

# 國立交通大學

土木工程學系

碩士論文

降雨入滲對於地下水中含氯有機溶劑降解之影響

**Effect of rainfall infiltration on degradation of chlorinated sol-  
vents in groundwater**

研究生：葉韋甫

指導教授：單信瑜 博士

中華民國一百零一年九月

降雨入滲對於地下水中含氯有機溶劑降解之影響  
Effect of rainfall infiltration on degradation of chlorinated sol-  
vents in groundwater

研究生：葉韋甫

Student : Wei-fu Yeh

指導教授：單信瑜 博士

Advisor : Hsin-yu Shan

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

September 2012

Hsinchu, Taiwan, Republic of China.

中華民國一百零一年九月

# 降雨入滲對於地下水中含氯有機溶劑降解之影響

研究生：葉韋甫

指導教授：單信瑜 博士

國立交通大學土木工程研究所

## 摘要

本研究針對降雨入滲對於含氯有機溶劑污染場址降解之影響，藉由模擬地下水污染物溶質傳輸的現象，對降雨入滲影響含氯有機溶劑之差異分佈進行分析。利用 Visual MODFLOW 套裝軟體 RT3D 數值模式來模擬含氯有機溶劑污染場址於地下水傳輸，評估各關切污染物對濃度分佈之影響。RT3D 可模擬四氯乙烯降解作用產生三氯乙烯、二氯乙烯、氯乙烯，各關切污染物的吸附作用使各污染物傳輸速度不同。模擬一假設場址於不同降雨量與降雨區塊影響其濃度與分佈和選用一國內著名含氯有機溶劑污染場址做研究案例。研究結果顯示，在假設場址模擬中，降雨量的大小與降雨區域性的不同不僅會影響含氯有機溶劑之濃度與也會改變溶解相污染團的形狀與移動方向。實際案例場址模擬結果顯示，降雨入滲對於地下水中含氯有機溶劑影響會因為都市區域有各式鋪面，雖然會使實際入滲量隨不同地表狀況降低，間接影響入滲到地層中的入滲量，但是入滲仍會影響污染團的濃度與分佈。

關鍵字: Visual MODFLOW、RT3D、含氯有機溶劑、污染傳輸模擬、入滲

# Effect of rainfall infiltration on degradation of chlorinated solvents in groundwater

By

Student: Wei-fu Yeh

Advisor: Hsin-yu Shan

Department of Civil Engineering

National Chiao Tung University

## Abstract

This research, evaluates the effect of rainfall infiltration on degradation of chlorinated solvents in groundwater by numerical simulation of groundwater contaminant transport with MODFLOW and RT3D. The anaerobic degradation of tetrachloroethylene (PCE) and all its daughter products such as trichloroethylene (TCE), dichloroethylene (DCE), vinyl chloride (VC) is taken into account by RT3D. In order to assess the effect of infiltration on the plume of dissolved chlorinated solvents a hypothetical aquifer was established. Infiltration was assumed to occur at various zones and rate to study the resulted change of the plume. In addition, a real site contaminated by chlorinated solvents in Taiwan was selected for the case study. The results of the research illustrated that the size and different regional of the rainfall will affect the concentration and the direction of plume migration. On the other hand, results of the Taiwan DNAPL site simulation showed that the pavement reduced the effect of rainfall infiltration and, in turn, its effect on the plume of chlorinated solvents in groundwater.

Keywords: Visual MODFLOW, RT3D, chlorinated solvent, contaminant transport simulation, infiltration

## 誌謝

此篇論文的完成承蒙許多人的支持以及鼓勵，讓我在曾經想要放棄之時卻又見到一絲曙光，特別感謝指導教授單信瑜 博士愛心與耐心指導，得以順利完成，感謝老師這些日子來，體恤學生的不足，在論文撰寫期間給予研究方向和實質幫助，並且從中學習到對於研究的執著與態度。論文初稿，承蒙王智澤 博士與劉志忠 博士於百忙中詳加審閱，並於口試時給予實際又寶貴的意見，使本論文更加完善，在此致上十二萬分的謝意。

在研究所期間，感謝彥森學長、韋恩學長與培旻學長對於我的照顧和傳授軟體操作的技巧與經驗，也感謝在研究室中一起努力的夥伴-凱仁給了我許多的支持以及鼓勵，學弟-智緯、效丞、潤翰、昱辰，以及所有大地組的同學，在最後幾個月的協助，使得小弟得以節省許多錯誤的嘗試，感謝你們帶給實驗室那麼多歡樂。

最後，感謝我的家人，讓我在求學過程當中無後顧之憂，忙碌之餘總是為我加油打氣，感謝台大骨科醫生張志豪在我受傷期間的細心照料，感謝台大土木系葉明生 博士教導軟體操作經驗，使我終於完成研究所的學業。

碩士生涯承蒙許多貴人的指導與協助，引領我在求學的迷霧中找到前進的方向，同時也讓我學習到許多待人處事的道理。畢業後就要離開校園，也祝福我的師長與諸位好友在日後的人生旅途都能平安順心，學術成就日益精進，僅此小小的成果獻給以上所有關心我的人。謝謝！

葉韋甫 謹誌

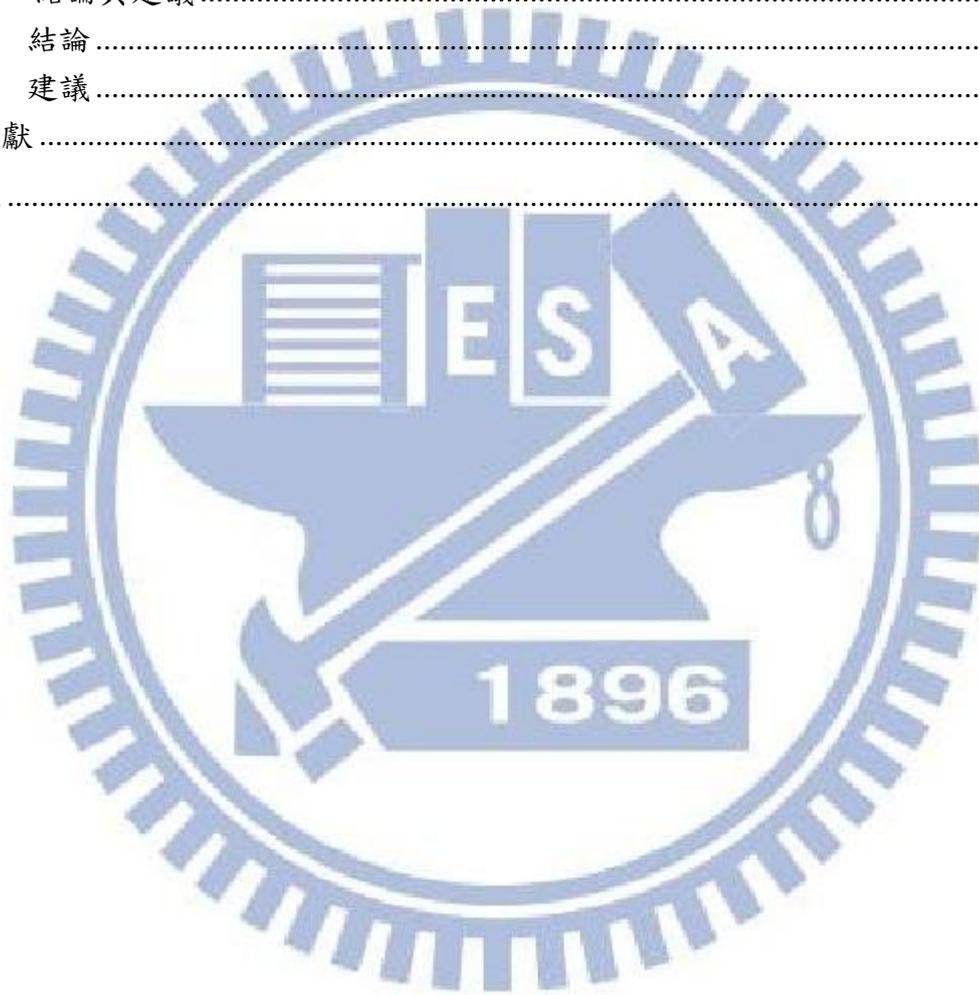
國立交通大學土木工程研究所

中華民國一百零一年九月

# 目錄

摘要 .....	I
Abstract.....	II
誌謝 .....	III
目錄 .....	IV
圖目錄 .....	VI
表目錄 .....	XI
第一章 緒論 .....	1
1.1 研究背景 .....	1
1.2 研究目的 .....	2
1.3 研究方法與流程 .....	2
第二章 文獻回顧 .....	4
2.1 含氯有機溶劑 .....	4
2.1.1 含氯有機溶劑之特性 .....	4
2.1.2 DNAPL 入滲之可能傳輸模式 .....	7
2.1.3 DNAPL 在水中之溶解相 .....	8
2.1.4 生物降解作用 .....	10
2.1.5 DNAPL 在水中溶解相之傳輸模式 .....	12
2.2 入滲對於地下水污染傳輸之影響 .....	14
2.2.1 降雨量分析 .....	15
2.2.2 入滲量推估方法介紹 .....	16
2.2.3 入滲對於含氯有機溶劑之影響 .....	18
2.3 MODFLOW 的控制方程式 .....	22
第三章 研究架構 .....	28
3.1 研究架構 .....	28
3.2 程式設定 .....	29
3.2.1 含水層格網建立與邊界條件 .....	29
3.2.2 降雨入滲量之變異性與降雨區域分佈 .....	32
3.3 國內某含氯有機溶劑污染場址之模擬假設 .....	35
3.3.1 XX 污染場址簡述 .....	35
3.3.2 模擬廠址時間 .....	36
3.3.3 數值模式格網建立 .....	36
3.3.4 地下水流模式邊界條件 .....	37
3.3.5 污染起始條件 .....	39
3.3.6 地下水厭氧還原脫氯模式 .....	40
3.3.7 吸附模式 .....	41
3.3.8 地層分部與水力傳導係數設定 .....	41

3.3.9	模擬之雨量大小與入滲量 .....	43
3.3.10	觀測井設置 .....	46
第四章	假設場址模擬結果 .....	48
4.1	假設場址模擬結果與分析 .....	48
4.1.1	各 Case 之濃度變化與污染團的範圍分佈 .....	48
4.2	實際 XX 場址模擬結果 .....	86
4.2.1	污染概況 .....	86
4.2.2	實際 XX 場址模擬結果與分析 .....	88
第五章	結論與建議 .....	99
5.1	結論 .....	99
5.2	建議 .....	100
參考文獻	.....	101
附錄 A	.....	107



## 圖目錄

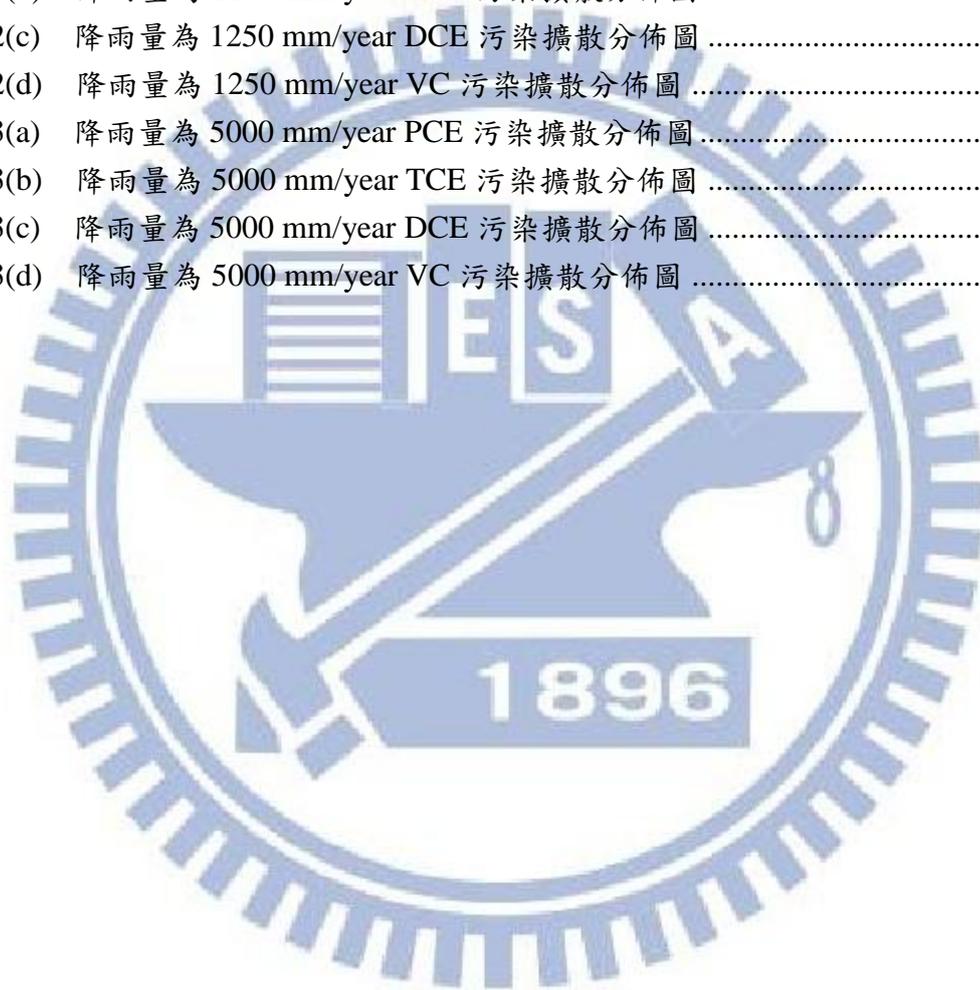
圖 1-1	研究流程圖 .....	3
圖 2-1	DNAPL 在土壤與地下水層中之分佈行為 .....	8
圖 2-2	含氯碳氫化合物於地下環境之衰減機制示意 .....	10
圖 2-3	含氯烯類化合物還原脫氯反應途徑 .....	11
圖 2-4	地下水監測井取樣與 DNAPL 溶解相傳輸之關係 .....	19
圖 2-5	TCE 入滲模擬圖 .....	20
圖 2-6	TCE 溶於水中入滲模擬圖 .....	20
圖 2-7(a)	有鋪面抑制地表入滲之污染團影響範圍 .....	21
圖 2-7(b)	無鋪面抑制地表入滲之污染團影響範圍 .....	21
圖 2-8	後勁溪仁武橋段歷年乾、雨季逸散量 .....	22
圖 2-9	含水層網格化示意圖 .....	24
圖 2-10	兩網格間水流系統示意圖 .....	24
圖 2-11	三維空間中各網格元素間相對位置示意圖 .....	25
圖 2-12	反向分法求解概念圖 .....	26
圖 3-1	研究架構與方法 .....	28
圖 3-2	模擬廠址正面與側面設定之網格大小 .....	30
圖 3-3	假設場址數值模式概念示意圖 .....	31
圖 3-4	降雨量分佈一 .....	33
圖 3-5	降雨量分佈二 .....	33
圖 3-6	降雨量分佈三 .....	34
圖 3-7	降雨量分佈四 .....	34
圖 3-8	降雨量分佈五 .....	35
圖 3-9	XX 場址內外受污染之民井分佈圖 .....	36
圖 3-10	XX 場址數值模式格網建立 .....	37
圖 3-11	XX 廠址地下水流方向 .....	38
圖 3-12	TM-201 至 TM-206 切面位置 .....	38
圖 3-13	第一含水層及第二含水層監測井所測得的水位及其隨時間之變化 .....	39
圖 3-14	Google Map 下 XX 污染場址鳥瞰圖 .....	40
圖 3-15	場內地質剖面圖 .....	42
圖 3-16	在 Visual Modflow 模擬之地質剖面圖 .....	42
圖 3-17	XX 場址的地層柱狀圖 .....	43
圖 3-18	假設測站雨量分佈圖 .....	43
圖 3-19	鋪面入滲區塊分佈 .....	44
圖 3-20	場址數值模式概念示意圖 .....	47
圖 4-1(a)	Case I-1250 之 PCE 鳥瞰濃度分佈圖 .....	50
圖 4-1(b)	Case I-2500 之 PCE 鳥瞰濃度分佈圖 .....	50
圖 4-1(c)	Case I-5000 之 PCE 鳥瞰濃度分佈圖 .....	50

圖 4-2(a)	Case I-1250 之 PCE 側面濃度分佈圖	50
圖 4-2(b)	Case I-2500 之 PCE 側面濃度分佈圖	50
圖 4-2(c)	Case I-5000 之 PCE 側面濃度分佈圖	50
圖 4-3(a)	Case I-1250 之 TCE 鳥瞰濃度分佈圖	53
圖 4-3(b)	Case I-2500 之 TCE 鳥瞰濃度分佈圖	53
圖 4-3(c)	Case I-5000 之 TCE 鳥瞰濃度分佈圖	53
圖 4-4(a)	Case I-1250 之 TCE 側面濃度分佈圖	53
圖 4-4(b)	Case I-2500 之 TCE 側面濃度分佈圖	53
圖 4-4(c)	Case I-5000 之 TCE 側面濃度分佈圖	53
圖 4-5(a)	Case I-1250 之 DCE 鳥瞰濃度分佈圖	54
圖 4-5(b)	Case I-2500 之 DCE 鳥瞰濃度分佈圖	54
圖 4-5(c)	Case I-5000 之 DCE 鳥瞰濃度分佈圖	54
圖 4-6(a)	Case I-1250 之 DCE 側面濃度分佈圖	54
圖 4-6(b)	Case I-2500 之 DCE 側面濃度分佈圖	54
圖 4-6(c)	Case I-5000 之 DCE 側面濃度分佈圖	54
圖 4-7(a)	Case I-1250 之 VC 鳥瞰濃度分佈圖	55
圖 4-7(b)	Case I-2500 之 VC 鳥瞰濃度分佈圖	55
圖 4-7(c)	Case I-5000 之 VC 鳥瞰濃度分佈圖	55
圖 4-8(a)	Case I-1250 之 VC 側面濃度分佈圖	55
圖 4-8(b)	Case I-2500 之 VC 側面濃度分佈圖	55
圖 4-8(c)	Case I-5000 之 VC 側面濃度分佈圖	55
圖 4-9(a)	Case II-1250 之 PCE 鳥瞰濃度分佈圖	59
圖 4-9(b)	CaseII-2500 之 PCE 鳥瞰濃度分佈圖	59
圖 4-9(c)	CaseII-5000 之 PCE 鳥瞰濃度分佈圖	59
圖 4-10(a)	Case II-1250 之 PCE 側面濃度分佈圖	59
圖 4-10(b)	CaseII-2500 之 PCE 側面濃度分佈圖	59
圖 4-10(c)	CaseII-5000 之 PCE 側面濃度分佈圖	59
圖 4-11(a)	Case II-1250 之 TCE 鳥瞰濃度分佈圖	60
圖 4-11(b)	CaseII-2500 之 TCE 鳥瞰濃度分佈圖	60
圖 4-11(c)	CaseII-5000 之 TCE 鳥瞰濃度分佈圖	60
圖 4-12(a)	Case II-1250 之 TCE 側面濃度分佈圖	60
圖 4-12(b)	CaseII-2500 之 TCE 側面濃度分佈圖	60
圖 4-12(c)	CaseII-5000 之 TCE 側面濃度分佈圖	60
圖 4-13(a)	Case II-1250 之 DCE 鳥瞰濃度分佈圖	61
圖 4-13(b)	CaseII-2500 之 DCE 鳥瞰濃度分佈圖	61
圖 4-13(c)	CaseII-5000 之 DCE 鳥瞰濃度分佈圖	61
圖 4-14(a)	Case II-1250 之 DCE 側面濃度分佈圖	61
圖 4-14(b)	CaseII-2500 之 DCE 側面濃度分佈圖	61

圖 4-14(c)	CaseII-5000 之 DCE 側面濃度分佈圖.....	61
圖 4-15(a)	Case II-1250 之 VC 鳥瞰濃度分佈圖.....	62
圖 4-15(b)	CaseII-2500 之 VC 鳥瞰濃度分佈圖.....	62
圖 4-15(c)	CaseII-5000 之 VC 鳥瞰濃度分佈圖.....	62
圖 4-16(a)	Case II-1250 之 VC 側面濃度分佈圖.....	62
圖 4-16(b)	CaseII-2500 之 VC 側面濃度分佈圖.....	62
圖 4-16(c)	CaseII-5000 之 VC 側面濃度分佈圖.....	62
圖 4-17(a)	Case III-1250 之 PCE 鳥瞰濃度分佈圖.....	66
圖 4-17(b)	CaseIII-2500 之 PCE 鳥瞰濃度分佈圖.....	66
圖 4-17(c)	CaseII-5000 之 PCE 鳥瞰濃度分佈圖.....	66
圖 4-18(a)	Case III-1250 之 PCE 側面濃度分佈圖.....	66
圖 4-18(b)	CaseIII-2500 之 PCE 側面濃度分佈圖.....	66
圖 4-18(c)	CaseII-5000 之 PCE 側面濃度分佈圖.....	66
圖 4-19(a)	Case III-1250 之 TCE 鳥瞰濃度分佈圖.....	67
圖 4-19(b)	CaseIII-2500 之 TCE 鳥瞰濃度分佈圖.....	67
圖 4-19(c)	CaseII-5000 之 TCE 鳥瞰濃度分佈圖.....	67
圖 4-20(a)	Case III-1250 之 TCE 側面濃度分佈圖.....	67
圖 4-20(b)	CaseIII-2500 之 TCE 側面濃度分佈圖.....	67
圖 4-20(c)	CaseII-5000 之 TCE 側面濃度分佈圖.....	67
圖 4-21(a)	Case III-1250 之 DCE 鳥瞰濃度分佈圖.....	68
圖 4-21(b)	CaseIII-2500 之 DCE 鳥瞰濃度分佈圖.....	68
圖 4-21(c)	CaseIII-5000 之 DCE 鳥瞰濃度分佈圖.....	68
圖 4-22(a)	Case III-1250 之 DCE 側面濃度分佈圖.....	68
圖 4-22(b)	CaseIII-2500 之 DCE 側面濃度分佈圖.....	68
圖 4-22(c)	CaseIII-5000 之 DCE 側面濃度分佈圖.....	68
圖 4-23(a)	Case III-1250 之 VC 鳥瞰濃度分佈圖.....	69
圖 4-23(b)	CaseIII-2500 之 VC 鳥瞰濃度分佈圖.....	69
圖 4-23(c)	CaseIII-5000 之 VC 鳥瞰濃度分佈圖.....	69
圖 4-24(a)	Case III-1250 之 VC 側面濃度分佈圖.....	69
圖 4-24(b)	CaseIII-2500 之 VC 側面濃度分佈圖.....	69
圖 4-24(c)	CaseIII-5000 之 VC 側面濃度分佈圖.....	69
圖 4-25(a)	Case IV-1250 之 PCE 鳥瞰濃度分佈圖.....	73
圖 4-25(b)	CaseIV-2500 之 PCE 鳥瞰濃度分佈圖.....	73
圖 4-25(c)	CaseIV-5000 之 PCE 鳥瞰濃度分佈圖.....	73
圖 4-26(a)	Case IV-1250 之 PCE 側面濃度分佈圖.....	73
圖 4-26(b)	CaseIV-2500 之 PCE 側面濃度分佈圖.....	73
圖 4-26(c)	CaseIV-5000 之 PCE 側面濃度分佈圖.....	73
圖 4-27(a)	Case IV-1250 之 TCE 鳥瞰濃度分佈圖.....	74

圖 4-27(b)	CaseIV-2500 之 TCE 鳥瞰濃度分佈圖	74
圖 4-27(c)	CaseIV-5000 之 TCE 鳥瞰濃度分佈圖	74
圖 4-28(a)	Case IV-1250 之 TCE 側面濃度分佈圖	74
圖 4-28(b)	CaseIV-2500 之 TCE 側面濃度分佈圖	74
圖 4-28(c)	CaseIV-5000 之 TCE 側面濃度分佈圖	74
圖 4-29(a)	Case IV-1250 之 DCE 鳥瞰濃度分佈圖	75
圖 4-29(b)	CaseIV-2500 之 DCE 鳥瞰濃度分佈圖	75
圖 4-29(c)	CaseIV-5000 之 DCE 鳥瞰濃度分佈圖	75
圖 4-30(a)	Case IV-1250 之 DCE 側面濃度分佈圖	75
圖 4-30(b)	CaseIV-2500 之 DCE 側面濃度分佈圖	75
圖 4-30(c)	CaseIV-5000 之 DCE 側面濃度分佈圖	75
圖 4-31(a)	Case IV-1250 之 VC 鳥瞰濃度分佈圖	76
圖 4-31(b)	CaseIV-2500 之 VC 鳥瞰濃度分佈圖	76
圖 4-31(c)	CaseIV-5000 之 VC 鳥瞰濃度分佈圖	76
圖 4-32(a)	Case IV-1250 之 VC 側面濃度分佈圖	76
圖 4-32(b)	CaseIV-2500 之 VC 側面濃度分佈圖	76
圖 4-32(c)	CaseIV-5000 之 VC 側面濃度分佈圖	76
圖 4-33(a)	Case V-1250 之 PCE 鳥瞰濃度分佈圖	80
圖 4-33(b)	CaseV-2500 之 PCE 鳥瞰濃度分佈圖	80
圖 4-33(c)	CaseV-5000 之 PCE 鳥瞰濃度分佈圖	80
圖 4-34(a)	Case V-1250 之 PCE 側面濃度分佈圖	80
圖 4-34(b)	CaseV-2500 之 PCE 側面濃度分佈圖	80
圖 4-34(c)	CaseV-5000 之 PCE 側面濃度分佈圖	80
圖 4-35(a)	Case V-1250 之 TCE 鳥瞰濃度分佈圖	81
圖 4-35(b)	CaseV-2500 之 TCE 鳥瞰濃度分佈圖	81
圖 4-35(c)	CaseV-5000 之 TCE 鳥瞰濃度分佈圖	81
圖 4-36(a)	Case V-1250 之 TCE 側面濃度分佈圖	81
圖 4-36(b)	CaseV-2500 之 TCE 側面濃度分佈圖	81
圖 4-36(c)	CaseV-5000 之 TCE 側面濃度分佈圖	81
圖 4-37(a)	Case V-1250 之 DCE 鳥瞰濃度分佈圖	82
圖 4-37(b)	CaseV-2500 之 DCE 鳥瞰濃度分佈圖	82
圖 4-37(c)	CaseV-5000 之 DCE 鳥瞰濃度分佈圖	82
圖 4-38(a)	Case V-1250 之 DCE 側面濃度分佈圖	82
圖 4-38(b)	CaseV-2500 之 DCE 側面濃度分佈圖	82
圖 4-38(c)	CaseV-5000 之 DCE 側面濃度分佈圖	82
圖 4-39(a)	Case V-1250 之 VC 鳥瞰濃度分佈圖	83
圖 4-39(b)	CaseV-2500 之 VC 鳥瞰濃度分佈圖	83
圖 4-39(c)	CaseV-5000 之 VC 鳥瞰濃度分佈圖	83

圖 4-40(a)	Case V-1250 之 VC 側面濃度分佈圖 .....	83
圖 4-40(b)	CaseV-2500 之 VC 側面濃度分佈圖 .....	83
圖 4-40(c)	CaseV-5000 之 VC 側面濃度分佈圖 .....	83
圖 4-41(a)	降雨量為 2500 mm/year PCE 污染擴散分佈圖 .....	90
圖 4-41(b)	降雨量為 2500 mm/year TCE 污染擴散分佈圖 .....	91
圖 4-41(c)	降雨量為 2500 mm/year DCE 污染擴散分佈圖 .....	91
圖 4-41(d)	降雨量為 2500 mm/year VC 污染擴散分佈圖 .....	92
圖 4-42(a)	降雨量為 1250 mm/year PCE 污染擴散分佈圖 .....	92
圖 4-42(b)	降雨量為 1250 mm/year TCE 污染擴散分佈圖 .....	93
圖 4-42(c)	降雨量為 1250 mm/year DCE 污染擴散分佈圖 .....	93
圖 4-42(d)	降雨量為 1250 mm/year VC 污染擴散分佈圖 .....	94
圖 4-43(a)	降雨量為 5000 mm/year PCE 污染擴散分佈圖 .....	94
圖 4-43(b)	降雨量為 5000 mm/year TCE 污染擴散分佈圖 .....	95
圖 4-43(c)	降雨量為 5000 mm/year DCE 污染擴散分佈圖 .....	95
圖 4-43(d)	降雨量為 5000 mm/year VC 污染擴散分佈圖 .....	96



## 表目錄

表 2-1	台灣土壤與地下水管制標準值.....	6
表 2-2	物理化學性質.....	6
表 2-3	污染物之有效溶解度.....	9
表 2-4	地下水中常見 20 種污染物及其污染之場址數目百分比.....	15
表 2-5	「水土保持技術規範」逕流係數 C 值對照表.....	17
表 2-6	「公路排水設計規範」逕流係數 C 值對照表.....	17
表 2-7	「水文資料分析與電子計算機應用手冊」逕流係數 C 值對照表.....	17
表 2-8	土壤質地與田間滲漏量之關係.....	18
表 3-1	模擬降雨量編號表.....	32
表 3-2	在 Modflow 的一階反應速率之範圍.....	41
表 3-3	各土層的水力傳導係數.....	42
表 3-4	逕流係數(C 值).....	44
表 3-5	各用地每日有效入滲量(初始降雨量).....	45
表 3-6	各用地每月有效入滲量(降雨量為初始 0.5 倍).....	45
表 3-7	各用地每月有效入滲量(降雨量為初始 2 倍).....	46
表 4-1	各 Case 與降雨量對照表.....	48
表 4-2	Case I-1250 監測井濃度.....	56
表 4-3	Case I-2500 監測井濃度.....	56
表 4-4	Case I-5000 監測井濃度.....	57
表 4-5	Case II-1250 監測井濃度.....	63
表 4-6	CaseII-2500 監測井濃度.....	63
表 4-7	CaseII-5000 監測井濃度.....	64
表 4-8	CaseIII-1250 監測井濃度.....	70
表 4-9	CaseIII-2500 監測井濃度.....	70
表 4-10	CaseIII-5000 監測井濃度.....	71
表 4-11	CaseIV-1250 監測井濃度.....	77
表 4-12	CaseIV-2500 監測井濃度.....	77
表 4-13	CaseIV-5000 監測井濃度.....	78
表 4-14	Case V-1250 監測井濃度.....	84
表 4-15	Case V-2500 監測井濃度.....	84
表 4-16	CaseV-5000 監測井濃度.....	85
表 4-17	不同入滲區域對污染物濃度減少百分比.....	85
表 4-18	地下水污染調查結果.....	87
表 4-19	Case 1 與 Case 2 觀測井濃度監測值.....	97
表 4-20	Case 1 與 Case 3 觀測井濃度監測值.....	98

# 第一章 緒論

## 1.1 研究背景

世界各國對環境污染整治，幾乎都是自目視可知的河川、空氣污染著手，再進入目測難識的地下水污染。地下水年使用量約 71 億立方公尺，佔總用水量的 40.6%（經濟部水利署，2009）。地下水為我國農、工、民生用水重要來源，隨著工業製造、生產過程中原料存放、產品製程及廢棄物質處理不當所致，污染地點可能為仍運作之工廠、停止生產之工廠或其他非法棄置地區。此外，近年來因廢棄物不當掩埋或棄置，造成各地非法棄置場址污染土壤及地下水事件，均是因為工業廢棄物未妥善處理所造成土壤及地下水污染，許多含水層已遭到不同污染物質侵入，造成地下水質惡化。

自 1980 年代發現含氯有機物溶劑釋放到地下水中易形成難以整治的污染後，其性質特殊與一般溶解性污染物之行為大不相同。因人為不當之管理與處置，造成國內外含氯有機溶劑成為土壤及地下水污染之主要來源之一。例如美國超級基金場址有將近 80% 的場址存在三氯乙烯及四氯乙烯污染。而舉凡台灣污染場址如 RCA 桃園廠、台灣氯乙烯公司頭份廠、台氯林園廠、台塑林園廠、台中加工出口區、原國泰塑膠竹南廠、飛利浦竹北廠，及台塑仁武廠等工業區，皆為國內遭受含氯有機溶劑污染之場址。目前關於確認含氯有機物溶劑蓄積池及殘餘相的位置，以及處理含氯有機物溶劑殘餘相及蓄積池的污染，都沒有很完善的解決方法。問題的困難點在於含氯有機物溶劑的比重比水大，所以造成污染範圍並不受地下水位線所控制（Dwarakanath, 1997），而殘留於土壤層或河川底質中，在經由雨水入滲或地下水流之帶動下，逐漸溶解釋出，對鄰近污染地區的地下水、地表水及土壤等環境等介質，造成嚴重且長期的環境危害。

所以，環保署於民國 80 年 4 月完成「土壤污染防治法(草案)」，直到民國 88 年才確定地下水污染應通盤納入考量，將法案名稱更改為「土壤與地下水污染整治法」。因為土壤及地下水污染整治工作相較於空、水、廢、毒等環境污染防治工作有其特殊性，有不易察覺、複雜之特性，也因為其污染的危害影響是日積月累的，若能做好事前污染管制措施，將

會減少事後的整治與醫療費用，並對人民安全多一分保障(行政院環保署，2010)。

## 1.2 研究目的

本研究藉由Visual MODFLOW數值模擬的軟體，模擬雨水入滲對於含氯有機溶劑在地下水污染溶質傳輸的影響，以了解在晴天、下雨與梅雨季節的濃度影響分布。

此外，本研究的主要污染物為四氯乙烯，所以利用Visual MODFLOW數值模擬的軟體之中的RT3D數值模式模擬含氯化合物於地下水傳輸過程中生物降解的結果，評估含氯有機溶劑污染場址因為雨水入滲之影響是否改變四氯乙烯的污染濃度與污染路徑之影響程度。

## 1.3 研究方法與流程

本研究是以數值模擬來探討導雨水入滲量的改變是否影響含氯有機溶劑的污染濃度與污染範圍。含氯有機溶劑污染物傳輸為多相流傳輸，其中地下水溶質傳輸為污染向外擴散之重要傳輸行為。本研究選用Visual MODFLOW此套模擬系統，其包含MODFLOW和RT3D來進行污染物傳輸模擬。本研究首先對含氯有機溶劑污染場址，污染傳輸行為相關文獻做回顧，再將場址參數設定輸入至Visual MODFLOW內建立場址模型。藉由模擬結果，針對污染物傳輸影響因子，入滲量參數做變異性分析，評估入滲量之影響。

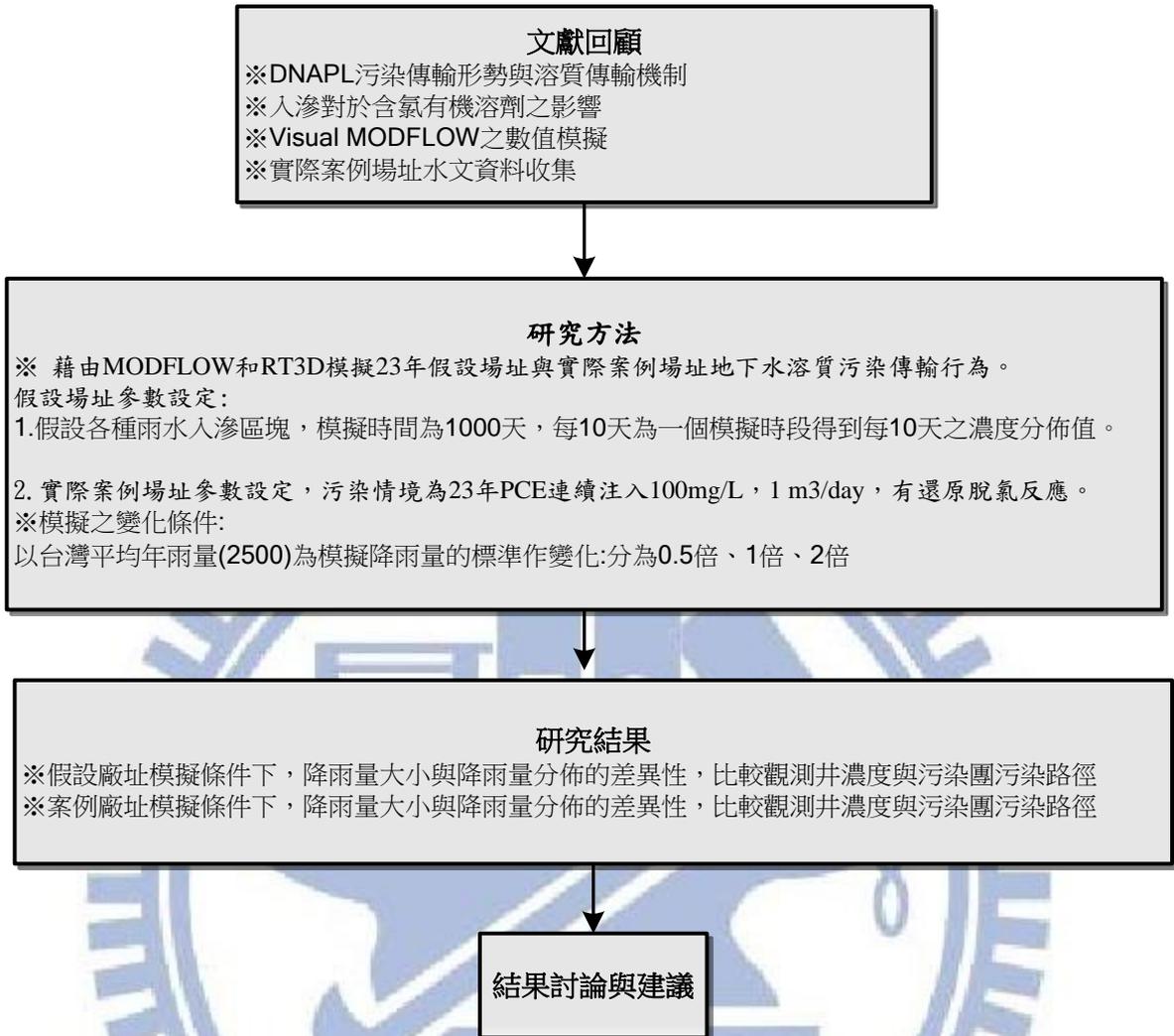


圖 1-1 研究流程圖

## 第二章 文獻回顧

### 2.1 含氯有機溶劑

含氯有機溶劑為重質非水相液體，純有機液體在水溶液中不易溶解，會獨自形成分離相的液體，通稱為非水相液體(Non-aqueous Phase Liquids, NAPL)。NAPL 依照和水的密度關係又可區分為兩大類：較水輕者稱為輕質非水相液體(Light Non-Aqueous Phase Liquid, LNAPL)；較水重者稱為重質非水相液體(DNAPL) (Schwille, 1988)。包括含氯有機溶劑、雜酚油(creosote)、煤焦油(coal tar)、多氯聯苯(PCB)等由於 DNAPL 有低的溶解度、高密度及低黏滯力的影響，使得 DNAPL 在土壤中具有相當大的流動性。水與 DNAPL 相對地為低密度、高黏滯性流體，因此水與溶解相的 DNAPL 在接觸面上會造成不穩定的前進鋒面，即所謂 Viscous Fingering 現象(Homsy, 1987)。當 DNAPL 於未飽和層中會以四種相體(phase)存在，溶於空隙水中的溶解相(dissolved phase)，揮發空氣中的蒸氣相(vapor phase)，連續相狀態移動於孔隙中的可移動相(mobile phase)，獨立分佈孔隙中的不可移動相(immobile phase)，又稱殘留量(residues)，因此，常常在調查過程中發現污染範圍並不會受到地下水位線所拘束(Dwarakanath, 1997)。本研究主要針對 DNAPL 含氯有機溶劑中的四氯乙炔、三氯乙炔、二氯乙炔與氯乙炔來做為這次的研究污染物質。

#### 2.1.1 含氯有機溶劑之特性

- (1) 四氯乙炔(Tetrachloroethylene 或 Tetrachloroethene 或 Perchloroethene，簡稱PCE或perc):

四氯乙炔又稱全氯乙炔，被廣泛用於乾洗和金屬除油(Lash et al., 1998)，也被用來製造其他化學品和消費品，四氯乙炔在室溫下是不易燃的液體，容易揮發，有刺激的甜味。急性高劑量暴露可導致暈眩、噁心、頭痛及神智不清，嚴重者可導致死亡(Levine et al., 1981)。慢性高劑量暴露也可能造成肝及腎臟病變(USEPA., 1985)。乾洗業勞工也被發現與高不孕率與高自發性流產有關聯(Eskenazi et al., 1991b)。

- (2) 三氯乙炔(Trichloroethylene 或 Trichloroethene，簡稱TCE):

三氯乙炔是工業常用溶劑，三氯乙炔在常溫下為無色、透明之

液體，易流動、不燃燒、易揮發，具有芳香味的液體，對神經有麻醉作用，長期接觸易罹患肝癌、腎臟癌、非何杰金氏淋巴瘤、前列腺癌和多發性骨髓癌有關(Wartenberg, 2000)。

### (3) 二氯乙烷(Dichloroethene, Dichloroethylene，簡稱為DCE):

二氯乙烷有1,1-二氯乙烷(1,1-Dichloroethylene)與1,2-二氯乙烷(1,2-Dichloroethylene)兩類，1,2-二氯乙烷有順-與反-兩種同分異構物。1,1-二氯乙烷用來在氯乙烯、丙烯腈(Acrylonitrile)、烯酸酯類(Acrylates)，以及半導體儀器製程中高純度矽晶膜之成長，1,1-二氯乙烷對健康的主要影響是中樞神經系統，可能發生的症狀包括：麻痺、暈眩、抽搐、失去知覺等。1,2-二氯乙烷在常溫下為無色液體，暴露於高濃度的1,2-二氯乙烷中會造成中樞神經系統損傷。低劑量下導致噁心、疲倦、勞累與眩暈等症狀 (Freundt et al., 1977)。

### (4) 氯乙烯(Vinyl Chloride，簡稱為VC):

氯乙烯在常溫下為無色、帶甜味、具毒性的氣體，氯乙烯單體是用來合成聚氯乙烯的原料，一旦形成聚氯乙烯之後，就是穩定、無毒的物質。氯乙烯IARC分類屬於group 1的致癌性化合物，確定對人體具致癌性。雖然在一般工廠並不使用氯乙烯，但是因為三氯乙烯、四氯乙烯等有機溶劑在自然環境中會因為脫氯降解作用產生氯乙烯，因此在許多污染場址中，都可以發現氯乙烯。因此，氯乙烯在美國CERCLA 場址優先危害物質清單中高居第四名，是有機物中的第一名。

含氯有機污染物具有潛在基因突變、胚胎畸形、致癌性以及對生物之毒害與環境中不易被分解之特性。表 2-1 是針對這些含氯有機溶劑在我國土壤污染物管制標準及地下水污染物管制標準值之列表 2-2 以及基本物理化學性質介紹，其中，第一類為國內飲用水質標準之地下水，第二類為非飲用水水源水質保護區內之地下水。

表 2-1 台灣土壤與地下水管制標準值

污染物項目	土壤污染物之管制標準 值(mg/kg)	地下水污染物管制標準值(mg/L)	
		第一類	第二類
四氯乙炔 (Tetrachloroethylene)	10	0.005	0.05
三氯乙炔 (Trichloroethylene)	60	0.005	0.05
1,1-二氯乙炔 (1,1-Dichloroethylene)	-	0.007	0.07
順-1,2-二氯乙炔 (cis-1,2-Dichloroethane)	-	0.07	0.7
反-1,2-二氯乙炔 (trans-1,2-Dichloroethane)	7	0.1	1
氯乙烯(Vinylchloride)	10	0.002	0.02

資料來源：行政院環境保護署

表 2-2 物理化學性質

污染物	Log K <sub>ow</sub>	分子量(grams)	水溶性(mg/L)	密度(g/cm <sup>3</sup> )
四氯乙炔(Tetrachloroethylene)	3.4	165.8	200	1.62
三氯乙炔(Trichloroethylene)	2.61	131.4	1,100	1.46
1,1-二氯乙炔 (1,1-Dichloroethylene)	2.13	96.9	2,250	1.22
順-1,2-二氯乙炔 (cis-1,2-Dichloroethane)	2	96.9	3,500	1.28
反-1,2-二氯乙炔 (trans-1,2-Dichloroethane)	2.06	96.9	6,300	1.26
氯乙烯(Vinylchloride)	1.17	62.5	2740	0.91

資料來源：1.Lucius, et al, 1992

2.gosseptjm, environ SCI, technology 21,1987 (毒管處提供)

3.Engineered Approaches to In Situ Bioremediation of Chlorinated  
Solvents

4.Rippen,1984

## 2.1.2 DNAPL 入滲之可能傳輸模式

DNAPL 為液體密度比水重的化學物質，具疏水性(不易溶於水) 一旦滲入土壤之中，由於密度大於水，因此會迅速向下移動直至不透水層，並於底部累積形成 DNAPL 池(DNAPL Pool)，在移動過程中於未飽和層及飽和層孔隙介質中形成殘餘相(Wilson,1990)，DNAPL 會緩慢溶解至地下水中，以下是 DNAPL 在土層中之傳輸情形(Reitsma and Marshall, 2000): 當 DNAPL 自污染源釋出而侵入地下環境後，首先到達通氣層土壤，此層土壤之孔隙中，同時含有空氣及吸附水，DNAPL 在通氣層時可能揮發成蒸氣相、溶解於水中形成溶解相、殘留於所通過之路徑而形成殘留量(residues)、或受重力影響而形成向下沈降的移動相(mobile phase)。當 DNAPL 穿過毛細作用帶及地下水位面，進入飽和含水層後，由於飽和含水層的土壤孔隙完全為水所充滿，因此 DNAPL 無法揮發成氣相，而以溶解相，殘留量及移動相存在於此飽和含水層中，且在飽和含水層會繼續向下沈陷(見圖 2-1)。此外，雖然 DNAPL 密度比水大，但當 DNAPL 與其他 NAPL 污染混合，使得整體比重小於水時，DNAPL 仍會浮在地下水面，而不會有往下沈陷的現象(US EPA, 2003)。事實上，DNAPL 在往下沈降的過程中，於不飽和層及飽和層的移動方式並不相同，DNAPL 在不飽和層中可能以一均勻之鋒面向下移動;但是，當 DNAPL 由不飽和層進入飽和層時，由於 DNAPL 的黏滯度比水低，因此 DNAPL 與水間的介面並無法保持穩定，故其在飽和層移動是如同指狀(fingers)般地向下移動，而無明顯之鋒面存在(US EPA, 2003)。此外，地質的異質性會使 DNAPL 之移動過程產生不穩定流，亦能夠造成 DNAPL 在飽和層以指狀般地向下移動。

另一方面，當 DNAPL 在移動過程中碰到顆粒較細的黏土層(Clay Lens)或岩床底部(Bedrock)時，可能因無法貫穿這些細質土壤，而堆積並形成停滯的 DNAPL Pool，此時 DNAPL 會緩慢溶解於地下水中，若要完全溶解需數百至數千年，然而，連續體狀的 DNAPL 移動相在通過土壤孔隙時會不斷被截留，而在土壤孔隙中形成無數不連續的獨立體狀之殘留量(US EPA, 2003)，此殘留量一旦形成後，幾乎不可能被地下水驅動(故殘留量又稱之不可移動相)，且其在含水層中溶解緩慢(US EPA,2003)，形成持久性的污染源，若要完全溶解可能需數年至數十年。

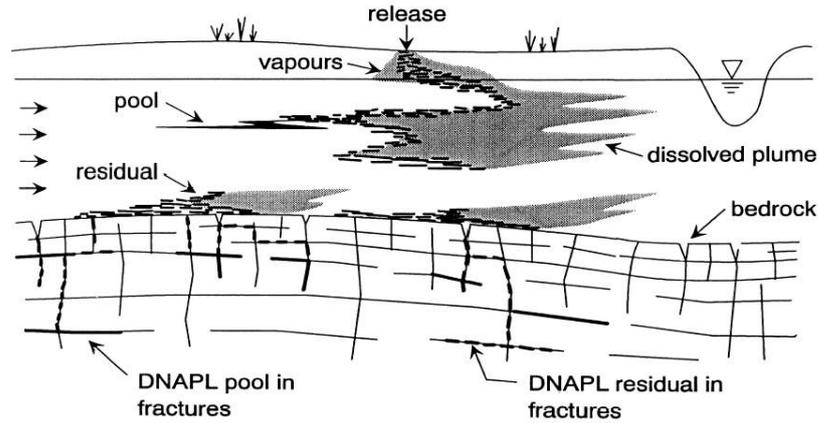


圖2-1 DNAPL在土壤與地下水層中之分佈行為

(Reitsma and Marshall, 2000 ; Urynowicz and Siegrist, 2000)

### 2.1.3 DNAPL 在水中之溶解相

DNAPL溶於水中形成溶解相隨地下水可溶性污染傳輸機制移動。而地下水流經DNAPL造成可移動相的移動與殘留量的形成，與毛細壓力、孔隙、水流、界面張力等因素有關 (Bedient et al.,1994; Pankow and Cherry,1996)。滲透其間DNAPL在移動路徑上會形成殘留量，不再受重力或周圍地下水流動的影響而移動，但仍會溶於水中，因此殘留量為一持久性的污染源(Johnson and Pankow, 1992; Longino and Kueper, 1995)，通常地下水中污染物濃度，超過該物質之有效溶解度之1%，表示場址內非常可能有DNAPL存在(USEPA, 1992)。

DNAPL在水中溶解度根據(Environment,2003)研究顯示，DNAPL經常以混合溶劑的型態被傾倒、棄置或同一工廠的污染池中同時儲存與洩漏的多種不同有機化合物成分洩漏至地表下，因此同時有數種DNAPL的情況實際上是多數案例。DNAPL也會以混合溶劑洩漏出多種不同的有機化合物成份至地表，各種DNAPL成分依據拉午爾定律(Raoult's Law)，推估有效溶解度是其莫耳分量和單一物種的溶解度的乘積(Banerjee, 1984)。若同時有數種DNAPL存在的情況下，污染物並不會以各自溶解度溶解至地下水中；而是各種成分會因為溶解度的大小分別溶解進入地下水中。水中若有多種污染物，則個別污染物之有效溶解度將會降低，其計算方式如下表2-3：

表2-3 污染物之有效溶解度

<p>資料來源：  Cohen and Mercer, DNAPL Site Evaluation, Chapter 7, 1993</p>	$S_i^e = X_i S_i$ <p>其中，<math>S_i^e</math> 為 <math>i</math> 污染物之有效溶解度(mg/L)</p> <p><math>X_i</math> 為混雜污染物中的 <math>i</math> 莫耳分率</p> <p><math>S_i</math> 為 <math>i</math> 污染物之水中溶解度</p>
<p>資料來源：  UK Environment Agent, An Illustrated Handbook of DNAPL Transport and Fate in the Subsurface, Section 7, 2003</p>	$\sum \frac{C_i^{obs}}{S_i} = a$ <p>其中，<math>C_i^{obs}</math> 為 <math>i</math> 污染物的地下水濃度</p> <p><math>S_i</math> 為 污染物之有效溶解度(mg/L)</p> <p>當 <math>a</math> 大於0.01時表示有DNAPL污染的可能性</p>
<p>資料來源：  Feenstra et al.,1991</p>	$C_w = \frac{C_s * \rho_b}{K_d * \rho_b + \theta_w}$ <p>其中，<math>C_w</math> 為地下水中之污染物分配濃度(mg/L)</p> <p><math>C_s</math> 為土壤實測濃度(mg/L)</p> <p><math>\rho_b</math> 為土壤之總體密度(g/cm<sup>3</sup>)</p> <p><math>K_d</math> 為地下水與土壤之間分布係數</p> <p><math>\theta_w</math> 為水份所佔之孔隙率</p>

## 2.1.4 生物降解作用

大部分含氯有機化合物在自然界中可以透過取代 (Substitution)、去鹵化氫 (Dehydrohalogenation)、氧化 (Oxidation) 與還原 (Reduction) 等反應進行分解。化氫反應通常為化學性轉換，氧化為生物性轉換，而取代與還原則可能為兩者之一。

對於含氯碳氫化合物之自然衰減機制而言，則以生物性的厭氧還原脫氯反應為最重要，其在地下環境中之傳輸與衰減機制如圖 2-2 所示。含氯脂肪烴的生物降解通常循著一階反應進行，在降解程序中，含氯碳氫化合物係作為電子接受者 (Electron Acceptor)，氯離子將被氫離子取代。常見的含氯烯類化合物還原脫氯的轉換過程如圖 2-3 所示。

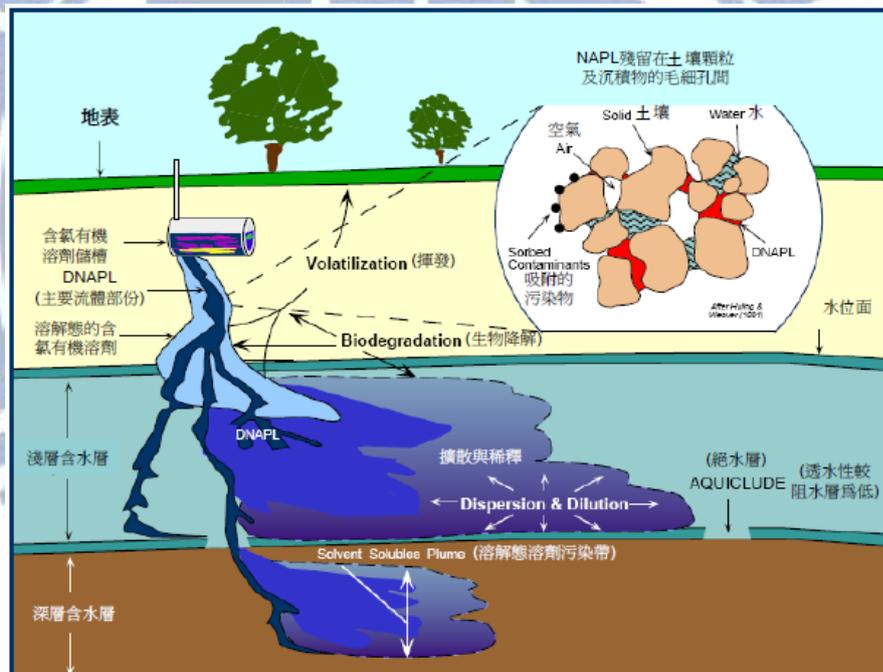


圖 2-2 含氯碳氫化合物於地下環境之衰減機制示意 (Jang et al., 2008)

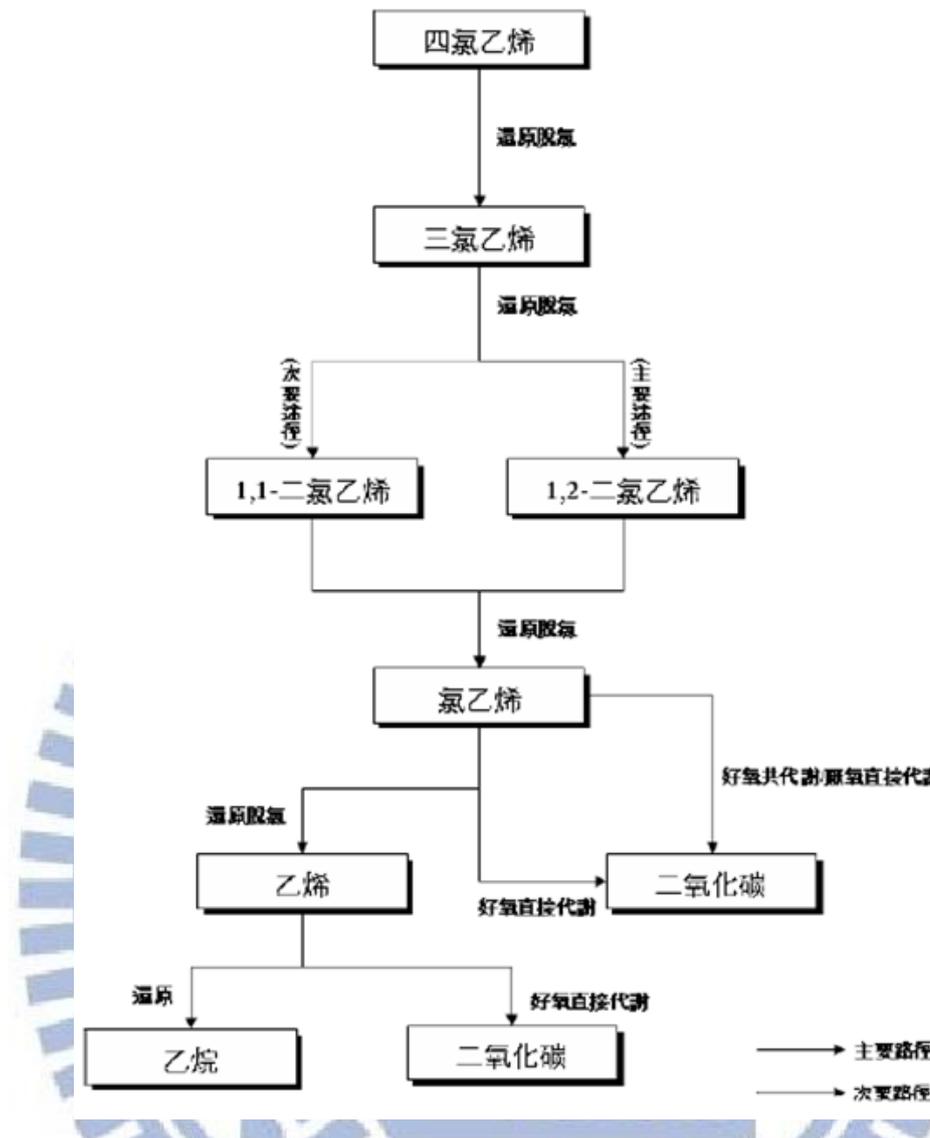


圖 2-3 含氯烯類化合物還原脫氯反應途徑

(El Fantroussi et al., 1998)

在缺氧且存在可利用之碳源及電子接受者，以及存在適當的營養鹽、氧化還原電位、Ph值及溫度時，厭氧菌會降解含氯碳氫化合物，將含氯有機污染物作為電子接受者，四氯乙炔接受電子後釋出氯離子，而原本氯離子則由氫取代，使其轉化成中間產物三氯乙炔，然後再脫氯可能轉成為順-1,2-二氯乙炔、反-1,2-二氯乙炔或1,1-二氯乙炔三種同分異構物，其中又以順-1,2-二氯乙炔為主，極少量的反-1,2-二氯乙炔和1,1-二氯乙炔，最後再脫氯轉換成氯乙炔及乙炔，乙炔可能會轉換為乙烷或直接因生物降解氧化為二氧化碳與水(El Fantroussi et al., 1998)。另一方面，由於PCE、TCE、DCE及VC等含氯碳氫化合物的氧化還原能力不同，因此隨著氯化程度的減少，還原脫氯反應的速率也會越慢 (Vogel and McCarty, 1985；

Bouwer, 1994) ，而這也可以解釋為什麼在PCE與TCE污染且有還原脫氯反應進行中的場址，常發現DCE與VC持續存在，反而未能偵測到PCE與TCE的原因所在。

## 2.1.5 DNAPL 在水中溶解相之傳輸模式

DNAPL 在飽和層中的型態有兩種形式，一為溶解態，一為吸附態。但是，若發生地下水位變動，使得部分液態的 DNAPL 以殘餘飽和度被困在地下水位面以下的土壤孔隙中，則以三態存在。

地下水位面之下的區域稱為地下含水層(Aquifer)，而地下水流動可利用達西定律(Darcy's Law)來描述：

$$q = K \cdot i \cdot A \quad (2-1)$$

式中， $q$  為滲流率(Flow rate,  $L^3/T$ )， $K$  為水力傳導係數( $L/T$ )， $i$  為水力梯度(無因次)， $A$  為滲流截面積( $L^2$ )

流動的速度與地下水的水力梯度成正比，也就是說土壤中的孔隙越大，水力傳導係數越大，水的流動也越快。地下水滲流速度可利用達西定律得到：

$$v_x = \frac{K \times i}{n_e} \quad (2-2)$$

式中， $n_e$  為有效孔隙率。

溶解在地下水中的污染物傳輸模式包含：平流(Advection)、擴散(Diffusion)以及機械延散(Mechanical dispersion)。

### (1) 平流(Advection):

平流是指污染物隨著水分子因水頭(地下水位)差異而帶動，隨地下水傳輸，其一維傳流方程式可表示：

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -v_x \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2-3)$$

## (2) 擴散(Diffusion):

擴散是污染物分子因濃度差異驅動，污染物從較高濃度往較低濃度區域移動。

物質在水中擴散可用費克第一定律(Fick's first Law)來表示:

$$F = -D_d \left( \frac{dC}{dx} \right) \quad (2-4)$$

式中， $D_d$ 為擴散係數( $L^2/T$ )， $\frac{dC}{dx}$ 為濃度梯度(質量/體積/距離)。負號表示從濃度高移至濃度低的情況。此外，費克第二定律則說明溶質濃度隨時間之變化情形：

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_d \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right) \quad (2-5)$$

式中， $\frac{\partial C}{\partial t}$ 為濃度隨時間之變化。而在土層中，溶質傳輸路徑並非直線前進，而是隨著孔隙路徑來移動，導致實際上的傳輸路徑較長，所以傳輸的速度較慢、時間較長。因此，在孔隙介質中的有效擴散係數( $D^*$ )可表示:

$$D^* = \omega D_d \quad (2-6)$$

式中， $\omega \leq 1$ ，為曲折性的修正因子，其值介於 0.5~0.01 之間。

## (3) 機械延散(Mechanical dispersion):

機械延散則是因溶解在水中的污染物，隨著水分子的真實運動路徑，顯示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在沿水流方向縱向(Longitudinal)和橫向(Transverse)延散方向散佈。

$$\text{縱向機械延散 } D_{mL} = \alpha_L v_x \quad (2-7)$$

$$\text{橫向機械延散 } D_{mT} = \alpha_T v_x \quad (2-8)$$

$v_x$ 為平均線性流速( $L/T$ )， $\alpha_L$ 為縱向延散度( $L$ )， $\alpha_T$ 為橫向延散度( $L$ )；因延散作用在水流方向較為劇烈，因此通常 $\alpha_T$ 約為 $\alpha_L$ 的十分之一左右。

