上傳時間：2025年12月12日下午 03:39

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

建立地下水 LNAPL 傳導係數分析方法與優化抽除效率(第二年)

成果報告(定稿)

主　辦　單　位　：　環境部環境管理署
專 案 執 行 單 位　：　淡江大學學校財團法人淡江大學／水資源及環境工程學系
專　案　主　持　人　：　張麗秋 教授
專 案 執 行 期 間　：　113 年 12 月 13 日起至 114 年 11 月 30 日止

中 華 民 國 114 年 12 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：張麗秋	NO：
計畫名稱	建立地下水 LNAPL 傳導係數分析方法與優化抽除效率(第二年)		

審查意見	執行單位回覆
委員一 1. 本計畫「建立地下水LNAPL傳導係數分析方法與優化抽除效率(第二年)」為模場型第二年度研發專案，已完成模場試驗(浮油提取試驗)及浮油 T 值估算等項主要研發工作，相關成果已於期末報告詳述，期末報告內容與成果符合計畫之預定進度、目標。 2. 本計畫浮油 T 值估算，提供油料污染場址有利技術工具，可有效增加浮油回收效益；建議後續可累積更為多元特性場址之實際應用經驗，進一步修訂、調整應用及操作模式。 3. 本計畫所建立之「地下水LNAPL抽除效率優化技術」有益於提升場址整治成效、縮短期程及降低成本，建議可推廣至合適之場址。	1. 感謝委員肯定。 2. 感謝委員肯定，本團隊將依循委員建議，未來會將本計畫所建立的提取試驗與 T 值計算方式，應用至不同類型之污染場址進行實證，藉此累積多元操作經驗，並持續優化與調整試驗方法及應用流程，使本技術工具更加完善。 3. 感謝委員肯定，本團隊將積極配合環管署的需求，未來會將此優化技術之操作模式與成功經驗，透過技術說明會或研討會等形式進行分享與推廣。
委員二 1. 計畫進度符合原定目標。 2. 專案基本資料表，主持人未簽名或蓋章。 3. 本計畫建立本土LNAPL提取試驗操作手冊，使現場操作標準化，提升數據可靠性。 4. 實驗結果顯示 Tn 值大，有提升回收效率，運用在整治初期，降低風險具有明顯效果。	1. 感謝委員肯定。 2. 感謝委員提醒，已於定稿本之專案基本資料表補上主持人印章及學校大小印章。 3. 感謝委員肯定。 4. 感謝委員肯定，誠如委員所述，試驗結果確實驗證了在 Tn 值較大的情況下，對於提升油品回收效率具有顯著助益，未來在推廣此項技術時，將特別強調其適用於整治初期的優勢，利用其可快速提升回收效率的特性，達到迅速降低場址污染風險的目的。

委員三 1. 本計畫將以概念模型及數值模型推估 LNAPL 釋放的速率和體積，應可產生更準確的模擬結果。 2. 請補充本案 LNAPL 污染物之密度、黏度相關數據，並與表 5-5 的數據比較。 3. 請補充豐水期及枯水期地下水位的位置(影響提取試驗 T 值計算)。 4. 油品對土壤顆粒間的膠結作用對相關模擬分析的影響應補充說明。	1. 感謝委員肯定，本計畫依原先規劃已完成概念模型及數值模型之建置與模擬。 2. 表 5-5 即為本計畫現場採樣與分析之 LNAPL 污染物密度、黏度相關數據成果，經評估後 LNAPL 污染物與台灣中油股份有限公司公佈之車用超級柴油規範 (15℃ 密度 820~845 kg/m^3 、40℃ 黏度 2.0~4.5 mm^2/s)較為接近。 3. 感謝委員建議，已於表 5-3、表 5-4 補上豐枯水期之地下水深度。 4. 感謝委員指出油品可能對土壤顆粒間膠結作用及孔隙結構造成影響，此一現象在細粒土或高黏土含量介質中確實可能改變局部水力特性。本計畫採用 LDRM 進行井尺度之等效介質模擬，油品對土壤顆粒膠結與孔隙結構之影響未另行個別模擬，而整合反映於等效傳導係數設定中。透過不同傳導係數情境分析，已間接涵蓋油品造成孔隙阻塞或流動受阻等水力行為差異，其中低傳導係數條件可視為保守之整治評估。
委員四 1. 建議在長期的整治作業規劃中,必須將水文條件的季節性變化納入考量,特別是在枯水期污染物濃度累積時,應評估是否需調整抽取頻率或速率,以最大化污染物移除量。 2. 建議操作手冊持續根據不同場址的實務經驗進行滾動式修正,特別是針對 2 吋監測井與 4 吋整治井在不同油層厚度下的操作限制與注意事項,其標準化流程(SOP)具備跨場址的適用性及可靠性。 3. 若浮油厚度低於 LNAPL 回收臨界值(如可回收厚度),需評估轉向其他修復技術,抑或有其他技術等建議。	1. 感謝委員建議，本團隊將依循委員建議，未來在整治作業中，將持續監測枯水期污染物濃度的累積情形，並建立動態調整機制，根據水位與濃度變化即時評估調整抽取頻率或速率，以確保污染物移除量最大化。 2. 感謝委員建議，本團隊將依循委員建議，未來會將本計畫所建立的提取試驗與 T 值計算方式，應用至不同類型之污染場址進行實證，藉此累積多元操作經驗，並持續優化與調整試驗方法及應用流程，使本技術工具更加完善。 3. 感謝委員建議，本計畫的核心目的是著重於優化與提升現有 LNAPL 抽除技術在有效回收期內的效率與效益。因此，本計畫的技術研發與驗證，主要適用於浮油厚度高於可回收臨界值(大於 15 公分)的情況。

委員五 **1.** 本計劃建立地下水 LNAPL 傳導係數，應用價值極高。	**1.** 感謝委員肯定。

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：王聖瑋	NO：
計畫名稱	建立地下水 LNAPL 傳導係數分析方法與優化抽除效率(第二年)		

審查意見	執行單位回覆
委員一 **4.** 計畫進度符合預期目標。 **5.** 完成篩選合適監測井或整治井進行試驗，並以不同解析方程式計算 T 值。 **6.** 圖 4-2 試驗場址周邊監測井分布，請增加標示整治井 W02、W16 的位置。 **7.** 豐水期同時採樣 W-07 井分析 TPH 值高，但密度、黏度並無相同情形，有無探討。 **8.** P5-6 頁說明豐水期地下水流動快，污染分散 TPH 濃度低，枯水期水流動慢，故濃度高。但是 W06、W07 豐、枯水期監測結果不同?	**4.** 感謝委員肯定。 **5.** 感謝委員肯定，本計畫期中報告已依執行進度完成預定工作項目。 **6.** 已於成果報告增加圖 4-2 之整治井位置。 **7.** 本計畫第一年(豐水期)採樣在密度與黏度是以採集水樣為主，主要確認地下水當中的密度與黏度，詳見表 5-5 備註說明。 **8.** 感謝委員的提醒，在本計畫地下水 TPH 採樣結果，W-07 確實在枯水期濃度反而下降，這和一般認知的枯水期污染物容易累積的情況不同。然而，由於本場址目前仍有進行地下水整治作業，現地抽水處理可能會影響地下水流動，導致污染物重新分布。因此，W-07 濃度下降可能與整治過程中的水流變化有關，而不是污染改善的結果。
委員二 **5.** 本計畫「建立地下水LNAPL傳導係數分析方法與優化抽除效率(第二年)」為模場型第二年度研發專案，期中報告已完成:篩選模場試驗場址中井徑較大且具油厚之整治井進行提取試驗及以不同解析解方程式計算提取試驗 T 值結果等項工作，相關細節已於期中報告詳述。 **6.** 期中報告成果中進行有關各監測井 T 值估算、地質水文分析、地下水豐枯水期水質監測分析及浮油回收效益模擬等相關成果有利	**5.** 感謝委員肯定，本計畫綜合比較取試驗 T 值計算結果，並提出 B&R、C&J、CB&P 等三種方法的優劣。 **6.** 感謝委員肯定，本計畫透過現地提取試驗並應用不同的解析方程式求得之LNAPL之傳導係數，另為了解 T 值估計的誤差對於 LNAPL 移動傳輸的影響程度，本計畫亦應用地下水污染傳輸模式進行情境模擬與探討，並提供 LNAPL 抽除方案評估建議。 **7.** 感謝委員肯定，本計畫持續依預定期程辦理相關工作。 **8.** 感謝委員肯定，本計畫研究預期效益包括研

於後續技術開發與應用之潛力。 **7.** 依據期中報告所示之執行內容與期程，整體進度符合原計畫之規劃進度。 **8.** 本計畫後續將執行數值模型建立、本土化提取試驗標準操作文件建立及整治效益分析等項目；完成後應有助於油料污染場址優化浮油回收操作及場址改善成效。	提未來LNAPL抽除整治方法之相關操作參數的建議及標準化文件，藉以評估LNAPL抽除過程可持續優化之操作參數，提升LNAPL污染整治效益。
委員三 **5.** 前年計畫有提及會建立「提取試驗標準操作文件」，建議研究團隊於本年度計畫執行時，滾動修正。另兩年度執行之過程，已調整或修正處，亦可於報告中呈述。 **6.** 期中報告第 6 頁，先期技術成果移轉已於第一年完成技轉，但查 P5 研發技術轉移之該項於備註撰寫本年度辦理，請說明。	**1.** 本計畫已於成果報告提出「提取試驗(Bail-down test)操作手冊」，另關於本計畫兩年期計畫執行內容，詳見成果報告第 4.1 節說明。 **2.** 本計畫之第一年先期技術成果已於 114 年 5 月 27 日由本校發函送交環管署(校研字第 1140007978 號)，並於 114 年 5 月 29 日經環管署同意備查(環管土字第 1147008482 號)。委員所提第 6 頁內容為計畫書中所列之「預期量化成果」，屬原規劃項目，並非實際執行狀況，關於本計畫實際執行情形，敬請參閱第 3~5 頁之「專案成果績效自評表」。
委員四 **4.** 本研究第二年計劃已經進行到數值模擬的建立，值得肯定。 **5.** 污染場址發現有純相浮油時及時抽除是應變的第一步，若能了解 T 值則可決定抽出時間、抽出時段、還有抽出的馬力等關鍵參數。	**4.** 感謝委員肯定。 **5.** 感謝委員肯定，如能掌握 T 值將有助於判斷浮油抽除的時機與所需抽出功率等關鍵參數，對應變策略的規劃具實質意義。本計畫亦以此為主要研究目標之一，藉由分析提取試驗資料解析解之 T 值，並比較不同解析方程式之便利性與合宜性，提出適合推估 LNAPL 之 T 值之提取試驗應用與限制。
委員五 **2.** 本研究研究程序嚴謹。 **3.** 建議補充 LNAPL 的黏度數據。表 5-5、油品密度與黏度分析結果綜整表。W06、W07 及 W10、W20 的黏度差異頗大，請補充說明。 **4.** 建議補充說明土壤的毛細孔及分布的相關數據。 **5.** 表 5-9、LNAPL 流體特性，有 LNAPL 的表面張力數據。建議根據土壤毛細孔，補充說明 LNAPL 的表面張力對於毛細現象的影	**2.** 感謝委員肯定。 **3.** 本計畫第一年(豐水期)採樣在密度與黏度是以採集水樣為主，主要確認地下水當中的密度與黏度，詳見表 5-5 備註說明。 **4.** 感謝委員建議，本計畫已補充土壤粒徑分析數據如附件四。場址土層以砂質土壤為主，粉土與黏土含量偏低，依美國土壤三角分類大致可歸類為壤質砂土(Loamy sand)。土層具一定程度的不均勻性，孔隙分布範圍廣。此特性意味毛細孔分布以中、大孔徑為主，

響。	利於流體傳輸，但局部仍可能因細顆粒而產生較強毛細作用。 **5.** 感謝委員建議，本計畫已將 LNAPL 之表面張力數據與土壤毛細孔分布進行對補充說明於 P.5-24~P.5-25。場址土壤粒徑分析顯示 D_{10} 約介於 0.009~0.037 mm，代表土層毛細孔徑多落於數十微米等級。在此尺度下，液體界面張力將顯著影響毛細壓力分布。根據表 5-9 所示，空氣/水表面張力為 72.74 dynes/cm，遠高於空氣/LNAPL (27.07 dynes/cm)與 LNAPL/水 (29.60 dynes/cm)，顯示水相在毛細孔中具有較強的毛細保持力，而 LNAPL 則相對容易受水相排斥而分布於較大孔徑區。此結果說明場址土壤中 LNAPL 主要聚集於含水層上部及毛細帶內，並與 SWCC 測得的強持水性相呼應。綜上所述，LNAPL 的表面張力特性與土壤毛細孔分布共同決定自由相存在型態與回收潛勢，已於本計畫第 5.4 節之模擬與討論當中加以考量與論述。

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：王聖瑋	NO：
計畫名稱	建立地下水 LNAPL 傳導係數分析方法與優化抽除效率(第二年)		

審查意見	執行單位回覆
委員一 請確認第二年成果"建立本土化提取試驗標準操作文件，研提未來 LNAPL 抽除整治方法之相關操作參數"內容。	本計畫將於成果報告撰寫「提取試驗標準操作文件」，內容預計涵蓋方法概要、名詞解釋、設備與材料、試驗步驟、試驗數據處理、注意事項等內容。
委員二 **1.** P.11-12，第一年計畫成果顯示煎餅模型基於浮油厚度推估體積較低(720.37 m^3)，垂直平衡模型則考慮毛細作用與飽和度梯度，估算結果為 2,829 m^3。建議在第二年計畫執行時，除應用 LDRM 數值模型修正 LNAPL 體積外，亦可考慮應用其他商業數值模型(如 STOMP、TMVOC 等)進行交叉驗證，以提升體積推估的準確性。 **2.** P.22-23，由於提取試驗(Bail-down test)的執行過程中，發現 2 吋監測井徑過小，導致設備無法同時順利安裝，且在油層厚度過薄時，容易受人工測量和環境因素影響。建議第二年執行時，應針對不同地質條件及油層厚度之 4 吋整治井進行試驗，並記錄各種試驗條件之操作限制與注意事項，以利後續標準作業流程之建立。 **3.** P.58-60，本計畫團隊目前已完成豐水期地下水檢測採樣工作，並預計在第二年執行枯水期採樣分析。建議除 TPH 檢測外，亦應加強分析油品密度、黏度等物化特性參數，並比較豐枯水期間之差異性，以提供完整的污染傳輸特性資訊，作為提升整治效率之參考依據。	**1.** 感謝委員建議，針對浮油體積估算差異的問題，本團隊後續將加強現地調查，深入了解 LNAPL 的分佈及性質。此外，本團隊將依委員的建議，應用其他模型或商業數值模型進行交叉驗證，並結合現場數據進行比較與調整，以提高推估結果的準確性，進一步提升模型的可靠性。 **2.** 本計畫在第二年執行提取試驗時，將優先與整治廠商協調篩選油厚較厚之 4 吋整治井之外，亦針對油厚較厚之 2 吋監測井進行試驗，並調整第一年作法，規劃在油位面及水位面分別放置自計式水位計，以拉長試驗期間至油水位面回復至初始值。 **3.** 感謝委員建議，本計畫將篩選辦理提取試驗之監測井或整治井，除了地下水 TPH 分析之外，亦同時分析油品之密度及黏度，以提供完整的污染傳輸特性資訊。

委員三 1. 本計畫針對 LNAPL 場址污染初期之雙相抽除工法進行純相 T 值試驗，擬改善油水比例過低問題，若能說明"整治成效"的改善機制當更佳。 2. 提高純相抽除效益有利於縮短整治期程並降低能耗，本計畫預計能降低 10%整治成本，建議說明量化的依據。 3. 本計畫擬撰寫本土化提取試驗操作手冊，若能完成並建構 SOP 當更佳。	1. 感謝委員建議，本計畫整治成效的改善機制主要是透過純相 T 值提取試驗的參數設計，如調整抽油泵抽速率及頻率，以及量測井內油/水分層比例，確保抽除效率最佳化，避免過多水相進入抽取系統。 2. 本計畫整治成本降低是指人力、設備維護、耗材成本的減少，或者作業時間縮短帶來的綜合成本節約。預計藉由蒐集整治廠商執行現況，與本計畫數值模型模擬最佳抽除效率進行比較，計算出整治成本降低之比率。 3. 本計畫期末預期產出之本土化提取試驗操作手冊，內容包含提取試驗步驟(含事前準備)與試驗數據處理。
委員四 1. 本專案為「113 年土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」，惟本計畫書多處誤繕成「112 年土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」，如封面、申請計畫書等，請重新檢視並修正。 2. 請於本報告書檢附「執行同意書」、「專案主持人聲明書」等應檢附之資料。 3. 附件 8-1 應有專案主持人之簽章，請修正。 4. 建議於「七、研究方法及步驟」內文中補充說明可能會遭遇之困難及配套措施。	1. 感謝委員細心檢視，已於申請書(修正稿)將本計畫執行年度修正為 113 年度。 2. 已於申請書(修正稿)檢附「保密切結書」、「執行同意書」、「專案主持人聲明書」、「執行專案重要規定自我檢核表」等資料。 3. 已於申請書(修正稿)檢附專案主持人之簽章。 4. 已補充可能遭遇之困難及配套措施於申請書(修正稿)當中。
委員五 1. 本計畫成果預期具有實場應用性。 2. 目前預估浮油量差異達 4 倍，如何驗證其真實量？建議可以探討。 3. 改成 4 吋井後，是否可以更準確量測？如何驗證？建議探討。	1. 感謝委員肯定。 2. 感謝委員提出浮油量預估差異的問題，這些差異源於有限的觀測數據及模型假設的問題，本團隊後續將收集更多現場數據進行比對，並進行模型的敏感性分析以優化參數，此外，還將檢查實際回收量與模型預測的匹配度。這些步驟將有助於縮小預估差異，提升結果的可靠性。 3. 本計畫第二年度篩選油厚較厚之 4 吋整治井及 2 吋監測井，並調整第一年作法，規劃在油位面及水位面分別放置自計式水位計，以拉長試驗期間至油水位面回復至初始值，此方法較第一年度可以更準確量測油位面及水位面之變化情形。
委員六 1. 宜增列第一年成果報告委員意見回覆處理情形。 2. 宜自評第一年研究成果是否達成達成預期目標？ 3. 報告少部分資料為 112 年之資料？	1. 已將第一年成果報告審查意見回覆對照表補充至申請計畫書(修正稿)「十六、第一年成果報告審查意見回覆對照表」。 2. 本計畫在第一年著重在提取試驗之文獻蒐集、現地執行流程建立、概念模型比較等，計畫執行成果皆符合預期效益，包括(1)蒐集

4. 預期研究效益和績效指標等具體明確，若能進行成本效益估算更佳？	提取試驗之參考文獻，包含方法原理、操作步驟、數據分析方法、應用限制等；(2)規劃前導試驗，以確認抽取 LNAPL 之設備可行性、操作條件等，並篩選 2 口監測井以貝勒管及整治泵等 2 種方式進行提取試驗流程；(3)採用兩種不同的現有概念模型(薄餅模型和垂直平衡模型)來估計 LNAPL 體積，並與假想場址之既有數據資料進行比較，以探討未來估算體積之適合方式；(4)發表國際研討會論文發表 1 篇(已發表至 2024 AGU，題目為 Evaluation of LNAPL Transmissivity in Aquifer for Improving Groundwater Remediation.)。 **3.** 本計畫為延續型計畫，部分資料為 112 年度執行成果，有關兩年度計畫執行內容請參照申請計畫書(修正稿)圖 2 及其說明。 **4.** 本計畫將蒐集場址內已辦理之浮油抽除數據，包括抽除井基本資料、抽除時間、抽除量、抽除油/水率等，並透過本計畫數值模型模擬最佳抽除速率與抽除時間之結果，再與現地應變計畫之結果進行比較，即可評估本計畫所貢獻之整治效益，而降低成本與能源效率之比例亦可透過模式模擬最佳整治方案時，一併計算得出量化數據。
委員七 建議針對第一年研究成果和文獻中的研究成果進行比較以作為第二年研究工作之依據	本計畫是以第一年建立提取試驗流程為基礎，篩選油厚較厚之 4 吋整治井及 2 吋監測井，並調整第一年作法，規劃在油位面及水位面分別放置自計式水位計，以拉長試驗期間至油水位面回復至初始值，藉以評估移除油品之成效。此外，有關 T 值計算方式，是參考文獻成果，採用 Generalized Bouwer and Rice (1976) (簡稱 B&R)、Cooper and Jacob (1946) (簡稱 C&J)、Cooper et al. (1967) (簡稱 CB&P)、以及 LDRM 數值模型等 4 種方法計算 T 值結果，以探討 T 值估計的誤差對於 LNAPL 移動傳輸的影響程度。
委員八 第二年計畫撰寫內容完整可行，與第一年執行內容相關與延續。	感謝委員肯定。
委員九 請依補助上限調整各項經費，並修正於申請計畫書修正稿。	已於申請書(修正稿)調整經費為核定金額。

專案基本資料表

專案性質	■實驗性質 □非實驗性質		**專案類別(單選)**	□先導型□研究型■模場型
研究主題	□調查 ■整治 □其他			
申請機構系所	淡江大學學校財團法人淡江大學			
機構地址	251301 新北市淡水區英專路 151 號			
專案主持人	張麗秋		**職等／職稱**	教授
協同主持人	王聖瑋 楊亞欣 張志誠		**職等／職稱**	助理教授 博士後研究人員 副董事長
專案名稱 **中文**	建立地下水 LNAPL 傳導係數分析方法與優化抽除效率(第二年)			
英文	Developing the analysis method of groundwater LNAPL Transmissivity for optimizing remediation efficiency			
關鍵字	地下水, LNAPL, 整治, 傳導係數, 提取試驗			
執行期程	自民國 113 年 12 月 13 日起至民國 114 年 11 月 30 日止			
專案主持人	姓名：張麗秋	E-mail：changlc@mail.tku.edu.tw		專線：(02)26250140 手機：
專兼任人員	姓名：陳嬿伃	E-mail：chenyytku@gmail.com		專線：(02)26215656#55689 手機：

經費分析總表(僅模場試驗專案需填寫兩年度金額)

	專案預估經費	**第一年金額**	**第二年金額**	**編列說明**
1.	**人事費用**	898,457	995,748	（1~5 項相加之 50%為限）
2.	**設備使用含維護費**	761,250	351,000	（與計畫實驗相關）
3.	**耗材與主要費用**	322,625	263,024	（與計畫主體相關）
4.	**其它研究相關費用**	50,868	90,228	（含差旅與租賃費用）
5.	**行政管理費**	358,800	300,000	（1~5 項相加之 15%為限）
6.	**自籌款**	0	0	（自行籌備款項）
申請補助金額(1~5 項)		**2,392,000**	**2,000,000**	**總金額：4,392,000 元**
計畫總金額(1~6 項)		**2,392,000**	**2,000,000**	**總金額：4,392,000 元**

專案主持人（簽名或蓋章）：_____ 日期：

113 年度專案成果績效自評表

一、 專案基本資料

填表日期：114 年 12 月 12 日

專案性質	■實驗性質 □非實驗性質	專案類別	□先導型□研究型■模場型
研究主題	■整治 □調查 □其他		
執行機構	淡江大學學校財團法人淡江大學 水資源及環境工程學系	專案主持人	張麗秋
專案名稱	建立地下水 LNAPL 傳導係數分析方法與優化抽除效率(第二年)		
專案執行期程	□申請階段 □期中 ■成果		

二、 成果績效自評

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

（一）學術面

項目		目標達成程度	申請預估數	期中達成數	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	0	0	0		
		(2)研討會論文	1	0	0		預計投稿國外期刊
	2.國外投稿(篇數)	(1)期刊論文	0	0	0		
		(2)國際研討會論文發表	1	1	1		已於第一年完成2024 AGU ” Evaluation of LNAPL Transmissivity in Aquifer for Improving Groundwater Remediation”
	3.報告(篇數)	(1)技術報告	0	0	0		
		(2)研究報告	0	0	0		
	4.專著 (本數)		0	0	0		
	5.辦理學術會議(場數)	(1)研討/說明會	0	0	0		
		(2)成果發表會	0	0	0		
		(3)論壇	0	0	0		
	6.研發改良技術(項數)	(1)已開發技術	0	0	0		
		(2)技術平台	0	0	0		
	7.技術獎項(項數)		0	0	0		
B 人才培育	8.研發人員 (人數)	(1)碩士	1	1	2		
		(2)博士	0	0	0		
	9.研究團隊(個數)	(1)跨領域團隊	1	1	1		以本計畫主持人負責溝通聯繫及現地試驗執行，協同主持人張志誠博士及捷博公

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）
							司負責試驗場地之溝通協調，楊亞欣博士負責模式設計與建置。
		(2)跨機構團隊	0	0	0		
		(3)形成研究中心	0	0	0		
		(4)形成實驗室	0	0	0		
10.其他指標(請自行命名)		(請自填)					

（二）產業面

項目 \ 目標達成程度				申請預估數	期中達成數	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）
A 智慧財產權	1.專利(件數)	已核准	發明	0	0	0		
			新型/設計	0	0	0		
			合計	0	0	0		
		申請中	發明	0	0	0		
			新型/設計	0	0	0		
			合計	0	0	0		
B 研發技術轉移	2.先期技術成果移轉	件數		1	0	1		已於第二年完成
		授權金(仟元)		100	0	100		已於第二年完成
		衍生利益金(仟元)		200	0	0		尚無相關衍生利益金
	3.技術移轉(專利)	件數		0	0	0		
		授權金(仟元)		0	0	0		
		衍生利益金(仟元)		0	0	0		
	4.技術移轉(應用技術)	件數		1	0	0		預計於結案後視情況辦理
		授權金(仟元)		200	0	0		預計於結案後視情況辦理
		衍生利益金(仟元)		500	0	0		預計於結案後視情況辦理
	5.可移轉產業技術	(1)技術(件數)		0	0	0		
		(2)品種/系(件數)		0	0	0		
C 產學研合作	6.促成合作研究	件數		0	0	0		
		金額(仟元)		0	0	0		
	7.促成投資	件數		0	0	0		
		投資金額(仟元)		0	0	0		
	8.促成取得業界科專	件數		0	0	0		
		業界投資金額(仟元)		0	0	0		
9.其他指標(請自行命名)		(請自填)						

（三）政策面

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（說明未達成原因或其他詳細資料）
A 服務便民	1.技術服務	次數	0	0	0		
		收入(仟元)	0	0	0		
	2.諮詢服務	次數	0	0	0		
		收入(仟元)	0	0	0		
B 政策推動	3.協助政府推動(件數)	(1)政策	0	0	0		
		(2)法規	0	0	0		
C 技術效益	4.整治技術提升(%)		10	0	25.5		計算方式如報告第5.5節
	5.整治成本降低(%)		10	0	42.6		計算方式如報告第5.5節
	6.提升能源效率(%)		10	0	119.2		計算方式如報告第5.5節
7.其他指標(請自行命名)		(請自填)					

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

學術面(如國內外研討會、期刊投稿件數、或人才培育碩博士生說明)

1. 已於 2024 年 12 月投稿至 American Geophysical Union (AGU)國際研討會論文 1 篇，發表題目為「Evaluation of LNAPL Transmissivity in Aquifer for Improving Groundwater Remediation」，並於 2025 年 3 月 6 日由環管署備查(環管土字第 1147003569 號)。
2. 已於計畫執行期間成立 1 個跨領域團隊(地下水資源-淡江大學、地質工程-成功大學、污染整治-捷博公司)。
3. 已培育 2 名碩士生(林亭佑、莊雅幃)。

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)

1. 已於 2025 年 5 月辦理先期技術成果移轉 1 件，移轉項目為「提取試驗(Bail-down test)操作手冊」，並已於 2025 年 5 月 29 日由環管署備查(環管土字第 1147008482 號)。
2. 預計在計畫完成後半年內視情況辦理技術移轉 1 件，預計移轉項目包括現地試驗、數據分析、數值模擬等成果。

政策面(如整治費用降低、特定污染物整治效益提升、或提供政府作為監測/管制標準、污染查核、場址管理等政策及法規研訂之參考)

1. 本計畫針對 LNAPL 場址污染初期之雙向抽除工法進行純相 T 值試驗，主要目的為改善油水比例過低問題，已透過整治廠商提供資料(優化前)與本計畫模式模擬結果(優化後)之油品回收量，計算出整治技術提升約 25.5%。
2. 由於提高純相抽除效益有利於縮短整治期程並降低能耗，因此本計畫透過整治廠商提供資料(優化前)與本計畫模式模擬結果(優化後)之操作人力換算整治成本與單位能耗回收效率，計算出整治成本降低約 42.6%及能源效率提升約 119.2%。

四、主要研究人力

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

姓名	服務機構/系所	職稱	在本研究專案內擔任之具體工作性質、項目及範圍	＊每月平均投入工作日數比率(%)
張麗秋 (專案主持人)	淡江大學/ 水資源及環境工程學系	教授	提供試驗結果之判定及修正建議、報告與論文之修訂建議等事項	10
王聖瑋 (協同主持人)	國立中央大學/ 土木工程學系	助理教授	提供試驗結果之判定及修正建議、報告與論文之修訂建議、撰寫國內外期刊及論文發表等事項	20
楊亞欣 (協同主持人)	國立成功大學/ 資源工程學系	博士後研究人員	協助試驗現場作業督導、模式設計與建置、撰寫國內外期刊及論文發表等事項	20
張志誠 (協同主持人)	捷博科技股份有限公司	副董事長	協助與試驗場址之溝通協調	20
陳嫿伃 (專任人員)	淡江大學/ 水環境資訊研究中心	研究助理	協助現場試驗工作規劃與聯繫、數據分析及判讀、報告撰寫、行政事務等	30
陳玟綺 (專任人員)	淡江大學/ 水資源及環境工程學系	研究助理	協助現場試驗工作、模式建置、報告撰寫、行政事務等	30
林亭佑 (臨時工)	淡江大學/ 水資源及環境工程學系	學生	協助文獻彙整、試驗結果數據分析	20
莊雅幃 (臨時工)	淡江大學/ 水資源及環境工程學系	學生	協助文獻彙整、試驗結果數據分析	20

五、產業界資源投入表

專案執行若有與產業界合作，請執行單位依實際量化成果填寫於欄位中。

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

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39

計畫中文摘要

本計畫旨在探討輕質非水相液體(Light Non-Aqueous Phase Liquid, LNAPL)在地下環境中之分布特性、傳輸行為與回收效能，並透過提取試驗(Bail-down test)與模式分析，建立適用於國內污染場址之 LNAPL 提取試驗與評估方法。第一年度主要聚焦於不同數值模型與監測條件對試驗數據的影響，第二年度則進一步透過不同井徑現地試驗、不同解析解進行傳導係數(T 值)估算、不同模擬條件進行效益分析，並建立本土化操作手冊以優化未來之 LNAPL 整治技術。第一年度成果指出，油層厚度薄時，易受人工操作及環境干擾影響，進而影響 LNAPL 體積估算之準確性；而在數值模型方面，煎餅模型基於浮油厚度計算，常低估 LNAPL 體積，垂直平衡模型則考慮毛細管作用與飽和度梯度，能更合理反映異質性地層中 LNAPL 之分布。第二年度(本年度)則延續前期經驗，針對不同井徑配置調整操作策略，為提高數據可靠性，亦全面改用整治泵並搭配自計式水位計，以延長液位監測時間，確保試驗期間能完整觀測油水位回復行為。此外，在 T 值估算方面，本計畫比較 B&R、C&J、CB&P 等三種解析解方法，結果顯示 B&R 適合於短時間且濾料影響小的情況，可快速取得估算值；C&J 可修正初期補注效應，但需謹慎設定參數；CB&P 則更適用於長期試驗與地層效應顯著的情境，能提供較準確的 T 值。由於 LNAPL 與地下水的化學性質迥異，故進一步利用推算結果確認不得直接套用地下水 T 值於 LNAPL 模擬，必須透過現地提取試驗實測獲得 LNAPL 的 T 值，方能提升污染評估與整治規劃的可靠性。另由數值模式模擬結果指出，LNAPL 回收潛力受浮油厚度、T 值及地層特性共同控制，並呈現「初期高效－中期衰減－末期低效」的典型動態，雖然最終回收總量受含水層厚度與油層體積支配，但T值決定抽除效率與時程，對整治規劃之影響實為關鍵。本計畫在第二年度建立「LNAPL 提取試驗操作手冊」，使現場作業流程標準化，涵蓋設備選擇、液位監測、數據紀錄與結果分析等要點，不僅提升數據一致性與可比性，也提供後續場址應用的實用依據。另以 W16 為例進行效益分析，顯示整治技術提升約 25.5%、整治成本降低約 42.6%、能源效率提升約 119.2%，充分展現本計畫在技術優化、經濟效益、能源利用方面的多重價值。

關鍵字：*地下水、LNAPL、整治、傳導係數、提取試驗*

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39

計畫英文摘要

This project aims to investigate the distribution characteristics, transport behavior, and recovery efficiency of Light Non-Aqueous Phase Liquids (LNAPLs) in subsurface environments and to establish a field-validated LNAPL bail-down testing and evaluation methodology applicable to contaminated sites in Taiwan through integrated field extraction experiments and modeling analyses. The first-year research primarily focused on the influence of monitoring conditions and numerical models on experimental data, while the second-year extended the scope to evaluate the effects of different well diameters through field trials, estimate transmissivity (T) using multiple analytical solutions, conduct benefit analyses under various simulation conditions, and develop a localized operational manual to optimize future LNAPL remediation practices. The first-year results indicated that thin oil layers are highly susceptible to errors caused by manual measurements and environmental disturbances, which reduce the accuracy of LNAPL volume estimation; moreover, model comparison showed that the pancake model, which calculates based on apparent oil thickness, often underestimates LNAPL volumes, whereas the vertical equilibrium model, by incorporating capillary pressure and saturation gradients, provides a more realistic representation of LNAPL distribution in heterogeneous strata. Building upon these findings, the second-year work optimized operational strategies according to well diameter configurations and, to improve data reliability, employed remediation pumps in combination with automated water level loggers to extend monitoring duration and capture complete water-oil interface recovery behavior. In terms of T-value estimation, three analytical methods—B&R, C&J, and CB&P—were compared: B&R was found suitable for short-duration tests with minimal filter media effects, C&J corrected for early-time recharge influences but required careful parameterization, while CB&P was most appropriate for long-duration tests where stratigraphic effects were significant, yielding more reliable T estimates. Considering the physicochemical differences between LNAPLs and groundwater, the study further confirmed that groundwater T-values cannot be directly applied to LNAPL transport simulations, highlighting the necessity of site-specific bail-down testing to obtain representative LNAPL transmissivity values for accurate assessment and remediation planning. Numerical simulations additionally revealed that LNAPL recovery potential is jointly governed by oil layer thickness, transmissivity, and aquifer characteristics, following a typical “high-efficiency in the early stage, decline in the mid-term, and low-efficiency in the late stage” dynamic pattern. While the ultimate

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39

recoverable volume is constrained by aquifer thickness and oil mass, transmissivity plays a critical role in controlling recovery rate and schedule, underscoring its importance in remediation design. To standardize field practices, a “LNAPL Bail-Down Test Operational Manual” was developed, covering equipment selection, water level monitoring, data recording, and result analysis, thereby enhancing data consistency, comparability, and practical applicability across sites. Furthermore, a benefit analysis using well W16 as a case study demonstrated that remediation technology improved by approximately 25.5%, remediation costs were reduced by about 42.6%, and energy efficiency increased by around 119.2%, collectively illustrating the project’s contributions not only in technical optimization but also in economic feasibility and energy efficiency, thus providing a robust scientific basis for future LNAPL remediation strategies.

Keywords: *Groundwater, LNAPL, Remediation, Transmissivity, Bail-down test*

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39

目次

第一章　前言 ……1-1

第二章　研究目的 ……2-1

第三章　文獻探討 ……3-1

3.1　雙相抽除法……3-1

3.2　提取試驗……3-2

3.3　提取試驗 T 值分析方法 ……3-4

3.4　油品污染傳輸模式 ……3-5

第四章　研究方法與過程 ……4-1

4.1　研究流程……4-1

4.2　試驗場址背景……4-3

4.3　提取試驗現場試驗 ……4-9

4.4　採樣檢測與試驗…… 4-10

4.5　LNAPL 分析方法論 …… 4-11

4.6　油品污染傳輸模式 …… 4-17

4.7　工作進度甘特圖…… 4-22

第五章　結果與討論 ……5-1

5.1　提取試驗作業……5-1

5.2　採樣與試驗分析……5-5

5.3　提取試驗 T 值計算 ……5-9

5.4　概念模式模擬…… 5-20

5.5　操作手冊建立及效益分析 …… 5-39

第六章　結論與建議 ……6-1

參考文獻 …… 文獻-1

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39

附件

附件一　採樣紀錄表

附件二　水體樣本檢測報告

附件三　油品樣本檢測報告

附件四　土壤粒徑分析(W-07、W-08、W-20)

附件五　提取試驗操作手冊

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39

圖次

圖 1-1、地下水油品類污染物分階段整治技術選用案例 1-1

圖 3-1、歸納基於 LNAPL 現地研究主要目的 3-2

圖 3-2、導致 T_n(LNAPL transmissivity)複雜性的可能原因 3-5

圖 4-1、本研究工作流程圖 4-1

圖 4-2、試驗場址周邊監測井分布 4-5

圖 4-3、桃園煉油廠鄰近地質圖 4-6

圖 4-4、試驗場址地質鑽探剖面圖 4-7

圖 4-5、地質鑽探地層柱狀剖面圖 4-8

圖 4-6、含水層系統中部分貫穿井示意圖 4-12

圖 4-7、油/水系統中部分貫穿井示意圖 4-12

圖 4-8、地層 LNAPL 體積受垂直水力梯度影響 4-15

圖 4-9、當考慮毛細管壓力時，無承壓均質各向同性含水層內地下水位界面處的 LNAPL 飽和度剖面預計將在平衡條件下呈現類似於魚翅的形狀 4-18

圖 4-10、預測及測量 LNAPL 之結果 4-19

圖 4-11、概念模型示意圖 4-20

圖 4-12、LDRM 參數對 LNAPL 厚度和可回收體積的敏感度分析 4-22

圖 5-1、2 吋監測井以整治泵進行提取試驗之過程 5-3

圖 5-2、4 吋整治井以整治泵進行提取試驗之過程 5-4

圖 5-3、壓力鍋試驗所得 SWCC 與 Loamy Sand 參考曲線比較 5-9

圖 5-4、提取試驗隨時間變化之液位面情形 5-10

圖 5-5、提取試驗隨時間變化之 LNAPL 洩降量與 LNAPL 抽除率 5-12

圖 5-6、提取試驗隨時間變化之 LNAPL 洩降量與 LNAPL 厚度 5-13

圖 5-7、提取試驗 LNAPL 洩降量與時間的關係 5-14

圖 5-8、提取試驗 T 值 B&R 分析 5-15

圖 5-9、提取試驗 T 值 C&J 分析 5-16

圖 5-10、提取試驗 T 值 CB&P 分析 5-17

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39

圖 5-11、模式評估分年度工作圖.....5-20

圖 5-12、W-08 透過提取試驗推估 LNAPL 真實厚度(第一年度試驗井).....5-22

圖 5-13、W-20 透過提取試驗推估 LNAPL 真實厚度(第一年度試驗井).....5-23

圖 5-14、本年度提取試驗推估 LNAPL 真實厚度.....5-23

圖 5-15、各井(a) LNAPL 飽和度垂直剖面分布及(b)單位面積特定厚度及可回收厚度、LNAPL 傳導係數曲線.....5-26

圖 5-15、各井(a) LNAPL 飽和度垂直剖面分布及(b)單位面積特定厚度及可回收厚度、LNAPL 傳導係數曲線(續).....5-27

圖 5-16、垂直平衡模型推估之浮油體積空間分布(以 114 年 1 月觀測結果推估).....5-30

圖 5-17、浮油回收位置與影響範圍.....5-31

圖 5-18、浮油回收效益分析結果(a)觀測浮油厚度、(b)浮油回收速率及(c)浮油回收量.....5-32

圖 5-19、本計畫推估之 Tn 值.....5-34

圖 5-20、不同 Tn 值條件下浮油抽除結果(a)浮油厚度隨時間變化；(b)浮油回收速率隨時間變化；(c)累積回收浮油體積隨時間變化.....5-35

圖 5-21、W02 與 W16 整治井在不同抽除情境下之浮油回收模擬結果(a)浮油厚度隨時間變化；(b)浮油回收速率隨時間變化；(c)累積回收浮油體積隨時間變化.....5-37

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39

表次

表 3-1、綜整 LNAPL 雙相抽除法之優點與限制.....3-1

表 4-1、場址公告列管資料 4-4

表 4-2、試驗場址周邊監測井基本資料 4-6

表 4-3、監測井地下水採樣流程說明 4-10

表 4-4、LNAPL 提取試驗之 T 值推估解析解方法 4-13

表 5-1、具有油厚之監測井及整治井資料彙整表 5-2

表 5-2、提取試驗所需設備彙整表 5-2

表 5-3、地下水 TPH 分析(豐水期)結果綜整表 5-5

表 5-4、地下水 TPH 分析(枯水期)結果綜整表 5-6

表 5-5、油品密度與黏度分析結果綜整表 5-7

表 5-6、壓力鍋試驗 van Genuchten (1980) SWCC 模型擬合結果 5-8

表 5-7、試驗井之 T 值估算方法分析結果綜整表 5-18

表 5-8、觀測浮油厚度、特定厚度與可回收厚度的區別與定義 5-24

表 5-9、LNAPL 流體特性.....5-25

表 5-10、土壤水力特性 5-25

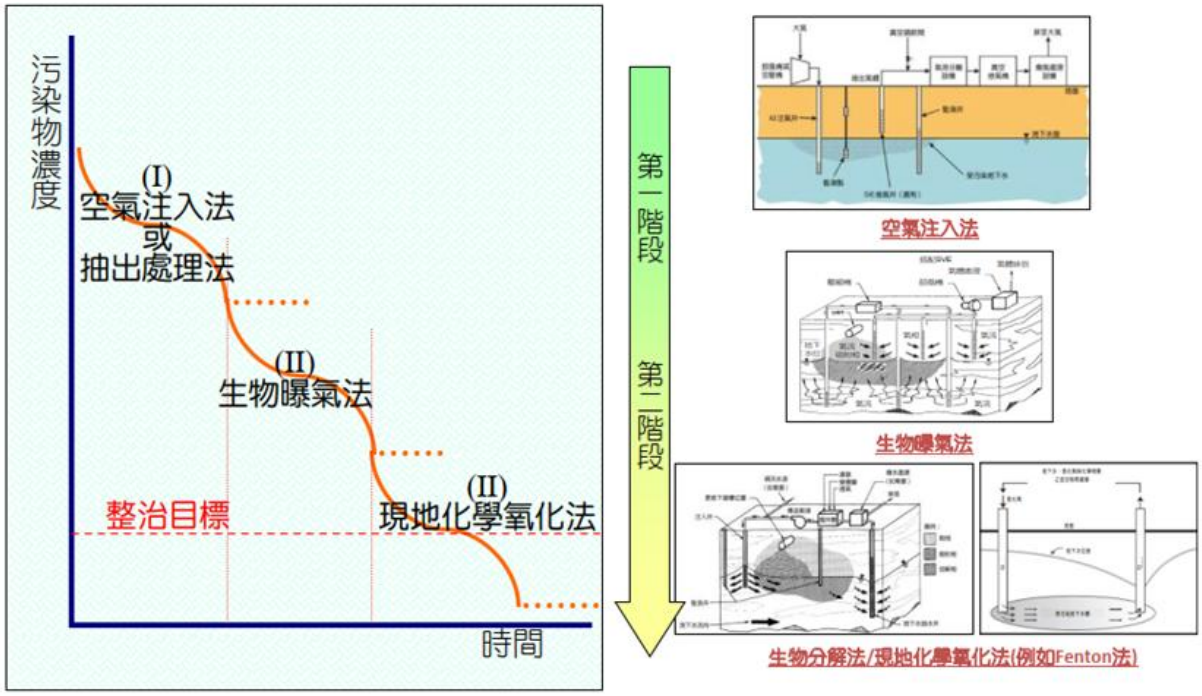
表 5-11、觀測浮油厚度、特定厚度、可回收厚度及傳導係數評估結果.....5-26

表 5-12、不同 Tn 值條件之的最大抽除流量、累積回收量與分階段回收時間 5-35

表 5-13、W02 與 W16 整治井在不同抽除率下之回收模擬結果 5-38

第一章　前言

有鑑於油品類之土壤及地下水污染場址有逐年增加趨勢，且污染物浮油是屬於輕質非水相液體(Light non-aqueous phase liquid，以下簡稱 LNAPL)，LNAPL 包括芳烴類化合物，如汽油、柴油和石油為地下環境中常見的污染物，由於 LNAPL 密度比水低，且在水中略微溶解，當 LNAPL 影響土壤時，大多往不飽和帶移動，並聚集於水位面上方。因此，LNAPL 移除方式較複雜故大多須採用多種整治技術併行，而當污染物擴散至地下水時，其擴散相較於土壤來的快，且擴散方向更是難以掌握，一般而言，臺灣常見之油品類地下水污染整治技術包括現地化學氧化法、空氣注入法、抽出處理法、雙相抽除法、加強好氧生物整治法等，在整治初期由於地下水污染物濃度較高，可採用空氣注入法或抽出處理法，將地下水污染物快速且大量移除，而整治中後期由於污染物已降至一定濃度以下，故可採用生物曝氣法或現地化學氧化法，地下水油品污染之整治階段選用如圖 1-1 所示。



資料來源：環境部環境管理署，2014，土壤及地下水油品類污染整治作業參考指引。

圖 1-1、地下水油品類污染物分階段整治技術選用案例

由於油品污染初期常存在油品純相當中，在整治初期為快速移除 LNAPL，故大多採用抽出處理的方式以降低污染物移動擴散的可能性，然而 LNAPL 與水的化學特性迥異，若未能妥善評估 LNAPL 在地層中的傳導能力，恐造成抽除過程之油/水比例過低而導致整治成效不彰。此外，在現場執行 LNAPL 抽除時，其

面臨問題主要為各地區之水文地質條件導致孔隙度及透水性不同，再加上污染物之流體密度、流體黏度、流體油水比例等亦不相同，故難以使用統一且穩定之抽除方式，大多是仰賴現場執行人員之經驗判斷。因此，本計畫以整治初期之雙相抽除法(Dual-phase Extraction)為探討目標，為提高 LNAPL 抽除效率，本計畫擬進行現地試驗測試，以提取試驗(Bail-down test)為基礎，並應用不同的解析方程式求得之 LNAPL 之傳導係數(Transmissivity, T 值)，此外，為了解 T 值估計的誤差對於 LNAPL 移動傳輸的影響程度，本計畫將應用地下水污染傳輸模式進行情境模擬與探討，並提供 LNAPL 抽除方案評估建議。

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39

第二章　研究目的

在現場執行 LNAPL 抽除時，其面臨問題主要為各地區之水文地質條件導致孔隙度及透水性不同，再加上污染物之流體密度、流體黏度、流體油水比例等亦不相同，故難以使用統一且穩定之抽除方式，大多是仰賴現場執行人員之經驗判斷，故實有必要以現地試驗方式取得流體(LNAPL)之 T 值，以提升地下水污染傳輸模式模擬之準確性。提取試驗(Bail-down test)在國外已有完整技術手冊(ASTM E2856-13 評估指引)，但尚未在國內進行現場試驗，因此無從得知此方法用於臺灣污染場址的適用性，本計畫將以桃園煉油場為計畫場址進行現地測試與實證，該場址做為我國少見之山坡地形(坡度>0.1)浮油回收案例，預計透過本計畫試驗結果可歸納彙整出專門應對山坡地形場址之浮油回收系統設計參考，並期能建立本土化地下水 LNAPL 傳導係數之工作流程與方法；此外，目前雖已有許多數學方法可用來預測 LNAPL 的宿命，然而在多相建模時，LNAPL 釋放的速率和體積普遍採用假設進行設定，本計畫將以概念模型及數值模型推估 LNAPL 釋放的速率和體積，以產生更準確的模擬結果。

有關本計畫研究目的如下所述。

一、 建立符合計畫場址之油品性質與水文地質特性之提取試驗，提供做為未來現場整治較精準的整治方法、抽除速率及頻率等現場操作參數。

二、 分析提取試驗資料解析解之 T 值，並比較不同解析方程式之便利性與合宜性，提出適合推估 LNAPL 之 T 值之提取試驗應用與限制。

三、 利用提取試驗所獲取 T 值修正數值模型之 LNAPL 體積，以有效推估 LNAPL 可能傳輸行為及 LNAPL 抽除狀況。

四、 研提未來 LNAPL 抽除整治方法之相關操作參數的建議及標準化文件，藉以評估 LNAPL 抽除過程可持續優化之操作參數，提升 LNAPL 污染整治效益。

本計畫綜整研究之可行性、新穎性及未來性，說明如下。

一、 可行性：提取試驗及 LNAPL 之 T 值估算方法在國外實務操作及研究皆已有完整作法，本計畫亦完成假想場址現地試驗之洽談，且執行過程將不影響污染整治期程。

二、 新穎性：目前國內幾乎尚無針對 LNAPL 之 T 值進行現場試驗及估算等相關研究，本計畫屬國內首例將提取試驗及 T 值分析應用於實際污染場址之研究案例。

三、 未來性：未來在地下水油品污染場址整治前，可優先釐清 LNAPL 之 T 值，以提供後續現場整治較精準的整治方法、抽除速率及頻率等現場操作參數。

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39

第三章　文獻探討

考量國內目前在進行 LNAPL 地下水污染整治，大多先採用雙相抽除法進行污染物移除，故本計畫優先彙整雙相抽除法之優缺與限制(詳見 3.1 節)，另分別蒐集提取試驗(詳見 3.2 節)、提取試驗 T 值分析方法(詳見 3.3 節)、油品污染傳輸模式(詳見 3.4 節)等國外研究成果，藉以評估較適合做為本計畫提取試驗之研究流程與方向。

