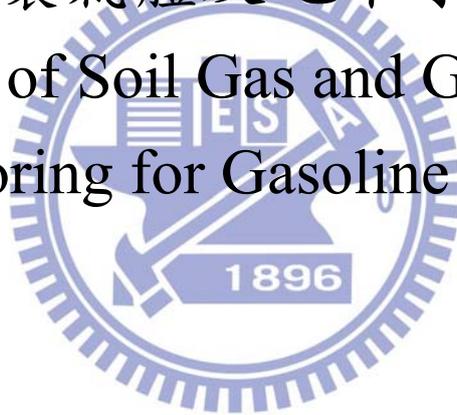


國立交通大學

土木工程研究所

碩士論文

加油站土壤氣體及地下水監測模擬  
Simulation of Soil Gas and Groundwater  
Monitoring for Gasoline Station



指導教授：單信瑜 博士

研究生：陳培旻

中華民國九十九年八月

# 加油站土壤氣體及地下水監測模擬

Simulation of Soil Gas and Groundwater

Monitoring for Gasoline Station

指導教授：單信瑜 博士

Advisor : Dr. Hsin-yu Shan

研究生：陳培旻

Student : Pei-ming Chen

國立交通大學  
土木工程研究所  
碩士論文



A Thesis

Submitted to Department of Civil Engineering

College of Engineering

National Chiao Tung University

in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Engineering

in

Civil Engineering

August 2010

Hsinchu, Taiwan, Republic of China.

中華民國九十九年八月

# 加油站土壤氣體及地下水監測模擬

研究生: 陳培啟

指導教授: 單信瑜 博士

國立交通大學土木工程研究所

## 摘要

加油站地下儲油槽與輸油管線會隨著使用年限的增加,使得老舊之油槽或輸油管線容易出現裂隙並發生油品洩漏。為了避免油品洩漏之量過多與洩漏時間過長而造成嚴重污染,因而必須設置監測設備進行油品洩漏偵測,然而於油品污染團傳輸之過程中會受地質條件、障礙物(油槽)等影響,使得傳輸路徑與距離皆受影響並間接影響監測井之監測效果。為了瞭解監測井於不同洩漏情境與土層狀態間相互關係,因此本研究以數值模擬軟體(TMVOC)模擬各種不同之洩漏情境與地層狀況,以探討監測井可能的最佳配置方式與監測範圍。研究結果顯示地下水位較高者(2 m)之土壤氣體監測井其靈敏度較地下水位低者(5 m)為高;監測井距離油品洩漏點近者(3 m 內)其效果較佳;而土層透水係數大、孔隙率小者其污染團之傳輸速率較快,對於土壤氣體之監測亦能有較大之幫助。地下水體之監測相較於土壤氣體而言其整體效果不佳,然而若監測井距離油品洩漏點較遠處時,則土壤氣體之效果反而不如地下水體監測井。

關鍵字: NAPL、地下儲槽、土壤氣體監測。

# Simulate soil gas and groundwater monitoring for gas station

By

Student: Pei-ming Chen

Advisor: Dr. Hsin-yu Shan

Department of Civil Engineering

National Chiao Tung University

## Abstract

The potential of leakage of USTs of gasoline station increases with their service life. In order to avoid serious pollution, monitoring measures are employed to provide early warning. Among the monitoring methods, soil gas and groundwater monitoring detect the leaked product directly. The pathway of leaked gasoline flows and diffuses and thus, in turn the effectiveness of soil gas and groundwater monitoring, may be affected by the existence of USTs of gasoline station. In this study, numerical simulation with the software TMVOC was performed in order to assess the effectiveness of soil gas and groundwater monitoring. The results show that both soil gas and groundwater monitoring are more effective if the site has a shallow groundwater table and the soil has higher hydraulic conductivity and lower porosity. The effectiveness of soil gas monitoring is better than groundwater monitoring in general, when soil gas and groundwater monitor well are far away leakage then the groundwater monitoring is better than soil gas.

Keywords: NAPL, underground storage tank, soil vapor monitoring.

# 誌謝

在交大的求學生涯即將結束，在這期間承蒙指導教授單信瑜 博士的細心指導與照顧，令我不僅獲得土壤地下水相關知識，更豐富了我的人生觀，讓我的思考有更上一層樓的提升。同時也很感謝林明德 教授、侯善麟 博士以及吳偉智 博士提供許多寶貴意見與建義，使得本論文能更趨於完整。以及感謝大地組的各位同學和實驗室裡的夥伴韋恩、凱仁、韋甫，謝謝你們不論是在課業上、研究上的協助，尤其要感謝彥森學長在我最無助時的鼓勵與協助！最後我要感謝我的母親，謝謝您的包容讓我順利完成學位。當然我也沒忘了從大學時期就一直陪伴著我、鼓勵我的美麗女孩—意婷！妳是我精神上很大的支柱，伴我渡過了幾次的困境與失落，謝謝妳讓我能無後顧之憂的繼續向前！還有我的小寶貝 TATA，每次抱著妳時心裡總是能獲得最大的平靜，我會繼續想念妳！最後感謝所有在這一路上關心與照顧我的老師與朋友們，因為有你們協助我才能順利的完成學業，謝謝大家！



# 目錄

摘要.....	I
ABSTRACT.....	II
誌謝.....	III
目錄.....	IV
圖目錄.....	V
表目錄.....	X
<b>第一章 緒論.....</b>	<b>1</b>
1.1 研究動機.....	1
1.2 研究目的.....	1
1.3 研究方法與流程.....	2
<b>第二章 文獻回顧.....</b>	<b>3</b>
2.1 加油站污染.....	3
2.2 加油站監測.....	14
2.3 數值模擬軟體.....	22
<b>第三章 研究方法.....</b>	<b>27</b>
3.1 研究架構.....	27
3.2 敏感度分析.....	28
3.3 加油站場址模擬.....	31
<b>第四章 模擬結果與分析.....</b>	<b>42</b>
4.1 面積敏感度分析.....	42
4.2 土層透水係數敏感度分析.....	53
4.3 土壤孔隙率敏感度分析.....	66
4.4 加油站場址模擬結果.....	76
4.5 綜合結論.....	83
<b>第五章 結論與建議.....</b>	<b>119</b>
<b>參考文獻.....</b>	<b>121</b>
<b>附表 汽油合成物之化學性質.....</b>	<b>126</b>

# 圖目錄

圖 1-1 研究流程圖.....	2
圖 2-1 一般常見加油站配置圖.....	4
圖 2-2 加油站常見之可能污染途徑示意圖 (環保署, 2006).....	4
圖 2-3 石油碳氫化合物於土壤及地下水中之分佈與傳輸示意圖.....	13
圖 2-4 美國緬因州加油站地下儲槽測漏管配置要求.....	18
圖 2-5 地下儲槽監測方法示意圖 (US EPA,1997).....	19
圖 2-6 二次阻隔層設置型式 (環保署, 2002).....	19
圖 2-7 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....	21
圖 2-8 TMVOC 中相之組成與變化; G-氣體、W-液體、N-NAPL.....	24
圖 2-9 積分有限差分法.....	26
圖 3-1 研究方法流程圖.....	27
圖 3-2 邊界效應敏感度分析之洩漏點及監測井配置示意圖.....	28
圖 3-3 地下水位與監測井配置示意圖.....	29
圖 3-3 加油站配置示意圖.....	32
圖 3-4 TMVOC 數值模擬之模型網格示意圖.....	32
圖 3-5 土壤/水-汽油保持曲線.....	33
圖 3-6(A) 地下水位於地表下 2 M 處.....	34
圖 3-6(B) 地下水位於地表下 3 M 處.....	34
圖 3-6(C) 地下水位於地表下 5 M 處.....	34
圖 3-7 監測井與油槽之相關位置示意圖.....	36
圖 3-8(A) CASE1:洩漏點 A 於油槽上方與輸油管連接處.....	40
圖 3-8(B) CASE2:洩漏點 B 位於儲槽區內之輸油管線.....	40
圖 3-8(C) CASE3:洩漏點 C 位於卸油口下方之輸油管線.....	41
圖 3-8(D) CASE4:洩漏點 D 位於儲油槽之下方.....	41
圖 4-1 (A) 於#1 測漏管之苯氣體濃度圖.....	44
圖 4-1 (B) 於#2 測漏管之苯氣體濃度圖.....	44

圖 4-1 (C) 於#3 測漏管之苯氣體濃度圖.....	45
圖 4-1 (D) 於#4 測漏管之苯氣體濃度圖.....	45
圖 4-1 (E) 於#5 測漏管之苯氣體濃度圖.....	46
圖 4-1 (F) 於#6 測漏管之苯氣體濃度圖.....	46
圖 4-1 (G) 於#7 測漏管之苯氣體濃度圖.....	47
圖 4-1 (H) 於#8 測漏管之苯氣體濃度圖.....	47
圖 4-1 (I) 於#9 測漏管之苯氣體濃度圖.....	48
圖 4-1 (J) 於#1 測漏管之地下水體含苯濃度圖.....	48
圖 4-1 (K) 於#2 測漏管之地下水體含苯濃度圖.....	49
圖 4-1 (L) 於#3 測漏管之地下水體含苯濃度圖.....	49
圖 4-1 (M) 於#4 測漏管之地下水體含苯濃度圖.....	50
圖 4-1 (N) 於#5 測漏管之地下水體含苯濃度圖.....	50
圖 4-1 (O) 於#6 測漏管之地下水體含苯濃度圖.....	51
圖 4-1 (P) 於#7 測漏管之地下水體含苯濃度圖.....	51
圖 4-1 (Q) 於#8 測漏管之地下水體含苯濃度圖.....	52
圖 4-1 (R) 於#9 測漏管之地下水體含苯濃度圖.....	52
圖 4-2 (A) 於#1 測漏管之苯氣體濃度圖.....	55
圖 4-2 (B) 於#2 測漏管之苯氣體濃度圖.....	55
圖 4-2 (C) 於#3 測漏管之苯氣體濃度圖.....	56
圖 4-2 (D) 於#4 測漏管之苯氣體濃度圖.....	56
圖 4-2 (E) 於#5 測漏管之苯氣體濃度圖.....	57
圖 4-2 (F) 於#6 測漏管之苯氣體濃度圖.....	57
圖 4-2 (G) 於#7 測漏管之苯氣體濃度圖.....	58
圖 4-2 (H) 於#8 測漏管之苯氣體濃度圖.....	58
圖 4-2 (I) 於#9 測漏管之苯氣體濃度圖.....	59
圖 4-2 (J) 於#1 測漏管之地下水體含苯濃度圖.....	59
圖 4-2 (K) 於#2 測漏管之地下水體含苯濃度圖.....	60
圖 4-2 (L) 於#3 測漏管之地下水體含苯濃度圖.....	60
圖 4-2 (M) 於#4 測漏管之地下水體含苯濃度圖.....	61

圖 4-2 (N) 於#5 測漏管之地下水體含苯濃度圖.....	61
圖 4-2 (O) 於#6 測漏管之地下水體含苯濃度圖.....	62
圖 4-2 (P) 於#7 測漏管之地下水體含苯濃度圖.....	62
圖 4-2 (Q) 於#8 測漏管之地下水體含苯濃度圖.....	63
圖 4-2 (R) 於#9 測漏管之地下水體含苯濃度圖.....	63
圖 4-3(A) 透水係數為 $2.74 \times 10^{-2}$ CM/SEC 之油相污染團分佈狀況.....	64
圖 4-3(B) 透水係數為 $2.74 \times 10^{-2}$ CM/SEC 之氣相污染團分佈狀況.....	64
圖 4-4(A) 透水係數為 $2.74 \times 10^{-4}$ CM/SEC 之油相污染團分佈狀況.....	65
圖 4-4(B) 透水係數為 $2.74 \times 10^{-4}$ CM/SEC 之氣相污染團分佈狀況.....	65
圖 4-5 (A)於#1 測漏管之苯氣體濃度圖.....	67
圖 4-5 (B)於#2 測漏管之苯氣體濃度圖.....	67
圖 4-5 (C)於#3 測漏管之苯氣體濃度圖.....	68
圖 4-5 (D)於#4 測漏管之苯氣體濃度圖.....	68
圖 4-5 (E)於#5 測漏管之苯氣體濃度圖.....	69
圖 4-5 (F)於#6 測漏管之苯氣體濃度圖.....	69
圖 4-5 (G)於#7 測漏管之苯氣體濃度圖.....	70
圖 4-5 (H)於#8 測漏管之苯氣體濃度圖.....	70
圖 4-5 (I)於#9 測漏管之苯氣體濃度圖.....	71
圖 4-5 (J) 於#1 測漏管之地下水體含苯濃度圖.....	71
圖 4-5 (K) 於#2 測漏管之地下水體含苯濃度圖.....	72
圖 4-5 (L) 於#3 測漏管之地下水體含苯濃度圖.....	72
圖 4-5 (M) 於#4 測漏管之地下水體含苯濃度圖.....	73
圖 4-5 (N) 於#5 測漏管之地下水體含苯濃度圖.....	73
圖 4-5 (O) 於#6 測漏管之地下水體含苯濃度圖.....	74
圖 4-5 (P) 於#7 測漏管之地下水體含苯濃度圖.....	74
圖 4-5 (Q) 於#8 測漏管之地下水體含苯濃度圖.....	75
圖 4-5 (R) 於#9 測漏管之地下水體含苯濃度圖.....	75
圖 4-6 (A) 污染團下游傳輸路徑受油槽阻擋時之傳輸行為示意圖(地下水位為 2 M).....	90
圖 4-6 (B) 污染團下游傳輸路徑受油槽阻擋時之傳輸行為示意圖(地下水位為 5 M).....	90

圖 4-6 (C) 污染團下游傳輸路徑受油槽阻擋時之傳輸行為示意圖(地下水位為 3 M).....	91
圖 4-6 (D) 污染團正下方之傳輸路徑受油槽阻擋時之傳輸行為示意圖.....	91
圖 4-6 (E) 洩漏點於地下水位面下 2 M 時之傳輸行為示意圖.....	92
圖 4-6 (F) 洩漏點於地下水位面下 1 M 時之傳輸行為示意圖.....	92
圖 4-6 (G) 洩漏點於油槽底部(於地下水位面上 1 M)時之傳輸行為示意圖.....	93
圖 4-6 (H) 洩漏點於 CASE2 地下水位深度為 2 M 之汽油污染團飽和度圖.....	93
圖 4-6 (I) 洩漏點於 CASE2 地下水位深度為 3 M 之汽油污染團飽和度圖.....	94
圖 4-6 (J) 洩漏點於 CASE2 地下水位深度為 5 M 之汽油污染團飽和度圖.....	94
圖 4-7(A) CASE1 地下水於 2 M 之模擬結果.....	95
圖 4-7(B) CASE1 地下水於 2 M 之模擬結果.....	96
圖 4-8(A) CASE1 地下水於 3 M 之模擬結果.....	97
圖 4-8(B) CASE1 地下水於 3 M 之模擬結果.....	98
圖 4-9(A) CASE1 地下水於 5 M 之模擬結果.....	99
圖 4-9(B) CASE1 地下水於 5 M 之模擬結果.....	100
圖 4-10(A) CASE2 地下水於 2 M 之模擬結果.....	101
圖 4-10(B) CASE2 地下水於 2 M 之模擬結果.....	102
圖 4-11(A) CASE2 地下水於 3 M 之模擬結果.....	103
圖 4-11(B) CASE2 地下水於 3 M 之模擬結果.....	104
圖 4-12(A) CASE2 地下水於 5 M 之模擬結果.....	105
圖 4-12(B) CASE2 地下水於 5 M 之模擬結果.....	106
圖 4-13(A) CASE3 地下水於 2 M 之模擬結果.....	107
圖 4-13(B) CASE3 地下水於 2 M 之模擬結果.....	108
圖 4-14(A) CASE3 地下水於 3 M 之模擬結果.....	109
圖 4-14(B) CASE3 地下水於 3 M 之模擬結果.....	110
圖 4-15(A) CASE3 地下水於 5 M 之模擬結果.....	111
圖 4-15(B) CASE3 地下水於 5 M 之模擬結果.....	112
圖 4-16(A) CASE4 地下水於 2 M 之模擬結果.....	113
圖 4-16(B) CASE4 地下水於 2 M 之模擬結果.....	114
圖 4-17(A) CASE4 地下水於 3 M 之模擬結果.....	115

圖 4-17(B) CASE4 地下水於 3 M 之模擬結果 ..... 116

圖 4-18(A) CASE4 地下水於 5 M 之模擬結果 ..... 117

圖 4-18(B) CASE4 地下水於 5 M 之模擬結果 ..... 118



# 表目錄

表 2-1 土壤及地下水管制標準-汽、柴油污染物部分.....	6
表 2-2 BTEX 物理化學基本特性.....	8
表 2-3 汽油主要成分與百分比.....	10
表 2-4 汽油之典型組成成份與百分比.....	10
表 2-5 無鉛汽油之成分含量百分比.....	11
表 2-6 代表汽油性質的 8 個餾分.....	11
表 2-7 數值模擬軟體比較.....	23
表 3-1 邊界範圍放大倍率說明.....	28
表 3-2 邊界效應敏感度分析之監測井與洩漏點距離說明.....	29
表 3-3 土壤參數變化說明.....	30
表 3-4(A)相對滲透係數參數(STONE'S MODEL).....	33
表 3-4(B)毛細壓力曲線參數(PARKER'S MODEL).....	33
表 3-5 無鉛與含鉛汽油組成成份.....	37
表 3-6 本研究中所採用之汽油組成成份及百分比.....	38
表 4-1 透水係數與傳輸速率之關係.....	53
表 4-2 土壤孔隙率與傳輸速率關係.....	66
表 4-3 (A) 監測井#1 之土壤氣體與地下水含苯濃度值.....	85
表 4-3 (B) 監測井#4 之土壤氣體與地下水含苯濃度值.....	85
表 4-3 (C) 監測井#5 之土壤氣體與地下水含苯濃度值.....	86
表 4-3 (D) 監測井#6 之土壤氣體與地下水含苯濃度值.....	86
表 4-3 (E) 監測井#7 之土壤氣體與地下水含苯濃度值.....	87
表 4-3 (F) 監測井#10 之土壤氣體與地下水含苯濃度值.....	87
表 4-4 洩漏點於 CASE3 之土壤氣體與地下水最終污染物濃度值.....	88
表 4-5 洩漏點於 CASE4 之土壤氣體與地下水最終污染物濃度值.....	89

# 第一章 緒論

## 1.1 研究動機

早期國內加油站設置的規範不完善且土壤地下水污染防範的觀念不如歐美國家先進。因此，當老舊的加油站因儲油設備的損壞、鏽蝕等而產生油品洩漏，其經常直接造成地下不飽和層、地下含水層與地下飽和層等的污染，並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。而依行政院主計處 2010 年 3 月止之統計資料，全台共設置 2,631 家加油站(經濟部能源局，2010)，而若平均每家加油站以 4 座地下儲油槽估算，全國至少約有 10,524 座地下儲油槽，其中有部分已設置超過 20 年。

然而，根據美國賓州環境資源部研究，地下儲油槽洩漏的機率與其埋設的年代正比例的關係，埋設 10 年以上的儲油槽有 46%之機率會發生洩漏，而設置 15 年以上者，其發生洩漏之機率更達 71%以上。而為減少儲油槽及管線洩漏所造成之污染災害與損失，應要能夠掌握污染物的傳輸與擴散特性及要對於老舊的下儲油槽有適當之監測設備與規範以早期發現污染並防範污染的擴大(Bedient et al., 1993)。

為此，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，2008)。由此可知加油站土壤及地下水污染問題早已成為環保主管機關日益關切之問題與施政重點，況且環保與節能已是全球各地所關注之顯學，因此是否能有效掌握加油站土壤及地下水污染並予以整治已是不可輕忽之問題。

## 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(暫不考慮柴油之洩漏)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. 評估地下水位對於土壤氣體與水中溶解相傳輸之影響。
3. 評估加油站監測井於不同情境下之監測靈敏度與半徑，如:不同之油品洩漏點、回填料以及傳輸路徑受障礙物阻擋之影響。

### 1.3 研究方法與流程

由於油品污染礙於法規與經費無法進行現地實驗，於實驗室內進行則危險度高且複雜難以施行，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。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，再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，最後再模擬分析以下針對污染物傳輸影響之因子：土壤孔隙率( $n$ )、土層絕對滲透係數( $L^2$ )、汽油洩漏速率( $R$ )、汽油洩漏時間( $T$ )、水力梯度( $i$ )等參數變異性分析，最後進行結果分析與監測井之有效性評估。研究流程步驟如圖 1-1 所示：

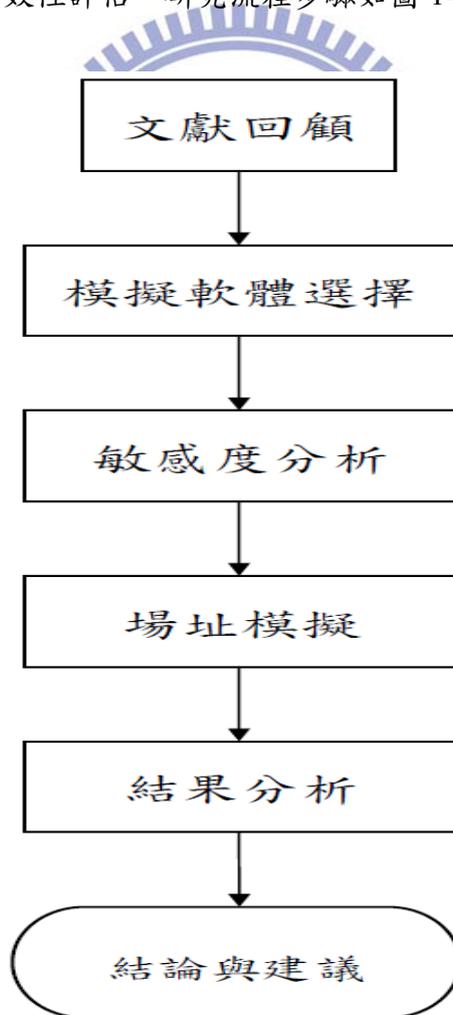


圖 1-1 研究流程圖

# 第二章 文獻回顧

本研究主要係在探討當加油站發生油品洩漏之後，油品污染物的傳輸擴散、分佈與監測等情形。本研究中之主要污染物為汽油，其本身是一種複雜的碳氫化合物，且為一非水相液體(Non-Aqueous Phase Liquid, NAPL)，並具有易揮發、不溶於水等特性，且可以多相的形態存在於土壤中。因此要確實掌握此類污染物於土層中的分佈情形極為不易。以下首先回顧相關文獻中有關國內外加油站污染情形、地下儲油槽管理與監測相關法規以及常用於油品污染傳輸模擬之模擬軟體。

## 2.1 加油站污染

石油碳氫化合物的污染來源可依產業特性區分為兩大來源：(1)油品儲運與銷售設施，如：儲運所與加油站、港口與航站、燃油火力發電廠等之儲油設施與管線；(2)石化工業工廠之設備、儲油設施與管線。而根據這些設施的特性來區分，則因加油站的數量和空間分布之獨特性以及地下儲槽系統和管線與其他類型之油品儲運設施有明顯之區隔，故為本研究中之重點研究對象(經濟部工業局，2007)。一般油品之儲槽可分為地面儲槽與地下儲槽兩類，而地面儲油槽所儲存之量又遠大於地下儲槽，因此一旦發生洩漏，其所洩漏之量與污染程度也較地下儲槽大。

### 2.1.1 加油站之油品洩漏

一般加油站皆採用地下儲槽式之儲油系統(Underground Storage Tank System, USTs)如圖 2-1 所示，由於此型式之儲油槽體是埋設於地下因此於卸、加油時所需之輸油管線亦隨著儲槽埋設於地表下，也因如此一旦儲槽本體或輸油管線因破損而發生洩漏，則對於油品之洩漏點以及所造成之污染範圍是很難能夠確切掌握。而一般加油站油品可能之主要污染途徑如圖 2-2 所示，分別為：

- 一、卸油口及卸油管線洩漏
- 二、地下儲槽洩漏
- 三、輸油管線洩漏
- 四、泵島加油機洩漏。

依儲油作業型態的不同，可將發生污染的原因分為靜態與動態污染。其中靜態污染是指泵島加油機下方、油槽、陰井、卸油口、管線等任何可能發生油品洩漏的設施；動態污染則是指卸油時產生的溢流與汽機車加油等兩項作業中所產生的洩漏。目前國內加油站均是以測漏管監測油槽區周圍土壤氣體之揮發性有機物氣體濃度，然而加油站站齡 10 年以上者均未於輸油管線區與泵島區設置測漏管監測土壤氣體中之揮發性有機物濃度與預警系統，因此較老舊之加油站容易成為監測死角(環保署，2006)。

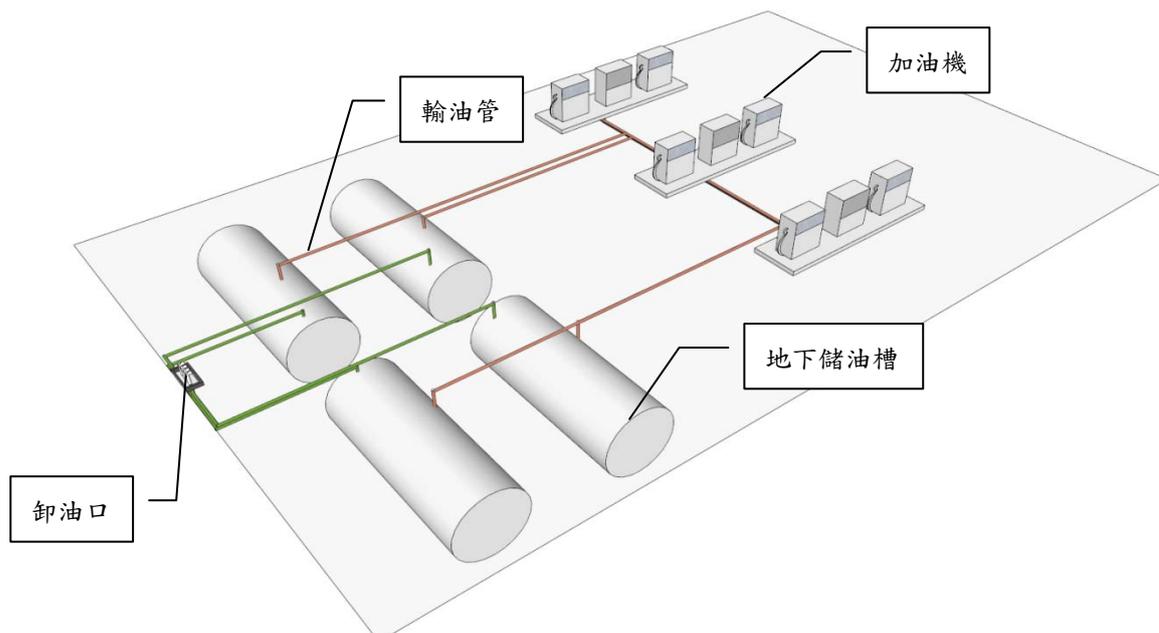


圖 2-1 一般常見加油站配置圖

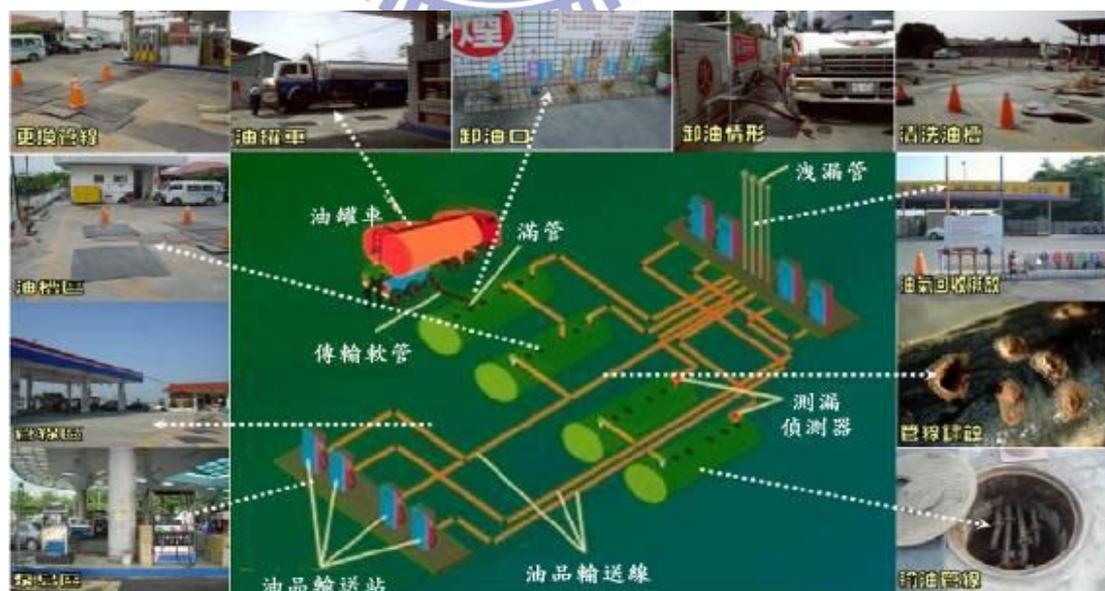


圖 2-2 加油站常見之可能污染途徑示意圖 (環保署，2006)

## 2.1.2 國內外加油站污染概述

美國於 1984 年制定「資源保育及回收法」(Resource Conservation and Recovery Act, RCRA),該法令要求環保署及州政府制訂法規規範地下儲槽業者及使用者避免洩漏及偵測方法,並對洩漏造成的污染負起清理及整治責任。隨後於 1988 年 12 月公布「40 CFR PART 280-Technical Standards and Corrective Action Requirements for Owners and Operators of Underground Storage Tanks」,該標準有明確之規範美國地下儲槽系統的設置與監測辦法(US EPA, 1997)。

根據美國賓州環境資源部統計,美國共有 110 萬個受聯辦法規管制的地下儲槽分佈於 40 萬個位址,這些地下儲槽絕大多數裝的是石化油品,其中有 25,000 個地下儲槽中裝的是有害物質。截至 1998 年止美國環保署已確認有 100,000 個儲槽發生洩漏,其中依美國賓州環境資源部統計,地下儲槽系統中儲槽本體洩漏占 49%,管線洩漏占 39%,以上兩種情況同時發生者占 12%,並且於 1988 年至 2003 年間,每年新發現並證實洩漏之地下儲槽平均約 27,000 座然而每年相對完成污染整治之儲槽平均為 19,000 座,兩者相較之下完成整治之儲槽數量遠小於新發現之儲槽洩漏數量(US EPA, 2004)。

國內部份,我國於 89 年 2 月公布施行「土壤及地下水污染整治法」,並於 90 年 11 月 21 日發布土壤污染管制標準、地下水污染管制標準。於 90 年 11 月 1 日成立「土壤及地下水污染整治基金管理委員會」(簡稱土污基管會)。並陸續對農地、加油站、非法棄置場址、廢棄工廠等有污染之虞場址全國污染潛勢調查。在「土壤污染管制標準」與「地下水管制標準」中規範汽、柴油等油品洩漏後,其所含成分或衍生物質污染濃度值,如表 2-1 所示(環保署, 2009)。

表 2-1 土壤及地下水管制標準-汽、柴油污染物部分

分類	項目	管制標準		單位
土    壤	苯(Benzene)	5		mg/kg- 土壤
	甲苯(Toluene)	500		
	乙苯(Ethylbenzene)	250		
	二甲苯(Xylene)	500		
	總石油碳氫化合物 (Total Petroleum Hydrocarbons, TPH)	1,000		
地	分類 (飲用水水源水質保護區)	第一類 (保護區內)	第二類 (保護區外)	mg/L
	單環芳香族碳 氫化合物	苯(Benzene)	0.005	
甲苯(Toluene)		1	10	
乙苯(Ethylbenzene)		0.7	7	
二甲苯(Xylene)		10	100	
多環芳香族碳 氫化合物	萘(Naphthalene)	0.04	0.4	
水				

本表改編自行政院環保署-土壤及地下水污染管制標準

([http://sgw.epa.gov.tw/public/07\\_Pollutant.asp?polluMethod=Soil](http://sgw.epa.gov.tw/public/07_Pollutant.asp?polluMethod=Soil))

歷年來除了全台各地相繼發生加油站洩漏事件，而中油公司與空軍之油品儲運作業亦曾發生油料洩漏問題。民國 78 年，於高雄苓雅區中油高雄苓雅寮儲運所發生洩漏，造成 32,000 平方公尺的浮油洩漏污染事件。民國 87 年 7 月，台南永康市中油輸油管因遭竊取油品，造成油品洩漏並污染鄰近區域的土壤與排水系統，且引起氣爆危險危及居民身家財產安全。大體而言，國內加油站因油品洩漏造成污染的原因，以人為因素居多。例如：未使用級配良好之回填料、陰極防蝕施作不確實；油罐車卸油時溢流、加油站更換輸油管線時未將殘餘油品確實回收、輸油管線因施工不良而導至接頭損壞等(環保署，2001)。

針對加油站地下儲槽管理以防止造成土壤及地下水之污染情事，必需藉由加油站許可及定期監測申報之事前防治機制，併同加油站施工、管理及防蝕不良等洩漏之人為因素改善，應可有效減低洩漏污染之發生(環保署，2007)。依行政院環保署統計截至 99 年 4 月止，已累計公告列管場址之加油站共計有 117 站，包括整治場址 16 站、控制場址 45 站、採取適當措施 21 站及已完成改善並解除列管 35 站(環保署，2010)。

### 2.1.3 汽油污染物特性

汽油(Gasoline)因其易於汽化揮發而得名，依用途不同可分為車用汽油與航空汽油。而車用汽油係由  $C_5H_{12}$  至  $C_{12}H_{26}$  之碳氫化合物所組成其沸點之範圍約在  $100^{\circ}F$  至  $400^{\circ}F$  間(朱少華等，2007)；柴油(Diesel)是由不同的碳氫化合物混合組成，主成分是由含有 9 到 18 個碳原子的鏈烷、環烷或芳烴所組成，而於主成分中有別於汽油的是含有萘(Naphthalene)，因此於油品污染場址中亦常發現萘，而萘於地下水中之管制標準如表 2-1 所示。

汽車在加速與上坡時需要較高之震爆，而欲達到較高之震爆則需使用較高辛烷值之汽油。一般由原油所蒸餾而得之汽油期辛烷值為 20 至 75 間，但卻無法滿足現代效率較高之汽車引擎需求，因此在煉油過程中皆會加入化學摻料以提高辛烷值；最常用之化學摻料為四乙基鉛(Tetraethyl lead: TEL)，而當加入四乙基鉛後雖然可以提高其抗震爆性，然而四乙基鉛在引擎燃燒室燃燒後會產生氧化鉛及溴化鉛經由排氣管排出，隨著廢氣所排放出之鉛約有 75% 會進入大氣中(周振瑞，2007)。人體會經由呼吸器官將殘留於大氣中的鉛吸入體內並累積，危害大眾健康甚鉅。

為改善環境污染與大眾健康危害之問題，經石油化學專家多年研究後，發現醇類與醚類可作為化學摻料；醇類包括甲醇、乙醇與丙醇等，醇類添加於汽油後可提高辛烷值且亦可改善對於環境之污染，因此較受環保單位所支持。而由甲醇與異丁烯所提煉可獲得甲基第三丁基醚(Methyl Tertiary Butyl Ether, MTBE)是目前公認為最適用添加於汽油中之化學摻料，其辛烷值較烷化油高且物理性質與汽油相近，且添加後幾乎不會改變汽油之物理性質(石油污染整治手冊，2007)。使用這類的替代鉛不但可以提高辛烷值還可以減少震爆及改善空氣品質，而 MTBE 的添加體積百分比約為 7%，而自 1979 年代起 MTBE 開始被使用作為氧化劑(Oxygenate)添加於汽油中後，其添加體積百分比進而提高至 11%-15%，並且於新英格蘭、紐澤西與美國東岸等地區開始被廣泛使用直到 1980 年代中期。

除了 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 2-2 所示。此四種化學物質皆具有高揮發性、不易溶於水以及低沸點等特性，且此四種化學物質屬於單環芳香族碳化物，若不慎誤食或經由呼吸與皮膚接觸則可能會造成慢性中毒、突變性畸胎性以及對於人體免疫系統會產生干擾，其中以苯更具有生物毒性、致癌性與突變性等，美國環保署已將 BTEX 列為 129 種優先列管污染物之一，而台灣也制訂了土壤與地下水中 BTEX 之管制標準如表 2-1 所示以下分別概述 BTEX 之基本特性。

表 2-2 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 <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> (C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>
分子量 (mg/mole)	78	92	106	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 <sub>oc</sub> )	97	242	622	570
辛醇-水分配 係數(K <sub>ow</sub> )	135	540	1,410	1,320
蒸氣壓 (mm Hg)	76	22	7	5
半衰期 (T <sub>1/2</sub> ) (day)	5	4	3	7
亨利常數 (Pa·m <sup>3</sup> /mole)	562	673	864	493

(經濟部工業局，2007)

## 一、苯(Benzene)

苯為透明無色之液體，可溶於乙醇及乙醚等有機污染物，一般用來做為酚、硝、基苯、氯苯、水楊酸、三基苯酚等有機化學物品及用來合成染料、乾洗劑、油漆等溶劑之用。通常會經由呼吸、皮膚接觸而進入人體並在人體脂肪中累積，會造成中樞神經及造血系統傷害。若接觸到較高之濃度者，嚴重時會引起呼吸衰竭、神智喪失而死亡，且已經證實長期累積會引起癌症，是 BTEX 中對人體危害程度最大的有機化學物品。此外苯對於水的溶解度較高，因此更容易溶於水中再經由水體的傳輸而造成更大的污染範圍。在國內，苯已被環保署公告為毒性化學物質，在飲用水質、土壤及地下水均有建立管制標準。

## 二、甲苯(Toluene)

甲苯透明是由焦煤油中分餾而得知無色液體其氣味與苯相似，亦可溶於乙醇及乙醚等有機污染物。一般常用於苯甲醛、苯甲酸、藥物、染料、糖精、溶劑及乾洗劑等。其  $K_{oc}$  值較苯高，因此更容易累積於人體脂肪中，對於人體具有催眠作用，亦可能會造成中樞神經系統、肝臟、腎臟等方面之慢性、急性傷害。而甲苯於水中之溶解度、毒性均較苯為低因此尚未被列入飲用水水質相關標準。

甲苯對人體以腦部的影響為最受注意，甲苯會引起頭痛、恍惚使喪失記憶，而是否會引起這些腦部病變則須視暴露時間的長短而定。若每天於工作場所中暴露中低濃度的量，則會引起疲倦、恍惚、虛弱、反胃等症狀，通常停止暴露後則這些症狀大部分皆可以恢復。若是飲酒又同時暴露於甲苯中則此時對於肝臟的影響會大於兩者單獨對肝臟的影響，此效應稱為協同作用。職業暴露與動物研究顯示甲苯不會引起癌症，國際癌症研究屬與美國衛生人力部尚未將甲苯列為致癌物質，因此美國環保署決定不將甲苯列為致癌物質。

## 三、乙苯(Ethylbenzene)

是由苯與氯甲烷於氧化鋁存在下加熱分餾而得，為無色液體可溶於乙醇、乙醚、苯、四氯化碳、醇迷等有機溶劑，可用於有機合成、溶劑與稀釋劑。以苯辛醇與水之間的分配係數  $K_{oc}$  值在 BTEX 中為最大，因此生物累積性為最明顯，對於人體則有催眠及增加膽酸等作用，對於神經系統則無明顯毒性。

## 四、二甲苯(Xylene)

是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。可供有機合成、溶劑、人造麝香、油漆及染料之用，並有間位、鄰位及對位三種不同排列之同分異構物。若經人體吸入後在肺部滯留量高，其急性中毒現象與苯類相似，但又因其結構複雜因此半衰期在 BTEX 中是較長之有機化學物質。

由以上可知汽油的添加物多且複雜，且有各自不同的溶解度、揮發性、吸附性、生物降解性質，因此無法僅以單一揮發性有機物質來代表其整體性質，有鑒於此 Lane(1980)將汽油依主要組成份以 5 種 VOC 來代表，如表 2-3。而典型之汽油組成成份則如表 2-4 所示。美國石油學會(1985)對典型無鉛汽油之平衡濃度進行量測，並列出汽油組成含量百分比結果如表 2-5。

Gustafson(1997)為了使得於模擬汽油污染物時更為簡化，故以總石油烴標準 (TPHCWG)法來簡化汽油組成份之複雜問題，將汽油成分中的化學性質與物理性質相似者劃分同一區，再依據等碳數(Equivalent Carbon Number, EC)將汽油分類成八個餾分如表 2-6。如此一來即可以較少之揮發性有機物質來詮釋汽油整體之污染傳輸行為。

表 2-3 汽油主要成分與百分比

汽油主要成分		
成分	範例	百分比(%)
正烷類(n-alkanes)	MTBE	11.6
支鏈烷烴 (branched alkanes)	四乙基鉛、二甲基	32
環烷(cycloalkanes)	異丙基	5
芳香族(aromatics)	苯	3.2
	乙苯	4.8
	甲苯	6.6
	二甲苯	1.4
其他(other)	磺酸、羧酸、磷酸	35.4

(IARC, 1989; Lane, 1980)

表 2-4 汽油之典型組成成份與百分比

汽油組成成分		
通稱	範例	百分比(%)
脂肪族-直鍊	庚烷(heptanes)	30-50
脂肪族-支鍊	異辛烷(isooctane)	
脂肪族-環鍊	環戊烷(cyclopentane)	20-30
芳香族	乙苯(ethylbenzene)	20-30

(Ophardt, 2003)

(<http://www.elmhurst.edu/~chm/vchembook/514gasoline.html>)

表 2-5 無鉛汽油之成分含量百分比

成份	純化合物之溶解度 (mg/L)	百分比
苯 (Benzene)	1750	1.94
甲苯 (Toluene)	515	4.73
乙苯 (Ethylbenzene)	152	2.00
鄰二甲苯 (o-xylene)	152	2.27
對二甲苯 (p-xylene)	198	1.72
間二甲苯 (m-xylene)	173	5.66
丁烷 (butane)	61	3.83
戊烷 (pentane)	40	3.11
其他(other)	—	74.74

改寫自 API, 1985

表 2-6 代表汽油性質的 8 個餾分

等碳數區間	重量百分比			等碳數平均值
	最小值	最大值	平均值	
脂肪族				
4-6	25.7	44.2	35.9	5.04
>6-8	7.92	38.1	23.6	7.17
>8-10	1.73	9.6	5.8	8.12
>10-12	0.09	0.31	0.2	11.3
芳香族				
苯 (5-7)	0.12	3.5	1.9	6.5
甲苯 (>7-8)	2.73	21.8	12.6	7.58
>8-10	5.42	22.3	14.2	9.13
>10-12	2.64	8.76	5.8	10.8

(Gustafson, 1997)

## 2.1.4 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 2-3 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。

當 LNAPL 污染物通過不飽和層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。

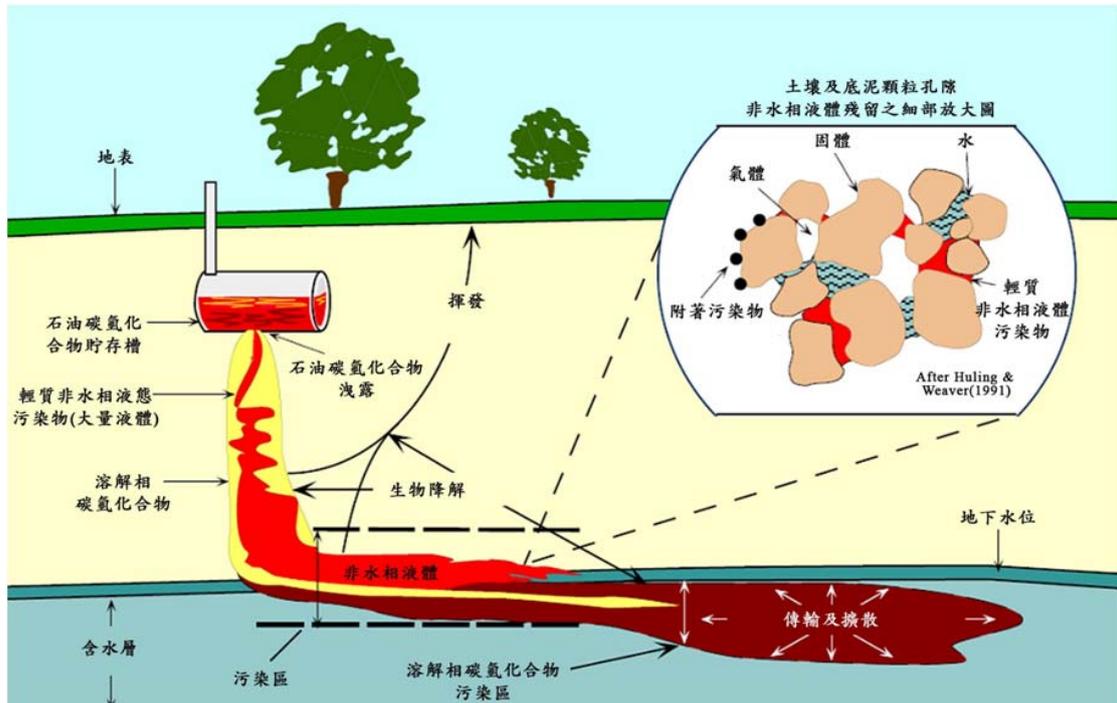


圖 2-3 石油碳氫化合物於土壤及地下水中之分佈與傳輸示意圖

摘自(經濟部工業局, 2007)



## 2.2 加油站監測

於 2.1.1 小節中可以知道加油站可能發生污染的洩漏點甚多，且由於儲油槽本體與輸油管線皆是埋於地表下，因此若是儲油槽或輸油管線發生些微破損而導致油品以小量且持續的洩漏，將難以立即察覺待發現油品洩漏並造成污染時，往往污染範圍早已擴散並且污染程度已頗為嚴重。而後續的整治以及控制污染等工程又所費不貲，因此如能在油品發生洩漏的初期就有效的掌握可能的洩漏源、範圍以及污染程度，就能及早採取應變措施，如此不但可以降低污染範圍與嚴重程度外，還可以避免日後可能被列為整治場址、控制場址以及整治費用過多等問題。

有鑒於此，國內法規已於「加油站防止污染地下水體設施及監測設備管理辦法」中對於地下儲槽系統之監測範圍規定應包含儲槽區、管線區、加油泵島區，並詳細規範了土壤氣體、地下水體及槽間監測之施作原則與項目(環保署，2006)，分別於以下小節中概述之。

### 2.2.1 土壤氣體監測

由於汽油屬於高揮發性之有機物質，因此於加油站內之儲槽區、管線區以及泵島區之不飽和土層皆是以監測土壤中油氣濃度為主，多是利用設置於槽體四周之「土壤氣體監測井」(Vapor Monitoring Well, 簡稱測漏管)，量測測漏管內油氣濃度變化，藉由測漏管內之濃度值即可判斷地下油槽是否有發生洩漏之情形。對於測漏管之配置原則有以下重點：

- 一、於油槽四周埋設四支測漏管(每側兩支)。
- 二、油槽相鄰者則測漏管可共用。
- 三、測漏管總數等於兩倍之油槽數再加二。
- 四、部分較大型油槽(六十公秉)四周埋設六支測漏管，測漏管總數等於三倍支油槽數再加三。

而以土壤氣體監測方法進行監測者，應每月實施一次並記錄之；其方法及設施標準應符合下列規定：

1. 監測設備應具有不因降雨、地下水、土壤濕度或其它因素影響，於儲存物質滲漏發生後測得滲漏物揮發之功能。
2. 開挖區回填孔隙介質，應具滲漏物蒸汽擴散之功能。
3. 依開挖區範圍、回填孔隙介質、儲存物質及監測設備之功能，決定土壤氣體監測井之數量及位置。
4. 監測項目為爆炸下限值百分比(% LEL)或揮發性有機氣體濃度。
5. 土壤氣體監測井應標記並加蓋。
6. 若已裝設有土壤氣體抽氣(Soil Vapor Extraction, SVE)設施，檢測作業前一週必須停止運轉，以避免干擾檢測之準確性。
7. 若測漏管發現阻塞情形時(透氣度，亦稱透氣真空度<sup>註1</sup> 檢測結果若抽氣負壓力值高於 500 mmHg 即視為阻塞)，應及時進行疏通或更新換新管等措施。
8. 若測漏管有積水過高或積油現象時(水氣及油氣存在)，則應先抽除後再進行檢測作業。
9. 油罐車卸油時，應立即停止檢測作業，因卸油時槽內油品擾動增加油氣逸散，將干擾測漏管油氣檢測之準確性，俟卸油作業結束後一小時後，繼續油氣檢測作業。

地下水水位最高距地表二公尺以內者，不得採用土壤氣體監測法。但本辦法修正實施前已設置土壤氣體監測井者，其功能符合透氣度小於 150 mmHg 之規定者，不在此限。

註 1：透氣真空度（負壓值）：為待測區之氣壓與大氣壓力的相對值，所測得數值為低於大氣壓之相對數值。

對於油氣檢測作業偵測器要求則可以選擇下列任一種偵測器，進行之：

1. 可燃性氣體檢測器(Combustible Gas Detector；CGD，簡稱測爆器)：用於測定爆炸下限值(Lower Explosive Limit)百分比(%LEL)。偵測範圍0~100% LEL。
2. 光離子偵測器(Photo Ionization Detector；PID)：特點為對環狀有機化合物反應較靈敏。偵測範圍：0~9999 ppmV。
3. 火焰離子偵測器(Flame Ionization Detector；FID)：可研判揮發性有機化合物之濃度。偵測範圍：0~9999 ppmV。

對於土壤氣體之偵測結果數據的判別則有以下兩點準則(環保署，2006)：

1. 測爆器檢測值(%LEL)若大於 25%，顯示有油氣污染滲漏之虞，建議查明可能原因
2. PID、FID 測值應與背景值之前後測值比較評估；若大於 500 ppmV 顯示有油氣污染滲漏之虞，建議查明可能原因(環保署，2006)。

## 2.2.2 地下水體監測

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；其方法及設施標準應符合下列規定：

1. 地下水監測井應於地下儲槽區及管線區上游設置一口以上、下游設置二口以上。
2. 地下水水位不得低於地表下七公尺。地下儲槽系統與監測井間介質之水力傳導係數不得小於0.01 cm/sec。
3. 監測井篩套管應具有防止土壤或濾料侵入井內之功能。
4. 監測井於高、低地下水位應能測得滲漏物質，其地表至濾料頂端並應予密封。
5. 自動或人工監測設備應具有監測滲漏物質之功能。
6. 地下水監測井之監測項目為浮油厚度或直轄市、縣(市)主管機關指定之項目。
7. 地下水監測井應標記並加蓋。

