

工程實務

土壤氣體調查技術

林宏昌*

摘要

土壤氣體調查技術廣泛地用於遭受揮發性有機物污染場址之調查。這些場址可能包括生產、使用、或處理各類揮發性有機物之化學工廠、煉油廠、加油站、掩埋場及電子工廠等。土壤氣體調查方法為地下有機物污染調查之初步篩選調查工具，除了可以提高後續土壤及地下水調查效率外並可減少無謂的調查經費浪費，本技術亦可用來建立土壤或地下水環境背景參考值，並可應用此調查技術作為土地買賣轉移時環境調查工具。

本文中就土壤氣體調查技術之應用，分別從調查目標之界定、適用性之評估、採樣之理論、分析精密度要求以及分析數據之解說等各項逐一論述，並介紹國外實際經驗，供執行規劃及設計調查工作時參考；也就國內現場調查過程所需之人力、期程、經費等提出現場經驗數字以供參考。

【關鍵字】

1. 土壤氣體(soil gas)
2. 非水溶性液體(NAPLs, Non-Aqueous Phase Liquids)
3. 未飽和層(vadose zone)
4. 樓止地下水(perched groundwater)
5. 挥發性有機物(VOCs, Volatile Organic Compounds)
6. 氣相層析儀(Gas Chromatography)
7. 固定／生物氣體(Fixed/Biogenic Gases)

*泰興工程顧問股份有限公司環保事業部專案副理

一、前　　言

土壤氣體調查技術近年來廣被使用作為土壤及地下水污染先驅調查工具。這個構想最初緣於石油探勘過程均會先進行油井（田）之油氣含量測試以判別油井（田）含油量多寡。擴大此一構思，當土壤或地下水遭受揮發物有機物污染時，這些有機物便能揮發進入並分佈於未飽和層之空隙，工程師／科學家藉由儀器分析土壤氣體濃度、成份以映對檢測點附近土壤及下方之地下水是否遭受污染。當今之土壤氣體調查技術除了用來測試含油品污染場址之調查應用之外，也可用來檢測常見之含氯溶劑污染；這些含氯溶劑廣泛被用於製程上之脫脂、萃取、清潔之用，表1列舉國內六種主要含氯溶劑之用途。這些含氯溶劑及油品在本身物性上均屬於非水溶性液體 (NAPLs, Non-Aqueous Phase Liquids)，若因操作或處置不當極易造成土壤及地下水污染。

表1 國內六種主要含氯有機溶劑之用途⁽²⁰⁾

二氯甲烷	<ul style="list-style-type: none"> • 脫脂溶劑 • 漆料剝除劑 • PU加工吹泡劑 • 噴霧劑 • 製藥萃取溶劑
氯仿	<ul style="list-style-type: none"> • 壓克力黏著 • 萃取用溶劑
四氯化碳	<ul style="list-style-type: none"> • 農藥中間體 • 印刷油墨溶劑
三氯乙烯	<ul style="list-style-type: none"> • 脫脂溶劑 • 樹脂、塑膠類之溶劑 • 有機化合物之萃取溶劑
四氯乙烷	<ul style="list-style-type: none"> • 脫脂溶劑 • 乾洗劑 • 一般性塗料之溶劑 • 萃取用溶劑
1, 1, 1-三氯乙烷	<ul style="list-style-type: none"> • 脫脂溶劑 • 清洗溶劑 • 樹脂類之溶劑 • 修正液

由於土壤及地下水污染不像空氣污染或表面水污染，可以較容易地由目視或感官直接感受到問題的嚴重性，且由於土壤本身不均質特性又位於地表下，對於已知有潛在污染問題之場址，如何有效率地進行調查工作，避免金錢及時間之虛擲，值得加以探討及重視；在本文中介紹土壤氣體調查之主要理論、應用限制、調查規劃原則及新近之發展，最後並且提供部份調查實驗經驗數字供參考選用。

二、土壤氣體調查之種類

所謂“土壤氣體(Soil Gas)”依據ASTM⁽¹³⁾定義為土壤中未飽和層之氣體(vadose zone atmosphere)。土壤為一多孔介質，內有許多孔隙存在，而介於地表與地下水位上方毛細管帶(capillary fringe)間土壤孔隙存在水分及氣體，這些土壤孔隙中之氣體即稱為土壤氣體。