#### (4) 水動力延散(Hydrodynamic dispersion):

水動力延散作用中在二維地下水流場中，縱向與橫向水動力延散係數， $D_L$ 與 $D_T$ 分別表示為：

$$D_L = \alpha_L v_x + D^* \quad (2-9)$$

$$D_T = \alpha_T v_x + D^* \quad (2-10)$$

綜合水動力延散傳輸機制，推導得三維平流-延散方程式(Freeze and Cherry, 1979 ; Bear, 1972 ; Ogata, 1970)：

$$D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - v_x \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (2-11)$$

## 2.2 入滲對於地下水污染傳輸之影響

土壤與地下水層的污染是密不可分的。往往污染物通過土壤，往下滲漏到地下水中；反之，被污染的地下水也會將污染物帶到原本未被污染的含水層土壤中。地表污染物進入地下水中有三種方式：已被污染之地表水經由天然補注途徑進入地下水體，或是工業和家庭廢棄水處置不當時，受污染之用水及污染物經由地表水入滲或是降雨入滲進到地下水體之中。其中工業活動產生大量有害廢棄物，包含各種以固體、液體存在之化學物質，往往因不當處置、儲存、任意棄置或排放，而經由土壤進入地下水層中，造成地下水污染，其中以有機溶劑污染地下水最為嚴重。部分污染物會因為土壤的吸附作用而停留在土壤中。但是，假如污染物的量和下滲的水量充足，則這些污染物會繼續往下滲，直達地下水含水層。因為吸附作用停留在土壤中的污染物，也會在日後受到雨水的入滲溶解釋放出來，隨著下滲的污染團繼續往下帶到更深層土壤或地下水含水層中。因此，往往將被污染的土壤視為地下水的污染源。

就目前現有我國環保署所列管登記之重大地下水污染事件中，以有機溶劑所佔有的比例將近80%，其中又以含氯有機溶劑之地下水污染事件所佔有的比例最大。美國環保署對546個國家優先整治場址(National Priority List, NPL)中所做的調查統計，見表2-4，美國環保署國家應變計畫(National Contingency Plan) (USEPA, 1997)統計地下水中常見的20種污染物及其所污染之場址數目百分比。其中最常見的是具有DNAPL特性之三氯乙烯(TCE)，約有33%的NAL場址之地下水中有發現。其他如四氯乙烯(PCE)，三氯乙烷(TCA)及二氯甲烷等含氯有機溶劑，也是名列前茅。

至於國內方面，則有美商無線電公司(RCA)因有機溶劑處置不慎，造成TCE等污染物入滲至土壤及地下水的污染事件。儘管目前已知的地下水受TCE污染場址仍相當有限，然而，由於TCE在國內的年使用量至今高達8,000公噸以上(行政院環保署, 2004)。

表2-4 地下水中常見20種污染物及其污染之場址數目百分比

順序	污染物	污染場比例	順序	污染物	污染場比例
1	Trichloroethylene(TCE)	33%	11	Chromium and Compounds	15%
2	Lead and Compounds	30%	12	1,1,1-Trichloroethane(1,1,1-TCA)	14%
3	Toluene	28%	13	Zinc and Compounds	14%
4	Benzene	26%	14	Ethylbenzene	13%
5	Polychlorinated biphenyls(PCB)	22%	15	Xylene	13%
6	Chloroform	20%	16	Methylene Chloride	12%
7	Perchloroethylene(PCE)	16%	17	Trans-1,2-dichloroethylene	11%
8	Phenols	15%	18	Mercury	10%
9	Arsenic and Compounds	15%	19	Copper and Compounds	9%
10	Cadmium and Compounds	15%	20	Cyanides	8%

資料來源: US EPA (1997)

### 2.2.1 降雨量分析

台灣的水文條件，年平均降雨量約2,510公釐，但是降雨時空分布不均，也嚴重影響水資源的利用，78%的降雨集中在每年5到10月，其中又以颱風及豪雨居多，大雨宣洩不及時常易釀成災害；相反地，枯水時期則常有缺水情況；而降雨空間的分布差異也很大，北部的豐枯比約6比4，中部和東部約8比2，南部則為9比1(經濟部水利署,2010)。

- (1) 有雨量、流量站之集水區，建議採用以下方法進行推估，並視情況更新參數及驗證模式。例如：無因次單位歷線、瞬時單位歷線、地貌型瞬時單位歷線及水筒模式等。
- (2) 有雨量但無流量資料之集水區，若有適用於該流域之無因次單位歷線，應優先使用之，否則應利用降雨－逕流模式中之合成方法

(三角形單位歷線、合成單位歷線等)或合理化公式法推估之，但應注意各方法之限制條件。

- (3) 有年最大瞬時流量資料之地點，需利用實測流量頻率分析方法進行比較驗證。
- (4) 對於雨量、流量資料缺乏之集水區，則可利用迴歸經驗法或比流量法等法推估之。

## 2.2.2 入滲量推估方法介紹

### (1) 逕流係數的合理化公式

逕流係數為地表面逕流量與該時間內總降雨量之比值。逕流係數之大小與地表特性、地表坡度、地表蓄水量、土壤飽和程度及降雨強度延時有關。分析降雨量時須特別留意分析區域內之降雨分布及土地利用應維持均一特性。因此，當分析面積小於10平方公里，考量區域特性變化不大時，得採用合理化公式進行分析。各項參數說明及洪峰流量估算程序如下所示：

$$Q_p = \frac{1}{360} \cdot C \cdot I \cdot A \quad (2-12)$$

其中， $Q_p$ ：某特定設計頻率之洪峰流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )；

$C$ ：逕流係數，可參照下表；

$I$ ：集流時間內之平均雨量強度 ( $\text{mm}/\text{hr}$ )；

$A$ ：集水面積 ( $\text{km}^2$ )。

逕流係數  $C$  值推估：

應依各土地分類之面積權重推估逕流係數  $C$  值，至於各分類說明則可參考下列對照表 2-5、2-6、2-7。

表 2-5 「水土保持技術規範」逕流係數 C 值對照表

集水區狀況	陡峻山地	山嶺區	丘陵地或 森林地	平坦耕地	非農業 使用
無開發整地區	0.75~0.90	0.70~0.80	0.50~0.75	0.45~0.60	0.75~0.95
開發整地區整 地後	0.95	0.90	0.90	0.85	0.95~1.00

資料來源：水土保持技術規範

表 2-6 「公路排水設計規範」逕流係數 C 值對照表

土地情形	C 值	土地情形	C 值
山區河川	0.75~0.85	平坦耕地	0.45~0.60
平地河川	0.45~0.75	水田及水塘	0.70~0.80
山區平地各半流域	0.50~0.75	市街區（建築面積>60%）	0.50~0.90
險峻山坡地	0.75~0.90	住宅區	0.35~0.65
平緩山坡地	0.60~0.80	村落（建築面積<30%）	0.30~0.50
覆蓋平原丘陵地	0.40~0.70	工業區	0.50~0.80
平地丘陵	0.35~0.60	公園、運動場	0.30~0.65
草原區	0.20~0.60	不透水鋪面	0.85~0.95

資料來源：公路排水設計規範

表 2-7 「水文資料分析與電子計算機應用手冊」逕流係數 C 值對照表

集水區狀況	陡峻 山地	三紀層 山嶺區	丘陵地 或森林 地	平坦 耕地	灌溉中 水田	山地 河川	平地 小河川	流域之 大半為 平地之 大河川
一次暴雨逕流 係數%	75~90	70~80	50~75	45~60	70~80	75~85	45~75	50~75
年逕流係數%	70~85	60~75	40~70	35~60	—	70~80	40~75	45~70

資料來源：水文資料分析與電子計算機應用手冊

## (2) 經濟部水利署經驗公式

經濟部水利署設計規範之經驗公式計算了台灣在水稻田的入滲率估算方法，主要應用於推估水田灌溉所需的水量：

$$f = \frac{240}{CI_f} \quad (2-13)$$

式中， $f$  為入滲率(mm/day)， $C$  為土壤黏粒百分比(%)， $I_f$  為入滲係數依土壤質地而定，當  $C$  值百分比越大，入滲率就越小，而表2-8為各種不同土壤質地與田間滲漏量之關係表。

表2-8 土壤質地與田間滲漏量之關係

土壤質地	黏粒含量(%)	入滲係數	滲漏量(mm/day)
砂質礫土	1.6	1	150
礫質砂土	5	1.1	43.7
砂土	8	1.2	25
壤質砂土	11.6	1.3	15.9
砂質壤土	14.9	1.4	11.5
壤土	18.2	1.5	8.8
黏質壤土	21.9	1.6	6.85
壤質黏土	27	1.7	5.24
黏土	33	1.8	4.04
中黏土	40	1.9	3.16
種黏土	49	2	2.45

### 2.2.3 入滲對於含氯有機溶劑之影響

當含氯有機溶劑在移動過程中在未飽和層中所殘留在顆粒之間的DNAPL會隨著降水或是地表水入滲而緩慢溶解至地下水中，加上地下水流經過飽和層的殘餘態DNAPL時，也會溶解出部分DNAPL向地下水流低水頭的區域產生持久性的污染源 (Grathwohl and Teutsch,1997)。

USEPA(1992)研究之結果當地下水流速在0.1~1 m/day時，DNAPL時所溶解產生的濃度可接近DNAPL的溶解度。Mercer and Cohen,1990實驗結果在25 °C時，TCE約為1100 mg/L，但是實際受污染場址地下水濃度僅在0.001~1 mg/L之間，推估可能原因為DNAPL污染傳輸受到擴散、吸附、

降解，和抽取地下水與乾淨地下水稀釋....等影響因子導致測出的濃度有所改變(Anderson et al., 1992a)。如圖2-2中顯示，若TCE的溶解度為1,100 mg/L，在A點水中DNAPL濃度可能接近溶解度；但是在B點則因為經過影響因子，DNAPL濃度會降低；C點為地下水水樣實際之監測點位，此時TCE的濃度因為監測井內的稀釋作用只有溶解度的1.81%。所以只要採樣所得的地下水水樣中DNAPL濃度達到溶解度的1%，表示在此範圍附近可能存在DNAPL殘餘物於地下含水層孔隙之中。(Environment Agency UK, 2003)

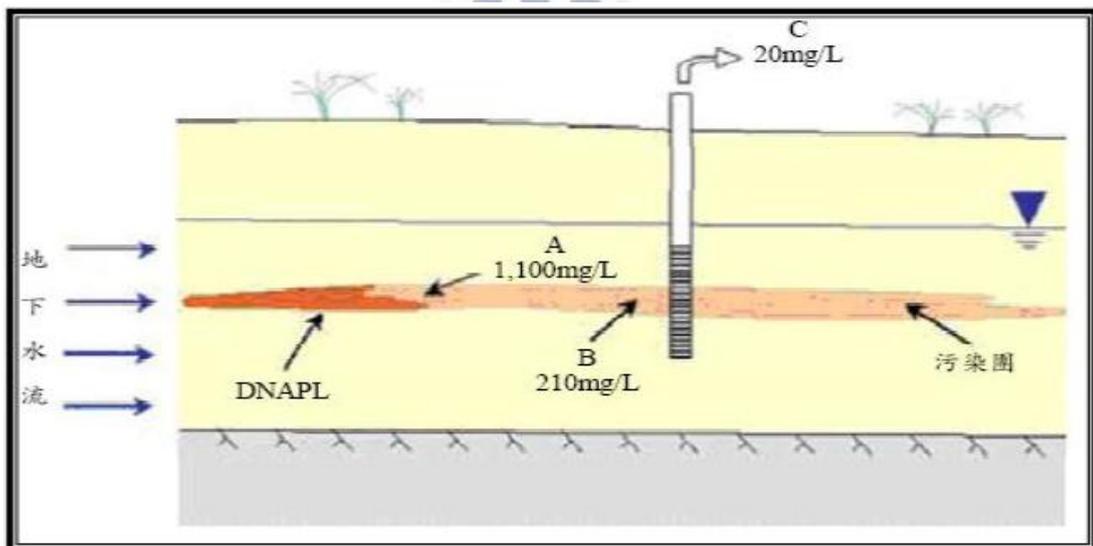


圖2-4 地下水監測井取樣與DNAPL溶解相傳輸之關係

(Environment Agency UK, 2003)

學者Ken Walton et al., 2011模擬研究TCE在非飽和土壤中有無與水溶合都會受重力向下污染，不同在於過程中如果和水溶合模擬結果顯示會更快進入地下水層中。Sale and McWhorter, 2001與Dekker and Abriola, 2000的研究中分別証實了DNAPL污染團受到導水度異質性以及入滲區域的入滲量變化等相關影響因子有絕對的關係。

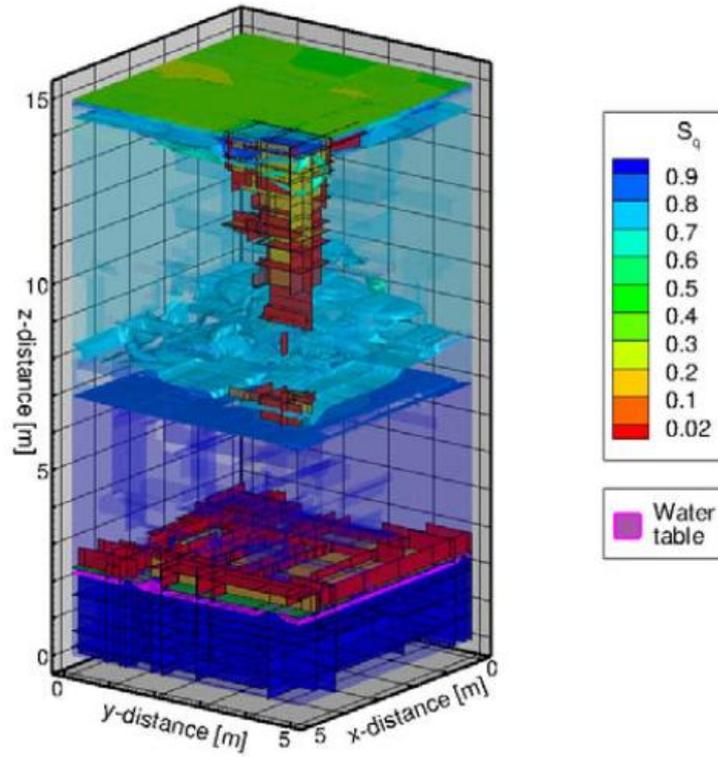


圖 2-5 TCE 入滲模擬圖 (Ken Walton et al., 2011)

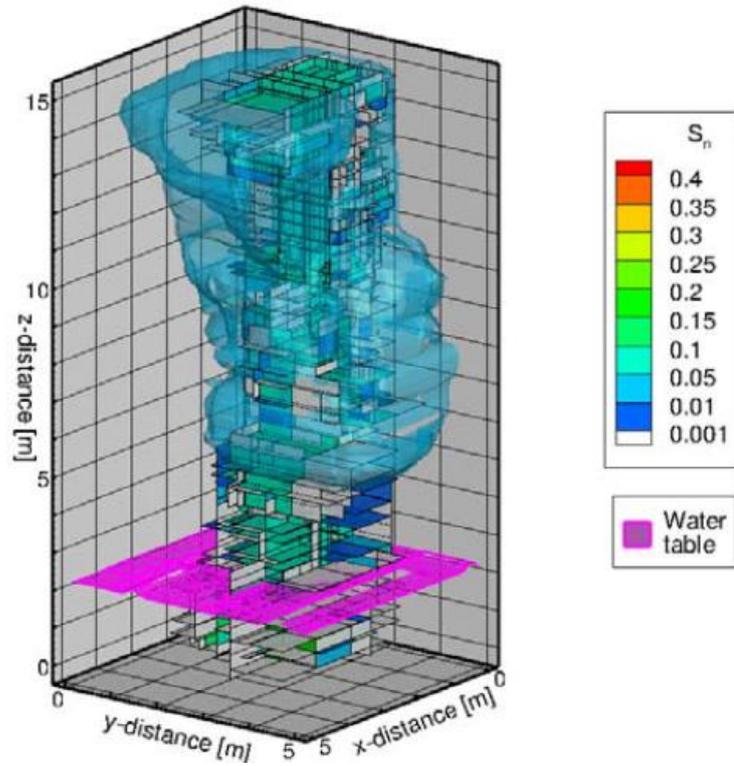
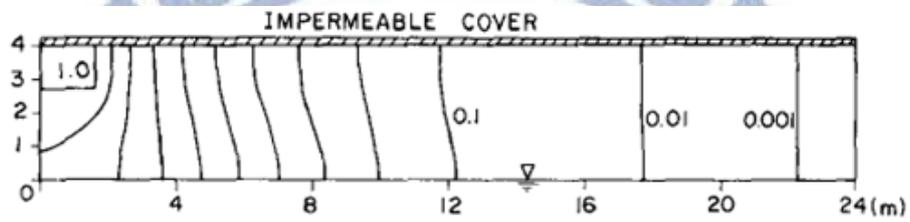
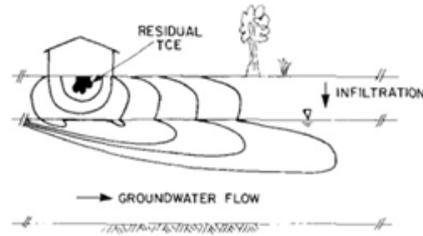


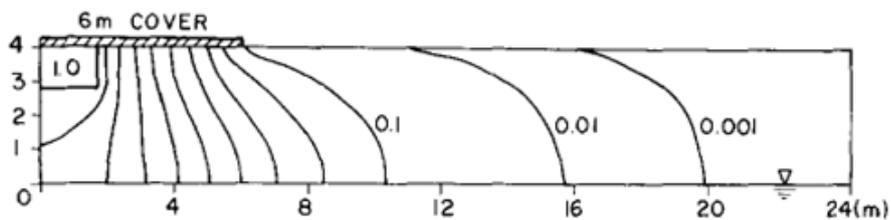
圖 2-6 TCE 溶於水中入滲模擬圖 (Ken Walton et al., 2011)

Carl A. Mendoza and Todd A. McAlary, 1990 研究顯示地表水的入滲會影響溶解相污染團在地下水中的污染傳輸。研究結果顯是在表面鋪上不透水布的在延著地下水流方向污染團範圍較小；相較於只鋪一部分不透水布的污染團影響下游範圍較廣。



$$\begin{aligned} z \uparrow \frac{\partial c}{\partial z} = 0 \quad \frac{\partial h^*}{\partial z} = 0 \\ \frac{\partial c}{\partial x} = 0 \quad \frac{\partial h^*}{\partial x} = 0 \end{aligned} \quad \begin{array}{c} \text{SOURCE} \\ \downarrow \\ h^* = z + \frac{p}{\rho_a g} \\ \rightarrow x \end{array} \quad \begin{aligned} \frac{\partial c}{\partial z} = 0 \quad D \frac{\partial c}{\partial z} = q_0 c_w t \\ \frac{\partial h^*}{\partial z} = 0 \quad D \frac{\partial c}{\partial z} = q_0 c_w t \end{aligned} \quad q_0 = \frac{D_w^*}{h_w t} = 2 \times 10^{-9} \text{ m/sec}$$

圖2-7 (a) 有鋪面抑制地表入滲之污染團影響範圍



$$\begin{aligned} z \uparrow \frac{q_0 c_0}{\theta} = D \frac{\partial c}{\partial z} - v c \quad q_0 = 0.25 \text{ m/yr} \\ h = 10 \text{ m} \quad \frac{\partial c}{\partial x} = 0 \end{aligned} \quad \begin{array}{c} \text{SOURCE AREA} \\ \downarrow \\ \frac{\partial c}{\partial x} = 0 \\ q_x = 0.05 \text{ m/d} \\ \rightarrow x \end{array} \quad \begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial z} = 0 \quad \frac{\partial c}{\partial z} = 0 \end{aligned}$$

圖2-7 (b) 無鋪面抑制地表入滲之污染團影響範圍 (Carl A. Mendoza and Todd A. McAlary, 1990)

在台灣林啟燦等人長時間監測資料，針對高雄市的後勁溪仁武橋做調查結果顯示，2006年7月之前仁武橋段氯仿呈低濃度且趨於穩定之狀態，從7月開始，氯仿濃度逐漸上升，此結果一直持續至11月時濃度才開始下降，其他年分亦呈現類似之趨勢。推估可能原因：

- (1) 因為污染物受到在雨季時強降雨，導至殘留於土壤孔隙之中的氯仿或是其他污染物質與雨水互相混合，順著雨水或是地下水流入地下含水層中，進而測得在降雨時的污染濃度上升。
- (2) 降雨量大時地下水位上升，導致地下水位高於殘留在土壤中的氯仿，使得污染物溶解在地下水中，造成在雨季時在觀測井所測得之氯仿濃度比沒降雨時來得高出許多，都是可能造成污染濃度上升的原因。

年度	2006年		2007年		2008年		2009年		2010年	
	乾季	雨季								
氯仿濃度 C (mg/m <sup>3</sup> )	5	560	87	2369	565	1193	344	1116	91	876
流量 Q (m <sup>3</sup> /min)	40.23	73.48	40.23	73.48	40.23	73.48	40.23	73.48	40.23	73.48
逸散總量 QC (公噸/年)	0.1	22	2	92	12	46	7	43	2	34
逸散總量合計 (公噸/年)	22		93		58		50		36	
Total (公噸)					259					

圖2-8 後勁溪仁武橋段歷年乾、雨季逸散量

### 2.3 MODFLOW 的控制方程式

本研究採用美國地質調查所 (U.S. Geological Survey) 發展的地下水流模擬方程式 MODFLOW (McDonals and Harbough, 1998)，來建立地下水流之數值模式。MODFLOW 係採用有限差分法 (Finite Difference Approach) 來求解地下水流控制方程式，該程式可解一維、二維及三維的地下水問題，從 1980 年代發展至今，已為國際廣泛接受與使用。雨水入滲改變 DNAPL 在地表下的汙染路徑，MODFLOW 模擬的主要目的在於計算地下水頭，已有許多附屬軟體藉由 MODFLOW 的水頭計算來進行模擬。

MODFLOW將含水層分割成適當個數的網格 (cell)，並針對每個網格列出差分形式的地下水流控制方程式，未知數為地下水頭，最後再利用數值方法求地下水頭線性聯立方程式之近似解。然而，除了因水頭梯度 (hydraulic gradient) 所造成的地下水流外 (達西定律)，同時也必須對地下水含水層內的水文及物質變化現象加以量化，如河川、湖泊與含水層的互動與側向補注、人為的抽水及灌注等。

本研究MODFLOW的處理程式採用體心式有限差分法 (Block-Centered Finite-Difference Approach)，來進行地下水流控制方程式之差分工作，有限差分法是將一連續的物理區間，分割成有限個形狀規則的網格，同時將控制方程式帶入離散的格點中，配合初始條件及邊界條件，計算某一格點與鄰近格點的關係。根據達西定律 (Darcy's Law)，在密度恆定下，三維地下水流的流動，可以用下述之偏微分方程式表示：

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_x \frac{\partial h}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_y \frac{\partial h}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_z \frac{\partial h}{\partial z}\right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2-14)$$

其中， $K_x$ 、 $K_y$ 、 $K_z$ 分別為沿著x、y、z主軸方向上的水力傳導係數 [L/T]，就一般現代沖積層而言，z方向為最小水力傳導係數的方向，通常垂直地表； $W$ 為進出單位體積模擬範圍之水量 [1/T]； $h$ 為水頭值 [L]； $S_s$ 比儲水率 [1/L]； $t$ 為時間 [T]。此控制方程式假設網格為飽和，即屬受壓狀態。

依據圖2-7，可求得差分化的控制方程式公式(2-14)。首先定義三個主軸方向：列 (Row)，每一列的間距為 $\Delta C_i$ ；行 (Column)，每一行間距為 $\Delta r_j$ ；層 (Layer)，每層之間距為 $\Delta v_k$ 。同時根據水流連續性方程式：水流入網格元素的量等於流出網格元素的量和網格元素內儲存量的變化率之總和。可表示為：

$$\Sigma Q_i = S_s \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta V \quad (2-15)$$

其中， $Q_i$ 為水流入網格元素之水流率 [L<sup>3</sup>/T]， $S_s$ 為網格之比儲水率 [1/L]， $V$ 為網格元素之體積 [L<sup>3</sup>]， $h$ 為在 $t$ 時段內之水頭變化 [L]。於公式(2-15)中，以正值之 $Q_i$ 代表水流流入網格的流量；反之，則代表水流流出網格。

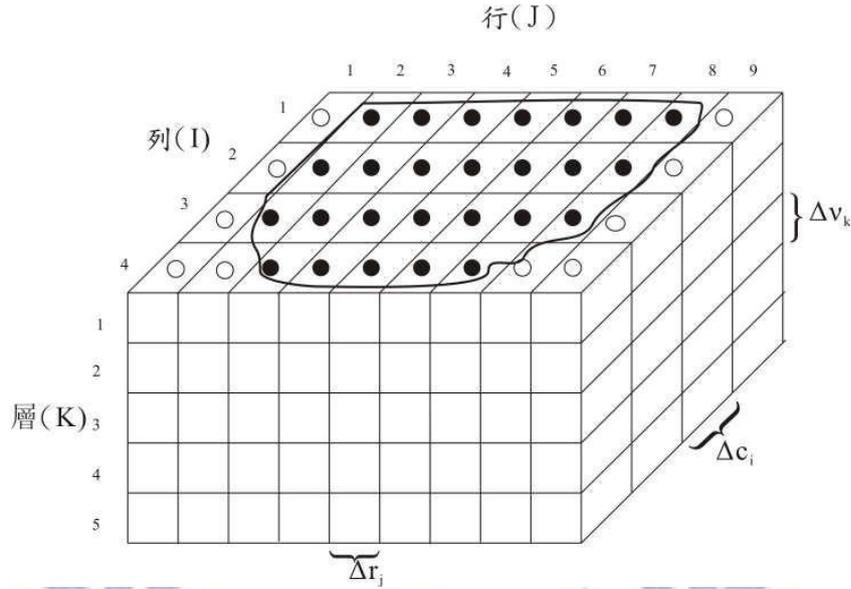


圖 2-9 含水層網格化示意圖

根據以上所敘，由 Cell (i, j-1, k) 和 Cell (i, j, k) 之間，依據達西定律 (Darcy's Law)，由 Cell (i, j-1, k) 流至 Cell (i, j, k) 之流量為  $q_{(i, j-1/2, k)}$ ，如圖 2-9 所示：

$$q_{(i, j-1/2, k)} = KR_{(i, j-1/2, k)} \Delta c_i \Delta v_k \frac{h_{(i, j-1, k)} - h_{(i, j, k)}}{\Delta(r_{j-1/2})} \quad (2-16A)$$

其中  $h_{(i, j, k)}$  為 Cell (i, j, k) 之水頭值 [L]； $h_{(i, j-1, k)}$  為 Cell (i, j-1, k) 之水頭值 [L]； $q_{(i, j-1/2, k)}$  為由 Cell (i, j-1, k) 通過兩網格交界面而流至 Cell (i, j, k) 之流量 [ $L^3/T$ ]； $KR_{(i, j-1/2, k)}$  為沿著 Cell (i, j-1, k) 和 Cell (i, j, k) 的 j 方向上之水力傳導係數 [L/T]； $\Delta c_i \Delta v_k$  為垂直 Cell (i, j-1, k) 和 Cell (i, j, k) 兩網格間列方向上之截面積 [ $L^2$ ]； $\Delta(r_{j-1/2})$  為 Cell (i, j-1, k) 網格中心與 Cell (i, j, k) 網格中心的距離 [L]。

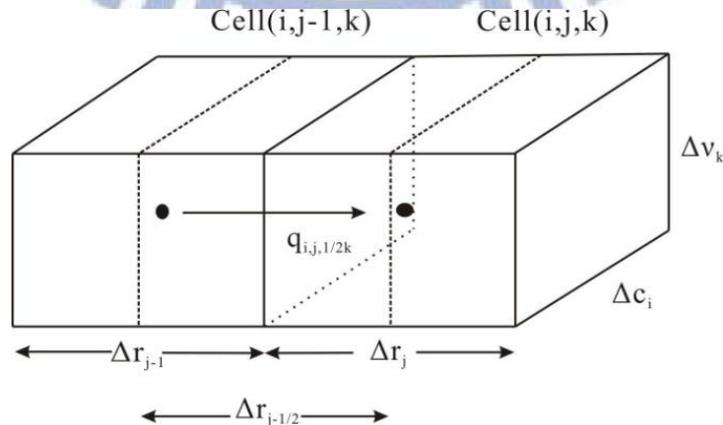


圖 2-10 兩網格間水流系統示意圖

對Cell( $i,j,k$ )來說，在三維空間中其相鄰的網格除了上述Cell( $i,j-1,k$ )外，尚有Cell( $i,j+1,k$ )、Cell( $i-1,j,k$ )、Cell( $i+1,j,k$ )、Cell( $i,j,k-1$ )及Cell( $i,j,k+1$ )等五個網格，均與Cell( $i,j,k$ )有水流的交換，其網格元素之三維空間關係如圖2-11所示。與公式(2-16A)同理，則可推導出其他五個流進、流出Cell( $i,j,k$ )的流量關係式：

$$q_{(i,j+1/2,k)} = KR_{(i,j+1/2,k)} \Delta c_i \Delta v_k \frac{h_{(i,j+1,k)} - h_{(i,j,k)}}{\Delta(r_{j+1/2})} \quad (2-16B)$$

$$q_{(i-1/2,j,k)} = KR_{(i-1/2,j,k)} \Delta c_i \Delta v_k \frac{h_{(i-1,j,k)} - h_{(i,j,k)}}{\Delta(r_{i-1/2})} \quad (2-16C)$$

$$q_{(i+1/2,j,k)} = KR_{(i+1/2,j,k)} \Delta c_i \Delta v_k \frac{h_{(i+1,j,k)} - h_{(i,j,k)}}{\Delta(r_{i+1/2})} \quad (2-16D)$$

$$q_{(i,j,k-1/2)} = KR_{(i,j,k-1/2)} \Delta c_i \Delta v_k \frac{h_{(i,j,k-1)} - h_{(i,j,k)}}{\Delta(r_{k-1/2})} \quad (2-16E)$$

$$q_{(i,j,k+1/2)} = KR_{(i,j,k+1/2)} \Delta c_i \Delta v_k \frac{h_{(i,j,k+1)} - h_{(i,j,k)}}{\Delta(r_{k+1/2})} \quad (2-16F)$$

其中， $KR_{(i-1/2,j,k)}$ 為沿著Cell( $i-1,j,k$ )和Cell( $i,j,k$ )的*i*方向上之透水係數[L/T]； $KR_{(i,j,k-1/2)}$ 為沿著Cell( $i,j,k-1$ )和Cell( $i,j,k$ )的*z*方向上之透水係數[L/T]。

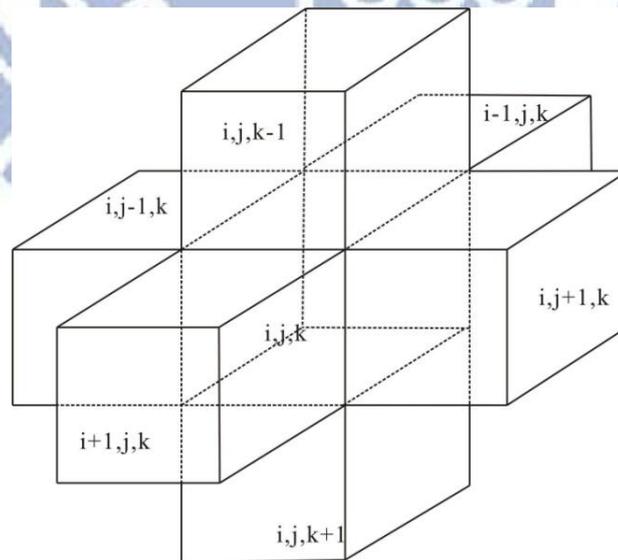


圖2-11 三維空間中各網格元素間相對位置示意圖

因水位梯度所造成的水流外（達西定律），尚需考慮由系統外抽取（sink）或注入（source）網格的水量：

$$a(i, j, k, n) = p(i, j, k, n) \times h(i, j, k) + q(i, j, k, n) \quad (2-17)$$

其中， $a(i, j, k, n)$  為第  $n$  個來源流入之流量 [ $L^3/T$ ]； $p(i, j, k, n)$  為與內部水頭值改變相關之流量，其值為常數 [ $L^2/T$ ]； $q(i, j, k, n)$  為與內部水頭值改變無相關之流量，其值為常數 [ $L^3/T$ ]。通常，若有  $N$  個內部源對單一網格造成影響時，其總流量可表是成：

$$QS(i, j, k) = \sum_{n=1}^N a(i, j, k, n) = \sum_{n=1}^N p(i, j, k, n)h(i, j, k) + \sum_{n=1}^N q(i, j, k, n) \quad (2-18)$$

而MODFLOW為了容許較大的時間間隔（ $\Delta t$ ）進行數值求解，所以採用向後差分法（Backward Difference Approach）進行對各時段（time step）的水頭計算，如圖2-12所示，其求解方法如下：

$$\left( \frac{\Delta h(i, j, k)}{\Delta t} \right)^m = \frac{h(i, j, k)^m - h(i, j, k)^{m-1}}{t_m - t_{m-1}} \quad (2-19)$$

其中： $t_m$  為第  $m$  段被估計時所代表的時間； $t_{m-1}$  為  $t_m$  的前一個時間；

$h(i, j, k)^m$ 、 $h(i, j, k)^{m-1}$  為網格 Cell ( $i, j, k$ ) 於  $t_m$ 、 $t_{m-1}$  時間所對應的水頭值。

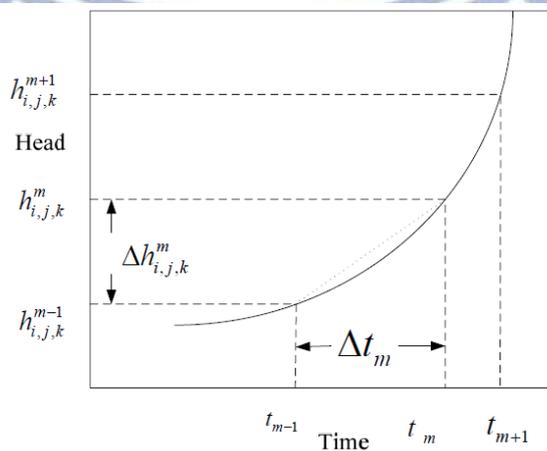


圖2-12 反向差分法求解概念圖

污染物於含水層之傳輸控制方程式可以下式表示(Clement, T. P.,1997)：

$$\frac{\partial C_k}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( D_{ij} \frac{\partial C_k}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (v_i C_k) + \frac{q_s}{\theta} C_{s_k} + r_c, k=1,2,\dots,m \quad (2-20)$$

$$\frac{\partial \tilde{C}_{im}}{\partial t} = \tilde{r}_c, im=1,2,\dots,(n-m) \quad (2-21)$$

其中，n為污染物物種總數，m為液相（或稱移動相mobile）污染物物種數， $C_k$ 為污染物k之溶解濃度， $C_s$ 為污染物k之溶解濃度， $\tilde{C}_{im}$ 為污染物im之固相濃度， $D_{ij}$ 為延散係數（dispersion coefficient），v為孔隙速度（pore velocity）， $\theta$ 為孔隙率（porosity）， $q_s$ 及 $C_s$ 分別為單位體積流量及濃度源匯項， $r_c$ 及 $\tilde{r}_c$ 分別為液相及固相之化學反應速率。



# 第三章 研究方法

## 3.1 研究架構

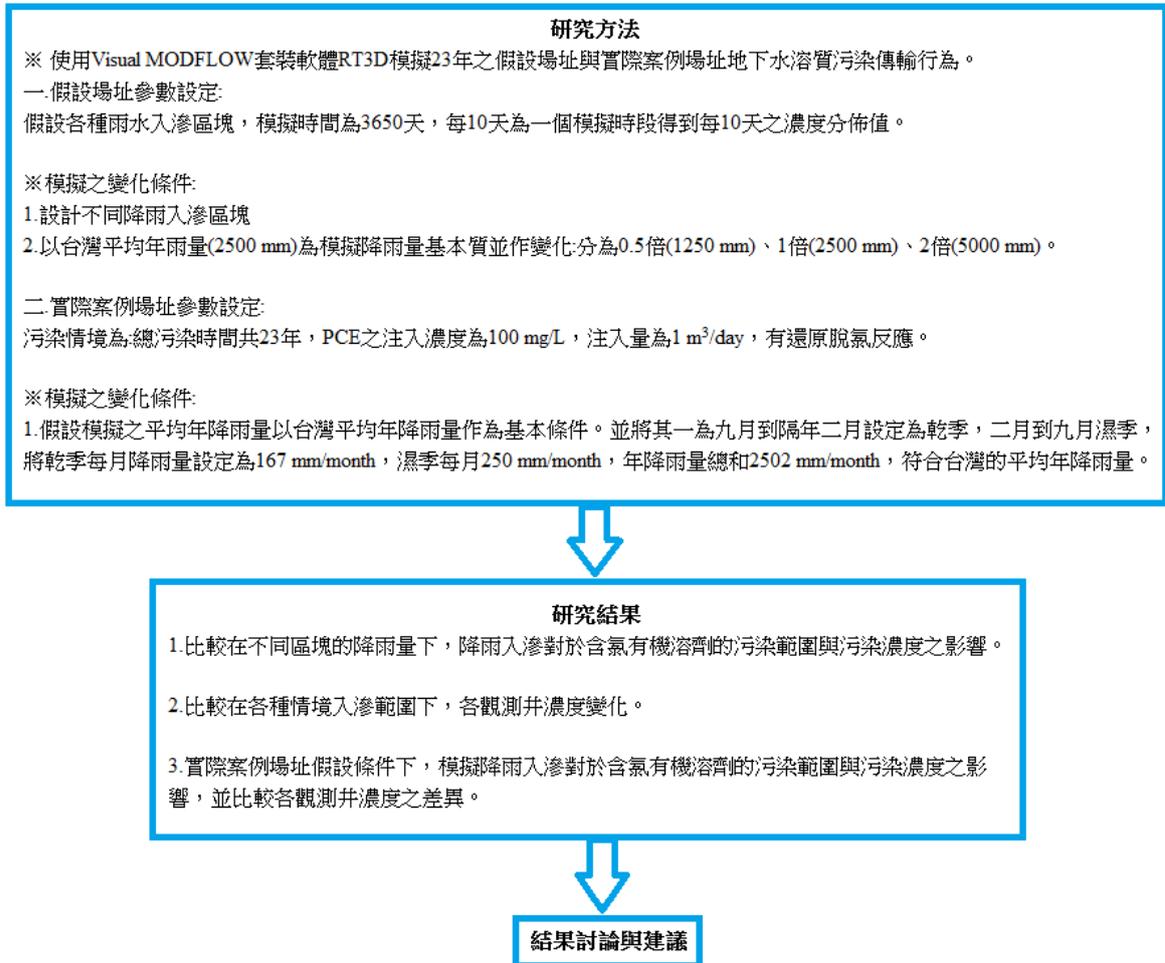


圖 3-1 研究架構與方法

本研究污染傳輸模擬軟體為 Visual Modflow 中的套裝軟體 RT3D，用以模擬降雨入滲導致 DNAPL 在飽和土壤中之生物降解、吸附反應與污染濃度傳輸。藉由設計各種降雨量大小，模擬 RT3D 在 DNAPL 中的污染物傳輸對於雨水入滲之影響。經由數值模擬污染傳輸結果，觀察特定距離觀測井的濃度隨入滲量差異之改變。本研究主要針對污染物為四氯乙烯、三氯乙烯、二氯乙烯和氯乙烯，因為二氯乙烯降解的產物為順 1,2-二氯乙烯、反 1,2-二氯乙烯、1,1-二氯乙烯，其中又以順 1,2-二氯乙烯為主，極少量的反 1,2-二氯乙烯、1,1-二氯乙烯。所以本研究模擬降解的二氯乙烯產物以順 1,2-二氯乙烯來當作污染物傳輸模擬。

本研究分別藉由假設場址與國內某知名含氯有機溶劑污染場址做為模擬案例之研究(以下簡稱為 XX 污染場址)，如圖 3-1。假設污染場址之設定，在相同場址的參數之下，因為雨水入滲區塊與入滲量的差異，做為本研究案例之模擬變化假設條件。另外，選定之國內某知名含氯有機溶劑污染整治場址案例，該場址之水文地質參數與實際案例相符合。而雨水入滲量之變異性做為本研究案例之變化假設條件。最後針對本研究論文之研究結果作討論與建議。

## 3.2 程式設定

本研究地下水模式選擇 Visual MODFLOW 2005，污染傳輸模式選擇 RT3D V2.5，Run Type 選擇模擬地下水之穩態流場(steady-state flow)，吸附模式選擇線性，降解模式選擇厭氧還原脫氯反應降解模式(Sequential decay reactions)。

### 3.2.1 含水層格網建立與邊界條件

#### ※建立含水層格網

本研究模擬含水層之假設條件為 20 m 厚之含水層，假設每 1 m 深為一個導水度分層。含水層中觀測井讀取各分層濃度值計算平均值，表示假設模擬一般抽水井抽取 20m 厚之含水層中污染團的平均濃度。而區域大小採 5 m x 5 m 格網，其每一網格大小為 5 m x 5 m x 1 m。假設場址模擬邊界範圍定於東西向 600 m，南北向 1000 m，假設含氯有機溶劑污染場址擴散可能重點區域。

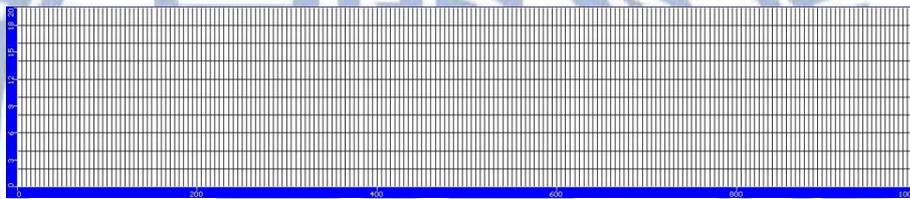
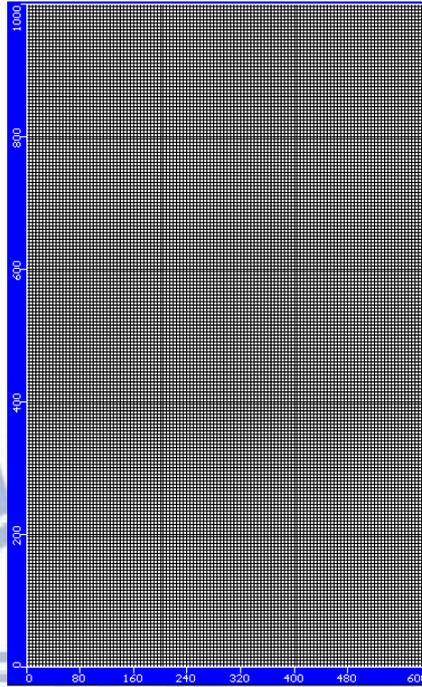


圖 3-2 模擬廠址正面與側面設定之網格大小

※邊界條件

假設場址地下水的水力梯度約為 0.005，假設東西二側之定水頭邊界 (Constant Head Boundary) 之水位值，南邊的定水頭邊界為 59 m，北邊的定水頭邊界為 50 m，而東西二側定為變水頭邊界 (Falling Head Boundary)，地下水由南往北流動。

※污染起始條件

本假設場址污染起始條件，PCE 的溶解度為 150 mg/L，假設污染源設定於第一層的網格 (300,200) 上。三維污染源初始濃度網格大小為 5 m×5 m×2 m，假設網格所注入的地下水流量每天 1 立方公尺，於網格中設定 PCE 初始濃度為 100 mg/L，持續注入於含水層中之連續污染源。其它格網之初始濃度皆設定為零。

## ※ 觀測井

觀測井讀取時間為模擬總時間共 3650 天，以每 10 天為一個 time steps。用以監測出在地下水中之污染物受到降雨入滲量之變異性以及降雨入滲區塊之影響，了解其濃度的改變以及污染團的擴散情形。在離污染源移動路徑上設置觀測井，位置分別於距離污染源下游 50 m 的 1 號井 (300,250)、100 m 的 2 號井 (300,300)、200 m 的 3 號井 (300,350) 位置、300 m 的 4 號井 (300,400)、400 m 的 5 號井 (300,500)、500 m 的 6 號井 (300,600)、700 m 的 7 號井 (300,800)，如圖 3-3 所示。

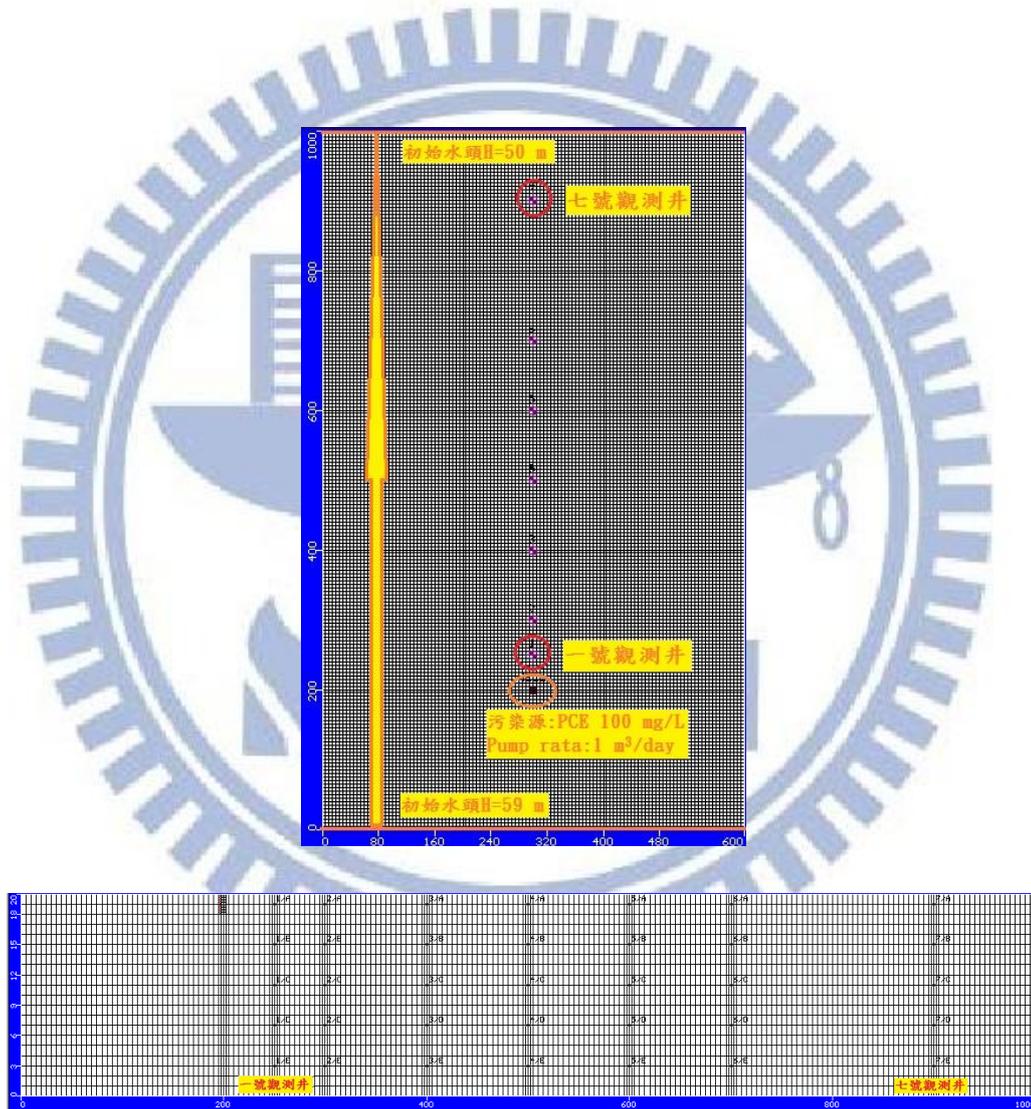


圖 3-3 假設場址數值模式概念示意圖

### 3.2.2 降雨入滲量之變異性與降雨區域分佈

本假設場址參數設定假設各種雨水入滲區塊，模擬時間為3650天，每10天為一個time steps得到每10天之污染濃度變異分佈值。藉由不同降雨區塊與不同降雨入滲量之影響，評估DNAPL在污染傳輸過程中受到污染濃度之變化量與污染傳輸路徑之變異性。

※模擬之變化條件：

以台灣平均年雨量(2500 mm/year)作為模擬降雨量之標準作變化：在同區塊降雨量變化為原本降雨量之0.5倍、1倍、2倍，相當於平均年降雨量為1250mm/year、2500 mm/year、5000 mm/year，對照入滲區塊作編號，編列編號見表3-1。比較各Case在不同降雨量以及降雨入滲區塊之濃度變化以及污染團溶解擴散狀況。

表 3-1 模擬降雨量編號表

	降雨量 1250mm	降雨量 2500mm	降雨量 5000mm
Case I	Case I-1250	Case I-2500	Case I-5000
Case II	Case II-1250	Case II-2500	Case II-5000
Case III	Case III-1250	Case III-2500	Case III-5000
Case IV	Case IV-1250	Case IV-2500	Case IV-5000
Case V	Case V-1250	Case V-2500	Case V-5000

CaseI:全區域降雨入滲

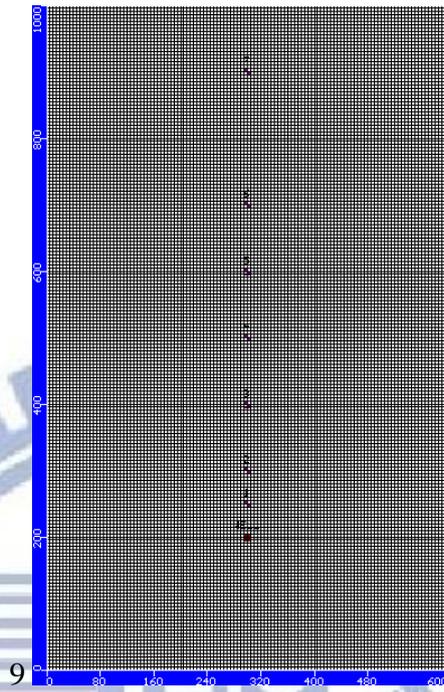


圖 3-4 降雨量分佈一

CaseII:污染源上方降雨入滲

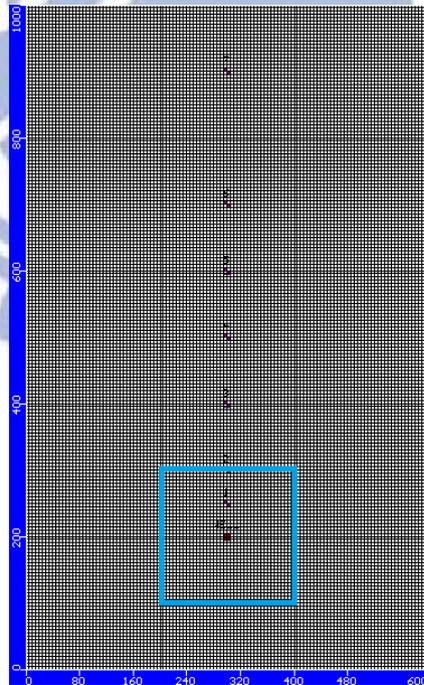


圖 3-5 降雨量分佈二

CaseIII:污染源下游近點降雨入滲

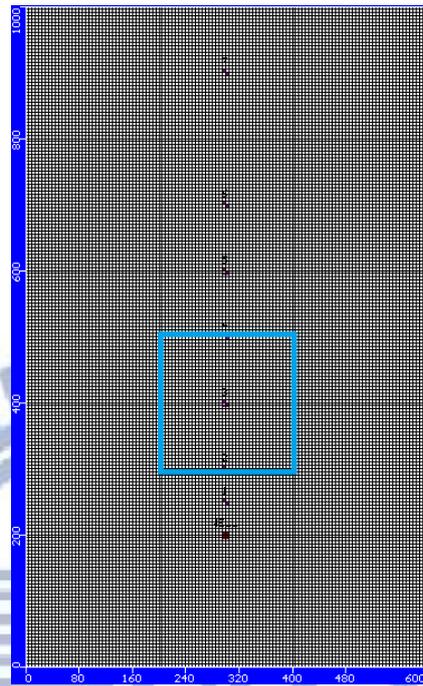


圖 3-6 降雨量分佈三

CaseIV:污染源下游近點左側降雨入滲

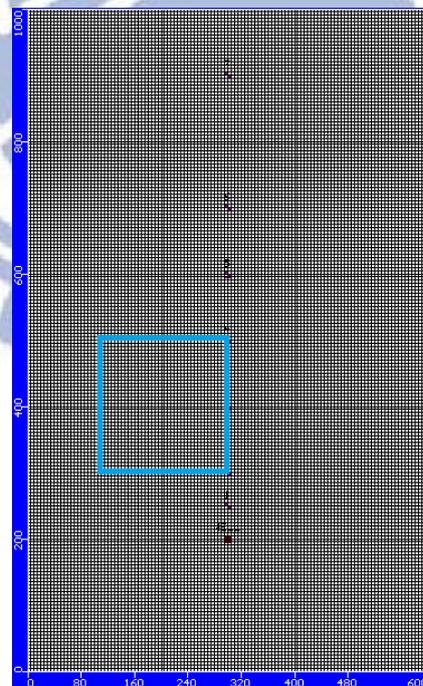


圖 3-7 降雨量分佈四

## CaseV:污染源下游遠處降雨入滲

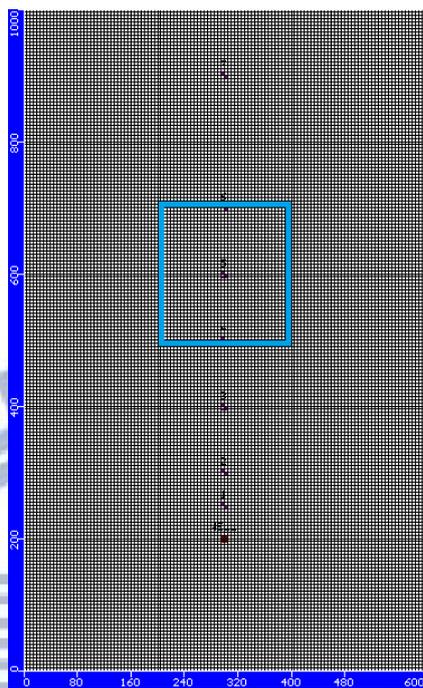


圖 3-8 降雨量分佈五

### 3.3 國內某含氯有機溶劑污染場址之模擬假設

#### 3.3.1 介紹 XX 含氯有機溶劑污染場址背景

XX 污染場址於 1970 年設立工廠，產品製造過程中，使用以四氯乙烷(年使用量約為 3,000 加侖)、1,1,1-三氯乙烷(年使用量約為 680 加侖)、三氯乙烯為主之去脂溶劑，污染物自廢溶劑回收區、線路板清洗區之洩漏，經沖洗排放而入滲至土壤及地下水。1989 年監測井及水井之地下水採樣分析結果顯示所有樣本都檢測出污染物，場址內第一含水層 9 口監測井地下水中三氯乙烯及四氯乙烯濃度皆高於第二類地下水污染管制標準。1994 年環保署為查證地下水污染程度，即調查 XX 場址附近共 20 口民用水井的水質，發現其中有 16 口民用水井之地下水出現三氯乙烯、四氯乙烯等揮發性含氯有機物，如圖 3-9。雖然已過二十餘年，至今該污染場址附近之地下水含氯有機溶劑仍超過地下水污染管制標準(行政院環境保護署土壤及地下水污染整治網，2010)。

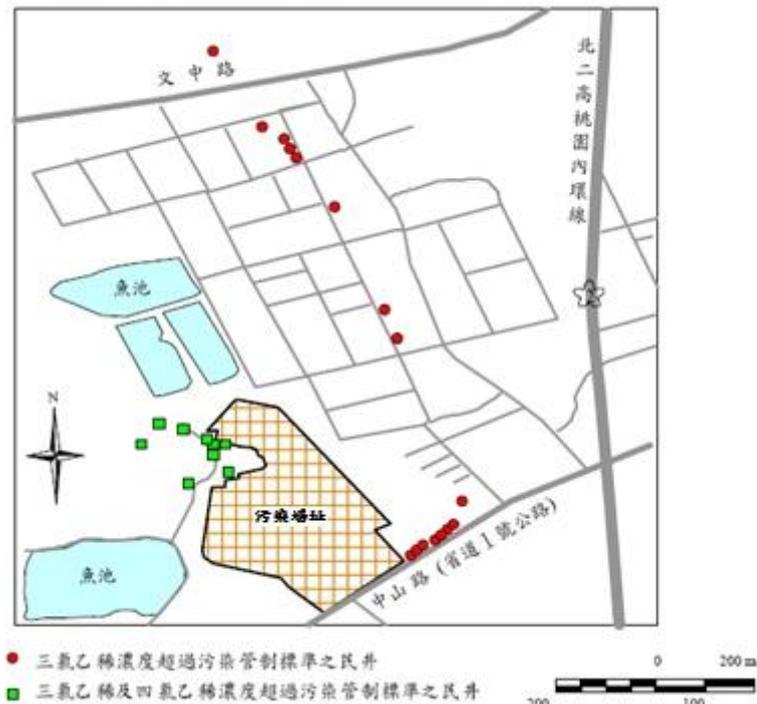


圖 3-9 XX 場址外受污染之民井分佈圖

### 3.3.2 模擬廠址程式時間設定

本研究依據報告指出 XX 場址於民國 59 年由美國 XX 公司設立，生產電子、電器產品，後經產權轉移，先後為美國奇異公司 (GE)、法國湯姆笙公司、國內宏億公司所持有，並於 81 年 10 月關廠，所以模擬假設時間為 23 年(8395 天)。雖然 XX 公司依環保署審閱同意之「綜合採樣計劃並整治設計報告」正式執行整治工作，其整治結果在土壤部分可以符合政府的管制標準，但是地下水部分則無法清除污染，宣告地下水整治失敗，至此不願再對地下水之整治負責，至今仍未再進行地下水整治。(聯美環保科技股份有限公司，2009)。

### 3.3.3 數值模式格網建立

XX 場址邊界區域之模擬大小設定廠址為中心，東西向 1100 m，南北向 1600 m，每 5 m 為一個網格大小，模擬深度設定為 95 m，各分層假設為地表下每 2 m 深為一個含水層分層，以此能夠於模式中輸入不同導水度值，其網格大小為 5 m x 5 m x 2 m，如圖 3-10。

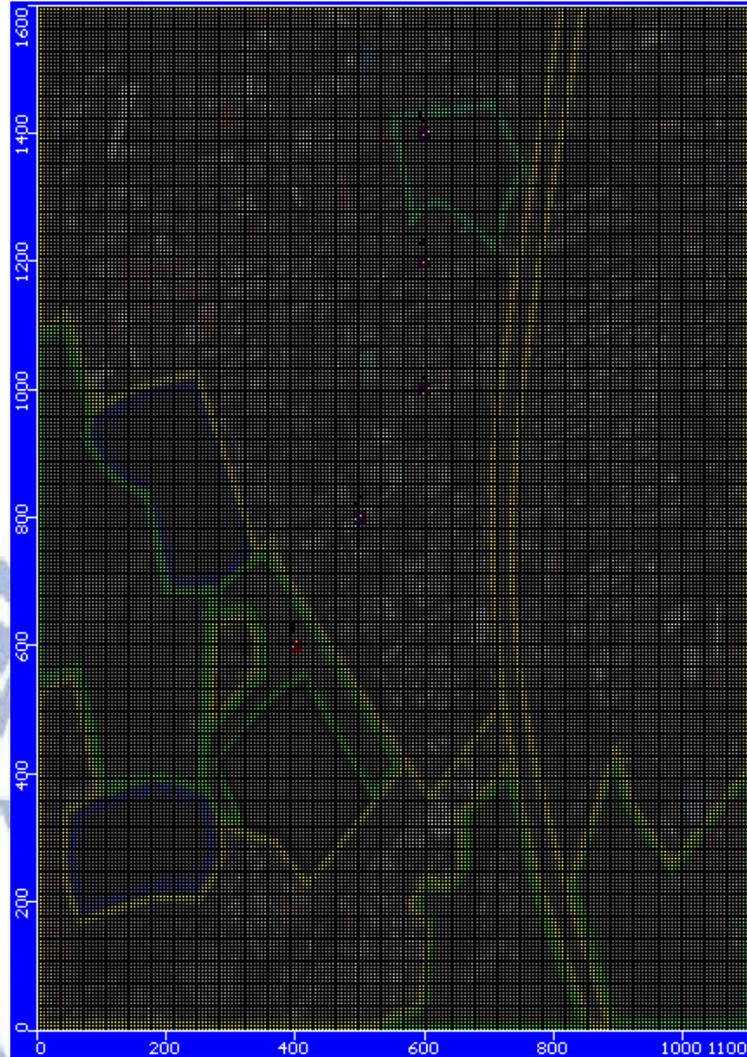


圖 3-10 XX 場址數值模式格網建立

### 3.3.4 地下水流模式邊界條件

本研究假設場址之模擬邊界東西向 1100 m，南北向 1600 m，假設場址地下水的水力梯度約為 0.005，假設南北二側之定水頭邊界(Constant Head Boundary)之水位值，南邊的初始水頭邊界為 97 m，北邊的初始水頭邊界為 90 m，而東西二側定為不流動邊界(No-Flow Boundary)，地下水流由南往北流動，如圖 3-11 所示，模擬地下水之穩態流場(steady-state flow)，並考慮模式區域內之注水及地表水入滲之影響。



