



行政院環境保護署

109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

電阻加熱輔助土壤氣體抽除系統整治 土壤三氯乙烯污染之模場試驗

期末報告（定稿）

主辦單位：  行政院環境保護署
專案執行單位： 崑山科技大學／環境工程系
專案主持人： 吳庭年 教授
專案執行期間： 109 年 1 月 30 日起至
109 年 12 月 4 日止

中 華 民 國 109 年 12 月 印製



書脊背請以標楷體14pt 打印



電阻
加熱輔助土壤氣體抽除系統
整治土壤三氣
乙烯污染之模場試驗
吳庭年
期末報告



專案基本資料表

專案性質		☐ 實驗性質 ☒ 非實驗性質		專案類別(單選)		☐ 研究型 ☒ 模場型	
研究主題		☐ 調查 ☒ 整治 ☐ 其他					
申請機構系所		崑山科技大學環境工程系					
機構地址		71070 台南市永康區崑大路 195 號					
專案主持人		吳庭年		職等／職稱		教授	
協同主持人		-		職等／職稱		-	
專案名稱	中文	電阻加熱輔助土壤氣體抽除系統整治土壤三氯乙烯污染之模場試驗					
	英文	Pilot study on TCE removal through an electrical resistance heating assisted SVE system					
	關鍵字	土壤加熱、土壤氣體抽除、三氯乙烯					
執行期程		自民國 109 年 1 月 30 日起 至民國 109 年 12 月 4 日止					
專案主持人		Email : 專線：06-2050456 姓名：吳庭年 wutn@mail.ksu.edu.tw 手機：0935399358					
兼任助理		Email : 專線：- 姓名：盧筱筑 qqqqq1234682@gmail.com 手機：0918023214					
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	270,000		(1~5 項相加之 50%為限)		
	2.	貴重儀器使用含維護費	0		(與計畫實驗相關)		
	3.	消耗性器材與主要費用	1,721,941		(與計畫主體相關)		
	4.	其它研究相關費用	40,800		(含差旅與租賃費用)		
	5.	雜支費用	40,259		(1~6 項相加之 5%為限)		
	6.	行政管理費	207,000		(1~5 項相加之 10%為限)		
	7.	自籌款	0		(自行籌備款項)		
	申請補助金額(1~6 項)		2,280,000		總金額：		
計畫總金額(1~7 項)		2,280,000		總金額：			

專案主持人（簽名及蓋章）：_____

日期：109/12/17



行政院環境保護署「109 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」研究成果中英文摘要

- 一、中文計畫名稱：電阻加熱輔助土壤氣體抽除系統整治土壤三氯乙烯污染之模場試驗
- 二、英文計畫名稱：Pilot study on TCE removal through an electrical resistance heating assisted SVE system
- 三、計畫編號：
- 四、執行單位：崑山科技大學/環境工程系
- 五、計畫主持人(包括共同主持人)：吳庭年
- 六、執行開始時間：民國109年01月 30日
- 七、執行結束時間：民國109年12月 04日
- 八、報告完成時間：民國109年10月 28日
- 九、報告總頁數：90頁
- 十、使用語文：中文
- 十一、報告電子檔名稱：電熱輔助土壤氣體抽除模場試驗(期末)
- 十二、報告電子檔格式：PDF
- 十三、中文摘要關鍵詞：土壤加熱、土壤氣體抽除、三氯乙烯
- 十四、英文摘要關鍵詞：soil heating, soil vapor extraction, trichloroethylene
- 十五、中文摘要：

電熱輔助土壤氣體抽除系統整治土壤三氯乙烯污染之模場試驗屬於新穎現地熱處理技術，係利用熱源加熱之方式藉由熱傳導作用加熱現地污染土壤，以提升有機污染物之蒸氣壓加速揮發速率，或經由共沸作用機制來移除水中污染成分，使吸附於土壤中或溶解於地下水中之有機污染物更容易揮發成氣態，並配合土壤氣體抽除後再予以分離處理。模場試驗場址土壤三氯乙烯污染濃度 110 mg/kg，污染土壤面積 226.9 m²，污染土壤深度 0~3 m；地下水污染物濃度三氯乙烯 101 mg/L、順-1,2-二氯乙烯 7.01 mg/L 及二氯甲烷 1,310 mg/L，受污染含水層面積 1,024,621 m²，受污染含水層厚度達 12.3 m。電熱輔助土壤氣體抽除系統之模場試驗區域設在高濃度污染區域下游，設置加熱井 3 口，加熱井間距約 1.5 m，預估土壤升溫溫度可達 45~90℃。同時搭配 7 口抽氣井與 1 口曝氣井構成一熱脫附改善井場。並設置 3 口溫度監測井，於試驗過程中監測熱脫附改善井場現地環境溫度變化。



十六、英文摘要：

This pilot test employed an electrical thermal conduction heating (TCH) assisted soil vapor extraction (SVE) system to remove TCE, which is one of novel in-situ thermal treatment technologies. The heating source conducted heat to in-situ soil to increase vapor pressure and volatilization rate of organic pollutants in the surroundings. The adsorbed pollutants in soil and the dissolved pollutants in groundwater are easily to vaporize through soil heating. The SVE system was installed to collect, separate and treat the subsequent soil vapors. In the study site, the area of TCE-contaminated soil is estimated 226.9 m² and 3 m deep with the highest concentration of 110 mg/kg. The area of TCE-contaminated groundwater is estimated 1,024,621 m² with the aquifer depth of 12.3m, which is contaminated with 101 mg/L TCE, 7.01 mg/L cis-1,2DCE and 1310 mg/L DCM. The TCH assisted SVE system was established in the downstream of the high potential contaminated area. The thermal desorption well domain consists of 3 heating wells with 1.5 m apart, 7 SVE wells and 1 AS well, which is able to enhance the soil temperature to 45~90°C. Also, 3 temperature monitoring wells were established to measure in-situ soil temperature underneath the thermal desorption well domain during the pilot test.



行政院環境保護署土壤及地下水污染整治基金管理會 土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案

109年度專案成果績效自評表

一、專案基本資料

填表日期：109 年 10 月 28 日

專案性質	☐ 實驗性質 ☒ 非實驗性質	專案類別	☐ 研究型 ☒ 模場型
研究主題	☒ 整治 ☐ 調查 ☐ 其他		
申請機構系所	崑山科技大學環境工程系	專案主持人	吳庭年
專案名稱	電阻加熱輔助土壤氣體抽除系統整治土壤三氯乙烯污染之模場試驗		
專案執行期程	☐ 申請階段 ☐ 期中 ☒ 期末		

二、成果績效自評

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

(一) 學術面

項目			目標達成程度	申請 預估數	期中 達成數	期末 達成數	結案後半年 達成率	備註 (說明未達成原因或 學術產出發表名稱)
A 學術 產 出 及 活 動	1.國內投稿 (篇數)	(1)論文						
		(2)研討會論文	1	0	0		計畫成果彙整中	
	2.國外投稿 (篇數)	(1)期刊論文	1	0	0		計畫成果彙整中	
		(2)研討會論文						
	3.報告 (篇數)	(1)技術報告						
		(2)研究報告	1	1	1		本案期末報告	
	4.專著(本數)							
	5.辦理學術 會議(場數)	(1)研討/說明會						
		(2)成果發表會						
		(3)論壇						
6.研發改良 技術(項數)	(1)已開發技術							
	(2)技術平台							
B 人 才 培 育	7.研發人員 (人數)	(1)碩士						
		(2)博士						
	8.研究團隊 (個數)	(1)跨領域團隊	1	1	1		崑山科技大學與裕 山環境工程公司合 作團隊	
		(2)跨機構團隊						
		(3)形成研究中心						
		(4)形成實驗室						
9.其他指標 (請自行命名)		(請自填)						



(二) 產業面

項目			目標達成程度		申請 預估數	期中 達成數	期末 達成數	結案後半年 達成率	備註 (說明未達成原因或 專利、技術轉移相關 詳細資料)
A 智慧 財產 權	1.專利 (件數)	已 核 准	發明						
			新型/設計						
			合計						
		申 請 中	發明	0	0	2		2案發明專利申請中：「電熱輔助土壤及地下水抽除系統」、「地下三維溫度量測方法」	
			新型/設計						
			合計						
B 研 發 技 術 轉 移	2.先期技術 成果移轉	件數							
		授權金(仟元)							
		衍 生 利 益 金(仟元)							
	3.技術移轉 (專利)	件數							
		授權金(仟元)							
		衍生利益金(仟元)							
	4.技術移轉 (應用技 術)	件數							
		授權金(仟元)							
		衍生利益金(仟元)							
	5.可移轉 產業技術	(1)技術(件數)							
		(2)品種/系(件數)							
C 產 學 研 合 作	6.促成合作 研究	件數							
		金額(仟元)							
	7.促成投資	件數							
		投資金額(仟元)							
	8.促成取得 業界科專	件數							
		業界投資金額(仟元)							
9.其他指標 (請自行命名)			(請自填)						



(三) 政策面

項目		目標達成程度	申請預估數	期中達成數	期末達成數	結案後半年達成率	備註 (說明未達成原因 或其他詳細資料)
A 服務 便民	1.技術服務	次數					
		收入(仟元)					
	2.諮詢服務	次數					
		收入(仟元)					
B 支 援 合 作	3.協助政府制定 (件數)	(1)政策					
		(2)法規					
		(3)規範					
		(4)標準					
D 社 會 效 益	4.獲得認證(件數)						
	5.獲得獎項(件數)						
	6.提升能源效率(%)						
	7.節能減碳效率(%)						
8.其他指標 (請自行命名)		(請自填)					

三、請依學術成就、技術創新、經濟效益、社會影響等方面，評估研究成果對現況或本署之學術或應用價值。(簡述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性，500字為限)

現地熱脫附處理技術為土壤整治技術之一種，係利用熱源加熱之方式藉由熱傳導作用加熱現地污染土壤，以提升有機污染物之蒸氣壓加速揮發速率，或經由共沸作用機制來移除水中污染成分，使吸附於土壤中或溶解於地下水中之有機污染物更容易揮發成氣態，並配合土壤氣體抽除後再予以分離處理。此類現地熱處理技術國外已有將近 20 年的發展與應用，但國內尚未有實際的應用案例，本團隊規劃開發電阻加熱輔助土壤氣體抽除系統，應用於含氯有機物污染場址的真實環境，並以模場試驗證實此技術可行。未來應用可加速含氯有機物污染場址的污染改善進度，對受油品污染之地下水亦具有良好的處理效果。對於建築物底下不適合開挖之地區、地下水面下、無法開挖之深層污染區等，只要熱能可以被傳送到深度均可應用現地熱處理技術。



行政院環境保護署
「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☒計畫構想書 ☐期中報告
☐修正計畫書 ☐期末報告

審查意見回覆對照表

計畫年度	109年度	計畫類型	☐ 研究型 ☒ 模場型
計畫類別	☐ 調查 ☒ 整治 ☐ 其他	主持人：吳庭年 NO：D8	
計畫名稱	電阻加熱輔助土壤氣體抽除系統整治土壤三氯乙烯污染之模場試驗		
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員一： 1. 欲加熱的目標值及溫度梯度，以及耗能估算。 2. 是否會對地下水的整治微生物造成干擾。		1. 本模場計畫導入的熱脫附加熱技術為熱電阻加熱類型的方式，熱源供應方式預定為電熱棒裝置型式為主，電熱棒升溫溫度可達300℃，預估土壤升溫溫度可達45~90℃。現場藉由升溫試驗測試土壤之升溫速率、溫控之影響半徑，並量測能源使用量。 2. 地下水的整治微生物對土壤溫度變化極為敏感，可耐受溫度約45~55℃，為避免影響微生物之生長，及維持生物整治之還原脫氯環境，電阻加熱輔助土壤氣體抽除系統之模場試驗區域選定在場址高濃度污染區域下游的位置。	
委員二： 1. 本研究為1年期模場型專案，針對2項技術試驗。TRL 由3、4至4、6。 2. 本研究建議就升溫模式之溫控範圍與去除效能之關聯性作研究。 3. 本研究以加溫方式，其耗能程度宜併考量是否經濟可行。		1. 本模場計畫之核心技術為電阻加熱輔助土壤氣體抽除系統開發，目前掌握之技術能力在實驗室環境下進行小尺度模型測試可行(TRL4)，藉由本模場計畫開發電阻加熱輔助土壤氣體抽除系統，應用於含氯有機物污染場址的真實環境，並以模場試驗證實此技術可行(TRL6)。 2. 本模場計畫規劃升溫試驗量測井場的土壤溫度分布，加熱區與有效溫度擴散區的溫控效果。取得溫控條件範圍，做為土壤氣體抽除試驗之階段升溫模式與定溫加熱模式的溫控設定。 3. 電阻加熱輔助土壤氣體抽除系統之模場設置完成後，執行升溫試驗測試土壤之升溫速率、溫控之影響半徑，並量測能源使用量，可估算系統操作成本。	



委員三： 1. 此計畫目標在測試不同藥劑的效率。 2. 研究團隊具廢水處理經驗。 3. 感覺此計畫為一般作業系統的前置測試，重點為自行開發的藥劑，用來取代高價位的市場商品。	1. 本模場計畫之目標為開發電阻加熱輔助土壤氣體抽除系統，應用於含氯有機物污染場址的真實環境，並以模場試驗證實此技術可行。 2. 本研究團隊具有污染場址調查與整治實務的經驗，如油品污染場址浮油回收、氯乙烯污染場址地下水污染整治。 3. 本模場計畫之核心技術為電阻加熱輔助土壤氣體抽除系統開發，利用熱源加熱之方式藉由熱傳導作用加熱現地污染土壤，以提升有機污染物之蒸氣壓加速揮發速率，或經由共沸作用機制來移除水中污染成分，使吸附於土壤中或溶解於地下水中之有機污染物更容易揮發成氣態，並配合土壤氣體抽除後再予以分離處理。
委員四： 1. 電阻加熱輔助 AS/SVE 整治技術為歐美成熟商轉技術，本研究藉由現地測試建立相關操作條件，有助於本項技術本土化。 2. 本計畫測試區域若為裸地或易有裂隙 RC 鋪面，建議考量鋪設不透水材料，以避免三氯乙烯蒸氣逸散，並增加污染物 (SVE) 去除效率。	1. 本模場計畫之目標為開發電阻加熱輔助土壤氣體抽除系統，應用於含氯有機物污染場址的真實環境，並以模場試驗證實此技術可行。未來應用可加速含氯有機物污染場址的污染改善進度，對受油品污染之地下水亦具有良好的處理效果。 2. 電阻加熱輔助土壤氣體抽除系統之模場試驗區域選定在公告場址範圍內，現場有完整的水泥鋪面，設井後亦會針對破壞的水泥鋪面進行修補，以避免三氯乙烯蒸氣逸散，並加強土壤氣體抽除。
委員五： 1. 本計畫屬於模場型與部分研究導向，國內已有類似相關實績，但操作參數仍待驗證。 2. 本計畫屬於模場型與部分研究導向，對現行國內土水污染技術的突破與應用性仍待說明。 3. 本計畫是否有專利之價值目前不易評估，待有具體的研究成果後，再加以完整的說明。	1. 電阻加熱輔助土壤氣體抽除系統規劃升溫試驗量測井場的土壤溫度分布，加熱區與有效溫度擴散區的溫控效果。取得溫控條件範圍，做為土壤氣體抽除試驗之階段升溫模式與定溫加熱模式的溫控設定。 2. 本模場計畫開發電阻加熱輔助土壤氣體抽除系統，應用於含氯有機物污染場址的真實環境，並以模場試驗證實此技術可行。未來應用可加速含氯有機物污染場址的污染改善進度，對受油品污染之地下水亦具有良好的處理效果。 3. 本模場計畫之核心技術為電阻加熱輔助土壤氣體抽除系統開發，藉由本模場計畫開發電阻加熱輔助土壤氣體抽除系統，應



4. 本計畫的研究成果具有技術轉移、實場應用性的可能性。 5. 本計畫書中對研究工作的構想與規劃的說明完整。 6. 本計畫對研究方法的說明具體，研究工作與執行流程具可執行性。	用於含氯有機物污染場址的真實環境，並以模場試驗證實此技術可行(TRL 6)。後續嘗試申請專利，提升技術成熟度至 TRL 7。 4. 感謝委員肯定，本模場試驗預期展示電阻加熱輔助土壤氣體抽除系統之應用案例，並於污染場址真實環境驗證此技術之可行性，研究成果未來應用具有技術轉移與實場應用性。 5. 感謝委員肯定。 6. 感謝委員肯定，本模場計畫主要工作項目包括現地電熱系統開發、試驗模場概念模型建置、溫度監控與模場設施配置、溫升模場試驗、加熱土壤氣體抽除試驗、成效驗證評估等。
委員六： 1. 核心技術掌握具體。 2. 模場研究架構流程明確(工作項目甚多)。 3. 關鍵參數管控待釐清。 4. 預期成果待釐清。	1. 感謝委員肯定，本模場計畫核心技術為電阻加熱輔助土壤氣體抽除系統開發。 2. 感謝委員肯定，本模場計畫主要工作項目包括現地電熱系統開發、試驗模場概念模型建置、溫度監控與模場設施配置、溫升模場試驗、加熱土壤氣體抽除試驗、成效驗證評估等。 3. 電阻加熱輔助土壤氣體抽除系統之關鍵參數管控，規劃升溫試驗量測井場的土壤溫度分布，加熱區與有效溫度擴散區的溫控效果。取得溫控條件範圍，做為土壤氣體抽除試驗之階段升溫模式與定溫加熱模式的溫控設定。 4. 電阻加熱輔助土壤氣體抽除系統結合溫控條件設定，調控 SVE 運轉控制，進行污染物脫附移除成效評估與成本效益評估。本模場試驗預期展示電阻加熱輔助土壤氣體抽除系統之應用案例，並於污染場址真實環境驗證此技術之可行性。
本署審查意見	計畫單位回覆
無	-



行政院環境保護署
土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案

☒申請計畫書 ☐期中報告
☐修正計畫書 ☐期末報告

審查意見回覆對照表

計畫年度	109 年度	計畫類型	☐ 研究型 ☒ 模場型
計畫類別	☐ 調查 ☒ 整治 ☐ 其他	主持人：吳庭年	
計畫名稱	電阻加熱輔助土壤氣體抽除系統整治土壤三氯乙烯污染之模場試驗		
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員一 1. 主持人與計畫執行團隊 (1)主持人的學術研究能力與技術發展能力均佳，其專業能力足以勝任本專案計畫。 (2)主持人近五年的研究成效與(或)土水污染技術發展績效佳。 (3)主持人與計畫執行團隊的學術研究能力與(或)土水污染技術發展能力佳，其專業能力足以勝任本計畫。 2. 送審的專案計畫價值、意義與專案計畫的可行性 (1)本專案對未來土壤及地下水污染調查及整治等相關工作之推動具有貢獻。 (2)由計畫申請書內的成果績效自評表可推知，本專案所預估的成果與績效對土水污染整治具有貢獻，但確切的成果仍有待於未來的執行成果中加以詳細說明。 (3)本專案計畫書撰寫具體，所研擬的研究方法(流程)可行。研究成果於未來實場的實際可能應用性則未具體說明(確切的應用性有待執行成果中加以明確說明)(本技術於國內已有實場操作中，本計畫所擬克服或改善提升既有技術的項目建請明確說明)。 (4)本專案計畫書中對相關文獻蒐集與整理尚完整。主持人對國內外本研究領域的發展現況了解。 (5)本專案計畫的執行期限合理，計畫書中對執行的預期成果也已說明。		1. 感謝委員對於主持人與計畫執行團隊專業能力的肯定。 2. 本模場計畫核心技術為電阻加熱輔助土壤氣體抽除系統開發，未來對土水污染整治工作之推動具有貢獻。本專案計畫於執行期限內，妥善使用經費，未來執行成果詳細說明改善提升既有技術，與實場的實際可能應用性。	



(6)本專案計畫的經費編列合理。 (7)本專案計畫非屬延續性計畫。	
委員二 1. 研究計畫書內容完整、期程及目標明確，可行性高。 2. 模場試驗已將操作程序及必要安全防護措施納入考量。 3. 本計畫研究主題包含電阻加熱及土壤氣體抽除等技術整合測試，相關成果可提供國內污染場址作為提升污染移除效率之參考。	1. 感謝委員對於研究計畫書內容的肯定。 2. 感謝委員肯定，模場試驗詳細規劃操作程序，並考量必要之安全防護措施。 3. 本計畫研究主題包含電阻加熱及土壤氣體抽除等技術整合測試，未來執行成果詳細說明改善提升既有技術，與實場的實際可能應用性，以提供國內污染場址作為提升污染移除效率之參考。
委員三 1. 場址資訊掌握具體。 2. 研究架構明確，惟溫昇模場試驗，加熱氣體抽除之實驗參數/操作，未具體說明，工作量不明。 3. 預期成果之檢核指標未提列。 4. 耗材編列部份待檢核薄膜介面探測器 57.6 萬，預熱設備 260 萬、溫度監控 50 萬，未與實驗配置點數，監控項目/頻率等對稱說明，整體資源需求配置待檢核。	1. 感謝委員對於場址資訊掌握度的肯定。 2. 升溫試驗以單井試驗進行，加熱井升溫至 350℃，持續操作約 1 個月，於升溫試驗過程中量測 3 處溫度觀測井附近土壤之升溫速率，並評估溫控之影響半徑與溫控效果。土壤氣體抽除試驗分為未加熱與電阻加熱之方式進行比對，分別持續操作約 1 個月。 3. 預期成果之檢核指標列於 <u>109 年度專案成果績效自評表</u>，包括國外期刊論文投稿 1 篇，符合計畫結案要求。 4. 耗材編列：薄膜介面探測器 38.4 萬，包括 4 次 MIP 調查與成效驗證，施作深度共 160 m；加熱管 3 支 30 萬、溫度控制器 9 萬、電源控制箱 15 萬，為 3 口加熱井所需設備材料；溫度監測管 3 支 12 萬、溫度監控器 9 萬，為 3 處溫度觀測井所需設備材料；3 口加熱井、7 口 SVE 井、1 口 AS 井、3 孔溫度監測井設置費共 32 萬，為熱脫附改善井場所需設置經費；本案消耗性器材及主要費用編列合計 165.78 萬，皆為模場試驗規劃工作項目所需。
委員四 模場規模與批次試驗之量，應具體之說明。	1. 規劃設置加熱井 3 口，加熱井間距約 3 m，預估土壤升溫溫度可達 45~90℃。同時搭配 7 口抽氣井與 1 口曝氣井構成一熱脫附改善井場，同時配置多點次溫度監測管，設置 3 處溫度觀測井，距離加熱井約 0.5 m、1 m、2 m 處位置，以瞭解土壤升溫的效果。升溫試驗以單井試驗進行，加熱井升溫至 350℃，持續操作約 1 個月；土壤



	氣體抽除試驗分為未加熱與電阻加熱之方式進行比對，分別持續操作約 1 個月。
委員五 已就委員意見回復說明，無進一步意見。	1. 感謝委員肯定。
委員六 1. 缺少執行同意書、模場同意函、場址基本資料確核表、污染防治衛生安全措施，請於修正稿補充。 2. 人事費僅編列 10 個月，請再確認(可編列 11 個月)。 3. (一)人事費-計畫主持人月支酬金建議編列以 15,000 元為限。 4. (三)消耗性器材及主要費用數字符號有誤，容易混淆。 5. (四)其他研究相關費用合計有誤，請確認。 6. (五)雜項費用-報告書印刷建議編列以 12,000 元為限。	1. 專案執行同意書已依核定補助經費修正後增補，模場試驗場址基本資料、地方主管機關確核表、土地使用同意書、污染防治衛生安全措施等相關文件提供於附件。 2. 依核定計畫的執行期限僅約 10 個月。 3. 參照委員意見，主持人月支酬金調整為 15,000 元。 4. 消耗性器材及主要費用數字符號已重新檢核修正。 5. 其他研究相關費用已重新調整。 6. 參照委員意見，報告書印刷編列調整為 12,000 元。



行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☐申請計畫書 ☒期中報告

☐修正計畫書 ☐期末報告

審查意見回復對照表

計畫年度	109 年度	計畫類型	☐ 研究型 ☒ 模場型
計畫類別	☒ 整治 ☐ 調查 ☐ 其它	主持人：吳庭年	NO：C5
計畫名稱	電阻加熱輔助土壤氣體抽除系統整治土壤三氯乙烯污染之模場試驗		
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員一			
1. 圖 1.1 第一階段、第二階段等是否對應 Y 軸的 Early Stage、Middle Stage 等?另第 2 頁第 2 段最後 1 句整治末期是對應哪個階段?		1.圖 1.1 第一階段場址污染概念模型建立完成即邁入整治 Early Stage，第二階段執行整治工法由 Early Stage 進入 Middle Stage，第三階段整治後污染濃度大幅下降，但亦有濃度彈升現象，最終污染濃度會在管制標準上下擺盪，即屬於 Late Stage。本模場試驗場址歷經 5 年現地生物整治作業，目前場址污染濃度亦下降至管制標準左右，呈現整治末期 Late Stage 污染濃度在管制標準上下擺盪的特徵。	
2. 本計畫是否有測量地下水溫度受電阻加熱的影響?		2.本計畫熱脫附改善井場設置 3 口溫度監測井，即時監測地下深度 2 m、4 m 及 6 m 之溫度變化，因此可得知熱脫附試驗期間土壤及地下水的溫度。	
3. 第 11 頁倒數第 5 行，主要吸附中心建議調整為主要吸附位置。		3.參酌委員建議，已修正為「土壤中有機質是有機污染物最主要吸附位置」。	
4. 圖 3.6 含水層標示位置建議調整為標示區間，具彎尾的箭頭建議標示為污染物蒸氣。		4.參酌委員建議，圖 3.6 進行標示修正。	
5. 表 3.4 項次 4 電熱法技術與其他加熱技術的差異為何?		5. thermal treatment 應翻譯為熱處理法係指污染土壤開挖離地處理的方式亦可提供熱源進行現地處理(如悶燃法)，與其他加熱技術的差異主要為加熱源的型式不同。	
6. 第 22 頁第 14 行，現地土壤降溫過程是否為升溫過程?		6.一般溫度升高流體表面張力下降，因此在現地土壤升溫過程，DNAPL 相污染物更易於移動。	
7. 第 29 頁倒數第 2 行 M15 的位置依圖 4.3 所示，是否在場址圍牆外?		7.107 年 3 月鄰近試驗區 M15 採樣點土壤三氯乙烯濃度 1.13 mg/kg，其相對位置在圖 4.9 場內 MW58-1 附近，非為圖 4.3 之 102 年調查場外 M15 的位置。	
8. 第 30 頁第 1 行，XSD 請補充英文全名。		8.XSD 為 halogen specific detector，係針對含鹵有機化合物偵測有較佳的訊號感度。	



9. 第 41 頁第 1 段與第 2 段敘述 AS 的井深、開篩長度均有差異，請予以確認。另 SVE 開篩區間為 1.5~6m，部分篩管是否位於含水層？是否影響抽氣？ 10. 圖 5.7 尾氣濃度是否缺少 4 月 9 日的數據？ 11. 本計畫如何由 PID 的測值推算 TCE 氣體濃度？ 12. 第 52 頁最後一行，較深層處次高濃度污染範圍增加，淺層低濃度範圍亦增加，這樣的結果是否解讀為污染擴散？	9. 不一致處已修正，SVE 抽氣井深度為 6.0 m，底部開篩長度 4.5 m；AS 注氣井深度為 8.0 m，底部開篩長度 1.0 m。現場地下水位約 4.0 m，部分 SVE 篩管位於地下水位之下，但不影響抽氣。 10. 4 月 9 日為 SVE/AS 系統試運轉，尾氣處理設備尚未裝填活性碳，僅量測系統抽氣濃度。4 月 10 日正式啟動 SVE/AS 模場試驗。 11. 依據第 49 頁污染物抽出量公式，以 PID 測值乘上抽氣量可估算 VOC 抽氣體積，假設本場址 VOC 污染物皆為 TCE，再代入理想氣體方程式計算出 TCE 抽出質量。 12. SVE/AS 模場試驗結果，淺層低濃度範圍增加係因 SVE 井抽氣的影響，造成污染物在模場試驗區內傳輸移動，皆在系統操作控制的範圍內，有別於不受控制之污染擴散現象。
委員二 1. 期中報告對計畫執行現況、研究流程及方法已具體說明。 2. 本計畫的後續執行工作項目及內容已於期中報告中簡述。 3. 計畫執行進度與預定進度大致相符。 4. 本報告書中未說明計畫執行的困難點，本計畫的執行進度並無落後。 5. 期中報告顯示本計畫的研究內容與計畫目標相符(模場建構中，5.3 節已說明)。 6. 期中報告中已提出相關的建議。 7. 因為計畫才剛執行，本期中報告尚未能顯示出整體的研究成果是否符合原預期成果(現地模場已建構測試中)。 8. 因為計畫才剛執行，本期中報告尚未能顯示具體的學術產出。 9. 本計畫有跨領域專家參與，可培育土水污染領域的相關人才。	1. 感謝委員肯定。 2. 感謝委員肯定。 3. 感謝委員肯定。 4. 本計畫期中執行進度較預定進度超前 20%。試驗場址為土壤及地下水污染整治場址，核定整治期程至 110 年 3 月，目前處於整治階段後期，計畫執行的困難點為場址污染分布僅剩零星污染區塊，沒有高濃度污染區域可供模場試驗展現明顯的整治成效。 5. 本計畫研究內容與計畫目標相符，熱脫附改善井場已於期中建立完成。 6. 感謝委員肯定。 7. 期中已完成 SVE/AS 抽除試驗，期末前完成熱脫附 SVE/AS 試驗，以比對加熱輔助之整治成效。 8. 規劃彙整期末報告執行成果，撰寫期刊論文投稿。 9. 本計畫由裕山環境工程公司協力完成諸多現場工程項目，目前崑山科技大學與裕山環境工程公司組成跨領域合作團隊，可



10. 因為計畫才剛執行，研發的成果是否能獲得專利或是有技術轉移的可能，目前尚無法評估。 11. 本計畫與土水污染領域的發展有關，當符合政策發展(現地整治)。	培育土水污染領域的相關人才，累積現場實務經驗。 10. 本計畫研究成果規劃以「電熱輔助土壤及地下水抽除系統」提出專利申請，目前正在準備專利申請文件。 11. 本計畫研究主題屬於現地整治技術，符合土水污染領域的政策發展。
委員三 1. 期中進度符合。 2. 期待年終能有完整詳實的成本效益評估。	1. 感謝委員肯定，本計畫期中執行進度較預定進度超前 20%。 2. 期末前完成熱脫附 SVE/AS 試驗，並提供成本效益評估。
委員四 1. 完成現地電熱輔助土壤氣體抽除系統開發等。 2. 期中報告進度，超前預定進度。 3. AS/SVE 模場試驗運轉結束一段期間後，建議測試紀錄地下水 TCE 回升情形。 4. 下階段現地電熱系統運作時，宜注意尾氣控污去除效率。	1. 本計畫完成現地電熱輔助土壤氣體抽除系統開發，規劃以「電熱輔助土壤及地下水抽除系統」提出專利申請，目前正在準備專利申請文件。 2. 感謝委員肯定，本計畫期中執行進度較預定進度超前 20%。 3. 期中已完成 SVE/AS 抽除試驗，模場試驗區地下水 TCE 最高濃度為 0.032 mg/L。接續進行熱脫附 SVE/AS 試驗，模場試驗區地下水 TCE 濃度皆為 ND 值。 4. SVE/AS 抽除試驗與熱脫附 SVE/AS 試驗執行期間，每日皆量測抽氣濃度與尾氣濃度，若尾氣處理效率不佳，立即更換活性炭。
委員五 1. 本研究會讓土壤溫度上升 45-90 度，是否會對土壤中之微生物造成影響？ 2. 額外加熱勢必增加能耗，請於期末評估能耗與污染減量之情形。 3. 期末亦請評估經濟成本效益。 4. 圖 5.7 請修正為不同線條，以方便閱讀。	1. 熱脫附 SVE/AS 試驗目標提升土壤溫度至 90℃，此溫度可能造成部分微生物死亡；但些微提升土壤溫度至 45℃ 以內，可以促進微生物活性，加速污染物分解。 2. 期中已完成 SVE/AS 抽除試驗，期末前完成熱脫附 SVE/AS 試驗，以比對加熱輔助之整治成效。 3. 期末前完成熱脫附 SVE/AS 試驗，並提供成本效益評估。 4. 參酌委員建議，圖 5.7 進行標線修正。



行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☐申請計畫書 ☐期中報告

☐修正計畫書 ☒期末報告

審查意見回復對照表

計畫年度	109 年度	計畫類型	☐ 研究型 ☒ 模場型
計畫類別	☒ 整治 ☐ 調查 ☐ 其它	主持人：吳庭年 NO：C5	
計畫名稱	電阻加熱輔助土壤氣體抽除系統整治土壤三氯乙烯污染之模場試驗		
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員一 1. 原理簡明、直接、優勢，是有相當完整的監測評估數據。 2. 理論上，污染濃度越高，此方法的成本效益越高，可考慮後續合適場址。其次，同一場址在冷卻一段時間後，如有後續追蹤數據更佳。		1. 感謝委員肯定。 2. 參酌委員建議，若有延續性計畫，將另覓整治初期高污染濃度場址執行模場試驗，較易展現電熱輔助土壤及地下水抽除系統的整治成本效益，並建立完整驗證數據。	
委員二 1. 本試驗專案計畫在背景描述、時程、規劃、研究方法、分析方法皆處理得宜，所提出的電阻加熱輔助土壤氣體抽系統對於三氯乙烯污染移除成效佳，效益評估凸顯在相同污染移除量下，加熱輔助 AS/SVE 更能在短時程即達到高污染移除量而降低人事成本，顯示本技術在短期局部區域及特定條件下，特別是其效能與 AS/SVE 相較更具競爭性。 2. p.69 提到加熱輔助 AS/SVE 可能因土壤溫度上升而造成 SVE 系統之 PVC 軟化，PVC 是聚氯乙稀，是否有可能因此釋出含氯分子，甚至塑化劑，造成二次污染防治裝置之活性碳壽命降低，更甚讓 XSD 量測到更高濃度之含氯有機物，而造成數據誤判？ 3. 成本效益評估相當完整，但建議評估到個位數就好。 4. 結論相當完整且具體，也有建設性的建議。		1. 感謝委員肯定。相較 AS/SVE 模場試驗，熱脫附 AS/SVE 模場試驗成果顯現較佳的整治成效，抽氣污染物濃度提升 22.5%，污染物平均抽除速率提升 10.7%，污染物移除量提升 71.0%。熱脫附 AS/SVE 試驗後高濃度區域明顯消失，中濃度區體積縮減 64.5%，低濃度區體積縮減 89.5%，顯示本技術的卓越效能與競爭性。 2. 熱脫附 AS/SVE 模場試驗結束前，觀察到 SVE 系統 PVC 管路軟化的現象，雖未量測氯乙稀分子或塑化劑的釋出量，但由 SVE 系統尾氣監測 PID 數據，並未發現異常現象。且 MIP 整治成效驗證之 XSD 測值，並未測得高值，沒有現場數據顯示有含氯有機物釋出的徵兆。 3. 感謝委員肯定。成本效益評估數據為計算結果，依委員建議修正計算結果至個位數。 4. 感謝委員肯定。	
委員三 1. SVE 所形成的氣流對溫度分布的影響建議討論 (1)是否同步進行 (2)是否間歇進行？(順序？)		1. SVE 系統日間抽氣控制採間歇性操作，抽氣 30 分鐘/停機 30 分鐘，夜間停止抽氣。熱脫附模場試驗區土壤溫度介於 44℃~80℃，抽氣氣流可能造成部分熱損失，檢核	



