



環境部環境管理署

113 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

整治場址數位監測與高精度污染團層析技術 於抽出處理及淋洗策略之應用

成果報告（定稿）

主辦單位： 環境部環境管理署
專案執行單位：國立中央大學／環境研究中心
專案主持人：倪春發 教授
專案執行期間：113 年 11 月 01 日起至
114 年 11 月 30 日止

中 華 民 國 114 年 10 月 印製



環境部環境管理署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☒構想書
 ☐申請計畫書
 ☐期中報告
☐修正計畫書
 ☐成果報告

審查意見回覆對照表

計畫年度	113 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：倪春發 NO：S8	
計畫名稱	整治場址數位監測與高精度汙染團層析技術於抽出處理及淋洗策略之應用		
審查意見		執行單位回覆	
委員一 1. 計畫書建議補充頁碼。 2. 本計畫預期規劃為 2 年，惟「表 2 本計畫執行工作項目與行程規劃甘特圖」僅規劃 1 年，請修正。 3. 本計畫中無相關參考文獻，故本案之可行性依據為何？		1. 依建議補充頁碼。 2. 依建議補充地 2 年工作規劃甘特圖。 3. 依建議補充參考文獻。	
委員二 1. 本場址主要污染物為地下水中之銅，並非國內地下水中主要類型汙染，建議可以考慮有機汙染場址。 2. 建議應與其他 K 值監測方法做比較。		1. 本計畫規劃之申請模場場址為與合作顧問公司共同討論，並依其遭遇之整治困境而共同規劃出適宜之整合研究與提出解決方案，雖非國內地下水中主要類型汙染，然仍符合本專案申請宗旨。 2. 本計畫除研究方法提出之 K 值推估方法以外，尚會與本模場經過先導試驗推估出知單點 K 值進行比較。	
委員三 1. P.3-5，有關報告中詳細介紹多項先進監測技術，對於技術於複雜地質條件下的適用性缺乏深入討論，建議補充說明相關技術於不同地質環境中的應用限制，以及如何克服可能遇到之困難，有助於評估技術的實際應用價值。 2. P.6-8，有關報告提到多種監測技術和數據來源，如何有效整合數據並進行綜合分析的方法描述不足，建議增加對數據整合平台的具體設計和功能說明，以及如何利用機器學習等先進方法處理大量即時數據，有助於展示項目的創新性及實用性。 3. P.9-10，有關報告主要聚焦於技術層面，		1. 本計畫提出之無線監測技術為以單井地下水位及地下水質作為主體，故不受複雜地質條件之影響。 2. 本計畫提出之水力試驗與溫度試驗模式分別為提供廠址範圍內二維導水能力分布以及井內地下水垂直通量，兩者為不同尺度關係並其所關注層面不同，但本計畫仍會將兩者推估出之結果進行共同討論，偕同評估整治效率；機器學習為預規劃第二年之工作項目，故無於構想書進行詳細之方法學及工作流程說明，僅先提出利用機器或深度學習欲解決之問題內容及預期成果。 3. 本專案提出之技術層面為以學術研究與實	



建議加入對技術實施成本的估算，以及與傳統方法相比的效益評估，有助於決策者瞭解新技術之實際應用價值，並評估其在大規模場址整治中之可行性。	作為基礎，提供模廠整治作業顧問公司分析與解決其整治過程中遭遇之困境，而實際操作成本將於完成所有作業後提供合作對象參考。另，與傳統方法相比的效益評估上，一為成果精細度，一為操作成本，本計畫將於計畫實行過程中與業者、顧問公司頻繁交流，以求將整治效益與經費控制最大化。
委員四 1. 建議應針對前期計畫技術後續推進以及與本研究計畫所提技術之相關性與差異進行說明。	1. 前期計畫技術之相關說明於本計畫書(七)進行詳細說明。
委員五 1. 宜強化說明前 3 年研發績效是否符合預期目標？ 2. 本案延續前期(111 年)研發成果，第 1 年主要聚焦於括(1) 地下水位及水質即時無線智能監測管理平台、(2) 整治處理過程伴隨水力層析技術，解析場址含水層地質材料空間分布，以及(3) 整治過程伴隨井下新型光纖高解析分層監測技術，以主動式熱示蹤劑監測汙染熱區動態。預期技術建置成果可有效提升本作業場址之整治工法效率及精準度。團隊掌握本案核心技術，有利於達成計畫目標和預期可能成果。	1. 本計畫引用之無線監測與平台展示技術分別為 106、107、108 年之土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案所發展，相關績效符合各計劃之預期目標，並於研究方法之相關章節進行說明。 2. 感謝委員肯定。
委員六 1. 主持人歷年主持多件土基會科研型計畫，建議說明先前科研計畫經驗或成果於本計畫研究規劃設計之應用。	本計畫引用之無線監測與平台展示技術分別為 106、107、108 年之土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案所發展，相關研計畫經驗或成果於本計畫研究規劃設計之應用於研究方法之相關章節進行說明。
委員七 1. 符合徵求主題。	感謝委員肯定。
委員八 1. 本計畫以"" 整治處理過程伴隨水力層析技術，解析場址含水層地質材料空間分布"" 為研究標的。 2. 計畫書中說明："" 整治過程伴隨井下新型	本計畫將配合抽出處理過程中，於各監測水井置放水壓計進行壓力紀錄並以相關模式進行分析；熱示綜劑則推估井內垂直通量提供後續灌藥淋洗作業效率評估。故實場於整治作業過程中之所有水位及參數變化將全部蒐



光纖高解析分層監測技術，以主動式熱示蹤劑監測污染熱區動態"。"

集並應用於後續分析作業中。

3. 本計畫中說明："...淋洗與螯合劑的使用可能會對土壤孔隙產生影響，進而影響後續的淋洗效果，含水層水力傳導係數空間分布評估增進抽、注處理作業效率..."，因此，本計畫擬以"井下新型光纖高解析分層監測技術，以主動式熱示蹤劑監測污染熱區動態"，藉以："...對場址地質參數提供更精細了解，以利規劃及調整整治工法之相關策略..."。
4. 建議說明如何以實場的實際狀況展現本計畫的成果。



環境部環境管理署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☐構想書 ☒申請計畫書 ☐期中報告
☐修正計畫書 ☐成果報告

審查意見回覆對照表

計畫年度	113 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：倪春發 NO：
計畫名稱	整治場址數位監測與高精度污染團層析技術於抽出處理及淋洗策略之應用		
審查意見		執行單位回覆	
委員一 模場結果提供預測地層資訊，是否須達到 AI 功能，若是，是否有軟硬體的規劃?		本研究提出之調查方法，如水力層析法及溫度試驗，係為以物理調查模式進行地層參數推估，提供含水層導水能力及局部流通性之資訊；而本計畫規劃第二年之 AI 功能，乃為建立於本年度之參數調查成果，作為訓練模型之基本輸入值，而後予以作為汙染傳輸及追蹤之判釋。 目前 AI 模型之運算系統正在開發中，尚規劃於單機及一般網路作業程序，然預期今年度本計畫將蒐取大量地下水位及水質資料，為因應巨量資料數值演算需求，將於明年度將視作業需求增添軟硬體設備。	
委員二 1. P.6-8，有關本計畫提出之無線監測技術與水力層析技術，計畫書中對於這些技術在複雜地質條件及受污染場址應用的可行性與限制討論較少。建議補充說明在不同地質環境中可能遭遇的技術應用限制，以及如何因應克服這些困難，以利評估技術的實際應用價值及可推廣性。 2. P.11-12，計畫提到將建置資料庫與展示平台系統。建議增加對數據整合平台的具體設計與功能說明，以及如何利用機器學習等先進方法處理大量即時數據的細節，以展現計畫的創新性及實用性。 3. P.25-27，計畫主要聚焦於技術層面的開發與應用，建議加入對新技術實施成本的具體估算，並與現行傳統方法進行效益比較分析，以利決策者瞭解新技術之實際應用價值，並評估其在大規模場址整治中之可行性。 4. 關鍵議題及其解決方案以 AI 加以預測，但		1. 依委員建議補充相關說明於 P6-8。 2. 數據整合平台的具體設計，本計畫於初期階段屬規劃與整合階段，將於期中報告提出本平台設計與功能。而大量即時數據之收集將建立資料庫妥善存置，本計畫之主軸並非以機器學習模式進行數據處理，而係為以歷史及即時數據之採集，配合各種試驗模式推估出之物理參數，而藉以作為深度學習模型之植入參數進行汙染物傳輸推估。 3. 本計畫所建立之技術為增進既有整治工法之整治效率，相關效益分析及應用價值將與整治作業工作者進行相關溝通，並藉由技術移轉之方式供其使用評估。 4. 在地質及水力特性高度異質的環境下，AI 預測模型可能因資料品質、空間分辨率不足、或未充分考慮物理現象而導致預測結果不準確，因此本計畫提出包括平面與垂直之空間參數推估，以及長時時序資料蒐集，提供多尺度之模型建立，並利用實際觀測資料進行修正，將使預測模型越至精準。	



因地質及水力特性使預測結果受影響，如何因應？	
委員三 1. 場址汙染以銅為主，請考慮如果場址中有其他類型汙染物(例如油品或含氯有機物)時，對於該技術之影響。 2. 本技術對於實場應用具有參考價值。	1. 場址若如為油品或含氯有機物，並不對水力層析法和熱示蹤劑試驗有相關影響，因此二種方法為針對含水層之物理特性作為主要推估目標，並不受限於水質反應；而無線監測模組，水質計部分將因應不同汙染物關係而選定不同的基本水質參數進行監控。 2. 感謝委員肯定。
委員四 1. 建議以實場的實測結果驗證本計畫的成果 2. 解析度是否同時將實廠操作的可操作度與經濟成本列入評估 3. 本計畫為延續性計畫	1. 本計畫所發展與應用之技術即為應用於實際模場之治中。 2. 本計畫於實場應用之技術將與負責該場址之汙染整治單位進行密切溝通與配合，可操作度將因應運作中之場址進行適當協調與修正，而經濟成本將於進行相關試驗後，提供整治單位進行工法效率評估，已獲得技術應用下對實際成本控制之效果。 3. 本計畫預期為2年工作期程。
委員五 突破整治瓶頸，具實務應用性	感謝委員肯定。
委員六 無	
委員七 1. 建議加強說明國內外相關案例應用情形，以強化說明本計畫可行性。 2. 建議說明本計畫預期效益之量化指標或評估方法。	1. 依委員簡易補充相關案例應用情形至相關章節說明。 2. 本計畫之預期效益為提升整治效率，而量化指標及評估方法為經過相關試驗後提供整治作業工作者進行參考，並予以修正整治模式，相關說明將於修正整治模式後進行撰述。
委員八 本案目標汙染物種類為何?欲監測淋洗方法或淋洗劑?	本案目標為重金屬銅，目標為利用本案建立之技術強化抽出處理及淋洗方法之工作效率。
委員九 1. 人事費:專任人員以8個人月為上限，酌減301,160元 2. 消耗性器材中涉及設備及軟硬體使用，請以租賃或分年度攤提，並補充說明租賃單價與使用月數。 3. 請依補助上限調整各項經費，並修正於申請計畫書修正稿。	1. 依建議更改人事費用。 2. 依建議修正相關費用使用項目。 3. 依建議調整。 4. 依建議整備文件內容。



4. 申請計畫書修正稿請檢附使用模場之地方環保機關、地主同意函、構想書審查意見回覆表。	
委員十 1. 人事費:專任人員以 8 個人月為上限，酌減 301,160 元 2. 消耗性器材中涉及設備及軟硬體使用，請以租賃或分年度攤提，並補充說明租賃單價與使用月數。 3. 請依補助上限調整各項經費，並修正於申請計畫書修正稿。 4. 申請計畫書修正稿請檢附使用模場之地方環保機關、地主同意函、構想書審查意見回覆表。	1. 依建議更改人事費用。 2. 依建議修正相關費用使用項目。 3. 依建議調整。 4. 依建議整備文件內容。



環境部環境管理署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☐構想書 ☐申請計畫書 ☒期中報告
☐修正計畫書 ☐成果報告

審查意見回覆對照表

計畫年度	113 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：倪春發 NO：	
計畫名稱	整治場址數位監測與高精度污染團層析技術於抽出處理及淋洗策略之應用		
審查意見		執行單位回覆	
委員一 1. p29 克利金均質等向假設，在複雜地層是否滿足，對 SLE 計算是否有影響？ 2. 圖 14 右之導水係數推估似有較多奇點(圖中黃色呈十字狀較周圍綠色高之小點)，或可再說明原因。		1. 感謝委員建議，SLE 採用協同克利金時，仍需假設主、輔變數間具有線性共變結構。若地層具顯著非均質或異向性，此假設在複雜介質中可能部分失效，導致共變矩陣不穩定或空間相關被低估。協同克利金可藉輔助變數部分補償非均質影響，針對主要沉積方向建立各向異性共變模型或分區協同克利金，以維持 SLE 穩定性與準確度。 2. 感謝委員建議， 3. 導水係數圖中十字狀高值為典型協同克利金在鄰域取樣不均或方向性不符時的人工效應，主因多為搜尋半徑、扇區劃分或等向假設所致。可調整各向異性參數、限制單點權重，或依地質主軸旋轉共變模型以減少此類奇點。	
委員二 變更後之場址經現勘後發現無法架設無線水位及水質計，改以單體式水位計，以人工作業取代相關程序，無法完成之工項經費可調整至其他新增項目或替代項目，俾利完成計畫目標。後續相關工項及經費支用若有調整，請於成果報告中表列詳細呈現。		感謝委員建議，依委員建議將工項經費可調整至其他新增項目或替代項目，並於 SRFS 系統變更作業經費項目	
委員三 1. 原意見已說明 2. 報告書中已說明執行現況與研究流程&方法 3. 報告書中說明："...務實改善抽出處理法與灌藥淋洗作業程序，降低整治成本並提升污染物移除處理率。增進整治工法效率，對抽出處理法與灌藥淋洗作業效率提升有正面的助益。..." & "...於進行整治過程中，污染團的清除狀況及殘餘熱區，為抽出處理與淋洗作法的修正參考..."，建議期末報告中能提出更具體的說明		1. 相關意見依回覆說明。 2. 感謝委員肯定。 3. 感謝委員建議，由於本場址尚在進行最新的水質調查中，污染清除率提升、抽出與淋洗效率改善之量化指標將於後期計畫呈現。 4. 感謝委員建議，期末報告提出各種操作模式及試驗成果，提供整治單位討論與未來應用至現地調查中。 5. 感謝委員建議，限制條件即是用情境已於各章節說明補充。	



4. 本計畫所擬探討的污染場址，"... 整治作業實施過程中 遭遇最主要的困難之一，為含水層地質構造具有高度異質性，導致抽水與藥劑灌注分佈不均，進而影響污染物去除效率與 整治成效。根據現地地質鑽探資料與模場試驗結果顯示..."，期末報告建議說明本計畫的成果如何改善此情境。 5. 期末報告建議說明：限制條件與適用情境	
委員四 1. 績效自評表中是否已完成產業技術轉移？ 2. 圖 19 之 Y 軸地下水深度表示由小至大，是否可採反之表示較符合地下水位普遍呈現方式(如圖 9)。 3. 圖 19 之 PW02、MW01、MW06-D 為何會有水位急速上升之現象？且部分水位上升至 0m 左右，請補充說明。 4. 5-4 結論與建議第二行，至期中階段已完成...「污染分布調查」，但報告中似未見(然本項亦非屬表 5 之本計畫工作範圍)？惟本計畫目的為整治策略應用，建議補充說明場址目前污染現況。	1. 感謝委員建議，目前已完成部分產業技術轉移。 2. 感謝委員建議，已改為由地下水位高程呈現數據。 3. 感謝委員建議，水位深度急速上升代表該井為抽水狀態，至 0m 係因洩降已超過水位計量測範圍。 4. 感謝委員建議，污染分布調查為整治計畫工作，非本計畫工作範圍，已於內文補充 114 第三季之污染現況說明。
委員五 1. 本研究目前已完成場址水位計安裝和 2 次地下水水質採樣及數據分析並套疊地下水水位空間分布與地下水水質空間分布，建立場址概念模型等工作。 2. 少部分本文中被引用參考文獻未列於參考文獻章節；另參考文獻章節之文獻排列方式和格式不一致？ 3. 後續宜強化呈現所建構系統之穩定度和耐久性等測試成果？ 4. 宜再強化說明量測地下水溫度對所開發技術之助益及高污染團層析技術之執行成果和應用？ 5. 期末報告可再強化呈現技術效益指標或成本效益之成果？ 6. 宜量化目前工作進度完成率，並說明與研究計畫書所擬工作進度甘特圖之進度差異？ 7. 期末報告宜說明本研究成果的實場應用性和限制及後續具體可行的精進或優化的研究方向？	1. 感謝委員建議，於期末階段已完成第三季地下水水質採樣及數據分析並套疊地下水水位空間分布與地下水水質空間分布。 2. 感謝委員建議，已修正參考文獻為引用狀況，並統一文獻排列格式 3. 感謝委員建議，本計畫成果為試驗性成果，取決於操作模式並完成一次性推估，故無系統穩定度和耐久度測試成果。 4. 感謝委員建議，已補充至 5-4 節 5. 感謝委員建議，依委員意見改善。 6. 感謝委員建議，目前期末報告已完整完成研究計畫書所擬工作進度甘特圖所有工作項目 7. 感謝委員建議，已將相關具體可行的精進或優化的研究方向呈現於期末報告成果與建議章節中。



環境部環境管理署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☐構想書 ☐申請計畫書 ☐期中報告
☐修正計畫書 ☒成果報告

審查意見回覆對照表

計畫年度	113 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：倪春發 NO：	
計畫名稱	整治場址數位監測與高精度污染團層析技術於抽出處理及淋洗策略之應用		
審查意見		執行單位回覆	
委員一 1. P5 請在圖四補充 PW06 井位 2. 建議可再補充說明導水係數反推估流程，例如初始值、迭代收斂條件等 3. APP 平台建議宜與整治業務需求進行連結，或以範例呈現其應用性。 4. 建議 SSLE/水力訊號給予的 K 值分布與異質性剖面，可與 TW-01 / TW-03 熱示蹤之垂直向熱傳曲線互相驗證。		1. 依委員建議修正 2. 感謝委員意見，相關說明補充至「5-2 SSLE 反推估場址二維導水性」。 3. 本研究所開發之行動裝置 APP，已於系統建置過程中與合作整治顧問廠商進行整治業務需求討論，並依現地調查人員實際作業流程逐步修正功能與介面設計，以提升系統與現地調查作業之整合性與可操作性。 4. SSLE 所推估之導水係數分布主要反應場址「平面尺度」之導水性特徵，而 TW-01 與 TW-03 熱示蹤試驗則提供井內「垂直尺度」之流通資訊，兩者屬不同尺度之水力特性描述，惟可於整治應用上加以整合，以提升場址地層結構與水力異質性之整體判釋精緻度。	
委員二 1. 請說明第一年改為人工採集的水位等數據密度和品質，是否足以作為第二年訓練機器學習模型的有效或可靠數值。 2. 成果報告中針對整治工法回饋的效益及成本效益等，尚無具體分析或說明。		1. 本計畫第一年因場址條件限制，改採人工方式進行地下水位等資料蒐集，相關量測作業仍依既有監測計畫之頻率與標準程序執行，資料品質可滿足趨勢判釋與物理行為分析之需求。雖人工採集之資料密度相較即時無線監測為低，惟其量測精度與一致性仍具可靠性。本計畫第二年所規劃之機器學習分析，並非單獨仰賴第一年資料進行模型訓練，而係以第一年資料作為基礎資料集，結合後續補充之長時序觀測資料與物理試驗結果，逐步建構與校正模型，以確保訓練資料之有效性與可靠性。 2. 目前整治作業仍在執行中，污染去除成效與整治成本尚未達可進行完整量化評估之時點，故本成果報告以技術回饋與操作支援效果為主，相關成本效益分析將俟整治作業完成後再行評估。	



委員三

1. 本計畫在學術產出目標達成度尚未符合預期，請持續努力。
2. 本計畫有諸多項工作成果，包括建置地下水質無線智能監測與平台展示系統、水力層析技術試驗與參數推估、新型光纖高解析監測系統建置、執行熱示蹤劑試驗等，對於整治工作回饋與改善之建議，能否再補充與上揭工作成果之應用性或關聯性。

1. 感謝委員指教，本計畫於執行期間以模場試驗與技術整合為主要工作重點，相關學術成果目前仍在整理與分析中，後續將持續彙整研究成果並進行學術論文撰寫與投稿，以提升學術產出。
2. 本計畫所完成之各項技術成果，係作為整治作業判釋與操作調整之輔助工具加以應用。其中，地下水位與水質監測及平台展示系統，可即時掌握整治期間水位與水質變化趨勢，提供抽出處理系統運作狀態之判斷依據；水力層析技術所推估之導水係數分布，則可用以輔助抽注配置與淋洗策略之規劃；而新型光纖高解析監測與熱示蹤試驗成果，則提供井內垂流通特性之判釋資訊，有助於辨識不同深度層位之流通差異。綜合上述成果，本計畫可透過多尺度水力資訊之整合，提供整治作業在抽水、灌注與操作調整上的參考依據，以提升整治策略調整之精準度與合理性。

委員四

1. 研究提出水力層析成像(SSLE)、主動式熱示蹤(DTS)結合機器學習，展現前瞻研究方向，具技術創新性。
2. 部分水井(PW03、PW04)因設備干擾無法進行水位觀測，需評估說明可能對研究成果之影響。
3. 成果績效自評表，少部分指標達成率偏低，宜再強化說明其可能原因及後續因應解決策略。
4. 可再強化呈現本研發技術與傳統方法相比之成本效益量化成果。
5. 多口監測井之時序水位資料、水質採樣結果、試驗參數等管理妥善，惟建議可補充資料品質管制標準、異常值判釋、缺失值補整等細節。

1. 感謝委員肯定，本計畫透過水力層析成像、主動式熱示蹤與資料分析技術之整合，期望建立具前瞻性之整治技術應用方向，後續將持續精進相關方法與實務應用。
2. 感謝委員指正。PW03 與 PW04 因現地設備干擾因素，於部分期間無法進行水位觀測，確實造成局部資料之缺漏。惟本研究之整體分析係整合多口監測井之水位、試驗與監測資料進行判釋，相關缺漏並未影響場址水力行為之整體趨勢判斷與主要研究結論。
3. 感謝委員指教，成果績效自評表中少部分指標未達原預期，主要係因本計畫屬模場型研究，執行重點著重於現地試驗與技術整合，相關學術產出與技術移轉需待試驗資料完整彙整後方能推動。後續將持續整理研究成果，強化論文撰寫、技術應用與產學合作，以提升相關指標之達成度。
4. 感謝委員建議。本計畫目前仍處於模場試驗與整治執行階段，相關整治成效與實際成本尚未完整累積，故尚未進行完整之成本效益量化比較。惟本研究所建置之監測與解析技術，已可作為後續整治操作優化與成本效益評估之基礎，相關量化分析將於整治作業完



	成並取得完整操作資料後進一步強化呈現。 5. 感謝委員建議。本計畫於資料蒐集與管理過程中，已依既有監測作業規範進行基本資料品質管制，包括量測儀器校正、時序合理性檢核與異常值判釋；對於缺失資料，則採保留原始紀錄並於分析時加以註記說明，以避免不當補值影響判釋結果。相關資料品質管制與限制條件，後續可視需求再行補充說明。
委員五 1. 研究成果的實務應用方式尚待更進一步說明。 2. 研究成果尚待進一步彙整	感謝委員建議。本計畫研究成果目前已完成主要技術建置與模場試驗，相關成果仍在彙整與整合中；實務應用方面，將以整治作業之抽注配置調整、淋洗策略規劃與整治成效判釋作為主要應用方向，後續將持續整理研究成果並強化其於實際整治作業中之應用說明。



專案基本資料表

專案性質		☒ 實驗性質 ☐ 非實驗性質		專案技術編碼		LAB-S-R-H1-P	
專案類別（單選）		☐ 先導型 ☐ 研究型 ☒ 模場型		研究主題		☒ 整治 ☐ 調查 ☐ 政策類或其他	
申請機構系所		國立中央大學/環境研究中心					
機構地址		(320317) 桃園市中壢區中大路 300 號					
專案主持人		倪 春 發		職等／職稱		教 授	
協同主持人		楊 信 欣		職等／職稱		七 職 等 / 經 理	
專案 名稱	中文	整治場址數位監測與高精度污染團層析技術於抽出處理及淋洗策略之應用					
	英文	Application of smart sensing and plume detection models to improve efficiency of in-situ pump and treat and flushing remediation technologies					
	關鍵字	數位監測、污染團層析技術、抽出處理、淋洗策略					
執行期程		自 民 國 113 年 11 月 01 日 起 至 民 國 114 年 11 月 30 日 止					
專案主持人		姓名：倪春發 E-mail：nichuenfa@geo.ncu.edu.tw				專線：03-4227151#65874 手機：0989-483898	
專/兼任人員		姓名：林淇平 E-mail：chepinglin@gmail.com				專線：03-4227151#57808 手機：0937-150285	
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 總 經 費		第一年 申請經費		第二年 申請經費		編列說明
	1.	人事費用	780,402	1,710,648	(1~5 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	889,098	991,180	(與計畫主體相關)		
	4.	其它研究相關費用	260,000	208,000	(含差旅與租賃費用)		
	5.	行政管理費	340,500	519,506	(1~5 項相加之 15%為限)		
	6.	自籌款	200,000	0	(申請單位自行籌備款項)		
	申請補助經費 (1~5 項)		2,270,000	3,429,334	總金額：5,699,334		
	計畫總經費 (1~6 項)		2,470,000	3,429,334	總金額：5,899,334		

說明：

1. 本署以部份補助為原則，得指定不補助項目，不補助項目應為自籌款項，應自行核銷不得申請。
2. 非實驗性質之專案，若第一項費用編列金額超出比率，須於申請公文內向本署說明，俾利審查。
3. 補助專案經費編列自申請起經專案核准後，經費編列中各項費用單價與需求只可減少與下修。

專案主持人：_____（簽名或蓋章） 日期：_____



土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案

113 年度專案成果績效自評表

(一) 學術面

項目 \ 目標達成程度			申請 預估數	期中 達成數	成果 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	1	0	0	0	相關學術論文已籌備撰寫中，惟至本案作業期程臨結後尚不及完備，故將後續歸納結果投稿。(後項亦同)
		(2) 研討會論文	1	0	0	0	
	2.國外投稿 (篇數)	(1) 期刊論文	1	0	0	0	
		(2) 國際研討會論文發表	1	0	0	0	
	3.報告 (篇數)	(1) 技術報告	0	0	0	0	
		(2) 研究報告	1	0	0	0	
	4.專著 (本數)		0	0	0	0	
	5.辦理學術 會議(場數)	(1) 研討/說明會	0	0	0	0	
		(2) 成果發表會	0	0	0	0	
		(3) 論壇	0	0	0	0	
	6.研發改良 技術 (項 數)	(1) 已開發技術	1	0	0	0	
		(2) 技術平台	1	0	0	0	
	7.技術獎項 (項數)						
B 人才 培育	8.研發人員 (人數)	(1) 碩士	3	3	3	100%	
		(2) 博士	3	3	3	100%	
	9.研究團隊 (個數)	(1) 跨領域團隊	1	1	1	100%	
		(2) 跨機構團隊	0	0	0	0	
		(3) 形成研究中心	0	0	0	0	



目標達成程度			申請 預估數	期中 達成數	成果 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)
項目							
		(4) 形成實驗室	0	0	0	0	
10.其他指標 (請自行命名)		(請自填)					

(二) 產業面

目標達成程度				申請 預估數	期中 達成數	成果 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)
項目								
A 智慧 財產權	1.專利 (件數)	已 核 准	發明	0	0	0	0	
			新型/設計	0	0	0	0	
			合計	0	0	0	0	
		申 請 中	發明	0	0	0	0	
			新型/設計	0	0	0	0	
			合計	0	0	0	0	
B 研發 技術轉 移	2.先期技術 成果移轉	件數		0	0	0	0	
		授權金(仟元)		0	0	0	0	
		衍 生 利 益 金 (仟元)		0	0	0	0	
	3.技術移轉 (專利)	件數		0	0	0	0	
		授權金(仟元)		0	0	0	0	
		衍生利益金 (仟元)		0	0	0	0	
	4.技術移轉 (應用技 術)	件數		0	0	0	0	
		授權金(仟元)		0	0	0	0	
		衍 生 利 益 金 (仟元)		0	0	0	0	
	5.可移轉 產業技術	(1)技術(件 數)		1	1	1	100%	
		(2)品種/系 (件數)		0	0	0	0	
	C 產學研 合作	6.促成合作 研究	件數		1	0	1	100%
金額(仟元)			0	0	0	0		
7.促成投資		件數		0	0	0	0	
		投資金額 (仟元)		0	0	0	0	
8.促成取得 業界科專		件數		0	0	0	0	
		業界投資金額 (仟元)		0	0	0	0	
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	成果達成數	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	1	1	1	1	
		收入(仟元)	0	0	0	0	
	2.諮詢服務	次數	1	1	1	1	
		收入(仟元)	0	0	0	0	
B 政策推動	3.協助政府推動(件數)	(1) 政策	0	0	0	0	
		(2) 法規	0	0	0	0	
C 技術效益	4.整治技術提升(%)		100	20	100	100%	
	5.整治成本降低(%)		100	20	100	100%	
	6.提升能源效率(%)		60	20	60	100%	
7.其他指標 (請自行命名)		(請自填)					

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）
1.投稿期刊 1 篇、參與國際研討會發表論文 1 篇。 2.培育 1 名碩士生。
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）
洽談產業合作開發，移轉專業技術至相關產業。
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、污場址管理等政策及法規研訂之參考）
1.務實改善抽出處理法與灌藥淋洗作業程序，降低整治成本並提升污染物移除處理率。 2.增進整治工法效率，對抽出處理法與灌藥淋洗作業效率提升有正面的助益。



主要研究人力

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

類別	姓名	服務機構/系所	職稱	在本計畫專案內擔任之具體工作性質、項目及範圍	*每月平均投入 工作日數比率 (%)
主持人	倪春發	國立中央大學/ 應用地質研究	教授	控制計畫研究流程與進度、 計畫品質管理、計畫執行指	40%
協同主持人	楊信欣	裕山環境工程 股份有限公司	經理	協助計畫研究流程與進度控 管、計畫執行偕同指導	30%
協同主持人	李唯祺	工業技術研究 院/綠能與環境 研究所	研究員	擔任第二年計畫協主持人， 協助計畫研究流程與進度控 管、計畫執行偕同指導	40%
專任助理	黃琳霜	國立中央大學/ 應用地質研究	兼任助理	協助計畫內容執行，包括試 驗執行、資料分析、行政事	50%
兼任助理	洪承欣	國立中央大學/ 應用地質研究	兼任助理	協助計畫內容執行，包括試 驗執行、資料分析、報告撰	50%



摘要

本計畫以佶鼎科技股份有限公司廠址作為模場試驗場域，驗證與優化土壤及地下水污染整治技術。調查結果顯示，地下水中銅（Cu）與鎳（Ni）污染分布面積分別為 507 及 811.2 平方公尺，另有多口監測井檢出鉛（Pb）濃度超標，顯示場址具多重重金屬污染特性。主要採用抽出處理法（Pump and Treat）控制污染，雖整體濃度呈下降趨勢，仍有局部監測井超標。為提升整治效能，輔以現地土壤淋洗法（In-situ Soil Flushing），促進土壤中金屬脫附並抽取處理，並已完成模場試驗。場址含水層由多層砂質與黏土交互組成，具高度異質性，7~8 公尺處之黏土層形成滯留屏障，使污染物分佈不均，抽出與灌注效率受限。此外，地下水流向受降雨與鄰近抽水行為影響，流場變異大，增加整治操作與成效評估之挑戰。因此，本模場計畫提出解決此挑戰之技術需求，包括：（1）即時地下水位與基礎水質觀測以強化整治策略規劃；（2）評估含水層水力傳導係數空間分布以增進抽注作業效率；（3）運用光纖高解析監測技術評估垂直向導水特性及水流通量。為強化地質分層與材料分布之空間解析，提高藥劑注入與抽出過程效率，本計畫採用水力層析成像技術（Hydraulic Tomography）推估導水係數二維空間分布場。相較於傳統抽水試驗僅進行單點分析並以數值內插模式進行特徵空間化分析，此方法可透過多次迭代與更新，根據現場量測（如水位、流速）調整模型參數，並以最小化觀測與預測差異為準則進行校正，更適用於大型、複雜含水層系統之多井參數估計。於整治過程中，污染團之清除狀況與殘餘熱區將作為抽出處理與淋洗作業修正依據。為解析地下水通量垂直分布，本計畫將進行井下熱示蹤試驗（Thermal Tracer Test），於井中主動施加微量熱源，並以高解析光纖感測技術監測溫度變化，藉由溫度偏移特徵推估地下水通量。第二年期將根據第一年所建立之觀測資料與試驗成果，導入機器學習模型進行大數據分析與污染行為預測，透過歷史水質與水位資料預測未來變化趨勢，協助識別污染源、高污染區及其影響範圍，並藉由模擬不同整治策略提供最佳化方案，以降低整治成本並提升處理效率。



Abstract

This project uses the Gi Ding Technology Co., Ltd. site as a pilot field to verify and optimize soil and groundwater contamination remediation technologies. Investigation results indicate that groundwater contamination by copper (Cu) and nickel (Ni) covers areas of 507 m² and 811.2 m², respectively. Several monitoring wells also showed lead (Pb) concentrations exceeding regulatory limits, suggesting multiple heavy-metal contamination at the site. The main remediation method is the Pump-and-Treat system; although overall concentrations show a declining trend, some wells remain above standards. To enhance remediation efficiency, in-situ soil flushing has been adopted to promote metal desorption and extraction from soil, and a pilot-scale test has been completed. The aquifer consists of alternating sand and clay layers with high heterogeneity; a clay layer at depths of 7–8 m forms a retention barrier, causing uneven contaminant distribution and limiting extraction and injection efficiency. Moreover, groundwater flow is influenced by rainfall and nearby pumping activities, resulting in significant flow variability and challenges for process optimization and performance evaluation. To address these issues, this pilot project proposes the following technical requirements: (1) real-time groundwater-level and basic water-quality monitoring to strengthen remediation planning; (2) spatial assessment of hydraulic conductivity to improve pumping and injection efficiency; and (3) application of high-resolution fiber-optic monitoring to evaluate vertical flow characteristics and groundwater flux. To refine geological layering and material distribution for more efficient chemical injection and extraction, hydraulic tomography will be applied to estimate two-dimensional spatial distributions of hydraulic conductivity. Compared with conventional single-point pumping tests and interpolation analysis, this method iteratively updates model parameters based on field data (e.g., hydraulic head and flow velocity) and minimizes discrepancies between measured and predicted values, making it suitable for large, complex multi-well systems. During remediation, the removal progress of contaminant plumes and residual hot spots will guide the adjustment of Pump-and-Treat and soil-flushing operations. To analyze vertical groundwater flux, the project will conduct in-well thermal tracer tests, introducing a controlled heat source and monitoring temperature changes with high-resolution fiber-optic sensors to infer groundwater flux from thermal responses. In the second project year, based on the first year's monitoring



and experimental data, machine-learning models will be employed for big-data analysis and contaminant-behavior prediction. By analyzing historical water-quality and water-level data, the models will forecast future trends, identify contamination sources and high-concentration zones, and simulate alternative remediation strategies to develop optimized solutions that reduce costs and enhance treatment efficiency.





