

土壤及地下水含氯有機物污染來源調查技術
參考手冊

— 高解析度場址調查策略與技術運用

(108 年定稿版)

出版日期：民國一〇八年二月

出版單位：行政院環境保護署

目 錄

目 錄.....	I
圖目錄.....	III
表目錄.....	IV
第一章 前言.....	1
1.1 編撰目的.....	1
1.2 適用範圍.....	3
第二章 高解析場址調查.....	4
2.1 何謂高解析場址調查.....	4
2.2 高解析調查工具.....	6
2.2.1 土壤採樣類.....	6
2.2.1.1 直接貫入法(Direct Push Method).....	6
2.2.1.2 旋鑽方式(Auger/Rotary Method).....	10
2.2.1.3 聲波(振動)鑽探法(Sonic Drilling Technology).....	11
2.2.2 地下水採樣類.....	13
2.2.2.1 裸孔採樣(Open-Hole Sampling).....	13
2.2.2.2 聚乙烯被動式擴散採樣袋(Polyethylene Diffusion Bag Samplers).....	15
2.2.3 水文與地質試驗.....	18
2.2.3.1 鑽孔流量計(Borehole Flowmeter).....	18
2.2.3.2 水力斷層掃描(Hydraulic Tomography).....	19
2.2.3.3 圓錐貫入試驗(Cone Penetrometer Technology, CPT).....	21
2.2.3.4 水文地質剖析儀(Hydraulic Profiling Tool, HPT).....	24
2.2.3.5 地球物理探測技術.....	25
2.2.4 污染濃度探測與其他分析方法.....	28
2.2.4.1 薄膜界面探測器(Membrane Interface Probe, MIP).....	28
2.2.4.2 呈色篩測(Colorimetric)-Color-Tec.....	30
2.2.4.3 呈色篩測(Colorimetric)-Sudan IV.....	31

2.2.4.4 現地分析(On-Site Laboratory)	32
第三章 調查策略與技術運用	34
3.1 污染來源不明情境	38
3.2 污染來源調查策略	39
3.3 調查工具選擇	42
3.4 現場動態工作策略	45
3.5 滾動式的場址調查	49
第四章 案例示範	50
4.1 A 場址	50
4.2 B 場址	53
4.3 C 場址	58
4.4 D 場址	60
4.5 E 場址.....	62
4.6 F 場址.....	64
第五章 參考資料	67

圖目錄

圖 1.1-1、含氯碳氫化合物污染來源呈現三維空間分布的示意圖	1
圖 2.2-1、聲波(振動)鑽探法示意圖	12
圖 2.2-2、被動式擴散採樣袋與其構造	15
圖 2.2-3、水力斷層掃描 3D 空間分布圖	20
圖 2.2-4、鑽錐貫入試驗卡車	22
圖 2.2-5、水力剖面層析儀及其數據呈現示意圖	24
圖 2.2-6、薄膜界面探測器	28
圖 2.2-7、Color-Tec 應用於篩測四氯乙烯之示意圖	30
圖 3-1、污染來源調查程序示意圖	37
圖 3.2-1、污染團未封閉示意圖	40
圖 3.2-2、三維污染分布示意圖	40
圖 3.4-1、以污染物濃度分布與場址地下水流向佈點示意圖	47
圖 3.5-1、滾動式場址調查的循環示意圖	49
圖 4.1-1、A 場址高解析場址調查技術實際採樣點位示意圖	52
圖 4.1-2、土壤純相測試結果	52
圖 4.2-1、B 場址預計設井位置規劃	54
圖 4.2-2、B 場址調查策略執行流程示意圖	55
圖 4.2-3、B 場址動態工作策略執行流程圖	56
圖 4.2-4、B 場址污染來源調查成果圖	57
圖 4.4-1、D 場址碳與氯穩定同位素二維分析圖	61
圖 4.5-1、E 場址及其鄰近區域之四氯乙烯污染濃度分布圖	62
圖 4.5-2、E 場址之四氯乙烯污染傳輸概念模式假設圖	63

表目錄

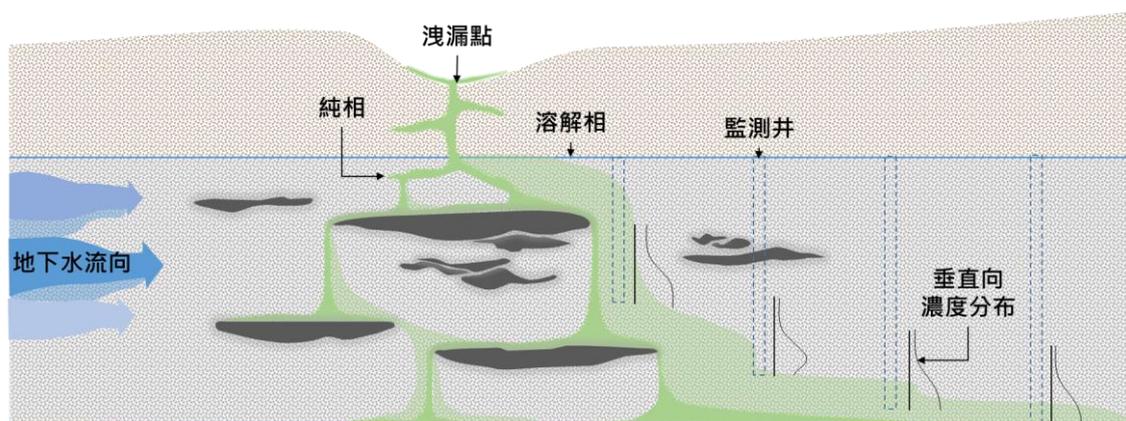
表 2.1-1、傳統調查與高解析場址調查差異表.....	5
表 2.2-1、土壤採樣器類型.....	8
表 2.2-2、土壤採樣器具適用之地質特性.....	10
表 3-1、各類調查工具之即時檢測功能評估.....	35
表 3.1-1、場址基本資料收集對照表.....	38
表 3.2-1、國內常見之污染來源不明情境與調查策略.....	39
表 3.3-1、國內常見之污染來源調查技術與工具組合.....	43
表 3.3-2、氫示蹤劑與穩定同位素之原理及適用條件.....	44
表 3.3-3、土壤採證技術及其適用之地質條件.....	44

第一章 前言

1.1 編撰目的

含氯碳氫化合物比水重、溶出緩慢等特性導致難以尋得其污染來源，而污染場址的整治、求償與行政管理等面向往往皆需要確認污染來源。此處所謂污染來源的定義與指標可參考「含氯碳氫化合物污染源區判定參考手冊」中之污染源區的界定，簡言之，主要指純相(Pure Phase)的含氯碳氫化合物，亦即含氯有機溶劑，在含水層中以殘留相(不具流動性)或是自由相(具流動性)的方式存在。

一般而言，含氯碳氫化合物自洩漏點洩漏至地底下後，因其密度比水大而逐漸往更深層移動，在含水層中隨地下水流而緩慢溶出，成為地下水中長期的污染來源。污染物濃度分布與純相的分布有極大關聯性，且純相可能呈三維空間的分布(Vroblecky, 2001; Vroblecky and Campbell, 2001)。以圖 1.1-1 二維示意圖為例，純相從洩漏點往含水層滲入後，因遇到細緻地質(如黏土層)而往水平方向分布，而當細緻地質為不連續的零星分布時，可能進一步導致純相污染物呈現三維空間的分布，純相所在深度則反映於垂直向濃度分布之最高處。



此圖由「含氯碳氫化合物環境鑑識技術建置與應用計畫(第2期)」自行繪製

圖 1.1-1、含氯碳氫化合物污染來源分布示意圖

環保署土污基管會於民國 105 年委託工研院辦理「含氯碳氫污染物環境鑑識技術建置與應用計畫」時，已參考美國、德國與日本的土壤及地下水污染相關法規，以及國內歷年的訴願訴訟判例與美國訴訟判例，在兼顧科學合理性、法律相容性與行政可行性的基礎下，建置「含氯碳氫化合物污染源區判定參考手冊」，該手冊已清楚定義污染源區之類別與判定方式。但是，要蒐集能夠判定污染來源的物證卻非易事。由於污染來源在空間中多是三維分布，**判定污染來源的物證蒐集須仰賴高密度的調查，亦即高解析度的調查**。然而，高密度的數據需要的代價也較高，為了在有限的調查經費下仍能達到高解析度的調查，含氯碳氫污染物環境鑑識技術建置與應用計畫(第2期)結合美國環保署近年來極力推廣應用的三合系統(Triad System)調查方式，利用現場即時檢測提升調查工作規劃的有效性，依據獲得的新資訊即時修正調查計畫，直到達成場址調查目標，藉以縮短過去調查所需的冗長時間並節省經費。

本手冊乃運用「含氯碳氫污染物環境鑑識技術建置與應用計畫」兩期計畫調查場址污染來源的經驗回饋，撰寫調查污染來源在含水層中分布的策略與方法，內容提供多種可即時回饋調查資訊的高解析場址調查工具供參，並針對數種常見的污染來源不明情境，提供參考策略，以及如何運用三合系統與選擇調查工具，以達到調查出污染來源的目標。

1.2 適用範圍

本手冊之內容原則上適用於四氯乙烯、三氯乙烯、二氯乙烯及氯乙烯等數種常見之含氯碳氫化合物污染場址之污染來源調查，包含污染深度、污染範圍、限縮調查方向或鎖定污染熱區、純相位置等，惟場址尚未確定含有純相污染物時，應假設其有純相存在並從嚴規劃，以避免調查工作使污染範圍擴大。

本手冊僅提供原則性之調查策略、調查與鑑識工具選用原則與時機，涵蓋的情境以國內場址常見的為主。此外，各工具或技術之詳細操作步驟非本手冊之研擬範圍，讀者宜另行參考各自的技術手冊或專書。

第二章 高解析場址調查

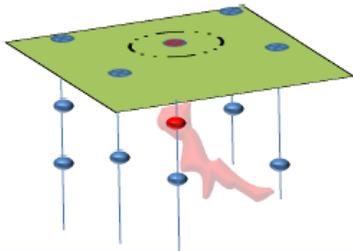
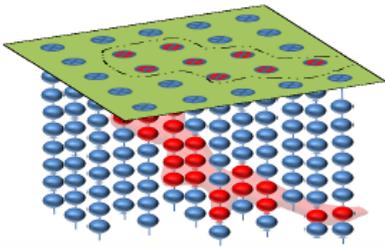
2.1 何謂高解析場址調查

高解析場址調查(High-Resolution Site Characterization, HRSC)為近年來美國環保署建立場址概念模型(Conceptual Site Model, CSM)時所提出的調查概念，其定義為利用適當的採樣密度或調查技術瞭解污染物於環境中分布的位置、傳輸途徑與宿命，以提供更快速或更有效率的場址整治策略。所謂適當的採樣密度，其考量點包括：

1. 縮小每樣品的取樣量，以避免大體積樣品的平均結果掩蓋細部變化資訊。
2. 適當小的垂直向採樣間距。
3. 適當小的水平向鑽孔間距。
4. 在污染物傳輸方向的垂直截面上，設置適當的鑽孔與採樣點。

高解析場址調查與傳統調查間的差異比較如表 2.1-1 (部分參考 King et al., 2013)，相較於傳統(過往)的調查方法，高解析場址調查最顯著的特徵就是其具有較密的採樣佈點，密集的數據點可以大幅降低結果的不確定性，因此，更能明確掌握污染物的暴露途徑、污染物宿命與污染物質量分布，甚至有助於定位污染洩漏位置，釐清污染責任主體。

表 2.1-1、傳統調查與高解析場址調查差異表

	傳統調查	高解析場址調查
水文	微水試驗量測井篩區間的平均水力傳導係數。	水文地質剖面儀可連續量測不同深度的水力傳導係數。
採樣規劃	一口監測井僅開篩特定區間，採樣多為單一深度。	一口監測井可執行多深度的採樣。
樣品分析	樣品須送至實驗室分析，現場無法立即知道檢測結果。	使用攜帶式監測器，現地立即可得檢測結果。
污染分布	多以二維之等濃度曲線呈現污染分布，忽略不同深度的濃度變化。	會考慮污染分布為三維的變化。
場址概念模型	數據點較少，解析度低，多屬場址初步概念模式。如下示意圖，僅有一點檢出污染(以紅點表示)，可能會誤判深處無污染或是污染僅限於該水平位置。	數據點較多，解析度高，較能建構場址細部概念模型。如下示意圖，由檢出污染的三維分布位置，可知污染在水平與垂直方向皆擴大分布，同時也可知污染物在靠近地表面的洩漏位置，有助於找到污染責任主體。
示意圖		

雖然高解析場址調查有如此好處，但是大量的量測數據通常意味著較高的調查成本，因此，較具「實用性」的高解析場址調查必須包含兩部分，一是選用適當的工具，也就是高解析調查工具；二是輔以三合系統的調查方式（詳第三章說明）。舉例來說，要以 10 個不同深度的污染物濃度來建構某一定點垂直向的污染分布，

可以使用傳統方法設井叢，也可以使用多深度採樣，前者要鑽 10 個井孔，而後者則僅需鑽 1 個井孔，由於鑽井所費不貲，後者(屬高解析調查工具)顯然較前者(傳統調查工具)具經濟效益；換言之，雖然傳統調查工具只要增加調查點位與數量，也可以得到高解析度的數據點，但因費用較高，因此，非屬此處所言之適當工具或高解析調查工具。本章節將會說明國內現有的高解析調查工具；三合系統的調查方式則於第三章說明。

2.2 高解析調查工具

本手冊彙整國內具有的調查技術，依應用種類分為土壤採樣、地下水採樣、水文與地質試驗、污染濃度探測與其他分析方法等四大類別，以下逐一說明各項工具之用途及原理、使用條件與限制、優缺點、國內運用情況及是否為即時檢測技術等資訊，若有足夠的公開資訊，則額外提供其經濟性供參考。

2.2.1 土壤採樣類

土壤採樣技術主要提供土壤、地質特性資訊，如粒徑、孔隙率等，此外，完整且不受擾動的土壤樣品可真實反應污染物分布的深度及濃度。取得土壤樣品的方式可分為直接貫入法(Direct Push Method)、旋鑽方式(Auger/Rotary Method)、聲波(振動)鑽探法(Sonic Drilling Technology)及圓錐貫入試驗(Cone Penetrometer Technology, CPT)等四類，其中，CPT 除了可以採集土壤樣品外，亦可用於採集土壤氣體樣品或地下水樣品，若搭配適當之探測器，則可獲取水文地質資訊，故此項將於 2.2.3.3 節說明。

2.2.1.1 直接貫入法(Direct Push Method)

1. 用途及原理：對於鬆散、未壓實地質的土壤及地下水採樣，直接貫入法為取代傳統旋鑽方式的一種採樣推進技術。依據場址土壤和地質情況，取樣深度

可達 15 到 30 公尺或更深。

2. **使用條件與限制：**直接貫入法係使用衝擊錘、車輛重量及液壓系統將採樣器或探測器推入土壤中，但無法應用於卵礫石地質。
3. **優點：**直接貫入法基本上不產生鑽屑，可減少污染場地調查過程中潛在危險廢物的產生，相對於許多傳統的旋轉鑽井技術，減少了作業人員暴露於有害污染物的可能性。
4. **缺點：**無法運用於礫石地質場址。
5. **經濟性：**多以點位數量及額外進尺數計費，故所需費用依調查目的、場址地質與採樣深度而定。
6. **國內運用情況：**國內已有廠家引進相關設備，多應用在坊砂地質之場址。直接貫入技術可搭配的土壤採樣器包括劈管採樣器、薄管採樣器、活塞式採樣器與雙套管採樣器等，其中，以活塞式採樣器的應用較為廣泛，各種採樣器的用途、原理、使用條件及優缺點彙整如表 2.2-1，各種地質條件適用之採樣器具詳表 2.2-2。
7. **是否為即時檢測技術：**是的，雖然此技術為採樣技術而非檢測技術，但是使用上可搭配即時檢測的工具，則可達到即時檢測的目的，換言之，此可做為即時檢測技術的採樣工具。