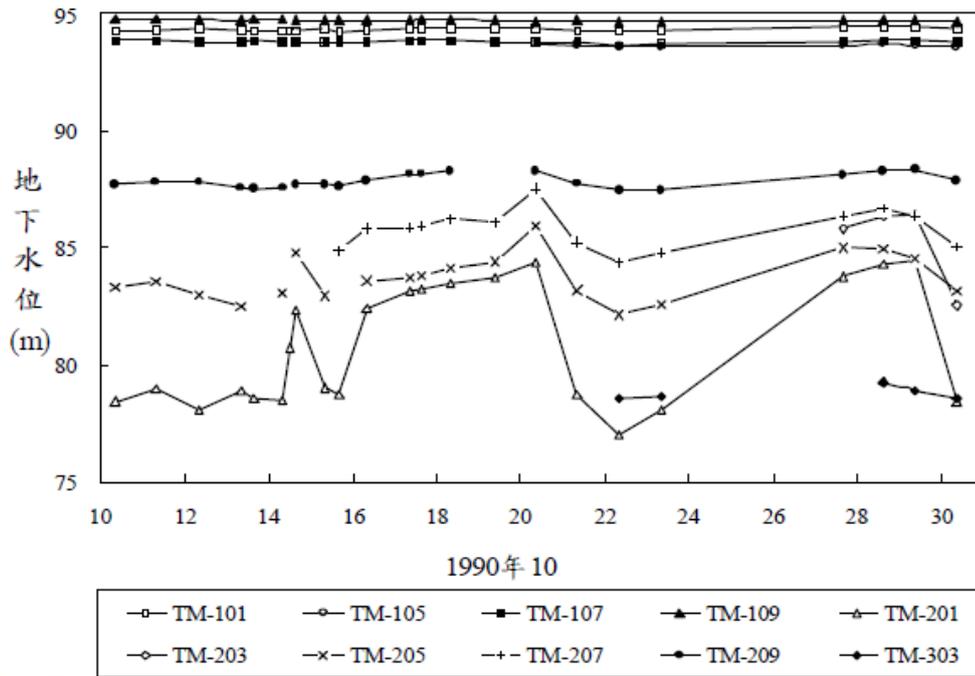


圖3-13 第一含水層及第二含水層監測井所測得的水位及其隨時間之變化

### 3.3.5 污染起始條件

DNAPL 污染團中有 PCE、TCE、DCE 及 VC，本假設場址模擬之初始濃度值之設定為根據溶質傳輸模擬的設定，模擬 DNAPL 的傳輸行為之溶解度作為污染溶質傳輸，DNAPL 中 PCE 溶解度為 100PPM，TCE 溶解度為 1100PPM，1,1-DCE 溶解度為 2640PPM，VC 之溶解度為 2670PPM。假設場址 DNAPL 污染團於含水層中持續 23 年以 PCE 溶解度溶解於含水層中之連續污染源。設定 DNAPL 的三維污染源初始濃度，根據地下水流量  $Q=K \cdot i \cdot A$ ，每個網格所注入的流量為每天 1 立方公尺，而 PCE 的溶解率設定為 100PPM，表示每天有 100 g 的 PCE 溶解於網格中，每年有 36500 g，總模擬時間 23 年共會有 839.5 kg 污染物溶於地下含水層中，網格位置在(360,500)，其它網格之污染初始濃度皆設定為零。



圖 3-14 Google Map 下 XX 污染場址鳥瞰圖

### 3.3.6 地下水厭氧還原脫氯模式

本研究地下水模擬軟體選擇 Visual MODFLOW 2000，污染傳輸模式選擇 RT3D 中 DNAPL 厭氧還原脫氯反應降解模式(Sequential decay reactions)模擬，選擇有限差分法(Finite Difference Approach)解水流控制方程式。假設場址模擬降解現象之結果，以 RT3D 中 DNAPL 厭氧反應降解模式模擬，根據地下水水質厭氧環境設定假設場址地下水厭氧還原脫氯模式  $PCE \rightarrow TCE \rightarrow DCE \rightarrow VC$ ，從文獻來看還原環境中各含氯有機溶劑常見的一階反應速率之範圍  $PCE: 0.0021 \sim 0.071$ ， $TCE: 0.0001 \sim 0.008$ ， $DCE: 0.0014 \sim 0.008$ ， $VC: 0.0005 \sim 0.002$ ，其參考參數假設值如表 3-1。

表 3-2 在 Modflow 的一階反應速率之範圍

Constant	Value	Designation
k1	0.005	PCE anaerobic constant
k2	0.003	TCE anaerobic constant
k3	0.002	DCE anaerobic constant
k4	0.001	VC anaerobic constant

資料來源: Visual MODFLOW User's Manual, 2009

Bagley and Gosset, 1990

Wilson et al, 1994

### 3.3.7 吸附模式

XX 場址模擬吸附現象，假設場址之有機含碳量  $2000\text{mg/kg}$  ( $f_{oc}=0.002$ )。設定如上一節假設場址吸附係數之設定。以線性吸附模式設定四氯乙烯的  $K_d$  值為  $0.327\text{ L/Kg}$ ，三氯乙烯的  $K_d$  值為  $0.236\text{ L/Kg}$ ，二氯乙烯的  $K_d$  值為  $0.118\text{ L/Kg}$ ，氯乙烯的  $K_d$  值為  $0.0164\text{ L/Kg}$ 。

### 3.3.8 地層分部與水力傳導係數設定

XX 場址地質狀況為，回填土及風化殘留土壤的厚度約有  $1.0\text{ m}$  至  $2.5\text{ m}$ ；地下大約  $2\text{ m}$  至  $23\text{ m}$  之間是一個深厚的礫石層，該層地下水與大氣直接相通，是一個典型的自由含水層，在此稱之為第一含水層。地下水面隨季節之降雨量與附近地區之抽水量而變化，也可能受到灌溉渠道、廠外西側及北側的池塘及東側茄苳溪等地面水水位變化之影響，其深度大約在地下  $4\text{ m}$  至  $7.5\text{ m}$  之間。卵礫石層夾雜粉砂及黏土，卵礫石組成大多為破碎砂岩，直徑最大約  $8\text{ cm}$ ，多數微細顆粒礫石及砂。地表下  $23\text{ m}$  有阻隔層為黏土/粉土層，依據現有鑽探資料，顯示此層應具有連續性，但厚度僅  $0.3\text{ m}$  至  $2\text{ m}$ ，且在場址內之厚度普遍較薄。第二、三含水層約地表下  $23\text{ m}$  至  $95\text{ m}$ ，其粉質砂、黏質砂及黏土互層，固結狀況普遍不佳，沙粒成分包括石英、長石、頁岩、煤粒等，設定含水層細砂的儲水率 ( $S_y$ ) 為  $0.2$ ，比儲率 ( $S_s$ ) 為  $10^{-5}$  ( $1/\text{m}$ )，有效孔隙率 ( $n_e$ ) 為  $0.15$ ，總體密度為  $1700\text{ kg/m}^3$  (Hudak, 2000)。根據地下水污染調查發現污染團主要存在於第一含水層中，而於先導試驗其間觀察到本區域的異質性非等向性地質特性，造成選擇性地下水流路徑。含水層選用試驗傳輸距離設定橫向延散度為縱向延散度之  $1/10$ 。

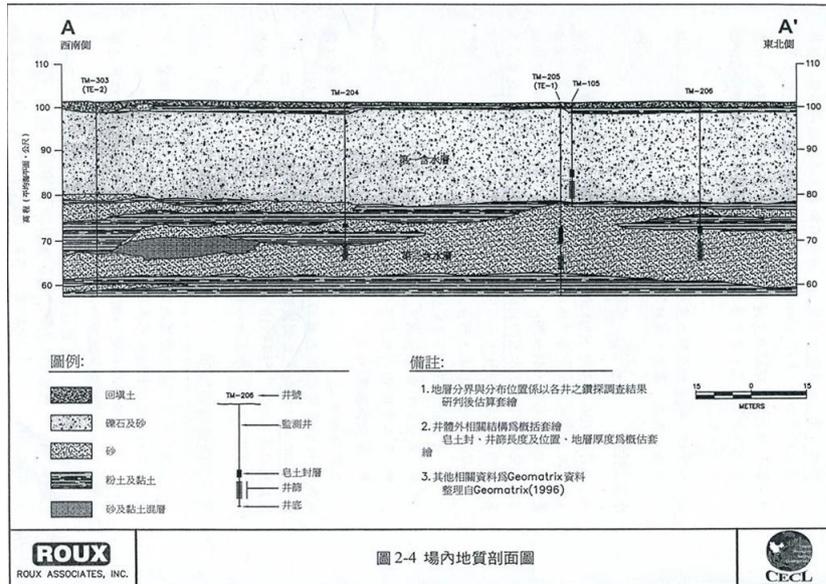


圖 3-15 場內地質剖面圖

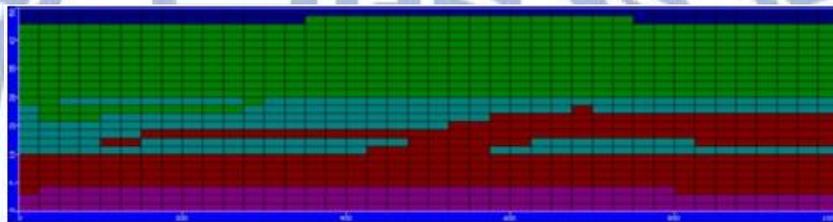


圖 3-16 在 Visual Modflow 模擬之地質剖面圖

表 3-3 各土層的水力傳導係數

表土層(回填土)	地表至 2.5 公尺	$K=1.539 \times 10^{-2} \text{m/s}$
第一含水層	2.5 公尺至 23 公尺	$K=1.4 \times 10^{-4} \text{m/s}$
粉土及黏土層夾雜砂土	23 公尺至 36 公尺	$K=1.53 \times 10^{-5} \text{m/s}$
第二含水層	35 公尺至 42 公尺	$K=3 \times 10^{-4} \text{m/s}$
不透水底層	底層	$K=1 \times 10^{-7} \text{m/s}$

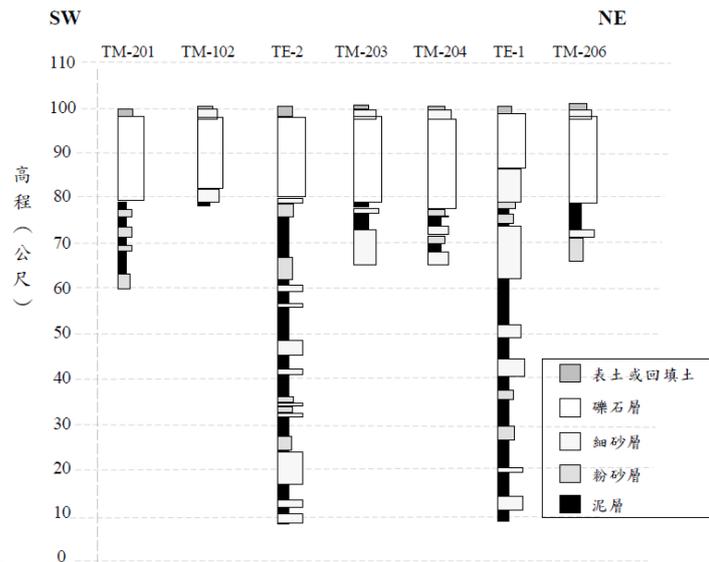


圖 3-17 XX 場址的地層柱狀圖

### 3.3.9 模擬之雨量大小與入滲量

假設模擬的年降雨量大小為台灣平均年降雨量作為條件，將乾季每月降雨量設定為 167 mm/month，濕季每月 250 mm/month，年降雨量總和 2502 mm/month，符合台灣的平均降雨量。並將其九月到隔年二月設定為乾季，二月到九月雨季。

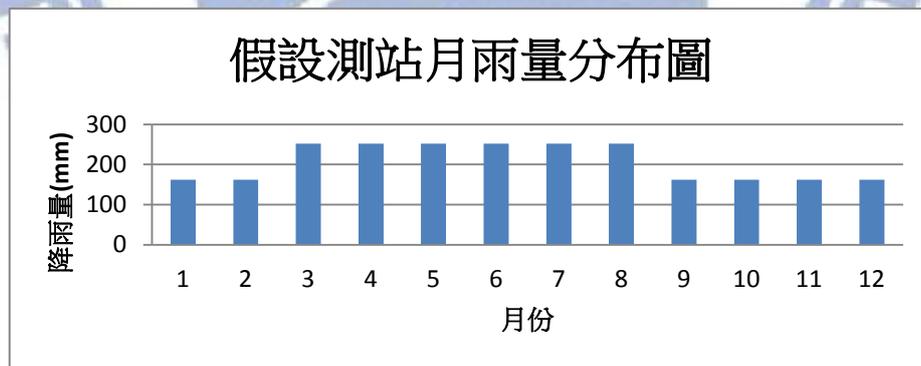


圖 3-18 假設測站雨量分佈圖

本研究入滲量的假設為將每月的雨量單位換算，其中乾季降雨量  $167 \text{ mm/month} = 0.0056 \text{ m/d}$ ；而濕季  $250 \text{ mm/month} = 0.0084 \text{ m/d}$ ，並配合鋪面所影響降雨入滲量乘以逕流係數(C 值)作折減，當作降雨入滲量。根據水土保持技術規範，依據各區塊的土地使用情況得到符合現況的逕流係數(C 值)，其平坦耕地逕流係數設定為 0.45、水塘逕流係數設定為 0.7，工業區逕流係數設定為 0.8，市街區逕流係數設定為 0.9 當作模擬的逕流

係數，如圖 3-19 所示。另外，水塘入滲量與一般鋪面不相同，所以做另外假設  $q = k \times i = (3.5 \times 10^{-6}) \times (4) = 0.000014 \text{ cm/s} = 0.012096 \text{ m/d} = 4415.04 \text{ mm/year}$  經過逕流係數折減之後當作水塘的入滲量，並假設水塘為穩定入滲量水塘入滲的改變量。

表 3-4 逕流係數(C 值)

土地使用情況	C 值
平坦耕地(plough) (藍色區塊)	0.45
水塘(pond) (綠色區塊)	0.7
工業區(industrial area) (水藍色區塊)	0.8
市街區(建築面積>60%者) (residential quarters) (紅色區塊)	0.9

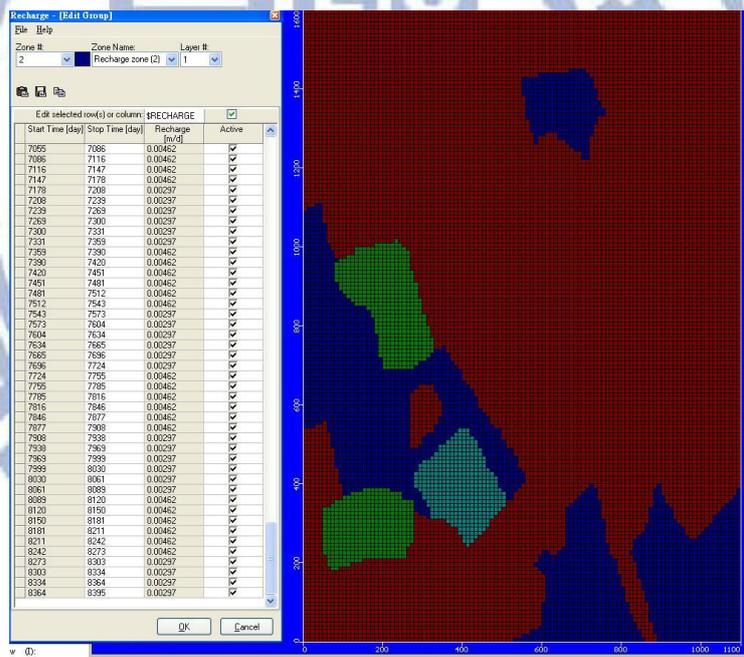


圖 3-19 鋪面入滲區塊分佈

表 3-5 各用地每日有效入滲量(初始降雨量)

月份	雨量(m/day)	有效入滲量(mm/day)			
		平坦耕地	工業區	市街區	水塘
1	0.0056	0.00308	0.00112	0.00056	3.6288
2	0.0056	0.00308	0.00112	0.00056	3.6288
3	0.0084	0.00462	0.00168	0.00084	3.6288
4	0.0084	0.00462	0.00168	0.00084	3.6288
5	0.0084	0.00462	0.00168	0.00084	3.6288
6	0.0084	0.00462	0.00168	0.00084	3.6288
7	0.0084	0.00462	0.00168	0.00084	3.6288
8	0.0084	0.00462	0.00168	0.00084	3.6288
9	0.0056	0.00308	0.00112	0.00056	3.6288
10	0.0056	0.00308	0.00112	0.00056	3.6288
11	0.0056	0.00308	0.00112	0.00056	3.6288
12	0.0056	0.00308	0.00112	0.00056	3.6288

表 3-6 各用地每月有效入滲量(降雨量為初始0.5倍)

月份	雨量(m/day)	有效入滲量(mm/day)			
		平坦耕地	工業區	市街區	水塘
1	0.0028	0.00154	0.00056	0.00028	3.6288
2	0.0028	0.00154	0.00056	0.00028	3.6288
3	0.0042	0.00231	0.00084	0.00042	3.6288
4	0.0042	0.00231	0.00084	0.00042	3.6288
5	0.0042	0.00231	0.00084	0.00042	3.6288
6	0.0042	0.00231	0.00084	0.00042	3.6288
7	0.0042	0.00231	0.00084	0.00042	3.6288
8	0.0042	0.00231	0.00084	0.00042	3.6288
9	0.0028	0.00154	0.00056	0.00028	3.6288
10	0.0028	0.00154	0.00056	0.00028	3.6288
11	0.0028	0.00154	0.00056	0.00028	3.6288
12	0.0028	0.00154	0.00056	0.00028	3.6288

表 3-7各用地每月有效入滲量(降雨量為初始2倍)

月份	雨量(m/day)	有效入滲量(mm/day)			
		平坦耕地	工業區	市街區	水塘
1	0.0112	0.00616	0.00224	0.00112	3.6288
2	0.0112	0.00616	0.00224	0.00112	3.6288
3	0.0168	0.00924	0.00336	0.00168	3.6288
4	0.0168	0.00924	0.00336	0.00168	3.6288
5	0.0168	0.00924	0.00336	0.00168	3.6288
6	0.0168	0.00924	0.00336	0.00168	3.6288
7	0.0168	0.00924	0.00336	0.00168	3.6288
8	0.0168	0.00924	0.00336	0.00168	3.6288
9	0.0112	0.00616	0.00224	0.00112	3.6288
10	0.0112	0.00616	0.00224	0.00112	3.6288
11	0.0112	0.00616	0.00224	0.00112	3.6288
12	0.0112	0.00616	0.00224	0.00112	3.6288

### 3.3.10 觀測井設置

觀測井模擬時間為23年(8395天)，每10天為一個time steps，設置觀測井位置於距離污染源移動路徑設立五個觀測井，分別位於場址附近下游處，1號觀測井位於(400,600)，2號觀測井位於(500,800)，3號觀測井位於(600,1000)，4號觀測井位於(600,1200)，5號觀測井位於(600,1400)，如圖3-20。觀測井紀錄這段時間地下水濃度隨時間變化之曲線，比較在實際地下水污染調查結果濃度差異性與污染擴散方向。

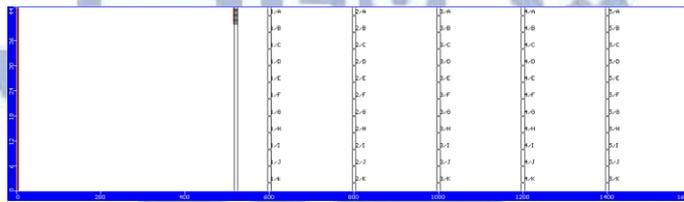


圖 3-20 場址數值模式概念示意圖

## 第四章 假設場址模擬結果

本研究利用 Visual MODFLOW 應用於假設場址和實際案例場址污染傳輸模擬。主要利用兩種模式軟體模擬污染之應用進行，Visual MODFLOW 用於模擬地下水流情形；RT3D 模擬含氯有機污染物 PCE、TCE、DCE、VC 在地下水中污染團溶質之傳輸。根據模式的操作流程與相關參數的輸入，time steps 以 10 天為單位，在假設場址部分共模擬 10 年，利用 RT3D 模擬降雨入滲影響含氯有機溶劑污染傳輸，得到地下水流之模擬與污染物傳輸的結果。

本研究結果呈現三種主要內容：

1. 比較在假設場址各種假設情境下，降雨在不同區塊下，降雨入滲對於含氯有機溶劑的污染範圍與各觀測井污染濃度之影響。
2. 比較在假設場址各種假設情境下，降雨在不同入滲區塊範圍下，降雨入滲對於含氯有機溶劑的污染範圍與各觀測井污染濃度之變化。
3. 比較在實際案例場址假設條件下，模擬降雨入滲對於含氯有機溶劑的污染範圍與污染濃度之影響，並比較各觀測井濃度之差異。

表 4-1 各 Case 與降雨量對照表

	降雨量 1250mm	降雨量 2500mm	降雨量 5000mm
Case I	Case I-1250	Case I-2500	Case I-5000
Case II	Case II-1250	Case II-2500	Case II-5000
Case III	Case III-1250	Case III-2500	Case III-5000
Case IV	Case IV-1250	Case IV-2500	Case IV-5000
Case V	Case V-1250	Case V-2500	Case V-5000

### 4.1 模擬結果與分析

#### 4.1.1 各 Case 之濃度變化與污染團的範圍分佈

Case I 模擬情境為全區域降雨入滲，比較在不同的入滲量影響之下含氯有機溶劑污染傳輸的濃度變化與污染團的範圍分佈，影響含氯有機溶劑污染傳輸模擬結果，模擬總時間為 10 年，DNAPL 之污染團的範圍分佈，見圖 4-1 到圖 4-8。模擬結果顯示在不同降雨入滲時：

PCE 污染團的範圍分佈不論在 Case I-1250、Case I-2500、Case I-5000 都呈現穩定狀態。Case I-1250 之 PCE 濃度最高在 1A 號監測井第 10 年時其濃度為 3.377mm/day、Case I-2500 之 PCE 濃度最高在 1A 號監測井第 10 年時其濃度為 3.25 mm/day、Case I-5000 之 PCE 濃度最高在 1B 號監測井第 10 年時其濃度為 2.514 mm/day，其最高污染團濃度從 1A 的位置降低至 1B 位置，結果顯示雨水入滲造成污染團有逐漸往地下含水層擴散的現象，其水平影響範圍向下游之長度約減少 10 m，垂直影響深度增加 2 m，濃度減少 25.6 %。

TCE 在 Case I-1250、Case I-2500、Case I-5000 其模擬結果，Case I-1250 之 TCE 濃度最高在 1A 號監測井第 10 年時其濃度為 1.8225mm/day、Case I-2500 之 TCE 濃度最高在 1A 號監測井第 10 年時其濃度為 1.3058 mm/day、Case I-5000 之 TCE 濃度最高在 1B 號監測井第 10 年時其濃度為 1.2144 mm/day，其最高污染團濃度從 1A 的位置降低至 1B 位置，結果顯示雨水入滲造成污染團有逐漸往地下含水層擴散的現象，其水平影響範圍向下游之長度約減少 200 m，垂直影響深度增加 4 m，濃度減少 33.36 %。

DCE 在 Case I-1250 之濃度最高在 3B 號監測井第 10 年時其濃度為 0.3804 mm/day Case I-2500 之 DCE 濃度最高在 3B 號監測井第 10 年時其濃度為 0.2056 mm/day、Case I-5000 之 DCE 濃度最高在 3B 號監測井第 10 年時其濃度為 0.204 mm/day，其最高污染團濃度從維持在 3B 位置附近，結果顯示雨水入滲造成污染團有逐漸往地下含水層擴散的現象，其水平影響範圍向下游之長度約減少 400 m，垂直影響深度增加 4 m，濃度減少 46.37 %。

VC 在 Case I-1250、Case I-2500、Case I-5000 其模擬結果，Case I-1250 之 VC 濃度最高在 4B 號監測井第 10 年時其濃度為 0.107 mm/day、Case I-2500 之 VC 濃度最高在 4B 號監測井第 10 年時其濃度為 0.0673 mm/day、Case I-5000 之 VC 濃度最高在 4D 號監測井第 10 年時其濃度為 0.0561 mm/day，其最高污染團濃度從 4B 的位置降低至 4D 位置，結果顯示雨水入滲造成污染團有逐漸往地下含水層擴散的現象，其水平影響範圍向下游之長度約減少 450 m，垂直影響深度增加 4 m，濃度減少 47.57 %。

污染範圍變化 PCE 在溶解相污染團向地下含水層深度污染範圍增加 2 m。TCE 受降雨入滲影響明顯在溶解相污染團向下游處污染範圍減少將近 250 m，向地下含水層污染深度增加 5 m，污染團呈現扁平向下污染。DCE 受降雨入滲影響在溶解相污染團向下游處污染範圍減少將近 450 m，但是向地下含水層污染深度達到模擬最大深度底層，其影響深度相差 7 m。VC 受降雨入滲影響，其溶解相污染團中心完全在地下含水層中，其溶解

降污染團在地下含水層深度達 9 m，其地下水流中之殘留污染物在地下含水層中順著地下水流對下游產生長時間的污染擴散。

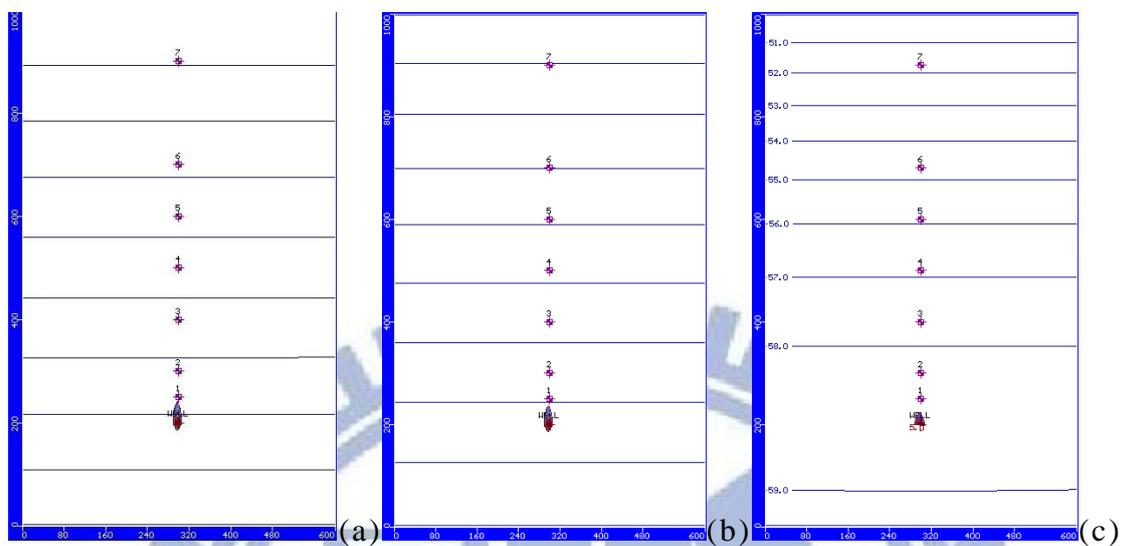


圖 4-1 (a) Case I-1250 之 PCE 鳥瞰濃度分佈圖、(b) Case I-2500 之 PCE 鳥瞰濃度分佈圖、(c) Case I-5000 之 PCE 鳥瞰濃度分佈

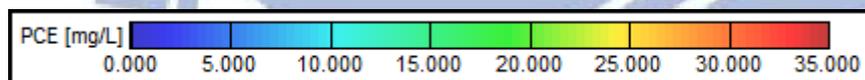


圖 4-2 (a) Case I-1250 之 PCE 側面濃度分佈圖、(b) Case I-2500 之 PCE 側面濃度分佈圖、(c) Case I-5000 之 PCE 側面濃度分佈圖

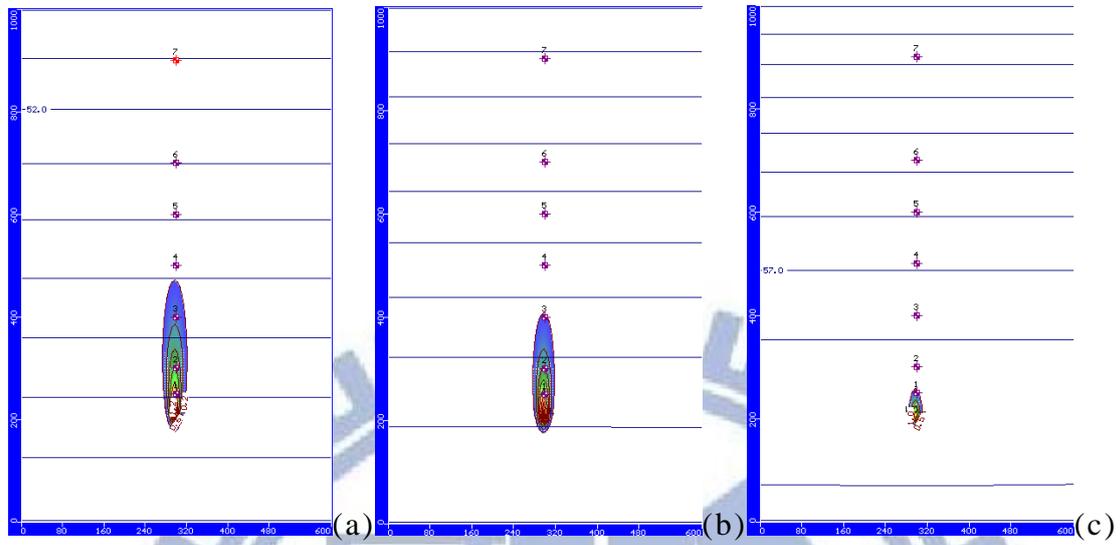


圖 4-3 (a) Case I-1250 之 TCE 鳥瞰濃度分佈圖、(b) Case I-2500 之 TCE 鳥瞰濃度分佈圖、(c) Case I-5000 之 TCE 鳥瞰濃度分佈圖

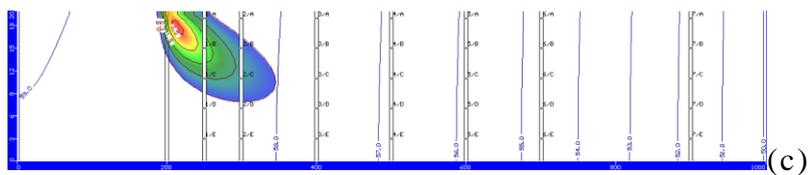
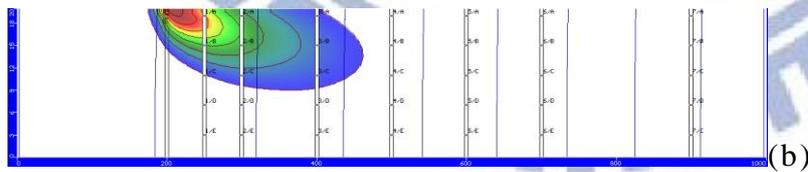
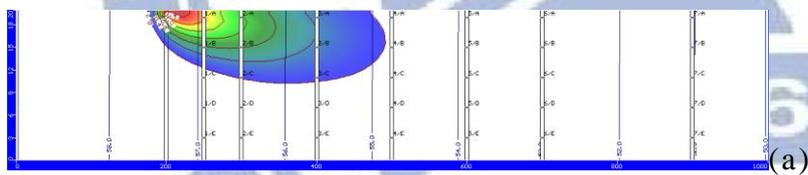
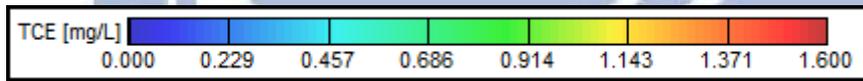


圖 4-4 (a) Case I-1250 之 TCE 側面濃度分佈圖、(b) Case I-2500 之 TCE 側面濃度分佈圖、(c) Case I-5000 之 TCE 側面濃度分佈圖

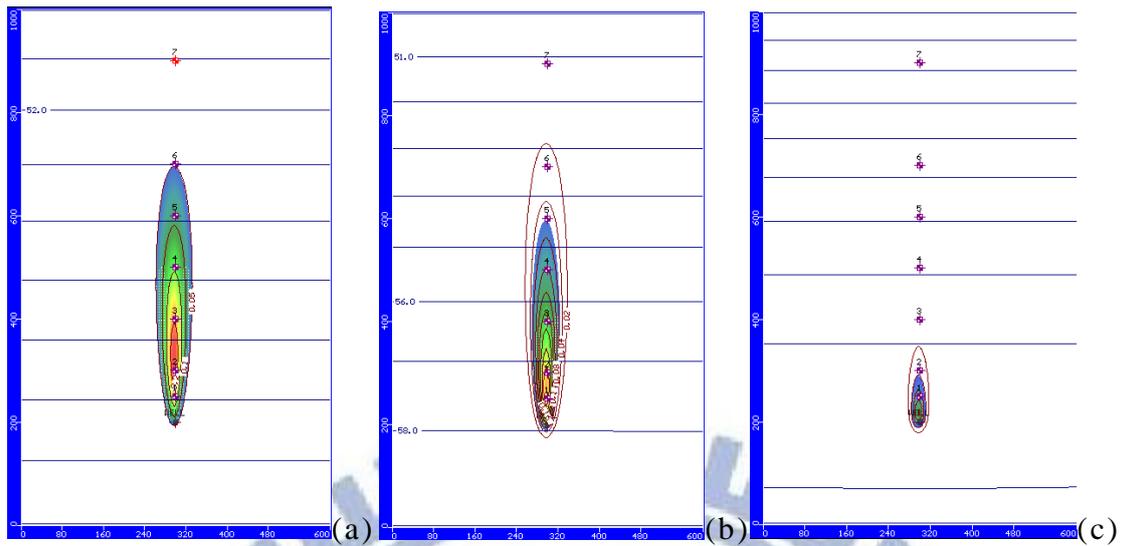


圖 4-5 (a) Case I-1250 之 DCE 鳥瞰濃度分佈圖、(b) Case I-2500 之 DCE 鳥瞰濃度分佈圖、(c) Case I-5000 之 DCE 鳥瞰濃度分佈圖

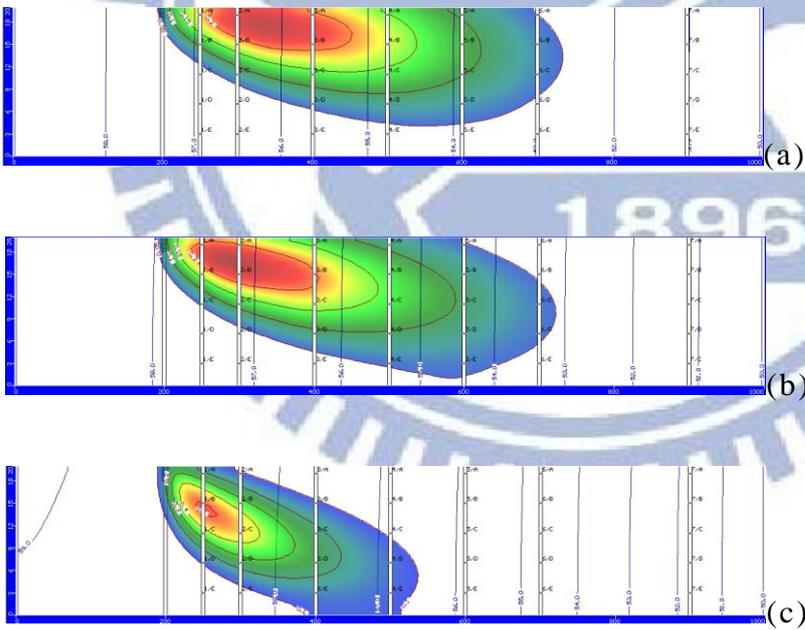
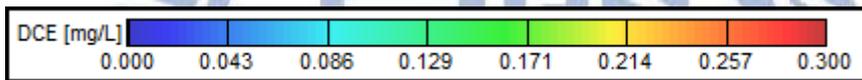


圖 4-6 (a) Case I-1250 之 DCE 側面濃度分佈圖、(b) Case I-2500 之 DCE 側面濃度分佈圖、(c) Case I-5000 之 DCE 側面濃度分佈圖

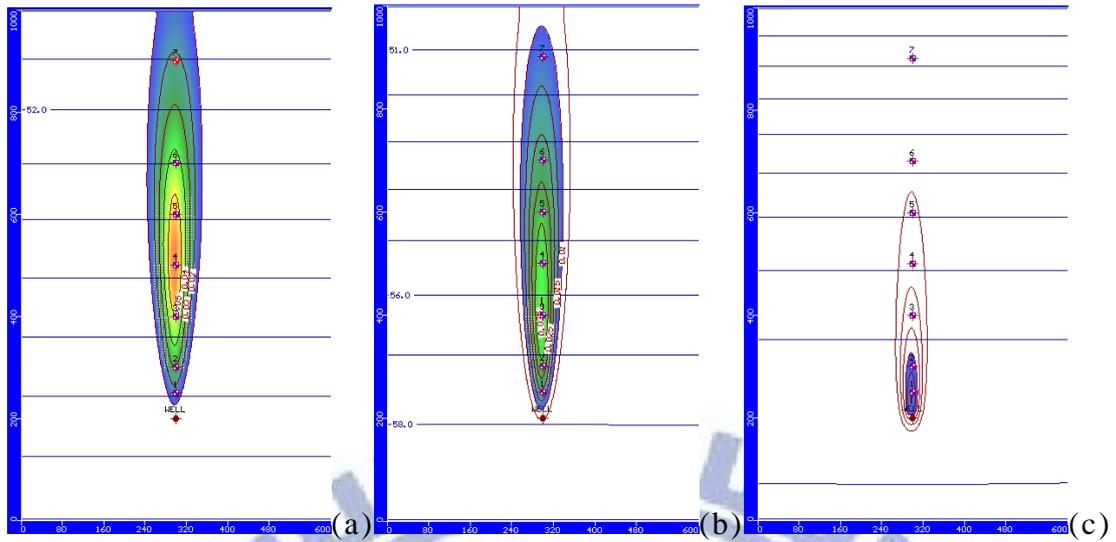


圖 4-7 (a) Case I-1250 之 VC 鳥瞰濃度分佈圖、(b) Case I-2500 之 VC 鳥瞰濃度分佈圖、(c) Case I-5000 之 VC 鳥瞰濃度分佈圖

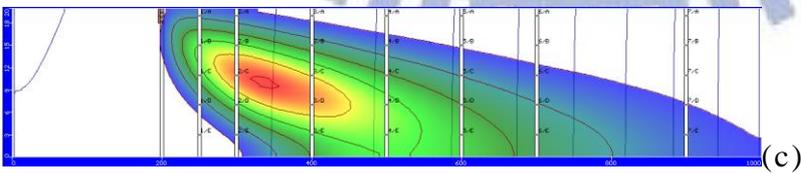
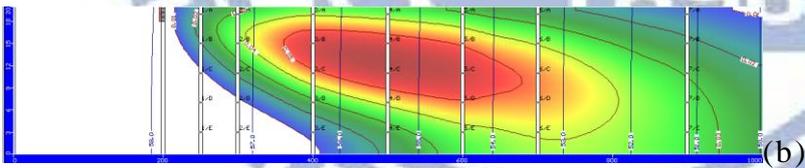
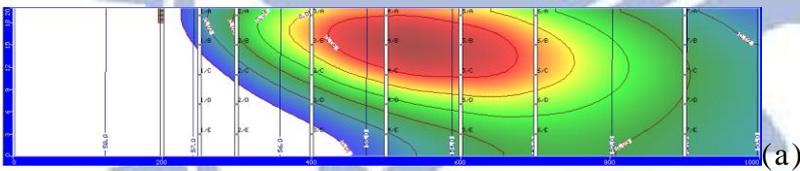
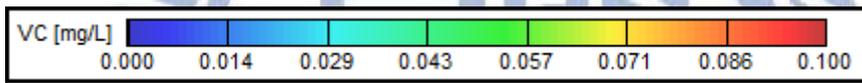


圖 4-8 (a) Case I-1250 之 VC 側面濃度分佈圖、(b) Case I-2500 之 VC 側面濃度分佈圖、(c) Case I-5000 之 VC 側面濃度分佈圖

表 4-2 Case I-1250 監測井濃度

Case I-1250	濃度(mm/day)	Case I-1250	濃度(mm/day)
PCE-1A	3.377	PCE-1B	0.866
TCE-1A	1.2144	TCE-1B	0.4598
TCE-2A	0.8582	TCE-2C	0.1736
TCE-3B	0.3632	TCE-3D	0.07568
DCE-2B	0.163	DCE-2D	0.0169
DCE-3B	0.204	DCE-3D	0.052
DCE-4B	0.1714	DCE-4D	0.0725
DCE-5B	0.114	DCE-5D	0.065
VC-3B	0.0519	VC-3D	0.01583
VC-4B	0.0673	VC-4D	0.0319
VC-5B	0.06658	VC-5D	0.0417
VC-6B	0.0563	VC-6D	0.0431
VC-7B	0.02933	VC-7D	0.02876

表 4-3 Case I-2500 監測井濃度

Case I-2500	濃度(mm/day)	Case I-2500	濃度(mm/day)
PCE-1A	3.25	PCE-1B	1.185
TCE-1A	1.3058	TCE-1B	0.6702
TCE-2A	0.7396	TCE-2C	0.2617
TCE-3B	0.3445	TCE-3D	0.1086
DCE-2B	0.1568	DCE-2D	0.02943
DCE-3B	0.2056	DCE-3D	0.0775
DCE-4B	0.1389	DCE-4D	0.08924
DCE-5B	0.08747	DCE-5D	0.0765
VC-3B	0.05548	VC-3D	0.0246
VC-4B	0.0561	VC-4D	0.0396
VC-5B	0.0506	VC-5D	0.0473
VC-6B	0.0408	VC-6D	0.04616
VC-7B	0.023	VC-7D	0.033

表 4-4 Case I-5000 監測井濃度

Case I-5000	濃度(mm/day)	Case I-5000	濃度(mm/day)
PCE-1A	1.541	PCE-1B	2.514
TCE-1A	1.0228	TCE-1B	1.8225
TCE-2A	0.2718	TCE-2C	0.8309
TCE-3B	0.1368	TCE-3D	0.227
DCE-2B	0.1316	DCE-2D	0.2109
DCE-3B	0.3804	DCE-3D	0.2314
DCE-4B	0.0491	DCE-4D	0.1275
DCE-5B	0.0205	DCE-5D	0.06274
VC-3B	0.0572	VC-3D	0.0879
VC-4B	0.033	VC-4D	0.107
VC-5B	0.0206	VC-5D	0.0626
VC-6B	0.01358	VC-6D	0.0433
VC-7B	0.00716	VC-7D	0.0215

Case II 模擬情境為污染源上方降雨入滲，比較在不同的入滲量影響之下含氯有機溶劑污染傳輸的濃度變化與污染團的範圍分佈，影響含氯有機溶劑污染傳輸模擬結果，模擬總時間為 10 年，DNAPL 之污染團其擴散濃度之分佈見圖 4-9 到圖 4-16。模擬結果顯示在不同降雨入滲時：

PCE 濃度在 Case II-1250 之 PCE 濃度最高在 1A 號監測井第 10 年時其濃度為 2.42568mm/day、Case II-2500 之 PCE 濃度最高在 1B 號監測井第 10 年時其濃度為 1.678mm/day、Case II-5000 之 PCE 濃度最高在 1B 號監測井第 10 年時其濃度為 1.494 mm/day，表示在 PCE 受到濃度隨著降雨量入滲的影響，當降雨量變大後其 PCE 受到入滲的雨量導致濃度降低，雨水入滲造成污染團有逐漸往地下含水層擴散的現象，污染團中心從 1A 的位置降至 1B 位置，結果顯示其水平影響範圍向下游之長度約減少 10 m，垂直影響深度增加 2 m，濃度減少 38.4 %。

TCE 濃度 Case II-1250 之 TCE 濃度最高在 1A 號監測井第 10 年時其濃度為 0.758mm/day、Case II-2500 之 TCE 濃度最高在 1B 號監測井第 10 年時其濃度為 0.58 mm/day、Case II-5000 之 TCE 濃度最高在 1B 號監測井第 10 年時其濃度為 0.4428 mm/day，表示在 TCE 受到濃度隨著降雨量入滲的影響，當降雨量變大後其 TCE 受到入滲的雨量導致污染團中心從

1A 的位置降低至 1B 位置，結果顯示雨水入滲造成污染團有逐漸往地下含水層擴散的現象，其水平影響範圍向下游之長度約減少 50 m，垂直影響深度增加 2 m，濃度減少 41.6 %。

DCE 濃度 Case II-1250 之 DCE 濃度最高在 3B 號監測井第 10 年時其濃度為 0.15522 mm/day、Case II-2500 之 DCE 濃度最高在 4B 號監測井第 10 年時其濃度為 0.1151 mm/day、Case II-5000 之 DCE 濃度最高在 4D 號監測井第 10 年時其濃度為 0.09356 mm/day，污染團中心隨時間入滲其溶解相污染團從 3B 位置到 4D 位置，結果顯示雨水入滲造成污染團有逐漸往地下含水層擴散的現象，其水平影響污染團向下游之長度約減少 100 m，垂直影響深度增加 6 m，濃度減少 37.8 %。

VC 濃度 Case II-1250 之 VC 濃度最高在 5B 號監測井第 10 年時其濃度為 0.0614 mm/day、Case II-2500 之 VC 濃度最高在 6B 號監測井第 10 年時其濃度為 0.048 mm/day、Case II-5000 之 VC 濃度最高在 6D 號監測井第 10 年時其濃度為 0.0422 mm/day，污染團中心隨時間入滲其溶解相污染團從 5B 位置到 6D 位置，結果顯示雨水入滲造成污染團有逐漸往地下含水層擴散的現象，其水平影響污染團向下游之長度約減少 100 m，垂直影響深度增加 12 m，濃度減少 31.3 %。

污染範圍變化在 PCE 污染源受到入滲影響在溶解相污染團下游污染範圍看似減少，但是其污染團向地下含水層深度增加 1.5 m。TCE 污染源受到入滲影響在溶解相污染團改變污染團流向順著向下入滲，污染團污染範圍達到含水層底層，其污染團再受到地下水流，導致在含水層中污染下游地下水層。DCE 污染團中心受到入滲影響，其殘餘的污染團在含水層下深度 12 m。VC 污染團受到入滲影響，其污染團在含水層底部 20 m，其地下水流中之殘留污染物在地下含水層中順著地下水流對下游產生長時間的污染擴散。

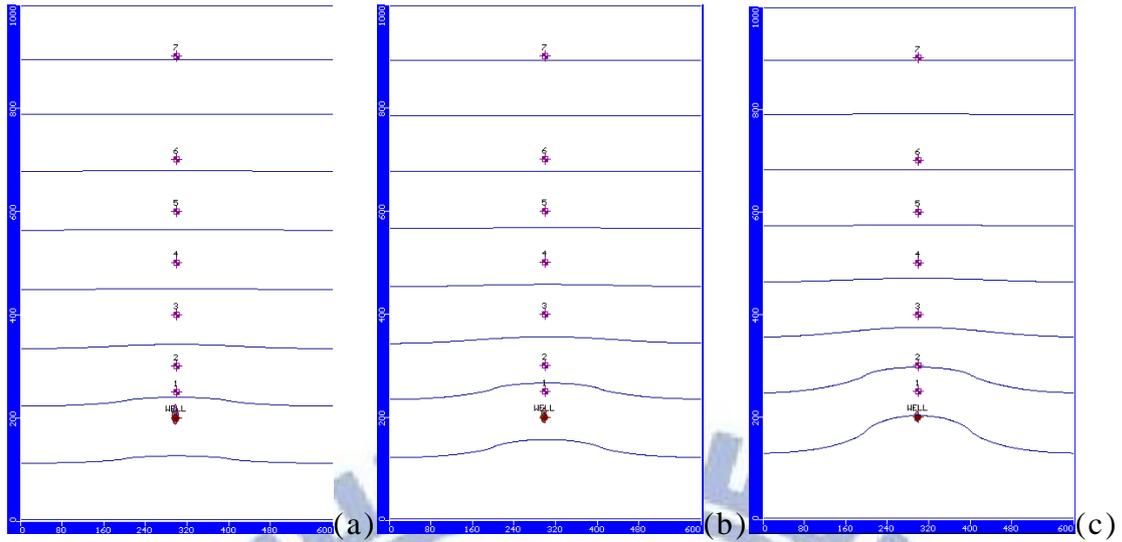


圖 4-9 (a) Case II-1250 之 PCE 鳥瞰濃度分佈圖、(b) CaseII-2500 之 PCE 鳥瞰濃度分佈圖、(c) CaseII-5000 之 PCE 鳥瞰濃度分佈圖

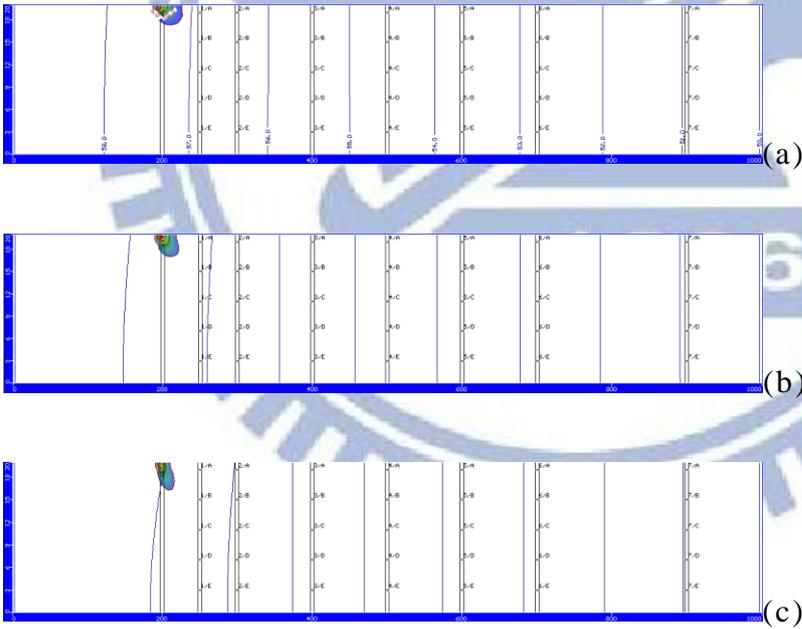
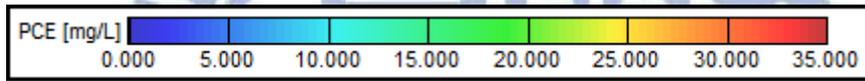


圖 4-10 (a) Case II-1250 之 PCE 側面濃度分佈圖、(b) CaseII-2500 之 PCE 側面濃度分佈圖、(c) CaseII-5000 之 PCE 側面濃度分佈圖

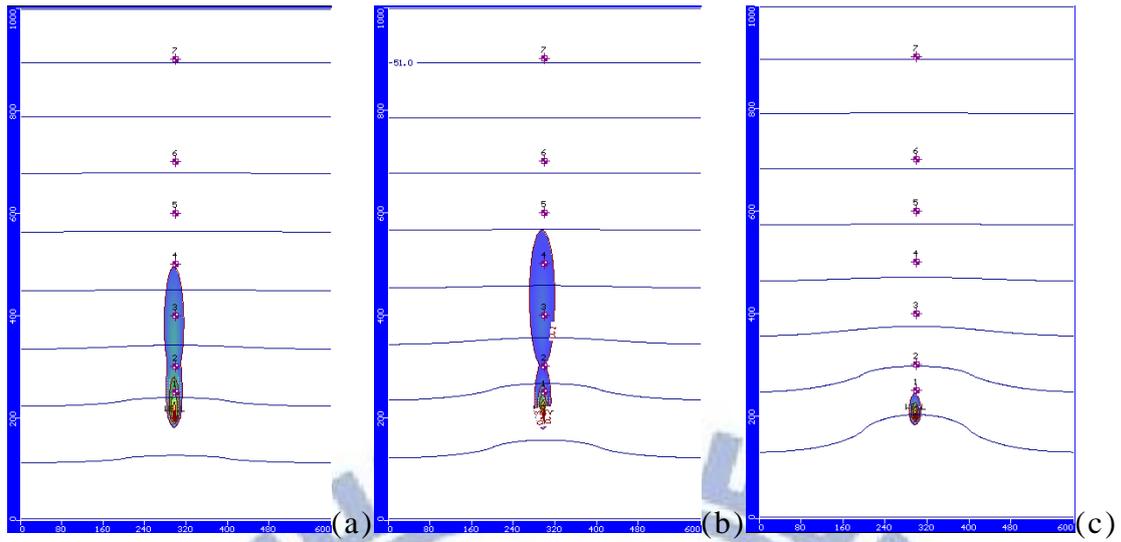


圖 4-11 (a) Case II-1250 之 TCE 鳥瞰濃度分佈圖、(b) CaseII-2500 之 TCE 鳥瞰濃度分佈圖、(c) CaseII-5000 之 TCE 鳥瞰濃度分佈圖

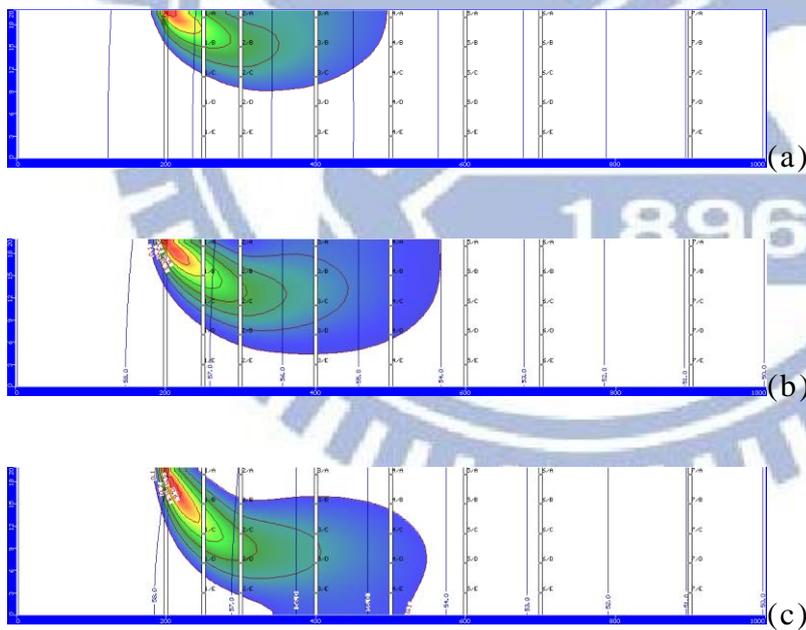
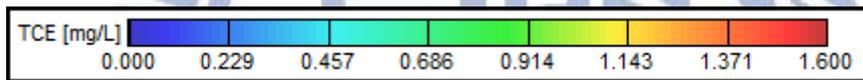


圖 4-12 (a) Case II-1250 之 TCE 側面濃度分佈圖、(b) CaseII-2500 之 TCE 側面濃度分佈圖、(c) CaseII-5000 之 TCE 側面濃度分佈圖

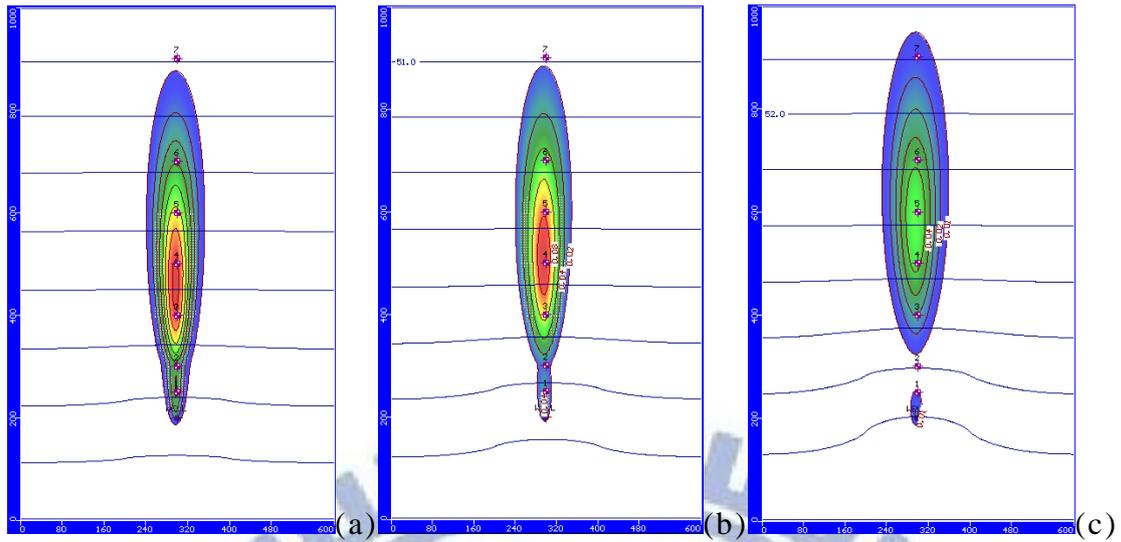


圖 4-13 (a) Case II-1250 之 DCE 鳥瞰濃度分佈圖、(b) CaseII-2500 之 DCE 鳥瞰濃度分佈圖、(c) CaseII-5000 之 DCE 鳥瞰濃度分佈圖

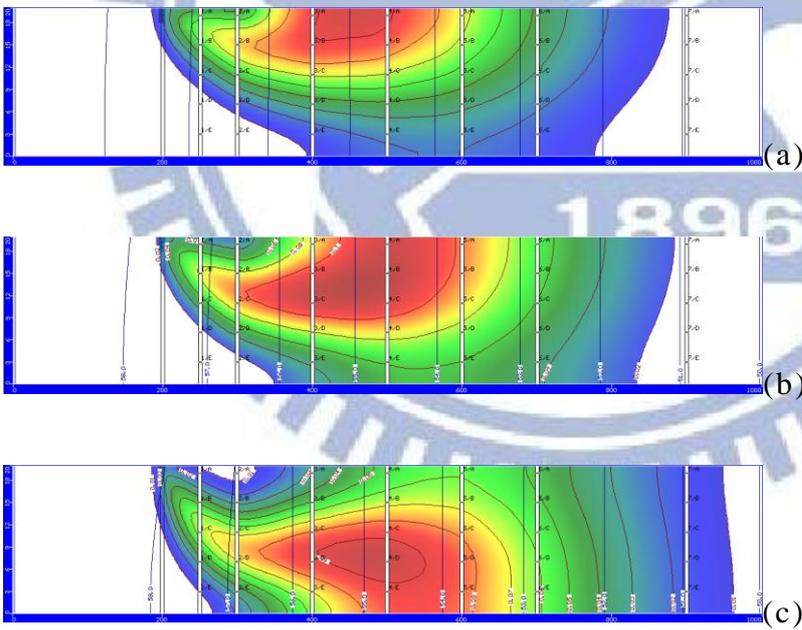
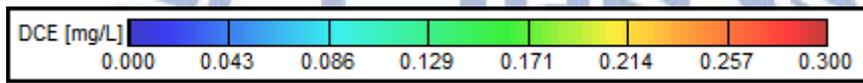


圖 4-14 (a) Case II-1250 之 DCE 側面濃度分佈圖、(b) CaseII-2500 之 DCE 側面濃度分佈圖、(c) CaseII-5000 之 DCE 側面濃度分佈圖

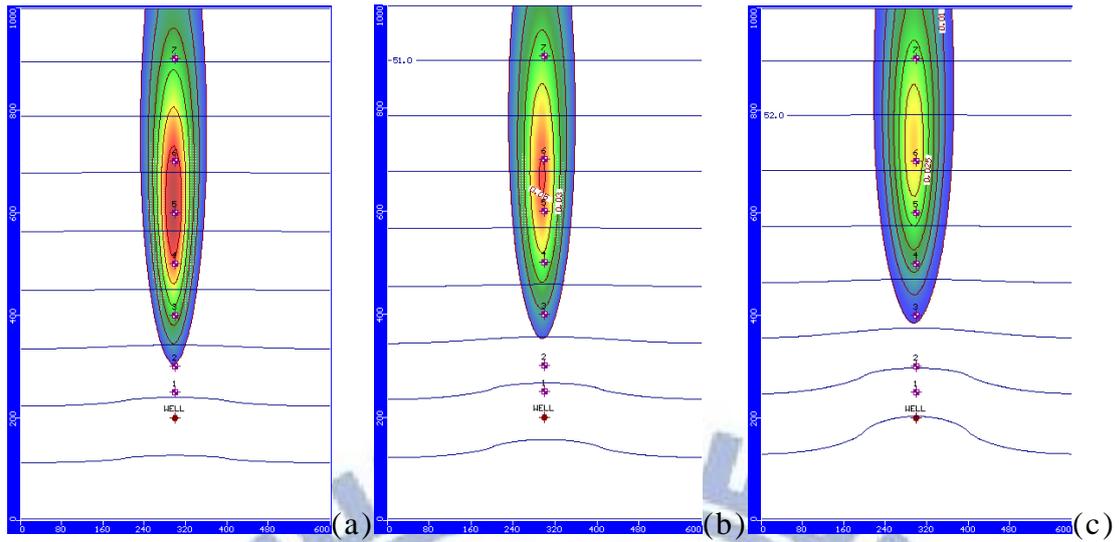


圖 4-15 (a) Case II-1250 之 VC 鳥瞰濃度分佈圖、 (b) CaseII-2500 之 VC 鳥瞰濃度分佈圖、 (c) CaseII-5000 之 VC 鳥瞰濃度分佈圖

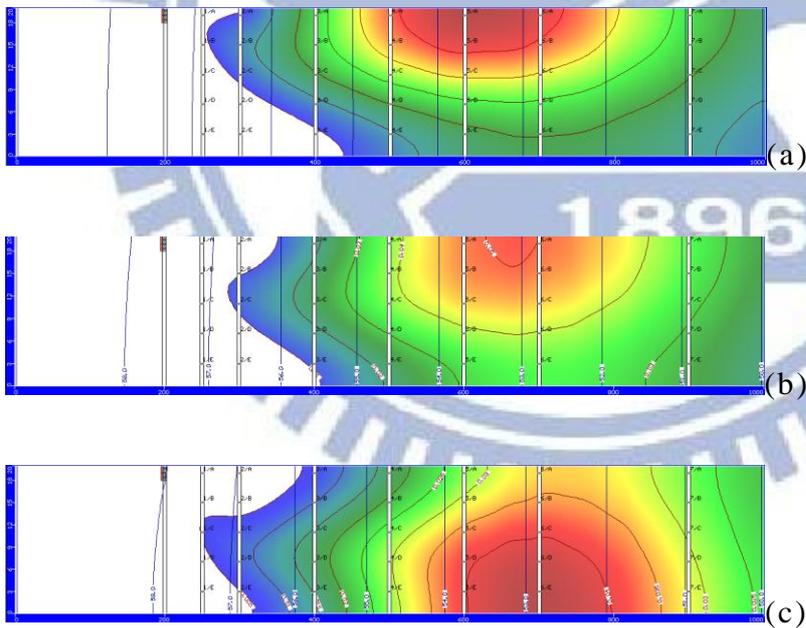
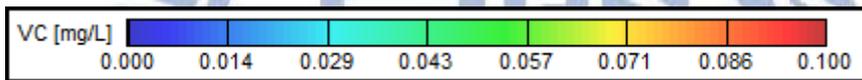