目錄

一、前言	1
1-1 場址說明	1
1-2 水文地質	3
1-3 地下水定期監測資訊	7
二、研究目的	10
2-1 研究動機與目的	10
2-2 技術需求與關鍵規劃	12
三、文獻探討	15
3-1 SSLE 應用於異質性含水層參數反推估	15
3-2 熱或溫度作為示蹤劑推估含水層參數	17
3-3 手持無線裝置 APP 以及網路即時平台在污染場址整治與土壤地下水環境工程之應用	19
四、研究方法與過程	21
4-1 研究流程	21
4-2 傳輸監測系統與展示平台建置	23
4-3 行動裝置 APP 開發	27
4-4 水力層析技術解析場址含水層地質材料空間分布	28
4-5 主動式熱示蹤劑試驗解析含水層垂直水力特徵	34
五、結果與討論（含結論與建議）	47
5-1 地下水位監測與調查	47
5-2 SSLE 反推估場址二維導水性	51
5-3 展示平台與行動裝置 APP 開發與應用	53
5-4 熱示蹤計試驗	59
5-5 整治工作回饋與改善	76
參考文獻	77



表次

表 1	場址資料.....	2
表 2	微水試驗資料（裕山環境工程，2014）.....	3
表 3	模場內設置監測井資訊.....	6
表 4	114 第 3 季地下水地期監測資訊.....	7
表 5	模場內設置抽水井操作資訊.....	33
表 6	DTS 偵溫系統解析範圍（Data From: APSENSING）.....	34
表 7	TW-01 藥劑降溫注入試驗操作資訊.....	61
表 8	分時段溫度垂向剖面變化.....	62
表 9	TW-01 降溫藥劑注入試驗流速分析結果與對流狀態評估.....	66
表 10	TW-03 線性加熱試驗操作資訊.....	67
表 11	TW-03 線性加熱試驗熱流狀態評估.....	70
表 12	TW-03 加熱試驗各深度推估流速.....	74



圖次

圖 1	本場址位置與公告範圍	1
圖 2	本場址臨近水系位置圖	4
圖 3	場址地質剖面圖	4
圖 4	本場址監測井位置	5
圖 5	114 年第 3 季淺井地下水污染濃度推估	8
圖 6	114 年第 3 季深井地下水污染濃度推估	9
圖 7	本計畫規劃流程圖	21
圖 8	工作進度甘特圖	22
圖 9	本計畫感測—傳輸—儲存—運算—介面工作流程概念圖	25
圖 10	Grafana 面板種類	25
圖 11	專案網路 GIS 平台	26
圖 12	DTS 原理拉曼反向散射示意圖	36
圖 13	典型 DTS 實驗設計；(a) 單端配置、(b) 雙頭單端配置、(c) 雙端配置	36
圖 14	DTS 連續量測溫度垂直分布圖 (Leaf et al., 2012)	37
圖 15	井內熱傳輸反應與 DTS 溫度剖面 (Maldaner et al., 2019)	38
圖 16	單井加熱試驗配置圖	39
圖 17	鐵氟龍加熱線	40
圖 18	高解析度鎧裝光纖與 DTS 解讀儀	40
圖 19	(a) 光纖感測線 (相對於熱源) 置於地下水流上游 1cm (藍點) 和下游 (橘點) 之溫度反應；(b) 為 (a) 無因次化之溫度反應 (des Tombe et al., 2019)	46
圖 20	場址地下水位監測成果	50
圖 21	SSLE 反推估之傳導係數 ($T, m^2/min$) 空間分布	53
圖 22	Grafana 面板種類	54
圖 23	專案網路 GIS 平台	55
圖 24	APP 表單設計，左至右分別為油水位紀錄表、水質分析紀錄表、土壤採樣紀錄表	58
圖 25	客製化案場表單設計	58
圖 26	單井各次調查數據與採樣深度資訊	59
圖 27	彙整不同水井各次調查數據時序結果	59
圖 28	藥桶內放置冰磚降溫，並緩慢注入至井內，由布置於井中之 DTS 量測溫度變化	61
圖 29	TW-01 試驗溫度全時圖	62
圖 30	TW-01 注入降溫藥劑試驗，各深度節點溫度隨時間變化圖，以地下水位以下之溫度紀錄為主	64
圖 31	TW-03 試驗溫度全時圖	69



圖 32	加熱試驗各深度之溫度穿透曲線與平均值、標準差	72
圖 33	TW-03 加熱試驗各深度之溫度穿透曲線推估地下水流速	75



一、前言

1-1 場址說明

本計畫以「佶鼎科技股份有限公司」為模場專案試驗場址，該場址位於桃園市觀音桃園市觀音區經建四路 7-1 號，場址地號為工業區段四小段 6-1 地號(如圖 1 所示)，面積為 1,521 m²，目前為持續營運中的工業用地，主要從事電子製程相關產業，相關資訊摘如表 1。因歷年操作過程中設有廢液儲槽及排放設施，導致場址土壤及地下水遭受污染。歷次環境調查結果顯示，場址主要污染物包括土壤中的重金屬銅(Cu)、鎳(Ni)、鉻(Cr)與鉛(Pb)，以及地下水中的銅(Cu)、鎳(Ni)、鉛(Pb)與揮發性有機物二氯甲烷，部分監測井至今仍高於《土壤及地下水污染整治法》第二類地下水污染管制標準。為解決污染問題，佶鼎公司委託裕山環境工程股份有限公司執行整治計畫，計畫已歷經多次變更，目前為第二次變更版本，整治目標為將污染物濃度降至法定標準 80% 以下，整治方法包含土壤的排土客土法與耕犁工法，以及地下水的抽出處理法與新增的現地土壤淋洗法。其中，現地淋洗法將利用既有監測井作為灌注井進行小型模場試驗，驗證藥劑灌注成效，並根據試驗結果調整灌注策略。此外，場址持續執行每季定期監測，並於整治完成後停止系統運作一個月，進行土壤與地下水的自行驗證，以確認整治成效。



圖 1 本場址位置與公告範圍



整治場址數位監測與高精度污染圖層析技術於抽出處理及淋洗策略之應用

表 1 場址資料

場址公告資料		
場址名稱	佶頂科技股份有限公司	
場址地址	桃園市觀音區經建四路 7-1 號	
場址地號	桃園市觀音區工業區段四小段 6-1 地號	
場址座標	TWD97-X: 261711.877, Y: 2772369.401	
場址類別	工廠	
場址面積	1,521 平方公尺	
場址污染情形	土壤主要高污染潛勢區域分別為半成品污泥暫存區域及廢棄物暫存區域，地下水主要污染潛勢區域為污泥暫存區域，檢測結果顯示土壤銅項目檢測濃度 3,340 mg/kg（管制標準 400 mg/kg）、鉻檢測濃度 524 mg/kg（管制標準 250 mg/kg），地下水鎳項目檢測濃度 4.11 mg/L（管制標準 1 mg/L）、鉛項目檢測濃度 0.158 mg/L（管制標準 0.1 mg/L）、二氯甲烷項目檢測濃度 0.895 mg/L（管制標準 0.05 mg/L）。	
場址污染物	土壤污染物：重金屬銅、鉻 地下水污染物：重金屬鎳、鉛；二氯甲烷（污染行為人待確認）	
整治計畫執行	裕山環境工程股份有限公司	
場址整治方案	土壤	排土克土法、耕犁工法
	地下水	抽出處理法、現地淋洗法



1-2 水文地質

本場址位於桃園市觀音產業園區內，屬中壢台地地形，地勢由東南向西北緩降。地質年代屬全新世，地層屬古砂丘沉積，地表下 20 公尺內主要以卵礫石、細粒砂及黏土為主，膠結性差，屬鬆散沉積層。依現地鑽探資料顯示(參照圖 3)，地表至約 7~8 公尺以下為黃棕色或灰色砂層與砂質黏土夾層，其下為礫石層，至約 14 公尺處轉為黏土層，研判為第一含水層底部。水文環境方面，場址西北側約 900 公尺即為臺灣海峽，附近有大堀溪(約 600 公尺)與富林溪(約 2 公里)，整體區域地下水流向為東南向西北，與地形坡度一致。場址地下水位變化範圍約為地表下 1.3~5.4 公尺，換算絕對高程為 5.5~27.4 公尺。根據微水試驗(Slug Test)結果，場址第一含水層之水力傳導係數介於 6.215×10^{-4} 至 9.449×10^{-4} cm/sec，代表其具有中等以上之透水性，與觀音工業區歷年調查資料一致。試驗過程採微水試驗而非抽水試驗，以避免擾動污染團分布。此外，場址受季節性降雨影響，地下水位及流向具一定變動性。夏季(6-9月)為高降雨期，月平均降雨量可達 23 公分，年平均降雨量約為 185 公分。整體地下水環境以非侷限含水層為主，污染物主要集中於地表下 7 公尺以內區段，7~8 公尺處因存在砂質黏土層形成相對阻水層，使上下層污染濃度產生差異。

場址目前共設 14 口監測井，位置如圖 4 所示，相關資訊參照表 3 內容，包含 MW10425-01、MTL-01-A、MTL-01-B、MW-01 至 MW-09 及深層監測井 MW-06-D、MW-09-D。這些監測井多數設於污染疑慮區周邊，用於地下水水質監測與流向分析。井深範圍約為 7.2 至 25 公尺，開篩區間主要位於地下水位上下，能有效反映含水層內水質狀況與水位變化。監測井微水試驗結果列如表 2。

表 2 微水試驗資料(裕山環境工程，2014)

監測井編號	開篩區間(m)	水位高程(m)	水力傳導係數(cm/sec)
MW-06-D	7.49-14.49	8.924	6.215×10^{-4}
MW-09-D	8.32-15.32	8.481	9.449×10^{-4}

整治場址數位監測與高精度污染圖層析技術於抽出處理及淋洗策略之應用

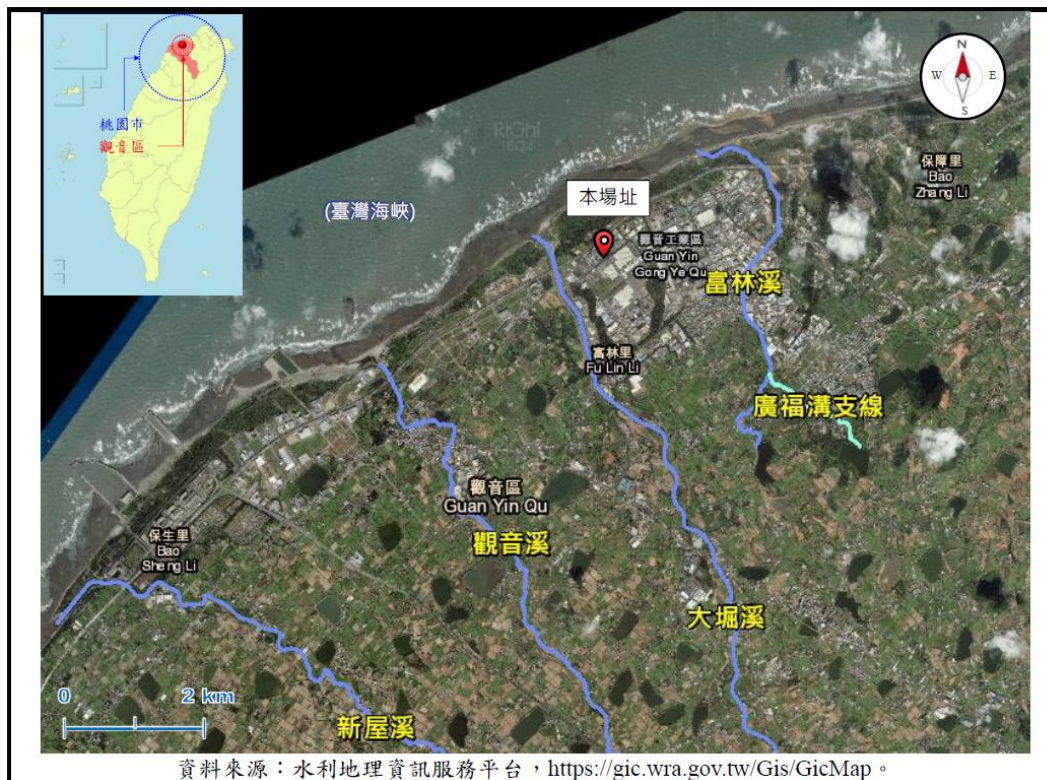


圖 2 本場址臨近水系位置圖

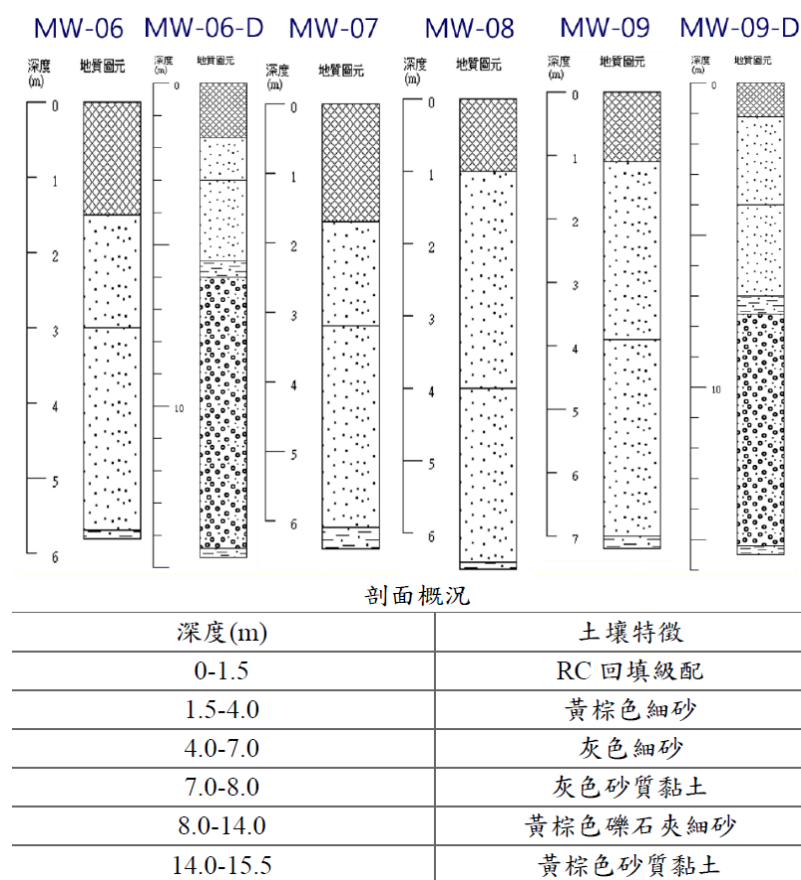


圖 3 場址地質剖面圖

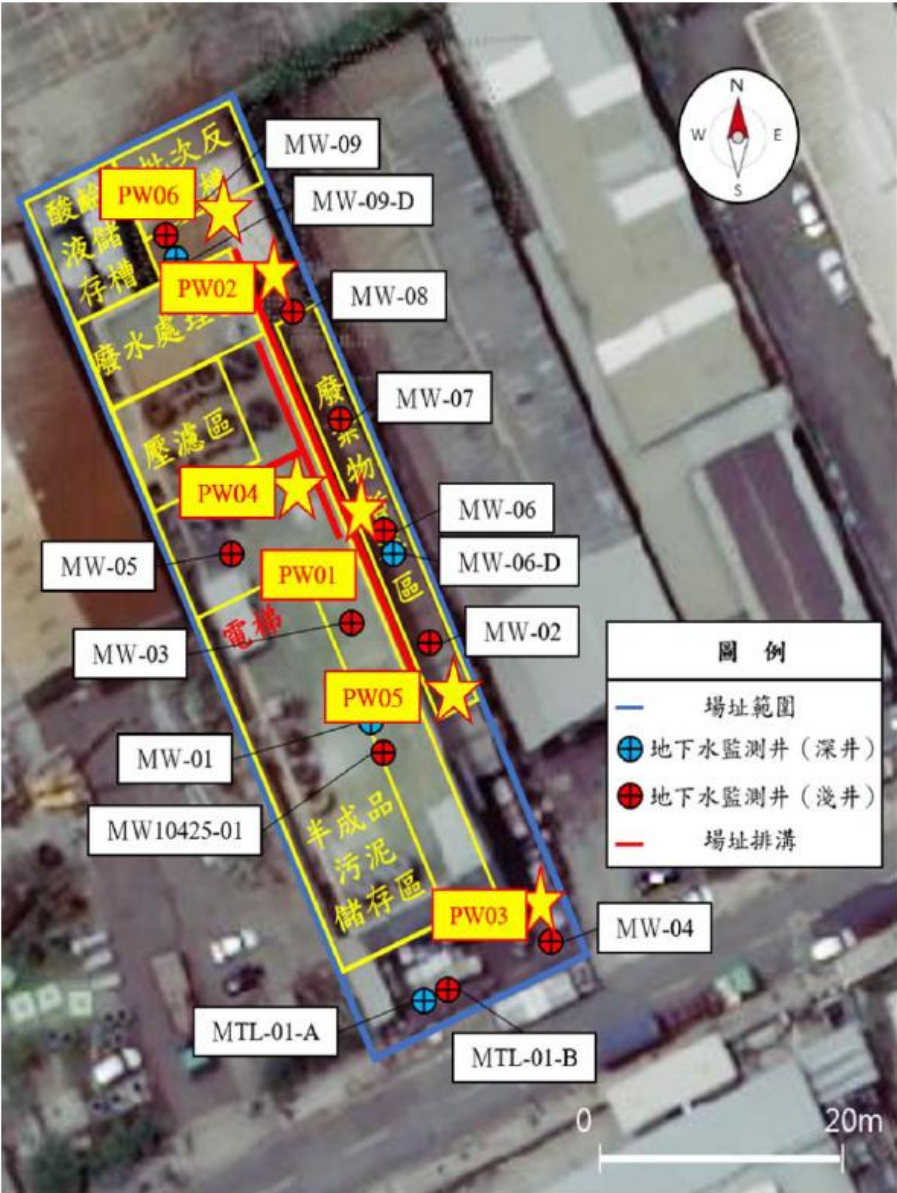


圖 4 本場址監測井位置



整治場址數位監測與高精度污染圖層析技術於抽出處理及淋洗策略之應用

表 3 模場內設置監測井資訊

監測井編號	井深 (TOC, m)	開篩區間 (TOC, m)	水位計監測
MW10425-01	7.121	1.041~7.041	無
MTL-01-A	16.2	10.1~16.1	深層監測
MTL-01-B	7.64	1.54~7.54	無
MW-01	15.32	9.22~15.22	深層監測
MW-02	7.83	1.73~7.73	淺層監測
MW-03	7.79	1.69~7.69	淺層監測
MW-04	8.02	1.92~7.92	淺層監測
MW-05	7.974	1.87~7.87	淺層監測
MW-06	5.67	0.61~5.61	無
MW-06-D	14.55	7.49~14.49	深層監測
MW-07	6.23	1.17~6.17	淺層監測
MW-08	6.4	1.34~6.34	淺層監測
MW-09	7.07	2.01~7.01	無
MW-09-D	15.38	8.32~15.32	深層監測
PW01	16	10-16	深層監測
PW02	10	1-10	深層監測
PW03	10	8-10	無
PW04	15	3-15	無
PW05	15	3-15	深層監測
PW06	15	3-15	深層監測

1-3 地下水定期監測資訊

本場址於 112 年 7 月 24 日整治計畫書（第一次變更）核定（府環水字第 111202411 號），依據整治計畫核定內容，應每季執行 1 次地下水定期監測以確認場址污染變化趨勢及改善成效。針對場內既設 14 口監測井於整治期間進行定期採樣分析，分析項目為地下水管制項目之八項重金屬及揮發性有機物。

114 年 7 月 16~17 日進行第 3 季地下水定期前監測，於現場進行地下水水質量測時，因 MW-03、MW-04、MW-06 出現水質異常情形，故於 9 月 18 日針對 MW-03、MW-04、MW-06 進行地下水定期監測。第 3 季地下水定期監測結果中，MW-03 鉻、銅超過地下水管制標準， MW-06-D 鎳、銅超過地下水污染管制標準，相關資訊參照表 4。

本季於場址中下游（MW-07~MW-09），出現濃度回升至地下水污染監測標準，可能與地下水水質有關，相較於歷次地下水定監測結果 pH 平均落在 4 左右，第 3 季地下水 pH 平均落在 3.5 左右。在酸性地下水環境中重金屬移動性較高，故有污染物濃度回升之情形。目前地下水污染整治計畫書已於 114 年 7 月 10 日備查，後續將依整治計畫書規劃書核定期程執行相關工作事項，並持續進行地下水定期監測，追蹤地下水污染物濃度變化。

本場址地表下 7 公尺至 8 公尺處地質為灰色砂質黏土，土壤質地透水性稍差，使污染物垂直交換受到阻礙，故污染濃度推估圖以淺井及深井區分淺層（地表下至 7 m）及深層（地表下 8 m~14 m）。本季定期監測成果使用 Surfer 軟體以克利金法（Kriging）推估地下水污染範圍並繪製成圖 5、圖 6。

表 4 114 第 3 季地下水定期監測資訊

採樣點編號	採樣日期	pH	DO	EC	ORP	DCM	氯甲烷	鎳	銅	鉻	鉛	鎘	錳	砷	汞
		-	mL	umho/cm	mV										
MTL-01-A	114.07.17	5.9	1.6	1,030	200	ND	ND	ND	<0.020(0.0059)	ND	ND	ND	<0.020(0.0141)	ND	<0.0010(0.00019)
MTL-01-B	114.07.17	5.8	1.5	2,260	148	<0.00100(0.00064)	ND	<0.020(0.0136)	<0.020(0.0166)	ND	ND	ND	<0.020(0.0112)	ND	ND
MW-01	114.07.17	3.7	1.5	4,390	306	0.0301	<0.0100	0.759	2.58	<0.020(0.0133)	0.024	ND	1.79	<0.0020(0.00091)	ND
MW10425-01	114.07.17	3.8	1.4	2,060	384	<0.0100	<0.0100	0.309	3.86	0.102	0.055	ND	1.21	<0.0020(0.00079)	ND
MW-02	114.07.16	4.1	5	1,190	324	<0.0100	<0.0100	0.05	0.84	ND	0.013	ND	0.574	ND	ND
MW-03	114.09.18	2.3	5.9	4060	417	<0.0100	<0.0100	0.888	15.7	0.661	0.05	0.011	3.42	0.0183	ND
MW-04	114.09.18	5.4	0.7	1480	74.1	<0.0100	<0.0100	0.194	0.368	<0.020(0.0077)	0.009	ND	0.779	<0.0020(0.00153)	ND
MW-05	114.07.17	3.7	2.1	944	438	<0.0100	<0.0100	0.05	0.84	ND	0.013	ND	0.2119	ND	ND
MW-06	114.09.18	2.6	4.4	1010	362	<0.0100	<0.0100	0.105	1.58	0.064	0.032	ND	0.352	0.0067	ND
MW-06-D	114.07.16	3.4	2	3,140	336	<0.0100	<0.0100	1.23	13.4	<0.020(0.0165)	0.034	<0.003(0.0015)	2.07	ND	ND
MW-07	114.07.16	3.5	1.5	2,810	346	<0.0100	<0.0100	0.339	7.43	0.041	0.018	<0.003(0.0017)	0.934	ND	0.0026
MW-08	114.07.16	3.3	1.4	3,110	438	<0.0100	<0.0100	0.398	8.36	0.037	<0.008(0.0043)	<0.003(0.0024)	0.979	ND	ND
MW-09	114.07.16	3.95	1.9	3,740	454	<0.0100	<0.0100	0.812	9.91	ND	<0.008(0.0055)	ND	ND	1.59	ND
MW-09-D	114.07.16	5	1.8	2,870	244	<0.0100	<0.0100	0.554	4.92	ND	0.019	<0.003(0.0029)	1.16	ND	ND
地下水污染監測標準						0.025	0.15	0.5	5.0	0.25	0.05	0.025	25.0	0.25	0.01
地下水污染管制標準						0.05	0.30	1.0	10.0	0.5	0.1	0.05	50.0	0.5	0.02

1. 監測井編號由場址上游到下游依序排列。
2. 粗體虛線表示超過第二類地下水污染監測標準，**底線粗體虛線**表示超過第二類地下水污染管制標準。
3. 因 7/16 及 7/17 地下水現場測量水質異常(MW-03 EC：11,000 umho/cm pH：1.8；MW-04 pH：10.11；MW-06 pH：10.11)，故於 9/18 重新進行地下水採樣。

整治場址數位監測與高精度污染圖層析技術於抽出處理及淋洗策略之應用

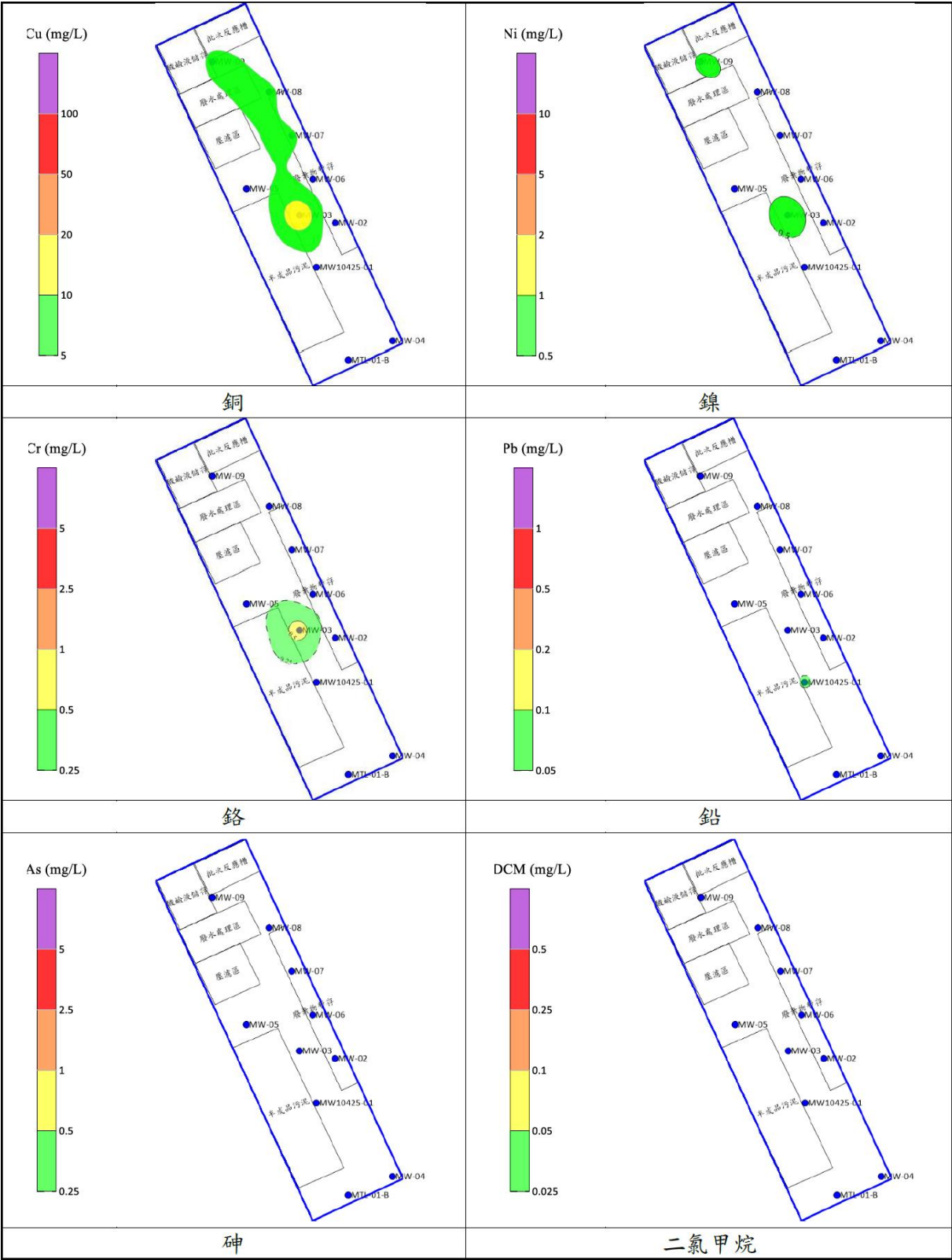


圖 5 114 年第 3 季淺井地下水污染濃度推估

一、前言

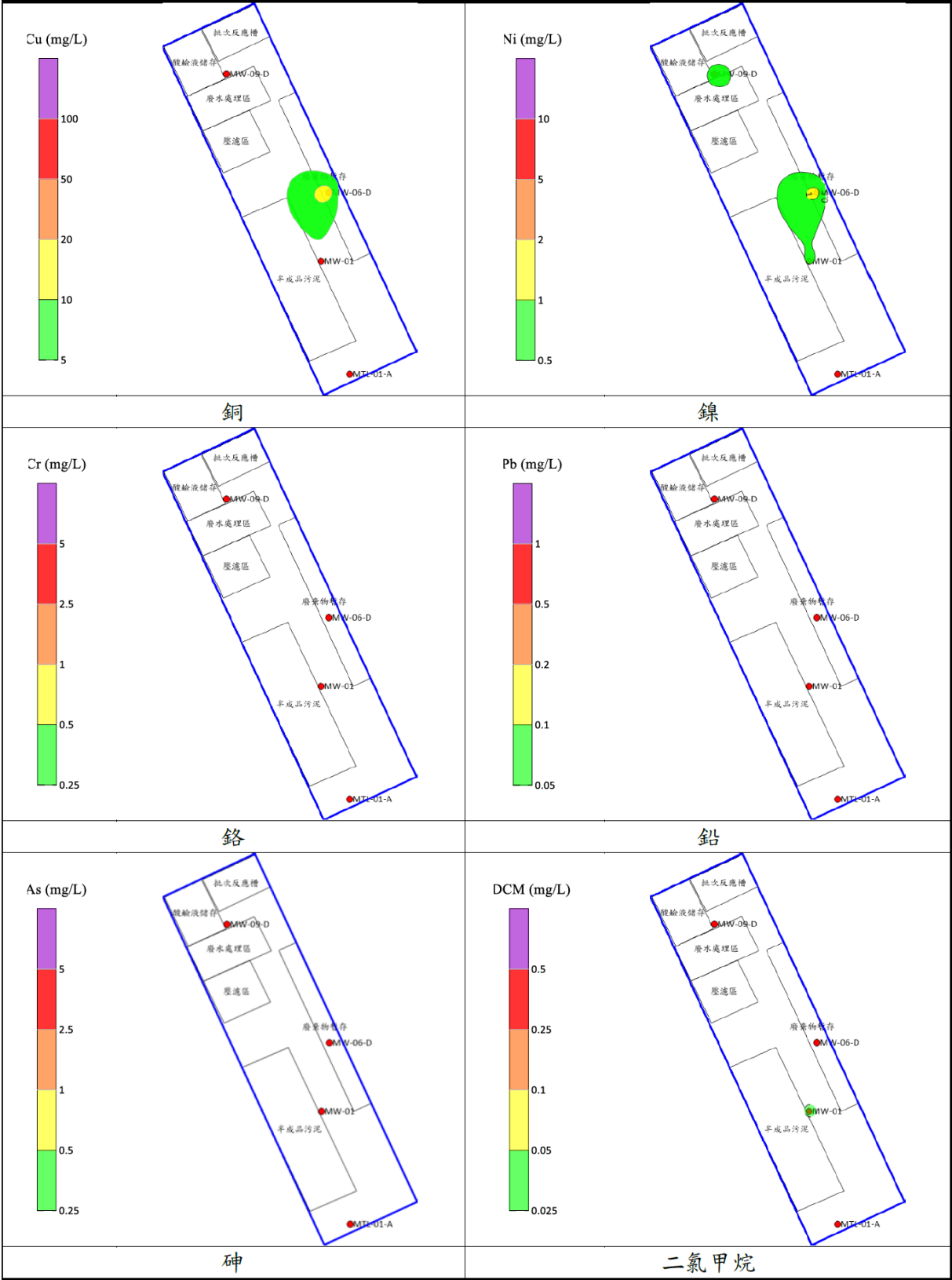


圖 6 114 年第 3 季深井地下水污染濃度推估



二、研究目的

2-1 研究動機與目的

在進行佶鼎科技股份有限公司土壤及地下水污染整治計畫（第二次變更）時，實務上確實面臨了多項挑戰與技術瓶頸，透過精確規劃與階段性調整將可逐步達成整治目標。本場址自原整治計畫核定後，雖已完成土壤污染整治與驗證作業，但地下水污染改善進度卻受到多項因素影響。首先，試燒計畫的推展不如預期，原規劃試燒作業應於整治計畫核定後的前三個月內完成，然因初次試燒成果未達「污染土壤離場原則」（即污染濃度須超過二倍管制標準），主管機關認為代表性不足，需重啟第二次試燒，導致整體時程延宕超過一年。此一過程突顯出在場址污染分布異質性高、污染強度低於技術分界值時，傳統熱處理技術效果不確定性的挑戰。其次，場址空間限制亦造成整治工法的調整壓力，佶鼎科技目前為營運中廠房，場內設備密集，缺乏足夠空間暫置污染土壤及調度施工機具，導致土壤開挖與搬運作業難以分批進行。此外，部分污染井的地下水濃度波動大，難以穩定達成管制標準以下，加上抽水效率受限於水力傳導係數與抽水井配置，進一步延長整治時程。為改善上述困難，第二次變更計畫採取兩項主要策略，整治期程正式展延兩年，從原定的 48 個月調整為 72 個月，以合理彈性配合現場作業進度與模場試驗驗證流程。其次，在地下水整治方面，新增「現地淋洗法」，以既有監測井為基礎，實施藥劑灌注及小型模場試驗，評估實際藥劑反應與水文地質條件之適配性，藉由淋洗藥劑的化學置換作用，輔助去除吸附於地下介質之重金屬離子，進而提升整體整治效率。