對於地下水的監測結果則依據地下水管制標準來判釋是否遭受污染，其管制標準如表 2-1 所示。

## 2.2.3 油槽本體監測

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。以美國緬因州環保署的規範為例，其監測井配置通常如圖 2-4 所示。於油槽區之監測施作項目以美國環境保護署規範為例如圖 2-5 所示，概述如下：

1. 人工儲槽計量或存量控制。
2. 儲槽密閉測試。
3. 輸油管線測漏。
4. 測漏管油氣監測。
5. 儲槽自動存量監測。
6. 槽間監測。
7. 地下水井內之地下水體監測。

另具有二次阻隔層保護之地下儲槽系統如圖 2-6 所示，其設施標準應符合下列規定：

1. 地下儲槽系統外層阻隔物，應使用滲透係數小於 $10^{-6}$  公分/秒之材質建造。
2. 外層阻隔物應高於地下水位且須與儲槽內之儲存物質相容。
3. 具有陰極保護系統之地下儲槽系統，其外層阻隔物設計不得妨礙陰極保護系統之正常操作。

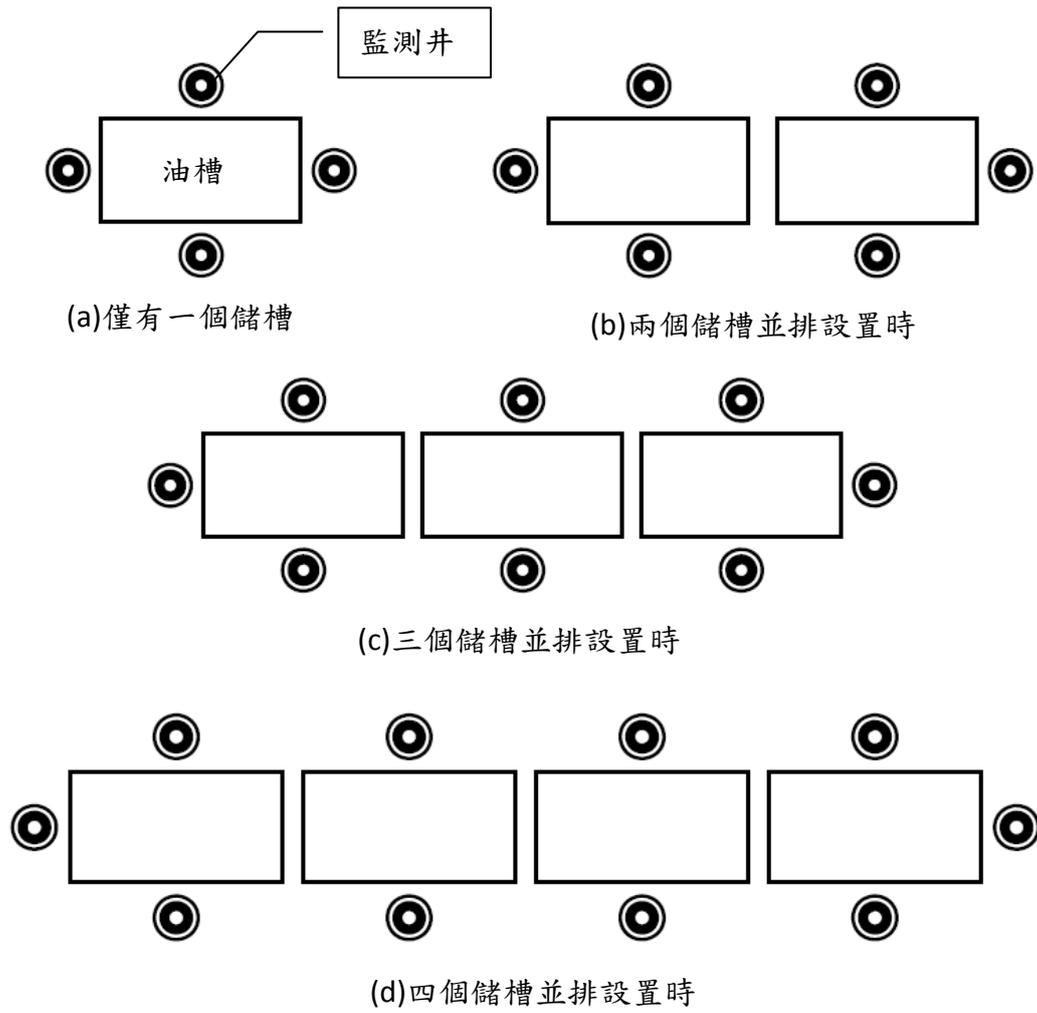


圖 2-4 美國緬因州加油站地下儲槽測漏管配置要求

(Maine Department of Environmental Protection, 2004)

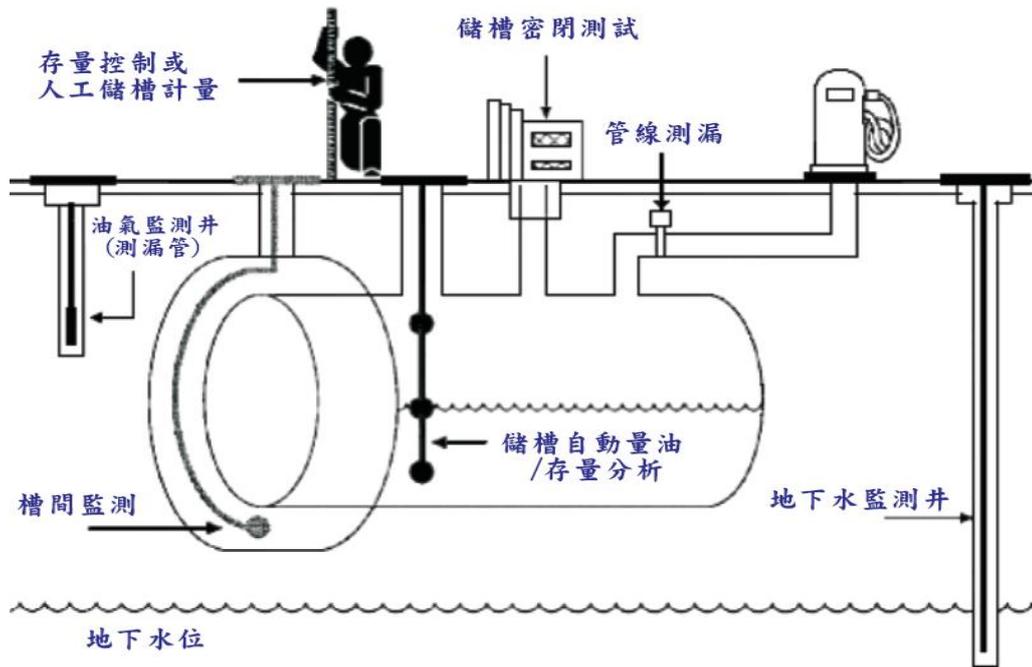


圖 2-5 地下儲槽監測方法示意圖 (US EPA,1997)

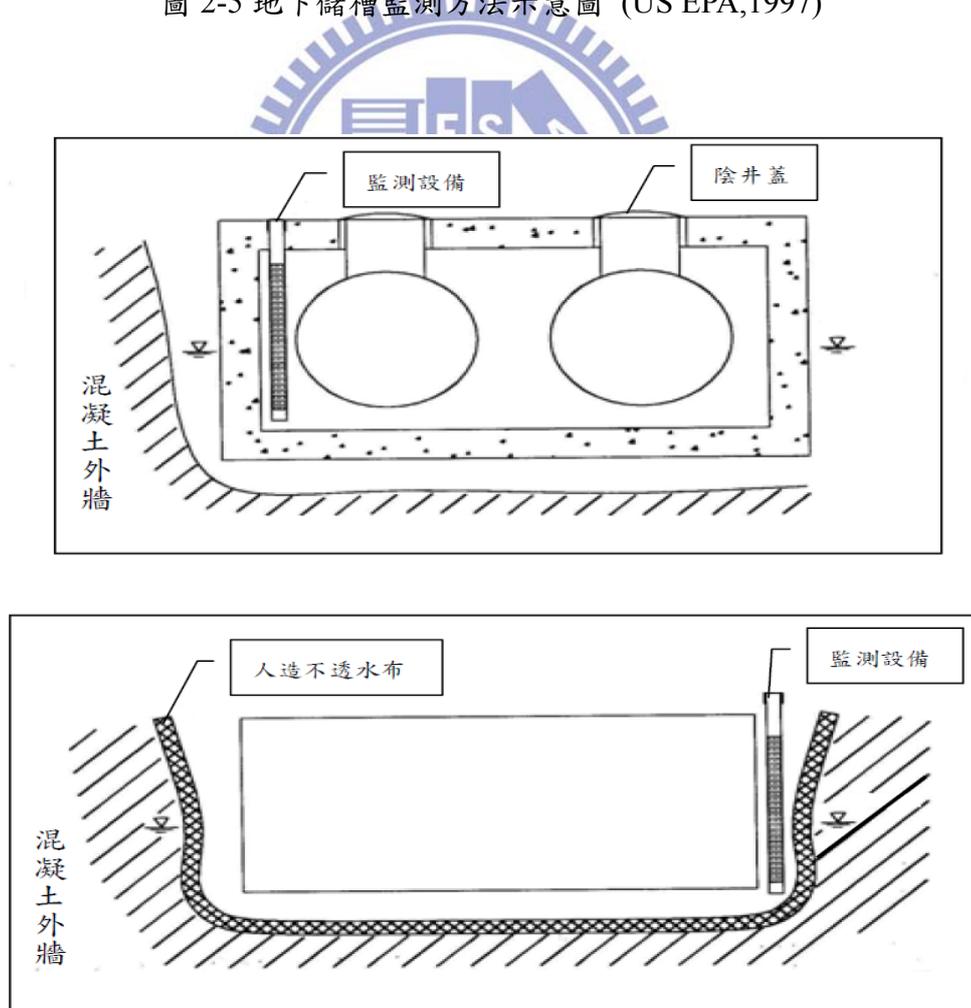


圖 2-6 二次阻隔層設置型式 (環保署, 2002)

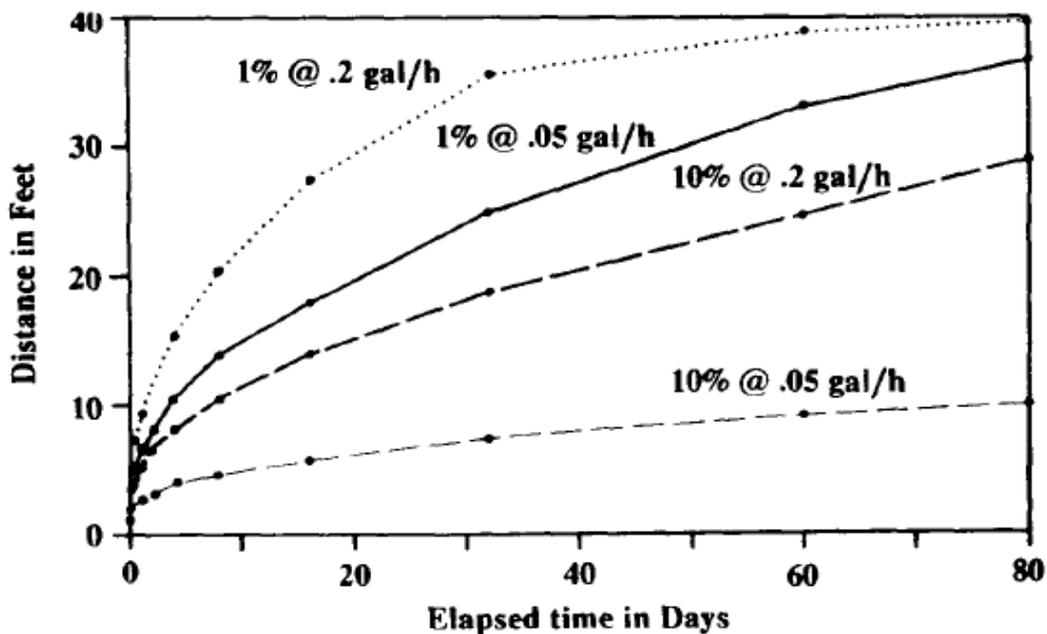
## 2.2.4 氣體監測井之敏感範圍

設置在地下儲油槽 (USTs) 外部位置的被動式蒸汽監測系統包含揮發性碳氫化合物的監測，普遍被視為是一種快速且有效的監測方法。然而對於量測油品洩漏量與蒸汽濃度間之關係仍處於僅止於了解物理過程的認知中，而如此即欲訂定一套定量的網狀系統設計標準幾乎是不可能，並且要能分辨污染來源是由地表之溢流(Spill)或是由地下儲槽洩漏(Leak)所產生之往往需要成熟的監測與分析系統，然而通常難以達成。

為了能對於油品洩漏與蒸汽濃度之關係更加了解 Weber and Schwille (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」。因此認為高透水係數之回填材較低透水係數者更適合設置蒸汽與液體濃度監測與控制設備，然而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。

對於一般在設置土壤氣體與地下水監測設備時，習慣以經驗法則作網狀式的佈點，且對於汽油之蒸汽相傳輸一般普遍被接受的經驗法則為「污染氣團傳輸至 15 ft (4.5 m) 需歷時 15 天」。然而由 Weber and Schwille (1989) 模擬之結果(如圖 2-7) 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 2-7 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。由此可知，若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。

由圖 2-7 亦可知對於洩漏數率較大者，則被檢驗出污染濃度大於警示值所需之時間將可以較為縮短；但對於有效擴散係數較低之情況而言，則又會使得污染濃度大於警示值所需之時間增加，因此若僅以經驗法則作為監測設備之配置依據時則其監測效果較難達預期之情況，除非土層參數有極佳之條件。



(Weber and Schwille, 1989)

圖 2-7 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

於 Weber and Schwille (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 2-7 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 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由於不飽和層中汽、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 (2006)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 Soralum (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。

表 2-7 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"> <li>● 穩態、非穩態</li> <li>● 侷限含水層、非侷限含水層、</li> <li>● 地下水系統之外來行為如:抽取井水、注水、蒸發散、區域排水...</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 僅可模擬水流狀態</li> <li>● 模擬污染物傳輸行為須搭配其他軟體。</li> <li>● 非飽和區及乾濕轉換時模擬限制多</li> </ul>	常用於模擬地下水流場分布
FEMWATER	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 可模擬不同密度流</li> <li>● 對於不規則邊界有較佳之符合能力</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 僅能模擬簡單之化學與生物動力</li> <li>● 於同一含水層中只能設定均質之水力傳導係數</li> <li>● 使用介面複雜</li> <li>● 不適用於油品污染</li> </ul>	
TOUGH2	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 放射性核種之熱傳模擬</li> <li>● 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</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 欲模擬 NAPL 傳輸須搭配其他軟體</li> <li>● 使用介面複雜</li> </ul>	主要用於模擬放射性物質
T2VOC	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 地下水層中之傳輸、揮發、溶解與吸附等</li> <li>● 可考慮多相系統之傳輸</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 以積分式有限差分法撰寫，較難符合複雜邊界</li> <li>● 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</li> <li>● 模擬污染傳輸時須分階段處理</li> <li>● 使用介面複雜</li> </ul>	以 TOUGH2 為藍本改寫
TMVOC	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 多相系統之傳輸</li> <li>● 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</li> <li>● 內建多種 VOC 可供使用</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 以積分式有限差分法撰寫，較難符合複雜邊界</li> <li>● 模擬污染傳輸時須分階段處理</li> <li>● 使用介面較 T2VOC 簡便</li> </ul>	以 TOUGH2 及 T2VOC 為藍本改寫

(摘自黃佳雯,2005)

### 2.3.1 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 2-8 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)。

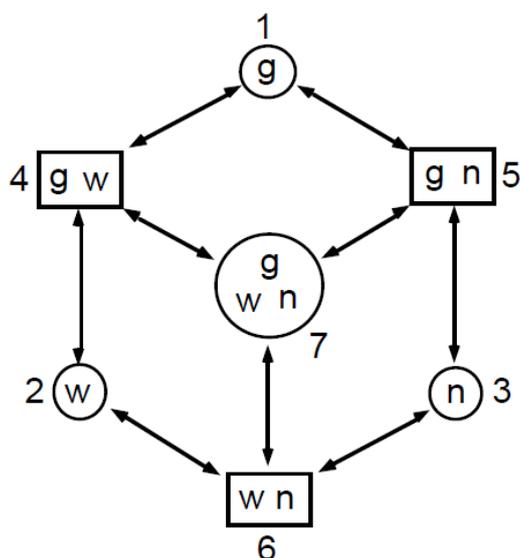


圖 2-8 TMVOC 中相之組成與變化；g-氣體、w-液體、n-NAPL

(摘自 Pruess and Battistelli, 2002)

## 2.3.2 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 2-1 描述之(Pruess, 1987)。

$$\frac{d}{dt} \int_{V_n} M^k dV_n = \int_{\Gamma_n} F^k \cdot n d\Gamma_n + \int_{\Gamma_n} q_m^k dV_n \dots\dots\dots(2-1)$$

上式中， $V_n$  是指在研究的流體系統內的任意之區間體積； $\Gamma_n$  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； $M$  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。

## 2.3.3 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) and (Narisham and Witherspoon, 1976)。其適當的體積平均值可以下式表示之：

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

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。

$$\int_{\Gamma_x} F^k \cdot n d\Gamma_n = \sum_m A_{nm} F_{nm} \dots\dots\dots(2-3)$$

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，而幾和參數與範圍如圖 2-8 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：

$$F_{\beta,nm} = -K_{nm} \left[ \frac{K_{\gamma\beta} \rho_{\beta}}{\mu_{\beta}} \right]_{nm} \left[ \frac{P_{\beta,n} - P_{\beta,m}}{D_{nm}} - \rho_{\beta,nm} g_{nm} \right] \dots\dots\dots(2-4)$$

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； $\rho_{\beta}$  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； $\mu_{\beta}$  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：

$$\frac{dM_n^K}{dt} = \frac{1}{V_n} \sum_m A_{nm} F_{nm}^K + q_n^K \dots \dots \dots (2-5)$$

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。

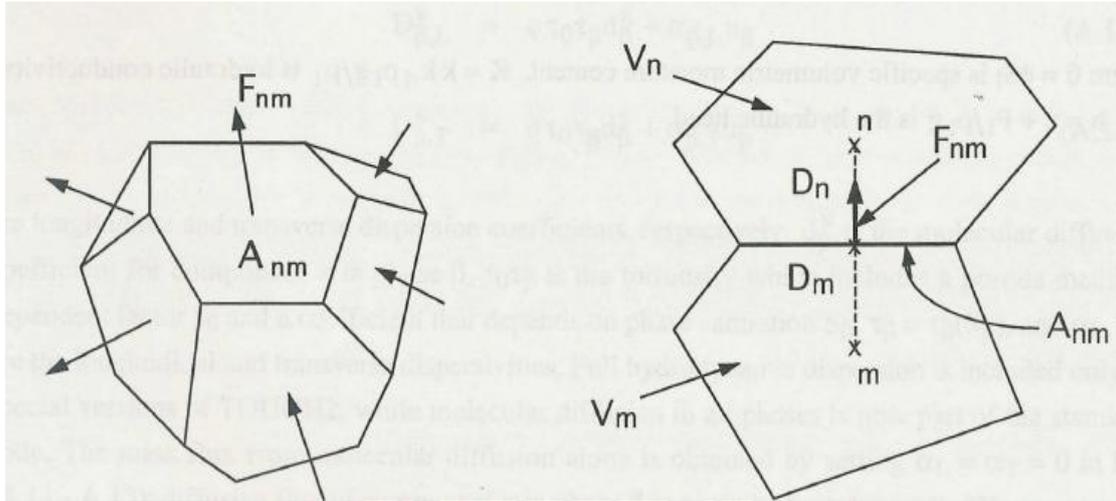


圖 2-9 積分有限差分法  
 摘自 (Pruess and Battistelli, 2002)

# 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。

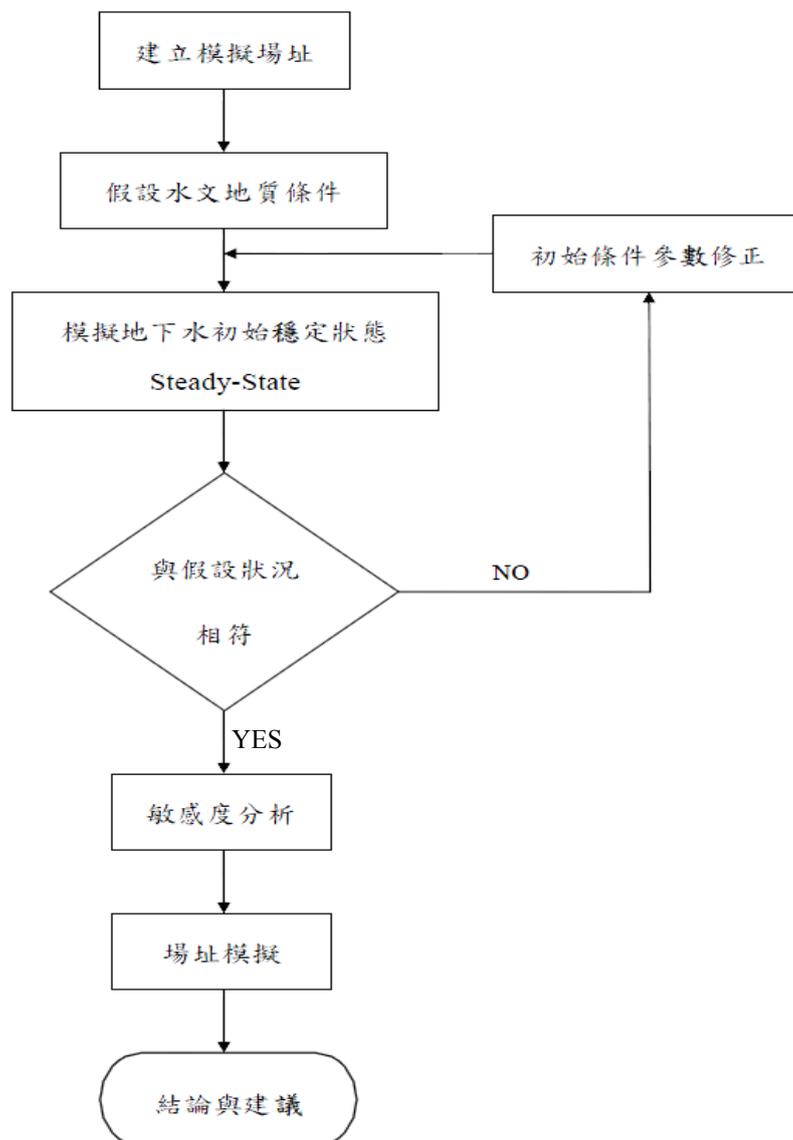


圖 3-1 研究方法流程圖

## 3.2 敏感度分析

本研究之模擬場址尺寸為長寬各 40 m。為了避免產生邊界效應而影響污染傳輸模擬之結果則需將模擬範圍放大，且為了於主要模擬區域內得到較精確之結果因此須將該區域內之網格尺寸縮小至長與寬皆為 1 m，如此則會使得網格數量大幅增加，會造成模擬時間的增加、輸出之結果檔案過大以致無法正常開啟以及開啟三維結果圖時之讀取時間過長而產生讀取失敗等不良影響。為了避免上述之問題則需將模擬範圍縮小，而又必須避免因減少模擬範圍的放大倍數所產生之邊界效應影響，因此對於面積放大倍數進行敏感度分析，以找出在不產生邊界效應下之最小放大倍數，除此之外亦針對絕對滲透係數與孔隙率進行敏感度分析，並評估這兩種參數對於污染物傳輸之影響。

### 3.2.1 邊界效應敏感度分析

為了解邊界效應與面積放大倍率之影響，乃將主要模擬區之各邊分別放大為 2 倍(2X)、1.5 倍(1.5X)、1 倍(1X)以及 0.5 倍(0.5X)之主要模擬區域如表 3-1。其污染物洩漏點與監測井配置及距離如圖 3-2 所示：

表 3-1 邊界範圍放大倍率說明

邊界範圍放大倍率	模型尺寸 (m)
四周各 2 倍之主要模擬區域， 2X	200×200
四周各 1.5 倍之主要模擬區域， 1.5X	160×160
四周各 1 倍之主要模擬區域， 1X	120×120
四周各 0.5 倍之主要模擬區域， 0.5X	80×80

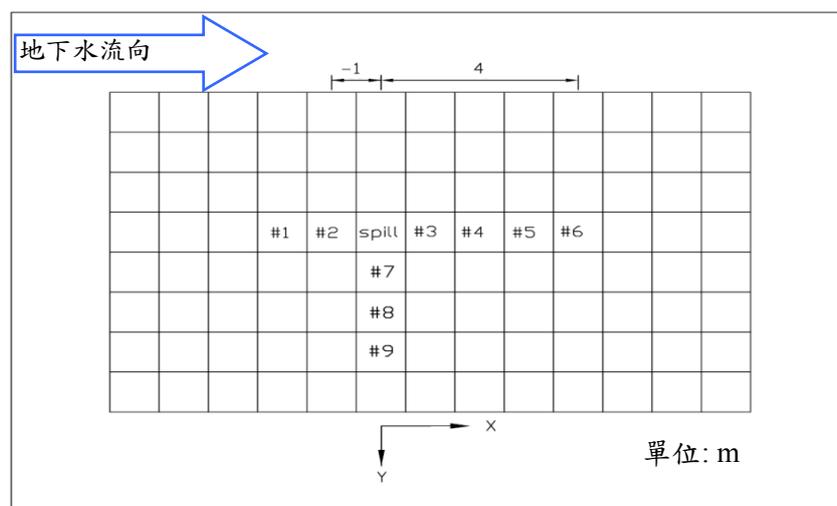


圖 3-2 邊界效應敏感度分析之洩漏點及監測井配置示意圖

由圖 3-2 可知污染物洩漏點與監測管之相對位置，而在模擬過程中於洩漏點位置持續注入 10 gal/day(1.58 L/hr)的苯，注入時間為一年，地下水位於地表下 2 m 處，如圖 3-3。

表 3-2 邊界效應敏感度分析之監測井與洩漏點距離說明

監測井編號	與洩漏點之距離(m)	說明
#1	-2	位於洩漏點之上游側
#2	-1	
#3	1	位於洩漏點之下游側
#4	2	
#5	3	
#6	4	
#7	1	位於洩漏點往下游傳輸方向之右側
#8	2	
#9	3	

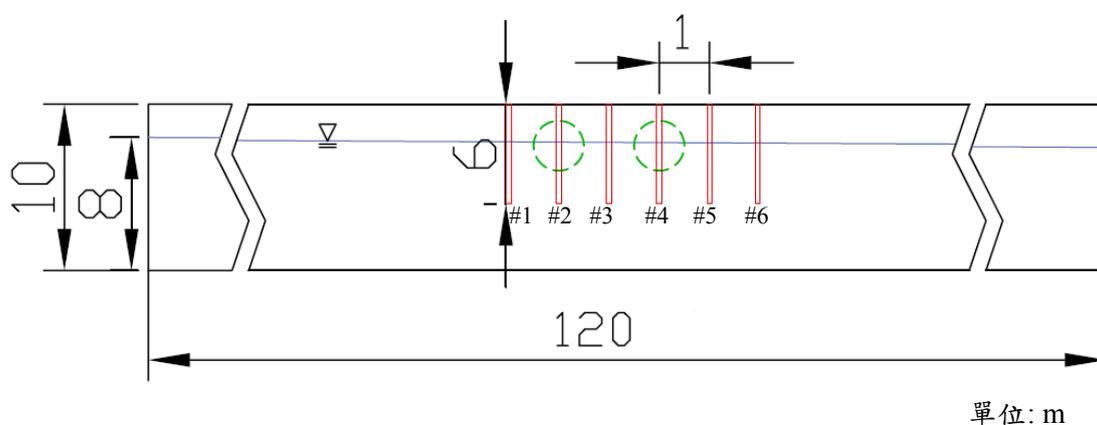


圖 3-3 地下水位與監測井配置示意圖

### 3.2.2 土壤透水係數敏感度分析

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。

首先對於模擬範圍的設定採取將各邊長往外延伸一個主要模擬區域，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  $2.74 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ )；孔隙率為 30%；地下水位於地表下 2 m。每次模擬僅調整單一參數而其餘參數則不做改變，參數變化說明如表 3-3 所示

於絕對滲透係數進行敏感度分析模擬時，於洩漏點處將苯持續以 10 gal/day(1.58 L/hr)的洩漏量注入，並持續洩漏一年。於模擬時間結束後輸出各測漏管之氣體濃度監測值，並以不同之絕對滲透係數與洩漏點之距離繪圖比較，各測漏管與洩漏點之相對位置關係圖如圖 3-2 所示。

表 3-3 土壤參數變化說明

絕對滲透係數 ( $\text{m}^2$ )	透水係數 $K_w$ (cm/sec)	孔隙率(%)
$2.5 \times 10^{-11}$	$2.74 \times 10^{-2}$	30
$2.5 \times 10^{-12}$	$2.74 \times 10^{-3}$	
$2.5 \times 10^{-13}$	$2.74 \times 10^{-4}$	
$2.5 \times 10^{-12}$	$2.74 \times 10^{-3}$	20
		30
		40

### 3.2.3 土壤孔隙率敏感度分析

針對土壤孔隙率進行敏感度分析模擬時，同樣於洩漏點處以苯持續注入 10 gal/day(1.58 L/hr)的量，並持續注入一年；土層絕對滲透係數為  $2.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ ；地下水位於地表下 2 m，再逐次調整孔隙率大小如表 3-3。於模擬時間結束後輸出各測漏管之氣體濃度監測值，再以土壤孔隙率為 0.2、0.3、0.4 之模擬結果與洩漏點距離繪圖比較，各測漏管與洩漏點之相對位置關係圖如圖 3-2 所示。

### 3.3 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 3-3，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、深度模擬至地下 10 m。並於 X 軸分割成 29 個網格(grid)、Y 軸分割為 21 個網格、Z 軸依地下水位深度之不同而分別分割為 13、14、16 個網格。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 3-4。

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  $2.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2$  與  $2.5 \times 10^{-13} \text{ m}^2$ ；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  $5.0 \times 10^{-13} \text{ m}^2$  與  $5.0 \times 10^{-14} \text{ m}^2$ ，土壤孔隙率為 0.3，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 3-4(a)-(b)；土壤/水-汽油保持曲線(圖 3-5)，由毛細壓力曲線參數 3-4(b) 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 3-6(a)~(c)。

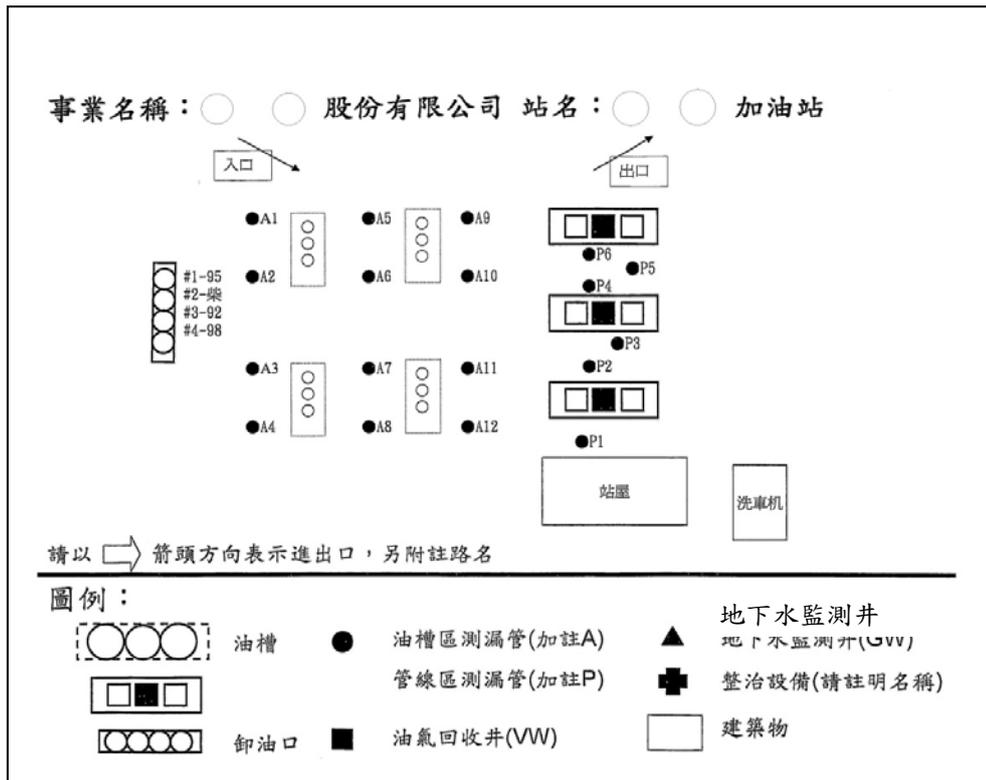


圖 3-3 加油站配置示意圖

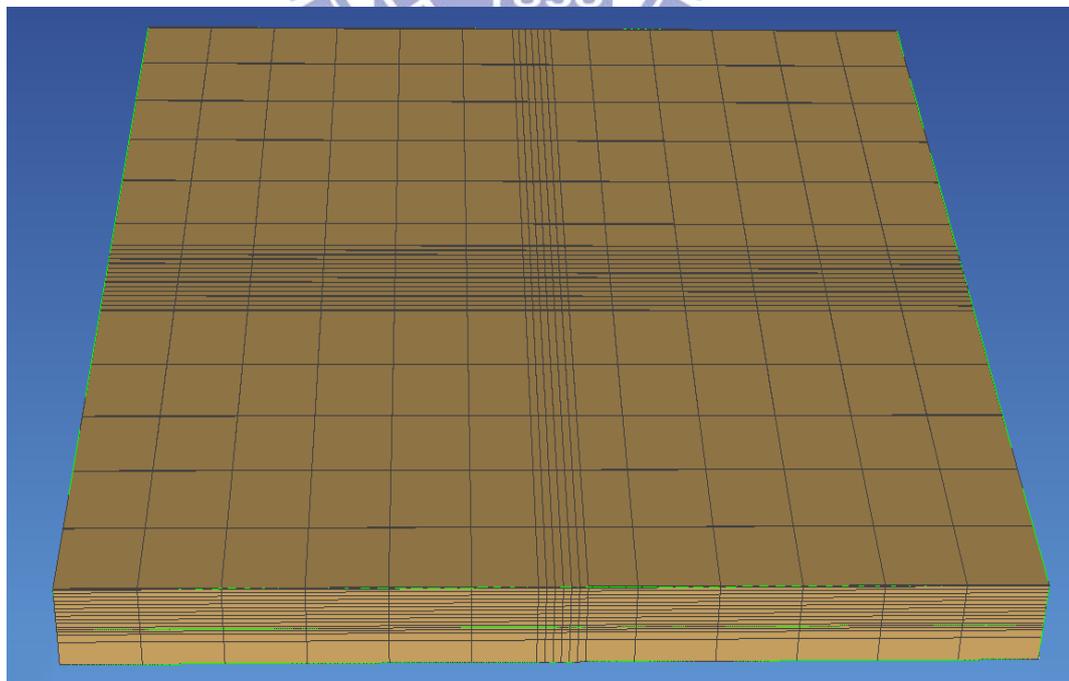


圖 3-4 TMVOC 數值模擬之模型網格示意圖

表 3-4(a)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(b)毛細壓力曲線參數(Parker's model)

參數	$S_m$	$\alpha_{gn}$	$\alpha_{nw}$	n exponent
材料				
大氣層	—	—	—	—
土壤	0	100	110	1.84

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

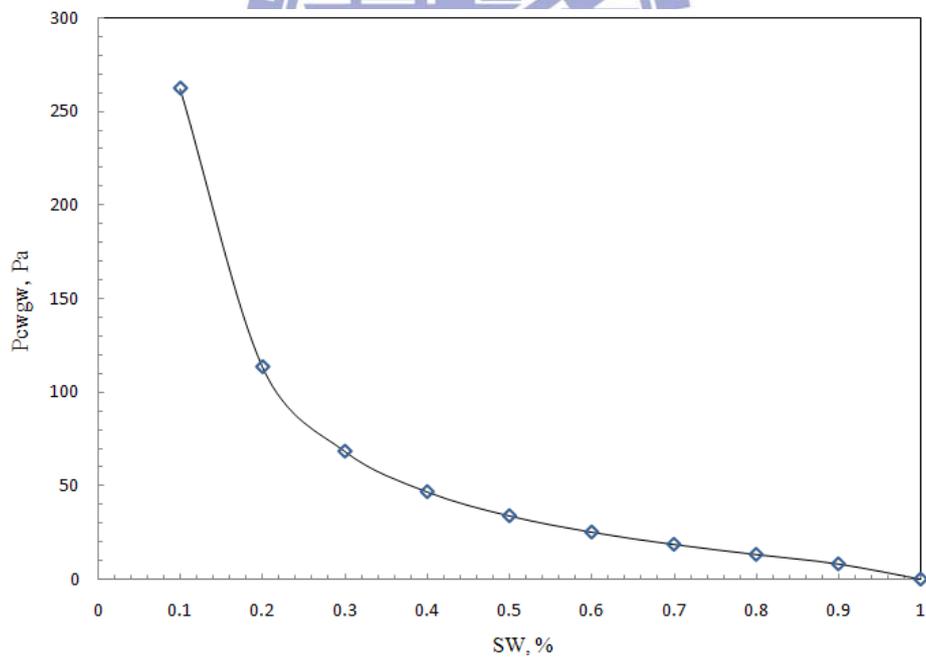


圖 3-5 土壤/水-汽油保持曲線

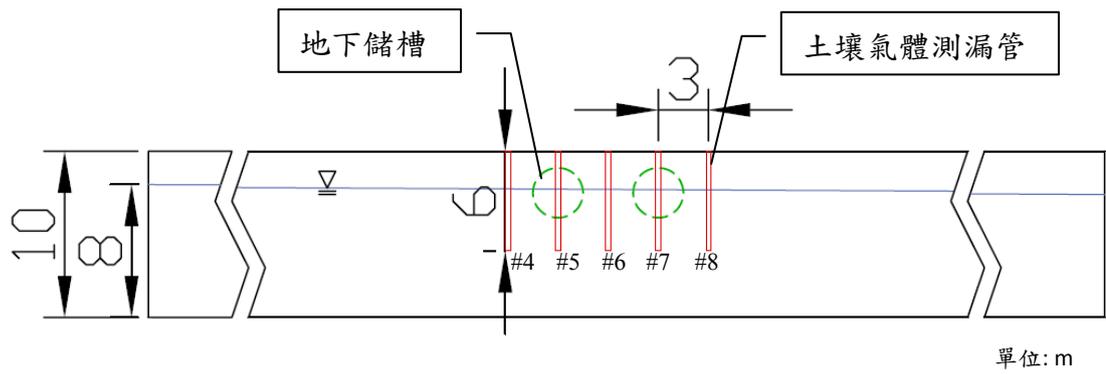


圖 3-6(a) 地下水位於地表下 2 m 處

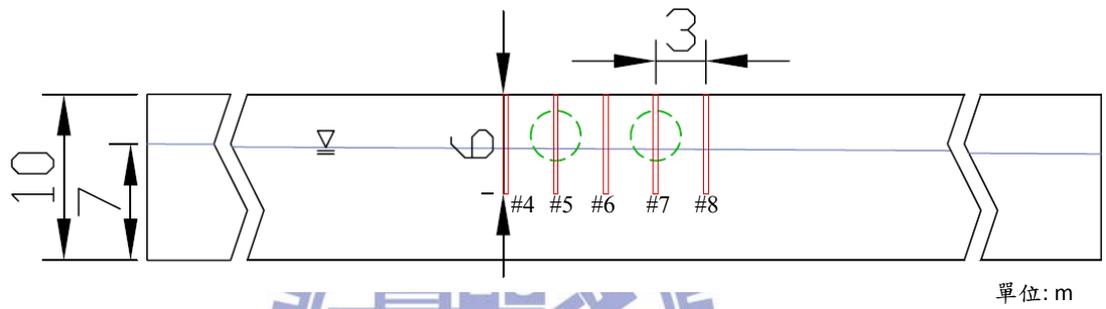


圖 3-6(b) 地下水位於地表下 3 m 處

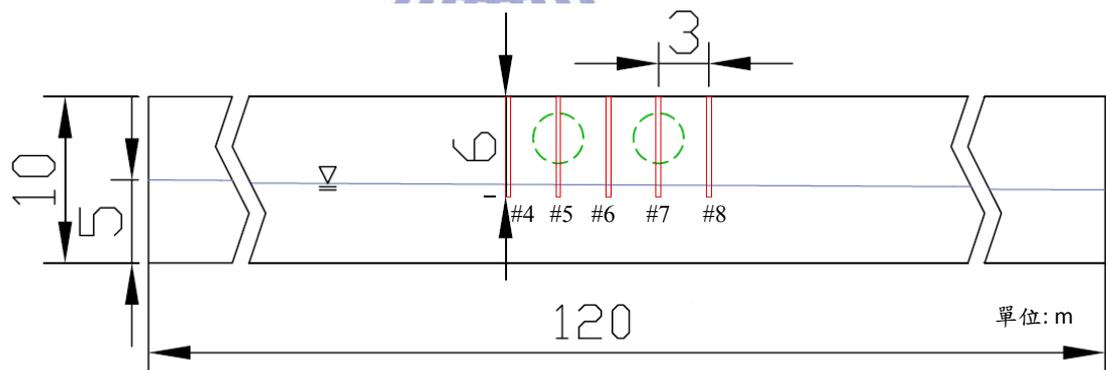


圖 3-6(c) 地下水位於地表下 5 m 處

### 3.3.1 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。

### 3.3.2 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  $10^{-22} \text{m}^2$ ，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。

### 3.3.3 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 3-7。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 3-6(a)-(c)所示。

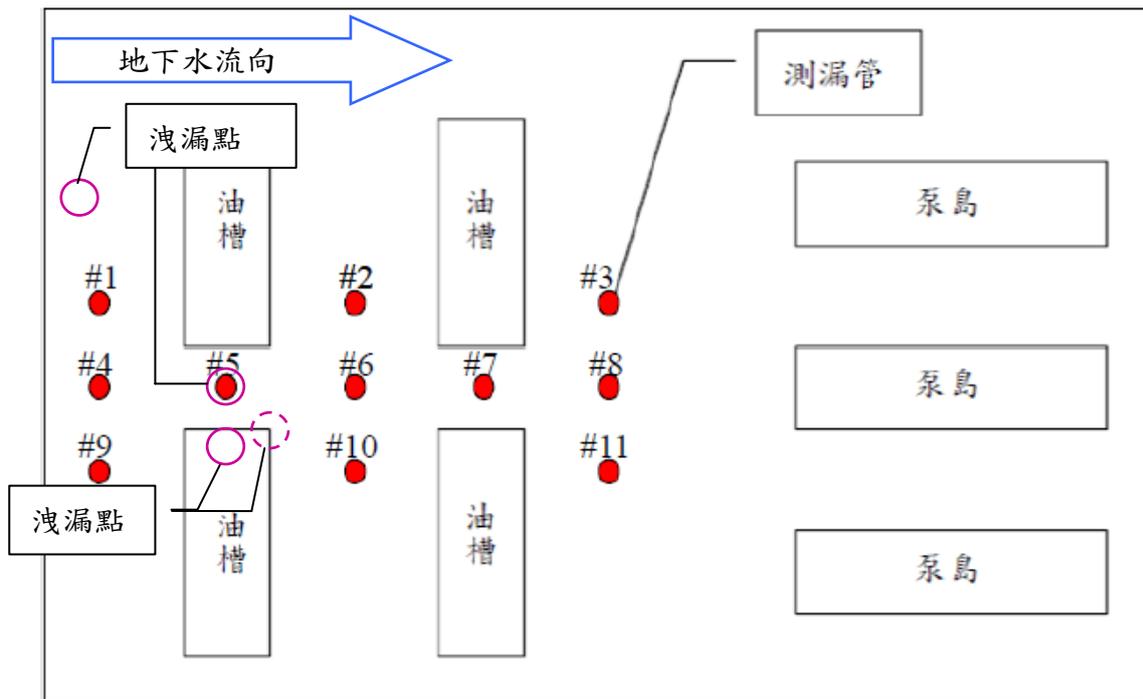


圖 3-7 監測井與油槽之相關位置示意圖

### 3.3.4 汽油污染物參數設定

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)。Lane (1980)將汽油依主要組成份以 5 種 VOC 來代表之，如表 2-3。Gustafson (1997)則以總石油煙標準法(TPHCWG)，將汽油成分中的化學性質與物理性質相似者劃分同一區，再依據等碳數(Equivalent Carbon Number, EC)將汽油分類成八個餾分如表 2-6，另 Cline et al., (1991)也曾對無鉛與含鉛汽油成分進行分析如表 3-5。而為減少數值模擬時間則須減少有機污染物之數量，因此本研究中綜合各學者之結果，採用 8 種揮發性有機物作為汽油之主要成份，其各成份與含量整理如表 3-6 所示。

表 3-5 無鉛與含鉛汽油組成成份

組成物	無鉛 <sup>1</sup>	含鉛 <sup>1</sup>
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)熾蒽(Benzo(b)fluoranthene)	3.9 mg/L	3.9 mg/L
蒽(Anthracene)	1.8 mg/L	1.8 mg/L
烯烴(Olefins)	5	10
環烴(Cyclic hydrocarbons)	5	5
添加劑(Additives)		
四乙鉛(Tetraethyllead)		600 mg/L
四甲基鉛(Tetramethyllead)		5 mg/L
二氯乙烷(Dichloroethane)		210 mg/L
二溴乙烷(Dibromoethane)		190 mg/L

<sup>1</sup> 為體積百分比

本表摘自 Cline, 1991

表 3-6 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



### 3.3.5 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)。因此於本研究中均假設其油品之洩漏速率為 5 gal/day；並連續注入油品一年。於本研究中在此假設 4 種不同位置發生油品洩漏分別概述如下：

Case1: 因發生接合不良、鏽蝕或破損等而產生油品洩漏如圖 3-8(a)所示。洩漏點於儲油槽上方與輸油管線之連接處，距離入口之地界線 23 m；與左側臨地之地界線距 14 m；深度於地表下 1 m 處。

Case2: 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 3-8(b)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。

Case3: 因發生鏽蝕、或外力造成破損而產生油品洩漏，但下游處並無受到儲油槽阻擋如圖 3-8(c)所示。洩漏點位於卸油口下方管線，距離入口之地界線 20 m；與左側臨地之地界線距 11 m；深度於地表下 1 m 處。

Case4: 因發生破損而產生油品洩漏如圖 3-8(d)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。