3.1　雙相抽除法

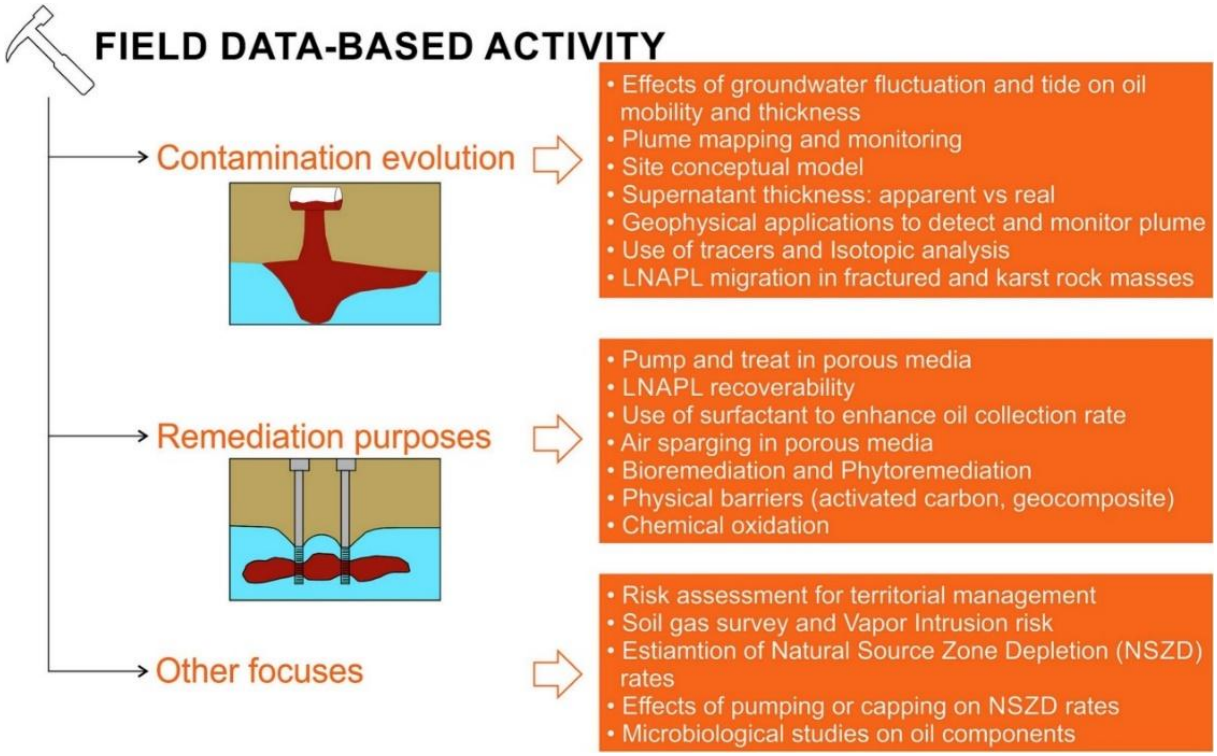
依據「土壤及地下水油品類污染整治作業參考指引」當中對於雙相抽除法之優缺點說明彙整如表 3-1 所示，本計畫主要針對其限制第 1、2 項提出解決方式，目標是經由提取試驗結果，計算污染場址 LNAPL 之 T 值，除了在整治初期可快速且有效將高比例的 LNAPL 抽除外，亦可藉由準確的 T 值評估 LNAPL 在整治期間之移動傳輸方向與速度，進而提供較精準的整治方法、抽除速率及頻率等，以持續優化現場操作參數，提升污染整治效率。

表 3-1、綜整 LNAPL 雙相抽除法之優點與限制

優點	限制
1. 雙相抽除法降低抽出地下水體積對浮油回收量的比例，進而降低整治費用。 2. 可將土壤氣的抽取量減至最低，維持抽出之氣體的濃度在法規值以下，進而減少尾氣處理的需求。 3. 由於氣相的 LNAPL 濃度普遍高於水，故所抽取的地下水有可能符合放流水水質標準，進而省去水處理設備的需求。 4. 因地下水位變動不大，故相關之污染擴散情形減低。 5. 飽和層的殘留相可以藉由回收井內之真空度，在回收方面獲得改善。 6. 雙相抽除法可被設計作為水力控制之用途，亦可輕易的被改裝作為生物通氣井。 7. 大部分所需元件都可設在地下，故污染場址地表利用上更具彈性。	1. 若未能妥善評估 LNAPL 在地層中的傳導能力，可能造成抽除過程之油/水比例過低而導致整治成效不彰。 2. 不同的水文地質條件導致孔隙度及透水性不同，再加上 LNAPL 之流體密度及黏度皆與水不同，可能影響抽除效率。 3. 所使用之液環式泵以及其他的高速抽氣泵較容易產生乳化的情形，特別是回收柴油時。 4. 由於有強化好氧生物活動的效果，所以有可能在井篩產生生物性積垢物。 5. 不能處理飽和層中受污染的土壤。

3.2 提取試驗

Mineo (2023)回顧對污染場址的現地相關研究，主要目的多為定義概念場址模型或污染來源以及針對修復整治等相關工作，如圖 3-1 所示。Atteia et al. (2019)指出油井通常與含水層不平衡，並且多孔介質中的 LNAPL 的移動速度比地下水位慢得多，地下水位波動導致 LNAPL 在地下水位以下和之上分布。因此，自由相 LNAPL 厚度是評估的關鍵，通常井中測量的 LNAPL(表觀厚度)與含水層中實際厚度的值不同。地下水波動會導致 LNAPL 被困在地下水位以下並達到新的平衡，從而導致更複雜的污染物遷移過程，而困在飽和區的 LNAPL 比積聚在水面上的污染團更難整治。



資料來源：Mineo (2023)。

圖 3-1、歸納基於 LNAPL 現地研究主要目的

井內 LNAPL 厚度通常被作為潛在 LNAPL、遷移率及可恢復性的指標，然而，LNAPL 厚度受到地層岩性、LNAPL 性質及水文地質條件的影響，因此評估需考慮毛細壓力-飽和度關係模型及平衡井內液位應代表地層的流體壓力(Sleep et al. 2000; Lenhard et al. 2017)。為克服 LNAPL 厚度使用限制，LNAPL 的傳導係數(T_n)已被許多研究採用並做為 LNAPL 污染場址管理的重要指標(Kirkman 2013; Nagaiah et al. 2015; Gatsios et al. 2018)。T_n 為含水層地質材料傳輸 LNAPL 的能力，表示單位梯度 LNAPL 通過單位寬度含水層的流量，類似於地下水的導水係數。

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39

T_n可以透過短期測試及長期測試進行推估，短期方法主要對 LNAPL 污染團施加瞬時應力，如提取試驗(Bail-down test)及浮動泵試驗(Manual skimming test)；長期方法則為對 LNAPL 污染團施加連續應力，並可透過 LNAPL 回收系統評估或使用示蹤劑進行推估(ASTM 2021)。其中，提取試驗(Bail-down test)是最常被採用的方法，主要原因為該方法所需的額外資源最少，各種推估 T_n 之試驗說明如下。

一、 提取試驗(Bail-down test)：該方法適用於所有的含水層類型，主要透過快速從井中移除已之量的 LNAPL 並觀測液壓面隨時間的變化。透過 LNAPL 洩降及流入井中的 LNAPL 的觀測數據，計算 LNAPL 傳導係數。提取試驗容易受到測試時地下水位的影響。可以在現場進行多次提取試驗，以描述不同水位條件下 LNAPL 傳導係數的範圍。須注意 LNAPL 厚度過薄(<15 公分)可能無法產生良好的試驗結果。

二、 浮動泵試驗(Manual skimming test)：該方法類似提取試驗，主要從井中移除所有 LNAPL，並在恢復達到預測試 LNAPL 厚度的 25%之前反覆移除 LNAPL。這個過程一直持續到LNAPL去除率穩定為止。主要建立連續去除 LNAPL 事件組成達到穩態的恢復率，可以最大限度的減少量測誤差，因此可代表受 LNAPL 影響的地層。

三、 LNAPL 回收系統評估(Recovery system evaluation)：該評估通常是建立在具有歷史 LNAPL 回收系統資料，透過長時間運行的回收系統，平均 LNAPL 體積恢復率與從 LNAPL 洩降有關。長期觀測資料可用於計算 LNAPL 回收、LNAPL 和地下水回收以及多相(LNAPL、地下水和土壤氣體)回收條件下的 LNAPL 傳導係數。

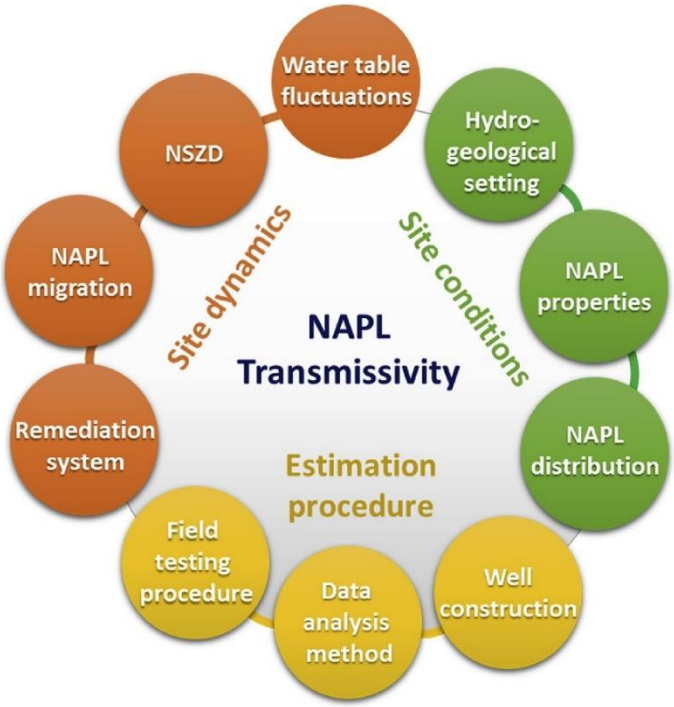
四、 示蹤劑評估方法(Dye trace testing)：該方法將可溶於石油但不溶於水的螢光染料加入監測井中的 LNAPL 中，測量井內 LNAPL 中的染料濃度隨時間的變化，並使用濃度下降速率來計算通過 LNAPL 通量。該方法為特殊的傳導係數測試方法，測量自然條件下 LNAPL 流量(而非外部施加應力的造成的流體梯度)，該方法適用於評估 LNAPL 的遷移率。

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39

3.3 提取試驗 T 值分析方法

前述 LNAPL 傳導係數試驗方法提供足夠的精度來表示可回收性、整治後可回收性的變化，以及校準用於預測 LNAPL 分布和回收性能的模型。Palmier et al. (2016)對同一位置的多種 LNAPL 傳導係數試驗結果比較研究，顯示不同的測試方法會產生類似的結果。此外，在提取試驗期間觀察到的 LNAPL 補注行為可用於評估 LNAPL 場址的水文地質狀況(Kirkman et al. 2013)。當在不同地點進行多次測試時，地質非均質性的影響會反應在傳導係數的評估結果。重複的現場試驗可以量化由地下水位波動而可能觀察到的 LNAPL 傳導係數範圍，從而增加傳導係數的可信度。

在均質多孔介質的補注或排水期間，T_n 可能存在 20%的差異(Palmier et al. 2017)。Gatsios et al. (2018)採用兩種方法現場量測傳導係數 T_n，依據量測方法可分別表示為 $T_{n,\,BD}$ (Bail-down test)及 $T_{n,\,SK}$ (Skimming test)，結果顯示 T_n 不一定僅代表質量回收系統(Mass recovery system)的整治效能(Remediation performance)，它還包括可變地下水位產生的耦合效應以及 NAPL 發生的潛在遷移和自然損失，如圖 3-2 所示。水位面高程也會影響這兩種方法的推估值的差異，當存在顯著的地下水位波動時，$T_{n,\,BD}$ 作為 $T_{n,\,SK}$ 預測因子的準確性可能會受到影響。因此，在恆定的地下水位條件下，T_n 可以視為管理受到飽和度影響的 LNAPL 污染場址基於飽和度風險的相對可靠的指標，並具有強烈的空間依賴性，而可變的地下水位條件可能會影響 T_n 的演變。He et al. (2022)基於二維流動室內試驗研究動態地下水行為對截留 LNAPL 的變化，考量初始地下水位、地下水波動強度及波動序列，分析結果顯示較高的初始地下水位會抑制污染團的橫向擴散，並促進污染物的垂直遷移。週期性的地下水波動會擴大污染團的橫向遷移，同時會減小縱向遷移的範圍，其原因為孔隙水壓力的降低促進了污染污染團的橫向移動，對縱向移動有一定的抑制作用，顯示 LNAPL 的分布受到地下水波動影響而改變，並且對 T_n 的值造成幾個數量級的影響(Beckett and Huntley 2015)。Nagaiah et al. (2015)在運作中煉油廠使用短期和長期測試方法估計的 T_n 的比較分析。短期 T_n 依賴於有限的時間範圍內對下降率和回收率的點測量，並且在針對性局部區域非常有用。根據長期對污染團施加應力並觀測的回收資料(Recovery data)建立的長期 T_n 可以做為考慮有關液壓回收限制的決策及規劃。Hampton (2003)指出在處理帶有浮油相的監測井時，應該採用標準化的測試方案進行評估，例如同時對兩口井進行抽水測試等。在設計浮油回收系統之前，建議先使用定性測試來評估浮油回收的可行性，以節省不必要的回收系統成本。同時，考慮利用長期試驗數據來補充短期提取試驗的資訊，從而預測長期回收系統的性能。這些方法有助於提高提取試驗的準確性和可靠性。



資料來源：Gatsios et al. (2018)。

註：NSZD (natural source zone depletion)：促進輕質非水相液體(LNAPL)衰減的自然發生的過程。

圖 3-2、導致 T_n(LNAPL transmissivity)複雜性的可能原因

3.4　油品污染傳輸模式

通常基於飽和度的風險評估主要針對 LNAPL 飽和度高於殘餘飽和度且可移動且可能遷移的部分，量化非飽和區 LNAPL 的時空分布是一個重要的環境議題，簡單概念模型適用於場址的初步評估，數值模型則適用於模擬和預測地下 LNAPL 行為，已有許多數學模型來模擬特定地下條件下的 LNAPL 行為(Salama et al. 2012; Vasudevan et al. 2014; Onaa et al. 2021; Chang et al. 2022; Yu et al. 2022)。

Farr et al. (1990)及 Lenhard and Parker (1990a, 1990b)指出地下 LNAPL 飽和度取決於毛細管頭，並且隨深度而變化，提出了 LNAPL 煎餅概念模型，此模型假設 LNAPL 均為可移動。Charbeneau (2007)開發 LDRM 模型，該模型考慮了地下水位以下被水截留的殘留 LNAPL 和水飽和區域上方的殘留 LNAPL，並已被應用開發及評估地下 LNAPL 概念模型和管理計畫(Johns et al. 2003; Adamski et al. 2005; Jeong and Charbeneau 2014; Statham et al. 2023)。LDRM 模型假設殘餘飽和度在水飽和區域以下恆定，移動 LNAPL 由總 LNAPL 飽和度和殘餘 LNAPL 飽和度之差決定。此外，由美國環保署國家風險管理研究實驗室開發的 NAPL 模擬器也已被廣泛應用於研究 LNAPL 污染物在近地表顆粒土壤中的傳輸和宿命評估(El Tabach et al. 2005; El Tabach et al. 2007; Yang et al. 2013; Zhou et al. 2014)。

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39

多相流和傳輸模型已開發用於解決兩相(水-NAPL)和三相(水-氣-NAPL)系統中的污染和整治問題，常見的現地尺度模型包含 MISER (Abriola et al. 1997)、STOMP (White and Oostrom 2000; White and Oostrom 2003)、TMVOC (Pruess and Battistelli 2002)、UTCHEM (University of Texas at Austin 2000)及 HSSM (Weaver et al. 1994; Charbeneau et al. 1995)等，透過結合各種本構關係(Constitutive relations)，如質相傳輸過程、耦合傳遞以及多種尺度的生物過程，需定量求解所需的數學公式，這些模型可用作概念工具，或用於描述特定的 LNAPL 污染問題，模型依賴特定的假設和相關的現地及實驗數據。因此，這些模型的預測能力及其各種假設的充分性需要進一步評估(Kechavarzi et al. 2005)。

Mineo (2023)彙整近 10 年 LNAPL 污染的數學模型評估，可將模擬目的區分為「評估污染團的演化及傳輸」及「用於整治效率評估目的」，這也顯示污染評估不同階段關注的重點。油品污染評估的數學模擬(解析或數值模擬)通常基於簡化模型，幾乎沒有異質性的污染介質，顯示影響該目前技術水平的限制。其中 LNAPL 污染團的真實行為只能根據現地調查及監測數據進行評估。現地調查數據能對所應用的調查或整治措施進行事後評估，從而提供肯定有價值的參考並用以改進後續的評估模型。

在分析污染團宿命及傳輸的數值模擬時，首先需要評析地下水波動對整個過程的影響，而地下水波動的特性會直接影響到污染物的傳播速率和方向，因此對其進行探討相當重要。接著，由於 LNAPL 的遷移路徑和速率直接受到介質結構的影響，需要進一步評析自由、截留及殘餘相 LNAPL 的飽和度及其傳輸過程。此外，凍融作用可能會改變土壤孔隙系統的連通性和介質特性，進而影響污染物的遷移速率和擴散情況，故也需要考慮土壤凍融現象對污染物傳輸的影響。然而，不同形狀的污染源會對地下水流場產生不同的影響，進而影響污染物的傳輸路徑和速率，其影響也是一個重要的考量因素。最後，必須綜合考量地質異質性對整個傳輸過程的影響，地質異質性會導致地下水流場的非均勻性，進而影響污染物的分佈和傳輸行為，因此在模擬過程中必須予以充分考慮。

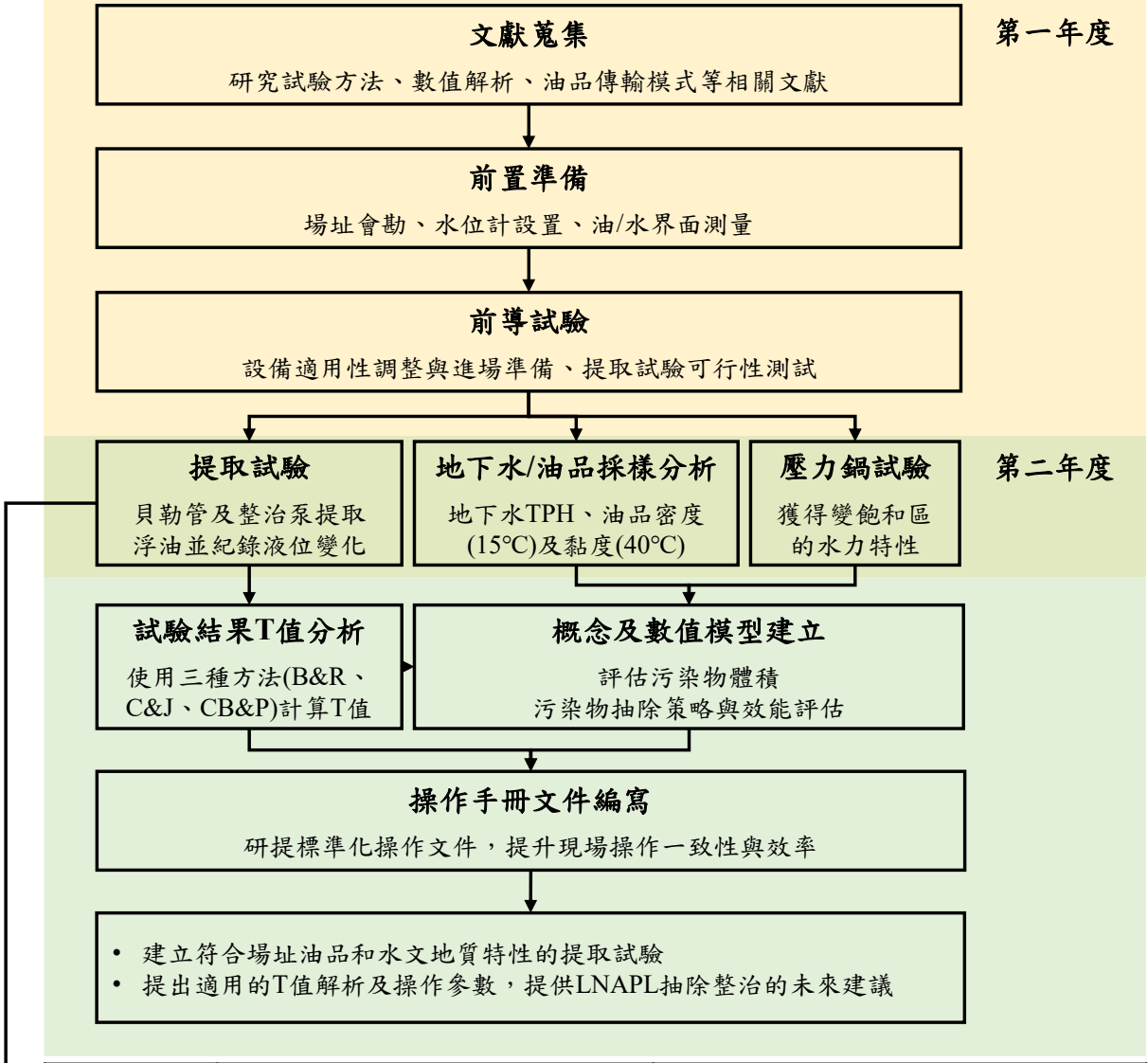
在評估整治效率的數值模擬方面，可以從多個角度進行分析，通過評估土壤特性和整治效率進而量化整治的成效，此外，針對多相萃取、蒸氣注入、抽除法、生物整治以及物理屏障等不同的整治方法皆進行效率評估，以找出最適合的整治方案。透過數值模擬可以更全面的了解整治過程中各種因素的影響，從而提高整治效率，達到整治與保護地下水資源之目的。

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39

第四章　研究方法與過程

4.1　研究流程

本研究計畫流程如圖 4-1 所示，各項研究方法包括文獻蒐集、前置準備、前導試驗、提取試驗、採樣與試驗分析、試驗結果 T 值分析、概念模型及數值模型建立、研提操作手冊相關文件等，各項方法與執行進度簡述如下。



試驗項目	第一年度	第二年度
提取試驗	貝勒管、整治泵 W-08、W-20	整治泵 W-07、W-08、W02、W16
地下水分析	W-06~W-10、W-16~W-25	W-06~W-10、W-16~W-25、W02、W16
油品分析	W-06、W-07、W-08、W-10、W-20	W-07、W-08、W-20、W02、W16
壓力鍋試驗	取得樣品進行試驗	分析變飽和區的水力特性

圖 4-1、本研究工作流程圖

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39

一、 文獻蒐集

本計畫已於第一年度完成文獻蒐集，包括試驗方法、數值解析方法和油品傳輸模式的相關文獻，理解已有的研究成果和現有的技術，接著，根據文獻蒐集的結果評估不同試驗方法與模式之優缺點，並考量本計畫研究目的，以選擇合適本計畫之試驗方法。詳細內容如第三章所述。

二、 前置準備與前導試驗

本計畫已於第一年度完成場址會勘，並陸續設置 15 口自計式水位計、量測油位及油/水界面等實地調查工作，以及彙整試驗監測井之水文地質概況。此外，為確定現地提取試驗之可行性，並避免在試驗過程中遇到重大問題，故本計畫亦已於第一年度完成前導試驗，確認 2 吋監測井管可如預期容納整治泵和管線，及油水介面尺可順利量測油位和油/水界面等情形，並確認在整治泵抽取時，其油位面及水位面確實會隨時間進行變化。詳細內容詳見第一年度計畫成果報告。

三、 提取試驗

本計畫已於第一年度篩選 2 口 2 吋監測井(W-08、W-20)完成提取試驗工作，主要是以貝勒管及整治泵等兩種方法將井中的液體進行移除。本計畫已於第二年度篩選油厚較厚之 4 吋整治井(W02、W16)及 2 吋監測井(W-07、W-08)，並調整第一年度作法，規劃在抽取油層且穩定後，分別在油位面及水位面放置自計式水位計，以拉長試驗油水位面之記錄時間，待試驗期間回復至油水位面初始值，藉以評估移除油品之成效。詳細內容如第 5.1 節所述。

四、 採樣分析與試驗

本計畫已於第一年度完成 15 口地下水及 5 口油品採樣工作(豐水期)，並進行地下水 TPH 及油品密度與黏度分析，其結果可做為後續模型建立及 T 值計算之重要參數，此外，為取得未飽和土壤的水力特性，亦於第一年度辦理土壤壓力鍋試驗工作。本計畫已於第二年度針對枯水期辦理地下水及油品之採樣與分析工作，藉以比較豐枯水期之檢測結果是否具有差異性。詳細內容如第 5.2 節所述。

五、 試驗結果 T 值分析

本計畫已於第二年度(本年度)採用 Bouwer and Rice (1976) (簡稱 B&R)、Cooper and Jacob (1946) (簡稱 C&J)、Cooper et al. (1967) (簡稱 CB&P)等三種方法計算 T 值結果，以探討 T 值估計的誤差對於 LNAPL 移動傳輸的影響程度。詳細內容如第 5.3 節所述。

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39

六、 概念模型及數值模型建立

由於概念模型及數值模型的建立需要將前面收集和分析的所有數據進行整合，故本計畫已於第一年度初步完成以概念模型(煎餅模型及垂直平衡模型)進行 LNAPL 體積估算成果，並預計在第二年度以數值模型為基礎，進一步以垂直平衡模型之 LDRM 模式評估 T 值差異對 LNAPL 傳輸移動與整治抽除效益的影響，藉以評析不同情境下之油品傳輸與回收狀況。詳細內容如第 5.4 節所述。

七、 撰寫操作手冊相關文件

本計畫預計在第二年度依據研究結果，研提未來 LNAPL 抽除整治方法之相關操作參數的建議及標準化文件，其成果可做為未來執行提取試驗時，相關人員在操作流程能有所依循，並藉由蒐集現地浮油抽除數據與資料，與本計畫數值模型模擬最佳抽除結果進行比較，計算本計畫所貢獻之整治效益與成本等量化數據。

4.2　試驗場址背景

本計畫以台灣中油股份有限公司煉製事業部桃園煉油廠(以下簡稱桃園煉油廠)為試驗場址，桃園煉油廠位於龜山、桃園、林口、蘆竹等四個行政區交界，地址為桃園市龜山區民生北路一段 50 號，鄰近中山高速公路南崁交流道旁，廠區佔地面積約 480 公頃，廠區三面環山(山區約 310 公頃)。試驗場址位於桃園市，其位在台灣西北部，靠近台北都會區。該區地形多為連綿不斷的丘陵台地，呈現西北東南狹長型，臨山面海。東南部地勢高，有丘陵地、階地及三岳，向東南逐漸升高，河谷狹窄。而西北部地勢較平緩，台地、階地發達，河流短且呈放射狀入海。桃園市的海岸北起超蘆竹區海湖，西南至新屋區蚵殼港，呈東北東-西南西走向，略呈向外凸的弧形，海岸以沙、礫石及珊瑚礁為主。沙岸佔大部分，海底平淺，礫岸分佈在北段海湖至竹圍沙崙，波浪侵蝕能量大，而珊瑚礁岸主要分佈在北超大園內海至新屋永安附近，海水浴場南側最為典型。

試驗場址位於桃廠內環山道路桃十路，公告範圍面積為 243,417m^2，公告資料如表 4-1 所示，公告範圍如圖 4-2(a)所示，試驗場址之污染物總石油碳氫化合物項目含量已達土壤及地下水污染管制標準，其中土壤中最高濃度達 187,000 mg/kg，而地下水中最高濃度達 43,000 mg/L，故已於 112 年 7 月 18 日公告為土壤及地下水污染整治場址，地理位置位於桃園煉油廠內環山道路桃十路，其中既有監測井共計 15 口(如圖 4-2(b)所示)，監測井基本資料如表 4-2 所示。試驗場內具有邊坡攔截設施、多道固定式圍堰及移動式攔油索，進行污染物攔阻作業，

避免污染物流出場外，最大限度的減少對周邊環境的影響。依據現場量測結果，浮油厚度介於 0.2 至 4 公尺之間，約為高程 98.9 至 116.6 公尺。現場回收浮油化驗結果顯示，污染油品為高硫柴油與少量煤油之混合，依其含硫量判定應屬早期所洩漏之油品。該場址已於 113 年 4 月 11 日起由業興環境科技股份有限公司進行桃園煉油廠污染整治場址應變必要措施執行工作。

試驗場址地質較為多元，包含大南灣層、桃園層、沖積層及林口層等，如圖 4-3 所示，依據鄰近地下水抽水井之工程鑽井顯示其附近之土壤特性大約為：0.0 至 0.4 公尺回填瀝青卵礫石粉土、0.4 至 1.6 公尺黃棕色粉土質砂、1.6 至 12.4 公尺卵礫石，基質為棕黃色粉土質砂、12.4 至 14.9 公尺卵礫石夾黃棕色粉土質砂偶夾砂質粉土、14.9 至 18.8 公尺卵礫石，基質為棕黃色土質砂、18.8-28.0 公尺卵礫石層夾棕黃色粉土質砂、28.0 至 30.6 公尺灰色膠結不佳砂岩、30.6 至 40.0 公尺棕灰色膠結不佳砂岩，

本計畫透過中油公司提供的場址地質鑽探剖面圖(如圖 4-4 所示)，該圖顯示調查區域內的地層主要由未膠結礫石層、未膠結砂岩層及未膠結砂岩、粉砂岩及黏土、灰色泥岩之互層組成，皆屬大南灣層地層，膠結性不佳。雖然地層中存在一層未膠結砂岩層及未膠結砂岩、粉砂岩及黏土、灰色泥岩之互層，其中多處有薄層粘土層，但連續性不佳。因此，當油品污染物洩漏至地層時，極易向地層深處移動至地下水位面，進而對地下水造成潛在威脅。根據圖 4-5 之地層柱狀剖面圖，在高程 113~123 公尺的地區存在一連續礫石層，且約略呈水平連續分布，推測場址地層未受台地抬升的影響，呈現了相對平坦的分佈狀態。此外，場址內之阻水層(黏土層或泥岩)並不具有明顯的厚度和連續性分布，且由水位資料監測結果，得出在該區域內沒有出現顯著的地下水分層現象。

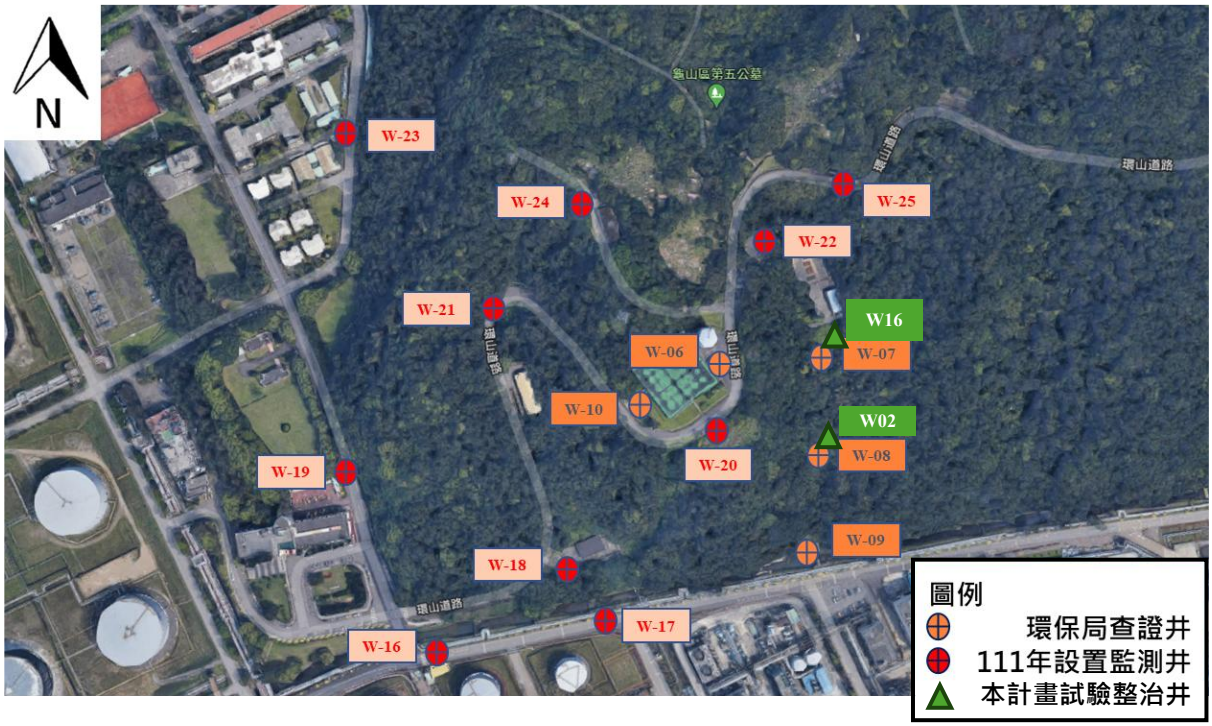
本計畫已於 112 年 12 月 25 日將計畫構想及需協助事項發文給桃園煉油廠及桃園市環保局(校研字第 1121006533 號函、校研字第 1121006509 號函)，並於 112 年 12 月 26 日獲桃園市環保局同意備查(桃環水字第 1120116479 號函)，另於 112 年 12 月 28 日獲桃園煉油廠土地同意書(桃廠環保發字第 11210956720 號函)。

表 4-1、場址公告列管資料

場址名稱	台灣中油股份有限公司煉製事業部桃園煉油廠
場址座標(TWD97)	X：281501；Y：2769936
場址類型	工廠
場址地址	桃園市龜山區南上里民生北路一段 50 號
場址地號	桃園市龜山區油廠段 134、136、137、138、139、140、141、142、143、144、145、146、147 等 13 筆地號
場址面積	243,417 m^2
場址現況概述	營運中場址



(a) 計畫場址公告範圍



(b) 地下水監測井分布圖

圖 4-2、試驗場址周邊監測井分布

表 4-2、試驗場址周邊監測井基本資料

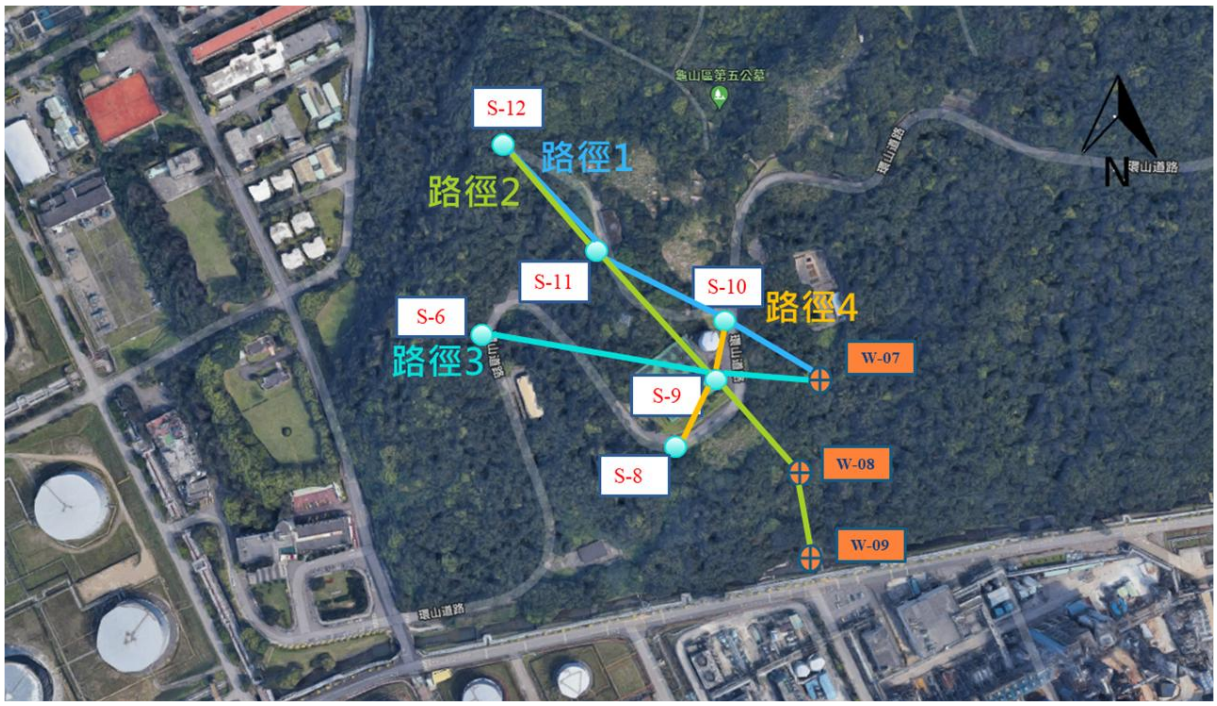
項次	編號	座標(X)	座標(Y)	井頂高程 (m)	井徑 (inch)	井深 (m)	井篩位置 (m)
1	W-06	281450.331	2770113.169	135.639	2	26.78	11.68~26.68
2	W-07	281525.671	2770085.953	115.169	2	15.66	3.56~15.56
3	W-08	281507.564	2769979.951	108.852	2	14.81	2.71~14.71
4	W-09	281532.844	2769953.967	100.267	2	10.27	1.17~10.17
5	W-10	281406.349	2770051.716	135.795	2	26.4	11.30~26.30
6	W-16	281240.066	2769865.821	92.209	2	10.4	4.28~10.28
7	W-17	281375.522	2769893.535	95.386	2	13.5	4.31~13.31
8	W-18	281341.67	2769933.761	104.427	2	15.6	6.48~15.48
9	W-19	281163.381	2770015.345	101.083	2	15.7	9.47~15.47
10	W-20	281443.431	2770043.764	135.326	2	37.6	22.47~37.47
11	W-21	281292.772	2770144.557	122.930	2	31.5	22.05~31.05
12	W-22	281481.966	2770177.772	133.905	2	27.8	17.85~26.85
13	W-23	281181.751	2770270.064	99.239	2	13.5	7.350~13.35
14	W-24	281354.174	2770202.311	147.936	2	49.8	40.40~49.40
15	W-25	281565.126	2770222.986	142.293	2	33.5	24.40~33.40
16	*W02	281517.564	2769989.951	109.15	4	12.36	6.26~12.26
17	*W16	281515.671	2770075.953	114.77	4	15.42	7.32~15.32

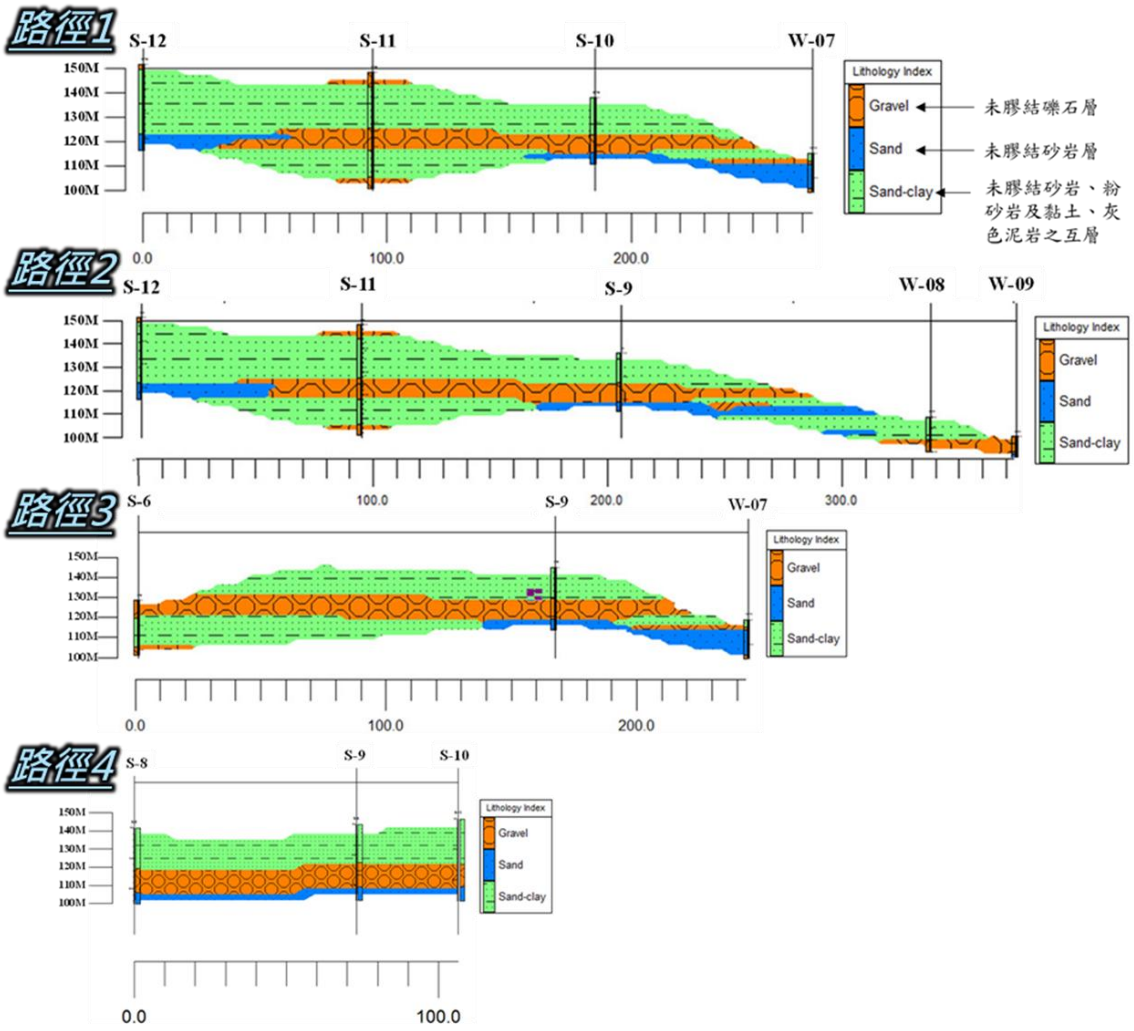
資料來源：台灣中油股份有限公司煉製事業部桃園煉油廠土壤及地下水污染調查及評估計畫。
備註：標註*代表本計畫有進行試驗之 4 吋整治井。



資料來源：經濟部地質調查及礦業管理中心-地質資料整合查詢網站

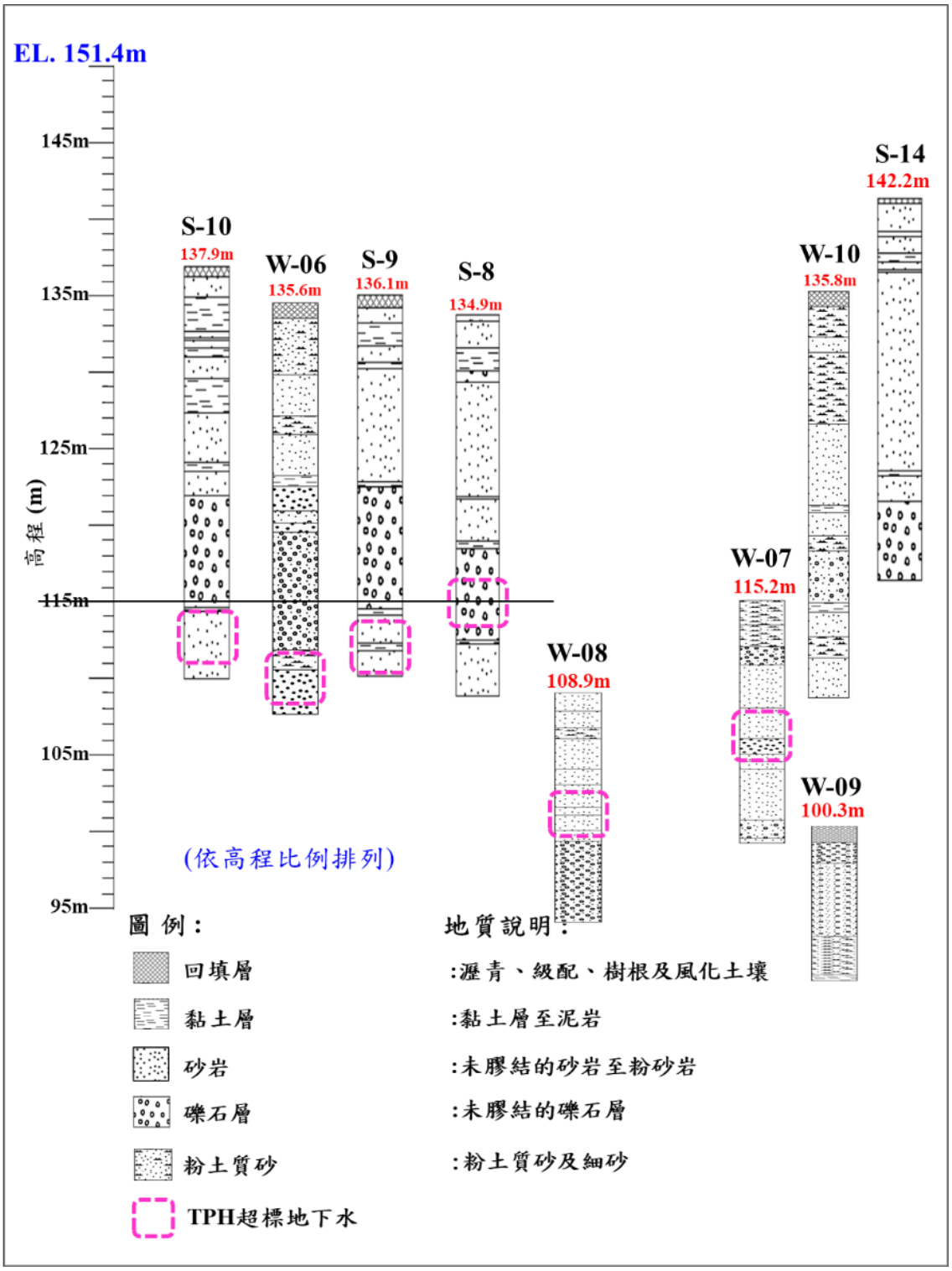
圖 4-3、桃園煉油廠鄰近地質圖





資料來源：111 年度桃園煉油廠污染場址調查及計畫撰寫長約工作-地質鑽探、透地雷達及地電阻探測工作。

圖 4-4、試驗場址地質鑽探剖面圖



資料來源：111 年度桃園煉油廠污染場址調查及計畫撰寫長約工作-地質鑽探、透地雷達及地電阻探測工作。

圖 4-5、地質鑽探地層柱狀剖面圖

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39

4.3　提取試驗現場試驗

LNAPL 傳導係數的定義為在單位寬度(L)的含水層中，LNAPL 體積(L3)在單位時間(t)內通過單位水位洩降(L)的量，其單位為(L^2/T)。監測井中所測得的 LNAPL 厚度受不同土壤類型、LNAPL 類型或水文地質條件影響產生可回收性之差異。相較於其他指標(例如：井中量測到 LNAPL 厚度)，LNAPL 傳導係數與 LNAPL 回收性之間成正比關係。此與以往偶有現場整治過程認為 LNAPL 厚度越厚、其回收效率越好的認知有明顯的不同，對於相同 LNAPL 厚度，不同土壤類型、LNAPL 類型、水文地質條件等，皆可能造成 LNAPL 回收效果的差異，因此，於 LNAPL 抽除前掌握準確的 T 值，將有助於快速且有效的純相抽除。

在過去 20 年已存在許多計算 LNAPL 傳導係數之方法，但少有關注於單獨測試的質量保證或現場程序的改進，因此本計畫參考 ASTM-E2856-13 內容，在第一年度計畫執行採用貝勒管與整治泵兩種設備進行提取試驗，藉此比較浮油回復速率的差異性，目的是為了深入研究浮油抽除後其厚度隨時間回復的動態變化，有關以貝勒管與整治泵兩種設備進行提取試驗之流程說明如下。

一、 量測初始油位面(Depth to Product, DTP)及水位面(Depth to Water, DTW)：以油水介面尺量測 DTP 及 DTW，記錄在未擾動情況前之液面初始值，做為判定液面回復之基準值。

二、 將整治泵或貝勒管放置於浮油層：將整治泵或貝勒管以最小程度的擾動放置在浮油層當中，避免監測井中之 DTP 及 DTW 擾動情形。

三、 【整治泵】啟動整治泵移除浮油：開啟連結整治泵之空壓機及發電機，以移除監測井中之浮油，應確實將浮油進行回收，以避免二次污染。

【貝勒管】拉取貝勒管移除浮油：由於不同監測井之浮油補注之情形不同，在無法提前確認補注情形之前提下，持續以貝勒管移除浮油，直至貝勒管中浮油厚度維持不變則可停止，應確實將浮油進行回收，以避免二次污染。若發生無法以貝勒管有效移除浮油之狀況，則建議需考慮採以整治泵進行提取試驗。

四、 記錄每分鐘抽出體積：先在回收浮油之容器上進行標記，以利於提取試驗進行期間，可快速記錄浮油體積。

五、 【整治泵】量測油厚是否持續下降：以油水介面尺量測 DTP 及 DTW，以確認採用整治泵移除浮油之速率大於地層補注之速率。

【貝勒管】量測油厚是否持續下降：倘若浮油厚度大於貝勒管之長度(一般為 1 公尺)，可於提取試驗進行期間，同時量測油位面(DTP)及水位面(DTW)

藉以換算油厚，以確定採用貝勒管移除浮油之速率大於地層補注之速率。

六、 【整治泵】待油厚不變時，停止運轉並移除整治泵：待整治泵無浮油排出時，停止並移除整治泵運轉。

【貝勒管】待油厚不變時，停止拉取貝勒管：當貝勒管中油厚減少至維持不變，則停止拉取貝勒管之動作。

七、 記錄隨時間變化之油位面(DTP)及水位面(DTW)：以油水界面尺持續量測 DTP 及 DTW，記錄數據可計算油厚變化，可做為後續分析 T 值之計算依據。

4.4 採樣檢測與試驗

本計畫已於第一年度委託台灣檢驗科技股份有限公司(SGS 公司)辦理地下水總石油碳氫化合物(TPH)檢測分析作業，而地下水採樣則係參照環境部國家環境研究院公告之「監測井地下水採樣方法」(NIEA W103.56B)進行地下水採樣作業，工作流程說明列如表 4-3 所示，考量第一年度採樣時間為 6 月份屬於豐水期，故在第二年度已在 2 月份進行枯水期採樣工作，藉以比較 TPH 結果之變化情形。本計畫預計篩選油厚較厚之 4 吋整治井及 2 吋監測井，並調整第一年度作法，規劃在油位面及水位面分別放置自計式水位計，以拉長試驗期間至油水位面回復至初始值，做為第二年度優先辦理提取試驗之對象，並同時檢測油品項目，包括油品密度(15℃)及油品黏度(40℃)，其分析方法分別採用美國材料和試驗協會國際組織(American Society for Testing and Materials)公告方法(ASTM D445 及 ASTM D4052)，本計畫地下水及油品採樣是委託業興環境科技股份有限公司執行，地下水及油品分析檢測是委託台灣檢驗科技股份有限公司執行。

