



行政院環境保護署

109 年度土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案

含氯污染物高解析被動式採樣器 開發測試及現地應用評估

期末報告(定稿)

主 辦 單 位： 行政院環境保護署
專案執行單位：國立中興大學／環境工程學系
專案主持人：梁振儒 教授
專案執行期間：109 年 1 月 30 日起至
109 年 12 月 4 日止

中 華 民 國 109 年 12 月 印製





109 年度專案成果績效自評表

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

109 年度專案成果績效自評表

1. 專案基本資料

填表日期：109 年 12 月 28 日

專案性質	☒ 實驗性質 ☐ 非實驗性質	專案類別	☐ 研究型 ☒ 模場型
研究主題	☐ 整治 ☒ 調查 ☐ 其他		
申請機構系所	國立中興大學 環境工程學系	專案主持人	梁振儒
專案名稱	含氮污染物高解析被動式採樣器開發測試及現地應用評估		
專案執行期程	☐ 申請階段 ☐ 期中 ☒ 期末		

2. 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	0	0	0	100%	
	2.國外投稿 (篇數)	(1)期刊論文	1	1	1	100%	
		(2)研討會論文	1	0	0	0%	原計畫所列 之研討會論 文為國外發 表，受疫情影 響，暫無法前 往國外進行 研討會論文 發表，將改以 國內研討會 論文發表。
	3.報告 (篇數)	(1)技術報告					
		(2)研究報告					
	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					
B 人	6.研發改良 技術(項數)	(1)已開發技術					
		(2)技術平台					
	7.研發人員 (人數)	(1)碩士	2	2	5	100%	
		(2)博士					



含氣污染物高解析被動式採樣器開發測試及現地應用評估

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)
才 培 育	8.研究團隊 (個數)	(1)跨領域團隊					
		(2)跨機構團隊					
		(3)形成研究中心					
		(4)形成實驗室					
9.其他指標 (請自行命名)		(請自填)					

(二) 產業面

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)
項目							
A 智慧財產權	1.專利 (件數)	已核准	發明				
			新型/設計				
			合計				
		申請中	發明				
			新型/設計	1	0	0	100%
			合計				
B 研發技術轉移	2.先期技術 成果移轉	件數					
		授權金(仟元)					
		衍生利益金(仟元)					
	3.技術移轉 (專利)	件數					
		授權金(仟元)					
		衍生利益金(仟元)					
	4.技術移轉 (應用技術)	件數					
		授權金(仟元)					
		衍生利益金(仟元)					



109 年度專案成果績效自評表

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)
	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)
項目							
A 服務 便民	1.技術服務	次數					
		收入(仟元)					
	2.諮詢服務	次數					
		收入(仟元)					
B 支 援 合 作	3.協助政府制定 (件數)	(1)政策					
		(2)法規					
		(3)規範					
		(4)標準					
D 社 會 效 益	4.獲得認證(件數)						
	5.獲得獎項(件數)						
	6.提升能源效率(%)						
	7.節能減碳效率(%)						
8.其他指標 (請自行命名)		(請自填)					



含氯污染物高解析被動式採樣器開發測試及現地應用評估

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

本計畫將開發可同時適用於未飽和含水層氣體及飽和含水層地下水採樣之含氯污染物高解析被動式採樣器並進行現地應用驗證，有助於定位 DNAPL 污染源及地下水污染團之分佈。高解析被動式採樣器可用於廣泛監測調查，於現有之監測井下進行，無須另耗費大量成本進行污染監測，不擾動污染狀態下取得數據；並可作為大規模的調查與污染長期追蹤，掌握污染物可能之暴露途徑與現地場址污染物之分佈情況，達到早期預防並掌握污染潛勢以及確立污染範圍劃定管制區；對於需進行處理之列管控制場址或列管整治場址，可作為整治技術可行性評估之依據。此外，經由高密度三維空間污染濃度調查，可反映真實地表下污染物特徵，逐步由濃度分佈趨勢推估污染物存在位置，達到高解析場址調查之目的；藉此建立明確之 CSM，有助於產業界對污染情形之掌握，進而選用合適之整治處理技術，降低整治費用成本，更有利後續整治工作之進行。開發被動式採樣器應用於實際之現地整治，可有效訓練參與研究之同學之工程設計規劃與實務能力，培育土水污染整治調查之人才，將成果融入大學及研究所教學，以擴大研究效益。



審查意見回覆對照表

行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☒申請計畫書 ☐期中報告
☐修正計畫書 ☐期末報告

審查意見回覆對照表

計畫年度	109 年度	計畫類型	☐ 研究型 ☒ 模場型
計畫類別	☒ 調查 ☐ 整治 ☐ 其他	主持人：梁振儒 NO：	
計畫名稱	含氯污染物高解析被動式採樣器開發測試及現地應用評估		
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員一 1. 主持人與計畫執行團隊 (1)主持人的學術研究能力與技術發展能力均佳，其專業能力足以勝任本專案計畫。 (2)主持人近五年的研究成效與(或)土水污染技術發展績效佳。 (3)主持人與計畫執行團隊的學術研究能力與(或)土水污染技術發展能力佳，其專業能力足以勝任本計畫。 2. 送審的專案計畫價值、意義與專案計畫的可行性 (1) 本專案對未來土壤及地下水污染調查及整治等相關工作之推動具有貢獻。 (2) 由計畫申請書內的成果績效自評表可推知，本專案所預估的成果與績效對土水污染整治具有貢獻，但確切的成果仍有待於未來的執行成果中加以詳細說明。 (3) 本專案計畫書撰寫具體，所研擬的研究方法(流程)可行。研究成果於未來實場的實際可能應用性則未具體說明(確切的應用性有待執行成果中加以明確說明)。 (4) 本專案計畫書中對相關文獻蒐集與整理尚完整。主持人對國內外本研究領域的發展現況了解。 (5) 本專案計畫的執行期限合理，計畫書中對執行的預期成果也已說明。 (6)本專案計畫屬延續性計畫第一年度。		委員一： 1. 感謝委員對於主持人與計畫執行團隊肯定 2. 感謝委員意見，本計畫之確切的成果及應用性，將於未來的執行過程所獲得之成效中加以詳細說明，並於第二年度實場計畫更具體加以修正調整。此外，感謝委員所提出對於此計畫之價值、意義與專案計畫的可行性之肯定。	



含氯污染物高解析被動式採樣器開發測試及現地應用評估

委員二 1. 計畫書內容已詳列研究案工作項目，模場測試使用場址執行期程及相關細部資訊，具體、可行。 2. 研究團隊尚有一位專任助理待聘，建議計畫獲核定後儘速聘任合適人員，以利後續工作推展。 3. 本項研究擬使用之二處含氯有機污染場址作為模場測試場所，建議補充場址管理單位同意文件。 4. 本計畫擬開發高解析度被動式採樣器，若可達預期目標，將可提升場址監測技術水平，並增加監測準確性降低監測成本。	委員二： 1. 感謝委員肯定。 2. 感謝委員提醒與支持，專案助理之聘任會立即進行。 3. 謹遵委員意見辦理，已於計畫書修正稿附件一補上場址管理單位同意文件及地方主管機關環保局相關公文之回覆。 4. 感謝委員肯定。
委員三 1. 兩年研究目的明確，場址條件掌握度佳。 2. 第一年(實驗室/開發備動採樣器)研究方法掌握採樣器影響性能參數明確，設計概念亦明確惟性能評估程序，只標未具體說明。 3. 第二年(現場實驗)研究方法尚屬完整，惟對所獲數據如何評析採樣器性能，未有具體說明。 4. 編列專任助理(第一年)於實驗室開發階段需求性待釐清。	委員三： 1. 感謝委員。 2. 關於委員關切之採樣器性能評估，將依據第一年四項研究目標逐步執行，所設計及製造之採樣器經各項試驗操作參數(例如：品管、採樣平衡時間等)確認後，將於目標四實場驗證中，將此計畫之採樣器與現行廣泛採用之主動及被動採樣方式進行比較，作為性能評估之依據。 3. 待第一年之成果確認後，第二年將於實場進行大規模採樣驗證，相關性能將與現行之採樣方法進行同步採樣，並將數據進行交互評析，予以確認採樣器之性能。 4. 環保署土壤及地下水污染整治基金管理會規定，模場型專案於核定後半年內須進行實場試驗，因此於本計畫第一年即編列專任助理協助執行。
委員四 1. 計畫書詳實完整。 2. 第二年應朝技術商品化努力。	委員四： 1. 感謝委員肯定。 2. 感謝委員建議，此採樣器將會進行專利之申請，亦將於第二年朝技術商品化努力。
委員五 已就委員初審意見回復說明，無進一步意見。	委員五： 感謝委員肯定。



審查意見回覆對照表

委員六 1. 缺少模場同意函、場址基本資料確核表、污染防治衛生安全措施，請補充於修正稿。 2. 未分別第一、二年經費資料。 3. 人事費請以 11 個月編列。 4. (五)雜項費用-報告書印刷建議編列以 12,000 元為限。	委員六： 1. 謹遵委員意見辦理，已於計畫書修正稿附件一補上場址管理單位同意文件(包含模場同意函、場址基本資料確核表等資料)及地方主管機關環保局相關公文之回覆附；附件二為污染防治衛生安全措施。 2. 經費編列已依據核定之金額進行調整，感謝委員提醒。 3. 謹遵辦理，人事費已修正為 11 個月 4. 謹遵辦理，雜項費用-報告書印刷已修正為 12,000 元，感謝委員提醒。
---	--



含氣污染物高解析被動式採樣器開發測試及現地應用評估



審查意見回覆對照表

行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☐申請計畫書 ☐期中報告
☒修正計畫書 ☐期末報告

審查意見回覆對照表

計畫年度	109 年度	計畫類型	☐ 研究型 ☒ 模場型
計畫類別	☒ 調查 ☐ 整治 ☐ 其他	主持人：梁振儒 NO：	
計畫名稱	含氮污染物高解析被動式採樣器開發測試及現地應用評估		
委員審查意見		計畫單位回覆	
1. 回復構想書委員五意見第 2 點格式請修正。 2 建議計畫主持人每月編列以 15,000 元為限。 3. 碳粉匣應列於雜項費用。		1. 已修正。 2. 已依據建議調整計畫主持人費。 3. 已修正。	



含氣污染物高解析被動式採樣器開發測試及現地應用評估



審查意見回覆對照表

行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

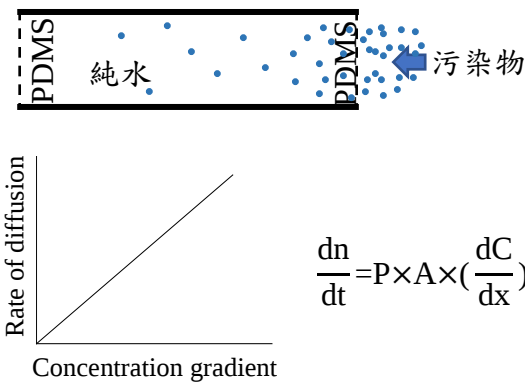
☐申請計畫書

☒期中報告

☐修正計畫書

☐期末報告

審查意見回復對照表

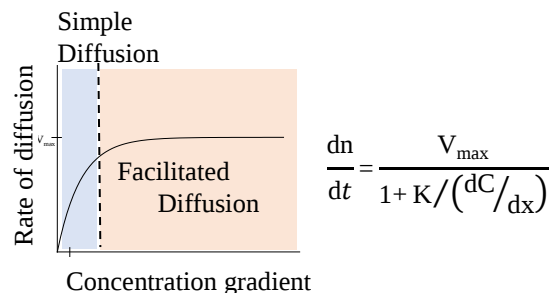
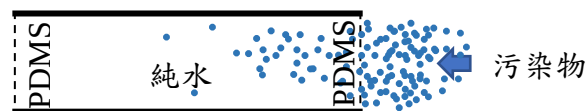
計畫年度	109 年度	計畫類型	☒ 研究型 ☐ 模場型
計畫類別	☐ 整治 ☒ 調查 ☐ 其它	主持人：梁振儒 NO：A8	
計畫名稱	含氯污染物高解析被動式採樣器開發測試及現地應用評估		
委員審查意見		計畫單位回覆	
委員一 1. 採樣器設計之基本概念(參數)宜具體說明。 2. 採樣器性能規範建議評析。		委員一 1. 本採樣器設計原理以費克定律 (Fick's Law)為基礎，污染物採樣時之擴散動力取決於濃度梯度(外界污染物濃度與採樣器內純水中之濃度差異)；污染物是藉由 PDMS 透析膜為傳輸媒介滲透至採樣器內部之純水，整體概念如下圖所示。若採樣器外界污染物之濃度未達透析膜吸附容量(Adsorption capacity)，污染物會遵循簡單擴散(Simple Diffusion)方式透過 PDMS 透析膜進行擴散至採樣器中之純水，其擴散速率隨濃度梯度增加而增加；若污染物之濃度超過 PDMS 之吸附容量，則會遵循促進擴散(Facilitated diffusion)之機制進行污染物擴散滲透入純水中，因受到分子對透析膜穿透速率的物理限制，此時擴散速率不隨濃度梯度增加而增加，依循透析膜之污染吸附濃度與內部純水間之濃度差異，將維持定值之擴散速率(Feher, 2017; Darnell et al., 1986)。 簡單擴散 (Simple Diffusion) 	



含氣污染物高解析被動式採樣器開發測試及現地應用評估

t = Time (seconds)
 P = Permeability constant for a particular molecule (cm/sec)
 A = Surface area of the PDMS membrane (cm²)
 C = Concentration of diffusing molecule (mol/cm³)
 X = Width of PDMS membrane (cm)

促進擴散 (Facilitated Diffusion)



n = Number of molecules inside sampler (mol)
 t = Time (seconds)
 V_{max} = Saturation constant (mol/cm³/sec)
 K = Constant determining speed of saturation (mol/cm⁴)
 C = Concentration of diffusing molecule (mol/cm³)
 X = Width of PDMS membrane (cm)

Reference:

Feher, J. J. (2017). *Quantitative human physiology: an introduction*. Academic press.
 Pederson, T. (1986). *Molecular cell biology*: By J. Darnell, H. Lodish, and D. Baltimore. New York: WH Freeman and Company.(1986).

2. 採樣器性能規範，針對適用條件、規格、平衡時間及操作流程等詳細列於附件一說明，感謝委員建議。

委員二

1. 原規劃至目前進度之工作項目原本就只有二項，目前僅就採樣器之設計，採樣之時間及濃度作試驗。
2. 採樣器係採用鐵氟龍之材質，係因其不易吸附污染物，並無考慮其他材質之可能性。
3. 未提供經費動支情形。
4. 目前尚難看出其人才培育情形。

委員二

1. 謝謝委員，本計畫依據核定之研究計畫書工作項目執行，進度截至期中皆已達成。
2. 鐵氟龍材質不易吸附污染物，若使用其他材質作為採樣器為主體，該材質可能吸附污染物進而使採樣分析之濃度高估。實驗室目前之研究結果顯示，在放置採樣器平衡污染物之組別與無放置採樣器之控制組；其背景污染物之濃度差異不大(變化<3%)。
3. 期中報告依書面報告書須知撰寫，經費動支部分乃於線上系統進行填寫。
4. 本計畫截至期中人才培育情形，以採樣器設計開發階段及採樣器性能條件測試為主；藉由經費補助一位兼任研究助理



審查意見回覆對照表

	及一位專任研究助理共同參與，亦同時有其他研究人員從旁協助，但未動支計畫相關費用。																														
委員三 1. P 附件 12-20 宜加強所開發採樣系統與標準方法之比對工作。 2. P 附件 12-28 宜列明實場應用之使用限制。 3. P 附件 12-30 平衡時間頗長，宜規劃降低與縮短平衡時間措施。 4. P 附件 12-32 PDMS 膜易阻塞，宜有改善措施。 5. P 附件 12-35、12-36 目前變異與不穩定性高，宜再改善。	委員三 1. 本計畫開發之被動式採樣系統與環檢所標準方法之監測井地下水揮發性有機物被動式擴散採樣袋採樣方法 (NIEA W108.50C) 比較如下表所示。 <table><tr><td></td><td>NIEA</td><td>土基會補助計</td></tr><tr><td>項目</td><td>W108.50C</td><td>畫開發之被動</td></tr><tr><td></td><td>被動式採樣袋</td><td>式採樣器</td></tr><tr><td>適用污染 物類型</td><td>VOCs</td><td>VOCs、無機溶質</td></tr><tr><td>監測井中 採樣區域</td><td>飽和含水層</td><td>飽和與未飽和 含水層</td></tr><tr><td>平衡時間</td><td>14 天</td><td>14 天</td></tr><tr><td>適用井口 尺寸</td><td>2 吋以上</td><td>1 吋以上</td></tr><tr><td>重複 使用性</td><td>不可重複使用</td><td>可重複使用</td></tr><tr><td>取樣方式</td><td colspan="2">達平衡時間後，直接將採樣袋表面清潔後開蓋，或破袋，將採樣袋中之水樣移至採樣瓶</td></tr><tr><td></td><td colspan="2">達平衡時間後，直接蓋上 PTFE 蓋，送至實驗室；分析時直接將分析取樣針穿刺透析膜取出水樣分析</td></tr></table> 2. 謝謝委員提議，關於被動式採樣器於實場應用相關規範，參照附件一之採樣器特性說明所示。 3. 經實驗結果可得知，三氯乙烯在中低濃度條件下，被動式採樣器之擴散平衡時間為 10 天；因此，為確保樣品採樣之準確性，方於計畫中建議以 14 天作為平衡時間之標準。此採樣器所需平衡時間與環檢所標準方法之監測井地下水揮發性有機物被動式擴散採樣袋採樣方法一致。 4. PDMS 對於非極性疏水化學物質之吸附，不會受到複雜的基質條件影響，適合作為污染物透析採樣程序使用(Annika Jahnke and Philipp Mayer, 2010)；另外，本研究之		NIEA	土基會補助計	項目	W108.50C	畫開發之被動		被動式採樣袋	式採樣器	適用污染 物類型	VOCs	VOCs、無機溶質	監測井中 採樣區域	飽和含水層	飽和與未飽和 含水層	平衡時間	14 天	14 天	適用井口 尺寸	2 吋以上	1 吋以上	重複 使用性	不可重複使用	可重複使用	取樣方式	達平衡時間後，直接將採樣袋表面清潔後開蓋，或破袋，將採樣袋中之水樣移至採樣瓶			達平衡時間後，直接蓋上 PTFE 蓋，送至實驗室；分析時直接將分析取樣針穿刺透析膜取出水樣分析	
	NIEA	土基會補助計																													
項目	W108.50C	畫開發之被動																													
	被動式採樣袋	式採樣器																													
適用污染 物類型	VOCs	VOCs、無機溶質																													
監測井中 採樣區域	飽和含水層	飽和與未飽和 含水層																													
平衡時間	14 天	14 天																													
適用井口 尺寸	2 吋以上	1 吋以上																													
重複 使用性	不可重複使用	可重複使用																													
取樣方式	達平衡時間後，直接將採樣袋表面清潔後開蓋，或破袋，將採樣袋中之水樣移至採樣瓶																														
	達平衡時間後，直接蓋上 PTFE 蓋，送至實驗室；分析時直接將分析取樣針穿刺透析膜取出水樣分析																														



含氯污染物高解析被動式採樣器開發測試及現地應用評估

被動式採樣器所使用之 PDMS 透析膜為消耗性項目，於每次採樣分析後即取出更換，因此在採樣過程中假如 14 天，較不易受阻塞影響。

Reference:

Jahnke, A., & Mayer, P. (2010). Do complex matrices modify the sorptive properties of polydimethylsiloxane (PDMS) for non-polar organic chemicals? Journal of Chromatography a, 1217(29), 4765-4770.

5. 本試驗以氣相層析質譜儀進行檢測分析三氯乙烯污染物，依環檢所公告之揮發性有機物檢測方法-氣相層析質譜法 (NIEA M711.04C) 規定，每一待測物的相對標準偏差須等於或小於 15%，但檢量線查核化合物之相對標準偏差則須等於或小於 30%；由本試驗結果顯示，平衡 14 天後之採樣檢測數值皆落於 $\pm 10\%$ 中，因此本被動式採樣器以 14 天作為平衡時間之檢測分析結果應具代表性及穩定性。

委員四

1. 期中報告書頁次，全本誤植以「附件 12-00 頁」編排，請修正。
2. 「附件 12-31 頁」預定進度查核表僅顯示規劃進度，未清楚說明或標示目前執行情形。
3. 「附件 12-22 頁」圖 1 字體過小，且圖 1-A 顯示採樣深度為 6~7m，但是該頁最末段文字敘述「疑似污染團……清洗區的下方 4~5 m 處及三氯乙烯暫存區下方 12 m 處」，請確認背景資料正確性。
4. 「附件 12-24 頁」圖 2 字體過小，完全無法辨識，請修正。
5. 章節 4.1 設計開發高解析被動式採樣器，目前於實驗室進行測試，未來於實地應用，請評估採樣器置入方式，若放置於監測井中，可能需再考慮井篩位置、設井濾料層薄壁效應及監測井並非密閉，衍生滯留水代表性問題；若直接埋設於地下，則需考慮設置及取樣

委員四

1. 感謝委員指正，將於期末報告修正。
2. 至期中進度已完成目標 1-1 採樣器設計開發及製造，目標 1-2 採樣時間及適用濃度範圍，其完成進度佔總進度之 50%；將於期末報告標示目標執行進度，謝謝委員。
3. 感謝委員指正，圖 1 將依委員建議於期末報告修正。背景資料提及之深度 0~13.5 m 是以薄膜介面探測器(MIP)進行探測，探測結果為污染團疑似位於早期表面清洗區 4~5 m 處及三氯乙烯暫存區下方 12 m 處；而圖 1-A 所顯示之採樣深度為監測井實際採樣之深度。
4. 謝謝委員，圖 2 將依委員建議於期末報告修正。
5. 被動式採樣器井中放置方式、操作流程、適用範圍及限制條件請參照附件一



審查意見回覆對照表

施工技術、傳導效率影響置放時間等因子。	說明；採樣器適用於 1 吋以上不同尺寸規格之監測井採樣，並建議放置於監測井中開篩區間深度。而薄壁效應主要受到洗井未完全，導致形成泥膜使井周透水性降低，或建井過程擾動造成透水性增加之影響，因本採樣器需在井中放置 14 天的平衡時間，故薄壁效應及監測井非密閉對於被動式採樣器之影響較小。																															
委員五 1. 本計畫將開發可同時適用於未飽和含水層氣體及飽和含水層地下水採樣之含氯污染物高解析被動式採樣器並進行現地應用驗證。 2. 本案有助於定位 DNAPL 污染源及地下水污染團之分佈。 3. 透過 PDMS 膜進行傳輸為重要的機制。請補充 PDMS 的孔徑分布的分析。 4. 水相中平衡反應時間須達 14 天，是否有其他的方法可以加速達到平衡的時間。 5. 本案所使用的 PDMS 膜是否有堵塞的問題。 6. 實場運作時，是否有適當的機制，以克服膜堵塞的問題。	委員五 1. 感謝委員認同。 2. 感謝委員肯定。 3. PDMS 透析膜傳輸機制，請參照委員一問題 1 之回覆意見，謝謝委員；而 PDMS 的材料特性分析，如下列所示。 <table><tr><th rowspan="2">Material</th><th colspan="4">Surface area (m²/g)</th></tr><tr><th>S_{BET}</th><th>S_{micro}</th><th>S_{meso}</th><th>S_{macro}</th></tr><tr><td>PDMS</td><td>315.75</td><td>77.69</td><td>208.13</td><td>29.93</td></tr></table> 註: S_{micro}: 為 t-plot 分析之比表面積。 <table><tr><th rowspan="2">Material</th><th colspan="4">Pore volume (cm³/g)</th><th>Pore size (nm)</th></tr><tr><th>V_{total}</th><th>V_{micro}</th><th>V_{meso}</th><th>V_{macro}</th><th>R_{avg}</th></tr><tr><td>PDMS</td><td>0.381</td><td>0.030</td><td>0.206</td><td>0.144</td><td>4.82</td></tr></table> 註: V_{meso}: BJH 吸附結果 2 nm~50 nm 之孔隙體積累加 R_{avg} (nm) = V_{macro} / S_{macro} 4. 感謝委員指教，請參照委員三問題 3 之平衡時間的說明。 5. 感謝委員指教，請參照委員三問題 4 之 PDMS 膜作為採樣器使用之說明。 6. 實場適用範圍與限制條件將列於附件一所示。	Material	Surface area (m ² /g)				S _{BET}	S _{micro}	S _{meso}	S _{macro}	PDMS	315.75	77.69	208.13	29.93	Material	Pore volume (cm ³ /g)				Pore size (nm)	V _{total}	V _{micro}	V _{meso}	V _{macro}	R _{avg}	PDMS	0.381	0.030	0.206	0.144	4.82
Material	Surface area (m ² /g)																															
	S _{BET}	S _{micro}	S _{meso}	S _{macro}																												
PDMS	315.75	77.69	208.13	29.93																												
Material	Pore volume (cm ³ /g)				Pore size (nm)																											
	V _{total}	V _{micro}	V _{meso}	V _{macro}	R _{avg}																											
PDMS	0.381	0.030	0.206	0.144	4.82																											



含氣污染物高解析被動式採樣器開發測試及現地應用評估



審查意見回覆對照表

行政院環境保護署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☐申請計畫書 ☐期中報告
☐修正計畫書 ☒期末報告

審查意見回復對照表

計畫年度	109 年度	計畫類型	☒ 研究型 ☐ 模場型
計畫類別	☐ 整治 ☒ 調查 ☐ 其它	主持人：梁振儒 NO：A8	
計畫名稱	含氯污染物高解析被動式採樣器開發測試及現地應用評估		
委員審查意見		計畫單位回覆	
蔡俊鴻委員： - 現場測試是否有重複實驗以檢視潛在干擾物質之影響？ - 地下水質濃度高/低對被動式採樣器之適用性(或數據可靠性)，建議提列平析，以共推廣參考。		蔡俊鴻委員： - 初步現場監測試驗皆進行重複實驗，所獲得之結果與微洗井試驗結果相近；而現場實驗中，觀察到些許懸浮物質沉澱於採樣器上側之 PDMS 透析膜，此些懸浮物之沉澱為可能之潛在干擾物質。 - 感謝委員建議，由於 PDMS 透析膜對於非極性疏水化學物質之吸附，不會受到複雜的基質條件影響，適合作為污染物透析採樣程序使用(Annika Jahnke and Philipp Mayer, 2010)；於試驗中已針對不同濃度 TCE 氣相及液相污染物進行適用範圍濃度探討，相關討論已於結果報告中進行討論評析，請參閱報告第 5.2 及 5.3 章節。 Reference: Jahnke, A., & Mayer, P. (2010). Do complex matrices modify the sorptive properties of polydimethylsiloxane (PDMS) for non-polar organic chemicals? Journal of Chromatography A, 1217(29), 4765-4770.	
陳玲慧委員： - 本計畫所擬研發之被動式採樣器，需有水相中平衡反應時間達 14 天，於商業應用上可能是會被考慮，因為耗時，可否在探討可否縮短平衡反應時間之可行性。 - 本計畫所列 KPI 中，研討會論文發表目前是 0，請說明如何可達到，另專利申請進度亦未說明，請一併於備註欄補充說明。 - 本計畫所列甘特圖之執行情形，亦請補充。		陳玲慧委員： - 三氯乙烯在中低濃度條件下，被動式採樣器之採樣平衡時間為 10 天；為確保樣品採樣之準確性，方於計畫中建議以 14 天作為平衡時間之標準。此採樣器所需平衡時間與環檢所標準方法之監測井地下水揮發性有機物被動式擴散採樣袋採樣方法一致，應可在商業應用上被接受。 - 原計畫所列之研討會論文為國外發表，受疫情影響，暫無法前往國外進行研討會論文發表，將改以國內研討會論文發表；被動式採樣器之專利「地表下環境污染物被動式採樣器」已撰寫完成提出校內申請，轉由承辦事務所提送專利申請。因專利之申請審查所需時程較長，尚無法於計畫結	



含氣污染物高解析被動式採樣器開發測試及現地應用評估

束時完成申請程序，依委員建議將於備註欄中加以說明。

3. 本計畫所列甘特圖完成百分比，將於第60頁說明執行進度，已達成本計畫設定之試驗項目。

吳一民委員：

1. 成果績效自評表中，產業面之智慧財產權項目，規劃申請1件新型/設計之專利，是否申請尚未通過，或是並無提出申請，請於報告中說明。
2. 報告書頁次，全本誤植以「附件 12-00 頁」編排，與目次頁碼不符，此項錯誤已於期中報告提出，回覆說明也表示將在期末報告修正，但是仍未修正。
3. 請於內文中說明「附件 12-51 頁」甘特圖執行情形，以確認各項工作是否依計畫書完成。
4. 全文編排建議不要用(一)、(二)、(三)...，計畫書面報告建議分章節，如第一章前言、第二章研究目的、第三章文獻探討...；另外，圖、表編號，則可依章節進行編排，如圖 4.1、4.2、4.3，以利檢索。
5. 本研究建議一個地下水樣品之採樣時間長達14天，建議應檢討及說明與傳統採樣方法之優劣比較，以及該方法之特點，以利凸顯此研究之貢獻。
6. 本技術長達14天採樣時間，而環境中可能有諸多干擾因素，如何應用在需要數據以調整加藥或點位的整治中污染場址？建請詳細說明此技術於何種實場具有何種應用性，以利了解未來推展應用之可能性。
7. 此採樣器具有較高之準確性，惟採樣時間過久，較不具時效性，後續請詳予論述在實場應用中之優勢為何？

吳一民委員：

1. 謝謝委員提醒，被動式採樣器之專利「地表下環境污染物被動式採樣器」已撰寫完成提出校內申請，轉由承辦事務所提送專利申請。因專利之申請審查所需時程較長，尚無法於計畫結束時完成申請程序，依委員建議將於備註欄中加以說明。
2. 感謝委員指正，於期末報告修正稿修正。
3. 本計畫所列甘特圖完成百分比，將於第60頁說明執行進度，皆達成本計畫設定之試驗項目。
4. 感謝委員指正，已遵照辦理。
5. 本計畫開發之被動式採樣系統與傳統環檢所標準採樣方法之監測井地下水揮發性有機物被動式擴散採樣袋採樣方法(NIEA W108.50C)比較，如第67頁表5.2所示。針對本採樣器方法之特點有：
 - (1) 可同時用於未飽和含水層之氣體採樣及飽和含水層之地下水採樣。
 - (2) 採樣完成後，直接鎖上蓋子密封採樣器避免揮發損失。
 - (3) 將密封採樣器送回實驗室進行分析時，將蓋子打開，以氣密針穿刺透膜，直接取樣，無須將所採集之樣本倒出，減少樣本與外界之接觸避免揮發。
 - (4) 採樣器可重複使用，僅需更換透析膜，節省經費。