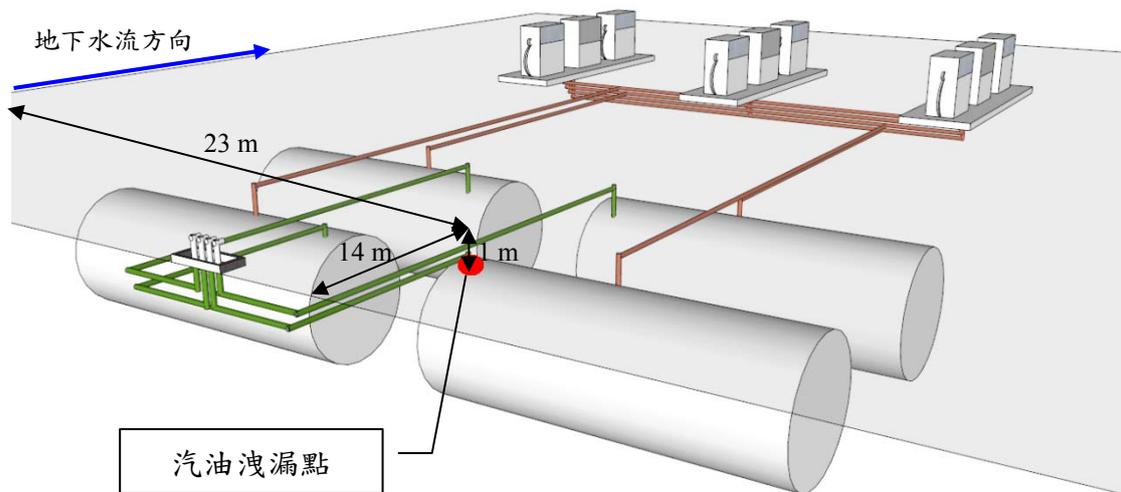


圖 3-8(a) Case1:洩漏點 A 於油槽上方與輸油管連接處

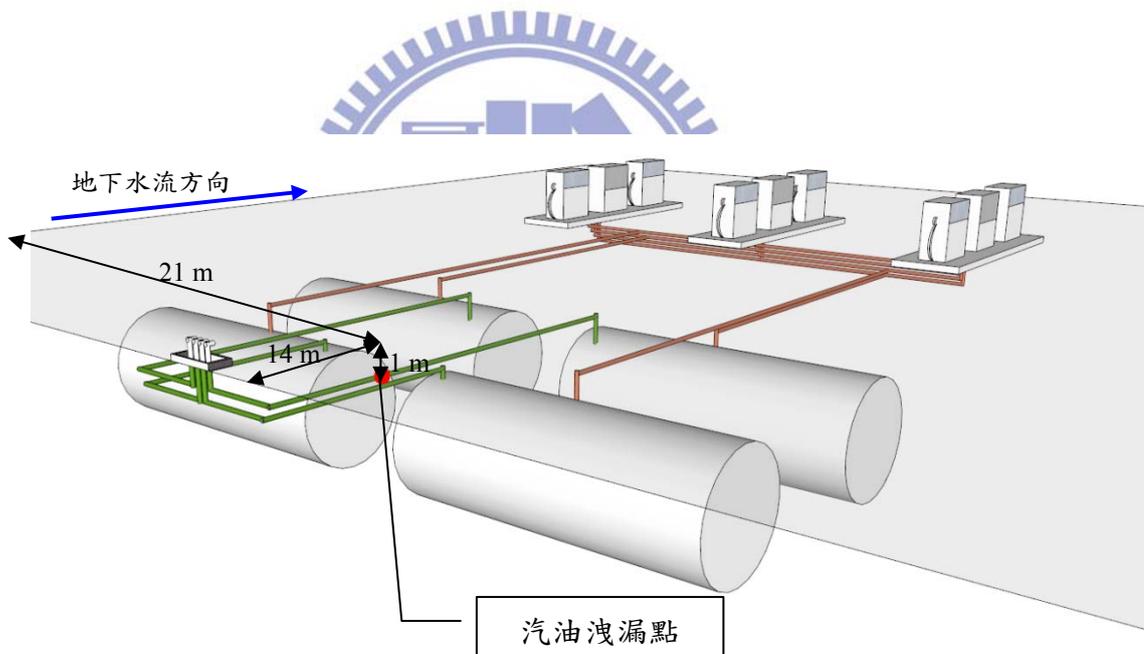


圖 3-8(b) Case2:洩漏點 B 位於儲槽區內之輸油管線

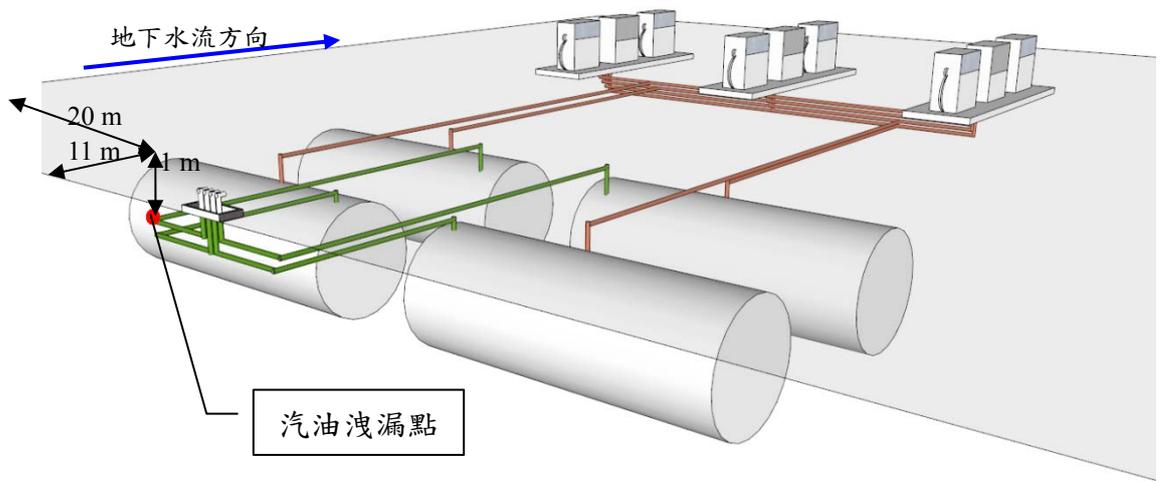


圖 3-8(c) Case3:洩漏點 C 位於卸油口下方之輸油管線

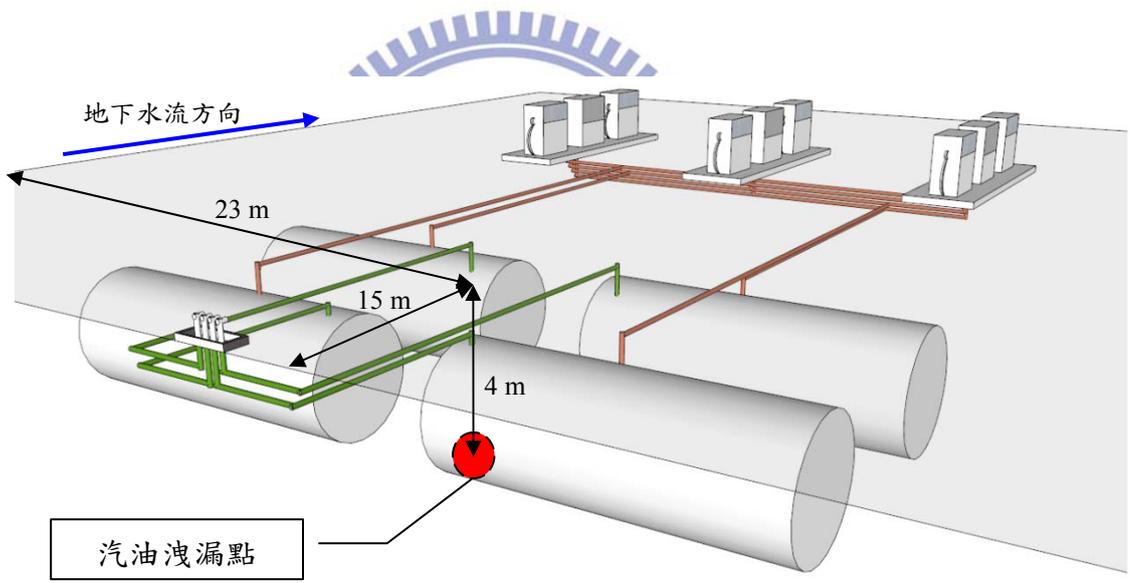


圖 3-8(d) Case4:洩漏點 D 位於儲油槽之下方

# 第四章 模擬結果與分析

## 4.1 面積敏感度分析

於模擬時間結束(一年)後輸出各測漏管之監測值並比較邊長放大倍率與邊界效應之影響。比較方法為:以洩漏點為座標軸中心，X 軸往右為正；Y 軸往下為正，並比較苯的氣體濃度是否會隨著與洩漏點距離之增加而受邊界效應之影響。模擬結果如圖 4-1(a)-(i)。

由邊界效應之敏感度分析結果可知，整體而言邊界效應對於油品污染物之傳輸行為並無明顯之影響，不過於圖 4-1(a)-(d)可發現由於苯於注入後開始揮發並有污染氣團的產生，而此時靠近洩漏點之氣體監測井已開始測得微量之氣體濃度，然而該污染氣團之形成尚未完全穩定因此於所測得之微量氣體濃度值會有飄移之現象，待污染氣團之形成較穩定後其傳輸行為亦較穩定此時(10 天)於監測井中所得之氣體濃度值亦較穩定，且於此四種邊界放大倍數之監測井中所得之讀數亦較趨於相近誤差亦小。而於監測井#5〔圖 4-1 (e)〕與監測井#6〔圖 4-1 (f)〕發現距離洩漏點較遠之氣體監測井由於污染氣團尚未到達，而於 60 天內監測井#5〔圖 4-1 (e)〕皆未能測得氣體濃度值，由此亦可知當監測井距洩漏點超過 3 m 時，則其敏感度將大幅下降且所需之監測時間亦較長。

於圖 4-1 (a)-(d)中亦可發現當污染團傳輸長時間後(100 天)，於監測井中污染氣團讀數會趨於穩定是因為污染團之尖峰值已傳輸至該點，使得土壤中之孔隙皆被污染團所飽和導致氣體濃度值不再增加，而於污染團尖峰值外之監測井〔圖 4-1 (e)-(f)〕由於尚未被污染團所飽和且距離洩漏點亦較遠，因此氣體濃度值較低。另外於洩漏點上游處監測井#1 與#2〔圖 4-1 (j)-(k)〕與洩漏點右側之監測井#7~#9〔圖 4-1 (p)-(r)〕中可發現其之地下水體含苯濃度之初始差異較大而隨著時間之增加而逐漸縮小差異，其原因可能是當污染物傳輸至地下水位面後隨即受到地下水流影響而往下游傳輸，使得上游處與下游處右側之浮動油餅累積較慢使得於初始溶解於水中的苯含量較少。對於監測井#3~#6〔圖 4-1 (l)-(o)〕而言，則因為皆位於洩漏點下游處且水力梯度均相同，因此地下水體含苯濃度受邊界效應之影響程度較小。

由洩漏點下游側之測漏管#3~#6〔圖 4-1 (l)〕可看出模擬範圍放大 2 倍(2X)與 1.5 倍(1.5X)與模擬範圍放大 1 倍(1X)0.5 倍(0.5X)之地下水體含苯濃度監測值相關性不佳，尤其隨著測漏管與洩漏點之距離增加至下游側 3 m〔測漏管#5 圖 4-1 (n)〕與 4 m 處〔測漏管#6 圖 4-1 (o)〕，更可明顯看出模擬範圍放大 2 倍之地下水體含苯濃度監測結果有明顯之飄移現象。由此可知，網格尺寸會伴隨著模擬範圍的放大而增加，因而造成軟體程式計算的誤差也被放大。而為了避免此現象的發生因此於本研究中的模擬尺寸就以放大倍率為 1 倍之尺寸設定之。



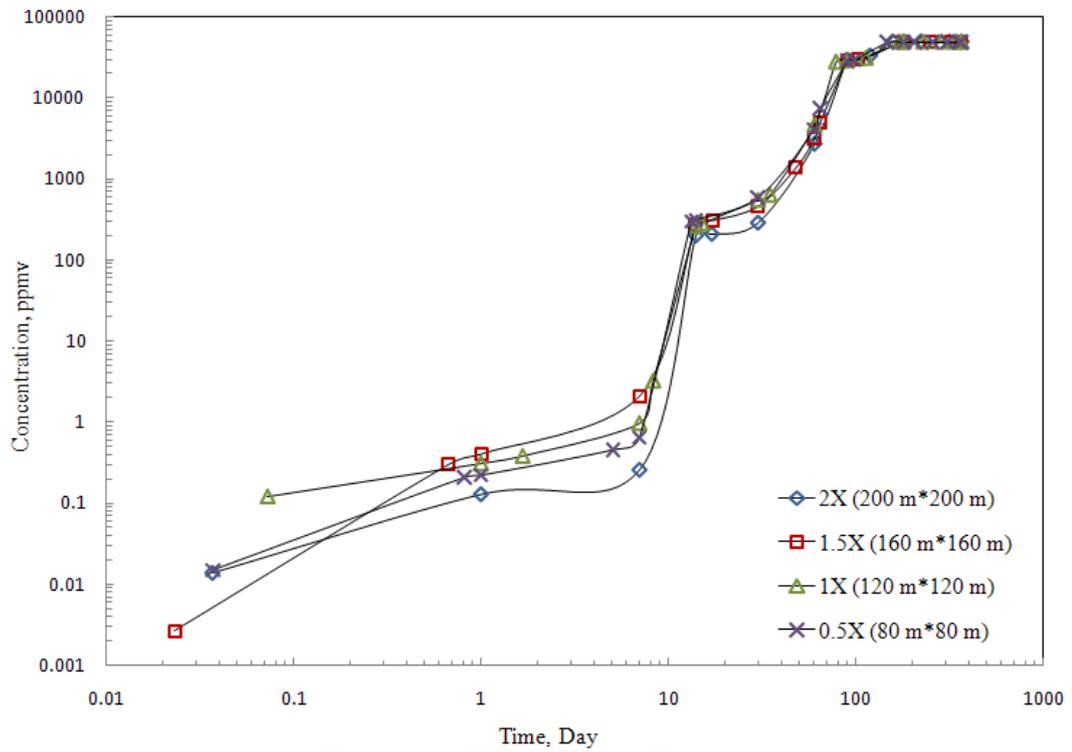


圖 4-1 (a) 於#1 測漏管之苯氣體濃度圖

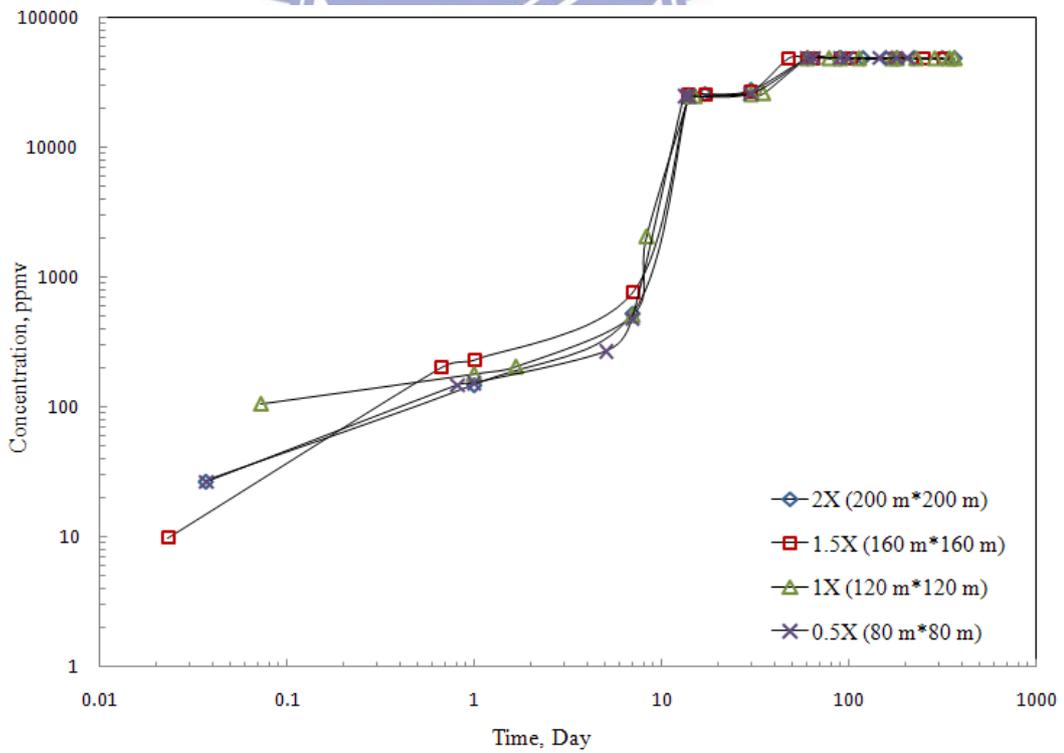


圖 4-1 (b) 於#2 測漏管之苯氣體濃度圖

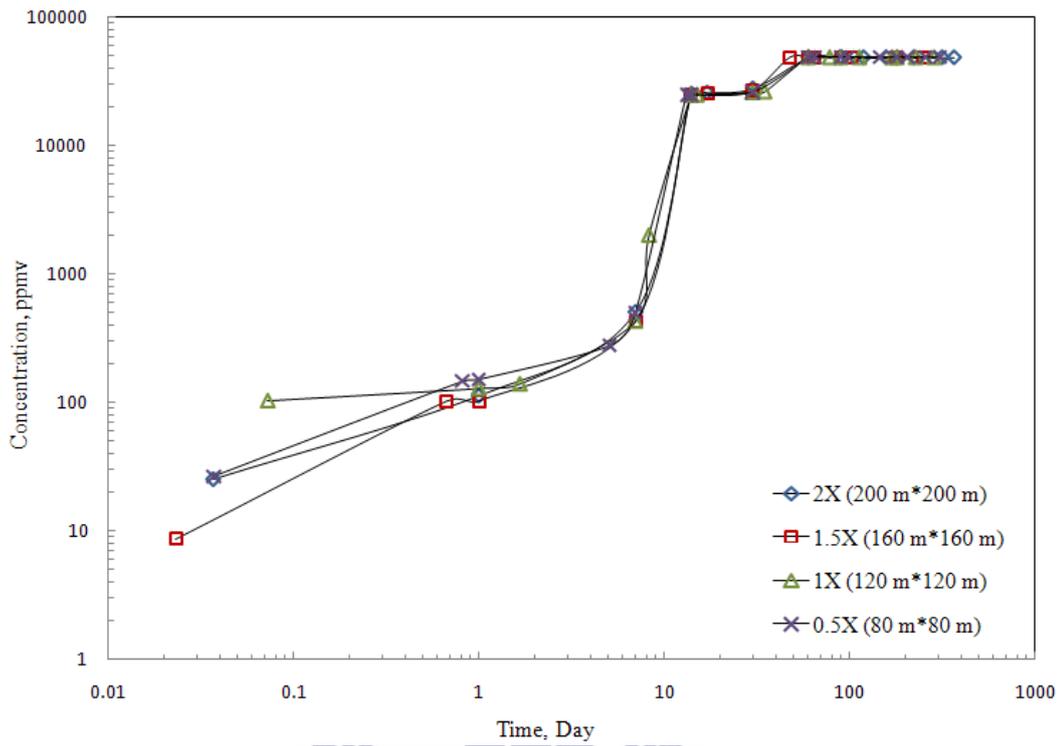


圖 4-1 (c) 於#3 測漏管之苯氣體濃度圖

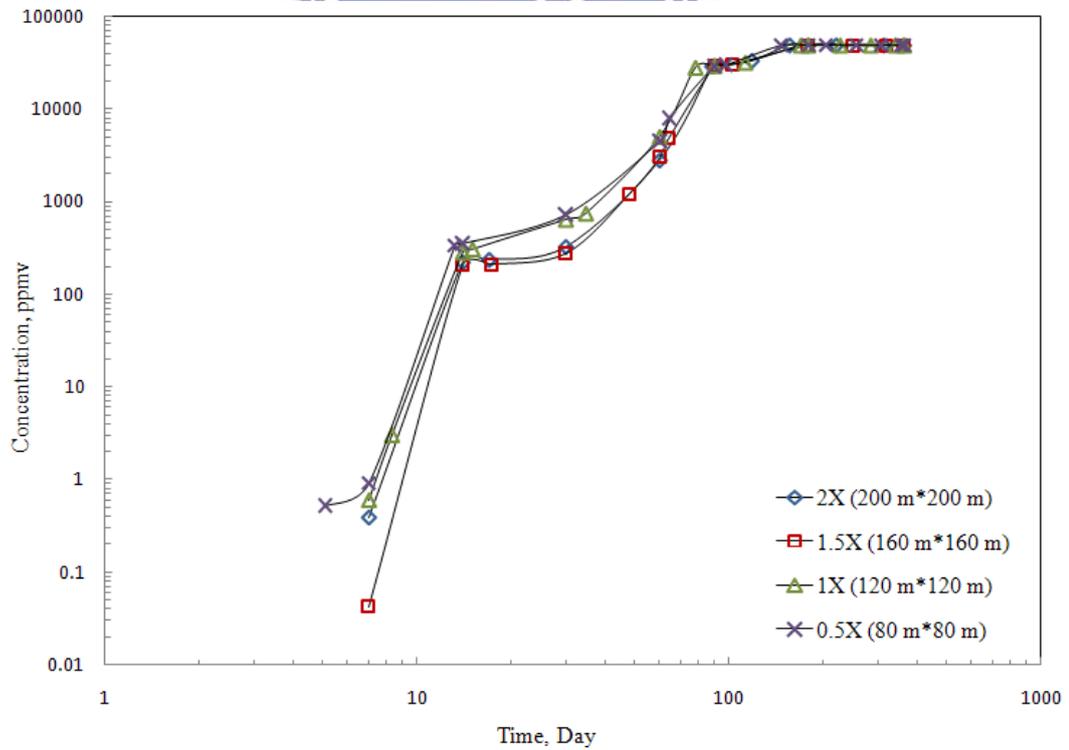


圖 4-1 (d) 於#4 測漏管之苯氣體濃度圖

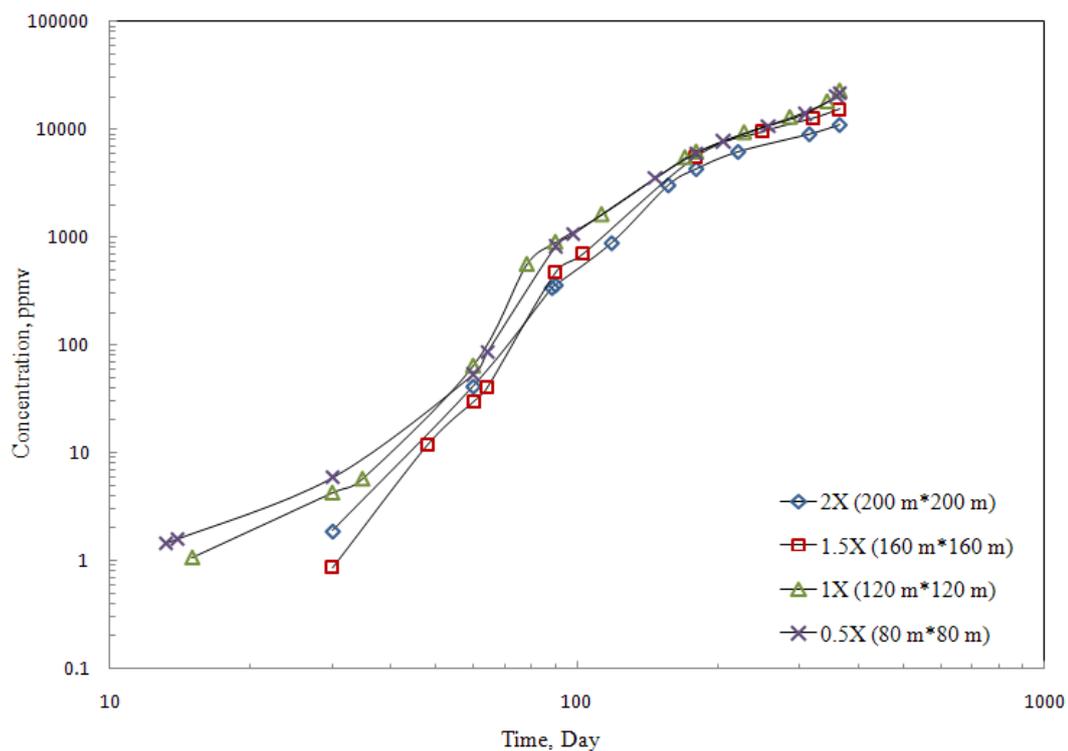


圖 4-1 (e) 於#5 測漏管之苯氣體濃度圖

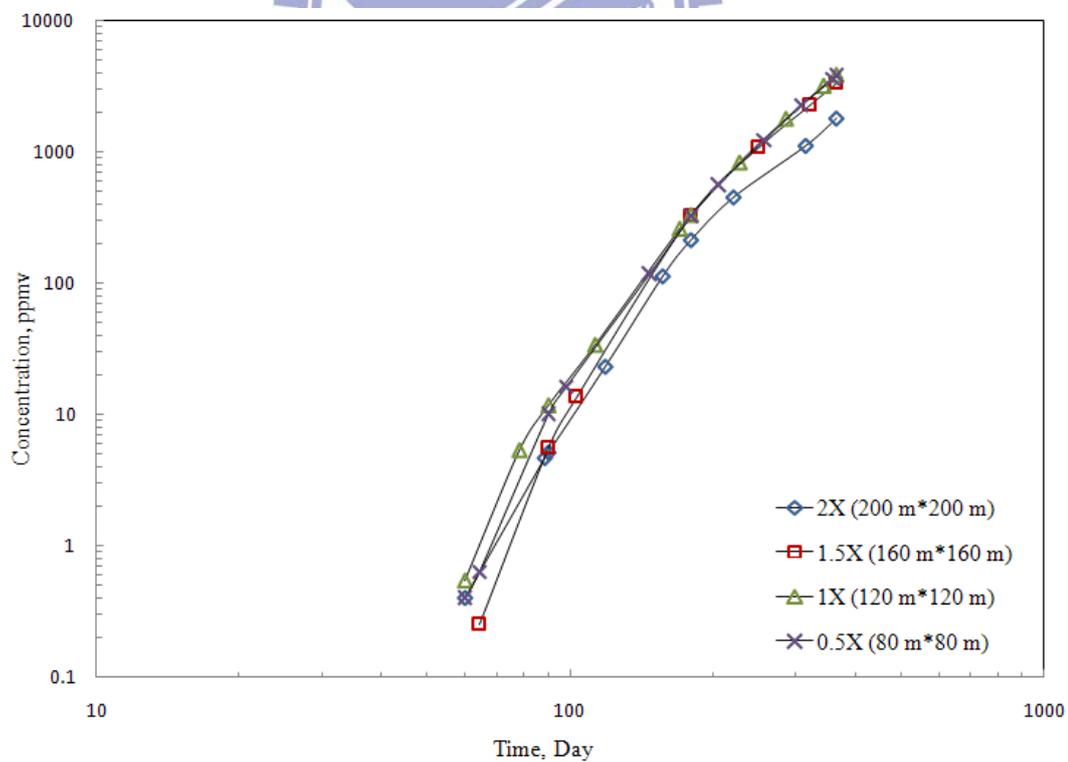


圖 4-1 (f) 於#6 測漏管之苯氣體濃度圖

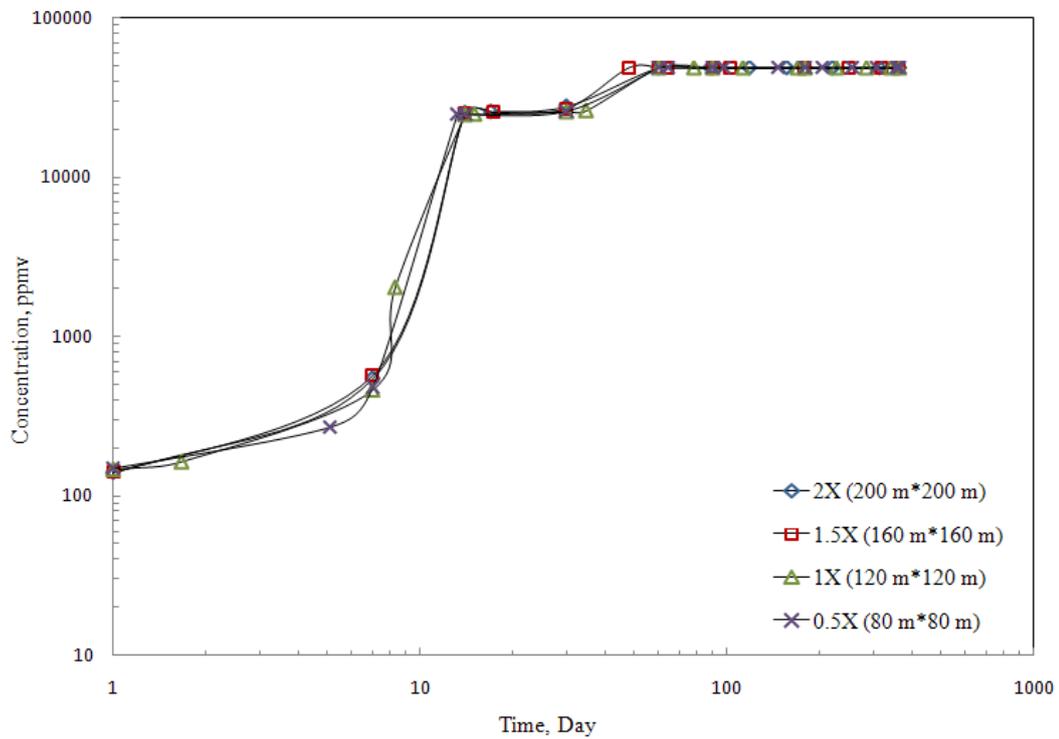


圖 4-1 (g) 於#7 測漏管之苯氣體濃度圖

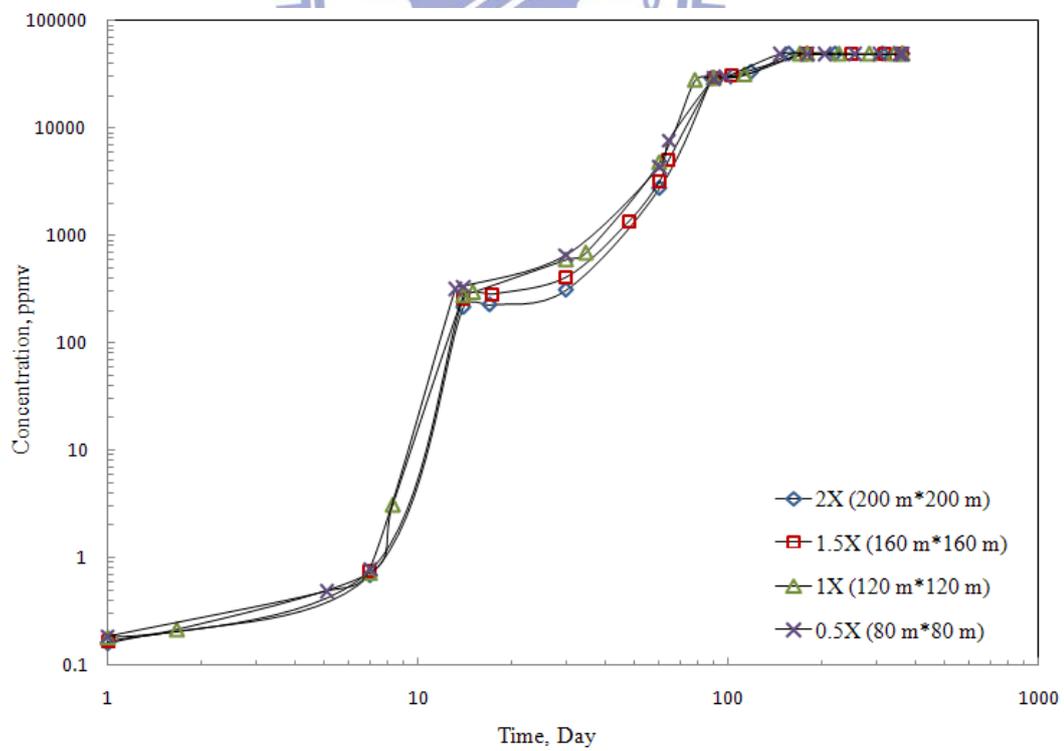


圖 4-1 (h) 於#8 測漏管之苯氣體濃度圖

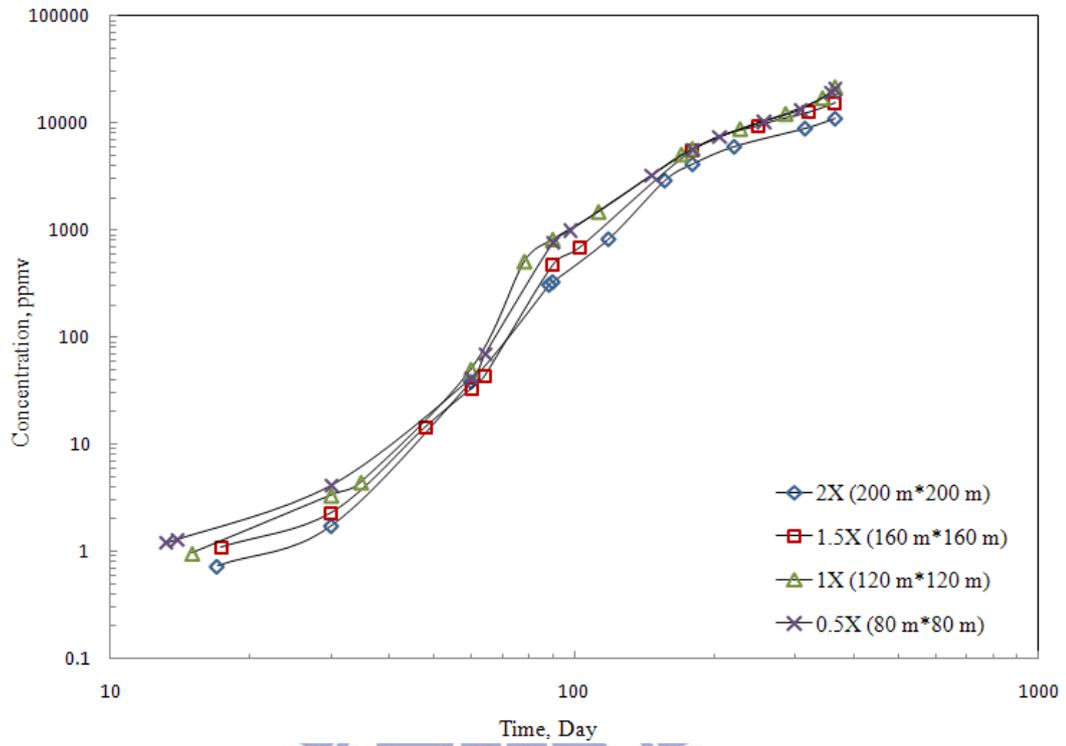


圖 4-1 (i) 於#9 測漏管之苯氣體濃度圖

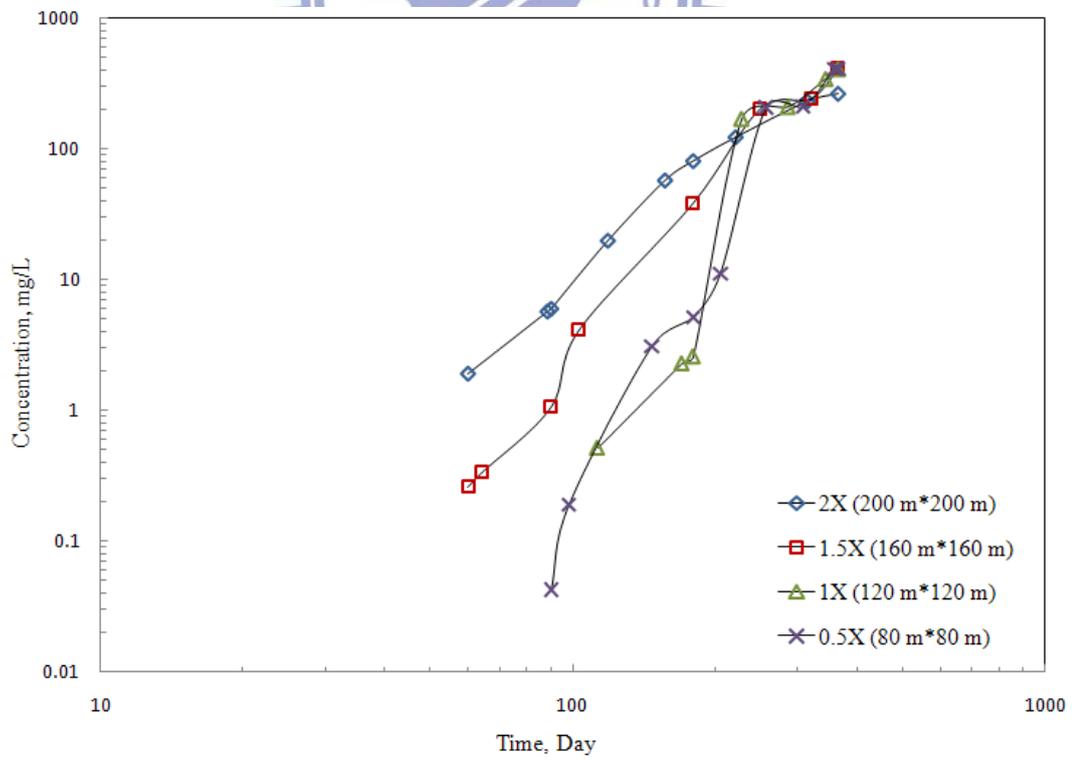


圖 4-1 (j) 於#1 測漏管之地下水體含苯濃度圖

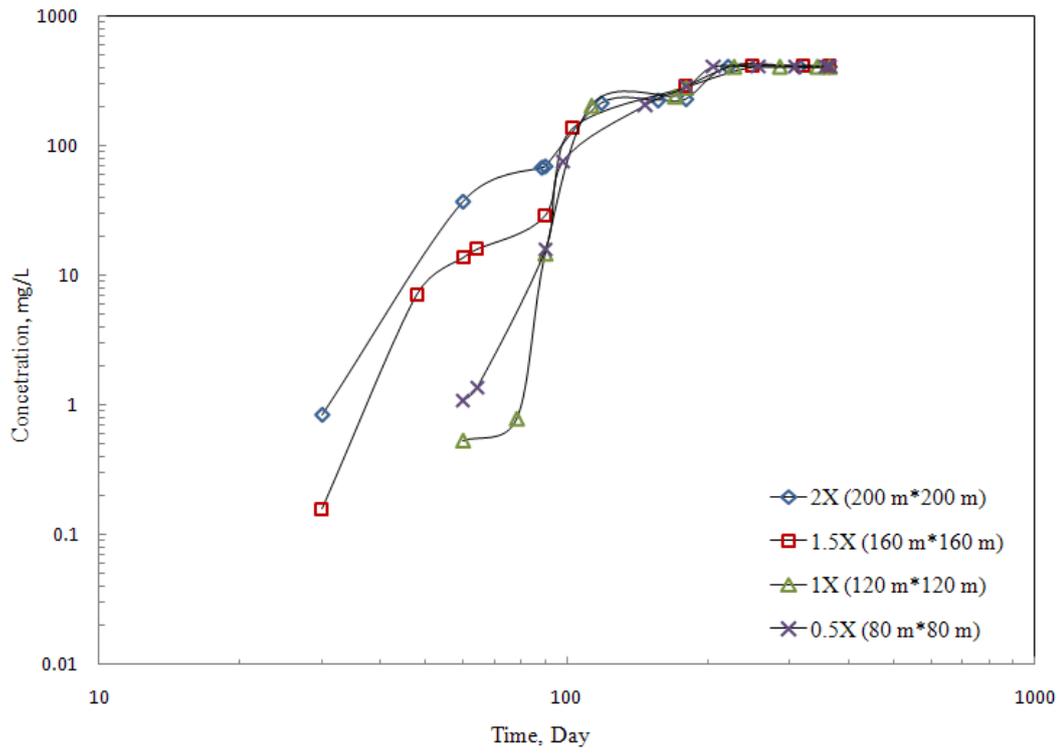


圖 4-1 (k) 於#2 測漏管之地下水體含苯濃度圖

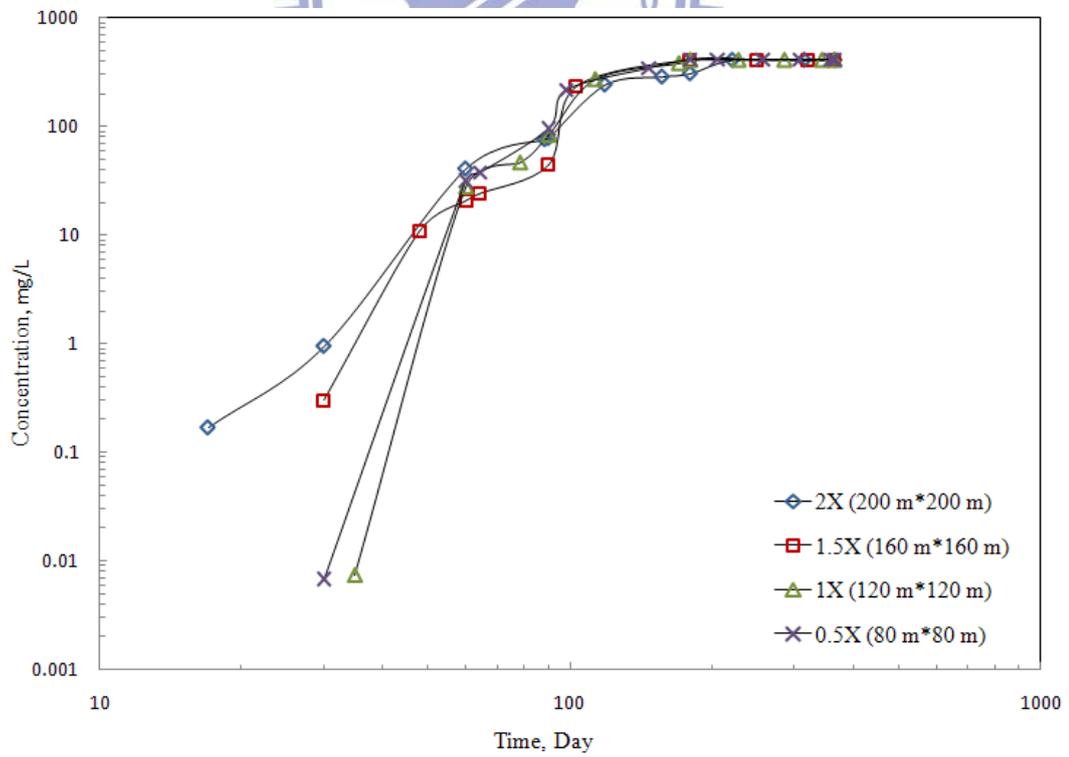


圖 4-1 (l) 於#3 測漏管之地下水體含苯濃度圖

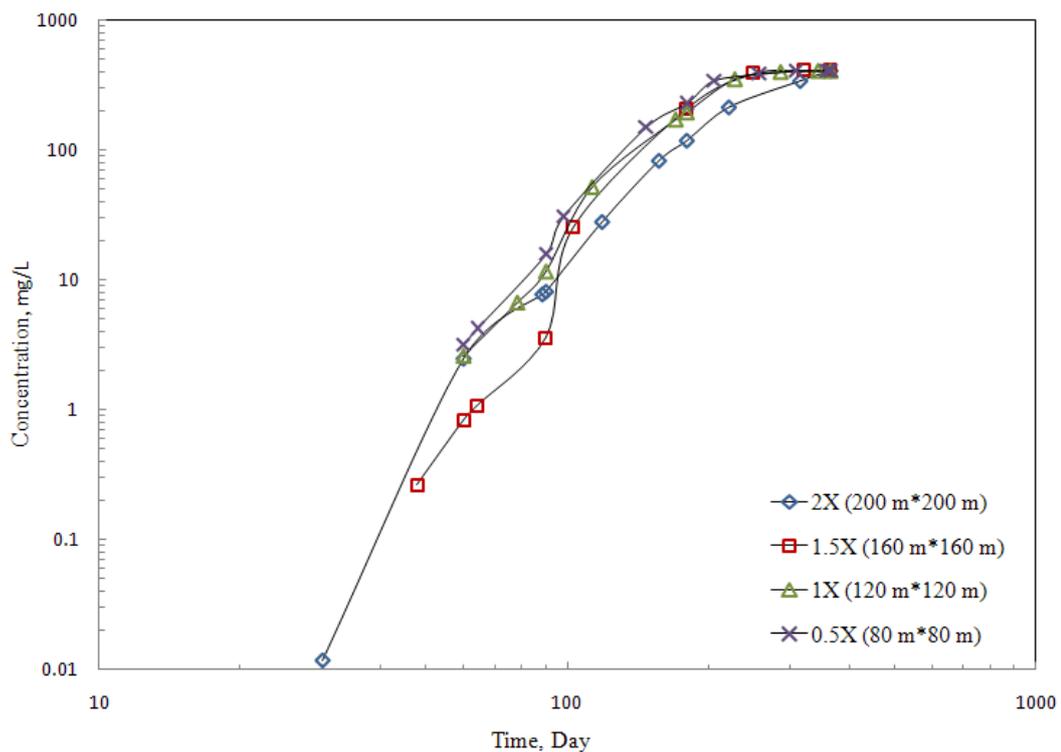


圖 4-1 (m) 於#4 測漏管之地下水體含苯濃度圖

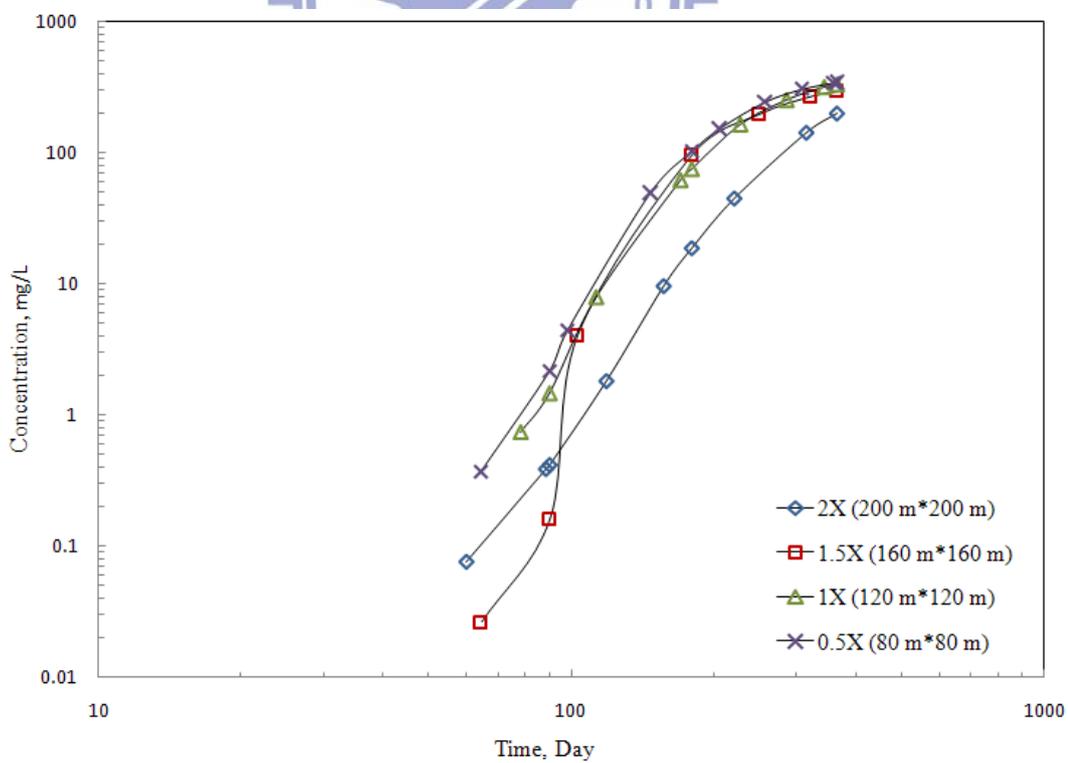


圖 4-1 (n) 於#5 測漏管之地下水體含苯濃度圖

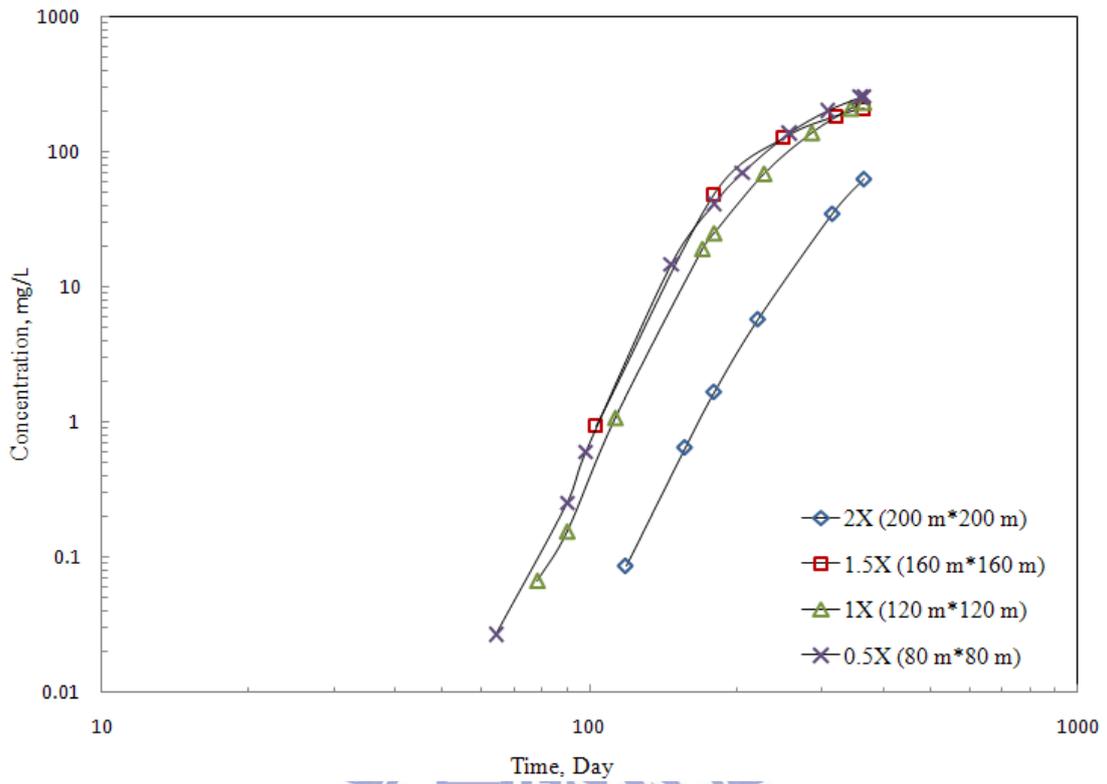


圖 4-1 (o) 於#6 測漏管之地下水體含苯濃度圖

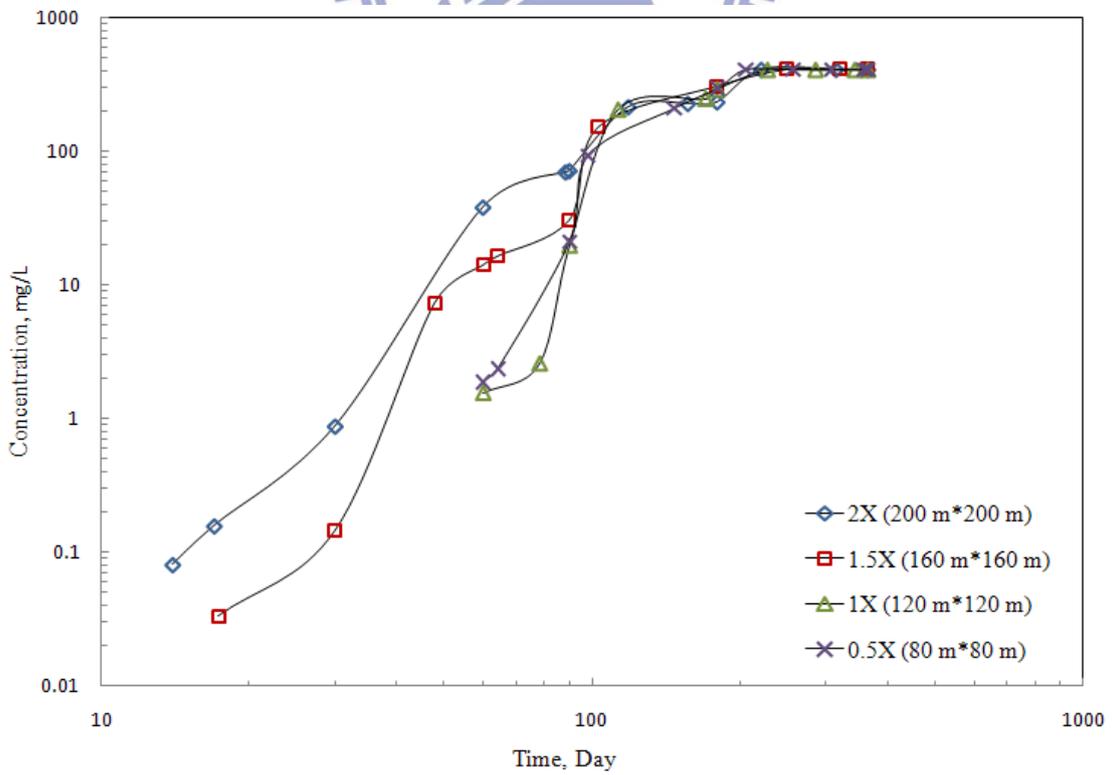


圖 4-1 (p) 於#7 測漏管之地下水體含苯濃度圖

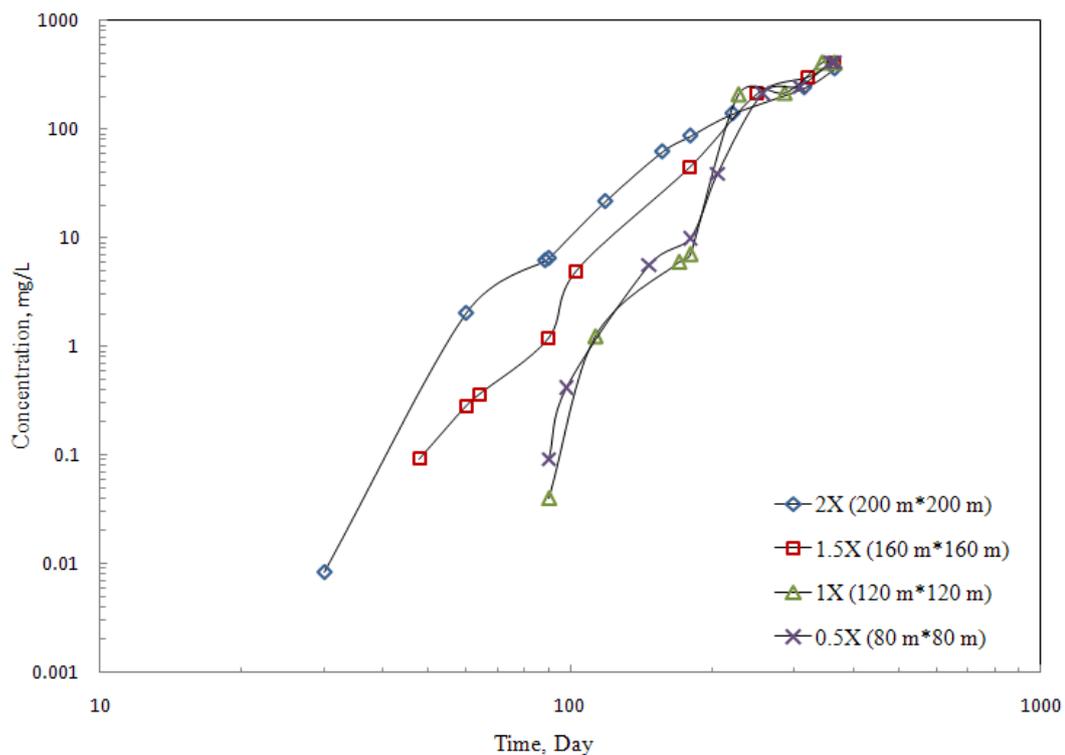


圖 4-1 (q) 於#8 測漏管之地下水體含苯濃度圖

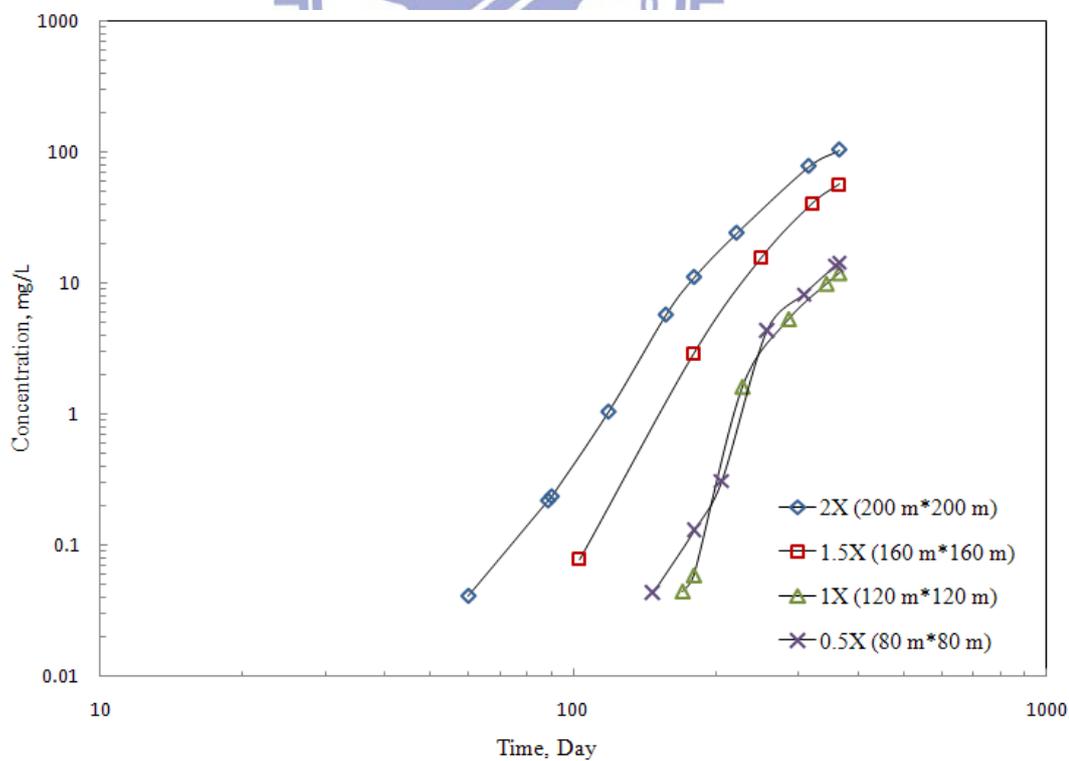


圖 4-1 (r) 於#9 測漏管之地下水體含苯濃度圖

## 4.2 土層透水係數敏感度分析

於模擬時間結束(一年)後輸出各測漏管之監測值並比較絕對滲透係數與洩漏點距離之比較結果如圖 4-2(a)~(i)。由分析結果可發現，監測井距離洩漏點較近者(1 m 內)圖 4-2 (c)其污染團受透水係數之影響不如距離較遠者明顯(4 m)圖 4-2 (f)，且當土壤孔隙受污染團飽和(100 天)後則氣體濃度值皆會趨於定值。於圖 4-2 (d)中可發現於 10 天時出現濃度值突然上升之情形，是因為當液相污染團傳輸至地下水水位面後逐漸形成一個浮動油餅往下游傳輸，而於#4 圖 4-2 (d)中第 10 天之時間點上因液相污染團之濃度尖峰值將要到達，使得濃度值快速上升。而於第 100 天後由於土壤之孔隙逐漸被污染團飽和，而使得後面濃度值逐漸趨於定值而不再變化。

