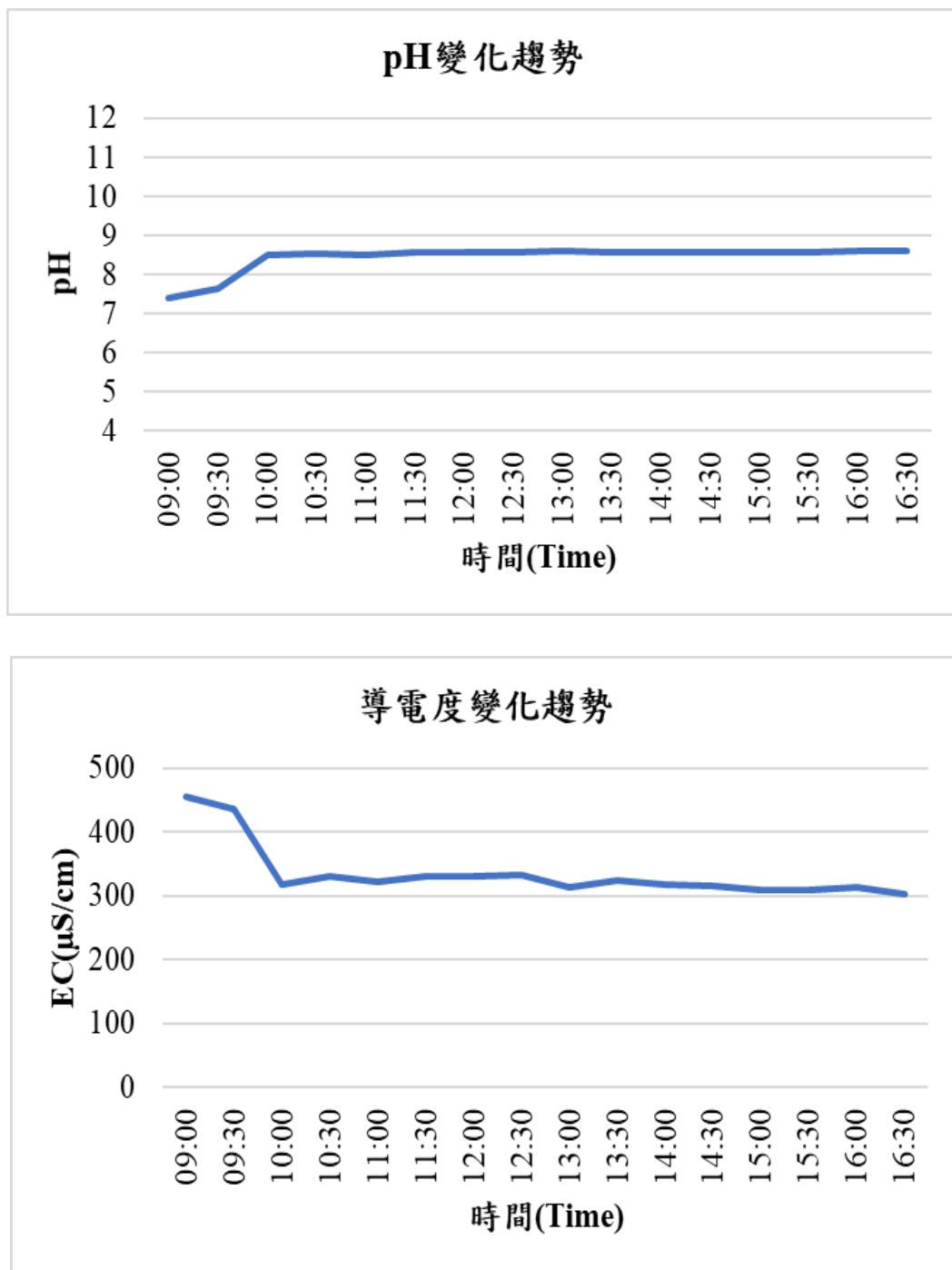


圖 3.13 廢水處理設施曝氣槽(a)pH 值及(b)導電度之變化



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

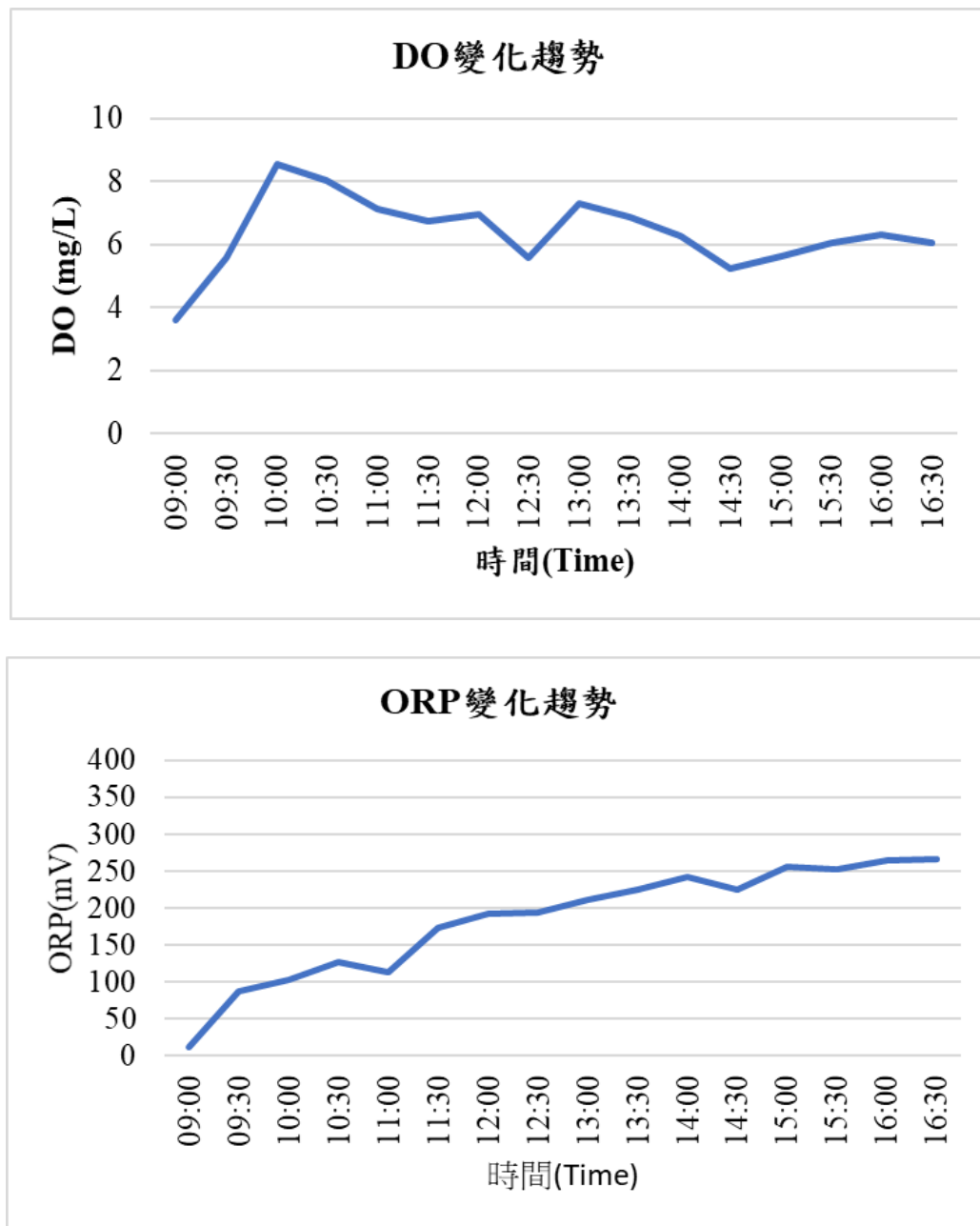


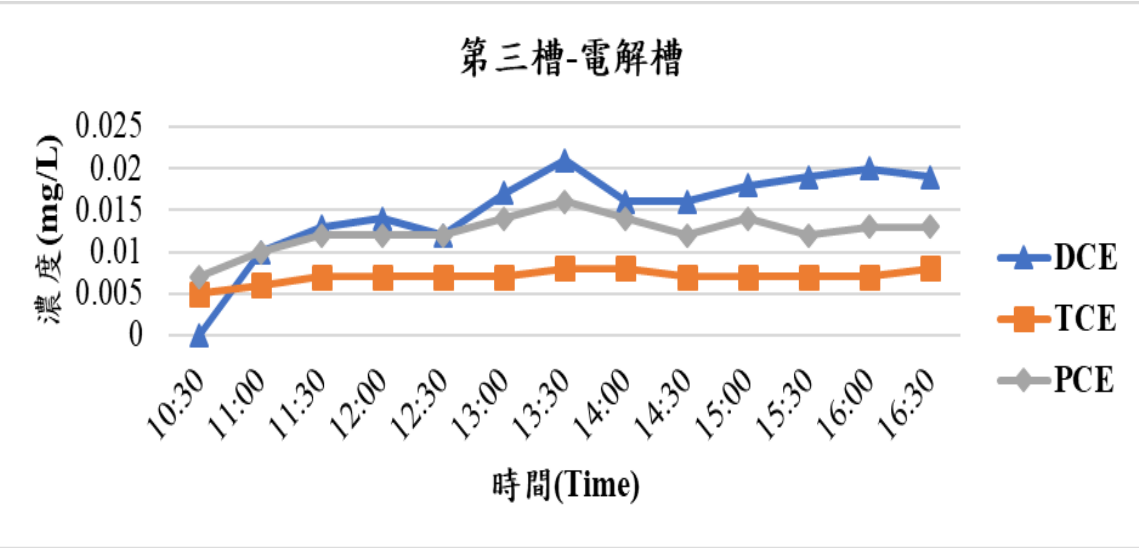
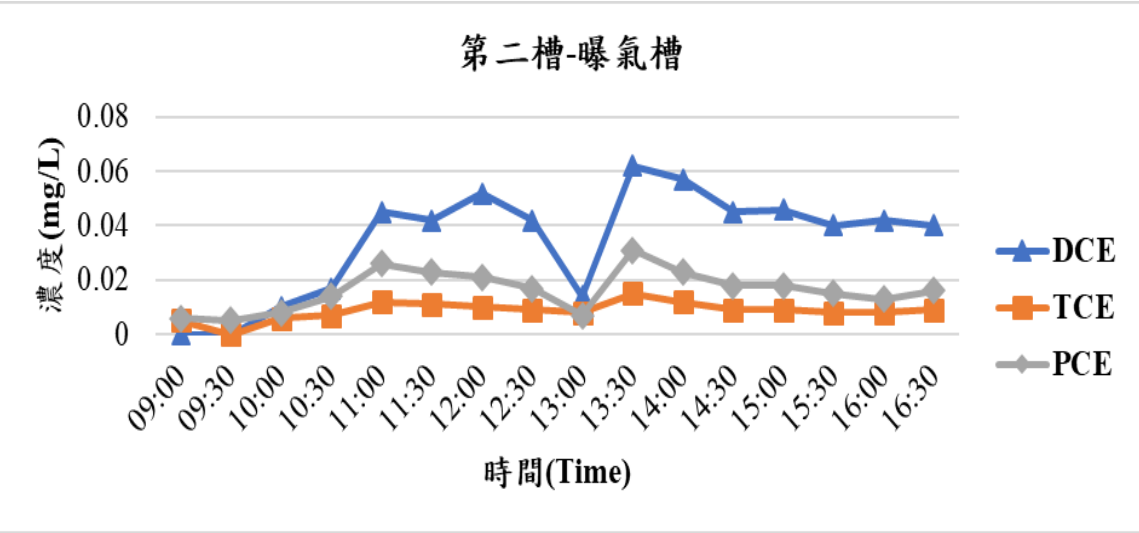
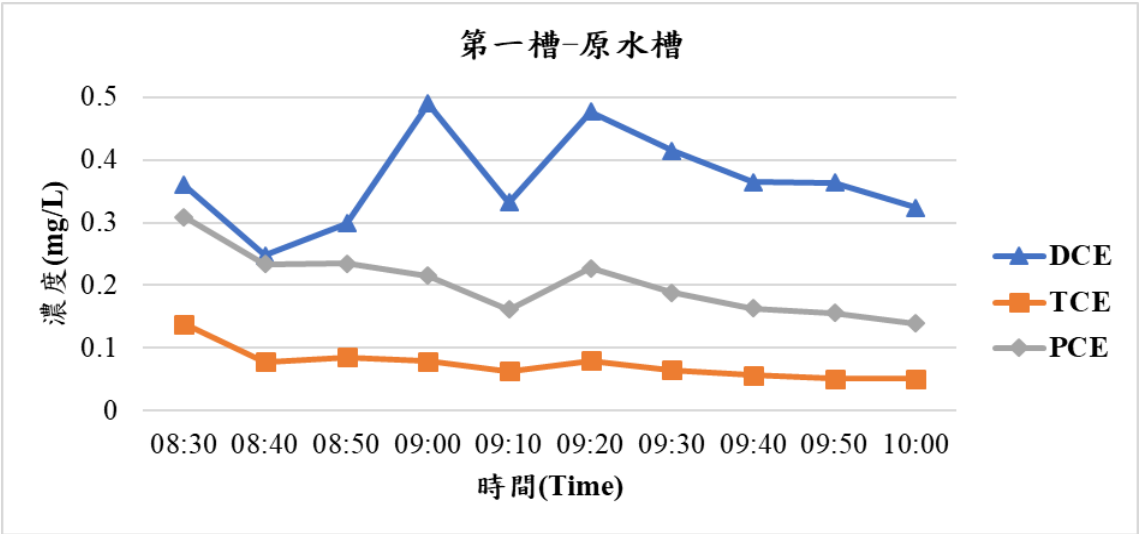
圖 3.14 廢水處理設施曝氣槽(a)溶氧及(b)氧化還原電位之變化



3.2.1.2 廢水處理含氯污染物濃度變化

本場址新設置監測井 MW08 地下水直接抽至地面之廢水處理設施處理，觀察本計畫設置之廢水處理設施對含氯污染物之處理成效，以作為後續放流水迴流至陽極端之參考依據。圖 3.15 及圖 3.16 為監測井 MW08 地下水抽至廢水處理設施下含氯污染物之濃度變化。監測井 MW08 地下水之順-二氯乙烯、三氯乙烯及四氯乙烯初始濃度別為 1.66 mg/L、1.83 mg/L 及 2.82 mg/L。