表 2.2-1、土壤採樣器類型

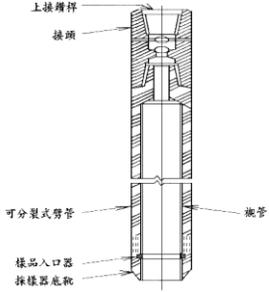
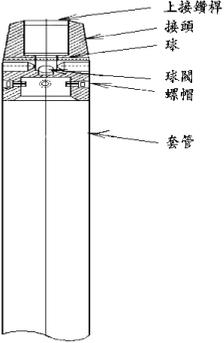
工具類型	用途及原理	使用條件與限制	優缺點	圖示
<p>劈管採樣器 (Split-Barrel Sampler/Split Spoon)</p>	<p>劈管採樣器用於取得「擾動性土樣」。取樣器因外管可以分離成兩半，因此稱為劈管(Split Spoon)。當裸孔已達到想要的深度時，鑽孔工具會從鑽桿上被移除，並將劈管採樣器裝於鑽桿上，再伸至裸孔底部，以打擊重錘驅使採樣器進入土壤中以取得樣品。完成後，將採樣器抽回並卸下切割軌及聯軸器，搜集於劈管內的土樣轉移到小玻璃罐中並送至實驗室分析。由於在取樣過程中，土壤是經過頗大的力量擠壓進銅圈，且整個取樣器的厚度厚，因此土壤的受力狀態和體積都有不小的變化。因此，劈管取樣所得到的銅圈內的土樣，通常稱為擾動土樣。(單信瑜，民國 87 年)</p>	<p>砂、泥、黏土等淺層未壓實(Unconsolidated)的土壤，當地層夾雜些許礫石時，可選用內徑較大(> 51 mm)的採樣器。此工具通常也會搭配空心螺旋鑽(Hollow-Stem Augers)使用。</p>	<p>常因地質因素(如：礫石層)，而無法採集較深層或受壓實的土壤樣品。另外，由於所獲得之土樣為擾動性土樣，故僅適合用於識別土壤的種類及變化、分析污染物濃度與了解其物理性質。</p>	 <p>圖片來源：土壤採樣方法(NIEA S102.63B)</p>
<p>薄管採樣器 (Thin-Walled Tubes Sampler)</p>	<p>在一般的土壤鑽探中，要取得不擾動土樣，係利用薄管取樣。在到達預定取樣深度時，先移除鑽孔工具並將採樣器裝載於鑽桿上，再利用油壓將厚度小的不銹鋼管，以靜壓方式壓入土中，取得不擾動土樣。由於土壤被壓送進薄管的過程中，未受到外力衝擊且壓入速度緩慢，因此除了土壤的體積只受到極為輕微的擠壓之外，土壤構造受到的干擾較少。取得土樣保持在較接近現地原有的狀況，因此稱為不擾動土樣。(單信瑜，民國 87 年)</p>	<p>砂、泥、黏土等淺層未壓實的土壤；本採樣器必須連接於手動土鑽設備或機械動力鑽探設備之採樣器接頭和壓入器具。此工具通常也會搭配空心螺旋鑽使用。此外，應儘量用全新的薄管取樣，以免無法頂出良好的試體或使土樣受到不當擾動。</p>	<p>常因地質因素(如：礫石層)，而無法採集較深層或受壓實的土壤樣品。在遇到較為堅硬土層時，唯有加大壓力緩慢壓入薄管，才能取得較為良好且不受擾動的土樣。</p>	 <p>圖片來源：土壤採樣方法(NIEA S102.63B)</p>

表 2.2-1、土壤採樣器類型(續)

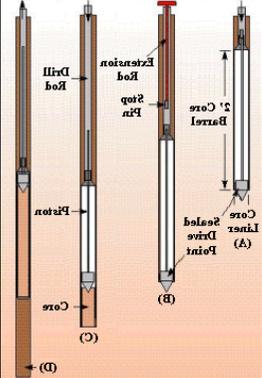
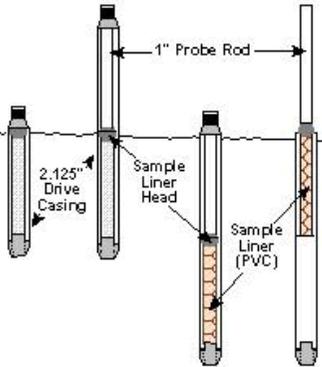
工具類型	用途及原理	使用條件與限制	優缺點	圖示
活塞式採樣器 (Piston Rod Soil Sampler)	屬於薄管採樣器的一種，由一薄管、活塞以及調節管子與活塞移動的機械組成。活塞採樣器非常適合用於取得不擾動土樣。設備上的活塞會產生適當的真空，以採集具有流動性的土壤樣品(如湧沙)，封存於樣品管中。由於活塞的存在能夠避免擠壓時有過多的土壤進入採樣管中，因此可以保持土壤樣品的完整性。	可用於淺層未壓實的土壤(黏土、砂土等)採集不受擾動與連續深度的土壤樣品。	其優點在於不會刮到孔壁土壤、可將孔底埋沒物擠開以及防止土樣滑落，但常因地質因素(如：礫石層)，而無法採集較深層或受壓實的土壤樣品，且設備操作較複雜。	 <p>圖示</p> <p>圖片來源：http://www.esnnw.com/discrete.html</p>
雙套管採樣器 (Dual Tube Soil Sampler)	具有內、外二組螺桿，內螺桿前端接採樣襯管，同時直接貫入土中，土樣即進入襯管中。	適用於採樣孔有崩孔之虞者。雙層套管工具在水位以下「流沙」的環境中可能無效。在這種情況下，必須加水來防止流沙起伏或換成活塞工具。	這種類型的工具可以防止鑽孔壁的塌陷並抑制鑽孔內流體的垂直運動	 <p>圖片來源：http://www.esnnw.com/dual.html</p>

表 2.2-2、土壤採樣器具適用之地質特性

地質特性 採樣方法	黏土層	粉砂層	砂層	湧砂含水層	礫石層
劈管採樣	✓	✓	✓	✗	△
活塞式採樣	✓	✓	✓	✓	✓
雙套管採樣	✓	✓	✓	△	△
薄管採樣	✓	△	✗	✗	✗

註：依採樣法的普遍性、效率與適用性程度，依序建議：✓屬「推薦使用」、△屬「適用」、✗屬「不適用」；資料來源：行政院環境保護署環境檢驗所，土壤採樣方法（NIEA S102.61B），中華民國 102 年 4 月 15 日生效。

2.2.1.2 旋鑽方式(Auger/Rotary Method)

- 用途及原理：**旋轉鑽井是一種通過快速旋轉鑽頭連接到鑽桿底部切割和研磨土壤並向下推進井眼的過程。利用鑽機以高速旋轉方式，帶動配備各種鑽頭的鑽桿，如開孔旋鑽(Open-Hole Rotary Drilling)、旋轉錘鑽(Roller-Cone)、中空螺旋鑽(Hollow Stem Auger)、套筒(Bucket)、實心螺旋鑽(Auger)等，以達到鑽進目的，可以容易地製造直徑範圍從 50 到 200 毫米的鑽孔。
- 使用條件與限制：**旋轉鑽井可用於粉砂、黏土和岩石(除非嚴重裂縫)。
- 缺點：**鑽探設備之選用須配合地質狀況，並搭配壓入設備使用。旋鑽時，土壤團粒因旋轉摩擦而受到擾動重組，所以對於採集含揮發性有機物的土樣較不適用。通常會產生大量需要處理和處理的廢料。
- 經濟性：**多以點位數量及額外進尺數計費，故所需費用依調查目的、場址地質與採樣深度而定。
- 國內運用情況：**國內有廠家引進中空螺旋鑽機，主要用於環保監測井及地質採樣作業，使用上需搭配各式土壤採樣器進行採樣，採樣器之用途、原理、使用條件及優缺點彙整如表 2.2-1，適用之地質條件詳表 2.2-2。
- 是否為即時檢測技術：**是的，同直接貫入法。

2.2.1.3 聲波(振動)鑽探法(Sonic Drilling Technology)

1. **用途及原理：**聲波(振動)鑽探法是一種土壤貫入或鑽孔的技術，能夠極大地減少因液化、慣性效應和土壤孔隙度暫時降低而導致的鑽柱和鑽頭的摩擦。這種組合使聲波(振動)鑽機和模具能夠輕鬆穿透大範圍的土壤。這項技術在大多數基岩的滲透率也更快。結合高頻振動力、回轉力和壓力，減少土壤和鑽屑的摩擦，使其變得流動並且能夠容易地沖洗或從鑽孔中移出，如此一來，鑽頭即可切入土層或軟岩、加深鑽孔並提高鑽探的效率與速度，過程中的液化及慣性效應可取得連續而完整不受擾動的「岩心/壤心」，設備與其原理如圖 2.2-1 所示。
2. **使用條件與限制：**適用於深層受壓實的土層，與其他方法的主要差異在於應用的地質特性更為廣泛，礫石、卵礫石砂土、黏土、軟基岩、沉積物等皆可。
3. **優點：**
 - (1) 可達到比直接貫入法和螺旋鑽機更大的深度。
 - (2) 採樣速度較一般旋鑽方式快 3 至 4 倍。
 - (3) 應用聲波高頻的另一個好處是即使在快速膨脹的黏土或巨石和困難的條件下，也能輕鬆取回鑽柱。
 - (4) 在鑽井時不一定需要空氣或鑽井泥漿，故在欲避免泥漿、空氣及水干擾的特定調查情況下，可選用此方法。
4. **缺點：**
 - (1) 在某些地層中，聲波頻率會導致產生顯著的熱量，從而驅散揮發性有

機化合物。

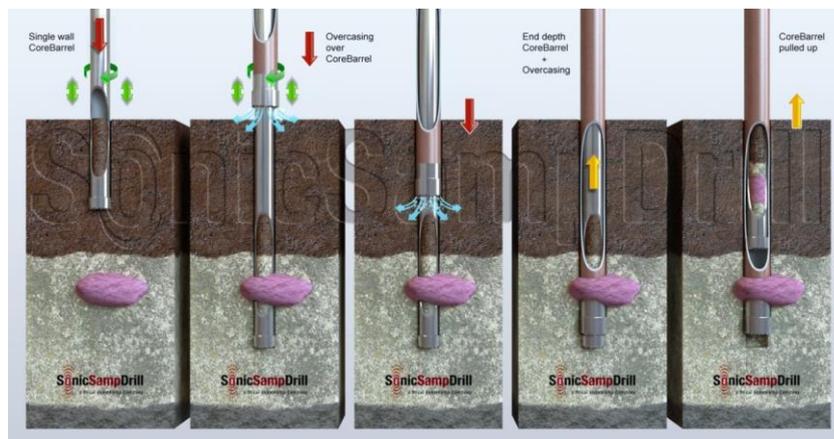
(2) 對於凝聚力較差的地質，如流沙，可能會導致樣品回收率較低。

(3) 在某些情況下，須加入大量的水，以防止“流沙”在推進過程中因堆積在岩心筒中而發生沉降。

5. **經濟性**：多以點位數量及額外進尺數計費，故所需費用依調查目的、場址地質與採樣深度而定。

6. **國內運用情況**：目前，國內已有公司於近年已引進聲波(振動)鑽探設備，惟於現地場址調查尚未普及化。建議後續可於含氯碳氫化合物污染場址調查時，應用此工具並評估適用性。使用上需搭配各式土壤採樣器進行採樣，採樣器之用途、原理、使用條件及優缺點彙整如表 2.2-1，各種地質條件適用之採樣方法詳表 2.2-2。

7. **是否為即時檢測技術**：是的，同直接貫入法。



圖片來源：<https://www.sonicsampdrill.com/sonic-drilling/how-does-sonic-drilling-work.htm>

圖 2.2-1、聲波(振動)鑽探法示意圖

2.2.2 地下水採樣類

高解析場址調查技術所使用的地下水採樣方式有裸孔採樣法(Open-Hole Sampling)、被動式擴散採樣袋(Polyethylene Diffusion Bag Samplers)及圓錐貫入試驗(Cone Penetrometer Technology, CPT)；前者強調於能於短時間內採集特定深度的地下水樣品，以快速掌握污染濃度分布情形，後者僅能在完井後之監測井內採樣，且須有 14 天之平衡時間，和前者相比，在樣品取得上相對耗時，本節對於裸孔採樣和聚乙烯被動式擴散採樣袋，介紹其原理、使用條件與限制、優缺點、經濟性及國內運用情況如下。其中，CPT 除了可以採集土壤樣品外，亦可用於採集土壤氣體樣品或地下水樣品，若搭配適當之探測器，則可獲取水文地質資訊，故此項將於 2.2.3.3 節說明。

2.2.2.1 裸孔採樣(Open-Hole Sampling)

1. **用途及原理：**裸孔採樣可透過直接貫入法、旋鑽法或鑽堡設井等開孔工法，獲得一裸孔後直接於該孔採樣，再將泵或貝勒管放入驅動桿中採集樣品。
2. **使用條件與限制：**
 - (1) 此方法在礫石、砂質等地層中，土壤會在驅動桿抽出時向上湧入桿中，導致無法採集水樣。
 - (2) 使用泵浦採樣可能會因泥沙或揚程導致樣品無法採集。
3. **優點：**無須搭配特製採樣器，可使用國內已引進之貝勒管進行。
4. **缺點：**可能有交叉污染之疑慮，為避免影響調查結果，應在採集樣品後以清水清洗採樣設備並晾乾，或者更換設備。
5. **經濟性：**根據國外研究案例，將直接貫入法應用於場址污染調查較傳統的場

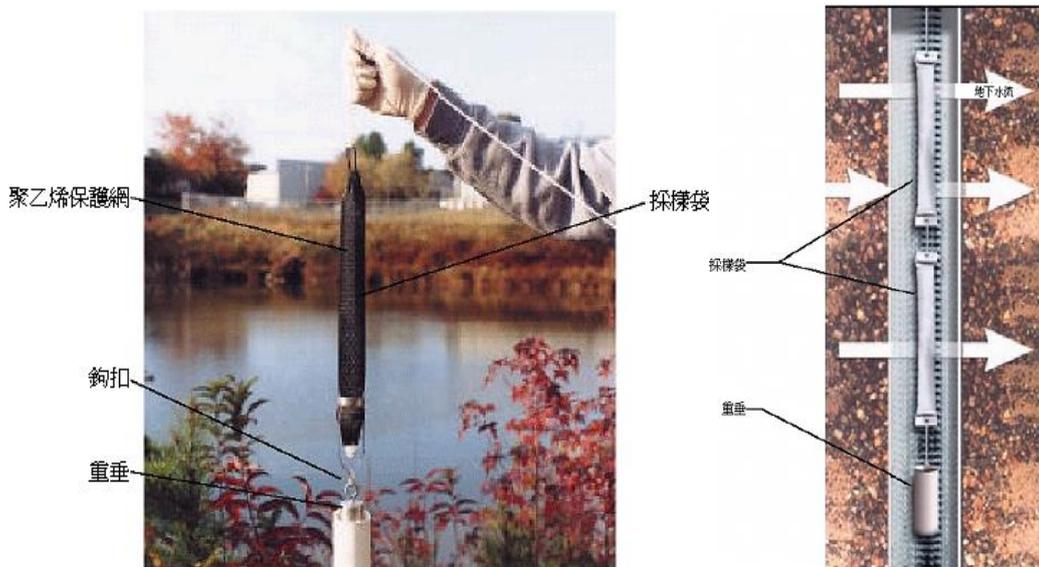
址評估方法來得經濟，但選用的技術工具、場址地質特性、污染範圍以及調查者的調查策略與樣品數量皆會影響調查費用。

6. 國內運用情況：國內地下水採樣多依公告方法於監測井採集水樣，裸孔採樣並不普及。有鑑於裸孔採樣在設井方面具有輔助動態工作策略之潛力，環保署主辦之「含氯碳氫污染物環境鑑識技術建置與應用計畫(第2期)」以裸孔採樣結合即時檢測工具，建立了「即時探測污染濃度之設井法」，在設置監測井時可即時提供濃度資訊，以現場決定設井深度與開篩區間，該設井法在國內場址的應用已收錄在本手冊案例中(B 場址)。

7. 是否為即時檢測技術：是的，可搭配即時檢測設備，在設井同時獲得污染物濃度資訊。

2.2.2.2 聚乙烯被動式擴散採樣袋(Polyethylene Diffusion Bag Samplers)

1. 用途及原理：聚乙烯被動式擴散採樣袋通常用於地下水污染揮發性有機物之採樣，且可同時執行多重深度採樣。此採樣袋之材質為低密度聚乙烯(以下簡稱 LDPE)(孔徑需小於 10 angstroms)，其可作為半透膜，在採樣袋內填充試劑水並密封後，置於監測井中，使水中揮發性有機污染物藉由擴散作用滲透至採樣袋內，直至採樣袋內的污染物濃度與地下水之濃度達到平衡，如圖 2.2-2。國外研究結果建議被動式採樣袋採樣所需的放置平衡時間為 14 天 (Vroblesky, 2001; Vroblesky and Campbell, 2001)。



圖片來源：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)

圖 2.2-2、被動式擴散採樣袋與其構造

2. 使用條件與限制：

- (1) 被動式擴散採樣會受有機物之分子大小、形狀、疏水性及採樣袋材質等因素之影響，易造成採集污染物(如：甲基異丁基醚、丙酮、鄰苯二甲酸酯類及大部分半揮發性有機物等)時之採樣偏差。
- (2) 採樣袋放置及取出時應避免與非水相液體接觸，以免有機污染物附著於採樣袋表面而造成干擾。
- (3) 不適用於水層透水係數(K)低於 10^{-6} m/s 之低滲透含水層採樣。
- (4) 不適用於自然復育整治之地下水污染監測。(行政院環境保護署環境檢驗所，民國 98 年)。