土壤氣體調查乃是利用採樣及分析設備來檢測土壤孔隙中氣體之化學成份，以評估揮發性有機污染物(VOCs)在土壤及地下水中所成之地下污染狀況⁽¹⁾⁽⁹⁾⁽¹⁹⁾。此種非直接檢測土壤或地下水之調查技術，可以作為判斷土壤或地下水是否遭受揮發性有機物污染。一旦地下水遭受揮發性有機物污染，揮發性有機物將在地下水及土壤空隙中依氣液平衡理論及亨利定律，揮發至土壤空隙之氣體中，因此可由檢測土壤氣體中揮發性有機物作為初步研判土壤或地下水是否遭受到污染之指標。

揮發性有機物在土壤氣體中濃度分佈狀況除了依循傳統擴散理論之外，往往受到地表至地下水位間之水文地質或地質狀況而有所改變（例如黏土層或棲止水之存在將阻隔濃度梯度變化之連續性）。經由土壤氣體初步調查結果除了可以用來研判土壤可能之污染位置及範圍，可進一步決定地下水抽除井(groundwater extraction well)及土壤蒸氣抽除井(soil vapor extraction well)的正確鑽探位置並減少誤選位置的可能性，此土壤氣體調查偵測工作，雖無法完全取代傳統土壤取樣及鑿井設置監測井調查方式，但確可以提高土壤及地下水污染調查及復育效率及正確性，同時較具有經濟性。

土壤氣體採樣分析技術主要分成主動式 (active) 及被動式 (passive) 兩大類⁽²⁾⁽⁵⁾。主動式調查方法乃是將採樣用鋼管錘入未飽和層中抽取土壤氣體進行分析；被動式調查方法則是將吸附材質埋入土壤中，靜置數天（週）後再從土壤中取出進行脫附及分析。主動式及被動式採樣方法各具優缺點⁽⁷⁾，主動式採樣方式從中空鋼管中抽取土壤氣體分析，該方法通常與現場分析工作相配合，所採得之可土壤氣體樣本立刻以現場分析儀器檢測，可獲得即時分析數據並作為選定下一個採樣點之參考，並可減低處理土壤氣體過程中所引起未飽和層中局部揮發性有機物之擾動。至於被動式採樣方法通常使用類似活性碳類吸附材質來捕捉擴散至土壤氣體中之揮發性有機物，該方法取出送至實驗室進行脫附及分析，該方法之優點在於採樣人員僅受些許訓練後即可從事採樣工作，並將環境因素所引起之濃度變動予於平均（即吸附平衡而非即時動態濃度）；其主要缺點為需要較長時間才能獲得調查結果；且對於揮發性有機物之沸點若低於 5°C 或脫附加熱過程中會分解之化學物均不太適用。此外，吸附材質對化學之吸附特性亦影響其適用性。

三、調查目標界定

調查工作首重目標之明確，典型的土壤氣體調查工作雖可以作為標定污染範圍及初步篩選工具，但值得注意的是土壤氣體調查本身乃是屬於間接式之調查方法，其結果僅提供初步資料，必須另外進行土壤及地下水採樣分析來驗證其結果。雖然土壤氣體並無法取代土壤採樣及設置監測井等工作，卻可以提供許多地下污染的初步資料，對於後續進行之土壤採樣工作之擬訂及監測井之設置可以有效地提供研判資料節省經費。土壤氣體調查也常作為初步評估及場址調查(preliminary assessment/site investigation)之主要工具並用於界定調查工作範籌(scoping)及復育調查(remedial investigation)之重要依據，並可用來評估污染物之抽除效率。土壤氣體調查之主要目標包括下列各項⁽³⁾：