從圖 3.15 及圖 3.16 不同含氯污染物濃度發現，當 MW08 地下水進入第一槽原水槽時，四氯乙烯濃度已降至 0.309 mg/L，經由 1.5 小時操作後，濃度下降至 0.138 mg/L；之後地下水進入第二槽曝氣槽後，四氯乙烯濃度逐漸上升，但後續持續降低，其主因較高濃度含氯污染物地下水進入曝氣槽後，導致濃度逐漸上升，但因足夠的曝氣裝置，使得於操作後期四氯乙烯濃度逐漸下降且趨於平緩，濃度為 0.016 mg/L；經由第二槽曝氣槽處理後，其四氯乙烯濃度已降至監測標準以下(0.025 mg/L)；第三槽電解槽與第二槽曝氣槽有相似的濃度變化，濃度呈現穩定的狀態，且濃度仍低於監測標準；當進入第四槽暫存槽及第五槽迴流槽之地下水四氯乙烯濃度已降至 ND。

觀察三氯乙烯的濃度變化可發現，其廢水處理設施之不同槽體的濃度變化與四氯乙烯有相同的趨勢，於第二槽曝氣槽及第三槽電解槽三氯乙烯濃度初始有些許上升，但隨著操作時間濃度逐漸下降且趨於穩定，操作後三氯乙烯濃度亦為 ND。至於順-二氯乙烯濃度，僅於第一槽原水槽濃度高於監測標準(0.35 mg/L)，其他槽體皆低於監測標準，且操作後亦為 ND。從第五槽迴流槽之順-二氯乙烯、三氯乙烯及四氯乙烯濃度得知，經由本計畫設置之廢水處理設施可將高濃度含氯污染物降至監測標準以下，且濃度皆為未檢出。後續可將陰極端抽出之地下水抽至本計畫設置之廢水處理設施處理，且放流水可迴流至陽極端達到循環的目標。