2. 與 AS/SVE 中的(加溫 AS)/SVE 比較？	抽氣溫度介於 45°C~52°C，與低溫區土壤溫度接近，抽氣流量控制得宜，並未造成熱脫附模場溫度分布之重大影響。
3. 依所提送的期末報告初稿所述，本計畫執行現況、流程及研究方法的說明具體詳盡。	2. SVE 系統抽氣僅由 1 部抽氣幫浦控制，7 口抽氣井受地質不均質性影響，各井抽氣量互有差異。熱脫附 AS/SVE 系統平均總抽氣流量介於 400~434 L/min，較 AS/SVE 試驗抽氣流量略降，係因熱脫附抽氣氣流受降溫後凝結水氣的影響。
4. 計畫後續執行工作項目及內容已於 p. 88 中說明。	3. 感謝委員肯定。
5. 計畫執行進度與預定進度查核表相符(4.3 節&表 4.1)，並無未執行項目。	4. 本計畫後續建議媒合高污染濃度場址進一步驗證，或可尋找重質油品污染場址進行模場試驗，另以加熱輔助 AS/SVE 系統結合生物整治工法，促進生物分解速率，深化加熱輔助 AS/SVE 系統之應用性。
6. 依自評表的說明，成果與結案標準大致符合。	5. 感謝委員肯定。
7. 研究成果的說明與原計畫目的相符，整體研究成果符合原計畫的預期。	6. 感謝委員肯定。
8. 根據研究內容所提出之討論與建議合理可行(5.4.1 節的升溫特性與特徵因子建議討論)(5.4.2 升溫與 SVE 的成效與貢獻度建議討論)(土壤質地的影響建議討論，尤其是對 5.6 節的成本效益評估的影響)。	7. 感謝委員肯定。
9. 研究成果與過程有相關研究人員參與(助理或研究生)，對土水領域的人才培育有貢獻。	8. 感謝委員肯定，土壤升溫效果與土壤質地有關，水蒸氣存在亦可提升熱傳導效應，呈現地下水位上方的毛細作用層升溫效果最好。土壤升溫促進污染物揮發與脫附作用，提升 SVE 系統抽氣污染物濃度 22.5%，因而增加污染移除量 71.0%。比對移除每克污染物之操作成本，熱脫附 AS/SVE 系統(338 元/g-TCE)較 AS/SVE 系統(376 元/g-TCE)更具競爭優勢。
10. 成果研發是否獲得專利、技術轉移等仍待更進一步的說明(報告書中已有初步的成果與規劃)。	9. 感謝委員肯定。
11. 本研究領域與國內土水污染技術研發一致，研究成果對土水技術發展有助益。	10. 本計畫已提出 2 案中華民國專利申請：「電熱輔助土壤及地下水抽除系統」及「地下三維度溫度量測方法」，靜待智財局審查結果。 11. 感謝委員肯定。



委員四 1. 工作項目及內容說明詳細。 2. 工作進度符合原訂目標。 3. 自評表勾選錯誤請更正為期末。 4. 論文期刊發表後請註明。 5. 有 2 案發明專利申請中：「電熱輔助土壤及地下水抽出席統」、「地下三維度溫度量測方法」。 6. 建議能列出最佳的操作參數。另加熱至 80°C，不適用生物整治。	1. 感謝委員肯定。 2. 感謝委員肯定。 3. 感謝委員指正，自評表誤繕處已修正。 4. 論文期刊發表與專利申請資料新穎性主張有衝突，考量專利申請時程，論文期刊發表宜延後辦理。 5. 本計畫已提出 2 案中華民國專利申請：「電熱輔助土壤及地下水抽除系統」及「地下三維度溫度量測方法」，靜待智財局審查結果。 6. 依熱脫附模場試驗結果，3 口電熱井加熱溫度 450°C，可使地下水位上方毛細作用層土壤升溫至 70°C~80°C，促進污染物揮發、汽化、脫附與溶解作用，加速污染物抽出移除成效。若採行生物整治法，土壤升溫則控制在 45°C 以內，以促進微生物活性為主，加速污染物分解。
委員五 1. p. 51 表 5.6 註二現場儀器故障？ 2. p. 62 T-1 平均 68.5°C，T-2 平均 52.0°C，試驗目標預計要達均溫 80°C，未來如何改善能在較節省能源下提高溫度？ 3. p. 71 現地濃度變化不大，活性碳 6/30 更換後約五天就出現去除率明顯降低趨勢，與 6/16 活性碳可維持約十天不同，可能因素為何？更換頻率是否需提高到 10 天？ 4. 部分加熱的抽氣濃度較未加熱者低？ 5. 成本效益中，請補充去除每克 TCE 所需費用做比較。	1. 表 5.6 係指可攜式水質監測儀器故障，SVE 試驗後地下水 pH、ORP、EC 未進行現場量測，但非關鍵性指標，不影響整治成效評估結果。 2. 土壤升溫試驗結果：T-1 平均 68.5°C、T-2 平均 52.0°C、T-3 平均 47.4°C，呈現距離電熱井越遠整體土壤升溫速率越慢。土壤升溫效果與土壤質地有關，水蒸氣存在亦可提升熱傳導效應，地表鋪設柏油層可提供保溫效果，以上各項措施可視現場作業情況參採。 3. 熱脫附模場試驗尾氣含有大量水氣，容易影響活性碳吸附效果，致使更換後約 5 天即顯現去除率降低。未來實場應用，可於活性碳吸附槽前加裝去水裝置，減緩活性碳吸附飽合，更換時機仍以尾氣偵測做為判斷依據。 4. 前期 AS/SVE 模場試驗結束之抽氣 PID 測值為 7.7 ppm，熱脫附 AS/SVE 模場試驗過程抽氣 PID 測值介於 6.0~14.3 ppm，僅單日測值偏低。 5. 以表 5.14 操作成本做為估算基礎，AS/SVE 模場試驗去除每克 TCE 花費 376 元，熱脫



6. 針對停電期間請加註在圖表上，以免造成誤解成果。	附 AS/SVE 模場試驗去除每克 TCE 花費 338 元，相較之下熱脫附 AS/SVE 工法仍具有操作成本優勢。 6. 參酌委員建議，109 年 5 月 14 日至 18 日工廠跳電停機已加註於圖 5.15。
-----------------------------------	--



行政院環境保護署「109 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」期末報告

目次

專案基本資料表	
研究成果中英文摘要	
109 年度專案成果績效自評表	
計畫構想書審查意見回覆表	
申請計畫書審查意見回覆表	
期中報告審查意見回覆表	
期末報告審查意見回覆表	
目次	I
圖次	III
表次	IV
第一章 前言	1
1.1 研究計畫背景	1
1.2 研究計畫構想	2
第二章 研究目的	5
2.1 目的說明	5
2.2 預期目標	6
第三章 文獻探討	7
3.1 含氯有機污染物特性與傳輸宿命	7
3.2 土壤與地下水污染物整治技術概述	12
3.3 加熱輔助土壤氣體抽除技術(Thermally Enhanced SVE)	20
第四章 研究方法與過程	25
4.1 模場試驗場址背景	25
4.1.1 場址水文地質資料	26
4.1.2 場址污染現況	27
4.2 研究方法	29
4.2.1 試驗模場污染概念模型建置	29
4.2.2 現地電熱系統開發	31
4.2.3 模場設施配置	31
4.2.4 溫升模場試驗	33
4.2.5 加熱輔助土壤氣體抽除試驗	33
4.2.6 成效驗證評估	33
4.3 執行進度	34
第五章 結果與討論	36
5.1 場址污染背景 MIP 調查結果	36
5.2 AS/SVE 模場試驗	41



5.2.1	AS/SVE 改善井場設置過程	41
5.2.2	AS/SVE 模場試驗操作紀錄	43
5.2.3	AS/SVE 模場試驗成果	46
5.2.4	AS/SVE 整治成效(MIP 調查比對驗證)	52
5.3	現地電熱系統設置	55
5.3.1	熱脫附改善模場建置	56
5.3.2	現地加熱井及溫度監測井設置過程	57
5.4	熱脫附 AS/SVE 模場試驗	62
5.4.1	土壤升溫模場試驗	62
5.4.2	熱脫附 AS/SVE 模場試驗操作紀錄	66
5.4.3	熱脫附 AS/SVE 模場試驗成果	67
5.4.4	熱脫附 AS/SVE 整治成效(MIP 調查比對驗證)	75
5.5	整治成效評析	79
5.6	成本效益評估	84
第六章	結論與建議	86
6.1	結論	86
6.2	建議	88
第七章	參考文獻	89



圖次

圖 1.1 DNAPL 進入土壤及地下水中污染宿命及其所對應之污染整治效率 ..	1
圖 1.2 常見污染物蒸汽壓與溫度關係圖	3
圖 3.1 DNAPL 洩漏至土壤及地下水傳輸	10
圖 3.2 在土壤中有機污染物不同的物理形式	11
圖 3.3 控制場址土壤污染整治技術應用分佈圖	12
圖 3.4 控制場址地下水污染整治技術應用分佈圖	13
圖 3.5 整治場址污染整治技術應用分佈圖	13
圖 3.6 加熱輔助土壤氣體抽除系統運作示意圖	20
圖 4.1 模場試驗場址位置圖	25
圖 4.2 模場試驗場址地下水水位及流向圖(101 年 10 月)	26
圖 4.3 模場試驗場址 MIP-ECD 調查結果之污染分布圖(102 年).....	27
圖 4.4 模場試驗場址歷年地下水三氯乙烯濃度變化	28
圖 4.5 本研究架構流程圖	29
圖 4.6 薄膜介面探測系統設備配件組成圖	30
圖 4.7 現地加熱井規劃設計圖示	31
圖 4.8 溫度監測井規劃設計圖	31
圖 4.9 場址內模場試驗區域位置圖	32
圖 4.10 模場試驗區井位配置	32
圖 5.1 模場設置位置與 MIP 調查點位圖	36
圖 5.2 各調查點位 MIP 探測剖面訊號反應強度	38
圖 5.3 MIP 探測結果繪製之 3D 場址污染概念模型	39
圖 5.4 MIP 探測之 3D 場址污染概念模型與點位訊號判視之疊圖	40
圖 5.5 AS/SVE 改善井場配置圖	40
圖 5.6 抽氣井之總流量紀錄之週平均圖	46
圖 5.7 SVE 系統抽氣及尾氣 PID 測值逐日變化圖	47
圖 5.8 SVE 系統尾氣處理效率逐日變化圖	48
圖 5.9 SVE 系統污染物移除量逐日變化圖(以三氯乙烯計算)	50
圖 5.10 SVE 系統污染物平均日移除量與累計移除總量(以三氯乙烯計算) ..	50
圖 5.11 比較經 AS/SVE 運轉前後之 MIP 污染分佈調查結果圖	53
圖 5.12 經 AS/SVE 運轉前後之 MIP 污染分佈調查結果三維空間圖	54
圖 5.13 熱脫附改善井場配置圖	56
圖 5.14 加熱井(左)與溫度監測井(右)構造剖面示意圖	57



圖 5.15 土壤升溫過程 3 口溫度監測井之監測溫度歷時變化.....	63
圖 5.16 土壤降溫過程 3 口溫度監測井之監測溫度歷時變化.....	65
圖 5.17 熱脫附 AS/SVE 試驗 3 口溫度監測井之監測溫度歷時變化.....	68
圖 5.18 熱脫附 AS/SVE 試驗抽氣井總流量紀錄之週平均圖.....	69
圖 5.19 熱脫附 AS/SVE 系統抽氣及尾氣 PID 測值逐日變化圖	70
圖 5.20 熱脫附 AS/SVE 系統尾氣處理效率逐日變化圖	71
圖 5.21 熱脫附 AS/SVE 系統移除量逐日變化圖(以三氯乙烯計算).....	73
圖 5.22 熱脫附 AS/SVE 系統污染物平均日移除量與累計移除總量(以三氯乙烯計算).....	73
圖 5.23 熱脫附 AS/SVE 試驗後 MIP 調查之溫度場域三維空間分布圖	76
圖 5.24 比較經熱脫附 AS/SVE 運轉前後之 MIP 污染分佈調查結果圖	77
圖 5.25 經 AS/SVE 運轉與熱脫附 AS/SVE 運轉前後 MIP 污染分佈調查結果之三維空間圖	78
圖 5.26 AS/SVE 系統與加熱輔助 AS/SVE 系統之抽氣 PID 濃度變化.....	79
圖 5.27 AS/SVE 系統與加熱輔助 AS/SVE 系統之逐日污染物抽除速率變化	80
圖 5.28 AS/SVE 系統與加熱輔助 AS/SVE 系統推估之每日污染移除量變化	81
圖 5.29 AS/SVE 系統與加熱輔助 AS/SVE 系統推估之累積污染移除量比較	81
圖 5.30 使用 Image J 估算污染殘餘體積之過程截圖	82
圖 5.31 模場試驗各階段估算之高、中、低濃度區污染殘留體積量比較.....	83



表次

表 3.1 常見含氯有機物於 25°C 下的物理及化學特性參數	8
表 3.2 含氯有機物土壤及地下水污染整治技術採用案例數量統計	14
表 3.3 常見之 DNAPL 土壤與地下水污染現地整治技術說明	15
表 3.4 國外利用加熱技術去除污染物的場址數量統計	21
表 3.5 常見 3 種現地熱處理技術特點比較	21
表 3.6 國外電阻加熱整治之應用案例	24
表 4.1 本研究實際執行進度及預定工作查核點	35
表 5.1 SVE 抽氣井與 AS 注氣井設井作業過程	41
表 5.2 抽注氣設施與管路配置安裝作業過程	42
表 5.3 AS/SVE 改善井場系統試運轉情形	43
表 5.4 AS/SVE 模場試驗與定期監測過程	44
表 5.5 SVE 抽氣井地下水採集作業過程	45
表 5.6 SVE 井之地下水位及三氯乙烯濃度	51
表 5.7 加熱系統及溫度監控系統元件規格明細	55
表 5.8 現地電熱井與溫度監測井設井作業過程	58
表 5.9 加熱與溫度監測系統安裝連線作業過程	60
表 5.10 加熱與溫度監測系統試運轉驗收情形	61
表 5.11 熱脫附 AS/SVE 模場試驗電熱井溫度設定及溫度監測井監測	66
表 5.12 熱脫附 AS/SVE 模場試驗 SVE 抽氣水分凝結及 PVC 抽氣管路軟化	69
表 5.13 熱脫附 AS/SVE 試驗 SVE 井之基本水質及三氯乙烯濃度	74
表 5.14 SVE 井之水質及三氯乙烯濃度	73
表 5.15 本模場之操作成本試算表	85
表 5.16 使用加熱輔助 AS/SVE 或繼續使用 AS/SVE 之操作成本比較表	85





第一章 前言

1.1 研究計畫背景

國內近年來調查已公告許多土壤及地下水污染案場，其中許多受到重質非水相液體(Dense Non-Aqueous Phase Liquid, DNAPL)污染之場址，由於DNAPL 污染物之物理與化學特性，再加上地質具不均質的複雜性以及地下水文隨季節變化、受周遭抽水情況等影響，使污染調查與整治工作備受挑戰，且整治成效不易掌握。含氯有機污染物進入土壤及地下水中污染宿命及其所對應之污染整治效率，在場址污染初期，採用積極性的整治工法，可快速減少污染濃度，但到了後期，DNAPL 的回收效率受到技術限制及污染物傳輸特性限制，使得積極性的整治技術效率下降，如圖1.1 所示。

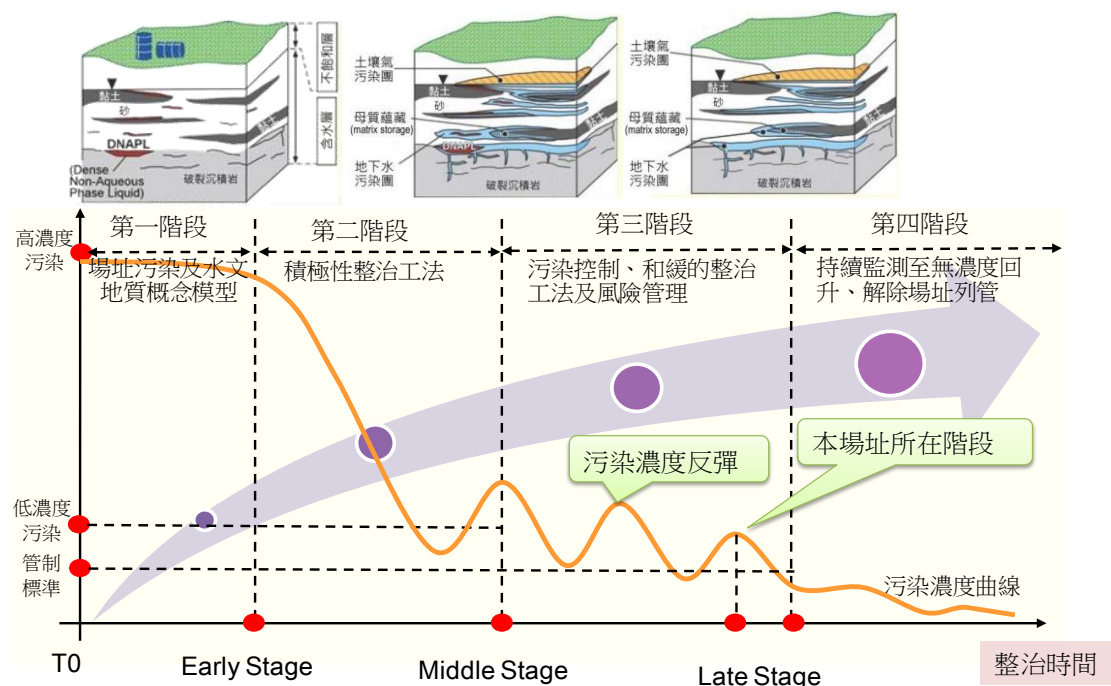


圖 1.1 DNAPL 進入土壤及地下水中污染宿命及其所對應之污染整治效率

目前國內含氯有機物污染的場址最普遍採行之整治工法，包括抽出處理、土壤間隙氣體抽除搭配多相回收、地下水注氣、電動力法、現地化學氧化或



電阻加熱輔助土壤氣體抽除系統整治土壤三氯乙烯污染之模場試驗

還原、現地生物整治或透水性反應牆等方式。若整治時程過久，其整治費用及其消耗的能資源將極為可觀。

本模場試驗場址因土壤與地下水之三氯乙烯(TCE)濃度超過污染管制標準，於民國 100 年公告列管為整治場址，高濃度區採行現地生物整治工法，雖然初期展現積極整治的成效，亦遭遇污染濃度回升的情況。另一方面，大量灌注生物藥劑難免將地下水污染團推移至下游區域，而地下水下游位置未有足夠藥劑量進行生物整治，呈現圖 1.1 整治末期污染整治效率的特徵。

有鑑於本模場試驗場址整治期程即將於民國 110 年 3 月屆滿，業主方有意願導入創新工法改善地下水下游區域的殘留污染物。本研究採行現地電熱輔助土壤氣體抽除工法，利用土壤加熱的方式提升土壤污染物的揮發性，並增加地下水污染物的溶解度，結合土壤氣體抽除系統促進殘留污染物移除，以期短期展現污染整治成效。透過本模場試驗之推動，期望能突破技術瓶頸，呈現現地電熱輔助土壤氣體抽除工法應用之成功案例，並建立技術操作參數與成本效益分析，以提供國內外同類型污染整治場址選用可行性整治技術之參考。

1.2 研究計畫構想

參考環保署「土壤及地下水污染調查與整治技術優先發展項目篩選與試驗計畫」統計 100 至 103 年資料，評析國內場址調查及整治技術，彙整國內 70 處污染控制場址採用之現地污染整治技術，土壤污染以化學氧化(In Situ Chemical Oxidation,ISCO)、土壤氣體抽除(Soil Vapor Extraction, SVE)為常用之整治工法；地下水污染者則以化學氧化還原、水力控制、現地生物整治及空氣注入/氣體抽除法(Air Sparging/Soil Vapor Extraction,AS/SVE)為常用之整治工法。彙整國內 23 處污染整治場址採用之現地污染整治技術，以化學氧化、AS/SVE 及水力控制為最普遍採用之整治工法，且大多數整治場址在採取化學氧化工法、多相抽除工法或水力控制時，會併同搭配 AS/SVE 工法，以加速完成污染改善工作。

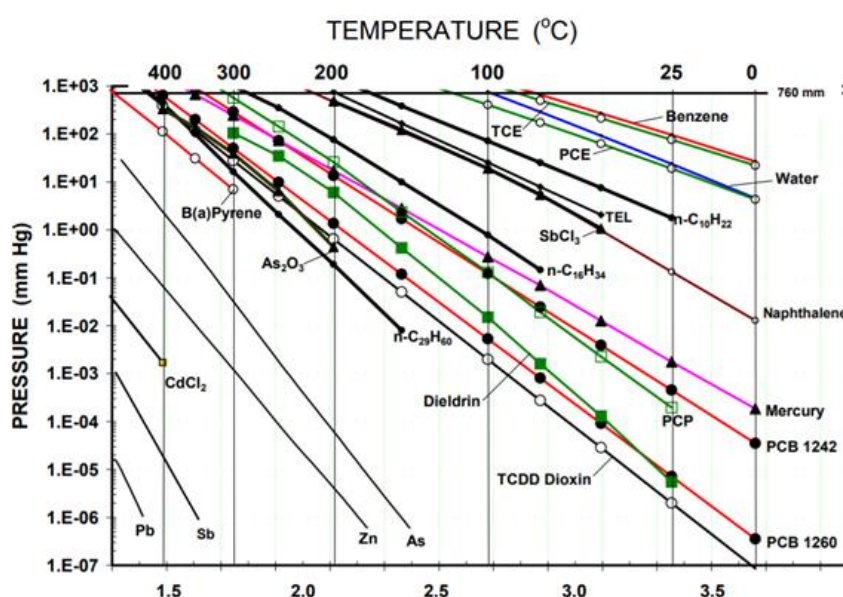
過往國內土壤整治工法多採用離地處理技術或翻堆稀釋方式，至於現地土壤整治技術之應用相對較少，且發展亦較為欠缺，多以成熟的化學氧化、土壤氣體抽除及固化(如地質改良)等物化整治技術作為現地土壤整治的對策。



第一章前言

以土壤屬於自然資源的概念考量，土壤離地處理技術顯然非屬於永續性的整治工法。相對應於重金屬污染，國內土壤與地下水污染物以油品與含氯有機物居多，近年已有部分使用現地物化整治技術之污染場址，因殘存高碳數油品污染物或揮發性較低的有機污染物，導致污染改善成效不彰或整治失敗。因此，針對高碳數油品污染物或揮發性較低的有機污染物，有發展或導入適用整治技術之實質需求。

國內土壤與地下水污染物以油品與含氯有機物居多，採用 SVE 處理技術處理高碳數油品污染物或揮發性較低的有機污染物，常因污染物的揮發性不佳導致整治失敗。SVE 處理成效受場址土壤滲透性與污染物揮發性影響，一般土壤透氣性 $k < 10^{-10} \text{ cm}^2$ 較不適用 SVE；地下水位距離地表 1 m 以內，會阻礙土壤污染物在 SVE 抽氣時之移動性，使 SVE 無法發揮正常功能；一般污染物蒸汽壓小於 0.5 mm-Hg 或污染物沸點大於 300℃ 亦不適用 SVE。本場址污染物三氯乙烯、順-1,2-二氯乙烯及二氯甲烷皆適用 SVE，若透過土壤升溫將大幅增加污染物蒸汽壓(圖 1.2)，可進一步促進 SVE 移除成效。





電阻加熱輔助土壤氣體抽除系統整治土壤三氯乙烯污染之模場試驗

若經技術試驗評估之成本效益及環境足跡亦優於開挖工法、或在可接受範圍內，現地熱處理技術應可作為國內處理此類難處理有機污染物之技術備選方案。熱處理在國際間是屬於相對成熟的技術，但國內應用則相對少見，是現地土壤處理技術上的缺口之一，以國內外的技術應用所存在之落差，可視為新興技術。離地熱處理法常見離地低溫/高溫熱脫附、熱裂解，國內此類技術目前已有相對成熟的發展及實場經驗，例如旋轉窯，及應用於加油站場址之熱增強型氣體抽除技術 (Thermally Enhanced Soil Vapor Extraction, TSVE; Thermally Enhanced Vapor Extraction Technology, TEVET) 等。現地熱處理技術包括將高溫熱空氣或高溫蒸氣注入地下環境中 (Hot Air/ Steam Injection)，或利用電阻 Electrical Resistance Heating, ERH)、電波頻率 Radio Frequency/ Electromagnetic Heating、熱傳導加熱 In Situ Thermal Desorption using thermal conduction) 等機制，將熱導入受污染土壤中，促使土壤或地下水溫度提升，從而提高污染物之揮發、汽化、脫附與溶解等，增強有機污染物的移動性，並配合適當之抽氣設備及後端處理設備抽除釋出或脫附的污染物，並進行尾氣處理。

本研究採行現地電熱輔助土壤氣體抽除工法，利用熱傳導加熱機制，將熱導入受污染土壤中，促使土壤或地下水溫度提升，從而提高污染物之揮發、汽化、脫附與溶解等作用，增強有機污染物的移動性，結合土壤氣體抽除系統促進殘留污染物移除，以期短期展現污染整治成效。



第二章 研究目的

2.1 目的說明

現地熱脫附處理技術為土壤整治技術之一種，係利用熱源加熱之方式藉由熱傳導作用加熱現地污染土壤，以提升有機污染物之蒸氣壓加速揮發速率，或經由共沸作用機制來移除水中污染成分，使吸附於土壤中或溶解於地下水中之有機污染物更容易揮發成氣態，並配合土壤氣體抽除後再予以分離處理。基本上此技術屬於物理分離機制，包含 2 個主要處理程序：第一為加熱單元，使用不同熱源提供方式藉由熱傳導(Conduction)、熱對流(Convection)、熱輻射(Radiation)與介質本身熱擴散(Thermal Diffusivity)等作用，間接加熱待處理之介質，使介質中有機污染物揮發成氣態；另一單元為氣狀污染物收集處理單元，可使用土壤氣體抽除系統或雙相抽除系統，收集揮發之土壤氣體後，進行分離與尾氣處理。

本研究開發現地電熱輔助土壤抽氣之整治系統，係以污染物熱脫附機制、土壤氣體抽除法與空氣注入法之原理為基礎，整合 3 種整治工法之功能於一體，應用於含氯有機物污染場址之土壤與地下水整治，以期在短時間內能移除土壤與地下水殘留的污染物。現地加熱井提供熱源，以熱傳導的方式提升模場試驗區內土壤溫度，增進土壤污染物的熱脫附機制，同時土壤升溫提升土壤污染物揮發性，地下水升溫增加地下水污染物溶解度。設置溫度監測井監測模場試驗區內土壤與地下水溫度，若地下水溫度夠高足以產生汽化現象，可進一步促進土壤污染物之蒸氣吹除作用。土壤氣體抽除井建立模場試驗區內未飽和層真空負壓流場，污染物可透過物理機制持續揮發，而具有較高的移動性，因此藉由土壤氣體流場傳輸進入抽氣井內，隨收集之土壤氣體移除。設置曝氣井增加地下水污染物注氣吹除的作用，同時藉由土壤氣體抽除方式移除地下水污染物。

本模場試驗區規劃設置加熱井 3 口，加熱井間距約 1.5 m，預估土壤升溫溫度可達 45~90℃。同時搭配 7 口抽氣井與 1 口曝氣井構成一熱脫附改善井場。藉由模場試驗操作比對土壤氣體抽除與電熱輔助土壤氣體抽除的效率，評估電熱輔助系統之操作成本，並驗證現地電熱輔助土壤抽氣整治系統的效能。同時降低模場試驗場址之污染物濃度，來達到污染整治的目的，以提供未來應用於同類型污染場址整治之案例參考。



2.2 預期目標

本研究開發現地電熱輔助土壤抽氣之整治系統，並建立熱脫附改善井場，以模場試驗測試電熱輔助系統應用於現地整治的操作條件。模場試驗前利用薄膜界面探測系統(MIP)調查，建立模場試驗區之污染場址概念模型；模場試驗操作後再次利用 MIP 調查，釐清模場試驗區之污染分布現況，並驗證現地電熱輔助土壤抽氣整治系統之操作成效。本計畫預期目標包括：

1. 完成電熱輔助土壤氣體抽除系統之開發。
2. 於模場試驗場址建置熱脫附改善井場，及彙整現場操作監控數據。
3. 建立現地電熱系統之溫控影響半徑。
4. 比較未加熱與電熱輔助土壤氣體抽除系統之污染移除效能。
5. 改善模場試驗場址內土壤三氯乙烯污染情況。
6. 驗證電熱輔助土壤氣體抽除系統應用於污染場址真實環境的技術可行性。



第三章文獻探討

3.1 含氯有機污染物特性與傳輸宿命

自 2000 年土壤及地下水污染整治法公布施行以來，環保署針對台灣高污染潛勢區域陸續展開加油站、廢棄工廠、含氯運作工廠、軍事營區、民航站、農地等處土壤及地下水污染調查作業，目前公告列管的污染場址有 3,934 處，主要為 3,399 處農地場址，其它 535 處列管場址中有 161 處場址與含氯有機物污染有關。國內使用含氯有機溶劑工廠遍及各類業別，如金屬製品、塑膠製品、化學製品、化學材料、電子及光學製品、機械設備…，在各類污染物中含氯有機溶劑屬重質非水相液體(Dense Non-Aqueous Phase Liquid，簡稱 DNAPL)，洩漏造成的污染問題最為棘手。為掌控高污染潛勢業別，行政院環境保護署於民國 97 年起首次針對全國含氯溶劑之運作中工廠展開調查。國內使用含氯溶劑工廠遍及各類業別，含氯有機溶劑致癌風險性高，污染洩漏後其移動分佈深受複雜的水文地質變化所影響，其污染流佈迥異於重金屬或油品類污染。

含氯有機污染物進入地下環境的途徑，包括廢棄物直接棄置於地面上(如原 RCA 桃園廠)、儲存或棄置於未加襯砌的蒸發池(如台氯頭份廠)、儲槽或管線之持續漏源或意外洩漏等。尤其早期尚未制訂廢溶劑管理或回收再利用之相關法令，加諸事業機構對含氯有機污染物之物化特性不甚明瞭，直接棄置或任由蒸發乃屬工廠運作常態，因此老舊工廠或無適當處置設施之工廠，含氯有機溶劑之污染潛勢普遍存在。因此在管理含氯污染場址時，應針對場址污染調查及評估工作有完整之概念，方可有效管理含氯污染場址，督促污染行為人確實進行場址調查及整治工作。

含氯有機溶劑之廣泛定義為含有氯之取代基及特性或者是被發展來作為溶劑使用之有機化合物，狹義包括含氯之芳香族化合物及含氯脂肪族化合物。最常見之用法已經將含氯有機溶劑當作是含氯脂肪族化合物(Henry et al., 2002)。工業常用的含氯有機溶劑基本都具備以下數種特質，符合溶劑使用上的限制條件：(1)蒸氣密度高；(2)與要處理之物件不起反應；(3)不可燃；(4)化性安定；(5)蒸氣壓高；(6)沸點低；(7)潛熱低；與(8)溶解力高。



電阻加熱輔助土壤氣體抽除系統整治土壤三氯乙烯污染之模場試驗

表 3.1 常見含氯有機物於 25°C 下的物理及化學特性參數

化合物	分子量	蒸氣壓 (P°) (torr)	溶解度 (S) (mg/L)	亨利常數 (H) (atm- m ³ /mol)	相對 蒸氣 密度	沸點 (°C)
Dichloromethane	84.9	415	20000	0.00212	2.05	41
Chloroform	119.4	194	8000	0.00358	1.80	62
Bromodichloromethane	163.8	64.2	4500	0.0206	1.39	90
Dibromochloromethane	208.3	17	4000	0.00115	1.14	119
Trichlorofluoromethane	137.4	796	1100	0.0888	4.91	23.8
Carbon tetrachloride	153.8	109	825	0.0298	1.62	76.7
1,1-dichloroethane	99	221	5100	0.00543	1.70	57.3
1,2-dichloroethane	99	82.1	8500	0.0015	1.26	83.5
1,1,1-trichloroethane	133.4	124.6	1300	0.0167	1.59	
1,1,2-trichloroethane	133.4	24.4	4400	0.00108	1.12	113.7
1,1,2,2-tetrachloroethane	167.9	6.36	2900	0.000459	1.04	146.4
1,1-dichloroethylene	97	603	3350	0.0255	2.86	31.9
Cis-1,2-dichloroethylene	97	205	3500	0.00374	1.63	60
Trans-1,2-dichloroethylene	97	315	6300	0.00916	1.97	48
Trichloroethylene (TCE)	131.5	75	1100	0.00937	1.35	86.7
Tetrachloroethylene (PCE)	165.8	18.9	200	0.0174	1.12	121.4
1,2-dichloropropane	113	52.3	2800	0.00262	1.20	96.8
Trans-1,3-dichloropropane	110	34	2800	0.0013	1.10	112
Bis(chloro)methylether	115	30	22000	0.00021	1.09	104
Bis(2-chloro)methylether	143	1.11	10200	0.00013	1.004	178
Bis(2-chloroisopropyl)ether	171	0.73	1700	0.00011	1.003	189
2-chloroethylvinylether	106.6	34.3	15000	0.00025	1.010	108
Chlorobenzene	112.6	11.7	500	0.00390	1.04	132
o-dichlorobenzene	147	1.39	140	0.00198	1.01	179
m-dichlorobenzene	147	2.25	119	0.00325	1.01	172

參考資料：R.D. Morrison, B. L. Murphy and R. E. Doherty, *Chlorinated Solvents.*, in Environmental Forensics. Contaminant Specific Guide, ed. R.D. Morrison, and B. L. Murphy, Elsevier Academic Press, 2006.