表 4-3、監測井地下水採樣流程說明

步驟	工作項目	內容
步驟 1	準備工作	確認監測井位置與功能，並架設儀器、設備與採樣工作區、除污區等，進行採樣設備之去污等準備工作。
步驟 2	地下水位量測	使用水位計量測地下水位
步驟 3	洗井	依現場狀況進行洗井，汲水位置為井管底部。
步驟 4	地下水及油品採樣	開始採樣時，記錄採樣開始時間，並以清洗過之貝勒管，取足量體積的水樣，裝於樣品瓶內。
步驟 5	樣品裝瓶	油品樣品以至少 300 毫升 PE 瓶進行裝瓶，地下水樣品以至少 1 公升棕色玻璃瓶進行裝瓶。
步驟 6	樣品封存	於瓶口邊緣包裹石蠟(Paraffin)封口膜之密封物，以確保密封，並填好樣品標籤，貼在樣品瓶上。
步驟 7	樣品保存與運送	所有樣品之運送應使用堅固容器盛裝，避免破損，並提供適當冷藏，以保持地下水及油品樣本的新鮮度。

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39

4.5　LNAPL 分析方法論

一、 提取試驗傳導係數

自 2000 年左右，提取試驗為評估油品傳導係數最為常見之方法，在過去應用傳統微水試驗(Cooper et al. 1967; Bouwer and Rice 1976)及修正抽水試驗理論(Modified pumping test theory) (Jacob and Lohman 1952)兩種分析方法說明石油於井中洩降測試量測之結果。

(一) 含水層系統中(圖 4-6)：提取試驗不同邊界條件及假設將影響分析結果有效性，在非受壓含水層系統中，Bouwer and Rice 方法依據穩定狀態之抽水井公式(Thiem equation)，提取試驗造成的水位洩降與含水層厚度相比可忽略不計(Bouwer and Rice 1976)；Cooper 方法則適用於受壓含水層非穩態狀態下之完全貫穿井(Fully penetrating well) (Cooper and Jacob 1946; Cooper et al. 1967)。

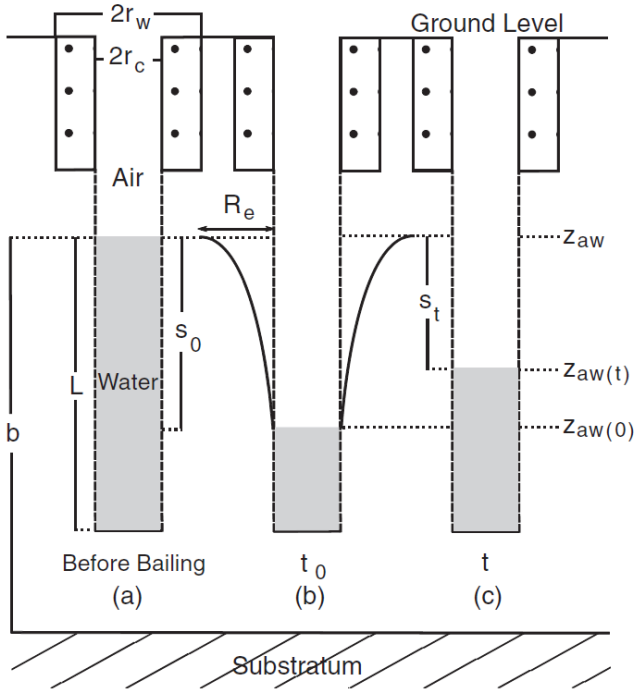
(二) 油/水系統中(圖 4-7)：延伸含水系統驗證的方法直接應用於油/水系統，且保持相同的邊界條件，修正 Bouwer and Rice 方法(Lundy and Zimmerman 1996; Huntley 2000)、Cooper 方法(Beckett and Lyverse 2002)以及 Jacob and Lohman 方法(Huntley 2000)，並簡化假設用以提取(抽水)計算方式(表 4-4)，其 Lundy and Zimmerman 方法為假設油被移除後，井內不再填充水，即為油/水界面在試驗期間沒有任何變化，在現實生活中此現象相當罕見且不太可能發生；Huntley(2000)假設水的傳導係數在多數情況下遠大於油的傳導係數，因此在試驗期間總受壓水面幾乎維持不變。

然而這些方法限制了修改後的 Bouwer and Rice 方法，在滿足 Huntley 或 Lundy and Zimmerman 假設提取試驗中的應用，因此 Kirkman (2013)提出壓力水頭面或油/水界面可非固定值(式 1)，此方式使修改後的 Bouwer and Rice 方法更廣泛適用提取試驗。

$$\mathbf{T_0} = \frac{\mathbf{r_c^2 \ln(R_e/r_w)}}{\mathbf{-2J}} \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{t}} \mathbf{ln}\left(\frac{\mathbf{S_{1(0)}}}{\mathbf{S_{1(t)}}}\right)^{\mathbf{5}} \qquad (1)$$

$$\mathbf{J} = \frac{\mathbf{\Delta S_n}}{\mathbf{\Delta S_b}} \qquad (2)$$

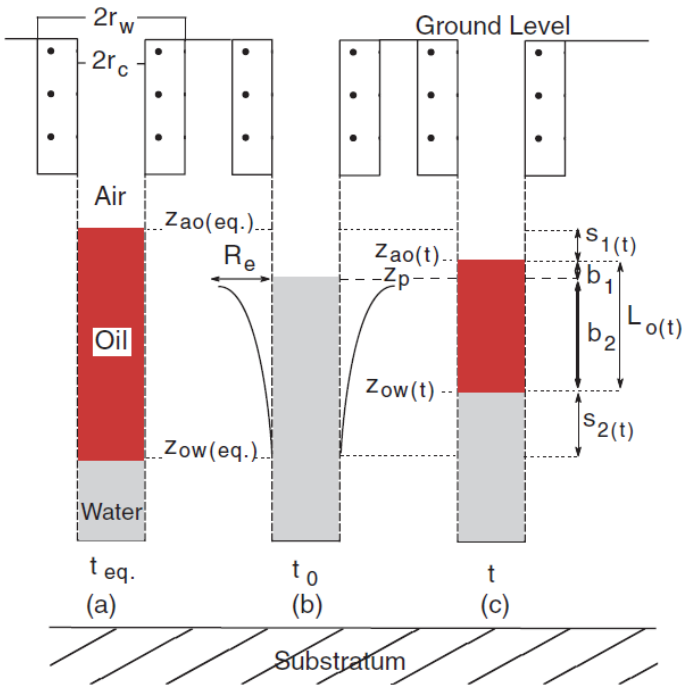
其中，T_0為油的傳導係數，r_c 為井篩管半徑，R_e 為井有效半徑，r_w 是鑽探井半徑，$S_{1(0)}$為時間 t=0 時油位面下降，$S_{1(1)}$為時間 t=1 時油位面下降，S_n為油位面下降，b_n 是井內量測之油層厚度。



(a) 提取前、(b) 時間 t=0 提取、(c) 時間 t=1 提取

資料來源：Palmier et al. (2017)。

圖 4-6、含水層系統中部分貫穿井示意圖



(a) 提取後平衡狀態、(b) 提取後時間 t=0、(c) 提取後時間 t=1

資料來源：Palmier et al. (2017)。

圖 4-7、油/水系統中部分貫穿井示意圖

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39

表 4-4、LNAPL 提取試驗之 T 值推估解析解方法

Authors	Assumptions/Boundary Conditions	Analytical Solutions to Assess the Hydraulic Transmissivity
Bouwer and Rice-modified solution. Lundy and Zimmerman 1996	• Changes in oil thickness are assumed to represent changes in oil head. • No groundwater flow to the well is assumed after the oil is bailed. • The depth to the water is constant during the test.	$T_o=\frac{r_c^2 \ln\left(R_e/r_w\right)}{2}\frac{1}{t}\ln\frac{s_{1(0)}}{s_{1(t)}}$ (1)
Bouwer and Rice-modified solution. Huntley 2000	• Changes in the elevation of the oil/air interface in the well represent changes in oil head. • The groundwater transmissivity is much greater than the oil transmissivity. • The groundwater potentiometric head is constant during the test.	$T_o=\frac{r_c^2\left(\frac{1}{1-\rho_o}\right)\ln\left(R_e/r_w\right)}{2}\frac{1}{t}\ln\left(\frac{s_{1(0)}}{s_{1(t)}}\right)$ (2)
Cooper et al.-modified solution. Beckett and Lyverse 2002	• Confined aquifer with fully penetrating well. • Resulting oil transmissivity values need to be multiplied by the oil density correction factor $(1/1-\rho_o)$.	$\frac{z_{ao(t)}}{z_{ao(0)}}=8\alpha/\pi^2\int_0^\infty e^{-\beta u^2/\alpha}du/\left(u\Delta(u)\right)$ (3) where $\alpha=r_c^2S/r_w^2$ and $\beta=T_o t/r_w^2$
Jacob and Lohman-modified solution. Huntley 2000	• Oil recovery is assumed to be slow enough to consider a pseudo steady-state condition.	$\sum_{i=1}^{n}(s_i\Delta t_i)=\frac{2.3}{4\pi T_o}\sum_{i=1}^{n}\left(Q_i\Delta t_i\log\frac{2.25T_o t_i}{r_c^2S}\right)$ (4)

資料來源：Palmier et al. (2016)。

註：ρ_0 為浮油密度、b 為含水層厚度(m)、J 為 Kirkman J-ratio、L 為浸沒於水中的井篩長度(m)、Q 為抽水量(m^3/s)、Q_i 為單位時間的浮油抽出量(m^3/min)、Re 為監測井影響半徑(m)、r_c 為監測井井徑(m)、r_w 為監測井鑽孔(擴孔)直徑(m)、S 為儲水係數、s_0 為提取試驗後於 t_0 之水位洩降量(m)、s_i 為於 t_i 時間之油位洩降(m)、s_t 為提取試驗後於 t 之水位洩降量 (m)、$s_{1(0)}$為於 t_0 之油位洩降(m)、$s_{1(t)}$ 為於 t 之油位洩降(m)、s′(t)為油位與水位之總洩降量(m)、T 為傳導係數(m^2/s)、T_o 為油之傳導係數 (m^2/min)、(u)為 Bessel function、$z_{ao(0)}$為 t_0 時油與大氣之界面位置、$z_{ao(t)}$為 t 時油與大氣之界面位置、$z_{aw(0)}$為 t_0 時水與大氣之界面位置、$z_{aw(t)}$為 t 時水與大氣之界面位置。

二、 LNAPL 其他參數分析方法

在地表或近地表釋放 LNAPL 在壓力梯度、重力和毛細壓力的影響下，主要垂直的往下遷移通過不飽和多孔區(Essaid et al. 2015)。如果 LNAPL 繼續向地下水位向下移動，當它到達毛細邊緣時，其速率顯著降低。LNAPL 遷移為熱力學流體特性的函數－密度、黏度、界面張力、潤濕性(Wettability)和可變的化學成分；和地質材料特性－孔隙度、滲透率、粒徑分佈、飽和度和空間異質性(Onaa et al. 2021)。LNAPL 也可能垂直向上遷移，向上遷移主要是透過毛細壓力驅動。非飽和帶地質材料孔隙空間可能同時充滿水、氣體和 LNAPL，因此，多相流體概念對於理解 LNAPL 在地下的遷移行為非常重要。本計畫彙整 LNAPL 垂直飽和度、垂直遷移、相對滲透性及傳導係數、回收系統等等方法論如下說明。

(一) LNAPL 垂直飽和度分佈

流體飽和度和毛細管壓力之間的關係由 van Genuchten (1980)模型定義，表示如下：

$$S_w = \left(\frac{1}{1+(\alpha\psi)^n}\right)^m$$

S_w為水的飽和度、ψ為基質吸力；α、m及n為曲線擬合參數。

在垂直平衡的假設下，方程式：(1)可以與毛細管壓力關係連結起來描述三相系統中 LNAPL 和水的垂直飽和度分布。使用 LNAPL 與水的 Leverett 假設(Charbeneau 2007)，分層土層中的水飽和度可表示如下：

$$S_w(z) = S_{wr,i} + \left(1 - S_{wr,i} - S_{nr,i}\right)\left(\frac{1}{1+\left(\alpha_{nw,i}(z - z_{nw})\right)}\right)^{m_i}$$
$$i = 1,2,\text{or } 3$$

$S_{wr,i}$為土壤水的殘餘飽和度；$S_{nr,i}$為殘餘 LNAPL 飽和度；$\alpha_{nw,i}$為 LNAPL 和水之間的毛管壓力的標度參數；z_{nw}為監測井中 LNAPL/水界面的高程。

總液體飽和度(包括水和 LNAPL)是空氣和 LNAPL 毛細管壓力的函數：

$$S_t(z) = S_{wr,i} + S_{nr,i} + \left(1 - S_{wr,i} - S_{nr,i}\right)\left(\frac{1}{1+\left(\alpha_{an,i}(z - z_{an})\right)^{n_i}}\right)^{m_i}$$
$$i = 1,2,\text{or } 3$$

式中，z_{an}為監測井空氣/NAPL 界面高程。因此，LNAPL 飽和度可表示為$S_n(z) = S_t(z) - S_w(z)$。

(二) LNAPL 垂直遷移

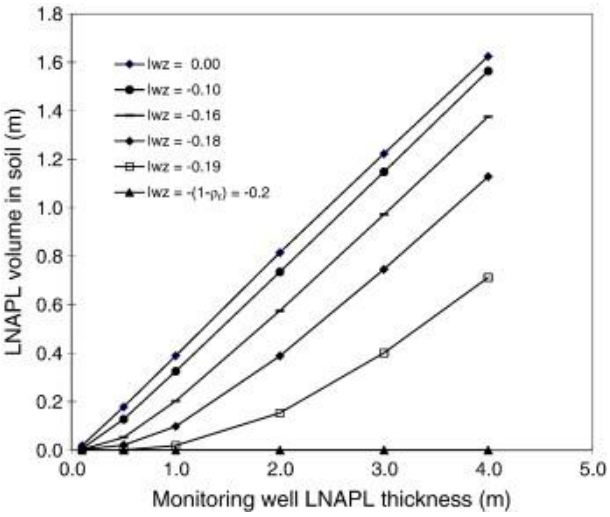
引起流體運動的主要力是壓力梯度和重力。如果垂直壓力梯度平衡了各流體相的重力，則存在垂直平衡條件，且垂直方向上不會有流動。LNAPL 的垂直遷移通常是由 0.1 至 0.7 的高垂直水力梯度引起的。LNAPL 水力梯度可表示為(Hubbert 1953)：

$$I_n = \frac{\nabla p_{c,nw}}{\rho_n g} + \left(\frac{\rho_w}{\rho_n} - 1\right)\hat{k} + \frac{\rho_w}{\rho_n} I_{wz}$$

I_n為 LNAPL 的水力梯度；I_{wz}為地下水的垂直水力梯度；$\hat{k}$為向上的單位向量；$\nabla p_{c,nw}$為毛細壓力梯度；ρ_n為 LNAPL 密度；ρ_w為水密度；g為重力。式中第一項表示毛細壓力梯度，第二項為浮力，當 NAPL 密度小於水密度時，浮力向上作用，第三項為與水相關的移動的力。當細粒地質材料覆蓋在滲透地層時，細粒地層可能會出現強烈的向下垂直水力梯度。LNAPL 穿過細粒土向下位移的臨界條件可表示為：

$$I_{wz,cr} = -(1-\rho_r)$$

式中，ρ_r為相對密度(可表示為ρ_n/ρ_w)。I_{wz}負值表示更大的向下梯度，梯度越大形成的 LNAP 體積減少，若I_{wz}超過臨界值則 LNAPL 變得不可回收，如圖 4-8 所示，當I_{wz}較小，地層 LNAPL 厚度剖面對I_{wz}不太敏感，但隨著I_{wz}增加而變得更加敏感，這意味著如果I_{wz}接近臨界值，則I_{wz}可能是估計地層 LNAPL 體積的關鍵因素。



資料來源：Jeong and Charbeneau (2014)。

圖 4-8、地層 LNAPL 體積受垂直水力梯度影響

(三) LNAPL 相對滲透性及傳導係數

對滲流區 LNAPL 流動進行建模需要知道流體滲透率、飽和度和壓力(k－S－P)之間的三相本構關係，以便求解控制流動方程式。描述 LNAPL 相對滲透率的兩個最常用模型是 Mualem (1976)和 Burdine (1953)模型。兩種模型都允許基於毛細管壓力關係以分析形式指定相對滲透率和流體飽和度之間的關係。

$$k_{rn}(S_w, S_n) = {S_n}^2 \left[\left(1 - \left(\frac{S_w - S_{wr}}{1 - S_{wr} - S_{br}}\right)^{\frac{1}{M}}\right)^{M} - \left(1 - \left(\frac{S_w + S_n - S_{wr} - S_{nr}}{1 - S_{wr} - S_{nr}}\right)^{\frac{1}{M}}\right)^{M} \right]$$

van Genuchten 和 Mualem 模型方程式的組合(vG-M 模型)可表示如下：

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39

$$k_{rn}(S_n) = \sqrt{S_n}\left[\left(1-\left(\frac{S_w - S_{wr}}{1 - S_{wr} - S_{br}}\right)^{\frac{1}{M}}\right)^{M} - \left(1-\left(\frac{S_w + S_n - S_{wr} - S_{nr}}{1 - S_{wr} - S_{nr}}\right)^{\frac{1}{M}}\right)^{M}\right]^2$$

兩個模型均能夠計算未飽合區地下水位邊緣的最大相對滲透率，Jeong and Charbeneau (2014)指出 vG-B 模型可能較為適合粗粒土壤，對於細粒材料則建議採用 vG-M 模型，因為對於細粒土壤，在已知 LNAPL 流向回收井的情況下，Burdine 方程式計算的相對滲透率幾乎為零。

(四) LNAPL 回收系統

四種常見的 LNAPL 回收系統分別為浮油抽除井(Skimmer wells)、水力強化井(Water enhanced wells)、真空強化井(Vacuum enhanced wells)和攔截溝(Interceptor trenches)。不同系統的 LNAPL 回收系統評估方程式如下：

- 浮油抽除系統的 LNAPL 回收率(Johns et al. 2003):

$$Q_{n,skimmer} = \frac{\pi(1-\rho_r)T_n(b_n)b_n}{ln\left(\frac{R_c}{R_w}\right)}$$

ρ_r為 LNPAL/水的密度比;R_c為抽除井的捕獲半徑；R_w為井的影響半徑。

- 水力強化系統 LNPAL 回收率:

$$Q_{n,WER} = \frac{T_n(b_n)}{\rho_w T_w(b_w)} Q_w$$

Q_w為抽水率；b_w含水層厚度；T_w含水層傳導係數。

- 真空強化系統 LNPAL 回收率:

$$Q_{n,VER} = \frac{\mu_{ar} T_n(b_n)}{\rho_r \overline{k}_{ra} T_w(b_a)} Q_a$$

μ_{ar}空氣與水的動黏度(Dynamic viscosity)；$\overline{k}_{ra}$為滲流區空氣平均相對滲透率；b_a為滲流區厚度；Q_a為空氣流量。

- 攔截溝系統 LNAPL 回收率(Charbeneau 2003):

$$Q_n = \frac{T_n(b_n)L_T}{\rho_r}\left(I_w + \frac{Q_w}{2L_T T_w(b_w)}\right)$$

L_T為接觸 LNAPL 污染團的溝槽長度。

4.6　油品污染傳輸模式

預測地下 LNAPL 行為最準確的方法是採用多維、多相流模式和本構理論進行模擬，以預測遊離、殘留和截留的 LNAPL。已有許多數學方法描述和預測 LNAPL 的宿命，包含參考殘餘截留率或將污染物進行單相或多相建模(Vasudevan et al. 2014; Ahmed et al. 2019; Agah et al. 2022)。Chen et al. (2016)考慮污染團的幾何形狀與方向，並建立 1、2 及 3 維污染團模擬，顯示污染團的幾何形狀與方向顯著影響整個傳輸過程及其濃度分布，且與地下水流方向垂直的另外兩個維度相比，其沿著地下水流方向的維度相對不那麼重要。Sookhak Lari et al. (2018)進行 80 個代表性多相流情境的數值模擬，顯示適當的數值方法可以準確評估 LNAPL 的整治和回收方法在複雜地下條件的有效性。Zhang et al. (2019)研究顯示當 LNAPL 的污染物前緣到達毛細管飽和區邊緣，其水平傳輸距離達到最大值，同時若存在低滲透土層則能夠有效阻止 LNAPLs 的向下遷移，有利於 LNAPLs 的水平傳輸，且 LNAPLs 的傳輸行為受土層滲透係數的影響。Sookhak Lari et al. (2019)針對 LNAPL 自然衰減法(Natural source zone depletion)和採用數值模型中可能需要考慮的關鍵過程進行批判性回顧，指出非飽和土壤的水力特性，包含水和 LNAPL 的保持行為(Retention behavior)以及滲透係數，都起重要的作用。鑑於複雜的 LNAPL-空氣-水-土壤相互作用，水文地質條件及不同時期佔據主導地位的地球化學過程，使建模具有挑戰性。

由於多相流和傳輸模式計算量大，除了本構關係外，還需要了解多相流模型的邊界條件，如 LNAPL 釋放的速率和體積、降雨和地下水位波動引起的潛在流體飽和路徑的變化等，而這些邊界條件通常非常不確定，且通常需要複雜的設備和訓練才能使用模型。在場址評估階段，初期關注重點可能在於快速且近似地評估地下污染物分布及傳輸概況，以選擇合適的調查或整治規劃。因此，基於數值模型的複雜性與不確定性，簡單概念模型已被證實在初步評估階段可以提供有效的估算(Frollini 2017; Frollini and Petitta 2018)。

為了規劃並實現污染場址的有效修復，有必要量化地下油品體積。考量場址為 112 年度公告較新的整治場址，配合調查數據的更新及相關試驗資料的獲取時程，本計畫第一年度採用兩種不同的現有概念模型(薄餅模型和垂直平衡模型)初步估計 LNAPL 體積，第二年度擬以垂直平衡模型為基礎之 LDRM 數值模型修

正 LNAPL 體積評估並推估可能傳輸及回收狀況，說明如下。

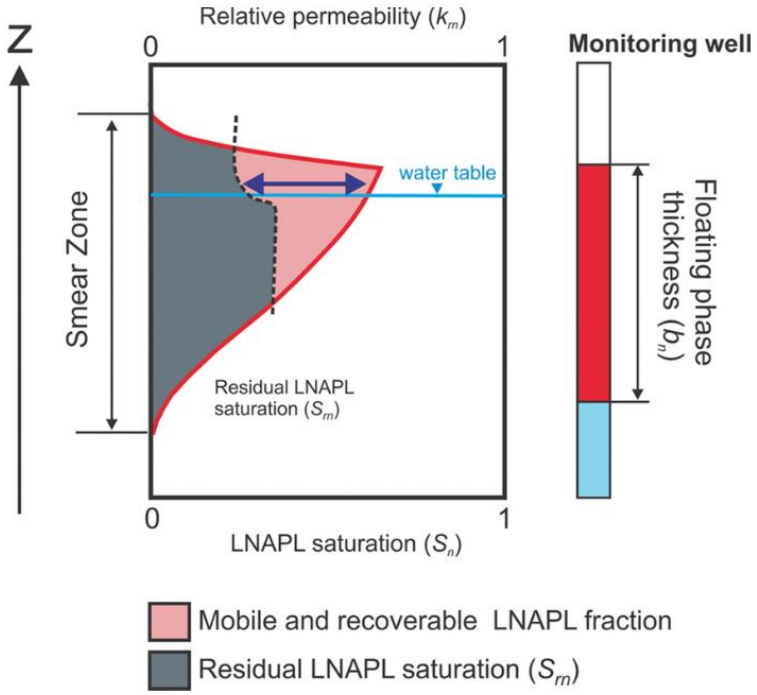
一、 垂直平衡模型(Vertical Equilibrium Model)

垂直平衡模型假設污染物停止釋放時適用，LNAPL 可以滲透到地下水位以下，並且不會在其上形成漂浮的離散層(Lundegard and Mudford 1998)。該模型的 LNAPL 的飽和度隨深度變化。對於均質含水層，LNAPL 飽和度剖面的形狀類似魚翅的形狀，如圖 4-9 所示，對於異質含水層，LNAPL 飽和度剖面的形狀可以是不規則的。因此，根據垂直平衡模型，監測井中的 LNAPL 厚度與其在含水層中的體積度(Specific volume)之間的關係源自於土壤的毛細管特性和影響飽和度剖面的 LNAPL 特徵，可定義為每單位表面積的 LNAPL 體積，並表示如下(Lenhard and Parker 1990b)：

$$V_o = \varphi \int_0^{surf} S_n(z)dz$$

式中，V_o體積度、$S_n(z)$為 LNAPL 飽和度隨深度的變化；φ土壤孔隙度(Soil porosity)。

LNAPL 飽和度隨深度的變化可以透過現地調查(岩心樣本)、解析模型或是 LDRM (LNAPL Distribution and Recovery Model, LDRM)等評估方法獲得。體積推估方法與煎餅模型一樣，基於體積度和相對面積計算 LNAPL 總體積。



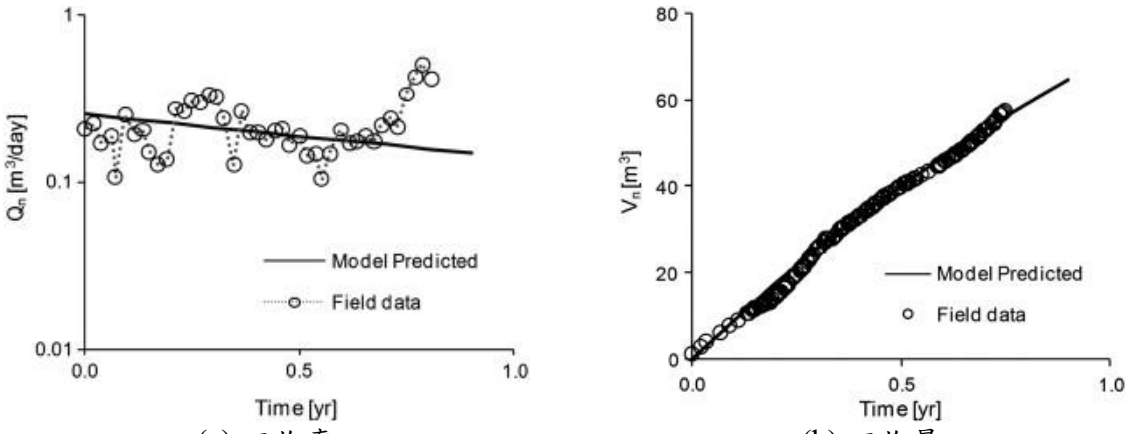
資料來源：Teramoto et al. (2020)。

圖 4-9、當考慮毛細管壓力時，無承壓均質各向同性含水層內地下水位界面處的 LNAPL 飽和度剖面預計將在平衡條件下呈現類似於魚翅的形狀

二、 LDRM 數值模型 (LNAPL Distribution and Recovery Model, LDRM)

LDRM 為美國石油學會發布之 LNAPL 分布及恢復模型(Charbeneau 2007)，是一種基於穩態徑向流的半解析模型，可用於評估含水層中的 LNAPL 分布、傳輸和可回收狀況(Jeong and Charbeneau 2014)，如圖 4-10 所示。LDRM 本質上是電子表格模型的升級並採用 Visual Basic 函數進行編碼。LDRM 基本假設為應用垂直平衡條件，以利地層 LNAPL 分布可以透過井中量測空氣/LNAPL 及 LNAPL/水的界面高程確定，並採用 van Genuchten (1980)、Mualem (1976)及 Burdine (1953)提出的毛細壓力-飽和度-滲透模型表示 LNAPL 的分布與移動。該模型假設空氣與水沒有直接接觸，因此，空氣與 LNAPL 的毛細壓力為總液體飽和度函數，模型參數包括最大 LNAPL 厚度、流體特性、土壤毛細管和岩石物理特性以及回收井性能。LDRM 模型涉及一系列簡化，例如假設地層、流體和整體化學條件的均勻性，同時考慮垂直力的平衡並忽略滯後現象。儘管在複雜地質條件下採用該模型可能在預測 LNAPL 總體積和可回收量具有一定的限制，但 Hartsock (2014)研究指出 LNAPL 做為一個相對簡單且免費的評估軟體，仍具備在現地應用的可靠性。

LDRM 假設地下多孔介質橫向均質，土壤非均質性可以透過多個土層來考慮，最多可具有三種不同的土層，且可設定不同的土壤特性和水力參數，雙層土壤系統的示意如圖 4-11 所示，垂直水力梯度的影響也被納入多相流的計算中，圖中間設置一個監測井，其 LNAPL 層位於空氣/LNAPL 界面Z_{an}和 LNAPL/水界面Z_{nw}之間，監測井中 LNAPL 的總厚度為b_n，上層土壤和下層土壤之間的交界高程為Z_{12}，地下水位的高程為Z_{aw}。儘管由於 LNAPL 層量測不到地下水位，但可以根據高程Z_{aw}和Z_{nw}以及 LNAPL 密度ρ_n(水的密度可假設為 1 g/cm^3)確定其高程。



(a) 回收率　　(b) 回收量

資料來源：Jeong and Charbeneau (2014)。

圖 4-10、預測及測量 LNAPL 之結果

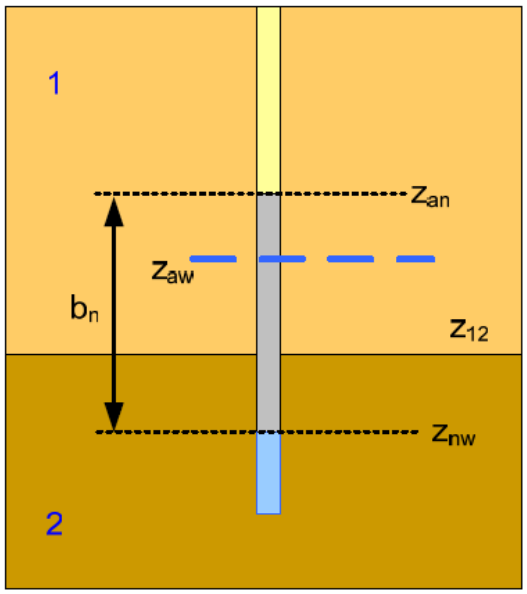


圖 4-11、概念模型示意圖

通常 LNAPL 現場監測會提供空氣/NAPL 界面高程Z_{an}和 NAPL/水界面高程Z_{nw}，若已知流體特性及土壤水力參數(VG 模型參數)，則可以根據監測井 LNAPL 最大厚度$b_{n[max]}$計算 LNAPL 飽和度分布：

- 已知 LNAPL 最大厚度 $b_{n[max]}$，透過下式計算 LNAPL 毛細管上升最高高度Z_{max}:

$$Z_{max} = \frac{\alpha_{an} z_{an} - \alpha_{nw} z_{nw}}{\alpha_{an} - \alpha_{nw}} = z_{an} + \frac{(1-\rho_r)(\rho_{an}/\sigma_{nw})}{\rho_r - (1-\rho_r)(\rho_{an}/\sigma_{nw})} b_{n[max]}$$

- 初始 LNAPL 飽和度分布:

$$若 z < z_{an}，S_{ni}(z) = \frac{(1-S_{wr})\left(1-S_{e[w]}(z)\right)}{1-f_r S_{e[w]}(z)}$$

$$若 z > z_{an}，S_{ni}(z) = f_r S_{ni} + (1 - S_{wr} - f_r S_{ni})\left(S_{e[t]} - S_{e[w]}\right)$$

- 剩餘 LNAPL 分布:

$$S_{nr}(z) = f_r S_{ni}$$

- 對於任何其他監測井 LNAPL 厚度b_n，可採用下式計算水和 LNAPL 飽和度分布

$$S_w(z) = S_{wr} + (1 - S_{wr} - S_{nr}) S_{e[w]}(z)$$

$$若 z < z_{an}，\ S_n(z) = 1 - S_w(z)$$

$$若 z > z_{an}，\ S_n(z) = S_{nr} + (1 - S_{wr} - S_{nr})\left(S_{e[t]} - S_{e[w]}\right)$$

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39

式中，$\alpha_{[nw]} = \sigma_{aw}\alpha/\sigma_{nw}$，$\alpha_{[nw]} = \sigma_{aw}\alpha/\sigma_{an}$，$\alpha$透過土壤水分特徵曲線 VG 模型獲得之參數。$\sigma$為表面張力，$\rho$為密度，$\rho_r$密度比$(\rho_r = \rho_n/\rho_w)$。$S_{e[w]}$為水的有效飽和度，$S_{e[t]}$為流體的有效飽和度，$S_{nr}$為 LNAPL 的殘餘飽和度，$S_{wr}$為水的殘餘飽和度。$f_r$為初始飽和度與殘餘飽和度的比例因子，Johnston and Adamski (2005)實驗結果顯示當土壤質地為細到中砂f_r=0.23、細砂(SP-SC)及壤土質砂(SC)分別為f_r=0.39 及f_r=0.43，黏土質地(CL)為f_r=0.56。

在 LDRM 模型中，LNAPL 傳導係數(Tn)用以定量自由相油品的在介質中遷移與流動的能力，計算方法基於浮油厚度與土壤滲透性，並考慮油品的動態行為，並可以表示如下：

$$\mathrm{T}_n(b_n) = \frac{\rho_r}{\mu_r}\int_{z_{nw}}^{z_{max}} K_{ws}(z)k_{rn}(S_w, S_n)dz$$

式中，ρ_r為 LNAPL-水的密度比，μ_r為 LNAPL-水的黏度比，K_{ws}為水的飽和水力傳導係數，k_{rn}為 LNAPL 的相對滲透係數，S_w為水的土壤飽和度，S_n為 LNAPL 的土壤飽和度，z為深度。該方法描述在不同深度，LNAPL 的流動能力，隨著浮油厚度的增加或土壤滲透性的提高，LNAPL 的 Tn 值會增加，表示其具有較高的流動潛勢，反之亦然。

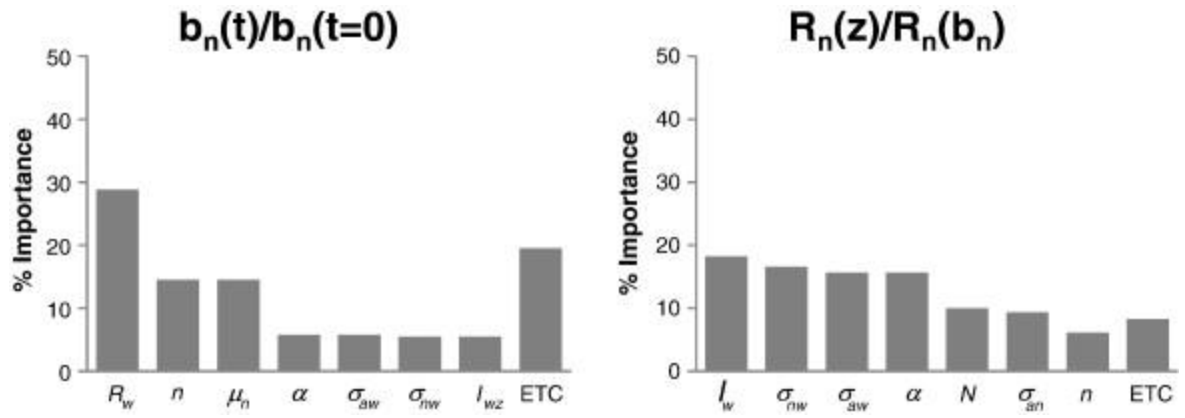
評析 LNAPL 特定體積D_n可透過監測井 LNAPL 厚度為函數進行計算，它由 LNAPL 飽和度曲線下的面積評估：

$$D_n(b_n) = \int_{z_{nw}}^{z_{max}} nS_n(z)dz$$

式中，n為孔隙率，不同土層的數值可能不同。LNAPL 可回收特定體積R_n由 LNAPL 飽和曲線和殘餘飽和曲線之間的面積計算：

$$R_n(b_n) = \int_{z_{nw}}^{z_{max}} n\big(S_n(z) - S_{nr}(z)\big)dz$$

Jeong and Charbeneau (2014)針對 LDRM 內參數進行敏感度分析，如圖 4-12 所示，結果顯示對於 LNAPL 厚度評估，抽水井的影響半徑R_w、土壤孔隙率n、及 LNAPL 運動黏度μ_n為高度敏感參數。此外，對於 LNAPL 可回收體積評估，地下水的水力梯度I_w、表面張力相關參數$(\sigma_{nw}$、$\sigma_{aw})$及毛細管壓力相關參數(α、N)為高度敏感參數。



資料來源：Jeong and Charbeneau (2014)。

圖 4-12、LDRM 參數對 LNAPL 厚度和可回收體積的敏感度分析

4.7 工作進度甘特圖

工作項目 \ 年月	113 12	114 1	114 2	114 3	114 4	114 5	114 6	114 7	114 8	114 9	114 10	114 11	備註
篩選合適監測井或整治井進行提取試驗	■	■	■	■	■								
地下水及油品之採樣與分析			■	■	■								
以不同解析解方程式計算 T 值				■	■	■	■						
以數值模型估計 LNAPL 體積				■	■	■	■	■	■				
評析 T 值影響，及油品傳輸與回收情形				■	■	■	■	■	■				
建立本土化提取試驗標準操作文件							■	■	■	■	■		
計算本計畫所貢獻之整治效益與成本										■	■		
研究結果分析及報告撰寫					■	■※					■	■※	
工作進度估計百分比（累積數）	5%	15%	25%	35%	45%	50%	60%	70%	80%	90%	95%	100%	

預定查核點		
	期中	(1) 篩選合適監測井或整治井進行提取試驗。 (2) 以不同解析解方程式計算 T 值。
	成果	(1) 以數值模型估計 LNAPL 體積，並設計浮油抽除情境。 (2) 建立本土化提取試驗標準操作文件。

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39

第五章　結果與討論

本年度(第二年度)依據前章節圖 4-1 流程圖執行工作，已於期中報告前完成現場提取試驗工作，詳見第 5.1 節；另在枯水期辦理地下水及油品之採樣與分析工作，藉以比較豐水期(第一年度)與枯水期(第二年度)之檢測結果是否具有差異性，此外，第一年度委託財團法人中興工程顧問社辦理土壤壓力鍋試驗(ASTM D6836 C)，已於本年度分析變飽和區的水力特性，詳見第 5.2 節。此外，本年度將提取試驗結果以三種方法(B&R、C&J、CB&P)計算 T 值，以探討 T 值估計的誤差對於 LNAPL 移動傳輸的影響程度，詳見第 5.3 節；並以數值模型為基礎，進一步以垂直平衡模型之 LDRM 模式評估 T 值差異對 LNAPL 傳輸移動與整治抽除效益的影響，藉以評析不同情境下之油品傳輸與回收狀況，詳見第 5.4 節。本年度將於期末報告完成提取試驗操作手冊撰寫工作，並藉由蒐集現地浮油抽除數據與資料，與本計畫數值模型模擬最佳抽除結果進行比較，計算本計畫所貢獻之整治效益與成本等量化數據。

5.1　提取試驗作業

本計畫已於第一年度篩選當時油厚較厚之 2 吋監測井(W-08、W-20)完成提取試驗工作，然而，在執行過程發現 W-20 監測井之油厚並未恢復至初始狀態，且歷經數個月後，其油厚範圍僅落在 1~2 公分左右，無法達到試驗所需至少 15 公分之厚度。因此，本年度以 113 年 12 月量測具有油厚之監測井及整治井資料(表 5-1)，篩選油厚較厚之 2 吋監測井名單為 W-07 及 W-08，已於 114 年 1 月 7~9 日以整治泵完成提取試驗工作，所需使用設備如表 5-2 所示，現場執行情形如圖 5-1 所示；本年度另針對 4 吋整治井辦理提取試驗，藉以釐清不同井徑在試驗過程及結果是否有差異性，辦理試驗之 4 吋整治井名單為 W02 及 W16，其位置分別位在監測井 W-08 及 W-07 旁邊 2~3 公尺處，已於 114 年 2 月 18~19 日以整治泵完成提取試驗工作，現場執行情形如圖 5-2 所示。

本計畫在第一年度已採用貝勒管及整治泵等兩種方法，並綜整出貝勒管及整治泵之優缺點，說明如下。

一、 貝勒管：優點是能夠快速移除固定量的 LNAPL，提供更即時的水頭變化，適用於 LNAPL 傳導性較高的監測井。缺點則是每次移除量較小，需多次操作才能完全去除井內的 LNAPL，且可能增加濾料回灌效應。

二、 整治泵：優點是可逐步抽取監測井內的 LNAPL，減少濾料回灌效應，適用於需要精確控制液位變化的情境。缺點則是抽取過程較為緩慢，無法像貝勒管般瞬間改變水頭，因此在傳導性較高的監測井中，效果可能不如貝勒管理想。

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39

由於本年度除針對 2 吋監測井進行提取試驗之外，亦針對 4 吋整治井辦理試驗工作，因此，為提高 LNAPL 移除量之效率，本年度僅以整治泵方法進行提取試驗工作。此外，考量第一年度僅以人工方式進行液位面量測，而場址為管制範圍有進出場時間之限制，因此，第一年度試驗之結果並未回復到初始水位面及油位面，造成T值計算結果異常，故本年度並調整第一年度作法，規劃在抽取油層且穩定後，分別在油位面及水位面放置自計式水位計，以拉長試驗油水位面之記錄時間，待試驗期間回復至油水位面初始值，藉以評估移除油品之成效。

表 5-1、具有油厚之監測井及整治井資料彙整表

井號	類型	油位(m)	水位(m)	油厚(m)	水力傳導係數(m/s)
W-06	2 吋監測井	25.78	26.08	0.303	$1.39x10^{-6}$
W-07	**2 吋監測井**	**9.943**	**11.17**	**1.23**	$2.68x10^{-6}$
W-08	***2 吋監測井***	***7.189***	***8.809***	***1.62***	$9.68x10^{-7}$
W-10	2 吋監測井	25.55	25.55	0.001	$4.35x10^{-7}$
W-20	*2 吋監測井*	*25.49*	*25.5*	*0.009*	$3.72x10^{-6}$
W00	4 吋整治井	6.394	6.663	0.269	—
W01	4 吋整治井	7.726	8.712	0.986	—
W02	**4 吋整治井**	**7.879**	**9.092**	**1.213**	—
W03	4 吋整治井	8.13	8.373	0.243	—
W04	4 吋整治井	8.128	8.382	0.254	—
W10	4 吋整治井	6.743	7.288	0.545	—
W11	4 吋整治井	6.713	6.875	0.162	—
W16	**4 吋整治井**	**10.31**	**11.71**	**1.397**	—
W17	4 吋整治井	10.01	10.19	0.184	—

備註 1：粗體代表本年度執行提取試驗之試驗井；斜體代表第一年度執行提取試驗之試驗井。
備註 2：整治井皆無水力傳導係數之試驗結果。

表 5-2、提取試驗所需設備彙整表

序號	設備名稱	本計畫採用廠牌及規格	說明
1	油水介面尺	Solinst 122	材質應具化學鈍性且不易對分析物造成吸附或脫附者，且可判定水及 LNPAL，其刻度須可讀到 0.1 公分。
2	整治泵	QED AutoPump AP2 Top Inlet Long	需要搭配發電機及空壓機使用，使自然流入整治泵中的液體透過空壓機加壓的空氣，沿著管線流至地表進行廢液回收。
3	發電機	MAX POWER CP3300	為空壓機供電使其能夠進行氣體壓縮，需安裝滅焰器及漏電斷電裝置以防止火花產生。
4	空壓機	B.W. STAR 2.5 HP	將空氣壓縮至高壓狀態，並將其輸送至整治泵，提供足夠的氣壓以促進泵內液體排放。
5	自計式水位計	IN-Situ TROLL 100 & TROLL 200	藉由壓力感測器記錄電壓後換算水壓，需搭配資料記錄器使用。



(a) 發電機安裝滅焰器及漏電斷電裝置



(b) 放置整治泵



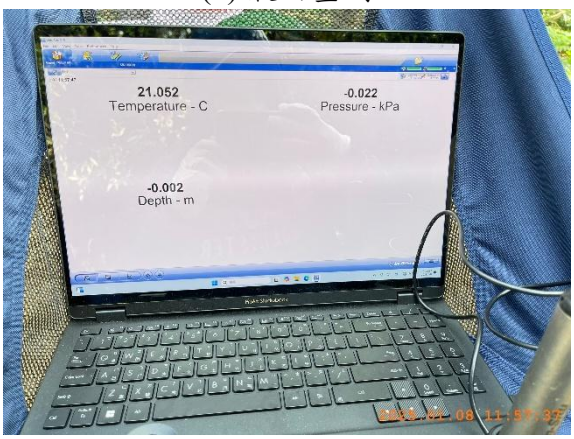
(c) 整治泵抽取



(d) 液面量測



(e) 放置水位計



(f)水位計設定及啟動

圖 5-1、2 吋監測井以整治泵進行提取試驗之過程



(a) 管材配置方式



(b) 放置整治泵



(c) 整治泵抽取



(d) 液面量測



(e) 放置水位計



(f) 廢液回收

圖 5-2、4 吋整治井以整治泵進行提取試驗之過程

5.2　採樣與試驗分析

一、 地下水 TPH 分析結果

本計畫在第一年度執行豐水期採樣，已於 113 年 6 月 5~26 日完成 15 口地下水採樣工作，其地下水 TPH 分析結果如表 5-3 所示；並於本年度執行枯水期採樣，已於 114 年 2 月 17~18 日完成 17 口地下水採樣工作，採樣紀錄如附件一所示，其地下水 TPH 分析結果如表 5-4 所示，分析報告如附件二所示。分析結果顯示，在豐水期之 W-06、W-07、W-08、W-10 等 4 口 TPH 超過第二類地下水污染管制標準(10 mg/L)，而在枯水期，超標井數增加為 7 口，包括 W-06、W-07、W-08、W-10、W-20，以及 2 口整治井 W02、W16。本計畫地下水 TPH 分析結果將做為後續數值模式建立之參考基礎，有關本計畫地下水豐枯水期之 TPH 分析結果說明如下。

表 5-3、地下水 TPH 分析(豐水期)結果綜整表

試驗井/檢測項目	採樣日期	總石油碳氫化合物 (mg/L)	總石油碳氫化合物 (C10-C40) (mg/L)	總石油碳氫化合物 (C6-C9) (mg/L)	水位深度 (公尺)
W-06	113.06.18	**71.8**	70.1	1.73	24.22
W-07	113.06.17	**3,150**	3,150	1.40	11.24
W-08	113.06.17	**106**	105	0.978	8.90
W-09	113.06.17	<0.500(0.287)	<0.300(0.212)	ND	0.85
W-10	113.06.26	**1,460**	1,460	ND	24.59
W-16	113.06.17	1.14	<0.300(0.143)	<1.00	4.64
W-17	113.06.17	1.09	<0.300(0.089)	<1.00	7.27
W-18	113.06.17	0.781	0.610	<0.200(0.171)	9.66
W-19	113.06.17	<0.500(0.206)	<0.300(0.131)	ND	13.17
W-20	113.06.18	3.99	2.74	1.25	25.75
W-21	113.06.26	<0.300(0.212)	<0.300(0.137)	ND	21.79
W-22	113.06.17	<0.500(0.315)	<0.300(0.240)	ND	19.33
W-23	113.06.17	<0.500(0.226)	<0.300(0.151)	ND	10.47
W-24	113.06.17	<0.500(0.211)	<0.300(0.136)	ND	46.37
W-25	113.06.05	<0.500(0.327)	<0.300(0.252)	ND	26.25

備註：TPH 粗體代表超過第二類地下水污染管制標準(10 mg/L)。

表 5-4、地下水 TPH 分析(枯水期)結果綜整表

試驗井/ 檢測項目	採樣 日期	總石油 碳氫化合物 (mg/L)	總石油 碳氫化合物 (C10-C50) (mg/L)	總石油 碳氫化合物 (C6-C9) (mg/L)	水位 深度 (公尺)
W-06	114.02.17	**1,570**	1,560	5.74	10.91
W-07	114.02.17	**240**	235	4.55	4.49
W-08	114.02.17	**472**	464	8.23	6.00
W-09	114.02.18	<0.500(0.203)	<0.300(0.129)	ND	9.36
W-10	114.02.17	**605**	603	2.39	10.85
W-16	114.02.18	ND	ND	ND	5.54
W-17	114.02.18	ND	ND	ND	6.18
W-18	114.02.18	<0.500(0.262)	<0.300(0.188)	ND	7.33
W-19	114.02.18	<0.500(0.254)	<0.300(0.180)	ND	2.55
W-20	114.02.17	**64.5**	61.4	3.06	12.10
W-21	114.02.18	<0.500(0.198)	<0.300(0.124)	ND	9.70
W-22	114.02.18	<0.500(0.177)	<0.300(0.103)	ND	9.00
W-23	114.02.18	ND	ND	ND	3.12
W-24	114.02.18	<0.500(0.343)	<0.300(0.269)	ND	3.40
W-25	114.02.18	<0.500(0.204)	<0.300(0.130)	ND	7.80
W02(整治井)	114.02.17	**432**	420	12.4	3.31
W16(整治井)	114.02.17	**3,160**	3,160	3.68	3.82

備註：TPH 粗體代表超過第二類地下水污染管制標準(10 mg/L)。

就水文條件而言，豐水期地下水流動較快且地下水位較高，可能增加污染傳輸移動的可能性，使污染物較分散導致 TPH 濃度相對較低；枯水期流動較慢，可能更集中於特定區域，污染物可能較易累積，導致 TPH 局部濃度上升。此外，由空間分布來看，W02 位在 W-08 在旁邊，W16 位在 W-07 在旁邊，然而，枯水期的監測結果顯示，W-07 及 W16 的 TPH 濃度差異極大，分別為 240 mg/L 及 3,160 mg/L，這可能與該區 LNAPL 的流動性較高有關。W16 顯示出顯著較高的 TPH 值，推測該井所在區域的 LNAPL 流動速度較快，影響範圍更大，進而導致較多 LNAPL 的累積。儘管 W16 和 W-07 兩口井地理位置接近，W16 可能因其地下水流動特性，使 LNAPL 持續匯聚，導致其 TPH 濃度顯著偏高。

