

國立交通大學

土木工程學系
碩士論文

以 TMVOC 模擬空氣注入法
Numerical Simulation of Air Sparging
with TMVOC

研 究 生：曹書銘

指 導 教 授：單信瑜 博士

中華民國一零三年八月

以 TMVOC 模擬空氣注入法
Numerical Simulation of Air Sparging
with TMVOC

指導教授：單信瑜 博士
研究生：曹書銘

Advisor : Dr. Hsin-yu Shan
Student : Shu-Ming Tsao



Hsinchu, Taiwan, Republic of China.

中華民國一零三年八月

摘要

國內自開放民營加油站設立後，加油站的數量大量增加。近年來土壤與地下水污染的控制與整治場址中，加油站所佔的比例亦逐漸提升，加油站污染途徑中，以油槽洩漏和輸油管洩漏機率相對大。現地地下水污染整治技術中，空氣注入法 (Air Sparging, AS) 屬於相當常見之整治方式。其原理為在地下水注入空氣，氣體與污染物接觸後使其揮發，此技術經常搭配氣體抽除法 (Soil Vapor Extraction, SVE) 使用。然而現今許多複雜地質條件使常見整治技術不易發揮，以細顆粒土壤來說，污染物在土層中不易傳輸而造成整治困難。本研究以上下分層的土壤作為對象，地表淺層為細顆粒土壤，深層為粗顆粒土壤。以加油站油品洩漏出發，使用數值模擬軟體 TMVOC 在上述地質條件下進行空氣注入法整治模擬。以四個操作變因進行討論，分別為空氣注入量的影響、氣體抽除量的影響、SVE 井與洩漏點距離之影響以及不同 AS 井佈井方式，另有均質地質作為對照。研究結果顯示空氣注入量的提升有助於水相苯的整治，以水相苯的整治上，空氣注入量的影響性大於氣體抽除量的影響性，但是空氣注入量或與氣體抽除量的上升，對於非飽和層的整治無明顯幫助。SVE 井越靠近洩漏點位置，由於加大了污染物蒸汽流動的壓力差與梯度，對於整治水相苯或石油碳氫化物 (Total Petroleum Hydrocarbon, TPH) 皆有明顯幫助。所有案例整治初期均發生污染範圍擴大的現象，需要留意風險，所有非均質土層案例在預定時間內皆沒有成功整治非飽和層。

關鍵字：汽油，加油站，洩漏，空氣注入法，氣體抽除法，模擬，TMVOC。

Numerical Simulation of Air Sparging with TMVOC

By

Student : Shu-Ming Tsao

Advisor : Dr. Hsin-yu Shan

Department of Civil Engineering
National Chiao Tung University

Abstract

The number of gas stations in Taiwan increased dramatically after the government lifted the ban on private ownership. However, the gas stations account for a large proportion of the soil and groundwater pollution sites. Leakage from storage tanks and pipelines accounts for the two major sources from which petroleum releases into the subsurface. Air sparging is one of the most commonly adopted in-situ remediation technology to clean up polluted groundwater in gas station sites. Its mechanism is to inject air into underground water where the dissolved constituents partition to vapor phase as they come into contact with the injected air. However, many pollution remediation technologies are difficult to be applied in cases of complicated soil structure. For example, it's difficult for contaminants to transport within fine-grained soils. This research focuses on two-layered strata, with shallow layer of fined grained soil on top of groundwater table and a layer of sandy soil beneath. A numerical model software called TMVOC is used to simulate air sparging in a model site with the above mentioned geological condition. Four independent variables which controlled the effect of remediation are discussed separately. These variables include, the air injection rate, the vapor extraction rate, the distance between spill point and extraction wells, and the different AS well layout schemes. In addition, the remediation at a model site with homogeneous sandy soil was also as simulated for comparison. The results show that greater air injection rate contributes significantly to efficiency of remediation of aqueous benzene, but increasing air injection rate or vapor extraction rate are less beneficial to removing residual petroleum products in the vadose zone. As SVE well gets closer to the spilling point, the pressure gradient around the contaminants increases, which helps remediate dissolved benzene and total petroleum hydrocarbon (TPH) in practice. The plume expands in the beginning of the air sparging because dissolved constituents are unable to partition to vapor phase in a short time, which happens in all cases. It's necessary to consider the risk of migrating of contamination during remediation. In all the cases with heterogeneous soil, the vadose zone cannot be cleaned up successfully within reasonable time.

Keywords: Gasoline, Gas Station, Leakage, Air Sparging, Soil Vapor Extraction, Simulation, TMVOC

誌謝

經過兩年的奮鬥，終於進入畢業尾聲。一路走來，除了專業知識，更多學到的是處理問題的能力，人與人之間的溝通，很多時候決定事情是否能完成。這邊要感謝單信瑜老師給我相對於其他研究生較多的工作，也感謝老師總是很有耐心地回答我的各種蠢問題，顯示老師對教學的認真與責任。雖說有學到專業知識，不過離職場還是很遙遠，仍需努力。最後論文口試階段，感謝張良正、劉志忠以及王智澤口試委員給予許多寶貴建議，使論文內容更加完整。

兩年的生活要是沒有實驗室的同僚那有多無聊。方麒滄和呂政信，有你們兩個夥伴彼此互相幫助才能完成這次的研究。黃彥博和林禹豪，你們兩個學弟總是帶給實驗室不少歡笑，每天欺負你們還真不好意思。還有常來實驗室串門子的林慶佑和黃柏穎，有你們一起分享心酸喜悅真的很快樂。

最後要感謝我的父母親。老爸，雖然你沒當面說，但我知道你很關心我。媽，謝謝妳忍著病痛維持這個家，還有每次我回家都會給我很多「戰備糧食」，雖然我每次都拿得很辛苦，因為真的蠻重的。對我的父母親感到抱歉，現階段的我仍需要你們幫助，之後我還要當兵，還要做職場菜鳥，仍無法獨立自主。

最重要的是，感謝我女朋友宜廷在我情緒低落時總會拉我一把，已經在工作的妳辛苦了，還要等一個不成熟的男孩變成男人，但是我對於妳的感情，依舊像桔梗花一般，永恆不變。

目錄

中文摘要.....	I
Abstract.....	II
誌謝.....	III
目錄.....	IV
圖目錄.....	V
表目錄.....	VIII
第一章 緒論	1
1.1 研究動機.....	1
1.2 研究目的.....	2
1.3 論文架構.....	3
第二章 文獻回顧	4
2.1 油品污染概述.....	4
2.1.1 輕質非水相溶液於地表下分佈與移動.....	5
2.1.2 加油站之油品洩漏.....	8
2.2 空氣注入法與土壤氣體抽除法概述.....	10
2.2.1 空氣注入法原理.....	12
2.2.2 空氣注入法設計要點.....	14
2.2.3 空氣注入法相關研究補充.....	19
2.2.4 土壤氣體抽除法概述.....	23
2.2.5 土壤氣體抽除法原理.....	24
2.2.6 土壤氣體抽除法系統設計.....	25
2.3 數值模擬 TMVOC.....	28
2.3.1 基本原理.....	28
2.3.2 成分設定.....	30
2.3.3 數值模擬相關研究.....	32
2.4 汽油成分設定.....	33
第三章 研究方法	35
3.1 模型參數設定.....	35
3.2 穩態地下水水流模型建立.....	38
3.3 油品洩漏情境設定.....	39
3.4 空氣注入井與土壤氣體抽氣井設置.....	40
第四章 模擬結果分析	43
4.1 油品洩漏模擬結果.....	45
4.2 空氣注入量之影響.....	48

4.3 氣體抽除量之影響.....	57
4.4 佈井距離影響.....	63
4.5 不同佈井設計之影響.....	71
第五章 結論與建議	77
5.1 結論.....	77
5.2 建議.....	79
參考文獻.....	80

圖目錄

圖 1-1 研究流程圖	3
圖 2-1 LNAPL 於地表下的分布(Fetter, 2001)	5
圖 2-2 不同相間轉換路徑(經濟部工業局, 2006).....	6
圖 2-3 典型粉土 SWCC (Fredlund and Xing, 1994)	7
圖 2-4 K-P 曲線示意圖 (改編自 van Genuchten, 1980)	7
圖 2-5 一般常見加油站配置圖(Mascott Equipment, n.d.)	8
圖 2-6 空氣注入法的有效性	11
圖 2-7 現地空氣注入法示意圖 (NM Environment Department,2003)	14
圖 2-8 井內空氣注入法示意圖(Federal Remediation Technologies Roundtable, n.d.)	15
圖 2-9 均質等相性土層中空氣注入 3 天後:(a)氣體飽和度;(b)正壓力(in H ₂ O, 1 in=2.54cm), (c)相對 TCE 濃度	16
圖 2-10 空氣流量與注入空氣壓力關係, 以不同均質土體試驗文獻	19
圖 2-11 不同空氣壓力下的穩定 ZOI 範圍, 介質顆粒大小為 0.8-1mm	20
圖 2-12 單一 air channel 實驗砂箱.....	20
圖 2-13 air diffuser tube (Pureozone, n.d.)	21
圖 2-14 砂箱中使用空氣注入法光學影像	22
圖 2-15 SVE 原理示意圖(經濟部工業局, 2007).....	24
圖 2-16 穩態壓力分佈一維場址示意圖(Johnson et al., 1994).....	26
圖 2-17 抽氣井群的影響半徑範圍(經濟部工業局, 2007).....	26
圖 2-18 液體在各相之組成與變化圖(g-氣體、w-液體、n-NAPL)	29
圖 2-19 TMVOC 離散模型(Pruess et al., 2002).....	30
圖 2-20 等碳數與沸點的回歸曲線 (Gustafson et al, 1997)	34
圖 3-1 模擬場址 XY 面俯視圖	36
圖 3-2 模擬場址 XZ 面	36

圖 3-3	蘆竹加油站污染場址地質剖面圖(新野科技, 2014).....	37
圖 3-4	土層配置	37
圖 3-5	穩態地下水流場	38
圖 3-6	模型俯視圖, 藍色網格為油槽, 紅色圓圈為油品洩漏點	39
圖 3-7	SVE 井設置位置 x-y 剖面圖	41
圖 3-8	AS 井相對位置 x-z 剖面圖	42
圖 4-1	水相苯監測點相關位置(x-y 剖面)	44
圖 4-2	TPH 監測點相關位置(x-z 剖面).....	45
圖 4-3	水相苯一年後分佈之 x-y 剖面圖	46
圖 4-4	水相苯一年後分佈之 x-z 剖面圖	46
圖 4-5	油品飽和度一年後 x-y 剖面圖	47
圖 4-6	油品飽和度一年後 x-z 剖面圖	47
圖 4-7	Case1-1 整治期間水相苯濃度變化	49
圖 4-8	Case1-2 整治期間水相苯濃度變化	50
圖 4-9	Case1-3 整治期間水相苯濃度變化	50
圖 4-10	Case1-1 約 22 天水相苯濃度三維分佈 3D 圖	51
圖 4-11	Case1-1、1-2 以及 1-3 的 2 號網格之水相苯比較.....	51
圖 4-12	Case1-1 整治期間 TPH 濃度變化.....	52
圖 4-13	Case1-2 整治期間 TPH 濃度變化.....	52
圖 4-14	Case1-3 整治期間 TPH 濃度變化.....	53
圖 4-15	模型初始水飽和度等值圖, 紅色圓圈為 b 網格	53
圖 4-16	Case4-1 整治期間水相苯濃度變化	54
圖 4-17	Case4-1 部分水相苯往下游流出 時間約 640 天	54
圖 4-18	Case4-2 整治期間水相苯濃度變化	55
圖 4-19	Case4-1 整治期間 TPH 濃度變化.....	56
圖 4-20	Case4-2 整治期間 TPH 濃度變化.....	56
圖 4-21	Case2-1 整治期間水相苯濃度變化	58
圖 4-22	Case1-2 整治期間水相苯濃度變化	58
圖 4-23	Case2-2 整治期間水相苯濃度變化	59
圖 4-24	Case2-1 整治期間 TPH 濃度變化.....	59
圖 4-25	Case1-2 整治期間 TPH 濃度變化.....	60
圖 4-26	Case2-2 整治期間 TPH 濃度變化.....	60
圖 4-27	Case 2-1 整治 3 年後水相苯三維分佈圖	61
圖 4-28	Case 2-2 整治 3 年後水相苯三維分佈圖	61
圖 4-29	Case 2-1 整治 3 年後油品飽和度三維分佈圖	62
圖 4-30	Case 2-2 整治 3 年後油品飽和度三維分佈圖	62
圖 4-31	Case1-2 整治期間水相苯濃度變化	64
圖 4-32	Case3-1 整治期間水相苯濃度變化	64

圖 4-33	Case3-2 整治期間水相苯濃度變化	65
圖 4-34	Case4-3 整治期間水相苯濃度變化	65
圖 4-35	Case3-3 整治期間水相苯濃度變化	66
圖 4-36	Case1-2 整治期間 TPH 濃度變化.....	66
圖 4-37	Case 3-1 整治期間 TPH 濃度變化.....	67
圖 4-38	Case 3-2 整治期間 TPH 濃度變化.....	67
圖 4-39	Case 4-3 整治期間 TPH 濃度變化.....	68
圖 4-40	Case 3-3 整治期間 TPH 濃度變化.....	68
圖 4-41	Case 1-2 壓力分佈圖 時間約為 3 年	69
圖 4-42	Case 3-1 壓力分佈圖 時間約為 3 年	69
圖 4-43	Case 3-2 壓力分佈圖 時間約為 3 年	70
圖 4-44	Case5-1 佈井相對位置	71
圖 4-45	Case5-1 整治期間水相苯濃度變化	72
圖 4-46	Case5-1 整治期間 TPH 濃度變化.....	72
圖 4-47	Case5-1 約 5 天後水相苯污染範圍擴大	73
圖 4-48	Case5-1 約 2 天後氣體飽和度	73
圖 4-49	三角形 AS 佈井示意圖(Battelle, 2001)	74
圖 4-50	三角形 AS 佈井相對位置	75
圖 4-51	Case5-2 整治期間水相苯濃度變化	75
圖 4-52	Case5-2 整治期間 TPH 濃度變化.....	76
圖 4-53	Case5-2 約 5 天後的水相苯 3D 分佈	76

表目錄

表 2-1	土壤及地下水管制標準-汽、柴油污染物 部分摘錄(環保署, 2013).....	9
表 2-2	空氣注入法優缺點(改編自 U.S. EPA, 1994).....	10
表 2-3	常見石油組成成份之亨利常數(U.S. EPA, 1994).....	12
表 2-4	常見石油組成成份之蒸氣壓(U.S. EPA, 1994).....	13
表 2-5	AS 系統常用設計參數(改編自 USACE, 2013).....	18
表 2-6	參數與推估氣體飽和度數值.....	22
表 2-7	SVE 的優缺點(改編自 U.S. EPA, 2004).....	23
表 2-8	本質滲透係數與 SVE 有效性 (改編自 U.S. EPA, 2004).....	25
表 2-9	原始汽油成分.....	34
表 3-1	模擬土壤滲透係數.....	37
表 3-2	土壤特徵曲線相關參數.....	38
表 3-3	油品成分與洩漏量.....	40
表 3-4	不同土壤地質之 SVE 影響半徑(Wong et al, 1997).....	40
表 3-5	單一 SVE 井參數.....	42
表 4-1	模擬案例列表.....	43
表 4-2	監測點位置說明.....	45
表 4-3	滲漏結果之初始污染物濃度.....	47

第一章 緒論

1.1 研究動機

空氣注入法(Air Sparging, AS)是一種現地(In-Situ)的土壤與地下水污染的整治技術，可有效的去除吸附於土壤孔隙中或溶於地下水中的揮發性有機物(Volatile Organic Compound, VOC)或是半揮發性污染物(Suthersan et al., 1999)。揮發性污染物的種類包含如油品類污染物如苯、甲苯、乙苯、二甲苯(Benzene, Toluene, Ethylbenzene, Xylene, BTEX)或是具揮發性氯化有機物如三氯乙烯(Trichloroethylene, TCE)，而 AS 適用於揮發性較高的有機物。

空氣注入法的原理是將空氣打入飽和含水層中，當空氣與溶解在水中的污染物接觸時，流動的氣體會加快污染物揮發後的蒸汽成為氣相的速度。氣相的污染物隨著空氣向上移動至非飽和含水層，再將其抽取。通常空氣注入法會搭配土壤氣體抽取法(Soil Vapor Extraction, SVE)使用。

空氣注入法雖然已成功運用在土壤與地下水整治，但仍缺乏足夠的相關文獻佐證，換句話說以目前的現地技術仍無法完全掌握空氣注入法在地底下的行為，因此我們認為以數值軟體模擬空氣注入法對於整治規畫有很大的幫助。市面上模擬土壤與地下水行為的軟體常見的有 Modflow、FEMWATER 等等，本次研究採用軟體為 TMVOC，其為三維有限差分數值軟體。

1.2 研究目的

從國內不少案例調查中，許多場址地表下淺層為細顆粒土壤，下方為粗顆粒土壤。由於污染物在低滲透係數的土壤傳輸不易，造成常用現地整治技術如生物整治(Bioremediation)或抽出處理法(Pump-and-Treat)效率降低、整治時間長。以空氣注入法為例，空氣從下方粗顆粒地層流動向上，遇上細顆粒地層時，由於空氣不易進入，而造成空氣往水平向移動，因此不易整治低滲透性地層內的污染物。

本研究將針對上述的地質狀況作情境模擬，探討不同的控制參數下使用空氣注入法整治的結果。變動因子包括：不同注氣量，配合SVE時不同的抽氣量、佈井配置等等。此外，本研究也針對均質地質狀況的整治進行模擬作為對照。

本研究期許以系統性模擬整治的結果，可以對於土壤與地下水污染整治工程設計應有相當的參考價值。



1.3 論文架構

本研究以空氣注入法對加油站油品污染整治作為研究對象。蒐集空氣注入法與相關現地案例加以彙整分析，之後使用數值模擬程式 TMVOC 來進行整治之模擬，以瞭解現地地質條件與整治設施配置與操作參數對整治效率之影響。TMVOC 為三維多相流之有限差分數值模擬軟體，因此相當適合模擬空氣注入法。研究流程如下：



圖 1-1 研究流程圖

第二章 文獻回顧

2.1 油品污染概述

汽油 (Gasoline) 為原油蒸餾產物之一部分，主要是5個碳至10個碳組成之碳氫化合物，沸點介於15°C至200°C之間。汽油中的碳氫化合物說明主要成分，對人體也都有一程度的危害，但是衡量這些物質對於人體與環境的危害輕重程度與行政管理上的務實，目前一般所公認石油碳氫化合物中的主要污染物有兩大類，一類為BTEX，另一類為MTBE(甲基第三丁基醚)。苯(Benzene)、甲苯(Toluene)、乙苯(Ethylbenzene)、二甲苯(Xylene) 四者通常被合起來簡稱為BTEX，這四種化學物質為常用的有機溶劑，大多油品中存在此四種化合物。這四種單環芳香族碳氫化合物對人類身體之影響可能因誤食、呼吸、接觸皮膚造成慢性毒性、致突變性、致畸胎性及對人體免疫系統干擾抑制，其中苯更證實有生物毒性、致癌性及突變性等，美國環保署已將BTEX列為129種優先列管污染物之一。BTEX亦已被列為我國地下水污染管制標準中。(經濟部工業局, 2007)

我國自76年經濟部能源委員會訂頒「加油站設置管理規則」，開放民間經營加油站以來，加油站數量逐年隨汽、機車數量之快速成長而增加。依經濟部能源局103年4月統計資料，國內共設置有2,600餘家汽車加油站(環保署, 2014)，若以1個加油站平均有4座地下儲油槽估算，全國至少約有10,400餘座地下儲油槽，其數量相當可觀，倘該等地下儲槽系統發生油品滲漏導致土壤及地下水污染時，將對周遭環境及國民健康產生危害。環保署於89年2月2日公布實施「土壤及地下水污染整治法」(簡稱土污法)後，為進一步有效管理加油站之污染問題，遂將加油站土壤及地下水污染調查工作列為施政重點，並擬定調查執行策略，自90年度起對全國加油站及大型儲槽之土壤及地下水污染進行調查。依據環保署91年統計，全國儲槽數量最多之縣市為高雄市之867座，其次為高雄縣之836座、雲林縣524座，就儲槽區位而言，以林園工業區之530座最多，其次為台塑工業園區之518座，高雄煉油廠廠區之331座再次之，100公秉以上儲槽總計3351座。民國90年開始，環保署針對國內加油站及大型儲槽分階段進行土壤及地下水污染調查工作，自91年起至101年底已完成共七期調查計畫，由中興顧問和美商傑明台灣分公司共同進行，其中第七期計畫中，調查共計331站加油站，總共有20站土壤污染物濃度或地下水污染物濃度超過管制標準。

2.1.1 輕質非水相溶液於地表下分佈與移動

油品為輕質非水相溶液 (Light Non-Aqueous Phase Liquid, 以下簡稱LNAPL) 的一種，當油品出現在土壤中時，可以下面五相存在：氣相、溶解相、自由相、吸附相、殘餘相。以圖2-1為例子來說明，當地表發生洩漏時，油品受重力影響將會向下移動，移動過程中有些液體將會以殘留飽和度留在非飽和層中而不向下移動，此即稱殘餘相。除了殘餘相，油品亦有機會在移動過程中揮發不飽和帶或大氣中，形成汽相。當油品在與土壤顆粒接觸後，部分油品被土壤顆粒中有機碳吸附在顆粒表面，形成吸附相。當油品向下移動至毛細緣層 (Capillary Fringe) 時，將會在該處聚積形成浮油並隨水力梯度向下游移動，此即為自由相。無論聚積造成的局部高壓是否足夠突破毛細緣層，油品都會溶解至地下水體中，形成溶解相並隨地下水流動，溶解相亦有機會出現在油品掃過之不飽和帶中所含之孔隙水中。

油品透過各種物理化學反應，將有機會在各相之間轉換。舉例來說，殘餘相油品可透過揮發變為氣相油品，而氣相油品也可溶解至孔隙水中形成溶解相。圖 2-2 簡單說明了油品在各相之間可能的轉換路徑，各轉換路徑須遵守特定的物理化學機制。

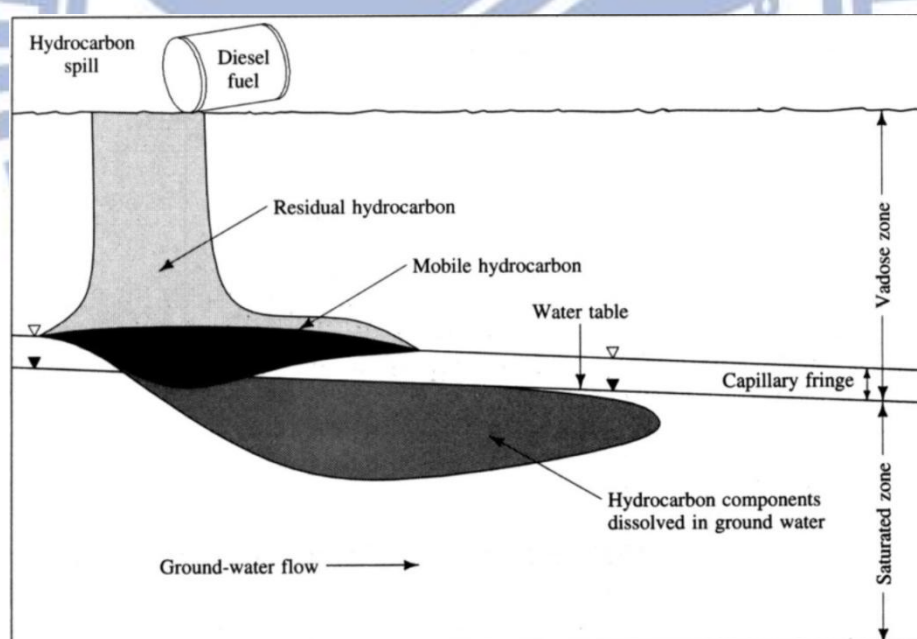


圖 2-1 LNAPL 於地表下的分布(Fetter, 2001)

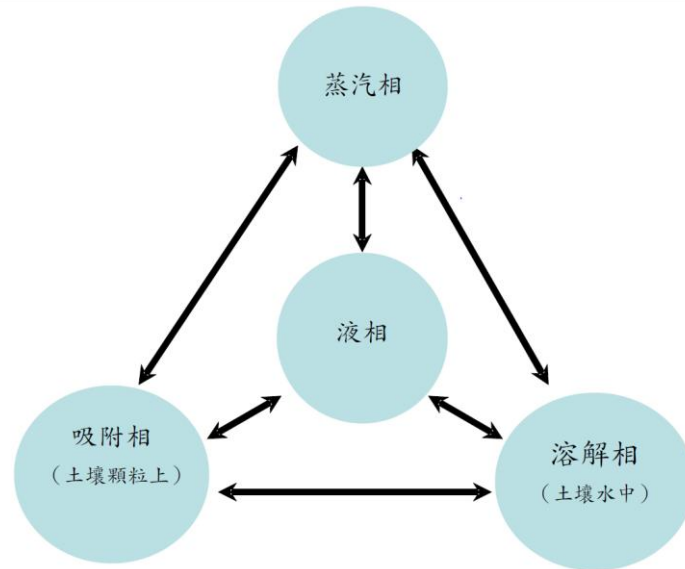


圖 2-2 不同相間轉換路徑(經濟部工業局，2006)

探討 LNAPL 在不飽和帶傳輸時有兩個重要的曲線，其一為土壤水特徵曲線 (Soil Water Characteristic Curve, 以下簡稱 SWCC)，其二為 K-S 曲線。SWCC 定義了土壤含水量與孔隙張力的關係，圖 2-3 為典型粉土的 SWCC，當飽和土體開始排水時，土壤含水量與張力的關係沿著排水曲線(Desorption Curve)變化，當空氣突破空氣進入壓力(Air-entry Pressure)開始進入土體後，孔隙張力將明顯隨含水量下降而上升，當含水量降至某一程度後曲線斜率開始趨緩，最後將達到殘餘含水量，此時孔隙水不再排出。理論上殘餘含水量的定義排水曲線斜率為 0 之處之含水量，但因孔隙張力隨含水量降低而持續上升的現象不易停止，斜率真實為 0 處不易尋找，實際使用上會設定一個張力分界點，van Genuchten (1980) 建議使用凋萎點 (15 m 水頭，約 147 kPa) 作為殘餘含水量對應張力。從殘餘含水量為起點開始對土體進行濕潤動作時，土壤含水量與張力的關係會沿著吸水曲線(Adsorption Curve)變化。隨著含水量提高，土體的空氣含量也逐漸降低，當孔隙張力不再有明顯變化後含水量也將固定住，此時之含水量與初始全飽和土體含水量有差距，此差距即為殘餘空氣量 (Residual Air Content)，為無法再被壓力排出的空氣。

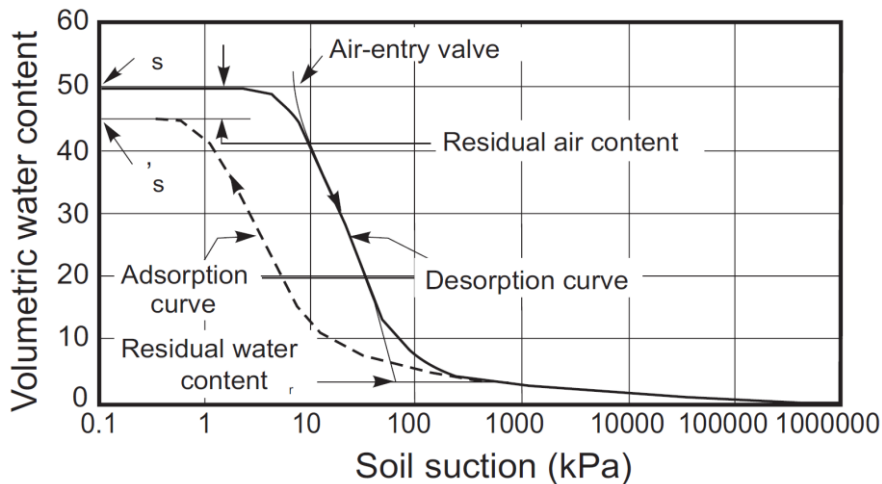


圖 2-3 典型粉土 SWCC (Fredlund and Xing, 1994)

所謂 K-S 曲線，是指土壤相對滲透係數 (K_r) 與飽和度 (S) 的關係曲線。當土壤自飽和狀態開始排水時，屬濕潤相液體的水傾向占據土壤顆粒表面迫使空氣只能存在於孔隙空間，一些連通孔隙中懸著水 (Pendular Water) 開始消失，孔隙水連續面連帶減少，部分孔隙水需經由更長的路徑方能排出，土壤滲透能力較全飽和狀態下降。當土壤繼續降低飽和度，部分薄膜水 (Pellicular Water) 的厚度開始降到 500\AA 至 1000\AA ，此厚度下凡德瓦力 (Van der Waal's force) 對薄膜水開始起顯著作用，孔隙水移動所需梯度驟增，土壤滲透能力開始顯著下降。隨著飽和度下降，會有更多孔隙水連續面消失且薄膜水厚度更加減少，土壤滲透能力將持續下降。由於土壤飽和度 S 可經由 SWCC 和孔隙張力 P 連接，K-S 曲線也可以 K-P 曲線形式表達。圖 2-4 為 K-P 曲線示意圖，在圖中可觀察到凡德瓦力開始影響造成的曲線斜率驟降情形。

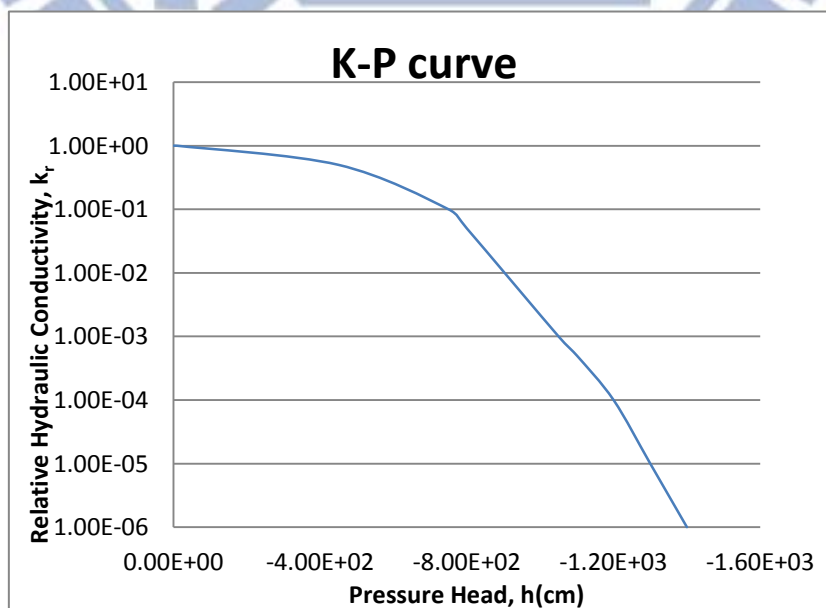


圖 2-4 K-P 曲線示意圖 (改編自 van Genuchten, 1980)

2.1.2 加油站之油品洩漏

一般加油站皆採用地下儲槽式之儲油系統(Underground Storage Tank System, USTs)如圖 2-5 所示，因此一旦儲槽槽體或輸油管線因破損而發生洩漏，則對於油品之洩漏點以及所造成之污染範圍是很難能夠確切掌握。而一般加油站油品可能之主要污染途徑分別為：

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

依儲油作業型態的不同，可將發生污染的原因分為靜態與動態污染。其中靜態污染是指泵島加油機下方、油槽、陰井、卸油口、管線等任何可能發生油品洩漏的設施；動態污染則是指卸油時產生的溢流與汽機車加油等兩項作業中所產生的洩漏。目前國內加油站均是以測漏管監測油槽區周圍土壤氣體之揮發性有機物氣體濃度，然而加油站站齡 10 年以上者均未於輸油管線區與泵島區設置測漏管監測土壤氣體中之揮發性有機物濃度與預警系統，因此較老舊之加油站容易成為監測死角(環保署，2006)。據 Eighmey et al. (2010)的報告，調查全美國 47 個州，發現地下油槽系統洩漏中，油槽佔 31%，管線佔 14%，兩者發生的機率為第一和第二高，其中有 23%無法得知洩漏位置。所以當加油站發生油品污染時，油槽和管線所導致污染比例相當的高。有關國內土壤與地下水管制標準請參閱 2-1。

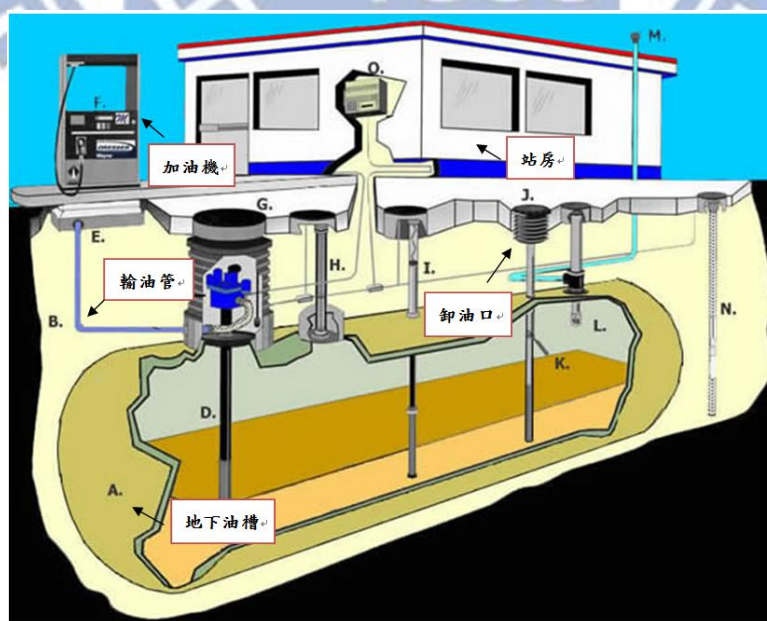
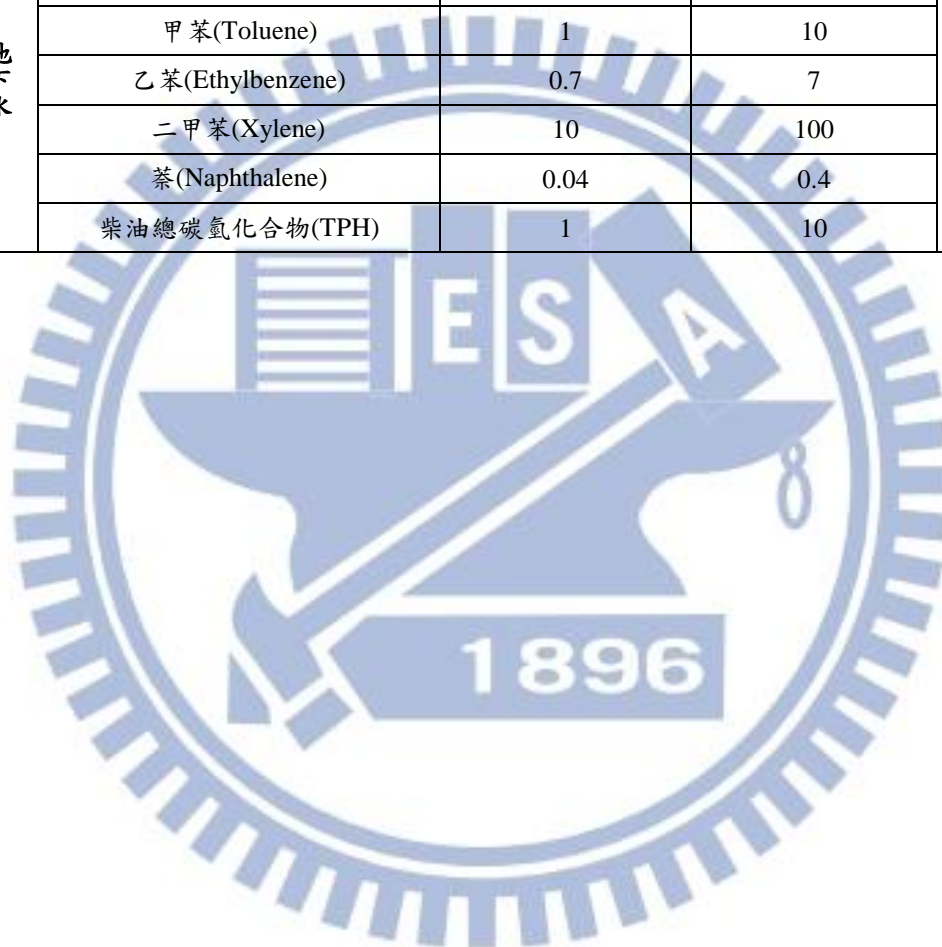


圖 2-5 一般常見加油站配置圖(Mascott Equipment, n.d.)