圖 4-16 (a) Case II-1250 之 VC 側面濃度分佈圖、 (b) CaseII-2500 之 VC 側面濃度分佈圖、 (c) CaseII-5000 之 VC 側面濃度分佈圖

表 4-5 Case II-1250 監測井濃度

CaseII-1250	濃度(mm/day)	CaseII-1250	濃度(mm/day)
PCE-1A	2.42568	PCE-1B	1.2738
TCE-1A	0.758	TCE-1B	0.5321
TCE-2A	0.4181	TCE-2C	0.2634
TCE-3B	0.3126	TCE-3D	0.1046
DCE-2B	0.1319	DCE-2D	0.0258
DCE-3B	0.15522	DCE-3D	0.0607
DCE-4B	0.1479	DCE-4D	0.07164
DCE-5B	0.114	DCE-5D	0.0625
VC-3B	0.03496	VC-3D	0.01573
VC-4B	0.053	VC-4D	0.028
VC-5B	0.0614	VC-5D	0.0362
VC-6B	0.0578	VC-6D	0.037
VC-7B	0.0345	VC-7D	0.02542

表 4-6 CaseII-2500 監測井濃度

CaseII-2500	濃度(mm/day)	CaseII-2500	濃度(mm/day)
PCE-1A	1.424	PCE-1B	1.678
TCE-1A	0.42	TCE-1B	0.58
TCE-2A	0.167	TCE-2C	0.348
TCE-3B	0.24	TCE-3D	0.147
DCE-2B	0.089	DCE-2D	0.0395
DCE-3B	0.108	DCE-3D	0.074
DCE-4B	0.1151	DCE-4D	0.083
DCE-5B	0.0965	DCE-5D	0.0722
VC-3B	0.0222	VC-3D	0.0167
VC-4B	0.038	VC-4D	0.0289
VC-5B	0.0476	VC-5D	0.037
VC-6B	0.048	VC-6D	0.0388
VC-7B	0.034	VC-7D	0.029

表 4-7 CaseII-5000 監測井濃度

CaseII-5000	濃度(mm/day)	CaseII-5000	濃度(mm/day)
PCE-1A	0.43	PCE-1B	1.494
TCE-1A	0.134	TCE-1B	0.4428
TCE-2A	0.033	TCE-2C	0.3332
TCE-3B	0.1273	TCE-3D	0.1968
DCE-2B	0.033	DCE-2D	0.0639
DCE-3B	0.054	DCE-3D	0.0866
DCE-4B	0.0699	DCE-4D	0.09356
DCE-5B	0.0686	DCE-5D	0.084
VC-3B	0.0105	VC-3D	0.0173
VC-4B	0.0215	VC-4D	0.0293
VC-5B	0.0316	VC-5D	0.039
VC-6B	0.036	VC-6D	0.0422
VC-7B	0.028	VC-7D	0.0311

Case III 模擬情境為污染源下游近點降雨入滲，比較在不同的入滲量影響之下含氯有機溶劑污染傳輸的濃度變化與污染團的範圍分佈，影響含氯有機溶劑污染傳輸模擬結果，模擬總時間為 10 年，DNAPL 之污染團其擴散濃度之分佈見圖 4-17 到圖 4-24。模擬結果顯示在不同降雨入滲時：

模擬結果顯示 PCE 濃度在 Case III-1250 之 PCE 濃度最高在 1A 號監測井第 10 年時其濃度為 4.22mm/day、Case III-2500 之 PCE 濃度最高在 1A 號監測井第 10 年時其濃度為 3.851mm/day、CaseIII-5000 之 PCE 濃度最高在 1A 號監測井第 10 年時其濃度為 3.6434 mm/day，結果顯示在 PCE 受到濃度隨著降雨量入滲的影響，因為降雨入滲不在污染源上方，使得雨水入滲造成污染團有逐漸往下擴散的現象變的不明顯，其 PCE 污染團中心最大濃度維持在 1A 位置，結果顯示雨水入滲造成污染團有逐漸往地下含水層擴散的現象，其水平影響範圍向下游之長度約減少 5 m，垂直影響深度增加 2 m，濃度減少 13.66 %。

TCE 濃度在 Case III-1250 之 TCE 濃度最高在 1A 號監測井第 10 年時其濃度為 1.392 mm/day、Case III-2500 之 TCE 濃度最高在 2A 號監測井第 10 年時其濃度為 1.267 mm/day、Case III-5000 之 TCE 濃度最高在 2A

號監測井第 10 年時其濃度為 1.176 mm/day，結果顯示在 TCE 受到濃度隨著降雨量入滲的影響，當降雨量變大後其 TCE 受到入滲的雨量導致污染團中心從 1A 的位置降低至 2A 位置，結果顯示雨水入滲造成污染團有逐漸往地下含水層擴散的現象，其水平影響範圍向下游之長度約減少 50 m，垂直影響深度增加 2 m，濃度減少 15.5 %。

DCE 濃度在 Case III-1250 之 DCE 濃度最高在 3B 號監測井第 10 年時其濃度為 0.4485mm/day、Case III-2500 之 DCE 濃度最高在 3B 號監測井第 10 年時其濃度為 0.2497mm/day、Case III-5000 之 DCE 濃度最高在 3B 號監測井第 10 年時其濃度為 0.1932 mm/day，污染團中心最大濃度維持在 3B，結果顯示雨水入滲造成污染團有逐漸往地下含水層擴散的現象，其水平影響範圍向下游之長度約減少 100 m，垂直影響深度增加 2 m，濃度減少 56.9 %。

VC 濃度在 Case III-1250 之 VC 濃度最高在 3B 號監測井第 10 年時其濃度為 0.0506 mm/day、Case III-2500 之 VC 濃度最高在 4D 號監測井第 10 年時其濃度為 0.047 mm/day、Case III-5000 之 VC 濃度最高在 5D 號監測井第 10 年時其濃度為 0.00863 mm/day，溶解相污染團中心隨時間入滲從 3B 位置下降至 5D 位置，結果顯示雨水入滲造成污染團有逐漸往地下含水層擴散的現象，其水平影響範圍向下游之長度約減少 200 m，垂直影響深度增加 6 m，濃度減少 82.9 %。

污染範圍變化 PCE 污染源上方並沒有降雨入滲，所以在污染擴散較不明顯。其污染團受到降雨入滲之影響，呈細長扁平型向地下含水層方向移動達到模擬最底層。溶解相污染團在距離污染源 100 m 處受到降雨入滲改變方向，污染團呈細長扁平型達到模擬最底層並順著地下水流對下游產生長時間的污染擴散。

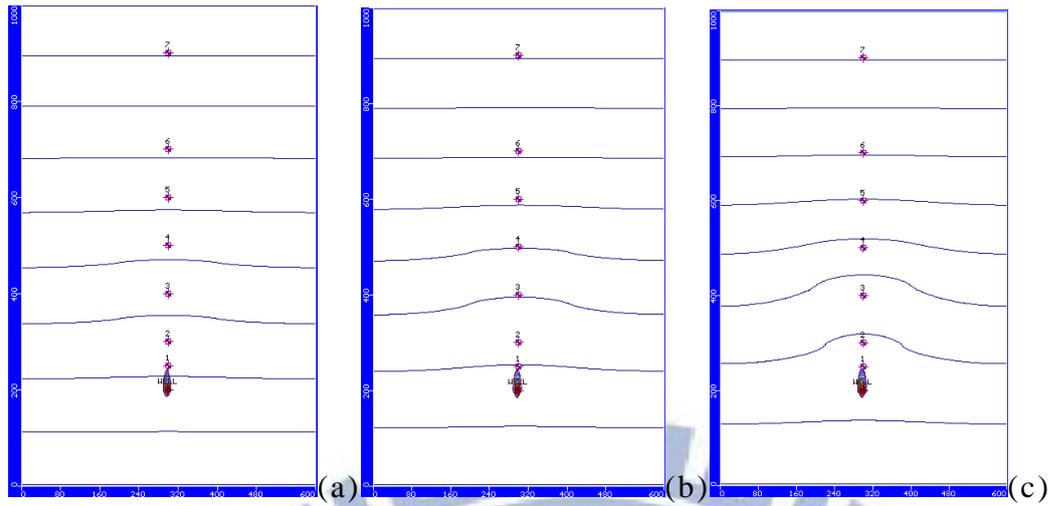


圖 4-17 (a) Case III-1250 之 PCE 鳥瞰濃度分佈圖、 (b) Case III-2500 之 PCE 鳥瞰濃度分佈圖、 (c) Case II-5000 之 PCE 鳥瞰濃度分佈圖

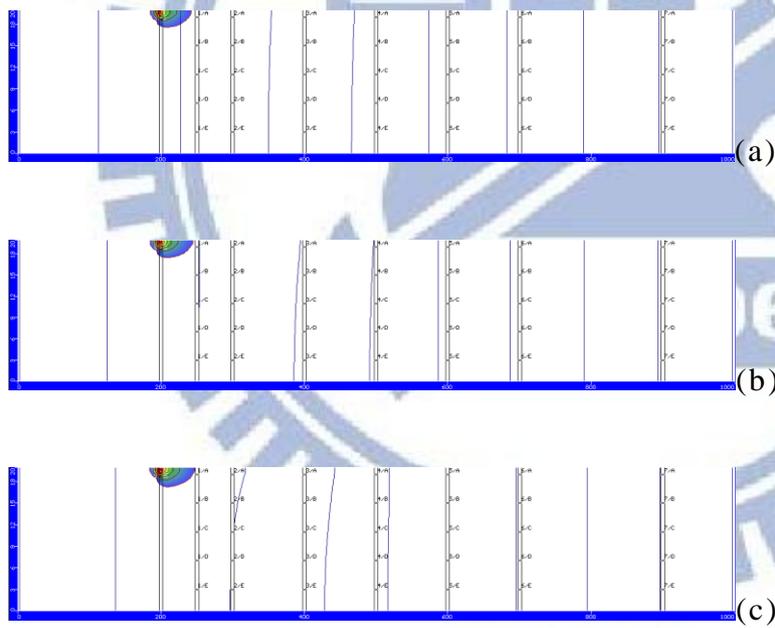
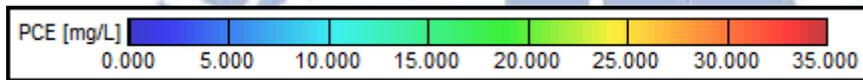


圖 4-18 (a) Case III-1250 之 PCE 側面濃度分佈圖、 (b) Case III-2500 之 PCE 側面濃度分佈圖、 (c) Case II-5000 之 PCE 側面濃度分佈圖

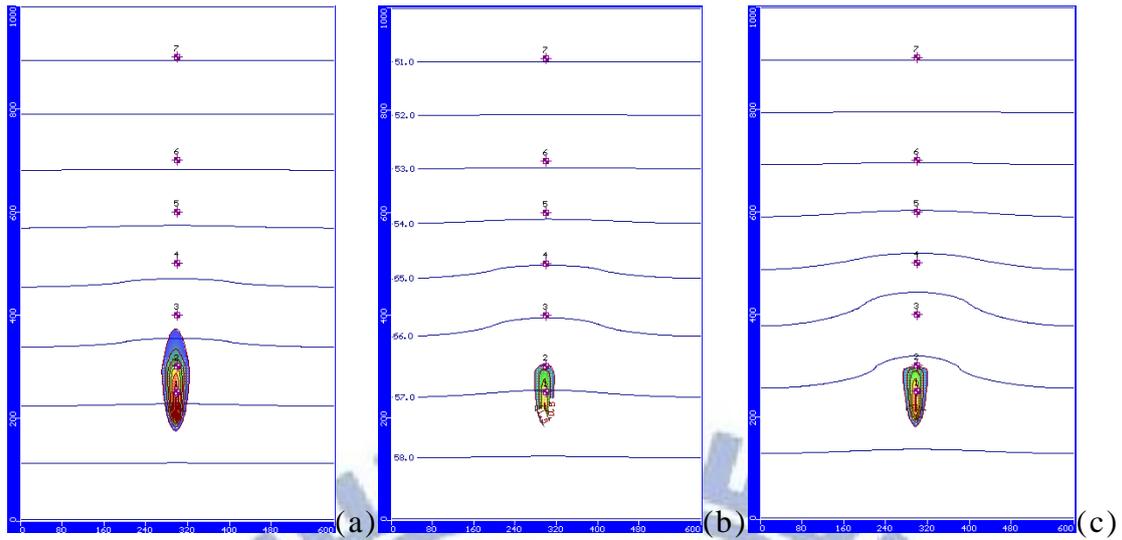


圖 4-19 (a) Case III-1250 之 TCE 鳥瞰濃度分佈圖、(b) Case III-2500 之 TCE 鳥瞰濃度分佈圖、(c) Case II-5000 之 TCE 鳥瞰濃度分佈圖

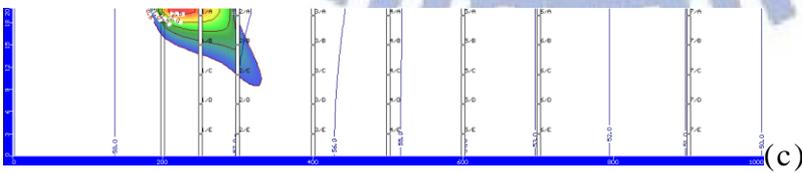
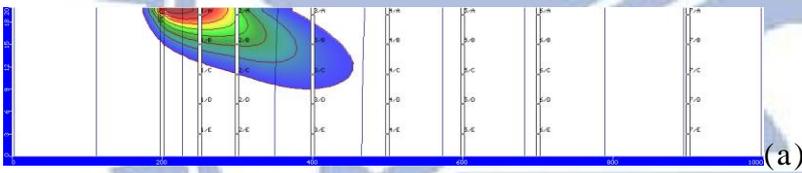
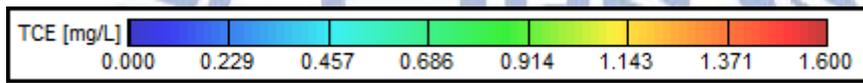


圖 4-20 (a) Case III-1250 之 TCE 側面濃度分佈圖、(b) Case III-2500 之 TCE 側面濃度分佈圖、(c) Case II-5000 之 TCE 側面濃度分佈圖

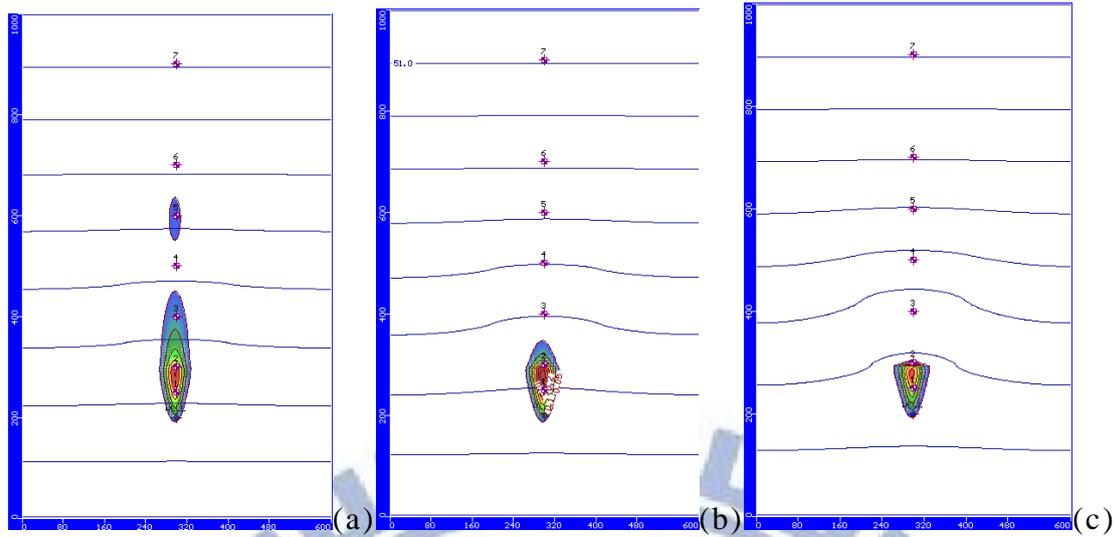


圖 4-21 (a) Case III-1250 之 DCE 鳥瞰濃度分佈圖、(b) CaseIII-2500 之 DCE 鳥瞰濃度分佈圖、(c) CaseIII-5000 之 DCE 鳥瞰濃度分佈圖

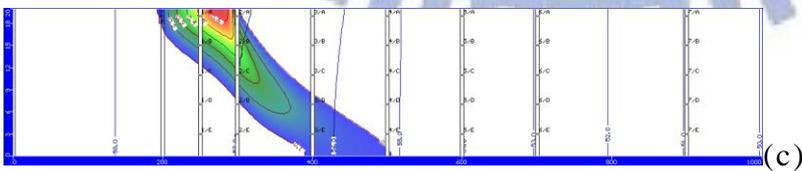
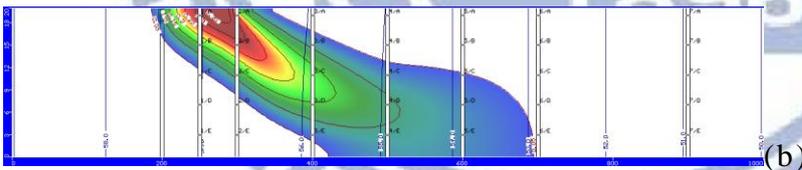
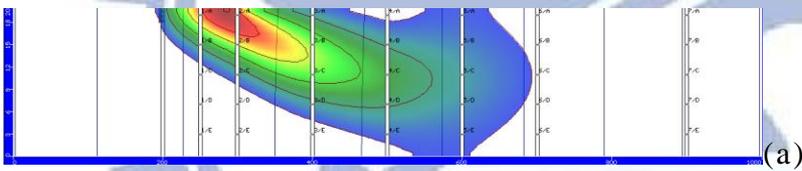
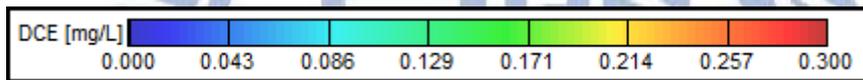


圖 4-22 (a) Case III-1250 之 DCE 側面濃度分佈圖、(b) CaseIII-2500 之 DCE 側面濃度分佈圖、(c) CaseIII-5000 之 DCE 側面濃度分佈圖

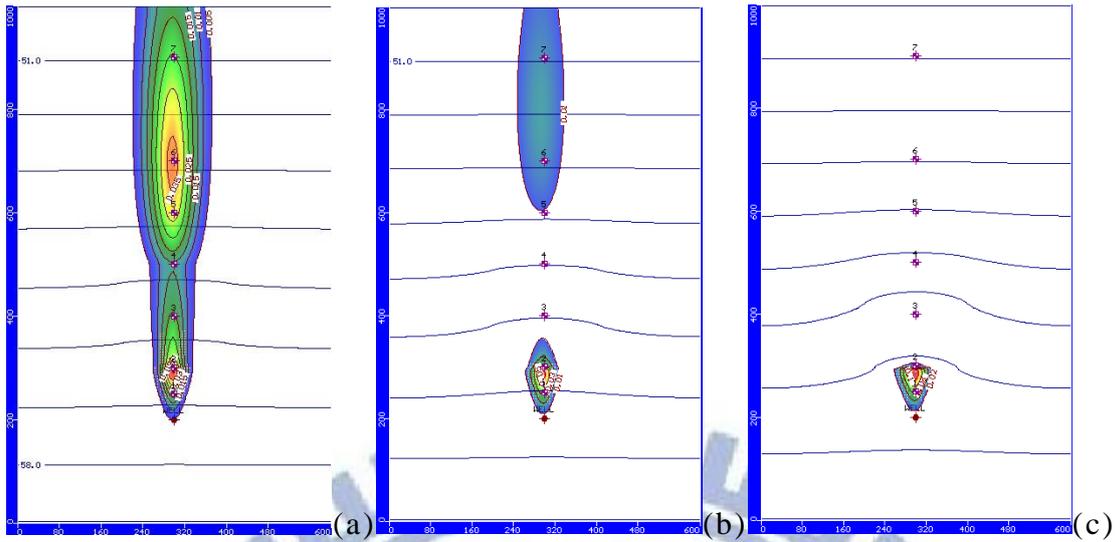


圖 4-23 (a) Case III-1250 之 VC 鳥瞰濃度分佈圖、(b) CaseIII-2500 之 VC 鳥瞰濃度分佈圖、(c) CaseIII-5000 之 VC 鳥瞰濃度分佈圖

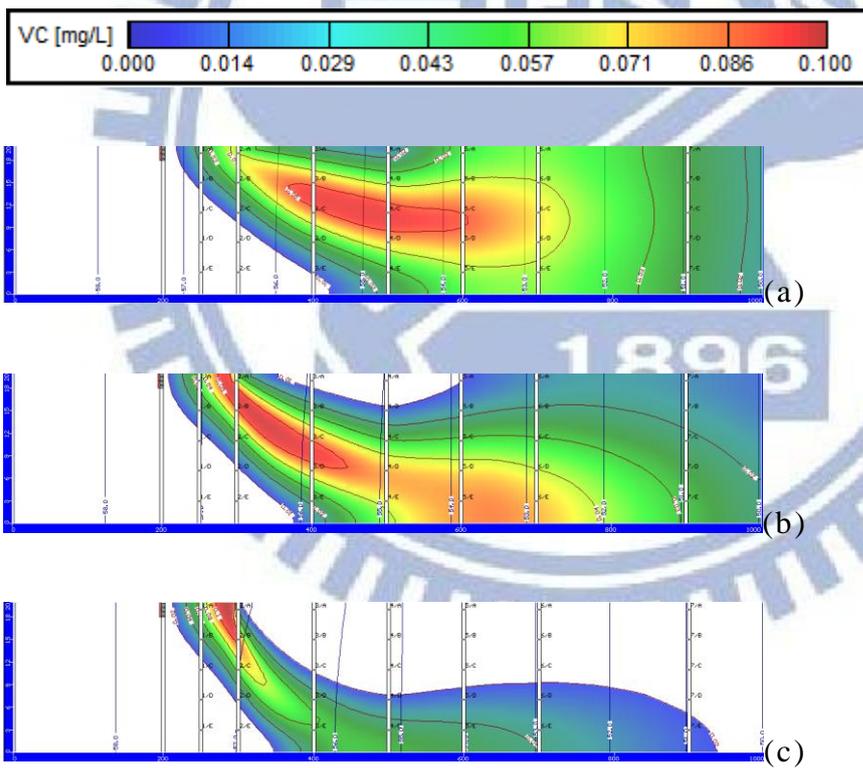


圖 4-24 (a) Case III-1250 之 VC 側面濃度分佈圖、(b) CaseIII-2500 之 VC 側面濃度分佈圖、(c) CaseIII-5000 之 VC 側面濃度分佈圖

表 4-8 CaseIII-1250 監測井濃度

Case III-1250	濃度(mm/day)	Case III-1250	濃度(mm/day)
PCE-1A	4.22	PCE-1B	0.7215
TCE-1A	1.392	TCE-1B	0.419
TCE-2A	1.0236	TCE-2C	0.158
TCE-3B	0.3332	TCE-3D	0.107
DCE-2B	0.1783	DCE-2D	0.01585
DCE-3B	0.1932	DCE-3D	0.0753
DCE-4B	0.1037	DCE-4D	0.0984
DCE-5B	0.073	DCE-5D	0.0743
VC-3B	0.0506	VC-3D	0.0234
VC-4B	0.0411	VC-4D	0.04234
VC-5B	0.043	VC-5D	0.04599
VC-6B	0.04089	VC-6D	0.042
VC-7B	0.0259	VC-7D	0.0259

表 4-9 CaseIII-2500 監測井濃度

CaseIII-2500	濃度(mm/day)	Case III-2500	濃度(mm/day)
PCE-1A	3.851	PCE-1B	0.759
TCE-1A	1.267	TCE-1B	0.49
TCE-2A	0.9923	TCE-2C	0.218
TCE-3B	0.1626	TCE-3D	0.184
DCE-2B	0.1042	DCE-2D	0.025
DCE-3B	0.2497	DCE-3D	0.1313
DCE-4B	0.0323	DCE-4D	0.1078
DCE-5B	0.0306	DCE-5D	0.0725
VC-3B	0.03	VC-3D	0.0418
VC-4B	0.014	VC-4D	0.047
VC-5B	0.0187	VC-5D	0.0446
VC-6B	0.022	VC-6D	0.0415
VC-7B	0.0181	VC-7D	0.026

表 4-10 CaseIII-5000 監測井濃度

CaseIII-5000	濃度(mm/day)	Case III-5000	濃度(mm/day)
PCE-1A	3.6434	PCE-1B	0.83
TCE-1A	1.176	TCE-1B	0.651
TCE-2A	0.668	TCE-2C	0.415
TCE-3B	0.013	TCE-3D	0.175
DCE-2B	0.01215	DCE-2D	0.062
DCE-3B	0.4485	DCE-3D	0.1468
DCE-4B	0.00273	DCE-4D	0.0507
DCE-5B	0.0058	DCE-5D	0.0396
VC-3B	0.0049	VC-3D	0.029
VC-4B	0.00161	VC-4D	0.027
VC-5B	0.00464	VC-5D	0.0555
VC-6B	0.00776	VC-6D	0.0284
VC-7B	0.00863	VC-7D	0.0184

Case IV 模擬情境為污染源下游近點左側降雨入滲，比較在不同的入滲量影響之下含氯有機溶劑污染傳輸的濃度變化與污染團的範圍分佈，影響含氯有機溶劑污染傳輸模擬結果，模擬總時間為 10 年，DNAPL 之污染團其擴散濃度之分佈見圖 4-25 到圖 4-32。模擬結果顯示在不同降雨入滲時：

PCE 濃度在 Case IV-1250 之 PCE 濃度最高在 1A 號監測井第 10 年時其濃度為 3.389 mm/day、Case IV-2500 之 PCE 濃度最高在 1A 號監測井第 10 年時其濃度為 3.154 mm/day、Case IV-5000 之 PCE 濃度最高在 1A 號監測井第 10 年時其濃度為 2.92 mm/day，其 PCE 污染團中心最大濃度維持在 1A 位置，污染範圍變化 PCE 污染源上方並沒有降雨入滲，所以在污染擴散較不明顯，其水平影響範圍向下游之長度約減少 5 m，垂直影響深度增加 2 m，濃度減少 13.84 %。

TCE 濃度在 Case IV-1250 之 TCE 濃度最高在 1A 號監測井第 10 年時其濃度為 1.297 mm/day、Case IV-2500 之 TCE 濃度最高在 1A 號監測井第 10 年時其濃度為 1.284 mm/day、Case IV-5000 之 TCE 濃度最高在 1A 號監測井第 10 年時其濃度為 1.097mm/day，表示在 TCE 受到濃度隨著降雨量入滲的影響，TCE 污染團中心最大濃度維持在 1A 位置，TCE 污染團

在(300,300)左方有降雨入滲，其溶解相污染團向右偏移 80 m，其水平影響範圍向下游之長度約減少 50 m，垂直影響深度增加 6 m，濃度減少 15.42 %。

DCE 濃度在 Case IV-1250 之 DCE 濃度最高在 2B 號監測井第 10 年時其濃度為 0.1446mm/day、Case IV-2500 之 DCE 濃度最高在 2B 號監測井第 10 年時其濃度為 0.1373mm/day、Case IV-5000 之 DCE 濃度最高在 2B 號監測井第 10 年時其濃度為 0.075 mm/day，污染團中心最大濃度維持在 2B 位置，DCE 污染團在(300,300)左方有降雨入滲，其溶解相污染團向右偏移 90 m，其水平影響範圍向下游之長度約減少 25 m，垂直影響深度增加 10 m，濃度減少 48.13 %。

VC 濃度在 Case IV-1250 之 VC 濃度最高在 3B 號監測井第 10 年時其濃度為 0.0333 mm/day、Case IV-2500 之 VC 濃度最高在 3B 號監測井第 10 年時其濃度為 0.0118 mm/day、Case IV-5000 之 VC 濃度最高在 4B 號監測井第 10 年時其濃度為 0.0076 mm/day，污染團中心隨時間入滲其溶解相污染團從 3B 位置到 4D 位置，VC 污染團在(300,300)左方有降雨入滲，其溶解相污染團向右偏移 90 m，污染範圍增加至含水層底層，其水平影響範圍向下游之長度約減少 200 m，垂直影響深度超過 12 m，濃度減少 77.17%。

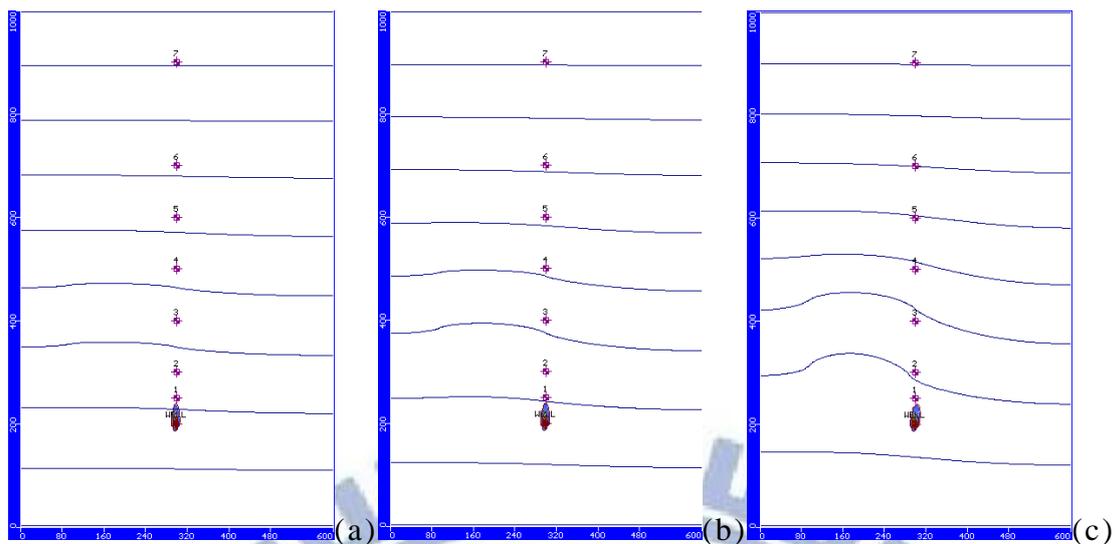


圖 4-25 (a) Case IV-1250 之 PCE 鳥瞰濃度分佈圖、(b) CaseIV-2500 之 PCE 鳥瞰濃度分佈圖、(c) CaseIV-5000 之 PCE 鳥瞰濃度分佈圖

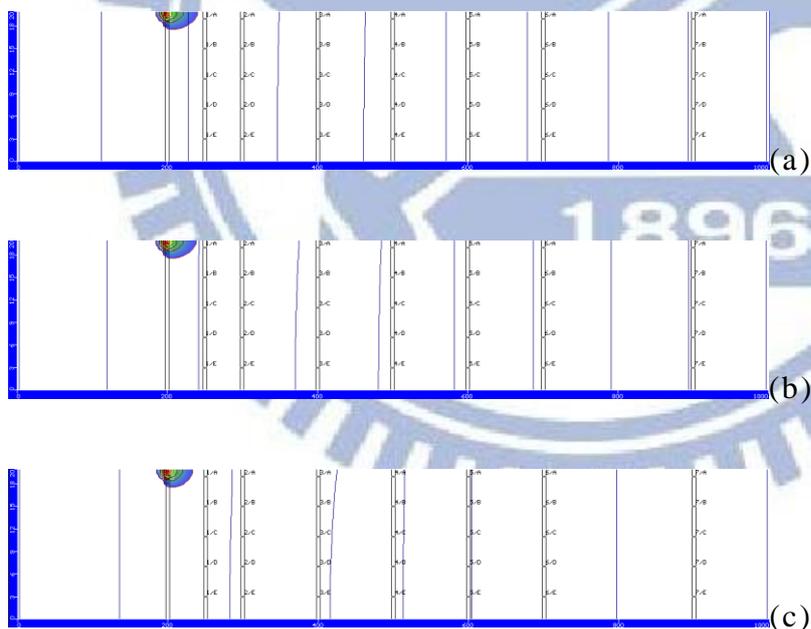
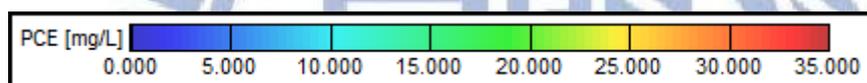


圖 4-26 (a) Case IV-1250 之 PCE 側面濃度分佈圖、(b) CaseIV-2500 之 PCE 側面濃度分佈圖、(c) CaseIV-5000 之 PCE 側面濃度分佈圖

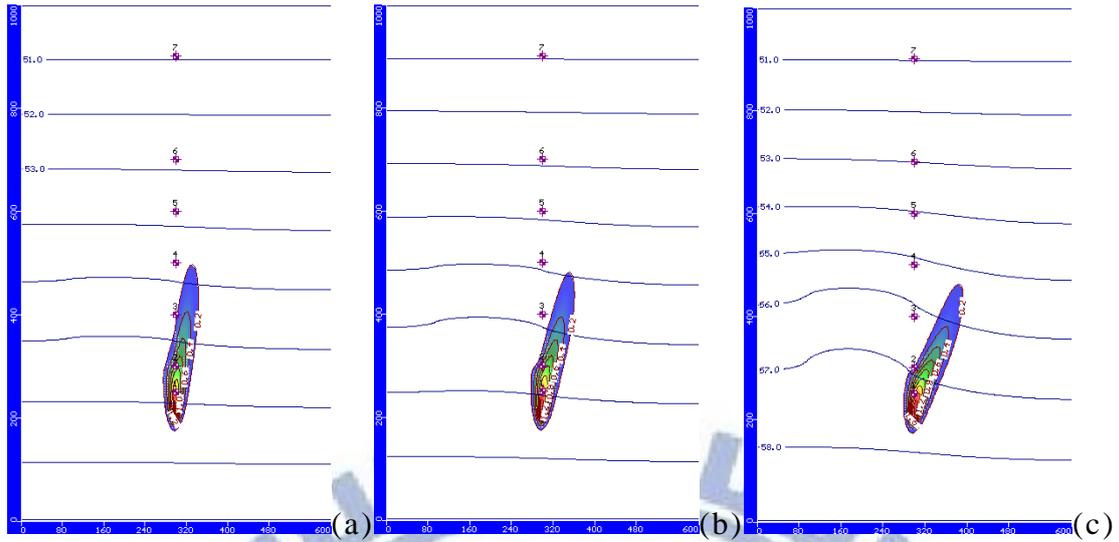


圖 4-27 (a) Case IV-1250 之 TCE 鳥瞰濃度分佈圖、(b) Case IV-2500 之 TCE 鳥瞰濃度分佈圖、(c) Case IV-5000 之 TCE 鳥瞰濃度分佈圖

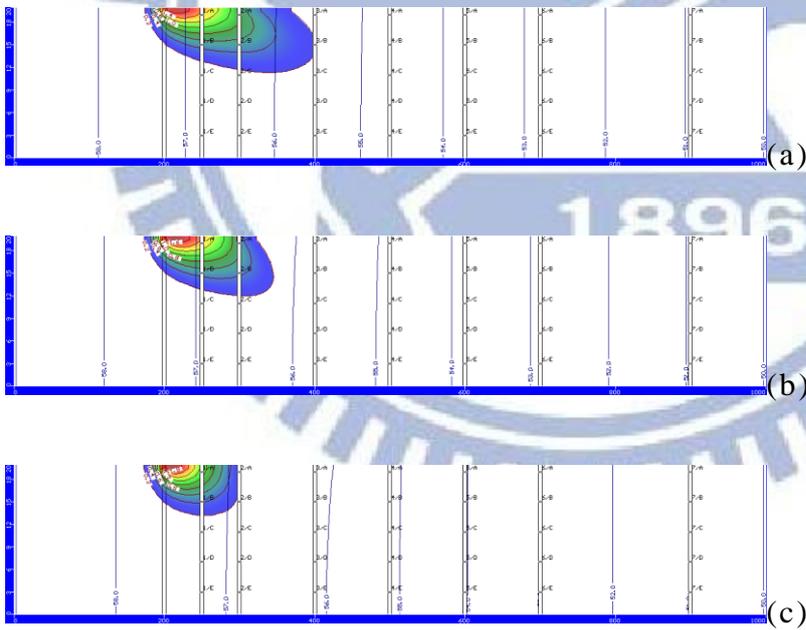
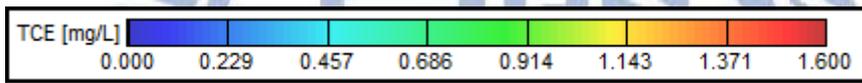


圖 4-28 (a) Case IV-1250 之 TCE 側面濃度分佈圖、(b) Case IV-2500 之 TCE 側面濃度分佈圖、(c) Case IV-5000 之 TCE 側面濃度分佈圖

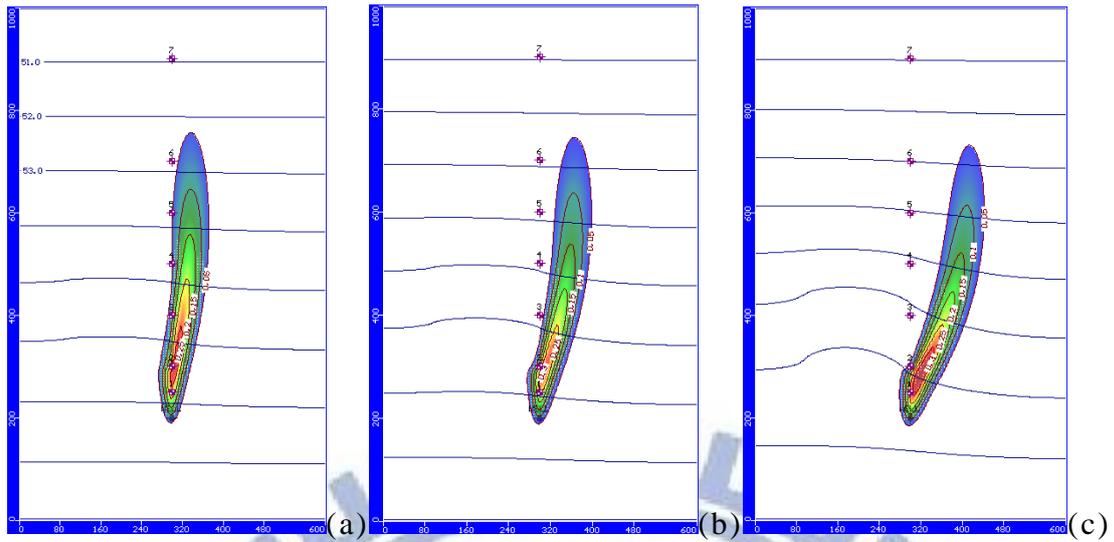


圖 4-29 (a) Case IV-1250 之 DCE 鳥瞰濃度分佈圖、(b) CaseIV-2500 之 DCE 鳥瞰濃度分佈圖、(c) CaseIV-5000 之 DCE 鳥瞰濃度分佈圖

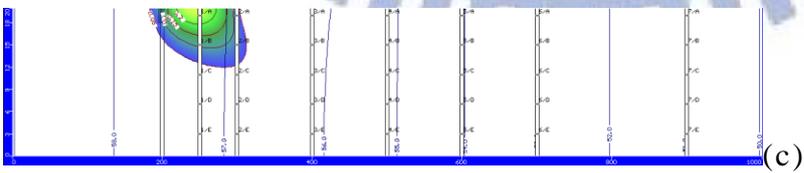
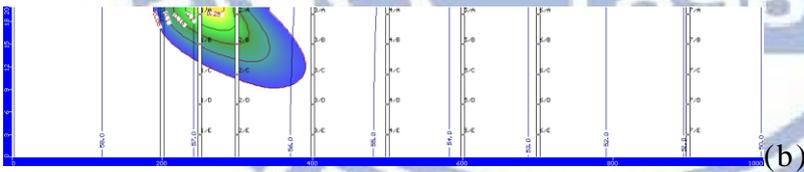
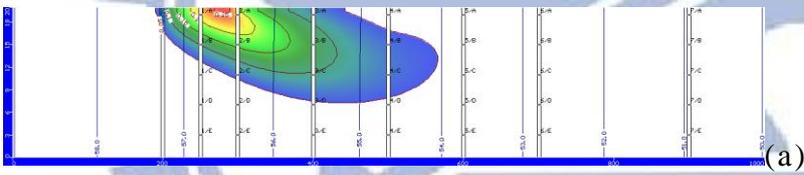
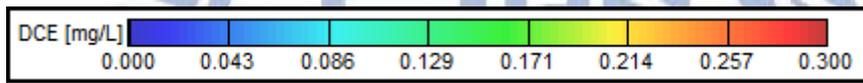


圖 4-30 (a) Case IV-1250 之 DCE 側面濃度分佈圖、(b) CaseIV-2500 之 DCE 側面濃度分佈圖、(c) CaseIV-5000 之 DCE 側面濃度分佈圖

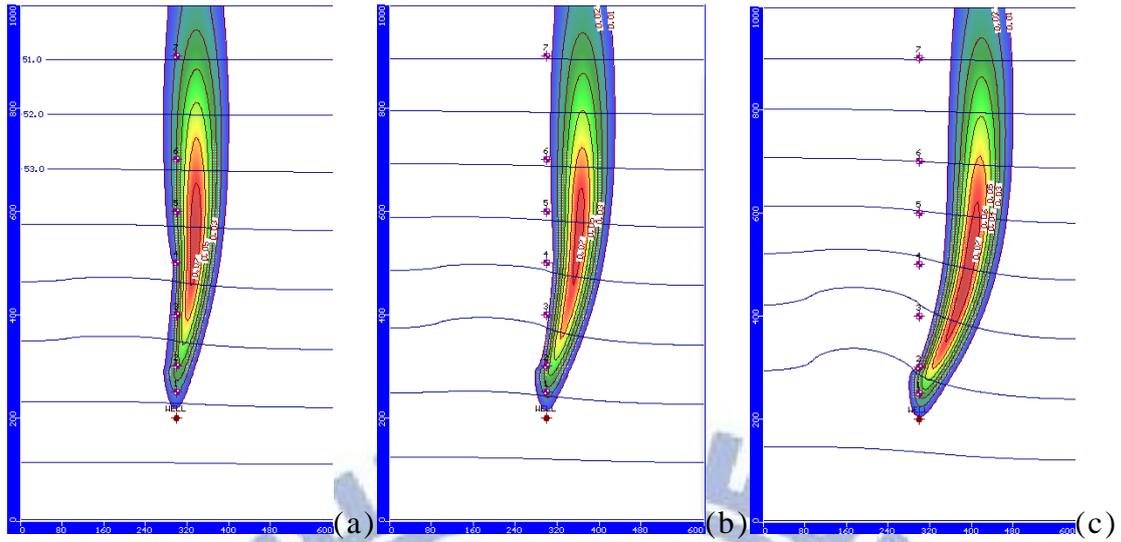


圖 4-31 (a) Case IV-1250 之 VC 鳥瞰濃度分佈圖、(b) CaseIV-2500 之 VC 鳥瞰濃度分佈圖、(c) CaseIV-5000 之 VC 鳥瞰濃度分佈圖

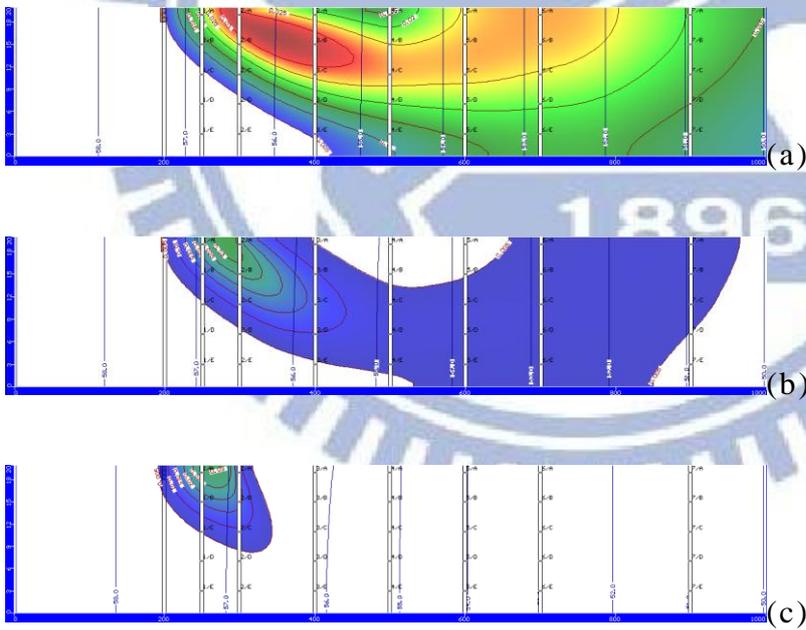
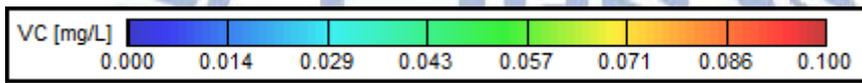


圖 4-32 (a) Case IV-1250 之 VC 側面濃度分佈圖、(b) CaseIV-2500 之 VC 側面濃度分佈圖、(c) CaseIV-5000 之 VC 側面濃度分佈圖

表 4-11 CaseIV-1250 監測井濃度

CaseIV-1250	濃度(mm/day)	CaseIV-1250	濃度(mm/day)
PCE-1A	3.389	PCE-1B	0.6674
TCE-1A	1.297	TCE-1B	0.388
TCE-2A	0.8455	TCE-2C	0.1276
TCE-3B	0.21154	TCE-3D	0.0543
DCE-2B	0.1446	DCE-2D	0.01257
DCE-3B	0.125	DCE-3D	0.039
DCE-4B	0.0634	DCE-4D	0.0416
DCE-5B	0.0442	DCE-5D	0.0313
VC-3B	0.0333	VC-3D	0.0123
VC-4B	0.026	VC-4D	0.0187
VC-5B	0.027	VC-5D	0.0204
VC-6B	0.0266	VC-6D	0.01997
VC-7B	0.0186	VC-7D	0.01466

表 4-12 CaseIV-2500 監測井濃度

CaseIV-2500	濃度(mm/day)	CaseIV-2500	濃度(mm/day)
PCE-1A	3.154	PCE-1B	0.626
TCE-1A	1.284	TCE-1B	0.387
TCE-2A	0.65	TCE-2C	0.119
TCE-3B	0.0586	TCE-3D	0.0338
DCE-2B	0.1373	DCE-2D	0.013
DCE-3B	0.03937	DCE-3D	0.02613
DCE-4B	0.00964	DCE-4D	0.0143
DCE-5B	0.0073	DCE-5D	0.0086
VC-3B	0.0118	VC-3D	0.0089
VC-4B	0.00445	VC-4D	0.0069
VC-5B	0.005	VC-5D	0.00611
VC-6B	0.00576	VC-6D	0.0059
VC-7B	0.0054	VC-7D	0.0049

表 4-13 CaseIV-5000 監測井濃度

CaseIV-5000	濃度(mm/day)	CaseIV-5000	濃度(mm/day)
PCE-1A	2.92	PCE-1B	0.4598
TCE-1A	1.097	TCE-1B	0.3385
TCE-2A	0.21183	TCE-2C	0.064
TCE-3B	0.0033	TCE-3D	0.0034
DCE-2B	0.075	DCE-2D	0.0093
DCE-3B	0.00199	DCE-3D	0.003368
DCE-4B	0.000177	DCE-4D	0.000487
DCE-5B	0.0001238	DCE-5D	0.000213
VC-3B	0.0073	VC-3D	0.00144
VC-4B	0.0076	VC-4D	0.00309
VC-5B	0.001074	VC-5D	0.00197
VC-6B	0.00144	VC-6D	0.00189
VC-7B	0.002246	VC-7D	0.0022

Case V 模擬情境為污染源下游遠處降雨入滲，比較在不同的入滲量影響之下含氯有機溶劑污染傳輸的濃度變化與污染團的範圍分佈，影響含氯有機溶劑污染傳輸模擬結果，模擬總時間為 10 年，DNAPL 之污染團其擴散濃度之分佈見圖 4-33 到圖 4-40。模擬結果顯示在不同降雨入滲時：

PCE 濃度在 Case V-1250 之 PCE 濃度最高在 1A 號監測井第 10 年時其濃度為 3.767mm/day、Case V-2500 之 PCE 濃度最高在 1A 號監測井第 10 年時其濃度為 3.5918mm/day、Case V-5000 之 PCE 濃度最高在 1A 號監測井第 10 年時其濃度為 3.511mm/day，其 PCE 污染團中心最大濃度維持在 1A 位置，PCE 污染源上方距離降雨入滲區塊較遠，所以在污染擴散較以上各 Case 相比幾乎接近不受影響，其水平影響範圍向下游之長度約減少 1 m，垂直影響深度沒有增加，濃度減少 6.8 %。

TCE 濃度在 Case V-1250 之 TCE 濃度最高在 1A 號監測井第 10 年時其濃度為 1.54mm/day、Case V-2500 之 TCE 濃度最高在 1A 號監測井第 10 年時其濃度為 1.3428 mm/day、Case V-5000 之 TCE 濃度最高在 1A 號監測井第 10 年時其濃度為 1.277 mm/day，其 TCE 污染團中心最大濃度維持在 1A，結果顯示雨水入滲造成污染團有逐漸往地下含水層擴散的現象，其水平影響範圍向下游之長度約減少 10 m，垂直影響深度增加 2 m，

濃度減少 17 %。

DCE 濃度在 Case V-1250 之 DCE 濃度最高在 3B 號監測井第 10 年時其濃度為 0.2696mm/day、Case V-2500 之 DCE 濃度最高在 3B 號監測井第 10 年時其濃度為 0.2338mm/day、Case V-5000 之 DCE 濃度最高在 3B 號監測井第 10 年時其濃度為 0.212mm/day，其 DCE 污染團中心最大濃度維持在 3B，結果顯示雨水入滲造成污染團有逐漸往地下含水層擴散的現象，其水平影響範圍向下游之長度約減少 30 m，垂直影響深度增加 2 m，濃度減少 21.4 %。

VC 濃度在 Case V-1250 之 VC 濃度最高在 4B 號監測井第 10 年時其濃度為 0.12972 mm/day、Case V-2500 之 VC 濃度最高在 5B 號監測井第 10 年時其濃度為 0.09497 mm/day、Case V-5000 之 VC 濃度最高在 5B 號監測井第 10 年時其濃度為 0.0623 mm/day，其 VC 污染團中心最大濃度從 4B 位置到 5B 位置，結果顯示雨水入滲造成污染團有逐漸往地下含水層擴散的現象，其水平影響範圍向下游之長度約減少 60 m，垂直影響深度增加 4 m，濃度減少 52%。

模擬結果顯示當 PCE 污染源上方沒有降雨入滲時，在污染範圍擴散情形較不明顯。TCE 污染團在(300,500)受到降雨入滲影響，其溶解相污染團在距離污染團下游 300 m 處像是遇到一道無形的牆阻擋污染團前進，導致溶解相污染團向地下含水層擴散，影響深度達 2 m 左右。DCE 污染團在(300,500)受到降雨入滲影響，其溶解相污染團在距離污染團下游 300 m 處像是遇到一道無形的牆阻擋污染團前進，導致溶解相污染團向下移動，影響深度達 2 m 以上。VC 污染團在(300,500)受到降雨入滲影響，其溶解相污染團在距離污染團下游 300 m 處像是遇到一道無形的牆阻擋污染團前進，導致溶解相污染團向下移動，其影響深度超過 4 m，其污染範圍達到地下含水層底持續擴散。

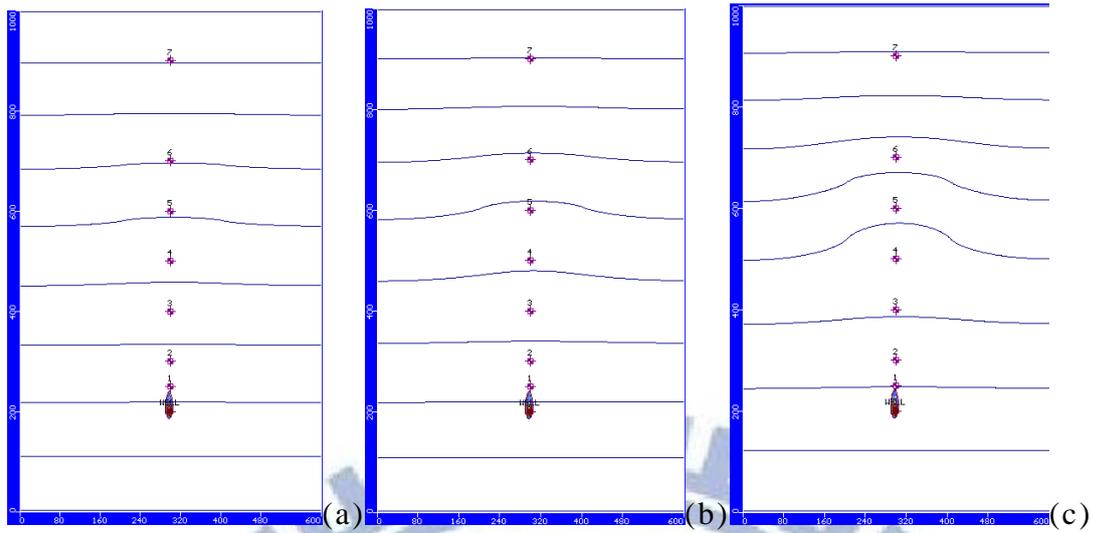


圖 4-33 (a) Case V-1250 之 PCE 鳥瞰濃度分佈圖、(b) CaseV-2500 之 PCE 鳥瞰濃度分佈圖、(c) CaseV-5000 之 PCE 鳥瞰濃度分佈圖

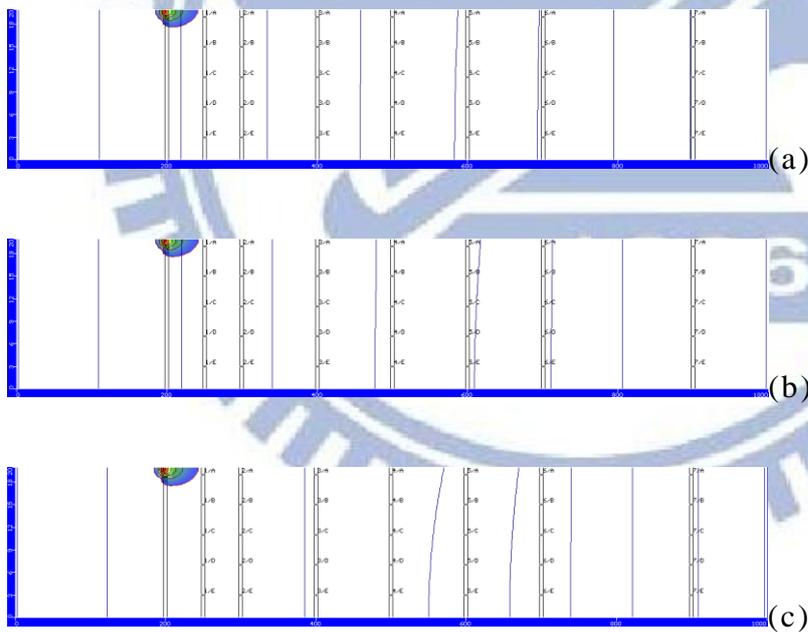
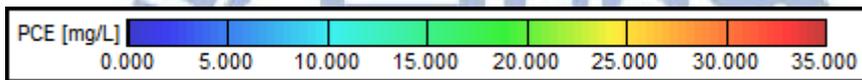


圖 4-34 (a) Case V-1250 之 PCE 側面濃度分佈圖、(b) CaseV-2500 之 PCE 側面濃度分佈圖、(c) CaseV-5000 之 PCE 側面濃度分佈圖

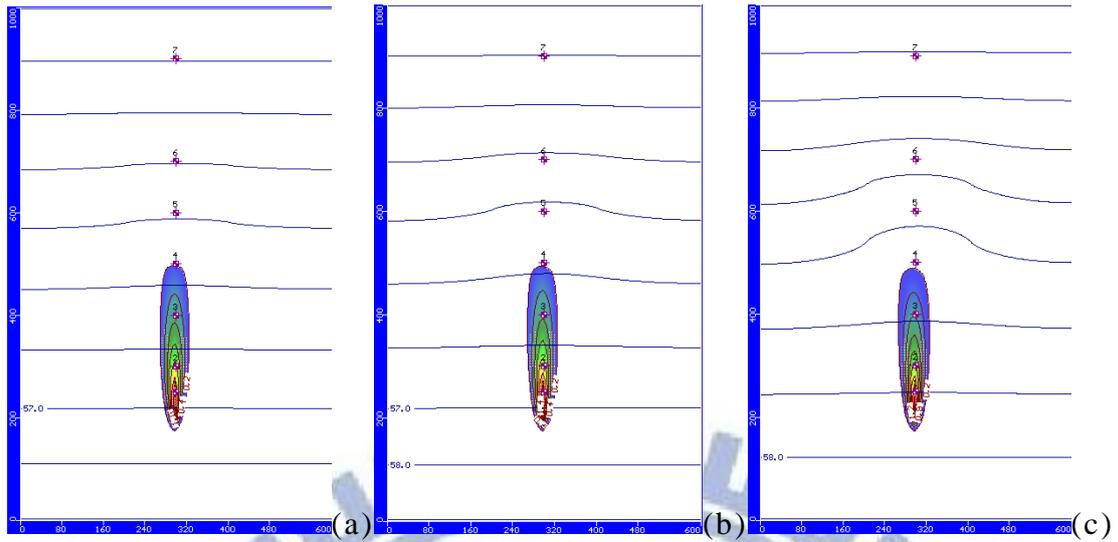


圖 4-35 (a) Case V-1250 之 TCE 鳥瞰濃度分佈圖、(b) CaseV-2500 之 TCE 鳥瞰濃度分佈圖、(c) CaseV-5000 之 TCE 鳥瞰濃度分佈圖

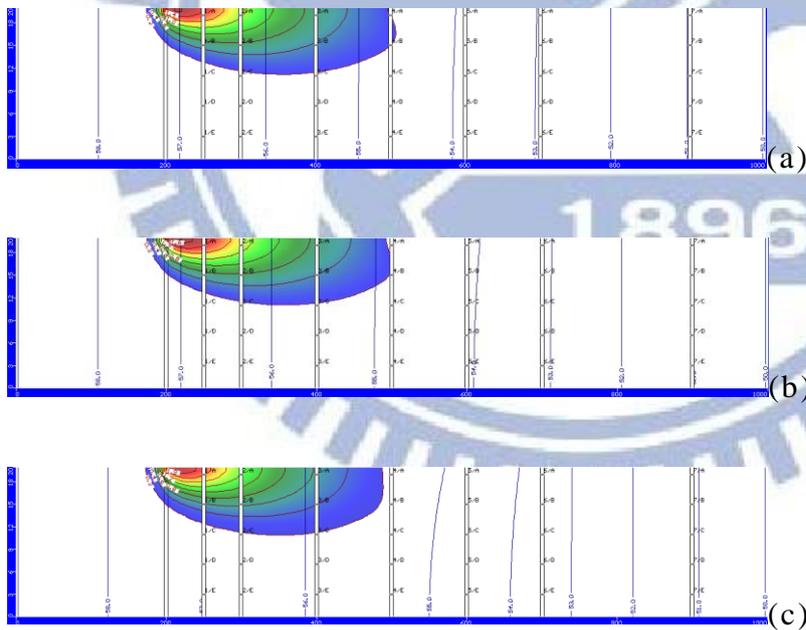
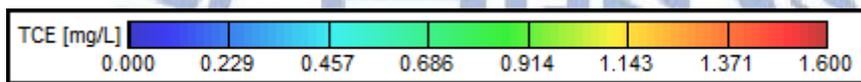


圖 4-36 (a) Case V-1250 之 TCE 側面濃度分佈圖、(b) CaseV-2500 之 TCE 側面濃度分佈圖、(c) CaseV-5000 之 TCE 側面濃度分佈圖

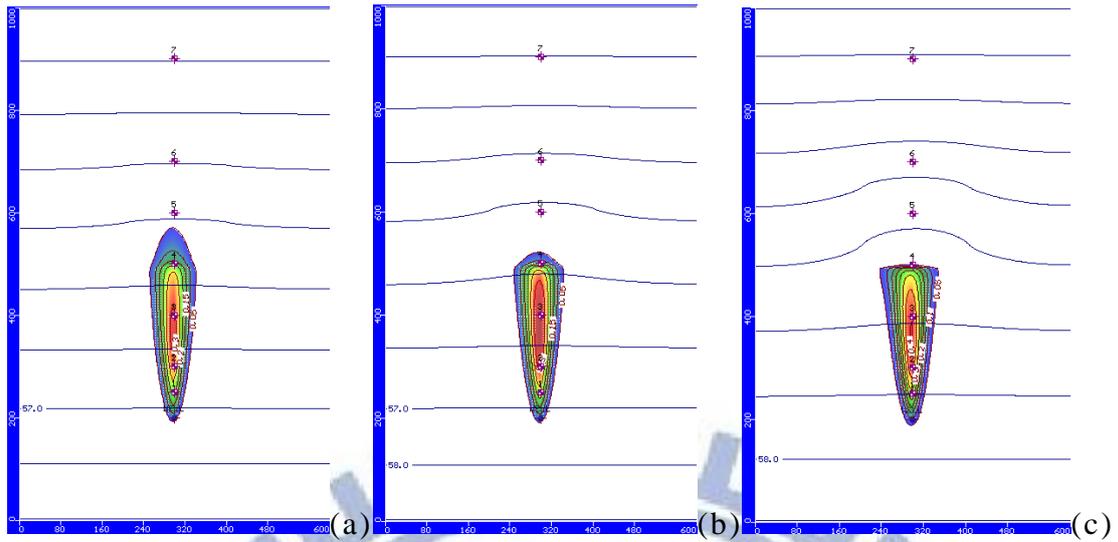


圖 4-37 (a) Case V-1250 之 DCE 鳥瞰濃度分佈圖、(b) CaseV-2500 之 DCE 鳥瞰濃度分佈圖、(c) CaseV-5000 之 DCE 鳥瞰濃度分佈圖

