



行政院環境保護署

110年度土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案

染色輔助雷射激發螢光技術應用於含氯 有機物污染調查之研究(第一年)

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： 110年 3 月 19 日起至
111年 2 月 28 日止

中 華 民 國 111 年 2 月 印 製



書脊背請以標楷體14pt 打印



染色輔助雷射激發螢光技術應用於含氯有機物污染調查之研究
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					
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	染色輔助雷射激發螢光技術應用於含氯有機物污染調查之研究					
	英文	The Study on Contaminant Investigation of Chlorinated Compounds by Dye Assisted Laser Induced Fluorescence Technology					
	關鍵字	染料、雷射激發螢光、含氯有機物、污染調查					
執行期程		自民國 110 年 3 月 19 日起 至民國 111 年 2 月 28 日止					
專案主持人		姓名：吳庭年		E-mail：wutn@mail.ksu.edu.tw		專線：06-2050456 手機：093539938	
專兼任人員		姓名：林沁叡		E-mail：benbiber@gmail.com		專線： 手機：0963669608	
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	333,000	500,000	(1~5項相加之50%為限)	
		2.	貴重儀器使用含維護費	200,000	250,000	(與計畫實驗相關)	
		3.	消耗性器材與主要費用	1,451,660	2,000,000	(與計畫主體相關)	
		4.	其它研究相關費用	40,739	150,000	(含差旅與租賃費用)	
		5.	雜支費用	47,601	100,000	(1~6項相加之5%為限)	
		6.	行政管理費	207,000	300,000	(1~5項相加之10%為限)	
		7.	自籌款	0	0	(自行籌備款項)	
		申請補助金額(1~6項)		2,280,000	3,300,000	總金額：	
		計畫總金額(1~7項)		2,280,000	3,300,000	總金額：	

專案主持人(簽名及蓋章)：_____

日期：111 / 2 / 21



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

110年度專案成果績效自評表

一、專案基本資料

填表日期：111 年1月 10 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	染色輔助雷射激發螢光技術應用於含氯有機物污染調查之研究		
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						
	2.國外投稿 (篇數)	(1)期刊論文						
		(2)研討會論文						
	3.報告 (篇數)	(1)技術報告						
		(2)研究報告	1	1	1		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	1	0	0		111年6月畢業	
		(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	
		(2)跨機構團隊						
		(3)形成研究中心						
		(4)形成實驗室						
9.其他指標 (請自行命名)		(請自填)						



(二) 產業面

項目				目標達成程度	申請 預估數	期中 達成數	期末 達成數	結案後半年 達成率	備註 (說明未達成原因 或專利、技術轉移 相關詳細資料)
A 智慧 財產 權	1.專利 (件數)	已 核 准	發明						
			新型/設計						
			合計						
		申 請 中	發明	1	0	0			專利撰寫中
			新型/設計						
			合計	1	0	0			
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

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 政策 推動	3.協助政府推動 (件數)	(1)政策					
		(2)法規					
C 技術 效益	4.整治技術提升(%)						
	5.整治成本降低(%)						
	6.提升能源效率(%)						
7.其他指標 (請自行命名)		污染調查技 術(件數)	1	0	1		現地含氯有機物染色螢 光調查技術

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

學術面 (如國內外研討會、期刊投稿件數、或人才培育碩博士生說明) 本計畫有1名碩士生參與，執行過程可順利培育1名碩士。此外，本計畫洽請裕山環境工程公司協助現場污染調查作業，執行過程可組成跨領域團隊，並整合學術與產業資源，提升國內污染調查技術的研發能量。
產業面 (如合作研發產業、申請專利、洽談技術移轉廠商件數說明) 本研究聚焦於研發本土化染色輔助雷射激發螢光技術(Dye-LIF)，以模場試驗成果申請中華民國發明專利1件，目前專利資料撰寫中。
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、污染場址管理等政策及法規研訂之參考) 有鑑於國內可運用於現地含氯有機物污染調查之技術甚感缺乏，本研究聚焦於研發本土化染色輔助雷射激發螢光技術(Dye-LIF)，選用疏水性染料進行三氯乙烯 NAPL 染色，即可使染色三氯乙烯 NAPL 具螢光特徵，利用 Dye-LIF 技術間接偵測環境介質中三氯乙烯 NAPL 殘留相的存在與否，未來可應用於污染場址三氯乙烯洩漏源調查，以補足國內污染調查技術的缺口。



110年度土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案

■構想書 □申請計畫書

□期中報告 □期末報告

審查意見回復對照表

計畫年度	110年度	計畫類型	☐ 研究型 ☒ 模場型
計畫類別	☐ 整治 ☒ 調查 ☐ 其它	主持人：	NO：A11
計畫名稱	染色輔助雷射激發螢光技術應用於含氯有機物污染調查之研究		
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員一： 1. 國外已有成熟的技術，本計畫在發展本土性對美國技術 know how 之自行建立。污染質亦由油品，擴大為含氯有機物。		1. 近年美國 Dakota Technologies 公司使用焦油特定綠色光學篩測工具(Tar GOST)，研發出染料雷射激發螢光探測技術 (Dye-LIF)，成功偵測到現地環境中 DNAPL 殘餘相污染源。目前國內僅有紫外光篩測工具(UVOST)，可偵測 NAPLs 中多環芳香烴(PAHs)成分激態散發之螢光，但無法偵測到含氯有機物 NAPL 殘留相。本計畫導入 UVOST 設備自行開發 Dye-LIF 技術，以補足目前國內調查技術缺口。	
委員二： 1. 研究主題符合徵求範疇。		1. 感謝委員肯定。	
委員三： 1. 執行團隊對此已有多年研究，建議說明本計畫對國內現有技術瓶頸的改善為何？ 2. 研究成果的應用建議說明。		1. 感謝委員肯定。雷射激發螢光(LIF)系統已成功應用於浮油相油品之現地即時探測，對於三氯乙烯之 NAPL 殘留相並無法利用 LIF 系統直接偵測得知。本研究強化現有技術不足之處，開發染料雷射激發螢光探測技術 (Dye-LIF)，選用疏水性染料之染色原理，使現地含氯有機物 NAPL 殘留相得以被偵測到。 2. 國內雷射激發螢光(LIF)技術係使用紫外光篩測工具(UVOST)，可偵測 NAPLs 中多環芳香烴(PAHs)成分激態散發之螢光，但無法偵測到含氯有機物 NAPL 殘留相。本計畫導入 UVOST 設備自行開發 Dye-LIF 技術，研究成果可應用於現地環境中 DNAPL 殘餘相污染物之偵測。	
委員四： 1. 本計畫所導入之 UVOST 設備，為已有的美國商品；		1. 美國 Dakota Technologies 公司研發之雷射激發螢光探測系統有紫外光篩測工具(UVOST)與焦油特定綠色光學篩測工具	



2. 試驗前，染料以1 ml/sec 的速率噴注，大幅增強現地含氯有機物之螢光感度，是否可行？宜審慎之。 3. 第1年於實驗室篩選適合之染料開發 Dye-LIF 技術，並以模場試驗測試 Dye-LIF 技術操作參數，建議先以研究型計畫先進行第一年的可行性評估方式，如微調 DNAPL 染料配方，並測試最佳的染料使用劑量，以及精進 LIF 分析感度等。	(Tar GOST)，本計畫所導入之系統為 UVOST 設備。 2. 鑽孔染料噴注的目的係利用染色原理，使現地含氯有機物 NAPL 殘留相得以被偵測到，屬必要作業程序。為避免減少環境衝擊，染料儘可能以少量噴注。 3. 第1年開發 Dye-LIF 技術，上半年於實驗室篩選適合之染料，包括微調 DNAPL 染料配方、測試最佳染料使用劑量、精進 LIF 分析感度等。依模場試驗計畫作業規定，下半年進場測試 Dye-LIF 技術操作參數，並以模場試驗確認技術可行性。
委員五： 1. 本模場型研究計畫為2年期，希望能產出現地探測模場試驗模組（接近商業化程度）	1. 本計畫導入紫外光篩測工具(UVOST)，開發染料雷射激發螢光探測技術（Dye-LIF），選用疏水性染料之染色原理，使現地含氯有機物 NAPL 殘留相得以被偵測到。研究成果以產出現地探測模場試驗模組為目標，開發 Dye-LIF 技術之應用可補足目前國內調查技術缺口。
委員六： 1. 有足夠經驗，可行。	1.感謝委員肯定。
委員七： 1. 土壤介質是否會影響（如有類似螢光光譜，或是不同土壤環境、水分、質地等） 2. NAPL 若調查採樣點（鑽機鑽孔）在 NAPL 位置正確，現有 MIP 搭配 on line 或 off line 搭配 PID、ECD 亦可達到 3. 建議執行上強化或針對現有技術不足之處。	1. 土壤介質對螢光檢測或有些許影響，本研究開發染料雷射激發螢光探測技術（Dye-LIF）係以定性分析為主，以偵測現地含氯有機物 NAPL 殘留相為目標，土壤介質之干擾影響相對得以忽略。 2. 薄膜介面探測(MIP)系統主要應用於「溶解相態」的有機污染物偵測，搭配 PID 對芳香烴化合物感度較佳，搭配 ECD 對含氯有機物感度較佳，但仍無法偵測到 NAPL 殘留相污染物。 3. 雷射激發螢光(LIF)系統的應用對象係針對非屬溶解相態的「自由相態」油品污染物，對於三氯乙烯之 NAPL 殘留相並無法利用 LIF 系統直接偵測得知。本研究強化現有技術不足之處，開發染料雷射激發螢光探測技術（Dye-LIF），選用疏水性染料之染色原理，使現地含氯有機物 NAPL 殘留相得以被偵測到。



委員八： 1. 運用美國 Dakota 公司技術於國內模場，有助污染場址調查的即時探測，可補目前國內調查技術缺口。	1. 本研究開發染料雷射激發螢光探測技術 (Dye-LIF)，選用疏水性染料之染色原理，使現地含氯有機物 NAPL 殘留相得以被偵測到，可補足目前國內調查技術缺口。



行政院環境保護署
土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案

☒申請計畫書 ☐期中報告
☐修正計畫書 ☐期末報告

審查意見回覆對照表

計畫年度	110 年度	計畫類型	☐ 研究型 ☒ 模場型
計畫類別	☒ 調查 ☐ 整治 ☐ 其他	主持人：吳庭年	
計畫名稱	染色輔助雷射激發螢光技術應用於含氯有機物污染調查之研究		
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員一 無		感謝委員意見。	
委員二 可擴散應用技術之限制待掌控。		本計畫以模場試驗成果推廣至實場應用，於期末報告彙整完整成果。	
委員三 一、主持人與計畫執行團隊 1. 主持人(協同主持人)與執行團隊的研究及技術研究發展績效良好。 2. 主持人與執行團隊的研究能力及技術發展能力佳，足以勝任本計畫。 二、本專案對土水污染及整治的潛在價值與意義 1. 本專案計畫對國內土壤與地下水污染調查工作的發展具有貢獻。 2. 本計畫書撰寫具體，對研究方法的說明完整，研究方法與試驗流程具可行性。 3. 本計畫成果的實場應用性，期末報告應有更具體的說明。 4. 主持人與執行團隊曾執行過土污基金會的模場(或研究)研究計畫，之前的專案執行績效佳。前期的實務應用建議說明。 5. 建議說明本計畫成果實務應用的適用情境(例如：土壤質地、濃度範圍、精準度…等等)與應用的限制條件。		一、 主持人與計畫執行團隊 1. 感謝委員肯定。 2. 感謝委員肯定。 二、本專案對土水污染及整治的潛在價值與意義 1. 感謝委員肯定。 2. 感謝委員肯定。 3. 本計畫以實驗室試驗成果進行模場驗證，以模場試驗成果推廣至實場應用，於期末報告彙整完整成果。 4. 前期研究證實雷射激發螢光(LIF)調查技術成功應用於污染場址洩漏油品的調查作業，簡要研究成果說明於專案背景(計畫書 p4)。 5. 於期末報告彙整完整模場試驗成果，與 Dye-LIF 技術應用的限制條件。	



(例如：純相的影響、干擾因子…等等) 6. 建議說明本計畫成果實務應用的適用情境及該情境下與其他可行調查方法的成本效益比較。(原計畫書中說明：“…本研究…研發本土化染色輔助雷射激發螢光技術 (Dye Laser Induced Fluorescence, Dye-LIF)，選用疏水性染料進行三氯乙烯 NAPL 染色，即可使染色三氯乙烯 NAPL 具螢光特徵，利用 Dye-LIF 技術間接偵測環境介質中三氯乙烯 NAPL 殘留相的存在與否。有鑑於國內可運用於現地含氯有機物污染調查之技術甚感缺乏，因此本研究開發本土化 Dye-LIF 技術，未來可應用於污染場址三氯乙烯洩漏源調查…”)，LIF 技術已應用多年，建議與其他追蹤技術多加比較)	6. 雷射激發螢光(LIF)調查技術成功應用於污染場址洩漏油品的調查作業，與薄膜界面探測(MIP)調查技術的差異比較說明於專案背景(計畫書 p4)，LIF 與 MIP 應用案例之調查結果比對於圖 1。本研究研發本土化染色輔助雷射激發螢光技術 (Dye-LIF)，偵查對象為環境介質中三氯乙烯 NAPL 殘留相，目前尚無可運用之即時調查技術。
委員四 1. 計畫導入 UVOST 設備自行開發 Dye-LIF 技術，以補足目前國內調查技術缺口，具有研究動機及特色。 2. 鑽孔染料噴注的目的係利用染色原理，使現地含氯有機物 NAPL 殘留相得以被偵測到，屬必要作業程序。為避免減少環境衝擊，染料儘可能以少量噴注，噴注方式宜提出明確的標準作業方法。	1. 感謝委員肯定。 2. 感謝委員建議，鑽孔染料噴注作業屬必要程序，儘可能以少量噴注減少環境衝擊。染料配方以植物天然色素優先考量，染料噴注標準作業方法依實驗室配方測試與模場施作經驗依序建立。
委員五 無	感謝委員意見。
委員六 說明清楚、合理，有潛在價值的技術。	感謝委員肯定。
委員七 本專案對未來土壤及地下水污染整治貢獻度佳。	感謝委員肯定。



委員八 1. 計畫內容明確，技術具可行性。 2. 有助場址即時調查，補足國內技術缺口。	1. 感謝委員肯定。 2. 感謝委員肯定。
委員九 1. 考量預算有限及計畫執行期程建議 p.31(一)人事費：以編列 11 個月為上限、計畫主持人月支酬金統一酌調為 15,000 元/月、協同主持人月支酬金統一酌調為 10,000 元/月。 2. p.35 兼任人員雜費經核算為 93 日(以兼任助理車資趟數計算而得)，請確認。 3. p.36(五)雜項費用 (1)報告書印刷編列上限建議為 40 本(300 元/本)共 12,000 元。 (2)保險費編列建議參酌現行產險商品以每人每年 2,000 元為限。 (3)建議辦公室文具及雜項費用以 5,000 元為限、其他耗材(如碳粉匣等)以 10,000 元為上限。	1. 參照委員意見調整計畫主持人月支酬金與支領月數。 2. 兼任人員雜費已依車資趟數重新核算。 3. 參照委員意見辦理。 (1) 報告書印刷調整為 12,000 元。 (2) 保險費編列調整為每人每年 2,000 元。 (3) 辦公室文具及雜項費用亦同步調整。



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	110 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：B7	
計畫名稱	染色輔助雷射激發螢光技術應用於含氯有機物污染調查之研究		
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員一 1. 請補充說明實驗室選用之化工染料，作為現地染劑追蹤時之可能影響，其中殘存量對於環境之衝擊，建議宜予以敘明。 2. 針對目前不同之染劑種類、性質、濃度或配方，是否可依螢光強度、環境安全、成本效益等可行之判斷因子，綜合歸納未來可資應用染劑之建議優先順序。 3. 請補充說明實驗室染料試驗之各項 QA/QC 執行成果，以利釐清試驗成果之可信度。		1. 實驗室染料試驗蒐集 50 餘種化工染料與食品級染料，現地染劑追蹤係以 20% 蜂蜜丙二醇液與 10% 薑黃液做為基底，皆為食品級染料，其殘存量自然界微生物即可分解，對於環境之衝擊極為輕微。 2. 實驗室染料試驗結果僅茉莉花丙二醇液、鳳梨丙二醇液、蜂蜜丙二醇液、薑黃液可有效提升土壤中 TCE NAPL 之辨識度，應用於模場試驗 Dye-LIF 探測作業之染劑係以複合式配方。 3. 實驗室染料試驗係以篩選適合 Dye-LIF 技術的染料，模場試驗 Dye-LIF 探測作業係使用調和染劑，Dye-LIF 探測作業結果的可信度則以重複探測比對其差異性。染料噴注 3 小時後，於 L10 點位重複執行 Dye-LIF 探測作業，顯示 Dye-LIF 探測螢光訊號再現性高，且染料噴注效果持續性佳，如圖 5.21 所示。	
委員二 1. 本計畫主要為導入雷射激發螢光系統以 UVOST 設備為基礎，於第一年在實驗室篩選適合 Dye-LIF 技術的染料，並以模場試驗相關操作參數。期中報告內容對研究構想的敘述相當詳實完整，國內外相關文獻、資料的蒐集亦完備，主持人對於關鍵技術已有初步掌握，應可達成計畫書所設定的預期目標。期中報		1. 感謝委員肯定。針對第四章所附剖面圖與調查結果相當模糊，圖 4.1 與圖 4.2 已修正。針對申請款之使用細項皆已定期填報於環保署 BAF 經費管理系統。	



告完成的成果包含染料吸收光譜篩檢，TCE 純相之螢光強度和光譜特徵，以及建立 TCE 污染土壤的螢光特性，期中進度與表 4.2 所列查核點相符。第四章研究方法與過程所附剖面圖與調查結果相當模糊應修正，而申請款與自籌經費之使用亦未說明。	
委員三 1. 運用美國 Dakota 公司技術加上國內開發之食品級染料，再藉由增強螢光強度來提升三氯乙烯 NAPL 相之可辨識度。另外，於國內模場進行污染場址調查的即時探測，可補目前國內調查技術缺口。 2. 目前進度完成染料吸收光譜篩檢、建立染色 TCE 純相樣品螢光強度和特徵光譜、建立染色 TCE 污染土壤螢光強度和特徵光譜。 3. 實際進度與預定進度相符。	1. 感謝委員肯定。本研究聚焦於研發本土化染色輔助雷射激發螢光技術 (Dye-LIF)，選用疏水性染料進行三氯乙烯 NAPL 染色，即可使染色三氯乙烯 NAPL 具螢光特徵，利用 Dye-LIF 技術間接偵測環境介質中三氯乙烯 NAPL 殘留相的存在與否，未來可應用於污染場址三氯乙烯洩漏源調查。 2. 期中報告完成查核點所有工作項目，實際執行進度與與預定進度相符。 3. 期末報告實際執行進度已完成 UVOST 螢光強度較強的染劑調製配方、場址模場試驗區 MIP 探測作業、Dye-LIF 探測模場試驗、現場土壤染料搖晃試驗等模場試驗現場工作，整體執行進度為 100%，
委員四 1. 計畫使用 UVOST 進行三氯乙烯分析，目前執行染料 LIF 螢光強度增幅實驗，污染土壤實際測試仍待執行。	1. 本計畫團隊順利完成本土化染色輔助雷射激發螢光技術之開發，並於模場試驗場址二展現三氯乙烯洩漏源調查之應用案例，獲致 Dye-LIF 探測剖面資料與現場土壤染料搖晃試驗結果比對，並進一步以土壤採樣分析 VOCs 濃度進行驗證。
委員五 1. P.I 目次中，表次、5.2、5.3 及第六章之頁碼錯誤，請修正。 2. P.V 表次中，表 5.8 之頁碼錯誤，請修正。	1. 謝謝委員指正，頁碼錯誤已修正。 2. 謝謝委員指正，頁碼錯誤已修正。



3. 圖 2.2、圖 4.2-圖 4.5、圖 4.11…等多處圖示模糊不易辨識，請調整解析度。	3. 模糊不易辨識之圖示已儘可能修正，有些無法取得原始圖檔，無法調整解析度。
4. P.3 第一行文字「“DANPLs”的低揮發…」，文字錯誤，請修正。	4. 謝謝委員指正，繕打錯誤已修正。
5. P.16 第二段第二行文字請改為「表 3.1」以與 P.17 表 3.1 之標題列一致。	5. 謝謝委員指正，繕打錯誤已修正。
6. P.58 第二段（一）化工染料 LIF 螢光特徵圖譜內文中，第二段提及「油性螢光染料配製於乙醇染液之 LIF 螢光強度較丙二醇染液為強」，惟倒數第三行敘述「一般油性螢光染料配製於丙二醇染液之 LIF 螢光強度相對較強」，且似與表 5.5 呈現之數據不符，請說明。	6. 謝謝委員指正，誤繕處已修正：「一般油性 化工 染料配製於丙二醇染液之 LIF 螢光強度相對較強」。



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	110 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：B7	
計畫名稱	染色輔助雷射激發螢光技術應用於含氯有機物污染調查之研究		
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員一 1. 請補充說明本計畫根據具高強度螢光訊號波峰之點位(L04 及 L11)，進行後續土壤採樣及呈色比對之試驗成果，其中與樣品深度間無一致性之變化趨勢，其相關原因為何？尤其是對於殘留 TCE 濃度之變化關係，應有進一步評析。 2. 有關應用於模場試驗之染劑配方，係以複合式配方為主，其中是否包括非有機性化學染劑？另外，對於調和染劑與 TCE 呈色反應或螢光訊號之可信度，宜有專節說明。 3. 請補充說明使用率研究之染劑，於實場或模場應用之限制條件，及其應用之場址特性等資訊。		1. Dye-LIF 探測與染料搖晃試驗及土壤 PID 篩測比對結果，大致具一致性，共通性認定點位 L04 污染深度為 8.75~9.0 m，L11 污染深度為 3.0~5.0 m。雖然各方法比對結果不全一致，係因土壤非均質性之影響，且樣品分樣作業並無法取得相同的樣品，各篩測方法分析原理亦不相同。目前僅 Dye-LIF 探測技術可能尋獲殘留 TCE NAPL，由表 5.11 中 4 個送樣土壤 TCE 濃度大於 1,000 mg/kg，即可獲得驗證。 2. Dye-LIF 技術現場噴注染液以蜂蜜丙二醇液、薑黃液、食用調和油、紅色油性染料、甘油、水等原料調製而成，僅含極少量非有機性化學染劑，為考量環境衝擊仍以食品級染料為大宗。至於 Dye-LIF 探測螢光訊號之可信度，現場進行土壤連續採樣，以土壤 PID 篩測、染料搖晃試驗、土壤樣品 VOC 分析等進行交叉比對驗證，比對結果說明於 5.3.2 節。 3. TCE NAPL 染色試驗使用之染料與 TCE NAPL 體積比為 1:9，亦即染料體積占比 10%，主要推估染料之劑量需求，並做為 Dye-LIF 探測作業之染劑噴注量估算基礎。實場染料噴注作業易受地質條件影響，如湧砂現象，可嘗試改良噴注設備效能予以克服。	



委員二 1. 本研究計畫以染料 LIF 技術，利用 UVOST 設備於選擇模場測試本土化之 Dye-LIF 技術操作參數，期末報告撰述完整，研究成果具體並符合預期目標。 2. 開發之 Dye-LIF 探測技術未來應用時是否均需配合 MIP 剖面探測及土壤染料搖晃試驗？ 3. 染料噴注後多久為最佳量測時間？其影響範圍為何(半徑)？ 4. 丙二醇及乙醇是否為最佳配置溶劑？降低溶劑與染料極性是否可提升螢光感度？ 5. 表 5.7 最佳條件測試例如含 10%TCE 染料溶液，於現地執行時可行性並無法掌握。	1. 感謝委員肯定，Dye-LIF 技術係利用注入染料使三氯乙烯 NAPL 染色後具螢光特徵，間接偵測環境介質中三氯乙烯 NAPL 殘留相的存在與否，本研究已展示 Dye-LIF 探測技術應用於污染場址三氯乙烯洩漏源調查之可行性。 2. Dye-LIF 探測技術可直接施作，並不需搭配 MIP 探測作業或土壤染料搖晃試驗，模場試驗係利用 MIP 探測成果挑選 Dye-LIF 探測點位，利用土壤染料搖晃試驗成果交叉比對 Dye-LIF 探測成果的可信度。 3. Dye-LIF 探測技術噴注少量染料，以充滿鑽孔表面為主，影響範圍僅及於鑽孔，單孔噴注作業時間約 1 小時。L10 點位執行 Dye-LIF 重複探測作業，染料噴注 3 小時後重複測試結果一致性頗高，顯示染料噴注後藥效可持續半日。 4. 一般食品級染料配製於丙二醇溶劑居多，部分醇溶性染料配製於乙醇溶劑之螢光強度較強。本研究選用食品級染料以降低環境衝擊，因此配製溶劑以丙二醇為大宗，考量染劑於地下水之擴散性，並以水分進行染劑稀釋。 5. 表 5.7 TCE NAPL 染色試驗使用之染料與 TCE NAPL 體積比為 1:9，亦即染料體積占比 10%，主要推估染料之劑量需求，並做為 Dye-LIF 探測作業之染劑噴注量估算基礎。
委員三 1. 本研究係將導入並自主開發 Dye-LIF 方法進行土壤 TCE 探勘，並應用於實場使用。TCE 染色測試挑選出茉莉花丙二醇液、鳳梨丙二醇液、蜂蜜丙二醇液、薑黃粉，可順利將 TCE NAPL 染色，並在土樣試驗中測試開發出混合	1. 本研究聚焦於研發本土化染色輔助雷射激發螢光技術(Dye-LIF)，選用食品級染料進行三氯乙烯 NAPL 染色，實驗室測試結果挑選出紡織紅染料、茉莉花丙二醇液、鳳梨丙二醇液、蜂蜜丙二醇液、薑黃粉，可順利將 TCE NAPL



染劑。 2. 由於 DNAPL 不僅僅只有 TCE，染料測試是否有選擇性有待檢驗，或許後續可作為廣用試驗方法。 3. 10 號採樣點之 MIP-XSD 與 Dye-LIF 分析結果之差異可能原因是否能嘗試說明？ 4. 針對 9 號採樣點第二年度是否會進行測試請說明。 5. 由模場試驗結果顯示，Dye-LIF 與 PID 及搖晃試驗，有不錯的重複性，但由表 5.11 發現 Dye-LIF 之螢光強度與濃度關係似乎無法形良好之線性關係，亦即可能出現誤判現象，是否能有改善之空間，請說明。	染色，後續調製 DNAPL 混合染劑配方供現場 Dye-LIF 探測作業使用。 2. 第 1 年模場試驗成果已展示 Dye-LIF 探測技術應用於三氯乙烯洩漏場址之示範案例，第 2 年模場試驗場址污染標的物以氯苯為主，進一步拓展 Dye-LIF 探測技術應用於其他污染物類別。 3. MIP-XSD 調查訊號係反應溶解相 TCE 污染分布，Dye-LIF 調查訊號係反應純相 TCE 殘留分布。M10 有高強度 XSD 訊號波峰，L10 僅有微弱 Dye-LIF 螢光訊號，顯示此點位未發現 TCE NAPL 殘留，僅有溶解相污染分布，已詳述於 5.3.2 節。 4. 第 1 年模場試驗工作已全數完成，第 2 年模場試驗場址為土壤及地下水氯苯污染整治場址，針對第 1 年模場試驗場址不會再進場測試。 5. 表 5.11 Dye-LIF 與 PID 及搖晃試驗比對結果一致性約 50%，因土壤非均質性之影響，雖依 Dye-LIF 探測結果進行土壤連續取樣，然而樣品分樣進行土壤 PID 篩測與搖晃試驗並無法取得同一樣品，因此調查結果之差異性必然存在，僅能由現場人員專業經驗降低誤判的情況。
委員四 1. 專案執行進度及產出成果達成計畫目標。 2. 專案基本資料表及 110 年度專案成果績效自評表，頁碼為「附件 12-3」，請再確認。 3. 110 年度專案成果績效自評表，專案執行期程請修正為期末。 4. P.39 第一段第二行「變卦」，”卦”字誤繕；P.43 倒數第三行及 P.87「藉由補捉…」，”捕”字誤繕；P.77「數據資料品值」，”質”字誤繕，請修正。	1. 謝謝委員肯定。 2. 謝謝委員指正，「專案基本資料表」及「110 年度專案成果績效自評表」頁碼已刪除。 3. 謝謝委員指正，「110 年度專案成果績效自評表」專案執行期程已修正為期末。 4. 謝謝委員指正，繕打錯誤已修正。



5. P.52 甘特圖建議以實際執行日期110.3.19~111.2.28 撰寫以利查核。	5. 謝謝委員指正，甘特圖已增列實際執行日期。
6. P.52 請確認預定查核點內項目(如：UVOST 螢光強度…)皆有納入甘特圖工作項目中。	6. 預定查核點內項目皆已納入甘特圖工作項目中，UVOST 螢光強度較強的染劑調製配方可經由 LIF 實驗室樣品分析工作項目中完成。



行政院環境保護署「110 年度土壤及地下水污染整治基金 補助研究與模場試驗專案」研究成果中英文摘要

- 一、中文計畫名稱：染色輔助雷射激發螢光技術應用於含氯有機物污染調查之研究
- 二、英文計畫名稱：The Study on Contaminant Investigation of Chlorinated Compounds by Dye Assisted Laser Induced Fluorescence Technology
- 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110年 3月19日
- 七、執行結束時間：民國111年 2月28日
- 八、報告完成時間：民國111年 1月10日
- 九、報告總頁數：100頁
- 十、使用語文：中文
- 十一、報告電子檔名稱：染色輔助雷射激發螢光技術(期末)
- 十二、報告電子檔格式：PDF
- 十三、中文摘要關鍵詞：染料、雷射激發螢光、含氯有機物、污染調查
- 十四、英文摘要關鍵詞：Dye, LIF, Chlorinated compound, Contaminant investigation
- 十五、中文摘要：

現地環境中殘存之重質非水溶相蓄積源(如三氯乙烯、四氯乙烯)，具有雙鍵化學結構，接收雷射激發光源後通常將能量轉為自體旋轉，並無法散發出螢光，因此無法利用雷射激發螢光系統直接偵測得知。近年美國 Dakota Technologies 公司研發出染料雷射激發螢光探測技術 (Dye-Laser Induced Fluorescence, Dye-LIF)，選用如同一般搖晃試驗使用的疏水性染料，類似 Sudan IV 或 Oil Red O 之染色原理，使現地含氯有機物得以被偵測到。有鑑於國內可運用於現地含氯有機物污染調查之技術甚感缺乏，目前雷射激發螢光系統國內僅有 UVOST 設備，本計畫導入此設備，第 1 年於實驗室篩選適合之染料應用於 Dye-LIF 技術，並以模場試驗測試 Dye-LIF 技術操作參數，順利完成本土化 Dye-LIF 技術之開發。第 1 年模場試驗場址為地下水三氯乙烯污染整治場址，依據 104 年場址污染調查評估計畫結果，地下水污染物濃



度三氯乙烯最高為 642 mg/L、順-1,2-二氯乙烯最高為 57.6 mg/L 及二氯甲烷最高為 27.5 mg/L。模場試驗成果已成功展示 Dye-LIF 技術應用於三氯乙烯洩漏源調查之示範案例，獲致 Dye-LIF 探測剖面資料與現場土壤染料搖晃試驗結果比對，並進一步以土壤採樣分析 VOCs 濃度進行驗證。依據 MIP 探測剖面資料、Dye-LIF 探測剖面資料、土壤鑽探連續採樣 PID 篩測結果、現場土壤染料搖晃試驗結果、土壤 VOCs 濃度分析數據綜合分析，得以順利推估模場試驗區域範圍 TCE 污染洩漏情境。

十六、英文摘要：

Because of their chemical double bond structures, TCE and PCE usually transfer energy as self-rotation after being excited by Laser induced fluorescence (LIF) light source. It seems impossible to detect the residual DNAPL pools in subsurface by using the LIF system. Dakota Technologies (US company) has developed Dye-Laser Induced Fluorescence (Dye-LIF) method, which employed Sudan IV or Oil Red O dye to make in-situ chlorinated compounds visible. There is no available investigation technology for detecting in-situ chlorinated compounds, such as Dye-LIF method. The Ultra-violet Optical Screening Tool (UVOST) is utilized as laser induced fluorescence system in this study. In the first year, lab work is focused on screening suitable dyes for Dye-LIF technology. The selected dyes were tested for detecting in-situ chlorinated compounds in pilot study, and the development of the localized Dye-LIF technology was eventually accomplished. A TCE-contaminated groundwater remediation site was selected as study site, and its highest concentration is 642 mg/L TCE, 57.6 mg/L cis-1,2-DCE and 27.5 mg/L DCM in groundwater. The application of Dye-LIF technology was successfully demonstrated in the study case. The obtained Dye-LIF vertical profiles were compared with dye shake tests of soil boring samples. The consistence of comparison outcome was further confirmed with VOC concentrations of soil boring samples. The investigation result was compiled with MIP vertical profiles, Dye-LIF vertical profiles, PID screening, dye shake tests and VOC concentrations of soil boring samples. Conclusively, the scenario of TCE leakage within pilot study region was reasonably put back based on the investigation results.