然而即使採取上述調整，整治工作仍應注意多項潛在風險與技術細節。現地淋洗法涉及藥劑與地下水或土壤的反應，不僅需確保藥劑選擇與劑量適當，也必須嚴格監控灌注範圍、反應時間與地層移動風險，避免造成次級污染或反向遷移現象。並且模場試驗結果若未達預期，仍需保留其他替代工法（如增設抽水井或強制壓力注入）的技術備案，再者由於污染場址鄰近仍有地下水使用紀錄，應持續落實環境監測機制，並確保污染物未向鄰近場址擴散，避免引發跨場址責任爭議。根據整治計畫中所揭露的地質條件與污染分布，佶鼎廠址地下水污染物主要集中於填土層及下伏之黏土層與礫石夾砂層交界處，深度約介於地下 1.5 至 6 公尺之間。此區域的地層特性對污染物的遷移與整治造成顯著挑戰，主要原因為地層的不均質性與異質性所引發的水力傳導變異。具體而言，黏土層與礫石夾砂層交互分布，導致污染物容易在相對低滲透性的黏土層中累積並擴散至下方透水性較高的礫石層。這種層間的污染擴散模式不僅加大了污染邊界的判定困難，也讓整治藥劑在注入時易受阻於低滲透性材料層面，無法均勻滲透至污染熱區，造



二、研究目的

成整治效果有限。此外，由於礫石層具高水力傳導性，若控制不當，藥劑可能過快流失，進一步降低與污染物的接觸反應時間。這樣的地層結構亦對抽水與注入系統的設計造成干擾，如當抽水井設置於礫石層中，容易造成水力短路現象，使得污染物在黏土層中殘留；而注入藥劑時若未能準確控制於黏土層上緣或夾砂層內，將難以達成污染物脫附與置換之目的。再者，場址中部分井位監測資料顯示污染濃度變化不穩定，也與地層厚薄不一與局部滲透性變化高度相關。因此，針對此類夾層交界型污染分布，整治設計需更為精準地掌握地層界面與污染熱區位置，並藉由模場試驗確認最佳灌注深度與壓力。同時，監測井與灌注井的配置應考量水平與垂直方向的水力連通性，避免整治範圍不足或藥劑稀釋效應過強。整體而言，針對夾層型污染物分布的場址，其整治工程之規劃與執行須高度結合地質剖面資料與水文特性分析，才能有效克服地層障礙，確保整治目標之達成。

本場址土壤與地下水污染整治作業採用「抽出處理法」與「現地淋洗法」作為主要整治技術，整體設計係考量污染物特性（以銅與鎳為主）、地質條件與場址營運限制。然而，整治作業實施過程中遭遇最主要的困難之一，為含水層地質構造具有高度異質性，導致抽水與藥劑灌注分佈不均，進而影響污染物去除效率與整治成效。根據現地地質鑽探資料與模場試驗結果顯示，場址含水層以砂質黏土與礫石夾細砂層交互堆積為主，垂向與側向之水力傳導係數變化顯著，顯示該區地下介質具明顯異質性。尤其在高污染潛勢區（MW-03、MW-06-D、MW-09-D）所觀測之試驗結果，顯示污染物主要集中於局部具高傳導性之礫石層中，且部分深井之污染濃度高於淺井，顯示污染可能順著層間垂向傳輸。此種層間分布型態不僅增加污染熱區之定位困難，也限制抽水井之有效捕捉範圍。抽出處理法的實施也反映了上述挑戰。在高傳導性區域（如礫石層）抽水井能快速抽取污染地下水，但在低傳導性層（如黏土夾砂層）則因污染物脫附速率緩慢，且易形成水動力死角，導致污染物長時間滯留。即使長期抽水，仍可能因緩慢的釋放作用造成地下水污染濃度回升。抽水操作亦受限於場址為營運中工廠，僅能於白天 12 小時操作，進一步降低抽水效率與整治時程，故為因應整治限制，新增「現地淋洗法」進行模場試驗。該技術係利用兩種不同特性的藥劑分階段注入含水層：1 號藥劑具良好傳輸性，用以擴散入孔隙介質中；2 號藥劑則具高金屬螯合力，可強化重金屬脫附作用。試驗顯示，兩種藥劑搭配可顯著提升污染物去除效率，惟其傳輸效應仍受地層異質性限制，例如部分低滲區域滯留時間過長，導致污染物未能有效移除。因此，本場址整治作業需高度仰賴高解析度的水文地質資料與模場試驗回饋，調整灌注井與抽水井位置與深度，逐步優化整治範圍與效率，避免污染物長期滯留或遷移風險。整體而言，地層異質性與污染物層間累積的特性，是本場址整治作業中最需克服的技術難題之一。



2-2 技術需求與關鍵規劃

綜合上述，場址整治工作需要更加精密的技術手段，來提高整體的工作效率和資源管控。因此，本模場計畫提出解決此一挑戰的相關技術需求如下：

1. 即時地下水位與基礎水質觀測強化整治策略規劃

由於本場址之地下水流向受大環境及鄰近區域小尺度抽水影響，將直接或間接影響灌藥作業及抽出處理等相關整治工作，因此場址內及其鄰近區域監測井之地下水文與水質之長時序觀測為相當重要之工作，可有效釐清場址區域長期之地下水位變化，以及受間歇性抽水影響之水位變異及恢復期，強化抽出處理控制及灌藥作業之方案程序。因此，本計畫以既有整治中場址，考量現場場地限制，改採一體式水位計技術，針對場址及鄰近區域之監測井進行多點、連續且高精度的觀測，所觀測到之數據將定期蒐集並上傳至雲端系統進行資料儲存，並可利用簡易統計資料歸納與分析地下水位與水質，提供各項地下水與水質參數於時空上之變異行為，提供整治作業程序進行中的策略擬定與修正。

一體式水位計技術以地下水位及水質作為主要參數蒐集對象，而其所汲取到之相關數值資料係為該「井」所釋放出之整體資訊，故無法針對於不同地層材質或特定深度進行資料採集；本計畫團隊曾於非污染含水層進行分層水位觀測作業，然其井與觀測儀器需經過特殊設計，如定尺度間隔開篩、濾料封層隔斷填置、井內封隔器長期阻封、光柵封隔組合與串聯等，因此以模場之現有井並無法達成相關作業需求，且經費限制無法支援多井群系統建置，故本計畫僅以井之平均資訊作為觀測成果展示，而其穩定、可靠且易於現場佈置的特性，對於監測污染物遷移、地下水流動以及場址長期環境變化具有高度實用與不可替代的優勢，尤其在現場場地條件受限的情境下，能確保觀測作業之連續性與資料品質。

2. 含水層水力傳導係數空間分布評估增進抽、注處理作業效率

淋洗與螯合劑是否影響土壤孔隙改變，並可能改變含水層之水流與傳輸能力問題，將以含水層水力傳導係數（hydraulic conductivity, K ）作為關鍵參數進行相關評估。水力傳導係數為控制地下水流及污染物溶質傳輸之關鍵參數，影響污染物在地下水中的遷移速率，高水力傳導係數可以加速污染物的傳播，而低水力傳導係數則可能導致污染物在土壤中滯留，增加污染整治的難度。 K 值與地下水的移流作用相結合，影響污染物在水中的擴散行為，進而影響其在地下水系統中的分布。因此，如何精確推估水力傳導係數於空間上之分布特徵，係為調查初期及整治過程中不可避減之重要工作。然而淋洗作業過程中，水流動將重新排列改變



二、研究目的

其孔隙度和聯通性，尤其如污染物導致土壤顆粒間隙變小或阻塞孔隙，去除污染物後 K 值的變動，可能導致局部產生高流通量之優先路徑，進而改變污染物於含水層之分布條件，造成抽出處理後局部區域之污染濃度將提高。因此，於淋洗作業及抽出處理過程後了解 K 值之變化為直接需求之工作，然而一般之單井或複井抽水試驗僅可提供單點或相對之水力傳導係數，無法直接應用於空間分布解析，因此本計畫將以「水力層析成像」(hydraulic tomography, HT) 技術強化 K 值之空間特徵推估，應用抽出處理或藥物灌注時之壓力反應進行 K 值空間域分析，有助場址地質參數提供更精細了解，以利規劃及調整整治工法之相關策略。

然而，水力層析技術在不同的地質環境中可能面臨不同的挑戰，如

- (1) 異質性地層的影響：水力層析技術在異質性高的地質環境中可能面臨困難，例如層內水力傳導係數變化劇烈或存在非連續性透水層，將會影響水力參數的準確解析，異質性會導致污染物分佈的複雜性增加，進而降低技術的數據可靠性。然而根據本場址之岩心鑽探判釋成果，各井經抽水試驗分析後其水力傳導係數均在同一級序 (order) 且為連續性透水層，因此水力層析技術可有效應用於本模場之地質條件中。
- (2) 低透水性地層的應用挑戰：在低透水性的地層中 (例如黏土層或淤泥層)，水力層析技術可能無法有效捕捉地下水的流動行為，導致數據解釋困難，並可能無法準確評估污染物遷移。因此，對於低透水性地層，建議在關鍵深度進行分層試驗或多尺度分析，從局部層次的地下水通量到整體的地層連續性進行綜合分析，從而克服低透水性對技術應用的限制，而本計畫另一提出之熱示蹤劑技術即為針對局部層次的地下水通量進行細部演算，達到分層試驗及多尺度分析之效果。
- (3) 場址干擾因素：複雜場址中如有現場施工、抽水試驗、地下結構物等可能影響地下水流動條件，這些干擾因素將使水力層析技術難以分辨自然條件與人工條件的影響。其解決方式為在受外部干擾影響的場址，需事先對可能的干擾條件進行排查，並設計補償性測試 (如背景觀測)，以校正數據的準確性。

3. 新型光纖高解析監測技術評估垂直向導水特性及水流通量

新型光纖高解析監測技術正逐漸被應用於地下水污染場址的修復過程中，尤其在評估垂直向導水特性和水流通量方面展現了卓越的效果。該技術利用光纖分布式感測器 (如分布式溫度感測器 Distributed Temperature Sensing, DTS) 來即時、高解析度地監測地下水的流動和溫度變化，從而識別垂直接流動特徵和水流通道。



整治場址數位監測與高精度污染圖層析技術於抽出處理及淋洗策略之應用

這些感測器能夠在長距離內精準偵測出細微的水流變化，為地下水的污染物傳輸機制提供了詳細的數據支持。在污染場址修復過程中，了解水流在井下垂直方向分佈和通量至關重要，因其直接影響到污染物的擴散及灌藥和抽出作業的效率。傳統的水文地質調查方法如抽水試驗或多孔隙壓力計，為井內單一觀測資料，通常無法精細捕捉到地下水系統在垂直向的異質性。光纖監測技術可以在井管內以高空間解析度提供垂直流動資訊，並且能夠實時監控不同深度水層的溫度和流速變化，配合連續水質觀測資料，有助於精確定位污染物濃度較高的區域，進而指導灌藥區域和抽出策略的制定。此外，光纖技術可以持續提供即時數據提供場址修復期間的動態調整，從而提高污染治理的效率和精確度。透過結合光纖監測技術與傳統的修復方法，場址操作人員能夠更準確地掌握污染物的分佈情況和水文特徵，從而優化灌藥及抽出作業，減少修復時間及成本。此技術能配合整治工作的抽、注過程進行，還能降低地下水修復過程中的環境風險，使其成為地下水污染場址修復的關鍵技術之一。

溫度監測與試驗受地層異質性（如砂岩與黏土層的交替分佈）影響，會導致熱對流與熱傳導行為的不均勻性，影響溫度的傳播路徑及結果解釋，因此在溫度監測與試驗上不能僅以單一井之測量結果進行評估，需於區域進行多井布置，捕捉不同區域的熱傳播特性。另，高滲透層可能導致熱對流作為主導溫度傳遞模式，而低滲透層則以熱傳導為主，因此熱源溫度傳播在兩者間的熱流差異可能導致結果解釋的難度，然而本計畫所使用之溫度測量與監測模式為分佈式光纖，其監測源為 20 公分一點，有效解析垂直向之地層溫度流通條件。



三、文獻探討

3-1 水力層析法—SSLE 應用於異質性含水層參數反推估

Sequential Successive Linear Estimator (SSLE) 是水文地質領域中一種基於地統計學的反推估模式，用於透過水力層析 (Hydraulic Tomography, HT) 估計異質性含水層的空間參數分佈，如導水係數 (T) 和儲蓄係數 (S)。SSLE 透過迭代線性化非線性地下水流方程式，逐步整合多組抽水試驗的暫態 (transient) 水頭數據，處理參數的不確定性和空間異質性。其假設 $\ln T$ 和 $\ln S$ 為穩態隨機過程，利用條件期望值和協方差矩陣更新估計值，特別適合應用於高度異質的含水層，可捕捉多尺度變異而不需假設均質性。SSLE 的發展源於早期地質統計反推估方法，如 Successive Linear Estimator (SLE) 的延伸，Yeh et al. (1996) 提出 SLE 作為處理非線性問題的迭代框架，後續 Yeh and Liu (2000) 將其應用於穩態 HT，開發出 SSLE 以序列式整合多井數據，提高異質性特徵的準確度。

Zhu and Yeh (2005) 進一步擴展 SSLE 至暫態 HT，透過納入時間序列水頭數據，估計 T 和 S 的三維分佈，證明其在合成異質含水層中能有效恢復參數場，優於傳統 Theis 方法，尤其在處理非穩定流和邊界不確定性時。該方法優點包括計算效率高 (透過序列式避免同時處理所有數據)、能整合先驗證地質資訊，並量化估計不確定性；缺點則為需大量觀測數據，否則易受初始猜測影響，且在極端異質性下可能平滑邊界。後續改進聚焦於計算優化和多數據整合，Xiang et al. (2009) 提出 Simultaneous Successive Linear Estimator (SimSLE)，同時納入所有抽水試驗數據，減少迭代次數並提升穩定性，在異質含水層中表現更佳，尤其適用於大型資料集。近期文獻如 Wang et al. (2021) 修改 SimSLE 以識別含水層邊界條件，改善異質模型的穩健性。其他擴展包括結合機器學習或高斯混合模型 (Gaussian Mixture Model)，如 Minutti et al. (2020) 開發基於 GMM 的反推估，在速度和精度上優於傳統 SSLE，適用於裂隙含水層。此外，Zhu and Yeh (2006) 引入時間矩 (temporal moments) 分析，簡化 THT 計算，適用於異質含水層的 K 和 S_s 估計。

SSLE 的應用多見於合成模擬和現場試驗，證明其在異質含水層中的實用性。Zhu and Yeh (2005) 的 3D 合成異質含水層，使用 SSLE 分析多組暫態抽水試驗，成功恢復 K 和 S_s 的空間分佈，在高度異質 (variance of $\ln K = 4.5$) 的合成含水層中，估計場與真實場高度匹配，驗證 SSLE 對邊界不確定性和噪訊的穩健性，該案例顯示 SSLE 能有效描繪層狀和隨機異質結構，適用於污染傳輸預測。Xiang et al. (2009) 的砂箱模擬，應用 SimSLE 整合多井數據估計 K 和 S_s ，結果



整治場址數位監測與高精度污染圖層析技術於抽出處理及淋洗策略之應用

準確預測獨立抽水事件的洩降分佈，證明 SimSLE 在異質含水層中優於 SSLE 的效率和精度，尤其在處理階層異質性時。Minutti et al. (2020) 的高斯混合模型整合，在多個概念性異質含水層測試中，GMM-based 反演優於 SSLE，更快更準確地估計 K 分佈，適用於裂隙或變飽和含水層。North Campus Research Site (NCRS) (Illman et al., 2019) 在高度異質的多含水層/阻水層系統中使用 SimSLE 分析 14 組抽水試驗，生成高解析 K 和 T 三維斷層圖，捕捉高低 K 交替層和連通性，優於少量試驗的分析。該案例強調增加數據密度能降低不確定性，適用於地下水管理和污染控制。Narashino Site (Ning et al., 2023) 使用 SSLE 和 SLE 分析 2019-2020 年 HT 數據，調查 K 和 S_s 的可重現性，在沉積異質含水層中證明估計場的一致性，儘管存在小尺度差異，然而增加數據密度和地質先驗模型改善結果，適用於監測邊界條件變化，如 cutoff walls 影響。Bohling et al. (2013) 應用 SSLE 於高度異質性含水層，結合數值實驗和現場數據估計異質 K 場，用於解決含水層連通性問題，證明 SSLE 在實際操作中的效率。這些案例顯示 SSLE 在異質含水層參數反推估的實用價值，能改善模型預測精度，但需足夠數據和先驗資訊以克服平滑效應



3-2 熱示蹤劑法反推估含水層參數

使用熱或溫度作為地下水示蹤劑 (heat tracer) 的概念源於 20 世紀後期，最初用於追蹤地表水與地下水的交互作用。Anderson (2005) 的綜述被視為這領域的里程碑，強調熱作為自然示蹤劑的優勢，包括其普遍存在、無需添加化學物質，以及能捕捉對流 (advection) 和傳導 (conduction) 過程。早期研究聚焦於淺層含水層的滲流通量 (seepage flux) 估計，常利用自然溫度梯度，如季節性或日夜溫差。Constantz (2008) 擴展了這一方法觀測熱用於溪床水交換的應用，提出溫度方法來量化地下水流動。這些早期工作奠定了基礎，顯示熱示蹤劑在水文地質學中的潛力，尤其在估計水力傳導係數、孔隙度和流速等參數時。

本章節文獻將熱示蹤方法分為主動和被動兩類。被動方法利用自然溫度信號，如河床溫度剖面來推估垂直通量，Stallman (1965) 和之後的 Suzuki (1960) 開發了解析解於從穩態溫度數據估計達西通量。Irvine et al. (2017) 擴展了這些模型，在異質介質中納入瞬態信號以改善精度。主動方法則涉及注入熱水或冷水，如熱脈衝測試，Klepikova et al. (2016) 展示熱示蹤測試在異質含水層中的應用，結合反推估模擬估計參數，並強調密度效應的校正。另一種熱回應測試類似抽水測試，聚焦熱傳輸。Wagner et al. (2014) 應用 TRTs 於含水層特徵推估，估計熱導率和水力參數，適用於地熱系統。結合其他示蹤劑的混合方法亦日益流行，Mastrocicco et al. (2019) 使用熱+鹽示蹤劑，透過監測電導率和溫度變化，改善含水層參數推估的準確度，尤其在傳導性良好之含水層中。Leaf et al. (2012) 引入主動熱稀釋測試，使用分佈式溫度感測來特徵化含水層，證明其在層狀系統中的應用效率。

熱示蹤劑也廣泛應用於河川-含水層交互作用和地下水補注推估，Rosenberry et al. (2018) 使用熱作為示蹤劑估計河川側向地下水流入，開發解析方法來量化通量。在異質含水層中，Sommer et al. (2013) 探討熱在深淺異質介質中的應用，指出傳統解析法假設同質性可能導致偏差，並建議數值模擬如 SUTRA 來處理複雜結構。裂隙含水層則是另一重點領域，Read et al. (2022) 使用冷水示蹤測試在熱裂隙含水層中，表徵熱矩陣擴散，提升斷裂網絡參數的估計。近期研究強調技術整合，如 FO-DTS (Fiber-Optic DTS) 用於高解析監測。Sellwood et al. (2015) 應用 DTS 於井內熱示蹤測試，評估井流條件。在低地含水層，Anibas et al. (2022) 執行地下水熱傳輸，了解溫度分佈動態，用於 Neogene Aquifer 的管理。熱示蹤劑的優點包括成本低、環境友好，以及能處理自然不確定性 (如噪聲數據)，然而局限性包括熱信號快速衰減，尤其在高流速或細粒介質中，以及對密度和熱擴散的敏感度。Blume et al. (2013) 指出，需小心設計測試以最小化噪聲，並建議敏



整治場址數位監測與高精度污染團層析技術於抽出處理及淋洗策略之應用

感度分析。未來趨勢包括結合機器學習反演和多示蹤劑方法，以提升異質含水層的精度。Desilets et al. (2022) 探討熱用於人工補注發展的監測，顯示其在時空變異分析中的潛力。



3-3 手持無線裝置 APP 以及網路即時平台在污染場址整治與土壤地下水環境工程之應用

手持式無線裝置 App 與網路即時平台在污染場址整治與土壤/地下水工程的價值，關鍵在把現場資料從「採集→傳輸→標準化整理→審核→決策」串成可稽核的閉環；依美國環保署（USEPA）QAPP 指南與 UFP-QAPP 要求，專案須在計畫層級明定資料品質需求、樣品鏈結（e-COC）、校正與稽核流程，並保留從現場到資料庫的審計軌跡，因此行動端表單必須具備 GPS 與時間戳、強制欄位與範圍檢核、照片/條碼與 e-COC，後端則以版本控制與記錄修訂史支撐品質稽核（USEPA, 2025）。為了把即時與可互相通訊落地，國際主流採用 OGC SensorThings API 的時空實體-觀測資料模型，以 REST 或 MQTT 對接資料平台與時序資料庫，並直接支援 GIS 與事件告警，OGC 1.1 版標準與研究實作（例如 FROST、研究社群近期對 STA 的水環境實作）提供可重用的資料結構與引用格式，降低後續系統整合成本（Open Geospatial Consortium, 2021；Horsburgh et al., 2025）。

通訊層面，污染場址多為分散井網與戶外惡劣環境，實務常以 LoRaWAN（遠距、低功耗、少量封包）與 4G/5G 或 NB-IoT 混合架構；水環境領域的多個可查證案例證明 LoRa/LoRaWAN 可穩定支援長距回傳與多測項資料上傳，例如 Sensors 針對社區供水洩漏與監測的 LoRaWAN 效能研究、Applied Sciences 的水質監測 LoRa 網路評估、Infrastructures 與 Electronics 等期刊的河川與水箱水質即時監測實作，建置方式皆採「節點→閘道→MQTT/HTTP→雲端」並結合儀表板可視化與告警（Alghamdi et al., 2022；Syed Taha et al., 2024；Pires et al., 2024；Georgantas et al., 2025）。在資料整理與現場作業一線的實際工具上，環工領域常用的 ESdat Field App 與 ESdat 平台提供從採樣計畫、現地資料擷取（含水位、場測參數、照片、e-COC、離線作業）、到雲端自動驗證與報表的端到端流程；其公開文件清楚載明欄位型別、資料檢核、API 匯出與工作流程模組（Field Programs/Field Portal/LSPECS），可直接對應 QAPP/EDM 的資料生命週期管理需求。資料治理綱領上，ITRC 的《Environmental Data Management（EDM）Best Practices》以從規劃到傳播的生命週期視角，提供資料管理計畫、欄位與單位標準化、版本控管、可視化與對外溝通的做法與案例，能直接反應到使用者要的「現場傳輸+雲端整理+QA/QC」藍圖（Interstate Technology & Regulatory Council, n.d., 2024/2025 更新）。就可驗證的公部門平台案例而言，美國地質調查所（USGS）之 NGWMN 資料入口把聯邦與各州井網的水位/水質/地層資訊集中於同一入口，做到了跨來源彙整與即時/歷史查詢，正是以標準化欄位與 API 讓分散資料



整治場址數位監測與高精度污染圖層析技術於抽出處理及淋洗策略之應用

成為可用資訊的經典案例 (U.S. Geological Survey, 2019; USGS, n.d.)；台灣方面，環境部推動之環境物聯網與水科技物聯網及與國科會民生公共物聯網 DSP 的 API/STA 教學，已形成可追溯的跨域資料生態，官方平台揭示大規模布建感測器（空氣逾萬點、水質數百點）、定期更新、資料開放與 API（含 SensorThings 教學），可直接支援監測到執法應用的資料流（Ministry of Environment, 2018, 2024；MOENV, 2024–2025；Civil IoT Taiwan, 2024–2025）。

綜合以上可查證文獻與平台案例，對污染場址而言，一套可靠的實務路徑是以 QAPP/EDM 為規範，把 QA/QC 與 e-COC 嵌入 App，通訊採 LoRaWAN+行動網路備援，平台採 OGC SensorThings 時空資料模型與時間序列庫，納入自動化驗證（範圍、離群、缺測、交叉比對）、版本與審計日誌，並以 API 供分析、儀表板與警示，最後參照 ESdat 與 NGWMN/MOENV 的公開實作與開放 API，確保資料不僅回傳得到，更能整理得好、稽核得過、決策用得上。綜合上述文獻與案例，手持無線裝置與網路即時平台在污染場址與地下水工程中展現出明顯優勢：（1）即時數據回傳可加速決策反應，（2）標準化資料模型促進跨平台整合，（3）自動化 QA/QC 降低錯誤率並符合監管要求，（4）異常告警功能能強化污染控制與風險預警。未來的研究趨勢預期將進一步結合人工智慧與機器學習演算法，對即時數據進行模式辨識與預測，以支持污染羽流遷移預測與整治優化操作，推動土壤與地下水修復工作邁向智慧化與數位轉型。



四、研究方法與過程

4-1 研究流程

基於前節提出本場址於整治過程中遭遇之困境與其技術需求，本計畫之研究設計流程與相關工作項目的關聯性繪如圖 7，工作進度甘特圖如圖 8。本模場計畫將以實際整治的場址作為實施對象，既有場址中，目前規劃有抽出處理作業與注藥作業進行中，本計畫將在模場中，建置地下水位及水質即時無線智能監測管理工作，以即時監測場址水位與水質變動特性；此外，整治處理過程中，將以整治的外加抽、注營力，進行水力層析技術分析，並且進行井下熱示蹤劑高解析分層監測，建立場址含水層地質材料與污染團空間分布。相關研究方法將於後節提出。

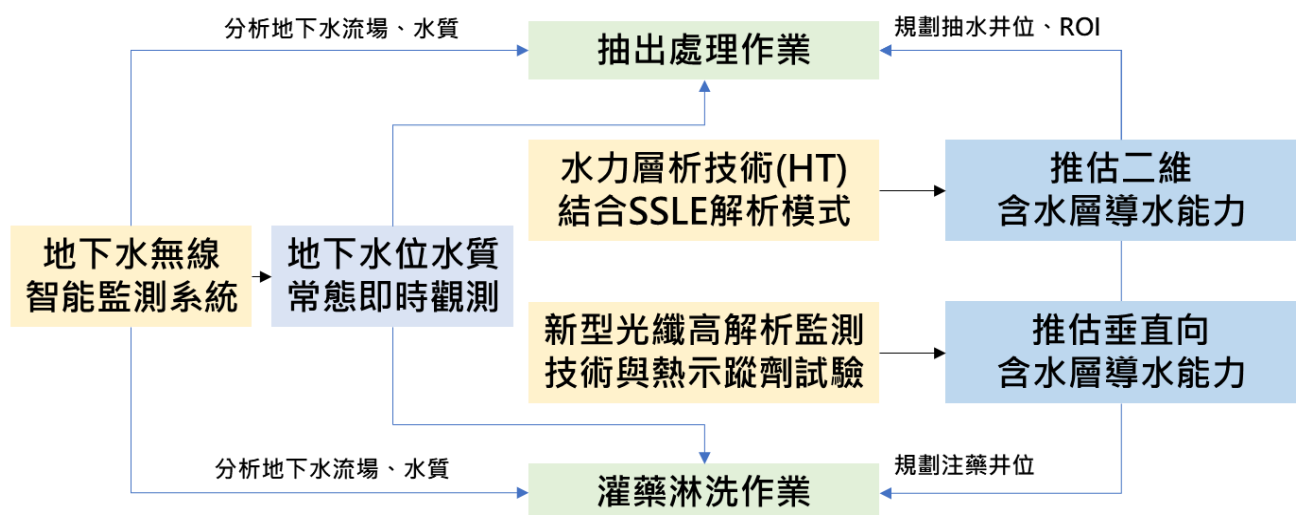


圖 7 本計畫規劃流程圖

整治場址數位監測與高精度污染團層析技術於抽出處理及淋洗策略之應用

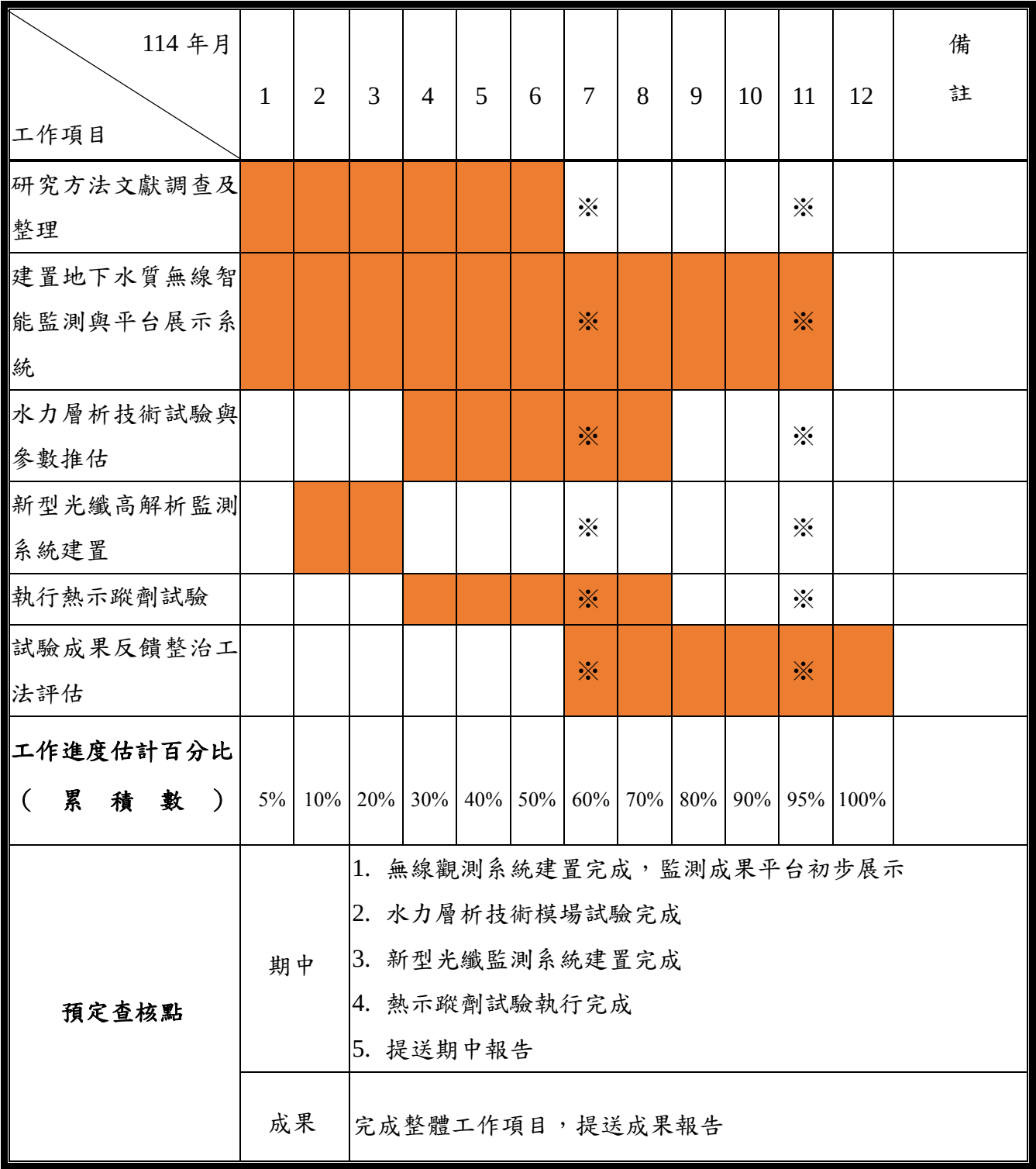


圖 8 工作進度甘特圖



4-2 傳輸監測系統與展示平台建置

於本計畫初步執行階段，原規劃擬採用無線觀測系統以執行地下水位與基礎水質之即時監測，該策略之核心目標為即時掌握地下水流向、水位變化與污染物遷移趨勢，進而強化整治作業之動態調控能力。所設計之無線監測系統具備資料即時上傳與遠端監控功能，理論上可提供場址高時空解析度之地下水文資訊，有助於掌握抽水干擾造成之水位波動、洩降範圍與回復期行為，並作為即時整治調整之依據。然在實地佈設過程中，由於本場址為持續營運中之工廠，場內既有管線錯綜且設施密集，部分監測井位更鄰近貨物堆放、主要生產作業區域，實際佈設條件受限於天線、資料傳輸模組及電源供應設備之穩定性。此外，場址周界無法建置穩定之中繼設施，導致整體通訊系統穩定性不足，進一步限制無線監測系統之有效應用。經現場綜合評估後，確認無法提供穩定與持久之安裝與維護環境，達成預期觀測品質與時效性目標。基此考量，整治團隊遂調整監測策略，改採穩定性與維護性更佳之「單體式水位計」作為主要觀測設備。單體式水位計雖不具即時資料傳輸功能，惟具備結構簡單、操作便利、量測精度高與長期穩定性佳等優點，且可依整治需求彈性佈設多井點與設定高頻率記錄週期。透過定期人工資料擷取與下載方式，仍可建立具代表性與時序連續性之地下水位觀測資料，提供充分依據以掌握水位變化趨勢與污染擴散行為。