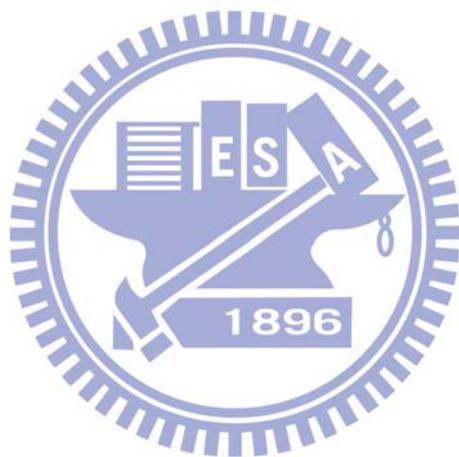
於監測井#7、#8、#9 之氣體濃度值圖 4-2 (g)、圖 4-2 (h)、圖 4-2 (i)可知其氣體濃度值與時間之關係相似於洩漏點下游側之監測井#3、#4、#5 圖 4-2 (c)、圖 4-2 (d)、圖 4-2 (e)，這是由於污染物-苯於注入後其污染氣團是以圓柱狀往上形成，因此對於污染氣團半徑 3 m 內之側向監測井或上下游處之監測井而言由於皆被污染氣團所包圍因此氣體污染濃度皆相近；當監測井距離洩漏點較遠時，則透水係數較大者其污染團之傳輸速率較快，因而於監測井#5 圖 4-2 (e)與#6 圖 4-2 (f)中可發現透水係數較大其污染團較快到達並被測得，且隨著距離的增加污染團之傳輸受透水係數之影響越明顯，由距離洩漏點 4 m 處之測漏管#5 [圖 4-2 (e)]可發現透水係數增加 10 倍則傳輸速率約可增加 1.5~5 倍如表 4-1。

由測漏管#5 之土壤氣體濃度結果來比較可發現，在透水係數為  $2.74 \times 10^{-2}$  cm/sec 之條件下測漏管#5 之氣體濃度值達 100ppmv 所需之時間約需 20 天 [表 4-1]；而在同樣之測漏管位置與土壤氣體濃度值之下當透水係數降低至  $2.74 \times 10^{-4}$  cm/sec 時，則所需之時間增加至 100 天，兩者之數率相差高達 5 倍，由此可知透水係數對於污染團之傳輸有很大的幫助，也能使得測漏管於相同之監測濃度標準之下縮短監測所需之時間。

表 4-1 透水係數與傳輸速率之關係

氣體濃度值 (ppmv) 時間(天) 透水係數 $K_v$ (cm/sec)	1	10	100
	$2.74 \times 10^{-2}$	9	12
$2.74 \times 10^{-3}$	15	40	70
$2.74 \times 10^{-4}$	30	60	100

另外於洩漏點上游處監測井#1 與#2 [圖 4-2 (j)-(k)] 可發現透水係數較大者 ( $2.74 \times 10^{-2}$  cm/sec) 其污染團能較快傳輸至地下水位面上，使得溶解於地下水中之苯含量亦較高，而洩漏點右側之監測井#7~#9 [圖 4-2 (p)-(r)] 同樣有此現象，不過隨著時間之增加而差異逐漸縮小，是因為飽和土壤之孔隙水逐漸被溶解相之苯所取代而達到飽和狀態。對於監測井#3~#6 [圖 4-2 (l)-(o)] 而言，則因為皆位於洩漏點下游處因此透水係數較大者 ( $2.74 \times 10^{-2}$  cm/sec) 其浮動油餅往下游之傳輸速度較快距離亦較遠，使得溶解於地下水中之苯含量較大，且隨著距離增加其地下水體苯濃度知差距越大，於監測井#6 (距離洩漏點 4 m，模擬時間為第 365 天) 圖 4-2 (o) 透水係數較大者 ( $2.74 \times 10^{-2}$  cm/sec) 其地下水體含苯濃度約為 300 mg/L，而透水係數較小者 ( $2.74 \times 10^{-4}$  cm/sec) 其地下水體含苯濃度約為 0.2 mg/L，兩者相差近 1500 倍。其原因是因透水係數低者 ( $2.74 \times 10^{-4}$  cm/sec) 再加上監測井#6 距離洩漏點較遠 (4 m) 使得污染團之傳輸不容易到達，因而造成兩者之地下水體含苯濃度值有如此之大差距。