行政院環境保護署「110 年度土壤及地下水污染整治基金 補助研究與模場試驗專案」期末報告

目次

專案基本資料表

110 年度專案成果績效自評表

申請計畫書審查意見回覆表

期中報告審查意見回覆表

研究成果中英文摘要

目次	I
圖次	III
表次	V
第一章 前言	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究構想	2
1.3 已掌握之關鍵技術	4
第二章 研究目的	7
2.1 目的說明	7
2.2 研究重要性	9
2.3 預期目標	11
第三章 文獻探討	12
3.1 含氯有機污染物傳輸宿命	12
3.2 含氯有機污染物調查技術	15
3.3 雷射激發螢光檢測	21
3.4 染料與色素	27
3.4.1 工業染料	27
3.4.2 食用色素	31
第四章 研究方法與過程	35
4.1 模場試驗場址一背景	35
4.1.1 場址一水文地質資料	36
4.1.2 場址一污染現況	37
4.2 模場試驗場址二背景	39
4.2.1 場址二水文地質資料	40
4.2.2 場址二污染現況	41
4.3 研究方法	42
4.3.1 實驗室染料試驗	45



	4.3.2 現地探測模場試驗.....	49
	4.4 執行進度.....	51
第五章	結果與討論.....	53
	5.1 實驗室染料試驗結果.....	53
	5.1.1 染料 UV 吸收光譜.....	53
	5.1.2 染料 LIF 螢光特徵圖譜.....	61
	5.1.3 DNAPL 染劑配方調製.....	67
	5.1.4 DNAPL 污土染色測試.....	74
	5.2 現地探測模場試驗結果.....	76
	5.2.1 場址一地球物理探測結果.....	76
	5.2.2 場址二薄膜界面探測結果.....	79
	5.2.3 場址二染料雷射激發螢光探測結果.....	84
	5.2.4 場址二土壤染料搖晃試驗與 VOCs 分析結果....	88
	5.3 試驗成果評析.....	92
	5.3.1 場址一試驗成果評析.....	92
	5.3.2 場址二試驗成果評析.....	93
第六章	結論與建議.....	96
	6.1 結論.....	96
	6.2 建議.....	97
第七章	參考文獻.....	98



圖次

圖 1.1 染料雷射激發螢光探測技術與其他調查工具之調查結果比對	3
圖 1.2 美國伊麗莎白市海岸防衛隊駐站以 LIF 系統調查油料場污染團 ...	5
圖 1.3 台灣中油林園廠以 MIP 系統與 LIF 系統調查場址污染團分布之差異情形	5
圖 2.1 LIF 螢光特徵圖譜之形成方式	7
圖 2.2 一般燃料典型的 LIF 激發光譜	8
圖 3.1 DNAPL 洩漏至土壤及地下水傳輸	13
圖 3.2 在土壤中吸附有機污染物的物理形式	14
圖 3.3 分子激發螢光過程之能階變化圖	22
圖 3.4 雷射激發螢光偵測污染物之螢光反應樣態示意圖	24
圖 3.5 LIF 系統於地表下現地即時探測油品污染物示意圖	26
圖 3.6 Dye-LIF 鑽頭結構改裝後示意圖	27
圖 3.7 拜耳藍合成方法	28
圖 4.1 模場試驗場址一位置圖	35
圖 4.2 模場試驗場址一地質鑽探剖面圖	36
圖 4.3 模場試驗場址一歷次土壤污染調查結果	38
圖 4.4 模場試驗場址一歷次地下水污染調查結果	38
圖 4.5 模場試驗場址一污染概念模型	39
圖 4.6 模場試驗場址二地下水流向圖	40
圖 4.7 模場試驗場址二 MIP-ECD 調查污染潛勢圖	41
圖 4.8 模場試驗場址二廠內監測井地下水採樣分析結果	42
圖 4.9 本研究使用之 UVOST 雷射激發螢光系統	44
圖 4.10 本研究方法之工作項目與執行步驟流程圖	45
圖 4.11 本研究蒐集之市售化工染料與調製染劑	46
圖 4.12 本研究蒐集之市售色膏與天然食用色素	46
圖 4.13 雷射激發螢光特徵圖譜說明示意圖	48
圖 4.14 本研究模場試驗 MIP 探測數量與施作位置圖	49
圖 5.1 紡織紅染劑劑量與染色三氯乙烯 NAPL 螢光強度相關性	69
圖 5.2 三氯乙烯 NAPL 與紡織紅染劑染色前後 LIF 螢光特徵比對	69
圖 5.3 茉莉花染劑劑量與染色三氯乙烯 NAPL 螢光強度相關性	70
圖 5.4 三氯乙烯 NAPL 與茉莉花染劑染色前後 LIF 螢光特徵比對	70
圖 5.5 鳳梨染劑劑量與染色三氯乙烯 NAPL 螢光強度相關性	71



圖 5.6 三氯乙烯 NAPL 與鳳梨染劑染色前後 LIF 螢光特徵比對.....	71
圖 5.7 蜂蜜染劑劑量與染色三氯乙烯 NAPL 螢光強度相關性	72
圖 5.8 三氯乙烯 NAPL 與蜂蜜染劑染色前後 LIF 螢光特徵比對.....	72
圖 5.9 薑黃粉染劑劑量與染色三氯乙烯 NAPL 螢光強度相關性	73
圖 5.10 三氯乙烯 NAPL 與薑黃粉染劑染色前後 LIF 螢光特徵比對.....	73
圖 5.11 三氯乙烯汚土以混合染劑配方染色前後 LIF 螢光特徵比對	75
圖 5.12 場址一地電阻測線佈置示意圖	77
圖 5.13 場址一透地雷達測線 E1 影像剖面圖	78
圖 5.14 場址一地電阻測線 E1 影像剖面圖	78
圖 5.15 場址二模場試驗區薄膜界面探測點位佈點位置圖	79
圖 5.16 場址二模場試驗區 MIP 探測點位導電度訊號垂直剖面圖	81
圖 5.17 場址二模場試驗區 MIP 探測點位 XSD 訊號垂直剖面圖	82
圖 5.18 場址二模場試驗區 MIP 探測結果繪製之 3D 場址污染概念模型 .	83
圖 5.19 場址二模場試驗區染料雷射激發螢光探測點位佈點位置圖	84
圖 5.20 場址二模場試驗區 Dye-LIF 探測作業施作情況	85
圖 5.21 場址二模場試驗區 Dye-LIF 探測點位螢光訊號垂直剖面圖	86
圖 5.22 場址二模場試驗區 L04 與 L11 染料搖晃試驗呈色結果	89



表次

表 3.1 含氯有機污染物調查技術分類與國內技術成熟度.....	17
表 3.2 氣體雷射相關型式介紹	25
表 3.3 準分子雷射-XeCl 特徵.....	25
表 3.4 依應用性能分類的染料類別與其結構特點	29
表 3.5 台灣核准 8 種人工合成色素一覽表.....	31
表 3.6 台灣核准 46 種天然食用色素一覽表.....	32
表 4.1 UVOST 雷射激發螢光系統之裝置單元.....	44
表 4.2 研究實際執行進度及預定工作查核點	52
表 5.1 化工染料 UV 吸收光譜	54
表 5.2 化工染料測定之 UV 吸收波峰與強度	56
表 5.3 食品染料 UV 吸收光譜	57
表 5.4 食品染料測定之 UV 吸收波峰與強度	60
表 5.5 化工染料 LIF 螢光特徵圖譜.....	62
表 5.6 食品染料 LIF 螢光特徵圖譜.....	64
表 5.7 TCE NAPL 染色前後 LIF 螢光強度增幅比較	67
表 5.8 TCE 污土染色前後 LIF 螢光強度增幅比較.....	75
表 5.9 場址二模場試驗區 L04 染料搖晃試驗結果與 PID 篩測結果比對 ..	90
表 5.10 場址二模場試驗區 L11 染料搖晃試驗結果與 PID 篩測結果比對 .	91
表 5.11 場址二模場試驗區送樣土壤 VOC 分析結果與 Dye-LIF 螢光強度、 PID 篩測數據、染料搖晃試驗結果比對	92



第一章 前言

1.1 研究背景

依據國內、外的污染調查經驗體認到傳統場址調查技術費用偏高，目前已發展出許多成熟的場址評估工具，因此「快速場址評估」(Expedited Site Assessment)之作業程序亦逐漸被廣泛採用。美國環保署更進一步整合快速場址評估系統性規劃、現場篩測分析技術與動態工作計畫，依環境整治效益決策發展出「三合系統」(Triad System)，目的在最短的時間內，利用最少的資源獲得最大效益之場址調查資訊。針對快速場址評估現場分析方法的選擇取決於許多因素，包括污染物種類、數據資料需求、設備取得難易度、施作便利性、取樣分析速度與調查評估費用等。根據調查的目的與場址本身狀況的不同，對每一個場址有其專一性的調查策略，並非如傳統方法般要求每一場址均使用同樣的作業程序與標準。

隨著土壤及地下水污染調查與整治技術的演進，行政院環保署於民國104年依污染物類別發行「土壤及地下水重金屬污染調查作業參考指引」、「土壤及地下水油品類污染調查作業參考指引」、「土壤及地下水比水重非水相液體污染調查作業參考指引」，惟污染調查作業參考指引僅提供概念性作業原則，然而每一個場址有其專一性的調查策略，所使用的作業程序、採樣位置、佈點數量、分析項目與污染判識方式等，仍依各場址現場狀況與執行者專業判斷做決定。

一般快速場址評估過程會使用不同精密程度的分析方法取得大量樣品數據，以提高污染團界定的解析度。目前針對污染場址之調查已發展出多種現地即時之調查或篩試方法，包含有地球物理、直接貫入法、土壤氣體、現場有機物/重金屬偵測技術、現場快速篩測試劑...等。針對國內場址有機污染物調查作業，經常使用的現地即時探測工具，包括薄膜介面探測(Membrane Interface Probe, MIP)系統及雷射激發螢光(Laser Induced Fluorescence, LIF)系統。MIP調查技術結合直接貫入(Geoprobe)機具可獲致鑽孔「溶解相態」有機污染物的垂直分布，LIF調查技術結合直接貫入(Geoprobe)機具可獲致鑽孔「自由相態」有機污染物的垂直分布。薄膜介面探測器系統主要應用熱揮發原理，加熱使土壤污染物揮發成為氣狀成分，透過半透膜傳遞，再利用傳



染色輔助雷射激發螢光技術應用於含氯有機物污染調查之研究

輸管路收集進行污染物偵測。因此當污染物揮發性較低時，污染成分較難脫附與高濃度管路殘留現象易造成檢測誤差。紫外光學雷射激發螢光系統則運用紫外波段雷射光源激發油品類污染物內特定成分，以進行激發螢光測定，惟對於輕質油品中某些特定成分之感度較低，所以也會產生檢測誤差現象。MIP 系統與 LIF 系統間的主要特性差異為 MIP 系統無法進行污染成分的特徵辨識，而 UVOST-LIF 系統除可偵測污染成分濃度的變化外，同時可針對污染成分組成進行特徵辨識作業。

LIF 應用於污染場址調查作業的案例多廣見於國外案場，於國內近幾年才偶有 LIF 技術應用於油品檢測之實際案例。油品類物質對於 LIF 分析技術有良好的反應強度，目前 LIF 調查技術亦成功應用於污染場址洩漏油品的調查作業。而指標性含氯有機物質具有雙鍵化學結構(如三氯乙烯、四氯乙烯)，接收雷射激發光源後通常將能量轉為自體旋轉，並無法散發出螢光，因此現地環境中殘存之重質非水溶相蓄積源(DNAPL pool)並無法利用雷射激發螢光系統直接偵測得知。近年美國 Dakota Technologies 公司研發出染料雷射激發螢光探測技術 (Dye-Laser Induced Fluorescence, Dye-LIF)，選用如同一般搖晃試驗使用的疏水性染料，類似 Sudan IV 或 Oil Red O 之染色原理，使現地含氯有機物得以被偵測到。有鑑於國內可運用於現地含氯有機物污染調查之技術甚感缺乏，因此本計畫導入國內既有紫外光學雷射激發螢光系統(UVOST)設備，開發本土化染料雷射激發螢光探測技術，並挑選含氯有機物洩漏場址進行模場試驗測試。

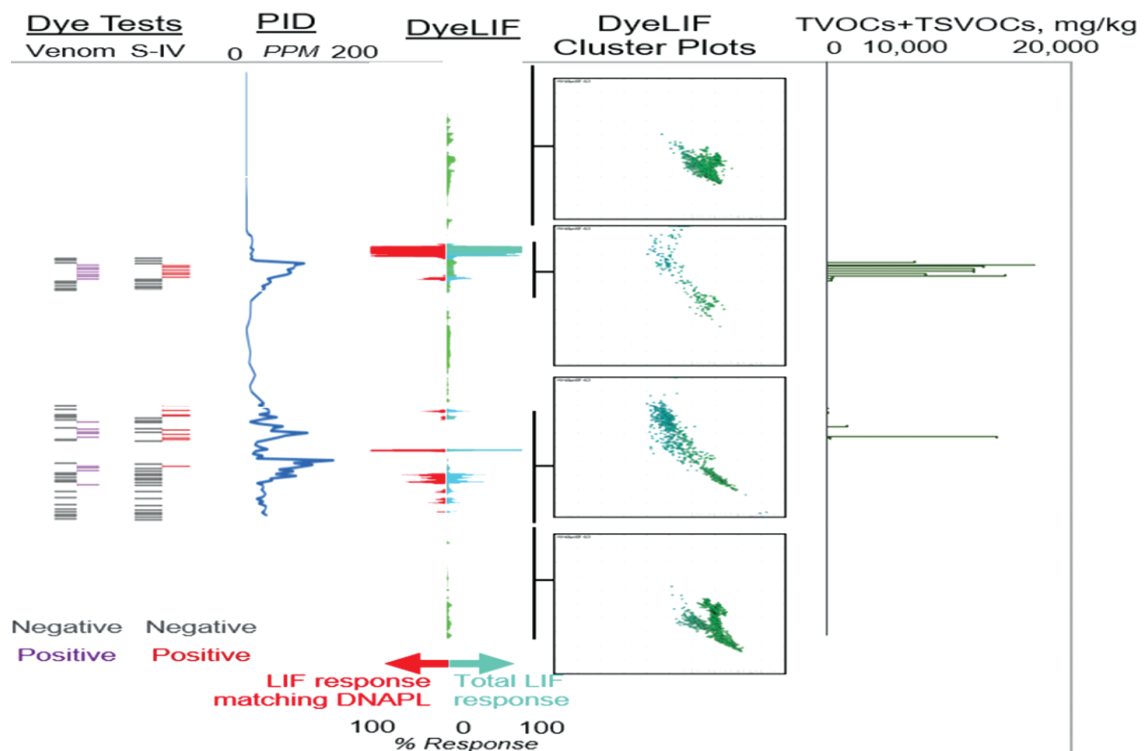
1.2 研究構想

染料雷射激發螢光探測(Dye-LIF)技術係由美國 Dakota Technologies 公司自行開發的現地即時探測技術，使用焦油特定綠色光學篩測工具(Tar-specific Green Optical Screening Tool, Tar GOST)，於 LIF 鑽頭螢光視窗下方加裝染料噴口，當 LIF 鑽頭直接貫入地表探測時，染料以 1 ml/sec 的速率噴注，大幅增強現地含氯有機物之螢光感度，探測 1 m 的染料噴注量約 0.11 g，隨著 LIF 探頭進尺即時獲得連續性之螢光強度訊號資訊(Germain et al., 2014)。於美國墨西哥灣某處化學品製造工廠之 DNAPLs 污染調查案例，現場調查作業共探測 73 個鑽孔，運用之調查工具除 Dye-LIF 現地探測外，尚包括現地染料試驗、PID 篩測、VOCs 及 SVOCs 採樣分析等，各種調查工具之調查結果比對如圖 1.1 所示。利用單孔鑽探取樣土壤以 Venom 及 Sudan IV 染料



第一章前言

之搖晃試驗，針對 2 種染料呈現正反應的位置有一致性；DNAPLs 的低揮發性常使 PID 偵測不到，LIF 染料亦明顯提升 PID 的分析感度，PID 篩測出的 DNAPLs 潛勢區域與染料搖晃試驗的結果相符合；Dye-LIF 探測結果比對各深度 DNAPLs 螢光測值與 LIF 總螢光強度，若兩者呈現鏡射關係，則 LIF 總螢光強度係反應 DNAPLs 之螢光測值，依此得以研判 DNAPLs 分布的深度；另利用 4 個分段土壤之 Dye-LIF 群集分佈圖，藉由螢光持續時間(縱軸)與對應之螢光波段(橫軸)，說明 LIF 螢光是否與 DNAPL 有關，若訊號集中於分佈圖之中間上方位置，即表示該段土壤具 DNAPLs 污染潛勢，如第 2 分段及第 3 分段土壤；土壤 VOCs 及 SVOCs 分析測值高達 20,000 mg/kg，高濃度位置與 Dye-LIF 探測之 DNAPLs 分布深度一致，經由各調查技術交叉驗證 Dye-LIF 技術成功應用於含氯有機物污染場址之 DNAPLs 調查(Horst et al., 2018)。



資料來源：Horst, J., N. Welty, R. Stuetzle, R. Wenzel and R. St. Germain. 2018, Fluorescent Dyes: A New Weapon for Conquering DNAPL Characterization. Groundwater Monitoring and Remediation 38, no. 1: 19– 25.

圖 1.1 染料雷射激發螢光探測技術與其他調查工具之調查結果比對



美國 Dakota Technologies 公司研發之雷射激發螢光探測系統有紫外光篩測工具(Ultra-Violet Optical Screening Tool, UVOST)與焦油特定綠色光學篩測工具(Tar GOST)，目前國內僅有 UVOST 設備，以 308 nm XeCl 氣體做為激發光源，可偵測 NAPLs 中多環芳香烴(PAHs)成分激態散發之螢光。目前僅 Dye-LIF 技術證實成功以 Tar GOST 設備偵測到現地環境中 DNAPL 殘餘相污染源，有鑑於國內可運用於現地含氯有機物污染調查之技術甚感缺乏，因此本計畫規劃導入 UVOST 設備，第 1 年於實驗室篩選適合之染料開發 Dye-LIF 技術，並以模場試驗測試 Dye-LIF 技術操作參數。第 2 年開發現場 Dye-LIF 調查的輔助工具，增加他處模場試驗場址驗證 Dye-LIF 技術，並嘗試導入顯微攝影技術，以模場試驗比對影像鑑識結果與 Dye-LIF 調查結果的一致性。

1.3 已掌握之關鍵技術

LIF 系統的發展最早是由美國陸軍、海軍及空軍在貫入式場址調查及分析系統計畫(SCAPS Program)下合作發展之 SCAPS-LIF 系統，該系統僅由美國陸軍工兵署(U.S. Army Corps of Engineers, USACE)提供相關服務，另一個常見之 LIF 系統係由美國 Dakota 公司發展之 ROST-LIF 系統，目前最新發展至 UVOST-LIF 系統。LIF 技術應用於油品污染調查國外已推行多年，以美國伊麗莎白市海岸防衛隊駐站為案例，案例場址位於北卡羅來納州的伊麗莎白市，目的是在示範 LIF 系統調查油料場污染的種類與程度的效能。在二週的工作時間內，總共完成 27 處的測點，並界定出污染團的邊緣。同時亦採集土壤樣品並以傳統方法檢測以作為驗證的數據。測試過程中，系統的穩定度相當好，每次貫入程序前後的校正偏差約在 35% 左右，部分的偏差可達二個冪次，其原因多為設備上的問題(光纖斷裂、光徑偏移)。以常態化總螢光強度(normalized summed fluorescence)相對於深度加以作圖，並繪製三維空間顯示污染團的分布，如圖 1.2。利用傳統採樣方法分析土壤樣品，顯示利用 JP-4 作為代表物之污染分布，與 LIF 的調查結果具可比較性。

國內近年來有數個使用 LIF 調查油品洩漏場址的案例，以 102 年度環保署土污基金模場試驗場址台灣中油林園廠為例，針對石油化學類污染成分調查使用 2 種現地即時偵測系統，包括薄膜介面探測器系統(Membrane Interface Probe, MIP)與紫外光學雷射激發螢光系統(Ultra Violet Optical Screen Tool-Laser Induced Fluorescence, UVOST-LIF)。



第一章前言

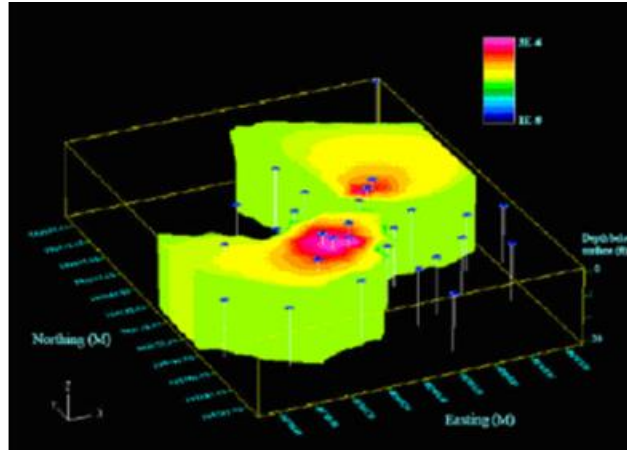


圖 1.2 美國伊麗莎白市海岸防衛隊駐站以 LIF 系統調查油料場污染團

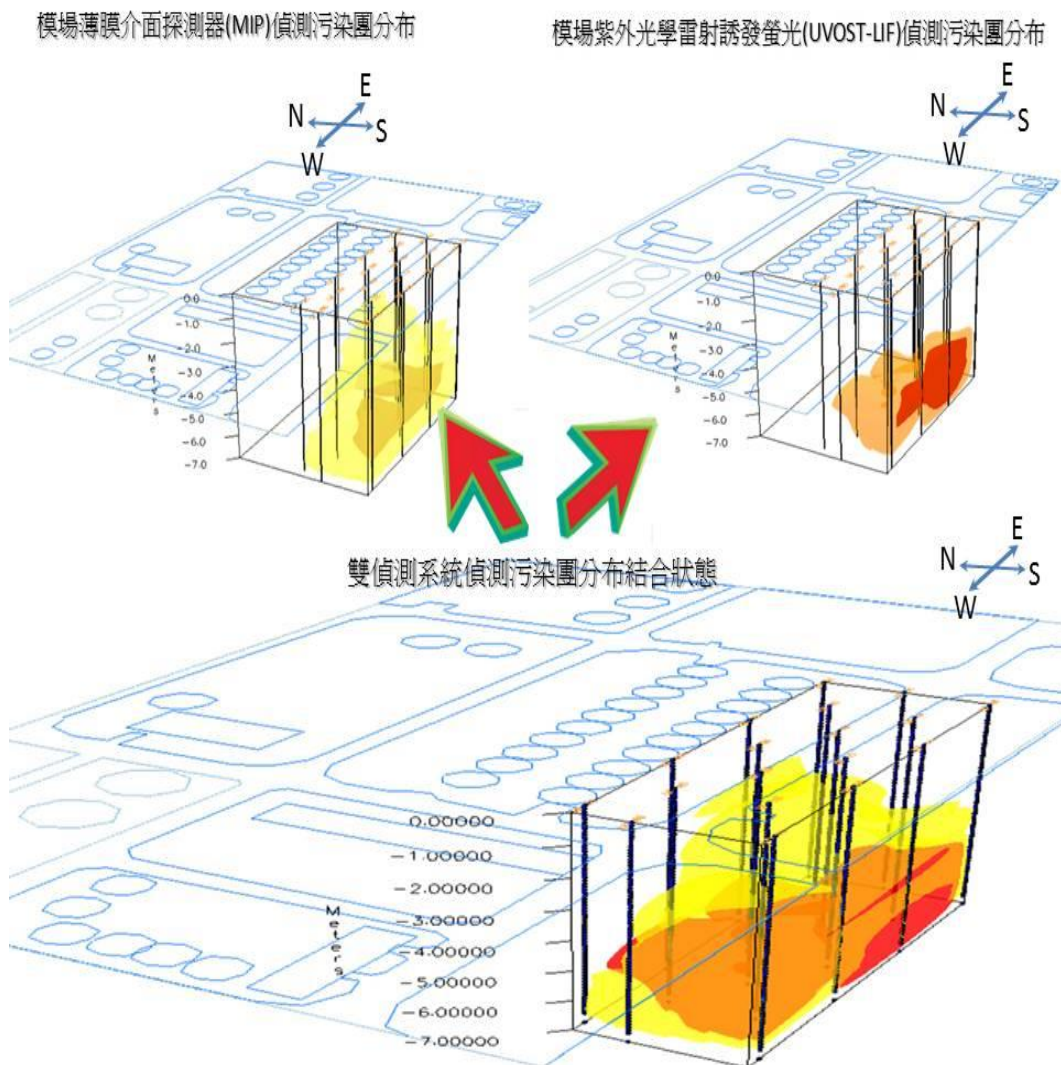


圖 1.3 台灣中油林園廠以 MIP 系統與 LIF 系統調查場址污染團分布之差異情形



染色輔助雷射激發螢光技術應用於含氯有機物污染調查之研究

針對常用之 2 種現地即時偵測系統各有其不同的偵測特性，薄膜介面探測器(MIP)系統主要應用熱揮發原理，加熱使土壤污染物揮發成為氣狀成分，透過半透膜傳遞，再利用傳輸管路收集進行污染物偵測。因此當污染物揮發性較低時，污染成分較難脫附與高濃度管路殘留現象易造成檢測誤差。紫外光學雷射激發螢光(LIF)系統則運用紫外波段雷射光源激發油品類污染物內特定成分，以進行激發螢光測定，惟對於輕質油品中某些特定成分之感度較低，所以也會產生檢測誤差現象。台灣中油林園廠油品污染調查案例呈現 MIP 系統與 LIF 系統現地偵測結果比對，2 套系統探測之污染物分布位置呈現出不盡相同的污染物流布狀態，如圖 1.3 所示。MIP 調查結果呈現污染分布位於場址中北方較淺層約 3 m 位置，開始往南方擴散至東西方位分布，並往深層移動的趨勢。UVOST-LIF 調查結果污染團則位於較深層約 4.5m 之位置，由場址中南方方位往北與西方向分布的趨勢。綜合兩種不同污染團分布的情形，初步可看出試驗場址中至少存在 2 種不同污染物質類型的洩漏來源存在

前期環保署土污基金模場試驗計畫已證實運用紫外光學雷射激發螢光系統進行石化油品污染場址調查是可行的，LIF 系統藉由洩漏污染物質的螢光特徵屬性與污染團空間傳輸分布狀況，得以專業判斷方式進行場址污染來源的溯源追蹤，追蹤場址中既存的持續洩漏源，或新發生洩漏情形之自由相源頭路徑。基於未含多環芳香烴(PAH)結構之含氯有機化合物(如三氯乙烯、四氯乙烯)，無法吸收雷射激發光源的能量而散發出螢光，因此直接利用 LIF 技術並無法偵測到環境介質中含氯有機化合物的存在與否。因 PAH 結構具有螢光特性，藉由含 PAH 成分的油溶性染料將三氯乙烯染色後，使 PAH 成分溶解分配至三氯乙烯，因而利用 LIF 技術偵測環境介質中三氯乙烯之可能性大為提高，此乃 Dye-LIF 技術偵測的原理。LIF 技術針對油品類污染物具有指紋鑑識的功能，本團隊已於多場油品污染場址使用 LIF 技術現地即時探測調查的實務經驗，目前對於 Dye-LIF 技術應用於含氯污染場址現地即時探測調查的用途尚有待開發。



第二章 研究目的

2.1 目的說明

雷射激發螢光技術之原理係以雷射光源提供激發能量，當分子吸收能量激發電子躍遷至高能激發態，而一個激發狀態的電子返回基態的躍遷過程中釋放出放射螢光。LIF 系統藉由監測 4 個獨特的光譜波段，來描述螢光激發的完整性，此紀錄形式以 wavelength-time matrix (WTM) 的方式呈現；並利用科學的統計方法，歸納出各單一油品於 4 個不同光譜波段之區間分佈比例，如圖 2.1 所示。

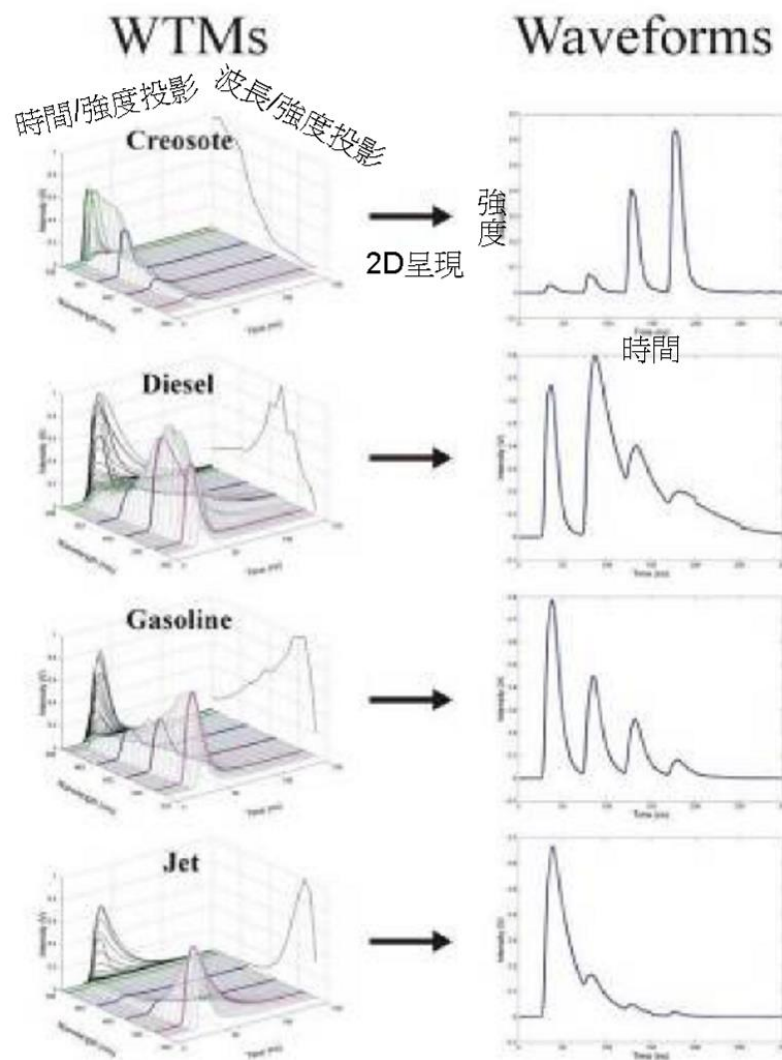
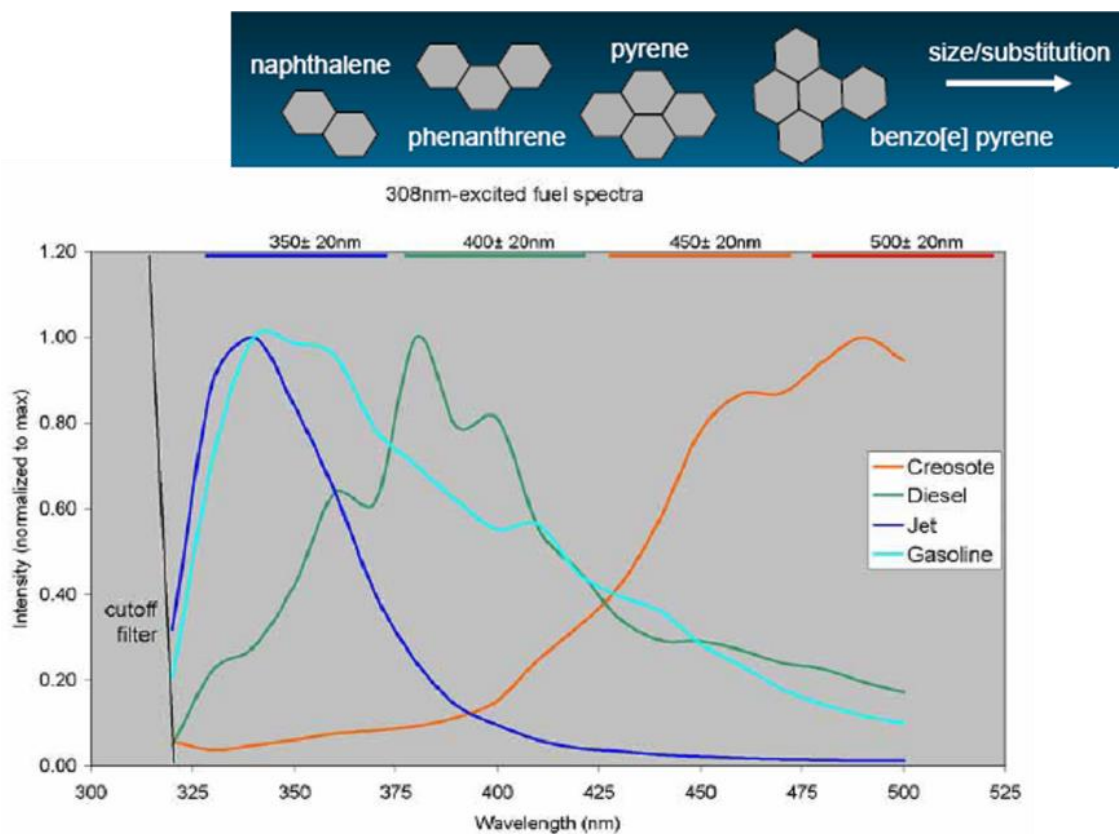


圖 2.1 LIF 螢光特徵圖譜之形成方式



染色輔助雷射激發螢光技術應用於含氯有機物污染調查之研究

油品中常含各類多環芳香烴(PAH)化合物，因 PAH 結構具有螢光特性，利用 LIF 技術可偵測環境介質中油品污染物的存在與否。另一方面，各類 PAHs 化合物的螢光特性互異，2 環結構的激發螢光波段約 350 nm，3 環結構的激發螢光波段約 400 nm，4 環結構的激發螢光波段約 450 nm，5 環結構的激發螢光波段約 500 nm，因此各類油品依其所含的 PAHs 化合物成分，呈現獨特的 LIF 激發螢光光譜，如圖 2.2 所示。各樣品依其螢光特性物質成分得以顯現獨特的 LIF 螢光特徵圖譜，因而 LIF 技術除具有偵測功能，亦兼具鑑別污染物種類之功能。



資料來源：行政院環境保護署，「101 年土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」：以雷射激發螢光系統建立國內油品特性光譜及風化效應影響之研究，期末報告，2012。

圖 2.2 一般燃料典型的 LIF 激發光譜

目前 LIF 調查技術亦成功應用於污染場址洩漏油品的調查作業，係因油品類物質對於 LIF 分析技術有良好的反應強度。而指標性含氯有機物質具



有雙鍵化學結構(如三氯乙烯、四氯乙烯)，接收雷射激發光源後通常將能量轉為自體旋轉，並無法散發出螢光，因此現地環境中殘存之重質非水溶相蓄積源(DNAPL pool)並無法利用雷射激發螢光系統直接偵測得知。近年美國 Dakota Technologies 公司研發出染料雷射激發螢光探測技術 (Dye-Laser Induced Fluorescence, Dye-LIF)，選用如同一般搖晃試驗使用的疏水性染料，類似 Sudan IV 或 Oil Red O 之染色原理，使現地含氯有機物得以被偵測到。

本研究計畫透過含氯有機物質之染色程序，使原先無法以雷射激發螢光系統偵測的物質，得以利用染料內含的螢光特性物質，於接收雷射激發光源後可以散發出螢光。有鑑於國內尚未發展含氯有機物洩漏源之現場污染調查技術，本研究以開發染色輔助雷射激發螢光技術應用於含氯有機物偵測為主要目的，包括篩選具有紫外螢光特徵之染料、調製染色含氯有機物之劑量配方、建立染色含氯有機物溶劑之螢光特徵圖譜、測試 LIF 偵測染色含氯有機物汚土劑量、現地模場試驗展示染色輔助雷射激發螢光技術應用可行性微分項目標。

2.2 研究重要性

雷射激發螢光系統之探測技術在國內多應用於生化和醫療領域之技術，如細胞的篩選、DNA 分析、螢光顯微照射等。在化學工程領域方面，則常見應用於微量分析，如自由基偵測，具有較高靈敏度和鑑別率的偵測方法。在環境工程領域方面，目前使用於少數污染場址之現地污染調查工作，主要應用於油品污染場址，至於含氯有機物洩漏場址污染調查之應用，目前尚待開發。

雷射激發螢光技術採用螢光光譜測量分析原油或原油產生之製品，如燃料油、潤滑油...等相關油品種類進行螢光特性研究，測試油品污染土壤時，含苯環結構污染物受到紫外光激發皆能夠發出很強的螢光現象，測試實驗中證明利用螢光光譜法對土壤中油品污染物進行檢測分析是可行的。一般受測試油品產生螢光光譜位於可見光區 320~700 nm 範圍，不同油品種類則有不同範圍光譜強度，因而形成油品所特有的光學指紋特性，運用此種特性即可辨別油品種類。依據量測的螢光特性光譜可鑑別污染土壤中油品種類，依據



染色輔助雷射激發螢光技術應用於含氯有機物污染調查之研究

量測的螢光強度可估算污染土壤中油品含量，雷射激發螢光分析可同時提供土壤中油品種類及含量之資訊，兼具光學指紋鑑識油品污染物的基礎。

針對雷射激發螢光系統探測技術之應用，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，包括「以雷射激發螢光系統建立國內油品特性光譜及風化效應影響之研究」及「運用紫外光學雷射誘發螢光系統於石化場址進行漏源追溯與組成特徵辨識」，已建立國內污染場址最常出現之 5 種純相油品 LIF 特徵圖譜，包括無鉛汽油、超級柴油、漁業用油、航空燃油 (JP-8) 及低硫燃油等，並探討地下環境中油品以混合型態存在下，其螢光特性圖譜之差異。將油品摻配土壤，以模擬實場污染狀況之 LIF 試驗結果發現，輕、中質類油品加入土壤後，螢光強度均會造成明顯的衰減。於已發生洩漏狀況之場址進行地表下連續性雷射螢光檢測，利用現場雷射螢光特徵圖譜測定結果，鑑定洩漏源之污染物種類，並辨識地下環境中自由相態污染物的分布情形。由多重洩漏源調查案例經驗得知，藉由洩漏污染物質之雷射誘發螢光特徵屬性與污染團空間傳輸分布狀況，來推估場址的污染來源是可行方式。

雷射激發螢光(LIF)調查技術為一即時現地之石油碳氫化合物調查篩試技術，可提供地下石油污染狀況高解析度之定性至半定量之訊息，亦可以快速及具經濟效益之方式區分受污染及未受污染之區域。LIF 技術常用於現地污染狀況之快速篩試作業，提供判斷地下環境是否存在石油碳氫化合物污染種類之依據。LIF 技術具有應用於油品污染鑑識的潛力，於現場調查採樣階段可進行樣品初步鑑識。然而針對未含多環芳香烴(PAH)結構之含氯有機化合物(如三氯乙烯、四氯乙烯)，無法吸收雷射激發光源的能量而散發出螢光，因此直接利用 LIF 技術並無法偵測到環境介質中含氯有機化合物的存在與否。藉由疏水性染料之染色原理，使染料中 PAH 成分溶解分配至三氯乙烯，因而利用 LIF 技術得以偵測現地含氯有機物之可能性大為提升。有鑑於國內可運用於現地含氯有機物污染調查之技術甚感缺乏，發展染色輔助雷射激發螢光探測技術有殷切需求，以補足國內污染調查技術的缺口。



2.3 預期目標

本計畫研究以開發本土化染色輔助雷射激發螢光技術為任務，上半年於實驗室篩選適合之染料，應用於三氯乙烯 NAPL 相染色，並建立 Dye-LIF 技術之偵測操作條件；下半年以模場試驗測試 Dye-LIF 技術之現地應用案例，並建立現地探測 SOP 作業程序。本年度預期目標說明於下：

1. 建立三氯乙烯染劑調製配方，應用於 Dye-LIF 探測分析。
2. 建立本土化 Dye-LIF 探測分析技術，模場展示三氯乙烯洩漏源調查之應用案例。
3. 完成現場土壤染料搖晃試驗與 Dye-LIF 鑽探分析結果比對。
4. 完成中華民國發明專利申請。



第三章 文獻探討

3.1 含氯有機污染物傳輸宿命

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。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。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。

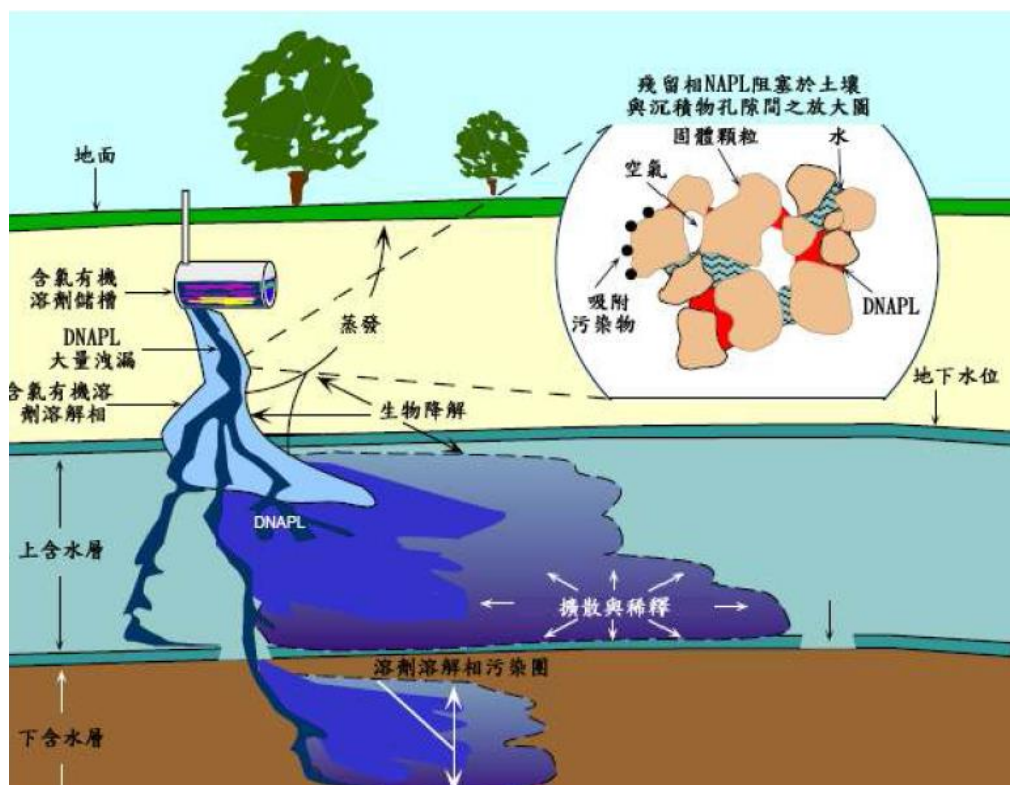
含氯有機物微溶於水，大部分密度範圍在 $1,100\sim 1,600\text{ kg/m}^3$ ，黏度範圍在 $0.57\sim 1.0\text{ cp}$ 間，因密度大及黏滯性低之特性，使其在地表下的移動性佳，能夠穿過連水都不能穿過之孔隙，所以可以從土壤表層一直往下移動至不透水層(Palmer and Johnson, 1989)。當 DNAPL 從污染源釋放出而流到地下後，宿命與傳輸方式依據其物化特性及水文地質而有所差異。推測當污染發生洩漏，污染物依土壤質地與通透特性，移動至不飽和之通氣層(vadoze zone)，於此土壤孔隙同時存在少量水分及空氣或其他氣體，且因 DNAPL 本身特性及重力，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，進入飽和含水層後，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，就會堆積變成重質非水相液體團(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，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。