本研究團隊進一步建構一套以「感測—傳輸—儲存—運算—介面」為主軸之監測系統架構（如圖 9），整合現地感測設備、雲端資料庫、數值運算模組與圖形化使用者介面平台，形成完整且具延展性之環境監控與決策支援鏈。此系統可應用於地下水污染整治歷程中，提供高頻率、多參數之水文與水質監測依據，提升污染控制效率與風險預警能力。於現地部署階段，系統先行透過實驗場址驗證監測井點配置與感測裝置安裝之適切性，確認資料來源具空間代表性與量測準確性。資料擷取與儲存層面，系統透過單體式水位記錄器與水質感測設備執行自動監測，並定期由現場人員下載資料後上傳至雲端資料倉儲伺服器進行彙整與管理；雖非即時傳輸，但藉由高頻率資料記錄與定期下載，可建立具時空連續性之地下水文資料基底，掌握場址地下水位波動、水質參數變異趨勢與潛在污染遷移情形。該資料倉儲系統支援結構化與非結構化資料之統一管理，並可串接政府開放資料庫，補強區域背景水文資訊與歷史監測紀錄，提升資料比對、變異解析與整治成效評估之深度與廣度。

此外，資料倉儲平台設有使用者自定義模組擴充機制，得依據場址污染特性、整治階段與監測目標，彈性新增監測項目與資料欄位，使監測資料具備模組化、標準化與可擴展性。後端系統可整合地下水模式與資料運算模組，執行地下



整治場址數位監測與高精度污染圖層析技術於抽出處理及淋洗策略之應用

水流場模擬、污染物遷移預測與藥劑灌注分布分析等進階計算，並可納入參數敏感度分析、模式不確定性評估與多場址經驗參數比對，以提供污染整治與風險管理決策之科學依據。最終成果可即時回傳至前端網頁式圖形介面平台，提供操作簡便、圖層切換靈活之資料視覺化功能，支援現場作業人員快速查閱井點資訊、水位趨勢與模擬成果，提升非技術使用者之操作便利性與資料應用效能。本系統整合前端感測裝置、中端資料倉儲與後端運算模組，兼具即時性、整合性與彈性擴充性，適用於各類污染場址之長期監測、整治進度追蹤與環境風險預警，為智慧型地下水整治與管理奠定關鍵基礎。

4-2-1 資料庫系統建置

本專案將於連接實驗模場進行即時監測數據作業，因此對於現場資料的儲存與讀取效能為極重要之關鍵作業，為提昇數據能即時紀錄於遠端倉儲伺服器中，需採用具有平行化的非結構化資料庫結構。在此本計畫採用開放軟體，InfluxDB 時間串列數據庫，可用於處理巨量資料寫入與負載查詢，其主要目的在於具有時間標記的任何數據，包括物聯網傳感器數據與即時分析後端儲存，故此架構非常適合應用於環境場址監測。InfluxDB 具有以下特點，兼具高效能時間標記數據儲存與讀取功能，TSM 引擎具有高效能寫入與數據壓縮。TSM 儲存引擎主要由幾個部分組成：cache、wal、tsm file、compactor，提供簡單、高性能的寫入、查詢 http API 功能。插件支持其它數據寫入協議，例如 graphite、collectd、OpenTSDB。支持類 SQL 查詢指令語法。

4-2-2 展示平台建置

本計畫將於實驗模場導入監測數據作業，現場資料之儲存與讀取效能為確保數據時效性與完整性之關鍵環節。為強化數據即時寫入並同步儲存至遠端倉儲伺服器，特採用具備高效能平行處理能力之非結構化資料庫架構。本計畫選用開源時間序列資料庫 InfluxDB，其專為處理具時間標記之大量數據（如物聯網感測器數據與即時分析結果）所設計，極為適用於環境場址之監測應用情境。InfluxDB 具備下列關鍵優勢：

- 高效能資料寫入與查詢能力：透過其 TSM（Time Structured Merge Tree）儲存引擎，整合快取區（cache）、寫入前日誌（WAL）、TSM 檔案及壓縮處理模組（compactor），可實現高吞吐量寫入與有效的資料壓縮機制。
- 支援多樣資料輸入協議：除原生 HTTP API 外，亦可透過插件支援如 Graphite、Collectd、OpenTSDB 等協議，有效整合各類資料來源。
- 類 SQL 語法之查詢介面：使用者可透過簡易直觀之語法進行資料查詢與



四、研究方法與過程

分析，大幅提升資料存取與應用效率。

綜上所述，InfluxDB 之高效能時間序列資料處理能力，將可充分支援本計畫於實驗模場中即時、大量數據之可靠儲存與快速調用需求，為場址監測與後端分析提供穩健技術基礎。展示於監控平台必須設定面板（Panel）（如圖 10），因為面板為 Grafana 最基本的展示單位，每個面板提供編輯功能，可利用編輯展示圖像方式。面板提供數種樣式和格式選項，而且支援拖拽來在儀錶盤上重排，並且可以調整大小。面板可以利用多種方式輕鬆共用，既可以通過連結分享，也可以匯出 JSON 等文字檔。本計畫平台提供使用者可以藉由 GIS 圖台介面（如圖 11），控制平面時序動畫展示介面，可利用按鈕全部播放，更可利用滑鼠控制播放特定時序圖層。

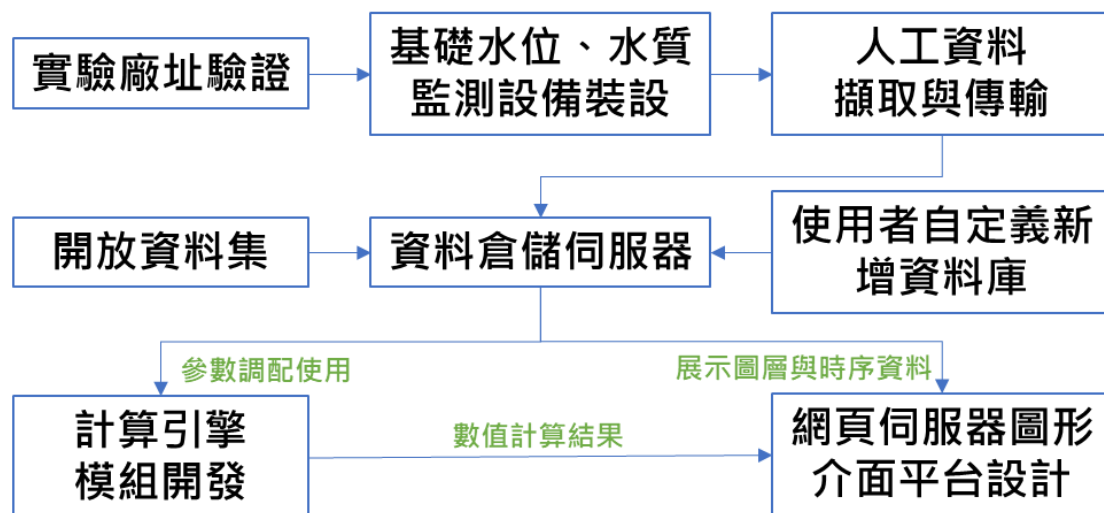


圖 9 本計畫感測－傳輸－儲存－運算－介面工作流程概念圖

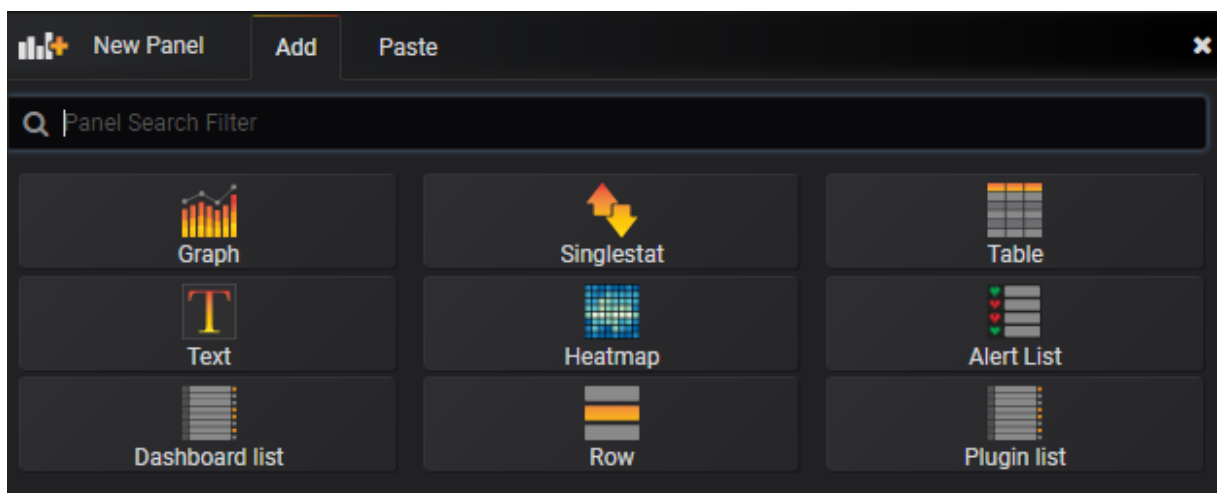


圖 10 Grafana 面板種類

整治場址數位監測與高精度污染圖層析技術於抽出處理及淋洗策略之應用

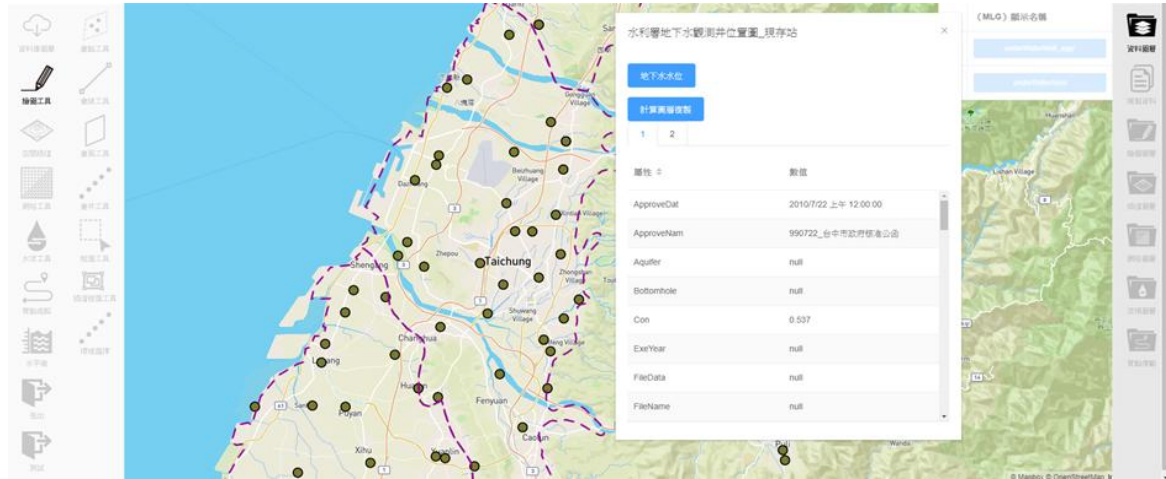


圖 11 專案網路 GIS 平台



4-3 行動裝置 APP 開發

因應本案地下水污染整治作業中對採樣流程、樣品紀錄與數據整合的高度精確與效率需求，團隊特別針對本場址之操作條件與整治程序，開發一套專屬之數位採樣紀錄平台「EaseTrack」，作為後續實地作業中資料蒐集與整治管理的基礎工具。該系統經本計畫實際導入場址使用，其設計、流程規劃與功能模組，已依據整治作業類型與監測需求進行全面性規劃與測試，未來將視本案後續實施進度逐步導入應用。EaseTrack 平台架構分為「工地負責人操作介面」與「現場採樣人員填報介面」兩層級，分別對應整治作業中指派任務、樣品管理與前線紀錄需求。平台支援三種紀錄類型：油水位紀錄、水質分析紀錄與土壤採樣紀錄，並依照污染場址典型作業流程建置固定欄位，包括採樣時間、採樣點位、採樣深度、LNAPL 厚度、水位高度、pH、導電度、溶氧量、溫度、PID/FID 數值、土壤性質與顏色、樣品編號與照片存證等，並設有必填驗證機制與時間戳記功能，確保資料紀錄具一致性、完整性與可追溯性。



4-4 水力層析技術解析場址含水層地質材料空間分布

水力層析成像 (hydraulic tomography, HT) 或稱水力剖面掃描，為一種連續的跨孔水力試驗 (cross-hole hydraulic test)，依照所有觀測之地下水位數據進行反推估，並繪製含水層水力特性的空間分佈圖。其試驗流程為將以監測井群中設計多組抽水/觀測井，按選定的時間間隔進行連續含水層抽水測試，在試驗井及其他觀測井中監測地下水壓力反應，此試驗流程完成即產生一組地下水壓力反應數據。當一組試驗流程完成，則以下口井作為試驗井並操作同樣流程，獲得另一組壓力反應數據，直至所有觀測井皆操作過後，即完成該井群之水力層析成像作業工作。HT 結合水力特性和壓力水頭的非線性關係，透過跨孔式含水層壓力試驗獲得大量地下水未反應數據，並利用連續性迭代方法 SSLE (sequential successive linear estimator) 減輕處理大量數據之計算負擔，且能將空間上水文參數異質性描繪得更詳盡；由於每組資料集都會交叉驗證其他資料集，基於 HT 估計的地下水流流量以及含水層特徵參數，將比基於傳統場址特徵方法和模型率定的估計更準確且不確定性更小。

許多研究已將水力層析成像運用到現地場址 (Berg and Illman 2015; Straface et al, 2007; Li et al, 2008; Cardiff et al, 2013; Paradis et al., 2016)，如 Bohling 等人於 2007 年，在美國堪薩斯州勞倫斯郡東北方的堪薩斯河谷進行跨孔式抽水試驗，他們使用 Bohling 等人於 2002 年提出的穩態形式進行分析，在抽水試驗長時間後水位達到穩態，在邊界效應影響之前，水位隨著時間變化很小，因此水頭反應和比儲蓄係數關聯較小，因此可以透過穩態分析有效的反推含水層的水力傳導係數，但是無法反推比儲蓄係數。他們透過穩態和暫態分析得到的水力傳導係數場，其結果與示蹤劑試驗 (tracer test) 吻合，證實水力層析成像的可行性，也顯示出穩態分析和暫態分析能得到相似的結果，但是穩態分析的計算負擔較小。黃奕儒 (2009) 於輔英科技大學也進行跨孔式抽水試驗，在未代入任何已知鑿井資料情況下，利用抽水資料反推估二維和三維的比儲蓄係數和水力傳導係數場，結果顯示模式對於含水層參數空間分布的推估已能大致準確，但若代入鑿井岩心資料做為已知值，則能更加提高精確度。水力剖面掃描可以結合水力特性和壓力水頭的非線性關係，透過跨孔式抽水試驗獲得大量水頭反應的數據，並利用連續線性迭代方法 SSLE 減輕處理大量數據之計算負擔，使得計算更有效率，且能將空間上水文參數的異質性描繪得更詳盡。Zha et al. (2019) 探討如何利用現有的抽取處理 (pump-and-treat, P&T) 系統資料，藉由水位變化資訊進行水力層析成像分析，以更有效率且低成本地描繪含水層異質性，該研究以美國亞利桑那州的 AFP44 超級基金場址為例，利用一年內 P&T 系統因整治等原因造成之抽水及回



注速率變化所引發的水位反應資料，結合 245 口鑽井的地質資料進行 HT 分析，估算含水層的水力傳導係數與比儲係數（specific storage）。研究比較了不同先驗資訊（包含均勻平均值、克里金估計值及校正後的區塊平均值），透過模擬實驗驗證了增加更多非冗餘事件能提升估計解析度，證明善用 P&T 運作資料進行 HT 分析能有效降低含水層特性調查的成本。

水力層析成像變至今已有許多應用及探討，過去也有許多研究透過傳統的單井、複井抽水試驗，搭配解析解以評估含水層的水文地質特性，然而鮮少研究於整治場址進行多種水力試驗，並交互比較結果。因此本計畫欲透過跨孔式抽水試驗，擷取不同資料，分別使用解析解和數值方法進行含水層參數之反推，探討不同逆推方法推估之結果的異同和趨勢進行不同尺度間的探討，提供後續抽出處理法策略規劃。

4-4-1 SSLE 數值分析模式

SSLE（sequential successive linear estimator）模式為 SLE（successive linear estimator, SLE）之延伸，而 SLE 模式之計算方式如下：為了更了解含水層異質性的變化，將含水層中水力傳導係數 K 值取自然對數為 $\ln K = F$ ，由水力層析成像中抽水所造成的水頭反應則表示為 $\phi(x) = H(x) + h'(x)$ ，其中 $H = \langle \phi \rangle$ ，代表取其期望值，也就是水頭反應之平均，而 h' 則為非條件水頭擾動。鑿井資料與岩心取樣（core samples）樣本數為 n_f ，則水力傳導係數值可表示為 $f_i = \ln K_i^* - F$ ， $i = 1, 2, \dots, n_f$ ，並將此稱為原始資訊。另外，由於需要推估水力傳導係數分布場之平均值與其空間結構相關性，因此假設在 m 組抽水試驗中共取得 n_h 組觀測水頭值為 ϕ_i^* ， $i = n_f + 1, n_f + 2, \dots, n_f + mn_h$ ，此部分由抽水試驗所獲得之反應數據，稱為間接資訊）。

接著利用模式產生與實際觀測位置相符的流場與水力傳導係數分佈場，且須能滿足原始場址的基本統計特性，如平均值或共變異數，與水流控制方程式。基於條件機率概念，以條件平均 K 值總和與其條件擾動表示條件 K 值分布場為 $K_c(x) = \langle K_c(x) \rangle + k_c(x)$ ；同樣地，條件水頭分布場（conditional head field）可表示為 $\phi_c(x) = \langle \phi_c(x) \rangle + h_c(x)$ 。由條件 K 值分佈場、條件水頭分布場，可獲得條件平均流場（conditional mean fields），並將利用條件平均水流方程式（conditional mean flow equation）求解此反推估問題：

$$\nabla \cdot [K(x) \nabla \phi] = 0 \quad (1)$$

將上述條件序率變數替換進式（1）當中：



$$\nabla \cdot \left[\left[\langle K_c(x) \rangle \cdot k_c(x) \right] \nabla \langle \phi_c(x) \rangle + h_c(x) \right] = 0 \quad (2)$$

取 (2) 式之期望值：

$$\nabla \cdot \left[\langle K_c(x) \rangle \cdot \langle \phi_c(x) \rangle \right] + \nabla \langle k_c(x) \cdot \nabla h_c(x) \rangle = 0 \quad (3)$$

為了根據現有的已知 K_i^* 和 ϕ_i^* ，找出條件 K 值分佈場和條件水頭分布場，若可得知 $\langle K_c(x) \rangle$ 和 $\langle \phi_c(x) \rangle$ 即能算出擾動項。SLE 初始使用協同克利金法計算，非條件 K 值擾動為 $f(x) = \ln K - F$ ， f_i 代表在 x_i 位置的 K 值， $i=1,2,\dots,n_f$ ；而非條件水頭擾動為 $h'(x) = \phi(x) - H(x)$ ， h_i 代表在 y_i 位置的水頭值， $j=n_f+1, n_f+2, \dots, n_f+n_h$ 。協同克利金具有線性之特性：估計值為觀測值的線性組合。一開始使用其中一次抽水試驗的觀測值 $f(x_i)$ 和 $h(y_i)$ 代入：

$$\bar{f}_0(x_0) = \sum \lambda_{io} f(x_i) + \sum \mu_{io} h(y_i) \quad (4)$$

其中 $\bar{f}_0(x_0)$ 為在 x_0 處使用協同克利金法計算後的 f 值， λ_{io} 與 μ_{io} 為使用協同克利金法計算的權重。協同克利金也有不偏估 (unbiased) 之特性，估計值的期望值會和觀測值的期望值相等，因此 (4) 式可以改寫成下式 (5)：

$$E[\bar{f}_0(x_0)] = \sum \lambda_{io} E[f(x_i)] + \sum \mu_{io} E[h(y_i)] = 0 \quad (5)$$

而為了符合協同克利金之「最佳化」之特性，使估計值與觀測值之共變異數為最小，即最小化下式：

$$\begin{aligned} & E \left[\left(\hat{f}_0 - f_0 \right)^2 \right] \\ &= E \left\{ \left[\sum \lambda_{io} f(x_i) + \sum \mu_{io} h(y_j) \right]^2 - 2 \left[\sum \lambda_{io} f(x_i) + \sum \mu_{io} h(y_j) \right] f_0 + f_0^2 \right\} \\ &= \sum \sum \lambda_{io} \lambda_{ko} R_{ff}(x_i, x_k) + \sum \sum \lambda_{io} \mu_{jo} R_{fh}(x_i, y_j) + \\ & \quad \sum \sum \mu_{jo} \lambda_{io} R_{hf}(y_j, x_i) + \sum \sum \mu_{jo} \mu_{lo} R_{hh}(y_j, y_l) - \\ & \quad 2 \sum \lambda_i f(x_i) f_0(x_0) - 2 \sum \mu_j h(y_j) f_0(x_0) + R_{ff}(x_0, x_0) \end{aligned} \quad (6)$$

其中， R_{ff} 、 R_{hh} 為 f 和 h 的共變異數， R_{fh} 、 R_{hf} 為 f 和 h 的交叉共變異數 (cross-covariance)，且 $R_{fh}(x, y) = R_{hf}(y, x)$ 。將 (6) 式對 λ_i 和 μ_i 偏微分，得到下式：



四、研究方法與過程

$$\frac{\partial E\left[\left(\bar{f}_0 - f_0\right)^2\right]}{\partial \lambda_i} = 2 \sum \lambda_k R_{ff}(x_i, x_k) + 2 \sum \mu_j R_{fh}(x_i, y_j) - 2 R_{ff}(x_i, x_0) \quad (7)$$

$$\frac{\partial E\left[\left(\bar{f}_0 - f_0\right)^2\right]}{\partial \mu_i} = 2 \sum \lambda_i R_{fh}(x_i, y_j) + 2 \sum \mu_l R_{hh}(y_i, y_l) - 2 R_{hf}(y_i, x_0) \quad (8)$$

使 (7)、(8) 式之結果為零，得到 (9)、(10) 式：

$$\sum \lambda_k R_{ff}(x_i, x_k) = \sum \mu_j R_{fh}(x_i, y_j) = R_{ff}(x_i, x_0) \quad (9)$$

$$\sum \lambda_k R_{fh}(x_i, y_j) = \sum \mu_l R_{hh}(y_i, y_l) = R_{hf}(y_i, x_0) \quad (10)$$

透過 (7)、(8) 兩式計算出 λ_{i0} 與 μ_{i0} 權重，透過 (9)、(10) 式得：

$$\sum \sum \lambda_i \lambda_k R_{ff}(x_i, x_k) + \sum \sum \lambda_i \mu_j R_{fh}(x_i, y_j) = \sum \lambda_i R_{ff}(x_i, x_0) \quad (11)$$

$$\sum \sum \mu_i \lambda_i R_{fh}(x_i, y_j) + \sum \sum \mu_j \mu_l R_{hh}(y_j, y_l) = \sum \mu_j R_{hf}(y_j, x_0) \quad (12)$$

將 (11)、(12) 代入 (5) 式，並簡化之：

$$\begin{aligned} \mathbf{var}\left[\bar{f}_0 - f_0\right] &= E\left\{\left[\bar{f}_0(x_0) - f_0(x_0)\right]^2\right\} \\ &= R_{ff}(x_0, x_0) - \sum \lambda_{i0} R_{ff}(x_i, x_0) - \sum \mu_{j0} R_{hf}(y_j, x_0) \end{aligned} \quad (13)$$

而為了使兩個位置間 K 值的誤差共變異數也最小化：

$$E\left[\left(\bar{f}_0 - f_0\right)\left(\bar{f}_1 - f_1\right)\right] = \varepsilon_{ff}(x_0 - x_1) \quad (14)$$

$$\varepsilon_{ff}(x_0 - x_1) = R_{ff}(x_0, x_1) - \sum \lambda_{i0} R_{ff}(x_i, x_1) - \sum \mu_{j0} R_{hf}(y_j, x_1)$$

其中 ε_{ff} 為誤差共變異數 (error covariance)。

而 SLE 的計算方式為：

$$\bar{f}_0(x_0)^{(r+1)} = \bar{f}_0(x_0)^{(r)} + \sum \omega_{j0}^{(r)} \left[h_j^*(y_j) - h_j^r(y_j) \right] \quad (15)$$



整治場址數位監測與高精度污染圖層析技術於抽出處理及淋洗策略之應用

其中 $\bar{f}_0(x_0)$ 為 $\ln K$ 之條件平均推估值， r 為迭代次數， ω_{j0} 為在 x_0 處推估值與相對 x_i 處觀測值之權重係數， h_j^* 為水頭觀測值， $h_i^{(r)}$ 為在 j 處迭代 r 次之後的水頭值。SLE 計算僅由一組抽水的原始與間接資訊做計算，而 SSLE 則是包含了抽水試驗中所有改變不同抽水位置的實驗之反應資料，因此計算的矩陣將會加大。在迭代過程中，模式利用實際觀測值與計算值之間的差異不斷提供推估的新訊息，而這些訊息即可組合成殘餘共變異數與交叉共變異數，透過新的權重 ω_{j0} 再代入 (14) 以得到新的 $\bar{f}_0(x_0)$ ，如此反覆進行迭代運算，直到達到使用者所設定的精度而停止，或是精度無法明顯提升而停止，以反推估出含水層水力參數在空間中的分布情形。

4-4-2 場址操作規劃

本場址共設置 20 口水井(如表 3)，依用途區分為 6 口抽水井(PW01 至 PW06)及 14 口監測井(包含 MW10425-01、MTL-01-A、MTL-01-B、MW01 至 MW09、MW06-D、MW09-D)，井深介於 5.67 至 16.2 公尺(以井口為基準，TOC)，其中監測井依據篩管設置深度可判別其監測目標含水層為淺層或深層，前者多集中於地表下 1 至 8 公尺區間(如 MW02 至 MW05、MW07、MW08)，後者則延伸至 14 至 16 公尺(如 MTL-01-A、MW01、MW06-D、MW09-D)，以掌握深層含水層變動，部分井如 MW06 與 MW09 未設置開篩或未配置監測水位計，故不列入水位監測分析範圍。

抽水井方面，各井配備不同型式抽水設備，其中 PW01、PW03 至 PW06 採用沉水馬達泵，PW02 則為氣動雙隔膜泵以因應污染熱點作業需求，操作方式均採定時定量控制，啟動時間大多設於每日 08:00 至 19:00 之間，抽水與停機時間依井別調整，例如常見之抽水 15 分鐘停機 45 分鐘循環，另搭配液位控制器自動觸發，控制水位介於 13 至 15.5 公尺間，兼顧抽水穩定性與水位保護。為驗證抽水系統效能與最佳操作參數，已完成先導試驗，於不同抽水井配置條件下實施輪抽與分段抽水操作，並同步監測其餘觀測井水位變化與污染物濃度，以分析抽水井間距對水力影響範圍與污染控制能力。試驗期間，各觀測井均佈設水位壓力計，形成四種情境下之時序水位變化資料，若試驗中某些井點未呈現有效洩降反應(如洩降幅度過小)，將剔除其資料以避免影響分析準確性。

目前本場址以鑿設 20 口監測與作業水井，相關資訊如表 3 所列，水井位置則如圖 4 所示，其中 PW01~PW06 為抽出處理井，其餘為水質水位監測井。目前本場址已進行先導試驗評估適宜的抽水條件，藉由現場先導試驗過程中，量測不同間距之觀測井觀測地下水位及進行污染物濃度檢測結果等成效分析，以評估本



四、研究方法與過程

模場抽水井之間距、系統之最佳操作量、操作參數與可影響之範圍等。為有效將水力層析法成果最大化，於抽水井抽水時於其他所有監測井放置水位壓力計，取得每口井之水位洩降以供後續分析，其中配合整治作業流程 PW01~PW06 將進行輪流抽水，取得各觀測井之水位變化數據，抽水作業資訊如表 5。如於觀測結果中，若干井無法取得有效數據（如洩降量過小）將予以剔除。

表 5 模場內設置抽水井操作資訊

抽水井	抽水設備	啟動方式及操作方式
PW01	沉水馬達	每日 8-19 時，設定定時器，啟動抽水 15 分後停止 45 分，液位控制水位在 15.5m。
PW02	氣動雙隔膜	每日 8-19 時，瞬時流量 0~1.5CMD。
PW03	沉水馬達	設備位置為污染層，依變頻器控制水量，每日 8-19 時，啟動抽水 30 分後停止 30 分
PW04	沉水馬達	每日 8-19 時，設定定時器，啟動抽水 15 分後停止 45 分，液位控制水位在 13m。
PW05	沉水馬達	每日 8-19 時，設定定時器，啟動抽水 60 分後停止 15 分，液位控制水位在 14m。
PW06	沉水馬達	每日 8-17 時，設定定時器，啟動抽水 60 分後停止 15 分，液位控制水位在 14m。



4-5 主動式熱示蹤劑試驗解析含水層垂直水力特徵

為了解地下水通量垂直分布狀況，本計畫預期在整治場址中進行井下熱示蹤劑試驗，利用現地單井加熱試驗主動提供微量熱源，並透過高解析度光纖感測井下溫度變化，以溫度偏移反應推估地下水通量，解析場址區域垂直向透水性之異質性地層分布。分析方法為將溫度資料代入控制方程式擬合溫度變化曲線，修正熱參數及水文地質特參數，再經計算可得地下水通量。

4-5-1 分布式熱光纖偵溫系統

本計畫使用分布式光纖偵溫系統 Distribute Temperature Sensing (DTS) 進行井體垂直向溫度測劉，DTS 利用光纖作為溫度感應纜線沿光纖偵測周圍溫度，並可連續記錄在空間上的解析度，以每 0.253m 為一量測點，時間解析度最小為每 5 秒量測一筆資料，溫度精度達 0.1°C，其規格如表 6。

表 6 DTS 偵溫系統解析範圍 (Data From: APSENSING)

Range	Channels	Resolution		Measurement Time	Fiber Type	Referencing
		Sampling	Temperature			
0-5km	4	25cm	0.01°C	≥sec	50/125 μm multimode	×2 PT-100 probes

DTS 使用雷射脈衝後發射的光 (參照圖 12)，其中拉曼反向散射特性進入光纖電纜，以確定沿光纖長達 35 公里的溫度分布。拉曼反向散射是由入射光與光纖中分子振動的非彈性相互作用產生的，這種相互作用導致發射光子的量級相對於注入光向上或向下移動 (Bense, 2016)。測量以特定的較高波長 (anti-Stokes) 和特定的較低波長 (Stokes) 及時返回光子強度的比率，可計算沿光纖的溫度作為距離的函數 (Farahani and Torsten, 1999; Hausner et al., 2011)。在大多數水文應用中，使用 DTS 將時間換成距離，通過反向散射光的傳播時間來確定距離，其原理與光時域反射計 (OTDR) (Dakin et al., 1985) 相同。連接 DTS 的光纖電纜可有許多不同的配置，包括簡單的單端、雙工單端或雙端 (參照圖 13) (Hausner et al., 2011)，本計畫光纖採用雙頭單端配置方式如圖 13 (b)。