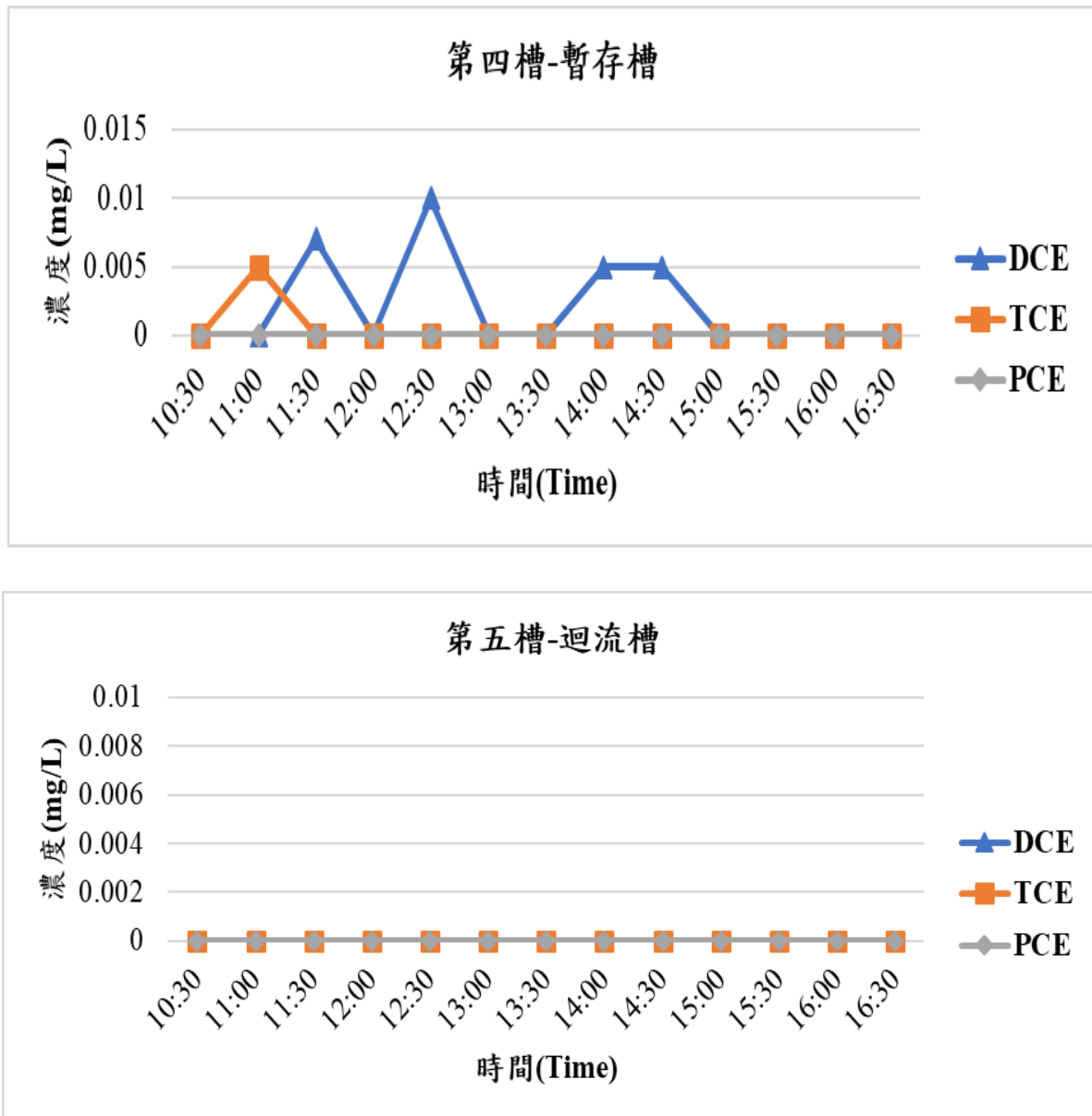


圖 3.15 廢水處理設施之不同含氯污染物濃度變化



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

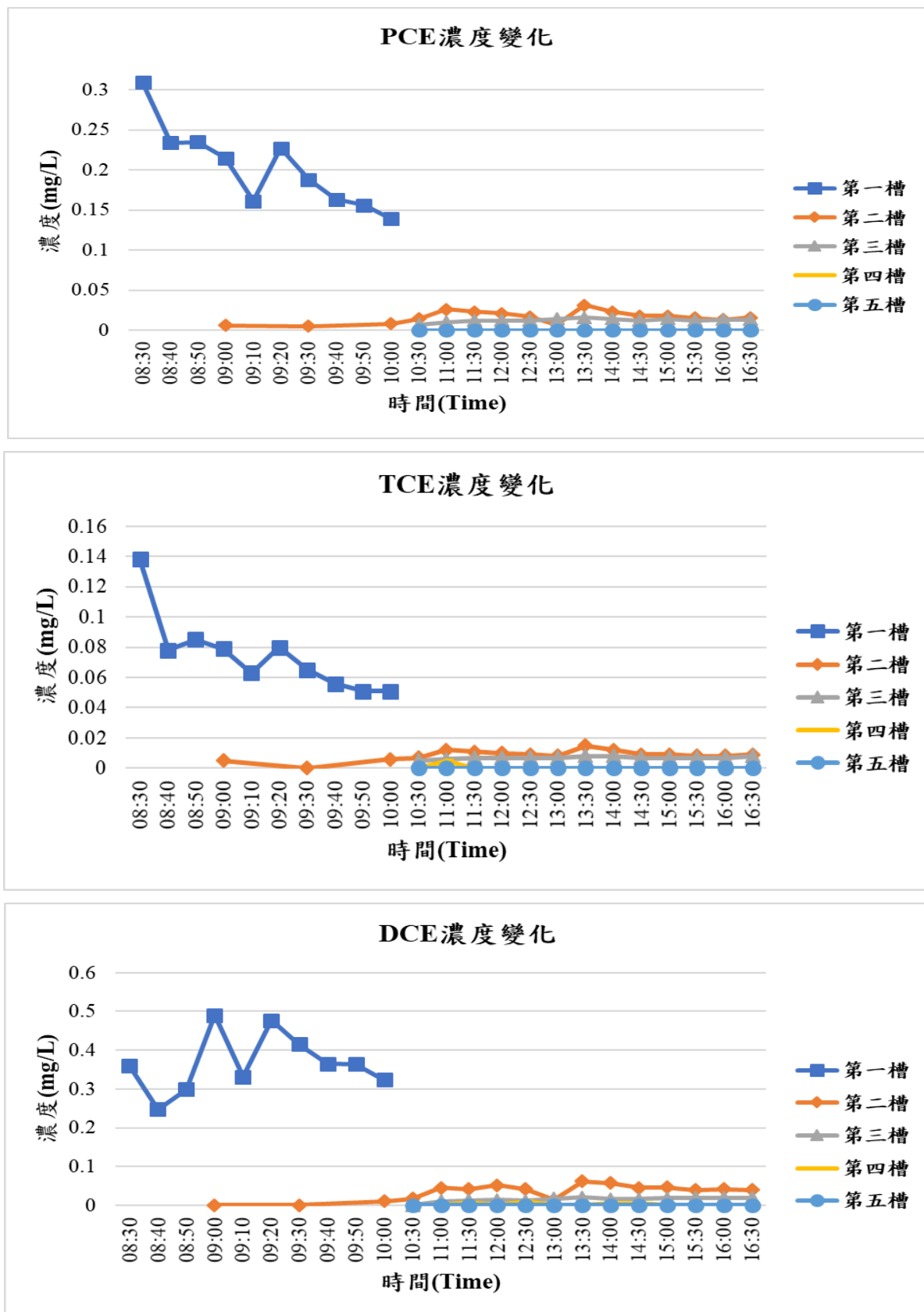


圖 3.16 廢水處理設施不同槽體之含氯污染物濃度變化



3.2.2 污染場址地下水整治成效

經由 MW08 地下水抽至本場址設置之廢水處理設施處理後證實，廢水處理設施可有效處理本場址高濃度含氯污染物之地下水，故接續進行高濃度污染區域(A5~A8 及 B5~B8 整治井)整治。本場址以每月定期檢測含氯污染物濃度，觀察本計畫工法共溶劑及電動力法之整治成效。本計畫共溶劑已於 111 年 10/19 及 12/16 注入，分別於 A5~A8 注藥井注入濃度 50%之乙醇 100 公升，接著進行電動力試驗操作，以每週三天間歇通電 6 小時的方式進行，並定期監測其地下水及放流水含氯污染物濃度及水質變化。

3.2.2.1 污染場址地下水水質變化

圖 3.17 及圖 3.18 為本計畫整治工法整治下，高濃度污染區域(A5~A8 及 B5~B8 整治井)地下水注藥井(陽極端)及抽除井(陰極端)pH 值之變化趨勢，監測期間為 111/8/12 至 112/2/24。本場址 A5~A8 及 B5~B8 整治井之地下水 pH 值初始約為 6.87~7.32 之間。從圖 3.17 變化趨勢發現，注藥井的 pH 值在整治期間變化保持平緩，其主要因廢水處理設施處理後之迴流水迴流至注藥井，使得注藥井之 pH 值可保持相對穩定狀態。最終，共溶劑搭配電動力整治下 pH 值約介於 6.54~7.20 之間，相較於整治前未有明顯差異，顯示乙醇共溶劑添加下未對地下水水體 pH 值造成明顯影響。圖 3.18 為抽除井 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，然因整治過程陰極端持續抽水，降低地下水 pH 值的變化幅度，在 111 年 11 月後 pH 值變化已趨於穩定，最後 pH 值約介於 6.78~7.05。

圖 3.19 及圖 3.20 為本計畫整治工法整治下，高濃度污染區域(A5~A8 及 B5~B8 整治井)地下水注藥井(陽極端)及抽除井(陰極端)電導度之變化趨勢。本場址 A5~A8 及 B5~B8 整治井之地下水電導度值初始約為 483 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ~722 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 之間。注藥井地下水電導度於乙醇共溶劑搭配電動力整治下發現，地下水電導度整體變化趨勢保持穩定，其主要原因為穩定的 pH 值所導致，整治後電導度約介於 527 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ~726 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 之間。圖 3.20 為抽除井地下水電導度之變化。因抽除井穩定持續的抽除地下水，電導度變化相當穩定，整治後電導度約介於 489 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ~735 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 之間。