以下針對目前我國常用的數種含氯有機溶劑進行說明。

1. 含氯有機溶劑基本物化特性

含氯類溶劑在 20 世紀中期開始於全世界廣泛且大量地被製造及使用，其用途包括乾洗、金屬表面處理之清洗劑、製造藥劑、製造殺蟲劑及化學中間物等，常見的含氯類溶劑且列為「地下水污染管制標準」之污染物有：1,1-二氯乙烷(1,1-Dichloroethane)、1,2-二氯乙烷(1,2-Dichloroethane)、1,1-二氯乙烯(1,1-Dichloroethylene)、順-1,2-二氯乙烯(cis-1,2-Dichloroethylene)、反-1,2-二氯乙烯(trans-1,2-Dichloroethylene)、三氯乙烯(Trichloroethylene)、四氯乙烯(Tetrachloroethylene)、四氯化碳(Carbon tetrachloride)等，常見之含氯有機溶劑基本物理及化學特性如表 3.1 所示。

2. 含氯有機溶劑宿命傳輸

含氯有機物，大部分密度範圍在 $1,100\sim 1,600\text{ kg/m}^3$ ，黏度範圍在 $0.57\sim 1.0\text{ cp}$ 間，其微溶於水，但因位密度大、黏滯性低等之特性，使得它們在地表下的移動性佳，能夠穿過連水都不能穿過之孔隙，所以可以從土壤表層一直往下移動至不透水層，這也使得整治工作更加困難(Palmer and Johnson, 1989)。

當 DNAPL 從污染源釋放出而流到地下後，宿命與傳輸方式將根據物化特性及水文地質而有所差異。推測當污染發生洩漏，污染物將依土壤質地與通透特性，移動至不飽和之通氣層(vadoze zone)，於此土壤孔隙同時存在少量水分及空氣或其他氣體，且因 DNAPL 本身的特性以及重力，故於通氣層中 DNAPL 可能存在數種型態—揮發成蒸氣相、溶解相、吸附在土壤有機碳上成吸附相、殘留於通過的路徑成殘留相及不斷往下或左右流動之移動相(Henry et al., 2002)。

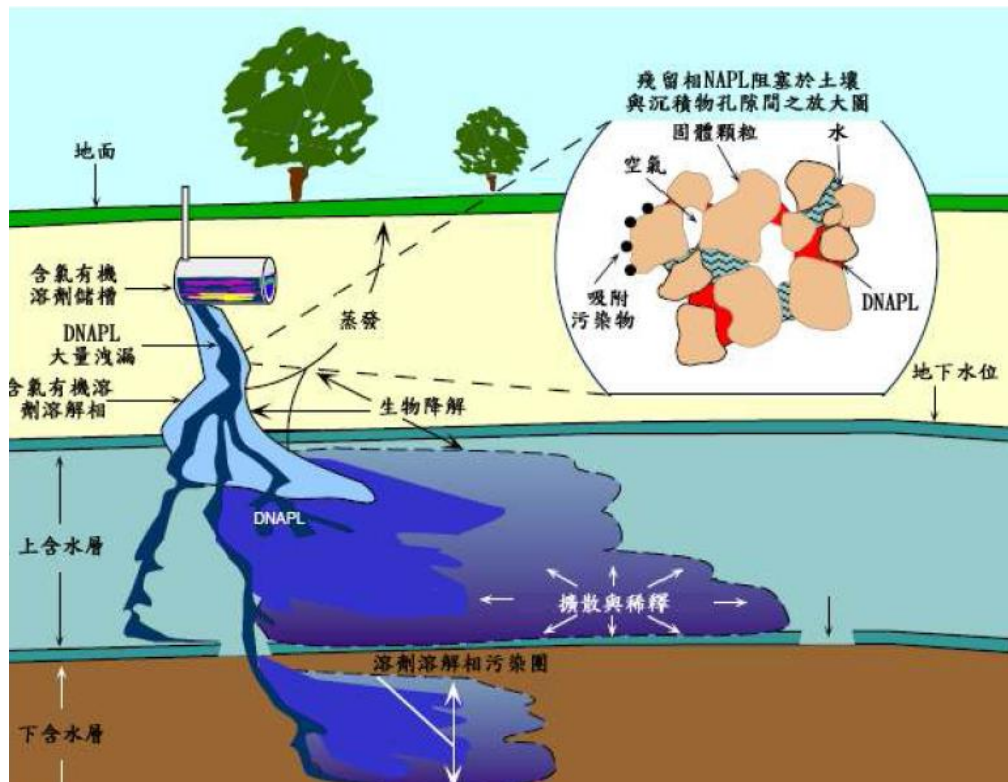
當 DNAPL 穿過毛細層及地下水位，進入含水飽和層後，主要以溶解相、移動相及殘留相存在此層當中，進而往下移動至不透水層才停止或變慢(Palmer and Johnson, 1989)。DNAPL 在移動過程中，可能附著在不飽和層中的土壤孔隙及裂縫，形成殘留相；再者遇到不同直徑的顆粒大小土壤層時，則選擇最小阻力的路徑移動；土壤有機碳含量高，提高污染物吸附效果等等因素，這將增加辨識 DNAPL 的傳輸與流佈困難。

假使在不斷移動過程中碰到顆粒較細小之土壤(例如黏土)，就可能因為無法穿過這些細顆粒的土壤而堆積，就會堆積變成重非水相液體團(DNAPL pool)，或者另外尋找黏土層周圍較好通過的通道繼續往下移動，形成污染團後慢慢溶解至地下水。但是本來連續的 DNAPL 在土壤孔隙移動過程中會被阻擋而變成不連續狀殘留態，DNAPL 是可以穿過水無法穿過的土壤間隙，



電阻加熱輔助土壤氣體抽除系統整治土壤三氯乙烯污染之模場試驗

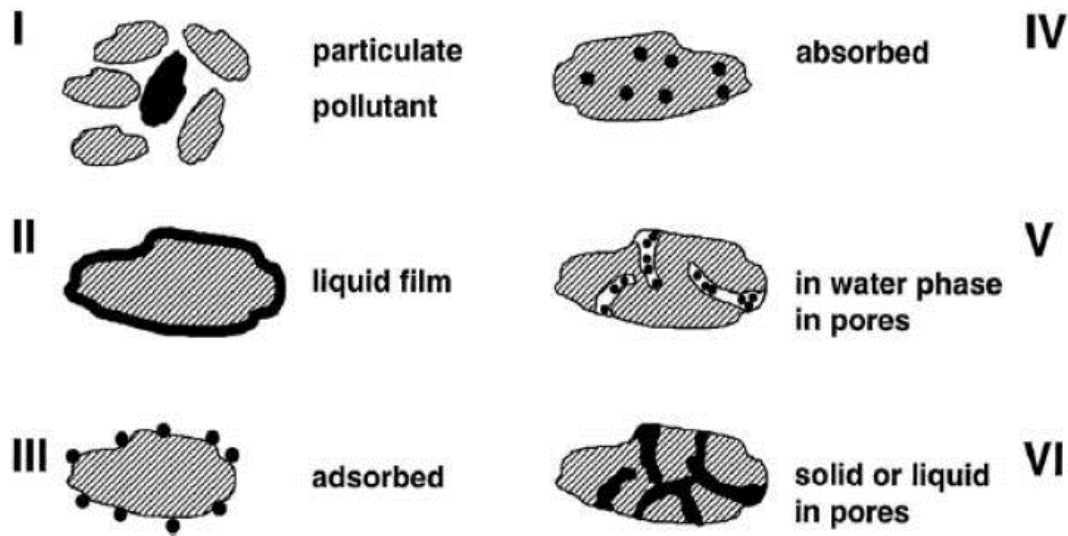
所以一旦有殘留相產生，它就不容易被水帶著走，所以殘留相又稱為不可移動相(陳，1997)。而且因為它不易被水帶走加上溶解速度緩慢，所以常常成為土壤地下水的持久性污染源，圖 3.1 為 DNAPL 污染土壤地下水之圖解機制。



資料來源：USEPA，1999。

圖 3.1 DNAPL 洩漏至土壤及地下水傳輸

有機物在土壤有許多不同型態，而其中有一型態為土壤吸附，因本研究目的主要是提升 DNAPL 現場調查方式與辨識污染濃度成效，因此瞭解其吸附機制對於本研究極為重要。所謂吸附(adsorption)作用指化合物與固相物質間的結合，依二者間作用力的大小及形式，吸附的機制可以分為化學性吸附與物理性吸附。化學性吸附 (chemisorption)為吸附質分子與吸附劑產生化學反應後，藉由原子共用電子形成吸聚力強的化學鍵結，如共價鍵(covalent bond)。離子鍵指帶電荷的吸附質與吸附劑間(正、負離子)藉由靜電引力吸附而產生的鍵結，如吸附質為金屬離子時，因為土壤顆粒所攜帶的負電荷吸引帶正電荷的金屬離子，如圖 3.2 所示。



備註：I：固體顆粒；II：液態膜；III：吸附在土壤上；IV：吸附進入土壤裡；V：在土壤大孔隙中的水相；VI：在土壤大孔隙中的固體或液體。(Source: Paria, 2008)

圖 3.2 在土壤中有機污染物不同的物理形式

污染物的分佈行為必須同時考慮土壤、污染物與土壤中之液體(如地下水)特性與三者間交互作用。土壤主要會影響污染物行為為土壤有機質含量，因污染物會被其吸附。而污染物的特性則定考慮其水溶解度大小及解離與否。另外土壤中之液體的特性，包括 pH 值、導電度等皆可能會改變土壤特性或污染物特性影響分佈行為。三者交互作用達到動態平衡後，會以固定之比例分佈於土壤有機碳上及土壤之液體中，在此可以以分佈係數(distribution coefficient)來表示之：

$$K_p = C_s / C_w$$

K_p ：污染物在兩相間的分佈係數 (kg/L)

C_s ：污染物在土壤濃度 (mg/Kg)

C_w ：污染物在溶液中濃度 (mg/L)

而因考慮到土壤中有機質是有機污染物最主要吸附位置，故可進一步將式子表示如下：

$$K_p = K_{oc} \times f_{oc}$$

K_{oc} ：污染物在土壤有機碳與水溶液間的分佈係數 (Kg/L)

f_{oc} ：土壤中有機碳之體積分率



3.2 土壤與地下水污染物整治技術概述

參考環保署「土壤及地下水污染調查與整治技術優先發展項目篩選與試驗計畫」統計 100 至 103 年資料，評析國內場址調查及整治技術，彙整國內 70 處污染控制場址採用之現地污染整治技術，土壤污染以化學氧化(ISCO)、土壤氣體抽除(SVE)為常用之整治工法(圖 3.3)；地下水污染者則以化學氧化還原、水力控制、現地生物整治及土壤氣體抽除結合空氣注入(AS/SVE)為常用之整治工法(圖 3.4)。彙整國內 23 處污染整治場址採用之現地污染整治技術，以化學氧化、AS/SVE 及水力控制為最普遍採用之整治工法(圖 3.5)，且大多數整治場址在採取化學氧化工法、多相抽除工法或水力控制時，會併同搭配 AS/SVE 工法，以加速完成污染改善工作。

過往國內土壤整治工法多採用離地處理技術或翻堆稀釋方式，至於現地土壤整治技術之應用相對較少，且發展亦較為欠缺，多以成熟的化學氧化、土壤氣體抽除及固化(如地質改良)等物化整治技術作為現地土壤整治的對策。以土壤屬於自然資源的概念考量，土壤離地處理技術顯然非屬於永續性的整治工法。相對應於重金屬污染，國內土壤與地下水污染物以油品與含氯有機物居多，近年已有部分使用現地物化整治技術之污染場址，因殘存高碳數油品污染物或揮發性較低的有機污染物，導致污染改善成效不彰或整治失敗。因此，針對高碳數油品污染物或揮發性較低的有機污染物，有發展或導入適用整治技術之實質需求。



圖3.3 控制場址土壤污染整治技術應用分佈圖



第三章文獻探討

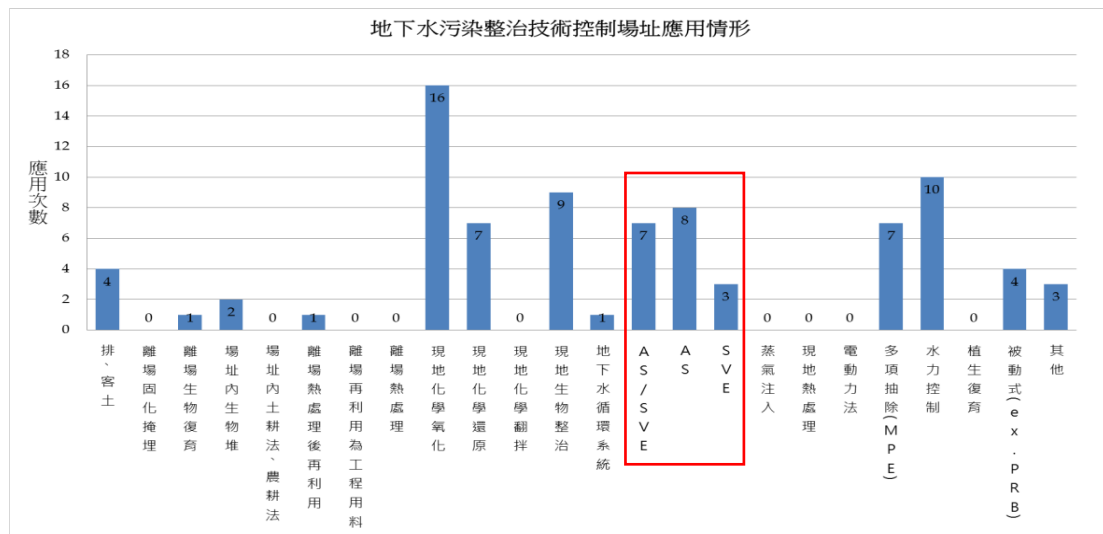


圖3.4 控制場址地下水污染整治技術應用分佈圖

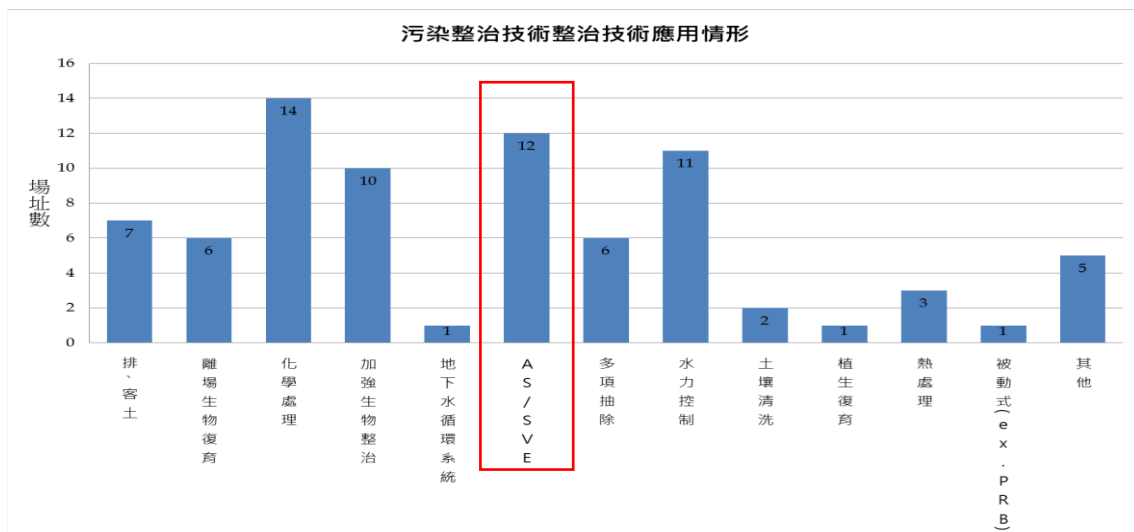


圖3.5 整治場址污染整治技術應用分佈圖

針對含氯有機物整治技術之選用，參考美國環保署 2007 年超級基金 DNAPL 整治場址採行整治技術之統計(表 3.2)，土壤整治技術以土壤氣體抽除法之應用最為普遍，焚化法與加熱脫附法之場址應用居次；地下水整治技術則以採用注氣法與生物整治法之場址案例居多。

電阻加熱輔助土壤氣體抽除系統整治土壤三氯乙烯污染之模場試驗

表 3.2 含氯有機物土壤及地下水污染整治技術採用案例數量統計

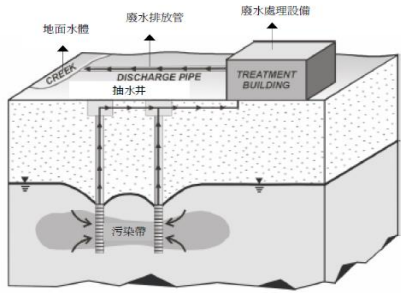
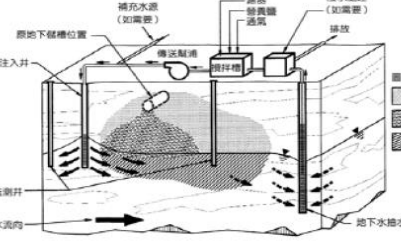
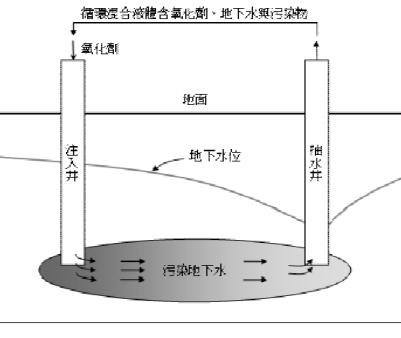
污染物種類 整治技術		揮發性 鹵化物	其他半揮發 性鹵化物	多環芳香族碳 氫化物(PAH)	多氯聯 苯(PCB)
土 壤 (污 染 源) 整 治	土壤間隙蒸氣抽除法	217	33	15	1
	焚化法	52	34	27	36
	加熱脫附法	33	12	21	16
	固化穩定化法	20	7	17	35
	生物整治法	22	17	37	2
	電分離法	18	8	9	1
	化學處理法	12	4	1	4
	沖洗法	11	3	3	0
	現地熱處理	8	3	5	0
	機械式土壤氧化法	7	1	0	0
	植物整治法	4	1	1	0
	熔融法	3	1	0	2
	溶劑萃取法	2	0	2	2
	多相萃取法	1	0	0	0
	中和法	0	0	2	0
	物理分離法	0	0	4	4
	土壤清洗法	0	0	1	1
	合計	410	124	145	104
地 下 水 整 治	地下水注氣法	53	5	5	7
	生物整治法	40	7	20	12
	化學處理法	25	9	3	3
	多相萃取法	16	7	6	0
	透水性反應牆	11	0	1	0
	植物整治法	11	3	1	2
	合計	156	31	36	24

註：1982 年至 2005 年間美國超級基金污染場址之資料。



常見之 DNAPL 整治技術概述及說明彙整於表 3.3，包括地下水抽出處理、地下水注氣、現生物復育、現地化學氧化、界面活性劑/共溶劑沖排、地下水循環井、開挖及圍堵技術、現地透水性反應牆、電動力整治技術、奈米科技處理、植生復育與監測式自然衰減法等。

表 3.3 常見之 DNAPL 土壤與地下水污染現地整治技術說明

整治技術	原理說明
地下水抽出處理法 (pump & treat) 	地下水抽出處理法係藉由抽水井或抽水渠(drain)等抽除系統，將受污染地下水抽除至地表進行處理，抽除系統於操作過程會形成一個捕捉區(capture zone)，可將經過捕捉區之受污染地下水進行抽除。可配合 SVE、AS 及蒸氣注入等方式，同時處理含水層及不飽荷層土壤中之 DNAPL 污染物。
現地生物復育(in-situ bioremediation) 	生物整治工法是經由人工添加植入或自然發生的過程中，以微生物污染物降解或轉移成較低毒性或無毒性的型態，藉此降低或排除整治污染物之濃度，完成整治作業，但本法需人工添加或植入營養源之生物性整治作業，具有成本低、整治時效長之特性。
現地化學氧化法 (In situ chemical oxidation, ISCO) 	現地化學氧化／還原法不需將污染土壤挖除或將污染地下水抽除，而是在污染區域（污染帶）中設置不同深度的注入井，再利用泵浦加壓，將化學氧化劑或還原劑透過井注入地下環境中。氧化劑與污染物混合、反應，使土壤與地下水中的污染物破壞、分解成較不具危害性的物質，理想狀況下，可轉化成二氧化碳、水與無機鹽類，但亦可能產生有毒的中間副產物。如為縮短整治期程，通常會利用一個井注入化學氧化劑，另一個井將污染地下水抽除出來，並且設置氧化劑循環再利用設備。

- 16 -

- 17 -



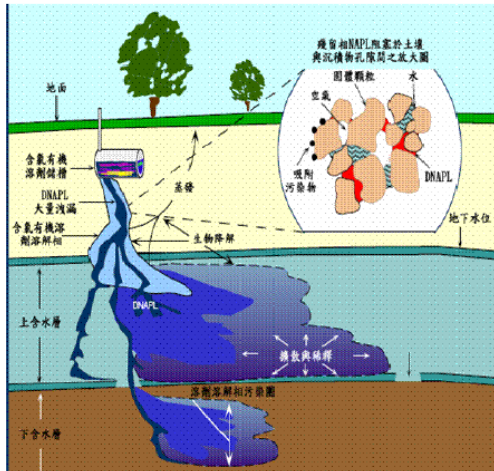
電阻加熱輔助土壤氣體抽除系統整治土壤三氯乙烯污染之模場試驗

表 3.3 常見之 DNAPL 土壤與地下水污染現地整治技術說明（續 3）

整治技術	原理說明
電動力整治技術 (electrokinetics remediation)	電動力法的原理係將正負電極置於待處理之污染場址中，使污染區域被包圍，並施加適當直流電壓或電流後，藉由陰、陽電極間生成之電場作用，驅使帶正電荷之離子被吸引到負極（陰極）；相反地，帶負電荷之離子則向正極（陽極）移動；此外，實驗證實溶解性非離子物種另可藉由電滲透流(electroosmosis flow)之傳輸，藉以引導土壤中電解質溶液之移動，進而達到去除土壤中污染物的目的。
奈米科技處理法 (nanotechnology)	在目前 DNAPL 地下水污染整治的領域中，奈米科技之主要應用，係結合原有零價鐵還原脫氯技術，藉由將零價鐵的顆粒奈米化，以強化零價鐵脫除地下水含氯有機物之能力，並增進反應速率。
植生復育法 (phytoremediation)	植物整治法係利用植物將土壤中污染物予以吸收、固定、轉化或累積，同時亦提供有利於生物整治的條件，以促進土壤中的微生物，將污染物予以降解或無害化。研究顯示，植物通常經由直接及間接的方式來移除地下環境中的污染物。一般而言，污染物進入植物組織的途徑，可以經由植物的吸附或吸收作用，達到移除部分的土壤污染物質。此外，土壤中的污染物也可經由植物的代謝過程而被轉化或礦化成低毒性或無毒性的物質。



表 3.3 常見之 DNAPL 土壤與地下水污染現地整治技術說明（續 4）

整治技術	原理說明
監測式自然衰減 (Monitored Natural Attenuation, MNA) 	依據美國環保署之自然衰減法定義：在有利的土壤及地下水環境中，無人為干預而自然發生之衰變程序，以減少或降低土壤及地下水中污染物的質量、毒性、移動性、體積或濃度，這些於現地所發生之程序包括生物分解、擴散、稀釋、吸附、揮發、污染物之化學性或生物性之穩定或破壞污染物等。污染場址在嚴謹的控制與長期成效監測下，藉由自然衰減過程進行清理之方法，且與其他積極性整治技術比較，利用監測式自然衰減法達到污染整治目標所需之整治時間仍是合理可接受的。

參照國內污染場址與美國超級基金 DNAPL 整治場址之整治經驗仍以土壤氣體抽除法為常用之整治工法，SVE 僅限於處理土壤中揮發性物質，抽出之污染氣體仍須再進一步處理，常結合空氣注入法同時可處理土壤與地下水之揮發性有機污染物，但仍限於土質較疏鬆區域，對於質地緊密之土壤處理效果不佳。SVE 處理成效受場址土壤滲透性與污染物揮發性影響，一般土壤透氣性 $k < 10^{-10} \text{ cm}^2$ 較不適用 SVE；地下水位距離地表 1 m 以內，會阻礙土壤污染物在 SVE 抽氣時之移動性，使 SVE 無法發揮正常功能；一般污染物蒸汽壓小於 0.5 mm-Hg 或污染物沸點大於 300°C 亦不適用 SVE。常見之含氯有機污染物如三氯乙烯、順-1,2-二氯乙烯及二氯甲烷（亨利常數 > 0.01 ）皆適用 SVE 處理，若透過土壤升溫將大幅增加污染物蒸汽壓，可進一步促進 SVE 移除成效，加速完成污染整治工作。



3.3 加熱輔助土壤氣體抽除技術(Thermally Enhanced SVE)

熱處理在國際間是屬於相對成熟的技術，但國內應用則相對少見，是現地土壤處理技術上的缺口之一，以國內外的技術應用所存在之落差，可視為新興技術。離地熱處理法常見離地低溫/高溫熱脫附、熱裂解，國內此類技術目前已有相對成熟的發展及實場經驗，例如旋轉窯，及應用於加油站場址之熱增強型氣體抽除技術 (Thermally Enhanced Soil Vapor Extraction, TSVE; Thermally Enhanced Vapor Extraction Technology, TEVET) 等。現地熱處理技術包括將高溫熱空氣或高溫蒸氣注入地下環境中 (Hot Air/ Steam Injection)，或利用電阻(Electrical Resistance Heating, ERH)、電波頻率(Radio Frequency/ Electromagnetic Heating)、熱傳導加熱(In Situ Thermal Desorption using thermal conduction) 等機制，將熱導入受污染土壤中，促使土壤或地下水溫度提升，從而提高污染物之揮發、汽化、脫附與溶解等，增強有機污染物的移動性，並配合適當之抽氣設備及後端處理設備抽除釋出或脫附的污染物，並進行尾氣處理，系統運作如圖 1 所示。

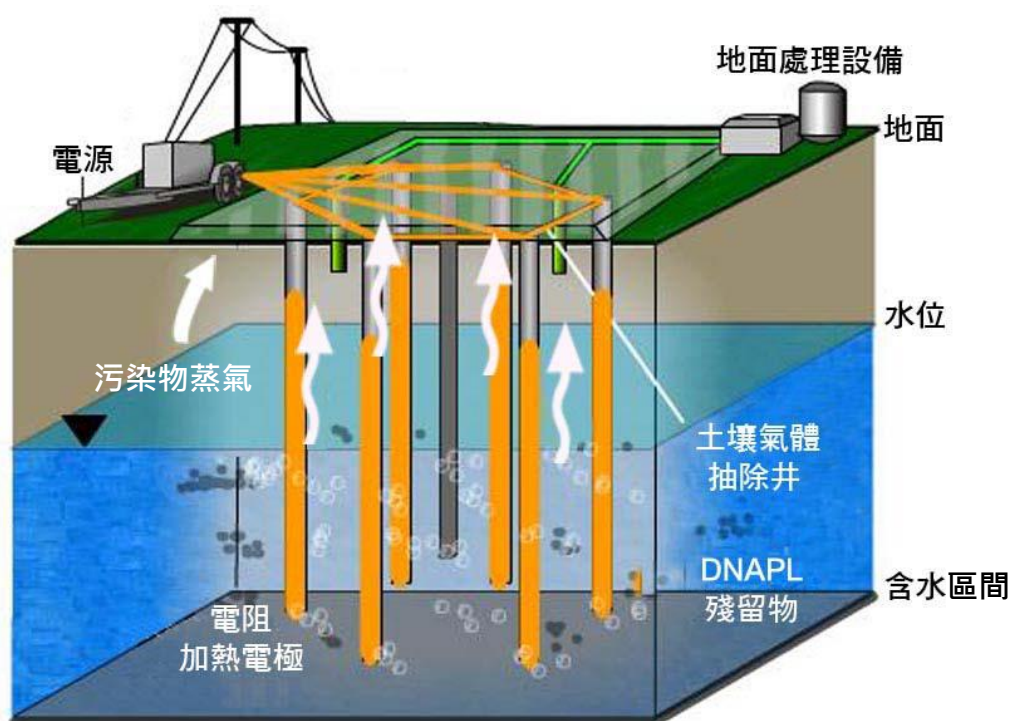


圖 3.6 加熱輔助土壤氣體抽除系統運作示意圖



表3.4國外利用加熱技術去除污染物的場址數量統計

加熱技術方式		案例數	百分比(%)
1	電阻加熱技術(Electrical Resistive Heating)	72	42.4
2	蒸氣注入技術 (Steam enhance)	52	30.6
3	熱傳導技術(Thermal Conductive Heating)	25	14.7
4	電熱法 (Thermal treatment)	10	5.9
5	射頻加熱技術(Radio Frequency Heating)	7	4.1
6	熱空氣注入法(Hot Air injection)	3	1.8
7	熱水注入法(Hot water injection)	1	0.6
合計		170	100

表3.5 常見3種現地熱處理技術特點比較

特點	熱傳導加熱 (TCH)	蒸汽注入抽提(SEE)	電阻加熱(ERH)
加熱方式	熱傳導	蒸汽注入/對流	電阻
加熱影響因素	熱導率 地下水流	土壤滲透性 注入速率	土壤電阻率 地下水流
可加熱溫度	325~400°C (脫水後)	100°C (沸點)	100°C (沸點)
含水率敏感度	乾、濕環境都可施工 高水流導致加熱困難	不敏感	乾燥條件無法施工 高水流導致加熱困難
土層敏感度	不同含水率和地下水 流速會影響加熱效率	低透水層不能被直接 加熱	電阻率不同會導致不 均勻、不完全加熱； 長電極效率可能較差
對埋藏物體 敏感度	不敏感	低滲透層會干擾蒸汽 通路	金屬物體和管道會導 致加熱不均
熱量輸入	土壤熱導率 (常見土質條件下熱 導率相差 1~3 倍)	水力滲透係數	土壤電阻率 (常見地質條件下可 相差 200 倍)
土壤注入液體	無	蒸汽	水



電阻加熱輔助土壤氣體抽除系統整治土壤三氯乙烯污染之模場試驗

現地熱處理系統的加熱方式包括電阻加熱技術、蒸汽注入抽提技術、熱傳導加熱技術、電熱法、射頻加熱技術、熱空氣注入法、熱水注入法，美國環保署統計 170 處利用加熱技術去除污染物的場址，以採用電阻加熱技術的場址數量最多，其次為蒸汽注入技術以及熱傳導加熱技術，如表 3.4 所示。電阻加熱整治技術源自於石油工業，原發展用途為回收砂與泥板岩中的原油。其應用於污染整治的作法係將電流通過飽和層土壤，以提高地下溫度，亦可高於水的沸點形成汽化，在電極間電流通路徑上的土壤加熱後，可將地下溫度提高至污染物沸點以上，使污染物變為氣態，利用氣體回收井抽除。電阻加熱整治技術除利用污染物揮發的原理，並利用現地水解、水合熱裂、生物降解原理，進行還原性脫鹵作用，將污染物降解。水解作用係以水分子的氫取代污染物分子的氯，反應過程不須處於氧化狀態或有氧的環境中才可進行。水合熱裂氧化作用須處於氧化狀態或有氧的環境中才可進行，其機制係將溶解於熱水中之大分子污染物分解成小分子。此外，在電阻加熱過程中，嗜熱菌會被活化，以更快的反應速率降解含氯有機物。在現地土壤升溫過程，DNAPL 相與水相間表面張力會形成水力坡降，使得 DNAPL 相污染物更易於移動，因此需設置抽除井與廢水處理等二次污染防制措施。

蒸汽注入抽提技術係利用蒸汽注入的方式，使含水層溫度提高，促進有機污染物揮發，並藉由蒸氣的吹提作用移除污染物。蒸汽注入抽提技術所需的設備包括蒸汽產生設備、蒸汽儲留裝置、蒸汽注入系統、尾氣收集處理系統等，系統操作過程需要導引蒸汽均勻地貫穿污染整治區域，一般設計上需考量抽氣井、注氣井、地表保溫覆蓋層等配設置。

熱傳導技術係利用熱源加熱之方式藉由熱傳導作用加熱現地污染土壤，以提升有機污染物之蒸氣壓加速揮發速率，或經由共沸作用機制來移除水中污染成分，使吸附於土壤中或溶解於地下水中之有機污染物更容易揮發成氣態，並配合土壤氣體抽除後再予以分離處理。基本上現地熱脫附處理技術屬於物理分離機制，包含 2 個主要處理程序：第一為加熱單元，使用不同熱源提供方式藉由熱傳導(Conduction)、熱對流(Convection)、熱輻射(Radiation)與介質本身熱擴散(Thermal Diffusivity)等作用，間接加熱待處理之介質，使介質中有機污染物揮發成氣態；另一單元為氣狀污染物收集處理單元，可使用土壤氣體抽除系統或雙相抽除系統，收集揮發之土壤氣體後，進行分離與尾氣處理。



針對常用 3 種現地熱處理技術特點進行比較(表 3.5)，電阻加熱技術適用於易揮發性有機物處理，可加熱最高溫度為 100°C ，受土壤含水率、地質電阻率、地下埋設物、地下水流況的影響，易導致加熱不均與不完全加熱的情況。蒸汽注入抽提技術適用於滲透性較高、可揮發性污染物的場址，可加熱最高溫度為 100°C ，受蒸汽注入速率與土壤滲透性之影響，低透水層不能被直接加熱。電阻加熱技術和蒸汽注入抽提技術皆可產生 NAPLs 與水的共沸作用，促進揮性有機物的移除。熱傳導加熱技術適用於所有低、中流速地下水條件下的 VOCs 和 SVOCs 污染場址，可加熱最高溫度為 $325\sim 400^{\circ}\text{C}$ ，受土壤熱導率和地下水流況的影響，高地下水流速會影響加熱效率。因熱傳導加熱技術可操作的溫度較高，除可產生 NAPLs 與水的共沸作用外，亦可產生汽化反應、水解反應、有機物蒸氣裂解反應、厭氧熱裂解反應等機制破壞污染物。

此類現地熱處理技術國外已發展將近 20 年，亦有許多應用案例的實績，如表 3.6 所示。現地加熱整治技術並非可以處理所有類型污染物，但已證實可有效移除重質非水相液體(DNAPL)，如三氯乙烯與四氯乙烯溶劑，以及輕質非水相液體(LNAPL)，如柴油與廢油品。一般加熱含水層所需的時間，快一點 1 星期，最慢 1 個月，即可完成加熱的過程，但降溫過程可能達到 1 年。現地加熱技術或可快速使含水層升溫，但含水層不均質性可能影響污染物的傳輸，使加熱整治技術的應用更形困難，如何有效地將揮發性有機污染物抽除才是整治成功的關鍵。

表3.6 國外電阻加熱整治之應用案例

整治場址名稱	行業別	技術層次	整治進度	污染物類型	受污染環境介質	處理污染體積(立方碼)	污染深度(英尺)	水文地質概況
Carson Plaza (加州 Carson 市)	乾洗業	商業化	設置中	1,1-二氯乙烯、三氯乙烯、四氯乙烯	土壤、地下水	9,400	28	黏土與粉黏土
Drycleaners at Suburban Shopping Mall(伊利諾州)	乾洗業	商業化	完成	四氯乙烯	土壤	1,100	20	低滲透性粉黏土
Electronics Manufacturing Facility (伊利諾州芝加哥市)	電子業	商業化	完成	四氯乙烯、含鹵揮發性有機性	土壤	12,500	30	緊密性黏土
Fargo Dry Cleaners Site (南達可他州 Fargo 市)	乾洗業	商業化	—	含鹵揮發性有機性	—	—	—	—
Former Agricultural Products Facility (紐澤西州 Newark 市)	農產品	模廠	整治中	含鹵揮發性與半揮發性有機性、有機金屬殺蟲劑與除草劑、二溴乙烷	土壤、地下水	600	20	粉土與黏土
Former Consumer Products Manufacturer (伊利諾州 Waukegan)	民生用品製造	商業化	完成	二氯甲烷、含鹵揮發性有機性	土壤	15,900	18~36	冰磧土與粉土
Former Drycleaner (伊利諾州西雅圖市)	乾洗業	商業化	完成	四氯乙烯、含鹵揮發性有機性	土壤、地下水	2,300	20	中砂至細砂
Former Electronics Manufacturing Facility (伊利諾州 Skokie 市)	電子業	商業化	完成	1,1,1-三氯乙烷、1,1-二氯乙烯、三氯乙烯	土壤、地下水	34,500	24	18 英尺非均質粉砂夾雜透鏡黏土
Former Petroleum Refinery (俄亥俄州辛辛那提市)	石油煉製	模廠	完成	總石油碳氫化合物、非鹵揮發性有機性	土壤、地下水	1,800	25	3-6 英尺黏土質粉土與粉黏土，6-23 英尺中至粗砂
Former Pharmaceutical Manufacturer (ICN) (奧瑞岡州波特蘭市)	藥品製造	商業化	完成	三氯乙烯、含鹵揮發性有機性	土壤、地下水	21,500	58	非均質不連續粉砂、細粉砂與細砂夾層
George's Conoco Leaking Underground Storage Tank Site (蒙大拿州 Ronan)	加油站	模廠	完成	苯、甲苯、乙苯、二甲苯、MTBE	土壤、地下水、LNAPL	74,827	19	10 英尺內粉土及細砂，10~40 英尺黏土
Georgia Manufacturer at Manufacturing Facility (喬治亞州)	製造業	商業化	完成	煤油、總石油碳氫化合物、非鹵揮發性有機性	土壤、地下水	4,500	30	非均質砂質黏土
Silresim Superfund Site (麻州 Lowell)	廢溶劑回收	模廠	完成	三氯乙烯、BTEX、PAHs、VOC 與 SVOC 等	土壤、地下水、DNAPL	1,250	40	10 英尺內粉砂，10~40 英尺粉黏土

資料來源：美國環保署 CLU-IN 網站之現地熱處理場址資料庫(網址：<http://www.clu-in.org/products/thermal/>)



第四章研究方法與過程

4.1 模場試驗場址背景

本案模場試驗場址為金順利工業(股)公司，位於彰化縣北斗鎮，鄰近北斗工業區，相關位置如圖 4.1 所示。於 100 年 8 月 19 日彰化縣政府公告金順利工業(股)公司為土壤及地下水污染整治場址，並劃定為土壤及地下水污染管制區。土壤遭受三氯乙烯、鉻、鋅、銅及鎳污染，地下水遭受三氯乙烯污染，與金順利工業之五金零件加工製程具關聯性。土壤三氯乙烯污染濃度 110 mg/kg，污染土壤面積 226.9 m²，污染土壤深度 0~3 m；地下水污染物濃度三氯乙烯 101 mg/L、順-1,2-二氯乙烯 7.01 mg/L 及二氯甲烷 1,310 mg/L，受污染含水層面積 1,024,621 m²，受污染含水層厚度達 12.3 m。



圖 4.1 模場試驗場址位置圖



電阻加熱輔助土壤氣體抽除系統整治土壤三氯乙烯污染之模場試驗

4.1.1 場址水文地質資料

(一) 場址地質

本場址在地表下 8 公尺內地質多以細砂地質為主（土壤導電度約為 25 至 50mS/m）；地表至地表下 1 至 3 公尺不等深度以中粗砂為主（土壤導電度小於 25 mS/m），偶夾粉黏土質薄夾層；在地表下 6 至 8 公尺存在一層厚度約為 1 至 2 公尺粉黏土層。利用 MIP-EC 測值研判地層分布，接續粉黏土層依序為厚度均為 1 公尺之細砂層及粉黏土層，而此黏土層無延伸至場址東側外圍。

(二) 地下水流向

本場址分別於 101 年 9 月及 10 月，針對 13 口場址監測井，進行水位量測顯示本場址地下水位介於地表下 2.7 至 1.5 公尺間，約為海平面上 36.06 公尺至 37.16 公尺。依本場址量測之地下水位進行流向模擬，本場址地下水流向為由南向北或南向西北方向流動，如圖 4.2 所示。

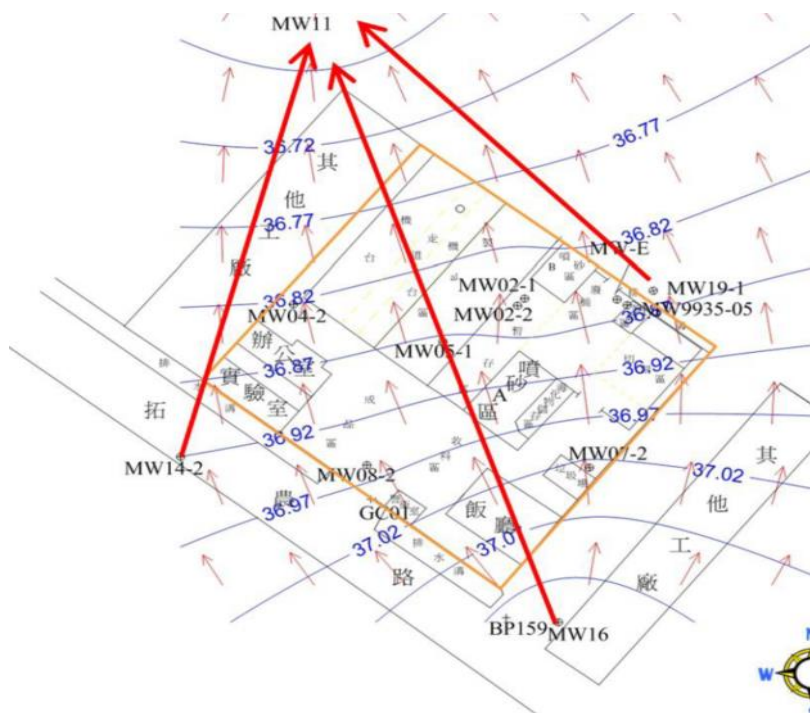


圖 4.2 模場試驗場址地下水水位及流向圖(101 年 10 月)