1. 界定地表下污染之可能範圍
2. 廣泛地篩選出揮發性有機污染物種類
3. 初步預測所遭遇之污染物狀況（氣、液相或成品）

4. 標定出污染物在氣相或液相之傳輸狀況
5. 描述出污染團(plume)之遷移(migration)狀況

四、適用性評估

使用土壤氣體來初步篩調查污染物之適用性因素，主要取決於場址地質狀況及化學污染物本身特性等兩大因素⁽³⁾。場址地質狀況影響著化學污染物在未飽和層中之濃度分佈梯度及連續性，一般將土壤氣體調查技術用於未飽和層中未固結土壤(unconsolidated soils)狀況下可得到較好之結果。至於其它會造成土壤氣體在未飽和層中濃度梯度改變之地質因素（如低滲透性之黏土層），將大大地降低土壤氣體調查之適用性。一般而言，未飽和土壤本身具有乾燥性、粗顆粒、低有機成份時適用性較佳，而細顆粒土壤可能具有較低孔隙率，且易捕捉水份及有機物，使從地下水位垂直擴散出來之揮發性有機物至此即受到阻礙無法擴散⁽⁴⁾。至於另一個主要影響因素則為化學污染物本身特性問題，通常此化學污染物涉及到所要調查之目標污染種類；在初步調查時可依場址過去化學物操作狀況，找出可疑污染種類，並選定那些可以很容易地從土壤或地下水 中揮發進入土壤氣體之指標化學物(indicator chemicals)作為土壤氣體調查之標的化學物。

依據Donn L. Marrin⁽⁴⁾之建議，概略而言適用於土壤氣體調查之揮發性化學污染其亨利常數(Henry's constant)至少應大於 $0.05\text{KPa}\cdot\text{M}^3/\text{mol}$ ；且其蒸氣壓(@ 20°C)應大於1公厘水銀柱(1mm-Hg)；其理由乃是因為化學物本身亨利常數較小時，較不易由液相揮發；而低蒸氣壓之化學污染物亦不易於土壤氣體中擴散。

依據美國加州區域水資源管理委員會洛杉磯分會對於主動式土壤氣體調查之工作計畫要求內容中，所列舉之22個主要適用於土壤氣體調查之污染物如下⁽¹¹⁾：

- | | |
|---------|----------------------|
| 1. 四氯化碳 | Carbon Tetrachloride |
| 2. 氯苯 | Chlorobenzene |

3.氯乙烷	Chloroethane
4.二溴一氯乙烷	Dibromochloroethane
5.二氯二氟甲烷	Dichlorodifluoromethane
6.1,1-二氯乙烷	1,1-Dichloroethane
7.1,2-二氯乙烷	1,2-Dichloroethane
8.1,1-二氯乙烯	1,1-Dichloroethene
9.順、反-1,2-二氯乙烯	Cis-and thans-1,2-Dichloroethene
10.二氯甲烷	Dichloromethane
11.1,1,2,2-四氯乙烷	1,1,2,2-Tetrachloroetane
12.1,1,1,2-四氯乙烷	1,1,1,2-Tetrachloroetane
13.四氯乙烯	Tetrachloroetane
14.1,1,1-三氯乙烷	1,1,1-Trichloroethane
15.1,1,2-三氯乙烷	1,1,2-Trichloroethane
16.三氯乙烯	Trichloroethene
17.三氯一氟甲烷	Trichlorofluoromethane
18.氯乙烯	Vinyi Chloride
19.苯	Benzene
20.乙基苯	Ethyl Benzene
21.甲苯	Toulene
22.二甲苯	Xylene

五、調查內容之規劃及設計原則

所有的土壤氣體調查工作主要由三大部份所組成，分別為採樣、分析檢測及數據解說⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。在規劃整個調查工作之初，有關採樣點位置之選定、採樣深度、數量及數據品質目標(data quality objective)均必須事先進行規劃，現場

工程師必須依現地已得到之採樣分析結果來調整。下一個採樣點位置而並非一成不變。通常可以遵循之原則如下⁽¹¹⁾：

- 1.找出可用之場址配置圖，標出主要建物或製程區等。
- 2.利用網格點劃定採樣點位置，一般可以用100呎當作網格距離，但對於高潛在污染位置可採用20~30呎距離作為選點之參考；Franco E. Godoy⁽³⁾等人則建議網格距離取2~4倍地下水位深度，通常以50呎至100呎間較為常用。
- 3.對於已知或已測得高度濃度之揮發性污染物之土壤氣體採樣點位置，可進行不同深度之採樣分析以了解污染物之垂直濃度分佈，並初步判斷該污染物在垂直方向之來源是由上而下或下而上擴散而來。
- 4.現場立即分析結果，可以用於調整現場採樣計畫（例如網格密度、採樣點位置及深度等），然而此可能調整內容儘量先在工作計畫書中提及並且不違背調查準則。
- 5.若發現特別不尋常之測試數據（例如高於鄰近點濃度100~1000倍時），重新在該點進行採點、分析。