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

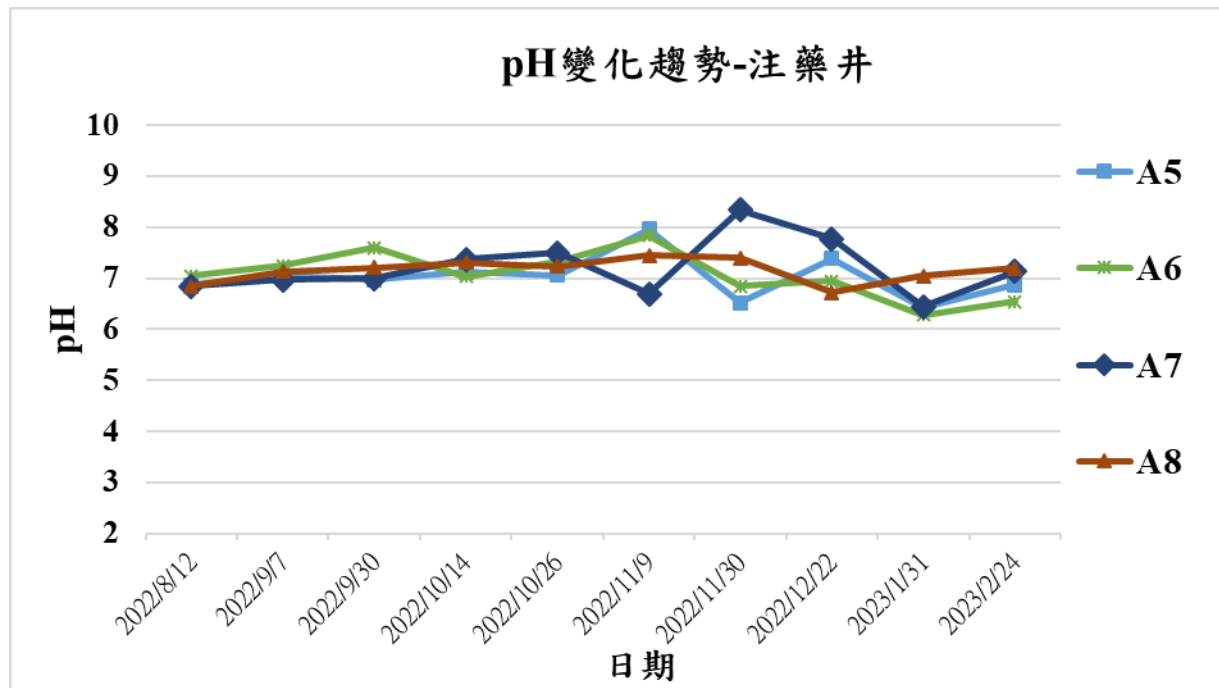


圖 3.17 高濃度污染區域之地下水 pH 值變化-注藥井

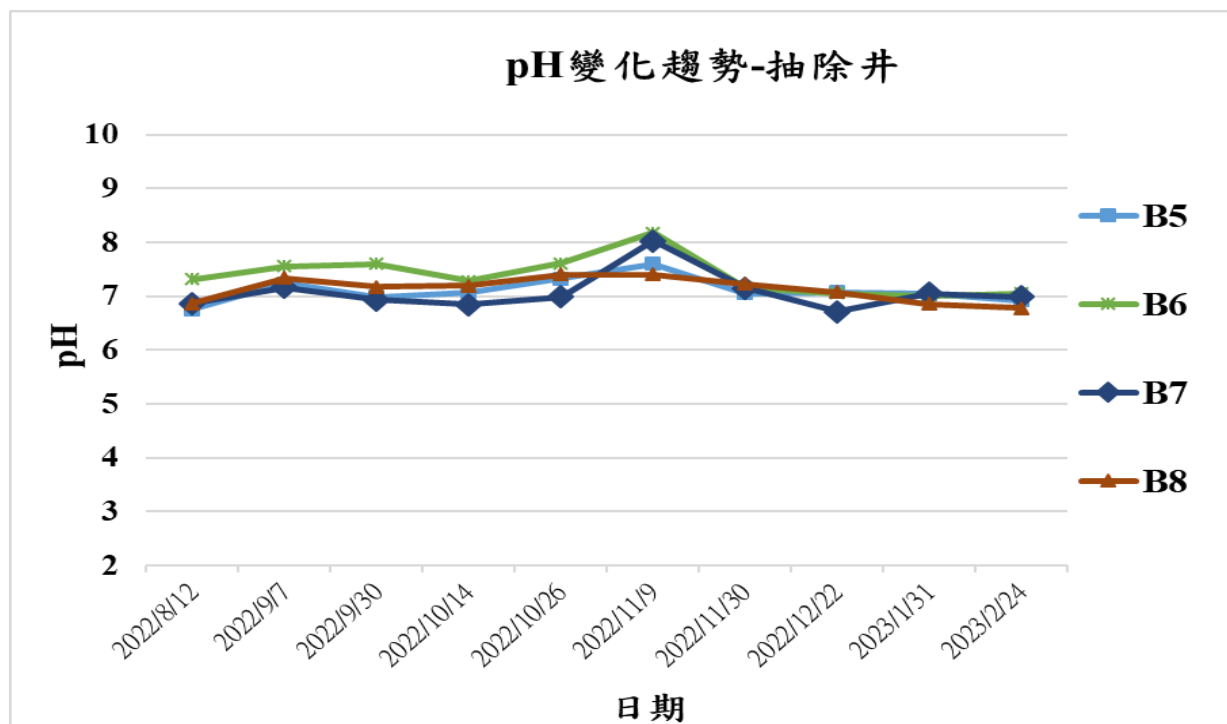


圖 3.18 高濃度污染區域之地下水 pH 值變化-抽除井

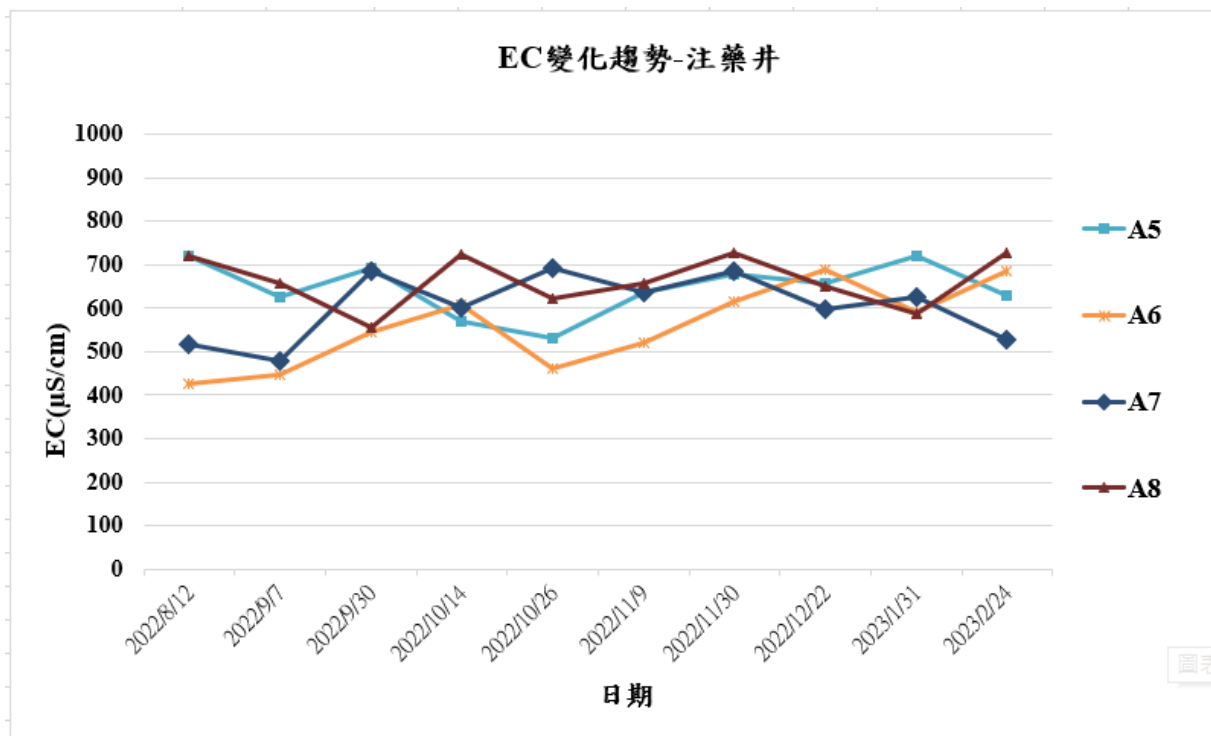


圖 3.19 高濃度污染區域之地下水電導度值變化-注藥井

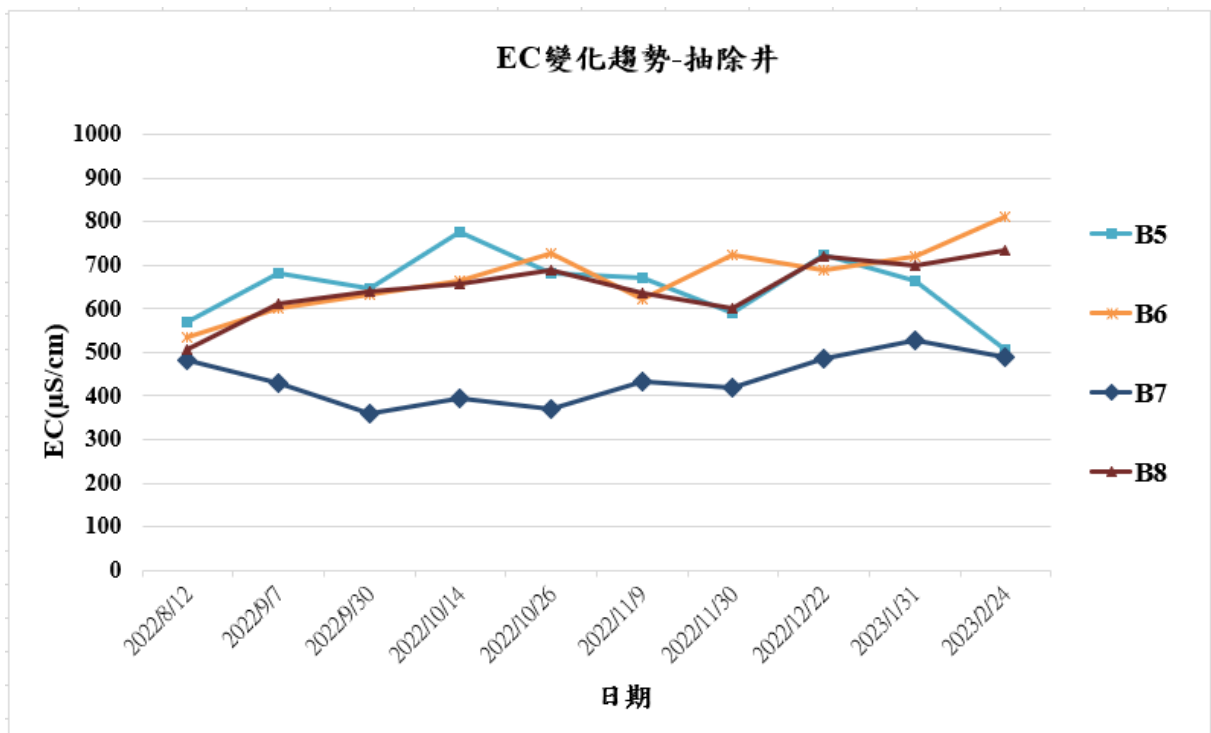


圖 3.20 高濃度污染區域之地下水電導度值變化-抽除井



圖 3.21 及圖 3.22 為本計畫整治工法整治下，高濃度污染區域(A5~A8 及 B5~B8 整治井)地下水注藥井(陽極端)及抽除井(陰極端)溶氧之變化。本場址 A5~A8 及 B5~B8 整治井之地下水溶氧值初始約為 1.81 mg/L~3.50 mg/L 之間。於乙醇共溶劑搭配電動力整治下觀察注藥井地下水溶氧變化發現，於整治初期溶氧變化較為平緩，之後隨整治時間有上升的趨勢。其主要為電動力操作下，陽極端會生成氧氣產物，且因迴流水之緣故，進而導致地下水中的溶氧值升高，經整治後，地下水之溶氧值約介於 2.83 mg/L~4.1 mg/L，相較於整治初始有微上升趨勢。至於圖 3.22 抽除井之溶氧變化則較為穩定，整治過程變化維持於 1.0 mg/L~4.0 mg/L 之間，沒有明顯的變化趨勢，整治後期地下水之溶氧值約介於 1.94 mg/L~3.33 mg/L，仍於整治初期的範圍。