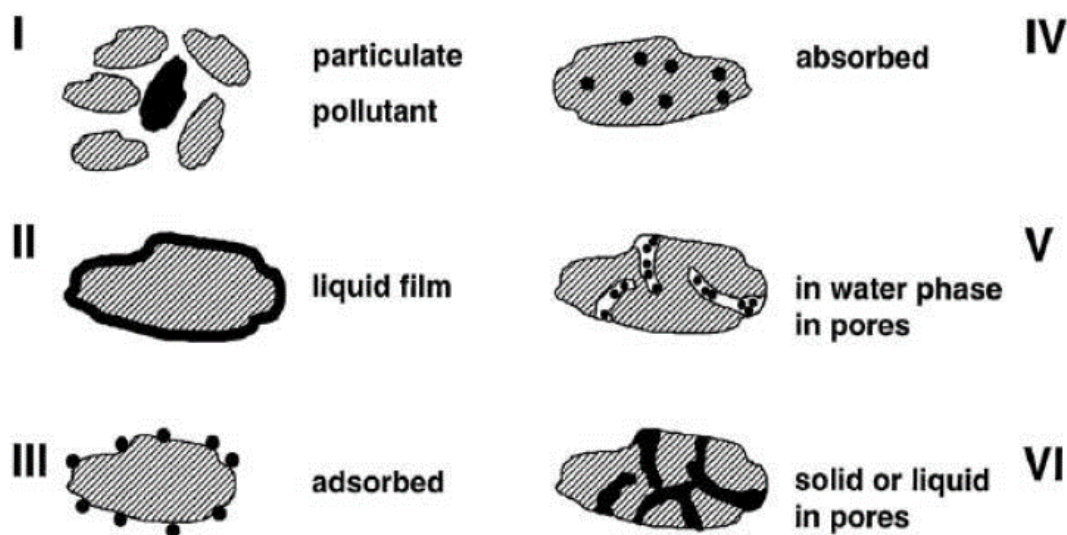
資料來源：USEPA，1999。

圖 3.1 DNAPL 洩漏至土壤及地下水傳輸



染色輔助雷射激發螢光技術應用於含氯有機物污染調查之研究

有機物在土壤中傳輸宿命作用最主要為土壤吸附機制，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。所謂化學性吸附(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附力強的化學鍵結，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。物理性吸附有許多不同型態，包括孔隙滯留、液膜吸附、表面吸附、內在吸收、內在孔洞吸附、內在孔洞儲留等，圖 3.2 為土壤物理性吸附型態的圖解說明。



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 在土壤中吸附有機污染物的物理形式

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：土壤吸附污染物主受土壤有機質含量影響，污染物特性需考慮其水溶解度大小及解離與否，土壤中液體特性包括 pH 值及導電度皆可能改變土壤特性或影響污染物分布型態。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配係數 (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 含氯有機污染物調查技術

絕大多數含氯有機化合物常溫下呈液態，其密度大於水，在水中溶解度較小，一般被歸類為「比水重之非水相液體」(DNAPL)。傳統 DNAPL 調查技術概分為侵入性方法與非侵入性方法，侵入性方法係指一般鑽孔採樣或設置監測井作業，包括土壤氣體採樣、土壤採樣、地下水採樣等；非侵入性方法一般泛指應用地球物理技術之探勘作業，如透地雷達技術、感應電磁技術、地電阻技術等。侵入性調查雖可獲致單點污染情形，欲界定污染區域範圍往往須配合細密調查採樣，累積許多單點污染情形以建構”面”的資訊。但針對大範圍調查佈點數量繁多，相對調查經費支出龐大，此外複雜之地質變化亦可能造成採樣漏失。非侵入性方法以地球物理探勘作業可能侷限 DNAPL 的地質條件與 DNAPL 污染範圍，屬非破壞性檢測技術對場址環境幾無任何影響。地球物理探勘作業應用於大範圍探勘作業迅速，可提供”線”的深度污染資訊，相對同尺度調查所需之傳統鑽探或設井採樣，可大幅降低調查經費與時間。非侵入性的地球物理方法並不能完全取代直接式的鑽探取樣，地球物理探勘結果僅提供定性研判，不過可於熱點區域搭配少數鑽探點查證確認。

早期 DNAPL 污染基線調查方法包括目視法及染色輔助目視法(Kram et al., 2001)，然而一般土壤採樣除非鑽到殘留含量甚高之土樣，否則很難以目視直接判斷有殘餘相存在。由於土壤的異質性造成採到純相的機率很低，一般經驗法則以土壤之 DNAPL 含量超過總重量的 1%，可直接判斷調查區域可能存在 DNAPL 純相。近期美國 ITRC (Interstate Technology & Regulatory



Council)出版 DNAPL 場址調查與工具篩選指引提出調查技術之分類，主要區分為地球物理調查、水力測試、蒸氣與土壤氣體採樣、土壤採樣與分析、現地直接進樣分析、NPAL 是否存在判斷技術、化學掃描、環境生物診斷、離地分析等類別，透過選項找到相對應的調查技術。在篩選技術過程說明須先確認需求，包含所缺的資訊是屬於何種類型(包含地質、水文、土壤氣體污染物、土壤中污染物、地下水污染物)，考量地層範圍是否包含岩盤部分，主要缺口數據是否需符合定性與定量的要求，調查範圍是否區分飽和含水層或未飽和層等(ITRC, 2015)。

參考國外調查技術類別分類，並依國內調查技術工具之可取得性，彙整常見之含氯有機污染物調查技術於表 3.1。針對各調查技術應用範圍與使用經驗限制提出說明，並評析各調查工法之國內技術成熟度。依據含氯有機污染物調查工具使用之作業順序，概略區分為地球物理調查技術、土壤氣體調查技術、水文地質調查技術、直接貫入技術、現地土壤及地下水取樣技術、其他類型調查技術。常用的地球物理調查技術工具包括透地雷達、感應電磁法、地電阻影像法、雷達波井測，常用的土壤氣體調查技術工具包括土壤氣體現地採樣 PID/FID 篩測、土壤間隙氣體採樣 GC-MS 分析、氣體檢知管、土壤間隙氣體被動式採樣法、土壤氣體彈性多層襯膜技術(Vadose Flexible Liner Underground Technologies, VadoseFLUTe)、繪製土壤氣體污染特徵分布，常用的水文地質調查技術工具包括超音波鑽機、微水試驗、單井流向流速測定，常用的直接貫入技術工具包括圓錐貫入試驗、電導度探測器、薄膜界面感測器調查(MIP)、MIP 搭配飛行時間質譜儀(Time-of-Flight Mass Spectrometry, TOF-MS)分析、MIP 搭配水文地質剖析儀(Hydraulic Profiling Tool, HPT)、誘發螢光技術、非水溶相彈性多層襯膜技術(NAPL Flexible Liner Underground Technologies, NAPLFLUTe)、現地攝影，現地土壤及地下水取樣技術工具包括傳統土壤採樣、監測井採樣檢測、各類型式地下水取樣器(如擴散袋、BAT、Simu Probe、Waterloo Profiler)、地下水彈性多層襯膜技術(Water Flexible Liner Underground Technologies, WaterFLUTe)、疏水性染料技術，其他類型調查技術尚包括光學造影儀、液相分配井間示蹤劑試驗(Partitioning Interwell Tracer Test, PITT)、氬-222 分析技術、樹芯調查技術、環境法醫技術。



表 3.1 含氯有機污染物調查技術分類與國內技術成熟度

技術名稱	調查技術應用內容	國內技術成熟度
一、地球物理調查技術		
透地雷達探測 (Ground Penetrating Radar, GPR)	1.適用於製程區或欲調查區域之地下設施/管線偵測。且較不受地形現制。 2.如有以往曾有相同區域、相同頻率之背景探測值，可用來比較地層中所反應之訊號於現況是否變化，輔助研判地層中是否存有開挖回填、滲水漏縫或污染潛勢。	○
感應電磁法 (ElectroMagnetic, EM)	1.適用於調查地下是否存在掩埋物質，且較不受地形現制。 2.以往有背景探測結果較易輔助研判。 3.如確認有大量新漏源持續洩漏，可快速掃瞄分布範圍。	○
地電阻影像法 (Electrical Resistivity Tomography, ERT)	1.最常使用於污染調查之地物方法。 2.面積大，製程區道路長而平坦，但污染潛勢不明之場址使用。 3.探測範圍大，除污染物，亦可協助研判地層組成。	○
雷達波井測 (Borehole Radar)	1.可用於探測污染深度分布及污染範圍。 2.配合標準監測井設置進行探測，後續再以微洗井進行定深度採樣。	○
二、土壤氣體調查技術		
土壤氣體現地採樣篩測 (PID/FID)	1.地表下 5 公尺內可用人工或機具鑽進之地質(如砂土、粉土、黏土)，採樣方式靈活，空間狹小地區可以人工推進方式採樣。 2.對洩漏源區或新洩漏含氯有機溶劑區域之篩測靈敏度較高。	○
土壤間隙氣體採樣質譜分析 (GC/MS)	1.地表下 5 公尺內可用人工或機具鑽進之地質(如砂土、粉土、黏土)。 2.如能鎖定洩漏源區或新洩漏含氯有機溶劑區域，且利用 GC/MS 分析管制標準項目之濃度亦偏高，建議可直接進行查證。	○
氣體檢知管	1.地表下 5 公尺內可用人工或機具鑽進之地質(如砂土、粉土、黏土)。 2.對洩漏源區或新洩漏含氯有機溶劑區域之篩測靈敏度較高。 3.直接呈色，單一物種鑑別度，準確性高。	○
土壤間隙氣體被動式採樣法	利用吸附材料吸附土壤間隙氣體中的污染物，用於評估污染分佈及土壤氣體入侵潛勢。	△



表 3.1 含氯有機污染物調查技術分類與國內技術成熟度(續 1)

技術名稱	調查技術應用內容	國內技術成熟度
繪製土壤氣體污染特徵分布 (Soil Gas Profiling)	1.可間接顯示 DNAPL 的存在,以及可提供揮發性有機物在地下透氣層(不飽和層)的直接濃度。 2.無法提供任何分層資料。	△
Vadose FLUTe 土壤氣體彈性多層襯膜技術	1.以直接貫入法鑽孔,以未飽和層彈性多層襯膜技術(Vadose Flexible Liner Underground Technologies, Vadose FLUTe)於不同深度設置土壤氣體採樣點,可應用於長期採樣及監測。 2.相較於直接貫入式土壤氣體採樣長期監測,需多次採樣,半透膜土壤氣體監測法僅需一次性設置。	△
三、水文地質調查技術		
超音波鑽機 (Ultrasonic Rig)	1.於傳統旋鑽機的鑽頭增設超音波產生設備,超音波鑽機可用於複雜地質及卵礫石層連續取樣,取得完整岩心,可用於地質調查、鑽井及連續取樣。 2.可同時完成地質鑽探、土壤取樣及監測井設置。	○
微水試驗 (Slug Test)	1.微水試驗在井內瞬間注入或取出一定體積的水,並同時測量井內水位隨時間的變化的數據,協助推估井周遭水力傳導係數 K 值。 2.水力傳導係數,又稱滲透係數,係指水力坡度為 1 時,地下水在介質中滲透速度。	○
單井流向流速測定	1.可快速掌握局部區域之流向,並透過砂箱試驗所建立經驗模式初估流速。 2.協助評估污染可能傳輸方向及範圍。	○
四、直接貫入(Direct Push)技術		
圓錐貫入試驗 (Cone Penetrometer Test, CPT)	提供土壤介質之相對電阻與摩擦力之連續讀值,據以比對場址之土壤類型。應以現場實際鑽取之土柱進行校正。	○
電導度探測器 (Conductivity Probe)	可協助解讀圓錐貫入試驗(CPT)的資料,可作為 DNAPL 存在的間接指標。	○
薄膜界面感測器 (Membrane Interface Probe, MIP)	1.適用於 Geoprobe 鑽機可鑽進之地質(如砂土、砂、黏土)。不受地下水位影響,並可利用鑽頭上溫度感應器之變化測得地下水位深度。 2.後端通常連接 ECD(Electron Capture Detector)-FID 偵測器調查含氯有機物污染,可顯示連續進尺深度,並可描繪「深度 VS 濃度」之變化曲線。 3.EC(導電度)偵測器之測值可反映連續進尺過程,地質特性之變化,避免鑽破黏土層。	○



表 3.1 含氯有機污染物調查技術分類與國內技術成熟度(續 2)

技術名稱	調查技術應用內容	國內技術成熟度
MIP 搭配 TOF-MS	整合薄膜界面感測器(MIP)及飛行時間質譜儀(TOF-MS)設備，可進行土壤氣體定性及半定量分析 20 種以上化合物。	△
MIHPT	整合薄膜界面感測器(MIP)及水文地質剖析儀(HPT)設備，同時瞭解污染分布及水文地質特徵。	△
現地攝影 (In-Site Camera)	1.攝影探測器應置於 DNAPL 存在的污染區域，在特定情形下，可拍攝到顆粒狀 DNAPL。 2.可顯示貫入過程中所遇到土壤的影像，可用於確認地質特性的變化。	X
激發螢光技術 (Induced Fluorescence)	1.可偵測螢光性化學物質(如芳香族與多環芳香族碳氫化合物)，可將污染物濃度區分成高、中、低，但無法確認自由相或殘留相 DNAPL 的存在。 2.其訊號反應與污染物濃度非成線性關係，現有的商業設備對於煤焦油(coal tar)的訊號反應微弱。	X
NAPL FLUTe 彈性多層襯膜技術	1.以直接貫入法鑽孔，以附有 NAPL 呈色劑之彈性多層襯膜技術(NAPLflexible Liner Underground Technologies, NAPLFLUTe)，設置再回抽後，如有 NAPL 污染，則會於特定深度與呈色劑反應。 2. NAPL FLUTe 可提供明確標定污染位置及深度。	X
五、現地土壤及地下水取樣技術		
土壤採樣	1.地表下 5 公尺內可用人工或機具鑽進之地質(如砂土、粉土、黏土)。 2.用於高污染潛勢地區之查證，其結果可作為公告列管依據。	○
監測井採樣檢測	1.透過地下水分析測得含氯有機溶劑污染。 2.用於高污染潛勢地區查證。 3.欲確認現場是否有純相洩漏源存在，可以污染物濃度是否 > 溶解度 1% 之經驗準則研判。	○
擴散袋地下水取樣器 (Diffusion Sampler)	使用於鑽孔或監測井中，設置定深度採樣器，可以讓特定深度地下水進入採樣袋，平衡一段時間後採樣。	○
BAT®地下水取樣器	無法提供任何分層資料。如果有不同的分層，DNAPL 較可能的移動路徑應先取樣，因此在取樣前應先了解地下水分層的狀況。	△
SimuProbe®取樣器	可同時採集土壤、土壤氣體與地下水樣品。如果有不同的分層，DNAPL 較可能的移動路徑應先取樣，因此在取樣前應先了解地下水分層的狀況。	△



表 3.1 含氯有機污染物調查技術分類與國內技術成熟度(續 3)

技術名稱	調查技術應用內容	國內技術成熟度
Waterloo Profiler®地下水取樣器	可初步評估土壤類型。如果有不同的分層，DNAPL 較可能的移動路徑應先取樣。	△
Water FLUTe 地下水彈性多層襯膜技術	以直接貫入法鑽孔，於不同深度設置地下水彈性多層襯膜技術 (Water Flexible Liner Underground Technologies, WATER FLUTe) 地下水採樣口，採得之水樣為特定深度之地下水樣品，並長期監測。	△
Sudan IV Oil Red O 疏水性染料	將樣品與試劑置入瓶中搖動，觀察其反應情形，以瞭解是否有 DNAPL 的存在。Sudan IV 毒性強，操作時須非常小心。	△
六、其他類型調查技術		
光學造影儀	1.可協助判斷地層斷裂面的走向，以及調查岩層的隙縫。 2.如鑽孔鑽至 DNAPL 處，攝影機可以拍攝到 DNAPL。	X
液相分配井間示蹤劑試驗 (Partitioning Interwell Tracer Test, PITT)	可間接顯示 DNAPL 的存在。整治前可用以評估污染範圍，整治後可評估整治成果。須設置一系列平行注入井與抽水井。	△
氬-222 分析	環境氬-222 因會分溶入(partitioning) NAPLs 而使濃度大為降低，因此比較氬-222 的濃度，可界定出廠址有無污染源或其範圍。	△
樹芯調查	以植物會吸收地下水及其污染物的特性，以樹芯樣品中所含之污染物濃度作為一快篩方法，劃定及確認污染濃度。此外，亦可以年輪化學方法，分析年輪中累積之元素濃度，可初步推斷污染時間。	△
環境法醫技術	依詳細的場址特徵調查量測資料，應用統計分析、化學分析、地球物理量測以及數值模式分析，用以評估污染來源及責任歸屬。	△

備註：

1. 國內技術成熟度：『○』表示成熟、『△』表示尚可、『X』表示不成熟

2. 資料來源：a. Kram et al., DNAPL Characterization Methods and Approaches, Part 1: Performance Comparisons, *Groundwater Monitoring and Remediation*, 2001 Fall, 109-123.

b. USEPA, Site Characterization Technologies for DNAPL Investigations, EPA 542-R-04-017, 2004.

c. Interstate Technology & Regulatory Council (ITRC), Integrated DNAPL Site Characterization and Tools Selection, 2015.

d. 行政院環境保護署，運作中工廠土壤及地下水含氯有機溶劑污染潛勢調查及查證計畫(第5期)期末報告，EPA-102-GA12-03-A124, 2014.



3.3 雷射激發螢光檢測

光譜光學分析一般可分成(1)吸收(2)放射(3)螢光等三種方式，其主要來自於它們的電子能階、振動能階及轉動能階等作用。原子光譜為當原子內電子運動狀態發生變化時，會產生發射或吸收特定頻率的電磁頻譜。原子因其內部運動狀態的不同，可以處於不同的定態，每一定態具有一定的能量，主要包括原子體系內部運動的動能、核與電子間的相互作用能以及電子間的相互作用能。能量最低的態叫做基態，能量高於基態的叫做激發態，它們構成原子的各能階。高能量激發態可以躍遷到較低能態而發射光子，發射光子的各種頻率構成發射光譜；反之，較低能態可以吸收光子躍遷到較高激發態，吸收光子的各種頻率構成吸收光譜。

分子光譜則是分子從一種能態改變到另一種能態時的吸收或發射光譜，可包括從紫外到遠紅外直至微波譜。分子光譜來自於分子繞軸的轉動、分子內原子的振動和分子內電子的躍遷有關，分子能階之間躍遷而形成發射光譜和吸收光譜。一般分子光譜非常豐富，可分為純轉動光譜、振動-轉動光譜和電子光譜。分子的純轉動光譜由轉能階之間的躍遷產生，分佈在遠紅外波段，通常主要為吸收光譜。振動-轉動光譜由不同的振動能階上的各轉動能階之間躍遷產生，是一些密集的譜線，分佈在近紅外波段，通常也為吸收光譜。電子光譜由不同電子能階上不同振動及不同轉動能級之間的躍遷產生，可分成許多帶，分佈在可見或紫外波段，為發射光譜。非極性分子由於不存在電偶極矩，沒有轉動光譜和振動-轉動光譜，只有極性分子才有這類光譜帶。

發射螢光光譜主要是當分子吸收能量時(通常是光子或電子束)，分子內的電子就會受到激發而躍遷至高能激發態，此一躍遷若不涉及電子自旋狀態的改變，意即由基態單態(singlet state)，躍遷至激發態單態，則其躍遷機率較大。而當一個激發狀態的電子在單態到單態之間躍遷時，因其躍遷機率較大，因此所放出的光強度較大，但生命期較短僅 $10^{-5} \sim 10^{-8}$ 秒之間，而將電子在此種狀態的躍遷所放出的光稱為放射螢光，如圖 3.3 所示。

螢光最常見於最低能階的躍遷，類型為鍵結 π 或未鍵結 n 電子到 π^* 反鍵結軌域，而這些所需之躍遷能量最小，波長範圍為 200~700 nm 屬一般紫外光及可見光的範圍。而螢光放射光譜是指某一激發波長引起物質放射不同



波長螢光的相對強度，當使用固定激發光的波長與強度，可藉此測定待測物所發射出不同波長的螢光強度，如此便得到特定的螢光放射光譜。一般常見螢光放射波長總是大於激發光的波長，主要是由於激發分子的內轉換等原因，造成部分能量損失。

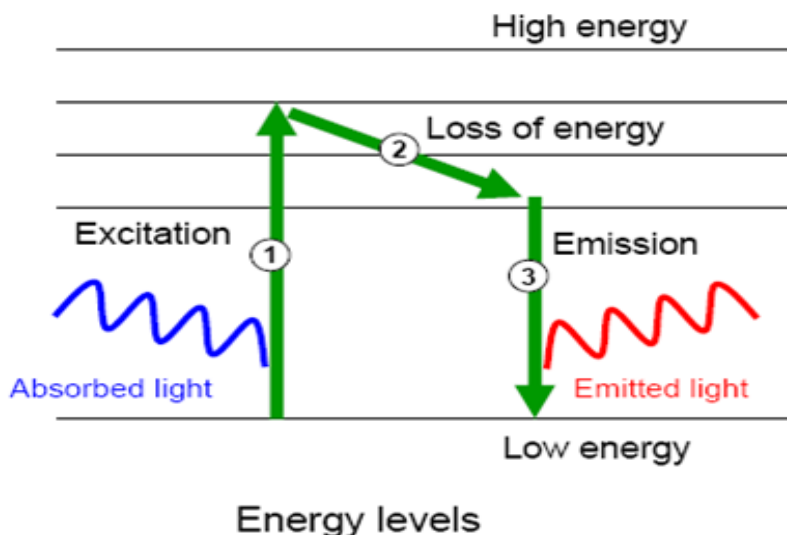


圖 3.3 分子激發螢光過程之能階變化圖

常見到能夠發出較強螢光的分子，幾乎都是通過 $\pi \rightarrow \pi^*$ 躍遷過程而產生的，因此含有多個共軛雙鍵，且具有高度共振穩定性的分子有利於發射螢光。 π 電子的共軛度越大，螢光量子產率越高。因此具有芳香族化合物及雜環化合物是產生螢光之基本條件，苯環愈多可提升螢光量子產率愈多。大多數具有剛硬性平面結構的有機分子常具有較強烈的螢光反應，這是因為剛硬性結構的分子結構不易產生形變，堅固不易振動，能夠保持較大 π 電子的共軛度關係。

雷射主要由三個部分組成：雷射介質、激發來源與共振腔，雷射產生的步驟中，先由激發來源光去激發雷射介質，使雷射介質中的活性粒子受到激發，達到某一激發態。藉此，有些電子會透過釋放光子，回到較低的能階。而釋放出的光子會被設於雷射介質兩端的鏡子來回反射，誘發更多的電子進行激發放射，使雷射光的強度達到最高。



雷射的種類繁多，大致可以分為：氣體雷射、液體雷射、固體雷射、半導體雷射，這四種。他們的共通點是光束高度平行、純色、同調、高強度；氣體雷射由於其增益介質有良好的均勻性，而且共振腔較長等特性，因此光束的指向性最強，其中又以氦氖雷射表現最優。固態雷射因為增益介質均勻性較差、共振腔較短，且容易有高階模態產生，所以固態光束的光束指向性次之。而半導體雷射以磊晶形成天然的鏡面當作反射鏡，且形成的共振腔非常短，所以半導體雷射的光束指向性最差(謝等，2005)。

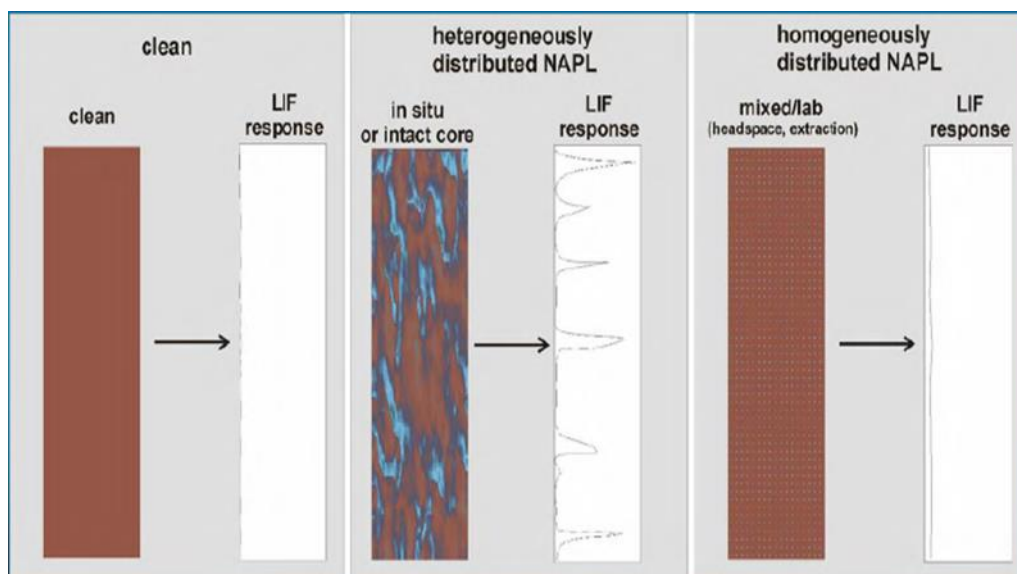
常見之雷射激發螢光探測系統主要有二種：由美國陸軍、海軍及空軍在貫入式場址調查及分析系統計畫 (SCAPS Program) 下合作發展之 SCAPS-LIF 系統，該系統僅由美國陸軍工兵署 (U.S. Army Corps of Engineers, USACE) 提供相關服務；另一系統係由美國空軍及 Dakota 公司合作發展之 ROST™/LIF 系統，目前由 Fugro Geosciences 公司提供美國及歐洲地區污染場址調查之服務。SCAPS-LIF 系統則主要提供軍方、州及聯邦政府等政府機構服務，並未開放供私人機構使用(賴，2006)。由美國 Dakota 公司發展之 ROST-LIF (Rapid Optical Screening Tool - Laser Induced Fluorescence) 系統，目前發展出 UVOST-LIF (Ultra Violet Optical Screening Tool - Laser Induced Fluorescence) 系統(環保署，2013)，屬於光學篩測工具，主要應用於非水相液體(NAPL)污染物偵測。絕大多數燃料油品中含有不同濃度之多環芳香烴 (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs)成分，因此可運用 UVOST-LIF 光學篩測工具進行檢測(Germain, 2008)。此套雷射激發螢光探測系統使用已知標準品進行單點校正，同時利用特徵圖譜形狀進行螢光定性分析。

雷射激發螢光探測調查技術屬於快速場址評估方式之一，適用於石油碳氫化合物現地即時調查及現場污染篩試，可提供地下石油污染狀況高解析度之定性至半定量之訊息。雷射激發螢光探測調查技術常運用於石化類污染場址中「自由相態」之有機污染物檢測，針對污染物成分具有光激發螢光反應之特性，以高功率密度之雷射光源回饋較高強度之螢光反應，增加雷射誘發螢光檢測的靈敏度。目前雷射激發螢光可確實地針對汽油、柴油、煤油、機油、液壓油、原油及燃料油進行檢測(環保署，2012)。針對部分物品具有偽陽性 (False Positives) 與偽陰性 (False Negatives)，如貝殼、方解石、樹根與紙張皆會有 1~10 %RE 之反應(USEPA, 1997)，而溶解相之多環芳香烴及



染色輔助雷射激發螢光技術應用於含氯有機物污染調查之研究

含氯溶劑等項目可能無法偵測。當執行雷射激發螢光檢測時，若待測物成分中不含多環芳香烴時，並不會產生任何螢光反應；待測物呈現為不均質狀時，螢光反應將隨多環芳香烴之分佈進行波動；當待測物內含有均質之多環芳香烴時，各深度螢光反應幾乎相同，呈現之螢光反應樣態如圖 3.4 所示(Germain, 2008)。



資料來源: Germain, R. St. 2008, New Generation Optical Sensors for Characterizing NAPL Source Zones, Dakota Technologies.

圖 3.4 雷射激發螢光偵測污染物之螢光反應樣態示意圖

本研究導入美國 Dakota Technologies 公司 UVOST 紫外光篩測系統，其雷射激發螢光之雷射型態為準分子雷射(Excimer)，藉由放電過程進行誘發，即在氣體中通以大小適中之電流，當電流通過氣體後產生自由電子與離子，當電子受到電場作用後取得足夠動能，使其與中性原子或離子碰撞，並將動能轉送給受碰撞之粒子，作為激發能的能量，將其誘發至高能階態。而中性原子氣體雷射是利用惰性氣體(inert gas)如氬、氖、氫與氦以及氙作為介質，亦有使用金屬原子蒸氣、分子蒸氣作為介質的系統，其相關型式介紹如表 3.2 所示(楊和黃，2006)。表 3.3 列舉多種準分子雷射的特徵，利用放電進行雷射氣體誘發(謝等，2005)。其中氯化氙產生特定波長(308 nm)之雷射光源誘發待測物內層的電子至外圍，為保持能量平衡，分子外圍電子將補入內層電子外移的空缺。因外圍電子能量較高，當電子進入內層軌域時，將放出特定的



螢光能量，透過分析螢光之強度，可得到待測物質之相對濃度(賴，2006)。待測物中所含多環芳香烴含量之多寡會影響螢光強度大小(USEPA, 1999)，若改變波長則會改變整體光譜變化(Travis and Germain, 2008)。

表 3.2 氣體雷射相關型式介紹

雷射體系	活性介質	激發方式	典型的 長度(cm)	輸出功率(Watt)	
				連續波式	脈衝式(尖峰)
氣體雷射	惰性氣體	氣體放電 化學激發	50	$10^{-3} \sim 10^4$	$10^3 \sim 10^5$
	分子氣體				
	金屬蒸氣				

資料來源: 楊國輝，黃宏彥，「雷射原理與量測概論」，五南圖書，2006。

表 3.3 準分子雷射-XeCl 特徵

雷射型態	活性物質/型態	誘發型式	放波型式	震盪波長 nm	特性/特徵
準分子雷射	ArF	放電	脈衝波	193	高輸出 紫外線
	KrF			248	
	XeCl			308	
	XeF/氣體			351	

資料來源: 謝嘉民，賴一凡，林永昌，枋志堯，「光激發螢光量測的原理、架構及應用」，奈米通訊，第十二卷第二期，2005。

通常一個場址若發生非屬溶解相液體(NAPL)類污染物洩漏事件後，該洩漏物質會因重力作用而入滲於土壤之中並沿著土壤間孔隙向下移動，在入滲移動過程中污染物會被吸附殘留在土壤孔隙形成殘留相(Residual Phase)。若過飽和油品類污染物繼續移動至地下水位面附近，由於油品的比重比水輕之特性，滲流油品便會浮在地下水水位界面處形成自由移動相的浮油(Free Product)，藉由連續性的偵測方式便可以了解 NAPL 存在於地表下分布的狀況。另外由於各污染成分之組成各異，因此在 LIF 系統檢測下便會產生不同



染色輔助雷射激發螢光技術應用於含氯有機物污染調查之研究

的螢光特徵圖譜，經由圖譜差異比較便進一步可了解不同深度位置之污染物組成，如圖 3.5 所示。油品中常含各類具有螢光特性之多環芳香烴(PAH)化合物，因此油品類物質對於 LIF 分析技術有良好的反應強度，國內已建立數個使用 LIF 調查油品洩漏場址的成功案例。

針對三氯乙烯、四氯乙烯等指標性含氯有機物，因其雙鍵化學結構不具有螢光反應特性，無法直接利用 LIF 技術偵測到環境介質中含氯有機化合物的存在與否。近年來美國 Dakota Technologies 公司提出染料雷射激發螢光探測(Dye-LIF)技術，藉由疏水性染料之染色原理，使染料中 PAH 成分溶解分配至三氯乙烯，因而利用 LIF 技術得以偵測現地含氯有機物之可能性大為提升。

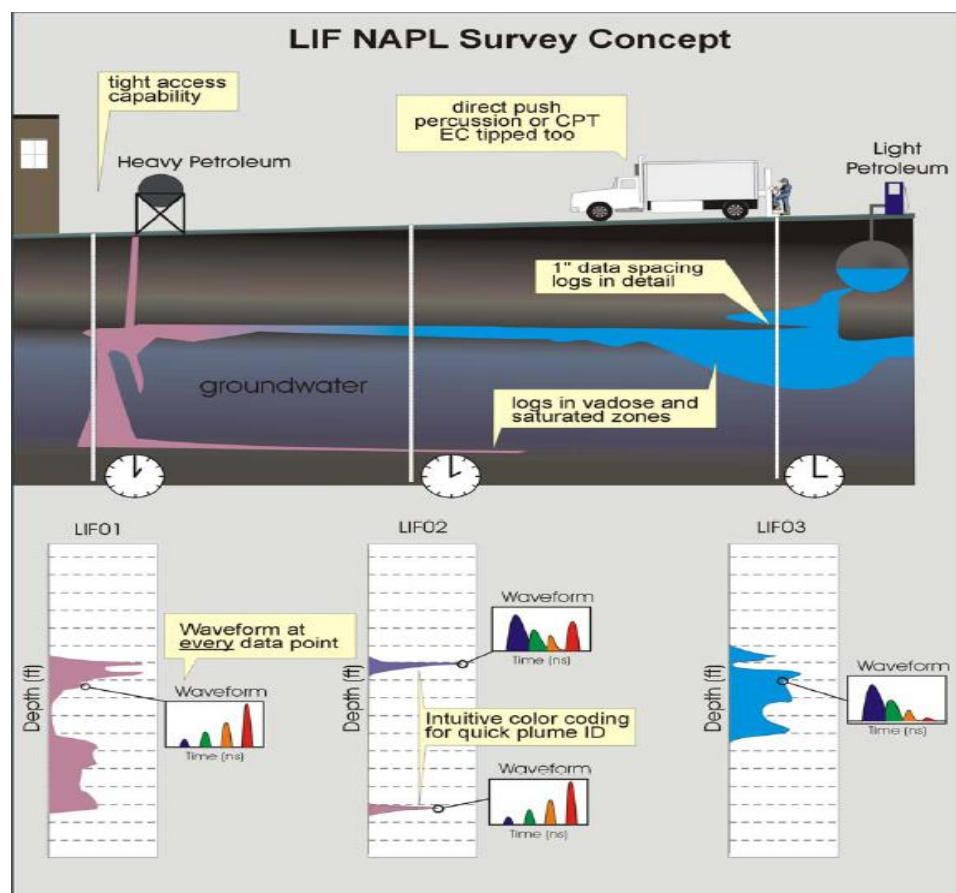


圖 3.5 LIF 系統於地表下現地即時探測油品污染物示意圖

Dye-LIF 技術使用焦油特定綠色光學篩測工具(Tar-specific Green Optical Screening Tool, Tar GOST)，於 LIF 鑽頭螢光視窗下方加裝染料噴口，改裝後 LIF 鑽頭結構如圖 3.6 所示。當 LIF 鑽頭直接貫入地表探測時，染料以 1 ml/sec



的速率噴注，大幅增強現地含氯有機物之螢光感度，探測 1 m 的染料噴注量約 0.11 g，隨著 LIF 探頭進尺即時獲得連續性之螢光強度訊號資訊(Germain et al., 2014)。

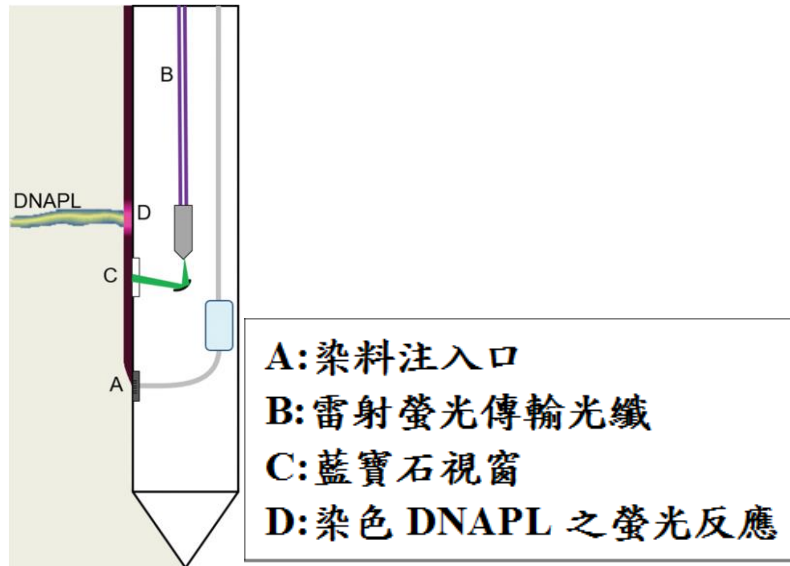


圖 3.6 Dye-LIF 鑽頭結構改裝後示意圖

3.4 染料與色素

3.4.1 工業染料

色素藉由吸收某段可見光的波長，改變物體的顏色，而染料則是讓色素滲入表面黏在材料的每一條纖維上。不同類型的染料利用不同化學作用，黏附在纖維上。數千年前，我們使用的纖維大多是動物纖維，例如羊毛、兔毛與蠶絲等等，這些纖維都是由蛋白質所構成，而天然染料如漿果和植物製染料可和動物蛋白質分子產生吸引力結合，且染料分子與水分子間亦有分子間引力，將動物性纖維放進含染料的水溶液中，靜置一段時間等待染料與纖維分子形成鍵結，即可完成染色。由於這種鍵結並不緊密，所以染色後經水洗可能會出現褪色。

1856 年英國化學家柏金(W. Perkin)設計由 toluidine 合成奎寧的方法，得到紅褐色的沉澱物，改用苯胺只得到黑色的沉澱物。在用水或酒精清洗這些



染色輔助雷射激發螢光技術應用於含氯有機物污染調查之研究

沉澱物時，柏金發現這些溶劑變為紫色，他將衣料拿來泡在這些紫色溶液中，衣料被染為紫色，因此申請專利發明第 1 個合成染料(mauveine)。

1883 年德國化學家拜耳(A. von Baeyer)發展出合成靛藍(Indigo)的方法，如圖 3.7 所示。靛藍在 1883 年以前都是取自一種豌豆科植物靛藍(indigofera tinctoria)，靛藍不溶於水，但在鹼性環境下可還原為水溶性染料靛白，纖維素與水溶性染料短暫接觸之後吸收染料，染料分子形狀剛好可以嵌入纖維素直鏈間的空隙，染料與纖維素之間以氫鍵與凡得瓦力結合，染色後的棉紗接觸空氣中的氧並在熱或光的環境中氧化回不溶於水的靛藍，而此時靛藍已被困在纖維素中，不易脫離布料。

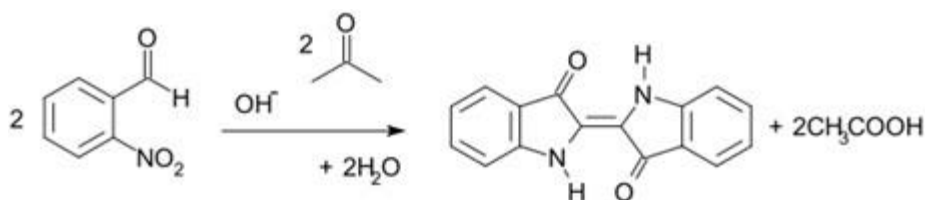


圖 3.7 拜耳靛藍合成方法

目前合成染料發展成熟，很多現代染料為複合式染料，包含許多不同類型的染劑，可同時將不同類型的纖維上色。依據染料的溶解性可分為水溶性與非水溶性類別：水溶性類屬於各種纖維著色的染料，包括不溶性的分散染料與還原染料；非水溶性類為溶劑型染料，溶於有機溶劑中以分子狀態著色。溶劑型染料可依據所溶解的溶劑極性不同，區分為分為油溶性染料與醇溶性染料。油溶性染料易溶於非極性或低極性溶劑，如烴類、甲苯、二甲苯、燃料油、石蠟等；醇溶性染料易溶於極性較強的溶劑，如乙醇、丙酮等。溶劑型染料較纖維著色的一般染料具有更廣泛的用途，其主要應用領域概括：聚合物樹脂、塑料的著色；彩色螢光塗料；燃料油、石油產品、油脂、石蠟與蠟製品等著色；金屬表面，如鋁製品著色及木材著色；清漆、罩光漆、印墨、鞋油及皮夾克油著色；文具用品，如原子筆印墨、記號筆印墨等；作為功能性染料、光碟記錄材料等。