4.1.2 場址污染現況

於 103 年 1 月 20 日金順利工業(股)公司啟動地下水污染緊急應變計畫書，於 104 年 3 月 31 日彰化縣環保局核定土壤及地下水污染整治計畫，採用整治工法先針對高濃度區域進行 DNAPL 相回收，於高濃度污染區域整治設置淺、中層注藥井進行生物整治，於場址周界設置抽水井進行水力控制作業，場址外污染整治亦以注藥進行生物整治。

於 102 年場址污染評估調查作業，以薄膜界面探測儀系統搭配電子捕捉偵測器(MIP-ECD)探測 20 點位，並以各調查點位之 ECD 訊號套疊於廠區平面配置圖，呈現本場址高濃度污染分布範圍於圖 4.3。MIP-ECD 調查結果顯示本場址高污染潛勢區位於場址東側，主要為製程生產區、廢空桶儲存區及廢空桶清洗區等區域，與五金零件加工製程之運作行為符合。

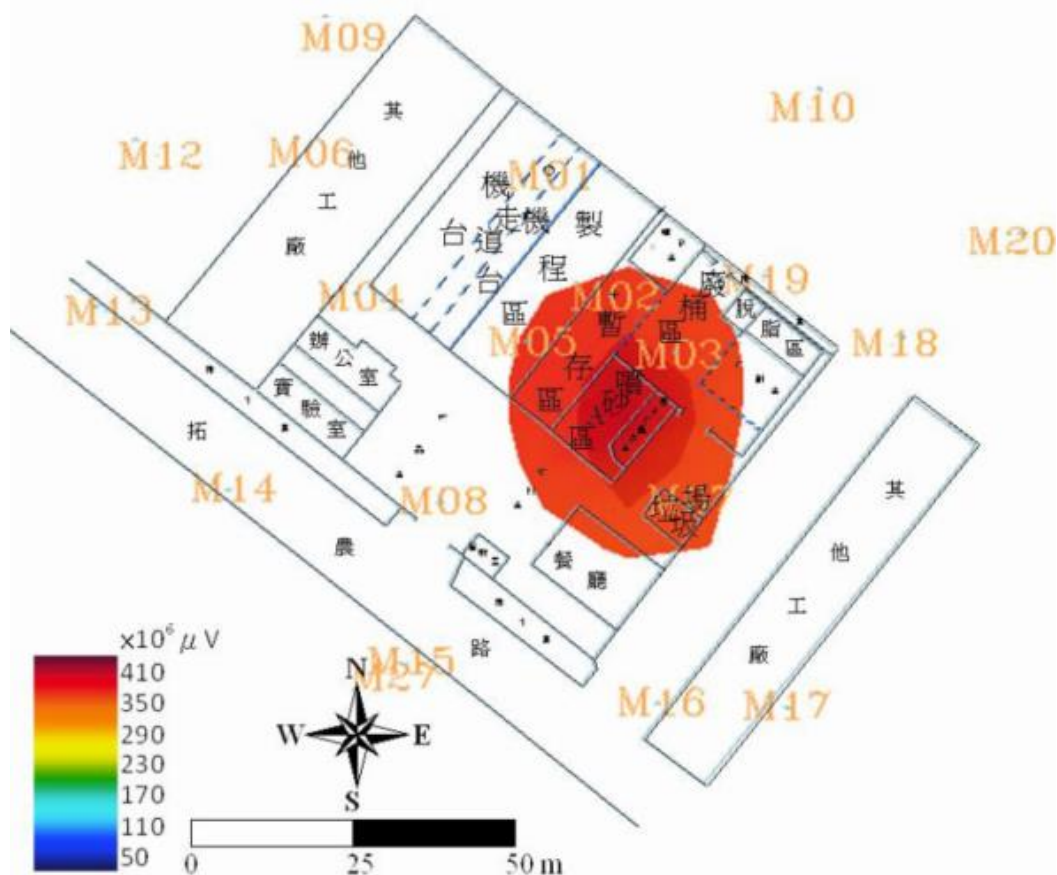


圖 4.3 模場試驗場址 MIP-ECD 調查結果之污染分布圖(102 年)



電阻加熱輔助土壤氣體抽除系統整治土壤三氯乙烯污染之模場試驗

本場址於高濃度污染區域整治設置淺、中層注藥井進行生物整治，經持續灌注乳化型釋氮基質，累計注入 1,246.29 噸，監測井 pH 值維持在 6.73~7.00，ORP 介於 -118.8~297.5 mV，營造適合微生物還原脫氯的環境。歷年地下水三氯乙烯濃度變化呈現下降趨勢，108 年地下水三氯乙烯最高濃度仍有 0.2 mg/L，如圖 4.4 所示。108 年 MIP 調查結果顯示，污染潛勢主要集中於地表下 3.0~4.0 m 深度，原高污染潛勢濃度降低，下游相對為高污染潛勢位置。DP 注入可能導致吸附污染物之細顆粒向下游及向地表方向搬遷，因此造成污染物下游污染潛勢增加，污染物向上移動的結果。

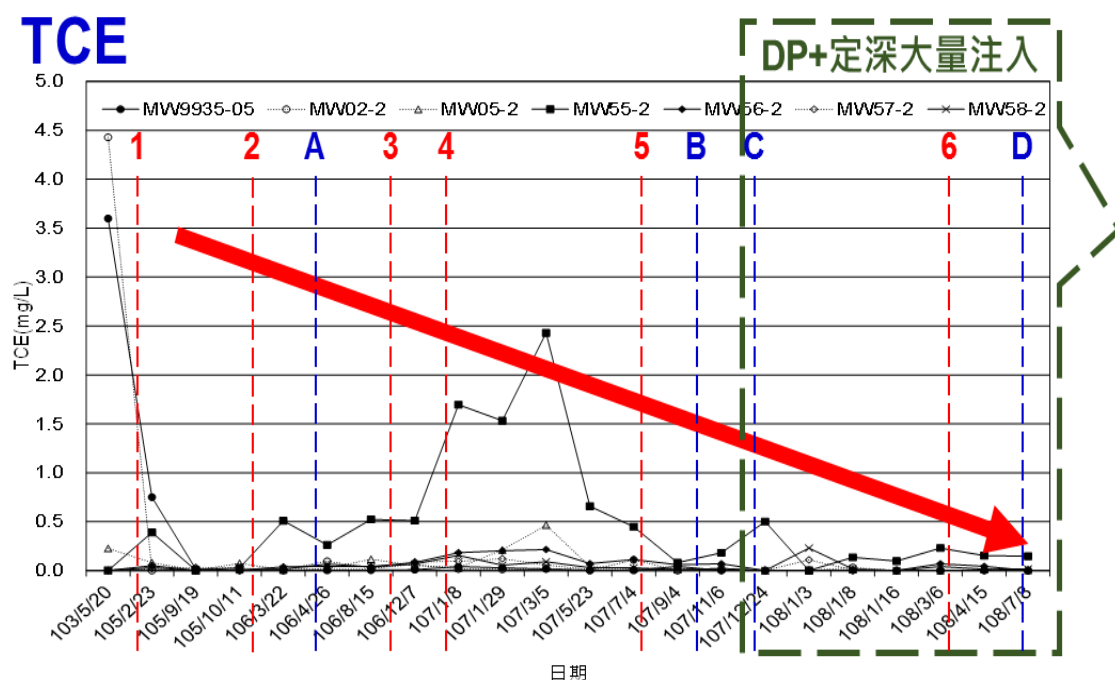


圖 4.4 模場試驗場址歷年地下水三氯乙烯濃度變化

因應本場址污染分布的現況，選用電熱輔助土壤氣體抽除工法進行現地模場試驗，因模場試驗之整治工法與本場址執行之現地生物整治工法不同，為避免影響微生物之生長，及維持生物整治之還原脫氯環境，電熱輔助土壤氣體抽除系統之模場試驗區域選定在原高濃度污染區域下游，目前為生物整治後之高污染潛勢位置。



4.2 研究方法

國內外污染場址選用污染整治工法仍以土壤氣體抽除法最普遍，常結合空氣注入法同時可處理土壤與地下水之揮發性有機污染物，但仍限於土質較疏鬆之場址。本場址地質屬於以細砂地質為主，適合採行土壤氣體抽除結合空氣注入法進行污染整治，但在地表下 6 至 8 公尺存在一層厚度約 1 至 2 公尺粉黏土層，因此以現地電熱輔助土壤氣體抽除系統加熱現地污染土壤，提升有機污染物之蒸氣壓加速揮發速率，或經由共沸作用機制來移除水中污染成分，使吸附於土壤中或溶解於地下水中之有機污染物更容易脫附揮發成氣態，並配合土壤氣體抽除後再予以分離處理，以期加速完成污染改善。

本模場試驗依執行步驟，包括試驗模場污染概念模型建置、現地電熱系統開發、溫度監控與模場設施配置、溫升模場試驗、加熱土壤氣體抽除試驗、成效驗證評估等執行項目，具體之執行架構流程如圖 4.5 所示。

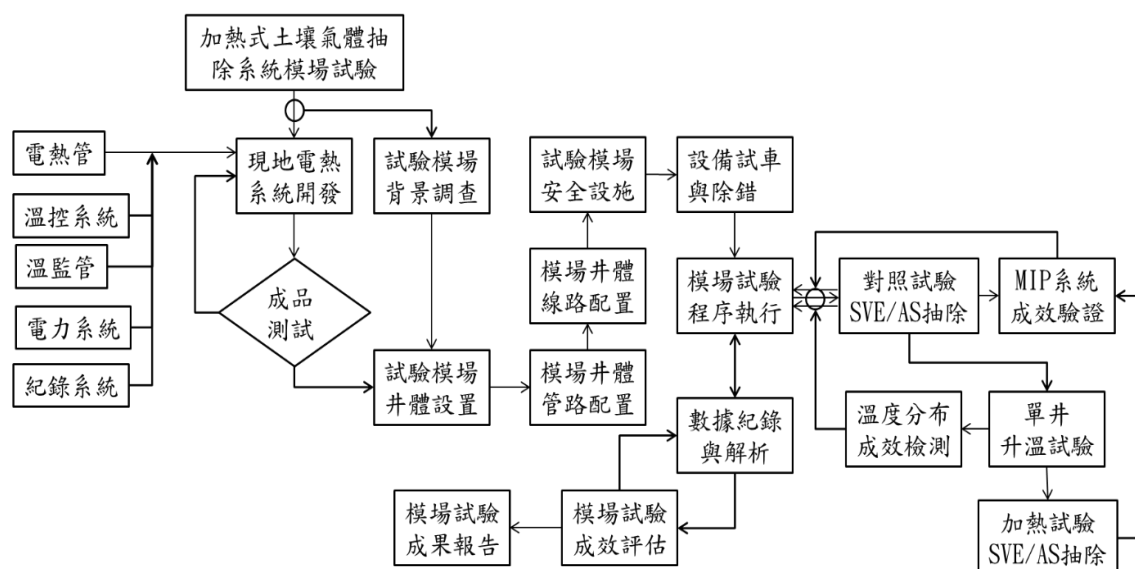


圖 4.5 本研究架構流程圖

4.2.1 試驗模場污染概念模型建置

電熱輔助土壤氣體抽除系統之模場試驗區域選定在場址南側，原高濃度污染區域之下游，於 107 年 3 月鄰近試驗區 M15 採樣點土壤三氯乙烯濃度 1.13 mg/kg。模場試驗區域污染分布規劃薄膜介面探測(Membrane Interface



電阻加熱輔助土壤氣體抽除系統整治土壤三氯乙烯污染之模場試驗

Probe, MIP) 調查，搭配 XSD (Halogen Specific Detector) 偵測器分析土壤含氯有機物的污染分布，利用電導度 (EC) 偵測器分類土壤質地層狀分布。結合多點 MIP 探測結果，得以建立模場試驗區域之 3D 場址污染概念模型。

薄膜介面探測系統乃利用掛載之可透氣及難滲水功能之薄膜與雙極式導電度感測器，現地即時偵測地下環境中非飽和層及飽和含水層中之揮發性有機化合物 (VOCs) 與半揮發有機化合物 (SVOCs) 及導電度。將 MIP 探測針直接以垂擊或下壓貫入方式驅入至地表下，並藉由 MIP 溫控系統加熱控制加熱片溫度於攝氏 100 至 120 度間，使探針薄膜片週圍之土壤中揮發性（或半揮發性）有機化合物受熱脫附後氣體揮發滲透而進入薄膜內。利用循環攜行之高純度氮氣載氣，以每分鐘 35 至 45 毫升之流量傳輸至偵測器進行揮發性有機化合物總量分析。直徑 6.35 毫米可透氣及難滲水之高分子鐵氟龍 (Teflon) 薄膜以及加熱器部分稱之為採樣模組。後段地面上偵測部分則稱為分析模組，如火焰離子偵測器 (Flame Ionization Detector, FID) 或光離子偵測器 (Photoionization Detector, PID) 可偵測油品類污染物，如苯、甲苯、乙苯、二甲苯等輕質難溶於水相之液體。而搭配電子補集偵測器 (Electron Capture Detector, ECD) 可偵測含鹵素的有機化合物，如多氯聯苯、殺蟲劑等環境污染物。MIP 系統設備配件組成，如圖 4.6 所示。

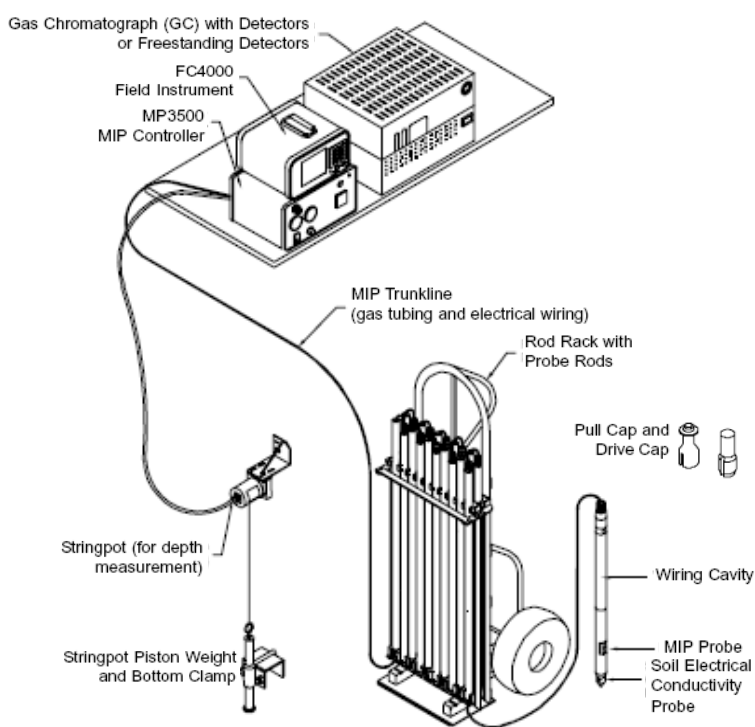


圖 4.6 薄膜介面探測系統設備配件組成圖



4.2.2 現地電熱系統開發

現地電熱系統設備包括電源供應器、電熱棒裝置、加溫控器、溫度感測器等，共設置3組電熱棒裝置，其規劃設計圖示如圖 4.7 所示。透過現地電熱系統操作電熱棒升溫溫度可達 300°C ，可升溫模場試驗區土壤達 $45\sim 90^{\circ}\text{C}$ ，有效提升土壤吸附含氯有機物之蒸汽壓，達到現地熱脫附的效果。距離現地加熱井約 0.5 m、1 m、1.5 m 處位置，設置3處溫度觀測井，其規劃設計圖示如圖 4.8 所示。溫度觀測井內垂直深度配置多點次溫度監測管，以瞭解模場試驗區土壤升溫的效果。

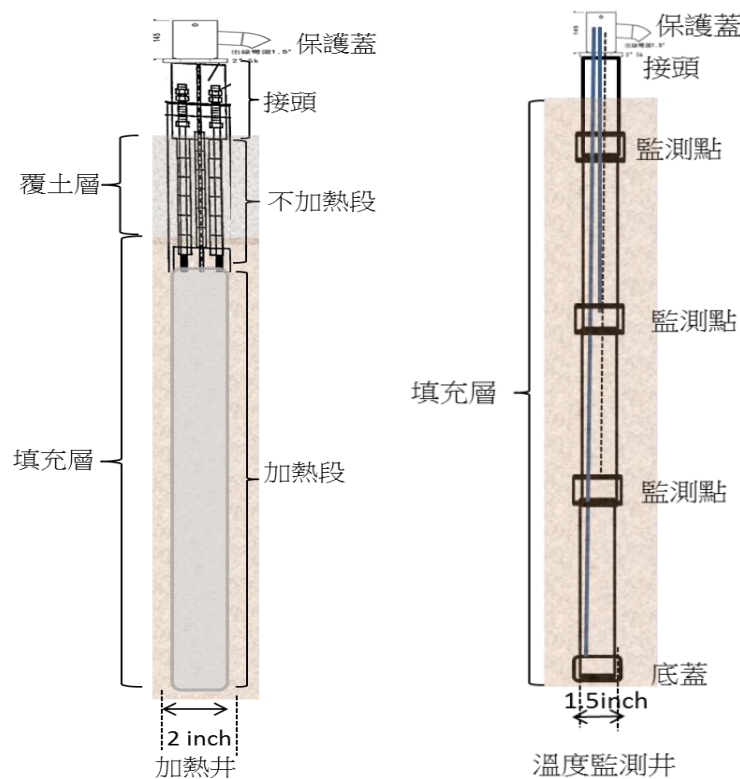


圖 4.7 現地加熱井規劃設計圖示 圖 4.8 溫度監測井規劃設計圖示

4.2.3 模場設施配置

本模場試驗規劃以電熱輔助土壤氣體抽除系統整治土壤三氯乙烯污染，採行之整治工法與本場址目前執行之現地生物整治工法不同，為避免影響微生物之生長，及維持生物整治之還原脫氯環境，模場設置範圍如圖 4.9 所示，選定在原高濃度污染區域下游，目前為生物整治後之高污染潛勢位置。



電阻加熱輔助土壤氣體抽除系統整治土壤三氯乙烯污染之模場試驗

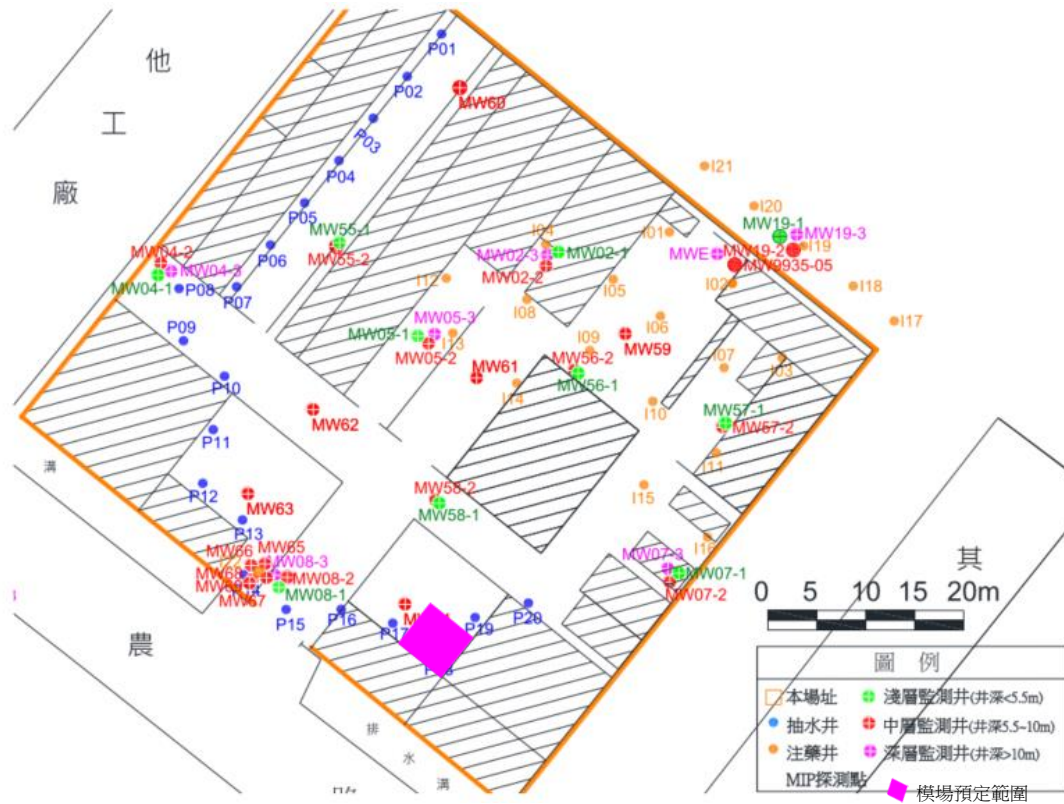


圖 4.9 場址內模場試驗區域位置圖

* 模場設置規劃

模場樣式:正六邊形

加熱井間距: 1.5 m

模場面積約: 5.84 m^2

模場體積約: 29.2 m^3

- ◎ SVE抽氣井X7口
- 加熱井X3口
- 溫度觀測井X3口
- ▼ 曝氣井X1口

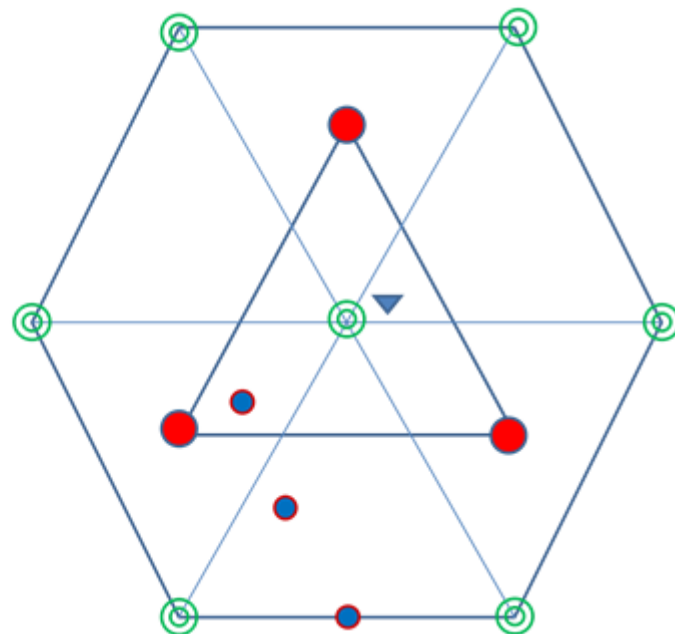


圖 4.10 模場試驗區井位配置



模場試驗區域設計為一熱脫附改善井場，可參照圖 4.10，包括設置間距約 1.5m 之加熱井 3 口，搭配 7 口抽氣井與 1 口曝氣井。抽氣井呈現正六邊形配置，包圍 3 口加熱井，避免脫附之土壤氣體逸散。曝氣井設置於正六邊形中央的抽氣井旁，以增強污染物的移除效果。於熱脫附改善井場同時配置多點次溫度監測管，設置 3 處溫度觀測井，距離加熱井約 0.5 m、1 m、1.5m 處位置，以瞭解土壤升溫的效果。

4.2.4 溫升模場試驗

升溫試驗以單井試驗進行，加熱井升溫至 350°C，持續操作約 1 個月，於升溫試驗過程中量測 3 處溫度觀測井附近土壤之升溫速率，並評估溫控之影響半徑與溫控效果。

4.2.5 加熱輔助土壤氣體抽除試驗

土壤氣體抽除試驗分為未加熱與電熱輔助之方式進行比對，分別持續操作約 1 個月，並利用以下三種方式評估成效，比較污染物脫附效能之差異：

1. 紀錄每日量測之抽出尾氣 PID 濃度，以推估污染物抽出移除量。
2. 利用 MIP 調查模場試驗區土壤污染分布情況，於模場試驗前以 MIP 調查結果建立場址污染背景；於 AS/SVE 模場試驗運作後以 MIP 調查結果，可比對 AS/SVE 整治後場址污染分布；於加熱輔助 AS/SVE 模場試驗運作後以 MIP 調查結果，可比對加熱輔助 AS/SVE 整治後場址污染分布。
3. 於未加熱與電熱輔助 AS/SVE 模場試驗運作後，自井管及 SVE 濾液採集水樣，分析地下水或抽出水 VOCs 濃度，可比對地下水污染整治成效。

4.2.6 成效驗證評估

本模場試驗預期展示電熱輔助土壤氣體抽除系統之應用案例，並於污染場址真實環境驗證此技術之可行性。結合溫度條件調控與 SVE 運轉控制，進行污染物脫附移除成效評估與成本效益評估。



4.3 執行進度

本模場試驗應用之現地加熱輔助土壤氣體抽除法，此一現地整治工法已在國外行之有年，然而整治現場作業仍存在諸多不確定因素，如含水層地質條件、地下水流況、地下水水質特性、污染物洩漏情況、污染源分布範圍等，各場址現地背景特徵互異，整治方法套用並不一定能順利如法炮製，皆有賴模場試驗一一釐清整治工法適用範圍與限制條件。一方面現地整治工法之推廣需奠基於模場試驗之成功應用，另一方面累積模場試驗的經驗對操作實務益顯重要。

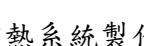
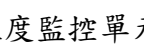
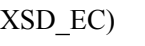
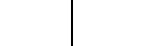
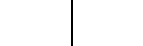
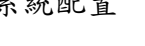
本專案模場試驗場址經金順利工業股份有限公司與裕山環境工程股份有限公司大力協助，研究目標主要為展示現地電熱輔助土壤氣體抽除系統，應用於整治含氯有機物污染場址之可行性。

本計畫執行期間自民國 109 年 1 月 30 日起至 109 年 12 月 4 日止，研究實際執行進度詳見表 4.1。本計畫自計畫核定通過後開始執行日起至第 5 個月份提交期中報告，第 10 個月份提交期末報告。於計劃期間設定 2 個查核點為期中與期末。期中報告實際執行進度已全數達成期中查核點進度要求，依進度完成現地電熱輔助土壤氣體抽除系統之開發、模場試驗場址之污染概念模型建置、建置熱脫附改善井場、土壤氣體抽除試驗與 MIP 成效驗證等工作項目。期中預定進度 45%，整體執行進度約 65%，超前進度 20%。期末報告實際執行進度已全數達成期末查核點進度要求，接續完成溫升模場試驗、加熱土壤氣體抽除試驗與 MIP 成效驗證、整治成效評析等工作項目。期末預定進度 100%，整體執行進度約 100%。



第四章研究方法

表 4.1 本研究實際執行進度及預定工作查核點

工作項目 \ 年月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
電熱系統製作(加熱單元)												
溫度監控單元製作(溫度管)												
模場背景調查(MIP_XSD_EC)												
模場污染概念模型建置												
電熱井設置												
SVE&AS 井設置												
溫度監測井設置												
試驗前置準備(電力、控制、紀錄系統、SVE/AS、場地安全)												
管路、管線、處理系統配置												
系統試車(溫升試驗、SVE)												
SVE/AS 抽除試驗(含 MIP 驗證)												
熱脫附 SVE/AS 試驗(含 MIP 驗證)												
整治成效評析												
報告撰寫												
工作進度累積百分比		10%	25%	35%	45%	55%	65%	75%	85%	95%	100%	
預定查核點	期中		完成現地電熱系統開發、完成模場污染概念模型建置、完成溫度監控與模場設施配置。									
	期末		完成土壤氣體抽除試驗、完成溫升模場試驗、完成加熱土壤氣體抽除試驗、成效評估。									

說明：  預定進度； 實際執行



第五章結果與討論

5.1 場址污染背景 MIP 調查結果

電熱輔助土壤氣體抽除系統之模場試驗區域選定在原場址高濃度污染區域下游，於 107 年 3 月鄰近試驗區 M15 採樣點土壤三氯乙烯濃度 1.13 mg/kg。模場試驗執行前，於模場試驗區域選取 7 個點位進行薄膜界面探測 (MIP) 探測，搭配 XSD 偵測器分析土壤揮發性有機物的污染分布，利用電導度 (EC) 偵測器分類土壤質地層狀分布。實際 MIP 施作的點位即是土壤抽氣井與注氣井規劃設置的位置，如圖 5.1 所示。

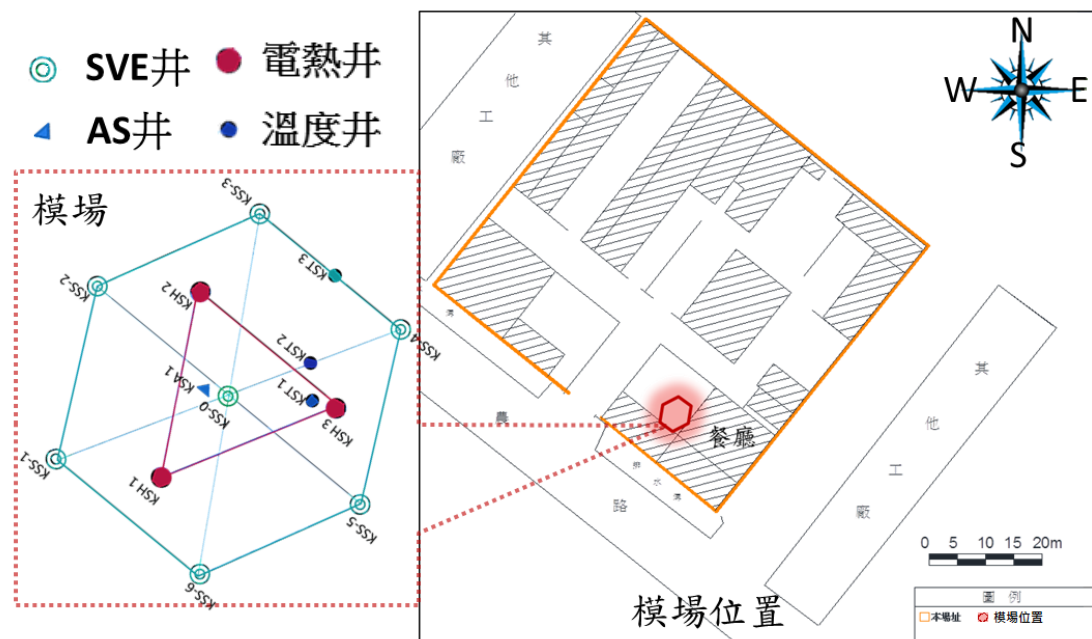


圖 5.1 試驗模場位置與 MIP 調查點位圖

108 年 3 月 10 日進場執行模場試驗場址薄膜界面探測作業，Kss_0 進尺深度 8 公尺，Kss_1 進尺深度 8 公尺，Kss_2 進尺深度 7 公尺，Kss_3 進尺深度 7 公尺，Kss_4 進尺深度 7 公尺，Kss_5 進尺深度 8 公尺，Kss_6 進尺深度 8 公尺，共計 7 點次，合計進尺深度 53 公尺。MIP 鑽探點位之垂直剖面污染物分布以 FID、PID、XSD 訊號值呈現，如圖 5.2 所示。其中，以 FID 之訊號感度較高，XSD 之訊號感度次之，PID 幾乎無訊號反應。模場試驗區污染物分布深度大致介於 4 至 7 公尺，以 6 至 7 公尺深度之污染物訊號



第五章結果與討論

較強，與場址地表下 6 至 8 公尺粉黏土層深度一致。調查點位以 Kss_2 的訊號最強，Kss_5 的訊號最弱，其他調查點位皆可測得污染物訊號。各調查點位深度之電導度趨勢變化頗接近，地表下 1 公尺呈現電導度峰值，地表下 3 公尺電導度逐步增加，至地表下 7 公尺呈現電導度高原值，僅地表下 1 至 3 公尺呈現電導度低值，反應場址地表下 1 至 3 公尺不等深度之中粗砂質地的特徵。

結合多點 MIP 剖面探測結果，得以建立模場試驗區域之 3D 場址污染概念模型，以此方式將圖 5.2 調查點位之剖面訊號轉繪於圖 5.3 試驗模場之污染物三維空間分布圖。其中灰色是表示推估之土壤質地，淺灰到深灰為砂土(粗顆粒)漸進至粉黏土(細顆粒)；藍、綠、紅則代表污染物訊號反應，依序分別是低濃度、中濃度及高濃度，在 4 公尺、5 公尺及 6 到 7 公尺均有污染物訊號反應。污染濃度最高的點位以 KSS-2 為中心，在 5 至 6 公尺深度有較明顯的污染團塊。而依據溫度變化推測地下水位則約落在 3.2m 深，圖 5.4 為 MIP 探測之 3D 場址污染概念模型與點位訊號判視之疊圖。



電阻加熱輔助土壤氣體抽除系統整治土壤三氯乙烯污染之模場試驗

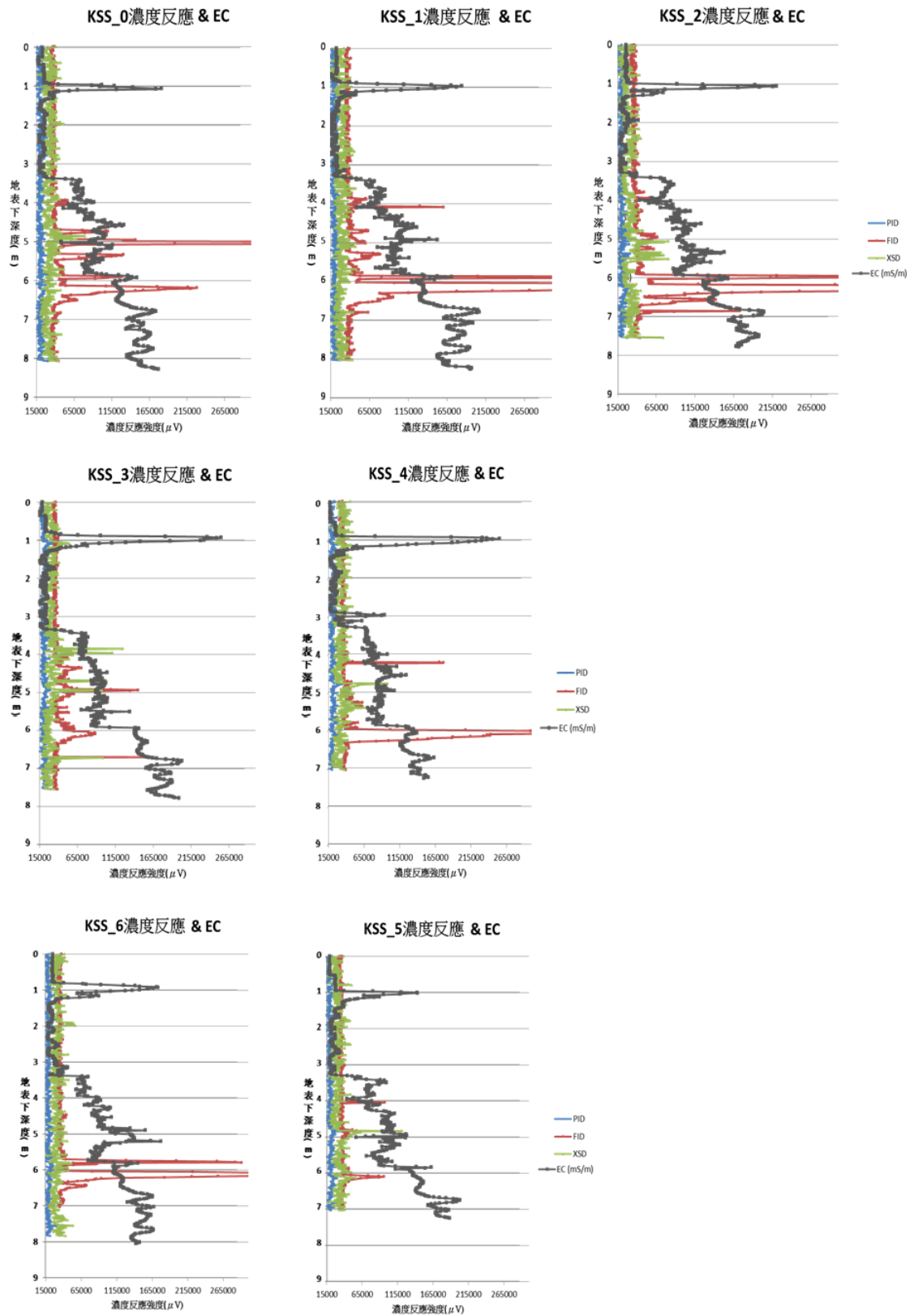


圖 5.2 各調查點位 MIP 探測剖面訊號反應強度



含氯污染分布

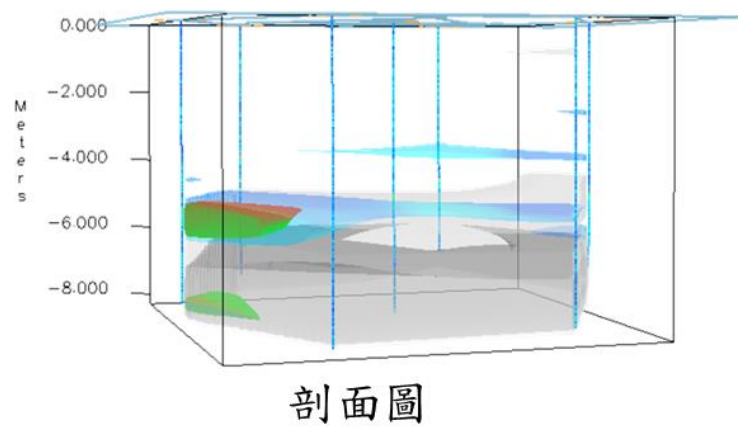
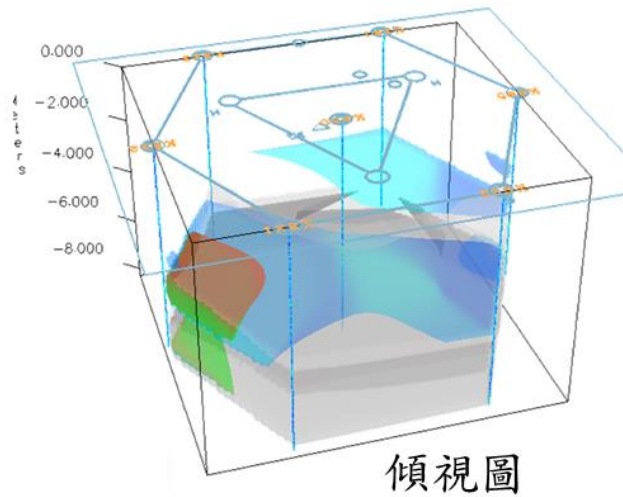
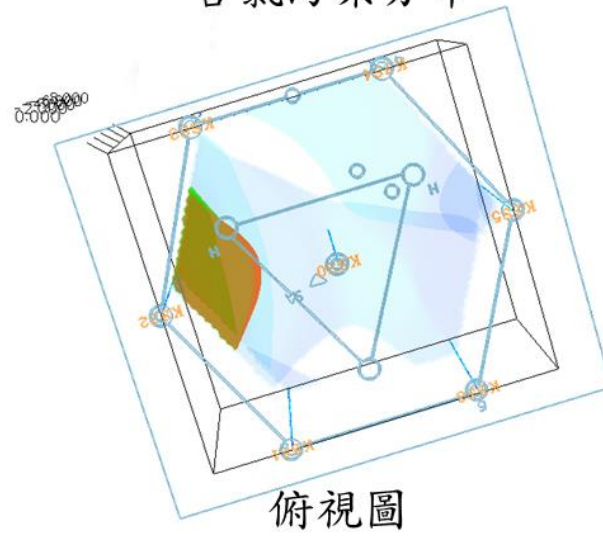