審查意見回覆對照表

	(5) 藉由亨利常數轉換氣相與液相間之濃度轉換，獲得實際之土壤孔隙之污染氣相濃度，無須進行複雜之計算；地下水之採樣則可直接經由平衡濃度之達到，獲得地下水中之液相濃度。 (6) 於不擾動環境下進行採樣，且採樣器體積小，可縮短採樣間距增加井中濃度解析。 6. 此開發之採樣器設定為被動式採樣程序，有別於主動式採樣分析，相較下無法於短時間取得實際之污染濃度數據。此開發之採樣器可應用於土壤及地下水中有機污染物濃度採樣相關作業，於未飽和含水層氣體及飽和含水層地下水採樣時，於監測井中高密度置放採樣器，可剖析垂直向之污染物分布進行高解析污染物調查，此功能為目前被動式採樣器尚無法達到之目標。此外，本計畫開發之被動式採樣系統與傳統環檢所標準採樣方法之監測井地下水揮發性有機物被動式擴散採樣袋採樣方法 (NIEA W108.50C) 比較，如第 67 頁表 5.2 所示 7. 三氯乙烯在中低濃度條件下，被動式採樣器之擴散平衡時間為 10 天；為確保樣品採樣之準確性，方於計畫中建議以 14 天作為平衡時間之標準。此採樣器所需平衡時間與環檢所標準方法之監測井地下水揮發性有機物被動式擴散採樣袋採樣方法一致，應可在商業應用上被接受。實場應用中之優勢，請參照意見 5 之回覆。
陳志恆委員： 1. 本計畫若開發成功，對於了解 DNAPL 污染源及地下水污染團之分佈很有助益。 2. 平衡反應時間進行 14 天，建議補充探討這段時間，水體中其他因子對採樣準確度可能造成的影響。 3. 本計畫的訴求為高解析度，建議補充說明本研究所開發採樣器的解析度。 4. 建議補充說明水體流速對採樣解析度及平衡時間的影響。 5. 建議補充說明採樣器的布點方式，以利得到三維的分布情況。	陳志恆委員： 1. 感謝委員肯定。 2. 感謝委員指較，請參照蔡俊鴻委員問題 2 的說明。 3. 本計劃之高解析度調查，指一口監測井可執行多深度的採樣，且可含括未飽和及飽和含水層之氣相及液相污染物監測，透過較多數據之高解析採樣，呈現場址細部概念模型；本計畫開發之採樣器，具備尺寸小(總長為 15 公分)，可同時適用於 1 吋及 2 吋監測井中之特性，用以得知污染在垂直方向之詳細分布，有助於污染場址於監測井中不同深度



含氣污染物高解析被動式採樣器開發測試及現地應用評估

6. 建議補充說明第一年現地應用評估檢測結果與模型推估的差異性。 7. 建議補充說明濃度高低對於平衡時間的影響。 8. 建議未來可以進一步評估所使用半透膜的使用壽命。 9. 建議未來評估本整治方法的成本分析。 10. 高解析度的定義、空間分佈的解析度及或濃度的解析度。 11. 同一種 membrane 可以同時偵測飽和層及不飽和層。	4. 由於地表下之環境不同於地表可目測或直接量測之情境，因此，被動式採樣可克服地表下之各環境條件，較真實呈現污染實況，包含地下水流速之影響亦可藉由較長時間之監測，反映實際污染狀況。 5. 針對三維空間的分佈呈現，被動式採樣器建議以至少三口以上非直線排列之監測井進行兩種不同深度之被動式採樣調查，請參閱本計畫砂箱試驗第 53 頁圖 4.3 所示，以 6 個被動式採樣器監測結果，即可透過概念模型得知三維空間污染物濃度分佈情形。現地實場應用規劃，將於後續計畫中進行。 6. 本計畫第一年現地應用評估檢測，乃針對被動式採樣器與被動式採樣袋及微洗井採樣方法進行現地採樣分析結果比較。以第一年現地試驗結果，改良現有之被動式採樣器設計後；於第二年計畫進一步擴大規模於現地場址作為污染濃度調查使用，搭配採樣分析結果進行三維空間之污染場址概念模型推估。 7. 污染物濃度高低對飽和及未飽和含水層平衡時間之影響，批次試驗結果列於本計畫第 5.2 及 5.3 章節所示(請參閱報告)，TCE 水溶液採樣器在低濃度(3 mg/L)中，於第 4 天即達平衡；高濃度(25 mg/L)中，在第 10 天可達到平衡，顯示濃度愈低所需之平衡時間愈短；於氣相 TCE 濃度 2.6~26 mg/L 範圍，平衡反應時間需>12 天。因此，建議此被動式採樣器可採 14 天作為取樣所需之平衡時間，應可適用於污染物高低濃度之採樣。 8. PDMS 半透析膜為拋棄式之耗材。每組採樣器搭配兩片 PDMS 半透析膜，每次採樣所需 PDMS 半透析膜成本小於 1 元，相較於現有之被動式採樣袋(僅單次使用即須拋棄，每個採樣袋約 900 元)，建議不考量半透析膜使用壽命，僅作為單次使用之拋棄式耗材。 9. 本被動式採樣器應用於飽和及未飽和含水層之氯化有機污染物調查使用，非為整治方法。被動式採樣器可適用於不同污染場址，其單次使用之拋棄式耗材總成本甚低於現行之被動式採樣袋，可
---	--



審查意見回覆對照表

	大幅降低污染場址之採樣成本。 10. 感謝委員建議，請參照委員問題 3 之高解析調查的說明。 11. 謝謝委員肯定，本採樣器所使用之 PDMS 透析膜，可同時應用於未飽和及飽和含水層之有機污染物偵測。
張章堂委員： 1. 本計畫已利用 PDMS 半透膜透析機制設計開發及製造採樣器，並已證實所開發採樣器能夠追蹤 TCE 於未飽和含水層之污染位置。 2. 宜列明 PDMS 應用場域(期中報告意見 2)，阻塞改善措施(意見 4)與變異性大及不穩定高(意見 5)等問題。 3. 宜列明砂箱模擬試驗於實場應用結果以利瞭解本採樣器實場應用可行性。 4. 宜有利用氣相層析儀所量測氣相 TCE 濃度與 PID 所量測 TCE 濃度關係，以利查驗係數 0.54 正確性。 5. 缺符號說明宜補列，宜說明圖 5.5 中含水率對氣相污染物於不同深度不穩定原因(尤其 soil)。 6. 宜列明本採樣器濃縮方式，尤其所採樣濃度較低時。	張章堂委員： 1. 謝謝委員肯定。 2. 謝謝委員建議，相關意見回覆已在期中審查意見回覆說明 3. 砂箱模擬試驗之兩組孔隙介質中偵測 TCE 污染物濃度分布，結果顯示主動式採樣因受幫浦抽氣影響，容易產生干擾而造成較誤差之 TCE 濃度分布判定，而被動式採樣相較於主動式採樣，能較準確推估場址概念模型，本被動式採樣可彌補主動式採樣之短處，更容易精準判斷 TCE 污染源範圍及可能來源位置，預期於實場應用將有較準確之場址概念模型。細節討論請參閱報告書。 4. 感謝委員建議，本研究批次平衡實驗及砂箱試驗前，查驗 PID 所量測 TCE 濃度之 0.54 係數，偵測值為理論值的 1.2 倍；此外，每半年請儀器廠商進行 PID 儀器數值校正與保養，因此 PID 分析結果具代表性。而現場採樣測試，除紀錄 PID 檢測數值外，並以 PID 收集井中氣體至採氣袋中；以氣相層析儀分析採氣袋污染物濃度與本被動式採樣器進行未飽和層試驗結果比較，此修正因子之乘積數值經確認具適用性。 5. 謝謝委員指正，報告轉檔 pdf 時出現格式錯誤，已修正圖 5.5 之符號說明。污染物於氣相中之分布，因天然土壤介質之存在及不同土壤滲透度(坵土及砂土)之分布，或含水率於不同深度之分布，皆可能造成氣相污染濃度分布之差異，此屬可預期之現象，但經由被動式採樣所得之結果仍可推估高濃度之分布區域，進而推論污染源之位置，詳細討論請參閱報告。 6. 本採樣器進行現地飽和及未飽和層採樣時，並未進行濃縮之步驟；採樣過程參照第 77 頁表 5.5 所示，採樣完成直接鎖上蓋子密封採樣器避免揮發，將密封採樣器送回實驗室進行分析時，將蓋子打開，以氣密針穿刺透膜，直接取樣，以環檢所公告之水中揮發性有機化合



含氯污染物高解析被動式採樣器開發測試及現地應用評估

物檢測方法—吹氣捕捉／氣相層析質譜儀法(NIEA W785.55B)進行揮發性有機污染物濃度檢測，無須將所採集之樣本倒出及濃縮。

專案主持人：_____ (簽名及蓋章)



專案基本資料表

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		國立中興大學 環境工程學系					
機構地址		台中市南區興大路145號 中興大學土木環工大樓5F 535室					
專案主持人		梁振儒		職等／職稱		特聘教授	
協同主持人				職等／職稱			
專案名稱	中文	含氯污染物高解析被動式採樣器開發測試及現地應用評估					
	英文	Development of high resolution passive sampler and evaluation of field application for chlorinated solvent contamination					
	關鍵字	含氯有機物、污染調查、被動式採樣、三氯乙烯、二氯乙烯					
執行期程		自民國 109 年 1 月 30 日起 至民國 109 年 12 月 4 日止					
專案主持人		姓名：梁振儒 E-mail：cliang@nchu.edu.tw				專線：04-22856610 手機：0937009106	
專任助理		姓名：黃榆茜 Email：viky580102@gmail.com				專線：04-22840441#524 手機：	
經費分析總表 (僅模場試驗專案需填寫兩年度金額)	專案預估經費		第一年金額	第二年金額	編列說明		
	1.	人事費用	676,979	710,340	(1~5 項相加之 50%為限)		
	2.	貴重儀器使用含維護費	0	0	(與計畫實驗相關)		
	3.	消耗性器材與主要費用	500,000	600,000	(與計畫主體相關)		
	4.	其它研究相關費用	150,000	200,000	(含差旅與租賃費用)		
	5.	雜支費用	45,749	48,751	(1~6 項相加之 5%為限)		
	6.	行政管理費	137,272	155,909	(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)		1,510,000	1,715,000	總金額：3,225,000		
	計畫總金額(1~7 項)		1,510,000	1,715,000	總金額：3,225,000		

專案主持人(簽名及蓋章)：_____

日期：_____



含氣污染物高解析被動式採樣器開發測試及現地應用評估



研究成果中文摘要

國內列管的土壤及地下水污染場址中，受碳氫化合物污染之場址數量最多高達 86.4 %，其中以含氯脂肪族碳氫化合物為最多占 56.4 %。透過高解析場址調查建立場址概念模型可有助於定位污染物洩漏位置，作為整治技術可行性評估之依據。地表下氣相及水相污染物採樣技術，可分為主動式採樣(Active sampling, AS)與被動式採樣(Passive sampling, PS)，其中被動式採樣具備操作方法簡易且不干擾污染物狀況等優點，通常可更真實反應地表下之污染分布狀況。鑑於國內發展高解析場址調查對土壤及地下水整治之重要性，本計畫擬開發可同時適用於未飽和含水層氣體污染物及飽和含水層地下水液相污染物之高解析被動式採樣器，並進行現地應用驗證，提升被動式採樣技術之應用層面，並藉由高密度之被動式採樣佈點，有效掌握實場 DNAPL 污染源及地下水污染團之分佈。

本計畫第一年利用聚二甲基矽氧烷(Polydimethylsiloxane, PDMS)半透膜透析(Dialysis) 機制設計開發及製造高解析被動式採樣器，探討被動式採樣器對於水相及氣相 TCE 與採樣器之平衡時間及適用範圍，分析結果得知水相 TCE 3 mg/L~25 mg/L 與採樣器所需之平衡時間需>10 天，進一步平衡反應時間 14 天進行試驗得知，此採樣器可應用之水相 TCE 濃度範圍為 0.05~150 mg/L。此外，氣相 TCE 濃度介於 2.6~26 mg/L 之間，平衡反應時間需>12 天，因此綜括水相及氣相實驗，建議此被動式採樣器可採 14 天作為取樣所需之平衡時間。砂箱模擬試驗中，主動式採樣因受幫浦抽氣影響，容易產生干擾而產生錯誤之 TCE 濃度分布，而被動式採樣相較於主動式採樣，有較準確之場址概念模型，應驗被動式採樣可彌補主動式採樣之短處。模場試驗以慶川及東陽場址進行現地應用評估，對於低濃度之採樣結果，可知被動式採樣器可測得之物質濃度較被動式採樣袋及微洗井採樣方法靈敏，可測得其他兩種方法無法測得之微量污染濃度；對於高濃度場址之採樣結果可知，三種採樣方法所得之數據比低濃度污染採樣相關性較高，受 VOC 逸散之影響程度較低。對於未飽和層之氣體採樣，傳統手持式 PID 之採樣所得之數據變異甚大，被動式採樣器之數據較為穩定；證實本研究之被動式採樣器能夠追蹤評估 TCE 於未飽和含水層之污染位置範圍，更容易精準判斷 TCE 污染源位置。第二年則將於具較高及較低三氯乙烯地下水污染之二處污染整治場址進行大規模實場驗證。

關鍵字：被動式採樣、氯化有機溶劑、三氯乙烯、聚二甲基矽氧烷、未飽和含水層、揮發性有機物監測



含氯污染物高解析被動式採樣器開發測試及現地應用評估



研究成果英文摘要

Among Taiwan EPA regulated contaminated soil and groundwater sites, organic hydrocarbons contaminated sites account for 86.4%, in which chlorinated aliphatic hydrocarbons account for 56.4%. High-resolution site investigation is possibly allowed for precisely tracking positions and distributions of contamination, thereby as a basis for identifying the restricted contamination area and designing a remediation project. Gaseous and aqueous phase samplings can be classified as active sampling and passive sampling methods. The passive sampling owns advantages of simple operation and no disturbing to contamination and may reflect true contamination distribution. Based on the demand for developing high-resolution site investigation for soil and groundwater remediation, the proposal intended to manufacture a high-resolution passive sampler, which could be applied in both unsaturated and saturated aquifer for detecting gaseous and aqueous phase contamination. Also, a field demonstration was conducted to ensure the applicability and identification of DNAPL via high densities of passive samplings.

The first year's objectives of this two-year project were to design and manufacture a passive sampler based on polydimethylsiloxane membrane dialysis mechanism, and examination of equilibrium sampling time and contaminant concentration range in gaseous and aqueous phases. The results indicated that an equilibrium time period of >10 d was required in the aqueous phase containing TCE concentrations ranging from 3 to 25 mg/L, while an equilibrium time period of >12 d was necessary for TCE vapor concentrations ranging from 2.6–26 mg/L. Therefore, a 14 d of equilibrium time was suggested for application of this passive sampler in detecting vapor and aqueous phase TCE. The multilayer passive sampling was conducted in a three-dimensional sandbox to construct a tomography of TCE vapor spatial distribution in the vadose zone above the saturated water level. After collection of the passive samples from the three-dimensional sandbox, a three-dimensional visualization was created, and it was demonstrated to be a reasonable way to simulate a three-dimensional TCE distribution. A pilot field testing for the passive sampler was conducted in two sites, including Chingchuan and Dongyang. In the relatively low contamination site, the passive sampler could detect trace concentration level in groundwater and is more sensitive than other sampling methods (low flow sampling and passive diffusion bag). In the high concentration site, the results obtained through three sampling methods revealed similar concentration values with high correlation. For detecting contamination in the unsaturated zone, the concentration detected by the portable PID showed significant deviations, while the passive sampler



含氯污染物高解析被動式採樣器開發測試及現地應用評估

provided stable concentration values. It was confirmed that the passive sampler developed in this study is effective for assessing TCE contamination in the subsurface. The second year's objects will be conducted in these two sites with full investigation for ensuring the applicability of the passive sampler.

Keywords: Passive sampler; Chlorinated solvents; Trichloroethylene; Polydimethylsiloxane (PDMS); Unsaturated aquifer; Monitoring of volatile organic compounds (VOCs)



目次

研究成果中文摘要.....	27
研究成果英文摘要.....	29
目次.....	31
圖次.....	33
表次.....	35
第一章 前言	37
第二章 研究目的	39
2.1 第 1 年實驗室及現地實場試驗.....	39
2.2 第 2 年現地應用試驗.....	39
2.3 模場試驗場址資料.....	40
2.2.1 東陽實業股份有限公司觀音廠背景資料說明.....	41
2.2.2 慶川企業社.....	43
第三章 文獻探討	45
第四章 研究方法與過程(含工作進度甘特圖).....	49
4.1 高解析被動式採樣器之設計開發及製造.....	49
4.2 批次試驗用以建立氣相及液相達反應平衡之採樣時間及適用濃度範圍 ..	51
4.3 砂箱模擬試驗.....	52
4.4 現地應用評估.....	55
4.5 模場試驗採樣步驟.....	58
4.6 分析方法.....	58
4.7 研究進度及預期完成之工作項目(甘特圖).....	60
第五章 結果與討論	63



含氯污染物高解析被動式採樣器開發測試及現地應用評估

5.1 高解析被動式採樣器之設計開發及製造	63
5.2 水相 TCE 與採樣器平衡	64
5.3 氣相 TCE 與採樣器平衡	66
5.4 砂箱試驗-主動式採樣與被動式採樣結果比較	68
5.4.1 石英砂介質	69
5.4.2 土壤介質	70
5.5 現地應用評估	75
5.5.1 被動式採樣器採樣之標準作業流程	75
5.5.2 慶川場址模場試驗結果	78
5.5.3 東陽場址模場試驗結果	86
5.6 結論	96
第六章 參考文獻	97
附錄一	101
附錄二	109



圖次

圖 2.1 東陽場址(A)三氯乙烯污染來源與污染物分析數值分布及(B)TCE 濃度分布推估.....	42
圖 2.2 慶川場址(A)三氯乙烯濃度污染分布及(B)三氯乙烯等污染物分析數值分布 ..	44
圖 3.1 多層被動式採樣器	45
圖 3.2 VPT 現地調查採樣設置範例	47
圖 3.3 VPT 三維濃度斷層攝影解析示意圖	47
圖 3.4 第一年研究目標實驗流程規劃.....	49
圖 4.1 被動式採樣器初步設計規格.....	49
圖 4.2 氣相與液相 TCE 與採樣器平衡實驗裝置	52
圖 4.3 砂箱配置示意圖.....	53
圖 4.4 (A)砂箱俯視圖、(B)石英砂介質之砂箱正視圖及(C)土壤介質之砂箱正視圖 ..	54
圖 4.5 慶川場區監測井位置示意圖	57
圖 4.6 慶川及東陽場區監測井採樣器放置位置示意圖	57
圖 4.7 東陽場區監測井位置示意圖	57
圖 4.8 手提式 VOCs 偵測器	59
圖 5.1 (A)被動式採樣器細部圖、(B)組裝成品及(C)被動式採樣器放置於篩管中示意	63
圖 5.2 染劑試驗被動式採樣器內水溶液反應前後之比較.....	64
圖 5.3 被動式採樣器之採樣 TCE 濃度與水溶液 TCE 濃度比值隨時間變化關係	65
圖 5.3 TCE 濃度對被動式採樣器平衡時間 10 天及 14 天之影響關係	66
圖 5.4 被動式採樣器 TCE 氣體採樣氣/液相濃度比例(C_G/C_{AQ})隨時間變化關係	67



含氯污染物高解析被動式採樣器開發測試及現地應用評估

圖 5.6 主動式採樣偵測砂箱中 TCE 濃度之斷層掃描(石英砂介質).....	71
圖 5.7 被動式採樣偵測砂箱中 TCE 濃度之斷層掃描(石英砂介質).....	72
圖 5.8 主動式採樣偵測砂箱中 TCE 濃度之斷層掃描(土壤介質).....	73
圖 5.9 被動式採樣偵測砂箱中 TCE 濃度之斷層掃描(土壤介質).....	74
圖 5.10 慶川場址微洗井、被動式採樣器與採樣袋採樣過程照片	79
圖 5.11 慶川場址監測井 SW08 未飽和與飽和含水層不同採樣方式平衡 14 天後所獲得之濃度隨井深度分布關係	83
圖 5.12 川場址監測井 SW08 未飽和含水層手持式光離子化檢測儀(PID)與被動式採樣器(PS)採樣分析結果之比較	85
圖 5.13 慶川場址監測井 SW08 飽和含水層微洗井採樣(LFS)、被動式擴散採樣袋(PDB)和被動式採樣器(PS)採樣分析結果之比較	85
圖 5.14 東陽場址微洗井、被動式採樣器與採樣袋採樣過程照片	87
圖 5.15 東陽場址監測井 GW03 未飽和與飽和含水層不同採樣方式平衡 14 天後所獲得之濃度隨井深度分布關係	93
圖 5.16 東陽場址監測井 GW03 未飽和含水層手持式光離子化檢測儀(PID)與被動式採樣器(PS)採樣分析結果之比較	94
圖 5.17 東陽場址監測井 GW03 飽和含水層微洗井(LFS)、被動式擴散採樣袋(PDB)和被動式採樣器(PS)採樣分析結果之比較	94



表次

表 1.1 主動式採樣與被動式採樣技術比較.....	38
表 2.1 此計畫擬進行模場試驗之三氯乙烯污染土壤與地下水整治場址.....	40
表 4.1 被動式採樣器之 PDMS 透析膜擴散原理.....	50
表 4.2 氣相平衡實驗規劃.....	51
表 4.3 被動式採樣器於水相中採樣平衡時間評估實驗規劃.....	52
表 4.4 主動及被動式採樣砂箱模擬試驗規劃.....	54
表 4.5 土壤介質特性及砂箱實驗參數.....	55
表 4.6 慶川及東陽場址監測井基本資料.....	56
表 4.7 不同採樣方法於現場監測井中採樣結果比較之實驗規劃.....	56
表 4.8 本計畫之甘特圖.....	60
表 5.1 反應瓶及採樣器中水溶液吸光值比較.....	64
表 5.2 被動式採樣系統與環檢所標準方法被動式擴散採樣袋之採樣方法比較.....	67
表 5.3 被動式採樣器規格.....	75
表 5.4 被動式採樣器組裝流程.....	76
表 5.5 被動式採樣器標準作業流程.....	77
表 5.6 慶川場址監測井 SW08 主動式及被動式未飽和及飽和含水層土壤氣體及地下水採樣分析數據.....	84
表 5.7 東陽場址監測井 GW03 主動式及被動式未飽和及飽和含水層土壤氣體及地下水採樣分析數據.....	92



含氣污染物高解析被動式採樣器開發測試及現地應用評估



第一章 前言

在經濟與工業發展的同時因地下管線、儲槽洩漏或人為操作不當等因素，可能使危害化學物質意外進入土壤及地下水中，因而對環境造成污染。根據美國超級基金於 1987 至 2014 年間，針對污染場址進行關切污染物(Contaminant of concern)之統計調查[1]，在地下水、土壤及底泥中揮發性有機污染物(Volatile organic compounds, VOCs)、重金屬(Heavy metals)、非揮發性有機污染物(Semivolatile organic compounds, SVOCs)與其他(Others)種類之含量所占比率差異甚大，其中地下水污染方面以 VOCs 占大多數高達 86.0%。在國內列管的地下水污染場址中，受碳氫化合物污染之場址數量最多高達 86.4%，其中以含氯脂肪族碳氫化合物(Chlorinated aliphatic hydrocarbons, CAHs)為最多(占 56.4%)，而最常出現之物質為三氯乙烯(Trichloroethylene, TCE)，其占污染物種類之 25.6% [2]。常見之土壤及地下水污染物氯化有機溶劑為重質非水相液體(Dense Non-Aqueous Phase Liquid, DNAPLs)，具有良好疏水性，且液體密度大於 1.0 g/cm^3 ，一旦洩漏進入飽和含水層(Saturated zone, SZ)中，將受到重力影響逐漸向下移動至停留於不透水層，形成高濃度的污染源，並會隨著時間緩慢的溶解釋出而成為溶解相之污染；此外，在 DNAPL 移動的過程中通過未飽和含水層(Unsaturated zone, UZ)時，也會受到土壤孔隙大小及毛細作用所影響，導致部分污染物殘留於較細顆粒之土壤孔隙中，並於土壤孔隙間揮發成氣相污染物，複雜之地表下污染情境造成含氯污染物調查之困難度。

近年來，美國環保署提出透過(1)審查數據質量目標 (Data Quality Objective, DQO) 程序確定決策規則並優化設計；(2)污染場址調查三合技術(Triad Approach)包含系統性規劃、動態工作策略及現場即時量測技術；(3)高解析場址調查(High Resolution Site Characterization, HRSC)，以適當的採樣頻率(時間間隔)及監測範圍(空間布點)詳加了解污染物分佈、傳輸和宿命；最後擬定土壤之採樣策略以偵查污染與調查污染面積與體積，方能建立完善的場址概念模型(Conceptual Site Model, CSM) [3]。透過高解析場址調查建立場址概念模型可有助於定位污染物洩漏位置，並掌握污染物可能之暴露途徑與現地場址污染物之分佈情況，達到早期預防並掌握污染潛勢以及確立污染範圍劃定管制區，並可作為整治技術可行性評估之依據。此外，土壤及地下水污染整治過程中，無論初期調查階段用以執行風險評估、污染整治階段之連續監測評估污染物隨時間與空間之變化趨勢，以及監控污染物濃度與分佈確認場址污染改善完成等，亦需大量檢測分析污染物。如何透過快速及準確的採樣方式進行污染場址調查是高解析場址調查之一項關鍵。

現今國內應用於高解析場址調查工具可分為土壤採樣、地下水採樣、水文地質試驗、污染濃度探測及其他等類別；而針對含氯污染物之 DNAPL 及污染團適用的採樣方式，在土壤採樣有(1)直接灌入方式(Direct-push methods)可用於鬆散或未壓



含氯污染物高解析被動式採樣器開發測試及現地應用評估

實之土壤，但受限於地層貫穿阻力無法運用於礫石地質及較深層或受壓實之土壤樣品，常見工具有活塞式採樣器、薄管採樣器、雙套管採樣器等；(2)土壤岩心採樣(Soil/rock core sample examination)可搭配即時監測有機氣體分析、紫外光螢光檢測等技術直接判別污染物濃度，但因需取出岩心量測易造成含氯污染物逸散，而有污染物低估之情形；(3)土壤氣體調查(Soil gas survey)是最些微侵入式調查工作，用以描繪未飽和含水層 VOC 分佈，藉以限縮判斷 DNAPL 可能之污染源頭。而在地下水採樣常見調查技術有(1)DNAPL 垂直向分佈剖析(DNAPL profiling)可提供井中不同深度 DNAPL 分佈，但不適用於判別地下水污染團；(2)地下水質垂直向剖析(Groundwater quality profiling)可提供 3-D 地下水污染濃度分佈，協助推估 DNAPL 範圍，常見工具有 Waterloo 水質分析器、多階段採樣監測、聚乙烯被動式擴散採樣器(Polyethylene diffusion bag samplers)。

主動式採樣與被動式採樣技術皆存在其優缺點，進行土壤氣體採樣之操作者可依現場土壤特性及分布，並考慮其採樣需求予以選擇，表 1 彙整兩種採樣方式的特性比較[4]。被動式採樣相較於主動式採樣器雖耗時長需待污染物濃度平衡後始可回收樣本，但靜置於地下污染物中，不會干擾污染物分佈較有助於提升高解析場址調查之準確性[4]。其中，聚乙烯被動式擴散採樣器是經由被動式擴散採樣，儘管需較長時間，但較能真實反應污染垂直分佈狀況，因此聚乙烯被動式採集器是目前國內廣泛用於現地採樣之被動式採樣器；然而此聚乙烯被動式採樣器不適合應用於 DNAPL 可能存在之污染源，其恐有材質溶出之疑慮，此外，採樣後需將水樣倒出至樣本品中，此過程可能造成污染物之溢散產生誤差。

表 1.1 主動式採樣與被動式採樣技術比較

主動式採樣(AS)	被動式採樣(PS)
✓ 可直接測定，得到濃度分布數據	✓ 待污染物濃度平衡後始可回收樣本，耗時長
✓ 不受任何擴散速度影響	✓ 太極端的擴散速度會影響其測值
✓ 利用幫浦抽取氣體，會干擾污染物分佈	✓ 靜置於地下污染物中，不會干擾污染物分佈

鑑於國內發展高解析場址調查對土壤及地下水整治之重要性，本計畫將開發可同時適用於未飽和含水層氣體及飽和含水層地下水採樣之含氯污染物高解析被動式採樣器並進行現地應用驗證，有助於掌握實場 DNAPL 污染源及地下水污染團之分佈，故本計畫選定含氯污染場址最常出現之污染物質 TCE 作為本研究採樣監測之目標污染物。



第二章 研究目的

本計畫第一年預計開發可同時運用於偵測未飽和含水層氣相污染物及飽和含水層液相污染物之高解析被動式採樣器，並執行氣相及液相之實驗室被動式採樣器適用性之批次試驗、3-D 土壤砂箱模擬驗證試驗及初步實場應用模擬，以及第二年進行大規模實場測試，藉以建立三維濃度斷層攝影解析之 CSM。此計畫擬分為兩年執行，研究目標分年陳述如下：

2.1 第 1 年實驗室及現地實場試驗

- (1) 進行高解析被動式採樣器之設計開發及製造。
- (2) 批次試驗用以探討三氯乙烯於氣相及液相狀況下，達反應平衡之採樣時間及適用之濃度範圍。
- (3) 透過砂箱試驗進行三氯乙烯污染物主動式採樣與被動式採樣結果比較，並以三維斷層掃描方式呈現污染物分布。
- (4) 為確保開發設計之被動式採樣器能妥善應用於現地，先行以一場址進行現地應用測試，於飽和含水層及未飽和含水層進行監測，確保施作之程序細節建立採樣之標準作業流程(standard operating procedure, SOP)。

針對未飽和含水層以 2 種採樣方式(開發之被動式採樣器及主動式 VOC 偵測器)進行比較評估；針對飽和含水層以三種不同採集方式(聚乙烯被動式採樣器、微洗井採樣、開發之被動式採樣器)進行比較評估，以利於進行可能之採樣器設計改良。

2.2 第 2 年現地應用試驗

選取在不同控制或整治場址，針對低及高濃度污染(大於及小於污染物 1%最大水中溶解度之地下水污染分別予以選定)之含氯化合物污染場址，進行未飽和含水層及飽和含水層採樣比較之現地應用試驗，分別以開發之被動式採樣器、聚乙烯被動式採樣器及微洗井採樣三種方式對飽和含水層地下水污染物；及以開發之被動式採樣器與手持式 VOCs 偵測器對未對飽和含水層氣相污染物進行採樣、分析並加以比較實際應用之結果，研究目標如下所述：

- (1) 優化高解析被動式採樣器及其應用。
- (2) 低及高濃度不同污染場址現地應用評估，以公告的受三氯乙烯污染之土壤及地下水控制/整治場址(桃園市東陽實業廠股份有限公司觀音廠(低污染濃度)及慶川企業社(高污染濃度))，於既有之監測井，搭配適當的採樣頻率



含氯污染物高解析被動式採樣器開發測試及現地應用評估

(時間間隔)及監測範圍(空間布點)以進行採樣現地應用調查評估。進行未飽和含水層及飽和含水層採樣比較之現地應用試驗，分別以開發之被動式採樣器、聚乙烯被動式採樣器及微洗井採樣三種方式對飽和含水層地下水污染物；及以開發之被動式採樣器與手持式 VOCs 偵測器對未對飽和含水層氣相污染物進行採樣、分析並加以比較實際應用之結果。