二、 油品密度與黏度分析結果

本計畫在第一年度於 113 年 6 月 17~18 日完成 5 口油品採樣工作，於本年度 114 年 2 月 17 日完成 4 口油品採樣工作，油品密度與黏度分析結果彙整如表 5-5 所示。第一年度的分析結果顯示，W-06、W-07、W-10、W-20 等 4 口監測井之分析結果與水體較為類似，15℃密度範圍在 998.9~999.9 kg/m³，而 40℃黏度範圍在 0.6617~0.6760 mm²/s，這可能是由於採樣過程中採集到的是地下水而非油層所導致；相較之下，W-08 監測井測得 15℃密度 826.3 kg/m³、40℃黏度 2.249 mm²/s，與台灣中油股份有限公司公佈之車用超級柴油規範 (15℃密度 820~845 kg/m³、40℃黏度 2.0~4.5 mm²/s)較為接近。

因此，本年度針對 4 口有辦理提取試驗之監測井及整治井，重新進行油品密度與黏度分析，結果顯示 W-07 與 W16 數據較為接近，15℃密度範圍在 833.7~834.1 kg/m³，而 40℃黏度範圍在 2.308~2.377 mm²/s；而 W-08 與 W02 的數據亦較相近，15℃密度範圍在 826.2~826.5 kg/m³，而 40℃黏度範圍在 2.223~2.249 mm²/s，分析報告如附件三所示。此結果與監測井之地理位置相符，顯示鄰近井的油品來源相近，並可能存在一定程度的流通與遷移。本計畫油品密度與黏度分析結果將做為後續 T 值計算及數值模式建立之參考基礎。

表 5-5、油品密度與黏度分析結果綜整表

試驗井/ 檢測項目	採樣日期	採樣期間	密度(15℃) (kg/m³)	黏度(40℃) (mm²/s)
W-06	113.06.18	豐水期	999.9	0.6672
W-07	113.06.17	豐水期	998.9	0.6760
	114.02.17	枯水期	833.7	2.308
W-08	113.06.17	豐水期	826.3	2.249
	114.02.17	枯水期	826.2	2.223
W-10	113.06.18	豐水期	999.5	0.6617
W-20	113.06.18	豐水期	999.6	0.6648
W02	114.02.17	枯水期	826.5	2.233
W16	114.02.17	枯水期	834.1	2.377

備註：第一年(豐水期)採樣以採集水樣為主，主要確認地下水當中的密度與黏度，第二年(枯水期)採樣是為了後續計算 T 值，因此必須分析純相油品之油品密度與黏度。

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39

三、 壓力鍋試驗分析結果

本計畫依據本場址 112 年土壤調查評估計畫採樣尚存但已乾燥之土壤樣本，選取靠近 W-20、W-07 及 W-08 範圍之樣本，並於第一年度進行壓力鍋試驗，並於本年度進行土壤水分特徵曲線擬合，擬合結果如表 5-6 所示。

表 5-6、壓力鍋試驗 van Genuchten (1980) SWCC 模型擬合結果

Sample / VG model	SPC-1	SPC-2	SPC-3	SPC-4	SPC-5	SPC-6
θ_s	0.5194	0.5078	0.5523	0.5010	0.5177	0.5132
θ_r	0.3428	0.2969	0.3392	0.2260	0.3346	0.1390
α (1/kpa)	0.1500	0.2321	0.1560	0.1165	0.0505	0.1163
n	1.5394	1.3783	2.7751	2.9636	2.3017	2.1195
m	0.3504	0.2745	0.6397	0.6626	0.5655	0.5282

備註：SPC-1 及 SPC-2 為緊鄰 W-20，深度 15 及 20 公尺土壤；SPC-3 及 SPC-4 為 W-07 旁深度 1 及 6 公尺土壤；SPC-5 及 SPC-6 為整治井 W13 旁深度 1 及 6 公尺土壤。

根據「桃園煉油廠地下水標準監測井設置報告(修正版)」粒徑分析結果，試驗土壤以砂為主要成分，粉土與黏土含量較低，參考美國土壤三角分類可歸類為壤質砂土(Loamy sand)。本計畫壓力鍋試驗所得的 α 值(1.369 m^{-1})顯著低於 Carsel and Parrish (1988) Loamy sand 參考值(12.4 m^{-1})，如圖 5-3 所示。由於本計畫的土壤樣本來自土壤調查評估及監測井設置時的取樣，已乾燥並放置較長時間，可能導致土壤顆粒間的膠結作用增強，影響孔隙結構，進而影響壓力鍋試驗的結果。膠結作用與孔隙塌陷可能使土壤的毛細孔平均尺度減小，導致 α 值變低，這種影響在壓力鍋試驗時可能無法完全恢復，使得測得的 SWCC 具有較強的持水特性。因此本計畫 α 值的變化主要來自試驗樣本的影響，而非土壤類型的變更。

因此，為了更準確地描述現地條件下的土壤水分特性，本計畫採用 Carsel and Parrish (1988)所提供的 α 值作為參數模型，並輔以微水試驗數據進行參數的率定與驗證。微水試驗的優勢在於其能夠在較小的壓力範圍內獲得更精細的水分-壓力關係，且更符合未飽和區實際的水分運動行為，因此能夠提供更可靠的模型輸入參數。未來若應用於現場模擬，應考慮此誤差範圍，並透過其他測試方法進行進一步驗證。

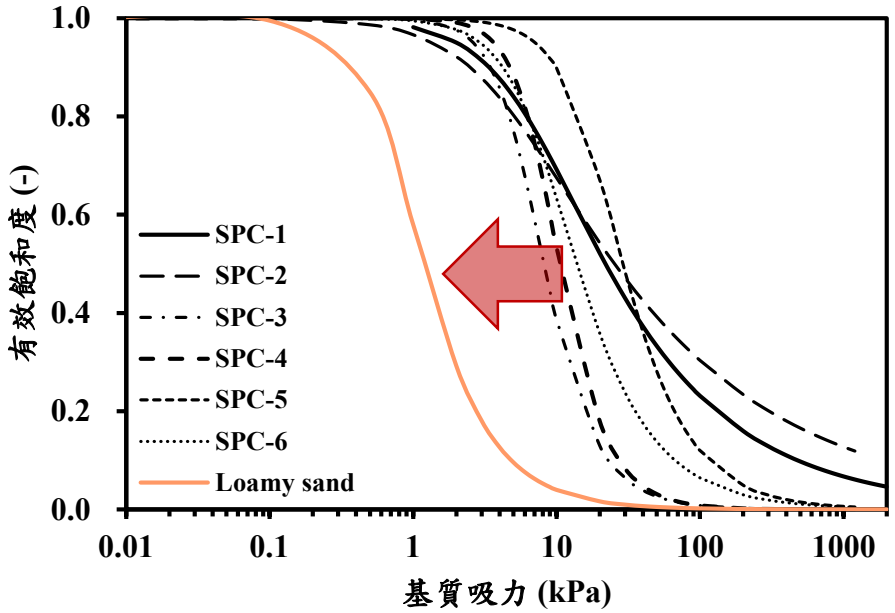


圖 5-3、壓力鍋試驗所得 SWCC 與 Loamy Sand 參考曲線比較

5.3　提取試驗 T 值計算

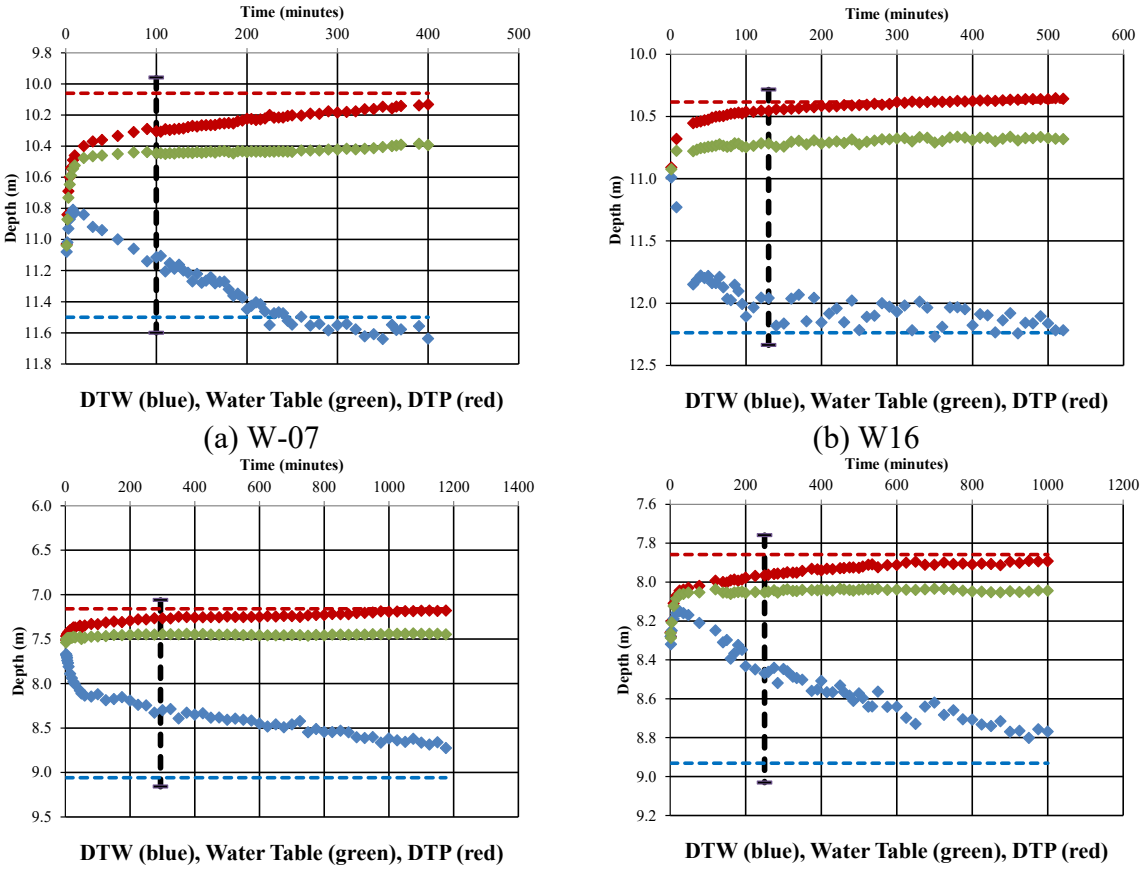
由於第一年度在進行提取試驗時，受到試驗場址進場時間限制影響，導致試驗期間之水油位面皆未回復到初始液位面。然而，本計畫所採用之 Bouwer & Rice (B&R)、Cooper & Jacob (C&J)、Cooper, Bredehoeft & Papadopulos (CB&P)等三種方法進行T值分析時，可能會因為洩降曲線未達穩態而影響結果的準確性。由於這三種方法皆假設洩降對數值與時間之間呈線性關係，若水位未回復，可能代表含水層仍受外部影響，導致洩降行為偏離理論預期，將使得T值被高估或低估。此外，水位未回復也可能影響 B&R 及 C&J 方法中截止時間點(Timecut)的選擇，使得早期受到井膚效應的數據判讀更加困難，甚至導致不適當的數據納入分析，進而降低 T 值計算的可靠性。而在 CB&P 方法中，由於使用有效半徑(r_e)來取代傳統井筒半徑(r_c)，若水位未回復，則有效半徑的估算可能會出現誤差，使得 T 值的計算結果進一步受到影響。

因此，為解決第一年度遇到之問題，本計畫在第二年度調整試驗作法，在試驗抽取油層且記錄液位面達穩定後，分別在油位面及水位面放置自計式水位計，以延長試驗油水位面之記錄時間，確保油水位面回復至初始值，以提高T值分析結果的準確性。有關本年度辦理提取試驗之 W-07、W-08、W02、W16 等 4 口監測井或整治井，有關液位面隨時間變化、洩降調整值估算、J-Ratio (J 比率)估算、截止時間點(Timecut)確定、及三種 T 值計算方法之分析結果說明如下。

一、 液位面隨時間變化

圖 5-4 為 4 口試驗井之液位面隨時間的變動情形，由 W-07 及 W02 等 2 口鄰近試驗井之 DTP(地表至 LNAPL 深度)與 DTW(地表至地下水深度)範圍介於 10~12 公尺之間，且兩者皆已回復至初始液位面，代表油厚皆已回復至初始狀態。相較之下，W-08 及 W16 等 2 口鄰近試驗井之 DTP 與 DTW 範圍介於 7~9 公尺之間，其中 DTP 已回復至初始液位面，但 DTW 仍未完全恢復至初始水位面，代表其油厚雖已大致回復，卻尚未完全達到試驗前的狀態。

在有 LNAPL 存在的情況下，通常在井裡面量到的 DTP 及 DTW 分別代表從井口到 LNAPL 面及水位面的深度，但由於 LNAPL 特性比水輕，因此會浮在水位面上，因此測得的 DTP 和 DTW 要結合密度比去修正，才能正確推估真實的地下水位(Water table)。此外，可觀察在試驗初期液面變化較劇烈，隨著地下水與 LNAPL 持續流入井中，液位面逐漸趨於穩定。在試驗初期之 DTP 與 DTW / Water table 間距較小，顯示提取試驗有效降低了井中浮油厚度，另由 DTP 與 DTW / Water table 變化可推測出地下水的補注速率明顯大於 LNAPL 補注至井中的速率，隨著試驗結束後時間的推移，DTW / Water table 逐漸增加，顯示浮油在試驗後逐漸回復至穩定狀態。



(a) W-07　(b) W16

(c) W-08　(d) W02

圖 5-4、提取試驗隨時間變化之液位面情形

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39

二、 估算洩降調整值(Drawdown Adjustment)

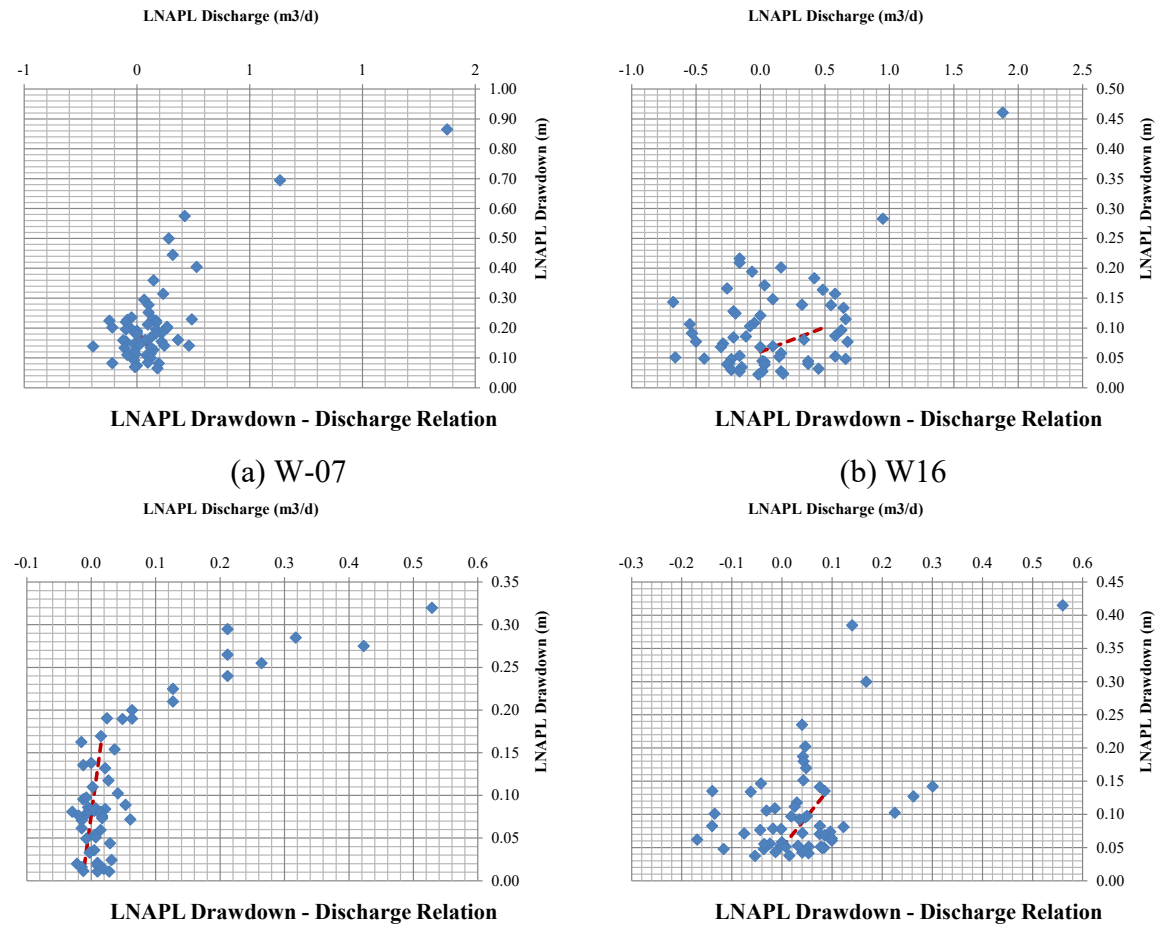
圖 5-5 為 4 口試驗井之 LNAPL 洩降量與 LNAPL 抽除率之診斷工具，屬於線性模型工具，主要用於確定洩降調整值。由於初始監測井中之 LNAPL 分布可能與地下環境中之 LNAPL 的平衡狀態略有差異，因此在傳導係數分析方法中，需在數據預處理時，依據 LNAPL 洩降量與抽除率隨時間變化之關係，對每個時間點的洩降量(S_{ni})進行校正，該變化量即為ΔS_n，根據ΔS_n對每個時間點t_i計算相應的S_{ni}，計算方法：

$$S_{ni} = DTP_i - DTP_0 - \Delta S_n$$

根據 4 口試驗井之 LNAPL 的洩降量與抽除率隨時間變化分析結果可見，在移除井中油品時，濾料中的殘存油品可能難以徹底清除。因此，試驗後初期的量測數據主要反映濾料中殘存油品的影響，而非來自井周圍地層的油品補注。經分析計算後，W-07、W-08、W02、W16 試驗井之ΔS_n分別為 0.01、0.01、-0.004、-0.05 公尺。

此外，由圖 5-5 顯示 LNAPL 抽除率與洩降量之間並無明顯的線性關係，但由監測井 W-07 及 W-08 可區分為右側的「高補注區」與左側的「低補注區」，整治井 W02 及 W16 則較無法明顯進行區分，可能與 4 吋整治井因內部空間大於 2 吋監測井，補注過程中 LNAPL 可能較均勻分佈，導致補注與洩降情況較不易區分。其中，W16 在試驗初期因油水交界面(DTP、DTW)較難準確量測，僅於第 1 分鐘與第 8 分鐘成功記錄有效資料點，導致繪圖時，高補注區資料點出現突跳現象，缺乏連續變化趨勢，此為資料密度不足所致，並非現地 LNAPL 動態之實際變化趨勢，此狀況亦將影響後續相關圖繪製時有突跳現象。儘管高補注區資料點未呈現連續趨勢，整體判讀方向仍可參考其他時間點資料分布加以推估。未來建議在抽注初期提高量測頻率，並設法克服油水界面觀測困難，以取得更完整且具代表性的資料序列。

由於試驗井皆位於非受壓含水層，當抽除率較大時，LNAPL 的洩降幅度也相應增加，而當抽除率較小時，洩降變化則較不顯著，顯示高補注區與低補注區之間可能存在兩種不同的補注機制。高補注區主要反映試驗初期的井內狀態，主要受到濾料孔隙中 LNAPL 流入的影響，而低補注區之補注來源主要來自周圍地層的孔隙滲流。因此，在後續分析中，應聚焦於低補注區的數據，進一步探討其補注特性、洩降行為及 T 值。



(a) W-07　　(b) W16

(c) W-08　　(d) W02

圖 5-5、提取試驗隨時間變化之 LNAPL 洩降量與 LNAPL 抽除率

三、 估算 J-Ratio (J 比率)

圖 5-6 為 4 口試驗井之 LNAPL 洩降量與 LNAPL 厚度之診斷工具，屬於線性模型工具，主要用於估算 J-Ratio (J 比率)，J-ratio 的計算方式是根據實測數據得出的線性關係，該值可應用於 B&R、C&J、CB&P 三種方法。下列方程式描述 LNAPL 的洩降變化量與厚度變化量之關係，J-Ratio 的大小受試驗井條件與地層特性影響而有所不同。經分析計算後，W-07、W-08、W02、W16 試驗井之 J-Ratio 分別為-0.263、-0.217、-0.174、-0.239。

$$J = \frac{\Delta s_n}{\Delta b_n}$$

其中，J為 J-Ratio(無單位)，表示 LNAPL 洩降與厚度變化之比值；Δs_n為某時段內 LNAPL 洩降量(m)；b_n為某時段內 LNAPL 厚度變化量(m)。

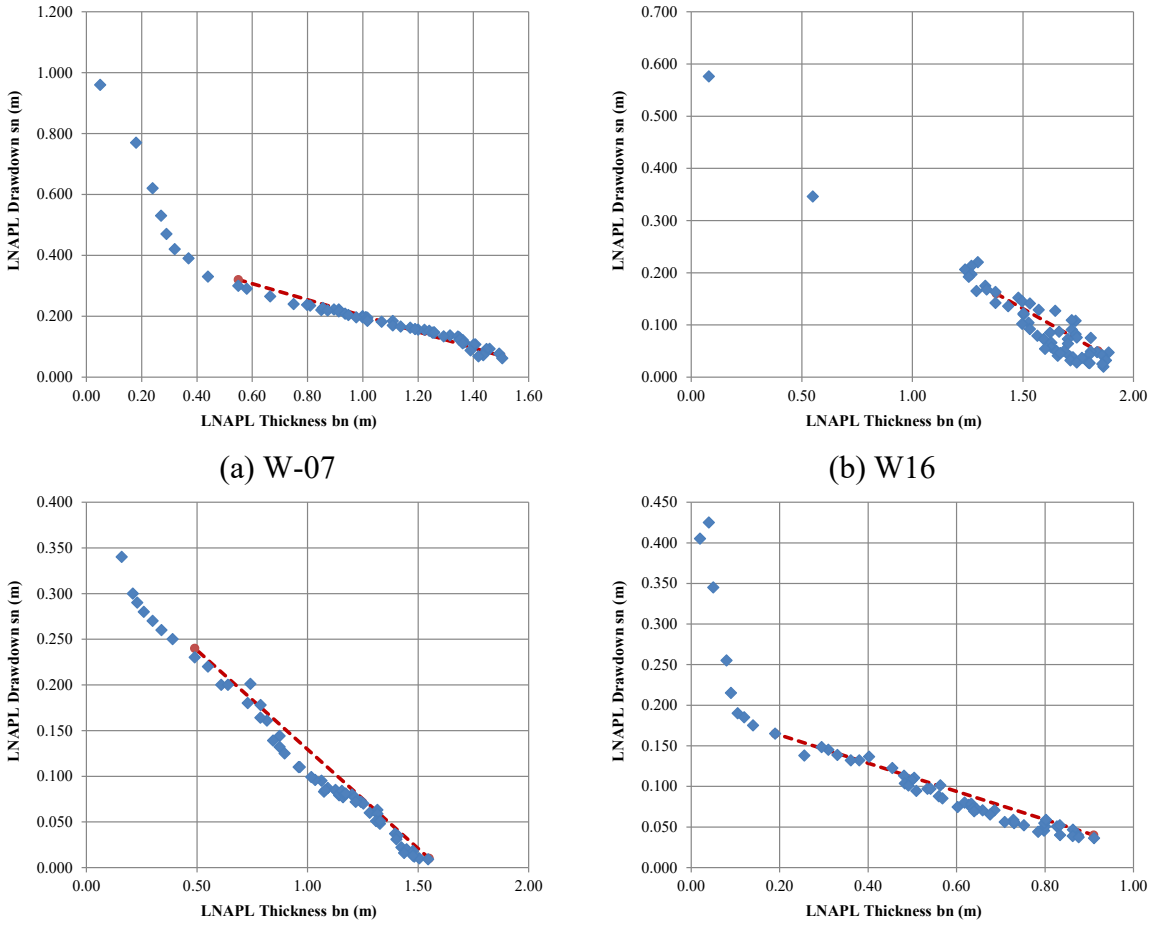


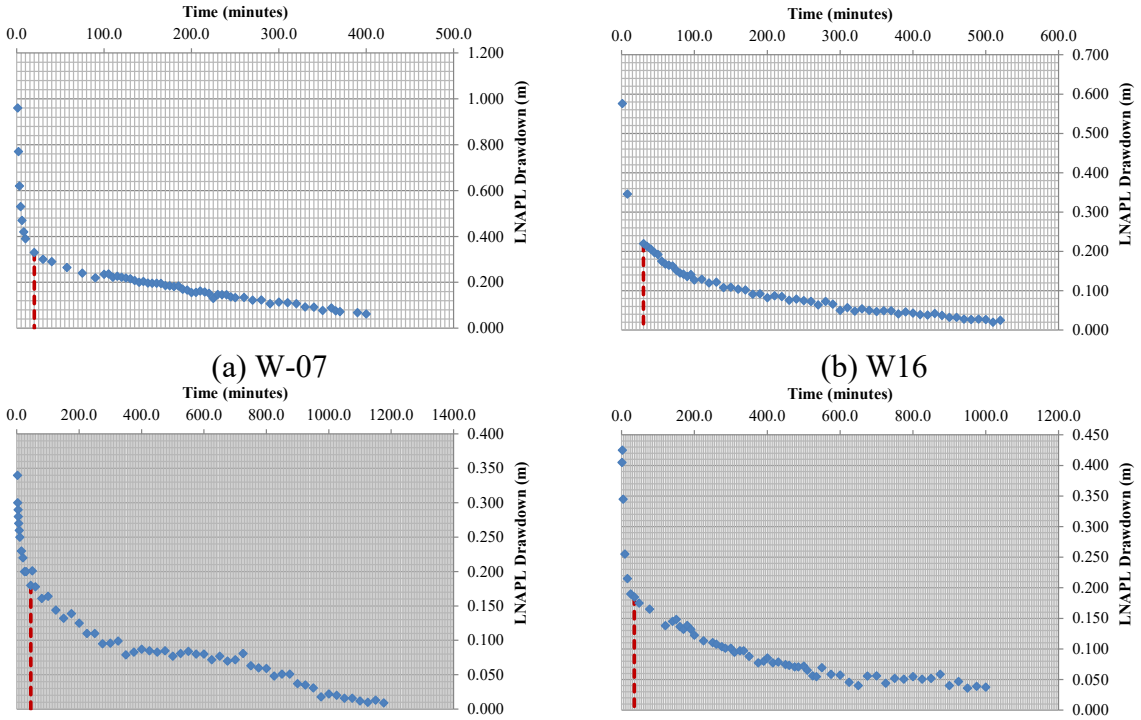
圖 5-6、提取試驗隨時間變化之 LNAPL 洩降量與 LNAPL 厚度

四、 確定截止時間點(Timecut)

在估算Δs_n及 J-Ratio 之後，還需要進一步確認截止時間點(Timecut)，以確立具代表性數據的範圍，確保後續分析的準確性。圖 5-7 為 4 口試驗井之 LNAPL 洩降量與時間的關係，具有相同Δs_n數值的數據可呈現兩種不同的趨勢：其一是在試驗前期，由井周圍濾料造成的高流量補注，對應較大的洩降區；其二則是在試驗後期，由井周圍地層特性影響，導致較低補注量與較小洩降區。透過 Timecut 的設定可明確區分這兩個區域，使 T 值分析時能更準確地聚焦於受地層特性主導的數據，提高分析結果的可靠性。經分析評估後，W-07、W-08、W02、W16 試驗井之截止時間點分別為 20、45、35、30 分鐘。

綜上所述，Timecut 前洩降變化較劇烈，之後趨於平緩並呈線性關係，顯示 LNAPL 由地層穩定補注至井中。當井內 LNAPL 主要來自濾料時，洩降變化較大，但隨時間推移，濾料內 LNAPL 逐漸耗盡，主要補注來源轉變為地層，洩降變化趨勢亦趨緩。因此，在確定 Timecut 後，可更準確區分濾

料與地質影響，避免數據混淆，使 T 值分析更能反映現地條件，提高結果可信度。



(a) W-07　(b) W16

(c) W-08　(d) W02

圖 5-7、提取試驗 LNAPL 洩降量與時間的關係

五、 B&R 分析

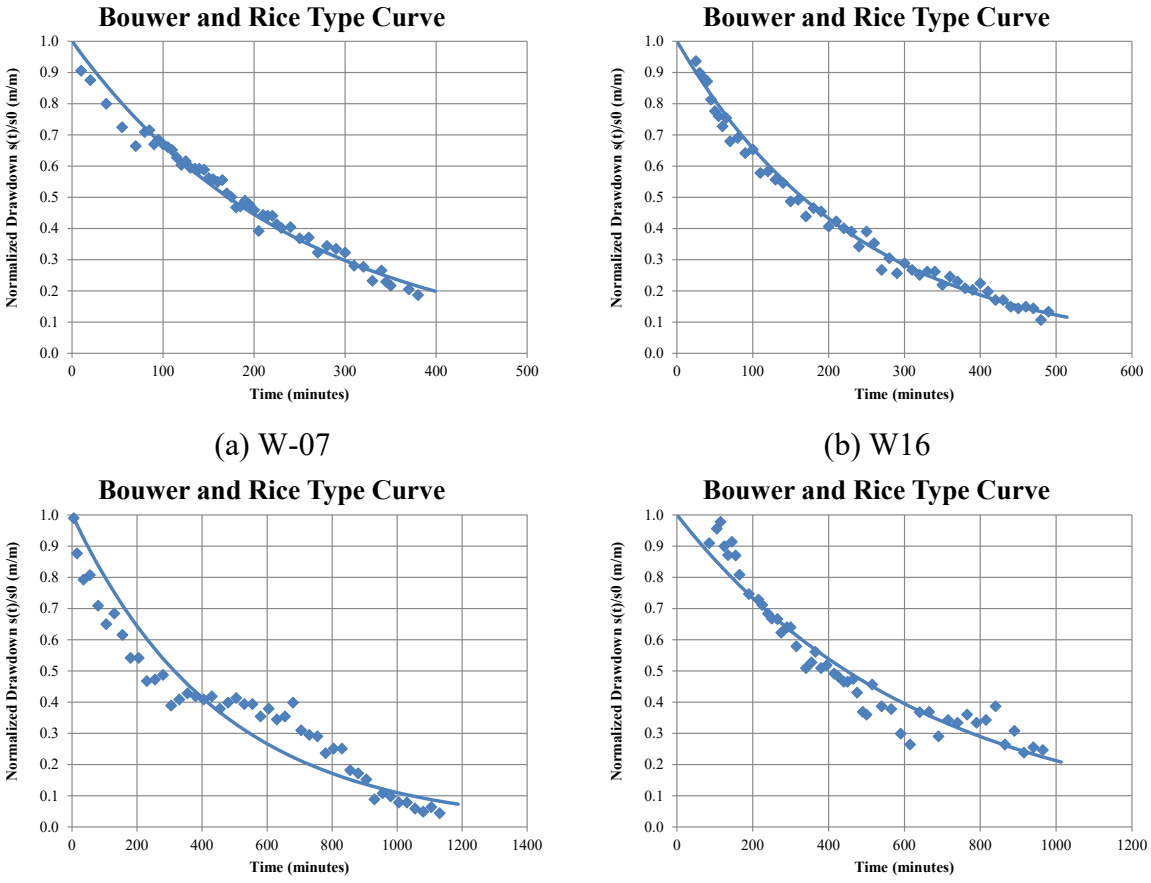
Bouwer and Rice (B&R)方法是常用於計算 LNAPL 之 T 值的數學方法，主要透過分析液面隨時間變化的數據求得 T 值。該方法假設洩降的對數值隨時間呈線性變化，並透過最小平方法對洩降對數與時間進行回歸分析，根據斜率計算 LNAPL 的 T 值，計算公式如下：

$$T_n = \frac{r_e^2 \ln(R/r_e) \ln(s_n(t_1)/s_n(t))}{2(-J)(t - t_1)}$$

其中，T_n為 LNAPL 為傳導係數(L^2/T)，r_e為有效半徑(L)，R為影響半徑(L)，$s_n(t_1)$為在初始時間的 LNAPL 洩降高度(L)，s_n(t)在t時間的 LNAPL 洩降高度(L)，J為 J 比率，t_1為初始時間(T)，t為當前時間(T)。

在實務上，試驗初期的數據可能會受到監測井周圍濾料孔隙內液體補注的影響，導致分析結果產生偏差。為避免此影響，可透過設定截止時間點(Timecut)，忽略初期較不具代表性的數據，以更準確的反映洩降與時間之間的線性關係。此方法的優勢在於能夠有效識別洩降穩定階段，進而提高 LNAPL 傳導率估算的準確性。

忽略 Timecut 前的數據進行 B&R 方法分析之曲線如圖 5-8 所示，W-07、W-08、W02、W16 試驗井之 T 值分別為 0.066±0.001、0.048±0.003、0.077±0.003、0.185±0.003 m^2/d。



(a) W-07　(b) W16

(c) W-08　(d) W02

圖 5-8、提取試驗 T 值 B&R 分析

六、 C&J 分析

Cooper & Jacob (C&J)方法是在 B&R 方法的基礎上進一步引入儲水係數(S_n)和校正時間(TimeAdjustment)，以提高分析精度。透過校正時間(TimeAdjustment)，截止時間點(Timecut)之前的部分數據被納入計算，以進行歸化求解分析，從而補償試驗初期因濾料孔隙中補注等因素引起的時間延遲或偏移，使結果更精準反映 LNAPL 的真實流動情況，該方法可以提高數據擬合的程度，計算公式如下：

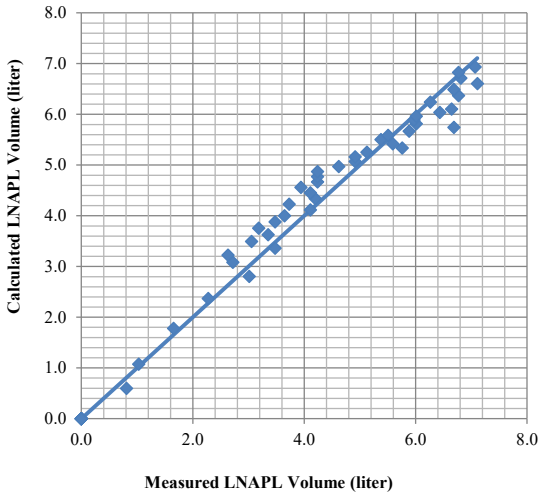
$$V_n(t_i) = \sum_{j}^{i} \frac{4\pi T_n s_j}{\ln\left(\frac{2.25 T_n t_j}{r_e^2 S_n}\right)} \Delta t_j$$

其中，$V_n(t_i)$為在時間t_i的累積滲流量(L^3)，T_n為 LNAPL 為傳導係數(L^2/T)，s_j在t_j時間的 LNAPL 洩降高度(L)，r_e為有效半徑(L)，S_n為 LNAPL 的儲水係數，Δt_j為時間間隔(T)。

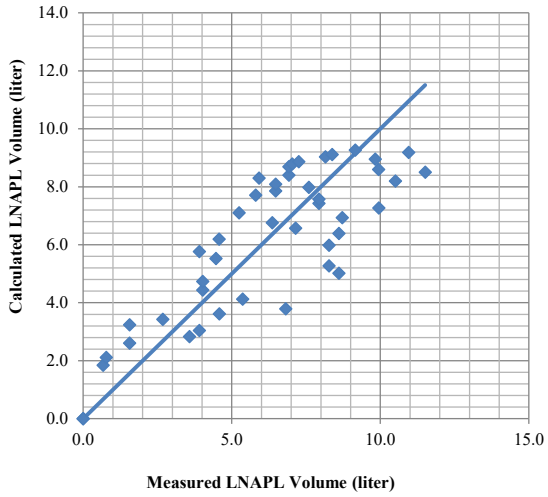
校正時間(TimeAdjustment)的範圍可以根據截止時間點(Timecut)進行調整，通常可依經驗或理論模型進行估算。一般建議校正時間設置為截止時間的 50%至 80%，推薦值為 60%或三分之二。

$$TimeAdjustment = (0.6 \text{ 或 } 2/3) \times Timecut$$

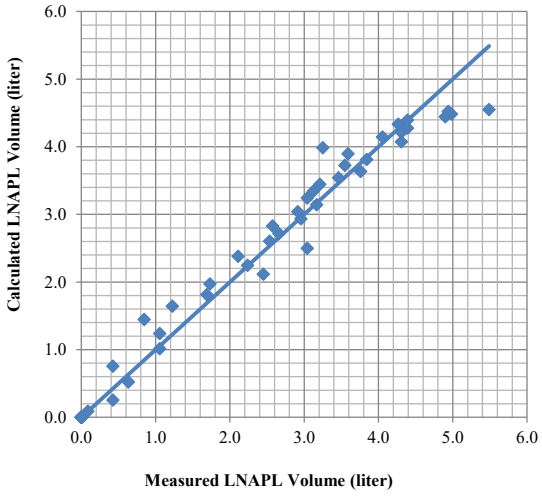
以 B&R 為基礎加入S_n和 TimeAdjustment 的數據，利用上述 C&J 公式將 T 值進行擬合，以得出均方根誤差(Root mean square error, RMSE)為最小之擬合曲線如圖 5-9 所示，W-07、W-08、W02、W16 試驗井之 T 值分別為 0.073、0.038、0.117、0.136 m^2/d；RMSE 別為 2.349、1.950、4.584、11.887 m^2/d。



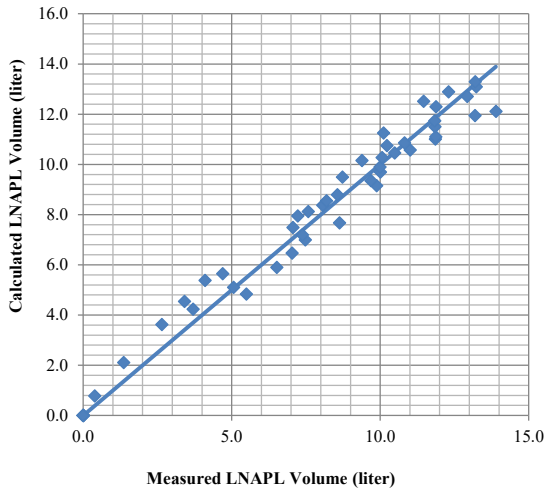
(a) W-07



(b) W16



(c) W-08



(d) W02

圖 5-9、提取試驗 T 值 C&J 分析

七、 CB&P 分析

Cooper, Bredehoeft & Papadopulos (CB&P)方法在 C&J 方法的基礎上進行了改進，使用傳統的擴孔半徑(r_c)來取代有效半徑(r_e)，此改變使得該方法能夠更準確地描述 LNAPL 在井中的實際流動情況，計算公式如下：

$$V_n(t_i) = \sum_{j}^{i} \frac{4\pi T_n s_j}{\ln\left(\frac{2.25 T_n t_j}{r_c^2 S_n}\right)} \Delta t_j$$

為提高估算結果的準確性，該方法結合截止時間點(Timecut)、LNAPL 洩降(s_n)以及儲水係數(S_n)，透過歸化求解以最小化均方根誤差(RMSE)進行分析，從而顯著提升模型的擬合度。擬合曲線如圖 5-10 所示，W-07、W-08、W02、W16 試驗井之 T 值分別為 0.050、0.032、0.112、0.199 m^2/d；RMSE 別為 0.159、0.302、0.246、0.186 m^2/d。由 RMSE 結果來看，CB&P 方法明顯優於 C&J 方法。

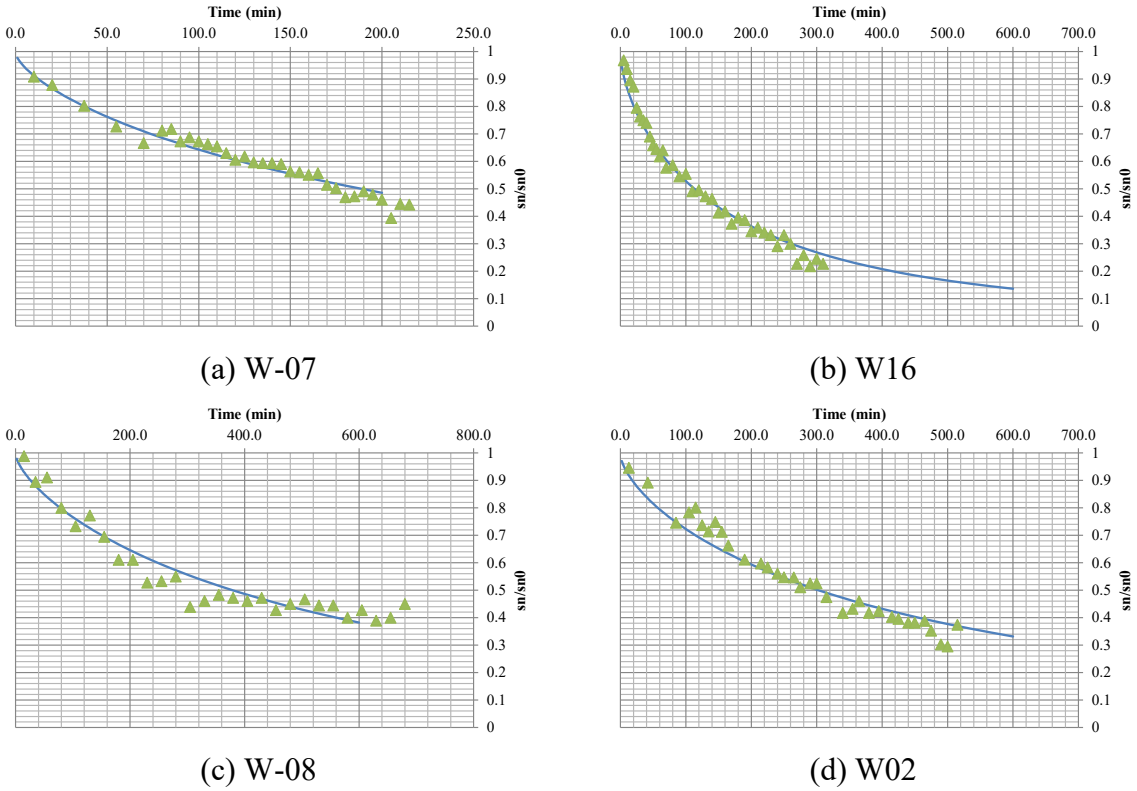


圖 5-10、提取試驗 T 值 CB&P 分析

八、 小結

本計畫利用常見的 T 值估算方法包括 Bouwer & Rice (B&R)方法、Cooper & Jacob (C&J)方法以及 Cooper, Bredehoeft & Papadopulos (CB&P)方法，本計

畫綜整三種方法計算結果如表 5-7 所示，並針對這三種方法的特性進行比較分析，說明如下。

表 5-7、試驗井之 T 值估算方法分析結果綜整表

試驗井	B&R 方法 (m^2/d)	C&J 方法 (m^2/d)	CB&P 方法 (m^2/d)	三種方法平均值 (m^2/d)
W-07	0.066±0.001	0.073	0.050	0.063±0.012
W-08	0.048±0.003	0.038	0.032	0.039±0.008
W02	0.077±0.003	0.117	0.112	0.102±0.022
W16	0.185±0.003	0.136	0.199	0.174±0.034

(一) B&R 方法：是最常用於 LNAPL 之 T 值估算方法，其基本假設為洩降的對數值與時間呈線性關係，該方法透過最小平方法對洩降數據進行回歸分析，並根據斜率計算 T 值。由於 B&R 方法計算簡單，適合用於一般地下水流動條件，並能快速獲得 LNAPL 的傳導係數。然而，此方法的一大限制在於，試驗初期的數據可能受到監測井周圍濾料補注影響，導致 T 值偏差，若未能有效排除受補注影響的數據，可能使估算結果不夠精確。此外，B&R 方法未考慮儲水係數(S_n)和時間延遲效應，因此在應用於較長時間的洩降過程時，準確性可能受到影響。

(二) C&J 方法：為了改善 B&R 方法的缺點，C&J 方法在其基礎上引入儲水係數(S_n)與校正時間(TimeAdjustment)，以補償試驗初期因濾料孔隙補注影響所產生的時間延遲或偏移。透過校正時間的設定，此方法能夠納入部分早期數據，使洩降與時間之間的線性關係更加穩健。C&J 方法的優勢在於能夠有效提升數據擬合的準確度，特別是在試驗期間較長、洩降過程較為緩慢時更具優勢。然而，該方法的計算較 B&R 方法複雜，且儲水係數(S_n)的選取需依據經驗或理論模型進行估算，可能引入額外的不確定性。此外，C&J 方法的 RMSE 在部分試驗井的結果較高，顯示其擬合效果仍有改進空間。

(三) CB&P 方法：進一步改進了 C&J 方法，使用傳統的擴孔半徑(r_c)來取代有效半徑(r_e)，以更精確地描述 LNAPL 在井中的流動特性。此外，該方法透過最小化 RMSE 來優化 T 值估算，使擬合結果更貼近實際數據。與 C&J 方法相比，CB&P 方法在不同試驗井中的 RMSE 顯著較低，顯示其能夠更準確地估算 LNAPL 傳導係數。此方法特別適用於地層影響較大的情境，能夠排除早期補注效應對數據的干擾。然而，由於 CB&P 方法

需考慮更多變數，其計算過程最為複雜，在應用時需投入更多計算資源。

(四) 綜合比較 B&R、C&J、CB&P 等三種方法的優劣，可得到以下結論。

1. 若需要快速估算 T 值，B&R 方法為最佳選擇，適用於試驗時間較短且數據受濾料影響較小的情境。
2. 若試驗初期受補注影響較大，C&J 方法能夠改善擬合效果，但需謹慎選擇儲水係數與校正時間。
3. 若希望獲得最準確的 T 值估算結果，CB&P 方法提供最佳擬合效果，特別適用於長期試驗及受地層特性影響較大的情境。

此外，為進一步釐清 LNAPL 與地下水在相同地層條件下的流動差異，本計畫亦將監測井之地下水水力傳導係數(K)換算為水之傳導係數(T)，並與 LNAPL 之 T 值進行比較。轉換方式係根據公式：

$$T = K \times b \times 86400$$

其中，K 為水力傳導係數(m/s)、b 為水位以下井篩區段(m)、86400 為秒轉日之單位轉換因子。

由前述表 5-1 監測井基本資料，可得到 W-07 水力傳導係數為 2.68×10^{-6} m/s，井篩區中水位以下有效厚度約 4.39 m，推算其地下水 T 值約為 1.015 m^2/d；而 W-08 水力傳導係數為 9.68×10^{-7}m/s，水位以下有效厚度約 5.901 m，故推算其地下水 T 值約為 0.493 m^2/d。相比之下，LNAPL 以 B&R、C&J、CB&P 等三種方法方法估算的平均 T 值，W-07 為 0.063±0.012 m^2/d，而 W-08 為 0.039±0.008 m^2/d，均明顯低於地下水之 T 值。此結果反映出即使於相同地層條件下，LNAPL 的傳導性顯著低於地下水，推測與其物理性質有關，例如較高黏滯性、毛細作用或界面張力等影響，皆可能抑制其在多孔介質中的流動行為。因此，在污染傳輸評估與整治方案設計上，不宜將地下水傳導係數直接套用至 LNAPL 模擬，而應依據實際油水性質差異進行量測與評估，以提升污染預測的準確性與整治成效，此亦為本計畫透過提取試驗獲得 LNAPL 之傳導係數之重要目標。

綜上所述，在實務應用上，建議根據試驗條件選擇適當的方法，或透過多方法比對提高結果的可信度。對於需要較高準確性的研究，CB&P 方法無疑是最理想的選擇，而在資源受限的情況下，B&R 方法仍能提供快速且合理的 T 值估算。透過不同方法的綜合應用，可提升 LNAPL 相關研究與管理決策的科學性與可靠性。

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39

5.4 概念模式模擬

配合場址現地調查與試驗評析，本計畫第一年度模式部分主要以概念模型初步估計 LNAPL 體積，第二年度基於前期試驗數據進行體積修正，進一步評估 T 值與 LNAPL 傳輸移動與整治抽除效益的影響，如圖 5-11 所示。

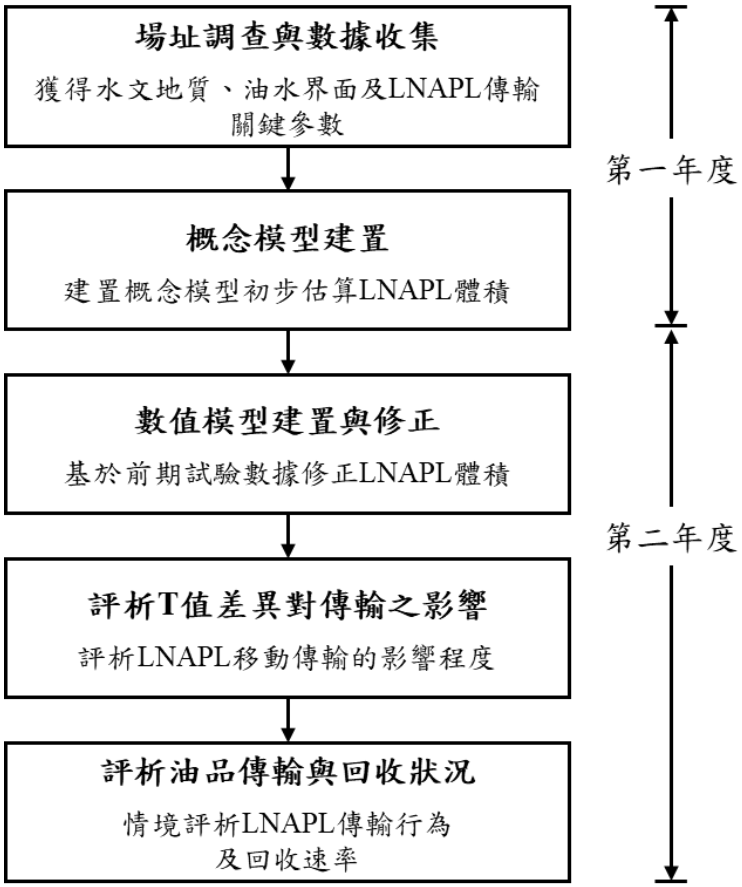


圖 5-11、模式評估分年度工作圖

一、 浮油厚度評估

監測井量測到的 LNAPL 觀測厚度通常大於在地下含水層的實際厚度(Lenhard et al. 2017)，這是由於 LNAPL 通過毛細帶遷移並在含水層中形成穩定的浮油層，而觀測井中由於無毛細作用，水位較低，促使更多自由相油進入井內，導致觀測到的浮油厚度較大(Frollini and Petitta 2018, Hughes et al. 1988)，這種現象被稱為表觀厚度或觀測厚度(Apparent thickness)，其與實際地層中的 LNAPL 厚度有所差異。如果在場址整治設計中未考慮這一因素，可能會對可排放的 LNAPL 量產生偏差，進而影響污染場址的整治策略。因此，需要對表觀厚度進行修正，才能夠進行合理的污染整治評估。