圖 5.3 MIP 探測結果繪製之 3D 場址污染概念模型



電阻加熱輔助土壤氣體抽除系統整治土壤三氯乙烯污染之模場試驗

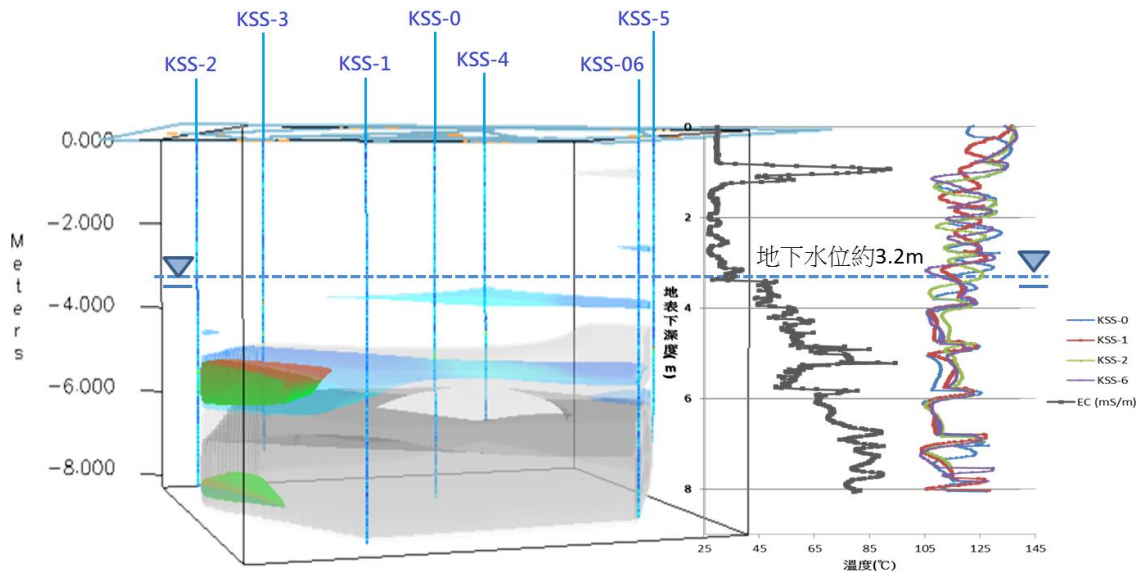


圖 5.4 MIP 探測之 3D 場址污染概念模型與點位訊號判視之疊圖

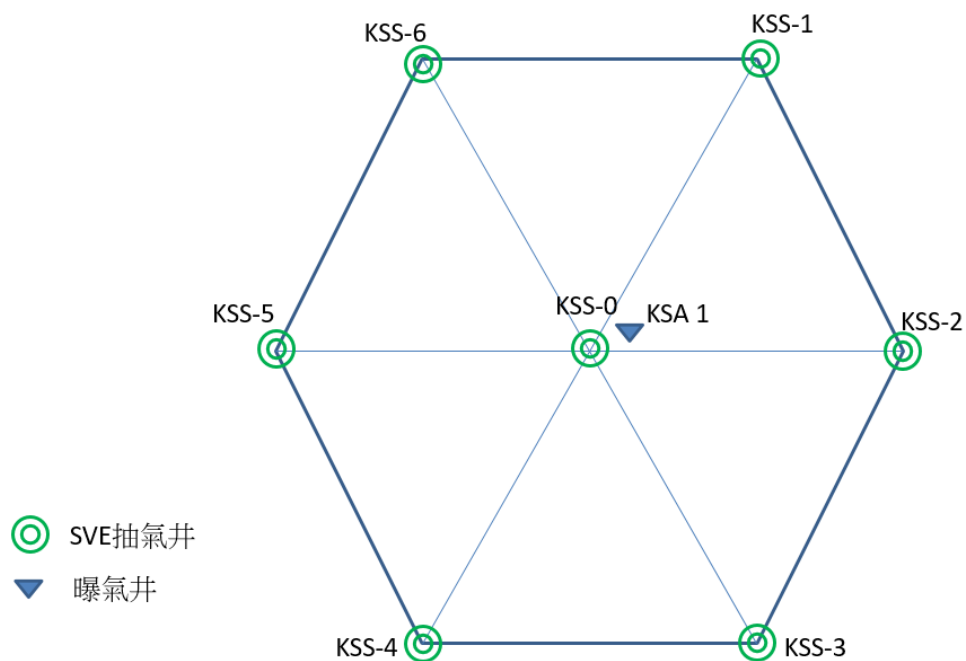


圖 5.5 AS/SVE 改善井場配置圖



5.2 AS/SVE 模場試驗

現地電熱系統設備製造階段，於模場試驗區設置 7 口 SVE 抽氣井與 1 口 AS 注氣井，建立 AS/SVE 改善井場。SVE 抽氣井呈現正六邊形配置，正六邊形中央各設 1 口 SVE 抽氣井與 1 口 AS 注氣井，其相關位置如圖 5.5 所示。SVE 抽氣井井徑為 2 英吋，設井深度為 6.0 m，開篩長度 4.5 m；AS 注氣井井徑為 1 英吋，設井深度為 8.0 m，開篩長度 1.0 m，於 109 年 3 月 31 日完成 AS/SVE 改善井場設置。

5.2.1 AS/SVE 改善井場設置過程

AS/SVE 改善井場設置工項包括 SVE 抽氣井與 AS 注氣井設井作業、設施與管路配置安裝作業、系統試運轉及驗收作業。設井作業包括試挖、鑽孔、設置井管、回填濾料、完井等工項，現場工程施作照片整理於表 5.1。SVE 抽氣井與 AS 注氣井構造剖面表層皆有 0.2m RC 鋪面，其中 SVE 抽氣井井管長度為 6.0 m，由地表至 1.5 m 為一般井管，1.5 至 6.0 m 則為 4.5 m 長篩管，開篩段填充石英砂，其餘則填充泥土；AS 注氣井管長達 8.0 m，0 到 7.0 m 皆為一般井管，7.0 至 8.0 m 則篩管，於開篩段填充石英砂，其餘則填充泥土。

表 5.1 SVE 抽氣井與 AS 注氣井設井作業過程

設井	放置井管
濾料填充(石英砂)	暫時性皂土封



電阻加熱輔助土壤氣體抽除系統整治土壤三氯乙烯污染之模場試驗

管路配置作業連接抽氣設備配管至每 1 口 SVE 抽氣井管，管線為 PVC 材質，每口 SVE 抽氣井皆裝設真空壓力錶及流量計，並設開關調控抽氣流量。SVE 抽氣設備有定時器開關，可調控 SVE 抽氣設備運轉的時間；並裝設氣液分離桶，尾氣接管至活性炭槽排放，相關作業照片彙整於表 5.2。AS/SVE 改善井場系統試運轉及驗收作業，相關作業照片彙整於表 5.3。

表 5.2 抽注氣設施與管路配置安裝作業過程

	
配管連接移動式 SVE 裝置	壓力表與流量計裝配完成
	
配管連接 AS 設備	設定定時運轉裝置
	
活性炭裝填(25KG)	完成尾氣處理設備



表 5.3 AS/SVE 改善井場系統試運轉情形

	
AS/SVE 系統	流量計判讀
	
壓力表判視	檢視尾氣排放口

5.2.2 AS/SVE 模場試驗操作紀錄

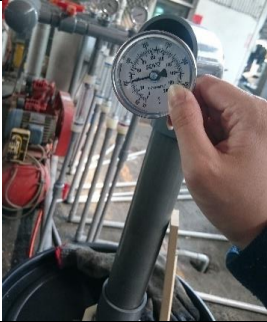
於 109 年 4 月 10 日啟動 AS/SVE 模場試驗，SVE 抽氣設備系統設定每日上午六時開始運作至下午十時結束，運作方式為運轉半小時停機半小時，運作時數相當於每日操作 8 小時。AS/SVE 模場試驗過程，每日以 PID 量測 SVE 系統抽出氣體與活性碳處理後尾氣之 VOCs 濃度。每週記錄 SVE 系統運轉時 SVE 抽氣井之抽氣流量、壓力與溫度，以監控 SVE 系統之正常運作。依據每日量測 SVE 系統抽出氣體 PID 測值與每週量測 SVE 抽氣井之抽氣流量，來估算 SVE 系統抽出氣體之污染物移除量，做為評估 AS/SVE 模場試驗之整治成效指標。AS/SVE 模場試驗與定期監測過程，相關作業照片彙整於表 5.4。

AS/SVE 模場試驗於 109 年 4 月 29 日運轉結束，於 SVE 抽氣井採集地下水樣品送實驗室分析 VOCs 濃度，以評估模場試驗區的污染情況。SVE 抽氣井地下水採集作業，相關作業照片彙整於表 5.5。



電阻加熱輔助土壤氣體抽除系統整治土壤三氯乙烯污染之模場試驗

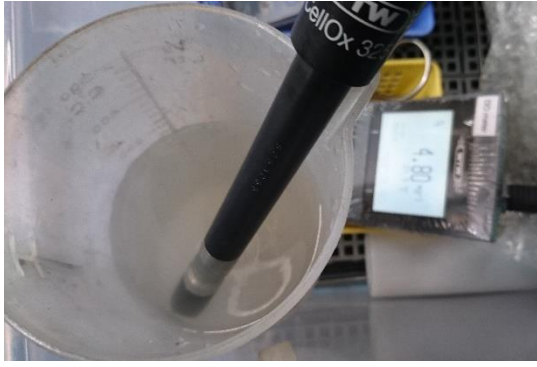
表 5.4 AS/SVE 模場試驗與定期監測過程

	
場內室溫	SVE 裝置溫度
	
抽氣溫度	尾氣溫度
	
壓力	流量
	
抽氣(PID)	尾氣(PID)



第五章結果與討論

表 5.5 SVE 抽氣井地下水採集作業過程

	
量測水位	截取適當長度之軟管
	
以低流速洗井	以樣品瓶裝取水樣
	
取水量測溶氧	洗滌電極
	
樣品以夾鏈袋封裝	裝盒冷藏寄送



5.2.3 AS/SVE 模場試驗成果

AS/SVE 模場試驗成果依試驗過程之量測紀錄彙整，分別說明模場試驗運作期間 AS/SVE 改善井場之抽氣流量、抽氣 VOCs 濃度、尾氣處理效率、估算污染物移除量、地下水污染濃度。

(一) 抽氣流量紀錄

SVE 抽氣設備系統設定每日上午六時開始運作至下午十時結束，運作方式為運轉半小時停機半小時，運作時數相當於每日操作 8 小時。受限於模場位置緊鄰場內員工餐廳及宿舍，為降低影響場內員工生活之噪音，晚間十點到早上六點停止 SVE 抽氣系統運作，並以低速運轉的方式抽氣。因各口 SVE 井之抽氣流量低至流量計刻度以下，流量判讀時以關閉其他井來量測單井運作的抽氣流量，再以各井判讀抽氣流量的平均值做為 SVE 抽氣系統之總抽氣流量。AS/SVE 模場試驗過程，每週記錄 SVE 系統運轉時各口 SVE 抽氣井之判讀流量，記錄於圖 5.6。每週記錄之抽氣流量有些許差異，平均總抽氣流量介於 410~480 L/min；多數抽氣井的抽氣流量前 2 週抽氣流量較大，後 2 週抽氣流量略小，可能有土壤孔隙因抽氣而略有阻塞的趨勢，但仍不影響各 SVE 井的抽氣效果。

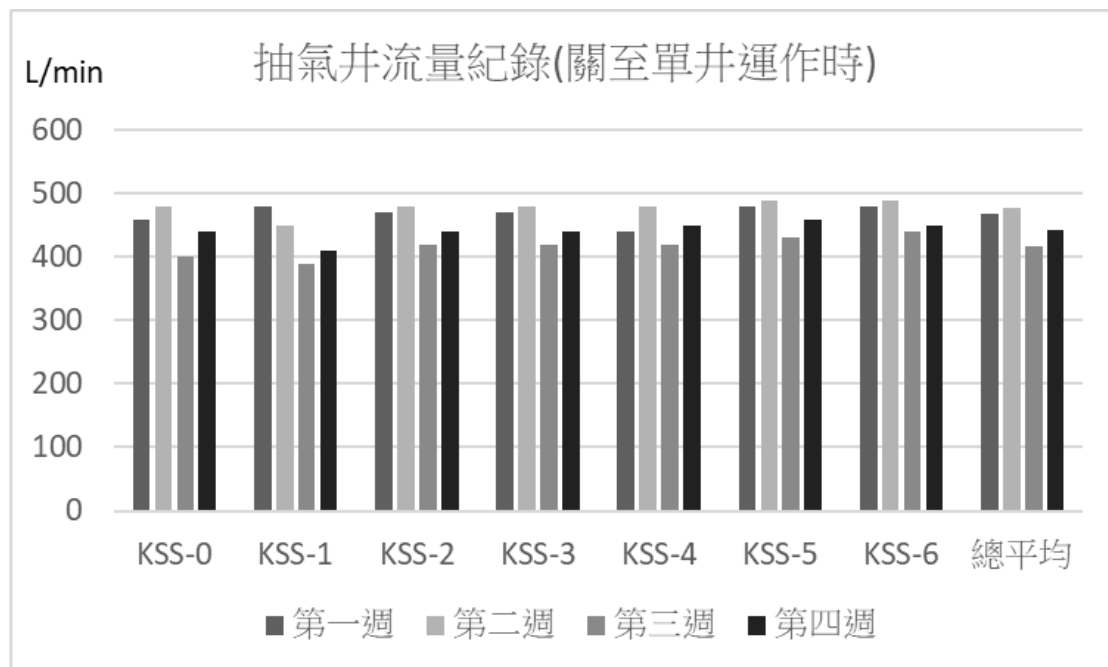


圖 5.6 抽氣井之總流量紀錄之週平均圖



(二)抽氣 VOCs 濃度

AS/SVE 模場試驗過程，每日以 PID 量測 SVE 系統抽出氣體與活性碳處理後尾氣之 VOCs 濃度，每日量測之 PID 測值逐日變化記錄於圖 5.7。AS/SVE 模場試驗啟動時抽氣 PID 初始測值為 16.5 ppm，隨後 SVE 系統抽出氣體 PID 測值落在 6.3~9.6 ppm 之間上下浮動。

為避免整治過程造成二次污染問題，抽出氣體先流經污染防制設施再排放至大氣中，本模場試驗使用簡易之活性碳桶作為二次污染防制裝置。AS/SVE 模場試驗啟動時，活性碳桶裝填 25 kg 活性碳呈現半滿狀態，排放尾氣的 PID 測值僅 0.7 ppm，遠低於抽氣濃度。AS/SVE 模場試驗過程，隨後排放尾氣的 PID 測值上升至 4.4~8.5 ppm，與 SVE 系統抽出氣體 PID 測值接近，顯示二次污染防制處理成效不佳。推測可能原因為活性碳裝填高度不足，使氣體流通路徑太短，或活性碳裝填量不足而快速達到吸附飽和，因此於 4 月 22 日添購新的活性碳 50 kg 重新裝填，以汰換原填充於桶內之活性碳，直到 AS/SVE 模場試驗結束之尾氣 PID 測值皆為 0.0~0.1 ppm，如圖 5.7 所示。

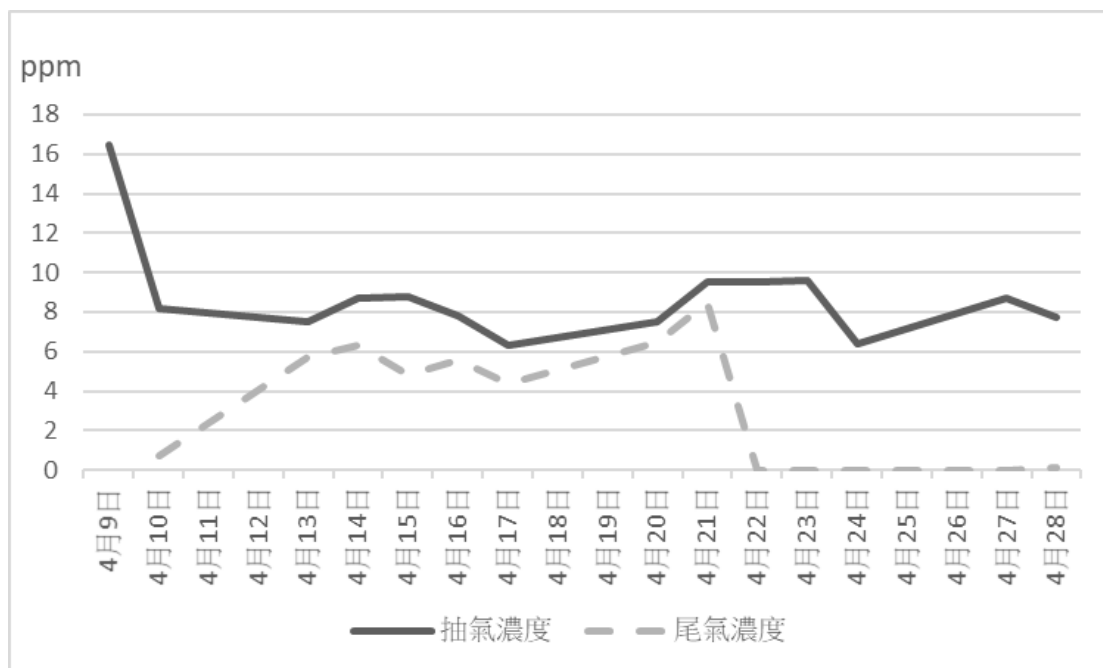


圖 5.7 SVE 系統抽氣及尾氣 PID 測值逐日變化圖



電阻加熱輔助土壤氣體抽除系統整治土壤三氯乙烯污染之模場試驗

(三)尾氣處理效率

AS/SVE 模場試驗使用簡易之活性炭桶作為二次污染防制裝置，由於活性炭吸附量有其上限，因此 AS/SVE 模場試驗過程須瞭解 SVE 系統操作之尾氣處理效率，以確認活性炭是否達吸附飽和。污染防制設備處理效率係指空氣污染物經污染防制設備處理後之排放量削減百分比，依同步檢測污染防制設備前端及後端廢氣濃度及排放量進行計算，其計算公式如下：

$$\text{處理效率} = (E - E_0) / E \times 100\%$$

E：經集氣系統進入污染防制設備前之空氣污染物單位排放量。

E₀：經污染防制設備後逕排入大氣之空氣污染物單位排放量。

AS/SVE 模場試驗過程，以每日量測 SVE 系統抽出氣體與活性炭處理後尾氣之 PID 測值，帶入上列公式計算，並將尾氣處理效率計算結果繪製於圖 5.8。AS/SVE 模場試驗啟動時，尾氣處理效率達 91%；隨後尾氣處理效率隨時間逐漸降低，直到 4 月 22 日重新裝填 50 kg 活性炭後，尾氣處理效率立即彈升至 100%，顯示定期更換活性炭是必要的。

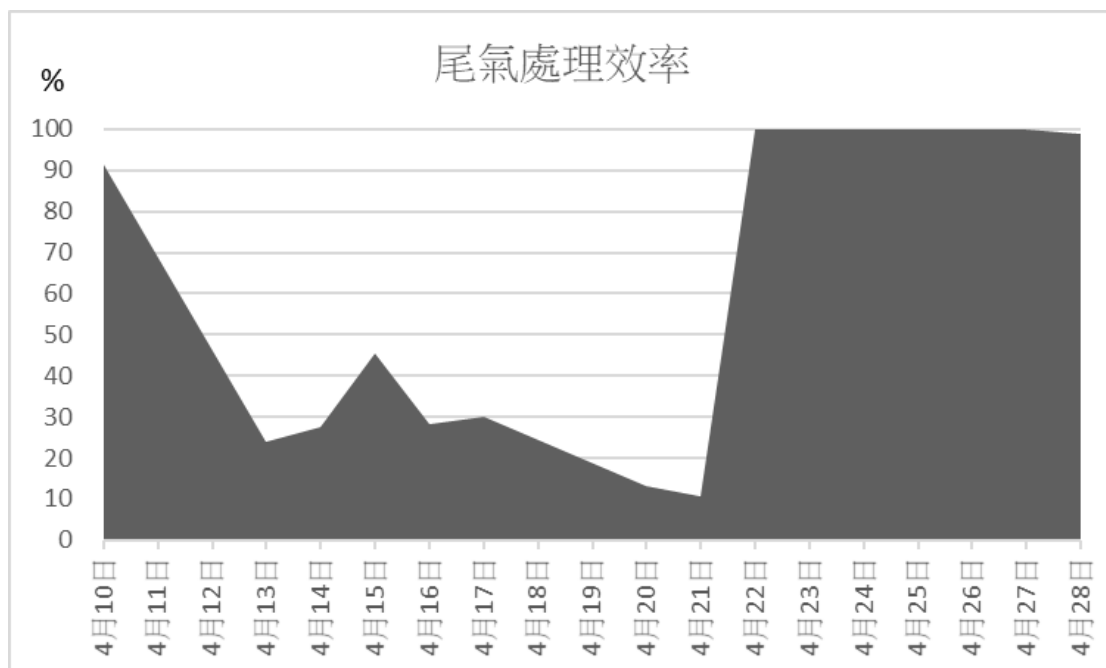


圖 5.8 SVE 系統尾氣處理效率逐日變化圖



(四)估算污染物移除量

AS/SVE 模場試驗之整治成效，可利用估算 SVE 系統抽出氣體之污染物移除量做為評估指標。參考「土壤氣體抽除整治技術系統設計參考指引」，敘明以抽除氣體濃度監測，可使用理想氣體方程式($PV=nRT$)計算理論抽除量，計算公式如下：

$$W_p = \frac{PM_p V_p}{RT} = \frac{PM_p QC_{in}}{RT \times 10^6}$$

其中

P ：壓力，單位： $mmHg$

R ：理想氣體常數， $8.314 J/g \cdot mole \cdot K$ ($0^\circ C$ ， $1atm$)

T ：溫度，單位： K

W_p ：污染物抽除總質量，單位： g

M_p ：污染物分子量： $g/mole$

V_p ：抽氣體積，單位： m^3

Q ：單位時間抽氣量，單位： L/min

C_{in} ：抽氣濃度，單位： ppm

以系統操作時紀錄之溫度、流量、壓力及每日運轉時間(共 8 小時)，並設定目標污染物為三氯乙烯(TCE)，進行每日污染抽除量估算，AS/SVE 模場試驗過程之污染物移除量逐日變化呈現於圖 5.9。AS/SVE 模場試驗啟動時初始抽氣濃度最高(PID 測值 16.5 ppm)，估算單日之理論抽除量高達 9.3 g/day，隨後估算單日之理論抽除量皆落在 3.2~5.1 g/day 之間。圖 5.9 理論抽除量之逐日變化趨勢與圖 5.7 之抽氣濃度之變化趨勢一致，係因 SVE 系統總抽氣流量穩定，污染物移除量推估結果主要受抽氣 VOCs 濃度影響。AS/SVE 模場試驗過程共 19 天，累計污染物移除總量共 91.3 g，污染物平均日移除量為 4.8 g/day，如圖 4.10 所示。



電阻加熱輔助土壤氣體抽除系統整治土壤三氯乙烯污染之模場試驗

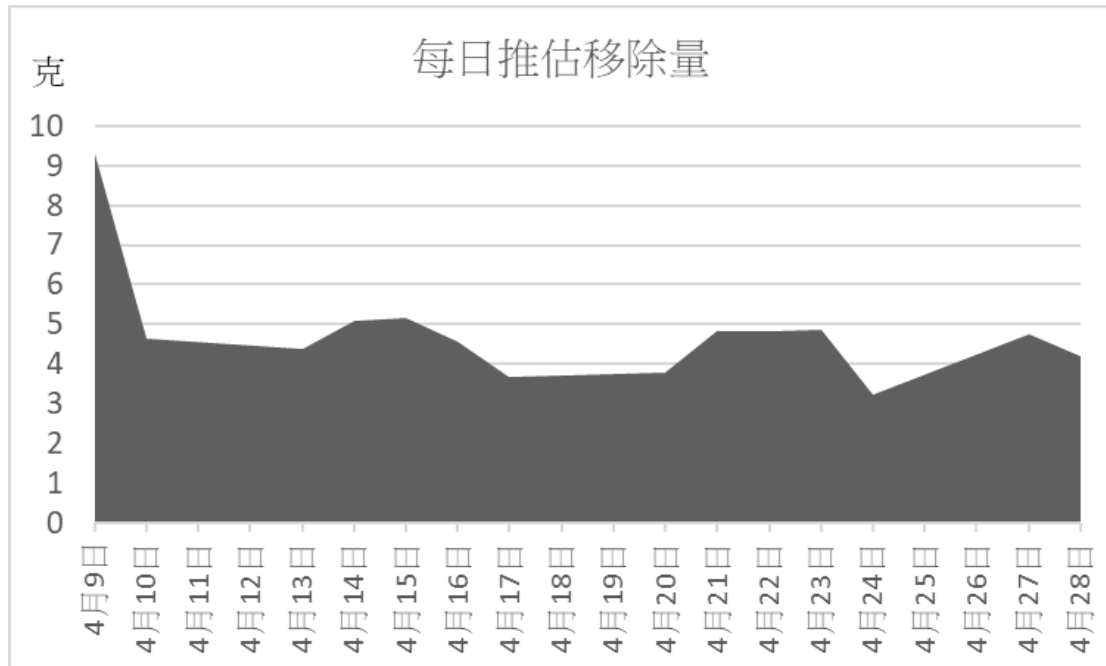


圖 5.9 SVE 系統累積總移除量逐日變化圖(以三氯乙烯計算)

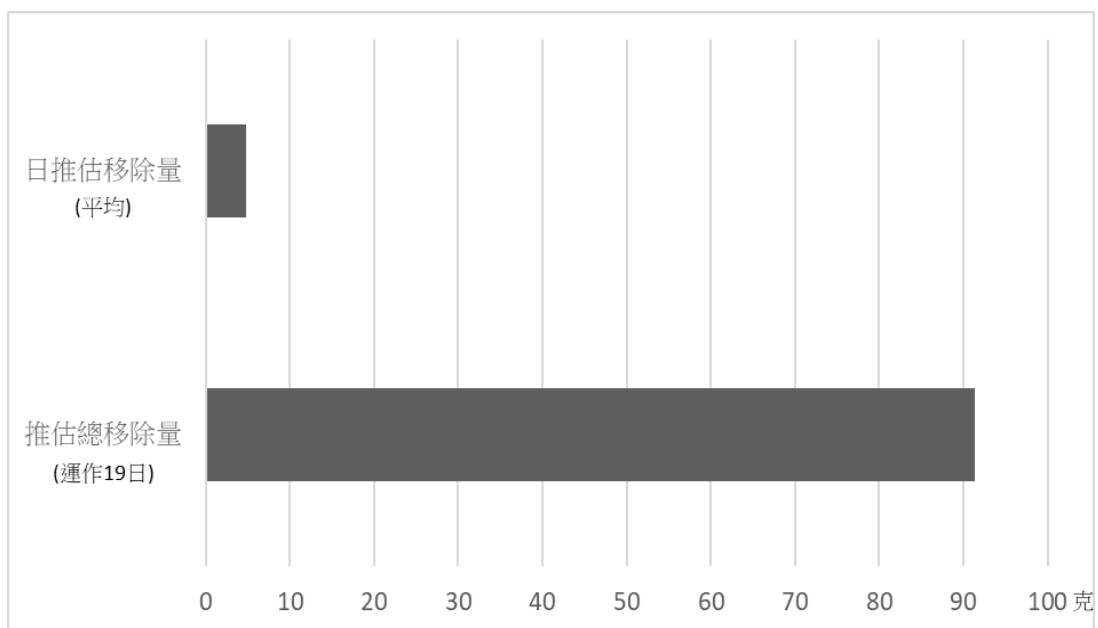


圖 5.10 SVE 系統污染物平均日移除量與累計移除總量(以三氯乙烯計算)



(五)地下水污染濃度

AS/SVE 模場試驗於 109 年 4 月 29 日運轉結束，於 SVE 抽氣井採集地下水樣品，採樣前先使用水位計量測地下水位，並以 SVE 井管管長(6m)計算採樣深度，放置軟管到井篩中段的深度，接上蠕動幫浦經低流速微洗井後，再將抽出水裝集至 40 mL 之棕色 VOCs 樣品瓶，且每口井均裝取 2 瓶水樣，送實驗室分析 VOCs 濃度。現場以量杯裝取抽出之地下水樣品，使用現場量測之水質儀器進行基本水質檢測，並待讀值穩定後記錄數值。

模場試驗區的地下水位，除了中央位置 KSS-0 地下水位略高，距地表井頂高程為 3.4 m，KSS-6 距地表井頂高程為 3.8 m 次高，其餘井位距地表井頂高程多半落在 4.0 m 左右，如表 5.6 所示。各 SVE 井地下水三氯乙烯濃度皆在地下水污染管制標準以下，其中 KSS-4 地下水三氯乙烯濃度為 0.032mg/L 略大於地下水污染監測標準，評估模場試驗區整體地下水污染潛勢不高。

表 5.6 SVE 井之地下水位及三氯乙烯濃度

	水位	DO	pH	ORP	EC	TCE
井號	m	mg/L		mV	μ S/cm	ppm
KSS-0	3.432	6.24	-	-	-	<QDL
KSS-1	4.035	5.44	-	-	-	0.013
KSS-2	4.009	6.06	-	-	-	<QDL
KSS-3	4.000	2.40	-	-	-	0.010
KSS-4	4.004	4.80	-	-	-	0.032
KSS-5	3.992	5.53	-	-	-	0.019
KSS-6	3.819	5.76	-	-	-	<QDL
<註1>	開啟SVE 廢液閥無水流出，故無採集送樣					
<註2>	現場之 pH、ORP、EC sensor 故障檢修中					
<註3>	TCE 之檢驗方法為FROG-5000，其QDL為0.020					
<註4>	TCE 之管制標準/監測標準為 0.050/0.025					



5.2.4 AS/SVE 整治成效(MIP 調查比對驗證)

AS/SVE 模場試驗運轉結束後，進場執行 MIP 探測作業，以確認模場試驗區域之污染分布現況，比較先前 MIP 調查之場址污染概念模型，做為 AS/SVE 整治成效驗證的依據。各口 SVE 井的 MIP 探測進尺深度與前次 MIP 場址污染背景調查相同。MIP 搭配 XSD 偵測器分析土壤含氯有機物的污染分布，利用電導度(EC) 偵測器分類土壤質地層狀分布。MIP 鑽探點位之垂直剖面污染物分布以 FID、PID、XSD 訊號值呈現，如圖 5.11 所示。模場試驗區整體 FID、PID、XSD 訊號值皆明顯減弱，原先場址污染背景存在於 KSS-2 深度 5 至 6 公尺的污染團塊已不存在，顯示污染物確實透過 AS/SVE 模場試驗運轉而移除。模場試驗區域僅殘留零星的污染物，FID 訊號最高的位置在 KSS-2 深度 3 公尺的位置，發現 AS/SVE 系統運作造成污染物往各 SVE 抽氣井移動，並有向上傳輸移動的趨勢。

結合多點 MIP 剖面探測結果，得以建立模場試驗區域之 3D 場址污染概念模型，以此方式將圖 5.11 此次調查點位之剖面訊號轉繪於圖 5.12 試驗模場之污染物三維空間分布圖。其中灰色是表示推估之土壤質地，淺灰到深灰為砂土(粗顆粒)漸進至粉黏土(細顆粒)；藍、綠、紅則代表污染物訊號反應，依序分別是低濃度、中濃度及高濃度，模場試驗區域深度 6 公尺處高濃度區消失，較深層處次高濃度污染範圍增加，淺層低濃度範圍亦增加。