圖 3.23 及圖 3.24 為本計畫整治工法整治下，高濃度污染區域(A5~A8 及 B5~B8 整治井)地下水注藥井(陽極端)及抽除井(陰極端)氧化還原電位之變化趨勢。從圖得知，本場址 A5~A8 及 B5~B8 整治井之地下水氧化還原電位初始約為 29 mV~252 mV，屬正電位狀態。圖 3.23 為注藥井地下水氧化還原電位之變化，可以從圖中發現，在整治初期氧化還原電位先有下降趨勢，之後隨著整治時間有上下起伏的變化，主要推測為氣候及操作電動力法產生的電解效應是導致氧化還原電位變化的原因。在整治時間 111 年 11 月之後，氧化還原電位變化趨於平緩，最後介於 -45 mV~35 mV。圖 3.24 為抽除井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有持續下降趨勢，在整治時間 111 年 11 月之後亦趨於穩定，於 -50 mV~-200 mV 之間變化。經整治後，抽除井地下水氧化還原電位介於 -109 mV~-148 mV，從初始正電位逐漸轉為負電位(還原電位)。

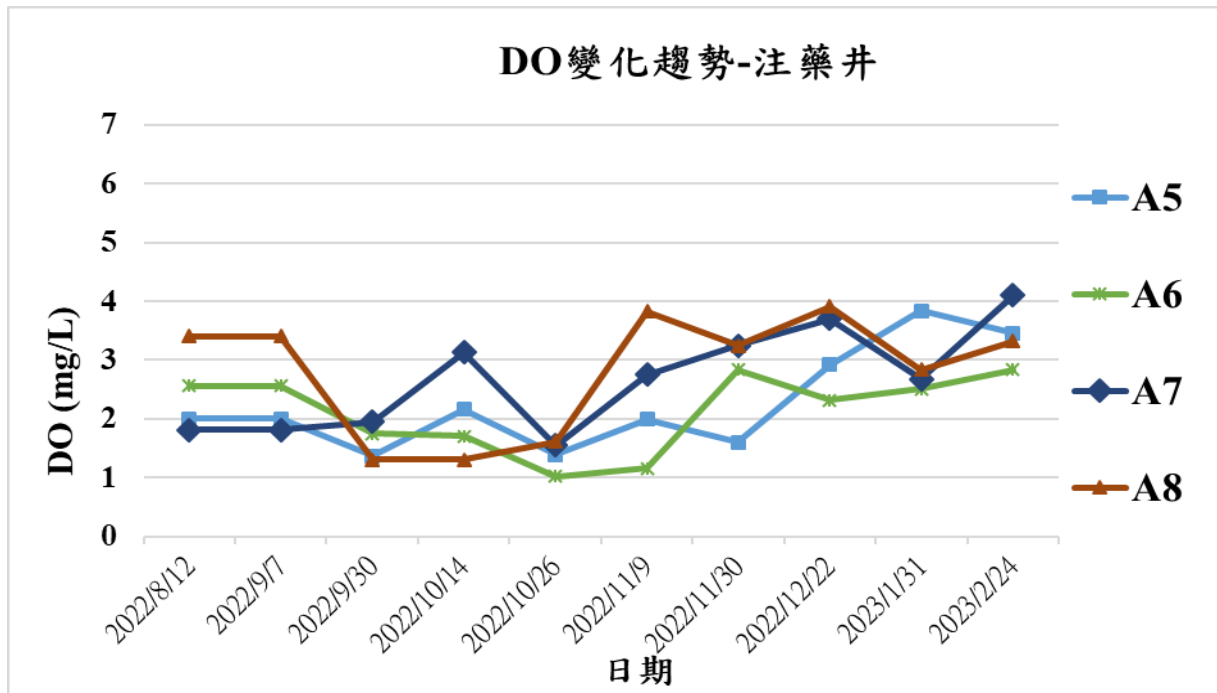


圖 3.21 高濃度污染區域之地下水溶值變化-注藥井

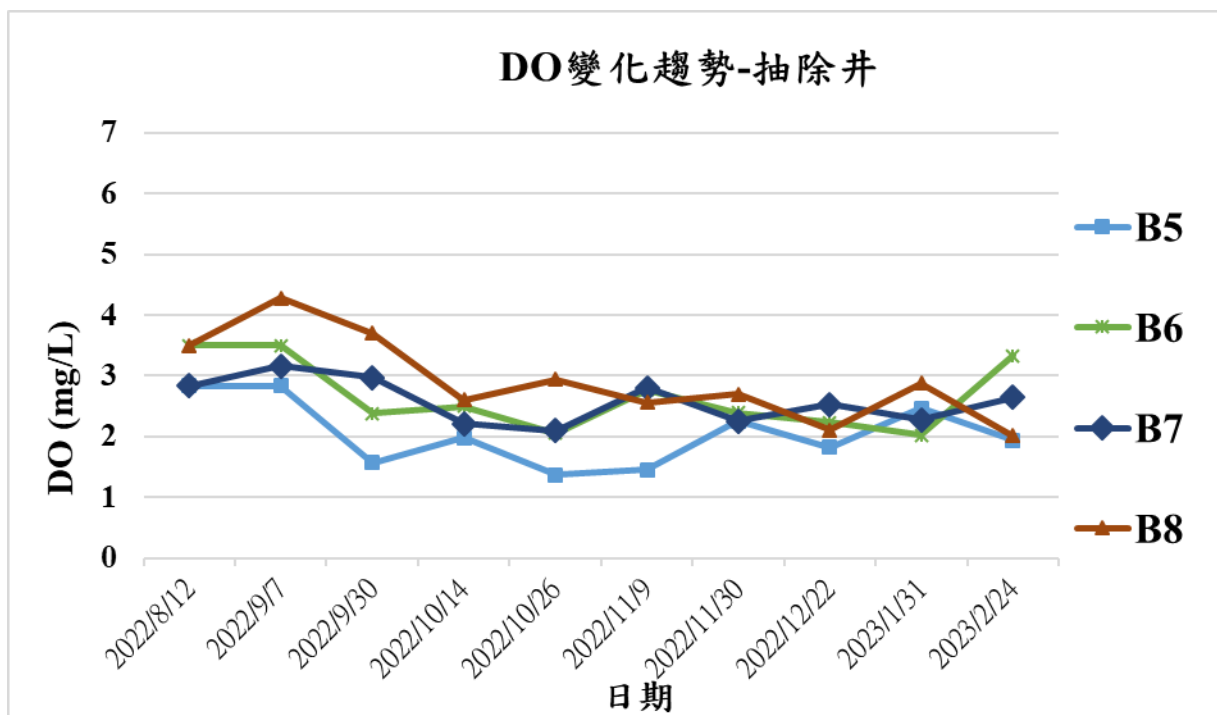


圖 3.22 高濃度污染區域之地下水溶值變化-抽除井



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

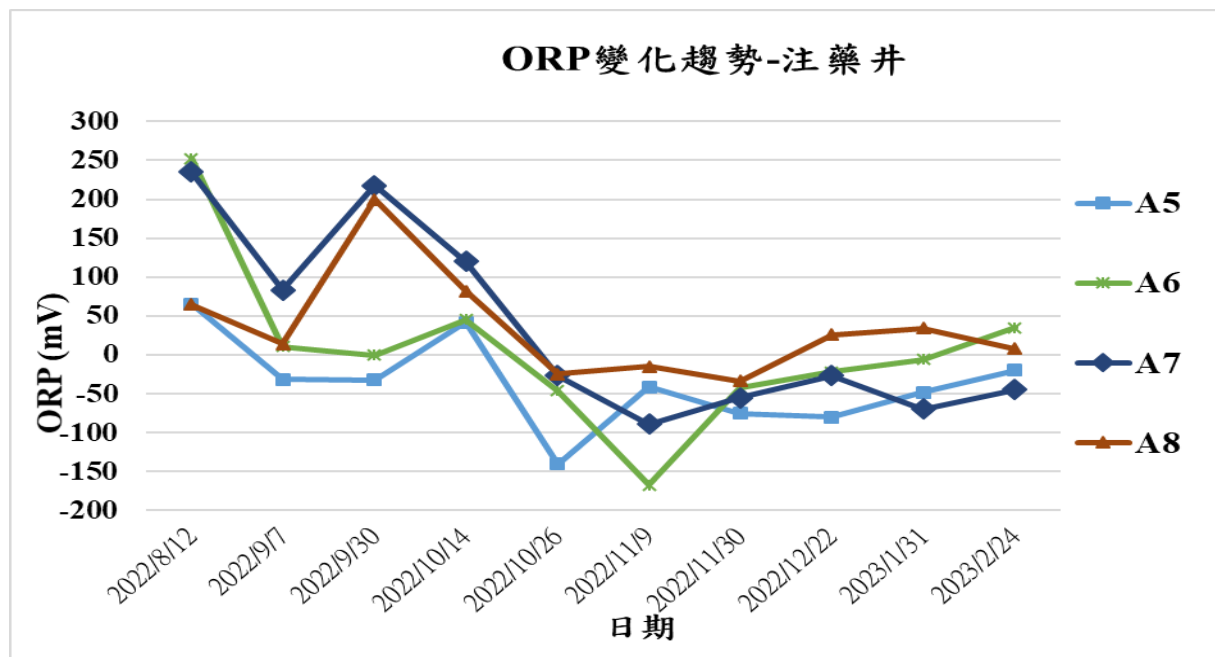


圖 3.23 高濃度污染區域之地下水氧化還原電位變化-注藥井

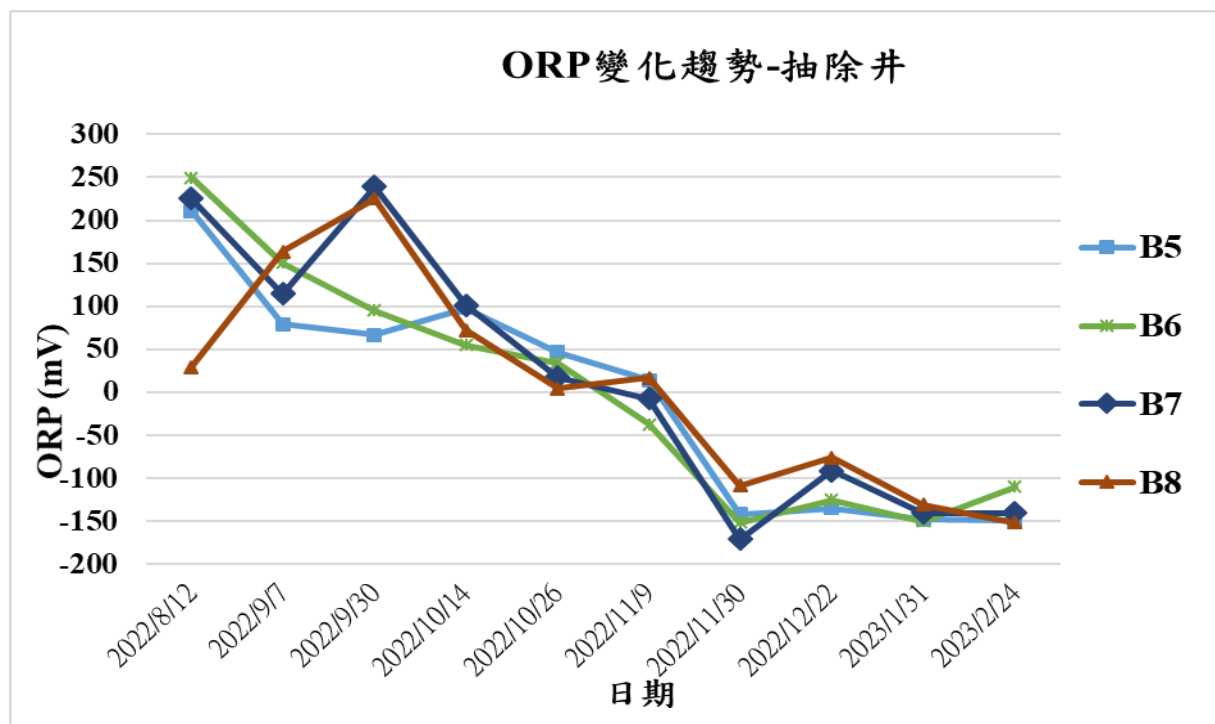


圖 3.24 高濃度污染區域之地下水氧化還原電位變化-抽除井



3.2.2.2 污染場址含氯污染物濃度變化

本場址高濃度污染區域(A5~A8 及 B5~B8 整治井)地下水每月定期檢測含氯污染物濃度，觀察本計畫整治成效。圖 3.25 為高濃度污染區域注藥井、抽除井及監測井地下水四氯乙烯濃度變化，監測期間為 111 年 8 月至 112 年 1 月。從 8 口注藥井(A5~A8 及 B5~B8)初始值得知，四氯乙烯濃度介於 0.28~1.50 mg/L 之間，其主要因鑿井緣故將土壤中高濃度四氯乙烯帶入地下水中。