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39

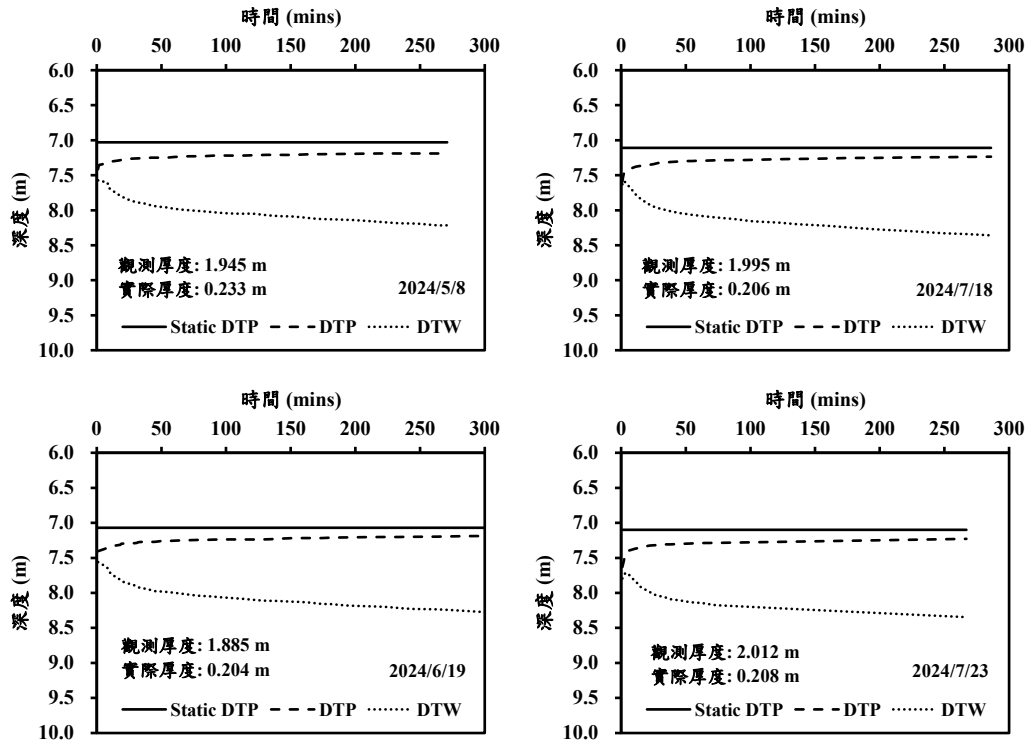
LNAPL 真實厚度可採用經驗式及現地試驗獲得，de Pastrovich et al. (1979)提出 CONCAWE 方法，推測觀測厚度約為真實厚度的 4 倍，而 Kramer (1982)及 Yaniga and Demko (1983)則估計該比例為 2 至 3 倍及 5 至 10 倍不等。Shepherd (1983)及 Hall et al. (1984)將土壤粒徑引入模型，Schiegg (1985)將數學模型加入毛細高度，Corey (1986)引入 Brooks-Corey 模型，Parker et al. (1987)及 Parker and Lenhard (1990)進一步將土壤飽和度整合進數學模型。提取試驗是一種有效的現地測量 LNAPL 實際厚度的方法，該方法不依賴於經驗式數學模型估算 LNAPL 的實際厚度。該方法基於現場測試數據，直接反映含水層的實際物理條件，包括孔隙度和裂隙等因素的影響，無需額外的數學修正。因此，可以更準確地考慮這些地質特徵對測量結果的影響，提供更實際 LNAPL 厚度的估算(Dippenaar et al. 2005)。Gruszczenski (1987)及 Hughes et al. (1988)發展基於現地提取試驗推估浮油真實厚度。

本計畫採用提取試驗持續記錄監測井中浮油界面和地下水位面隨時間的變化，並將這些數據繪製成曲線圖。當自由相油品被移除後，水和 LNAPL 會以一定的速率重新進入井中。隨著井內液位逐漸回升，補注速率逐漸減慢，最終形成一個拐點(即速率顯著變化的點)。這個拐點反映油品恢復速率的變化，並可用來推斷地層中實際的浮油厚度。具體而言，井中實際浮油厚度可由此拐點至測試前初始浮油界面之間的垂直距離推算，即從拐點至初始靜態浮油界面的距離，稱之為浮油回升法(Hughes et al. 1988)。

監測井浮油實際厚度的分析結果如圖 5-12 至圖 5-14 所示，第一年度試驗井為 W-08 及 W-20，在觀測期間，W-08 浮油厚度變化不大，平均觀測厚度為 1.947 m，平均實際厚度為 0.208 m，平均校驗係數為 9.42。W-20 受到場址整治規劃的影響，浮油厚度則有逐漸下降的趨勢，平均觀測厚度為 0.204 m，平均實際厚度為 0.023 m。W-20 試驗數據觀測到回升的浮油界面超過初始浮油界面，推測可能原因該測站浮油層較薄，在提取過程中，地下水和油品的流體動力學特性可能導致浮油界面波動，尤其是在水位和油位之間的流動性差異較大時。提取過程中若造成井內液位振盪大，可能會造成油品回升過程中出現超過靜態浮油界面的情況，這種現象一般是暫時的，隨著系統的穩定，浮油界面通常會回到靜態狀態。試驗操作中的不確定性(如抽取速率過快或測量誤差)也可能導致浮油界面在短時間內超過靜態浮油界面。另本年度額外增做之監測井平均校驗係數分別 W-07 為 4.24，W02 為 5.92，W16 為 10.90。

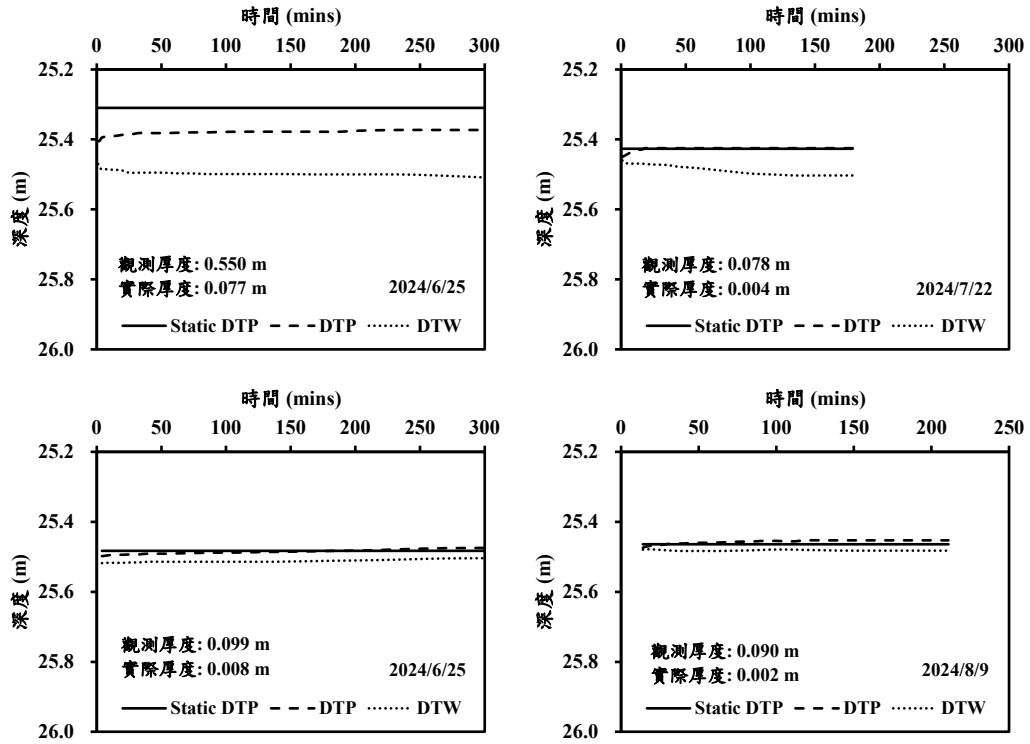
浮油回升法反映的是井周區域流體回補行為，較能真實捕捉實際可回升油層的厚度範圍，通常用於初步評估回補油層能力與驗證自由相油品之可回

收性，該方法容易受井構造、井周滲透性與抽取歷程等因素影響，導致結果產生不確定性或偏差。首先，抽取過程中的速率若控制不當，過快可能導致井內液位劇烈擾動，造成油水界面位置波動，進而影響拐點判讀準確性。此外，液位及界面測量儀器的解析度與反應時間亦會影響資料的精確性，尤其在界面快速變動初期更為明顯。井周地層的異質性與井壁效應亦可能限制油品向井內的回復速率，導致浮油回升不足而低估其實際厚度。當浮油層厚度本身較薄時，回復過程中可能無明顯拐點，增加推估困難度。另一方面，自由相油品與地下水在黏度、密度與毛細性等物性上的差異，也會影響其進入井內的動態與界面穩定性。試驗期間若有溫度或氣壓顯著變化，也可能造成液位膨脹或壓力擾動，使得界面觀測出現偏差。若回升觀測期間不足，油品尚未恢復至穩定狀態即進行厚度推估，亦可能低估其實際厚度。最後，界面偵測設備的選用若不符合場址油品特性(如高黏度或低反射率)，亦可能導致界面誤判。綜上所述，雖浮油回升法具有一定代表性，但為提升評估結果之準確性與代表性，建議搭配多次試驗、適當觀測期間及其他飽和度模型(如LDRM)輔助分析，以進行交叉驗證與必要修正。



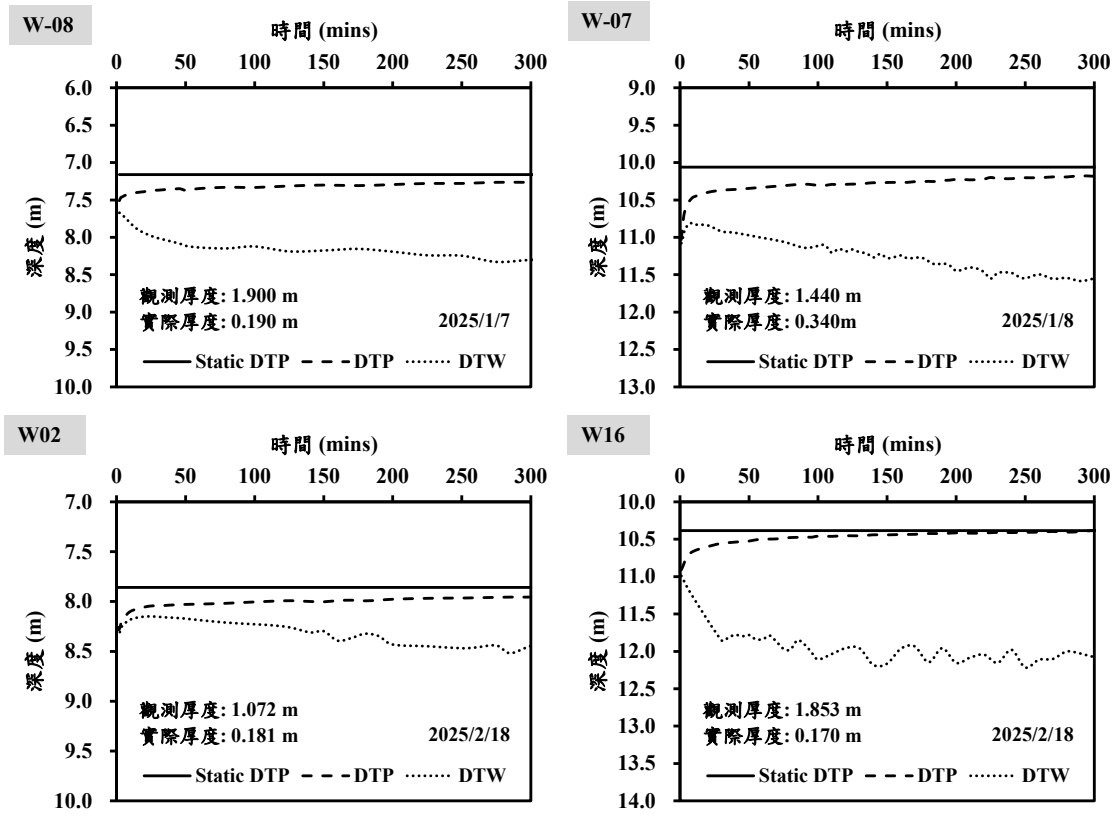
Static DTP:初始浮油界面深度、DTP: 浮油界面深度、DTW:地下水位深度。此處深度係指距井口距離。

圖 5-12、W-08 透過提取試驗推估 LNAPL 真實厚度(第一年度試驗井)



Static DTP:初始浮油界面深度、DTP: 浮油界面深度、DTW:地下水位深度。此處深度係指距井口距離。

圖 5-13、W-20 透過提取試驗推估 LNAPL 真實厚度(第一年度試驗井)



Static DTP:初始浮油界面深度、DTP: 浮油界面深度、DTW:地下水位深度。此處深度係指距井口距離。

圖 5-14、本年度提取試驗推估 LNAPL 真實厚度

二、 垂直平衡模型 LNAPL 體積估計

根據地層飽和度－壓力曲線，可推估自由相油品在孔隙中的分布情形，進而評估其可回收潛能。相較於單井的觀測數值，飽和度曲線推估具有較高的空間代表性與物理一致性。在此基礎上，垂直平衡模型(Vertical Equilibrium Model)可將監測井中觀測之浮油厚度轉換為特定厚度(Specific Thickness, Dn)，以反映地層中實際自由相油品的厚度範圍。然而，並非所有存在於孔隙中的 LNAPL 皆具備可回收性；其實際可移除的部分受到 LNAPL 傳導係數(LNAPL Transmissivity, Tn)之影響。因此，需進一步評估可回收厚度(Recoverable Thickness, Rn)，作為現地操作可行性的依據。Rn 值一般小於 Dn，且受到地層滲透性、油品性質與抽取操作條件的影響。在污染量與回收量的估算中，應使用特定厚度(Dn)來評估 LNAPL 總污染量，使用可回收厚度(Rn)來評估 LNAPL 的可回收量，以確保整治策略的合理性。觀測浮油厚度(bn)、特定厚度(Dn)以及可回收厚度(Rn)之間的區別列如表 5-8 所示，這些厚度評為 LNAPL 污染場址時的重要參數，能幫助決定污染整治計畫中的有效回收量及修正模型。

表 5-8、觀測浮油厚度、特定厚度與可回收厚度的區別與定義

指標	觀測浮油厚度(bn)	特定厚度(Dn)	可回收厚度(Rn)
定義	現地監測井量測之浮油厚度	地層中 LNAPL 實際厚度	可實際回收的 LNAPL 厚度
測量方式	井內油水界面探測	依據垂直平衡模式推估	依據 LNAPL 傳導係數推估
影響因素	毛細作用、井膚效應、流體密度	毛細作用、水文地質	LNAPL 流動性、傳導係數
關係	通常最大	受地層影響，略小於 bn	僅包含可回收部分，通常最小

LNAPL 飽和度隨深度的變化可以透過岩心樣本、解析模型或是 LDRM (LNAPL Distribution and Recovery Model, LDRM)等評估方法獲得。本計畫採用 LDRM 評析 LNAPL 飽和度曲線，首先，部分輸入參數(如浮油厚度、地表高程、水位高程、LNAPL 的密度和黏度、表面張力)來自現地或實驗室數據，van Genuchten 模型中的 N 和 α 參數、孔隙率、水力傳導係數和殘餘飽和度依據壓力鍋試驗結果進行率定。本計畫採用模型參數如表 5-9 及表 5-10 所示。此外，LNAPL 之表面張力亦會與土壤毛細孔分布共同影響飽和度曲線與自由相存在型態。根據表 5-9 所示，空氣/水表面張力(72.74 dynes/cm)明

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39

顯高於空氣/LNAPL(27.07 dynes/cm)與 LNAPL/水(29.60 dynes/cm)，顯示水相在細孔中具有較強的毛細保持力，而 LNAPL 相對容易受水相排斥並集中於較大孔徑區域。場址土壤粒徑分析顯示 D10 約為 0.009~0.037 mm，對應的孔徑多為數十微米，此尺度下毛細作用顯著，解釋了 LNAPL 主要分布於含水層上部及毛細帶的特徵。此一現象同時反映在 LNAPL 飽和度曲線的形態中，並為本計畫後續回收行為模擬與解釋的重要依據。

LDRM 還需要選擇一種模型來決定 LNAPL 的相對滲透率，分別可以選擇 Burdine 模型和 Mualem 模型。Burdine 模型適用於砂土，而 Mualem 模型則適用於砂土和含粉砂的砂土。本計畫擬採用適用範圍較廣泛的 Mualem 模型進行評估。

本計畫 LNAPL 密度係採用 ASTM D4052: 2022 方法獲得，動黏度採用 ASTM D445: 2023 方法獲得。其中，動黏度(Kinematic viscosity, υ)，又稱為運動黏度，為描述流體流動能力的指標，該指標不考慮流體密度，描述定溫度下且不施加外力條件下流體的流動性。動態黏度(Dynamic viscosity, μ)，又稱為絕對黏度、動力黏度，或簡稱黏度，表示流體內部分子間相互作用的強度，並受到外力作用下流動的抵抗力，與流體密度有關。因此，可以透過密度將動黏度轉換為動力黏度，並表示如下:

$$\mu = \upsilon \times \rho$$

υ 為動黏度，單位常以 mm^2/s 或 St 表示。μ 為動態黏度，單位常以 $N{\cdot}s/m^2$ 或 Pa·s 表示。ρ 為流體密度，單位常以 kg/m^3 或 g/cm^3 表示。

表 5-9、LNAPL 流體特性

項目	數值
LNAPL 密度 (gm/cc)	0.826
LNAPL 黏度 (cp)	1.858
空氣/水表面張力 (dynes/cm)	72.74
空氣/LNAPL 表面張力 (dynes/cm)	27.07
LNAPL/水表面張力 (dynes/cm)	29.60

表 5-10、土壤水力特性

項目	W-20	W-08	W02	W-07	W16
水力傳導率 (m/d)	0.235	0.084	0.321	0.232	
孔隙率 (-)	0.25				
Van Genuchten N (-)	2.54				
Van Genuchten α (1/m)	12.4				
殘餘飽和度(%)	5.7				

本計畫以 W-07、W-08 及 W-20 監測井與 W02 及 W16 整治井，評析 LNAPL 飽和度垂直剖面分布，及在垂直平衡條件下，通過 LNAPL 飽和度曲線的面積計算可獲得 LNAPL 特定體積(Specific Volume)及可回收體積(Recoverable Volume)，在此以單位面積的特定厚度(Dn)及可回收厚度(Rn)表示，評析結果列如表 5-11 所示，LNAPL 飽和度垂直剖面分布、單位面積特定厚度及可回收厚度、LNAPL 傳導係數曲線如圖 5-15 所示。各井的 LNAPL 觀測厚度範圍介於 0.571 m 至 1.900 m 之間，其中 W-08 (1.9 m)與 W16 (1.853 m)顯示較高的 LNAPL 厚度，而 W-20 (0.571 m)最低。

表 5-11、觀測浮油厚度、特定厚度、可回收厚度及傳導係數評估結果

項目	W-20*	W-08	W02	W-07	W16
	113/03/29	114/01/07	114/02/18	114/01/08	114/02/18
觀測厚度(m)	0.571	1.900	1.072	1.440	1.853
特定厚度(m)	0.084	0.391	0.197	0.283	0.380
可回收厚度(m)	0.066	0.333	0.164	0.238	0.323
最大 Tn 值(m^2/d)	0.029	0.056	0.103	0.110	0.151

備註：標示*代表 W-20 以 113 年 03 月觀測最大厚度進行評估，該口井於 113 年 10 月及 11 月量測時觀測厚度 0.031 m，已低於可回收特定厚度。

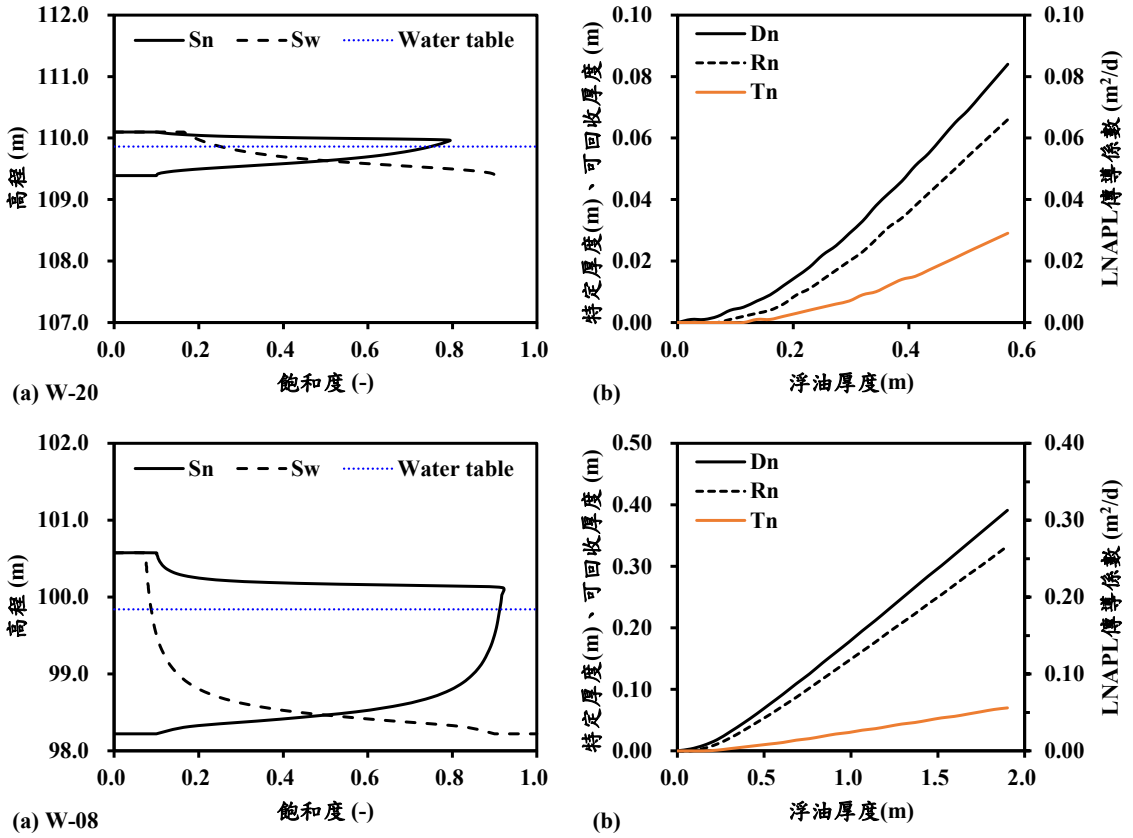


圖 5-15、各井(a) LNAPL 飽和度垂直剖面分布及(b)單位面積特定厚度及可回收厚度、LNAPL 傳導係數曲線

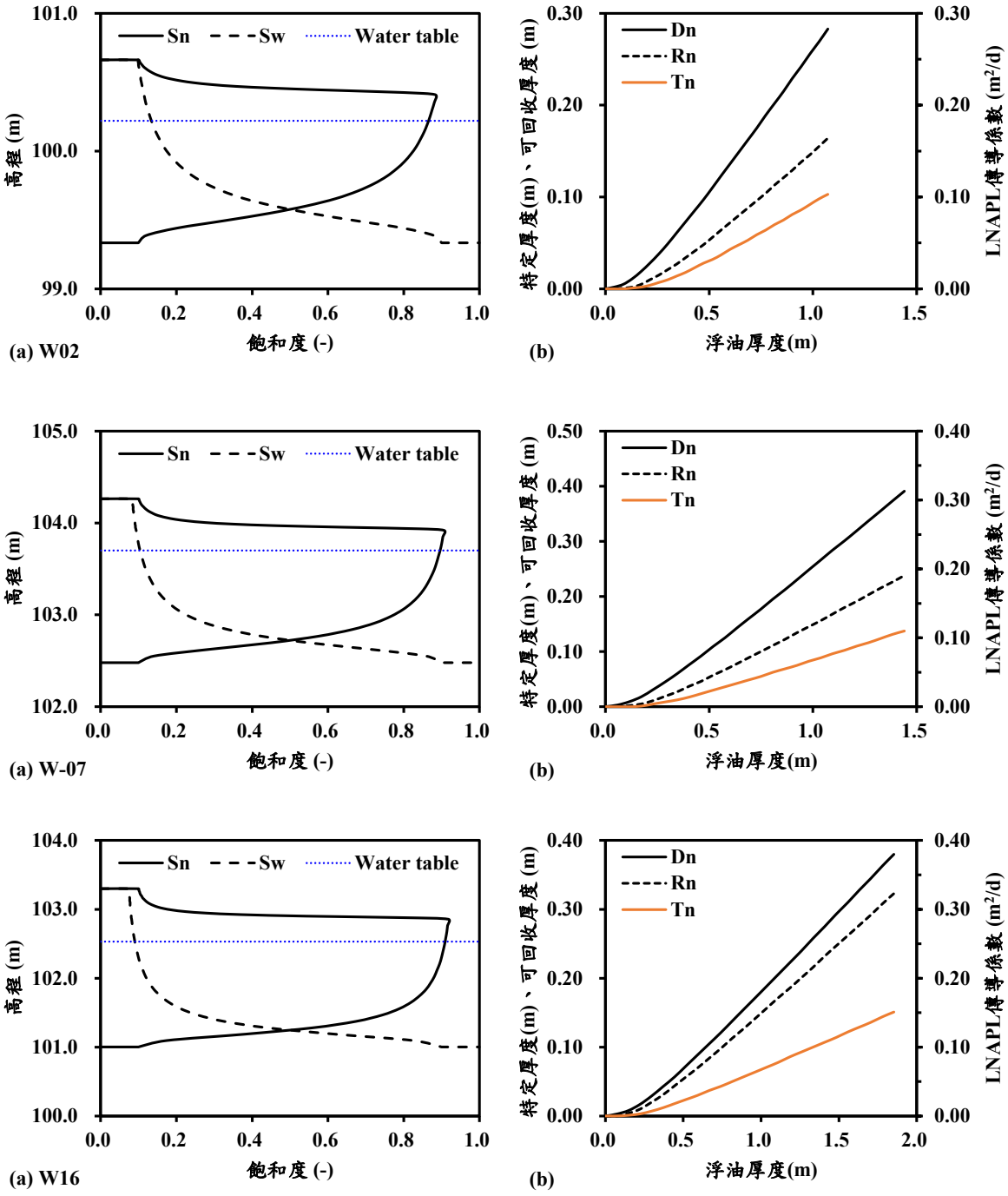


圖 5-15、各井(a) LNAPL 飽和度垂直剖面分布及(b)單位面積特定厚度及可回收厚度、LNAPL 傳導係數曲線(續)

W-20 於提取試驗期間，LNAPL 浮油層迅速被移除，且回復速率極低。後續監測顯示，LNAPL 浮油層厚度持續下降，至 113 年 10 月及 11 月僅測得 0.031 m。因此，本計畫以 113 年 03 月觀測最大厚度(0.571 m)進行評估，顯示 W-20 特定厚度為 0.084 m、可回收厚度為 0.066 m，LNAPL 傳導係數為 0.029 m^2/d。當觀測浮油厚度顯著低於可回收厚度時，通常表示 LNAPL 已進

入殘留相其飽和度低於可移動閾值，導致自由相 LNAPL 的可回收性顯著降低。在此情況下，LNAPL 主要受毛細作用與孔隙結構控制，以殘留相存在，回收效率趨近零。此外，若浮油厚度持續下降且無補充現象，可能反映 LNAPL 已進入穩定分布狀態，或透過溶解作用進入地下水相與揮發作用遷移至氣相。因此，當浮油厚度低於可回收臨界值時，應重新評估回收策略，並透過地下水與土壤氣監測，確定是否需轉換為監測自然衰減(Monitored Natural Attenuation, MNA)或其他修復技術，以確保污染場址管理的有效性。

從特定厚度與可回收厚度的比較顯示，即便某些井的觀測厚度較大，實際可回收量仍可能受限。W-08 擁有較高的觀測厚度(1.9 m)，並且其特定厚度(0.391 m)和可回收厚度(0.333 m)相對較大，顯示其回收潛力不錯。然而，W-08 的 LNAPL 傳導係數較低(Tn=0.056 m^2/d)，這可能會限制 LNAPL 的流動性及回收效率。W02 雖然觀測厚度相對小(1.072 m)，但其地層傳導係數較高(Tn = 0.103 m^2/d)，可能有助於 LNAPL 的回收。然而，可回收厚度較低(0.164 m)，回收潛力仍有限。W-08 與 W02 位於相對接近的位置，這使得它們在 LNAPL 的觀測厚度與回收潛力上可能具有相似的地質條件，但 W-08 局部的地層特性使得 LNAPL 的流動性受到一定的限制，即便觀測厚度較大，實際可回收的部分仍較少。

另一方面，W-07 與 W16 的距離也較近，這兩口井顯示出較高的回收潛力。W16 的觀測厚度為 1.853 m，並且具有 0.323 m 的可回收厚度，顯示 LNAPL 在此區域的流動性較強。而 W-07 的可回收厚度為 0.238 m，雖然略低於 W16，但兩者的 LNAPL 傳導係數均較高，分別為 0.110 m^2/d 和 0.151 m^2/d，說明這兩口井內的 LNAPL 都具有較高的可回收性。

整體而言，W02 與 W16 的 LDRM 模型 T 值模擬結果(分別為 0.103 和 0.151 m^2/d)與第 5.3 節現地試驗所得之 T 值平均值相近(分別為 0.102±0.022 和 0.174±0.034 m^2/d)，顯示模型於此兩口整治井具有良好一致性與代表性；而 W-08 模型 T 值(0.056 m^2/d)略高於現地試驗 T 值平均值(0.039±0.008 m^2/d)，可能與現地試驗條件下自由相分布不均或土壤微尺度非均質性有關，導致傳導係數低估；而 W-07 模型 T 值(0.110 m^2/d)則高於現地試驗 T 值平均值(0.063±0.012 m^2/d)，可能反映 LDRM 模型設定中飽和度–傳導率參數與實際場地條件仍存偏差，需進一步調整。因此，提取試驗主要反映特定厚度與瞬時條件下的等效傳導行為，而 LDRM 模型則依據 LNAPL 厚度變化模擬傳導係數的連續響應，兩者在物理涵義與尺度上有所差異，因此局部差異屬合理現象。整體而言，本計畫透過現地試驗與 LDRM 模型評估之交叉比對，確認 LDRM 模擬具備一定準確性，惟建議未來仍應透過率定與現地量測資料

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39

交叉驗證，以提升模擬結果的準確性與場址應用價值。

基於上述分析，本計畫建議以下優先回收目標：

(一) W16、W-07、W02 應作為優先回收目標，因其可回收厚度較高且 Tn 值相對較佳，LNAPL 的流動性與回收潛力較大。

(二) W-08 可作為次要回收對象，但仍需進一步監測其 LNAPL 回復速率，以確保回收作業的經濟性與可行性。

(三) W-20 建議停止回收並改為監測自然衰減(MNA)策略，因其 LNAPL 主要處於殘留相，回收效率極低。

雖然在監測井中可以觀測到較明顯的 LNAPL 厚度，但當可回收體積和傳導係數降至較低值時，回收效率會顯著降低。這表明在低傳導係數的情況下，LNAPL 的流動性受到限制，進而影響了其可回收潛力。低傳導係數可能導致液體在地下水中的運移速率變慢，使得浮油難以有效地從地層中回收，從而使得回收作業的效率和效益大打折扣。因此，在回收計畫中，除了考慮 LNAPL 的總體厚度外，還應重視傳導係數對回收效率的影響，特別是在低傳導係數區域，應調整回收策略以達到最佳效果。

依據本場址 112 年調查報告「煉製事業部桃園煉油廠土壤及地下水污染調查及評估計畫」以觀測厚度模擬估算浮油體積約為 1,695 m^3 至 3,323 m^3。本計畫以 114 年 1 月觀測浮油厚度，透過垂直平衡模式評估 LNAPL 在含水層中的實際浮油厚度，修正過程考量 LNAPL 在不同孔隙壓力條件下的飽和度分佈，使其結果更符合地層內的實際 LNAPL 分佈情形。114 年 1 月修正後浮油體積分布如圖 5-16 所示，推估浮油總體積約為 2438.43 m^3。

LNAPL 的體積估算存在許多挑戰，這些挑戰主要源於測量和建模過程中的不確定性。一個主要的問題是由於 LNAPL 厚度變異性大，且分布不均勻，容易造成空間插值的不確定性。此外，模型評估主要依賴觀測井的浮油厚度數據，但這些數據可能因手動或自動回收浮油操作中的誤差而不準確。如果回收操作在測量前剛剛進行，可能導致浮油厚度被低估，進而影響體積估算的精確性。

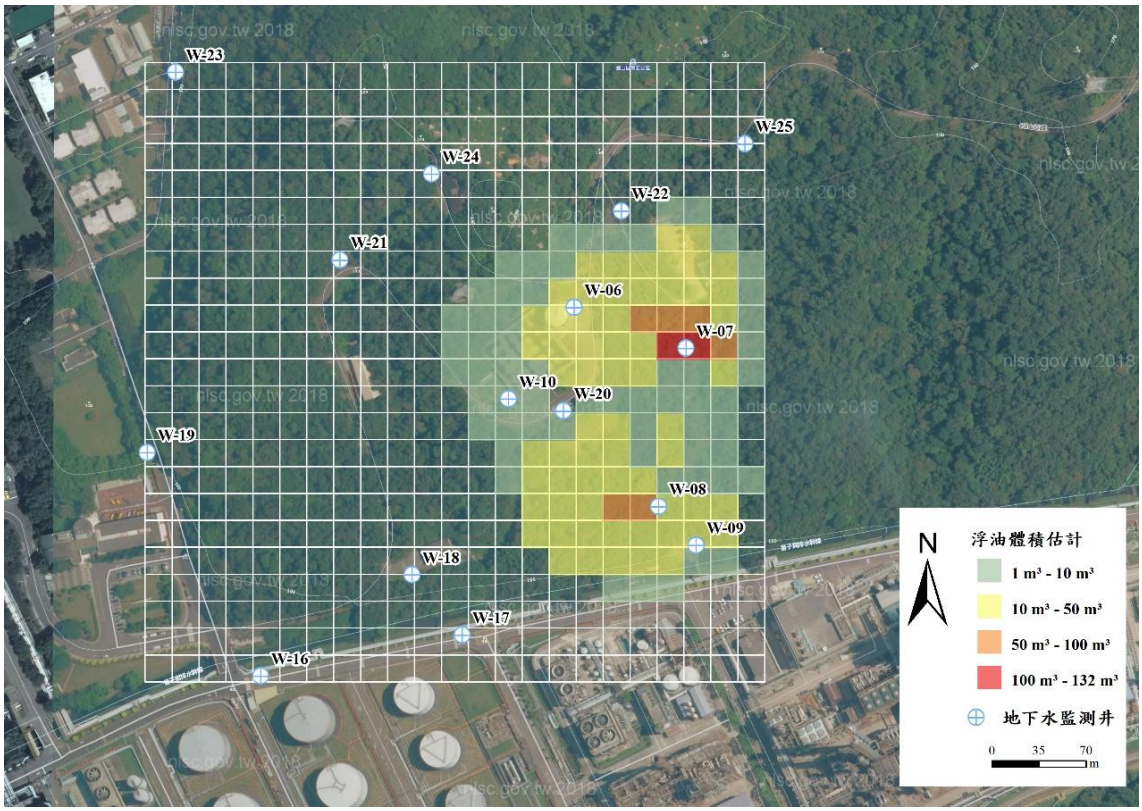
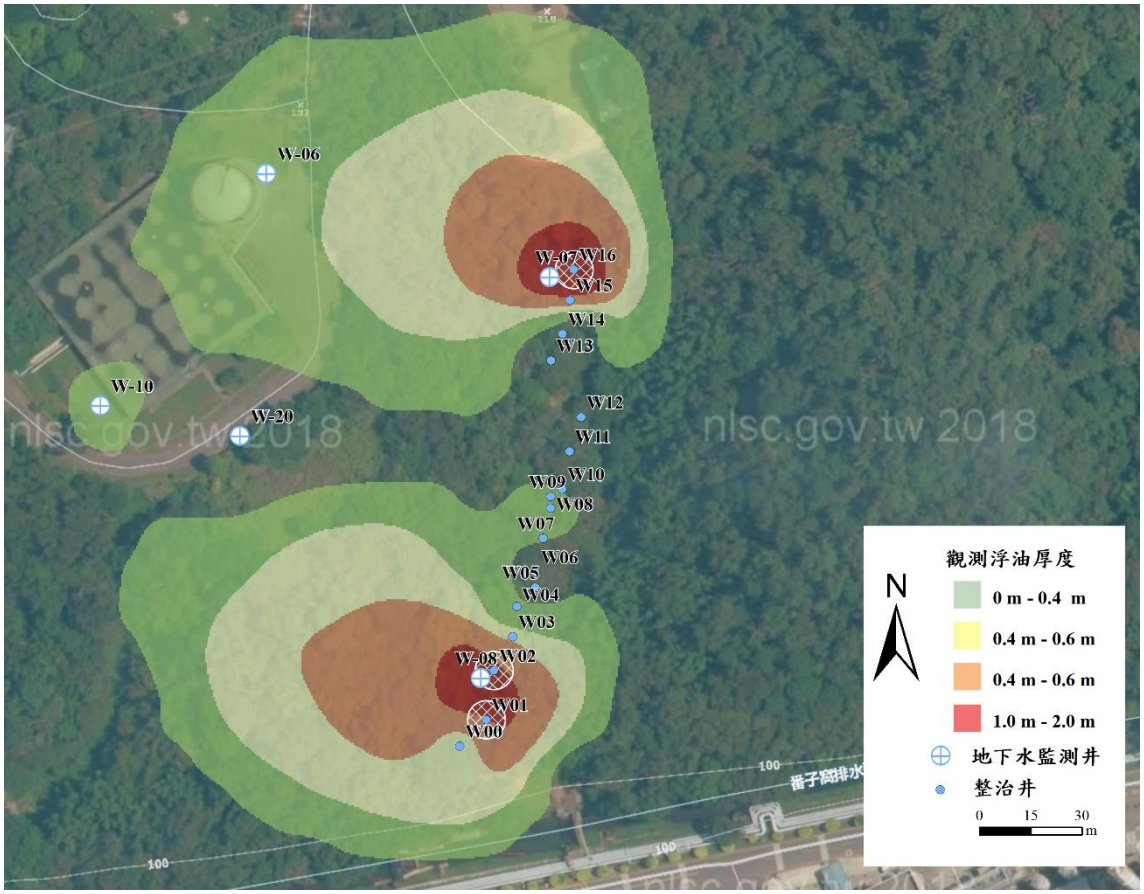


圖 5-16、垂直平衡模型推估之浮油體積空間分布(以 114 年 1 月觀測結果推估)

三、 浮油回收(Skimmer recovery)效益評估

依據油品污染緊急應變現場作業條件，初期應變階段採用浮油回收(LNAPL Recovery Using Skimmer Wells)。其判斷依據主要來自回收系統的設計目的、操作條件以及流體力學行為。首先，系統主要目的為回收自由相 LNAPL，操作上將抽取深度設定於地下水位以下 0.5 公尺，啟動後約十分鐘內井中自由相即完全去除，且水位同步下降至裝置位置，顯示該作業以撇除自由相為主，且對地下水造成之洩降範圍有限，此特性符合典型浮油回收作業條件，即以最小化地下水抽取量為前提，僅回收進井之 LNAPL。其次，本計畫蒐集試驗場址之整治作業採用氣動泵驅動方式，依賴空壓機供氣(3HP，2.2 kW)，未設置真空抽氣系統，亦無引入氣相流動或建立大氣至井間之壓力梯度，顯示操作並未具備真空加強抽取(Vacuum-Enhanced Recovery, VER)的必要條件。綜合上述，考量回收目標為自由相 LNAPL、抽水規模極小、抽除深度固定且不造成顯著洩降，以及未設置氣體誘導裝置等因素，可合理判定目前整治作業屬於之自由相回收作業。該作業模式適用於初期應變處理階段，或自由相分布具侷限性之場址，有助於針對性去除井中可回收之自由相 LNAPL。

本計畫污染物主要為高硫柴油混少量煤油(屬於高黏度、低揮發性的 LNAPL 混合物)，在地層中的遷移性與可回收性都會比汽油等輕質烴低許多，因此在模擬 LNAPL 整治時間時，應考慮其可能具有殘留性強、自然降解速率慢、回收效率低等特性。因此，本計畫採用浮油回收，針對 W-07、W-08 鄰近的三口自由相回收井(W16、W02 及 W01)進行回收模擬分析，參考 Charbeneau (2003)對整治井影響半徑之建議，本計畫假設每口整治井的影響半徑為 5 公尺，如圖 5-17 所示，設定模擬時間為 10 年，以評估長期回收作業下自由相厚度的變化趨勢。LNAPL 回收模擬結果如圖 5-18 所示，各井之自由相厚度(bn)皆隨時間遞減，顯示長期浮油回收作業下油層厚度明顯降低，回收效率亦呈逐步衰減趨勢。



備註：觀測浮油厚度以 114 年 1 月觀測數據進行空間分布，白圈範圍為整治井位置及其影響半徑。

圖 5-17、浮油回收位置與影響範圍

三口井自由相抽除初期均具良好回收效能，然隨自由相厚度變薄，回收速率顯著下降，至模擬後期均趨近系統極限回收能力(Qn < 1 L/d)。本計畫將整體浮油回收過程劃分為三個回收階段，反映不同回收效率與作業重點：第一階段為自由相最厚時期，回收效率最高；第二階段回收速率中等，可考慮是否持續投入資源或轉用低耗能設備；第三階段則為自由相極薄、回收效率

最低，應評估是否繼續長期且低效浮油回收作業，或改採生物修復、自然衰減等替代策略。

分析結果顯是 W16 初始厚度最高(1.85 m)，模擬期間累積回收量約 23,306.6 L。回收速率自初期 58 L/d 快速下降，第一年平均約為 33 L/d，至第 5 年降至僅約 2 L/d。分段回收所需時間依序為 0.49 年、1.56 年與超過 5.6 年，反映出初期高效、後期遞減之典型趨勢。W02 初始厚度為 1.07 m，累積回收量為 11,639.6 L。其回收速率由初期 23 L/d 降至第一年平均 15 L/d，第五年降至 1 L/d 以下。分段所需時間依序為 0.71 年、2.35 年與 9.54 年，回收潛力居中，具可觀初期成效，惟後期效率快速衰減。相較之下，W01 初始厚度雖為 1.13 m，但初期回收速率僅約 7 L/d，模擬期間總回收量為 9,287.4 L，為三口井中最低。其第一階段需 2.52 年，第二階段達 8.33 年，而第三階段則需超過 33.3 年，顯示自由相分布較不集中且後期回收非常低效。

整體而言，W16 具最高回收潛力與效率，W02 次之，W01 則顯示自由相條件較差、抽除效率有限。未來浮油回收策略應根據不同階段調整作業模式，並視經濟效益與技術可行性考量是否導入輔助技術或改採替代處理方式。

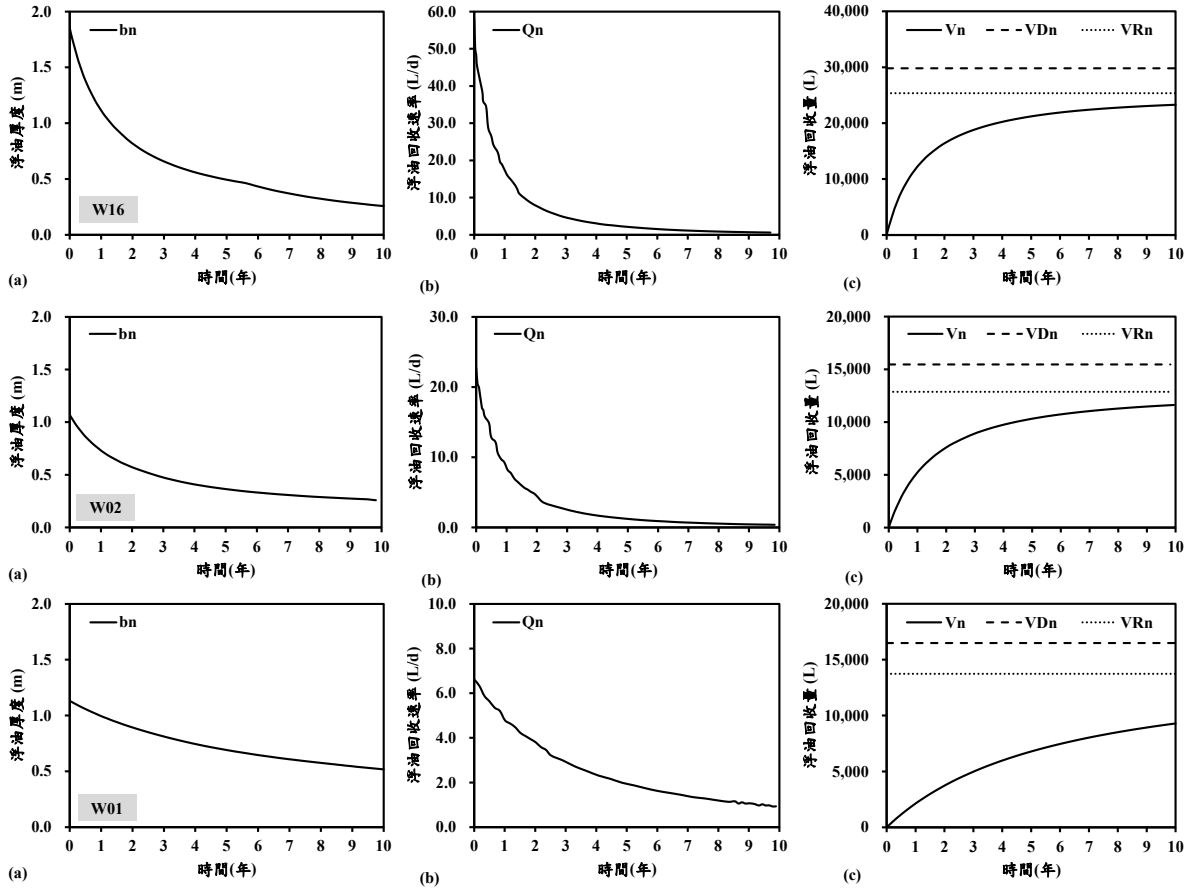


圖 5-18、浮油回收效益分析結果(a)觀測浮油厚度、(b)浮油回收速率及(c)浮油回收量

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39

四、 Tn 不確定性下之 LNAPL 抽除模擬分析

為探討浮油傳導係數(Tn)不確定性對浮油抽除模擬結果的影響，本計畫針對 4 口井(W-07、W-08、W02、W16)進行 LNAPL 浮油回收模擬，評估 Tn 不確定性對回收效率與時間的影響。第 5.3 節現地提取試驗法主要是提供局部水力條件下的推估的 Tn 值，而本(5.4)節則是利用 LDRM 模型所求得之 Tn 值整合油品性質、抽除效率與含水層參數，代表整體系統下浮油傳導能力的綜合表徵，通常會略高於現地試驗瞬時推估值。兩者可互為驗證基礎，並有助於釐清抽除模擬結果之參數敏感性與不確定性來源。

本計畫評估之 Tn 值如圖 5-19 所示，涵蓋現地試驗所得之最小值(min)、最大值(max)、平均值(mean)及模型推估值(model)，以評估其對浮油抽除流量(Qn)、總抽除體積(Vn)及三階段回收時間的影響。分析結果如圖 5-20 所示，各井於不同浮油傳導係數(Tn)條件下之最大抽除流量、累積回收量與分階段回收時間如表 5-12 所示。

(一) 不同 Tn 對抽除效率與回收時間的影響

模擬結果顯示，浮油傳導係數(Tn)對抽除效率及回收時間具有顯著影響。隨著 Tn 值增加，各井之抽除流量(Qn)明顯上升，例如 W-07 由 15 L/d 增至 33 L/d，W-08 由 13 L/d 增至 22 L/d，W02 由 20 L/d 增至 30 L/d，W16 由 60 L/d 增至 88 L/d。雖然總回收體積(Vn)亦隨之增加，但增幅相對有限，顯示回收總量主要仍受含水層厚度與油層體積控制。

在回收時間方面，Tn 值的提升則能顯著縮短各階段的回收歷程。以 W-07 為例，第一階段回收時間由 1.48 年降至 0.67 年，第三階段則由 18.05 年降至 8.15 年，縮短幅度均達 55%；W-08 的三階段縮短幅度亦約 43%；W02 及 W16 回收時間雖也隨 Tn 提升而縮短，但幅度相對較小，約為 10%~25%。因此，縮短比例較高並不等同於抽除效率較佳，W-07 與 W-08 雖展現出更大的百分比縮短，但其基準回收時間原本就較長，因此即使縮短一半，仍遠長於高傳導性井 W02 及 W16，顯示出高縮短比例反映的是對 Tn 變化的敏感度，而非整體效能的優勢。

綜合而言，Tn 的主要影響在「抽除速率」與「回收時程」，而非顯著改變最終可回收的總體積。因此，在整治規劃與抽除時程預測時，必須審慎考量 Tn 的不確定性，以避免對長期回收效率的過度低估或高估。