金順利熱模場SVE作業後MIP訊號比對
濃度變化狀況_20200430

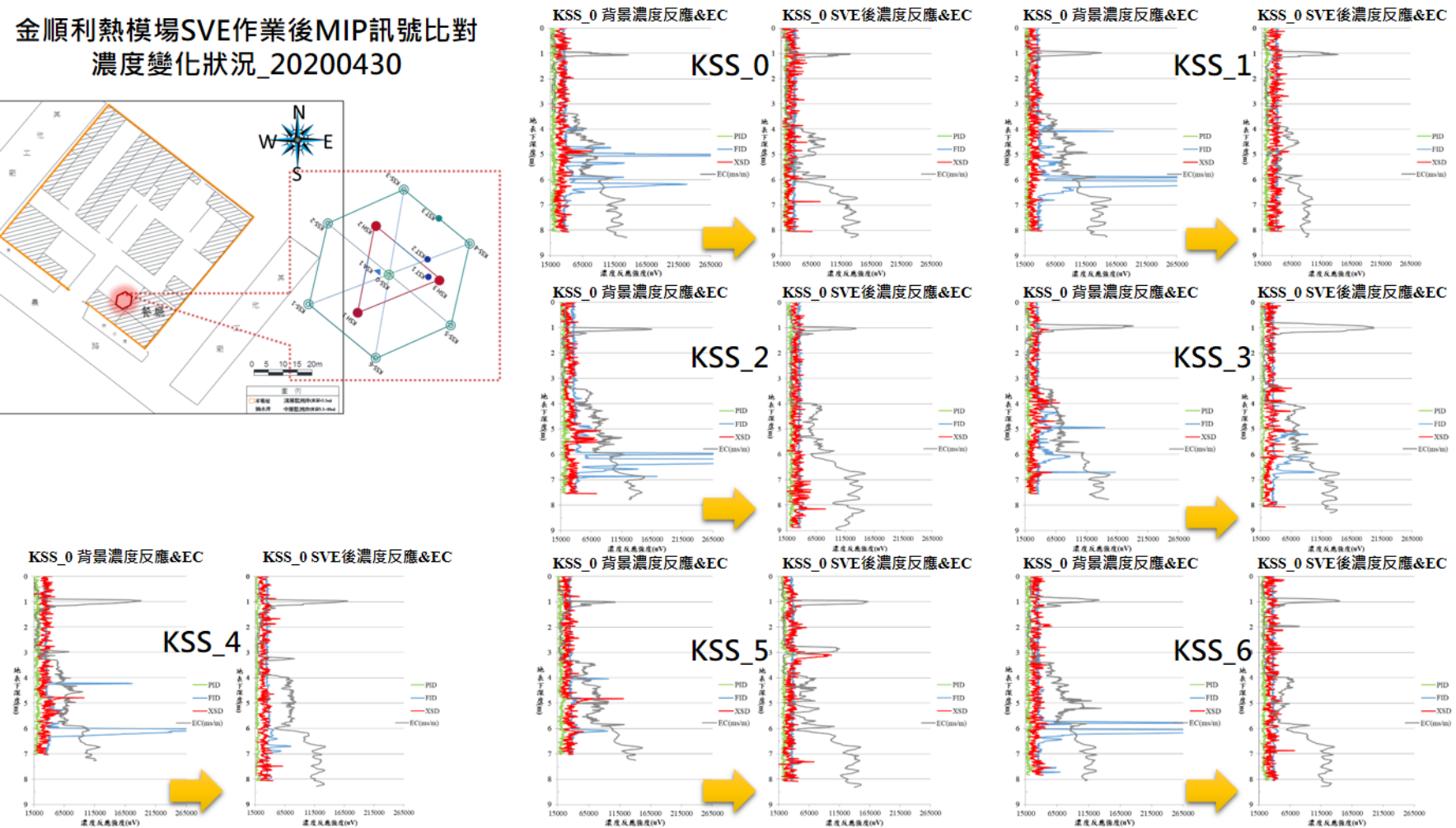
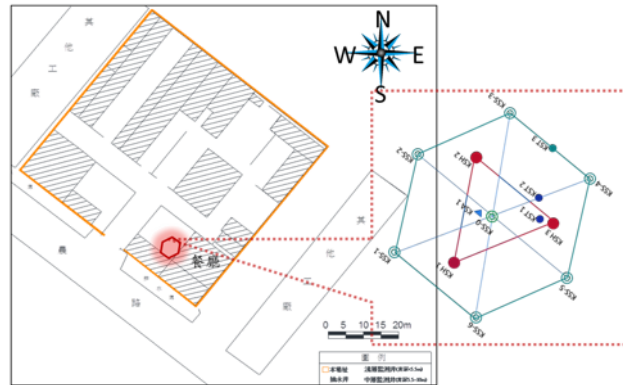


圖 5.11 比較經 AS/SVE 運轉前後之 MIP 污染分佈調查結果圖

金順利熱模場SVE-AS作業後MIP訊號比對空間濃度變化狀況_20200503

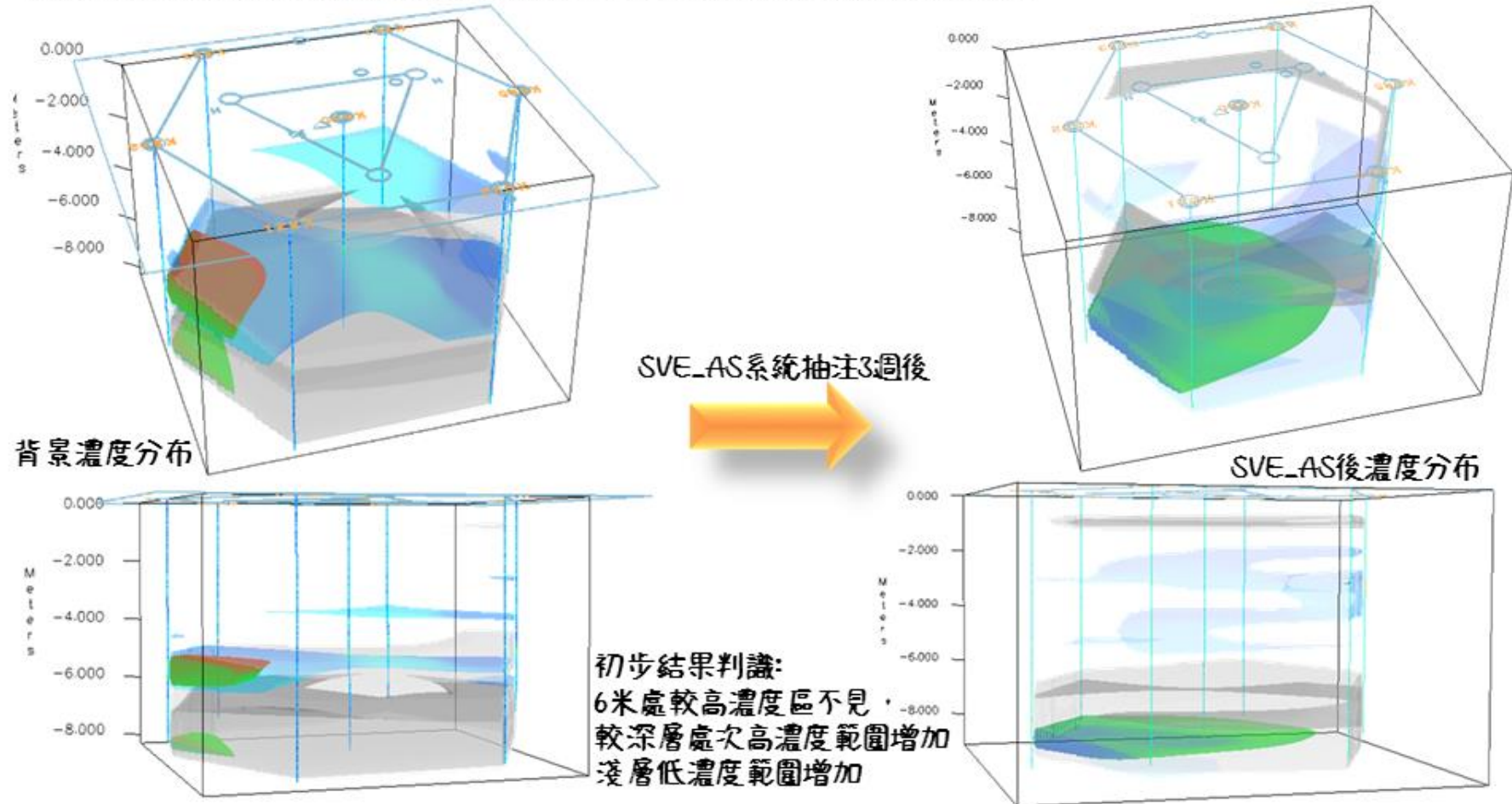


圖 5.12 經 AS/SVE 運轉前後之 MIP 污染分佈調查結果之三維空間圖



5.3 現地電熱系統設置

現地電熱系統設備包括加熱系統和溫度監控系統，加熱系統主要元件有電源控制箱、加溫控制器、現地電熱管 3 支，透過加熱系統操作現地電熱管升溫可達 300°C，模場試驗區土壤可升溫達 45~90°C。溫度監測系統主要元件有溫度監測管 3 支、溫度監測器，相關系統元件規格明細如表 5.7 所示。

表 5.7 加熱系統及溫度監控系統元件規格明細

項次	品名	規格	數量/單位
1.	現地電熱管	口徑為 2"，材質為 304 不鏽鋼管，輸入電源 220VAC，額定加熱功率 10kW，內置上中下多深度陶瓷加熱點與溫度監測點，管長 6 M，加熱管可控制加熱最大達 600°C。須具備保護頭蓋設施	3 支
2.	溫度控制器	3 組，盤面型 96*96mm，PID 控制，電源 AC 90~220V，取樣速率：5 次/秒，溫度監控加熱與過載警報輸出	1 式
3.	電源控制箱	總電流表 0~400A、電壓表 0~300V，3 組加熱器控制電流表 0~150A 及電壓表，3 組 3 ϕ 220V 電力調整器 75A，及溫度過載蜂鳴警報功能。	1 式
4.	溫度監測管	井徑為 1-1/2"、材質為鍍鋅鋼管、螺旋加長組合式，單元管長 1 M，內置接觸式溫度感測接點與線路通道孔。	3 支
5.	溫度監測器	加熱井用：無紙紀錄器一台，電源 90~250VAC，5.6" TFT 觸控寬螢幕，18 通道，取樣速度可達 100 msec/點，RAM 256MB，附 16G SD card。溫度監測井用：人機介面 10.4" 觸控螢幕，電源 DC24V，觸控程式具趨勢圖、48 組溫度即時監控數據、48 組歷史溫度數據，32G 外接隨身碟。PLC 主機：12 點 24VDC 數位輸入(4 點高速 200KHz，2 點中速 20KHz，6 點中速總和 5KHz)；8 點繼電器輸出(4 點高速 200KHz，4 點中速 20KHz)；一個 RS232 通訊埠。溫度量測模組：3 組，電源 DC24V，16 通道之熱電偶溫度輸入模組，0.1°C 解析度。	1 式
6.	電力線配置作業	加熱控制系統：主電源：3 ϕ 220VAC，190A，電線 3C*100mm ² 長 30m；加熱井：1 ϕ 220V，50A，電線 2C*22mm ² ，長 75m。溫度監測井監測系統：1 ϕ 220VAC，10A，電線 2C*2.0mm ² 長 15 m；SVE 電源 3 ϕ 220VAC，30A，電線 3C*5.5mm ² ，長 20m；AS 電源 3 ϕ 220VAC，15A，電線 3C*2.0mm ² ，長 20m	1 式
7.	監控訊號線配置作業	K type，單芯 0.6mm ² 2C，環境溫度 300°C，金屬網線，400M	1 式



5.3.1 熱脫附改善井場建置

於模場試驗區設置間距約 1.5 m 之現地加熱井 3 口，搭配 7 口 SVE 抽氣井與 1 口 AS 注氣井。SVE 抽氣井呈現正六邊形配置，包圍 3 口現地加熱井，避免脫附之土壤氣體逸散；正六邊形中央各設 1 口 SVE 抽氣井與 1 口 AS 注氣井，以增強污染物的移除效果。距離加熱井約 0.5 m、1 m、1.5m 處位置，分別設置 3 處溫度監測井，以瞭解土壤升溫的效果。由現地加熱井、溫度監測井、SVE 抽氣井、AS 注氣井建構熱脫附改善井場，其相關位置如圖 5.13 所示。現地加熱井管上端 1.5m 為不加熱段，下方加熱段長達 4.5m；溫度監測井管與加熱井同長，溫度監測井內垂直深度配置多點次溫度監測管，其構造剖面如圖 5.14 所示。

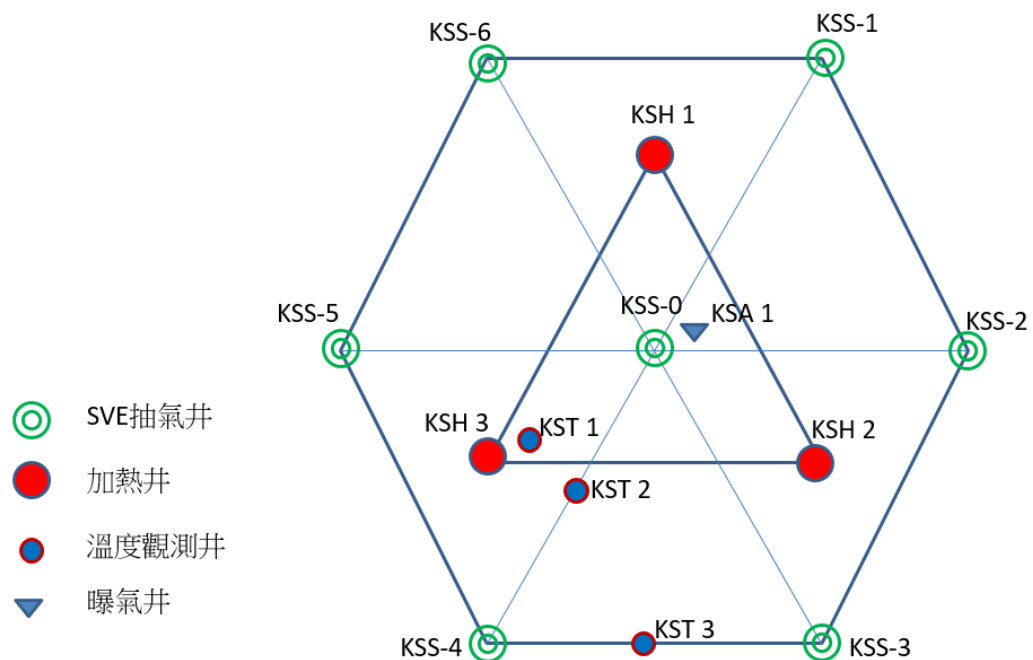


圖 5.13 熱脫附改善井場配置圖

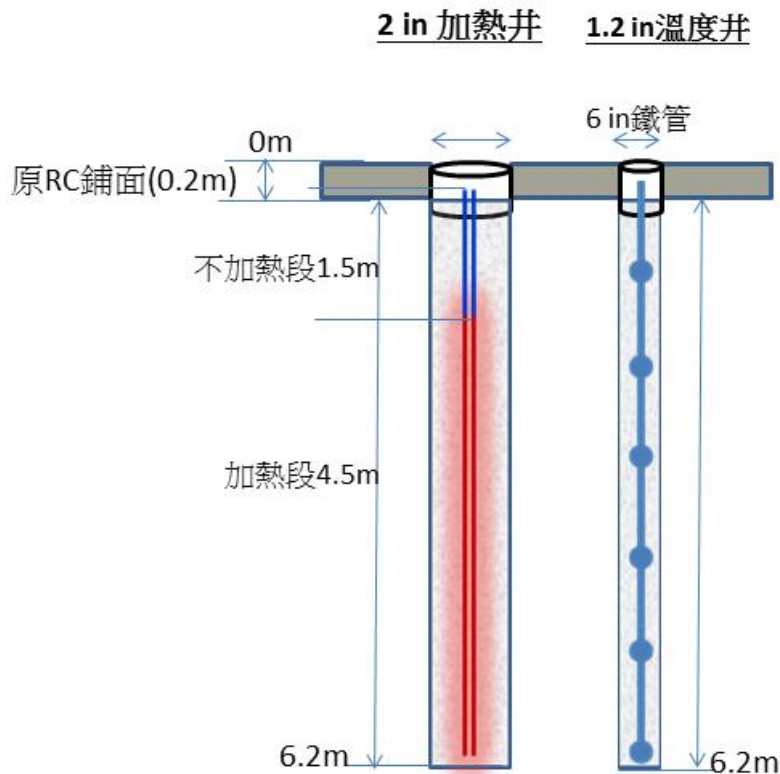


圖 5.14 加熱井(左)與溫度監測井(右)構造剖面示意圖

5.3.2 現地加熱井及溫度監測井設置過程

AS/SVE 改善井場已預先設置完成，配合現地電熱井及溫度監測井設置，即可建構熱脫附改善井場。現場工項包括現地電熱井與溫度監測井設井作業、加熱與溫度監測系統安裝連線作業、加熱與溫度監測系統試運轉及驗收作業。現地電熱井與溫度監測井設井作業包括量測點位並標記、移動鑽機至指定位置、鑽設井孔、放置井管、濾料填充與覆土完井等，現場工程施作照片整理於表 5.8。加熱與溫度監測系統安裝連線作業過程，簡易步驟為：裝設井管保護蓋、配線連接、供電裝置、溫度控制系統、紀錄裝置與系統設定等，現場工程施作照片整理於表 5.9。加熱與溫度監測系統試運轉及驗收作業照片整理於表 5.10，包括檢視欲埋設之井管、討論調整井管設置點位、檢視井管設置過程、完工之井體與配線之成果，最後驗收啟動系統試運轉。



電阻加熱輔助土壤氣體抽除系統整治土壤三氯乙烯污染之模場試驗

表 5.8 現地電熱井與溫度監測井設井作業過程

	
量測點位並標記	移動鑽機至指定位置
	
鑽設加熱井	放置加熱井管
	
濾料填充(石英砂)	填土完井



第五章結果與討論

表 5.8 現地電熱井與溫度監測井設井作業過程(續)

移動鑽機至指定位置	鑽設溫度監測井
放置溫度監測井管	溫度監測井管放置完成
地下井管裝設完成	



電阻加熱輔助土壤氣體抽除系統整治土壤三氯乙烯污染之模場試驗

表 5.9 加熱與溫度監測系統安裝連線作業過程

加熱井配線連接	供電裝置
裝設加熱井保護蓋	溫度控制系統
溫度監測井配線連接	紀錄裝置
系統運作之控制設定	系統建置完成



第五章結果與討論

表 5.10 加熱與溫度監測系統試運轉驗收情形

	
討論加熱井與溫度監測井設置點位	檢視加熱井管
	
檢視加熱井設置過程	檢視溫度監測井管
	
檢視完工之加熱井	檢視完工之溫度監測井
	
檢視加熱與溫度監測系統配線	加熱與溫度監測系統試運轉



5.4 熱脫附 AS/SVE 模場試驗

5.4.1 土壤升溫模場試驗

為獲得土壤加熱系統適合的操作條件，並瞭解加熱井對土壤之升溫速率，與土壤的熱傳影響半徑，於啟動熱脫附 AS/SVE 模場試驗前，規劃先執行土壤升溫模場試驗。熱脫附改善井場於 109 年 5 月 4 日設置完成，隨即啟動電熱井土壤升溫試驗，熱脫附改善井場共設置 7 口 SVE 抽氣井、1 口 AS 注氣井、3 口電熱井、3 口溫度監測井，與加熱與溫度監測系統，各井相對位置請參見圖 5.13。第一階段僅啟動 1 口電熱井 H-2，設定電熱溫度為 350°C 加熱土壤，於距離 0.5 m、1.0 m、1.5 m 處設有 3 口溫度監測井記錄土壤溫度變化，並建立土壤升溫曲線。

(一) 第一階段土壤升溫：

土壤升溫試驗設定土壤加熱溫度目標達 80°C，109 年 5 月 4 日啟動電熱井 H-2 後，記錄 3 口溫度監測井土壤初始溫度介於 27.5~31.9°C，隨加熱時間溫度監測井土壤溫度逐步提高，10 天後距離 0.5 m 處溫度監測井 T-1 土壤溫度可達 60°C，距離 1.0 m 處溫度監測井 T-2 土壤溫度可達 50°C，距離 1.5 m 處溫度監測井 T-3 土壤溫度可達 45°C。109 年 5 月 14 日因工廠電力負載過大跳電造成加熱系統停機，重新檢修設備元件，於 109 年 5 月 18 日再次啟動加熱井 H-2。模場試驗區土壤再次升溫過程，呈現第 1 天土壤快速升溫，3 天後升溫趨緩，11 天後又再次加速升溫的現象，於 109 年 6 月 5 日土壤加熱溫度達設定目標，完成第一階段土壤升溫試驗，關閉土壤加熱系統。

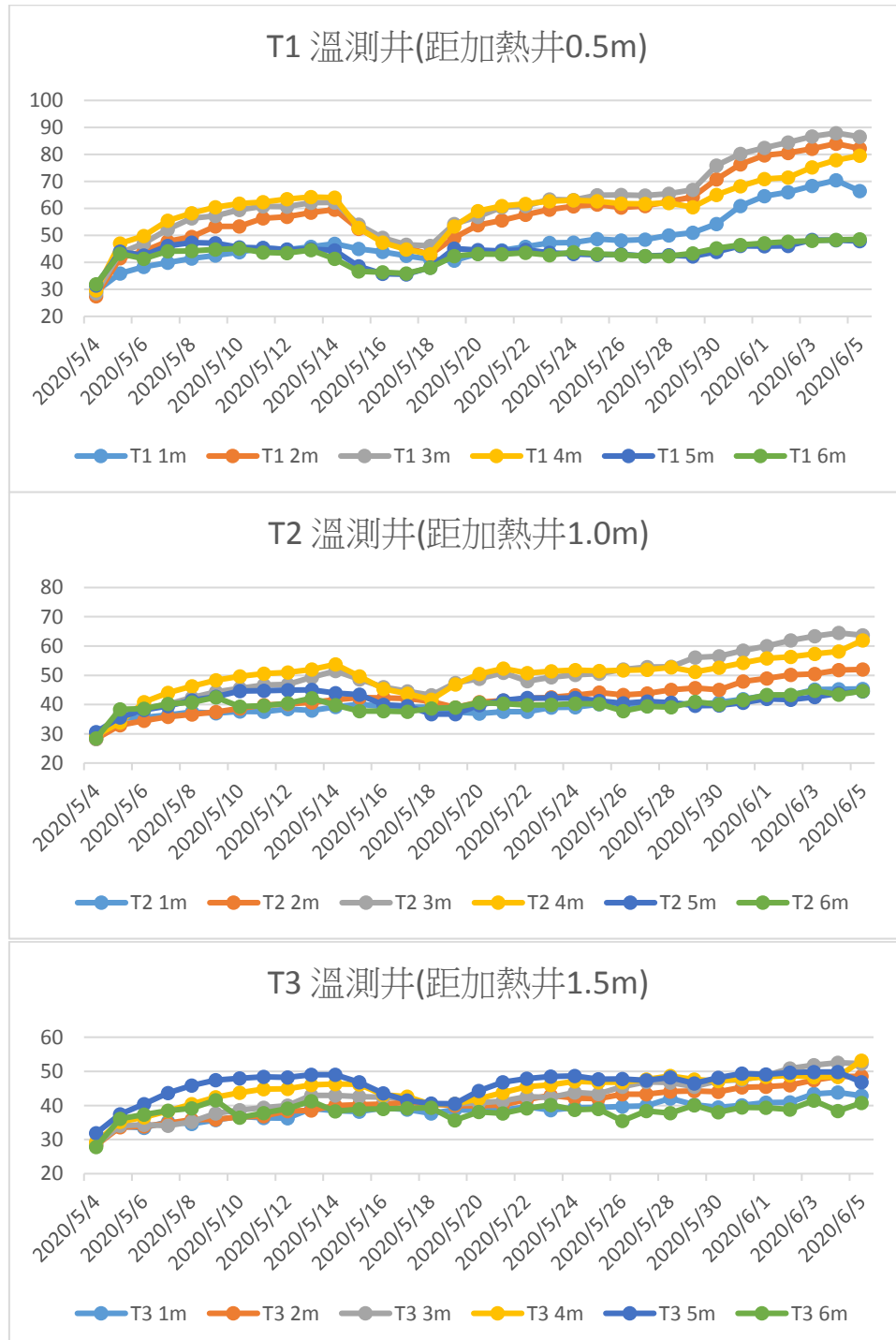
土壤升溫過程 3 口溫度監測井之監測溫度歷時變化呈現於圖 5.15，除 109 年 5 月 14 日至 18 日因工廠跳電使加熱系統停機外，3 口溫度監測井測得土壤溫度皆隨加熱時間而逐步提高的趨勢。距離 0.5 m 處溫度監測井 T-1 於 3 m 深度測得最高溫度達 86.6°C，於 5 m 深度測得最低溫度為 47.9°C，平均土壤溫度為 68.5°C。距離 1.0 m 處溫度監測井 T-2 亦於 3 m 深度測得最高溫度達 63.7°C，於 5 m 深度測得最低溫度為 44.5°C，平均土壤溫度為 52.0°C。距離 1.5 m 處溫度監測井 T-3 亦於 3 m 深度測得最高溫度達 53.2°C，於 6 m 深度測得最低溫度為 40.8°C，平均土壤溫度為 47.4°C。

本模場之地下水位約為地表下 4m 位置，溫度監測井 T-1 及 T-2 皆發現深度 3 m 與 4 m 的土壤溫度最高，因距離電熱井 1.0 m 內，地下水位上方的毛細作用層可因土壤加熱促進水分蒸發，水蒸氣熱傳導效果較空氣更好，因而促進毛細作用層土壤的升溫效果。溫度監測井 T-3 於深度 5 m 測得土壤溫



第五章結果與討論

度最高，因距離電熱井稍遠(1.5 m)，毛細作用層的水分蒸發效應較不明顯，主要以表層地下水熱傳導作用促進土壤升溫效果，因此以地下水位下方 4 m 與 5 m 間的土壤升溫速度較快。3 口溫度監測井皆觀察到一致的現象，深度 6 m 的監測溫度最低，顯示電熱井加熱深層地下水的升溫速率較緩慢。



註：109 年 5 月 14 日至 18 日因工廠跳電使加熱系統停機

圖 5.15 土壤升溫過程 3 口溫度監測井之監測溫度歷時變化



電阻加熱輔助土壤氣體抽除系統整治土壤三氯乙烯污染之模場試驗

針對各口溫度監測井土壤升溫最快及升溫最慢之監測點進行比較：距離 0.5 m 處溫度監測井 T-1 於 3 m 深度測得土壤升溫平均速率為 $2.07^{\circ}\text{C}/\text{day}$ ，於 5 m 深度測得土壤升溫平均速率為 $0.59^{\circ}\text{C}/\text{day}$ 。距離 1.0 m 處溫度監測井 T-2 於 3 m 深度測得土壤升溫平均速率為 $1.27^{\circ}\text{C}/\text{day}$ ，於 5 m 深度測得土壤升溫平均速率為 $0.50^{\circ}\text{C}/\text{day}$ 。距離 1.5 m 處溫度監測井 T-3 於 5 m 深度測得土壤升溫平均速率為 $0.53^{\circ}\text{C}/\text{day}$ ，於 6 m 深度測得土壤升溫平均速率為 $0.46^{\circ}\text{C}/\text{day}$ 。

土壤升溫過程之溫度變化可分為快速升溫期及平緩期兩個階段，以距離 0.5 m 處溫度監測井 T-1 為例，於 3 m 深度測得未飽合層土壤快速升溫期速率為 7.85 及 $5.18^{\circ}\text{C}/\text{day}$ ，平緩期速率為 $0.820^{\circ}\text{C}/\text{day}$ ；於 5 m 深度測得飽合層土壤快速升溫期速率為 $4.89^{\circ}\text{C}/\text{day}$ ，平緩期速率為 $-0.213^{\circ}\text{C}/\text{day}$ 。以距離 1.0 m 處溫度監測井 T-2 為例，於 3 m 深度測得未飽合層土壤快速升溫期速率為 $3.95^{\circ}\text{C}/\text{day}$ ，平緩期速率為 $0.889^{\circ}\text{C}/\text{day}$ ；於 5 m 深度測得飽合層土壤快速升溫期速率為 $2.98^{\circ}\text{C}/\text{day}$ ，平緩期速率為 $0.001^{\circ}\text{C}/\text{day}$ 。以距離 1.5 m 處溫度監測井 T-3 為例，於 5 m 深度測得飽合層土壤快速升溫期速率為 $3.95^{\circ}\text{C}/\text{day}$ ，平緩期速率為 $0.152^{\circ}\text{C}/\text{day}$ ；於 6 m 深度測得飽合層土壤快速升溫期速率為 $3.55^{\circ}\text{C}/\text{day}$ ，平緩期速率為 $0.086^{\circ}\text{C}/\text{day}$ 。快速升溫期的土壤升溫速率大致隨電熱井的距離而遞減，各口溫度監測井測得平緩期的土壤升溫速率較為接近，與電熱井的距離較無明顯的相關性。

基本上，距離電熱井越遠整體土壤平均升溫速率越慢，以地下水位上方毛細作用層的土壤的升溫效果評估，距離 1.5 m 處溫度監測井 T-3 的土壤升溫效果不甚明顯，電熱井的熱傳影響半徑僅約 1.0 m。以模場試驗區整體土壤加熱溫度 80°C 的目標，單口電熱井設定加熱溫度 350°C 的操作條件略顯不足。

(二) 第二階段土壤降溫：

109 年 6 月 5 日土壤加熱溫度達設定目標，關閉土壤加熱系統，進入第二階段土壤降溫試驗，觀察模場試驗區土壤餘熱的溫度變化，並建立土壤降溫曲線，於 109 年 6 月 15 日土壤溫度變化趨緩，停止溫度監測井之溫度記錄，土壤降溫過程 3 口溫度監測井之監測溫度歷時變化呈現於圖 5.16。

3 口溫度監測井之降溫趨勢大體上一致，降溫 10 天後土壤溫度約降至 40°C 左右，發現的一致現象為深度 3 m 處毛細作用層的土壤降溫速率最快，飽合層含水層深度 5 m 及 6 m 處的土壤降溫速率較為緩慢。距離 0.5 m 處溫



第五章結果與討論

度監測井 T-1 於 3 m 深度測得土壤降溫速率為 $-3.11^{\circ}\text{C}/\text{day}$ ，於 6 m 深度測得土壤降溫速率為 $-0.11^{\circ}\text{C}/\text{day}$ 。距離 1.0 m 處溫度監測井 T-2 於 3 m 深度測得土壤降溫速率為 $-2.12^{\circ}\text{C}/\text{day}$ ，於 6 m 深度測得土壤降溫速率為 $-0.14^{\circ}\text{C}/\text{day}$ 。距離 1.5 m 處溫度監測井 T-3 於 4 m 深度測得土壤降溫速率為 $-1.62^{\circ}\text{C}/\text{day}$ ，於 6 m 深度測得土壤降溫速率為 $-0.18^{\circ}\text{C}/\text{day}$ 。

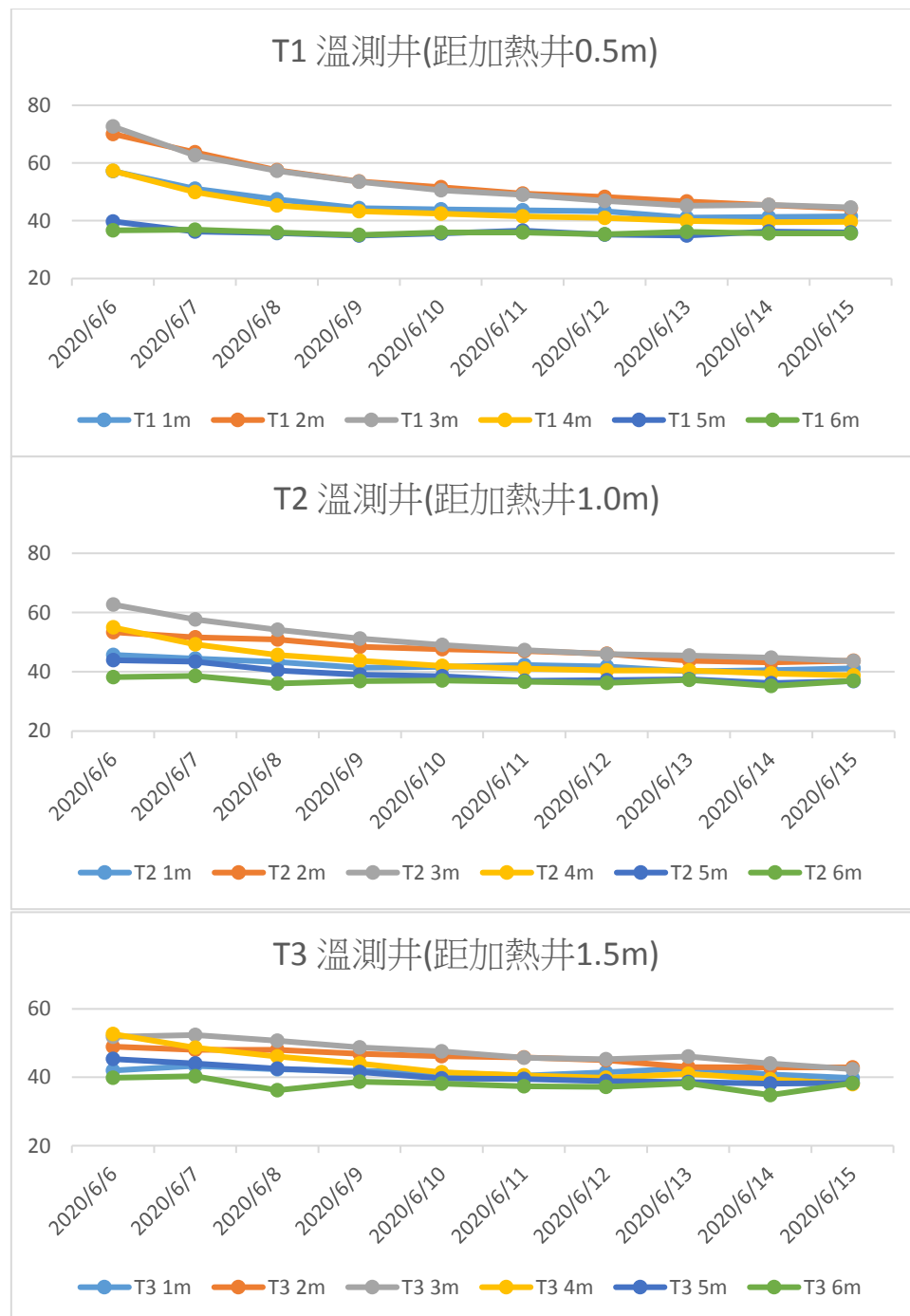


圖 5.16 土壤降溫過程 3 口溫度監測井之監測溫度歷時變化



電阻加熱輔助土壤氣體抽除系統整治土壤三氯乙烯污染之模場試驗

5.4.2 熱脫附 AS/SVE 模場試驗操作紀錄

完成土壤升溫模場試驗及土壤降溫過程，於 109 年 6 月 16 日啟動熱脫附 AS/SVE 模場試驗，同時開啟 3 口電熱井加熱土壤，因發現升溫試驗設定電熱溫度 350°C 之土壤加熱效果略有不足，因此現地熱脫附 AS/SVE 模場試驗設定 3 口電熱井加熱溫度為 450°C，採全天 24 小時加熱模式。電熱井加熱溫度控制除以面板顯示外，輔以溫度記錄器每隔 30 秒自動記錄電熱井溫度，得以 CSV 檔案格式儲存於外接隨身碟，以利後續監測數據解析。3 口溫度監測井的監測數據，亦以訊號傳輸線傳送至溫度記錄器，熱脫附 AS/SVE 模場試驗過程可即時呈現模場試驗區土壤溫度監測記錄，儲存之溫度監測紀錄可彙整土壤監測溫度之歷時變化，相關作業照片彙整於表 5.11。

SVE 抽氣設備系統設定每日上午八時開始運作至下午八時結束，運作時數相當於每日操作 12 小時。熱脫附 AS/SVE 模場試驗過程，每日以 PID 量測 SVE 系統抽出氣體與活性碳處理後尾氣之 VOCs 濃度。每週記錄 SVE 系統運轉時 SVE 抽氣井之抽氣流量、壓力與溫度，以監控 SVE 系統之正常運作。熱脫附 AS/SVE 模場試驗過程現場操作控制、數據量測與操作期程，皆與 AS/SVE 模場試驗的操作記錄方式一致，以利進行污染整治成效比對。

依據每日量測 SVE 系統抽出氣體 PID 測值與每週量測 SVE 抽氣井之抽氣流量，可估算 SVE 系統抽出氣體之污染物移除量，做為評估模場試驗之整治成效指標之一。熱脫附 AS/SVE 模場試驗於 109 年 7 月 7 日運轉結束，於 SVE 抽氣井採集地下水樣品送實驗室分析 VOCs 濃度，以評估模場試驗區的污染情況。

表 5.11 熱脫附 AS/SVE 模場試驗電熱井溫度設定及溫度監測井監測

電熱控制裝置	溫度即時監測記錄器



5.4.3 熱脫附 AS/SVE 模場試驗成果

熱脫附 AS/SVE 模場試驗成果依試驗過程之量測紀錄彙整，分別說明熱脫附模場運作期間土壤溫度變化、AS/SVE 系統操作之抽氣流量、抽氣 VOCs 濃度、尾氣處理效率、估算污染物移除量、地下水污染濃度等。

(一) 熱脫附模場溫度變化

熱脫附改善井場共設置 3 口電熱井及 3 口溫度監測井，溫度監測井分別距離電熱井 H-2 0.5 m、1.0 m 及 1.5 m，各口井深均為 6 m，每 1 m 深度設有 1 個溫度監測器。109 年 6 月 16 日啟動 3 口現地電熱井加熱土壤，設定加熱溫度為 450℃。3 口溫度監測井測得初始土壤溫度介於 35.3℃ 至 42.1℃ 之間，平均溫度為 38.4℃。以距離 0.5 m 處溫度監測井 T-1 為例，於 4 m 深度土壤快速升溫期速率為 14.04℃/day，加熱 3 天後土壤溫度可達設定目標 80℃，平緩期土壤溫度變化可維持於 80℃ 以上，平緩期土壤升溫速率為 0.12℃/day。於 1 m 深度測得土壤最低溫度為 47.9℃，快速升溫期土壤升溫速率為 0.67℃/day，平緩期土壤升溫速率為 0.36℃/day。

