

第一章 緒論

1.1 研究背景

早期國內加油站設置規範並不完善，且土壤地下水污染的防治觀念不如歐美等國家。隨著各行各業發展以及民生上的需求，國內的加油站數量成長至今已不下2600多家加油站。根據行政院經濟部能源局統計，全臺灣由民國76年582座加油站，至民國100年7月營業中加油站已增加為2627多站(不含自用及整修中之加油站)。當老舊的加油站發生儲油設備的鏽蝕、損壞等狀況時候，產生的油品洩漏經常直接造成地下不飽和層、地下含水層與地下飽和層的污染，且隨著地下水位的升降與水力梯度的帶動而使得污染範圍更為擴散。若以平均每一間加油站含4座地下儲油槽進行估算，全臺各地至少有10508座地下油槽，其中有部分設置時間已超過20年。(土污基管會，2011)

根據美國賓州環境資源部(Pennsylvania Department of Environmental Protection) 研究，地下儲油槽的洩漏機率與其埋設年代成正比，設置10年以上的儲油槽發生洩漏機率為46%；而15年以上者，其發生洩漏之機率更達71%以上。(黃冠良等，1993)為了減少儲油槽及配置管線的可能洩漏所造成之污染災害及損失，對於污染物的傳輸與擴散以及年代較長的儲油槽，我們必須掌握其特性，設置相關的監測設備與規範的訂定，早期發現污染，並且防範及控制污染的擴大。

為因應國內加油站所衍生的問題，經濟部於民國82年9月10日第一次發布加油站設置規則後，由原有之全文27條條文逐年增修條文至民國97年12月25日止全文37條條文(經濟部工業局，2008)。加油站土壤及地下水污染的問題早已成為環保主管機關日益關切之問題與施政重點，如今全球環保意識抬頭，是否能有效掌握加油站土壤及地下水污染的問題並予以整治考驗著相關單位及專業人才的能力。

1.2 研究目的

於本研究中希望透過數值模擬軟體TMVOC 模擬加油站之汽油槽洩漏於土壤與地下水中之傳輸而獲得以下資訊：

1. 整體評估加油站監測方法之有效性。
2. 評估季節性地下水位變動對於土壤氣體與水中溶解相傳輸之影響。
3. 遲滯現象的影響。

1.3 研究方法與流程

油品污染礙於法規與經費之問題，所以無法進行現地實驗；若於實驗室內進行則複雜難以進行，且危險性較高。因此本研究係以數值模擬來探討加油站監測之問題。汽油污染物是以多相系統方式來傳輸，而目前一般商業軟體中可模擬多相流與異質性土層之數值模擬軟體就屬TOUGH2 系列之功能較完整。其中，又以TMVOC 為較新版之模擬軟體，且操作性能與功能較符合本研究，因此本研究選用TMVOC 此套數值模擬軟體來進行污染物傳輸模擬。

本研究中，首先對加油站進行土層參數、油槽之數量、滲漏狀況與現有之監測數據進行資料蒐集，並進一步將所獲得之場址資訊輸入TMVOC 內進行場址模型的建立。依據地下水層狀況建立地下含水層與水力梯度模擬出穩態之初始狀況，再以汽油洩漏速率(R)、汽油洩漏時間(T)，同時包含地下水位隨時間之升降、且加入遲滯現象的比較。最後進行結果分析兩監測井之有效性評估。研究流程步驟如圖1-1所示：

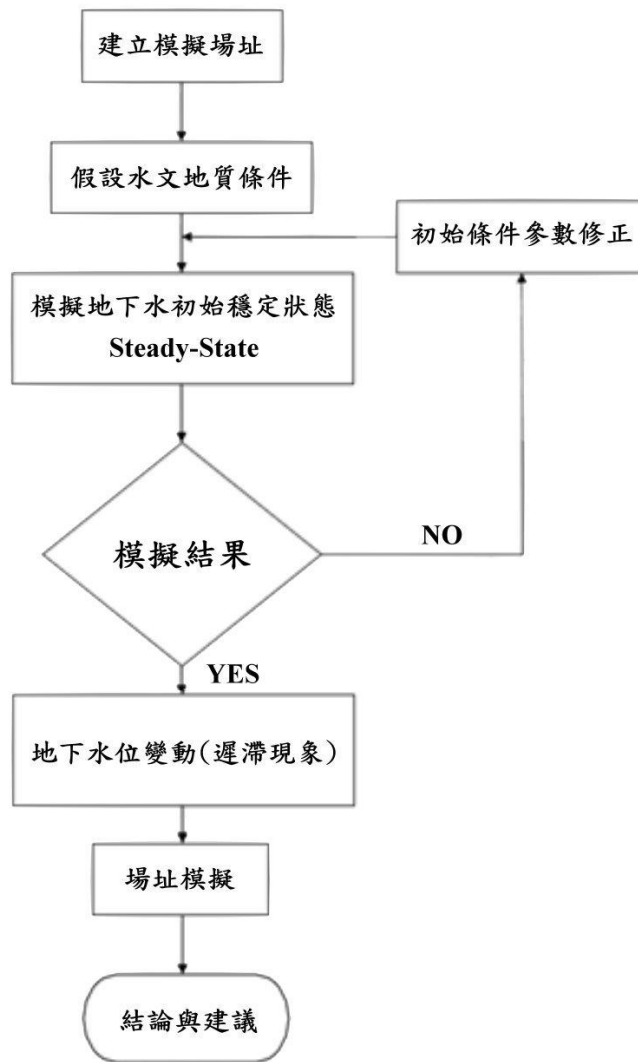


圖1-1 研究流程圖

第二章 文獻回顧

隨著工業及各行業科技日新月異的發展，卻也造成了不少後遺症，帶來了不少負面產物，無論是電子家電產品、半導體產業、石化工業…等等。皆造成了環境的負擔，多數污染物質如石化產品、汽油、柴油、三氯乙烯(Trichloroethylene, TCE)、四氯乙烯(Tetrachloroethylene, PCE)、三氯乙烷(Trichloroethane, TCA)等有機溶劑。

本章節欲探討當加油站發生油品(汽油)洩漏 (spill) 之後，隨著季節性降雨造成地下水位的波動，造成其污染物之傳輸、分佈狀況以及監測的效果。汽油屬於比水輕非水相液體(Light Non-Aqueous Phase Liquid, LNAPL)之一種，為複雜碳氫化合物，洩漏至地表下，由於土壤組成的複雜性，加上氣候因素導致地下水位的升降也使得油品在土壤孔隙中的分佈更難以處理，另外本研究也加入了遲滯現象，討論其分析結果差異性。

汽油，為石油衍生出來的一種液態混合物，主要為內燃機燃料，多為複雜碳氫化合物，不可再生能源，通常會加入異辛烷、苯、甲苯等來提高辛烷值。

2.1 加油站污染

2.1.1 國外加油站污染情形

美國政府於 1984 年訂定「資源保育及回收辦法」(Resource Conservation and Recovery Act, RCRA)，明確要求環保署(Environmental Protection Agency, EPA)及州政府制定法規，規範儲油槽業者及使用者，若發生洩漏污染之情事，須對其負責，完成清理及整治。並於 1988 年 12 月公佈「40 CFR PART 280-Technical Standards and Corrective Action Requirements for Owners and Operators of Under-ground Storage Tanks」，規範地下儲槽系統設置及監測辦法。此外，截至 1998 年美國環保署已確定有 10 萬個儲油槽發生洩漏的情形，並且完成整治的油槽數量遠少於新發現的洩漏量。

2.1.2 國內加油站洩漏情形

近年來國內科技不斷進步，環境保護的議題逐漸受人們的重視，但歷年下來各地接二連三發生儲油槽以及加油站的洩漏問題，嚴重影響其鄰近居民的安危，令人憂心忡忡，至 2011 年 9 月為止，全台約有 2600 多家加油站，環保署已將其中 138 站公告列為污染場址，其中有 16 站為污染情節較嚴重知「整治場址」。

此外，環保署近日也公佈國道高速公路沿線 14 處服務區中，當中有 27 站加油站的土壤及地下水污染嚴重，27 站中有 7 站檢測出污染物，其中 5 站超過土壤污染管制標準，2 站超過土壤及地下水污染管制標準。

早年加油站依據「加油站設置管理規則」設立，設施要求不夠嚴謹，民國 89 年以後土污法制訂之後強化管理，對於管線、油槽材質及空間設計皆嚴格要求，但超過 10 年的老舊加油站，當初設計之時大多未做好周詳的規畫，尤其加油泵島區管線老舊鏽蝕，容易發生洩漏情形。洩漏問題日益嚴重，但行政單位也積極進行補救辦法，因此也有不少加油站已進行整治工作、進行適當的措施並且完成改善及解除列管。

2.1.3 加油站油品污染

石油及相關化學產物污染可能隨處可見，我們大概能夠將其污染源簡單歸類成兩個部分：(1)油品類的儲存處，如加油站、港口、火力發電廠等。(2)上述地方的設備及埋藏管線。

儲油槽有多種型式(如圖 2-1、圖 2-2)，基本上可分為地面儲油槽及地下儲油槽兩種。而加油站儲油槽多採用地下儲油系統 (Underground Storage Tank System, USTs)。圖 2-3 為加油站常見之污染，此外，加油站潛在污染源之可能為地下儲油槽及卸油、出油管線，其主要污染途徑為下：

1. 油槽鏽蝕破裂可能因地下儲槽體使用較差的材質，或儲槽年限過常導致保護系統失去其功能，進一步造成油槽鏽蝕、破裂，污染土壤及地下水體。

2. 關連管線洩漏

管線表面無適當的防腐蝕材料包覆，或於兩管線間連接處鬆脫造成污染。

3. 油罐車卸油油品殘留地面

油罐車洩油時不經意的溢出油品，若加油站本身並未有適當防護措施來收集溢出之油品，油品滲入地下便會造成其污染。

4. 加油機過濾器更換殘餘油料滲入地下

加油站業者於更換過濾器和清潔網時，沒有使用標準廢油回收桶收集殘餘油料，並將溢出之油料輕除，導致油品滲入地下。

5. 加油作業因二次加油造成油品溢出至地面，或因油氣回收管路進油阻塞導致加油機流量異常產生濺溢。加油站區加油過滿或加油槍滴油造成地面積油流入地下水或土壤中。



圖 2-1 位於地面油槽(台灣工業文化資產網，2009)



圖 2-2 位於港口之油槽(交通部觀光局，2010)

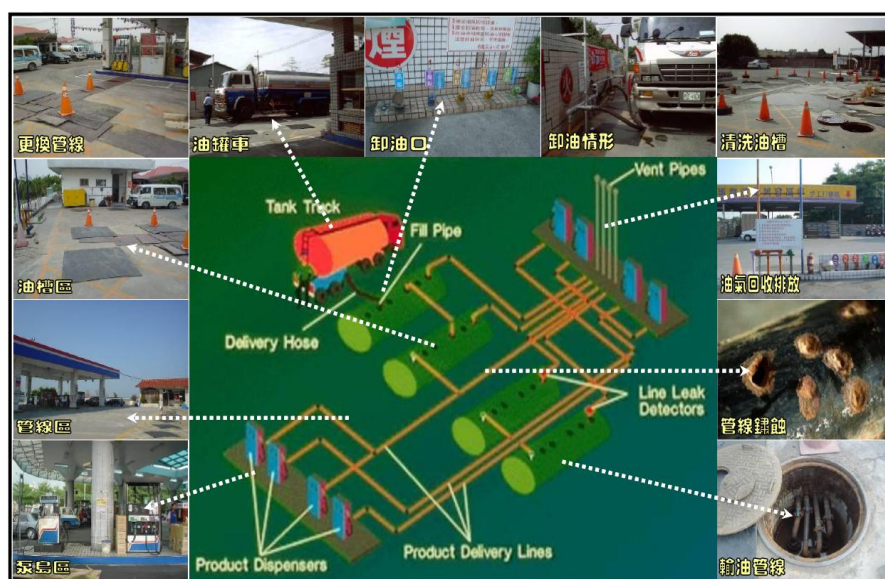


圖 2-3 加油站常見污染途徑(環保署，2006)

2.1.4 汽油種類及特性

汽油是經由石油分餾而成，其主要成分為烴類混合物，如正辛烷(n-octane)，沸點範圍為 30 至 200 度，一般俗稱的汽油並非完全經由石油分餾，同時包含了石油裂解、汽油重組或是人工合成。汽油的種類可分為以下幾種(林百福，2001)：

- 一、直餾汽油(Straight run gasoline)，由蒸餾塔中直接蒸餾冷凝而成，溫度範圍 37°C 至 224°C。
- 二、分裂汽油(Cracked gasoline)，石油經過蒸餾法煉製後的蒸餾油，在高溫高壓下分解重烴之後，再重組較輕的烴而製成的汽油，或用觸媒分裂法(Catalytic cracking)製成。此汽油沸點高，揮發性差，抗爆震效果較佳。
- 三、它種汽油：天然汽油(natural gasoline)，氫汽油(hydrogenation gasoline)，合成汽油(synthesis gasoline)。
- 四、混和汽油(blend gasoline)，將上述前三類所述不同種類的汽油混合而成，今日汽油多屬此類，且可加入不同之添加劑(如抗爆劑)。

今日的汽油經過不斷的研究與改進，目前公認較適用於汽油添加的化學物質為甲醇與異丁烯所提煉的甲基第三丁基醚(Methyl Tertiary Butyl Ether, MTBE)，除此之外，尚有一種要 MTBE 外在汽油中還有另一重要摻料稱為 BTEX，是苯(Benzene)、甲苯(Toluene)、乙苯(Ethylbenzene)、及二甲苯(Xylene)等四種化學物質合起來的簡稱，其基本物理化學性質如表 2-1 所示(環保署，2011)。

一、苯：

常溫下為無色並具刺激性味道之氣體，熔點為 5.5°C，沸點為 80.1°C，二次世界大戰前，苯由焦碳(coal tar)於隔離空氣高溫下形成，戰後苯多由石化工業提煉取得苯及甲苯，由於兩者可提高辛烷值，多用於添加至汽油中。此外，苯也是許多有機化合物的製造原料，亦是良好的溶劑。醫學證明苯為致癌物質，因此因減少接觸。

二、甲苯：

甲苯是一種澄清、無色的液體，具有明顯的味道，常與苯、二甲苯添加到汽油中。甲苯會從原油與妥路香脂(tolu)樹自然散發出來，也是以原油提煉汽油與其他燃料、以煤製造焦煤與製造苯乙烯過程中產生的副產品。其用途是製造塗料、塗料稀釋劑、指甲油、漆器、黏著劑和橡膠，也可用於印刷與皮革鞣製過程等。甲苯對健康的影響以腦部最為受關切，甲苯會引起頭痛、恍惚與喪失記憶；是否會引起這些腦部症狀視其暴露量與暴露期的長短而定。但是在職業暴露與動物研究顯示，甲苯不會引起癌症，國際癌症研究署部尚未將甲苯歸類為致癌性物質，於國內環保署也決定不將甲苯歸類為致癌性物質。

三、乙苯：

乙苯為帶有香味的無色液體，以 15-20%的濃度存在於二甲苯混合物中，此混合物常被應用於油漆工業、殺蟲藥劑的噴灑和汽油混合物中。乙苯常做為生產苯乙烯和苯乙酮的溶劑，並可為生產瀝青與石腦油的成分。

四、二甲苯：

由粗製二甲苯分餾而得，為無色具臭味，可溶於己醇、己醚等有機溶劑，並具有毒性之液體。二甲苯主要是用於製造殺蟲劑，以及藥物、清潔劑的成分，並且為墨水、膠黏劑、油漆和繪畫顏料的溶劑。含有二甲苯的石油蒸餾液，通常被廣泛並且持續增加地使用在混合汽油上。三種二甲苯的同分異構物，都分別被當作許多不同化學藥品的原料。

表 2-1 BTEX 物理化學基本特性

物理化學特性	苯 (Benzene)	甲苯 (Toluene)	乙苯 (Ethylbenzene)	二甲苯 (Xylene)
分子式	C ₆ H ₆	C ₇ H ₈	C ₈ H ₁₀	C ₆ H ₄ (C ₂ H ₃) ₂
分子量 (mg/mole)	78	92	106.17	106
熔點(°C)	5.53	-95	-95	-25.2
沸點(°C)	80	111	135.2	144.4
密度(g/mL)	0.876	0.866	0.867	0.868
溶解度(mg/L)	1,780	500	150	150
沉積物-水分 配係數(K _{oc})	97	242	622	570
辛醇-水分 配係數(K _{ow})	135	540	1,410	1,320
蒸氣壓 (mm Hg)	76	22	7	5
半衰期 (T _{1/2}) (day)	5	4	3	7
亨利常數 (Pa·m ³ /mole)	562	673	864	493

(經濟部工業局， 2007)

汽油是由很多各自具有不同之揮發、吸附、生物降解、溶解度等性質所組成，而不同之成分亦有不同之相態，因此若要以數值模擬來表現汽油之多相傳輸行為則勢必需簡化汽油之組成物質(Fagerlund and Niemi, 2003)。Gustafson (1997)則以總石油烴標準法(TPHCWG)，將汽油成分中的化學性質與物理性質相似者劃分，再依據等碳數(Equivalent Carbon Number, EC)將汽油分類成八個餾分，另 Cline et al. (1991)也曾對無鉛與含鉛汽油成分進行分析如表 2-2。

表 2-2 無鉛與含鉛汽油組成成份

組成物	無鉛 ¹	含鉛 ¹
直鏈烴(Normal /iso-hydrocarbons)	55	59
異戊烷(Isopentane)	9-11	9-11
正丁烷(n-butane)	4-5	4-5
正戊烷(n-pentane)	2.6-2.7	2.6-2.7
芳香烴(Aromatic hydrocarbons)		
二甲苯(Xylenes)	6-7	6-7
甲苯(Toluene)	6-7	6-7
乙苯(Ethylbenzene)	5	5
苯(Benzene)	2-5	2-5
萘(Naphthalene)	0.2-0.5	0.2-0.5
苯基(b)芘蒽 (Benzo(b)fluoranthene)	3.9 mg/L 1.8 mg/L	3.9 mg/L 1.8 mg/L
蒽(Anthracene)	5	10
烯烴(Olefins)	5	5
環烴(Cyclic hydrocarbons)		
添加劑(Additives)		600 mg/L
四乙鉛(Tetraethyllead)		5 mg/L
四甲基鉛(Tetramethyllead)		210 mg/L
二氯乙烷(Dichloroethane)		190 mg/L
二溴乙烷(Dibromoethane)		

¹ 為體積百分比

本表摘自 Cline (1991)

2.2 加油站監測

加油站洩漏原因甚多，且當油槽及管線埋設於地下，發生洩漏時難以立即察覺，待發現時往往污染程度已無法掌握，污染發生後續的控制及整治問題更令人感到棘手，如能及早發現或偵測到場址洩漏程度及污染範圍，將有助於日後的控制及整治。

行政院環保署依據水污染防治法於民國91年12月訂定「防止污染地下水體設施及監測設備設置管理辦法」，但為建全防止污染地下水體設施與監測設備之設置與管理及完備法令未周詳之處，又於100年1月14日訂定「地下儲槽系統防止污染地下水體設施及監測設備設置管理辦法」修正條文，全文21條，共修正20條及新增1條。其中第八條「地下儲槽系統應依下列方式之一，進行監測並記錄，其監測範圍應包含儲槽區、管線區、加油泵島區」：

1. 密閉測試。
2. 土壤氣體監測。
3. 地下水監測。
4. 槽間監測。
5. 其他中央主管機關核准之監測方式。

其他施作原則及項目分別於以下幾點概述。

2.2.1 監測系統

一、土壤氣體監測

汽油為高揮發性物質，因此於地下儲槽或其它設施下的不飽和土層皆以偵測土壤中的油氣濃度為主，監測設施多為土壤氣體監測井(Vapor Monitoring Well, 測漏管)，量測其管內油氣濃度變化藉以判斷是否發生洩漏之情形。原法令規定土壤氣體監測方法進行監測者，應每月實施一次並記錄之，今日若委託檢驗測定機構進行之土壤氣體監測，自民國 102 年 1 月 1 日起，應每四個月實施監測一次並記錄之。

二、地下水監測

當加油站區內之油品污染物通過不飽和層到達飽和層時，會有部分溶解於地下水體中，因此於飽和層的監測項目則改以測地下水體中之含苯濃度。而以地下水監測方式監測者，應每月實施一次並記錄之，其監測項目為浮油厚度，或直轄市、縣(市)主管機關指定之項目。自民國 102 年 1 月 1 日起，應每年實施監測一次並記錄之，其監測項目為苯、甲苯、乙苯、二甲苯及柴油總碳氫化合物或直轄市、縣(市)主管機關指定之項目。

三、槽間監測

加油站地下儲油槽區之監測施作應每月實施一次並記錄之，應設置足夠數量的監測井偵測滲漏的發生，每一獨立地下儲槽至少必須設置四口監測井，而一組位於同一開挖坑洞的數個地下儲槽至少必須設置數口監測井。監測井之數量與位置必須由具有執照的技師或地質師設計簽證，並呈報主管機關核准，以確保可有效偵測到儲槽的滲漏。其自行進行之槽間監測，應每月實施一次並記錄之，其監測項目為滲漏油品。委託檢驗測定機構進行之槽間監測，自民國 102 年 1 月 1 日起，應每 4 個月實施監測一次並記錄之，其監測項目為滲漏油品。

2.2.2 氣體監測井敏感度

為了更加了解油品洩漏與蒸汽濃度之間的關係，Weber and Schville (1989)以模擬軟體 CFEST(Contaminant Finite Element Solute Transport)注入以甲烷、丁烷與 TCE 所混合之污染氣團，模擬汽油揮發後其污染氣團於不飽和層之傳輸，其模擬結果驗證了 Geonomics (1988)於實驗現地所獲得之結果「如回填於油槽區之回填材為低透水係數者，其汽相濃度消散之速率非常緩慢」。由於蒸汽相的逸散速率非常緩慢，因此使得該區域之污染濃度長期維持於高值，使得難以區分該區之污染原因是因洩漏或溢流所導致，使得分析背景濃度的變化較為困難，而對於非均質之土壤亦會發生這類難以辨識之困難。

Weber and Schville (1989)模擬之結果(如圖 2-4)可知，對於經驗法則使用之正確性須根據可接受之最大洩漏量與最大污染濃度含量管制標準。由圖 2-4 可發現在洩漏速率為 0.2 gal/h 之情況下，距離洩漏點外 20 英尺處氣體濃度達 1 % 時所對應之洩漏時間約為 9 天；而氣體濃度達 10 % 所需之洩漏時間則約為 40 天。而若於相同之洩漏條件下，將測漏管距離增加至 30 英尺處，則氣體濃度達 1 % 所需之時間約為 18 天；對於氣體濃度為 10 % 而言，則是於模擬時間 80 天內無法到達。以較低之氣體濃度門檻值或者使測漏管距離洩漏點較近之情況下，其兩種情況所對應之洩漏時間均較短，即可以減少洩漏量與污染程度。

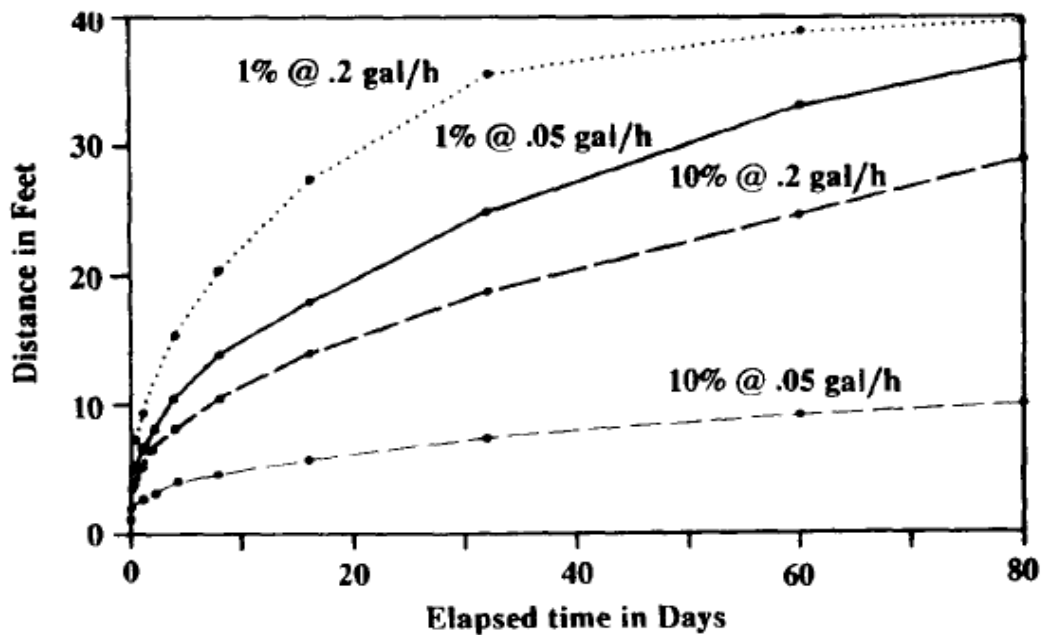


圖 2-4 0.05 與 0.2 gal/hr 油品滲漏造成之油氣濃度 1% 與 10% 之鋒面移動距離與時間曲線(Weber and Schuille, 1989)

於 Weber and Schuille (1989) 之研究結果可知，若沒有定量的量測洩漏速率是無法制定一套較佳效果之監測系統，因為缺乏了解污染源之特徵即使知道偵測設備的性能與靈敏性也是難以設定確切的污染濃度警示值。另外於圖 2-4 中可發現在油品滲漏速率為 0.2 gal/hr 且於洩漏後 30 日時進行監測，則若油氣濃度警示值採較高標準者(1%)其氣體測漏管的有效監測範圍較廣可達 35 ft(約 10.8 m)；若油氣濃度警示值採較低標準者(10%)其氣體測漏管的有效監測範圍較差僅可達 18 ft(約 5.5 m)，因此若氣體監測井於配置時採較大之間距或油品實際發生洩漏之速率較小時，則會延長氣體監測井測得油氣濃度達(10%)之時間，因此可知氣體濃度標準值與測漏管之間距為成反比之關係。

2.3 季節性地下水位變動對於污染物之影響

2.3.1 污染物傳輸方式

純有機污染物質其特性為難溶於水，會獨自形成一分離相的液體，通稱為非水相液體(Non-Aqueous Phase Liquid, NAPL)而可依其比重大小分為兩類：密度較水低者，會浮於水面上者稱為 LNAPL(Light Non-Aqueous Phase Liquid)如：汽油、柴油各類機油等油品；而密度大於水，會沉於水面下者，稱為 DNAPL (Dense Non-Aqueous Phase Liquid) 如：三氯乙烯(TCE)及四氯乙烯(PCE)等。

當發生純有機污染物質污染時，污染物會經由土壤孔隙往下游或更深層之土層傳輸。於污染物往更深層土層傳輸時過程中會先經由不飽和層，再到達地下水位面下之飽和層；而不飽和層(Unsaturated Zone) 一般可定義為包含固態相、液態相及氣態相等三相之系統，亦可稱為通氣層(Vadose Zone)，因為於此層中的毛細水緣層(Capillary Fringe)雖然位於地表水位以上，但因毛細力的作用使得此層的含水比接近飽和，故以通氣層來描述之。

由圖 2-5 中可以看出當 LNAPL 通過不飽和層向下傳輸時，有一部份會於土壤孔隙中揮發再逸散至地表，有部分則會吸附在土壤有機質之表面，而其餘繼續往下傳輸之 LNAPL 當遭遇到地下水層時則會向周遭擴張，形成一層薄浮油相。浮油相的傳輸有部分會殘留於不飽和層的孔隙中，然而這些殘留的油分子會逐漸不斷的溶解至地下水中且速度極為緩慢，除非使用界面活性劑(Surfactant)或以熱蒸汽灌注降低毛細力作用，讓油分子可以隨著地下水流動，否則這些油粒的存在就是二次污染來源，會隨著地下水位面的升降而持續擴散污染範圍。

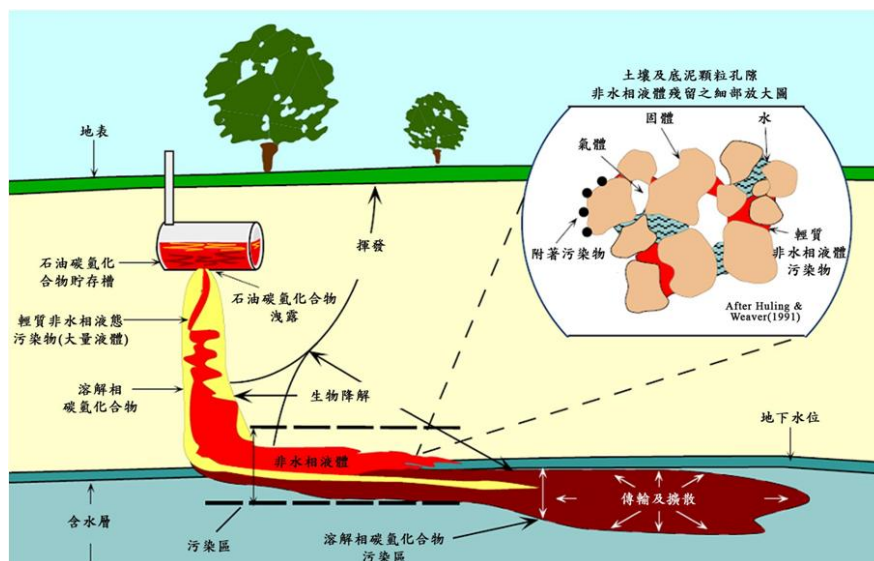


圖 2-5 石油碳氫化合物於土壤地下水中分佈與傳輸示意圖(經濟部工業局，2007)

當 LNAPL 污染物通過不飽和傳輸至飽和層時會以兩種型態存在，一為吸附態，一為溶解態；吸附於土壤孔隙中的液態 LNAPL 油分子會隨著地下水位的變動，使得部分液態的 LNAPL 以殘餘飽和度被困在地下水位面以下的土壤孔隙中，則 LNAPL 就以三態存在；而溶解於地下水中的污染物傳輸的方式則包括：平流(Advection)、機械延散(Mechanical Dispersion)、擴散(Diffusion)。平流是指污染物隨著水分子因水頭(地下水位)差異而帶動，污染物隨著水分子由高地下水位往低地下水位方向運動；擴散是污染物分子因濃度差異而驅動，污染物從較高濃度往較低濃度區域移動；機械延散則是因為地下水流動時，微觀真實的流速差異和流動方向不一，導致污染物水分子和污染物沿水流方向(Longitudinal)和側向(Transverse)方向散佈。

2.3.2 地下水位概述

一、地下水位變動機制

五種主要機制包括：(1)地面水體對地下水位之影響；(2)蒸發散作用對地下水位之影響；(3)暴雨對地下水位之影響；(4)地層突增荷重對地下水位之影響；(5)潮汐變化對地下水位之影響。(董天行，2006)

(1)地面水體對地下水位之影響

陸地上之地面水體一般包括河川、湖泊、水庫…等。而地面水體與含水層(非受壓含水層)之間的交互作用在地面水體之水量平衡分析以及含水層局部範圍之流向變化上扮演相當重要的角色(Siegel, 1988)。

(2)蒸發散作用對地下水位之影響

季節性為地面水體與其含水層水位變化的主因，如降雨及非降雨造成水位的抬升或蒸發作用。此外，監測井的鄰近若有植物存在，其蒸散作用造成非受壓含水層地下水位的異常變化，尤其乾季特別嚴重。Meyboom (1967) 觀察加拿大西岸河谷區附近的監測井之長期水位變化，該處監測井附近植林叢生。連續 9 天的觀測結果發現，白天期間因植物的蒸散作用造成地下水位持續下降，但一到夜間，因植物葉孔的關閉又導致地下水位逐漸回升，每天均呈現週期性的變化。由於白天期間因氣溫上升，又屬乾季季節，未飽和層之含水量因蒸發作用而減少，植物根部會吸收未飽和層底部之毛細帶水分，並造成地下水位相形降低；夜間時則因植物停止根部吸收水分，其周遭含水層之水位因上游之地下水持續滲流補注而又上升。因此植物的蒸散作用會直接影響到周遭含水層之水位變化，特別在植物生長期與乾季時期，具有相當程度的影響。

因此一般的水位調查，建議盡量不選取植物叢生區附近的監測井，或避開植物生長期、枯水期等，以免誤判整體之流向。但若植物叢生區附近屬於潛在污染區下游之調查範圍，則建議利用長期水位計紀錄植物叢生區附近監測井之長期水位變化，以評估可能的流場變化。

(3) 暴雨對地下水位之影響

暴雨發生會造成非受壓含水層水位劇烈的攀升，但實際上水位的上升並非來自地表入滲的補注，而是因未飽和層中空氣的推擠壓迫所導致之水位上升 (Bianchi and Haskell, 1966; McWhorter, 1971)。

上述之地下水位攀升與地下水之補注無關，但因伴隨降雨事件的發生，因此常被誤解。基本上，若長時間且大範圍的降雨會造成區域性流場整體地下水位之抬升，整體之流場將不致有太大的改變或不會有影響。但突然的暴雨事件或局部範圍的降雨，則很可能造成上述誤判的情形，亦即監測井之水位很可能不具代表性，特別因地質異質性的變化，未飽和層入陷空氣多寡不一，以及地質材料的粗細變化，均將造成不同地區會有程度不一的水位上升變化。而這些水位突升的變化會在幾小時或幾天之後恢復原始之水位面，因原本入陷的空氣會逐漸往四周擴散而恢復成一大氣壓。

(4) 地層突增荷重對地下水位之影響

一般地層荷重可包括長時間與瞬間的荷重，而其荷重會對受壓含水層之壓力面造成影響。長時間的荷重如建築物，基本上因荷重持續存在，因此其對流場之影響亦為持續性，不致造成水位異常的變化。而會造成水位誤判的原因主要來自突然的或瞬間的荷重變化，例如火車經過、結構物的爆破、地震等，均會造成受壓含水層水壓瞬間的震盪變化。結構物的爆破或地震所產生之震波，則會同時影響地層中的土壤應力與孔隙水壓，而造成水壓面的震盪變化。例如1964年阿拉斯加州的大地震造成了北美地區大範圍受壓含水層壓力面產生劇烈的震盪變化 (Scott and Render, 1964)。

針對受壓含水層的水位調查宜避開上述的突增荷重變化，基於壓力面之回穩需有一段時間，因此建議在突增荷重發生 2~3 小時以後再予以量測，才可取得較具代表性之水位。

(5)潮汐變化對地下水位之影響

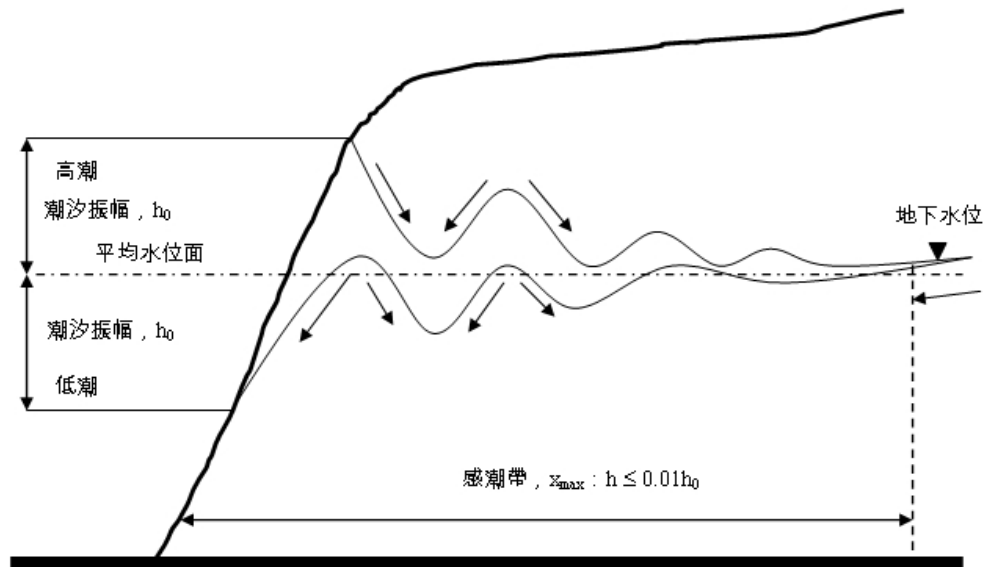


圖2-6 地下水流向受潮汐影響所產生之來回波動示意圖 (董天行, 2006)

h_0 : 潮汐振幅 (L)

x : 監測井與河岸 (或海岸線) 之距離 (L)

t : 時間 (T)

t_0 : 潮汐週期 (T), 為二次高潮或二次低潮的時間差

$$\beta = \sqrt{\frac{S\pi}{t_0 T}} : \text{代表含水層之物裡性質 (1/L)}$$

T : 含水層流通係數, 為水力傳導係數與含水層平均厚度的乘積 (L^2/T)

S : 含水層之儲水係數

濱海地區含水層因受到潮汐週期性波動的影響, 會在距離海岸特定範圍內的含水層 (包括非受壓與受壓含水層) 造成地下水向海或背海的雙向流動 (如圖 2-6 所示), 此特定範圍稱為「感潮帶」。而感潮帶內的流場變化對濱海地區的地下水污染監測或水位觀測均會有直接的影響。濱海地區地下水受到潮汐波動之影響而呈現水位上下波動的變化, 此波動會沿著含水層向內陸傳播, 而波動的振幅會隨著距離海岸線愈遠而愈小, 在超出感潮帶範圍後的振幅則可忽略。因此位於感潮帶範圍內的地下水污染濃度與流佈會受到潮汐影響而產生變化 (Yim and Mohsen, 1992)。

綜合以上觀念，簡單來說導致地下水位變化的原因有許多種，其中包括來自於自然和人為現象的「非構造因子」，及來自於地質活動和板塊運動的「構造因子」。在非構造因子中的自然現象，包括：降雨、大氣壓力、溫度、地下含水層分部及附近水系的伏流、地潮、海潮、引力、季節變化等；非構造因子中的人為現象，包括人為的抽取與補注等，甚至於地下含水層附近地表負載及震動都可能造成地下水位在井裏的振盪。在構造因子的現象中，則包括：來自於地球組成與大地構造的現象所造成的火山活動與地震事件及板塊運動作用等(劉政，2005)。

地下水位產生變化在非構造因子中，以降雨為最大的影響因子，其次為大氣壓力與潮汐變化。但這些影響因子對地下水位變化的影響，降雨會因區域性地質現象及含水層分布，導致降雨入滲到含水層時，產生遲延的現象。而大氣壓力與潮汐雖能直接影響水位的變化，但都屬長週期的影響，通常需要4至12小時，可參考圖2-7。

自然或非自然之影響機制		受影響之含水層型態	影響期間：短時間/全天候/季節性/長時間	是否受氣候影響
自然 機 制	地下水補注	非受壓含水層	季節性	是
	地表入滲所造成保和層之氣壓變化	非受壓含水層	短時間	是
	蒸發散作用	非受壓含水層	全天候	是
	地面水體周邊之儲水作用	非受壓含水層	季節性	是
	海岸線之潮汐影響	非受壓含水層 受壓含水層	全天候	否
	大氣壓力改變	非受壓含水層 受壓含水層	全天候	是
	地震	受壓含水層	短時間	否
非 自 然 機 制	地表面荷重的影響	受壓含水層	短時間	否
	抽、注地下水	非受壓含水層 受壓含水層	長時間	否
	深井注入	受壓含水層	長時間	否
	人造補注源 (池塘、掩埋場等)	非受壓含水層	長時間	否
	農業灌溉區及排水區 地工排水坑、渠道	非受壓含水層	長時間	是 否

圖 2-7 潮汐變化對水位造成之影響(董天行，2006)

三、台灣地區地下水位變化狀況

地下水位產生變化在非構造因子中，以降雨為最大的影響因子，其次為大氣壓力與潮汐變化。但這些影響因子對地下水位變化的影響，降雨會因區域性地質現象及含水層分布，導致降雨入滲到含水層時，產生遲延的現象。而大氣壓力與潮汐雖能直接影響水位的變化的，但都屬長週期的影響。

遠近地震引所引起地下水位變化之研究(劉政，2005)台灣位於歐亞大陸板塊與菲律賓海洋板塊之碰撞區域，特別是花蓮地區更是位於兩板塊之交接處，所受到板塊碰撞應力更是較其他區域為大，且地震發生頻率也較其他區域為高，此區域之地下含水層應易受大地應力變化與地震的影響。

2.3.3 地下水位變動與 LNAPL 分佈之關係

有機液體之存在使得不飽和層被提升成為一三相液體共存之系統。在典型之土壤系統中，水是溼相(Wetting fluid)，會佔據最小的孔隙。在一含水的兩相系統中，空氣或汽油為非溼相(Non-wetting fluid)，但在三相併存情況下，其溼相之順序(Wettability)為：水、汽油、空氣。

定義上，非水相液體為一不易溶於空氣及水之液體。當少量的 LNAPL 洩漏至地下，其將自行通過非飽和區最後成為殘餘飽和。如果洩漏的量較大，則污染的方向會通過毛細緣層到達飽和區而持續橫向傳輸。

LNAPLs 的流動隨著季節性地下水位的變動而非常複雜。如圖 2-8 (a)，一層浮在毛細緣層表面的 LNAPL，隨著地下水位的下降，這一層動態油體也會隨之下降。當油體液面下降時，一些油會殘留在下降後油體液面之上的非飽和層(vadose zone)。如圖 2-8(b)。當水位上升時，少量的 LNAPL 持續留在飽和區。如圖 2-8 (c)，當地下水位上升時，油體液面也跟著上升。然而，圖 2-8 (c)中，說明殘餘油體遺留在飽和區之中，假設當水位上升的速度大於油體液面時，「口袋狀」(Pockets)裡的自由油體可能會留在地下水位下，地下水及碳氫化合物的流動皆遵循達西定律(Darcy's law)及依循有效的密度、黏滯性及相對滲透性。根據這些因子，任意的碳氫化合物或水可以和水位一同快速升降。

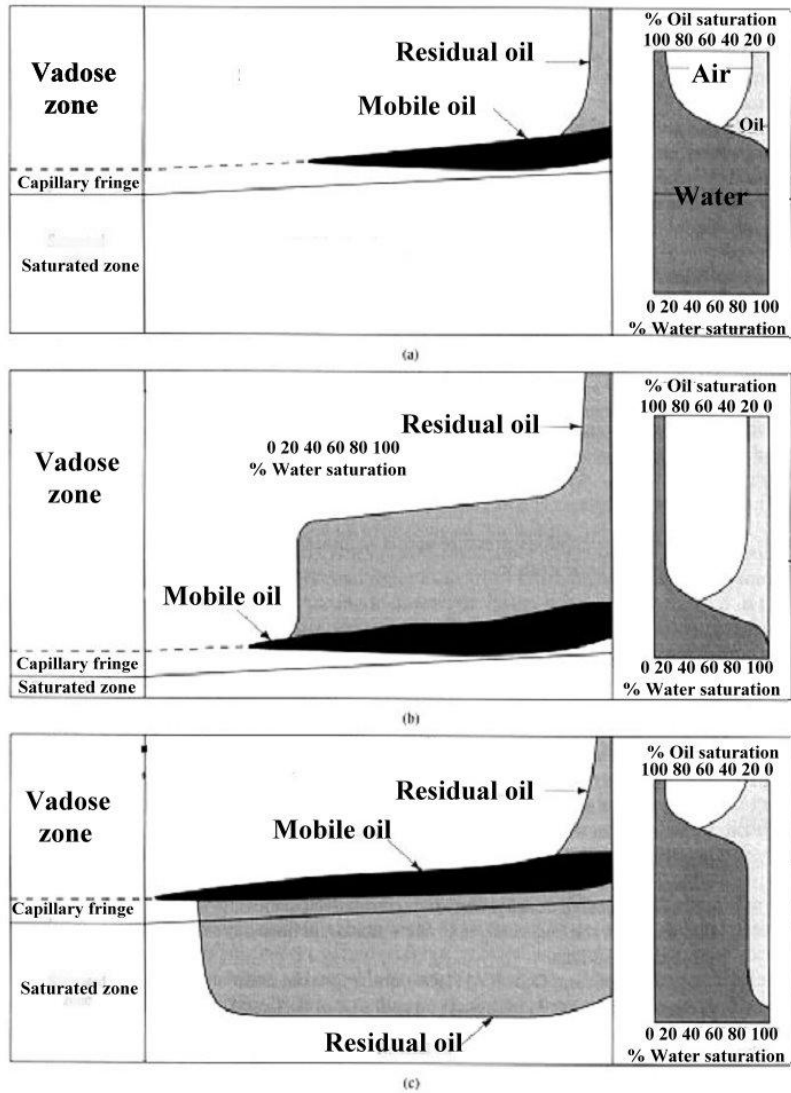


圖 2-8 (a) (b) (c) LNAPL 隨地下水位升降分佈之情形(Fetter, 1999)

Marinelli 及 Durnford(1996)記錄了四點共同觀察現象，由現地的水文地質學家們 (hydrogeologists)使碳氫化合物洩漏並且提供和地下水位升降相關的解釋

1. 監測井可能不會有浮動 LNAPL，即使鄰近的土壤裡已有不少碳氫化合物。

這可能發生在由於地下水位的起伏導致碳氫化合物同時殘留於地下水位以上及以下的土壤孔隙中。

2. 監測井中，浮動 LNAPL 的厚度隨著水位上升而減少。

當水位上升，油體受限於土壤中，因此少許動態油體能夠進入井中。

3. 在監測井中，LNAPL 可能會突然出現或消失其中。

水位突然上升可能會完全困住碳氫化合物，結果使得監測井測不到 LNAPL。

Brooks-Corey 模擬提出，在監測井中累積任何 LNAPL 之前，就會有一個最小量的浮動油體存在，當這個存在的量超過一個定值，井中就會突然測得 LNAPL 的存在。

4. 假設水位驟降至一個前所未有的點位，則浮動的 LNAPL 可能會消失

這可能會導致這個事實，碳氫化合物可能通過土壤的速度變的緩慢，而且其下降的速度並不如水位下降之快。因此這系統便失去平衡，而移動油體明顯的沒有足夠的時間到達新的平衡以及到達監測井中。

在清除 LNAPL 洩降之後，動態的 LNAPL 在撇取井或溝槽中分離，然而，一個完整 LNAPL 的量會殘留在土壤中。揮發性的 LNAPLs 可以透過土壤-蒸汽抽取法系統來分離。然而，非揮發性的產物會留在土壤中。此統計根據 LNAPL 的性質以及土壤的結構紋理。土壤中的油體估計其保留容積範圍，礫石約為 5L/m^3 、粉砂為 40L/m^3 (Testa and Paczkowski, 1989)。許多碳氫化合物會因為土壤中的細菌降解，特別是有氧的土壤。碳氫化合物洩漏使用生物處理法，漫射氣體至土壤中是最有效的系統。(Fetter, 1999)