DTS 的校準溫度程序依賴於校正參考溫度或電纜上的已知溫度。在現地量測已知、均勻溫度 (例如，獨立記錄的循環冷熱桶) (Tyler et al., 2009)。因此需保持在均勻的溫度，假定該溫度在 DTS 測量的時間尺度上是恆定的。校準必須計算距離衰減、拉曼散射和儀器靈敏度的影響。原則上將需要至少三個 DTS 參考觀測點，空間上藉由光纖分離 (Hausner et al., 2011)。DTS 提供的校準程序需要



四、研究方法與過程

在儀器附近放置兩個參考溫度點，依賴觀測信號衰減來消除遠程觀察必須性。DTS 校準反映了在此介紹的反向散射的基本物理原理。在位置 z (m) 處，拉曼斯托克斯功率 $P_s(z)$ 和反斯托克斯功率 $P_{as}(z)$ 信號根據 (Suarez et al., 2011) 轉換為溫度：

$$T(z) = \frac{\gamma}{\ln \frac{P_s(z)}{P_{as}(z)} + C - \Delta\alpha z} \quad (16)$$

式 (16) 中， γ [K] 為入射激光波長的光子與散射拉曼光子之間的能量偏移， C 為無因次校準參數，包含入射激光和 DTS 儀器特性， $\Delta\alpha$ 為光纖中反斯托克斯信號和斯托克斯信號之間的差分衰減。

$$\bar{A}\bar{x} = \bar{b} \quad (17)$$

式 (17) 中，若 $\bar{A}$ 為非奇異矩陣，則可逆推 γ ， C 和 $\Delta\alpha$ 之值。為使矩陣 $\bar{A}\bar{A}^T$ 可逆， T_1 、 T_2 和 T_3 須至少有兩個不同溫度。給定矩陣 $\bar{A}$ 和 $\bar{b}$ ，則可使用奇異值分解對式 (18) 求解 $\bar{x}$ 。光纖分佈式偵溫 (FO-DTS) 以高空間和時間分辨率，沿著光纖 (FO) 電纜記錄時間和溫度。溫度測量的準確性和有效空間分辨率

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} 1 & -T_1 & T_1 z_1 \\ 1 & -T_2 & T_2 z_2 \\ 1 & -T_3 & T_3 z_3 \end{bmatrix}; \quad \bar{x} = \begin{bmatrix} \gamma \\ C \\ \Delta\alpha \end{bmatrix}; \quad \bar{b} = \begin{bmatrix} T_1 \ln \frac{P_s(z_1)}{P_{as}(z_1)} \\ T_1 \ln \frac{P_s(z_1)}{P_{as}(z_1)} \\ T_1 \ln \frac{P_s(z_1)}{P_{as}(z_1)} \end{bmatrix} \quad (18)$$



整治場址數位監測與高精度污染圖層析技術於抽出處理及淋洗策略之應用

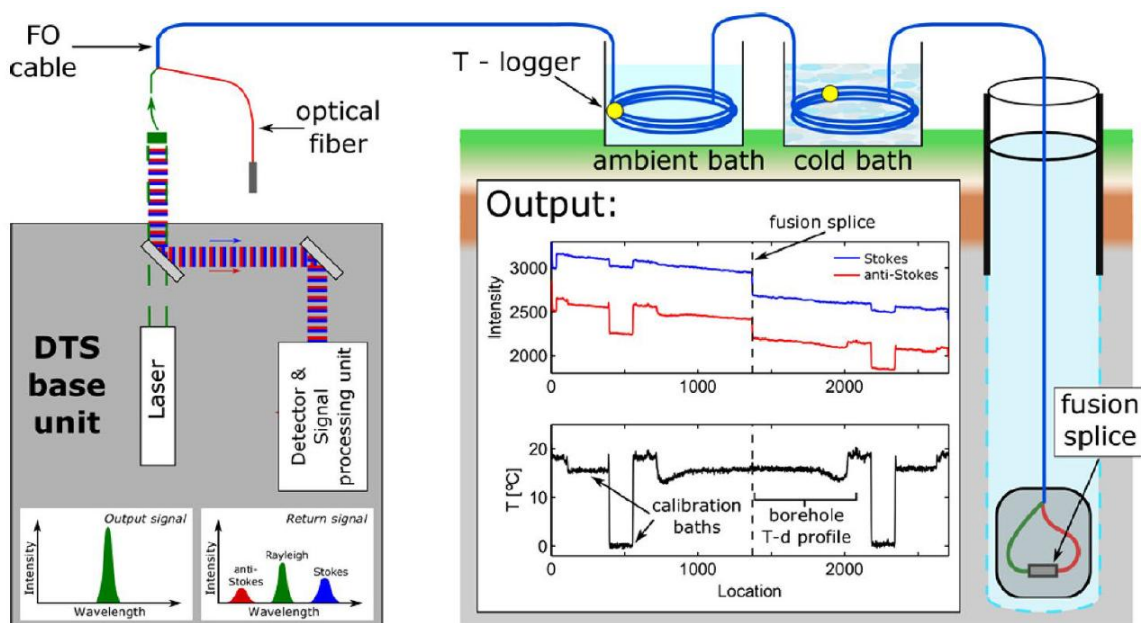


圖 12 DTS 原理拉曼反向散射示意圖

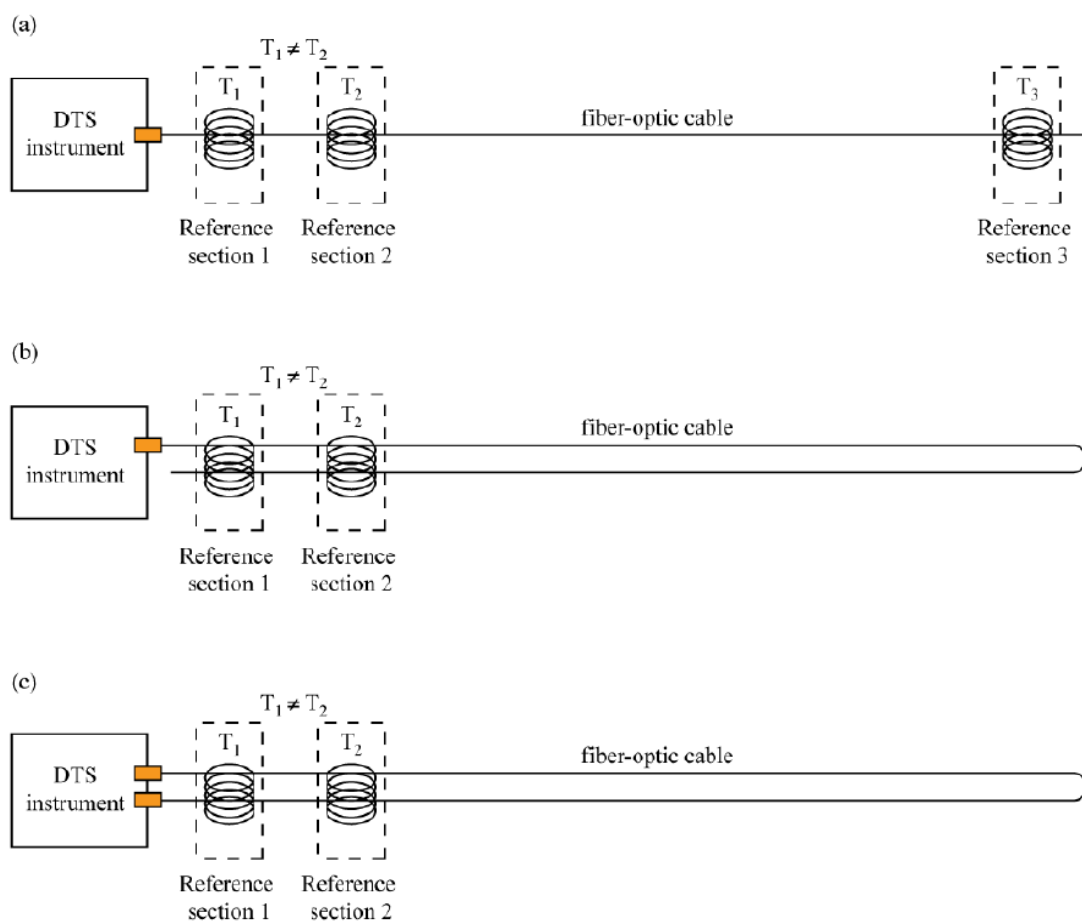


圖 13 典型 DTS 實驗設計；(a) 單端配置、(b) 雙頭單端配置、(c) 雙端配置



四、研究方法與過程

光纖分佈式偵溫 (FO-DTS) 以高空間和時間分辨率，沿著光纖 (FO) 電纜記錄時間和溫度 (Smolen, 2003; Habel et al., 2009; SEAFOM, 2010; Ukil et al., 2011; Van et al., 2012)。溫度測量的準確性和有效空間分辨率不僅取決於 DTS 裝置的性能，也取決積分時間、光纖與現場試驗條件影響 (Simo et al., 2020)，水文科學研究中許多應用皆證明 DTS 分析地下水流動和分佈特徵的潛力 (Selker et al., 2018)。早期的應用證明熱示踪劑量化井內流量的能力 (Leaf et al., 2012; Liu et al., 2013; Banks et al., 2014)。相對來說，需要測量自然熱異常或自然溫度隨時間波動來表徵地下水流的被動式 DTS 方法相反 (Andetson, 2005)，主動式 DTS 方法對於流量更加敏感，並可藉由溫度變化推估流量。儘管 DTS 溫度測量相對於 Troll 溫度探頭的分辨率較低，由於 DTS 具有在水柱中進行連續溫度測量的優勢 (如圖 14)，不因工具移動而受到任何干擾，當井內的地下水受到快速加熱時，土壤孔隙或活動裂縫在環境流動條件下，利用 DTS 感測高解析熱傳輸反應 (Malder et al., 2019) (如圖 15 所示)。

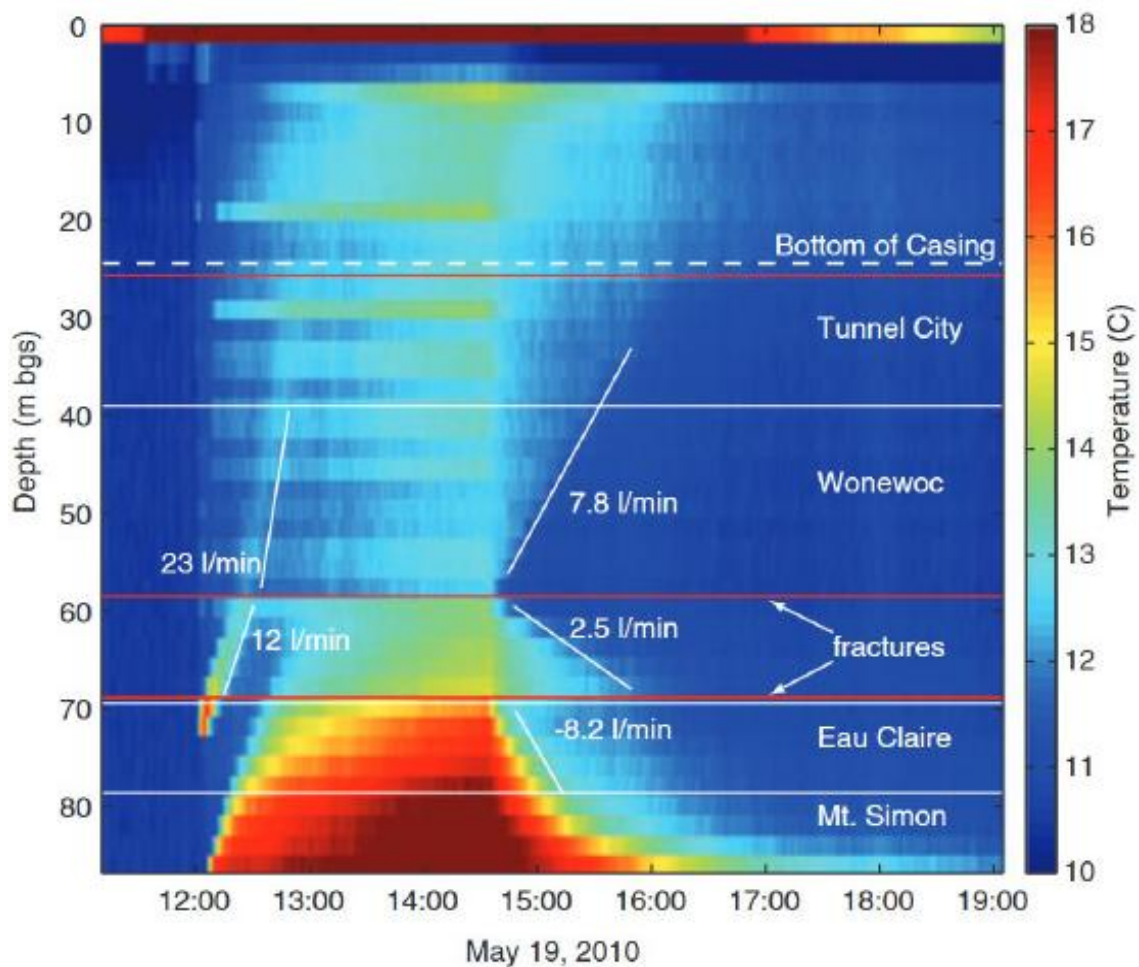


圖 14 DTS 連續量測溫度垂直分布圖 (Leaf et al., 2012)



整治場址數位監測與高精度污染團層析技術於抽出處理及淋洗策略之應用

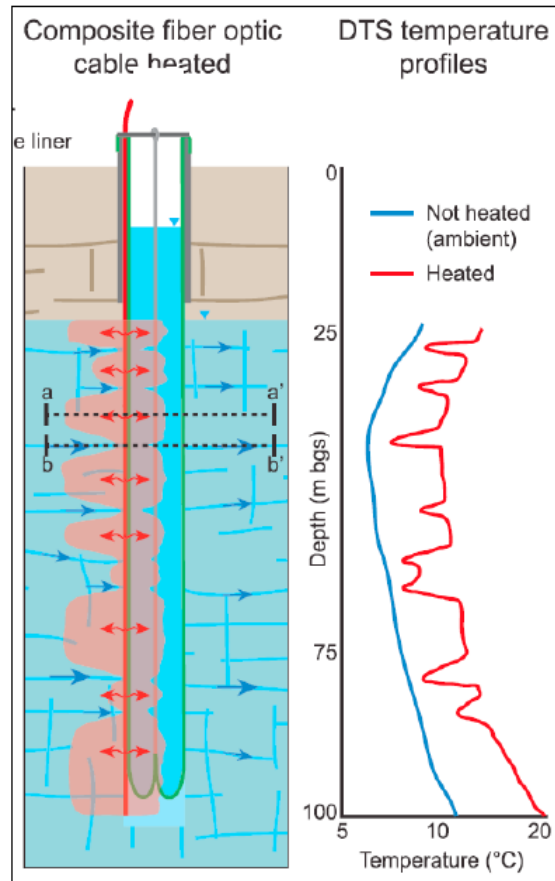


圖 15 井內熱傳輸反應與 DTS 溫度剖面 (Maldaner et al., 2019)

4-5-2 單井熱示蹤劑試驗流程

為了解地下水通量垂直分布狀況，本計畫利用模場監測井進行單井熱示蹤劑試驗，藉由提供熱源並透過高解析度光纖感測井下溫度變化，以溫度偏移反應推估地下水通量，相關設備配置（如圖 16 所示）。試驗主要係藉由鐵氟隆加熱線對監測井井內之地下水同時加熱，同時利用 DTS 感測井內溫度變化，以特定時間之垂直剖面溫度分布，判釋透水性良好之地層，進一步比對岩心材料，將溫度資料代入控制方程式擬合溫度變化曲線，修正熱參數為更貼近水文地質特徵，再經計算可得地下水通量。

(1) 試驗配置

加熱試驗配置為結合上述兩項試驗配置，概念圖如圖 16，將鐵氟龍加熱線連接電源與鎧裝光纖配置井內，其中光纖需連接 DTS 量測記錄溫度，並藉由冷熱桶校正溫度數據，試驗開始時可利用 DTS 觀測溫度變化。



四、研究方法與過程

(2) 加熱設備

加熱線實照如圖 17 所示，其設計考慮 4 英吋井管之水體控制體積，且評估水比熱容量，以致加熱可使井內溫度上升約攝氏 2-3 度，採用鐵氟隆線紅色線段為鐵氟龍加熱線，黑色線段為電源供應線，連接電源控制器以調整功率，並以 220 伏特發電機連接加熱。

(3) 鎧裝光纖與 DTS 連接方式

鎧裝光纖材料較一般光纖堅硬，仍需小心勿過度曲折以免光纖損壞（圖 18），依觀測井之井深將鎧裝光纖設置於各觀測井內，以光纖感測觀測井內溫度，並將鎧裝光纖連接 DTS 主機，其中光纖與 DTS 主機連接方式設定為雙頭單端配置，需設定量測時間區間且光纖間距每 0.253m 可記錄一筆數據。為考慮 DTS 測量數據誤差，DTS 利用 PT100 以及其中兩段光纖分別浸入冷水桶約攝氏 0 度和熱水桶約攝氏 32 度，需確保冷熱桶保持恆溫，以利校正溫度數據誤差。

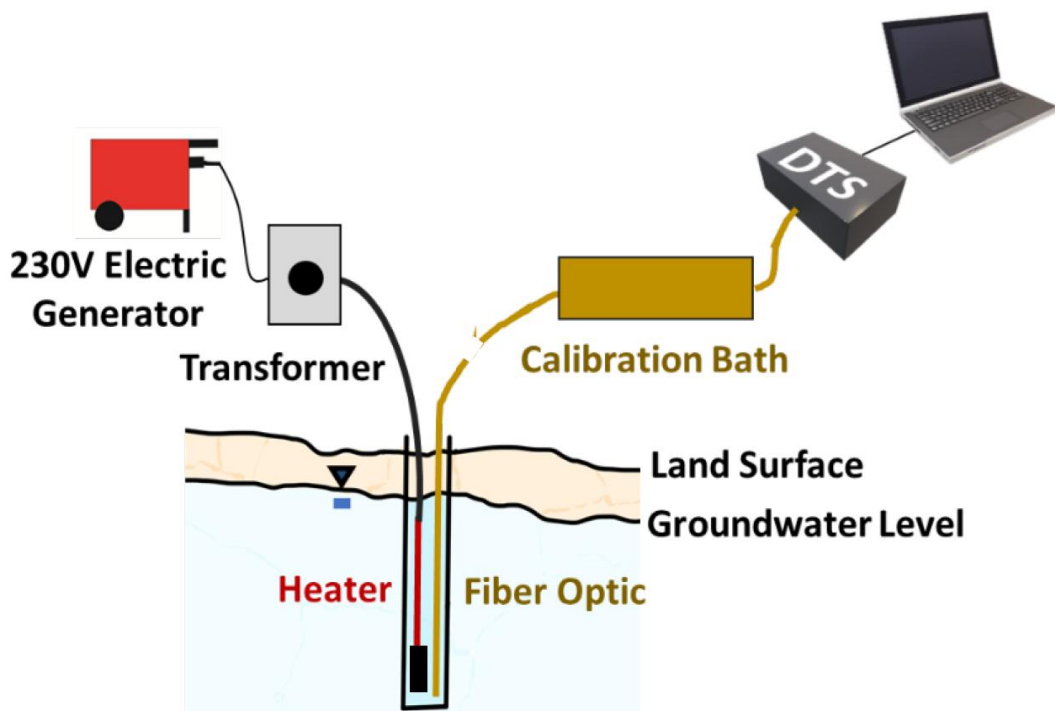


圖 16 單井加熱試驗配置圖



圖 17 鐵氟龍加熱線



圖 18 高解析度鎧裝光纖與 DTS 解讀儀

4-5-3 地下水通量推估方法

針對地下水流數值之驗證，除仰賴不同位置之壓力水頭觀測外，對於垂直分布之流通狀況，則需要水流通量協助驗證，相較於水流狀況而言，壓力水頭易於直接觀測，水流觀測則需要透過示蹤劑方法進行推估。基於地下含水層熱反應以推估地下水流皆有許多前人之研究 (Drury, 1984; Trainer, 1968; Reiter, 2001)，Dylan et al. (2015) 以數值模擬比較了在非均質含水層中，利用水力方法、熱示蹤劑和溶質示蹤劑估算地下水流速的差異，結果顯示熱示蹤劑估算的平均流速較準確，而溶質示蹤劑則能更好地反映流速的變異性，這與熱傳輸和溶質傳輸的物理機制差異有關。研究考量了不同含水層異質性參數對估算結果的影響，並發現所有方法估算的流速變異性都相對較小，儘管兩種示蹤劑方法都顯示出些微的系統性高估或低估，但整體誤差都在可接受範圍內。Kurylyk et al. (2018) 探討利用熱量作為地下水示蹤劑來估算淺層和深層非均質介質中的垂直地下水通量，作者提出一個修正過的 Shan and Bodvarsson (2004) 分析解，並開發了一個名為



四、研究方法與過程

Flux-LM 的試算表工具，自動化該解的應用。Somogyvari and Bayer (2017) 提出利用熱示蹤斷層攝影術重建含水層異質性，瑞士東北部進行田野實驗，透過脈衝式注入加熱水，並利用多點溫度觀測，建立多源/多接收器的斷層攝影實驗設置。他們將取得的溫度穿透曲線數據，運用基於傳輸時間的反演方法，重建含水層的導水係數斷層圖。此重建結果與先前該地點的調查結果相符，證實了該方法在解析含水層結構和傳輸特性上的潛力，並發現先前未知的低滲透區域。

熱追蹤劑試驗可提供詳細的溫度場分布，幫助識別地下水流動的主通道、偏好流徑 (preferential flow paths) 以及低滲透區域，能有效揭示空間尺度上的滲透率差異，強化含水層滲透性於高度異質材料之空間解析；熱追蹤劑不會與地下水或地層物質發生化學反應，因此可以避免化學追蹤劑在不同條件下的降解或吸附效應，提供更穩定的數據，對於需要避免污染的情境，熱追蹤劑試驗是一種環境友好的選擇。透過分析熱傳導與熱對流，可以反推滲透率、導水係數以及孔隙率等水力參數，並能定量評估不同區域的流速與流量差異，從而解析異質性對流動的影響，通過了解異質性對流動的影響，可以更準確地設計抽水井、回灌井的布局及運行策略，在污染修復中，可幫助識別污染物的滯留區與流動區，優化修復效率。

本計畫基於以前人研究基礎上，利用線性熱源加熱井下水溫所推導的熱傳輸解析解公式進行地下含水層垂直通量量化分析。飽和含水層中一維方向之熱與水的傳輸模式如 Stallman (1963) 提出的傳輸模式方程式如下：

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - q C_w \frac{\partial T}{\partial z} = C_s \frac{\partial T}{\partial t} \quad (19)$$

式(19)中， k 為岩層 (或河床沉積物) 之熱傳導係數 [$W/m^\circ C$]； T 為溫度 [$^\circ C$]； q 為水通過沉積物的流速 [m/s]； C_w 及 C_s 分別為水和沉積物的體積熱容量 (volumetric heat capacity) [$J/m^3^\circ C$]； z 為深度 [m]； t 為時間 [s]。Kipp (1987) 年將此模型進一步延伸為熱傳輸與流體流動之對流擴散方程式，其單位體積內能量變化率為熱傳導、熱擴散與熱對流傳輸，以及控制體積內流出或是流入之熱源總和，表示如下：

$$\frac{\partial [\theta C_w + (1-n) C_s] T}{\partial t} = \nabla \cdot k(\theta) \nabla T + \nabla \cdot \theta C_w \lambda_h \nabla T - \nabla \cdot C_w T q + Q C_w T_s \quad (20)$$

式(20)中， θ 為體積含水量 [%]； n 為沉積物之孔隙率 [-]； λ_h 為熱擴散張量 (thermomechanical dispersion tensor) [m^2/s]； q 為流體流速 (specific discharge)



整治場址數位監測與高精度污染團層析技術於抽出處理及淋洗策略之應用

[m/s]； Q 為源、匯項[m³]； T_s 為系統源匯項之溫度[°C]。式（20）左側代表單位體積內能量隨時間的變化量；右側的第一項透過熱傳導方式的能量傳輸，第二項為熱擴散方式的能量傳輸，第三項為熱對流方式的能量傳輸，而最後一項代表單位體積內流入或流出的熱源。

近年來許多研究以線性熱源進行井內水體加熱，利用此模型為基礎進一步進行地下水流量化分析（Bakker et al., 2015; des Tombe et al., 2019），於含水層中的熱能傳輸，將以熱對流（heat convection）與熱傳導（heat conduction）的形式傳遞，在含水層中的傳輸方向不僅在水平面上移動，也同時在垂直方向上擴散。因此，在探討無限水平含水層中的地下水流和熱傳輸作用時，Bakker et al.（2015）假設一水平向延伸的地層中，含水層呈現垂直分布，而地下水流與熱能僅能在單一地層中流動，不同含水層之間的垂向傳輸則忽略不計。每一地層均假設為均質，且地下水流沿著 x 軸方向穩態流動。當流體黏滯力與密度影響忽略不計，以及水和固體的溫度達到瞬間平衡時，地層中溫度變化的控制方程式為（Kluitenberg and Warrick, 2001）：

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - \frac{q}{v} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (21)$$

式（21）中，其中 T 為溫度[°C]； t 為時間[s]， D 為熱擴散係數（diffusion coefficient）[m²/s]， V 為熱遲滯係數。後兩項參數與水和固體顆粒的特性有關：

$$D = \frac{\kappa}{c\rho} \quad (22)$$

$$q = \frac{c\rho}{c_w\rho_w} V \quad (23)$$

式（22）中， c 為地層整體的熱容量[J/m³ K]， ρ 為地層整體的密度[kg/m³]， w 為水體。假設一條和水流方向垂直且無限延伸之熱源，將起點為座標系統中原點之位置，當熱源以穩定功率 P [w/m]，於 $t = t^*$ 進行加熱時，溫度變化的函數式可表示為：

$$\theta(x, y, t, t^*) = \frac{P}{4\pi k} \exp\left(-\frac{qx}{2DR}\right) W\left(\frac{x^2 + y^2}{4D(t - t^*)}, q \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{2DR}\right) \quad (24)$$



式 (24) 中 W 為 Hantush Well 函數[74]，其計算如下式所示：

$$W(a,b) = \int_a^{\infty} \frac{1}{s} \exp\left(-s - \frac{b^2}{4s}\right) ds \quad (25)$$

熱源在開始加熱 t_0 與結束加熱 t_1 之溫度函數可表示為：

$$T(x,y,t) = \theta(x,y,t,t_0) \quad t_0 \leq t \leq t_1 \quad (26)$$

$$T(x,y,t) = \theta(x,y,t,t_0) - \theta(x,y,t,t_1) \quad t \geq t_1 \quad (27)$$

為了將熱源與觀測位置相對距離之不確定性影響予以消除，2019 年 des Tombe et al. (2019) 以線性熱源加熱井下水溫所推導的熱傳輸解析解公式進行無因次變化之解析，使無論在地下水流之上、下游位置，所量測到之溫度變化將完全相同，避免因熱源與觀測位置間相對距離之不確定性而影響地下水流速之推估，並將整體孔隙介質的熱傳導及地下水流速分佈不均之影響，加入線性熱源加熱井下水溫所推導的熱傳輸解析解公式中，式 (28) 中之熱延散係數受地層孔隙介質的熱傳導及地下水流速分佈不均影響，得出下列控制方程式 (Hopmans et al., 2002)：

$$D_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} - q \frac{\rho_w c_w}{\rho c} \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (28)$$

其中 T 是含水層中的溫度[°C]， x 和 y 為橫向與縱向坐標[m]， t 是時間[s]， D_x 和 D_y 分別為 x 和 y 方向上的熱擴散係數 (dispersion coefficient) [m²/s]， q 是 x 方向上之流速[m/s]， ρc 和 $\rho_w c_w$ 分別為飽和土壤和水的熱容量乘上密度所形成之體積熱容量[J/(m³·K)]。上述參數皆為在空間和時間上的常數，為線性微分方程式。而參數中的熱擴散係數受整體的水和固體顆粒的特性、熱傳導及水相中熱對流的分散作用所影響 (Smith and Chapman, 1983)。

$$D_x = \frac{k}{c\rho} + \beta_x q_x \frac{c_w \rho_w}{c\rho} ; D_y = \frac{k}{c\rho} + \beta_y q_y \frac{c_w \rho_w}{c\rho} \quad (29)$$

式 (29) 中， k 是岩層整體的熱傳導係數[w/m·K]， β_x 與 β_y 分別為縱向與橫向的熱延散係數 (dispersivity) [m]，其特性與溶質傳輸擴散性相同。

Longuer and Michael (1983) 以式 (29) 為基礎，求解具有初始條件與邊界條件及點源釋放的溶質傳輸微分方程式，隨後 Zubair and Chaudhry (1996) 則將 Longuer and Michael (1983) 的求解過程轉換至熱傳輸，假設垂直的線性熱源位



整治場址數位監測與高精度污染圖層析技術於抽出處理及淋洗策略之應用

於座標系的原點處，當時間 $t = 0$ 時開始加熱， $p[\text{w/m}]$ 為每單位長度提供的恆定熱源。溫度於初始時間 ($t = 0$) 與無窮大的時間 ($t \rightarrow \infty$) 相對於背景溫度為零，在穩態與均勻的流速條件下，忽略光纖纜線對流場的影響，可得溫度變化之解析解方程式：

$$T = \frac{p}{4\pi\rho c\sqrt{D_x D_y}} \exp\left(\frac{x}{B}\right) W\left(\frac{A}{t}, \frac{r}{B}\right) \quad (30)$$

其中參數為：

$$A = \frac{r^2}{D_x} ; B = D_x \frac{\rho c}{q\rho_w c_w} ; r = \sqrt{x^2 + \frac{D_x}{D_y} y^2} ; \quad (31)$$

$$W = \left(\frac{A}{t}, \frac{r}{B}\right) = \int_{\frac{A}{t}}^{\infty} \frac{1}{s} \exp\left(-S - \frac{r^2}{4B^2 S}\right) ds$$

式 (30) 中， W 為地下水文獻中的 Hantush Well function。Zubair and Chaudhry (1996) 與 Diao et al. (2004) 提出在穩態溫度 $T = (t_{\infty})$ 時的解：

$$T(t_{\infty}) = \frac{p}{2\pi\rho c\sqrt{D_x D_y}} \exp\left(\frac{x}{B}\right) k_0\left(\frac{r}{B}\right) \quad (32)$$

式 (32) 中， k_0 為零階的第二類修正貝索函數 (Modified Bessel Function of the second kind of order 0)。將式 (30) 與式 (31) 結合，可表示為：

$$T(t) = \frac{T(t_{\infty})}{2k_0(r/B)} W\left(\frac{A}{t}, \frac{r}{B}\right) \quad (32)$$

依據溫度的疊加效應，當開始加熱時 $t = 0$ 至停止加熱時 $t = t_0$ 的變化，線性溫度變化如下：

$$T(t) = \begin{cases} \frac{T(t_{\infty})}{2k_0(r/B)} W\left(\frac{A}{t}, \frac{r}{B}\right), & 0 \leq t \leq t_0 \\ \frac{T(t_{\infty})}{2k_0(r/B)} \left[W\left(\frac{A}{t}, \frac{r}{B}\right) - W\left(\frac{A}{t-t_0}, \frac{r}{B}\right) \right], & t > t_0 \end{cases} \quad (33)$$

在式 (33) 中，溫度的變化是 $A, r/B$ 與 $T(t_{\infty})$ ，及各項參數值 ($q, \rho c, \rho_w c_w, \beta_x, \beta_y$ 與 k) 之函數。其中， $A, r/B$ 與 $T(t_{\infty})$ 已將溫度感測器與線性熱源間之相



四、研究方法與過程

對距離納入考量，而各參數值則與含水層之組成及特性有關。其中熱傳導係數 k 在不同的岩層中，由於岩性的組成、孔隙與密度等不相同，對於傳導熱的能力不同，因此設定熱傳導係數 k 時，以 Hamdhan and Clarke (2010) 提出在不同土壤和岩層之熱特性作為參考依據，進行熱參數設定。

圖 19 為在現地含水層異質性之線性熱源水井加熱井下水溫資料，所繪製之溫度穿透曲線 (breakthrough curve, BTC)。圖中 x 為熱源與量測位置距離，正號代表量測位置，位於地下水流下游方向 (藍色點)，溫度上升較高；負號則代表量測位置，位於地下水流上游方向 (橘色點)，溫度上升較小，圖中顯示即使熱源與量測位置距離相同，而地下水流方向不同，將受地下水流影響導致量測溫度數據不相同。透過式 (33) 中參數的無因次化，式中當熱源與觀測位置於地下水流上、下游相對位置不同時，所形成之溫度變化在加熱期間有明顯的不同，然而在熱源關閉後則較為相似，故將 $T(t)/T(t_\infty)$ 繪製成函數，其溫度變化具有相同的 A 和 r/B ，若時間尺度縮放為 t/A ，將兩種溫度曲線重疊，即可消除相對位置之不確定性影響，不論在地下水流之上、下游位置，所量測之溫度變化將完全相同圖 19 (b) (des Tombe et al, 2019)。

$$q = \frac{1}{\rho_w c_w} \left[\left(\frac{r/B}{\sqrt{A}} \right)^2 \frac{\beta_x \rho c}{2} + \frac{r/B}{\sqrt{A}} \sqrt{k \rho c + \left(\frac{1}{2} \frac{r/B}{\sqrt{A}} \beta_x \rho c \right)^2} \right] \quad (34)$$