- (3) 氣相及液相濃度分布斷層攝影(Vapor and Aqueous Phase Tomography, VPT and APT)技術評析，經由高密度三維空間污染濃度調查，可反映真實地表下污染物特徵，逐步由濃度分佈趨勢推估污染物存在位置，達到高解析場址調查之目的；比較經由各種不同之採樣方式所獲得之數據，評估藉此建立 CSM，更有利後續整治工作之進行。

2.3 模場試驗場址資料

本計畫以環保署公告為整治場址(包含受三氯乙烯及其他含氯污染物之土壤與地下水)共二處，以進行現地被動式採樣應用評估，場址資料則見表 2.1。

表 2.1 此計畫擬進行模場試驗之三氯乙烯污染土壤與地下水整治場址

場址公告 列管狀態	場址名稱	土壤/地下水污染物
整治場址	東陽實業股份有限公司 觀音廠 (桃園市)	<u>較低濃度污染場址</u> 地下水檢測濃度：三氯乙烯為 0.514mg/L(地下水污染管制標準：0.05 mg/L)，超過地下水污染管制標準，可能污染範圍為該公司營運區範圍
	慶川企業社 (彰化縣)	<u>較高濃度污染場址</u> 地下水三氯乙烯 3.48 mg/L 超過第二類地下水污染管制標準(0.05 mg/L)及順-1,2-二氯乙烯 1.68 mg/L 超過第二類地下水污染管制標準(0.7 mg/L)。

資料來源：土壤及地下水污染整治網 <https://sgw.epa.gov.tw/public/>

第一年計畫將選取其一場址，進行現地應用評估，測試所開發之被動式採樣器之使用程序 SOP，並進一步針對採樣器改良或修正平衡時間與參數，以確保高解析場址調查之準確性；第二年則於整治/控制場址以開發之被動式採樣器，進行適當的採樣頻率(時間間隔)及監測範圍(空間布點)詳加了解污染物分佈、傳輸和宿命；詳加偵查污染與調查污染面積與體積，並建立 CSM。



2.2.1 東陽實業股份有限公司觀音廠背景資料說明

土壤及地下水污染整治網資訊：

此場址東陽實業股份有限公司觀音廠，從事汽車零件製造，主要製程為將塑膠粒使用射出成型，半成品經人工打磨拋光、噴塗，目前仍持營運中。此場址依據環保署執行「運作中工廠土壤及地下水污染含氯有機溶劑污染潛勢調查及查證計畫(第5期)」調查結果，地下水檢測濃度：三氯乙烯為 0.514 mg/L(地下水污染管制標準：0.05 mg/L)，超過地下水污染管制標準，可能污染範圍為該公司營運區範圍。

場址資訊：

透過早期三氯乙烯使用區對照目前污染範圍顯示主要有三處之洩漏來源，分別為早期三氯乙烯表面清洗區、三氯乙烯暫存區及過去排放至廢水處理場的管溝，相關監測數值如圖 2.1 所示(圖中藍色點表示場區監測井之分布)。三者皆因早期使三氯乙烯防護施作不當，以致於 DNAPL 逐漸往地層底下洩漏，並隨著地下水流向逐步往下游移動。桃園地區多屬於礫石型態的地質分佈，大致上可分為淺層(1~5 m)屬砂質地層，5~11 m 則多為礫石夾砂的地質型態，然而 10~13 m 則發現為較緻密的黏土型態。透過與 MIP 的調查結果發現，疑似污染團的分佈區域主要位於早期表面清洗區的下方 4~5 m 處及三氯乙烯暫存區下方 12 m 處。前者位處於砂質及礫石地質的交界面，而後者則位於黏土層附近，推估 DNAPL 碰到此黏土層後逐步隨著地勢往水平方向傳輸。由圖 2.1 可得知 TCE 為主要之污染物，亦有監測到 1,2-DCE 以微量濃度存在，此場址之污染物符合此計畫規劃探究污染物分布之情境，且此場址之污染物濃度適合用以驗證低濃度污染物之採樣分析。



含氯污染物高解析被動式採樣器開發測試及現地應用評估

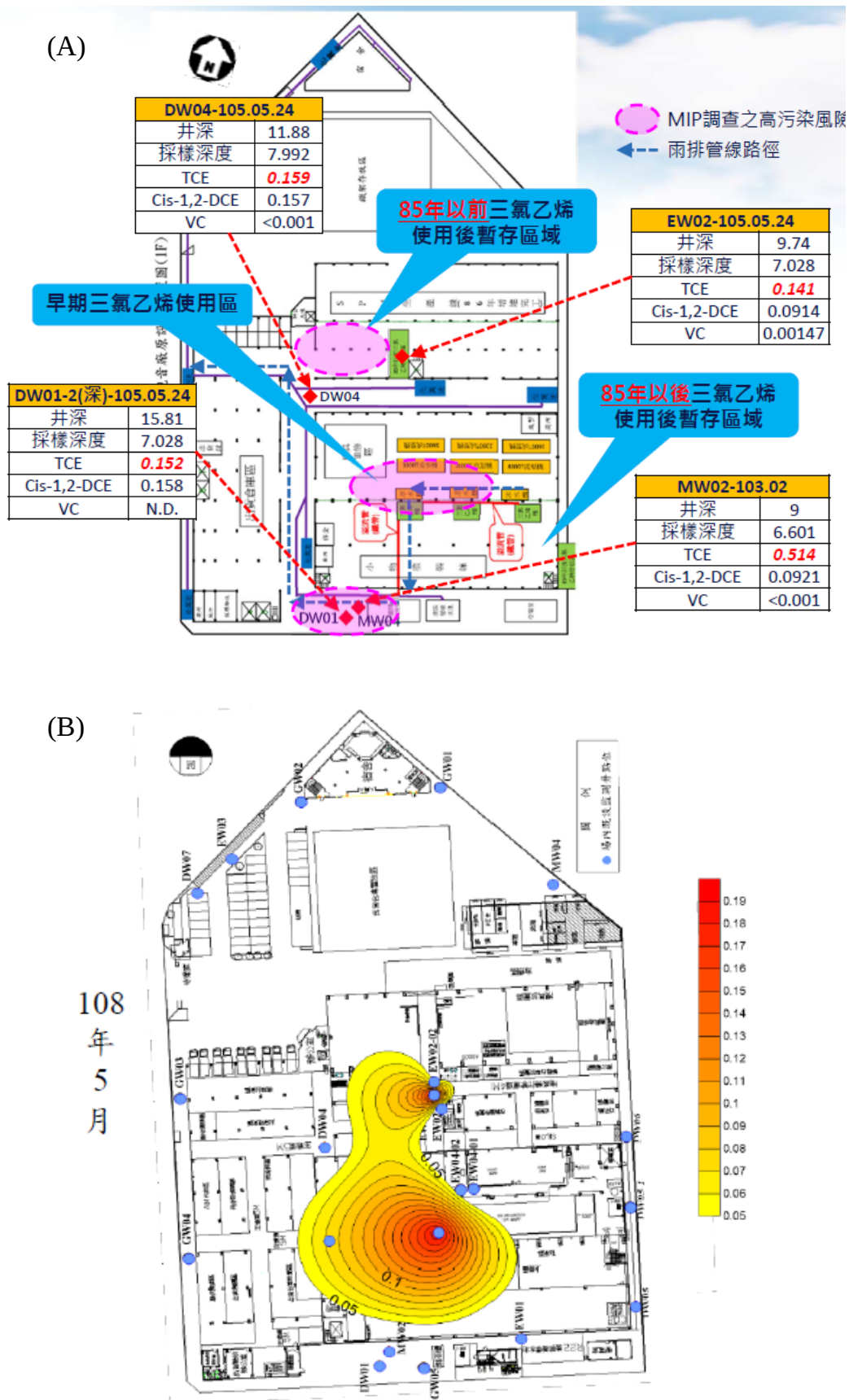


圖 2.1 東陽場址(A)三氯乙烯污染來源與污染物分析數值分布及(B)TCE 濃度分布推估



2.2.2 慶川企業社

土壤及地下水污染整治網資訊:

本場址佔地面積約為 650 平方公尺位於鹿港鎮，於民國 81 年 5 月開始營運至今，登記產業類別為金屬製品製造業，主要從事五金零件材料表面清洗以及塗料、塗裝製程，產品以皮帶頭及衛浴五金為主。製程中使用三氯乙烯作為表面清洗劑，後續再進行塗裝上膜作業。環保署進場執行地下水調查結果，「含氯運作區」：微洗井採樣檢測結果，地下水檢出順-1,2-二氯乙烯(1.68 mg/L)超過管制標準 2.40 倍、三氯乙烯(1.11 mg/L)超過管制標準 22.20 倍；「廢棄物暫存區」：微洗井採樣檢測結果，地下水檢出順-1,2-二氯乙烯(1.68 mg/L)超過管制標準 2.40 倍、三氯乙烯(3.48 mg/L)超過管制標準 69.60 倍

場址資訊:

本場址運作方式包括有引掛、清洗、烘乾、塗裝及廢棄物暫存區等相關製程作業。廢棄物暫存區則位於本場址之東北區域，場址作業區分佈及平面配置如圖 2.2 所示。本場址污染物為三氯乙烯，主要用於清洗製程中金屬鑄件品油污，場址清洗作業方式為將須塗裝或烤漆之物件以掛件及輸送帶方式輸送至一封閉式清洗設備中(此設備架高與地面無直接接觸，若有滲漏可直接肉眼觀察到，此外其底部均設置有不銹鋼材質槽體，以防止滲漏至地面)，清洗後再輸送至塗裝區，清洗劑均經加熱蒸餾冷凝後回收再利用。土壤地質取樣紀錄資料，顯示本場址以回填土(0~1 m)、褐色粗砂及坵土(1~2 m)、黃色細砂(2~7 m)為主；彰化縣境內豐枯水期地下水流場變化不大，地下水流向主要是沿八卦山向西北方向流動，流動方向大致與地勢變化雷同，本場址地下水流場易受到鄰近民井抽取地下水之影響。本場址使用三氯乙烯主要用於清洗製程中金屬鑄件品油污，而使用過的三氯乙烯於設備中需由不織布來過濾雜質後回收再利用，故上述不織布每隔一段時間需清洗，不織布清洗前會先進行晾曬乾燥後，再放置洗衣機中清洗，清洗後廢水直接管排入鎮公所管轄之生活污水排水溝，再匯流至西側灌溉溝渠，此作業區為本場址「廢棄物暫存區」旁，故推測本場址東側地下水污染來源為因不織布清洗後廢水中含有三氯乙烯入滲至地表下所造成。目前本場址已不再使用三氯乙烯，而更改為溴丙烷。

TCE 為主要之污染物，圖 2.2 呈現目前地下水井及場址周遭民井分布位置，地下水 TCE 曾監測到甚高之濃度 19.6 mg/L，此場址適合用以驗證高濃度污染物之採樣分析。



含氯污染物高解析被動式採樣器開發測試及現地應用評估

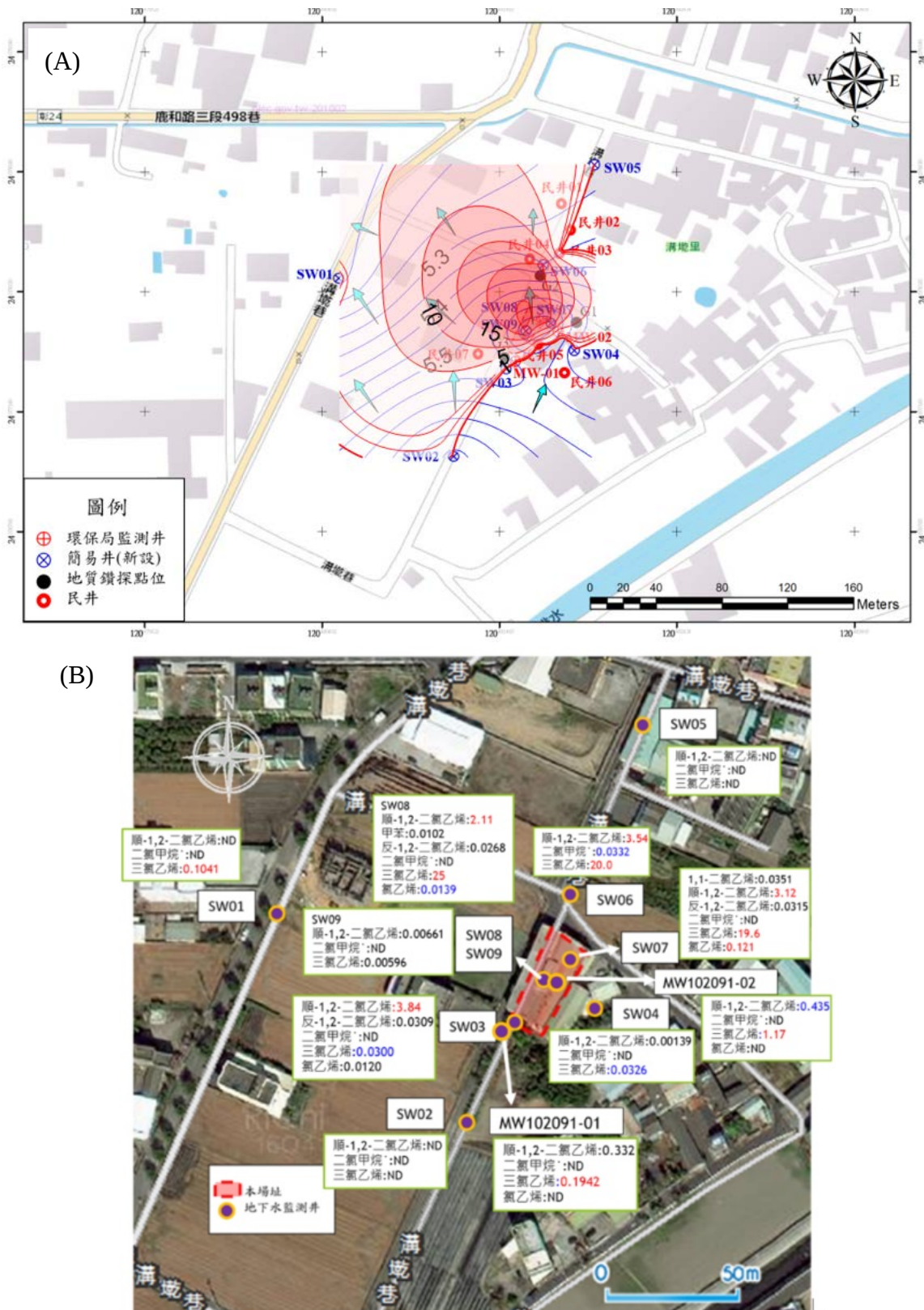


圖 2.2 慶川場址(A)三氯乙烯濃度污染分布及(B)三氯乙烯等污染物分析數值分布



第三章 文獻探討

為了偵測土壤層中污染物分佈，採樣器的選擇具有其重要性。每種採樣器的材料、組成及應用上大不相同，大致上可分為於氣相中採樣及於水相中採樣兩大項。因此藉由參考以下可應用於未飽和含水層且已商業化之採樣器的操作方法作為本實驗採樣器材開發的基礎。

Gore-Sorber® Passive Sampler 可安裝於約 0.5 in 直徑的孔洞中。操作上先利用滑錘上配有的鑽頭於土壤層中鑽孔，開孔後達特定深度，將活性碳吸附劑接於鐵氟龍繩上並放入孔洞，並用軟木塞塞住孔洞密封，再標記樣本位置以供檢索取回。取回時將鐵氟龍繩拉起後，將活性碳收集於容器中以待分析。BEACON sampler (BEACON BeSure Soil Gas Sampler™) 裝置是先於土壤層中準備約直徑 1 in 的鑽孔中，在孔中放置環狀的金屬管，再放入 7 ml 採樣瓶，於瓶身外綁金屬線並連接至地表上，以便取回樣本。其中採樣瓶裝入疏水性吸附劑並蓋上具有孔隙的採氣蓋後倒置，使氣體能穿過採氣蓋被吸附劑吸收，最後在金屬管蓋上鋁蓋，再使用部分土壤回填，即設置完成[5, 6]。

被動式多層採樣器(Passive Multilayer Sampler, MLS)可在監測井中設置數個採樣透析單元裝置，能跨越飽和及未飽和含水層，其裝置與設置方式如圖 3.1 所示[4]。每個採樣透析單元中設有一橫向倒置的透析單元圓柱體裝置(dialysis cell)，內含 20 mL 蒸餾水，圓柱體兩側皆有一層半透膜包覆，具有讓環境中的 VOCs 分子通過，水分子則無法滲透，達到與外界有機污染物質交換的能力；而每個單元皆為獨立裝置。將透析單元裝置與不鏽鋼管連接置入開篩井中之目標深度，待污染物濃度平衡後取回，可直接取出圓柱體中之液體上機分析污染物成分[7]，並將水樣中分析濃度藉由亨利常數換算回氣相中之污染物濃度，即可得知氣相污染物之分布；在飽和含水層之採樣，此採樣器達平衡時，內部水體之污染物濃度即會與外界水體濃度相當，藉以獲得地下水體污染物之分布狀況。然而此裝置尚在研究階段，仍有許多待克服之技術問題，例如量產商業化之成本或使用方便性。

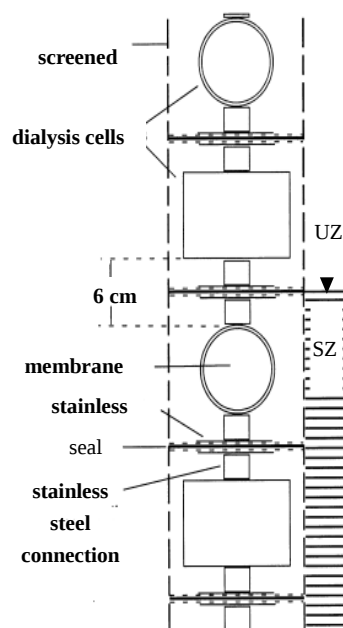


圖 3.1 多層被動式採樣器

被動式採樣方法中其中一種採樣器可藉由透析原理進行被動式採樣，而半透膜扮演重要之角色，半透膜顧名思義為能夠使物質穿透之薄膜。聚二甲基矽氧烷



含氣污染物高解析被動式採樣器開發測試及現地應用評估

(Polydimethylsiloxane, PDMS)，能在環境存在濃度梯度之狀況下，使污染物穿透薄膜，直到達成內外平衡。除此之外，其有高疏水性，且不易吸附污染物，因此常作為被動式採樣器之薄膜使用[8-11]。除上述提及之採樣器以外，另有其他不同形式之被動式採樣器被應用於受氯化有機溶劑污染之場址，如下所列舉，而本研究則參考上述之採樣器進行設計。半透膜接口探測器(Membrane Interface Probe, MIP)[12]，為美國 Geoprobe 公司研發的產品，此採樣器利用外部加熱器將環境溫度提升至 120°C，使周遭之 VOC 汽化後，與採樣器內部產生極大之濃度梯度，並藉由中端之半透模進行傳輸，以達到採樣的目的。被動式通量採樣器(Passive Flux Meter, PFM)[13]，則應用於飽和含水層中，利用吸附劑吸附地下水中污染物，再進行萃取所得到之質量及流經地下水之水體體積比即為所求之污染物濃度。井間介入性示蹤劑測試(Partitioning Interwell Tracer Tests, PITT)[14-16]，於土壤中加入介入性及非介入性示蹤劑，當非介入性示蹤劑接觸 NAPL 時，不會與之反應；反之，介入性示蹤劑則會溶解於 NAPL 中，使其濃度降低，而造成介入性示蹤劑之流動相對於非介入性示蹤劑產生明顯之滯後現象，再藉由數學模式計算污染物濃度。

傳統被動式採樣仍有多種限制，例如偵測空間分布不佳或平衡時間過長，導致濃度誤差過大等問題[17]，氣相或液相斷層攝影(Vapor or Aqueous Phase Tomography, VPT or APT)技術評析[18, 19]，可輔助應用於解析被動式採樣所得之數據，加以進行高解析場址污染調查。Mainhagu et al.⁶曾利用在監測井未飽和含水層開篩區間，於不同深度放置活性碳吸附被動式採樣器，如圖 3.2 所示，以抽氣方式產生負壓引導井中氣體流動，透過活性碳吸附之氣相污染物經萃取後可得知其質量[20, 21]，加上控制抽氣流量可得通過活性碳之氣體體積，兩者相除後，即得每個深度之氣體濃度。早期軟體產業不發達加上當時無多深度採樣之概念，大多僅以二維污染物濃度分布圖作為判斷污染源之標準，但二維污染物濃度分布圖僅可傳達單層污染物濃度之訊息，於應用上受限甚多，因污染物傳輸方式複雜，單憑其分析污染物位置，容易造成判斷錯誤；反觀現今之進步，三維空間之濃度分布已廣為盛行，因此破除二維地圖之限制，改以三維場址概念模型(Conceptual Site Model, CSM)作為有力之污染狀態判斷依據[22-25]。因此，氣相斷層攝影於同一時間內獲得多處深度之污染物濃度，並對照各監測井監測地點相對位置與深度一併匯入 3D 繪圖軟體後，利用線性插值的方法將濃度的分布繪出如圖 3.3 之 VPT 圖形呈現方式[19]，由圖中可清楚觀察到污染物之濃度及其分布狀況，能降低誤判濃度分佈之評估，且直接判斷出污染源位置[19]。因此，經由高密度三維空間污染濃度調查，可反映真實地表下污染物特徵，逐步由濃度分佈趨勢推估污染物存在位置，達到高解析場址調查之目的；藉此建立明確之 CSM，更有利後續整治工作之進行。

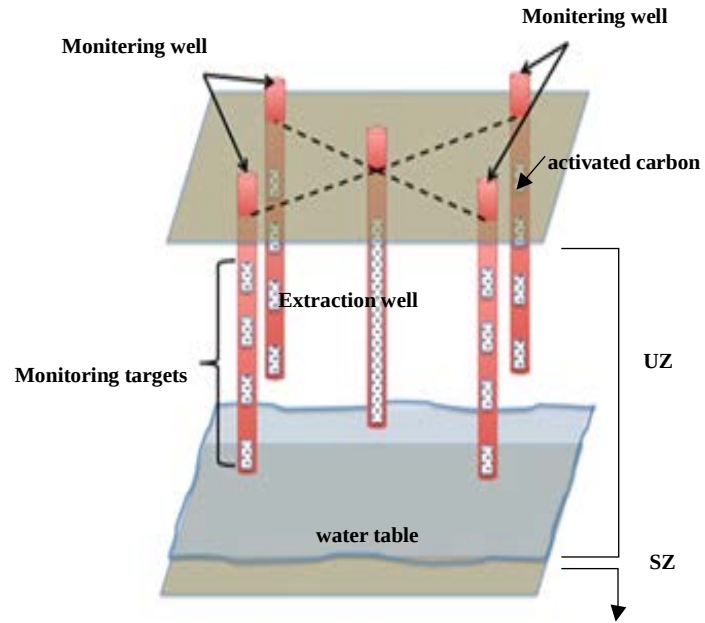


圖 3.2 VPT 現地調查採樣設置範例

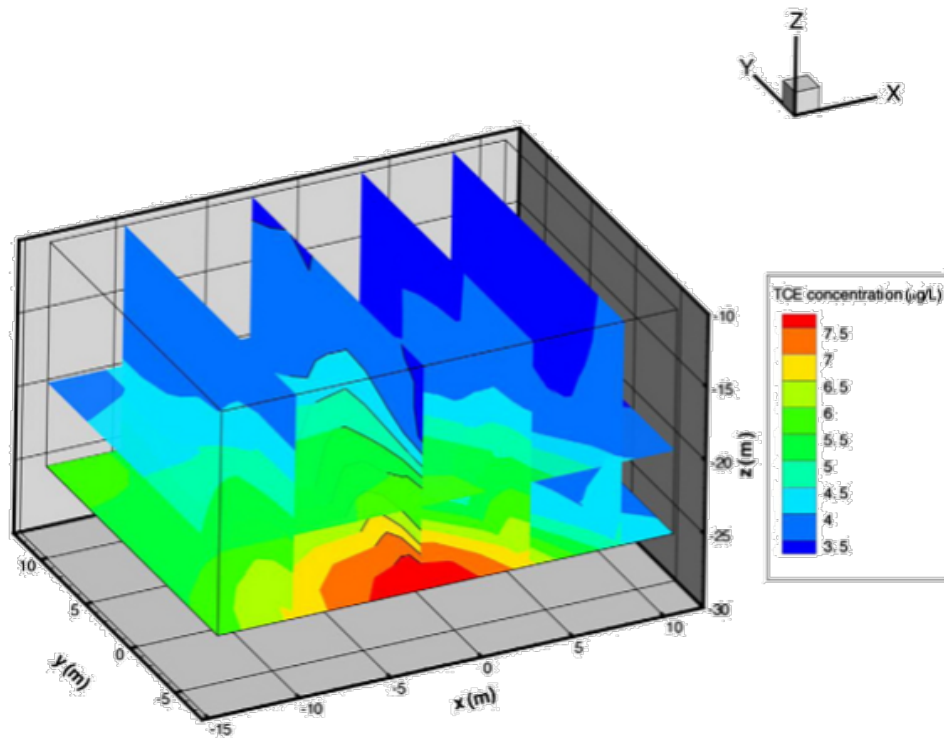


圖 3.3 VPT 三維濃度斷層攝影解析示意圖



含氣污染物高解析被動式採樣器開發測試及現地應用評估



第四章 研究方法與過程(含工作進度甘特圖)

第一年實驗室及現地實場試驗包含四項目標，實驗架構如下圖 3.4 流程所示，另詳述執行方式如後續說明。

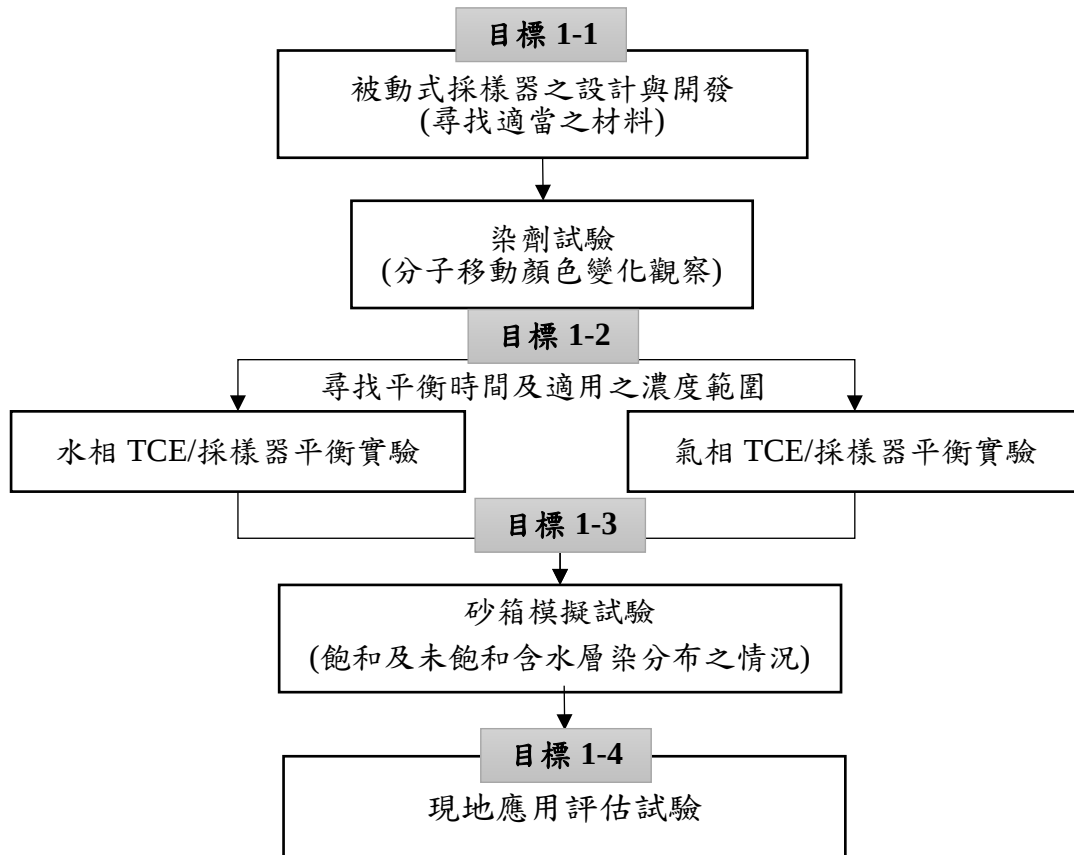


圖 3.4 第一年研究目標實驗流程規劃

4.1 高解析被動式採樣器之設計開發及製造

本實驗之被動式採樣器結合 BEACON Sampler [5]及被動式多層採樣器[4]之構想設計，初步設計規格如圖 4.1，以鐵氟龍(Polytetrafluoroethene, PTFE)材質作為主體，總長 10 cm、外徑 2.3 cm(可用於放入半徑 ≥ 1 吋監測井中)，內部中空，選用鐵氟龍之原因為其不會與污染物產生化學反應或吸附作用。接著在採樣器內部中空處填滿試劑水，保持零瓶頂空間，再裝上聚二甲基矽氧烷(Polydimethylsiloxane, PDMS)半透膜，使外界污染物可藉由濃度梯度穿透此膜，達到內外平衡[8-11]，最後再以 Oring 固定，鎖上外蓋即可進行測試。

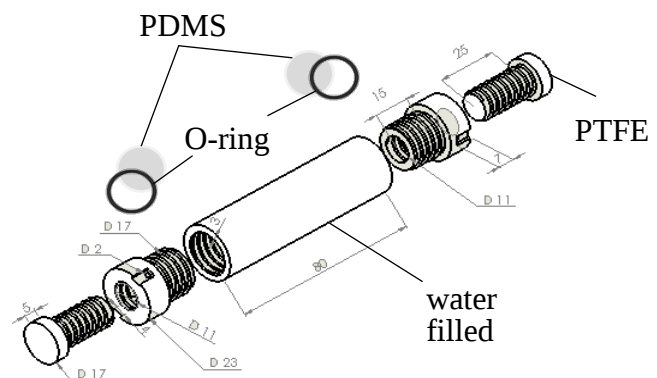


圖 4.1 被動式採樣器初步設計規格

本採樣器設計原理以費克定律



含氣污染物高解析被動式採樣器開發測試及現地應用評估

(Fick's Law)為基礎，污染物採樣時之擴散動力取決於濃度梯度(外界污染物濃度與採樣器內純水中之濃度差異)；污染物是藉由 PDMS 透析膜為傳輸媒介滲透至採樣器內部之純水，整體概念如下表 4.1 所示。若採樣器外界污染物之濃度未達透析膜吸附容量(Adsorption capacity)，污染物會遵循簡單擴散(Simple Diffusion)方式透過 PDMS 透析膜進行擴散至採樣器中之純水，其擴散速率隨濃度梯度增加而增加；若污染物之濃度超過 PDMS 之吸附容量，則會遵循促進擴散(Facilitated diffusion)之機制進行污染物擴散滲透入純水中，因受到分子對透析膜穿透速率的物理限制，此時擴散速率不隨濃度梯度增加而增加，依循透析膜之污染吸附濃度與內部純水間之濃度差異，將維持定值之擴散速率(Feher, 2017; Darnell *et al.*, 1986)。