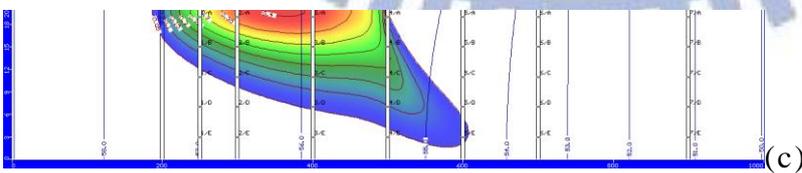
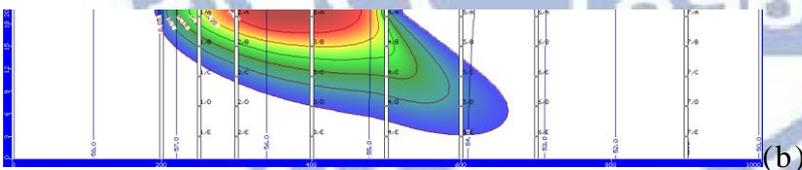
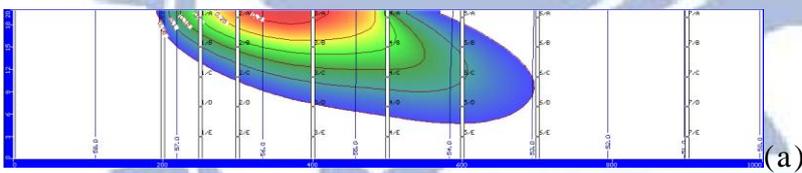
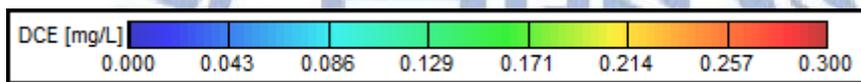


圖 4-38 (a) Case V-1250 之 DCE 側面濃度分佈圖、(b) CaseV-2500 之 DCE 側面濃度分佈圖、(c) CaseV-5000 之 DCE 側面濃度分佈圖

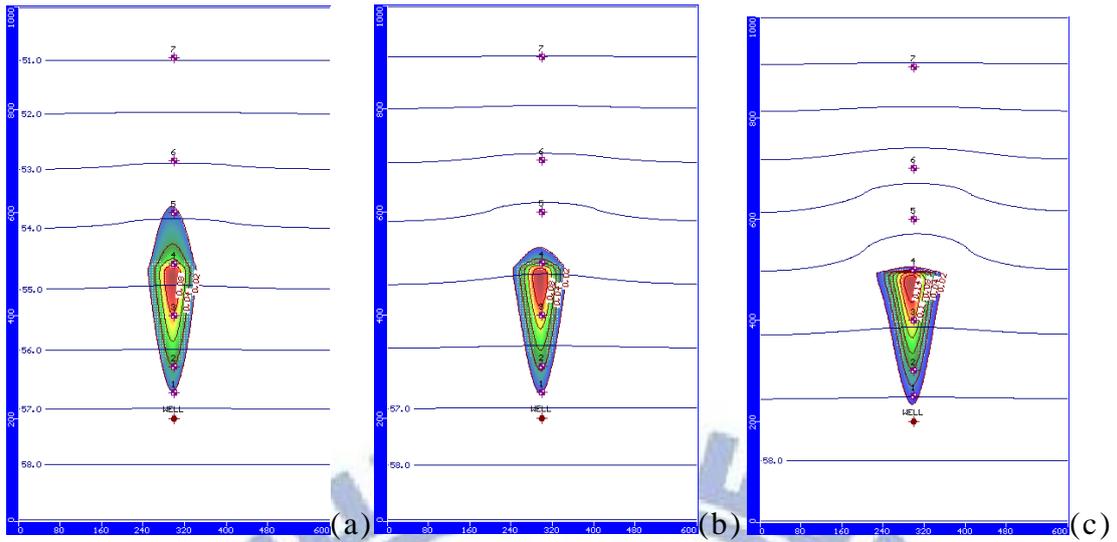


圖 4-39 (a) Case V-1250 之 VC 鳥瞰濃度分佈圖、(b) CaseV-2500 之 VC 鳥瞰濃度分佈圖、(c) CaseV-5000 之 VC 鳥瞰濃度分佈圖

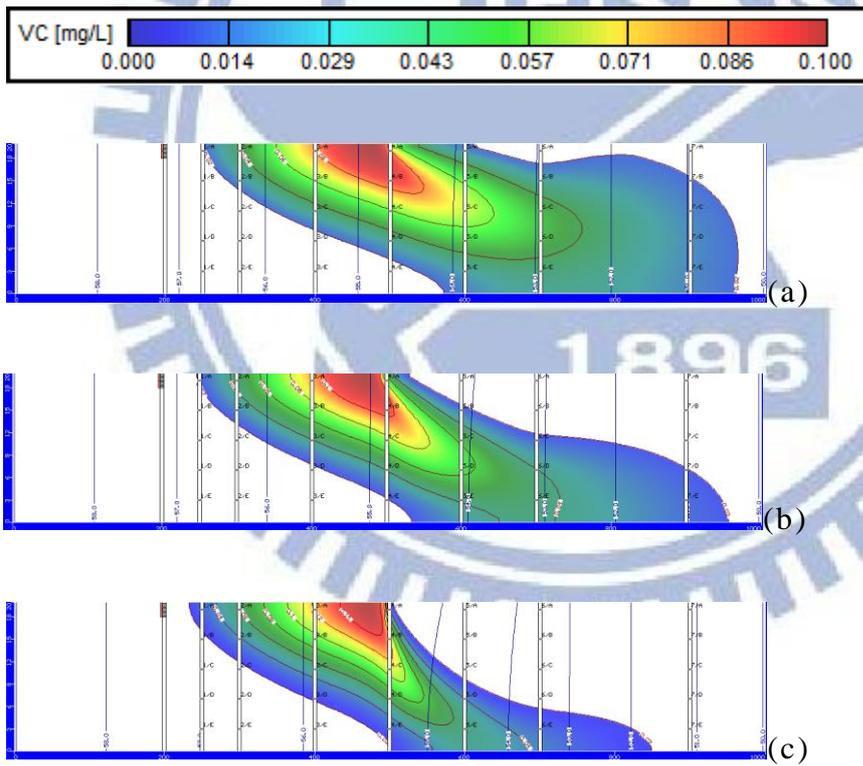


圖 4-40 (a) Case V-1250 之 VC 側面濃度分佈圖、(b) CaseV-2500 之 VC 側面濃度分佈圖、(c) CaseV-5000 之 VC 側面濃度分佈圖

表 4-14 Case V-1250 監測井濃度

CaseV-1250	濃度(mm/day)	CaseV-1250	濃度(mm/day)
PCE-1A	3.511	PCE-1B	0.696
TCE-1A	1.277	TCE-1B	0.384
TCE-2A	1.005	TCE-2C	0.12995
TCE-3B	0.359	TCE-3D	0.0525
DCE-2B	0.1476	DCE-2D	0.012177
DCE-3B	0.212	DCE-3D	0.03843
DCE-4B	0.195	DCE-4D	0.058
DCE-5B	0.0968	DCE-5D	0.066
VC-3B	0.0564	VC-3D	0.01241
VC-4B	0.12972	VC-4D	0.02815
VC-5B	0.0611	VC-5D	0.0463
VC-6B	0.03348	VC-6D	0.0445
VC-7B	0.02085	VC-7D	0.0251

表 4-15 Case V-2500 監測井濃度

CaseV-2500	濃度(mm/day)	CaseV-2500	濃度(mm/day)
PCE-1A	3.5918	PCE-1B	0.7104
TCE-1A	1.3428	TCE-1B	0.404
TCE-2A	1.056	TCE-2C	0.1355
TCE-3B	0.374	TCE-3D	0.054
DCE-2B	0.1602	DCE-2D	0.0131
DCE-3B	0.2338	DCE-3D	0.042
DCE-4B	0.2146	DCE-4D	0.067
DCE-5B	0.04066	DCE-5D	0.079
VC-3B	0.066	VC-3D	0.01444
VC-4B	0.070147	VC-4D	0.036
VC-5B	0.09497	VC-5D	0.061
VC-6B	0.08058	VC-6D	0.0418
VC-7B	0.06007	VC-7D	0.0209

表 4-16 CaseV-5000 監測井濃度

CaseV-5000	濃度(mm/day)	CaseV-5000	濃度(mm/day)
PCE-1A	3.767	PCE-1B	0.7354
TCE-1A	1.54	TCE-1B	0.4579
TCE-2A	1.1735	TCE-2C	0.146
TCE-3B	0.3825	TCE-3D	0.0528
DCE-2B	0.1938	DCE-2D	0.0153
DCE-3B	0.2696	DCE-3D	0.0468
DCE-4B	0.2214	DCE-4D	0.084
DCE-5B	0.002957	DCE-5D	0.04698
VC-3B	0.0833	VC-3D	0.01835
VC-4B	0.0959	VC-4D	0.05537
VC-5B	0.0623	VC-5D	0.04545
VC-6B	0.04139	VC-6D	0.0168
VC-7B	0.0393	VC-7D	0.01126

表 4-17 不同入滲區域對污染物濃度減少百分比

	PCE	TCE	DCE	VC
Case I	25.60%	33.36%	46.37%	47.57%
Case II	38.49%	41.60%	37.80%	31.30%
Case III	13.66%	15.5%	56.90%	82.90%
Case IV	13.84%	15.42%	48.13%	77.17%
Case V	6%	17%	21.40%	52%

本研究污染物有厭氧還原脫氯反應  $PCE \rightarrow TCE \rightarrow DCE \rightarrow VC$  降解模式，比較在沒有降雨時與不同降雨入滲量時的濃度受到降雨入滲的影響，雖然濃度因為降雨入滲影響有所降低，但是，並不表示該區域的濃度總值下降，反而是相同濃度情況下，污染物擴散的範圍擴大或是進入更下層的地下含水層之中。

Case I 為全區域降雨入滲，當污染物持續注入並且有厭氧還原脫氯反應時 PCE 濃度比受到入滲影響濃度下降 25.60%，TCE 濃度比受到入滲影響濃度下降 33.36%，DCE 濃度比受到入滲影響濃度下降 46.37%，VC 濃度比受到入滲影響濃度下降 47.57%，模擬結果顯示越是厭氧還原脫氯反應後的污染物受到降雨入滲影響越大。

Case II 為污染源上方降雨入滲，當污染物持續注入並且有厭氧還原脫氯反應時 PCE 濃度比受到入滲影響濃度下降 38.49%，TCE 濃度比受到入滲影響濃度下降 41.60%，DCE 濃度比受到入滲影響濃度下降 37.80%，VC 濃度比受到入滲影響濃度下降 31.30%，模擬結果顯示因為降雨區域在污染源上方的關係，PCE 在降解成 TCE 後受到入滲的影響，污染濃度下降比全區域降雨入滲所影響較大，DCE、VC 因為擴散範圍漸漸遠離降雨入滲區塊，污染濃度下降百分比也隨著距離變遠影響變小。

Case III 為污染源下游近點降雨入滲，當污染物持續注入並且有厭氧還原脫氯反應時 PCE 濃度比受到入滲影響濃度下降 13.84%，TCE 濃度比受到入滲影響濃度下降 15.5%，DCE 濃度比受到入滲影響濃度下降 56.90%，VC 濃度比受到入滲影響濃度下降 82.90%，模擬結果顯示 PCE 在降解成 TCE 後，因為還未擴散到降雨入滲區域，所以受到的影響較小，當降解後之 DCE、VC 受到降雨入滲區域污染濃度下降較大。

Case IV 為污染源下游近點左側降雨入滲，當污染物持續注入並且有厭氧還原脫氯反應時 PCE 濃度比受到入滲影響濃度下降 13.84%，TCE 濃度比受到入滲影響濃度下降 15.42%，DCE 濃度比受到入滲影響濃度下降 48.13%，VC 濃度比受到入滲影響濃度下降 77.17%，模擬結果顯示 PCE 在降解成 TCE 在擴散時受到降雨入滲影響較小，當降解之後 DCE、VC 進入降雨入滲區域受的影響變大濃度下降百分比比較大。但是，入滲區域為下游近點左側降雨入滲，總入滲量比 Case III 來的小以至於濃度下降百分比略小。

Case V 為污染源下游遠處降雨入滲，當污染物持續注入並且有厭氧還原脫氯反應時 PCE 濃度比受到入滲影響濃度下降 6%，TCE 濃度比受到入滲影響濃度下降 17%，DCE 濃度比受到入滲影響濃度下降 21.40%，VC 濃度比受到入滲影響濃度下降 52%，模擬結果顯示因為降雨區域在污染源下游遠處降雨入滲的關係，PCE 在降解成 TCE、DCE 受到入滲的影響污染濃度下降百分比比較小，VC 因為擴散範圍漸漸進入降雨入滲區塊，污染濃度下降百分比也隨著距離入滲區域進而下降百分比增加。

## 4.2 實際 XX 場址模擬結果

### 4.2.1 污染概況

國內一著名 XX 含氯有機溶劑污染場址。依據歷年地下水污染調查結果，場址外附近民井 20 口地下水質，和場址範圍內地下水污染調查結

果，如表 4-16 證實污染擴散情形，確認該場址內地下水中 1,1-二氯乙烯、氯乙烯、三氯乙烯、四氯乙烯等污染物已達地下水污染管制標準。場址內污染濃度分佈型態以第二場房北側為當初工人倒入含氯有機污染物的地下水溝處濃度最高。四氯乙烯濃度較高的民井多分佈於桃園廠北側鄰近地點，濃度值高達 0.2106 mg/L；三氯乙烯在地下水中之溶解度較高，污染濃度高的民井分布較為廣範，濃度值高達 0.09345 mg/L；二氯乙烯濃度值高達 0.0824 mg/L，且溶於水中之污染物已隨地下水流往北擴展至廠外地區，場址外氯乙烯沒有超過地下水污染濃度管制標準，但是濃度也達到 0.0057 mg/L。由於現地含水層不易產生氧化反應降解污染濃度，含水層內的還原環境易使含氯有機溶劑進行還原脫氯反應。根據監測井濃度調查結果來看，其數據顯示本污染場址之 PCE 發生還原反應產生脫氯作用而降解：如三氯乙烯、順-1,2-二氯乙烯、1,1-二氯乙烯及氯乙烯等還原反應降解出來的化合物都已超過污染管制標準濃度好幾倍。

XX 場址過去使用 PCE 長期排放於場址地下水中，實際場址調查中可見 PCE、TCE、DCE、VC 污染物，場址調查結果裡可見污染場址內外某些監測井有高濃度的含氯有機溶劑污染團分佈，而且濃度並沒有隨時間降低消散，反而有持續穩定的溶解且向外擴散，證明該場址地下水環境會場生還原降解之反應和擴散的現象。

根據 XX 場址調查結果顯示，第一地下含水層與第二地下含水層中間有一層黏土層夾雜在中間使含水層分開，報告中提到在黏土層附近所量測之含氯有機溶劑污染濃度最高。本研究以 XX 場址降雨入滲量變異條件下 PCE、TCE、DCE、VC 隨時間之濃度變化。XX 場址模擬 23 年期間 PCE 污染源連續注入量為 100mm/day，在設定皆基於相同情境下，考慮含氯有機溶劑有連續還原降解反應，配合所得之水文地質資料做假設，模擬 XX 場址結果與實質調查結果做比較與討論。

表 4-18 地下水污染調查結果

地下水污染物	場址內最高濃度值 mg/L	場址外最高濃度值 mg/L
四氯乙烯	1.53	0.2106
三氯乙烯	0.252	0.09345
順-1,2-二氯乙烯	0.384	0.0917
1,1-二氯乙烯	0.162	0.0824
氯乙烯	0.0523	0.0057

## 4.2.2 實際 XX 場址模擬結果與分析

本節討論內容為 XX 廠址輸入現有監測資料，比較在模擬結果與實際觀測資料差異度，總模擬時間為 23 年(8395 天)，time steps 為 10 天，

以不同降雨量為各 Case 之模擬變異因素，當降雨量為初始 2500 mm/year 編號為 Case1，當降雨量為初始值的一半 1250 mm/year 編號為 Case2，當降雨量為初始值的兩倍 5000 mm/year 編號為 Case3，其中水塘入滲值為固定 4415.04 mm/year。

※Case1 降雨量 2500 mm/year、水塘入滲量 4415.04 mm/year

※Case2 降雨量 1250 mm/year、水塘入滲量 4415.04 mm/year

※Case3 降雨量 5000 mm/year、水塘入滲量 4415.04 mm/year

本研究結果呈現三個主要內容：

1. 模擬 23 年改變降雨入滲量所影響之污染傳輸，模擬結果比較各觀測井濃度與污染擴散之差異。
2. 模擬 23 年改變降雨入滲量所影響之污染傳輸，比較實際觀測井所測得之污染濃度與模擬結果各觀測井濃度之差異。
3. 模擬 23 年改變降雨入滲量所影響之污染傳輸，比較實際污染擴散方向與模擬結果的擴散方向之差異。

Case 1 降雨入滲量 2500 mm/year 跟水塘入滲量 4415.04 mm/year，一號觀測井所測得之 PCE 最高濃度為 0.144 mg/L、TCE 為 0.318 mg/L、DCE 為 0.218 mg/L、VC 為 0.072 mg/L，一號觀測井 PCE、TCE、DCE、VC，最高濃度值在達到 13~14 年已接近穩定狀態，濃度隨時間變化不大。二號觀測井所測得之 PCE 最高濃度為 0.00039 mg/L、TCE 為 0.0064 mg/L、DCE 為 0.019 mg/L、VC 為 0.0268 mg/L。三號觀測井所測得之 PCE 最高濃度為 1.7E-7 mg/L、TCE 為 1.8E-5 mg/L、DCE 為 0.000225 mg/L、VC 為 0.00085 mg/L。四號觀測井所測得之 PCE 最高濃度為 4.2E-8 mg/L、TCE 為 1.6E-5 mg/L、DCE 為 0.00051 mg/L、VC 為 0.00265 mg/L。五號觀測井所測得之 PCE 最高濃度為 2.2E-10 mg/L、TCE 為 8.3E-7 mg/L、DCE 為 0.00017 mg/L、VC 為 0.00085 mg/L。如附錄圖 A-21 至圖 A-40。

Case 2 降雨入滲量 1250 mm/year 跟水塘入滲量 4415.04 mm/year，一號觀測井所測得之 PCE 最高濃度為 0.141 mg/L、TCE 為 0.317 mg/L、

DCE 為 0.221 mg/L、VC 為 0.0751 mg/L。二號觀測井所測得之 PCE 最高濃度為 0.0003 mg/L、TCE 為 0.0062 mg/L、DCE 為 0.021 mg/L、VC 為 0.0288 mg/L。三號觀測井所測得之 PCE 最高濃度為  $1.3E-7$  mg/L、TCE 為  $1.54E-5$  mg/L、DCE 為 0.00021 mg/L、VC 為 0.00084 mg/L。四號觀測井所測得之 PCE 最高濃度為  $2.8E-8$  mg/L、TCE 為  $1.2E-5$  mg/L、DCE 為 0.00049 mg/L、VC 為 0.00241 mg/L。五號觀測井所測得之 PCE 最高濃度為  $1.4E-10$  mg/L、TCE 為  $4.65E-7$  mg/L、DCE 為 0.000155 mg/L、VC 為 0.000755 mg/L。如附錄圖 A-1 至圖 A-20。

Case 3 降雨入滲量 5000 mm/year 跟水塘入滲量 4415.04 mm/year，一號觀測井所測得之 PCE 最高濃度為 0.13 mg/L、TCE 為 0.281 mg/L、DCE 為 0.194 mg/L、VC 為 0.064 mg/L。二號觀測井所測得之 PCE 最高濃度為 0.00036 mg/L、TCE 為 0.00545 mg/L、DCE 為 0.0178 mg/L、VC 為 0.0243 mg/L。三號觀測井所測得之 PCE 最高濃度為  $1.04E-7$  mg/L、TCE 為  $1.21E-5$  mg/L、DCE 為 0.000168 mg/L、VC 為 0.00064 mg/L。四號觀測井所測得之 PCE 最高濃度為  $1.92E-8$  mg/L、TCE 為  $8.9E-6$  mg/L、DCE 為 0.0004 mg/L、VC 為 0.00195 mg/L。五號觀測井所測得之 PCE 最高濃度為  $5.6E-11$  mg/L、TCE 為  $2.25E-7$  mg/L、DCE 為  $9.4E-5$  mg/L、VC 為 0.000454 mg/L。如附錄圖 A-41 至圖 A-60。

模擬結果 Case 1 與 Case 2，如圖 4-41 與圖 4-42。因為 Case 2 降雨入滲量為 Case 1 的一半，PCE 在一、二號觀測井濃度減少幅度不大，約略降低 2% 至 7.7%。三、四、五號觀測井則因為擴散範圍不及，以至於模擬結果濃度值低於  $1.70E-07$ ，濃度改變的百分比雖然大但是濃度變化不大。TCE 在一、二號觀測井濃度減少幅度不大，約略降低 0.3% 至 3.1%。三、四、五號觀測井則因為與 PCE 相同問題，以至於模擬結果濃度值低於  $1.80E-05$ 。DCE 在一、二號觀測井濃度沒有降低反而升高，約略增加 1% 至 10%，三、四、五號觀測井約略降低 3.9% 至 8.8%。VC 在一、二號觀測井濃度沒有降低反而升高，約略增加 4.3% 至 7.4%，三、四、五號觀測井約略降低 1.1% 至 11%。DCE 與 VC 估計在一、二號觀測井濃度上升可能原因，降雨入滲量變小以至於污染擴散範圍變小，但是總污染濃度值不變的情況下，以至於在這兩個觀測井所測得之濃度增加。

模擬結果 Case 1 與 Case 3，如圖 4-41 與圖 4-43。因為 Case 3 降雨入滲量為 Case 1 的兩倍，PCE 在一、二號觀測井濃度約略降低 9.7% 至 19%。三、四、五號觀測井則因為擴散範圍不到觀測井，以至於模擬結果濃度值低於  $1.70E-07$ ，濃度改變的百分比雖然大但是濃度變化不大。TCE 在一、二號觀測井濃度減少幅度不大，約略降低 11.6% 至 14.8%。三、四、五號觀測井則因為與 PCE 相同問題，以至於模擬結果濃度值低於

1.80E-05。DCE 在一號到四號觀測井濃度約略降低 6.3% 至 21.6%，五號觀測井濃度改變的百分比雖然大但是濃度變化不算大。VC 在一號到武號觀測井濃度都逐漸降低從 10% 至 46.6%。模擬結果顯示 Case 3 不管是 PCE、TCE、DCE、VC 濃度都比 Case 1 來的小，而且越是遠離污染源的觀測井所測得之濃度越小。估計可能原因，當降雨量變大時，污染擴散區域會因為入滲影響，濃度有所降低，但是總污染濃度值不變的情況下，污染擴散範圍反而增加。

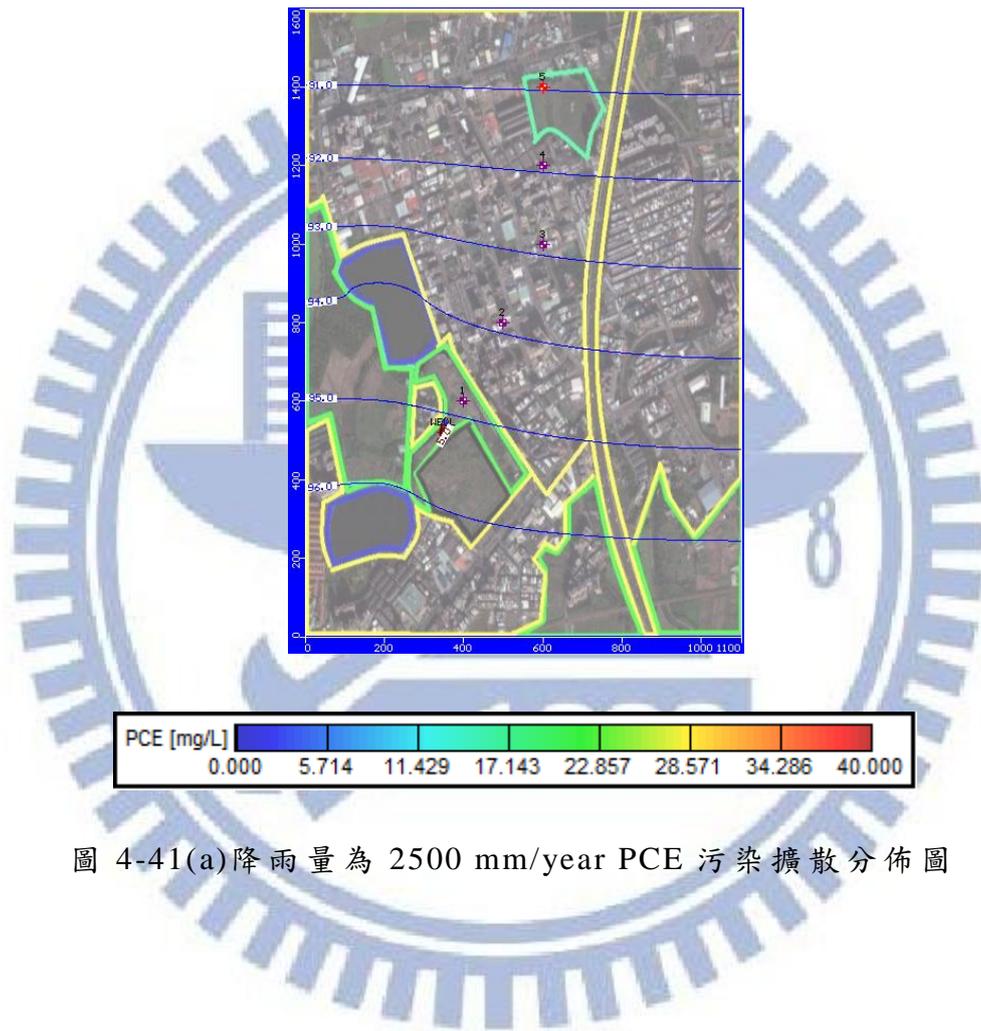


圖 4-41(a)降雨量為 2500 mm/year PCE 污染擴散分佈圖

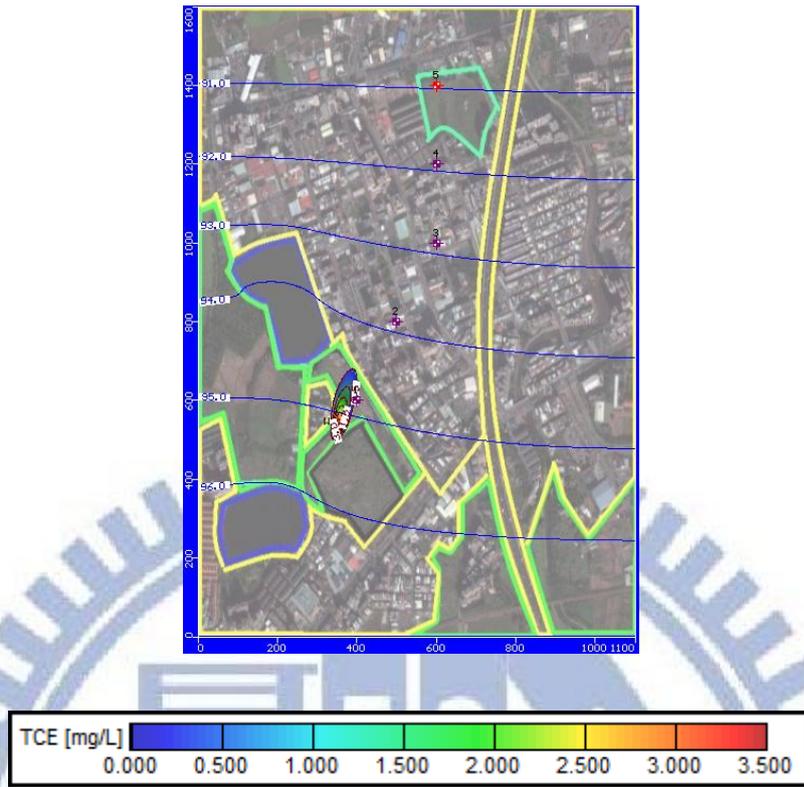


圖 4-41(b)降雨量為 2500 mm/year TCE 污染擴散分佈圖

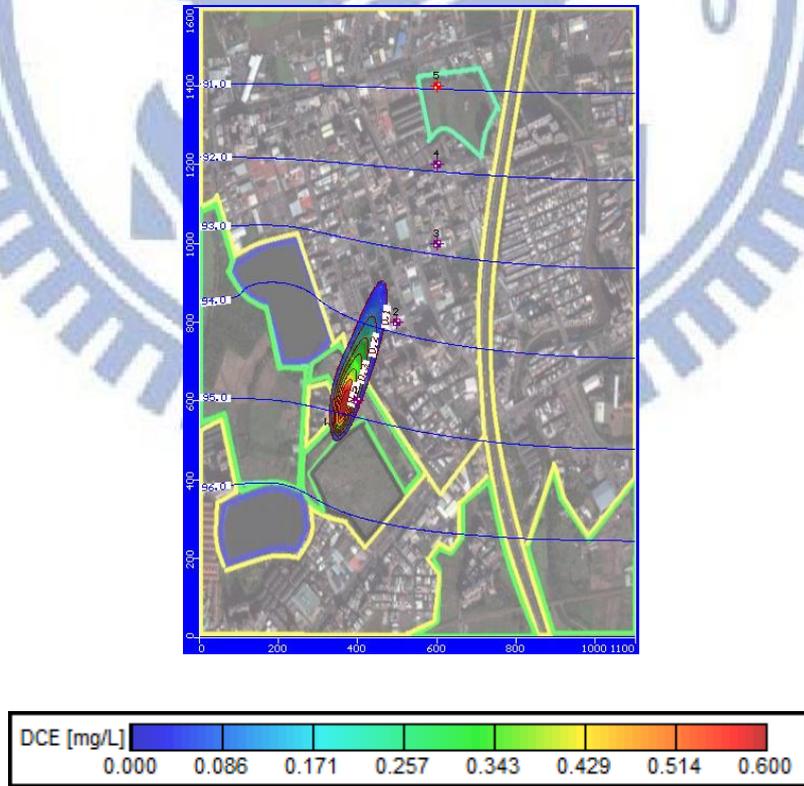


圖 4-41(c)降雨量為 2500 mm/year DCE 污染擴散分佈圖

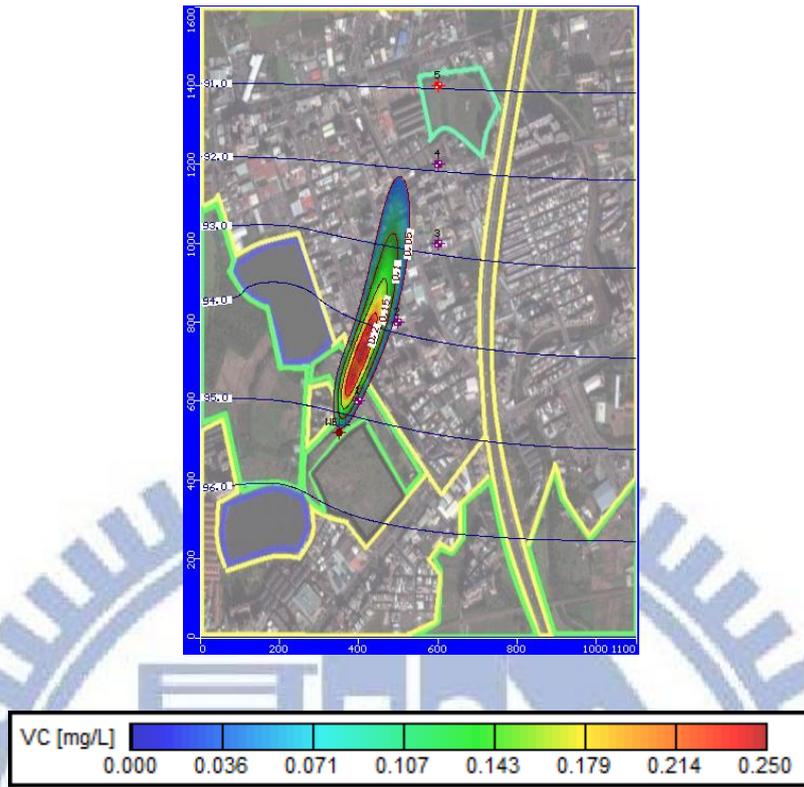


圖 4-41(d)降雨量為 2500 mm/year VC 污染擴散分佈圖

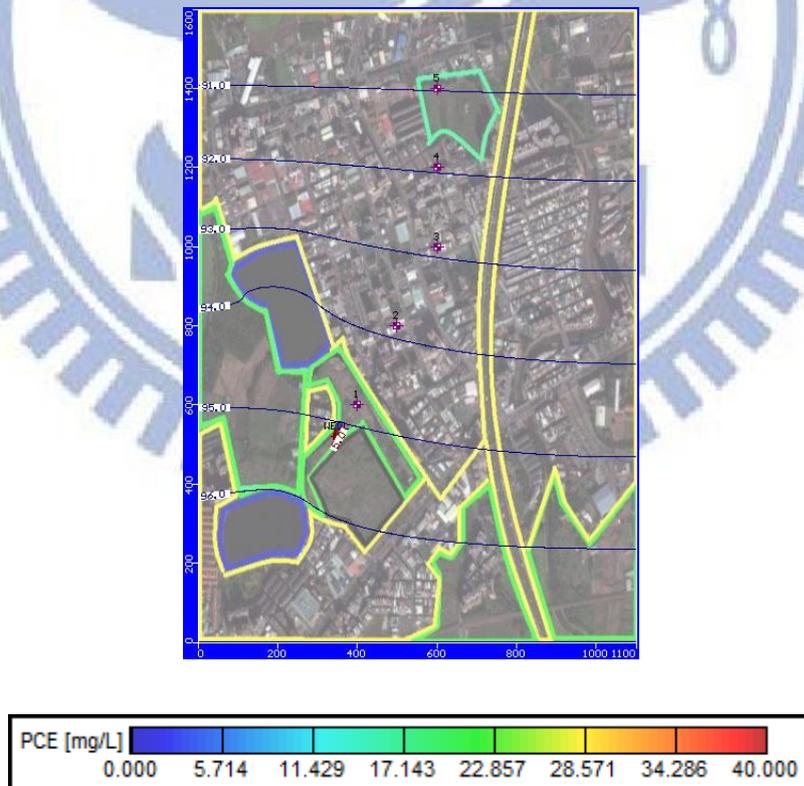


圖 4-42(a)降雨量為 1250 mm/year PCE 污染擴散分佈圖

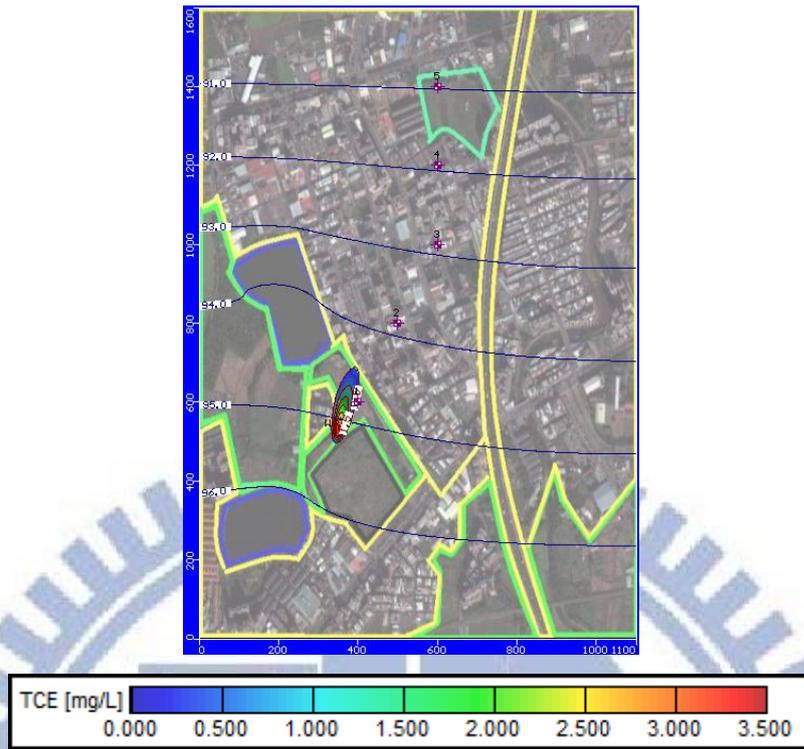


圖 4-42(b)降雨量為 1250 mm/year TCE 污染擴散分佈圖

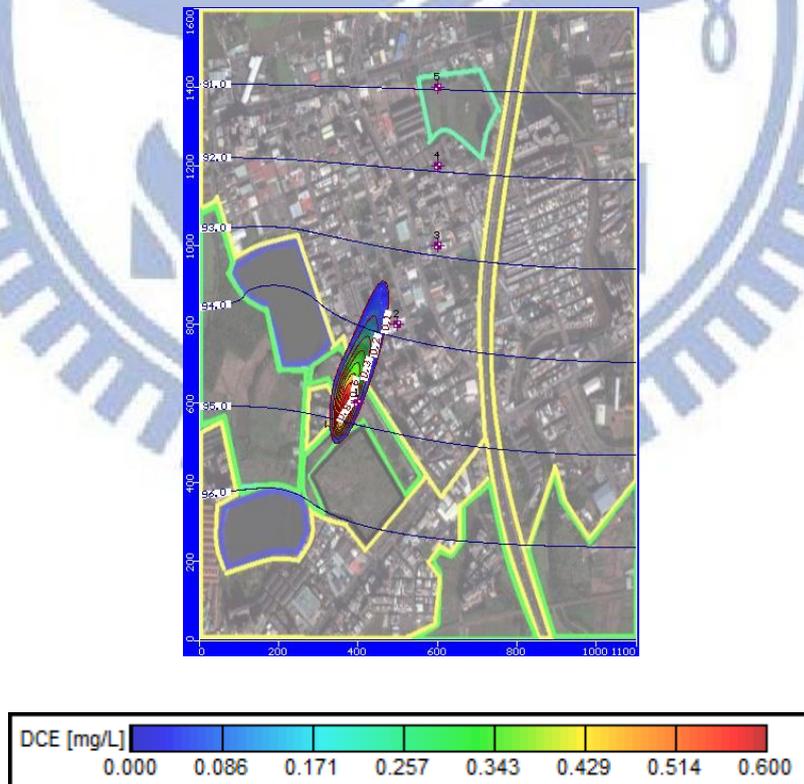


圖 4-42(c)降雨量為 1250 mm/year DCE 污染擴散分佈圖

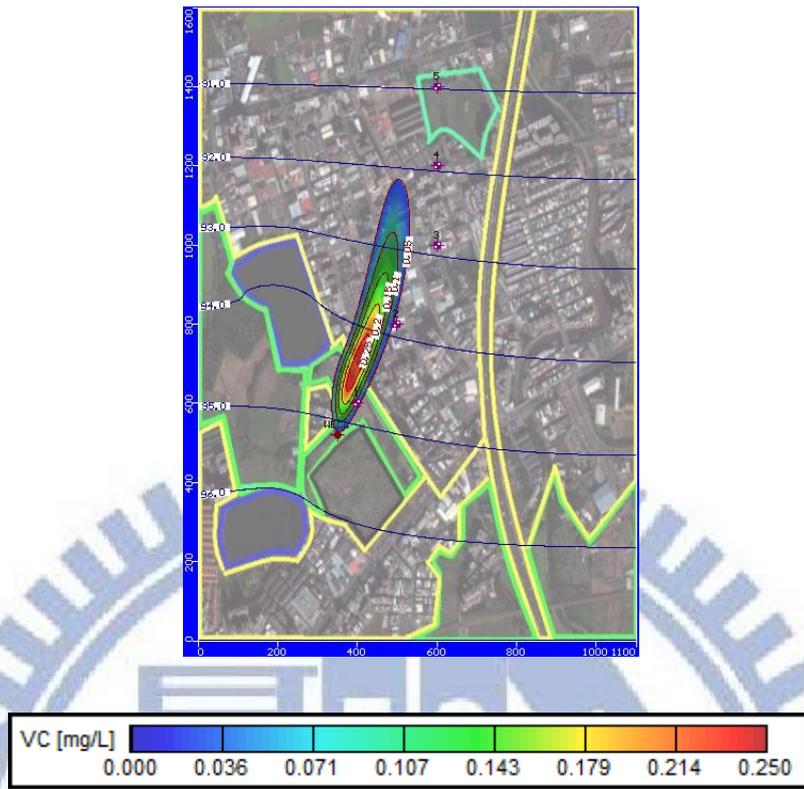


圖 4-42(d)降雨量為 1250 mm/year VC 污染擴散分佈圖

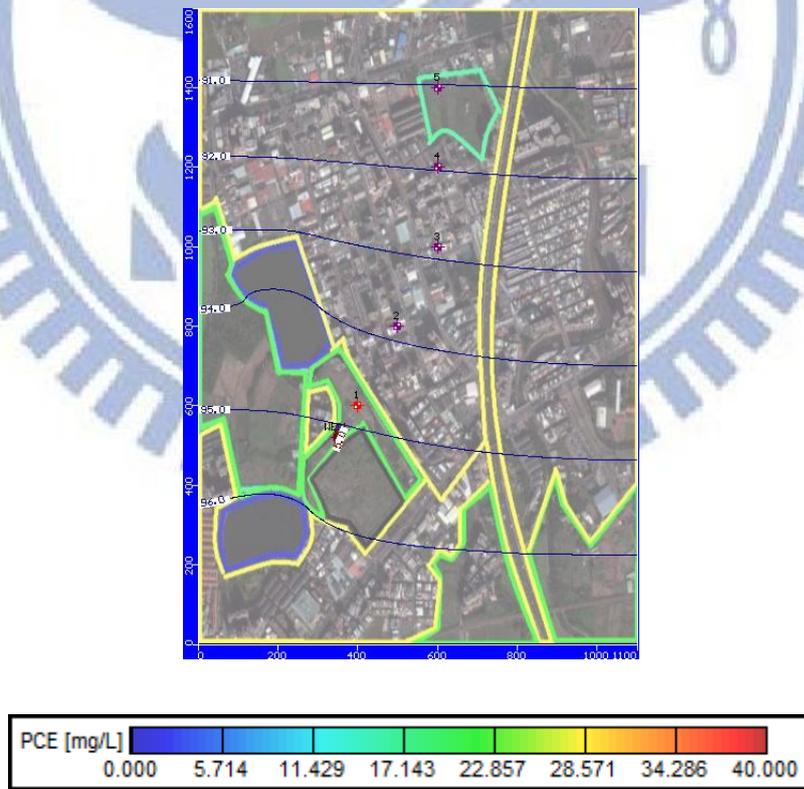


圖 4-43(a)降雨量為 5000 mm/year PCE 污染擴散分佈圖

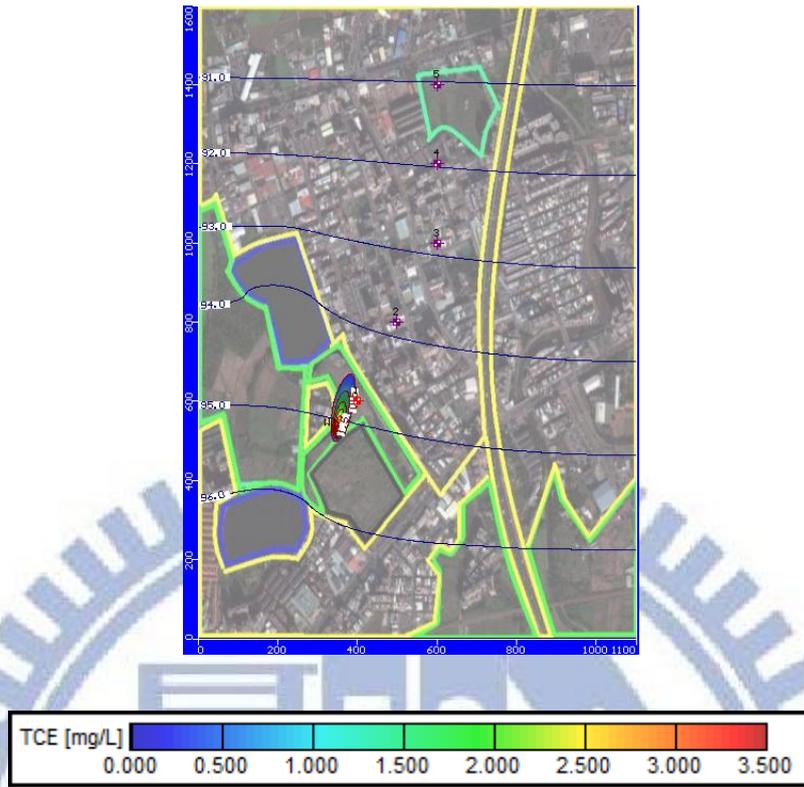


圖 4-43(b)降雨量為 5000 mm/year TCE 污染擴散分佈圖

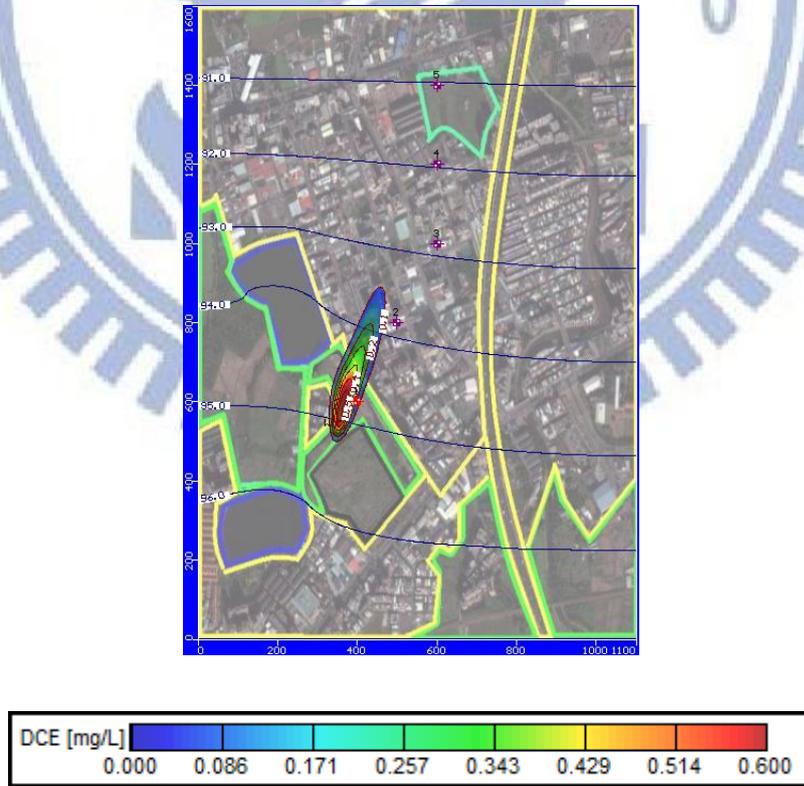


圖 4-43(c)降雨量為 5000 mm/year DCE 污染擴散分佈圖

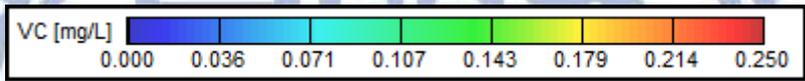
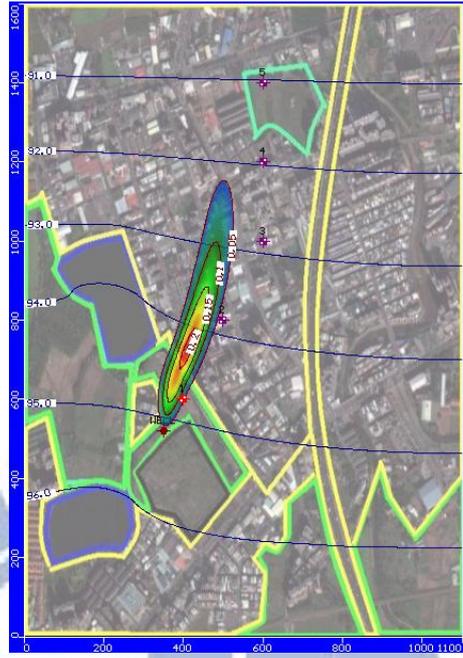


表 4-19 Case 1 與 Case 2 觀測井濃度監測值

Case1	PCE(mg/L)	TCE(mg/L)	DCE(mg/L)	VC(mg/L)
一號觀測井最高濃度值	0.144	0.318	0.218	0.072
二號觀測井最高濃度值	0.00039	0.0064	0.019	0.0268
三號觀測井最高濃度值	1.70E-07	1.80E-05	0.000225	0.00085
四號觀測井最高濃度值	4.20E-08	1.60E-05	0.00051	0.00265
五號觀測井最高濃度值	2.20E-10	8.30E-07	0.00017	0.00085
Case2	PCE(mg/L)	TCE(mg/L)	DCE(mg/L)	VC(mg/L)
一號觀測井最高濃度值	0.141	0.317	0.221	0.0751
二號觀測井最高濃度值	0.00036	0.0062	0.021	0.0288
三號觀測井最高濃度值	1.30E-07	1.54E-05	0.00021	0.00084
四號觀測井最高濃度值	2.80E-08	1.20E-05	0.00049	0.00241
五號觀測井最高濃度值	1.40E-10	4.65E-07	0.000155	0.000755
濃度變化百分比(%)	PCE(%)	TCE(%)	DCE(%)	VC(%)
一號觀測井濃度變化(%)	-2.083	-0.314	1.376	4.306
二號觀測井濃度變化(%)	-7.7	-3.125	10.526	7.463
三號觀測井濃度變化(%)	-23.529	-14.444	-6.667	-1.176
四號觀測井濃度變化(%)	-33.333	-25	-3.922	-9.057
五號觀測井濃度變化(%)	-36.364	-43.976	-8.823	-11.176

表 4-20 Case 1 與 Case 3 觀測井濃度監測值

Case1	PCE(mg/L)	TCE(mg/L)	DCE(mg/L)	VC(mg/L)
一號觀測井最高濃度值	0.144	0.318	0.218	0.072
二號觀測井最高濃度值	0.00039	0.0064	0.019	0.0268
三號觀測井最高濃度值	1.70E-07	1.80E-05	0.00021	0.00084
四號觀測井最高濃度值	4.20E-08	1.60E-05	0.00051	0.00265
五號觀測井最高濃度值	2.20E-10	8.30E-07	0.00017	0.00085
Case3	PCE(mg/L)	TCE(mg/L)	DCE(mg/L)	VC(mg/L)
一號觀測井最高濃度值	0.13	0.281	0.194	0.064
二號觀測井最高濃度值	0.000315	0.00545	0.0178	0.0243
三號觀測井最高濃度值	1.04E-07	1.21E-05	0.000168	0.00064
四號觀測井最高濃度值	1.92E-08	8.90E-06	0.0004	0.00195
五號觀測井最高濃度值	5.60E-11	2.25E-07	9.40E-05	0.000454
濃度變化百分比(%)	PCE(%)	TCE(%)	DCE(%)	VC(%)
一號觀測井濃度變化(%)	-9.722	-11.635	-11.009	-11.111
二號觀測井濃度變化(%)	-19.231	-14.844	-6.316	-9.328
三號觀測井濃度變化(%)	-38.823	-32.778	-20	-23.810
四號觀測井濃度變化(%)	-54.286	-44.375	-21.569	-26.415
五號觀測井濃度變化(%)	-74.545	-72.892	-44.706	-46.588

## 第五章 結論與建議

### 5.1 結論

- (1) 本研究對於降雨入滲做系統性的分析，了解含氯有機溶劑在地下水層中因為入滲的影響改變污染團濃度與方向，數值模擬工具選用MODFLOW套裝軟體RT3D地下水流數值模擬軟體作為研究工具。
- (2) XX場址過去使用PCE長期排放於場址地下水中，實際場址調查中可見PCE、TCE、DCE、VC污染物，場址調查結果裡可見污染場址內外某些監測井有高濃度的含氯有機溶劑污染團分佈，而且濃度並沒有隨時間降低消散，反而有持續穩定的溶解且向外擴散，證明該場址地下水環境會場生還原降解之反應和擴散的現象。模擬結果符合預期，當降雨量變大時，越是遠離污染源的觀測井所測得之濃度越小，污染擴散範圍增加。
- (3) 本研究污染物有厭氧還原脫氯反應 $PCE \rightarrow TCE \rightarrow DCE \rightarrow VC$ 降解模式，比較在沒有降雨時與不同降雨入滲量時的濃度受到降雨入滲的影響，雖然濃度因為降雨入滲有所降低，但是，並不表示該區域的濃度總值下降，反而是相同濃度情況下，反而是污染物擴散的範圍擴大或是進入更下層的地下含水層之中。
- (4) 本研究模擬結果顯示在濃度分佈圖與調查民井濃度分佈圖可知，污染團在地底擴散方向符合，證明在此XX廠址外污染團除了受到降雨入滲的影響，水塘較大的入滲量也有影響到污染擴散方向，其中VC所改變之污染團擴散方向最為明顯。

## 5.2 建議

- (1) 本次模擬因採用Steady state的模式，參數有所簡略，模式建立時的參數設定假設值為合理固定不變值，但是在現實狀況，一些參數會有所改變，例如氣溫、氣壓、日照、含氧量、孔隙率、水力梯度、降解率，吸附係數，延散度都會有所改變。在垂直導水度異質性方面只輸入模擬其中一層監測資料，如果能考慮模擬污染場址地底下大範圍的地層狀況則可以更接近實際污染擴散傳輸情形，如果能將這些變異值考慮進去則會更接近現實情況。
- (2) 本研究指出污染場址中降解作用和吸附作用對於污染傳輸影響甚大，可延伸模擬其變異性影響程度。若能清楚得知地下水氧化還原環境影響原污染物降解的速率，和土壤有機質含量的多寡，造成含氯有機溶劑遲滯速度的差異，有助於判定實際場址污染擴散範圍與影響程度。
- (3) 在模擬入滲量推估方面，利用有效入滲分析法探討降雨量與入滲量之相關性，並使用最大入滲量來進行模擬分析。模擬結果驗證方面，地下水模擬水位與監測井水位大致符合，但是由於枯水期與豐水期降雨量到入滲量由人工計算其每日降雨入滲量，使得模擬結果會產生誤差。

## 參考文獻

- 經濟部水利署，2009，「中華民國九十八年臺灣水文年報」，臺灣。
- 聯美環保科技股份有限公司，2009，RCA原桃園廠場址地下水汙染整治計畫書，台灣美國無線電公司。
- 經濟部工業局，2008，含氯碳氫化合物土壤及地下水汙染預防與整治技術手冊，世環科技工程股份有限公司，計畫編號：EPA-96-GA13-02-A182。
- 行政院環保署，2008，運作中工廠土壤與地下水含氯有機溶劑汙染潛勢調查及查證計畫，瑞昶科技股份有限公司，計畫編號：EPA-97-GA103-03-A184。
- 徐年盛、張德鑫、吳呈懋、劉宏仁、劉建宏，2005，地下水汙染擴散模式建立之研  
國立台灣大學，計畫編號：EPA-94-1604-02-01。
- 董天行，1998，三氯乙烯汙染地下水相關清除困難之研究，碩士論文，中央大學應用地質學研究所，中壢。
- 丁澈士、蘇惠珍（譯），2004，PMWIN三維地下水模式，五南圖書出版公司。
- 行政院環境保護署，2006，「環保科技育成中心計畫」，「利用整治列車系統處理受DNAPL 汙染之地下水期末報告」，計畫編號：EPA-95-U1U4-001。
- 林啟燦、陳勁宇、林純仔、高英暉、高永峰，2008，「河川水中含氯VOC 汙染總量評估－以後勁溪仁武橋段為例」，高雄第一科技大學，碩士論文。
- 單信瑜，劉韋恩，2010，「導水度異質性對於含氯有機溶劑汙染場址健康風險評估之影響」，國立交通大學，碩士論文。
- 張良正，葉明生，1995，「濁水溪沖積扇地下水序率數值模擬模式之研究」，國立交通大學，碩士論文。

- Anderson M. R., Johnson R. L and Pankow J. F., 1992a, Dissolution of dense chlorinated solvents into ground water: 1. Dissolution from a well-defined residual source, *Ground Water*, v30 i2.pp. 250-256.
- Alexander M., 1999, *Biodegradation and Bioremediation* 2nd ed., Academic Press, San Diego, CA., U.S.A..
- Bedient P. B., Rifai H. S., and Newell C. J., 1994, *contamination, transport and remediation*, PTR Prentice Hall, , Englewood cliff, New Jersey,pp.541.
- Banerjee S., 1984, Solubility of organic mixtures in water. *Environ. Sci. Technol.* v18 i8. Pp.587-591.
- Bouwer , E.J. Bouwer ,1994, Bioremediation of chlorinated solvents using alternate electron acceptors, In *Handbook of Bioremediation*. Norris, R.D., Hincbee, R.E.
- Brown, R., McCarty, P.L, Semprini, L., Wilson, J.T., Kampbell, D.H., Reinhard.M., Bouwer, E.J., Borden, R.C., Vogel, T.M., Thomas, J.M., and Ward, C.H.(Eds.). Pp.149-175.
- Bear,J.,1972.*Dynamics of Fluids in Porous Media*,Elsevier,New York.
- Ball W. P., Robert P. V., 1991, Long-term sorption of halogenated organic-chemicals by aquifer material at equilibrium . *Environ. Sci. Technol.*, 25, pp.1223-1236.
- Bagley, D. M. and J. M. Gossett, 1990, Tetrachloroethene Transformation to Trichloroethene and cis-1,2-Dichloroethene by Sulfate-Reducing Enrichment Cultures, *Applied and Environmental Microbiology*, 56(8), pp. 2511-2516.
- Cohen,R.M.and J.W.Mercer,1993,*DNAPL Site Evaluation*,Lewis Publishers,Chelsea,MI.
- Clement, T.P, 1997, RT3D - A modular computer code for simulating reactive multispecies transport in 3-Dimensional groundwater aquifers, Battelle Pacific Northwest.National Laboratory Research Report, draft version, PNNL-SA-28967. Available at:<http://bioprocess.pnl.gov/rt3d.htm>.
- Dwarakanath, V. ,1997,*Characterization and Remediation of Aquifers Contaminated by Nonaqueous Phase Liquid Using Partitioning Tracers and Surfactants*, Ph.D. Dissertation, The University of Texas at Austin
- Dwarakanath, V. ,1997,*Characterization and Remediation of Aquifers Contaminated by Nonaqueous Phase Liquid Using Partitioning Tracers and Surfactants*, Ph.D. Dissertation, The University of Texas at Austin
- Domenico P. A. and Scheartz F. W., 1998, *Physical and Chemical Hydrogeology*, 2nd ed., wiley, New York, pp.506.

- Eskenazi B., Fenster L., Hudes M., Wyrobek A. J., Katz D. F., Gerson J. and Rempel D. M., 1991b, A study of the effect of perchloroethylene exposure on the reproductive outcomes of wives of dry-cleaning workers. *Am. J. Ind. Med.* 20:pp.593-600.
- Environment Agency UK, 2003, An illustrated handbook of DNAPL transport and fate in the subsurface.
- El Fantroussi S, Naveau H and Agathos S. N., 1998, Anaerobic dechlorinating bacteria. *Biotechnol Prog* 14:pp.167-188
- Eggleston, J., Rojstaczer, S., 1998. Identification of large-scale hydraulic conductivity trends and the influence of trends on contaminant transport. *Water Resources Research* 34 (9),pp. 2155-2168.
- Freundt K. J., Liebaltd G. P., Lieberwirth E., 1977, Toxicity studies on trans-1,2-dichloroethylene. *Toxicology*, 7:pp.141-153.
- Freeze, R.A., and J.A., 1979. *Cherry, Groundwater*, Prentice-Hall, Englewood cliffs, N.J..
- Feenstra, S., D.M. Mackay, and J.A. Cherry, 1991. "A Method for Assessing Residual NAPL Based on Organic Chemical Concentrations in Soil Samples." *Ground Water Monitoring Review*. 11(2):pp.128-136.
- Grathwohl, P., and G. Teutsch, 1997, "In-Situ Remediation of Persistent Organic Contaminants In Groundwater, " *International Conference On Groundwater Quality Protection*, pp.85-99.
- Harmon T. C., Roberts P. V., 1994 Comparison of intraparticle sorption and desorption rates for a halogenated alkene in a sandy aquifer material. *Environ. Sci. Technol.*, 28,pp.1550-1560.
- Homsy G. M., 1987, *Viscous Fingering in Porous Media*. *Annual Review of Fluid Mechanics*. Volume 19, pp.271-311.
- Jang W. and Aral M. M., 2008, The Effect of Oxygen Transport on Bio-transformation of Trichloroethylene in the Subsurface, *ASCE Conference Proceedings* 316, pp.60.
- J.Schaerlaekens , Mallants D., Simunek J., Van Genuchten M. Th. and Feyen J., 1999, Numerical simulation of transport and sequential biodegradation of chlorinated aliphatic hydrocarbons using CHAIN\_2D. *Hydrological Processes*, 13, 17,pp.2847-2859.
- Johnson R. L. and Pankow J. F., 1992, Dissolution of dense chlorinated solvents into groundwater. 2. Source function for pools of solvent. *Environ. Sci. Technol.*, 26,pp.896-901.
- Ken Walton, Andre Unger, Beth Parker and Mario Ioannidis, 2011, Simulating infiltration of TCE and water in unsaturated, discretely fractured rock.