表 2-1 土壤及地下水管制標準-汽、柴油污染物 部分摘錄(環保署，2013)

分類	項目	管制標準		單位
土壤	苯(Benzene)	5		mg/kg
	甲苯(Toluene)	500		
	乙苯(Ethylbenzene)	250		
	二甲苯(Xylene)	500		
	總石油碳氫化合物(TPH)	1000		
地下水	分類(飲用水水源水質保護區)	第一類(保護區內)	第二類(保護區外)	mg/L
	苯(Benzene)	0.005	0.05	
	甲苯(Toluene)	1	10	
	乙苯(Ethylbenzene)	0.7	7	
	二甲苯(Xylene)	10	100	
	萘(Naphthalene)	0.04	0.4	
	柴油總碳氫化合物(TPH)	1	10	



2.2 空氣注入法與土壤氣體抽除法概述

空氣注入法(Air Sparging, AS)是一種現地(in-situ)的土壤與地下水污染的處理方法，可有效的去除吸附於土壤孔隙中或溶於地下水中的揮發性有機物(Volatile Organic Compound, VOC)或是半揮發性污染物。揮發性污染物的種類包含如油品類污染物(Benzene, Toluene, Ethylbenzene, Xylene, BTEX)或是具揮發性氯化有機物如trichloroethylene (TCE) 等，都是有利於空氣注入法的去除對象。空氣注入法的原理是將空氣注入到飽和含水層中，當空氣和污染物接觸時會加快污染物揮發成為氣相的速度，氣相污染物則隨著空氣上升到非飽和含水層之後加以抽取去除。由於注氣過程中，在污染地下水與非飽和區注入了氧氣，因此還有增強生物降解(Biodegradation)的效果。表2-2為空氣注入法優缺點。

表 2-2 空氣注入法優缺點(改編自 U.S. EPA, 1994)

優點	缺點
<ol style="list-style-type: none"> 1. 器材容易取得；容易安裝。 2. 對現地環境擾動小。 3. 較短的處理時間，在理想的狀況下。整治期小於1至3年。 4. 每噸土壤處理費用約20~50美元，較其他地面處理程序便宜。 5. 不須移除、處理、儲存、處置受污染的地下水。 6. 可以SVE加強整治效能。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 若有自由相浮油，不能同時處理，必須先移除浮油。 2. 不能處理侷限含水層的地質條件。 3. 土壤若有分層，恐造成效能降低。 4. 一些化學性、物理性、生物性的交互作用尚不清楚。 5. 缺乏現地與實驗室數據支持設計考量因子。 6. 潛在機率造成污染物擴大污染範圍。 7. 需設計細部模場試驗，確認氣體揮發之控制。

下圖 2-6 表示一般的狀況下，空氣注入法的有效性，分為兩類別作整理：土壤的滲透係數及氣相吸附性。圖上方以本質滲透係數(Intrinsic Hydraulic Conductivity)和土壤分類整理。下方以污染物沸點和污染物種類整理，沸點越低表示越容易揮發至汽相，因此空氣注入法越有效。Kirtland and Aelion et al.(2000)以在細顆粒土層做空氣注入法的相關研究，該研究案例中最小的土壤滲透係數為 $6.2 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ ，大約為 10^{-12} cm^2 ，即使分類為空氣注入法較不有效之場址，仍有整治成功之案例。

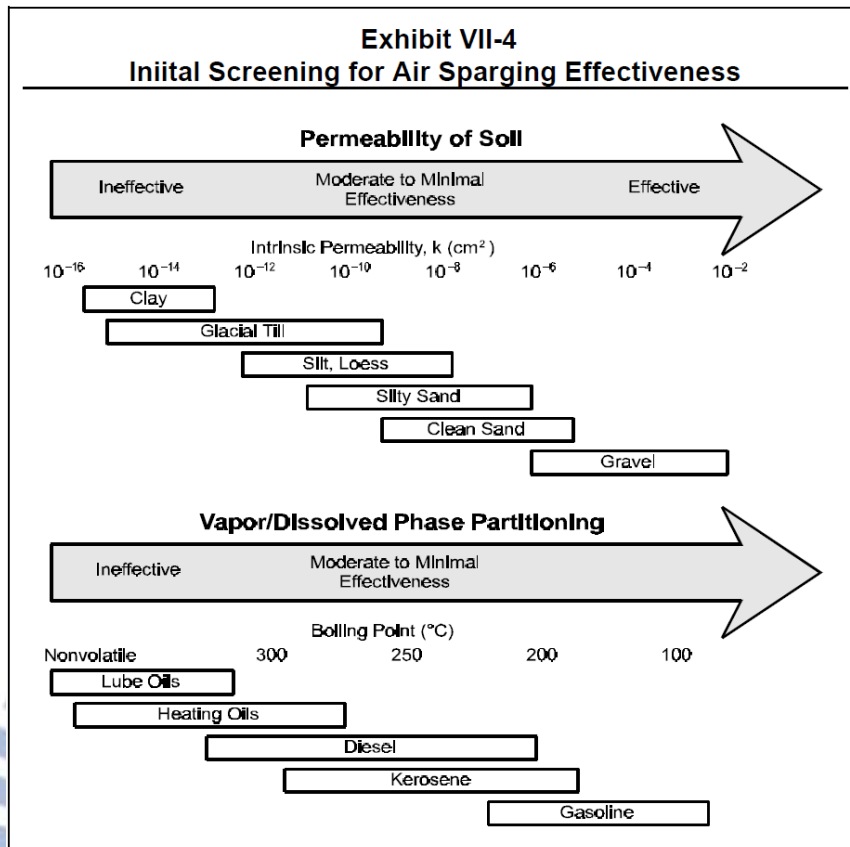


圖 2-6 空氣注入法的有效性

2.2.1 空氣注入法原理

空氣注入法的主要的原理是將液相的污染物轉成氣相，而氣相的污染物向上移動至非飽和層，最後由 SVE 抽氣井抽除。而污染物由液相變成氣相的過程主要有兩個理論可以解釋，分別是亨利定律和蒸汽壓，以下將進一步說明。

亨利定律(Henry's Law)：氣體在溶液中之溶解性質與氣體的分壓有關，此氣體性質可由亨利定律(Henry's law)來說明：在常溫下，某氣體溶解於某溶劑中的體積莫耳濃度和該溶液達成平衡的氣體分壓成正比。亨利定律的公式可表示如下：

$$P_a = H_a \cdot X_a \quad (\text{式 2-1})$$

P_a 指溶液上的氣體分壓(Partial Pressure)； X_a 是溶液的體積莫耳濃度(Molar Concentration)； H_a 則是亨利常數， H_a 會因溶劑和溫度的不同而變化。 H_a 的常用單位是 $\text{atm}\cdot\text{L}\cdot\text{mol}^{-1}$ 或 $\text{Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{mol}^{-1}$ 。 L 為溶液的升數； atm 為溶液上的氣體分壓； mol 為溶於溶劑中的莫耳數。 X_a 也可以代表溶液的莫耳分率，此時 H_a 單位為 atm 。下表為常見石油化合物之亨利常數。亨利常數主要解釋溶解相的污染物轉換成汽相的現象，而亨利常數越大代表越容易轉換成氣相。表 2-3 為常見石油組成成份之亨利常數。

表 2-3 常見石油組成成份之亨利常數(U.S. EPA, 1994)

常見石油組成成份之亨利常數	
成分	20°C 下亨利常數(atm)
四乙基鉛(Tetraethyl lead)	4700
乙苯(Ethylbenzene)	359
二甲苯(Xylenes)	266
苯(Benzene)	230
甲苯(Toluene)	217
萘(Naphthalene)	72
二溴乙烷(Ethylene dibromide)	34
甲基第三丁基醚(Methyl t-butyl ether)	27

蒸汽壓是指這種物質在汽相中的分壓，飽和蒸汽壓是蒸汽與非蒸汽在平衡狀態的壓力，這種平衡狀態是一種動態平衡，處於液態和固態的物質有汽化至氣態的趨勢；處於氣態的物質也有回到液態和固態的趨勢。

液體靠近表面的分子，動能較大的會逃脫而進入氣態，然而逃脫分子也可能會與液體上方的氣體分子相碰撞，而使得有些分子重返液體內。密閉容器中，由液體逃脫的分子越來越多，這些逃脫的分子也會碰撞到液體表面而被捕捉，這就出現凝結現象。當汽化和凝結過程均以同一速率進行即平衡達成時，蒸汽中的分子數目將不會改變，此時液體呈現的蒸汽壓稱為飽和蒸汽壓，溫度越高飽和蒸汽壓越大。

蒸汽壓的理論公式表示如下：

$$P_i^* = X_i \cdot \gamma_i \cdot P_i^0 \quad (\text{式 2-2})$$

P_i^* 為物質在汽相的平衡分壓， X_i 為物質在溶液中的莫耳分率， γ_i 為物質活性係數， P_i^0 為物質的蒸汽壓。由上式得知， P_i^0 與 P_i^* 為正比關係，換句話說，蒸氣壓越大，物質越容易轉換成汽相。值得注意的是，蒸氣壓主要解釋純相的物質 (Pure Compound) 便成汽相的原理，這點與亨利定律不同，以地下水污染的領域來說，好比是自由相或在土壤孔隙中的殘餘相油品。下表 2-4 為常見污染物之蒸汽壓：

表 2-4 常見石油組成成份之蒸氣壓(U.S. EPA, 1994)

常見石油組成成份之蒸氣壓	
成分	蒸氣壓(mm Hg 20°C 下)
甲基第三丁基醚(Methyl t-butyl ether)	245
苯(Benzene)	76
甲苯(Toluene)	22
二溴乙烷(Ethylene dibromide)	11
乙苯(Ethylbenzene)	7
二甲苯(Xylenes)	6
萘 (Naphthalene)	0.5
四乙基鉛(Tetraethyl lead)	0.2

2.2.2 空氣注入法設計要點

目前有關空氣注入法的技術，主要可以區分兩類：

(一) 現地空氣注入法(In-situ Air Sparging, IAS)

如圖 2-7 所示，直接將乾淨空氣注入到含水層中，然後再以 SVE 井移除隨空氣上升的污染物，此方是應是最早最直接的整治方法。

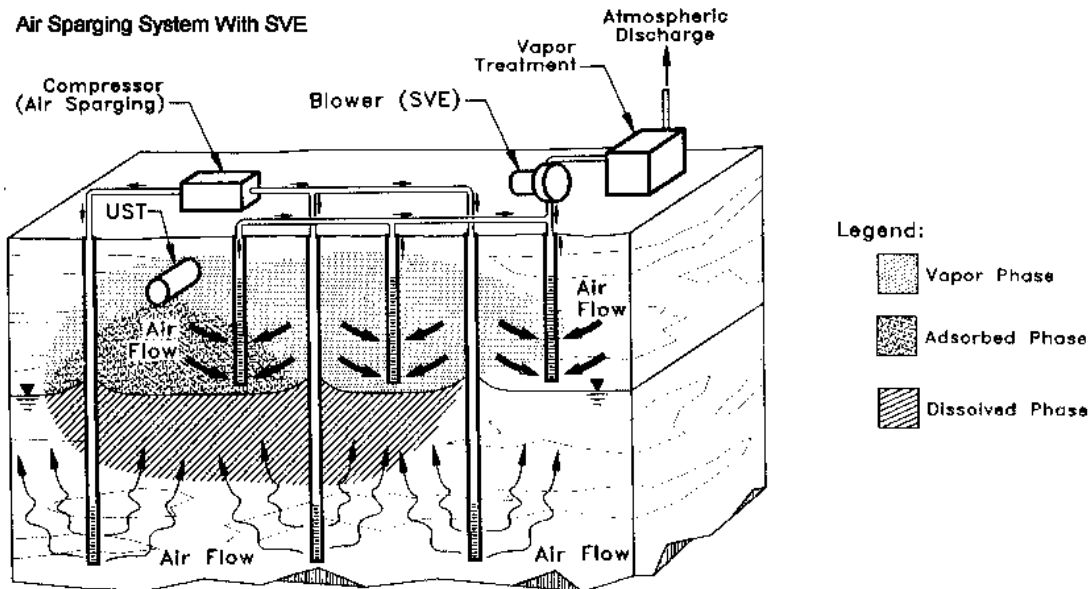


圖 2-7 現地空氣注入法示意圖 (NM Environment Department, 2003)

(二) 井內空氣注入法(In-Well Air Sparging；或稱 In-well Aeration)

空氣注入法技術除 IAS 之外，還有井內空氣注入法，如圖 2-8 所示，將空氣注入地下水中，但所產生之氣體(氣泡)卻在與空氣注入管相同的井中垂直逸出並帶 VOCs，氣泡不會逸散至井外；在氣泡垂直上升的同時，亦會造成地下水油井管下方之篩縫(Screen)流入，而由井管之上方切縫流出，靠著氣泡將 VOCs 由液相帶到氣相，及地下水於井管附近之流動、更換，地下水中之 VOCs 得以去除。井內空氣注入法最早被開發成為商業化技術是由德國 IEG Technologies 公司，此技術有專利。

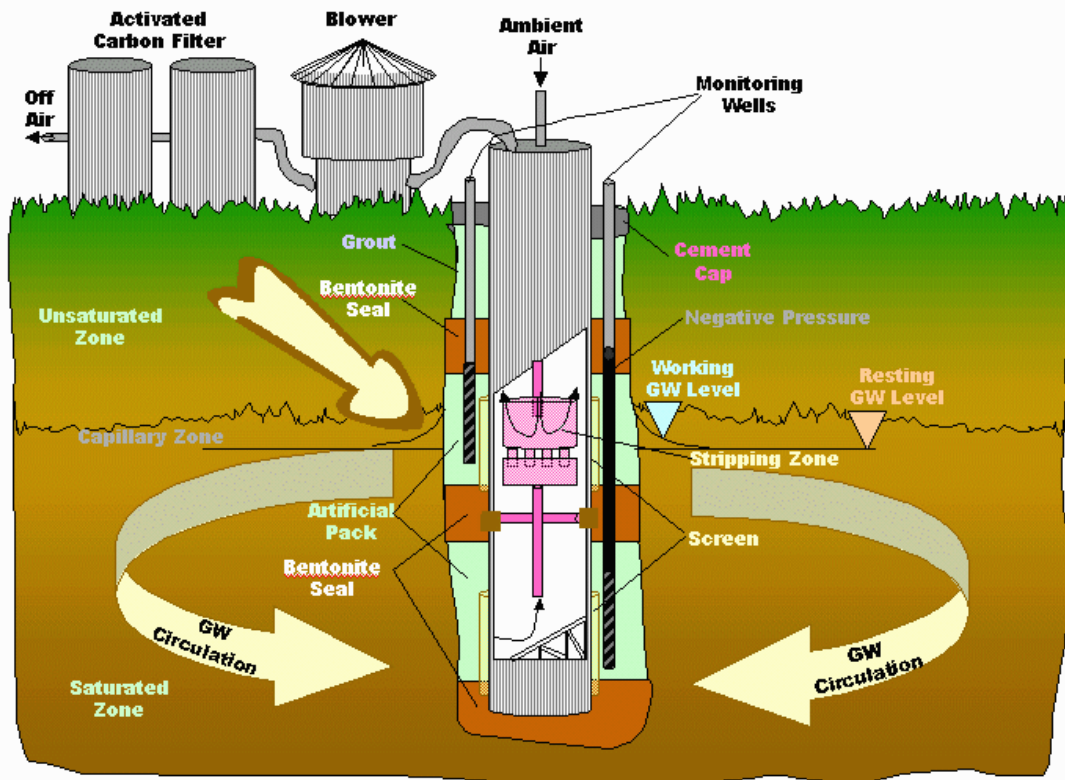


圖 2-8 井內空氣注入法示意圖(Federal Remediation Technologies Roundtable, n.d.)

影響範圍是空氣注入法設計上很重要的因素，主要影響空氣注入井的分佈與密集度。過去的研究整理出四種評估空氣注入井的影響範圍(radius of influence, ROI)：量測地下水面以下的壓力變化，量測地下水的溶氧濃度，量測非飽和層 VOC 氣體濃度，量測地下水位抬升(Mounding of the Water Table)(Brown et al., 1991；Kresge and Dacey, 1991；Felten et al., 1992；Hinchee, 1994)。但是沒有一個方法能確實代表影響範圍內，污染物有實質上的移除。

McCray and Falta(1996)認為量測水面下氣體壓力變化較能準確定義空氣注入法的 ROI，也就是說有空氣流通的區域其氣體壓力比靜水壓力高，同時定義氣體壓力比靜水壓力高的壓力差稱作正壓力(Positive Pressure)。並以數值軟體 T2VOC 模擬情境。如下圖 2-9，比較(a)和(b)可以看出正壓力 1in 水壓力以上和氣體飽和度分佈範圍差不多，從(c)發現同一範圍內 TCE 幾乎被整治了，而正壓力 1 in 水壓以上範圍，事實上還遠大於(c)中 TCE 被整治的範圍，顯示說此定義 ROI 的方法，還有些保守。

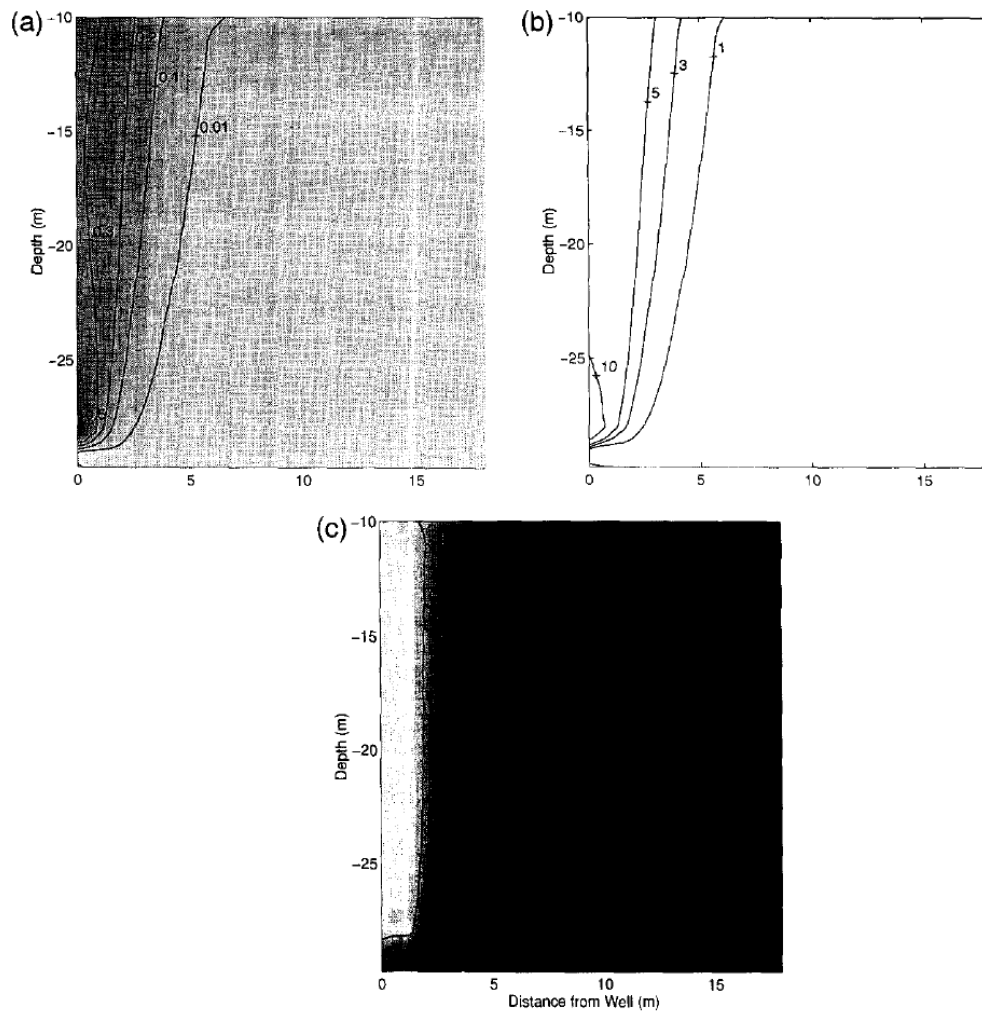


圖 2-9 均質等相性土層中空氣注入 3 天後：(a)氣體飽和度；(b)正壓力(in H₂O，1 in=2.54 cm)，(c)相對 TCE 濃度

另一個最直接影響的設計條件為水文地質特性。一般而言空氣注入法最適合均值而且土壤粒徑大者，主要是促使空氣可以均勻分佈，避免小孔隙的區域無空氣流通。一般常用空氣注入設計參數可參照表 2-5。

另外，許多地下水層屬於沉積地層，水平方向的水力傳導細數往往比垂直方向的值大 10~100 倍，雖然此現象可擴大影響範圍，卻也阻礙空氣垂直方向移動。

呂信傑等人(2006)以T2VOC模擬空氣注入法配合土壤氣體抽除法。該研究針對三個不同場址進行模擬，結果顯示三個場址的污染物去除率與模擬結果具有一致性。另外有做敏感度分析，以空氣飽和度0.1為影響範圍邊界，研究顯示垂直絕對滲透係數比較小的場址，所注入的空氣不容易上升到地下水水面，而會流動到比較遠的地方才升到地下水水面，因而有比較大的影響圈半徑，其對影響圈半徑的改變程度大於水平絕對滲透係數所造成的改變。雖然研究顯示在具有比較大的垂直滲透係數的地層中，影響圈半徑內之高濃度污染物可以有效的去除，但是同時由於影響圈半徑過於狹小，造成整體液相污染物去除率比較差。

綜合經濟部工業局(2008)和 TN and A Inc.(2008)的結果，整理出系統主要器材包括：

- (一) 空氣注入井：井數需依整治範圍與井的影響半徑大小做決定
- (二) 土壤氣體抽除系統：由於污染物蒸氣會自地下水中傳輸到未飽和層，因此需 SVE 的方法，設治土壤氣體抽除系統
- (三) 空氣壓縮系統：
 - 包括空氣壓力機(Air Compressor)、空氣儲存槽(Air Receiver Tank)、氣壓控制系統(Air Regulator)、尾氣過濾器(Post-Air Receiver Tank Filters)。
- (四) 系統管線與附件設計
 - 曝氣井與抽氣井都需要使用鼓風機。一般使用的注入空氣流量約 1~10cfm
 - 其他附屬管件在監測方面有：
 1. 氣體流量計
 2. 壓力計
 3. 火焰偵測器之汽相層析儀(GC/FID)或爆炸性氣體偵測器
 4. 地下水水位計
 5. 水中溶氧測定儀
 6. 氧氣測定器
 7. 二氧化碳測定器

(五) 監測系統

監測系統是需求不同而異，但是包括氣體注入之壓力、流量、監測井中之溶氧與有機物濃度、未飽和層土壤中之壓力、抽氣井之壓力、氣體流量與成分濃度，地下水位高度等等。

(六) 影響半徑測量

影響半徑是指當空氣注入地下時，受注入空氣影響的範圍或半徑，此參數是設計井數多寡及井內安排之依據。理論上，可以由數學理論推導，但是實際上地質的非均勻性，與空氣在地下水常形成匯流等因素，因此截至目前為止，多使用現地實驗值，作為實場設計之依據。現地試驗主要是證明空氣注入法是否可行。

由 API (American Petroleum Institute) 調查之資料顯示，目前最廣為使用的方法為測量不同位置的地下水溶氧濃度隨時間變化之關係圖。由 API 調查資料顯示最廣為使用的影響半徑約 3~8 公尺。

(七) 井管材料

抽氣井與注入井之管材材料可使用 PVC 或不鏽鋼材，一般會考慮井管材質對地下水環境之耐化學性與腐蝕性，最常使用的仍是 PVC 管，其原因乃 PVC 管較為便宜，且管徑大小以直徑為 2 英寸最常見。注入井的構造合一般監測井類似，井管篩網開口處大概在最深的受污染點以下約 1~2 英尺，會有最佳的處理效果；另外由於氣體會從篩網的最上方逸出，因此篩網的開口不長，僅約 1~3 英尺。

表 2-5 AS 系統常用設計參數(改編自 USACE, 2013)

參數	常用範圍 ¹
井直徑	2.5-10 cm(1-4 inches)
井開篩長度	15-300 cm(0.5-10 ft)
井開篩頂端離地下水位面深度	1.5-6 m(5-20 ft)
空氣注氣量	0.04-1.1 m ³ /min(1.3-40 scfm)
氣體注入壓差(Overpressure) ²	2-120 kPa(0.3-18 psig)
AS 影響範圍(Zone of Influence, ZOI)	1.5-7.5 m(5-25 ft)

¹ 由 Marley and Bruell 編寫(1995)
² 氣體注入壓差是指氣體注入壓力與靜水壓力差值

2.2.3 空氣注入法相關研究補充

Hu等人(2010)以不同空氣注入壓力和不同顆粒的土壤介質作物理試驗，研究結果如下：

1. 氣體流量和注入空氣壓力成正比，如下圖2-10所示。
2. 影響範圍(Zone of Influence, ZOI)如下圖2-11所示，橫軸為離注入點之水平距離，縱軸為離注入點之垂直距離。一般ZOI會橫向擴張的原因是壓力破裂(Pneumatic Fracturing)以及偏好侵入路徑(Preferential Intrusion)。另外從圖中顯示，同樣土壤介質中，隨著注入氣體壓力加大，ZOI的角度最終會出現極限值(Limited Angle of ZOI)
3. 不同壓力下影響範圍的角度angle差不多

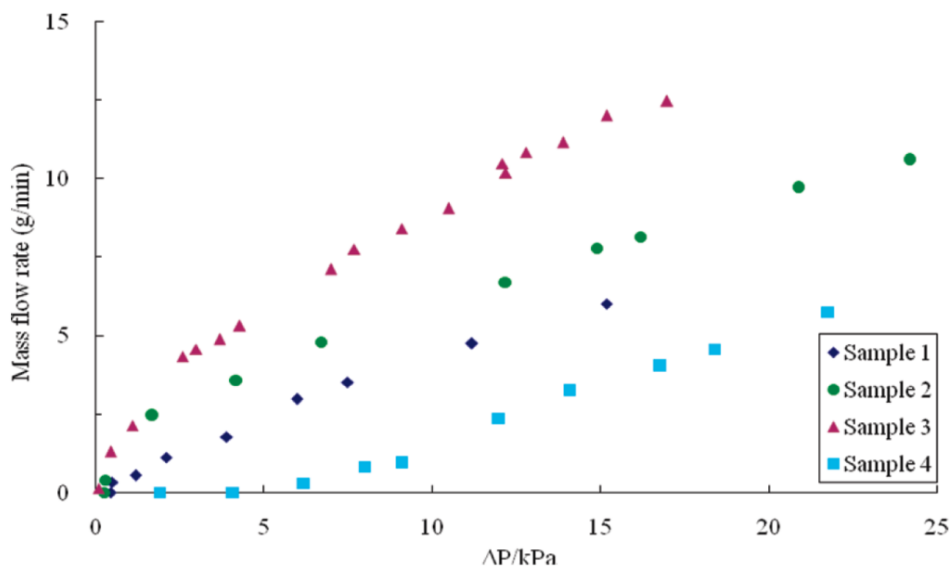


圖 2-10 空氣流量與注入空氣壓力關係，以不同均質土體試驗文獻

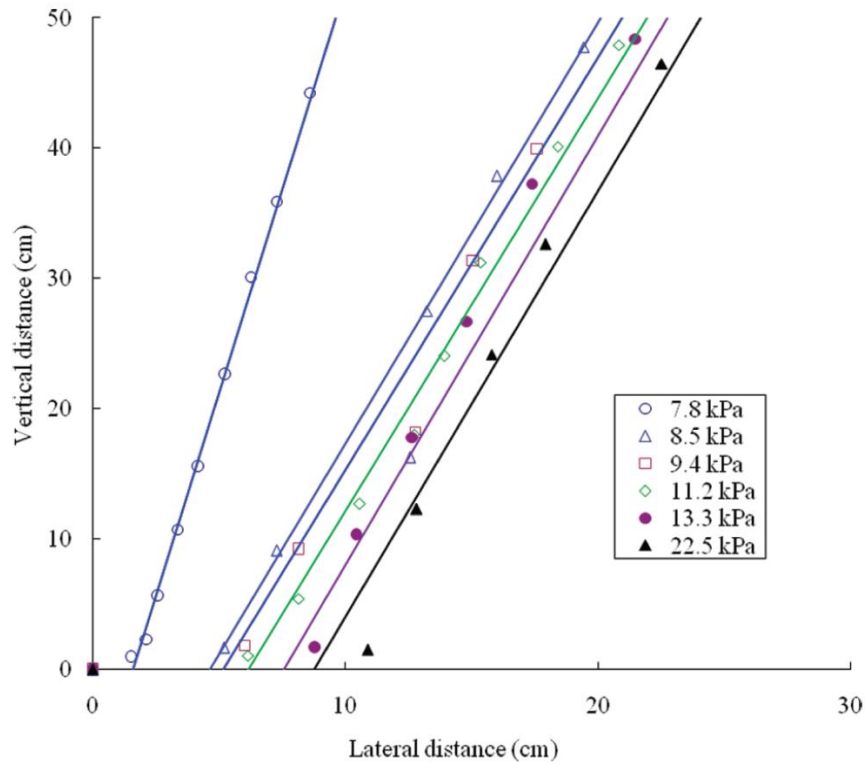


圖 2-11 不同空氣壓力下的穩定 ZOI 範圍，介質顆粒大小為 0.8-1mm

空氣在土壤中會尋找阻礙較少的路徑前進，而形成偏好路徑(Preferential Path)，這些空氣直通的路徑稱作空氣通道(Air Channel)。Braida et al. (2001)設計一個探討空氣道影響範圍的砂箱，如下圖 2-12，儀器上方有一水平空氣道，另有許多取樣點，由此可以探討單一空氣通道可以使多少污染物揮發至氣體，影響範圍有多大。但本研究採用之數值模擬軟體本身沒辦法模擬空氣通道的行為，所以在此僅回顧與本研究相關的部分。

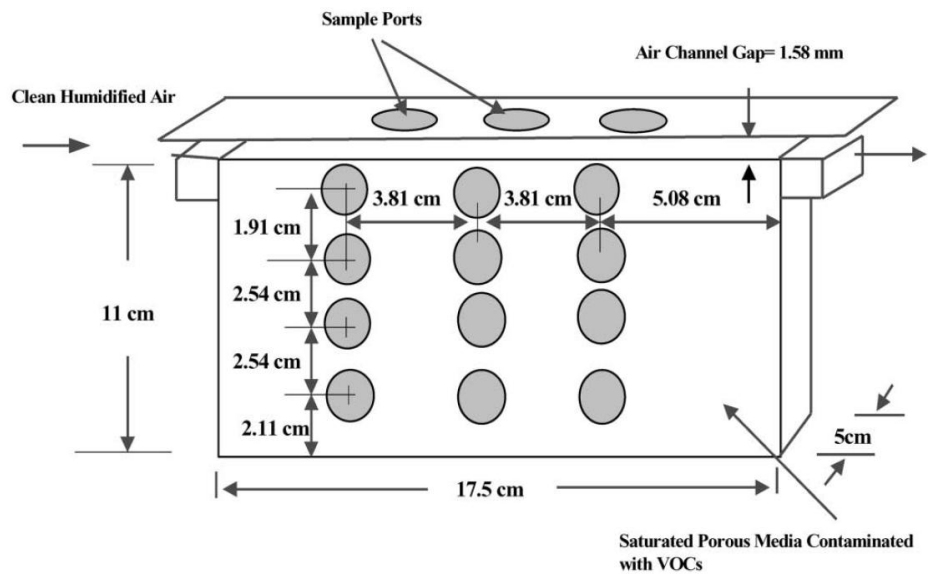


圖 2-12 單一 Air Channel 實驗砂箱

進行數值模擬前先了解一個問題，如下圖 2-13 所示，空氣注入法所注入土

壤內的為細小的空氣泡沫，但是對於數值軟體而言，並不會分辨空氣是泡沫還是氣流。理論上必須了解現地空氣注入口(Air Diffuser)周圍的氣體飽和度，並與模擬結果作比較。不過相關研究即使是國外也相當罕見，沒有研究針對此詳細說明。

Lazik 等人(2007)以光學攝影評估空氣注入法與氣體飽和度的關係，在一透明砂箱置入玻璃珠，內部設置空氣注入口，砂箱外架設攝影機。結果以圖相灰階程度推算氣體飽和度(Gas Saturation)，圖 2-14 和表 2-6 為部分研究結果。



圖 2-13 Air Diffuser Tube (Pureozone, n.d.)