由於濃度已超出管制標準 5~30 倍，故本計畫先進行電動力法+抽水的方式進行整治，觀察其含氯污染物濃度之變化。經電動力搭配抽水操作後，相較於整治前的初始值，4 口注藥井地下水四氯乙烯濃度已顯著下降。由於本計畫可透過電動力產生之電滲透流驅動下，將土壤孔隙中之四氯乙烯往抽除井方向移動，促使四氯乙烯有效降低其濃度；接著，分別於 111 年 10/19 及 12/16 注入乙醇共溶劑，並進行電動力及抽水整治操作。其觀察濃度變化發現，四氯乙烯污染濃度持續下降，目前已低於監測標準(0.025 mg/L)，且 A7 及 A8 已為 N.D 值。

至於抽除井(B5~B8)四氯乙烯的濃度變化，4 口抽除井地下水之四氯乙烯初始濃度約介於 0.14~1.5 mg/L。於電動力操作下，四氯乙烯污染物將從注藥井往抽除井方向移動，於抽除井持續的抽水及陰極還原反應下，使四氯乙烯污染物有效移除。除了 B5 及 B8 檢測出微量濃度外，其他抽除井濃度皆為 N.D。另外，檢測本計畫監測井濃度變化，監測點分布如圖 2.4。依據檢測 9 口監測井四氯乙烯濃度得知，僅有監測井 MW02 及 MW03 檢測出四氯乙烯(介於 0.053~0.095 mg/L)，其他監測井濃度皆符合管制標準。



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

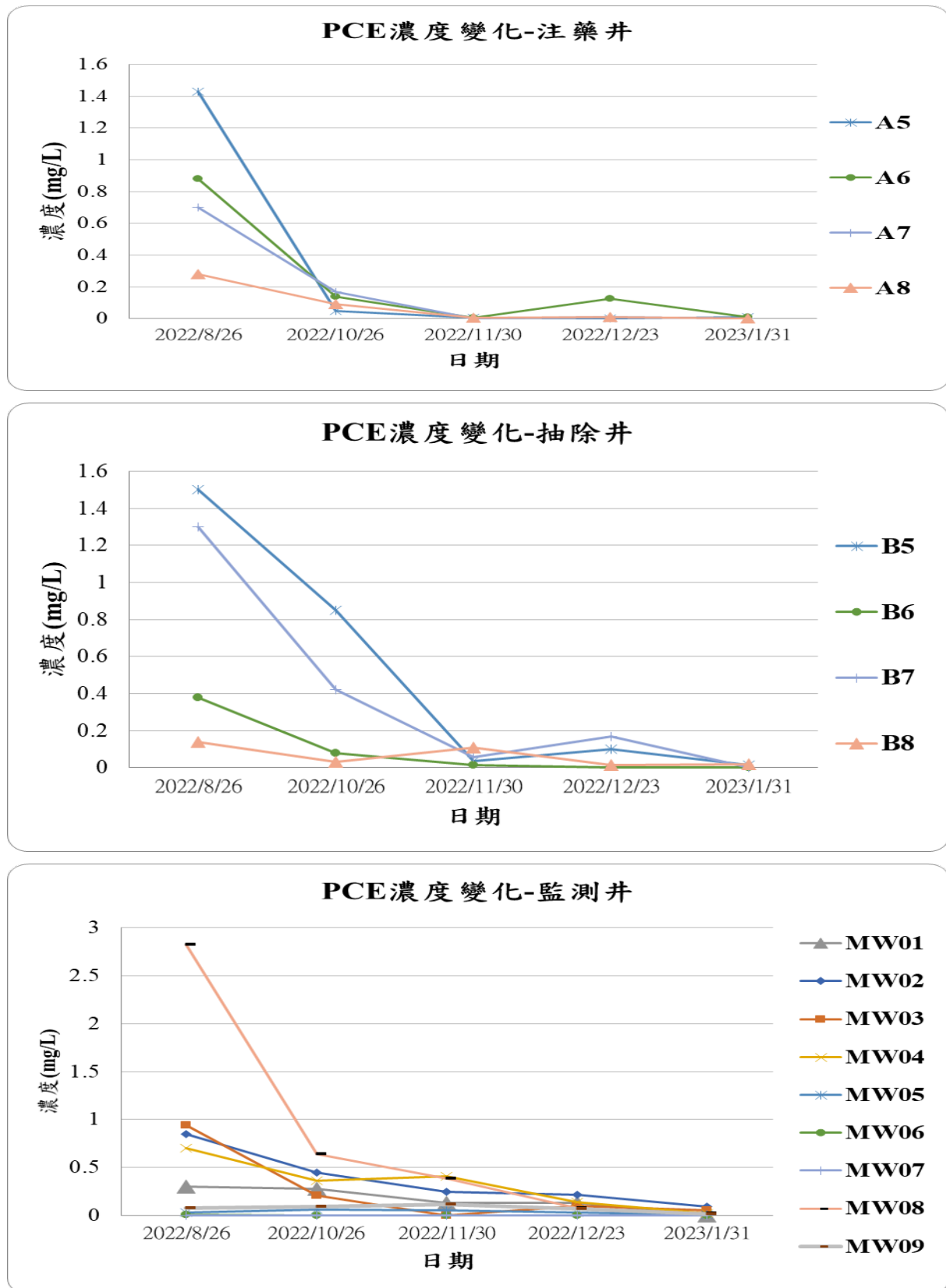


圖 3.25 高濃度污染區域之地下水四氯乙烯變化



圖 3.26 為高濃度污染區域注藥井、抽除井及監測井地下水三氯乙烯濃度變化。從 4 口注藥井(A5~A8)初始值得知，所有注藥井三氯乙烯濃度介於 0.43~1.26 mg/L。經共溶劑搭配電動力及抽水操作後，注藥井地下水三氯乙烯濃度隨著處理時間已有顯著下降趨勢，其主要推測為本整治工法可協助三氯乙烯污染物溶解釋出及移動，故導致三氯乙烯污染濃度的下降。目前除了注藥井 A5 及 A6 有部分濃度外(0.010 mg/L)，其他所有注藥井三氯乙烯濃度已為 N.D，且所有注藥井三氯乙烯濃度皆符合地下水監測標準(0.025 mg/L)。至於抽除井(B5~B8)三氯乙烯的濃度變化，4 口抽除井地下水三氯乙烯濃度初始約介於 0.36~1.46 mg/L，整治後三氯乙烯濃度同樣已符合監測標準，顯示本整治工法可將三氯乙烯污染有效移除；同時，觀察監測井三氯乙烯濃度變化得知，除了 MW02 及 MW03 之外，所有監測井濃度皆低於管制標準。