依染料的化學結構分類，可分為偶氮染料、蒽醌染料、芳甲烷染料、靛族染料、硫化染料、酞菁染料、硝基和亞硝基染料等，另有其他結構類型的



染料，如甲川和多甲川類染料、二苯乙烯類染料及各種雜環類染料等。依染料的應用性能分類，可分為直接染料、酸性染料、陽離子染料、活性染料、不溶性偶氮染料、分散染料、還原染料、硫化染料、縮聚染料、螢光增白劑等，如表 3.4 所示。此外，還有用於紡織品的氧化染料（如苯胺黑）、溶劑染料、丙綸染料以及用於食品的食用色素等。

表 3.4 依應用性能分類的染料類別與其結構特點

染料名稱	結構特點	染色應用
直接染料	直接染料是一類水溶性陰離子染料。染料分子中大多含有磺酸基，有的具有羧基，染料分子與纖維素分子之間以凡得瓦力和氫鍵相結合。	直接染料主要用於纖維素纖維的染色，也可用於蠶絲、紙張、皮革的染色。染色時染料在染液中直接上染纖維，通過范德華力和氫鍵等吸附於纖維上。
酸性染料	酸性染料是一類水溶性陰離子染料。染料分子中含磺酸基、羧基等酸性基團，通常以鈉鹽的形式存在，在酸性染液中可以與蛋白質纖維分子中的氨基以離子鍵結合，故稱為酸性染料。	常用於蠶絲、羊毛和聚醯胺纖維以及皮革染色。酸性染料，通過自身親和力上染纖維，並以離子鍵與纖維結合；酸性媒染染料，其染色條件和酸性染料相似，但需要通過某些金屬鹽的作用，在纖維上形成螯合物才能獲得良好的耐洗性能；酸性含媒染料，有一些酸性染料的分子中具有螯合金屬離子，水解傾向小，染色牢度好。
陽離子染料	陽離子染料可溶於水，染料分子中具有氨基等鹼性基團，常以酸鹽形式存在。	主要用於聚丙烯腈纖維的染色，染色時能與蠶絲等蛋白質纖維分子中的羧基負離子以鹽鍵形式相結合。
活性染料	活性染料又稱為反應性染料，分子結構中含有活性基團，染色時能夠與纖維分子中的羥基、氨基發生共價結合，而牢固地染著在纖維上。	活性染料主要用於纖維素纖維紡織物的染色和印花，也能用於羊毛和錦綸纖維的染色。染料通過自身親和力上染纖維，之後在鹼劑的作用下通過共價鍵與纖維牢固結合。
不溶性偶氮染料	在染色過程中，由重氮組分（色基）和偶合組分（色酚）直接在纖維上反應，生成不溶性色淀而染著。	主要用於纖維素的染色和印花。色基先重氮化，然後通過親和力上染到用色酚打底的纖維織物，然後偶合形成不溶性色淀而牢固存在織物上。



表 3.4 依應用性能分類的染料類別與其結構特點(續)

染料名稱	結構特點	染色應用
分散染料	分散染料結構簡單，水溶性極低，在染液中主要以微小顆粒的分散體存在的非離子染料。分散染料的化學結構以偶氮和蒽醌類為主，也有雜環類分散染料。	分散染料主要用於聚酯纖維的染色和印花，同時也可用於醋酯纖維以及聚醯胺纖維的染色。染色時必須藉助分散劑將染料均勻地分散在染液中，然後對各類合成纖維進行染色。
還原染料	還原染料大都屬於多環芳香族化合物，其分子結構不含磺酸基，羧酸基等水溶性基團。其分子共軛雙鍵含有 2 個(含)以上的羰基，在保險粉作用下可使羰基還原成羥基，並在鹼性水溶液中成為可溶性的隱色體鈉鹽。	還原染料主要用於纖維素纖維的染色。染色時，它們在含有還原劑(如 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ ，連二亞硫酸鈉，俗稱保險粉)的鹼性溶液中被還原成水溶性的隱色體鈉鹽後上染纖維，再經氧化後重新成為不溶性染料而固著在纖維上。
硫化染料	硫化染料屬水不溶性染料，一般由芳胺類或酚類化合物與硫磺或多硫化鈉混合加熱製得。	硫化染料主要用於纖維素纖維的染色。染色時，它們在硫化鹼溶液中被還原為可溶狀態，上染纖維後，經過氧化又成不溶狀態固著在纖維上。
縮聚染料	縮聚染料在上染過程中，染料本身分子間或與纖維以外的化合物發生共價鍵結合，從而增大分子的染料。縮聚染料分子中含有硫代硫酸基 ($-\text{SSO}_3\text{Na}$)，它們在硫化鈉、多硫化鈉等作用下，能將亞硫酸根從硫代硫酸基上脫落下來，並在染料分子間形成 $-\text{S}-\text{S}-$ 鍵，使 2 個(含)以上的染料分子結合成不溶狀態而固著在纖維上。	縮聚染料可溶於水，它們在纖維上能脫去水溶性基團而發生分子間的縮聚反應，成為相對分子質量較大的不溶性染料而固著在纖維上。目前，此類染料主要用於纖維素纖維的染色和印花，也可用於維綸的染色。
螢光增白劑	螢光增白劑可看作一類無色的染料，它們上染到纖維、紙張等基質後，可吸收紫外線，發出藍色光，從而抵消織物上因黃光反射量過多而造成的黃色感，在視覺上產生潔白、耀目的效果	不同類型的螢光增白劑可用於各種纖維的增白處理。它們直接處理到織物上，通過自身親和力或交聯劑而固著在纖維上。



3.4.2 食用色素

食用色素之主要用途為使食品上色、著色，以改善食品色調和色澤的食品添加劑，故稱為著色劑。根據來源不同，食用色素可分為天然色素和人工合成色素，目前台灣核准 46 種來源的天然食用色素和 8 種人工合成色素。人工合成色素是化學合成的著色劑，主要是以煤焦油中分離出來的苯胺染料為原料製成的，人工合成各式顏色和色調，比天然化合物更耐熱、更光亮、更鮮豔，且成本較為低廉。各國對於人工合成食用色素的規範不同，可參照顏色索引編號 (Color Index)，簡稱 CI，對照每一種色素的編號，台灣核准有 8 種人工食用色素：紅色六號、紅色七號、紅色四十號、黃色四號、黃色五號、綠色三號、藍色一號、藍色二號，如表 3.5 所示。

萃取天然食用色素之溶劑包括水、乙醇、植物油等食物原料，天然食用色素純度之安全限量為砷小於 3 ppm、鉛小於 2 ppm、重金屬小於 40 ppm。表 3.6 彙整台灣核准 46 種來源的天然食用色素，皆經過歐、美、日多國長期使用，有一定的安全性及實用性。常見的天然食用色素包括葉綠素、花青素、番茄色素、胭脂紅色素、黃梔子色素、紅甜菜色素、胡蘿蔔素、葉綠素色素、紅麴色素等，大多數耐熱及耐光性佳，且相當安定，部分天然食用色素容易受環境中的酸鹼值影響。

表 3.5 台灣核准 8 種人工合成色素一覽表

中文名稱	英文名稱	顏色	CI	CAS#	分子式
食用紅色六號	New Coccin		16255	2611-82-7	$C_{20}H_{14}N_2O_{10}S_3$
食用紅色七號	Erythrosine		45430	16423-68-0	$C_{20}H_8I_4O_5$
食用紅色四十號	Allura red AC		16035	25956-17-6	$C_{18}H_{16}N_2O_8S_2$
食用黃色四號	Tartrazine		19140	1934-21-0	$C_{16}H_{12}N_4O_9S_2$
食用黃色五號	Sunset yellow FCF		15985	2783-94-0	$C_{16}H_{12}N_2O_7S_2$
食用綠色三號	Fast green FCF		42053	2353-45-9	$C_{37}H_{36}N_2O_{10}S_3$
食用藍色一號	Beilant blue FCF		42090	3844-45-9	$C_{37}H_{36}N_2O_9S_3$
食用藍色二號	Indigo carmine		73015	860-22-0	$C_{16}H_{10}N_2O_8S_2$



表 3.6 台灣核准 46 種天然食用色素一覽表

中文名稱	英文名稱	主成分	來源
胭脂紅	Carmine	胭脂蟲酸 (Carminic Acid)	由雌性胭脂蟲 (Coccus cacti L.) 取得
婀娜多	Annatto, water or oil soluble	水溶性婀娜多 (Norbixin) ; 油溶性婀娜多紅木素 (Bixin)	由紅木 (Bixa orellana L.) 之種子取得
紅莧菜色素	Amaranthus Colors	莧紅素 (Amaranthin)	由紅莧菜取得
紅甜菜色素	Beet Red	甜菜 (Betanin)	由甜菜 (Beta vulgaris) 之根莖取得
番茄色素	Tomato Colors	番茄紅素 (Lycopene)	由番茄之果實取得
紫菜色素	Laver Colors	藻紅素 (Phycoerythrin)	由紫菜 (Porphyra tenera KJELLM.) 取得
紅麴色素	Monascus Colors	-	由紅麴菌 (Monascus purpureus, Monascus anka) 產生
胡蘿蔔色素	Carrot Colors	胡蘿蔔素 (β -Carotene)	由胡蘿蔔之根莖取得
甘薯色素	Sweet Potato Colors	胡蘿蔔素 (Carotene)	由甘薯 (Ipomoea batatas POIR.) 之塊根取得
橘子色素	Orange Colors	類胡蘿蔔素 (Carotenoids)	由橘子之果皮取得
紅椒色素	Paprika Colors	類胡蘿蔔素 (Carotenoids)	由茄科之紅椒 (Capsicum annuum) 果實取得
黃玉蜀黍色素	Corn Colors	類胡蘿蔔素 (Carotenoids)	由黃玉蜀黍 (Zea mays L.) 之種子取得
蟹色素	Crawfish Colors	類胡蘿蔔素 (Carotenoids)	由蟹等之甲殼取得
蝦色素	Shrimp Colors	類胡蘿蔔素 (Carotenoids)	由蝦子之甲殼取得
薑黃色素	Turmeric	薑黃素 (Curcumin)	由薑黃 (Curcuma longa) 之根莖取得
紅花黃	Safflower Yellow	黃色素 (Flavonoids)	由紅花 (Carthamus tinctorius) 之花瓣取得
花生色素	Peanut Colors	黃色素 (Flavonoids)	由花生 (Arachis hypogaea L.) 果實之內皮取得



表 3.6 台灣核准 46 種天然食用色素一覽表(續 1)

中文名稱	英文名稱	主成分	來源
洋蔥色素	Onion Colors	黃色素 (Flavonoids)	由洋蔥 (<i>Allium cepa</i> L.) 之鱗莖取得
蕎麥全草抽出物	Buckwheat Extract	黃色素 (Flavonoids)	由蕎麥 (<i>Fagopyrum esculentum</i> MOENCH) 全草抽出取得
甘草色素	Licorice Colors	黃色素 (Flavonoids)	由甘草 (<i>Glycyrrhiza glabra</i> L., <i>Glycyrrhiza uralensis</i> FISCH.) 或其他同屬植物之根及莖取得
高粱色素	Sorghum Colors	黃色素 (Flavonoids)	由高粱果實之殼取得
可可色素	Cocoa Colors	黃色素 (Flavonoids)	由可可 (<i>Theobroma cacao</i>) 之種子取得
黃梔子色素	Gardenia Yellow	黃梔苷 (Crocina)	由黃梔子 (<i>Gardenia augusta</i> MERR. var <i>graciliflora</i> HORT) 之果實取得
番紅花色素	Saffron	黃梔苷 (Crocina) 及黃梔配質 (Crocetin)	由番紅花 (<i>Crocus sativus</i> L.) 之柱頭取得
葉黃素類	Xanthophylls	葉黃素類 (Xanthophylls)	由苜蓿中萃取濃縮而得
葉綠素	Chlorophyll Colors	葉綠素 (Chlorophyll)	由綠色可食植物之葉取得
綠藻色素	Chlorella Colors	葉綠素 (Chlorophyll)	由綠藻取得
花青素	Anthocyanin	花青素 (Anthocyanin)	青花菜 (Betanin)
櫻桃色素	Cherry Colors	花青素 (Anthocyanins)	由櫻桃 (<i>Prunus pauciflora</i> BUNCH) 取得
草莓色素	Strawberry Colors	花青素 (Anthocyanins)	由草莓 (<i>Fragaria ananassa</i> DUCHESNE) 取得
藍莓色素	Blueberry Color	花青素 (Anthocyanins)	由藍莓 (<i>Vaccinium corymbosum</i> L.) 取得
藍果 (蒴藋) 色素	Elderberry Colors	花青素 (Anthocyanins)	由藍果 (蒴藋) (<i>Sambucus caerulea</i> RAFIN.) 取得
洛神花色素	Hibiscus Colors	花青素 (Anthocyanin)	由洛神葵 (<i>Hibiscus sabdariffa</i> L.) 之花取得



表 3.6 台灣核准 46 種天然食用色素一覽表(續 2)

中文名稱	英文名稱	主成分	來源
桑椹色素	Mulberry Colors	花青素 (Anthocyanins)	由桑椹 (Morus nigra L., M. alba L.) 取得
葡萄汁色素	Grape Juice Colors	花青素 (Anthocyanins)	由葡萄 (Vitis vinifera L.) 榨汁取得
葡萄果皮色素	Grape Skin Colors	花青素 (Anthocyanins)	由紅葡萄之果皮取得
紫蘇色素	Perilla Colors	花青素 (Anthocyanins)	由紫蘇之葉取得
李子色素	Plum Colors	花青素 (Anthocyanins)	由李子之果皮取得
紅玉蜀黍色素	Purple Corn Colors	花青素 (Anthocyanins)	由紅玉蜀黍 (Maiz morado) 種子之殼取得
紫甘藍菜色素	Red Cabbage Colors	花青素 (Anthocyanins)	由紫甘藍菜 (Brassica oleracea L. var. Capitata DC. ev. Red Acre) 之葉取得
梔子藍色素	Gardenia Blue	Genipin	由黃梔子色素經酵素處理後所得
藍藻色素	Spirulina Colors	藻藍素 (Phycocyanin)	由藍藻 (Spirulina) 取得
柿子色素	Persimmon Colors	多酚類 (Polyphenol)	由柿之可食部分經發酵、分離、加壓、褐變、過濾、濃縮、乾燥而
大瑪琳色素	Tamarind Color	多酚類 (Polyphenol)	由大瑪琳 (Tamarindus indica L.) 之種子取得
植物碳	Vegetable carbon	-	以木、纖維素、泥炭、椰子殼及果殼等原料，經高溫 (800-1000°C) 碳化而製成之黑色粉末
棉子粉	Cottonseed flour	-	棉花子經高溫處理後而得之黑褐色粉末



第四章 研究方法與過程

4.1 模場試驗場址一背景

本案模場試驗場址為浚達(股)公司，位於經濟部工業局彰化濱海工業區電鍍專區內，東邊鄰環工九路，南邊鄰環工三路，北邊鄰環工一路，西邊鄰環工七路，其相關位置如圖 4.1 所示。於 93 年 5 月開始營運，從事五金零件材料表面研磨、清洗、塗裝、烤漆製程，製程中使用三氯乙烯作為清洗劑，統計 94 年至 108 年三氯乙烯總使用量約 140.76 公噸。原先清洗設備下方並未鋪設環氧樹脂防滲漏層，早期曾因設備與管線連接處有洩漏情形發生，致使清洗區三氯乙烯廢液下滲。103 年環保署運作中工廠第 5 期計畫進場調查，發現地下水三氯乙烯、順-1,2-二氯乙烯、氯乙烯濃度超過管制標準。104 年 11 月 10 日環保署公告本場址為地下水污染整治場址。107 年執行場址污染調查評估計畫，109 年 5 月彰化縣環保局核定土壤及地下水污染整治計畫。



圖 4.1 模場試驗場址一位置圖



4.1.1 場址一水文地質資料

(一)場址地質

彰濱工業區係由填海造陸所建成，故其土壤質地與彰化縣較不相同，彰濱工業區鹿港區地下環境土壤多以細砂質地為主。本場址於 107 年曾於場址周界進行 G1~G4 共 4 點岩心取樣，取樣深度為 10 公尺，岩心鑽探調查結果如圖 4.2 所示。地質剖面圖顯示本場址於 1~4 公尺處有粉、黏土存在，與彰濱工業區土壤質地略微不同，推測乃因廠房興建過程之客土回填及壓實所造成。本場址地質地表下 0 至 1 公尺為回填土，1 至 1.7 公尺為黑棕色細砂，1.7 至 3.7 公尺為灰色粉土質黏土，3.7 至 10 公尺以黑棕色細砂地質為主。



圖 4.2 模場試驗場址一地質鑽探剖面圖

(二)地下水流向

本場址位於彰濱工業區鹿港區，工業區屬海埔墾殖地，工業區地下水流向與彰化縣地下水流向不同，工業區內場址地下水流向乃以工業區中央為水位最高點，往四周海平面流佈。於 109 年量測場址內監測井地下水位絕對高程，最高點為 2.022 公尺，最低點為 1.984 公尺，高低水位差僅 4 公分。因本場址地下水水力坡降小，地下水流向容易受潮汐影響致使流向不穩定。本



場址位於工業區東南側區域，依工業區地下水流向推測，本場址地下水流向可能為東北向西南或北向南。

參照場址內 2 口環保署標準監測井基本資料，本場址含水層水力導數 K 值為 4.50×10^{-7} m/s~ 4.64×10^{-7} m/s，因場址地表 4 公尺處呈現地質分層現象，井卡資料之水力導數 K 值可能低估。109 年針對監測井 GW08-2 進行微水試驗，測得水力導數 K 值為 1.53×10^{-5} m/s。因此，本場址地表 4 公尺以內之水力導數 K 值約為 10^{-7} m/s，地表 4 公尺以下之水力導數 K 值約為 10^{-5} m/s。

4.1.2 場址一污染現況

107 年 4 月執行場址內 20 點次薄膜界面探測(MIP)作業，搭配 PID 及 XSD 偵測器測得不同深度 VOCs 訊號值，發現 M09 及 M20 於 3~4 公尺處有明顯訊號反應，此區域位於廠房內超音波清洗槽旁及下游位置。參考 MIP 探測結果訊號異常點位及深度執行土壤 VOCs 採樣，檢出土壤三氯乙烯污染最高濃度為 33.1 mg/kg、順 1,2-二氯乙烯污染最高濃度為 21.5 mg/kg，土壤污染物檢出位置如圖 4.3 所示。土壤三氯乙烯及順 1,2-二氯乙烯主要污染深度約 3.0~3.5 公尺，而場址常態性地下水位約位於地表下 2.5~3.0 公尺變動範圍，顯示土壤污染高濃度區域皆位於地下水位面下。

另參考 MIP 探測結果設置 11 口 2 吋簡易井，地下水採樣分析結果檢出三氯乙烯最高濃度為 19 mg/L、順-1,2-二氯乙烯最高濃度為 146 mg/L、反-1,2-二氯乙烯最高濃度為 1.29 mg/L、1,1-二氯乙烯最高濃度為 0.31 mg/L、氯乙烯最高濃度為 0.874 mg/L，地下水污染物檢出位置如圖 4.4 所示。場址外監測井皆未檢出地下水污染物，顯示地下水污染團仍侷限於場址內。場內地下水三氯乙烯及順-1,2-二氯乙烯檢出最高濃度位置皆位於超音波清洗槽下游西南側，污染團傳輸方向大致與場址東北向西南之地下水流向一致，推估受污染含水層面積約 3,699 m²。

彙整 107 年場址污染調查評估結果與場址地質鑽探調查結果，提供本模場試驗場址污染概念模型於圖 4.5，高污染潛勢區主要在廢棄物暫存區及清洗區西南方的製程廠房用地。本場址地表 4 公尺以內土壤質地細緻，易吸附含氯污染物，但土壤污染深度皆位於地下水位面下，造成土壤與地下水調查結果關連性較低。



染色輔助雷射激發螢光技術應用於含氯有機物污染調查之研究

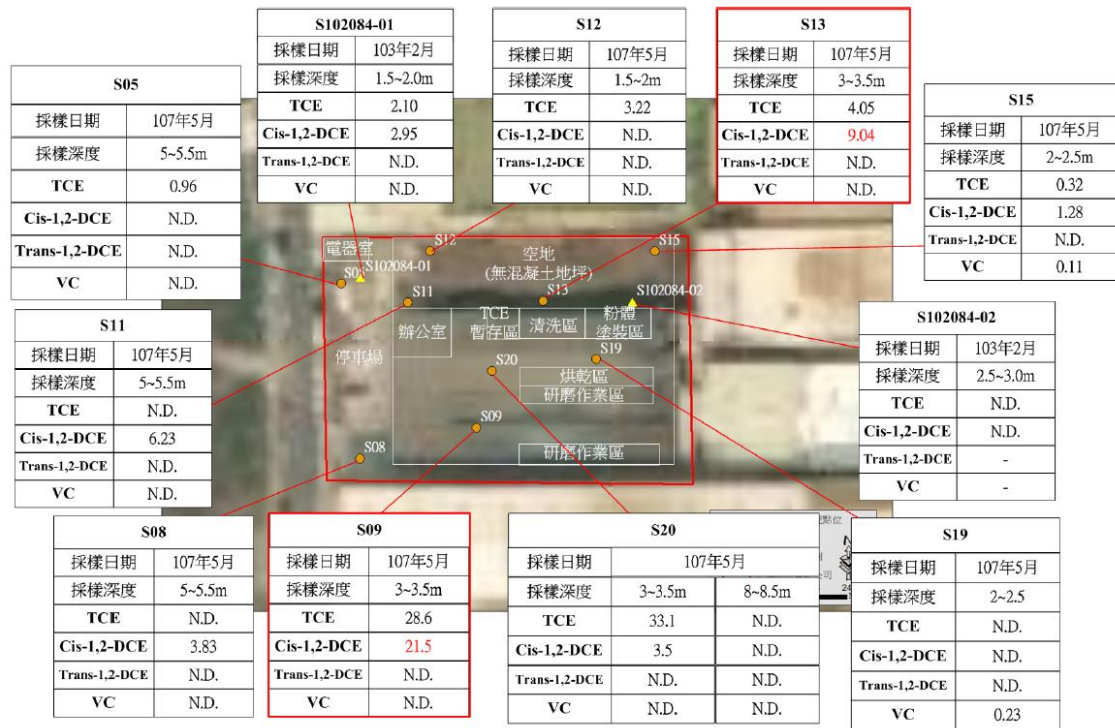


圖 4.3 模場試驗場址一歷次土壤污染調查結果

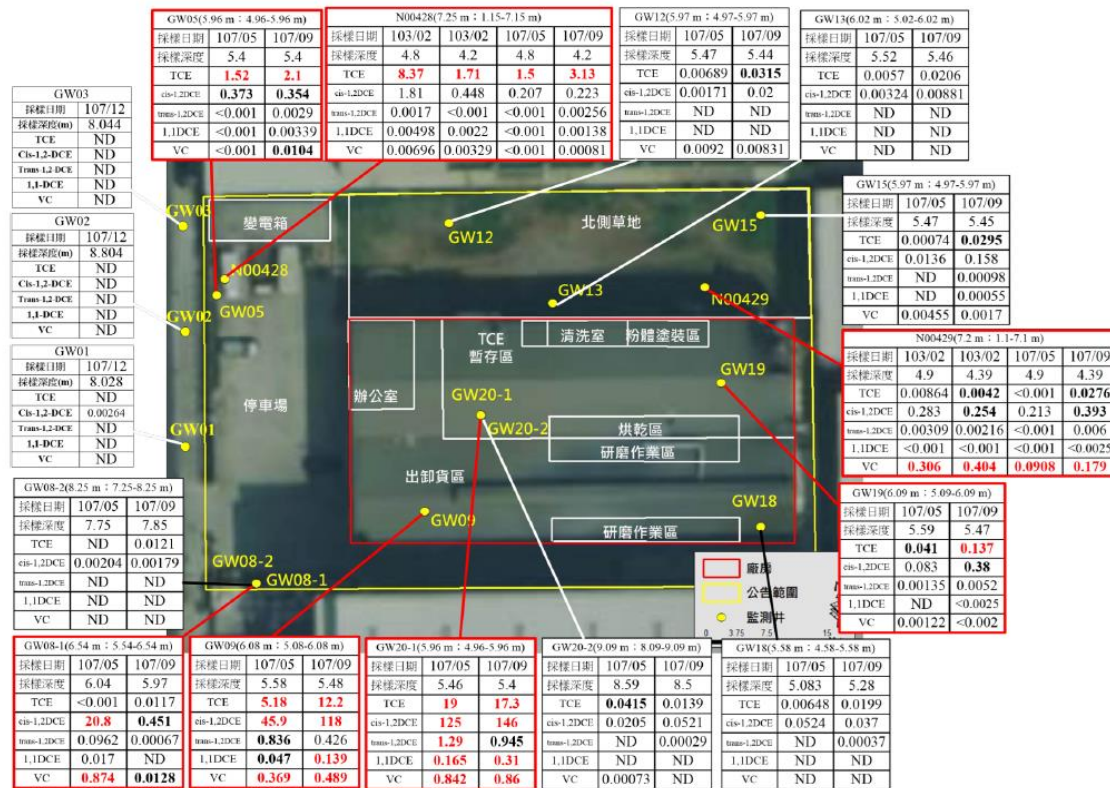


圖 4.4 模場試驗場址一歷次地下水污染調查結果



第四章研究方法與過程

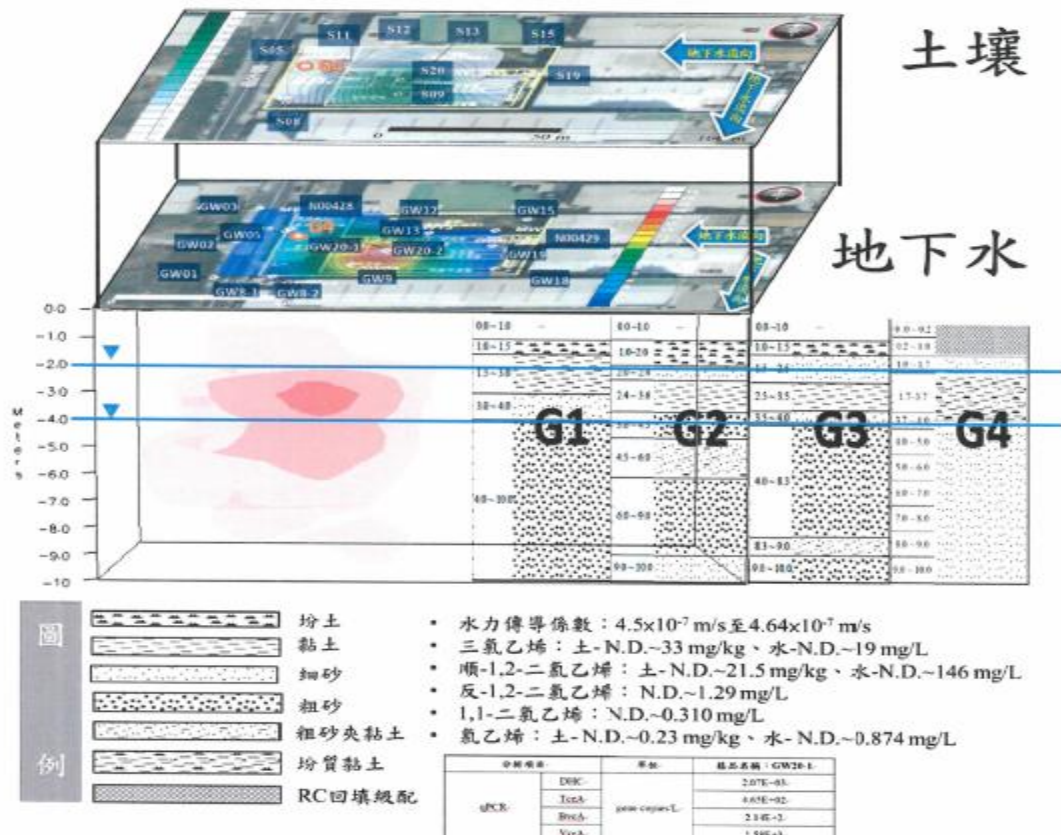


圖 4.5 模場試驗場址一污染概念模型

4.2 模場試驗場址二背景

原模場試驗場址為宏達(股)公司，本計畫團隊進場執行地球物理探測作業後，因該場址負責人臨時變卦不同意進場執行下階段模場試驗，因而變更模場試驗場址為鑫榮機械工業(股)公司，俾利持續推動本計畫模場試驗現場工作。

鑫榮機械工業(股)公司位於嘉義縣頭橋工業區內，從事五金零件加工及各種汽車總泵分泵製造，製程中使用三氯乙烯作為清洗劑，運作區域為表面清洗區至生產線中段區，污染來源推測於清洗區回收三氯乙烯造成污染物滴落地面，或被沖洗至水溝，藉由地表鋪面或水溝裂縫向下滲漏。雖於 87 年停用三氯乙烯，將脫脂劑更換為二氯甲烷，但又發生二氯甲烷洩漏，於 102 年將二氯甲烷更換為正溴丙烷作為表面清洗劑。102 年環保署運作中工廠第



染色輔助雷射激發螢光技術應用於含氯有機物污染調查之研究

4 期計畫進場調查，發現地下水三氯乙烯、順-1,2-二氯乙烯、1,1-二氯乙烯及二氯甲烷濃度超過管制標準。103 年 1 月 24 日環保署公告本場址為地下水污染整治場址。103 年執行場址污染調查評估計畫，106 年 3 月嘉義縣環保局核定土壤及地下水污染整治計畫。

4.2.1 場址二水文地質資料

(一)場址地質

本場址位於嘉義縣平地平原土壤，絕大部分為沖積母質，曾於污染熱區周邊進行 MIP 補充調查，結果顯示於含氯製作-表面清洗區至生產線中段區域，地表下 9~10m 處有一層黏土層，而中間多為砂土或是砂土夾砂之質地。生產線中、後段依 EC 結果顯示，黏土層的分佈不均勻，在地表下 11~15m 間大致會發現黏土層，其它深度則以砂土及砂土夾砂之質地為主。

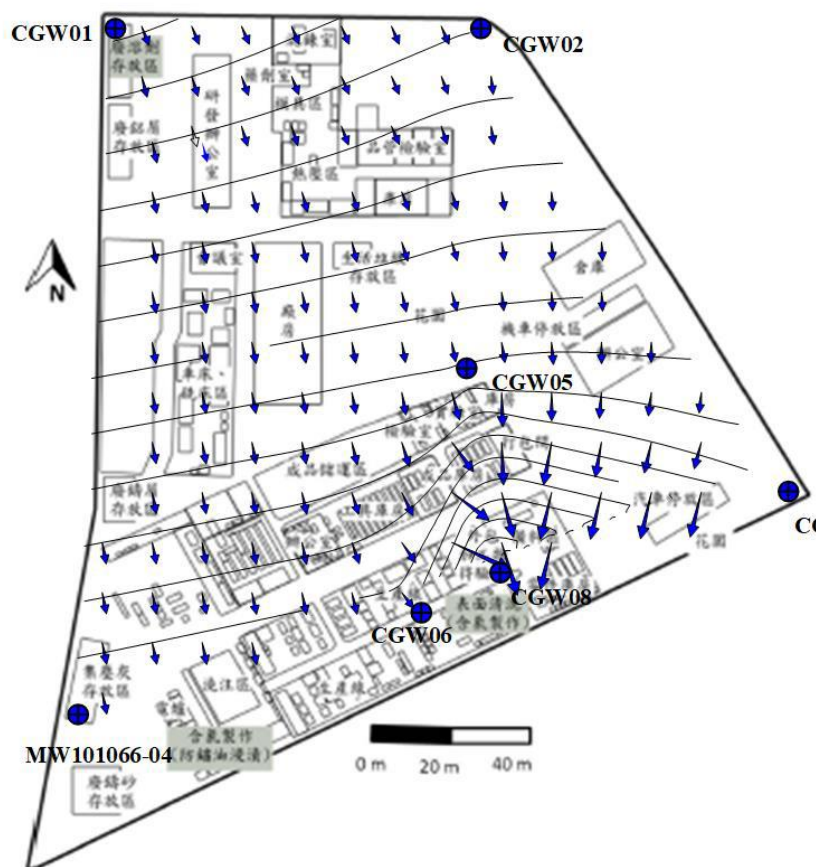


圖 4.6 模場試驗場址二地下水流向圖



(二)地下水流向

針對場外兩口監測井(TCO01 與 TCO05)及場內抽水井(GW04)分別放置自記式水位計，進行為期 1 週進行地下水水位量測作業，結果顯示地下水水位差僅為 10~20 公分，並無明顯變化情形。模場試驗場址二經 4 次地下水流向調查，其結果顯示地下水流向大致上皆為東北向西南流，場址地下水流向圖如圖 4.6 所示。抽水試驗推估出場址水力傳導係數 K 值約為 2.22×10^{-2} m/s 至 2.49×10^{-2} m/s，落於砂土夾砂(silty sand)質地範圍。

4.2.2 場址二污染現況

歷次執行之 MIP、土壤採樣及地下水採樣調查結果，目前高濃度污染團主要仍在廠內，污染熱區主要還是在環保署標準井 MW101066-01 周邊，下游榕懋公司受到影響之風險呈現在與鑫榮公司的交界處，且主要濃度遷移風險則為鑫榮公司西南角範圍，污染物濃度擴散邊界區已呈現明顯之收斂情形，如圖 4.7 所示。污染物自洩漏至地表下後，因土壤質地關係向下傳輸，在接觸到地下水位後因抽水作用之外力影響，污染物有朝向與地下水流相反方向的傳輸情形，而在後續抽水井不再使用後，污染物的傳輸方向才受到地下水流的影响，開始朝向下游移動。

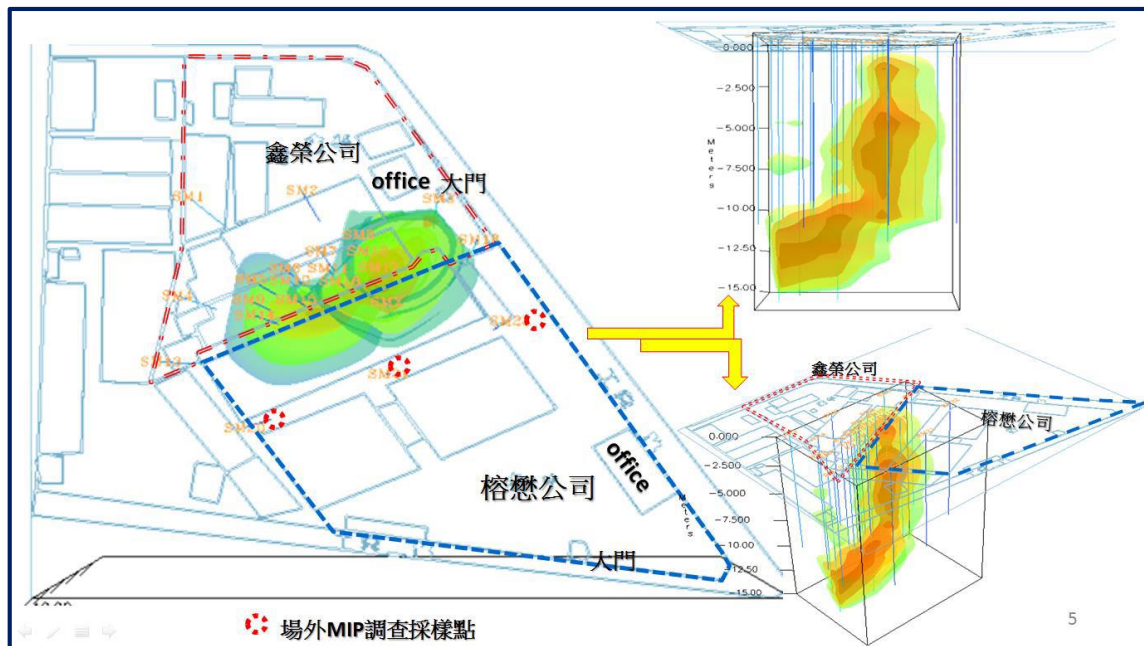


圖 4.7 模場試驗場址二 MIP-ECD 調查污染潛勢圖



染色輔助雷射激發螢光技術應用於含氯有機物污染調查之研究

依據 104 年 3 月地下水檢測結果顯示，場址內監測井 CGW06~CGW10 分別皆檢出順-1,2-二氯乙烯、三氯乙烯超出地下水污染管制標準，其中以距離行政院環保署監測井 MW101066-01 旁之監測井 CGW09 濃度最高，其次以監測井 CGW09 西側約 10 公尺之監測井 CGW10 濃度次之，最高濃度分別為 23.0mg/L、642 mg/L。另於監測井 CGW09 亦檢出超過地下水污染管制標準之二氯甲烷，濃度高達 27.5 mg/L。本場址主要污染物仍為三氯乙烯及二氯甲烷，但此次亦檢出超出管制標準之順-1,2-二氯乙烯，順-1,2-二氯乙烯並非廠內原先所使用之清洗溶劑，故推測應是由舊有三氯乙烯脫氯所產生。廠內監測井相關位置圖與地下水採樣分析結果，彙整於圖 4.8。

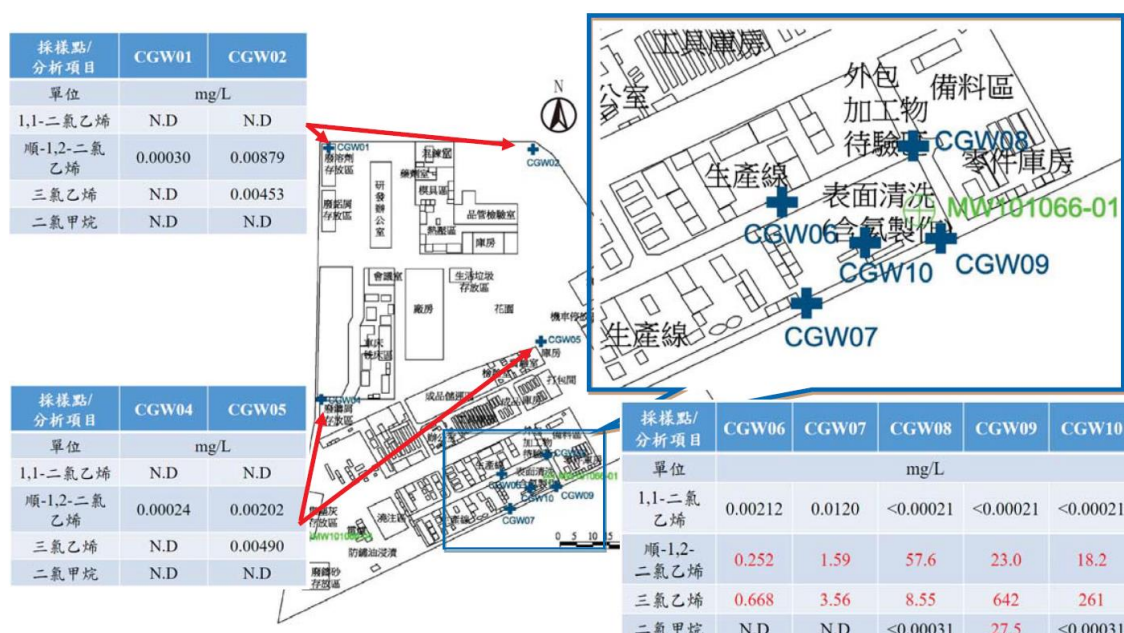


圖 4.8 模場試驗場址二廠內監測井地下水採樣分析結果

4.3 研究方法

前期環保署土污基金模場試驗計畫已證實運用紫外光學雷射激發螢光系統進行石化油品污染場址調查是可行的，LIF 系統藉由洩漏污染物質的螢光特徵屬性與污染團空間傳輸分布狀況，得以專業判斷方式進行場址污染來