2.3.4 油品滲漏地下水位變動之相關研究

Lenhard et al. (1989) 即曾以數值模擬初步探討 LNAPL 因地下水位變動而被困住的狀況。而之後 Lenhard et al. (1993) 以實驗量測因地下水位變動被困在孔隙中的 LNAPL。Ryan and Dhir (1996) 探討殘留在孔隙中的 LNAPL 之移動性與 Bond number 的關係。其基本概念與毛細力數類似。只要水流夠快或毛細力可降低，則 LNAPL 被困在孔隙中的機會較小。

Kamon et al. (2006) 利用實驗室管柱試驗模擬一維地下水位變化對苯分布之影響，並以 NAPL Simulator 程式模擬。在修改程式碼之後，NAPL Simulator 模擬地下水位變化後苯的分布正確性較高。

陳培昉(2010)利用 TMVOC 模擬軟體探討加油站滲漏監測的可靠度。結果顯示 TMVOC 模擬相當良好。整體而言地下水位較高者(地表下 2 m)其土壤氣體與地下水體含苯濃度之監測效果均優於地下水位較低者(地表下 5 m)。但研究中對於污染團傳輸路徑受到障礙物阻擋或洩漏點位置發生於油槽底部而言，其整體之監測效果較不理想，建議可以於油槽底部另外增設監測儀器以彌補監測井之監測盲點。研究之結果中發現影響監測井功效之主要控制因子為「洩漏點之位置」。

而為了確保測漏管均能發揮其功效，建議測漏管之設置盡可能的靠近潛在洩漏機率較高之位置。研究中對於不同之地下水位深度均以同樣之土壤管制標準值來判斷其土壤氣體是否達管制標準，未來可以深入研究土壤氣體濃度、地下水體含苯濃度與不同地下水位深度之相互關係。實務上監測井會因積水、有效深度不足等因素，致使無法量測土壤氣體濃度值，而改以其他之監測井內濃度值來判定是否達管制標準，然而該監測井與洩漏點之距離因子尚未被考慮，未來應可以考慮監測井與洩漏點之距離因子。

2.4 非飽和層土壤水特性

2.4.1 非飽和層中液體的貯留與滲流

液體在非飽和層(Vadoze Zone)中的流動機制較在飽和土壤中複雜許多，如液體因毛細現象運動(Capillary Movement)，而使得排水及出水之間上會有遲滯現象(Hysteresis)，即土壤水保持曲線上會有一遲滯區間(Hysteresis Loop)，使液體在非飽和層中模擬及預測難度增加(單信瑜，張良正，2002)。

土壤水特徵曲線在非飽和土壤中水分傳輸的解析非常重要，其特性取決於土壤的含水量及土壤類型等因素。推估與量測土壤水特徵曲線(Soil Water Characteristic Curve, SWCC)或稱土壤水保持曲線(Soil Moisture Retention Curve)，在土壤水平衡中非常重要。SWCC可評定土壤在平衡時之含水量和基質吸力(Matric suction)之函數，以實驗測得，曲線表示之。簡單來說為土壤含水量及張力之關係(Williams，1982)。

2.4.2 土壤水之勢能

水在土壤中的運動可以用勢能來解釋。水的流動便是藉由勢能的高低差來達到平衡。土壤水總勢能(Water Potential)主要由三種勢能所影響(Hillel，1980)：

1. 重力勢能(Gravitation Potential)：地球引力對水分所造成的影響，常定義一高程為參考面，重力勢能為正值，重力勢能和土壤內水分化學及壓力狀況無關，僅和所訂之相對高度有關。
2. 基質勢能(Matric Potential)：土壤水分主要因為土壤基質毛細力和吸附力所產生。毛細作用上升的水分在自由水面之上，低於大氣壓力，造成其壓力為負值。亦稱(Suction)。
3. 滲透勢能(Osmotic Potential)：因土壤水分中的溶質所造成，水分子由高濃度往低濃度方向移動，但其中溶質的離子對水分產生吸力，降低水分移動的能量，因此視為負值。

以上為土壤水分勢能主要影響原因，非飽和土壤中，水分常由毛細力及吸附力所保持，且當靜水壓低於參考值，加上土壤水分含有溶值，使土壤水分總勢能為負值。

2.4.3 土壤水特徵曲線

土壤水特徵曲線在土壤水平衡中是極為重要的一環。SWCC可定為土壤在平衡時含水量和基質吸力之函數，該關係常以試驗測得，並以曲線表示之。簡單而言為土壤含水量及張力關係(Williams，1982)。

根據毛細理論(Corey，1984)，在土壤排水過程中，土壤孔隙中水分會在特定的毛細壓力下排水，而土壤之間孔隙較大，相對應毛細壓力會較小；土壤間孔隙較小排水時，相對應毛細壓力也較大。圖 2-9 為一土壤水保持曲線，其中 θ_s 為土壤在大氣壓力飽和的

體積含水比， h_b 為空氣進入值(Air entry value) 或起泡壓力 (Bubbling pressure)，意指空氣(或非濕相液體)開始進入孔隙的毛細壓力，則為最後殘餘體積含水比(Residual volumetric water content)。

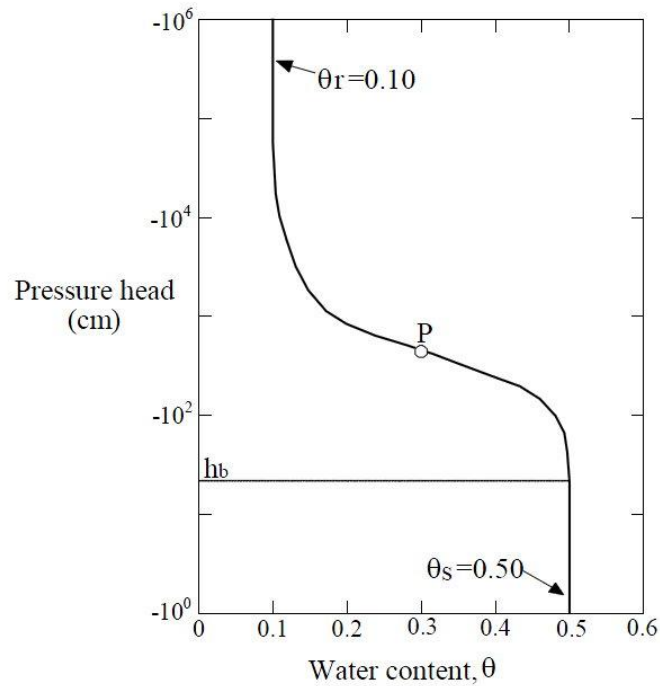


圖 2-9 土壤水特徵曲線

2.4.4 遲滯現象

基質勢能與土壤濕度之間關係，可以用兩種方法獲得之。1.排水(Desorption)，土壤自飽和逐漸加吸力，使土壤慢慢乾燥量測其保持曲線。直至土壤液體不再排出，此時壓(張)力與體積含水比的關係為土壤主要排出曲線(Main Drainage Curve, MDC)。2.吸水(Sorption)，逐漸濕潤乾燥土壤，降低吸力。此時張力與體積含水量的關係，稱為土壤主要濕潤曲線(Main Wetting Curve, MWC)，如圖 2-10。

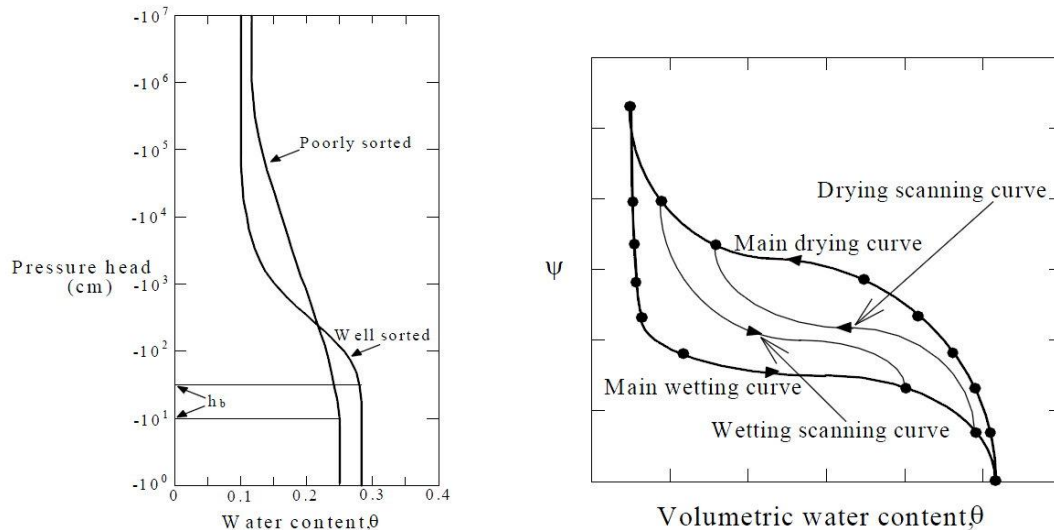


圖 2-10 土壤主要濕潤曲線

如圖 2-8 這兩條特徵曲線並不會相同，在濕潤曲線上的任何一點其含液比都會比排出曲線上對應相同張力情況下的含水比來得低。當土壤在排水過程中，可重新進行吸水作用，此時特徵曲線會由主要排出曲線沿著掃瞄曲線到達濕潤曲線；同理，在濕潤過程中也可再進行排水作用，此時特徵曲線會由主要濕潤曲線沿著掃瞄曲線到達排出曲線。主要造成遲滯曲線的原因有三項：(Hillel, 1982)

1. 由於土壤孔隙的大小及幾何形狀成不規則，因此在相同的含水比下有不同張力 ($P \propto 1/r$)，即墨水瓶效應 (Ink bottle effect)。
2. 液體和土體顆粒間的接觸角會視液體在土體是排出或進入的情況而異 (Receding or advancing)，接觸角在濕潤情形 (Advancing) 時會較排出時大，因而張力較小 ($P \propto \cos \alpha/r$)。
3. 當土壤在濕潤時，濕相液體 (如水) 會取代非濕相液 (如空氣、有機液)，但同時也會將非濕相亦給牽絆住 (Entrapped)，使得濕相液含液量因此減少，也因此原因，常使 MWC 在張力為零時常不能回到 MDC 的起點，此差值即為殘餘非濕相含量 (Residual nonwetting fluid content)。

此外，土壤的乾縮 (Shrinking) 及膨脹 (Swelling)，乾濕速率不同。孔隙表面的粗糙程度等都會影響土壤遲滯效應 (Davidson et al., 1996; Demond and Roberts, 1991)。

在非飽和層中，因土壤水分會因乾燥、濕潤交替歷程而產生遲滯現象，但大部分的研究為避免複雜計算而忽略。但在入滲及蒸發兩者交替的歷程是不能忽略 (Royer and Vachaud, 1975)，一般在土壤水分估計計算上，多未能真實反應土壤水分變化情形，要準確計算必須在乾燥、濕潤交替歷程中考慮遲滯現象 (Beese and van der Ploeg, 1976)。在排水過程中，受到空氣進入值影響甚大，若土壤含有較大空氣進入值時，在排水初期會有基質水頭變化而含水量不變之情形，此現象使得一般預測值在低負基質水頭會有高估含水量現象。

2.5 數值模擬軟體

目前市面可應用於污染傳輸模擬之商用軟體甚多，且所考慮之機制不外乎包括蒸氣、水、NAPL 在水中之溶解、NAPL 之多相流傳輸及 NAPL 與土壤顆粒之吸附作用，然而其中土壤孔隙的蜿蜒度、孔隙連續性與吸附性等皆以常數處理，其是否會影響污染物傳輸模擬結果的可靠性還有待研究。而國內外目前常用於污染物傳輸模擬之數值軟體有：MODFLOW、MT3D、TOUGH2、T2VOC、3DFATMIC 等各數值模擬軟體之比較如表 2-7。然而因本研究所欲模擬之污染物為汽油，因此需要能夠自行編輯與新增汽油之有機化學混合物以及汽油於不飽和層中汽、液、NAPL 相之多相傳輸，故本研究選用 TOUGH2 系列中之 TMVOC 數值模擬軟體。

在過去有許多學者也曾模擬多相有機污染物的遷徙且發表了許多論文，如：斯克誠(2002)先以 TOUGH2 模擬五氯酚受熱傳導效應之影響，再以 T2VOC 模擬五氯酚之傳輸，其結果顯示在 100 °C 等溫線以內的五氯酚濃度甚低，表示五氯酚已由吸附相轉變為溶解相；於 100 °C 等溫線外之五氯酚會受到蒸汽之影響而產生推移，若場址之垂直方向滲透係數較高則使得污染氣團易往上移動，高污染區域亦隨之往上移動。顏柏穎(2002)以 T2VOC 模擬水下空氣注入法(Air Sparging)結合氣體萃取法(Soil Vapor Extraction, SVE)受 NAPLs 污染區域之整治成效與分析。

Fagerlund and Niemi (2003)將汽油依等碳數分成 8 個餾分，再以 T2VOC 逐步編輯這 8 個餾分的化學參數，並觀察汽油於傳輸過程中汽、液以及油相的變化。Zandin and Niemi (2003)以 T2VOC 模擬非均質多孔隙介質且考慮入滲水為變動，其 DNAPL 之傳輸影響，其結果顯示污染物所受之影響是由多孔隙介質的非均質性與入滲水的變異性所結合，且會隨著時間尺度而變動。Kererat and Soralump (2010)以數值模擬軟體 TMVOC 模擬苯於傳輸過程中受到阻隔牆之阻礙，且於模擬過程中考慮(1)地下水流為靜止(即無受水力梯度影響)與(2)受水力梯度為 0.017 之影響，結果發現影響污染物擴散因子為土壤滲透係數與水力梯度，此結果可用來作為設計防滲透牆之尺度與性質。

另外在浮油回收模擬的部分，Parker et al. (1994)開發了 ARMOS 數值模式，模擬非拘限含水層中浮油移動和回收，可模擬 LNAPL 在自然梯度或浮動泵(Skimmer pump)抽取下(僅抽 LNAPL 未抽水)之流動。Waddill and Parker (1997a) 對數值模式加以修正，以考慮土壤水保持中遲滯現象對 LNAPL 困在土壤中的效應，並用在以抽水製造地下水位洩降加速 LNAPL 回收之狀況分析。之後 Waddill and Parker (1997b)在 ARMOS 中納入隨機統計分析(Stochastic analysis)評估含水層異質性對 LNAPL 回收之影響。其結果顯示含水層異質性對浮油回收與油品困在土壤中的影響不顯著；利用土壤性質的幾何平均數作為模擬參數可有效評估浮油回收。

Charbeneau 等人(2000)提出兩個浮油回收模擬的簡單模型來模擬抽油井和負壓增強系統(Vacuum enhanced systems)。其模式與 ARMOS 相較更為簡單，且有利於用來作為回收系統的初步設計之用。但此模式僅考慮垂直向平衡，無法真正用來模擬三維的現

場狀況和同時使用多井回收的狀況。

表 2-3 數值模擬軟體比較

軟體名稱	優點	缺點	備註
MODFLOW	<ul style="list-style-type: none"> ● 穩態、非穩態 ● 侷限含水層、非侷限含水層、 ● 地下水系統之外來行為如:抽取井水、注水、蒸發散、區域排水... 	<ul style="list-style-type: none"> ● 僅可模擬水流狀態 ● 模擬污染物傳輸行為須搭配其他軟體。 ● 非飽和區及乾濕轉換時模擬限制多 	常用於模擬地下水流場分布
FEMWATER	<ul style="list-style-type: none"> ● 可模擬不同密度流 ● 對於不規則邊界有較佳之符合能力 	<ul style="list-style-type: none"> ● 僅能模擬簡單之化學與生物動力 ● 於同一含水層中只能設定均質之水力傳導係數 ● 使用介面複雜 ● 不適用於油品污染 	
TOUGH2	<ul style="list-style-type: none"> ● 放射性核種之熱傳模擬 ● 氣相與液相之熱傳現象 ● 可模擬非等溫之多相、多成分之地下水流與溶質傳輸 	<ul style="list-style-type: none"> ● 欲模擬 NAPL 傳輸須搭配其他軟體 ● 使用介面複雜 	主要用於模擬放射性物質
T2VOC	<ul style="list-style-type: none"> ● 地下水層中之傳輸、揮發、溶解與吸附等 ● 可考慮多相系統之傳輸 	<ul style="list-style-type: none"> ● 以積分式有限差分法撰寫，較難符合複雜邊界 ● 使用時須先強制選擇現場模擬型態，有時與現場狀況相差甚遠 ● 模擬污染傳輸時須分階段處理 ● 使用介面複雜 	以 TOUGH2 為藍本改寫
TMVOC	<ul style="list-style-type: none"> ● 多相系統之傳輸 ● 考慮熱傳對於溶質傳輸之影響、VOCs 之吸附、揮發、溶解與生物降解 ● 內建多種 VOC 可供使用 	<ul style="list-style-type: none"> ● 以積分式有限差分法撰寫，較難符合複雜邊界 ● 模擬污染傳輸時須分階段處理 ● 使用介面較 T2VOC 簡便 	以 TOUGH2 及 T2VOC 為藍本改寫

(摘自黃佳雯，2005)

第三章 研究方法

3.1 研究架構

本研究首先針對加油站現場配置建立模擬區域再進行敏感度分析，並以敏感度分析之結果作為建立模擬區域網格之參考依據，完成網格之建立後再建立不同深度之穩定地下水水位狀態，最後於油槽區內進行油品污染物洩漏之模擬，如圖 3-1 所示。

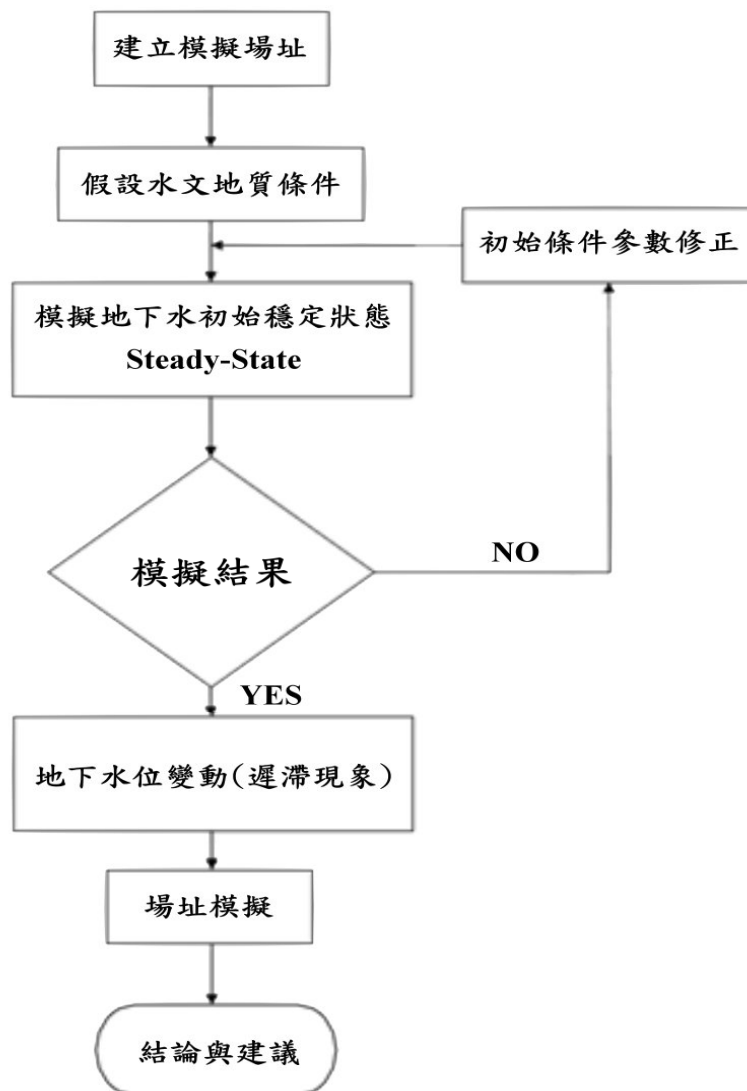


圖3-1 研究架構與方法

3.2 軟體 TMVOC

3.2.1 TMVOC 之組成與相態

在一個由水與空氣所組成的簡單系統中，存在著兩個組成物(水與空氣)因此也會有兩個相(水相與氣相)。而最重要的是，這兩個組成物(水與空氣)可以同時存在於這兩個相中；液相可以由液態水與溶解態的氣體所組成。同樣的，氣相也可以是由氣態空氣與水蒸氣所組成(Pruess， 1987)。

在 TMVOC 中不同的組成是由熱動力條件與相對關係所決定之，流體(液相)可能存在於七個不同相的結合體中，如圖 3-2 所示。箭號是表示相的出現或消失路徑，是依據牛頓-拉夫森(Newton-Raphson)的熱動力條件迭代過程而得之(Pruess and Battistelli， 2002)。

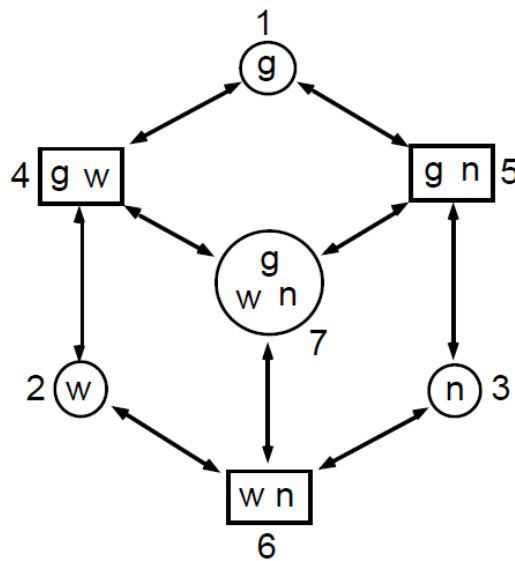


圖 3-2 TMVOC 中相之組成與變化；g-氣體、w-液體、n-NAPL

(摘自 Pruess and Battistelli， 2002)

3.2.2 TMVOC 之質量與能量平衡

在 TOUGH2 使用手冊中記載了一個基礎的質量與能量的平衡方程式，可以式 3-1 描述之(Pruess, 1987)。

$$\frac{d}{dt} \int_{V_n} T^k dV_n = \int_{\Gamma_n} F^k \cdot nd\Gamma_n + \int_{\Gamma_n} q_m^k dV_n \dots\dots\dots(3-1)$$

上式中， V_n 是指在研究的流體系統內的任意之區間體積； Γ_n 有界的封閉曲面面積； k 是用來表示在分析非等溫情況下的質量組成與額外的熱組成； T 是區域內每單位體積的質量或能量累積量； F 是質量或熱通量； q 是指匯和源； n 是表面元素的法線相量； t 為時間。

3.2.3 TMVOC 之空間與時間離散

在 TOUGH2 家族的程式編碼中，其在空間離散的連續方程式是以積分有限差分法 (Integral Finite Difference method, IFD) 來描述之(Edwards, 1972；Narasimham and Witherspoon, 1976)。其適當的體積平均值以下式表示之：

$$\int_{V_x} M dV = V_n M_n \dots\dots\dots(3-2)$$

上式中， M 是體積正規化的量； M_n 是 M 除以 V_n 的平均值。其表面積分近似於平均值除以表面線段 A_{nm} 的離散總和。

$$\int_{\Gamma_x} F^K \cdot nd\Gamma_n = \sum_m A_{nm} F_{nm} \dots\dots\dots(3-3)$$

式中 F_{nm} 是內部法線組成的 F 除以介於體積元素 V_n 與 V_m 的表面線段 A_{nm} 部分之平均值。其離散方法是使用積分有限差分法，而幾何參數與範圍如圖 3-3 所示。

其離散通量可以表示為由平均值除上元素參數 V_n 與 V_m 。再由達西定律我們可以得到從周圍區域 m 流入區域 n 的質量通量 $F_{\beta,nm}^k$ ，可以描寫如下式：

$$F_{\beta,nm} = -K_{nm} \left[\frac{K_{\gamma\beta} \rho_{\beta}}{\mu_{\beta}} \right]_{nm} \left[\frac{P_{\beta,n} - P_{\beta,m}}{D_{nm}} - \rho_{\beta,nm} g_{nm} \right] \dots\dots\dots(3-4)$$

上式中 D_{nm} 代表從區域 n 的中心點至區域 m 的中心點距離； ρ_{β} 代表流體密度； $\beta=1,2,3\dots$ NAPL 代表氣相、液相及非水相液體等成分； $P_{\beta,n}$ 代表流體中各個相的壓力； $K_{\gamma\beta}$ 代表各個相的相對絕對滲透係數，是飽和度的函數； μ_{β} 代表流體在各個相的黏滯度； g_{nm} 為由 m 到 n 方向的重力加速度(Pruess et al. 1999)。

而時間離散則是將體積平均量與表面積分近似成以質量與能量平衡來取代，則可以得到一組一階長微分方程式，可以描寫如下式：

$$\frac{dM_n^K}{dt} = \frac{1}{V_n} \sum_m A_{nm} F_{nm}^K + q_n^K \dots \dots \dots (3-5)$$

將時間項作一階有限差分來離散，且將右邊的源與匯以及通量項以新的時間去計算，即可獲得在多相流中需要較高計算效率的穩定數值解。

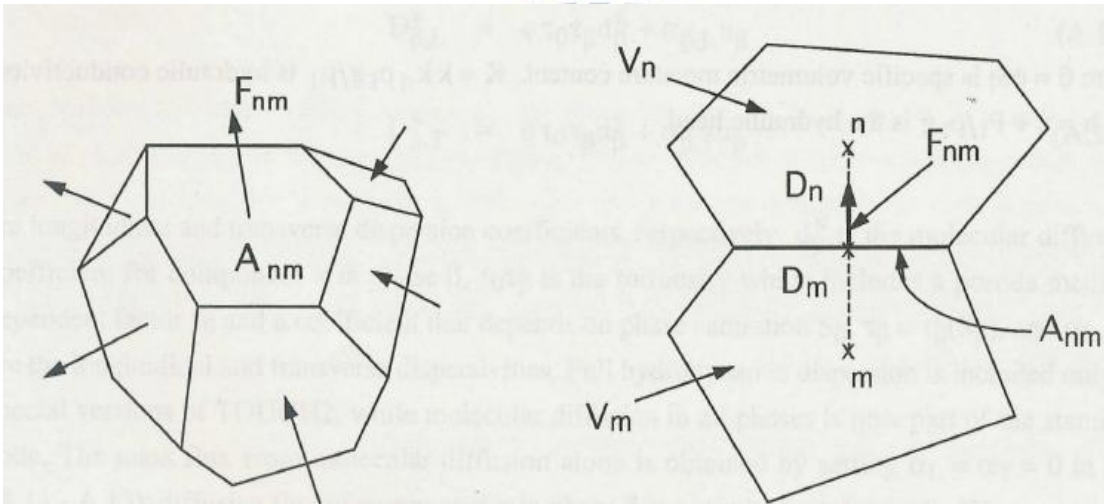


圖 3-3 積分有限差分法

摘自 (Pruess and Battistelli, 2002)

3.3 模擬模型

3.3.1 邊界

本研究中，將忽略邊界效應之敏感度，使用 120m×120m 研究模型(Case 1)，尚增加 100m×80m 之模型(Case 2)。如圖 3-5、圖 3-6 及表 3-1。

表 3-1 邊界範圍說明

邊界範圍	模型尺寸 (m)
四周各 1 倍之方形為模擬區域	120×120 (case 1)
四周分長形為主要模擬區域	100×80 (case 2)

3.3.2 土壤透水係數

會影響未飽和層中地下水的流動與污染物的傳輸之因數甚多，如：透水係數、土壤孔隙率、土壤含水量、其他土壤參數等；而於 TMVOC 之操作界面中，土層之透水係數是以絕對滲透係數(Permeability, L^2)表示之。於 4.2 與 4.3 小節中將針對絕對滲透係數與土壤孔隙率等參數進行敏感度分析並對其結果加以討論。

首先對於模擬的設定，其絕對滲透係數設定為 $2.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ (即透水係數 K_w 為 $2.74 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$)；孔隙率設定為 30% 或 40%；地下水位於地表下 2 m。

表 3-2 土壤參數變化說明

絕對滲透係數(m^2)	透水係數 K_w (cm/sec)	孔隙率(%)
2.5×10^{-11}	2.74×10^{-2}	40
2.5×10^{-12}	2.74×10^{-3}	
2.5×10^{-12}	2.74×10^{-3}	30

3.4 加油站場址模擬

本模擬場址是以中型加油站為參考場址其站區範圍為：長 40 m、寬 40 m；而模擬深度至地下 10 m 如圖 3-4，此範圍即為主要模擬區域；模擬區域之三維座標是採卡氏座標(Cartesian System)系統表示之。而為避免邊界效應因此將數值模擬區域之四個邊界往外再延伸一倍模擬範圍，每個模擬範圍長為 40 m，寬為 40 m，因此整個數值模型尺寸長為 120 m、寬為 120 m 及 100 m 長、80 m 寬兩種。深度皆模擬至地下 10 m。並於 X 軸、Y 軸、Z 軸分割網格。於主要模擬區內，油槽區之網格再細分：於 X 軸與 Y 軸分割為 1 m/grid，Z 軸則為 0.5 m/grid 如圖 3-5、圖 3-6。

本研究場址之水文地質狀況假設為：地表下 0 m 至 10 m 為同一土層，其水平之絕對滲透係數分別為 $2.5 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ 與 $2.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ ；而一般垂直透水係數約為水平透水係數之 1/5~1/100 間(Noonan and Curtis, 1990; Testa and Winegardner, 1991; Nyer, 1993; Domenico and Schwartz, 1998)，因此垂直之絕對滲透係數分別為 $5.0 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ 與 $5.0 \times 10^{-13} \text{ m}^2$ ，土壤孔隙率分別為 0.3、0.4，水力梯度均採 0.005。土層之相對滲透率與三相系統之毛細壓力曲線則參考 Kererat and Soralump (2010)之研究模型，整理如表 3-3、表 3-4；土壤/水-汽油保持曲線(圖 3-7)，由毛細壓力曲線參數(表 3-4) 搭配 TMVOC 中之 Parker's model 即可求得。

本加油站內之儲槽區假定設有儲油量為 55 公秉之儲油槽 4 個，其尺寸為直徑 3 m、長度 8.2 m。並埋設於地表下 1 m 處，以符合規範之油槽頂部距地表至少 0.6 m 之規定，而地下水位部分則假設為有三種情況分別是在地表下 2 m、3 m、5 m 處，亦符合監測井之設置規範中，監測井有效深度不得低於 2 m(即地下水位須於地表下 2 m)；地下水位深度亦不可高過 7 m，如圖 3-8(a)~(c)。

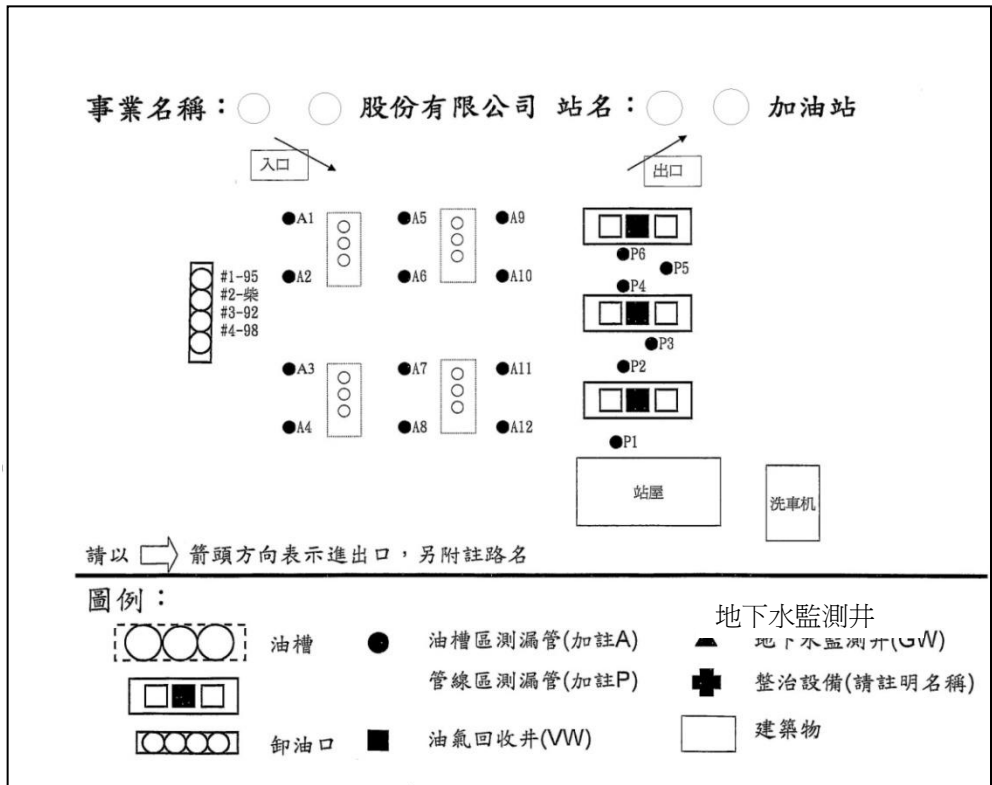


圖 3-4 加油站配置示意圖

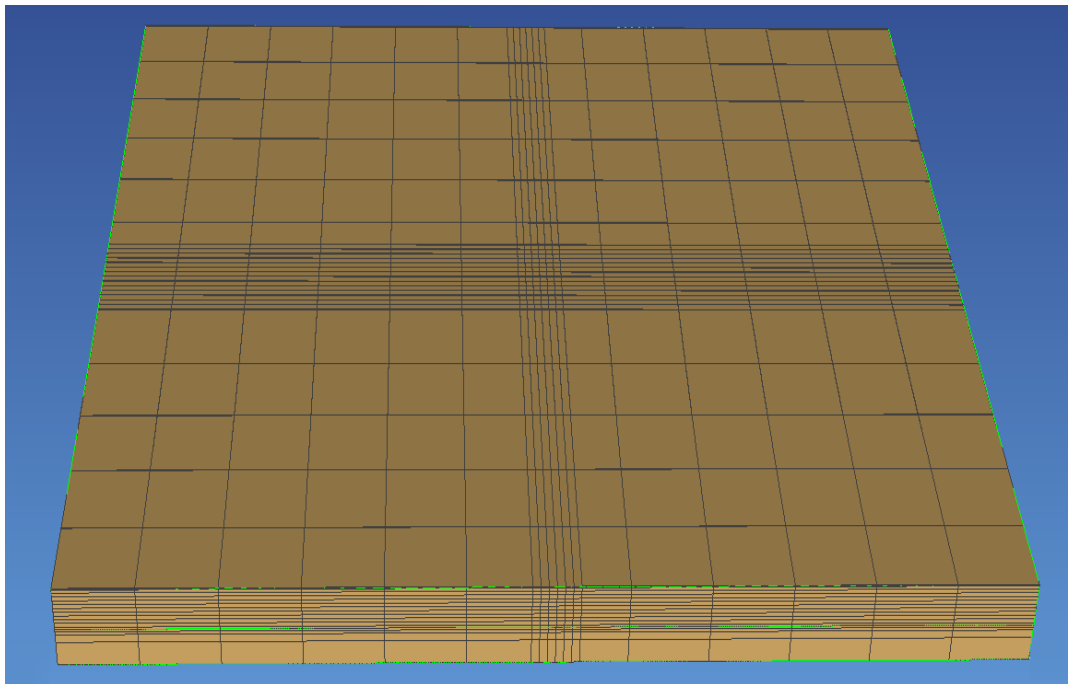


圖 3-5 TMVOC 數值模擬之模型網格示意圖(Case 1)

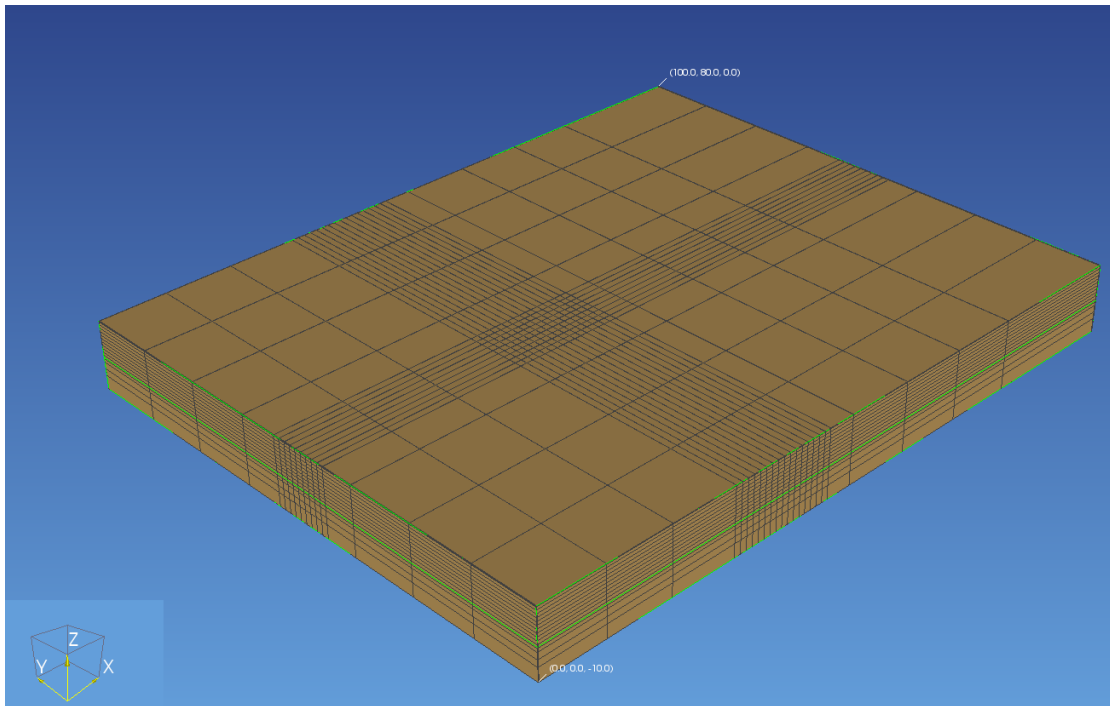


圖 3-6 TMVOC 數值模擬之模型網格示意圖(Case 2)

表 3-3 相對滲透係數參數(Stone's model)

參數	S_{wr}	S_{nr}	S_{gr}	n exponent
材料				
大氣層	0.1	0.05	0.05	3
土壤	0.1	0.05	0.05	3

註: S_{wr} 為殘餘水相飽和度、 S_{nr} 為殘餘 NAPL 相飽和度、 S_{gr} 為殘餘汽相飽和度

表 3-4 毛細壓力曲線參數(Parker's model)

參數	S_m	α_{gn}	α_{nw}	n exponent
材料				
大氣層	—	—	—	—
土壤	0	100	110	1.84
土壤(hysteresis)	0	450	450	1.6636

註: S_m 為極限飽和度、 α_{gn} 為強度參數(氣-NAPL 相)、 α_{nw} 為強度參數(NAPL-水相)

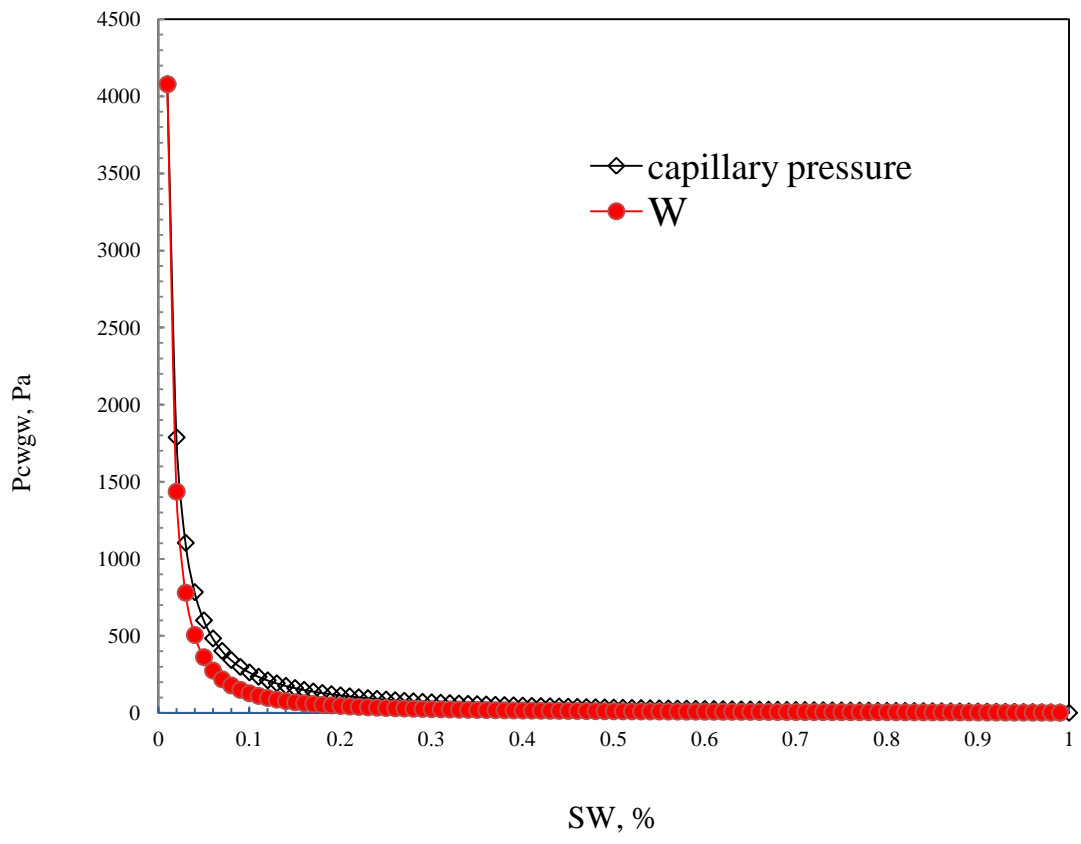
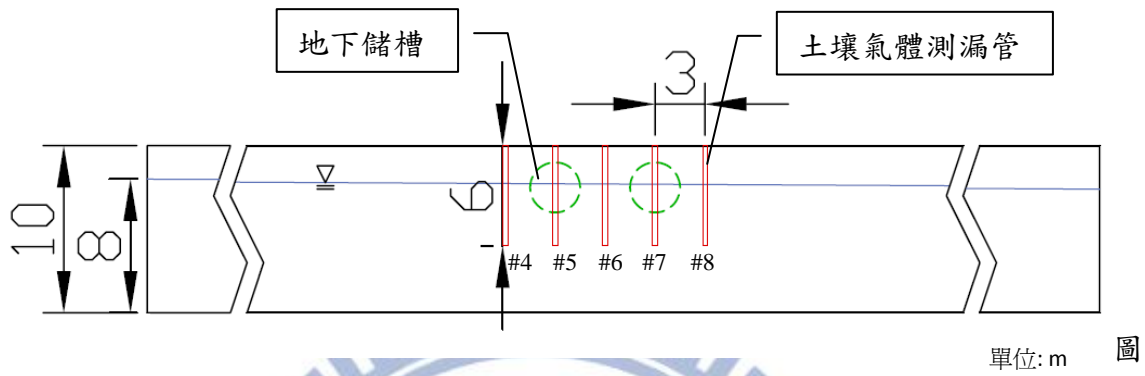


圖 3-7 土壤/水-汽油保持曲線



3-8(a) 地下水位於地表下 2 m 處

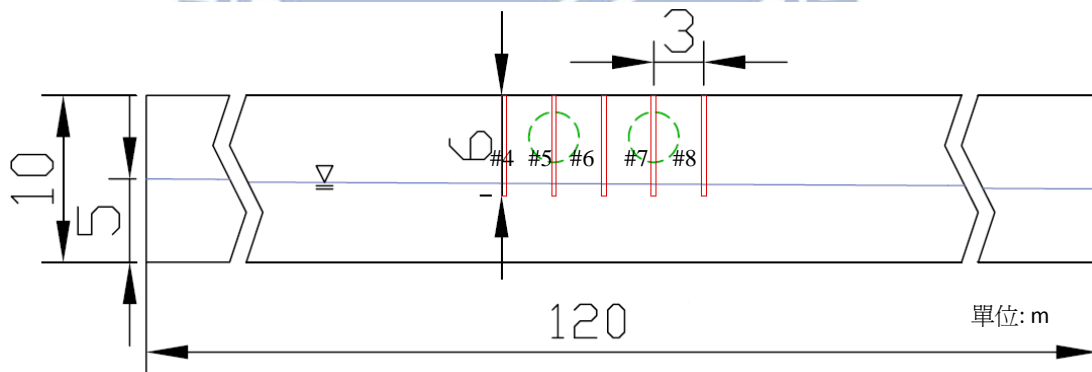


圖 3-8(b) 地下水位於地表下 5 m 處

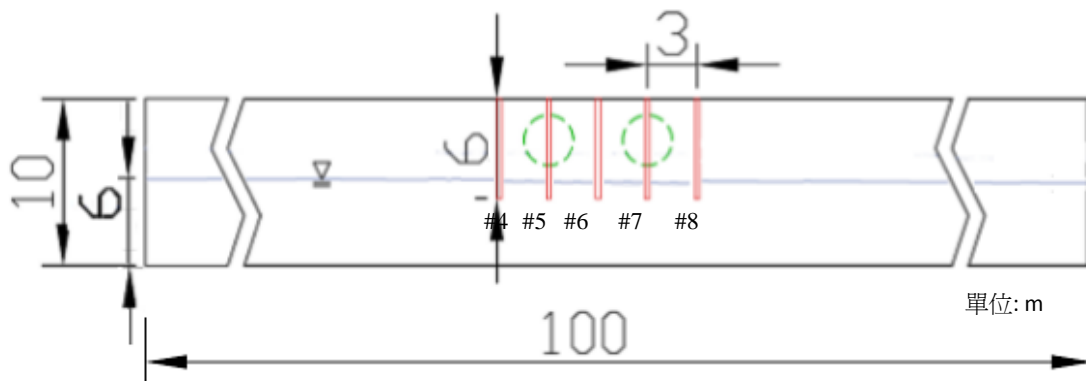


圖 3-8(c) 地下水位於地表下 4m 處

3.4.1 邊界條件參數設定

在 TMVOC 中土層之邊界條件的假設可以設為: Dirichlet Boundary Condition 即為定水頭邊界與 Neuman Boundary Condition 即為無通量(No Flow)邊界(Pruess and Battistelli, 2002)。

於本研究中之模擬區域由於假設水力梯度為 0.005，且於模擬進行中時，上下游之水頭須維持不變。因此將模擬區域之邊界設定為定水頭邊界，而地表面則為大氣壓力邊界(Atmospheric Pressure Boundary Condition)，並且假設地表無逕流。