3. 優點：

- (1) 採樣時，因不須抽水洗井，擾動極小，不會有氣提或氣曝產生，且採樣袋的 LDPE 材質孔隙只有 10 angstroms，泥砂或者沉澱物不會進入採樣袋中，對於揮發性有機物的樣品品質較傳統式洗井採樣高。
- (2) 採樣袋為拋棄式，所以每採集一組樣品隨即丟棄，故沒有採樣設備於井和井之間交互污染之可能。
- (3) 被動式擴散採樣袋採樣所需之人力及攜帶之設備相較於傳統式洗井採樣較少，且不需使用到額外電力(如發電機)，在現場採樣作業時也較不受場址地形地物影響。
- (4) 相較於傳統式洗井採樣，被動式擴散採樣袋採樣的放置與收樣(採樣)容易，可大幅降低人為採樣誤差(范仲奇及陳舜岳，民國 99 年)。

4. 缺點：當監測井內不同深度有水頭差而導致地下水具垂直流向時，有垂直向

交叉污染的疑慮。

5. **經濟性**：通常以放置的採樣袋個數計價，倘若能排除井內地下水垂直向混合的疑慮，則此法比設置井叢以得到垂直向污染分布更為經濟。
6. **國內運用情況**：國內已有數家環境檢測業具備此採樣設備與方法，且環保署環境檢驗所已訂定「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)」。
7. **是否為即時檢測技術**：否，該技術需有至少 14 天之平衡時間，無法在場址調查過程提供即時之調查數據。

2.2.3 水文與地質試驗

2.2.3.1 鑽孔流量計(Borehole Flowmeter)

1. 用途及原理：主要係用於量測裸孔或井孔中的垂直向流速，若於井孔中連續分段量測垂直方向水流流速，則可進一步了解地層滲透性、地下水流向、裂隙連通性、地下水補注或滲漏位置、含水層型態等。量測垂直流的鑽孔流量計主要有熱脈衝流速儀(Heat-Pulse Flowmeter)、孔內電磁式流速儀(Electromagnetic Flowmeter)及葉輪流量計(Impeller Flowmeter)等 3 種。其原理分述如下：

- (1) 熱脈衝流速儀(Heat-Pulse Flowmeter)：內部之柵狀發熱線圈加熱鑽孔附近的流體，當此處具有垂直向流動，被加熱的流體會隨其往上或往下流動，藉由發電圈上下方之熱感應器可偵測溫度之差異與偵測到最高溫的時間，並以熱脈衝曲線顯示，可用來判斷地下水垂直流向及流速。而水平向量測則藉由探測棒中心的加熱器以及周圍的 16 支以圓形排列的溫度感應計，在地下水流經後，藉由不同方位溫度感測計之溫差及升溫速率的差異性，來判斷地下水流速及流向。
- (2) 孔內電磁式流速儀(Electromagnetic Flowmeter)：依據法拉第原理，導體以垂直於磁場方向的方式通過磁場所產生之電壓，與導體之移動速度成正比。同理，將流體流視為導體，使其以 90 度角通過以電磁鐵所產生的磁場，並以電極探棒量測產生之電壓，其電壓則與地下水流速成正比，藉以推估地下水流速。
- (3) 葉輪流量計(Impeller Flowmeter)：流體流經葉輪會帶動葉輪旋轉，透過自動記錄每秒葉輪轉速，即可計算流體流速。

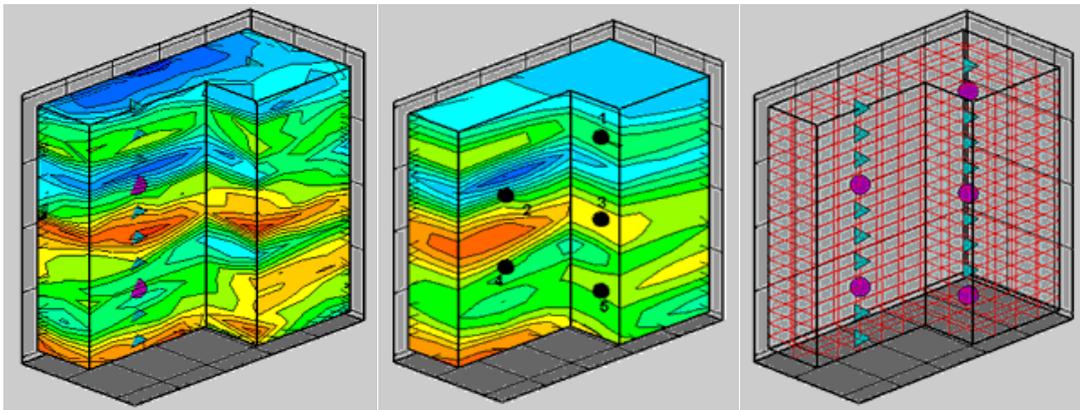
2. 使用條件與限制：

- (1) 必要時前述三種流量計皆可搭配封隔(Packers)進行測定，而封隔僅能設置在既設監測井內。
 - (2) 葉輪流量計和孔內電磁式流速儀可用於旋轉(垂直向上或向下移動井筒)或靜止模式。
 - (3) 熱脈衝流速儀適用 2~4 吋井，只能用於靜止模式；量測流速範圍 0.006~30 公尺/天；精度可達到流速 $\pm 10\%$ ，流向 $\pm 10^\circ$ 。
 - (4) 熱脈衝流速儀無法分辨如電磁式及熱脈衝類型低的流量。
3. **優點：**在得知小區域地下水流速及流向，擁有較快速，準確及成本低等優點，且可量測井篩內不同深度之地下水流速，故可應用於地下水位等值線圖之細部修正與污染場址水文資料之細部調查。
4. **缺點：**測值會受到井的結構影響，如集膚效應(Skin Effects)，在數據分析方面垂直向相對水平向為複雜。
5. **經濟性：**依據場址特性不同，此項調查技術所需花費金額不一。
6. **國內運用情況：**國內在垂直流向流速測定上，僅有少數幾間公司與研究單位有設備；而水平流向多使用熱脈衝流速儀，已普遍於場址應用。
7. **是否為即時檢測技術：**是的，國內使用之流量計多為可攜式，皆可在現地量測後即時產出訊號，提供專業人員判釋。

2.2.3.2 水力斷層掃描(Hydraulic Tomography)

1. **用途及原理：**水力斷層掃描係於場址中進行現地循序抽水試驗，再應用軟體進行數值模擬，以得到水力傳導係數的 3D 空間分布。水力斷層掃描係將同

一井孔以封塞分割為許多垂直井段，在其中一個井段進行抽水(或注水)，同時對含水層中其它井段水頭進行監測，得出一組抽水量(注水量)/水位資訊。依序地在該井和其他井孔的不同井段抽水(或注水)，就可以得到連續性的交叉孔抽水量(注水量)/水位資訊。最後，利用水位數據和 Successive Linear Estimator (SLE)軟體演算法得到含水層水力傳導係數的 3D 空間分布，如圖 2.2-3。



(a)水力傳導係數空間分布 (b)水力斷層掃描演算 (c)抽水試驗與觀測點
資料來源：(Yeh and Liu, 2000)

圖 2.2-3、水力斷層掃描 3D 空間分布圖

- 2. 使用條件與限制：**適用於礫石、砂、淤泥等非阻水層地質。Bohling and Butler Jr (2010)指出，儘管用於推估的數據係在精心控制的水力試驗下獲得的，仍無法推估出含水層完整的水力參數分布狀態，因此，目前水力斷層掃描的技術仍有待精進，使用時須搭配其他地球物理探測技術進行驗證。
- 3. 優點：**僅須透過抽水試驗期間所蒐集的數據即可推估含水層的性質，無須採集及分析土芯，免去樣品受擾動或樣品是否具代表性之困擾。
- 4. 經濟性：**與岩心分析相較之下，水力斷層掃描較費用較高，如水力斷層掃描之設備能租用或再利用，可降低成本(Maliva, 2016)。此外，Bohling and Butler Jr (2010)亦提及水力斷層掃描有部分費用和現場工作量難以量化。

5. **國內運用情況：**國內有幾篇關於水力斷層掃描之學術研究發表(黃紹揚，101年；陳泳霖，101年；陳煥昇，97年；陳欣儀，105年)，但尚未實際應用於污染場址。
6. **是否為即時檢測技術：**否，現地抽水試驗往往需耗費 2~3 天時間進行，且大多需搭配既有監測井執行。

2.2.3.3 圓錐貫入試驗(Cone Penetrometer Technology, CPT)

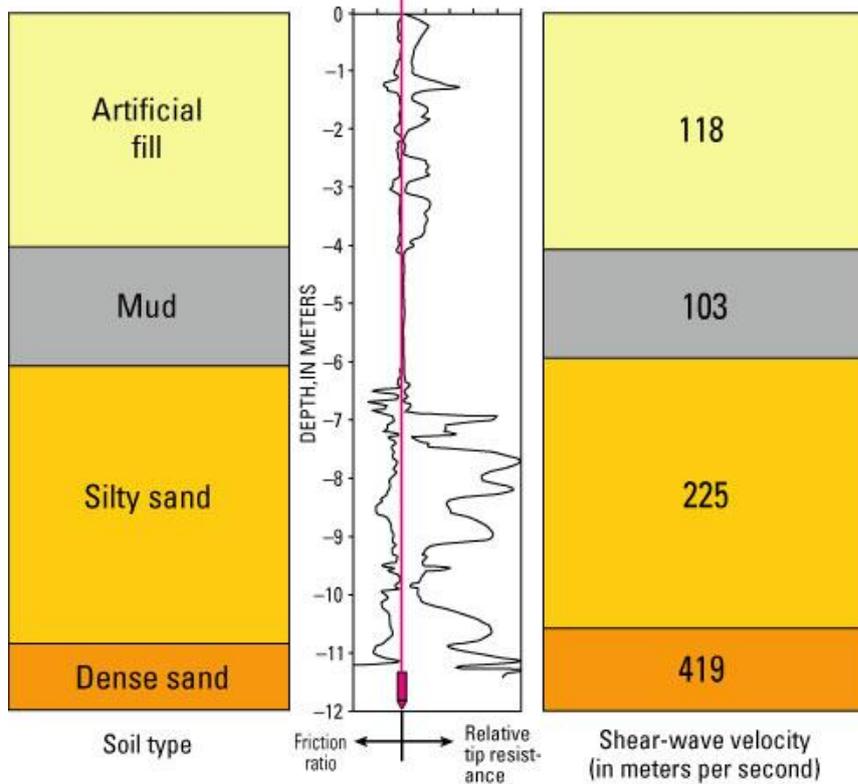
1. **用途及原理：**圓錐貫入試驗(CPT)系統即是一種直接貫入式的平台，可以搭載各種土壤、土壤氣體和地下水採樣器或是各種分析儀器。特別設計過的採樣器係用於採集高質量的地下水、土壤氣體和土壤樣品；另可搭配感測器同時收集水文地質參數與資訊，以岩土工程感測器(Geotechnical Sensors)為例，其係一種快速、可靠且經濟的工具，可用於確定土壤的行為型態，包含土壤地層(Soil Stratigraphy)、相對密度及強度等，或是收集水力傳導係數、靜態和動態孔隙壓力以及土壤和水的電導率等水文地質條件。CPT 技術的原理相當簡單，使用液壓油缸將錐形穿透器(Cone Penetrometer)頂端和推桿推入地下。利用直接貫入工法與載具，將錐形穿透器(Cone Penetrometer)往地層下直接貫入，搭配土壤採樣器可取得土壤樣品，另外再以感應器測量頂端壓力(Tip Pressure)，經換算分類土壤質地及畫出地層剖面圖，如圖 2.2-4，或是搭配其他感測器獲取所需的水文與地質資訊。

2. 使用條件與限制：

- (1) 通常深度可超過 100 英尺。穿透深度受到地下地層結構的限制，此技術僅限使用於未受壓實的(Unconsolidated)地質，不適用於基岩層(Bedrock Layer)、硬質層、礫石層、部分膠結的沉積物、凝土地基、岩石/巨石和部分鈣質層(Caliche Layers)或非常細緻的飽和砂。這是因

為地質密度的變化或覆蓋硬層的軟層的存在可能改變探針的排列或是折斷、彎曲鑽桿；穿透深度也會受到電纜線長度的限制。

- (2) 大多數 CPT 系統因其系統尺寸和質量的關係，無法像打擊鏈系統可在狹窄的地方施作。



圖片來源：<https://earthquake.usgs.gov/research/cpt/>

圖 2.2-4、鑽錐貫入試驗卡車

3. 優點：

- (1) 除非是採用雙管連續取芯(Dual Tube Continuous Coring)，否則直接貫入式技術不會產生「碎屑」或多餘的土壤，所以毋須額外處理可能受污染的土壤。施作過程簡單且可降低調查成本。
- (2) 較傳統的鑽機快速且具移動性，採樣及數據收集速度快，可減少完成調查的時間，且增加調查過程中的取樣點位。
- (3) 可搭配其他地球物理探測器與分析設備，即時獲取土壤地質、水文或污染物的資訊，減少運送至實驗室的時間及相關費用。
- (4) CPT 系統不具高桅杆，可在架有電線桿的路面或區域運行。可用於安裝預填井篩的監控井(Prepacked Screen Monitoring Wells)，且成本遠低於使用傳統鑽機安裝監測井的成本。
- (5) CPT 的鑽桿可與許多附加工具一併使用得到即時監測數據，如後端裝載雷射誘導螢光(Laser-Induced Fluorescence, LIF)可偵測比水輕非水相液體(Light Non-Aqueous Phase Liquid, LNAPL)污染物分布、薄膜介面感測器(Membrane Interface Probe, MIP)可偵測揮發性有機物濃度、拉曼光譜儀(Raman Spectroscopy)可進行化學物質、藥品、爆裂物或油品等介質的晶格及分子，做定性和定量的分析。

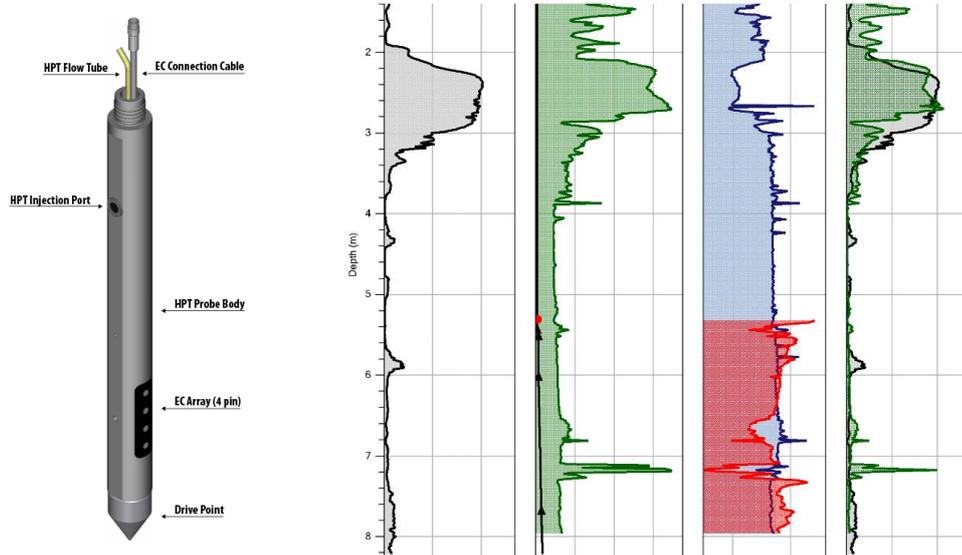
4. 缺點：無法運用於礫石地質場址。**5. 經濟性：**計價視採樣目標與搭載的探測器類型、數量、採樣/試驗深度而定。**6. 國內運用情況：**目前，國內有引進應用於確定大地工程特性並劃定土壤岩性，也有應用在污染場址探測土壤質地。對於國內屬於坩砂地質之含氯氫化合物污染場址之場址調查，建議可適時採用此設備，以提升數據獲取量及調查

效率；此設備本身不適合用於礫石地質。

7. 是否為即時檢測技術：是的，該技術在直接貫入後便可經由移動式實驗室獲取即時資訊。

2.2.3.4 水文地質剖析儀(Hydraulic Profiling Tool, HPT)

1. 用途及原理：水文地質剖析儀(HPT)可量測水注入土壤時的壓力反應，藉以辨識水在地層中流動的途徑以及辨識土壤的類型。其原理係在鑽機上裝置含有壓力與電性感測器的探測棒，以直接貫入方式貫入地層，經由探測棒上壓力感測器，測量將水注入土壤的土壤反應壓力，進而反應土壤的水力特性如圖 2.2-5。當土壤反應壓力較低時，表示土壤顆粒度較大(如：砂或是礫石)，水的透水能力較強；反之，則表示土壤顆粒度較小(如：粉土或是黏土)，傳導性較低。



圖片來源：<http://numac.com.au/hydraulic-profiling-tool-hpt-1/>

圖 2.2-5、水力剖面層析儀及其數據呈現示意圖

2. 使用條件與限制：此技術適用於淺層粒徑小於 4 mm 之未壓實含水層；此外，探測棒裝置的電性感測器，可同步獲得土壤導電度(Electric Conductivity, EC)