5.1 採樣

有關土壤氣體採樣方法之準則，目前並無一定之定論，依筆者實際從事採樣經驗並參酌國外研究人員⁽⁴⁾⁽⁶⁾⁽¹¹⁾之建議，彙整如下：

- 1.在適當的深度下進行土壤氣體採樣以減低大氣中之空氣對土壤氣體之干擾（通常最少為5呎）；N.Tillman等人⁽⁶⁾建議最佳採樣點深度為3~6呎，但仍應視現場地質狀況是否可以鑽到所預定深度而調整。
- 2.決定最佳之抽氣率及體積並儘可能減少吹除(purge)以取得代表性之土壤氣體樣品；同時儘可能使用小管徑之鋼管採樣以減少土壤受到外來干擾，採樣過程中儘量減低連續抽氣可以避免土壤氣體濃度受到稀釋而影響調查結果。
- 3.採取過程應進行必要之除污(decontamination)步驟以避免交替污染(cross contamination)發生；採樣鋼管通常先以肥皂水清洗後用再用清水沖洗，最後必須以熱水或蒸氣清洗機(steam cleaner)清洗並吹除殘餘在採樣鋼管中之揮發性有機物污染物，每一工作日必須以儀器檢測流經鋼管之氣體，以驗證是否受到殘留揮發性有機物之污染。

4. 選擇適當之樣品收集容器，以保持樣品之完整性；常用之樣品容器包括玻璃或不銹鋼容器、泰勒(Tedlar)袋及氣密式注射針(gas tight syringe)。

選擇土壤氣體樣品容器應採用不與揮發性有機物起反應之材質為主。而泰勒(Tedlar)袋較有漏氣之虞，儘可能小心操作避免漏氣。另外對於所採得之土壤氣體樣品應儘快進行分析，以避免分析化學物質分解（尤其是碳氫化合物），但若無法立即於短時間內進行分析時，樣品也應避免或減少陽光照射，並應注意置放場所之氣壓等因素。

5.2 分析檢驗

土壤氣體分析檢驗工作依其數據品質目標可分為三種，依要求精密程度包括有機蒸氣分析(OVA)、光離子偵測(PID)及氣相層析／火焰離子或電子捕捉偵測(GC/FID、GC/ECD)，該分析技術依其分析屬用與應用要求分別列於表2。業主及顧問公司人員應依專案需求選擇最適合之分析技術。

表2 土壤氣體分析技術⁽³⁾

分析技術	分析屬性	應用及其敏感度
有機蒸氣分析(OVA)	定性	即時分析，以火焰離子偵測總有機物
光離子偵測(PID)	定性	即時分析，揮發性有機物之光離子化程度受限於光離子燈之能階
氣相層析儀(GC/FID, GC/ECD)	定量	完全掃瞄分析所管制之揮發性有機物

對某些使用溶劑於製程而沒有使用油品燃料之調查區位，可使用GC/ECD作含鹵素碳氫化合物之掃瞄偵測；相反地若僅使用油品之工廠之進行調查時，應以GC/FID進行部份特定碳氫化合物之掃瞄分析；若是對於調查範圍內之可疑污染一無所知或想徹底了解大致揮發性有機化學品種類時，建議同時採用GC/ECD及GC/FID作較廣泛掃瞄分析。

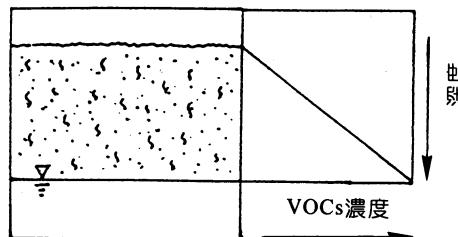
在整個土壤氣體調查工作中，採樣部份之費用並不因採樣方式不同，而大幅變動。分析技術之選擇及數據品質目標之要求為決定整個調查成本之主要因素。在選擇最適分析技術層次所需考慮之因素包括：實驗室收到樣品至執行分析之間所需時間、分析結果要求定量或定性、樣品數量及品保／品管之要求。