- Lash L. H., Qian W., Putt D. A., Desai K., Elfarra A. A., Sicuri A. R. and Parker J. C., 1998, Glutathione conjugation of perchloroethylene in rats and mice in vitro: sex-, species-, and tissue-dependent differences. *Toxicol. Appl. Pharmacol.* 150:pp.49-57.
- Levine B., Fierro M. F. and Goza S. W., 1981, A tetrachloroethylene Fatality. *J. Forensic Sci.* 26:pp.206-209.
- Longino B. L. and Kueper, B. H., 1995, The use of upward gradients to arrest downward DNAPL migration in the presence of solubilizing surfactants, *Can. Geotech. J.* 32, pp.296-308.
- Lucius, J.E., G.R. Olhoeft, P.L. Hill, and S.K. Dule, 1992. Properties and hazards of 108 selected substances-1992 edition. U.S.G.S. Open File Report 92-57. pp.554.
- Mercer, J. W., and Cohen R. M., 1990, A review of immiscible fluids in the subsurface: models, characterization and remediation, *Journal of Contaminant Hydrology*:pp.107-163.
- McDonald, M.G., Harbaugh, A.W., Orr, B.R., and Ackerman, D.J., 1992. A method of converting no-flow cells to variable-head cells for the U.S. Geological Survey modular finite-difference ground-water flow model: U.S. Geological Survey Open-File Report, pp.99.
- Middeldorp P. J. M., Luijten M. L. G. C., van de Pas B. A., van Eekert M. H. A., Kengen S. W. M., Schraa G. and Stams A.J.M., 1999, Anaerobic microbial reductive dehalogenation of chlorinated ethenes. *Biorem. J.*, 3 (3), pp.151-169.
- Ogata, A., 1970, Theory of dispersion in a granular medium. *Geological Survey Professional Paper*, pp.411.
- Pankow, J. F., and Cherry J. A., 1996, *Dense Chlorinated Solvents and other DNAPLs in Groundwater*, Waterloo Press, Portland, OR, pp.522.
- Rippen 1984. *Manual Environmental Chemistry*. Germany.
- Reitsma, S. and Marshall, M., 2000, Experimental study of oxidation of pooled NAPL, in *The Second International Conference on Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds*, Vol. C2-6: Chemical Oxidation and Reaction Barriers, Monterey, CA, pp.25-32.
- Schwille F., 1988, *Dense Chlorinated Solvents in Porous and Fractured Media*. Lewis, Chelsea, MI.
- Schaerlaekens J., Mallants D., Simunek J., Van Genuchten M. Th. and Feyen J., 1999, Numerical simulation of transport and sequential biodegradation of chlorinated aliphatic hydrocarbons using CHAIN\_2D. *Hydrological Processes*, 13, 17, pp.2847-2859.

- Srinivasan P. and Mercer J. W., 1988, Simulation of biodegradation and sorption processes in groundwater, *Ground Water*, 26(4):pp.475-487.
- Tiehm A., Schmidt K., Stoll C., Muller A., Lohner S., Heidinger M., Wickert F. and Karch U., 2007, Assessment of natural microbial dechlorination. *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*, Special Issue I: pp.71-77.
- U.S. EPA ,Solid Waste and Emergency Response,542-R-00-008 July 2000 . Engineered Approaches to In Situ Bioremediation of Chlorinated Solvents:Fundamentals and Field Applications.
- U.S. EPA, 2003“*The DNAPL Remediation Challenge*,”EPA/600/R-03/143.
- Urynowicz M.N., and Siegrist R.L., 2000. Chemical degradation of TCE DNAPL by permanganate. In: Wickramanayake, G.B., A.R. Gavaskar, and A.S.C. Chen (ed.). *Chemical Oxidation and Reactive Barriers*. Battelle Press, Columbus, OH.pp.75-82.
- U.S.EPA.,1992, *Guidelines for Exposure Assessment*. Risk Assessment Forum and U.S Environmental Protection Agency, Washington DC.
- U.S.EPA., 1992, *Estimating Potential for Occurrence of DNAPL at Superfund Sites*. OSWER Publication 9355.4-07FS.
- U.S.EPA.,1992, *Guidelines for Exposure Assessment*. Risk Assessment Forum and U.S Environmental Protection Agency, Washington DC.
- U.S.EPA., 1992, *Estimating Potential for Occurrence of DNAPL at Superfund Sites*. OSWER Publication 9355.4-07FS.
- Verce M. F., Gunsch C. K., Danko A. S. and Freedman D. L., 2002, Cometabolism of cis-1,2-dichloroethene by aerobic cultures grown on vinyl chloride as the primary substrate. *Environ. Sci. Technol.*, 36(10):pp.2171-2177.
- Vogel, T. M., and P.L. McCarty, (1985). Biotransformation of tetrachloroethylene to trichloroethylene, dichloroethylene, vinyl chloride, and carbon dioxide under methanogenic conditions: *Appl. Environ. Microbiol.*, 49(5):1080-1083.
- Wartenberg D, Reyner D, Scott CS. ,2000. Trichloroethylene and cancer: epidemiologic evidence. *Environ Health Perspect*. May;108 (Suppl 2):pp.161-176.
- Wilson, J.L., S.H. Conrad, W.R. Mason, W. Peplinski, and E. Hafgan. April 1990. *Laboratory Investigations of Residual Liquid Organics from Spills, Leaks, and the Disposal of Hazardous Wastes in Groundwater*. EPA/600/6-90/004.
- Wood W. W., Kramer T. P. and Hem P. P. Jr., 1990, Intergranular diffusion:

An important mechanism influencing solute transport in clastic aquifers. Science 247 (March 30):pp.1569-72.

Wilson J. T., Weaver J. W., Kampbel D. H., 1994, Intrinsic bioremediation of TCE in ground water a an NPL site in St. Joseph, Michigan. In Proceedings of the EPA Symposium on Intrinsic Bioremediation of Ground Water, August 30–September 1, Denver, CO, US Environmental Protection Agency, EPA/540/R-94/515.

其他參考出處：

行政院環境保護署，2010，「土壤及地下水污染整治法」

<http://ivy5.epa.gov.tw/epalaw/index.aspx>

水利署，2009，「台灣水資源」， <http://wra.gov.tw>

行政院環境保護署，2010，毒性化學物質毒理資料庫，

[http://ivy2.epa.gov.tw/out\\_web/j/toxic/chemical.data/index.html](http://ivy2.epa.gov.tw/out_web/j/toxic/chemical.data/index.html)