第四章研究方法與過程

源的溯源追蹤，追蹤場址中既存的持續洩漏源，或新發生洩漏情形之自由相源頭路徑。本研究模場試驗場址土壤三氯乙烯污染最高濃度為 33.1 mg/kg，地下水三氯乙烯最高濃度為 19 mg/L，地下水三氯乙烯濃度超過飽和溶解度 1%，疑似模場試驗場址現地有三氯乙烯殘留相存在。然而三氯乙烯具雙鍵化學結構，接收雷射激發光源後通常將能量轉為自體旋轉，並無法散發出螢光，因此現地環境中三氯乙烯殘留相(DNAPL residual)並無法利用雷射激發螢光系統直接偵測得知。

因多環芳香烴(PAH)化合物結構具有螢光特性，利用 LIF 技術可偵測環境介質中具螢光反應物質的存在與否。部分油性染料可能含有雜環類或具螢光物質的成分，透過染料將三氯乙烯純相(TCE NAPL)進行染色，即可使染色 TCE NAPL 具螢光特徵，利用 LIF 系統間接偵測 TCE NAPL 的存在與否。本研究聚焦於開發本土化染色輔助雷射激發螢光(Dye-LIF)檢測技術，並於模場試驗場址展現 Dye-LIF 技術的應用成果。

本研究計畫所採用的 LIF 設備型號為 UVOST (Ultra-Violet Optical Screening Tool)，為美國 DAKOTA 公司於 2008 年發展的產品，其設備之裝置單元說明如表 4.1，其設備外觀如圖 4.9 所示。UVOST 雷射激發螢光系統為裕山環境工程(股)公司獨家擁有的設備，為順利測試染料樣品及污土染色樣品是否產生螢光特徵圖譜，特別情商裕山環境工程(股)公司以貴重儀器使用費的租借方式，使用 LIF 設備檢測本研究規劃的試驗樣品。本裝置係利用特定波長 308 nm 之氯化氙(Xenon Chloride, XeCl)準分子雷射，為惰性氣體原子和鹵素氣體原子結合成的準分子，運用紫外波段的短波長脈衝雷射，將高分子材料內部電子激發，造成瞬間的離子化；紫外光雷射光源激發待測物內層的電子至外圍，為保持能量平衡，分子外圍電子將補入內層電子外移的空缺。因外圍電子能量較高，當電子進入內層軌域時，將放出特定的螢光能量，透過分析螢光之強度，可得到待測物質之相對濃度。藉由捕捉四個主要獨特的光譜特徵波段(350 ± 20 nm、 400 ± 20 nm、 450 ± 20 nm、 500 ± 20 nm)，來描述螢光激發的完整性，並以 wavelength-time matrix (WTM)作為其紀錄形式。



染色輔助雷射激發螢光技術應用於含氯有機物污染調查之研究

表 4.1 UVOST 雷射激發螢光系統之裝置單元

1. Control computer 控制電腦	7. Fiber I/O 光纖進出口
2. Oscilloscope 示波器	8. Launch Assembly 發射組合
3. Laser 雷射	9. Fiber-based Trigger 光纖基礎觸發器
4. Remote Display 移動式顯示器	10. E-Deck 電子傳輸機構
5. Emission/detection module 放射物偵測模組	11. Probe 探測桿
6. Breakout Box 設備線組連結拆裝盒	12. Reference Emitter (RE) Material 參考射極

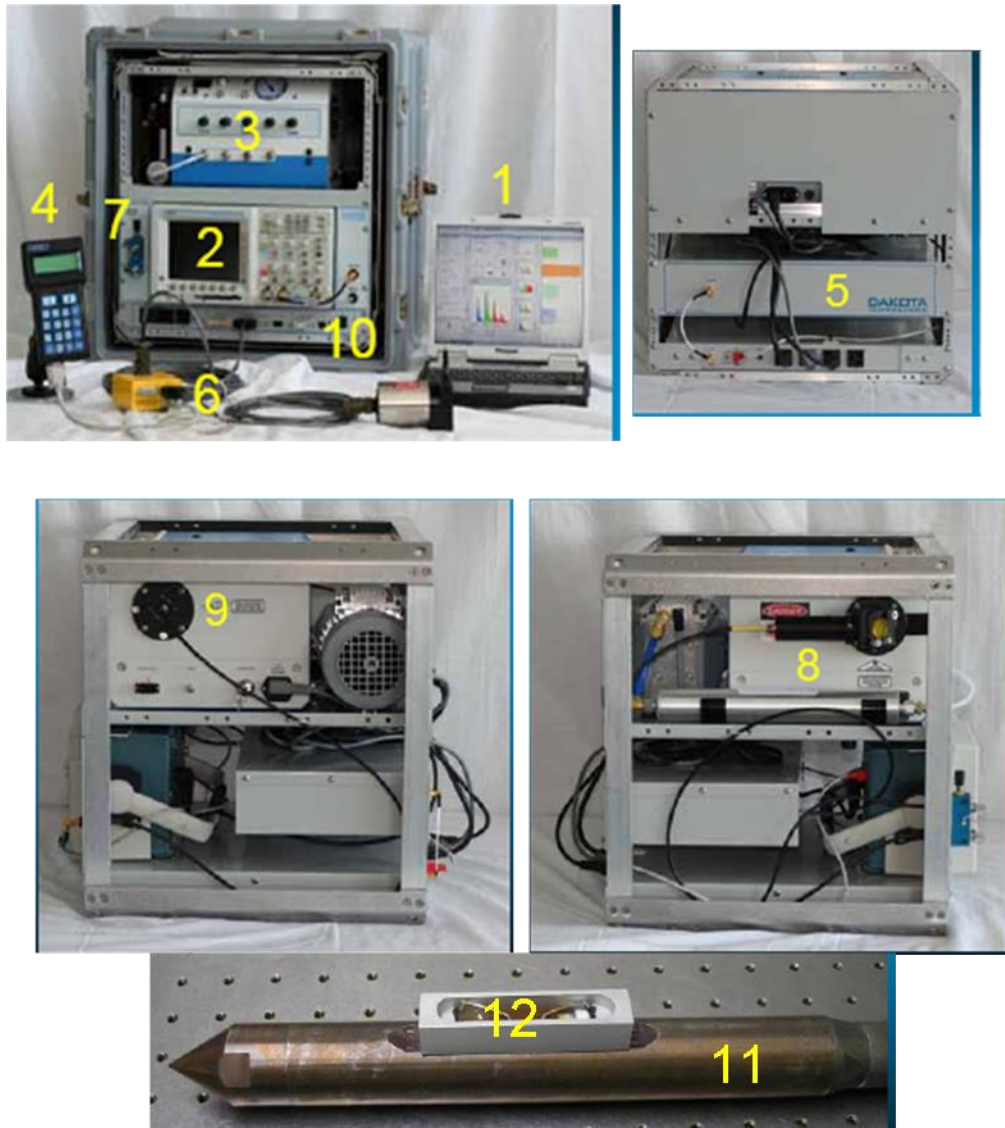


圖 4.9 本研究使用之 UVOST 雷射激發螢光系統



本研究工作內容為開發本土化 Dye-LIF 技術，包括實驗室染料試驗與現地探測模場試驗等工作，上半年度以實驗室工作為主，包括篩選適合染料進行三氯乙烯 NAPL 相染色，並建立 Dye-LIF 技術之偵測操作條件；下半年度以模場試驗測試 Dye-LIF 技術之操作參數，並建立現地應用案例之現地探測 SOP 作業程序。本研究規劃之執行步驟彙整於圖 4.10，詳細內容分述於下列章節。

* 第1年執行步驟

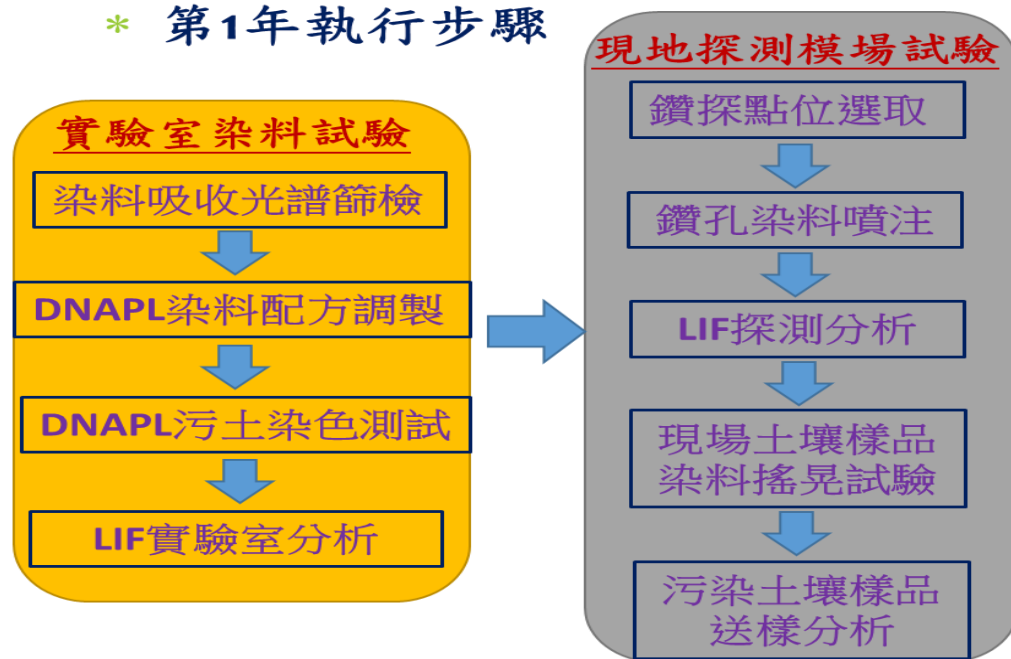


圖 4.10 本研究方法之工作項目與執行步驟流程圖

4.3.1 實驗室染料試驗

(一) 染料吸收光譜篩檢

依文獻資料蒐集結果，可應用於本研究的染料以疏水性染料或油溶性染料為主，包括化工染料與食用色素。市售化工染料大多以顏色區分，且以粉狀成品居多，粉狀染料須先溶於溶劑中方可使用，考量溶劑之極性分別選用乙醇及丙二醇進行染劑調製，如圖 4.11 所示。圖 4.12 為蒐集之市售色膏與天然食用色素，市售色膏食品添加物亦以顏色區分，由多種人工合成色素、丙二醇、玉米糖漿、甜味劑混合而成，成品為濃稠狀液體，分別選用乙醇及



染色輔助雷射激發螢光技術應用於含氯有機物污染調查之研究

丙二醇進行稀釋成染劑。市售天然食用色素大多為香料、丙二醇、甜味劑之混合液體，少部分為天然食品粉末，分別選用乙醇及丙二醇進行稀釋或染劑調製。



(a) 市售化工染料



(b) 化工染料調製於乙醇溶劑



(c) 化工染料調製於丙二醇溶劑

圖 4.11 本研究蒐集之市售化工染料與調製染劑



(a) 市售色膏食品添加物



(b) 市售天然食用色素

圖 4.12 本研究蒐集之市售色膏與天然食用色素



調製好的染劑利用 UV-Vis 儀器進行吸收光譜全幅掃描，建立調製染劑之吸收光譜範圍。本研究使用 UVOST 系統之接收螢光光譜的範圍介於 350~500 nm，因此以此吸收光譜範圍作為篩選染料的條件，以利後續 LIF 分析待測物可被激發，獲致較強之螢光訊號。

(二) DNAPL 染劑配方調製

本研究模場試驗場址標的污染物包括三氯乙烯、順 1,2-二氯乙烯等，依染料吸收光譜篩檢結果，選用合適的染劑種類摻入三氯乙烯純相液體進行染色，染劑配方需考量染料使用劑量，測試摻入三氯乙烯的混合比例，避免三氯乙烯超過飽合溶解度。並利用 UV-Vis 儀器進行吸收光譜全幅掃描，觀察染色 TCE 樣品是否造成吸收光譜波段範圍偏移。

(三) DNAPL 污土染色測試

一般污染土壤中僅有少量殘留相存在，因此土壤介質之雷射激發螢光強度會比純油相的螢光強度衰減許多，本研究規劃選擇砂土及坩土分別製備 TCE 污染土壤。砂土來源購買市售黑砂，以#10 篩網過篩取得 2 mm 均質砂土。坩質壤土來源取自國內整治場址之土壤，分別以#40 篩網與#270 篩網過篩取得 0.42 mm 與 0.053 mm 均質坩土，經清洗烘烤後將其置於雷射專用之螢光比色槽中，以 LIF 建立螢光特徵圖譜及特定波段強度等資訊；確認無螢光反應干擾，則代表此批土壤可作為摻配之空白基質土壤。

使用空白基質土壤摻配染色 TCE 樣品，調製成染色 TCE 污染土壤，後續進行 LIF 分析，測試 LIF 螢光反應強度是否足以偵知。並比對染色土壤與染色 TCE 污土的 LIF 螢光特徵圖譜與螢光反應強度，兩者螢光反應強度之差異應大到足可鑑別，方能應用於現地模場測試。

(四) LIF 實驗室分析

本研究使用 UVOST 設備進行 LIF 分析，將待測物盛裝於雷射專用之螢光比色槽中，以波長 308 nm 氯化氬做為激發光源，經雷射激發螢光檢測後，收集之特徵波段分別為 350 ± 20 nm、 400 ± 20 nm、 450 ± 20 nm 以及 500 ± 20 nm 之 4 個波段原始資料，藉此建置螢光光譜特徵波段(螢光強度-波長-時間)。LIF 特徵圖譜各部分名稱將以現地偵測到圖譜為例進行說明，如圖 4.13 所示。為確保檢測數據品質，待測樣品皆以 10 重複進行分析，頻率為 1 次/秒，



染色輔助雷射激發螢光技術應用於含氯有機物污染調查之研究

維持 10 秒，確認樣品變異度與均質度。獲得分析結果後，收集並比對各類油品產生螢光特徵圖譜特定波段之螢光相對百分強度 (%RE) 平均值。

第 1 階段使用 UVOST 設備檢測染色 DNAPL 溶劑樣品，以雷射激發螢光分析測試染色 DNAPL 溶劑樣品是否散射出螢光，接收 350 nm、400 nm、450 nm、500 nm 等 4 個波段螢光訊號，建立各樣品的螢光強度和特徵光譜。針對不同染劑配方種類與劑量多寡的樣品，並進行各樣品的螢光特徵圖譜比對，選擇可使用 UVOST 設備偵知的 DNAPL 染劑配方。

第 2 階段使用 UVOST 設備檢測染色 DNAPL 污土樣品，以雷射激發螢光分析測試染色 DNAPL 污土樣品是否散射出螢光，檢核可使用 UVOST 設備偵知 DNAPL 污土的污染劑量。並以接收 350 nm、400 nm、450 nm、500 nm 等 4 個波段螢光訊號，建立各污土樣品的螢光強度和特徵光譜。

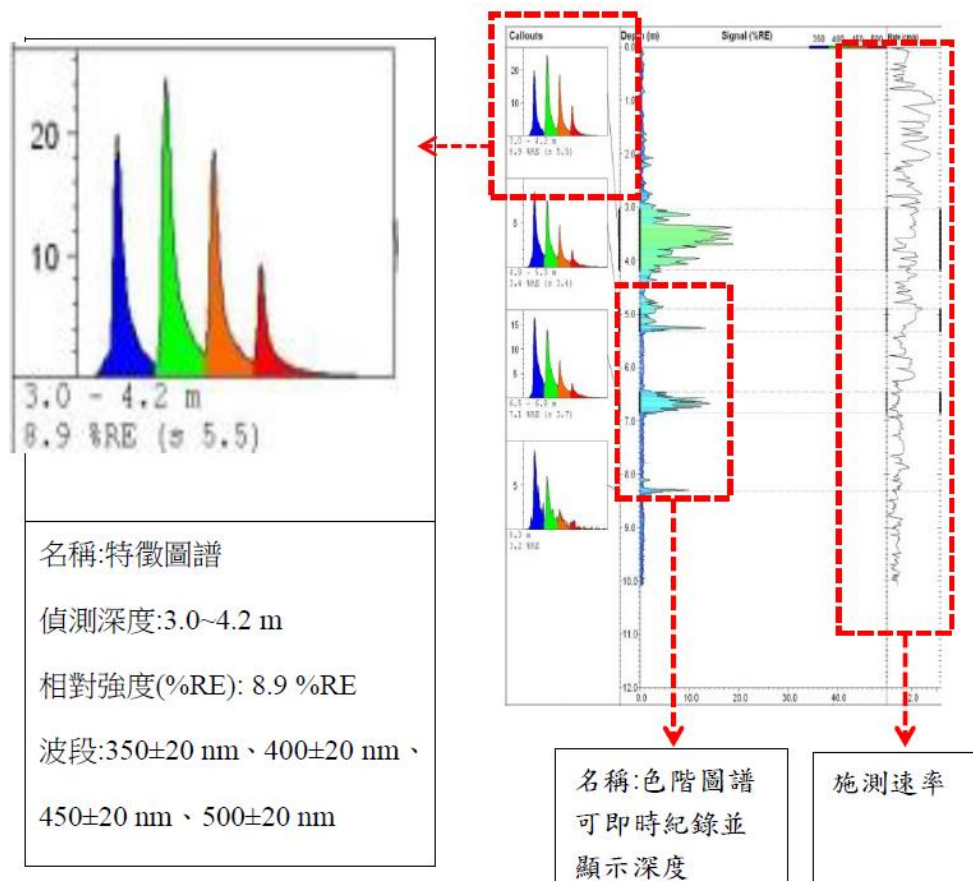


圖 4.13 雷射激發螢光特徵圖譜說明示意圖



4.3.2 現地探測模場試驗

(一) 鑽探點位選取

本研究場址高污染潛勢區主要在含氯製作區及表面清洗區，位於東南方的製程廠房用地，地下水檢出三氯乙烯最高濃度位置為監測井 CGW09，次高濃度位置為監測井 CGW10，因此模場試驗區位置選擇在監測井 CGW09 與 CGW10 間的表面清洗區，約為長 6 公尺與寬 6 公尺為區域範圍，其相對位置圖如圖 4.14 所示。於場址內高污染潛勢區選擇適當點位，先以薄膜界面探測(MIP)設備進行鑽探，確認污染情況，以利後續選擇高測值點位進行後續 Dye-LIF 鑽探分析。第一階段執行 9 點次 MIP 探測，中心位置探測 1 點，距離 1.5 公尺處東、南、西、北方向各探測 1 點，距離 3.0 公尺處東、南、西、北方向各探測 1 點，探測深度為 11 公尺。依第一階 9 點次 MIP 探測結果，選擇於高測值點位區塊中間擇 2 個點位，進行第二階段 MIP 探測，探測深度為 11 公尺。綜合二階段 MIP 探測結果，以高測值點位界定疑似三氯乙烯漏源區，作為 Dye-LIF 探測的區域範圍，模場試驗 MIP 探測之施作位置規劃如圖 4.14 所示。

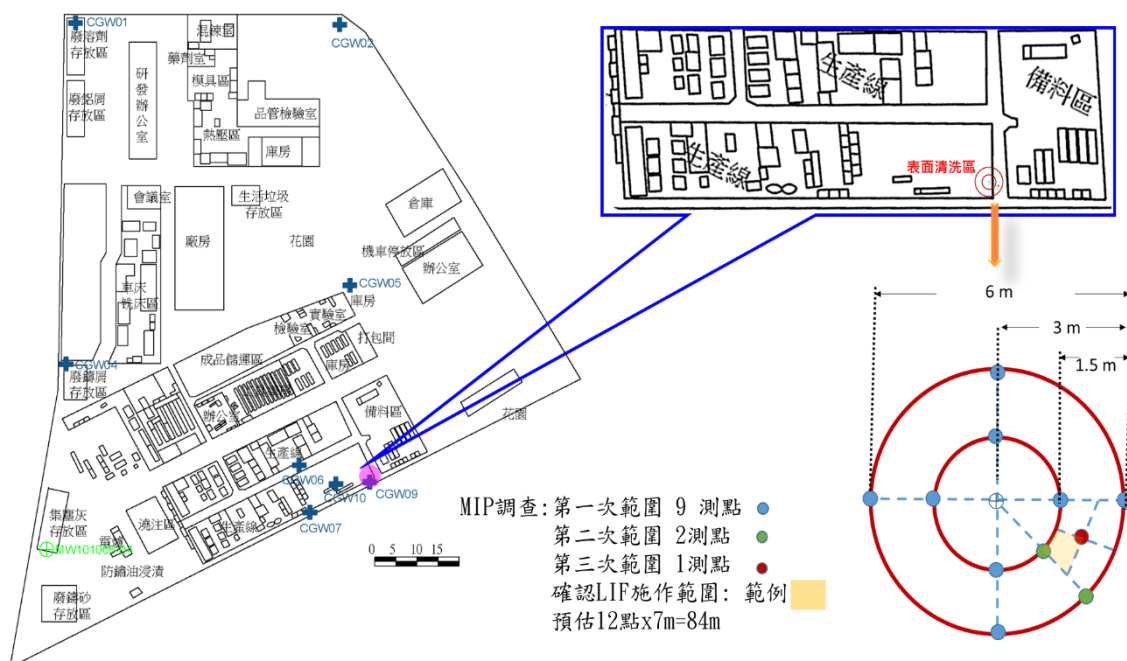


圖 4.14 本研究模場試驗 MIP 探測數量與施作位置圖



(二) 鑽孔染料噴注

Dye-LIF 探測作業前於選取之鑽探點位，以實驗室篩選出 UVOST 螢光強度較強的調製染劑配方，進行鑽孔染料噴注。為避免鑽孔染料噴注作業失敗，於模場試驗區廠房外空地規劃灌注模場試驗區，以利鑽孔染料噴注作業測試，並建立噴注作業操作條件。

(三) Dye-LIF 探測分析

待掌握噴注作業操作條件後，即可執行 Dye-LIF 探測分析。依作業程序先執行鑽孔染料噴注作業後，隨即執行 LIF 探測分析作業，依進尺深度建立污染剖面資訊。Dye-LIF 探測分析位置於 MIP 探測界定出之疑似三氯乙烯漏源區內選點，原則選取 2 個鑽孔執行 Dye-LIF 探測分析作業，各鑽孔皆進行重複 LIF 探測分析，探測深度為 11 公尺。包含 Dye-LIF 探測分析作業失敗重作，估算 Dye-LIF 探測分析作業共 4 孔次。

(四) 現場土壤樣品染料搖晃試驗

染料搖晃試驗(oil-red shake test)係使用少量疏水性染料如 Sudan IV 或 Oil-Red-O，與裝入密封玻璃樣品瓶中的土壤充分混合，混合後疏水性染料會滲入 NAPL 溶劑相，但不會分配至水溶相。若有 NAPL 溶劑相殘留於土壤樣品，NAPL 溶劑相因染色作用會以紅色液滴狀呈現，暴露其殘留於土壤介質中的位置。本研究選取鑽探點土壤樣品，以每 50 公分選取 1 個土壤樣品為原則，高污染訊號段樣品加密選樣數量進行 oil-red shake test，確認 Dye-LIF 鑽探結果。Dye-LIF 探測分析作業 2 個鑽孔，探測深度為 11 公尺，估算執行染料搖晃試驗之土壤樣品共 44 個。

(五) 污染土壤樣品送樣分析

依 oil-red shake test 現場土壤篩測結果，並搭配現場土壤 PID 篩測結果，選擇高污染土壤樣品送認證實驗室分析土壤 VOCs 濃度，比對 Dye-LIF 鑽探結果。每個鑽孔選擇 2 個土壤樣品送樣分析為原則，2 個鑽孔估算 4 個送樣樣品。



4.4 執行進度

本研究計畫第 1 年執行期間自民國 110 年 3 月 19 日起至 111 年 2 月 28 日止，共計 347 日曆天，研究實際執行進度詳見表 4.2。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，於第 10.5 個月份須提交期末報告初稿，預定繳交日期為民國 111 年 1 月 14 日。於計畫期間預定期中查核點為執行期程之第 5 個月份，期中報告實際執行進度已完成染料吸收光譜篩檢、建立染色 TCE 純相樣品螢光強度和特徵光譜、建立染色 TCE 污染土壤螢光強度和特徵光譜等實驗室工作項目。於計畫期間預定期末查核點為執行期程之第 10.5 個月份，期末報告實際執行進度已完成 UVOST 螢光強度較強的染劑調製配方、場址模場試驗區 MIP 探測作業、Dye-LIF 探測模場試驗、現場土壤染料搖晃試驗等模場試驗現場工作。整體執行進度為 100%，符合預定進度要求。



染色輔助雷射激發螢光技術應用於含氯有機物污染調查之研究

表 4.2 研究實際執行進度及預定工作查核點

年月	1	2	3	4	5	6※	7	8	9	10	11※	12
工作項目	110/3	110/4	110/5	110/6	110/7	110/8	110/9	110/10	110/11	110/12	111/1	111/2
染料蒐集與器材準備												
染料吸收光譜篩檢												
TCE 染劑配方調製												
TCE 污土染色測試												
LIF 實驗室樣品分析												
期中報告						▲ ●						
模場試驗 MIP 探測												
鑽孔染料噴注測試												
Dye-LIF 探測分析												
土樣染料搖晃試驗												
土壤樣品送樣分析												
期末報告											▲ ●	
工作進度累積百分比	5%	15%	25%	30%	40%	50%	60%	70%	75%	85%	95%	100%
預定查核點	期中	完成染料吸收光譜篩檢、建立染色 TCE 純相樣品螢光強度和特徵光譜、建立染色 TCE 污染土壤螢光強度和特徵光譜										
	期末	完成 UVOST 螢光強度較強的染劑調製配方、完成場址模場試驗區 MIP 探測作業、完成 Dye-LIF 探測模場試驗、完成現場土壤染料搖晃試驗										

說明： 預定進度； 實際執行



第五章 結果與討論

5.1 實驗室染料試驗結果

本研究實驗室染料試驗工作主要為篩選適合染料，可以將染料滲入三氯乙烯 NAPL 相，使用 UVOST 設備進行 LIF 分析時，藉由增強螢光強度來提升三氯乙烯 NAPL 相之可辨識度。實驗室染料試驗工作包括染料 UV 吸收光譜篩檢、染料 LIF 螢光圖譜與強度分析、DNAPL 染劑配方調製、DNAPL 污土染色測試等，以準備得以應用於模場 Dye-LIF 探測技術之調製染劑。

5.1.1 染料 UV 吸收光譜

本研究分別收集市售化工染料約 20 餘種與食品級染料約 30 餘種，化工染料多屬粉狀成品，須先溶於溶劑中方可使用，考量現場噴注溶劑宜降低環境的衝擊，特別選用無毒性之乙醇及丙二醇做為調製溶劑。食品級染料部分為粉狀成品，部分為調製於丙二醇的液態成品，使用時亦選用乙醇及丙二醇進行稀釋或染劑調製。

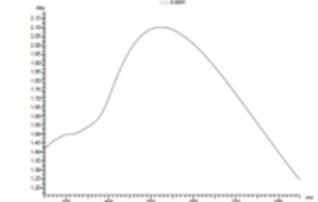
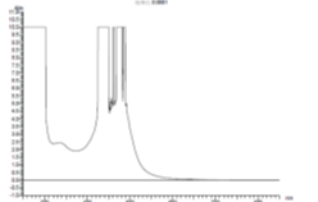
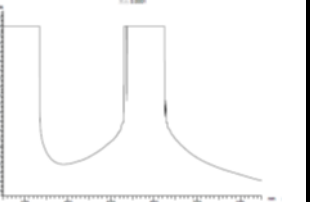
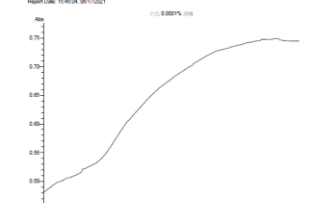
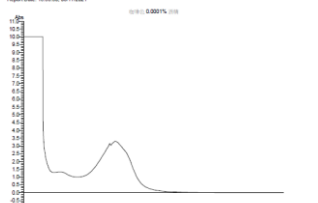
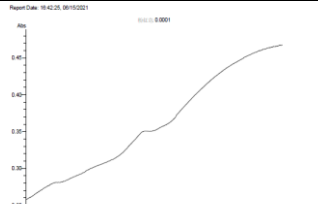
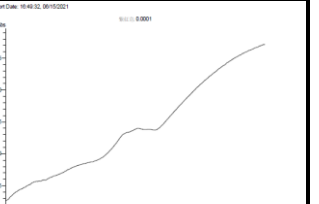
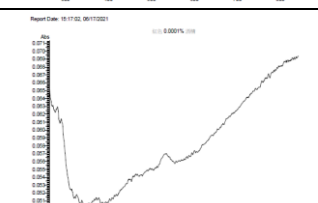
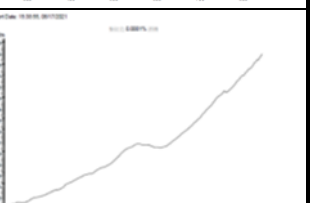
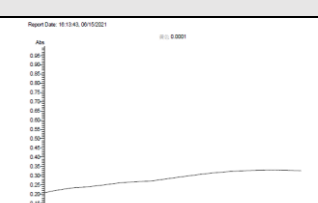
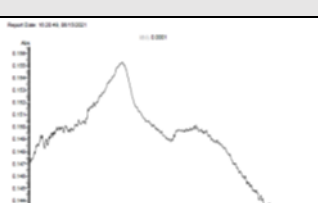
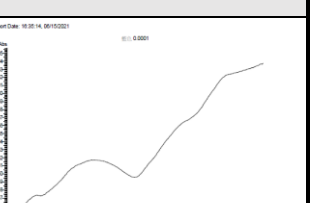
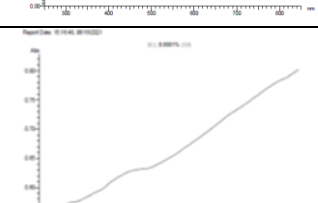
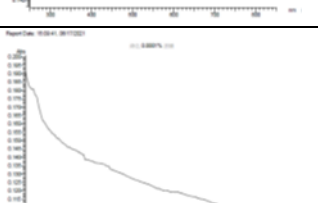
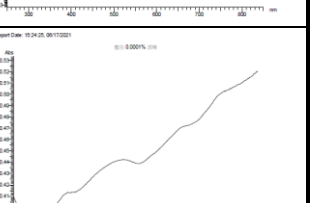
(一) 化工染料 UV 吸收光譜

市售化工染料大多以顏色區分，大致上有紅、橙、黃、綠、藍等色系，依成分添加區分為螢光染料與非螢光染料，依染色標的物用途區分有皮革、紡織布料及一般物件等，染料各有特殊配方因而 UV 吸收光譜互異。表 5.1 彙整市售化工染料之 UV 吸收光譜，各種顏色染料的吸收波峰有明顯差異，即使同色系染料因染料配方成分亦呈現互異的吸收波峰，如螢光紅、蘇丹紅-IV、皮革紅、紡織紅等。油性螢光染料於 250 nm 至 850 nm 測定範圍，大多未測得明顯的吸收波峰，且吸光值偏弱，僅螢光藍染料顯現 447.5 nm 吸收波峰，吸光值 0.52。一般油性螢光染料大多可測得 2 個明顯的吸收波峰，其一波峰顯現於 260~360 nm 範圍，另一波峰顯現於 430~666 nm 範圍，彙整如表 5.2 所示。其中 260~360 nm 的波峰接近 UVOST 設備之氯化氫激發螢光波長 308 nm，因此有利於吸收 UVOST 設備雷射激發光的能量。至於染料是否能散發螢光，與化工染料中雜環結構成分之螢光特性有關，續由 LIF 螢光分析得知。



染色輔助雷射激發螢光技術應用於含氯有機物污染調查之研究

表 5.1 化工染料 UV 吸收光譜

染料名稱	油性白色	油性咖啡	油性黑色
0.01% 染料於丙二醇			
0.01% 染料於乙醇			
染料名稱	油性螢光紅	油性螢光粉紅	油性螢光紫紅
0.01% 染料於丙二醇			
0.01% 染料於乙醇			
染料名稱	油性螢光黃	油性螢光綠	油性螢光藍
0.01% 染料於丙二醇			
0.01% 染料於乙醇			



第五章結果與討論

表 5.1 化工染料 UV 吸收光譜(續)

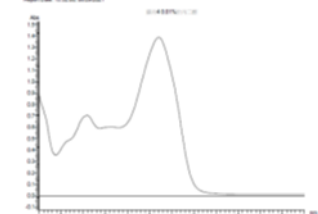
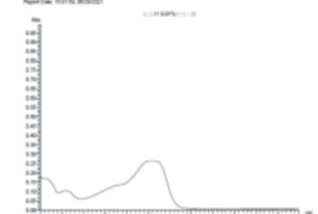
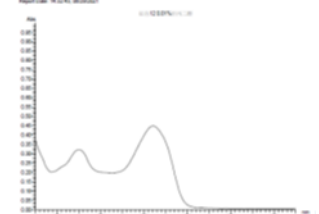
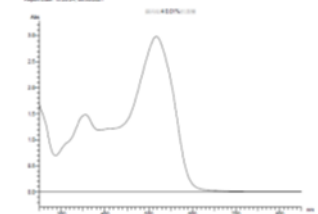
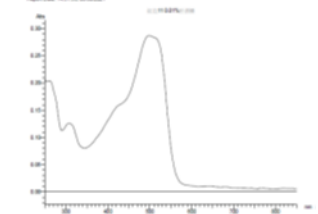
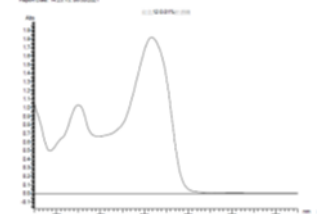
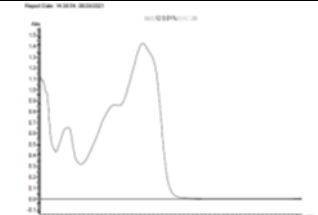
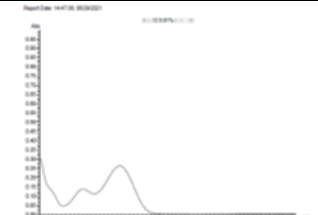
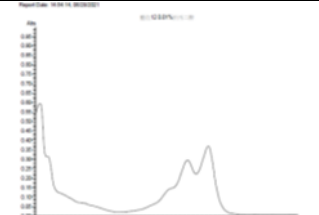
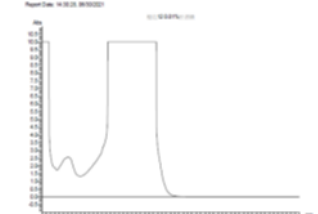
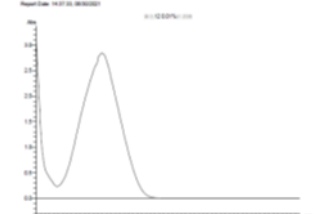
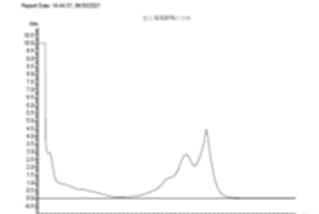
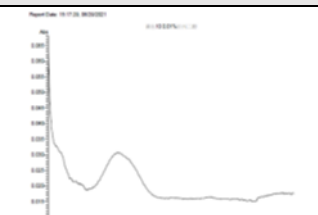
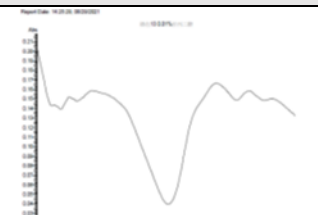
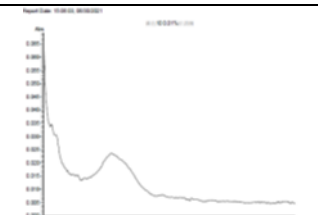
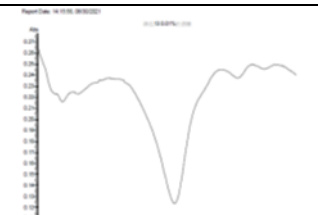
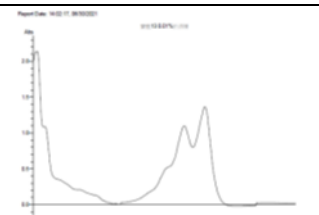
染料名稱	蘇丹紅-IV	皮革紅色	紡織紅色
0.01% 染料於丙二醇			
0.01% 染料於乙醇			
染料名稱	紡織橙色	紡織黃色	紡織藍色
0.01% 染料於丙二醇			
0.01% 染料於乙醇			
染料名稱	油性黃色	油性綠色	油性寶藍
0.01% 染料於丙二醇			
0.01% 染料於乙醇			



表 5.2 化工染料測定之 UV 吸收波峰與強度

染料名稱	波峰 1 波長	波峰 1 吸光值	波峰 2 波長	波峰 2 吸光值
油性寶藍	260.5 nm	0.60	597.5 nm	0.31
紡織藍	260.5 nm	0.59	597.5 nm	0.30
皮革紅	310 nm	0.26	504.5 nm	0.11
紡織橙	313.5 nm	0.66	485 nm	1.43
油性咖啡	337 nm	2.45	449.5 nm	10
紡織紅	349 nm	0.32	520.5 nm	0.45
紡織黃	350.5 nm	0.14	437.5 nm	0.26
蘇丹紅 IV	358.5 nm	0.70	520 nm	1.39
油性綠	376.5 nm	0.16	666 nm	0.17
油性黃	417.5 nm	0.03	-	-
螢光藍	447.5 nm	0.52	-	-
油性白	520.5 nm	2.10	-	-
油性黑	623.5 nm	10	-	-