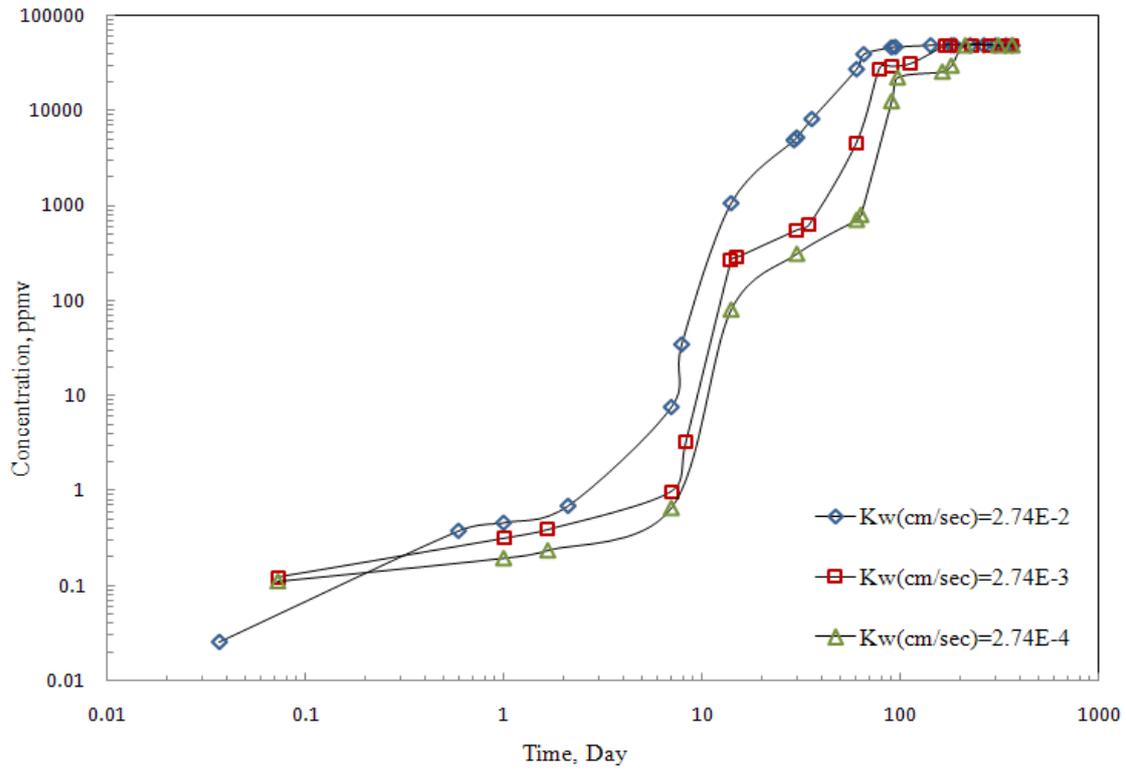


圖 4-2 (a) 於#1 測漏管之苯氣體濃度圖

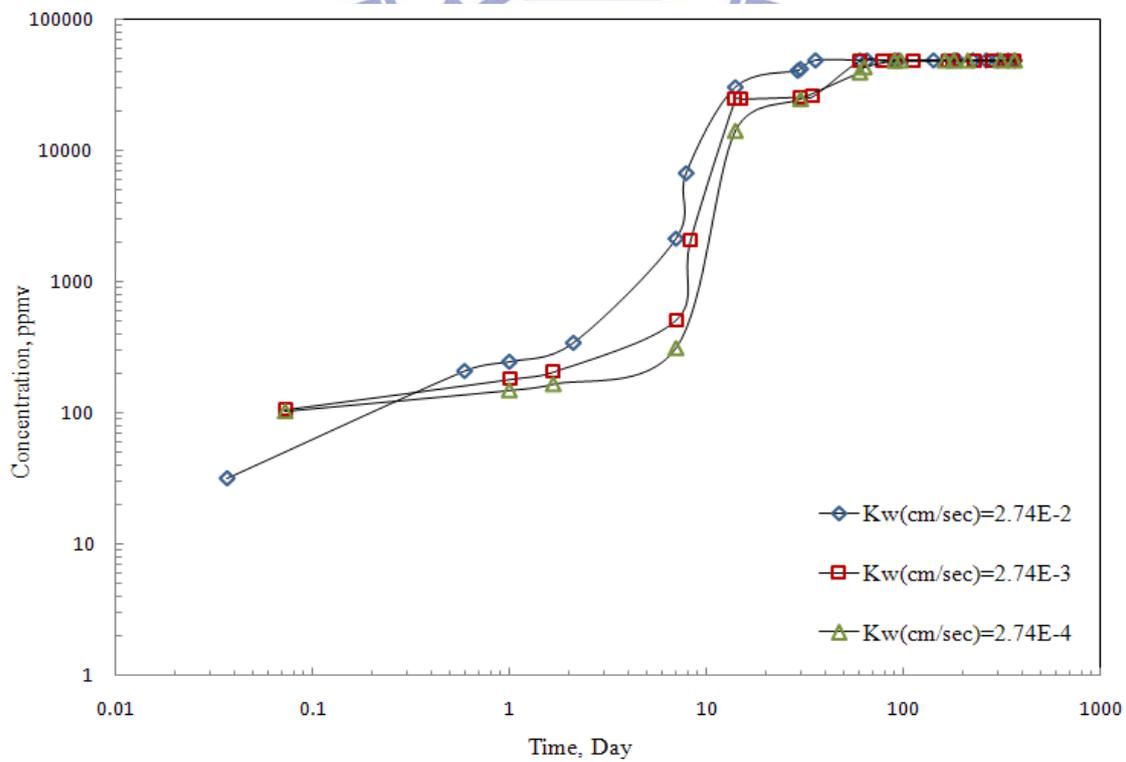


圖 4-2 (b) 於#2 測漏管之苯氣體濃度圖

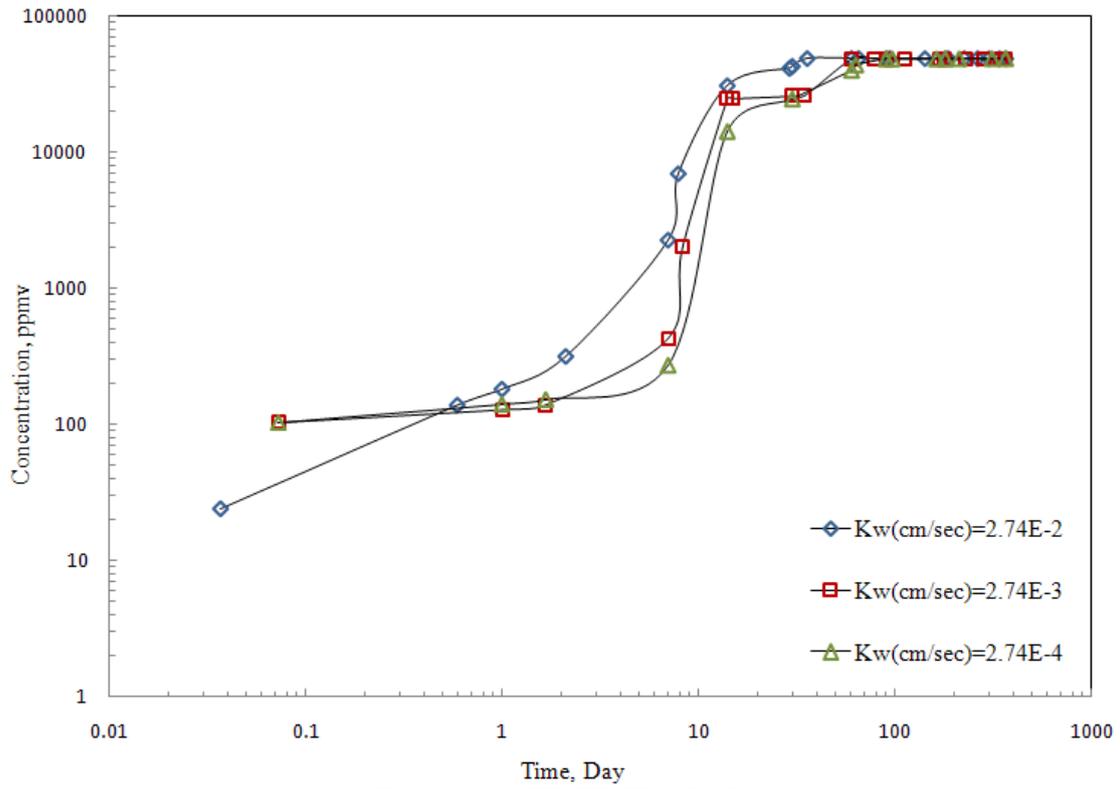


圖 4-2 (c) 於#3 測漏管之苯氣體濃度圖

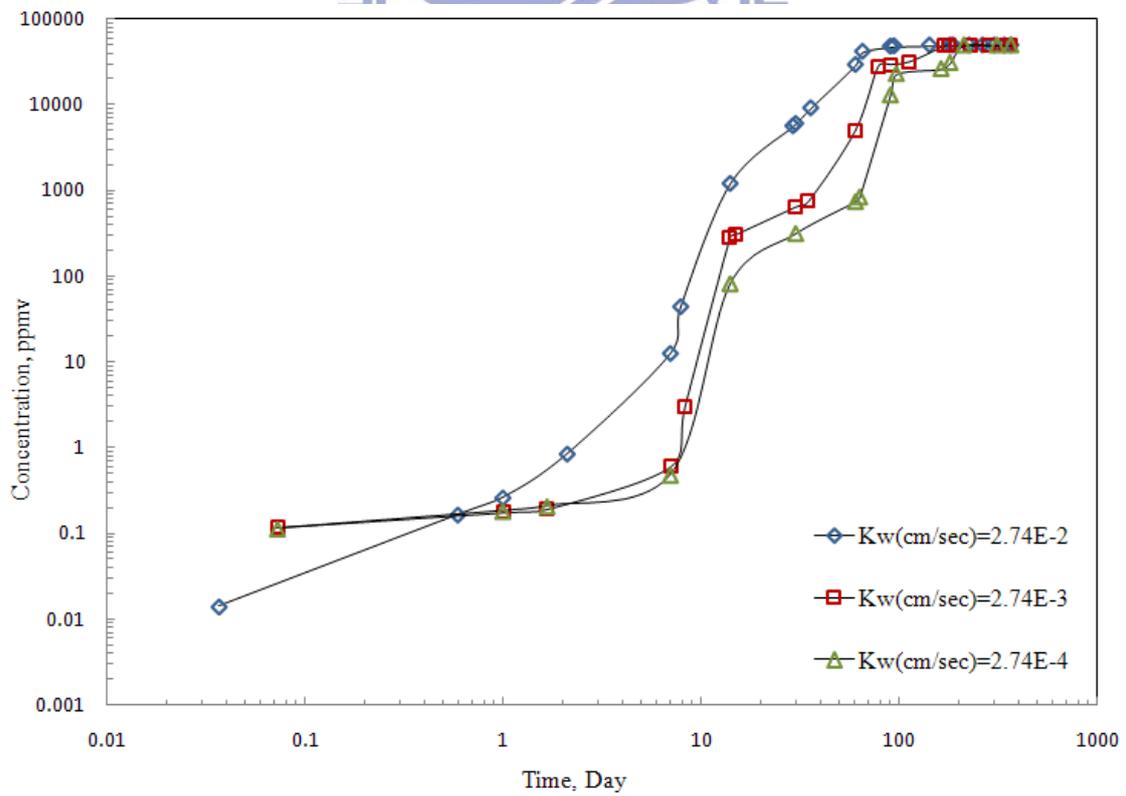


圖 4-2 (d) 於#4 測漏管之苯氣體濃度圖

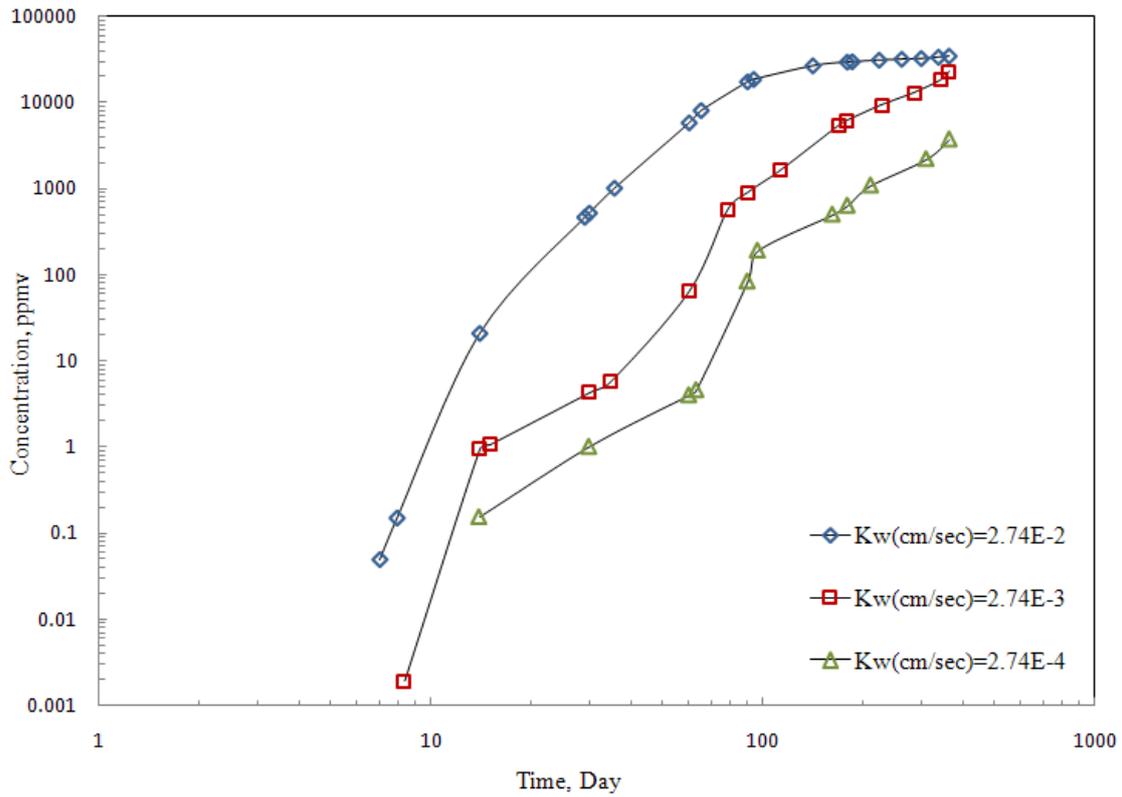


圖 4-2 (e) 於#5 測漏管之苯氣體濃度圖

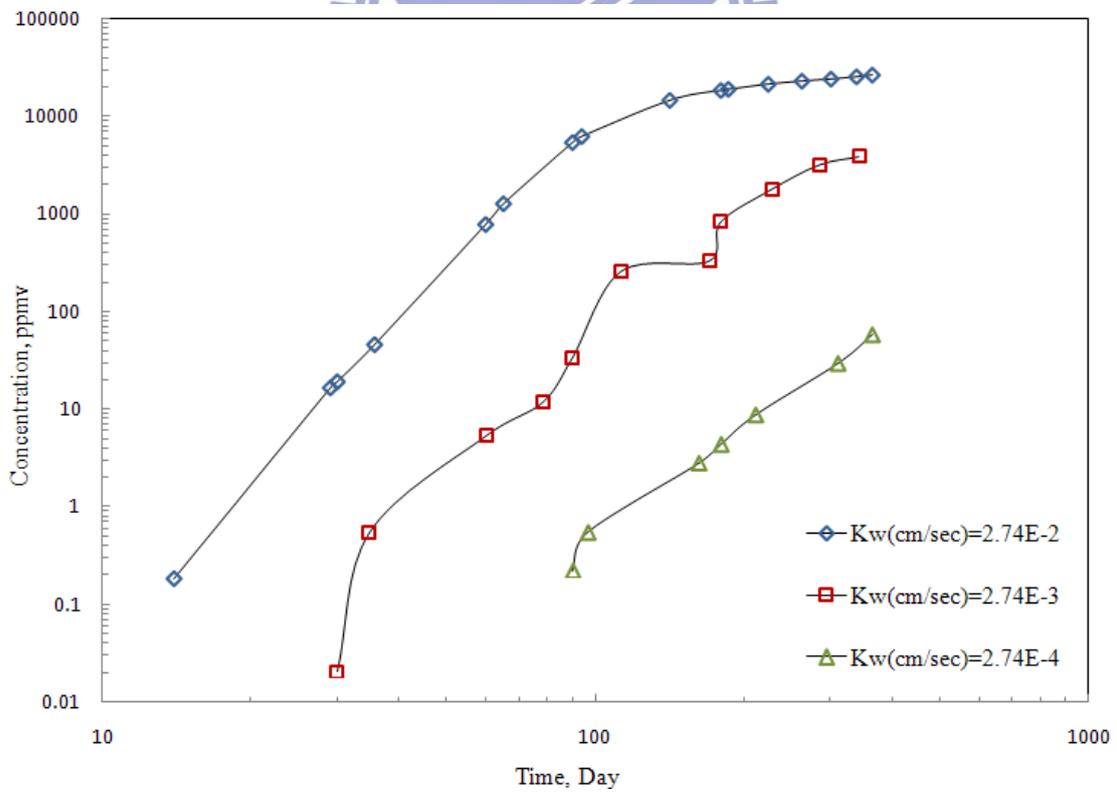


圖 4-2 (f) 於#6 測漏管之苯氣體濃度圖

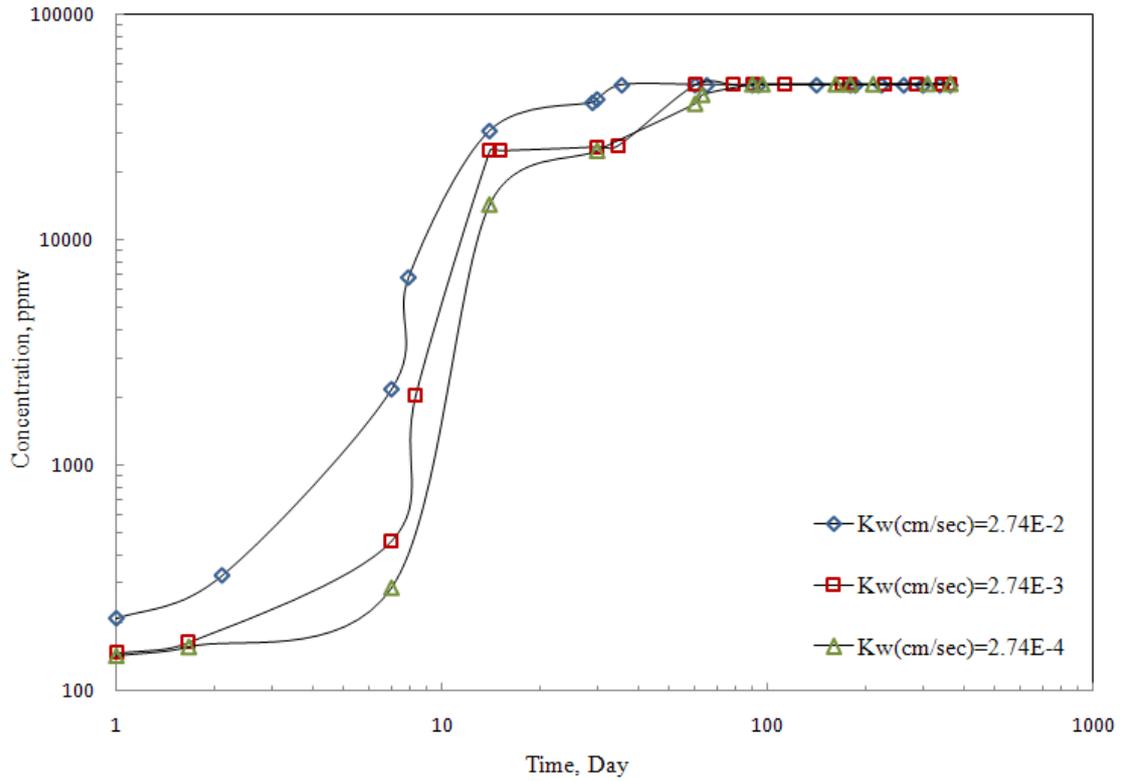


圖 4-2 (g) 於#7 測漏管之苯氣體濃度圖

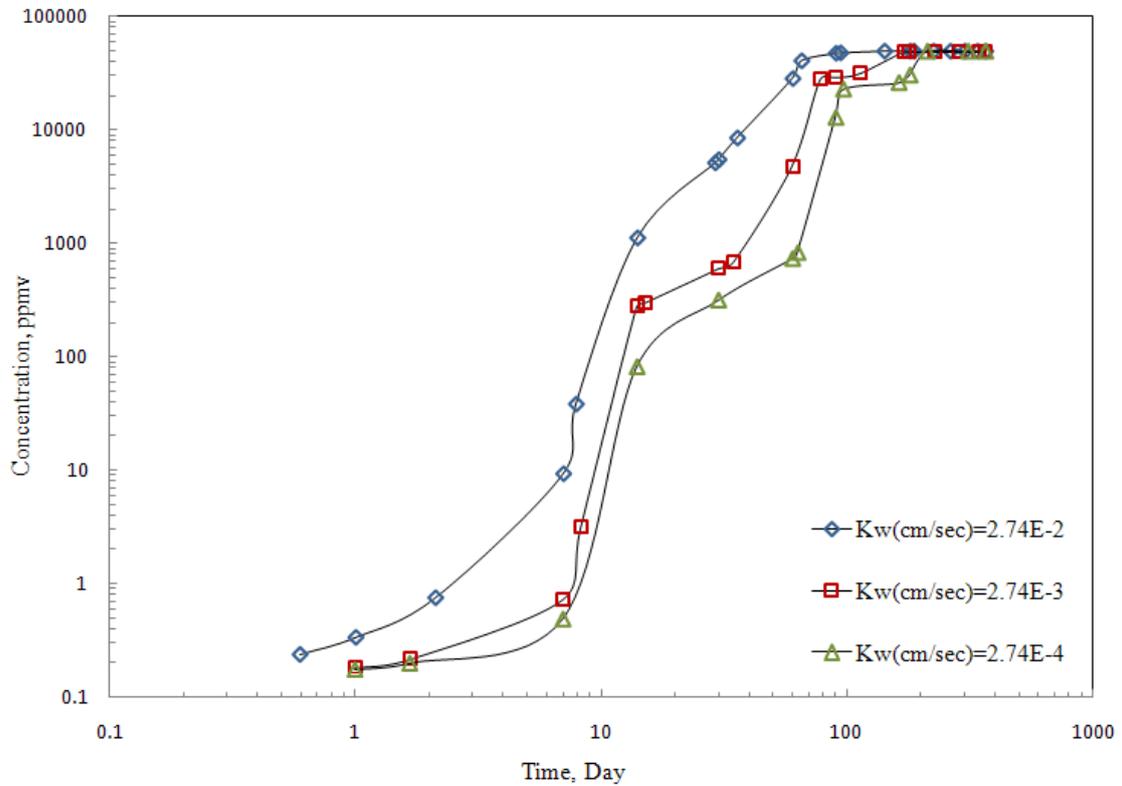


圖 4-2 (h) 於#8 測漏管之苯氣體濃度圖

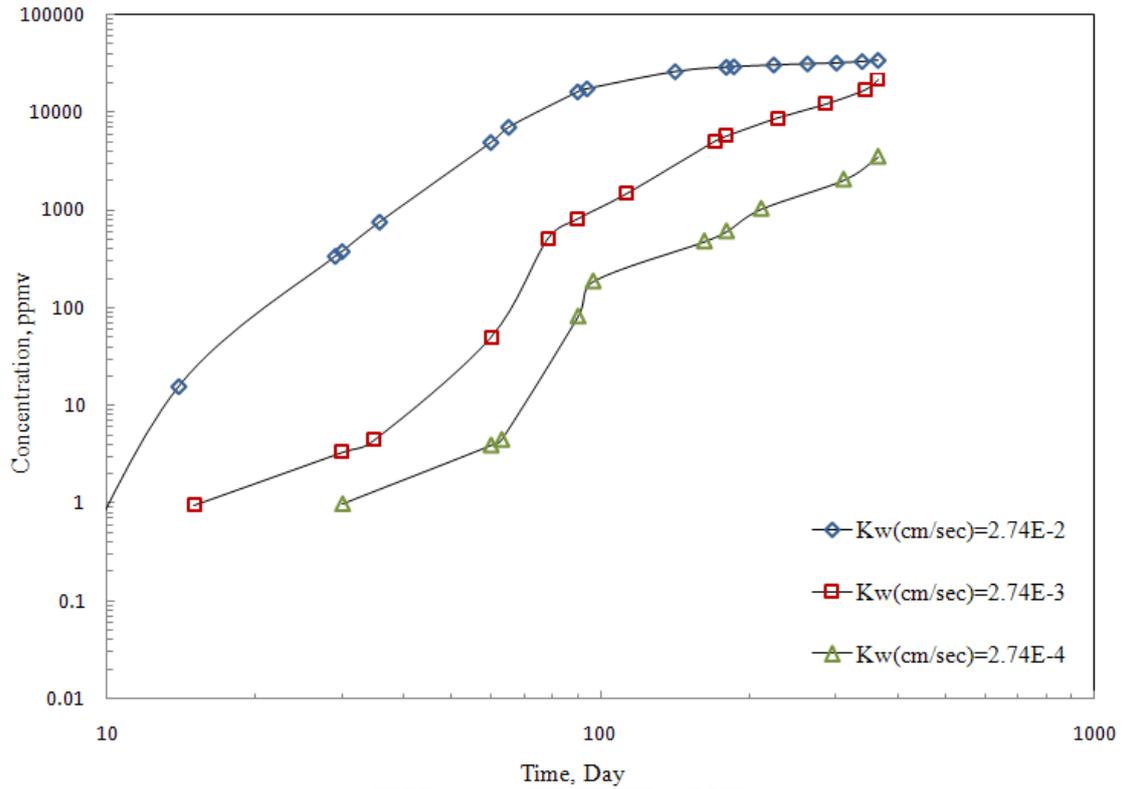


圖 4-2 (i) 於#9 測漏管之苯氣體濃度圖

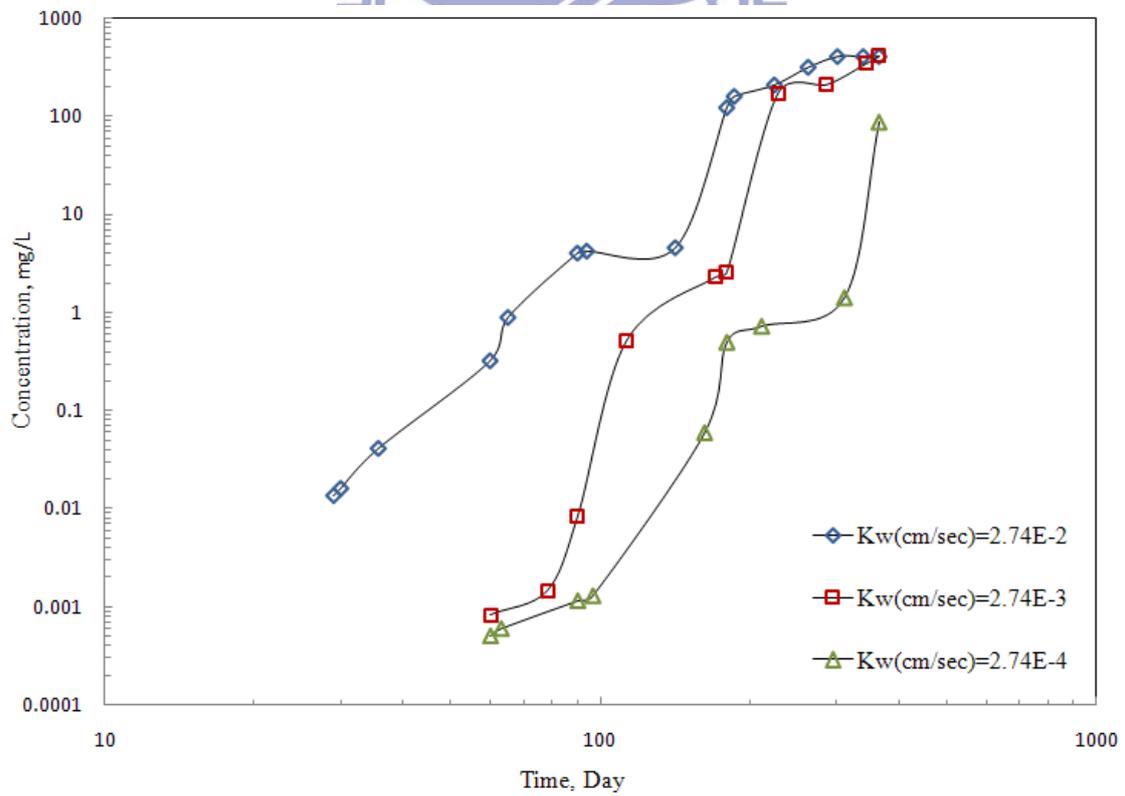


圖 4-2 (j) 於#1 測漏管之地下水體含苯濃度圖

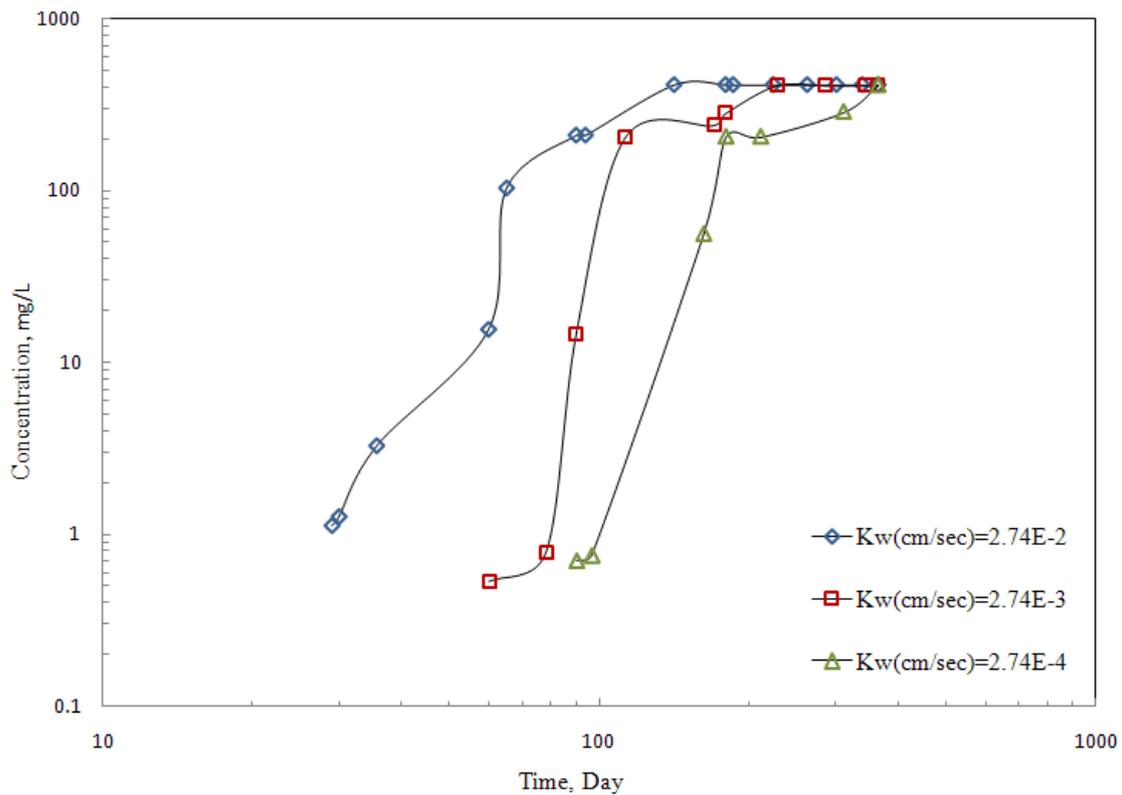


圖 4-2 (k) 於#2 測漏管之地下水體含苯濃度圖

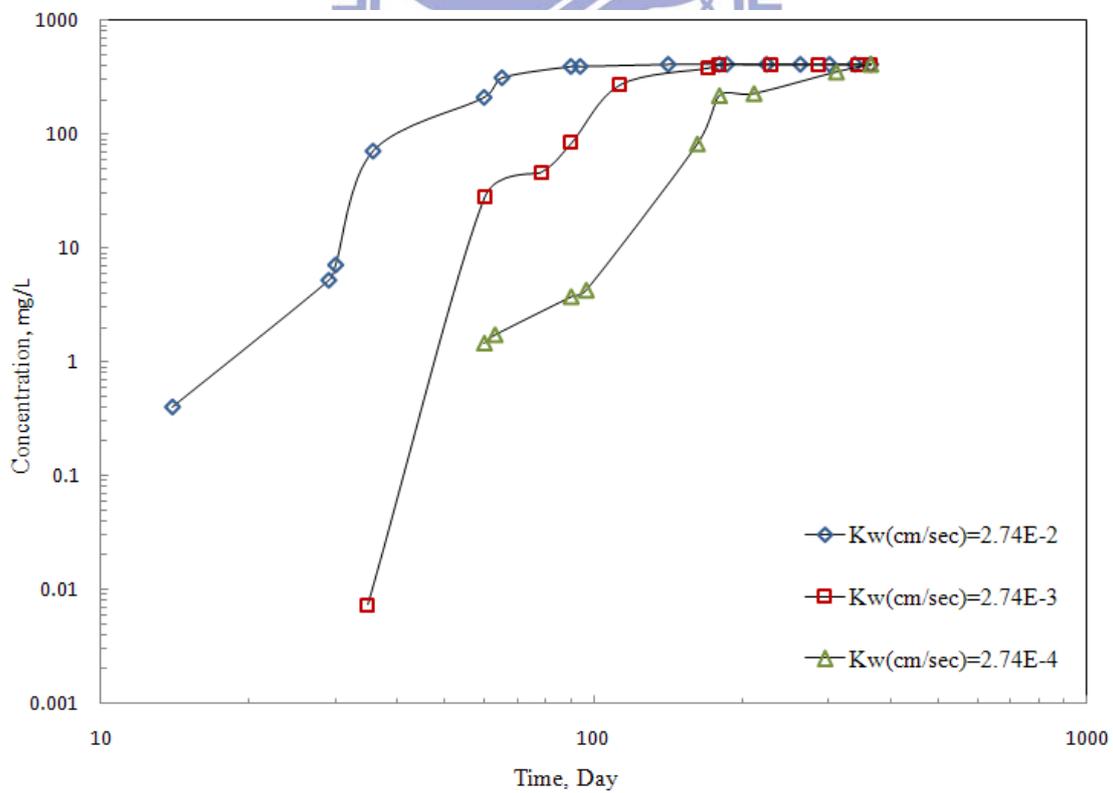


圖 4-2 (l) 於#3 測漏管之地下水體含苯濃度圖

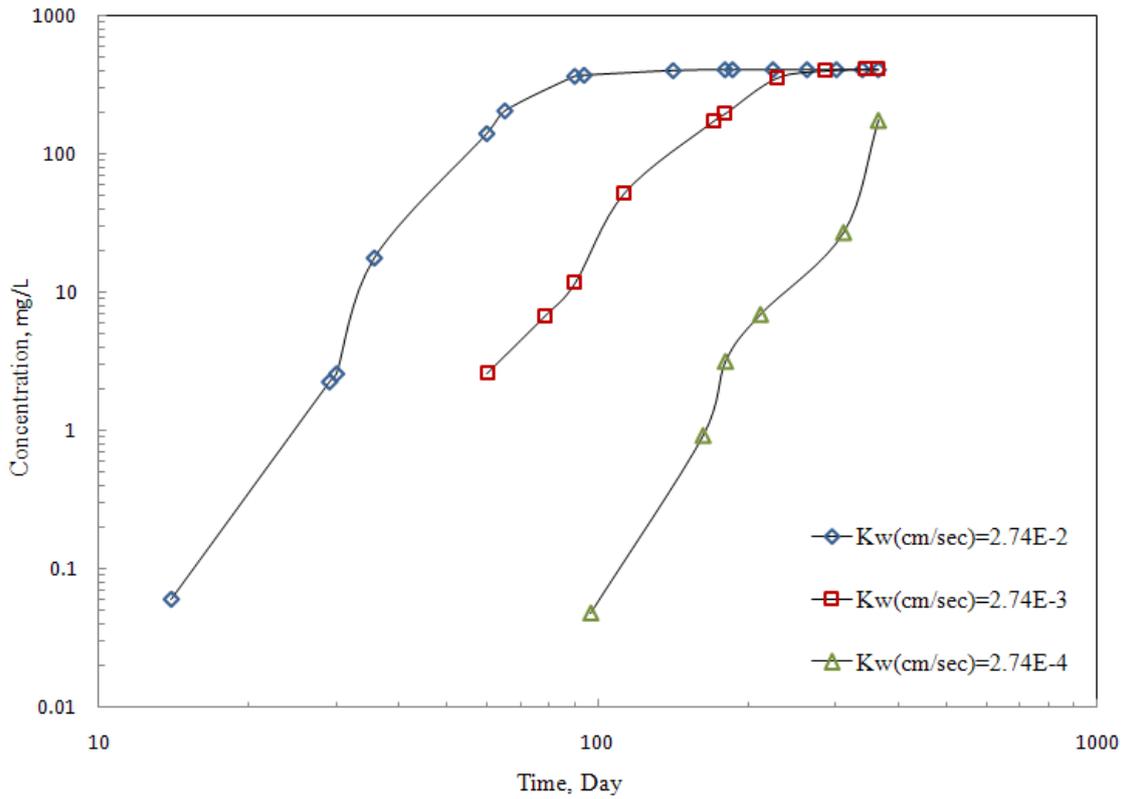


圖 4-2 (m) 於#4 測漏管之地下水體含苯濃度圖

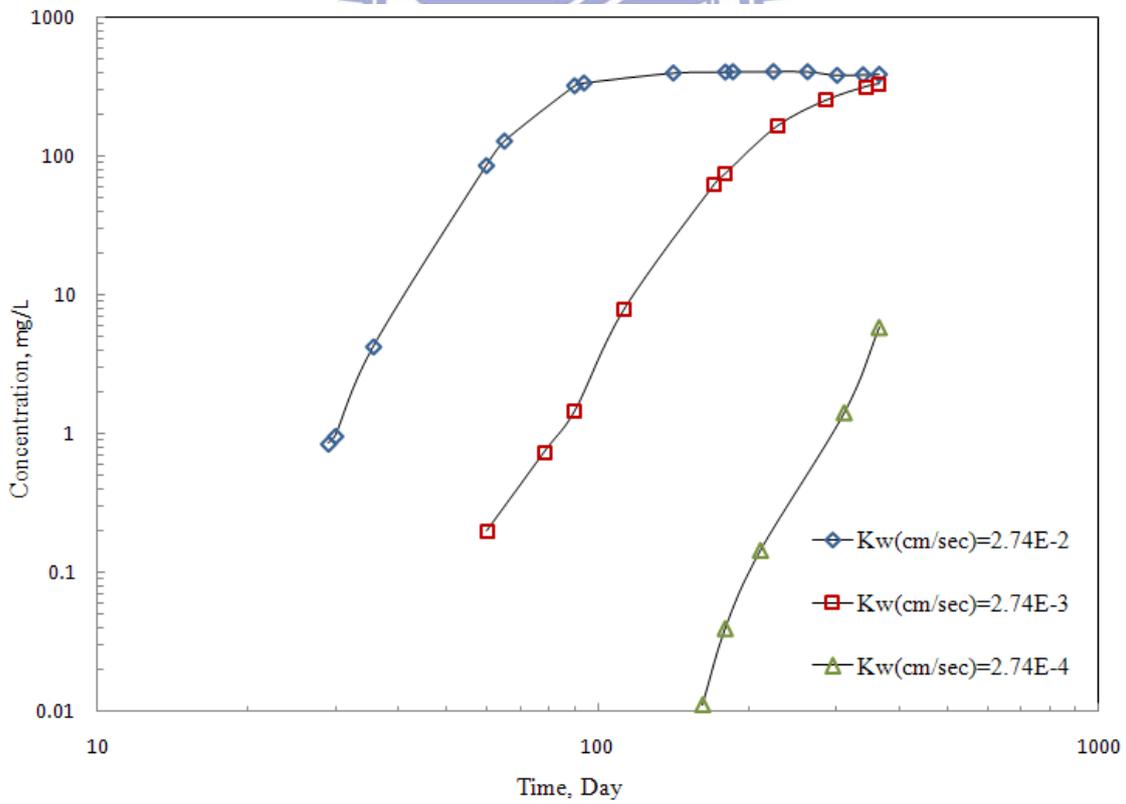


圖 4-2 (n) 於#5 測漏管之地下水體含苯濃度圖

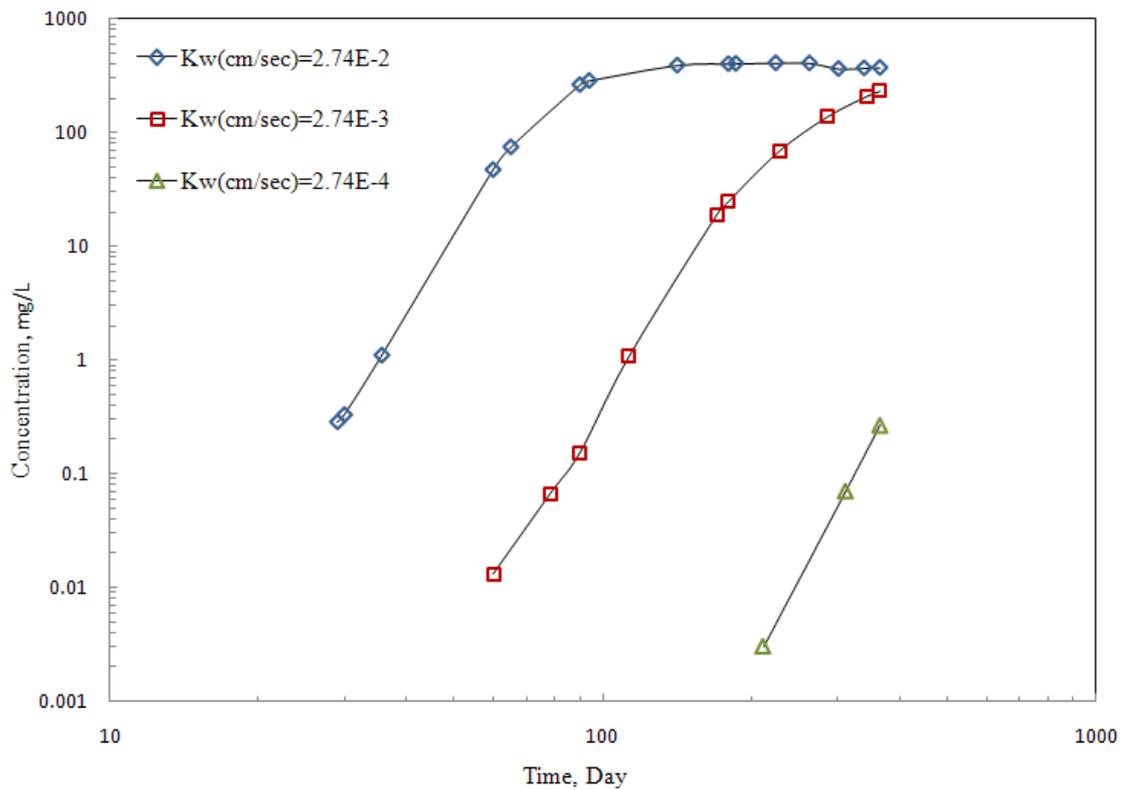


圖 4-2 (o) 於#6 測漏管之地下水體含苯濃度圖

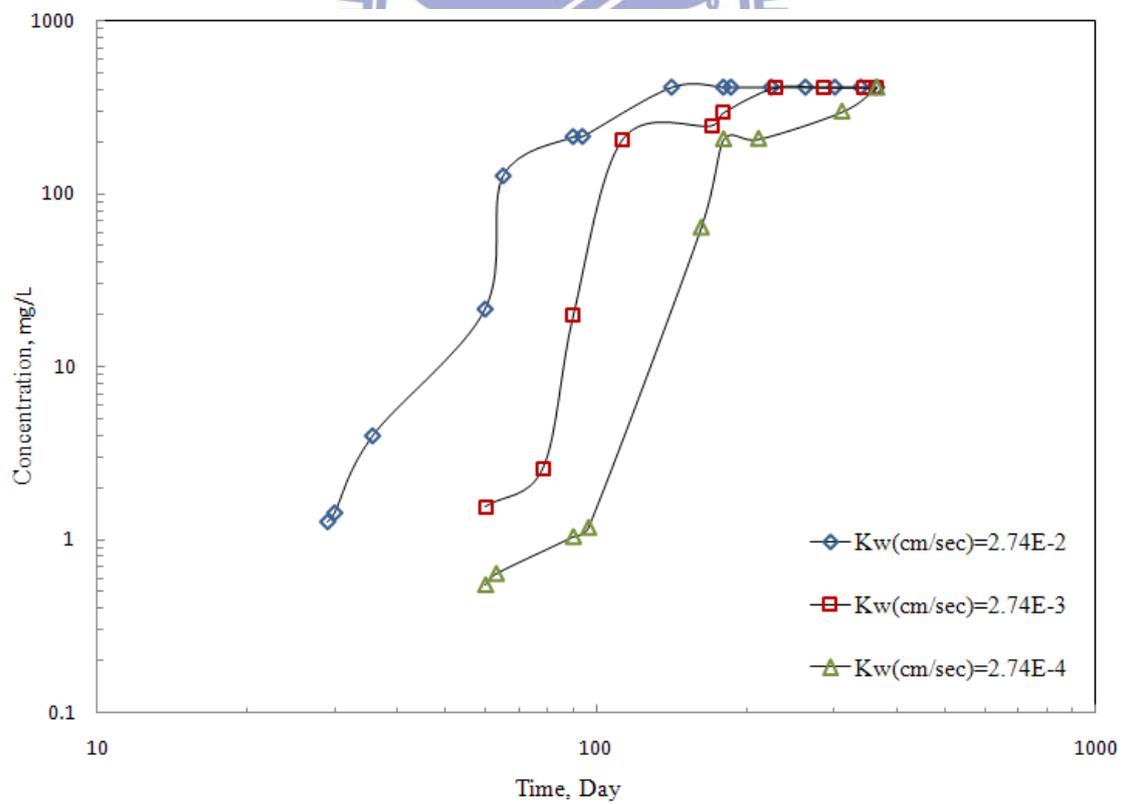


圖 4-2 (p) 於#7 測漏管之地下水體含苯濃度圖

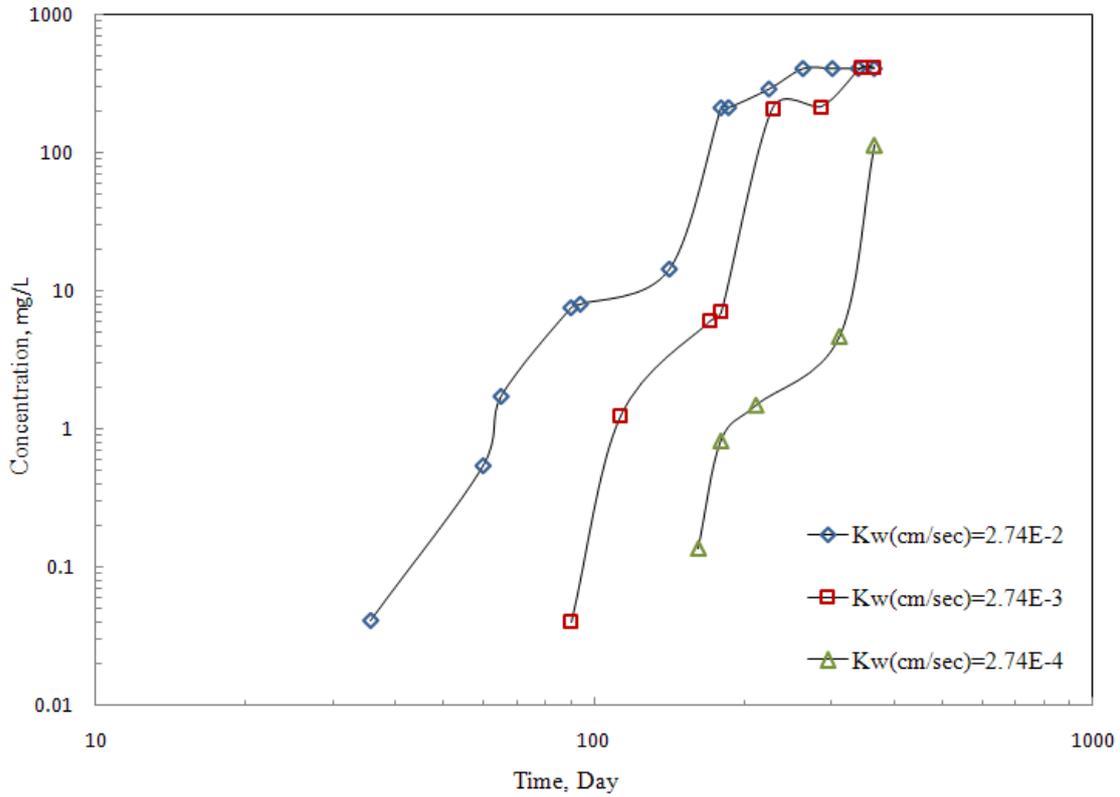


圖 4-2 (q) 於#8 測漏管之地下水體含苯濃度圖

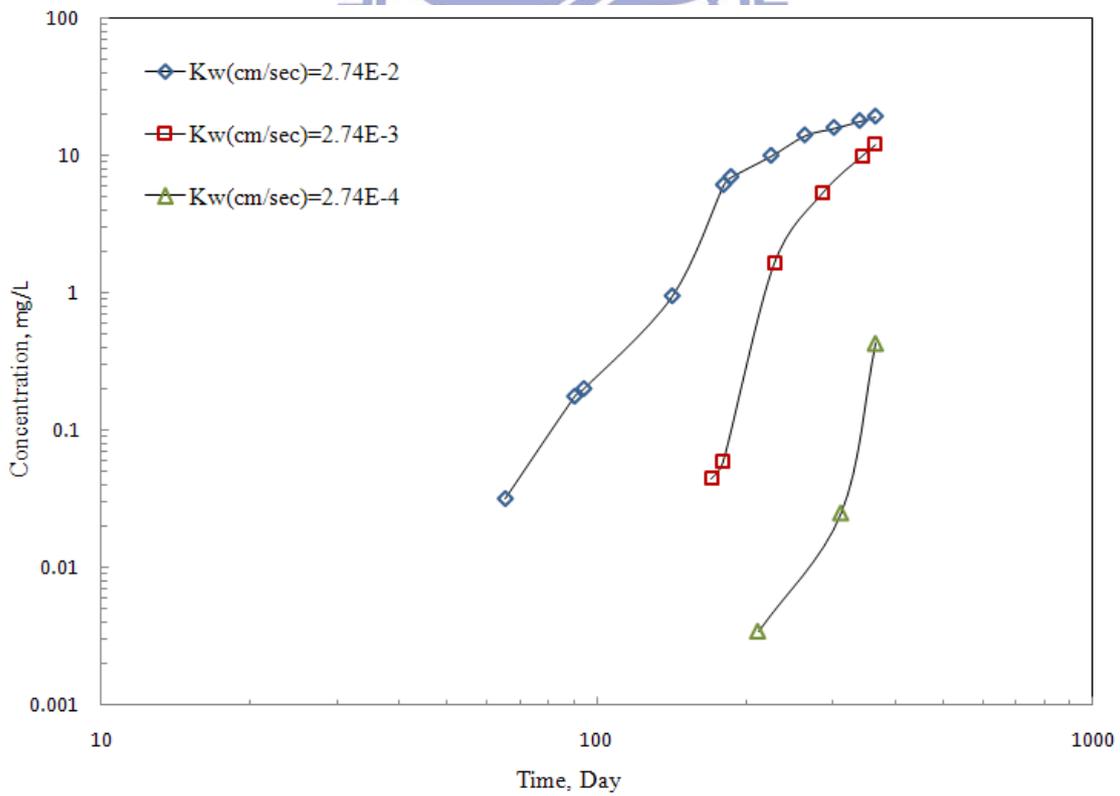


圖 4-2 (r) 於#9 測漏管之地下水體含苯濃度圖

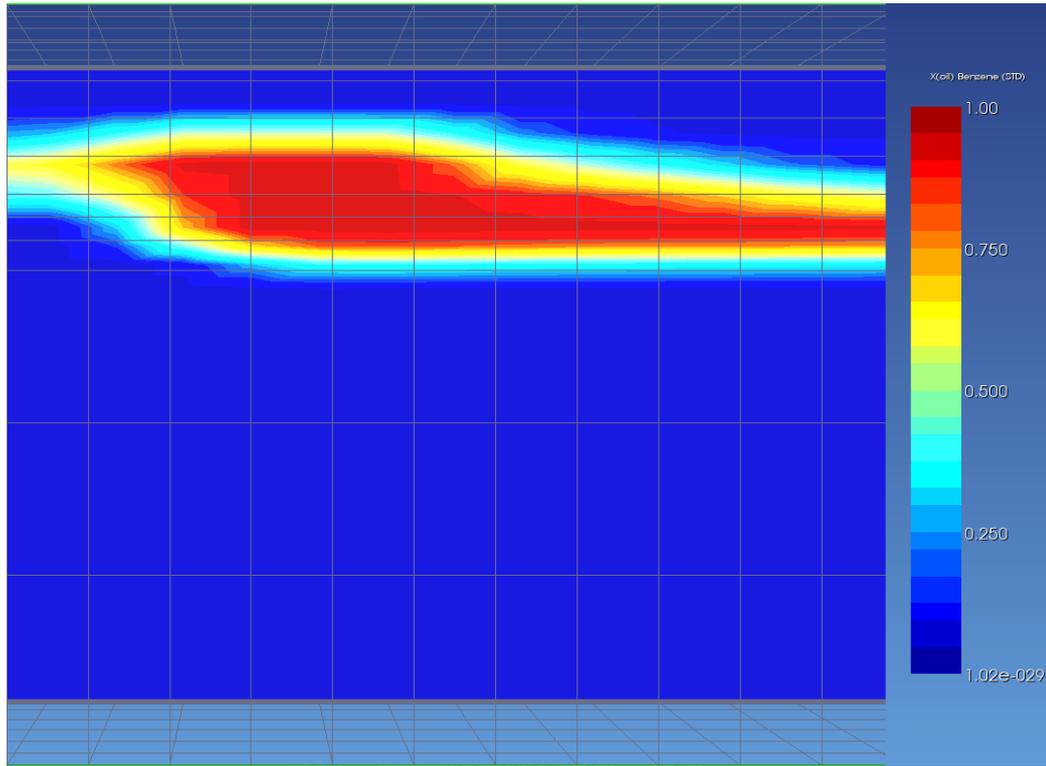


圖 4-3(a) 透水係數為  $2.74 \times 10^{-2}$  cm/sec 之油相污染團分佈狀況

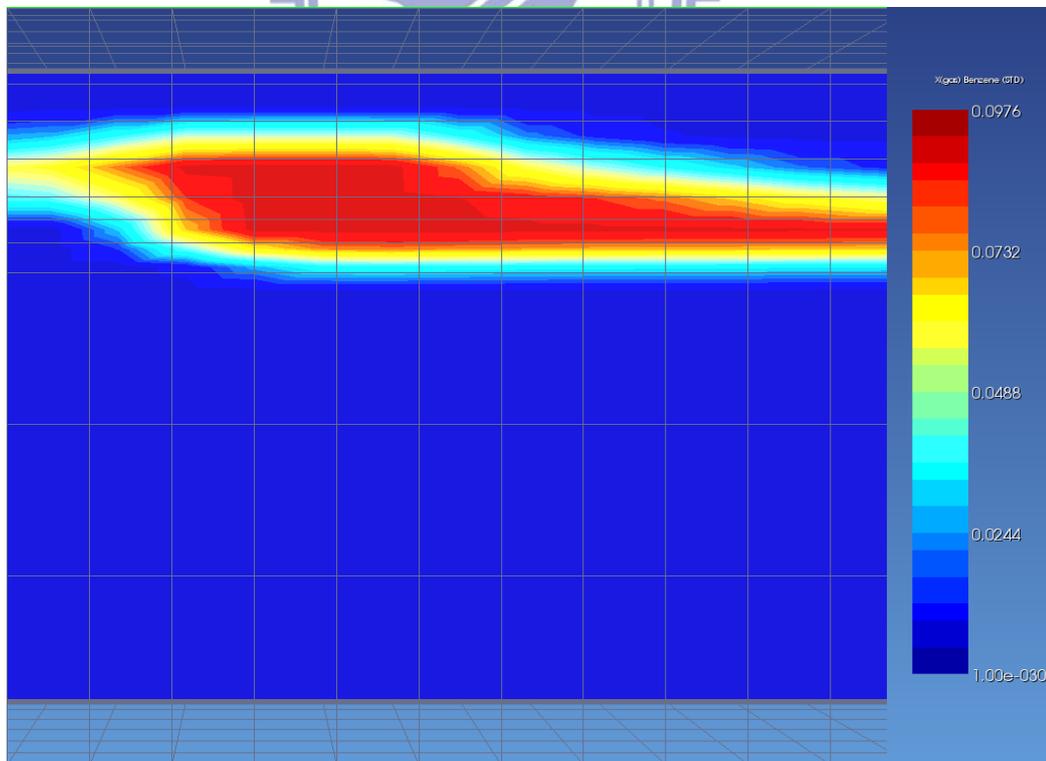


圖 4-3(b) 透水係數為  $2.74 \times 10^{-2}$  cm/sec 之氣相污染團分佈狀況

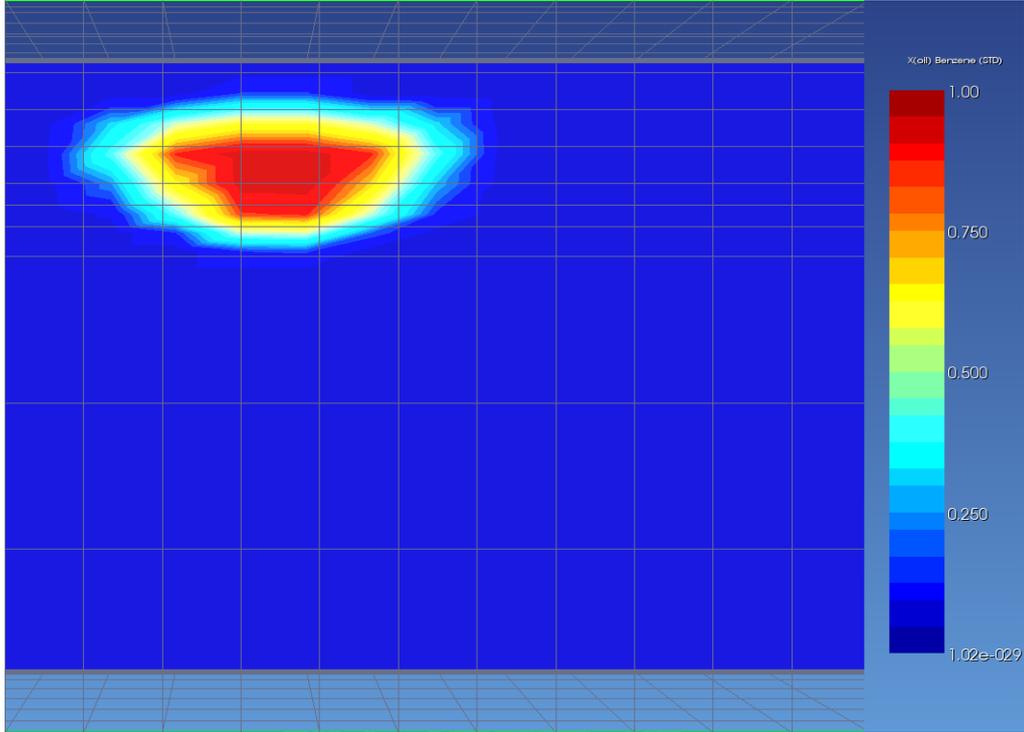


圖 4-4(a) 透水係數為  $2.74 \times 10^{-4}$  cm/sec 之油相污染團分佈狀況

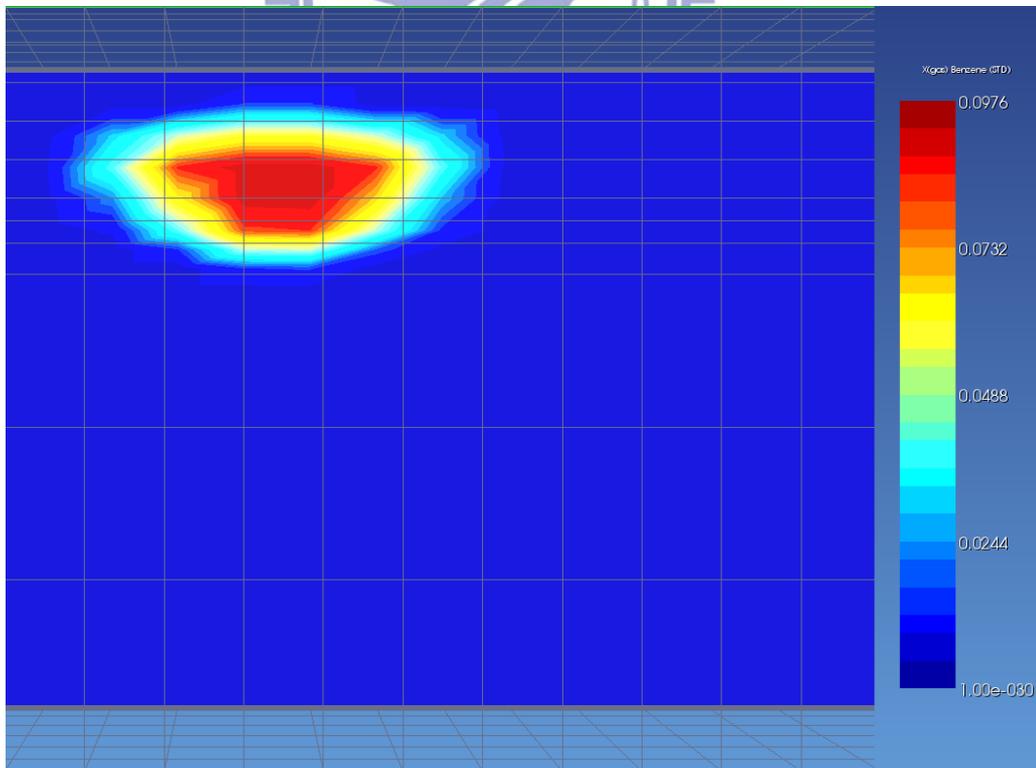


圖 4-4(b) 透水係數為  $2.74 \times 10^{-4}$  cm/sec 之氣相污染團分佈狀況

### 4.3 土壤孔隙率敏感度分析

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與洩漏點距離之比較結果如圖 4-5(a)~(i)。由孔隙率敏感度分析結果可知，監測井距離洩漏點較近者(1 m 內)圖 4-5 (c)其污染團受孔隙率之影響不如距離較遠者明顯(4 m)圖 4-5 (f)，其原因是因當污染團於揮發後其污染氣團會逐漸以圓柱狀往上形成而若監測井距離洩漏點較近則監測井皆位於污染氣團範圍內，因此於此範圍內之監測井其氣體濃度值皆相近。而孔隙率較小者其被污染團飽和之時間較短，由圖 4-5 (d)可看出孔隙率為 0.2、0.3、0.4，分別被污染團飽和之時間為 90、110、120 天。當土壤孔隙受污染團飽和後則氣體濃度值皆會趨於定值。

於圖 4-5 (c)中可發現於 10 天時出現濃度值突然上升之情形，是因為當污染團傳輸至地下水水位面後逐漸形成一個浮動油餅往下游傳輸，而於#3 圖 4-5 (c)中第 10 天之時間點上因浮動油餅之濃度尖峰值將要到達，使得濃度值快速上升。

另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，可由圖 4-5 (e)與圖 4-5 (f)看出。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，由測漏管#5 [圖 4-5 (f)]可發現，在土壤孔隙率為 0.2 情況下，土壤氣體濃度達 100 ppmV 所需之時間約為 39 天；而在孔隙率為 0.4 之情況下則增加至 79 天，兩者相差約 2.1 倍。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。

表 4-2 土壤孔隙率與傳輸速率關係

土壤孔隙率	氣體濃度值(ppmv)		
	1	10	100
0.2	10	28	39
0.3	17	39	61
0.4	23	45	79

另外於洩漏點上游處監測井#1 與#2 [圖 4-5 (j)-(k)] 與洩漏點右側之監測井#7~#9 [圖 4-5 (p)-(r)] 中可發現其之地下水體含苯濃度之初始差異較大而隨著時間之增加而逐漸縮小差異，其原因可能是當污染物傳輸至地下水水位面後隨即受到地下水流影響而往下游傳輸，且因飽和土壤之孔隙水逐漸被溶解相之苯所取代而逐漸達飽和狀態因而差異逐漸縮小。