資料，輔助佐證壤心的解釋，例如坩黏土地層因土壤表面電性較大，土壤電導值較高。經由 HPT 所提供的數據(如：壓力、流量)可推估水力傳導係數，進而了解垂直剖面的水力傳導係數變化。HPT 可同時裝載 LIF、MIP 等偵測器，以得到相關的即時監測數據。

3. **優點**：因搭配 Geoprobe 以直接貫入法施工，無須設井，程序快速，比起現地微水試驗所測得之 K 值，HPT 得以較快速的速率提供較多的場址調查數據數量，以瞭解垂直剖面之變化，故 HPT 較傳統微水試驗經濟。
4. **經濟性**：以施作點數及進尺數計價，所需費用隨調查目的、佈點及深度而定。
5. **國內運用情況**：國內有引進此技術，已廣泛用於地質水文相關之研究與環境調查。
6. **是否為即時檢測技術**：是的，該技術可搭配移動實驗室，將訊號處理設備攜至現場，提供現場專業人員即時的調查數據。

2.2.3.5 地球物理探測技術

1. **用途及原理**：檢測物體透過地球物理探測技術反應出不同物理量，再由不同問題所反應之物理量變化間接推估工程問題之解答，近來年已逐漸應用環境污染場址之調查。目前，國內污染場址調查常見的地球物理探測技術包含透地雷達 (Ground-Penetrating Radar Method, GPR)、電磁波探測 (Electromagnetic Method, EM)、井內探測(Well Logging)及地電阻法(Electrical Resistivity Tomography, ERT)：等。有關以上四項技術之運用原理簡述如下：

- (1) 透地雷達(Ground-Penetrating Radar Method, GPR)：主要是依據污染物質本身或其造成土壤導電性之變化，分辨出污染區域範圍。如新漏油區域地電阻較高，而舊漏油區域因油品遭細菌分解產生或溶出弱

酸性物質，地電阻較低。

- (2) 電磁波法(Electromagnetic Method, EM)：依據地層導電程度之差異來區分地下地層，而地層導電層度與組成的礦物、顆粒大小、位態、含水量以及含鹽度等有關。
- (3) 井內探測(Well Logging)：為地表地球物理探測法在井孔內的延伸，一般而言，地表上所能進行的各種地球物理探測技術都能在井孔內施行。在無法佈設長距離地表地物探測測線之場址，井內地球物理探測便能發揮其效用，藉由鑽鑿井孔，將探測儀器置入井孔內進行施測。在污染調查方面，由於其探測深度可隨井孔往地表下延伸，近年來井測法逐漸被應用於較深層污染團調查，並輔助描繪地質構造。
- (4) 地電阻法(Electrical Resistivity Tomography, ERT)：主要依據地層的電阻率來區分地層，根據組成的礦物、顆粒大小、位態、含水量以及含鹽度不同來區分地層及地下構造。

2. 使用條件與限制：各類地球物理技術均有其應用限制及干擾因素；如地電阻法，探測時若污染源為新鮮油品(高電阻)，污染場址地層及管線皆為低電阻，很可輕易將污染範圍確立，但若污染與原本之電性地層差異不大情況下，就會增加探測之困難。就如同利用透地雷達探測時，若地質與污染所造成之介電常數差異性大，就容易分辨，但若污染與原本之電性地層介電常數差異不大情況下，就應輔以其他地球物理探勘方法測勘。此外，相關結果必需配合各類資料軟體予以解讀及研判，本項工作必須由累積豐富經驗之專業技術人員為之，如需準確、快速研判評估結果，非累積多年實作經驗莫辯，相較一般傳統調查技術，其技術門檻仍高，因此，使用上仍需謹慎。

3. 優點：地球物理探測技術是一種非破壞性的檢測技術，其可快速且大量地在

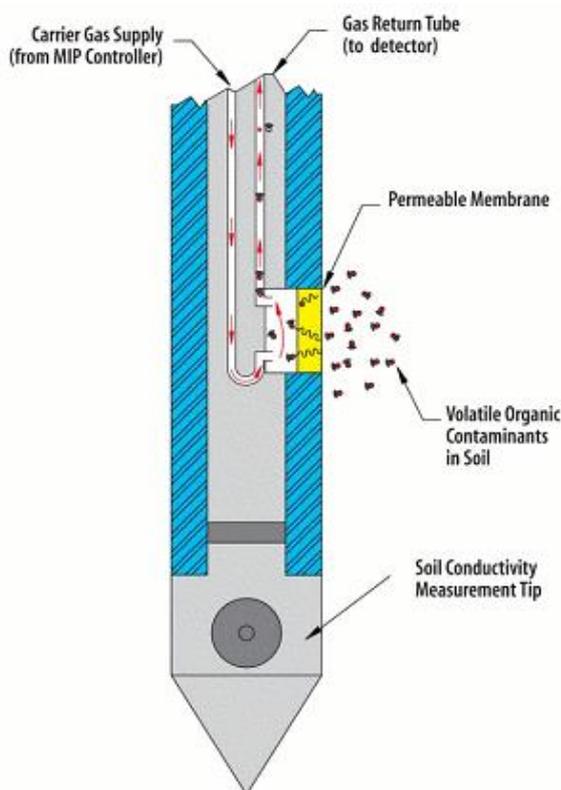
檢測物體表面上或孔內進行施作。亦可同時評估地下環境之污染及水文地質情形，因此，對大面積範圍、深層地層或具複雜水文地質條件場址之污染調查評估，相較於傳統採樣檢測，地球物理探測具有其優勢。

4. **缺點：**若欲透過地球物理技術掌握污染範圍或程度，洩漏量不可太小且須持續一段時間，使足以影響區域土壤特性，方容易探測，針對初期洩漏偵測技術仍有待突破。
5. **經濟性：**一般而言，以施測尺度計價，以地電阻法為例，施測每公尺以 650-850 元計費，雖然範圍/尺度越大，費用越高，但對於初步篩測大範圍污染分布或了解地質資訊而言，地球物理探測技術較傳統調查與檢測技術經濟。
6. **國內運用情況：**國內已將地球物理探測技術廣泛使用於污染場址調查，應用場址不勝枚舉，環保署亦針對此技術研擬「地球物理探勘參考指引」提供使用者參考。
7. **是否為即時檢測技術：**是的，該技術於現地即可以螢幕呈現訊號回饋成果，提供現場專業人員即時判斷地下環境或潛在污染範圍。

2.2.4 污染濃度探測與其他分析方法

2.2.4.1 薄膜界面探測器(Membrane Interface Probe, MIP)

1. 用途及原理：薄膜介面探測器(MIP)可提供水平面上固定點位的垂直向污染分布情形。原理係利用探測器前端的半透膜僅允許揮發性有機分子通過的特性，在薄膜加熱後，土壤中的氣體藉由擴散作用通過薄膜，再被抽出至地面的儀器進行分析，如圖 2.2-6 所示。通常 MIP 會搭配直接貫入方式，逐步由淺而深往含水層深處做垂直方向連續式的偵測，MIP 後端連接的偵測器包括：電子捕獲檢測器(Electron Capture Detector, ECD)、火焰離子偵測器(Flame Ionization Detector, FID)、乾電解導電感應偵測器(Dry Electrolytic Conductivity Detector, DELCD)等，因此，可提供該採樣點不同深度土壤及地下水污染的情形。



圖片來源：<https://clu-in.org/characterization/technologies/mip.cfm>

圖 2.2-6、薄膜界面探測器

2. 使用條件與限制：MIP 可連接光離子偵測器(Photo Ionization Detector, PID) 或 FID 等可快速偵測淺層地表下 VOCs(如：燃料油、含氯有機溶劑)的濃度的儀器，藉以得知污染物濃度分布及其遷移路徑，以及確認比水重非水相液體(Dense Non-Aqueous Phase Liquid, DNAPL)所在位置或深度。不同的偵測器有其特定的偵測物種，例如：PID 適用於烯烴、芳香族碳氫化合物(如：BETX)；FID 適用於烷烴、烯烴、芳香族碳氫化合物(如：甲烷或丁烷等)；ECD 適用於含氯碳氫污染物(如：三氯乙烯、四氯乙烯等)之定性分析；DELCD 適用於含鹵素的有機污染物，由於其靈敏度不如 ECD，因此適用於 ECD 訊號飽和時的含氯化合物偵測。MIP 較可施用於未受壓密實(Unconsolidated)之土層狀況，但受限於沼澤溼地、陡坡等不易安置儀器設備及操作之地面狀況，或堅硬之大礫石土層、岩盤及硬質黏土等不易貫穿之地質類型。由於 MIP 之偵測結果為波峰，峰值須經過換算後方可得知濃度，其偵測值在 1ppm 以上較為準確。

3. 優點：

- (1) 可即時獲得污染物垂直向之濃度分布。
- (2) 與傳統設井調查相較之下較經濟。

4. 缺點：

- (1) 所獲得之污染物數據為相對的濃度，非絕對濃度值。
- (2) 不同偵測儀器對於污染物的靈敏度不同。

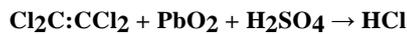
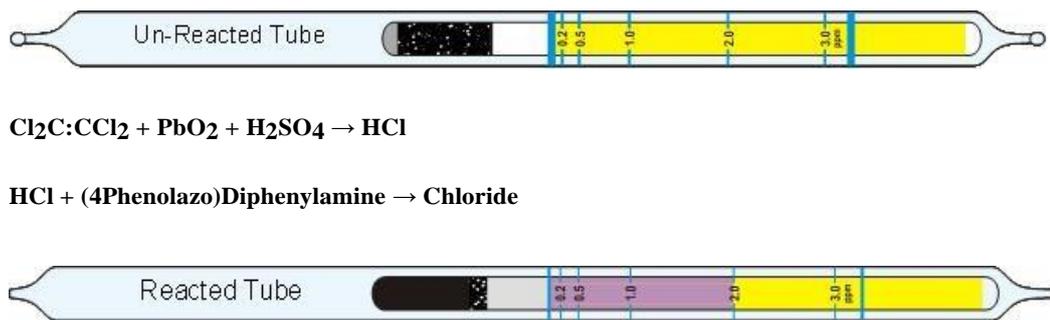
5. 經濟性：以施作點數及進尺數計價，所需費用隨調查目的、佈點及深度而定。

6. 國內運用情況：國內已有廠家引進此技術並廣泛運用於非礫石之未壓實地質之污染場址調查。

7. **是否為即時檢測技術**：是的，該技術為國內普遍使用之坩、砂或黏土質地質污染濃度調查技術，常搭配攜帶式偵測器現場即時判斷污染位置。

2.2.4.2 呈色篩測(Colorimetric)-Color-Tec

1. **用途及原理**：透過此方式可確認樣品的污染物濃度，或垂直剖面的污染濃度變化。Color-Tec 係透過手動真空泵將地下水或土壤樣品中的揮發性化合物吹入檢知管，檢知管中含有氧化劑(PbO₂)和催化劑(H₂SO₄)，其會將氯化化合物分解並轉化為氯化氫，氯化氫會將管中的試劑(4-苯基偶氮二苯胺)從黃色變色為紫色。若土壤或地下水中含有特定污染物，則有顏色呈現(如圖 2.2-7)，透過比對可間接定量地下水中污染物的總濃度。



圖片來源：https://triadcentral.clu-in.org/user/doc/TPP-Callaway-ColorTec_SOPManual.pdf

圖 2.2-7、Color-Tec 應用於篩測四氯乙烯之示意圖

2. **使用條件與限制**：偵測範圍為 5 ppb 至 60 ppm。比色管對所有氯化揮發性有機鹵化碳都有正反應，包括飽和和不飽和氯化烯烴和烷烴。因此，檢測器的顯示反映了樣品中存在的每種單獨的氯化化合物的濃度的總和。
3. **優點**：快速、經濟、可測得低濃度(< 2 µg/L)的含氯有機物，可現場得知污染濃度。
4. **經濟性**：每次分析成本為 15.80 美元。
5. **國內運用情況**：國內坊間使用的檢知管其應用原理與國外 Color-Tech 雷同，

即碰到含氯碳氫污染物會呈色。

6. **是否為即時檢測技術：**是的，該技術可搭配土壤、地下水採樣技術採集之樣品，於現場即時判斷污染濃度。

2.2.4.3 呈色篩測(Colorimetric)- Sudan IV

1. **用途及原理：**此方法係透過染料辨識土壤中是否有 NAPL 存在。將疑似 NAPL 污染的土壤樣品添加到樣品瓶中，並於樣品瓶中添加純水，上蓋後劇烈搖動內容物，蓋上附有 Sudan IV 紅色染劑及螢光黃/綠色的水溶性染料。紅色染劑會將 LNAPL 及 DNAPL 染色，而螢光黃/綠色則會溶於水，與紅色成為對比，以利視覺辨識。

2. 使用條件與限制：

- (1) Sudan IV 無法取代現場定量篩測試驗，但在污染土壤的挖掘過程中，Sudan IV 土壤測試套件可快速評估污染物的深度和方向，從而減少通常與現場篩選方法相關的時間和成本。
 - (2) Sudan IV 是一種偶氮染色劑，被國際癌癥研究機構認定為 3 級致癌物質，使用時操作人員應做好防護措施，避免接觸、攝入，此外，亦應妥善處理使用後之廢棄物。
3. **優點：**可即時檢測，且無須專門的測量設備。
 4. **缺點：**僅能定性。
 5. **經濟性：**以商業化之 Oil Screen Soil (Sudan IV)[®]而言，一盒土壤試驗組費用為 60 美元(含運)。
 6. **國內運用情況：**目前，國內會使用 Sudan IV 作為判定土壤中是否存在

DNAPL 的佐證。

7. **是否為即時檢測技術**：是的，該技術可搭配土壤採樣技術採集之樣品，於現場即時判斷是否有 NAPL 相存在。

2.2.4.4 現地分析(On-Site Laboratory)

1. **用途及原理**：主要用於即時監測與分析場址污染物的濃度及水文地質資訊等，不需要另行將樣品移送進實驗室，即可得到相對濃度數據，可進行現地分析的工具具有可攜式氣相層析儀(Portable Gas Chromatography, Portable GC)、氣相層析質譜儀(Gas Chromatography–Mass Spectrometry, GC-MS)、高壓液相層析儀(High Performance Liquid Chromatography, HPLC)、飛行時間質譜儀(Time-of-Flight Mass Spectrometry, TOFMS)或其他分析儀器等，其分析原理與該設備於實驗室之大型分析儀器類似。
2. **使用條件與限制**：使用前應注意樣品狀態與前處理之必要性，以免縮短設備使用期限或導致數據可信度降低；使用時須按設備說明書進行操作，以確保數據之可比性，並應定時進行保養與校正。
3. **優點**：相對於一般實驗室分析儀器，可攜式設備較輕巧、便於攜帶、購置成本較低、分析程序短、操作簡單，可用於現場樣品篩測，作為初步判斷以及送檢樣品之挑選。
4. **經濟性**：現地分析工具一般依可攜式儀器、設備或篩測耗材之購入成本、保養及維護成本等為主，依使用之各廠工具、工具類型及分析頻率而異。
5. **國內運用情況**：目前，國內已有兩間公司代理與自行研發可現場即時監測並定量之 Portable GC/MS，另外也有應用 TOFMS 於現地之案例。
6. **是否為即時檢測技術**：是的，該技術可搭配地下水採樣技術採集之樣品，於

現場即時判斷污染物濃度。

第三章 調查策略與技術運用

高解析場址調查的特徵是具有較密的採樣佈點，藉由密集的調查點位，可以大幅降低調查結果的不確定性。但是，密集的調查點位通常表示較高的調查成本。若要兩者兼顧，有賴導入三合系統(Triad System)。

三合系統為美國環保署以減少調查成本並加速調查效率為目的所推動的循環式調查流程(USEPA, 1997)，流程中包括系統性規劃(Systematic Planning)、動態工作策略(Dynamic Work Strategies)與即時檢測技術(Real-Time Measurements Technologies)等三大要素，其含意與分述如下：

1. 系統性規劃

系統性規劃為在進行調查前所需的準備工作，應盡可能的蒐集場址相關資訊，以建立初步場址概念模型，設立明確的調查目標並擬定其調查策略，以有效率的方式取得可靠的數據。

2. 動態工作策略

動態工作策略，係指在現場作業的當下，依現場所產出新的調查結果，作調查規劃調整的即時決定(Real-Time Decision Making)。相較於傳統調查多為事前規劃、現場僅是照做不變更，動態工作策略強調的是調查工作的規劃盡可能地建立在足夠多的資訊上，包括現場剛完成的局部調查工作結果都應參考。

3. 即時檢測技術

要作到即時決定，運用即時檢測技術是重要的關鍵，意即在現地可以立即或當天得到檢測結果，包括地球物理探測技術、即時成像技術、現地分析技術或移動式實驗室等皆屬即時檢測技術，表 3-1 彙整第二章所提及之工具是否具備即時檢測功能。