表 4.1 被動式採樣器之 PDMS 透析膜擴散原理

簡單擴散 (Simple Diffusion)	促進擴散 (Facilitated Diffusion)
$\frac{dn}{dt} = P \times A \times \left(\frac{dC}{dx} \right)$ n = Number of molecules inside sampler (mol) t = Time (seconds) P = Permeability constant for a particular molecule (cm/sec) A = Surface area of the PDMS membrane (cm²) C = Concentration of diffusing molecule (mol/cm³) X = Width of PDMS membrane (cm)	$\frac{dn}{dt} = \frac{V_{\max}}{1 + K / \left(\frac{dC}{dx} \right)}$ n = Number of molecules inside sampler (mol) t = Time (seconds) $V_{\max}$ = Saturation constant (mol/cm³/sec) K = Constant determining speed of saturation (mol/cm⁴) C = Concentration of diffusing molecule (mol/cm³) X = Width of PDMS membrane (cm)

另外，此採樣器外部可加上不鏽鋼材料或水線串聯另一個採樣器，以測量不同深度之污染物，得到不同深度下污染物之濃度分布。當取回採樣器時，為了避免其和空氣接觸導致污染物揮發的可能性，而在最外側加上螺帽，使整個採樣器密閉，並依被動式採樣流程送回實驗室分析。欲分析時，僅需打開螺帽蓋，利用取樣針筒直接穿入 PDMS 取出樣本以上機分析，內容物液體體積符合吹氣捕捉設備(Purge & Trap) 之前處理搭配 VOC 氣相層析質譜儀進行分析，並不會使樣本接



觸到外界而造成揮發損失。

為確認被動式採樣器和外界污染物之間僅透過穿越半透膜的方式進行傳輸，因此進行品管測試，將被動式採樣器放入 150 ppm 之食用藍色一號染料水溶液中進行測試，待 7 天後，以紫外光/可見光分光光譜儀(Ultraviolet-visible spectroscopy, UV-Vis)在 630 nm 的波長下進行吸光值量測，比較採樣器內外於實驗前後之吸光值；每一個製造好的採樣器皆會進行確認採樣器製作之品質是否有滲漏。

4.2 批次試驗用以建立氣相及液相達反應平衡之採樣時間及適用濃度範圍

將以單純氣相或溶解相三氯乙烯平衡實驗模擬未飽和及飽和含水層的污染情況。本實驗將被動採樣器置於反應瓶中，與氣相或溶解相污染物接觸，尋找其平衡時間及適用之濃度範圍。水相 TCE 與採樣器平衡實驗用以測試其採樣所需之平衡時間，實驗方式為配置不同濃度之 TCE 水溶液，接著將被動式採樣器放置反應器中，裝置如圖 4.2 所示，進行不同反應平衡時間之實驗，尋找系統之平衡時間；再以實驗結果得知之所需平衡時間，分別放入不同濃度污染物之水溶液中，觀察此被動式採樣適用的採樣濃度範圍。

第一階段批次實驗，考量未飽和含水層之土壤孔隙中大多為空氣，因此以單純氣相平衡實驗模擬未飽和含水層的污染情況。本實驗將被動式採樣器置於反應瓶中，再將純質 TCE 從旁注入，使其揮發至整個反應瓶中，氣相濃度分別為 2.6 及 26 mg/L，並以 7, 10, 12, 14, 20 天之反應時間，尋找其平衡時間，實驗規劃表如表 4.2 所示。

表 4.2 氣相平衡實驗規劃

Objective	Vapor phase CAHs conc. (mg/L)	Equilibrium period (day)
Vapor phase equilibrium test	2.6, 26	7, 10, 12, 14, 20

Note: 2, 20 μ L TCE injected in 1.134 L reactor, respectively



含氯污染物高解析被動式採樣器開發測試及現地應用評估

第二階段批次實驗，是進行水相 TCE 與採樣器平衡實驗用以測試其採樣所需之平衡時間，實驗方式為配置 3 mg/L 及 25 mg/L 濃度之三氯乙烯水溶液，接著將被動式採樣器放置反應器中，進行 2、4、7、10、12、14 天反應平衡時間之實驗，尋找系統之平衡時間；再以實驗結果得知之所需平衡時間，分別放入 0.05、3、25、40、50、100、150 mg/L 之 TCE 水溶液中，觀察此被動式採樣適用的 TCE 採樣濃度範圍，實驗規劃及裝置如表 4.3 所示。

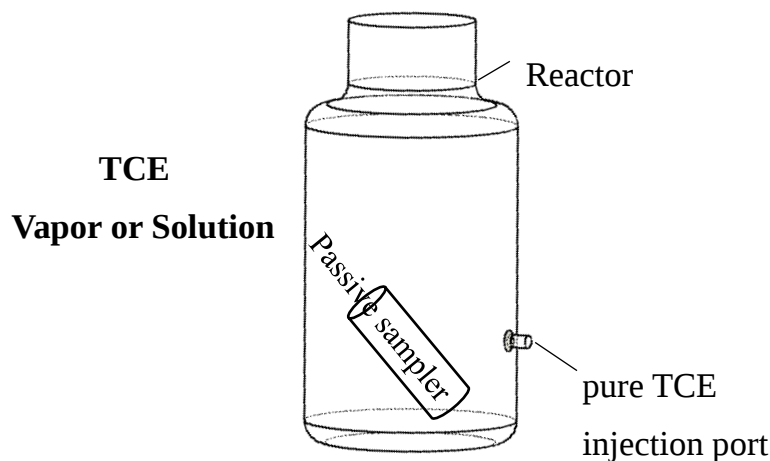


圖 4.2 氣相與液相 TCE 與採樣器平衡實驗裝置

表 4.3 被動式採樣器於水相中採樣平衡時間評估實驗規劃

Objective	Aqueous phase CAHs conc. (mg/L)	Equilibrium period (day)
Aqueous phase equilibrium test	3, 25 ⁽¹⁾	2, 4, 7, 10, 12, 14
	0.05, 3, 25, 40, 50, 100, 150 ⁽²⁾	10, 14

Note: ⁽¹⁾ 2, 20 μ L TCE injected in 1.1 L reactor, respectively. ⁽²⁾ 2, 20, 30, 40, 75, 110 μ L TCE injected in 1.1 L reactor, respectively

4.3 砂箱模擬試驗

確認採樣器於氣相實驗之平衡時間後，以砂箱模擬實場狀況，追蹤評估三氯乙烯之污染範圍。砂箱配置規劃如圖 4.3 所示及圖 4.4 則為實體砂箱之照片，本實驗在低滲透度區 II (Low permeability zone, LPZ) 上之表層((x, y, z) = (17, 38, 23)) 注入 0.5 mL 純相三氯乙烯，待 14 天後，同時進行主動式採樣及被動式採樣以比較兩者採樣方式之差別。使用之孔隙介質為通過 30~70 號(0.212~0.545 mm)篩網之石英砂或土壤介質，砂箱底部為飽和含水層 5 cm (35~40 cm-bgs)，其次為未飽和含水層 32 cm (3~35 cm-bgs)，最上層鋪皂土層 3 cm (0~3 cm-bgs) 以防止氣相 TCE 揮發至大氣中。此外，並在其中設有低滲透度區 I，觀察其對氣相三氯乙烯濃度分布之影



研究方法與過程

響。主動式採樣分別在六個點三個不同深度下(A~F；8、18、28 cm-bgs)，插入三條鐵氟龍管(內徑 1/16 in、外徑 1/8 in)，並以手提式光離子偵測器(Photo-ionization Detector, PID) 偵測土壤中氣體濃度，操作方式係於每點抽取 6 秒，每次抽取體積為 50 mL，分別佔石英砂及土壤介質之總孔隙體積之 0.26%及 0.24%；而被動式採樣為三組串連的兩個被動式採樣器吊掛於開篩井中(SW1~SW3；15、25 cm-bgs)，其中開篩管中間塞海綿以阻擋開篩管中氣體上下對流，避免造成實驗誤差，且開篩管上下方皆以管蓋密封，待達平衡時間後，取其中之水溶液進行分析。砂箱實驗規劃如表 4.4 所示、土壤介質及砂箱參數如表 4.5，最後將主動式採樣各點所得之每秒數據加總平均及被動式採樣分析後之水溶液濃度一併匯入 Voxler 軟體中，以呈現場址概念模型。

Voxler 由美國 Golden Software 公司開發，能應用於二維及三維建模之工具，能顯示地表下污染物分布狀況、鑽孔模型或礦體沉積模型等。此軟體依據輸入之相對位置、深度及對應之濃度，以線性插值計算，產生三維場址概念模型，並可觀察特定位置或深度之濃度分布。此外，Voxler 亦可搭配其內部組件(如等濃度線)使圖像結果清晰化，且其人性化之設計使操作上簡單方便，是廣泛被使用之軟體。

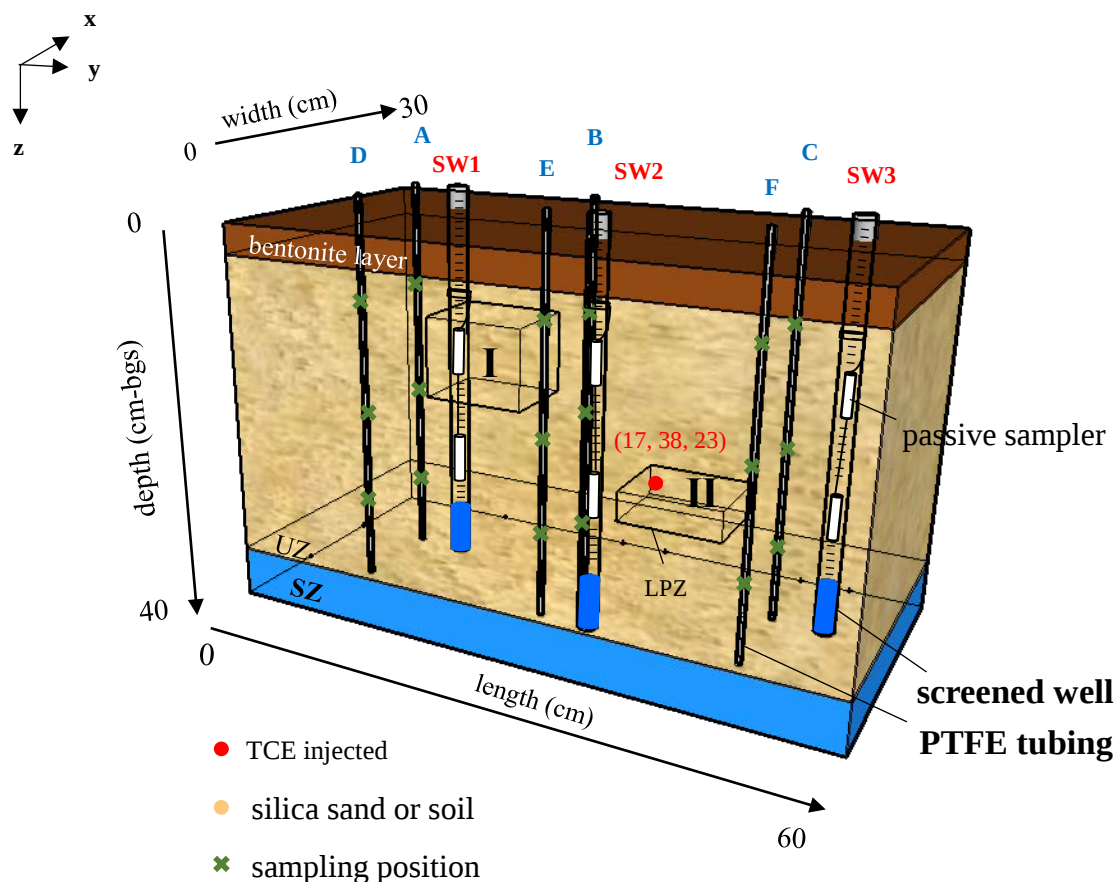


圖 4.3 砂箱配置示意圖



含氯污染物高解析被動式採樣器開發測試及現地應用評估

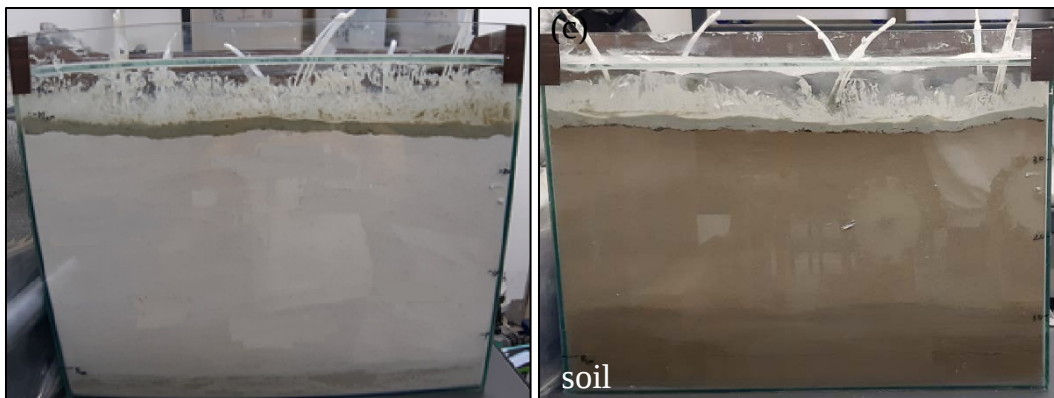
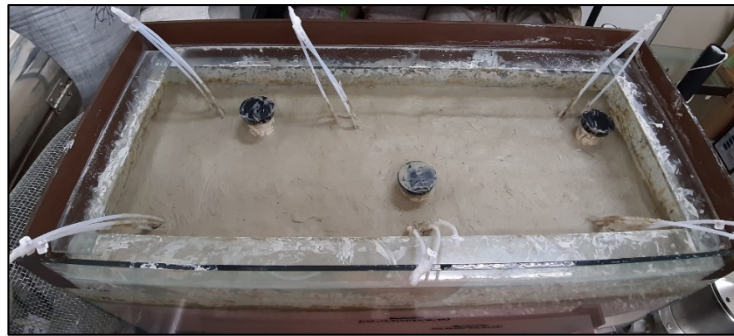


圖 4.4 (A)砂箱俯視圖、(B)石英砂介質之砂箱正視圖及(C)土壤介質之砂箱正視圖

表 4.4 主動及被動式採樣砂箱模擬試驗規劃

Sampling method	Sampling point	Medium	Pure TCE injected (mL)	TCE injected position	Detection time (day)
Active sampling	A, B, C, D, E, F	silica sand	0.5	(x, y, z) = (17, 38, 23)	14
Passive sampling	SW1, SW2, SW3	soil			



表 4.5 土壤介質特性及砂箱實驗參數

Parameter		Value
Soil medium		
silica sand	particle size	#30-70
	hydraulic conductivity	0.08 cm/s
	porosity	0.35
bentonite	particle size	#150-160
	hydraulic conductivity	10^{-8} cm/s
	porosity	0.67
sandy soil	particle size	#30-70
	hydraulic conductivity	0.08 cm/s
	porosity	0.38
	total organic carbon	0.06 %
Sandbox		
sandbox size (L/W/H)		60/30/40 cm
LPZ-I size (L/W/H)		8/10/8 cm
LPZ-II size (L/W/H)		8/10/3 cm
bentonite-covered thickness		3 cm
unsaturated zone thickness		32 cm
saturated zone thickness		5 cm
temperature		$25 \pm 1^{\circ}\text{C}$

4.4 現地應用評估

以模場試驗探討本研究設計之被動式採樣器分別於高濃度污染及低濃度污染場址採樣之適用性，場址分別為慶川與東陽場址，監測井基本資訊如表 4.6 井之未飽和及飽和含水層中使用主動式及被動式之採樣方法進行採樣，並比較採樣之分析結果。未飽和含水層中使用手持式光離子化檢測儀(Photo-ionization Detector, PID)及被動式採樣器(Passive sampler, PS)進行比較，飽和含水層中則使用微洗井採樣(Low-flow sampling, LFS)、被動式擴散採樣袋(Passive diffusion bag, PDB)及被動式採樣器進行比較，實驗規劃如表 4.7 所示。



含氣污染物高解析被動式採樣器開發測試及現地應用評估

表 4.6 慶川及東陽場址監測井基本資料

場址	井號	井徑 (inch)	井頂高程 (m)	座標 (TWD97)		井深 (m)	開篩區間 (m)	井口至水 面深度(m)
				X	Y			
慶川	SW08	2	9.9856	197227	2663772	6.2	4.6~6.1	4.041 ^(a)
東陽	GW03	2	22.8154	262812	2771986	14.4	8.3~14.3	3.359 ^(b)

註: ^(a) 地下水位監測日期為 2020/09/15。^(b) 地下水位監測日期為 2020/10/08。

表 4.7 不同採樣方法於現場監測井中採樣結果比較之實驗規劃

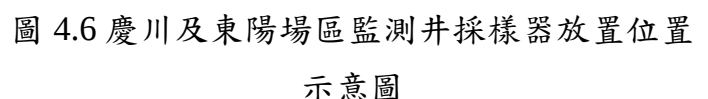
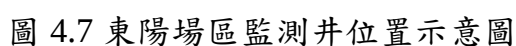
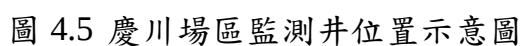
Objective	Sampling methods	Sampling Well (Well screen interval)	Number of samplers deployed		Parameters measured	Sampling period (day)
			Unsaturated zone	Saturated zone		
Comparison of different sampling methods	Passive sampler	慶川 SW08 (1.5 m)	2	3	VOC pH DO	14
	Passive diffusion bag				EC ORP	
	Photoionization detector (PID)	東陽 GW03 (6.0 m)	1	4		0, 14
	Low-flow sampling					

註: 1. PID 抽氣流量為 330 mL/min，置換 3 次所連接鐵氟龍管線之體積後才開始記錄 PID 讀值，PID 出口端接上採氣袋收集氣體帶回實驗室使用 GC/MS 進行分析。

2. pH, DO, EC, ORP 由微洗井採樣測得，微洗井抽水流量為 100 mL/min。

3. 所有監測井由上而下進行採樣，避免擾動井管空氣及積水。

慶川場址位於彰化縣鹿港鎮溝墘里溝墘巷，附近多為農地及住宅，慶川企業社主要從事五金零件材料表面清洗以及塗料、塗裝製程。製程中曾使用三氯乙烯作為表面清洗劑，後續再進行塗裝上膜作業，目前本場址已不再使用三氯乙烯。慶川場址採樣之監測井以 SW08 作為此計畫之測試井，該井位於超音波清洗區旁，監測井位置與採樣深度如圖 4.5 及圖 4.6 (a) 所示。東陽場址位於桃園市觀音工業區榮工北路，東陽實業主要從事汽車零件製造，主要製程為將塑膠粒使用射出成型，半成品經人工打磨、拋光、噴塗，使用原料有甲苯、二甲苯、環己烷、甲基異丁酮、去漬油等，早期使用三氯乙烯作為塑膠零件塗裝前之清潔，目前已改為使用脫脂劑加熱水之方式，未再使用含氯之有機溶劑。本場址採樣之監測井為 GW03，該井位於場區作業場所內，監測井位置與採樣深度如圖 4.7、圖 4.6(b) 所示。





含氯污染物高解析被動式採樣器開發測試及現地應用評估

4.5 模場試驗採樣步驟

開始採樣前先進行監測井拍照與環境狀況記錄，為避免擾動井管空氣及積水，由未飽和至飽和含水層依序進行採樣。

採樣步驟依序如下：

1. 量測地下水水位及井深。
2. 進行未飽和含水層土壤氣體採樣，使用手提式 PID，將鐵氟龍管一端以束帶固定於水位計上，確認 PID 於未飽和含水層採樣之深度，另一端連接於 PID 進氣端。將固定好之水位計放入井中欲採樣之深度，開始採樣前先置換 3 次管線內之氣體後，開始記錄 PID 讀值並於 PID 出口端接上採氣袋抽取約 500 毫升之氣體，帶回實驗室進行後續之分析。
3. 進行飽和含水層地下水採樣，使用微洗井採樣，組裝微洗井採樣設備並校正水質參數測定儀器，將氣囊式泵與水位計一同放入井中確認採樣深度，開始抽取井水、調整抽水流量於 0.1 ~ 0.5 L/min 之間，測量井水之水質參數(pH、EC、DO、ORP)，測量頻率約間隔 5 分鐘，待水質參數穩定始得取樣，採樣完畢後將樣品保存於冰桶中。
4. 放置被動式採樣，將被動式擴散採樣袋與被動式採樣器依不同深度固定於尼龍線上，尼龍線下端綁重物，將被動式採樣器緩慢放置於井中，並固定於井口，採樣平衡 14 天。
5. 採樣平衡 14 天後，先進行被動式採樣之取樣(註 1)，再依前述步驟依序進行 PID 與微洗井採樣。

註 1: 井中放置被動式採樣，使水位計及 PID 之鐵氟龍管無法伸入井中，須先進行被動式採樣之取樣。

4.6 分析方法

染劑試驗中，食用藍色一號水溶液之吸光度測定是利用紫外光/可見光分光光譜儀在 630 nm 的波長下進行吸光值量測而得，此實驗為確認反應瓶及被動式採樣器中個別水溶液之吸光度是否有改變。

主動式採樣分析以手提式 VOCs 偵測器—MiniRAE 3000 (圖 4.8)，為美國 RAE Systems 公司之產品，其構造中含有光離子偵測器，電流強度為 10.6 eV，以異丁烯(Isobutylene)作為檢量線之校正氣體，可每秒量測揮發性污染物濃度並記錄



數據，再以 RAE Systems by Honeywell 公司提供之修正因子(Correction Factor, CF)進行氣體間濃度轉換。

偵測方法分成兩種，一種為將偵測器接上鐵氟龍管插入監測井中，利用儀器偵測之 VOCs 濃度訊號乘上揮發性污染物之修正因子獲得其氣相濃度，本研究使用三氯乙烯之修正因子為 0.54，計算式如式(4-1)；另一種為在偵測器側邊外接採氣袋收集井中的氣體，並參照行政院環保署公告之



圖 4.8 手提式 VOCs 偵測器

「空氣中揮發性有機化合物檢測方法—不銹鋼採樣筒／氣相層析質譜儀法(NIEA A715.15B)」[26]，以氣相層析儀搭配質譜儀(Gas chromatography/Mass spectrometry, GC/MS)進行分析。本研究僅以讀取偵測器上之濃度與三氯乙烯修正因子之乘積代表主動式採樣分析結果，作為與被動式採樣結果比較之用。

$$\text{TCE 氣相濃度 (ppmv)} = \text{PID 訊號} \times 0.54 (\text{CF}_{\text{TCE}}) \quad (4-1)$$

被動式採樣所獲得之水體分析方法參照行政院環保署公告之「水中揮發性有機化合物檢測方法—吹氣捕捉／氣相層析質譜儀法(NIEA W785.55B)」[27]，以 GC/MS 進行分析。採樣器中的 TCE 水溶液得到其濃度後，利用亨利定律換算氣相 TCE 的濃度值，再藉由理想氣體方程式將氣相濃度轉換成百萬分濃度。以下計算式(4-2)為無因次亨利定律，因實驗溫度為 20°C，但分析時室溫約為 25°C，所以採用 TCE 之無因次亨利常數值介於 0.34 (20°C)~0.40 (25°C)[4]，以式(4-2) 20°C 為例，予以式(4-3)換算氣相濃度，再以式(4-4)將濃度轉換成百萬分濃度。

$$H = \frac{\text{氣相中 TCE 之濃度}}{\text{水相中 TCE 之濃度}} = 0.34 (20^\circ\text{C}) \quad (4-2)$$

$$\text{氣相中 TCE 濃度}(\text{mg/L}) = 0.34 \times \text{水相中 TCE 濃度}(\text{mg/L}) \quad (4-3)$$

氣相中 TCE 百萬分濃度(ppmv)

$$= \text{氣相中 TCE 濃度}(\text{mg/L}) \times 10^{-3} \frac{\text{g}}{\text{mg}} \times \frac{1}{131.4} \frac{\text{mol}}{\text{g}} \times 24 \frac{\text{L}}{\text{mol}} \times 10^6 \quad (4-4)$$



含氣污染物高解析被動式採樣器開發測試及現地應用評估

4.7 研究進度及預期完成之工作項目(甘特圖)

本計畫之工作進度與甘特圖如表 4.8 所示，皆已達成第 1 年實驗室及現地實場試驗之預定進度。研究成果已發表於 Journal of Hazardous Materials 期刊中，被動式採樣器之專利已撰寫完成，轉由承辦事務所提送專利申請；原計畫所列之研討會論文為國外發表，受疫情影響暫無法前往國外進行研討會論文發表，改以國內研討會論文發表；本計畫第 1 年進度應屬符合。

表 4.8 本計畫之甘特圖

工作項目	年月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	備註
第一年 實驗室及現地實場試驗														
目標1-1 進行高解析被動式採樣器之設計開發及製造。														
目標1-2 批次試驗用以探討於氣相及液相狀況下，達反應平衡之採樣時間及適用之濃度範圍。							※							
目標1-3 透過砂箱試驗進行三氯乙烯污染物主動式採樣與被動式採樣結果比較，並以三維斷層掃描方式呈現污染物分布。														
目標1-4 為確保開發設計之被動式採樣器能妥善應用於現地，先行以一場址進行現地應用測試，建立採樣之標準作業流程。													※	
第二年 現地應用試驗														
目標2-1 優化高解析被動式採樣器。														
目標2-2 低及高濃度不同污染場址現地應用評估。							※							
目標2-3 氣相及液相濃度分布斷層攝影技術評析。													※	
工作進度估計百分比 (累積數)	5%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	95%	100%		
預定查核點	期中	第一年 目標1-1 被動式採樣器成品及目標1-2 反應平衡之採樣時間及適用之濃度範圍確認。 第二年 目標2-1 被動式採樣器成品優化及目標2-2 低及高濃度不同污染場址現地目標。												



研究方法與過程

	期 末	第一年 1-3 三維斷層掃描方式呈現污染物分布及目標1-4 一處場址針對未飽和及飽和含水層不同採樣分析比較 第二年 延續目標2-2 低及高濃度不同污染場址現地應用評估及目標2-3 氣相及液相濃度分布斷層攝影技術評析。
--	--------	--



含氯污染物高解析被動式採樣器開發測試及現地應用評估



第五章 結果與討論

5.1 高解析被動式採樣器之設計開發及製造

本研究開發之被動式採樣器(圖 5.1)是利用透析原理以 PDMS 半透膜進行傳輸，當濃度梯度存在時，外界污染物會穿透半透膜進入採樣器內部，使內外濃度達到平衡。其細部構造如圖(a)及(b)所示，整體之採樣器為鐵氟龍材質，不易吸附污染物，總長 10 cm，外徑 2.3 cm，加上 PDMS 半透膜後，再以 O-ring 固定並上蓋密封，使水完整的保留在採樣器中。除此之外，在圖 5.1 中，可發現採樣器之鐵氟龍蓋上有凹槽設計，其中以半徑 0.2 cm 之小洞貫穿，並以金屬串接多個採樣器，以達成多層被動式採樣之目的，其示意圖如圖 5.1(c)。

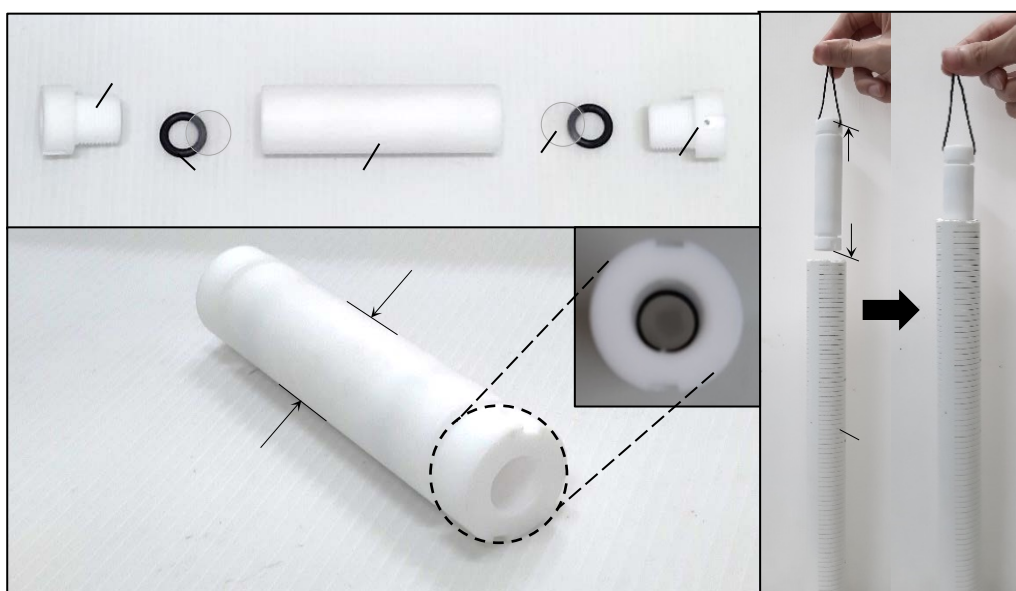


圖 5.1 (A)被動式採樣器細部圖、(B)組裝成品及(C)被動式採樣器放置於篩管中示意

染劑試驗是為了觀察反應瓶中水溶液是否會透過滲透 PDMS 膜進行傳輸，其結果如圖 5.2 所示，可觀察到第 0 天及第 7 天被動式採樣器中的水溶液皆保持透明澄清。此外，於反應前後分別測量反應瓶及被動式採樣器中水溶液之吸光度(表 5.1)，顯示被動式採樣器中之水溶液吸光值皆為 0，且反應瓶中水溶液吸光值保持不變(<10%)。因染劑分子量大，無法滲透 PDMS 膜而進入採樣器中，又採樣器內水溶液在反應後保持澄清無色，此結果顯示反應瓶中水溶液無其他路徑進入採樣器中(例如滲漏)，僅可透過滲透 PDMS 膜進行傳輸。



含氯污染物高解析被動式採樣器開發測試及現地應用評估

表 5.1 反應瓶及採樣器中水溶液吸光值比較

Reaction time (day)	Reactor	Sampler
	Absorbance (@ 630 nm)	
0	2.7469	0
7	2.7365	0



圖 5.2 染劑試驗被動式採樣器內水溶液反應前後之比較

5.2 水相 TCE 與採樣器平衡

通過染劑試驗的測試，確認反應瓶中水溶液僅可透過滲透 PDMS 膜進行傳輸後，接著進行水相 TCE 與採樣器之平衡實驗，找出此採樣器在水相 TCE 中所需之平衡時間，作為取回採樣器分析之依據；除此之外，將採樣器放置於不同濃度之 TCE 污染水中，模擬實場可能出現的污染情況，並於達平衡時間後，分析並確認此採樣器可應用的濃度範圍。第一階段將被動式採樣器放置於 3 及 25 mg/L 兩濃度之 TCE 水溶液中，分別於放置 2, 4, 7, 10, 12, 14 天後，取出被動式採樣器並分析反應瓶中水相 TCE 濃度。當被動式採樣器與反應瓶中濃度比值($C_{\text{sampler}}/C_{\text{solution}}$)達 1.0 ± 0.1 時，即達平衡。結果如圖 5.3，採樣器於 3 mg/L 之 TCE 水溶液中，在第 4 天即達平衡；而於 25 mg/L 之 TCE 水溶液中，在第 10 天可達到平衡，顯示濃度愈低所需之平衡時間愈短。綜合兩組試驗得知於此濃度範圍採樣器所需之平衡時間需 >10 天。