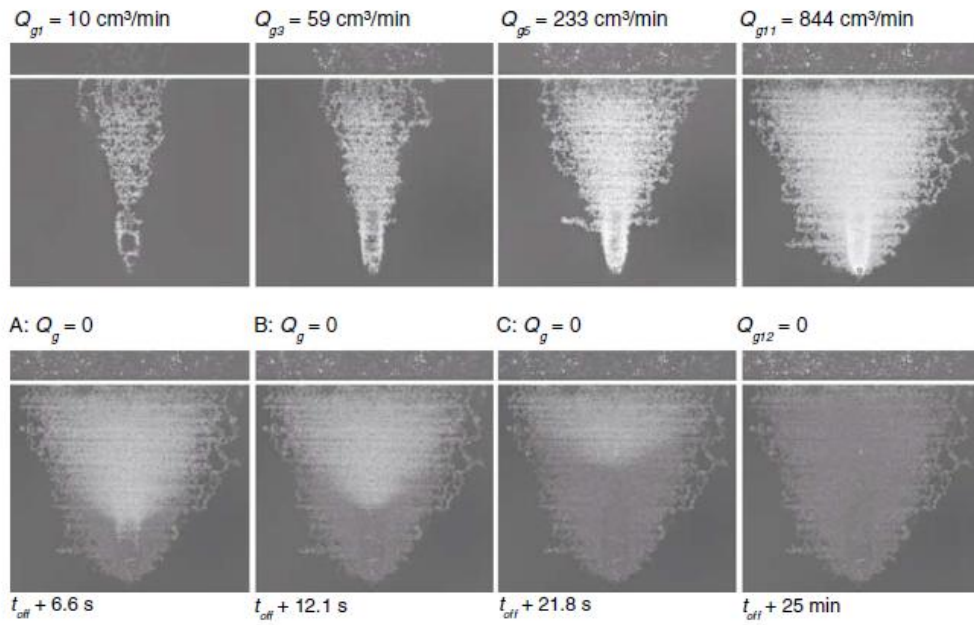


圖 2-14 砂箱中使用空氣注入法光學影像
表 2-6 參數與推估氣體飽和度數值

	Glass bead size d_k (mm):			Permeability K (m ²):			Porosity φ (-): Bulk density ρ_B (g/cm ³):			0.38 1.56		
Exp. No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
p_e (kPa)	4.8	5.5	5.9	7.0	8.5	9.6	10.4	11.7	13.5	15.3	19.4	3.64 ^a
Q_g (cm ³ /min)	10	31	59	146	233	321	407	495	582	669	844	0
V_g (cm ³)	17.7	22.4	29.1	50.2	66.5	77.4	88.8	98.9	108.	114.	136.	52.6
$\bar{s}_{g,grav}^b$ (%)	2.36	2.99	3.89	6.71	8.89	10.3	11.9	13.2	14.5	15.24	18.2	7.01

^a Hydrostatic pressure at injection port

^b $\bar{s}_{g,grav}$ (flow cell) = $\bar{\theta}_g/\varphi$ according Eq. 2 but corrected from load layer influence

2.2.4 土壤氣體抽除法概述

土壤氣體除取(Soil Vapor Extraction, SVE)是最早應用來處理被揮發性有機物污染土壤的整治技術之一。透過在非飽和層抽取氣體，強迫土壤氣體流動並夾帶揮發性有機物(Volatile Organic Compounds, VOCs)遷移至地面上再加以處理。該技術可以有效去除土壤中的 VOCs，在世界各地廣泛運用，也經常搭配 AS 使用。SVE 憑藉其簡易、價格便宜、迅速等優點，往往是優先被考量使用的技術。表 2-7 為使用 SVE 的優缺點。

表 2-7 SVE 的優缺點(改編自 U.S. EPA, 2004)

優點	缺點
<ol style="list-style-type: none">1. 在國外，相關整治成效已被證明，使用者容易取得配備，設置安裝容易。2. 對場址的干擾最小。3. 整治期短：在理想情況下，一般整治期約 6 個月至 2 年。4. 價格具競爭性5. 容易與其他技術結合運用，如空氣注入法、生物整治法等6. 可運用於建築物下方或其他不能進行開挖的地方。	<ol style="list-style-type: none">1. 污染物濃度降低 90% 以上不易整治。2. 當應用於低滲透性土壤或分層土壤之場址時，其可靠性低。3. 經抽除後之土壤氣體，為符合空氣排放標準，其廢氣處理費用可能需支付較昂貴的處理費用。4. 僅適用不飽和層土壤污染之整治；飽和層土壤部分需採用別種整治方法。

2.2.5 土壤氣體抽除法原理

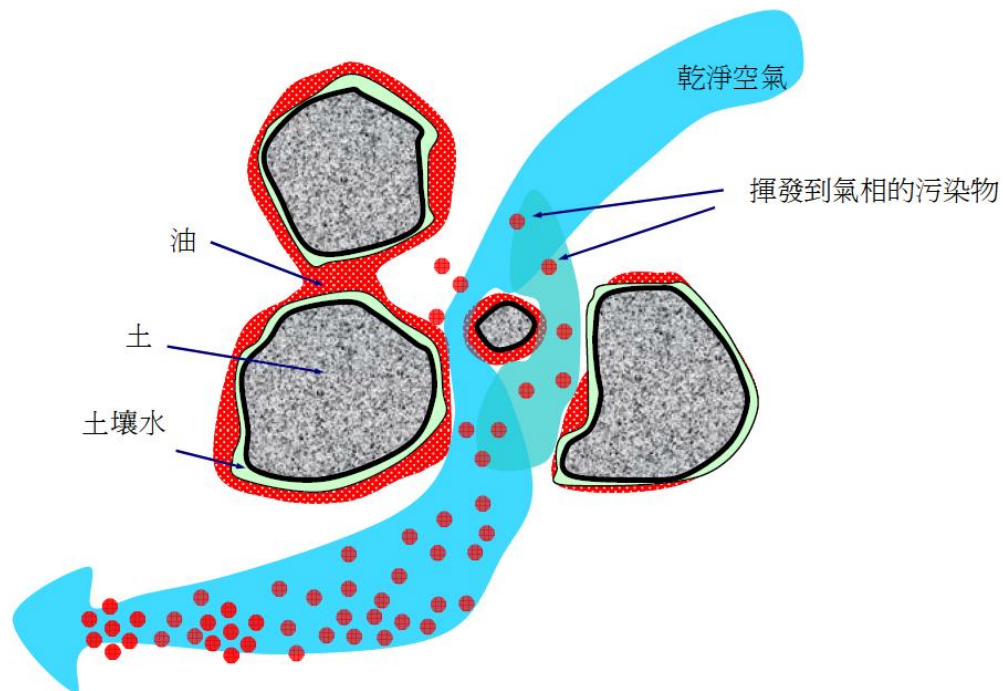


圖 2-15 SVE 原理示意圖(經濟部工業局，2007)

SVE 的原理是利用在非飽和層土壤中以抽出空氣的方式引發負壓與氣體流動，使原本溶解在土壤水中或是以自由相(Free Product)駐留在土壤孔隙中，或分配(Partitioning)在土壤有機質中的污染物，因抽氣所造成的負壓而持續蒸發到土壤孔隙得汽相中，再被流通的空氣帶到地表處理，如上圖 2-15 所示。SVE 的原理也可以用亨利定律與蒸汽壓理論解釋。

SVE 技術的適用性主要取決於地質與污染物兩大因素。對於低滲透係數的土壤，如粘土，不利空氣在土壤孔隙中流動；相反地，有利空氣在土壤孔隙中流通的砂性或礫石土壤則相當適合。表 2-8 為土壤本質滲透係數(Intrinsic Permeability)與 SVE 有效性之對照表，其中土壤滲透係數與地質孔隙大小相關，有關於各種土壤的滲透係數可參考圖 2-6。另外因流體習慣往阻力最小的地方流動，因此非飽和層土壤的不均勻度(Heterogeneity)也將嚴重影響處理的效果。

表 2-8 本質滲透係數與 SVE 有效性 (改編自 U.S. EPA, 2004)

本質滲透係數 k (cm^2)	SVE 有效性
$k \geq 10^{-8}$	通常有效
$10^{-8} \geq k \geq 10^{-10}$	可能有效，需要進一步評估
$k \leq 10^{-10}$	可能無效

而本質滲透係數(k)可借由以下公式轉換成滲透係數(Hydraulic Conductivity, K)

$$K=k(\rho g/\mu)$$

其中 ρ 是土壤中流體的密度， μ 是流體的黏滯度

另一影響因子為污染物的揮發性，亨利定律與蒸汽壓解釋了物質揮發的機制，相關補充請查閱 2.2.1 空氣注入法原理。

2.2.6 土壤氣體抽除法系統設計

一個完整的 SVE 系統需包括下列設備：抽氣井、管線系統、鼓風機、儀控設備、抽氣井、地表面覆蓋(Surface Seals)、地下水抽水泵浦、尾氣處理設備等選擇性設備。綜合 U.S. EPA 和 SVE 設計要點如下：

1. 影響半徑(Radius of Influence, ROI)

是最重要的參數。以經驗法則來說，觀察能造成水柱壓力下降至少 0.1 英吋 (0.25 公分) 之最大距離。此參數受到土壤側向和垂向的滲透係數、地下水位深度、井篩位置等因素影響。一般而言，ROI 的設計範圍從 1.5 m(5 英尺) 到 30 m(100 英尺) 都有，通常會進行現地前導試驗(pilot test)來設計。但是就算得知 SVE 井周圍產生壓力梯度，也無法得知氣體以多快的速度流動，頂多知道該範圍內可以捕捉氣相污染物(USACE, 2004)。決定 ROI 時，土層結構也是影響因素之一。如 Johnson et al. (1994) 發現在一穩態壓力分佈場址，如圖 2-16，井開篩橫跨兩種滲透係數差異甚大之土層，及使在兩種土層的壓力分佈是相同的，大部分的氣流仍在滲透係數較大的砂土層，也可以解釋為氣體的偏好路徑。

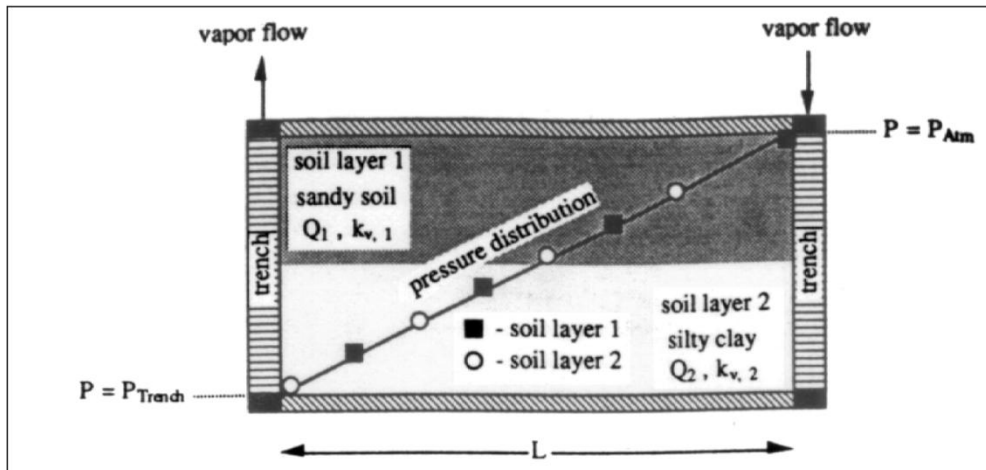


圖 2-16 穩態壓力分佈一維場址示意圖(Johnson et al., 1994)

2. 井頂真空度

抽氣井頂約維持在 3 至 100 英吋(7.62 至 254 cm)水柱支真空度，低滲透率之土壤需要較高支真空度以維持一定影響半徑。

3. 氣體抽出流量

一般抽出流量約維持在每分鐘 10 至 100 立方英尺(0.28 至 2.83 m³)之範圍，而氣體抽出流量與抽氣井影響半徑與井頂真空度均相互影響。

4. 抽氣井井數

一個受污染場址需要幾個抽氣井才夠，取決於受污染的範圍大小與影響半徑大小而定，如圖 2-17 所示，抽氣井群的抽氣範圍必須涵蓋場址的污染範圍。

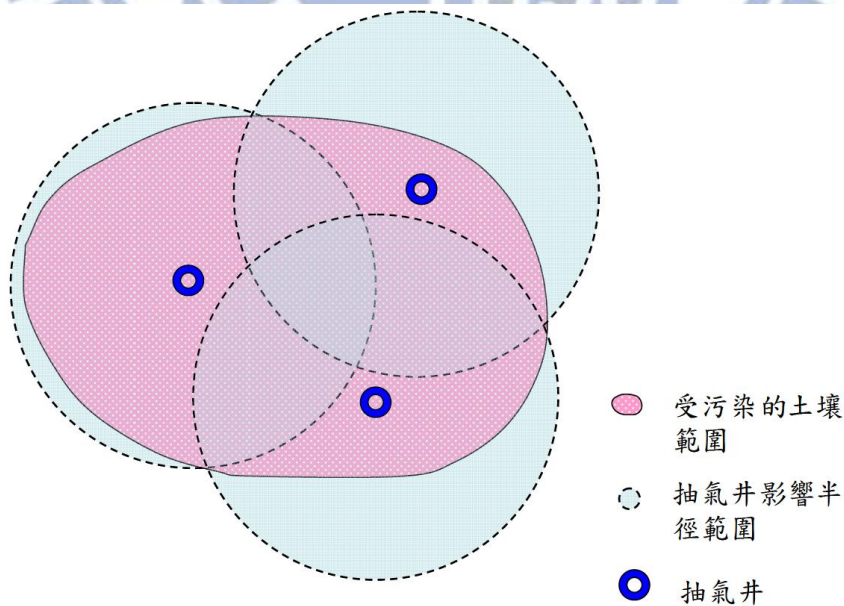


圖 2-17 抽氣井群的影響半徑範圍(經濟部工業局，2007)

5. 孔隙體積計算

與氣體抽出流量可計算孔隙體積交換率(Pore Volume Exchange)，建議每天抽取氣體體積至少比土壤孔隙體積大。抽換土壤氣體孔隙體積所花費時間，可借由下列公式評估：

$$E = \frac{nV}{Q} \quad (\text{式 2-3})$$

其中，E 為孔隙體積交換時間(小時)

n 為土壤孔隙率(m^3 氣體/ m^3 土壤)

V 為需整治的土壤體積(m^3 土壤)

Q 為總氣體抽出流量

一般而言孔隙體積交換時間採用 8 至 24 小時

6. 欲達到最終污染物濃度

以國內而言，係以污染管制標準為最終整治目標。此項目可評估所需整治範圍以及 SVE 何時可停止運轉。

7. 排放限制或監測需求

以國內為例，SVE 排放限制主要受到環保署空氣污染防制法相關法規要求。設計時需確認 SVE 系統設計監測口，以利系統運轉時進行監測(國內大部分 SVE 系統無此設計)

8. 場址構造物限制

如建築物位置、設備、埋藏物體、住宅區或其他於設計時需考量之因素。

9. 抽氣井類型

SVE 系統可運垂直或是水平抽氣井，是地下水位深度而定，一般而言，垂質抽氣井適用於地下水位面深度超過 3 公尺以上，地下水位過高的場址若使用垂直抽氣井，而其影響半徑過小，增加設置成本，此時可採用水平抽氣井的方式。

2.3 數值模擬 TMVOC

TMVOC 是能模擬水、氣體及 VOC 在三維空間裡非恆溫情況下的流體系統，可依使用者設置不同氣體和 VOC 呈現在三維的不同孔隙介質中(Pruess and Battistelli, 2002)。是由美國勞倫斯柏克萊國家實驗室(Lawrence Berkeley National Laboratory)所開發，為 TOUGH2 做延伸的有限差分數值程式。McCray and Falta(1996)成功以 T2VOC 模擬 Ji 等人(1993)做的空氣注入法砂箱實驗，因此認定 T2VOC 可以模擬空氣注入法，而本研究所使用的模擬軟體 TMVOC 為 T2VOC 的後繼版本。以下針對 TMVOC 做基本介紹。

2.3.1 基本原理

TMVOC 可以模擬水、氣體及 VOC 在三維空間裡非恆溫情況下的流體系統，可依使用者設置不同氣體和 VOC 呈現在三維的不同孔隙介質中(Pruess and Battistelli, 2002)。TMVOC 是由美國勞倫斯柏克萊國家實驗室(Lawrence Berkeley National Laboratory)所開發，為 TOUGH2 做延伸的有限差分數值程式。

為了描述流體在多相系統的組成和組態，不同相之間的轉換是根據 Newton-Raphson 疊代過程，依循熱動力條件和不同成分相互關係，可存在七種不同相的結合體(Pruess and Battistelli, 2002)，如圖 2-18 描述液體可在不同相中由氣體、液體和 NAPL 所組成，其中 g 為汽相， w 為液相、 n 為 NAPL 相。

在質量與能量平衡的方面，仍是以某區間中其質量變化通量，會等於進入該區域的質量淨通量，再加上其它能量所導致該區域的質量變化為基礎，而 TMVOC 是以 2-4 式來描述在任何區間內的質量或熱量淨增加量：

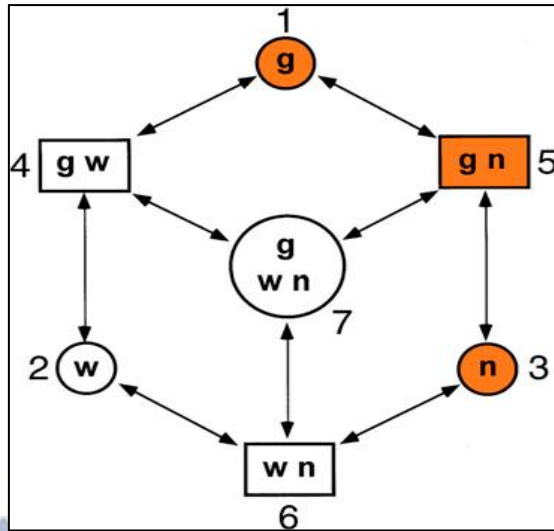


圖 2-18 液體在各相之組成與變化圖(g-氣體、w-液體、n-NAPL)

$$\frac{d}{dt} \int_{V_n} M^k dV_n = \int_{\Gamma_n} F^k n d\Gamma_n + \int_{\Gamma_n} q_n^k dV_n \dots \dots \dots (式 2-4)$$

上式的 V_n 為模擬流體系統內任一區域的體積； Γ_n 有界的封閉曲面面積；k代表不同成分(如:水、VOC、NCGs)；M為區域內每單位體積的質量或能量的累積量；F為質量或熱通量；q為匯合源；n為封閉曲線的法線向量；t為時間。至於TMVOC空間與離散部分，使用積分式有限差分(Integral Finite Difference)來漸近平均體積值。控制體積中的累積總量為系統內任一區域的體積乘上在此區中的通量平均值，可表示為：

$$\int_{V_n} M dV = V_n M_n^k \dots \dots \dots (式 2-5)$$

式中M為 V_n 中質量或能量的累積總量， M_n^k 為M在 V_n 中的平均值。在離散空間下，其任二個體積元素的表面積分(Surface Integral)近似於其兩者的垂直分量平均值 F_{nm} 乘上相接表面段 A_{nm} 的離散總和，如圖 2-19 所示。相當於在離散空間下，各連接面淨通量平均值的總和等於控制面積上內延性質通量的表面積分，表示為：

$$\int_{\Gamma_n} F^k \cdot n d\Gamma_n = \sum A_{nm} F_{nm} \dots \dots \dots (式 2-6)$$

Γ_n 為控制面積， F_{nm} 為控制面積上法相量， F^k 代表為不同物質K的流速， A_{nm} 為 V_n 和 V_m 的相接表面段， F_{nm} 為在 A_{nm} 上的垂直分量平均通量。而物質k可在不同相流體所攜帶，所以 F_{nm} 可表示為：

$$F_{nm} = \sum_{\beta} X_{\beta}^k F_{\beta, nm} \dots \dots \dots (式 2-7)$$

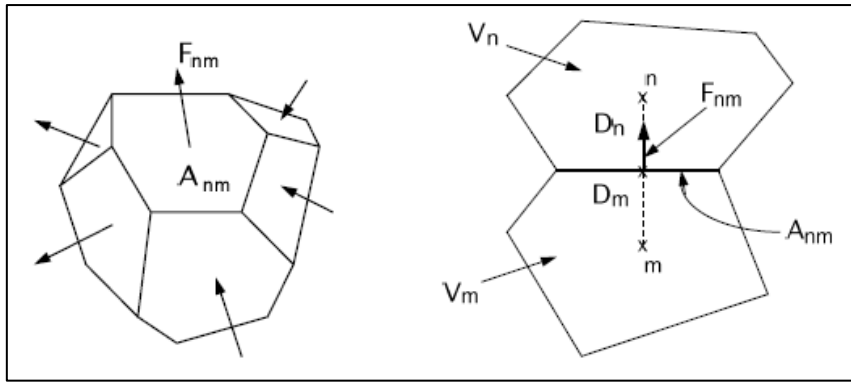


圖 2-19 TMVOC 離散模型(Pruess et al., 2002)

X_{β}^k 為 k 在 β 相流體的濃度， $F_{\beta,nm}$ 為 β 相在 A_{nm} 上的垂直分量平均流速。 $F_{\beta,nm}$ 以廣義達西定義可表示成：

$$F_{\beta,nm} = -k_{nm} \left[\frac{k_{\gamma,\beta} \rho_{\beta}}{\mu_{\beta}} \right]_{nm} \left[\frac{P_{\beta,n} - P_{\beta,m}}{D_{nm}} - \rho_{\beta,nm} g_{nm} \right] \dots \dots \dots (式 2-8)$$

k_{nm} 為在 V_n 中的絕對滲透係數 (Intrinsic Permeability)， $k_{\gamma,\beta}$ 為 β 的相對滲透係數， ρ_{β} 為 β 相密度， μ_{β} 為在 β 相的黏滯力， $P_{\beta,n}$ 與 $P_{\beta,m}$ 分別代表 β 在 V_n 及 V_m 的壓力， D_{nm} 為 V_n 及 V_m 的節點距離， g_{nm} 為重力加速度在節點 n 、 m 連線上的分量。將 2-2 及 2-3 式帶入 2-1 式中，以一階有限差分式表示：

$$\frac{dM_n^k}{dt} = \frac{1}{V_n} \sum_m A_{nm} F_{nm}^k + q_n^k \dots \dots \dots (式 2-9)$$

其中 q 為匯合源在 V_n 中的平均值，此即為 TMVOC 的控制方程式。

2.3.2 成分設定

不同化學物質擁有各自不同的物理及化學性質，但大多模擬軟體僅用密度區分 LNAPL 和 DNAPL，或者是成分在水中的縱向及橫向延散度來對不同成分作定義。TMVOC 在污染傳輸部份模擬較為細緻周延，特別是當污染物在非飽和及飽和間，是因為其對化學物質定義較為詳述。化學成份設定在 TMVOC 裡，是以溫度、壓力、壓縮性、Pitzer's Acentric Factor、化學偶極矩 (Chemical Dipole Moment)、沸點、蒸汽壓、莫耳分量、理想氣體熱常數 (Ideal Gas Heat Constant)、密度 (NAPL density)、空氣中的 VOC 的擴散係數 (Binary Diffusivity of VOC in Air)、氣體發生擴散溫度 (Temperature for Gas Diffusivity)、黏滯度 (Viscosity)、體積、水中溶解性 (Solubility)、土壤中有機物吸附量、吸附係數 (K_{oc})、生物降解，以上 20 個參數來描述成份的物理特性。

本研究在生物降解部分未考慮，所以各成份在此部分均設為 0，而在模擬過程中又以蒸汽壓、黏滯性及在水中溶解性參數設定對物質傳輸影響較大。對 TMVOC 模擬而言，化學成份的蒸汽壓決定物質的揮發性，往往在設置上易在非

飽和區發生計算上的不收斂。Rasmusson (2009)模擬柴油洩漏中，常在當 VOCs 到達地下水面時會易發生模擬計算上的不收斂情況。VOCs 普遍在水中溶解性較小，而柴油中成分在水中溶解度幾乎落在 $1 \times 10^{-2} \sim 1 \times 10^{-12}$ 莫耳分量間，在 TMVOC 之各個化學物質的飽和蒸汽壓計算，則是以 Wander equation 計算得出，公式如下：

$$P_{\text{vap}} = P_c \exp\{[a(1 - T_r) + b(1 - T_r)^{1.5} + c(1 - T_r)^3 + d(1 - T_r)^6]/T_r\} \dots \dots \dots (\text{式 2-10})$$

P_c 為臨界壓力， T_r 為臨界溫度， a 、 b 、 c 、 d 為描述化學物質常數值，其不同 VOCs 的常數值可參照 Reid et al. (1987)。但有些 VOCs 的常數值無法得知，其蒸汽壓計算也可以用較少準確的 Antoine Correlation，其將所需參數降至三個經驗參數： A 、 B 及 C ，同樣可參照 Reid et al. (1987)，公式如下：

$$\ln P_{\text{vap}} = A - \frac{B}{T+C} \dots \dots \dots (\text{式 2-11})$$

至於化學成分的黏滯性，可用 Yaws et al. (1976) 的溫度函數方程式來計算，公式表示：

$$\ln \mu = A' - \frac{B'}{T} + C'T + D'T^2 \dots \dots \dots (\text{式 2-12})$$

式中的 A' 、 B' 、 C' 、 D' 為黏滯性常數，但在模擬傳輸上，各項成份的黏滯性會容易影響到整體的黏滯性。也可將 C' 和 D' 設為 0，只考慮 A' 和 B' 參數來描述化學物質黏滯性的 Velzen et al. (1972) 所提供之簡化相關參數，來降低所需之數值計算量。

修正黏滯參數設定在程式中，除了會影響污染團傳輸速度外，也會影響到污染模擬開始的讀取時間。因各成份擁有各自不同的黏滯力，TMVOC 則是下列公式描述整體污染物黏滯力，但此式卻忽略成份之壓力與黏滯力的相關性：

$$\mu_n = \prod_k \mu_n^{x_k} \dots \dots \dots (\text{式 2-13})$$

2.3.3 數值模擬相關研究

吳志清等人(2013)使用 TMVOC 模擬加油站柴油洩漏與整治，柴油簡化為常見的十種成分進行模擬。該研究以每日 5 加侖之柴油洩漏量進行模擬，洩漏點附近之的監測井可測到濃度變化，結果顯示柴油洩漏點在非飽和區，氣體監測會優於地下水監測，但地下水之苯和萘監測均難以在一年內達到偵測濃度標準值。若提高土壤滲透係數及孔隙率，柴油之污染物在地下水中較容易傳輸。其中高孔隙率土壤對監測井之氣體及地下水監測均有明顯提升，在高孔隙率場址能在一年內，在距離洩漏源 3 m 處監測井偵測到柴油洩漏。而抽取井在孔隙率較大之土壤介質會擁有較高整治速率。

陳培昉(2010)以 TMVOC 建立模型砂質土層 $120\text{ m} \times 120\text{ m} \times 10\text{ m}$ ，模擬加油站汽油洩漏，結果發現在同樣假設條件下，汽油污染物傳輸速率與孔隙率大小是成反比關係，透水係數相較孔隙率而言，其變動對汽油污染傳輸影響較大。江潤翰(2012)也用 TMVOC 建立 $400\text{ m} \times 200\text{ m} \times 16\text{ m}$ 長度單位砂質土層模擬油品 MPE 整治，探討抽取井位置的整治效率，模擬結果於洩漏點下游 10 m 處能獲得最佳的整治效率，設井位置隨著距離增加，其整治效率會下降，建議在洩漏點上游 10 m 至下游 30 m 範圍內佈井，可預期整治效率達到 11 %

2.4 汽油成分設定

油相是由不同 NAPL 所組成之一個流體相，油相之黏滯力、密度、莫爾體積等性質將由油品內各 NAPL 所佔百分比的不同而產生變化，而各 NAPL 在油相中所佔百分比將由各自的飽和蒸汽壓、溶解度、化學活性等互相制衡。為了避免數值模擬過程中發生不收斂情形，油品成分必須簡化。簡化過程中需保持三個原則，原則一，BTEX 四項為主要研究對象，應將其視為獨立的 NAPL，故新成分汽油中勢必要保留 BTEX，並保持此四物質的物理化學性質不變；原則二，新油品之流動性必須和原始油品相似，而在多相傳輸中流體通量大小與黏滯力和密度的比例有關，故在新成分汽油中，其黏滯力和密度的比例必須維持不變；原則三，TMVOC 在化學平衡過程中時常用到莫爾濃度此一物理量，故對於主要研究對象的 BTEX 四項，其在油品中之莫爾濃度應當維持不變。

江潤翰等人 (2012) 使用所謂「4+1」的五成分汽油來進行模擬，即保留 BTEX 並另外加上一個足以代表餘下成分的背景 NAPL 來組成汽油。陳培昫等 (2010) 所使用之簡化汽油，其成分可細分成三大類：芳香族、脂肪族、醚類。如表 3-4 所式，芳香族包含了苯、甲苯、乙苯、二甲苯，脂肪族飽含了環戊烷、庚烷、異辛烷，而甲基第三丁基醚被獨立歸到醚類中。芳香族四成分為欲保留的 BTEX 四項，不予以變動，故油品簡化重點在於將其他物質以單一物質取代。但受限於甲基第三丁基醚參數未收集完整，並且考量其只占有汽油 18.0% 之下，此成分將被屏除於新汽油成分外，本研究只對脂肪族三物質作簡化的動作。

Gustafson et al. (1997) 將汽油以等碳數 (Equivalent Carbon Number) 做分類的研究，以及 Rasmusson (2009) 以等碳數對柴油成分作簡化的研究，在此以等碳數概念將脂肪族簡化成單個物質。等碳數是將碳氫化合物之沸點對正烷類之沸點做正規化的概念，一般來說碳氫化合物之飽和蒸汽壓、溶解度、密度等化學性質與沸點具有正相關，一個等碳數 5 的碳氫化合物將可預期和碳數 5 之正烷類——即正戊辛烷具有相似的物化性質。

Gustafson et al. (1997) 另外給出了脂肪族與芳香族碳氫化合物沸點對等碳數的迴歸曲線 (圖 2-20)，江潤翰等 (2012) 以此迴歸曲線找出庚烷、異辛烷、環戊烷相對應的等碳數，再以三者於原始油品中的重量百分比為權重來計算加權等碳數，最後算出三者加權平均等碳數。脂肪族加權平均等碳數為 7.9913，取最近的整數為 8，故本研究遂以正辛烷來代取代整個脂肪族碳氫化合物。8 成分汽油至此簡化成「BTEX+正辛烷」的 5 成分汽油。在確定新汽油成分後，須再調整正辛烷性質以符合莫爾濃度以及流動性的要求。表 2-9 和 2-10 為原始汽油成分和簡化汽油成分

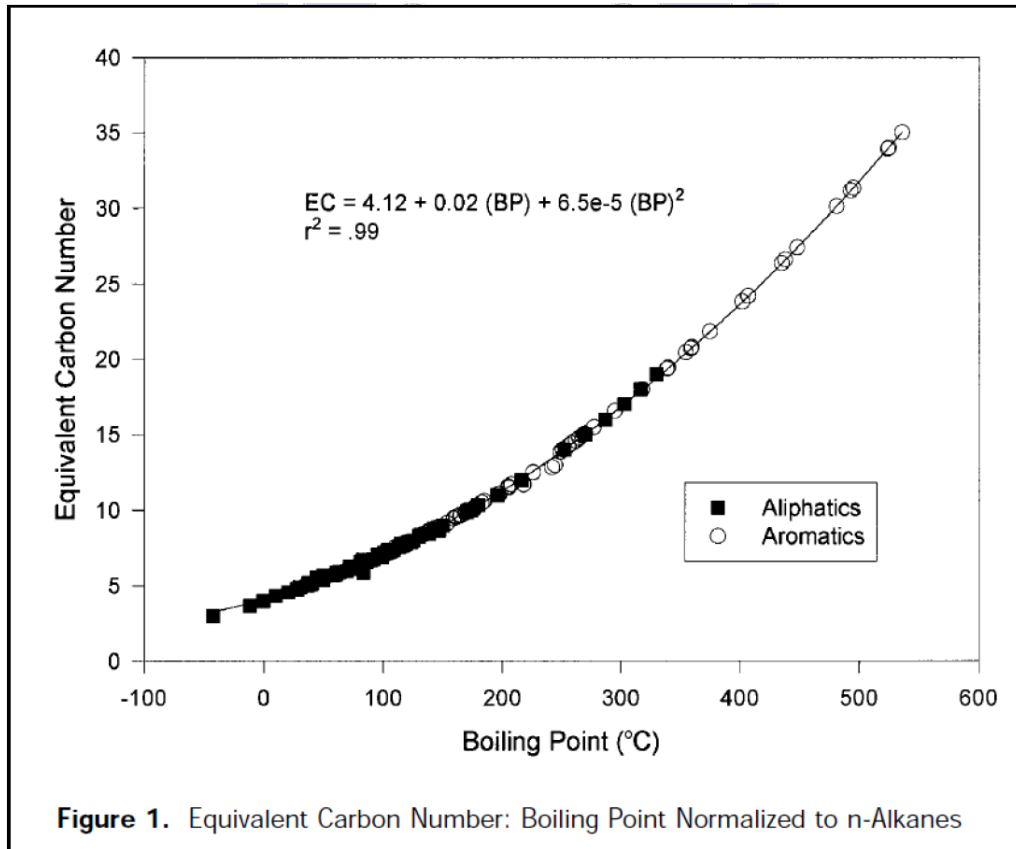


圖 2-20 等碳數與沸點的回歸曲線 (Gustafson et al, 1997)

表 2-9 原始汽油成分

	Weight Percent (%)	Viscosity (cP)	Density (kg/ m ³)	Molar Mass (g)	Mole Fraction
Benzene	3.5	0.652	885.0	78.114	0.0393
Toluene	7.0	0.590	867.0	92.141	0.0667
Ethylbenzene	5.5	0.669	867.0	106.168	0.0455
Xylene	1.5	0.620	864.0	106.168	0.0124
Density = 778.6 kg/ m ³ Total Moles = 1139.6 mole Viscosity = 0.4733 cP					

表 2-10 簡化汽油成分

	Weight Percent (%)	Viscosity (cP)	Density (kg/ m ³)	Molar Mass (g)	Mole Fraction
Benzene	3.5	0.652	885.0	78.114	0.0393
Toluene	7.0	0.590	867.0	92.141	0.0667
Ethylbenzene	5.5	0.669	867.0	106.168	0.0455
Xylene	1.5	0.620	864.0	106.168	0.0124
Density = 778.7 kg/ m ³ Total Moles = 1139.6 mole Viscosity = 0.4726 cP					

第三章 研究方法

本研究使用 TMVOC 軟體模擬地表下淺層土壤滲透性較低場址之油品污染注氣整治，比較不同整治方案效率差異。模擬分為三個階段：地下水流場建立、油品洩漏、與整治模擬這不是三個步驟？。當所有控制變因都完成後，比較不同情境下的整治結果，並提出建議與結論。

3.1 模型參數設定

本研究使用虛擬的模擬場址，其模擬尺寸為長 20 m、寬 20 m、深度至地下 15 m，做為主要模擬區域。為了避免邊界效應影響，將主要模擬區域向外延伸，整體模型尺寸為長 80 m、寬 60 m。

而在網格切割部分，各自將 X 軸分割成 35 個網格(grid)、Y 軸分割為 34 個網格、Z 則切割成 13 個網格。在主要模擬區的 X 軸、Y 軸及 Z 軸方向網格皆細分為 1 m/grid，如圖 3-1。此區域之三維座標是採用卡氏座標(Cartesian System)表示之。為了呈現加油站配置情況，而在主要模擬區內，放置四個儲油量約為 55 公秉之儲油槽。尺寸為矩形面積 $3 \times 3 \text{ m}^2$ 、長度 8.2 m，並埋設於地表下 1 m 處，以符合規範之地下油槽頂部距地表至少 0.6 m 之規定，如圖 3-2，網格中藍色網格即為油槽。

細顆粒土層屬於相對不易整治的地質條件，但又是必須面對的議題，舉例圖 3-3 為蘆竹加油站污染場址地質剖面圖，圖中顯示其為上方細顆粒土層，下方粗顆粒土層。本研究加油站的模型土層採取雙層配置，如圖 3-4，地表至地下 4m 為粉土層，地下 4 m 以下為砂土層，地下水位則在地下 5m 處。粉土層之水平方向絕對滲透係數為 $5 \times 10^{-14} \text{ m}^2$ ；砂土層之水平方向絕對滲透係數為 $2 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ 。而垂直方向則參考一般垂直透水係數約為水平透水係數之 1/5~1/100 間(Noonan and Curtis, 1990; Testa and Winegardner, 1991; Nyer, 1993; Domenico and Schwartz, 1998)，表 3-1 為土層參數整理。

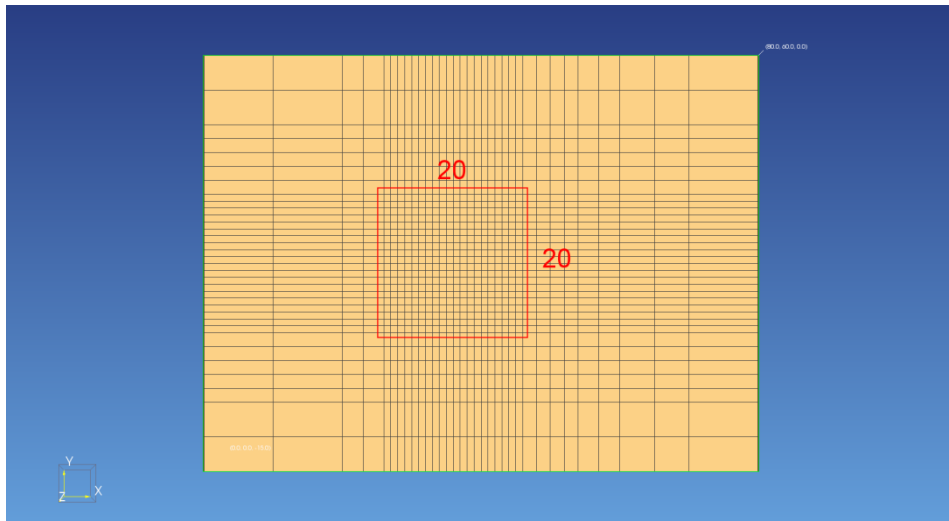


圖 3-1 模擬場址 XY 面俯視圖

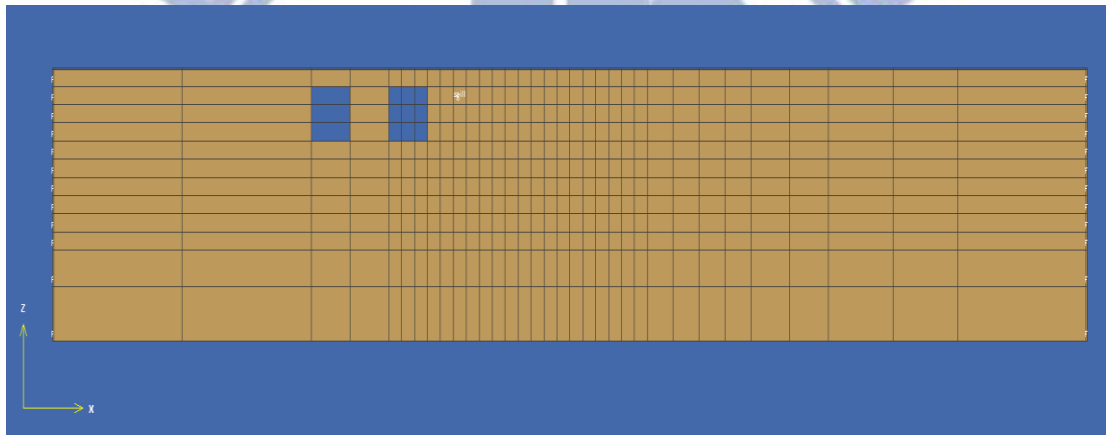


圖 3-2 模擬場址 XZ 剖面

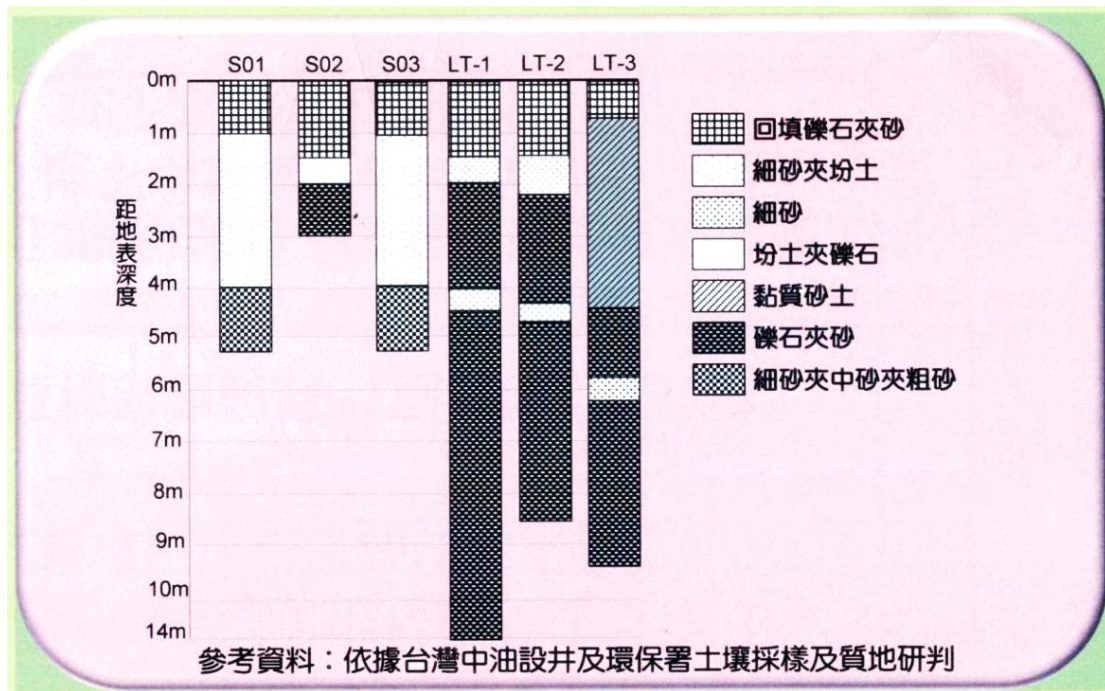


圖 3-3 蘆竹加油站污染場址地質剖面圖(新野科技，2014)