以距離 1.0 m 處溫度監測井 T-2 為例，於 4 m 深度土壤快速升溫期速率為 10.13℃/day，加熱 4 天後土壤溫度可達 70℃，平緩期土壤溫度變化可維持於 70℃ 以上，平緩期土壤升溫速率約為 0.40℃/day。於 6 m 深度測得土壤最低溫度為 46℃，土壤平均升溫速率約為 0.35℃/day。以距離 1.5 m 處溫度監測井 T-3 為例，於 4 m 深度土壤快速升溫期速率為 6.21℃/day，加熱 9 天後土壤溫度可達 66.6℃，平緩期土壤溫度變化可維持於 65℃ 以上，平緩期土壤升溫速率約為 0.68℃/day。於 6 m 深度測得土壤最低溫度為 43.8℃，土壤平均升溫速率約為 0.37℃/day。熱脫附 AS/SVE 模場試驗期間，溫度監測井 T-1、T-2、T-3 測得平均土壤溫度分別為 60.6℃、57.4℃、55.5℃，3 口溫度監測井之監測溫度歷時變化如圖 5-17 所示。

本模場地下水位深度約 4 m，地下水位上方的毛細作用層可因土壤加熱促進水分蒸發，水蒸氣熱傳導效果較空氣更好，因而促進毛細作用層土壤的升溫效果。3 口溫度監測井皆發現深度 3 m 與 4 m 間毛細作用層的土壤溫度最高，整體模場試驗區土壤溫度可維持 60℃ 以上，因此增進未飽合層 AS/SVE 抽除成效。現地加熱井頭 1.5 m 為不加熱段，深度 1 m 處土壤升溫效果極不明顯，與地下水位下方 6 m 處飽合層土壤的溫度相近，飽合層土壤的升溫速率緩慢，同為土壤監測溫度最低的 2 層區域。距離現地電熱井越遠整體土壤平均升溫速率越慢，以距離 1.5 m 處溫度監測井 T-3 為例，土壤快速升溫的現象相對不明顯，平緩期亦略見土壤持續升溫。



電阻加熱輔助土壤氣體抽除系統整治土壤三氯乙烯污染之模場試驗

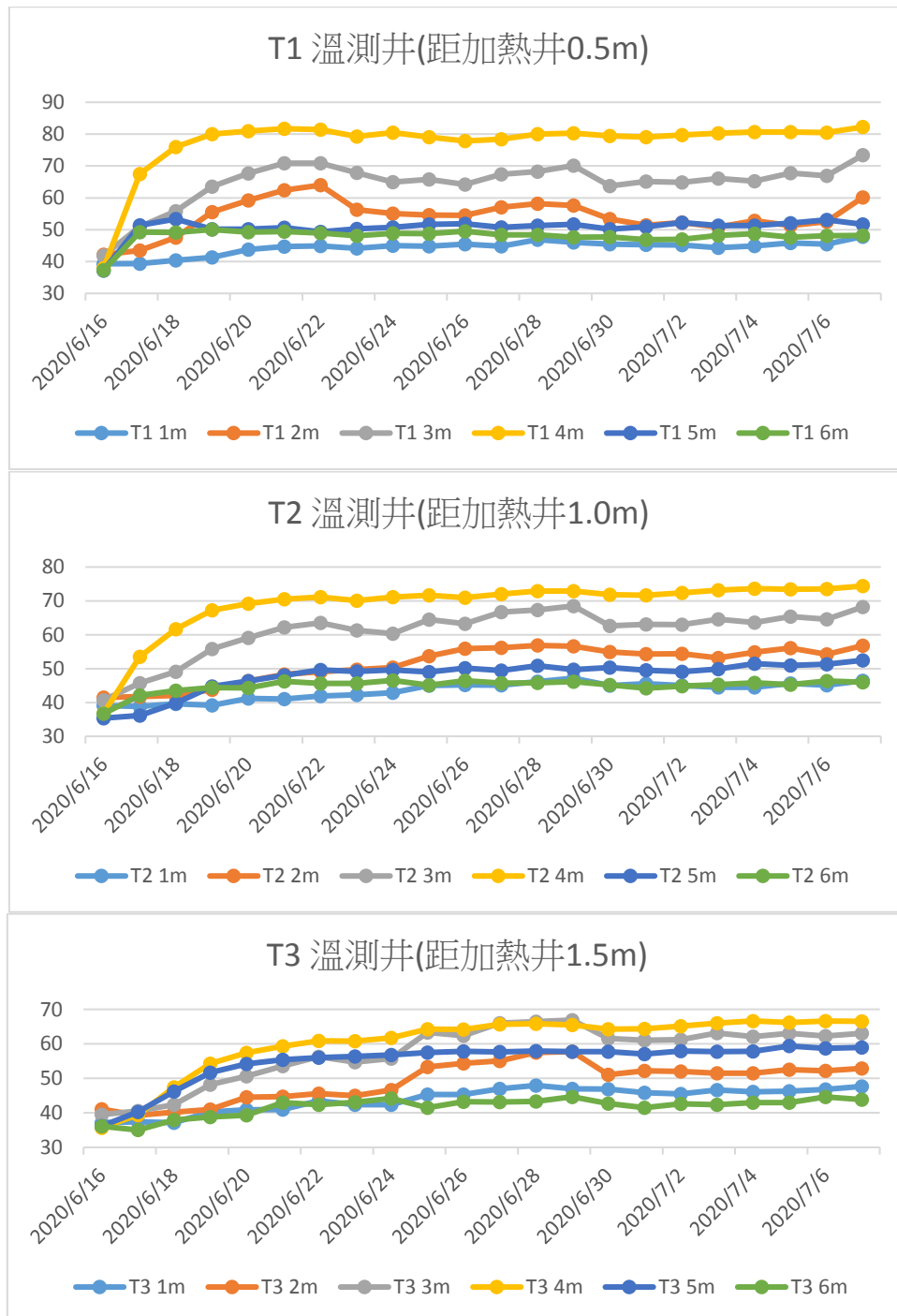


圖 5.17 熱脫附 AS/SVE 試驗 3 口溫度監測井之監測溫度歷時變化

(二) 抽氣流量紀錄

熱脫附 AS/SVE 模場試驗，除維持 3 口現地電熱井升溫操作外，並配合 1 口 AS 注氣井及 7 口 SVE 抽氣井收集加熱的土壤氣體。SVE 抽氣設備系統設定每日上午八時開始運作至下午八時結束，運作時數相當於每日操作 12



小時。受限於模場位置緊鄰場內員工餐廳及宿舍，為降低影響場內員工生活之噪音，晚間點到早上點停止 SVE 抽氣系統運作，並以低速運轉的方式抽氣。因各口 SVE 井之抽氣流量低至流量計刻度以下，流量判讀時以關閉其他井來量測單井運作的抽氣流量，再以各井判讀抽氣流量的平均值做為 SVE 抽氣系統之總抽氣流量。AS/SVE 模場試驗過程，每週記錄 SVE 系統運轉時各口 SVE 抽氣井之判讀流量，記錄於圖 5.18。每週記錄之抽氣流量有些許差異，平均總抽氣流量介於 400~434 L/min，抽氣溫度介於 45°C~52°C；除試驗末期 KSS-6 故障外，多數抽氣井抽氣流量大致隨抽氣時間遞增，推測可能因土壤加熱效應，增進水蒸氣蒸發因而收集到更多土壤氣體。部分 SVE 抽氣井抽除之土壤氣體中可發現凝結的水分，試驗末期因抽除土壤氣體溫度達 50°C 以上，致使 PVC 材質抽氣管路顯現軟化現象，如表 5.12 所示。

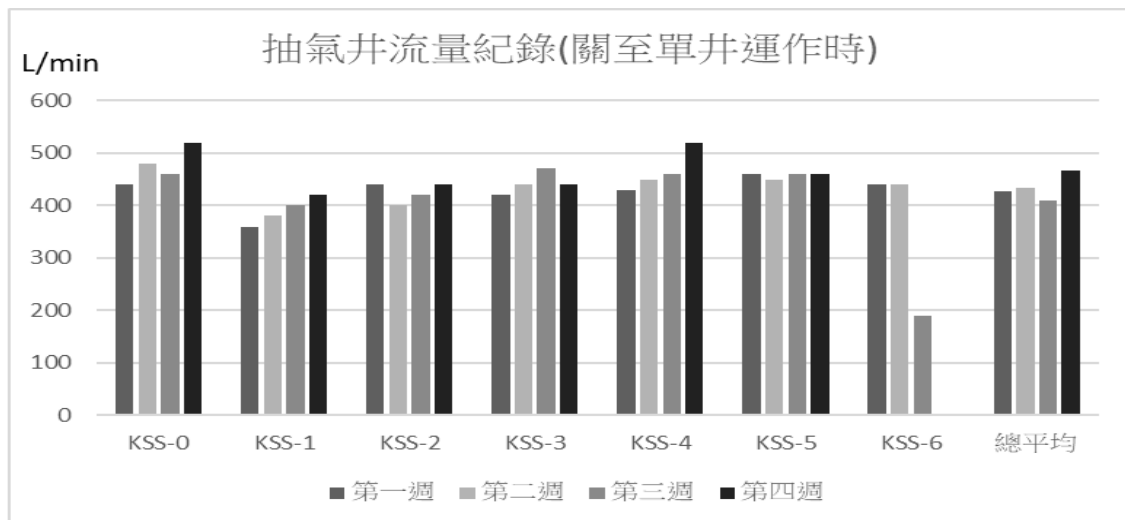


圖 5.18 熱脫附 AS/SVE 試驗抽氣井總流量紀錄之週平均圖

表 5.12 熱脫附 AS/SVE 模場試驗 SVE 抽氣水分凝結及 PVC 抽氣管路軟化

	
SVE 抽氣水分凝結	PVC 抽氣管路軟化



電阻加熱輔助土壤氣體抽除系統整治土壤三氯乙烯污染之模場試驗

(三) 抽氣 VOCs 濃度

熱脫附 AS/SVE 模場試驗過程，每日以 PID 量測 SVE 系統抽出氣體與活性碳處理後尾氣之 VOCs 濃度，每日量測之 PID 測值逐日變化記錄於圖 5.19。前期 AS/SVE 模場試驗結束之抽氣 PID 測值為 7.7 ppm，熱脫附 AS/SVE 模場試驗啟動之抽氣 PID 初始測值為 8.9 ppm，試驗過程 SVE 系統抽出氣體 PID 測值落在 6.0~14.3 ppm 之間上下浮動。

為避免整治過程造成二次污染問題，抽出氣體先流經污染防制設施再排放至大氣中，本模場試驗使用簡易之活性碳桶作為二次污染防制裝置。熱脫附 AS/SVE 模場試驗啟動時，活性碳桶裝填 50 kg 活性碳，排放尾氣的 PID 測值為 0 ppm，遠低於抽氣濃度。試驗過程活性碳隨操作時間漸達吸附飽和，2 週後排放尾氣的 PID 測值上升至 8.6 ppm，尾氣 VOCs 濃度雖不高，但與 SVE 系統抽出氣體 PID 測值 9.4 ppm 接近，顯示二次污染防制處理成效不佳。推測可能原因為活性碳達到吸附飽和，因此於 6 月 30 日添購新的活性碳 50 kg 重新裝填，汰換原填充於桶內之活性碳，直到熱脫附 AS/SVE 模場試驗結束之尾氣 PID 測值僅 1.9 ppm。熱脫附 AS/SVE 模場試驗過程系統抽氣與尾氣 PID 測值逐日變化，如圖 5.19 所示。

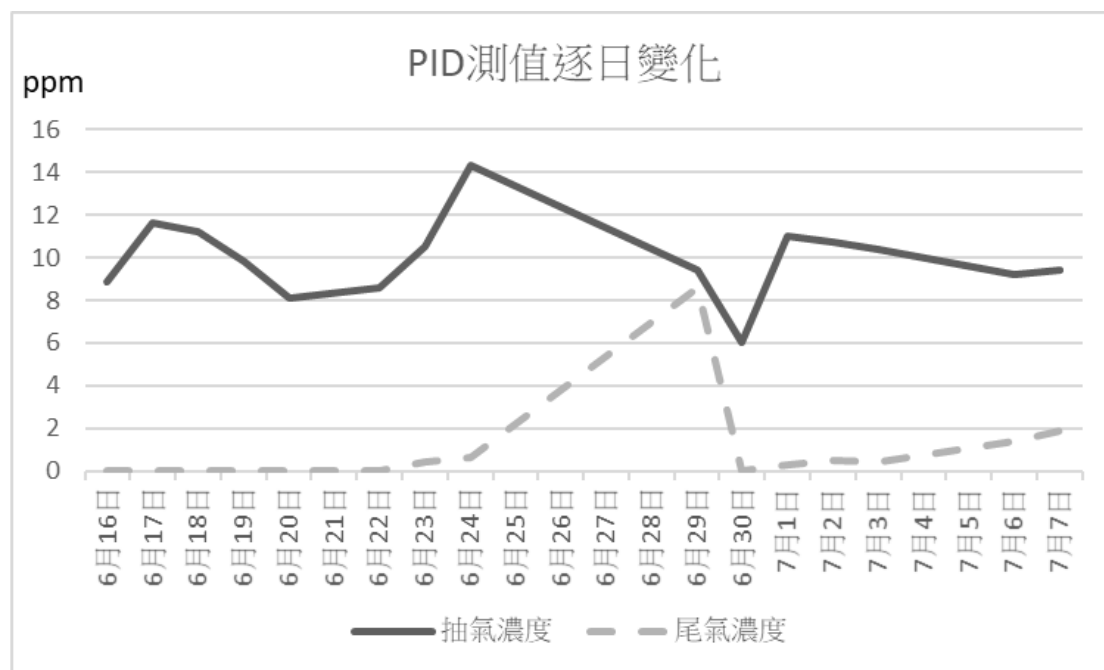


圖 5.19 熱脫附 AS/SVE 系統抽氣及尾氣 PID 測值逐日變化圖



(四)尾氣處理效率

熱脫附 AS/SVE 模場試驗使用簡易之活性炭桶作為二次污染防制裝置，由於活性炭吸附量有其上限，因此模場試驗過程須瞭解 SVE 系統操作之尾氣處理效率，以確認活性炭是否達吸附飽和。污染防制設備處理效率係指空氣污染物經污染防制設備處理後之排放量削減百分比，依同步檢測污染防制設備前端及後端廢氣濃度及排放量進行計算，其計算公式如下：

$$\text{處理效率} = (E - E_0) / E \times 100\%$$

E：經集氣系統進入污染防制設備前之空氣污染物單位排放量。

E₀：經污染防制設備後逕排入大氣之空氣污染物單位排放量。

熱脫附 AS/SVE 模場試驗過程，以每日量測 SVE 系統抽出氣體與活性炭處理後尾氣之 PID 測值，帶入上列公式計算，並將尾氣處理效率計算結果繪製於圖 5.20。模場試驗啟動時，尾氣處理效率達 100%；系統操作過程尾氣處理效率逐漸降低，活性炭尾氣處理效率最低達 8.5%，立即於 6 月 30 日重新裝填 50 kg 活性炭後，尾氣處理效率立即彈升至 100%，顯示定期每 2 週更換活性炭是有必要的。

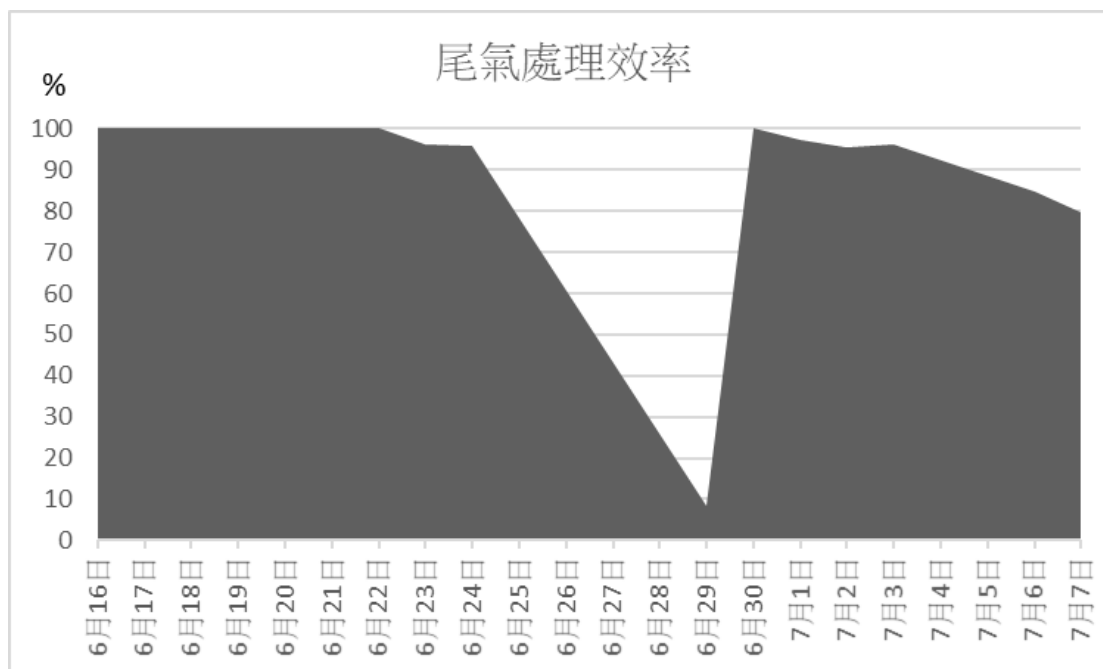


圖 5.20 熱脫附 AS/SVE 系統尾氣處理效率逐日變化圖



電阻加熱輔助土壤氣體抽除系統整治土壤三氯乙烯污染之模場試驗

(五) 估算污染物移除量

AS/SVE 模場試驗之整治成效，可利用估算 SVE 系統抽出氣體之污染物移除量做為評估指標。參考「土壤氣體抽除整治技術系統設計參考指引」，敘明以抽除氣體濃度監測，可使用理想氣體方程式($PV=nRT$)計算理論抽除量，計算公式如下：

$$W_p = \frac{PM_p V_p}{RT} = \frac{PM_p Q C_{in}}{RT \times 10^6}$$

其中

P ：壓力，單位： $mmHg$

R ：理想氣體常數， $8.314 J/g \cdot mole \cdot K$ ($0^\circ C$ ， $1atm$)

T ：溫度，單位： K

W_p ：污染物抽除總質量，單位： g

M_p ：污染物分子量： $g/mole$

V_p ：抽氣體積，單位： m^3

Q ：單位時間抽氣量，單位： L/min

C_{in} ：抽氣濃度，單位： ppm

以系統操作時紀錄之溫度、流量、壓力及每日運轉時間(共 12 小時)，並設定目標污染物為三氯乙烯(TCE)，進行每日污染抽除量估算，AS/SVE 模場試驗過程之污染物移除量逐日變化呈現於圖 5.21。熱脫附 AS/SVE 模場試驗抽氣濃度 PID 最高測值為 14.3 ppm，估算單日之理論抽除量高達 11.10 g/day，隨後估算單日之理論抽除量落在 4.32~8.91 g/day 之間。圖 5.21 理論抽除量之逐日變化趨勢與圖 5.19 之抽氣濃度之變化趨勢一致，係因 SVE 系統總抽氣流量穩定，污染物移除量推估結果主要受抽氣 VOCs 濃度影響。熱脫附 AS/SVE 模場試驗過程共 21 天，累計污染物移除總量共 156.16 g，污染物平均日移除量為 7.44 g/day，如圖 5.22 所示。

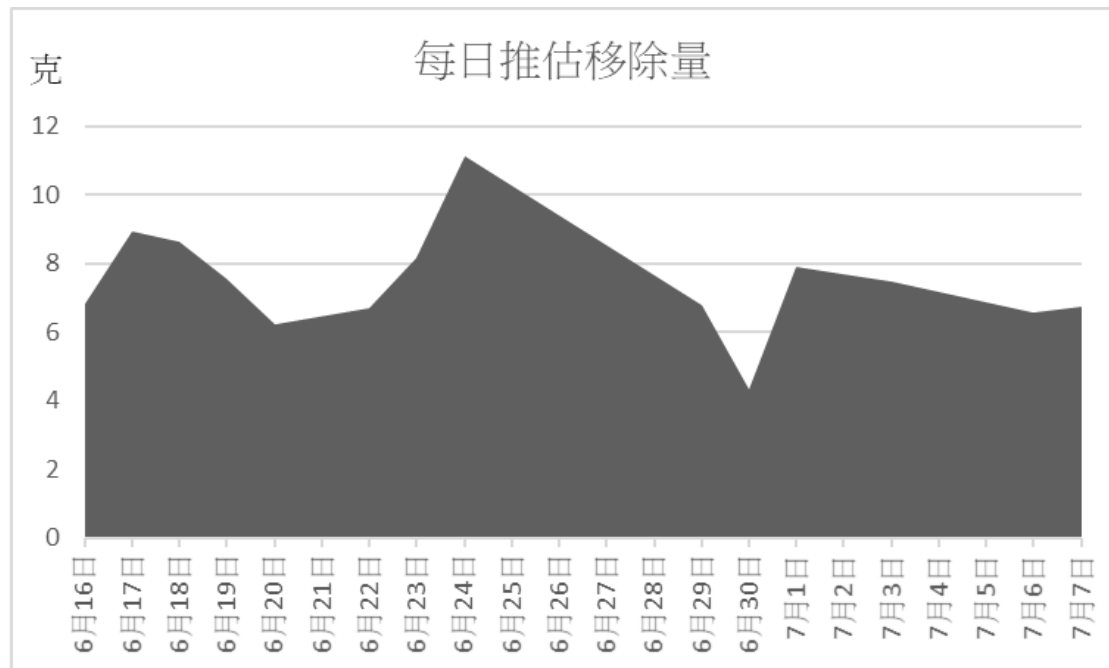


圖 5.21 熱脫附 AS/SVE 系統移除量逐日變化圖(以三氯乙烯計算)

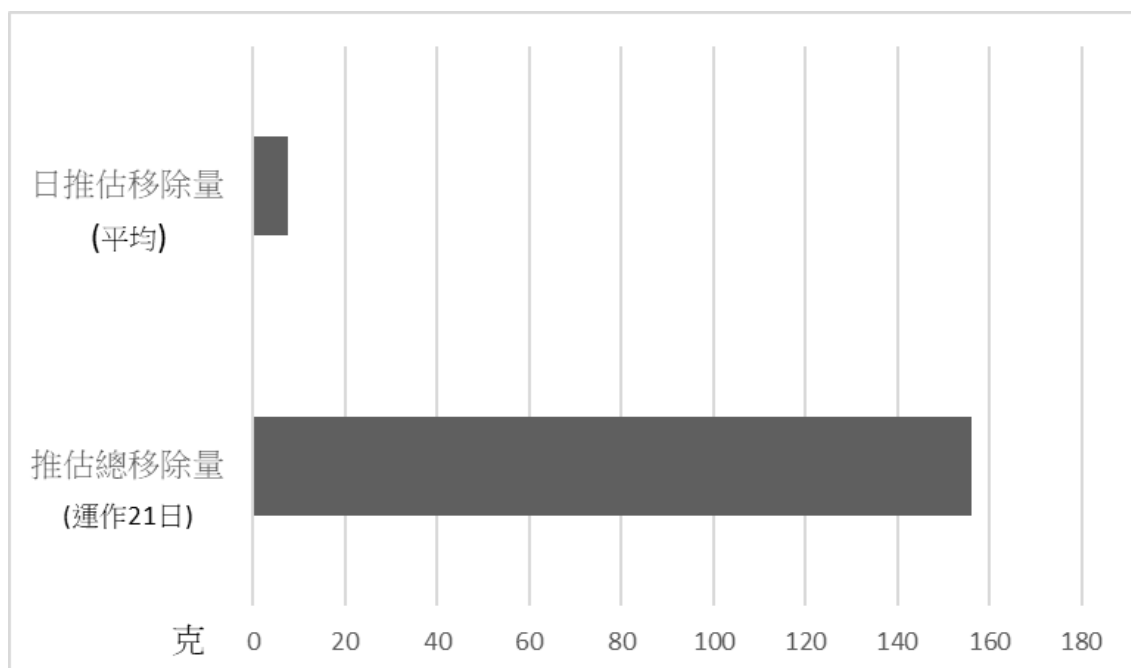


圖 5.22 熱脫附 AS/SVE 系統污染物平均日移除量與累計移除總量(以三氯乙烯計算)



電阻加熱輔助土壤氣體抽除系統整治土壤三氯乙烯污染之模場試驗

(六) 地下水污染濃度

熱脫附 AS/SVE 模場試驗於 109 年 7 月 7 日運轉結束，SVE 二次污染防治設備氣液分離桶收集到抽出液體 17.5 L，採集水樣分裝至 2 瓶 40mL 棕色 VOCs 樣品瓶，送實驗室分析 VOCs 濃度，用以估算 SVE 系統抽出液體之污染物移除量。分析結果顯示水樣三氯乙烯濃度小於定量偵測極限(QDL)，因而無法量化經由抽出液體之污染物移除量。

比照 AS/SVE 模場試驗，於 SVE 抽氣井採集地下水樣品，採集深度為井篩中段深度 5m，每口井均裝取地下水分裝至 2 瓶 40mL 棕色 VOCs 樣品瓶，送實驗室分析 VOCs 濃度。現場以多參數綜合水質分析儀量測地下水 pH、EC、ORP、TDS、溫度等基本水質參數，同時以探針型溫度計量測溫度，並待讀值穩定後記錄數值，如表 5.13 所示。模場試驗區各 SVE 井地下水三氯乙烯濃度皆小於 QDL(0.02 mg/L)，亦低於地下水污染管制標準 0.05 mg/L，整體模場試驗區未發現地下水污染潛勢。

表 5.13 熱脫附 AS/SVE 試驗 SVE 井之基本水質及三氯乙烯濃度

	探針量測溫度	水質儀器測溫	pH	EC	ORP	TDS	TCE
井號	℃	℃		μs	mv	ppm	ppm
SVE-廢	51	42.8	8.05	545	200	54.2	<QDL
KSS-0	41	40.4	7.96	615.4	189	393	<QDL
KSS-1	44	42.5	7.23	676.1	42	435.7	<QDL
KSS-2	40	38	7.09	626.5	47	406	<QDL
KSS-3	30	32	6.73	1108	78	753	<QDL
KSS-4	35	35.1	6.87	1130	84	166.3	<QDL
KSS-5	34	33.4	6.59	1068	65	721.5	<QDL
KSS-6	38	37.7	7.72	778	215	508.2	<QDL
<註1>	樣品於採樣時即為溫水，數據僅供參考						
<註2>	TCE 之檢驗方法為FROG-5000，其QDL為0.020						
<註3>	TCE 之管制標準/監測標準為 0.050/0.025						



5.4.4 熱脫附 AS/SVE 整治成效(MIP 調查比對驗證)

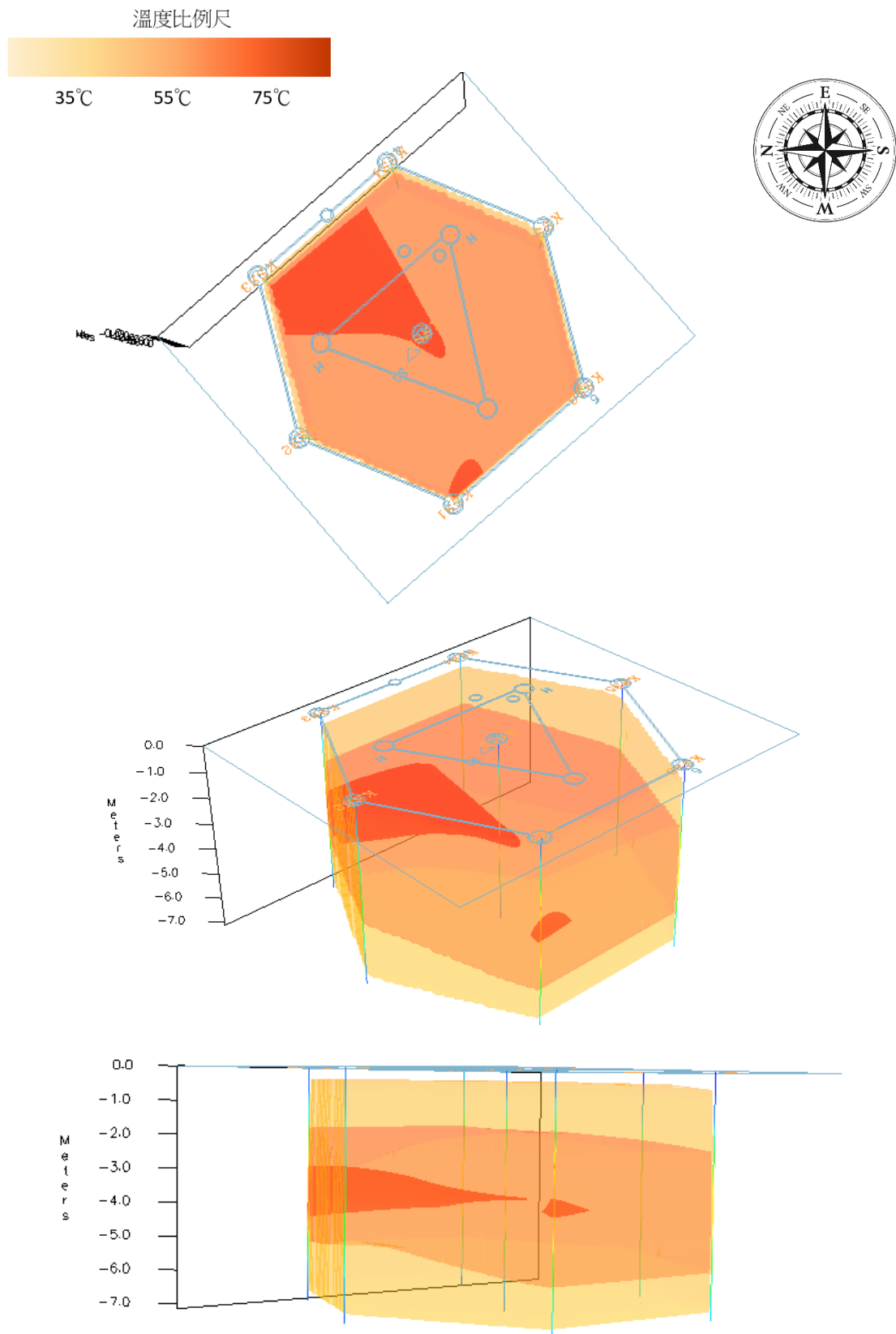
熱脫附 AS/SVE 模場試驗運轉結束後，進場執行 MIP 探測作業，利用溫度模組即時量測各 SVE 抽氣井垂直深度之現地環境溫度變化，續利用 7 口 SVE 抽氣井之量測溫度數據組建模場試驗區溫度場域之溫控分布現況，其溫度場域三維空間分布圖如圖 5.23 所示。溫度場域依溫度高低分為高溫區($>75^{\circ}\text{C}$)、中溫區($55\sim 75^{\circ}\text{C}$)與低溫區($35\sim 55^{\circ}\text{C}$)等 3 個區段，由側視圖觀察到高溫區位於深度 3 m 與 4 m 間毛細作用層，中溫區位於地下水位上深度 2~3 m 及地下水位下深度 4~6 m 之溫度擴散層，低溫區位於地下水位上深度 0~2 m 未加熱地表層與地下水位下深度 6m 以下之地下水層。MIP 探測之溫度調查結果與 3 口溫度監測井之溫度紀錄(圖 5.17)大致吻合。由俯視圖觀察到高溫區位於模場試驗區北側區域，亦為 3 口溫度監測井之佈設位置，因本模場試驗場址地下水流向為南向北或南向西北，可據此推論溫度場域之溫度傳導與地下水流向略有關連性。

完成模場試驗區溫度場域調查後，再次進場執行 MIP 探測作業，以確認模場試驗區域之污染分布現況。以先前 AS/SVE 模場試驗運轉後 MIP 調查結果做為污染背景，比較熱脫附 AS/SVE 模場試驗運轉後 MIP 調查之污染現況，做為熱脫附 AS/SVE 整治成效驗證的依據。各口 SVE 井的 MIP 探測進尺深度與前次 AS/SVE 整治成效驗證之 MIP 調查相同。MIP 搭配 XSD 偵測器分析土壤含氯有機物的污染分布，利用電導度(EC) 偵測器分類土壤質地層狀分布。MIP 鑽探點位之垂直剖面污染物分布以 FID、PID、XSD 訊號值呈現，如圖 5.24 所示。模場試驗區所有 MIP 調查點位皆發現 FID 訊號明顯增加，PID 訊號普遍略增，但 XSD 訊號大致持平。此 FID、PID、XSD 訊號值呈現不一致的奇特現象，推測為模場試驗場址於地下水上游執行生物藥劑灌注作業所致。一般生物藥劑成分為直鏈狀有機化合物為主，且生物厭氧分解易生成甲烷，因而 FID 訊號反應最敏感；PID 偵測以環狀有機化合物為標的，針對生物藥劑之 PID 訊號反應明顯較弱；XSD 偵測以含氯有機化合物為標的，針對生物藥劑之 XSD 訊號幾無反應。

結合多點 MIP 剖面探測結果，將圖 5.24 此次調查點位之剖面 XSD 訊號轉繪於圖 5.25 試驗模場之污染物三維空間分布圖。其中灰色是表示推估之土壤質地，淺灰到深灰為砂土(粗顆粒)漸進至粉黏土(細顆粒)；藍、綠、紅分別代表低濃度、中濃度及高濃度污染物訊號強度。MIP 調查比對驗證結果顯示污染物確實透過熱脫附 AS/SVE 模場運轉而移除，模場試驗區域深度 6 公尺以下中濃度區幾近消失，且低濃度區涵蓋範圍亦大為減少。



電阻加熱輔助土壤氣體抽除系統整治土壤三氯乙烯污染之模場試驗



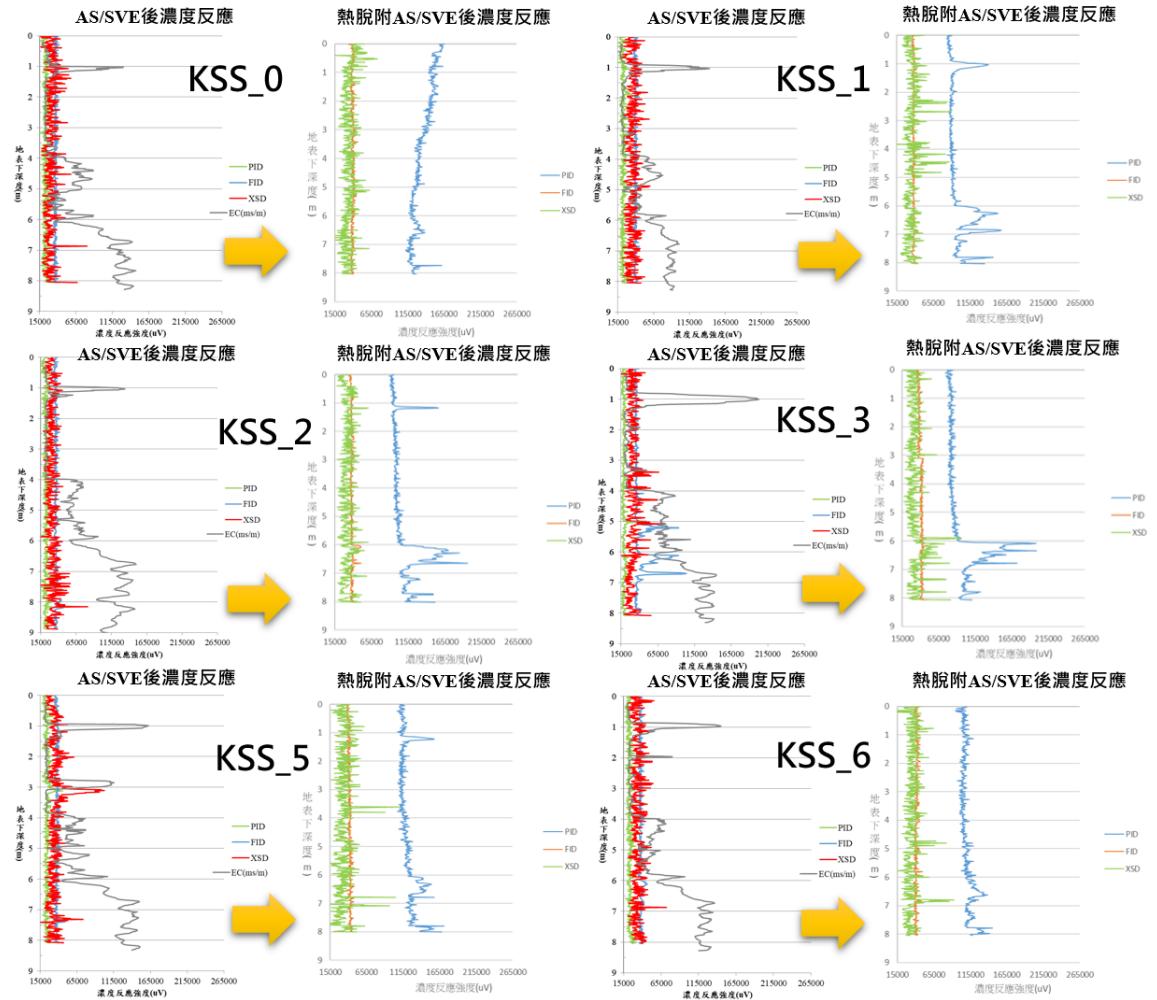
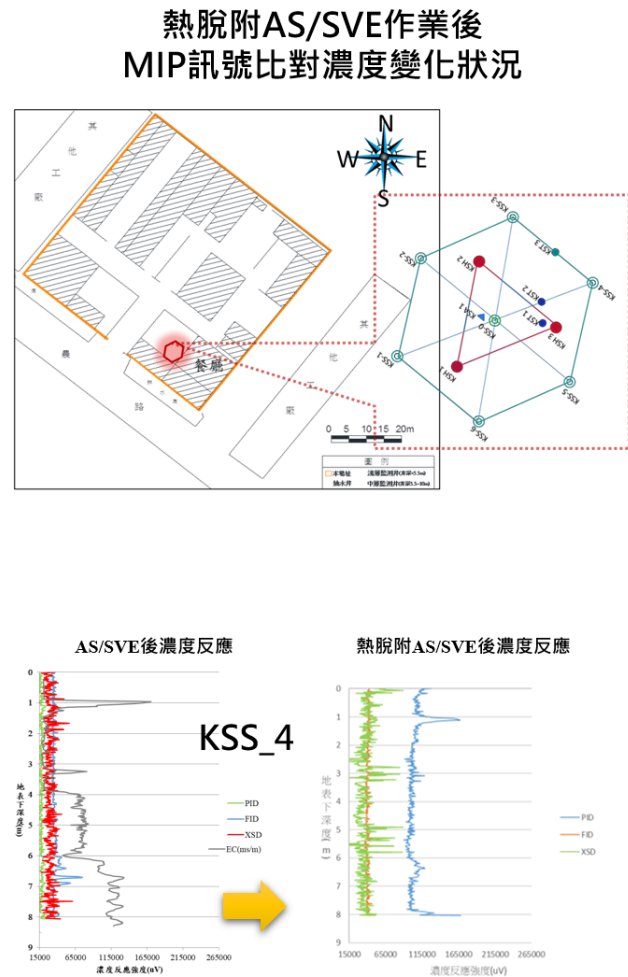