圖 3.27 為高濃度污染區域注藥井、抽除井及監測井地下水順-1,2-二氯乙烯濃度變化。從 4 口注藥井(A5~A8)初始值得知，注藥井順-1,2-二氯乙烯濃度介於 0.22~1.52 mg/L。經乙醇共溶劑搭配電動力整治期間，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導致的結果。然而，依據整治時間 112 年 1 月檢測結果得知，注藥井地下水順-1,2-二氯乙烯污染物濃度已明顯下降，濃度約介於 0.02~0.35 mg/L，去除率介於 56~92%之間，皆低於地下水管制標準。至於抽除井(B5~B8)順-1,2-二氯乙烯的濃度變化，4 口抽除井地下水之初始濃度約介於 0.22~1.92 mg/L，經整治後濃度已下降至 0.075~0.18 mg/L，去除率介於 20~96%之間。另檢測本場址 9 口監測井地下水順-1,2-二氯乙烯濃度得知，MW06 及 MW07 為 N.D 值，其於監測井濃度介於 0.01~2.57 mg/L 之間。



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

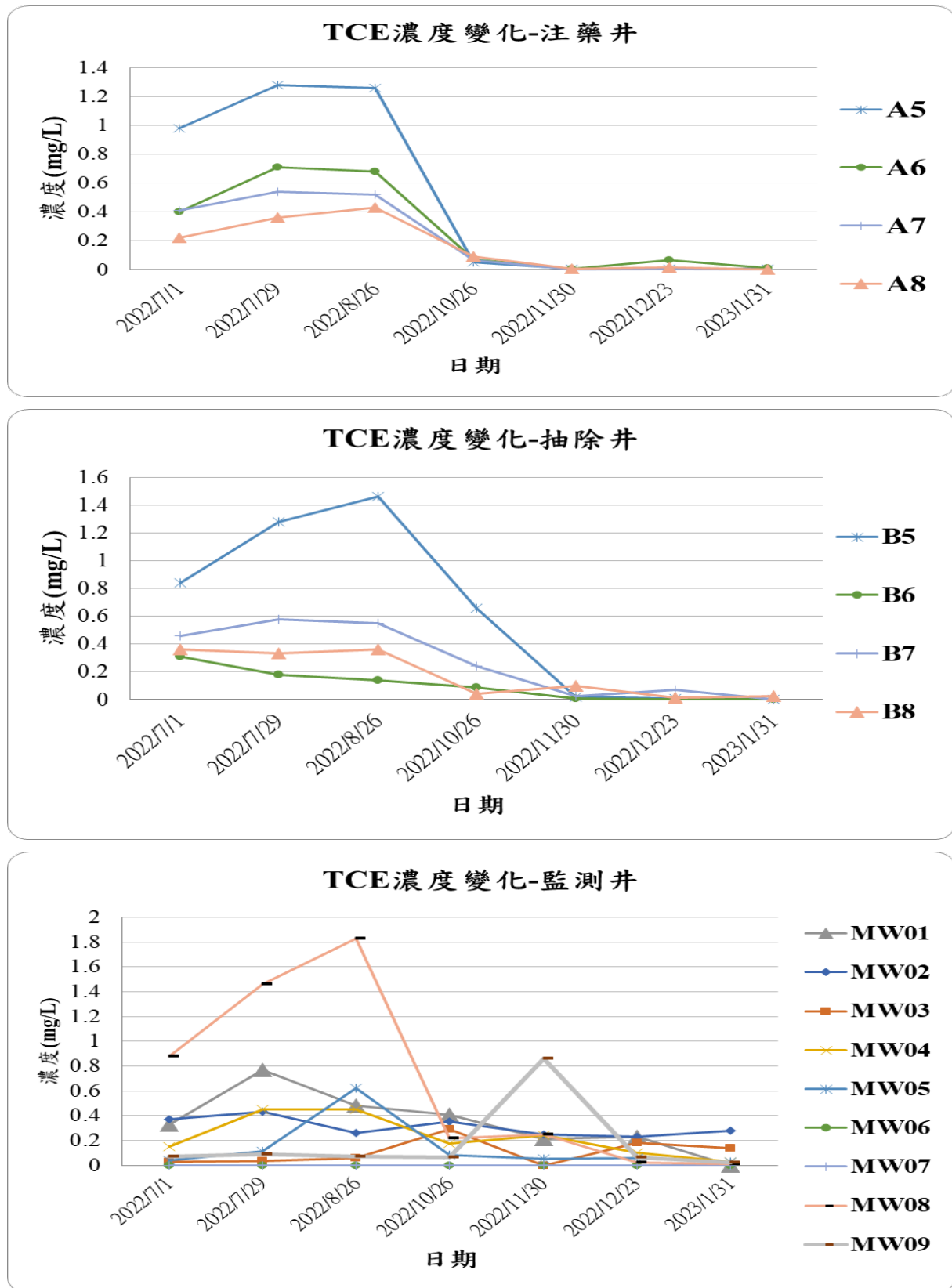


圖 3.26 高濃度污染區域之地下水三氯乙烯變化

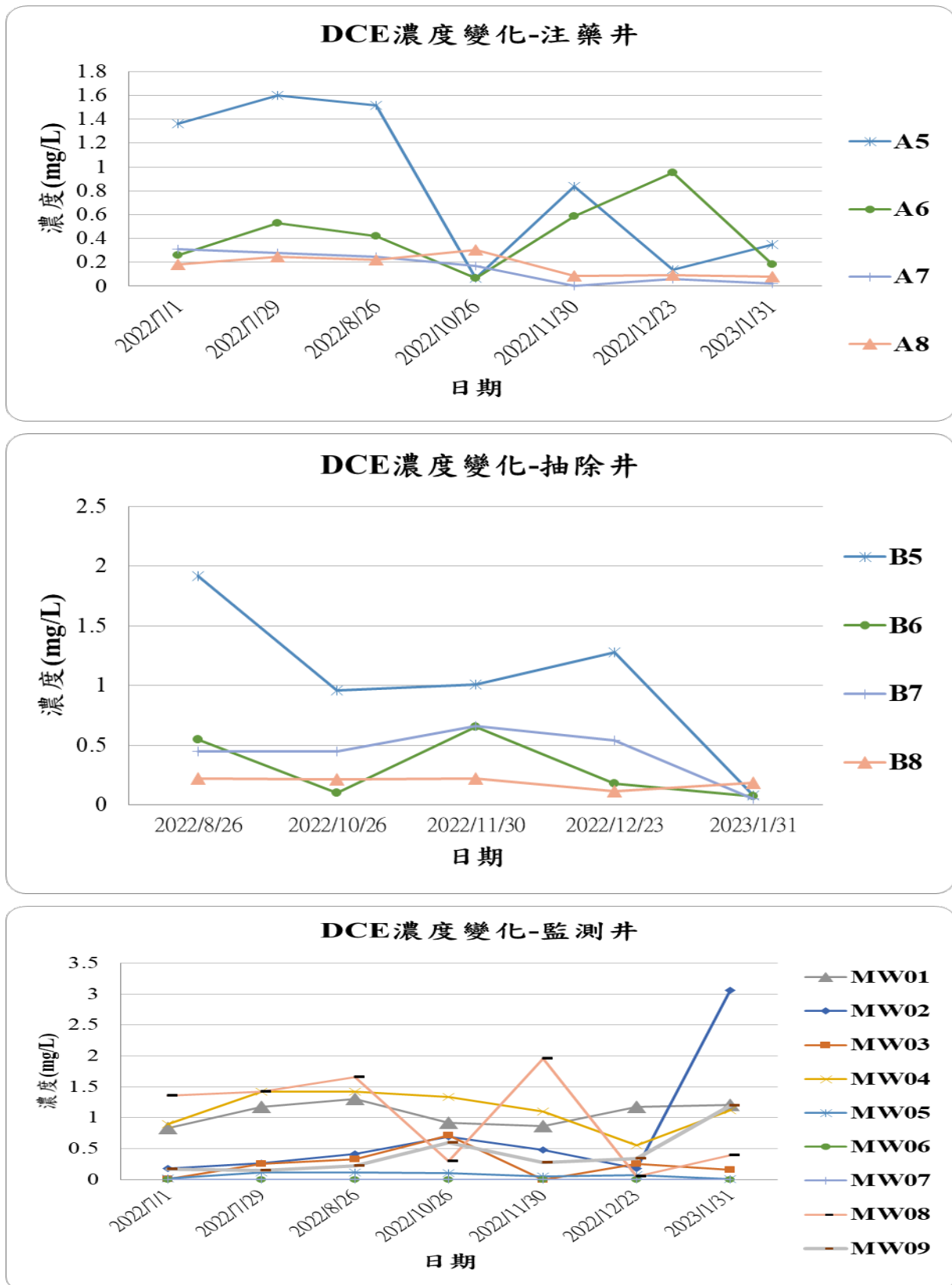


圖 3.27 高濃度污染區域之地下水順-1,2-二氯乙烯變化



本計畫係透過乙醇共溶劑灌注後協助土壤孔隙含氯污染物的溶解釋出，再透過電動力產生之電滲透流驅動下，將溶解於地下水之污染物往抽除井方向移動，再以抽水抽除方式將地下水抽至廢水處理設施處理；另外微生物效應也可協助污染物的降解，促使含氯污染物有效降低其濃度。