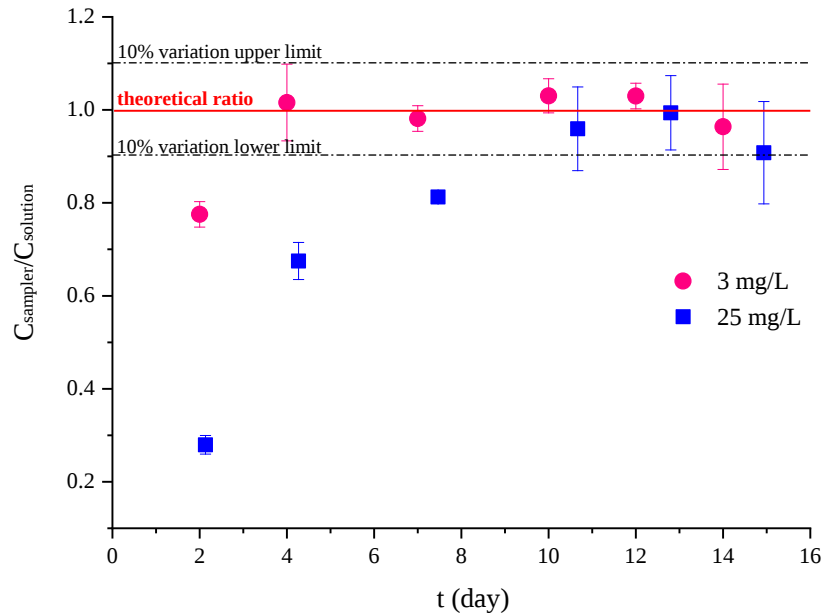


圖 5.3 被動式採樣器之採樣 TCE 濃度與水溶液 TCE 濃度比值隨時間變化關係

由第一階段平衡實驗得知被動式採樣器在水相 TCE 中之平衡時間為 10 天後，第二階段以 10 天為平衡時間之基準點，然而為確保足夠之平衡反應時間，此第二階段之實驗將採樣器分別放置 10 天及 14 天後再取回予以分析，美國 Beacon Environmental Services Inc. 之被動式採樣器之建議平衡反應時間亦為 14 天[28]，並且將被動式採樣器置於濃度為 0.05, 3, 25, 40, 50, 100, 150 mg/L 之 TCE 水溶液中觀察其平衡情況。實驗結果如圖 5.3 所示，當平衡時間為 10 天時，TCE 濃度為 40 mg/L 之 $C_{\text{sampler}}/C_{\text{solution}}$ 比值為 0.9，達 10% 誤差下限，當 TCE 水溶液提升至 50 mg/L 時，則已超出達平衡的範圍(比值為 0.62)；反之，平衡時間為 14 天時，TCE 濃度介於 0.05~150 mg/L 範圍內比值皆在 1.0 ± 0.1 間。因此可知於水相中平衡反應時間須達 14 天，此採樣器可適用之 TCE 濃度範圍為 0.05~150 mg/L。



含氯污染物高解析被動式採樣器開發測試及現地應用評估

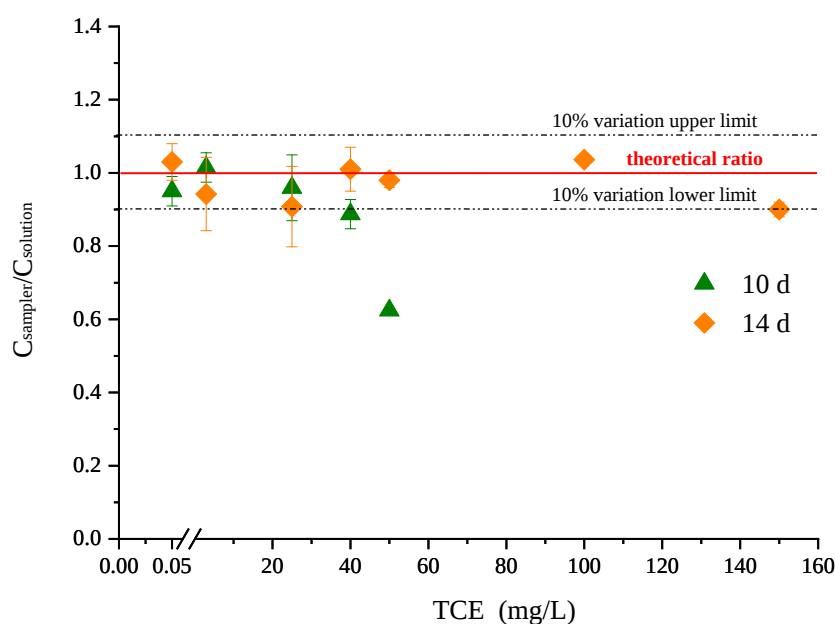


圖 5.3 TCE 濃度對被動式採樣器平衡時間 10 天及 14 天之影響關係

5.3 氣相 TCE 與採樣器平衡

前節之實驗結果已確認被動式採樣器在 TCE 水溶液中能達成平衡後，用以進行被動式採樣，接著以氣相 TCE 為目標污染物，模擬未飽和含水層之情況。在氣相 TCE 為 2.6 及 26 mg/L 之條件下，將採樣器置入並於不同反應平衡時間 7、10、12、14、20 天後，分別取瓶中 TCE 氣體及採樣器中 TCE 水溶液進行分析，兩比值等於亨利常數(0.34@ 20°C)時即達平衡。結果如圖 5.4，因氣相 TCE 濃度愈高，氣體愈容易藉由擴散而較快達成平衡，而兩不同 TCE 濃度組別之氣/液相濃度比例 (C_g/C_{aq})皆在第 12 天達成平衡，分別為 0.32 及 0.36。此外，將 12、14、20 天之數據平均後之比例為 0.342，接近 20°C 下之亨利常數 0.34，由此些結果可知此採樣器在氣/液相間之傳輸符合亨利定律，可應用於進行氣相污染物之被動式採樣，氣相 TCE 濃度 2.6~26 mg/L 範圍，平衡反應時間需>12 天。

經實驗結果可得知，三氯乙烯在中低濃度條件下，被動式採樣器之擴散平衡時間為 10 天；因此，為確保樣品採樣之準確性，方於計畫中建議以 14 天作為平衡時間之標準。此採樣器所需平衡時間與環檢所標準方法之監測井地下水揮發性有機物被動式擴散採樣袋採樣方法一致；本計畫開發之被動式採樣系統與環檢所標準方法之監測井地下水揮發性有機物被動式擴散採樣袋採樣方法 (NIEA W108.50C)比較如下表 5.2 所示。

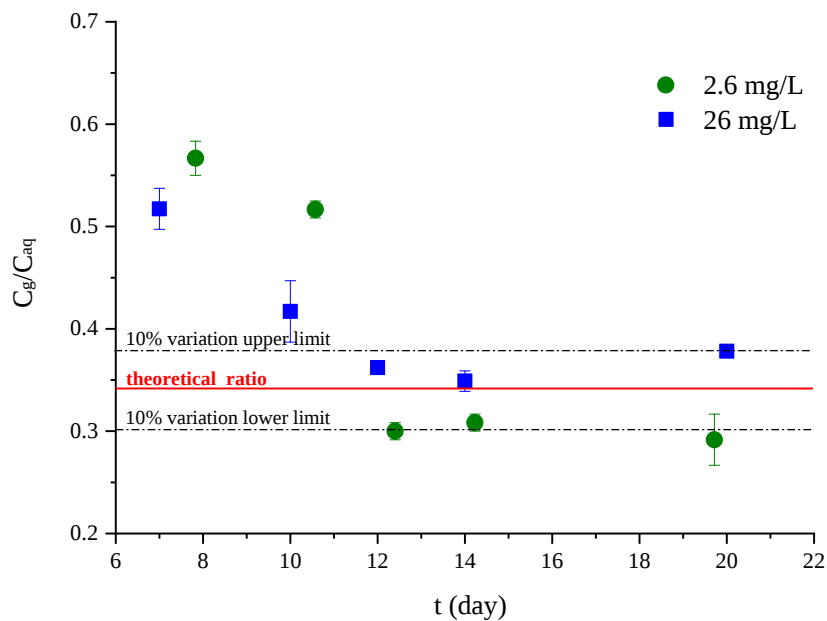
圖 5.4 被動式採樣器 TCE 氣體採樣氣/液相濃度比例(C_G/C_{AQ})隨時間變化關係

表 5.2 被動式採樣系統與環檢所標準方法被動式擴散採樣袋之採樣方法比較

項目	NIEA W108.50C 被動式採樣袋	土基會補助計畫開發之被動 式採樣器
適用污染物類型	VOCs	VOCs、無機溶質
監測井中採樣區域	飽和含水層	飽和與未飽和含水層
平衡時間	14 天	14 天
適用井口尺寸	2 吋以上	1 吋以上
重複使用性	不可重複使用	可重複使用
取樣方式	達平衡時間後，需將採樣袋表面清潔後開蓋或破袋，將採樣袋中之水樣移至採樣瓶	達平衡時間後，直接蓋上 PTFE 蓋，送至實驗室；分析時直接將分析取樣針穿刺透析膜取出水樣分析



含氣污染物高解析被動式採樣器開發測試及現地應用評估

5.4 砂箱試驗-主動式採樣與被動式採樣結果比較

經由氣相平衡實驗後，確認被動式採樣器於第 12 天達成平衡。因此，規劃以砂箱模擬受三氯乙烯污染場址之情況，在低滲透度區表面((x, y, z) = (17, 38, 23))注入 0.5 mL TCE (圖 4.3)，待 14 天後，利用 MiniRAE 3000 VOCs 手持式偵測器進行主動式採樣，並將放置井管中之被動式採樣器取出分析，接續以三維斷層掃描呈現污染物分布。

含水率對氣相污染物有一定之影響，含水率愈高，氣相污染物愈能溶於水中，偵測到的濃度愈低；反之，含水率愈低，水相-氣相分配係數之影響愈小，能偵測到較高之濃度[29]，因此於每五公分處以溼度計偵測含水率，作為參考之用，結果如圖 5.5 所示，在石英砂及土壤介質中，隨著深度漸淺(接近表層)，濕度愈低，顯示孔隙介質間之毛細力促使水分向上移動，而造成飽和含水層之水分向上傳輸[20]。

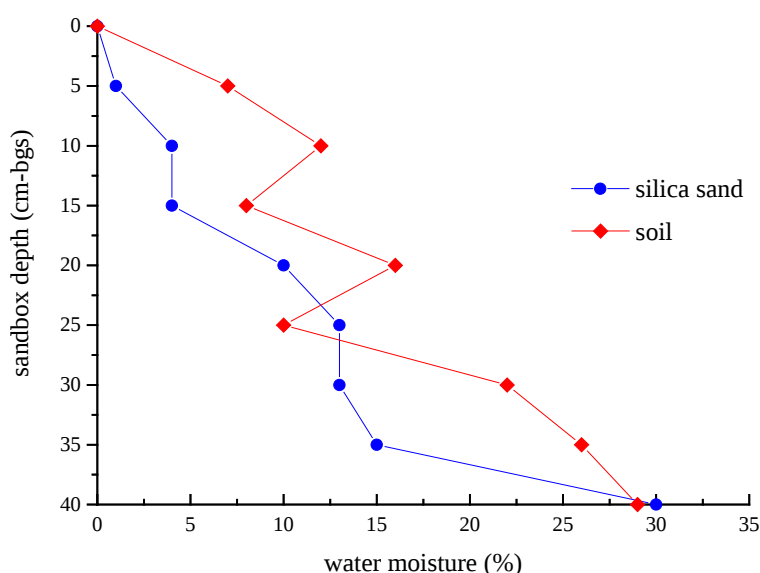


圖 5.5 平衡時間後，石英砂介質及土壤介質組別中濕度隨深度之變化

然而，實驗中添加水量約 3150 mL，使底部(35 cm-bgs~40 cm-bgs)土壤達成飽和狀態，理論上飽和含水層中，水分含量應等於孔隙率，即石英砂介質與土壤介質之含水率分別為 35%及 38%，但實際上石英砂及土壤介質中含水量分別為 30%及 29% (圖 5.5)，造成此原因可能為毛細力之影響，且操作期間砂箱中無水流通過，以至於無法補充孔隙中流失之水分，根據土壤孔隙毛細力上升公式(5-1)，可求得石英砂及土壤介質之 $h_c = 20.63$ cm，其中石英砂與土壤之滲透度(k)由其個別之水力傳導係數(K)(表 4.5)換算(5-2)。



$$h_c = \frac{\beta\sigma}{\Delta\rho g} \sqrt{\frac{n}{k}} \quad (5-1)$$

where:

h_c = height of capillary rise, (cm)

β = wetting coefficient, (0.4 for water)

σ = surface tension of water in air (73 dynes/cm @ 25°C)

$\Delta\rho$ = density difference between air and water (~1.0 g/cm³)

g = acceleration due to gravity (980 cm/s²)

n = soil total porosity expressed at decimal

k = intrinsic permeability (cm²)

$$k = \frac{K\mu}{\rho g} \quad (5-2)$$

where:

K = hydraulic conductivity (cm/s)

μ = dynamic viscosity (0.8937×10⁻⁷ N·s/m² for water @ 25°C)

ρ = density (1.0 g/cm³ for water @ 25°C)

圖 5.6~圖 5.9 中顏色由紅至藍表示氣相 TCE 濃度由高至低(ppmv)，依採樣位置及深度作圖，其中主動式採樣圖 5.6 及圖 5.8 中之(B)與(C)圖分別為 $x = 10, 20$ cm 之橫切面，(D)、(E)、(F)圖分別為 $y = 8, 18, 28$ cm 之橫切面，(G)、(H)、(I)圖分別為 $z = 30, 20, 10$ cm-bgs 之橫切面；而被動式採樣圖 5.7 及圖 5.9 中(B)、(C)圖分別為 $x = 10, 20$ cm 之橫切面，(D)、(E)、(F)圖分別為 $y = 13, 33, 53$ cm 之橫切面，(G)、(H)、(I)圖分別為 $z = 25, 15, 10$ cm-bgs 之橫切面，兩採樣方式產生之場址概念模型主要之差異為主動式採樣是以幫浦抽取氣體，圖中皆有明顯排列之圈型區塊，其可能為其抽取氣體之影響半徑，而被動式採樣則無此現象。

5.4.1 石英砂介質

在石英砂介質中，因密度流的影響(空氣密度為 1.19 g/L；TCE 氣體密度為 1.52 g/L@ 20°C[30])，導致 TCE 於垂直方向較水平方向移動更為快速[29, 31]，無論是主動式採樣或被動式採樣，可觀察到 TCE 之污染途徑由灌注點((x, y, z) = (17, 38, 23))向下移動，明顯有較高之 TCE 濃度。此外，TCE 氣體亦有往右上方向移動之趨勢(圖 5.6 (B)、(C)、(F)、(I)；圖 5.7 (B)、(C)、(F)、(I))；當檢視圖 5.6 (C)、(D)及圖 5.7 (C)、(D)，主動式採樣中，砂箱之左上區域亦有較高的 TCE 濃度，反觀被動式採樣之同一區塊，並無明顯的濃度變化，造成此些結果之原因推測可能



含氣污染物高解析被動式採樣器開發測試及現地應用評估

為主動式採樣利用幫浦抽氣擾亂地層下污染物之分布而產生誤差[6]。另外砂箱中設有較厚之低滲透區I，以觀察兩種採樣方法是否可偵測 TCE 氣體之繞曲現象，主動式採樣如圖 5.6 (D)，因氣體受干擾，偵測而得之濃度相似，無繞過低滲透度之現象，而被動式採樣如圖 5.7 (D)，有一處濃度較低之區域與低滲透度區I位置及大小皆相符，能清楚看到 TCE 因繞曲現象而繞過低滲透區[32, 33]。對污染源位置而言，主動式採樣因幫浦抽氣而無法正確判斷污染源位置，而被動式採樣中，TCE 高濃度範圍為 $x = 0 \sim 30 \text{ cm}$ 、 $y = 22 \sim 60 \text{ cm}$ 、 $z = 12 \sim 40 \text{ cm-bgs}$ ，能明顯觀察到 TCE 污染源即為此區塊中淺紅色的點(圖 5.7 (E)、(G))，綜觀上述特點，於石英砂介質中，顯示被動式採樣優於主動式採樣。

5.4.2 土壤介質

在土壤介質中，兩種採樣方式中皆顯示氣相 TCE 如同前述在石英砂介質中因密度流影響而下沉，同樣的，比較圖 5.8 (B)、(D)、(F)及圖 5.9 (B)、(D)、(F)，主動式採樣也因氣體受干擾而造成濃度偵測上的誤差，且圖 5.8 (C)、(F)、(G)及圖 5.9 (C)、(F)、(G)中，主動式採樣無法看出低滲透度區I之位置所造成之影響，而被動式採樣於低滲透度區I之 TCE 濃度較低。對污染源位置而言，主動式採樣無法得知確切污染位置，而被動式採樣中能明顯觀察到 TCE 高濃度範圍為 $x = 6 \sim 18 \text{ cm}$ 、 $y = 26 \sim 44 \text{ cm}$ 、 $z = 4 \sim 18 \text{ cm-bgs}$ (圖 5.9 (E)、(H))，而灌注位置($(x, y, z) = (17, 38, 23)$)在於此高濃度污染團之下方，顯示被動式採樣較精準測得污染源位置及污染途徑。

除此之外，比較圖 5.6 (B)及圖 5.8 (B)，兩種孔隙介質於主動式採樣之情況下，土壤介質相較於石英砂介質氣相 TCE 之移動受幫浦干擾之影響較大，造成此原因可能為土壤介質相對於石英砂介質有較高之有機物含量，使之具備吸附污染物的能力，因此當 TCE 揮發後，易吸附於土壤上，而造成較快之純相 TCE 揮發擴散，當主動式採樣之吸引氣流造成被吸附之 TCE 因外界有濃度梯度差異時，會釋放其吸附之 TCE，使 TCE 由吸附相轉為氣相存在，而擴大濃度誤差[20]。在兩組孔隙介質中偵測 TCE 污染物濃度分布，結果顯示主動式採樣因受幫浦抽氣影響，容易產生干擾而造成較誤差之 TCE 濃度分布判定，而被動式採樣相較於主動式採樣，能較準確推估場址概念模型，此結果再次證實被動式採樣可彌補主動式採樣之短處，更容易精準判斷 TCE 污染源範圍及可能來源位置。

總而言之，此被動式採樣器於砂箱試驗中，映證其在 14 天達成平衡後，結果證實本研究之被動式採樣器能夠追蹤評估 TCE 於未飽和含水層之污染位置範圍。

AS-silica sand

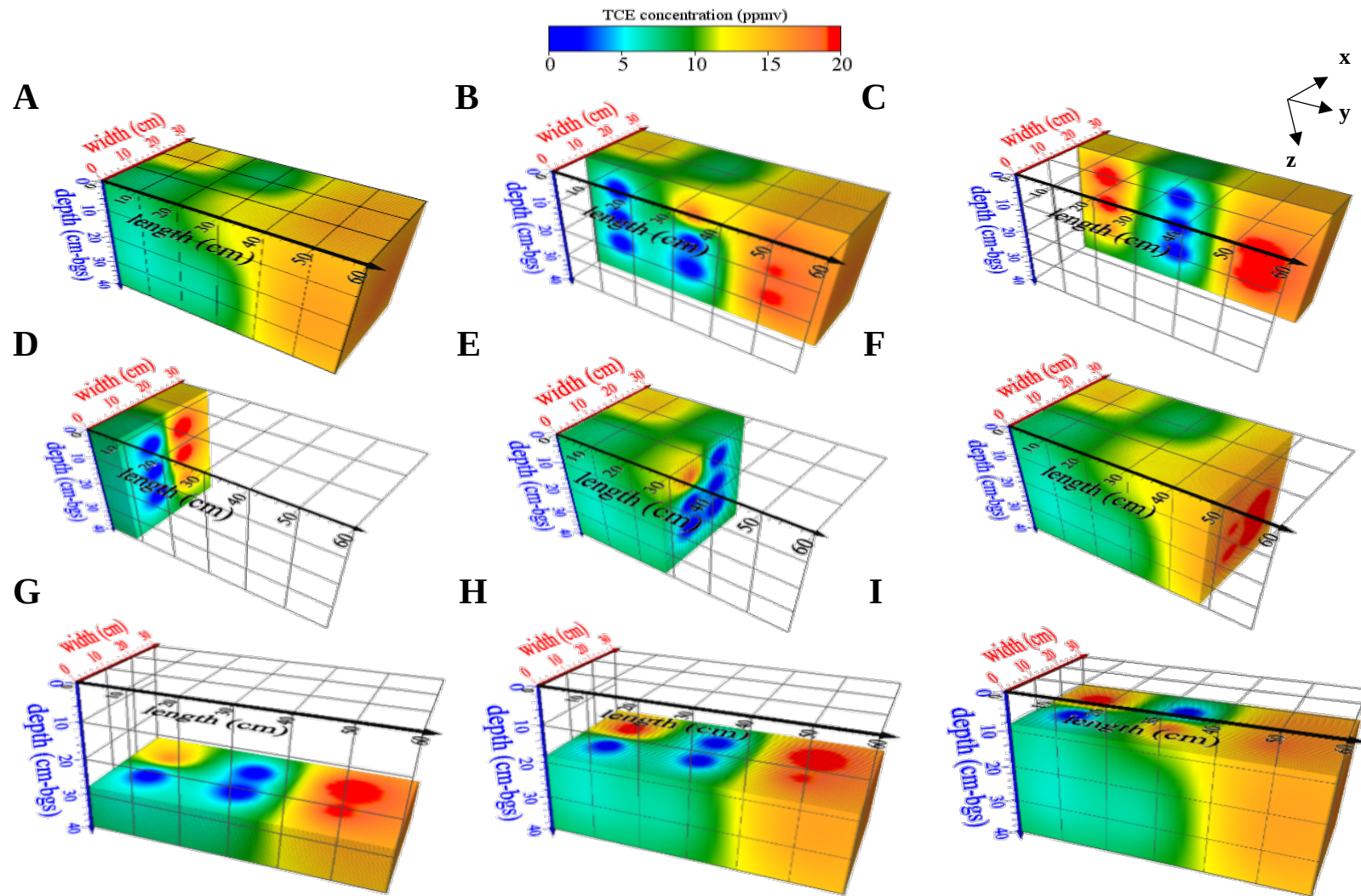


圖 5.6 主動式採樣偵測砂箱中 TCE 濃度之斷層掃描(石英砂介質)

PS-silica sand

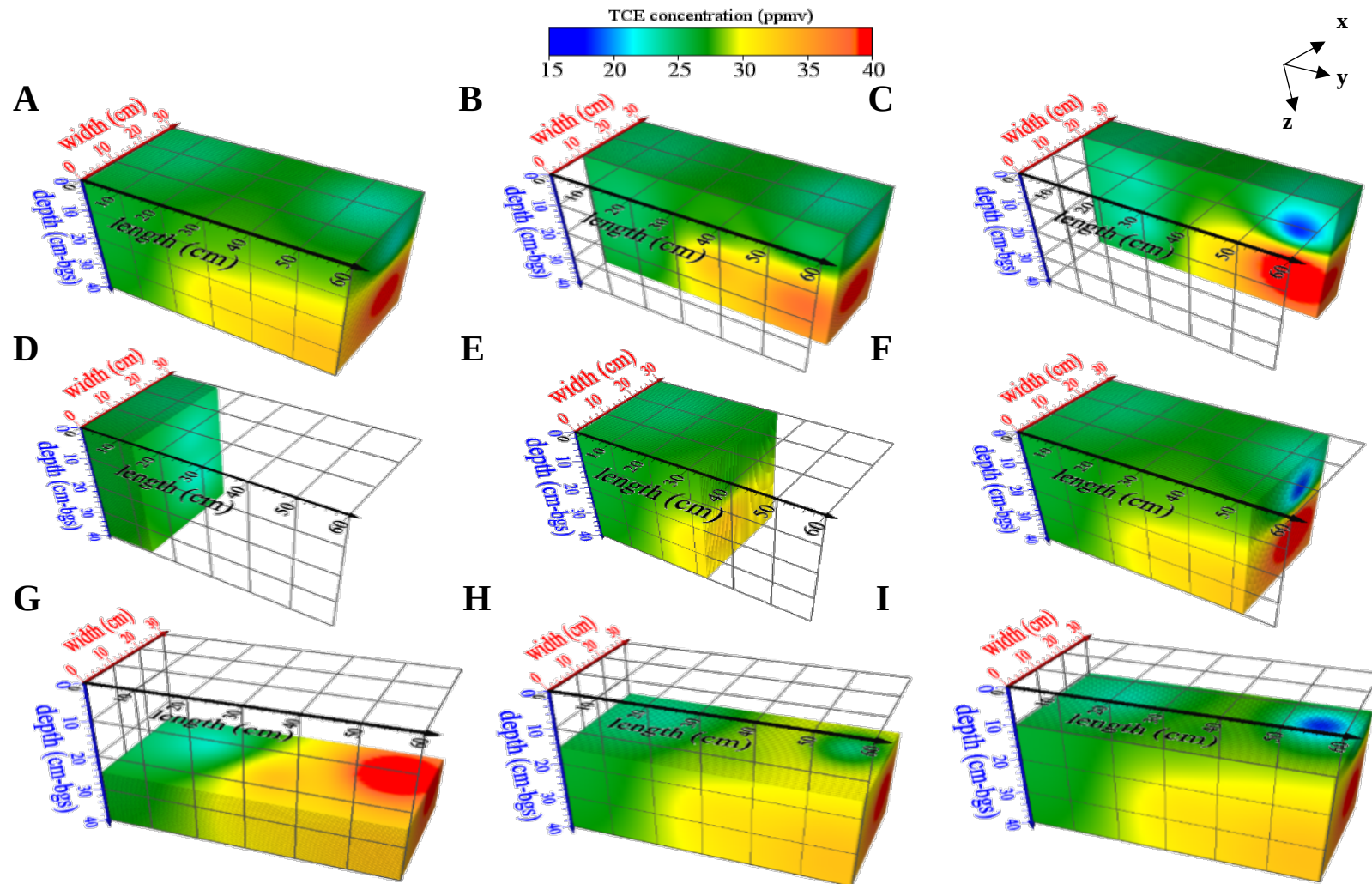


圖 5.7 被動式採樣偵測砂箱中 TCE 濃度之斷層掃描(石英砂介質)

AS-soil

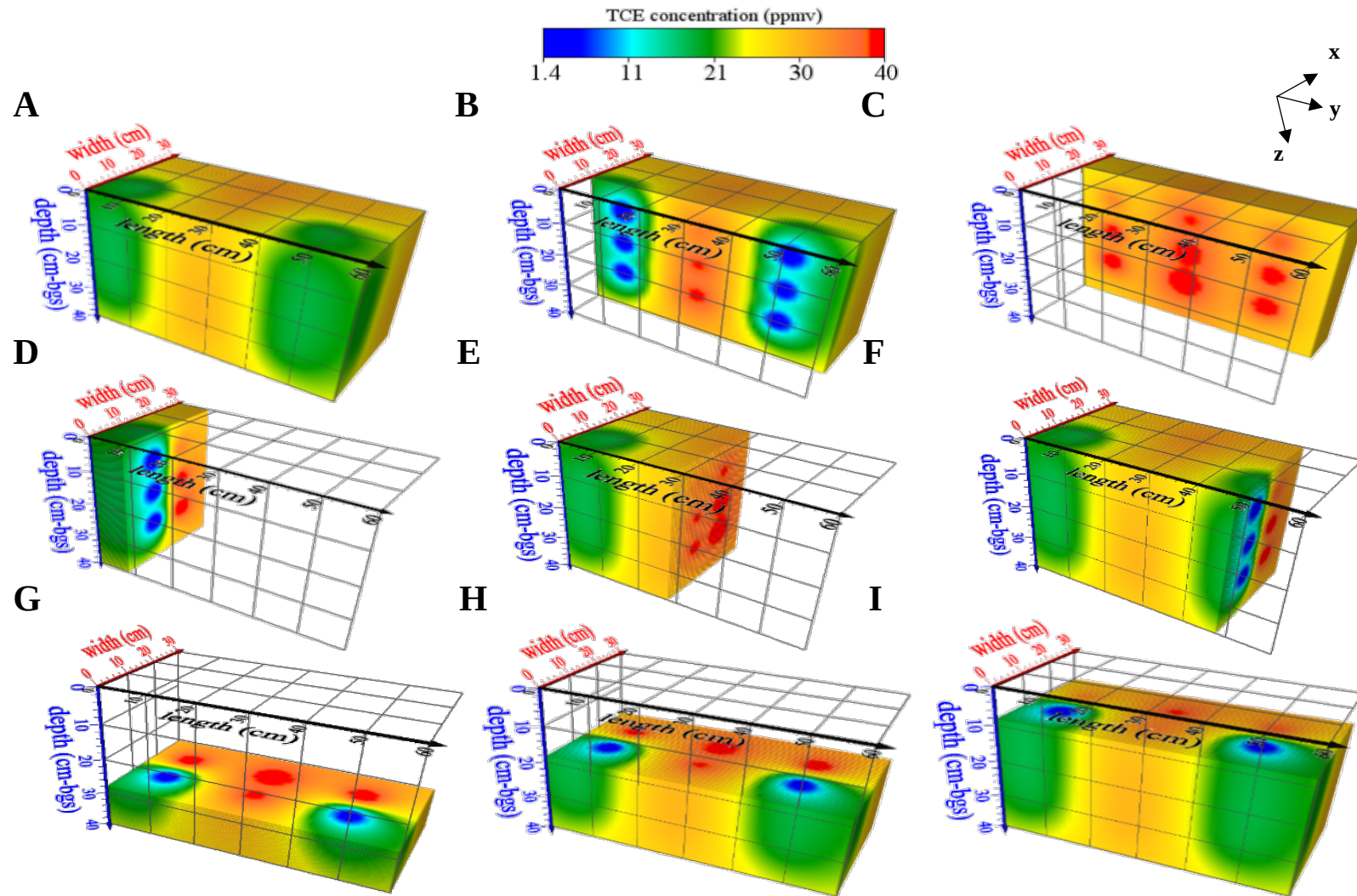


圖 5.8 主動式採樣偵測砂箱中 TCE 濃度之斷層掃描(土壤介質)

