

土壤氣體抽除整治技術作業
參考指引
(104 年版)

出版年份：民國 104 年 8 月
出版單位：行政院環境保護署
EPA-25-III-06B-2015-001

目錄

	<u>頁碼</u>
第一章 前言	1-1
1.1 目的	1-1
1.2 適用範圍與限制	1-1
1.3 內容概述	1-2
1.4 中英文專有名詞對照表	1-3
第二章 整治技術原理與應用	2-1
2.1 污染物傳輸與移除機制	2-1
2.1.1 污染物傳輸	2-1
2.1.2 污染物移除機制	2-2
2.2 整治系統單元	2-4
2.3 整治技術應用	2-5
2.4 輔助整治技術選項	2-9
2.4.1 現地加熱輔助	2-9
2.4.2 搭配其他整治技術	2-12
第三章 適用條件	3-1
3.1 SVE 適用性篩選流程	3-1
3.2 其他 SVE 成效影響因子	3-7
3.3 其他選用考量因子	3-9
第四章 整治效能評估	4-1
4.1 評估策略	4-1
4.2 評估方式	4-1
4.3 評估結果分析	4-2
4.4 系統關閉	4-3
第五章 案例解析	5-1
5.1 場址背景	5-1

5.2 SVE 適用性說明	5-2
5.3 規劃設計	5-2
5.4 設備操作與維護	5-3
5.5 整治效能評估	5-3
參考文獻	參-1
附件 常見污染物物化特性表	附-1

圖目錄

	<u>頁碼</u>
圖 2.1.1-1	SVE 於不同地層之存在型態與反應機制 2-2
圖 2.2-1	一般常見的 SVE 系統 2-4
圖 2.3-1	TPE 系統示意圖 2-6
圖 2.3-2	生物漱洗裝置系統 2-7
圖 2.3-3	DPE 系統示意圖 2-8
圖 2.4.1-1	電阻加熱整治技術示意圖 2-11
圖 2.4.2-1	空氣注入法示意圖 2-13
圖 3.1-1	SVE 適用性篩選流程圖 3-2
圖 3.1-2	各種土壤之土壤滲透率表現 3-3
圖 3.1-3	SVE 水平井示意圖 3-4
圖 4.3-1	土壤污染移除量比對分析圖(範例) 4-2
圖 5.5-1	土壤抽氣量與氣體濃度變化趨勢圖 5-4
圖 5.5-2	單月與累積污染移除趨勢圖 5-4
圖 5.5-3	土壤污染移除量及移除率變化趨勢圖 5-5

表目錄

	<u>頁碼</u>
表 1.4-1	中英文專有名詞對照表..... 1-3
表 3.1-1	SVE 可處理之揮發性污染物 3-6
表 4.2-1	整治效能評估方式彙整表..... 4-2

第一章 前言

1.1 目的

在環保署推動及民間單位共同推廣下，無論是調查或整治技術均有長足的進步。環保署彙整歷年所執行之農地、加油站、工廠、工業區調查及健康風險評估方法等計畫經驗，亦發表各類型土壤及地下水污染預防、調查或整治技術手冊。期望透過技術手冊發表與使用，促使污染改善相關單位，在場址中應用正確的調查整治觀念及方法。然而，雖然發表許多污染物類型或不同場址類型的整治技術篩選與評估的手冊，然目前並無特別針對特定整治技術發佈設計參考指引。

以環保主管機關所擔任之監督污染改善、控制或整治工作之角色而言，除需依現行土污法進行相關管制工作外，對於整治技術之基本知識，例如相關之整治技術原理、整治技術選取、系統設計要點與注意事項等，也需進一步瞭解。環保署為協助各級政府機關人員及相關人員對於整治技術的了解，遂編訂「土壤氣體抽除整治系統作業參考指引」(以下簡稱本指引)，俾利於監督相關之污染改善計畫、控制或整治計畫及場址施工過程中掌握重點，亦提供為污染行為人參考，透過對於整治技術方法的進一步了解與相關人員共同監督污染改善作為的進行。

1.2 適用範圍與限制

- 一、 本指引所有內容均以科學與技術層面的解釋為出發點，著重場址污染調查與評估實務工作；現場土壤及地下水採樣、監測井設置、或實驗室檢測分析皆應依環境檢驗所公告之標準方法執行，本指引不提供各項方法之技術說明，以及相關儀器之操作步驟。
- 二、 本指引僅建議通論性之規劃、程序、步驟、方法及數量等，各場址應依現場實際狀況彈性調整，並依執行單位之專業判斷評估規劃，以符合場址執行需求。
- 三、 本指引內容不代表環保署任何政策或法規的制定方向，也不作為任

何法規相關解讀與論證之用。

1.3 內容概述

第一章 前言

本章說明本指引之撰寫目的、適用範圍及限制、指引內容概述，並提供專有名詞中英文對照表。提供初次使用本指引讀者可快速了解本指引之目的與使用方法。

第二章 整治技術原理介紹

本章簡要說明如何利用 SVE 進行地下環境之污染物轉移與移除機制、系統單元，及可搭配使用之輔助整治技術。讓讀者可藉由對於該整治技術的污染移除機制有初步了解，以評估是否使用該整治技術進行場址的污染改善，亦可選用合適之輔助整治技術。

第三章 適用條件

本章彙整國內外場址常使用 SVE 進行污染改善之各項篩選條件，同時採納整治目標與污染改善相關人的要求，並提供決策樹作為技術篩選的策略。至此，讀者已可評估是否使用該整治技術。