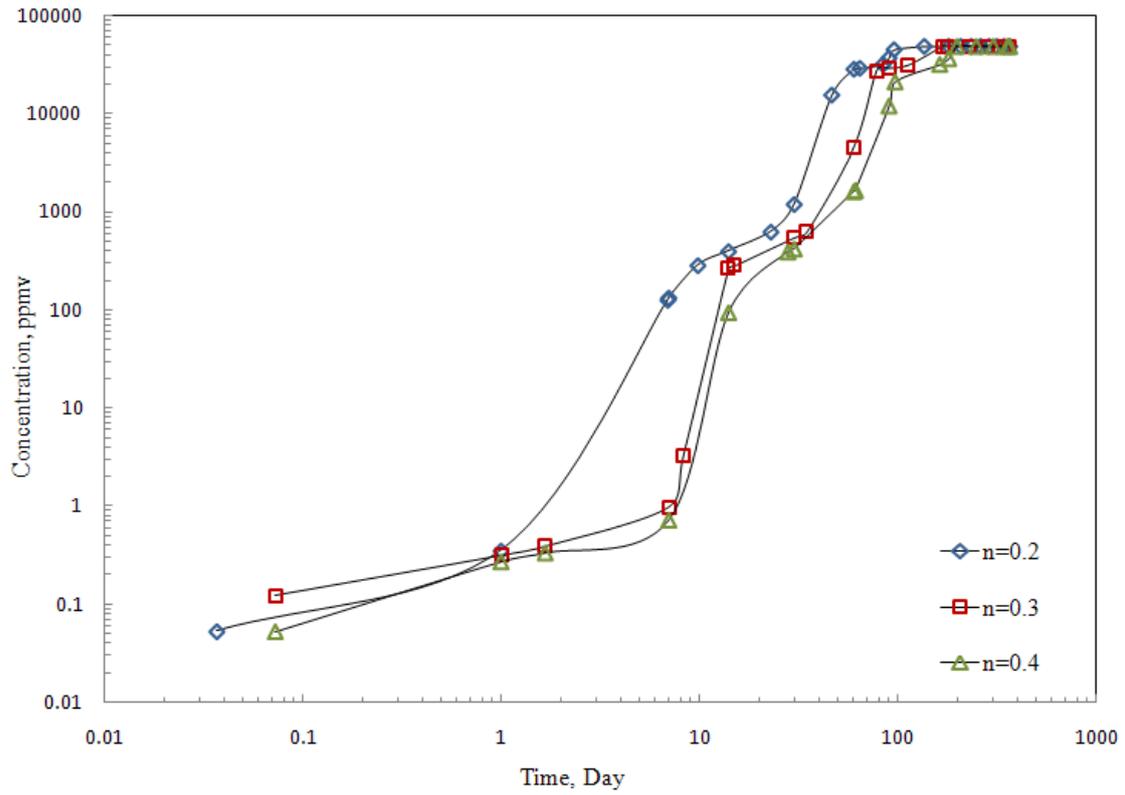


圖 4-5 (a)於#1 測漏管之苯氣體濃度圖

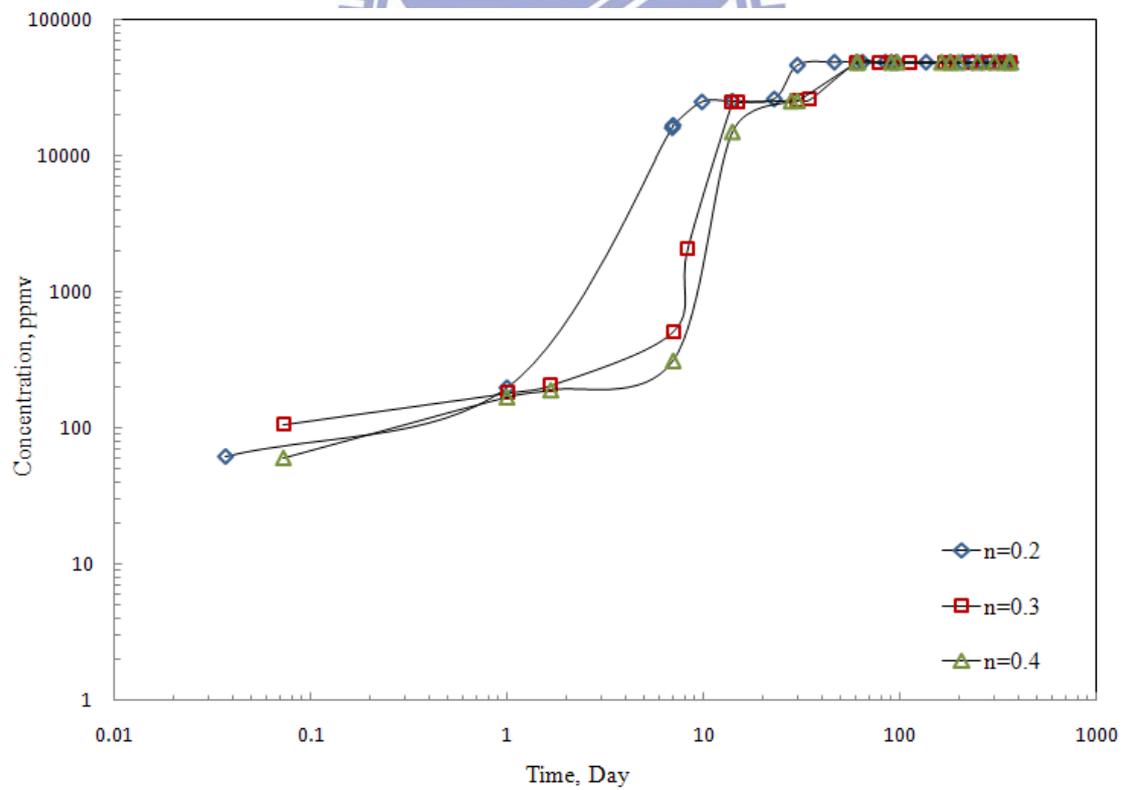


圖 4-5 (b)於#2 測漏管之苯氣體濃度圖

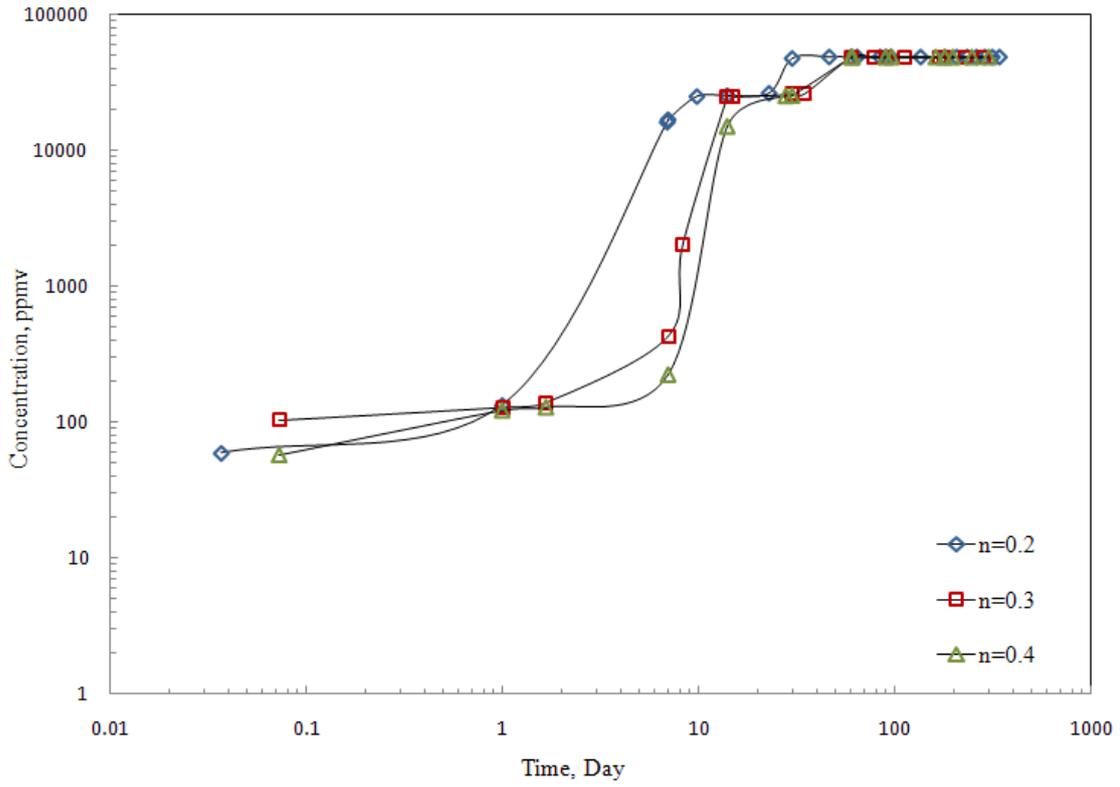


圖 4-5 (c)於#3 測漏管之苯氣體濃度圖

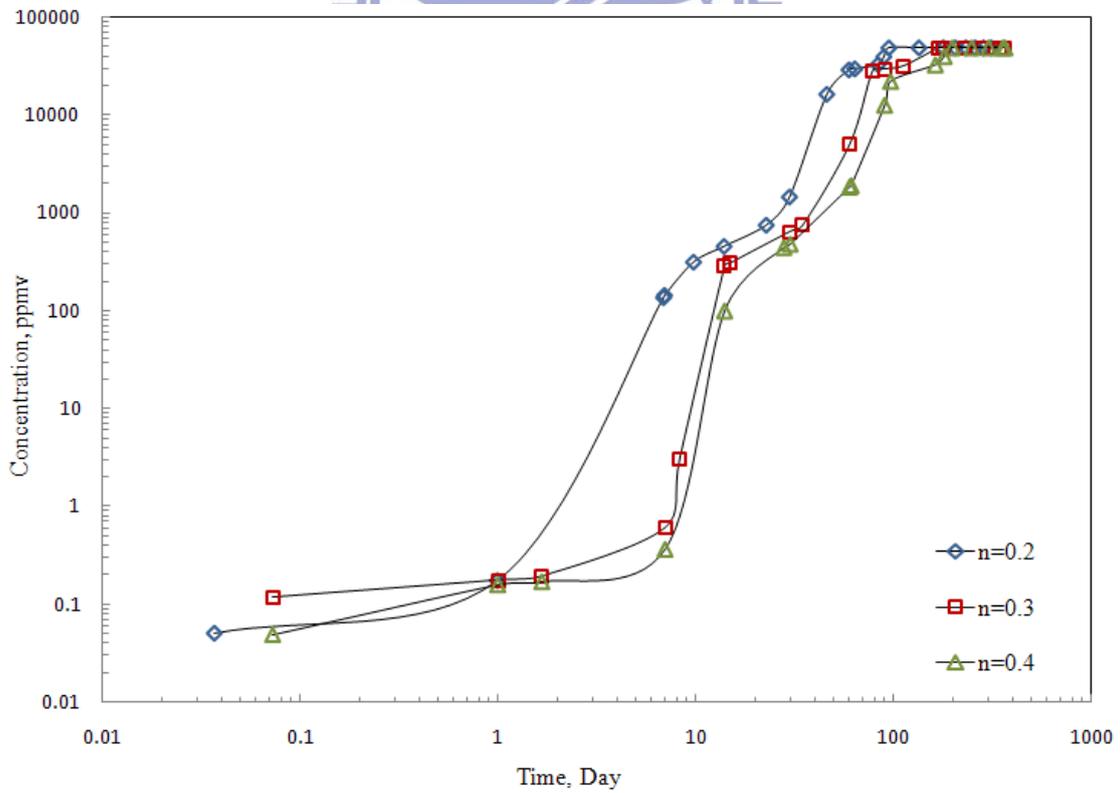


圖 4-5 (d)於#4 測漏管之苯氣體濃度圖

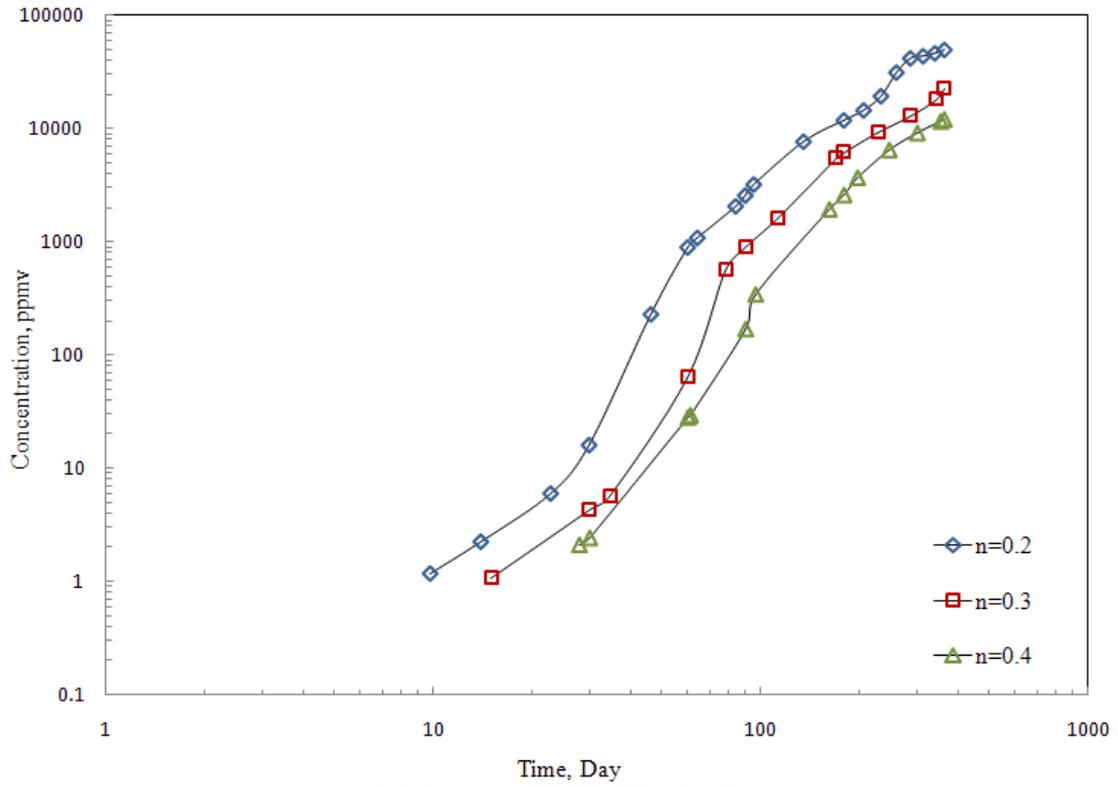


圖 4-5 (e)於#5 測漏管之苯氣體濃度圖

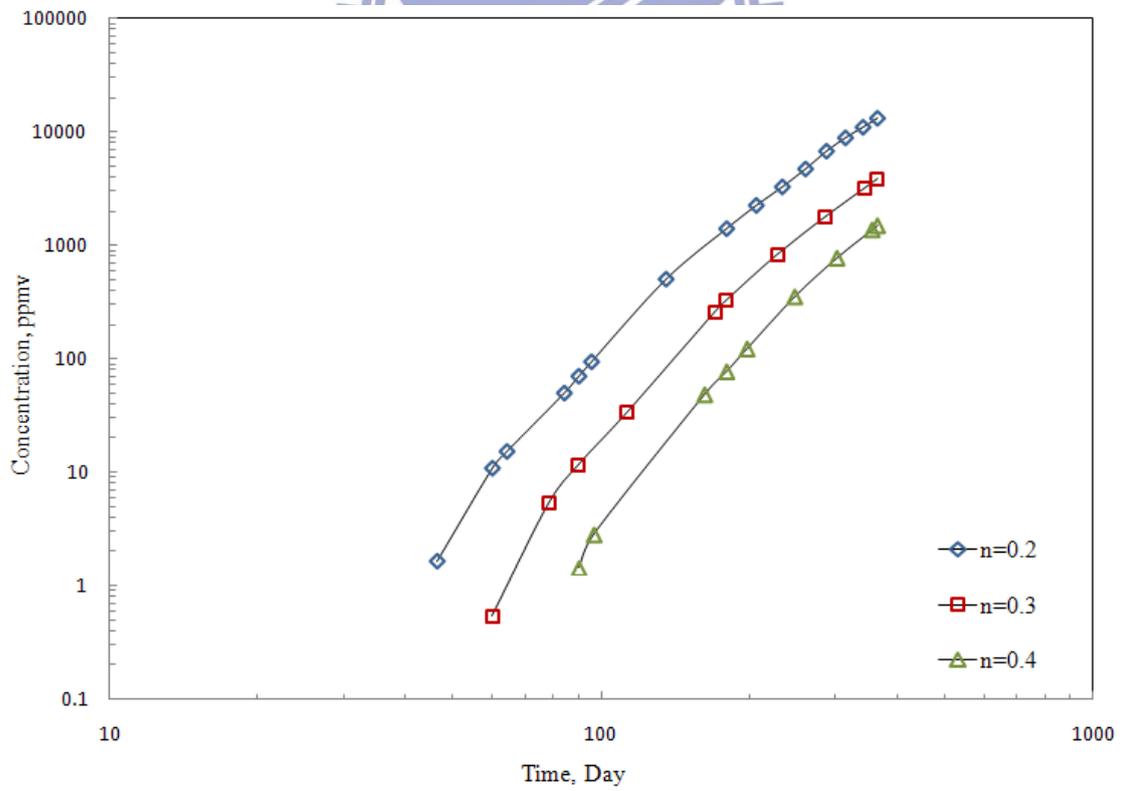


圖 4-5 (f)於#6 測漏管之苯氣體濃度圖

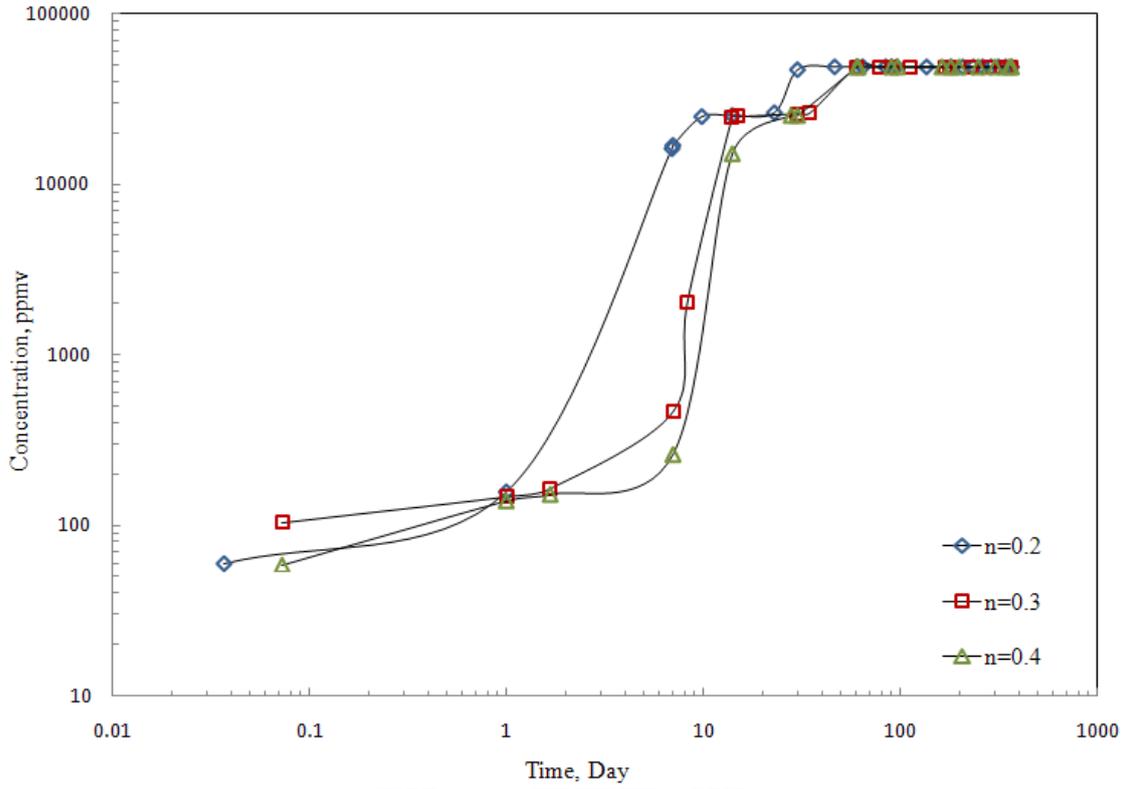


圖 4-5 (g) 於#7 測漏管之苯氣體濃度圖

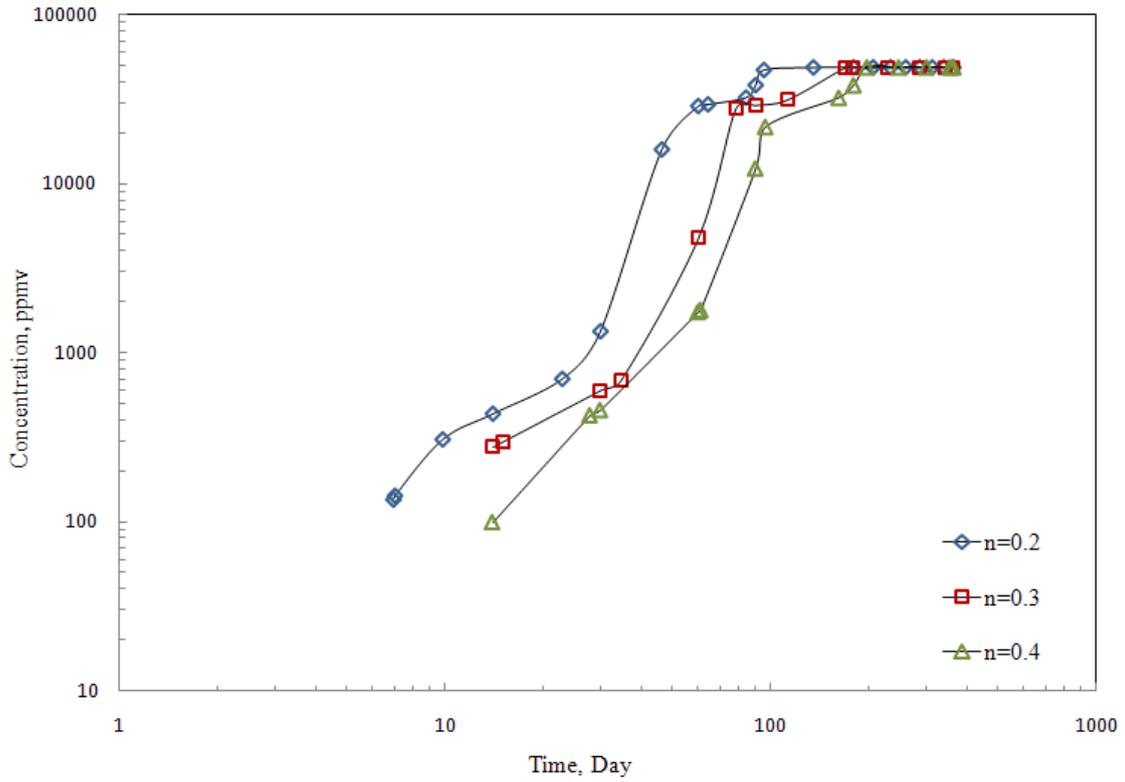


圖 4-5 (h) 於#8 測漏管之苯氣體濃度圖

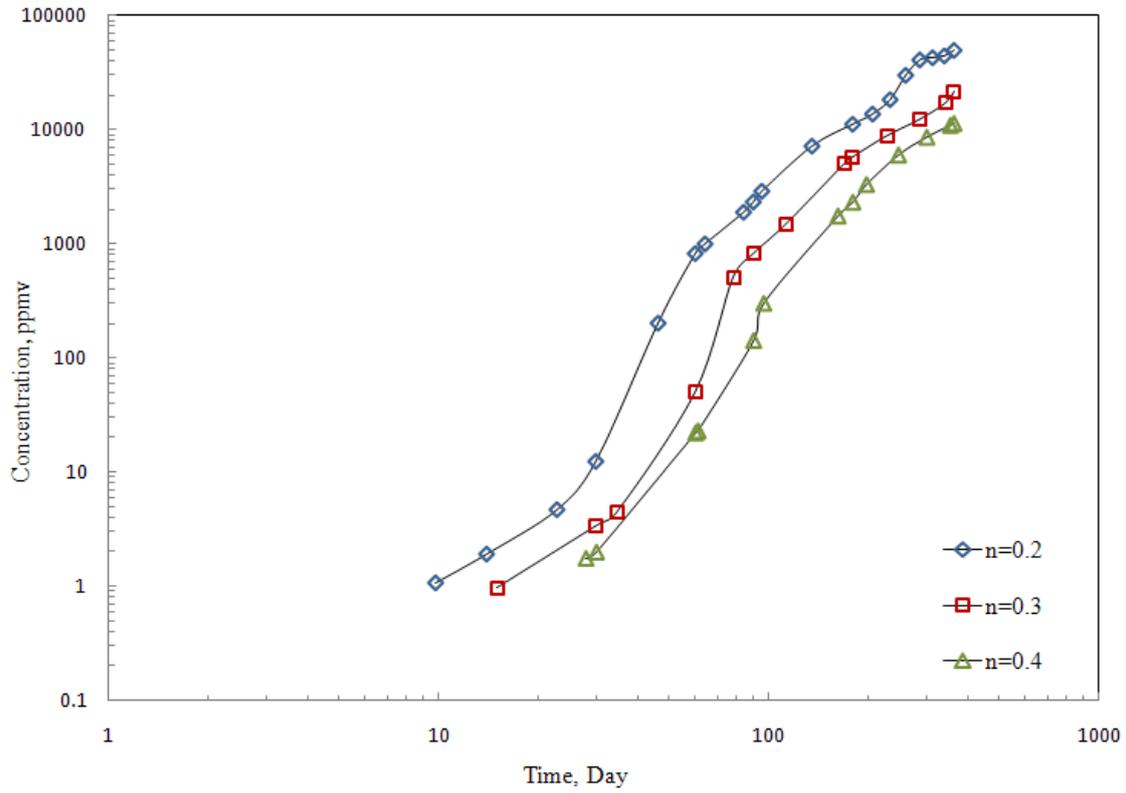


圖 4-5 (i) 於#9 測漏管之苯氣體濃度圖

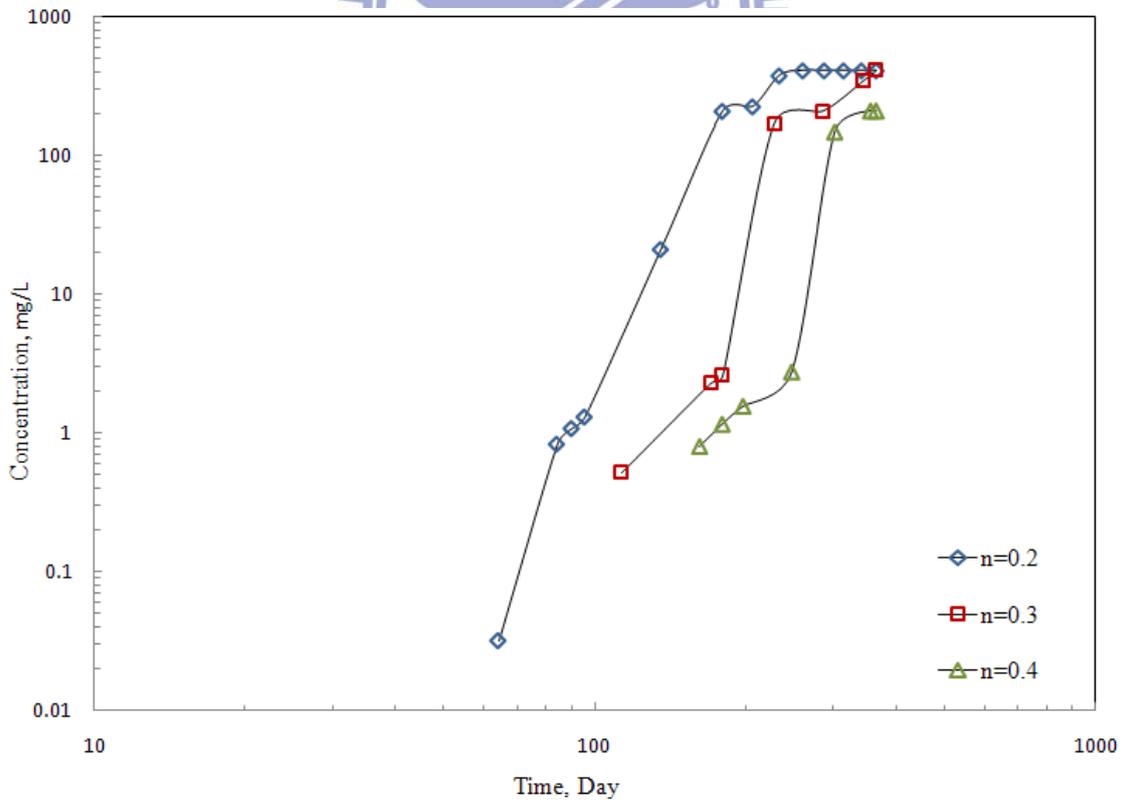


圖 4-5 (j) 於#1 測漏管之地下水體含苯濃度圖

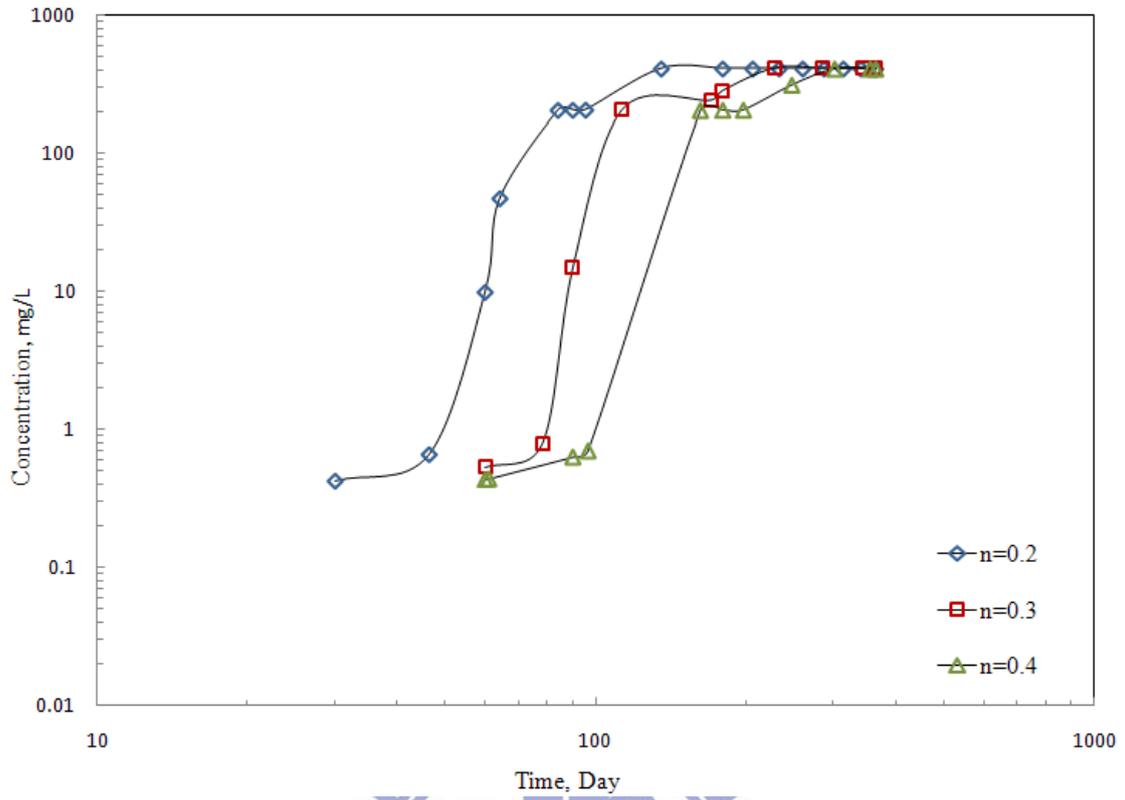


圖 4-5 (k) 於#2 測漏管之地下水體含苯濃度圖

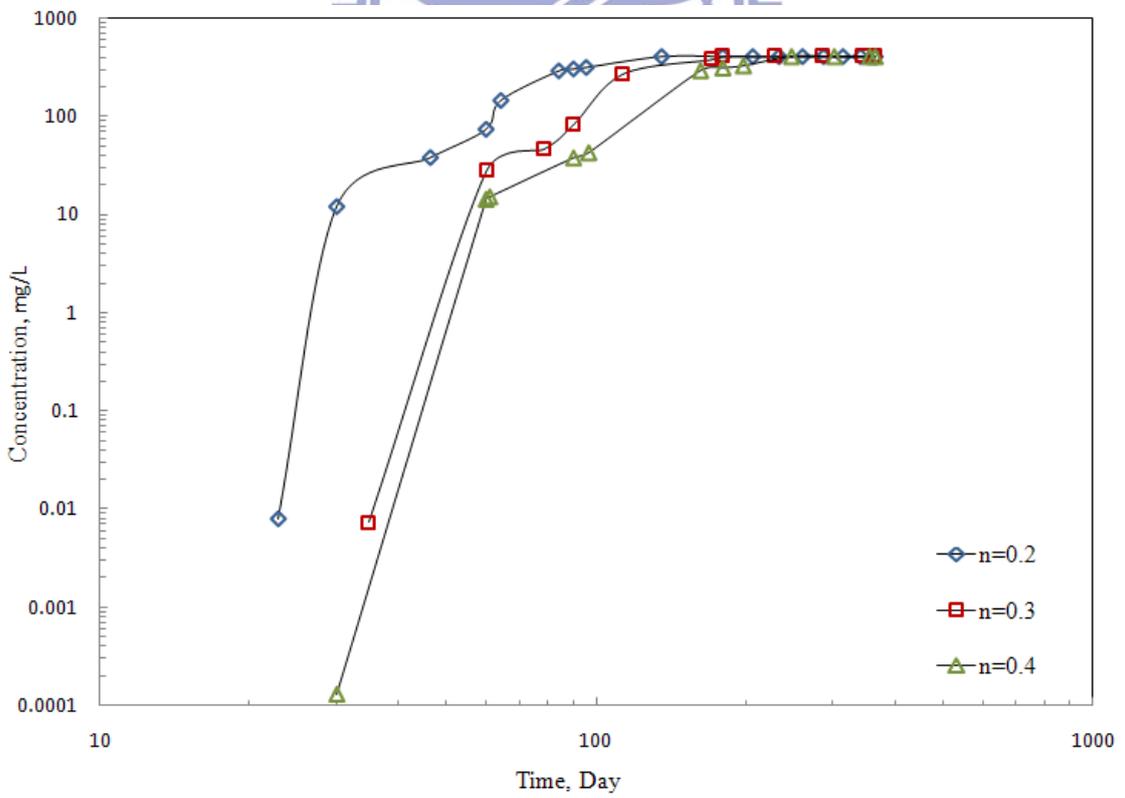


圖 4-5 (l) 於#3 測漏管之地下水體含苯濃度圖

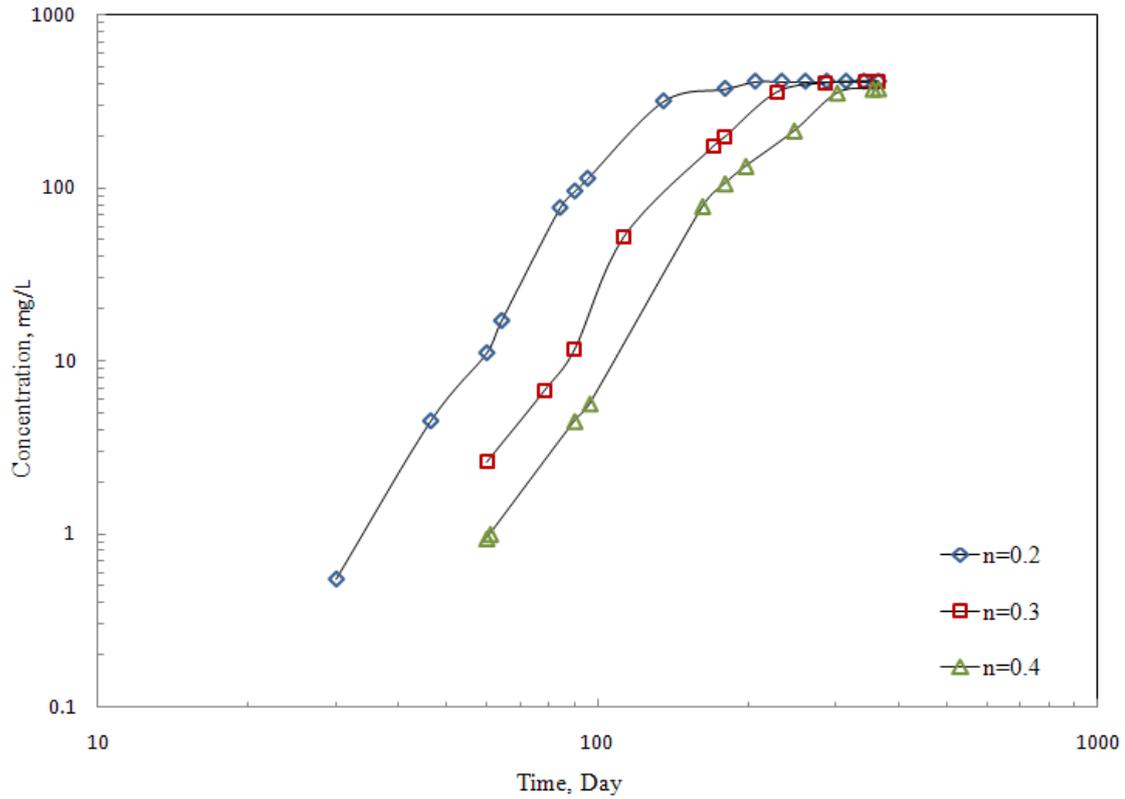


圖 4-5 (m) 於#4 測漏管之地下水體含苯濃度圖

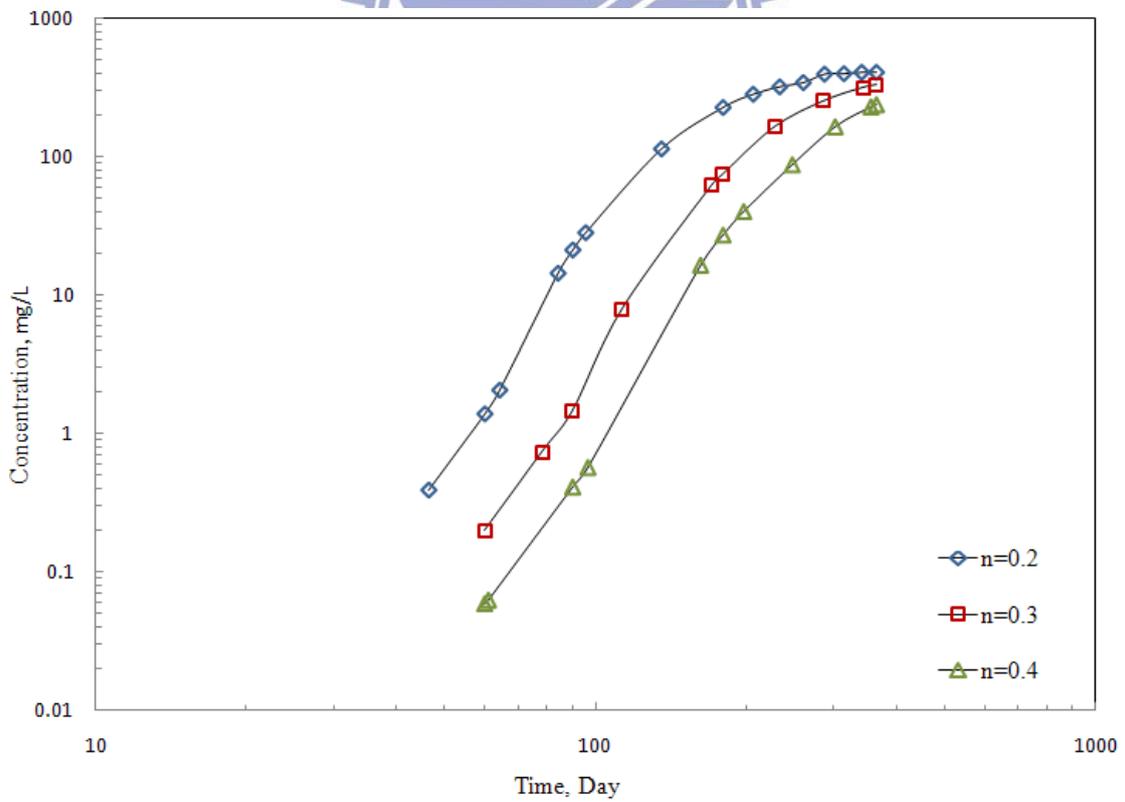


圖 4-5 (n) 於#5 測漏管之地下水體含苯濃度圖

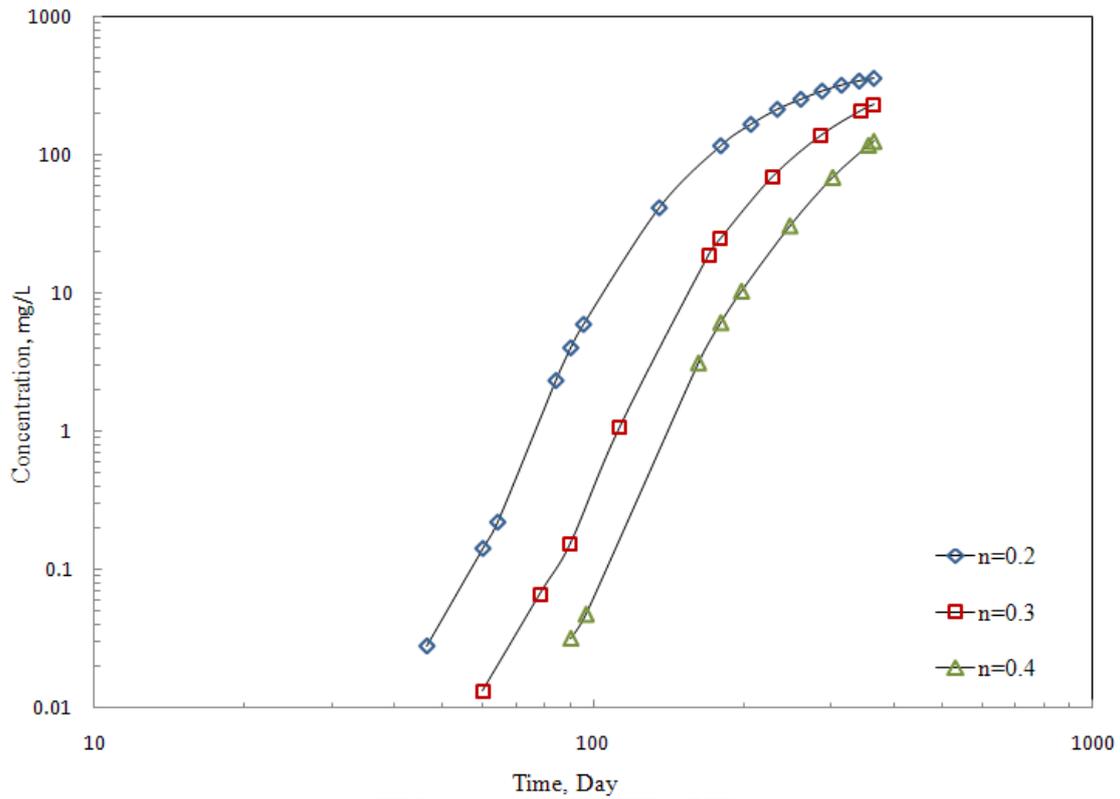


圖 4-5 (o) 於#6 測漏管之地下水體含苯濃度圖

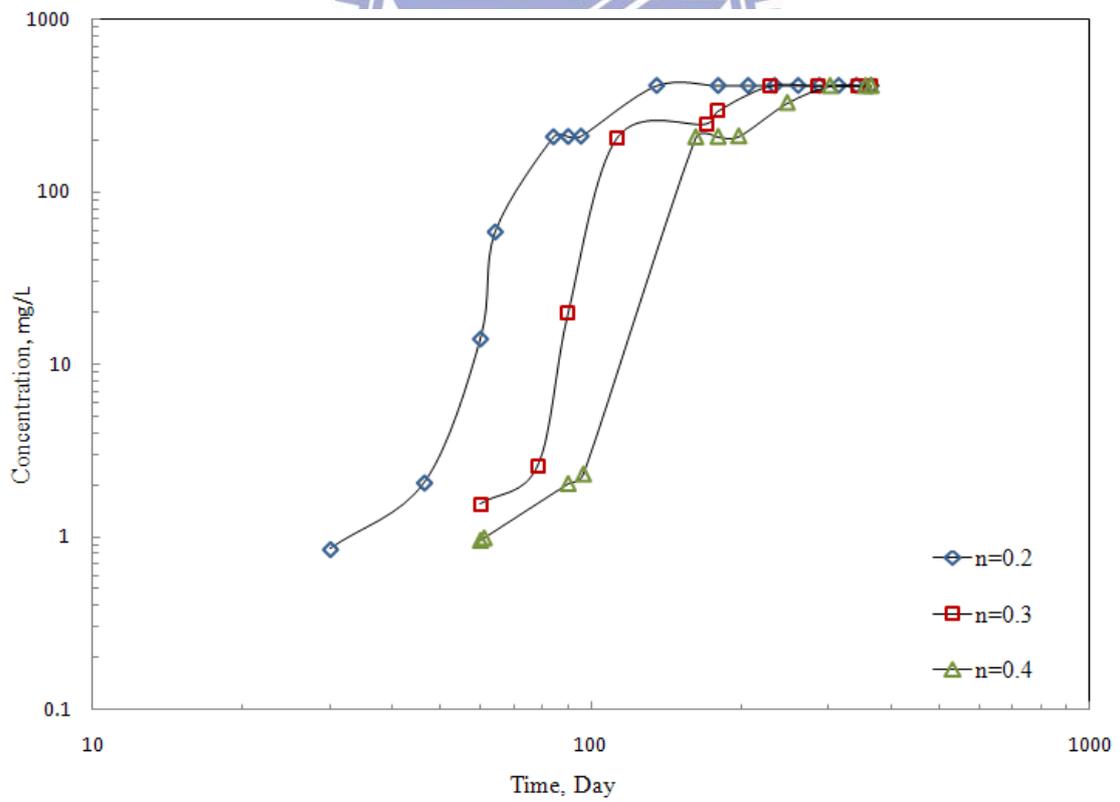


圖 4-5 (p) 於#7 測漏管之地下水體含苯濃度圖

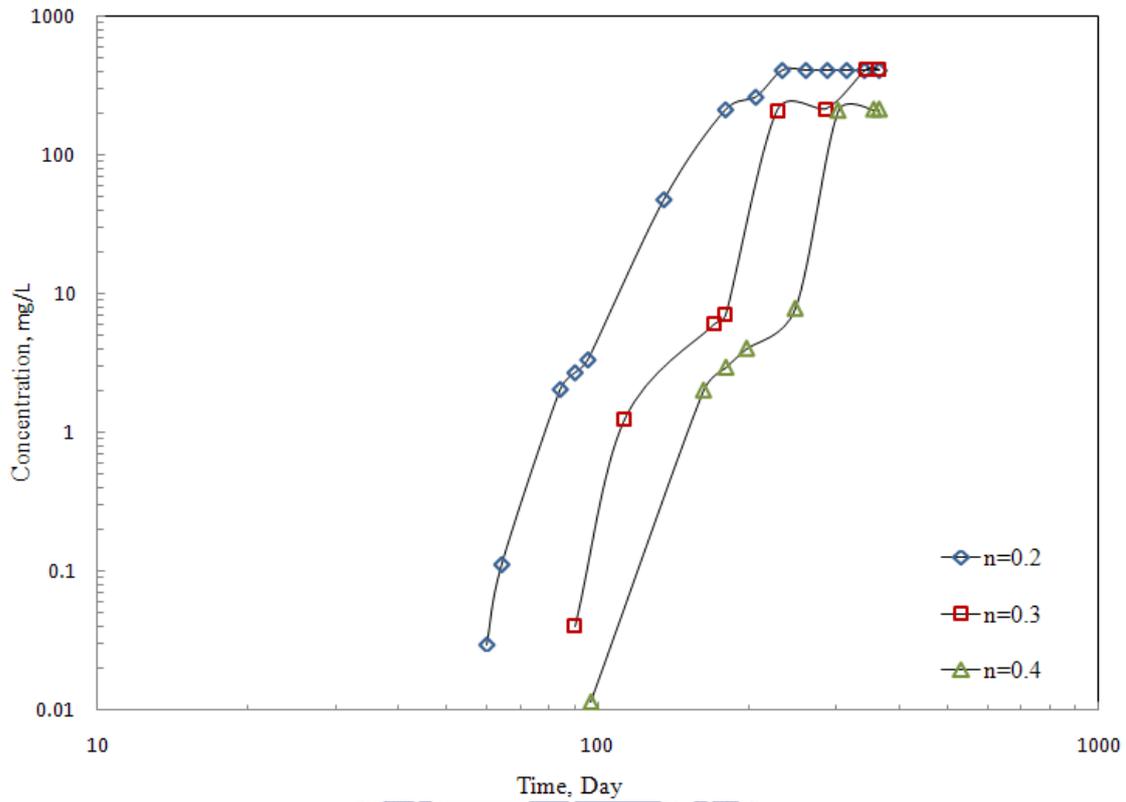


圖 4-5 (q) 於#8 測漏管之地下水體含苯濃度圖

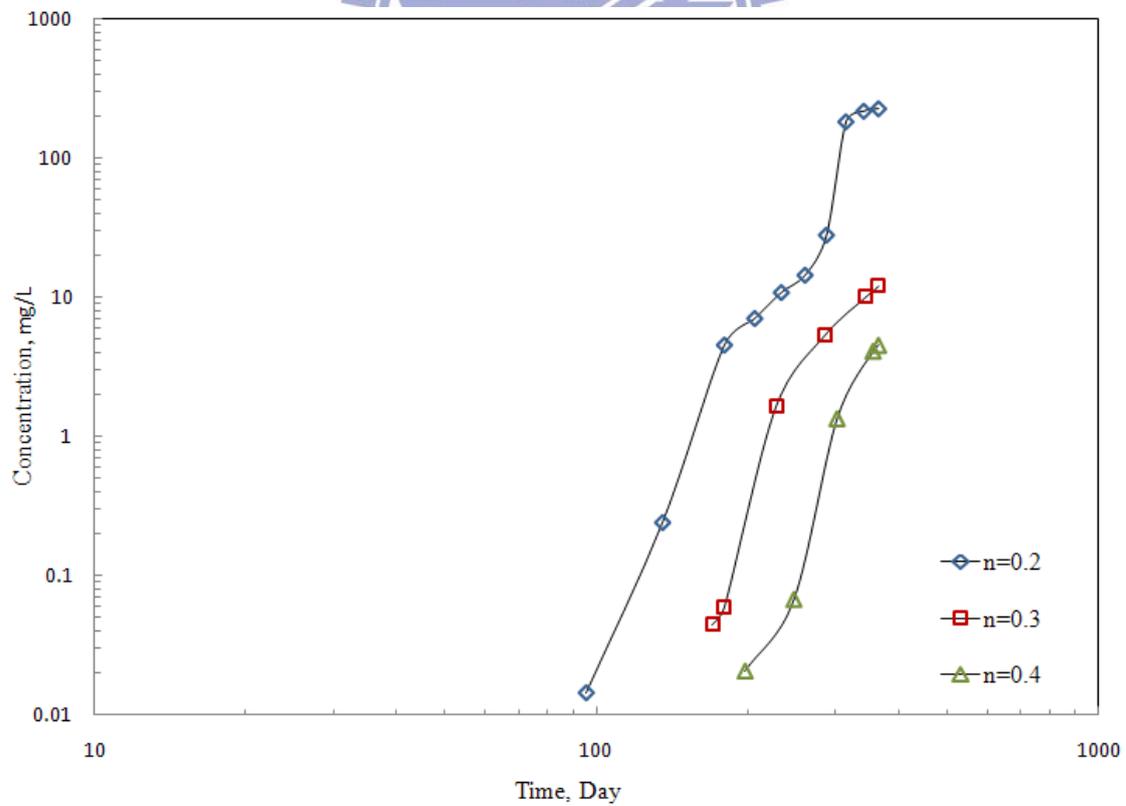


圖 4-5 (r) 於#9 測漏管之地下水體含苯濃度圖

## 4.4 加油站場址模擬結果

在油品洩漏速率為 5 gal/day 的注入下當模擬時間(一年)到達後，分別依不同之地下水位深度(2 m、3 m、5 m)、透水係數( $2.74 \times 10^{-2}$ 、 $2.74 \times 10^{-3}$ 、 $2.74 \times 10^{-4}$  cm/sec)以及油品洩漏點(Case1-4)等三部分進行資料整理與分類，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。而由於監測井#1、#2、#3 對稱於#9、#10、#11，因此以監測井#9、#10、#11 來表示之，其結果如圖 4-7(a)- 圖 4-18(b)，最後再將油品洩漏點(Case1-4)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 4-3(a)-(f)，以下分別對模擬場址之地下水位深度、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分析。

### 一、地下水位之影響

首先為能凸顯地下水位對於污染團傳輸之影響，因此選定以污染物傳輸狀況最為自由受限最少之洩漏狀況 Case2 如圖 3-10(b)。在 Case2 之狀況中油品之洩漏點正好位於監測井#5 上，因此先以下游處之監測井#6 來分析地下水位對於污染團傳輸之影響，由監測井#6 [表 4-3(d)] 中之 Case2 可看出在土層絕對透水係數同樣為  $2.5 \times 10^{-12}$  m<sup>2</sup> 時，當地下水位深度由地表下 2 m 降低為 3 m 時則土壤氣體濃度達管制標準(500 ppmV)之時間由 140 天增加為 160 天約增加 1.1 倍。而當地下水位再降低至地表下 5 m 時其土壤氣體濃度達管制標準之時間則增加至 230 天約是地下水位於 2 m 之 1.6 倍，然而地下水位深度由 3 m 降低為 5 m 時其土壤氣體濃度達管制標準之時間則相差不大，其原因為當油品之洩漏量為 5 gal/day 且洩漏時間為一年時，其污染團向下傳輸之深度約僅至 3 m 如圖 4-6(a)，尚未到達 5 m 之地下水位面因此污染團尚未累積於地下水位面上。此外由油品洩漏點之上游處之監測井#4 [表 4-3 (b)] 中之 Case2 亦可看出地下水位於地表下 2 m 時其土壤氣體濃度達管制標準之時間為 120 天，而地下水為深度降低至 3 m 與 5 m 時，其土壤氣體濃度達管制標準之時間分別為 180 天與 178 天其變化不大，由此可知地下位深度大於 3 m 時且滲漏量少時則需再加上長時間的洩漏否則影響污染團傳輸的現象不大。最後由油品洩漏點 Case2 中監測井#4 [表 4-3 (b)]、#6 [表 4-3 (d)] 及#7 [表 4-3 (e)] 還可發現於污染團之傳輸路徑不受阻擋之情形下，其監測井之監測能力範圍約在油品洩漏點半徑 3 m 內。

地下水含苯濃度受地下水位深度之影響程度則可由監測井#5〔表 4-3 (c)〕中之 Case2 看出當地下水位深度為 2 m 時(土層絕對透水係數為  $2.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ )其地下水體含苯濃度達管制標準(第二類飲用水標準 0.05 mg/L)之時間為 102 天;而地下水位深度增加至 3 m 時其時間則增加至 238 天約增加 2.3 倍;地下水位深度於 5 m 時則由於污染團傳輸深度僅至 3 m 如圖 4-6 (b)因此無法監測到地下水體含苯濃度。

另外由油品洩漏點 Case3 如圖 3-10(c)中因油品洩漏點是位於儲油槽之上游側,因此下游側之監測井#2 受到油槽完全阻擋使得難以發揮其監測功效,故以監測井#1 來分析之。於監測井#1〔表 4-3 (a)〕中可發現土層絕對透水係數為  $2.5 \times 10^{-11} \text{ m}^2$  時,可發現地下水位深度於 2 m 時其土壤氣體濃度達管制標準之時間為 35 天;地下水深度於 3 m 時其土壤氣體濃度達管制標準之時間為 40 天;地下水深度於 5 m 時其土壤氣體濃度達管制標準之時間為 47 天,可發現地下水深度於 3 m 與 5 m 時其土壤氣體濃度達管制標準之時間差別不大,其原因為污染團於模擬時間一年內向下傳輸之深度大約至地表下 3 m,而本研究中對於不飽和層之土壤氣體濃度值僅採用至地表下 3 m,因而才會使得地下水深度於 3 m 與 5 m 時其土壤氣體濃度達管制標準之時間差別不大。若將監測井之位置再往外移動至監測井#4〔表 4-3 (b)〕時,則可發現當監測井之監測範圍內無受到外在因素(油槽)影響時,其污染濃度分佈之趨勢則相似於油品洩漏點於 Case2 (傳輸路徑無受阻礙)之狀況即隨著地下水位由 2 m 降低至 3 m 則土壤氣體濃度達管制標準之時間約需增加 1.5 倍。

地下水體含苯濃度部分同樣可由監測井#1〔表 4-3 (a)〕中之 Case3 可知當地下水位深度為 2 m 時(土層絕對透水係數為  $2.5 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ )其地下水體含苯濃度達管制標準之時間為 98 天;而地下水位深度增加至 3 m 時其時間則增加至 180 天;地下水位深度於 5 m 時則勉強於第 365 天時剛好達管制標準。

綜合 Case2 與 Case3 可知監測井之監測能力與地下水位深度成反比，因地下水位較高(2 m)則不飽和層厚度較薄使得土壤氣體濃度之累積量較大；而地下水為較深時(5 m)不飽和層厚度較厚，使得污染氣團於土壤孔隙中可分佈之空間較大，因而使土壤氣體濃度之累積量減少導致土壤氣體濃度達管制標準之時間需較長。對於地下水體之監測而言，其監測能力亦與地下水位之深度成反比，因地下水為較深會使得污染團傳輸至地下水位面所需之時間較長，使得於本研究中之模擬時間一年內污染團無法到達地下水位面(5 m)處，因而地下水體含苯濃度之監測效果不佳。

而汽油污染團於孔隙中飽和度之分析，則以洩漏點於 Case2 與 Case4 之狀況來討論之。於洩漏點 Case4 之模擬結果〔圖 4-6(e) 與 4-6 (f)〕中可看出，當油品於地下水位面下發生洩漏時，則污染團洩漏後受到油槽阻擋無法立即揮發，而使得污染團累積於油槽下方因此污染團之飽和度較高約 21 % 左右；而若洩漏點位置於 Case2(地下水位面以上)，當油品洩漏後則因有一部份開始揮發，使得污染團之飽和度稍稍降低約為 19 %〔圖 4-6 (h) 與 4-6 (i)〕，且由於洩漏點 Case2 並沒有受到油槽的阻擋，因此污染團較容易往外擴散，使周圍之測漏管較容易測得污染濃度。

在洩漏點於 Case4 且地下水位深度為 5 m 之模擬結果〔圖 4-6 (g)〕與洩漏點於 Case2 且地下水位深度為 2 m 之模擬結果〔圖 4-6 (h)〕互相比較可發現，其污染團濃度與形狀皆相似，這是因為於 Case4(地下水位為 5 m)之洩漏點距離地下水位之距離與 Case2(地下水位為 2 m)之狀況相同，使得結果亦相近。此外，當洩漏點位於地下水位面下 Case4 之模擬結果〔圖 4-6 (f)〕其污染團形狀較扁平；而洩漏點位於地下水位面上 Case2 之模擬結果〔圖 4-6 (i)〕其污染團形狀則呈現向下漏斗狀，會造成此現象之原因是因汽油之比重比水低，因而洩漏於地下水中後會有往上浮出水面之現象，因而呈現扁平狀而非是向下傳輸之漏斗狀。

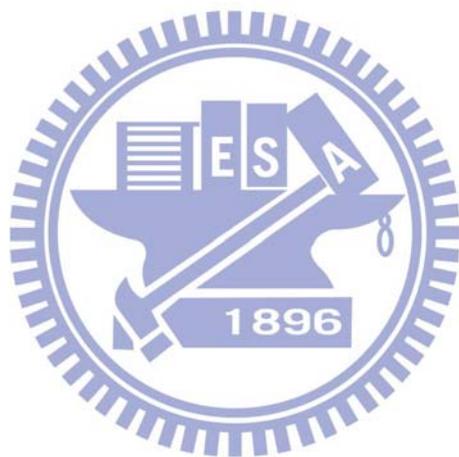
## 二、絕對透水係數之影響

透水係數對於污染團傳輸之影響於本研究中之四種洩漏情境中以油品洩漏點於 Case2 之情況最為顯著，其原因為於 Case2 之洩漏情況中其污染團往下游傳輸之路徑無受阻擋，因此污染團之傳輸行為發展相較於另外三種洩漏情境而言，較為完整，因此於透水係數影響因子中以洩漏點於 Case2 之情況作為討論之案例。

於油品洩漏點為 Case2 之案例〔圖 3-10(b)〕，先以洩漏點上游處之監測井#4〔表 4-3 (b)〕來分析，當土層絕對透水係數為  $2.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2$  (模擬回填料為細砂) 情況下且地下水位深度為 2 m 時其土壤氣體濃度值達管制標準之時間為 120 天，然而將土層絕對透水係數提高 10 倍至  $2.5 \times 10^{-11} \text{ m}^2$  (模擬回填料為粗沙) 時，則土壤氣體濃度值達管制標準之時間縮短為 45 天，達管制標準之時間約縮短 2.6 倍。地下水位深度於 3 m 時土壤氣體濃度值達管制標準之時間由 180 天縮短至 80 天 (約縮短 2.3 倍)；地下水位深度於 5 m 情況下土壤氣體濃度值達管制標準之時間由 178 天縮短至 80 天 (約縮短 2.2 倍)。若與透水係數敏感度分析之結果比較可發現，透水係數之敏感度分析中其監測井之設置間距為了避免間距過大，而受距離因子影響因而以網格之最短間距即為 1 m 來設置，(於場址模擬中其監測井之間距則考慮到油槽間距之關係因而將測漏管之間距增為 3 m) 隨著監測井與洩漏點之距離加大使得透水係數較大者對於浮動油相污染團之傳輸速率更為增加，因而各監測井達管制標準之時間差更為顯著。

而若僅比較土層絕對透水係數則發現，對於透水係數為  $2.5 \times 10^{-11} \text{ m}^2$  之土層而言其地下水位深度對污染團傳輸之影響不大；但對於土層絕對透水係數為  $2.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2$  之情況而言，由於土層之垂直向之傳輸速率僅為水平向傳輸速率之 1/50，且地下水位越深則不飽和層越厚如此可供污染氣團擴散之範圍亦較大，使得土壤氣體濃度之累積所需時間較長。如此雙重影響下於土層絕對透水係數為  $2.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2$  之情況中因而出現地下水位深度越深，則土壤氣體濃度累積所需之時間拉長，如此即可解釋為何增加土層絕對透水係數則土壤氣體濃度值達管制標準之時間縮短倍數會隨著地下水位深度之增加而增加。且此情況同樣可由位於油品洩漏點下游處之監測井#6〔表 4-3 (d)〕獲得佐證。

對於位於油品洩漏點上游處之監測井#4〔表 4-3 (b)〕其地下水含苯濃度值無論土層絕對透水係數如何變動皆不影響，因當污染團傳輸至地下水水位面後隨即受到水力梯度影響進而以平流傳輸向下游傳輸；而對於下游處之監測井#6〔表 4-3 (d)〕而言，當地下水水位深度為 2 m 土層絕對透水係數為  $2.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2$  之情況下其地下水體含苯濃度達管制標準所需之時間為 140 天，而將土層絕對透水係數提高至  $2.5 \times 10^{-11} \text{ m}^2$  時則達管制標準所需之時間減少至 102 天約縮短 1.3 倍；而地下水水位深度為 3 m 土層絕對透水係數為  $2.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2$  時則由於透水係數低與地下水水位較低等影響使得無法測得地下水體含苯濃度值，僅於土層絕對透水係數為  $2.5 \times 10^{-11} \text{ m}^2$  於第 180 天時測得地下水體含苯濃度達管制標準；而當地下水位在降低至 5 m 時則由於地下水水位過低使得污染團無法到達地下水水位面(於模擬時間一年內)，因此無論土層絕對透水係數如何變動均無法測得地下水體之含苯濃度值。



### 三、洩漏點位置之影響

影響監測井效能之因子除了地下水位深度與土層透水係數外，另一重要因子即為污染物之洩漏點位置，在油品洩漏點於 Case1 如圖 3-10(a)之監測井#5 [表 4-3 (c)] 中可發現油品污染物之洩漏點下方若有障礙物(油槽)則使得污染團無法直接向下傳輸，會先聚集於障礙物上方 [圖 4-6 (d)] 最後才經由障礙物邊緣垂直向下傳輸，而此時距離油品洩漏點最近之監測井#5 [表 4-3 (c)] 在絕對透水係數為  $2.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2$  之情況下，則地下水位之變化對於監測效果而言並無太大影響。當絕對透水係數增加至  $2.5 \times 10^{-11} \text{ m}^2$  時地下水位深度亦對於監測效果之影響不大，然而若以洩漏點之上下游監測井#4 [表 4-3 (b)] 與#6 [表 4-3 (d)] 來觀察則可發現，由於傳輸路徑受障礙物阻擋因此絕對透水係數較小( $2.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ )之情況下，無論地下水位為何皆無法測得土壤氣體濃度，僅在絕對透水係數較大( $2.5 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ )之情況下且地下水位於 2 m 與 3 m 之深度中才能測得土壤氣體濃度達管制標準，其餘監測井則受制於障礙物之影響而無法測得土壤氣體濃度達管制標準之時間。

在地下水含苯濃度部分則因污染團垂直向下傳輸路徑受障礙物阻擋，使得污染團到達地下水位的量較少，因此無論地下水體監測井與油品洩漏點之距離為何皆無法在模擬期間一年內測得地下水體含苯濃度超過管制標準。

最後當油品洩漏點改變至油槽下方 Case4 如圖 3-10(d)，由於本研究中假設油槽之埋設深度為地表下 1 m 至 4 m。而於地下水位為 2 m 之情況中，此時洩漏點位是位於地下水位面以下 2 m，因此油品之洩漏是直接洩漏於地下水中。然而由於污染物之傳輸路徑上方受油槽阻擋使得傳輸受拘限無法直接垂直向上傳輸 [圖 4-6 (e)]，導致於模擬期間(一年)內無任何氣體監測井或地下水體監測井能測得污染濃度高過管制標準。當地下水位降低至 3 m 時，洩漏點則是位於地下水位面以下 1 m 而同樣於污染團傳輸路徑上方受油槽阻擋使得傳輸受拘限 [圖 4-6 (f)]，使得無任何土壤氣體監測井能測得土壤氣體濃度超過管制標準，至於地下水體含苯濃度則僅有距離洩漏點旁 2 m 處之監測井#5 [表 4-3 (c)] 能測得地下水體含苯濃度高過管制標準(於絕對透水係數為  $2.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2$  時需 89 天；於絕對透水係數為  $2.5 \times 10^{-11} \text{ m}^2$  時需 63 天)。當地下水位再降低至 5 m 時，此時洩漏點則是位於地下水位面以上 1 m 處，雖然洩漏點已不在地下水位面之下，但污染團傳輸路徑上方同樣受油槽阻擋 [圖 4-6 (g)] 使得土壤氣體團無法於模擬期間(一年)內達管制標準，僅下游處之地下水體含苯濃度能達管制標準。監測井#10 [表 4-3 (f)] 於絕對透水係數為  $2.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2$  時需 107 天；絕對透水係數為  $2.5 \times 10^{-11} \text{ m}^2$  時需 60 天；監測井#6 [表 4-3 (d)] 於絕對透水係數為  $2.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2$  時需 115 天；絕對透水係數為  $2.5 \times 10^{-11} \text{ m}^2$  條件下於第 99 天；監測井#7 [表 4-3 (e)] 於絕對透水係數為  $2.5 \times 10^{-11} \text{ m}^2$  條件下於第 101 天可測得地下水體含苯濃度高過管制標準。

本研究中選擇四種不同油品洩漏點、三種不同之地下水位深度與兩種土層之透水係數共有 24 種模擬情境之組合，由地下水位深度與土層透水係數影響因子中可知，若要以地下水位深度與土層透水係數為主要控制因子則，測漏管位置與污染團之傳輸路徑勢必要無受外力阻礙之狀況下才會對於污染團之傳輸行為有重大影響。而以距離洩漏點 3 m 內之監測井而言主要以地下水位深度之影響為主，距離洩漏點超過 3 m 者，若增加土層透水係數則僅能增加污染團往下游傳輸之速率，對於監測井之監測效果影響不大，由此可知影響測漏管內之土壤氣體濃度值或地下水體含苯濃度值之最主要影響因子是油品洩漏點與監測井距洩漏點之距離，其次是地下水位深度與土層透水係數，而對於油品洩漏點與監測井距離近者 (3 m) 而言地下水位深度之影響程度又較土層透水係數大；惟監測井與油品洩漏點距離大於 3 m 則以土層透水係數之影響大於地下水位深度之影響。由本研究之結果可知，在土層透水係數不高且污染團傳輸路徑有受到阻擋之情形下，將測漏管盡可能的設置於靠近洩漏點附近(3 m 內)，則才能發揮較佳之效果。



## 4.5 綜合結論

對於洩漏點 Case3 與 Case4 而言，無論是土壤氣體或地下水體含苯濃度均僅有少部分之監測井監測到有達管制標準，且對大部份之監測井而言監測效果均不佳。因此另外將洩漏點 Case3 周圍之監測井濃度值整理於表 4-4；將洩漏點 Case4 周圍之監測井濃度值整理於表 4-5。於表 4-4 中可發現除了監測井#1 可測得土壤氣體濃度達管制標準外，其餘監測井#4 與#5 均須在透水係數較大之情況下才能測得氣體濃度達管制標準，然而地下水體部分則已無法達管制標準。而洩漏點於 Case4 之情況下(表 4-5)，則對於地下水位於 2 m 與 3 m 而言由於洩漏點是位於地下水位面以下，因此無論是氣體監測或地下水體含苯濃度之監測均難以發揮其功效，僅於地下水位於 3 m 之情況且監測井#5 正好位於洩漏點旁之地下水監測井才能測得地下水含苯濃度達管制標準。地下水位於 5 m 之情況則稍較前面兩者好一點，但也僅止於洩漏點旁 3 m 之監測井能測得濃度高過管制標準。顯然對於油槽下方發生破損所造成之洩漏，以目前實務上監測井之配置方式而言其監測效果實屬不佳，需配合其他監測設備才能有效監測。

整體而言監測井之監測效果以氣體監測效果優於地下水體之監測；土層透水係數高者( $2.74 \times 10^{-2}$  cm/sec)監測效果優於透水係數低者( $2.74 \times 10^{-3}$  cm/sec)；地下水位高者(地表下 2 m)其監測效果優於地下水位低者(5 m)，其原因可能為：地下水位高(2 m)則污染物較快遭遇地下水層，則經由地下水層之帶動使得污染團擴散範圍增加、傳輸速度增加等因素；反之當地下水位較低時(5 m)油品於洩漏後則需先向下擴散至地下水位，而因不飽和層較厚使得污染氣團平均分佈於垂直向土層中之孔隙，因此較晚達到 500 ppmV 之門檻值且污染團之擴散範圍亦較小。而當監測井與油品洩漏點間之距離大於 3 m 以上且地下水位深度於 3 m 內者，則僅剩地下水體之監測能發揮監測效果(於油品洩漏時間為一年情況下)，然而地下水體含苯濃度達第二類飲用水管制標準 0.05 mg/L 所需之時間仍過長，由此可知在此情況下，土壤氣體濃度達管制標準之反應時間較地下水體含苯濃度為快，因此預警效果也較快。

另外若以距離洩漏點為 Case2 [圖 3-10(b)] 較遠之監測井#7 [表 4-3 (e)] 來分析(位於洩漏點下游 6 m 處)，則發現三種地下水位狀況之氣體監測井中之氣體濃度皆甚低，地下水體監測井狀況則僅剩地下水位於 2 m 處之監測井能發揮其功效，但測得地下水體含苯濃度所需之時間較長，同樣較難及時發現有油品洩漏之虞。而若將油槽區之回填材改以滲透係數較佳之回填料回填之，則監測井之模擬結果與上述之現象相似，不過由於滲透係數提高 10 倍使得監測井#4 [表 4-3 (b)] 與#6 [表 4-3 (d)] 之土壤氣體濃度達管制標準之時間提早了 2~3 倍。

本研究中汽油之洩漏量設定為 5 加侖/天，而對於本研究中所模擬之測漏管而言，絕大部分之監測效果均不理想。僅在透水係數為  $2.74 \times 10^{-2}$  cm/sec 以及測漏管距離洩漏點較近(1 m)之情況下，才能發揮出較佳之監測效果(土壤氣體濃度最快於 23 天達門檻值) [監測井#5，表 4-3 (c)]。因此可知，若要縮短測漏管土壤氣體與地下水體含苯濃度值到達監測門檻值所需之時間，則污染團之傳輸路徑需與測漏管位置配合才可達到最佳之監測效果。



表 4-3 (a) 監測井#1 之土壤氣體與地下水含苯濃度值

監測井編號：#1					
油品洩漏點位置	地下水位(m)	氣體濃度達 500ppmV 所需之時間(day)		地下水體含苯濃度達 0.05 mg/L 所需之時間(day)	
		絕對透水係數 (m <sup>2</sup> ) : 2.5×10 <sup>-12</sup>	絕對透水係數 (m <sup>2</sup> ) : 2.5×10 <sup>-11</sup>	絕對透水係數 (m <sup>2</sup> ) : 2.5×10 <sup>-12</sup>	絕對透水係數 (m <sup>2</sup> ) : 2.5×10 <sup>-11</sup>
Case1	2	—	—	—	—
	3	—	—	—	—
	5	—	—	—	—
Case2	2	—	130	—	—
	3	—	205	—	—
	5	—	—	—	—
Case3	2	110	35	146	98
	3	110	40	—	180
	5	160	47	—	365
Case4	2	—	—	—	—
	3	—	—	—	—
	5	—	—	—	—

表 4-3 (b) 監測井#4 之土壤氣體與地下水含苯濃度值

監測井編號：#4					
油品洩漏點位置	地下水位(m)	氣體濃度達 500ppmV 所需之時間(day)		地下水體含苯濃度達 0.05 mg/L 所需之時間(day)	
		絕對透水係數 (m <sup>2</sup> ) : 2.5×10 <sup>-12</sup>	絕對透水係數 (m <sup>2</sup> ) : 2.5×10 <sup>-11</sup>	絕對透水係數 (m <sup>2</sup> ) : 2.5×10 <sup>-12</sup>	絕對透水係數 (m <sup>2</sup> ) : 2.5×10 <sup>-11</sup>
Case1	2	310	76	—	—
	3	—	100	—	—
	5	—	93	—	—
Case2	2	120	45	—	—
	3	180	80	—	—
	5	178	80	—	—
Case3	2	—	89	200	110
	3	—	120	—	350
	5	—	180	—	—
Case4	2	—	—	—	—
	3	—	—	—	—
	5	—	—	—	90

—:於模擬時間內(一年)其土壤氣體或地下水含苯濃度無達管制標準。

表 4-3 (c) 監測井#5 之土壤氣體與地下水含苯濃度值

監測井編號：#5					
油品洩漏點位置	地下水位(m)	氣體濃度達 500ppmV 所需之時間(day)		地下水體含苯濃度達 0.05 mg/L 所需之時間(day)	
		絕對透水係數 (m <sup>2</sup> ) : 2.5×10 <sup>-12</sup>	絕對透水係數 (m <sup>2</sup> ) : 2.5×10 <sup>-11</sup>	絕對透水係數 (m <sup>2</sup> ) : 2.5×10 <sup>-12</sup>	絕對透水係數 (m <sup>2</sup> ) : 2.5×10 <sup>-11</sup>
Case1	2	46	23	—	—
	3	60	28	—	—
	5	70	33	—	—
Case2	2	1	1	102	85
	3	1	1	238	117
	5	1	1	—	—
Case3	2	—	185	300	118
	3	—	200	—	—
	5	—	—	—	—
Case4	2	—	—	—	—
	3	—	—	89	63
	5	—	—	200	90

表 4-3 (d) 監測井#6 之土壤氣體與地下水含苯濃度值

監測井編號：#6					
油品洩漏點位置	地下水位(m)	氣體濃度達 500ppmV 所需之時間(day)		地下水體含苯濃度達 0.05 mg/L 所需之時間(day)	
		絕對透水係數 (m <sup>2</sup> ) : 2.5×10 <sup>-12</sup>	絕對透水係數 (m <sup>2</sup> ) : 2.5×10 <sup>-11</sup>	絕對透水係數 (m <sup>2</sup> ) : 2.5×10 <sup>-12</sup>	絕對透水係數 (m <sup>2</sup> ) : 2.5×10 <sup>-11</sup>
Case1	2	300	80	—	—
	3	—	103	—	—
	5	—	130	—	—
Case2	2	140	45	140	102
	3	160	50	—	180
	5	230	61	—	—
Case3	2	—	200	—	120
	3	—	320	—	—
	5	—	—	—	—
Case4	2	—	—	—	—
	3	—	—	—	—
	5	—	—	225	99