表 3-1、各類調查工具之即時檢測功能評估

工具類別	工具	是否為即時檢測技術
土壤採樣類	直接貫入法	O
	旋鑽方式	O
	聲波(振動)鑽探法	O
	圓錐貫入試驗	O
地下水採樣類	裸孔採樣	O
	聚乙烯被動式擴散採樣袋	X
	圓錐貫入試驗	O
水文與地質試驗	鑽孔流量計	O
	水力斷層掃描	X
	圓錐貫入試驗	O
	水文地質剖析儀	O
	地球物理探測技術	O
污染濃度探測與其他分析方法	薄膜界面探測器	O
	呈色篩測-Color-Tec	O
	呈色篩測-Sudan IV	O
	現地分析	O

三合系統的調查方式，係將上述三要素進行不斷的重複循環，直到達成目標。譬如工作團隊先系統性的擬定場址之調查規劃，經選用即時檢測工具，並以動態工作策略進行規劃調整後，可獲得更新的場址概念模型，但未必足以決定污染來源，此時應依更新的場址概念模型，再次執行系統性調查規劃、即時調查與動態工作策略等，並視場址概念模型更新的情況決定是否還需要重複三要素，倘若更新後的場址概念模型足以決定污染來源，則達成場址調查目標。

本手冊之調查程序採用三合系統的精神，強調滾動式的不斷回饋新調查資訊與調整調查策略。圖 3-1 為建議的污染來源調查程序，首先，應依初始資訊辨識污染來源不明的情境，再進一步擬定調查策略；有些策略可以幫助調查迅速聚焦，譬如鄰近有已知污染來源時，若能判斷極可能來自該污染來源，就可以把調查資源聚焦在傳輸途徑的證明；有了調查策略，則挑選適當的工具，對於污染分布不明之場

址，工具之挑選建議優先挑選即時檢測設備及高解析調查工具，現場執行調查時，則運用動態工作策略選取採樣(設井)點。獲得調查結果時，未必能夠一次就達到目標，此時，應依據新的調查資訊重新判斷污染來源不明情境，修正調查策略，藉由滾動式調整情境、策略、工具與現場決策，直到達到污染來源調查目標。

以下各小節將分別說明污染來源不明情境的擬定、污染來源調查策略、工具選擇以及動態工作策略等細節。



圖 3-1、污染來源調查程序示意圖

3.1 污染來源不明情境

調查人員須針對關切場址進行場址資料搜集，以便確認污染不明情境。場址基本資料應盡可能包含水文、地質、監測井、污染分布、水質與場址運作歷史等項目，如表 3.1-1，所獲得之資訊越充足，對於情境的確認越有幫助。污染來源不明之情境主要可分為以下五種：

1. 監測井數量少，污染團等濃度曲線圖尚未封閉。
2. 監測井數量少，等濃度曲線圖尚未封閉，但鄰近有污染場址，且具相同污染物。
3. 等濃度曲線圖已封閉，但範圍大，仍未知局部濃度高點位置。
4. 局部濃度高點位置已知，但尚無污染來源的直接或間接證據。
5. 有多個局部濃度高點，部分為已知污染來源，其他則尚無污染來源的證據。

表 3.1-1、場址基本資料收集對照表

項目	資料內容	用途
水文資訊	<ul style="list-style-type: none"> • 豐枯水期地下水位 • 地下水流向、流速 • 水力傳導係數 	了解污染物流布。
地質資訊	<ul style="list-style-type: none"> • 地電阻 • 設井之土壤柱狀圖 • 鑽探資訊 	了解場址為壓實(礫石、岩層)、未壓實地質(粉砂)或不均質(互層)程度，將影響調查工具的選擇以及污染物傳輸路徑的判斷。
監測井資訊	<ul style="list-style-type: none"> • 井號 • 井頂高程 • 開篩長度與區間 • 分布位置(XY 座標) 	井位置和井篩區間將影響污染濃度捕捉。
污染分布	<ul style="list-style-type: none"> • 水平向及垂直向污染濃度數據 (含採樣深度與採樣時間) 	判斷三維污染分布。
一般水質資訊	<ul style="list-style-type: none"> • DO、ORP、pH、EC、溫度 	用以判斷現地是否具有自然降解潛勢或作為其他輔助判斷。
場址運作歷史	<ul style="list-style-type: none"> • 歷年廠家製程 • 事業廢棄物清理計畫書 • 廠房配置圖 • 工安事件紀錄 • 毒化物運作紀錄歷史 	找尋污染物運作之可能跡象以及可能運作位置。

3.2 污染來源調查策略

在確認污染來源不明情境之後，各情境對應的調查策略建議如表 3.2-1，以下說明各情境的調查策略。

表 3.2-1、國內常見之污染來源不明情境與調查策略

污染來源不明情境	調查策略
➤ 監測井數量少，等濃度曲線圖尚未封閉。	建構三維污染分布，以得到污染來源位置。
➤ 監測井數量少，等濃度曲線圖尚未封閉，但鄰近有污染場址，且具相同污染物。	釐清與鄰近污染場址的污染來源關聯性。
	確定另有其他來源時，建構三維污染分布，以得到污染來源位置。
➤ 等濃度曲線圖已封閉，但範圍大，仍未知局部濃度高點位置。	在限縮的範圍內，建構三維污染分布，以得到污染來源位置。
➤ 局部濃度高點位置已知，但尚無污染來源的直接或間接證據。	釐清局部濃度高點的原因為污染來源或污染物聚集。
	若確定存在污染來源，則挑選適當地質採證，譬如容易殘留純相污染物的粉土或黏土層。 若是污染物聚集，則釐清上游或淺層是否還有其他局部濃度高點。
➤ 有多個局部濃度高點，部分為已知污染來源，其他則尚無污染來源的證據。	釐清濃度高點與已知污染來源之間的關聯性。

註：多深度土壤與地下水採樣技術為使用現有之調查技術在相近時間內(如同一天)於同一點位但不同深度取得樣品。

1. 污染團等濃度曲線圖尚未封閉

場址等濃度曲線圖尚未封閉之原因可能為周遭監測井數量太少，導致水平向和垂直向之濃度資訊不足，亦有可能因井篩區間、設井位置和深度等因素，使調查人員無法確切取得污染濃度資訊，而有誤判之情形發生，因此，調查策略為「**建構三維污染分布**」，以得到正確之污染來源位置。如圖 3.2-1 為污染團等濃度曲線圖尚未封閉之示意圖，圖中監測井 A1 和 A2 之西側，因沒有足夠的濃度資訊，而無法確定污染團是否封閉亦無法得知污染邊界位置。圖 3.2-2 則為三維污染分布示意圖。

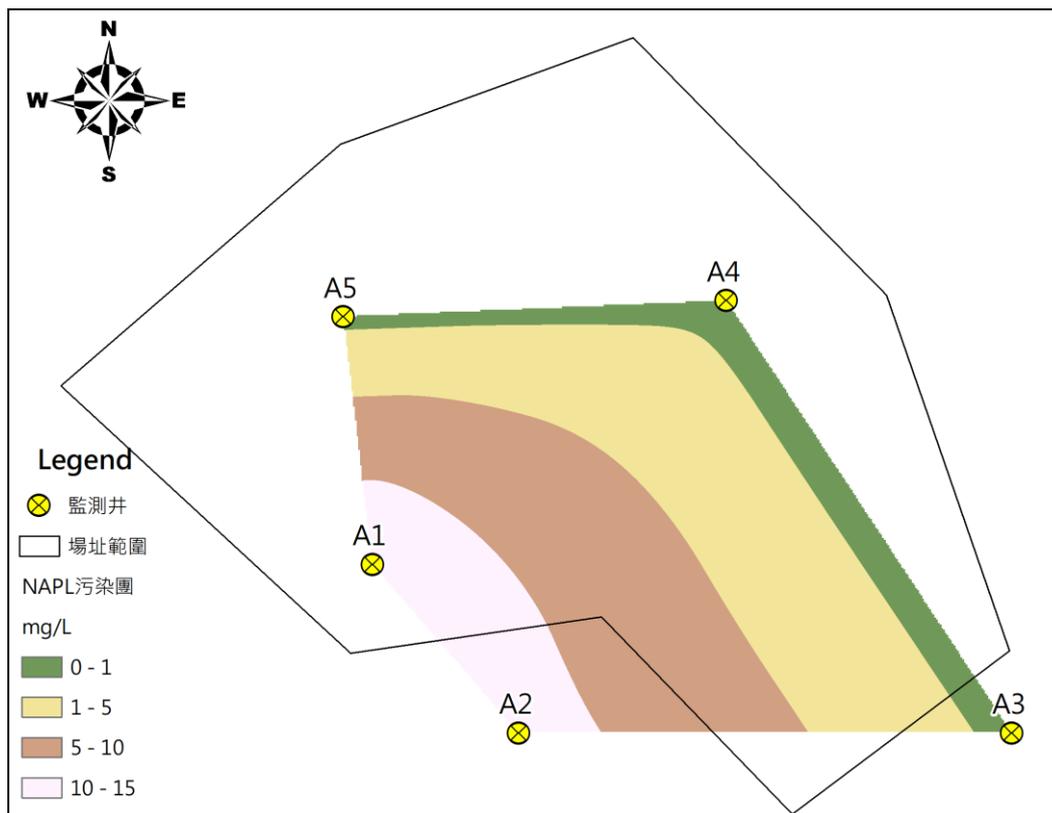
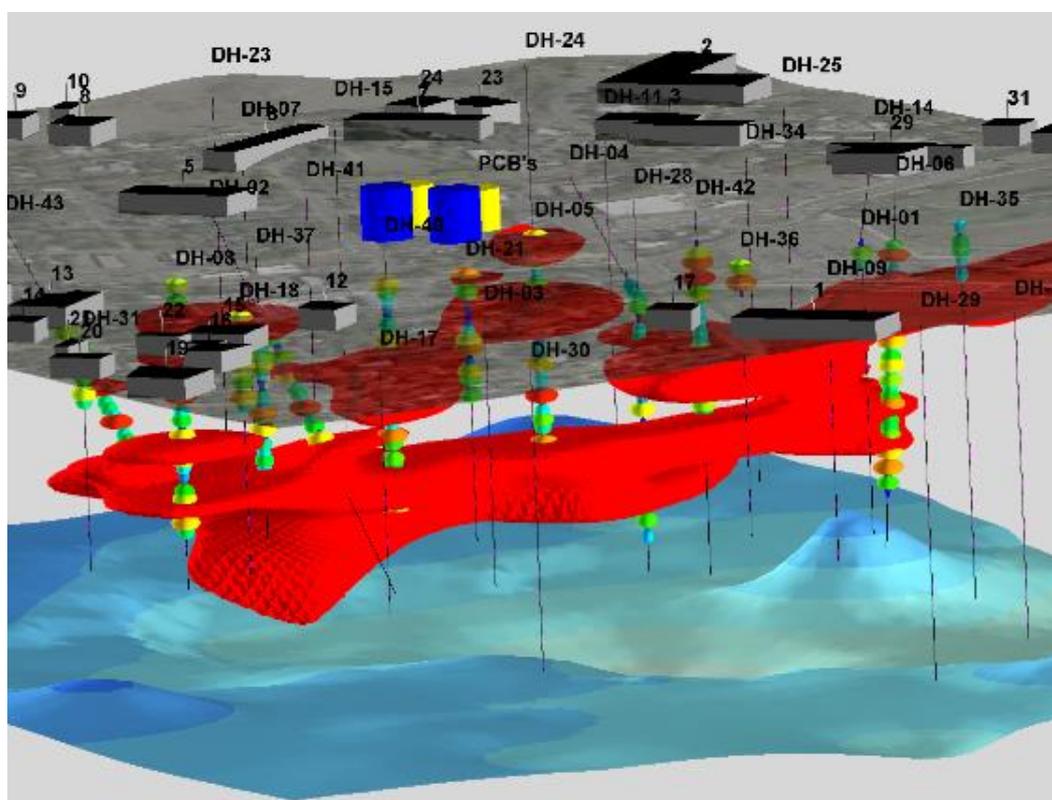


圖 3.2-1、污染團未封閉示意圖



圖片來源：<https://www.rockware.com/product/rockworks/#description>

圖 3.2-2、三維污染分布示意圖

2. 污染團等濃度曲線尚未封閉但鄰近有污染物相同之場址

在進行場址調查前，若鄰近有污染物相同之場址，應優先釐清與鄰近場址間的「**污染來源關聯性**」，若污染團間具來源關聯性，則可朝水文地質或管線等方向行調查，釐清污染傳輸途徑，並確認何者為來源；倘若污染團之間不具來源關聯性，則可針對關切污染團「**建構三維污染分布**」，以得到正確之污染來源位置。

3. 污染團等濃度曲線圖已封閉但未知局部濃度高點位置

等濃度曲線封閉並不代表已找到純相(即 DNAPL)或污染熱區(Local Hotspot)，因為採樣點可能密集度不足，或者監測井開篩位置並未涵蓋污染熱區存在的深度(如：設井深度不足或過深、井開篩位置不正確等)，所以調查策略應在封閉之等濃度曲線內「**建構三維污染分布**」，以得到精確之污染來源位置。

4. 局部濃度高點位置已知但採集不到污染來源的直接或間接證據

污染濃度分布的局部高點可能是因為存在污染來源，但也可能因地質條件(譬如土壤中的有機質含量局部偏高或透水性低)導致污染物聚集或不易擴散，因此，調查策略上第一階段可先「**釐清局部濃度高點的原因**」。若確定存在污染來源，則第二階段調查策略可為「**挑選適當地質採證**」(例如：可以在容易殘留純相污染物之坩土層或黏土層地質進行採樣)；倘若為污染物聚集處，表示該局部濃度高點並非污染來源，污染來自他處，則第二階段的調查策略可參考水文，釐清污染上游或污染相對淺層處，是否還有其他局部高點，再利用污染來源關聯性確認實際污染來源，類似於情境 5。

5. 有多個局部濃度高點，部分為已知污染來源，其他則尚無污染來源的證據

場址內若有多個局部濃度高點，且部分為已知的污染來源，則可釐清濃度高點與該污染來源之「**污染來源關聯性**」。若具污染來源關聯性，則表示極可能源自已

知污染來源，可蒐集更多污染傳輸途徑的證據來支持該項結論。倘若濃度高點之間皆不具污染來源關聯性，表示各自另有污染來源，後續調查策略可比照情境 4 中的「挑選適當地質採證」。

3.3 調查工具選擇

前述不同情境之調查策略可分為四種：(1)建構三維污染分布、(2)釐清污染來源關聯性、(3)釐清局部濃度高點的原因、(4)挑選適當地質採證；以下針對不同策略建議可使用且國內已發展的技術或工具組合。

1. 建構三維污染分布

建構三維污染分布可提供精細且可靠的資訊，對於含氯碳氫化合物污染場址之污染來源調查非常重要。欲建構三維污染分布，必須取得垂直向和水平向之污染濃度、水文及地質等資訊。**表 3.3-1** 針對不同資訊類別提供國內常見之技術與工具組合，並呈現其可獲得之資訊、適用的地質條件，以及在獲得相同類型的資訊下相對的費用高低與費時長短，供調查者選用參考。

2. 釐清污染來源關聯性

針對含氯碳氫化合物污染來源關聯性之判定，國內目前已發展的技術主要係穩定同位素分析，詳細之執行與判釋方法可參考環保署擬定的「利用穩定同位素判定含氯碳氫化合物污染來源關聯性指引」。

表 3.3-1、國內常見之污染來源調查技術與工具組合

類別	資訊	技術/工具組合	適用地質		費用	耗時	與動態工 作策略搭 配
			粉砂	礫石			
水文	單井流向流速	鑽孔流量計	NA		中	短	✓
	大範圍流速	現地抽水試驗	NA		高	長	✗
	小範圍流速	微水試驗	NA		低	中	✗
	流向	等水位線模擬	NA		低	短	✓
地質	相對透水性 地質材料粒徑	水文地質剖析儀(HPT)	✓	✗	高	短	✓
	地質分布	地球物理探測	✓	✓	低	短	✓
		地質鑽探	✓	✓	高	長	✓
污染物 濃度	垂直濃度	擴散式採樣袋+實驗室分析	NA		高	長	✗
		微洗井+實驗室分析	NA		高	中	✗
		微洗井+可攜式偵測器	NA		中	短	✓
		薄膜介面探測器+可攜式偵測器	✓	✗	低	短	✓
		螺旋鑽+貝勒管+實驗室分析	✓	✓	高	中	✗
		螺旋鑽+貝勒管+可攜式偵測器	✓	✓	低	短	✓

註：1.依調查工具的效率與適用性程度，依序建議：✓屬「推薦使用」，✗屬「不適用」。

2.取得多點垂直向濃度之同時亦可獲得水平向之濃度，故此處僅以可獲取垂直向濃度之技術或工具組合為代表。

3.表中的費用高低及耗時長短係以獲取相同類型之資訊為基礎，依執行經驗之主觀判斷結果。

3. 釐清局部濃度高點的原因

造成局部濃度高點的原因大致上有以下兩點：(1)存在純相污染物；(2)地質導致污染物聚集；若欲快速判斷場址是否有純相污染物，可運用氦-222 示蹤劑，但油品污染會影響地下水中氦-222 之濃度，故此技術不適合用於同時受油品污染之場址。此外，當場址具備自然降解潛勢時，亦可透過穩定同位素分析亦判別純相污染物或污染來源所在方位，藉由污染物降解過程所發生的穩定同位素分餾效應(越靠近污染來源，污染物之碳穩定同位素越小)，即可判定污染來源所在方位。有關兩技術之原理及使用條件簡述如表 3.3-2。