第四章 整治效能評估

本指引宗旨為提供使用者檢視污染改善是否如預期規劃進行，因此，本章彙整污染改善評估方式，並說明污染改善期間或改善完成後應進行之污染物濃度持續監測方式。

第五章 案例解析

本指引利用國內採用土壤氣體抽除之案例場址，說明在評估污染改善工作之重點。

1.4 中英文專有名詞對照表

本指引將內容中所使用之專有名詞中英文對照彙整如表 1.4-1，提供各位讀者參考。

表 1.4-1 中英文專有名詞對照表

英文	中文
advection	水平對流
air permeability	透氣性
air sparging (AS)	空氣注入法
air/water separator	氣液分離器
airflow pattern	氣流流場
airflow rate	空氣流量
biodegradation	生物降解作用
bioslurping	生物漱洗
blower	鼓風機
boiling point	沸點
capillary fringe	毛細現象帶
cone penetrometry	圓錐貫入試驗
confining layers	侷限含水層
co-solvation	共溶解作用
dense non-aqueous phase liquid, DNAPL	比水重非水相液體
density of water	水密度
desorption	脫附作用
desorption rate	脫附速率
diffusion	擴散作用
distribution	流佈
drop tube	落管
Dual Phase extraction, DPE	雙重抽汲技術
dynamic viscosity	動力黏度
effect of partitioning	分配效應
effective water saturation	有效水飽和度
electric capture detector, ECD	電子捕捉偵測器
electrical resistance heating	電阻加熱
evaporation	蒸發作用
excavation and offsite disposal	開挖與離場處理
extraction well	抽取井
free phase liquid	自由相液體
free product	自由基

英文	中文
full water saturation	飽和含水量
gravitational constant	重力常數
heat capacity	熱容量
Hentry's law constant	亨利常數
heterogeneity	土壤異質性
horizontal airflow	水平氣流作用
hydrolic conductivity	水力傳導係數
Hydrous Pyrolysis Oxidation, HPO	水合熱裂氧化
impermeable cap	不透水鋪面
intrinsic permeability	內在滲透率
lance	矛
layering	分層
light non-aqueous phase liquid, LNAPL	輕質水相液體
lower explosive limit, LEL	爆炸下限值
moisture content	含水量
Multi-Phase Extraction, MPE	多相抽除技術
non-aqueous phase liquid, NAPL	非水相液體
offgas treatment system	尾氣處理系統
pipe within the pipe	管中管
pneumatic and hydraulic fracturing	氣動/水力壓裂法
pore water	孔隙水
porosity	孔隙率
preferential flow	優勢流
pressure gradient	壓力梯度
radio frequency heating, RF	射頻加熱
relative permeability	相對滲透性
residual phase	殘餘相
residual water saturation	殘餘水飽和度
skin effect	集膚效應
slurp tube	漱洗管
soil boring	土壤鑽孔試驗
soil column	土壤管柱
soil moisture	土壤水分
soil profile examination	土壤剖面試驗
Soil vapor extraction, SVE	土壤氣體抽除整治技術
spatial variation	空間變化
steam distillation	蒸氣蒸餾作用
steam injection	蒸氣注入
steam-assisted evaporation	蒸氣引發蒸氣作用

英文	中文
stratification	分層現象
stringer	針
submersible pump	沉水泵
suction pipe	吸管
test pit	試驗井
thermal gradient	熱梯度
thermal oxidizer units	焚燒爐裝置
transport rate	傳輸速率
Two Phase Extraction, TPE	雙相抽汲技術
vacuum enhanced	真空強化
vacuum pump	真空泵
vadose zone	通氣層
vapor phase	蒸氣相
vapor pressure	蒸氣壓
Volatic organic compounds, VOCs	揮發性有機物
volatilization	揮發作用
water saturation	水飽和度

第二章 整治技術原理與應用

土壤氣體抽除整治技術(Soil vapor extraction, 以下簡稱 SVE), 係以移除不飽和層土壤中的揮發性有機物(Volatile organic compounds, VOCs)為目標。該整治技術適用於受高揮發性化學物質污染土壤之整治, 如四氯乙烯或苯等污染之土壤。此整治技術已於國內廣泛應用。

由於 SVE 主要原理為抽除土壤中氣體, 有許多別稱, 像是土壤通氣、土壤真空抽除、真空抽除、地表下通氣、土壤氣體蒸氣的抽除、現地通氣、加強式揮發、與蒸氣抽取等, 本技術指引將以土壤氣體抽除整治技術或 SVE 進行後續內容說明。

本章將說明 SVE 移除土壤中污染物之原理與設備需求。此外, 為了提昇土壤氣體抽除成效與強化污染傳輸速率(transport rate), SVE 可搭配會其他輔助整治技術, 本章將列舉說明常見之搭配整治技術(如現地加熱法、蒸氣注入等)。

SVE 的處理速率, 往往隨著地層透氣性(air permeability)、污染物濃度、尾氣處理系統(offgas treatment system)特性等因素的作用, 而在不同場址有顯著不同。評估場址是否適用之場址特性與污染物特性資料詳如第三章, 整治設備系統的效能評估詳見第四章說明。