5.3 數據之解說

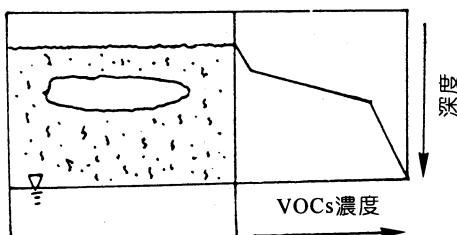
完成調查後所提出之報告包括採樣分析結果，最好以等濃度圖標示在調查圖中，圖中也應把相關建物、地標及各採樣點分析數據一併標示出來，並應說明污染物化學特性或地質概況特性等，以利研判。

在解讀／研判分析數據上應特別注意最常造成誤導及干擾的因素，即未飽和層中阻礙氣體擴散之因素⁽⁴⁾，包括棲止地下水(perched groundwater)、黏土夾層(clay lenses)、已埋設之基礎、灌溉引水(irrigate)、地下管線及地層特性等。這些無法直接目視到之因素均可能使土壤氣體在未飽和層中濃度梯度被中途截斷而造成測試結果沒有顯示污染。相反的在某些情況下可能使調查結果產生污染假象及誤判，其中最普遍的情況為靠近地表附近少量不明污染，被誤認地下水業已遭受污染，在這種狀況下可藉由多重不同深度之採樣分析以判斷污染發生是從上而下或由地下水揮發至未飽和層中所引起。土壤氣體調查結果另外也可以尋求擴散理論加以解釋。Donn L. Marrin⁽⁷⁾等人提出土壤氣體中污染物之擴散在均質土層中垂直方向之濃度分析與深度呈線性關係，而土壤均質程度、孔隙率、含水率、地下水揮發性有機物濃度及吸附平衡等均會影響土壤氣體中污染物濃度。此外，微生物高活動力使土壤氣體中污染物濃度分佈曲線劇降或污染源存在未飽和層中造成局部土壤氣體高濃度現象等狀況，這些狀況所造成土壤氣體濃度分佈結果請參閱圖1⁽⁷⁾。

除了前述之污染物擴散及土壤地質條件等物理因素之外，了解化學污染物本身在土壤中之生物／化學反應亦將有助於分析數據之解讀。由於土壤中孔隙中含有少量氧氣存在，在土壤環境中可能引發部份有機污染物氧化現象，此現象在愈靠近地表土壤中愈為明顯；因此在靠近上層土壤中層於好氧狀態有利於好氧菌對碳氫化合物分解，使得無法在上層土壤中測得揮發性有機物存在，因此在界定採樣目標污染物時，對於較容易受到氧化之分解之一般低分子量揮發性有機物污染，應儘可能增加採樣深度。至於偵測含氯有機污染物時，雖較不易受好氧分解，但仍受制於厭氧分解、土壤酸鹼值、氧化還原電位、移動性、吸附性、傳輸機制及微生物等因素影響，唯其影響程度不若碳氫化合物來得明顯。以上物理、生物或化學影響因素對已在某些調查應用特性獲得證實⁽⁵⁾。因此在數據解釋時應採較嚴謹的態度。

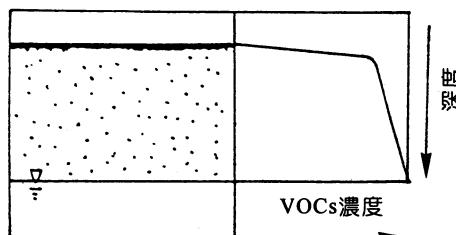


(A)土壤介質均勻性良好，孔隙度佳



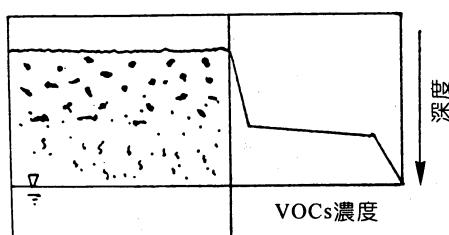
(B)地表下存在不透水層

(例如黏土或棲止地下水)

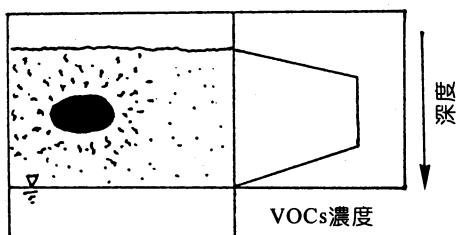


(C)不透水層存在

(例如水泥或柏油鋪面)