表 3.3-2、氫示蹤劑與穩定同位素之原理及適用條件

技術名稱	原理	場址適用/限制條件
氫-222 示蹤劑	氫-222 會傾向於溶入純相污染物中，導致原地下水中氫氣濃度含量大幅降低，故藉由氫-222 之濃度可判定是否有純相污染物。	不適合用於同時受油品污染之場址
穩定同位素分析	污染物在生化反應過程中，傾向先反應掉含有 ^{12}C 的分子，導致殘存的污染物分子中 ^{13}C 的比例增加，此現象稱為穩定同位素分餾效應。在污染團中，越往下游，降解反應程度越高，所測得之污染物穩定同位素特徵越大；反之，越靠近污染來源，其穩定同位素特徵則越小，藉此可判定污染來源所在之方位。	適合具有自然降解潛勢之場址

4. 挑選適當地質採證

當已確定在場址內存在污染來源時，則可挑選適當之地質進行採證(例如：純相污染物容易殘留在粉土或黏土層中)，此時可視地質條件選取合適的土壤採樣工具，詳如表 3.3-3。再以呈色篩測法(如 Sudan IV)進行純相污染物辨識，確認是否已取得關鍵物證。

表 3.3-3、土壤採證技術及其適用之地質條件

調查工具	地質條件			
	礫石	砂土	粉土	黏土
直接貫入法 (Direct Push Method)	✗	△	✓	✓
旋鑽方法 (Auger/Rotary Method)	✗	△	✓	✓
聲波(振動)鑽探法 (Sonic Drilling Technology)	✓	✓	✓	✓
圓錐貫入試驗 (Cone Penetrometer Technology)	✗	△	✓	✓

註：1. 依調查工具的效率與適用性程度，依序建議：✓屬「推薦使用」、△屬「可能適用」、✗屬「不適用」

2. 地下水採樣類之技術在使用上皆須搭配監測井或地表開孔工法(如：Geoprobe 直接貫入法、鑽堡開孔)才能執行

3.4 現場動態工作策略

擬定完污染來源調查策略後，再針對調查目標進行採樣佈點，由於各場址之佈點應依場址現有的調查數據、場址特性與調查缺口等資訊進行規劃，雖然各個場址之調查需求不盡相同，亦難以事先預料。本節提出三大採樣佈點原則，方便讀者於預先規劃階段或現地執行動態時可依循相關原則進行較完善之佈點設計。倘若有需要評估地下水阻水層下方之污染來源，預防之方式主要為(1) 監測井施作時一定要符合設井規範、(2) 盡量在疑似污染源(由淺層濃度判斷)之周圍進行評估、(3) 除非確定純相已洩漏到阻水層之下，否則盡可能不要在污染源處設井。

一、根據不同資訊與場址地下水流向進行佈點

(1)根據污染物濃度分布與場址地下水流向

在掌握歷次所調查污染物濃度及地下水流場後，可依據濃度分布及地下水流向，先往上游佈點，再依調查結果動態工作策略後續佈點的方向，以圖 3.4-1 為例，根據檢出污染物關切井的位置與地下水流向，在與流向垂直的橫切線上往其上游依序佈點，其中，數字僅代表調查施作的可能順序，實際施作情況及順序則依現場執行狀況以動態工作策略決定。此原則雖適用性廣，但應注意所掌握的資訊的準確性，尤其是地質不均的場址，其流場可能有局部不均的狀況。

(2)根據穩定同位素特徵值分布及地下水流向，往靠近原始特徵值的方向佈點。

雖然多數場址在初期調查時，即能從監測井的地下水位獲得場址的地下水流向；然而，若因過去設井數量不多導致地下水位數據量不足，抑或是歷次的水位量測資訊非屬同一時間(豐、枯水期、不同年份)量測，或甚至是數據紀錄有誤(如：將地下水位深度(TOC)記錄成絕對高程(MSL))，以致於場址地下水流向具有很大的不確定性時，若場址具有現地降解潛勢，或曾實施生物整治或化學整治，則可藉由原

生污染物的穩定同位素特徵分布，確認地下流場的準確性，再利用穩定同位素的分餾效應，往靠近原始特徵值的方向佈點。

以具現地降解潛勢或曾實施生物整治的三氯乙烯污染場址為例，微生物降解三氯乙烯時，多傾向先將具有 ^{12}C 的三氯乙烯降解成二氯乙烯，以致於降解後所觀察到的殘餘三氯乙烯之碳穩定同位素特徵比其原始特徵還要大，在一污染場址中，越遠離污染來源的降解時間越長，對污染物所測得之碳穩定同位素則越大，欲尋得污染來源，則應往碳穩定同位素特徵越小的方向佈點。值得注意的是，不同的降解或化學反應，對於穩定同位素的分餾效應不盡相同，調查者應事先了解該生物/化學反應對穩定同位素的分餾現象，再往靠近原始特徵值的方向佈點。

(3)根據氬-222 濃度分布及地下水流向，往上游及氬-222 濃度最低處方向佈點。

氬-222 傾向溶於非水相液體，亦即有機溶劑。因此，越靠近純相污染物位置，水中氬-222 的濃度越低。調查上，可參考氬-222 的濃度分布，往氬-222 濃度較低處方向佈點。

二、參考地質資訊決定佈點密度

在進行佈點時，場址之地質特性與佈點的密集度有很大的關聯，當場址飽和層地質係屬於均勻的礫石層時，通常地下水流速較快，污染物的傳輸速率與範圍亦會比緻密的粉砂層來得快且廣，因此，佈點時，點位與點位之間間距可拉大；反之，對於流速較慢的粉砂地質場址，佈點之密度應較密集，以在有限資源下掌握污染團的分布與污染來源所在位置。然而，對於場址地質較為不均的狀況，則須針對該場址的地質分布情況進行調整。

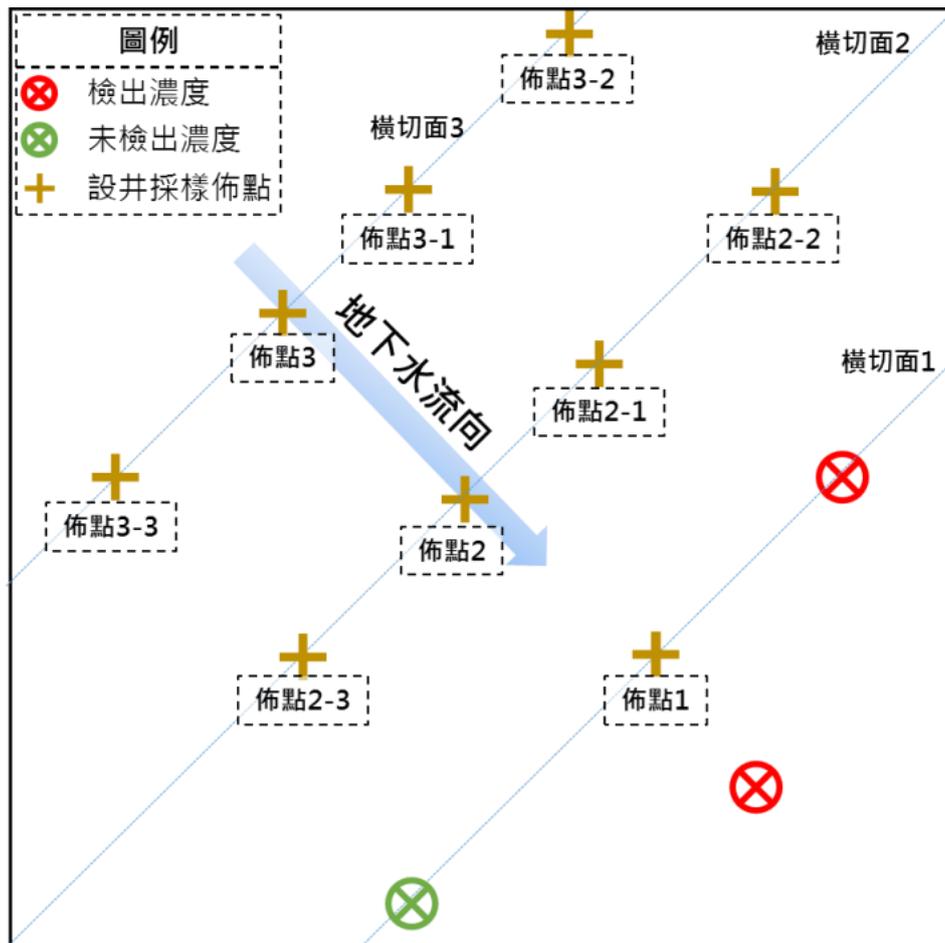


圖 3.4-1、以污染物濃度分布與場址地下水流向佈點示意圖

三、佈點時應考量阻水層的連續狀況與不同含水層互通的可能性

由於污染物在地底下的傳輸與地質結構和地下水流向有關，並非每次皆能透過設置單一深度的監測井來釐清，因此，佈點前應盡可能收集場址的阻水層與不同含水層資訊，如非侵入性的地球物理探測結果，以評估阻水層是否有不連續、破裂之處，或是不同含水層之間連通的可能性，必要時，應佈點設法釐清此疑慮。舉例來說，當場址阻水層有不連續之處，再加上深層地下水水壓較高且受含氯碳氫化合物污染時，其阻水層不連續之處可能為污染物傳輸至淺層地下水的途徑，導致淺層之污染透過一般佈點原則與設置單一深度的監測井難以查得其污染來源，若遇此狀況，應於破裂處附近至少佈設一點位，設置較深之監測井，除了採集樣品確認深

層地下水是否受污染外，亦量測其地下水流向與流速，評估含水層互通的可能性，進而透過深層與淺層的地下水流向確認污染來源的調查方向，以利動態工作策略之進行。此處須注意的是，打穿阻水層設置深井可能有將污染物帶至第二含水層或導致淺層污染傳輸至深層地下水之疑慮，故調查者應於施作前審慎規劃，並於放置井管後，妥善進行皂土封工作。

3.5 滾動式的場址調查

從初始的污染來源不明情境判定，經調查策略的擬定與現場執行後，若能獲得決定污染來源明確的物證(物證的類別可參考「含氯碳氫化合物污染源區判定參考手冊」)，則達成目標。倘若尚未能達成目標，則應彙整新數據，重新檢視污染來源不明情境，並調整調查策略，再次進場調查等。換言之，場址調查係一個循環過程，在此過程中，調查者須不斷經歷「場址資料搜集」、「擬定調查策略」、「佈點及採樣分析」及「判讀數據」的循環(圖 3.5-1)。每一次調查所獲取的新數據，將揭露出更多的場址樣貌，也會改變場址的調查情境與調查需求，調查者得依新的場址情境擬定合適的調查策略及目標，再進行佈點、採樣分析與數據判讀，直至達成最終目標(找到污染來源)為止。因此，污染來源之調查並非一蹴即成。

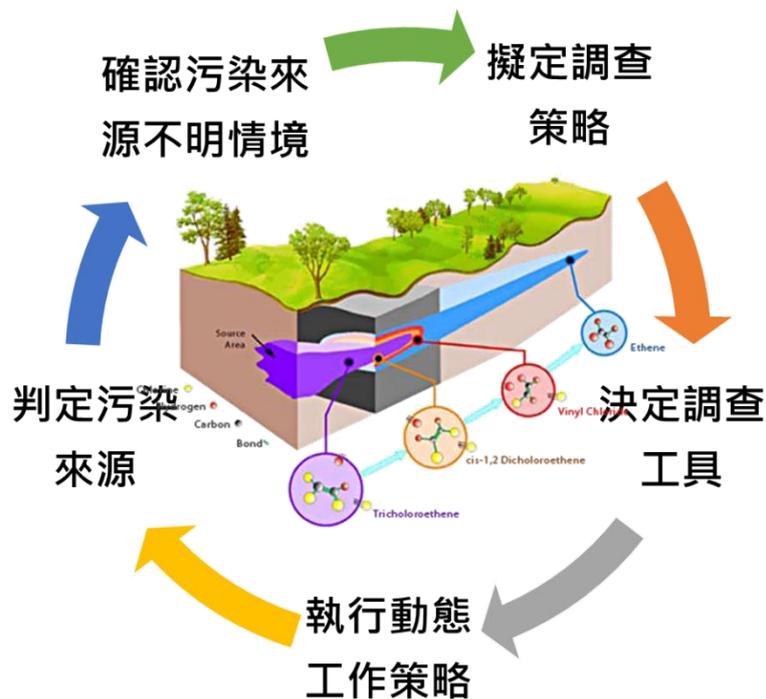


圖 3.5-1、滾動式場址調查的循環示意圖

第四章 案例示範

本章將透過 6 個污染場址調查案例的說明，示範如何運用本手冊的調查程序達到污染來源調查目的，其中 B 場址乃應用「含氯碳氫污染物環境鑑識技術建置與應用計畫(第二期)」所建立可應用在礫石地質的高解析調查技術，額外針對其相較於傳統調查方法的經濟效益做評析。

4.1 A 場址

一、場址資料搜集

A 場址鄰近地區的地目皆為田地，場址與周遭之工廠，經查毒性化學物質許可管理系統，均非使用三氯乙烯之列管廠家。場址內外皆有數口深度約略介於 10 至 20 公尺間之監測井，場內外有多口監測井之三氯乙烯超過管制標準，根據過去計畫的地電阻探測結果、監測井土壤柱狀圖及感應電磁探測數據來理解地質條件，場內外均無觀察到明顯的阻水層，地下水流場部分，流向大致上由西南往東北流，深層流速較淺層快。

二、污染來源不明情境與調查策略

由資料搜集結果顯示污染熱區位於場址內之東側，但污染來源位置不明確，須進一步限縮污染來源位置以便採集關鍵物證，因此，模擬情境為「等濃度曲線圖已封閉，但範圍大，仍未知局部濃度高點位置」調查策略採用「建構三維污染分布」，以限縮或得到污染來源位置。

三、高解析場址調查結合動態工作策略

參考地質資料顯示場址為粉砂地質，因此，選用 Geoprobe 以直接貫入方式搭配 MIP 輔以 ECD 和 DELCD 為偵測器，提供高解析垂直向濃度分布，於場址內檢

出污染物超標之監測井周遭，進一步限縮污染來源分布位置與深度。圖 4.1-1 為 A 場址施作高解析場址調查之採樣點位示意圖(M-1 至 M-8 為動態工作策略執行點位)，運用 MIP-ECD/DELCD 即時回饋訊號判斷污染物之相對濃度，決策下一施作點位，以地下水流上游且靠近三氯乙烯濃度超過 1%有效溶解度之 M-1 開始，調查深度參考歷史污染調查結果設定為 10 公尺，依序執行 M-1 到 M-8 點位用以劃定污染邊界，其中，M-2 回饋之訊號較 M-1 高，M-4、M-5 和 M-7 之訊號偏低，因此，將污染來源範圍限縮於四個點位之間，後續將再進一步調查核心區域，採集關鍵物證。

四、污染來源採證

場址調查為一個動態循環過程，在調查過程中所獲得的場址資訊漸趨完整，因此，需不斷的檢視流程和進度，此時，已將污染來源範圍限縮於 M-2、M-4、M-5 和 M-7 之間，但仍未採集污染來源的直接或間接證據，所以將調查情境變更為「局部濃度高點位置已知但採集不到污染來源的直接或間接證據」之情境，調查策略為「挑選適當地質採證」。

因場址為粉砂地質，所以調查技術選用直接貫入法搭配雙套管採樣器(Dual Tube Soil Sampler)執行土壤採樣作業，輔以 PID 快速篩測樣品內之揮發性有機物含量，如圖 4.1-1 在核心位置採集 M-9、M-10 和 M-11 之土壤樣品進行篩測，其中，M-11 之篩測值最高，將進一步執行呈色篩測，呈色篩測運用 Sudan IV 之紅色染劑會將 NAPL 染色之特性，推測土壤中存在純相有機物質(圖 4.1-2)，透過純相測試來佐證以釐清場址之三氯乙烯污染源頭是否來自於場內，結果證實 M-11 點位確實有純相存在，是為污染來源。最後，於動態工作策略點位 M-1 至 M-11 皆採集土壤樣品進行實驗室分析，結果顯示，除 M-4、M-5 和 M-7 外，其餘點位土壤中之三氯乙烯皆超過管制標準，確定取得污染來源之關鍵證據，完成 A 場址之調查。