2.1 污染物傳輸與移除機制

2.1.1 污染物傳輸

污染物在不同地層內存在的型態與反應移除機制皆不相同, 如圖 2.1.1-1(USEPA 1991c)所示, 以下說明污染物在通氣層間與毛細作用帶間之型態。

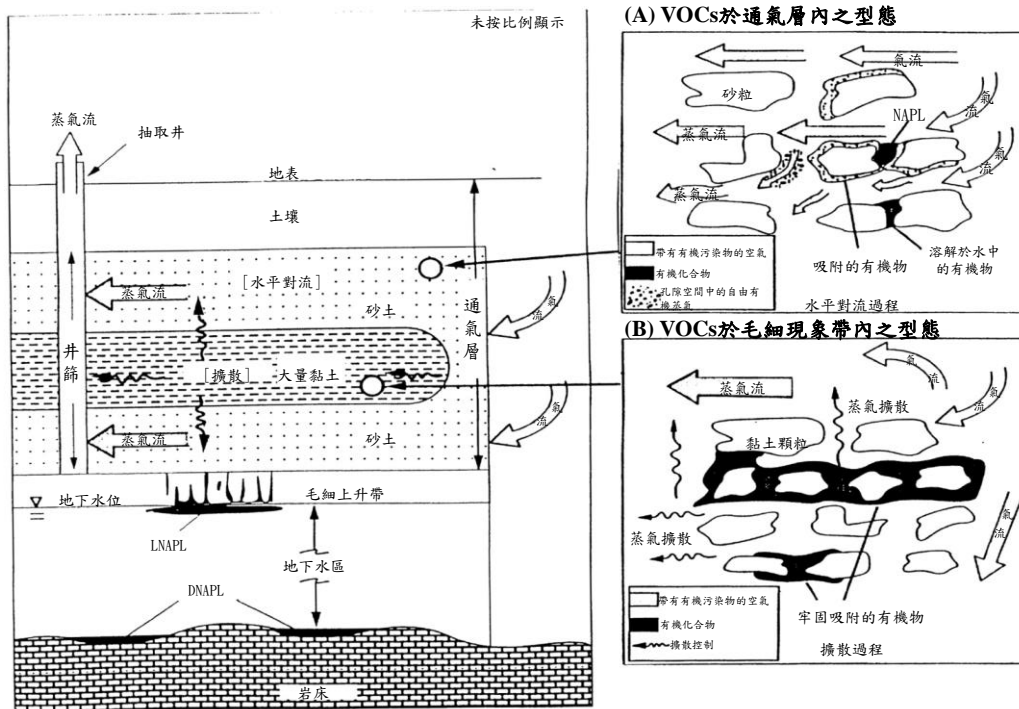
一、通氣層

VOCs 在通氣層(vadose zone)的型態有四種, 包含固體粒子之間毛細作用下所殘餘的非水相液體(Non-aqueous Phase Liquid, NAPL)、吸附於固體表面的有機物、溶解於土壤孔隙水中的有機物, 及土壤孔隙氣

體中的有機蒸氣自由態。VOCs 在液、固、氣相之間的分佈，將受到污染物相態間各種物理現象支配。

二、毛細作用現象(capillary fringe)

在毛細作用帶內與地下水位以上的區間，通常為比水輕非水相液體(Light non-aqueous pahse liquid, LNAPL)污染物累積所在。然而，在飽和層底部則累積比水重非水相液體(Dense non-aqueous phase liquid, DNAPL)物質。若 LNAPL 與 DNAPL 混合物同時存在，可能發生共同溶解作用(co-solvation)。



參考來源：USEPA 1991c

圖 2.1.1-1 SVE 於不同地層之存在型態與反應機制

2.1.2 污染物移除機制

SVE 係利用垂直/水平井或溝渠，於抽取空氣時所引發的壓力梯度變化 (pressure gradient)，進而提昇土壤中 NAPL 及溶解於孔隙水中之污染物揮發作用，及土壤表面污染物的脫附速率 (desorption rate)。以 SVE 移除 VOCs 的機制，包含水平對流 (advection)、揮發 (volatilization)、脫附 (desorption)、

生物降解(biodegradation)與擴散作用(diffusion)等，以下將針對主要影響 SVE 處理成效的作用，包含水平對流及擴散作用之原理與污染移除限制因素。

一、 水平對流

使用 SVE 從土壤抽走空氣後，揮發性有機物揮發成為氣相的污染物，將伴隨著大量空氣移動至滲透性較高的區域，這種過程稱為水平對流。通常而言，低滲透性區域的水平對流作用相對較低。

理論上，當污染物可完全揮發，並存在於相互連接的土壤孔隙中時，可達到最高的移除率。因此，當污染物的移除受水平對流率限制時，就污染移除原理而言，應可直接增加空氣流量(airflow rate)提昇移除率。然而，往往受其他污染物特性或污染物存在型態的限制。如增加空氣流量，亦無法移除揮發率有限的 NAPL 或水相污染物；或無法提昇土壤顆粒表面的污染物脫附作用等(Novak, Young, and Forsling 1993)。

二、 擴散作用

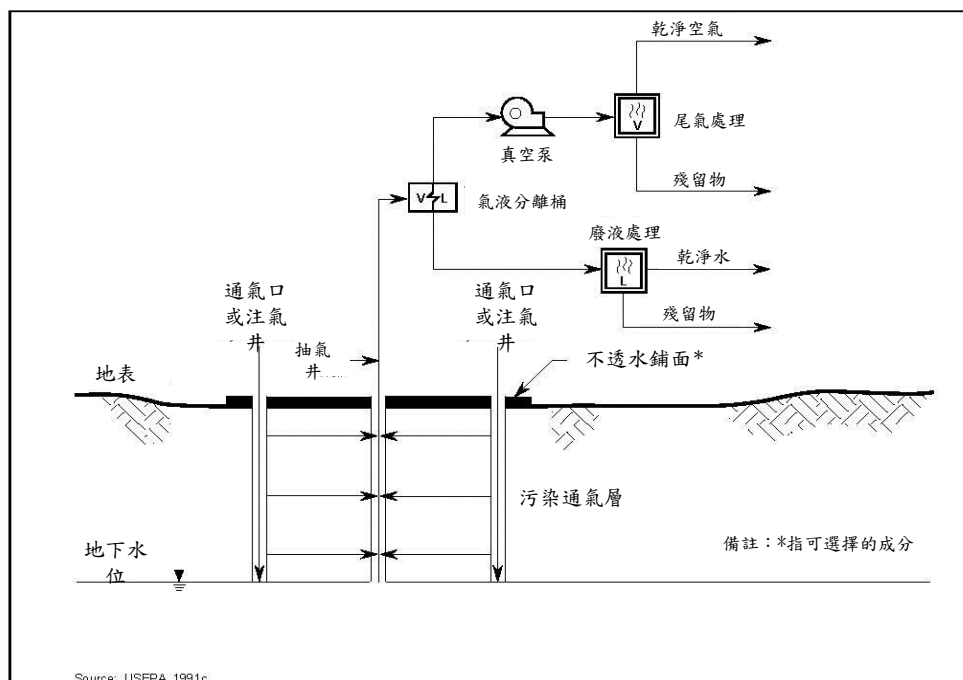
利用經氣體抽除後孔隙間污染物氣體濃度降低，與尚未有完成抽氣部份之污染濃度，所產生的濃度梯度變化，誘使高濃度污染物區域將隨著空氣擴散往低濃度的方向移動，稱之為擴散作用。然而，擴散作用通常遠比水平對流慢，因此在滲透性較低的區域，污染移除率會受較大的限制。