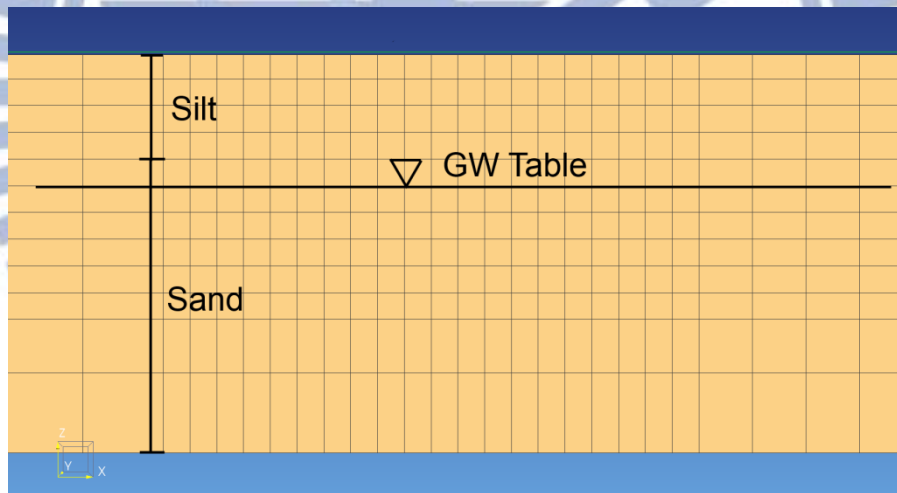


圖 3-4 土層配置

表 3-1 模擬土壤滲透係數

	水平向本質滲透係數 (Horizontal Intrinsic Permeability)	垂直向本質滲透係數 (Vertical Intrinsic Permeability)	孔隙率 (Porosity)
砂土	$2 \times 10^{-12} \text{ m}^2$	$4 \times 10^{-13} \text{ m}^2$	0.3
粉土	$5 \times 10^{-14} \text{ m}^2$	$1 \times 10^{-14} \text{ m}^2$	0.4

在土水特徵曲線(SWCC)方面，皆採用 Paker et al.(1987)的理論，粗顆粒土壤相關參數為： $S_m=0$ 、 $n=1.84$ 、 $\alpha_{gn}=0.99$ 、 $\alpha_{gw}=0.11$ ，其中 S_m 為殘餘飽和度， n 和 α 皆為曲線形狀參數(Curve Shape Parameter)，整理如下表 3-2；相對滲透係數是使用 Stone's 3-Phase 的理論，相關參數為： $S_{wr}=0.1$ 、 $S_{nr}=0.05$ 、 $S_{gr}=0.05$ 、 $n=3$ ，其中 S_{wr} 為水殘餘飽和度， S_{nr} 為 NAPL 殘餘飽和度， S_{gr} 為氣體殘餘飽和度， n 為曲線形狀參數。由於現地整治上若將 SWCC 納入設計條件會大幅增加設計的難度，所以本研究並未針對 SWCC 深入探討。

表 3-2 土壤特徵曲線相關參數

參數	砂土	粉土
S_m	0	0.36
n	1.84	1.86
α_{gn}	0.99	0.108
α_{gw}	0.11	0.06

3.2 穩態地下水水流模型建立

地下水流場址部分，上下游邊界條件為定水頭邊界(Dirichlet Boundary Condition)，地下水流梯度設置為 0.005，為了符合一般加油站地表為柏油路面，地表設為不透氣層，並且假設地表無逕流及無降雨入滲情形發生。地下水流方向皆為由左向右 X 方向流動。由於 TMVOC 無法呈現水位等勢能線，下圖 3-5 僅表示場址中水的飽和度分佈圖，圖中右側圖標的 SW 為水的飽和度(Water Saturation)。

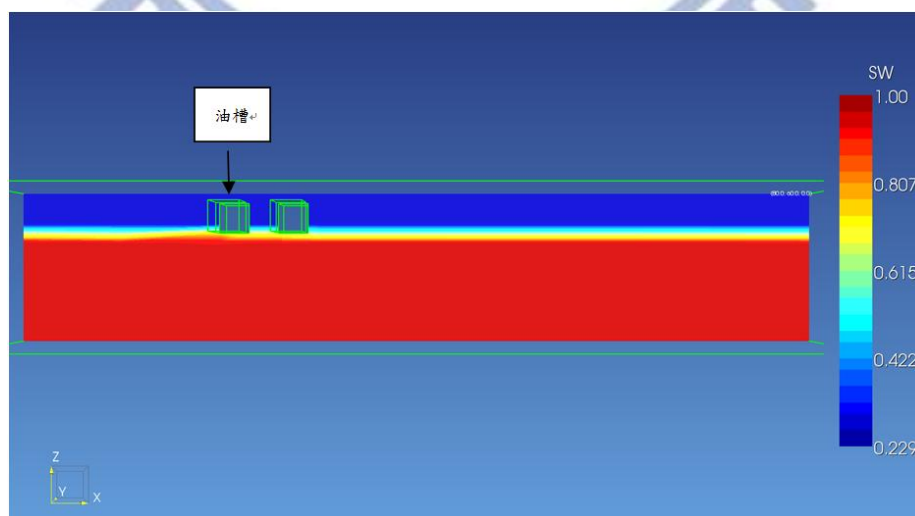


圖 3-5 穩態地下水水流場

3.3 油品洩漏情境設定

依據參考文獻所顯示的油品污染狀況統計，本研究假設油品洩漏發生在距離油槽 2m 的管線，洩漏點的位置如圖 3-6 所示。

由於油品內含有各種成分，但是過多成分會使模擬時間過長，因此採用江潤翰(2012)所設計的簡化油品，將油品分為「4+1」種代表性的成分，分別為苯、甲苯、乙本、二甲苯以及正辛烷。洩漏速率則假設為 2 kg/day，並以此速率維持二年，二年後總洩漏量達到 1460 kg。各成分洩漏速率以及在油品所占百分比整理於表 3-3。TMVOC 中各 VOC 成分在的相關化學參數設定可參考附錄。

此外，本研究在模擬時還有幾項假設條件，分述如後。在模擬時設定在恆溫 25°C 下，讓各成分化學參數不會因溫度而產生變化；在水溶液相因平流與機械延散遠較分子擴散速度快，因此各成分也沒有針對擴散(Diffusion)設定。在地下水水位部分，不考慮地下水水位季節性波動。

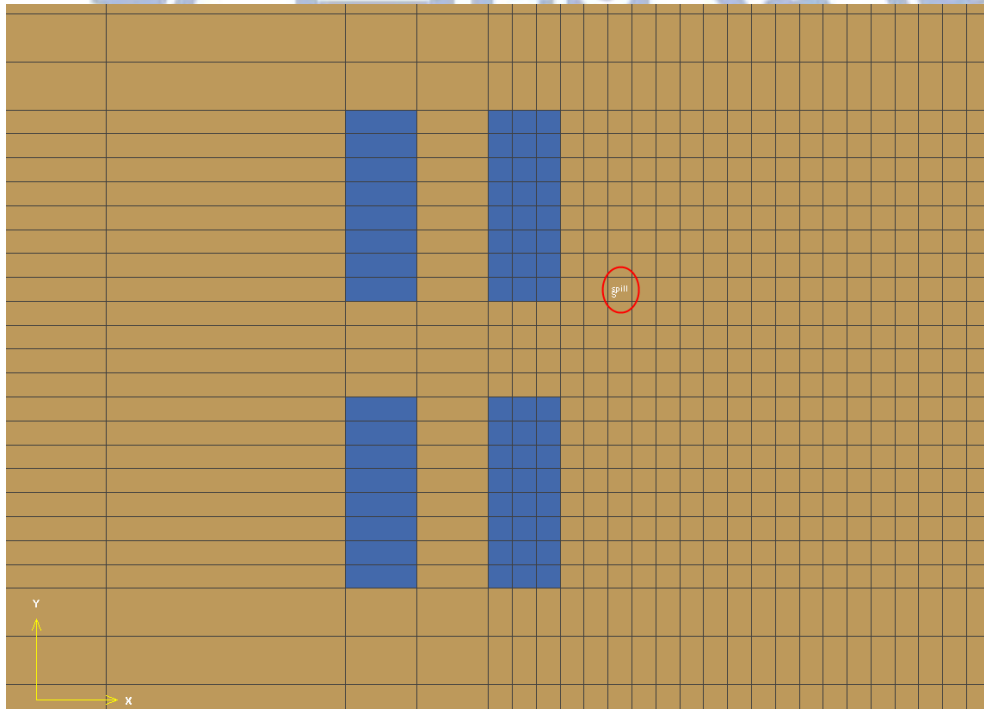


圖 3-6 模型俯視圖，藍色網格為油槽，紅色圓圈為油品洩漏點

表 3-3 油品成分與洩漏量

成分	百分比(%)	洩漏速率(kg/s)	兩年洩漏量(kg)
苯	3.5	8.1×10^{-7}	51
甲苯	7	1.62×10^{-6}	102.17
乙苯	5.5	1.27×10^{-6}	80.1
二甲苯	1.5	3.472×10^{-7}	21.9
正辛烷	82.5	1.91×10^{-5}	1204.68
總計	100	2.315×10^{-5}	1460

3.4 空氣注入井與土壤氣體抽氣井設置

土壤氣體抽氣井分為垂直及水平式，本場址採用垂直式。至於井的數量係以影響範圍評估，其方法如下：

$$\text{單一抽氣井之影響範圍} = \pi \times (\text{ROI})^2$$

$$\text{所需抽氣井數量} = \text{處理面積}(\text{m}^2) / \text{單一抽氣井之影響面積}(\text{m}^2/\text{well})$$

ROI(影響半徑)：以抽氣井為原點，觀察能造成水柱下降至少 0.1 in(0.25 cm) 之最大距離，表 3-4 為影響半徑之經驗數據。

表 3-4 不同土壤地質之 SVE 影響半徑(Wong et al, 1997)

土壤地質(Soil Type)	影響半徑(ROI, ft)
粗砂(Coarse Sand)	>100
細砂(Fine Sand)	60~100
粉土(Silt)	20~40
黏土(Clay)	<20

本研究 SVE 設置在粉土層，依表 3-4 SVE 影響半徑為 6~12 m(20-40 ft)，採用 6 m 設計。假設土壤孔隙體積交換時間為 8 小時，也就是說預計 24 小時內抽取影響範圍內 3 倍的土壤孔隙體積，單井抽氣量= $6 \text{ m} \times 6 \text{ m} \times \pi \times 5 \text{ m}$ (地下水位深度) $\times 0.4$ (土壤孔隙率) $\times 3/24 \text{ hr} = 28.27 \text{ m}^3/\text{hr}$ 。本場址的處理面積預估約為 66 m^2 ，單一 SVE 井影響範圍為 113 m^2 ，而本研究的初始污染範圍約 66 m^2 ，所以理論上只要一口抽氣井即覆蓋所有污染範圍，但是，為避免進入地下水的污染物快速向下游移動，在下游處多設一口 SVE 井，總共兩口井，總抽氣量為 $56.5 \text{ m}^3/\text{hr}$ ，相關位置參考圖 3-7。SVE 抽氣井假設為 4 吋井，深度 4 m，開篩 1 至 4 m。

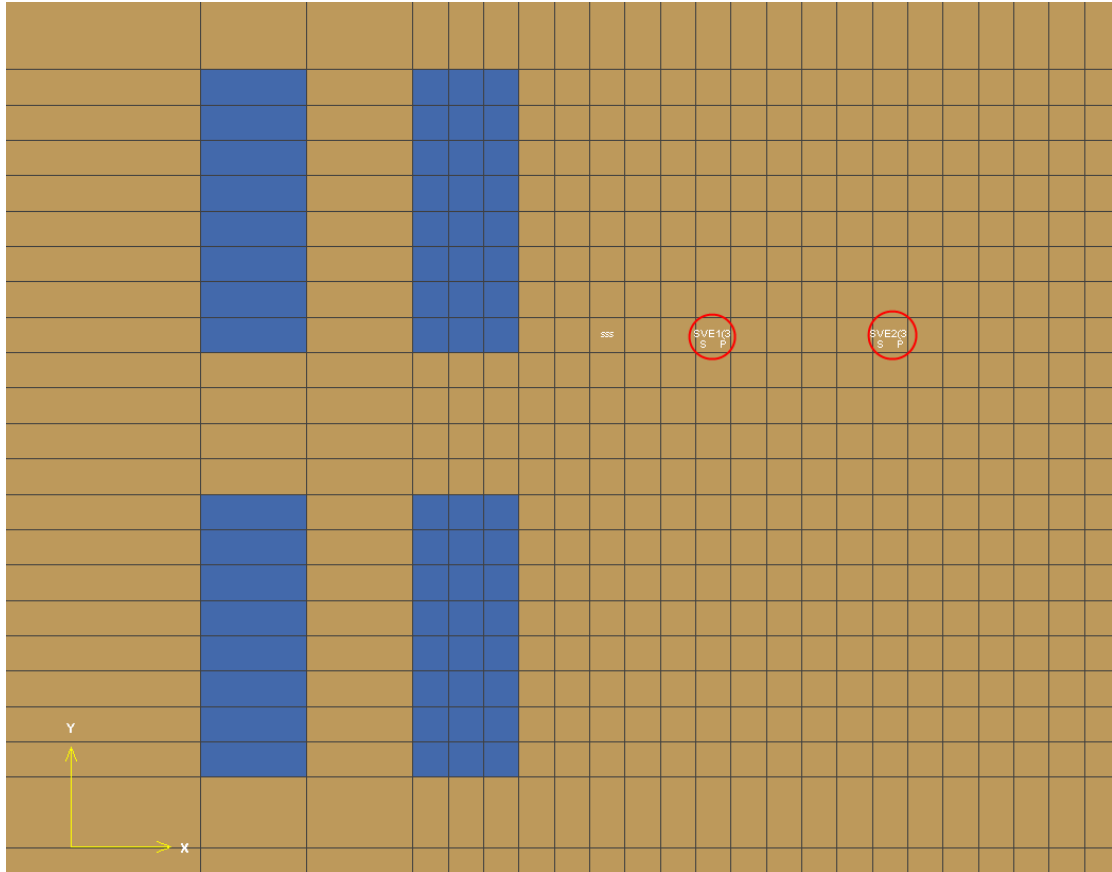


圖 3-7 SVE 井設置位置 x-y 剖面圖

在 TMVOC 是以 Deliverability Model 中的生產力指標(Productivity Index, PI)和井底壓力來描述抽取井強度(Coats, 1977)。藉由井周邊區域與井底形成壓力差，而 PI 則是定義在單位壓差下每單位時間的出水量。其公式如下：

$$q_{\beta} = \frac{k_{r,\beta}}{\mu_{\beta}} \rho_{\beta} \cdot PI \cdot (P_{\beta} - P_{wb}) \dots \dots \dots (式 3-1)$$

式中 q_{β} 為抽取流量、 $k_{r,\beta}$ 為相對滲透係數、 μ_{β} 為在 β 相中黏滯係數、 ρ_{β} 為在 β 相中密度、PI 生產力指標、 P_{β} 和 P_{wb} 分別為在 β 相中壓力及井底壓力。

而 SVE 的設定參考 McCray and Falta(1997)使用的設定：PI 為 $1.3 \times 10^{-10} \text{ m}^3$ ，井底壓力為 0.9 倍大氣壓力，抽氣量估計約 54 cfm，約等於 $91 \text{ m}^3/\text{hr}$ 。由於實際抽氣量不易估計，本研究利用 McCray and Falta 的設定做換算，參數整理如下表 3-5。

表 3-5 單一 SVE 井參數

表面因子	0
生產力指標	$1.3 \times 10^{-10} \text{ m}^3$
井底壓力	98000 Pa
大氣壓力	101325 Pa
大氣壓力與井底壓力差值	3325 Pa
抽氣流量	約 $28.27 \text{ m}^3/\text{hr}$

空氣注入井設計開篩段長度 1 m，開篩的深度由地表下 6 m 至地表下 7 m，符合美國環保署的設計原則，開篩處在已知污染團最深深度往下 1~2 英尺。每一口井空氣量為控制參數，一般注入空氣流量約 1~10 cfm。一般而言空氣注入井需在現地進行前導試驗(Pilot Test)來決定影響範圍，由於土層為上方細顆粒，下方粗顆粒，因此可以預期空氣由下方粗顆粒層上升至細顆粒層時，會因為氣體不易垂直移動，而由水平相擴散，使影響範圍擴大。本研究不預設任何影響範圍前提下，共設計六口井，井的位置如下圖 3-8，紅色圓圈為空氣注入井位置，藍色圓圈為洩漏點正下方位置。六口井以包圍氣體抽取井的方式設置，上游和下游各一口注氣井。

單一井先假設注氣井流量為 $1.7 \text{ m}^3/\text{hr}$ ，相當於 1 cfm，總注氣量為 $10.2 \text{ m}^3/\text{hr}$ 。本研究預計採取不同空氣注入量做為控制參數。

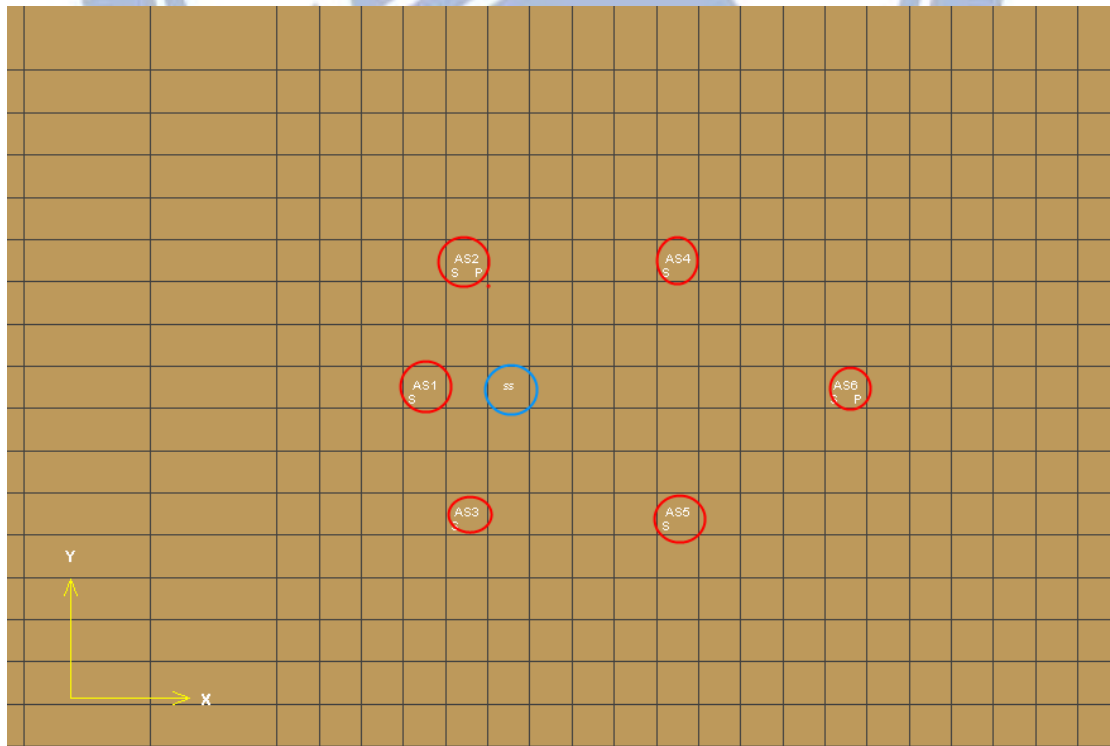


圖 3-8 AS 井相對位置 x-z 剖面圖

第四章 模擬結果分析

本章將針對加油站油品污染模擬結果進行討論，預先選定數個污染物初始濃度較高的網格作為監測點，觀察這幾個網格位置的污染物濃度變化。本研究主要比較的指標為水溶液相的苯以及土壤中殘留的總石油碳氫化合物(total petroleum hydrocarbon, TPH)，主要藉由水相苯觀察 AS 對地下水污染物的整治效果；TPH 則可以觀察非飽和區的整治情況。首先第一部分先說明油品洩漏模擬結果。第二部分說明在同樣的地質條件下，不同的 AS 注氣量會造成整治效果的差異，同時另以均質砂地層的模擬做為對照組。第三部分係探討不同 SVE 抽氣量對整治之影響。第四部分探討佈井距離的影響，僅移動單一 SVE 井做比較，佈井位置改變對對流勢能變化有不同影響。最後第五部分，嘗試以不同的佈井配置觀察模擬結果。下表 4-1 為模擬案例列表。

表 4-1 模擬案例列表

代號	控制參數			備註
	單井空氣注入量	單井抽氣量	SVE 與洩漏點距離	
Case 1-1	1 cfm(1.7 m ³ /hr)	28.27 m ³ /hr	3 m	
Case 1-2	3 cfm(5.1 m ³ /hr)	28.27 m ³ /hr	3 m	
Case 1-3	5 cfm(8.5 m ³ /hr)	28.27 m ³ /hr	3 m	
Case 2-1	3 cfm(5.1 m ³ /hr)	18.8 m ³ /hr	3 m	
Case 2-2	3 cfm(5.1 m ³ /hr)	91.4 m ³ /hr	3 m	
Case 3-1	3 cfm(5.1 m ³ /hr)	28.27 m ³ /hr	2 m	
Case 3-2	3 cfm(5.1 m ³ /hr)	28.27 m ³ /hr	1 m	
Case 3-3	3 cfm(5.1 m ³ /hr)	91.4 m ³ /hr	1 m	
Case 4-1	1 cfm(1.7 m ³ /hr)	28.27 m ³ /hr	3 m	均質砂
Case 4-2	3 cfm(5.1 m ³ /hr)	28.27 m ³ /hr	3 m	均質砂
Case 4-3	3 cfm(5.1 m ³ /hr)	28.27 m ³ /hr	2 m	均質砂
Case 5-1	3 cfm(5.1 m ³ /hr)	28.27 m ³ /hr	3 m	直線佈 AS 井
Case 5-2	3 cfm(5.1 m ³ /hr)	28.27 m ³ /hr	3 m	三角形佈 AS 井

如上述，本研究將以幾個污染物初始濃度較高的網格作為監測點，以下將解說所取網格相對位置。首先是水相苯的部分，取四個網格作為監測點，四個網格皆在地下 5m 處，約在地下水位面附近。如圖 4-1，H2 網格為洩漏點正下方，H1 為上游 2 米處，H3 為下游 2 米處，H4 為下游 4m 處。

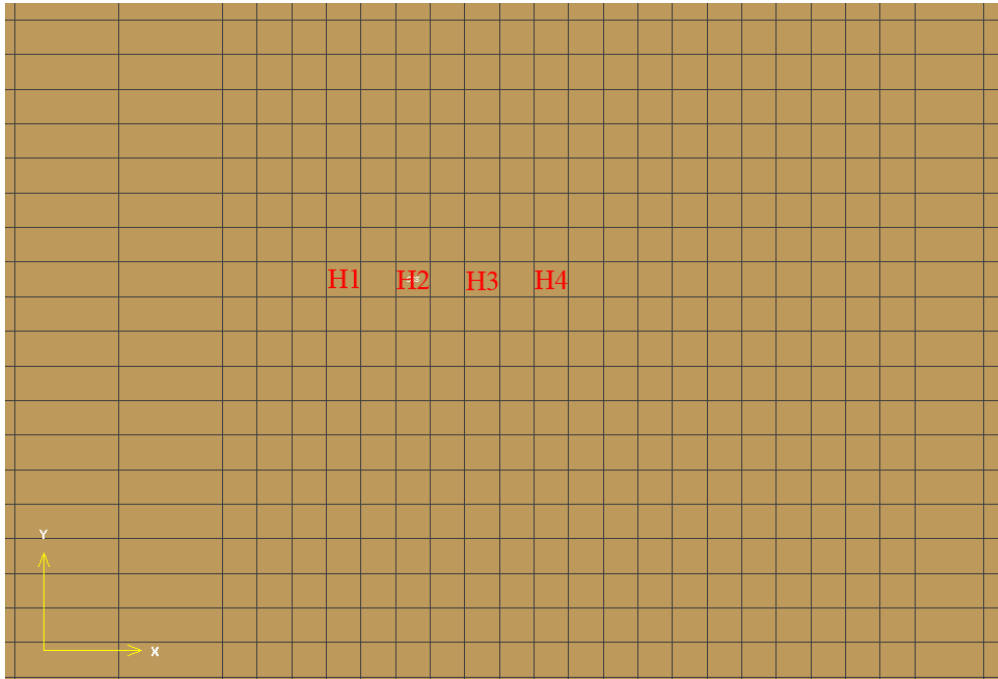


圖 4-1 水相苯監測點相關位置(x-y 剖面)

土壤中 TPH 濃度比較的網格如圖 4-2，V1 網格與油品洩漏點同一網格，V2 網格約在地下 2.5 m，V3 網格在地下 3.5 m 處，且 V3 網格是砂土土壤，三個網格皆在非飽和區內，表 4-2 整理各監測點位置說明。

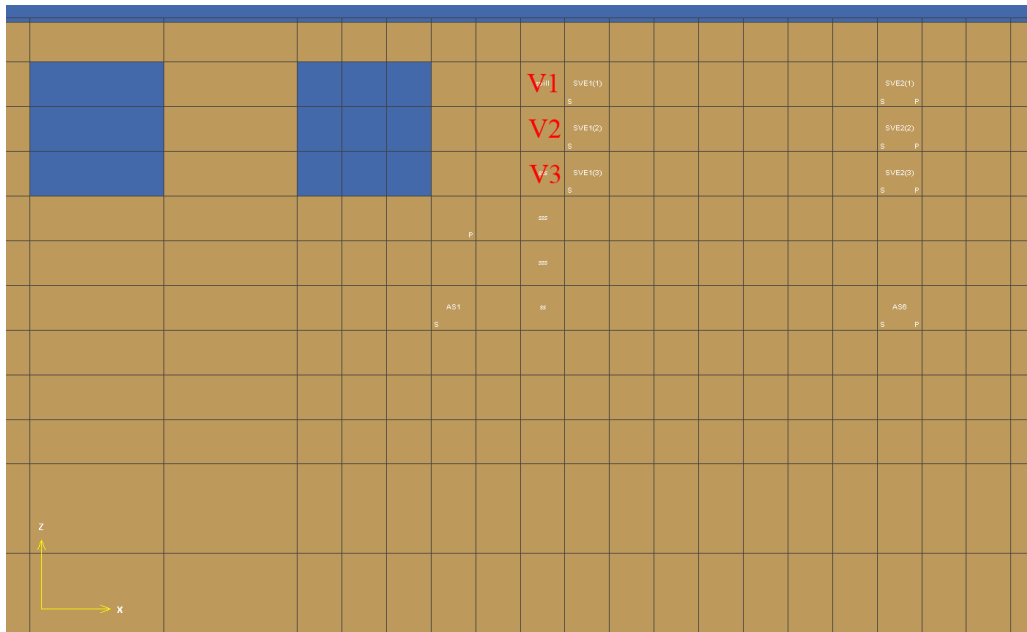


圖 4-2 TPH 監測點相關位置(x-z 剖面)

表 4-2 監測點位置說明

監測點	相對位置說明
V1	地下 1.5 m，同油品洩漏點位置
V2	地下 2.5 m，洩漏點正下方
V3	地下 3.5 m，洩漏點正下方
H1	地下 5 m，H2 上游 2 m
H2	地下 5 m，洩漏點正下方
H3	地下 5 m，H2 下游 2 m
H4	地下 5 m，H2 上游 4m

4.1 油品洩漏模擬結果

加油場基本參數設定完成後，進行一個連續 NAPL 洩漏污染源，每天兩公斤的滲漏量持續一年後結果如圖 4-3 和 4-4，圖中單位為水溶液相苯的莫耳分率。油品經重力向下滲漏，在細顆粒土層不易向下滲漏，相對地在水平向展開的範圍較大。油品遇到地下水層後，因假設的滲漏量較低、且滲漏時間較短，因此並未在地下水水位面上形成浮油。接觸到地下水水位面的油品中較易溶解的成分，如 BTEX，在溶解後快速被水流帶動，使迅速擴散。圖 4-5 為洩漏一年後的油品飽和度，從圖 4-6 可看出地下水水位面上並無純相油品，符合 U.S. EPA 提到的 AS 設計原則。監測網格的初始污染物濃度請如表 4-3。

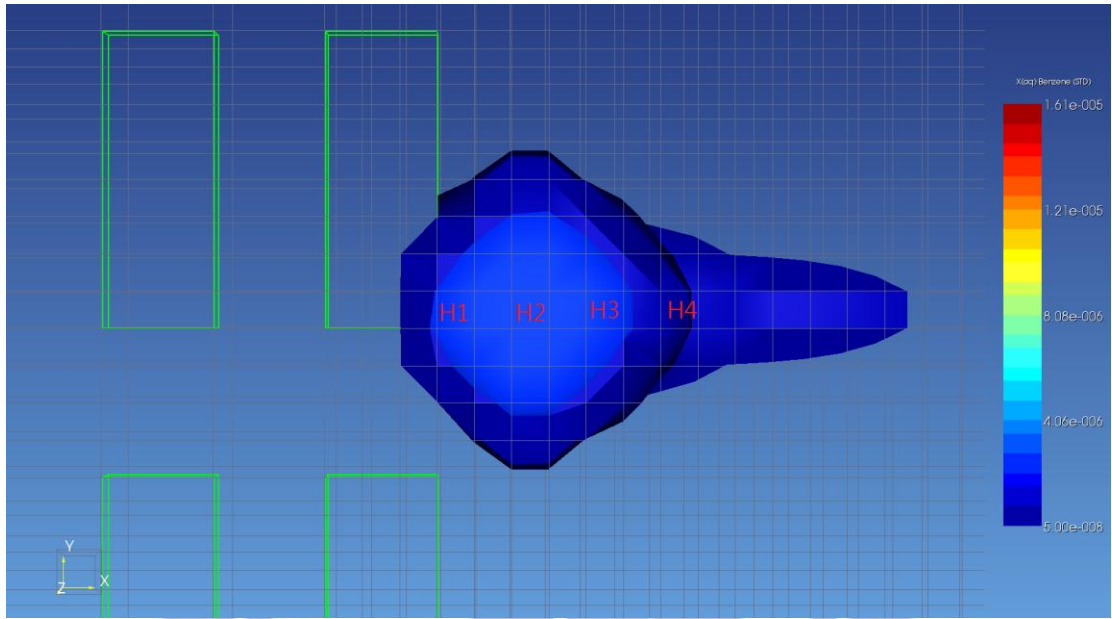


圖 4-3 水相苯兩年後分佈之 x-y 剖面圖

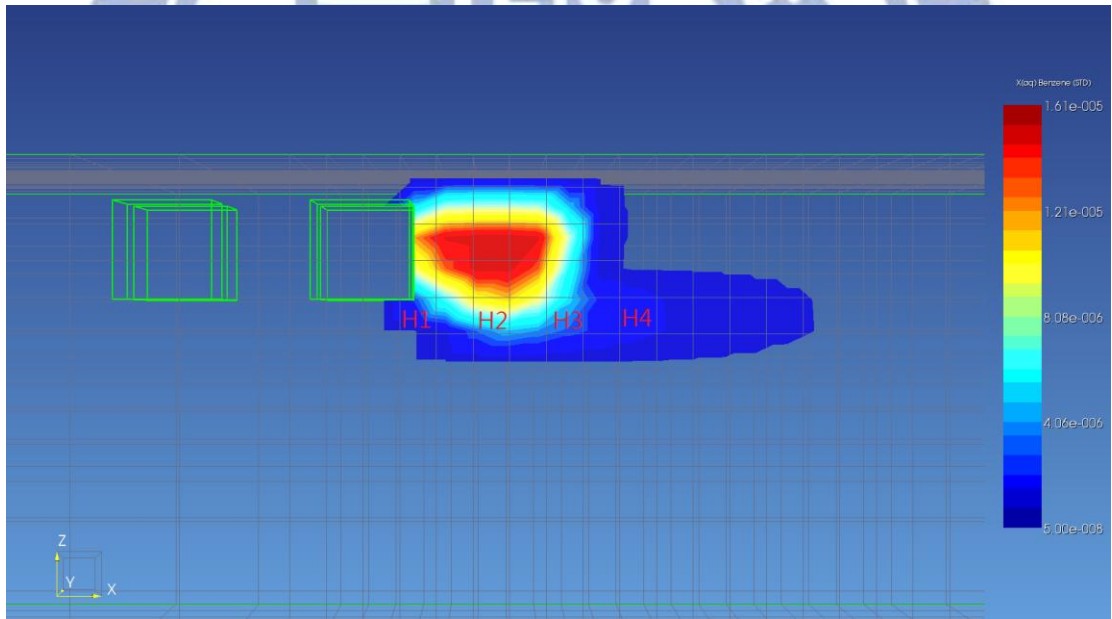


圖 4-4 水相苯兩年後分佈之 x-z 剖面圖

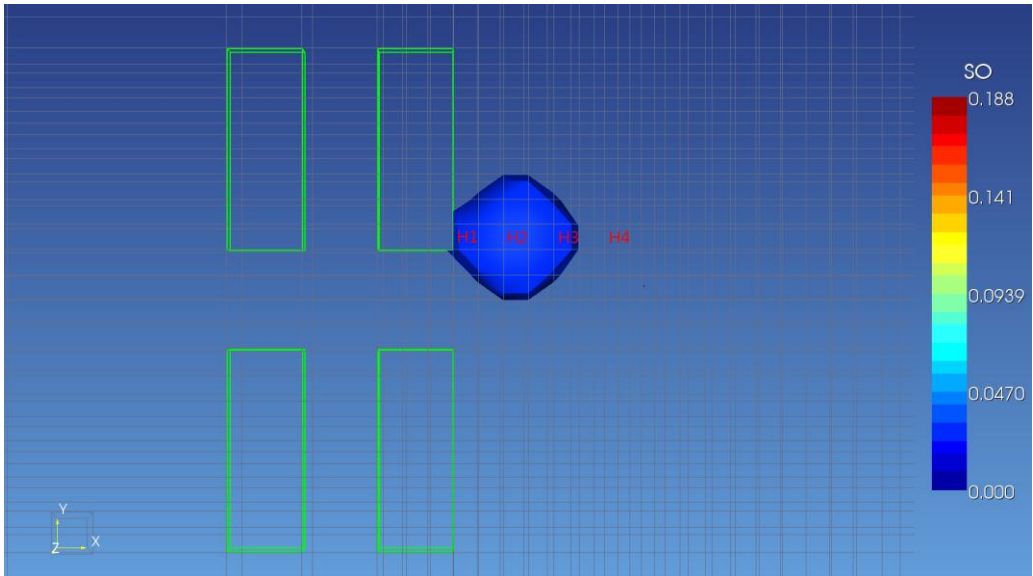


圖 4-5 油品飽和度兩年後 x-y 剖面圖

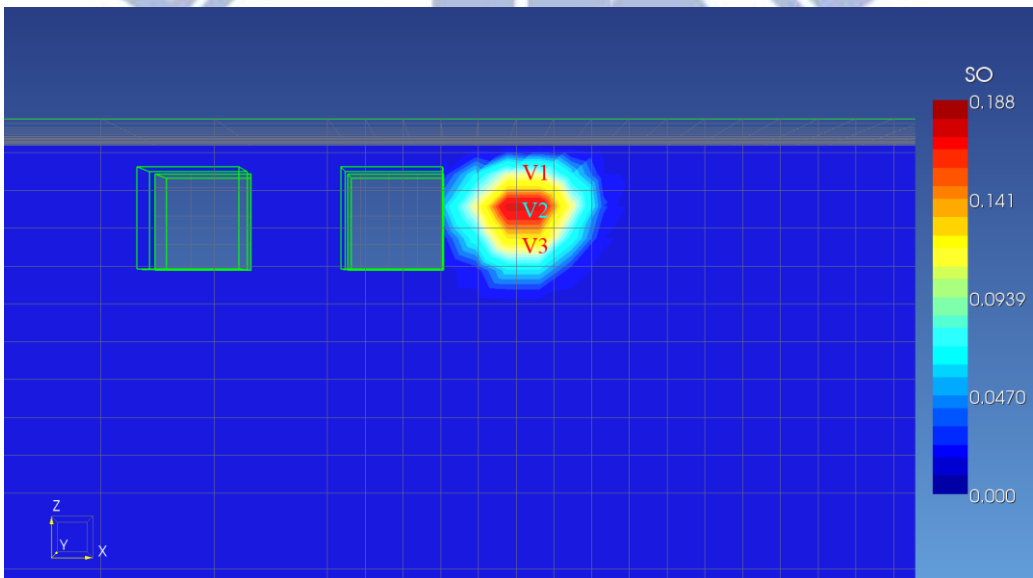


圖 4-6 油品飽和度兩年後 x-z 剖面圖

表 4-3 滲漏結果之初始污染物濃度

網格代號	Benzene aq (ppm)				TPH (ppm)		
	H1	H2	H3	H4	V1	V2	V3
初始濃度	0.081	11.440	9.488	5.01	80,829	60,586	47,142