PS-soil

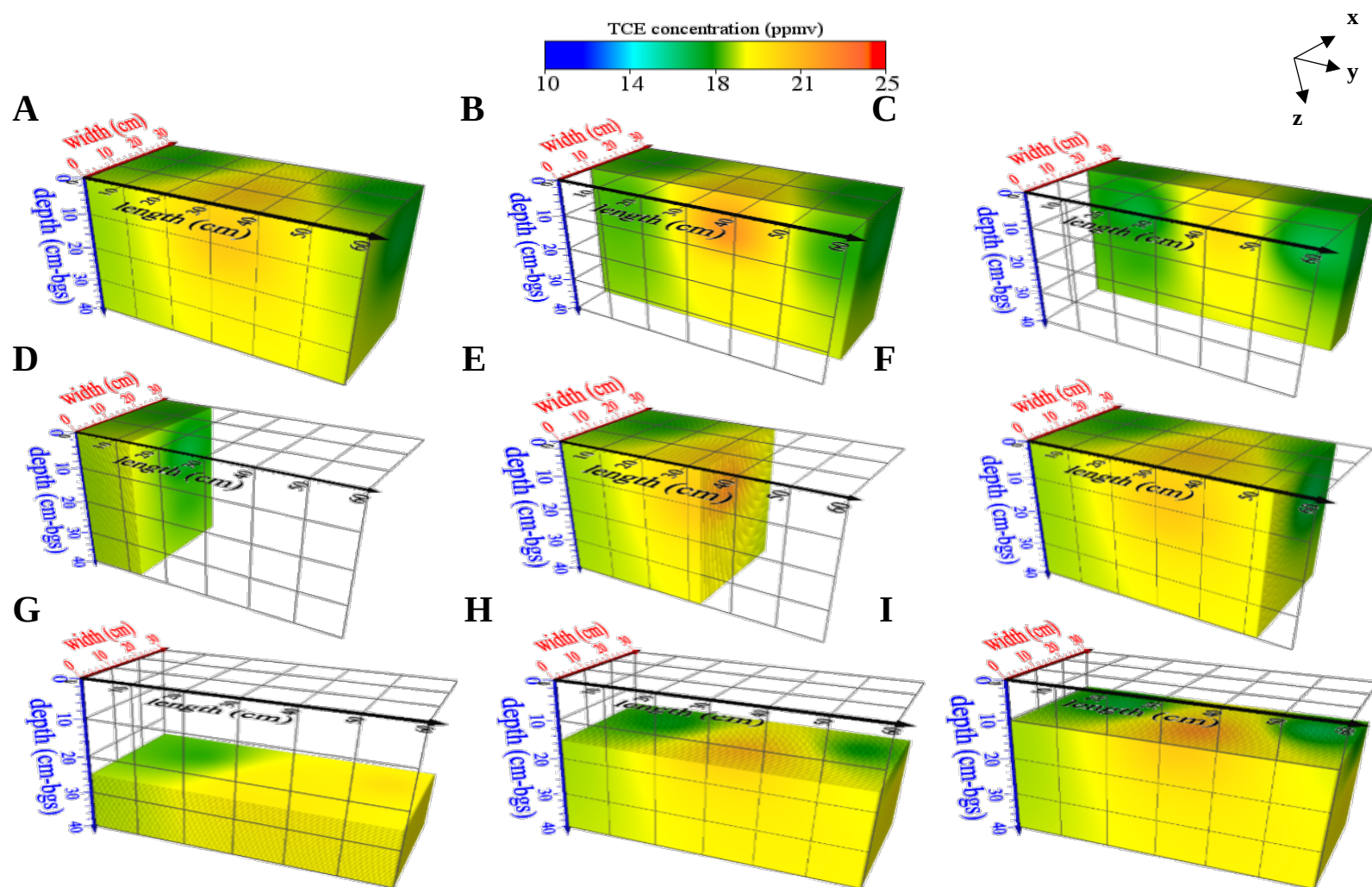


圖 5.9 被動式採樣偵測砂箱中 TCE 濃度之斷層掃描(土壤介質)

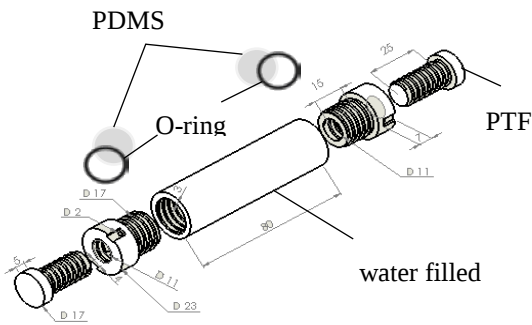
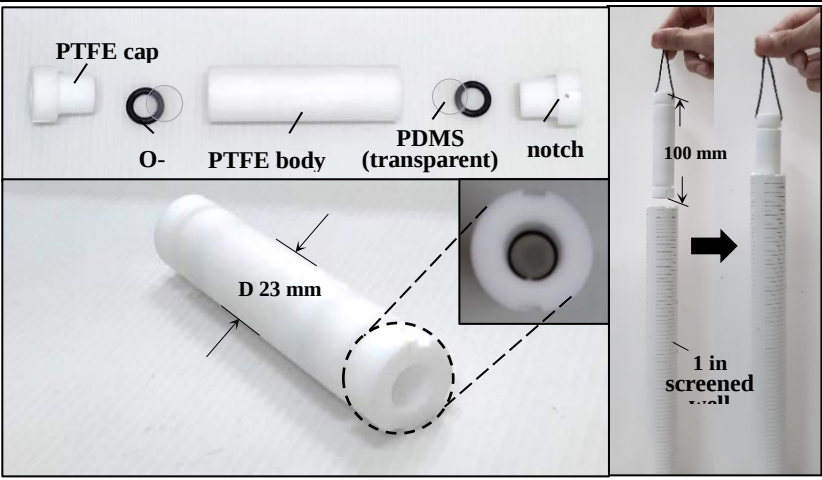


5.5 現地應用評估

5.5.1 被動式採樣器採樣之標準作業流程

經前節針對本研究開發設計之被動式採樣器之氣/液相採樣平衡時間及平衡濃度、砂箱試驗實驗結果，整理詳細特性規範及適用範圍於表 5.3 中，被動式採樣器組裝流程如表 5.4 及被動式採樣器放置流程操作說明如表 5.5。

表 5.3 被動式採樣器規格

材質	鐵氟龍
尺寸規格	一寸，直徑 2.4 cm、長 11 cm 
配件	O-ring 墊片、PDMS 透析膜
PDMS 透析膜厚及尺寸	膜厚 0.1 mm，直徑 15 mm (一寸採樣器用)
適用監測井尺寸	一寸以上
適用污染物類型	水相溶解性揮發及半揮發性有機物質、無機物溶質
採樣平衡時間	建議 14 天
污染物濃度範圍	建議 150 mg/L 以下 (以三氯乙烯為例，實驗驗證，但並不表示僅限於此濃度之限制值)
組裝及井吊掛範例	

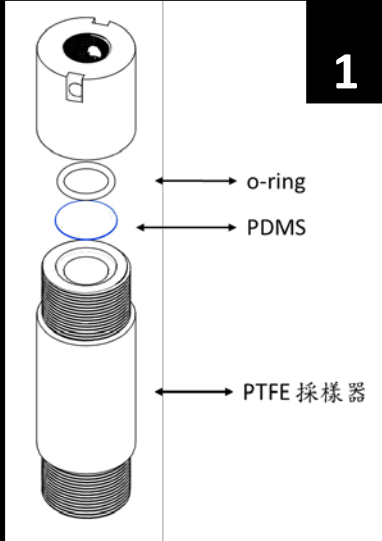
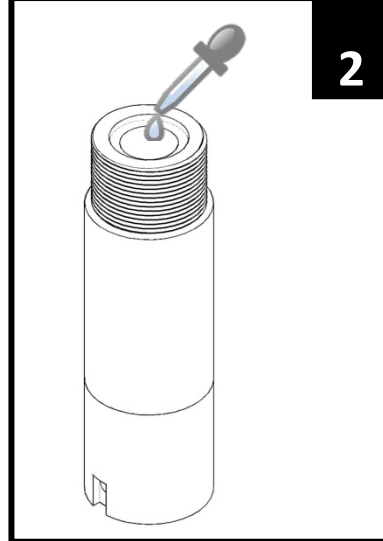
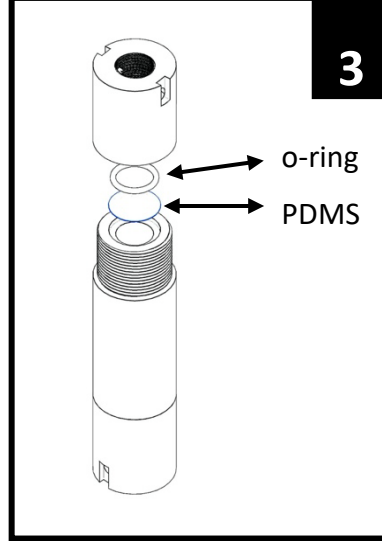
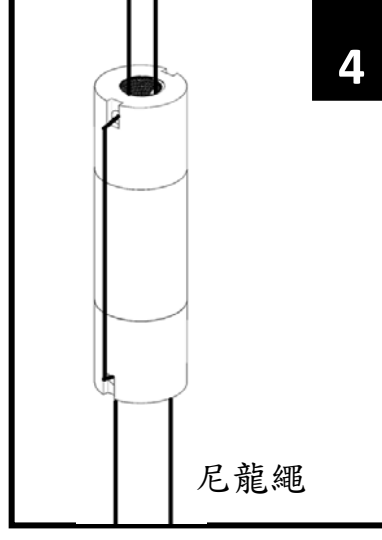
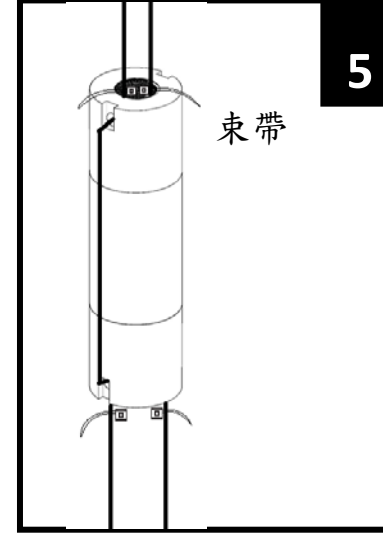
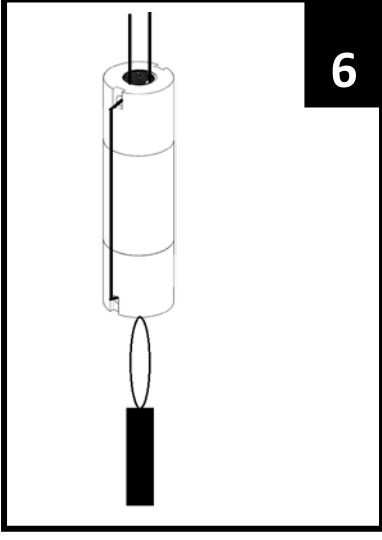
備註：

- (1) 本採樣器建議在開篩範圍內使用。
- (2) 採樣器放置位置建議不要靠近井底，井底過多泥沙可能對採樣器 PDMS 膜之物質透析造成干擾。
- (3) 採樣結束從井中取出採樣器時，應馬上用 PTFE 旋蓋 (PTFE cap) 密封，避免物質揮發或反擴散損失。



含氣污染物高解析被動式採樣器開發測試及現地應用評估

表 5.4 被動式採樣器組裝流程

 1 ● 將採樣器之一端依圖中之方向安裝 ● 放置 PDMS 膜 ● 放置 o-ring 至採樣器內的凹槽內 ● 固定上蓋鎖緊。 註: PDMS 膜為耗材，每次採樣皆須更新。	 2 ● 將步驟 1 之採樣器組裝完成之側朝下。 ● 沿採樣器內壁緩慢加入純水，至純水液面微凸出凹槽，填充過程中需確保沒有氣泡。	 3 ● 將裝滿純水之採樣器，依序放置 PDMS 膜、o-ring 並鎖緊上蓋。 註：上蓋鎖緊後，需確認採樣器 PDMS 膜內無氣泡。
 4 ● 將裝滿純水之採樣器以 4 mm 直徑尼龍製之水線串接採樣器。	 5 ● 確認採樣器位置後，以束帶固定採樣器上下端，再剪除多餘之束帶。	 6 ● 採樣器下端可用重錘增加配重。

備註：

- (1) 建議於採樣一週內，進行被動式採樣器裝填與組裝；(2) 每次採樣前，兩端皆需更換成新的 PDMS 膜；
 (3) 建議以尼龍材質之水線與束帶，串接被動式採樣器(尼龍繩直徑需小於 4 mm)。

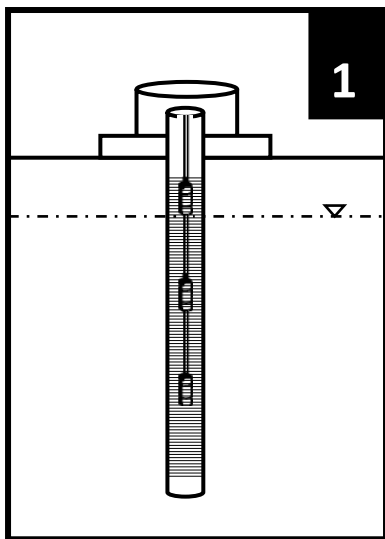


結果與討論

依被動式採樣器組裝流程組裝採樣器，將採樣器以尼龍繩固定於不同採樣深度位置，尼龍線下端綁重物，再依表 5.5 被動式採樣器標準作業流程緩慢放置採樣器至井中，並固定於井口，採樣平衡 14 天後取樣、密封採樣器保存於 4°C，送回檢驗實驗室分析。

表 5.5 被動式採樣器標準作業流程

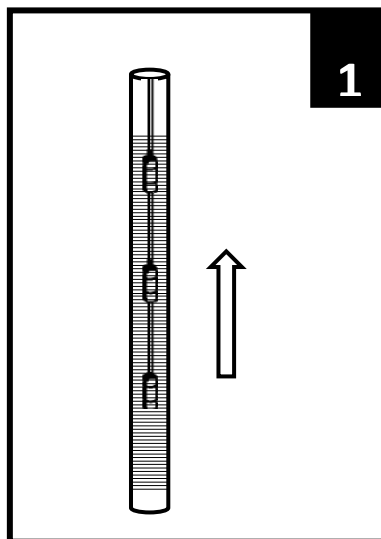
被動式採樣器放置流程



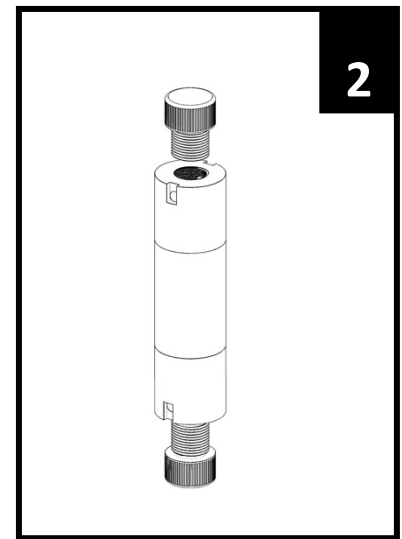
- 將採樣器緩慢放置監測井中，放置到所需之深度後，將尼龍繩固定於井口。
- 平衡 14 天後，即可取出採樣器採樣。

註：可根據需求放置多個深度之採樣器

被動式採樣器取樣流程



- 將採樣器從井中緩慢拉出。



- 將固定採樣器之尼龍繩剪斷後，立即以 PTFE 蓋將上下兩端密封。



5.5.2 慶川場址模場試驗結果

慶川場址之採樣監測井位於廠區中間，開始採樣前先行於監測井拍照及記錄環境狀況，為避免擾動井管空氣及積水，由未飽和至飽和含水層依序進行採樣。首先量測地下水水位及井深(圖 5.10 (A))後，於未飽和含水層進行手提式 PID 採樣，將鐵氟龍管一端以束帶固定於水位計上，確認 PID 於未飽和含水層採樣之深度，另一端連接於 PID 進氣端。開始採樣前先置換管線內 3 倍體積之氣體後，開始記錄 PID 讀值，並於 PID 出口端接上採氣袋抽取約 500 毫升之氣體(圖 5.10 (B))，進行後續之分析。未飽和含水層採樣結束後，於飽和含水層進行微洗井採樣，首先組裝採樣設備並校正水質參數測定儀器，將氣囊式泵與水位計一同放入井中確認採樣深度，開始抽取井水、調整抽水流量於 0.1 ~ 0.5 L/min，測量井水之水質參數(pH、EC、DO、ORP) (圖 5.10 (C))，測量頻率約 10 分鐘，待水質參數穩定始得取樣，採樣完畢後將樣品保存於冰桶中。將被動式擴散採樣袋與被動式採樣器依不同深度固定於尼龍線上，尼龍線下端綁重物(圖 5.10 (D))，並將被動式採樣器緩慢放置於井中(圖 5.10 (E))，並固定於井口採樣；由於此口慶川監測井為簡易井，無法以十字型吊環懸掛被動式採樣器，改固定於廠區旁之角鋼及強力膠帶加強固定；上方以鐵片覆蓋，避免落塵(圖 5.10 (F))。

採樣平衡 14 天後，先進行被動式採樣之取樣，並紀錄被動式採樣器(圖 5.10 (G)、(H)、(J))及被動式採樣袋(圖 5.10 (G)、(I))外觀之完整性，再依前述步驟依序進行 PID 與微洗井採樣；於飽和含水層之被動式採樣器上方有些許雜質，採樣器外觀表面有明顯礦物質或土壤附著之情形，未飽和含水層之被動式採樣器則無此現象；詳細。針對慶川場址本次採樣之地下水監測井背景調查表、監測井地下水採樣紀錄表及監測井地下水揮發性有機物被動式採樣器採樣紀錄表，詳細列於附錄一提供參考。



結果與討論

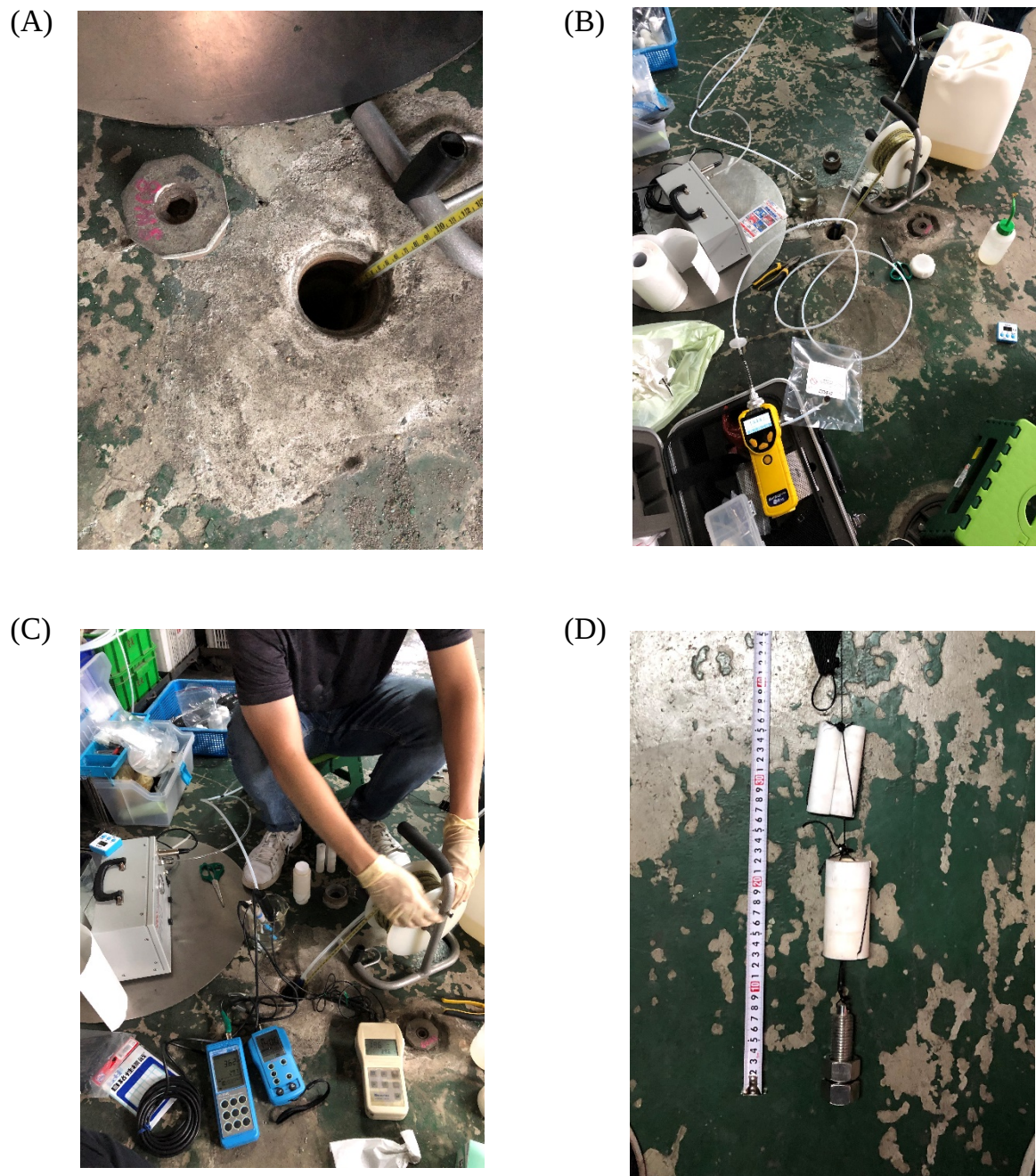


圖 5.10 慶川場址微洗井、被動式採樣器與採樣袋採樣過程照片



含氣污染物高解析被動式採樣器開發測試及現地應用評估

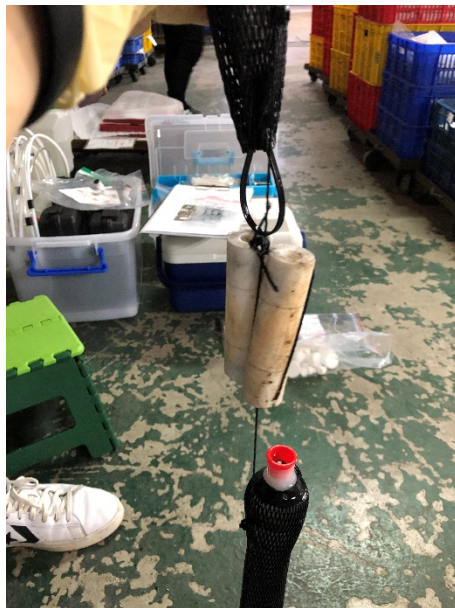
(E)



(F)



(G)



(H)



圖 5.10 慶川場址微洗井、被動式採樣器與採樣袋採樣過程照片(續)

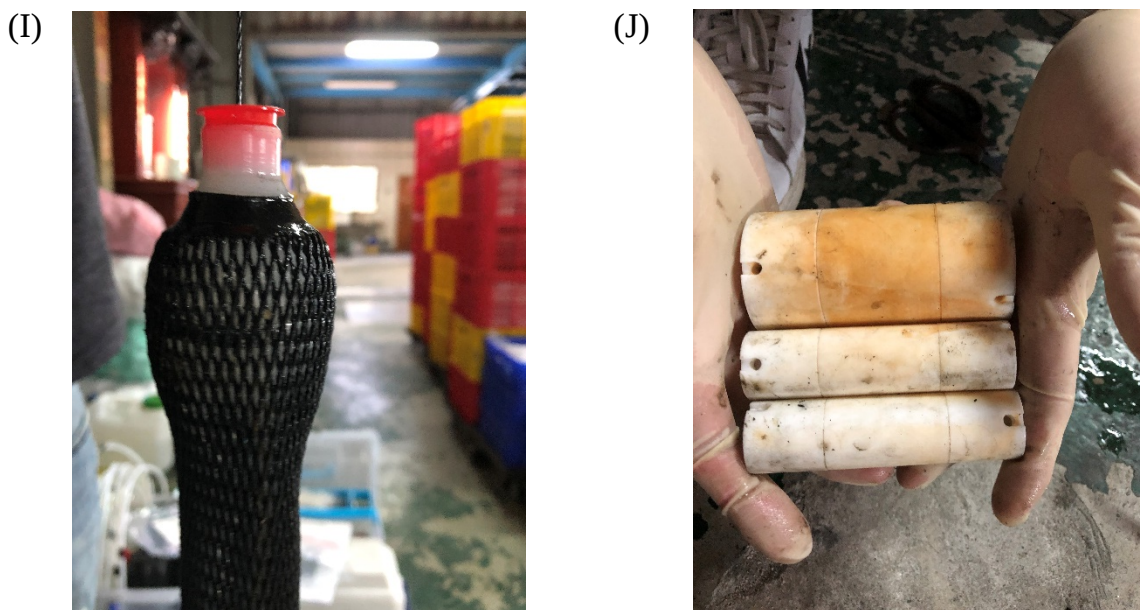


圖 5.10 慶川場址微洗井、被動式採樣器與採樣袋採樣過程照片(續)

慶川高濃度污染場址模場試驗於未飽和及飽和含水層進行不同主動式及被動式採樣方法之採樣分析結果比較，如表 5.6 所示。此外，未飽和及飽和含水層中濃度隨井深之變化關係，如圖 5.11 所示。

首先探討井中未飽和含水層之部分，手持式 PID 測得第 0 天之總 VOC 濃度於不同井深(2.5 及 3.5 m)介於 700 ~ 3600 ppmv 之間(見圖 5.12 (a)及表 5.6)，其中較接近地表之 2.5 m 處濃度較高，採樣當下將井蓋打開時，即可聞到 VOC 之強烈氣味；進一步對手持式 PID 收集之採氣袋氣體樣品分析 trans-1,2-DCE、cis-1,2-DCE 和 TCE 之濃度(依序分別如圖 5.12 (b)、(c)及(d)所呈現，表 5.6 列舉濃度數值)，其中於不同井深處所測得 TCE 之濃度最高，cis-1,2-DCE 次之及 trans-1,2-DCE 最低。

第 0 天於井深 2.5 m 所測得之濃度高於井深 3.5 m 處，此結果與第 14 天所得之結果(3.5 m 處濃度較 2.5 m 處高)相反(圖 5.12 (a))，因監測井 SW08 於未飽和含水層中未開篩，而 TCE 蒸氣密度(1.58 g/L @ 25 °C)比空氣(1.17 g/L @ 25 °C)重 [34]，於未擾動之情況下 3.5 m 處所測得之濃度應較 2.5 m 處高。此現象可能因為打開井蓋，井內 VOC 之蒸氣壓蓄積，於井蓋開放後與外界空氣對流，使 VOC 逐漸向井外移動，此外，手持式 PID 於未飽和含水層中採樣時，可能會造成擾動影響，手持式 PID 採樣所使用之鐵氟龍管內徑與外徑分別為 4 和 6 mm，PID 抽氣泵抽氣流量為 330 mL/min，鐵氟龍管管長約為 6 m，為使氣體取樣時樣本具代表性，於採樣前置換至少 3 倍之鐵氟龍管之體積(226 ml)，置換 3 倍鐵氟龍管之體積約需抽氣 41 秒，為使換氣量至少大於 226 ml，抽氣時間增加至 1 分鐘(總抽氣量此



含氣污染物高解析被動式採樣器開發測試及現地應用評估

時約 330 ml)。此外，採氣袋收集之井管氣體樣品約 500 ml，換氣量與採氣袋收集之井管體積加總約為 830 ml，此體積換算於 2 吋井中影響之深度範圍約為 0.41 m 之井管內體積。

儘管 PID 於 2.5 m 處進行採樣之影響範圍不至直接影響 3.5 m 深之採樣點位，然而氣流仍會引導氣相濃度之擾動。第 0 天於未飽和含水層不同深度所測得之總 VOC 濃度差異甚大，第 0 天採樣時，井管內為密閉狀態導致 VOC 於水中揮發後蓄積於井管中，打開井蓋後井中之 VOC 持續向井外擴散，而採樣深度由上至下進行採樣，使蓄積於井管中大部分之 VOC 被 PID 抽氣泵所造成之壓力差抽取至 2.5 m 處，使 3.5 m 處之 VOC 受到空氣稀釋之影響，所以 2.5 m 處所測得之總 VOC 高於 3.5 m 處。

第 14 天採樣時，因被動式採樣器尚放置於井中(2 吋井)，使 PID 之鐵氟龍管及水位計無法一同進入井中確認採樣之深度，所以必須先將被動式採樣拉出井外，才得以進行取樣，此動作可能會造成井管內氣體與水體之擾動，因而使 PID 於未飽和含水層之採樣受到干擾。所以第 14 天 PID 於不同深度所測得之總 VOC 濃度值皆相近，此外，第 0 天採氣袋中 TCE 之濃度所佔之比例較多(57~90%)；第 14 天 TCE 雖仍為主要 VOC 物種，但其濃度所佔之比例較低(38~52%)，此濃度比例關係之變動亦有可能與採樣所造成之擾動有關。

被動式採樣器於井中放置平衡 14 天後，PID 第 0 天及第 14 天所收集之採氣袋分析結果進行比較得知，被動式採樣器之濃度皆比第 0 天與第 14 天 PID 所獲得之數值低(圖 5.12 (b)、(c)及(d))，會有此情形可能是 PID 採樣易受擾動影響，被動式採樣器較不易受到擾動之影響。

井中飽和含水層之部分，微洗井採樣、被動式採樣袋和被動式採樣器所測得之濃度皆為 cis-1,2-DCE 最高，TCE 次之及 trans-1,2-DCE 最低。此外，微洗井採樣及被動式採樣袋皆未測得 trans-1,2-DCE，僅被動式採樣器測得微量濃度(0.319 mg/L(深度 4.8 m)及 0.426 mg/L(深度 5.4 m)(圖 5.13 (a)))，微洗井採樣第 0 天所測得 cis-1,2-DCE 及 TCE 之濃度皆比第 14 天高(圖 5.13 (b)及(c))。飽和含水層中之微洗井採樣，在微洗井採樣抽水階段時，水位曾一度洩降至 4.454 m 該井因為地質關係或開篩範圍只有 1.5 m 造成回水速度較慢，水位已低於井深 4.2 m 處，使得採樣時無法依照原定 4.2 m 之深度進行採樣，第 14 天被動式採樣袋與被動式採樣器之濃度具有高度相關性，例如深度 4.2 m 處被動式採樣袋相較被動式採樣器之 TCE 為 0.454 mg/L vs N.D.，cis-1,2-DCE 17.634 vs 18.655 mg/L (RAD = 2.8 %)，trans-1,2-DCE N.D. vs N.D. (表 5.6)。註：相對平均偏差(Relative average deviation, RAD)。但 4.8 m 處，兩者間之數值差距甚大，由於此井開篩範圍較短，且採樣袋長度 45 cm，相較於被動式採樣器 (7 cm) 包括深度範圍較長於被動式採樣器，接觸取樣之



結果與討論

範圍較廣，因此若此區間之污染濃度有明顯差異可能導致兩種被動式採樣濃度有所差異。然而當比較 4.8 m 處微洗井採樣 vs 被動式採樣袋之數據 44.910 vs 37.194 mg/L 則較接近，可推測 4.8 m 處所產生之差異，可能有較高之污染潛勢。另外，5.4 m 處三種採樣方法所獲得之濃度數據則有高度相關性(見表 5.6)。

此計畫所開發之被動式採樣器所獲得之濃度數據其 RAD 皆小於 4 % (例如：4.8 m 處 $RAD = 0.622/16.291 = 3.8\%$)，顯示被動式採樣器具有高度之精確採樣數據，此外，相較於微洗井採樣及被動式採樣袋之採樣方式得到多筆 N.D.數據 (GC/MS 分析方法之 VOC 最低定量極限為 0.0010 mg/L)，但被動式採樣器可獲得較低之污染濃度，例如 5.4 m 處微洗井採樣及被動式採樣袋之 trans-1,2-DCE 及 TCE 皆為 N.D.，但被動式採樣器則測得 0.426 及 0.721 mg/L，顯示被動式採樣器可測得較低之污染濃度範圍。