3.4.2 地下儲油槽配置

由於需要於主要模擬區域中配置地下儲油槽 4 個，然而 TMVOC 僅提供使用者於模擬區域中改變土壤參數，並無法置入非土壤材料。而 TMVOC 中之土壤絕對滲透係數極小值僅到 10^{-22} m^2 ，若以此作為地下儲槽區之土壤絕對滲透係數時，則當模擬時間較久或污染物洩漏量較大時，則仍會發生有微量之污染物滲入，而此狀況並不符合現實。因此改以將地下儲槽區之網格狀態設定為 Disabled 狀態，使得於模擬期間地下儲槽區之狀態維持不變，以符合現實狀況中污染物無法滲入地下儲槽。

3.4.3 監測井配置

為得到較密集之模擬資料以及為了減少網格數與執行模擬所需之時間，因此將監測井儘量靠近油品洩漏點以及縮小監測井間之間距，因此採每一監測井間之間距為 3 m，共設置 11 支監測井如圖 3-9。監測井的設置深度，為顧及當地下水位於地表下 5 m 時，仍能獲得不飽和層之氣體濃度與飽和層中之水中濃度，因此設置深度達地表下 6 m 處如圖 3-8(a)-(c)所示。

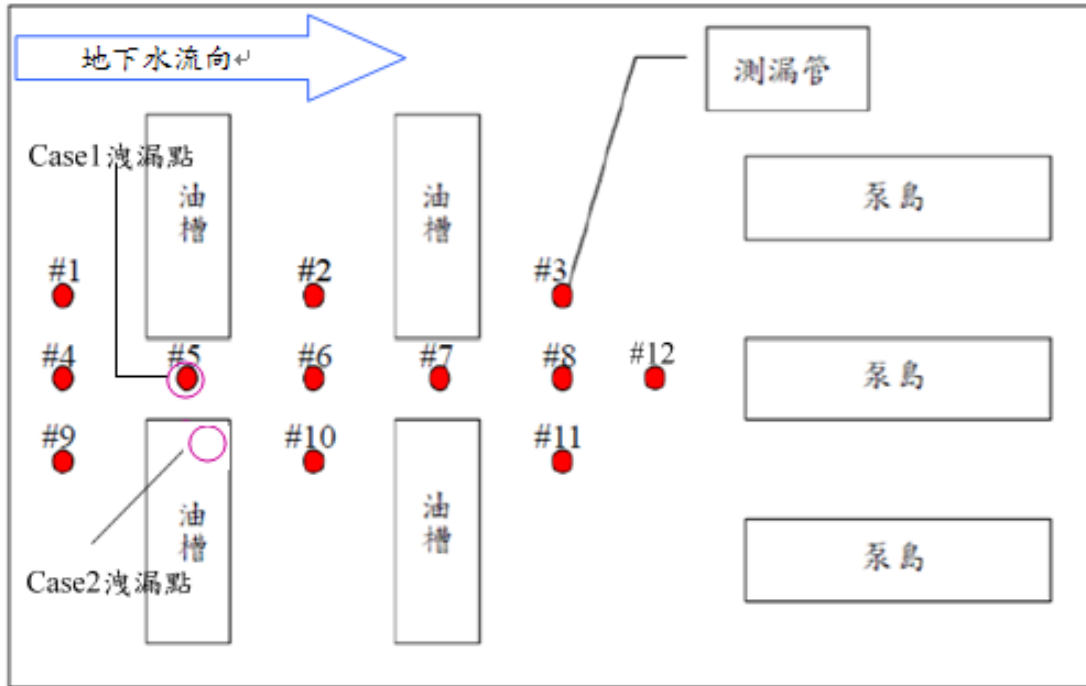


圖 3-9 監測井與油槽之相關位置示意圖

3.4.4 季節性地下水位設定

本模擬總時間為 360 天(約 1 年計)，水位升降以半年為單位設定，每個 Case 起始水位各有兩種，如 Case 1-1 水位設定為 0 至 180 天水位由地下 2 m 下降至地下 5 m，第 180 至 360 天水位再由地下 5 m 上升至地下 2 m(表 3-4)。Case 1-2 水位設定則由地下 5 m 開始模擬。Case 2 模擬方式如 Case 1，但是水位設定只到地下 4 m。

表 3-5 地下水位設定

地 下 水 位 案 例	時間 (days)	地下水位 (-m)		
		0	180	360
Case 1		2	5	2
Case 1		5	2	5
Case 2		2	4	2
Case 2		4	2	4

3.4.5 遲滯現象之模擬

遲滯現象之模擬則在 Case 1、Case 2 中各再增加一組模擬，來對照未加入遲滯現象(H)的模擬情形。

表 3-6 加入遲滯現象之模擬(H 為遲滯現象)

Time(days) 地下水位(-m)	0-180	180-360
Case 1	2 — 5	5 — 2
Case 1	2 — 5	5H — 2H
Case 1	5 — 2	2 — 5
Case 1	5H — 2H	2 — 5
Case 2	2 — 4	4 — 2
Case 2	2 — 4	4H — 2H
Case 2	4 — 2	2 — 4
Case 2	4H — 2H	2 — 4

3.4.6 汽油污染物參數設定

表 3-7 本研究中所採用之汽油組成成份及百分比

汽油組成成份		
成分	範例	百分比(%)
正烷類	MTBE	18
芳香族	苯	3.5
	乙苯	5.5
	甲苯	7
	二甲苯	1.5
脂肪族	庚烷	20
	異辛烷	20
	環戊烷	24.5

3.4.7 加油站油品洩漏情況

一般加油站油品的洩漏約以 10 L/day~100 L/day 不等的速率洩漏，而於美國規範中，加油站之測漏管應能於 30 天內測得 150 加侖之油品洩漏事件，即平均每天以 5 加侖之速度洩漏(約為 19 L/Day)；環保署(2006)於「加油站防止污染地下水體設施及監測設備管理辦法」中明訂對於偵測靈敏度要求須能達 0.2 gal/hr 之水準(即為 4.8 加侖/天)。因此於本研究中原本均假設其油品之洩漏速率為 5 gal/day，但是由於軟體模擬時間過長，因此在油品洩漏速率進行調整；並連續注入油品(約 1 年)360 天。於本研究中在此假設 2 種不同位置發生油品洩漏分別概述如下：

Case 1：因發生鏽蝕、或外力造成破損而產生油品洩漏，且於下游處受到油槽阻擋如圖 3-10 (a)所示。洩漏點於加油區內之輸油管線，距離入口之地界線 21 m；與左側臨地之地界線距 14 m；深度於地表下 1 m 處。

Case 2：因發生破損而產生油品洩漏如圖 3-10 (b)所示。洩漏點於儲油槽之底部，距離入口之地界線 23 m；與左側臨地之地界線距 15 m；深度於地表下 4 m 處。

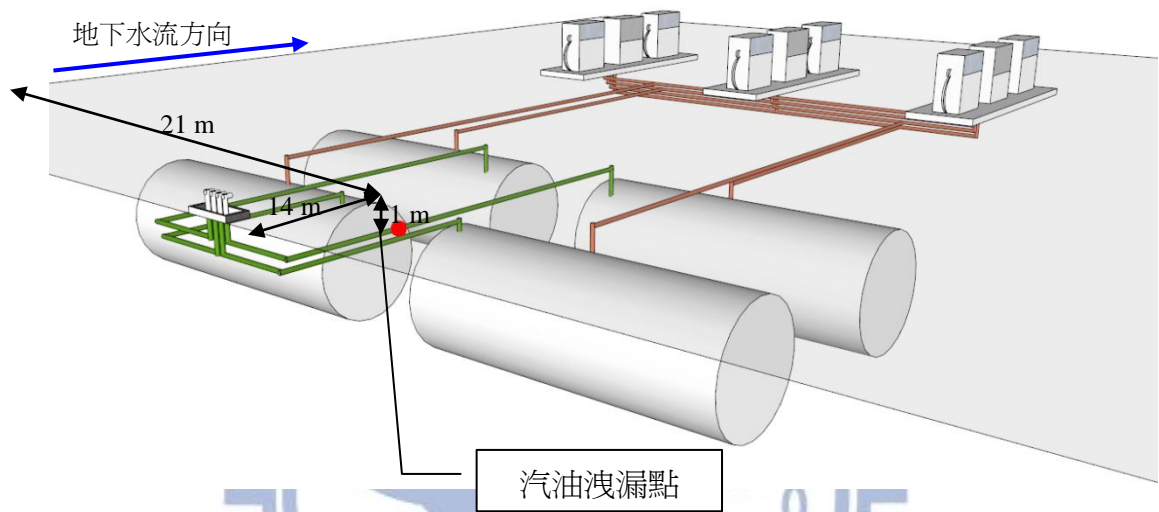


圖 3-10 (a) Case 1：洩漏點 B 位於儲槽區內之輸油管線

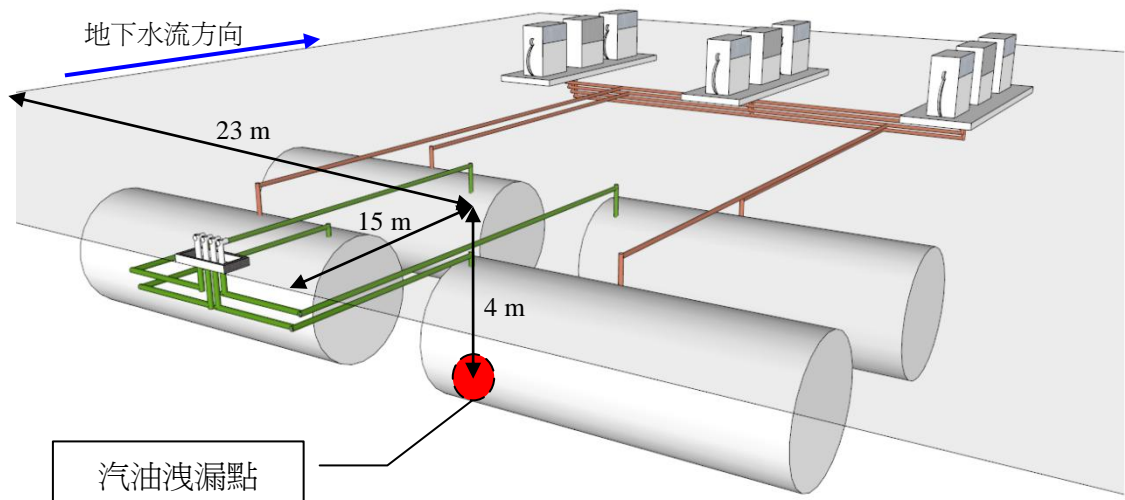


圖 3-10 (b) Case 2：洩漏點 D 位於儲油槽之下方

3.5 研究模式整理

油品的洩漏速率分別為 1.35 gal/day(Case 1)、1.5 gal/day (Case 2)，其注入模擬時間達到 360 日(約 1 年)，分別依照不同的地下水位變化 (如 Case 1 之 2-5-2 m、5-2-5 m；Case 2 之 2-4-2 m、4-2-4 m)、透水係數(2.74×10^{-2} 、 2.74×10^{-3} cm/sec)、孔隙率($n=0.3$ 、 0.4)、及不同的洩漏點位置(Case 1—儲槽區內之輸油管線、Case 2—儲油槽下方)、遲滯現象的加入，來進行資料整理及分析。並以各測漏管之網格資料分別篩選出不飽和層之平均土壤氣體濃度(X_{Gas})與溶解於地下水中之苯溶解相濃度(X_{Liq})。最後列出各監測井達到規範中「有油氣污染滲漏之虞」之土壤氣體濃度(500 ppmV)時間及達第二類地下水污染管制標準中苯含量達 0.05 mg/L 警戒值之時間。以 12 支監測井分別如圖 3-11，其油品洩漏點附近之監測井中土壤氣體濃度與地下水含苯濃度值其分別達到警示值之時間與地下水位、透水係數間之關係統整於表 3-8。此章節以下分別對模擬場址之地下水位變動(加入遲滯現象)情形、透水係數以及油品洩漏點等各變動參數對於油品污染物傳輸之影響進行比較及分析。

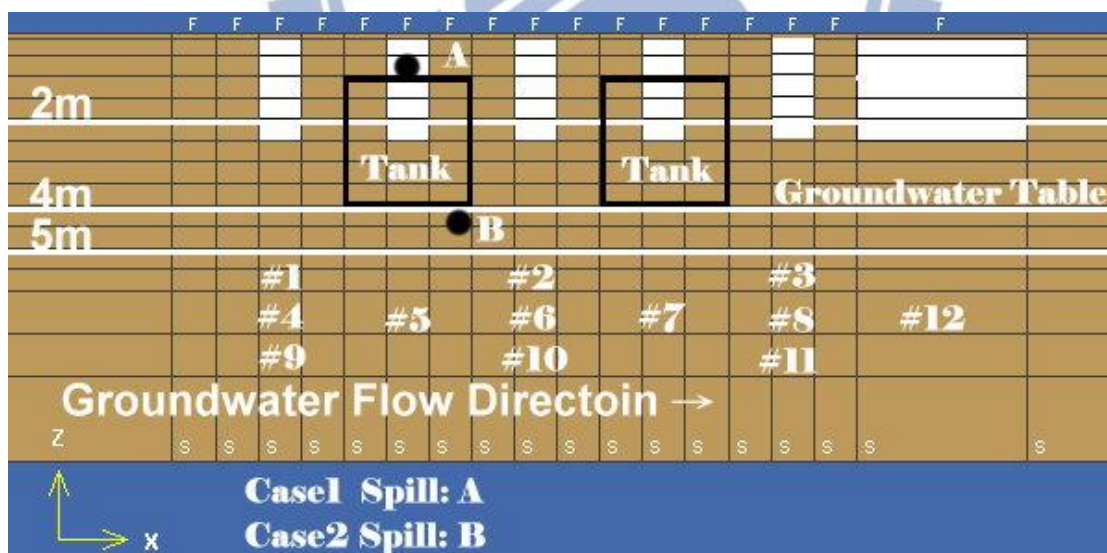


圖 3-11 模擬示意圖

表 3-8 傳輸模擬之影響因子：

洩漏速率(gal/day)	1.35、1.5
洩漏點位置	儲槽區內之書油管線、儲油槽下方
地下水位變化(-m)	252、525、242、424
透水係數(cm/sec)	2.74×10^{-2} 、 2.74×10^{-3}
孔隙率(n)	0.3、0.4
遲滯現象	