(二) 食品染料 UV 吸收光譜

市售食品級染料包括天然食品添加物與食用色素，天然食品添加物有水果、花草、作物、香料等多種類別，食用色素有紅、棕、桔、黃、綠、藍、紫等調製色膏成品。市售食品級染料有調製於丙二醇的液態成品與天然食品粉末，分別選用乙醇及丙二醇進行稀釋或調製成染劑，以供 UV 吸收光譜測定。表 5.3 彙整市售食品染料之 UV 吸收光譜，大部分皆可測得 1~2 個明顯的吸收波峰，少數吸收光譜未顯現可識別波峰(如南瓜粉)。某些市售食品染料 UV 吸收光譜顯現 3 個吸收波峰(如芋頭丙二醇液、藍色色膏等)，配合 UVOST 設備之氯化氫激發螢光波長 308 nm，因而選擇較接近 308 nm 之 2 個吸收波峰彙整於表 5.4。大多數市售食品染料 UV 吸收光譜之一波峰落於 260~360 nm 範圍，其中茉莉花、鳳梨、香草、芋頭丙二醇液及紫甘藷粉皆有 2 個波峰皆落於 308±50 nm 範圍，較有利於吸收 UVOST 設備雷射激發光的能量。至於染料是否能散發螢光，與食品染料中雜環結構成分之螢光特性有關，續由 LIF 螢光分析得知。



第五章結果與討論

表 5.3 食品染料 UV 吸收光譜

染料 名稱	玫瑰	茉莉花	香草
5% 染液於 丙二醇			
10% 染液於 乙醇			
染料 名稱	草莓	鳳梨	香蕉
5% 染液於 丙二醇			
10% 染液於 乙醇			
染料 名稱	牛奶	蜂蜜	芋頭
5% 染液於 丙二醇			
10% 染液於 乙醇			



染色輔助雷射激發螢光技術應用於含氯有機物污染調查之研究

表 5.3 食品染料 UV 吸收光譜(續 1)

染料 名稱	巧克力	紅色色膏	粉紅色膏
5% 染液於 丙二醇			
10% 染液於 乙醇			
染料 名稱	棕色色膏	桔色色膏	黃色色膏
5% 染液於 丙二醇			
10% 染液於 乙醇			
染料 名稱	綠色色膏	藍色色膏	紫色色膏
5% 染液於 丙二醇			
10% 染液於 乙醇			



第五章結果與討論

表 5.3 食品染料 UV 吸收光譜(續 2)

染料 名稱	梔子紅 A 粉	紅麴粉	伯爵紅茶粉
0.5% 色粉於 丙二醇			
10% 染液於 乙醇			
染料 名稱	辣椒粉	紫甘藷粉	南瓜粉
0.5% 色粉於 丙二醇			
10% 染液於 乙醇			
染料 名稱	咖哩粉	可可粉	竹碳粉
0.5% 色粉於 丙二醇			
10% 染液於 乙醇			



染色輔助雷射激發螢光技術應用於含氯有機物污染調查之研究

表 5.4 食品染料測定之 UV 吸收波峰與強度

染料名稱	波峰 1 波長	波峰 1 吸光值	波峰 2 波長	波峰 2 吸光值
茉莉花	260.5 nm	3.59	339 nm	2.72
鳳梨	265 nm	10	297 nm	4.10
伯爵紅茶粉	270 nm	3.63	-	-
辣椒粉	270.5 nm	1.61	-	-
可可粉	272.5 nm	4.13	-	-
香草	274 nm	10	304.5 nm	4.14
芋頭	274.5 nm	2.66	308 nm	1.87
玫瑰	277 nm	3.69	-	-
薑黃粉	284 nm	10	449 nm	10
紫甘藷粉	298 nm	0.93	328 nm	1.05
草莓	304.5 nm	3.66	-	-
梔子紅 A 粉	308 nm	3.41	533 nm	3.18
藍色色膏	312.5 nm	10	409 nm	3.78
粉紅色膏	315.5 nm	3.13	554 nm	10
牛奶	316.5 nm	3.65	-	-
桔色色膏	323 nm	10	528 nm	10
蜂蜜	328 nm	0.17	761 nm	0.03
巧克力	328.5 nm	10	-	-
紅色色膏	332.5 nm	2.81	554.5 nm	10
棕色色膏	339 nm	10	552.5 nm	10
咖哩粉	344 nm	2.26	427 nm	2.85
香蕉	347 nm	3.27	-	-
紫色色膏	410 nm	2.72	574.5 nm	10
紅麴粉	444.5 nm	10	550.5 nm	10
黃色色膏	449 nm	10	461 nm	4.07
綠色色膏	486.5 nm	10	646 nm	10
竹碳粉	609 nm	1.43	-	-



5.1.2 染料 LIF 螢光特徵圖譜

針對蒐集之市售染料分別以乙醇及丙二醇調製成染劑，利用 UVOST 設備進行雷射激發螢光分析。每次 LIF 分析前先以標準品校正螢光強度，樣品經由雷射激發螢光以頻率為 1 次/1 秒，接收 350 nm、400 nm、450 nm、500 nm 等 4 個波段螢光訊號，偵測 10 秒取得之螢光強度以平均數據呈現，可顯示分析樣品各波段與累加的螢光強度，並繪製螢光特徵圖譜。

(一) 化工染料 LIF 螢光特徵圖譜

表 5.5 彙整市售化工染料之 LIF 螢光特徵圖譜，肉眼可辨識各種化工染料明顯的色澤，但 LIF 分析之螢光強度並不若肉眼辨識般顯著。油性螢光染料配製於乙醇染液之 LIF 螢光強度較丙二醇染液為強，大致上歸屬於醇溶性染料，其中螢光紅、螢光粉紅、螢光紫紅染料因未測得明顯的 UV 吸收波峰，測得之 LIF 螢光強度相對微弱；**螢光黃、螢光綠、螢光藍**染料則測得極強之 LIF 螢光強度，推測與內含螢光添加物有關，可納入下階段 DNAPL 染劑配方調製測試。一般油性化工染料配製於丙二醇染液之 LIF 螢光強度相對較強，但大多數 total %RE < 10，僅**紡織紅**染料測得之 LIF 螢光強度較強，篩選納入下階段 DNAPL 染劑配方調製測試。

(二) 食品染料 LIF 螢光特徵圖譜

表 5.6 彙整市售食品染料之 LIF 螢光特徵圖譜，絕大部分食品染料配製於丙二醇染液之 LIF 螢光強度較乙醇染液為強，因此選擇以丙二醇為調製溶劑基底。市售色膏丙二醇液為濃稠狀液體，影響染液溶解度，普遍測得之 LIF 螢光強度十分微弱；市售食品丙二醇液中**茉莉花、鳳梨、蜂蜜**染液則測得極強之 LIF 螢光強度，3 者的 LIF 螢光特徵相近，皆以 400 nm 與 450 nm 為主要螢光特徵波段，推測與內含植物性雜環結構物有關，可納入下階段 DNAPL 染劑配方調製測試。天然食品粉末配製於丙二醇染液亦具有中等螢光強度，其中以**薑黃粉、紫甘藷粉、咖哩粉、辣椒粉**染液測得 total %RE > 25，篩選納入下階段 DNAPL 染劑配方調製測試。薑黃粉與咖哩粉的 LIF 螢光特徵類似，以 500 nm 為主要螢光特徵波段；紫甘藷粉之 400 nm、450 nm 與 500 nm 螢光特徵波段皆具代表性；辣椒粉之 4 個螢光特徵波段皆具代表性。



染色輔助雷射激發螢光技術應用於含氯有機物污染調查之研究

表 5.5 化工染料 LIF 螢光特徵圖譜

染料		1%染料丙二醇液		1%染料乙醇液	
油性 螢光 紅	350 nm	0.28		0.42	
	400 nm	0.90		1.33	
	450 nm	0.98		0.98	
	500 nm	1.85		2.00	
	%RE	4.00		4.73	
油性 螢光 粉紅	350 nm	0.32		0.50	
	400 nm	1.25		2.25	
	450 nm	1.12		1.89	
	500 nm	0.59		0.54	
	%RE	3.27		5.17	
油性 螢光 紫紅	350 nm	0.26		0.33	
	400 nm	0.98		1.60	
	450 nm	0.94		1.61	
	500 nm	0.28		0.26	
	%RE	2.47		3.80	
油性 螢光 黃	350 nm	0.61		0.62	
	400 nm	0.70		0.68	
	450 nm	27.73		26.60	
	500 nm	359.90		553.56	
	%RE	388.94		581.47	
油性 螢光 綠	350 nm	0		0.18	
	400 nm	0.02		0.09	
	450 nm	23.38		34.33	
	500 nm	283.04		436.84	
	%RE	306.36		471.44	
油性 螢光 藍	350 nm	2.95		4.34	
	400 nm	117.10		137.16	
	450 nm	408.99		609.52	
	500 nm	110.12		178.83	
	%RE	63916		929.85	



第五章結果與討論

表 5.5 化工染料 LIF 螢光特徵圖譜(續)

染料		1%染料丙二醇液		1%染料乙醇液	
蘇丹紅 IV	350 nm	2.76		0.46	
	400 nm	4.11		0.68	
	450 nm	0.19		0.32	
	500 nm	0		0.09	
	%RE	0.22		1.54	
紡織紅色	350 nm	6.18		2.18	
	400 nm	14.88		5.28	
	450 nm	7.61		2.45	
	500 nm	2.14		0.52	
	%RE	30.81		10.43	
皮革紅色	350 nm	2.76		0.18	
	400 nm	4.11		0.16	
	450 nm	1.47		0.14	
	500 nm	0.15		0.05	
	%RE	8.49		0.53	
油性黃色	350 nm	1.99		1.45	
	400 nm	1.72		0.88	
	450 nm	1.81		0.96	
	500 nm	1.24		0.75	
	%RE	6.76		4.04	
油性綠色	350 nm	0		0	
	400 nm	0.29		0.17	
	450 nm	1.13		0.66	
	500 nm	2.02		1.22	
	%RE	3.44		2.03	
紡織藍色	350 nm	0.06		0	
	400 nm	0.29		0.03	
	450 nm	0.35		0.07	
	500 nm	1.53		0.04	
	%RE	2.22		0.11	



染色輔助雷射激發螢光技術應用於含氯有機物污染調查之研究

表 5.6 食品染料 LIF 螢光特徵圖譜

染料		丙二醇染液		乙醇染液	
玫瑰	350 nm	4.95	7.9 %RE (s 0.2) rose	4.46	6.9 %RE (s 0.1) rose
	400 nm	1.96		1.73	
	450 nm	0.84		0.63	
	500 nm	0.19		0.08	
	%RE	7.94		6.91	
茉莉花	350 nm	22.43	922.7 %RE (s 18.3) jasmine	22.68	679.1 %RE (s 9.3) jasmine
	400 nm	416.80		340.30	
	450 nm	378.15		257.30	
	500 nm	107.03		58.73	
	%RE	924.40		679.01	
香草	350 nm	0.19	1.4 %RE (s 0.1) vanilla	0.18	0.6 %RE (s 0.0) vanilla
	400 nm	0.72		0.32	
	450 nm	0.47		0.16	
	500 nm	0.01		0	
	%RE	1.38		0.57	
草莓	350 nm	0.20	0.9 %RE (s 0.1) strawberry	0.19	0.5 %RE (s 0.1) strawberry
	400 nm	0.37		0.22	
	450 nm	0.30		0.15	
	500 nm	0		0	
	%RE	0.87		0.51	
鳳梨	350 nm	0.51	23.5 %RE (s 0.6) pineapple	0.69	28.3 %RE (s 0.6) pineapple
	400 nm	11.94		14.99	
	450 nm	9.11		10.43	
	500 nm	1.94		2.15	
	%RE	23.50		28.27	
香蕉	350 nm	0	0.1 %RE (s 0.0) banana	0.02	0.3 %RE (s 0.1) banana
	400 nm	0.15		0.24	
	450 nm	0.09		0.10	
	500 nm	0		0	
	%RE	0.15		0.26	



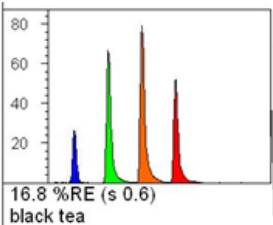
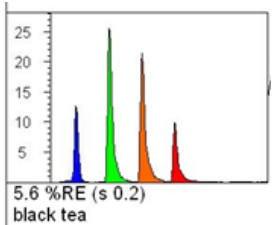
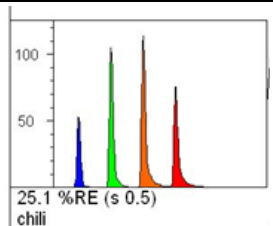
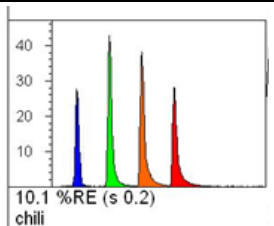
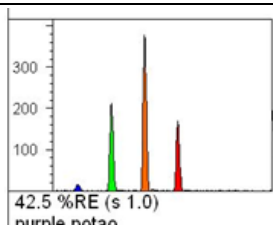
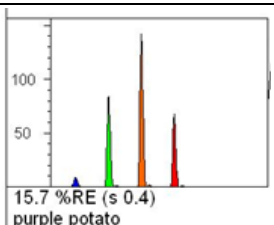
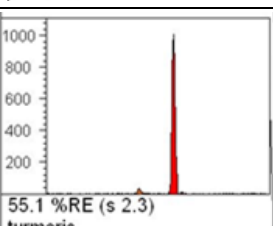
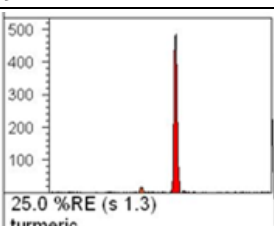
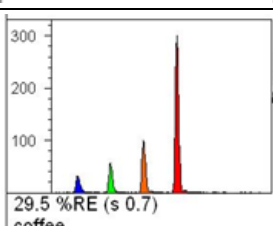
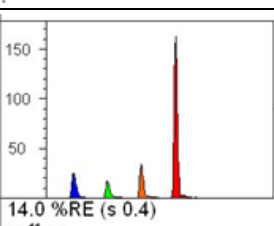
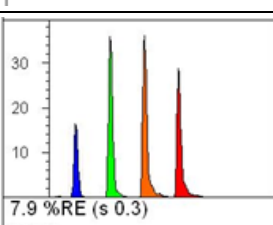
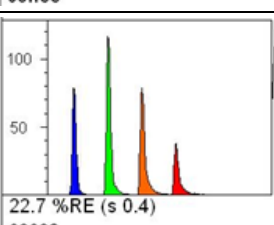
第五章結果與討論

表 5.6 食品染料 LIF 螢光特徵圖譜(續)

染料		丙二醇染液		乙醇染液	
芋頭	350 nm	0.24		0.04	
	400 nm	0.68		0.24	
	450 nm	0.64		0.27	
	500 nm	0.33		0.09	
	%RE	1.89		0.63	
蜂蜜	350 nm	6.48		3.49	
	400 nm	154.4		64.67	
	450 nm	125.89		45.68	
	500 nm	28.24		9.48	
	%RE	315.01		123.32	
紅色色膏	350 nm	0.17		0.02	
	400 nm	0.48		0.21	
	450 nm	0.31		0.18	
	500 nm	0.12		0	
	%RE	1.07		0.35	
黃色色膏	350 nm	0.06		0	
	400 nm	0.05		0	
	450 nm	0.06		0.01	
	500 nm	0.46		0	
	%RE	0.62		0	
綠色色膏	350 nm	0.04		0	
	400 nm	0.06		0	
	450 nm	0.13		0.05	
	500 nm	0.39		0	
	%RE	0.62		0.04	
藍色色膏	350 nm	0.07		0	
	400 nm	0.27		0.09	
	450 nm	1.21		0.42	
	500 nm	0.50		0.08	
	%RE	2.06		0.58	



表 5.6 食品染料 LIF 螢光特徵圖譜(續 2)

染料		1%染料丙二醇液		1%染料乙醇液	
伯爵紅茶粉	350 nm	1.65			
	400 nm	4.91			
	450 nm	6.29			
	500 nm	3.96			
	%RE	16.81			
辣椒粉	350 nm	3.41			
	400 nm	7.16			
	450 nm	8.39			
	500 nm	6.12			
	%RE	25.08			
紫甘藷粉	350 nm	0.91			
	400 nm	11.56			
	450 nm	20.56			
	500 nm	9.44			
	%RE	42.47			
薑黃粉	350 nm	0			
	400 nm	0			
	450 nm	1.89			
	500 nm	53.89			
	%RE	55.15			
咖哩粉	350 nm	2.43			
	400 nm	3.48			
	450 nm	6.09			
	500 nm	17.48			
	%RE	29.48			
可可粉	350 nm	0.99			
	400 nm	2.33			
	450 nm	2.57			
	500 nm	1.95			
	%RE	7.83			



5.1.3 DNAPL 染劑配方調製

依據表 5.5 及表 5.6 配製染液 LIF 分析結果，篩選 LIF 螢光強度 total %RE > 20 之染液，包括 4 種化工染料及 7 種食品染料進行 TCE 染色測試。TCE 純相液體之 LIF 螢光強度 total %RE 介於 3.11~3.92，篩選出染料原液之 LIF 螢光強度 total %RE 介於 23.50~924.40，TCE 染色測試係將染料原液以 5%TCE 純相體積逐次滲入，依序分析染色 TCE 純相液體之 LIF 螢光強度，直至 LIF 螢光強度未持續顯著增加，依此判斷染料原液合適的添加劑量。另以 10%TCE 純相體積添加劑量為基準，比較 TCE NAPL 染色前後 LIF 螢光強度之差異，以判斷染料原液是否得以將 TCE 純相液體染色。

表 5.7 顯示螢光黃、螢光綠、螢光藍等化工染料添加於 TCE NAPL 後，LIF 螢光強度增幅小於 10%，因此螢光染料並無法將 TCE NAPL 染色。化工染料中僅**紡織紅**染料可將 TCE NAPL 染色，染色後 LIF 螢光強度增強 6.68 倍。食品染料中辣椒粉添加於 TCE NAPL 後，LIF 螢光強度卻降低，係因辣椒粉無法溶入 TCE NAPL。紫甘藷粉與咖哩粉添加於 TCE NAPL 後，LIF 螢光強度增幅僅約 2 倍，不建議納為 DNAPL 染劑配方調製材料。

表 5.7 TCE NAPL 染色前後 LIF 螢光強度增幅比較

類別	染料名稱	100%染料 螢光強度	TCE NAPL 螢光強度	10%染 TCE 螢光強度	染色 TCE 螢光增幅
化 工 染 料	0.01%螢光黃	109.89	3.66	3.95	7.9%
	0.01%螢光綠	42.98	3.74	3.77	0.8%
	0.01%螢光藍	164.17	3.92	3.92	0%
	1%紡織紅	30.81	3.60	24.05	668%
食 品 染 料	茉莉花丙二醇	924.40	3.73	189.00	5067%
	鳳梨丙二醇	23.50	3.60	11.50	319%
	蜂蜜丙二醇	315.01	3.34	16.83	504%
	1%辣椒粉	25.08	3.88	3.65	-6.0%
	1%紫甘藷粉	42.47	3.11	6.53	210%
	1%薑黃粉	55.15	3.67	76.48	2084%
	1%咖哩粉	29.48	3.78	5.35	142%



食品染料以市售丙二醇液之茉莉花、鳳梨、蜂蜜染液可有效溶入 TCE NAPL，順利將 TCE NAPL 染色，染色後 LIF 螢光強度分別增強 50.67 倍、3.19 倍、5.04 倍。此外，薑黃粉添加於 TCE NAPL 後，染色後 LIF 螢光強度極強，LIF 螢光強度增幅可達 20.84 倍，如表 5.7 所示。TCE 染色測試結果挑選出紡織紅染料、茉莉花丙二醇液、鳳梨丙二醇液、蜂蜜丙二醇液、薑黃粉，可順利將 TCE NAPL 染色，建議納為 DNAPL 染劑配方調製材料。

圖 5.1 顯示紡織紅染劑添加 20%TCE 純相體積後，LIF 螢光強度之增加趨勢減緩，以 20%為合適的添加劑量。染色 TCE NAPL 之 400 nm 螢光強度貢獻量皆較 TCE NAPL 與染料原液略有成長，以 400 nm 為主要螢光特徵波段，如圖 5.2 所示。圖 5.3 顯示茉莉花丙二醇液添加 20%TCE 純相體積後，LIF 螢光強度增幅幾乎持平，以 20%為合適的添加劑量。染色 TCE NAPL 之 400 nm 螢光強度貢獻量皆較 TCE NAPL 與染料原液更顯著，以 400 nm 為主要螢光特徵波段，如圖 5.4 所示。圖 5.5 顯示鳳梨丙二醇液添加 20%TCE 純相體積後，LIF 螢光強度增幅幾乎持平，以 20%為合適的添加劑量。染色 TCE NAPL 之 400 nm 螢光強度貢獻量皆較 TCE NAPL 與染料原液略有成長，以 400 nm 為主要螢光特徵波段，如圖 5.6 所示。圖 5.7 顯示蜂蜜丙二醇液添加 30%TCE 純相體積後，LIF 螢光強度達到最高，以 30%為合適的添加劑量。染色 TCE NAPL 之 400 nm 螢光強度貢獻量皆較 TCE NAPL 與染料原液更顯著，以 400 nm 為主要螢光特徵波段，如圖 5.8 所示。圖 5.9 顯示 1%薑黃粉染劑添加 15%TCE 純相體積後，LIF 螢光強度增幅幾乎持平，以 15%為合適的添加劑量。染色 TCE NAPL 之 500 nm 螢光強度貢獻量較 TCE NAPL 大幅增加，但較薑黃粉染劑大幅減少，以 500 nm 為主要螢光特徵波段，如圖 5.10 所示。

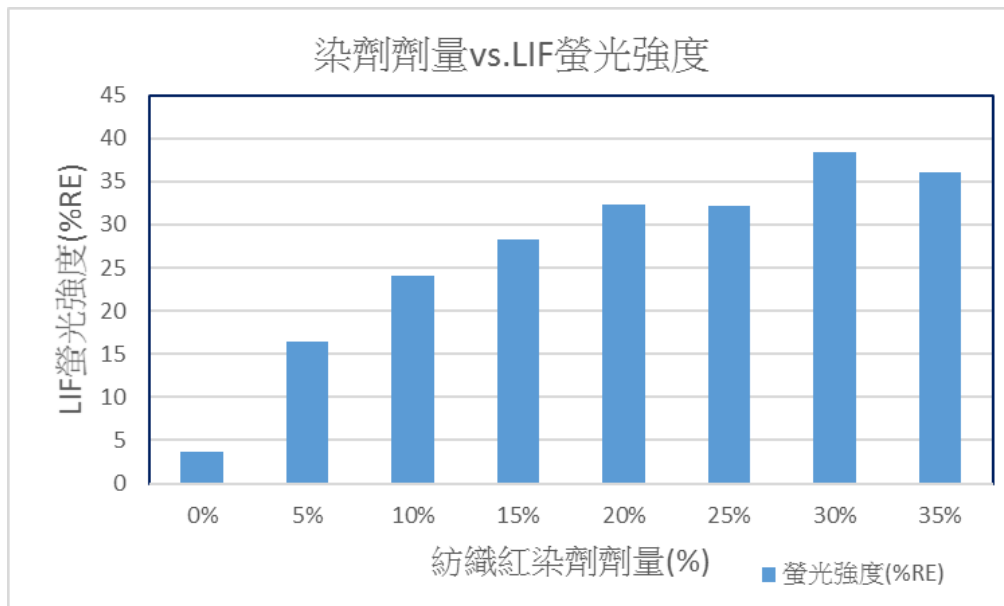


圖 5.1 紡織紅染劑劑量與染色三氯乙烯 NAPL 螢光強度相關性

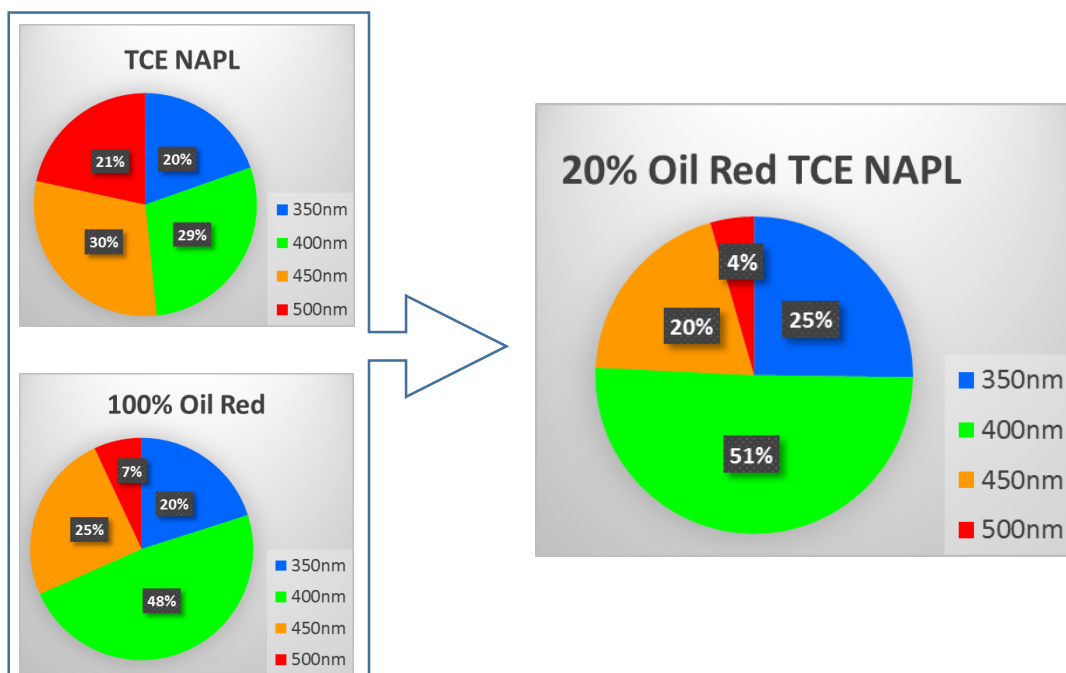


圖 5.2 三氯乙烯 NAPL 與紡織紅染劑染色前後 LIF 螢光特徵比對



染色輔助雷射激發螢光技術應用於含氯有機物污染調查之研究

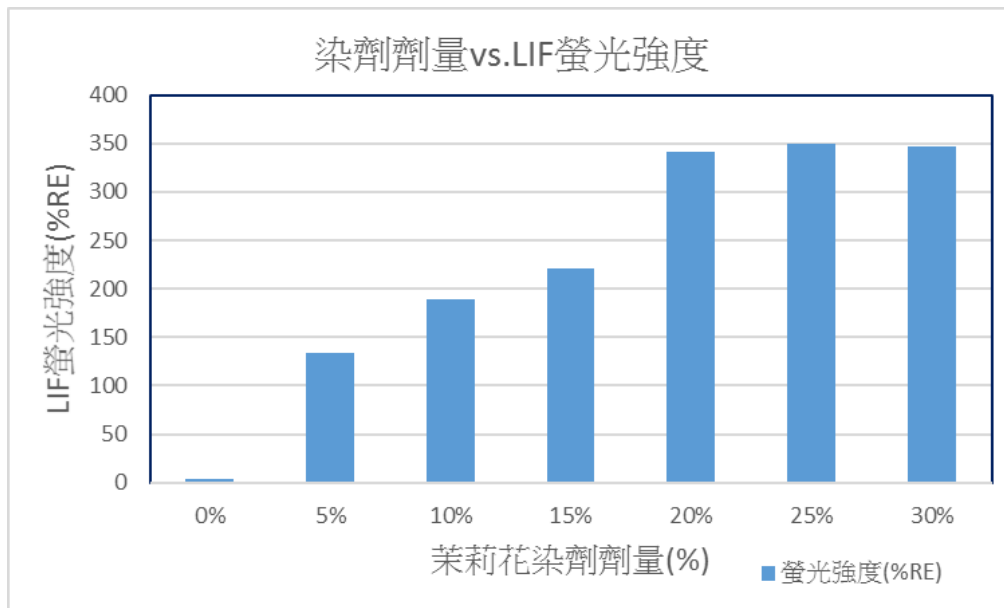


圖 5.3 茉莉花染劑劑量與染色三氯乙烯 NAPL 螢光強度相關性

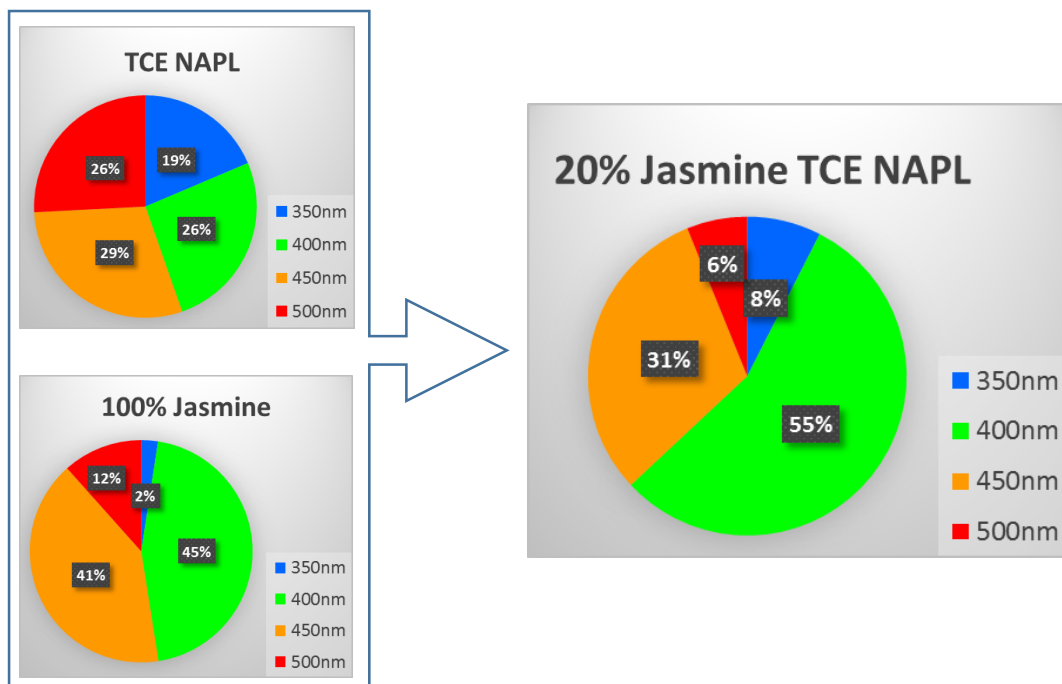


圖 5.4 三氯乙烯 NAPL 與茉莉花染劑染色前後 LIF 螢光特徵比對

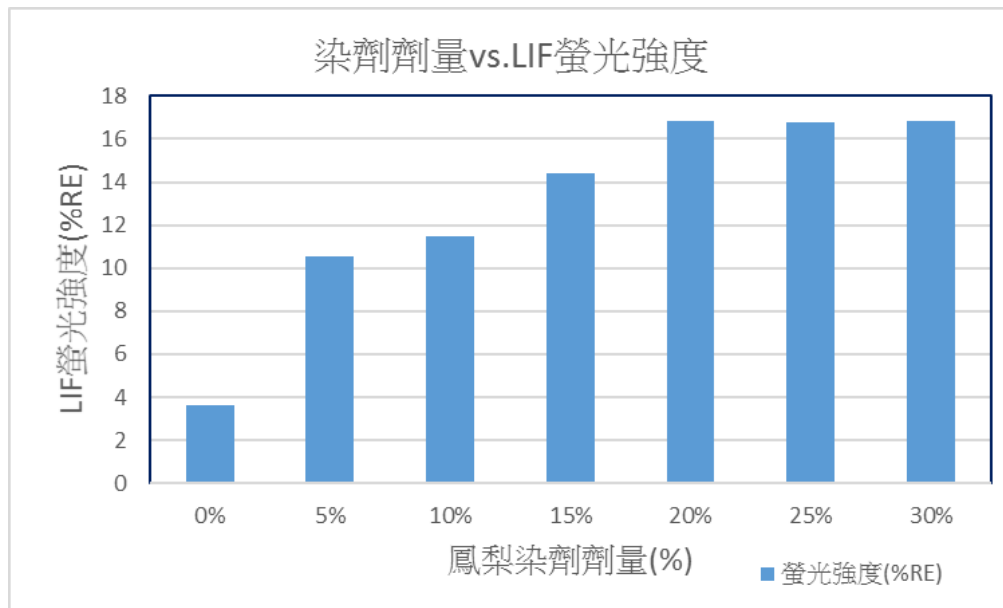


圖 5.5 鳳梨染劑劑量與染色三氯乙烯 NAPL 螢光強度相關性

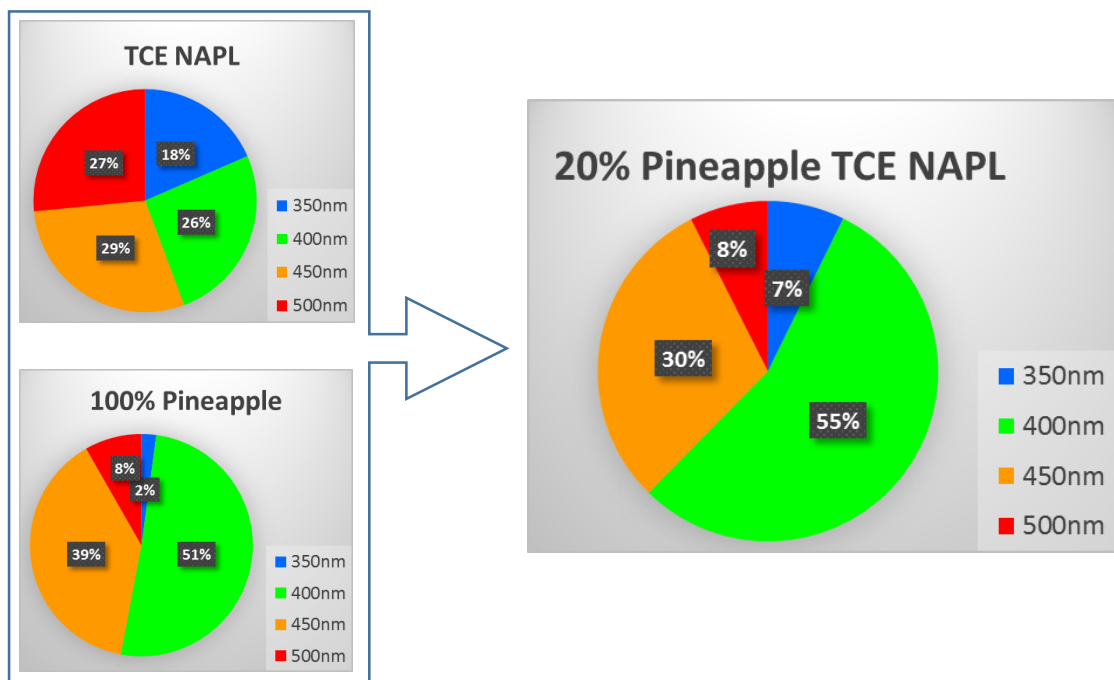


圖 5.6 三氯乙烯 NAPL 與鳳梨染劑染色前後 LIF 螢光特徵比對



染色輔助雷射激發螢光技術應用於含氯有機物污染調查之研究

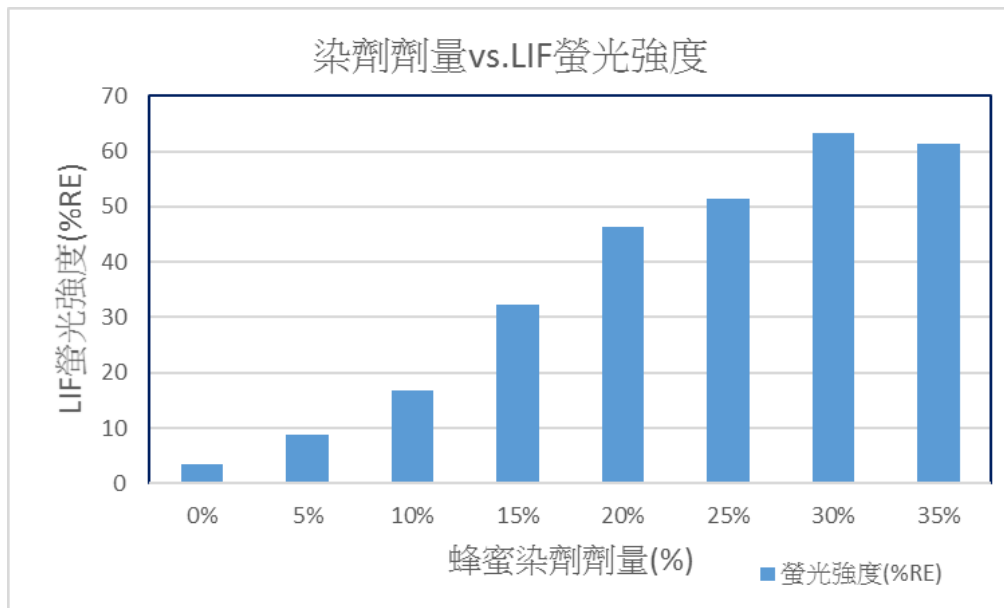


圖 5.7 蜂蜜染劑劑量與染色三氯乙烯 NAPL 螢光強度相關性

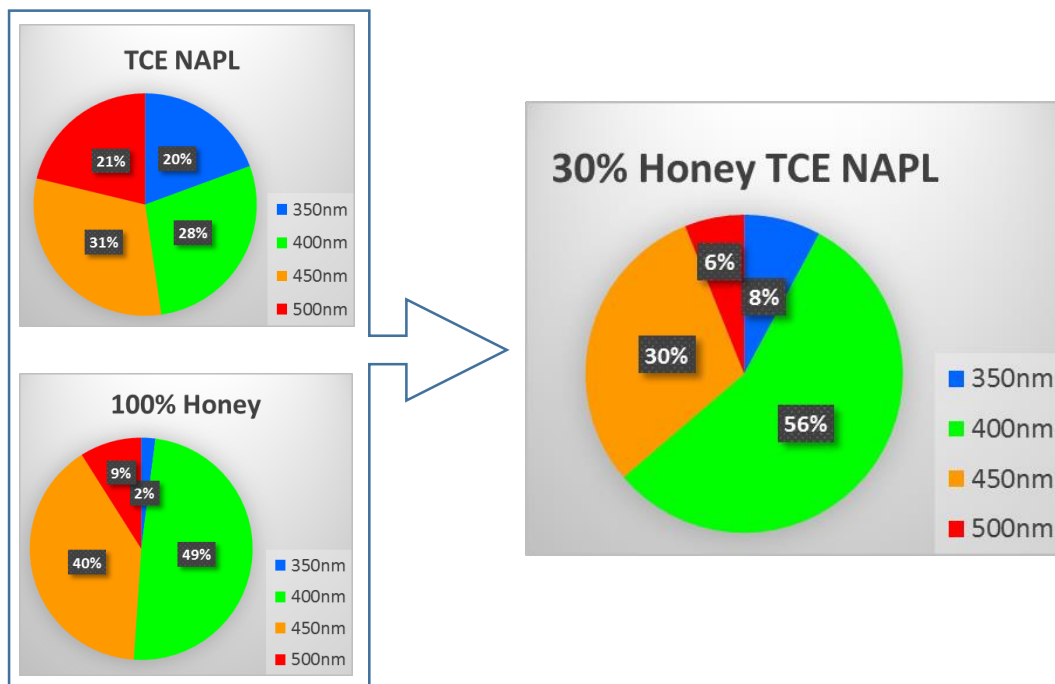


圖 5.8 三氯乙烯 NAPL 與蜂蜜染劑染色前後 LIF 螢光特徵比對

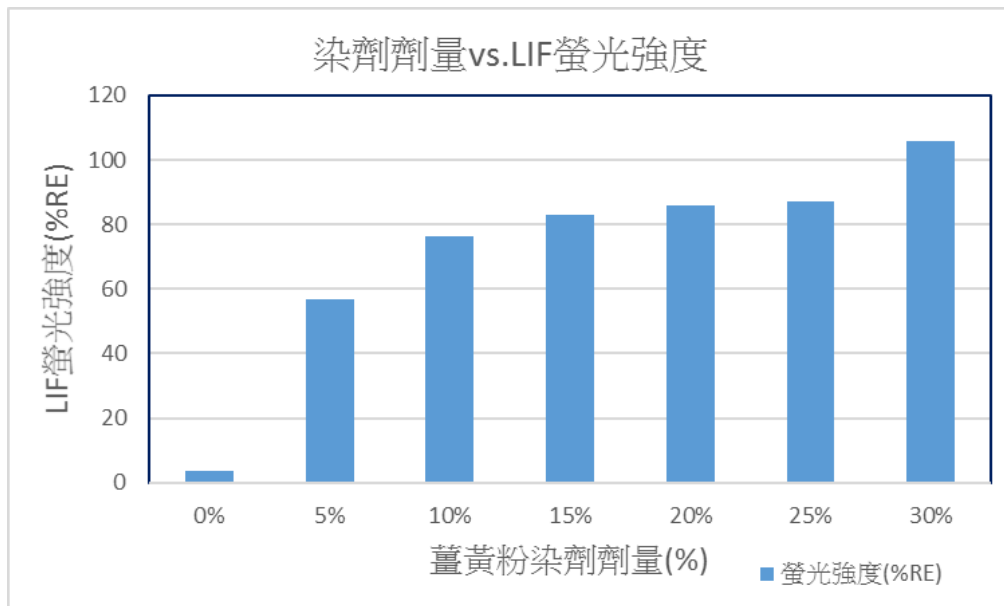


圖 5.9 薑黃粉染劑劑量與染色三氯乙烯 NAPL 螢光強度相關性

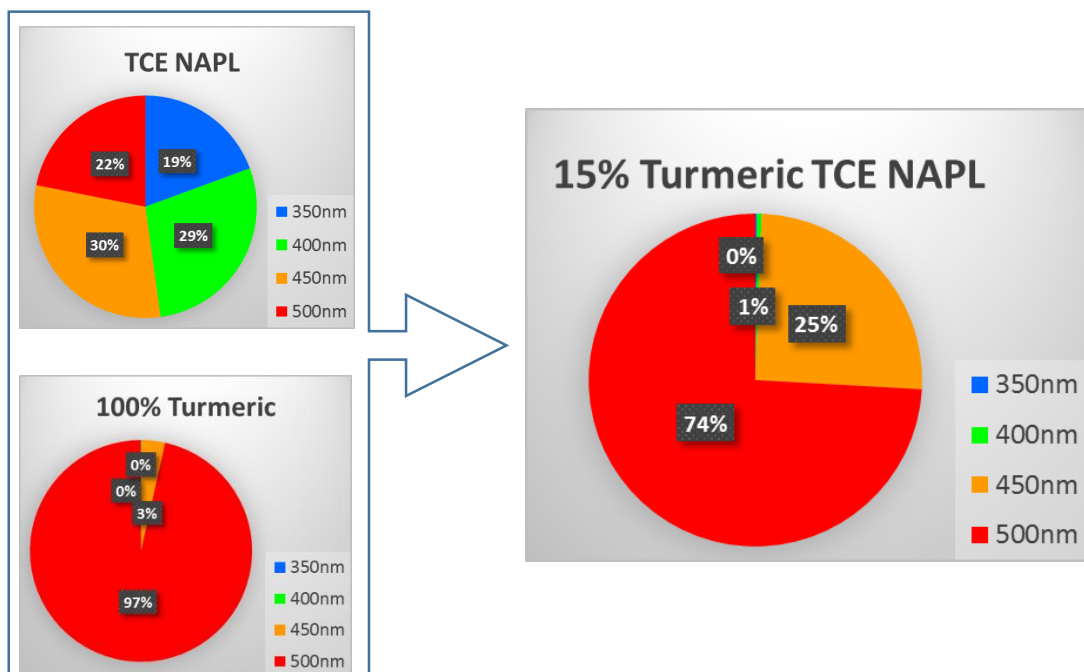


圖 5.10 三氯乙烯 NAPL 與薑黃粉染劑染色前後 LIF 螢光特徵比對



5.1.4 DNAPL 污土染色測試

依據 TCE NAPL 染色測試結果，得知紡織紅染料、茉莉花丙二醇液、鳳梨丙二醇液、蜂蜜丙二醇液、薑黃粉可順利將 TCE NAPL 染色，接續進行 TCE 污土染色測試。一般污染土壤中僅有少量殘留相存在，因此土壤介質之雷射激發螢光強度會比 NAPL 相的螢光強度衰減許多。本研究選用 0.42 mm 細砂及 0.074 mm 坩土做為製備土壤，濕潤細砂之 LIF 螢光強度介於 0.59~0.69 (%RE)，濕潤坩土之 LIF 螢光強度介於 0.70~0.76 (%RE)。製備土壤添加 TCE NAPL 調製 TCE 污染土壤，TCE 污土於細砂質地之 LIF 螢光強度介於 3.16~3.60 (%RE)，於坩土質地之 LIF 螢光強度介於 2.20~4.60 (%RE)，因坩土吸附性較強，易呈現 TCE 分布非均質的現象，導致坩土質地之 LIF 螢光強度變異性較大。