式 (34) 中， q 為 x 方向上之流速 [m/s]； ρc 和 $\rho_w c_w$ 分別為飽和土壤和水的熱容量乘上密度所形成之體積熱容量 [$J/(m^3 \cdot K)$]； r 為熱源與光纖間之水平距離， β_x 為 x 方向上的熱延散係數 [m]， k 為熱傳導係數 [$W/m \cdot K$]。本計畫依據 des Tombe et al. (2019) 推導之解析解公式 (34) 並代入相同參數，將解析解公式計算之結果繪製溫度曲線，與現地量測之溫度變化曲線進行擬合，量化現地試驗結果中不同深度溫度變化資料，並以式 (34) 推估加熱井在不同深度之地下水流速。



整治場址數位監測與高精度污染層析技術於抽出處理及淋洗策略之應用

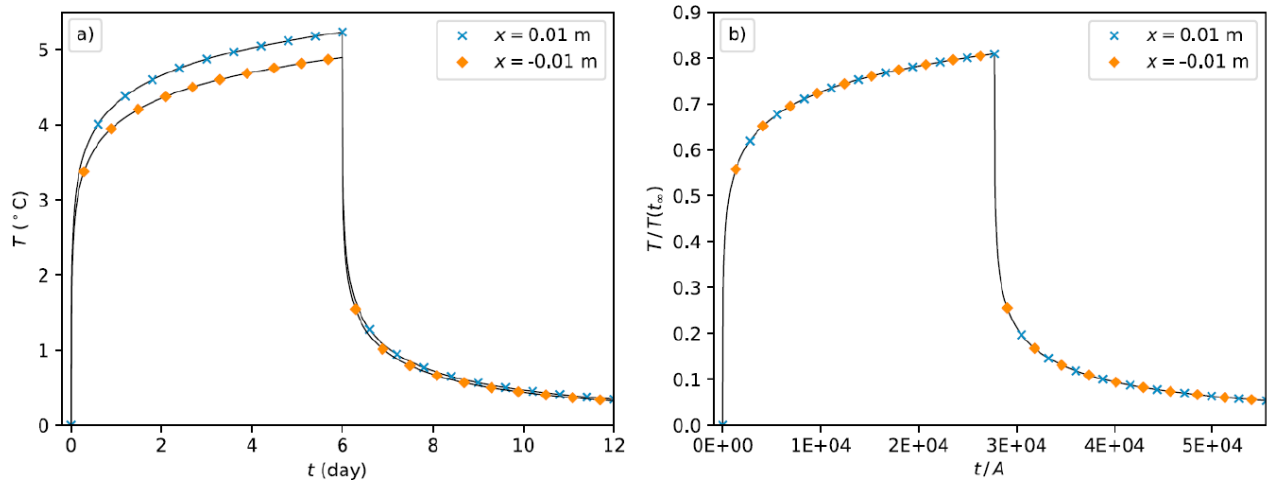


圖 19 (a) 光纖感測線 (相對於熱源) 置於地下水流上游 1cm (藍點) 和下游 (橘點) 之溫度反應; (b) 為 (a) 無因次化之溫度反應 (des Tombe et al., 2019)



五、結果與討論（含結論與建議）

5-1 地下水位監測與調查

在本計畫初步執行階段，原規劃擬採用無線觀測系統以執行地下水位與基礎水質之即時監測，該策略之核心目標為即時掌握地下水流向、水位變化與污染物遷移趨勢，進而強化整治作業之動態調控能力。所設計之無線監測系統具備資料即時上傳與遠端監控功能，理論上可提供場址高時空解析度之地下水文資訊，有助於掌握抽水干擾造成之水位波動、洩降範圍與回復期行為，並作為即時整治調整之依據。然在實地佈設過程中，由於本場址為持續營運中之工廠，場內既有管線錯綜且設施密集，監測井位鄰近貨物堆放、主要生產作業區域，實際佈設條件受限於天線、資料傳輸模組及電源供應設備之穩定性。此外，場址周圍無法建置穩定之中繼設施，導致整體通訊系統穩定性不足，進一步限制無線監測系統之有效應用。經現場綜合評估後，確認無法提供穩定與持久之安裝與維護環境，將無法達成預期觀測品質與時效性目標。基此考量，整治團隊遂調整監測策略，改採穩定性與維護性更佳之「單體式水位計」作為主要觀測設備。單體式水位計雖不具即時資料傳輸功能，惟具備結構簡單、操作便利、量測精度高與長期穩定性佳等優點，且可依整治需求彈性佈設多井點與設定高頻率記錄週期。透過定期人工資料擷取與下載方式，仍可建立具代表性與時序連續性之地下水位觀測資料，提供充分依據以掌握水位變化趨勢與污染擴散行為。本計畫之水井監測排程如表 5，部分抽水井如 PW03 和 PW04 因水井中已布置諸多設備儀器，使電子水位計無法順利投入，故此二抽水井並無法進行水位觀測。另以 MW 系列之觀測井，如甚為相近者則以深井作為主要觀測對象井。

本期場址地下水監測結果整體顯示（如圖 20），地下水位場高度受抽水井操作所控制，監測水位的變化特徵並非單純反映自然補注或區域流場，而是長期處於多口抽水井交互影響下所產生的擾動狀態。透過分析各井的時序資料可以明確觀察到，場址內的水位變化呈現出規律性的鋸齒狀波動，這種變化模式與抽水井操作（表 5）中所列之抽停循環條件高度一致，顯示井群之間存在顯著的水力連通性。由於場址幾乎全時維持抽水運轉，地下水自然流場被人為壓制，其勢面不再單純呈現背景水力梯度，而是形成多個降深錐相互干擾的格局，致使整體地下水流向難以以單一方向描述。換言之，場址在監測期間的水位場是一個受控的人工流場，其控制來源主要來自於幾口運轉頻繁、抽水規模較大的抽水井。

在所有抽水井之中，PW06 與 PW01 對地下水位的影響最為主導；PW06 採每日 8–17 時運轉的模式，抽水 60 分鐘停 15 分鐘，且液位控制設於 14 m，



整治場址數位監測與高精度污染圖層析技術於抽出處理及淋洗策略之應用

導致其鄰近觀測井 MW09-D 呈現出最為劇烈的降深反應。MW09-D 的水位曲線展現出典型的快速下降後緩慢回復型態，且回復幅度有限，長期累積下呈現下降趨勢，顯示此區含水層在連續抽水作用下形成了明顯的負壓帶，代表 PW06 與 MW09-D 之間存在高度水力連通性，不僅在時間上反應同步且其幅度上也遠大於其他觀測井，故可視為場址內最具代表性之控制井組。另一抽水井 PW01 採定時每日 8-19 時抽水，抽水 15 分鐘停 45 分鐘，液位設定於 15.5 m，雖然單次抽水時間較短，但因長時間日間連續運轉，其對鄰近 MW01 與 MW04 的影響也相當明顯。這些觀測井在水位曲線上同樣呈現顯著的鋸齒狀波動，說明 PW01 在局部區域形成穩定的洩降錐，並與 PW06 的影響區域部分重疊，使得場址中央至南側的地下水流場呈現出複雜的分布狀況。

其他抽水井的影響則屬次要但仍具區域意義。PW05 與 PW04 採類似的定時液位控制模式，液位分別設定於 14 m 與 13 m，抽水與停抽時間介於 15 至 60 分鐘不等。其鄰近井反應幅度雖較 PW06 與 PW01 小，但仍可觀察到穩定的週期性下降，顯示這兩口井對區域水位有一定控制作用。PW03 對鄰近井造成的水位變化幅度相對有限，曲線變動較為平緩，反映出抽水規模及抽停均衡所帶來的低度干擾效果。至於 PW02 則採用氣動雙隔膜泵，對整體含水層影響極小，幾乎未在觀測井的時序曲線上造成明顯擾動，可視為區域抽水系統中的輔助性或邊緣性設施。

觀測井群的反應特徵可以依敏感程度劃分層級。MW09-D 屬於近場高敏感井，直接受 PW06 控制，其水位變化最大，為場址內最關鍵的監測點。MW01 與 MW04 屬於中度反應井，對 PW01 及部分 PW06 的抽水反應明顯，但幅度小於 MW09-D，屬於次一級控制範圍。MW02、MW03、MW08 以及 MTL01A 之水位曲線則相對平穩，僅呈現自然補注或氣象因素造成的微幅變化，幾乎不受抽水操作影響，可作為背景基準井，用於分辨抽水效應與自然趨勢之差異。

更進一步觀察水位曲線，可見抽水期間普遍呈現快速下降，停抽後則緩慢回升，惟回升幅度不足以回到抽水前水位，導致基準水位逐步下降，顯示含水層的有效儲水係數有限，且可能存在一定程度的延遲回復效應，反射出抽水對地下水資源的長期累積壓力。在連續數週的觀測下，場址內多口井的平均水位均呈現緩降趨勢，這不僅是抽水週期性干擾的結果，更代表場址含水層在長期抽取下出現水量赤字的徵兆。若抽水維持不變，長期而言可能導致區域地下水位逐步下降，甚至影響含水層孔隙壓力與污染物傳輸行為，這是後續需要特別關注的風險。

本期監測結果所呈現之地下水流場並不具備單一方向性，而是由多口抽水井



五、結果與討論

交織形成的人工匯水場，場址水位場的主控來源可歸納為以 PW06 與 PW01 為核心，PW05 與 PW04 次之，PW03 與 PW02 則為輔助。觀測井則依敏感度區分為近場（MW09-D）、中場（MW01、MW04）、背景（MW02、MW03、MW08、MTL01A）三類。基於此，本報告不嘗試推估自然背景流向，而是強調抽水影響評估與井間水力關係之解析。未來建議整治團隊可透過於抽水作業中設計停抽視窗，以取得不受擾動之自然水位，作為背景基準參考；場址地下水系統已顯著受到抽水活動所支配，流場分布屬於典型的人工控制流場，監測與整治策略必須將抽水效應納入整體判釋架構，方能達到有效且合理的資源管理與污染控制。



整治場址數位監測與高精度污染團層析技術於抽出處理及淋洗策略之應用

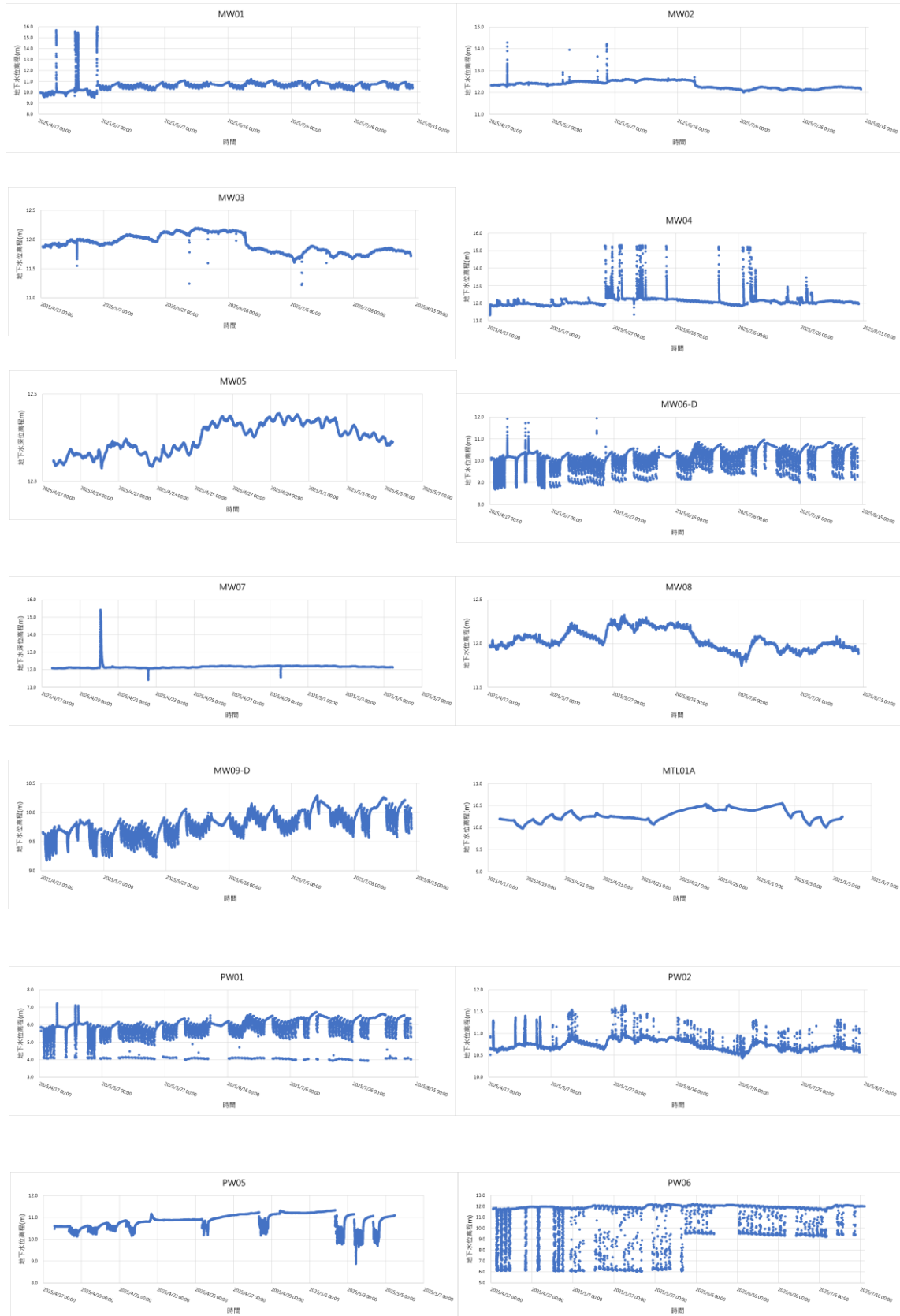


圖 20 場址地下水位監測成果



5-2 SSLE 反推估場址二維導水性

本節說明採用 SSLE 整合各井的位置與抽水期間之水位時序資料，反推估含水層導水係數 (T) 之分布。資料前處理包含：抽停事件標記、離群點剔除、各井時標校正與同步化、抽水準穩態—平穩段與回復早期段的洩降擇取。由於本計畫地下水位資料多數在抽水狀態下取得，試驗所得 T 值可視為營運擾動條件下之有效傳導係數。成果如圖 21 所示， T 值範圍約 $0.001\sim0.013\text{ m}^2/\text{min}$ ，呈現鮮明的帶狀異質性，其主軸大致沿 NE-SW 方向展布，整體 T 值分布可歸納為南高、中低、北中。

本研究採用之穩態水力層析成像 (SSLE) 導水係數反推估結果，係建立於具物理意義之參數反推估流程，而非單純依據單點試驗結果進行空間內插。於反推估初始階段，導水係數場之設定係參考場址既有微水試驗與歷史抽水試驗成果，給定代表性之均質導水係數作為初始值，以避免過度引入先驗假設而影響反推估穩定性。在反推估過程中，SSLE 模式透過多組抽水與回注工況所量測之地下水位反應，逐步修正各網格單元之導水係數，使模擬水位場能合理再現實測水位分布。此一修正過程係以最小化觀測水位與模擬水位間之整體殘差為目標，透過多次迭代更新導水係數分布，逐漸收斂至穩定解。迭代停止之判斷，係依據整體水位殘差於連續迭代間之變化趨於穩定，且導水係數更新幅度不再出現顯著空間調整為主要依據。當上述條件達成時，即視為反推估結果已達收斂狀態，最終所得之導水係數分布可代表場址尺度下含水層相對導水性之空間差異特徵。相較於傳統單井抽水試驗僅能提供局部導水參數，本研究所建立之 SSLE 導水係數分布，能整合多口監測井於不同操作條件下之水位反應，反映場址內部之水力異質性結構，對於後續抽出處理與淋洗作業中抽注配置之調整，具有實務參考價值。

就空間分布而言，南側 (MTL-01A、MTL-01B 一帶) 為高傳導核心區， T 值約 $0.009\sim0.013\text{ m}^2/\text{min}$ ，顯示通水性極佳，推測為厚層砂、礫質通道相；該高 T 值區核心向北緩收斂，過渡至場址中央 (MW-03、MW-05、PW-05、MW-02 近側) 之低傳導凹陷帶， T 值約 $0.001\sim0.003\text{ m}^2/\text{min}$ ，形成明顯的低滲屏障；再往北至 MW-09、PW-06 近側則為 T 值中等傳導區， T 值約 $0.004\sim0.007\text{ m}^2/\text{min}$ ，通水性較中央為佳但不及南側。在這樣的三分帶結構下，南側高 T 值區提供主要流通與能量傳遞通道，中央低 T 值區抑制南北側的水力耦合，北側中 T 值區則在抽水運轉時對洩降訊號有明顯但受限的傳遞能力。此解釋與井位上之時序觀測可相互印證，位於中央低 T 值區的 MW-03 在多次抽停循環中僅呈小幅、相對平緩的震盪，顯示低 T 對壓降傳播的阻隔；位於北側中 T 值區且鄰近 PW-06 的 MW-09-D 則在每次啟泵時出現降幅明顯、回復較慢的反應，這一方面來自與抽



整治場址數位監測與高精度污染團層析技術於抽出處理及淋洗策略之應用

水井的幾何近距與高頻運轉帶來的壓降疊加，另一方面亦反映中等 T 值區在相同抽水量下仍會形成顯著的局部洩降；至於南側高 T 值區核心（MTL-01A、MTL-01B 近側）則對遠端抽水的波動相對鈍化、回復較快，符合高 T 值體系能快速消散水力壓降的物理行為。整體觀之，中央低 T 值區與南北兩側較高 T 值區之對照關係，合理解釋了先前圖組中中央多井平穩、北側（靠 PW-06）波動顯著、南側回復快速的時序特徵。

由此分布延伸至整治作業意涵，首先南側高 T 值區核心帶為抽水效率與捕集寬度皆較佳的區域，在相對較小洩降下即可形成較寬的等勢收斂，但同時亦代表污染物在此的遷移速度較快，需以較密集的監測頻率或即時導電度監控佐證捕集成效。其次，中央低 T 值區屬於天然水力屏障或緩衝帶，對南北側抽水之壓降傳播具有阻滯作用，這能解釋為何 MW-03、MW-05 的震盪有限，該區不利污染團橫越擴散，但亦容易造成污染停滯與積聚，因此在整治上更適合採用邊緣抽取＋低壓回灌的組合來控制界面，而非在低 T 值區核心內大流量抽取。北側中 T 區（PW-06—MW-09-D）雖非最低值，仍可在高頻運轉下形成明顯洩降與穩定匯水中心，適合做近場控制與整治告警；若要擴大捕集寬度，建議於中 T 值區與中央低 T 值區的接觸帶布設或強化抽水，使北側等勢線從 NE-SW 背景趨勢被扳向井群，避免只形成狹窄的洩降錐。

為提升結果可信度，本研究並檢視 SSLE 的假設與不確定度來源，一是本次反推估採二維等效 T 值場，且以抽水期擬穩態—早期回復為特徵事件，未顯式分離垂向滲漏與邊界條件時變效應，故在求解域邊緣與井點稀疏處不確定度較高；二是 T 值場之平滑度與各向異性比值會影響中央低 T 值區的幾何形狀，建議後續以階梯試驗與 12-24 小時定率抽水—回復資料進行靈敏度測試與交叉驗證；三是在 PW-06、MW-09-D 的近井區，局部膚層效應與井徑尺度非達西行為可能使洩降在時間域上更為尖銳，而 SSLE 的區域化 T 值會把此類近井效應平均化為中等 T 值，這也解釋了北側為中 T 值區但降深幅度仍大的觀察。整體而言 T 值帶狀格局與井群時序的洩深幅度、遲滯、回復速率三項指標可相互印證，為後續數抽水、灌藥配置與捕集區（capture zone）設計提供了關鍵的物理基礎。



五、結果與討論

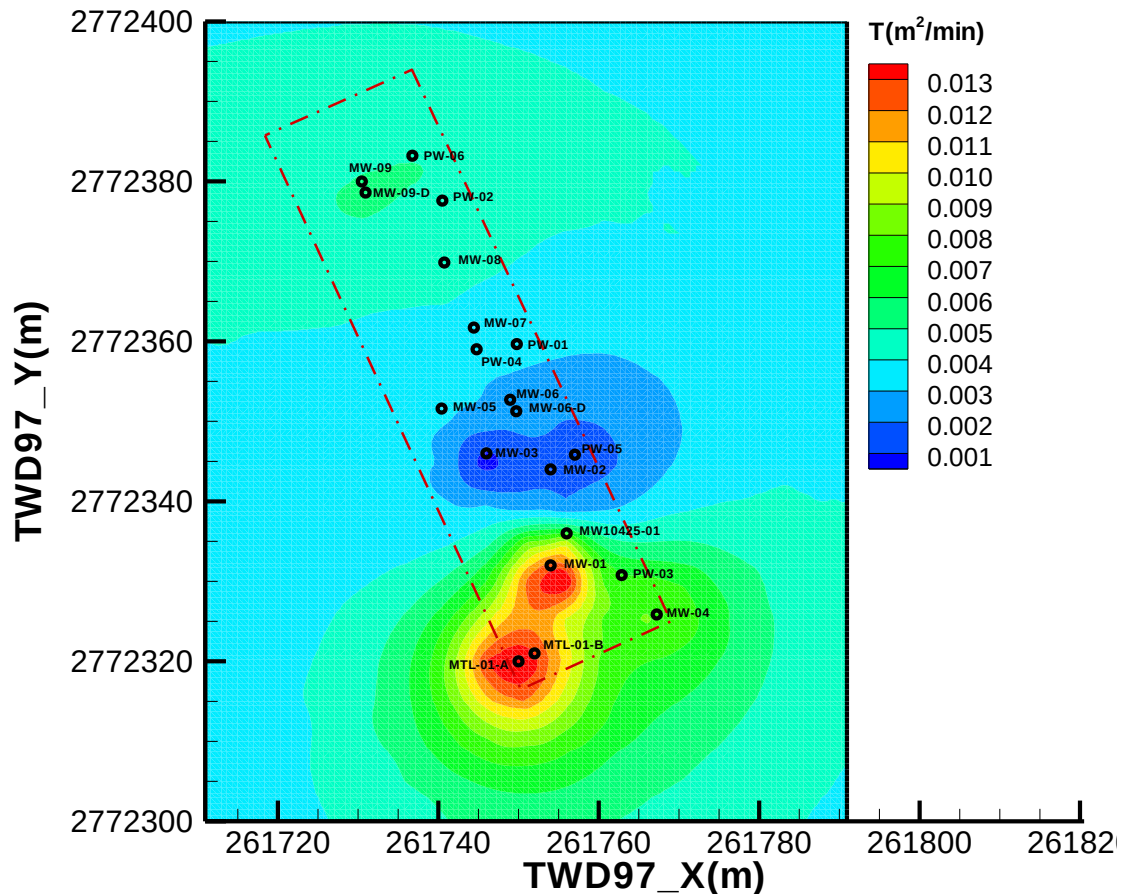


圖 21 SSLE 反推估之傳導係數 ($T, \text{m}^2/\text{min}$) 空間分布

5-3 展示平台與行動裝置 APP 開發與應用

5-3-1 展示平台建置

本計畫將於實驗模場導入監測數據作業，現場資料之儲存與讀取效能為確保數據時效性與完整性之關鍵環節。為強化數據即時寫入並同步儲存至遠端倉儲伺服器，特採用具備高效能平行處理能力之非結構化資料庫架構。本計畫選用開源時間序列資料庫 InfluxDB，其專為處理具時間標記之大量數據（如物聯網感測器數據與即時分析結果）所設計，極為適用於環境場址之監測應用情境。InfluxDB 具備下列關鍵優勢：

- 高效能資料寫入與查詢能力：透過其 TSM (Time Structured Merge Tree) 儲存引擎，整合快取區 (cache)、寫入前日誌 (WAL)、TSM 檔案及壓縮處理模組 (compactor)，可實現高吞吐量寫入與有效的資料壓縮機制。
- 支援多樣資料輸入協議：除原生 HTTP API 外，亦可透過插件支援如



整治場址數位監測與高精度污染圖層析技術於抽出處理及淋洗策略之應用

Graphite、Collectd、OpenTSDB 等協議，有效整合各類資料來源。

- 類 SQL 語法之查詢介面：使用者可透過簡易直觀之語法進行資料查詢與分析，大幅提升資料存取與應用效率。

綜上所述，InfluxDB 之高效能時間序列資料處理能力，將可充分支援本計畫於實驗模場中即時、大量數據之可靠儲存與快速調用需求，為場址監測與後端分析提供穩健技術基礎。展示於監控平台必須設定面板（Panel）（如圖 22），因為面板為 Grafana 最基本的展示單位，每個面板提供編輯功能，可利用編輯展示圖像方式。面板提供數種樣式和格式選項，而且支援拖拽來在儀錶盤上重排，並且可以調整大小。面板可以利用多種方式輕鬆共用，既可以通過連結分享，也可以匯出 JSON 等文字檔。本計畫平台提供使用者可以藉由 GIS 圖台介面（如圖 23），控制平面時序動畫展示介面，可利用按鈕全部播放，更可利用滑鼠控制播放特定時序圖層。

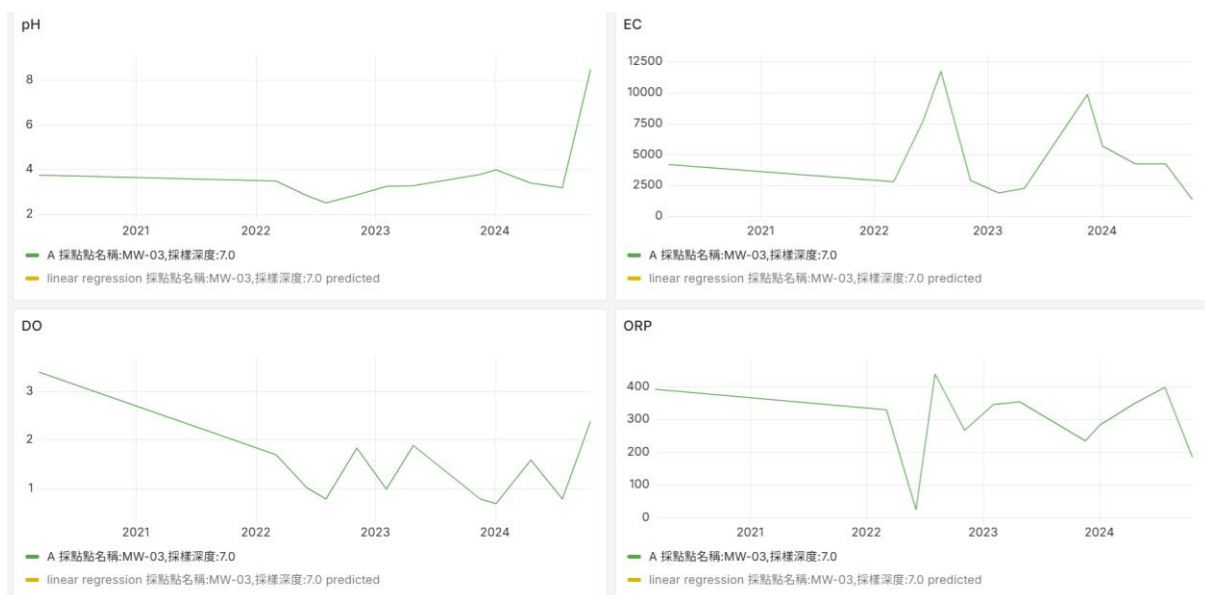


圖 22 Grafana 面板種類



五、結果與討論



圖 23 專案網路 GIS 平台

5-3-2 行動裝置 APP 開發

因應本案地下水污染整治作業中對採樣流程、樣品紀錄與數據整合的高度精確與效率需求，團隊特別針對本場址之操作條件與整治程序，開發一套專屬之數位採樣紀錄平台「EaseTrack」，作為後續實地作業中資料蒐集與整治管理的基礎工具。該系統尚未實際導入場址使用，惟其設計、流程規劃與功能模組，已依據整治作業類型與監測需求進行全面性規劃與測試，未來將視本案後續實施進度逐步導入應用。EaseTrack 平台架構分為「工地負責人操作介面」與「現場採樣人員填報介面」兩層級，分別對應整治作業中指派任務、樣品管理與前線紀錄需求。平台支援三種紀錄類型：油水位紀錄、水質分析紀錄與土壤採樣紀錄，並依照污染場址典型作業流程建置固定欄位，包括採樣時間、採樣點位、採樣深度、LNAPL 厚度、水位高度、pH、導電度、溶氧量、溫度、PID/FID 數值、土壤性質與顏色、樣品編號與照片存證等，並設有必填驗證機制與時間戳記功能，確保資料紀錄具一致性、完整性與可追溯性。

本平台之開發流程中，參考國內外污染場址整治紀錄作業標準，結合本案模場試驗與現地淋洗等作業需求，預設可支援「灌注前評估」、「灌注操作紀錄」、「灌注後水質比對」、「樣品流向紀錄」與「照片佐證」等功能模組。操作端可透過行動裝置（手機或平板）完成表單填報、照片上傳與樣品資訊登錄，資料將依據表單類型與作業階段進行自動分類與雲端儲存，為整治過程提供透明、高效且具結構性之資料輸入平台。目前 EaseTrack 平台將實際應用於本計畫場址整治作業中，本次開發已完成功能驗證與操作測試，並針對不同使用者角色（如工地主責人員、採樣技術人員）進行模擬操作與界面優化，具備隨時可部署與操作說明完善之特性。未來將視整治工程實施階段與業主需求，擇定具代表性作業項目（如



整治場址數位監測與高精度污染圖層析技術於抽出處理及淋洗策略之應用

快篩採樣、灌注作業或模場試驗）進行導入應用，進一步累積現地應用經驗與數據流程管理模式。EaseTrack 平台的開發不僅回應了污染場址整治資料紀錄電子化、樣品資訊透明化與作業流程可稽核的趨勢，也為日後污染場址之智慧整治系統建構奠定基礎。透過此次系統性規劃與模擬演練，本案已為後續實地數位整治操作建立完整準備，有助於整體污染控制作業進一步邁向數據治理與智慧化監控的新階段。

EaseTrack 採用 Web App 架構，使用者可透過手機或平板裝置，不須安裝程式即可使用平台功能。整體平台操作權限分為兩大角色模組：工地負責人（管理端）與現場採樣人員（執行端）。

➤ 管理端（工地負責人）功能：

1. 任務派發與連結生成：平台可依據採樣日程，快速派發對應表單，並透過專屬連結分配給現場人員。
2. 紀錄查核與樣品流向監控：所有表單回傳資料自動彙整至管理介面，支援採樣時間、位置、樣品編號與照片即時比對，方便確認紀錄完整性。
3. 補件與審核控制：若欄位有缺漏，可主動通知現場補充，並留下稽核紀錄，落實品質控管。
4. 分段擴充功能（針對土壤樣品）：可允許一筆表單中新增多段採樣深度，便於對複層土壤進行逐層記錄。
5. 樣品管理與分析追蹤：透過平台可註記樣品分析預定項目、預計分析日、分析機構等，作為樣品管理追蹤機制之基礎。

➤ 執行端（採樣人員）功能：

1. 即時填報介面：表單包含多種欄位型態，如選擇器（採樣點）、數值欄位（pH、EC、PID）、照片上傳、備註說明等，可於現場完成資料填寫。
2. 內建欄位驗證規則：例如水質分析紀錄需填寫 pH、EC、DO、溫度等，若未填寫系統將禁止提交，確保資料完整。
3. 動態樣品登錄功能：除既定樣品外，現場可依實際採樣情形新增樣品名稱與性質，提升操作彈性。
4. 拍照存證與自動時間戳記：平台強制要求拍攝現場照片，並自動附加 GPS 與時間資訊，確保影像與紀錄之對應性與真實性。

表單類型與欄位設計，EaseTrack 設計有三類標準作業表單（圖 24），涵蓋



五、結果與討論

污染場址整治常見採樣需求：

1. 油水位紀錄表：採樣點、填寫人、浮油厚度 (LNAPL)、水位、總厚度 (自動計算)、照片。
2. 水質分析紀錄表：採樣點、pH、導電度 (EC)、溶氧 (DO)、水溫 (T)、樣品名稱、照片與備註。
3. 土壤採樣紀錄表：採樣深度、採樣終點、天候、PID/FID 數值、採樣工具、土壤質地、顏色、樣品編號、分析項目、回收量、照片與註解。

所有表單均設有「必填驗證」、「樣品編碼自動儲存」、「段落編輯」與「即時回傳」功能，支援工作流程高效與品質一致性。EaseTrack 平台的開發，除了解決整治現場紀錄失真、樣品遺失與回報延遲問題外，更具備高度模組化與彈性擴充潛力。其雲端資料架構可與後端 GIS 系統、污染場址資料庫、感測器資料串接系統 (如水位計、電導度計等) 進行整合，未來可升級為「智慧場址監控平台」，提供污染趨勢分析、風險預警與即時灌注決策支援功能。

本平台目前已完成原型系統開發、跨角色測試 (包括工地負責人與現場採樣技術人員) 與操作流程模擬演練，針對不同操作情境 (快篩採樣、灌注前比對、模場監測) 進行測試與功能驗證，確認系統可即時穩定運作，並具備高彈性與可維運性。未來將依據本案整治工程實施進度，選定代表性作業階段進行實地試行，逐步蒐集實務應用回饋，調整與優化系統操作邏輯與界面設計。