第四章 模擬結果與分析

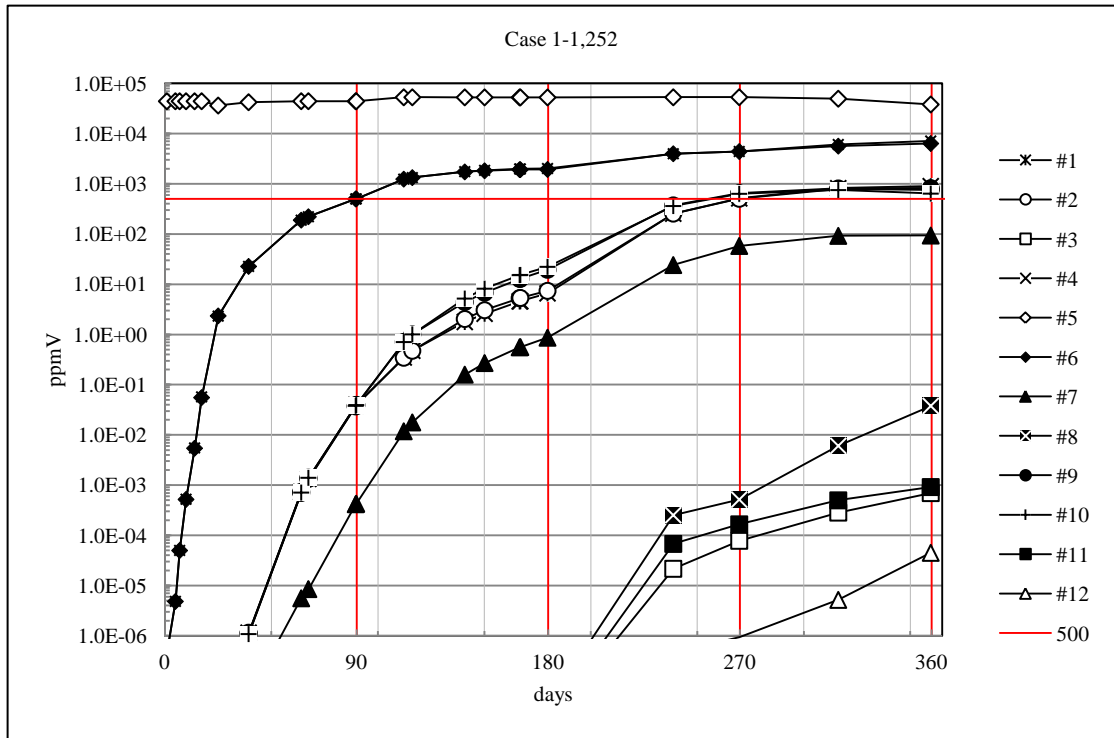


圖 4-5 (a) Case 1-1，252 測漏管土壤氣體濃度圖

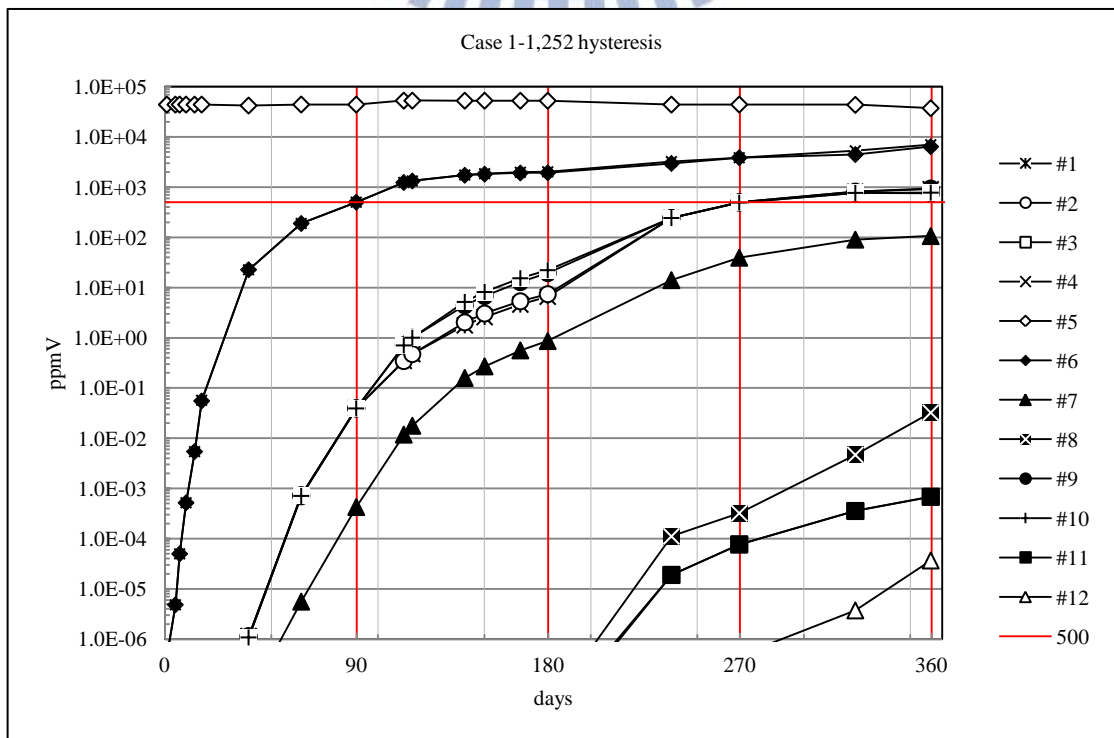


圖 4-5 (b) Case 1-1，252 (hysteresis) 測漏管土壤氣體濃度圖

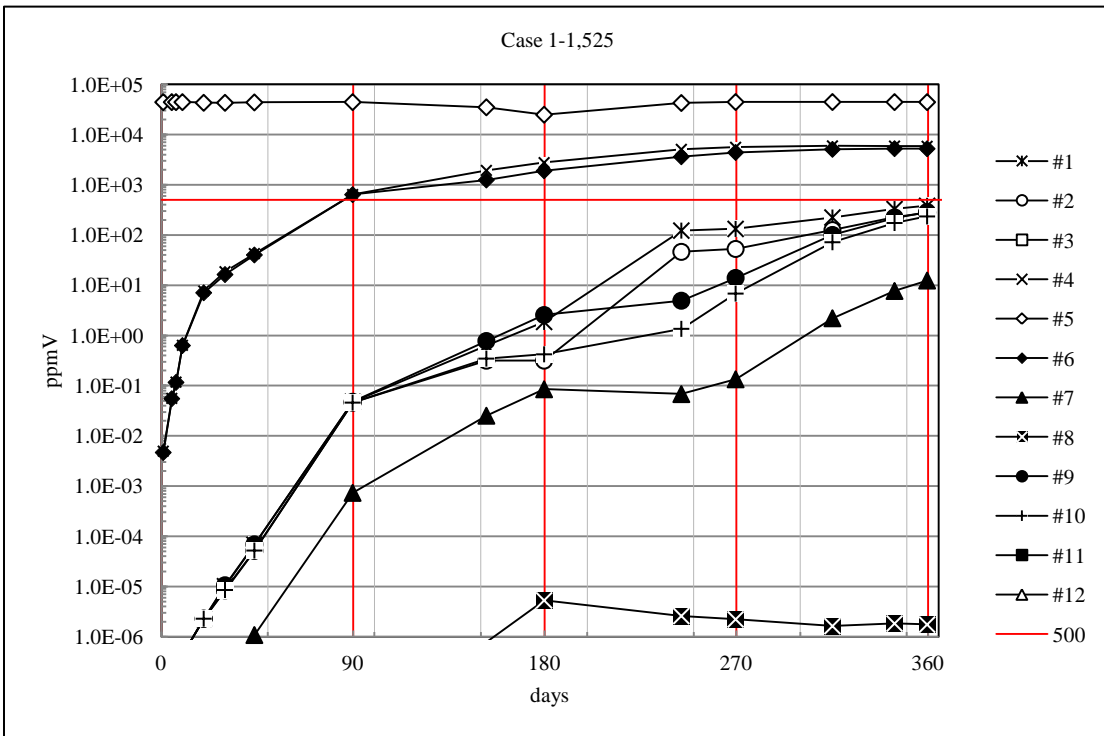


圖 4-5 (c) Case 1-1, 525 m 測漏管土壤氣體濃度圖

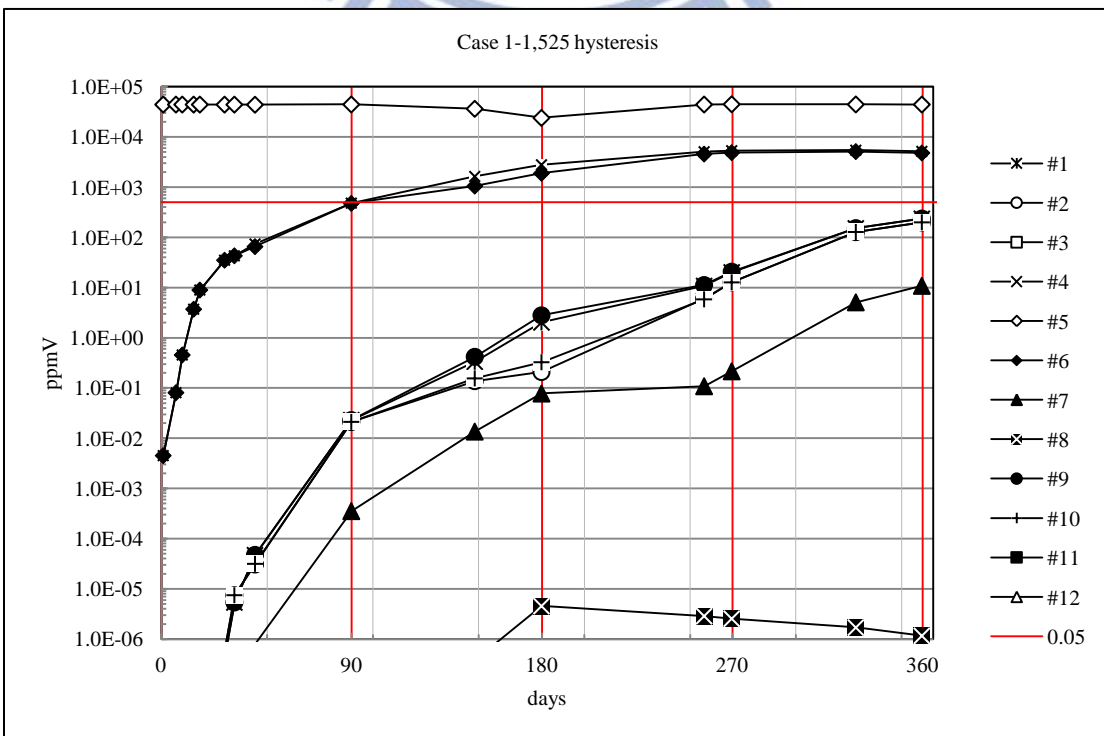


圖 4-5 (d) Case 1-1, 525 m (hysteresis) 測漏管土壤氣體濃度圖

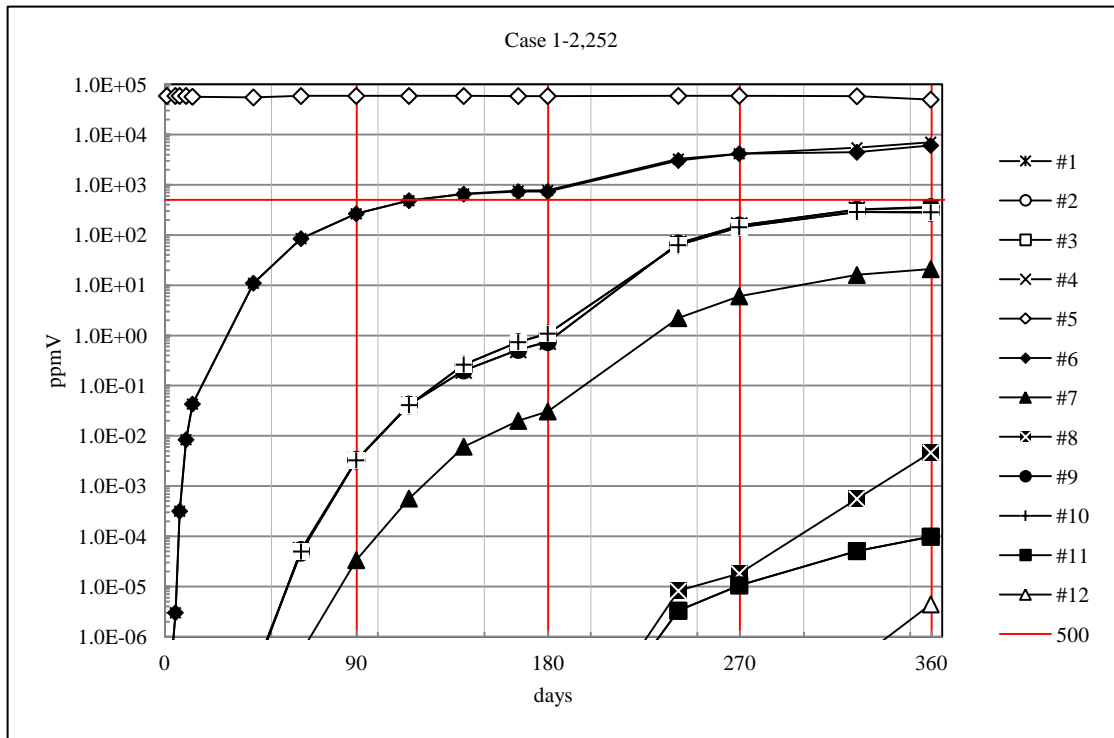


圖 4-5 (e) Case 1-2, 252 m 測漏管土壤氣體濃度圖

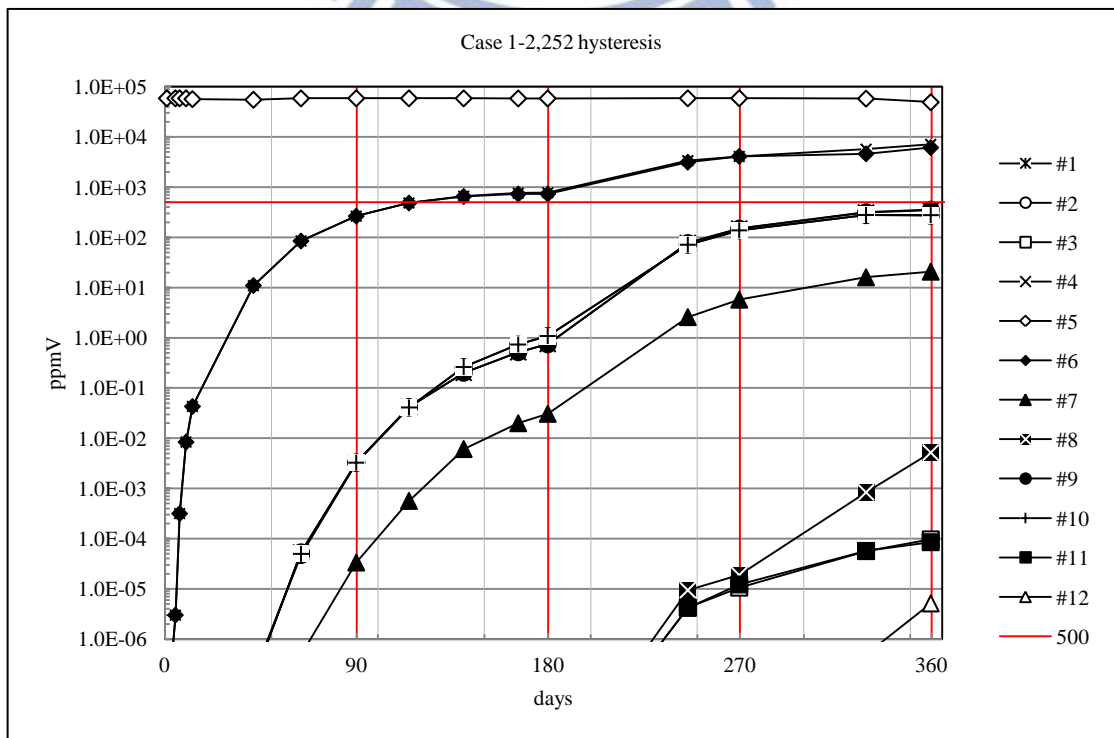


圖 4-5 (f) Case 1-2, 252 m (hysteresis) 測漏管土壤氣體濃度圖

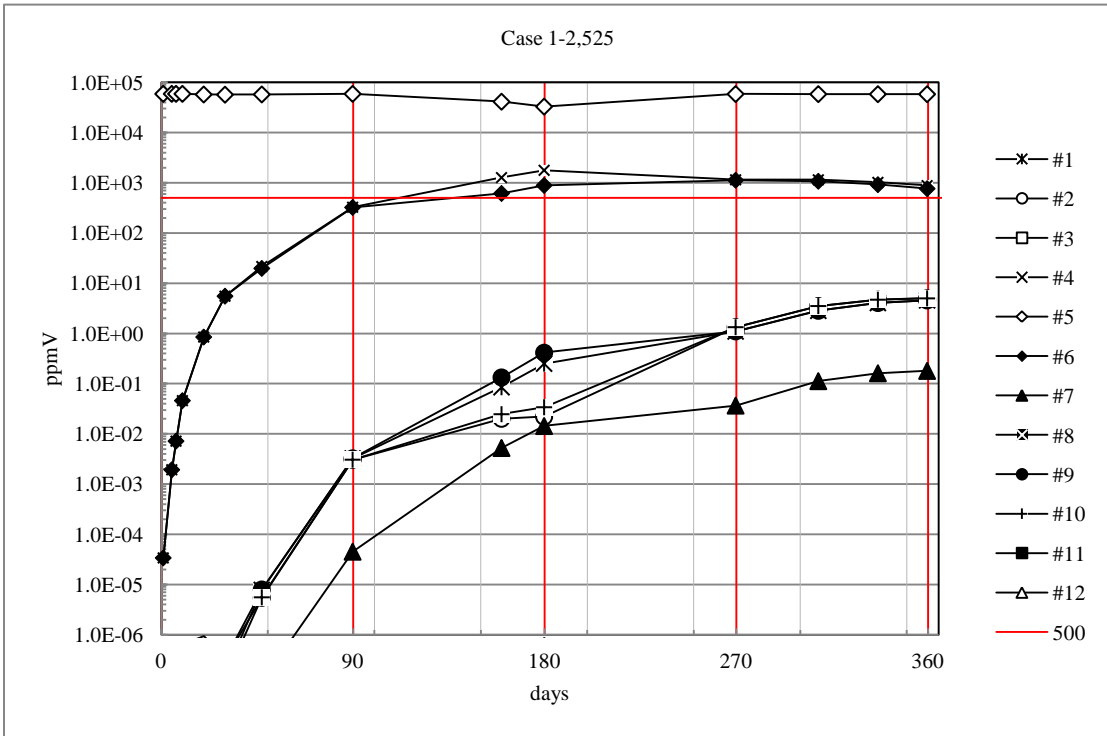


圖 4-5 (g) Case 1-2, 525 m 測漏管土壤氣體濃度圖

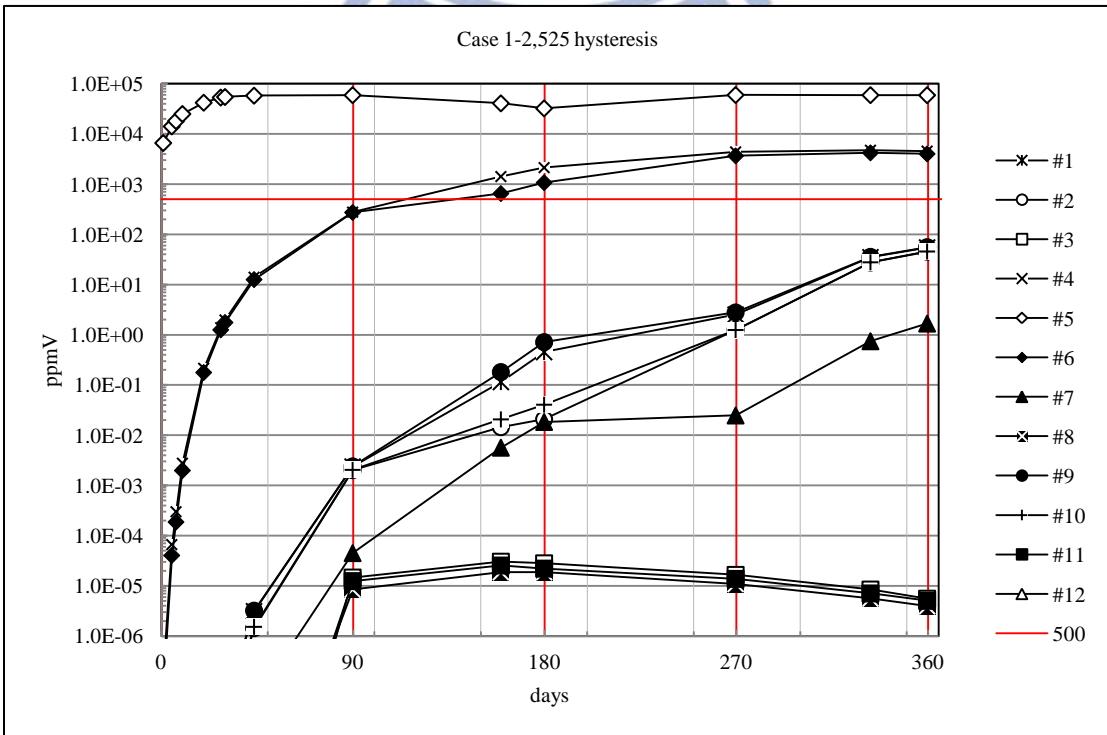


圖 4-5 (h) Case 1-2, 525 m (hysteresis) 測漏管土壤氣體濃度圖

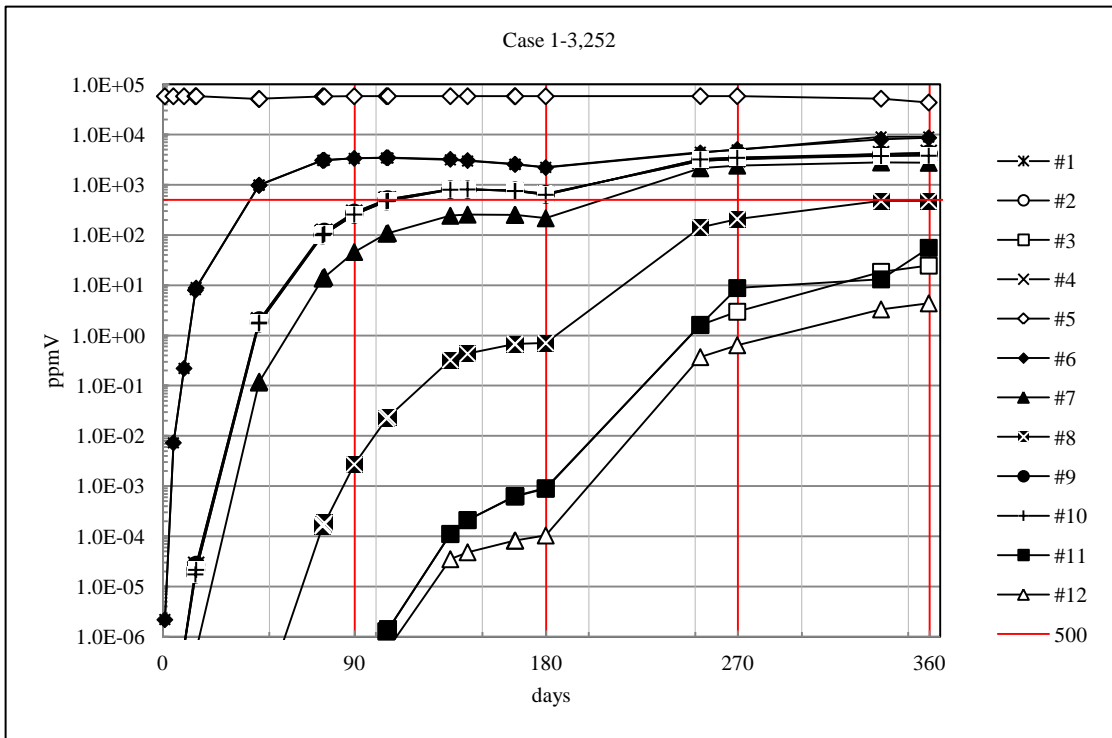


圖 4-5 (i) Case 1-3，252 m 測漏管土壤氣體濃度圖

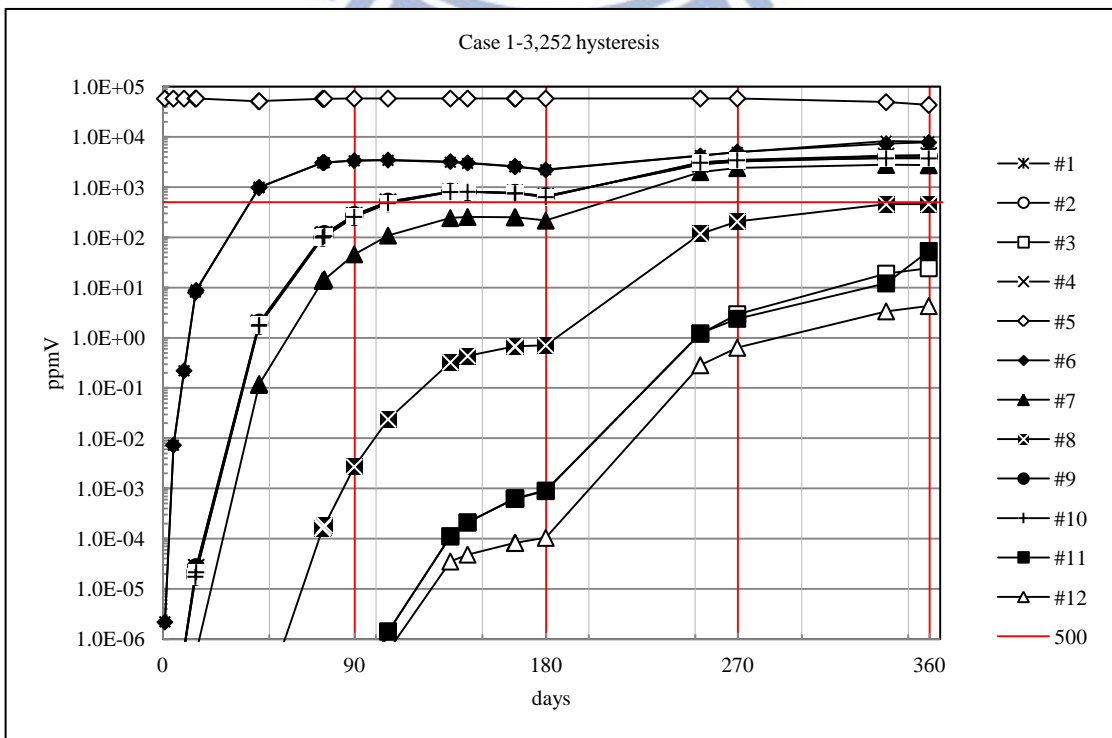


圖 4-5 (j) Case 1-3，252 m (hysteresis) 測漏管土壤氣體濃度圖

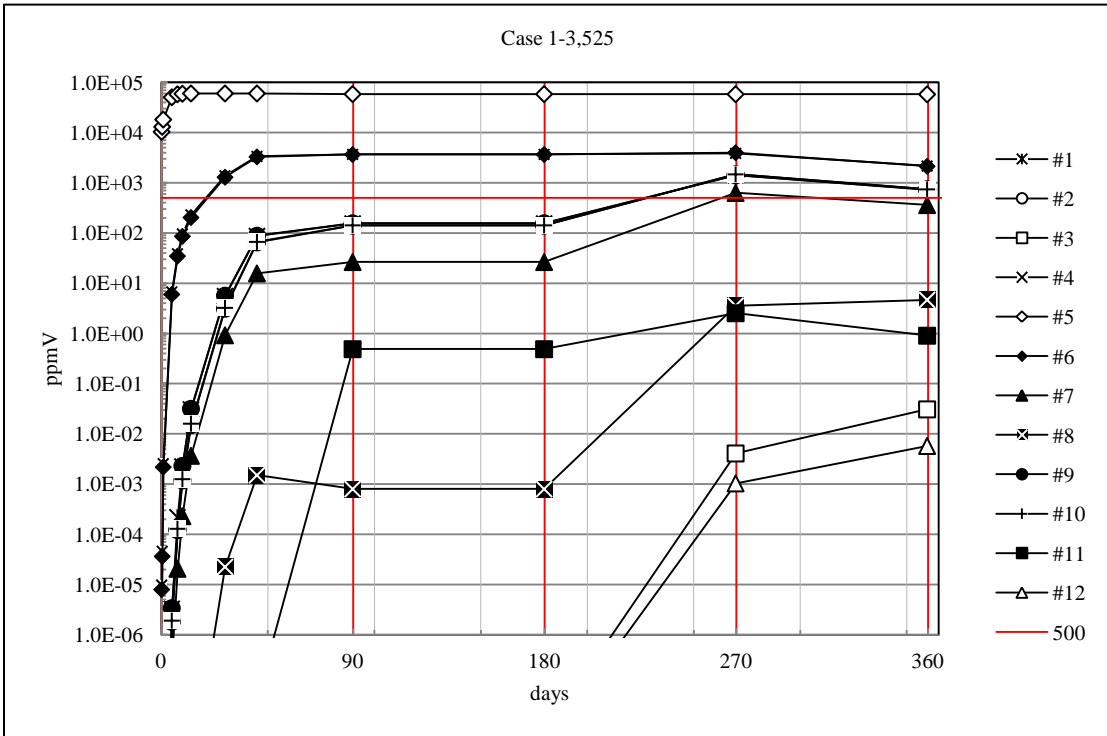


圖 4-5 (k) Case 1-3，525 m 測漏管土壤氣體濃度圖

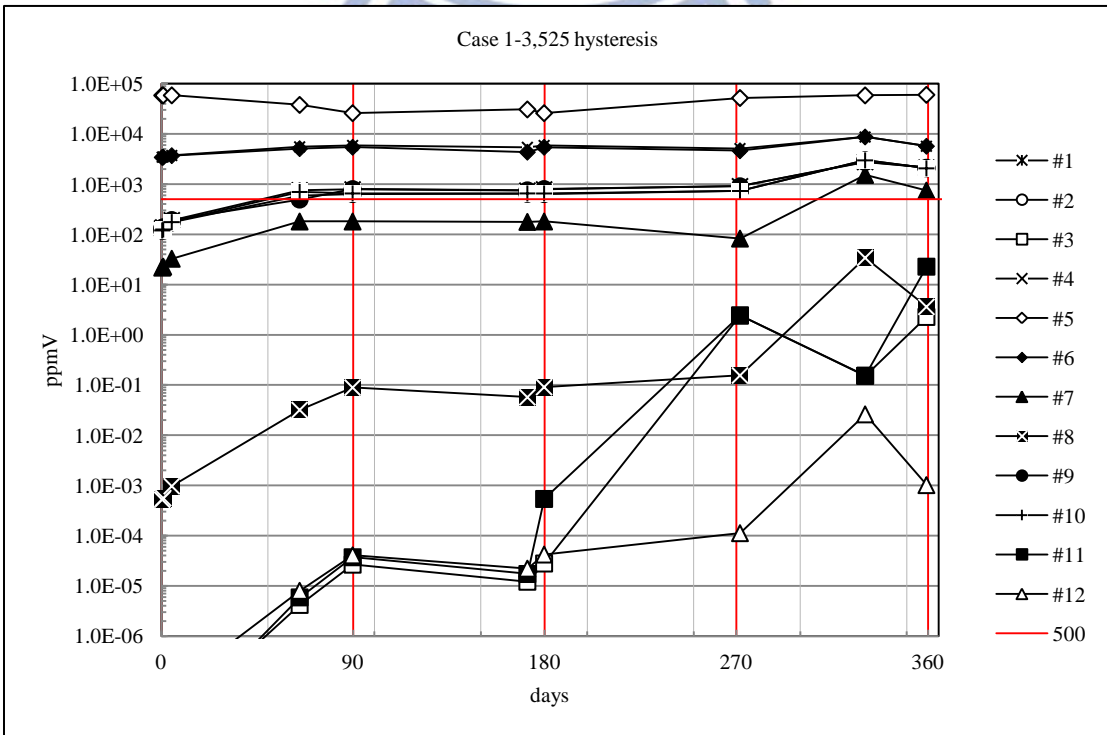


圖 4-5 (l) Case 1-3，525 m (hysteresis) 測漏管土壤氣體濃度圖

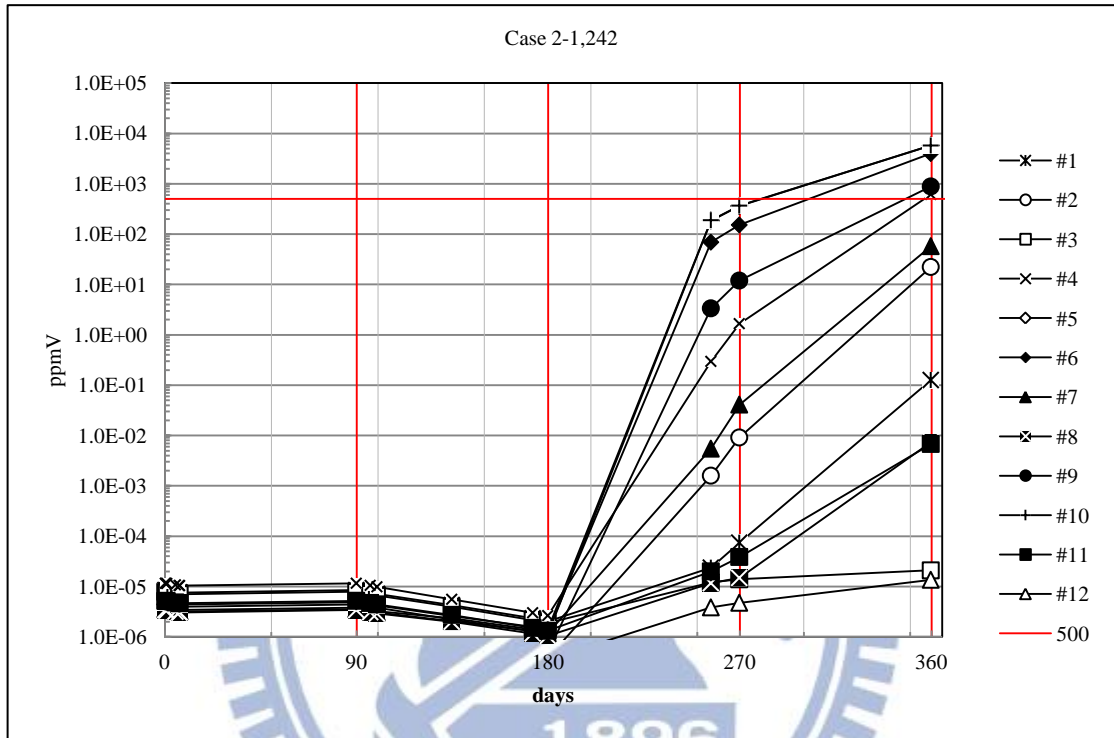


圖 4-6 (a) Case 2-1，242 m 測漏管土壤氣體濃度圖

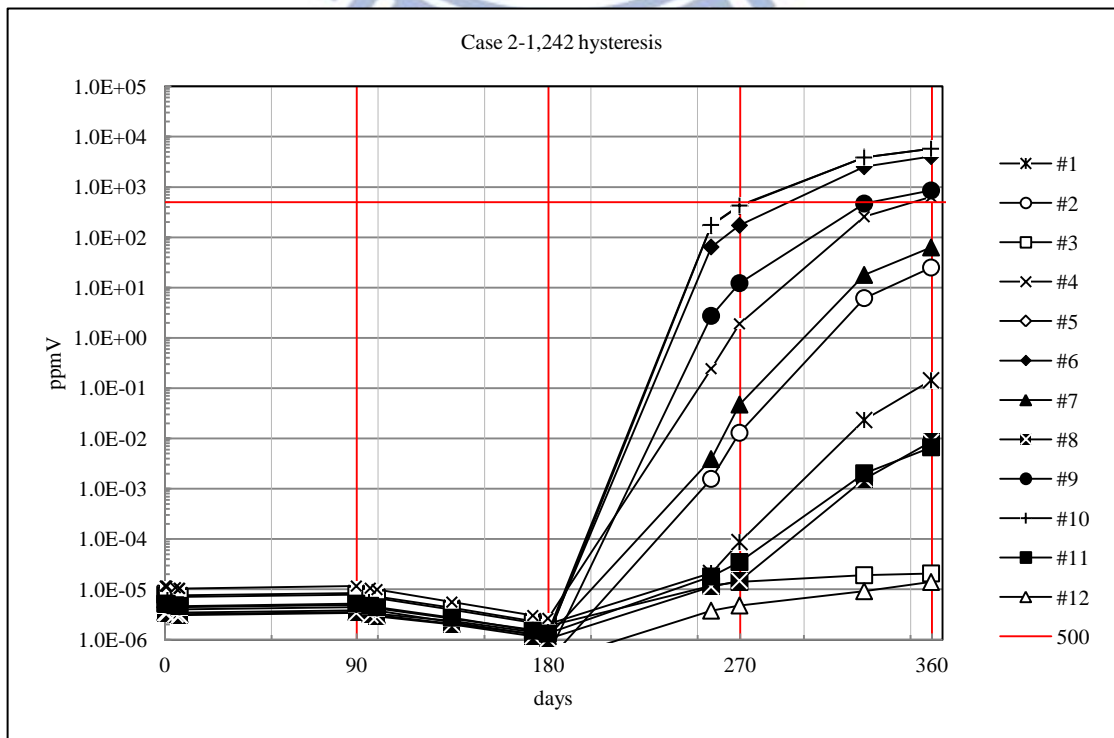


圖 4-6 (b) Case 2-1，242 m (hysteresis) 測漏管土壤氣體濃度圖

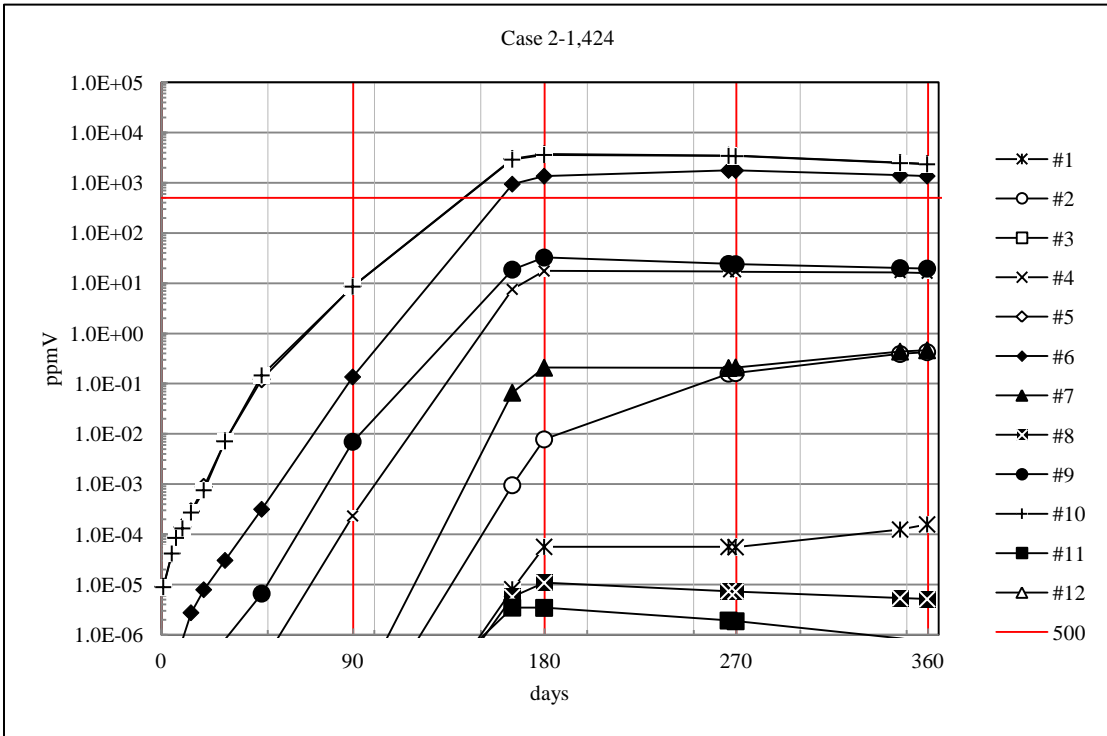


圖 4-6 (c) Case 2-1，424m 測漏管土壤氣體濃度圖

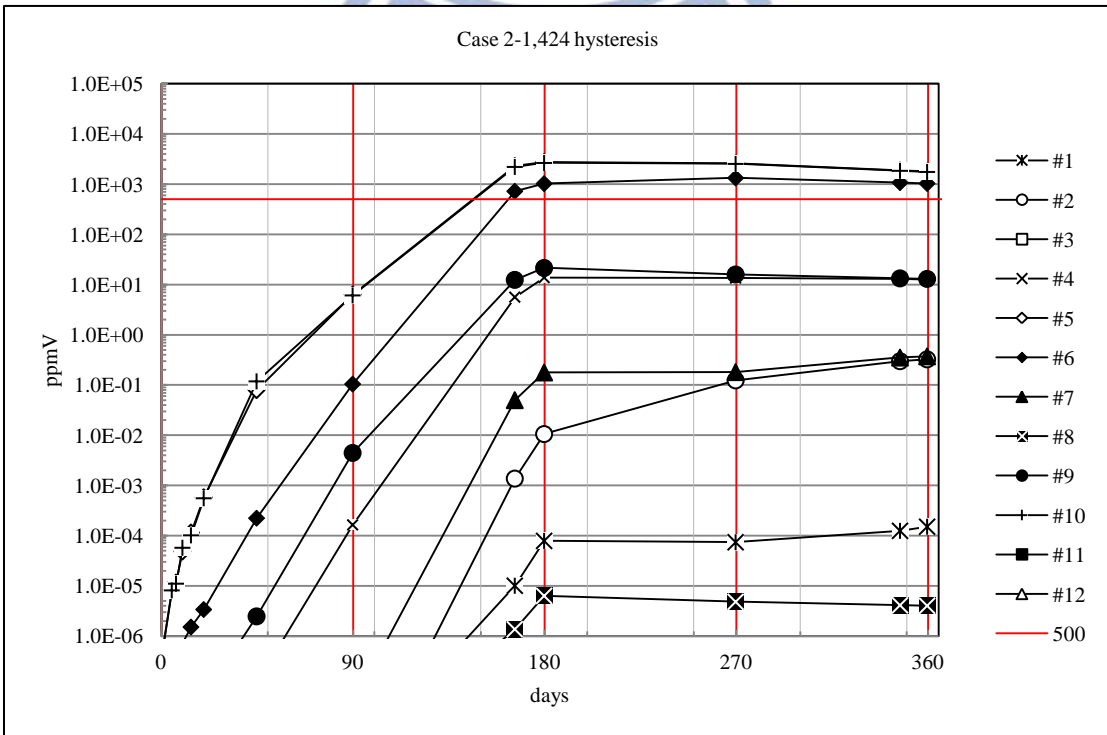


圖 4-6 (d) Case 2-1，424 m (hysteresis) 測漏管土壤氣體濃度圖

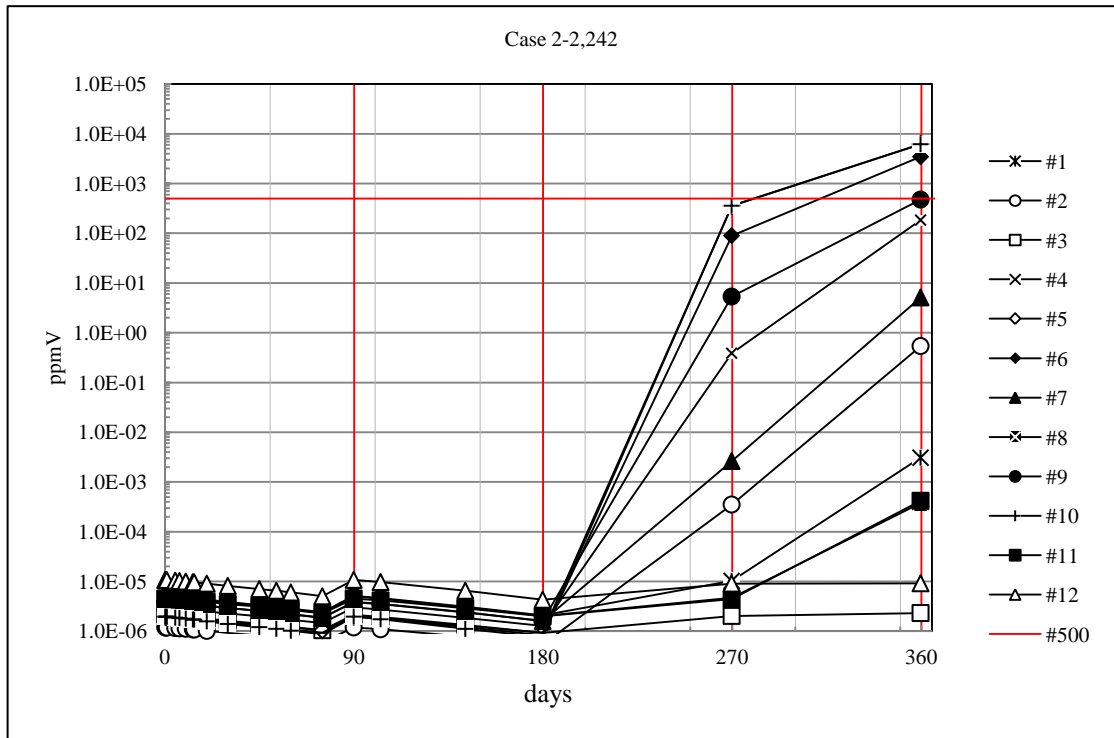


圖 4-6 (e) Case 2-2，242 m 測漏管土壤氣體濃度圖

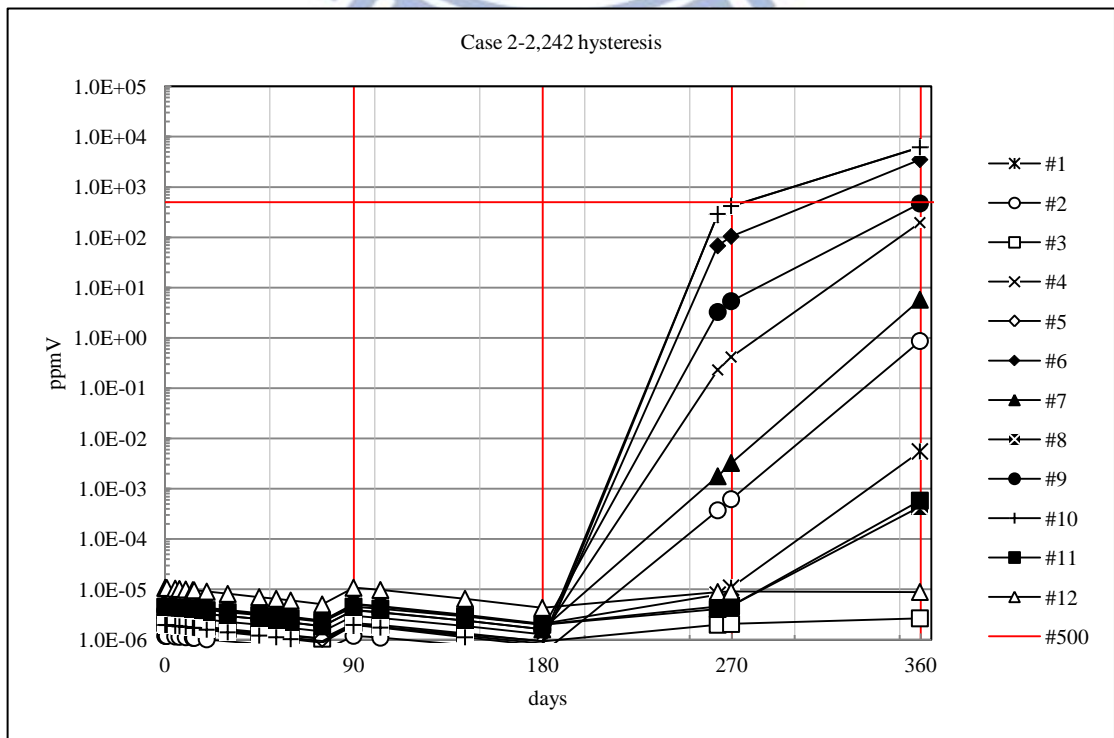


圖 4-6 (f) Case 2-2，242 m (hysteresis) 測漏管土壤氣體濃度圖

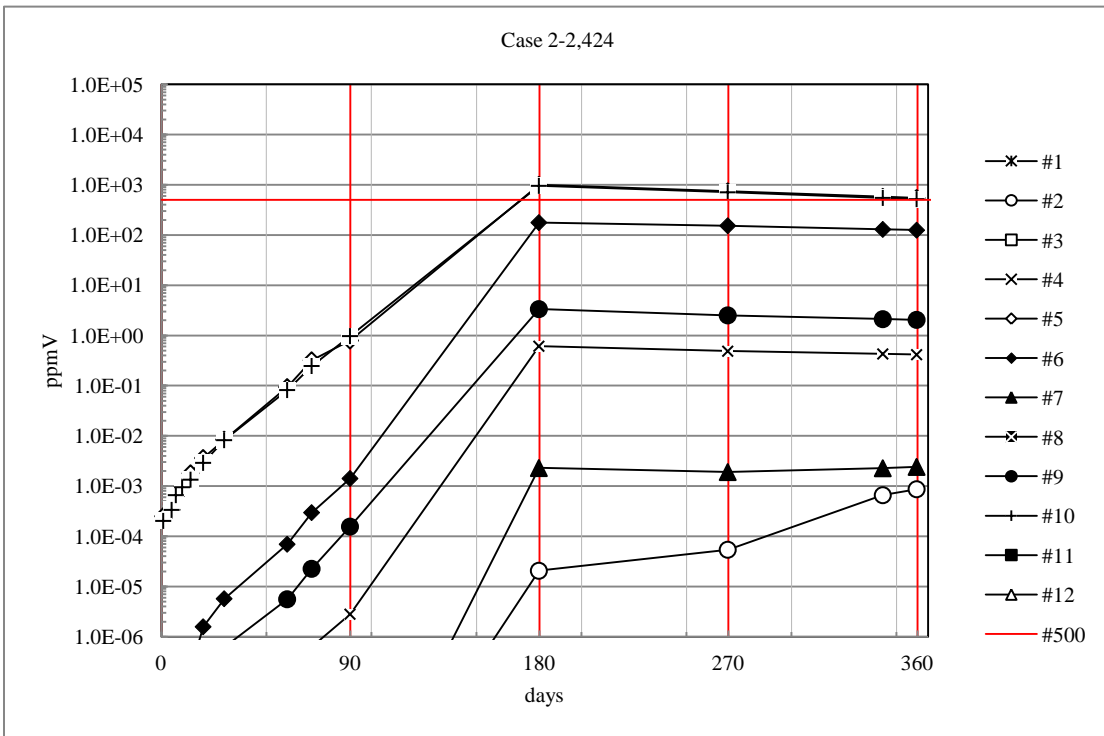


圖 4-6 (g) Case 2-2，424 m 測漏管土壤氣體濃度圖

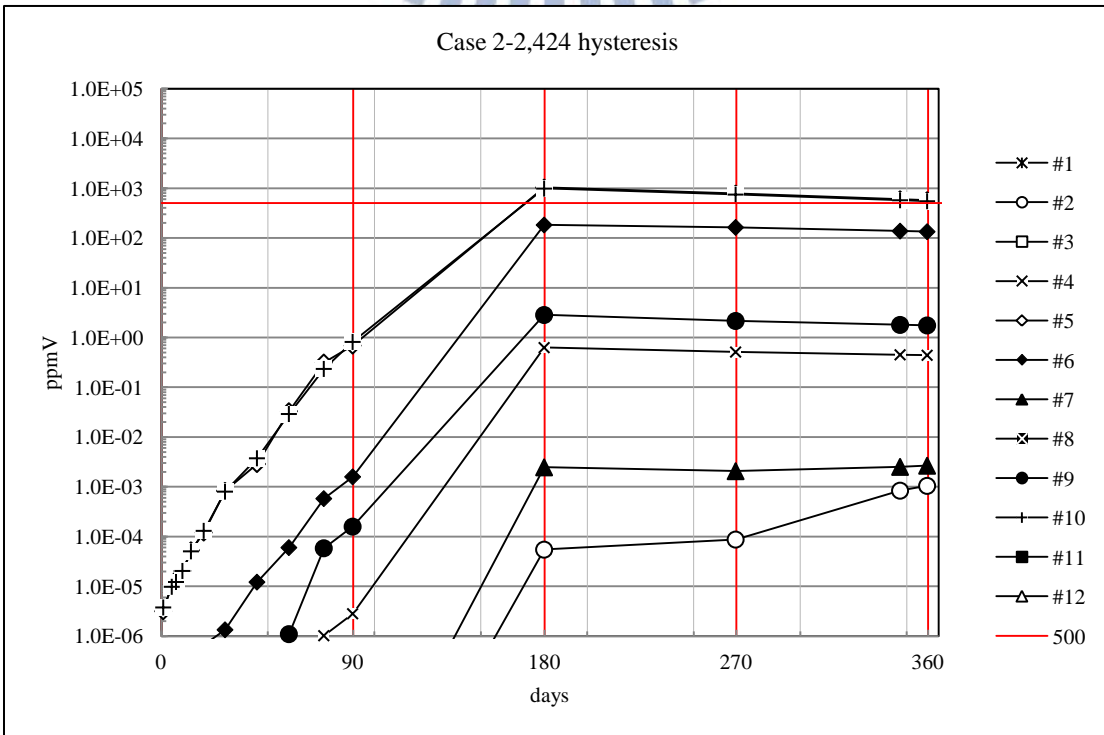


圖 4-6 (h) Case 2-2，424 m (hysteresis)測漏管土壤氣體濃度圖

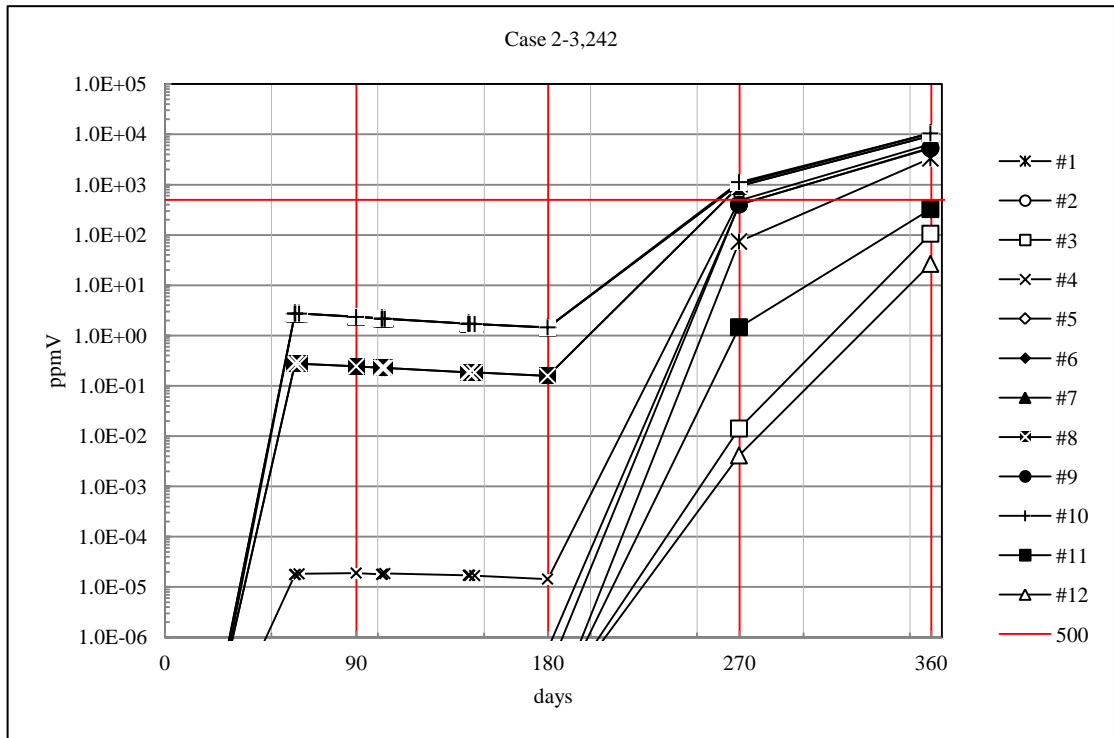


圖 4-6 (i) Case 2-3，242 m 測漏管土壤氣體濃度圖

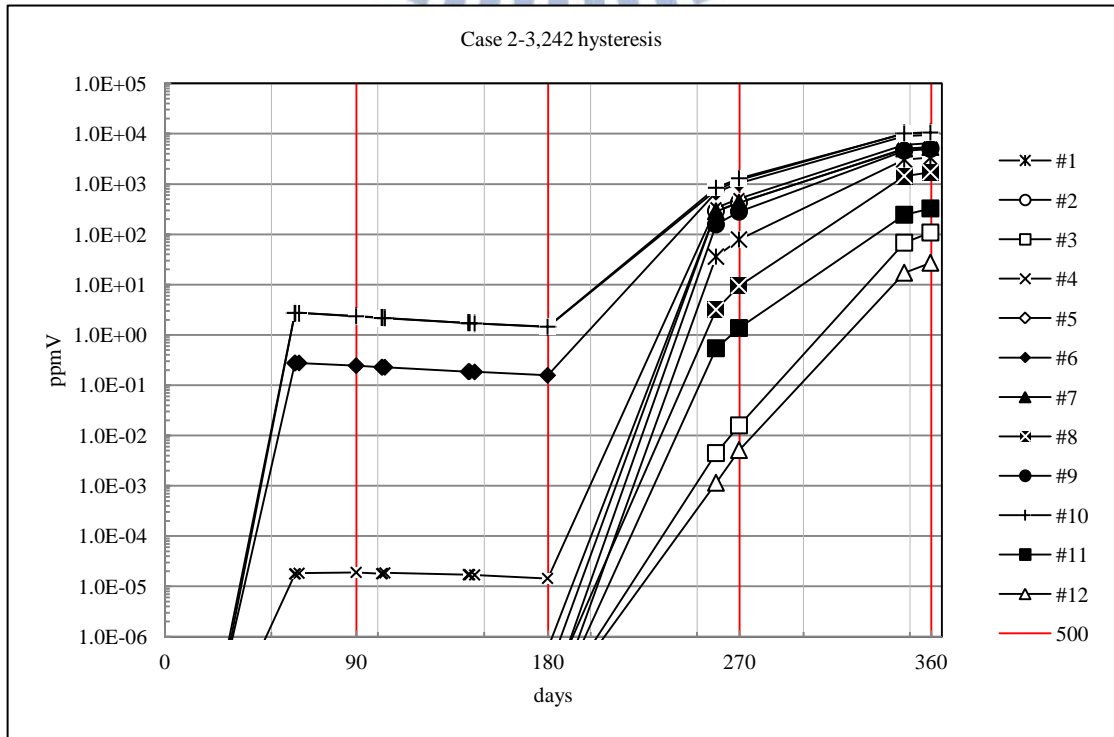


圖 4-6 (j) Case 2-3，242 m (hysteresis) 測漏管土壤氣體濃度圖

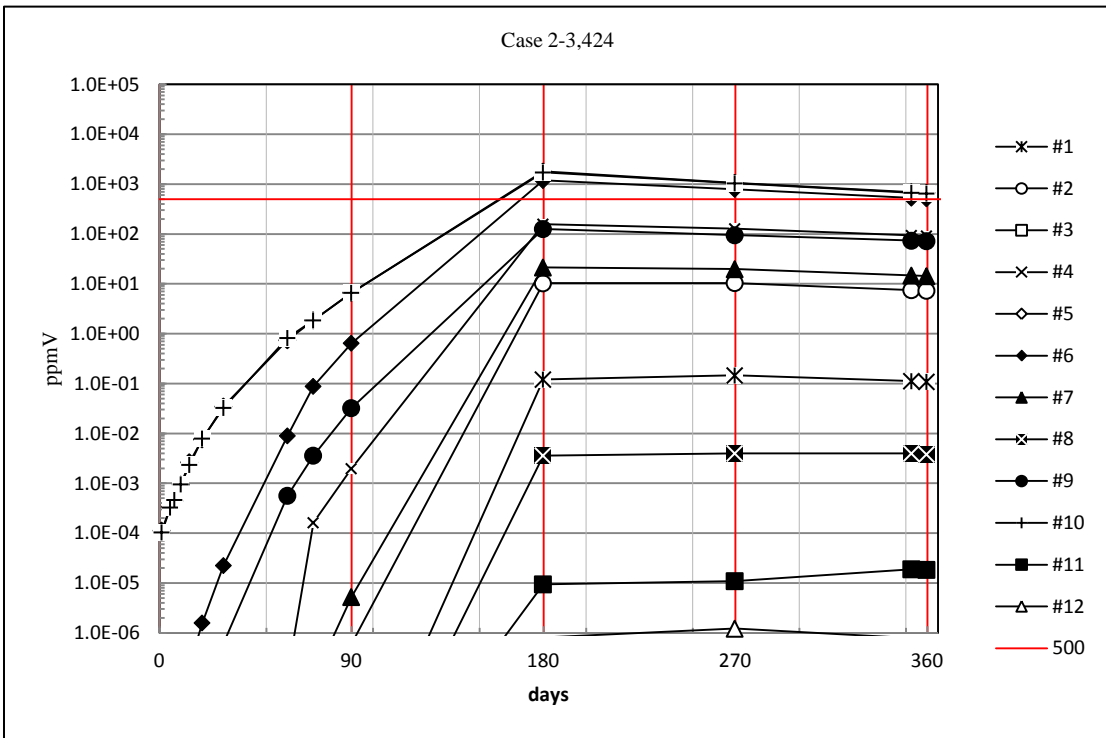


圖 4-6 (k) Case 2-3，424 m 測漏管土壤氣體濃度圖

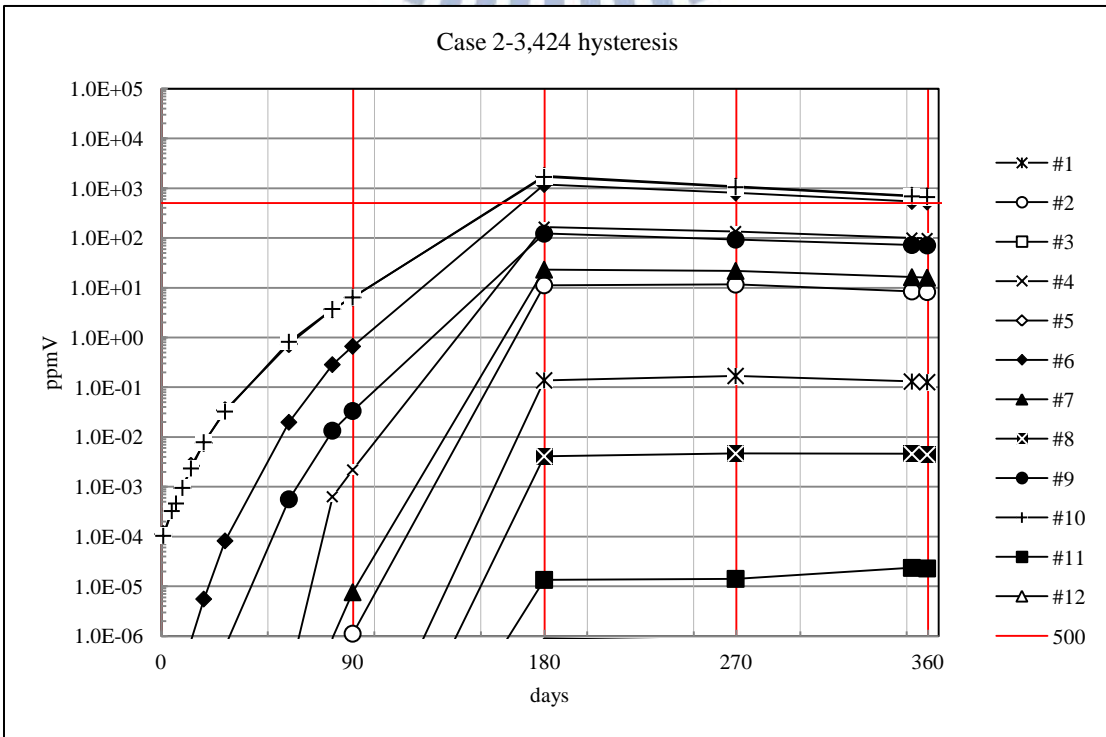


圖 4-6 (l) Case 2-3，424 m (hysteresis) 測漏管土壤氣體濃度圖

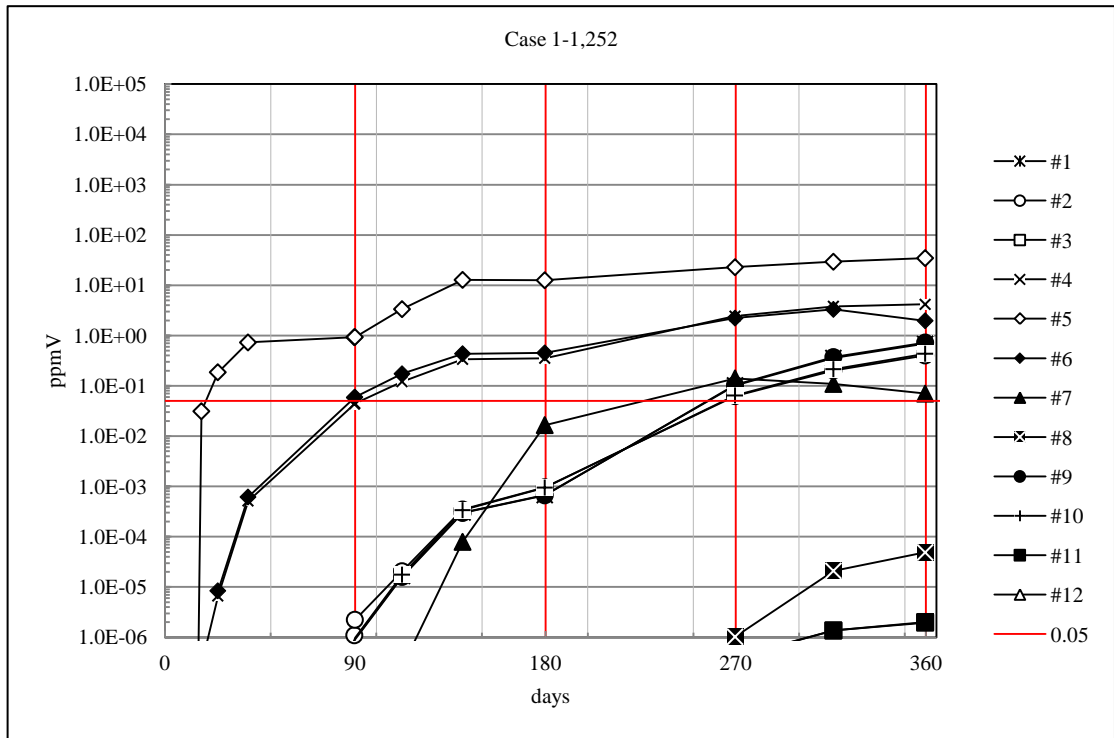


圖 4-7 (a) Case 1-1，252 m 測漏管地下水體含苯濃度圖