Johnson, Palmer, Keely(1987)曾研究土壤溼度對 VOCs 於土壤管柱(soil column)中擴散的影響，研究證實當污染物在濕沙中的移動時間比乾沙高出 2~3 倍。這樣的延遲作用，歸因於孔隙水(pore water)的分配效應(effect of partitioning)。例如，在汽油或燃油的污染場址，其 LNAPL 污染物會殘留在地下水位與毛細作用帶附近，亦即污染物累積於飽和層的地下水位變動區間。由於土壤孔隙體積為定值，當 LNAPL 佔據該區間的孔隙後，將與氣體抽除作用競爭流動位置，導致未飽和帶的擴散作用延遲。因此，濕度往往成為該類型場址的傳輸機制限制。

2.2 整治系統單元

典型的 SVE 系統如圖 2.2-1 所示，由一或多個抽取井(extraction well)、氣液分離器(air/water separator)，及鼓風機(blower)或真空泵(vacuum pump)所組成，也可能包含一或多個空氣入口或注入井、地表上的不透水鋪面，及空氣或水流處理系統。使用 SVE 時需要依據污染物特性(例如揮發性)，及土壤性質(例如透氣性與地層結構)進行系統設計。本技術指引將該整治技術常見使用設備彙整如下：

- 一、 井場系統：抽氣井、井頭設施
- 二、 管線系統：抽汲管線、流量計、球閥、壓力錶
- 三、 抽氣主系統：鼓風機、氣/液分離器、空氣過濾芯
- 四、 二次污染防治設備：尾氣處理系統、廢液處理系統
- 五、 操作監測設備：PID/FID、主動式空氣採樣箱、採氣袋
- 六、 其他：不透水鋪面(impermeable cap)



參考來源：USEPA, 1991c

圖 2.2-1 一般常見的 SVE 系統

2.3 整治技術應用

針對存在自由相或稱殘餘相(residual phase)污染場址之抽除回收，現已發展出多種抽除技術，最常見的就是多相抽除技術(Multi-Phase Extraction, MPE)。MPE 可於土壤未飽和層、地下水飽和層，及地下水位變動區間之毛細現象帶，同時抽取蒸氣相、溶解相與殘餘相的污染物。搭配該抽除技術，可提昇 SVE 在中度滲透性的土壤污染物移除成效(滲透率(intrinsic permeability)，介於 10^{-8} 至 10^{-10}cm^2)。一般而言，利用 MPE 相較於傳統 SVE 工法，可使通氣層、毛細現象帶與飽和帶交會的井或溝渠，產生較高的負壓狀態。此外，因 MPE 可將井篩置入污染水層之飽和帶，因此可同時將土壤氣體與污染之地下水一併抽除，通常應用於地下水位變動區間的污染物移除。

MPE 又可以依據不同場址地質特性選用不同之技術，如在相同導管中抽取液體與氣體，稱為雙相抽除技術(Two Phase Extraction, TPE)。有時也稱為生物漱洗(bioslurping)，主要為透過真空強化(vacuum-enhanced)方式，移除比水輕非水相液體；然而，當蒸氣與液體採用不同導管時，則稱為雙重抽除技術(Dual Phase Extraction, DPE)，以下分別詳細說明：

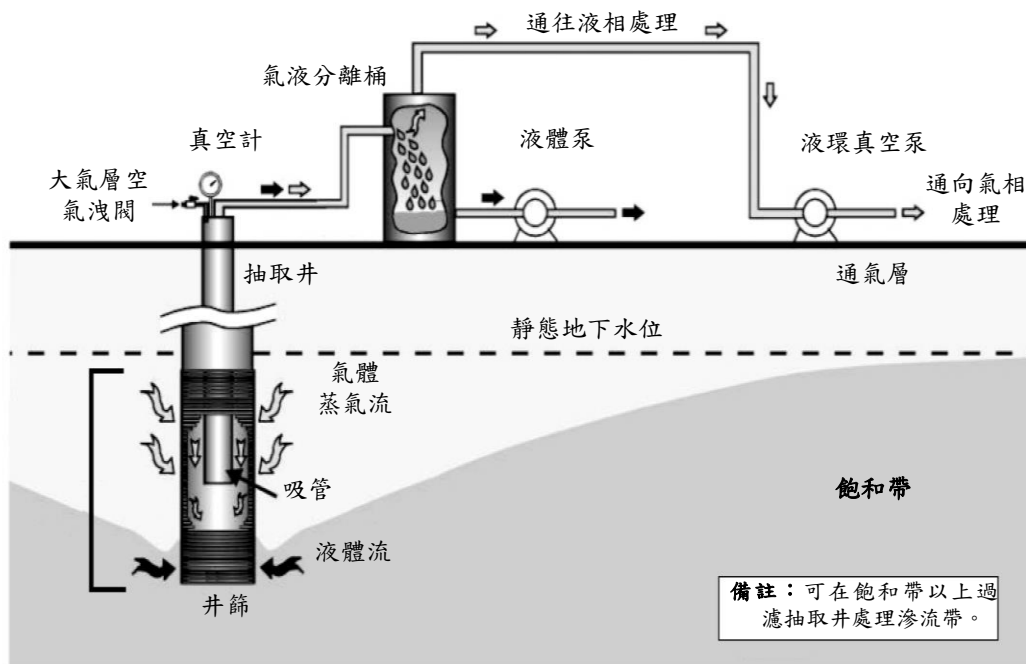
一、雙相抽除技術(TPE)