本系統支援客製化設計任務管理，允許使用者根據採樣點、預計採樣時間、人員配置等條件，進行細緻任務指派，並透過專屬表單 QR code 連結分享給採樣人員，表單圖示如 (圖 25)。

本系統提供使用者可以在每個採樣點新增照片，且同一個位置可增加不同時間的照片，例如圖 26 中的 MW-09 之中，更可以呈現每次採樣結果，繪製為時序圖，並依據不同採樣深度進行分類，不同水井之重金屬濃度等時序圖如圖 27，可提供使用者挑選特定水井與其特定深度。

EaseTrack 平台之開發與部署，標誌污染場址整治管理由傳統紙本紀錄進入數位治理與智能監控新階段，不僅強化資料可靠性與樣品管理效率，亦為後續導入 AI 分析、趨勢預測與灌注決策支援等進階功能提供資料基礎與系統框架。

整治場址數位監測與高精度污染團層析技術於抽出處理及淋洗策略之應用

油水位紀錄表

送出

目標說明

紀錄河流的油水位差異

選擇紀錄的採樣點

填寫人

betty

* 請填寫您的大名以利我們追蹤表單

LNAPL (m, toc)

water (m, toc)

thickness (m)

照片紀錄

* 每張照片的備註說明最多 20 字

+ 上傳照片

水質分析紀錄表

送出

目標說明

選擇紀錄的採樣點

填寫人

betty

* 請填寫您的大名以利我們追蹤表單

pH

EC (μS/cm)

DO (ppm)

ORP

T (°C)

送樣品編號

照片紀錄

* 每張照片的備註說明最多 20 字

+ 上傳照片

備註

土壤採樣紀錄表

送出

目標說明

選擇紀錄的採樣點

填寫人

betty

* 請填寫您的大名以利我們追蹤表單

預設間距深度

30

cm

土壤採樣紀錄

* 點選以下「+ 新增採樣區段」來紀錄不同深度區段的採樣

+ 新增採樣區段

照片紀錄

* 每張照片的備註說明最多 20 字

+ 上傳照片

備註

圖 24 APP 表單設計，左至右分別為油水位紀錄表、水質分析紀錄表、土壤採樣紀錄表

水質分析紀錄表		測量項目 (須送樣)		
估鼎整治計畫採樣表單		測量項目		
基本欄位		自訂欄位	鉻	
		自訂欄位	pH	
		自訂欄位	銅	
		自訂欄位	鉛	
系統預設	選擇紀錄的採樣點		自訂欄位	鎳
系統預設	填寫人		自訂欄位	砷
系統預設	照片記錄		自訂欄位	二氯甲烷
系統預設	水質採樣區段記錄		自訂欄位	鎘
系統預設	深度		自訂欄位	鋅
系統預設	天氣		自訂欄位	
系統預設	採樣設備			
系統預設	送樣品編號			

圖 25 客製化案場表單設計



五、結果與討論



圖 26 單井各次調查數據與採樣深度資訊

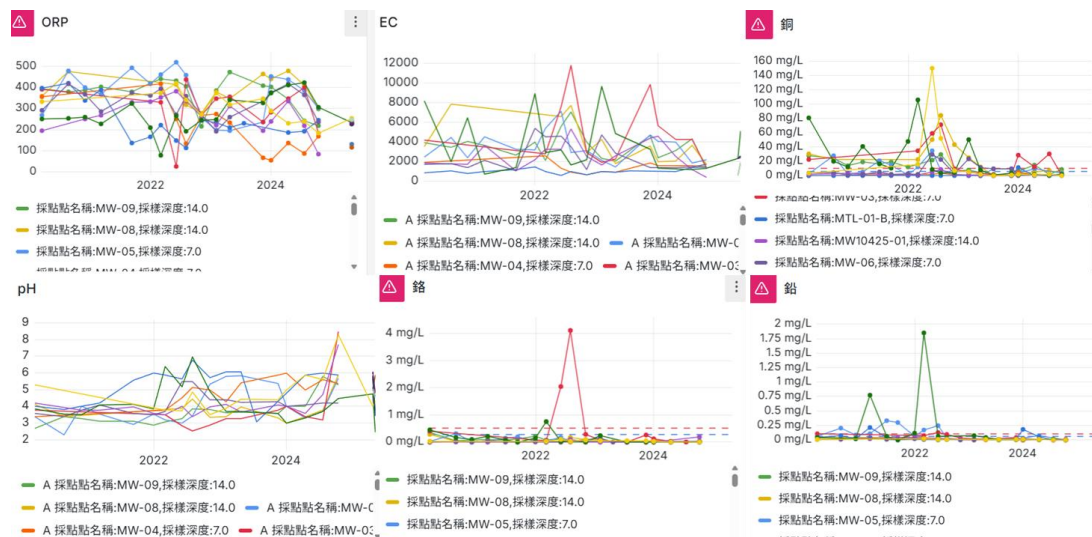


圖 27 彙整不同水井各次調查數據時序結果

5-4 熱示蹤計試驗

5-4-1 TW-01 藥劑降溫注入試驗

井孔注入冷、熱水或藥劑是水文地質研究中常用的方法，用於評估地下流動、儲層特性和污染物傳輸。本案例中，TW-01（4 吋）進行藥劑灌入，約 1 噸藥劑在約 40 分鐘內注入，試驗相關資訊表表 7。由於藥劑本體黏滯度、密度、溫度等影響，因此注入井後以重力密度流方式，由注入流體與井內水的密度差（ $\Delta\rho$ ）驅動，可能加速深層流動（Doughty et al., 1982），影響井內有效流率（Bear,



1972)。藥劑降溫試驗以置放冰磚為主要操作，過程中藥劑以緩慢流速注入至井內（參照圖 28），不致提高地下水位，並以重力流模式讓降溫藥劑於井內混合，並以 DTS 布置於井中量取井內地下水溫變化。

在本次注入藥劑實驗中，從注入開始的 10 分鐘到 120 分鐘期間（參照圖 30），井內溫度剖面呈現出典型的時間序列變化特徵，清楚反應出從初期熱傳導主導到中後期自然對流主導的轉變過程（參照表 8）。於注入初期 10 至 30 分鐘溫度分佈相對穩定，僅在井深約 4 至 5 公尺處出現輕微的溫度上升或下降，這顯示熱量主要沿著井壁以傳導方式擴散，熱擾動仍局限於局部區域，井內流體尚屬靜止狀態。進入中期 40 至 70 分鐘後溫度梯度逐漸加大，剖面中央出現明顯的轉折區或異常帶，顯示井內中層流體開始受到注入液體密度差與壓力差的影響，產生緩慢的垂向循環運動。此階段的溫度變化呈現局部增減交錯的形態，代表熱傳導與對流混合作用開始占主導，冷鋒波前向下推進逐漸擴散至井底部。當注入時間達 90 分鐘以上時，井底部出現明顯的溫度反應，顯示熱量波已傳至井下深部，井內對流趨於穩定。最終於 120 分鐘時，整體溫度分佈趨於平衡，垂向梯度顯著減小，井內上下層溫差消失，顯示流體混合充分進入準穩態熱平衡階段。

依據溫度變化幅度與延遲反應時間估算，等效熱波前的垂向傳輸速率約介於 10^{-5} 至 10^{-4} 公尺每秒，遠高於單純熱傳導速率（約 10^{-7} 公尺每秒），顯示密度差所驅動的自然對流對熱傳輸具有顯著貢獻。此一現象源自注入液體與原地下水間的溫度差異，導致密度變化並形成重力流驅動，使冷水下沉、熱水上浮，造成井內流體循環與熱交換的強化。此種密度驅動對流在具有濾管開放段的井中尤其明顯，因為上下層水體得以自由交換，形成垂向熱循環。以溫度分布觀察，井內熱傳遞的控制機制經歷三個階段：初期為純傳導，熱量自注入端向外擴散；中期為傳導與對流共存階段，局部形成環流結構；後期則以對流為主，井內流體完全混合，熱波前鋒逐漸消散。此過程顯示在注入作業持續進行時，井內溫度場可作為流體動態的重要指標，能揭示出地層內流體交換的時空行為。綜合上述，觀測結果證實井內的熱傳輸並非單一擴散過程，而是受密度差、流體黏滯性、井壁熱傳導及流場連通性共同控制的複合機制。此現象在地層注入與地下水回灌過程中均具有重要意涵，因其決定了井內熱平衡的建立速度與注入流體的擴散範圍，也間接反應了井周圍地層的滲透性特徵與對流穩定性。



五、結果與討論

表 7 TW-01 藥劑降溫注入試驗操作資訊

井名	TW-01
地下水深	3.71m
井深	7.25m
溫度測量起始時間	2025/09/19 10:23
注藥起始時間	2025/09/19 10:53
注藥結束時間	2025/09/19 11:31
溫度測量結束時間	2025/09/19 13:00



圖 28 藥桶內放置冰磚降溫，並緩慢注入至井內，由布置於井中之 DTS 量測溫度變化

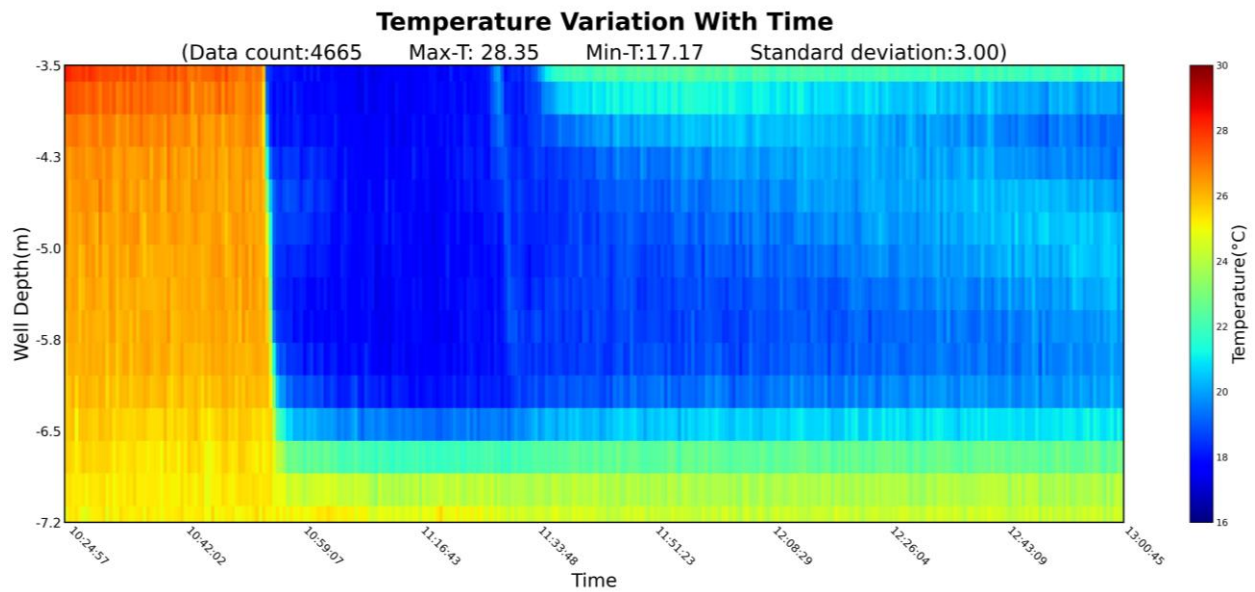
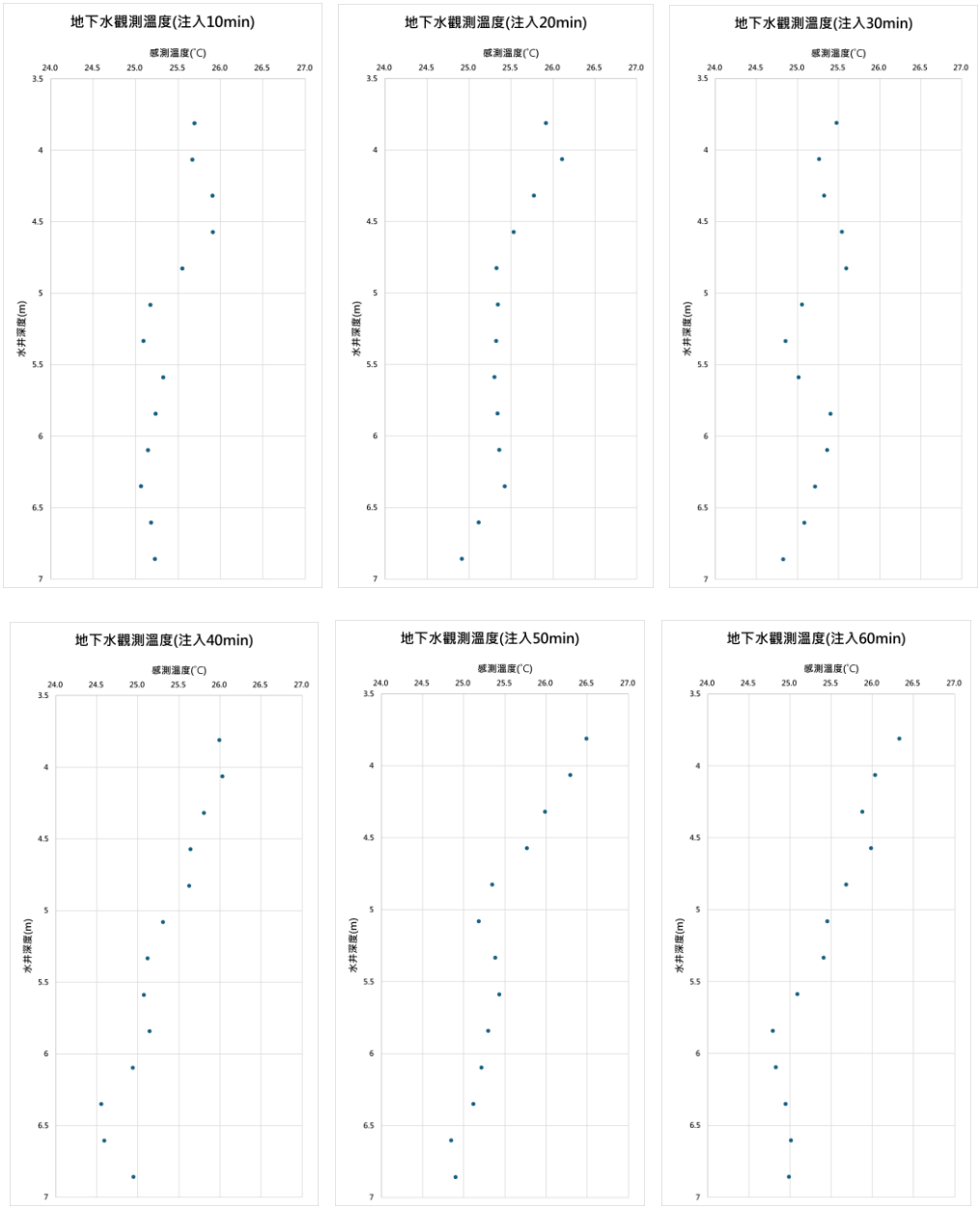


圖 29 TW-01 試驗溫度全時圖

表 8 分時段溫度垂向剖面變化

時間	溫度分布特徵	狀態評估
注入 10 min	僅淺層（-4 m 附近）出現初步降溫，深層尚未受到影響	冷劑剛開始進入井口
注入 20-40 min	降溫範圍快速擴展至-6 m 左右，溫度降至 25 °C 以下	對流及擴散逐漸傳導向下
注入 50-70 min	溫度梯度趨於平緩，-4 m 至-6.5 m 區間溫度趨一致（約 25.0 °C）	注入流量穩定，井內水體充分混合
注入 80-90 min	各深度溫度差異極小，代表井內已近熱平衡	對流主導，顯示井內開放流動通道存在

五、結果與討論





整治場址數位監測與高精度污染團層析技術於抽出處理及淋洗策略之應用

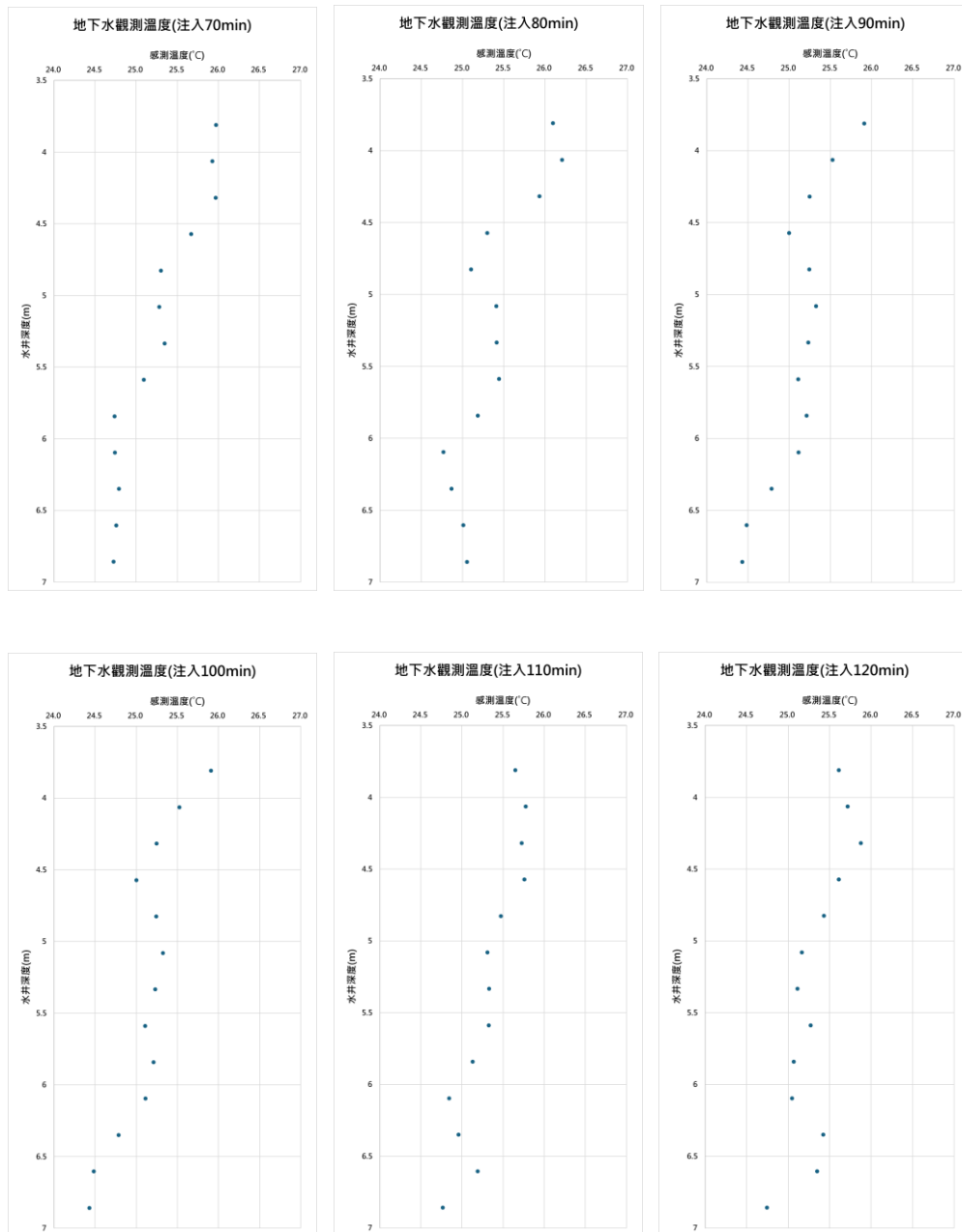


圖 30 TW-01 注入降溫藥劑試驗，各深度節點溫度隨時間變化圖，以地下水位以下之溫度紀錄為主

由於本試驗非以線性加熱做為操作基礎，因此無法以式 (34) 進行分析，為解析注降溫藥劑試驗井內不同深度溫度變化與對流傳輸行為，採用「熱波前抵達時間法 (first-arrival time/ breakthrough time)」(Stopa and Wojnarowski, 2006; Somogyvári et al., 2016) 來估算等效垂向速度。分析步驟如下：

以首筆量測時間 t_0 為各深度的基準溫度，定義：

$$\Delta T(t, z) = T(t, z) - T(t_0, z) \quad (35)$$



五、結果與討論

由全井溫度變化趨勢判定降溫歷程，即注入流體溫度低於原地下水溫度，造成井內熱波下沉傳遞。對每一深度 z 求解首次滿足下式的時間 $t_{arr}(z)$ ：

$$|\Delta T(t_{arr}, z)| \geq \Delta T^* \quad (36)$$

其中 ΔT^* 為門檻值，本試驗採靈敏度設定， $\Delta T^* = 0.20^\circ\text{C}$ 。若測值於相鄰時間間隔內首次跨越門檻，則以線性內插求得抵達時間：

$$t_{arr} = t_1 + \frac{\Delta T^* - \Delta T(t_1)}{\Delta T(t_2) - \Delta T(t_1)}(t_2 - t_1) \quad (37)$$

假設熱波前以近似穩定速率向下傳播，則抵達時間與深度的關係可用線性模型表示：

$$t_{arr} = az + b \quad (38)$$

其中 $a = dt/dz$ ，其倒數即為表觀前緣速度：

$$v = \frac{1}{a \times 60} \quad (39)$$

此速度代表熱擾動向下傳播的等效速度，反應密度驅動對流與混合強度，為呈現不同深度間熱量波傳遞速率，利用中央差分法近似：

$$v(z_i) = \frac{1}{\left[\frac{t_{arr}(z_{i+1}) - t_{arr}(z_{i-1}))}{z_{i+1} - z_{i-1}} \right] \times 60} \quad (40)$$

依據溫度時序資料計算出的各深度節點的熱波前抵達時間與等效局部垂向流速（採門檻 $\Delta T = 0.20^\circ\text{C}$ ）結果如表 9 所列。其中上部區段（3.8-4.5m），熱量波前抵達時間短且流速最高（ $\sim 2.6 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ ），顯示冷水迅速滲入並沿管壁下沉，屬於主導對流區。中部區段（4.5-5.5m）出現正負交錯的流速值（ $\pm 10^{-3} \text{ m/s}$ ），代表井內局部環流與回流現象，可能有上升與下沉流並存。而深部區段（ $> 5.8 \text{ m}$ ）抵達時間延後（約 20–55 min），速度多為負值（約 -4×10^{-4} 至 $-1.4 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ ），顯示冷水向下推進並在下部形成穩定對流循環。熱量波前的平均傳播速率約在 10^{-3} (m/s) 等級，屬於典型的密度驅動對流主導區間。正負號則表示垂向流動方向，其中正值為上升、負值為下沉。



整治場址數位監測與高精度污染圖層析技術於抽出處理及淋洗策略之應用

雖由熱波前抵達時間推算的流速屬於對流主導的表觀速度，其物理意涵與達西流速不同，但兩者仍具有可比性，特別是在空間變化趨勢與優先流動通道的辨識上。熱對流流速在井內反映了局部流體交換與密度驅動效應的強弱，而這些現象通常與地層的水力導水性差異高度相關。以本井分析結果為例，對流速度介於 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ m/s，明顯高於抽水試驗所得的達西滲流速度（ $\sim 10^{-8}$ m/s），但不同深度之間的相對分布仍可揭示地層滲透性差異的方向性。在 3.8–4.5 m 區段，熱波前抵達時間最短、對流速度最高（達 2.6×10^{-3} m/s），顯示該深度區段的流體交換與熱擾動最為強烈，此現象往往出現在濾管開口或高 K 層位置，故可視為含水層中的優先流動通道。相反地，在 5.8 m 以下的深部區域，熱波前抵達明顯延遲、速度低於 10^{-3} m/s，顯示對流弱化、傳導主導，對應至相對低滲層。熱對流的形成需要垂向開口與水力連通性，因此觀察到明顯的局部高速區可代表該處地層具垂向連通裂隙、高滲透性透水層或濾管接觸層，因此對流流速的空間差異不僅顯示井內流體的動態，也間接反應出地層非均質性與優先流動通道分布，換言之對流流速高的區段，極可能對應於滲透係數高、導水性佳的優先通道；而對流弱或延遲區段，則反應低 K 層或不連通層。此熱前緣流速剖面可視為地層滲流結構的高解析度替代指標，可輔助修正抽水試驗所得的單一整體 K 值，使其具有深度分辨能力。

表 9 TW-01 降溫藥劑注入試驗流速分析結果與對流狀態評估

深度 (m)	熱量波前抵達時間 (min)	等效局部流速 (m/s)	密度流狀態評估
3.810	4.07	2.57×10^{-3}	熱量波快速下沉區
4.064	5.72	4.83×10^{-4}	微弱下沉流區
4.318	21.60	6.88×10^{-4}	中部擾動區
4.572	18.03	-1.06×10^{-3}	向上回流區
4.826	13.58	-6.73×10^{-4}	局部對流
5.080	5.44	-1.06×10^{-3}	回流環
5.334	5.57	4.20×10^{-4}	混和帶
5.588	25.59	1.73×10^{-4}	下層慢速下沉
5.842	54.62	6.68×10^{-4}	對流區下端
6.096	38.27	-3.99×10^{-4}	向上回流
6.350	33.42	-1.42×10^{-3}	深部反向對流
6.604	32.31	-8.12×10^{-4}	穩定循環流
6.858	22.99	-4.55×10^{-4}	下部循環出口



5-4-2 TW-03 線性熱源加熱試驗

本研究以 TW-03 觀測井為目標井，進行井內線性加熱試驗，相關資訊列如表 10，欲探討井中垂直剖面之溫度變化行為，進一步推估地下水之流速分布。該試驗為一種主動式熱示蹤技術，透過在井內施加穩定微量熱源，並以高解析度光纖溫度感測系統持續監測井中不同深度的溫度變化歷程，藉由升溫與回溫階段的熱傳導與對流反應，可反推估局部含水層中水流的速度。本次線性熱源加熱試驗的溫度全時圖（10:11–15:31）（參照圖 31）清楚揭示了井內熱傳遞的時間與深度變化特性，並反應出地下水流動與含水層熱交換的空間差異。試驗於 10:51 啟動加熱（2.65kW），12:31 停止加熱後進入自然回溫階段，整體水深約為-5.3 m 至-14.5 m。隨著線性加熱源啟動，井內溫度迅速上升，並在約-9.0 m 與-12.5 m 深度形成兩個顯著的高溫集中帶。從全時圖顏色變化可見，兩處紅色熱異常持續時間長、溫度上升幅度大，顯示該區域的熱能累積效應明顯，熱傳散失速率較慢。此現象表示該處為地下水流速最慢，交換效應最弱之區域。線性熱源法的熱傳機制主要由導熱與對流兩種機制共同控制，若局部地層或井內水流流速高，則流體運動能有效攜帶熱量，使該處升溫幅度受抑制，且在停止加熱後快速回冷；相對地若流速緩慢，流體交換有限，熱量無法即時帶離，便會在局部積聚而形成高溫帶。從本次全時圖的熱分佈可推論，-9 m 與-12.5 m 兩處所在之地層，應屬於滲透性較低或局部水流滯留的區段。由於熱能在該處難以透過對流被移除，因此累積效應顯著，最終呈現出最高溫度達 35.8 °C 的熱峰區。這種現象在井內加熱實驗中相當典型，代表地層或井周存在局部封閉結構、細粒層或泥質層，導致熱量被困於特定深度範圍內。

表 10 TW-03 線性加熱試驗操作資訊

井名	TW-03
地下水深	5.26m
井深	14.5m
溫度測量起始時間	2025/10/16 10:11
加熱線源啟動時間	2025/10/16 10:51
加熱線源結束時間	2025/10/16 12:31
溫度測量結束時間	2025/10/16 15:31

從時間軸變化觀察，井內水溫變化在加熱後約 20 分鐘內快速形成，當加熱停止後溫度逐漸下降，但兩個高溫帶的回溫速率明顯較慢，甚至在測試結束時仍維持高於鄰層約 3~5 °C 的溫差，顯示該區段的熱交換係數低。相對地，在-7 m 至



整治場址數位監測與高精度污染圖層析技術於抽出處理及淋洗策略之應用

-8 m 與-13.5 m 以下深部，溫度回復明顯較快，顯示這些位置的流體交換活躍、流速較高，可能對應通水砂層。綜合上述結果可知，井內溫度分佈並非單純反應加熱功率或傳導強度，而是流場與地層特性共同作用的結果。最熱的地方並不代表能量輸入最多，而是因為能量輸出最少、流體移動最慢，熱量無法即時被帶走所造成。換言之，高溫區即為流速最慢區，低溫區反而對應流速最快區。這一特徵對判定含水層內部異質性與井—地層界面交換特性具有重要意義。線性熱源加熱試驗成功呈現井內溫度時空演化特徵，並揭示地下水流動的空間非均質性，將近一步以 des Tombe et al. (2019) 進行地下水流速分析。

在本次線性熱源加熱實驗的分析中，選取六個代表性深度，分別為-5.85 m、-7.88 m、-9.92 m、-11.44 m、-12.97 m 及-13.73 m 進行單點時序解析，六個深度的分布覆蓋自井內地下水位上部至底部的主要流動與傳熱區間，能完整描繪垂向熱傳結構。上部（-5.85 m、-7.88 m）代表受井內對流影響最顯著的區段，是評估高交換、高流速條件的重要基準；中部（-9.92 m、-11.44 m）對應全時圖中第一個熱異常帶及其過渡區，是流速由快轉慢、熱量開始積聚的關鍵範圍；而下部（-12.97 m、-13.73 m）則位於第二個熱核心與井底滯留區，能反應低流速、弱交換的極端條件。此分層選點原則源於物理線熱源理論（Carslaw and Jaeger, 1959）與有限脈衝線源模型（Gustafsson, 1991）的應用邏輯，在對流主導環境下，溫度響應沿深度不再線性，而會在流動過渡帶出現顯著拐點。透過多層深度對照，可辨識熱擴散與對流效應的空間耦合，並推估局部滲流速的垂向分布。

6 個深度間距設計亦符合 Nyquist 取樣原則在熱傳實驗中的概念（Hausner et al., 2011），即樣點需能解析主要溫度梯度變化頻率而不致混疊。以本井厚度約 9 m、主導熱異常波長約 2 m 估算，平均取樣間距 ~ 1.5 m 足以捕捉一階與二階熱變化型態。再者，各點皆避開明顯井口干擾區與底部邊界效應，確保量測結果主要反應井—地層間的自然交換，而非儀器或邊界造成的假信號。透過這樣的取樣策略，可比較不同深度的加熱與回溫曲線形態，並進一步建立高交換區、過渡區、弱交換區的垂向結構關係。因此，選取此六個深度的目的在於以有限而具代表性的垂向樣點，捕捉井內對流與地層導熱之耦合機制，並藉由時間序列曲線的差異化行為，精確判識地下水流速變化與熱滯留現象的空間分布。



五、結果與討論

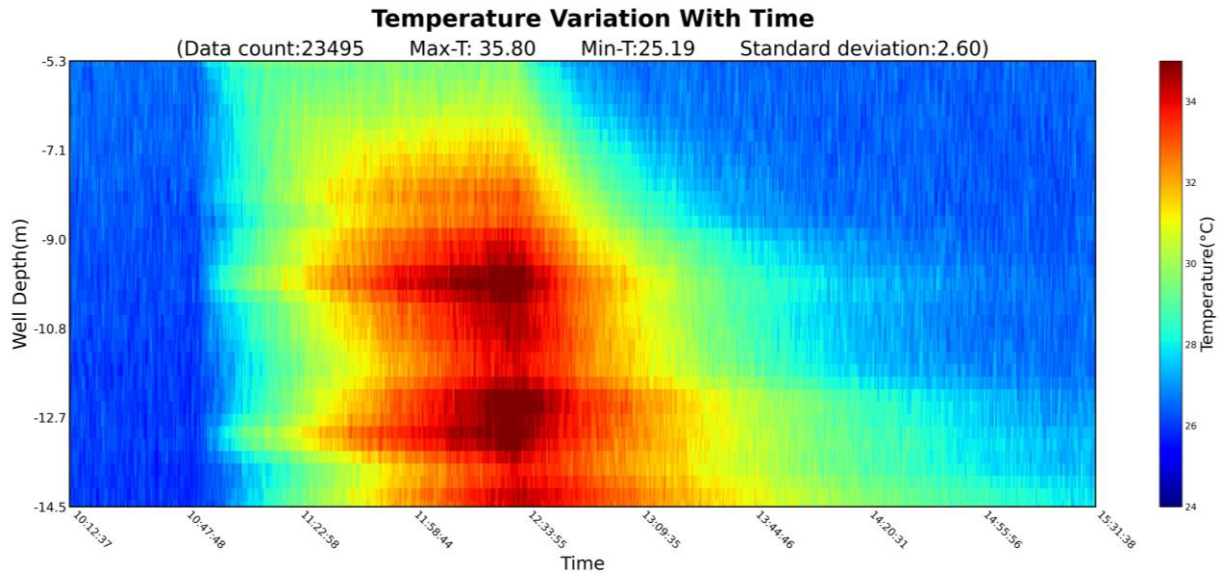


圖 31 TW-03 試驗溫度全時圖

以六個代表深度的溫度穿透曲線（參照圖 32）對照全時圖可知，淺層 -5.85 m 與 -7.88 m 對加熱最早響應，但停熱後降溫迅速，顯示井內空間的流體置換活躍、等效流速較快；反之，在 -9.92 m 與 -12.97 m 處可觀察到高幅度且持續時間長的溫度峰值，停熱後呈現明顯長尾，代表局部熱能外散緩慢，乃慢流、弱交換區段。介於兩者之間的 -11.44 m 表現為中等峰值與中等冷卻率，對應循環通道的過渡交換帶；最深的 -13.73 m 雖不一定是峰值最高，但回溫顯著遲緩，符合循環下沉端的滯留特性。綜合研判，最熱且回溫最慢的兩個層位（-9.92 m、-12.97 m）即為地下水局部流速最慢、交換效率最低之區域；此結果與深端 -13.73 m 的長尾現象共同勾勒出井內垂向循環的結構：淺部為高交換上升區，中深部（-11.44 m）為通量過渡帶，而 -9.92 m 與 -12.97 m 為熱堆積核心，-13.73 m 為下沉端滯留臂。此一判釋不僅解釋了加熱、回溫兩階段的時空圖像，也提供後續劃分優先通道與低滲段、設定監測深度與加熱功率配置的依據。