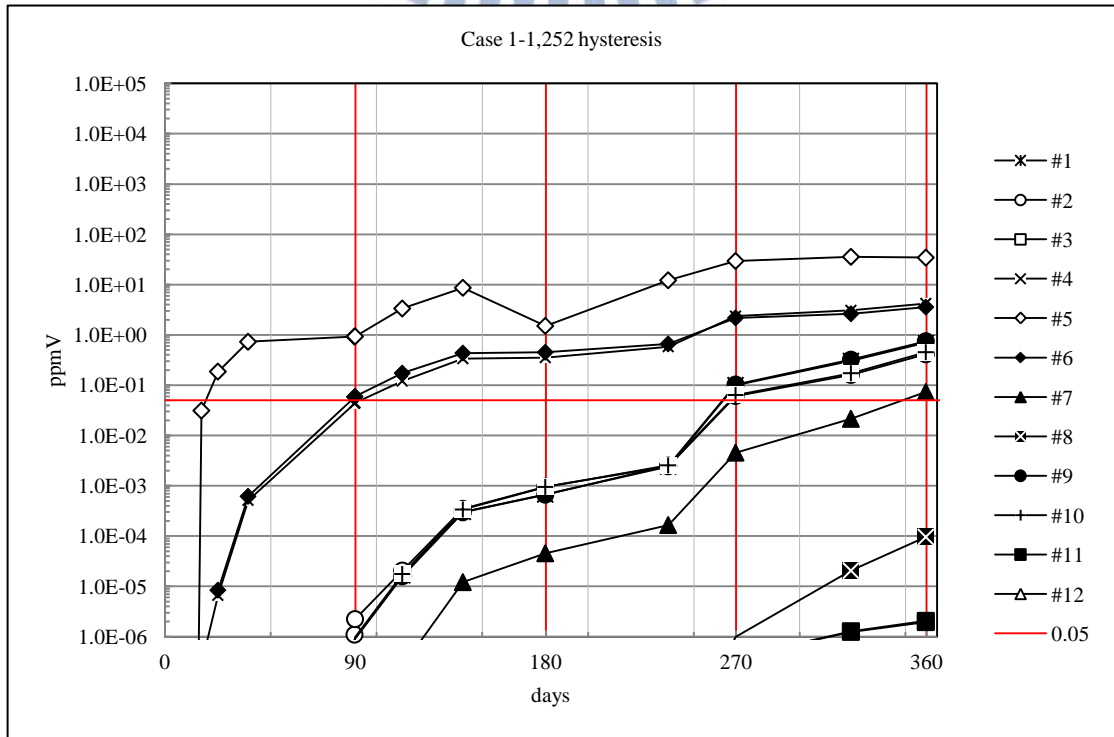


圖 4-7 (b) Case 1-1，252 m (hysteresis) 測漏管地下水體含苯濃度圖

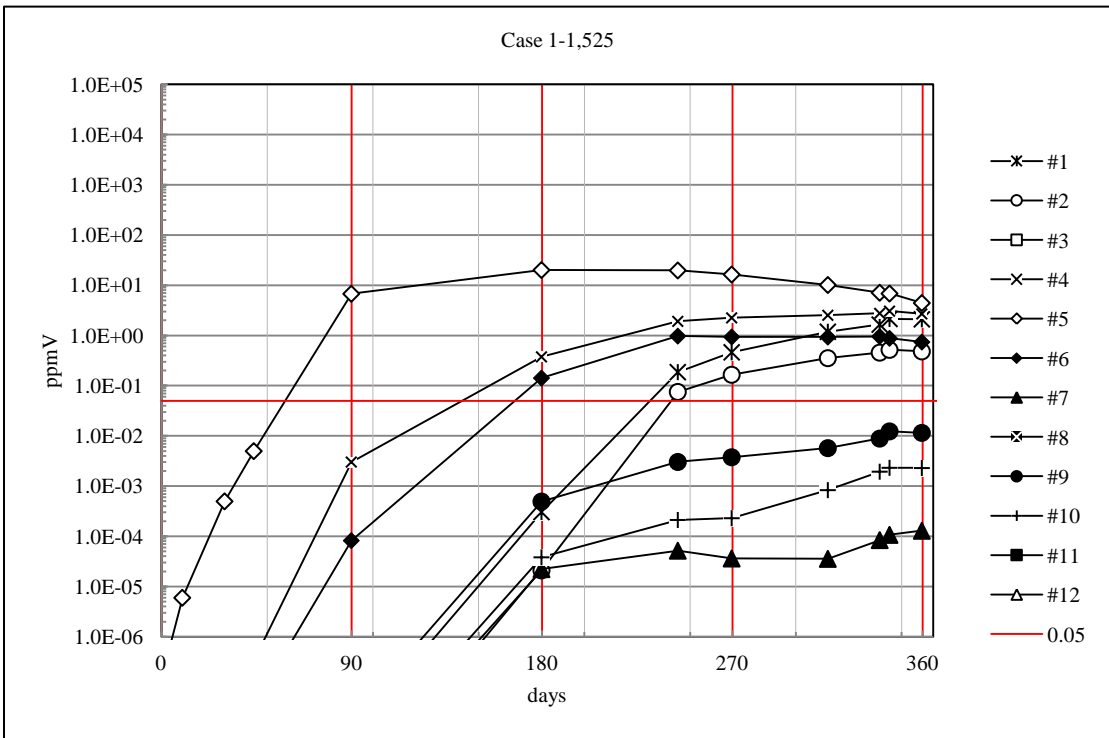


圖 4-7 (c) Case 1-1，525 m 測漏管地下水體含苯濃度圖

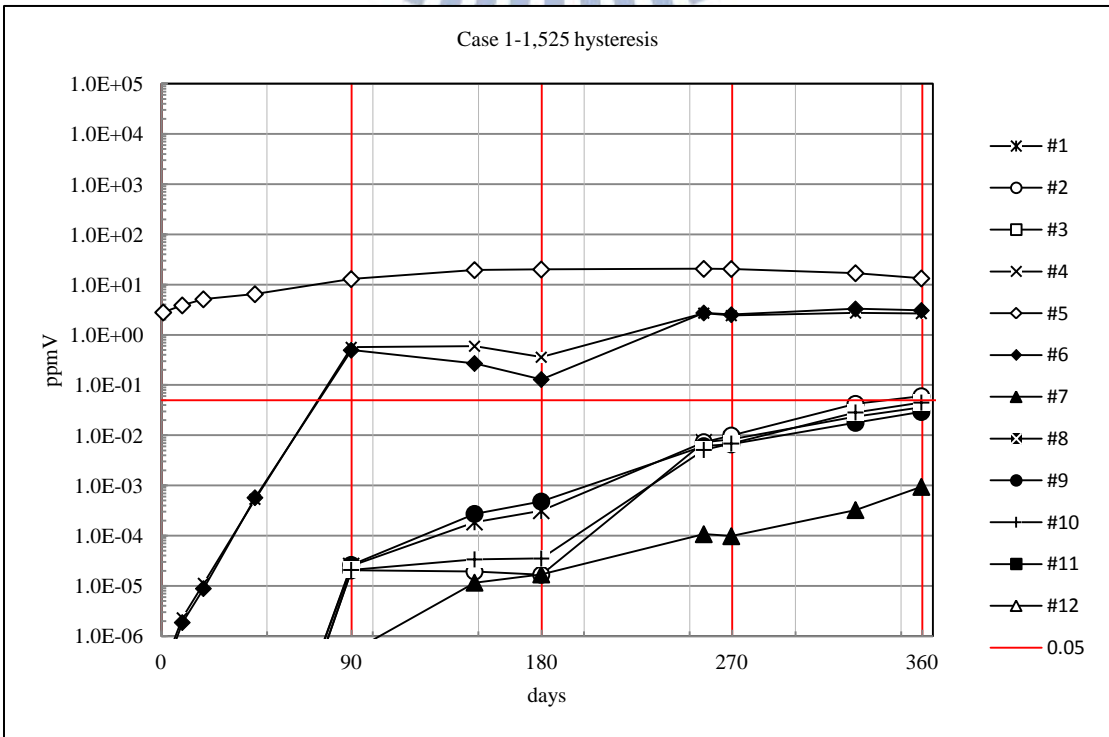


圖 4-7(d) Case 1-1，525 m (hysteresis) 測漏管地下水體含苯濃度圖

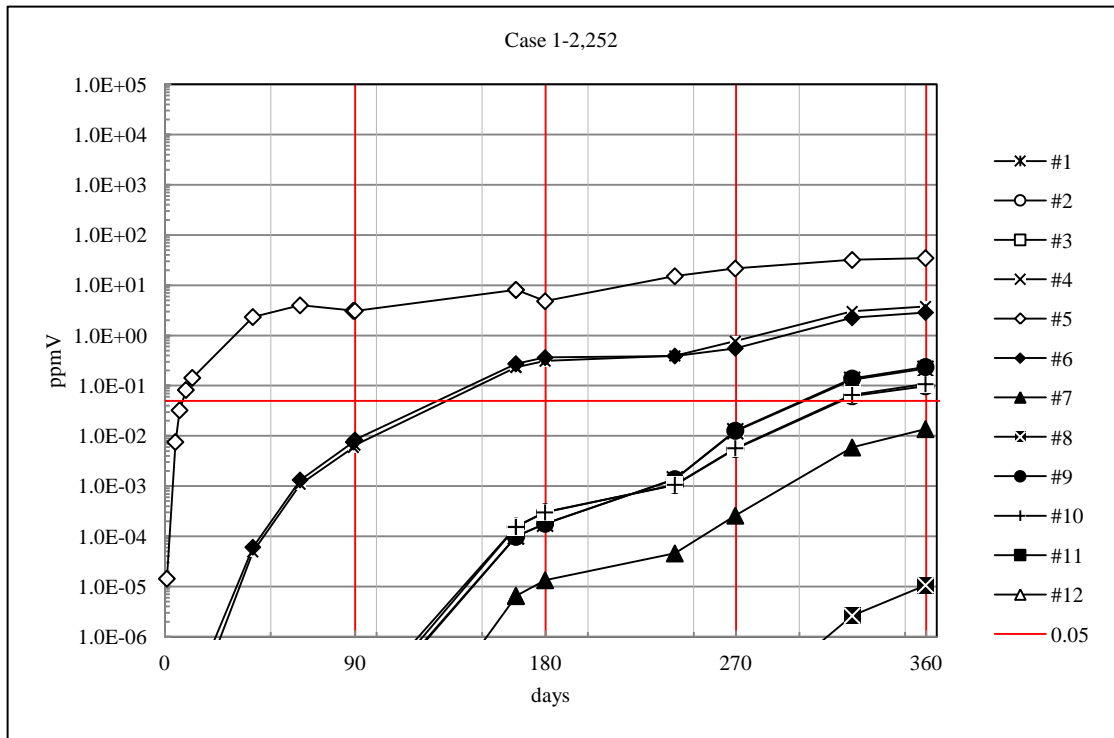


圖 4-7 (e) Case 1-2，252 m 測漏管地下水體含苯濃度圖

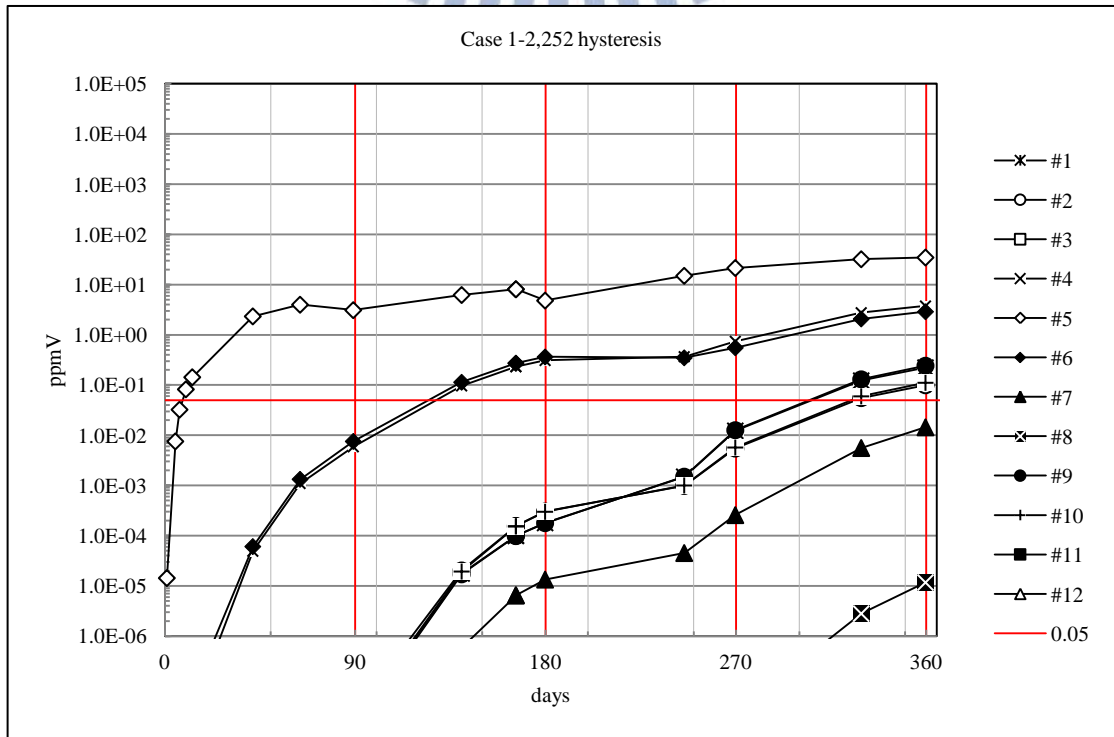


圖 4-7 (f) Case 1-2，252 m (hysteresis) 測漏管地下水體含苯濃度圖

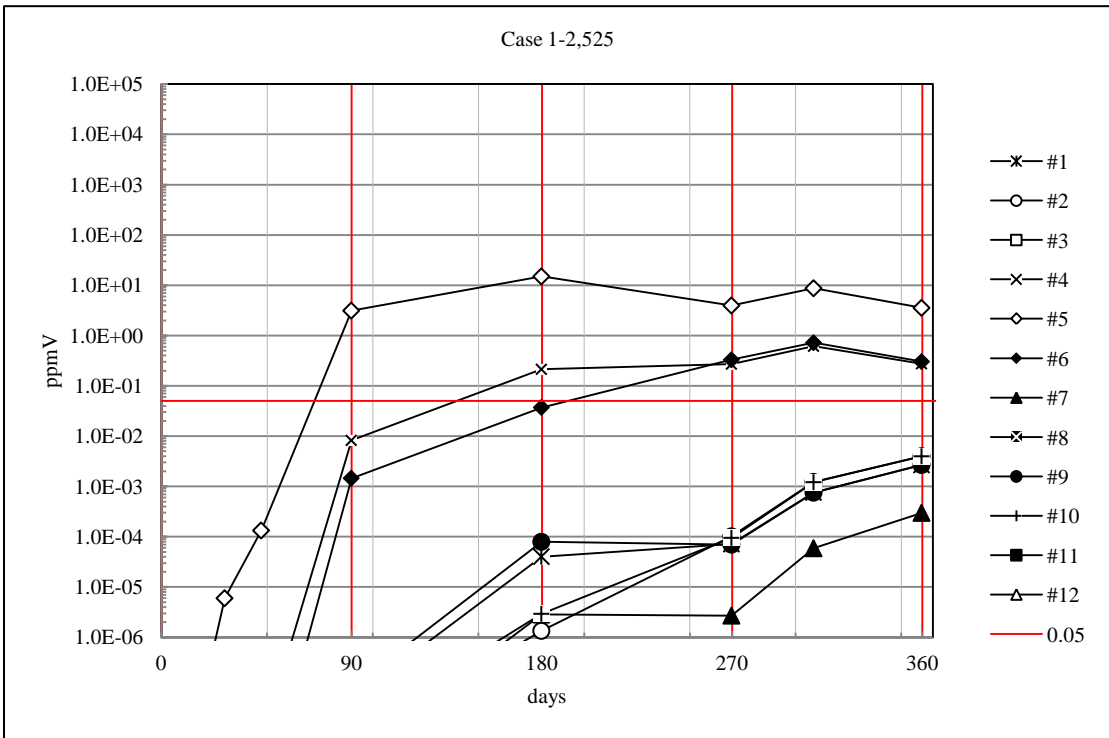


圖 4-7 (g) Case 1-2 , 525 m 測漏管地下水體含苯濃度圖

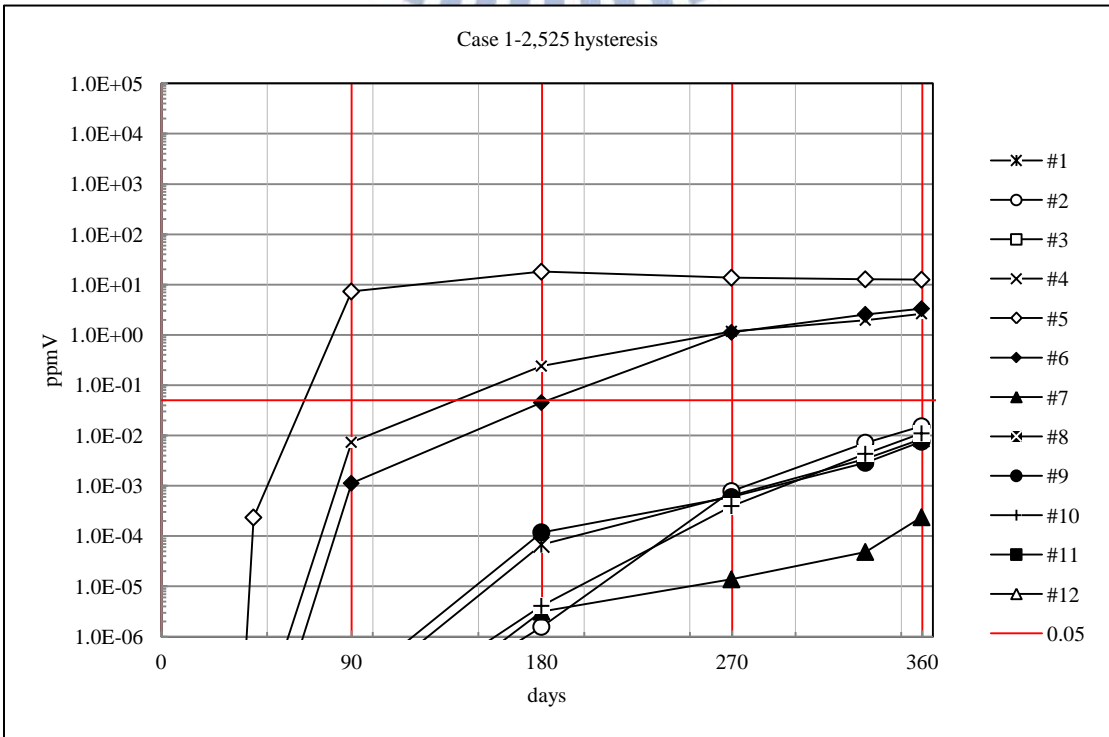


圖 4-7 (h) Case 1-2 , 525 m (hysteresis) 測漏管地下水體含苯濃度圖

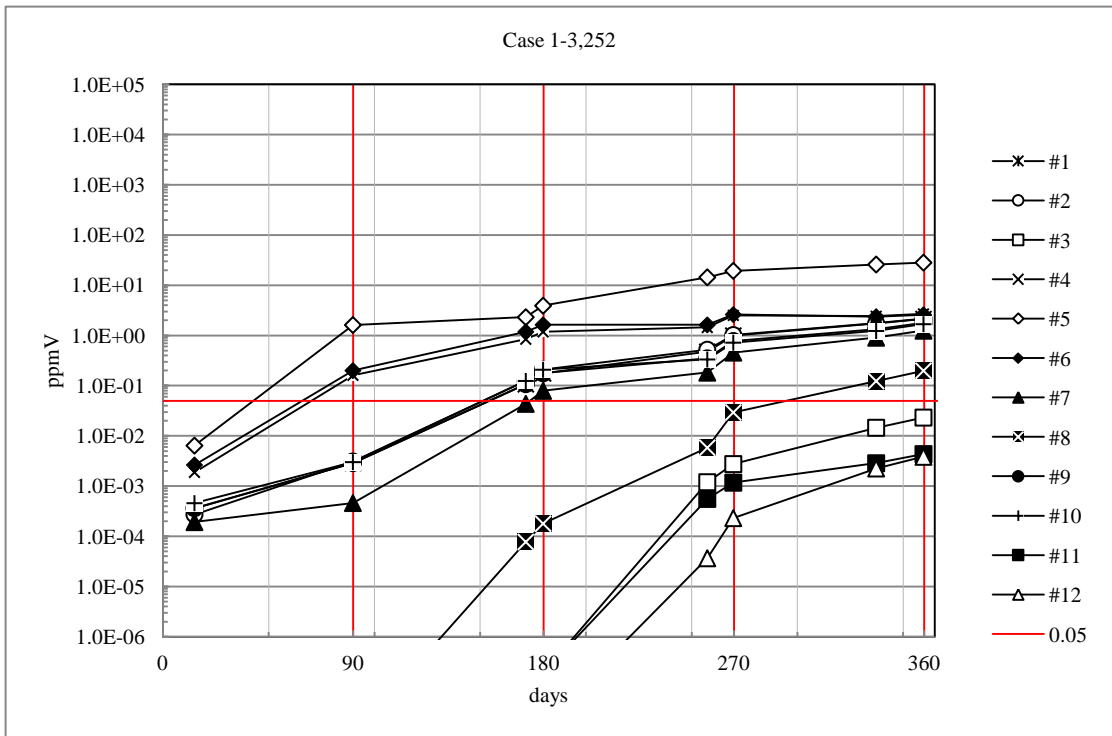


圖 4-7 (i) Case 1-3，252 m 測漏管地下水體含苯濃度圖

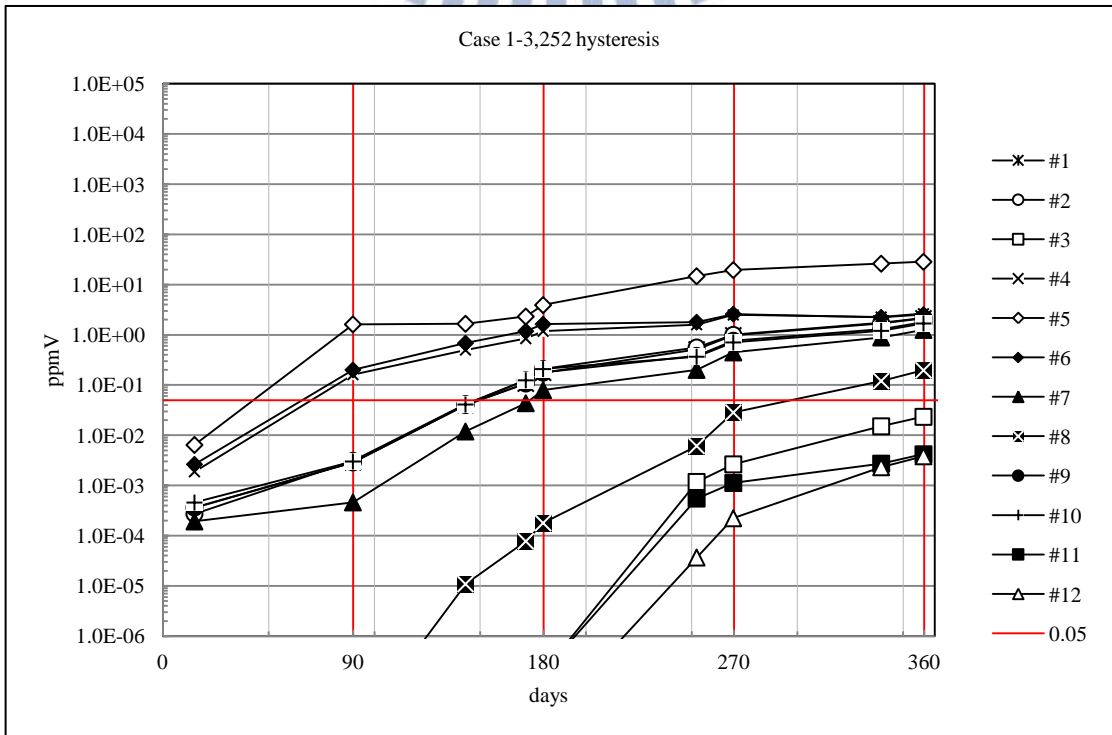


圖 4-7 (j) Case 1-3，252 m (hysteresis) 測漏管地下水體含苯濃度圖

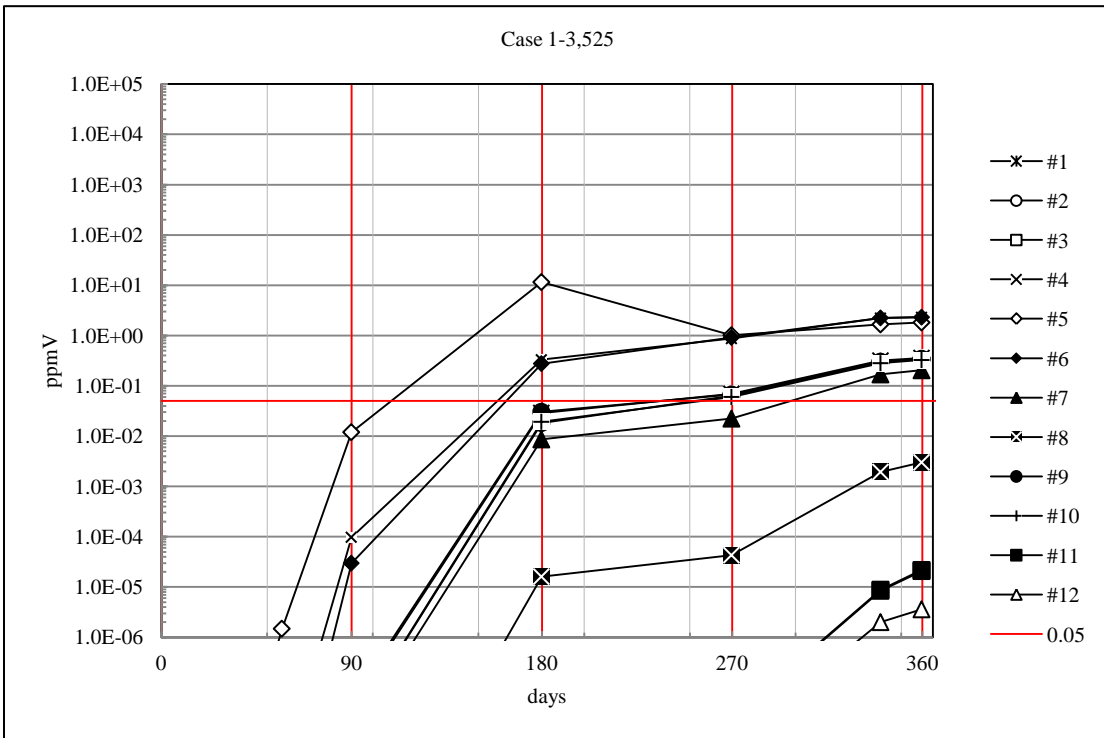


圖 4-7 (k) Case 1-3，525 m 測漏管地下水體含苯濃度圖

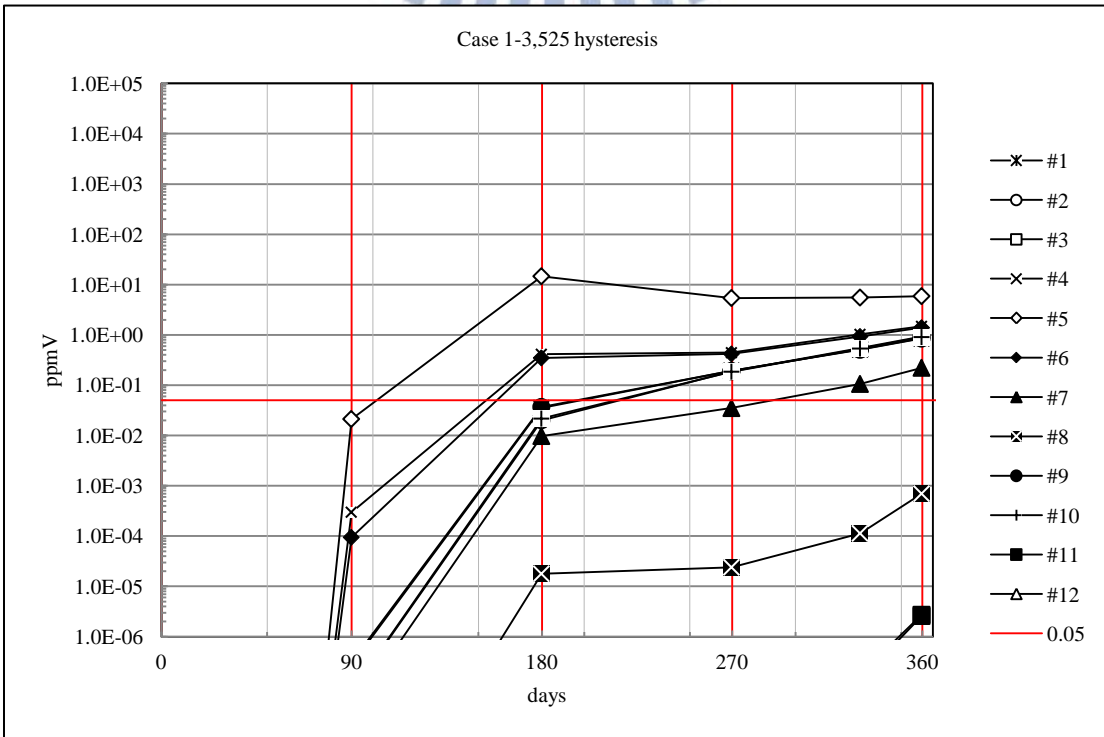


圖 4-7 (l) Case 1-3，525 m (hysteresis) 測漏管地下水體含苯濃度圖

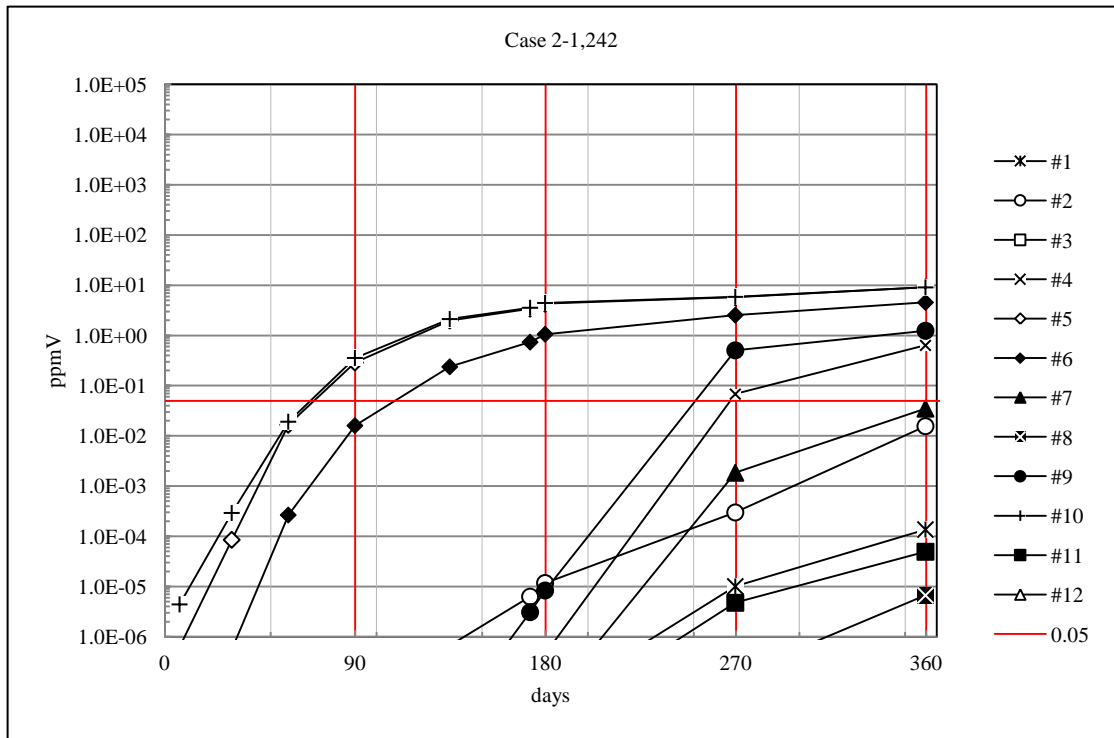


圖 4-8 (a) Case 2-1，242 m 測漏管地下水體含苯濃度圖

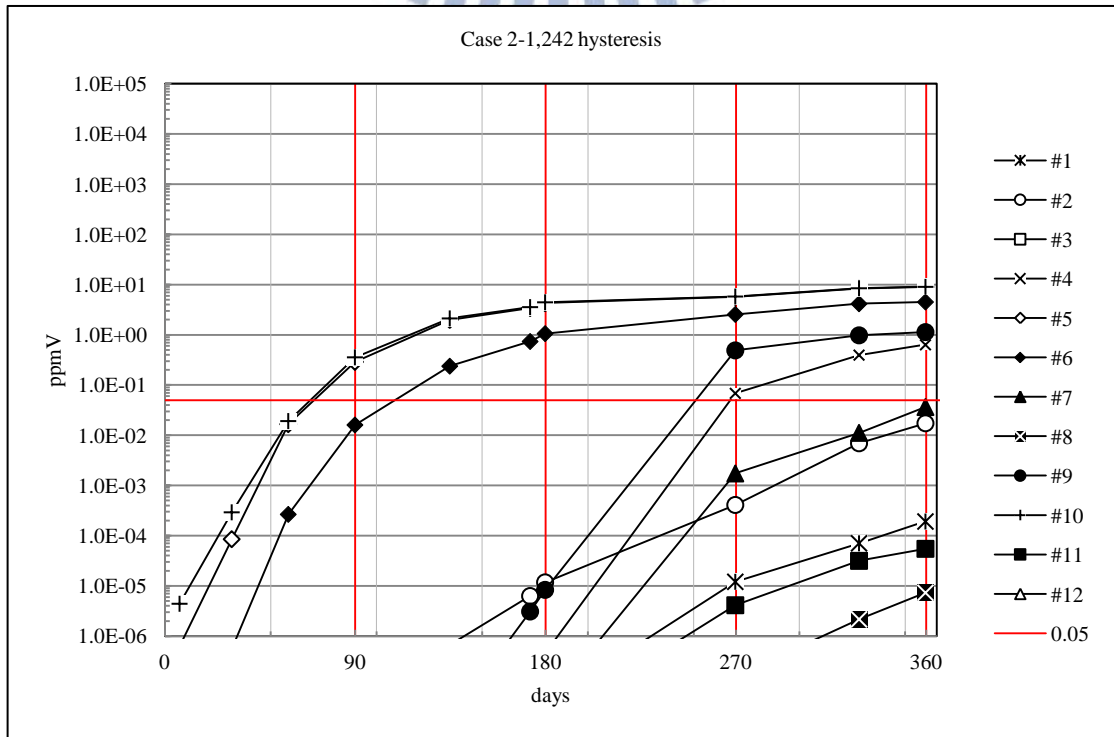


圖 4-8 (b) Case 2-1，242 m (hysteresis) 測漏管地下水體含苯濃度圖

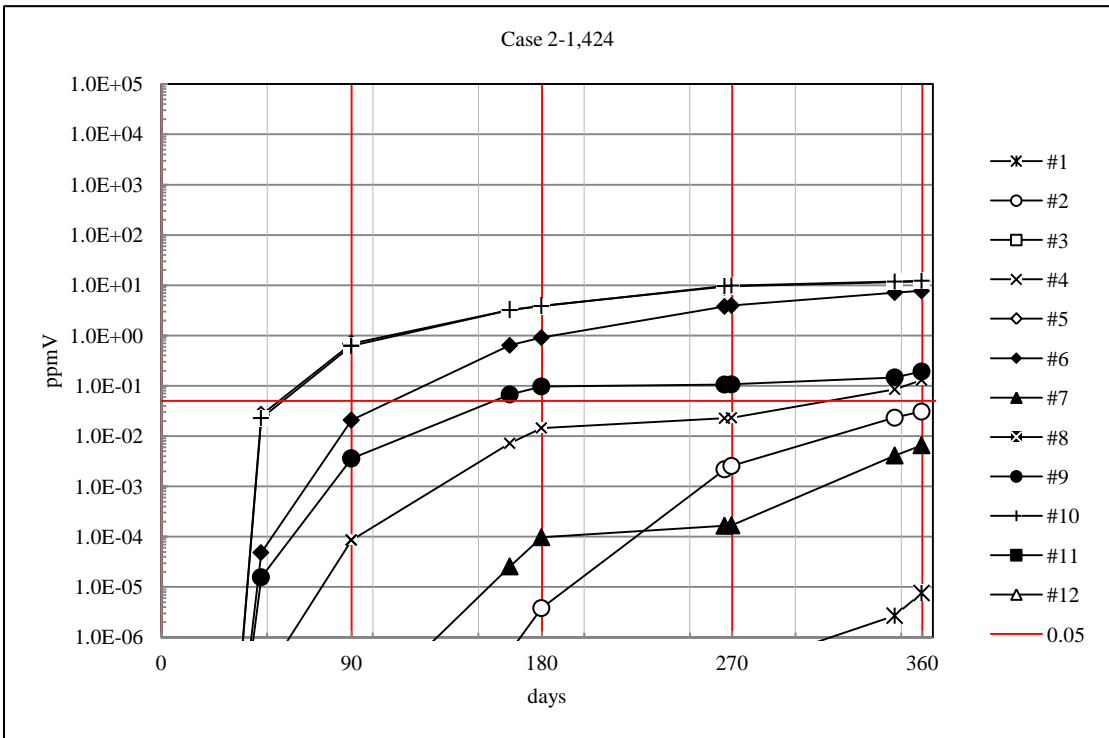


圖 4-8 (c) Case 2-1，424 m 測漏管地下水體含苯濃度圖

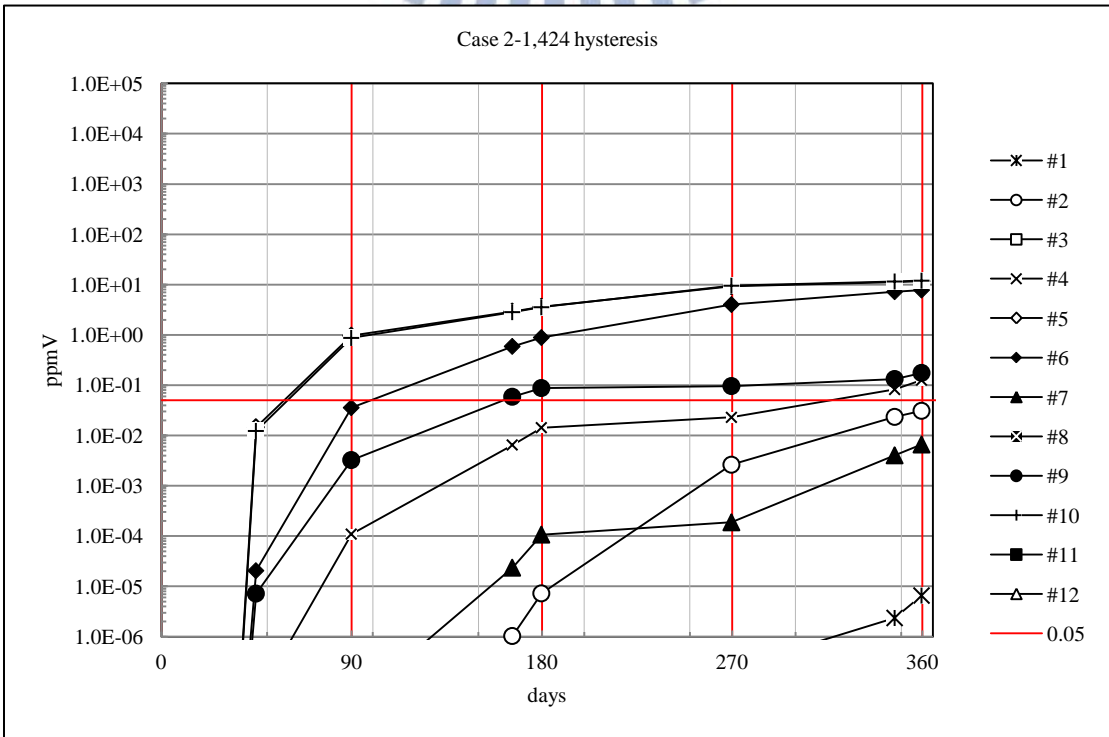


圖 4-8 (d) Case 2-1，424 m (hysteresis) 測漏管地下水體含苯濃度圖

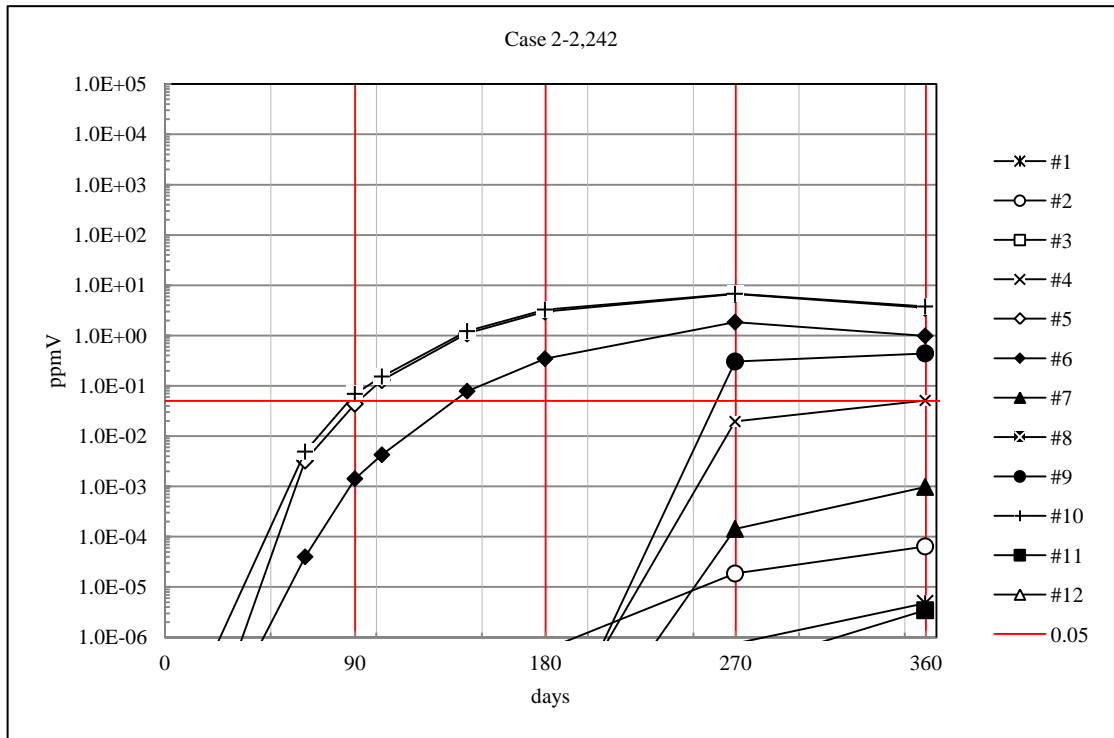


圖 4-8 (e) Case 2-2，242 m 測漏管地下水體含苯濃度圖

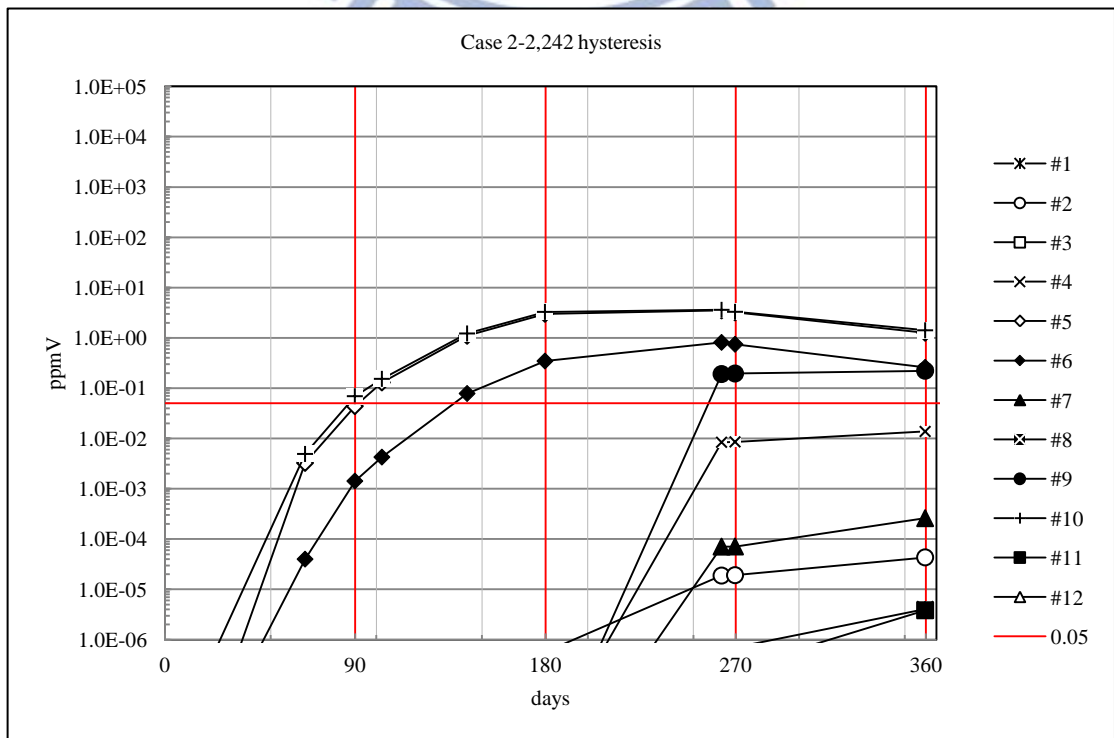


圖 4-8 (f) Case 2-2，242 m (hysteresis)測漏管地下水體含苯濃度圖

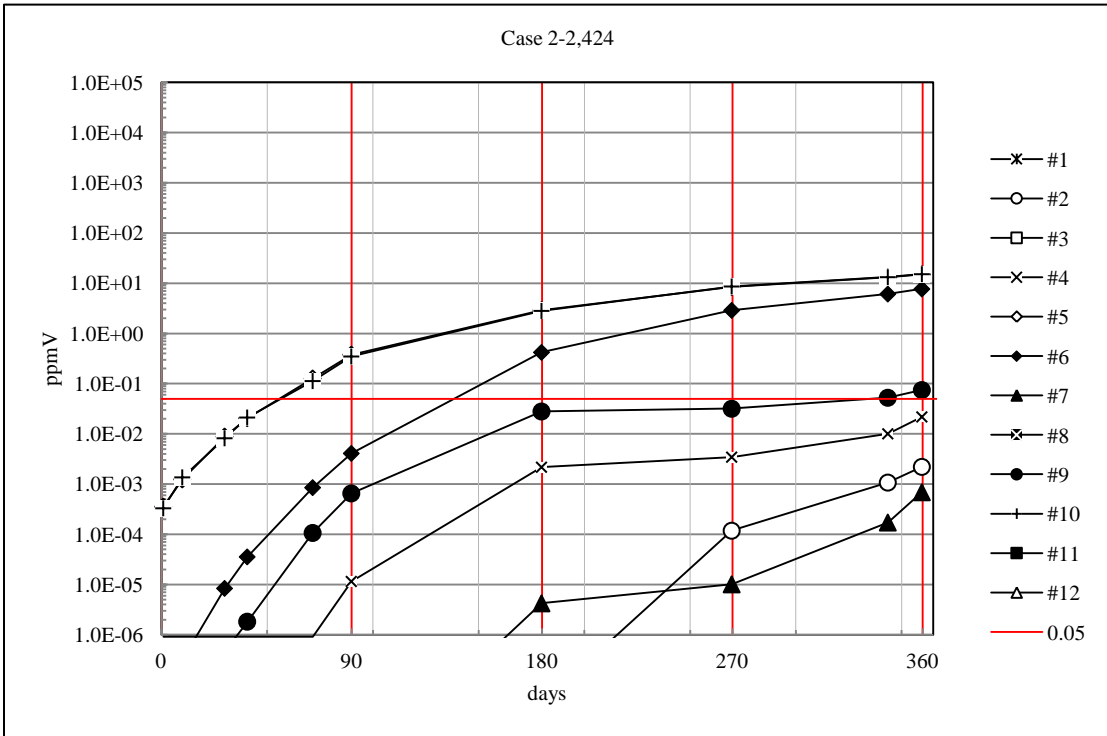


圖 4-8 (g) Case 2-2，424 m 測漏管地下水體含苯濃度圖

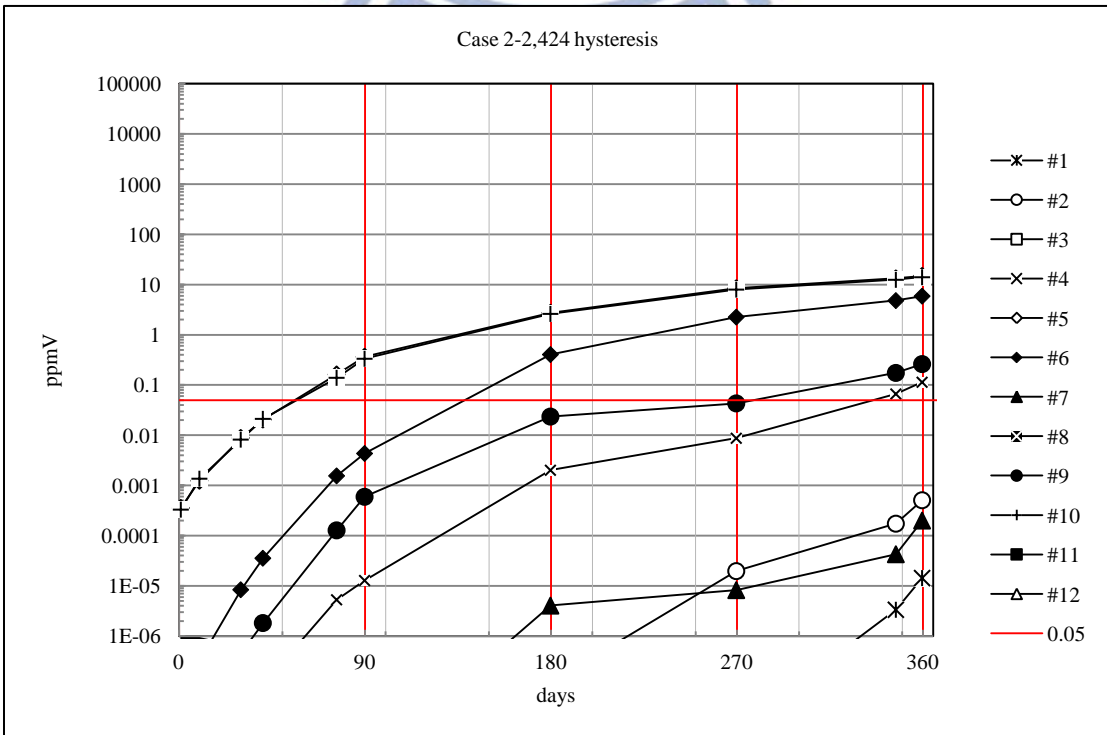


圖 4-8 (h) Case 2-2，424 m (hysteresis)測漏管地下水體含苯濃度圖

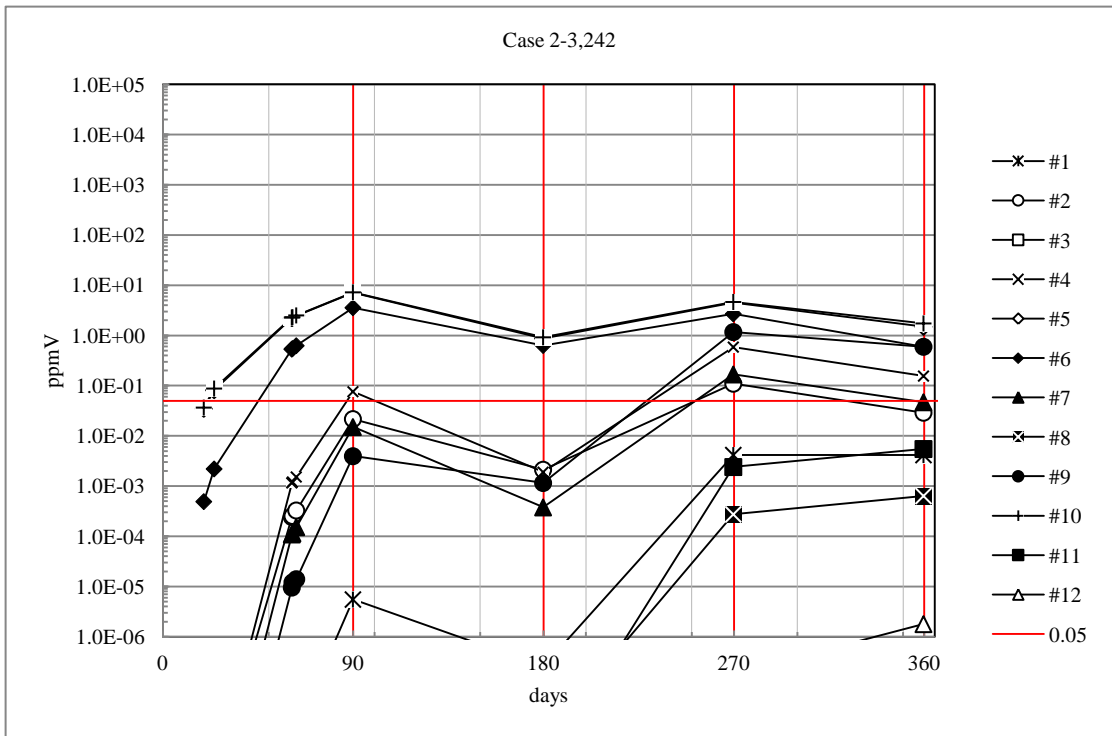


圖 4-8 (i) Case 2-3，242m 測漏管地下水體含苯濃度圖

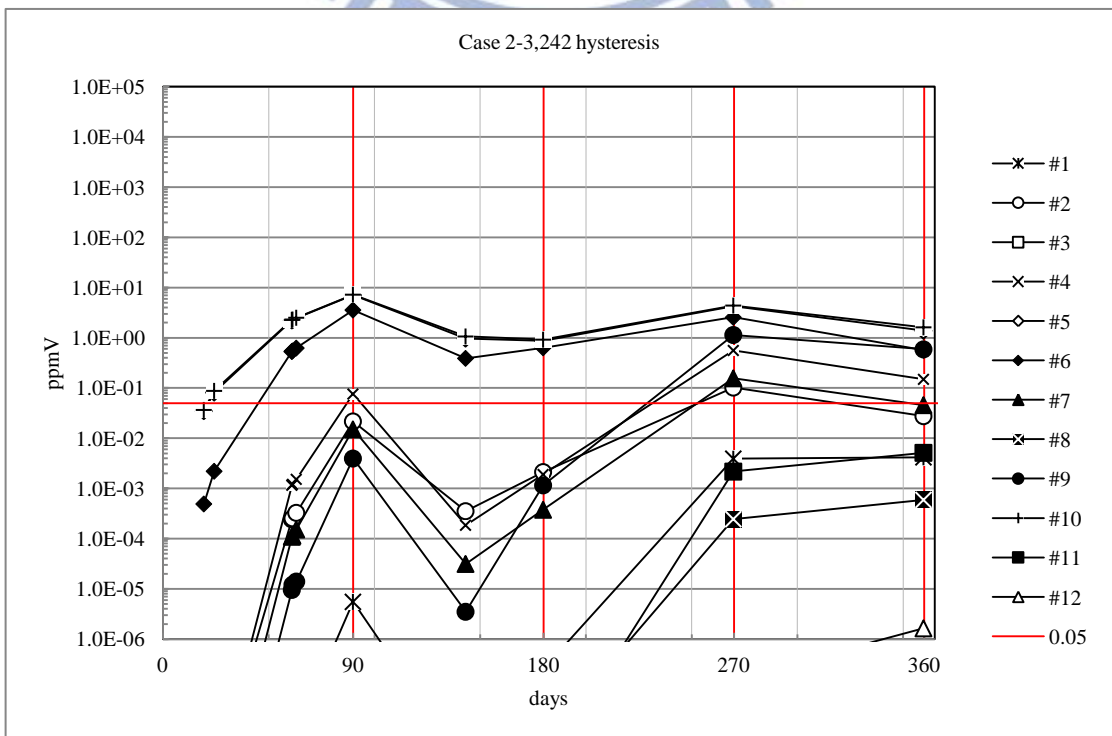


圖 4-8 (j) Case 2-3，242m (hysteresis) 測漏管地下水體含苯濃度圖

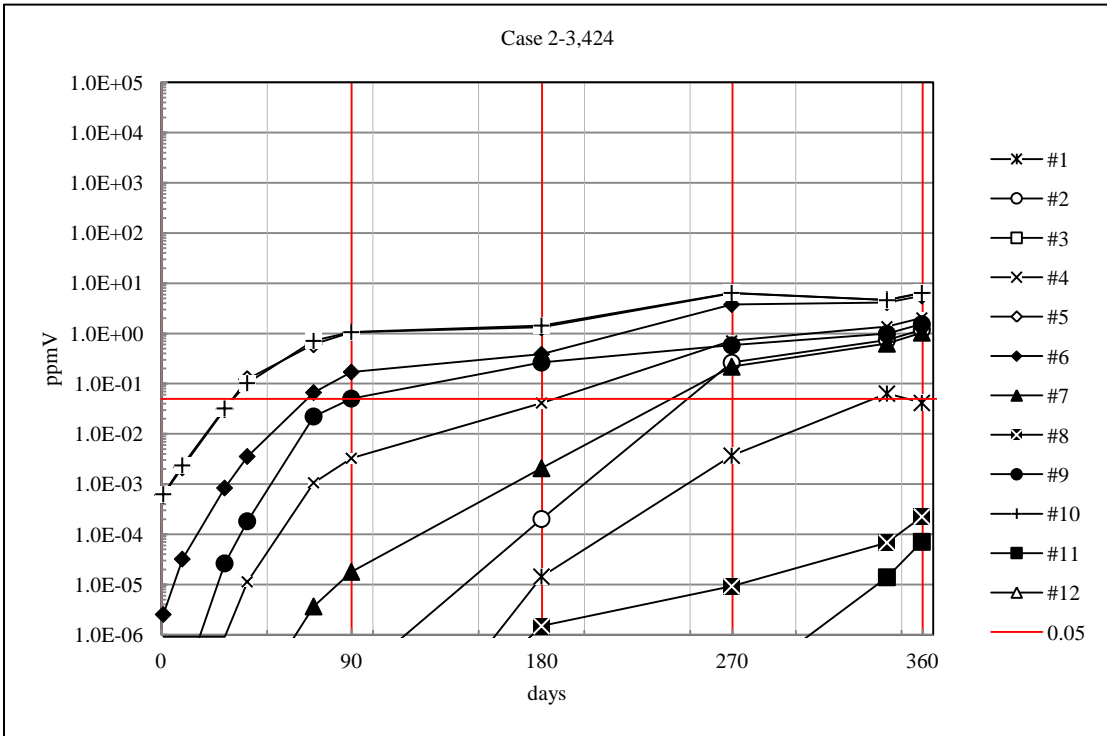


圖 4-8 (k) Case 2-3，424 m 測漏管地下水體含苯濃度圖

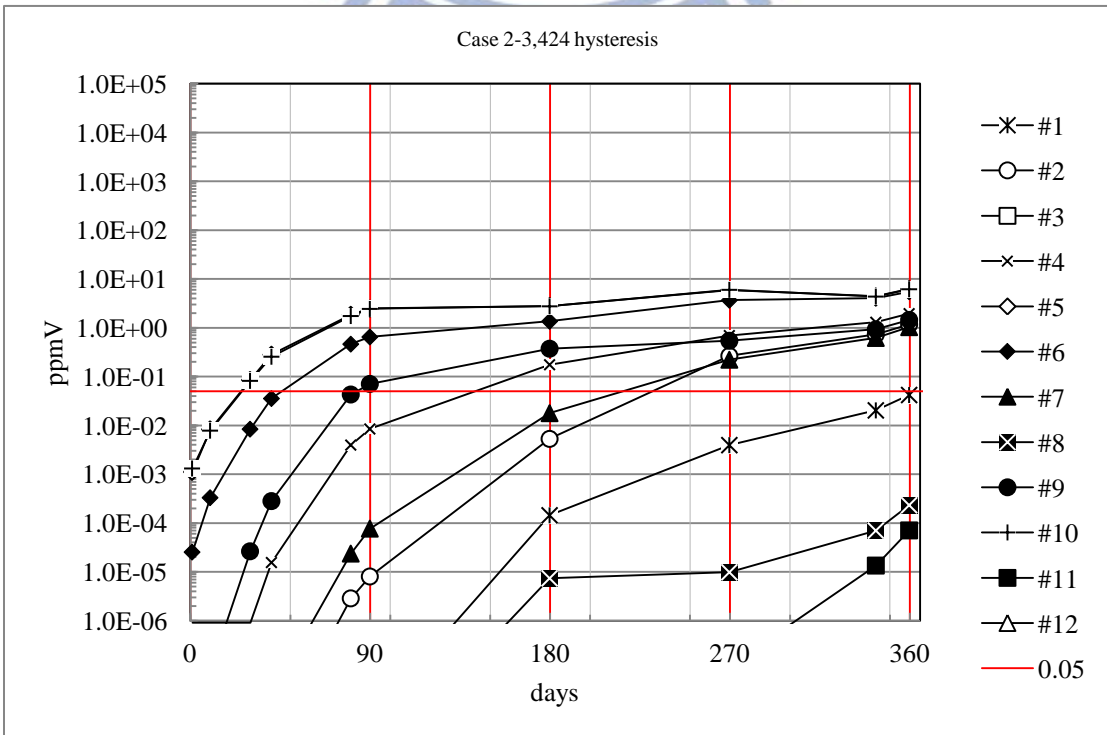


圖 4-8 (l) Case 2-3，424 m (hysteresis) 測漏管地下水體含苯濃度圖

表 4-1 (a) Case 1-1，252 模擬結果

模擬情境說明		
地下水位變化 (-m) / 遲滯現象	2-5-2 / 無	
土層絕對滲透係數 (m ²) / 孔隙率	2.5×10 ⁻¹² / 0.3	
油品洩漏點	Case1 (儲槽區內之輸油管線)	
油品洩漏時間 / 速率(cm/sec)	360 日 / 1.35	