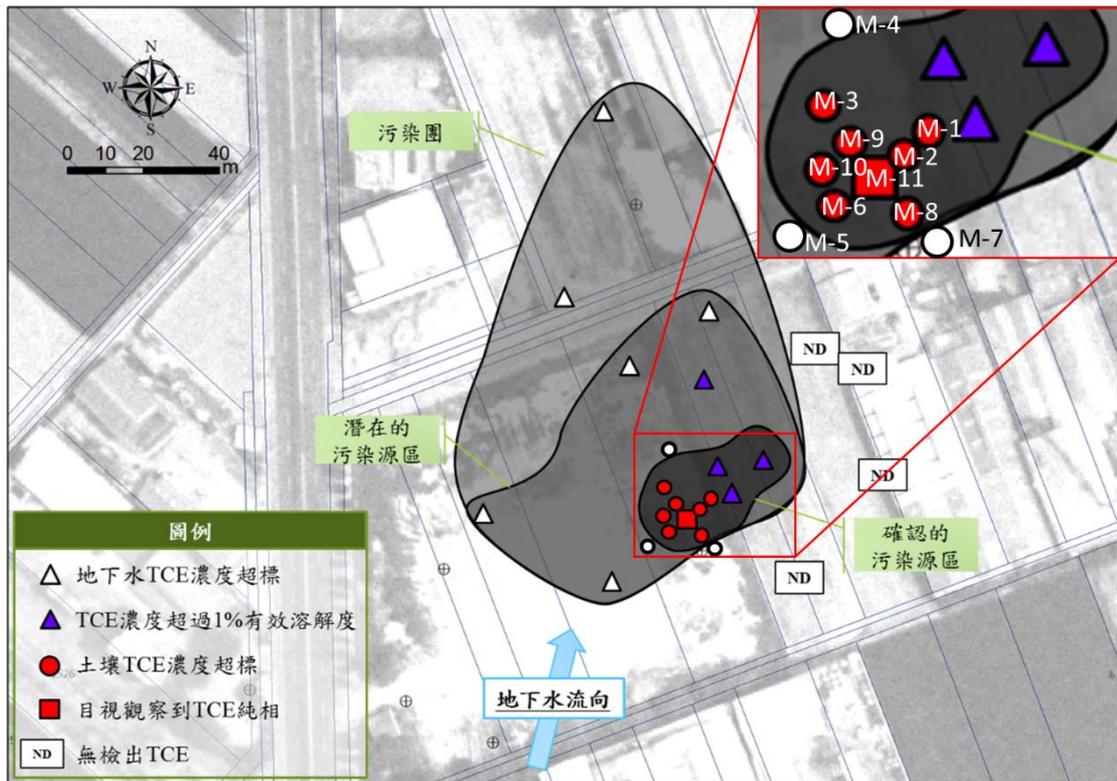


圖 4.1-1、A 場址高解析場址調查技術實際採樣點位示意圖



註：圖中紅色區塊為運用 Sudan IV 將 NAPL 染色之成果

圖 4.1-2、土壤純相測試結果

4.2 B 場址

一、場址資料收集

B 場址位於工業區內，其鄰近廠家在毒性化學物質管理系統查無相關三氯乙烯相關紀錄，地質資訊顯示場址周遭屬礫石層，其深度大於 60 公尺以上，且不存在明顯之阻水層。區內共設置數口場置性監測井，做為地下水品質定期監測使用，監測井彼此設井深度及開篩位置差異幅度較大，近期之地下水檢測報告指出監測井中僅一口水質檢出三氯乙烯超過管制標準，由水位監測成果得知，地下水流向隨季節之變化不大，且不隨豐、枯水期變化，區域流向為西北往東南。

由於 B 場址可能污染範圍內之監測井，井深度及開篩位置差異幅度較大，且分布間距亦較疏遠，致使目前的地下水水質監測資訊僅能提供概略性參考價值。

二、污染來源不明情境與調查策略

場址周遭僅一口監測井地下水檢出三氯乙烯超過管制標準，因此，尚無釐清污染關聯性之需求，但周遭監測井深度和開篩位置差異較大，且無足夠垂直向與水平向的濃度分布資料，既有背景資訊並不足夠，因此，判定場址之情境為「**監測井數量少，等濃度曲線圖尚未封閉**」，調查策略為「**建構三維污染分布**」，以得到正確之污染來源，由於場址屬礫石地質，調查工具將選用「**即時探測污染之設井法**」進行污染來源限縮。

三、採樣佈點規劃

根據場址資料收集成果，並至現場勘查設井位置後，在關切井上游規劃設置預設監測井如圖 4.2-1。因為場址屬礫石地質，且周遭監測井設置深度皆不一致，傳統調查方式為規劃預計設井點位後，再至現場依照預計點位設置監測井，於完井後再進行地下水採樣分析，該方式耗時且存在污染深度無法確實捕捉之風險；因此，

調查工具選用工作團隊開發之「即時探測污染濃度之設井法」，用以即時判斷設井深度與位置；該技術為一種使用可攜式氣相層析儀做為即時分析儀器搭配現有鑽井技術於鑽井過程中以貝勒管進行地下水採樣之技術。



圖 4.2-1、B 場址預計設井位置規劃

四、高解析場址調查技術結合動態工作策略

現地設井之動態工作策略參考圖 4.2-2 所示，場址動態工作策略流程圖如圖 4.2-3，以關切井上游之 SW1 做為出發點，因可攜式氣相層析儀即時回饋 SW1 之樣品濃度皆低於方法偵測極限(ND)，故不往上游之 SW1-1 設井，而 SW1 南側既有監測井曾檢測出極微量之三氯乙烯，因此，改往南側 SW3 設井，分析結果顯示 SW3 之樣品濃度亦皆為 ND，所以往北側 SW2-1 進行設井，而 SW3-1 暫時排除設井需求，於 SW2-1 設井過程中即有檢出三氯乙烯，因此，往上游 SW2-2 進行設井，而

在 SW2-2 有些微三氯乙烯濃度檢出，但為確保來源方向明確，因此，在 SW2-2 之北側 SW4-1 設井確認，SW4-1 之樣品濃度皆為 ND，而南側 SW1-1 因為位於 SW-1 上游，在先前檢測結果為 ND，故推測污染來源應由 SW2-2 上游往 SW2-1 方向流至關切井位置，由此可知，透過「即時探測污染濃度之設井法」之即時回饋功能，能達到有效溯源的成果。

五、評析污染來源所在深度或限縮調查方向

原先規劃 7 處設井位置，因使用即時探測污染之設井法搭配動態工作策略，有效且明確限縮調查方向，減少設井數量，最終，僅設置 5 口井便能判斷污染來源，每口井深度為 45 公尺到 70 公尺不等；由於採用即時探測污染之設井法能即時得知樣品濃度，因而可以大幅降低採樣與分析耗時，縮短傳統調查方式所需花費的時間，另外，樣品數量減少，亦能有效降低調查所需的經費，調查成果詳圖 4.2-4。

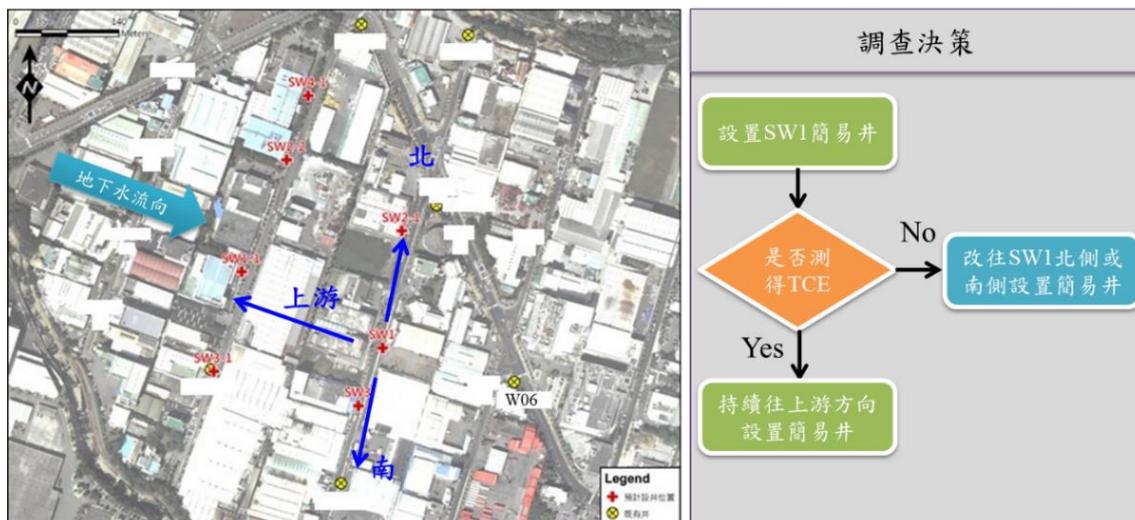


圖 4.2-2、B 場址調查策略執行流程示意圖

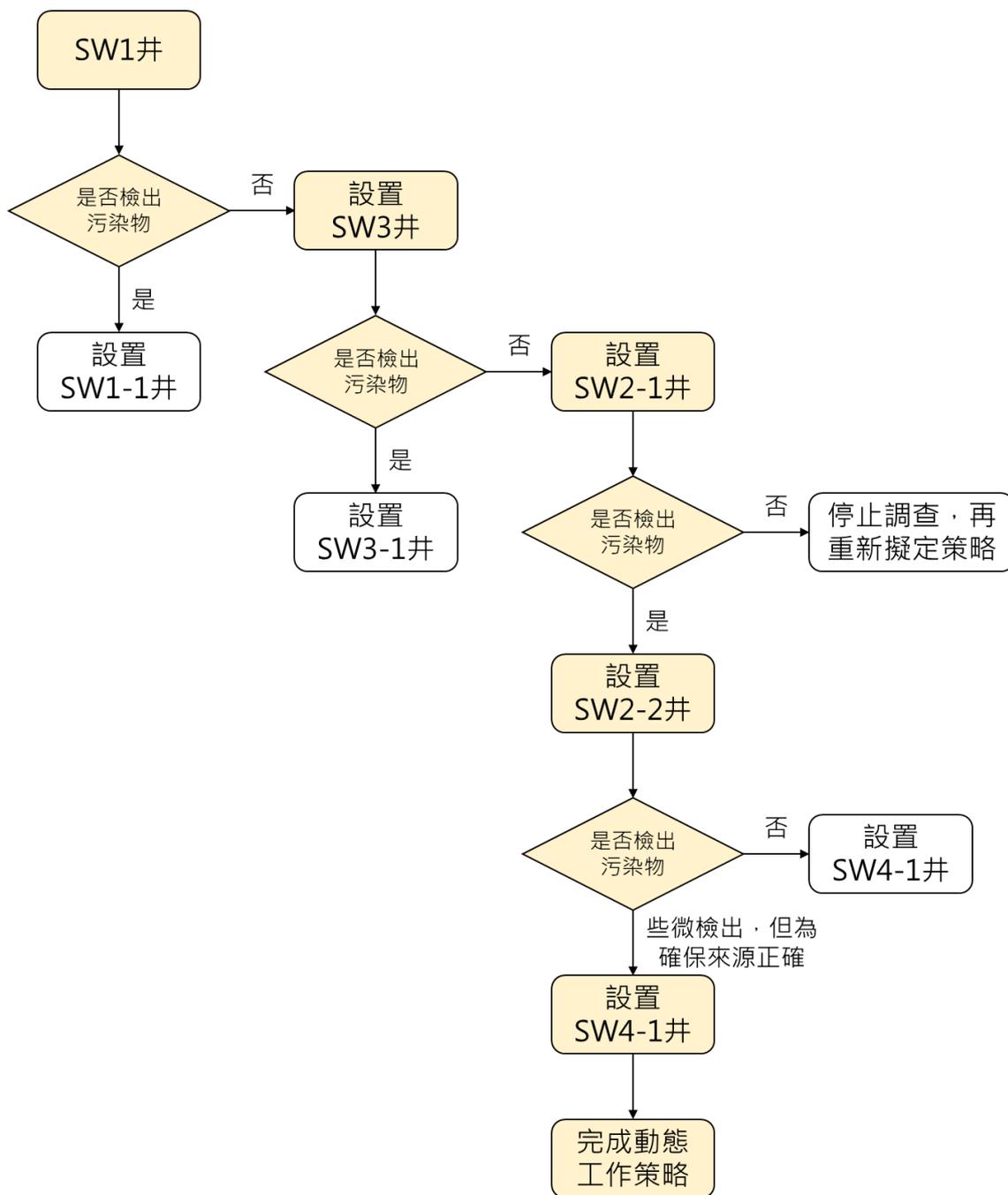


圖 4.2-3、B 場址動態工作策略執行流程圖

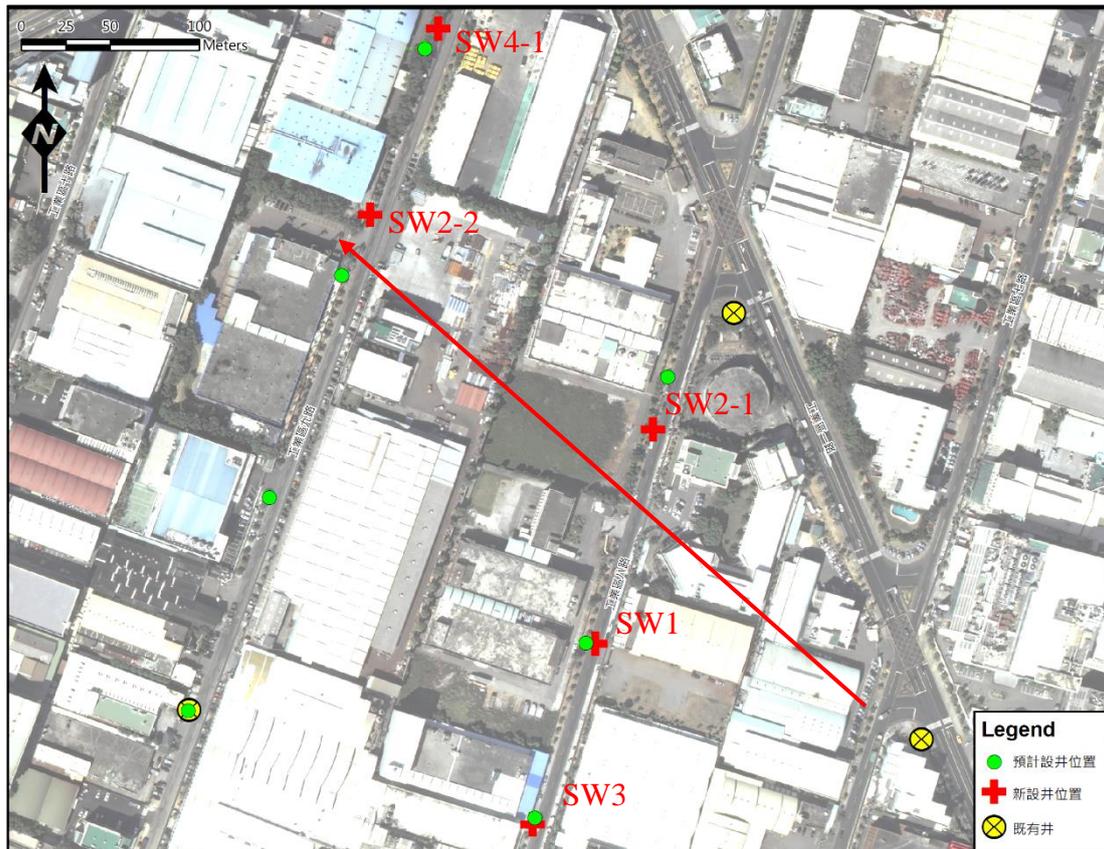


圖 4.2-4、B 場址污染來源調查成果圖

六、國內常見之調查方式與高解析場址調查之比較

國內常見之調查方式為搜集場址資料、參考鄰近監測井深度和開篩位置後，即規劃預計監測井設置位置，在確定位置後便展開設井工作，一次將規劃之監測井完成設置，待水質穩定後再進行採樣分析，這樣的過程往往耗時，且常因錯誤的開篩區間和設井深度，導致污染來源誤判。

以 B 場址為例，由於場址地表高程落差極大，如果參考既設井之開篩區間和設井深度，將會造成採樣位置錯誤無法呈現真實污染情況，若規劃重新設井，將耗費多餘的成本；另外，如果以國內常見之調查方式參考圖 4.2-1 完成 8 口井之設置，與高解析場址調查之「即時探測污染之設井法搭配動態工作策略」比較，高解析場址調查方式僅設置 5 口井便能取得污染來源方向，在找尋污染來源方面，除了減少設井可能耗費的成本外，亦能節省分析的耗時，達成調查之目的。

4.3 C 場址

一、場址資料收集

台灣中北部某區地下水受多種含氯碳氫化合物污染，污染物種類包含四氯乙烯、三氯乙烯、順-1,2-二氯乙烯、反-1,2-二氯乙烯、1,1-二氯乙烯、氯乙烯、1,1,2,2-四氯乙烷、1,1,2-三氯乙烷、1,1-二氯乙烷、1,2-二氯乙烷、1,3-二氯丙烷、苯與氯苯等。過去調查資料顯示主要污染區域包括污染來源已明確之工業區、污染來源尚未確認的某塑膠廠以及工業區外西南側之民宅區(C 場址)。地下水流向為東北往西南，故 C 場址位於工業區外下游，而塑膠廠則位在 C 場址下游。已知 C 場址地下水檢出多種污染物，與工業區污染物種類相似度高，但 C 場址之污染團在水平方向上與工業區之污染團並未連續，故污染來源不明。