4.2 空氣注入量之影響

本節敘述在相同條件下，模擬整治時改變空氣注入井的空氣注入量，並比較結果。圖 4-7 為 Case 1-1 的水相苯濃度，圖上標示 0.05 ppm，該值為水相苯的地下水管制標準。圖中可知，H1 網格約 160 天整治成功。H1 上游處濃度先上升後下降，此現象在本研究不同的模擬案例都發生，推測應該是在初期空氣注入時，揮發成氣相的油品尚未順利往上移動，且有油槽阻礙氣體往上方垂直移動便往上游側移動（圖 4-10），導致上游濃度上升。之後上游水相苯濃度又快速下降，應是因為水相苯轉換成氣相，或是往下游流動，且上游濃度本來就不高。而初始濃度最高的 H2 網格，在三年的模擬時間內完全未達到管制標準以下，因此 Case 1-1 顯示以空氣注入法整治無法有效除去水中的苯。初始濃度次高的 H3 網格，約在 860 天後整治成功。最下游的 H4 網格，由於下游濃度本來就不高，且位置接近 SVE 井，因此約 4 天苯濃度就已低於 0.05 ppm。

Case 1-2(圖 4-8)水相苯的部分，H1 網格也一樣濃度先上升後下降的情形，約 210 天時苯濃度已低於管制標準，H2 網格則需約 620 天，H3 網格約 275 天，H4 網格約 2 天。整體來說，就水相苯的部分，Case 1-2 的整治是成功的。Case 1-3(圖 4-9)則整治速率更快，苯濃度低於管制標準所需要的系統操作時間，H1 網格約 150 天，H2 網格約 360 天，H3 網格約 180 天，H4 網格約 1 天半。

比較 Case 1-1、1-2 以及 1-3，僅以濃度最高的 H2 網格比較，圖 4-11 顯示隨著 AS 注氣量變大，對於整治效果有明顯提升。

非飽和區的部分，土壤中 TPH 的管制標準為 1000 ppm，圖 4-12、圖 4-13 和圖 4-14 皆可發現經過 SVE 抽氣後，TPH 無法全部降低到管制標準以下，顯示出依據預設的影響範圍所設置的 SVE 抽氣井無法發揮效果。從這些案例可以發現，V1 雖然初始濃度較高，但濃度下降的速度比 V2 網格快。可能是因為 V1 網格的初始水飽和度比 V2 網格的初始水飽和度低(圖 4-15)，因此 V1 網格的空氣滲透係數比 V2 網格高，所以 V1 網格中的殘留油品相對容易揮發與抽除。V3 網格整治效果遠比 V1、V2 網格好是因為 V3 網格是屬於砂性土壤。

以均質土壤的 Case 4-1(圖 4-16)與非均質土壤的 Case 1-1(圖 4-7)比較，均質土壤的整治效率明顯高很多，而 Case 1-1 是無法整治成功。Case 4-1 中可發現，H3 網格的濃度有先上升在下降的趨勢。推測可能是初期水溶相油品受到空氣氣流影響而揮發，但注氣量不足以使油品持續揮發，導致汽相油品上升後又凝結成水溶相油品；之後又發生水相苯未被整治且往下游流動(圖 4-17)，因此 Case 4-1 也是整治不成功的案例。不過這種狀況在 Case 4-2(圖 4-18)便沒有出現。

均質土壤在非飽和層整治方面是成功的，Case 4-1(圖 4-19)約需 625 天整治成功，而 Case 4-2(圖 4-20)則需 275 天。

非均質土壤 Case 1-2(圖 4-8)中，下游 H4 網格濃度下降得比上游 H1 快，但均質土壤 Case 4-2(圖 4-18)卻相反，上游 H1 網格的苯濃度下降得比 H4 快。估計可能是因為在均質土壤並不會發生先前提到的「揮發成氣相的油品尚未順利往上移動」這種情形，反而是上游污染物更直接得揮發後往垂直方向移動。