		氣(ppmV)	液(mg/L)			氣(ppmV)	液(mg/L)			氣(ppmV)	液(mg/L)
#1	90	0.04E+0	9.35E-7	#2	90	0.04E+0	2.24 E-6	#3	90	7.34E-9	6.57 E-11
	180	6.63E+0	6.72E-4		180	7.43E+0	9.61 E-4		180	1.71E-8	8.66 E-9
	270	5.16E+2	0.1		270	5.07E+2	0.06E+0		270	7.84E-5	4.05 E-7
	360	8.22E+2	0.69		360	7.59E+2	4.00E-1		360	6.98E-4	1.95 E-6
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		268 ⁽¹⁾	257 ⁽²⁾	所需時間		268 ⁽¹⁾	265 ⁽²⁾	所需時間		-(3)	-(3)
#4	90	5.05E+2	4.47 E-2	#5	90	4.43E+4	0.93	#6	90	5.05E+2	0.06
	180	2.03E+3	3.54 E-1		180	5.28E+4	0.37		180	1.94E+3	0.45
	270	4.43E+3	2.43		270	5.33E+4	19.55		270	4.42E+3	2.22
	360	7.17E+3	4.17		360	3.82E+4	30.45		360	6.39E+3	1.97
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		90 ⁽¹⁾	92 ⁽²⁾	所需時間		17 ⁽¹⁾	19 ⁽²⁾	所需時間		90 ⁽¹⁾	88 ⁽²⁾
#7	90	4.29E-4	1.20E-9	#8	90	1.85E-8	1.73E-10	#9	90	3.98E-2	9.10E-7
	180	8.67E-1	5.73E-6		180	4.15E-8	1.59E-9		180	1.95E+1	6.66E-4
	270	5.83E+1	6.86E-4		270	5.18E-4	1.03E-6		270	6.58E+2	0.1
	360	9.39E+1	0.03		360	3.79E-2	4.87E-5		360	8.25E+2	0.73
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		-(3)	-(3)	所需時間		-(3)	-(3)	所需時間		254 ⁽¹⁾	257 ⁽²⁾
#10	90	3.95E-2	9.76E-13	#11	90	1.45E-8	3.23E-11	#12	90	1.53E-8	1.92E-10
	180	2.23E+1	9.50E-4		180	2.23E-8	1.52E-9		180	3.11E-8	6.38E-9
	270	6.36E+2	0.06		270	1.67E-4	3.96E-7		270	9.40E-7	4.99E-9
	360	6.41E+2	0.44		360	9.20E-4	2.02E-6		360	4.51E-5	1.20E-7
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		255 ⁽¹⁾	265 ⁽²⁾	所需時間		-(3)	-(3)	所需時間		-(3)	-(3)

註⁽¹⁾:土壤氣體濃度達 500 ppmV 所需之時間(day)。

註⁽²⁾:地下水含苯濃度達 0.05 mg/L 所需之時間(day)。

註⁽³⁾:該監測井之土壤氣體或地下水含苯濃度無達到法規管制標準。

表 4-1 (b) Case 1-1，252(hysteresis)模擬結果

模擬情境說明

地下水位變化 (-m) / 遲滯現象

2-5-2 / 有

土層絕對滲透係數 (m²) / 孔隙率

2.5×10⁻¹² / 0.3

油品洩漏點

Case1 (儲槽區內之輸油管線)

油品洩漏時間 / 速率(cm/sec)

360 日 / 1.35

		氣(ppmV)	液(mg/L)			氣(ppmV)	液(mg/L)			氣(ppmV)	液(mg/L)
#1	90	3.97E-2	9.35E-7	#2	90	3.93E-2	2.24 E-6	#3	90	6.734E-9	6.57 E-11
	180	6.63E+0	6.72E-4		180	7.43E+0	9.61 E-4		180	1.71E-8	8.66 E-9
	270	5.04E+2	0.1		270	4.95E+2	0.06		270	7.73E-5	3.88E-7
	360	9.15E+2	0.7		360	7.57E+2	0.41		360	6.87E-4	1.95E-6
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		270 ⁽¹⁾	264 ⁽²⁾	所需時間		270 ⁽¹⁾	268 ⁽²⁾	所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾
#4	90	5.05E+2	4.47 E-2	#5	90	4.44E+4	0.93	#6	90	5.05E+2	0.06
	180	2.03E+3	3.54 E-1		180	5.28E+4	0.37		180	1.94E+3	0.45
	270	3.88E+3	2.36		270	4.45E+4	29.5		270	3.88E+3	2.18
	360	7.03E+3	4.23		360	3.75E+4	34.4		360	6.43E+3	3.07
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		90 ⁽¹⁾	92 ⁽²⁾	所需時間		17 ⁽¹⁾	17 ⁽²⁾	所需時間		90 ⁽¹⁾	88 ⁽²⁾
#7	90	4.29E-4	1.20E-9	#8	90	1.85E-8	1.73E-10	#9	90	3.98E-2	9.10E-7
	180	8.67E-1	5.73E-6		180	4.15E-8	1.59E-9		180	1.95E+1	6.66E-4
	270	3.96E+1	4.56E-3		270	3.23E-4	9.98E-7		270	5.04E+2	0.1
	360	1.07E+2	0.07		360	3.25E-2	9.60E-5		360	9.46E+2	0.75
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		- ⁽³⁾	349 ⁽²⁾	所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾	所需時間		254 ⁽¹⁾	264 ⁽²⁾
#10	90	3.95E-2	9.76E-13	#11	90	1.45E-8	3.23E-11	#12	90	1.53E-8	1.92E-10
	180	3.95E-2	9.50E-4		180	2.23E-8	1.52E-9		180	3.12E-8	6.38E-9
	270	4.95E+2	0.06E-4		270	7.73E-5	3.81E-7		270	4.72E-7	0.1
	360	7.82E+2	0.45E-1		360	6.87E-4	9.60E-5		360	3.70E-5	0.75
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		255 ⁽¹⁾	267 ⁽²⁾	所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾	所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾

註⁽¹⁾:土壤氣體濃度達 500 ppmV 所需之時間(day)。

註⁽²⁾:地下水含苯濃度達 0.05 mg/L 所需之時間(day)。

註⁽³⁾:該監測井之土壤氣體或地下水含苯濃度無達到法規管制標準。

表 4-1 (c) Case 1-1，525 模擬結果

模擬情境說明		
地下水位變化 (-m) / 遲滯現象	5-2-5 / 無	
土層絕對滲透係數 (m ²) / 孔隙率	2.5×10 ⁻¹² / 0.3	
油品洩漏點	Case1 (儲槽區內之輸油管線)	
油品洩漏時間 / 速率(cm/sec)	360 日 / 1.35	

		氣(ppmV)	液(mg/L)			氣(ppmV)	液(mg/L)			氣(ppmV)	液(mg/L)
#1	90	4.78E-2	1.11E-8	#2	90	4.61E-2	1.29E-9	#3	90	5.95E-10	1.04E-13
	180	1.87E+0	3.06E-4		180	3.17E-1	2.10E-5		180	1.59E-9	1.23E-12
	270	1.33E+2	0.46		270	5.31E+1	0.17		270	2.71E-8	3.28E-10
	360	3.84E+2	2.11		360	2.77E+2	0.48		360	7.36E-9	4.24E-10
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		- ⁽³⁾	231 ⁽²⁾	所需時間		- ⁽³⁾	241 ⁽²⁾	所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾
#4	90	6.44E+2	3.03E-3	#5	90	4.46E+4	6.79	#6	90	6.40E+2	8.26E-5
	180	2.78E+3	0.38		180	2.50E+4	20.2		180	1.91E+3	0.14
	270	5.62E+3	2.25		270	4.48E+4	16.4		270	4.43E+3	0.94
	360	5.88E+3	2.7		360	4.46E+4	4.45		360	5.26E+3	0.74
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		85 ⁽¹⁾	142 ⁽²⁾	所需時間		44 ⁽¹⁾	58 ⁽²⁾	所需時間		85 ⁽¹⁾	167 ⁽²⁾
#7	90	7.38E-4	5.99E-10	#8	90	3.21E-10	2.08E-13	#9	90	4.80E-2	2.31E-8
	180	8.52E+2	2.23E-5		180	5.33E-6	3.30E-9		180	2.57E+0	4.96E-4
	270	1.35E-1	3.64E-5		270	2.23E-6	1.77E-9		270	1.41E+1	3.77E-3
	360	1.25E+1	1.30E-4		360	1.76E-6	2.37E-9		360	2.89E+2	0.01
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾	所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾	所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾
#10	90	4.62E-2	2.14E-9	#11	90	1.35E-10	2.32E-13	#12	90	1.02E-10	3.23E-13
	180	4.24E-1	3.84E-5		180	2.80E-9	8.32E-13		180	2.37E-9	2.39E-12
	270	6.86E+0	2.31E-4		270	5.35E-9	3.28E-11		270	5.59E-9	1.24E-11
	360	2.36E+2	2.30E-3		360	2.35E-9	5.31E-7		360	2.33E-9	5.66E-9
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾	所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾	所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾

註⁽¹⁾:土壤氣體濃度達 500 ppmV 所需之時間(day)。

註⁽²⁾:地下水含苯濃度達 0.05 mg/L 所需之時間(day)。

註⁽³⁾:該監測井之土壤氣體或地下水含苯濃度無達到法規管制標準。

表 4-1 (d) Case 1-1，525(hysteresis)模擬結果

模擬情境說明

地下水水位變化 (-m) / 遲滯現象	5-2-5 / 有
土層絕對滲透係數 (m ²) / 孔隙率	2.5×10 ⁻¹² / 0.3
油品洩漏點	Case1 (儲槽區內之輸油管線)
油品洩漏時間 / 速率(cm/sec)	360 日 / 1.35

		氣(ppmV)	液(mg/L)			氣(ppmV)	液(mg/L)			氣(ppmV)	液(mg/L)
#1	90	2.30E-2	2.51E-5	#2	90	2.11E+2	2.04E-5	#3	90	5.97E-11	1.65E-12
	180	2.30E+0	3.13E-4		180	2.10E-1	1.68E-5		180	3.21E-10	1.57E-12
	270	2.02E+1	8.29E-3		270	1.28E+1	9.90E-3		270	1.04E-9	6.50E-12
	360	2.36E+2	3.60E-2		360	1.99E+2	6.00E-2		360	2.22E-10	7.76E-12
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		-(³)	-(³)	所需時間		-(³)	343(²)	所需時間		-(³)	-(³)
#4	90	4.83E+2	5.66E-1	#5	90	4.45E+4	1.29E+1	#6	90	4.77E+2	4.96E-1
	180	2.80E+3	3.60E-1		180	2.40E+4	2.01E+1		180	1.90E+3	1.29E-1
	270	5.34E+3	2.42E+0		270	4.50E+4	2.06E+1		270	4.89E+3	2.53E+0
	360	5.80E+3	2.66E+0		360	4.44E+4	1.33E+1		360	4.83E+3	3.07E+0
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		92(¹)	75(²)	所需時間		74(¹)	44(²)	所需時間		94(¹)	77(²)
#7	90	3.56E-4	4.85E-7	#8	90	2.14E-10	6.58E-12	#9	90	2.31E-2	2.63E-5
	180	7.80E-2	1.70E-5		180	4.56E-6	2.46E-9		180	2.81E+0	4.80E-4
	270	2.16E-1	9.82E-5		270	2.56E-6	6.48E-9		270	2.08E+1	6.62E-3
	360	1.09E+1	9.42E-4		360	1.16E-6	5.40E-9		360	2.38E+2	2.93E-2
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		-(³)	-(³)	所需時間		-(³)	-(³)	所需時間		-(³)	-(³)
#10	90	2.13E-2	2.09E-5	#11	90	2.40E-6	2.59E-12	#12	90	1.79E-10	2.43E-14
	180	3.28E-1	3.53E-5		180	3.46E-2	1.77E-12		180	2.05E-9	1.23E-12
	270	1.28E+1	6.87E-3		270	1.94E-2	4.34E-12		270	2.06E-9	3.20E-12
	360	2.00E+2	4.50E-2		360	3.14E-2	4.50E-12		360	5.73E-10	3.54E-12
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		-(³)	-(³)	所需時間		-(³)	-(³)	所需時間		-(³)	-(³)

註⁽¹⁾:土壤氣體濃度達 500 ppmV 所需之時間(day)。

註⁽²⁾:地下水含苯濃度達 0.05 mg/L 所需之時間(day)。

註⁽³⁾:該監測井之土壤氣體或地下水含苯濃度無達到法規管制標準。

表 4-2 (a) Case 1-2，252 模擬結果

模擬情境說明		
地下水位變化 (-m) / 遲滯現象	2-5-2 / 無	
土層絕對滲透係數 (m ²) / 孔隙率	2.5×10 ⁻¹² / 0.4	
油品洩漏點	Case1 (儲槽區內之輸油管線)	
油品洩漏時間 / 速率(cm/sec)	360 日 / 1.35	

		氣(ppmV)	液(mg/L)			氣(ppmV)	液(mg/L)			氣(ppmV)	液(mg/L)
#1	90	3.31E-3	2.15E-8	#2	90	3.25E-3	3.78E-8	#3	90	3.11E-9	1.11E-10
	180	7.57E-1	1.80E-4		180	1.09E+0	3.03E-4		180	8.94E-10	2.84E-10
	270	1.55E+2	1.24E-2		270	1.44E+2	5.51E-3		270	1.06E-5	1.09E-8
	360	3.50E+2	2.18E-1		360	2.79E+2	9.79E-2		360	9.89E-5	1.79E-7
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		-(3)	322(2)	所需時間		-(3)	310(2)	所需時間		-(3)	-(3)
#4	90	2.66E+2	6.58E-3	#5	90	5.92E+4	3.10E+0	#6	90	2.66E+2	8.39E-3
	180	7.81E+2	3.10E-1		180	5.87E+4	4.83E+0		180	7.37E+2	3.64E-1
	270	4.18E+3	7.72E-1		270	5.93E+4	2.16E+1		270	4.18E+3	5.57E-1
	360	7.10E+3	3.79E+0		360	4.98E+4	3.49E+1		360	6.10E+3	2.87E+0
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		117(1)	125(2)	所需時間		13(1)	13(2)	所需時間		117(1)	120(2)
#7	90	3.37E-5	2.40E-10	#8	90	2.13E-9	5.16E-11	#9	90	3.33E-3	1.99E-8
	180	3.08E-2	1.34E-5		180	1.17E-9	1.80E-10		180	7.44E-1	1.79E-4
	270	6.03E+0	2.59E-4		270	1.81E-5	2.96E-8		270	1.56E+2	1.27E-2
	360	2.10E+1	1.37E-2		360	4.65E-3	1.07E-5		360	3.62E+2	2.36E-1
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		-(3)	-(3)	所需時間		-(3)	-(3)	所需時間		-(3)	301(2)
#10	90	3.28E-3	2.57E-8	#11	90	3.52E-9	4.24E-11	#12	90	4.43E-9	6.00E-11
	180	1.09E+0	3.01E-4		180	9.67E-10	2.54E-10		180	1.53E-9	1.11E-10
	270	1.44E+2	5.71E-3		270	1.06E-5	1.09E-8		270	2.62E-8	7.65E-11
	360	2.86E+2	1.08E-1		360	9.85E-5	1.86E-7		360	4.43E-6	1.22E-8
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		-(3)	309(2)	所需時間		-(3)	-(3)	所需時間		-(3)	-(3)

註(1):土壤氣體濃度達 500 ppmV 所需之時間(day)。

註(2):地下水含苯濃度達 0.05 mg/L 所需之時間(day)。

註(3):該監測井之土壤氣體或地下水含苯濃度無達到法規管制標準。

表 4-2 (b) Case 1-2，252(hysteresis)模擬結果

模擬情境說明

地下水位變化 (-m) / 遲滯現象	2-5-2 / 有
土層絕對滲透係數 (m ²) / 孔隙率	2.5×10 ⁻¹² / 0.4
油品洩漏點	Case1 (儲槽區內之輸油管線)
油品洩漏時間 / 速率(cm/sec)	360 日 / 1.35

		氣(ppmV)	液(mg/L)			氣(ppmV)	液(mg/L)			氣(ppmV)	液(mg/L)
#1	90	3.31E-3	2.15E-8	#2	90	3.25E-3	3.78E-8	#3	90	3.11E-9	1.11E-10
	180	7.57E-1	1.80E-4		180	1.09E+0	3.03E-4		180	8.94E-10	2.84E-10
	270	1.50E+2	1.23E-2		270	1.39E+2	5.47E-3		270	1.06E-5	1.05E-8
	360	3.45E+2	2.24E-1		360	2.71E+2	9.96E-2		360	9.73E-5	1.80E-7
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		- ⁽³⁾	306 ⁽²⁾	所需時間		- ⁽³⁾	327 ⁽²⁾	所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾
#4	90	2.66E+2	6.58E-3	#5	90	5.92E+4	3.10E+0	#6	90	2.66E+2	8.39E-3
	180	7.81E+2	3.10E-1		180	5.87E+4	4.83E+0		180	7.37E+2	3.64E-1
	270	4.11E+3	7.46E-1		270	5.93E+4	2.15E+1		270	4.12E+3	5.54E-1
	360	7.14E+3	3.77E+0		360	4.94E+4	3.48E+1		360	6.16E+3	2.90E+0
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		117 ⁽¹⁾	125 ⁽²⁾	所需時間		13 ⁽¹⁾	13 ⁽²⁾	所需時間		117 ⁽¹⁾	120 ⁽²⁾
#7	90	3.37E-5	2.40E-10	#8	90	2.13E-9	5.16E-11	#9	90	3.33E-3	1.99E-8
	180	3.08E-2	1.34E-5		180	1.17E-9	1.80E-10		180	7.44E-1	1.79E-4
	270	5.78E+0	2.58E-4		270	1.90E-5	2.94E-8		270	1.50E+2	1.27E-2
	360	2.08E+1	1.45E-2		360	5.20E-3	1.18E-5		360	3.58E+2	2.43E-1
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾	所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾	所需時間		- ⁽³⁾	305 ⁽²⁾
#10	90	3.28E-3	2.57E-8	#11	90	3.52E-9	4.24E-11	#12	90	4.43E-9	6.00E-11
	180	1.09E+0	3.01E-4		180	9.67E-10	2.54E-10		180	1.53E-9	1.11E-10
	270	1.39E+2	5.73E-3		270	1.23E-5	1.05E-8		270	2.57E-8	7.46E-11
	360	2.79E+2	1.11E-1		360	8.54E-5	1.89E-7		360	5.16E-6	1.40E-8
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		- ⁽³⁾	325 ⁽²⁾	所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾	所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾

註⁽¹⁾:土壤氣體濃度達 500 ppmV 所需之時間(day)。

註⁽²⁾:地下水含苯濃度達 0.05 mg/L 所需之時間(day)。

註⁽³⁾:該監測井之土壤氣體或地下水含苯濃度無達到法規管制標準。

表 4-2 (c) Case 1-2，525 模擬結果

模擬情境說明		
地下水位變化 (-m) / 遲滯現象	5-2-5 / 無	
土層絕對滲透係數 (m ²) / 孔隙率	2.5×10 ⁻¹² / 0.4	
油品洩漏點	Case1 (儲槽區內之輸油管線)	
油品洩漏時間 / 速率(cm/sec)	360 日 / 1.35	

		氣(ppmV)	液(mg/L)			氣(ppmV)	液(mg/L)			氣(ppmV)	液(mg/L)
#1	90	3.26E-3	5.85E-8	#2	90	3.07E-3	7.91E-9	#3	90	2.14E-9	2.25E-11
	180	2.52E-1	4.02E-5		180	2.21E-2	1.35E-6		180	1.78E-8	1.10E-11
	270	1.10E+0	7.14E-5		270	1.34E+0	1.02E-4		270	8.17E-10	1.17E-10
	360	4.58E+0	2.67E-3		360	5.04E+0	3.99E-3		360	1.82E-10	1.69E-11
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		-(3)	-(3)	所需時間		-(3)	-(3)	所需時間		-(3)	-(3)
#4	90	3.28E+2	8.24E-3	#5	90	5.93E+4	3.13E+0	#6	90	3.25E+2	1.46E-3
	180	1.79E+3	2.14E-1		180	3.30E+4	1.50E+1		180	8.91E+2	3.72E-2
	270	1.15E+3	2.70E-1		270	5.89E+4	3.96E+0		270	1.13E+3	3.30E-1
	360	8.84E+2	2.75E-1		360	5.85E+4	3.55E+0		360	7.70E+2	3.03E-1
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		110 ⁽¹⁾	140 ⁽²⁾	所需時間		47 ⁽¹⁾	72 ⁽²⁾	所需時間		135 ⁽¹⁾	192 ⁽²⁾
#7	90	4.53E-5	4.07E-9	#8	90	1.40E-10	2.09E-12	#9	90	3.27E-3	9.90E-8
	180	1.44E-2	2.84E-6		180	8.58E-7	3.60E-10		180	4.16E-1	7.94E-5
	270	3.68E-2	2.70E-6		270	3.96E-10	1.19E-10		270	1.11E+0	6.96E-5
	360	1.81E-1	2.98E-4		360	2.04E-10	6.32E-12		360	4.57E+0	2.67E-3
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		-(3)	-(3)	所需時間		-(3)	-(3)	所需時間		-(3)	-(3)
#10	90	3.08E-3	1.31E-8	#11	90	2.22E-7	2.30E-12	#12	90	9.47E-10	8.25E-12
	180	3.41E-2	2.94E-6		180	1.95E-9	2.15E-12		180	1.69E-8	7.88E-12
	270	1.34E+0	9.52E-5		270	5.90E-10	4.57E-11		270	4.76E-10	5.83E-12
	360	5.03E+0	3.98E-3		360	1.96E-10	5.71E-12		360	1.96E-10	4.29E-12
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		-(3)	-(3)	所需時間		-(3)	-(3)	所需時間		-(3)	-(3)

註⁽¹⁾:土壤氣體濃度達 500 ppmV 所需之時間(day)。

註⁽²⁾:地下水含苯濃度達 0.05 mg/L 所需之時間(day)。

註⁽³⁾:該監測井之土壤氣體或地下水含苯濃度無達到法規管制標準。

表 4-2 (d) Case 1-2，525(hysteresis)模擬結果

模擬情境說明

地下水位變化 (-m) / 遲滯現象	5-2-5 / 有
土層絕對滲透係數 (m ²) / 孔隙率	2.5×10 ⁻¹² / 0.4
油品洩漏點	Case1 (儲槽區內之輸油管線)
油品洩漏時間 / 速率(cm/sec)	360 日 / 1.35

		氣(ppmV)	液(mg/L)			氣(ppmV)	液(mg/L)			氣(ppmV)	液(mg/L)
#1	90	2.39E-3	6.00E-8	#2	90	2.03E-3	6.84E-9	#3	90	1.47E-5	2.71E-11
	180	4.55E-1	6.77E-5		180	2.08E-2	1.57E-6		180	2.83E-5	2.98E-11
	270	2.53E+0	6.33E-4		270	1.27E+0	7.84E-4		270	1.66E-5	1.39E-10
	360	5.51E+1	8.56E-3		360	4.55E+1	1.52E-2		360	5.59E-6	2.67E-10
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		-(³)	-(³)	所需時間		-(³)	-(³)	所需時間		-(³)	-(³)
#4	90	2.78E+2	7.34E-3	#5	90	5.95E+4	7.31E+0	#6	90	2.74E+2	1.13E-3
	180	2.15E+3	2.40E-1		180	3.24E+4	1.81E+1		180	1.08E+3	4.51E-2
	270	4.40E+3	1.18E+0		270	5.99E+4	1.37E+1		270	3.68E+3	1.13E+0
	360	4.57E+3	2.64E+0		360	5.93E+4	1.25E+1		360	4.03E+3	3.32E+0
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		144 ⁽¹⁾	139 ⁽²⁾	所需時間		44 ⁽¹⁾	67 ⁽²⁾	所需時間		140 ⁽¹⁾	182 ⁽²⁾
#7	90	4.52E-5	4.36E-9	#8	90	8.44E-6	3.79E-11	#9	90	2.41E-3	1.05E-7
	180	1.85E-2	3.15E-6		180	1.89E-5	5.09E-10		180	7.19E-1	1.19E-4
	270	2.49E-2	1.38E-5		270	1.10E-5	1.11E-9		270	2.80E+0	5.97E-4
	360	1.68E+0	2.37E-4		360	3.95E-6	1.44E-9		360	5.59E+1	7.53E-3
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		-(³)	-(³)	所需時間		-(³)	-(³)	所需時間		-(³)	-(³)
#10	90	2.05E-3	1.30E-8	#11	90	1.25E-5	9.59E-11	#12	90	2.18E-8	1.24E-10
	180	4.07E-2	4.10E-6		180	2.22E-5	9.65E-11		180	5.57E-7	8.94E-11
	270	1.25E+0	3.96E-4		270	1.38E-5	1.88E-10		270	3.25E-7	3.49E-10
	360	4.58E+1	1.10E-2		360	5.07E-6	6.07E-10		360	1.06E-7	7.93E-10
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		-(³)	-(³)	所需時間		-(³)	-(³)	所需時間		-(³)	-(³)

註⁽¹⁾:土壤氣體濃度達 500 ppmV 所需之時間(day)。

註⁽²⁾:地下水含苯濃度達 0.05 mg/L 所需之時間(day)。

註⁽³⁾:該監測井之土壤氣體或地下水含苯濃度無達到法規管制標準。

表 4-3 (a) Case 1-3，252 模擬結果

模擬情境說明		
地下水位變化 (-m) / 遲滯現象	2-5-2 / 無	
土層絕對滲透係數 (m ²) / 孔隙率	2.5×10 ⁻¹¹ / 0.4	
油品洩漏點	Case1 (儲槽區內之輸油管線)	
油品洩漏時間 / 速率(cm/sec)	360 日 / 1.35	

		氣(ppmV)	液(mg/L)			氣(ppmV)	液(mg/L)			氣(ppmV)	液(mg/L)
#1	90	2.79E+2	2.91E-3	#2	90	2.55E+2	3.10E-3	#3	90	7.19E-8	3.41E-11
	180	6.64E+2	1.76E-1		180	6.37E+2	2.08E-1		180	9.13E-4	1.94E-7
	270	3.25E+3	9.98E-1		270	3.48E+3	1.02E+0		270	2.98E+0	2.76E-3
	360	4.36E+3	2.14E+0		360	4.27E+3	2.17E+0		360	2.47E+1	2.33E-2
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		105 ⁽¹⁾	252 ⁽²⁾	所需時間		108 ⁽¹⁾	154 ⁽²⁾	所需時間		- ⁽³⁾	151 ⁽²⁾
#4	90	3.36E+3	1.62E-1	#5	90	5.84E+4	1.62E+0	#6	90	3.38E+3	2.01E-1
	180	2.24E+3	1.18E+0		180	5.83E+4	3.93E+0		180	2.21E+3	1.64E+0
	270	4.98E+3	2.52E+0		270	5.86E+4	1.94E+1		270	5.07E+3	2.62E+0
	360	9.00E+3	2.70E+0		360	4.38E+4	2.84E+1		360	8.69E+3	2.60E+0
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		41 ⁽¹⁾	77 ⁽²⁾	所需時間		16 ⁽¹⁾	20 ⁽²⁾	所需時間		41 ⁽¹⁾	75 ⁽²⁾
#7	90	4.62E+1	4.63E-4	#8	90	2.72E-3	1.06E-8	#9	90	2.81E+2	2.89E-3
	180	2.16E+2	7.94E-2		180	7.08E-1	1.79E-4		180	6.63E+2	1.77E-1
	270	2.42E+3	4.58E-1		270	2.09E+2	2.94E-2		270	3.24E+3	7.79E-1
	360	2.76E+3	1.25E+0		360	4.77E+2	1.99E-1		360	4.00E+3	1.78E+0
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		207 ⁽¹⁾	173 ⁽²⁾	所需時間		- ⁽³⁾	194 ⁽²⁾	所需時間		105 ⁽¹⁾	154 ⁽²⁾
#10	90	2.57E+2	3.02E-3	#11	90	2.73E-8	1.80E-11	#12	90	3.78E-8	2.43E-11
	180	6.36E+2	2.09E-1		180	8.89E-4	1.93E-7		180	1.04E-4	1.82E-8
	270	3.46E+3	7.23E-1		270	8.84E+0	1.17E-3		270	6.42E-1	2.31E-4
	360	3.82E+3	1.69E+0		360	5.59E+1	4.36E-3		360	4.38E+0	3.85E-3
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		108 ⁽¹⁾	151 ⁽²⁾	所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾	所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾

註⁽¹⁾:土壤氣體濃度達 500 ppmV 所需之時間(day)。

註⁽²⁾:地下水含苯濃度達 0.05 mg/L 所需之時間(day)。

註⁽³⁾:該監測井之土壤氣體或地下水含苯濃度無達到法規管制標準。

表 4-3 (b) Case 1-3，252(hysteresis)模擬結果

模擬情境說明

地下水水位變化 (-m) / 遲滯現象 2-5-2 / 有
 土層絕對滲透係數 (m²) / 孔隙率 2.5×10⁻¹¹ / 0.4
 油品洩漏點 Case1 (儲槽區內之輸油管線)
 油品洩漏時間 / 速率(cm/sec) 360 日 / 1.35

		氣(ppmV)	液(mg/L)			氣(ppmV)	液(mg/L)			氣(ppmV)	液(mg/L)
#1	90	2.79E+2	2.91E-3	#2	90	2.55E+2	3.10E-3	#3	90	7.19E-8	3.41E-11
	180	6.64E+2	1.76E-1		180	6.37E+2	2.08E-1		180	9.13E-4	1.94E-7
	270	3.25E+3	9.81E-1		270	3.46E+3	1.00E+0		270	2.96E+0	2.64E-3
	360	4.31E+3	2.13E+0		360	4.24E+3	2.18E+0		360	2.44E+1	2.34E-2
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		105 ⁽¹⁾	252 ⁽²⁾	所需時間		108 ⁽¹⁾	149 ⁽²⁾	所需時間		108 ⁽¹⁾	148 ⁽²⁾
#4	90	3.36E+3	1.62E-1	#5	90	5.84E+4	1.62E+0	#6	90	3.38E+3	2.01E-1
	180	2.24E+3	1.18E+0		180	5.83E+4	3.93E+0		180	2.21E+3	1.64E+0
	270	4.95E+3	2.50E+0		270	5.86E+4	1.95E+1		270	5.05E+3	2.60E+0
	360	8.10E+3	2.64E+0		360	4.35E+4	2.86E+1		360	7.79E+3	2.54E+0
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		41 ⁽¹⁾	77 ⁽²⁾	所需時間		16 ⁽¹⁾	20 ⁽²⁾	所需時間		41 ⁽¹⁾	75 ⁽²⁾
#7	90	4.62E+1	4.63E-4	#8	90	2.72E-3	1.06E-8	#9	90	2.81E+2	2.89E-3
	180	2.16E+2	7.94E-2		180	7.08E-1	1.79E-4		180	6.63E+2	1.77E-1
	270	2.40E+3	4.48E-1		270	2.07E+2	2.84E-2		270	3.23E+3	7.67E-1
	360	2.74E+3	1.26E+0		360	4.60E+2	1.97E-1		360	3.94E+3	1.78E+0
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		209 ⁽¹⁾	173 ⁽²⁾	所需時間		- ⁽³⁾	197 ⁽²⁾	所需時間		105 ⁽¹⁾	149 ⁽²⁾
#10	90	2.57E+2	3.02E-3	#11	90	2.73E-8	1.80E-11	#12	90	3.78E-8	2.43E-11
	180	6.36E+2	2.09E-1		180	8.89E-4	1.93E-7		180	1.04E-4	1.82E-8
	270	3.45E+3	7.09E-1		270	2.40E+0	1.12E-3		270	6.37E-1	2.24E-4
	360	3.76E+3	1.69E+0		360	5.39E+1	4.20E-3		360	4.30E+0	3.83E-3
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		108 ⁽¹⁾	148 ⁽²⁾	所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾	所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾

註⁽¹⁾:土壤氣體濃度達 500 ppmV 所需之時間(day)。

註⁽²⁾:地下水含苯濃度達 0.05 mg/L 所需之時間(day)。

註⁽³⁾:該監測井之土壤氣體或地下水含苯濃度無達到法規管制標準。

表 4-3 (c) Case1-3，525 模擬結果

模擬情境說明		
地下水位變化 (-m) / 遲滯現象	5-2-5 / 無	
土層絕對滲透係數 (m ²) / 孔隙率	2.5×10 ⁻¹¹ / 0.4	
油品洩漏點	Case1 (儲槽區內之輸油管線)	
油品洩漏時間 / 速率(cm/sec)	360 日 / 1.35	

		氣(ppmV)	液(mg/L)			氣(ppmV)	液(mg/L)			氣(ppmV)	液(mg/L)
#1	90	7.88E+1	4.74E-8	#2	90	7.15E+1	1.69E-8	#3	90	5.25E-9	1.17E-12
	180	1.55E+2	2.89E-2		180	1.41E+2	1.82E-2		180	1.05E-8	8.45E-9
	270	1.42E+3	6.98E-2		270	1.48E+3	6.33E-2		270	4.10E-3	2.43E-8
	360	7.34E+2	3.58E-1		360	7.49E+2	3.45E-1		360	3.09E-2	2.18E-5
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		225 ⁽¹⁾	236 ⁽²⁾	所需時間		225 ⁽¹⁾	253 ⁽²⁾	所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾
#4	90	2.41E+3	9.77E-5	#5	90	5.80E+4	1.20E-2	#6	90	2.36E+3	2.99E-5
	180	3.70E+3	3.30E-1		180	5.87E+4	1.16E+1		180	3.68E+3	2.77E-1
	270	3.88E+3	8.69E-1		270	5.84E+4	1.01E+0		270	4.00E+3	9.17E-1
	360	2.17E+3	2.31E+0		360	5.81E+4	1.82E+0		360	2.14E+3	2.32E+0
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		57 ⁽¹⁾	- ⁽³⁾	所需時間		57 ⁽¹⁾	109 ⁽²⁾	所需時間		57 ⁽¹⁾	163 ⁽²⁾
#7	90	1.34E+1	9.71E-9	#8	90	4.00E-4	4.07E-12	#9	90	7.97E+1	5.46E-8
	180	2.66E+1	8.61E-3		180	8.00E-4	1.61E-5		180	1.57E+2	3.05E-2
	270	6.32E+2	2.23E-2		270	3.59E+0	4.31E-5		270	1.42E+3	6.75E-2
	360	3.62E+2	2.04E-1		360	4.68E+0	3.01E-3		360	7.29E+2	3.38E-1
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		258 ⁽¹⁾	298 ⁽²⁾	所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾	所需時間		225 ⁽¹⁾	236 ⁽²⁾
#10	90	7.25E+1	1.74E-8	#11	90	2.45E-1	8.51E-13	#12	90	2.92E-9	1.54E-12
	180	1.43E+2	1.93E-2		180	4.89E-1	9.80E-9		180	5.79E-9	1.69E-8
	270	1.48E+3	6.02E-2		270	2.54E+0	2.33E-8		270	1.04E-3	7.54E-9
	360	7.44E+2	3.26E-1		360	9.07E-1	2.08E-5		360	5.78E-3	3.61E-6
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		225 ⁽¹⁾	255 ⁽²⁾	所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾	所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾

註⁽¹⁾:土壤氣體濃度達 500 ppmV 所需之時間(day)。

註⁽²⁾:地下水含苯濃度達 0.05 mg/L 所需之時間(day)。

註⁽³⁾:該監測井之土壤氣體或地下水含苯濃度無達到法規管制標準。

表 4-3 (d) Case 1-3，525(hysteresis)模擬結果

模擬情境說明

地下水位變化 (-m) / 遲滯現象	5-2-5 / 有
土層絕對滲透係數 (m ²) / 孔隙率	2.5×10 ⁻¹¹ / 0.4
油品洩漏點	Case1 (儲槽區內之輸油管線)
油品洩漏時間 / 速率(cm/sec)	360 日 / 1.35

		氣(ppmV)	液(mg/L)			氣(ppmV)	液(mg/L)			氣(ppmV)	液(mg/L)
#1	90	1.26E+2	2.80E-7	#2	90	1.14E+2	7.87E-8	#3	90	1.27E-8	1.07E-11
	180	7.87E+2	3.51E-2		180	6.39E+2	2.01E-2		180	2.80E-5	6.68E-9
	270	2.74E+3	1.93E-1		270	2.65E+3	1.88E-1		270	4.72E-3	1.53E-8
	360	2.19E+3	8.57E-1		360	2.31E+3	9.23E-1		360	3.10E-1	2.73E-6
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		154 ⁽¹⁾	198 ⁽²⁾	所需時間		159 ⁽¹⁾	217 ⁽²⁾	所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾
#4	90	3.43E+3	2.99E-4	#5	90	5.89E+4	2.13E-2	#6	90	3.39E+3	9.46E-5
	180	5.92E+3	4.13E-1		180	2.61E+4	1.47E+1		180	5.45E+3	3.49E-1
	270	1.01E+4	4.43E-1		270	5.86E+4	5.42E+0		270	1.01E+4	4.19E-1
	360	7.79E+3	1.48E+0		360	5.87E+4	5.90E+0		360	7.76E+3	1.39E+0
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		53 ⁽¹⁾	153 ⁽²⁾	所需時間		53 ⁽¹⁾	102 ⁽²⁾	所需時間		53 ⁽¹⁾	158 ⁽²⁾
#7	90	2.09E+1	3.20E-8	#8	90	4.89E-4	1.52E-11	#9	90	1.28E+2	3.14E-7
	180	1.81E+2	9.76E-3		180	9.14E-2	1.78E-5		180	8.02E+2	3.70E-2
	270	8.86E+2	3.51E-2		270	1.35E+0	2.40E-5		270	2.74E+3	1.92E-1
	360	1.22E+3	2.22E-1		360	3.83E+1	6.98E-4		360	2.17E+3	8.45E-1
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		- ⁽³⁾	289 ⁽²⁾	所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾	所需時間		154 ⁽¹⁾	196 ⁽²⁾
#10	90	1.15E+2	8.23E-8	#11	90	2.81E-8	1.41E-12	#12	90	8.13E-8	1.32E-11
	180	6.56E+2	2.17E-2		180	5.41E-4	9.84E-9		180	4.23E-5	1.46E-8
	270	2.65E+3	1.86E-1		270	4.75E-3	1.41E-8		270	1.07E-4	1.64E-8
	360	2.30E+3	9.05E-1		360	3.24E+1	2.58E-6		360	4.42E-2	4.57E-7
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		159 ⁽¹⁾	215 ⁽²⁾	所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾	所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾

註⁽¹⁾:土壤氣體濃度達 500 ppmV 所需之時間(day)。

註⁽²⁾:地下水含苯濃度達 0.05 mg/L 所需之時間(day)。

註⁽³⁾:該監測井之土壤氣體或地下水含苯濃度無達到法規管制標準。

表 4-4 (a) Case 2-1，242 模擬結果

模擬情境說明		
地下水位變化 (-m) / 遲滯現象	2-4-2 / 無	
土層絕對滲透係數 (m ²) / 孔隙率	2.5×10 ⁻¹² / 0.3	
油品洩漏點	Case2 (儲油槽下方)	
油品洩漏時間 / 速率(cm/sec)	360 日 / 1.50	

		氣(ppmV)	液(mg/L)			氣(ppmV)	液(mg/L)			氣(ppmV)	液(mg/L)
#1	90	8.47E-6	2.66E-9	#2	90	6.83E-7	5.78E-9	#3	90	7.87E-6	2.93E-9
	180	2.04E-6	4.37E-8		180	3.79E-7	1.18E-5		180	1.88E-6	7.68E-8
	270	7.43E-5	1.01E-5		270	9.14E-3	3.00E-4		270	1.39E-5	5.94E-8
	360	1.26E-1	1.37E-4		360	2.33E+1	1.57E-2		360	2.09E-5	5.46E-8
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾	所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾	所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾
#4	90	1.16E-5	2.19E-9	#5	90	4.43E-6	2.90E-1	#6	90	3.82E-6	1.61E-2
	180	2.65E-6	4.57E-7		180	1.15E-6	4.30E+0		180	1.28E-6	1.06E+0
	270	1.66E+0	6.83E-2		270	3.63E+2	5.76E+0		270	1.52E+2	2.55E+0
	360	6.13E+2	6.37E-1		360	5.77E+3	9.07E+0		360	3.99E+3	4.57E+0
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		335 ⁽¹⁾	267 ⁽²⁾	所需時間		280 ⁽¹⁾	70 ⁽²⁾	所需時間		302 ⁽¹⁾	109 ⁽²⁾
#7	90	3.55E-6	4.37E-9	#8	90	3.41E-6	1.24E-9	#9	90	1.20E-6	1.20E-9
	180	1.17E-6	3.96E-8		180	1.04E-6	7.72E-8		180	7.60E-7	8.38E-6
	270	4.11E-2	1.85E-3		270	1.48E-5	1.71E-7		270	1.87E+2	5.08E-1
	360	5.76E+1	3.51E-2		360	7.42E-3	6.71E-6		360	1.28E+3	1.25E+0
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾	所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾	所需時間		305 ⁽¹⁾	251 ⁽²⁾
#10	90	4.89E-6	3.58E-1	#11	90	5.21E-6	4.33E-9	#12	90	2.62E-7	8.52E-10
	180	1.41E-6	4.46E+0		180	1.32E-6	1.77E-8		180	3.57E-7	6.29E-8
	270	3.68E+2	5.59E+0		270	3.87E-5	4.77E-6		270	4.75E-6	4.29E-8
	360	5.76E+3	9.11E+0		360	6.80E-3	4.95E-5		360	1.36E-5	4.06E-8
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		280 ⁽¹⁾	68 ⁽²⁾	所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾	所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾

註⁽¹⁾:土壤氣體濃度達 500 ppmV 所需之時間(day)。

註⁽²⁾:地下水含苯濃度達 0.05 mg/L 所需之時間(day)。

註⁽³⁾:該監測井之土壤氣體或地下水含苯濃度無達到法規管制標準。

表 4-4 (b) Case 2-1，242(hysteresis)模擬結果

模擬情境說明

地下水位變化 (-m) / 遲滯現象	2-4-2 / 有
土層絕對滲透係數 (m ²) / 孔隙率	2.5×10 ⁻¹² / 0.3
油品洩漏點	Case2 (儲油槽下方)
油品洩漏時間 / 速率(cm/sec)	360 日 / 1.50