本計畫持續定期檢測上一年度 A1~A4 及 B1~B4 整治井之濃度變化。其中，A1 及 A2 濃度因受到新整治井鑿井的影響有些微上升，但隨著時間已經顯著下降，截至目前，A1~A4 注藥井之四氯乙烯及三氯乙烯濃度皆為 N.D，順-1,2-二氯乙烯濃度皆低於監測標準；B1~B4 之四氯乙烯及三氯乙烯濃度同樣低於監測標準，僅有 B1 抽除井之順-1,2-二氯乙烯濃度低於管制標準(0.7 mg/L)，其餘抽除井之順-1,2-二氯乙烯皆低於監測標準(0.35 mg/L)。有鑑於此，本計畫之整治工法可有效移除含氯污染物濃度，且停止操作後未有濃度回升的情形發生。

根據兩年計畫的執行下，除了原場址監測井 MW02 及 MW03 仍有污染濃度外，其餘整場含氯污染物濃度已達到約 90% 的去除，顯示本計畫整合技術之有效性。依照目前本場址污染整治區域進行估算，其污染範圍約為 3,000 m³(長 25 m x 寬 15 m x 深度 8 m)，依照土壤挖除每 1 m³ 處理費約 NT\$. 8,000 元進行估算，整治費用約為 2,400 萬元。本計畫整治所需之設井、電極、整流器、抽水機、廢水處理設施、藥劑、操作電費及人員管銷等費用粗估為 1,300 萬元；其中，於操作電費部分包括抽水機電力、廢水處理設施(曝氣裝置與電解槽)電力及電動力法操作之電力等，目前 6 個月整治下，其所消耗之電力約為 3,500 度，平均每天約耗費 19 度。綜觀本整治技術相較於傳統土壤挖除法可降低約 40% 的整治成本，具有實場應用的高度潛力，可作為未來處理土壤地下水中有機污染物之技術選項。



3.2.3 微生物菌相檢測

為了瞭解本計畫乙醇共溶劑添加對本場址地下水中微生物含量及微生物菌相的影響，特委託台灣中油公司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 3.7 為 111 年 8 月檢測 A5、A6 及 A7 注藥井地下水中整理出前 5 大之微生物菌種。於 A5 注藥井中，A5 井地下水中主要優勢菌種大多為未知菌種，但也可鑑定出少量 *Dechloromonas* (1.08%)、*Acidovorax*(0.95%)菌基因；A7 井鑑定出之優勢菌種 *Dechloromonas*、*Acidovorax* 為文獻記載與降解三氯乙烯(trichloroethylene, TCE)相關微生物，在 A6 井中 *Dechloromonas* 也為主要優勢菌種。整體而言，本場址地下水中菌相基因鑑定結果，比對文獻可得本場址三口井地下水含 *Dechloromonas*、*Acidovorax* 二株菌具有降解三氯乙烯屬性[23]，因此可推測此地區有含氯有機物生物降解活動之情形。此菌種生成推測為上一年度乙醇共溶劑添加後所殘餘的微生物效應之結果。

表 3.8 為 111 年 12 月檢測 A5、A7 及 MW08 地下水中整理出前 5 大之微生物菌種。從 A5 井地下水中鑑定出之優勢菌種得知，其中 *Methanospirillum*、*Methanobacterium* 屬於甲烷菌生成菌，*Clostridium*、*Sulfurospirillum* 屬於產氫菌，其皆與甲烷生成，其生物功能有利於厭氧脫氯作用，為與含氯化合物降解有關之菌種[24]；A7 井地下水中鑑定出之優勢菌種，大多為未知菌種，但鑑定出含量第三多之 *Geobacter* (6.41%)，其為脫氯相關的 1.5，文獻資料顯示，在整治過程中給予不同氮源時，易刺激產生生物強化作用。*Xanthobacter* 則能利用丙烯生長，有助於降解某些氯化烯烴[25]；MW08 井地下水中鑑定出之優勢菌種，大多為未知菌種，但鑑定出含量第二多之 *Geobacter*(22.5%)與少量 *Xanthobacter*(2.77%)，顯示仍有含氯有機物生物降解活動之潛勢。

經由以上檢測結果證實，乙醇共溶劑添加後對於地下水體不會造成不良的影響，且能生成有利於降解含氯污染物之菌種。綜觀上述檢測結果，本整治工法不僅能有效降解含氯污染物，亦屬於綠色且環境友善之處理技術，有利於未來持續研究推廣。



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 3.7 本場址主要菌種檢測 (111.8 檢測)

A5	A6	A7
unclassified (13.63%)	Dechloromonas (15.21%)	Acidovorax (18.05%)
unclassified (11.82%)	unclassified (11.58%)	unclassified (7.72%)
unclassified (7.71%)	unclassified (8.75%)	unclassified (6.94%)
unclassified (6.86%)	unclassified (4.43%)	Dechloromonas (6.53%)
unclassified (4.86%)	unclassified (3.32%)	unclassified (4.67%)

表 3.8 本場址主要菌種檢測 (111.12 檢測)

A5	A7	MW08
Methanospirillum (13.63%)	unclassified (20.75%)	unclassified (12.38%)
Methanobacterium(12.58%)	unclassified (18.97%)	Geobacter(9.54%)
unclassified (7.73%)	Geobacter(6.41%)	unclassified (4.85%)
Sulfurospirillum (7.14%)	unclassified (4.67%)	unclassified (4.32%)
Clostridium (5.89%)	Xanthobacter (5.47)	unclassified (3%)



3.3 結論與建議

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、土壤質地調查、廢水處理設施處理成效、含氯污染物整治操作及微生物菌相檢測，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。
2. 本場址地下水水質及含氯污染物濃度皆已掌握，且土壤質地調查亦已完成，可作為含氯污染物整治之探討依據。
3. 本年度污染場址整治井 A5~A8 及 B5~B8 含氯污染物於 6 個月整治下，濃度皆已低於管制標準，顯示本計畫整治工法可有效處理地下水含氯污染物。
4. 上一年度整治井 A1~A4 及 B1~B4 已整治完成，但因本年度新整治井鑿井過程導致 A1 及 A2 濃度升高，但經過一段時間後即降至法規以下，且後續未有濃度回升的情形發生。
5. 本計畫污染場址之監測井 MW01~MW09 污染濃度大部分已符合法規，僅少部分監測井仍高於管制標準。
6. 根據整治成效得知，本計畫已將整場污染場址含氯污染物濃度降至約 90%，未來僅有少數區域需要持續整治即可達到完全處理。
7. 經廢水處理設置處理後，地下水四氯乙烯濃度從 2.82 mg/L 降至 ND；三氯乙烯濃度從 1.83 mg/L 降至 ND；順-1,2-二氯乙烯濃度從 1.66 mg/L 降至 ND。顯示本廢水處理設施能有效將抽除的地下水進行降解，使迴流水符合法規標準，達到地下水循環的目標。
8. 經由微生物菌落及菌相檢測得知，本場址於整治工法操作下，地下水體中仍含有許多微生物物種存在，顯示本整治工法(共溶劑結合電動力法)是具綠色及環境友善之整治技術。

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，於電觸媒廢水系統處理成果及高濃度污染區域整治下皆可達到本計畫整治目標。未來污染場址的整治規劃建議如下：

1. 目前全場污染場址含氯污染物濃度大部分已符合地下水管制標準，僅有少部分原監測井未來須持續整治即可達成全場污染整治目標。



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

2. 本計畫整治井的設置操作對污染物濃度的影響已掌握，未來面對較大範圍之污染場址，可將每一處理單元之間距縮短進行設計，使整治規劃更為完善。
3. 未來實場應用上，可以透過自動控制系統減少人力操作需求及成本，使整體整治操作更具自動化及智慧化。
4. 依據微生物菌相檢測得知，乙醇共溶劑搭配電動力法操作後不僅不會對地下水體造成不良影響，且可促進優勢菌種的生成；且相較於傳統處理方法，本整治工法可大幅降低操作成本，是一套同時兼顧環境、社會與經濟效益三面向的整治技術，未來可進一步應用於其他污染場址的整治規劃。



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. Coptly, 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.
- [23] 黃宇伶，以長效型基質處理受三氯乙烯污染之地下水，中山大學環境工程研究所碩士論文，2012。
- [24] W.H. Lin, C.C. Chien, C.W. Lu, Deyi Hou, Y.T. Sheu, S.C. Chen, C.M. Kao, “Growth inhibition of methanogens for the enhancement of TCE dichlorination”, *Science of the Total Environment*, 2021.
- [25] Youlboong Sung et al., “*Geobacter lovleyi* sp. nov. strain SZ, a novel metal-reducing and tetrachloroethene-dechlorinating bacterium”, *Applied and Environmental Microbiology*, Vol. 72, No. 4, 2006.



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

[26] 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」。