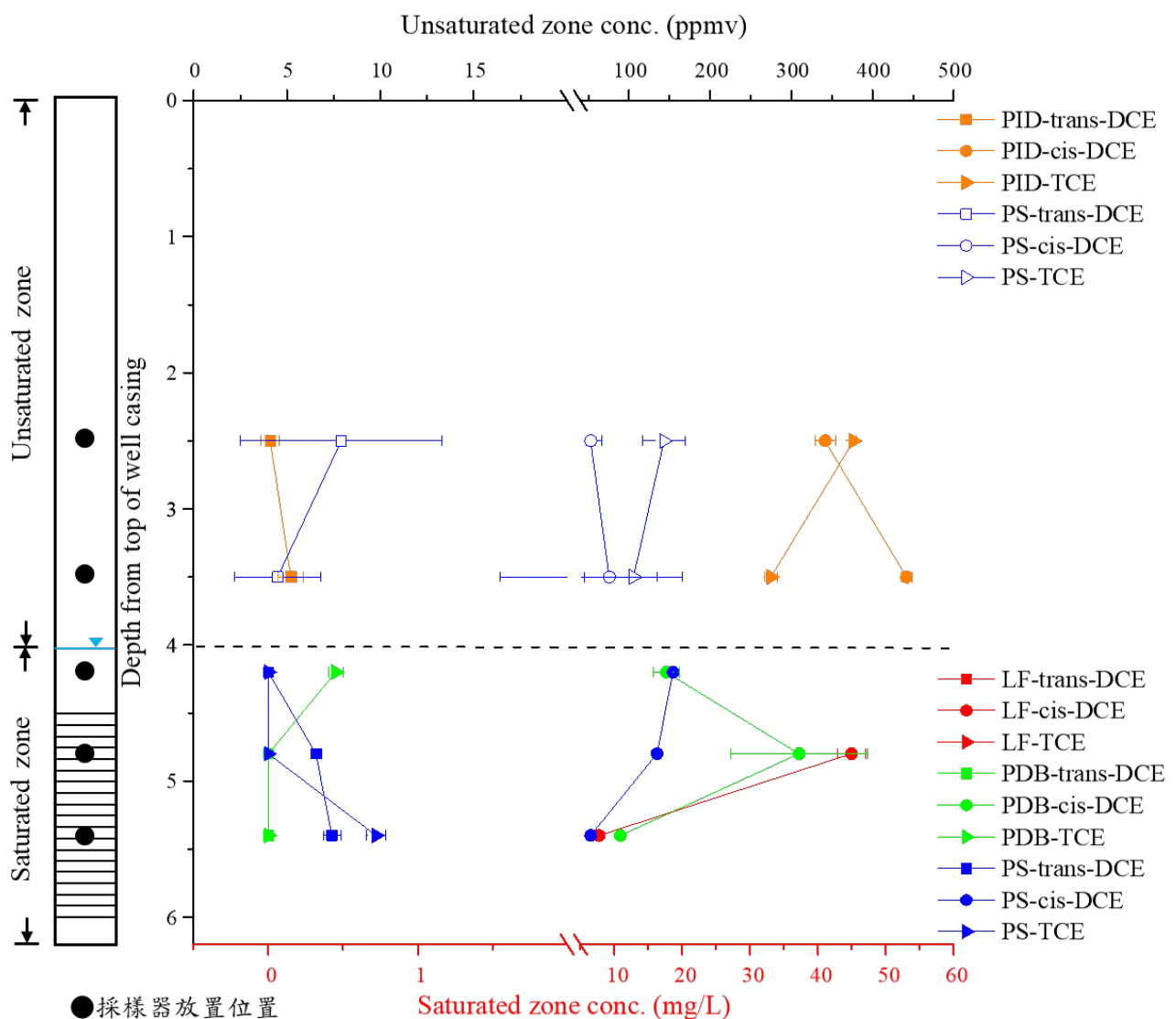


圖 5.11 慶川場址監測井 SW08 未飽和與飽和含水層不同採樣方式平衡 14 天後所獲得之濃度隨井深度分布關係

表 5.6 慶川場址監測井 SW08 主動式及被動式未飽和及飽和含水層土壤氣體及地下水採樣分析數據

Well	Placement depth in aquifer (m)		Portable PID				Low-flow sampling			Passive diffusion bag			Passive sampler (OD 1")		
			Responses ^(a)	trans-1,2-DCE	cis-1,2-DCE	TCE	trans-1,2-DCE	cis-1,2-DCE	TCE	trans-1,2-DCE	cis-1,2-DCE	TCE	trans-1,2-DCE	cis-1,2-DCE	TCE
SW08 (t = 0 d)	Soil gas unsaturated aquifer (unit: ppmv)	2.5	3560.1	2.3 ±0.7	116.5 ±31.9	967.1 ±146.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		3.5	712.0	0.4 ±0.2	46.7 ±18.5	60.9 ±24.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Groundwater saturated aquifer (unit: mg/L)	4.2	-	-	-	-	N.D.	57.129 ±8.185	2.147 ±0.150	-	-	-	-	-	-
		4.8	-	-	-	-	N.D.	53.133 ±1.522	2.020 ±0.070	-	-	-	-	-	-
		5.4	-	-	-	-	N.D.	30.126 ±4.813	1.588 ±0.101	-	-	-	-	-	-
SW08 (t = 14 d)	Soil gas unsaturated aquifer (unit: ppmv)	2.5	1137.4	4.1 ±0.5	341.6 ±12.5	376.4 ±2.7	-	-	-	-	-	-	7.9 ±5.4	52.7 ±13.5	142.9 ±25.8
		3.5	1567.1	5.2 ±0.7	441.7 ±6.5	274.6 ±7.6	-	-	-	-	-	-	4.5 ±2.3	75.6 ±59.2	105.4 ±59.9
	Groundwater saturated aquifer (unit: mg/L)	4.2	-	-	-	-	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	17.634 ±1.921	0.450 ±0.049	N.D.	18.655 ±0.189	N.D.
		4.8	-	-	-	-	N.D.	44.910 ±2.043	N.D.	N.D.	37.194 ±10.046	N.D.	0.319	16.291 ±0.622	N.D.
		5.4	-	-	-	-	N.D.	7.765 ±0.087	N.D.	N.D.	10.871 ±0.200	N.D.	0.426 ±0.059	6.527 ±0.110	0.721 ±0.065

註: ^(a) Calibrated with Isobutylene gas ; “-” = Not available ; N.D.= Not detected ; Sampling number (n) = 2 (note that PDB sample were distributed into two sampling vials, while duplicate samples were obtained from specific sampling

depth for other two methods)



結果與討論

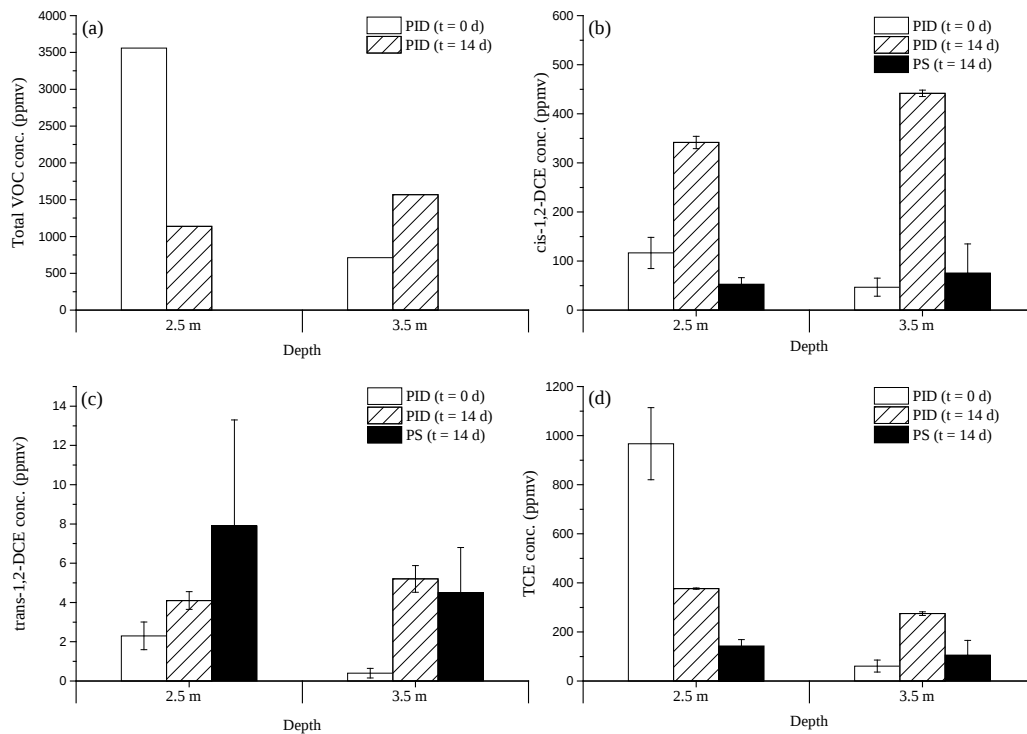


圖 5.12 川場址監測井 SW08 未飽和含水層手持式光離子化檢測儀(PID)與被動式採樣器(PS)採樣分析結果之比較

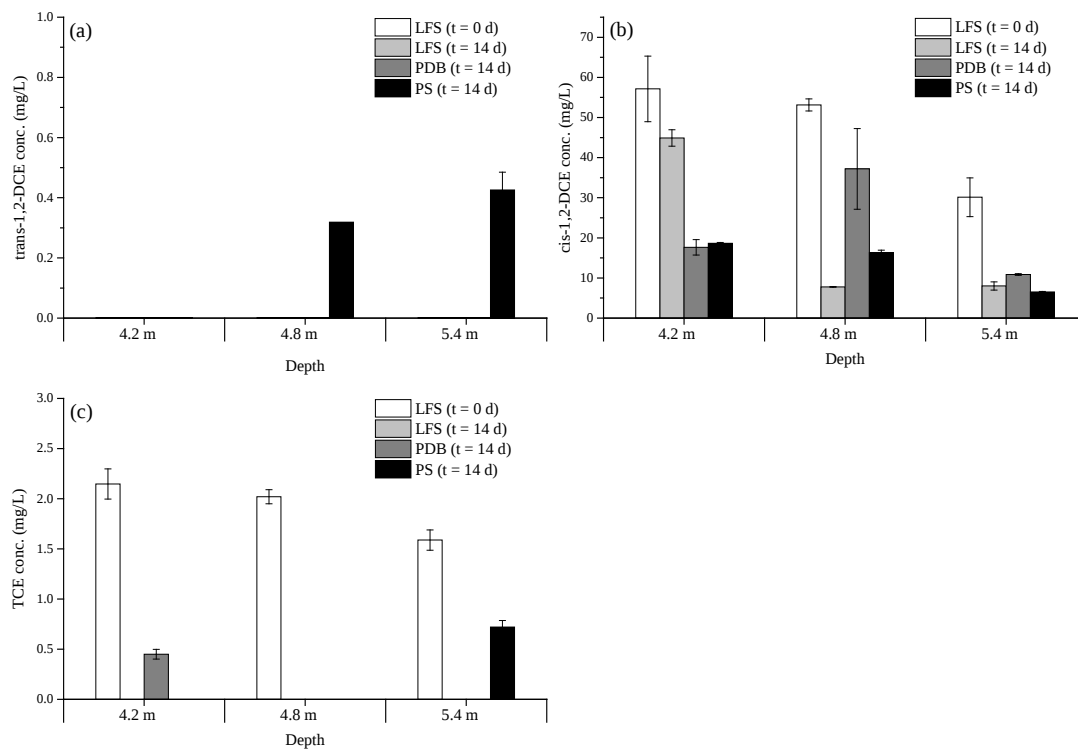


圖 5.13 慶川場址監測井 SW08 飽和含水層微洗井採樣(LFS)、被動式擴散採樣袋(PDB)和被動式採樣器(PS)採樣分析結果之比較



5.5.3 東陽場址模場試驗結果

東陽場址之採樣監測井 GW03 位於廠區邊界處廠房外側，開始採樣前先行於監測井拍照及記錄環境狀況(圖 5.14 (A))，為避免擾動井管空氣及積水，由未飽和至飽和含水層依序進行採樣。首先量測地下水水位及井深(圖 5.14 (B))後，於未飽和含水層進行手提式 PID 採樣，將鐵氟龍管一端以束帶固定於水位計上(圖 5.14 (C))，確認 PID 於未飽和含水層採樣之深度，另一端連接於 PID 進氣端。開始採樣前先置換管線內 3 倍體積之氣體後，開始記錄 PID 讀值，並於 PID 出口端接上採氣袋抽取約 500 毫升之氣體(圖 5.14 (D))，進行後續之分析。未飽和含水層採樣結束後，於飽和含水層進行微洗井採樣，首先組裝採樣設備並校正水質參數測定儀器，將氣囊式泵與水位計一同放入井中確認採樣深度(圖 5.14 (E))，開始抽取井水、調整抽水流量於 0.1 ~ 0.5 L/min，測量井水之水質參數(pH、EC、DO、ORP)(圖 5.14 (F))，測量頻率約 10 分鐘，待水質參數穩定始得取樣(圖 5.14 (G))，採樣完畢後將樣品保存於冰桶中。將被動式擴散採樣袋與被動式採樣器依不同深度固定於尼龍線上，尼龍線下端綁重物，並將被動式採樣器緩慢放置於井中(圖 5.14 (H))，並以十字型吊環懸掛被動式採樣器(圖 5.14 (I))後鎖緊監測井上蓋，平衡 14 天後取回。

在第 14 天取回被動式採樣器當日，桃園觀音地區降小雨，監測井周圍有些許積水之情形，採樣前先行於監測井拍照及記錄環境狀況(圖 5.14 (J)、(K))；待雨停後，先進行被動式採樣之取樣，並紀錄被動式採樣器(圖 5.14 (L))及被動式採樣袋(圖 5.14 (M))外觀之完整性，再依前述步驟依序進行 PID 與微洗井採樣(圖 5.14 (O))；於飽和含水層及未飽和含水層之被動式採樣器上方有些許雜質，採樣器外觀表面無附著之情形；針對東陽場址本次採樣之地下水監測井背景調查表、監測井地下水採樣紀錄表及監測井地下水揮發性有機物被動式採樣器採樣紀錄表，詳細列於附錄二提供參考。



結果與討論

(A)



(B)



(C)



(D)



圖 5.14 東陽場址微洗井、被動式採樣器與採樣袋採樣過程照片



含氯污染物高解析被動式採樣器開發測試及現地應用評估

(E)



(F)



(G)



(H)



圖 5.14 東陽場址微洗井、被動式採樣器與採樣袋採樣過程照片(續)



結果與討論

(I)



(J)



(K)



(L)



圖 5.14 東陽場址微洗井、被動式採樣器與採樣袋採樣過程照片(續)



含氣污染物高解析被動式採樣器開發測試及現地應用評估

(M)



(O)



圖 5.14 東陽場址微洗井、被動式採樣器與採樣袋採樣過程照片(續)

東陽低濃度污染場址模場試驗於未飽和及飽和含水層進行不同主動式及被動式採樣方法之採樣分析結果比較，如表 5.7 所示。此外，未飽和及飽和含水層中濃度隨井深之變化關係如圖 5.15 所示。

首先探討未飽和含水層之部分，手持式 PID 於深度 2.5 m 處測得第 0 天與第 14 天之總 VOC 濃度分別為 0.2 及 0.1 ppmv (圖 5.16 (a))，進一步對手持式 PID 收集之採氣袋氣體樣品分析 trans-1,2-DCE、cis-1,2-DCE 和 TCE 之濃度(圖 5.16 (c)、(b)及(d))，其中 TCE 之濃度最高，cis-1,2-DCE 次之及 trans-1,2-DCE 最低，此外第 0 天與第 14 天未飽和含水層深度 2.5 m 處，採氣袋氣體樣品分析之濃度遠高於 PID 之讀值(表 5.7)，由於第 14 天採樣時之天氣為雨天，可能使 PID 之讀值與採氣袋分析之濃度受到水氣之影響而降低[29]；被動式採樣器之平衡時間為 14 天，短時間內之氣候、水氣變化對被動式採樣器之影響較小，因此由所得之二重複分析數據可知被動式採樣器之 RAD 介於 9.7 ~ 15.6 % 間，分析濃度則皆高於以 PID 採集之採氣袋分析濃度(圖 5.16 (b)、(c)及(d))。

飽和含水層之部分，微洗井採樣、被動式採樣袋及被動式採樣器採樣分析之濃度整理於表 5.7 所示，於深度 6 m 處 trans-1,2-DCE 只有被動式採樣器測得其濃度(圖 5.17 (a))；cis-1,2-DCE 於被動式採樣器分析之濃度(0.0371 mg/L)比微洗井採樣(0.0016 mg/L)高(約 20 倍)，如圖 5.17 (b)；TCE 分析之濃度則與 cis-1,2-DCE 之情況相同，於 6 m 處被動式採樣器所測得之濃度(0.0609 mg/L)較高(約 41 倍)，而被動式採樣袋採樣僅測得 TCE，其濃度為 0.0017 mg/L (被動式採樣器所測得之濃度高約 36 倍)。



結果與討論

於 8.5 m 深度處，trans-1,2-DCE 三種採樣方式皆未測得；其他兩項物質，被動式採樣袋及被動式採樣器所測得之濃度皆高於微洗井採樣所測得之濃度 2~6 倍，然而被動式採樣袋與被動式採樣器所得之數據則相當一致，例如 cis-1,2-DCE 0.0047 vs 0.0064 mg/L 及 TCE 0.0248 vs 0.0136 mg/L，由此可知微洗井採樣於採樣過程會造成部分質量消失，其可能來自由水體擾動或收集水樣時污染物之揮發所致。

表 5.7 東陽場址監測井 GW03 主動式及被動式未飽和及飽和含水層土壤氣體及地下水採樣分析數據

Well	Placement depth in aquifer (m)	Portable PID				Low-flow sampling			Passive diffusion bag			Passive sampler (OD 1")		
		Responses ^(a)	trans-1,2-DCE	cis-1,2-DCE	TCE	trans-1,2-DCE	cis-1,2-DCE	TCE	trans-1,2-DCE	cis-1,2-DCE	TCE	trans-1,2-DCE	cis-1,2-DCE	TCE
GW03 (t = 0 d)	Soil gas unsaturated aquifer (unit: ppmv)	2.5	0.2	N.D.	20.46 ±2.15	39.20 ±3.13	-	-	-	-	-	-	-	-
	Groundwater saturated aquifer (unit: mg/L)	6.0	-	-	-	-	0.0032 ±0.0001	N.D.	-	-	-	-	-	-
		8.5	-	-	-	-	0.0035 ±0.0001	0.0692 ±0.0026	-	-	-	-	-	-
GW03 (t = 14 d)	Soil gas unsaturated aquifer (unit: ppmv)	2.5	0.1	0.67 ±0.02	2.13 ±0.03	4.78 ±0.07	-	-	-	-	-	7.41 ±0.72	8.76 ±1.06	16.39 ±2.55
	Groundwater saturated aquifer (unit: mg/L)	6.0	-	-	-	-	0.0016 ±0.0000	0.0015 ±0.0000	N.D.	N.D.	0.0017 ±0.0001	0.0031	0.0371	0.0609
		8.5	-	-	-	-	0.0020 ±0.0001	0.0041 ±0.0003	N.D.	0.0047 ±0.0006	0.0248 ±0.0009	N.D.	0.0064	0.0136

註: ^(a) Calibrated with Isobutylene gas ; “-” = Not available ; N.D.= Not detected ; Sampling number (n)= 2.



結果與討論

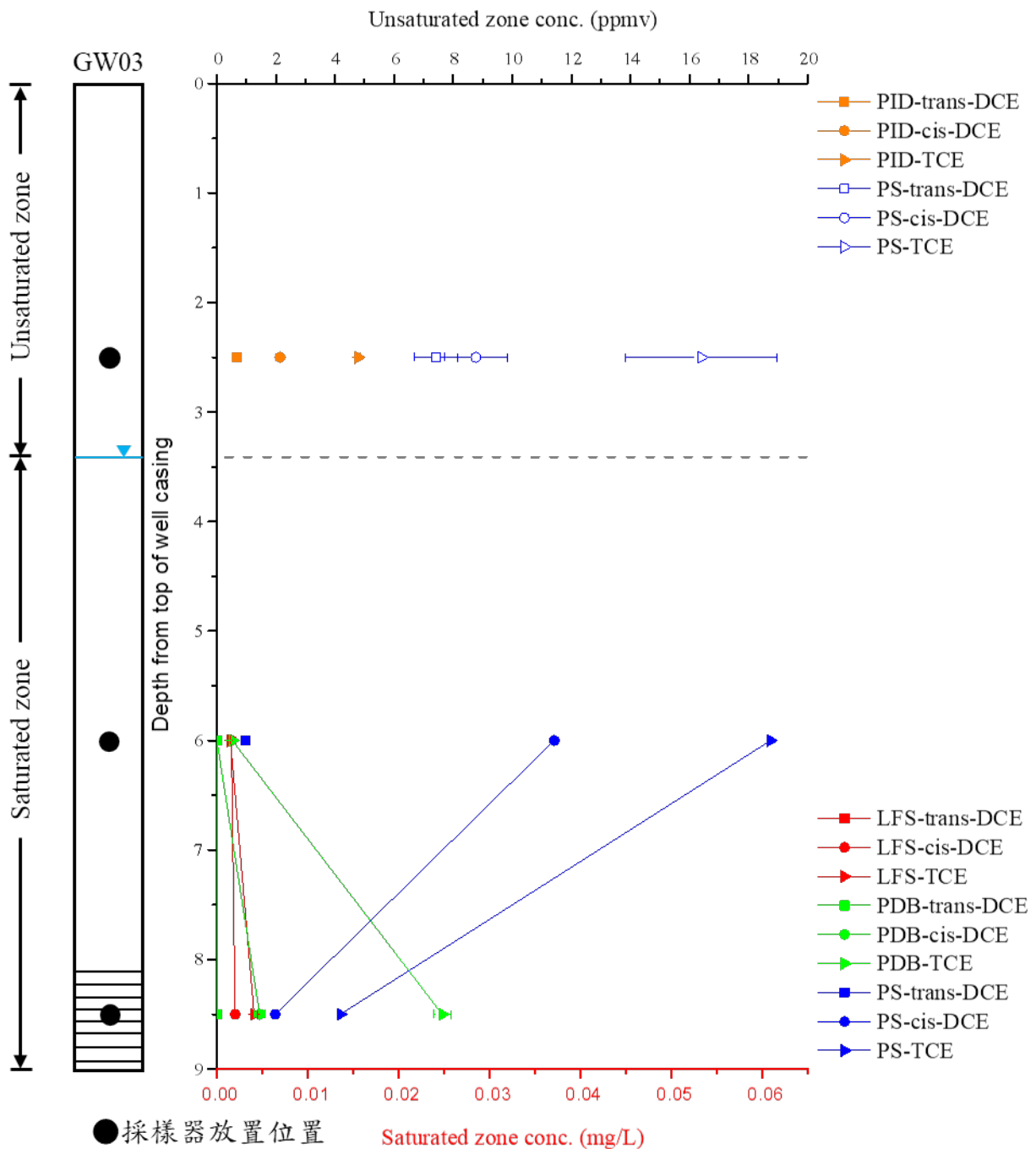


圖 5.15 東陽場址監測井 GW03 未飽和與飽和含水層不同採樣方式平衡 14 天後所獲得之濃度隨井深度分布關係



含氯污染物高解析被動式採樣器開發測試及現地應用評估

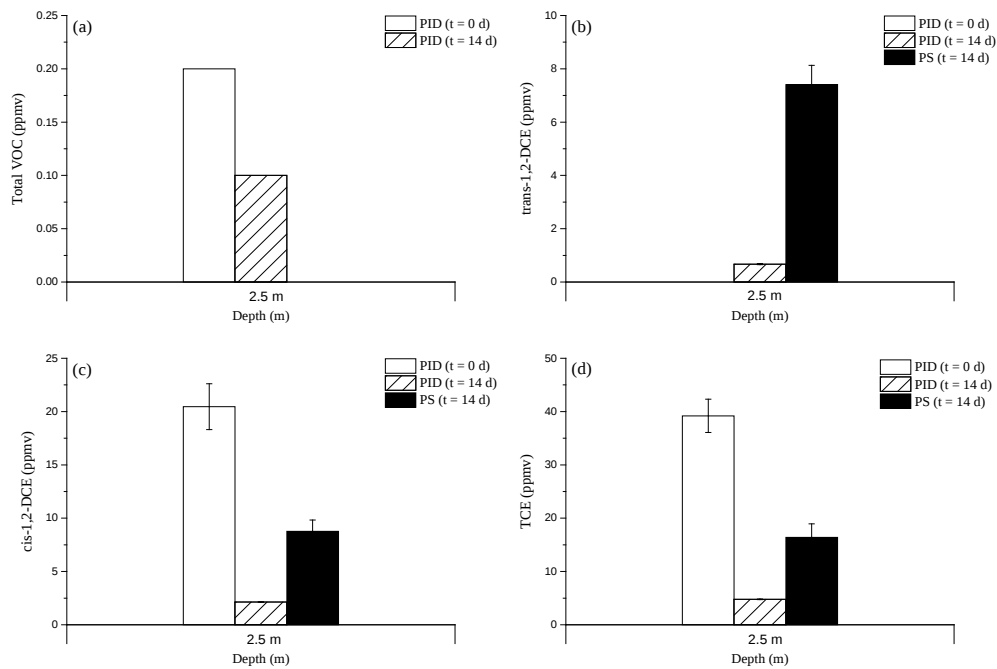


圖 5.16 東陽場址監測井 GW03 未飽和含水層手持式光離子化檢測儀(PID)與被動式採樣器(PS)採樣分析結果之比較

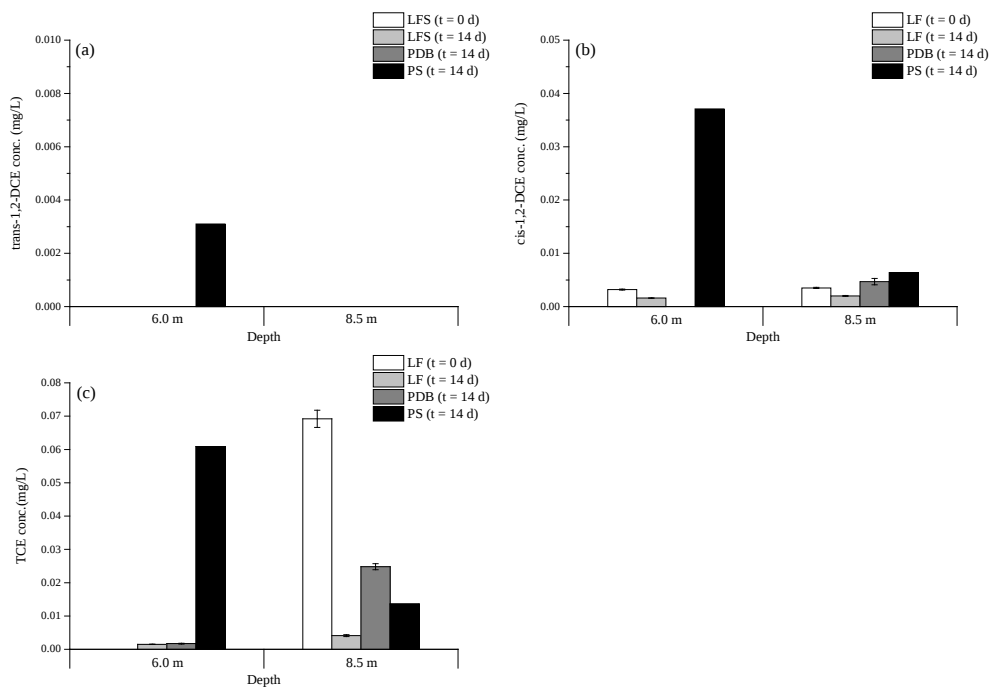


圖 5.17 東陽場址監測井 GW03 飽和含水層微洗井(LFS)、被動式擴散採樣袋(PDB)和被動式採樣器(PS)採樣分析結果之比較



結果與討論

綜括而言，兩場址之結果分析，對於低濃度之採樣結果，可知被動式採樣器可測得之物質濃度較其他兩種方法靈敏，可測得其他兩種方法無法測得之污染濃度；此外，可知被動式採樣器所得之濃度亦可能較其他兩種方法所得之濃度為高，其原因可能為被動式採樣器無需開啟採樣器，可避免微量之 VOC 污染物逸散，另對於高濃度場址之採樣結果可知，三種採樣方法所得之數據具較高之相關性，與低濃度污染採樣結果相較 VOC 逸散之影響程度較低。對於未飽和層之氣體採樣，傳統手持式 PID 之採樣所得之數據變異甚大，被動式採樣器之數據較為穩定可做為未飽和層氣體之採樣器。



5.6 結論

本研究設計出方便使用及可重複使用之被動式採樣器，以鐵氟龍材質為主體，利用透析原理，在採樣器中裝入試劑水後，裝上 PDMS 半透膜再蓋上中間鏤空之蓋子即完成，並以一系列批次實驗及實驗室規模之砂箱測試其可行性。首先在測試採樣器密閉性之染劑試驗中，被動式採樣器放入食用藍色一號水溶液，持續七天後，用以確認採樣器中水溶液之顏色無明顯差異，水溶液在 630 nm 波長下之吸光度於進行比較，結果顯示反應瓶中之水溶液無其他路徑(例如滲漏)可進入採樣器中，僅可透過 PDMS 膜進行傳輸，所有製備之採樣器皆通過此一測試確認採樣器之品質。水相 TCE 與採樣器平衡實驗中，發現較低的水相 TCE 濃度所需之平衡時間較短，且於 3 mg/L~25 mg/L TCE 濃度範圍中，採樣器所需之平衡時間需 >10 天。此外，可知於水相中平衡反應時間須達 14 天，此採樣器可適用之 TCE 濃度範圍為 0.05~150 mg/L。氣相 TCE 與採樣器平衡實驗中，因氣相 TCE 濃度愈高，氣體愈容易藉由擴散而較快達成平衡，於氣相 TCE 濃度 2.6~26 mg/L 範圍，平衡反應時間需 >12 天。此外，將 12、14、20 天之數據平均後之氣/液相濃度比例為 0.342，接近 20 °C 下之無因次亨利常數值 0.34，可知此採樣器在氣/液相間之傳輸符合亨利定律，能夠應用於進行氣相污染物之被動式採樣。綜括水相及氣相實驗，建議此被動式採樣器可採 14 天作為取樣所需之平衡時間。砂箱模擬試驗中，主動式採樣因受幫浦抽氣影響，容易產生干擾而產生錯誤之 TCE 濃度分布推估，而被動式採樣相較於主動式採樣，其數據可較準確用以描繪場址概念模型，應驗被動式採樣可彌補主動式採樣之短處。模場試驗以慶川及東陽場址進行現地應用評估，對於低濃度之採樣結果，可知被動式採樣器可測得之物質濃度較其他兩種方法靈敏，可測得被動式採樣袋及微洗井無法測得之低污染濃度；對於高濃度場址之採樣結果可知，三種採樣方法所得之數據比低濃度污染採樣相關性較高，受 VOC 逸散之影響程度較低。對於未飽和層之氣體採樣，傳統手持式 PID 之採樣所得之數據變異甚大，被動式採樣器之數據較為穩定，證實本研究之被動式採樣器能夠追蹤評估 TCE 於未飽和含水層之污染位置範圍，更容易且精準判斷 TCE 污染源位置。



第六章 參考文獻

- [1] USEPA, Superfund Remedy Report (EPA-542-R-17-001), in: O.o.L.a.E. Management (Ed.), United States Environmental Protection Agency, Office of Land and Emergency Management, Washington, DC., 2017.
- [2] 行政院環境保護署, 105 年度土壤及地下水污染整治年報, 土壤及地下水污染整治基金管理會, 2017.
- [3] J. Baldock, A. Sexton, K. Leahy, A. Thomas, H. Tillotson, S. Pitkin, M. Rossi, Integrated use of a combination of high-resolution techniques to characterize a site impacted by Volatile Organic Compounds to develop a sustainability-led remedial strategy, Battelle Remediation Conference Proceedings, Monterey, CA., 2012.
- [4] Y. Laor, D. Ronen, E.R. Graber, Using a passive multilayer sampler for measuring detailed profiles of gas-phase VOCs in the unsaturated zone, Environmental Science & Technology 37 (2003) 352-360.
- [5] Beacon Environmental Services Inc., BeSure Passive Soil-Gas Technology, 2019.
- [6] NJDEP, Guidance: Field Sampling Procedures Manual, Department of Environmental Protection, State of New Jersey (NJDEP), New Jersey, 2005.
- [7] D. Ronen, E.R. Graber, Y. Laor, Volatile Organic Compounds in the saturated–unsaturated interface region of a contaminated phreatic aquifer, Vadose Zone Journal 4 (2005) 337-344.
- [8] O. Goli, T. Górecki, H.T. Mugammar, M. Marchesi, R. Aravena, Evaluation of the suitability of the Waterloo Membrane Sampler for sample preconcentration before compound-specific isotope analysis, Environmental Technology & Innovation 7 (2017) 141-151.
- [9] S. Seethapathy, T. Górecki, Polydimethylsiloxane-based permeation passive air sampler. Part II: Effect of temperature and humidity on the calibration constants, Journal of Chromatography A 1217 (2010) 7907- 7913.
- [10] S. Seethapathy, T. Górecki, Polydimethylsiloxane-based permeation passive air sampler. Part I: Calibration constants and their relation to retention indices of the analytes, Journal of Chromatography A 1218 (2011) 143-155.