圖 5.24 比較經熱脫附 AS/SVE 運轉前後之 MIP 污染分佈調查結果圖

電阻加熱輔助土壤氣體抽除系統整治土壤三氯乙烯污染之模場試驗

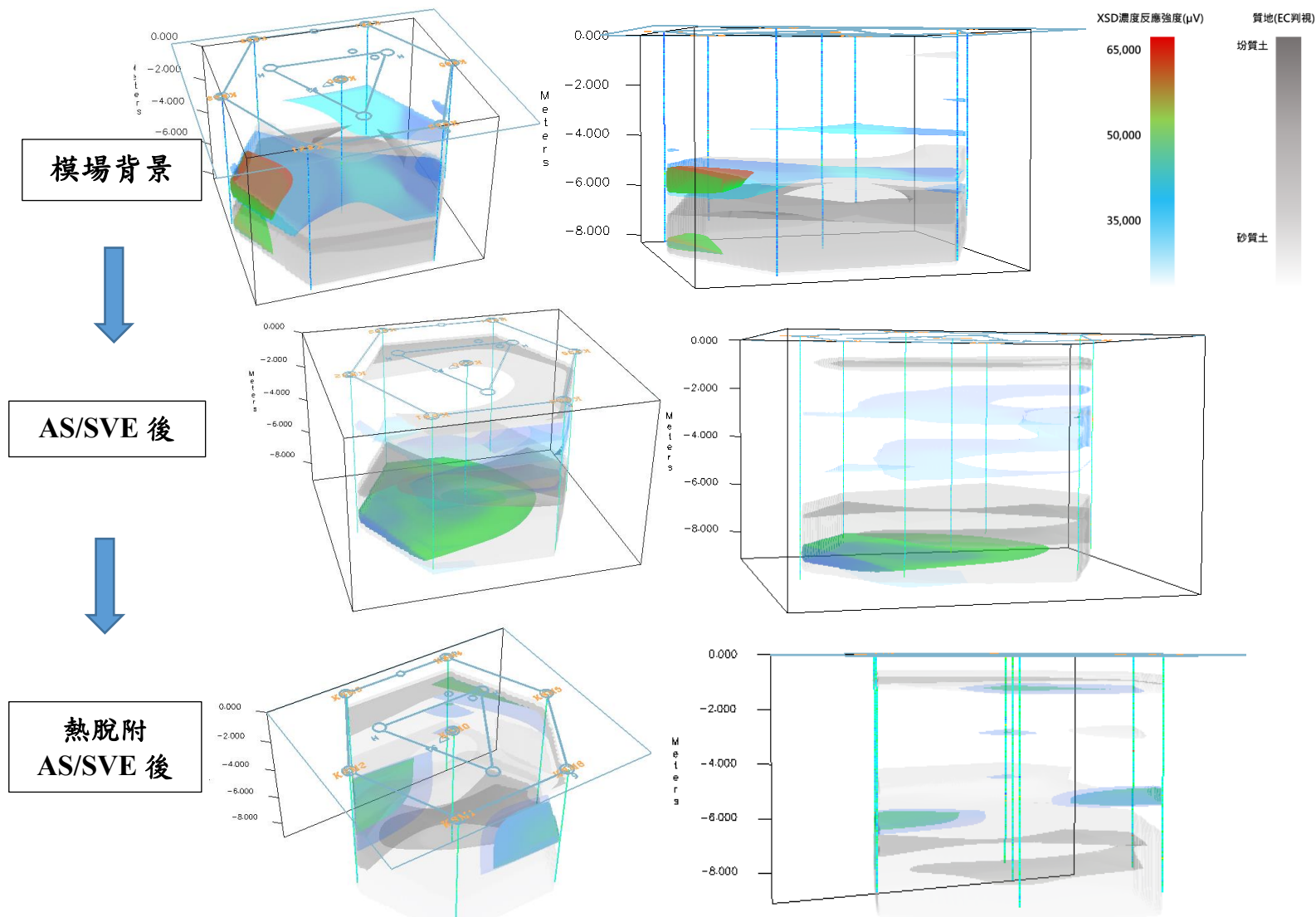


圖 5.25 經 AS/SVE 運轉與熱脫附 AS/SVE 運轉前後 MIP 污染分佈調查結果之三維空間圖



5.5 整治成效評析

本模場試驗整治成效評析以 AS/SVE 系統操作成效與加熱輔助 AS/SVE 系統操作成效進行比較，分別從抽氣污染物濃度、污染物抽除速率、污染移除量及污染殘留量等 4 個面向，評估 AS/SVE 系統加熱與否對整治成效之影響。由於加熱輔助 AS/SVE 試驗係接續在 AS/SVE 試驗結束後運作，污染物初始濃度基準不同，且觀察 AS/SVE 系統僅在啟動日之數值偏高與後續常態值變化差異甚大，為使兩者之比較具有意義，故刪除試驗首日之極端值進行討論。

(一) 抽氣污染物濃度

依據 AS/SVE 系統與加熱輔助 AS/SVE 系統操作期間紀錄，每日量測之抽氣 PID 濃度繪製於圖 5.26。AS/SVE 試驗最高抽氣濃度為 9.6 ppm，最低抽氣濃度為 6.4 ppm，平均抽氣濃度為 8.2 ppm。加熱輔助 AS/SVE 試驗最高抽氣濃度 14.3 ppm，最低抽氣濃度為 6.0 ppm，平均抽氣濃度為 10.0 ppm。以最高抽氣污染物濃度比較，即使加熱輔助 AS/SVE 試驗係接續在 AS/SVE 試驗結束後運作，加熱輔助 AS/SVE 系統高於 AS/SVE 系統 48.9%。圖 5.26 逐日抽氣污染物濃度變化趨勢顯示，AS/SVE 系統皆小於 10 ppm，而加熱輔助 AS/SVE 系統則有 12 天大於 10 ppm。若以平均抽氣污染物濃度做為比較基準，模場試驗期間加熱輔助 AS/SVE 系統較 AS/SVE 系統增大抽氣污染物濃度 1.84 ppm，約提升整治效率 22.5%。

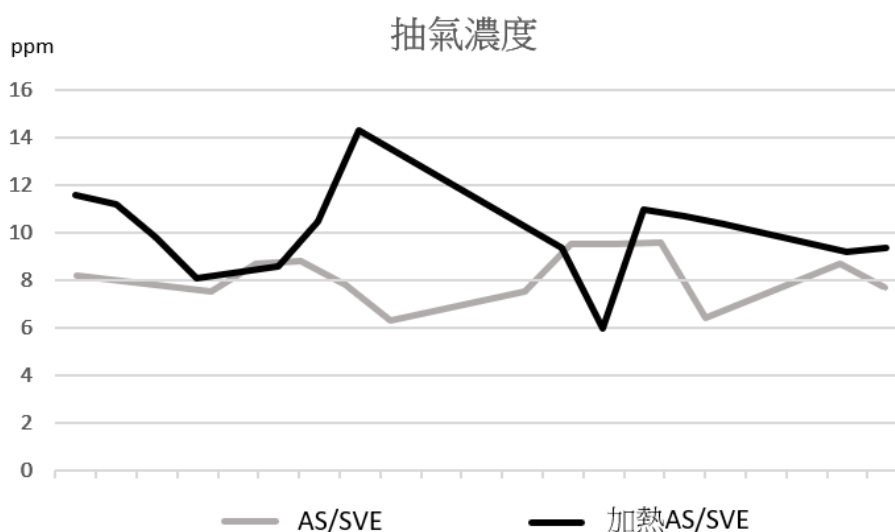


圖 5.26 AS/SVE 系統與加熱輔助 AS/SVE 系統之抽氣 PID 濃度變化



電阻加熱輔助土壤氣體抽除系統整治土壤三氯乙烯污染之模場試驗

(二) 污染物抽除速率

依據記錄量測的抽氣濃度、流量、溫度等數據，可以公式推算出每日污染物抽除速率，AS/SVE 系統與加熱輔助 AS/SVE 系統比較之逐日污染物抽除速率變化趨勢，如圖 5.27 所示。AS/SVE 試驗污染物抽除速率最高為 0.64 g/hr，最低抽除速率為 0.46 g/hr，平均抽除速率為 0.56 g/hr。加熱輔助 AS/SVE 試驗污染物抽除速率最高為 0.93 g/hr，最低抽除速率為 0.36 g/hr，平均抽除速率為 0.62 g/hr。以最高污染物抽除速率比較，即使加熱輔助 AS/SVE 試驗係接續在 AS/SVE 試驗結束後運作，加熱輔助 AS/SVE 系統高於 AS/SVE 系統 45.3%。圖 5.27 逐日污染物抽除速率變化趨勢顯示，AS/SVE 系統皆小於 0.7 g/hr，而加熱輔助 AS/SVE 系統則有 6 天大於 0.7 g/hr。若以平均污染物抽除速率做為比較基準，模場試驗期間加熱輔助 AS/SVE 系統較 AS/SVE 系統增大污染物抽除速率 0.06 g/hr，約提升整治效率 10.7%。

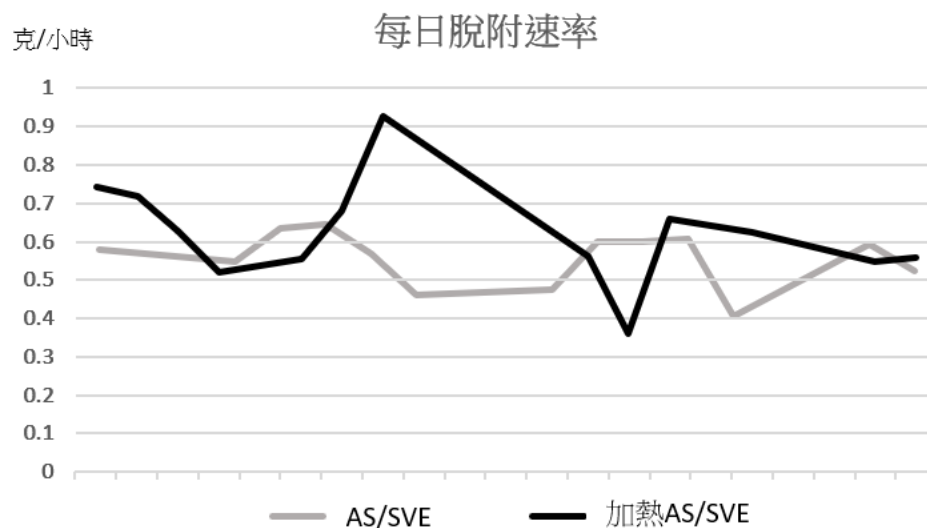


圖 5.27 AS/SVE 系統與加熱輔助 AS/SVE 系統之逐日污染物抽除速率變化

(三) 污染移除量

依據公式推估之每日污染物抽除速率，乘以每日操作時數計算每日污染移除量，AS/SVE 系統與加熱輔助 AS/SVE 系統比較之逐日污染移除量變化趨勢，如圖 5.28 所示。AS/SVE 試驗最高污染移除量為 5.15 g，最低污染移除量為 3.24 g，平均污染移除量為 4.46 g。加熱輔助 AS/SVE 試驗最高污染移除量為 11.10 g，最低污染移除量為 4.32 g，平均污染移除量為 7.48 g。



第五章結果與討論

以最高污染移除量比較，加熱輔助 AS/SVE 系統高於 AS/SVE 系統 115.5%；以最低污染移除量比較，加熱輔助 AS/SVE 系統高於 AS/SVE 系統 33.3%。若以平均污染移除量做為比較基準，模場試驗期間加熱輔助 AS/SVE 系統較 AS/SVE 系統增加每日污染移除量 3.02 g，約提升整治效率 67.7%。模場試驗期間加熱輔助 AS/SVE 系統累積總移除量為 156.16 g，AS/SVE 系統累積總移除量為 91.33 g，如圖 5.29 所示。若以累積污染移除量做為比較基準，模場試驗期間加熱輔助 AS/SVE 系統較 AS/SVE 系統增加污染物移除量 64.83 g，約提升整治效率 71.0%。

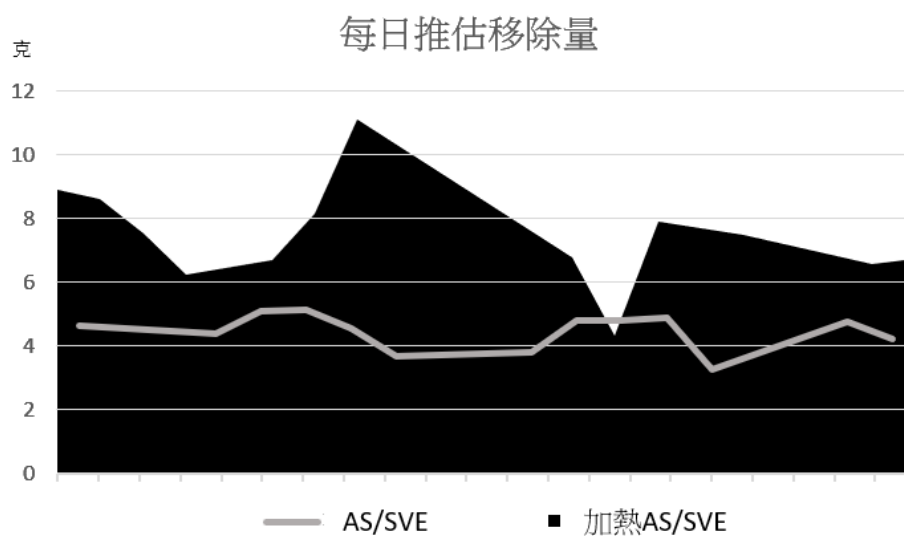


圖 5.28 AS/SVE 系統與加熱輔助 AS/SVE 系統推估之每日污染移除量變化

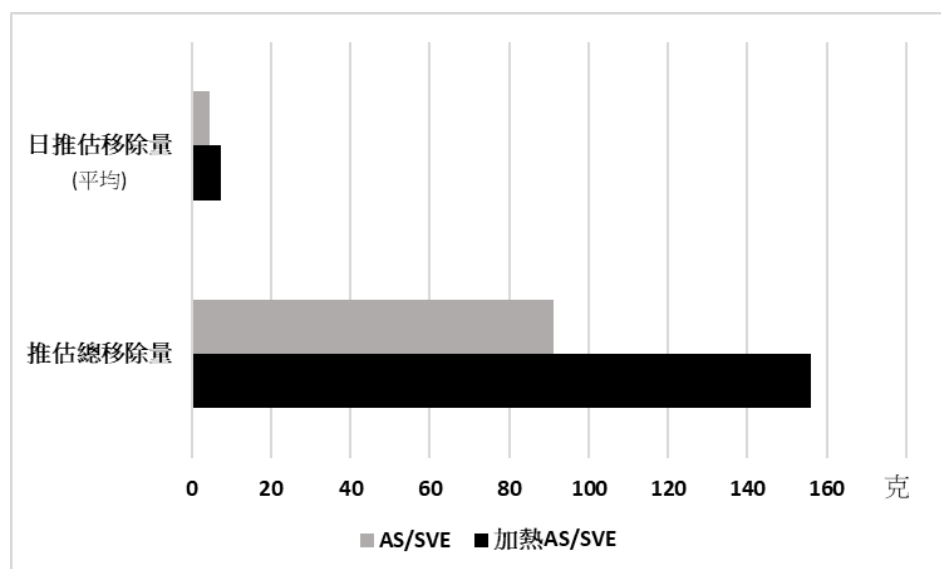


圖 5.29 AS/SVE 系統與加熱輔助 AS/SVE 系統推估之累積污染移除量比較



電阻加熱輔助土壤氣體抽除系統整治土壤三氯乙烯污染之模場試驗

(四)MIP 推估污染殘餘體積量

參考 MIP 調查結果繪製之三維空間分布圖，以高濃度、中濃度及低濃度分類，利用 Image 估算污染殘餘體積，估算過程如圖 5.30 所示。以此方式分別估算高濃度區、中濃度區及低濃度區之污染殘留體積量，模場試驗各階段估算之污染殘留體積量比較，如圖 5.31 所示。模場背景原始之高濃度區 0.209 m^3 、中濃度區 0.359 m^3 、低濃度 1.681 m^3 ，經 AS/SVE 試驗後高濃度區 0.000 m^3 、中濃度區 1.792 m^3 、低濃度 6.890 m^3 ，續經加熱輔助 AS/SVE 試驗後高濃度區 0.000 m^3 、中濃度區 0.637 m^3 、低濃度 0.722 m^3 。

圖 5.31 對比結果發現，AS/SVE 試驗後高濃度區域明顯消失，但造成中濃度區及低濃度區之體積較模場背景增加了 499.7%及 409.8%。顯示經 AS/SVE 系統操作雖可移除高濃度區域污染物，相對亦造成污染物傳輸擴散之風險。而加熱輔助 AS/SVE 試驗後，中濃度區及低濃度區之體積則有明顯降低，分別為 AS/SVE 試驗後推估污染殘餘體積量的 35.5%及 10.5%。顯示加熱輔助 AS/SVE 系統操作可大幅地減少污染殘餘體積，同時亦降低污染物傳輸擴散之風險。

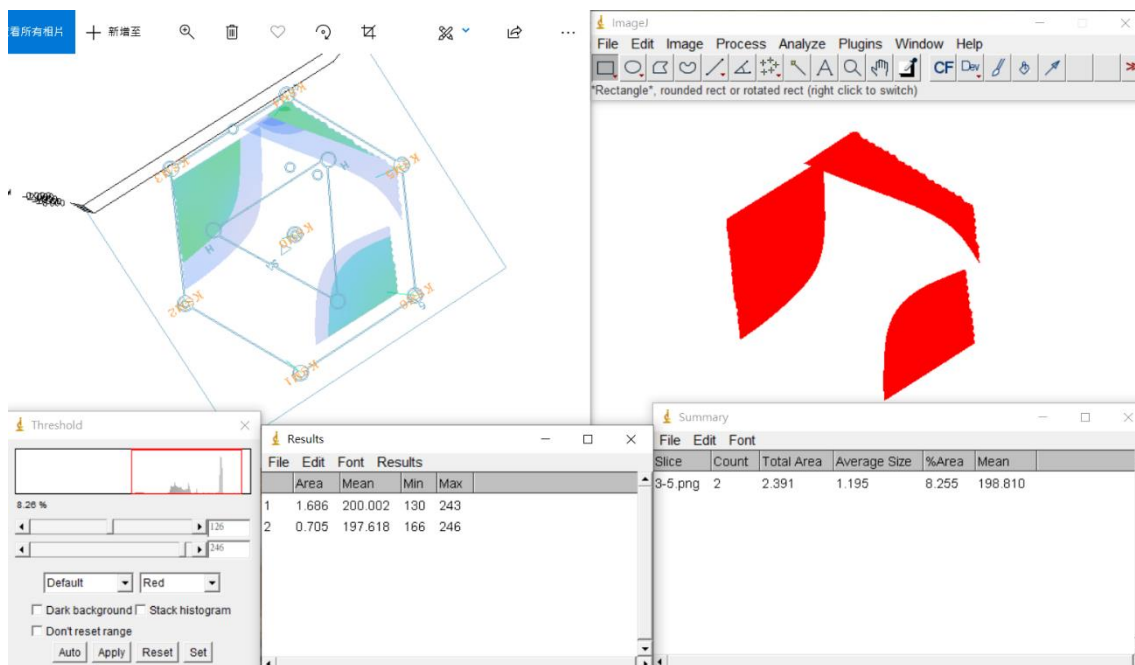


圖 5.30 使用 Image J 估算污染殘餘體積之過程截圖



第五章結果與討論

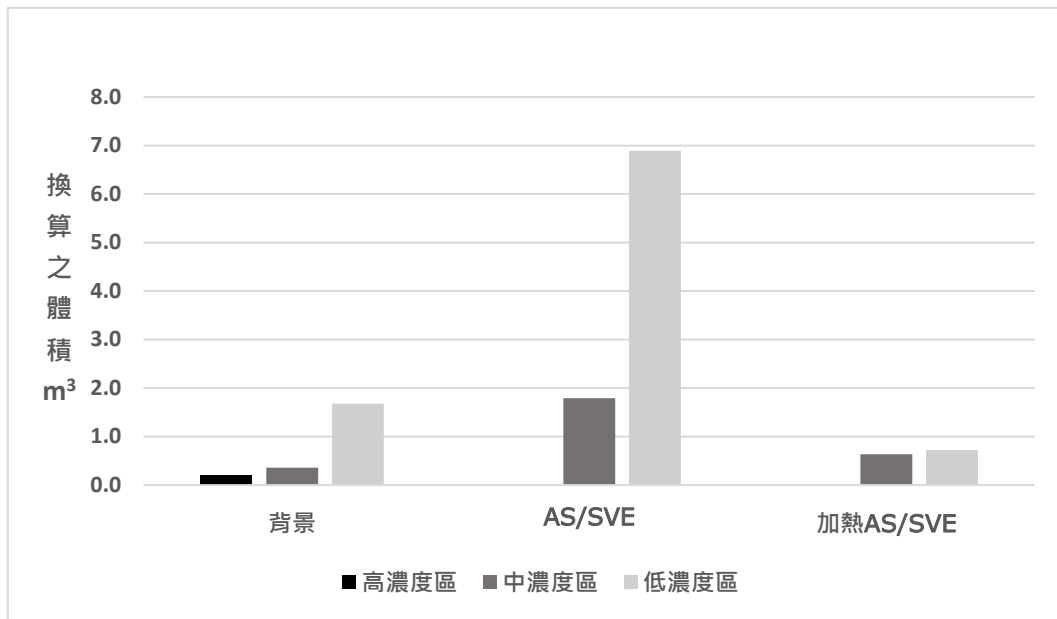


圖 5.31 模場試驗各階段估算之高、中、低濃度區污染殘留體積量比較



5.6 成本效益評估

關於操作成本，根據設備之耗電量與操作時數及天數可估計總用電度數，再乘以工業用電每度 2 元可估算總電費。本研究於裝設電熱設備時，即裝設系統用電之電錶，以記錄之用電度數與工業用電每度電費，亦可計算總電費。每日人事費乘以操作天數，可得知總人事費用。將本模場之操作成本分為 AS/SVE 系統及加熱輔助 AS/SVE 系統，比較彙整於表 5.14。其中 AS/SVE 系統操作成本總花費為 34,337 元，而加熱輔助 AS/SVE 系統操作成本之費用共計 52,806 元，兩者差異主要源自於電熱設備所增加的能耗及電費。以表 5.14 操作成本做為估算基礎，AS/SVE 模場試驗總污染移除量 91.3 g，去除每克 TCE 花費 376 元；熱脫附 AS/SVE 模場試驗總污染移除量 156.16 g，去除每克 TCE 花費 338 元，相較之下熱脫附 AS/SVE 工法仍具有操作成本優勢。

為進一步了解加熱輔助 AS/SVE 系統所增加能耗是否具有實際效益，故假設若模場未改用加熱輔助 AS/SVE 系統，而繼續使用 AS/SVE 系統進行整治，若要達到相同的結果可能耗費之時間及經費成本。以加熱輔助 AS/SVE 系統操作推估之總污染移除量 156.16 g 作為計算之基準，並輔以 AS/SVE 系統平均每日推估移除量，推算需操作天數，進一步推估操作成本。AS/SVE 系統去除首日極端值之平均每日移除量為 4.46 g/day，若以此假設估算需維持操作 36 天。如若加上考慮 AS/SVE 系統抽氣流量紀錄有隨時間降低的趨勢，則平均每日移除量可大致推估為 4.00 g/day，此條件下仍須繼續運轉 40 天。將各條件之操作時間，列入表格計算結果彙整於表 5.15。

依據表 5.15 可以了解到 AS/SVE 系統長期耗用之電費較低，且無論何種假設均低於加熱輔助 AS/SVE 系統，電費依操作天數少到多，分別較加熱輔助之系統減少：10,247 及 9,018 元，也就是僅有加熱輔助 AS/SVE 系統的 51.9%及 57.7%，而彼此差距會隨著操作天數增加而減少。但即便如此由於 AS/SVE 系統整治期程較長，同樣也可以直接觀察到，其增加之人事費反而皆遠超過加熱輔助 AS/SVE 系統，依操作天數少到多，分別較加熱輔助之系統增加：22,500 及 28,500 元，也就是等同於加熱輔助 AS/SVE 系統的 171%及 191%，隨著操作時間增加差距越發明顯。以合計費用來看也是，隨著 AS/SVE 系統操作時間增加，其操作成本較加熱輔助 AS/SVE 系統分別提高了：12,253 元及 19,482 元，相當於增加了 123%與 137%。比較結果說明加



熱輔助 AS/SVE 系統雖短期能耗較高，但若可降低時間成本，就能大幅減少人事費用，進而節省總花費。

表 5.14 本模場試驗之操作成本估算表

	AS/SVE	加熱 AS/SVE
耗電量(Kw)	2.2+4.2	-
每日電度數	153.6	-
操作天數	19	21
合計電度數	2,918.4	10,653
工業用電一度(元)	2	2
合計電費(元)	5,837	21,306
每日人事費(元)	1,500	1,500
合計人事費(元)	28,500	31,500
合計費用(元)	34,337	52,806

表 5.15 使用加熱輔助 AS/SVE 或繼續使用 AS/SVE 之操作成本比較表

	AS/SVE		電熱設備
耗電量(Kw)	2.2+4.2	2.2+4.2	-
每日電度數	153.6	153.6	-
操作天數	36	40	21
合計電度數	5529.6	6144	10653
工業用電一度(元)	2	2	2
合計電費	11059	12288	21306
每日人事費	1500	1500	1500
合計人事費	54000	60000	31500
合計費用	65059	72288	52806



第六章 結論與建議

6.1 結論

本計畫團隊完成電熱輔助土壤氣體抽除系統之開發，並於模場試驗場址建置之熱脫附改善井場，包括電源控制箱、現地加熱井、溫度監測井、土壤氣體抽除井(或雙相抽除井)、曝氣井，二次污染防治設備。於 109 年 8 月 10 日本計畫團隊以「**電熱輔助土壤及地下水抽除系統**」提出中華民國專利申請，並以熱脫附 AS/SVE 模場試驗成果做為實施案例說明。

於模場試驗區域進行薄膜界面探測儀(MIP)鑽探調查，搭配 XSD 偵測器分析土壤揮發性有機物的污染分布，結合多點 MIP 剖面探測結果，成功建立模場試驗區域之 3D 場址污染概念模型。模場試驗過程中，應用 MIP 調查工具溫度監測模組，即時量測鑽探點位垂直深度之現地環境溫度變化，結合多點位剖面量測溫度數據，成功組建模場試驗區溫度場域之 3D 溫度分布現況。於 109 年 10 月 7 日本計畫團隊以「**地下三維度溫度量測方法**」提出中華民國專利申請，並以本熱脫附 AS/SVE 模場試驗 3D 溫度場域量測結果做為案例。

AS/SVE 系統平均總抽氣流量介於 410~480 L/min，抽氣 2 週後土壤孔隙略有阻塞的趨勢，抽出氣體 PID 測值介於 6.3~9.6 ppm。AS/SVE 模場試驗過程共 19 天，累計污染物移除總量共 91.3 g，污染物平均日移除量為 4.8 g/day。MIP 調查比對驗證結果發現，AS/SVE 系統運作造成污染物往各 SVE 抽氣井移動，並有向上傳輸移動的趨勢，模場試驗區域深度 6 公尺處原高濃度區消失，較深層處次高濃度污染範圍增加，淺層低濃度範圍亦增加。模場試驗區整體地下水污染潛勢不高，地下水三氯乙烯濃度最高為 0.032 mg/L。

熱脫附改善井場升溫試驗發現，距離電熱井越遠整體土壤平均升溫速率越慢，以地下水位上方毛細作用層的土壤升溫效果最為明顯，評估電熱井的熱傳影響半徑僅約 1.0 m。現地熱脫附 AS/SVE 模場試驗啟動 3 口電熱井，加熱溫度為 450°C，採全天 24 小時加熱模式，整體模場試驗區土壤溫度可維持 60°C 以上，因此增進未飽合層 AS/SVE 抽除成效。熱脫附 AS/SVE 系統平均總抽氣流量介於 400~434 L/min，抽氣溫度介於 45°C~52°C，多數抽氣井抽氣流量大致隨抽氣時間遞增，抽出氣體 PID 測值介於 6.0~14.3 ppm。熱脫附 AS/SVE 模場試驗過程共 21 天，累計污染物移除總量共 156.16 g，污染物



第六章結論與建議

平均日移除量為 7.44 g/day。MIP 調查比對驗證結果顯示，污染物確實透過熱脫附 AS/SVE 模場運轉而移除，模場試驗區域深度 6 公尺以下中濃度區幾近消失，且低濃度區涵蓋範圍亦大為減少。整體模場試驗區未發現地下水污染潛勢，各 SVE 井地下水三氯乙烯濃度皆小於 QDL(0.02 mg/L)。

本模場試驗整治成效評析，模場試驗期間加熱輔助 AS/SVE 系統較 AS/SVE 系統增大平均抽氣污染物濃度 1.84 ppm，約提升整治效率 22.5%；增大污染物平均抽除速率 0.06 g/hr，約提升整治效率 10.7%；增加污染物移除量 64.83 g，約提升整治效率 71.0%。AS/SVE 試驗後高濃度區域明顯消失，但造成中濃度區及低濃度區之體積較模場背景增加了 499.7%及 409.8%。而加熱輔助 AS/SVE 試驗後，中濃度區及低濃度區之體積則有明顯降低，分別為 AS/SVE 試驗後推估污染殘餘體積量的 35.5%及 10.5%。

加熱輔助 AS/SVE 系統適合處理淺層土壤及地下水污染物，利用現地電熱井加熱土壤與地下水，藉由熱傳導作用促進未飽和層土壤污染物升溫加速揮發，可大幅地減少污染殘餘體積，同時亦降低污染物傳輸擴散之風險。加熱輔助 AS/SVE 系統短期能耗較高，操作費用較高，適用於短期局部區域的污染改善作業，整治成效明顯。比對移除每克污染物之操作成本，熱脫附 AS/SVE 系統(338 元/g-TCE)仍較 AS/SVE 系統(376 元/g-TCE)更具競爭優勢。



6.2 建議

1. AS/SVE 系統操作雖可移除未飽合層高濃度區域污染物，本模場試驗發現較深層處次高濃度污染範圍增加，淺層低濃度範圍亦增加，可能造成污染物傳輸擴散之風險。而加熱輔助 AS/SVE 系統操作，並未發現類似污染物傳輸擴散之現象，適用於淺層土壤及地下水污染物整治工法之較佳選擇。
2. 試驗場址為土壤及地下水污染整治場址，核定整治期程至 110 年 3 月，目前處於整治階段後期，場址污染分布僅剩零星污染區塊，沒有高濃度污染區域可供模場試驗展現明顯的整治成效。後續可媒合高污染濃度場址，進一步驗證加熱輔助 AS/SVE 系統之實務應用性。
3. 加熱輔助 AS/SVE 系統並不侷限於土壤三氯乙烯污染整治，後續可尋找重質油品污染場址，進行模場試驗，以深化加熱輔助 AS/SVE 系統之操作控制。
4. 加熱輔助 AS/SVE 系統可創造溫度場域，結合生物整治工法，土壤升溫控制在 45°C 以內，可促進生物分解速率，後續可申請模場試驗進行技術驗證。



第七章參考文獻

- 行政院環保署。2008。土壤及地下水受比水重非水相液體污染場址整治技術選取、系統設計要點與注意事項參考手冊。台北。
- 行政院環保署。2008。土壤及地下水受比水重非水相液體污染場址之初步篩試調查、查證及驗證作業技術參考手冊。台北。
- 行政院環保署。2015。土壤氣體抽除整治技術系統設計參考指引。台北。
- 陳呈芳，電阻加熱技術於土壤及地下水污染整治之應用，經濟部工業局全球資訊網 http://ebooks.lib.ntu.edu.tw/1_file/moeaidb/012570/item2f-1f.pdf
- 賴宜欣，電阻加熱處理應用於污染源整治之案例，經濟部工業局全球資訊網 http://ebooks.lib.ntu.edu.tw/1_file/moeaidb/012589/item2f-1aj.pdf
- 林威州，土壤氣體抽除法(Soil Vapor Extraction)整治技術探討，
<https://proj.ftis.org.tw/eta/epaper/PDF/ti039-2.pdf>
- 黃智，土壤與地下水污染整治技術與整合策略，經濟部工業局全球資訊網 http://ebooks.lib.ntu.edu.tw/1_file/moeaidb/012728/2005091404.pdf
- Air Force Center for Engineering and the Environment (AFCEE), (2007) AFCEE Source Zone Initiative, Contributing Authors – T. Sale, B. Twitchell, F. Marinelli, Colorado State University, - T. Illangasekare, B. Wilking, and D. Rodriguez, Colorado School of Mines, Final Submitted to AFCEE September 2007
- Chapman, S.W. and Parker, B.L., (2005) Plume Persistence Due to Aquitard Back Diffusion Following Dense Nonaqueous Phase Liquid Removal or Isolation, Water Resource Research, Vol. 41, No. 12.
- Henry, S.M., Hardcastle, C.H., Warner, S.D. (2002) Chlorinated Solvent and DNAPL Remediation: An Overview of Physical, Chemical, and Biological Processes. American Chemical Society, Washington, DC.
- Morrison, R.D., Murphy, B. L., Doherty, R. E. Chlorinated Solvents., in Environmental Forensics. Contaminant Specific Guide, ed. R.D. Morrison, and B. L. Murphy, Elsevier Academic Press, 2006.
- Palmer, C.J., Johnson, R.L. (1989) Physucal Processes Controlling the Transport of Non-aqueous Phase Liquids in the Subsurface. Seminar Publication:



電阻加熱輔助土壤氣體抽除系統整治土壤三氯乙烯污染之模場試驗

Transport and Fate of contaminants in the Subsurface. EPA/625/4-89/019 23-28. United States Environmental Protection Agency. USA.

Sale, T., Newell, C., Stroo, H., Hincsee, R., and Johnson, P. (2008) Frequently Asked Questions Regarding Management of Chlorinated Solvents in Soils and Groundwater . ESTCP.

EPA. (1995) Remediation case Studies: Bioremediation, Federal Remediation Technologies Roundtable Report, EPA/542/R-97/002.

EPA. (1999) Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide.

USDOE. (1995) Six Phase Soil Heating, Innovative Technology Summary Report, Office of Environmental Management and Office of Science and Technology, U. S. Department of Energy.