		氣(ppmV)	液(mg/L)			氣(ppmV)	液(mg/L)			氣(ppmV)	液(mg/L)
#1	90	8.47E-6	2.66E-9	#2	90	6.83E-7	5.78E-9	#3	90	7.87E-6	2.93E-9
	180	2.04E-6	4.37E-8		180	3.79E-7	1.18E-5		180	1.88E-6	7.68E-8
	270	8.71E-5	1.21E-5		270	1.30E-2	4.11E-4		270	1.40E-5	6.19E-8
	360	1.43E-1	1.92E-4		360	2.51E+1	1.74E-2		360	2.07E-5	5.38E-8
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		-(³)	-(³)	所需時間		-(³)	-(³)	所需時間		-(³)	-(³)
#4	90	1.57E-5	2.19E-9	#5	90	1.35E+0	2.90E-1	#6	90	4.18E-2	1.61E-2
	180	7.25E-6	4.57E-7		180	9.48E-1	4.30E+0		180	3.17E-2	1.06E+0
	270	3.03E+1	6.86E-2		270	2.63E+3	5.70E+0		270	1.32E+3	2.56E+0
	360	8.28E+2	6.36E-1		360	6.26E+3	8.99E+0		360	5.24E+3	4.53E+0
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		356 ⁽¹⁾	267 ⁽²⁾	所需時間		247 ⁽¹⁾	70 ⁽²⁾	所需時間		256 ⁽¹⁾	109 ⁽²⁾
#7	90	3.55E-6	4.37E-9	#8	90	3.41E-6	1.24E-9	#9	90	4.37E-7	1.20E-9
	180	1.17E-6	3.96E-8		180	1.04E-6	7.72E-8		180	4.29E-7	8.38E-6
	270	4.72E-2	1.74E-3		270	1.48E-5	1.60E-7		270	1.23E+1	4.29E-1
	360	6.29E+1	3.67E-2		360	8.60E-3	7.34E-6		360	8.53E+2	1.14E+0
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		-(³)	-(³)	所需時間		-(³)	-(³)	所需時間		331 ⁽¹⁾	251 ⁽²⁾
#10	90	4.89E-6	3.58E-1	#11	90	7.26E-6	4.33E-9	#12	90	2.62E-7	8.52E-10
	180	1.41E-6	4.46E+0		180	3.44E-6	1.77E-8		180	3.57E-7	6.29E-8
	270	4.28E+2	5.82E+0		270	2.77E-4	4.14E-6		270	4.78E-6	4.36E-8
	360	5.77E+3	9.07E+0		360	1.32E-2	5.50E-5		360	1.40E-5	4.09E-8
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		273 ⁽¹⁾	68 ⁽²⁾	所需時間		-(³)	-(³)	所需時間		-(³)	-(³)

註⁽¹⁾:土壤氣體濃度達 500 ppmV 所需之時間(day)。

註⁽²⁾:地下水含苯濃度達 0.05 mg/L 所需之時間(day)。

註⁽³⁾:該監測井之土壤氣體或地下水含苯濃度無達到法規管制標準。

表 4-4 (c) Case 2-1，424 模擬結果

模擬情境說明		
地下水位變化 (-m) / 遲滯現象	4-2-4 / 無	
土層絕對滲透係數 (m ²) / 孔隙率	2.5×10 ⁻¹² / 0.3	
油品洩漏點	Case2 (儲油槽下方)	
油品洩漏時間 / 速率(cm/sec)	360 日 / 1.50	

		氣(ppmV)	液(mg/L)			氣(ppmV)	液(mg/L)			氣(ppmV)	液(mg/L)
#1	90	2.09E-10	4.37E-12	#2	90	6.42E-9	1.90E-11	#3	90	6.94E-9	8.38E-12
	180	5.66E-5	4.22E-8		180	7.81E-3	3.82E-6		180	2.53E-7	5.53E-11
	270	5.57E-5	2.16E-7		270	1.63E-1	2.56E-3		270	1.97E-7	2.91E-10
	360	1.58E-4	7.62E-6		360	4.26E-1	3.08E-2		360	8.74E-8	8.41E-10
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾	所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾	所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾
#4	90	2.34E-4	8.61E-5	#5	90	5.75E+0	6.90E-1	#6	90	1.37E+1	2.08E-2
	180	1.76E+1	1.46E-2		180	3.73E+3	3.89E+0		180	1.36E+3	9.11E-1
	270	1.70E+1	2.32E-2		270	3.51E+3	9.57E+0		270	1.76E+3	3.97E+0
	360	1.59E+1	1.31E-1		360	2.39E+3	1.20E+1		360	1.37E+3	7.72E+0
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		- ⁽³⁾	315 ⁽²⁾	所需時間		142 ⁽¹⁾	55 ⁽²⁾	所需時間		259 ⁽¹⁾	109 ⁽²⁾
#7	90	4.07E-8	2.23E-8	#8	90	2.01E-10	2.17E-12	#9	90	7.01E-3	3.61E-3
	180	2.09E-1	9.78E-5		180	1.09E-5	1.39E-8		180	3.27E+1	9.75E-2
	270	2.11E-1	1.69E-4		270	7.26E-6	1.79E-8		270	2.41E+1	1.07E-1
	360	4.64E-1	6.59E-3		360	5.14E-6	2.29E-8		360	1.97E+1	1.93E-1
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾	所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾	所需時間		- ⁽³⁾	157 ⁽²⁾
#10	90	8.61E+0	6.27E-1	#11	90	3.11E-9	7.05E-12	#12	90	1.93E-10	1.45E-12
	180	3.61E+3	3.86E+0		180	3.45E-6	7.29E-9		180	5.57E-7	8.26E-11
	270	3.42E+3	9.88E+0		270	1.87E-6	8.88E-9		270	2.95E-7	6.38E-10
	360	2.35E+3	1.23E+1		360	7.15E-7	1.31E-8		360	1.12E-7	1.56E-9
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		142 ⁽¹⁾	57 ⁽²⁾	所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾	所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾

註⁽¹⁾:土壤氣體濃度達 500 ppmV 所需之時間(day)。

註⁽²⁾:地下水含苯濃度達 0.05 mg/L 所需之時間(day)。

註⁽³⁾:該監測井之土壤氣體或地下水含苯濃度無達到法規管制標準。

表 4-4 (d) Case 2-1，424(hysteresis)模擬結果

模擬情境說明

地下水水位變化 (-m) / 遲滯現象

4-2-4 / 有

土層絕對滲透係數 (m²) / 孔隙率

2.5×10⁻¹² / 0.3

油品洩漏點

Case1-1 (儲槽區內之輸油管線)

油品洩漏時間 / 速率(cm/sec)

360 日 / 1.50

		氣(ppmV)	液(mg/L)			氣(ppmV)	液(mg/L)			氣(ppmV)	液(mg/L)
#1	90	3.08E-9	4.51E-11	#2	90	5.82E-10	3.41E-10	#3	90	7.06E-10	7.17E-13
	180	7.91E-5	7.73E-8		180	1.06E-2	7.27E-6		180	3.45E-9	7.78E-13
	270	7.43E-5	2.35E-7		270	1.24E-1	2.63E-3		270	3.13E-9	2.80E-11
	360	1.51E-4	6.57E-6		360	3.26E-1	3.10E-2		360	1.06E-9	5.44E-11
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾	所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾	所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾
#4	90	1.65E-4	1.10E-4	#5	90	6.35E+0	9.65E-1	#6	90	1.05E-1	3.58E-2
	180	1.39E+1	1.43E-2		180	2.77E+3	3.63E+0		180	1.03E+3	8.87E-1
	270	1.36E+1	2.30E-2		270	2.59E+3	9.28E+0		270	1.33E+3	4.02E+0
	360	1.26E+1	1.26E-1		360	1.79E+3	1.17E+1		360	1.04E+3	7.79E+0
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		- ⁽³⁾	317 ⁽²⁾	所需時間		146 ⁽¹⁾	58 ⁽²⁾	所需時間		163 ⁽¹⁾	99 ⁽²⁾
#7	90	4.47E-8	4.46E-8	#8	90	2.60E-9	8.83E-11	#9	90	4.46E-3	3.25E-3
	180	1.79E-1	1.07E-4		180	6.35E-6	9.10E-9		180	2.16E+1	8.79E-2
	270	1.82E-1	1.88E-4		270	4.84E-6	9.11E-9		270	1.60E+1	9.63E-2
	360	3.74E-1	6.62E-3		360	4.04E-6	1.19E-8		360	1.31E+1	1.76E-1
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾	所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾	所需時間		- ⁽³⁾	162 ⁽²⁾
#10	90	6.12E+0	8.71E-1	#11	90	1.19E-8	9.72E-12	#12	90	5.40E-10	1.04E-11
	180	2.66E+3	3.55E+0		180	1.74E-7	1.96E-9		180	6.32E-9	1.95E-11
	270	2.54E+3	9.50E+0		270	1.14E-7	1.98E-9		270	5.75E-9	2.46E-11
	360	1.76E+3	1.20E+1		360	9.04E-8	2.99E-9		360	2.37E-9	4.45E-11
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		146 ⁽¹⁾	60 ⁽²⁾	所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾	所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾

註⁽¹⁾:土壤氣體濃度達 500 ppmV 所需之時間(day)。

註⁽²⁾:地下水含苯濃度達 0.05 mg/L 所需之時間(day)。

註⁽³⁾:該監測井之土壤氣體或地下水含苯濃度無達到法規管制標準。

表 4-5 (a) Case 2-2，242 模擬結果

模擬情境說明		
地下水位變化 (-m) / 遲滯現象	2-4-2/ 無	
土層絕對滲透係數 (m ²) / 孔隙率	2.5×10 ⁻¹² / 0.4	
油品洩漏點	Case2 (儲油槽下方)	
油品洩漏時間 / 速率(cm/sec)	360 日 / 1.50	

		氣(ppmV)	液(mg/L)			氣(ppmV)	液(mg/L)			氣(ppmV)	液(mg/L)
#1	90	5.15E-6	1.11E-9	#2	90	1.19E-6	2.09E-10	#3	90	2.14E-6	4.27E-9
	180	2.07E-6	1.91E-9		180	5.38E-7	5.65E-7		180	9.24E-7	6.07E-9
	270	1.02E-5	7.25E-7		270	3.52E-4	1.86E-5		270	2.03E-6	3.77E-9
	360	3.08E-3	4.78E-6		360	5.41E-1	6.43E-5		360	2.32E-6	1.53E-9
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		0.05 mg/L	0.05 mg/L
所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾	所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾	所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾
#4	90	3.00E-6	4.09E-9	#5	90	1.95E-6	4.39E-2	#6	90	2.01E-6	1.42E-3
	180	1.28E-6	6.28E-9		180	9.31E-7	3.01E+0		180	8.35E-7	3.47E-1
	270	3.89E-1	1.95E-2		270	3.55E+2	6.68E+0		270	9.00E+1	1.85E+0
	360	1.85E+2	5.11E-2		360	6.22E+3	3.55E+0		360	3.46E+3	9.88E-1
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		0.05 mg/L	0.05 mg/L
所需時間		- ⁽³⁾	360 ⁽²⁾	所需時間		280 ⁽¹⁾	91 ⁽²⁾	所需時間		- ⁽³⁾	137 ⁽²⁾
#7	90	3.87E-6	4.41E-10	#8	90	5.01E-6	2.98E-9	#9	90	3.82E-6	1.59E-9
	180	1.60E-6	6.01E-10		180	2.01E-6	4.56E-9		180	1.62E-6	2.83E-9
	270	2.64E-3	1.43E-4		270	4.70E-6	8.44E-9		270	5.35E+0	3.05E-1
	360	5.14E+0	9.79E-4		360	3.80E-4	2.19E-7		360	4.77E+2	4.42E-1
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		0.05 mg/L	0.05 mg/L
所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾	所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾	所需時間		360 ⁽¹⁾⁽¹⁾	261 ⁽²⁾
#10	90	1.96E-6	6.93E-2	#11	90	4.53E-6	1.25E-9	#12	90	1.08E-5	7.09E-9
	180	7.58E-7	3.29E+0		180	1.98E-6	1.67E-9		180	4.30E-6	1.08E-8
	270	3.58E+2	6.77E+0		270	4.43E-6	2.40E-7		270	9.06E-6	7.66E-9
	360	6.18E+3	3.79E+0		360	4.19E-4	3.46E-6		360	9.20E-6	3.47E-9
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		0.05 mg/L	0.05 mg/L
所需時間		280 ⁽¹⁾	87 ⁽²⁾	所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾	所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾

註⁽¹⁾:土壤氣體濃度達 500 ppmV 所需之時間(day)。

註⁽²⁾:地下水含苯濃度達 0.05 mg/L 所需之時間(day)。

註⁽³⁾:該監測井之土壤氣體或地下水含苯濃度無達到法規管制標準。

表 4-5 (b) Case 2-2，242(hysteresis)模擬結果

模擬情境說明

地下水位變化 (-m) / 遲滯現象	2-4-2 / 有
土層絕對滲透係數 (m ²) / 孔隙率	2.5×10 ⁻¹² / 0.4
油品洩漏點	Case2 (儲油槽下方)
油品洩漏時間 / 速率(cm/sec)	360 日 / 1.50

		氣(ppmV)	液(mg/L)			氣(ppmV)	液(mg/L)			氣(ppmV)	液(mg/L)
#1	90	5.15E-6	1.11E-9	#2	90	1.19E-6	2.09E-10	#3	90	2.14E-6	4.27E-9
	180	2.07E-6	1.91E-9		180	5.38E-7	5.65E-7		180	9.24E-7	6.07E-9
	270	1.08E-5	7.03E-7		270	6.21E-4	1.92E-5		270	2.05E-6	2.50E-9
	360	5.53E-3	4.03E-6		360	8.66E-1	4.33E-5		360	2.66E-6	9.53E-10
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		0.05 mg/L	0.05 mg/L
所需時間		-(³)	-(³)	所需時間		-(³)	-(³)	所需時間		-(³)	-(³)
#4	90	3.00E-6	4.09E-9	#5	90	1.95E-6	4.39E-2	#6	90	2.01E-6	1.42E-3
	180	1.28E-6	6.28E-9		180	9.31E-7	3.01E+0		180	8.35E-7	3.47E-1
	270	4.17E-1	8.56E-3		270	4.10E+2	3.21E+0		270	1.04E+2	7.47E-1
	360	1.95E+2	1.38E-2		360	6.21E+3	1.27E+0		360	1.51E+3	2.60E-1
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		0.05 mg/L	0.05 mg/L
所需時間		-(³)	-(³)	所需時間		276 ⁽¹⁾	91 ⁽²⁾	所需時間		-(³)	137 ⁽²⁾
#7	90	3.87E-6	4.41E-10	#8	90	5.01E-6	2.98E-9	#9	90	3.82E-6	1.59E-9
	180	1.60E-6	6.01E-10		180	2.01E-6	4.56E-9		180	1.62E-6	2.83E-9
	270	3.26E-3	7.12E-5		270	4.73E-6	5.63E-9		270	5.37E+0	1.96E-1
	360	5.74E+0	2.60E-4		360	4.41E-4	9.77E-8		360	4.70E+2	2.22E-1
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		0.05 mg/L	0.05 mg/L
所需時間		-(³)	-(³)	所需時間		-(³)	-(³)	所需時間		360 ⁽¹⁾	257 ⁽²⁾
#10	90	1.96E-6	6.93E-2	#11	90	4.53E-6	1.25E-9	#12	90	1.08E-5	7.09E-9
	180	7.58E-7	3.29E+0		180	1.98E-6	1.67E-9		180	4.30E-6	1.01E-8
	270	4.18E+2	3.30E+0		270	4.67E-6	2.64E-7		270	9.08E-6	4.78E-9
	360	6.16E+3	1.42E+0		360	5.81E-4	3.84E-6		360	8.87E-6	2.06E-9
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		0.05 mg/L	0.05 mg/L
所需時間		276 ⁽¹⁾	87 ⁽²⁾	所需時間		-(³)	-(³)	所需時間		-(³)	-(³)

註⁽¹⁾:土壤氣體濃度達 500 ppmV 所需之時間(day)。

註⁽²⁾:地下水含苯濃度達 0.05 mg/L 所需之時間(day)。

註⁽³⁾:該監測井之土壤氣體或地下水含苯濃度無達到法規管制標準。

表 4-5 (c) Case 2-2，424 模擬結果

模擬情境說明		
地下水位變化 (-m) / 遲滯現象	4-2-4 / 無	
土層絕對滲透係數 (m ²) / 孔隙率	2.5×10 ⁻¹² / 0.4	
油品洩漏點	Case2 (儲油槽下方)	
油品洩漏時間 / 速率(cm/sec)	360 日 / 1.50	

		氣(ppmV)	液(mg/L)			氣(ppmV)	液(mg/L)			氣(ppmV)	液(mg/L)
#1	90	5.88E-11	5.13E-12	#2	90	4.35E-11	8.31E-12	#3	90	4.12E-11	1.49E-12
	180	3.53E-7	3.08E-9		180	2.07E-5	1.19E-4		180	1.62E-8	1.47E-10
	270	1.82E-7	8.13E-8		270	5.43E-5	1.08E-3		270	7.42E-9	2.42E-10
	360	2.29E-7	2.32E-7		360	8.71E-4	2.21E-3		360	2.88E-9	2.60E-10
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		0.05 mg/L	0.05 mg/L
所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾	所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾	所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾
#4	90	2.83E-6	1.16E-5	#5	90	7.96E-1	3.79E-1	#6	90	1.42E-3	4.11E-3
	180	6.14E-1	3.46E-3		180	1.00E+3	8.52E+0		180	1.78E+2	2.90E+0
	270	4.88E-1	1.01E-2		270	7.45E+2	1.31E+1		270	1.54E+2	6.12E+0
	360	4.17E-1	2.19E-2		360	5.47E+2	1.51E+1		360	1.26E+2	7.72E+0
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		0.05 mg/L	0.05 mg/L
所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾	所需時間		171 ⁽¹⁾	72 ⁽²⁾	所需時間		- ⁽³⁾	138 ⁽²⁾
#7	90	8.55E-11	1.19E-9	#8	90	7.81E-11	6.74E-13	#9	90	1.57E-4	6.56E-4
	180	2.30E-3	1.01E-5		180	1.05E-7	3.57E-10		180	3.37E+0	3.18E-2
	270	1.91E-3	1.72E-4		270	5.38E-8	4.28E-10		270	2.52E+0	5.27E-2
	360	2.42E-3	6.91E-4		360	3.01E-8	4.60E-10		360	2.06E+0	7.51E-2
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		0.05 mg/L	0.05 mg/L
所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾	所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾	所需時間		- ⁽³⁾	336 ⁽²⁾
#10	90	9.77E-1	3.50E-1	#11	90	5.85E-11	1.81E-12	#12	90	2.12E-10	1.41E-11
	180	9.59E+2	8.67E+0		180	9.07E-8	1.06E-10		180	3.34E-9	2.23E-11
	270	7.14E+2	1.33E+1		270	3.73E-8	3.66E-10		270	1.42E-9	3.14E-11
	360	5.22E+2	1.52E+1		360	1.31E-8	3.85E-10		360	5.50E-10	3.52E-11
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		0.05 mg/L	0.05 mg/L
所需時間		171 ⁽¹⁾	72 ⁽²⁾	所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾	所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾

註⁽¹⁾:土壤氣體濃度達 500 ppmV 所需之時間(day)。

註⁽²⁾:地下水含苯濃度達 0.05 mg/L 所需之時間(day)。

註⁽³⁾:該監測井之土壤氣體或地下水含苯濃度無達到法規管制標準。

表 4-5 (d) Case 2-2，424(hysteresis)模擬結果

模擬情境說明

地下水位變化 (-m) / 遲滯現象	4-2-4 / 有
土層絕對滲透係數 (m ²) / 孔隙率	2.5×10 ⁻¹² / 0.4
油品洩漏點	Case2 (儲油槽下方)
油品洩漏時間 / 速率(cm/sec)	360 日 / 1.50

		氣(ppmV)	液(mg/L)			氣(ppmV)	液(mg/L)			氣(ppmV)	液(mg/L)
#1	90	9.75E-12	3.46E-13	#2	90	8.10E-12	3.14E-11	#3	90	4.90E-12	1.18E-13
	180	2.90E-7	1.39E-8		180	5.49E-5	1.98E-5		180	1.79E-9	5.25E-12
	270	2.34E-7	3.36E-6		270	8.75E-5	1.74E-4		270	8.51E-10	1.42E-11
	360	3.48E-7	1.44E-5		360	1.05E-3	5.10E-4		360	2.84E-10	1.44E-11
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		0.05 mg/L	0.05 mg/L
所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾	所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾	所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾
#4	90	2.83E-6	1.29E-5	#5	90	6.91E-1	3.67E-1	#6	90	1.59E-3	4.36E-3
	180	6.30E-1	8.75E-3		180	1.03E+3	8.47E+0		180	1.83E+2	2.26E+0
	270	5.13E-1	6.67E-2		270	7.80E+2	1.33E+1		270	1.64E+2	4.83E+0
	360	4.42E-1	1.14E-1		360	5.77E+2	1.49E+1		360	1.34E+2	5.91E+0
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		0.05 mg/L	0.05 mg/L
所需時間		- ⁽³⁾	336 ⁽²⁾	所需時間		171 ⁽¹⁾	76 ⁽²⁾	所需時間		- ⁽³⁾	138 ⁽²⁾
#7	90	1.33E-10	2.57E-9	#8	90	7.96E-12	4.73E-14	#9	90	1.59E-4	5.98E-10
	180	2.47E-3	8.28E-6		180	4.06E-8	1.51E-10		180	2.85E+0	4.33E-2
	270	2.07E-3	4.28E-5		270	3.19E-8	1.41E-10		270	2.16E+0	1.75E-1
	360	2.67E-3	2.01E-4		360	2.62E-8	1.46E-10		360	1.75E+0	2.63E-1
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		0.05 mg/L	0.05 mg/L
所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾	所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾	所需時間		- ⁽³⁾	278 ⁽²⁾
#10	90	8.19E-1	3.35E-1	#11	90	4.94E-12	1.51E-13	#12	90	1.07E-11	4.91E-13
	180	9.87E+2	7.99E+0		180	1.37E-8	3.66E-10		180	7.13E-10	9.33E-13
	270	7.48E+2	1.25E+1		270	8.74E-9	4.7010		270	4.43E-10	1.08E-12
	360	5.50E+2	1.41E+1		360	5.81E-9	4.85E-10		360	1.94E-10	1.12E-12
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		171 ⁽¹⁾	76 ⁽²⁾	所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾	所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾

註⁽¹⁾:土壤氣體濃度達 500 ppmV 所需之時間(day)。

註⁽²⁾:地下水含苯濃度達 0.05 mg/L 所需之時間(day)。

註⁽³⁾:該監測井之土壤氣體或地下水含苯濃度無達到法規管制標準。

表 4-6 (a) Case 2-3，242 模擬結果

模擬情境說明		
地下水位變化 (-m) / 遲滯現象	2-4-2 / 無	
土層絕對滲透係數 (m ²) / 孔隙率	2.5×10 ⁻¹¹ / 0.4	
油品洩漏點	Case2 (儲油槽下方)	
油品洩漏時間 / 速率(cm/sec)	360 日 / 1.50	

		氣(ppmV)	液(mg/L)			氣(ppmV)	液(mg/L)			氣(ppmV)	液(mg/L)
#1	90	4.28E-8	1.36E-9	#2	90	7.44E-7	6.28E-6	#3	90	8.35E-8	4.45E-9
	180	1.94E-8	2.54E-7		180	1.93E-7	2.13E-3		180	3.03E-8	4.47E-9
	270	7.40E+1	4.17E-3		270	4.05E+2	1.10E-1		270	1.42E-2	1.38E-7
	360	3.33E+3	4.17E-3		360	5.24E+3	2.91E-2		360	1.06E+2	5.85E-7
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		0.05 mg/L	0.05 mg/L
所需時間		315 ⁽¹⁾	- ⁽³⁾	所需時間		277 ⁽¹⁾	- ⁽³⁾	所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾
#4	90	1.90E-5	5.76E-7	#5	90	2.36E+0	5.07E-7	#6	90	2.45E-1	9.31E-2
	180	1.44E-5	1.90E-3		180	1.44E+0	8.78E-1		180	1.57E-1	6.36E-1
	270	4.83E+2	5.90E-1		270	1.03E+3	4.51E+0		270	9.33E+2	2.70E+0
	360	6.43E+3	1.56E-1		360	1.06E+4	1.49E+0		360	9.41E+3	5.92E-1
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		0.05 mg/L	0.05 mg/L
所需時間		271 ⁽¹⁾	231 ⁽²⁾	所需時間		260 ⁽¹⁾	55 ⁽²⁾	所需時間		263 ⁽¹⁾	81 ⁽²⁾
#7	90	5.37E-7	1.11E-7	#8	90	2.70E-7	9.26E-9	#9	90	1.02E-7	1.61E-9
	180	5.88E-7	3.78E-4		180	7.48E-8	9.34E-9		180	4.87E-8	1.16E-3
	270	4.01E+2	1.68E-1		270	8.26E+0	2.75E-4		270	2.66E+2	1.17E+0
	360	5.40E+3	4.70E-2		360	1.67E+3	6.39E-4		360	5.22E+3	5.98E-1
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		0.05 mg/L	0.05 mg/L
所需時間		277 ⁽¹⁾	- ⁽³⁾	所需時間		339 ⁽¹⁾	- ⁽³⁾	所需時間		289 ⁽¹⁾	229 ⁽²⁾
#10	90	2.35E+0	6.31E-1	#11	90	6.78E-8	1.35E-9	#12	90	7.91E-8	5.22E-10
	180	1.46E+0	9.24E-1		180	2.32E-8	2.31E-9		180	2.81E-8	6.57E-10
	270	1.12E+3	4.67E+0		270	1.46E+0	2.41E-3		270	4.13E-3	1.82E-7
	360	1.05E+4	1.74E+0		360	3.27E+2	5.50E-3		360	2.66E+1	1.79E-6
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		259 ⁽¹⁾	52 ⁽²⁾	所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾	所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾

註⁽¹⁾:土壤氣體濃度達 500 ppmV 所需之時間(day)。

註⁽²⁾:地下水含苯濃度達 0.05 mg/L 所需之時間(day)。

註⁽³⁾:該監測井之土壤氣體或地下水含苯濃度無達到法規管制標準。

表 4-6 (b) Case 2-3，242(hysteresis)模擬結果

模擬情境說明

地下水位變化 (-m) / 遲滯現象	2-4-2 / 有
土層絕對滲透係數 (m ²) / 孔隙率	2.5×10 ⁻¹¹ / 0.4
油品洩漏點	Case2 (儲油槽下方)
油品洩漏時間 / 速率(cm/sec)	360 日 / 1.50

		氣(ppmV)	液(mg/L)			氣(ppmV)	液(mg/L)			氣(ppmV)	液(mg/L)
#1	90	4.28E-8	1.36E-9	#2	90	7.44E-7	6.28E-6	#3	90	8.35E-8	4.45E-9
	180	1.94E-8	2.54E-7		180	1.93E-7	2.13E-3		180	3.03E-8	4.47E-9
	270	7.88E+1	3.93E-3		270	4.33E+2	1.03E-1		270	1.59E-2	1.42E-7
	360	3.34E+3	4.20E-3		360	5.28E+3	2.76E-2		360	1.09E+2	6.40E-7
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		309 ⁽¹⁾	-(³)	所需時間		274 ⁽¹⁾	-(³)	所需時間		-(³)	-(³)
#4	90	1.90E-5	5.76E-7	#5	90	2.36E+0	5.07E-7	#6	90	2.45E-1	9.31E-2
	180	1.44E-5	1.90E-3		180	1.44E+0	8.78E-1		180	1.57E-1	6.36E-1
	270	5.13E+2	5.62E-1		270	1.20E+3	4.24E+0		270	1.04E+3	2.57E+0
	360	6.45E+3	1.50E-1		360	1.07E+4	1.38E+0		360	9.50E+3	5.66E-1
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		269 ⁽¹⁾	231 ⁽²⁾	所需時間		253 ⁽¹⁾	55 ⁽²⁾	所需時間		256 ⁽¹⁾	81 ⁽²⁾
#7	90	5.37E-7	1.11E-7	#8	90	2.70E-7	9.26E-9	#9	90	1.02E-7	1.61E-9
	180	5.88E-7	3.78E-4		180	7.48E-8	9.34E-9		180	4.87E-8	1.16E-3
	270	4.27E+2	1.57E-1		270	9.44E+0	2.64E-4		270	2.82E+2	1.14E+0
	360	5.45E+3	4.58E-2		360	1.71E+3	5.94E-4		360	4.98E+3	5.91E-1
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		274 ⁽¹⁾	-(³)	所需時間		331 ⁽¹⁾	-(³)	所需時間		285 ⁽¹⁾	229 ⁽²⁾
#10	90	2.35E+0	6.31E-1	#11	90	6.78E-8	1.35E-9	#12	90	7.91E-8	5.22E-10
	180	1.46E+0	9.24E-1		180	2.32E-8	2.31E-9		180	2.81E-8	6.57E-10
	270	1.30E+3	4.41E+0		270	1.37E+0	2.18E-3		270	5.14E-3	1.56E-7
	360	1.06E+4	1.63E+0		360	3.27E+2	5.15E-3		360	2.72E+1	1.65E-6
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		252 ⁽¹⁾	52 ⁽²⁾	所需時間		-(³)	-(³)	所需時間		-(³)	-(³)

註⁽¹⁾:土壤氣體濃度達 500 ppmV 所需之時間(day)。

註⁽²⁾:地下水含苯濃度達 0.05 mg/L 所需之時間(day)。

註⁽³⁾:該監測井之土壤氣體或地下水含苯濃度無達到法規管制標準。

表 4-6 (c) Case 2-3，424 模擬結果

模擬情境說明		
地下水位變化 (-m) / 遲滯現象	4-2-4 / 無	
土層絕對滲透係數 (m ²) / 孔隙率	2.5×10 ⁻¹¹ / 0.4	
油品洩漏點	Case2 (儲油槽下方)	
油品洩漏時間 / 速率(cm/sec)	360 日 / 1.50	

		氣(ppmV)	液(mg/L)			氣(ppmV)	液(mg/L)			氣(ppmV)	液(mg/L)
#1	90	2.92E-10	2.17E-10	#2	90	6.05E-7	1.23E-7	#3	90	5.84E-11	2.55E-12
	180	1.21E-1	1.44E-5		180	1.03E+1	2.03E-4		180	3.41E-8	1.35E-11
	270	1.46E-1	3.70E-3		270	1.04E+1	2.64E-1		270	4.44E-7	1.47E-9
	360	1.09E-1	4.15E-2		360	7.30E+0	1.19E+0		360	2.96E-7	8.77E-8
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		- ⁽³⁾	337 ⁽³⁾	所需時間		- ⁽³⁾	247 ⁽³⁾	所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾
#4	90	1.97E-3	3.28E-3	#5	90	6.67E+0	1.05E+0	#6	90	6.48E-1	1.72E-1
	180	1.58E+2	4.14E-2		180	1.79E+3	1.34E+0		180	1.19E+3	3.88E-1
	270	1.28E+2	7.15E-1		270	1.07E+3	6.32E+0		270	7.89E+2	3.80E+0
	360	9.15E+1	2.05E+0		360	6.70E+2	6.44E+0		360	5.10E+2	5.60E+0
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		- ⁽³⁾	264 ⁽²⁾	所需時間		159 ⁽¹⁾	251 ⁽²⁾	所需時間		169 ⁽¹⁾	256 ⁽²⁾
#7	90	5.26E-6	1.80E-5	#8	90	6.40E-11	3.88E-10	#9	90	3.23E-2	5.08E-2
	180	2.14E+1	2.08E-3		180	3.60E-63	1.50E-6		180	1.26E+2	2.64E-1
	270	1.98E+1	2.19E-1		270	3.99E-3	9.30E-6		270	9.47E+1	2.83E-1
	360	1.43E+1	1.04E+0		360	3.81E-3	2.26E-4		360	7.20E+1	1.54E+0
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		- ⁽³⁾	242 ⁽³⁾	所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾	所需時間		- ⁽³⁾	260 ⁽²⁾
#10	90	6.64E+0	1.07E+0	#11	90	5.86E-11	3.70E-11	#12	90	7.04E-11	1.32E-12
	180	1.72E+3	1.44E+0		180	9.45E-6	7.15E-9		180	8.13E-7	6.91E-10
	270	1.04E+3	6.45E+0		270	1.10E-5	6.88E-8		270	1.22E-6	4.40E-9
	360	6.50E+2	6.45E+0		360	1.84E-5	7.13E-5		360	7.58E-7	9.64E-9
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		160 ⁽¹⁾	251 ⁽²⁾	所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾	所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾

註⁽¹⁾:土壤氣體濃度達 500 ppmV 所需之時間(day)。

註⁽²⁾:地下水含苯濃度達 0.05 mg/L 所需之時間(day)。

註⁽³⁾:該監測井之土壤氣體或地下水含苯濃度無達到法規管制標準。

表 4-6 (d) Case 2-3，424(hysteresis)模擬結果

模擬情境說明

地下水水位變化 (-m) / 遲滯現象 4-2-4 / 有
 土層絕對滲透係數 (m²) / 孔隙率 2.5×10⁻¹¹ / 0.4
 油品洩漏點 Case2 (儲油槽下方)
 油品洩漏時間 / 速率(cm/sec) 360 日 / 1.50

		氣(ppmV)	液(mg/L)			氣(ppmV)	液(mg/L)			氣(ppmV)	液(mg/L)
#1	90	8.52E-10	9.70E-9	#2	90	1.13E-6	8.08E-6	#3	90	9.16E-12	3.73E-12
	180	1.38E-1	1.45E-4		180	1.16E+1	5.33E-3		180	4.13E-8	5.97E-11
	270	1.69E-1	3.96E-3		270	1.16E+1	2.67E-1		270	8.62E-8	6.42E-10
	360	1.27E-1	4.22E-2		360	8.24E+0	1.18E+0		360	2.64E-7	8.73E-8
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾	所需時間		- ⁽³⁾	231 ⁽²⁾	所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾
#4	90	2.20E-3	8.50E-3	#5	90	6.40E+0	2.49E+0	#6	90	6.68E-1	6.51E-1
	180	1.66E+2	1.76E-1		180	1.76E+3	2.80E+0		180	1.19E+3	1.36E+0
	270	1.35E+2	6.96E-1		270	1.08E+3	5.95E+0		270	8.08E+2	3.68E+0
	360	9.79E+1	1.96E+0		360	6.88E+2	6.26E+0		360	5.29E+2	5.51E+0
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		- ⁽³⁾	142 ⁽²⁾	所需時間		159 ⁽¹⁾	80 ⁽²⁾	所需時間		169 ⁽¹⁾	80 ⁽²⁾
#7	90	7.64E-6	7.73E-5	#8	90	5.63E-11	9.78E-10	#9	90	3.36E-2	7.11E-2
	180	2.32E+1	1.79E+2		180	4.12E-3	7.42E-6		180	1.23E+2	3.75E-1
	270	2.19E+1	2.23E-1		270	4.66E-3	9.86E-6		270	9.31E+1	5.45E-1
	360	1.60E+1	1.04E+0		360	4.43E-3	2.34E-4		360	7.11E+1	1.46E+0
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		- ⁽³⁾	216 ⁽²⁾	所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾	所需時間		- ⁽³⁾	85 ⁽²⁾
#10	90	6.43E+0	2.45E+0	#11	90	1.00E-11	1.13E-10	#12	90	6.17E-11	5.83E-12
	180	1.69E+3	2.77E+0		180	1.36E-5	7.19E-8		180	8.97E-7	2.42E-9
	270	1.05E+3	6.02E+0		270	1.42E-5	1.16E-7		270	8.01E-7	3.30E-9
	360	6.67E+2	6.20E+0		360	2.30E-5	7.10E-5		360	7.56E-7	7.95E-9
管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L	管制標準		500 ppmV	0.05 mg/L
所需時間		160 ⁽¹⁾	80 ⁽²⁾	所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾	所需時間		- ⁽³⁾	- ⁽³⁾

註⁽¹⁾:土壤氣體濃度達 500 ppmV 所需之時間(day)。

註⁽²⁾:地下水含苯濃度達 0.05 mg/L 所需之時間(day)。

註⁽³⁾:該監測井之土壤氣體或地下水含苯濃度無達到法規管制標準。

監測的有效性受到水位變化或土層參數之關係之影響，本章節分別依研究方法的模擬結果加以呈現，其模擬結果分別依照地下水位變動、土層透水係數、土壤孔隙率以及遲滯現象來加以說明。

圖 4-1 (a)至圖 4-4 (l)為模擬結果測漏管土壤氣體濃度圖，表 4-1 (a)至表 4-6 (d)為 Case 1-1 至 Case 2-3 於各種情形下的模擬結果。表 4-8 (a)至 4-9 (b)為固定水位及變動水位下土壤氣體及地下水含苯濃度達警戒值 500 ppmV 及 0.05 mg/L(ppm)所需要的時間。

4.1 地下水位變動之影響

4.1.1 定水位與變動水位之比較

由於模擬的測漏管及監測井數量很多，因此只選擇最具代表性或距離洩漏點較近的土壤氣體測漏管或地下水監測井，較容易看出變化者來說明。

固定水位的情形下，測漏管監測到土壤氣體濃度及地下水含苯濃度的情形會比水位變動時的狀況來的好，本小節將以 Case 1 的固定水位 2 m、5 m 與變動水位 2-5-2 m、5-2-5 m 以及 Case 2 的固定水位 2 m、4 m 與 2-4-2 m、4-2-4 m 來做比較。加入遲滯現象的狀況則將於後面小 4.4 節加以說明。

Case 1 分別位於上、下游的測漏管#4 與#6，和洩漏點的距離皆為 3 m，由表 4-8 (a) Case 1-1 中，可以看出這兩支測漏管測到土壤氣體濃度達 500 ppmV 警戒值之天數非常皆近。於固定水位 2 m 下，Case 1-1 測漏管#4 與#6 達到土壤氣體濃度值的門檻時皆為 29 天、Case 1-2 為 37 天，Case 1-3 為 26 天。在變動水位 2-5-2 m 下，Case 1-1 之測漏管#4 與#6 達到警戒值標準時為 90 天、Case 1-2 為 117 天、Case 1-3 為 42 天。不論固定水位或變動水位，有遲滯者皆與未加入遲滯者相同。至於固定水位 5 m 監測時間 Case 1-1 為 51 天、Case 1-2 為 59 天、Case 1-3 為 22 天；變動水位 5-2-5 m 時，測漏管#4 的 Case 1-1、Case 1-2、Case 1-3 監測達門檻時間分別為 85 天、110 天、57 天。有遲滯者為 92、144、53 天。測漏管#6 在固定水位 5 m 為 Case 1-1 至 Case 1-3 分別為 85、135、57 天，有遲滯者為 94、140、53 天。

由土壤氣體濃度的監測來看，水位固定的情況下皆能較快速的偵測到土壤氣體濃度超過標準值；水位有變動情形者，通常需要花比較長的時間才能監測到土壤氣體濃度達到警戒標準。先不討論遲滯現象模擬的情況，就 Case 1-1 固定水位 2 m 與變動水位 2-5-2 m 兩種情形[表 4-8 (a)、4-9 (a)]，且同樣以測漏管#4 比較，水位固定的時候測漏管#4 測得土壤氣體濃度達警戒標準的時間為 29 天，變動水位為 90 天，相差 61 天。固定水位 5 m 與變動水位 5-2-5 m 相比，測漏管#4 在水位 5 m 時需要 51 天才能達到 500 ppmV 的警戒門檻，而變動水位 5-2-5 m 需要 85 天，相差 34 天。如此一來發現水位固定的時候監測到的速度比水位變動的情形下要快上許多。Case 1-2、Case 1-3 情形也與 Case 1-1 相同，Case 1-2 固定水位 2 m 時需要 37 天，變動水位 2-5-2 m 則要花 117 天，兩者相差 80 天；固定水位 5 m 與變動水位 5-2-5 m 分別需要 59 天及 110 天，相差 51 天。Case 1-3 固定水位 2 m 與變動水位 2-5-2 m 也相差 15 天，5 m 與 5-2-5 m 相差 35 天，皆為固定水

位下比較快達到警戒標準。因此可以判定在固定水位時，測定土壤氣體濃度比水位變動的時候穩定許多。

地下水中苯濃度的部分[表 4-8 (a)]，於固定水位的情形下，水位無論是在地下 2 m 或 5 m 時，地下水監測井偵測到水中苯濃度警戒值的時間均相同。如水位在 2 m 時，Case 1-1 監測井#4 與#6 所花的時間為 35 天；Case 1-2 為 47 天，Case 1-3 為 30 天。固定水位在 5 m 時，Case 1-1 偵測時間為 44 天；Case 1-2 為 57 天；Case 1-3 為 55 天。變動水位下[表 4-9 (a)]為 2-5-2 m 時，Case 1-1 的監測井#4 偵測到水中苯濃度達警戒值時間為 92 天；Case 1-2 為 125 天；Case 1-3 為 77 天。監測井#6，Case 1-1 為 88 天；Case 1-2 為 120 天；Case 1-3 為 75 天。水位在 5-2-5 m 時，監測井#4 偵測所需時間 Case 1-1 為 142 天；Case 1-2 為 140 天；Case 1-3 為 160 天。

比較地下水中含苯濃度的狀況，Case 1-1 固定水位 2 m 與變動水位 2-5-2 m 相比[表 4-8 (a)、4-9 (a)]，2 m 達 0.05 mg/L(ppm)的測定標準所需要的時間為 35 天，2-5-2 m 為 92 天，相差 57 天；固定水位 5 m 與變動水位 5-2-5 m 為 44 天及 142 天，相差 98 天。Case 1-2 固定水位 2 m 為 47 天，變動水位 2-5-2 m 為 125 天，相差 78 天；5 m 與 5-2-5 m 為 57 天及 140 天，相差 93 天。Case 1-3，2 m 與 2-5-2 m 分別為 30 天與 77 天，相差 47 天；5 m 與 5-2-5 m 為 55 與 160 天，相差 95 天。其分析結果與土壤氣體濃度的測定狀況相同，地下水中含苯濃度的測定值，達到警戒標準的時間依然是固定水位的時候比變動水位要快的許多，差異較大甚至達到 3 個月之久，水位變動確實使得監測井偵測濃度時間增加的情形。

Case 2 固定水位及變動水位於的部分[表 4-8 (b)、4-9 (b)]，固定水位 2 m 下，測漏管#5 偵測到土壤氣體濃度於 Case 2-1 需要 134 天、Case 2-2 需 170 天、Case 2-3 需 106 天；變動水位 2-4-2 m 在 Case 2-1、Case 2-2 及 Case 2-3 則需要 70 天、91 天及 55 天，分別相差 64 天、89 天與 51 天。測漏管#10 相對於洩漏點的位置對稱於測漏管#5，因此偵測到土壤氣體濃度所花的時間和測漏管#5 相同。位置稍為較遠一點的測漏管#6 偵測到氣體濃度達到 500 ppmV 警戒標準的時間，於固定水位 2 m 時，Case 2-1 為 174 天與 Case 2-3 為 241 天；變動水位 2-4-2 m 則只有 Case 2-1 與 Case 2-3 偵測到濃度時間為 302 天及 263 天，與固定水位 2 m 監測相差 128 天和 37 天。Case 2 中偵測土壤氣體濃度的情形和 Case 1 相似，雖然偵測所花的時間皆比 Case 1 久，不過固定水位偵測土壤氣體濃度的狀況依舊比變動水位來的穩定。土壤氣體監測在固定水位 4 m 的時候，因為污染物的洩漏點較低(位於水面以下)加上水位沒有變化，因此測漏管無法偵測到儲油槽下方洩漏的污染物。變動的水位 4-2-4 m 則在 0~180 天的時候由上升的水位逐漸地將污染團往上帶起因此 Case 2-1、Case 2-2 與 Case 2-3 仍然能夠偵測到土壤氣體濃度，所需要的時間分別為 142、171 與 160 天。

至於地下水中含苯濃度[表 4-8 (b)]，地下水監測井#5 固定水位 2 m 時於 Case 2-1 測得濃度所花的時間為 68 天，Case 2-2 為 86 天，Case 2-3 為 44 天；變動水位 2-4-2 m 分別為 70 天、91 天及 55 天，監測井#10 與#5 相同。Case 2-1，固定水位快了 2 天、5 天

及 11 天，差距比較小。監測井#6 固定水位 2 m 下，Case 2-1 監測時間為 108 天，Case 2-2 為 148 天，Case 2-3 為 82 天；2-4-2 m 分別為 109、137、81 天；但是只有 Case 2-1 固定水位偵測的時間比變動水位快了 1 天，Case 2-2 與 Case 2-3 則是變動水位測到苯污染濃度的速度較快，Case 2-2 快 11 天、Case 2-3 快 1 天。固定水位 4 m 與變動水位 4-2-4 m 相比及同樣為監測井#5，4 m 於 Case 2-1 為 105 天、Case 2-2 為 118 天、Case 2-3 為 72 天，監測井#10 與#5 相同；4-2-4 m 於 Case 2-1~ 2-3 分別為 55、76、72 天，相差 50 天、42 天與 0 天。另外的#6 固定水位 4 m 偵測到水中苯濃度需要的時間，Case 2-1 為 140 天，Case 2-2 為 190 天，Case 2-3 為 109 天；變動水位 4-2-4 m 則分別為 109 天、138 天與 72 天。兩者相差 31 天、52 天與 37 天。

綜合 Case 1 與 Case 2 來說，固定水位下由於 Case 2 的洩漏位置比 Case 1 來的要低，因此 Case 2 中設置的測漏管與監測井即使離洩漏點距離較近，要偵測到污染濃度還是要花比較多的時間。甚至 Case 2 固定水位 4 m 無法測到土壤氣體濃度，固定水位 2 m 最快如 Case 2-3 也要 3 個月後才能偵測到土壤氣體濃度。另外，變動水位時的測漏管無論是在 Case 1 或 Case 2 監測效果都不是很理想，而且洩漏點若是在水位以下將很難被偵測到。但是就 Case 2 而言，固定水位 4 m 原本沒辦法測到土壤氣體濃度，反而是由於 4-2-4 m 水位上升的情形，讓污染物有機會向上擴散，使得測漏管能夠偵測到土壤氣體的濃度。至於其它因為濃度不夠抑或受孔隙率或透水係數的影響監測效果的評估，會於 4.2、4.3 小節來分析。

Case 1，Case 2 中距離較遠的測漏管，固定水位下由於 Case 1 洩漏點的位置位於油槽上方的輸油管線[圖 3-10 (a)]，在測漏管與監測井#5 中，其次井#1、#2、#9、#10 和測漏管#5 的距離皆相同，使得這 4 支井在定水位下無論是測定氣體濃度或地下水含苯濃度時間都相同。井#3、#8 與#11 則因為在下游，雖然還是可以測到，不過幾乎都已經超過 5 個月以上甚至半年之久。而 Case 2 則因為洩漏點的位置在儲油槽[圖 3-10 (b)]的下方，靠近下游處且距離約在井#5 與井#10 之間使其呈對稱，使得這兩支井偵測到土壤氣體與苯濃度達到警戒值的時間完全相同。但是在較遠的井#1、#2、#9 即使在達到警戒標準時也已經花了很長的時間；井#3、#8 由於模擬的洩漏量較少且距離較遠，無法測到濃度。井#12 位於本模擬場址所設置的最下游處，無論是 Case 1 及 Case 2 皆因距離洩漏點太遠導致在一年之內無法測得任何有效濃度。變動水位下 Case 1、Case 2 [表 4-9 (a)、4-9 (b)]，無論是土壤氣體濃度或地下水含苯濃度監測時間都需要花比固定水位還要多一倍的時間，而且皆超過半年以上。不過 Case 2 於地下水含苯濃度的監測效率和固定水位非常皆近，因此也不能由單一情形推斷監測井的監測效果而下定論。