(D)高微生物活動區存在



(E)污染源存在未飽含層中

圖 1 土壤氣體濃度分佈狀況舉例^[7]

六、土壤氣體調查技術之應用

傳統上之土壤氣體技術上已廣泛地用於煉油廠、儲油槽、輸油管線、加油站、掩埋場及使清潔溶劑之電子工業之場址土壤及地下水污染調查。筆者過去曾參與國外著名之土壤氣體調查專業公司在國內執行油槽區及電子工廠之土壤及地下水揮發性有機物污染調查，也曾參與加油站土壤氣體調查，此土壤調查技術已甚成熟。然而傳統之土壤氣體調查對於煉油廠／油槽區等非揮發性及半揮發性之重質油料洩漏偵漏方面之應用卻受到部份限制。

Marrin⁽¹⁴⁾除對土壤氣體進行傳統揮發性有機物分析外，也同時分析土壤氣體中甲烷、二氧化碳及氧氣之濃度，藉以評估有機物厭氧分解作用對土壤氣體成份之影響。筆者曾與國外專業公司藉此分析方法來評估可能之半揮發性或不揮發性重質油污染。此方法之理論依據主要依未飽和土壤中重質油受到厭氧菌分解之最終產物為甲烷氣體，而好氧分解最終產物則為二氧化碳；因此可利用甲烷氣體濃度及CO₂/O₂比值來進行評估受重質油品污染之可能性，在一般未受污染之土壤中CO₂/O₂比值通常小於0.3且甲烷氣體濃度通常不超過10到50ppmv，當CO₂/O₂比值高且同時測得甲烷濃度異常偏高時，可能暗示因土壤中有機物存在而造成較高之微生物分解活動，可用來作為評估重質油品污染之指標。以上方法稱為固定／生物氣體(fixed/biogenic gases)評估⁽⁸⁾。

另外William B. Kerfoot⁽¹⁵⁾改進傳統之土壤氣體調查技術，發展出誘發式土壤氣體採樣系統，把攜帶氣體(carrier gas)加熱後經採樣鋼管泵入土壤中，此加熱氣體（不含污染物）於鋼管底部均勻注入鋼管底部四週土壤，鋼管內管與鋼管之環狀空間使用真空系統來誘引鋼管周圍之土壤氣體。經由攜帶氣體溫度之提高及真空系統之利用，有利於有機物揮發而擴大分析範圍，系統配置如圖2所示。一般而言，傳統之土壤氣體調查對沸點在200°C以下有機物才能測得。此法大致可以擴大分析有機物範圍至沸點400°C之物質。值得注意的是使用此方法時，地球土壤本身是熱吸收體，需要較大的能源消耗。

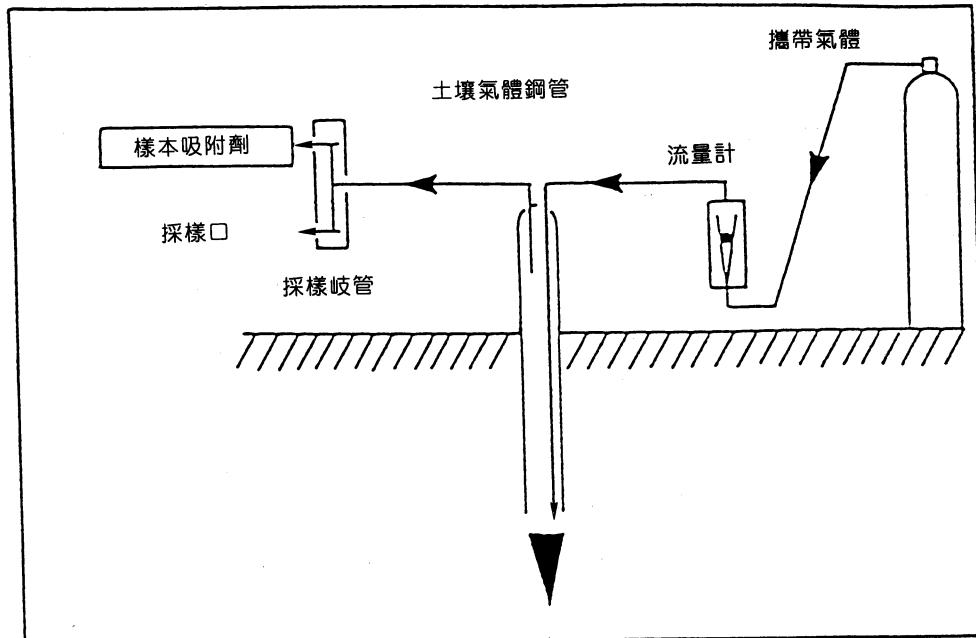
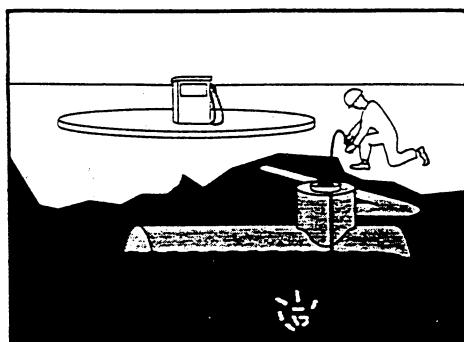