TPE 於單一抽除管中，抽除通氣層中的土壤氣體與飽和層中的液體，並輸送到地表處理。該抽除管有各種不同的名稱，如落管(drop tube)、漱洗管(slurp tube)、針(stinger)、矛(lance)或吸管(suction pipe)。同時抽取液相與氣相，可利用單一真空源(真空泵或鼓風機)，TPE 配置示意圖如圖 2.3-1 所示。在抽除井中的吸管能同時抽取液體(非水相液體或地下水)與土壤氣體。不論是抽除之液體或氣體，皆被送至地表上的氣液分離器，進行氣液分離後，分別進入後續處理系統。若已知 LNAPL 的存在，可在氣液分離器的後端加裝油水分離器，以回收油品再利用，並降低後續廢水處理成本

由於 TPE 為透過真空方式，同時抽除氣相與液相，可引發飽和層的水位洩降。因水位洩降裸露的變動區間，可將存在於此處之殘餘相抽除，並可評估是否回收再利用。

生物漱洗為 TPE 的一種形式，可強化對 LNAPL 的污染抽除成效，

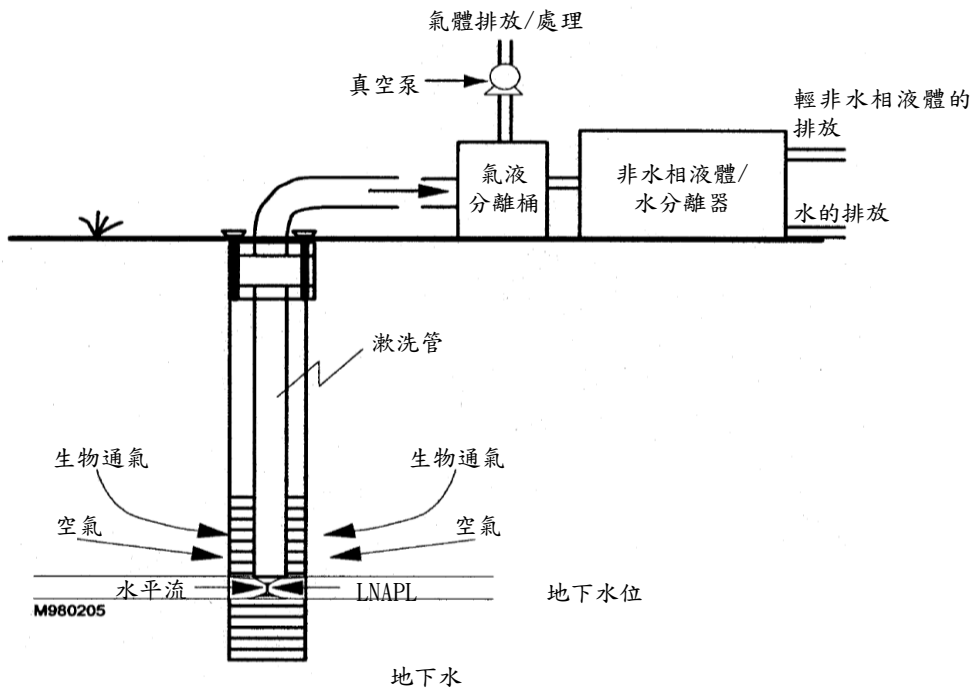
刺激不飽和層內的生物通氣作用(AFCEE 1994a；Kittel et al., 1994)。生物漱洗裝置，透過裝設在靠近 LNAPL 與水介面的抽吸管所引發壓力梯度，將水、LNAPL、與氣體一起導入井內，圖 2.3-2 為一般生物漱洗的配置情形。在抽除一段時間後，地下水表層的 LNAPL 量減少將產生如凹槽型態，將引發鄰近區域之 LNAPL 的，擴大 TPE 系統可抽除範圍。抽入井中的水或 LNAPL 會被運送到氣液分離器，液相流體傳輸到油水分離器，尾氣及廢水經處理確認污染濃度低於標準後排放。生物漱洗以強化浮油回收的主要目的，盡可能提高 LNAPL 的回收量，至於地下水與氣相流體的回收量並無特別要求。



M960212

資料來源：USACE(2002)