—:於模擬時間內(一年)其土壤氣體或地下水含苯濃度無達管制標準。

表 4-3 (e) 監測井#7 之土壤氣體與地下水含苯濃度值

監測井編號：#7					
油品洩漏點位置	地下水位(m)	氣體濃度達 500ppmV 所需之時間(day)		地下水體含苯濃度達 0.05 mg/L 所需之時間(day)	
		絕對透水係數 (m <sup>2</sup> ): 2.5×10 <sup>-12</sup>	絕對透水係數 (m <sup>2</sup> ): 2.5×10 <sup>-11</sup>	絕對透水係數 (m <sup>2</sup> ): 2.5×10 <sup>-12</sup>	絕對透水係數 (m <sup>2</sup> ): 2.5×10 <sup>-11</sup>
Case1	2	—	160	—	220
	3	—	190	—	—
	5	—	—	—	—
Case2	2	—	120	180	105
	3	—	165	—	350
	5	—	—	—	—
Case3	2	—	—	—	—
	3	—	—	—	—
	5	—	—	—	—
Case4	2	—	—	—	—
	3	—	—	—	—
	5	—	—	—	101

表 4-3 (f) 監測井#10 之土壤氣體與地下水含苯濃度值

監測井編號：#10					
油品洩漏點位置	地下水位(m)	氣體濃度達 500ppmV 所需之時間(day)		地下水體含苯濃度達 0.05 mg/L 所需之時間(day)	
		絕對透水係數 (m <sup>2</sup> ): 2.5×10 <sup>-12</sup>	絕對透水係數 (m <sup>2</sup> ): 2.5×10 <sup>-11</sup>	絕對透水係數 (m <sup>2</sup> ): 2.5×10 <sup>-12</sup>	絕對透水係數 (m <sup>2</sup> ): 2.5×10 <sup>-11</sup>
Case1	2	255	50	—	190
	3	260	63	—	310
	5	258	73	—	—
Case2	2	—	80	330	120
	3	—	100	—	210
	5	—	160	—	—
Case3	2	—	—	—	—
	3	—	—	—	—
	5	—	—	—	—
Case4	2	—	—	—	—
	3	—	—	—	—
	5	—	—	107	60

—:於模擬時間內(一年)其土壤氣體或地下水含苯濃度無達管制標準。

表 4-4 洩漏點於 case3 之土壤氣體與地下水最終污染物濃度值

洩漏點位置 : Case3					
監測井 編號	地下水位(m)	油品洩漏一年後於土壤氣體監 測井中所測得之濃度值(ppmV)		油品洩漏一年後於地下水體監 測井中所測得之濃度值(mg/L)	
		絕對透水係數 (m <sup>2</sup> ) : 2.5×10 <sup>-12</sup>	絕對透水係數 (m <sup>2</sup> ) : 2.5×10 <sup>-11</sup>	絕對透水係數 (m <sup>2</sup> ) : 2.5×10 <sup>-12</sup>	絕對透水係數 (m <sup>2</sup> ) : 2.5×10 <sup>-11</sup>
#1	2	10,626	39,019	13.68	26
	3	5,390	22,252	0	0.67
	5	3,968	8,467	0	0.05
#4	2	243.5	11,747	0.42	4.34
	3	39.7	10,562	0	0.08
	5	2.74	2,095	0	0.01
#5	2	0.11	7,129	0.17	7.03
	3	0.01	5,224	0	0.01
	5	0	8.08	0	0.01
#6	2	0	1,538	0.01	4.11
	3	0	559	0	0
	5	0	0	0	0
#7	2	0	8.07	0	2.26
	3	0	0.95	0	0
	5	0	0	0	0
#10	2	0	0	0	0
	3	0	0	0	0
	5	0	0	0	0

表 4-5 洩漏點於 case4 之土壤氣體與地下水最終污染物濃度值

洩漏點位置 : Case4					
監測井 編號	地下水位(m)	油品洩漏一年後於土壤氣體監 測井中所測得之濃度值(ppmV)		油品洩漏一年後於地下水體監 測井中所測得之濃度值(mg/L)	
		絕對透水係數 (m <sup>2</sup> ) : 2.5×10 <sup>-12</sup>	絕對透水係數 (m <sup>2</sup> ) : 2.5×10 <sup>-11</sup>	絕對透水係數 (m <sup>2</sup> ) : 2.5×10 <sup>-12</sup>	絕對透水係數 (m <sup>2</sup> ) : 2.5×10 <sup>-11</sup>
#1	2	0	0	0	0
	3	0	0	0	0
	5	0	0	0	0
#4	2	0	0	0	0
	3	0	0	0	0
	5	0	5	0	0.03
#5	2	0	0	0	0
	3	0	0	2	1.23
	5	0	9.8	0.18	0.25
#6	2	0	0	0	0
	3	0	0	0	0
	5	0	18.9	0.05	0.25
#7	2	0	0	0	0
	3	0	0	0	0
	5	0	0.02	0	0.26
#10	2	0	0	0	0
	3	0	0	0	0
	5	0	87	0.31	11.7

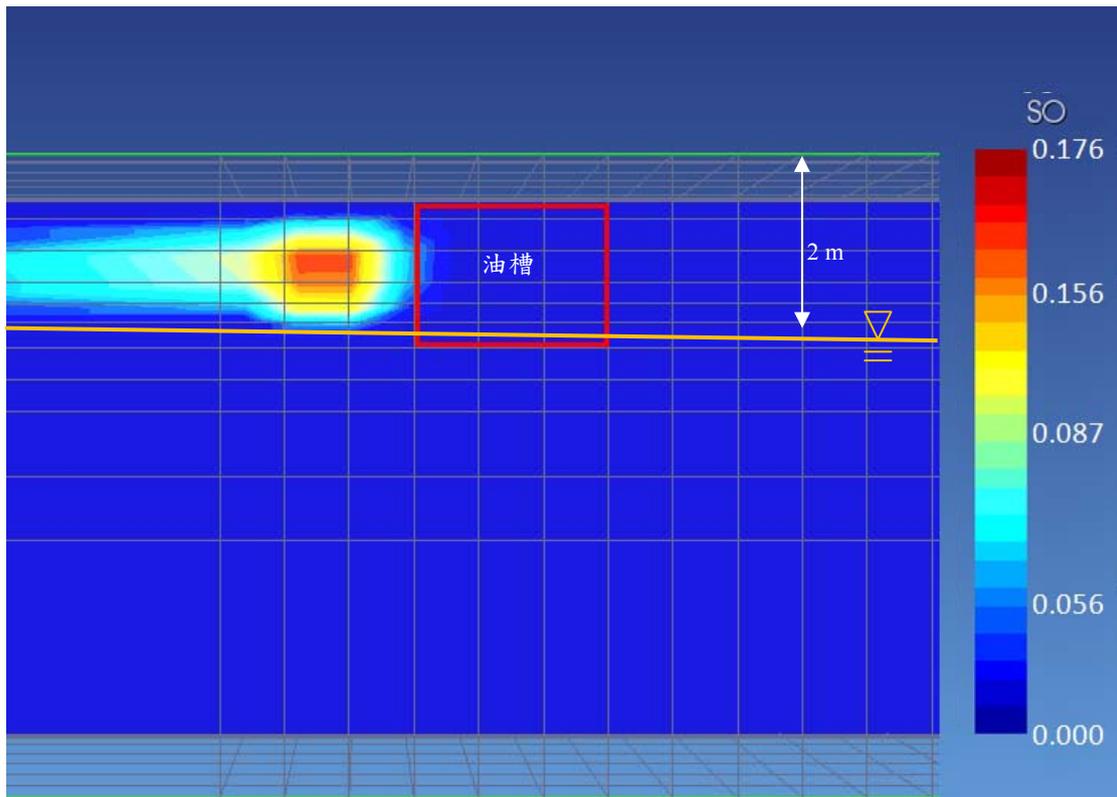


圖 4-6 (a) 污染團下游傳輸路徑受油槽阻擋時之傳輸行為示意圖(地下水位為 2 m)

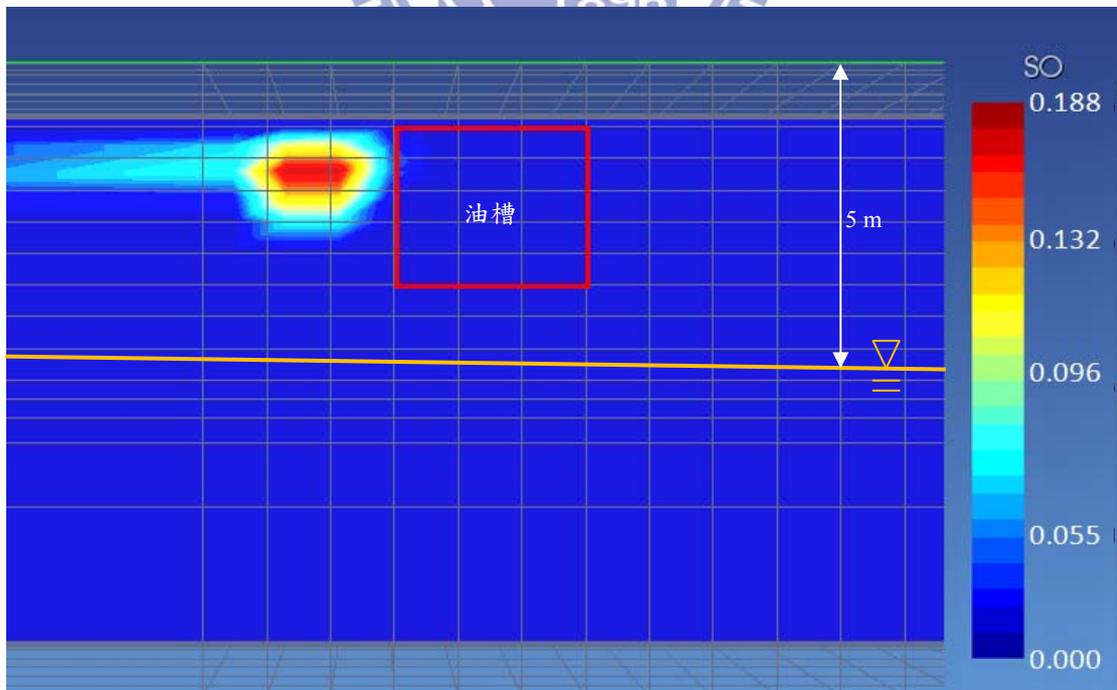


圖 4-6 (b) 污染團下游傳輸路徑受油槽阻擋時之傳輸行為示意圖(地下水位為 5 m)

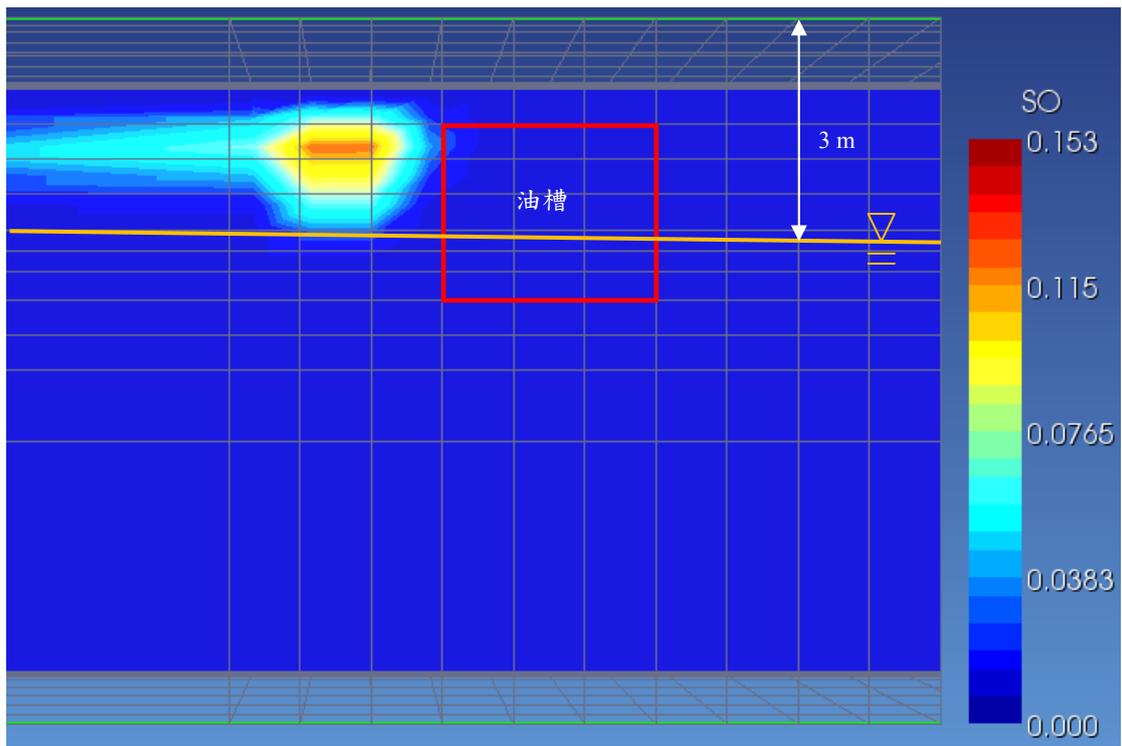


圖 4-6 (c) 污染團下游傳輸路徑受油槽阻擋時之傳輸行為示意圖(地下水位為 3 m)

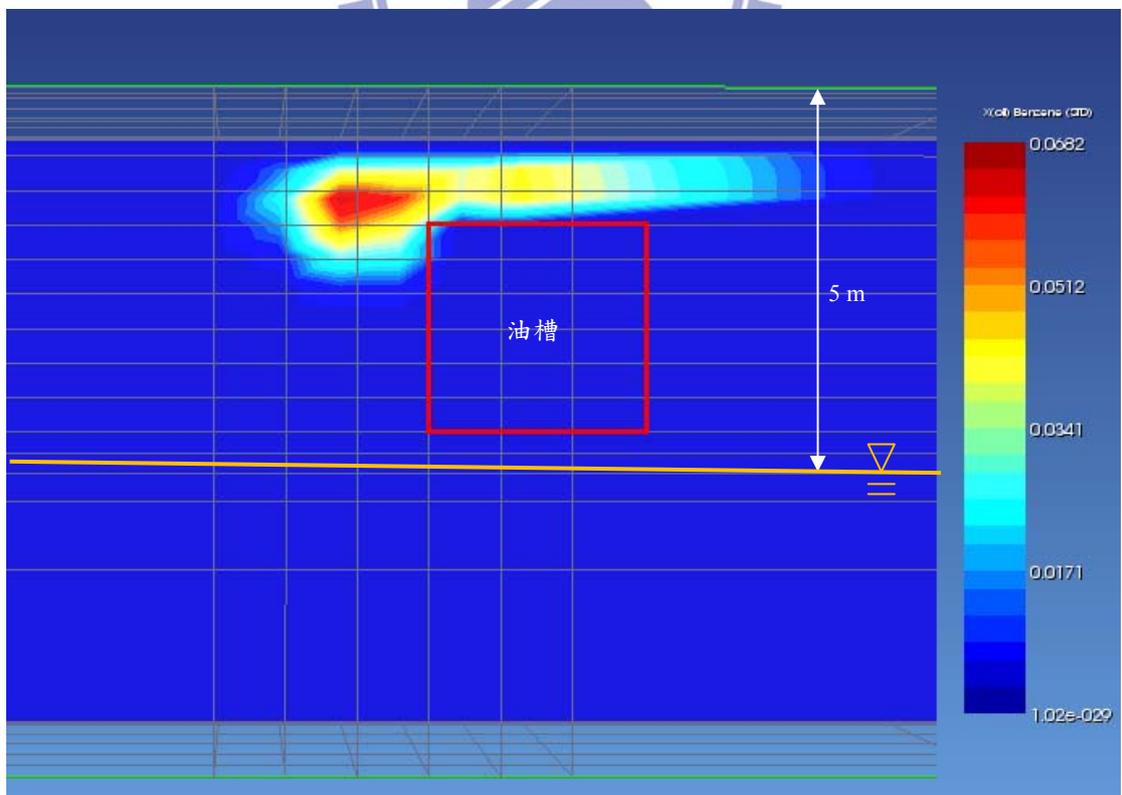


圖 4-6 (d) 污染團正下方之傳輸路徑受油槽阻擋時之傳輸行為示意圖

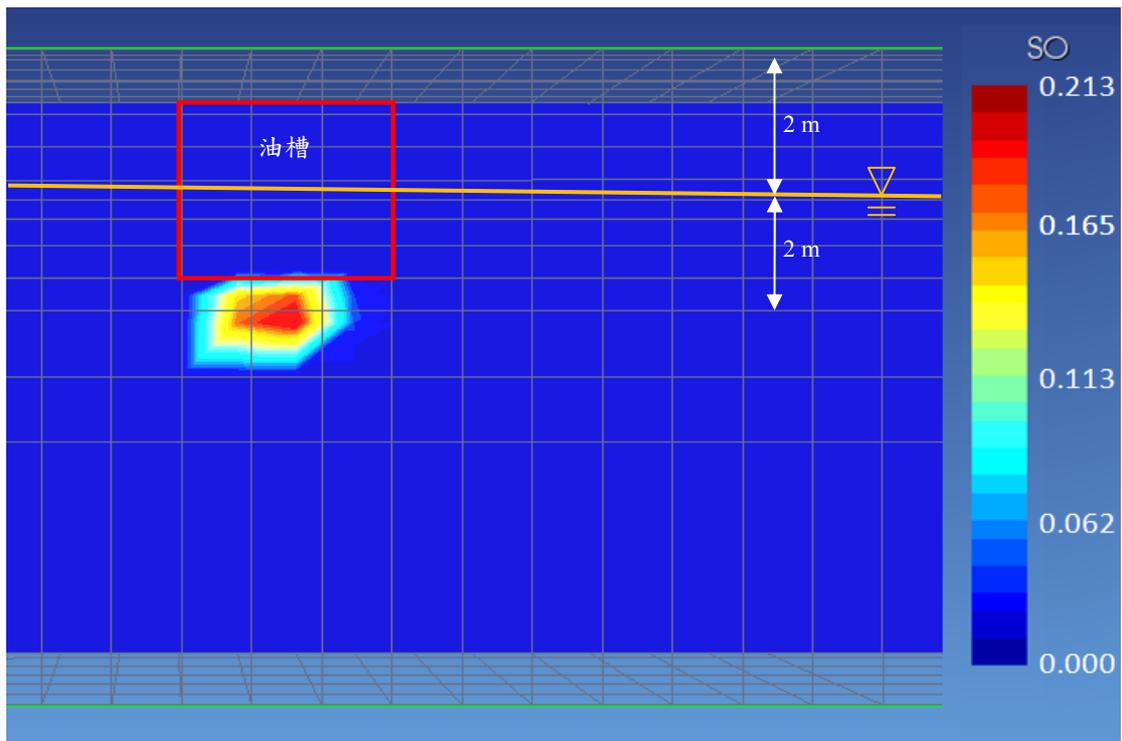


圖 4-6 (e) 洩漏點於地下水位面下 2 m 時之傳輸行為示意圖

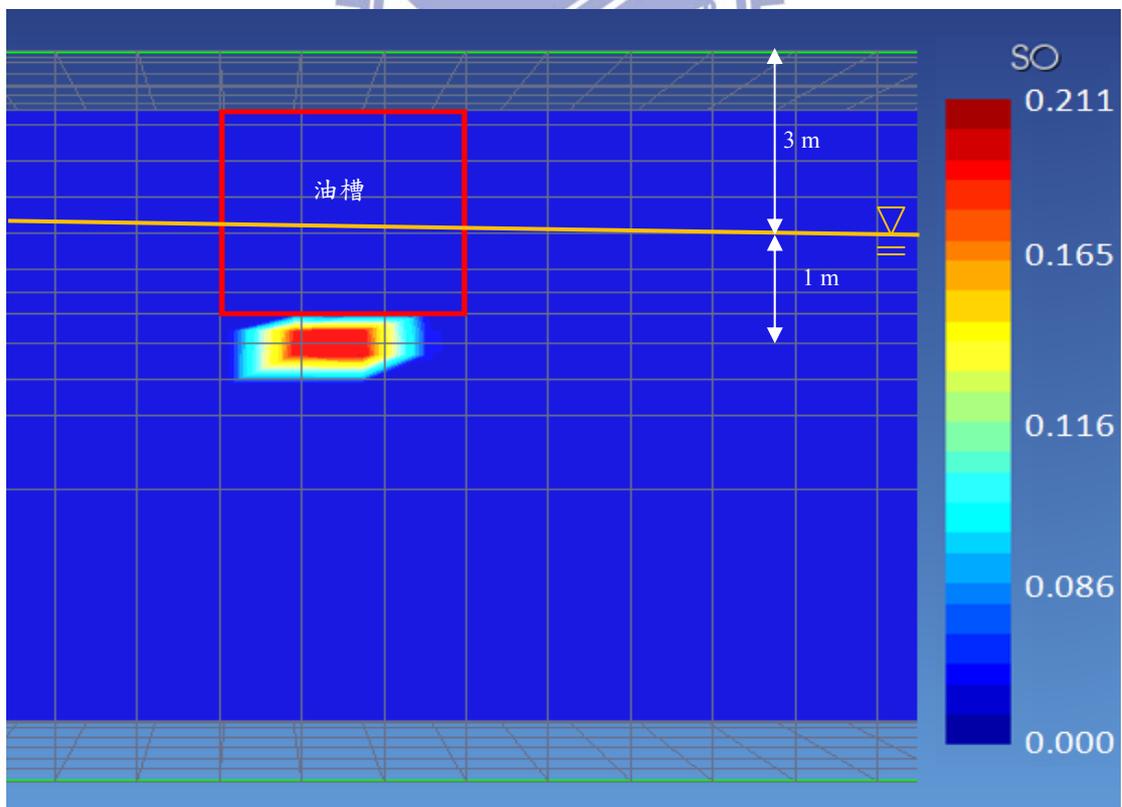


圖 4-6 (f) 洩漏點於地下水位面下 1 m 時之傳輸行為示意圖

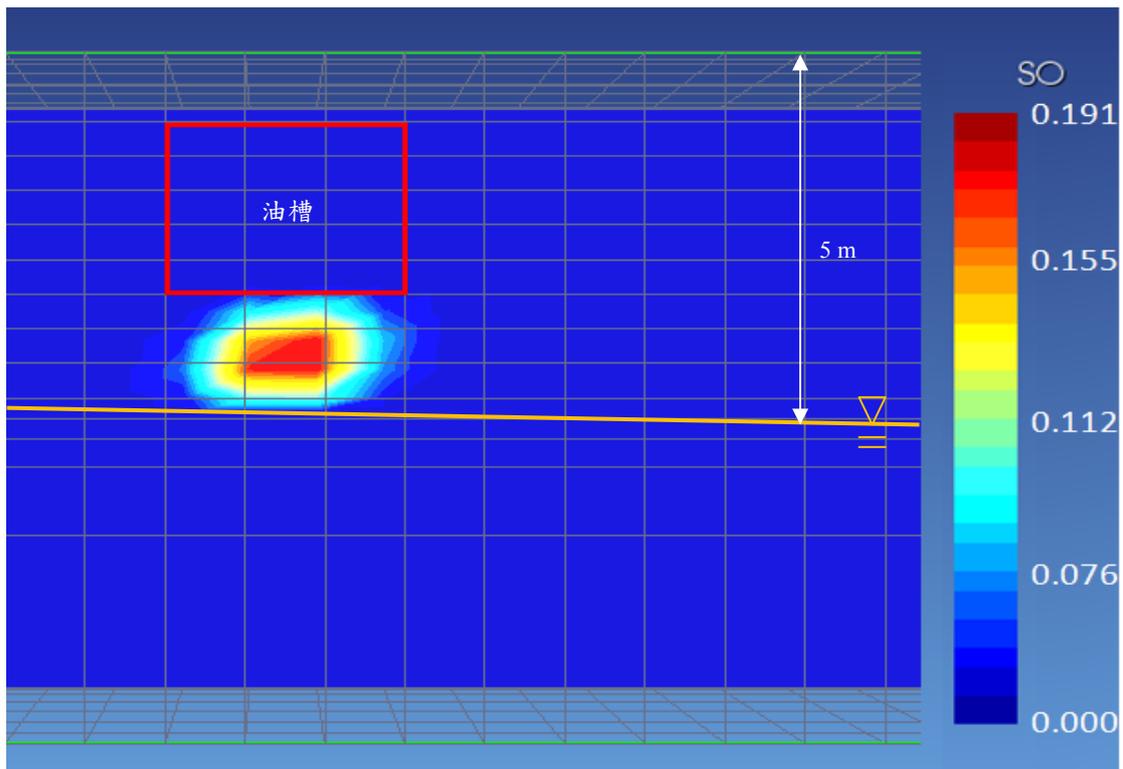


圖 4-6 (g) 洩漏點於油槽底部(於地下水位面上 1 m)時之傳輸行為示意圖

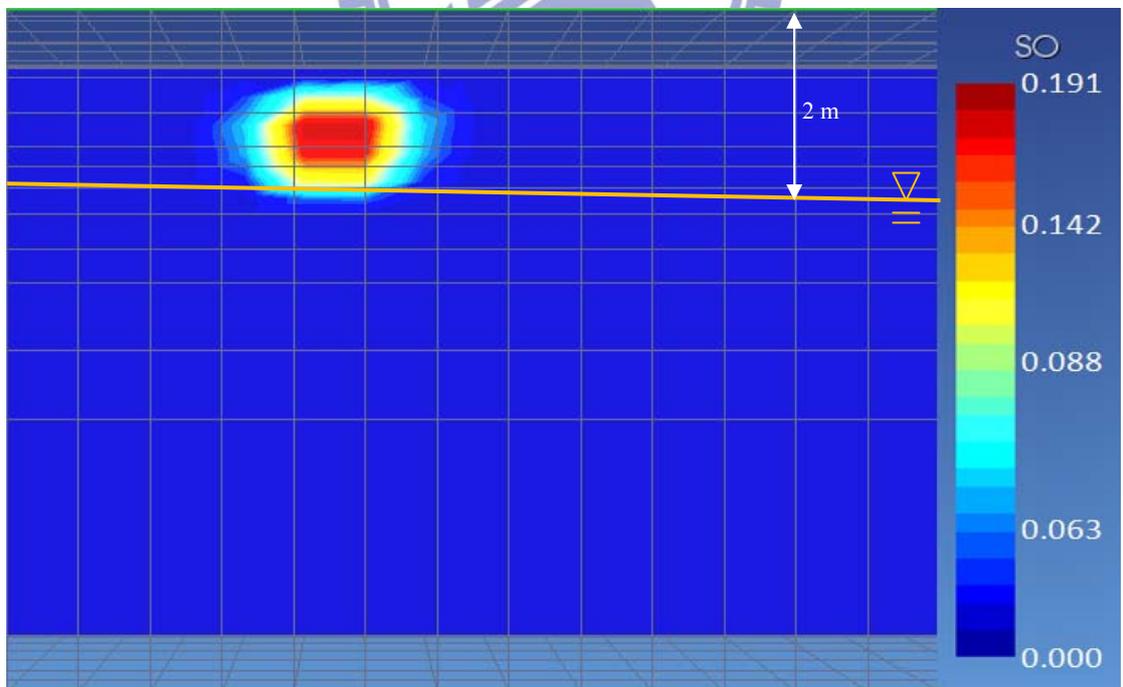


圖 4-6 (h) 洩漏點於 Case2 地下水位深度為 2 m 之汽油污染團飽和度圖

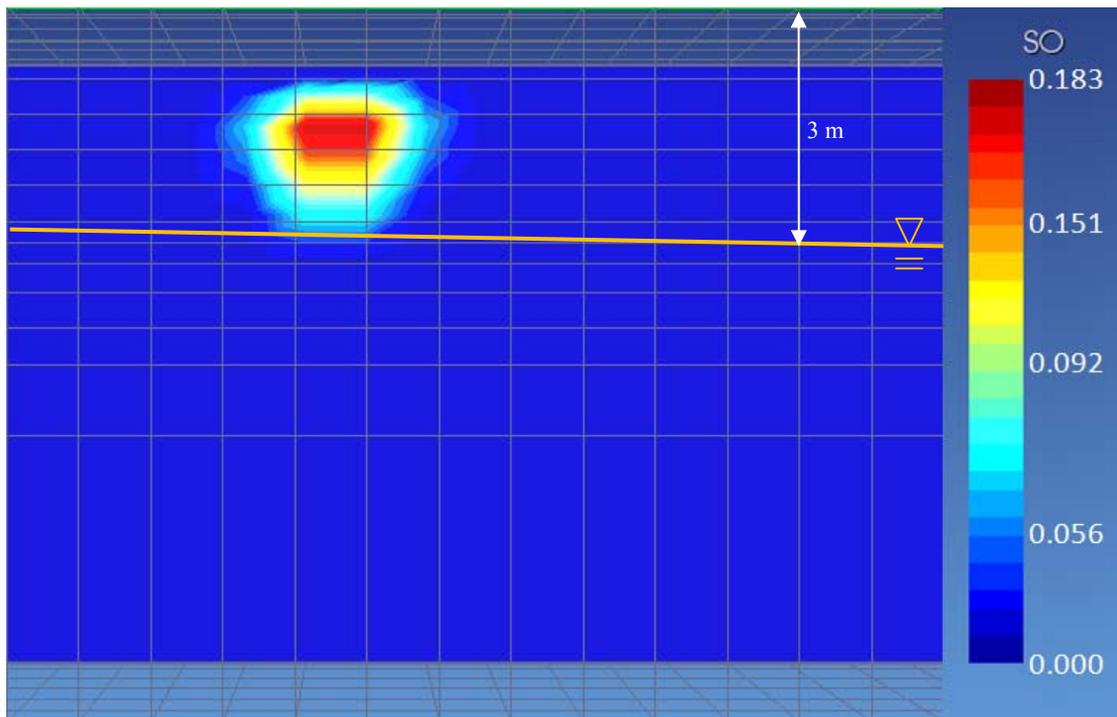


圖 4-6 (i) 洩漏點於 Case2 地下水位深度為 3 m 之汽油污染團飽和圖

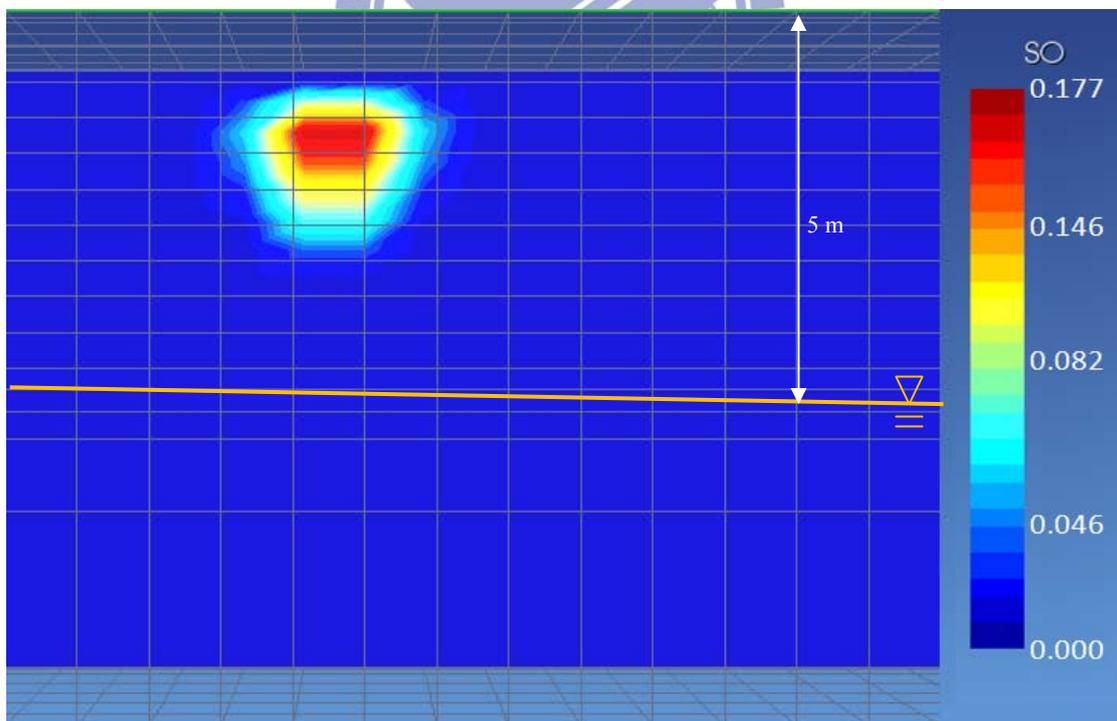


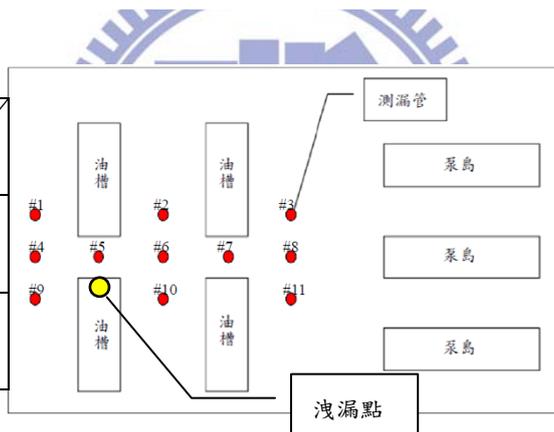
圖 4-6 (j) 洩漏點於 Case2 地下水位深度為 5 m 之汽油污染團飽和度圖

### 模擬情境說明

地下水位深度 (m)	2
土層絕對滲透係數 (m <sup>2</sup> )	2.5×10 <sup>-12</sup>
油品洩漏點	Case1 (油槽上方與輸油管連接處)
油品洩漏時間	一年

#5								#6								#7							
天	1	7	15	30	150	365	46 <sup>1</sup>	天	1	7	15	30	150	365	300 <sup>1</sup>	天	1	7	15	30	150	365	— <sup>3</sup>
項目							— <sup>3</sup>	項目							— <sup>3</sup>	項目							— <sup>3</sup>
氣	0.04	1.26	4.2	153	17219	81693	500	氣	0	0	0	0	2.8	1134	500	氣	0	0	0	0	0	0.35	500
(ppmV)								(ppmV)								(ppmV)							
液	0	0	0	0	0	0	0.05	液	0	0	0	0	0	0	0.05	液	0	0	0	0	0	0	0.05
(mg/L)								(mg/L)								(mg/L)							

#4							
天	1	7	15	30	150	365	310 <sup>1</sup>
項目							— <sup>3</sup>
氣	0	0	0	0	2.67	1056	500
(ppmV)							
液	0	0	0	0	0	0	0.05
(mg/L)							



#8							
天	1	7	15	30	150	365	— <sup>3</sup>
項目							— <sup>3</sup>
氣	0	0	0	0	0	0	500
(ppmV)							
液	0	0	0	0	0	0	0.05
(mg/L)							

#9							
天	1	7	15	30	150	365	280 <sup>1</sup>
項目							— <sup>3</sup>
氣	0	0	0	0	133	3795	500
(ppmV)							
液	0	0	0	0	0	0	0.05
(mg/L)							

#10							
天	1	7	15	30	150	365	255 <sup>1</sup>
項目							— <sup>3</sup>
氣	0	0	0	0	134	3737	500
(ppmV)							
液	0	0	0	0	0	0	0.05
(mg/L)							

#11							
天	1	7	15	30	150	365	— <sup>3</sup>
項目							— <sup>3</sup>
氣	0	0	0	0	0	0	500
(ppmV)							
液	0	0	0	0	0	0	0.05
(mg/L)							

- <sup>1</sup>: 土壤氣體濃度達 500 ppmV 所需之時間(day)。
- <sup>2</sup>: 地下水含苯濃度達 0.05 mg/L 所需之時間(day)。
- <sup>3</sup>: 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。

圖 4-7(a) case1 地下水於 2 m 之模擬結果

模擬情境說明

地下水位深度 (m)	2
土層絕對滲透係數 (m <sup>2</sup> )	2.5×10 <sup>-11</sup>
油品洩漏點	Case1 (油槽上方與輸油管連接處)
油品洩漏時間	一年

#5

天 項目	1	7	15	30	150	365	23 <sup>1</sup> 335 <sup>2</sup>
氣 (ppmV)	0.2	27	143	2020	3810	96224	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0.1	0.05

#6

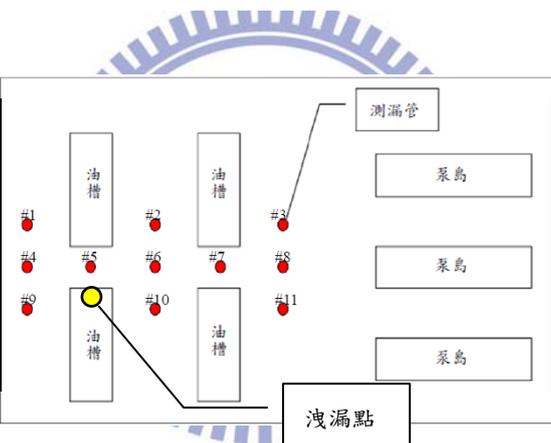
天 項目	1	7	15	30	150	365	80 <sup>1</sup> — <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0.2	7830	21019	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0.04	0.05

#7

天 項目	1	7	15	30	150	365	160 <sup>1</sup> 220 <sup>2</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	280	11619	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0.67	0.05

#4

天 項目	1	7	15	30	150	365	76 <sup>1</sup> — <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0.2	7650	20605	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05



#8

天 項目	1	7	15	30	150	365	200 <sup>1</sup> 240 <sup>2</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0.15	3267	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0.5	0.05

#9

天 項目	1	7	15	30	150	365	51 <sup>1</sup> — <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0.1	16	10310	24457	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05

#10

天 項目	1	7	15	30	150	365	50 <sup>1</sup> 190 <sup>2</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0.01	16.4	1121	24308
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	3.4	0.05

#11

天 項目	1	7	15	30	150	365	340 <sup>1</sup> 320 <sup>2</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	526	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	2.3	0.05

<sup>1</sup>:土壤氣體濃度達 500 ppmV 所需之時間(day)。  
<sup>2</sup>:地下水含苯濃度達 0.05 mg/L 所需之時間(day)。  
<sup>3</sup>: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。

圖 4-7(b) case1 地下水於 2 m 之模擬結果

模擬情境說明

地下水位深度 (m)	3
土層絕對滲透係數 (m <sup>2</sup> )	2.5×10 <sup>-12</sup>
油品洩漏點	Case1 (油槽上方與輸油管連接處)
油品洩漏時間	一年

#5

天 項目	1	7	15	30	150	365	60 <sup>1</sup> — <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0.03	0.9	2.8	102	11300	56412	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05

#6

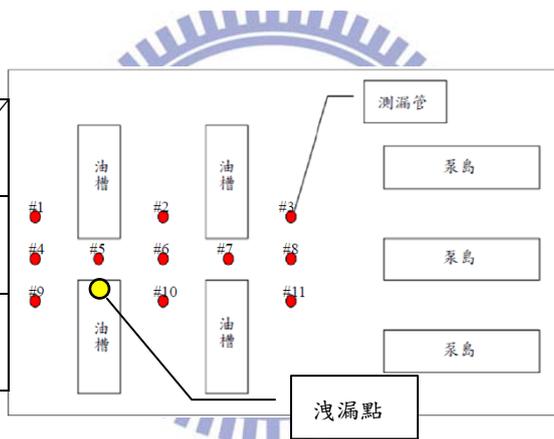
天 項目	1	7	15	30	150	365	— <sup>3</sup> — <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	1.8	430	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05

#7

天 項目	1	7	15	30	150	365	— <sup>3</sup> — <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0.07	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05

#4

天 項目	1	7	15	30	150	365	— <sup>3</sup> — <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	1.8	407	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05



#8

天 項目	1	7	15	30	150	365	— <sup>3</sup> — <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05

#9

天 項目	1	7	15	30	150	365	210 <sup>1</sup> — <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	96	2435	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05

#10

天 項目	1	7	15	30	150	365	260 <sup>1</sup> — <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	103	2382	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05

#11

天 項目	1	7	15	30	150	365	— <sup>3</sup> — <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05

<sup>1</sup>:土壤氣體濃度達 500 ppmV 所需之時間(day)。

<sup>2</sup>:地下水含苯濃度達 0.05 mg/L 所需之時間(day)。

<sup>3</sup>: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。

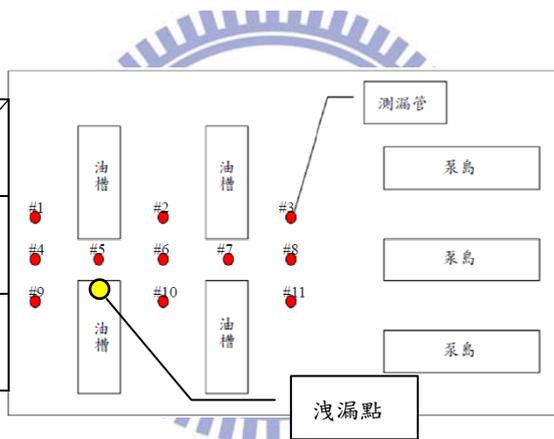
圖 4-8(a) case1 地下水於 3 m 之模擬結果

模擬情境說明

地下水位深度 (m)	3
土層絕對滲透係數 (m <sup>2</sup> )	2.5×10 <sup>-11</sup>
油品洩漏點	Case1 (油槽上方與輸油管連接處)
油品洩漏時間	一年

#5								#6								#7										
天	1	7	15	30	150	365	33 <sup>1</sup>	天	1	7	15	30	150	365	103 <sup>1</sup>	天	1	7	15	30	150	365	190 <sup>1</sup>			
項目								- <sup>3</sup>	項目								- <sup>3</sup>	項目								- <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0.1	18.4	95	1296	29350	78268	500	氣 (ppmV)	0	0	0	0.1	3783	14646	500	氣 (ppmV)	0	0	0	0	33	7795	500			
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0.04	0.05	液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0.08	0.05	液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05			

#4								
天	1	7	15	30	150	365	100 <sup>1</sup>	
項目								- <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0.09	3640	14795	500	
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0.04	0.05	



#8								
天	1	7	15	30	150	365	300 <sup>1</sup>	
項目								- <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0.01	1579	500	
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05	

#9								
天	1	7	15	30	150	365	60 <sup>1</sup>	
項目								244 <sup>2</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	9.2	6844	18449	500	
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0.2	0.05	

#10								
天	1	7	15	30	150	365	63 <sup>1</sup>	
項目								310 <sup>2</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	9.3	6472	17883	500	
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0.06	0.05	

#11								
天	1	7	15	30	150	365	- <sup>3</sup>	
項目								- <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	209	500	
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05	

<sup>1</sup>:土壤氣體濃度達 500 ppmV 所需之時間(day)。  
<sup>2</sup>:地下水含苯濃度達 0.05 mg/L 所需之時間(day)。  
<sup>3</sup>: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。

圖 4-8(b) case1 地下水於 3 m 之模擬結果

模擬情境說明

地下水位深度 (m)	5
土層絕對滲透係數 (m <sup>2</sup> )	2.5×10 <sup>-12</sup>
油品洩漏點	Case1 (油槽上方與輸油管連接處)
油品洩漏時間	一年

#5

天 項目	1	7	15	30	150	365	70 <sup>1</sup> - <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0.02	0.5	1.4	78	6730	56564	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05

#6

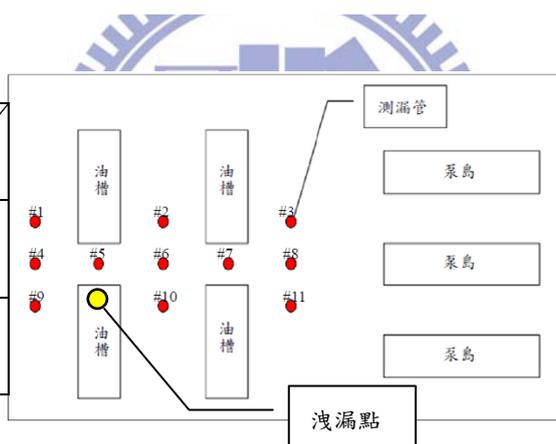
天 項目	1	7	15	30	150	365	- <sup>3</sup> - <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	5.1	193	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05

#7

天 項目	1	7	15	30	150	365	- <sup>3</sup> - <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05

#4

天 項目	1	7	15	30	150	365	- <sup>3</sup> - <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	10.3	396	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05



#8

天 項目	1	7	15	30	150	365	- <sup>3</sup> - <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05

#9

天 項目	1	7	15	30	150	365	250 <sup>1</sup> - <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	30	2355	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05

#10

天 項目	1	7	15	30	150	365	258 <sup>1</sup> - <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	28	1981	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05

#11

天 項目	1	7	15	30	150	365	- <sup>3</sup> - <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05

<sup>1</sup>:土壤氣體濃度達 500 ppmV 所需之時間(day)。  
<sup>2</sup>:地下水含苯濃度達 0.05 mg/L 所需之時間(day)。  
<sup>3</sup>: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。

圖 4-9(a) case1 地下水於 5 m 之模擬結果

模擬情境說明

地下水位深度 (m)	5
土層絕對滲透係數 (m <sup>2</sup> )	2.5×10 <sup>-11</sup>
油品洩漏點	Case1 (油槽上方與輸油管連接處)
油品洩漏時間	一年

#5

天 項目	1	7	15	30	150	365	25 <sup>1</sup> — <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	10	61	1050	28933	78846	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05

#6

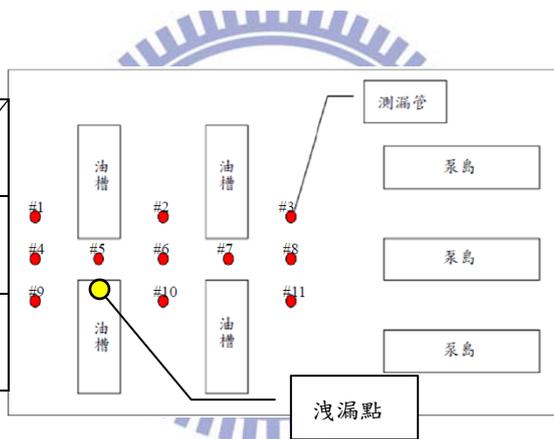
天 項目	1	7	15	30	150	365	130 <sup>1</sup> — <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	931	10792	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05

#7

天 項目	1	7	15	30	150	365	— <sup>3</sup> — <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05

#4

天 項目	1	7	15	30	150	365	93 <sup>1</sup> — <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	3571	1159	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05



#8

天 項目	1	7	15	30	150	365	— <sup>3</sup> — <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05

#9

天 項目	1	7	15	30	150	365	65 <sup>1</sup> — <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	8	6438	17163	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05

#10

天 項目	1	7	15	30	150	365	73 <sup>1</sup> — <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	2.5	4496	17319	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05

#11

天 項目	1	7	15	30	150	365	— <sup>3</sup> — <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05

<sup>1</sup>:土壤氣體濃度達 500 ppmV 所需之時間(day)。

<sup>2</sup>:地下水含苯濃度達 0.05 mg/L 所需之時間(day)。

<sup>3</sup>: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。

圖 4-9(b) case1 地下水於 5 m 之模擬結果

模擬情境說明

地下水位深度 (m)	2
土層絕對滲透係數 (m <sup>2</sup> )	2.5×10 <sup>-12</sup>
油品洩漏點	Case2 (儲槽區內之輸油管線)
油品洩漏時間	一年

#5

天	1	7	15	30	150	365	1 <sup>1</sup>
項目							102 <sup>2</sup>
氣 (ppmV)	14178	39053	47095	73228	146043	150112	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	20.1	32.6	0.05

#6

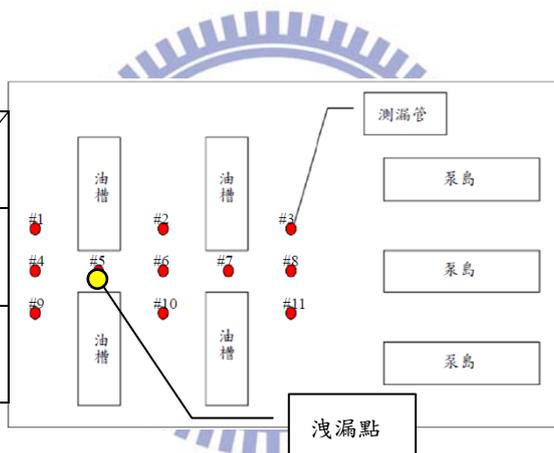
天	1	7	15	30	150	365	140 <sup>1</sup>
項目							140 <sup>2</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0.4	830	7873	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0.81	24	0.05

#7

天	1	7	15	30	150	365	— <sup>3</sup>
項目							180 <sup>2</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	32	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	8.2	0.05

#4

天	1	7	15	30	150	365	120 <sup>1</sup>
項目							— <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0.4	813	7684	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05



#8

天	1	7	15	30	150	365	— <sup>3</sup>
項目							320 <sup>2</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	1.4	0.05

#9

天	1	7	15	30	150	365	— <sup>3</sup>
項目							— <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	43	220	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05

#10

天	1	7	15	30	150	365	— <sup>3</sup>
項目							— <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0.3	207	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0.09	0.05

#11

天	1	7	15	30	150	365	— <sup>3</sup>
項目							— <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05

<sup>1</sup>:土壤氣體濃度達 500 ppmV 所需之時間(day)。

<sup>2</sup>:地下水含苯濃度達 0.05 mg/L 所需之時間(day)。

<sup>3</sup>: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。

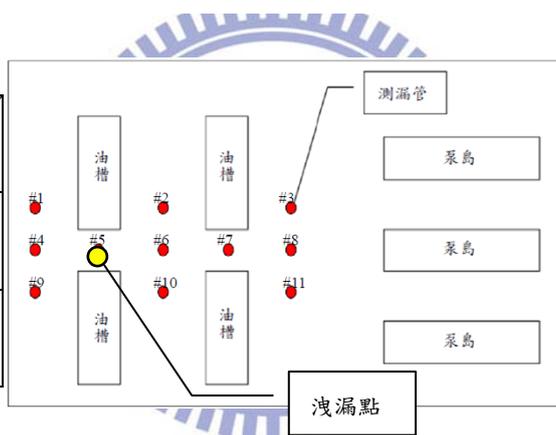
圖 4-10(a) case2 地下水於 2 m 之模擬結果

模擬情境說明

地下水位深度 (m)	2
土層絕對滲透係數 (m <sup>2</sup> )	2.5×10 <sup>-11</sup>
油品洩漏點	Case2 (儲槽區內之輸油管線)
油品洩漏時間	一年

#5		#6		#7															
天	項目	1	7	15	30	150	365	45 <sup>1</sup>	102 <sup>2</sup>	天	項目	1	7	15	30	150	365	120 <sup>1</sup>	105 <sup>2</sup>
氣	(ppmV)	14363	426779	55645	91989	142383	144936	500	500	0	0	0	0	0	0	2013	10039	500	500
液	(mg/L)	0	0	0	0	18	27	0.05	0.05	0	0	0	0	0	0	7.2	18.1	0.05	0.05