圖2 誘發式土壤氣體採樣系統⁽¹⁵⁾

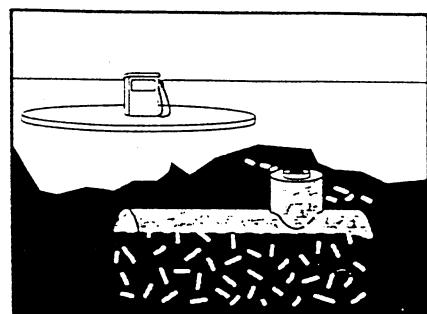
另外許多公司也利用添加對氣相層析敏感度高之追蹤劑於儲槽及輸送管線來進行測漏，若儲槽或發生洩漏則追蹤劑伴隨油料在洩漏點位置往外擴散分佈於未飽和層中，藉由分析未飽和層中追蹤劑及總碳氫化合物濃度即可找出儲槽及輸送管線之可能洩漏點，其方法示如圖3。

54 土壤氣體調查技術

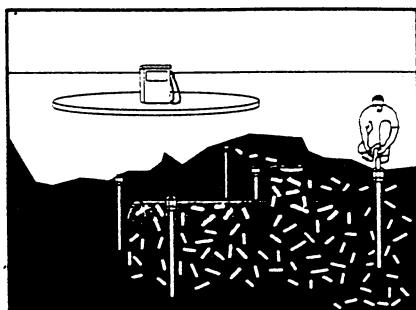
一、添加追蹤劑



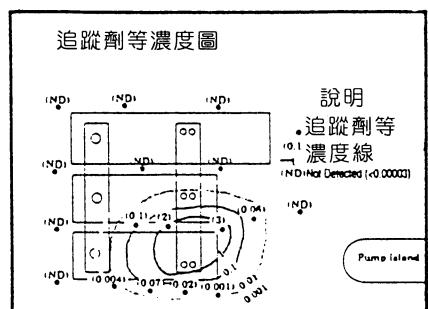
二、均勻混合



三、採樣分析



四、追蹤劑濃度分佈



五、總碳氫化合物濃度分佈

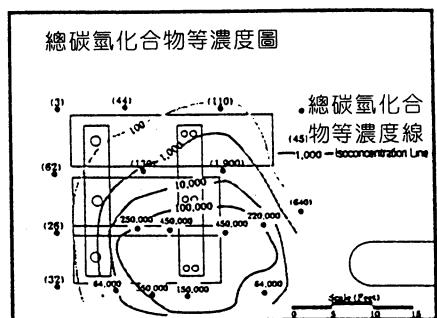


圖 3 加油站儲槽測漏示意圖

七、結論與建議

土壤氣體調查技術在國外已被廣泛地用來成為初步評估及場址調查(preliminary assessment/site investigation,PA/SI)之主要工具之一⁽¹⁸⁾，為快速之場址污染篩選方法。基於土地永續利用之觀念，當發生疑似揮發性有機物污染或在工廠設立之初及關廠後地目變更或土地所有權轉移前，可以利用此法初步篩選及調查場址污染狀況，供環保及相關開發單位進一步評估。至於相關調查所需之費用，依筆者過去與國外廠商從事現場調查所累積之經驗，使用車上配備液壓採樣系統及二部實驗室級氣相層析儀之採樣車一部，配合二位熟練工程師進行100~150點之採樣分析工作將不會超過台幣250萬，每日依土壤地質條件約可完成10~20點採樣分析工作。