## 附錄 A

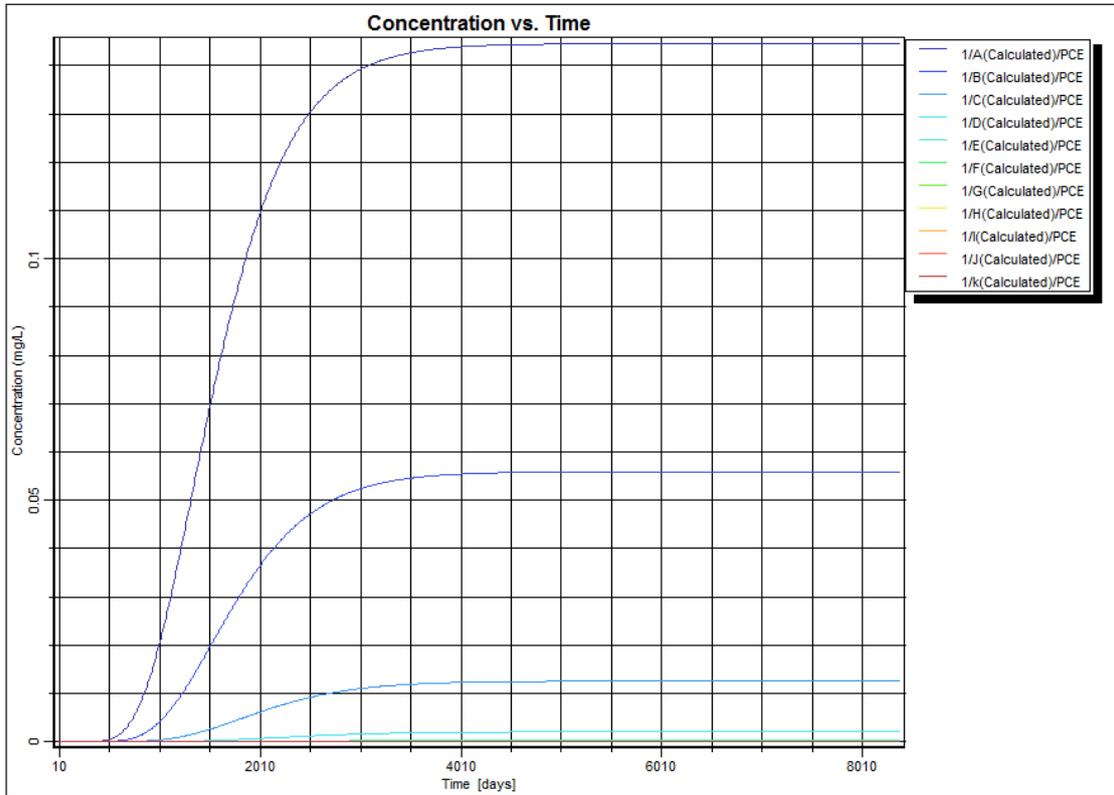


圖 A-1 降雨量為 2500 mm/year 一號觀測井 PCE 的濃度隨時間變化

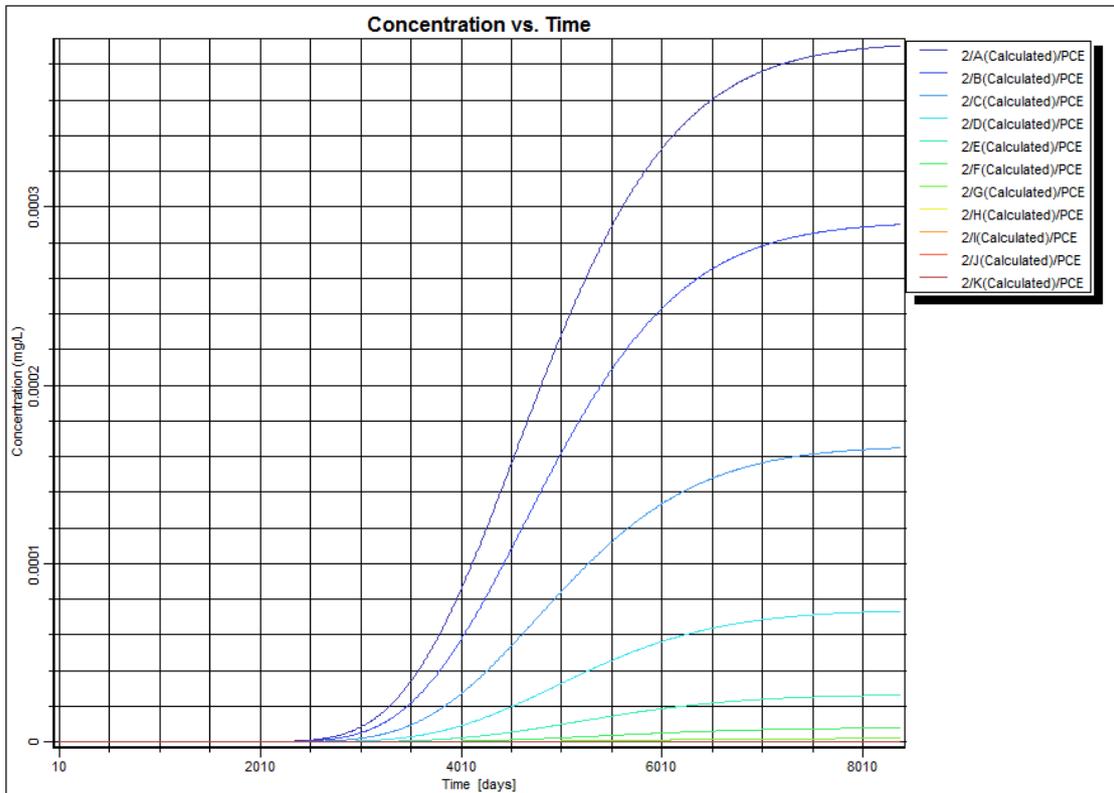


圖 A-2 降雨量為 2500 mm/year 二號觀測井 PCE 的濃度隨時間變化

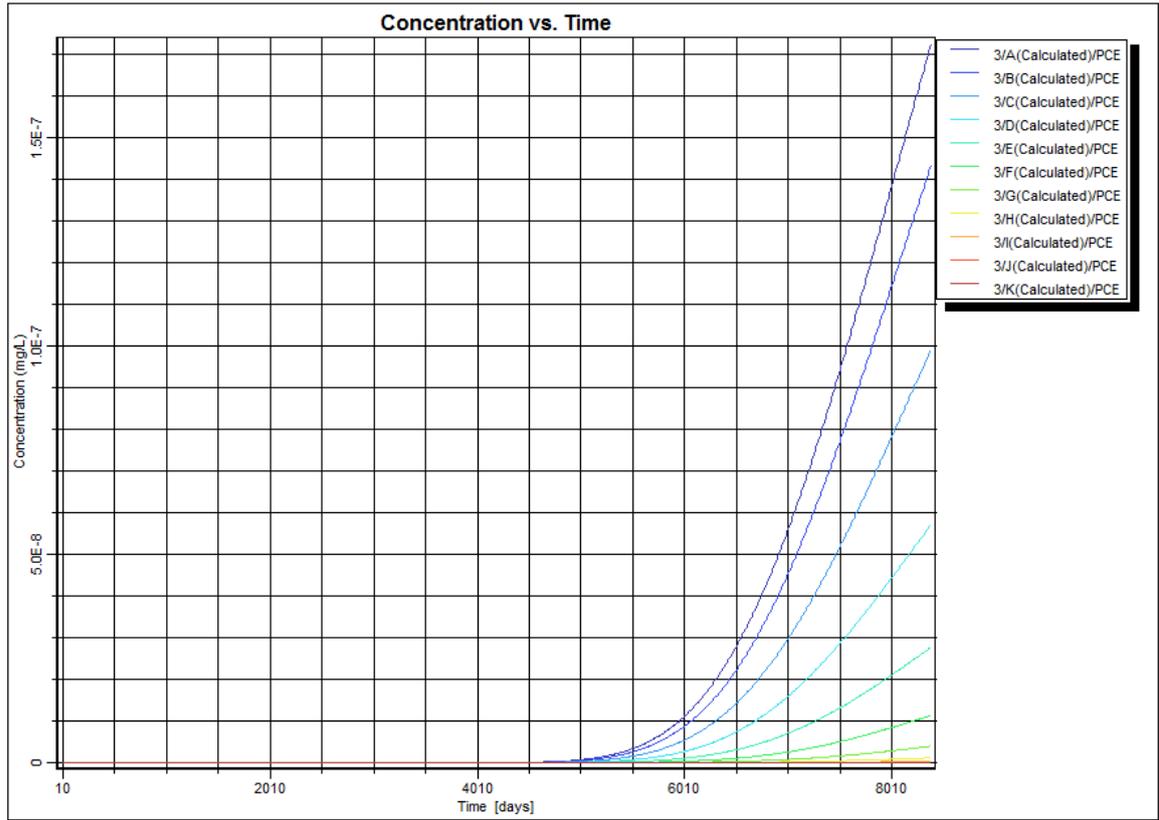


圖 A-3 降雨量為 2500 mm/year 三號觀測井 PCE 的濃度隨時間變化

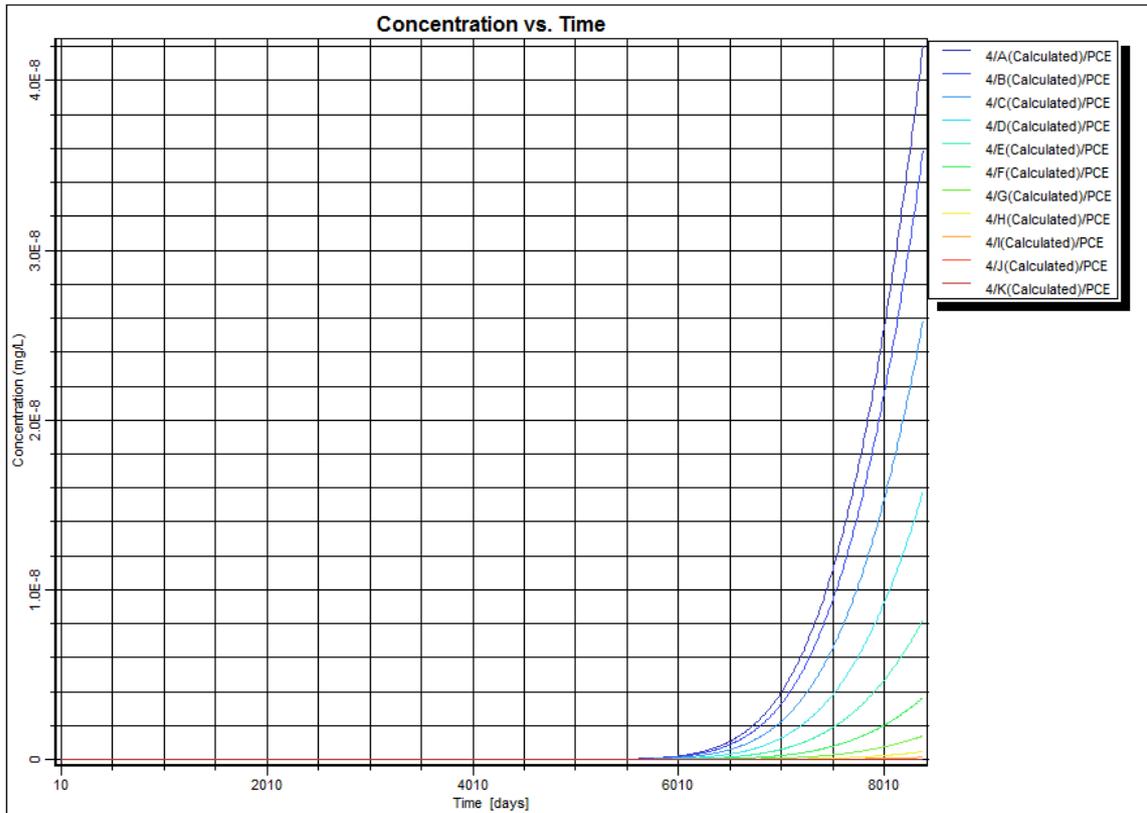


圖 A-4 降雨量為 2500 mm/year 四號觀測井 PCE 的濃度隨時間變化

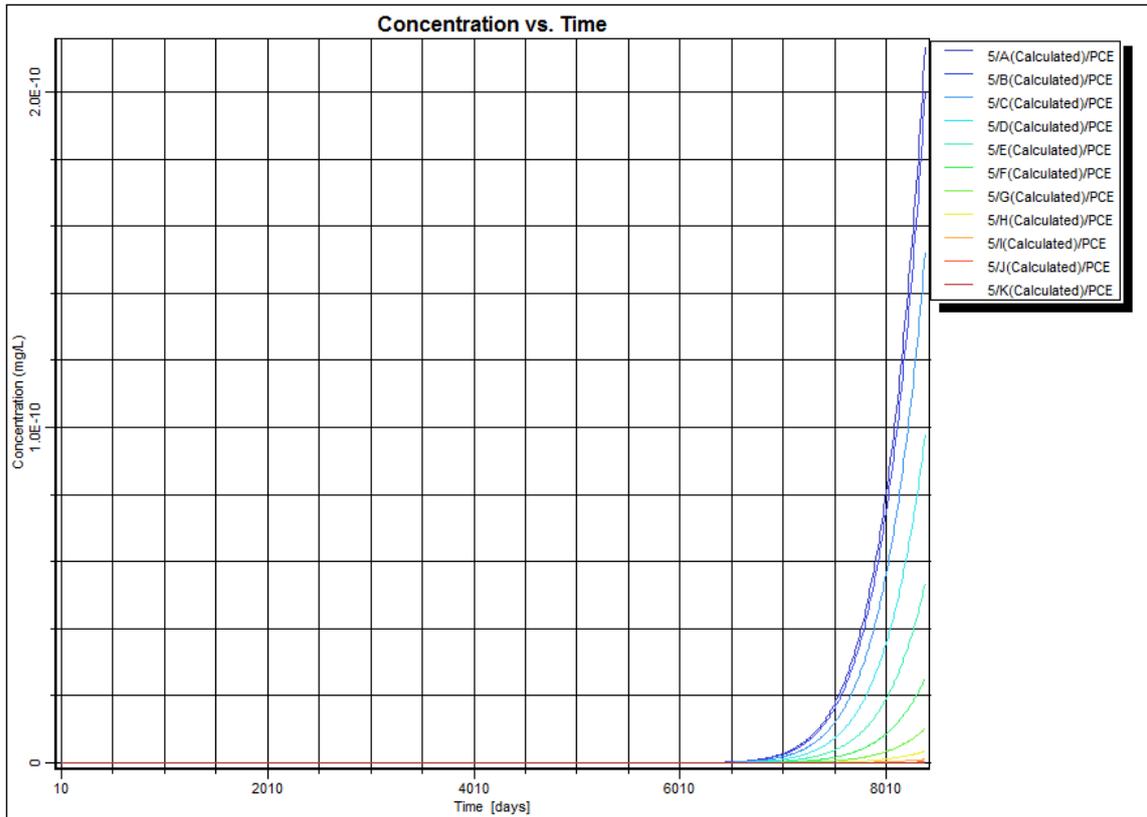


圖 A-5 降雨量為 2500 mm/year 五號觀測井 PCE 的濃度隨時間變化

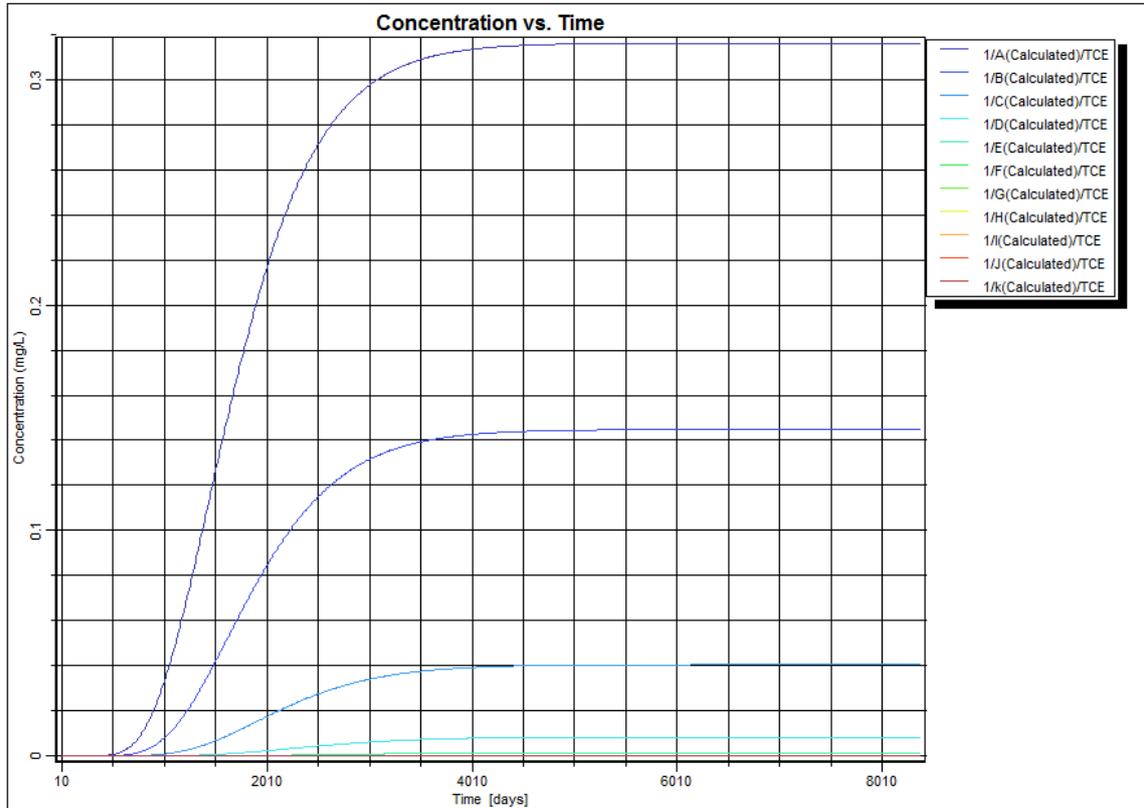


圖 A-6 降雨量為 2500 mm/year 一號觀測井 TCE 的濃度隨時間變化

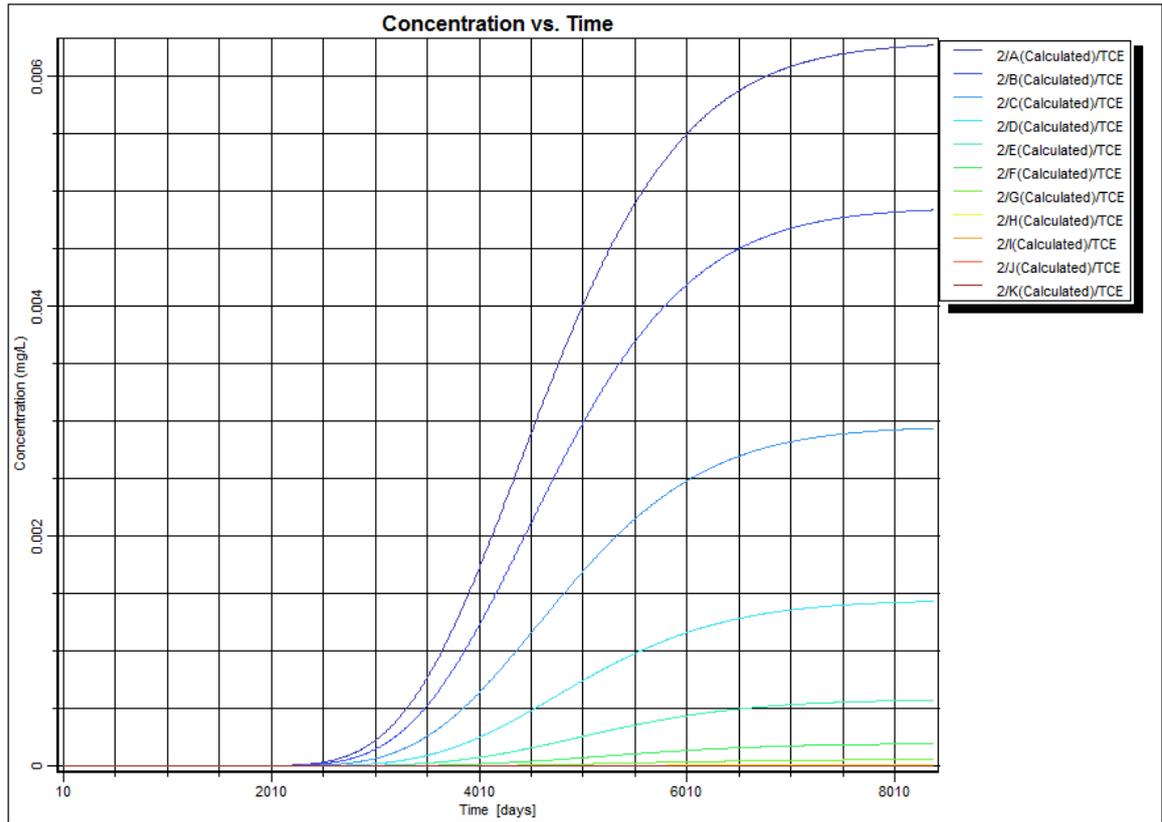


圖 A-7 降雨量為 2500 mm/year 二號觀測井 TCE 的濃度隨時間變化

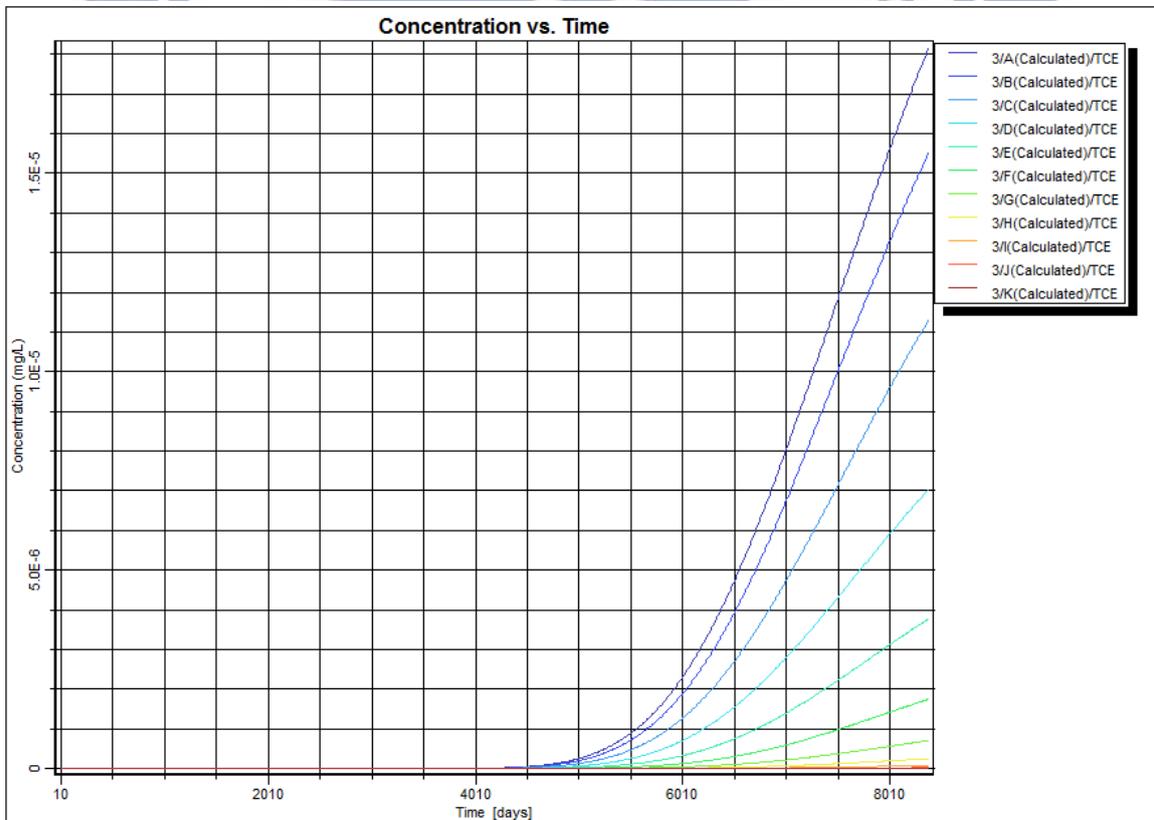


圖 A-8 降雨量為 2500 mm/year 三號觀測井 TCE 的濃度隨時間變化

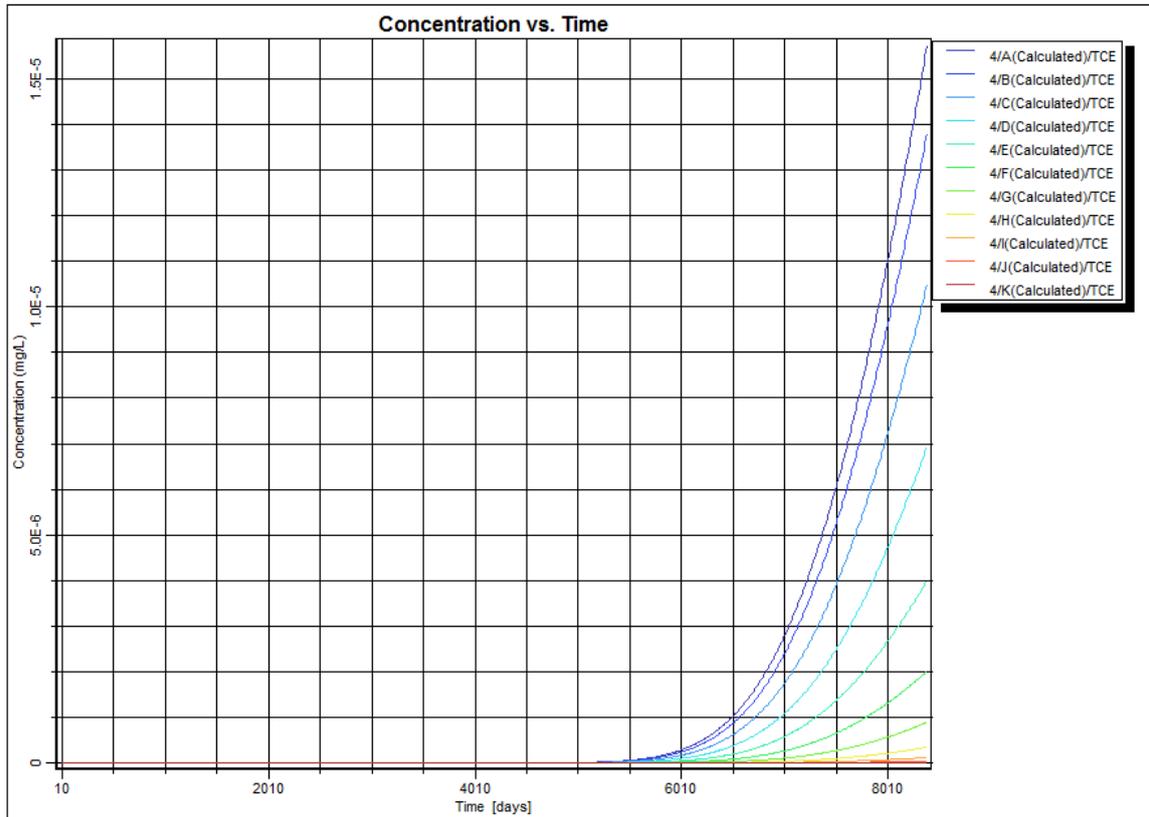


圖 A-9 降雨量為 2500 mm/year 四號觀測井 TCE 的濃度隨時間變化

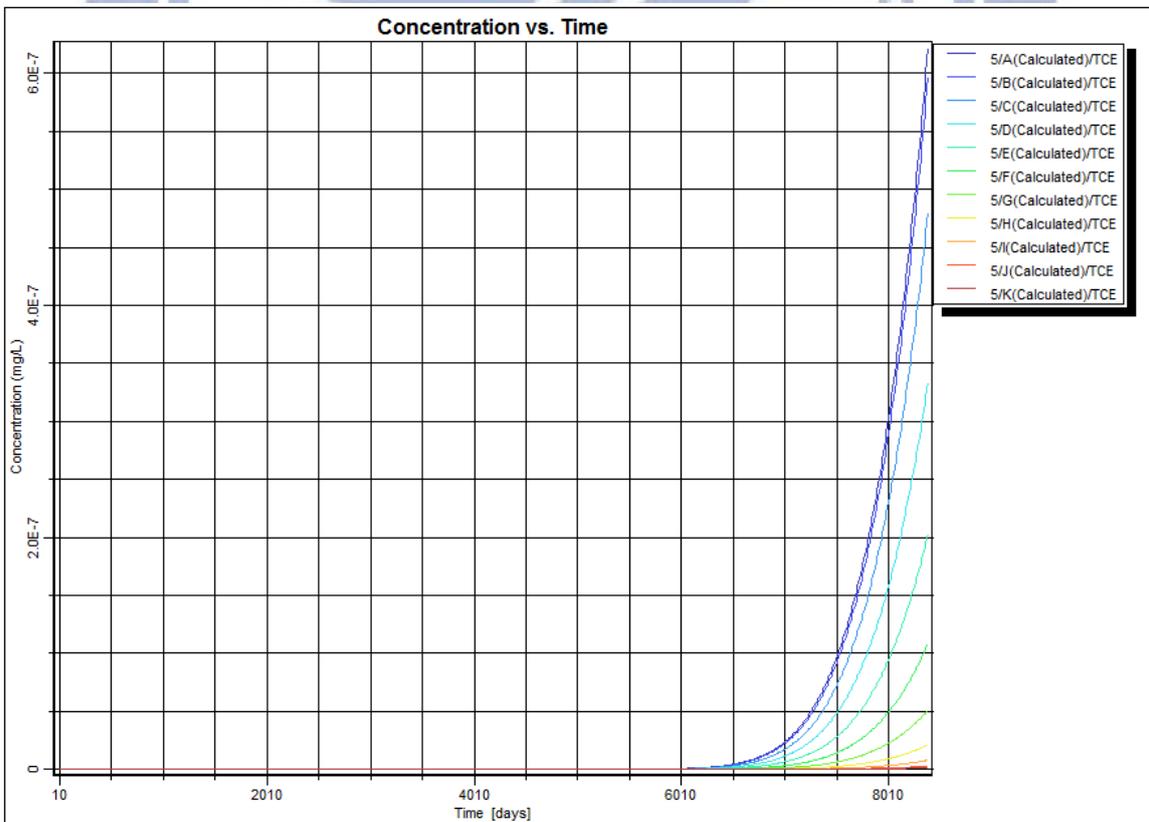


圖 A-10 降雨量為 2500 mm/year 五號觀測井 TCE 的濃度隨時間變化

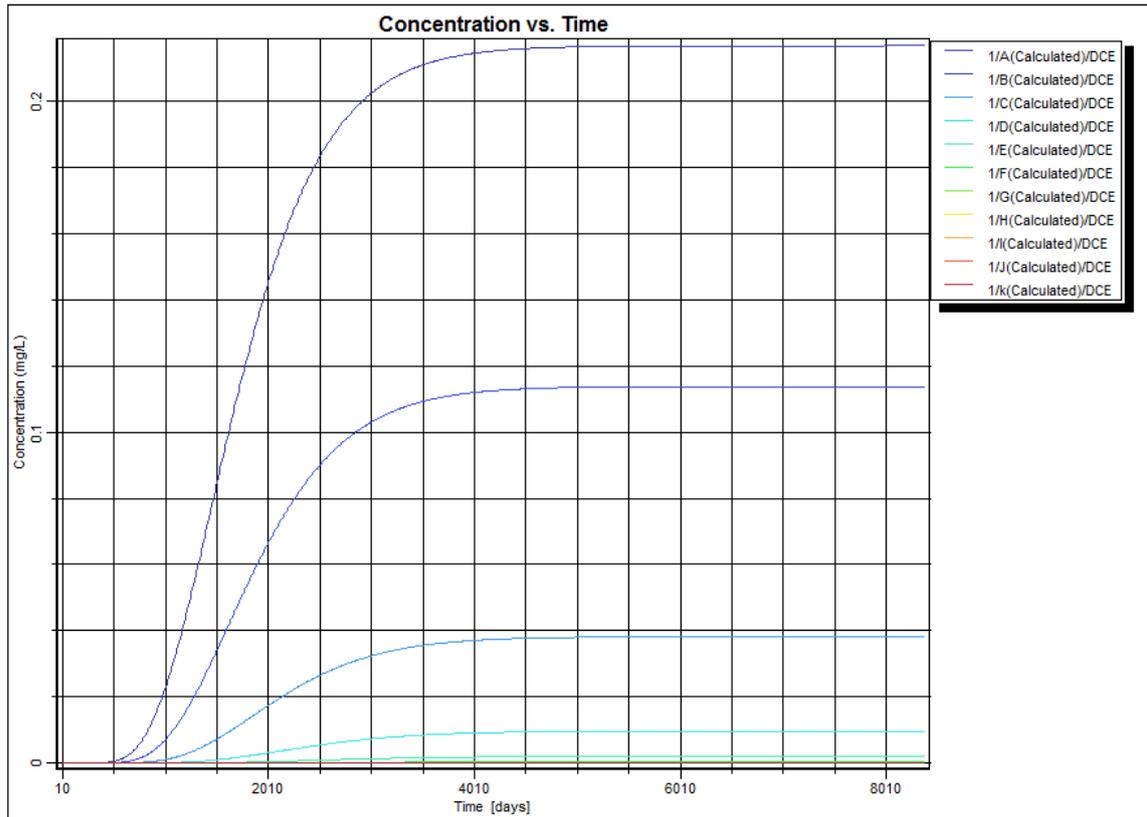


圖 A-11 降雨量為 2500 mm/year 一號觀測井 DCE 的濃度隨時間變化

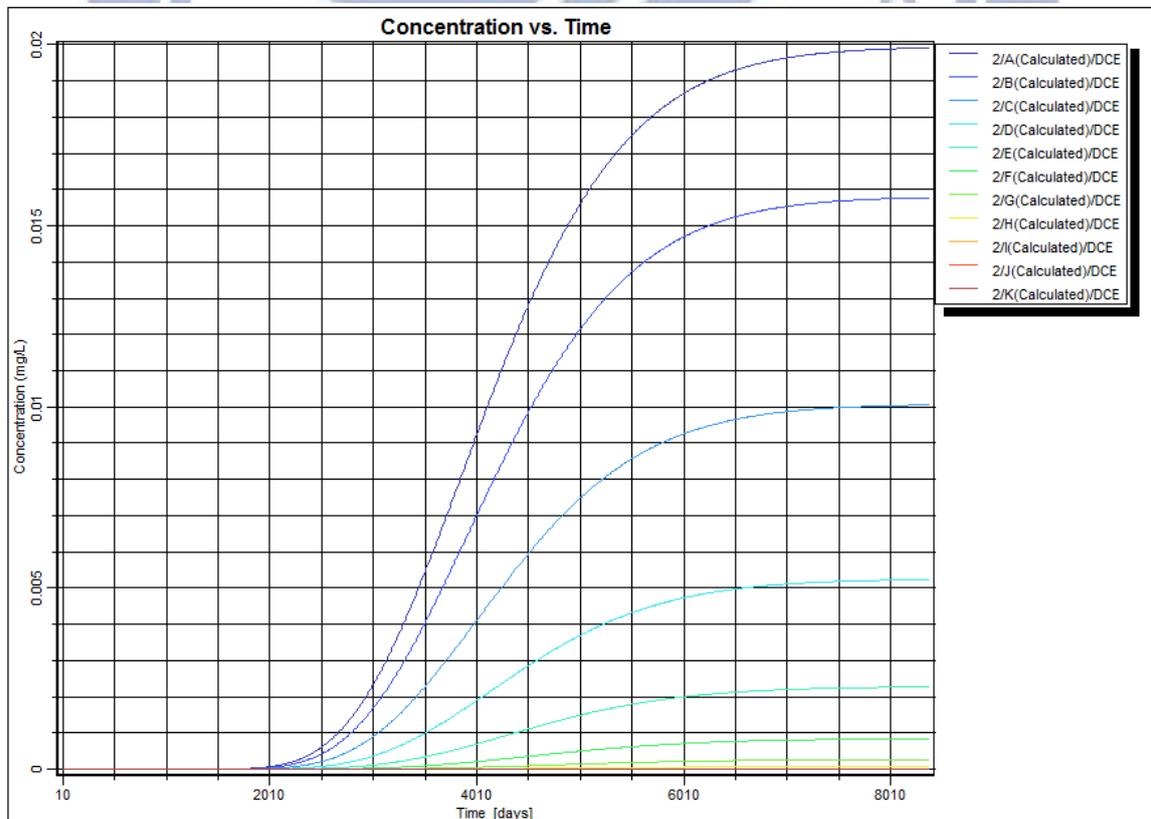


圖 A-12 降雨量為 2500 mm/year 二號觀測井 DCE 的濃度隨時間變化

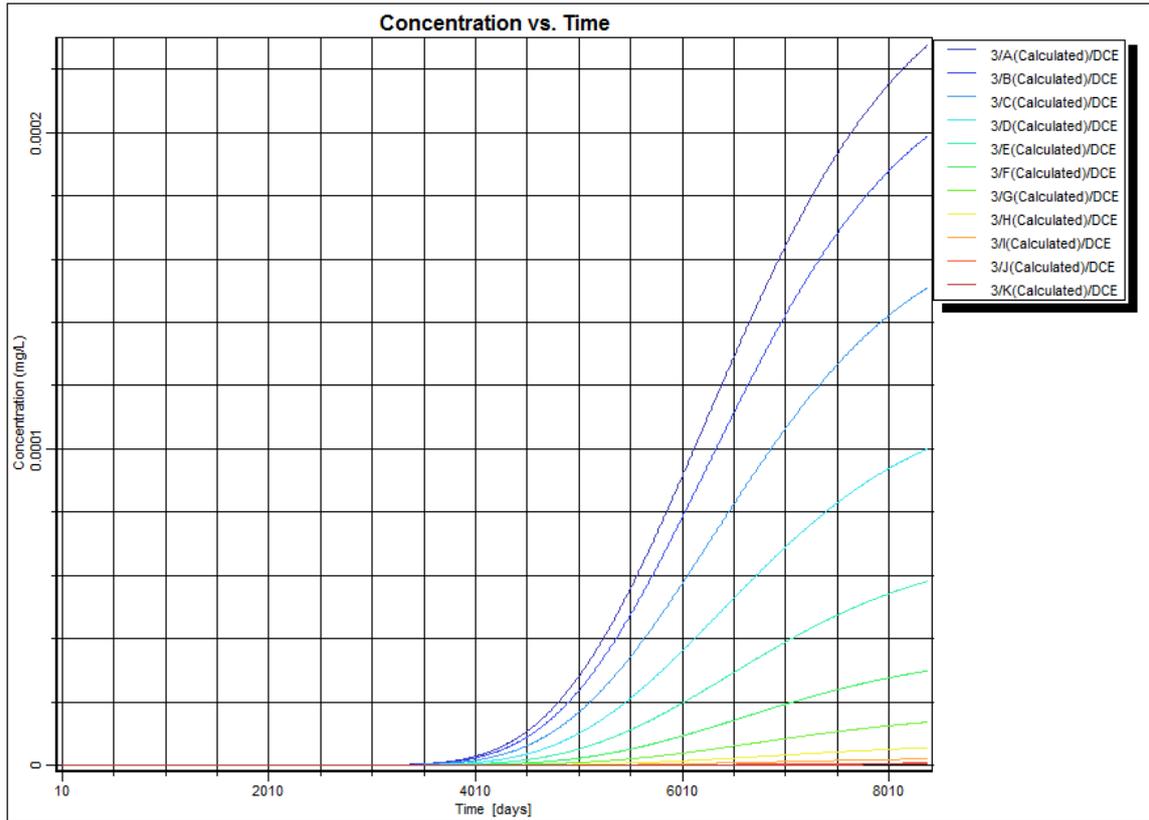


圖 A-13 降雨量為 2500 mm/year 三號觀測井 DCE 的濃度隨時間變化

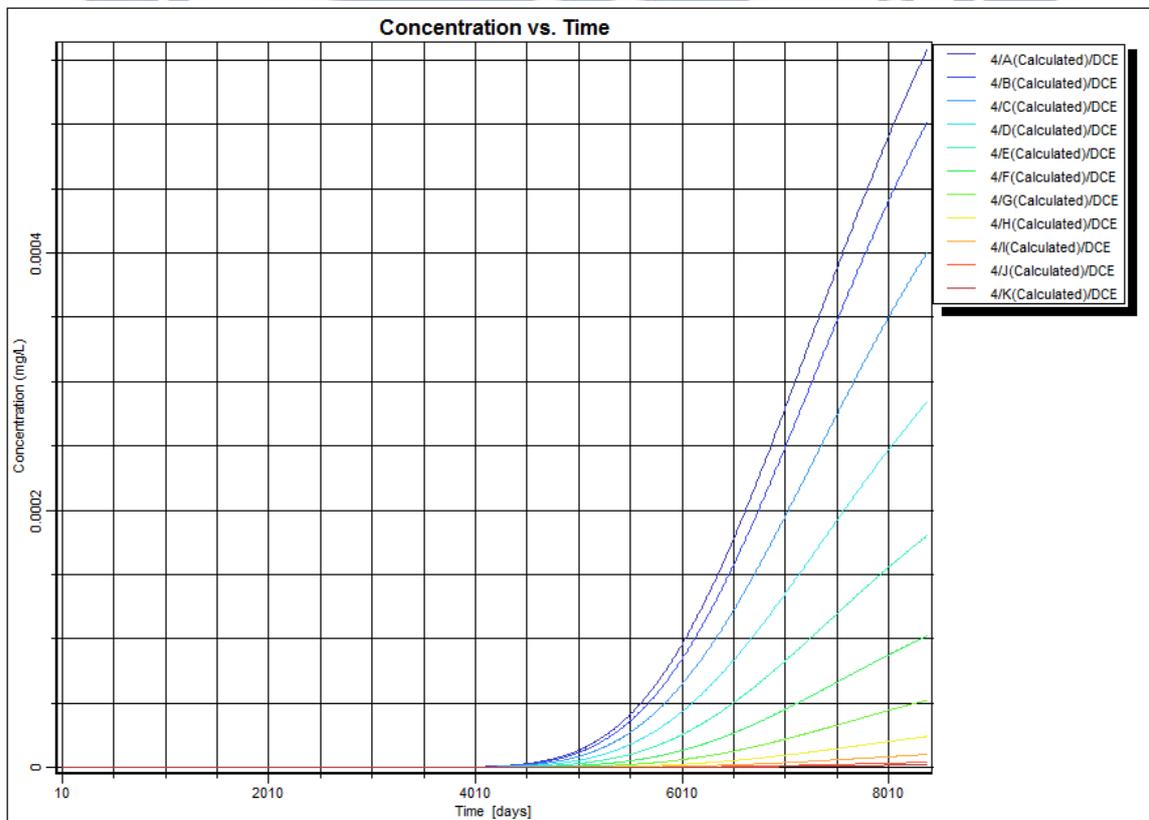


圖 A-14 降雨量為 2500 mm/year 四號觀測井 DCE 的濃度隨時間變化

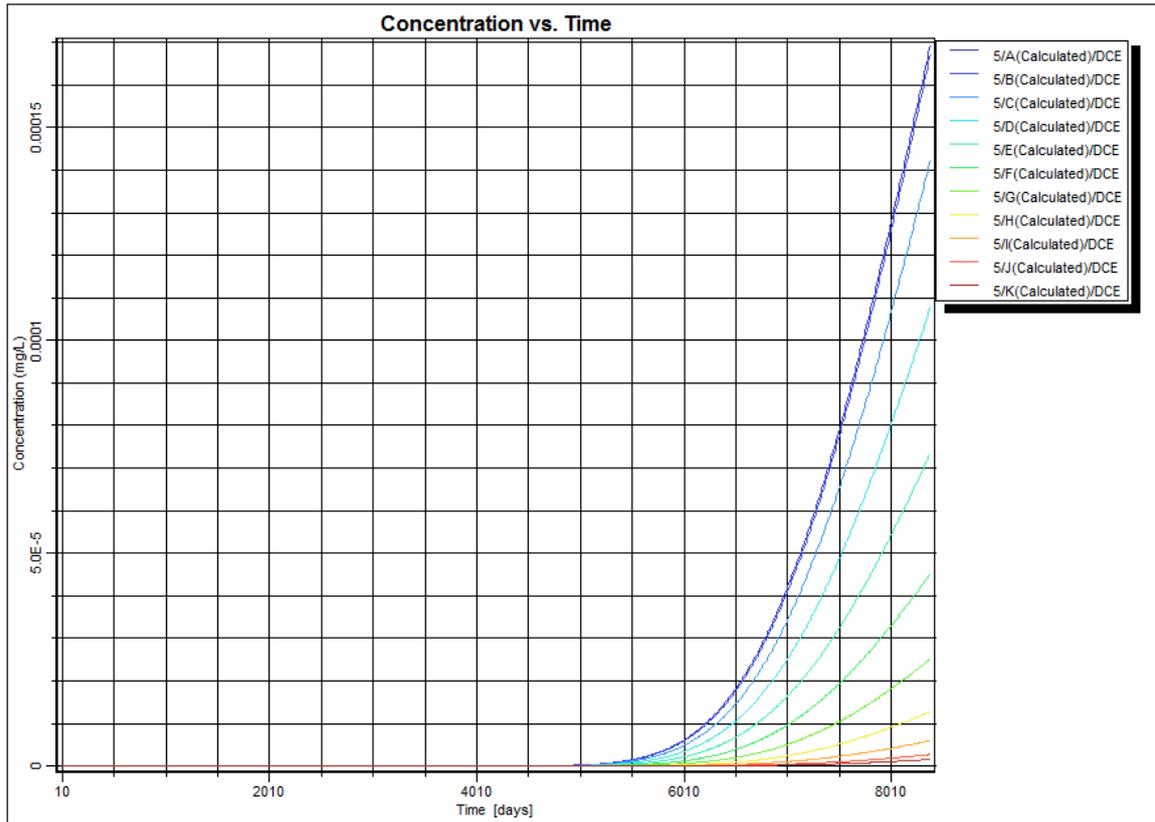


圖 A-15 降雨量為 2500 mm/year 五號觀測井 DCE 的濃度隨時間變化

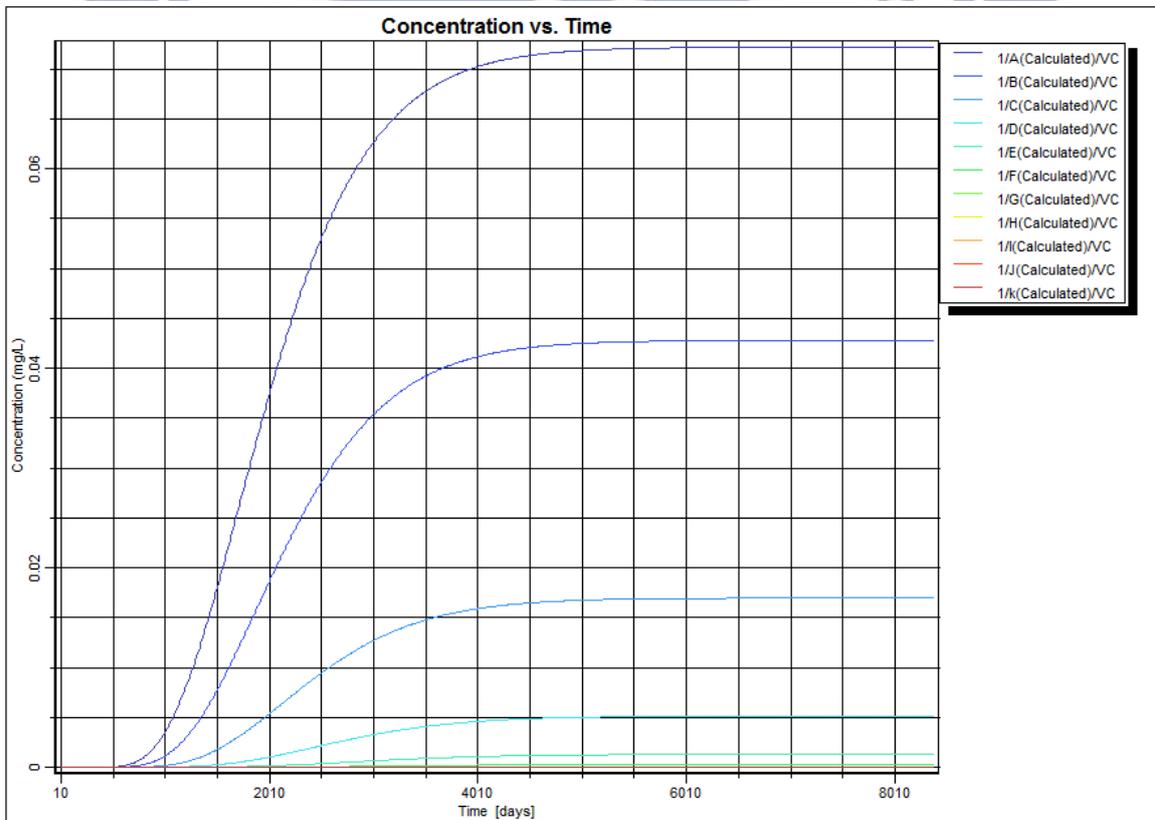


圖 A-16 降雨量為 2500 mm/year 一號觀測井 VC 的濃度隨時間變化

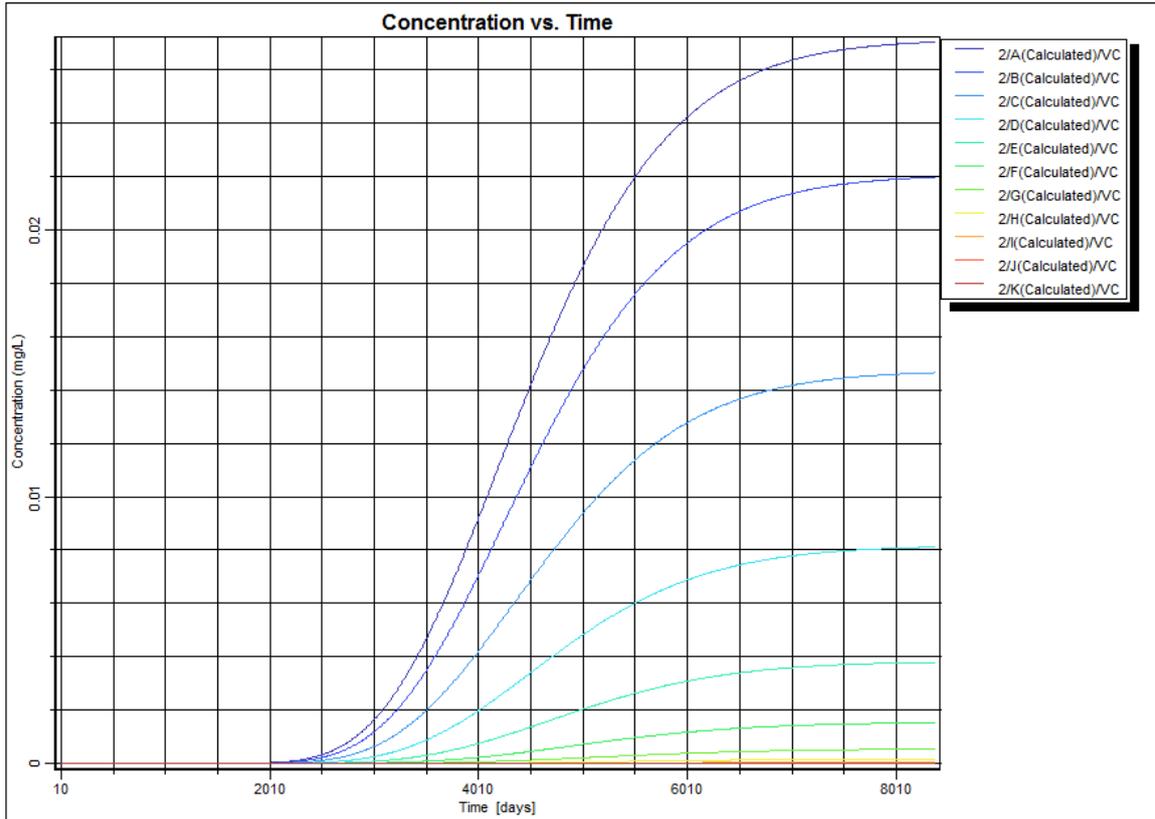


圖 A-17 降雨量為 2500 mm/year 二號觀測井 VC 的濃度隨時間變化

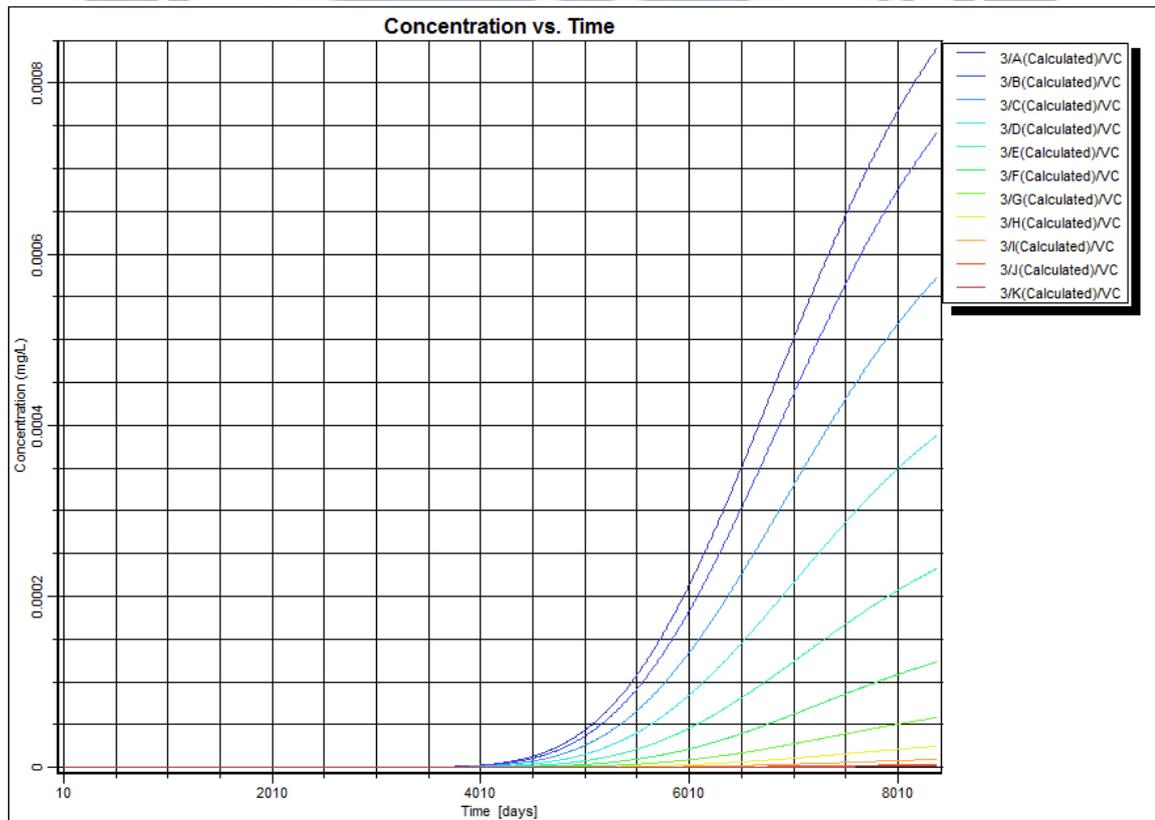


圖 A-18 降雨量為 2500 mm/year 三號觀測井 VC 的濃度隨時間變化

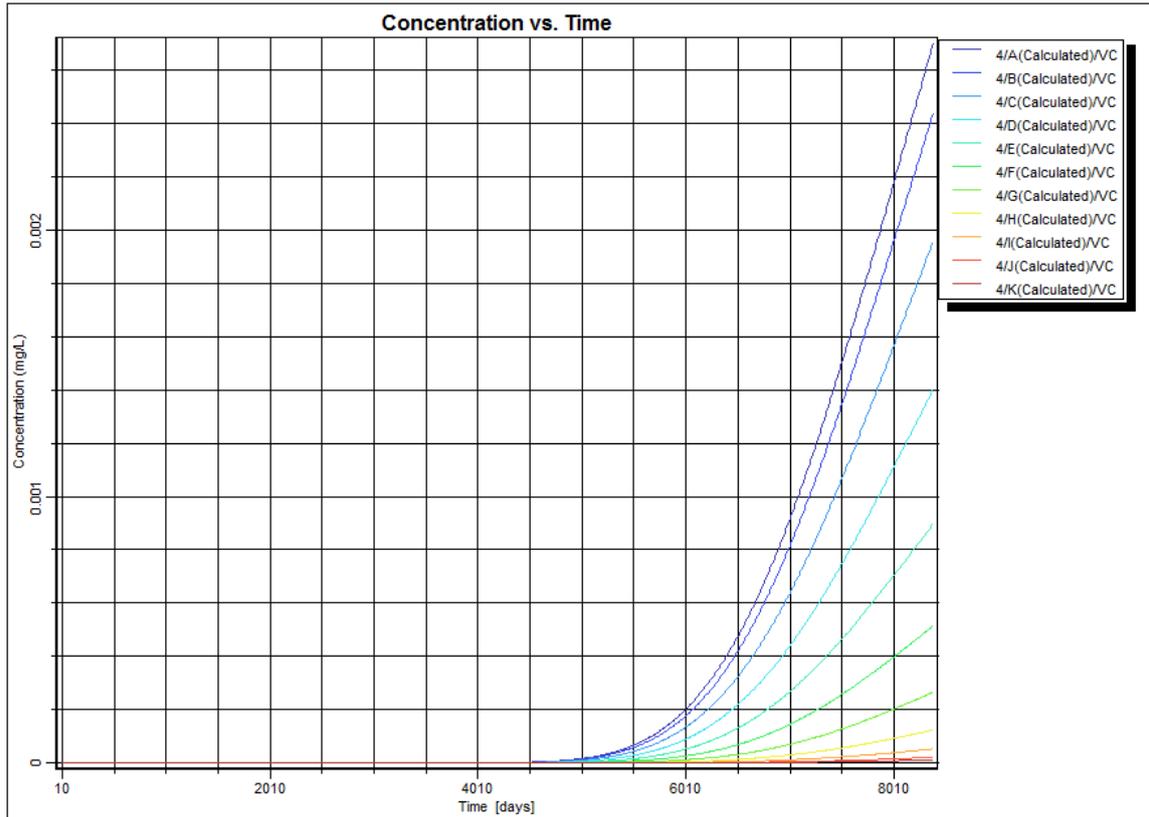


圖 A-19 降雨量為 2500 mm/year 四號觀測井 VC 的濃度隨時間變化

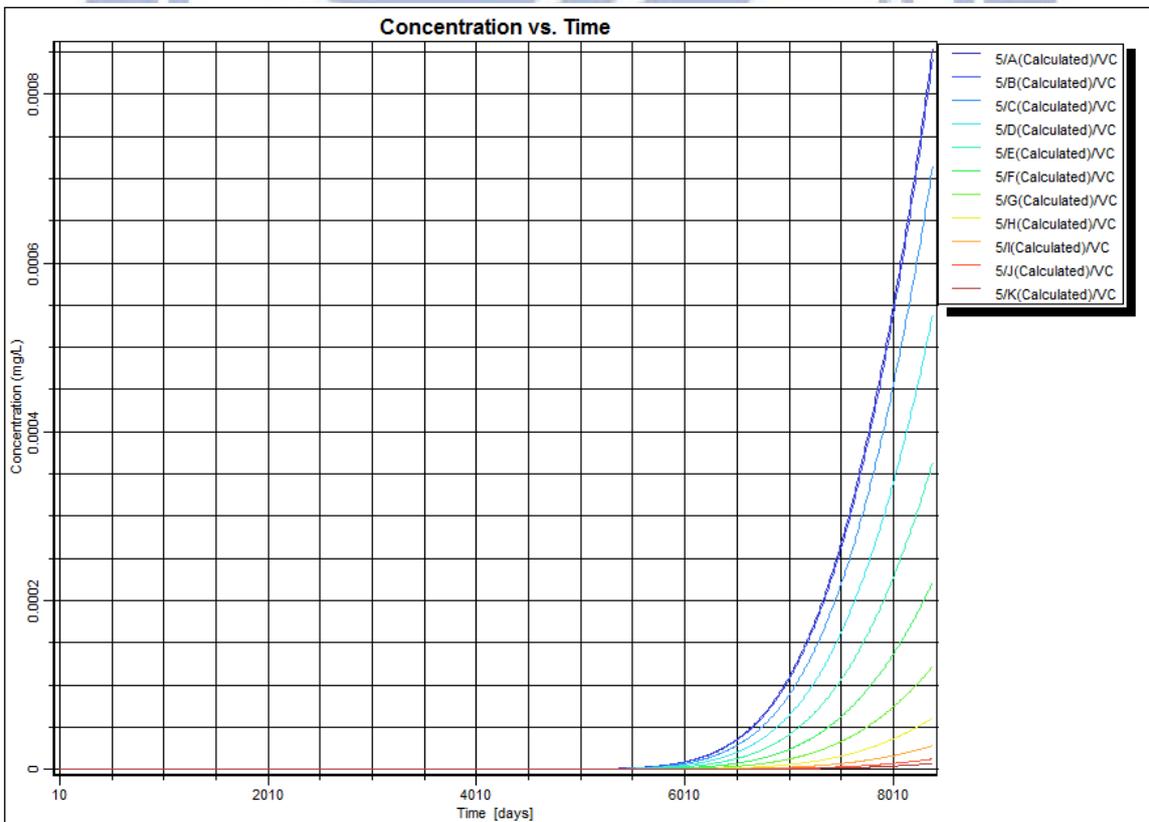


圖 A-20 降雨量為 2500 mm/year 五號觀測井 VC 的濃度隨時間變化

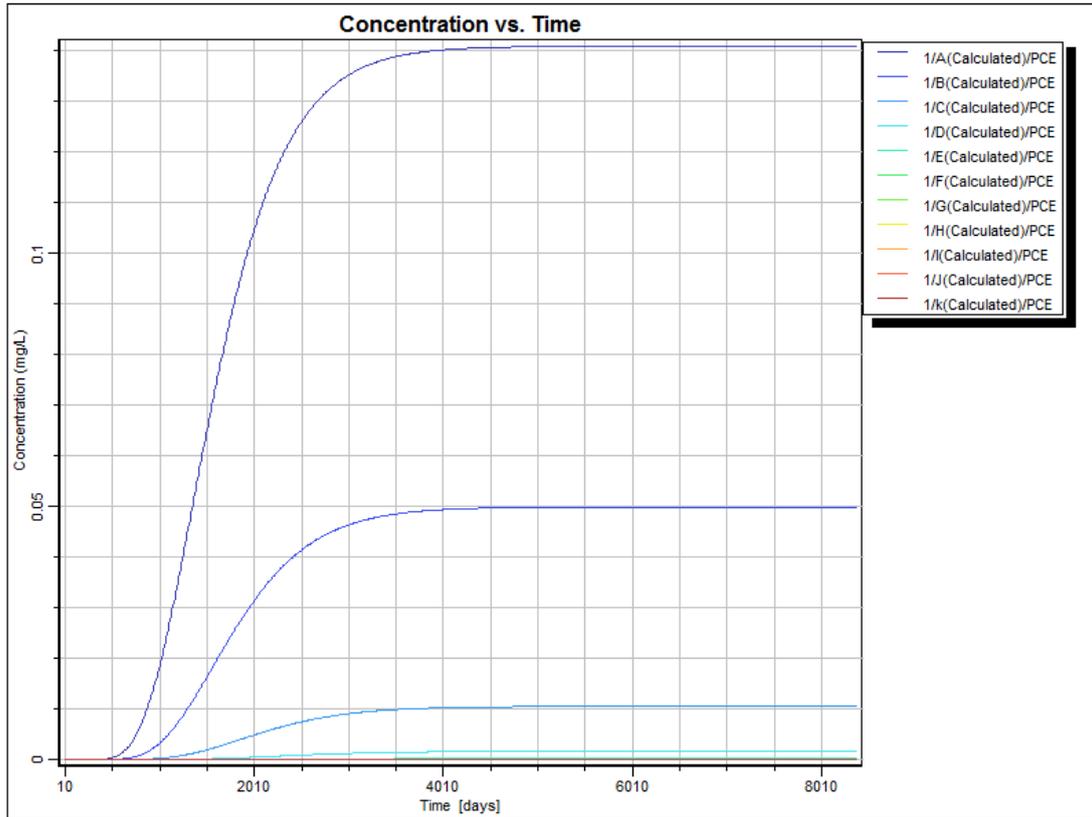


圖 A-21 降雨量為 1250 mm/year 一號觀測井 PCE 的濃度隨時間變化

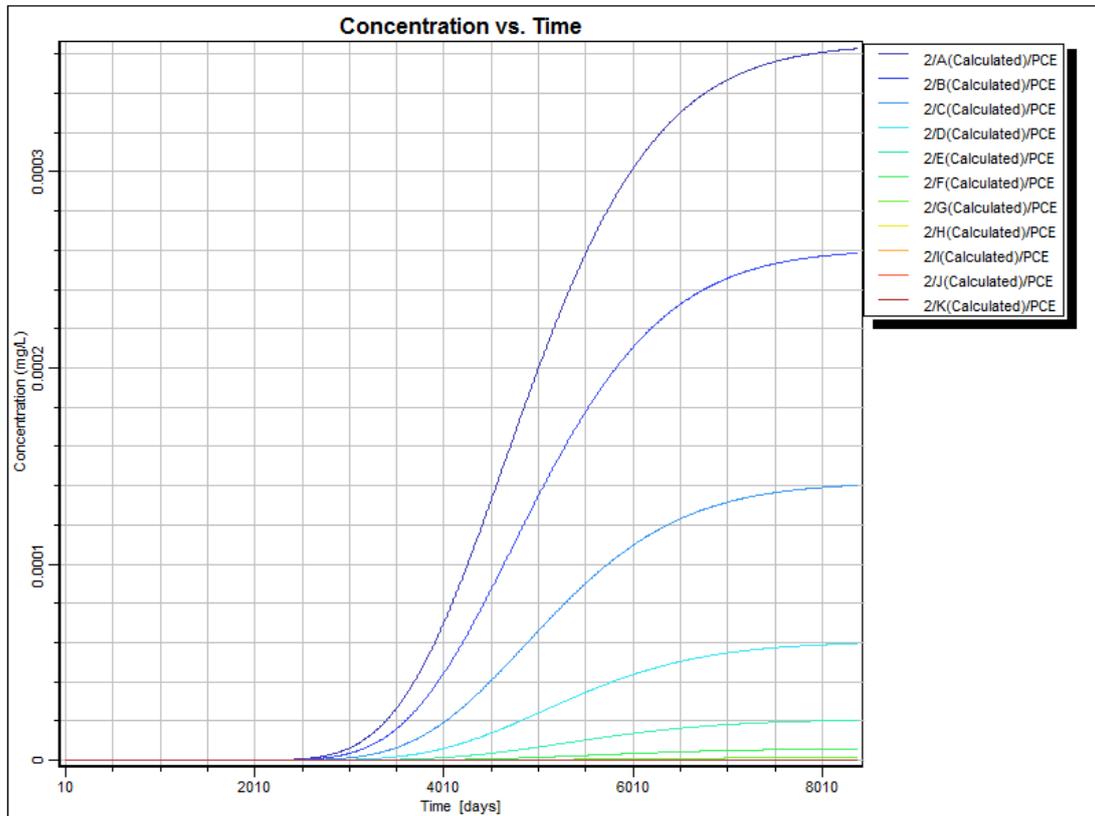


圖 A-22 降雨量為 1250 mm/year 二號觀測井 PCE 的濃度隨時間變化

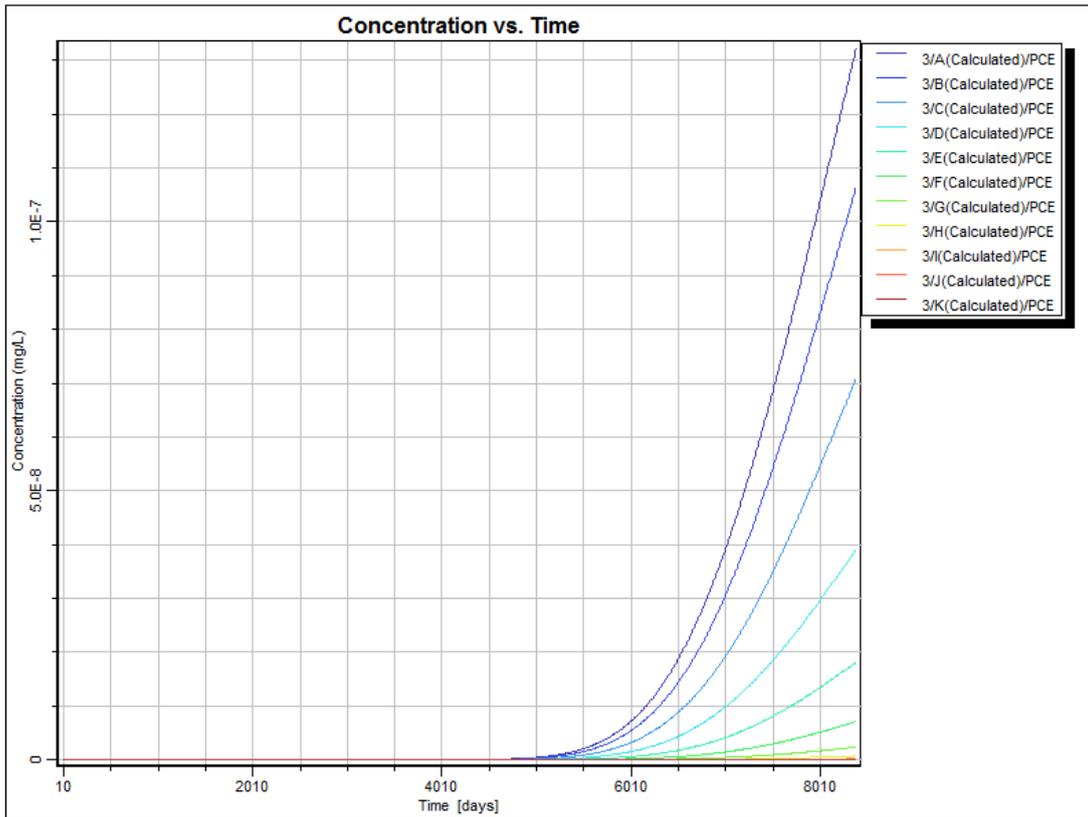


圖 A-23 降雨量為 1250 mm/year 三號觀測井 PCE 的濃度隨時間變化

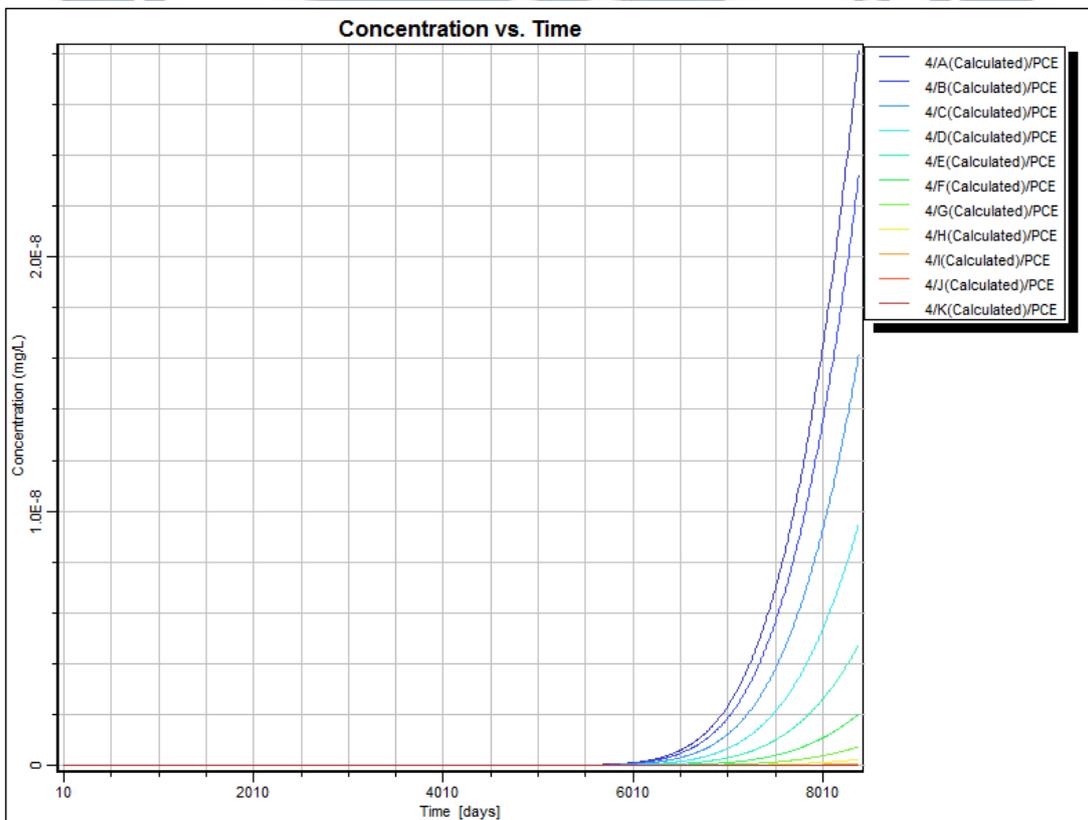


圖 A-24 降雨量為 1250 mm/year 四號觀測井 PCE 的濃度隨時間變化

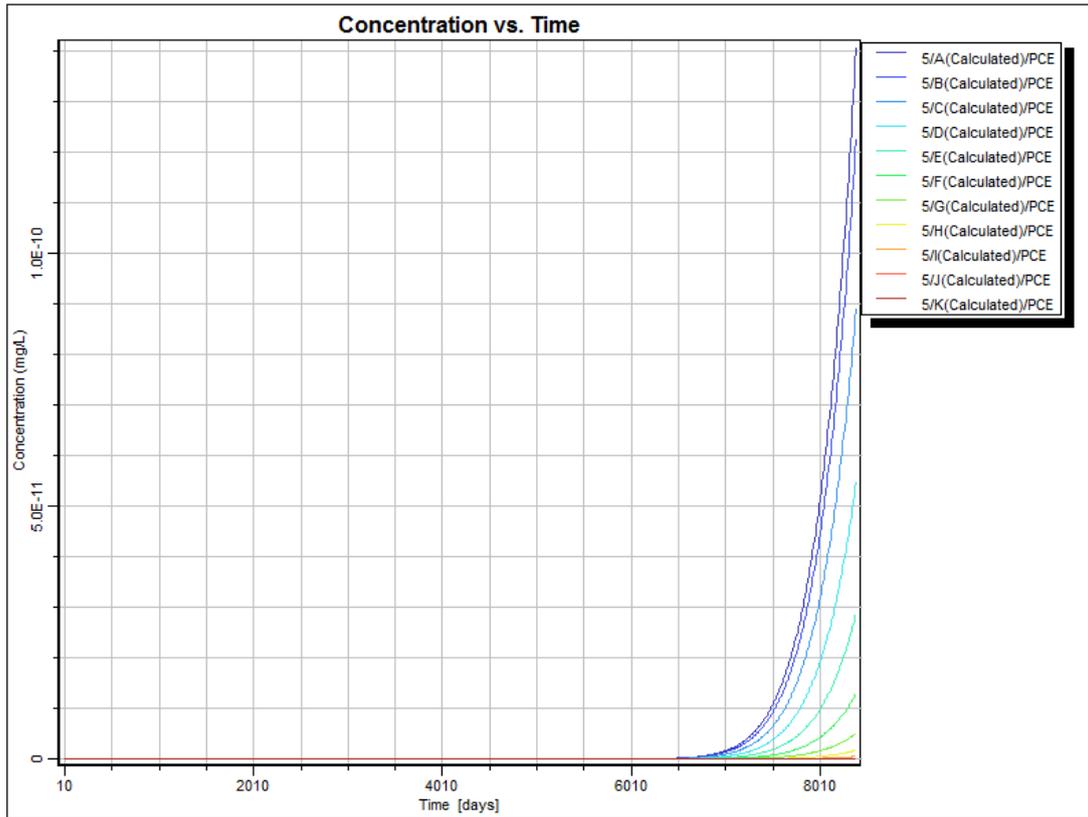


圖 A-25 降雨量為 1250 mm/year 五號觀測井 PCE 的濃度隨時間變化

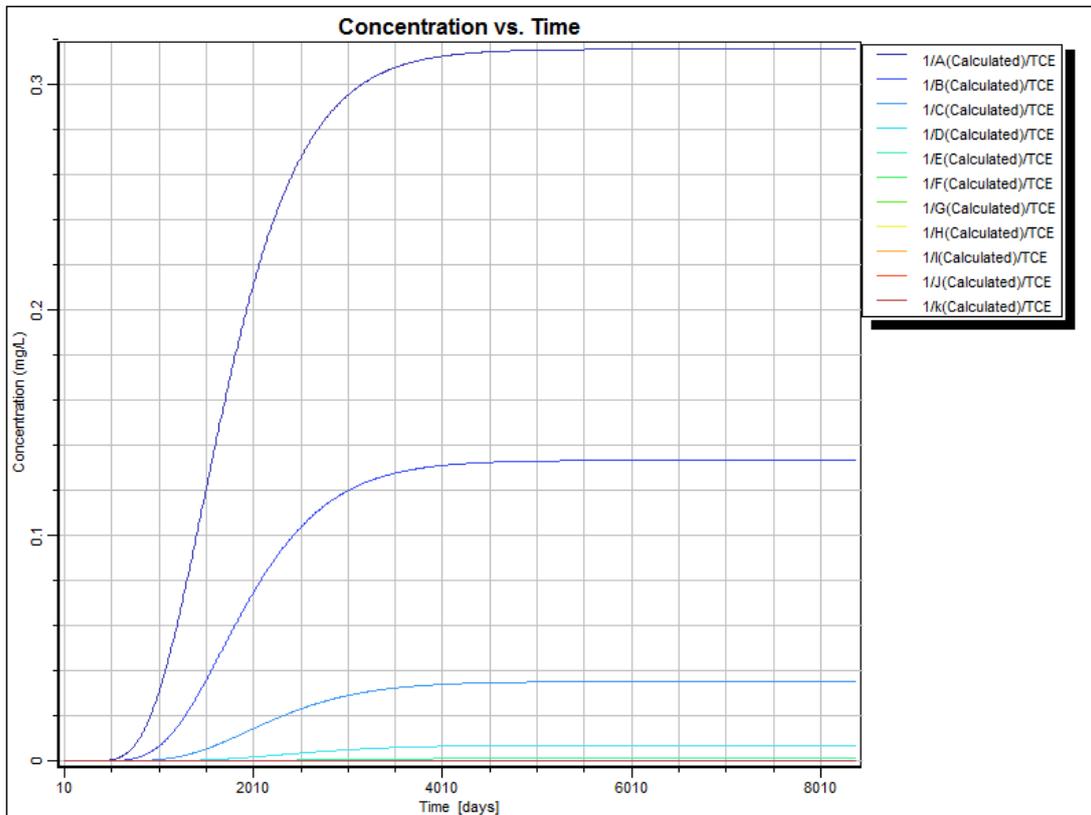


圖 A-26 降雨量為 1250 mm/year 一號觀測井 TCE 的濃度隨時間變化

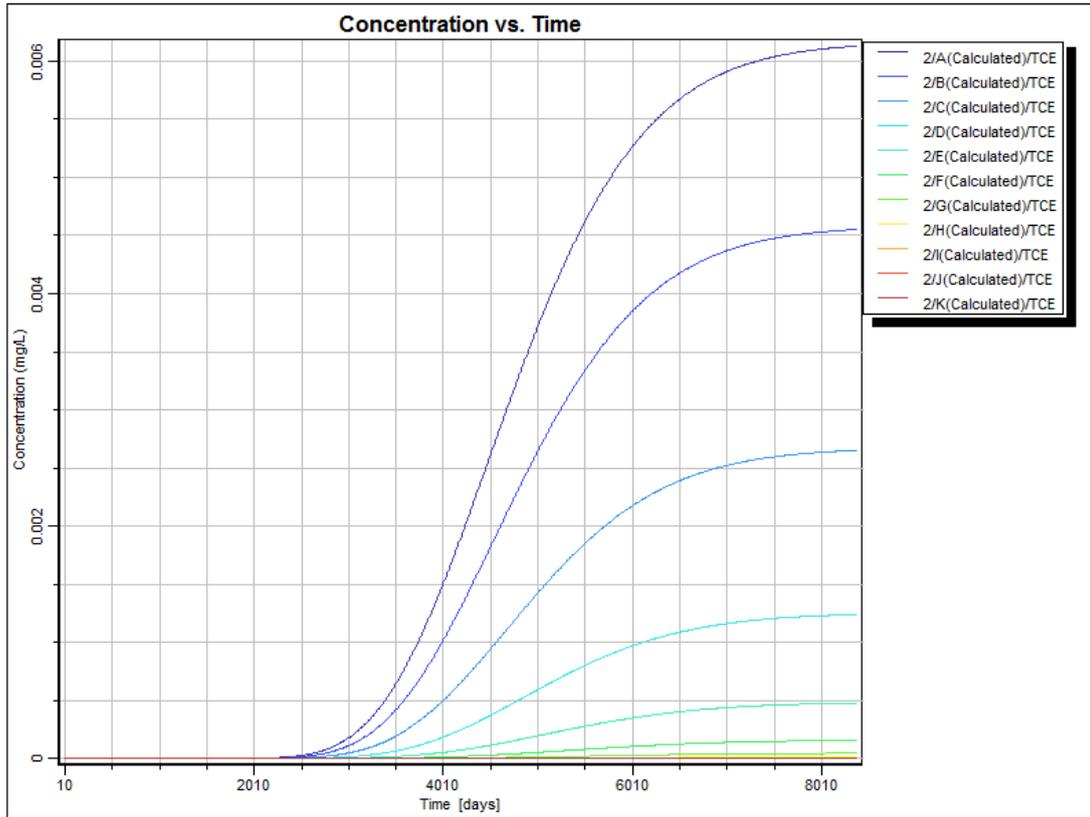


圖 A-27 降雨量為 1250 mm/year 二號觀測井 TCE 的濃度隨時間變化

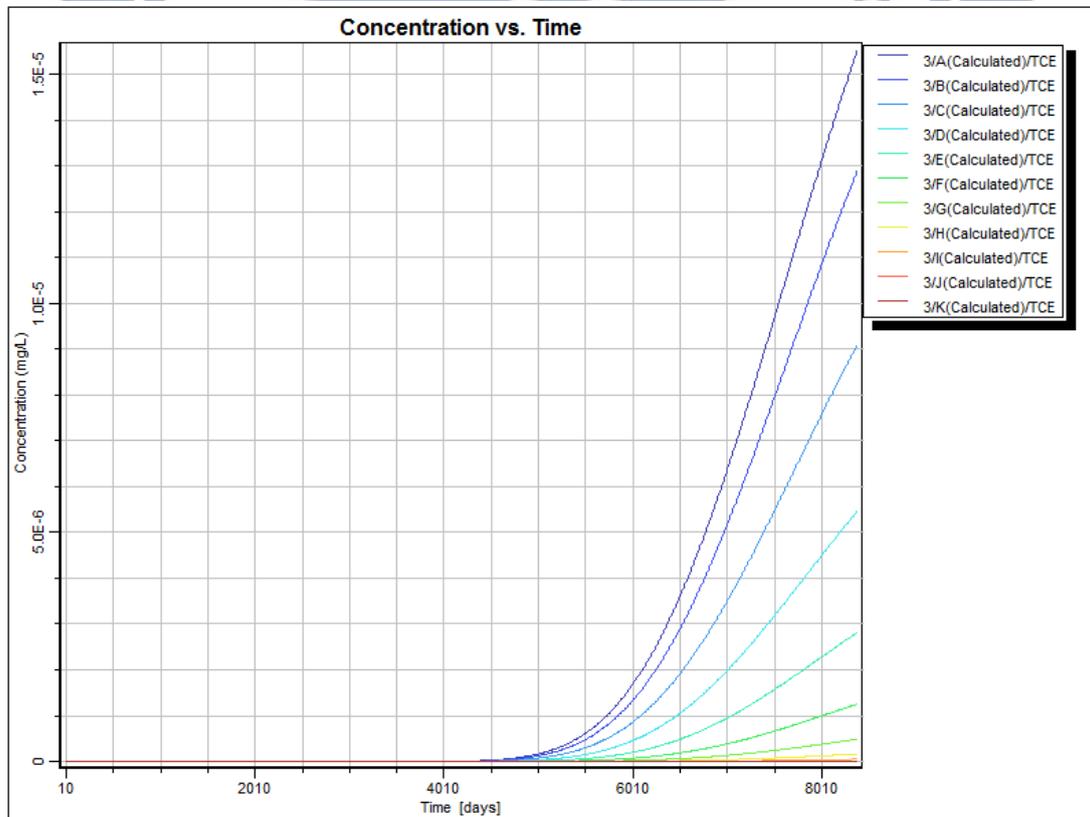


圖 A-28 降雨量為 1250 mm/year 三號觀測井 TCE 的濃度隨時間變化

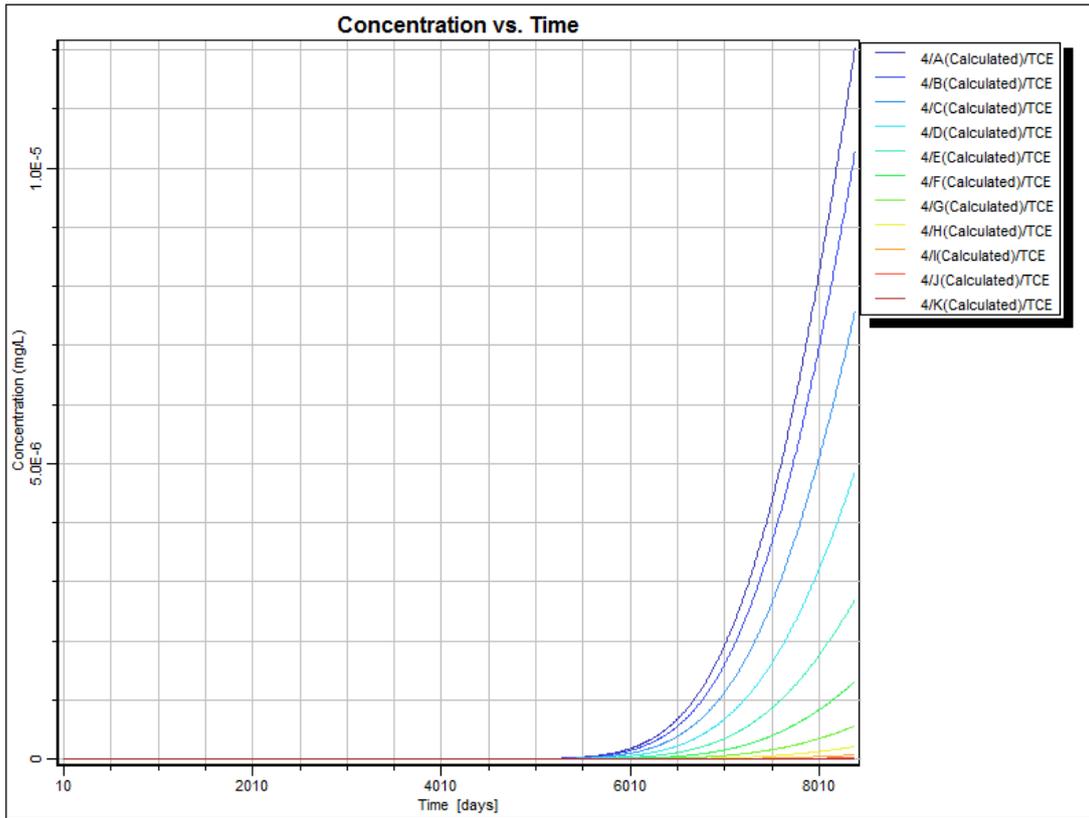


圖 A-29 降雨量為 1250 mm/year 四號觀測井 TCE 的濃度隨時間變化

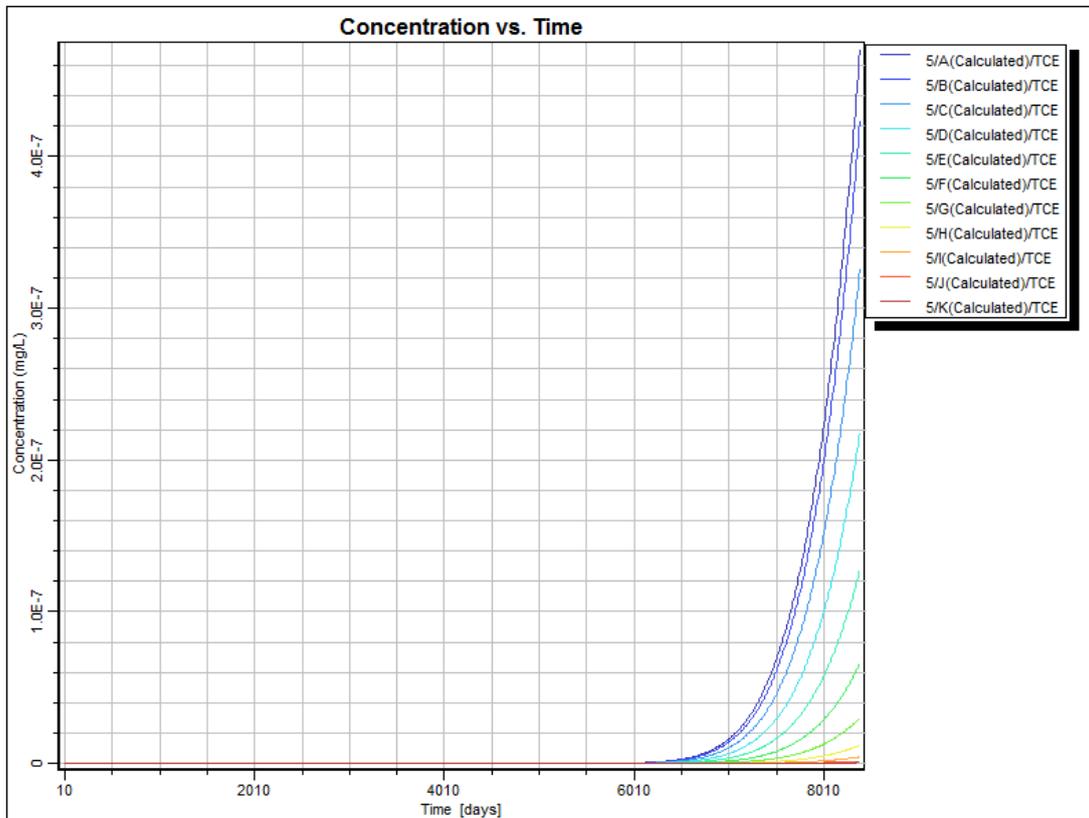


圖 A-30 降雨量為 1250 mm/year 五號觀測井 TCE 的濃度隨時間變化