#4	天	項目	1	7	15	30	150	365	45 <sup>1</sup>	113 <sup>2</sup>
氣	(ppmV)	0	0	1.5	100	15130	359.9	500	500	500
液	(mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05	0.05	0.05



#8	天	項目	1	7	15	30	150	365	210 <sup>1</sup>	113 <sup>2</sup>
氣	(ppmV)	0	0	0	0	103	4203	500	500	500
液	(mg/L)	0	0	0	0	3.5	16	0.05	0.05	0.05

#9	天	項目	1	7	15	30	150	365	90 <sup>1</sup>	125 <sup>2</sup>
氣	(ppmV)	0	0	0	0	5507	11712	500	500	500
液	(mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05	0.05	0.05

#10	天	項目	1	7	15	30	150	365	80 <sup>1</sup>	120 <sup>2</sup>
氣	(ppmV)	0	0	0	0	5313	12326	500	500	500
液	(mg/L)	0	0	0	0	1.15	2	0.05	0.05	0.05

#11	天	項目	1	7	15	30	150	365	230 <sup>1</sup>	125 <sup>2</sup>
氣	(ppmV)	0	0	0	0	1.8	965	500	500	500
液	(mg/L)	0	0	0	0	0.7	3.8	0.05	0.05	0.05

<sup>1</sup>:土壤氣體濃度達 500 ppmV 所需之時間(day)。  
<sup>2</sup>:地下水含苯濃度達 0.05 mg/L 所需之時間(day)。  
<sup>3</sup>:該監測井之土壤氣體或地下水含苯濃度無法達法規管制標準。

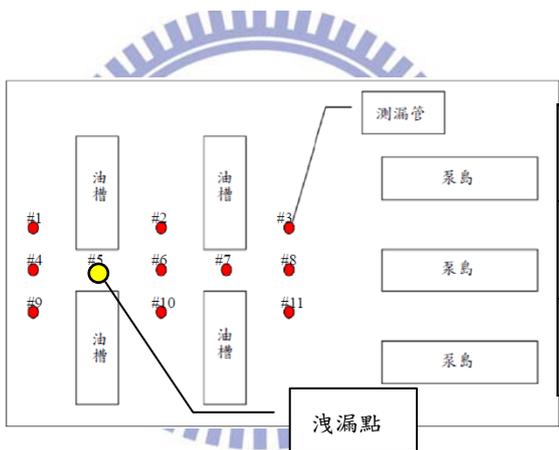
圖 4-10(b) case2 地下水於 2 m 之模擬結果

模擬情境說明

地下水位深度 (m)	3
土層絕對滲透係數 (m <sup>2</sup> )	2.5×10 <sup>-12</sup>
油品洩漏點	Case2 (儲槽區內之輸油管線)
油品洩漏時間	一年

#5								#6								#7										
天	1	7	15	30	150	365	1 <sup>1</sup>	天	1	7	15	30	150	365	160 <sup>1</sup>	天	1	7	15	30	150	365	— <sup>3</sup>			
項目								238 <sup>2</sup>	項目								— <sup>3</sup>	項目								— <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	9453	26049	31426	48871	111653	159910	500	氣 (ppmV)	0	0	0	0.2	233	4896	500	氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0.3	8.3	500		
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0.27	0.05	液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05	液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0	0.05		

#4								
天	1	7	15	30	150	365	180 <sup>1</sup>	
項目								— <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0.2	210	4861	500	
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0.04	0.05	



#8								
天	1	7	15	30	150	365	— <sup>3</sup>	
項目								— <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	500	
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05	

#9								
天	1	7	15	30	150	365	— <sup>3</sup>	
項目								— <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0.08	45	500	
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05	

#10								
天	1	7	15	30	150	365	— <sup>3</sup>	
項目								— <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0.08	36.8	500	
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05	

#11								
天	1	7	15	30	150	365	— <sup>3</sup>	
項目								— <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	500	
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05	

<sup>1</sup>:土壤氣體濃度達 500 ppmV 所需之時間(day)。  
<sup>2</sup>:地下水含苯濃度達 0.05 mg/L 所需之時間(day)。  
<sup>3</sup>:該監測井之土壤氣體或地下水含苯濃度無法達法規管制標準。

圖 4-11(a) case2 地下水於 3 m 之模擬結果

模擬情境說明

地下水位深度 (m)	3
土層絕對滲透係數 (m <sup>2</sup> )	2.5×10 <sup>-11</sup>
油品洩漏點	Case2 (儲槽區內之輸油管線)
油品洩漏時間	一年

#5

天 項目	1	7	15	30	150	365	1 <sup>1</sup> 117 <sup>2</sup>
氣 (ppmV)	9576	28480	37249	63246	134539	152920	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0.11	0.49	0.05

#6

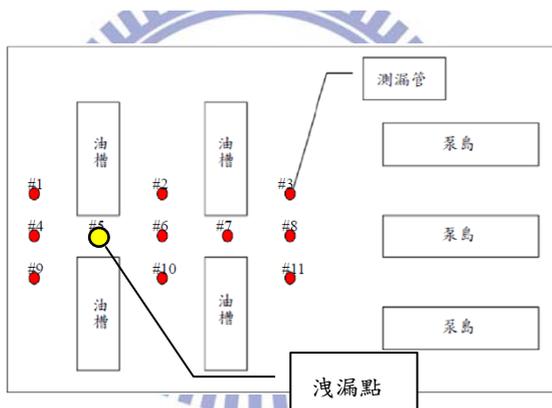
天 項目	1	7	15	30	150	365	50 <sup>1</sup> 180 <sup>2</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0.7	44	10330	23257	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0.36	0.05

#7

天 項目	1	7	15	30	150	365	165 <sup>1</sup> 350 <sup>2</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	435	8710	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0.06	0.05

#4

天 項目	1	7	15	30	150	365	80 <sup>1</sup> — <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0.1	0.8	42.8	10809	26126	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0.04	0.05



#8

天 項目	1	7	15	30	150	365	130 <sup>1</sup> 220 <sup>2</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	931	11365	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0.9	0.05

#9

天 項目	1	7	15	30	150	365	130 <sup>1</sup> 160 <sup>2</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	991	11365	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0.9	0.05

#10

天 項目	1	7	15	30	150	365	100 <sup>1</sup> 210 <sup>2</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	9038	11504	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0.16	0.05

#11

天 項目	1	7	15	30	150	365	— <sup>3</sup> — <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	498	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05

<sup>1</sup>:土壤氣體濃度達 500 ppmV 所需之時間(day)。  
<sup>2</sup>:地下水含苯濃度達 0.05 mg/L 所需之時間(day)。  
<sup>3</sup>:該監測井之土壤氣體或地下水含苯濃度無法達法規管制標準。

圖 4-11(b) case2 地下水於 3 m 之模擬結果

### 模擬情境說明

地下水位深度 (m)	5
土層絕對滲透係數 (m <sup>2</sup> )	2.5×10 <sup>-12</sup>
油品洩漏點	Case2 (儲槽區內之輸油管線)
油品洩漏時間	一年

#5

#6

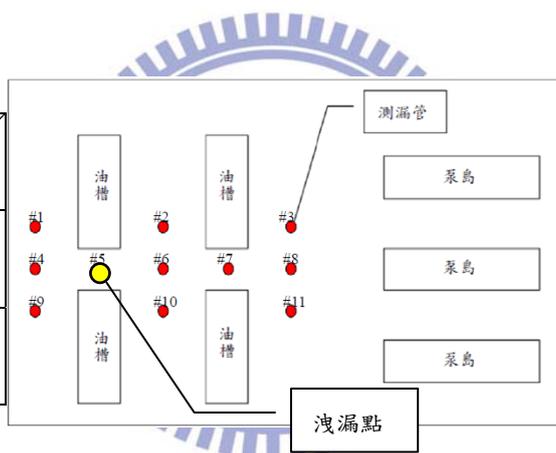
#7

天 項目	#5							天 項目	#6							天 項目	#7							
	1	7	15	30	150	365	1 <sup>1</sup> - <sup>3</sup>		1	7	15	30	150	365	230 <sup>1</sup> - <sup>3</sup>		1	7	15	30	150	365	- <sup>3</sup> - <sup>3</sup>	
氣 (ppmV)	9454	26044	31409	48546	100352	163701	500	氣 (ppmV)	0	0	0	0.04	113	2522	500	氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	0	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05	液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05	液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0	0.05

#4

#8

天 項目	#4							天 項目	#8							
	1	7	15	30	150	365	178 <sup>1</sup> - <sup>3</sup>		1	7	15	30	150	365	- <sup>3</sup> - <sup>3</sup>	
氣 (ppmV)	0	0	0	0.2	430	4276	500	氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	0	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05	液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0	0.05



#9

#10

#11

天 項目	#9							天 項目	#10							天 項目	#11							
	1	7	15	30	150	365	- <sup>3</sup> - <sup>3</sup>		1	7	15	30	150	365	- <sup>3</sup> - <sup>3</sup>		1	7	15	30	150	365	- <sup>3</sup> - <sup>3</sup>	
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	17	500	氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	4.8	500	氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	0	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05	液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05	液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0	0.05

<sup>1</sup>: 土壤氣體濃度達 500 ppmV 所需之時間(day)。

<sup>2</sup>: 地下水含苯濃度達 0.05 mg/L 所需之時間(day)。

<sup>3</sup>: 該監測井之土壤氣體或地下水含苯濃度無法達法規管制標準。

圖 4-12(a) case2 地下水於 5 m 之模擬結果

模擬情境說明

地下水位深度 (m) 5  
 土層絕對滲透係數 (m<sup>2</sup>) 2.5×10<sup>-11</sup>  
 油品洩漏點 Case2 (儲槽區內之輸油管線)  
 油品洩漏時間 一年

#5

#6

#7

天 項目	1	7	15	30	150	365	1 <sup>1</sup> — <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	9575	28464	37219	63274	145936	158577	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0.04	0.05

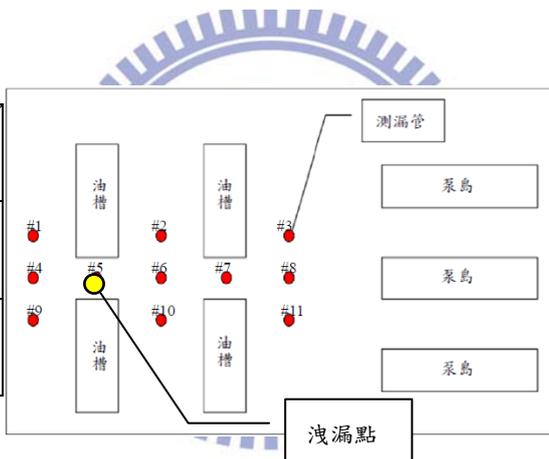
天 項目	1	7	15	30	150	365	61 <sup>1</sup> — <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	5.4	5563	6305	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0.04	0.05

天 項目	1	7	15	30	150	365	— <sup>3</sup> — <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0.1	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0.04	0.05

#4

#8

天 項目	1	7	15	30	150	365	80 <sup>1</sup> — <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	1.5	50	11042	10603	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05



天 項目	1	7	15	30	150	365	— <sup>3</sup> — <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0.03	0.05

#9

#10

#11

天 項目	1	7	15	30	150	365	133 <sup>1</sup> — <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	883	5377	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0.02	0.05

天 項目	1	7	15	30	150	365	160 <sup>1</sup> — <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	480	3822	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0.01	0.05

天 項目	1	7	15	30	150	365	— <sup>3</sup> — <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05

<sup>1</sup>:土壤氣體濃度達 500 ppmV 所需之時間(day)。

<sup>2</sup>:地下水含苯濃度達 0.05 mg/L 所需之時間(day)。

<sup>3</sup>:該監測井之土壤氣體或地下水含苯濃度無法達法規管制標準。

圖 4-12(b) case2 地下水於 5 m 之模擬結果

模擬情境說明

地下水位深度 (m)	2
土層絕對滲透係數 (m <sup>2</sup> )	2.5×10 <sup>-12</sup>
油品洩漏點	Case3 (卸油口下方之輸油管線)
油品洩漏時間	一年

#1

#2

#3

天 項目	1	7	15	30	150	365	110 <sup>1</sup> 146 <sup>2</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0.7	1083	10626	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	13.7	0.05

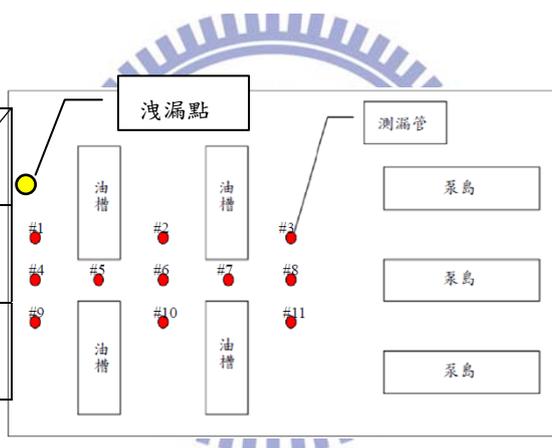
天 項目	1	7	15	30	150	365	- <sup>3</sup> - <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05

天 項目	1	7	15	30	150	365	- <sup>3</sup> - <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05

#4

#8

天 項目	1	7	15	30	150	365	200 <sup>2</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0.2	243	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0.42	0.05



天 項目	1	7	15	30	150	365	- <sup>3</sup> - <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05

#5

#6

#7

天 項目	1	7	15	30	150	365	300 <sup>2</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0.11	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0.17	0.05

天 項目	1	7	15	30	150	365	- <sup>3</sup> - <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0.01	0.05

天 項目	1	7	15	30	150	365	- <sup>3</sup> - <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05

<sup>1</sup>:土壤氣體濃度達 500 ppmV 所需之時間(day)。

<sup>2</sup>:地下水含苯濃度達 0.05 mg/L 所需之時間(day)。

<sup>3</sup>:該監測井之土壤氣體或地下水含苯濃度無法達法規管制標準。

圖 4-13(a) case3 地下水於 2 m 之模擬結果

模擬情境說明

地下水位深度 (m)	2
土層絕對滲透係數 (m <sup>2</sup> )	2.5×10 <sup>-11</sup>
油品洩漏點	Case3 (卸油口下方之輸油管線)
油品洩漏時間	一年

#1

#2

#3

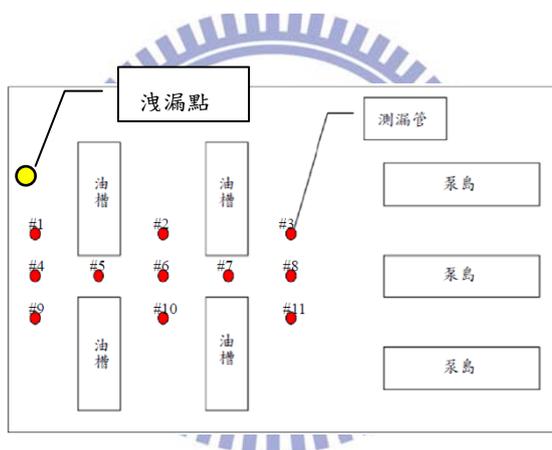
天 項目	1	7	15	30	150	365	35 <sup>1</sup> 98 <sup>2</sup>
氣 (ppmV)	0	0.2	3.4	169	16820	39019	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	2.1	26	0.05

天 項目	1	7	15	30	150	365	— <sup>3</sup> 110 <sup>2</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0.02	199	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	1.2	6.5	0.05

天 項目	1	7	15	30	150	365	— <sup>3</sup> 130 <sup>2</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0.19	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	1.3	4.8	0.05

#4

天 項目	1	7	15	30	150	365	89 <sup>1</sup> 110 <sup>2</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	6390	11747	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	4.3	0.05



#8

天 項目	1	7	15	30	150	365	— <sup>3</sup> — <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05

#5

天 項目	1	7	15	30	150	365	185 <sup>1</sup> 118 <sup>2</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	110.2	3598.8	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0.9	7	0.05

#6

天 項目	1	7	15	30	150	365	200 <sup>1</sup> 120 <sup>2</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0.3	1538	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	4.1	0.05

#7

天 項目	1	7	15	30	150	365	— <sup>3</sup> — <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	8	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05

<sup>1</sup>:土壤氣體濃度達 500 ppmV 所需之時間(day)。

<sup>2</sup>:地下水含苯濃度達 0.05 mg/L 所需之時間(day)。

<sup>3</sup>:該監測井之土壤氣體或地下水含苯濃度無法達法規管制標準。

圖 4-13(b) case3 地下水於 2 m 之模擬結果

模擬情境說明

地下水位深度 (m)	3
土層絕對滲透係數 (m <sup>2</sup> )	2.5×10 <sup>-12</sup>
油品洩漏點	Case3 (卸油口下方之輸油管線)
油品洩漏時間	一年

#1

#2

#3

天 項目	1	7	15	30	150	365	110 <sup>1</sup> — <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0.5	600	5390	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05

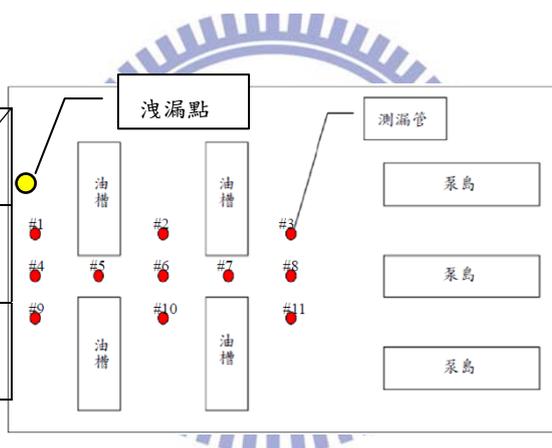
天 項目	1	7	15	30	150	365	— <sup>3</sup> — <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05

天 項目	1	7	15	30	150	365	— <sup>3</sup> — <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05

#4

#8

天 項目	1	7	15	30	150	365	— <sup>3</sup> — <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0.08	39.8	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05



天 項目	1	7	15	30	150	365	— <sup>3</sup> — <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05

#5

#6

#7

天 項目	1	7	15	30	150	365	— <sup>3</sup> — <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0.01	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05

天 項目	1	7	15	30	150	365	— <sup>3</sup> — <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05

天 項目	1	7	15	30	150	365	— <sup>3</sup> — <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05

<sup>1</sup>:土壤氣體濃度達 500 ppmV 所需之時間(day)。

<sup>2</sup>:地下水含苯濃度達 0.05 mg/L 所需之時間(day)。

<sup>3</sup>:該監測井之土壤氣體或地下水含苯濃度無法達法規管制標準。

圖 4-14(a) case3 地下水於 3 m 之模擬結果

模擬情境說明

地下水位深度 (m)	3
土層絕對滲透係數 (m <sup>2</sup> )	2.5×10 <sup>-11</sup>
油品洩漏點	Case3 (卸油口下方之輸油管線)
油品洩漏時間	一年

#1

#2

#3

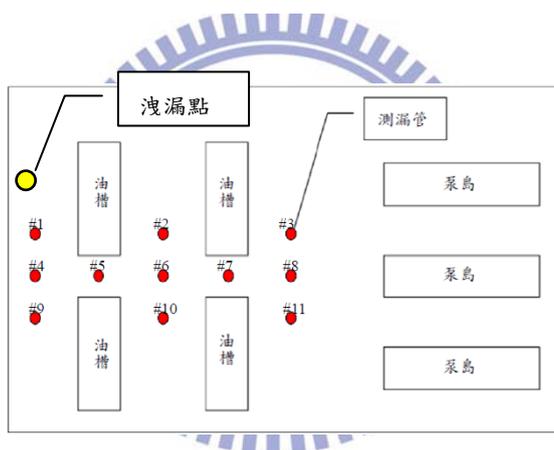
天 項目	1	7	15	30	150	365	40 <sup>1</sup> 180 <sup>2</sup>
氣 (ppmV)	0	0.06	1.8	67	11890	22252	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0.01	0.4	0.05

天 項目	1	7	15	30	150	365	— <sup>3</sup> — <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	43	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05

天 項目	1	7	15	30	150	365	— <sup>3</sup> — <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05

#4

天 項目	1	7	15	30	150	365	120 <sup>1</sup> 350 <sup>2</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	2030	10562	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0.08	0.05



#8

天 項目	1	7	15	30	150	365	— <sup>3</sup> — <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05

#5

天 項目	1	7	15	30	150	365	188 <sup>1</sup> — <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	70	5224	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0.01	0.05

#6

天 項目	1	7	15	30	150	365	320 <sup>1</sup> — <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	559	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05

#7

天 項目	1	7	15	30	150	365	— <sup>3</sup> — <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0.9	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05

<sup>1</sup>:土壤氣體濃度達 500 ppmV 所需之時間(day)。

<sup>2</sup>:地下水含苯濃度達 0.05 mg/L 所需之時間(day)。

<sup>3</sup>:該監測井之土壤氣體或地下水含苯濃度無法達法規管制標準。

圖 4-14(b) case3 地下水於 3 m 之模擬結果

模擬情境說明

地下水位深度 (m)	5
土層絕對滲透係數 (m <sup>2</sup> )	2.5×10 <sup>-12</sup>
油品洩漏點	Case3 (卸油口下方之輸油管線)
油品洩漏時間	一年

#1

#2

#3

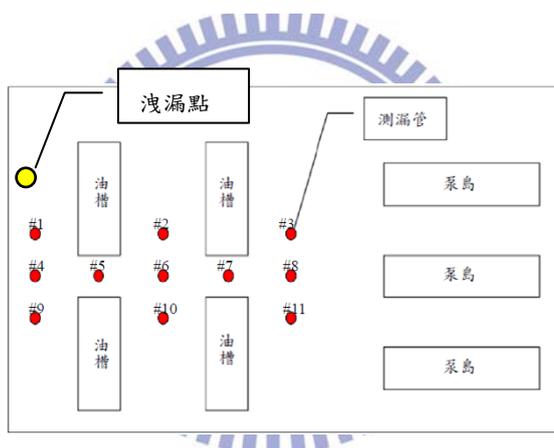
天 項目	1	7	15	30	150	365	160 <sup>1</sup> - <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0.3	400	3968	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05

天 項目	1	7	15	30	150	365	- <sup>3</sup> - <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05

天 項目	1	7	15	30	150	365	- <sup>3</sup> - <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05

#4

天 項目	1	7	15	30	150	365	- <sup>3</sup> - <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	2.7	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05



#8

天 項目	1	7	15	30	150	365	- <sup>3</sup> - <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05

#5

天 項目	1	7	15	30	150	365	- <sup>3</sup> - <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05

#6

天 項目	1	7	15	30	150	365	- <sup>3</sup> - <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05

#7

天 項目	1	7	15	30	150	365	- <sup>3</sup> - <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05

- <sup>1</sup>:土壤氣體濃度達 500 ppmV 所需之時間(day)。
- <sup>2</sup>:地下水含苯濃度達 0.05 mg/L 所需之時間(day)。
- <sup>3</sup>:該監測井之土壤氣體或地下水含苯濃度無法達法規管制標準。

圖 4-15(a) case3 地下水於 5 m 之模擬結果

模擬情境說明

地下水位深度 (m)	5
土層絕對滲透係數 (m <sup>2</sup> )	2.5×10 <sup>-11</sup>
油品洩漏點	Case3 (卸油口下方之輸油管線)
油品洩漏時間	一年

#1

#2

#3

天 項目	1	7	15	30	150	365	60 <sup>1</sup> 365 <sup>2</sup>
氣 (ppmV)	0	0.03	1	44	10880	8467	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0.05	0.05

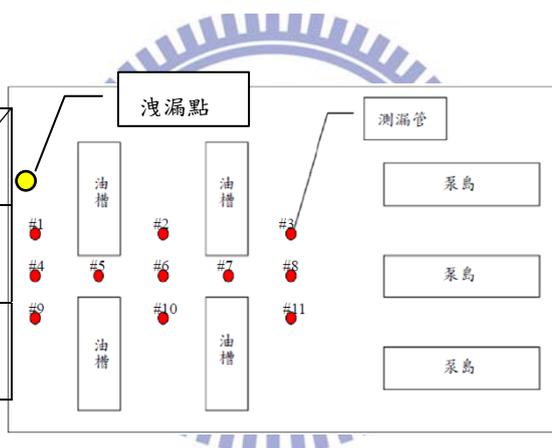
天 項目	1	7	15	30	150	365	- <sup>3</sup> - <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0.04	0.05

天 項目	1	7	15	30	150	365	- <sup>3</sup> - <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0.03	0.05

#4

#8

天 項目	1	7	15	30	150	365	180 <sup>1</sup> - <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	209	2095	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0.02	0.05



天 項目	1	7	15	30	150	365	- <sup>3</sup> - <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05

#5

#6

#7

天 項目	1	7	15	30	150	365	- <sup>3</sup> - <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	8	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0.01	0.05

天 項目	1	7	15	30	150	365	- <sup>3</sup> - <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05

天 項目	1	7	15	30	150	365	- <sup>3</sup> - <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05

<sup>1</sup>:土壤氣體濃度達 500 ppmV 所需之時間(day)。

<sup>2</sup>:地下水含苯濃度達 0.05 mg/L 所需之時間(day)。

<sup>3</sup>:該監測井之土壤氣體或地下水含苯濃度無法達法規管制標準。

圖 4-15(b) case3 地下水於 5 m 之模擬結果

模擬情境說明

地下水位深度 (m)	2
土層絕對滲透係數 (m <sup>2</sup> )	2.5×10 <sup>-12</sup>
油品洩漏點	Case4 (儲油槽之下方)
油品洩漏時間	一年

#5

#6

#7

天 項目	1	7	15	30	150	365	— <sup>3</sup> — <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05

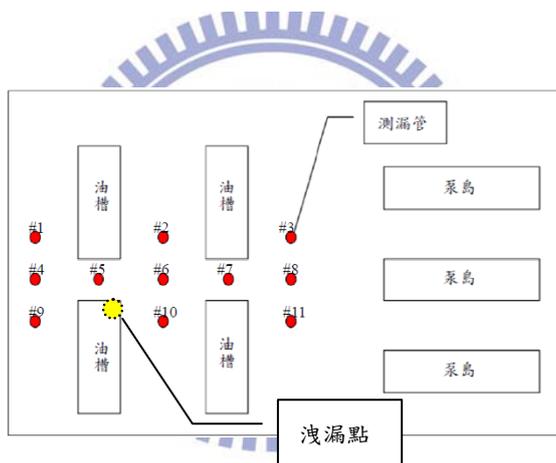
天 項目	1	7	15	30	150	365	— <sup>3</sup> — <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05

天 項目	1	7	15	30	150	365	— <sup>3</sup> — <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05

#4

#8

天 項目	1	7	15	30	150	365	— <sup>3</sup> — <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05



天 項目	1	7	15	30	150	365	— <sup>3</sup> — <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05

#9

#10

#11

天 項目	1	7	15	30	150	365	— <sup>3</sup> — <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05

天 項目	1	7	15	30	150	365	— <sup>3</sup> — <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0.03	0.05

天 項目	1	7	15	30	150	365	— <sup>3</sup> — <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05

<sup>1</sup>:土壤氣體濃度達 500 ppmV 所需之時間(day)。

<sup>2</sup>:地下水含苯濃度達 0.05 mg/L 所需之時間(day)。

<sup>3</sup>:該監測井之土壤氣體或地下水含苯濃度無法達法規管制標準。

圖 4-16(a) case4 地下水於 2 m 之模擬結果

模擬情境說明

地下水位深度 (m)	2
土層絕對滲透係數 (m <sup>2</sup> )	2.5×10 <sup>-11</sup>
油品洩漏點	Case4 (儲油槽之下方)
油品洩漏時間	一年

#5

#6

#7

天 項目	1	7	15	30	150	365	- <sup>3</sup> - <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05

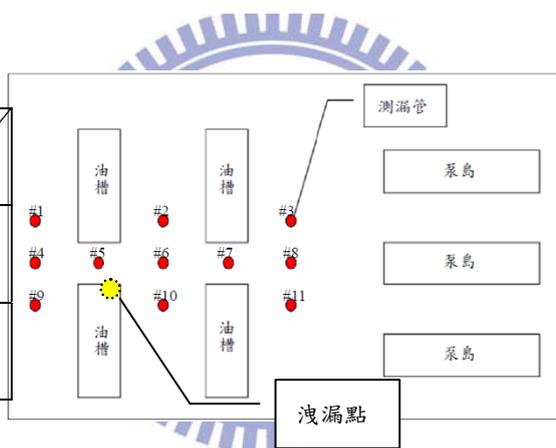
天 項目	1	7	15	30	150	365	- <sup>3</sup> - <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05

天 項目	1	7	15	30	150	365	- <sup>3</sup> - <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05

#4

#8

天 項目	1	7	15	30	150	365	- <sup>3</sup> - <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05



天 項目	1	7	15	30	150	365	- <sup>3</sup> - <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05

#9

#10

#11

天 項目	1	7	15	30	150	365	- <sup>3</sup> - <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05

天 項目	1	7	15	30	150	365	- <sup>3</sup> - <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0.03	0.05

天 項目	1	7	15	30	150	365	- <sup>3</sup> - <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0.04	0.05

<sup>1</sup>:土壤氣體濃度達 500 ppmV 所需之時間(day)。

<sup>2</sup>:地下水含苯濃度達 0.05 mg/L 所需之時間(day)。

<sup>3</sup>:該監測井之土壤氣體或地下水含苯濃度無法達法規管制標準。

圖 4-16(b) case4 地下水於 2 m 之模擬結果

模擬情境說明

地下水位深度 (m)	3
土層絕對滲透係數 (m <sup>2</sup> )	2.5×10 <sup>-12</sup>
油品洩漏點	Case4 (儲油槽之下方)
油品洩漏時間	一年

#5

天 項目	1	7	15	30	150	365	- <sup>3</sup> 89 <sup>2</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0.8	2	0.05

#6

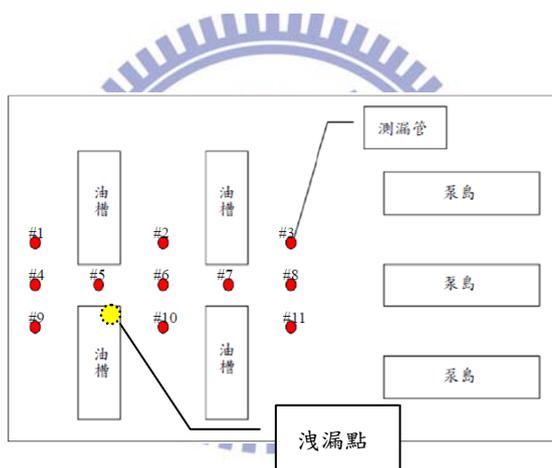
天 項目	1	7	15	30	150	365	- <sup>3</sup> - <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05

#7

天 項目	1	7	15	30	150	365	- <sup>3</sup> - <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05

#4

天 項目	1	7	15	30	150	365	- <sup>3</sup> 312 <sup>2</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0.12	0.05



#8

天 項目	1	7	15	30	150	365	- <sup>3</sup> - <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05

#9

天 項目	1	7	15	30	150	365	- <sup>3</sup> - <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05

#10

天 項目	1	7	15	30	150	365	- <sup>3</sup> 107 <sup>2</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0.08	0.31	0.05

#11

天 項目	1	7	15	30	150	365	- <sup>3</sup> - <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0.04	0.05

- <sup>1</sup>:土壤氣體濃度達 500 ppmV 所需之時間(day)。
- <sup>2</sup>:地下水含苯濃度達 0.05 mg/L 所需之時間(day)。
- <sup>3</sup>:該監測井之土壤氣體或地下水含苯濃度無法達法規管制標準。

圖 4-17(a) case4 地下水於 3 m 之模擬結果

模擬情境說明

地下水位深度 (m)	3
土層絕對滲透係數 (m <sup>2</sup> )	2.5×10 <sup>-11</sup>
油品洩漏點	Case4 (儲油槽之下方)
油品洩漏時間	一年

#5

#6

#7

天 項目	1	7	15	30	150	365	— <sup>3</sup> 90 <sup>2</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0.1	0.25	0.05

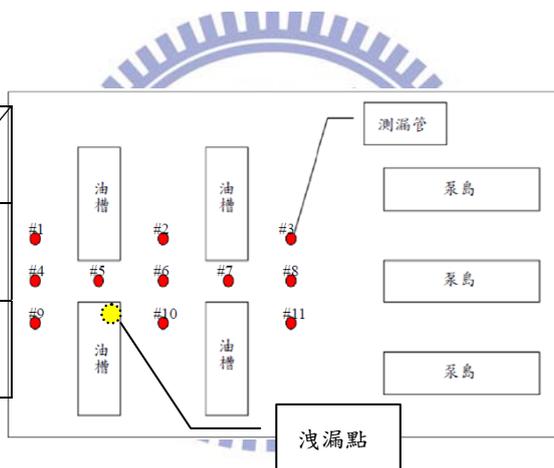
天 項目	1	7	15	30	150	365	— <sup>3</sup> 99 <sup>2</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0.08	0.25	0.05

天 項目	1	7	15	30	150	365	— <sup>3</sup> 101 <sup>2</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0.09	0.26	0.05

#4

#8

天 項目	1	7	15	30	150	365	— <sup>3</sup> — <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0.04	0.05



天 項目	1	7	15	30	150	365	— <sup>3</sup> — <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05

#9

#10

#11

天 項目	1	7	15	30	150	365	— <sup>3</sup> — <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	0.05

天 項目	1	7	15	30	150	365	— <sup>3</sup> 1 <sup>2</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0.04	0.05

天 項目	1	7	15	30	150	365	— <sup>3</sup> — <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0.04	0.05

<sup>1</sup>:土壤氣體濃度達 500 ppmV 所需之時間(day)。

<sup>2</sup>:地下水含苯濃度達 0.05 mg/L 所需之時間(day)。

<sup>3</sup>:該監測井之土壤氣體或地下水含苯濃度無法達法規管制標準。

圖 4-17(b) case4 地下水於 3 m 之模擬結果

模擬情境說明

地下水位深度 (m)	5
土層絕對滲透係數 (m <sup>2</sup> )	2.5×10 <sup>-12</sup>
油品洩漏點	Case4 (儲油槽之下方)
油品洩漏時間	一年

#5

#6

#7

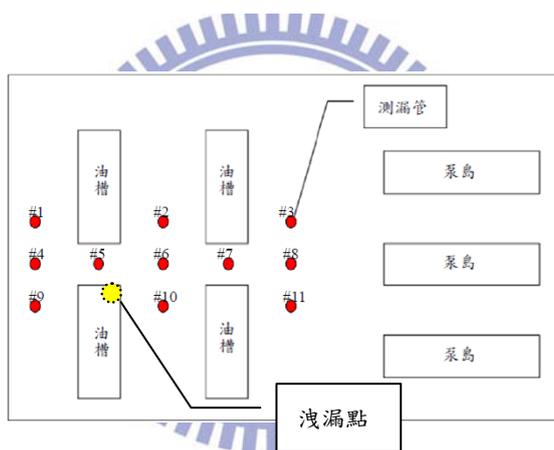
天 項目	1	7	15	30	150	365	<sup>-3</sup> / <sub>-3</sub>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0.08	<b>500</b>
液 (mg/L)	0	0	0	0	0.07	0.18	<b>0.05</b>

天 項目	1	7	15	30	150	365	<sup>-3</sup> / <sub>-3</sub>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0.067	<b>500</b>
液 (mg/L)	0	0	0	0	0.03	0.05	<b>0.05</b>

天 項目	1	7	15	30	150	365	<sup>-3</sup> / <sub>-3</sub>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	<b>500</b>
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	<b>0.05</b>

#4

天 項目	1	7	15	30	150	365	<sup>-3</sup> / <sub>-3</sub>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	<b>500</b>
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	<b>0.05</b>



#8

天 項目	1	7	15	30	150	365	<sup>-3</sup> / <sub>-3</sub>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	<b>500</b>
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	<b>0.05</b>

#9

天 項目	1	7	15	30	150	365	<sup>-3</sup> / <sub>-3</sub>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	<b>500</b>
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0	<b>0.05</b>

#10

天 項目	1	7	15	30	150	365	<sup>-3</sup> / <sub>-3</sub>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0.002	0.029	<b>500</b>
液 (mg/L)	0	0	0	0	0.16	0.31	<b>0.05</b>

#11

天 項目	1	7	15	30	150	365	<sup>-3</sup> / <sub>-3</sub>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0	<b>500</b>
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0.07	<b>0.05</b>

<sup>1</sup>:土壤氣體濃度達 500 ppmV 所需之時間(day)。

<sup>2</sup>:地下水含苯濃度達 0.05 mg/L 所需之時間(day)。

<sup>3</sup>:該監測井之土壤氣體或地下水含苯濃度無法達法規管制標準。

圖 4-18(a) case4 地下水於 5 m 之模擬結果

模擬情境說明

地下水位深度 (m)	5
土層絕對滲透係數 (m <sup>2</sup> )	2.5×10 <sup>-11</sup>
油品洩漏點	Case4 (儲油槽之下方)
油品洩漏時間	一年

#5

#6

#7

天 項目	1	7	15	30	150	365	- <sup>3</sup> 90 <sup>2</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0.43	1.268	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0.14	0.25	0.05

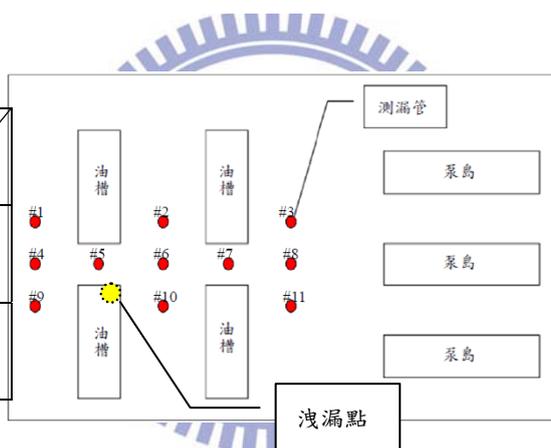
天 項目	1	7	15	30	150	365	- <sup>3</sup> 99 <sup>2</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	3.2	11.89	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0.01	0.25	0.05

天 項目	1	7	15	30	150	365	- <sup>3</sup> 101 <sup>2</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	5.4	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0.13	0.26	0.05

#4

#8

天 項目	1	7	15	30	150	365	- <sup>3</sup> - <sup>3</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0.09	13.21	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0.01	0.05



天 項目	1	7	15	30	150	365	- <sup>3</sup> 230 <sup>2</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0.002	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0.06	0.05

#9

#10

#11

天 項目	1	7	15	30	150	365	- <sup>3</sup> 365 <sup>2</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0.18	7.296	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0	0.06	0.05

天 項目	1	7	15	30	150	365	- <sup>3</sup> 60 <sup>2</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0.15	0.89	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0.21	0.31	0.05

天 項目	1	7	15	30	150	365	- <sup>3</sup> 350 <sup>2</sup>
氣 (ppmV)	0	0	0	0	0	0.13	500
液 (mg/L)	0	0	0	0	0.03	0.07	0.05

<sup>1</sup>:土壤氣體濃度達 500 ppmV 所需之時間(day)。

<sup>2</sup>:地下水含苯濃度達 0.05 mg/L 所需之時間(day)。

<sup>3</sup>:該監測井之土壤氣體或地下水含苯濃度無法達法規管制標準。

圖 4-18(b) case4 地下水於 5 m 之模擬結果

# 第五章 結論與建議

本研究之目的希望透過以數值模擬軟體 TMVOC 模擬加油站之汽油槽洩漏後其污染團於土壤及地下水中之傳輸狀況，並且評估加油站之監測井於不同之境下其監測靈敏度與範圍，由研究結果中有以下結論與建議：

1. 模擬範圍放大倍數為 1X 與 0.5X 之網格尺寸較小，因而對於模擬軟體之計算而言誤差較小，所得之結果也較模擬範圍放大 2X 與 1.5X 為準確。
2. 透水係數較大者其污染團之傳輸速率較快，且隨著距離的增加污染團之傳輸受透水係數之影響越明顯。
3. 當所有模擬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，且孔隙率較小則液相污染團較易充滿孔隙，使得流速增加因而傳輸速率較快。
4. 由透水係數與孔隙率之敏感度分析可知，透水係數相較於孔隙率而言透水係數的變動對於污染團傳輸之影響較大因此較為敏感。
5. 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)。
6. 土層之絕對透水係數較大者( $2.5 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ )能提供浮動油相污染團較大之傳輸速率，因此監測效果優於土層絕對透水係數較小者( $2.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ )。
7. 於本研究中發現回填材料之若以透水係數較大(約為 $\times 10^{-2} \text{ cm/sec}$ )之碎石作為回填材，則能大幅提高監測井之效果。
8. 本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，其整體之監測效果均不佳，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。
9. 於本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。

10. 本研究尚未考慮場址鄰近抽水機之影響，如鄰近有抽水則會影響傳輸速率與方向，未來可於增加模擬抽水井對於污染團傳輸之影響。
11. 本研究之土層狀況假設為均質均向，而土層之異質性是影響污染物傳輸之重要因子，未來可將主要模擬區域之地質材料假設為異質性土層。
12. 於本研究中使用氣油中苯之含量為 5.5%，而於 1990 年美國清潔空氣法修正案(Clean Air Act Amendment)通過後，限制苯於汽油中之體積含量最大值為 1%，因此當苯含量降低後對於地下水體含苯濃度是否能達法規之管制標準(0.05 mg/L)與時間值得後續研究。
13. 於本研究中對於不同之地下水位深度均以同樣之土壤氣體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。
14. 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。



# 參考文獻

1. 行政院環境保護署，「地下儲槽系統土壤氣體監測標準作業程序」，環署土字第0950082897B 號令修正發布，2006。
2. 李松益，「從工安管理角度探討加油站土壤地下水洩漏原因」，在職專班碩士論文，國立中興大學，2009。
3. 陳逸文，「加油站漏油-油槽及管線地下室化可行性評估」，碩士論文，國立中央大學，2006。
4. 張家榮，「油料污染場址水質監測井井篩適當位置之評估」，碩士論文，國立成功大學，2002。
5. 單信瑜，「地下儲槽滲漏偵測方法評估及建議期末報告」，NSC 88-CPC-E-009-004，中國石油股份有限公司，1999。
6. 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。
7. 斯克誠，「蒸汽注入法去除地下水中有機氯化物之研究」，碩士論文，國立台灣大學，2002。
8. 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。
9. 瑞昶科技股份有限公司，「運作中工廠土壤及地下水含氯有機溶劑污染潛勢調查及查證計畫」，行政院環保署，2010。
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. 顏伯穎，「應用數值方法模擬水下空氣注入法整治受非水相液污染區域之研究」，碩士論文，國立成功大學，2002。

1. 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.
2. 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.
3. Bedient, P.B., H.S. Rifai, and C. J. Newell, "Ground Water Contamination: Transport and Remediation," Englewood, Prentice Hall, 1993.
4. 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 Koc," Amoco Corporation. Tulsa, Oklahoma, 2004.
5. 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.
6. 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.
7. Domenico, P. A., F. W. Schwartz, "Physical and Chemical Hydrogeology , 2<sup>nd</sup> ED., "John Wiley & Sons, Inc., NEW YORK, NY, 1998.
8. Das, B. M. "Principles of Geotechnical Engineering, 5<sup>th</sup> Ed," Thomson, Singapore, 2002.
9. 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.
10. Kererat, C. and S. Soralump, "Modeling of Organic Contaminant Migration through Soil Cement Barrier Using TMVOC," *The 17<sup>th</sup> Southeast Asian Geotechnical Conference*, Thailand, 2010.
11. 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.
12. McCray, J. E. and R. W. Falta, "Air Sparging for Subsurface Remediation: Numerical Analysis Using T2VOC," Clemson University, Clemson, 2003.

13. 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.
14. Noonan, D. C. and J. T. Curtis, "Groundwater Remediation and Petroleum: A Guide for Underground storage Tanks," Lewis Publishers, Chelsea, MI, 1990.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. Falta, R. W., K. Pruess, S. Finsterle. and A. Battistelli, "T2VOC User's Guide," Sandia National Laboratory, USA, 1995.
19. Fagerlund, F. and A. Niemi, "Multi-Constituent Modeling of A Gasoline Spill Using The T2VOC Numerical Simulator," Lawrence Berkeley National Laboratory Berkeley, California, 2003.
20. Fetter, C. W., "Contaminant Hydrogeology, 2<sup>nd</sup> Ed," Prentice-Hall, Inc., London, 1999.
21. Geonimics, Inc.: "Soil Vapor Monitoring for Fuel Leak Detection," Report to EPA, EMSL Las Vegas, Nevada, 1987.
22. 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.
23. 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.

24. 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.
25. Pruess, K. "TOUGH User's Guide, Nuclear Regulatory Commission Report NUREG/CR-4645," Lawrence Berkeley Laboratory Report No. LBL-20700, 1987.
26. 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.
27. Reid, R. C., J. M., Prausnitz. and B. E., Poling., "The Properties of Gases & Liquids, 4<sup>th</sup> Ed," McGraw-Hill, New York, 1987.
28. 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.
29. Suthan, S. S., and C. P. Fred, "In situ remediation engineering, CRC Press," pp. 315-353, New York, 2000.
30. Silka, L. R., "Simulation of Vapor Transport Through the Unsaturated Zone-Interpretation of Soil-Gas Surveys," GWMR. pp. 115-123. (1988).
31. Smiley, S. T., "Soil Density Analysis," Bartlett Tree Research Laboratorys, Charlotte, NC, 2000.
32. Schmelling, S. G., and R. R. Ross, "Contaminant Transport in Fractured Media: Models for Decision Makers," USEPA, 1996.
33. Testa, S. M. and M. L. Winegardner, "Restoration of Petroleum –Contaminated Aquifers," Lewis publishers, Chelsea, MI, 1991.
34. Weaver, J. W., J. E. Haas, And J. T. Wilson, "Analysis of Gasoline Spill at East patchoque, New York," Washington, D.C., 1996.
35. Weber, D. and F. Schuille, "Passive Vapor Monitoring of Underground Storage Tanks For Leak Detection," Las Vegas, USA, 1989.
36. Thunderhead Engineering, "PetraSim User Manual," Laboratory, USA, 2008.

37. 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.
38. 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.
39. 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.

參考網址:

1. 經濟部能源局，加油站數與人口比統計表，  
[http://www.moeaboe.gov.tw/oil102/cpknew/A04/A0410/population\\_frame.asp](http://www.moeaboe.gov.tw/oil102/cpknew/A04/A0410/population_frame.asp), 2010。
2. 經濟部修正「加油站設置管理規則」部分條文，台灣法律網，  
[http://www.lawtw.com/article.php?template=article\\_content&area=free\\_browse&job\\_id=144636&parent\\_path=1,2169,1484,&article\\_category\\_id=2100&article\\_id=75220](http://www.lawtw.com/article.php?template=article_content&area=free_browse&job_id=144636&parent_path=1,2169,1484,&article_category_id=2100&article_id=75220)，2008。
3. 行政院環境保護署土污基管會，加油站之污染預防及調查情況，  
[http://ivy5.epa.gov.tw/enews/fact\\_Newsdetail.asp?inputtime=0990506183054](http://ivy5.epa.gov.tw/enews/fact_Newsdetail.asp?inputtime=0990506183054)，2010。
4. Agency for Toxic Substances & Disease Registry,  
<http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp72-c3.pdf>。

## 附表 汽油合成物之化學性質

名稱		苯 (Benzene)	甲苯 (Toluene)	乙苯 (Ethylbenzene)	二甲苯 (Xylene)	環戊烷 (Cyclopentane)	庚烷 (Heptane)	異辛烷 (Isooctane)	甲基第三丁基 醚 (MTBE)
物理化學特性									
Chemical critical temperature, Tc		562.2	591.8	617.2	617.1	460.4	474.8	544	496.4
Chemical critical pressure, Pc		48.2	41	36	35.4	52.7	16.2	25.7	33.7
Chemical critical compressibility, Zc		0.271	0.263	0.262	0.259	0.274	0.273	0.266	0
Pitzer's acentric factor, OMEGA		0.212	0.263	0.302	0.325	0.191	0.556	0.303	0.269
Chemical dipole moment (debyes)		0	0.4	0.4	0.3	2.0	0	0	1.2
Chemical normal boiling point (K)		353.2	383.8	409.3	412.3	285.5	355.6	372.4	328.3
Chemical critical vapor pressure constant	VPA	-6.9827 3	-7.28 607	-7.48645	-7.5922 2	-6.51809	-9.1339 2	-7.3889	-7.825 16
	VPB	1.3321 3	1.380 91	1.45488	1.3944 1	0.38442	2.7532 8	1.2529 4	2.9549 3
	VPC	-2.6286 3	-2.83 433	-3.37538	-3.2274 6	-1.11706	-8.3381 3	-3.1660 6	-6.940 79
	VPD	-3.3339 9	-2.79 168	-2.23048	-2.4037 6	-4.50275	6.8208 5	-2.2200 1	12.174 16

接續附表一

Chemical molecular weight (g/mol)	78.114	92.14	106.168	106.16	64.515	388.05	114.23	88.15	
Reference density for NAPL (kg/m <sup>3</sup> )	885	867	867	864	896	679.5	688	740.6	
Reference temperature for NAPL (K)	289	293	293	293	293	293	293	293	
Reference binary diffusivity of VOC in Air (m <sup>2</sup> /s)	$7.7 \times 10^{-6}$	$8.8 \times 10^{-6}$	$7.7 \times 10^{-6}$	$7.04 \times 10^{-6}$	$1.02 \times 10^{-5}$	$7.7 \times 10^{-6}$	$7.7 \times 10^{-6}$	$7.7 \times 10^{-6}$	
Reference temperature for gas diffusivity (k)	273.1	303.1	298.1	293	293	273.1	273.1	273.1	
Chemical diffusivity exponent	1.52	1.41	1.79	1.93	1.88	1.52	1.52	1.52	
Liquid NAPL viscosity constant (cp)	VLOA	4.612	-5.878	-6.106	-3.82	0	0	0	0
	VLOB	148.9	1287	1353	1027	0	0	0	0
	VLOC	-0.02544	0.004575	$5.112 \times 10^{-3}$	$-6.38 \times 10^{-4}$	0.413	0.387	0.503	0.47
	VLOD	$-2.222 \times 10^{-5}$	$-4.499 \times 10^{-6}$	$-4.552 \times 10^{-6}$	$4.52 \times 10^{-7}$	260	293	293	293
Chemical critical volume (cm <sup>3</sup> /mole)	259	316	374	376	199	664	468	—	
Chemical organic carbon partition coefficient, K <sub>oc</sub> (m <sup>3</sup> /kg)	0.0891	0.273	0.681	0.55	0	0.0114	0.0114	0.114	

接續附表一

Default fraction of organic carbon in soil, $f_{oc}$	0.0001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
VOC biodegradation decay constant ( $s^{-1}$ )	0	0	0	0	0	0	0	0

(摘自 The Properties of Gases & Liquids)