含氣污染物高解析被動式採樣器開發測試及現地應用評估

- [11] B. Zabiegała, T. Górecki, J. Namieśnik, Calibration of permeation passive samplers with silicone membranes based on physicochemical properties of the analytes, *Analytical Chemistry* 75 (2003) 3182-3192.
- [12] B. McAndrews, K. Heinze, W. DiGuseppi, Defining TCE plume source areas using the membrane interface probe (MIP), *Soil and Sediment Contamination: An International Journal* 12 (2003) 799-813.
- [13] M.D. Annable, K. Hatfield, J. Cho, H. Klammler, B.L. Parker, J.A. Cherry, P.S.C. Rao, Field-scale evaluation of the passive flux meter for simultaneous measurement of groundwater and contaminant fluxes, *Environmental Science & Technology* 39 (2005) 7194-7201.
- [14] N.E. Deeds, G.A. Pope, D.C. McKinney, Vadose zone characterization at a contaminated field site using partitioning interwell tracer technology, *Environmental Science & Technology* 33 (1999) 2745-2751.
- [15] V. Dwarakanath, N. Deeds, G.A. Pope, Analysis of partitioning interwell tracer tests, *Environmental Science & Technology* 33 (1999) 3829-3836.
- [16] P.E. Mariner, M. Jin, J.E. Studer, G.A. Pope, The first vadose zone partitioning interwell tracer test for nonaqueous phase liquid and water residual, *Environmental Science & Technology* 33 (1999) 2825-2828.
- [17] J. Mainhagu, C. Morrison, M. Truex, M. Oostrom, M.L. Brusseau, Measuring spatial variability of vapor flux to characterize vadose-zone VOC sources: Flow-cell experiments, *Journal of Contaminant Hydrology* 167 (2014) 32-43.
- [18] M.L. Brusseau, J. Mainhagu, C. Morrison, K.C. Carroll, The vapor-phase multi-stage CMD test for characterizing contaminant mass discharge associated with VOC sources in the vadose zone: Application to three sites in different lifecycle stages of SVE operations, *Journal of Contaminant Hydrology* 179 (2015) 55-64.
- [19] J. Mainhagu, C. Morrison, M.L. Brusseau, Using vapor phase tomography to measure the spatial distribution of vapor concentrations and flux for vadose-zone VOC sources, *Journal of Contaminant Hydrology* 177-178 (2015) 54-63.
- [20] B.H. Conant, R.W. Gillham, C.A. Mendoza, Vapor transport of trichloroethylene in the unsaturated zone: field and numerical modeling investigations, *Water Resources Research* 32 (1996) 9-22.



參考文獻

- [21] M.L. Brusseau, V. Rohay, M.J. Truex, Analysis of soil vapor extraction data to evaluate mass-transfer constraints and estimate source-zone mass flux, *Groundwater Monitoring & Remediation* 30 (2010) 57-64.
- [22] D. Pedretti, M. Masetti, G.P. Beretta, M. Vitiello, A revised conceptual model to reproduce the distribution of chlorinated solvents in the Rho aquifer (Italy), *Groundwater Monitoring & Remediation* 33 (2013) 69-77.
- [23] M. Jancin, W.F. Ebaugh, Shallow lateral DNAPL migration within slightly dipping limestone, southwestern Kentucky, *Engineering Geology* 65 (2002) 141-149.
- [24] USEPA CLU-IN, Sediments Conceptual Site Models, 2019.
- [25] N.B. Basu, P. Suresh, C. Rao, I.C. Poyer, S. Nandy, M. Mallavarapu, R. Naidu, G.B. Davis, B.M. Patterson, M.D. Annable, K. Hatfield, Integration of traditional and innovative characterization techniques for flux-based assessment of dense non-aqueous phase liquid (DNAPL) sites, *Journal of Contaminant Hydrology* 105 (2009) 161-172.
- [26] 行政院環保署, 空氣中揮發性有機化合物檢測方法—不銹鋼採樣筒／氣相層析質譜儀法(NIEA A715.15B), 2014.
- [27] 行政院環保署, 水中揮發性有機化合物檢測方法—吹氣捕捉／氣相層析質譜儀法(NIEA W785.55B), 2012.
- [28] Beacon Environmental Services Inc., Passive soil gas surveys: the collection of high resolution, time-integrated samples to support site characterization and VI investigations, Beacon Environmental Services Inc., Williams Street, Bel Air, MD, USA, 2015.
- [29] M. Trolborg, P.J. Binning, S. Nielsen, P. Kjeldsen, A.G. Christensen, Unsaturated zone leaching models for assessing risk to groundwater of contaminated sites, *Journal of Contaminant Hydrology* 105 (2009) 28-37.
- [30] S. Jellali, H. Benremita, P. Muntzer, O. Razakarisoa, G. Schäfer, A large-scale experiment on mass transfer of trichloroethylene from the unsaturated zone of a sandy aquifer to its interfaces, *Journal of Contaminant Hydrology* 60 (2003) 31-53.
- [31] M.O. Rivett, G.P. Wealthall, R.A. Dearden, T.A. McAlary, Review of unsaturated-zone transport and attenuation of volatile organic compound (VOC) plumes leached from shallow source zones, *Journal of Contaminant Hydrology* 123 (2011) 130-156.



含氯污染物高解析被動式採樣器開發測試及現地應用評估

- [32] W.A. Illman, S.J. Berg, X. Liu, A. Massi, Hydraulic/partitioning tracer tomography for DNAPL source zone characterization: small-scale sandbox experiments, *Environmental Science & Technology* 44 (2010) 8609-8614.
- [33] J.W.E. Page, K. Soga, T. Illangasekare, The significance of heterogeneity on mass flux from DNAPL source zones: An experimental investigation, *Journal of Contaminant Hydrology* 94 (2007) 215-234.
- [34] R.J. Lenhard, M. Oostrom, C.S. Simmons, M.D. White, Investigation of density-dependent gas advection of trichloroethylene: Experiment and a model validation exercise, *Journal of Contaminant Hydrology* 19 (1995) 47-67.



附錄一

地下水監測井背景調查表

一、井址：彰化縣鹿港鎮溝墘里溝墘巷 36 之 3 號

二、井號：SW08

三、附近可能之污染源描述：

1. TCE、trans-1,2-DCE、cis-1,2-DCE

四、地下水監測井位置簡述：（標明道路及明顯標的物並繪圖描述）





含氯污染物高解析被動式採樣器開發測試及現地應用評估

監測井地下水採樣紀錄表

計畫名稱：含氯污染物高解析被動式採樣器開發測試及現地應用評估

採樣日期：109 年 9 月 15 日

採樣地點：慶川企業社

井號：SW08

天候狀況：晴

井篩深度：4.6 ~ 6.1 (1.5 m)

環境描述：(1)監測井鎖扣是否完整：是 ☒ 否 ☐ (情況描述：)

(2)監測井附近環境描述：廠區內部，有明顯溶劑味，附近有人員作業

洗井資料

井管內徑：2 吋 水位面至井口深度：4.041 m 井底至井口深度：6.142 m

井水深度：2.101 m 井水體積：4.258 公升 預估洗井時間：

型式：氣囊式 型號：geo-control PRO 抽水速率：0.114 L/min

抽水方法：微洗井 泵進水口深度：5.2 m 井篩長度：1.5 m

水位洩降：0.413 m 水流元容積：0.5 L 現場儀器量測頻率：5 min

洗井開始時間：14:58 洗井結束時間：15:25

現場量測儀器校正

(1) pH 計校正後，Buffer - 7 之讀值：【7.0】

(2) 0.01 N 之氯化鉀溶液於 25 °C 下之導電度的測值為：【1410】 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ；0.01 N 之標準氯化鉀溶液於 25 °C 下之導電度測試合格參考值為：【1343 ~ 1483】 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。(3) 溶氧計之校正，空氣校正之讀值：【7.18】 mg/L ，校正時溫度【36.8】 $^{\circ}\text{C}$ 。(4) 氧化還原電位校正，氧化還原電位(ORP)標準液校正之讀值：【121】 mV ，標準液之氧化還原電位值【220】 mV 。



附錄一

水質參數								
時間	汲水 速率 (L/min)	水位 深度 (m)	汲出水 體積(升)	pH 值	導電度 (μ S/cm)	溶氧 (mg/L)	氧化還原 電位 (mV)	洗井水觀察 (水色、色 味、雜質...)
(洗井前) 14:58	0.114	4.493	1	6.9	1370	3.78	-97	微黃
(洗井中) 15:04	0.114	4.485	0.684	7.0	1380	3.63	-101	微黃
(洗井中) 15:10	0.114	4.498	0.684	7.0	1400	3.65	-110	微黃
(洗井中) 15:19	0.114	4.507	1.026	7.0	1400	3.61	-118	微黃
(洗井中) 15:25	0.114	4.497	0.684	7.0	1400	3.62	-125	微黃
(洗井後) :								
(採樣時) :								

汲出水總體積：4.078 公升

洗井結束時水位面至井口深度：4.497 m

採樣資料

採樣器材：氣囊式泵

採樣方法：微洗井

採樣器放置深度：4.8, 5.4 m

開始時間：15:25

結束時間：15:50

附註：由淺至深依序進行採樣。

採樣人員：劉芮宏



含氯污染物高解析被動式採樣器開發測試及現地應用評估

監測井地下水採樣紀錄表

計畫名稱：含氯污染物高解析被動式採樣器開發測試及現地應用評估

採樣日期：109 年 9 月 29 日

採樣地點：慶川企業社

井號：SW08

天候狀況：晴

井篩深度：4.6 ~ 6.1 (1.5 m)

環境描述：(1)監測井鎖扣是否完整：是 ☒ 否 ☐ (情況描述：)

(2)監測井附近環境描述：廠區內部，有明顯溶劑味，附近有人員作業

洗井資料

井管內徑：2 吋 水位面至井口深度：4.075 m 井底至井口深度：6.141 m

井水深度：2.066 m 井水體積：4.187 公升 預估洗井時間：

型式：氣囊式 型號：geo-control PRO 抽水速率：0.12 L/min

抽水方法：微洗井 泵進水口深度：5.2 m 井篩長度：1.5 m

水位洩降：0.379 m 水流元容積：0.5 L 現場儀器量測頻率：5 min

洗井開始時間：13:30 洗井結束時間：13:55

現場量測儀器校正

(1) pH 計校正後，Buffer - 7 之讀值：【7.0】

(2) 0.01 N 之氯化鉀溶液於 25 °C 下之導電度的測值為：【1410】 $\mu\text{S} / \text{cm}$ ；0.01 N 之標準氯化鉀溶液於 25 °C 下之導電度測試合格參考值為：【1343 ~ 1483】 $\mu\text{S} / \text{cm}$ 。(3) 溶氧計之校正，空氣校正之讀值：【7.95】 mg / L ，校正時溫度【30.6】 $^{\circ}\text{C}$ 。(4) 氧化還原電位校正，氧化還原電位(ORP)標準液校正之讀值：【135】 mV ，標準液之氧化還原電位值【220】 mV 。



附錄一

水質參數								
時間	汲水速率 (L/min)	水位深度 (m)	汲出水 體積 (升)	pH 值	導電度 ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	溶氧 (mg/L)	氧化還原 電位 (mV)	洗井水觀察 (水色、色 味、雜質...)
(洗井前) 13:30	0.12	4.340	0.5	6.9	1300	3.78	-122	微黃、清澈
(洗井中) 13:35	0.12	4.397	0.6	7.0	1310	3.83	-123	微黃、清澈
(洗井中) 13:40	0.12	4.443	0.6	7.0	1340	3.73	-138	微黃、清澈
(洗井中) 13:45	0.12	4.449	0.6	7.0	1360	3.59	-130	微黃、清澈
(洗井中) 13:50	0.12	4.454	0.6	7.0	1360	3.49	-126	微黃、清澈
(洗井後) 13:55	0.12	4.454	0.6	7.0	1370	3.48	-134	微黃、清澈
(採樣時) :								

汲出水總體積：3.5 公升

洗井結束時水位面至井口深度：4.454 m

採樣資料

採樣器材：氣囊式泵

採樣方法：微洗井

採樣器放置深度：4.8, 5.4 m

開始時間：13:55

結束時間：14:20

附註：由淺至深依序進行採樣。

採樣人員：劉芮宏



含氯污染物高解析被動式採樣器開發測試及現地應用評估

監測井地下水揮發性有機物被動式採樣器採樣紀錄表

計畫名稱：含氯污染物高解析被動式採樣器開發測試及現地應用評估

採樣日期：109 年 9 月 29 日

採樣地點：慶川企業社

採樣人員：劉芮宏

天候狀況：晴

環境描述：(1)監測井鎖扣是否完整：是■ 否□(情況描述：)

(2)監測井附近環境描述：廠區內部，有明顯溶劑味，附近有人員作業

井號：SW08	井管內徑：2 吋
井口至水面深度(A)：4.075 m	井篩頂部深度(B)：4.6 m
井口至井底深度(D)：6.141 m	井篩底部深度(C)：6.1 m

採樣器放置	採樣器中間點至井口之距離(N)	放置時間
	2.5, 3.5, 4.2, 4.8, 5.4m	109/9/15 16:00
採樣器回收	採樣器中間點至井口之距離(N)	取出時間
	2.5, 3.5, 4.2, 4.8, 5.4m	109/9/29 12:24
採樣器表面是否有附著物：無		總採樣時間：13 天 20 時
備註：井中雜質較多，被動式採樣器上方均有雜質存在		

水質參數							
日期	時間	採樣深度(m)	溫度(°C)	pH	導電度(μS/cm)	溶氧(mg/L)	氧化還原電位(mV)
109/9/15	15:25	5.2	29.6	7.0	1400	3.62	-125
109/9/29	13:55	5.2	28.5	7.0	1370	3.48	-134

註：水質參數參考微洗井採樣最後所測得之數據。



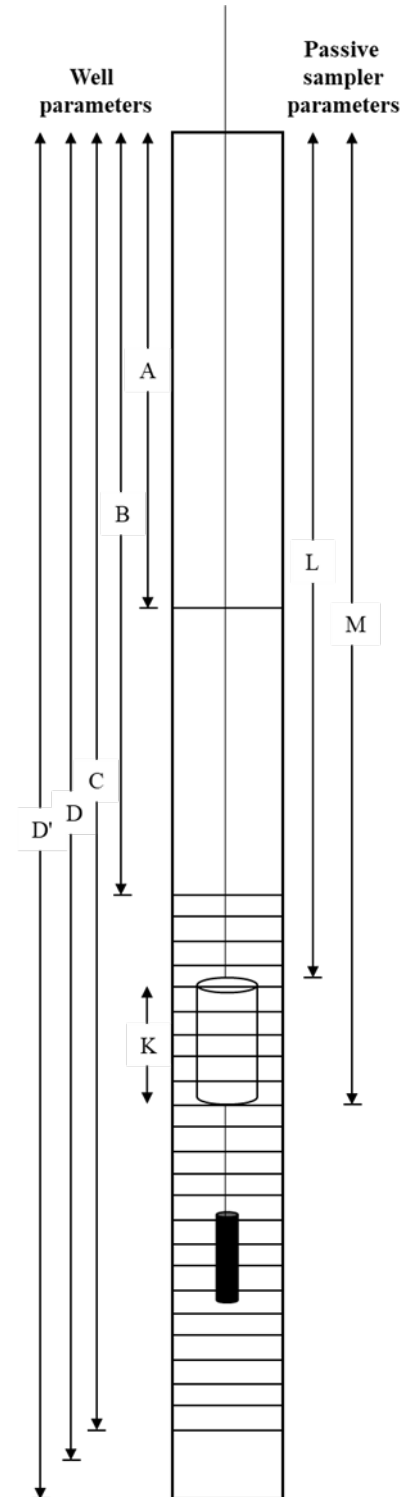
附錄一

監測井地下水揮發性有機物被動式採樣器採樣紀錄表

監測井與採樣器參數對照表

(m)

(A)井口至水面深度	4.075	
(B)井篩頂部深度	4.6	
(C)井篩底部深度	6.1	
(D)井口至井底深度 (現場量測)	6.141	
(D')井口至井底深度(設井初始深度)	6.1	
(K)採樣器長度	採樣器 0.07	採樣袋 0.45
(L)採樣器頂部至井口距離	2.465, 3.465, 4.465, 5.065, 5.665	3.975, 4.575, 5.175
(M)採樣器底部至井口距離	2.535, 3.535, 4.535, 5.135, 5.735	4.425, 5.025, 5.625
(N)採樣器中間點至井口距 (L+M)/2	2.5, 3.5, 4.5, 5.1, 5.7	4.2, 4.8, 5.4





含氯污染物高解析被動式採樣器開發測試及現地應用評估



附錄二

地下水監測井背景調查表

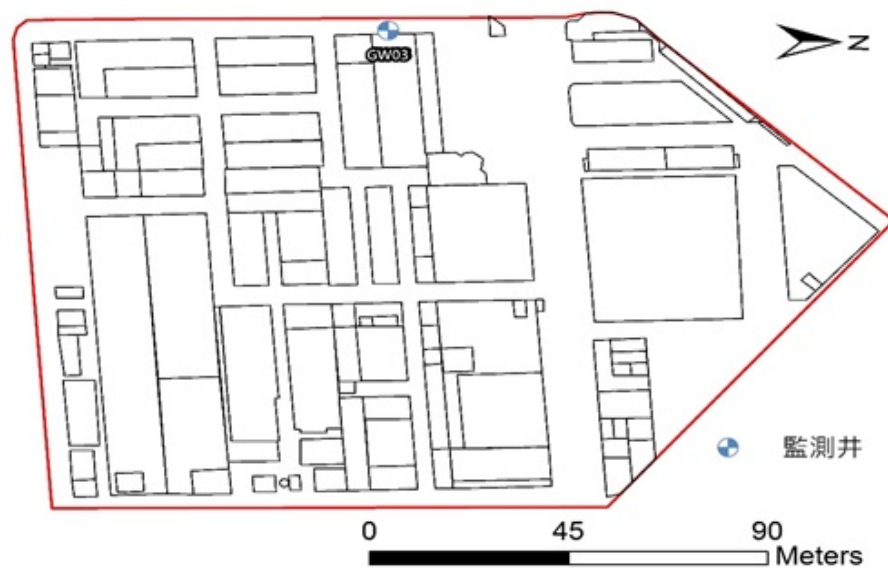
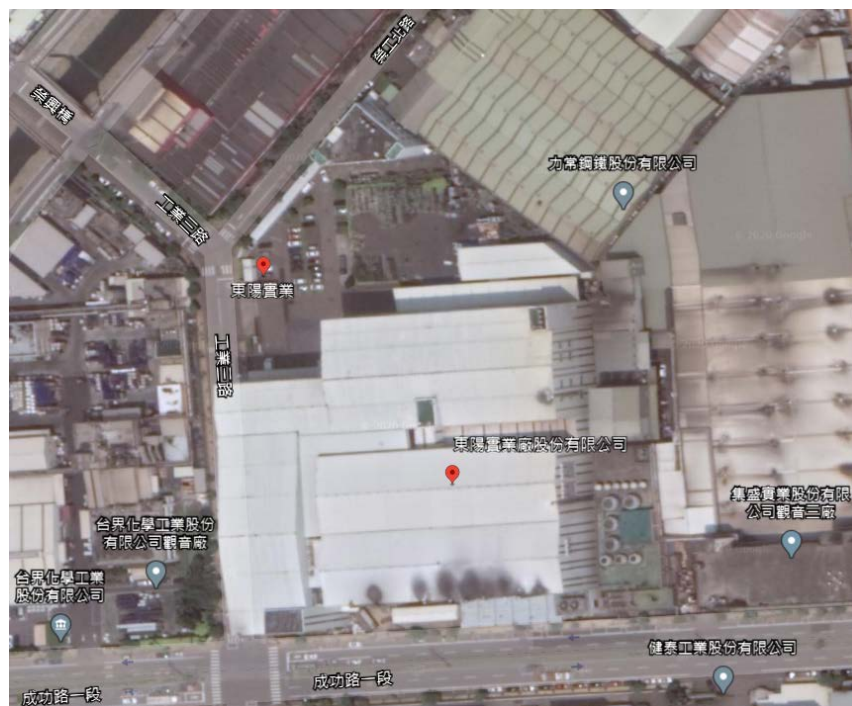
一、井址：桃園市觀音區榮工北路 17 號

二、井號：GW03

三、附近可能之污染源描述：

1. TCE、trans-1,2-DCE、cis-1,2-DCE

四、地下水監測井位置簡述：（標明道路及明顯標的物並繪圖描述）





含氯污染物高解析被動式採樣器開發測試及現地應用評估

監測井地下水採樣紀錄表

計畫名稱：含氯污染物高解析被動式採樣器開發測試及現地應用評估

採樣日期：109 年 10 月 08 日 採樣地點：東陽實業

井號：GW03 天候狀況：晴

井篩深度：8.3 ~ 14.3 (6 m)

環境描述：(1)監測井鎖扣是否完整：是 ☒ 否 ☐ (情況描述：)

(2)監測井附近環境描述：大門口附近，靠近榮工北路一側

洗井資料

井管內徑：2 吋 水位面至井口深度：3.359 m 井底至井口深度：14.386 m

井水深度：11.027 m 井水體積：22.350 公升 預估洗井時間：-

型式：氣囊式 型號：geo-control PRO 抽水速率：0.141 L/min

抽水方法：微洗井 泵進水口深度：8.5 m 井篩長度：6.0 m

水位洩降：0.005 m 水流元容積：0.5 L 現場儀器量測頻率：5 min

洗井開始時間：10.30 洗井結束時間：11:00

現場量測儀器校正

(1) pH 計校正後，Buffer - 7 之讀值：【7.0】

(2) 0.01 N 之氯化鉀溶液於 25 °C 下之導電度的測值為：【1410】 $\mu\text{S} / \text{cm}$ ；0.01 N 之標準氯化鉀溶液於 25 °C 下之導電度測試合格參考值為：【1343 ~ 1483】 $\mu\text{S} / \text{cm}$ 。(3) 溶氧計之校正，空氣校正之讀值：【7.75】 mg / L ，校正時溫度【27.0】°C。

(4) 氧化還原電位校正，氧化還原電位(ORP)標準液校正之讀值：【145】mV，標準液之氧化還原電位值【220】mV。



附錄二

水質參數								
時間	汲水速率 (L/min)	水位深度 (m)	汲出水 體積 (升)	pH 值	導電度 ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	溶氧 (mg/L)	氧化還原 電位 (mV)	洗井水觀察 (水色、色 味、雜質...)
(洗井前) 10:30	0.141	3.359	1	5.8	2300	3.4	123	微濁、黃
(洗井中) 10:40	0.141	3.363	1.41	5.8	2310	3.38	117	微濁、黃
(洗井中) 10:45	0.141	3.365	0.705	5.9	2290	3.32	118	微濁、黃
(洗井中) 10:50	0.141	3.366	0.705	5.9	2220	3.27	118	微濁、黃
(洗井中) 10:55	0.141	3.364	0.705	5.9	2280	3.27	116	微濁、黃
(洗井後) 11:00	0.141	3.364	0.705	5.9	2280	3.35	112	微濁、黃
(採樣時) :								

汲出水總體積：5.23 公升

洗井結束時水位面至井口深度：3.364 m

採樣資料

採樣器材：氣囊式泵

採樣方法：微洗井

採樣器放置深度：6.0, 8.5 m

開始時間：11:00

結束時間：11:30

附註：由淺至深依序進行採樣。

採樣人員：劉芮宏



含氯污染物高解析被動式採樣器開發測試及現地應用評估

監測井地下水採樣紀錄表

計畫名稱：含氯污染物高解析被動式採樣器開發測試及現地應用評估

採樣日期：109 年 10 月 22 日 採樣地點：東陽實業

井號：GW03 天候狀況：風大，毛毛雨

井篩深度：8.3 ~ 14.3 (6 m)

環境描述：(1)監測井鎖扣是否完整：是 ☒ 否 ☐ (情況描述：井蓋上積水，開蓋後雨水流入井中)

(2)監測井附近環境描述：大門口附近，靠近榮工北路一側

洗井資料

井管內徑：2 吋 水位面至井口深度：3.392 m 井底至井口深度：14.383 m

井水深度：10.991 m 井水體積：22.277 公升 預估洗井時間：-

型式：氣囊式 型號：geo-control PRO 抽水速率：0.141 L/min

抽水方法：微洗井 泵進水口深度：8.5 m 井篩長度：6.0 m

水位洩降：0.022 m 水流元容積：0.5 L 現場儀器量測頻率：5 min

洗井開始時間：13:26 洗井結束時間：13:50

現場量測儀器校正

(1) pH 計校正後，Buffer - 7 之讀值：【7.0】

(2) 0.01 N 之氯化鉀溶液於 25 °C 下之導電度的測值為：【1410】 $\mu\text{S} / \text{cm}$ ；0.01 N 之標準氯化鉀溶液於 25 °C 下之導電度測試合格參考值為：【1343 ~ 1483】 $\mu\text{S} / \text{cm}$ 。(3) 溶氧計之校正，空氣校正之讀值：【8.50】 mg / L ，校正時溫度【22.6】 $^{\circ}\text{C}$ 。(4) 氧化還原電位校正，氧化還原電位(ORP)標準液校正之讀值：【137】 mV ，標準液之氧化還原電位值【220】 mV 。



附錄二

水質參數								
時間	汲水速率 (L/min)	水位深度 (m)	汲出水 體積 (升)	pH 值	導電度 (μ S/cm)	溶氧 (mg/L)	氧化還原 電位 (mV)	洗井水觀察 (水色、色 味、雜質...)
(洗井前) 13:26	0.141	3.422	0.5	6.3	200	6.98	280	清澈
(洗井中) 13:32	0.141	3.410	0.846	6.3	210	6.12	351	清澈
(洗井中) 13:38	0.141	3.415	0.846	6.3	230	7.49	437	清澈
(洗井中) 13:44	0.141	3.411	0.846	6.3	250	7.41	459	清澈
(洗井中) 13:50	0.141	3.414	0.846	6.3	270	7.34	468	清澈
(洗井後) :								
(採樣時) :								

汲出水總體積：3.884 公升

洗井結束時水位面至井口深度：3.414 m

採樣資料

採樣器材：氣囊式泵

採樣方法：微洗井

採樣器放置深度：6.0, 8.5 m

開始時間：13:50

結束時間：14:20

附註：由淺至深依序進行採樣。

採樣人員：劉芮宏



含氯污染物高解析被動式採樣器開發測試及現地應用評估

監測井地下水揮發性有機物被動式採樣器採樣紀錄表

計畫名稱：含氯污染物高解析被動式採樣器開發測試及現地應用評估

採樣日期：109 年 10 月 22 日 採樣地點：東陽實業

採樣人員：劉芮宏 天候狀況：風大，毛毛雨

環境描述：(1)監測井鎖扣是否完整：是■ 否□(情況描述：井蓋上積水，開蓋後雨水流入井中)

(2)監測井附近環境描述：廠區內部，有明顯溶劑味，附近有人員作業

井號：GW03	井管內徑：2 吋
井口至水面深度(A)：3.392 m	井篩頂部深度(B)：8.3 m
井口至井底深度(D)：14.383 m	井篩底部深度(C)：14.3 m

採樣器放置	採樣器中間點至井口之距離(N)	放置時間
	2.5, 6.0, 8.5 m	109/10/08 12:00
採樣器回收	採樣器中間點至井口之距離(N)	取出時間
	2.5, 6.0, 8.5 m	109/10/22 10:30
採樣器表面是否有附著物：些微顆粒		總採樣時間：13 天 22.5 時
備註：被動式採樣器上方均有雜質存在，皆使用 DI 水沖洗採樣器兩端		

水質參數							
日期	時間	採樣深度(m)	溫度(°C)	pH	導電度(μS/cm)	溶氧(mg/L)	氧化還原電位(mV)
109/10/08	11:00	8.5	27.0	5.9	2280	3.35	112
109/10/22	13:50	8.5	23.2	6.3	270	7.34	468

註：水質參數參考微洗井採樣最後所測得之數據。



附錄二

監測井地下水揮發性有機物被動式採樣器採樣紀錄表

監測井與採樣器參數對照表

(m)

(A)井口至水面深度	3.392	
(B)井篩頂部深度	8.3	
(C)井篩底部深度	14.3	
(D)井口至井底深度 (現場量測)	14.383	
(D')井口至井底深度(設井初始深度)	14.3	
(K)採樣器長度	採樣器 0.07	採樣袋 0.45
(L)採樣器頂部至井口距離	2.465, 6.330, 8.830	5.775, 8.275
(M)採樣器底部至井口距離	2.535, 6.400, 8.900	6.225, 8.725
(N) 採 樣 器 中 間 點 至 井 口 距 (L+M)/2	2.5, 6.365, 8.865	6.0, 8.5