(二) 不同井位 Tn 值與回收效率比較

不同井位在 Tn 值範圍與抽除效率上呈現明顯差異，其中以 W16 具

有最高的 Tn 值範圍(0.136~0.199 m^2/d)，其抽除流量(Qn)可達 88 L/d，第三階段回收時間僅需 3.68~5.39 年，顯示其位於高傳導性區域，浮油補注能力佳，整體回收效率最高；而 W02 的 Tn 值範圍介於 0.077~0.117 m^2/d，對應 Qn 為 20~30 L/d，第三階段回收時間約 7.26~11.04 年，亦屬中高傳導性井，具相對良好的回收效能；相對之下，W-07 及 W-08 的 Tn 值顯著較低(分別為 0.005~0.110 m^2/d 與 0.032~0.056 m^2/d)，抽除流量僅約 13~33 L/d，長期回收進程明顯受限，其中 W-08 的第三階段回收時間最長，介於 14.94~26.15 年之間，而 W-07 亦需 8.15~18.05 年，這顯示在低傳導性條件下，即使 Tn 的提升能帶來流量增加，長期回收進程仍受浮油補注速率緩慢所限制，導致抽除作業需耗費更長時間。

過去 LNAPL 回收之評估工作，多聚焦於浮油厚度(Smear zone thickness)或可見油層變化，較少深入探討浮油傳導係數(Tn)之不確定性與其在場址間的變異範圍，以往 Tn 常被視為定值，或僅以經驗法則近似估算，忽略其因地層異質性與現地量測誤差所帶來的不確定性，進而可能導致回收時程預測過於樂觀，亦限制抽除作業設計之適切性與調適性。因此，本計畫藉由整合現地試驗所得之 Tn 上下限及平均值，進行 LNAPL 抽除模擬，系統性評估 Tn 不確定性對回收效率與時程預測之影響，結果顯示 Tn 為控制模擬結果的關鍵參數，其敏感性對抽除規劃精度與風險評估具高度意義，補足既有研究中對 Tn 參數變異性與不確定性關注不足之缺口。

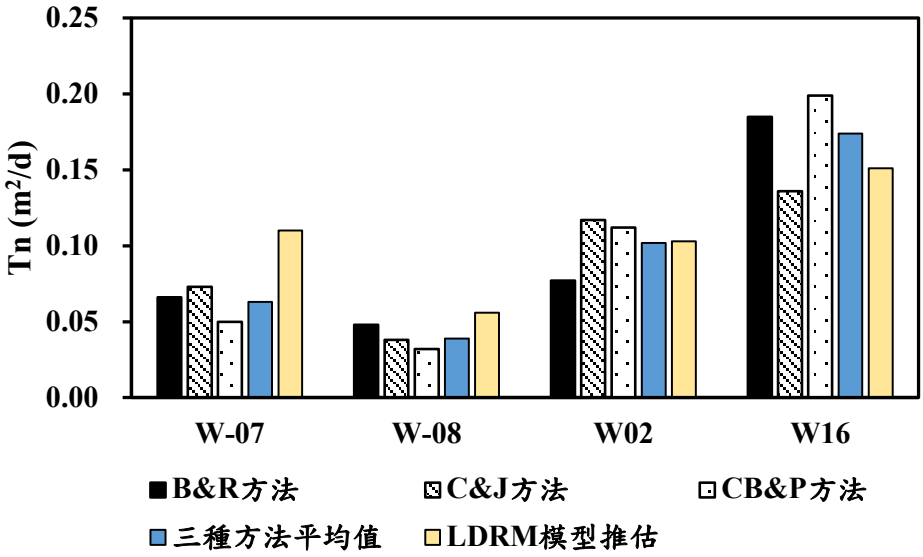


圖 5-19、本計畫推估之 Tn 值

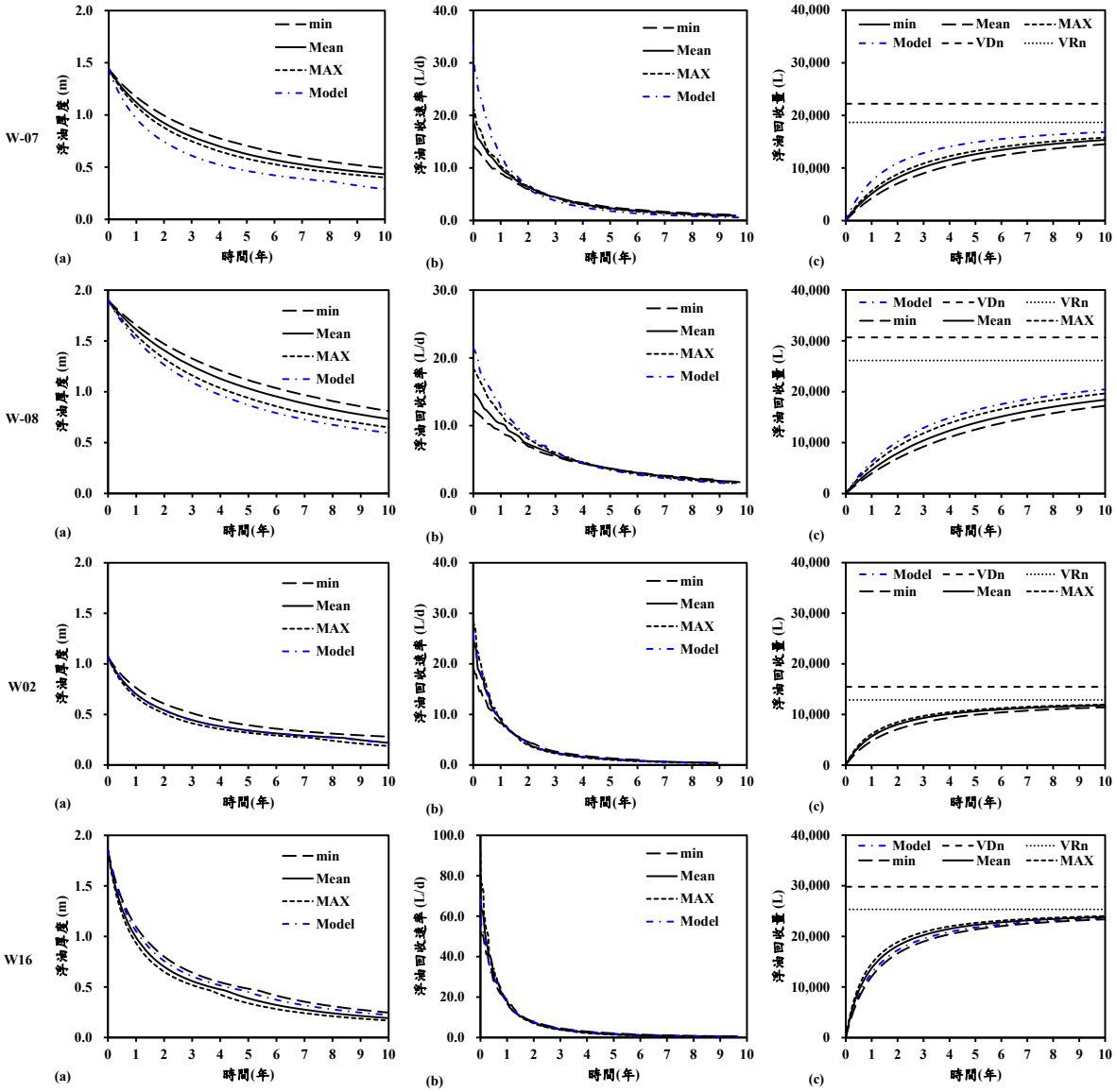


圖 5-20、不同 Tn 值條件下浮油抽除結果(a)浮油厚度隨時間變化；(b)浮油回收速率隨時間變化；(c)累積回收浮油體積隨時間變化

表 5-12、不同 Tn 值條件之的最大抽除流量、累積回收量與分階段回收時間

Well	Tn (m^2/d)	最大抽除流量 Qn (L/d)	累計回收浮油總量 Vn (L)	各階段回收時間(yr)		
				第一階段	第二階段	第三階段
W-07	0.005	15.0	14521.35	1.48	4.78	18.05
	0.063	19.0	15346.11	1.17	3.77	14.25
	0.073	22.0	15779.54	1.01	3.28	12.39
	0.110	33.0	16822.18	0.67	2.16	8.15

表 5-12、不同 Tn 值條件之的最大抽除流量、累積回收量與分階段回收時間(續)

Well	Tn (m^2/d)	最大抽除流量 Qn (L/d)	累計回收浮油總量 Vn (L)	各階段回收時間(yr)		
				第一階段	第二階段	第三階段
W-08	0.032	13.0	17264.28	2.30	7.30	26.15
	0.039	15.0	18433.86	1.90	6.04	21.64
	0.048	19.0	19669.20	1.53	4.87	17.43
	0.056	22.0	20478.91	1.31	4.17	14.94
W02	0.077	20.0	11421.74	0.82	2.72	11.04
	0.102	26.0	11802.38	0.62	2.07	8.39
	0.117	30.0	11956.24	0.54	1.79	7.26
	0.103	26.0	11820.48	0.61	2.04	8.26
W16	0.136	60.0	23387.94	0.47	1.50	5.39
	0.174	77.0	23824.49	0.37	1.17	4.20
	0.199	88.0	24015.91	0.32	1.02	3.68
	0.151	67.0	23584.77	0.42	1.35	4.85

五、 不同抽取速率對回收效率之影響

本計畫主動抽除模擬針對兩口 4 吋整治井(W02 與 W16)執行，做為主要回收整治作業井。由於這兩口井具有較大井徑及水力能力，能夠支撐持續且穩定的抽除操作，足以形成有效的回收半徑與水力梯度，驅動鄰近自由相 LNAPL 匯入井中。相較之下，2 吋監測井(W-07 與 W-08)則維持以低擾動浮油回收及油厚監測為主，以確保現地監測資料的客觀性與可靠性。

本計畫僅考量水力抽除(Hydraulic recovery)技術，該方法透過整治井將含水層中的地下水抽出，藉由降低地下水位形成水力梯度，驅動自由相 LNAPL 向井內移動，並隨抽水一併回收或以浮油形式集聚於水面，其主要特徵為抽水量大，但油水比通常偏低(約 1~5%)，此技術適合於污染物含量較高的初期階段，能有效促使污染團向井中集中；然而，其缺點在於後端需處理大量含油廢水，造成水處理成本高。整體而言，水力抽除適合做為初期快速回收的策略，但需搭配適當之水處理系統以減輕後續負荷。本計畫設計抽除速率為 0.1、0.5 與 1.0 m^3/d 三個等級，分別代表低擾動基線、穩健常規操作及偏高抽率，此三段設定涵蓋保守至強化的操作範圍，可用以評估不同抽除強度對回收效率與井中自由相厚度變化的影響，並釐清高抽率是否能顯著提升初期回收速率，或反而導致系統提早進入低效回收期。

模擬結果列如圖 5-21 所示，分段回收時間列如表 5-13 所示，兩口整治

井(W02 與 W16)在相同抽除條件下之回收趨勢相似，但 W16 的最終可回收體積約為 W02 的兩倍，顯示 W16 具備更高的回收潛力。此外，W16 的回收時間普遍短於 W02，原因為 W16 的 Tn 值較大，更有效驅動 LNAPL 匯入井中，從而縮短回復時間並提升回收效率。另一方面，亦可能反映 W16 鄰近之自由相油分布較為集中，使其在相同抽除條件下展現出更高的回收效率。因此，在整治策略規劃上，W16 可做為主要回收貢獻井，而 W02 則可做為輔助回收井。

此外，不同抽取率對回收行為亦具有顯著影響，高抽取率可在前 0.5~1 年內迅速降低井中自由相厚度，並使累積回收量快速接近最終上限。此特性對於整治初期降低風險具有明顯效果。然而，高抽取率同時導致回收速率在短時間內快速衰減，整治井較早進入低效回收階段，後期僅能維持低幅度回收，成本效益下降；中等抽取率雖然初期效率稍低於高抽取率，但能在 1~2 年內回收大部分油量，且延緩進入尾端回收期，於效率與成本之間取得平衡；低抽取率最終回收量雖相近，但需耗時數年至十年，整治時程過長，實務上不具經濟效益。

需要注意的是，LDRM 模擬採用連續抽除假設，因此所得回收時間屬於理想化下限。實際現地操作常因能源消耗、設備維護或整治策略考量而採取間歇抽除，實際所需時間可能長於模擬預測。然而，不同情境間的相對比較趨勢仍具參考價值，可用於整治方案的優化。

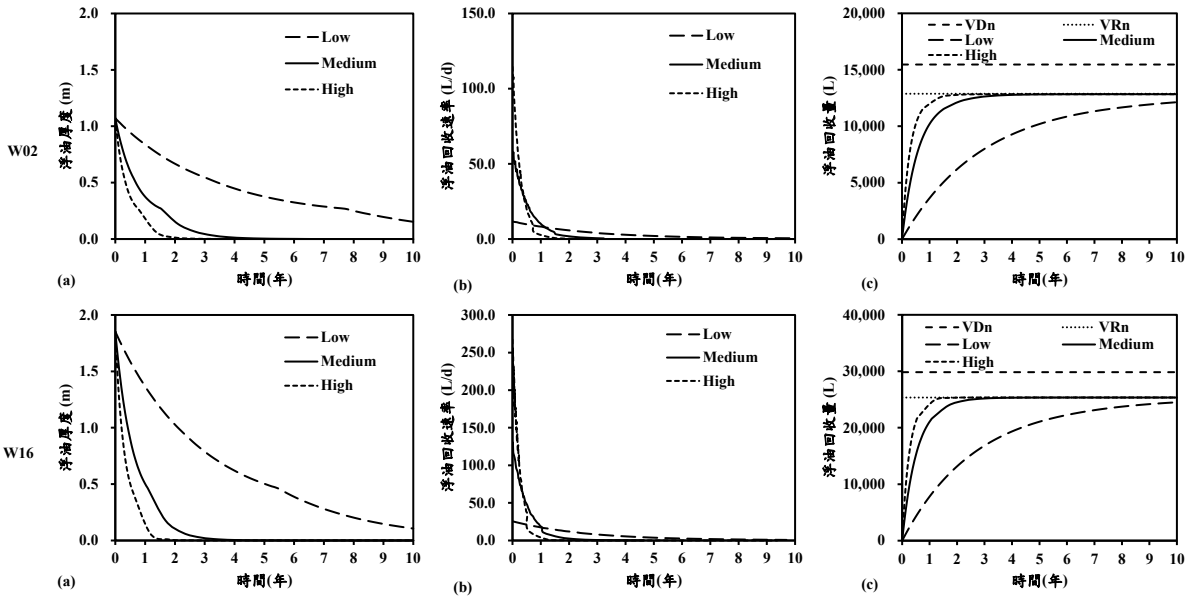


圖 5-21、W02 與 W16 整治井在不同抽除情境下之浮油回收模擬結果(a)浮油厚度隨時間變化；(b)浮油回收速率隨時間變化；(c)累積回收浮油體積隨時間變化

表 5-13、W02 與 W16 整治井在不同抽除率下之回收模擬結果

Well	Tn(m/d)	等效抽除率 (L/min)		最大抽除流量	累計回收浮油總量	各階段回收時間(yr)		
				Qn (L/d)	Vn (L)	第一階段	第二階段	第三階段
W02	0.103	Low	0.07 (0.1 m^3/day)	12	12123.46	1.18	3.10	7.71
		Medium	0.35 (0.5 m^3/day)	59	12842.56	0.24	0.62	1.54
		High	0.70 (1.0 m^3/day)	118	12842.60	0.12	0.31	0.77
W16	0.151	Low	0.07 (0.1 m^3/day)	26	24513.31	0.95	2.39	5.45
		Medium	0.35 (0.5 m^3/day)	129	25355.20	0.19	0.48	1.09
		High	0.70 (1.0 m^3/day)	258	25355.21	0.09	0.24	0.55

六、 模式模擬小結

本計畫完成浮油厚度評析、垂直平衡模型評估與自由相 LNAPL 回收效益分析，並針對場址內六口井(W-20、W-08、W-07、W16、W02、W01)進行分區回收潛力檢討。結果顯示，雖部分井具有相對較高的浮油厚度，實際可回收量仍受到浮油傳導係數(Tn)、特定厚度與地層特性等因子的限制。其中，W-20 已進入殘留相階段，顯示持續回收效益有限；W-08 雖觀測厚度較高，但 Tn 較低，回收潛力受限，需持續監測以確認可行性。

進一步之長期回收模擬針對三口整治井(W16、W02、W01)進行分析，顯示 W16 具最高回收潛力與效率，除觀測厚度與可回收厚度較高外，Tn 值亦顯示其具良好傳導性；W02 次之，雖厚度稍低，但 Tn 值佳，具備穩定回收條件；W01 則因 Tn 較低且厚度有限，整體回收效能受限。模擬顯示，在 10 年操作期間，各井自由相厚度逐步遞減，回收速率亦隨時間衰退，呈現由初期高效回收、中期效率衰減至末期低效階段的典型動態。

此外，本計畫針對具有現地試驗 Tn 值的井別(W-07、W-08、W02、W16)進行 Tn 不確定性分析，並進一步探討整治井(W02、W16)主動抽除條件下之回收效益。結果顯示，Tn 為控制抽除效率與回收時程的關鍵參數，其變動顯著影響抽除速率與完成時間，雖不改變最終可回收總量，卻可能導致回收效率的高估或低估。不同抽取速率亦顯示顯著差異，高抽取率可於初期快速降低自由相厚度並提升風險控制效果，但同時加速進入低效回收期；中等抽取率則在效率與經濟性間取得平衡；低抽取率雖最終回收量相近，但所需時程過長，實務可行性不足。整體比較結果指出，W16 具有最高的回收潛力與效率，適合作為主要回收井，而 W02 則可視為輔助回收井。

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39

綜整以上論述，本計畫顯示浮油傳導係數(Tn)與抽取速率為控制LNAPL回收行為的關鍵因子，Tn 的不確定性將影響抽除效率與時程判斷，而不同抽取速率則反映效率與經濟性的權衡。因此，整治策略規劃應納入 Tn 變異性與抽取條件之系統性評估，以提升回收成效與資源配置之合理性。

5.5　操作手冊建立及效益分析

為了系統化整理本計畫的操作流程與整治成果，本節首先建立本土化的 LNAPL 提取試驗操作手冊，以確保現場操作標準化、數據可重現；其次，依據模式模擬結果，計算本計畫的整治效益，包括整治技術提升、成本降低及能源效率提升，提供後續決策與策略優化的量化依據。

一、 建立本土化提取試驗操作手冊

由於 LNAPL 污染在地下水環境中具有高度異質性，其分布與移動特性受到地層孔隙度、透水性、流體黏度及密度等因素影響，且傳統依賴經驗的抽除方式，往往難以精確掌握其傳輸特性與回收效率。為了在現場進行高效、可重現的 LNAPL 提取試驗，並確保試驗結果能準確反映地層實際情況，有必要建立標準化操作流程。因此，本計畫建立「提取試驗(Bail-down test)操作手冊」(如附件五所示)，旨在提供系統化、科學化的操作指南，從試驗準備、設備選擇、液位量測、數據記錄到結果分析，皆依據國際標準(ASTM E2856-13)及實務經驗進行撰寫，以提高 LNAPL 傳導係數(T 值)測量的準確性與可靠性，並協助整治人員在不同地層條件下制定最適化的抽除策略。

二、 計算本計畫效益分析

在污染場址整治過程中，不同整治策略可能造成整治時間與效率差異，為了全面評估整治成效，僅單純考慮累積回收量或抽除速率並不足以反映整體效益。因此，本計畫選擇績效自評表當中之三個百分比指標，包括整治技術提升百分比、整治成本降低百分比、能源效率提升百分比等，藉由技術、經濟及能源等三個面向，全面量化整治策略優化的效果，為決策者提供明確且可比較的依據。

依據前述模式模擬之浮油回收效益評估結果，W16 初始厚度最高，累積回收量及回收速率最佳，呈現初期高效、後期逐漸遞減的典型趨勢。基於此結果，本計畫以 W16 為例，依據整治廠商提供目前整治現況與本計畫模式模擬後之成果，計算其整治技術提升百分比、整治成本降低百分比及能源效率提升百分比，具體如下。

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39

(一) 整治技術提升百分比

1. 計算方式：

$$\textbf{整治技術提升百分比}(\%) = \frac{\textbf{優化後油品回收量} - \textbf{優化前油品回收量}}{\textbf{優化前油品回收量}} * \textbf{100}\%$$

2. 使用數據：

(1) 整治廠商提供(優化前)：抽除之油/水速率約可計為 7.3 噸/週，其中包含 5%的油品約 36.5 L，假設整治期間為 10 年，換算成油品總量為$36.5\ \text{L/週} * 52\ \text{週/年} * 10\ \text{年} = 18{,}980\ \text{L}$。

(2) 本計畫模式模擬(優化後)：依據前述表 5-12 所示，以提取試驗得到之平均 Tn 值(0.174 m^2/d)，模擬油品回收期間共計約 5.74 年，累計回收油品總量為23,824.5 L。

3. 計算結果：

$$\textbf{整治技術提升百分比}(\%) = \frac{\textbf{23824.5} - \textbf{18980}}{\textbf{18980}} * \textbf{100}\% = \textbf{25.5}\%$$

(二) 整治成本降低百分比

1. 計算方式：

$$\textbf{整治成本降低百分比} = \frac{\textbf{優化前整治成本} - \textbf{優化後整治成本}}{\textbf{優化前整治成本}} * \textbf{100}\%$$

2. 使用數據：

(1) 整治廠商提供(優化前)：整治操作人力，每週 1 人共約半天巡視及操作，假設整治期間為 10 年，以每人每週 1,500 元計算，預估人力成本為$10\ \text{年} * 52\ \text{週/年} * 1{,}500\ \text{元/週} = 780{,}000\ \text{元}$。

(2) 本計畫模式模擬(優化後)：依據前述表 5-12 所示，以提取試驗得到之平均 Tn 值(0.174 m^2/d)，模擬油品回收期間共計約 5.74 年，預估人力成本為$5.74\ \text{年} * 52\ \text{週/年} * 1{,}500\ \text{元/週} = 447{,}720\ \text{元}$。

(3) 假設條件：在設備維護次數、耗材更換頻率、水處理成本等條件皆相同情況下，僅考慮整治操作時間縮短之人力成本。

3. 計算結果：

$$\textbf{整治成本降低百分比}(\%) = \frac{\textbf{780000} - \textbf{447720}}{\textbf{780000}} * \textbf{100}\% = \textbf{42.6}\%$$

(三) 能源效率提升百分比

1. 計算方式：

$$\textbf{能源效率提升百分比}(\%) = \frac{\textbf{優化後單位能耗回收效率} - \textbf{優化前單位能耗回收效率}}{\textbf{優化前單位能耗回收效率}} * \mathbf{100}\%$$

2. 使用數據：

(1) 整治廠商提供(優化前)：假設整治期間為 10 年，優化前油品回收量為 18,900 L，假設每月運轉 30 小時，每小時耗電量為 2.2 kW，故單位能耗回收效率為18,900 L/((10 年 * 12 月/年 * 30 hr/月) * 2.2 kW) = 2.39 L/kWh。

(2) 本計畫模式模擬(優化後)：依據前述表 5-12 所示，以提取試驗得到之平均 Tn 值(0.174 m^2/d)，模擬油品回收期間共計約 5.74 年，累計回收油品總量為 23,824.5 L，假設每月運轉 30 小時，每小時耗電量為 2.2 kW，故單位能耗回收效率為23,824.5 L/((5.74 年 * 12 月/年 * 30 hr/月) * 2.2 kW) = 5.24 L/kWh。

(3) 假設條件：僅考慮泵浦/抽除設備的電能消耗，忽略其他附屬設備、照明、控制系統等耗能，並忽略維護、耗材更換等間接能耗對單位能耗回收效率之影響。

3. 計算結果：

$$\textbf{能源效率提升百分比}(\%) = \frac{\mathbf{5.24 - 2.39}}{\mathbf{2.39}} * \mathbf{100}\% = \mathbf{119.2}\%$$

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39

第六章　結論與建議

一、結論

(一) 本計畫篩選 W-07、W-08、W02、W16 進行提取試驗，透過比較不同井徑對試驗結果之影響，此外，為提高移除效率，本年度試驗皆使用整治泵進行而非貝勒管，並新增自計式水位計，以延長油水位面觀測時間，確保試驗期間油水位回復初始狀態。

(二) 依據油品密度與黏度分析結果，顯示試驗場指油品污染以車用超級柴油成分為主，另由分析結果與監測井之地理位置互相比較，顯示鄰近井的油品來源相近，並可能存在一定程度的流通與遷移。另由地下水採樣結果，顯示豐水期地下水流動快、污染物分散，TPH 濃度相對較低；枯水期流動慢、污染物易累積，TPH 濃度明顯偏高，顯示地下水流動特性對污染分布與累積影響顯著。

(三) 依據解析解 T 值估算結果，顯示 B&R 方法適合在短時間、濾料影響小時快速估算；C&J 方法能修正初期補注影響，但需注意參數選擇；CB&P 方法則在長期試驗與地層影響明顯時，能提供最準確的 T 值估算。此外，由於 LNAPL 的物理性質與地下水差異較大，故地下水 T 值不宜直接套用於 LNAPL 傳輸模擬，必須透過實測獲得 LNAPL 的 T 值，方能提升污染評估與整治設計的準確性。

(四) 依據模式模擬結果，顯示 LNAPL 回收潛力受浮油 T 值、厚度與地層特性影響，並呈現初期高效、中期衰減、末期低效的典型動態。T 值為控制抽除效率與時程的關鍵參數，其不確定性會影響效率評估，雖最終可回收總量主要受含水層厚度與油層體積控制，但 T 值決定回收動態與效率差異。因此，建議整治規劃與資源配置須將 T 值分析納入評估。

(五) 本計畫透過建立本土化 LNAPL 提取試驗操作手冊，使現場操作標準化並提升數據可靠性。另以 W16 為例計算本計畫效益分析，顯示整治技術提升 25.5%、整治成本降低 42.6%、能源效率提升 119.2%，證明本研究方法不僅能優化技術表現，亦能兼顧經濟性與能源效益，為後續整治決策提供量化依據。

二、建議

(一) 建議未來應根據試驗條件靈活選擇 T 值估算方法，此外，在污染傳輸評估與整治規劃時，應避免直接套用地下水傳導係數，應透過現場提取試驗獲得 LNAPL 之 T 值，並結合監測數據動態校正，以提升預測準確性

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39

與整治效能。

(二) 建議試驗場址應針對浮油傳導係數(Tn)的不確定性與抽取速率進行持續監測與調整，並針對高回收潛力整治井(W16)維持主要抽除作業，同時輔助回收整治井(W02)以穩定整體回收效能。

(三) 建議整治規劃與資源配置須將 T 值納入評估，未來可考慮採用分期或變動速率抽取策略，以兼顧初期高效率回收與長期經濟性，並結合現場監測資料持續校正模型參數，以提升回收量預測準確性及資源配置合理性。

(四) 建議未來在執行 LNAPL 提取試驗時，能夠參考本計畫建立之「LNAPL 提取試驗操作手冊」，並持續滾動式調整內容，包含試驗準備、設備選擇、液位量測、數據記錄、結果分析等，以精進此技術之標準性並提高可靠性，提供應用在不同場址可執行之操作依據。

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39

參考文獻

1. Abriola, L.M., Lang, J., Rathfelder, K., 1997. Michigan soil vapor extraction remediation (MISER) model: a computer program to model soil vapor extraction and bioventing of organic chemicals in unsaturated geological material. (EPA/600/SR-97/099)
2. Adamski, M., Kremesec, V., Kolhatkar, R., Pearson, C., Rowan, B., 2005. LNAPL in fine-grained soils: Conceptualization of saturation, distribution, recovery, and their modeling. Groundwater Monitoring Rem 25, 100–112. https://doi.org/10.1111/j.1745-6592.2005.0005.x
3. Agah, A., Doulati Ardejani, F. & Azinfar, M.J. 2022. 2D simulation of dynamic transportation of volatile hydrocarbons in vadose zone of tehran oil refinery and industrial area of Ray, Tehran, Iran. Journal of Mining and Environment, 13, 809-820, https://doi.org/10.22044/jme.2022.12004.2195
4. Ahmed, W., Palmier, C., Atteia, O., Class, H., 2019. Multiphase Simulation Model for Validating the Estimate of Light Non-Aqueous Phase Liquids (LNAPL) Transmissivity Using Bail-Down Test. Arab J Sci Eng 44, 6099–6107. https://doi.org/10.1007/s13369-018-3663-7
5. ASTM. 2021. Standard Guide for Estimation of LNAPL Transmissivity. ASTM E2856-13, 68.
6. Atteia, O., Palmier, C., Schäfer, G., 2019. On the influence of groundwater table fluctuations on oil thickness in a well related to an LNAPL contaminated aquifer. Journal of Contaminant Hydrology 223, 103476. https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2019.03.008
7. Beckett, G.D., Huntley, D., 2015. LNAPL Transmissivity: A Twisted Parameter. Groundwater Monitoring Rem 35, 20–24. https://doi.org/10.1111/gwmr.12116
8. Beckett, G.D., Lyverse, M.A., 2002. A protocol for performing field tasks and follow-up analytical evaluation for LNAPL transmissivity using well baildown procedures. API Interactive LNAPL Guide (Version 2.0, Release 2.04) 2: 1–27.
9. Bouwer, H., Rice, R.C., 1976. A slug test for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells. Water Resources Research 12, 423–428. https://doi.org/10.1029/WR012i003p00423

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39

10. Burdine, N.T. 1953. Relative permeability calculations from pore size distribution data. Journal of Petroleum Technology, 5, 71-78, https://doi.org/10.2118/225-G

11. Carsel, R.F. & Parrish, R.S. 1988. Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. Water Resour. Res., 24, 755-769, https://doi.org/10.1029/WR024i005p00755

12. Chang, Z., Lu, W., Wang, Z., 2022. Study on source identification and source-sink relationship of LNAPLs pollution in groundwater by the adaptive cyclic improved iterative process and Monte Carlo stochastic simulation. Journal of Hydrology 612, 128109. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128109

13. Charbeneau, R., 2007. LNAPL Distribution and Recovery Model. Distribution and Recovery of Petroleum Hydrocarbon Liquids in Porous Media. Vol. 1. API Publication 4760. Washington, DC: API Publications.

14. Charbeneau, R.J., 2003. Models for design of free-product recovery systems for petroleum hydrocarbon liquids. American Petroleum Institute. www. api. org/lnapl

15. Charbeneau, R.J., Weaver, J.W., Lien, B.K., 1995. The Hydrocarbon Spill Screening Model (HSSM): Volume 2: Theoretical Background and Source Codes. US Environmental Protection Agency, Office of Research and Development.

16. Chen, K., Zhan, H. & Zhou, R. 2016. Subsurface solute transport with one-, two-, and three-dimensional arbitrary shape sources. Journal of Contaminant Hydrology, 190, 44-57, https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2016.04.004

17. Cooper, H.H., Bredehoeft, J.D., Papadopulos, I.S., 1967. Response of a finite-diameter well to an instantaneous charge of water. Water Resources Research 3, 263–269. https://doi.org/10.1029/WR003i001p00263

18. Cooper, H.H., Jacob, C.E., 1946. A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field history. Transactions American Geophysical Union 27, 526–534. https://doi.org/10.1029/TR027i004p00526

19. Corey, A.T. 1986. Mechanics of immiscible fluids in porous media. Water Resources Publication, Littleton, CL, US.

20. de Pastrovich, T., Baradat, Y., Barthel, R., Chiarelli, A., Fussell, D., 1979. Protection of groundwater from oil pollution. Concawe.

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39

21. Dippenaar, M.A., Sole, M.D., Van Rooy, J.L., du Toit, G.J. & Reynecke, J.L. 2005. Determining actual LNAPL plume thickness: review and case study in a fractured aquifer. Bull. Eng. Geol. Environ., 64, 347-360, https://doi.org/10.1007/s10064-005-0278-5

22. El Tabach, E., Lancelot, L., Shahrour, I., Maillot, H., Najjar, Y., 2005. Estimation de la migration d'une pollution accidentelle dans un projet routier à l'aide des réseaux de neurones artificiels. Rev. Fr. Geotech. 49–57. https://doi.org/10.1051/geotech/2005112049

23. El Tabach, E., Lancelot, L., Shahrour, I., Najjar, Y., 2007. Use of artificial neural network simulation metamodelling to assess groundwater contamination in a road project. Mathematical and Computer Modelling 45, 766–776. https://doi.org/10.1016/j.mcm.2006.07.020

24. Essaid, H.I., Bekins, B.A., Cozzarelli, I.M., 2015. Organic contaminant transport and fate in the subsurface: Evolution of knowledge and understanding. Water Resources Research 51, 4861–4902. https://doi.org/10.1002/2015WR017121

25. Farr, A.M., Houghtalen, R.J., McWhorter, D.B., 1990. Volume Estimation of Light Nonaqueous Phase Liquids in Porous Media. Groundwater 28, 48–56. https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1990.tb02228.x

26. Frollini, E., 2017. Methodological approach for the estimation of recoverable LNAPL volumes in aquifer and for the analysis of residual phase behaviour in laboratory. AS-ITJGW. https://doi.org/10.7343/as-2017-300

27. Frollini, E., Petitta, M., 2018. Free LNAPL Volume Estimation by Pancake Model and Vertical Equilibrium Model: Comparison of Results, Limitations, and Critical Points. Geofluids 2018, 1–13. https://doi.org/10.1155/2018/8234167

28. Gatsios, E., García-Rincón, J., Rayner, J.L., McLaughlan, R.G., Davis, G.B., 2018. LNAPL transmissivity as a remediation metric in complex sites under water table fluctuations. Journal of Environmental Management 215, 40–48. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.03.026

29. Gruszczenski, T.S. 1987. Determination of a realistic estimate of the actual formation product thickness using monitor wells: A field bailout test. Proceedings of the National Water Well Association of Ground Water Scientists and Engineers and the American Petroleum Institute Conference on Petroleum Hydrocarbons and

Organic Chemicals in Ground Water: Prevention, Detection and Restoration, 235-253

30. Hall, R., Blake, S. & Champlin, S. 1984. Determination of hydrocarbon thicknesses in sediments using borehole data. The Fourth National Symposium and Exposition on Aquifer Restoration and Ground Water Monitoring May 23-25, 1984. The Fawcett Center, Columbus, Ohio. 300-304.
31. Hampton, D.R. 2003. Improving bail-down testing of free product wells. Proceedings of 2003 Petroleum Hydrocarbons and Organic Chemicals in Ground Water. Prevention, Detection, and Remediation Conference and Exposition, 19-22
32. Hartsock, J., 2014. Evaluating the effectiveness of pre-remedial LNAPL recovery modeling using the 'LNAPL distribution and recovery model'at two active remediation sites, Emporia State University.
33. He, Z., Liang, F., Meng, J., Li, N., 2022. Effects of groundwater fluctuation on migration characteristics and representative elementary volume of entrapped LNAPL. Journal of Hydrology 610, 127833. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127833
34. Hubbert, M.K., 1953. Entrapment of Petroleum Under Hydrodynamic Conditions1. AAPG Bulletin 37, 1954–2026. https://doi.org/10.1306/5CEADD61-16BB-11D7-8645000102C1865D
35. Hughes, J., Sullivan, C. & Zinner, R. 1988. Two techniques for determining the true hydrocarbon thickness in an unconfined sandy aquifer. Proceedings of the National Water Well Association of Ground Water Scientists and Engineers and the American Petroleum Institute Conference on Petroleum Hydrocarbons and Organic Chemicals in Ground Water: Prevention, Detection and Restoration, 1, 291-314
36. Huntley, D., 2000. Analytic Determination of Hydrocarbon Transmissivity from Baildown Tests. Groundwater 38, 46–52. https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2000.tb00201.x
37. Jacob, C.E., Lohman, S.W., 1952. Nonsteady flow to a well of constant drawdown in an extensive aquifer. Eos, Transactions American Geophysical Union 33, 559–569. https://doi.org/10.1029/TR033i004p00559

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39

38. Jeong, J., Charbeneau, R.J., 2014. An analytical model for predicting LNAPL distribution and recovery from multi-layered soils. Journal of Contaminant Hydrology 156, 52–61. https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2013.09.008

39. Johns, R.T., Lake, L.W., Obigbesan, A.B., Bermudez, L., Hassan, M.R., Charbeneau, R.J., 2003. Analytical Solutions for Free-Hydrocarbon Recovery Using Skimmer and Dual-Pump wells. Groundwater Monitoring Rem 23, 97–106. https://doi.org/10.1111/j.1745-6592.2003.tb00788.x

40. Johnston, C.D. & Adamski, M. 2005. Relationship between initial and residual LNAPL saturation for different soil types. Proceedings of the 2005 petroleum hydrocarbons and organic chemicals in Groundwater®: prevention, assessment, and remediation conference, 29-42

41. Kechavarzi, C., Soga, K., Illangasekare, T.H., 2005. Two-dimensional laboratory simulation of LNAPL infiltration and redistribution in the vadose zone. Journal of Contaminant Hydrology 76, 211–233. https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2004.09.001

42. Kirkman, A.J., 2013. Refinement of Bouwer-Rice Baildown Test Analysis. Groundwater Monitoring Rem 33, 105–110. https://doi.org/10.1111/j.1745-6592.2012.01411.x

43. Kirkman, A.J., Adamski, M., Hawthorne, J.M., 2013. Identification and Assessment of Confined and Perched LNAPL Conditions. Groundwater Monitoring Rem 33, 75–86. https://doi.org/10.1111/j.1745-6592.2012.01412.x

44. Kramer, W.H. 1982. Ground-water pollution from gasoline. Groundwater Monitoring & Remediation, 2, 18-22

45. Lenhard, R.J., Parker, J.C., 1990a. Estimation of Free Hydrocarbon Volume from Fluid Levels in Monitoring Wells. Groundwater 28, 57–67. https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1990.tb02229.x

46. Lenhard, R.J., Parker, J.C., 1990b. DISCUSSION OF “Estimation of Free Hydrocarbon Volume from Fluid Levels in Monitoring Wells,” by R. J. Lenhard and J. C. Parker, January-February 1990 issue, v. 28, no. 1, pp. 57–67 and “Volume Estimation of Light Nonaqueous Phase Liquids in Porous Media,” by A. M. Farr, R. J. Houghtalen, and D. B. M C Whorter, January-February 1990 issue, v. 28, no.

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39

1, pp. 48–56. Groundwater 28, 800–801. https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1990.tb01994.x

47. Lenhard, R.J., Rayner, J.L., Davis, G.B., 2017. A practical tool for estimating subsurface LNAPL distributions and transmissivity using current and historical fluid levels in groundwater wells: Effects of entrapped and residual LNAPL. Journal of Contaminant Hydrology 205, 1–11. https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2017.06.002

48. Lundegard, P.D., Mudford, B.S., 1998. LNAPL Volume Calculation: Parameter Estimation by Nonlinear Regression of Saturation Profiles. Groundwater Monitoring Rem 18, 88–93. https://doi.org/10.1111/j.1745-6592.1998.tb00732.x

49. Lundy, D.A., Zimmerman, L.M., 1996. Assessing Recoverability of LNAPL Plumes for Recovery System Conceptual Design, Proceedings of the 10th National Outdoor Action Conference and Expo, Las Vegas, NV, May 13-15, 1996 National Groundwater Association, 19–33.

50. Mineo, S., 2023. Groundwater and soil contamination by LNAPL: State of the art and future challenges. Science of The Total Environment 874, 162394. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162394

51. Mualem, Y., 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resources Research 12, 513–522. https://doi.org/10.1029/WR012i003p00513

52. Nagaiah, M., Law, D.R., Ueland, S., 2015. Transmissivity as a Primary Metric for LNAPL Recovery—Case Study Comparison of Short-Term vs. Long-Term Methods. Remediation Journal 26, 43–55. https://doi.org/10.1002/rem.21448

53. Onaa, C., Olaobaju, E.A., Amro, M.M., 2021. Experimental and numerical assessment of Light Non-Aqueous Phase Liquid (LNAPL) subsurface migration behavior in the vicinity of groundwater table. Environmental Technology & Innovation 23, 101573. https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101573

54. Palmier, C., Cazals, F., Atteia, O., 2017. Bail-Down Test Simulation at Laboratory Scale. Transp Porous Med 116, 567–583. https://doi.org/10.1007/s11242-016-0790-z

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39

55. Palmier, C., Dodt, M., Atteia, O., 2016. Comparison of Oil Transmissivity Methods Using Bail-Down Test Data. Groundwater Monitoring Rem 36, 73–83. https://doi.org/10.1111/gwmr.12173

56. Parker, J.C. & Lenhard, R.J. 1990. Vertical integration of three-phase flow equations for analysis of light hydrocarbon plume movement. Transport in Porous Media, 5, 187-206, https://doi.org/10.1007/BF00144603

57. Parker, J. C., Lenhard, R. J. and Kuppusamy, T. 1987. A parametric model for constitutive properties governing multiphase flow in porous media. Water Resources Research, 23(4), 618-624. https://doi.org/10.1029/WR023i004p00618

58. Pruess, K., Battistelli, A., 2002. TMVOC, a numerical simulator for three-phase non-isothermal flows of multicomponent hydrocarbon mixtures in saturated-unsaturated heterogeneous media.

59. Salama, A., Sun, S., El Amin, M.F., 2012. A novel numerical approach for the solution of the problem of two-phase, immiscible flow in porous media: Application to LNAPL and DNAPL. Presented at the POROUS MEDIA AND ITS APPLICATIONS IN SCIENCE, ENGINEERING, AND INDUSTRY: Fourth International Conference, Potsdam, Germany, pp. 135–140. https://doi.org/10.1063/1.4711165

60. Schiegg, H.O. 1985. Considerations on Water, Oil and Air in Porous Media. Water Sci. Technol., 17, 467-476, https://doi.org/10.2166/wst.1985.0152

61. Shepherd, W. 1983. Practical geohydrological aspects of groundwater contamination.

62. Sleep, B.E., Sehayek, L., Chien, C.C., 2000. A Modeling and experimental study of light nonaqueous phase liquid (LNAPL) accumulation in wells and LNAPL recovery from wells. Water Resources Research 36, 3535–3545. https://doi.org/10.1029/2000WR900224

63. Sookhak Lari, K., Davis, G.B., Rayner, J.L., Bastow, T.P. & Puzon, G.J. 2019. Natural source zone depletion of LNAPL: A critical review supporting modelling approaches. Water Research, 157, 630-646, https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.04.001

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39

64. Sookhak Lari, K., Rayner, J.L. & Davis, G.B. 2018. Towards characterizing LNAPL remediation endpoints. Journal of Environmental Management, 224, 97-105, https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.07.041

65. Statham, T.M., Sumner, R., Hill, A.F.M., Smith, J.W.N., 2023. Transition from active remediation to natural source zone depletion (NSZD) at a LNAPL-impacted site, supported by sustainable remediation appraisal. QJEGH 56, qjegh2022-140. https://doi.org/10.1144/qjegh2022-140

66. Teramoto, E.H., Pede, M.A.Z., Chang, H.K., 2020. Impact of water table fluctuations on the seasonal effectiveness of the pump-and-treat remediation in wet–dry tropical regions. Environ Earth Sci 79, 435. https://doi.org/10.1007/s12665-020-09182-1

67. University of Texas at Austin, 2000. UTCHEM-9.0 A three-dimensional chemical flood simulator. Center for Petroleum and Geosystems Engineering. Austin, Texas, US.

68. van Genuchten, M., 1980. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. Soil Science Soc of Amer J 44, 892–898. https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x

69. Vasudevan, M., Suresh Kumar, G., Nambi, I.M., 2014. Numerical modelling of multicomponent LNAPL dissolution kinetics at residual saturation in a saturated subsurface system. Sadhana 39, 1387–1408. https://doi.org/10.1007/s12046-014-0282-1

70. Weaver, J.W., Charbeneau, R.J., Lien, B.K., 1994. A screening model for nonaqueous phase liquid transport in the vadose zone using Green-Ampt and kinematic wave theory. Water Resources Research 30, 93–105. https://doi.org/10.1029/93WR02341

71. White, M.D., Oostrom, M., 2000. STOMP subsurface transport over multiple phases version 2.0 theory guide. Pacific Northwest National Lab.(PNNL), Richland, WA, US.

72. White, M.D., Oostrom, M., 2003. STOMP subsurface transport over multiple phases version 3.0 User's guide. Pacific Northwest National Lab., Richland, WA, US.

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39

73. Yang, Q., Li, Y., Zhou, J., Xie, X., Su, Y., Gu, Q., Kamon, M., 2013. Modelling of benzene distribution in the subsurface of an abandoned gas plant site after a long term of groundwater table fluctuation. Hydrological Processes 27, 3217–3226. https://doi.org/10.1002/hyp.9442

74. Yaniga, P. & Demko, D. 1983. Hydrocarbon contamination of carbonate aquifers: Assessment and abatement. Proceedings of the Third National Symposium on Aquifer Restoration and Ground-Water Monitoring. National Water Well Association, Worthington OH. 60-65.