4.1.2 Case1、Case2 不同起始水位情形

土壤氣體濃度變化首先可以由變動水位的模擬結果圖 4-1 (a) ~ 圖 4-4 (h) 來對應表 4-7 (a) ~ 表 4-8 (b) 來看 2-5-2 m 及 5-2-5 m 分別在水位變化的比較。暫時先不討論遲滯現象的模擬狀況。如圖 4-1(a)、4-1(e)、4-1(i)；為 Case 1-1~ Case 1-3 中 2-5-2 m 的情形下，Case 1-1 測漏管#5 監測土壤氣體濃度的部分在濃度曲線幾乎趨近於穩定，有遲滯現

象模擬時狀況皆如此。不過參照 Case 1-1 [表 4-1 (a)]卻可以發現，其實土壤氣體在模擬結束第 360 天的濃度為 3.82×10^4 ppmV，比第 270 天 5.33×10^4 ppmV 還要少。Case 1-2 與 Case 1-3 之 2-5-2 m 的測漏管#5 情形皆為如此[表 4-2(a)、4-3(a)]。由[圖 4-1 (a)]模擬結果可看出測漏管中的由氣濃度在 180 天後隨地下水位升高而增加，孔隙變小，所以油氣濃度增加。

Case 1-1[圖 4-1 (a)]，離洩漏點較近的測漏管#4 與#6 達到 500 ppmV 的警戒值之後，濃度則是持續緩慢的增加，不過到了第 180 天後水位開始上升時，其測漏管濃度由於不斷的洩漏及加上由水位從地下 5 m 將污染氣團抬升導致其偵測濃度有明顯的增加；較遠的測漏管如#1、#2、#9 與#10 偵測到警戒值的時間比較長，每次偵測到的濃度差異也比較大。太遠的測漏管由於濃度太少偵測不到，也因此於模擬結果圖擷取範圍設定在 1×10^6 至 1×10^4 ppmV。主要就設定在讀取土壤氣體濃度 500 ppmV 或者地下水含苯濃度 0.05 mg/L 附近的數據。而土壤氣體的濃度在 270 天之後會逐漸趨於穩定的飽和狀態。

Case 1-3 的測漏管#4 與#6 同樣地在第 360 天濃度比高水位的時候來的較低。因 180 天後水位便開始下降，到了第 270 天，由於整個污染氣團隨著水位下降又使得測漏管中的濃度再度上升。不過由於整個污染氣團處於持續在下降的狀態，因此當模擬天數達到第 360 天時，最後濃度會稍微下降。如圖 4-1 (k)，其它較遠的測漏管雖然較遠，曲線會明顯呈現出來，油氣濃度隨著地下水位變化狀況較明顯，但是濃度太小，不多著墨。測漏管#1、#2、#9 與#10，甚至連無法偵測到污染氣體濃度的#7 與#8 曲線差異更大。當 180 天後污染氣團浮在水位上隨著水位增加，測漏管濃度明顯上升，但是上升至水位將原來到達測漏管下部的污染氣團濃度又持續往上帶走。距離洩漏點較遠的測漏管由於偵測到的濃度比起與距離較近測漏管原本就少了許多，例如測漏管#8 即使是偵測到最大的氣體濃度，仍然比#4 少了將近 1000 倍，曲線上的起伏也比較明顯。濃度上升的差異雖然比較大，但是總量卻很少。因此水位上升後將污染氣體趕出土壤孔隙的情形也就更明顯。

Case 2-1[(圖 4-2 (a))] 2-4-2 m 的洩漏情形，由於油品洩漏的位置在油槽下方，測漏管測漏管不易偵測到土壤氣體濃度。持續洩漏的污染氣團與水位下降可能在第 90 天的時候互相交會，雖然污染氣團會浮至水面上，但是水位仍然持續在下降的狀態，因此使污染氣團距離測漏管更遠，此時濃度變不斷降低。不過在 180 天後水位回升，這時把一直都在油槽底部的污染氣團帶上來，使大約在第 270 天時濃度突然大量的上升，與第 180 天的濃度差將近有 10^8 倍[圖 4-2 (a)]，使曲線呈現極大的變化。

Case 2-2、Case 2-3 與含有遲滯現象模擬的變動水位 2-4-2 m 都有相同的情形發生。4-2-4 m 則與 Case 1 的 5-2-5 m 模擬的狀況較為類似，不過 5-2-5 m 的洩漏點(地下 1 m)高於 4-2-4 m 的洩漏點(地下 4 m)。且 5-2-5 m 的狀況是洩漏向下與水位上升同時進行，直到交會時水位又順勢將污染氣團往上推。當到 180 天後水位達到 2 m 時使污染氣團浮在上方，接著污染氣團又隨水位下降而逐漸往下，主要污染氣團直到接近 270 天離測漏管較遠時才導致濃度才有下降的情形。4-2-4 m 主要是由水位上升同時將污染氣團往上

帶，不過到了 180 天，由於洩漏點較低，主要污染氣團的高度可能沒有被完全帶上來，因此水位開始下降的時候，氣團也隨之下降，使得測漏管得到的濃度值由 180 天起便不斷的減少。

2-5-2 的情形下，測漏管#4 與#6 的濃度在 180 天的前後都會處於比較平衡的狀態，較明顯的如圖 4-3(e)。可能是因為苯濃度在這段期間已經達到飽和，濃度雖不斷向外擴散，但是污染物也不斷的補注進來原來的位址，使得在動態間達到平衡。180 天後，水位往上升又將主要污染物逐漸抬起才使得濃度又緩慢的上升。5-2-5 m 時，#4 與#6 偵測地下水含苯濃度於本模擬中都是會不斷的再增加，只是速度緩慢與否。不過可以注意到 Case 1-1[圖 4-3 (g)]的情形，只有此案例的測漏管#4 與#6 當到達約 310 天左右的時候濃度沒有超過 1 ppmV 之後濃度反而開始減少。可能是由於孔隙率較小，因此當水位開始下降時，水及水溶液的飽和度都隨之降低導致含苯濃度下降。

Case 2-1[圖 4-4 (a)]就測漏管#5、#10 而言，如 2-4-2 m 地下水位下降對於苯濃度的影響不大，水中苯濃度不斷增加且污染團持續向外擴散。Case 2-2 的 2-4-2 m 在第 180 天後水位開始上升的同時，濃度仍然持續增加。不過當到了第 270 天時，由於水位升高，苯濃度污染團擴大導致原本離洩漏點較近的測漏管測到的苯濃度開始有下降趨勢[圖 4-4(e)]。Case 2-3[圖 4-4(i)]則是因為滲透係數較高的關係使得水位快速的下降到 180 天使濃度曲線趨近平緩，但是在水位上升之後又急速的將污染團往上帶，直到 270 天之可能擴散的速度較高，因此測漏管偵測到的濃度值反而又下降了。4-2-4 m 的狀況大致上水中含苯濃度皆穩定且緩慢增加，唯 Case 2-3[圖 4-4(k)]在由於透水係數較高的影響導致含水苯濃度有些許的下降。

4.2 土層透水係數之影響

本模擬中對土層透水係數 $K_w=2.74 \times 10^{-3}$ (cm/sec)、 $K_w=2.74 \times 10^{-2}$ (cm/sec) 兩者相差 10 倍於洩漏的影響，分別以固定水位下以及變動水位下 Case 1-2(K_w 小)、Case 1-3(K_w 大) 與 Case 2-2(K_w 小)、Case 2-3(K_w 大) 來進行說明。

固定水位就 Case 1 之井#4 與#6 可以看出差異，透水係數較高者其測漏管監測效率較高，能比較快速偵測到土壤氣體濃度達到警戒值。於 2 m[表 4-8(a)]，Case 1-2(K_w 小)、Case 1-3(K_w 大) 偵測到土壤氣體濃度 500 ppmV 的時間分別為 37 天與 26 天，相差 11 天。較遠的測漏管如#1、#2、#9 與#10 濃度達到警戒的監測時間，當 K_w 小需要 119 天， K_w 大則為 77~79 天，相差約 40 天。最遠且有偵測到濃度的測漏管#7 則差了 60 天。

地下水含苯濃度就監測井#4 與#6 來比較，Case 1-2(K_w 大)的時候偵測達 0.05 mg/L 的警戒標準值需要 47 天的時間，但 Case 1-3(K_w 大)則只要 30 天就可以偵測到，相差 17 天。較遠的井#1、#2、#9 與#10 當 K_w 較小時所需要的監測時間皆為 129 天； K_w 大則只要花 73 天，相差 56 天。整體來說兩種污染濃度的偵測時間差異不會太大，但是 K_w 大者偵測效果較好。固定水位在 5 m 時，同樣監測井的位置相較於 2 m。則不同透水係數

影響更明顯。井#4 與#6 當 K_w 較小時，偵測需要 59 天； K_w 大時則在 22 天就能偵測到，兩者相差 37 天。較遠的測監測井#1、#2、#9、#10， K_w 小與 K_w 大時監測到濃度的天數分別為 167 天及 65 天，相差達 100 天之久。地下水含苯濃度差距比較小，當 K_w 較小時，井#4 與#6 測得濃度時間為 57 天； K_w 較大時則需要 55 天，只有相差兩天。不過較遠的監測井仍舊是 K_w 較大的其偵測效果較好，快了 54 天。

Case 2 中固定水位 2 m 只有測漏管#5、#6 與#10 測得濃度，Case 2-2(K_w 小)所偵測到土壤氣體濃度的時間分別為 170、226、170 天；Case 2-3(K_w 大)所花的時間為 106、135、106 天，相差 64、91、64 天。地下水含苯濃度測於 2 m(K_w 較小)時，監測井#5 與#10 的監測時間為 86 天； K_w 較大為 44 天。較遠的監測井#6 與#4， K_w 較小的時候為 148、342 天； K_w 較大為 82、160 天，相差 66、182 天。固定水位於 4 m 時偵測的苯濃度於較小的 K_w 時，監測井#5 與#10 需要時間為 118 天； K_w 較大需要時間為 72 天。較遠的監測井#6 與#9 於 K_w 較小監測時間為 190 天； K_w 較大需要 109 天，相差 81 天。

整體來說透水係數(K_w)提高 10 倍時，固定水位 2 m 距離洩漏點較近 (3 m) 的測漏管測得土壤氣體達污染標準的時間減少 1.4 倍，較遠的(6 m) 則減少 1.5 倍；於固定水位 5 m 時，由近而遠為減少 2.7 倍與 2.6 倍。Case 2 於固定水位 2 m 時約減少 1.6 倍。至於地下水含苯濃度 Case 1 固定水位 2 m 由近而遠依序為 1.6 至 1.9 倍；5 m 為 1 倍至 1.6 倍。Case 2 固定水位 2 m 距離洩漏點的測漏管由近而遠所花的時間縮短皆 2 倍；4 m 則為 1.6、1.7、2 倍。

變動水位 Case 1-2[表 4-9(a)]，(K_w 小)時測漏管#4 與#6 在 2-5-2 m 需要花 117 天才能偵測達到 500 ppmV 的土壤氣體濃度值；(K_w 大)時 Case 1-3 為 41 天。當 Case 1-2 在 5-2-2 m 時，#4 與#6 分別為 110 天與 135 天可測得；Case 1-3 皆為 57 天。地下水含苯濃度於 K_w 較小的 Case 1-2 之#4 與#6 測得 0.05 mg/L 天數為 125 及 120 天； K_w 較大的 Case 1-3 則分別需要 77 天及 75 天。較遠的測漏管#1、#2、#9、#10 於 K_w 較小的時候需要 300 天以上才能測得超標的污染物； K_w 較大則分別於大約 150~250 天可測得污染物。

Case 2-2(K_w 較小)與 Case 2-3(K_w 較大)的比較，土壤氣體濃度由測漏管#5 與#10 來看，水位 2-4-2 m 時 K_w 小需要 280 天； K_w 較大需要 260 天。以 4-2-4 m， K_w 較小需要 171 天 K_w 較大需要 160 天。地下水含苯濃度於較近的測漏管(#5 與#10)差異並不大，但是距離較遠的測漏管(#4 與#9)則 Case 2-3(K_w 較大)偵測到苯濃度的速度比 Case 2-2(K_w 較小)快上許多。

綜合分析就固定水位而言，高水位、低水位分開比較，不論測漏管與監測井偵測為土壤氣體濃度或是地下水含苯濃度，皆透水係數(K_w)大者有助於測漏管監測的效率。且離洩漏點越遠者，影響愈越大。這情況於 Case 1 與 Case 2 的結果均相同，而且如本小節第一點最後一段，當 K_w 增加 10 倍，則固定水位偵測土壤氣體濃度的時間約可縮短 1.4~2.7 倍；地下水含苯濃度的偵測時間約可縮短 1.6~2 倍。

若是由變動水位來看，Case 1-3(K_w 大)[表 4-9 (a)]之 2-5-2 m 比起 Case 1-2(K_w 小)快了 76 天就測得土壤氣體濃度達到 500 ppmV 的門檻，少了將近 3 倍的時間；5-2-5 m 同樣也快了 2.6 倍左右。Case 1-3(K_w 大)在時間則比 Case 2-2(K_w 小)快了 20 至 80 天不等，平均約減少 1.1 倍的時間。不過地下水含苯濃度到達警戒值的時間卻不一定受透水係數 K_w 值的影響。監測苯濃度的部分，Case 1 於 5-2-5 m 的狀況除了監測井#6 之外，監測井#4 不受到透水係數影響[表 4-9 (a)]，反而是透水係數較低的比較快到達警戒值門檻，於 Case 2 的 4-2-4 m[表 4-9 (b)]也有此現象，因此可以發現透水係數對於土壤氣體濃度影響較大，於地下水含苯濃度卻不一定受透水係數大小影響監測的時間。

另外，監測井距離洩漏點的遠近也不一定和監測井監測到警戒濃度的時間成正比，意即即使較遠的測漏管雖然透水係數較高，但偵測到濃度達警戒值的時間並不會差太多。相較於固定水位，變動水位於偵測地下水含苯濃度得效果並沒有很好。於本小節還可以用其他角度來檢視透水係數於變動水位的監測效果。同樣就 Case 1 的三個案例來看[表 4-9 (a)]，相同的透水係數於 2-5-2 m 或 5-2-5 m 這兩種情形，起始水位高低對於測漏管的監測效果影響不同(Case 2 也是如此)。意即同樣水位於第 2 m~5 m 或地下 2 m~4 m，透水係數相同時，起始水位初始設定位置會影響偵測結果。

因此就透水係數而言，時間拉長以後能夠明顯的看出差異性。所以透水係數的影響大概可以歸類成下列幾點：

1. 固定水位下的測漏管的監測無論是對於土壤氣體濃度或者地下水含苯濃度皆可看出監測效果的差異性非常明顯。透水係數較大者，測漏管監測的效果較好。
2. 變動水位下測漏管監測土壤氣體濃度仍然是透水係數較高者，其監測效果較好；但是監測地下水含苯濃度時，透水係數大小不影響監測效果。
3. 變動水位模擬時設定的初始水位對監測的效果有一定影響。

4.3 土壤孔隙率之影響

固定水位下於模擬時間結束(一年)後輸出各測漏管之監測值並比較土壤孔隙率之影響。由 Case 1-1(孔隙率 $n=0.3$)、Case 1-2($n=0.4$)進行比較結果如表 4-8(a)~4-9(b)。

於固定水位土壤氣體監測結果，與透水係數相同的情形下來比較發現孔隙率較小($n=0.3$)者，達到 500 ppmV 濃度的監測門檻速度較快。固定水位 2 m 下[圖 4-8 (a)]Case 1-1(n 小)與 Case 1-2(n 大)比較測漏管#4 與#6，孔隙率小偵測時間為 29 天；孔隙率大者需要 37 天，相差 8 天。於固定水位 5 m 則孔隙率小需要 51 天，孔隙率大需要 59 天，相差 8 天。地下水含苯濃度於 2 m 情形下，測漏管#4 與#6 在孔隙率較小時需要 35 天；孔隙率較大需要 47 天，相差 12 天。5 m 情形下，孔隙率小為 44 天；孔隙率大為 57 天，相差 13 天。Case 2-1[圖 4-8 (b)]，土壤氣體濃度於 2 m 時，測漏管#5 與#6 於孔隙率較小偵測到濃度需要的時間為 134 與 174 天；孔隙率較大的需要 170 天與 226 天；分別相差

36 天與 52 天(#10 與#5 相同)。地下水含苯濃度於 Case2 固定水位 2 m 時，測漏管#5 與 #6 於孔隙率小需要 68 天及 108 天；孔隙率較大者需要 86 天及 148 天，相差 18 天及 40 天。4 m 時測漏管#5 與#6 於孔隙率較小需要 105 天及 140 天；孔隙率較大者需要 118 天及 190 天，相差 13 天及 50 天。變動水位於 Case 1 及 Case 2 的案例皆整理於表 7-1，相較於固定水位時的情形，變動水位於孔隙率較小時，其監測的效果比較好。

表 4-7 土壤孔隙率於變動水位監測土壤氣體與水中含苯濃度情形(days)

測漏管 n	Case1-1		Case1-2	Case1-1		Case1-2	相差天數
	2-5-2(m)			5-2-5(m)			
	0.3(A)	0.4(B)	(B)-(A)	0.3(A)	0.4(B)	(B)-(A)	
#4、#6(gas)	90	117	27	85	110	25	
#4、#6(aq)	92	125	33	142	140	-2	
案例 水位	Case2-1	Case2-2		Case2-1	Case2-2		
	2-4-2(m)			4-2-4(m)			
#5 #10(gas)	280	280	0	142	171	29	
#5、#10(aq)	70	91	21	55	72	17	
#6(aq)	109	137	28	109	138	29	
#9(aq)	251	261	10	157	336	179	

本表改編自表 4-9 (a)、4-9 (b)

變動水位的部分如表 4-7，Case 1-1(孔隙率小)，2-5-2 m 下土壤氣體濃度以測漏管#4 與#6 偵測所花的時間為 90 天；Case 1-2(孔隙率大)偵測濃度的時間為 117 天，相差 27 天。5-2-5 m 的情形下，Case 1(孔隙率小)，測漏管#4 與#6 同為 85 天到達氣體濃度門檻；Case 1-2(孔隙率大)則花了 110 天才測到污染物濃度，相差 25 天。Case 2-1(孔隙率小)與 Case 2-2(孔隙率大)變動水位 2-4-2 m 之測漏管#5 與#10 則是花了 280 天達到警戒值，但是 Case 2-2 與 Case 2-1 模擬時間相同。離洩漏點較遠的測漏管監測均是孔隙小偵測到土壤氣體濃度的時間較快。至於在地下水含苯濃度情形的測定，於表 4-7 可見，變動水位於 5-2-5 m 時，孔隙率大小並沒有影響到測漏管偵測的時間，可能是模擬的誤差。因為於 Case 2-1 與 Case 2-2 仍然是孔隙率較小的監測效果較好。

由平流傳輸速率之公式 $v_x = \frac{K}{n_e} i$ (式中 v_x 為平均線性速度、K 為水力傳導係數、i

為水力梯度、 n_e 為有效孔隙率)可知，當所有條件皆相同之情況下則傳輸速率約略與孔隙率之大小成反比。且考慮污染團在擴散的傳輸機制下，當孔隙率較小則會使得液相污染團較容易充滿孔隙，因而流速增加而傳輸速率也會提高。

因此不論是固定水位或者是變動水位，仍然可以判定土壤孔隙率的大小對於污染物傳輸模擬監測的效果仍有影響，且在水位變動的情形下一致性非常高，當孔隙比較小的時候，容易被水或污染物充滿，飽和時間比較短會導致水流的速度加快，同時污染物的擴散速度也會增加。而土壤孔隙率對於污染團傳輸速率之影響亦會隨著距離之增加而更

為顯著由結果可得出孔隙率小對於污染團傳輸有較大幫助之結論。最後以透水係數與孔隙率之敏感度分析結果比較可知，變動透水係數相較於變動孔隙率而言對於污染團傳輸之影響較大也較為敏感。

4.4 遲滯現象模擬結果

遲滯現象加入模擬的結果如表 4-8 (a)、4-8(b)，就土壤氣體濃度而言，Case 1 中，變動水位 2-5-2 m 下由較近的測漏管#4 與#6 來看，加入遲滯現象和未加入的模擬結果相同，因此看不出變化的情形。不過若是由較遠的測漏管，如 Case 1-1 至 Case 1-3 的#1、#2 則只有相差 2 天；在#9 與#10 則有相差 16 天。但若是以起始水位較低的 5-2-5 m 來看，水位上升時加入了遲滯現象導致一開始模擬的條件就不同，因此偵測到土壤氣體濃度達警戒標準的時間變的不一樣，但是差異也沒有特別明顯。Case 1-1，2-5-2 m，也就是水位由高降低的時候，土壤開始排水，到了 180 天後，水位由地下 5 m 低水位開始上升，此時的有加入遲滯現象的模擬導致殘留於水面下的 LNAPL 比較多，所以氣體濃度會變的比較少，導致偵測到濃度的速度稍為慢一些。這樣的情形於 Case 1-1、Case 1-2 的 5-2-5 m 也能夠看的出來。5-2-5 m 一開始便由低水位開始上升，因此屬於吸水狀態，而在土壤濕潤時濕相液體(水)會取代非濕相液體(空氣或有機液體)，同時也牽引著非濕相液體，使得 LNAPL 或土壤氣體沒辦法往上擴散，因此在模擬天數達 180 天之前，測漏管#4 及#6 皆已偵測到土壤氣體的濃度，只是有加入遲滯現象所需要偵測到的時間較長。至於 Case 1-3 的 5-2-5 m 反而是有遲滯現象模擬速度較快，則是因為有遲滯現象時，空氣孔隙較大，導致氣體飽和度較高，因此土壤氣體濃度較快被偵測到。

Case 1-2 於 5-2-5 m 的比較[圖 4-1 (g)、4-1 (h)]測漏管#4 與#6，水位由 180 天開始下降後，此時土壤氣體濃度也會隨之減少。但是有遲滯者其土壤測漏管裡濃度卻不斷上升，是因為受到遲滯的影響導致土壤中的汽氣體濃度下降少，在非飽和層(地下水位以上)，水飽和度都較無遲滯者少，因此含空氣孔隙較多，固定體積土壤中油氣總量高，則油氣濃度高。

Case 1-3 於 5-2-5 m [圖 4-1 (k)、4-1 (l)]土壤氣體測漏管#4、#6 與#7 在 180 天水位開始下降時，濃度曲線卻在第 270 天時達 peak 值後開始減少，雖然擴散濃度增加，但是由於水位降低的效果較大，所以土壤氣體濃度有下降的趨勢，而有遲滯者在 180 天至 270 天中可看出曲線的差異，有遲滯者上升濃度較緩慢。

而 Case 2-1 模擬的結果不同於 Case 1-1，由於洩漏點一開始的位置就不一樣，Case 2-1 的洩漏點位於儲油槽底部導致模擬結果的差異。較近的測漏管如#5、#10 與、#6，加入遲滯現象監測時間較快，不過#4 與#9 則相反。但可以確定的是偵測到濃度的時間都在 180 天之後，也表示水位由高(地下 2 m)往下降(地下 4 m)的時候屬於排水狀態，水位回升的時候遲滯現象的模擬有不同的結果。比較近的測漏管偵測的時間較快仍舊是因為有遲滯現象時，於土壤中氣體孔隙率較大，因此滲透較快，使得有遲滯現象時能夠較快偵測到土壤氣體濃度。Case 2-2 與 Case 2-3 的 2-4-2 m 結果皆與 Case 2-1 相同。而 Case 2-1

的#4 與#9 比較快能偵測到則是因為沒有遲滯現象時，殘留在水下的濕相液體較少，因此氣體濃度相對的比較高。

由 Case 2-1 的 2-4-2 m[圖 4-2 (a)、4-2 (b)]自 180 天後，由 4 m 回升至 2 m 的狀況時，部分孔隙中仍然有空氣，未完全被水填滿，可能較容易讓油品進入，而且在 Vadose Zone 中，空氣孔隙較多會使得油氣傳輸較快。

地下水含苯濃度值[表 4-9 (a)]於 Case 1，距離洩漏點較近的監測井#4 與#6，於 2-5-2 m 的部分，Case 1-1 的#4 與#6 為 92 天及 88 天。遲滯者為 92 天及 88 天。Case 1-2 的#4 與#6 為 125 天與 120 天，有遲滯者模擬結果相同。Case 1-3 的#4 與#6 為 77 及 75 天，有遲滯者偵測結果仍然相同。但是在 5-2-5 m 的部分，有遲滯者模擬的結果偵測到地下水含苯濃度的時間較快，如 Case 1-1[圖 4-3 (c)、4-3 (d)]，於圖中的監測井#4，模擬時為定量注水的方式，使得有遲滯者在孔隙有空氣時，水位上升較快且較高，因此會先遇到注入的油品。由於水位在地下水位下的水相液體，若有遲滯現象時濕相液體會牽引住殘留於水中的空氣及有機液體，因此水中的含苯濃度便增加，使得測漏管的偵測效果提升。

Case 2 的部分，2-4-2 m 於較近的監測井#5 與#10 監測其遲滯影響並不大，偵測到水中苯濃度的時間相同。但於 4-2-4 m 較近的監測井#5 與#10，由於洩漏時在水位面下，水位上升時土壤成吸水狀態，殘留在水下的 LNAPL 增加，不過由於有遲滯現象時，氣相的空氣孔隙較大，水位上升到達飽和的時間較久，因此偵測到水含苯濃度的時間比較長。

遲滯現象加入模擬的結果較為複雜，而且其模擬結果不是非常明顯，未來可進一步進行其它相關的模擬。

表 4-8 (a) Case 1 定水位監測井土壤氣體及地下水含苯濃度值達警戒所需時間(day)

Case 1(gas) ¹	Case 1-1		Case 1-2		Case 1-3	
孔隙率(%)	0.3		0.4		0.4	
透水係數 K _w (cm/sec)	2.74×10 ⁻³		2.74×10 ⁻³		2.74×10 ⁻²	
洩漏速率(gal/day)	1.35					
起始水位(-m)	2	5	2	5	2	5
500ppmV	gas					
#1	91	182	119	167	77	64
#2	91	182	119	167	77	66
#3	-	-	-	-	253	-
#4	29	51	37	59	26	22
#5	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
#6	29	51	37	59	26	22
#7	131	311	170	-	110	82
#8	310	-	-	-	181	180
#9	91	193	119	167	79	64
#10	91	182	119	167	77	66
#11	-	-	-	-	217	-
#12	-	-	-	-	311	-
Case 1(aq) ²	aq					
#1	96	114	129	147	73	93
#2	96	114	129	147	73	-
#3		-	-	-	73	275
#4	35	44	47	57	30	55
#5	2	9	3	11	11	33
#6	35	44	47	57	30	55
#7	141	176	189	235	100	33
#8		319	-	-	203	240
#9	96	114	129	147	72	93
#10	96	114	129	147	73	93
#11	-	-	-	-	293	275
#12	-	-	-	-	-	-

註：⁽¹⁾：土壤氣體濃度達 500ppmV 所需之時間(day)

註：⁽²⁾：地下水含苯濃度達 0.05 mg/L 所需之時間(day)

表 4-8 (b) Case 2 定水位監測井土壤氣體及地下水含苯濃度值達警戒所需時間(day)

Case 2(gas) ¹	Case 2-1		Case 2-2		Case 2-3	
孔隙率(%)	0.3		0.4		0.4	
透水係數 K _w (cm/sec)	2.74×10 ⁻³		2.74×10 ⁻³		2.74×10 ⁻²	
洩漏速率(gal/day)	1.5					
起始水位(-m)	2	4	2	4	2	4
500ppmV	gas					
#1	-	-	-	-	-	-
#2	-	-	-	-	-	-
#3	-	-	-	-	-	-
#4	-	-	-	-	354	-
#5	134	-	170	-	106	-
#6	174	-	226	-	135	-
#7	-	-	-	-	238	-
#8	-	-	-	-	-	-
#9	-	-	-	-	-	-
#10	134	-	170	-	106	-
#11	-	-	-	-	-	-
#12	-	-	-	-	-	-
Case 2(aq) ²	aq					
#1	-	-	-	-	314	-
#2	-	-	-	-	196	277
#3	-	-	-	-	-	-
#4	336	335	342	-	160	208
#5	68	105	86	118	44	72
#6	108	140	148	190	82	109
#7	-	-	-	-	198	277
#8	-	-	-	-	-	-
#9	342	258	-	344	200	169
#10	68	105	86	118	44	72
#11	-	-	-	-	-	-
#12	-	-	-	-	-	-

註：(1)：土壤氣體濃度達 500ppmV 所需之時間(day)

註：(2)：地下水含苯濃度達 0.05 mg/L 所需之時間(day)

表 4-9 (a) Case 1 變水位監測井土壤氣體及地下水含苯濃度值達警戒所需時間(day)

Case 1(gas) ¹	Case 1-1				Case 1-2				Case 1-3			
孔隙率(%)	0.3				0.4				0.4			
透水係數 K _w (cm/sec)	2.74×10 ⁻³				2.74×10 ⁻³				2.74×10 ⁻²			
洩漏速率(gal/day)	1.35											
起始水位(-m)	252		525		252		525		252		525	
是否含遲滯現象		H		H		H		H		H		H
#1	268	270							105	105	225	154
#2	268	270							108	108	225	159
#3									108			
#4	7	7	7	1	27	27	14	115	1	1	11	1
#5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
#6	7	7	7	1	27	27	16	138	1	1	12	1
#7									207	209	258	
#8												
#9	254	270							105	105	225	154
#10	255	270							108	108	225	159
#11												
#12												
Case 1(aq) ²												
是否含遲滯現象		H		H		H		H		H		H
#1	257	264	231		322	306			252	252	236	198
#2	265	268	241	343	310	327			154	149	253	217
#3									151	148		
#4	5	5	5	9	35	35	50	50	73	73	160	153
#5	1	1	1	1	1	1	1	1	42	42	109	102
#6	2	2	26	27	39	39	50	50	73	73	163	158
#7		349							173	173	298	289
#8									194	197		
#9	257	264			301	305			154	149	236	196
#10	265	267			309	325			151	148	255	215
#11												
#12												

註：(1)：土壤氣體濃度達 500ppmV 所需之時間(day)

註：(2)：地下水含苯濃度達 0.05 mg/L 所需之時間(day)

表 4-9 (b) Case 2 變水位監測井土壤氣體及地下水含苯濃度值達警戒所需時間(day)

Case 2(gas) ¹	Case 2-1				Case 2-2				Case 2-3			
孔隙率(%)	0.3				0.4				0.4			
透水係數 K _w (cm/sec)	2.74×10 ⁻³				2.74×10 ⁻³				2.74×10 ⁻²			
洩漏速率(gal/day)	1.50											
起始水位(-m)	242		424		242		424		242		424	
是否含遲滯現象		H		H		H		H		H		H
#1									315	309		
#2									277	274		
#3												
#4	335	356							271	269		
#5	280	247	142	146	280	276	171	171	260	253	159	159
#6	302	256	259	163					263	256	169	169
#7									277	274		
#8									339	331		
#9	305	331			360	360			289	285		
#10	280	273	142	146	280	276	171	171	259	252	160	160
#11												
#12												
Case 2(aq) ²												
是否含遲滯現象		H		H		H		H		H		H
#1											337	
#2											247	231
#3												
#4	267	267	315	317	360			336	231	231	185	142
#5	70	70	55	58	91	91	72	76	55	55	72	80
#6	109	109	109	99	137	137	138	138	81	81	72	80
#7											242	216
#8												
#9	251	251	157	162	261	257	336	278	229	229	78	85
#10	68	68	57	60	87	87	72	76	52	52	72	80
#11												
#12												

註：⁽¹⁾：土壤氣體濃度達 500ppmV 所需之時間(day)

註：⁽²⁾：地下水含苯濃度達 0.05 mg/L 所需之時間(day)

第五章 結論與建議

本研究以 TMVOC 模擬加油站油品洩漏並評估土壤氣體與地下水監測之有效性與地下水位變動以及土壤參數間之關係。根據研究結果可歸納出之結論如下：

1. 變動水位相較於固定水位時，監測的效果較不穩定，平均起來測漏管監測污染物到達警戒標準的時間都比固定水位增加許多。根據美國規範中，加油站之測漏管應能於 30 天內測得 150 加侖之油品洩漏事件，意即平均每天應該以 5 加侖的速度做洩漏(大約為 19 L/day)；環保署(2006)於法規中明訂偵測靈敏度須能達到 0.2 gal/hr 之標準(4.8 gal/day)。本研究為進一步探討在洩漏量更小的狀況下，土壤氣體監測與地下水監測是否仍然有效，故降低了洩漏的濃度。研究結果發現，在研究中假設的較小之土壤導水度條件下，土壤氣體監測和地下水監測仍然可能及時監測到滲漏事件。因此，若當加油站的回填材料導水度完全符合規範要求時，當可更早偵測到油品的滲漏。
2. 地下水位變化對於透水係數(K_w)與孔隙率(n)的影響，無論是固定水位或者是變動水位，透水係數(K_w)較大或者孔隙率(n)較小者其偵測土壤氣體或地下水含苯濃度的效果較好。但是水位變動的情形下，土壤氣體濃偵測的效果比地下水含苯濃度好。傳輸速率會受到透水係數及孔隙率的影響，就透水係數而言，即使在水位變動的情形下，透水係數較大的案例其污染團整體傳輸速率會比較快，尤其隨著距離的增加，污染團傳輸速率受透水係數的影響越明顯。孔隙率則是當其他條件相同下，其值越小時，污染團容易充滿孔隙而飽和，使得污染物在土壤的孔隙中流速增加，讓傳輸速率變的更快。
3. 土壤中水分的貯留有所謂的土壤水特徵曲線來描述，而此一曲線實際上有所謂的遲滯現象；因此本研究中亦在加入遲滯現象進行模擬。研究結果發現，在有遲滯現象時，殘留於地下水位面下的 LNAPL 較多，濕相液體在水位上升的過程中進行濕潤作用時，會取代原來孔隙中的非水相液體及空氣。但是過程中又牽引著非水相液體及空氣，使浮到水位面上的氣體減少，測漏管偵測土壤氣體濃度的效果較差，相對的地下水含苯濃度的監測效果比較好。沒有遲滯現象時，則情形相反，當殘留於水位面下的 LNAPL 較少，此時代表土壤氣體濃度較容易被偵測到，水中含苯濃度則恰好相反。另外於氣相中，有遲滯現象的模擬其空氣孔隙率會比較高，無遲滯現象時空氣孔隙率較小；遲滯現象於水相中水的滲透力會變小，反之則較大，這些都是遲滯現象所造成的影響。而大致上來說，本研究於洩漏的濃度可能較不足，因此遲滯現象在水位面下於模擬並沒有明顯的效果，雖然同樣的測漏管監測有不同結果，但影響似乎不大。

4. 本文中洩漏點的位置確實會影響到測漏管的監測效果。就固定水位而言，Case 1 無論是偵測土壤氣體濃度或地下水含苯濃度，效果較好。而且除了距離洩漏點太遠的測漏管(#3、#11 與#12)無法監測到數據外，其它測漏管皆能監測到土壤氣體濃度達到警戒的標準。不過洩漏點位於儲油槽下方，較不利於監測，如 Case 2 於固定水位 2 m 時比較近的測漏管(#5、#10 與#6)能測到土壤氣體濃度，其它的測漏管完全沒有辦法發揮作用。甚至固定水位 4 m 的情形下，沒有測漏管測得土壤氣體濃度的數據，效果其差。變動水位時，Case 1 洩漏點在水位上方洩漏，對於測漏管偵測土壤器土濃度而言，效果較好。Case 2 洩漏點位於儲油槽下方(水位面下)，較不利於土壤氣體濃度偵測效果。地下水含苯濃度的監測，距離較近的測漏管無論是洩漏位置的高低不影響其濃度的監測效率。但是 Case 1 由於洩漏位置較高，因此若是以監測範圍而言，Case 1 仍然比 Case 2 來的好。為了求監測效果能夠更好，監測井的設置仍然建議靠近污染物的潛勢洩漏地區較高的地方，以確保監測井測漏管能夠發揮最佳的效果。
5. 本研究中相對於實務上，監測井可能會因為環境、地形等因素而無法隨時就地測量其土壤的氣體濃度。由於加入變動水位的條件，使得程式在模擬的時間大幅增加，為了減少模擬冗長的等待時間，場址大小的縮減及減少污染物的洩漏量都可能造成模擬結果的參考性質降低，此外也尚未加入抽水井、異質性土層的模擬方式，另外也可以探討不同的土壤氣體，或不同的污染物加入成為模擬的條件。都是未來可以努力的目標。

參考文獻

1. 土污基管會，「加油站及儲油槽」，2011。(http://sgw.epa.gov.tw/public/0502.asp)
2. 林百福，「引擎燃料系統與檢修」，台北科技大學，2001。
3. 單信瑜等，「遲滯效應及尺度原則對非水相液於孔隙介質中傳輸模擬之影響」中國土木工程學刊，第十三卷 第四期，747~759 頁，2001。
4. 單信瑜，張良正，「非水相液體於非飽和地層中傳輸行為之特性」2002。
5. 單信瑜，張良正，「非水相液體於非飽和地層中傳輸行為之特性」，地球系統科學研討會，中央大學，桃園，2003
6. 龍元祥，碩士論文，「含非水相液體土壤之透水性」，國立交通大學，碩士論文，2004。
7. 林立偉，「非水相液體於土壤中滲流之研究」，國立交通大學，碩士論文，2005。
8. 劉政，「遠近地震所引起地下水位變化之研究」，國立中央大學，博士論文，2005。
9. 董天行，「地下水位調查重點」，台灣土壤及地下水環境保護協會簡訊，第二十期，14~25 頁，2006。
10. 經濟部工業局，「石油碳氫化合物土壤及地下水污染預防與整治技術手冊」，2007。
11. 經濟部工業局，「土壤及地下水污染預防與整治技術手冊」，2009。
12. 單信瑜，「加油站地下水及槽間監測作業介紹」，國立交通大學，2010。
13. 黃佳雯，「地下水模式工具於污染控制場址範疇界定之研析」，碩士論文，國立台灣大學，2005。
14. 環保署「地下儲槽系統防止污染地下水體設施及監測設備設置管理辦法」，環保署，2011

1. C. W. Fetter, Contaminant Hydrogeology” 1999
2. Anthony, T. C. and M. B. Parlange, “On water vapor transport in field soils,” *Water resource research.*, Vol. 34, NO. 4, pp. 731–739, 1998.
3. Alfredo, B., C. M. Oldenburg, G. J. Moridis, K. Pruess, “MODELING GAS RESERVOIR PROCESSES WITH TMVOC V.2.0,” Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California, 2003.
4. Bedient, P.B., H.S. Rifai, and C. J. Newell, “Ground Water Contamination: Transport and Remediation,” Englewood, Prentice Hall, 1993.
5. Bruce, L., T. Miller, and B. Hockman, “Solubility Versus Equilibrium Saturation of Gasoline Compounds: A Method to Estimate Fuel/Water Partition Coefficient Using Solubility or K_{oc},” Amoco Corporation. Tulsa, Oklahoma, 2004.
6. Cary, J. W. “Soil Moisture Transport due to Thermal Gradients: practical Aspects,” *Soil Science Society of America Proceedings.*, Vol 30, No 4. pp. 428-433, 1966.
7. Cline, P. V., J. J. Delfino, and P. S. C. Rao, “Partitioning of aromatic constituents into water from gasoline and other complex solvent mixtures,” *Environ Sci. Technol.* pp.914-920, 1991.
8. Domenico, P. A., F. W. Schwartz, “Physical and Chemical Hydrogeology , 2nd ED., ”John Wiley & Sons, Inc., NEW YORK, NY, 1998.
9. Das, B. M. “Principles of Geotechnical Engineering, 5th Ed,” Thomson, Singapore, 2002.
10. Edwards, A.L. TRUMP, “A Computer Program for Transient and Steady State Temperature Distributions in Multidimensional Systems, ”National Technical Information Service, National Bureau of Standards, Springfield, VA, 1972.
11. Kererat, C. and S. Soralump, “Modeling of Organic Contaminant Migration through Soil Cement Barrier Using TMVOC,” *The 17th Southeast Asian Geotechnical Conference*, Thailand, 2010.
12. Mark, J. L. “Distinguishing the Contributions of Multiple Sources from a Gasoline Release,” KW Brown Environmental Science & Engineering 13101 Northwest Freeway Suite 314, Houston, 2003.
13. McCray, J. E. and R. W. Falta, “Air Sparging for Subsurface Remediation: Numerical Analysis Using T2VOC,” Clemson University, Clemson, 2003.

14. Narasimhan, T.N. and P.A. Witherspoon, "An Integrated Finite Difference Method for Analyzing Fluid Flow in Porous Media," *Water Resour. Res.*, Vol. 12, No. 1, pp. 57 – 64, 1976.
15. Noonan, D. C. and J. T. Curtis, "Groundwater Remediation and Petroleum: A Guide for Underground Storage Tanks," Lewis Publishers, Chelsea, MI, 1990.
16. Pruess, K. and A. Battistelli, "TMVOC, A Numerical Simulator for Three-Phase Non-Isothermal Flows of Multicomponent Hydrocarbon Mixtures in Saturated-Unsaturated Heterogeneous Media," Lawrence Berkeley National Laboratory, USA, 2002.
17. Pruess, K., "Brief Guide to the MINC-Method for Modeling Flow and Transport in Fractured Media," Earth Sciences Division Lawrence Berkeley Laboratory University of California Berkeley, California, 1992.
18. Pruess, K., C. Oldenburg and G. Moridis. "TOUGH2 User's Guide, Version 2.0, Lawrence Berkeley National Laboratory Report LBNL-43134," Berkeley, CA, November 1999.
19. Falta, R. W., K. Pruess, S. Finsterle. and A. Battistelli, "T2VOC User's Guide," Sandia National Laboratory, USA, 1995.
20. Fagerlund, F. and A. Niemi, "Multi-Constituent Modeling of A Gasoline Spill Using The T2VOC Numerical Simulator," Lawrence Berkeley National Laboratory Berkeley, California, 2003.
21. Fetter, C. W., "Contaminant Hydrogeology, 2nd Ed," Prentice-Hall, Inc., London, 1999.
22. Geonometrics, Inc.: "Soil Vapor Monitoring for Fuel Leak Detection," Report to EPA, EMSL Las Vegas, Nevada, 1987.
23. Gustafson, J. B., T. J. Griffith, and D. Orem, "Selection of Representative TPH Fractions Based on Fate and Transport Considerations," Total Petroleum Hydrocarbon Criteria Working Group Series, Vol.3, Amherst Scientific Publishers, Massachusetts, 1997.
24. Pruess, K. and G.S. Bodvarsson, "A Seven-Point Finite Difference Method for Improved Grid Orientation Performance in Pattern Steam Floods," *Proceedings, Seventh Society of Petroleum Engineers Symposium on Reservoir Simulation*, pp. 175 - 184, San Francisco, CA, 1983.

25. Pruess, K. and T.N. Narasimhan, "A Practical Method for Modeling Fluid and Heat Flow in Fractured Porous Media," *Soc. Pet. Eng. J.*, Vol. 25, No. 1, pp. 14 - 26, February 1985.
26. Pruess, K. "TOUGH User's Guide, Nuclear Regulatory Commission Report NUREG/CR-4645," Lawrence Berkeley Laboratory Report No. LBL-20700, 1987.
27. Pruess, K., C. Oldenburg and G. Moridis, "TOUGH2 User's Guide, Version 2.0," Lawrence Berkeley National Laboratory Report LBNL-43134, Berkeley, CA, November 1999.
28. Reid, R. C., J. M., Prausnitz. and B. E., Poling., "The Properties of Gases & Liquids, 4th Ed," McGraw-Hill, New York, 1987.
29. Surampalli, R., S. K. Ong, E. Seagren, J. Nuno., and S. Banerji, "Natural Attenuation of hazardous Wastes," American Society of Civil Engineers, pp. 120-129, USA, 2004.
30. Suthan, S. S., and C. P. Fred, "In situ remediation engineering, CRC Press," pp. 315-353, New York, 2000.
31. Silka, L. R., "Simulation of Vapor Transport Through the Unsaturated Zone-Interpretation of Soil-Gas Surveys," *GWMR*. pp. 115-123. (1988).
32. Smiley, S. T., "Soil Density Analysis," Bartlett Tree Research Laboratorys, Charlotte, NC, 2000.
33. Siegel, D. I. The rechargedischarge function of wetland near Juneau, Alaska: Part.1. Hydrological Investigation. *Ground Water*. Vol. 26.P.580-585.(1988).
34. Schmelling, S. G., and R. R. Ross, "Contaminant Transport in Fractured Media: Models for Decision Makers," USEPA, 1996.
35. Testa,S.M., and M.T. Paczkowski. Volume determination and recoverability of free hydrocarbon. *Ground Water Monitoring Review*,9 no.1:120-127 (1989)
36. Testa, S. M. and M. L. Winegardner, "Restoration of Petroleum –Contaminated Aquifers," Lewis publishers, Chelsea, MI, 1991.
37. Weaver, J. W., J. E. Haas, And J. T. Wilson, "Analysis of Gasoline Spill at East patchoque, New York," Washington, D.C., 1996.
38. Weber, D. and F. Schwillle, "Passive Vapor Monitoring of Underground Storage Tanks For Leak Detection," Las Vegas, USA, 1989.
39. Thunderhead Engineering, "PetraSim User Manual," Laboratory, USA, 2008.
40. Tjalfe G. P., T. Yamaguchi. and J. A. Hansen, "Predicting Soil-Water and Soil-Air

Transport Properties and Their Effects on Soil-Vapor Extraction Efficiency,” GWMR, pp. 61-70, 1999.

41. Zhang K., H. Yamamoto., and K. Pruess., “TMVOC-MP: A Parallel Numerical Simulator for Three-Phase Non-isothermal Flows of Multicomponent Hydrocarbon Mixtures in Porous/Fractured Media,” Lawrence Berkeley National Laboratory, USA. Laboratory, USA, 2007.
42. Zandin, H. and A. Niemi, “A Modeling Case Study of NAPL Transport In Prous Medium Under The Influence of Variable Water Infiltration And Geological Heterogeneity,” Department of Earth Sciences, Uppsala University, Sweden, 2006.