圖 2.3-1 TPE 系統示意圖



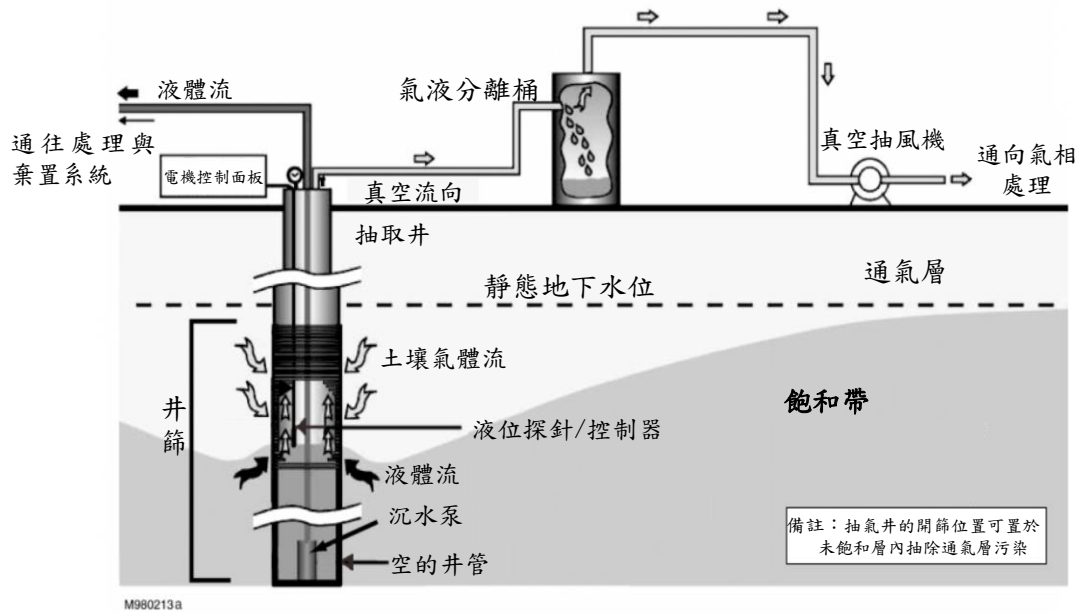
資料來源：USACE(2002)

圖 2.3-2 生物漱洗裝置系統

二、 雙重抽除技術(DPE)

該項抽除技術為在本質上，可補強 SVE 無法回收及處理受污染地下水回收的能力。在使用 DPE 時，會藉由泵浦或鼓風機，以個別獨立的抽除管將土壤氣體與液體從抽取井抽到地表，由於抽除管分別獨立之故，又稱為管中管(pipe within the pipe)配置，如圖 2.3-3 所示。其中，懸吊在井管內的沉水泵(submersible pump)，可抽取非水相液體或地下水並增加地下水位洩降，由抽水管輸送到地表上的處理系統。除常見的沉水泵之外，亦可使用抽吸(例如在地表上以雙隔膜泵運作)將液體自井內抽離(Blake and Gates 1986)，也是 DPE 的應用之一。

該技術原理基本上與 TPE 相同，為同時抽取土壤氣體與飽和層液體。然而，在含水層回水率較高場址較適合採用 DPE，是因為透過沉水泵的安裝，有利於產生較大之地下水位洩降，以增加未飽和層裸露的厚度，以利抽除地下水變動區間內之污染土壤氣體及 LNAPL 回收。



資料來源：USACE(2002)

圖 2.3-3 DPE 系統示意圖

為了強化抽除井附近地下水變動區域的抽除效率，可提高負壓環境的建立，也就是提昇抽氣的真空度，以強化 MPE 的抽除成效，可根據目標抽除污染物的差異，進行不同深度的真空強化作用，以下就抽除 LNAPL 及氣相有機污染物個別說明。

一、 真空強化抽除 LNAPL

由於 LNAPL 隨地下水位變動，主要存在於飽和層與未飽和層之地下水位變動區間內。欲透過強化 MPE 抽除成效時，可將抽除井開篩位置放置於較為淺層。此時，透過抽除氣體的吸力提昇，可同時提高 LNAPL 及地下水的抽除速率，一方面抽除既有的浮油又可增加地下水的抽出量，進而使抽除地下水產生的洩降作用更加顯著，強化井鄰近區域的 LNAPL 流入，加強全井場的抽除成效。

二、 真空強化抽除氣相有機污染物

藉由提高真空度的建立，強化 MPE 同時抽除氣體及地下水的特性，可增加地下水變動區間裸露區域。因此，當欲抽除之污染物為氣相有機污染物時，透過地下水變動區間的水分抽除，使氣流通過原本充

滿水分的變動飽和區間內的揮發性有機物，轉變為蒸氣相進入流動空氣中而被抽除。此外，也能移除存在於抽取地下水中的可溶性揮發性有機物(USEPA 1997a)。

2.4 輔助整治技術選項

2.4.1 現地加熱輔助

由於 SVE 主要原理係將污染之土壤氣體移除，受場址與污染物特性影響甚大，故通常可藉由對地表下介質加熱過程，增加污染物揮發的速率。增加地表下溫度能提升污染物蒸氣壓與溶解度，改善生物轉化與脫附。增加溫度也會降低非水相液體的黏度與介面張力(EPA 1997b)。然而，加熱技術皆為較耗能、高成本之輔助技術選項，本指引僅列舉部份加熱技術供使用者評估參考使用。

根據 USACE (2002)報告指出，在美國已進行過實場試驗的地下環境增溫技術包含：蒸氣注入(stream injection)、射頻加熱(radio-frequency heating, RF)、電阻加熱(electrical resistance heating)。選取時須根據各個場址的熱源特性，考慮合適的現地加熱技術。以下個別說明不同加熱技術之原理：

一、 蒸氣注入

利用注氣井將蒸氣注入到地下水位上下的區域，可提高溫度、增加熱梯度(thermal gradient)，以提昇污染物的揮發作用或提高污染物的溶解度，加強對不同相態的液體回收，提昇 SVE 在土壤氣體移除的整體成效(USEPA 1998, USEPA 1997b, Udell 1996)。

將蒸氣注入至地下深層的技術，已證明能創造往上的熱對流，促進以 SVE 移除污染物的成效(Adams、Smith and Basile 1992)。以蒸氣注入提昇整治成效的成功案例，如位於 Visalia 南加州 Edison 森林整治場址。相較於抽取處理法，注入蒸氣能提高木餾油與相關化合物的回收量高達一千倍。該場址注入蒸氣的作法，亦顯著提高了非水相液體的回收，其中多數為非水相液體—水乳膠狀態。該場址多數的移除物為揮發性物質及非水相液體。