國內約於五、六年前即從國外引進此技術，包括中油、工研院及台大環工所及工程顧問公司等亦陸續使用此技術於相關調查及研究計畫，同時亦欣見已有國內公司著手建立本身技術，然而在分析測試數據之判讀上，仍須依賴累積相當經驗之工程師及專家學者才能減低誤判，期藉由本文拋磚引玉，希望國內從事相關工作之人員能集思廣益共同建立本土化之技術。

參考文獻

- 1.D.A.Devitt, R.B. Evans, W.A. Jury et al., "Soil Gas Sensing for Detection and Mapping of Volatile Organics, "National Water Well Association, Dublin, OH, 1987.
- 2.Mark Stutman, "ANovel Passive Sorptive Method for Site Screening of VOCs and SVOCs in Soil and Ground Water", 8th Annual Conf. on Contaminated Soils, Sep. 1993.
- 3.F.E. Godoy, D.S. Naleid, "Optimizing the Use of Soil Gas Surveys" Hazardous Material Control, Sep/Oct, 1990.

4. Donn L. Marrin, "Soil Gas Sampling and Misinterpretation: GWMR, Spring, 1988.
5. Glenn M. Thompson, Donn L. Marrin "Soil Gas Contaminant Investigations: A Dynamic Approach" Ground Water Monitoring Review, Summer, 1987.
6. N. Tillman, K. Ranlet, T.J. Meyer "Soil Gas Surveys: Part II/Procedures", Pollution Engineering, August, 1989.
7. Donn L. Marrin, Henry B. Kerfoot, "Soil Gas Surveying Techniques", Environ. Sci Technol., Vol 22, No.7, 1988.
8. Bechtel Environmental, Inc., "Soil Gas Survey Report for Chinese Petroleum Corporation", January, 1992.
9. Kurt O. Thomson, Sarah Joyner, "Source Identification and Characterization Using Areal and Vertical Soil GAs Sampling Techniques", Hazardous Material Control, July/August, 1991.
10. J.H. Viellenave, J.C. Hickey, "Use of Passive Resolution Passive Soil Gas Analyses To Characterize Sites Contaminated With Unknowns, Complex Mixtures, Amd Semivolatile Organic Compounds", Hazardous Material control, July/Auguest, 1991.
11. California Regional Water Quality Control Board, "Work Plan Requirements for Active Soil Gas Investigation Well Investigation Plan", 1993.
12. N. Tillman, K. Ranlet, T.J. Meyer, "Soil Gas Surveys : Part I"Pollution Engineering, July, 1989.
13. "ASTM Standards Ground Water and Vadose Zone Investigations", ASTM, Second Edition, 1994.
14. Donn L. Marrin, "Soil Gas Analysis of Methane and Carbon Dioxide:Delineating and Monitoring Petroleum Hydrocarbons" Proceedings, NWWA Conference on Petroleum Hydrocarbons and Organic Chemicals in Ground Water, November 17-19, 1987.

- 15.William B. Kerfoot "Advective Flux Probes for Enlarging the Range of Soil Gas Analysis" Hydrocarbon Contaminated Soile", Volume 1 Lewis Publishers, Inc., 1991.
- 16.Douglas G. Schuring "Soil Gas Testing-A Possible Alternative to Conventional Monitoring Methods" Hazmat World, August, 1989.
- 17.Lule R. Silka "Simulation of Vapor Transport Through the Unsaturated Zone-Interpretation of Soil Gas Surveys" GWMR, Sprign, 1988.
- 18.Dan Millison, Barbara Marcotte, Caroline Rudolph and Karen Randles "Aplications and Comparision of Soil Gas, Flux Chamber and Ambient Air Sampling Results to Supprt Risk Assessment at a Hazardous Waste Site".
- 19.Syed S.H. Rizvi and Stephen J. Fleischacker "Determination of VOCs in Subsurface Soile Using Soil Gas Sampling : A Case Study" Hazardous Material Control, March/April, 1991.
- 20.蔡文田「含氯有機溶劑之毒性及新陳代謝機制」工業污染防治,第11卷,第3期,1991。