75. Yu, J., Zhou, C., Mu, Q.Y., 2022. Numerical investigation on light non–aqueous phase liquid flow in the vadose zone considering porosity effects on soil hydraulic properties. Vadose Zone Journal 21, e20211. https://doi.org/10.1002/vzj2.20211

76. Zhang, J., Liu, Z., Liu, S., Wei, Q., Wang, Y. & Lu, L. 2019. Study on Influence of Geological Heterogeneity on Migration of LNAPL in Contaminated Site Through Numerical Analysis. 834-841, https://doi.org/10.1007/978-981-13-2221-1_95

77. Zhou, J., Li, Y., Xu, J., Kamon, M., 2014. Testing of NAPL simulator to predict migration of a light nonaqueous phase liquid (LNAPL) under water table fluctuation in a sandy medium. J. Cent. South Univ. 21, 317–325. https://doi.org/10.1007/s11771-014-1943-2

78. 環境部國家環境研究院，2021，監測井地下水採樣方法(NIEA W103.56B)。

79. 環境部環境管理署，2014，土壤及地下水油品類污染整治作業參考指引。

80. 台灣中油股份有限公司，2013，煉製事業部桃園煉油廠土壤及地下水污染調查及評估計畫。

附件一

採樣紀錄表

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39

水質檢測儀器校正紀錄表

1748

計畫名稱：建立地下水LNAPL傳導係數分析方法與優化抽除效率(第2年)　採樣日期：114年2月　日

採樣人員：陳彥宏

會同人員：

儀器廠牌序號	pH 計	導電度計	溶氧計	氧化還原電位	濁度計

儀器校正	pH 計	(1) 標準緩衝液 ☑ pH=4.0 ☑ pH=7.0 ☑ pH=10.0 校正時溫度：25.4℃			
		(2) 零點電位讀值	-23.1 mV(-25~25mV)		
		(3) 斜率讀值	-60 mV/pH(-56~ -61 mV/pH)		
	導電度計	(1) 0.01N KCL(aq)讀值	1420 μS/cm		
		(2) 允收標準	1343～1483 μS/cm		
	氧化還原電位	(1) 220 mV 標準溶液讀值	226 mV		
		(2) 允收標準	198～242 mV		
	溶氧計	(1) 校正讀值、電極斜率及飽和空氣讀值	7.95 mg/L	S= 0.90	101.2 %
		(2) 電極斜率(S)允收範圍	0.6~1.25		
		(3) 校正時溫度	26.8 ℃		
		(4) 鹽度補償	0.0 ‰		
		(5) 校正時大氣壓力	1014 mbar		
	濁度計	(1) 校正後讀值	NTU		
		(2) 允收標準	900 ~ 1100 NTU		

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39

地下水採樣紀錄表

計畫名稱：建立地下水LNAPL傳導係數分析方法與優化抽除效率(第2年)　採樣日期：114年2月17日

採樣地點：中油桃園煉油廠　天候狀況：☑晴☐陰☐雨

採樣人員：陳俊紅

會同人員：楊子

監測井基本資料

鎖扣是否完整：☑是 ☐否　情況描述：

附近環境現況描述：

型 式	☐平台式 ☑隱藏式 ☐非標準監測井 ☐民井			座 標	N：
井 號	W-06	告示牌井深	m		E：
井管內徑	2吋 英吋	水位面至井口深度	25.79 m	井底至井口深度	26.70 m
井篩長度	m	井水深度	0.910 m	井水體積	~~2.274~~ 1.82 L

洗井資料

抽水方式	☐氣囊壓縮式泵 ☐貝勒管 ☐民井				
採樣器放置深度	m	抽水速率	L/min	三倍井水體積	L
水流元容積	L	儀器量測頻率	min/次	水位洩降	m

地下水位洩降及水質參數量測紀錄

預洗井	時間	:	:	:	:	:	:	:	:
	水位(m)								

量測資料	時間	抽水速率 (L/min)	水位 (m)	汲出水體積 (L)	水溫 (℃)	pH值	導電度 (μS/cm)	溶氧 (mg/L)	氧化還原電位 (mV)	濁度 (NTU)	井水觀察 (顏色、味道、雜質)
洗井開始	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井後	:					6.432	1350	1.23	-81.7		

洗井結束時水位面至井口深度：　m　汲出水總體積：　L

採樣資料

採樣器材：☐氣囊壓縮式泵 ☑貝勒管 ☐民井

開始時間：		結束時間：		採樣器放置深度：(☐業主指定深度)	m

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39

地下水採樣紀錄表

計畫名稱：建立地下水LNAPL傳導係數分析方法與優化抽除效率(第2年)　採樣日期：114年2月17日

採樣地點：中油桃園煉油廠　天候狀況：☑晴☐陰☐雨

採樣人員：陳俊仁

會同人員：林O

監測井基本資料

鎖扣是否完整：☑是 ☐否　情況描述：

附近環境現況描述：

型 式	☐平台式 ☑隱藏式 ☐非標準監測井 ☐民井			座 標	N：
井 號	W-20	告示牌井深	m		E：
井管內徑	2 英吋	水位面至井口深度	25.500 m	井底至井口深度	37.60 m
井篩長度	m	井水深度	12.100 m	井水體積	24.200 L

洗井資料

抽水方式	☐氣囊壓縮式泵 ☐貝勒管 ☐民井				
採樣器放置深度	m	抽水速率	L/min	三倍井水體積	L
水流元容積	L	儀器量測頻率	min/次	水位洩降	m

地下水位洩降及水質參數量測紀錄

預洗井	時間	:	:	:	:	:	:	:	:
	水位(m)								

量測資料	時間	抽水速率 (L/min)	水位 (m)	汲出水體積 (L)	水溫 (℃)	pH值	導電度 (μS/cm)	溶氧 (mg/L)	氧化還原電位 (mV)	濁度 (NTU)	井水觀察 (顏色、味道、雜質)
洗井開始	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井後	:					6.352	1028	2.96	-22.5		

洗井結束時水位面至井口深度：	m	汲出水總體積：	L

採樣資料

採樣器材：☐氣囊壓縮式泵 ☑貝勒管 ☐民井

開始時間：		結束時間：		採樣器放置深度：(☐業主指定深度)	m

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39

地下水採樣紀錄表

計畫名稱：建立地下水LNAPL傳導係數分析方法與優化抽除效率(第2年)　採樣日期：114年2月17日

採樣地點：中油桃園煉油廠　天候狀況：☑晴☐陰☐雨

採樣人員：陳俊仁

會同人員：林[illegible]

監測井基本資料	鎖扣是否完整：☐是 ☑否　情況描述：					
	附近環境現況描述：					
	型 式	☐平台式 ☑隱藏式 ☐非標準監測井 ☐民井			座 標	N：
	井 號	W-10	告示牌井深	m		E：
	井管內徑	2 英吋	水位面至井口深度	25.550 m	井底至井口深度	26.40 m
	井篩長度	m	井水深度	0.850 m	井水體積	1.700 L
洗井資料	抽水方式	☐氣囊壓縮式泵 ☐貝勒管 ☐民井				
	採樣器放置深度	m	抽水速率	L/min	三倍井水體積	L
	水流元容積	L	儀器量測頻率	min/次	水位洩降	m

地下水位洩降及水質參數量測紀錄

預洗井	時間	:	:	:	:	:	:	:	:
	水位(m)								

量測資料	時間	抽水速率 (L/min)	水位 (m)	汲出水體積 (L)	水溫 (℃)	pH值	導電度 (μS/cm)	溶氧 (mg/L)	氧化還原電位 (mV)	濁度 (NTU)	井水觀察 (顏色、味道、雜質)
洗井開始	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井後	:					6.350	775	1.91	-57.7		

洗井結束時水位面至井口深度：	m	汲出水總體積：	L

採樣資料	採樣器材：☐氣囊壓縮式泵 ☑貝勒管 ☐民井				
	開始時間：		結束時間：	採樣器放置深度：(☐業主指定深度)	m

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39

地下水採樣紀錄表

計畫名稱：建立地下水LNAPL傳導係數分析方法與優化抽除效率(第2年)　採樣日期：114年2月17日

採樣地點：中油桃園煉油廠　天候狀況：☑晴☐陰☐雨

採樣人員：陳俊紅

會同人員：郭阿財

監測井基本資料

鎖扣是否完整：☐是 ☑否　情況描述：

附近環境現況描述：

型 式	☐平台式 ☑隱藏式 ☐非標準監測井 ☐民井			座 標	N：
井 號	W-07	告示牌井深	m		E：
井管內徑	2 英吋	水位面至井口深度	11.173 m	井底至井口深度	15.660 m
井篩長度	m	井水深度	4.487 m	井水體積	8.974 L

洗井資料

抽水方式	☐氣囊壓縮式泵 ☐貝勒管 ☐民井				
採樣器放置深度	m	抽水速率	L/min	三倍井水體積	L
水流元容積	L	儀器量測頻率	min/次	水位洩降	m

地下水位洩降及水質參數量測紀錄

預洗井	時間	:	:	:	:	:	:	:	:
	水位(m)								

量測資料	時間	抽水速率 (L/min)	水位 (m)	汲出水體積 (L)	水溫 (℃)	pH值	導電度 (μS/cm)	溶氧 (mg/L)	氧化還原電位 (mV)	濁度 (NTU)	井水觀察 (顏色、味道、雜質)
洗井開始	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井後	:					6.465	1566	1.74	-109.8		

洗井結束時水位面至井口深度：	m	汲出水總體積：	L

採樣資料

採樣器材：☐氣囊壓縮式泵 ☑貝勒管 ☐民井

開始時間：		結束時間：		採樣器放置深度：(☐業主指定深度)	m

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39

地下水採樣紀錄表

計畫名稱：建立地下水LNAPL傳導係數分析方法與優化抽除效率(第2年)　採樣日期：114年2月17日

採樣地點：中油桃園煉油廠　天候狀況：☑晴☐陰☐雨

採樣人員：陳俊紅

會同人員：胡[illegible]

監測井基本資料

鎖扣是否完整：☐是 ☑否　情況描述：

附近環境現況描述：

型 式	☐平台式 ☑隱藏式 ☐非標準監測井 ☐民井			座 標	N：
井 號	W16	告示牌井深	m		E：
井管內徑	4 英吋	水位面至井口深度	11.706 m	井底至井口深度	15.530 m
井篩長度	m	井水深度	3.824 m	井水體積	30.974 L

洗井資料

抽水方式	☐氣囊壓縮式泵 ☐貝勒管 ☐民井				
採樣器放置深度	m	抽水速率	L/min	三倍井水體積	L
水流元容積	L	儀器量測頻率	min/次	水位洩降	m

地下水位洩降及水質參數量測紀錄

預洗井	時間	:	:	:	:	:	:	:	:
	水位(m)								

量測資料	時間	抽水速率 (L/min)	水位 (m)	汲出水體積 (L)	水溫 (℃)	pH值	導電度 (μS/cm)	溶氧 (mg/L)	氧化還原電位 (mV)	濁度 (NTU)	井水觀察 (顏色、味道、雜質)
洗井開始	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井後	:					6.513	1408	1.96	-100.9		

洗井結束時水位面至井口深度：　m　汲出水總體積：　L

採樣資料

採樣器材：☐氣囊壓縮式泵 ☑貝勒管 ☐民井

開始時間：		結束時間：		採樣器放置深度：(☐業主指定深度)	m

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39

地下水採樣紀錄表

計畫名稱：建立地下水LNAPL傳導係數分析方法與優化抽除效率(第2年)　採樣日期：114年2月17日

採樣地點：中油桃園煉油廠　天候狀況：☑晴☐陰☐雨

採樣人員：陳俊仁

會同人員：

監測井基本資料

鎖扣是否完整：☐是 ☑否　情況描述：

附近環境現況描述：

型 式	☐平台式 ☑隱藏式 ☐非標準監測井 ☐民井			座 標	N：
井 號	W-08	告示牌井深	m		E：
井管內徑	2 英吋	水位面至井口深度	8.807 m	井底至井口深度	14.810 m
井篩長度	m	井水深度	6.003 m	井水體積	12.006 L

洗井資料

抽水方式	☐氣囊壓縮式泵 ☐貝勒管 ☐民井				
採樣器放置深度	m	抽水速率	L/min	三倍井水體積	L
水流元容積	L	儀器量測頻率	min/次	水位洩降	m

地下水位洩降及水質參數量測紀錄

預洗井	時間	:	:	:	:	:	:	:	:
	水位(m)								

量測資料	時間	抽水速率 (L/min)	水位 (m)	汲出水體積 (L)	水溫 (℃)	pH值	導電度 (~~μS/cm~~ mS/cm)	溶氧 (mg/L)	氧化還原電位 (mV)	濁度 (NTU)	井水觀察 (顏色、味道、雜質)
洗井開始	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井後	:					6.344	5.60	2.13	-47.6		

洗井結束時水位面至井口深度：	m	汲出水總體積：	L

採樣資料

採樣器材：☐氣囊壓縮式泵 ☑貝勒管 ☐民井

開始時間：		結束時間：		採樣器放置深度：(☐業主指定深度)	m

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39

地下水採樣紀錄表

計畫名稱：建立地下水LNAPL傳導係數分析方法與優化抽除效率(第2年)　採樣日期：114年2月17日

採樣地點：中油桃園煉油廠　天候狀況：☑晴☐陰☐雨

採樣人員：陳俊仁

會同人員：林[illegible]

監測井基本資料

鎖扣是否完整：☐是 ☑否　情況描述：

附近環境現況描述：

型 式	☐平台式 ☑隱藏式 ☐非標準監測井 ☐民井			座 標	N：
井 號	W02	告示牌井深	m		E：
井管內徑	4 英吋	水位面至井口深度	9.092 m	井底至井口深度	12.400 m
井篩長度	m	井水深度	3.308 m	井水體積	26.795 L

洗井資料

抽水方式	☐氣囊壓縮式泵 ☐貝勒管 ☐民井				
採樣器放置深度	m	抽水速率	L/min	三倍井水體積	L
水流元容積	L	儀器量測頻率	min/次	水位洩降	m

地下水位洩降及水質參數量測紀錄

預洗井 時間	:	:	:	:	:	:	:	:	:
預洗井 水位(m)									

量測資料	時間	抽水速率 (L/min)	水位 (m)	汲出水體積 (L)	水溫 (℃)	pH值	導電度 (~~μS/cm~~ mS/cm)	溶氧 (mg/L)	氧化還原電位 (mV)	濁度 (NTU)	井水觀察 (顏色、味道、雜質)
洗井開始	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井後	:					6.390	4.07	2.90	-71.7		

洗井結束時水位面至井口深度：　m　汲出水總體積：　L

採樣資料

採樣器材：☐氣囊壓縮式泵 ☑貝勒管 ☐民井

開始時間：		結束時間：		採樣器放置深度：(☐業主指定深度)	m

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39

地下水採樣紀錄表

計畫名稱：建立地下水LNAPL傳導係數分析方法與優化抽除效率(第2年)　採樣日期：114年2月18日

採樣地點：中油桃園煉油廠　天候狀況：☑晴☐陰☐雨

採樣人員：陳俊仁

會同人員：林[illegible]

監測井基本資料	鎖扣是否完整：☑是 ☐否 情況描述：					
	附近環境現況描述：					
	型 式	☑平台式 ☐隱藏式 ☐非標準監測井 ☐民井			座 標	N：
	井 號	W-24	告示牌井深	m		E：
	井管內徑	2 英吋	水位面至井口深度	46.40 m	井底至井口深度	49.80 m
	井篩長度	m	井水深度	m	井水體積	L

洗井資料	抽水方式	☐氣囊壓縮式泵 ☐貝勒管 ☐民井				
	採樣器放置深度	m	抽水速率	L/min	三倍井水體積	L
	水流元容積	L	儀器量測頻率	min/次	水位洩降	m

地下水位洩降及水質參數量測紀錄

預洗井	時間	:	:	:	:	:	:	:	:
	水位(m)								

量測資料	時間	抽水速率 (L/min)	水位 (m)	汲出水體積 (L)	水溫 (℃)	pH值	導電度 (μS/cm)	溶氧 (mg/L)	氧化還原電位 (mV)	濁度 (NTU)	井水觀察 (顏色、味道、雜質)
洗井開始	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井後	:					6.025	185.8	1.74	-3.7		

洗井結束時水位面至井口深度：	m	汲出水總體積：	L

採樣資料	採樣器材：☐氣囊壓縮式泵 ☑貝勒管 ☐民井				
	開始時間：		結束時間：	採樣器放置深度：(☐業主指定深度)	m

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39

地下水採樣紀錄表

計畫名稱：建立地下水LNAPL傳導係數分析方法與優化抽除效率(第2年)　採樣日期：114年2月18日

採樣地點：中油桃園煉油廠　天候狀況：☑晴☐陰☐雨

採樣人員：陳俊仁

會同人員：郭旭

監測井基本資料

鎖扣是否完整：☑是 ☐否　情況描述：

附近環境現況描述：

型 式	☐平台式 ☑隱藏式 ☐非標準監測井 ☐民井			座 標	N：
井 號	W-25	告示牌井深	m		E：
井管內徑	2 英吋	水位面至井口深度	25.70 m	井底至井口深度	33.50 m
井篩長度	m	井水深度	7.800 m	井水體積	15.600 L

洗井資料

抽水方式	☐氣囊壓縮式泵 ☐貝勒管 ☐民井				
採樣器放置深度	m	抽水速率	L/min	三倍井水體積	L
水流元容積	L	儀器量測頻率	min/次	水位洩降	m

地下水位洩降及水質參數量測紀錄

預洗井	時間	:	:	:	:	:	:	:	:		
	水位(m)										

量測資料	時間	抽水速率 (L/min)	水位 (m)	汲出水體積 (L)	水溫 (℃)	pH值	導電度 (μS/cm)	溶氧 (mg/L)	氧化還原電位 (mV)	濁度 (NTU)	井水觀察 (顏色、味道、雜質)
洗井開始	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井後	:					5.852	206	4.29	90.7		

洗井結束時水位面至井口深度：　m　汲出水總體積：　L

採樣資料

採樣器材：☐氣囊壓縮式泵 ☑貝勒管 ☐民井

開始時間：		結束時間：		採樣器放置深度：(☐業主指定深度)	m

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39

地下水採樣紀錄表

計畫名稱：建立地下水LNAPL傳導係數分析方法與優化抽除效率(第2年)　採樣日期：114年2月18日

採樣地點：中油桃園煉油廠　天候狀況：☑晴☐陰☐雨

採樣人員：陳俊仁

會同人員：趙中

監測井基本資料

鎖扣是否完整：☑是 ☐否　情況描述：					
附近環境現況描述：					
型　式	☐平台式 ☑隱藏式 ☐非標準監測井 ☐民井			座　標	N：
井　號	W-22	告示牌井深	m		E：
井管內徑	2 英吋	水位面至井口深度	18.80 m	井底至井口深度	27.80 m
井篩長度	m	井水深度	9.000 m	井水體積	18.000 L

洗井資料

抽水方式	☐氣囊壓縮式泵 ☐貝勒管 ☐民井					
採樣器放置深度	m	抽水速率	L/min	三倍井水體積	L	
水流元容積	L	儀器量測頻率	min/次	水位洩降	m	

地下水位洩降及水質參數量測紀錄

預洗井 時間	:	:	:	:	:	:	:	:
預洗井 水位(m)								

量測資料	時間	抽水速率 (L/min)	水位 (m)	汲出水體積 (L)	水溫 (℃)	pH值	導電度 (μS/cm)	溶氧 (mg/L)	氧化還原電位 (mV)	濁度 (NTU)	井水觀察 (顏色、味道、雜質)
洗井開始	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井後	:					5.577	212	4.17	69.8		

洗井結束時水位面至井口深度：	m	汲出水總體積：	L

採樣資料

採樣器材：☐氣囊壓縮式泵 ☑貝勒管 ☐民井					
開始時間：		結束時間：		採樣器放置深度：(☐業主指定深度)	m

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39

地下水採樣紀錄表

計畫名稱：建立地下水LNAPL傳導係數分析方法與優化抽除效率(第2年)　採樣日期：114年2月18日

採樣地點：中油桃園煉油廠　天候狀況：☑晴☐陰☐雨

採樣人員：陳修正

會同人員：楊宗叶

監測井基本資料	鎖扣是否完整：☑是 ☐否　情況描述：					
	附近環境現況描述：					
	型　式	☐平台式 ☑隱藏式 ☐非標準監測井 ☐民井			座　標	N：
	井　號	W-21	告示牌井深	m		E：
	井管內徑	2 英吋	水位面至井口深度	21.80 m	井底至井口深度	31.50 m
	井篩長度	m	井水深度	9.700 m	井水體積	19.400 L
洗井資料	抽水方式	☐氣囊壓縮式泵 ☐貝勒管 ☐民井				
	採樣器放置深度	m	抽水速率	L/min	三倍井水體積	L
	水流元容積	L	儀器量測頻率	min/次	水位洩降	m

地下水位洩降及水質參數量測紀錄

頂洗井	時間	:	:	:	:	:	:	:	:
	水位(m)								

量測資料	時間	抽水速率 (L/min)	水位 (m)	汲出水體積 (L)	水溫 (℃)	pH值	導電度 (μS/cm)	溶氧 (mg/L)	氧化還原電位 (mV)	濁度 (NTU)	井水觀察 (顏色、味道、雜質)
洗井開始	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井後	:					6.135	221	2.37	93.8		

洗井結束時水位面至井口深度：	m	汲出水總體積：	L

採樣資料	採樣器材：☐氣囊壓縮式泵 ☑貝勒管 ☐民井				
	開始時間：		結束時間：	採樣器放置深度：(☐業主指定深度)	m

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39

地下水採樣紀錄表

計畫名稱：建立地下水LNAPL傳導係數分析方法與優化抽除效率(第2年)　採樣日期：114年2月18日

採樣地點：中油桃園煉油廠　天候狀況：☑晴☐陰☐雨

採樣人員：陳俊仁

會同人員：林阿

監測井基本資料

鎖扣是否完整：☑是 ☐否　情況描述：

附近環境現況描述：

型 式	☐平台式 ☑隱藏式 ☐非標準監測井 ☐民井			座 標	N：
井 號	W-18	告示牌井深	m		E：
井管內徑	2 英吋	水位面至井口深度	8.270 m	井底至井口深度	15.60 m
井篩長度	m	井水深度	7.330 m	井水體積	14.660 L

洗井資料

抽水方式	☐氣囊壓縮式泵 ☐貝勒管 ☐民井				
採樣器放置深度	m	抽水速率	L/min	三倍井水體積	L
水流元容積	L	儀器量測頻率	min/次	水位洩降	m

地下水位洩降及水質參數量測紀錄

預洗井	時間	:	:	:	:	:	:	:	:
	水位(m)								

量測資料	時間	抽水速率 (L/min)	水位 (m)	汲出水體積 (L)	水溫 (℃)	pH值	導電度 (μS/cm)	溶氧 (mg/L)	氧化還原電位 (mV)	濁度 (NTU)	井水觀察 (顏色、味道、雜質)
洗井開始	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井後	:					5.499	278	2.15	91.7		

洗井結束時水位面至井口深度：　m　汲出水總體積：　L

採樣資料

採樣器材：☐氣囊壓縮式泵 ☑貝勒管 ☐民井

開始時間：		結束時間：		採樣器放置深度：(☐業主指定深度)	m

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39

地下水採樣紀錄表

計畫名稱：建立地下水LNAPL傳導係數分析方法與優化抽除效率(第2年)　採樣日期：114年2月18日

採樣地點：中油桃園煉油廠　天候狀況：☑晴☐陰☐雨

採樣人員：陳俊仁

會同人員：招陳

監測井基本資料

鎖扣是否完整：☑是 ☐否 情況描述：

附近環境現況描述：

型 式	☐平台式 ☑隱藏式 ☐非標準監測井 ☐民井			座 標	N：
井 號	W-16	告示牌井深	m		E：
井管內徑	英吋	水位面至井口深度	4.860 m	井底至井口深度	10.400 m
井篩長度	m	井水深度	5.540 m	井水體積	11.08 L

洗井資料

抽水方式	☐氣囊壓縮式泵 ☐貝勒管 ☐民井				
採樣器放置深度	m	抽水速率	L/min	三倍井水體積	L
水流元容積	L	儀器量測頻率	min/次	水位洩降	m

地下水位洩降及水質參數量測紀錄

預洗井	時間	:	:	:	:	:	:	:	:
	水位(m)								

量測資料	時間	抽水速率 (L/min)	水位 (m)	汲出水體積 (L)	水溫 (℃)	pH值	導電度 (μS/cm)	溶氧 (mg/L)	氧化還原電位 (mV)	濁度 (NTU)	井水觀察 (顏色、味道、雜質)
洗井開始	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井後	:					5.356	250	2.75	78.9		

洗井結束時水位面至井口深度：	m	汲出水總體積：	L

採樣資料

採樣器材：☐氣囊壓縮式泵 ☑貝勒管 ☐民井

開始時間：		結束時間：		採樣器放置深度：(☐業主指定深度)	m

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39

地下水採樣紀錄表

計畫名稱：建立地下水LNAPL傳導係數分析方法與優化抽除效率(第2年)　採樣日期：114年2月18日

採樣地點：中油桃園煉油廠　天候狀況：☑晴☐陰☐雨

採樣人員：陳俊仁

會同人員：

監測井基本資料

鎖扣是否完整：☑是 ☐否　情況描述：

附近環境現況描述：

型 式	☐平台式 ☑隱藏式 ☐非標準監測井 ☐民井			座 標	N：
井 號	W-17	告示牌井深	m		E：
井管內徑	2 英吋	水位面至井口深度	7.320 m	井底至井口深度	13.50 m
井篩長度	m	井水深度	6.180 m	井水體積	12.360 L

洗井資料

抽水方式	☐氣囊壓縮式泵 ☐貝勒管 ☐民井										
採樣器放置深度	m	抽水速率	L/min	三倍井水體積	L						
水流元容積	L	儀器量測頻率	min/次	水位洩降	m						

地下水位洩降及水質參數量測紀錄

頂洗井	時間	:	:	:	:	:	:	:	:		
	水位(m)										

量測資料	時間	抽水速率 (L/min)	水位 (m)	汲出水體積 (L)	水溫 (℃)	pH值	導電度 (μS/cm)	溶氧 (mg/L)	氧化還原電位 (mV)	濁度 (NTU)	井水觀察 (顏色、味道、雜質)
洗井開始	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井後	:					5.782	217	4.01	98.1		

洗井結束時水位面至井口深度：　m　汲出水總體積：　L

採樣資料

採樣器材：☐氣囊壓縮式泵 ☑貝勒管 ☐民井

開始時間：		結束時間：		採樣器放置深度：(☐業主指定深度)	m

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39

地下水採樣紀錄表

計畫名稱：建立地下水LNAPL傳導係數分析方法與優化抽除效率(第2年)　採樣日期：114年2月18日

採樣地點：中油桃園煉油廠　天候狀況：☑晴☐陰☐雨

採樣人員：陳俊仁

會同人員：林佩叶

監測井基本資料

鎖扣是否完整：☑是 ☐否　情況描述：

附近環境現況描述：

型 式	☐平台式 ☑隱藏式 ☐非標準監測井 ☐民井			座 標	N：
井 號	W-09	告示牌井深	m		E：
井管內徑	2 英吋	水位面至井口深度	0.912 m	井底至井口深度	10.270 m
井篩長度	m	井水深度	9.358 m	井水體積	18.716 L

洗井資料

抽水方式	☐氣囊壓縮式泵 ☐貝勒管 ☐民井				
採樣器放置深度	m	抽水速率	L/min	三倍井水體積	L
水流元容積	L	儀器量測頻率	min/次	水位洩降	m

地下水位洩降及水質參數量測紀錄

預洗井	時間	:	:	:	:	:	:	:	:
	水位(m)								

量測資料	時間	抽水速率 (L/min)	水位 (m)	汲出水體積 (L)	水溫 (℃)	pH值	導電度 (μS/cm)	溶氧 (mg/L)	氧化還原電位 (mV)	濁度 (NTU)	井水觀察 (顏色、味道、雜質)
洗井開始	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井後	:					5.904	325	3.55	56.7		

洗井結束時水位面至井口深度：　m　汲出水總體積：　L

採樣資料

採樣器材：☐氣囊壓縮式泵 ☑貝勒管 ☐民井

開始時間：		結束時間：		採樣器放置深度：(☐業主指定深度)	m

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39

地下水採樣紀錄表

計畫名稱：建立地下水LNAPL傳導係數分析方法與優化抽除效率(第2年)　採樣日期：114年2月18日

採樣地點：中油桃園煉油廠　天候狀況：☑晴☐陰☐雨

採樣人員：陳修立

會同人員：

監測井基本資料	鎖扣是否完整：☑是 ☐否　情況描述：					
	附近環境現況描述：					
	型　式	☐平台式 ☑隱藏式 ☐非標準監測井 ☐民井			座　標	N： E：
	井　號	W-23	告示牌井深	m		
	井管內徑	2 英吋	水位面至井口深度	10.380 m	井底至井口深度	13.500 m
	井篩長度	m	井水深度	3.120 m	井水體積	6.240 L
洗井資料	抽水方式	☐氣囊壓縮式泵 ☐貝勒管 ☐民井				
	採樣器放置深度	m	抽水速率	L/min	三倍井水體積	L
	水流元容積	L	儀器量測頻率	min/次	水位洩降	m

地下水位洩降及水質參數量測紀錄

預洗井	時間	:	:	:	:	:	:	:	:
	水位(m)								

量測資料	時間	抽水速率 (L/min)	水位 (m)	汲出水體積 (L)	水溫 (℃)	pH值	導電度 (μS/cm)	溶氧 (mg/L)	氧化還原電位 (mV)	濁度 (NTU)	井水觀察 (顏色、味道、雜質)
洗井開始	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井後	:					5.709	380	3.77	32.8		

洗井結束時水位面至井口深度：	m	汲出水總體積：	L

採樣資料	採樣器材：☐氣囊壓縮式泵 ☑貝勒管 ☐民井				
	開始時間：		結束時間：	採樣器放置深度：(☐業主指定深度)	m

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39

地下水採樣紀錄表

計畫名稱：建立地下水LNAPL傳導係數分析方法與優化抽除效率(第2年)　採樣日期：114年2月18日

採樣地點：中油桃園煉油廠　天候狀況：☑晴☐陰☐雨

採樣人員：陳俊仁

會同人員：[illegible]

監測井基本資料

鎖扣是否完整：☑是 ☐否　情況描述：

附近環境現況描述：

型 式	☐平台式 ☑隱藏式 ☐非標準監測井 ☐民井			座 標	N：
井 號	W-19	告示牌井深	m		E：
井管內徑	英吋	水位面至井口深度	13.150 m	井底至井口深度	15.70 m
井篩長度	m	井水深度	2.55 m	井水體積	5.10 L

洗井資料

抽水方式	☐氣囊壓縮式泵 ☐貝勒管 ☐民井				
採樣器放置深度	m	抽水速率	L/min	三倍井水體積	L
水流元容積	L	儀器量測頻率	min/次	水位洩降	m

地下水位洩降及水質參數量測紀錄

預洗井	時間	:	:	:	:	:	:	:	:
	水位(m)								

量測資料	時間	抽水速率 (L/min)	水位 (m)	汲出水體積 (L)	水溫 (℃)	pH值	導電度 (μS/cm)	溶氧 (mg/L)	氧化還原電位 (mV)	濁度 (NTU)	井水觀察 (顏色、味道、雜質)
洗井開始	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井中	:										
洗井後	:					6.21	238	4.61	76.3		

洗井結束時水位面至井口深度：　m　汲出水總體積：　L

採樣資料

採樣器材：☐氣囊壓縮式泵 ☑貝勒管 ☐民井

開始時間：		結束時間：		採樣器放置深度：(☐業主指定深度)	m

採樣點位紀錄表（ 地下水 ）

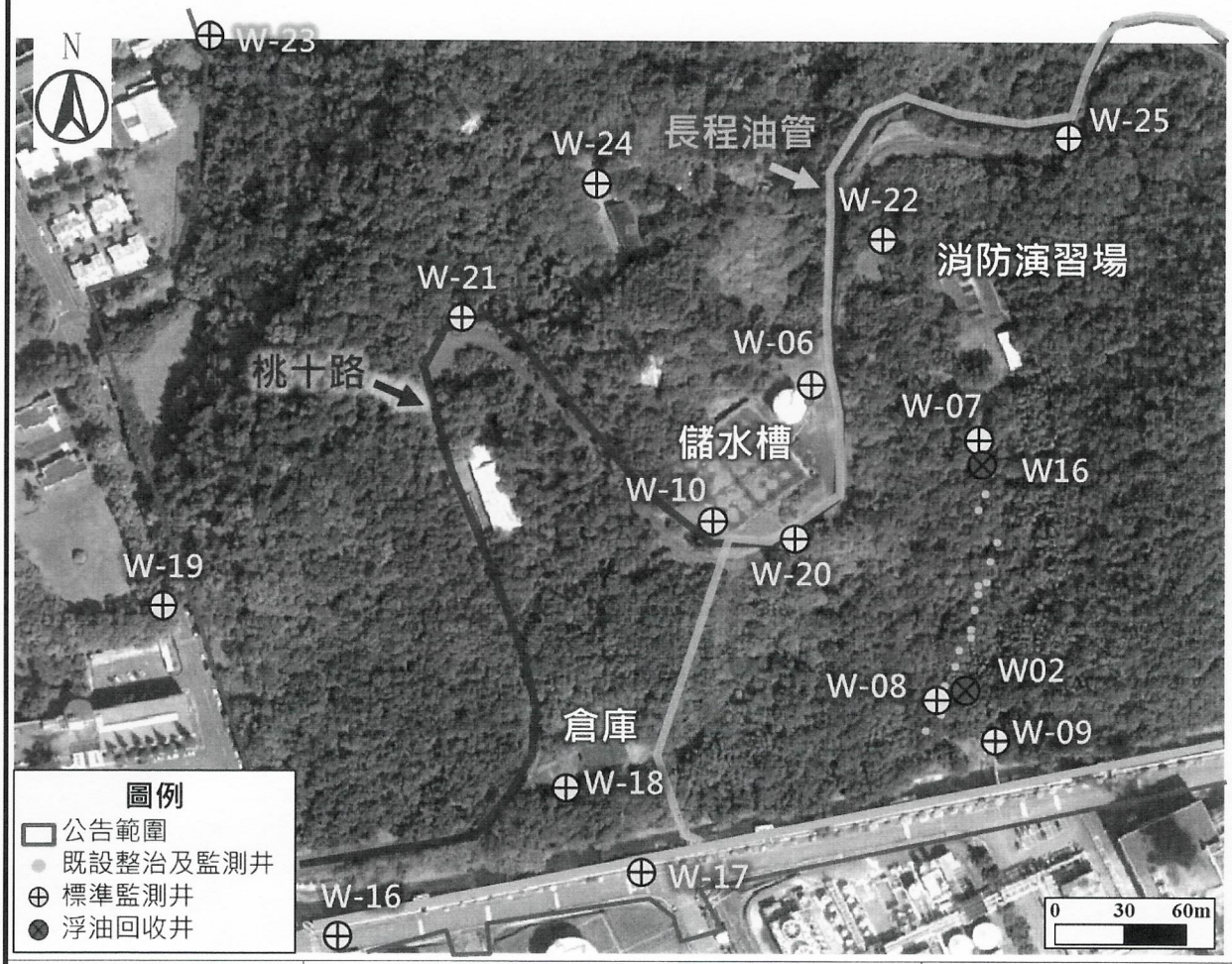
計畫名稱： 建立地下水LNAPL傳導係數分析方法與優化抽除效率(第2年)　　日　　期： 1748 114年 2 月 日

採樣地點： 中油桃園煉油廠　　天候狀況： ☑晴 ☐陰 ☐雨

採樣人員： 陳俊仁

會同人員： 郭

採樣點位紀錄表



採樣點號	採樣點座標(TWD97)		備註
	E(X)	N(Y)	
W02	281510	2769980	
W16	281523	2770083	
W-06	281450.3	2770113	
W-07	281525.7	2770086	

W-08	281507.6	2769980	
W-09	281532.8	2769954	
W-10	281406.3	2770052	
W-16	281240.1	2769866	
W-17	281375.5	2769894	
W-18	281341.7	2769934	
W-19	281163.4	2770015	
W-20	281443.4	2770044	
W-21	281292.8	2770145	
W-22	281482	2770178	
W-23	281181.8	2770270	
W-24	281354.2	2770202	
W-25	281565.1	2770223	

附件二

水體樣本檢測報告

台灣檢驗科技股份有限公司

環境部許可證字號：環境部國環檢證字第035號

地下水樣品檢測報告

委託單位：淡江大學水資源及環境工程學系
計畫名稱：建立地下水LNAPL傳導係數分析方法與優化抽除效率(第二年)
樣品特性：水樣
樣品編號：NPG25200575001~017
採樣單位：業興環境科技股份有限公司
採樣方法：-----
採樣地點：台灣中油股份有限公司煉製事業部桃園煉油廠(委託單位提供)

檢測目的：自行評估
採樣時間：114年02月17日＊時＊分
至：114年02月18日＊時＊分
收樣時間：114年02月19日10時36分
報告日期：114年03月05日
報告編號：NPG25200575
聯絡人：周家薇
電話/傳真：02-2299-3279ext2306 / 02-2299-3261

備　註：
1. 本報告已由核可報告簽署人審核無誤，並簽署於內部報告文件，簽署人如下：有機檢測類：謝淑敏(FIO-03)。
2. 本報告共13頁，分離使用無效。
3. 測定值低於方法偵測極限(MDL)時，以″ ND″ 表示，並註明方法偵測極限(MDL)；若高於MDL但低於檢量線最低濃度時，以″ <檢量線最低濃度值″ 表示，並括號註明實測值。
4. 本樣品由委託單位自行送樣，本報告僅對該樣品負責，不得隨意複製及作為宣傳廣告之用。
5. 本次採樣時間由委託單位提供。

報告專用章
台灣檢驗科技股份有限公司
環境實驗室-台北
負責人：李仁燮
檢驗室主管：葉峻榕

公司名稱：台灣檢驗科技股份有限公司

負責人：李仁燮

檢驗室主管：謝淑敏

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39

此報告是本公司依照背面所印之通用服務條款所簽發，此條款可在本公司網站http://www.sgs.com.tw/Terms-and-Conditions閱覽，凡電子文件之格式依http://www.sgs.com.tw/Terms-and-Conditions之電子文件期限與條件處理。請注意條款有關於責任、賠償之限制及管轄權的約定。任何持有此文件者，請注意本公司製作之結果報告書將僅反映執行時所紀錄且於接受指示範圍內之事實。本公司僅對客戶負責，此文件不妨礙當事人在交易上權利之行使或義務之免除。未經本公司事先書面同意，此報告不可部份複製。任何未經授權的變更、偽造、或曲解本報告所顯示之內容，皆爲不合法，違犯者可能遭受法律上最嚴厲之追訴。除非另有說明，此報告結果僅對測試之樣品負責。

TWE 2878917

SGS Taiwan Ltd.
台灣檢驗科技股份有限公司
136-1, Wu Kung Road, New Taipei Industrial Park, Wu Ku District, New Taipei City 248016, Taiwan /248016 新北市五股區新北產業園區五工路136-1號
t (886-2) 2299-3939　f (886-2) 2299-3261　www.sgs.com.tw
Member of SGS Group

3002

台灣檢驗科技股份有限公司

環境部許可證字號：環境部國環檢證字第035號

樣品檢測報告

樣品編號： NPG25200575001~008

序號	樣品編號 / 檢測項目	檢測方法	MDL	單位	NPG25200575001 W-06	NPG25200575002 W-20	NPG25200575003 W-10	NPG25200575004 W-07	NPG25200575005 W16	NPG25200575006 W-08	NPG25200575007 W02	NPG25200575008 W-24
1	總石油碳氫化合物	NIEA W901.51B	0.161	mg/L	1570	64.5	605	240	3160	472	432	<0.500(0.343)
	以下空白											
備註												

報告專用章
台灣檢驗科技股份有限公司
環境實驗室 台北
負責人：李仁樊
檢驗室主管：葉峻榕

此報告是本公司依照背面所印之通用服務條款所簽發，此條款可在本公司網站http://www.sgs.com.tw/Terms-and-Conditions閱覽，凡電子文件之格式依http://www.sgs.com.tw/Terms-and-Conditions之電子文件期限與條件處理。請注意條款有關於責任、賠償之限制及管轄權的約定。任何持有此文件者，請注意本公司製作之結果報告書將僅反映執行時所紀錄且於接受指示範圍內之事實。本公司僅對客戶負責，此文件不妨礙當事人在交易上權利之行使或義務之免除。未經本公司事先書面同意，此報告不可部份複製。任何未經授權的變更、偽造、或曲解本報告所顯示之內容，皆爲不合法，違犯者可能遭受法律上最嚴厲之追訴。除非另有說明，此報告結果僅對測試之樣品負責。

TWE 2878918

工作時間：2025年12月12日下午 03:39
3002

台灣檢驗科技股份有限公司

環境部許可證字號：環境部國環檢證字第035號

樣品檢測報告

樣品編號： NPG25200575009~016

序號	樣品編號 / 檢測項目	檢測方法	MDL	單位	NPG25200575009 W-25	NPG25200575010 W-22	NPG25200575011 W-21	NPG25200575012 W-18	NPG25200575013 W-16	NPG25200575014 W-17	NPG25200575015 W-09	NPG25200575016 W-23
1	總石油碳氫化合物	NIEA W901.51B	0.161	mg/L	<0.500(0.204)	<0.500(0.177)	<0.500(0.198)	<0.500(0.262)	ND	ND	<0.500(0.203)	ND
	以下空白											
備註												

報告專用章
台灣檢驗科技股份有限公司
環境實驗室-台北
負責人：李仁燮
檢驗室主管：葉峻榕

此報告是本公司依照背面所印之通用服務條款所簽發，此條款可在本公司網站http://www.sgs.com.tw/Terms-and-Conditions閱覽，凡電子文件之格式依http://www.sgs.com.tw/Terms-and-Conditions之電子文件期限與條件處理。請注意條款有關於責任、賠償之限制及管轄權的約定。任何持有此文件者，請注意本公司製作之結果報告書將僅反映執行時所紀錄且於接受指示範圍內之事實。本公司僅對客戶負責，此文件不妨礙當事人在交易上權利之行使或義務之免除。未經本公司事先書面同意，此報告不可部份複製。任何未經授權的變更、偽造、或曲解本報告所顯示之內容，皆爲不合法，違犯者可能遭受法律上最嚴厲之追訴。除非另有說明，此報告結果僅對測試之樣品負責。

TWE 2878919

SGS Taiwan Ltd.
台灣檢驗科技股份有限公司
136-1, Wu Kung Road, New Taipei Industrial Park, Wu Ku District, New Taipei City 248016, Taiwan /248016 新北市五股區新北產業園區五工路136-1號
t (886-2) 2299-3939 f (886-2) 2299-3261 www.sgs.com.tw
Member of SGS Group

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39
3002

台灣檢驗科技股份有限公司

環境部許可證字號：環境部國環檢證字第035號

樣品檢測報告

樣品編號： NPG25200575017

序號	樣品編號		MDL	單位	NPG25200575017	-	-	-	-	-	-	-
	檢測項目	檢測方法			W-19	-	-	-	-	-	-	-
1	總石油碳氫化合物	NIEA W901.51B	0.161	mg/L	<0.500(0.254)	-	-	-	-	-	-	-
	以下空白											
備註												

報告專用章
台灣檢驗科技股份有限公司
環境實驗室-台北
負責人：李仁燮
檢驗室主管：葉峻榕

此報告是本公司依照背面所印之通用服務條款所簽發，此條款可在本公司網站http://www.sgs.com.tw/Terms-and-Conditions閱覽，凡電子文件之格式依http://www.sgs.com.tw/Terms-and-Conditions之電子文件期限與條件處理。請注意條款有關於責任、賠償之限制及管轄權的約定。任何持有此文件者，請注意本公司製作之結果報告書將僅反映執行時所紀錄且於接受指示範圍內之事實。本公司僅對客戶負責，此文件不妨礙當事人在交易上權利之行使或義務之免除。未經本公司事先書面同意，此報告不可部份複製。任何未經授權的變更、偽造、或曲解本報告所顯示之內容，皆爲不合法，違犯者可能遭受法律上最嚴厲之追訴。除非另有說明，此報告結果僅對測試之樣品負責。

TWE 2878920

土壤時間：2025年12月12日下午 03:39
3002

台灣檢驗科技股份有限公司

環境部許可證字號：環境部國環檢證字第035號

品保品管報告

報告編號：NPG25200575

序號	品保樣品名稱		查核樣品分析結果			添加樣品分析結果				重複樣品分析結果			
	檢測項目	檢測方法	配製值(ug)	回收率(%)	查核管制標準	添加值(ug)	回收值(ug)	回收率(%)	添加管制標準	分析值1(ug)	分析值2(ug)	相對差異百分比率(%)	重複管制標準
1	總石油碳氫化合物(C6-C9)	NIEA W901.51B	12.5	101.4	60~140%	12.5	11.4	91.5	50~150%	11.5	11.9	4.0	0~30%
	以下空白												
備註													

報告專用章
台灣檢驗科技股份有限公司
環境實驗室-台北
負責人：李仁燮
檢驗室主管：葉峻榕

此報告是本公司依照背面所印之通用服務條款所簽發，此條款可在本公司網站http://www.sgs.com.tw/Terms-and-Conditions閱覽，凡電子文件之格式依http://www.sgs.com.tw/Terms-and-Conditions之電子文件期限與條件處理。請注意條款有關於責任、賠償之限制及管轄權的約定。任何持有此文件者，請注意本公司製作之結果報告書將僅反映執行時所紀錄且於接受指示範圍內之事實。本公司僅對客戶負責，此文件不妨礙當事人在交易上權利之行使或義務之免除。未經本公司事先書面同意，此報告不可部份複製。任何未經授權的變更、偽造、或曲解本報告所顯示之內容，皆爲不合法，違犯者可能遭受法律上最嚴厲之追訴。除非另有說明，此報告結果僅對測試之樣品負責。

TWE 2878921

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39
3002

台灣檢驗科技股份有限公司

環境部許可證字號：環境部國環檢證字第035號

品保品管報告

報告編號：NPG25200575

序號	品保樣品名稱		查核樣品分析結果			添加樣品分析結果				重複樣品分析結果			
	檢測項目	檢測方法	配製值 (ng)	回收率(%)	查核管制標準	添加值 (ng)	回收值 (ng)	回收率(%)	添加管制標準	分析值1 (ng)	分析值2 (ng)	相對差異 百分比率(%)	重複管制標準
1	總石油碳氫化合物 (C10-C50)	NIEA W901.51B	886248	80.6	60～140%	-	-	備註1.	-	714640	696826	2.5	0～30%
	以下空白												

台灣檢驗科技股份有限公司

環境部許可證字號：環境部國環檢證字第035號

品保品管報告

報告編號：NPG25200575

序號	品保樣品名稱		查核樣品分析結果			添加樣品分析結果				重複樣品分析結果			
	檢測項目	檢測方法	配製值 (ug)	回收率(%)	查核管制標準	添加值 (ug)	回收值 (ug)	回收率(%)	添加管制標準	分析值1 (ug)	分析值2 (ug)	相對差異 百分比率(%)	重複管制標準
1	總石油碳氫化合物 (C6-C9)	NIEA W901.51B	12.5	86.2	60~140%	12.5	11.1	89.0	50~150%	11.2	12.0	7.6	0~30%
	以下空白												

台灣檢驗科技股份有限公司

環境部許可證字號：環境部國環檢證字第035號

品保品管報告

報告編號：NPG25200575

序號	品保樣品名稱		查核樣品分析結果			添加樣品分析結果				重複樣品分析結果			
	檢測項目	檢測方法	配製值 (ng)	回收率(%)	查核管制標準	添加值 (ng)	回收值 (ng)	回收率(%)	添加管制標準	分析值1 (ng)	分析值2 (ng)	相對差異 百分比率(%)	重複管制標準
1	總石油碳氫化合物 (C10-C50)	NIEA W901.51B	886248	87.2	60~140%	886248	719012	81.1	50~150%	719012	724661	0.8	0~30%
	以下空白												
備註													

(第8頁，共13頁)

報告專用章
台灣檢驗科技股份有限公司
環境實驗室-台北
負責人：李仁燮
檢驗室主管：葉峻榕

此報告是本公司依照背面所印之通用服務條款所簽發，此條款可在本公司網站http://www.sgs.com.tw/Terms-and-Conditions閱覽，凡電子文件之格式依http://www.sgs.com.tw/Terms-and-Conditions之電子文件期限與條件處理。請注意條款有關於責任、賠償之限制及管轄權的約定。任何持有此文件者，請注意本公司製作之結果報告書將僅反映執行時所紀錄且於接受指示範圍內之事實。本公司僅對客戶負責，此文件不妨礙當事人在交易上權利之行使或義務之免除。未經本公司事先書面同意，此報告不可部份複製。任何未經授權的變更、偽造、或曲解本報告所顯示之內容，皆爲不合法，違犯者可能遭受法律上最嚴厲之追訴。除非另有說明，此報告結果僅對測試之樣品負責。

TWE 2878924

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39
3002

台灣檢驗科技股份有限公司

環境部許可證字號：環境部國環檢證字第035號

品保品管報告

報告編號：NPG25200575

序號	品保樣品名稱		查核樣品分析結果			添加樣品分析結果				重複樣品分析結果			
	檢測項目	檢測方法	配製值(ug)	回收率(%)	查核管制標準	添加值(ug)	回收值(ug)	回收率(%)	添加管制標準	分析值1(ug)	分析值2(ug)	相對差異百分比率(%)	重複管制標準
1	總石油碳氫化合物(C6-C9)	NIEA W901.51B	12.5	86.1	60~140%	12.5	10.3	82.5	50~150%	10.3	9.89	4.3	0~30%
	以下空白												
備註													

(第9頁，共13頁)

報告專用章
台灣檢驗科技股份有限公司
環境實驗室-台北
負責人：李仁燮
檢驗室主管：葉峻榕

此報告是本公司依照背面所印之通用服務條款所簽發，此條款可在本公司網站http://www.sgs.com.tw/Terms-and-Conditions閱覽，凡電子文件之格式依http://www.sgs.com.tw/Terms-and-Conditions之電子文件期限與條件處理。請注意條款有關於責任、賠償之限制及管轄權的約定。任何持有此文件者，請注意本公司製作之結果報告書將僅反映執行時所紀錄且於接受指示範圍內之事實。本公司僅對客戶負責，此文件不妨礙當事人在交易上權利之行使或義務之免除。未經本公司事先書面同意，此報告不可部份複製。任何未經授權的變更、偽造、或曲解本報告所顯示之內容，皆爲不合法，違犯者可能遭受法律上最嚴厲之追訴。除非另有說明，此報告結果僅對測試之樣品負責。

TWE 2878925

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39
3002

台灣檢驗科技股份有限公司

環境部許可證字號：環境部國環檢證字第035號

品保品管報告

報告編號：NPG25200575

序號	品保樣品名稱		查核樣品分析結果			添加樣品分析結果				重複樣品分析結果			
	檢測項目	檢測方法	配製值 (ng)	回收率(%)	查核管制標準	添加值 (ng)	回收值 (ng)	回收率(%)	添加管制標準	分析值1 (ng)	分析值2 (ng)	相對差異 百分比率(%)	重複管制標準
1	總石油碳氫化合物 (C10-C50)	NIEA W901.51B	886248	80.0	60~140%	-	-	備註1.	-	708966	735812	3.7	0~30%
	以下空白												

附件

樣品編號： NPG25200575001~008

序號	樣品編號 / 檢測項目	檢測方法	MDL	單位	NPG25200575001	NPG25200575002	NPG25200575003	NPG25200575004	NPG25200575005	NPG25200575006	NPG25200575007	NPG25200575008
					W-06	W-20	W-10	W-07	W16	W-08	W02	W-24
1	總石油碳氫化合物(C10-C50)	NIEA W901.51B	0.087	mg/L	1560	61.4	603	235	3160	464	420	<0.300(0.269)
2	總石油碳氫化合物(C6-C9)	NIEA W901.51B	0.074	mg/L	5.74	3.06	2.39	4.55	3.68	8.23	12.4	ND
	以下空白											
備註												

報告專用章
台灣檢驗科技股份有限公司
環境實驗室-台北
負責人：李仁燮
檢驗室主管：葉峻榕

此報告是本公司依照背面所印之通用服務條款所簽發，此條款可在本公司網站http://www.sgs.com.tw/Terms-and-Conditions閱覽，凡電子文件之格式依http://www.sgs.com.tw/Terms-and-Conditions之電子文件期限與條件處理。請注意條款有關於責任、賠償之限制及管轄權的約定。任何持有此文件者，請注意本公司製作之結果報告書將僅反映執行時所紀錄且於接受指示範圍內之事實。本公司僅對客戶負責，此文件不妨礙當事人在交易上權利之行使或義務之免除。未經本公司事先書面同意，此報告不可部份複製。任何未經授權的變更、偽造、或曲解本報告所顯示之內容，皆爲不合法，違犯者可能遭受法律上最嚴厲之追訴。除非另有說明，此報告結果僅對測試之樣品負責。

TWE 2878927

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39
3002

附件

SGS

樣品編號： NPG25200575009~016

序號	樣品編號 / 檢測項目	檢測方法	MDL	單位	NPG25200575009	NPG25200575010	NPG25200575011	NPG25200575012	NPG25200575013	NPG25200575014	NPG25200575015	NPG25200575016
					W-25	W-22	W-21	W-18	W-16	W-17	W-09	W-23
1	總石油碳氫化合物(C10-C50)	NIEA W901.51B	0.087	mg/L	<0.300(0.130)	<0.300(0.103)	<0.300(0.124)	<0.300(0.188)	ND	ND	<0.300(0.129)	ND
2	總石油碳氫化合物(C6-C9)	NIEA W901.51B	0.074	mg/L	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	以下空白											
備註												

報告專用章
台灣檢驗科技股份有限公司
環境實驗室-台北
負責人：李仁燮
檢驗室主管：葉峻榕

此報告是本公司依照背面所印之通用服務條款所簽發，此條款可在本公司網站http://www.sgs.com.tw/Terms-and-Conditions閱覽，凡電子文件之格式依http://www.sgs.com.tw/Terms-and-Conditions之電子文件期限與條件處理。請注意條款有關於責任、賠償之限制及管轄權的約定。任何持有此文件者，請注意本公司製作之結果報告書將僅反映執行時所紀錄且於接受指示範圍內之事實。本公司僅對客戶負責，此文件不妨礙當事人在交易上權利之行使或義務之免除。未經本公司事先書面同意，此報告不可部份複製。任何未經授權的變更、偽造、或曲解本報告所顯示之內容，皆爲不合法，違犯者可能遭受法律上最嚴厲之追訴。除非另有說明，此報告結果僅對測試之樣品負責。

TWE 2878928

SGS Taiwan Ltd.
台灣檢驗科技股份有限公司
136-1, Wu Kung Road, New Taipei Industrial Park, Wu Ku District, New Taipei City 248016, Taiwan /248016 新北市五股區新北產業園區五工路136-1號 t (886-2) 2299-3939 f (886-2) 2299-3261 www.sgs.com.tw
Member of SGS Group

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39
3002

附件



樣品編號： NPG25200575017

序號	樣品編號 / 檢測項目	檢測方法	MDL	單位	NPG25200575017	-	-	-	-	-	-	-
					W-19	-	-	-	-	-	-	-
1	總石油碳氫化合物(C10-C50)	NIEA W901.51B	0.087	mg/L	<0.300(0.180)	-	-	-	-	-	-	-
2	總石油碳氫化合物(C6-C9)	NIEA W901.51B	0.074	mg/L	ND	-	-	-	-	-	-	-
	以下空白											
備註												