二、污染來源不明情境與調查策略

C 場址之情境屬於「有多個局部濃度高點，部分為已知污染來源，其他則尚無污染來源的證據」，為應先釐清 C 場址、某塑膠廠與已知污染來源(工業區)之間的來源關聯性，故採用「穩定同位素分析技術」。

三、採樣佈點規劃

為了能夠採集具代表性之地下水樣品做穩定同位素特徵的判斷，以下兩大篩選原則進行監測井篩選：(1) 污染物濃度曾超過第二類地下水污染管制標準；(2) 污染物濃度未曾超標，但高於穩定同位素之偵測極限。篩選出的監測井依「監測井地下水採樣方法」(NIEA W103.54B)辦理地下水採樣，並分析多種污染物的穩定同位素特徵。

四、污染來源關聯性判定

穩定同位素特徵分析結果顯示 C 場址與工業區有多種污染物的穩定同位素特徵皆無顯著差異，具有高度的污染來源關聯性；而最下游的塑膠廠其污染物的穩定同位素特徵則顯著不同，應為不同污染來源。

五、滾動式調查

由於有多種污染物的穩定同位素特徵皆顯示 C 場址與工業區具有相同的污染來源特徵，因此 C 場址有高度可能來自工業區的污染，接續的調查應致力於證明傳輸途徑，尤其需要了解為何 C 場址之污染團在水平方向上與工業區之污染團並未連續。

由於污染團實為三維的分布，污染可能經由不同深度發生橫向的傳輸，因此，重新檢視污染來源不明情境，可歸類為「**監測井數量少，等濃度曲線圖尚未封閉**」，此處之等濃度曲線圖係特別指不同深度的，因此，後續在調查策略上需強化不同深度的污染資訊，亦即「**建構三維污染分布**」。經結合更深處的污染調查結果，顯示工業區已污染至深層，並且擴及 C 場址的深層位置；另外，長期水文調查顯示 C 場址的深淺層彼此具有水文連動性，表示有水文的連通，深層的污染確實可能經由通道流污染淺層地下水，證實了工業區污染流到 C 場址之污染傳輸途徑。

4.4 D 場址

一、場址資料搜集

根據初步資料顯示，D 場址之地質主要為礫石夾砂，19~30 公尺深為細砂夾黏土層，由於監測井 A 於民國 104 年檢出三氯乙烯濃度(0.0521 mg/L)超過管制標準，且廠商曾運作三氯乙烯，故隔年依法公告為控制場址。106 年，環保局於鄰近工廠新設一口監測井 B，檢出三氯乙烯濃度(0.116 mg/L)高於監測井 A，然而，該工廠並未曾使用三氯乙烯，該處監測井數量不多，調查資訊有限，監測井 B 之三氯乙烯污染來源仍不明(視為 D 場址)。

二、污染來源調查策略

此場址之情境屬於「監測井數量少，等濃度曲線圖尚未封閉，但鄰近有污染場址，且具相同污染物」，故率先採用採用「穩定同位素分析技術」，釐清監測井 A 與 B 三氯乙烯的污染來源關聯性。

三、採樣佈點規劃

由於此場址缺乏垂直向污染濃度分布資訊，為能採集具代表性之穩定同位素特徵樣品，優先使用微洗井採樣搭配可攜式氣相層析儀，現場量測各監測井污染物垂直向之濃度分布，並從中挑選污染物濃度較高且大於穩定同位素分析方法偵測極限者，作為本次調查之採樣對象。並進行監測井之地下水水位量測，用以釐清此場址之地下水流向。

四、污染來源關聯性判定結果

根據本次調查所得之監測井水位量測結果，場址地下水流向大致上係由西向東流。為確認 D 場址與監測井 B 三氯乙烯(TCE)之來源關聯性，將 TCE 的碳、氯穩定同位素特徵進行二維分析。

TCE 之二維碳、氯同位素特徵分析結果如圖 4.4-1，A、C、D 和 E 四口井之 TCE 碳、氯穩定同位素特徵呈一線性關係，表示這幾口井之三氯乙烯為同一來源。另一方面，B 井之三氯乙烯同位素特徵與 A 井之特徵有顯著差異($\delta^{13}\text{C} > 0.5 \text{ ‰}$)，亦未呈線性，研判 B 井之三氯乙烯來源應與 A 井等四口井的來源不同，而監測井 F 之穩定同位素特徵介於監測井 A 及 B 之間，且其位置在所有監測井之最下游，表示 F 井有可能同時受到兩個三氯乙烯污染來源之污染。

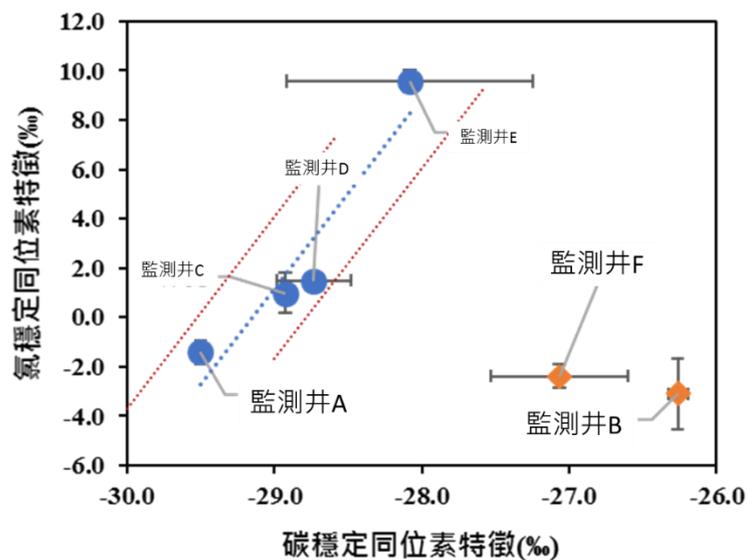


圖 4.4-1、D 場址碳與氯穩定同位素二維分析圖

五、滾動式調查

在確認場址 D 與監測井 B 之三氯乙烯不具污染來源關聯性後，重新確認場址 D 之情境應變更為「監測井數量少，等濃度曲線圖尚未封閉」，而監測井 B 之污染來源另有其他，應為另一場址，情境也是「監測井數量少，等濃度曲線圖尚未封閉」，因此，兩者皆須各自「建構三維的污染分布」，以釐清污染來源。

4.5 E 場址

一、場址資料搜集

E'場址於場內監測井檢出四氯乙烯及多項含氯碳氫化合物超標。根據污染物的濃度分布結果，污染範圍已擴散到場外西南側。由污染物種類以及氧化還原電位，可推知本場址應存在還原脫氯反應。但當時於 E 場址場外西側的 BW01 監測井檢出更高的四氯乙烯濃度(如圖 4.5-1)，該井之四氯乙烯污染團尚未封閉且污染來源不明(視為 E'場址)。

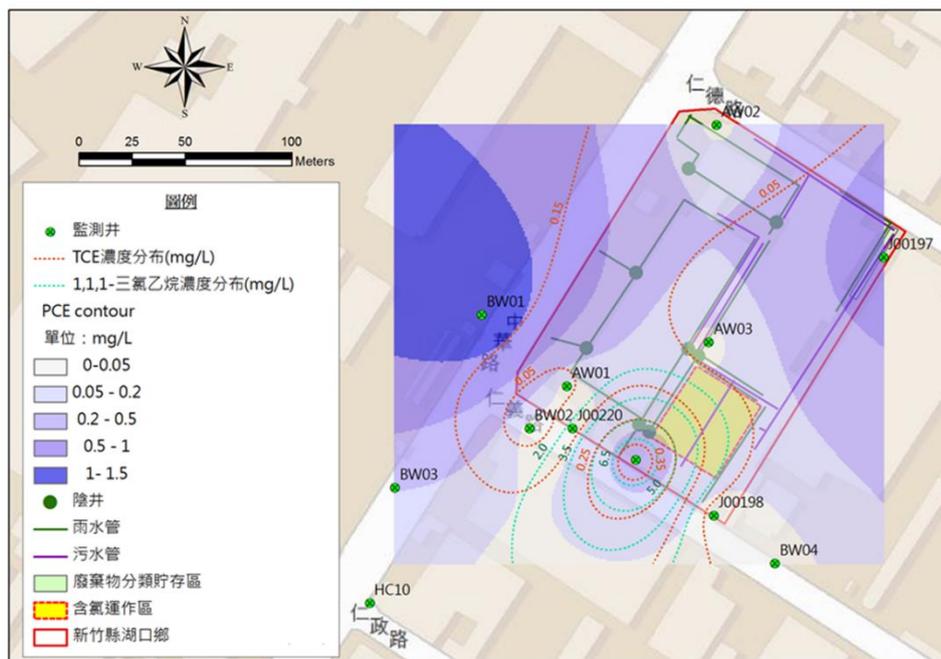


圖 4.5-1、E 場址及其鄰近區域之四氯乙烯污染濃度分布圖

二、污染來源調查策略

E 場址之情境屬於「監測井數量少，等濃度曲線圖尚未封閉，但鄰近有污染場址，且具相同污染物」，故率先採用採用「穩定同位素分析技術」，釐清監測井 A 與 B 三氯乙烯的污染來源關聯性。

三、採樣佈點規劃

為評估四氯乙烯污染來自 E'場址的可能性，依當時現有地下水檢測結果，若 BW01 監測井中的四氯乙烯污染係來自 E'場址，則污染團的分布可能如圖 4.5-2 所示。為驗證此傳輸概念圖及判斷污染來源關聯性，規劃採集 AW01 與 BW02 較淺處的樣品進行四氯乙烯濃度分析，並根據過去各監測井四氯乙烯之濃度，篩選出檢出濃度較高的監測井進行採樣與穩定同位素分析。

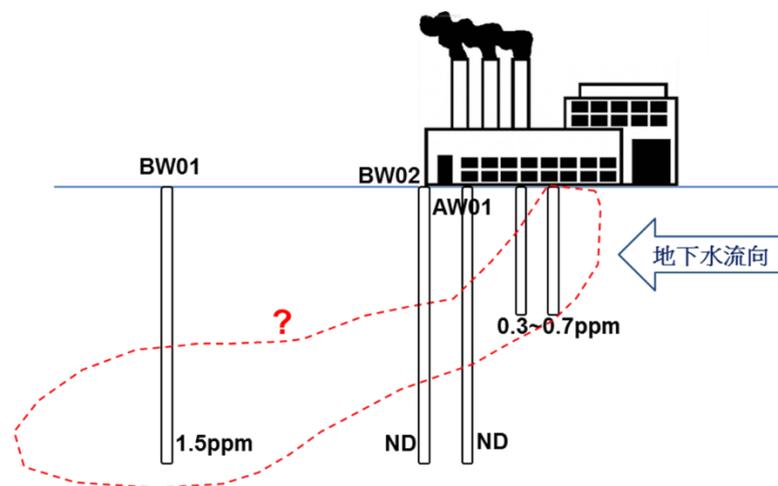


圖 4.5-2、E 場址之四氯乙烯污染傳輸概念模式假設圖

四、污染來源關聯性判定

為確認場內外四氯乙烯之來源相關性，穩定同位素特徵數據以二維分析來進行相關性之判斷，結果顯示確實呈線性關係，表示場外 BW01、BW02 之四氯乙烯與場內 AW01 及 J00196 之四氯乙烯為同一來源。

另一方面，經由採集 BW02 及 AW01 較淺處的樣品進行四氯乙烯濃度分析後，發現該深度之樣品四氯乙烯濃度皆超過管制標準 0.05 mg/L，亦驗證了先前假設之傳輸路徑假設，證實 E 場址之四氯乙烯源自於 E'場址，完成 E 場址污染來源之調查。

4.6 F 場址

一、場址資料搜集

F 場址之地下水監測井在歷次監測下，皆檢出三氯乙烯濃度超標，其周圍監測井數量少，污染團尚未封閉，污染來源亦不明。而其上游有三氯乙烯污染來源明確之 M 及 L 場址。

二、污染來源調查策略

F 場址之情境屬於「監測井數量少，等濃度曲線圖尚未封閉，但鄰近有污染場址，且具相同污染物」，故率先採用採用「穩定同位素分析技術」，釐清 F 場址與上游 M 或 L 之污染來源關聯性。

三、採樣佈點規劃

為採集具代表性且可進行穩定同位素分析之樣品，從過去各監測井之檢測濃度，排除三氯乙烯濃度偏低之監測井，並根據 M 及 L 場址檢出較高濃度的深度，做為地下水採樣深度。

四、污染來源關聯性判斷

由穩定同位素特徵結果判斷 F 場址主要受到 M 場址的污染，但有些許部分來自 L 場址。

五、滾動式調查

由穩定同位素結果得知 F 場址的污染可能來自 M 與 L 場址，因此接續的場址調查目標可以聚焦在釐清污染從 M 與 L 場址到 F 場址的傳輸途徑。此時，污染來源不明情境雖為「監測井數量少，等濃度曲線圖尚未封閉」，但因前段污染來源關聯性研判顯示可能來自鄰近污染來源，故在「建構三維污染分布」時，可將調查資

源聚焦在 M 與 L 場址到 F 場址可能存在的污染傳輸途徑驗證上，提高調查資源的效益。

第五章 參考資料

- Bohling, G. C., and Butler Jr, J. J. (2010). Inherent limitations of hydraulic tomography. *Groundwater*, 48(6), 809–824.
- King, T., Finney, D., and Palaia, T. (2013). High-Resolution Sampling and Characterization Techniques that Minimize Uncertainties and Improve Remediation Outcomes. In *Battelle Remediation Conference Proceedings, Jacksonville, Florida, June 2013*.
- Maliva, R. G. (2016). *Aquifer characterization techniques : Schlumberger methods in water resources evaluation series no. 4*. New York, Berlin: Schlumberger Water Services : Springer.
- Vroblesky, D. A. (2001). *User's guide for polyethylene-based passive diffusion bag samplers to obtain volatile organic compound concentrations in wells. Part I, Deployment, recovery, data interpretation, and quality control and assurance (Water-Resources Investigations Report 2001-4060)*.
- Vroblesky, D. A., and Campbell, T. R. (2001). Equilibration times, compound selectivity, and stability of diffusion samplers for collection of ground-water VOC concentrations. *Advances in Environmental Research*, 5(1), 1–12.
- USEPA (1997) *Expedited Site Assessment Tools for Underground Storage Tank Sites: A Guide for Regulators*, EPN510/B-97/001. Solid Waste and Emergency Response.
- Yeh, T. C. J., and Liu, S. (2000). Hydraulic tomography: Development of a new aquifer test method. *Water Resources Research*, 36(8), 2095–2105.

許心蘭、劉沛宏、方孟德、陳俞瑾、李佳珮、黃文宏、曾素媛、劉文堯、廖珮瑜及郭正翔（民 104），含氯碳氫污染物環境鑑識技術建置與應用計畫，行政院環境保護署委託之專題研究成果報告（編號：EPA-104-G13-03-A266），臺北市：行政院環境保護署。

霖昌工程有限公司，地球物理探勘應用於土壤及地下水污染場址之調查驗證作業及整治技術評估計畫（第二期）地球物理探勘參考指引，行政院環境保護署委託之專題研究成果報告（編號：EPA-105-GA13-03-A271），臺北市：行政院環境保護署。

行政院環境保護署環境檢驗所，土壤採樣方法（NIEA S102.61B），中華民國 102 年 4 月 15 日生效。

行政院環境保護署環境檢驗所，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），中華民國 98 年 6 月 15 日生效。

行政院環境保護署（民 105），含氯碳氫化合物污染源區判定參考手冊，臺北市：行政院環境保護署。

單信瑜（民 87），土壤材料與土壤取樣，鑿井公會鑽探訓練班講義。

范仲奇及陳舜岳（民 99），地下水被動式擴散採樣袋採樣方法介紹，社團法人臺灣土壤及地下水環境保護協會簡訊，第三十六期，27-35 頁，臺北市：臺灣土壤及地下水環境保護協會。

黃紹揚（民 101），現地循序抽水試驗之水力斷層掃描分析研究，國立雲林科技大學工程科技研究所博士班博士論文，雲林縣。

陳泳霖（民 101），水力斷層掃描應用於循序抽水試驗之再現性分析，國立雲林科技大學環境與安全衛生工程系碩士班碩士論文，雲林縣。

陳煥昇（民 97），水力斷層掃描技術應用於現地抽水試驗之研究，國立雲林科技大學環境與安全工程系碩士班碩士論文，雲林縣。

陳欣儀（民 105），探討重複驗證方法與非重複驗證方法對水力斷層掃描方法的影響，國立雲林科技大學環境與安全衛生工程系碩士論文，雲林縣。