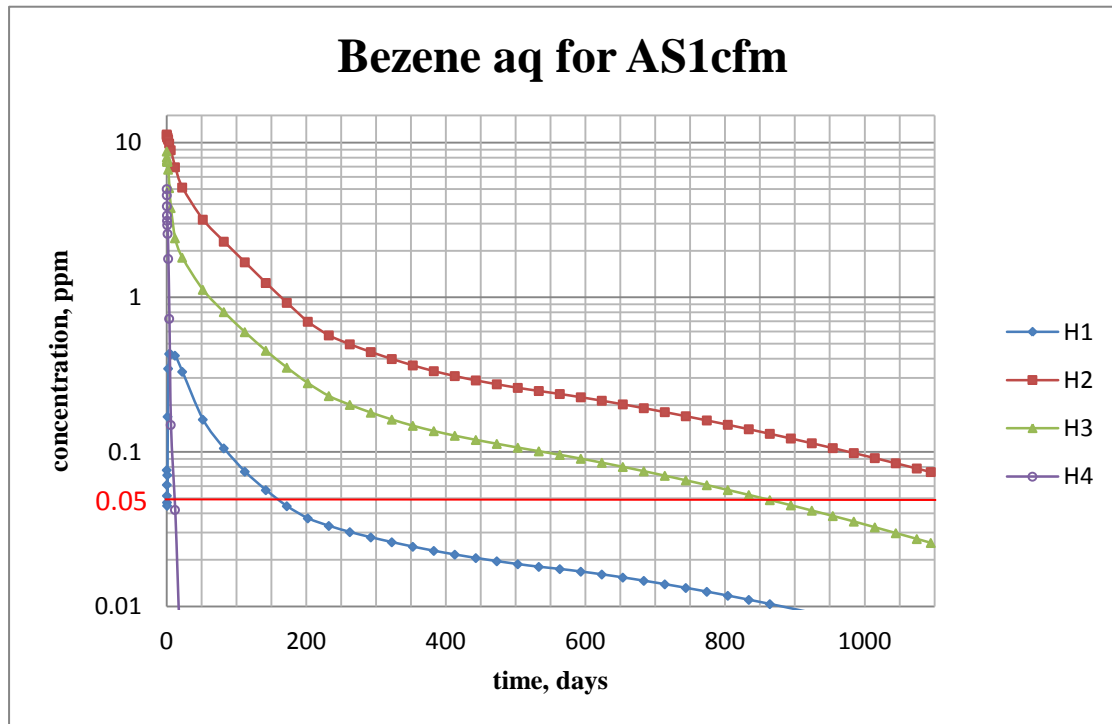


圖 4-7 Case 1-1 整治期間水相苯濃度變化

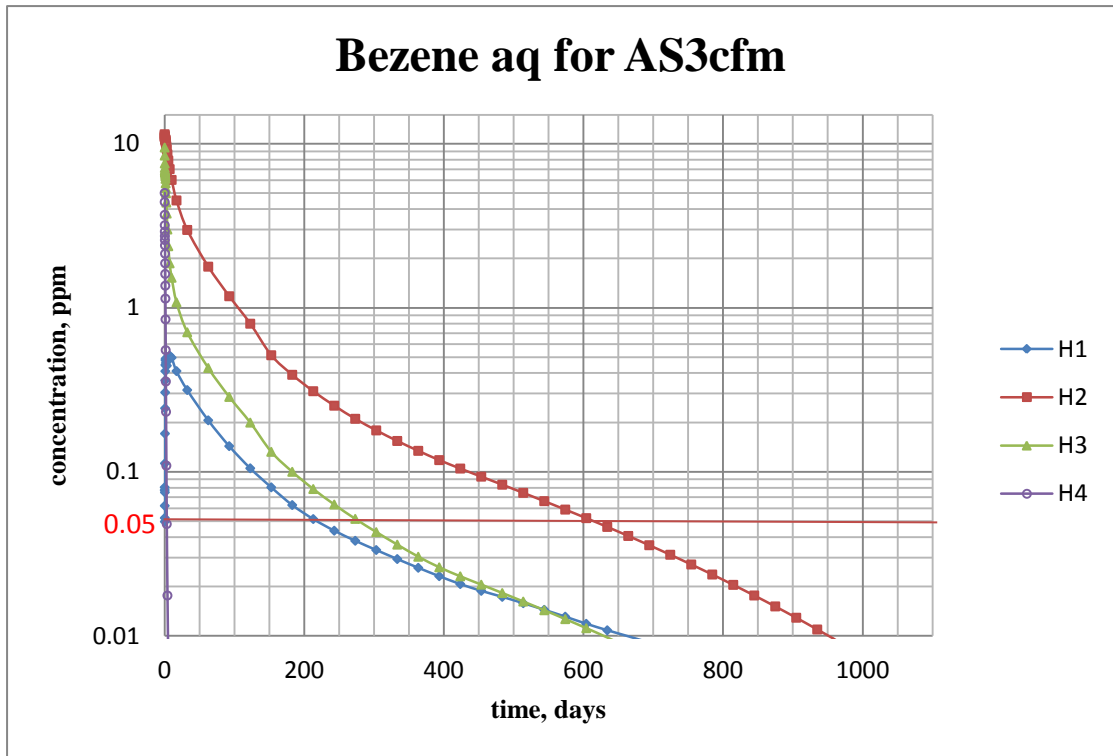


圖 4-8 Case 1-2 整治期間水相苯濃度變化

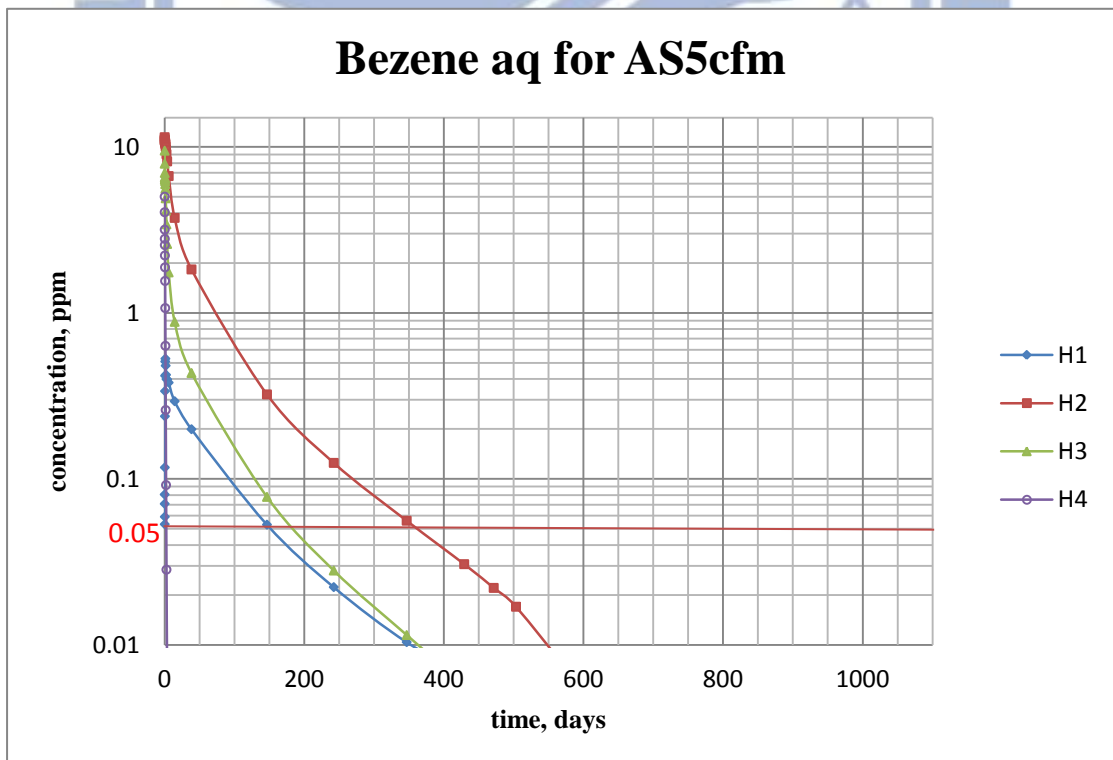


圖 4-9 Case 1-3 整治期間水相苯濃度變化

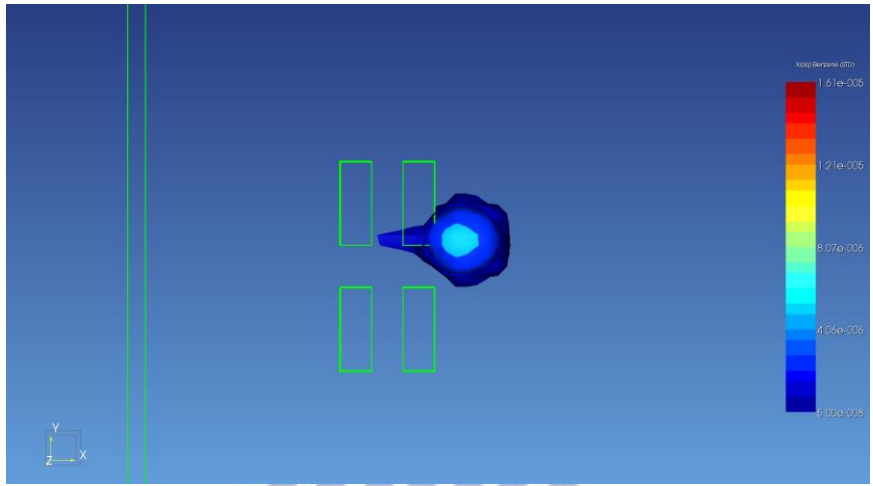


圖 4-10 Case 1-1 約 22 天水相苯濃度三維分佈 3D 圖

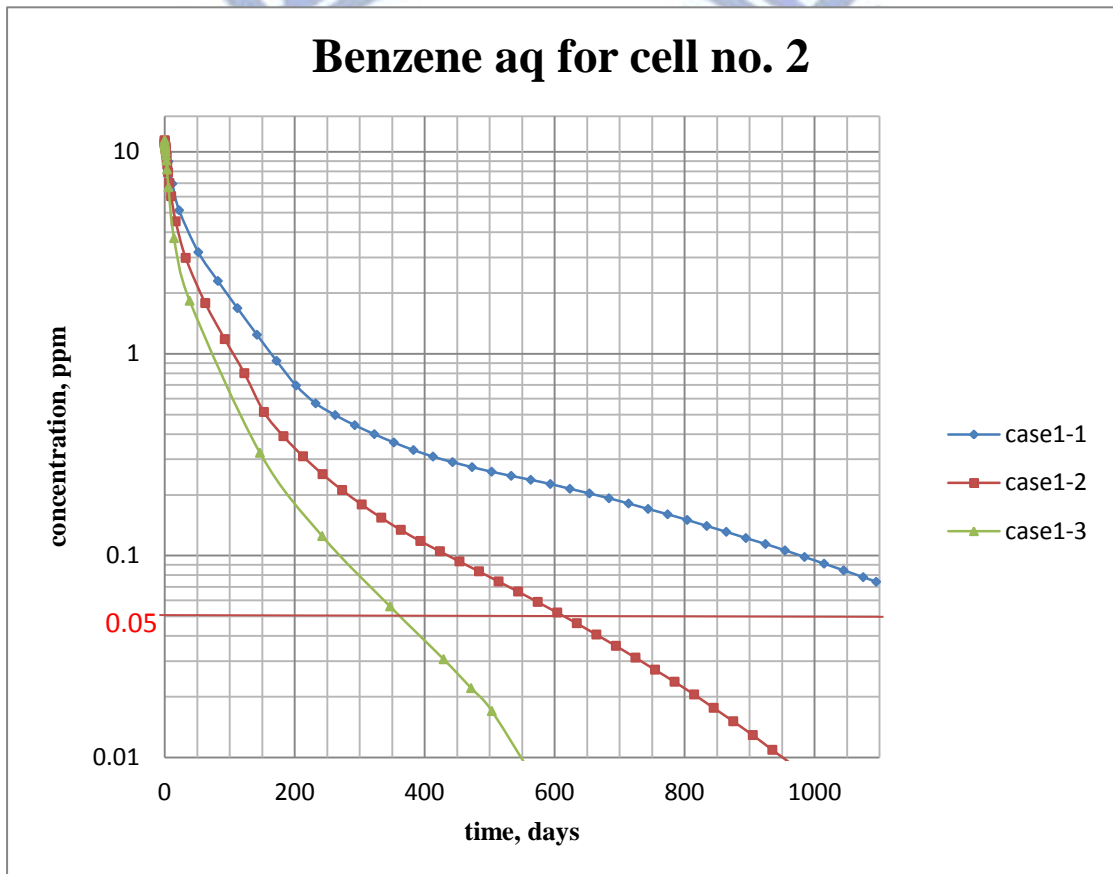


圖 4-11 Case 1-1、1-2 以及 1-3 的 H2 網格之水相苯比較

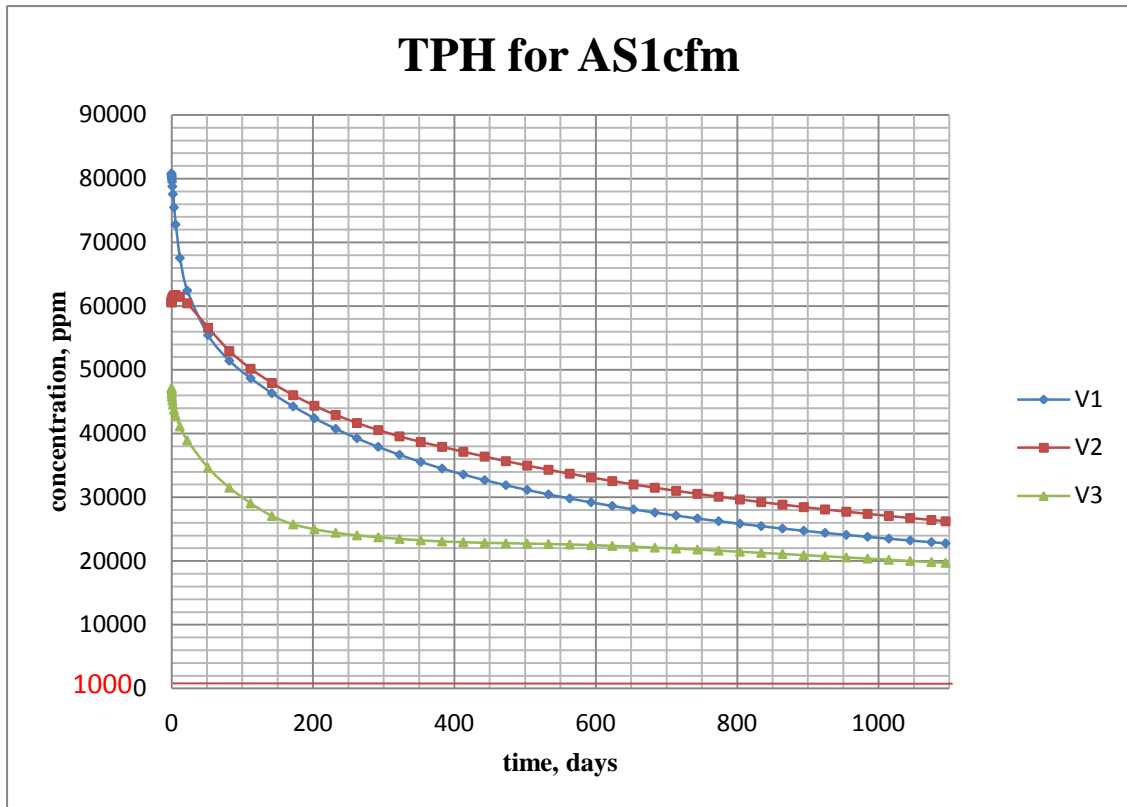


圖 4-12 Case 1-1 整治期間 TPH 濃度變化

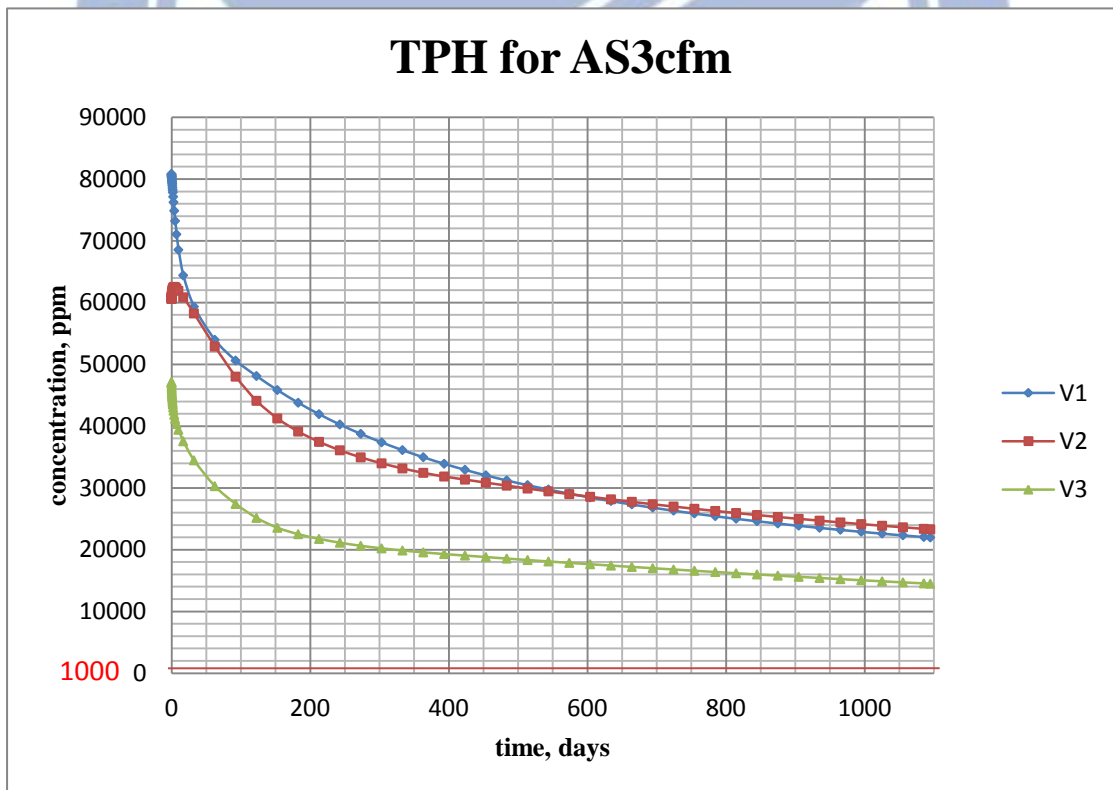


圖 4-13 Case 1-2 整治期間 TPH 濃度變化

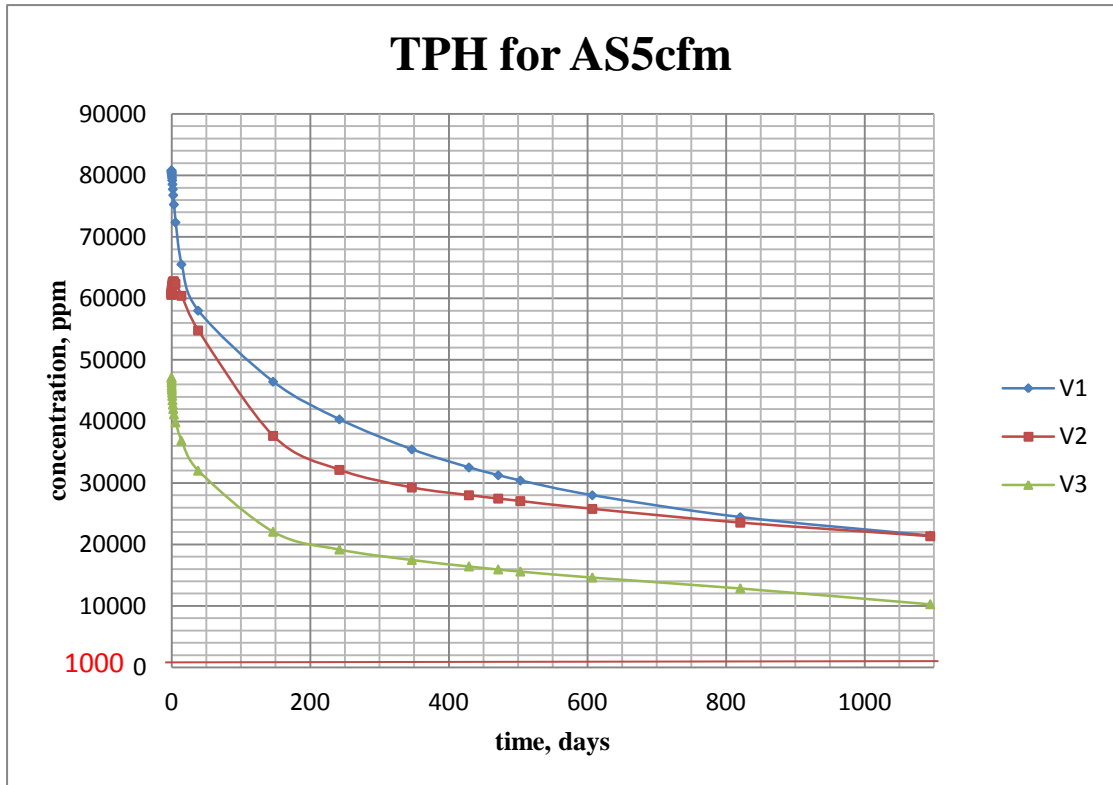


圖 4-14 Case 1-3 整治期間 TPH 濃度變化

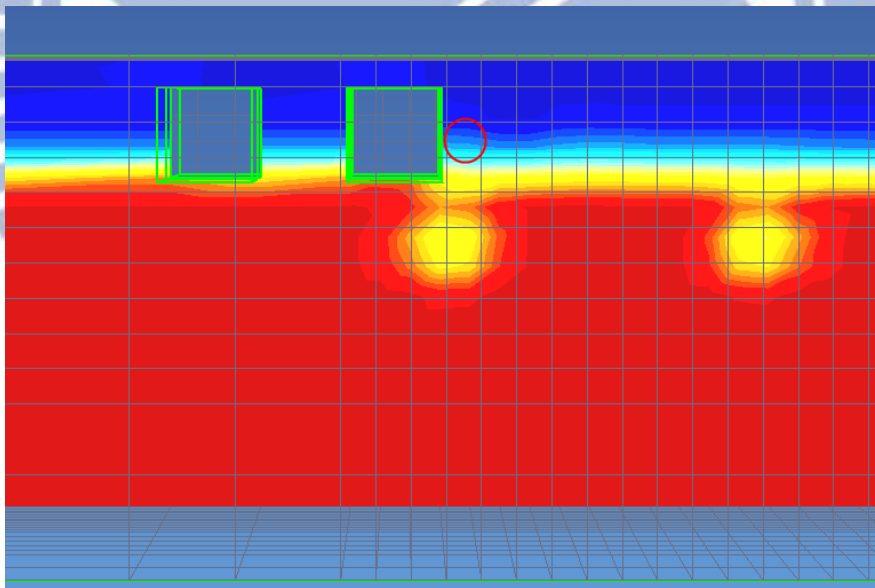


圖 4-15 模型初始水飽和度等值圖，紅色圓圈為 b 網格

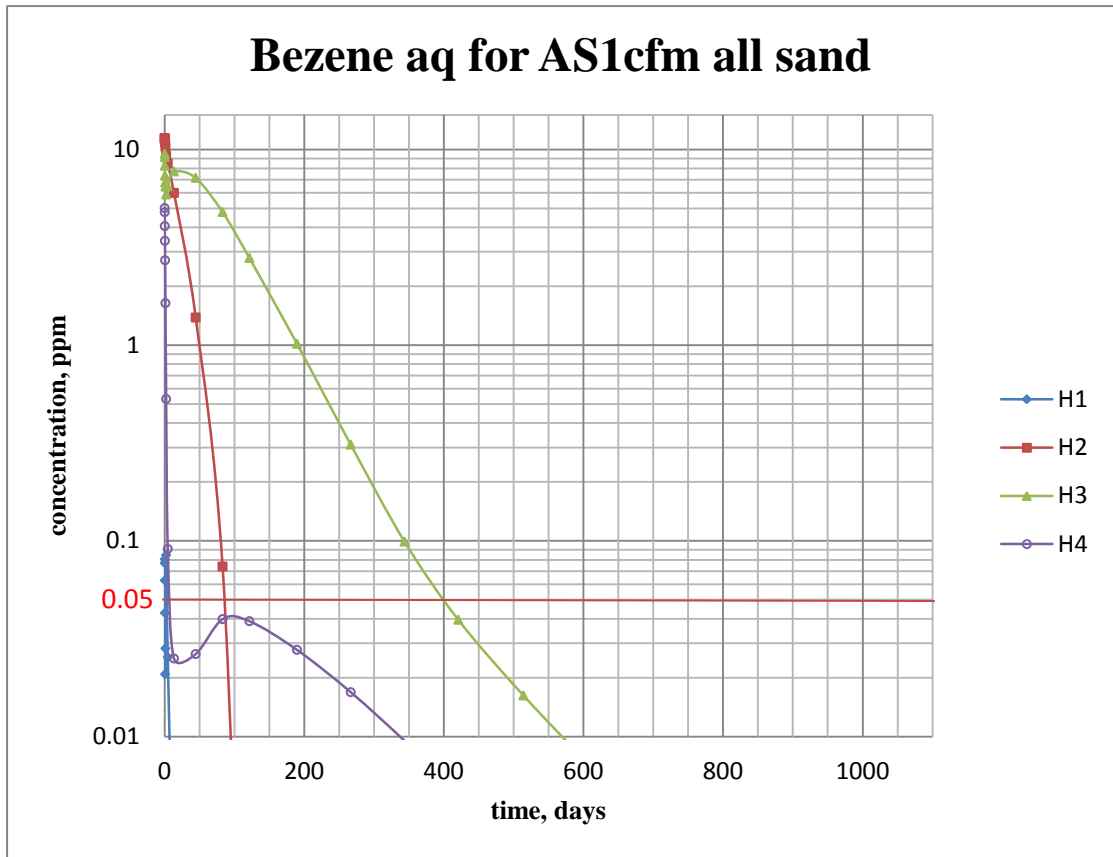


圖 4-16 Case 4-1 整治期間水相苯濃度變化

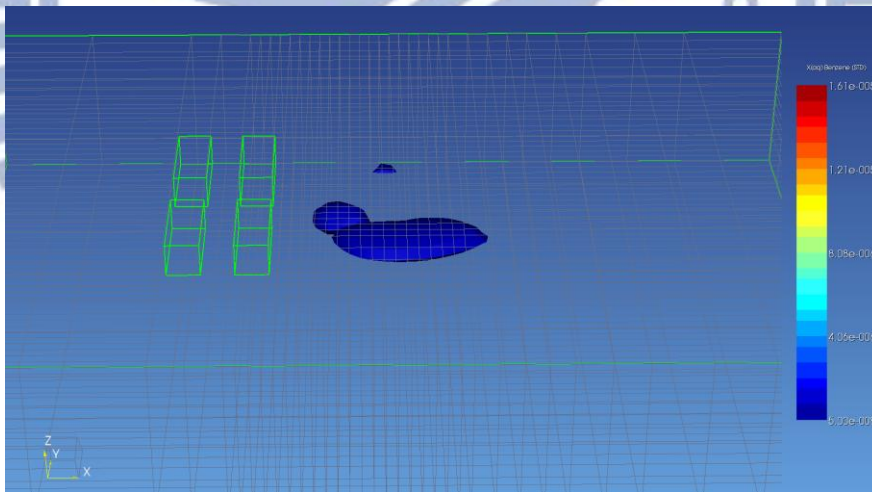


圖 4-17 Case 4-1 部分水相苯往下游流出 時間約 640 天

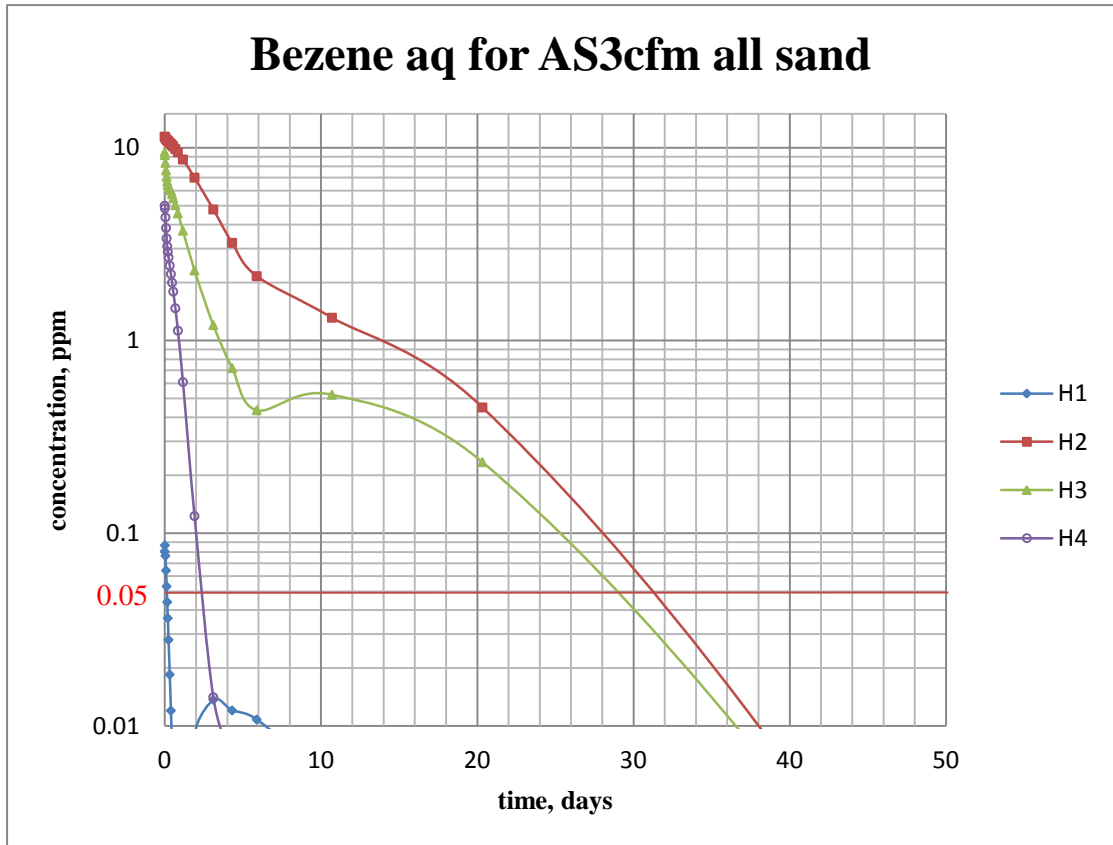


圖 4-18 Case 4-2 整治期間水相苯濃度變化



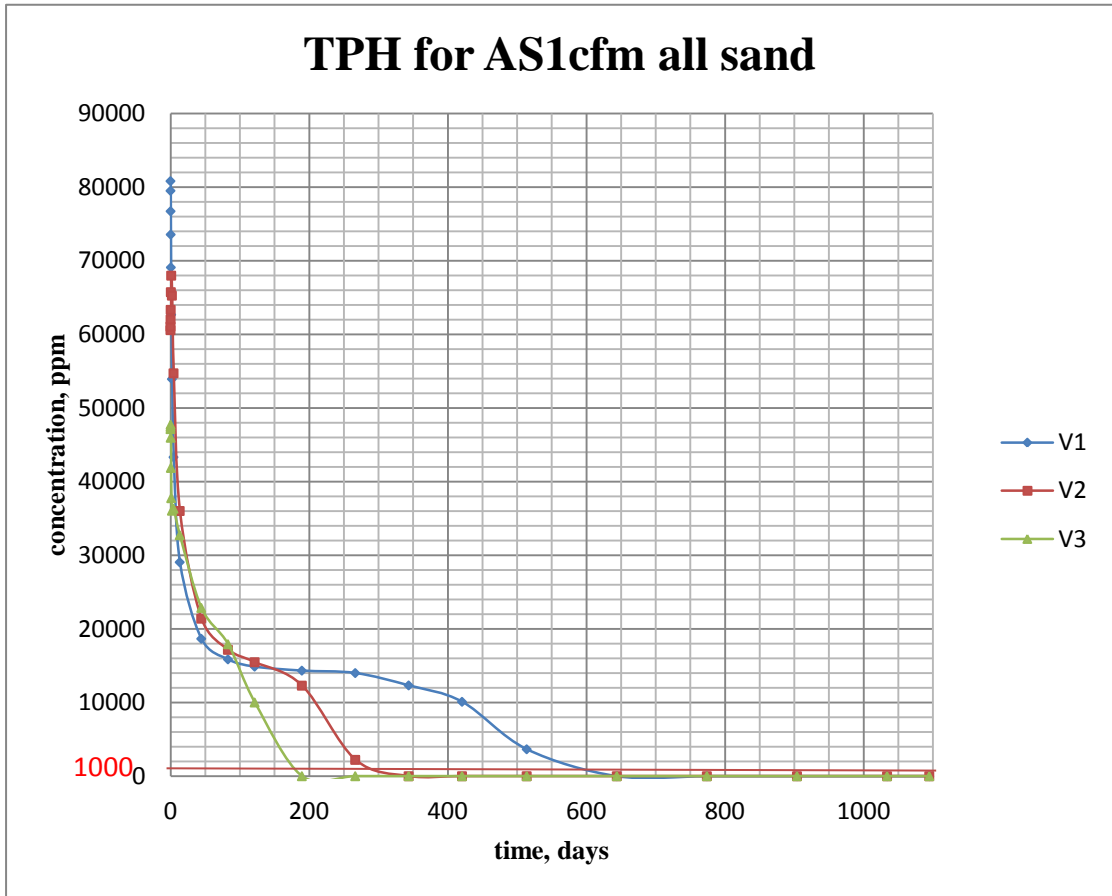


圖 4-19 Case 4-1 整治期間 TPH 濃度變化

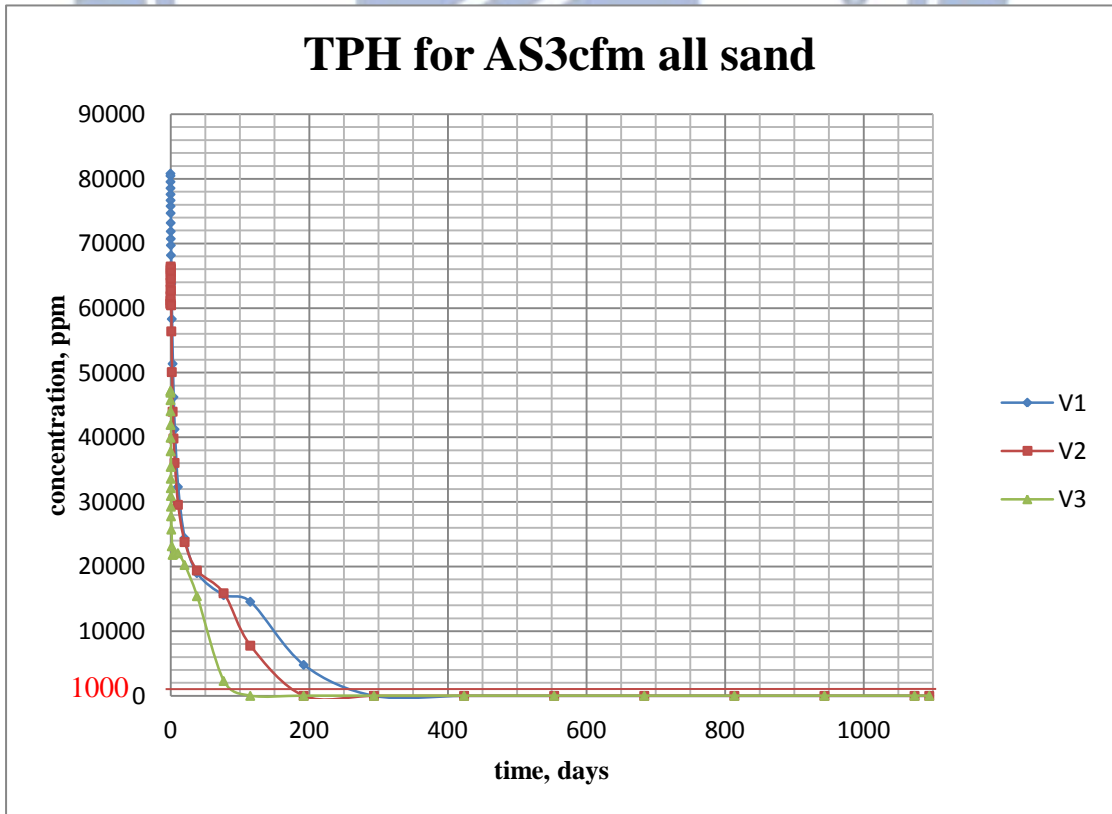


圖 4-20 Case 4-2 整治期間 TPH 濃度變化

4.3 氣體抽除量之影響

本節探討在同樣的地質條件下，不同的 AS 注氣量所造成整治效果的差異。本研究以空氣注入量 3 cfm (5.1 m³/hr) 為固定參數，而氣體抽氣量共分為三種：第一種為 Case 2-1，假設孔隙體積交換時間為 12 hr 所計算的氣體抽除量，第二種為 Case 1-2，假設孔隙體積交換時間為 8 hr，而最後一種為 Case 2-2，是根據 McCray et al.(1997) 模擬空氣注入法時所設定的參數，將氣體抽除量設為 54 cfm (91.4 m³/hr)。

比較 Case 2-1(圖 4-21)和 Case 1-2(圖 4-22)的水溶液相苯，Case 2-1 約在 650 天達到管制標準以下，而 Case 1-2 約在 620 天才低於管制標準。雖然抽氣量差了 0.5 倍，但是整治效率沒有大幅上升；換言之即使抽氣量提升，揮發後的氣相油品仍不易往細顆粒土層移動。但是在 Case 2-2(圖 4-23)中整治效率又有明顯的提升，不過 Case 2-2 的氣體抽除量大約是 Case 1-2 的三倍。

在非飽和層土壤中的 TPH 方面，從 Case 1-2(圖 4-24)、Case 2-1(圖 4-25)和 Case 2-2(圖 4-26)的結果發現幾乎沒有差異，可見在細顆粒土層，因為土壤含水量較高(圖 4-15)，透氣性較低，即使 SVE 造成比較大的壓力梯度，也無法有效提高抽氣的效率，亦即在此類型土壤中文獻中列舉的 SVE 影響範圍可能不等於 SVE 有效抽氣範圍。

以目前的結果來說，以水相苯的整治情形的方面，比較空氣注入量的影響性與氣體抽除量的影響性。Case 1-1 的空氣注入量約 1.7 m³/hr，Case 1-3 空氣注入量約 8.5 m³/hr，空氣注入量相差五倍，兩個案例的水相苯整治比較上，前者無法整治成功，後者約 360 天完成整治。同樣以兩個氣體抽除量相差五倍的案例比較，分別是 Case 2-1 氣體抽除量約 18.8 m³/hr，以及 Case 2-2 氣體抽除量約 91.4 m³/hr，兩個案例水相苯整治比較上，前者約 670 天可達管制標準以下，後者約需 440 天。在非飽和層土壤的整治方面，增加氣體抽除量或者增加空氣注入量的影響性皆不大。以這樣的結果推測，不考慮任何外力影響下，以水相苯的整治上，空氣注入量的影響性大於氣體抽除量的影響性。

圖 4-27 和圖 4-28 分別為 Case 2-1 與 Case 2-2 整治進行 3 年後的水相苯三維分佈圖，可以發現兩個案例中地下水皆無水相苯存在，因此地下水污染整治方面是成功的，苯僅存在非飽和層，兩個案例中飽和層的苯濃度分佈範圍無明顯差異，圖 4-29 和圖 4-30 分別為 Case 2-1 與 Case 2-2 整治進行 3 年後的油品飽和度三維分佈圖，圖中顯示，兩個案例中飽和層的油品分佈範圍無明顯差異。

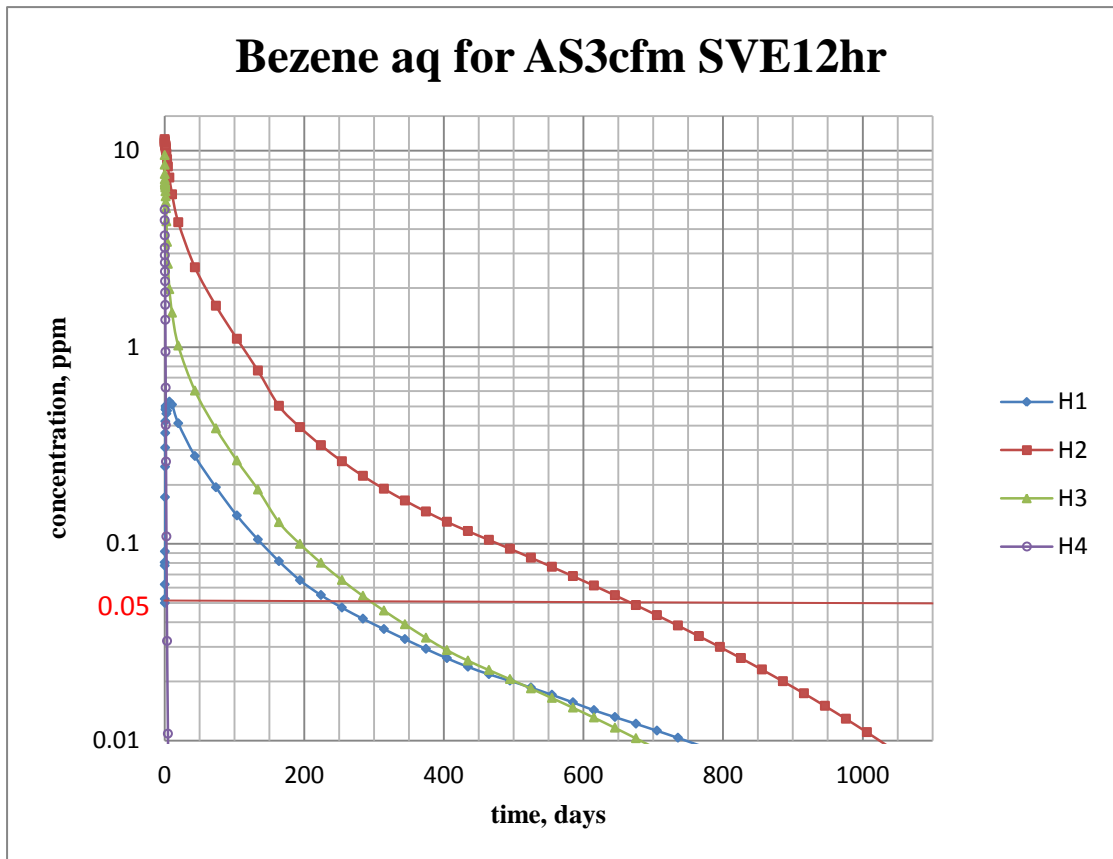


圖 4-21 Case 2-1 整治期間水相苯濃度變化

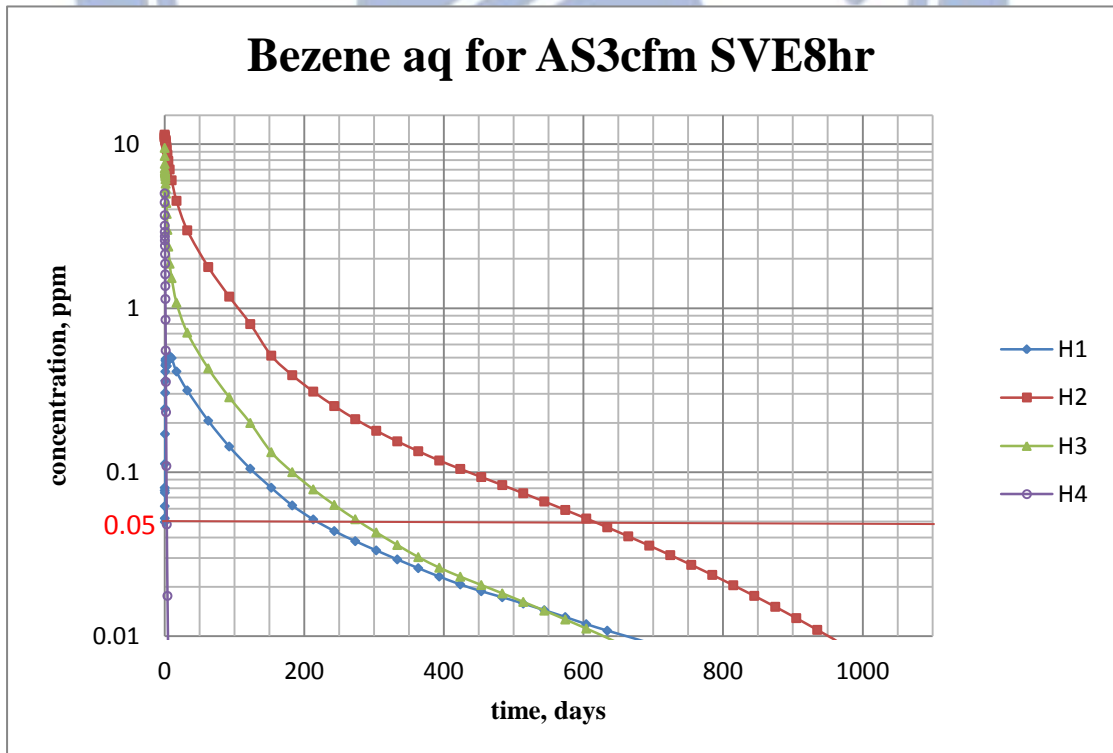


圖 4-22 Case 1-2 整治期間水相苯濃度變化

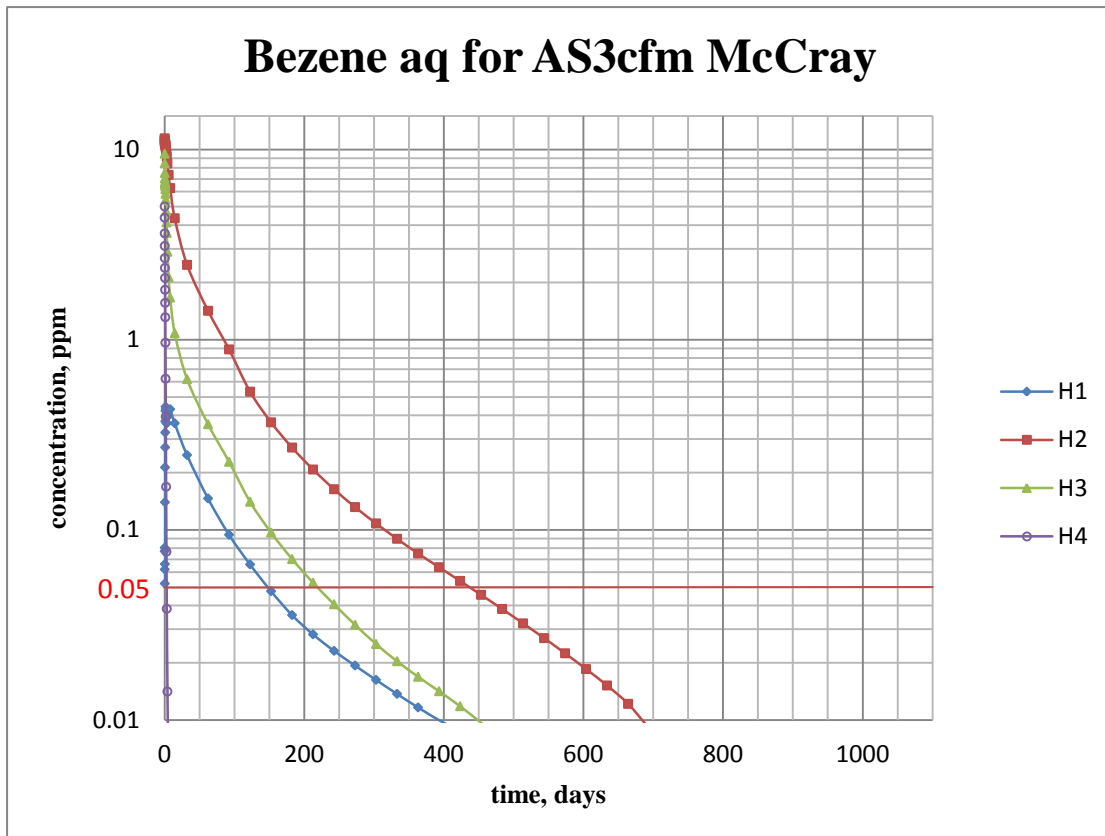


圖 4-23 Case 2-2 整治期間水相苯濃度變化

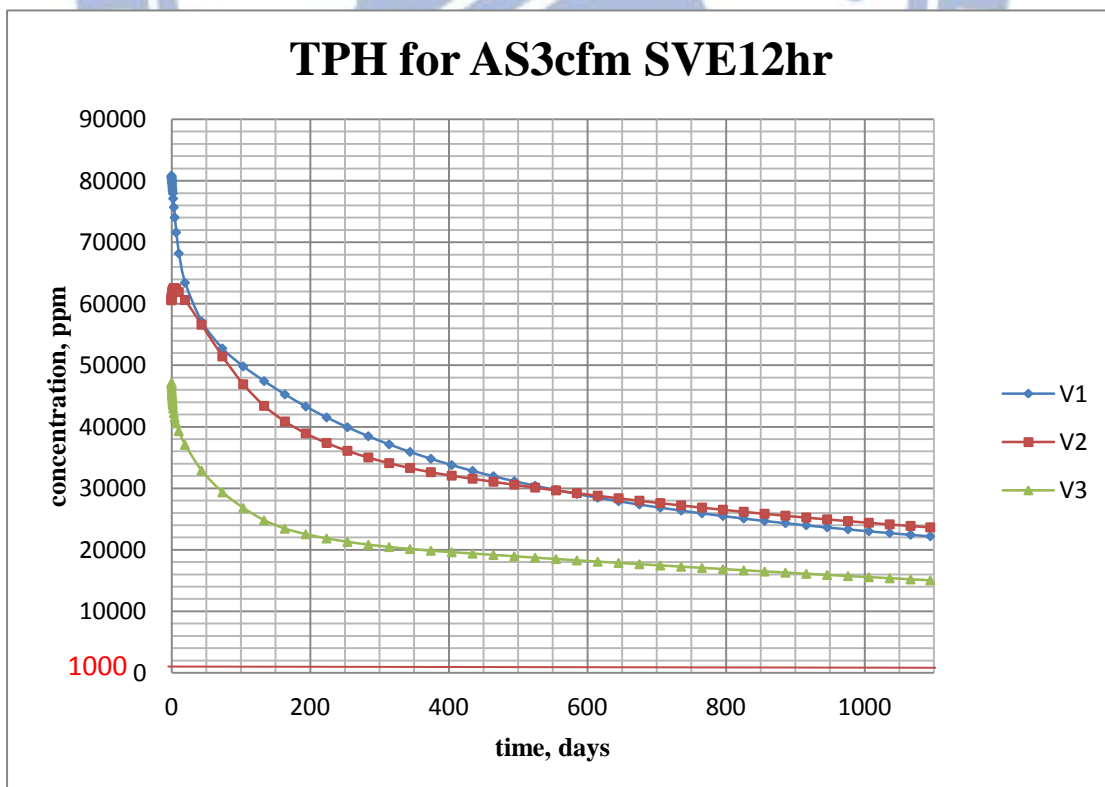


圖 4-24 Case 2-1 整治期間 TPH 濃度變化

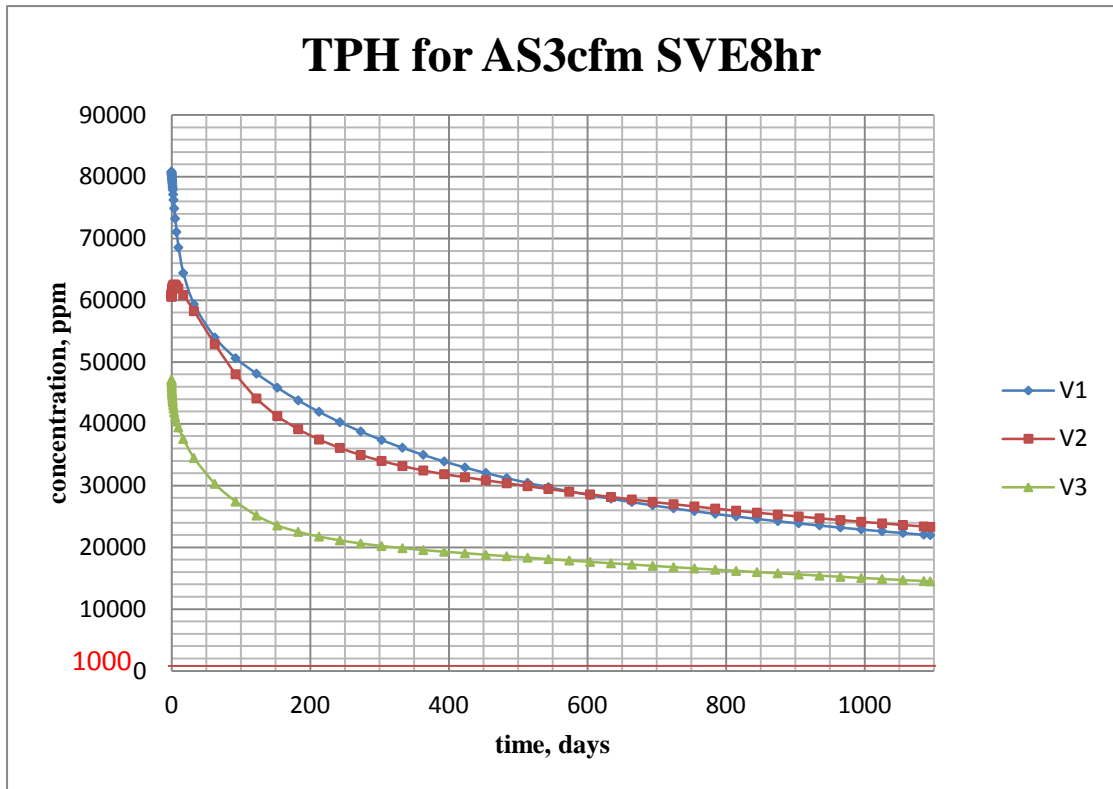


圖 4-25 Case 1-2 整治期間 TPH 濃度變化

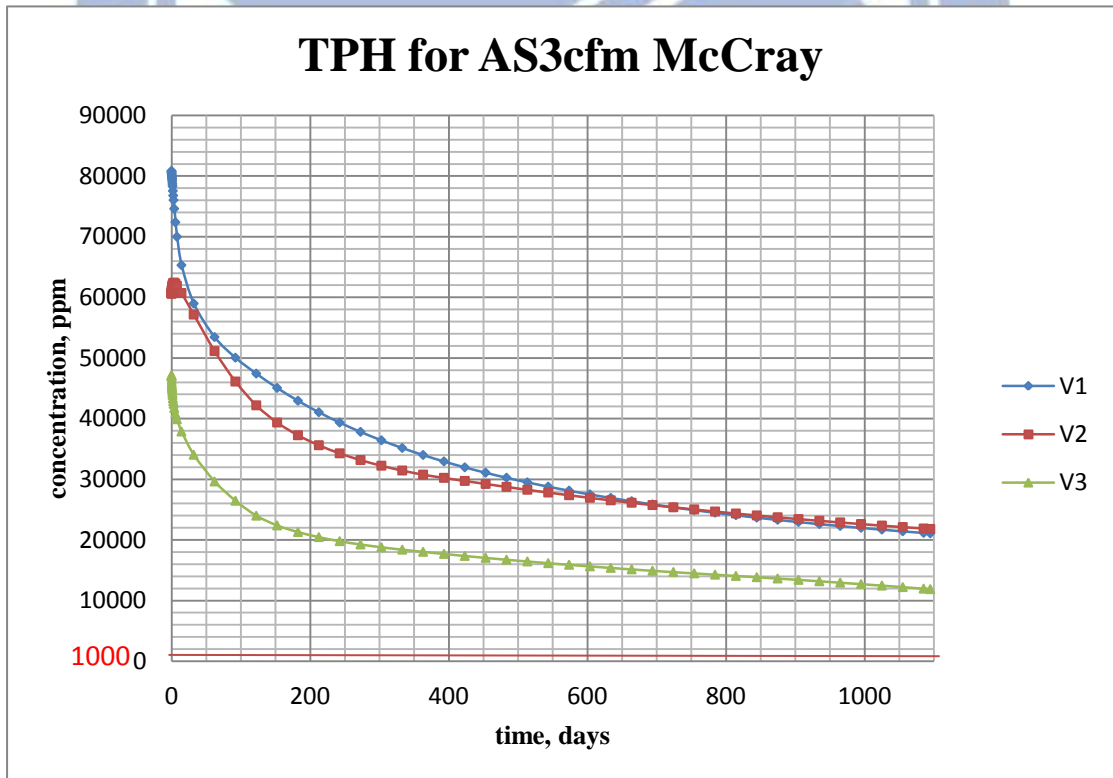


圖 4-26 Case 2-2 整治期間 TPH 濃度變化

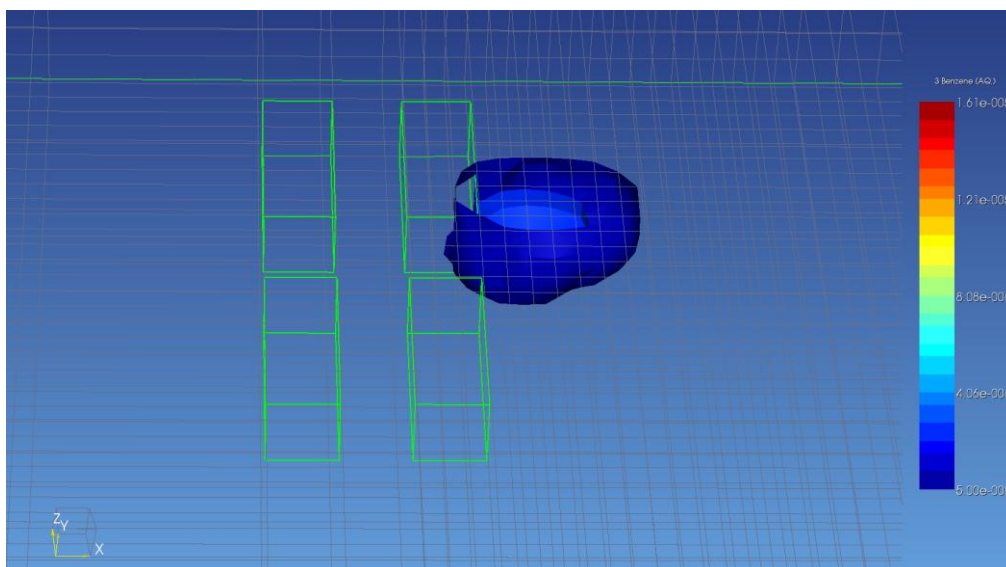


圖 4-27 Case 2-1 整治 3 年後水相苯三維分佈圖

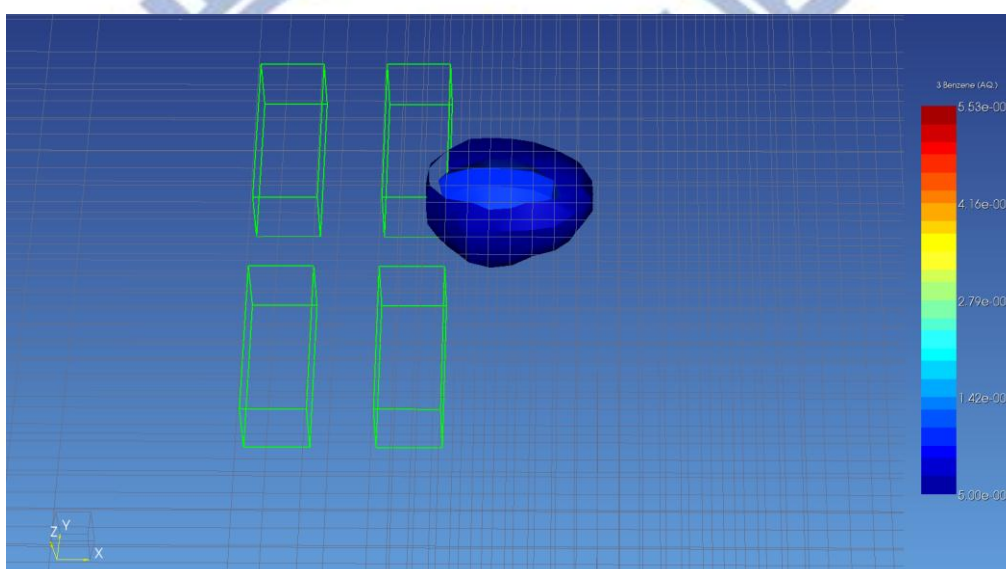


圖 4-28 Case 2-2 整治 3 年後水相苯三維分佈圖

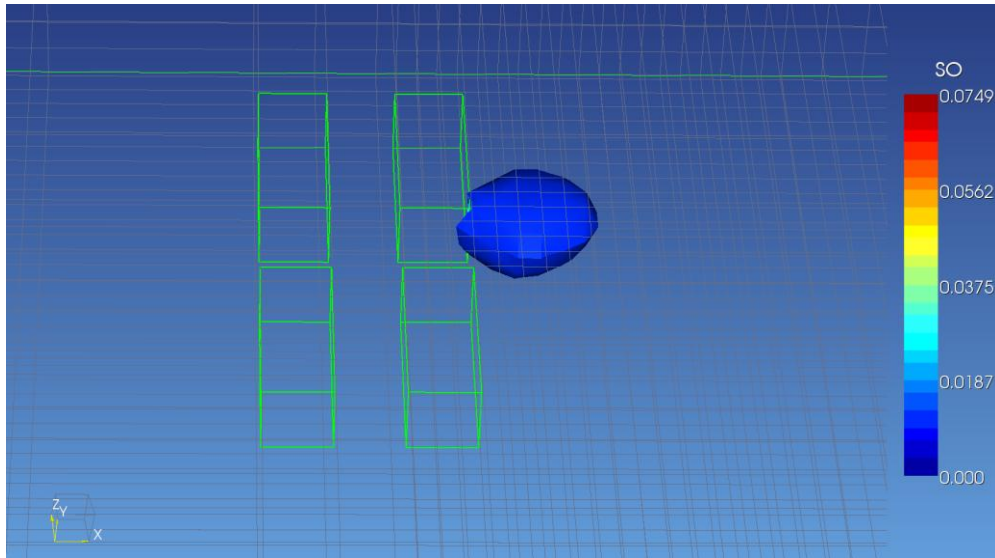


圖 4-29 Case 2-1 整治 3 年後油品飽和度三維分佈圖

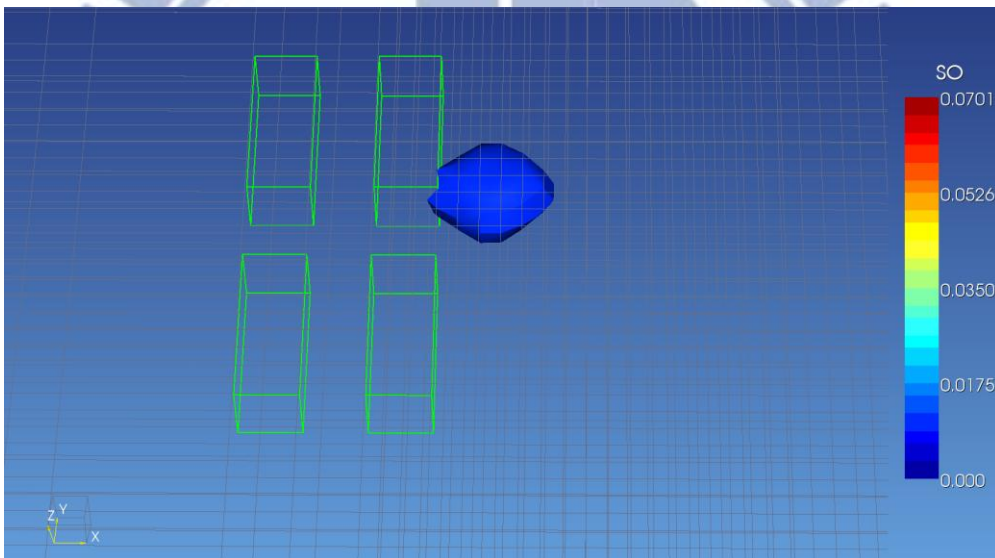


圖 4-30 Case 2-2 整治 3 年後油品飽和度三維分佈圖

4.4 佈井距離影響

本節探討 SVE 佈井距離影響。在 AS 系統運作時，SVE 井除了本身可針對非飽和層污染物進行清除外，也是集中 AS 處理後的氣相污染物的必要機制。如 3.4 節描述過的，本研究所採用的污染團理論上僅需一口 SVE 井即可覆蓋所有污染範圍，原本預設該 SVE 井距離洩漏點約 3 m，而在這樣的設定下，雖然水相苯的整治有所進展，但是土壤內 TPH 整治上不成功。因此本研究控制 SVE 井離洩漏點的距離，以探討整治結果，分別為距離 3 m、2 m 以及 1 m。

水相苯方面，比較 Case 1-2(圖 4-31)、Case 3-1(圖 4-32)以及 Case 3-2(圖 4-33)，可以發現整治效率隨著 SVE 井距離越近而越來越提升。Case 1-2 約在 620 天低於管制標準，Case 3-1 約 230 天，而 Case 3-2 則約需 80 天。由此可知，縮短氣相污染物離 SVE 井之距離，因有效降低非飽和層與地下水位面上的氣壓，加大了污染物蒸汽流動的壓力差與梯度，可加快流動速率，對於整治有正向的幫助。比較 Case 3-1 和 Case 3-2，發現 H4 網格在 Case 3-2 的整治時間比 Case 3-1 長，應是因為 SVE 井離 H4 網格距離拉長的關係。圖 4-41、圖 4-42 和圖 4-43 分別為 Case 1-2、Case 3-1 以及 Case 3-2 的壓力分佈圖，顯示 SVE 井距離洩漏點越近，SVE 井造成的低氣壓範圍也往污染團越靠近。

在非飽和層的 TPH 方面，比較 Case 1-2(圖 4-36)、Case 3-1(圖 4-37)以及 Case 3-2(圖 4-38)，V3 網格的整治速度越來越快，Case 3-1 中 V3 網格約在 1000 天後 TPH 降低到 1000 ppm 以下，Case 3-2 中 V3 網格則約需 190 天。三個 Case 中，V1 和 V2 網格皆無法到達土壤污染管制標準。V3 網格整治速率遠快於 V1、V2 網格，主要是因為 V3 網格正下方是砂層，與 V1、V2 網格比較起來，空氣容易進入 V3 網格並造成污染物揮發，同時 SVE 井的距離，會影響汽相油品進入 SVE 井的距離，距離越短，越容易被抽除。

在均質砂方面，Case 4-3 中，水相苯不到 20 天便均降低到 0.05 ppm 以下(圖 4-34)，TPH 不到 150 天(圖 4-39)三個網格亦皆低於管制標準，與非均質地質的 Case 3-1 的狀況相比相去甚遠。

為了加強整治非飽和區，本節也敘述本研究採用 McCray et. al.(1997)的 SVE 井模擬參數，使用較大的抽氣量進行模擬的結果。地質條件同為非均質土壤。圖 4-35，Case 3-3 的水相苯約在 57 天有效降低至管制標準以下；而 TPH 的部分，如圖 4-40，V3 網格約在 175 天低於 1000 ppm，V2 網格則需要約 1050 天，而 V1 網格中 TPH 濃度始終無法低於土壤污染管制標準，三年後的 TPH 濃度為 3,047 ppm；以目前結果而言，加大抽氣量後依然無法在三年內有效整治非飽和區。