二、射頻加熱

利用射頻電能加熱受污染的土壤，在溫度升高時會引發蒸發作用 (evaporation)、蒸氣蒸餾作用 (steam distillation) 與蒸氣引發蒸發作用 (steam-assisted evaporation)，使土壤內的污染物揮發，並由 SVE 抽氣系統將污染物抽除。

RF 為安裝一連串的電極陣列於鑽孔內，並連接至地表的電源。執行時可觀察到靠近接電端的溫度最高可達 100°C。在接電端會將電轉換為熱，熱在離開接電端後，主要傳輸機制是熱傳導而非熱輻射，故離接電端的距離越大，溫度逐漸遞減。在潮濕的土壤中，產生集膚效應 (skin effect)，會使接電端與鄰近土壤的溫度差異更大。RF 的費用常因土壤體積、土壤含水量與最終處理溫度的函數及其他因素影響。根據美國環保署在 CLU-IN 資料庫的報告，估計費用取決於處理的土方量，每立方碼介於 100 至 250 美元之間 (USACE, 2002)。應用本技術將土壤溫度提高至約水的沸點時，會出現類似蒸氣注入的現地熱脫附、熱氧化與加強生物降解的現象，亦可提昇污染物的揮發作用。然而，基於成本及節能的考量，

三、電阻加熱

電阻加熱是利用電極間電流通過，將流經範圍的土壤及水份(非電極)加熱，可提高地下環境溫度使污染物達到沸點至以上，進而將污染物揮發成氣態，再利用真空抽氣方式予以移除，如圖 2.4.1-1 所示。除利用污染物揮發的原理外，亦可能發生以下幾種反應將污染物移除 (電阻加熱處理應用於污染源整治之案例，賴宜欣)。

- (一) 現地水解：利用水中的氫，取代污染物上的氯，使污染物不具毒性，反應過程不需處於氧化狀況或需要氧存在的環境。
- (二) 水合熱裂又稱水合熱裂氧化 (Hydrous Pyrolysis Oxidation, HPO)：將溶解於熱水中分子較大的污染物，分解成較小的分子，水合熱裂作用則需要在氧化狀況或在有溶氧的環境方能進行反應。
- (三) 生物降解：在電阻加熱過程中，嗜熱菌會被活化，以較一般環境中更快的反應速率，降解含氯揮發性有機物。

(四)在現地在降溫的過程中，油相 DNAPL 與水間的表面張力會形成水力坡降，使得油相的 DNAPL 更易於移動，因此，可能需設置抽除井與地面廢水處理設備。

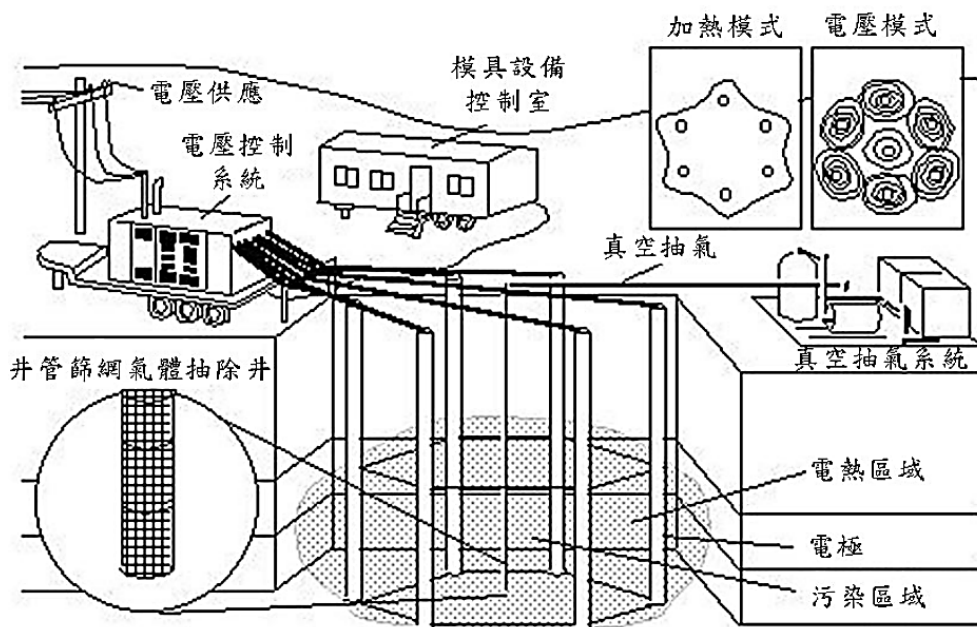
四、 其他加熱技術

除了上述特定整治技術與工法外，亦可考慮其他加熱方式，將熱導入地下環境中，使溫度上升。

(一)可將直燃式焚燒爐裝置(thermal oxidizer units)的廢熱，經由注入井而用於現地加熱。但須注意，若熱處理後的尾氣不含氧氣，在直接注入地表下後，可能會抑制生物降解作用。

(二)當注入的空氣熱容量(heat capacity)低於現地的水與土壤時，將限制地下熱量傳輸作用，限制地下溫度上升程度。

(三)另可利用埋在地下的加熱電纜，或水加熱時的滲透作用導入熱量 (Sayles et al. 1992)。



參考資料：Final Report – Cost and Performance Review of Electrical Resistance Heating (ERH) for Source Treatment, Technical Report TR-2279-ENV, Naval Facilities Engineering Service Center, 2007

圖 2.4.1-1 電阻加熱整治技術示意圖

2.4.2 搭配其他輔助技術

除了現地加熱技術搭配外，亦可應用其他輔助技術，例如土壤加熱與地表下爆破破裂，進一步強化傳輸速率。SVE 最常見的整治技術組合為空氣注入系統，在抽除地下的污染空氣的同時，注入新鮮空氣。以下將列舉常見可作為 SVE 輔助技術，包含空氣注入法、注入空氣以外氣體，及氣動/水力壓裂法(pneumatic and hydraulic fracturing)。然而，各種整治技術原理及所需時間成本皆不相同，本指引僅提供部份可搭配之整治技術作為整治方案組合的參考。