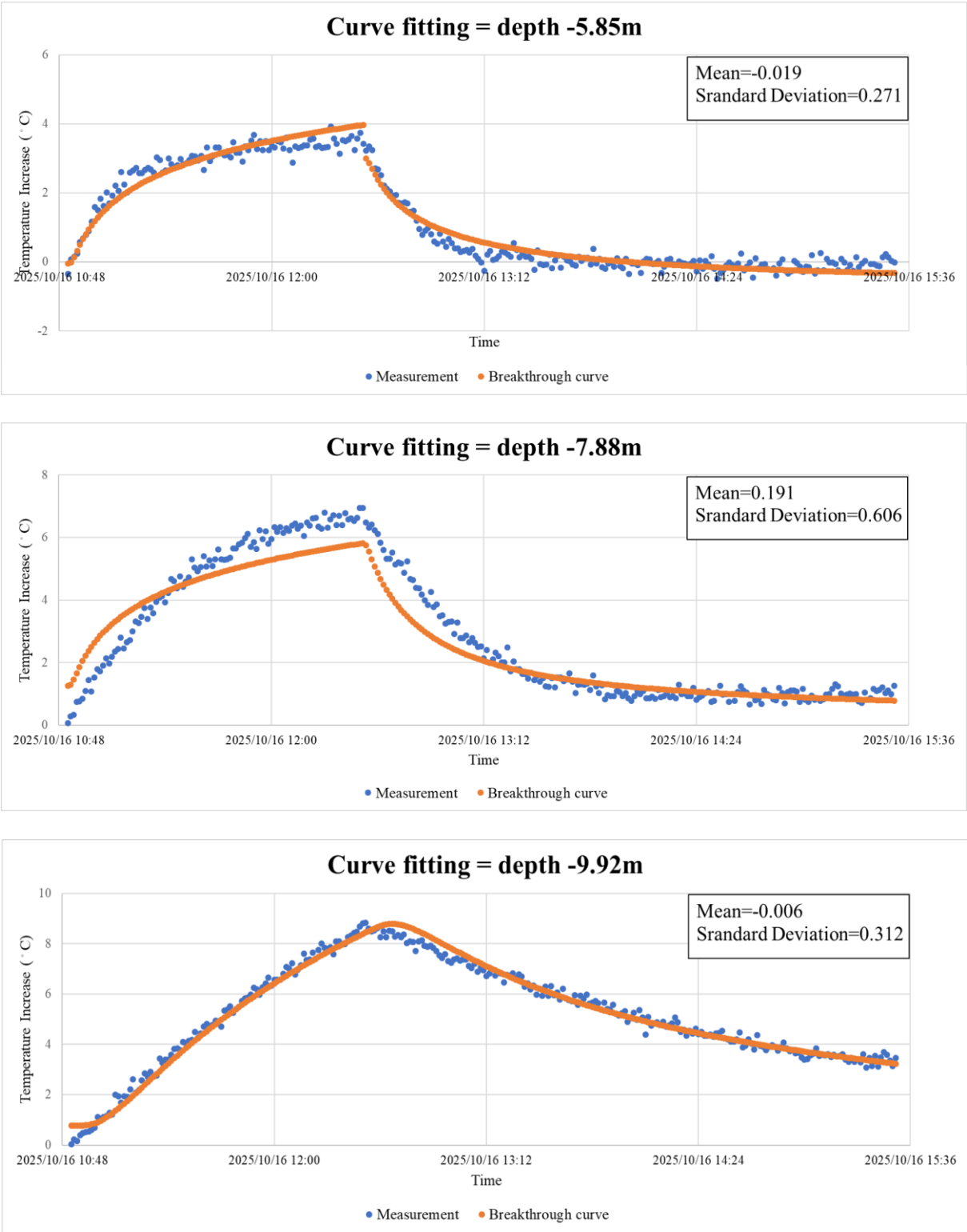


整治場址數位監測與高精度污染圖層析技術於抽出處理及淋洗策略之應用

表 11 TW-03 線性加熱試驗熱流狀態評估

取樣深度	加熱反應	回溫反應	狀態評估
5.85m	在加熱啟動後最早出現升溫；但峰值不極端。	停熱後降溫最快、曲線斜率大。	此處受井內循環影響最大，流體交換活躍、等效流速偏快，熱量不易滯留，因此不會形成高溫長尾，屬於沖刷帶、高交換帶。
7.88m	升溫明顯但峰值仍屬中等。	冷卻速度仍快於深層，尾巴不長。	相對 5.85 m 稍弱，但仍屬交換偏強區；可能反應濾管有效開口，等效流速偏快，不構成熱堆積。
9.92m	在加熱期內迅速升至高溫，峰值高且維持時間長。	停熱後降得慢、呈長尾。	典型熱滯留帶，當地流速最慢、交換係數最低，熱量無法被迅速帶走而積聚，是本井的第一個慢流指標層。
11.44m	會升溫，但峰值較 9.92、12.97 m 低。	冷卻率介於淺層與熱核心帶之間。	此處多為循環回流的通道或半開放交換帶，具一定移流、對流，故不出現極端熱堆積，等效流速中等。
12.97m	在加熱期內形成高度顯著的高溫帶。	停熱後溫度維持偏高很久，長尾最明顯之一。	與 9.92 m 性質相同，屬於慢流/弱交換區；可能對應細粒層、半封閉段，為第二個慢流指標層。
13.73m	峰值不一定比 12.97 m 更高，但降溫特別慢、拖尾長。	同等時間窗內溫度回復最慢之一。	井最深端常作為井內循環的下沉端、滯留端，局部置換效率低，熱被困住，此處可視為最慢流的尾端區。

五、結果與討論





整治場址數位監測與高精度污染團層析技術於抽出處理及淋洗策略之應用

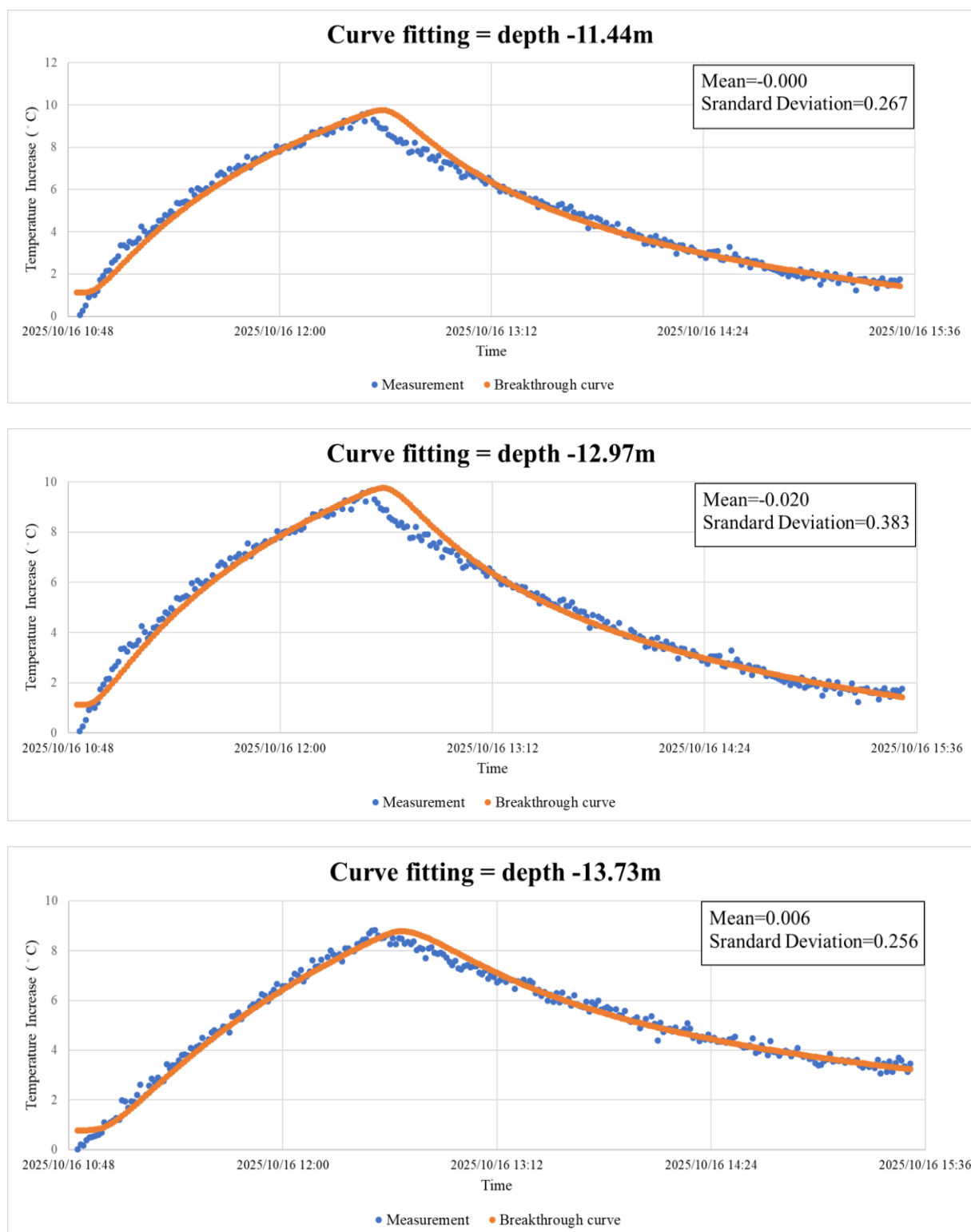


圖 32 加熱試驗各深度之溫度穿透曲線與平均值、標準差



TW-03 井的加熱試驗結果顯示，地下水流速隨深度明顯遞減（如表 12 及圖 33 所示），從上部 -5.85 m 的 4.77×10^{-6} m/s（約 0.413 m/day）逐步降低至底部 -13.73 m 的 4.91×10^{-8} m/s（約 0.004 m/day），垂向分佈呈現典型的含水層-阻水層結構變化，顯示在上部地層中存在明顯的高滲透性導水層，而下部則轉為低滲透層，地下水流流動受限。從流速-深度曲線（圖 33）可觀察出兩個主要轉折，其一在 -9 至 -10 m 附近，流速由中等值明顯下降；其二在 -12 m 以後，流速急劇衰減至 10^{-7} m/s 等級以下，顯示此區已接近黏土或粉砂層的導水下限。在 -5.85 m 位置，流速高達 4.77×10^{-6} m/s，對應於主要的含水層範圍，推測地層以礫石及粗砂為主，孔隙連通性高，具良好導水能力。根據 Freeze and Cherry（1979）與 Fetter（2001）的滲透係數經驗值，該流速範圍對應水力傳導係數 K 約在 10^{-3} 至 10^{-2} m/s 之間，顯示此深度具強導水性，是地下水主要的水平流通通道，也可能是場址中最有效的補注層或抽水影響層。進入 -7.88 m 深度時，流速下降至 3.38×10^{-6} m/s（約 0.292 m/day），但仍屬活躍的滲流範圍，地層岩性可推測為粗砂與中砂混層，屬於良好導水層，孔隙結構尚具連續性，該深度仍可視為主要流通帶的一部分，可能受地層粒度變化或局部結構界面影響而略有衰減。由流速變化可知，地下水於此區段仍呈穩定水平流動，未出現明顯阻水現象。

至 -9.92 m 深度，流速明顯降至 1.49×10^{-6} m/s（約 0.129 m/day），顯示水流運動受到地層細化之影響。根據經典水文地質資料（Domenico and Schwartz, 1990），此範圍的流速通常對應於中砂夾細砂層或粉砂過渡層，導水性較上層為低，但仍維持一定的水平流動。這樣的層位在現地沉積環境中常屬過渡相或微環境變化造成的顆粒級配差異，其水力傳導係數推估約為 10^{-5} 至 10^{-4} m/s，水流雖緩慢但仍具滲透傳導能力。在 -11.44 m 深度，流速為 1.80×10^{-6} m/s（約 0.155 m/day），數值略高於前一深度，顯示局部層內仍存在可導水的通道。地層岩性推定為細砂與粉砂混層，此種層位常見於含水層下部的相對細粒沉積環境中，水流可能沿特定細粒層間的孔隙或微裂隙流動。該層的流速介於中低滲透範圍，顯示水流通道逐漸收斂，流體交換減弱。

自 -12.97 m 起，流速急劇下降至 3.07×10^{-7} m/s（約 0.0265 m/day），導水性顯著降低。依據 Fetter（2001）及 Kruseman and de Ridder（1990）的滲透性分級，此流速對應於粉砂-黏土層之典型範圍，孔隙細小且連通性差，主要以緩慢滲流為主，此層可視為含水層的下界面，對垂向水流具有明顯阻滯作用，亦可能構成局部隔水層。至最下部 -13.73 m，流速僅 4.91×10^{-8} m/s（約 0.004 m/day），為全井中最低值，顯示幾乎無可偵測的對流流動。該區岩性推斷為黏土層，孔隙度雖高但孔徑極小，滲透性低於 10^{-7} m/s，屬於典型隔水層或滯留層。此層的存



整治場址數位監測與高精度污染圖層析技術於抽出處理及淋洗策略之應用

在對上部含水層形成自然封閉作用，可防止污染物或注入水的向下滲透，亦對區域地下水流系形成邊界控制。除材料影響外，亦可能為井底淤砂導致熱量無法有效移流而導致積熱效應。

綜合整體分佈，TW-03 的流速曲線呈現上高下低的趨勢，顯示地下水運動主要集中於 -6 至 -10 m 之間。上部礫砂層具有明顯的高導水性，為主要流通層；中部細砂—粉砂層則為過渡帶，導水性中等；而下部粉砂—黏土層則形成低導水區。這樣的垂向變化符合典型沖積層沉積體構造，由上部河道沉積的粗顆粒物質過渡至下部泛洪層的細粒沉積。此現象亦反映了區域含水層的分層特性：上層具快速水力反應，下層則以緩慢滲透與封閉行為為主。綜合上述，TW-03 井的加熱試驗結果成功揭示了地下水流速與地層材質之間的高度對應性。流速值與礫砂、砂、粉砂及黏土的典型水力傳導係數範圍吻合（參照表 12），顯示量測結果具有良好的地質合理性。

表 12 TW-03 加熱試驗各深度推估流速

深度 (m)	流速 (m/s)	流速 (m/day)	主要地質材料判釋
5.85	4.777E-06	0.413	礫石、粗砂
7.88	3.377E-06	0.292	粗砂、中砂
9.92	1.488E-06	0.129	細砂、粉砂、黏土
11.44	1.796E-06	0.155	細砂、粉砂
12.97	3.072E-07	0.0265	粉砂、黏土
13.73	4.911E-08	0.00424	黏土



五、結果與討論

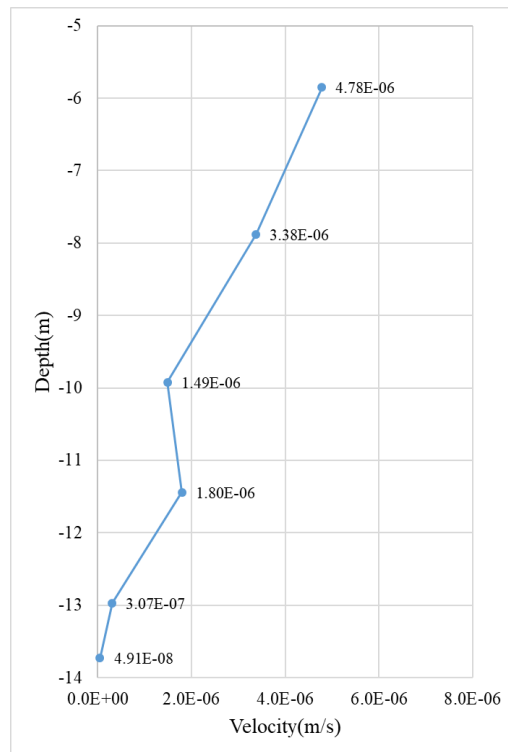


圖 33 TW-03 加熱試驗各深度之溫度穿透曲線推估地下水流速



5-5 整治工作回饋與改善

本場址依照本次試驗成果，針對現地整治工作有以下回饋與改善調整：

抽水處理策略：採用循環抽水（Pump-and-Recirculation）模式，針對污染熱區進行定點反覆抽灌。選定一口或數口污染嚴重井作為整治井（可利用既有監測井），在該井進行週期性的抽出一處理一回灌操作。此內循環作法可在場內形成一個局部水流循環迴路，一方面抽出降低了局部水壓，促進污染水向井內流動；另一方面回灌補充經處理的潔淨水，可在場內沖稀殘餘污染並推動藥劑在孔隙介質中流動。如此反覆多次循環，使污染熱區的地下水得到高頻次更換（例如當北側中 T 區捕集寬度不足時，建議提升 PW-06 啟泵頻率並在中低 T 交界新增邊界抽水點）。同時，在每次循環過程中持續監測抽出水的污染物濃度變化，作為整治進展指標。此 Push-Pull 循環抽水策略能大幅增加污染區域的水交換速率，比自然地下水流動快許多倍，有助於突破低滲區的滯留瓶頸，將沉積污染物儘快帶離原位。

藥劑淋洗設計：在操作上，可對目標污染井執行多輪單井 Push-Pull 淋洗循環。每輪包含藥劑推送、藥劑滯留與藥劑抽提等三個階段：首先在井中注入預先調配的處理藥劑（推階段），藉由壓力將藥劑推入含水層孔隙，使其與土壤/地下水中的重金屬污染發生螯合、置換等化學作用。為提高淋洗對不同深度污染的覆蓋，本方案在必要時可採用分層注入技術：例如利用封隔器在污染層特定深度（如 7-8 m 黏土層上緣、10-12 m 砂層）分段注入藥劑，以確保各主要污染層面都受到藥劑沖刷。多輪循環淋洗後，再對該井及鄰近區域地下水進行監測評估，如污染濃度顯著下降則可轉移下一熱區重複此方法，逐點去除不同深度污染物，也能降低藥劑損耗與浪費。

最後透過「傳輸監測系統+展示決策平台」之整體架構，場址整治管理正式由傳統紙本文書與點狀量測，邁入數位治理（Digital Governance）與智能監控（Intelligent Monitoring）的新階段。這些創新手段將有助於提早識別污染再升高的風險（例如透過異常導電度或 pH 變化預警），並及時調整抽水或注藥策略。未來潛在的整治效益在於：透過分區分層施策（高傳導區強化抽水控制、低傳導區加強藥劑沖提）可以更全面地消滅殘留污染，縮短達標時間。同時，多重技術的整合（抽出處理+現地淋洗+監測預測）將降低整治不確定性。



參考文獻

- [1] Anderson, M. P. (2005). Heat as a ground water tracer. *Ground Water*, 43 (6), 951–968.
<https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2005.00052.x>
- [2] Anibas, C., Kukral, J., Possemiers, M., and Huysmans, M. (2022). Characterizing groundwater heat transport in a complex lowland aquifer. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26 (21), 5577–5602.
<https://doi.org/10.5194/hess-26-5577-2022>
- [3] Alghamdi, A. M., Khairullah, E. F., and Al Mojamed, M. M. (2022). LoRaWAN performance analysis for a water monitoring and leakage detection system in a housing complex. *Sensors*, 22 (19), 7188.
<https://doi.org/10.3390/s22197188>
- [4] APSENSING,
<https://www.apsensing.com/en/technology-and-products/distributed-temperature-sensing>
- [5] Bear, J., and Braester, C. (1972). On the flow of two immiscible fluids in fractured porous media. In *Developments in soil science* (Vol. 2, pp. 177-202). Elsevier.
- [6] Bohling, G. C., Liu, G., Knobbe, S. J., Reboulet, E. C., Hyndman, D. W., Dietrich, P., and Butler, J. J. (2012). Geostatistical analysis of centimeter-scale hydraulic conductivity variations at the MADE site. *Water Resources Research*, 48 (2), W02525.
<https://doi.org/10.1029/2011WR010791>
- [7] Blume, T., Krause, S., Meinikmann, K., and Lewandowski, J. (2013). Upscaling lacustrine groundwater discharge rates by fiber-optic distributed temperature sensing. *Water Resources Research*, 49 (12), 7929–7944.
<https://doi.org/10.1002/2012WR013215>
- [8] Carslaw, H. S., and Jaeger, J. C. (1959). *Conduction of heat in solids*, Clarendon.
- [9] Constantz, J. (2008). Heat as a tracer to determine streambed water exchanges. *Water Resources Research*, 44 (4), W00D10.
<https://doi.org/10.1029/2008WR006996>
- [10] Cardiff, M., Barrash, W., Kitanidis, P. K., Malama, B., Revil, A., Straface, S., and Rizzo, E. (2009). A potential-based inversion of unconfined steady-state hydraulic tomography. *Ground Water*, 47 (2), 259–270.



- <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2008.00541.x>
- [11]Cardiff, M., Barrash, W., and Kitanidis, P. K. (2012). A field proof-of-concept of aquifer imaging using 3-D transient hydraulic tomography with modular, temporarily-emplaced equipment. *Water Resources Research*, 48 (5), W05531. <https://doi.org/10.1029/2011WR011704>
- [12]Civil IoT Taiwan. (2024–2025). Data service platform [Datasets, API docs, dashboards]. <https://ci.taiwan.gov.tw/dsp/>
- [13]Drost, W., Klotz, D., Koch, A., Moser, H., Neumaier, F., and Rauert, W. (1968). Point dilution methods of investigating ground water flow by means of radioisotopes. *Water resources research*, 4 (1), 125-146. <https://doi.org/10.1029/WR004i001p00125>
- [14]Domenico, P. A., and Schwartz, F. W. (1990). *Physical and Chemical Hydrogeology*. Wiley.
- [15]Desilets, S. L., Ferre, T. P. A., and Troch, P. A. (2022). Using heat as a tracer to detect the development of the recharge plume beneath an ephemeral river. *Hydrology*, 9 (1), 14. <https://doi.org/10.3390/hydrology9010014>
- [16]Environmental Protection Agency. (2025, January 24). EPA QA/R-5: *EPA requirements for quality assurance project plans*. <https://www.epa.gov/quality/epa-qar-5-epa-requirements-quality-assurance-project-plans>
- [17]Environmental Protection Agency. (2025, October 1). *Quality assurance project plan (QAPP) guidance*. <https://www.epa.gov/quality/quality-assurance-project-plan-qapp-guidance>
- [18]ESdat. (n.d.-a). Field programs—Field data capture (groundwater, surface water, soil, landfill gas). <https://esdat.net/field-programs/> ESdat
- [19]ESdat. (n.d.-b). Field portal and field app. <https://esdat.net/supportdocs/field-portal-and-field-app/> ESdat
- [20]ESdat. (n.d.-c). LSPECS—Field program management. <https://support.esdat.net/lspcs.aspx>
- [21]Freeze, R. A., and Cherry, J. A. (1979). *Groundwater* prentice-hall. Englewood Cliffs, NJ, 176, 161-177.
- [22]Fetter, C. W. (2001). *Applied hydrogeology*, 4th edn. Prantice-Hall. Inc., New



- Jersey, p 621p.
- [23]Gustafsson, S. E. (1991) . Transient plane source techniques for thermal conductivity and thermal diffusivity measurements of solid materials. Review of scientific instruments, 62 (3) , 797-804.
<https://doi.org/10.1063/1.1142087>
- [24]Hausner, M. B., Suárez, F., Glander, K. E., Van de Giesen, N., Selker, J. S., and Tyler, S. W. (2011) . Calibrating single-ended fiber-optic Raman spectra distributed temperature sensing data. Sensors, 11 (11) , 10859-10879.
<https://doi.org/10.3390/s111110859>
- [25]Hess, A. E. (1986) . Identifying hydraulically conductive fractures with a slow-velocity borehole flowmeter. Canadian Geotechnical Journal, 23 (1) , 69-78.
<https://doi.org/10.1139/t86-008>
- [26]Horsburgh, J. S., Lippold, K., and Slaugh, D. L. (2025) . Adapting OGC's SensorThings API and data model to support data management and sharing for environmental sensors. Environmental Modelling & Software, 183, 106241.
<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2024.106241>
- [27]Irvine, D. J., Cranswick, R. H., Simmons, C. T., Shanafield, M. A., and Lautz, L. K. (2015) . The effect of streambed heterogeneity on groundwater-surface water exchange fluxes inferred from temperature time series. Water Resources Research, 51 (1) , 198–214.
<https://doi.org/10.1002/2014WR015769>
- [28]Interstate Technology & Regulatory Council. (n.d.) . Environmental data management (EDM) best practices.
<https://edm-1.itrcweb.org/>
- [29]Illman, W. A., Berg, S. J., and Yeh, T. C. J. (2019) . Transient hydraulic tomography analysis of fourteen pumping tests at a highly heterogeneous multiple aquifer–aquitard system. Water, 11 (9) , 1864.
<https://doi.org/10.3390/w11091864>
- [30]Kruseman, G. P., De Ridder, N. A., and Verweij, J. M. (1970) . Analysis and evaluation of pumping test data (Vol. 11, p. 200). Wageningen, The Netherlands: International institute for land reclamation and improvement.
- [31]Klepikova, M. V., Wildemeersch, S., Hermans, T., Jamin, P., Orban, P., Nguyen, F., Brouyère, S., and Dassargues, A. (2016) . Heat tracer test in an alluvial aquifer: Field experiment and inverse modelling. Journal of Hydrology, 540, 812–823.



- <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.06.062>
- [32]Leaf, A. T., Hart, D. J., and Bahr, J. M. (2012). Active thermal tracer tests for improved hydrostratigraphic characterization. *Ground Water*, 50 (5), 726–735.
<https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2012.00913.x>
- [33]Mao, D., Yeh, T. C. J., Wan, L., Hsu, K. C., Lee, C. H., and Wen, J. C. (2013). Joint interpretation of sequential pumping tests in unconfined aquifers. *Water Resources Research*, 49 (4), 1782–1796.
<https://doi.org/10.1002/wrcr.20129>
- [34]Ministry of Environment (Taiwan). (2018, April 30). IoT smart enforcement application wins 2018 Smart City award.
<https://www.moenv.gov.tw/en/news/press-releases/6541.html>
- [35]Ministry of Environment (Taiwan). (2024, May 8). Ministry of Environment honored with Smart 20 Award... [Press release].
<https://www.moenv.gov.tw/en/news/press-releases/21701.html>
- [36]Ministry of Environment (Taiwan). (2024–2025). 環境物聯網(Environmental IoT platform).
<https://iot.moenv.gov.tw/iot/>
- [37]Mastrocicco, M., Busico, G., and Colombani, N. (2019). Combined use of heat and saline tracer to estimate aquifer properties in a lucustrine aquifer system. *Journal of Hydrology*, 573, 78–89.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.03.048>
- [38]Minutti, C., Illman, W. A., and Gomez, S. (2020). A new inverse modeling approach for hydraulic conductivity estimation based on Gaussian mixtures. *Water Resources Research*, 56 (8), e2019WR026531.
<https://doi.org/10.1029/2019WR026531>
- [39]Open Geospatial Consortium. (2021). OGC SensorThings API Part 1: Sensing (v1.1, OGC 18-088).
<https://docs.ogc.org/is/18-088/18-088.html>
- [40]Pires, L. M., Gomes, J. (2024). River water quality monitoring using LoRa-based IoT. *Infrastructures*, 8 (6), 127.
<https://www.mdpi.com/2411-9660/8/6/127> MDPI
- [41]Rosenberry, D. O., Sheibley, R. W., Cox, S. E., Simonds, F. W., and Naftz, D. L. (2013). Temporal variability of exchange between groundwater and surface water based on high-frequency direct measurements of seepage at the sediment-water interface. *Water Resources Research*, 49 (5), 2975–2986.



- <https://doi.org/10.1002/wrcr.20198>
- [42]Read, T., Bense, V. F., and Bour, O. (2022). Heat tracing in a fractured aquifer with injection of hot and cold water. *Groundwater*, 60 (2), 285–296.
<https://doi.org/10.1111/gwat.13157>
- [43]Ren, S., Mao, D., Zha, Y., Zhao, Z., Yeh, T. C. J., and Wen, J. C. (2023). Three-dimensional hydraulic tomography analyses to investigate commingling issues of reproducibility, data density, and geological prior models. *Journal of Hydrology*, 616, 128809.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128809>
- [44]Ren, S., Mao, D., Yeh, T. C. J., Zhao, Z., Zha, Y., and Wen, J. C. (2020). The importance of fracture geometry and matrix data on transient hydraulic tomography in fractured rocks: Analyses of synthetic and laboratory rock block experiments. *Journal of Hydrology*, 588, 125066.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125066>
- [45]Stallman, R. W. (1965). Steady one-dimensional fluid flow in a semi-infinite porous medium with sinusoidal surface temperature. *Journal of Geophysical Research*, 70 (12), 2821–2827.
<https://doi.org/10.1029/JZ070i012p02821>
- [46]Stopa, J., and Wojnarowski, P. (2006). Analytical model of cold water front movement in a geothermal reservoir. *Geothermics*, 35 (1), 59-69.
<https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2005.11.002>
- [47]Sommer, W., Herbst, H., Scheytt, T., and Stummeyer, J. (2013). Heat as a groundwater tracer in shallow and deep heterogeneous media: Analytical solution, spreadsheet tool, and field applications. *Ground Water*, 51 (5), 768–779.
<https://doi.org/10.1111/gwat.12002>
- [48]Sellwood, S. M., Hart, D. J., and Bahr, J. M. (2015). An in-well heat-tracer-test method for evaluating borehole flow conditions. *Hydrogeology Journal*, 23 (8), 1817–1830.
<https://doi.org/10.1007/s10040-015-1305-9>
- [49]Somogyvári, M., Bayer, P., and Brauchler, R. (2016). Travel-time-based thermal tracer tomography. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20 (5), 1885-1901.
<https://doi.org/10.5194/hess-20-1885-2016>
- [50]Syed Taha, S. N., Abu Talip, M. S., Mohamad, M., Azizul Hasan, Z. H., and Tengku Mohmed Noor Izam, T. F. (2024). Evaluation of LoRa network performance for water quality monitoring systems. *Applied Sciences*, 14 (16),



7136.

<https://www.mdpi.com/2076-3417/14/16/7136> MDPI

- [51]U.S. Geological Survey. (2019, March 4) . National Ground-Water Monitoring Network (NGWMN) data portal.

<https://www.usgs.gov/tools/national-ground-water-monitoring-network-ngwmn-data-portal> USGS

- [52]U.S. Geological Survey. (n.d.) . National Ground-Water Monitoring Network (NGWMN) [About portal].

<https://www.usgs.gov/apps/ngwmn/> USGS

- [53]Wagner, V., Bayer, P., Kübert, M., and Blum, P. (2014) . Hydraulic characterization of aquifers by thermal response testing: Validation by large-scale laboratory and field experiments. *Water Resources Research*, 50 (1) , 71–85.

<https://doi.org/10.1002/2013WR014047>

- [54]Wang, Y., Yeh, T. C. J., Wen, J. C., Zhao, Z., Zha, Y., and Tso, C. H. (2021) . On the identification of the aquifer boundary conditions using hydraulic tomography. *Journal of Hydrology*, 593, 125883.

<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125883>

- [55]Xiang, J., Yeh, T. C. J., Lee, C. H., Hsu, K. C., and Wen, J. C. (2009) . A simultaneous successive linear estimator and a guide for hydraulic tomography analysis. *Water Resources Research*, 45 (2) , W02432.

<https://doi.org/10.1029/2008WR007180>

- [56]Yeh, T. C. J., Gutjahr, A. L., and Jin, M. (1995) . An iterative cokriging-like technique for ground-water flow modeling. *Ground Water*, 33 (1) , 33–41.

<https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1995.tb00259.x>

- [57]Yeh, T. C. J., Jin, M., and Hanna, S. (1996) . An iterative stochastic inverse method: Conditional effective transmissivity and hydraulic head fields. *Water Resources Research*, 32 (1) , 85–92.

<https://doi.org/10.1029/95WR02869>

- [58]Yeh, T. C. J., and Liu, S. (2000) . Hydraulic tomography: Development of a new aquifer test method. *Water Resources Research*, 36 (8) , 2095–2105.

<https://doi.org/10.1029/2000WR900114>

- [59]Zhu, J., and Yeh, T. C. J. (2005) . Characterization of aquifer heterogeneity using transient hydraulic tomography. *Water Resources Research*, 41 (7) , W07028.

<https://doi.org/10.1029/2004WR003790>

- [60]Zhu, J., and Yeh, T. C. J. (2006) . Analysis of hydraulic tomography using



參考文獻

temporal moments of drawdown recovery data. Water Resources Research, 42(2), W02403.

<https://doi.org/10.1029/2005WR004309>

- [61] 佶鼎科技股份有限公司土壤及地下水污染整治計畫（第一次變更），第五次半年執行進度報告暨 113 年第二季進度報告。裕山環境工程股份有限公司，2024。