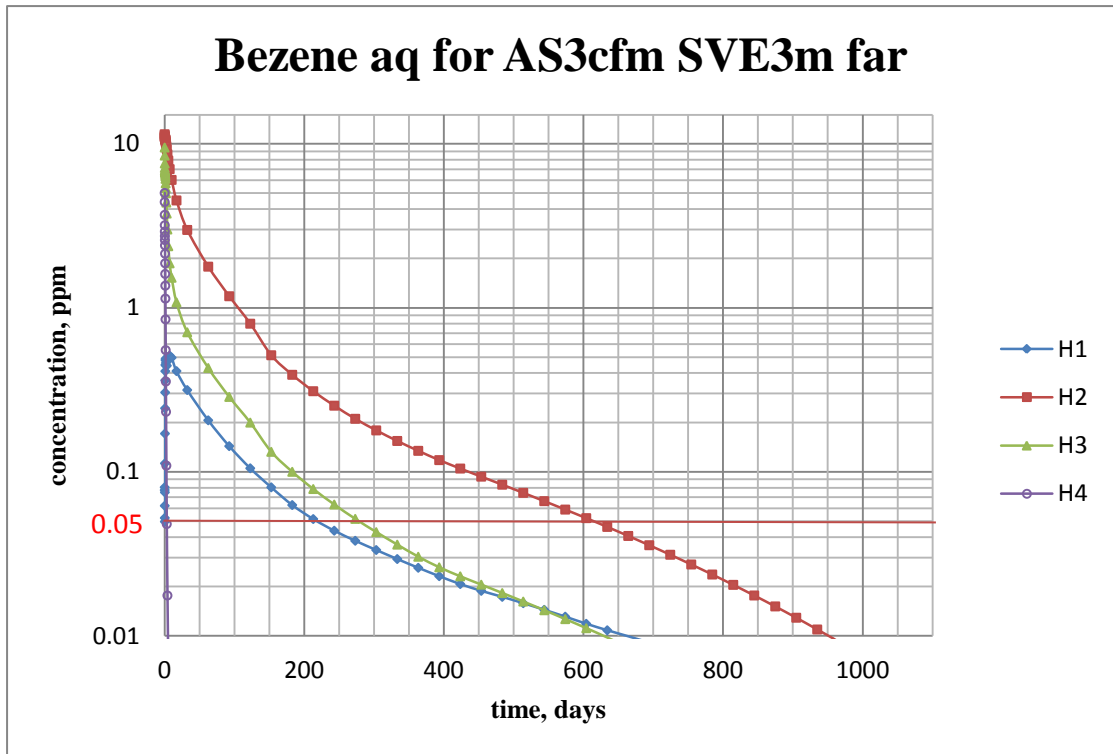


圖 4-31 Case 1-2 整治期間水相苯濃度變化

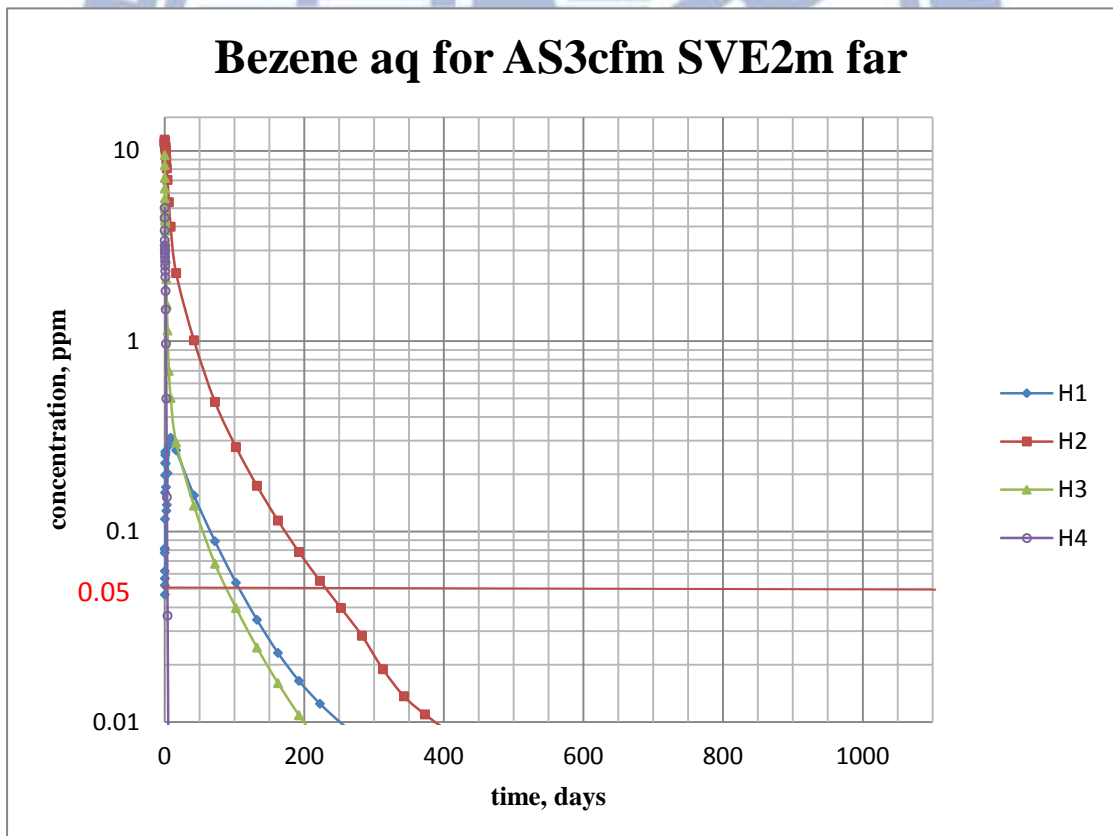


圖 4-32 Case 3-1 整治期間水相苯濃度變化

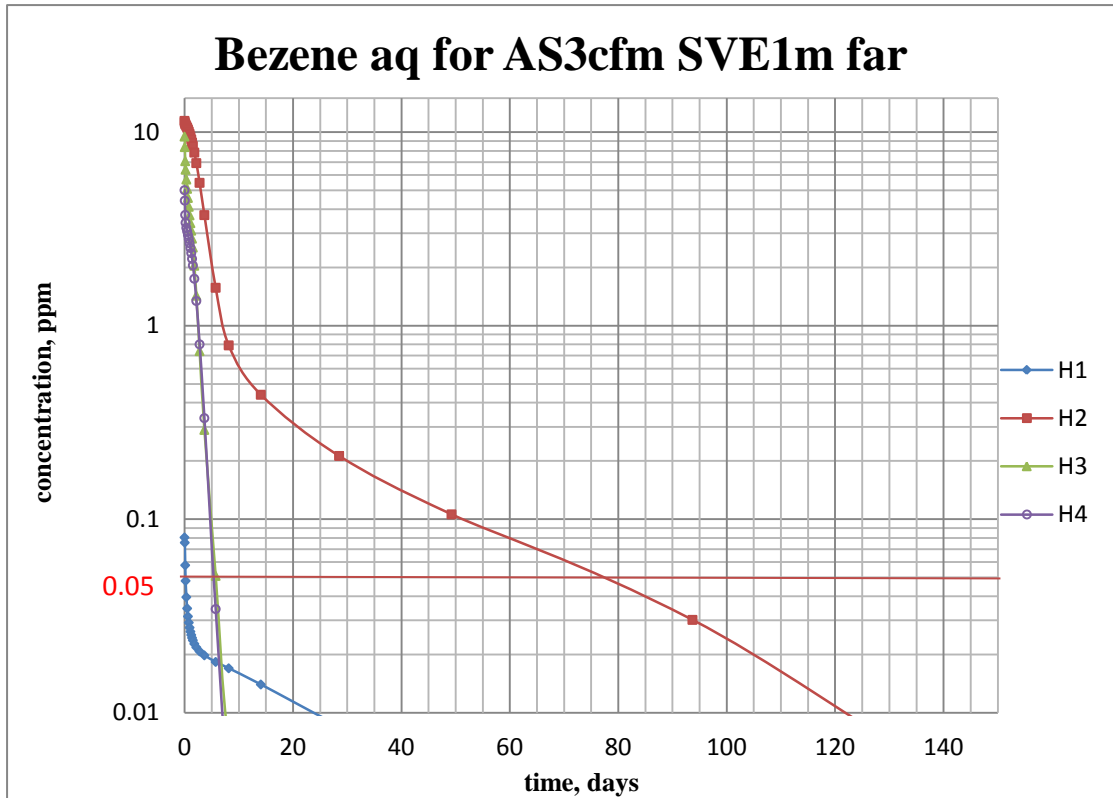


圖 4-33 Case 3-2 整治期間水相苯濃度變化

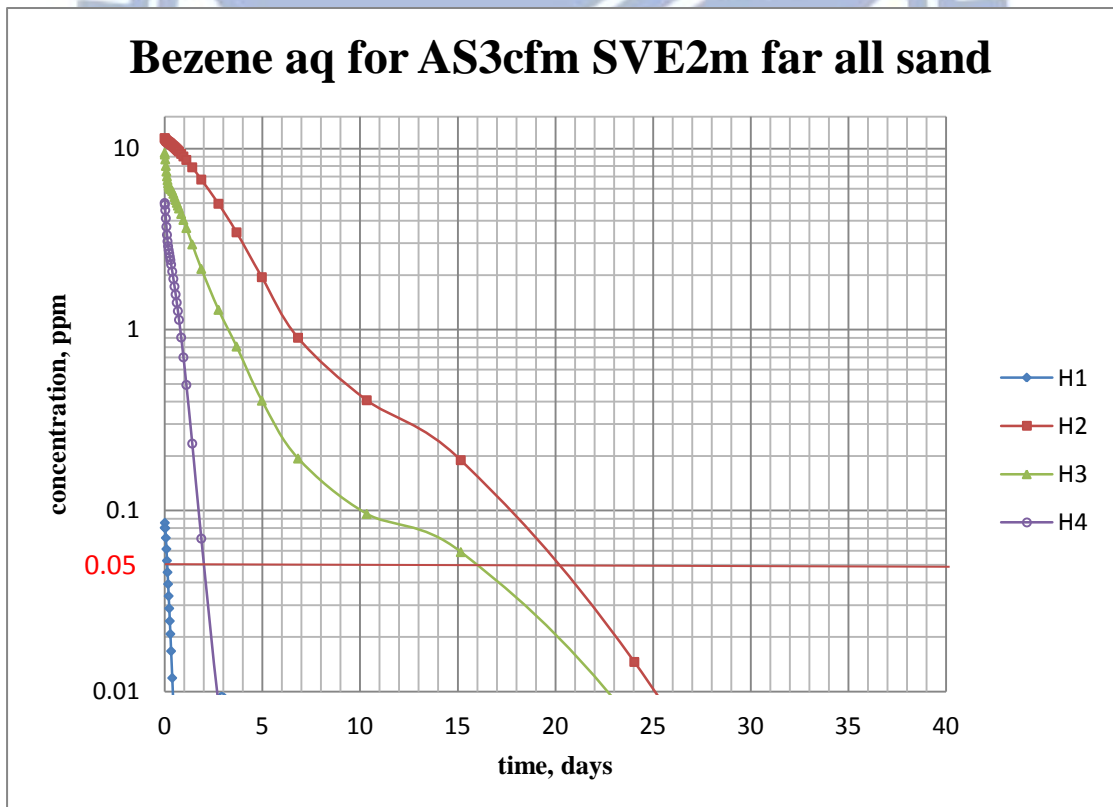


圖 4-34 Case 4-3 整治期間水相苯濃度變化

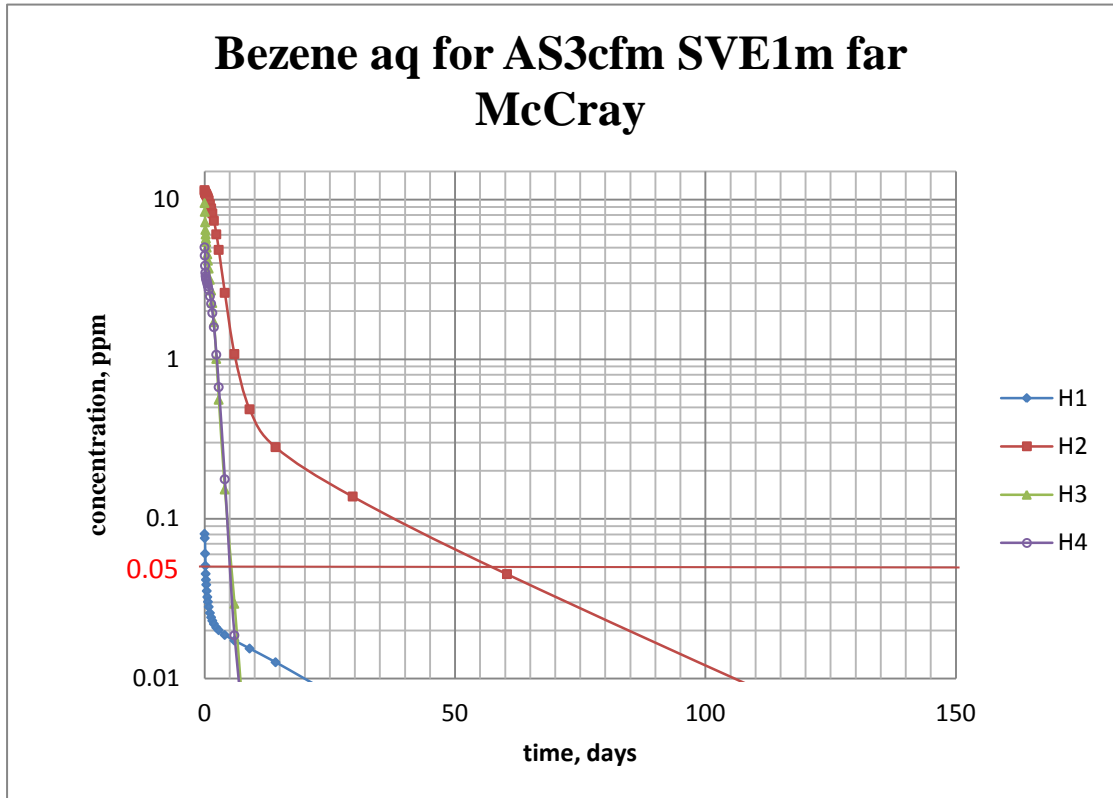


圖 4-35 Case 3-3 整治期間水相苯濃度變化

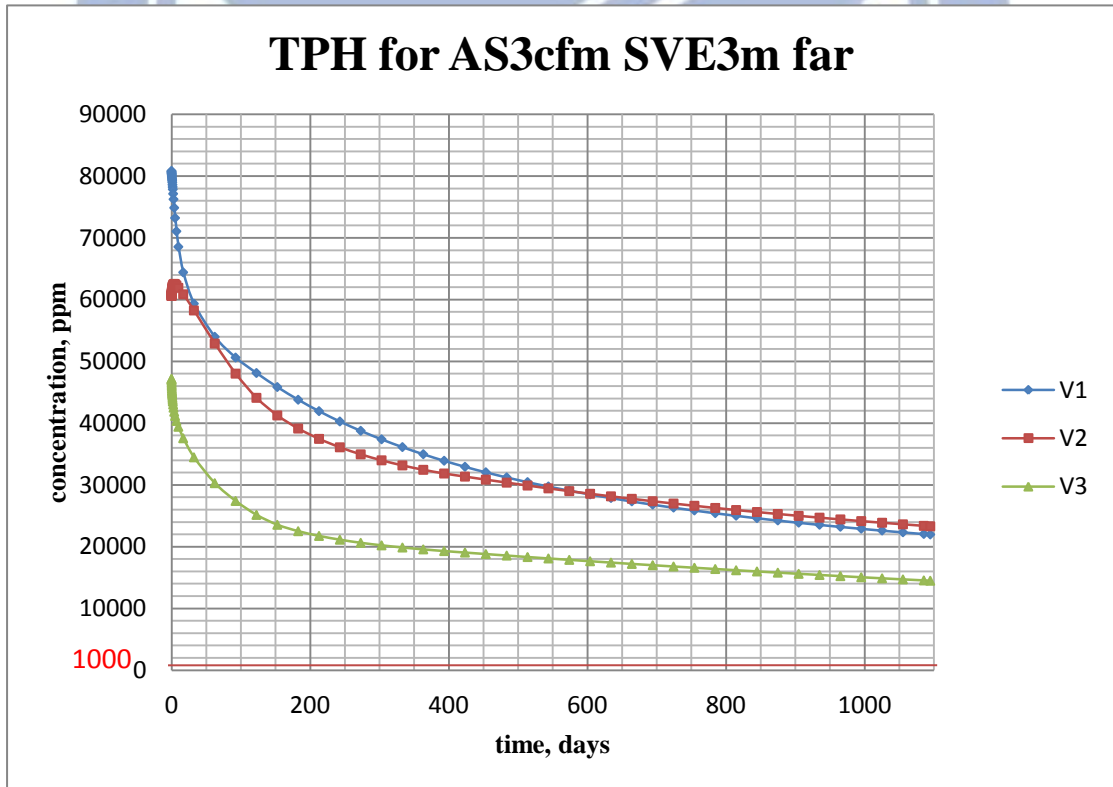


圖 4-36 Case 1-2 整治期間 TPH 濃度變化

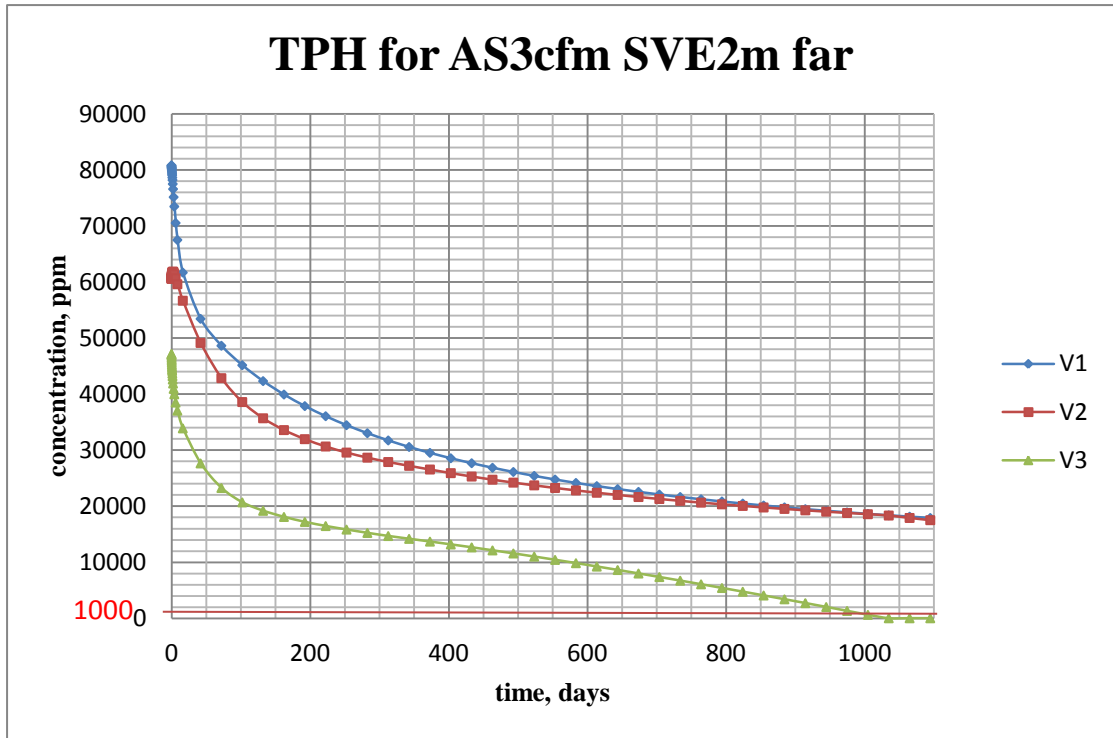


圖 4-37 Case 3-1 整治期間 TPH 濃度變化

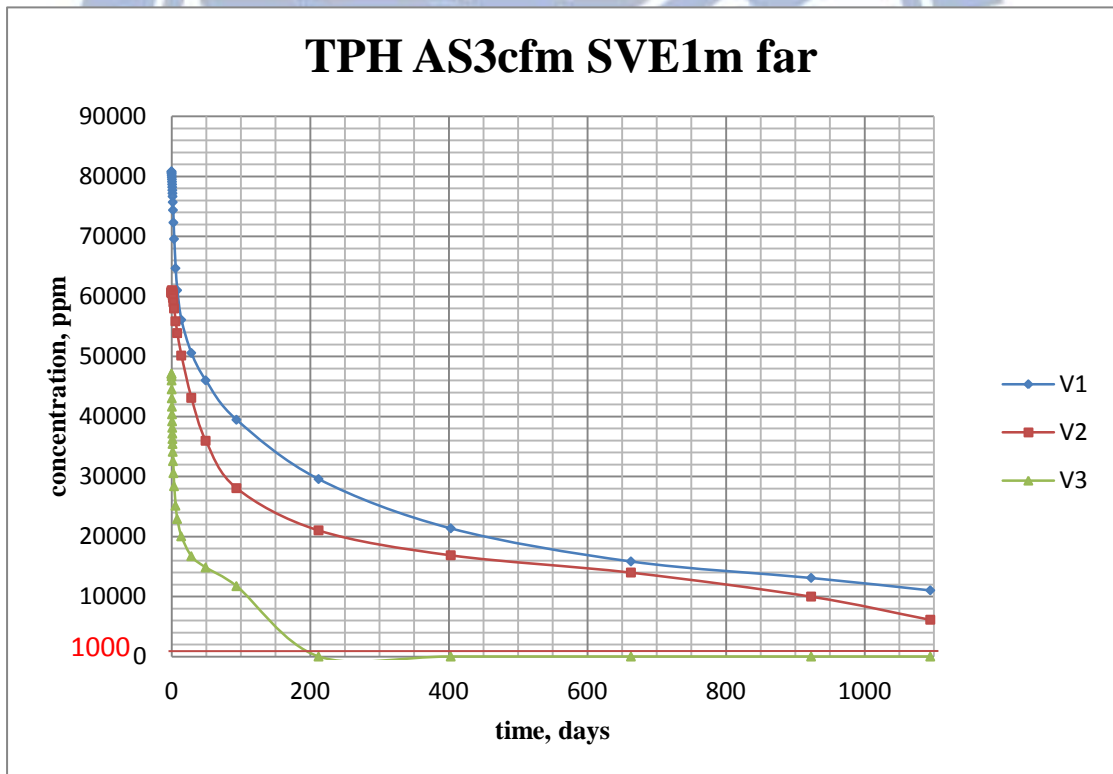


圖 4-38 Case 3-2 整治期間 TPH 濃度變化

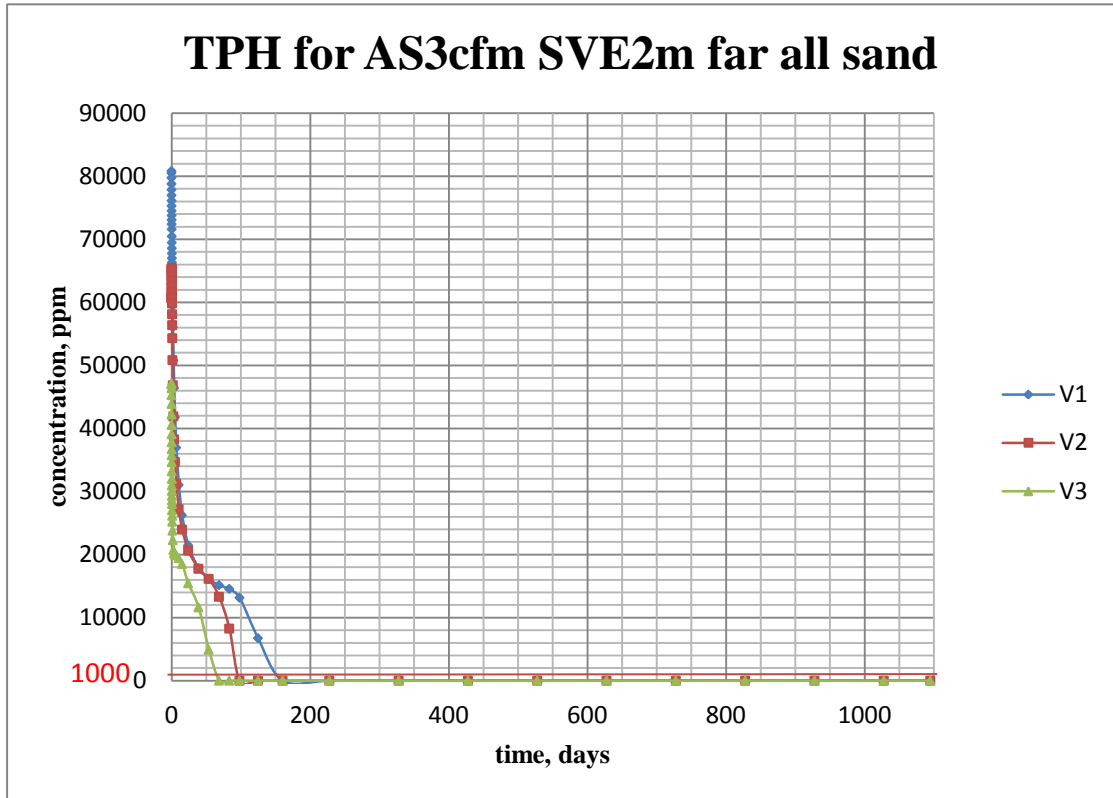


圖 4-39 Case 4-3 整治期間 TPH 濃度變化

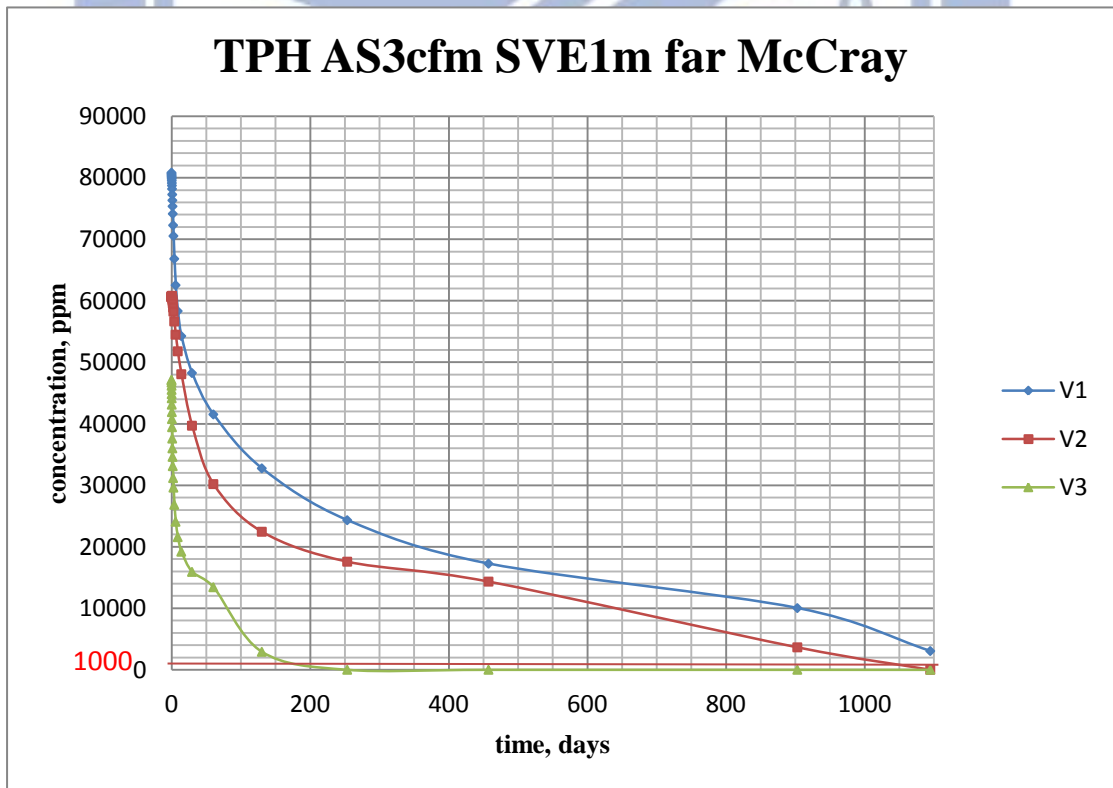


圖 4-40 Case 3-3 整治期間 TPH 濃度變化

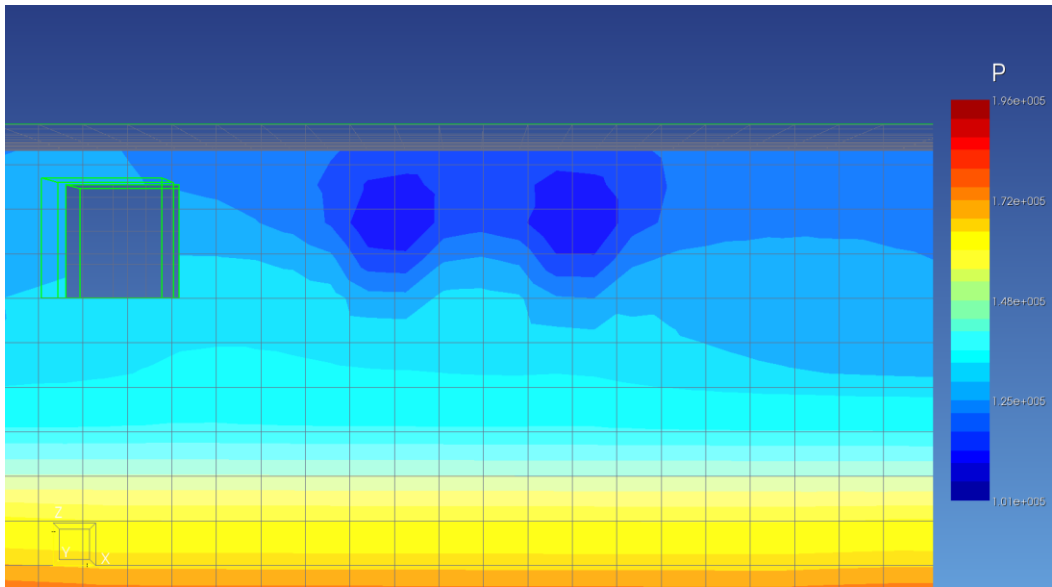


圖 4-41 Case 1-2 壓力分佈圖 時間約為 3 年

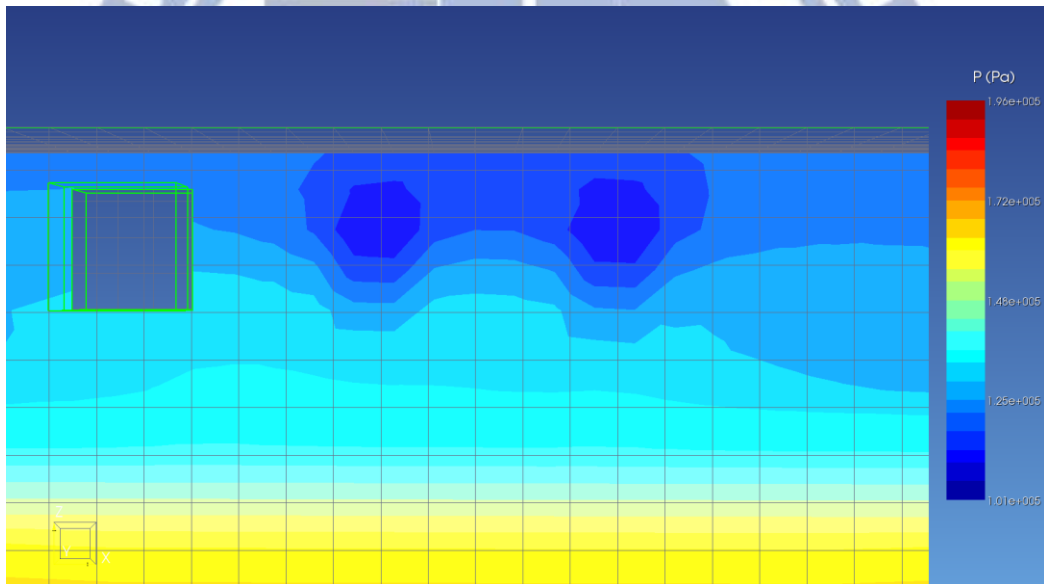


圖 4-42 Case 3-1 壓力分佈圖 時間約為 3 年

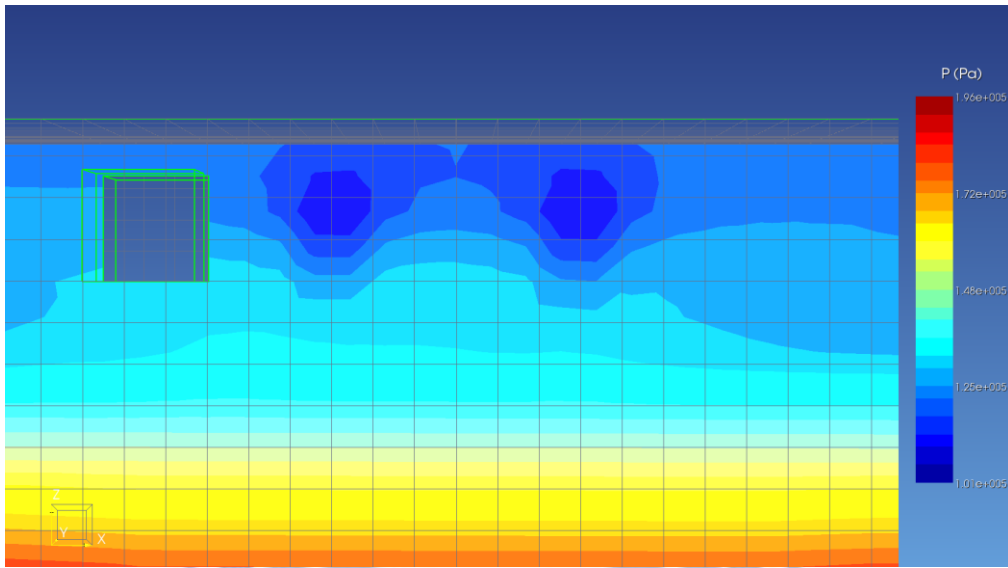


圖 4-43 Case 3-2 壓力分佈圖 時間約為 3 年



4.5 不同佈井設計之影響

本節將以不同 AS 佈井方式探討整治差異，分為兩種，第一種為一直線分佈 AS 井，第二種為三角形佈井，以下將分別討論。

第一種佈井方式是假設在分層土壤中，單一 AS 井的影響範圍大到可以包圍污染範圍時所做的設計。佈井相對位置如圖 4-44，圓圈為 AS 井位置，AS 井同樣為深開篩段長度 1 m，開篩的深度由地表下 6 m 至地表下 7 m。橢圓圈為 SVE 井，SVE 井同樣為地下 2 - 4m 深，共計三口 AS 井和兩口 SVE 井。

整治結果如圖 4-45，水相苯約在 900 天可整治完成，整治效率較 Case 1-2 低。土壤中 TPH 的部分，如圖 4-46，則與 Case 1-2 相比沒有明顯差距，顯示 AS 佈井的變動對於非飽和區沒有影響。特別要注意的是，此設計在初期時，污染範圍有向外擴大的現象，如圖 4-47，水相苯有向左右與上游方向擴散，由於下游還有空氣注入井，所以污染範圍不易往下游擴大。另一方面解釋 AS 井的 ROI，以空氣飽和度 0.1 為影響範圍邊界，從圖 4-48 可看出單一 AS 井的 ROI 至少有 7m，足夠覆蓋污染範圍。這個現象可以解釋成，因為初期污染範圍擴大使監測點濃度降低，由於污染範圍擴大使 SVE 井抽除效率嚴重降低，大部分的污染物因 AS 所注入空氣的作用向四周移動且在過程中持續因為 AS 作用被稀釋或揮發，並遠離 SVE 井氣流梯度較高的中心區域。但是雖然整治到後期，所有監測點以外的水相苯皆達到地下水污染管制標準，但是這樣的設計存在瑕疵，污染團外圍仍需要設置 AS 井以防污染物過度擴張。