先以 20% 染劑的劑量添加於製備土壤，進行 LIF 分析建立土壤中染料背景螢光強度，於細砂質地之染劑螢光強度介於 1.49~6.50 (%RE)，於坩土質地之染劑螢光強度介於 1.45~3.74 (%RE)。污土染色測試以 20% 染劑的劑量添加於 TCE 污土，於細砂質地之螢光強度介於 10.88~13.78 (%RE)，於坩土質地之螢光強度介於 2.68~14.32 (%RE)。大致上染色 TCE 污土之螢光強度比土壤中染料背景強度大了許多，不容易將土中染料誤判為染色 TCE NAPL，得以應用於現地模場試驗。比對 TCE 污土與染色 TCE 污土的 LIF 螢光強度，於細砂質地添加染劑後 TCE NAPL 之螢光增幅約 3.4 至 4.3 倍，於坩土質地添加染劑後 TCE NAPL 之螢光增幅僅紡織紅染料不明顯，其他染劑之螢光增幅約 2.5 至 5.1 倍，如表 5.8 所示。

DNAPL 污土染色測試結果，僅紡織紅染料較不適用，茉莉花丙二醇液、鳳梨丙二醇液、蜂蜜丙二醇液、薑黃粉皆可有效提升土壤中 TCE NAPL 之辨識度，LIF 螢光強度增幅可達 3~5 倍。茉莉花丙二醇液、鳳梨丙二醇液、蜂蜜丙二醇液之 LIF 螢光特徵皆以 400 nm 為主要波段，薑黃粉則以 500 nm 為主要螢光特徵波段，嘗試調製混合染劑配方，以增強 TCE 污土染色前後之 LIF 辨識度。初步以 20% 蜂蜜丙二醇液與 10% 薑黃液染劑，做為混合染劑配方之基底，以染色 TCE 污染坩土為例，染色前 TCE 螢光特徵波段以 450 nm 和 500 nm 為主，染色後 500 nm 螢光強度貢獻量大幅增加，且染色後 TCE 螢光特徵與薑黃液的螢光特徵較為接近，但與混合染劑配方具 350 nm 和 400



nm 次要螢光特徵波段有明顯區別，如圖 5.11 所示。以 20%蜂蜜丙二醇液與 10%薑黃液做為混合染劑配方，可使用於下階段模場試驗。

表 5.8 TCE 汚土染色前後 LIF 螢光強度增幅比較

類別	染料名稱	土壤背景 螢光強度	土中染料 螢光強度	土中 TCE 螢光強度	染色 TCE 螢光強度	染色 TCE 螢光增幅
細 砂 土	0.2%紡織紅	0.67	1.49	3.16	10.88	344%
	茉莉花丙二醇	0.59	6.50	3.60	12.50	347%
	鳳梨丙二醇	0.68	1.86	3.23	13.78	427%
	蜂蜜丙二醇	0.61	2.30	3.31	13.61	411%
	0.2%薑黃粉	0.69	1.69	3.31	12.05	364%
粉 土	0.2%紡織紅	0.76	1.80	2.20	2.68	122%
	茉莉花丙二醇	0.67	2.17	3.42	13.63	399%
	鳳梨丙二醇	0.70	1.45	4.60	11.47	249%
	蜂蜜丙二醇	0.70	3.74	2.79	14.32	513%
	0.2%薑黃粉	0.67	2.67	3.37	9.86	293%

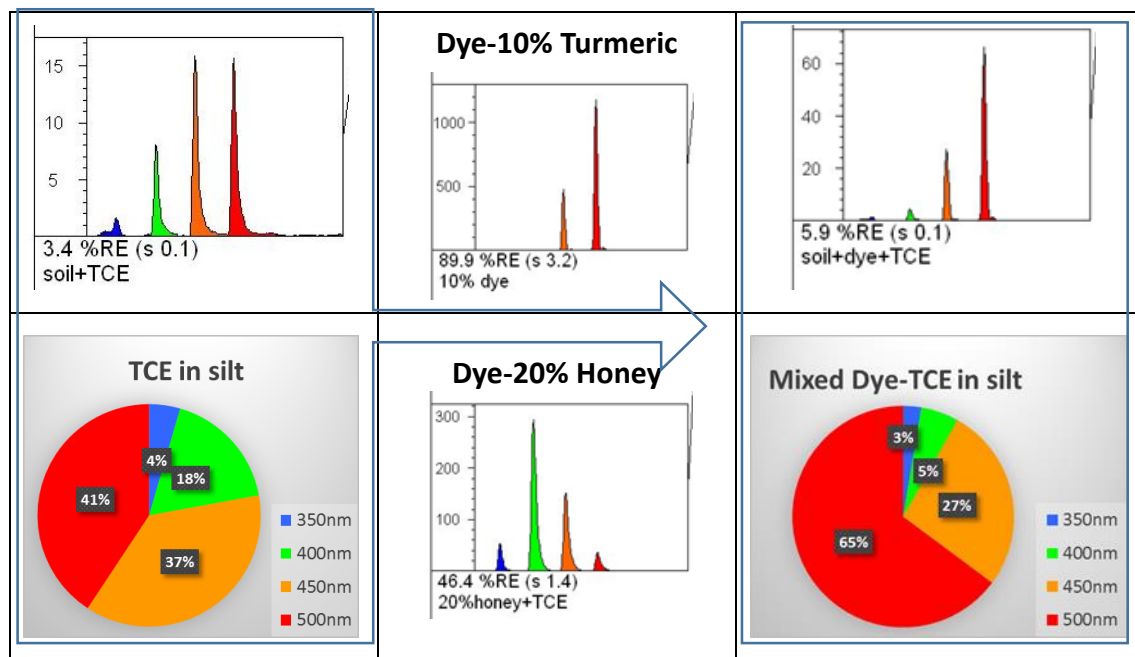


圖 5.11 三氯乙烯汚土以混合染劑配方染色前後 LIF 螢光特徵比對



5.2 現地探測模場試驗結果

現地探測模場試驗工作項目包括地球物理探測作業、薄膜界面探測器調查作業、染料噴注作業、雷射激發螢光系統探測作業、現場土壤樣品染料搖晃試驗、現場土壤樣品 VOC 分析等，依規劃 110 年 9 月於場址一進場施作地球物理探測作業後，因該場址負責人臨時變掛不同意進場執行下階段模場試驗。110 年 10 月緊急尋覓土壤及地下水三氯乙烯污染整治場址做為變更後模場試驗場址，以利推動本計畫模場試驗現場工作。110 年 11 月於場址二進場施作薄膜界面探測(MIP)作業，選擇於 MIP-XSD 高測值訊號的鑽孔位置作為染料雷射激發螢光(Dye-LIF)探測的點位。110 年 12 月於場址二進場施作 Dye-LIF 探測作業，參照實驗室染料試驗調製的染劑配方，以蜂蜜丙二醇液、薑黃液、食用調和油、紅色油性染料、甘油、水等原料，調製現場噴注用染液，應用於模場試驗測試 Dye-LIF 技術之操作參數，並建立現地應用案例之現地探測 SOP 作業程序。110 年 12 月選擇於 Dye-LIF 訊號較強的鑽孔 2 處，進行土壤鑽探連續取樣，以每 50 公分選取 1 個土壤樣品為原則，進行土壤樣品 PID 篩測。同時另選取土壤樣品進行染料搖晃試驗(oil-red shake test)，亦以每 50 公分選取 1 個土壤樣品為原則，遇 Dye-LIF 高污染訊號段樣品加密選樣數量。依 oil-red shake test 現場土壤篩測結果，並搭配現場土壤 PID 篩測結果，選擇高污染土壤樣品送認證實驗室分析土壤 VOCs 濃度。依據現場土壤 PID 篩測數據、現場土壤 oil-red shake test 結果、實驗室分析土壤 VOCs 濃度，得以交叉比對驗證 Dye-LIF 鑽探結果的可信度。各項現地探測模場試驗工作執行成果分述於後：

5.2.1 場址一地球物理探測結果

本次調查地點為彰化縣鹿港鎮上林段 0428-0000 及 0429-0000 地號廠房內地坪，主要目的為透過地電阻技術調查廠房內鄰近污染熱區地層狀況，由於污染熱區監測井 GW20-2 土壤及地下水含氯有機物濃度超過污染管制標準，因此地電阻調查係針對此監測井週遭地質作為調查重點，經現場採用透地雷達技術掃描廠房地坪為雙排筋之 RC 地坪，地電阻技術受鋼筋地坪影響甚大，現場僅此空間最適合進行探測作業。場址共佈設 1 條地電阻測線，地



第五章結果與討論

電阻測線命名為 E1，採用二種電極梯度排列法進行探測(Dipole-Gradient Array 及 Edge-Gradient Array)，測線長度為 27 公尺，地電阻測線佈設位置如圖 5.12 所示。

地電阻施測前，先以透地雷達掃描地表下結構體及管線，以避開管線及結構體干擾位置，透地雷達掃描影像剖面如圖 5.13 所示。地電阻掃描影像剖面彙整於圖 5.14，水平軸為測線水平距離(M)，縱軸為地表下垂直深度(M)，全測線 27 公尺，最深可探至地表下約 5 公尺，測線由西往東佈，監測井 GW20-2 位於測線水平距離約 0.6 公尺處。經比對二種電極梯度排列方法，獲致二個影像剖面資料之再現性高，數據資料品質佳，誤差值(RMS)低於 9%。地電阻二個剖面綜合剖析結果，發現測線範圍內地層皆有 2 處電阻率異常區域：分別為異常區 1(測線水平距離約 0~8 公尺；地表下垂直深度約 0~4 公尺)及異常區 2(測線水平距離約 12~16 公尺；地表下垂直深度約 0~3 公尺)。2 處異常區域電阻率皆明顯偏高，甚至高於 200 Ohm-m，尤其以異常區 1 特別明顯，疑似地表污染源洩漏的徵兆，建議針對此區域進行 MIP 探測及 Dye-LIF 探測，或可發現 TCE NAPL 殘存的位置。



圖 5.12 場址一地電阻測線佈置示意圖



染色輔助雷射激發螢光技術應用於含氯有機物污染調查之研究

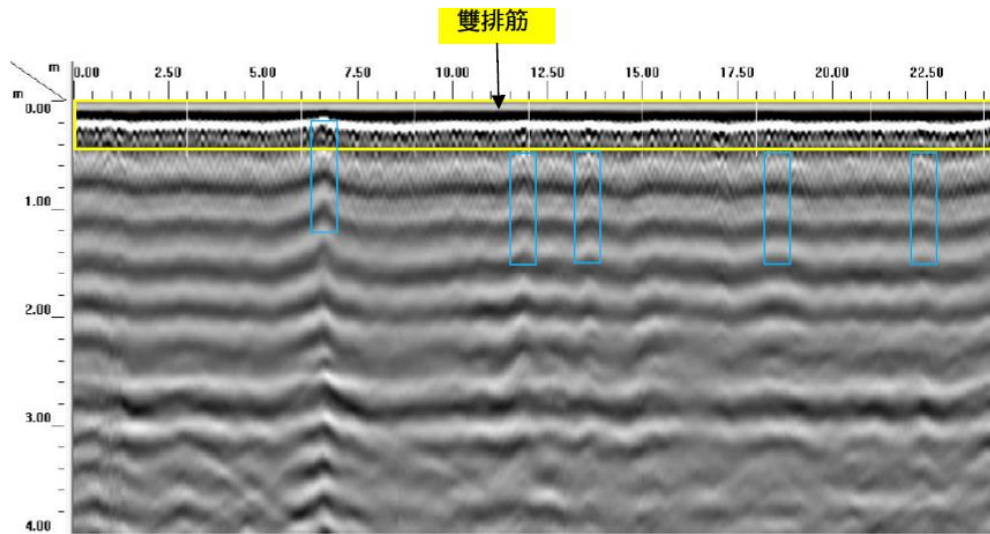
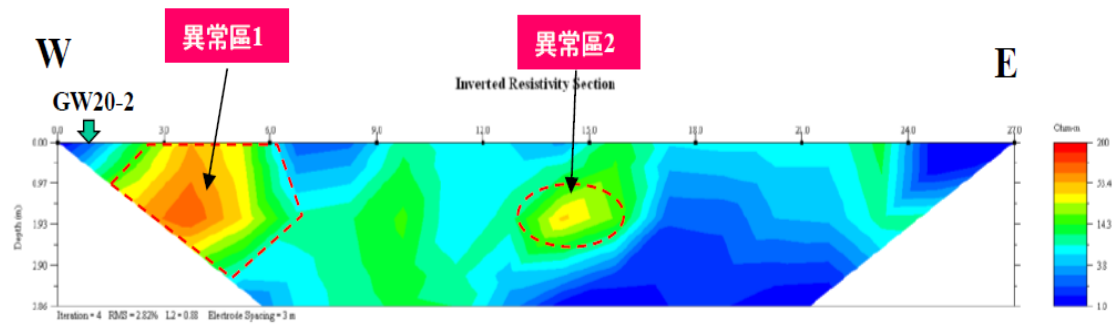
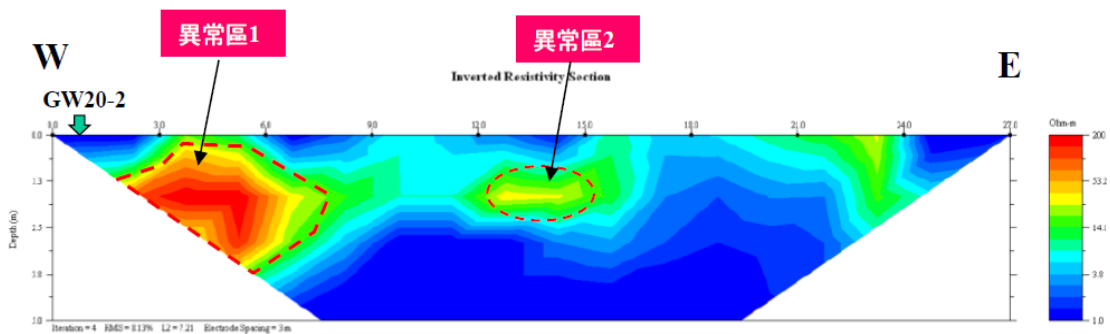


圖 5.13 場址一透地雷達測線 E1 影像剖面圖



(a) 梯度排列法一(Dipole-Gradient Array)



(b) 梯度排列法二(Edge-Gradient Array)

圖 5.14 場址一地電阻測線 E1 影像剖面圖



5.2.2 場址二薄膜界面探測結果

本次調查地點為嘉義縣民雄鄉頭橋段工業小段 0013-0000 地號之廠房內含氯製作與表面清洗區，主要目的為透過薄膜界面探測(Membrane Interface Probe, MIP)技術調查廠房內鄰近污染熱區土壤及地下水污染狀況，由於 110 年污染熱區地下水三氯乙烯測值仍明顯超過污染管制標準，監測井 CGW09 三氯乙烯濃度高達 13.35 mg/L，監測井 CGW10 三氯乙烯濃度亦有 7.33 mg/L，因此薄膜界面探測作業係針對 CGW09 與 CGW10 間高污染潛勢區進行佈點規劃，搭配鹵素特定偵測器(Halogen Specific Dector, 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。。因表面清洗區範圍不大，約為長 6 公尺與寬 6 公尺之區域範圍，第一階段執行 9 點次 MIP 探測，中心位置探測 1 點，距離 1.5 公尺處東、南、西、北方向各探測 1 點，距離 3.0 公尺處東、南、西、北方向各探測 1 點，探測深度為 11 公尺。依第一階段 9 點次 MIP 探測結果，選擇於高測值點位區塊中間擇 2 個點位，進行第二階段 MIP 探測，探測深度為 11 公尺。模場試驗區薄膜界面探測作業共 11 個點位，其相關位置如圖 5.15 所示。

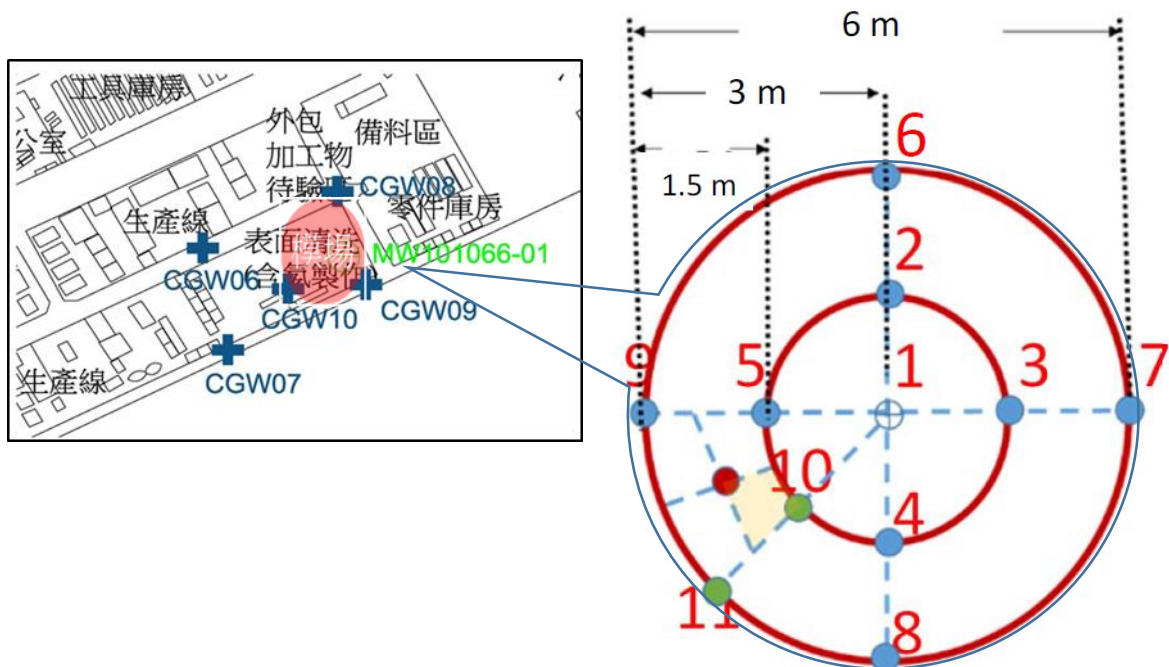


圖 5.15 場址二模場試驗區薄膜界面探測點位佈點位置圖



染色輔助雷射激發螢光技術應用於含氯有機物污染調查之研究

薄膜界面探測系統係利用掛載之可透氣且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。110 年 11 月 14 日進場執行模場試驗場址薄膜界面探測作業，完成 M01、M03、M04、M05、M07、M09 計 6 點次 MIP 探測作業，各點次進尺深度皆為 11 公尺，總進尺深度小計 66 公尺。110 年 11 月 21 日接續進場執行 M02、M06、M08、M10、M11 計 5 點次 MIP 探測作業，各點次進尺深度皆為 11 公尺，總進尺深度小計 55 公尺，2 階段 MIP 探測作業合計 121 公尺。

MIP 鑽頭可量測土壤電導率之偵測範圍為 5~400 mS/m，在一般情況下土壤的電導率隨顆粒大小而變化，細顆粒的土壤比粗顆粒的砂和礫石有更高的 EC 測值。雖然具體的 EC 測值不能直接套用至土壤質地分級的類型，但是各場址的土壤電導率會具有一定程度之比較性，黏質土壤之 EC 測值通常大於 100 mS/m，而砂質土壤之 EC 測值則多低於 50 mS/m。藉著密集佈點執行 MIP 調查，可將土壤 EC 測值適當及合理的轉換成土壤質地，並建構場址的水文地質模型。11 個 MIP 鑽探點位之電導度垂直剖面彙整於圖 5.16，各調查點位深度之電導度趨勢變化頗接近，大體上土壤 EC 測值介於 50 與 100 mS/m 之間，以粉土及粉土夾砂之質地為主。M02、M03、M06 及 M07 點位地表下 3 至 8 公尺電導度低於 50 mS/m，屬砂質土壤質地；M04、M08、M09、M10、M11 點位地表下 1 至 3 公尺呈現電導度峰值，反應場址地表下 1 至 3 公尺有一層黏土層質地的特徵。

MIP 鑽頭從上往下垂直的貫入調查過程，因各深度土層中的污染物濃度不同，使偵測器產生電壓變化。在鑽探調查時，可同時記錄施作深度及偵測器電壓變化，進尺 1.5 公分即記錄一筆資料，連接每一深度的電壓變化，即可製作深度與電壓的 2D 圖譜，便可研判背景訊號(baseline)及波峰(peak)出現的相對深度，瞭解污染物分佈之地層深度。11 個 MIP 鑽探點位之垂直剖面污染物分布以 XSD 訊號值呈現，如圖 5.17 所示。其中，以 M04、M08、M09、M10、M11 點位訊號感度較高，與場址地表下 1 至 3 公尺具黏土層質地特徵的點位一致。污染物分布深度大致介於 4 至 5 公尺與 9 至 10 公尺，尤其以 M10 及 M11 點位之污染物訊號特別強，因此選擇 M04、M09、M10、M11 點位進行下階段 Dye-LIF 探測作業。



第五章結果與討論

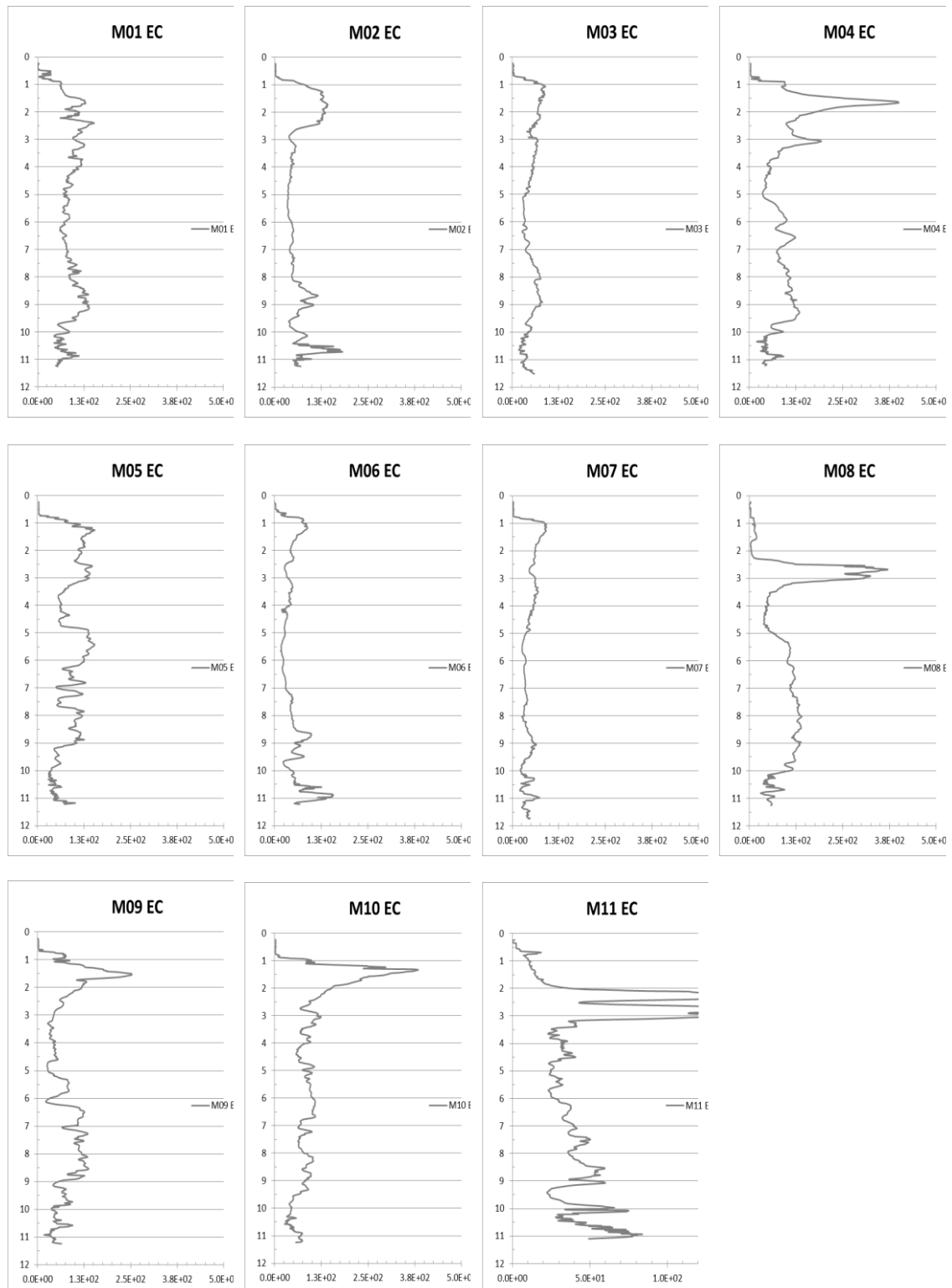


圖 5.16 場址二模場試驗區 MIP 探測點位導電度訊號垂直剖面圖



染色輔助雷射激發螢光技術應用於含氯有機物污染調查之研究

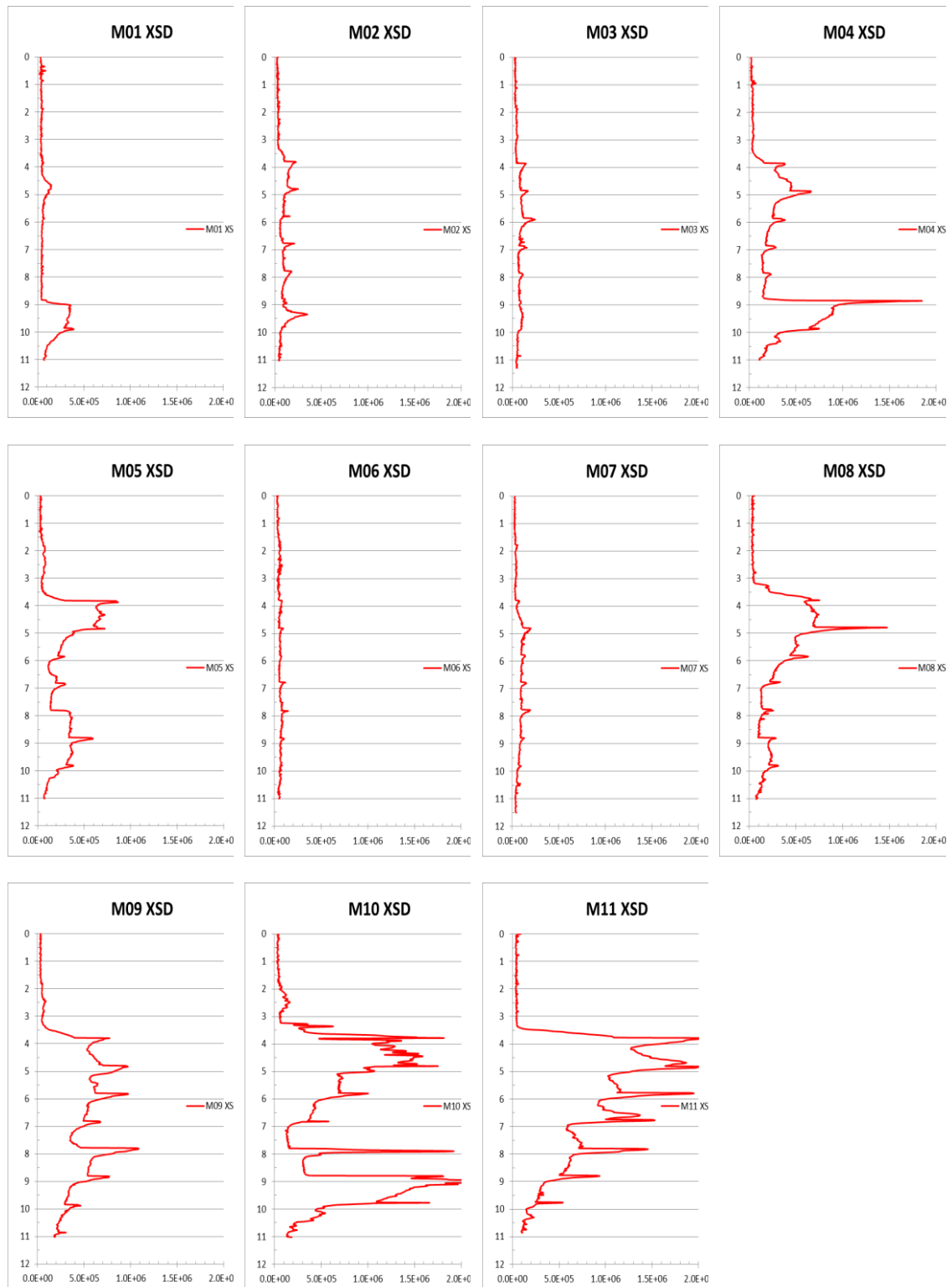


圖 5.17 場址二模場試驗區 MIP 探測點位 XSD 訊號垂直剖面圖



第五章結果與討論

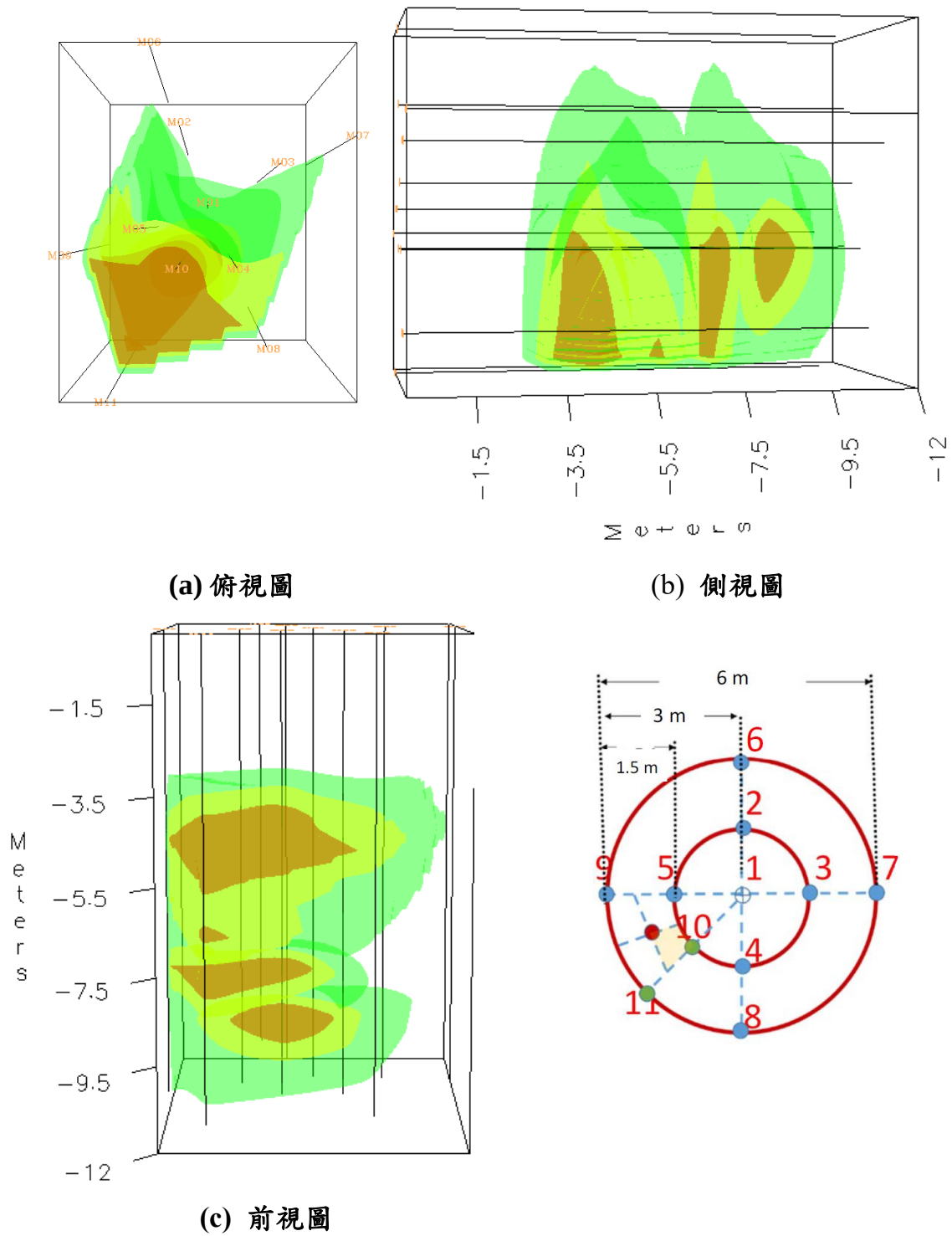


圖 5.18 場址二模場試驗區 MIP 探測結果繪製之 3D 場址污染概念模型



結合多點 MIP 剖面探測結果，建立模場試驗區域之 3D 場址污染概念模型，以此方式將圖 5.17 調查點位之剖面訊號轉繪於圖 5.18 試驗模場之污染物三維空間分布圖。其中褐色表示高濃度污染物訊號，黃綠到草綠為中濃度至低濃度污染物訊號，模場試驗區西南側為高污染潛勢區，亦即 M10 及 M11 點位的相對位置，在深度 4 公尺、7 公尺及 9 公尺均有污染物訊號反應。