(第13頁，共13頁)

報告專用章
台灣檢驗科技股份有限公司
環境實驗室-台北
負責人：李仁燮
[illegible]

此報告是本公司依照背面所印之通用服務條款所簽發，此條款可在本公司網站http://www.sgs.com.tw/Terms-and-Conditions閱覽，凡電子文件之格式依http://www.sgs.com.tw/Terms-and-Conditions之電子文件期限與條件處理。請注意條款有關於責任、賠償之限制及管轄權的約定。任何持有此文件者，請注意本公司製作之結果報告書將僅反映執行時所紀錄且於接受指示範圍內之事實。本公司僅對客戶負責，此文件不妨礙當事人在交易上權利之行使或義務之免除。未經本公司事先書面同意，此報告不可部份複製。任何未經授權的變更、偽造、或曲解本報告所顯示之內容，皆爲不合法，違犯者可能遭受法律上最嚴厲之追訴。除非另有說明，此報告結果僅對測試之樣品負責。

TWE 2878929

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39

3002

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39

台灣檢驗科技股份有限公司

打勾或反黃處請填寫完整並與樣品一同送驗

環境實驗室委託檢測申請書 EHS APPLICATION FORM

環境實驗室-台北
電話：02-2299 3279　傳真：02-22982436　承辦人：鍾佳玲　分機：2338
24803 新北市五股區新北產業園區五工路 136-1 號
No.136-1, Wu Kung Road, New Taipei Industrial Park, Wu Ku District, New Taipei City, Taiwan 24803

報告抬頭資訊

委託單位 Application：淡江大學水資源及環境工程學系　統一編號 Company Tax ID：37300900
聯絡人 Contact Person：陳嬿伃　電話(T)/分機(ext)：02-26215656#55689
行動電話(M)：0928287846　傳真(F)：02-2620-9651　電郵(E)：chenyytku@gmail.com
地址 Address：251301 新北市淡水區英專路 151 號工學大樓 E718 室
☑ ※以下資料請必須確實填寫，報告完成後如要修改客戶填寫內容需酌收費用
僅提供中文檢測報告一式三份(加印 0 份，需另酌收費用)
檢測目的：自行評估
受驗單位(必填) ☒同委託單位：
計畫名稱 Project Name：建立地下水 LNAPL 傳導係數分析方法與優化抽除效率(第2年) ~~地下~~ 2/9 蕙禎
採樣單位 Sampling Company：業興環境科技股份有限公司
採樣方法：————
採樣地點 Sampling Place：台灣中油股份有限公司煉製事業部桃園煉油廠
採樣時間 Sampling Time：114 年 2 月 17~18 日　時　分(必填寫)

付款及帳單資訊

☑ 付款廠商☒同委託單位：淡江大學學校財團法人淡江大學
統一編號 Company Tax ID：37300900
報告/發票地址 Address：251301 新北市淡水區英專路 151 號水環系辦公室
聯絡人 Contact Person：王聖瑋 先生　電話(T)/分機(ext)：02-26215656 #2716
行動電話(M)：0937-268133　傳真(F)：02-2620-9651　電郵(E)：wangsw@mail.tku.edu.tw

委託檢測項目 Test Item (請註明分析方法 Test Method)

類別	樣品特性	樣品名稱	分析項目 Test Request	數量 Sample Number	分析方法 Test Method
PG	水質	W-06 W-22 W-20 W-21 W-10 W-18 W-07 W-16 W16 W-17 W08 W-09 W02 W-23 W-24 W-19 W-25	TPH(C6-C9) TPH(C10-C50)	40mL 棕玻*3 1L 棕玻*1 共 17 組	

樣品是否退樣：☒否 ☐是　←如未勾選，視同不退樣
惟若屬廢棄物一律退樣，退還樣品之快遞費用由客戶負擔

取報告方式：
☒限掛郵寄☐自取(若三天未自取則郵寄給客戶)

服務方式：12~15 工作天
☒普通件☐急　件（費用另行報價）"工作天數不包括收件當天與郵寄之時間(例假日不列入工作天數)"

備註：樣品需低溫冷藏 4℃運送　☒附件：報價單暨委託申請書

送驗公司/送驗人員/聯絡電話：業興環境科技/陳俊仁/0979031912

送驗人員/委託單位簽章：陳俊仁　SGS 承辦人簽章：鍾佳玲 2/9

總價(含稅)：　日期：

說明

1.本公司報告是遵循 SGS 通用服務條款規定製作，倘需此條款內容，請來電索取或至 http://www.sgs.com.tw/Terms-and-Conditions 網站查閱。
2.申請人/委託者同意授權予本公司處理外包轉件事宜。
3.依本公司規定，前三次合作之新客戶需於取報告前付清全部檢測費用。
4.非新客戶，除另有書面約定外，客戶應於收到發票後，以現金或依發票日起 30 天內票期支付全部檢測費用。
5.若因本件檢測及其檢測費用涉訟時，雙方當事人同意以台灣台北地方法院為第一審管轄法院。
6.委託單位及受驗單位皆為報告之使用人，相關之報告使用人皆應承擔連帶給付檢測費用責任，針對應支付本公司檢測費用，履行付款義務，絕無異議。
7.本實驗室承諾對委託方的檢測結果或商業之資訊，將確實遵守並履行保密的義務與責任。
8.本實驗室於試驗報告結果中不提供量測不確定度與符合性聲明。
9.本委託書經「委託單位」及「本公司」雙方人員簽名或蓋章確認後，視同本契約即刻生效。

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39

SGS 台灣檢驗科技股份有限公司

樣品監管記錄表

樣品編號：NPG 25200575001 ~ 017

樣品數量

PE 瓶
- ☐ 1L _____
- ☐ 0.5L _____
- ☐ 0.25L _____

PP 瓶
- ☐ 1L _____
- ☐ 0.5L _____
- ☐ 0.25L _____

玻璃瓶
- ☑ 1L X17
- ☐ 0.5L _____
- ☐ 0.25L _____
- ☑ 40mL X5

無菌袋/杯 _____
PETG 管 _____
寶特瓶 _____
PE 袋 _____
_____
其他 _____

樣品運送方式	封條	樣品保存	LIMS 系統登錄
☑郵寄/快遞 ☐公務車 ☐委託單位自行送樣	☑已貼封條 ☐未貼封條 ☐未開封市售商品（不須黏貼封條） 如:未開封包裝飲用水	☑符合保存方法 不符合保存方法 ☐超過保存期限 ☐未冷藏 ☐容器不符 ☐pH 不符合 ☐未加藥 ☐其他_____	人員：吳亭儀 日期/時間： 2/19 10:36

備註(台北公司以外地區收到客戶樣品時，請填寫下方資料)

人員：

日期/時間：

☐郵寄/快遞 ☐公務車 ☐委託單位自行送樣
☐已貼封條 ☐未貼封條 ☐未開封市售商品
☐室溫 ☐冷藏

收樣人員：周虹儒 2/19

附件三

油品樣本檢測報告

檢　測　報　告

委託單位：	淡江大學水資源及環境工程學系
計畫名稱：	建立地下水LNAPL傳導係數分析方法與優化抽除效率(第二年)
樣品基質：	油品
樣品編號：	NPX25200150001~004
採樣單位：	業興環境科技股份有限公司
採樣地點：	台灣中油股份有限公司煉製事業部桃園煉油廠(委託單位提供)

採樣時間：	114年02月17日＊時＊分
收樣時間：	114年02月19日10時36分
報告日期：	114年03月07日
報告編號：	NPX25200150
聯絡人：	周家薇
電話/傳真：	02-2299-3279ext2306 / 02-2299-3261

備註：1.本樣品由委託單位自行送樣，本報告僅對該樣品負責，不得隨意複製及作為宣傳廣告之用。
2.測試結果僅對測試品有效。
3.本報告共2頁，分離使用無效。
4.本次採樣時間由委託單位提供。

SGS TAIWAN LTD SGS TAIWAN

Wen Chen, M.S./ Asst. Supervisor

SIGNED FOR AND ON BEHALF OF

SGS TAIWAN LTD.

(第1頁，共2頁)

此報告是本公司依照背面所印之通用服務條款所簽發，此條款可在本公司網站http://www.sgs.com.tw/Terms-and-Conditions閱覽，凡電子文件之格式依http://www.sgs.com.tw/Terms-and-Conditions之電子文件期限與條件處理。請注意條款有關於責任、賠償之限制及管轄權的約定。任何持有此文件者，請注意本公司製作之結果報告書將僅反映執行時所紀錄且於接受指示範圍內之事實。本公司僅對客戶負責，此文件不妨礙當事人在交易上權利之行使或義務之免除。未經本公司事先書面同意，此報告不可部份複製。任何未經授權的變更、偽造、或曲解本報告所顯示之內容，皆爲不合法，違犯者可能遭受法律上最嚴厲之追訴。除非另有說明，此報告結果僅對測試之樣品負責。

TWE 2878906

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39
3002

樣品檢測報告

樣品編號： NPX25200150001~004

序號	樣品編號		MDL	單位	NPX25200150001	NPX25200150002	NPX25200150003	NPX25200150004	-	-	-	-
	檢測項目	檢測方法			W-07	W-08	W16	W02	-	-	-	-
1	密度,15℃	參考ASTM D4052: 2022方法	-	kg/m³	833.7	826.2	834.1	826.5	-	-	-	-
2	動黏度,40℃	參考ASTM D445: 2024方法	-	mm²/s	2.308	2.223	2.377	2.233	-	-	-	-
	以下空白											

備註：1.密度,15℃及動黏度,40℃是委託台灣檢驗科技股份有限公司-高雄自然資源實驗室分析。

此報告是本公司依照背面所印之通用服務條款所簽發，此條款可在本公司網站http://www.sgs.com.tw/Terms-and-Conditions閱覽，凡電子文件之格式依http://www.sgs.com.tw/Terms-and-Conditions之電子文件期限與條件處理。請注意條款有關於責任、賠償之限制及管轄權的約定。任何持有此文件者，請注意本公司製作之結果報告書將僅反映執行時所紀錄且於接受指示範圍內之事實。本公司僅對客戶負責，此文件不妨礙當事人在交易上權利之行使或義務之免除。未經本公司事先書面同意，此報告不可部份複製。任何未經授權的變更、偽造、或曲解本報告所顯示之內容，皆爲不合法，違犯者可能遭受法律上最嚴厲之追訴。除非另有說明，此報告結果僅對測試之樣品負責。

TWE 2878907

SGS Taiwan Ltd.
台灣檢驗科技股份有限公司
136-1, Wu Kung Road, New Taipei Industrial Park, Wu Ku District, New Taipei City 248016, Taiwan /248016 新北市五股區新北產業園區五工路136-1號 t (886-2) 2299-3939 f (886-2) 2299-3261 www.sgs.com.tw
Member of SGS Group

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39
3002

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39

SGS

台灣檢驗科技股份有限公司

打勾或反黃處請填寫完整並與樣品一同送驗

環境實驗室委託檢測申請書 EHS APPLICATION FORM

環境實驗室-台北
電話：02-2299 3279　傳真：02-22982436　承辦人：鍾佳玲　分機：2338
24803 新北市五股區新北產業園區五工路 136-1 號
No.136-1, Wu Kung Road, New Taipei Industrial Park, Wu Ku District, New Taipei City, Taiwan 24803

報告抬頭資訊

委託單位 Application：淡江大學水資源及環境工程學系　統一編號 Company Tax ID：37300900
聯絡人 Contact Person：陳嬿伃　電話(T)/分機(ext)：02-26215656#55689
行動電話(M)：0928287846　傳真(F)：02-2620-9651　電郵(E)：chenyytku@gmail.com
地址 Address：251301 新北市淡水區英專路 151 號工學大樓 E718 室
☑ ※以下資料請必須確實填寫，報告完成後如要修改客戶填寫內容需酌收費用
僅提供中文檢測報告一式三份(加印 0 份，需另酌收費用)
檢測目的：自行評估
受驗單位(必填) ☒同委託單位：
計畫名稱 Project Name：建立地下水 LNAPL 傳導係數分析方法與優化抽除效率(第 2 年)

採樣單位 Sampling Company：業興環境科技股份有限公司
採樣方法：————
採樣地點 Sampling Place：台灣中油股份有限公司煉製事業部桃園煉油廠
採樣時間 Sampling Time：114 年 2 月 17~18 日　時　分(必填寫)

付款及帳單資訊

☑ 付款廠商☒同委託單位：淡江大學學校財團法人淡江大學
統一編號 Company Tax ID：37300900
報告/發票地址 Address：251301 新北市淡水區英專路 151 號水環系辦公室
聯絡人 Contact Person：王聖瑋 先生　電話(T)/分機(ext)：02-26215656 #2716
行動電話(M)：0937-268133　傳真(F)：02-2620-9651　電郵(E)：wangsw@mail.tku.edu.tw

委託檢測項目 Test Item (請註明分析方法 Test Method)

類別	樣品特性	樣品名稱	分析項目 Test Request	數量 Sample Number	分析方法 Test Method
PX	柴油	W-07 W-08 W16 W02	密度/15℃ 黏度/40℃	500mL PE 瓶*1 (最少 300mL) 共 4 組	ASTM D4052 ASTM D445 KAO-OGC-lab

樣品是否退樣：☒否 ☐是　←如未勾選，視同不退樣
惟若屬廢棄物一律退樣，退還樣品之快遞費用由客戶負擔

取報告方式：
☒限掛郵寄☐自取(若三天未自取則郵寄給客戶)

服務方式：12~15 工作天
☒普通件☐急　件（費用另行報價）"工作天數不包括收件當天與郵寄之時間(例假日不列入工作天數)"

備註：樣品需低溫冷藏 4℃運送　☒附件：報價單暨委託申請書

送驗公司/送驗人員/聯絡電話：業興環境科技 / 陳俊仁 / 0979031912

送驗人員/委託單位簽章：陳俊仁　SGS 承辦人簽章：鍾佳玲 2/19

總價(含稅)：　日期：

說明

1.本公司報告是遵循 SGS 通用服務條款規定製作，倘需此條款內容，請來電索取或至 http://www.sgs.com.tw/Terms-and-Conditions 網站查閱。
2.申請人/委託者同意授權予本公司處理外包轉件事宜。
3.依本公司規定，前三次合作之新客戶需於取報告前付清全部檢測費用。
4.非新客戶，除另有書面約定外，客戶應於收到發票後，以現金或依發票日起 30 天內票期支付全部檢測費用。
5.若因本件檢測及其檢測費用涉訟時，雙方當事人同意以台灣台北地方法院為第一審管轄法院。
6.委託單位及受驗單位皆為報告之使用人，相關之報告使用人皆應承擔連帶給付檢測費用責任，針對應支付本公司檢測費用，履行付款義務，絕無異議。
7.本實驗室承諾對委託方的檢測結果或商業之資訊，將確實遵守並履行保密的義務與責任。
8.本實驗室於試驗報告結果中不提供量測不確定度與符合性聲明。
9.本委託書經「委託單位」及「本公司」雙方人員簽名或蓋章確認後，視同本契約即刻生效。

上傳時間：2025年12月12日下午 03:39

SGS 台灣檢驗科技股份有限公司

樣品監管記錄表

樣品編號：NPX25200150001~004

樣品數量

PE 瓶
- ☐ 1L _____
- ☑ 0.5L x4
- ☐ 0.25L _____

PP 瓶
- ☐ 1L _____
- ☐ 0.5L _____
- ☐ 0.25L _____

玻璃瓶
- ☐ 1L _____
- ☐ 0.5L _____
- ☐ 0.25L _____
- ☐ 40mL _____

無菌袋/杯 _____
PETG 管 _____
寶特瓶 _____
PE 袋 _____
_____
其他 _____

樣品運送方式	封條	樣品保存	LIMS 系統登錄
☑郵寄/快遞 ☐公務車 ☐委託單位自行送樣	☑已貼封條 ☐未貼封條 ☐未開封市售商品（不須黏貼封條） 如:未開封包裝飲用水	☑符合保存方法 不符合保存方法 ☐超過保存期限 ☐未冷藏 ☐容器不符 ☐pH 不符合 ☐未加藥 ☐其他_____	人員： 吳亭儀 日期/時間： 2/19 10:36

備註(台北公司以外地區收到客戶樣品時，請填寫下方資料)

人員：

日期/時間：

☐郵寄/快遞 ☐公務車 ☐委託單位自行送樣
☐已貼封條 ☐未貼封條 ☐未開封市售商品
☐室溫 ☐冷藏

收樣人員：周虹儒 2/19

附件四

土壤粒徑分析

(W-07、W-08、W-20)

表 3-50 土壤粒徑分析成果表(W-07)

井名/井址/井號： W-07/桃園市龜山區民生北路一段 50 號/W-07

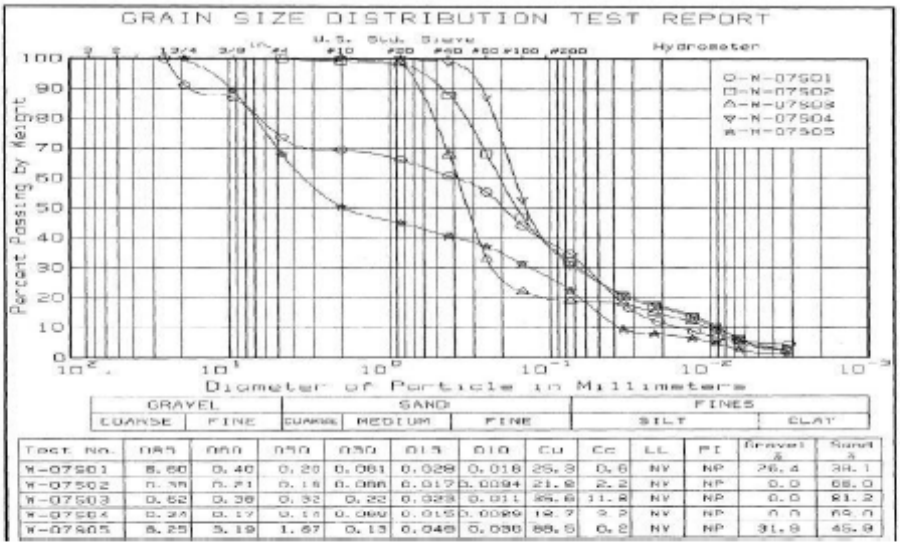
取 樣 日 期 ： 111.01.05　　分析日期：111.01.22

分 析 單 位 ： 吉泰工程顧問有限公司　　分析人員：黃忠敬

（土樣應在試驗室內遵循CNS A3005、ASTM C136或CNS A3251及ASTM D422，至少完成三組粒徑分布曲線圖）

土樣深度範圍（地表下 3.5~15.8 公尺）	土壤粒徑分析結果			
	D_{10}（公釐）	D_{50}（公釐）	D_{60}（公釐）	均勻係數 Cu（D_{60}/D_{10}）
3.5-4.2	0.016	0.20	0.40	25.3
4.2-9.0	0.0094	0.16	0.21	21.8
9.0-10.0	0.011	0.32	0.38	35.6
10.0-14.3	0.0089	0.14	0.17	18.7
14.3-15.8	00.036	1.87	3.19	88.5

土樣之粒徑分布曲線圖



Test No.	D85	D60	D50	D30	D15	D10	Cu	Cc	LL	PI	Gravel %	Sand %
N-07501	8.60	0.40	0.20	0.081	0.028	0.016	25.3	0.6	NV	NP	26.4	38.1
N-07502	0.35	0.21	0.16	0.088	0.017	0.0094	21.8	2.2	NV	NP	0.0	68.0
N-07503	0.62	0.38	0.32	0.23	0.033	0.011	35.6	11.8	NV	NP	0.0	81.2
N-07504	0.24	0.17	0.14	0.090	0.015	0.0089	18.7	3.2	NV	NP	0.0	69.0
N-07505	8.25	3.19	1.87	0.13	0.040	0.036	88.5	0.2	NV	NP	31.8	45.9

備註

表 3-58 土壤粒徑分析成果表(W-08)

井名/井址/井號： W-08/桃園市龜山區民生北路一段 50 號/W-08

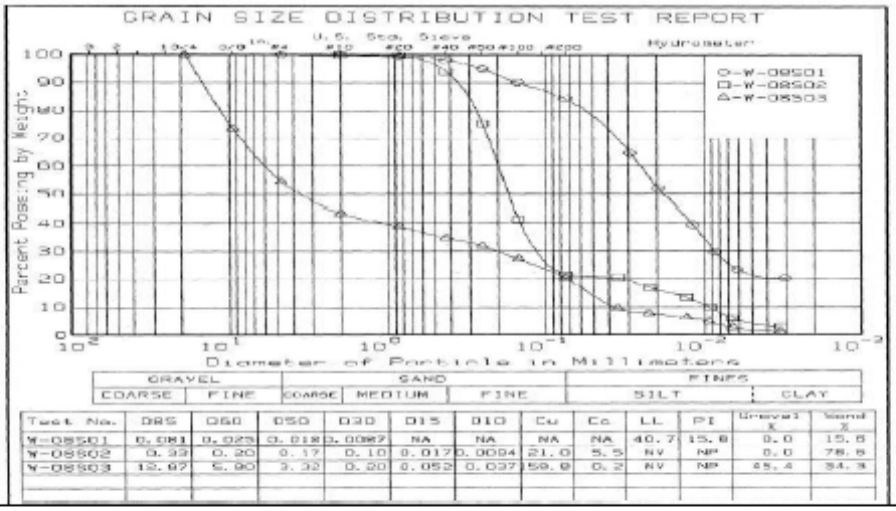
取 樣 日 期 ： 111.01.05　　分析日期：111.01.22

分 析 單 位 ： 吉泰工程顧問有限公司　　分析人員：黃忠敬

（土樣應在試驗室內遵循CNS A3005、ASTM C136或CNS A3251及ASTM D422，至少完成三組粒徑分布曲線圖）

土樣深度範圍（地表下 2.7~15 公尺）	土壤粒徑分析結果			
	D_{10}（公釐）	D_{50}（公釐）	D_{60}（公釐）	均勻係數 Cu（D_{60}/D_{10}）
2.7-3.0	-	0.018	0.025	-
3.0-9.7	0.0094	0.17	0.20	21.0
9.7-15.0	0.037	3.32	5.80	158.8

土樣之粒徑分布曲線圖



Test No.	D85	D60	D50	D30	D15	D10	Cu	Cc	LL	PI	Gravel %	Sand %
W-08S01	0.081	0.025	0.018	0.0097	NA	NA	NA	NA	40.7	15.8	0.0	15.8
W-08S02	0.33	0.20	0.17	0.10	0.017	0.0094	21.0	5.5	NV	NP	0.0	78.8
W-08S03	12.87	5.90	3.32	0.20	0.052	0.037	159.0	0.2	NV	NP	45.4	34.3

備註

土壤粒徑分析成果表

井名/井址/井號： 桃煉/桃園市龜山區民生北路一段 50 號/W-20

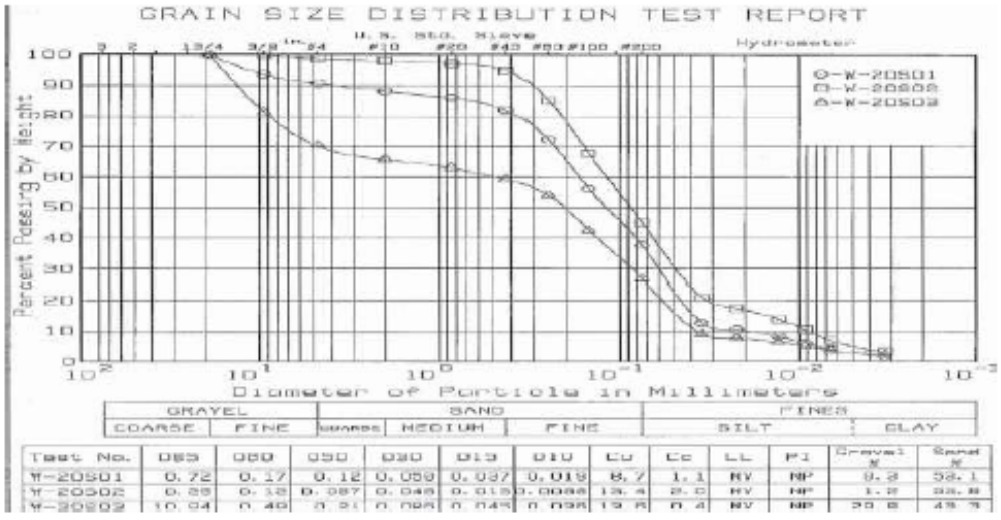
取 樣 日 期 ： 111.07.20　　分析日期：111.08.29

分 析 單 位 ： 吉泰工程顧問有限公司　　分析人員：黃忠敬

（土樣應在試驗室內遵循CNS A3005、ASTM C136或CNS A3251及ASTM D422，至少完成三組粒徑分布曲線圖）

土樣深度範圍（地表下 22.5~37.6 公尺）	土壤粒徑分析結果			
	D_{10}（公釐）	D_{50}（公釐）	D_{60}（公釐）	均勻係數 C_u（D_{60}/D_{10}）
22.5-28.0	0.019	0.12	0.17	8.7
28.0-33.0	0.0088	0.087	0.12	13.4
33.0-37.6	0.036	0.21	0.49	13.6

土樣之粒徑分布曲線圖



備註

附件五

提取試驗操作手冊

提取試驗(Bail-down test)操作手冊

壹、前言

在現場執行輕質非水相液體(Light non-aqueous phase liquid, LNAPL)抽除時，其面臨問題為各地區之水文地質條件導致孔隙度及透水性不同，再加上污染物之流體密度、流體黏度、流體油水比例等亦不相同，故難以使用統一且穩定之抽除方式，大多是仰賴現場執行人員之經驗判斷，故本手冊是以蠕動泵或貝勒管(Bailers)為提取設備，以提取試驗(Bail-down test)方式取得流體(LNAPL)之傳導係數(T 值)。

貳、名詞解釋

一、輕質非水相液體(Light non-aqueous phase liquid, LNAPL)：是一類常見於地下環境的污染物，包括芳烴類化合物，如汽油、柴油、及石油等。由於 LNAPL 密度低於水且在水中僅略微溶解，當 LNAPL 影響土壤時，通常會往不飽和帶移動，並聚集於水位面上方。

二、提取試驗(Bail-down test)：是一種用於評估地下水或油類污染物在含水層中移動與補注特性的試驗方法。試驗過程中，透過抽取監測井中的液體(如地下水或 LNAPL)，觀察監測井中液面隨時間的下降變化，並測量洩降速率與補注量，這些觀測數據可用於推估含水層的傳導係數及補注速率等傳輸特性。

參、適用範圍

LNAPL 傳導係數的定義為在單位寬度(L)的含水層中，LNAPL 體積(L^3)在單位時間(T)內通過單位水位洩降(L)的量，其單位為(L^2/T)。監測井中所測得的 LNAPL 厚度受到不同土壤類型、LNAPL 類型、或水文地質條件等因素影響，進而產生可回收性之差異。相較於其他指標(例如：監測井中量測到 LNAPL 厚度)，LNAPL 傳導係數與 LNAPL 回收性之間成正比關係，這與過去現場整治過程中，普遍認為 LNAPL 厚度越厚，則其回收效率越好的認知有明顯的不同，實際上，即使 LNAPL 厚度相同，不同土壤類型、LNAPL 類型、或水文地質條件等，皆可能影響 LNAPL 的回收效果，因此，在進行 LNAPL 抽除前，準確掌握 T 值將有助於更快速且有效的進行純相 LNAPL 抽除。

肆、注意事項

目前已有多種方法可用於計算 LNAPL 的傳導係數，然而，這些方法通常不會特別強調對每次單獨試驗的準確性與可靠性，也較少針對實際現場操作流程進行優化或標準化。因此，本操作手冊參考 ASTM-E2856-13，提供精細的數據收集現場程序，以及計算 LNAPL 傳導係數前所需的最低資料要求。在進行提取試驗以獲取 LNAPL 傳導係數時，需考慮以下相關事項：

一、 地下水含水層之條件：各種試驗方法通常適用於受壓含水層、非受壓含水層、及棲止水(Perched)等情況。在不同地層條件下，監測井的量測數據與 LNAPL 洩降之關係可能有所不同。在受壓含水層及棲留水條件下，計算 LNAPL 傳導係數時，需要考慮土壤剖面與水液面的位置，以準確計算洩降。此外，潮汐或水位梯度坡降也可能影響測量結果，進而改變傳導係數。

二、 監測井設置方法：監測井應在整個 LNAPL 可移動區間內設置井篩。針對單口井，可在多個離散的可移動區間進行篩選，以簡化洩降的計算並提高 LNAPL 傳導係數推導的準確性。需特別注意的是，可移動 LNAPL 區間並非僅在空氣與 LNAPL 介面上，例如，在受壓條件下，可移動區間可能位於受壓層基底之下，因此，應根據整個 LNAPL 受影響區間的垂直分布，適當的設置監測井井篩位置。

三、 LNAPL 類型：目前尚未發現特定 LNAPL 類型會限制傳導係數的計算，然而，LNAPL 的比重必須與測量水之比重成反比關係，才能使用介面探針(Interface probe)進行準確的測量。

四、 完井作業：為了得到最準確的 LNAPL 傳導係數，監測井應進行適當的完井作業，以確保地層中的 LNAPL 與監測井之間的連通性。由以往經驗得知，LNAPL 可能需要在監測井完井後，經過數月的時間才能完全飽和濾料層並建立穩定的井內連通性。

伍、設備與材料

在提取試驗方法中，主要原理透過改變監測井內的 LNAPL 液位，使其產生瞬間變化，並藉由液位恢復至初始狀態的過程，評估 LNAPL 的傳導係數。由於不同的水文地質條件會影響 LNAPL 的傳導係數，因此試驗方法、設備選擇、及試驗條件需依據現場環境進行調整，以確保量測結

果的準確性。有關進行提取試驗所需之設備說明如下：

一、LNAPL 移除設備：在提取試驗中，最常見的做法是使用貝勒管瞬間移除部分 LNAPL 體積、或採用蠕動泵完全移除井管內的 LNAPL，方法的選擇需考量現場條件，並評估對濾料回灌效應(Filter pack recharge effect)的影響，此兩種設備的優缺點及適用情形說明如下：

- 貝勒管：優點為能快速移除固定量的 LNAPL，提供更即時的水頭變化，適用於 LNAPL 傳導性較高的監測井。缺點是通常每次只能移除較小的量，需要反覆操作才能完全移除井中的 LNAPL，可能導致濾料回灌效應增加。

- 蠕動泵：優點為可以逐步抽取監測井中所有的 LNAPL，減少濾料回灌效應，適用於需要精確控制液位變化的情況。缺點為抽取過程較緩慢，無法像貝勒管那樣瞬間改變水頭，因此在傳導性較高的監測井中，效果可能不如貝勒管理想。

因此，若執行目標是快速測量 LNAPL 傳輸性，貝勒管通常更適合，因為它能瞬間改變 LNAPL 水頭，便於觀察流體反應；而如果目標是精確移除 LNAPL 並最小化回灌效應，蠕動泵可能是更好的選擇，特別是在傳導係數低或易受干擾的監測井。

二、液位量測設備：液位變化測量通常使用介面探針，即地下水污染調查與整治常稱之油水介面尺，用於測量空氣/LNAPL 及 LNAPL/水介面。目前最精確的介面探針是利用光學與電阻技術，常見的量測精確範圍介於 0.3 公分至 0.6 公分，其操作便利性與普遍性皆高。當 LNAPL 恢復速度較快(例如小於 1 小時)時，可以考慮使用壓力傳感器(即水位計)進行試驗，將壓力傳感器放置在監測井底部附近(水相中)，現場人員僅需測量 LNAPL 移除的空氣/LNAPL 介面深度，而無需測量 LNAPL/水介面深度，這樣能夠減少測量過程對井內液柱的干擾，提升量測準確性。若有更高精度需求，也可使用兩個壓力傳感器，一個置於水相中以監測 LNAPL/水介面變化，另一個置於 LNAPL 相中以監測空氣/LNAPL 介面變化。

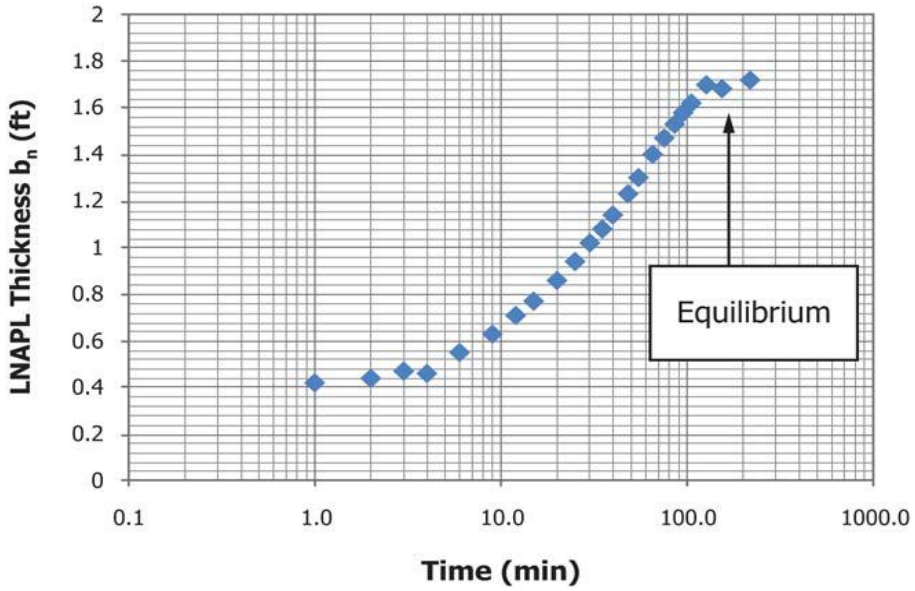
三、計時設備：用於記錄試驗過程中的經過時間，以確保數據收集的準確性與連續性。

四、刻度容器：用於收集水和 LNAPL，並需具備刻度標示，其測量精度

應控制在預估回收總量的 10%以內，以確保數據的可靠性。

五、 除污設備：在試驗過程中，監測井內的 LNAPL 可能會污染測量設備，因此應使用適當的清潔劑(如無磷清潔劑)進行清洗，特別是在試驗多口井的情況下，每次試驗不同監測井之前，皆應徹底清除井液污染，以避免交叉污染。

六、 試驗表單：試驗表單應用於記錄試驗參數，試驗期間應使用半對數圖紙繪製數據，以幫助觀察 LNAPL 厚度的變化趨勢，確定何時達到平衡並完成試驗。圖 1 提供了一個試驗期間 LNAPL 厚度達到平衡的示例。



資料來源：ASTM E2856-13 (2021)。

圖 1、提取試驗之 LNAPL 厚度隨時間變化示意圖

陸、試驗前步驟與條件

一、 應先蒐集監測井相關資訊，包括鑽孔直徑、井管及篩管直徑、井篩頂部及底部與井管的相對位置、監測井深度、以及確認井篩是否位於含水層厚度等，以做為後續數據分析之參數。

二、 在試驗前，應定期抽除井內滯留的 LNAPL，以確保 LNAPL 與地層之間的連通性。

三、 在進行提取試驗前，必須讓井內水位恢復至平衡狀態，這樣才能確

保測得的 LNAPL 厚度、水位面、以及地下水的流動狀態能準確反映真實的地層條件。

四、 在進行提取試驗前，應連續量測監測井水位與液位隨時間的變化情形，以確保現場取得的起始 LNAPL 厚度與液位面可代表地下水環境的平衡狀態，此狀態有利於取得提取試驗過程較平滑的液位變化曲線，而非不規則的上下跳動。

五、 在未壓密狀態下，大部分 LNAPL 儲存在濾料內，並位於有效井半徑範圍內。如果僅移除部分 LNAPL，試驗結果將主要反映濾料的回灌行為。為了減少濾料效應，可以透過增加排液量或完全移除井內的 LNAPL。井孔內 LNAPL 體積(L^3)計算方式如下：

井管中的 LNAPL 體積 (V_c)：$Vc = b_n \pi r_c^2$

鑽孔中的 LNAPL 體積 (V_b)：$V_b = S_{yf} b_b \pi (r_b^2 - r_c^2)$

總體積(V_t)：$V_t = V_c + V_b$

其中，S_{yf}為濾料的特定出水量或儲存係數；b_b為井孔內 LNAPL 厚度(L)；b_n為測得的 LNAPL 厚度(L)；r_c為井管半徑(L)；r_b為鑽孔半徑(L)。

六、 估算井孔孔隙率與 LNAPL 飽和度所需的儲存係數，一般為 0.175 至 0.190 之間，並可根據 LNAPL 的黏度進行調，公式如下：

$$S_{yf} = -0.0418 \ln(\mu_n) + 0.2007$$

其中，μ_n為 LNAPL 的動力黏度(M/Lt)。

柒、試驗步驟

一、 試驗時間與頻率：若 LNAPL 之傳導係數或濾料填充狀況不明確時，需於前期提早開始抽水，並確保在試驗前 8 小時內能夠頻繁地重複量測，以獲得足夠的量測數據。

二、 LNAPL 移除：較大幅度的移除量能夠減少濾料回灌效應，且移除應儘可能迅速，在總試驗時間的 1/100 內進行，以模擬瞬間的水頭變化。

三、 記錄與測量：詳細記錄 LNAPL 移除的開始和結束時間及總移除量，如果移除量較大或移除時間較長，應多次記錄中間的移除量和時間。

此外，試驗期間需定期監測 LNAPL 水頭變化，前 100 分鐘的數據尤為關鍵。

四、 黏度影響：試驗的持續時間會根據 LNAPL 的黏度而有所不同。低黏度 LNAPL(<1 cp)通常需要 30 分鐘或更少時間來清除，而高黏度 LNAPL(>2 cp)則可能需要幾小時。

五、 液位測量：LNAPL 移除後，記錄空氣/LNAPL 介面和 LNAPL/水介面的深度(表格範例如表 1 所示)。監控 LNAPL 厚度的變化趨勢，並注意任何異常讀數。測量液位的頻率應至少為每次 LNAPL 厚度變化約 1.5 公分。

六、 試驗後校準：試驗的前 100 分鐘過後，應對數據進行審查，並根據已收集的數據準備未來的測量計劃。數據應該以對數尺度繪製，以便進行分析。

七、 壓力傳感器的使用：如果液位變化過快，無法手動測量，可以使用壓力傳感器，步驟如下。

(一) 將傳感器時鐘與用來收集測量數據的時鐘同步，設置測量計劃，最少收集 50 次讀數，這些讀數應該與預估的試驗時長相符，確保壓力傳感器具有適當的電池壽命並已經過校準。

(二) 將壓力傳感器放到底部井中，並測量井口直到液位再次穩定。

(三) 穩定後，記錄並比較測量數據和壓力傳感器讀數，確保其運行正常。

(四) 開始並進行試驗，試驗過程中不需要手動測量 LNAPL/水介面。應在試驗開始前和試驗結束後手動測量空氣/LNAPL 和 LNAPL/水介面，以便用來校準壓力傳感器。

(五) 在整個試驗過程中盡可能頻繁地測量空氣/LNAPL 介面。

(六) 查看製造商規格，了解傳感器數據的準確性和精確度，確保數據不會受到設備規格的限制。

(七) 在離開現場之前進行數據的初步分析，並依照標準評估測試結果。試驗數據應類似於圖 1 中顯示的趨勢。抽水和時間的量值可能會有所不同，但在半對數圖上應展現相似的變化趨勢。

表 1、提取試驗油水位面紀錄表(範例)



提取試驗(Bail-down test)油水位面紀錄表

計畫名稱 ：　　方　　法 ：☐貝勒管

日　　期 ：　　☐蠕動泵

試驗井名 ：　　紀 錄 人 ：

初始油/水面：　　油厚：　　試驗開始/結束時間：

時間		距井口距離 (m)		時間		距井口距離 (m)		時間		距井口距離 (m)	
		油面	水面			油面	水面			油面	水面
1				21				41			
2				22				42			
3				23				43			
4				24				44			
5				25				45			
6				26				46			
7				27				47			
8				28				48			
9				29				49			
10				30				50			
11				31				51			
12				32				52			
13				33				53			
14				34				54			
15				35				55			
16				36				56			
17				37				57			
18				38				58			
19				39				59			
20				40				60			

備註：紀錄之時間可為"時鐘的時間"或"試驗過程時間"，統一標示即可。

八、壓力傳感器的數據校正：由於壓力傳感器測得的是壓力，而非直接的液位高度，且 LNAPL 和水的密度不同，相同壓力對應的液柱高度也不同。此外，大氣壓力會影響測量結果，因此必須透過公式修正，扣除大氣壓並考慮流體密度，以修正計算水位與 LNAPL 介面高度。有關流體介面的修正計算公式說明如下。

(一) 計算水位高程(Z_{CGW})

$$Z_{CGW} = Z_{P1} + \frac{P_{P1} - P_{atm}}{\rho_w g}$$

其中，Z_{CGW}為計算水位高程(L)，Z_{P1}為水相壓力傳感器的高程(L)，P_{P1}為傳感器測量的絕對壓力(M/^{2}L)，P_{atm}為在鑽孔內的量測的氣壓(M/^{2}L)，ρ_w為地下水密度(M/L^3)，g為重力加速度(L/T^2)。

(二) 計算空氣/LNAPL 介面高程(Z_{AN})

$$Z_{AN} = Z_{P2} \pm \frac{P_{P2} - P_{atm}}{\rho_n g}$$

其中，Z_{AN}為計算空氣/LNAPL 介面高程(L)，Z_{P2}為 LNAPL 相壓力傳感器的高程(L)，P_{P2}為傳感器測量的絕對壓力(M/^{2}L)，ρ_n為 LNAPL 密度(M/L^3)。

(三) 計算 LNAPL/水介面高程(Z_{OW})

$$Z_{OW} = \frac{Z_{CGW} - \rho_r Z_{AN}}{1 - \rho_r}$$

其中，Z_{OW}為 LNAPL/水介面高程(L)，ρ_r為 LNAPL 與水的相對密度，$\rho_r = {\rho_n}/{\rho_w}$。

捌、試驗數據處理

試驗數據可使用美國石油協會(American Petroleum Institute)發布之 API LNAPL Transmissivity Workbook，該工作簿將根據使用者選擇試驗井之含水層類型進行 1 種至 3 種 LNAPL 之 T 值分析，有關工作簿之操作說明如下。

一、HOME 頁籤

(一) 首先需選擇含水層類型，共有 3 種含水層可以選擇，包含自由含水層(Unconfied)、拘限含水層(Confined)或棲止水層(Perched)。

(二) 最後可輸出不同方法獲取之 T 值分析結果，包含平均值、標準差、及變異數。

二、 DATA 頁籤

(一) 輸入監測井基本數據

(1) Elevation of ground surface：m msl，地表高程，如無量測可輸入井頂高程數據。
(2) Top of Casing Elev：m msl，井頂高程。
(3) Well casing radius (r_c)：m，井管半徑。
(4) Well (borehole) radius (r_w)：m，鑽探半徑。
(5) LNAPL Specific Yield (S_y)：LNAPL 的比出水量，可參照本操作手冊第陸-六項進行計算。
(6) LNAPL Density Ratio (ρ_r)：LNAPL 的密度。
(7) Top of screen：m bgs，井篩頂部的深度。
(8) Bottom of screen：m bgs，井篩底部的深度。
(9) LNAPL Baildown Vol.：liter，從井中移除之 LNAPL 體積，僅用於比較，實際計算與該值無關。

(二) 液面初始及隨時間變化之數值

(1) 量測時間(min)。
(2) DTP (m btoc)：井口至油位面之距離。
(3) DTW (m btoc)：井口至地下水位面之距離。
(4) 此處建議將表格內之黃底部分完整輸入。

三、 Figures 頁籤

(一) Figure 1 為 Depth to Fluid Interface vs. Time (算術時間刻度)：用來描繪隨時間變化的液面深度(DTP 及 DTW)。

(二) Figure 2 為 Depth to Fluid Interface vs. Time (對數時間刻度)：與 Figure 1 類似，但使用對數時間刻度，更適合檢查長期試驗中早期的變化。

(三) Figure 3 為 LNAPL Drawdown vs. LNAPL Discharge：為核心診斷工具，屬於線性模型工具，用於確定 Drawdown Adjustment (降幅調整值)，並將其複製到其他工作簿。

◆ 由於初始監測井中之 LNAPL 分布可能與地下環境中之 LNAPL 的平衡狀態有微小之差異，故在傳導係數分析方法中，需在預處理數據時，根據 LNAPL 之洩降量與抽除率隨時間變化之關係進行逐一時間點之洩降量(S_{ni})之校正，該變化量即為ΔS_n，根據ΔS_n對每個時間點t_i計算相應的S_{ni}，計算方法：

$$S_{ni} = DTP_i - DTP_0 - \Delta S_n$$

(四) Figure 4 為 LNAPL Drawdown vs. LNAPL Thickness：為核心診斷工具，屬於線性模型工具，用於估算 J-Ratio (J 比率)。J-ratio 的計算方式是根據實測數據得出的線性關係，該值可應用於 B&R 和 CB&P 兩種方法。下列方程式描述 LNAPL 的洩降變化量與厚度變化量之關係，J-Ratio 的大小受試驗井條件與地層特性影響而有所不同。

$$J = \frac{\Delta s_n}{\Delta b_n}$$

其中，J為 J-Ratio(無單位)，表示 LNAPL 洩降與厚度變化之比值；Δs_n為某時段內 LNAPL 洩降量(m)；b_n為某時段內 LNAPL 厚度變化量(m)。

(五) Figure 5 為 Depth to Product (DTP) vs. LNAPL Discharge：用於診斷土壤地層對 LNAPL 釋出的影響。

(六) Figure 6 為 Depth to Water (DTW) vs. LNAPL Discharge：與 Figure 5 類似，用於分析水深變化與土壤地層的關係。

(七) Figure 7 為 LNAPL Thickness vs. Time：用於評估試驗結束時液位是否達到平衡。

(八) Figure 8 為 LNAPL Discharge vs. Time：為 Figure 7 的替代方法，評估井內是否達到平衡條件。

(九) Figure 9 為 LNAPL Well Inflow Volume vs. Time：與 Figure 7 類似，但以井內總體積的方式呈現。

(十) Figure 10 為 LNAPL Drawdown vs. Time：為線性模型工具，與 Figure 3 結合使用，用於確定早期數據的截止時間點(Timecut)。

◆ 當分析 LNAPL 洩降隨時間的變化時，需要確定初期數據的截止時間。由於試驗期間移除的 LNAPL 體積可能小於總體積，初期測得的數據可能主要反映監測井內周圍濾料造成的變化，而非地層環境的整體行為。因此，透過 LNAPL 洩降隨時間的變化趨勢來確定適當的截止點，有助於排除受監測井井膚效應影響的早期數據，確保 LNAPL 傳導率的估算更加準確。

四、 B&R 頁籤

Bouwer and Rice (B&R)方法是常用於計算 LNAPL 之 T 值的數學方法，主要透過分析液面隨時間變化的數據求得 T 值。該方法假設洩降的對數值隨時間呈線性變化，並透過最小平方法對洩降對數與時間進行回歸分析，根據斜率計算 LNAPL 的 T 值，計算公式如下：

$$T_n = \frac{r_e^2 \ln(R/r_e) \ln(s_n(t_1)/s_n(t))}{2(-J)(t - t_1)}$$

其中，T_n為 LNAPL 為傳導係數(L^2/T)，r_e為有效半徑(L)，R為影響半徑(L)，$s_n(t_1)$為在初始時間的 LNAPL 洩降高度(L)，$s_n(t)$在t時間的 LNAPL 洩降高度(L)，J為 J 比率，t_1為初始時間(T)，t為當前時間(T)。

在實務上，試驗初期的數據可能會受到監測井周圍濾料孔隙內液體補注的影響，導致分析結果產生偏差。為避免此影響，可透過設定截止時間點(Timecut)，忽略初期較不具代表性的數據，以更準確的反映洩降與時間之間的線性關係。此方法的優勢在於能夠有效識別洩降穩定階段，進而提高 LNAPL 傳導率估算的準確性。

五、 C&J 頁籤

Cooper & Jacob (C&J)方法是在 B&R 方法的基礎上進一步引入儲水係數(S_n)和校正時間(TimeAdjustment)，以提高分析精度。透過校正時間(TimeAdjustment)，截止時間點(Timecut)之前的部分數據被納入計算，以進行歸化求解分析，從而補償試驗初期因濾料孔隙中補注等因素引起的時間延遲或偏移，使結果更精準反映 LNAPL 的真實流動情況，該方法可以提高數據擬合的程度，計算公式如下：

$$V_n(t_i) = \sum_{j}^{\mathrm{i}} \frac{4\pi T_n s_j}{\ln\left(\frac{2.25 T_n t_j}{r_e^2 S_n}\right)} \Delta t_j$$

其中，$V_n(t_i)$為在時間t_i的累積滲流量(L^3)，T_n為 LNAPL 為傳導係數(L^2/T)，s_j在t_j時間的 LNAPL 洩降高度(L)，r_e為有效半徑(L)，S_n為 LNAPL 的儲水係數，Δt_j為時間間隔(T)。

校正時間(TimeAdjustment)的範圍可以根據截止時間點(Timecut)進行調整，通常可依經驗或理論模型進行估算。一般建議校正時間設置為截止時間的 50%至 80%，推薦值為 60%或三分之二。

$$TimeAdjustment = (0.6 \text{ 或 } 2/3) \times Timecut$$

六、CB&P 頁籤

Cooper, Bredehoeft & Papadopulos (CB&P)方法在 C&J 方法的基礎上進行了改進，使用傳統的擴孔半徑(r_c)來取代有效半徑(r_e)，此改變使得該方法能夠更準確地描述 LNAPL 在井中的實際流動情況。為提高估算結果的準確性，該方法結合截止時間點(Timecut)、LNAPL 洩降(s_n)以及儲水係數(S_n)，透過歸化求解以最小化均方根誤差(RMSE)進行分析，從而顯著提升模型的擬合度。

玖、參考資料

1. ASTM. 2021. Standard Guide for Estimation of LNAPL Transmissivity. ASTM E2856-13, 68.
2. American Petroleum Institute, API LNAPL Transmissivity Workbook: A Tool for Baildown Test Analysis, https://www.api.org/oil-and-natural-gas/environment/clean-water/ground-water/lnapl/transmissivity-workbook