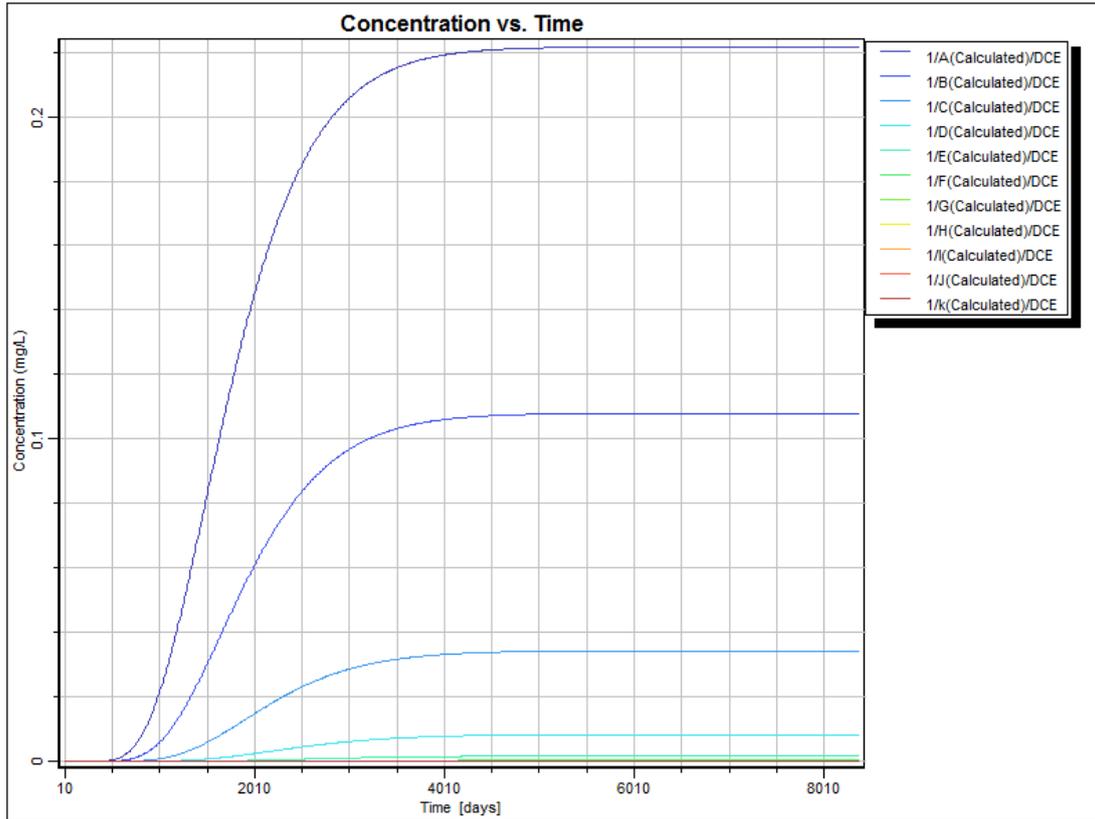


圖 A-31 降雨量為 1250 mm/year 一號觀測井 TCE 的濃度隨時間變化

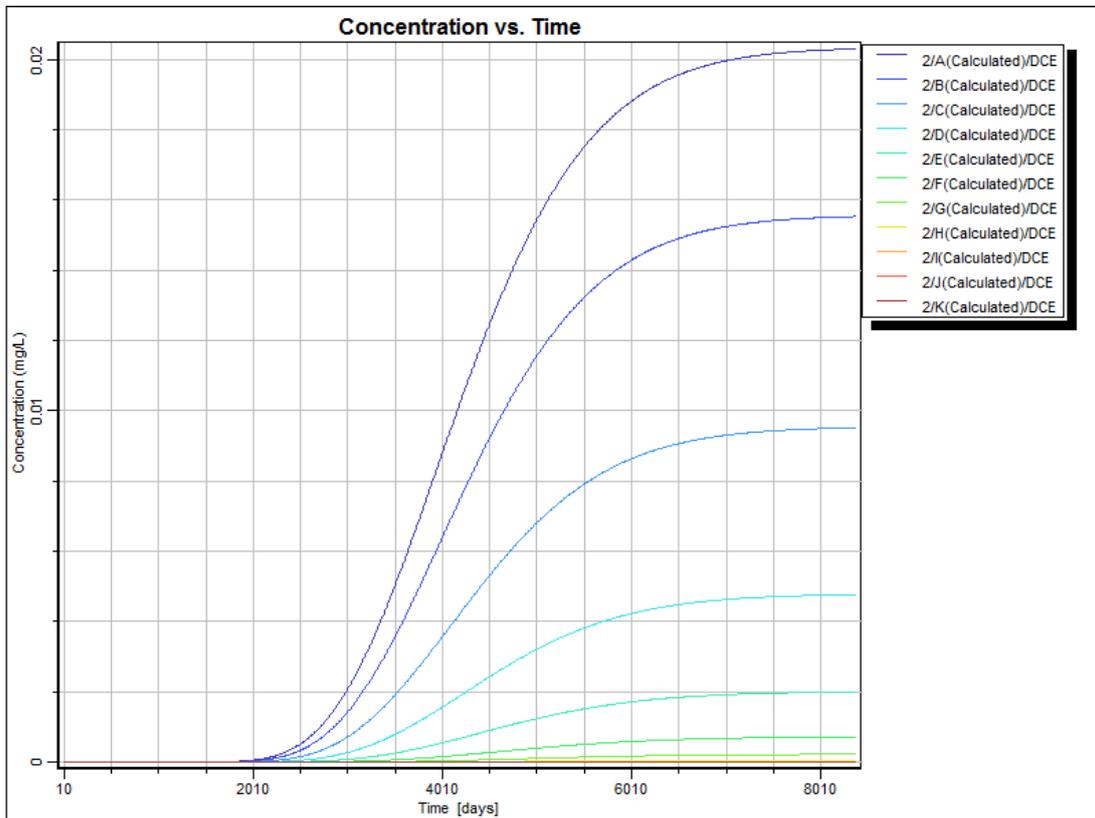


圖 A-32 降雨量為 1250 mm/year 二號觀測井 TCE 的濃度隨時間變化

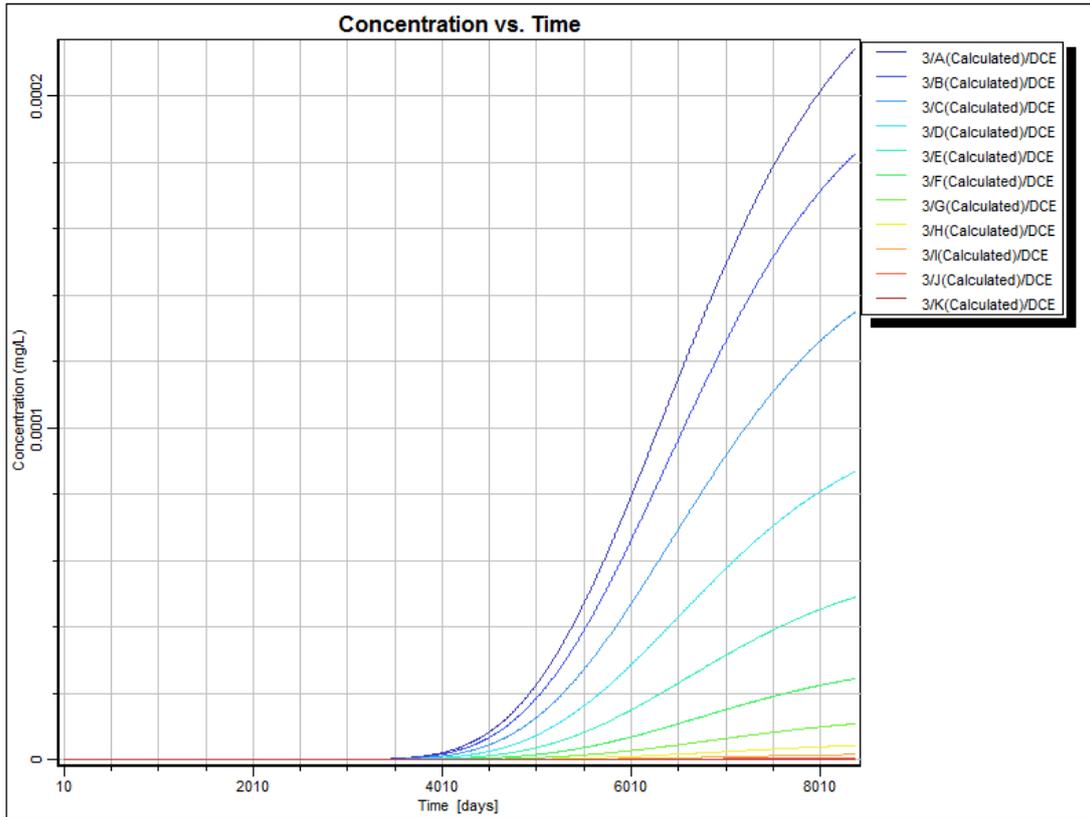


圖 A-33 降雨量為 1250 mm/year 三號觀測井 TCE 的濃度隨時間變化

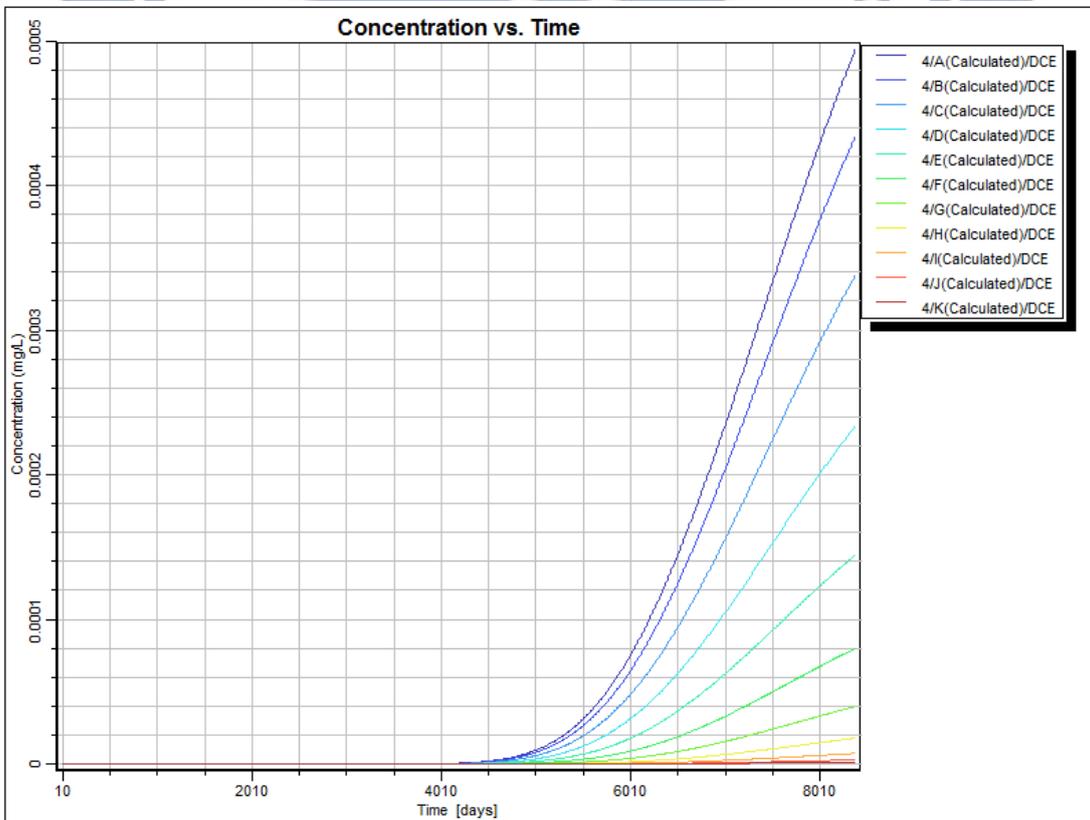


圖 A-34 降雨量為 1250 mm/year 四號觀測井 TCE 的濃度隨時間變化

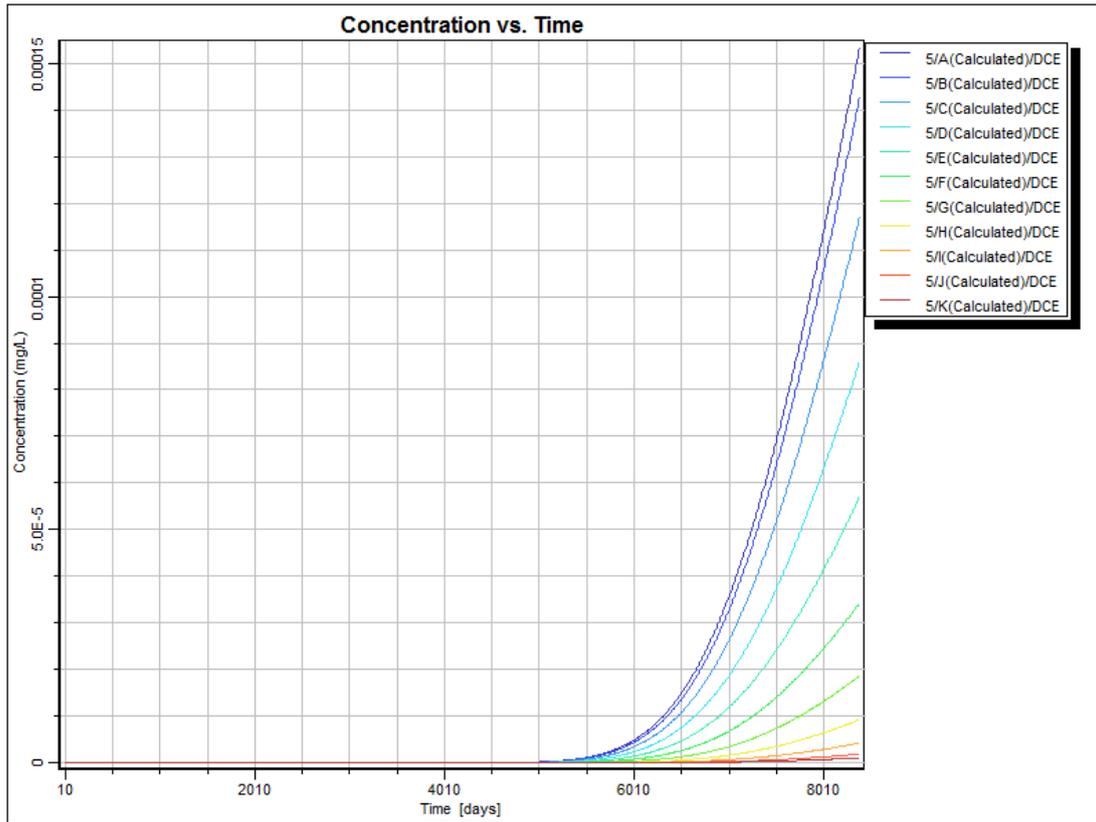


圖 A-35 降雨量為 1250 mm/year 五號觀測井 TCE 的濃度隨時間變化

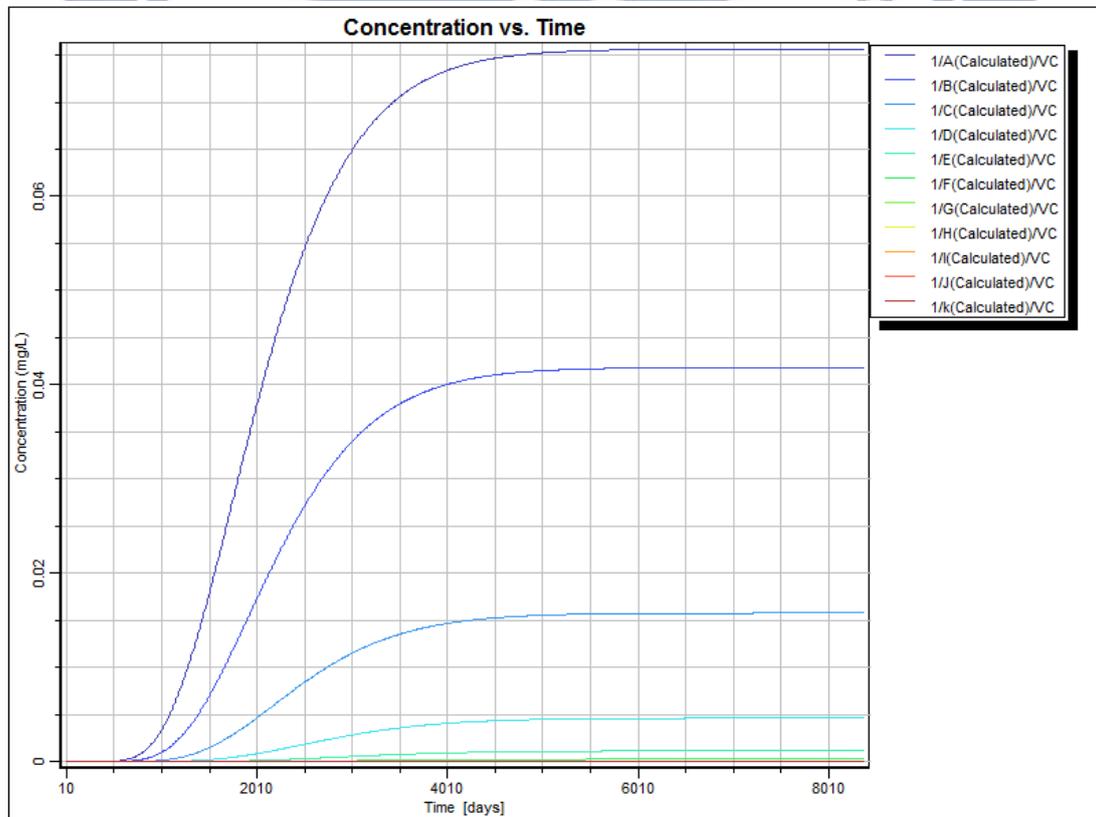


圖 A-36 降雨量為 1250 mm/year 一號觀測井 VC 的濃度隨時間變化

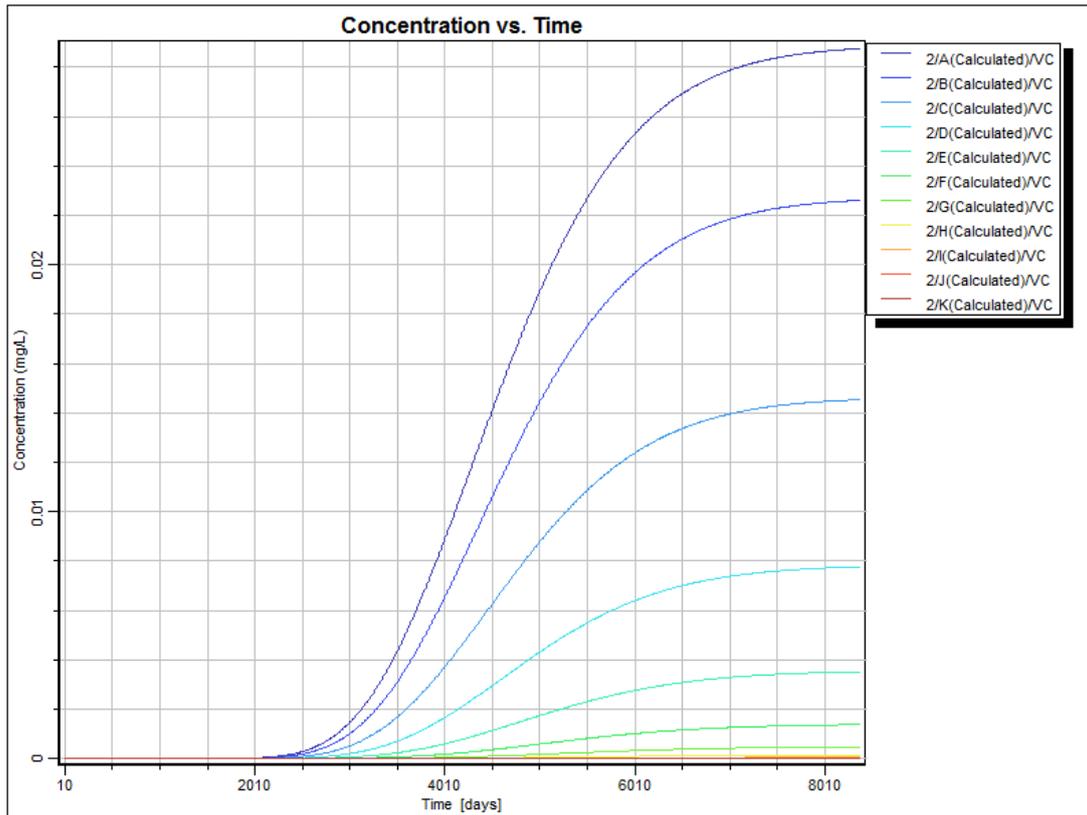


圖 A-37 降雨量為 1250 mm/year 二號觀測井 VC 的濃度隨時間變化

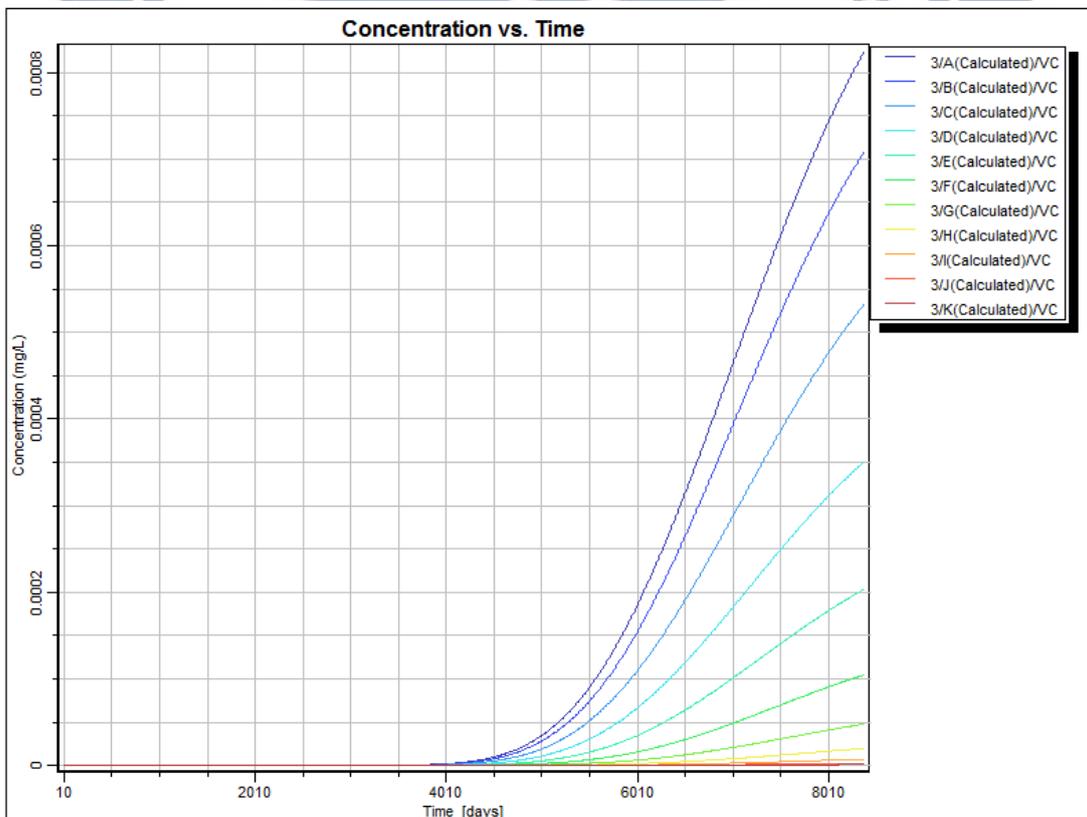


圖 A-38 降雨量為 1250 mm/year 三號觀測井 VC 的濃度隨時間變化

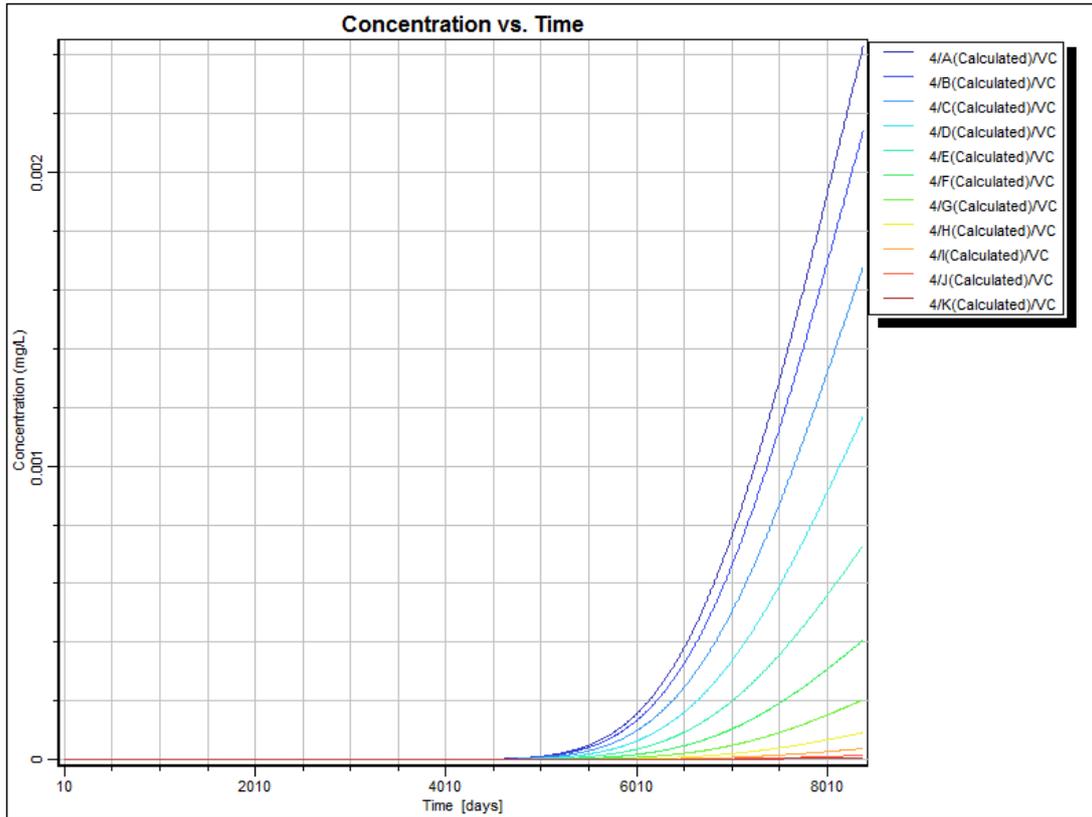


圖 A-39 降雨量為 1250 mm/year 四號觀測井 VC 的濃度隨時間變化

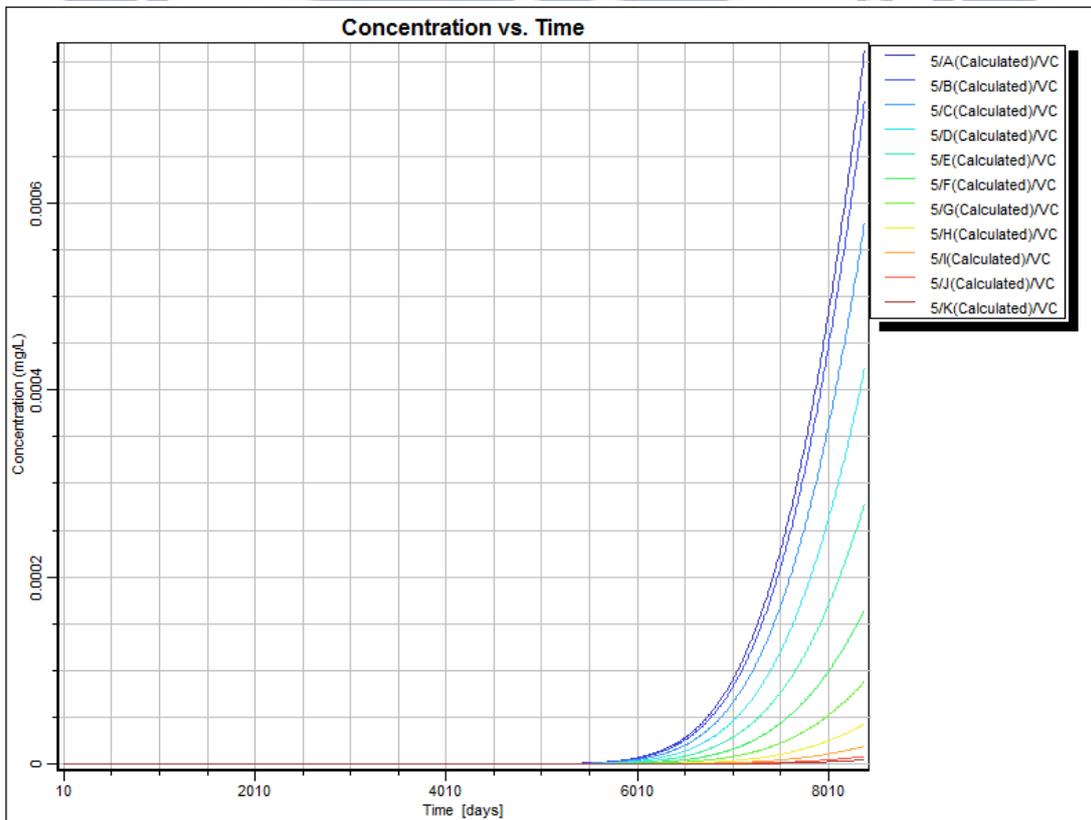


圖 A-40 降雨量為 1250 mm/year 五號觀測井 VC 的濃度隨時間變化

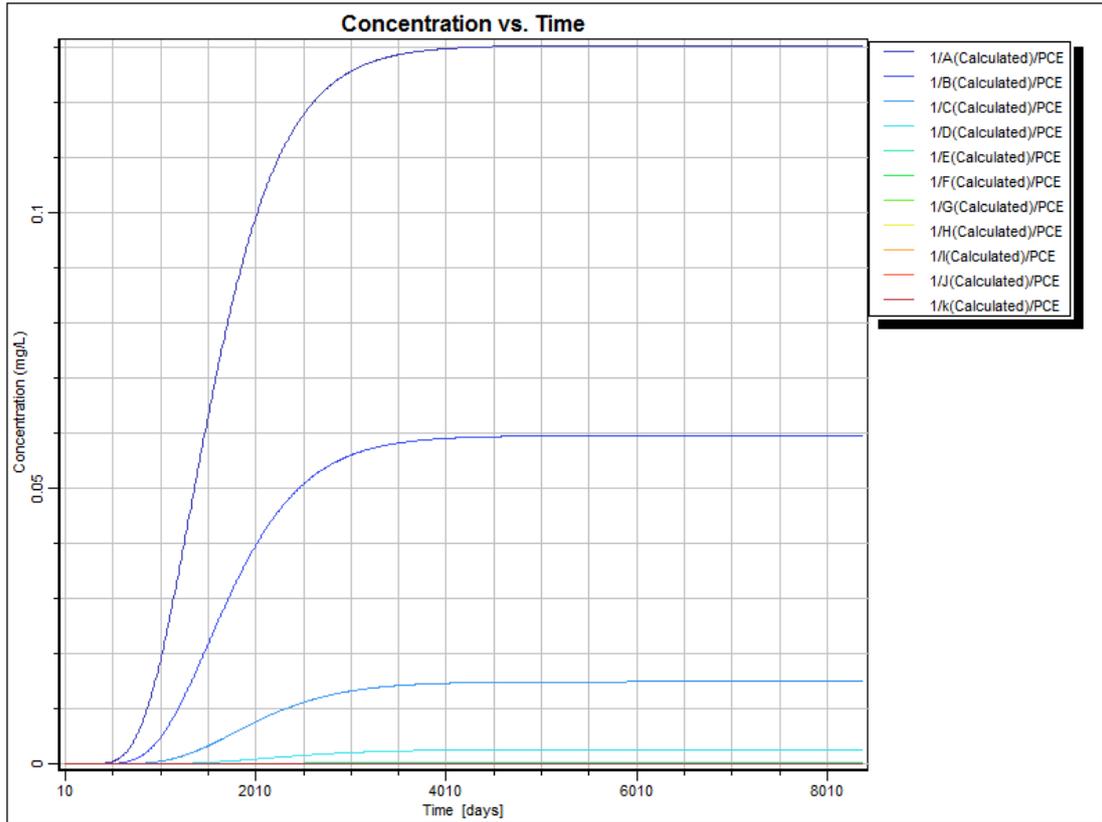


圖 A-41 降雨量為 5000 mm/year 一號觀測井 PCE 的濃度隨時間變化

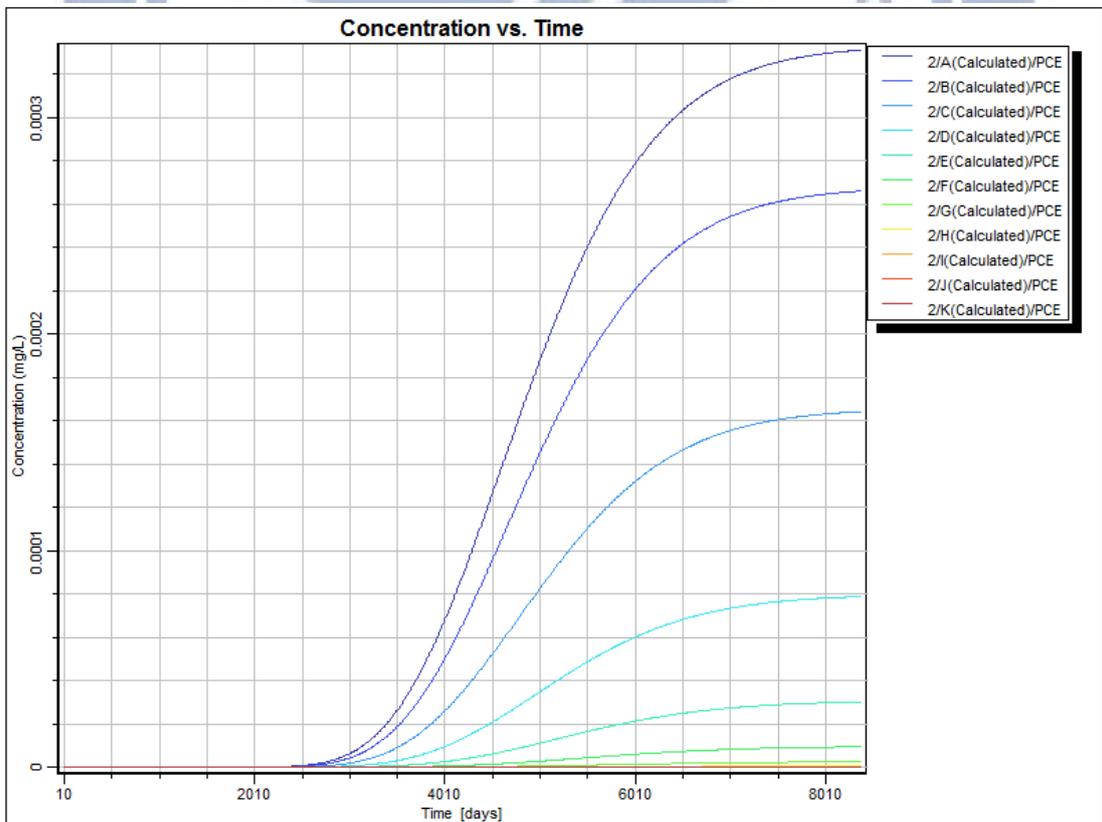


圖 A-42 降雨量為 5000 mm/year 二號觀測井 PCE 的濃度隨時間變化

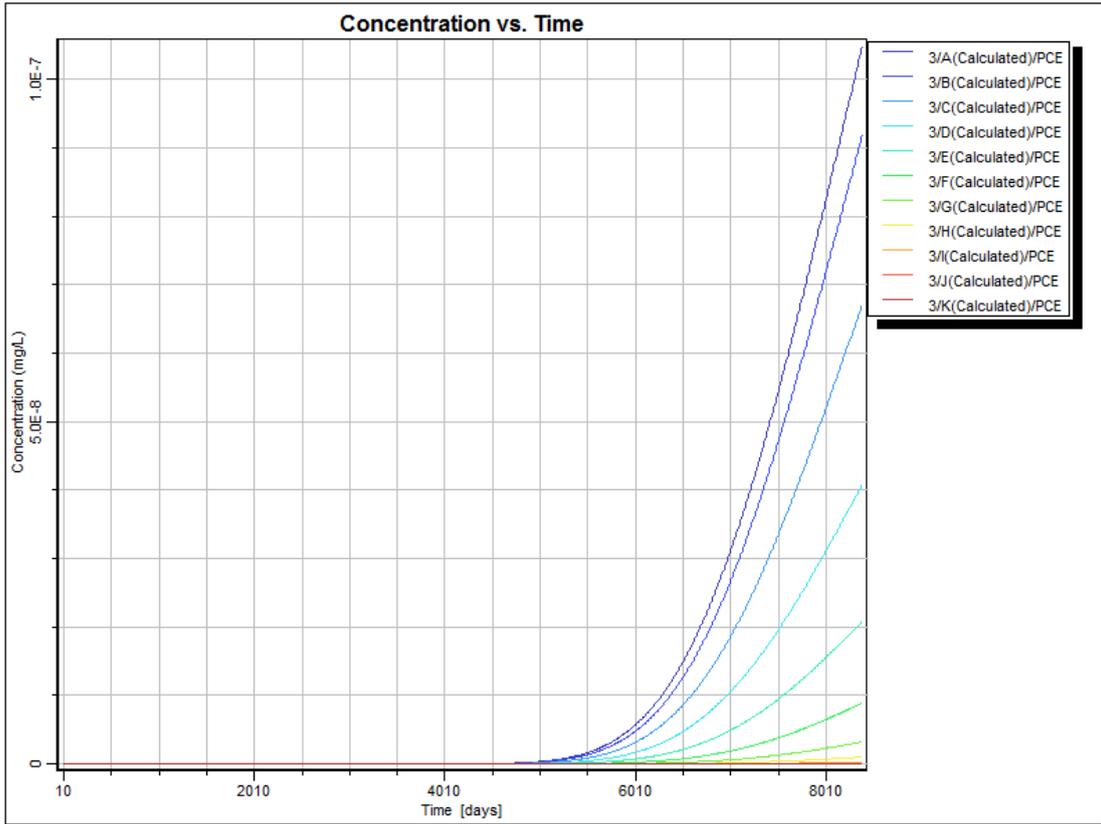


圖 A-43 降雨量為 5000 mm/year 三號觀測井 PCE 的濃度隨時間變化

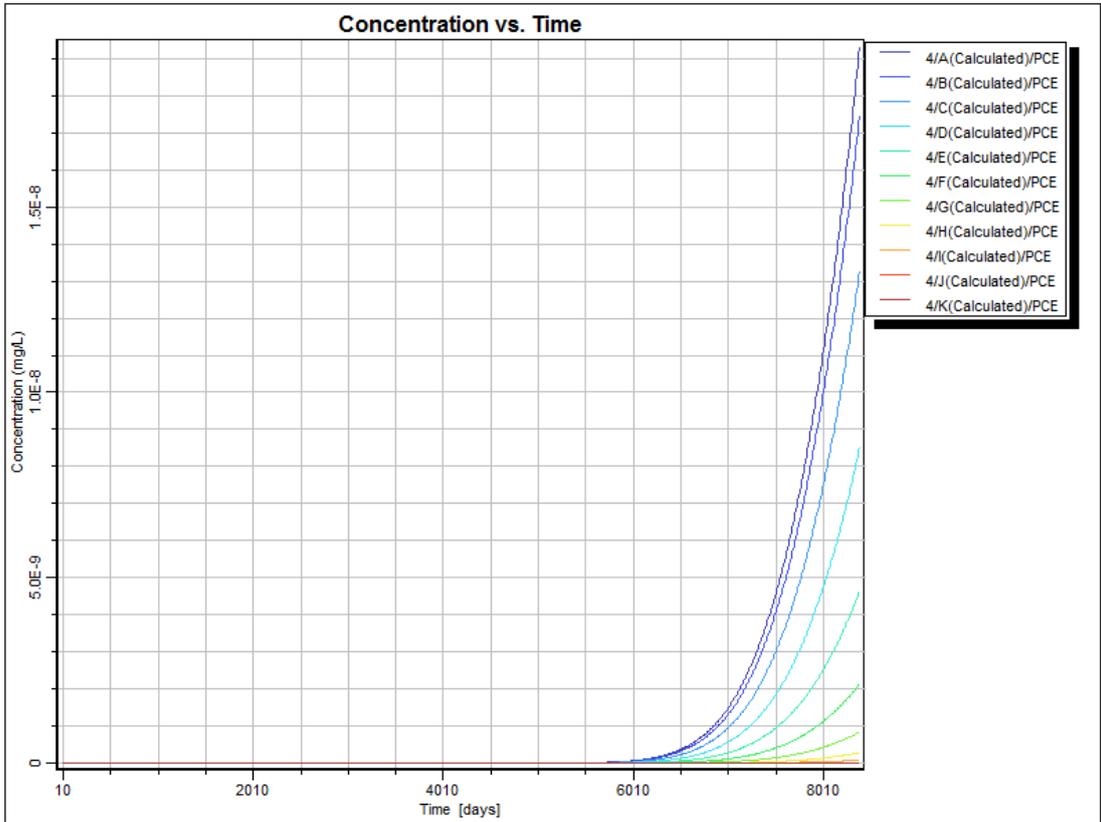


圖 A-44 降雨量為 5000 mm/year 四號觀測井 PCE 的濃度隨時間變化

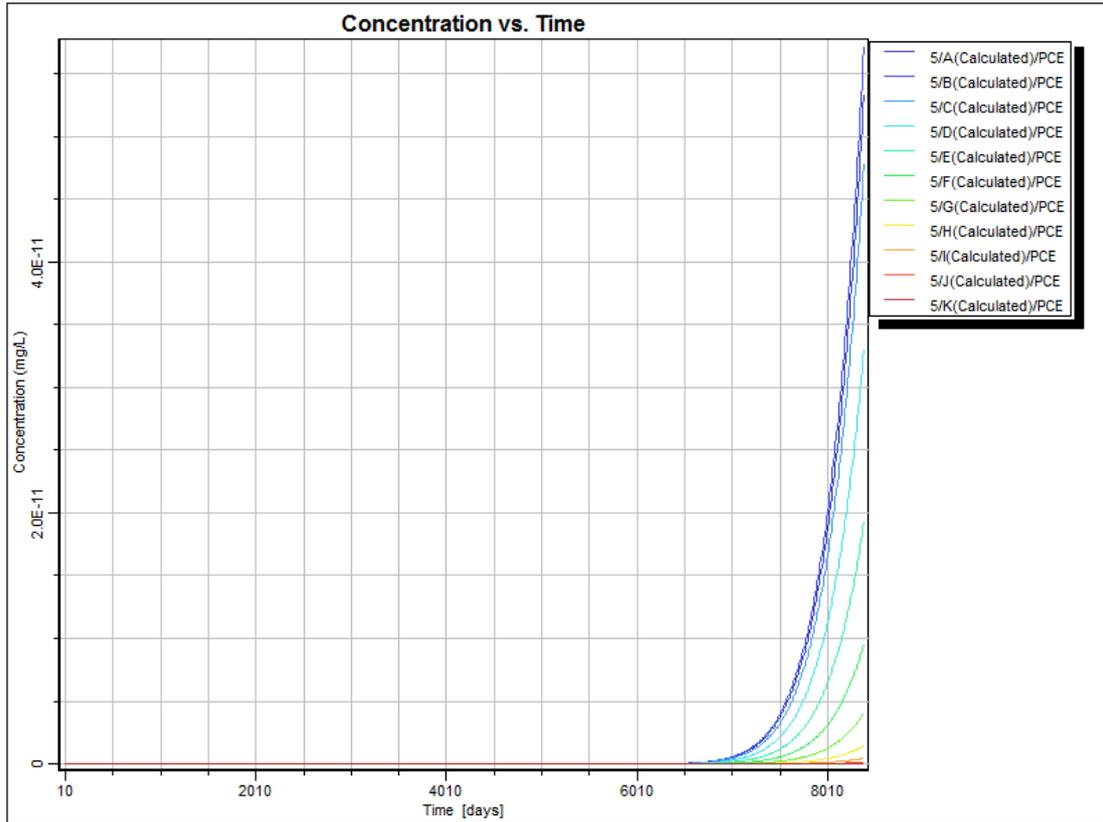


圖 A-45 降雨量為 5000 mm/year 五號觀測井 PCE 的濃度隨時間變化

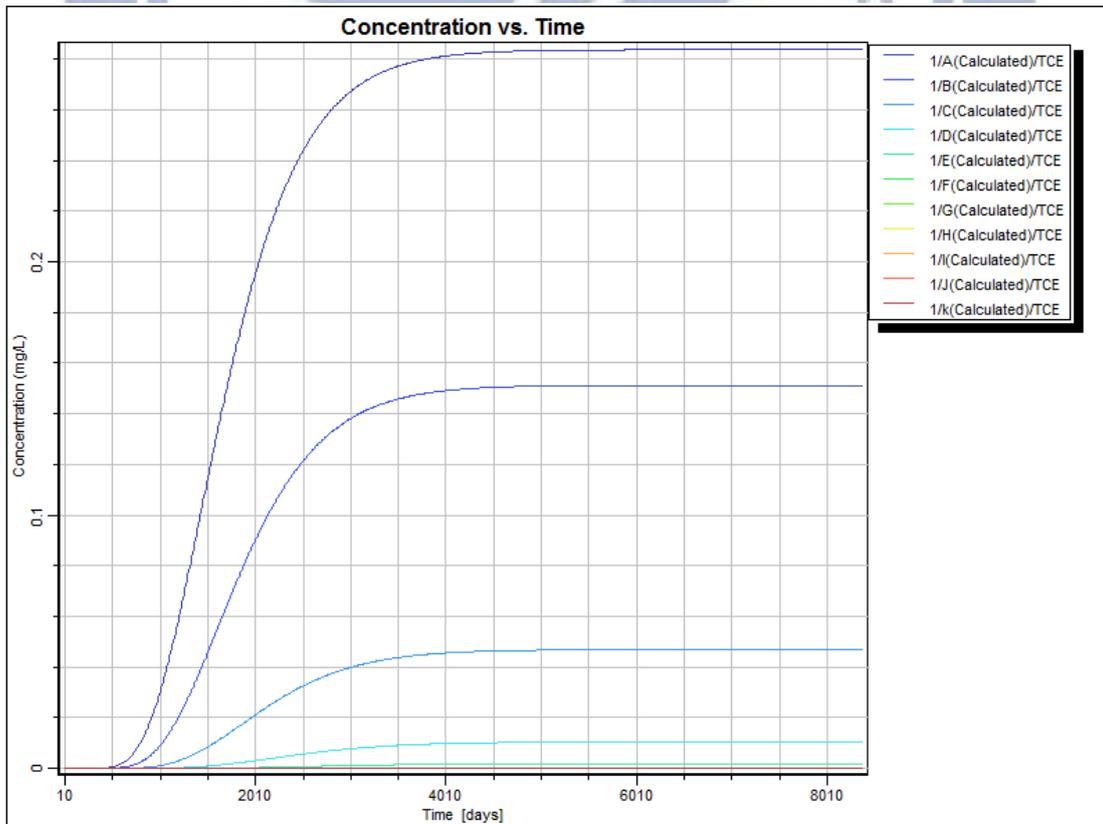


圖 A-46 降雨量為 5000 mm/year 一號觀測井 TCE 的濃度隨時間變化

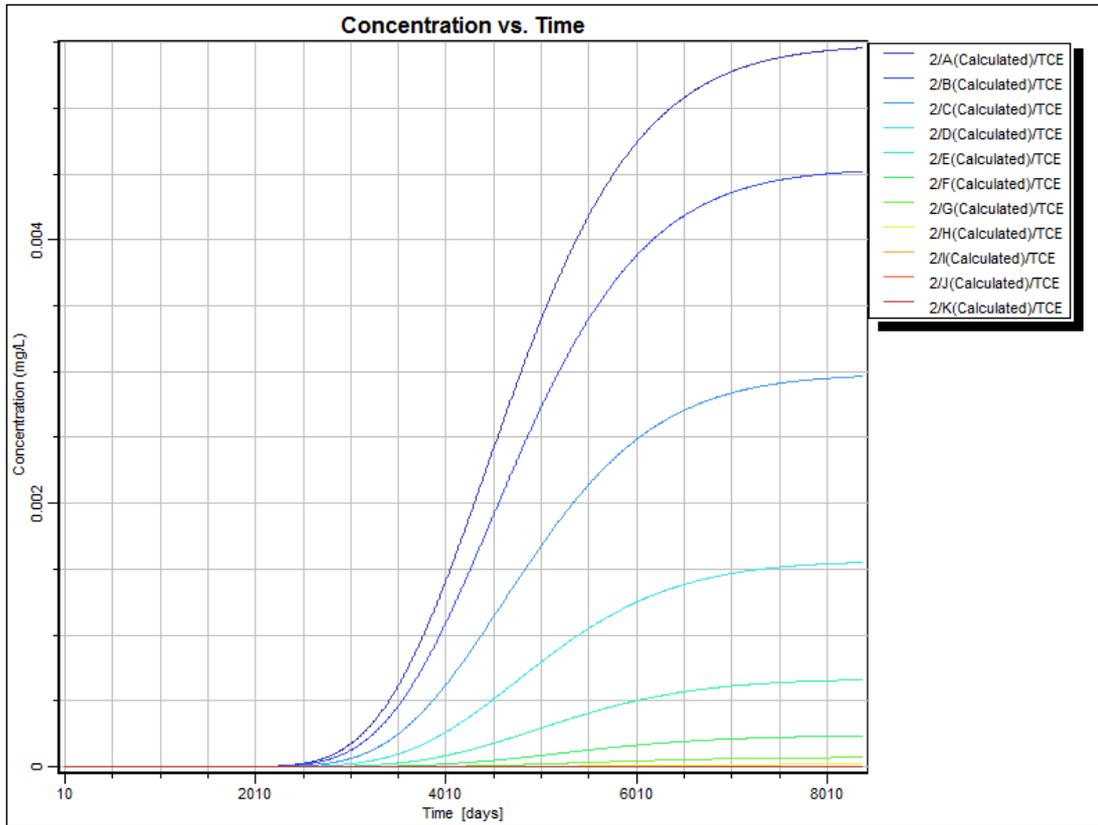


圖 A-47 降雨量為 5000 mm/year 二號觀測井 TCE 的濃度隨時間變化

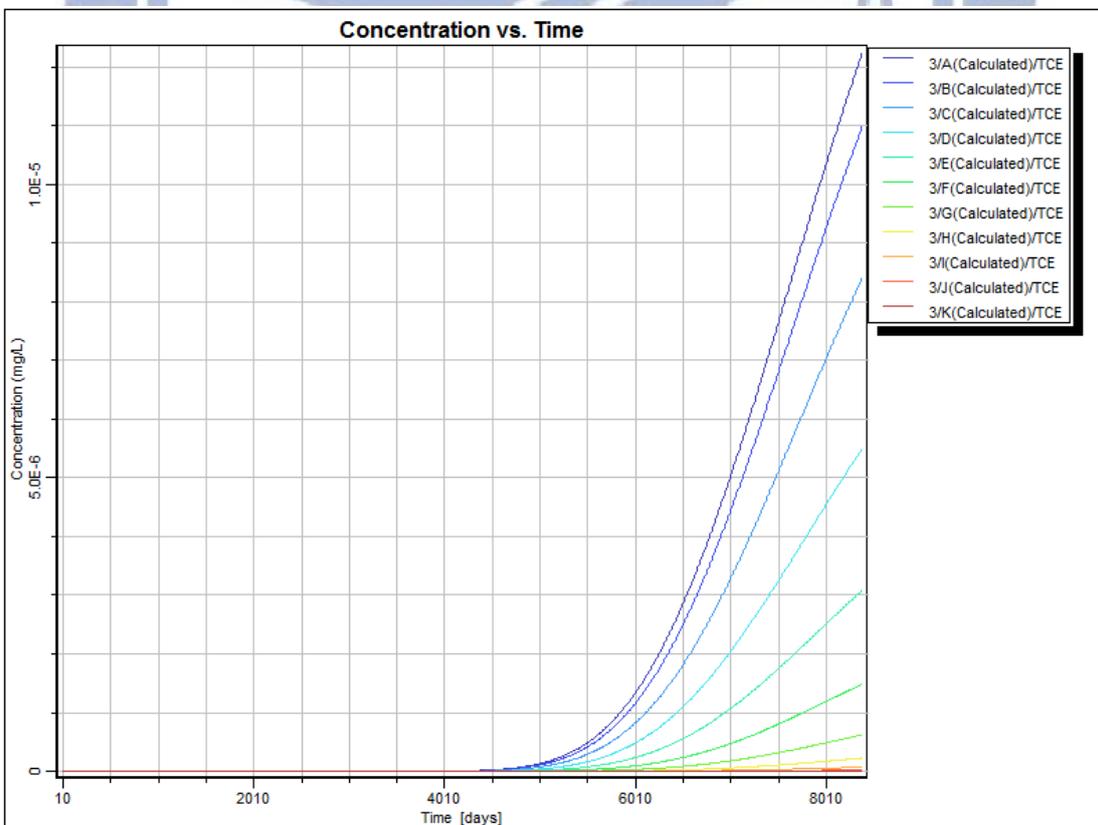


圖 A-48 降雨量為 5000 mm/year 三號觀測井 TCE 的濃度隨時間變化

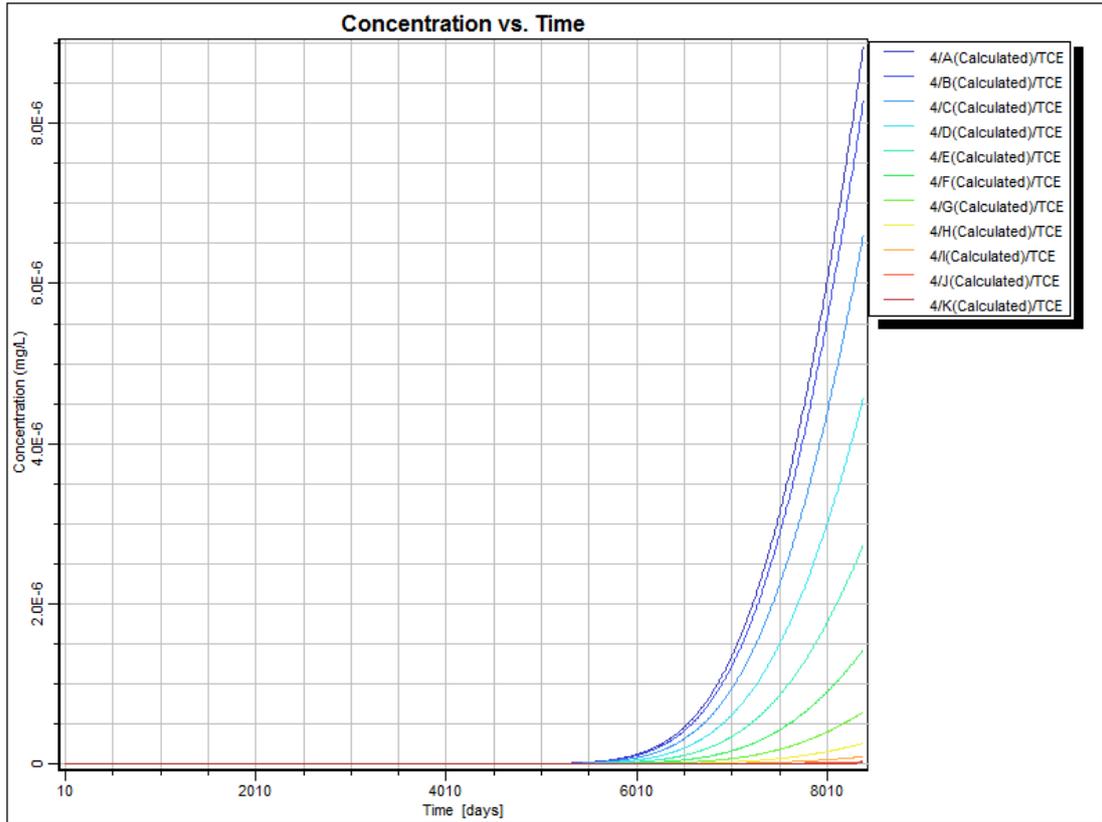


圖 A-49 降雨量為 5000 mm/year 四號觀測井 TCE 的濃度隨時間變化

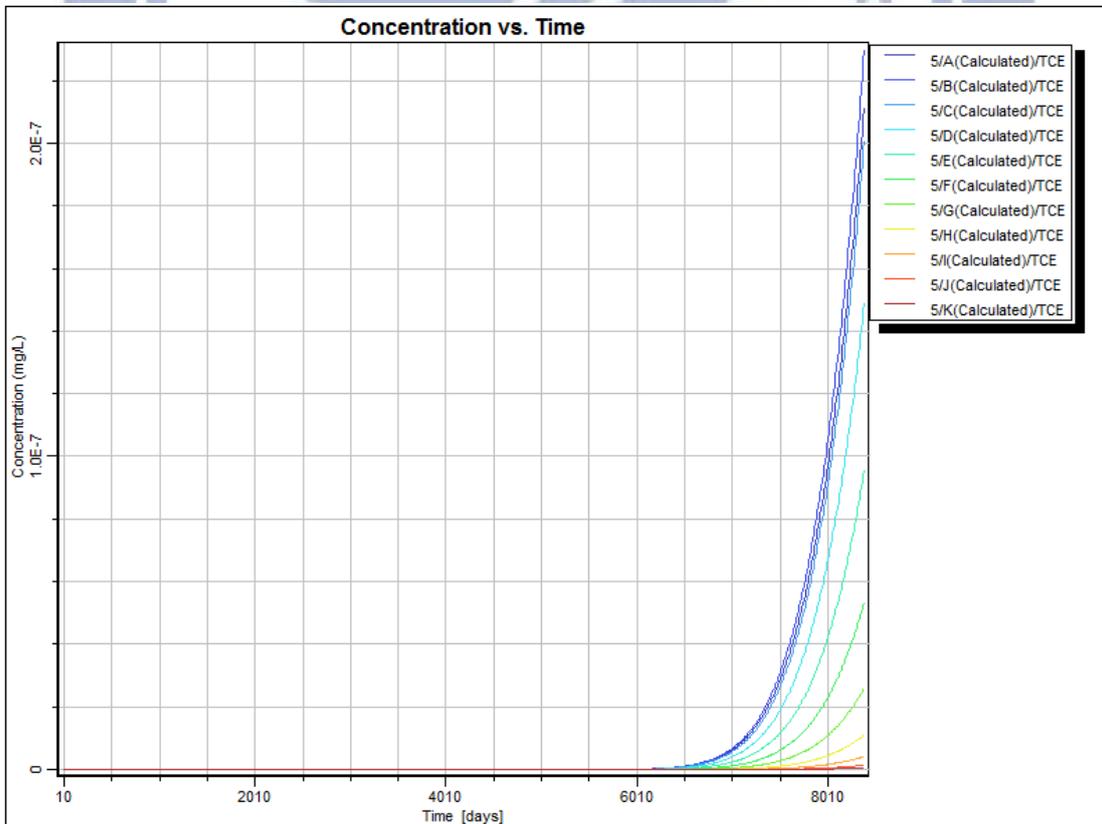


圖 A-50 降雨量為 5000 mm/year 五號觀測井 TCE 的濃度隨時間變化

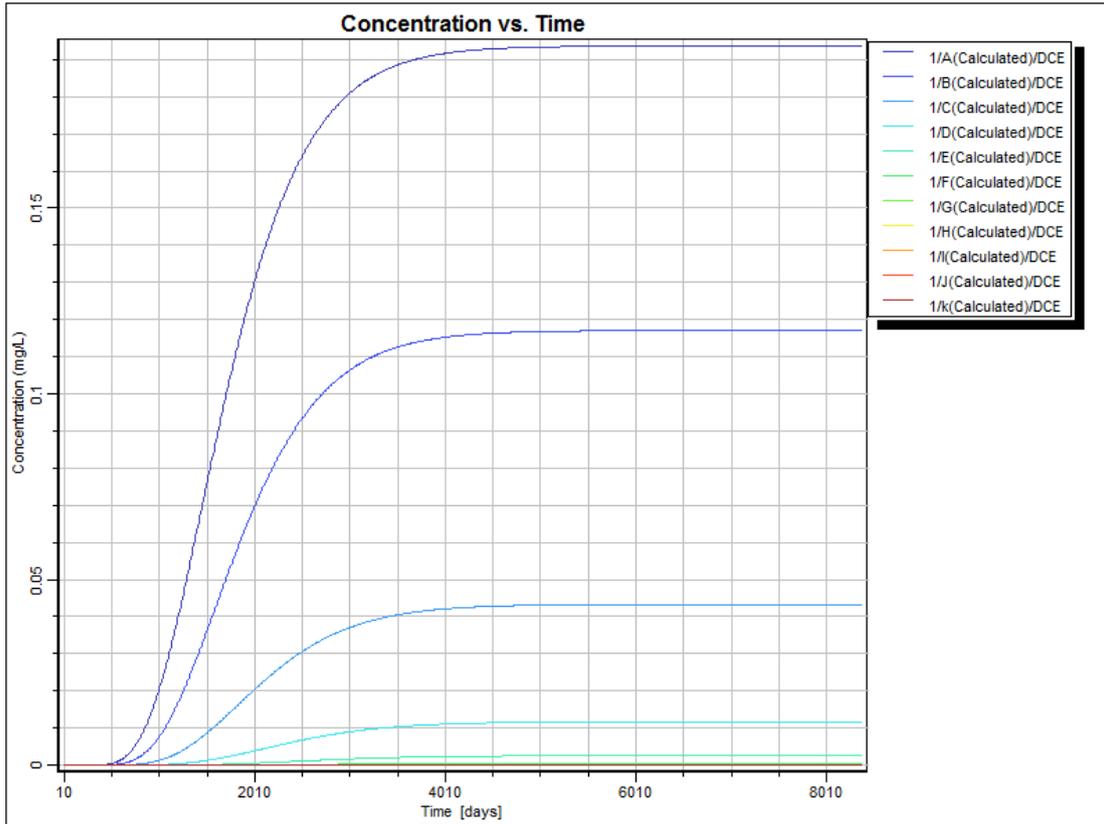


圖 A-51 降雨量為 5000 mm/year 一號觀測井 DCE 的濃度隨時間變化

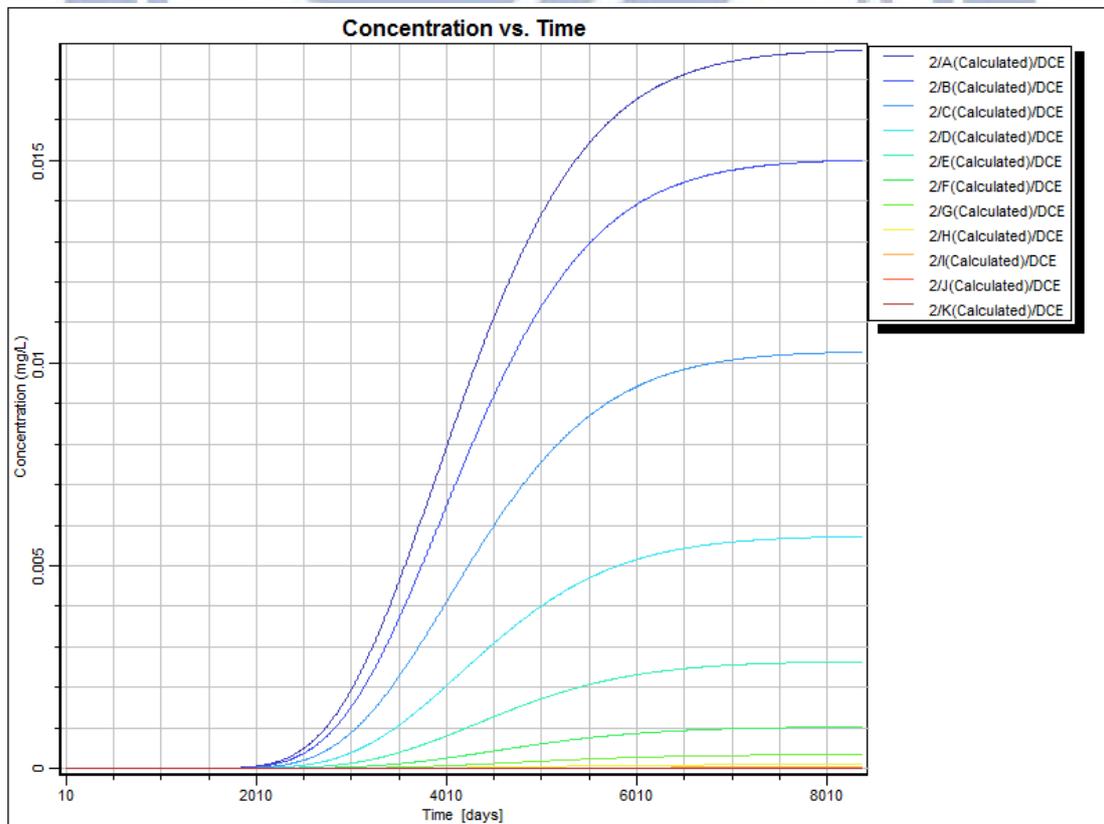


圖 A-52 降雨量為 5000 mm/year 二號觀測井 DCE 的濃度隨時間變化

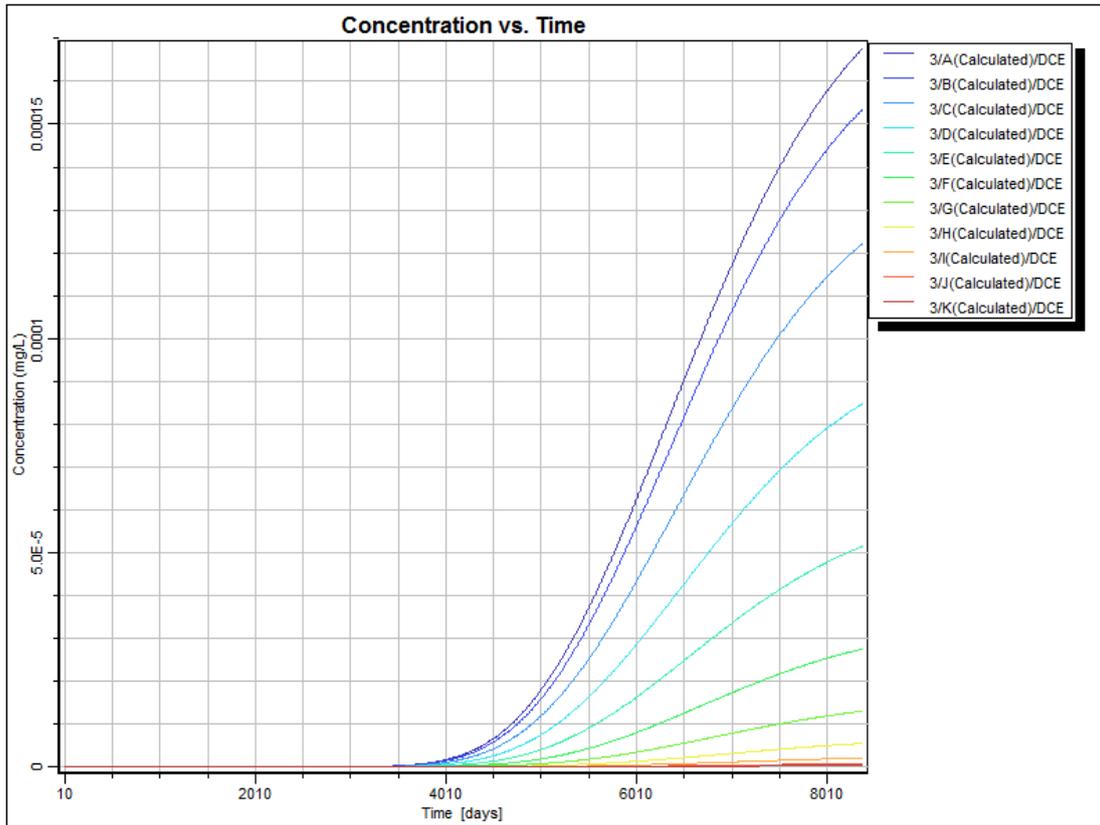


圖 A-53 降雨量為 5000 mm/year 三號觀測井 DCE 的濃度隨時間變化

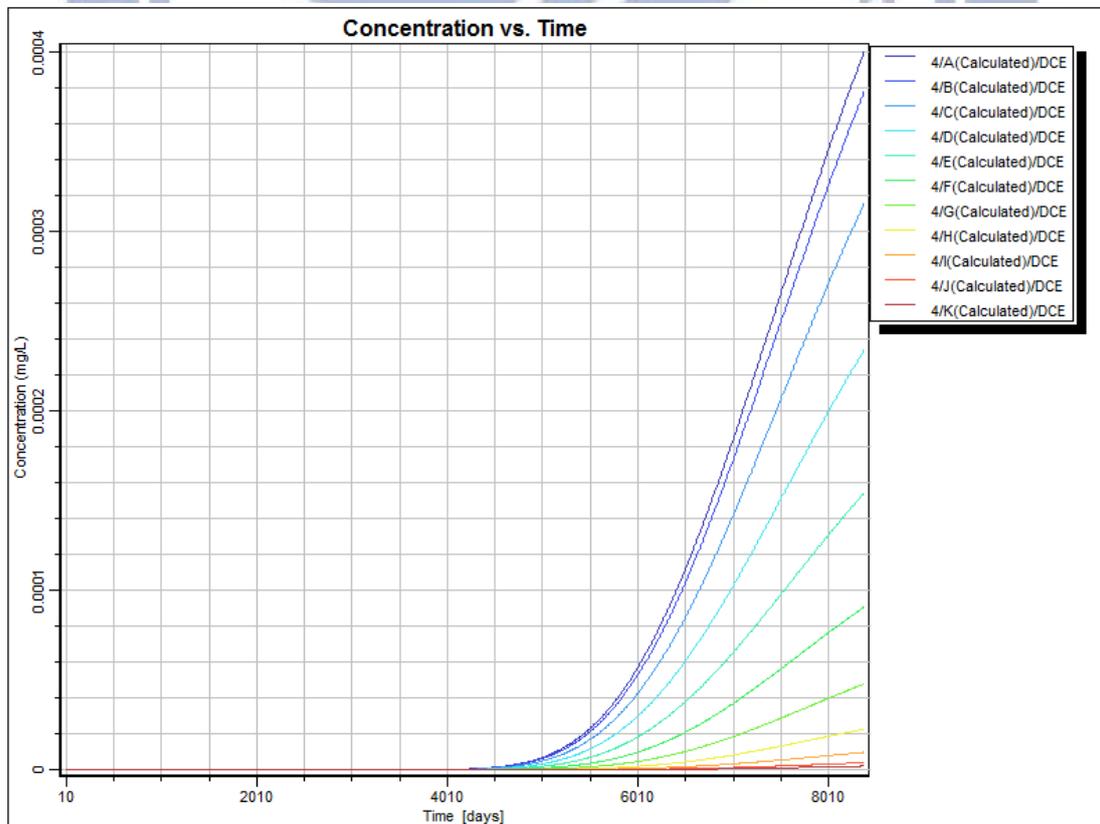


圖 A-54 降雨量為 5000 mm/year 四號觀測井 DCE 的濃度隨時間變化

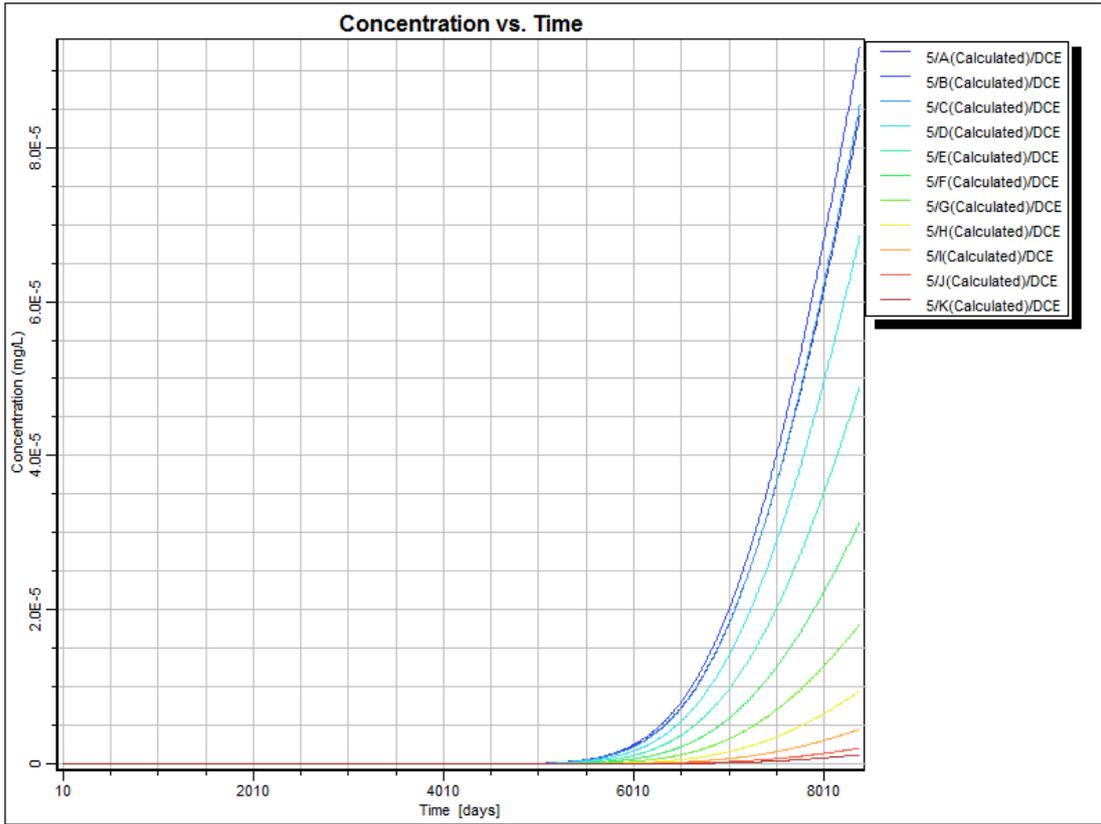


圖 A-55 降雨量為 5000 mm/year 五號觀測井 DCE 的濃度隨時間變化

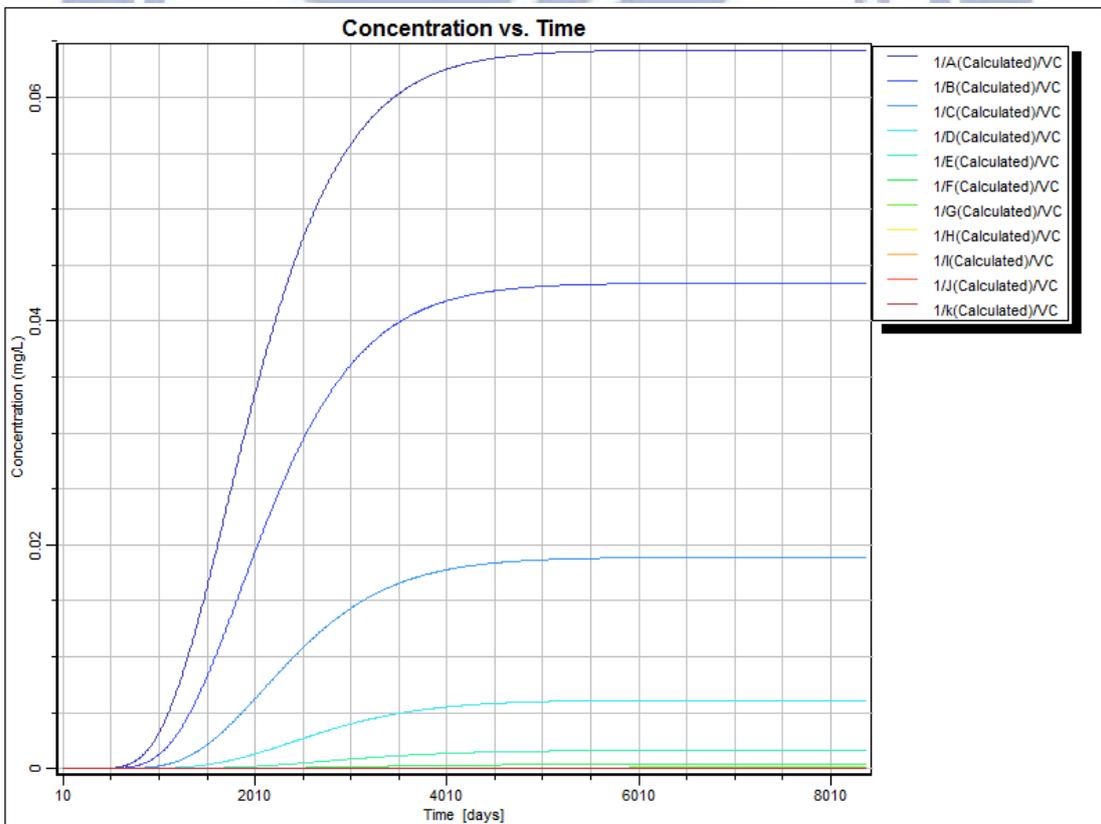


圖 A-56 降雨量為 5000 mm/year 一號觀測井 VC 的濃度隨時間變化

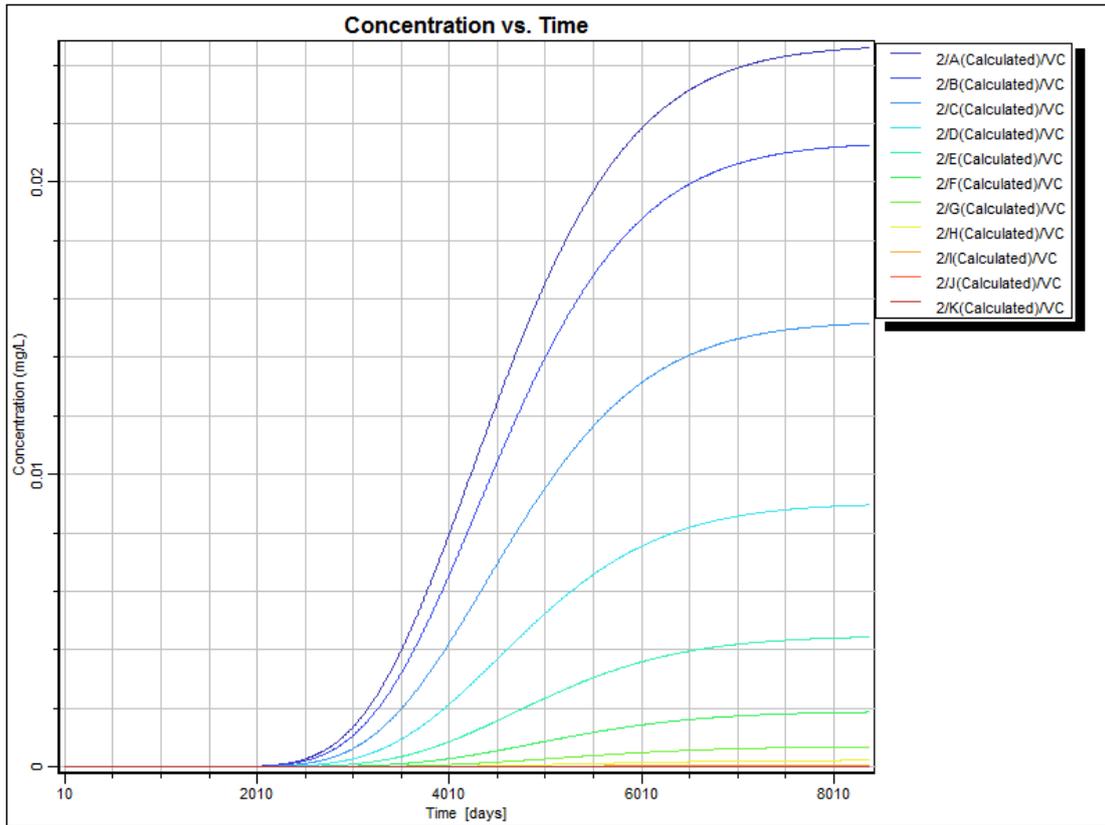


圖 A-57 降雨量為 5000 mm/year 二號觀測井 VC 的濃度隨時間變化

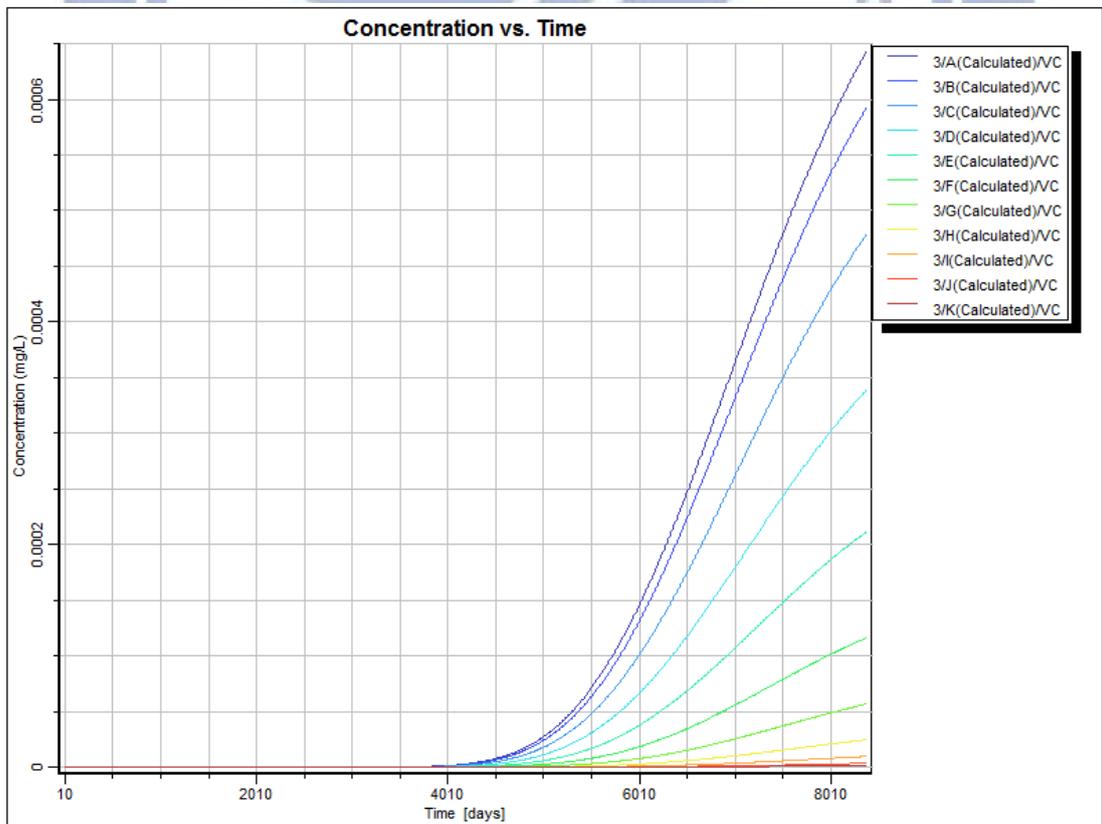


圖 A-58 降雨量為 5000 mm/year 三號觀測井 VC 的濃度隨時間變化

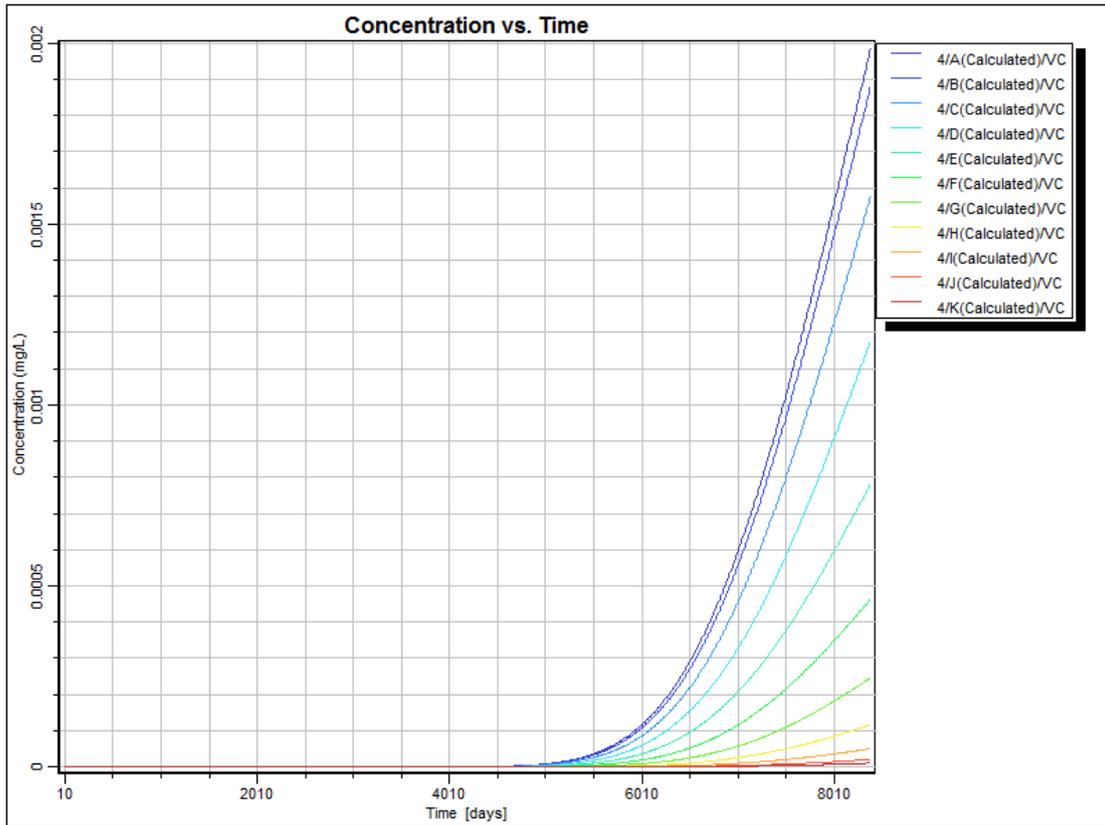


圖 A-59 降雨量為 5000 mm/year 四號觀測井 VC 的濃度隨時間變化

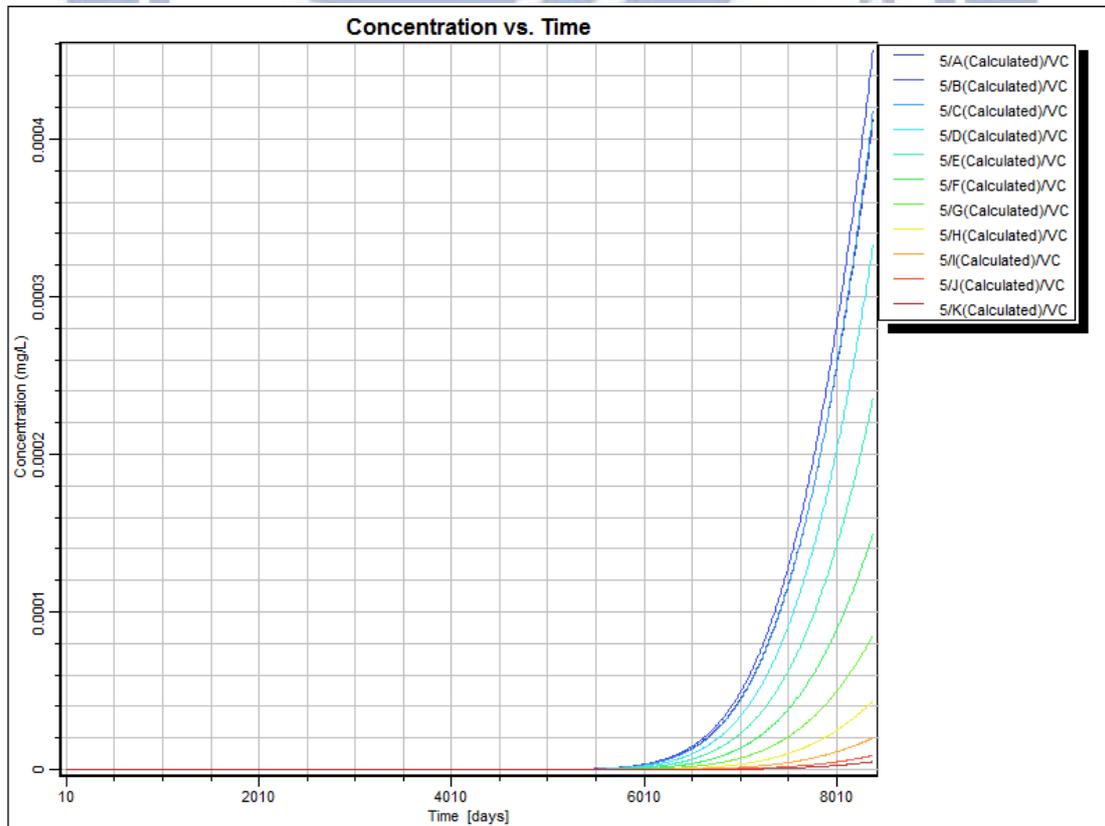


圖 A-60 降雨量為 5000 mm/year 五號觀測井 VC 的濃度隨時間變化