5.2.3 場址二染料雷射激發螢光探測結果

依據 MIP 剖面探測結果，選擇 XSD 高訊號點位 M04、M09、M10、M11 進行染料雷射激發螢光探測作業，相關位置圖如圖 5.19 所示。Dye-LIF 探測作業程序須先執行鑽孔染料噴注作業，參照實驗室染料試驗調製的染劑配方，以蜂蜜丙二醇液、薑黃液、食用調和油、紅色油性染料、甘油、水等原料，調製現場噴注用染液，以 1.5 L/m 噴注速度由鑽孔底部緩慢上提噴注管至地表，使鑽孔充滿染液，隨即執行 LIF 探測分析作業，依進尺深度建立污染剖面資訊。110 年 12 月 5 日進場執行模場試驗場址 Dye-LIF 探測作業，規劃 L09 點位因 7 至 9 公尺深度發生湧砂現象，無法完成染液噴注作業，因而替換 L10 點位重複 Dye-LIF 探測作業，共完成 L04、L10、L10-重複、L11 計 4 點次探測作業，各點次進尺深度皆為 11 公尺，總進尺深度合計 44 公尺。現場 Dye-LIF 探測作業施作情況，如圖 5.20 所示。

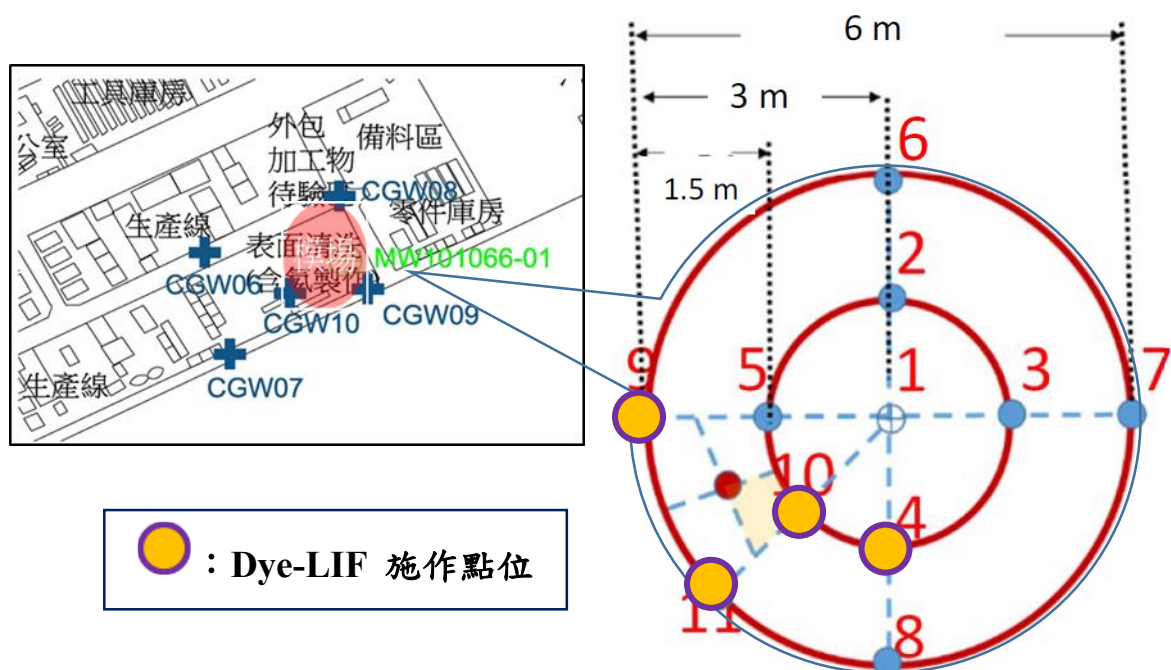


圖 5.19 場址二模場試驗區染料雷射激發螢光探測點位佈點位置圖



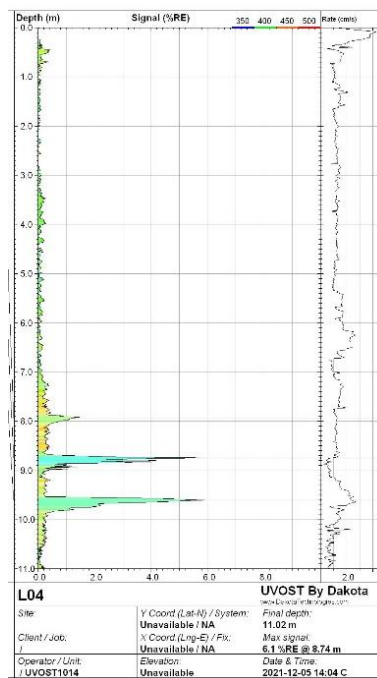
第五章結果與討論

	
染料灌注條件測試	機具移動
	
探測點鋪面銑孔	L04 染料灌注情形
	
L10 染料灌注情形	L04 探測情形
	
L10 探測情形	L11 探測情形

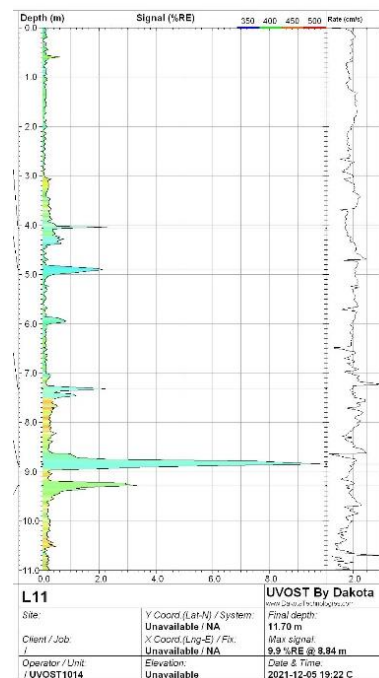
圖 5.20 場址二模場試驗區 Dye-LIF 探測作業施作情況



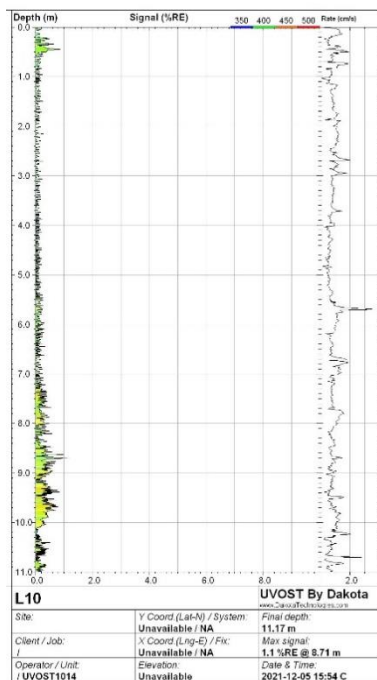
染色輔助雷射激發螢光技術應用於含氯有機物污染調查之研究



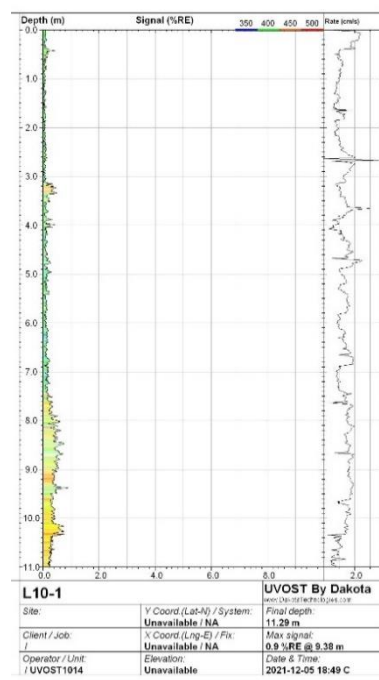
(1) L04 Dye-LIF 剖面



(2) L11 Dye-LIF 剖面



(3) L10 Dye-LIF 剖面



(4) L10 重複 Dye-LIF 剖面

圖 5.21 場址二模場試驗區 Dye-LIF 探測點位螢光訊號垂直剖面圖



噴注作業使鑽孔充滿染液，若土層中有 TCE NAPL 殘留相，如同實驗室測試結果，TCE NAPL 染色後 LIF 螢光強度可增強 5 至 20 倍，大幅提高 LIF 偵測感度。本研究使用美國 DAKOTA 公司生產的紫外光學篩測工具 (Ultra-Violet Optical Screening Tool, UVOST)，搭配 Geoprobe 鑽機執行鑽探作業，LIF 鑽頭從上往下垂直的貫入調查過程，同時散發氯化氙(Xenon Chloride, XeCl)特定波長 308 nm 之短波長脈衝雷射，提供各深度土層中染色 TCE NAPL 的激發光源，待測物激發後將放出特定的螢光能量，藉由捕捉 4 個主要獨特的光譜特徵波段(350 ± 20 nm、 400 ± 20 nm、 450 ± 20 nm、 500 ± 20 nm)，來描述激發螢光的光譜特徵，且透過分析螢光之強度，可得到待測物之相對濃度。

彙整 4 個 Dye-LIF 鑽探點位之垂直剖面螢光訊號值於圖 5.21，**L04** 於深度 **8.5~9.0 m** 與 **9.5~10.0 m** 處發現高強度螢光訊號波峰，因場址表面清洗區地表下 9~10 m 處有一層黏土層，可能造成 TCE NAPL 殘留相蓄積。**L10** 於深度 7.5~10.0 m 處有微弱螢光訊號，無任何波峰型態出現，與 **M10** 於深度 3.5~5.0 m 與 8.0~10.0 m 處有高強度 XSD 訊號波峰有極大差異，顯示此點位 MIP 探測結果之溶解相污染分布與 Dye-LIF 探測結果呈現之 NAPL 殘留相分布並不一致。規劃 **L09** 點位發生湧砂現象，因此替換 **L10** 點位執行 Dye-LIF 探測作業，染料噴注 3 小時後重複測試結果一致性頗高，發現 **L10** 深度 3.0~3.5 m 與 7.5~10.0 m 處有微弱螢光訊號，波峰型態極不明顯。**L11** 之 Dye-LIF 探測結果發現數處明顯螢光訊號波峰，於深度 **3.0~5.0 m** 與 **7.0~7.5 m** 處有中強度螢光訊號波峰，**8.5~9.0 m** 處有極高強度螢光訊號波峰，**9.0~9.5 m** 處有中高強度螢光訊號波峰。**L11** 點位緊鄰三氯乙烯運作機台，依 MIP 電導度調查結果，**M11** 深度有多處 EC 訊號值偏高具粉黏土層質地特徵，因此 TCE 洩漏後恐造成多處深度 TCE NAPL 殘留相蓄積。

Dye-LIF 探測重複測試結果，顯示 **L10** 之 Dye-LIF 探測螢光訊號再現性佳。模場試驗場址二之高污染潛勢點位以 **L04** 與 **L11** 為主，皆發現 TCE NAPL 殘留相蓄積的徵兆，後續以土壤染料搖晃試驗進行現場確認，並進行土壤採樣送認證實驗室分析進一步驗證 Dye-LIF 探測結果之正確性。此外，**L09** 因湧砂現象無法完成 Dye-LIF 探測作業，但此處亦為高污染潛勢點位，且具粉黏土層質地特徵，亦可能造成 TCE NAPL 殘留相蓄積。



5.2.4 場址二土壤染料搖晃試驗與 VOCs 分析結果

依據 Dye-LIF 剖面探測結果，選擇具高強度螢光訊號波峰之點位 L04 及 L11 進行土壤鑽探採樣，110 年 12 月 12 日進場執行模場試驗場址土壤採樣作業，利用 Geoprobe 鑽機以直接貫入法採集連續式深度土壤樣品至深度 10 m，遇湧砂情況，接續以活塞式採樣器採集 10~11 m 土壤樣品。並以 RAE 3000 手持式 VOC 氣體偵測器(搭載 10.6 eV 燈泡)進行土壤 PID 篩測，每段以 50 公分篩測 1 樣品為原則，快速瞭解採樣之土壤污染濃度。針對淺層土壤回收率不佳或污染潛勢較低的土壤樣品，降低 PID 篩測頻率至每 100 公分篩測 1 樣品；針對深層高污染潛勢的土壤樣品，提升 PID 篩測頻率至每 25 公分篩測 1 樣品。進行 PID 篩測的土壤段另取樣 5 g 土壤樣品，進行染料搖晃試驗，添加 8 mL 二段水，滴入 2 滴蘇丹紅油性染料，搖晃 30 秒後靜置 1 分鐘觀察呈色結果。點位 L04 及 L11 各進行 23 組搖晃試驗樣品，其呈色結果如圖 5.22 所示。

點位 L04 搖晃試驗結果僅 4-17 樣品呈色，比對 PID 篩測數據為 15,000 ppmV，PID 篩測值較高的樣品深度介於 8.75 m 與 9.25 m 之間，其他深度樣品之 PID 篩測值皆小於 500 ppmV，如表 5-9 所示。點位 L11 搖晃試驗結果有 11-4、11-5、11-6、11-9 樣品呈色，比對 PID 篩測數據分別為 15,000 ppmV、15,000 ppmV、3,313 ppmV、15,000 ppmV，PID 篩測值較高的樣品深度有 3.0~7.0 m 與 7.5~8.75 m 兩段樣品，其他深度樣品之 PID 篩測值皆小於 500 ppmV，如表 5-10 所示。

Dye-LIF 探測結果比對染料搖晃試驗結果與土壤 PID 篩測結果，大致上呈現一致性的結果，共通性認定點位 **L04 污染深度為 8.75~9.0 m**，共通性認定點位 **L11 污染深度為 3.0~5.0 m**。依據 Dye-LIF 探測高螢光訊號深度，參考土壤 PID 篩測數據與染料搖晃試驗結果，點位 L04 選擇深度 8.75~9.0 m 與 9.5~9.75 m 樣品，點位 L11 選擇深度 3.5~4.0 m、4.5~5.0 m、6.5~7.0 m 與 8.5~8.75 m 樣品，送認證實驗室分析土壤 VOCs 濃度。土壤 VOCs 實驗室分析結果、Dye-LIF 螢光強度、PID 篩測數據與染料搖晃試驗結果比對，彙整於表 5-11，6 個送樣土壤樣品有 4 個樣品土壤 TCE 濃度大於 1,000 mg/Kg，其他 2 個樣品土壤 TCE 濃度亦大於土壤污染管制標準 60 mg/Kg。此外，土壤樣品亦測得 cis-1,2-DCE 濃度，推測為 TCE 生物降解的中間產物。



第五章結果與討論



圖 5.22 場址二模場試驗區 L04 與 L11 染料搖晃試驗呈色結果



染色輔助雷射激發螢光技術應用於含氯有機物污染調查之研究

表 5.9 場址二模場試驗區 L04 染料搖晃試驗結果與 PID 篩測結果比對

L04 點位 dye-LIF 探測垂直剖面	樣品深度 (公尺)	PID 篩測 (ppm V)	搖晃試驗 呈色結果
L04 Site: Y Coord. (Lat-N) / System: Final depth: 11.02 m Client / Job: X Coord. (Long-E) / Fix: Max signal: 6.1 %RE @ 8.74 m Operator / Unit: Elevation: Date & Time: 2021-12-05 14:04 C / UVOST1014 Unavailable UVOST By Dakota www.DakotaElectronics.com	0.0-1.0	0.9	X
	1.5-2.0	8.4	X
	2.5-3.0	42.4	X
	3.0-3.5	126.1	X
	4.5-5.0	329.7	X
	5.0-5.5	151.3	X
	5.5-6.0	72.7	X
	6.0-6.5	56.0	X
	6.5-7.0	279.9	X
	7.0-7.25	45.3	X
	7.25-7.5	106.9	X
	7.5-7.75	116.0	X
	7.75-8.0	80.8	X
	8.0-8.25	69.8	X
	8.25-8.5	365.0	X
	8.5-8.75	144.9	X
	8.75-9.0	15000	V
	9.0-9.25	999.6	X
	9.25-9.5	157.4	X
	9.5-9.75	103.1	X
	9.75-10.0	19.4	X
	10.0-10.5	41.4	X
	10.5-11.0	38.2	X



第五章結果與討論

表 5.10 場址二模場試驗區 L11 染料搖晃試驗結果與 PID 篩測結果比對

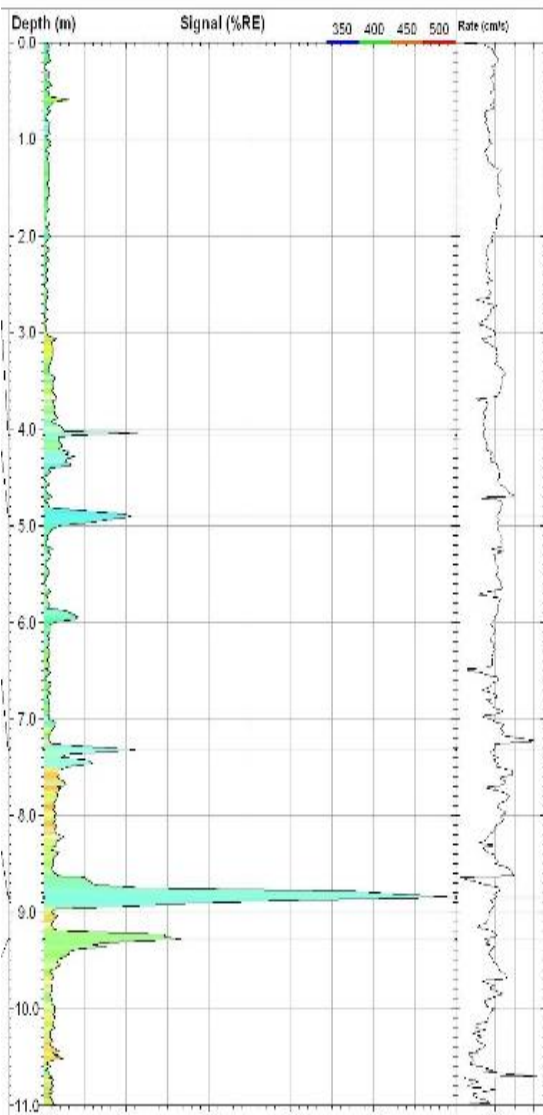
L11 點位 dye-LIF 探測垂直剖面		樣品深度 (公尺)	PID 篩測 (ppm V)	搖晃試驗 呈色結果																					
 <table><tr><td colspan="2">L11</td><td>UVOST By Dakota www.dakota-technology.com</td></tr><tr><td>Site:</td><td>Y Coord (Lat-N) / System:</td><td>Final depth:</td></tr><tr><td></td><td>Unavailable / NA</td><td>11.70 m</td></tr><tr><td>Client / Job:</td><td>X Coord (Long-E) / Fix:</td><td>Max signal:</td></tr><tr><td></td><td>Unavailable / NA</td><td>9.9 %RE @ 8.84 m</td></tr><tr><td>Operator / Unit:</td><td>Elevation:</td><td>Date & Time:</td></tr><tr><td>/ UVOST1014</td><td>Unavailable</td><td>2021-12-05 19:22 C</td></tr></table>		L11		UVOST By Dakota www.dakota-technology.com	Site:	Y Coord (Lat-N) / System:	Final depth:		Unavailable / NA	11.70 m	Client / Job:	X Coord (Long-E) / Fix:	Max signal:		Unavailable / NA	9.9 %RE @ 8.84 m	Operator / Unit:	Elevation:	Date & Time:	/ UVOST1014	Unavailable	2021-12-05 19:22 C	0.0-0.5	1.6	X
		L11		UVOST By Dakota www.dakota-technology.com																					
		Site:	Y Coord (Lat-N) / System:	Final depth:																					
			Unavailable / NA	11.70 m																					
		Client / Job:	X Coord (Long-E) / Fix:	Max signal:																					
			Unavailable / NA	9.9 %RE @ 8.84 m																					
		Operator / Unit:	Elevation:	Date & Time:																					
		/ UVOST1014	Unavailable	2021-12-05 19:22 C																					
		1.5-2.0	4.8	X																					
		2.0-3.0	191.3	X																					
		3.0-3.5	15000	V																					
		3.5-4.0	15000	V																					
		4.5-5.0	3313	V																					
		5.0-5.5	2463	X																					
		5.5-6.0	15000	X																					
		6.5-7.0	15000	V																					
		7.0-7.25	229.2	X																					
7.25-7.5	307.0	X																							
7.5-7.75	1203	X																							
7.75-8.0	1650	X																							
8.0-8.25	15000	X																							
8.25-8.5	15000	X																							
8.5-8.75	15000	X																							
8.75-9.0	232.8	X																							
9.0-9.25	136.2	X																							
9.25-9.5	127.6	X																							
9.5-9.75	181.7	X																							
9.75-10.0	125.3	X																							
10.0-10.5	107.1	X																							
10.5-11.0	17.6	X																							



表 5.11 場址二模場試驗區送樣土壤 VOC 分析結果與 Dye-LIF 螢光強度、PID 篩測數據、染料搖晃試驗結果比對

採樣點位	樣品深度 (m)	土壤 TCE (mg/Kg)	Cis-1,2-DCE (mg/Kg)	Dye-LIF 螢光強度(%RE)	PID 篩測 (ppm V)	搖晃試驗呈色
L04	8.75~9.0	1,100	7.88	5.6	15,000	V
	9.5~9.75	75.7	1.26	5.9	103.1	X
L11	3.5~4.0	6,370	12.8	0.75	15,000	V
	4.5~5.0	2,670	5.28	2.12	3,313	V
	6.5~7.0	139	ND	2.22	15,000	V
	8.5~8.75	1,020	27.3	9.86	15,000	X

5.3 試驗成果評析

因場址進場問題干擾，依計畫規劃之現場污染調查項目分別於 2 處模場試驗場址執行完成，場址一僅執行地球物理探測作業，場址二執行 MIP 探測作業、Dye-LIF 探測作業、土壤染料搖晃試驗、土壤 PID 篩測及土壤 VOCs 檢測分析。各場址試驗成果評析說明於後。

5.3.1 場址一試驗成果評析

場址一僅執行地球物理探測作業，地電阻調查主要針對污染熱區監測井 GW20-2 周遭佈線，測線 E1 土壤污染調查歷史測值深度 3.0~3.5 m 處 TCE 28 mg/kg、cis-1,2-DCE 21.5 mg/kg，監測井 GW20-2 地下水含氯有機物濃度 TCE 19.0 mg/L、cis-1,2-DCE 146 mg/L、trans-1,2-DCE 1.29 mg/L、1,1-DCE 0.31 mg/L、VC 0.86 mg/L。地電阻測線 E1 長度 27 公尺，最深可探至地表下約 5 公尺，地電阻影像剖面發現測線範圍內地層皆有 2 處電阻率異常區域，電阻率皆明顯偏高，甚至高於 200 Ohm-m，尤其以異常區 1(測線水平距離約 0~8 公尺；地表下垂直深度約 0~4 公尺)特別明顯，如圖 5.14 所示。監測井 GW20-2 位於異常區 1 範圍內，電阻率偏高訊號由地表延伸至深度 2.5 m 處，疑似地表污染源洩漏的徵兆，地球物理探測作業已協助鎖定污染源洩漏的相



對位置，後續針對此區域進行 MIP 探測及 Dye-LIF 探測，或可發現 TCE NAPL 殘存的位置。然因場址負責人臨時變掛不同意進場執行下階段模場試驗，以致無法完成 Dye-LIF 技術應用案例之成果展示。

5.3.2 場址二試驗成果評析

延續場址一未能完成的含氯有機物洩漏源的污染調查作業，場址二模場試驗執行 MIP 探測作業、Dye-LIF 探測作業、土壤染料搖晃試驗、土壤 PID 篩測及土壤 VOCs 檢測分析。場址二高污染潛勢區為表面清洗區，此區範圍內監測井 CGW06~CGW10 分別皆檢出順-1,2-二氯乙烯、三氯乙烯超出地下水污染管制標準，其中以監測井 CGW09 地下水含氯有機物濃度最高：TCE 642 mg/L、cis-1,2-DCE 23 mg/L、DCM 27.5 mg/L。表面清洗區地表下 9~10m 處有一層黏土層，而中間多為砂土或是砂土夾砂之質地，因此 MIP 探測作業及 Dye-LIF 探測作業以深度 11 m 為限。

11 點次 MIP 探測結果以 M04、M08、M09、M10、M11 點位淺層 EC 訊號較強，反應場址地表下 1~3 m 具黏土層質地特徵，如圖 5.16 所示。因黏土層質地提供 TCE NAPL 傳輸路徑上滯留的環境，M04、M08、M09、M10、M11 點位淺層深度 4~5 m 處出現 XSD 訊號波峰，其中 M09、M10、M11 點位 XSD 訊號波峰隨 MIP 探測深度陸續出現至深度 10 m，M04 點位則另於深層深度 9~10 m 處出現 XSD 訊號超強波峰，如圖 5.17 所示。3D 場址污染概念模型反應場址溶解性污染物分布深度大致介於 4~5 m、7~8 m 與 9~10 m，尤其以 M10 及 M11 點位之污染較為嚴重，如圖 5.18 所示。

選擇以 XSD 訊號較強的 M04、M09、M10、M11 點位執行 Dye-LIF 探測作業，L09 點位因發生湧砂現象無法完成染液噴注作業，因此遇地質湧砂情況將限制 Dye-LIF 探測作業施作。染料噴注 3 小時後，於 L10 點位重複執行 Dye-LIF 探測作業，顯示 Dye-LIF 探測螢光訊號再現性高，且染料噴注效果持續性佳，如圖 5.21 所示。L10 點位 Dye-LIF 探測結果發現深度 3.0~3.5 m 與 7.5~10.0 m 處有微弱螢光訊號，波峰型態極不明顯；與 M10 點位 MIP 探測結果發現深度 3.5~5.0 m 與 8.0~10.0 m 處有高強度 XSD 訊號波峰有極大差異，顯示此點位 MIP 探測結果之溶解相污染分布與 Dye-LIF 探測結果呈現之 NAPL 殘留相分布並不一致。L04 點位 Dye-LIF 探測結果發現深度 8.5~9.0 m 與 9.5~10.0 m 處有高強度螢光訊號波峰，因場址表面清洗區地表



染色輔助雷射激發螢光技術應用於含氯有機物污染調查之研究

下 9~10 m 處有一層黏土層，可能造成 TCE NAPL 殘留相蓄積。L11 點位 Dye-LIF 探測結果發現數處明顯螢光訊號波峰，深度 3.0~5.0 m 與 7.0~7.5 m 處有中強度螢光訊號波峰，8.5~9.0 m 處有極高強度螢光訊號波峰，9.0~9.5 m 處有中高強度螢光訊號波峰。L11 點位緊鄰三氯乙烯運作機台，與 M11 點位 MIP 探測結果一致性高，依 MIP 電導度調查有多處深度 EC 訊號值偏高具粉黏土層質地特徵，因此 TCE 洩漏後恐造成多處深度 TCE NAPL 殘留相蓄積。模場試驗場址二之高污染潛勢點位以 L04 與 L11 為主，皆發現 TCE NAPL 殘留相蓄積的徵兆，模場試驗成功展示 Dye-LIF 探測結果應用之可行性。

L04 與 L11 點位 Dye-LIF 探測結果皆發現 TCE NAPL 殘留相蓄積的徵兆，以土壤染料搖晃試驗進行現場確認，且進行土壤採樣送認證實驗室分析進一步驗證 Dye-LIF 探測結果之正確性。L04 點位土壤鑽探連續取樣 23 組土壤樣品，PID 篩測值較高的樣品深度介於 8.75 m 與 9.25 m 之間，其 PID 篩測數據為 15,000 ppmV，其他深度樣品之 PID 篩測值皆小於 500 ppmV，如表 5.9 所示。23 組土壤樣品皆進行染料搖晃試驗，僅 1 組有呈色反應(圖 5.22)，比對樣品深度為 8.75 ~9.25 m，與 PID 篩測數據有一致的判定結果。該樣品實驗室分析土壤 TCE 濃度 1,100 mg/kg，確認 L04 點位深度 8.75 ~9.25 m 處有 TCE NAPL 殘留相蓄積。

L11 點位土壤鑽探連續取樣 23 組土壤樣品，PID 篩測值大於 3,000 ppmV 有 8 組，其中染料搖晃試驗有呈色反應僅有 4 組土壤樣品，如表 5.10 所示。染料搖晃試驗呈色結果與 PID 篩測數據有一致性的土壤樣品深度為 3.0~5.0 m 與 6.5~7.0 m，其中深度 3.0~5.0 m 土壤樣品之實驗室分析 TCE 濃度為 6,370 mg/kg 與 2,670 mg/kg，確認 L11 點位深度 3.0 ~5.0 m 處有 TCE NAPL 殘留相蓄積。此外，L11 點位深度 8.5~8.75 m 有 Dye-LIF 高強度螢光訊號波峰，其土壤樣品之實驗室分析 TCE 濃度為 1,020 mg/kg，亦確認為潛在 TCE NAPL 殘留相蓄積處。

場址二污染熱區 TCE 污染傳輸情境，推測表面清洗區機台滴落的 TCE 藉由地表鋪面或水溝裂縫向下滲漏，遇淺層黏土層質地開始形成殘留相蓄積，如同 L11 點位深度 3.0 ~5.0 m 處。TCE 傳輸至中間層遇砂土或粉土夾砂質地，循著可移動路徑向下傳輸，抵達地下水後，TCE 溶解相污染團順沿地下



第五章結果與討論

水方向移動，如同 M08 與 M10 點位 MIP 探測 XSD 訊號分布。而 TCE 純相則受重力作用持續向下移動，直至碰觸污染熱區下方約 10 m 處不易透水之粉黏土緻密地層，形成殘留相蓄積，如同 L11 點位深度 8.5 ~8.75 m 處；或順沿粉黏土地層橫向移動至窪處蓄積。如同 L04 點位深度 8.75 ~9.25 m 處。



第六章結論與建議

6.1 結論

本計畫團隊順利完成本土化染色輔助雷射激發螢光技術之開發，並於模場試驗場址二展現三氯乙烯洩漏源調查之應用案例，獲致 Dye-LIF 探測剖面資料與現場土壤染料搖晃試驗結果比對，並進一步以土壤採樣分析 VOCs 濃度進行驗證。依據 MIP 探測剖面資料、Dye-LIF 探測剖面資料、土壤鑽探連續採樣 PID 篩測結果、現場土壤染料搖晃試驗結果、土壤 VOCs 濃度分析數據綜合分析，推估模場試驗區域範圍 TCE 污染洩漏情境。以下針對實驗室試驗成果，與現地探測模場試驗應用調查技術的重要發現，分別彙整說明於後。

1. 實驗室染料試驗蒐集 50 餘種化工染料與食品級染料，僅紡織紅染料、茉莉花丙二醇液、鳳梨丙二醇液、蜂蜜丙二醇液、薑黃粉可順利將 TCE NAPL 染色。其中紡織紅染料除外之 4 種食品級染料可有效提升土壤中 TCE NAPL 之辨識度，LIF 螢光強度增幅可達 3~5 倍。參照染料試驗結果，以 20% 蜂蜜丙二醇液與 10% 薑黃液做為基底，添加食用調和油、紅色油性染料、甘油、水等原料調製染劑調和配方，應用於模場試驗 Dye-LIF 探測作業。
2. Dye-LIF 探測技術 SOP 作業程序：(1) 調製現場噴注用染液，並計算單一鑽孔之染液噴注量；(2) 噴注管線須先以鑽機循鑽孔垂直設置，直抵鑽孔底部；(3) 利用蠕動幫浦以 1.5 L/m 噴注染液，由鑽孔底部緩慢上提噴注管線至地表，使鑽孔充滿染液；(4) 隨即執行 LIF 探測分析作業；(5) 依進尺深度建立螢光訊號剖面資訊。
3. 現地探測模場試驗 11 個 MIP 鑽探點位之電導度垂直剖面發現，模場試驗區域西南側地表下 1 至 3 公尺有一層黏土層質地特徵，僅西南側範圍內 6 個 MIP 鑽探點位有 XSD 訊號，MIP 探測係針對溶解相污染物，其污染深度大致介於 4 至 5 公尺與 9 至 10 公尺，尤其以 M10 及 M11 點位之污染物訊號特別強。
4. 現地探測模場試驗 Dye-LIF 探測重複測試結果，顯示 L10 之 Dye-LIF 探測螢光訊號再現性佳。LIF 探測係針對純相污染物，Dye-LIF 探測垂直剖面僅 L04 與 L11 有螢光訊號，L04 高強度螢光波峰出現於深度



8.5~9.0 m 與 9.5~10.0 m 處，反應 TCE NAPL 殘留相蓄積的徵兆。L11 有數處明顯螢光訊號波峰出現於深度 3.0~5.0 m、7.0~7.5 m、8.5~9.0 m 及 9.0~9.5 m 處，亦反應 TCE NAPL 殘留相蓄積的徵兆。

5. 點位 L04 搖晃試驗結果僅深度 8.75~9.25 m 樣品有呈色反應，比對土壤 PID 篩測數據為 15,000 ppmV，比對 Dye-LIF 探測結果大體上具一致性，共通性認定污染深度為 8.75~9.0 m。該樣品實驗室分析土壤 TCE 濃度 1,100 mg/kg，確認 L04 點位深度 8.75~9.25 m 處有 TCE NAPL 殘留相蓄積。
6. 點位 L11 搖晃試驗結果有深度 3.5~4.0 m、4.0~5.0 m、6.5~7.0 m、8.5~8.75 m 等 4 個樣品具呈色反應，比對 PID 篩測數據分別為 15,000 ppmV、15,000 ppmV、3,313 ppmV、15,000 ppmV，比對 Dye-LIF 探測結果大致相符，共通性認定污染深度為 3.0~5.0 m。點位 L11 深度 3.0~5.0 m 土壤樣品之實驗室分析 TCE 濃度為 6,370 mg/kg 與 2,670 mg/kg。此外，深度 8.5~8.75 m 土壤樣品亦測得 TCE 濃度 1,020 mg/kg，確認 L11 點位深度 3.0~5.0 m 與 8.5~8.75 m 處有 TCE NAPL 殘留相蓄積。
7. 模場試驗場址污染熱區 TCE 污染傳輸情境，推測表面清洗區機台滴落的 TCE 藉由地表鋪面或水溝裂縫向下滲漏，遇淺層黏土層質地開始形成殘留相蓄積，如同 L11 點位深度 3.0~5.0 m 處。TCE 純相則受重力作用持續向下移動，直至碰觸污染熱區下方粉黏土緻密地層，形成殘留相蓄積，如同 L11 點位深度 8.5~8.75 m 處；或順沿粉黏土地層橫向移動至窪處蓄積。如同 L04 點位深度 8.75~9.25 m 處。

6.2 建議

1. 執行模場試驗場址 Dye-LIF 探測作業，因部分地質構造發生湧砂現象，以致無法完成染液噴注作業，限制 Dye-LIF 探測技術之應用。下年度可改良噴注設備效能，以克服類似地層湧砂的問題。
2. 本年度模場試驗成果已展示 Dye-LIF 探測技術應用於三氯乙烯洩漏場址之示範案例，並順利發現模場試驗區域內三氯乙烯洩漏源的點位，及標示洩漏傳輸途徑上三氯乙烯殘餘相分布位置與深度。下年度可尋覓其它含氯有機物洩漏場址(如四氯乙烯、氯苯等)，進行 Dye-LIF 探測技術模場試驗，進一步拓展 Dye-LIF 探測技術應用之污染物類別。



第七章 參考文獻

1. Dakota Technologies. 2021. <http://www.dakotatechnologies.com/>.
2. Estracanhalli, E.S., Nicolodelli, G., Pratavieira, S., Kurachi, C., Bagnato, V.S. “Mathematical Methods to Analyze Spectroscopic Data – New Applications”, Advanced Aspects of Spectroscopy, Chapter 17, 2012.
3. Germain, R. St. 2008, New Generation Optical Sensors for Characterizing NAPL Source Zones, Dakota Technologies.
4. Germain, R. St., Einarson, M., A. Fure, and S. Chapman. 2014, Field Testing of the Dye-LIF™ High-Resolution Chlorinated DNAPLs Logging System. Ninth International Conference on Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds.
5. 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.
6. Horst, J., N. Welty, R. Stuetzle, R. Wenzel and R. St. Germain. 2018. Fluorescent Dyes: A New Weapon for Conquering DNAPLs Characterization. Groundwater Monitoring and Remediation 38, no. 1: 19– 25.
7. ITRC (Interstate Technology & Regulatory Council). 2015. Integrated DNAPLs Site Characterization and Tools Selection (ISC-1) . Washington, D.C.: Interstate Technology & Regulatory Council, DNAPLs Site Characterization Team. http://www.itrcweb.org/DNAPLs-ISC_toolsselection
8. Kram, M.L., A.A. Keller, J. Rossabi and L.G. Everett. 2001. DNAPLs Characterization Methods and Approaches, Part 1: Performance Comparisons, Groundwater Monitoring and Remediation, 2001 Fall: 109-123.
9. Palmer, C.J., Johnson, R.L. 1989, Physical Processes Controlling the Transport of Non-aqueous Phase Liquids in the Subsurface. Seminar Publication: Transport and Fate of contaminants in the Subsurface. EPA/625/4-89/019 23-28. United States Environmental Protection Agency. USA.
10. Travis Martin, Germain, R. St, “Direct Push Site Characterization of NAPL with Laser-Induced Fluorescence (LIF) ”, LIF Workshop, 2008.



11. U.S. DOD, 1997, ESTCP Cost and Performance Report: POL Sensor Validation of SCAPS.
12. U.S. EPA, 1997, The Site Characterization and Analysis Penetrometer System (SCAPS) Laser-Induced Fluorescence (LIF) Sensor and Support System. USEPA Office of Research and Development, EPA/600/R-97/019.
13. U.S. EPA, 1997, The Rapid Optical Screening Tool (ROST) Laser-Induced Fluorescence (LIF) System for Screening of Petroleum Hydrocarbons in Subsurface Soils, USEPA Office of Research and Development, EPA/600/R-97/020.
14. U.S. EPA, 1999, Laser Fluorescence EEM Probe for Cone Penetrometer Pollution Analysis, USEPA Office of Research and Development, EPA/600/R-99/041.
15. U.S. EPA, 2004, Site Characterization Technologies for DNAPL Investigations, EPA 542-R-04-017.
16. 中央研究院總務組，「輻射作業意外事故處理程序-雷射安全」，中央研究院原子分子科學研究所安全委員會，2010。
17. 行政院環境保護署土壤及地下水污染整治網，<http://sgw.epa.gov.tw/public/index.asp>。
18. 行政院環境保護署，「101 年土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」：以雷射激發螢光系統建立國內油品特性光譜及風化效應影響之研究，期末報告，2012。
19. 行政院環境保護署，「102 年土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」：運用紫外光學雷射誘發螢光系統於石化場址進行漏源追溯與組成特徵辨識，期末報告，2013。
20. 行政院環境保護署，運作中工廠土壤及地下水含氯有機溶劑污染潛勢調查及查證計畫(第 5 期)期末報告，EPA-102-GA12-03-A124，2014。
21. 行政院環境保護署，「107 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」：雷射激發螢光技術應用於油品污染鑑識之研究，期末報告，2018。
22. 楊國輝，黃宏彥，「雷射原理與量測概論」，五南圖書，2006。
23. 賴宜欣，「雷射誘發螢光 (Laser Induced Fluorescence, LIF) 技術應用於石油碳氫化合物污染場址調查介紹」，經濟部工業局環境技術 e 報，第 34 期，2006。



24. 謝嘉民，賴一凡，林永昌，枋志堯，「光激發螢光量測的原理、架構及應用」，奈米通訊，第十二卷第二期，2005。