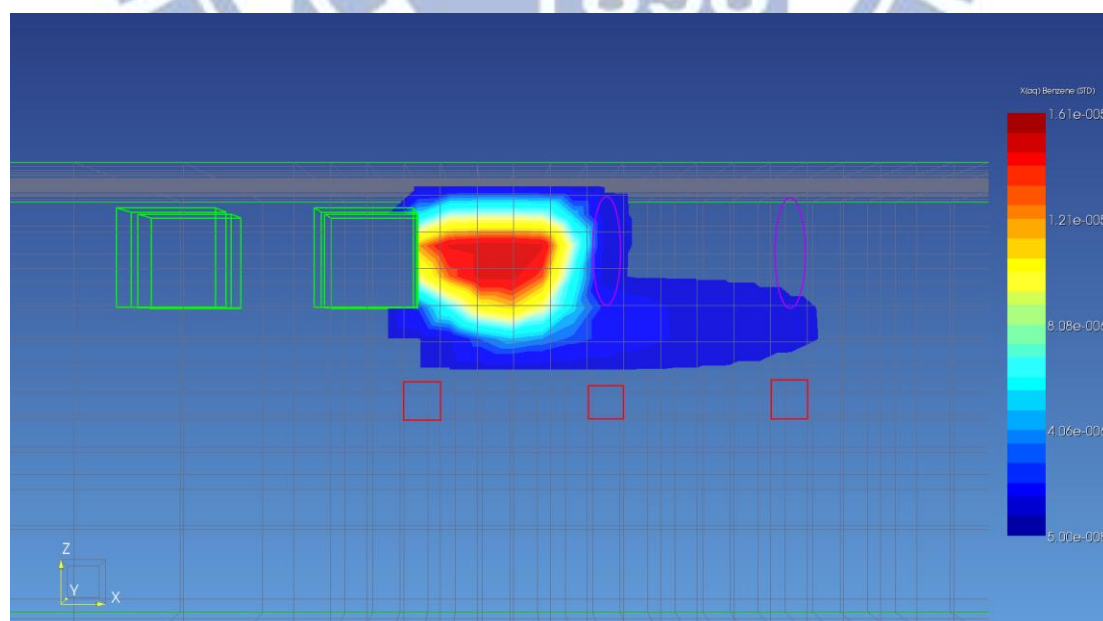


圖 4-44 Case 5-1 佈井相對位置

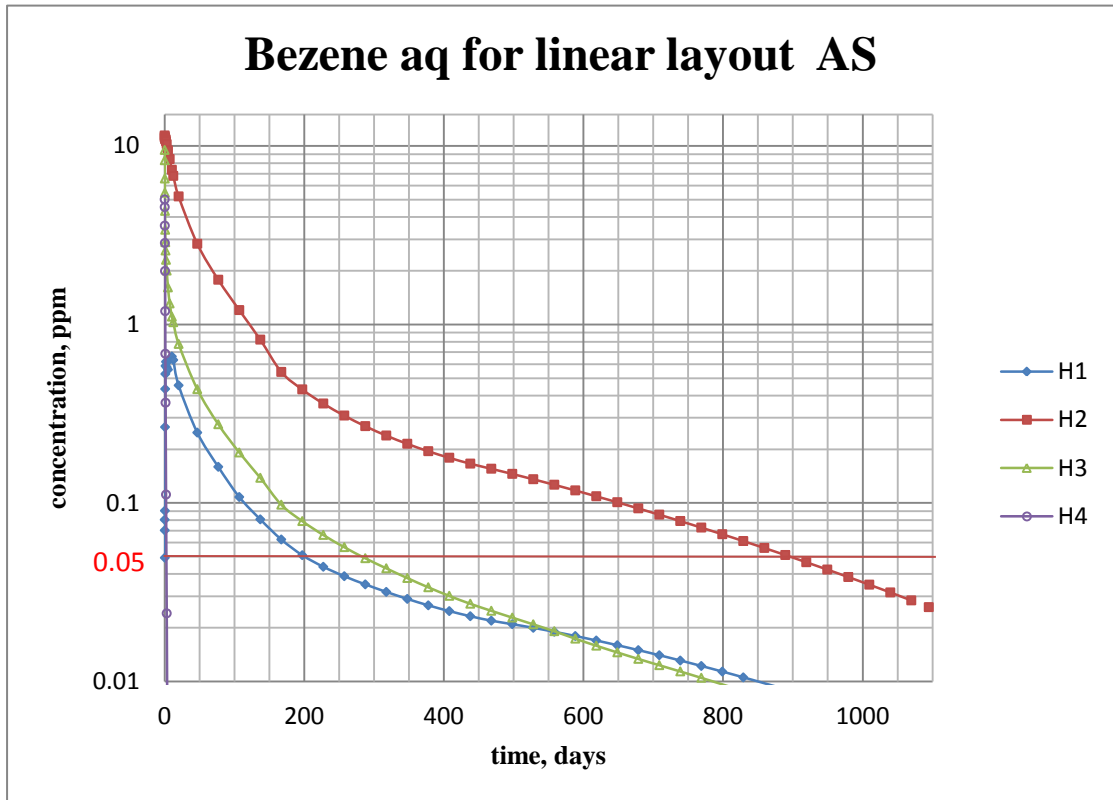


圖 4-45 Case 5-1 整治期間水相苯濃度變化

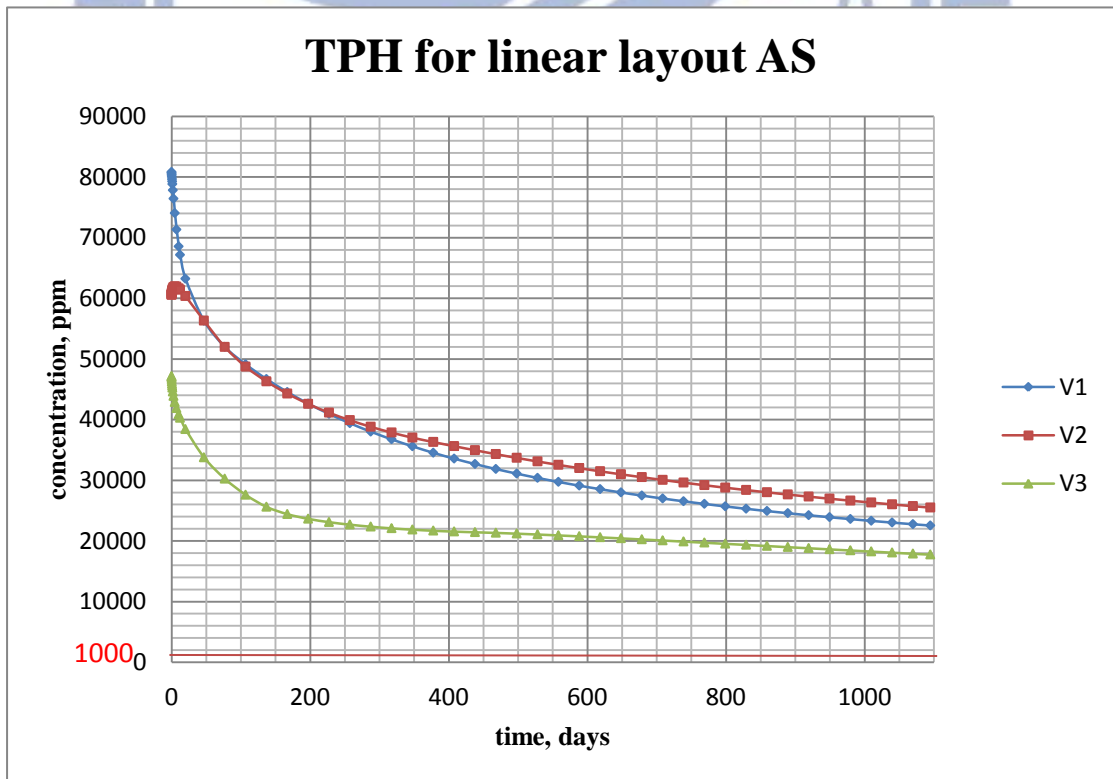


圖 4-46 Case 5-1 整治期間 TPH 濃度變化

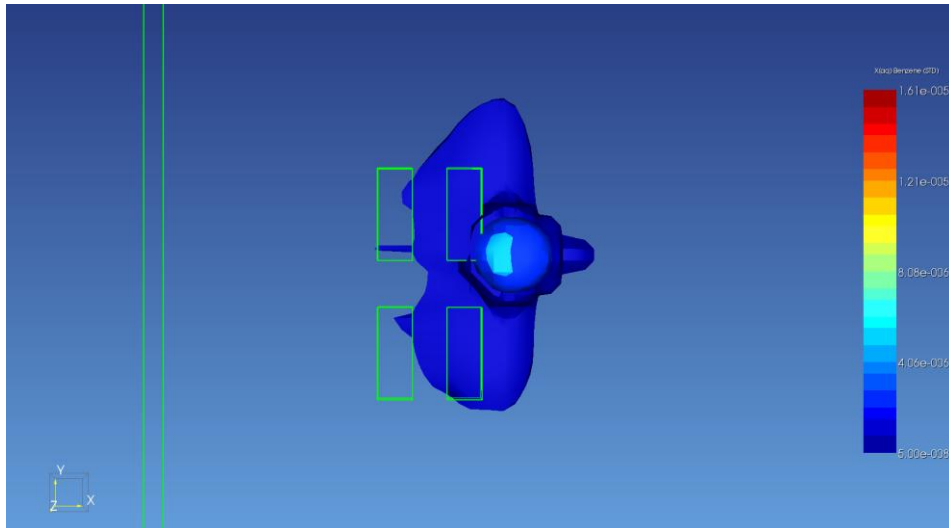


圖 4-47 Case 5-1 約 5 天後水相苯污染範圍擴大

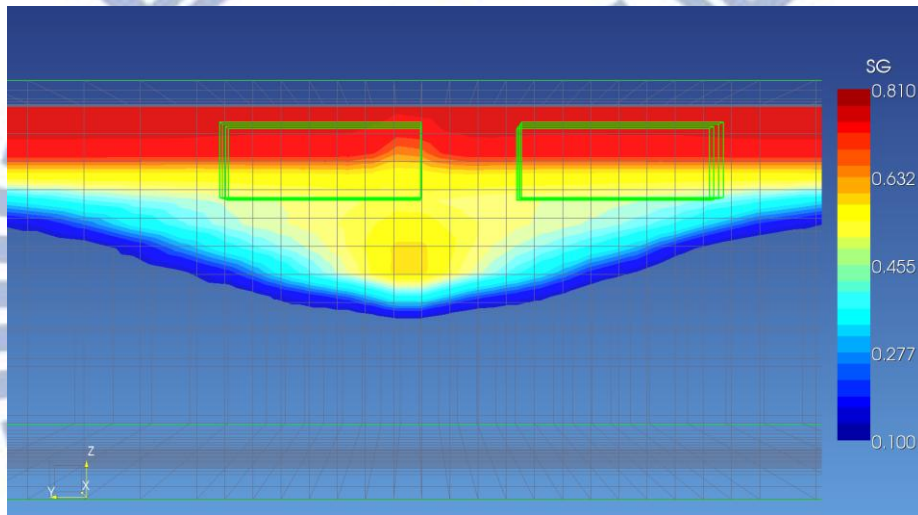


圖 4-48 Case 5-1 約 2 天後氣體飽和度

第二種方式為三角形佈井(Triangular Well Placement)，國內亦稱作梅花式佈井，Leeson et al.(2001)認為 AS 相對井密度間距(Relative dense well spacing)最佳距離為 4.6 m (15 ft)到 6 m (20 ft)之間，如下圖 4-49。Bass et al.(2000)則認為 AS 相對井密度間距至少小於 9 m (30 ft)。使用三角形佈井的優點是各別 AS 井的影響範圍可以互相重疊。依據以上原則，本研究設計 AS 井配置如下圖 4-50，圓圈為 AS 井的位置，所有 AS 井皆設為開篩段長度 1 m，開篩的深度由地表下 6 m 至地表下 7 m。

模擬結果如圖 4-51，水溶液苯約在 450 天完成整治，跟 Case 5-1 相較效率高很多，從圖 4-52 來看，TPH 的濃度也沒有因為 AS 的佈井改變增加整治效率。整體來說，水相苯整治效率比 Case 1-2 好，但非飽和區的整治效果則差異極微。

如果從水相苯 3D 圖形(圖 4-53)來看，整治初期仍有污染範圍有向外擴大的現象，不過污染團範圍擴大的程度明顯比 Case 5-1 小。此外，進入整治後期，由於 AS 的影響範圍相當廣，擴散的污染團也同樣因 AS 作用被稀釋或揮發，因此整體來說，Case 5-2 在水相苯方面的整治是成功的，但是仍要留意污染範圍擴大的風險，能不能接受這樣的風險是需要考慮的條件。以現地整治來說，在沒有完全把握污染範圍時，這樣的佈井方式相對簡單直覺。

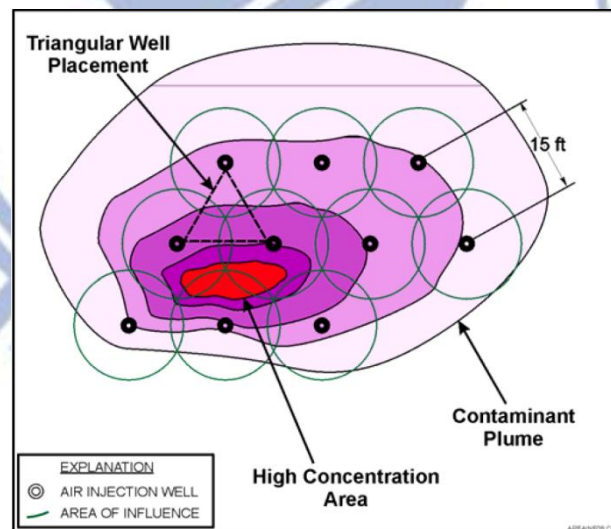


圖 4-49 三角形 AS 佈井示意圖(Battelle, 2001)

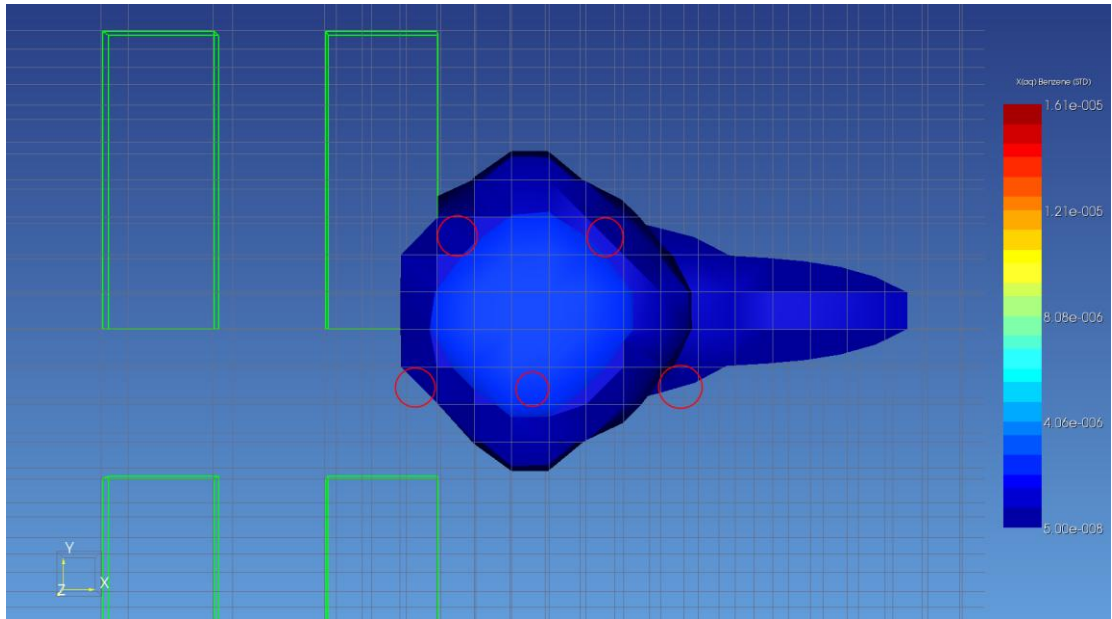


圖 4-50 三角形 AS 佈井相對位置

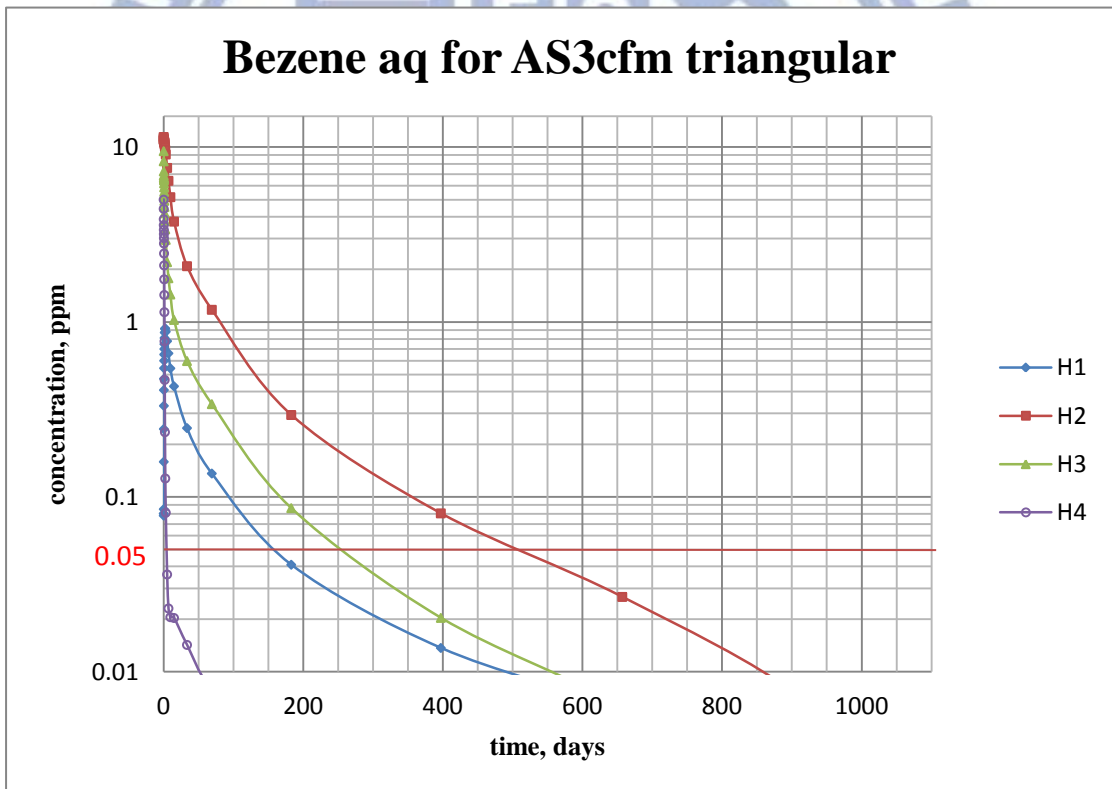


圖 4-51 Case 5-2 整治期間水相苯濃度變化

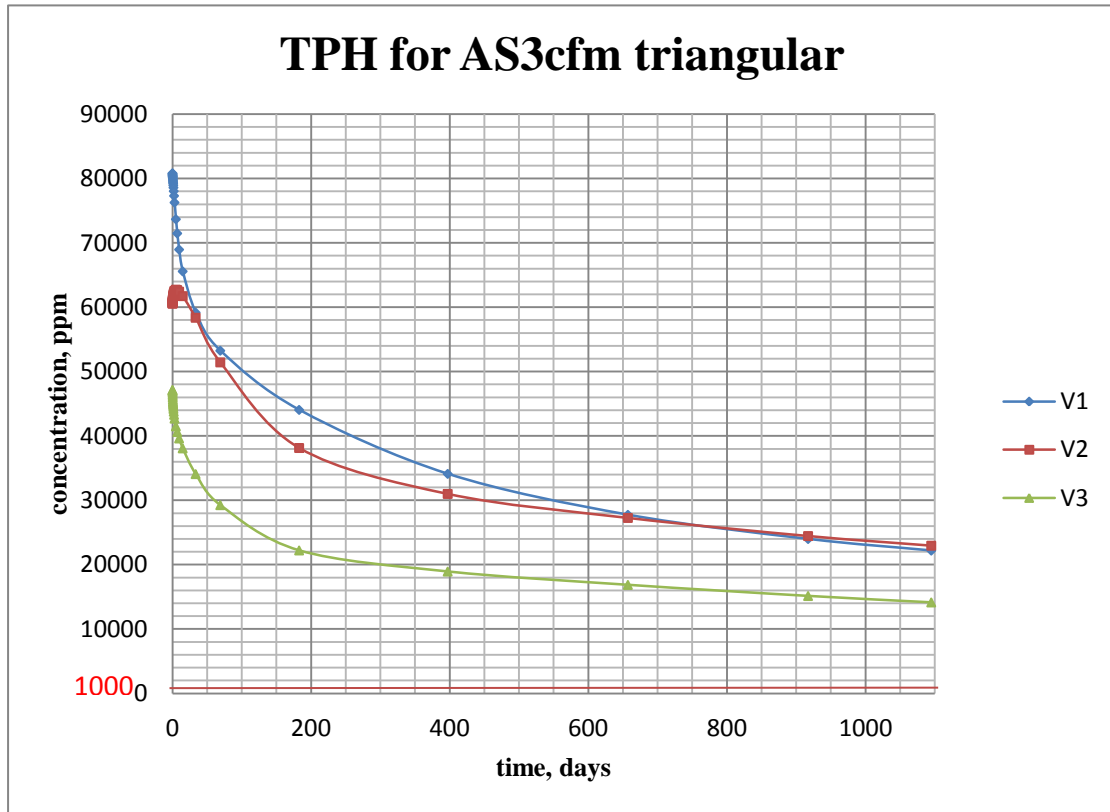


圖 4-52 Case 5-2 整治期間 TPH 濃度變化

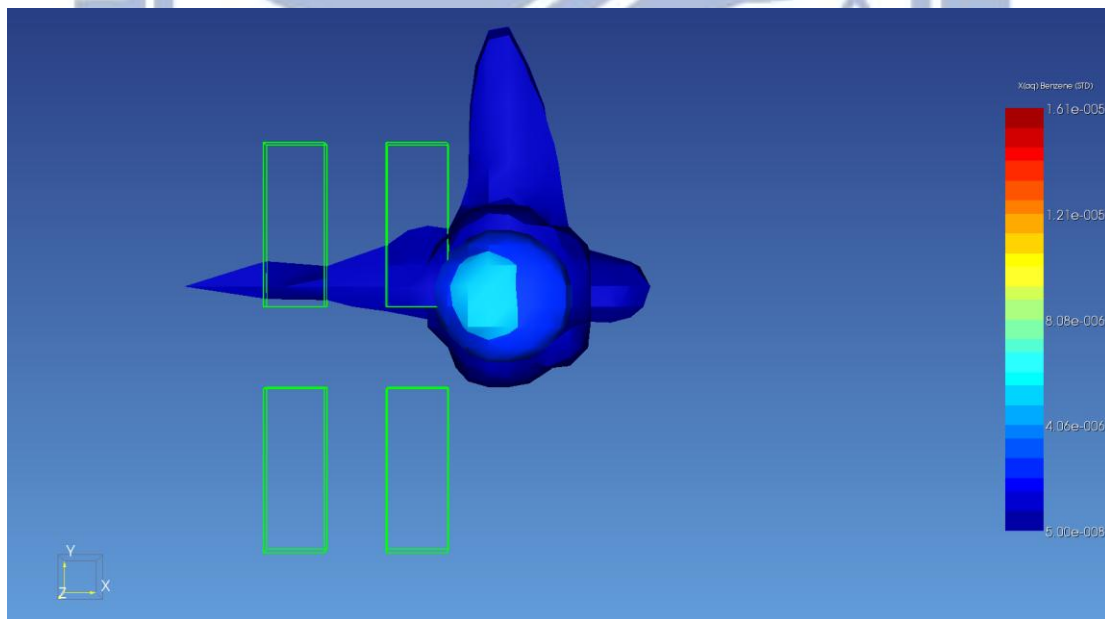


圖 4-53 Case 5-2 約 5 天後的水相苯 3D 分佈

第五章 結論與建議

5.1 結論

本研究成功以 TMVOC 模擬空氣注入法。針對 $80\text{ m} \times 60\text{ m} \times 15\text{ m}$ ，恆溫 25°C 上下分層之非均質地質模擬油品洩漏，上層為細粒料土壤，下層為砂質土層，洩漏品為油品，洩漏量為每日 2 kg ，洩漏時間為 2 年。2 年後進行空氣注入法設計，加入四種控制變因討論。

第一部分以空氣注入量為變數，相同的污染場址以及相同整治設計下，探討不同空氣注入量的整治差異，同時還有砂質均質地質作為對照組。模擬結果顯示，非均質地質場址中，不同的空氣注入量對非飽和層土壤的整治無明顯影響，表示空氣在細粒料層的傳輸效率，沒隨空氣注入量上升而提升。而水相苯的部分，提升空氣注入量後整治效率則大幅上升，以本研究來說，Case 1-1 無法整治，Case 1-2 約 620 天整治完成，Case 1-3 約 360 天整治完成，顯示出提升空氣注入量會增加水相苯揮發的效率。但是仍要注意空氣注入井的影響範圍，本研究的案例中有出現，空氣注入量不足，影響範圍過小，使整治失敗的例子。均質土壤中，非飽和層的整治速率遠大於均質層土壤，在非飽和層的污染物也能有效整治，顯示出天然土層的性質將決定污染整治的難易度。

第二部分以氣體抽除量為變數，相同的污染場址以及相同整治設計下，探討不同氣體抽除量的整治差異。水相苯隨著氣體抽取量上升，整治效果有所上升但不顯著，Case 2-1 與 Case 1-2 抽氣量相差 0.5 倍，整治完成天數卻只相差約 30 天，但是在高氣體抽取量的案例中，整治效果又有顯著得上升。TPH 的整治方面影響也不大，代表 SVE 造成比較大的壓力梯度，也無法有效使土壤中的氣體滲透係數上升。推測是因為土壤透氣性較低，即使 SVE 造成比較大的壓力梯度，也無法有效提高抽氣的效率，亦即在此類型土壤中文獻中列舉的 SVE 影響範圍可能不等於 SVE 有效抽氣範圍。本研究比較兩個空氣注入量相差五倍的案例，另外也比較兩個氣體抽除量相差五倍的案例，發現不考慮任何外力影響下，以水相苯的整治上，空氣注入量的影響性大於氣體抽除量的影響性。

第三部分以佈井距離影響作探討，改變單一 SVE 井至洩漏點的距離並探討整治差異，同時還有均質砂性地質做對照。結果顯示，不論是水相苯或 TPH 的整治，皆隨著 SVE 距離洩漏點越近，而整治效率大幅提升，由此可知，縮短氣相污染物離 SVE 井之距離，因有效降低非飽和層與地下水位面上的氣壓，加大了污染物蒸汽流動的壓力差與梯度，可加快流動速率，對於整治有正向的幫助。

土壤的 TPH 方面僅有砂土的非飽和層降低到土壤污染管制標準，Case 3-1 中 V3 網格約在 1000 天後 TPH 降低到 1000 ppm 以下，Case3-2 中 V3 網格則約需 190 天。而均質砂的案例的整治效果與非均質地質相去甚遠，非飽和層也可以整治成功。為了加強整治非均質土壤的非飽和區，本研究也進行高抽汽量的模擬，但是依然無法在三年內有效整治非飽和區。

第四部分嘗試以不同的 AS 佈井方式來探討整治差異。第一種為一直線分佈 AS 井。模擬結果顯示，監測點的水相苯到達管制標準，雖然模擬結果單一 AS 井的影響半徑至少有 7m，足夠覆蓋污染範圍，但其整治過程有瑕疵，水相苯有向左右與上游方向過度擴散的跡象。此現象可解釋為因為初期污染範圍擴大使監測點濃度降低，由於污染範圍擴大使 SVE 井抽除效率嚴重降低，大部分的污染物僅向四周移動而漸漸稀釋或揮發，並遠離 SVE 井影響範圍。第二種為三角形佈井，使用三角形佈井的優點是各別 AS 井的影響範圍可以互相重疊。模擬結果顯示水相苯的整治是成功的，Case 5-2 約 450 天完成整治，但是初期仍有污染團範圍擴大的跡象，但後期擴散的污染團因 AS 作用被稀釋或揮發，設計上需要注意這樣的風險。以現地整治來說，這樣的佈井方式相對簡單直覺。非飽和層整治的部分，兩種佈井的改變均沒有對 TPH 的整治有明顯的影響，非飽和層無法整治成功。



5.2 建議

本研究在非均質土壤中，均沒有成功整治非飽和層，但是最後非飽和層僅剩下一小部分的污染團，如果此時空氣注入法效果不彰，也可以採用生物通氣法、現地氧化法以及開挖處理法等其它整治技術以彌補空氣注入法的不足。

另外實務方面，空氣注入法有可能在整治過程中，因為監測井顯示整治的效果不彰，而增加空氣注入量或增設空氣注入井與氣體抽除井，而實際上 SVE 在粉土中進行數年的操作有極大可能造成機械損毀。目前現地也有使用所謂脈衝式空氣注入法(Pulsed Operation)。但以上狀況在本研究中均無考慮。

氣體在土壤傳輸時，會形成偏好侵入路徑，而每一道偏好侵入路徑又有不同影響範圍，因此有可能造成局部區域無法被整治，而數值模擬軟體 TMVOC 無法模擬偏好侵入路徑。空氣注入法注入的是微小氣泡，數值軟體沒有分辨氣泡和氣流的機制，我們沒有證據顯示氣泡和氣流的傳輸機制相同，仍有待研究。

空氣注入法使用初期，均有污染範圍擴大的跡象，因此相關整治手冊均有提到，若地下水存在自由相污染物，則空氣注入法不建議使用。但是實際上不容易存在沒有自由相污染物的整治場址，是否空氣注入法完全不適用，或是多少自由相污染物是容許範圍內，則是另一個需研究的課題。

參考文獻

王峰，王慧鈴，「土壤汽相抽提影響半徑及透氣率現場試驗」，北京市勘察設計研究院，2011。

行政院環保署，「加油站土壤及地下水污染調查計畫(第七期)(乙)」，美商傑明工程顧問台灣分公司，EPA-100-GA102-02-A216，2012。

江潤翰，「油品多相抽除法整治之模擬」，國立交通大學，2012。

吳志清，「加油站柴油滲漏與抽取模擬」，國立交通大學，2013。

呂信傑，斯克誠，「應用T2VOC模擬空氣注入法與土壤氣體抽除法之研究」，台灣土壤及地下水環境保護協會簡訊(第十八期)，2006。

陳培旻，「加油站土壤氣體及地下水監測模擬」，國立交通大學，2010。

楊凱仁，「水位波動對地下儲油槽洩漏之影響」，國立交通大學，2012。

經濟部工業局，「土壤及地下水污染預防與整治技術手冊—石油碳氫化合物」，經濟部工業局，2007。

經濟部工業局，「土壤及地下水污染預防與整治技術手冊—含氯碳氫化合物」，經濟部工業局，2008。

劉曉娜，程莉蓉，「地下水LNAPL層的原位曝氣模擬研究」，北京師範大學，2012。

顏伯穎，「應用數值方法模擬水下空氣注入法整治受非水相液污染區域之研究」，國立成功大學，2002。

- Adenekan, A.E., Pruess, K., and Falta, R.W., "Removal of Trichloroethylene Contamination from the Subsurface-A Comparative Evaluation of Different Remediation Strategies by Means of Numerical Simulation," Lawrence Berkeley Laboratory, 1990.
- Albergaria, J.T., Alvim-Ferraz, M.C., Delerue-Matos, C., "Soil Vapor Extraction in Sandy Soils: Influence of Airflow Rate," *Chemosphere* 73, pp. 1557-1561, 2008
- Barrera, J.A., "Air Sparging and Vapor Extraction as a Means of Removing Chlorinated and BTEX Compounds in Complex Groundwater Conditions," Four Seasons Environmental, Inc, n.d.
- Battelle, "Air Sparging Guidance Document," Naval Facilities Engineering Command, pp. 23-25, 2001.
- Braida, W. J., and Ong, S. K., "Air Sparging Effectiveness: Laboratory Characterization of Air-Channel Mass Transfer Zone for VOC Volatilization," 2001.
- Christine, D., "User's Guide for Hysteretic Capillary Pressure and Relative Permeability Functions in TOUGH2," Lawrence Berkeley National Laboratory, 2013.
- Eighmey, R.C., Schruben, T.J., and Rollo, P., "Leak Scene Investigation," National Tanks Conference, 2010.
- Hu, L., and Wu, X., "Physical Modeling of Air Flow During Air Sparging Remediation," *Environ. Sci. Technol.*, 44, pp. 3883-3888, 2009.
- Ji, W., Dahmani, A, Ahlfeld, D., Lin, J.D., and Hill, E., "Laboratory Study of Air Sparging: Air Flow Visualization," *Groundwater Monitoring & Remediation*, volume 13, issue 4, pp. 115-126, 1993.
- Kirtland, C.K., and Aelion, C.M., "Petroleum Mass Removal from Low Permeability Sediment Using Air Sparging/Soil Vapor Extraction: Impact of Continuous or Pulsed Operation," *Journal of contaminant Hydrology*(2000), pp. 367-383, 1999.
- Lazik, D., and Krauss, G., Geistlinger, H., and Vogel, H.J., "Multi-scale Optical Analyses of Dynamic Gas Saturation During Air Sparging into Glass Beads," *Transp Porous Med* 74, pp. 87-104, 2008.

- Lu, Y., Fan, W., Yang, Y.S., and Du, X.Q., "Mathematical Modeling of Differentiation Processes in Porous Media During Soil Vapor Extraction (SVE) Remediation of Contaminated Soil/Water," *Water Air Soil Pollut* 224:1491, 2013.
- McCray, J. E., and Falta, R. W., "Defining the Air Sparging Radius of Influence for Groundwater Remediation," *Journal of Contaminant Hydrology* 24, pp. 25-52, 1996.
- McCray, J. E., and Falta, R. W., "Numerical Simulation of Air Sparging for Remediation of NAPL Contamination," *Ground Water*, vol. 35, No. 1, 1997.
- Parker, J.C., Lenhard, R.J., and Kuppusamy, T., "A Parametric Model for Constitutive Properties Governing Multiphase Flow in Porous Media," *Water Resource Research*, vol. 23, No. 4, pp. 618-624, 1987.
- Pruess, K., and Battistelli, A., "TMVOC, A Numerical Simulator for Three-Phase Non-isothermal Flows of Multicomponent Hydrocarbon Mixtures in Saturated-Unsaturated Heterogeneous Media," Lawrence Berkeley National Laboratory, 2002.
- Ranbeh, M.E., and Mohtar, R.H., "Application of Multiphase Transport Models to Field Remediation by Air Sparging and Soil Vapor Extraction," *Journal of Hazardous Materials*(143), pp. 156-170, 2006.
- Stone, H.L., "Probability Model for Estimating Three-Phase Relative Permeability," *Journal of Petroleum Technology*, 1970.
- Thomson, N.R., and Johnson, R.L., "Air Distribution During in Situ Air Sparging: an Overview of Mathematical Modeling," *Journal of Hazardous Materials* 72, pp. 265-282, 2000.
- TN ,and Associates, Inc, "Operations and Maintenance Manual Nebo North Plume Source Area Air Sparging and Soil Vapor Extraction System," U.S. Department of the Navy, 2008
- Tsai, Y. J., and Lin, D. F., "Mobilizing Particles in a Saturated Zone during Air Sparging," *Environ. Sci. Technol*, 38, pp. 643-649, 2004
- U.S. Army Corps of Engineering, "Soil Vapor Extraction and Bioventing," US Army Corps of Engineering, 2002.

U.S. EPA, "How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Sites, Chapter VII- Air Sparging," EPA, 1994

U.S. EPA, "How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Sites, Chapter II- Soil Vapor Extraction," EPA, 1994.

V. Genuchten, M. Th., "A Close-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils," Soil Science of America Journal, vol. 44, no. 5, 1980.

Wong, J. H.C., Lim, C.H, and Nolen, G. L., "Design of Remediation Systems," Lewis Publishers, 1997.

Yang, X. M., Beckham, D., Fiorenza, S., Heaton, K., and Niedermeier, C., "Pulsed Air Sparging Field Test," RETEC Group, Inc, n.d.

Yang, X. M., Beckham, D., Fiorenza, S., Heaton, K., and Niedermeier, C., "Field Study of Pulsed Air Sparging for Remediation of Petroleum Hydrocarbon Contaminated Soil and Groundwater," Environ. Sci. Technol, 39, pp. 7279-7286, 2005.

參考網址

Federal Remediation Technologies Roundtable (n.d.) Retrieved April 10, 2014 from <http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4-40.html>.

Mascott Equipment(n.d.) Retrieved February 12, 2014 from <http://www.mascottec.com/UST%20layout.html>

NM Environment Department (2003) from <http://www.nmenv.state.nm.us/ust/remed-6.html>

Purezone(n.d.) Retrieved March 6, 2014 from <http://www.pureozone.com/diffuser.html>