一、 空氣注入法

空氣注入法(Air sparging, AS)亦可稱為現地氣提法或現地空氣注入法。主要原理為透過氣體注入飽和含水層，可將溶解態的(dissolved)、吸附於氣體表面的、液態的 VOCs 透過氣體流動，一併往通氣層的氣體孔隙方向移動。此時，可利用 SVE 收集流動於孔隙間的污染物。此外，空氣注入亦能提高飽和與不飽和層內的氧氣含量，強化可能揮發性較低的污染物進行好氧生物降解反應(Brown and Fraxedas 1991)。

由於 AS 操作係將飽和層污染物氣提至未飽和層，至於 SVE 則可將未飽和層污染物抽除，故兩項技術為常見之搭配使用技術。SVE 常因目標處理區域或毛細現象帶中的含水量/產物含量高，而有較差的整治成效，皆可透過 AS 的搭配提昇處理成效。空氣注入為一項節省時間與成本的地下水污染整治技術(Marley 1992)。典型的空氣注入應用場址特性，多為非侷限且高滲透性的含水層，或無明顯揮發性有機污染物分層現象(stratification)的區域。由於注入空氣會產生正壓梯度，當單獨採用空氣注入而不用 SVE 時，可能造成污染物移動到未受影響區域，例如地下室或公用管路，可能造成爆炸或危害健康等潛在危害。

在 AS 設計須考量地下水位、污染物的溶解性、生物降解性、蒸氣壓、土壤類型、土壤有機碳的含量、土壤異質性(heterogeneity)、是否存在侷限含水層(confining layers)、是否存在 NAPL 等。

空氣注入系統通常由以下設備，詳如圖 2.4.2-1。空氣注入井、空壓機、抽取井、真空泵或鼓風機、蒸氣預處理設備、尾氣處理系統，及相關管線和儀錶(Johnson et al., 1993)等。

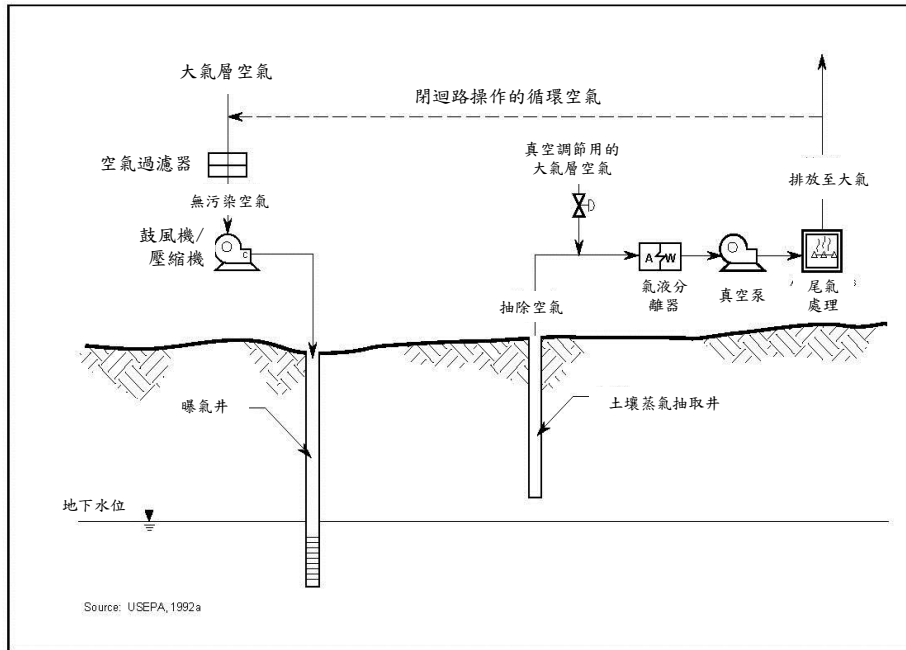


圖 2.4.2-1 空氣注入法示意圖

空氣注入功效取決於空氣的流佈(distribution)，故在充分考量地質條件，確實將空氣輸送到目標移除帶或毛細現象帶時，其成效將相當顯著。然而，在許多案例中，注入的空氣並不會適當的分布在目標處理區域或通過預定路徑，而是流經最短路徑(Baker、Hayes and Frisbie 1995)。探究注入空氣的流佈區域，對有效的空氣注入設計很重要，當時間及成本可接受的條件下，建議可採用以下監測技術來判定空氣流佈，如中子探測器、時域反射計、電阻斷層攝影、溶解氧或追蹤氣體(在極短的篩選監測點使用 SF_6 或 He)測量。

二、 注入空氣以外氣體

為了提昇空氣流動，除了空氣注入外，可注入電子接收者、基質、營養鹽或追蹤物至地下。電子接收者如注入純氧，但應特別考慮爆炸的危害性。可注入甲烷(Alvarez-Cohen et al., 1992)、丙烷(Wackett et al., 1989)或天然氣(甲烷、乙烷、丙烷、與較大的烷烴追蹤氣體混合物)(Wilson and Wilson 1985)，作為生物降解三氯乙烯之生物降解的共基質。由於會有爆炸的危險，不應注入空氣中濃度高於爆炸下限(lower explosive limit, LEL)的氣體。

為了計算注入氣體在地下流動時間與地下環境透氣性的估算，可搭配追蹤氣體的使用。針對土壤異質性之通氣層孔隙率進行定性與量化，以氣壓與通量估算地下環境的透氣性。例如，氦氣可做為追蹤氣體，判定是否能用定量方式回收注入與吹入氣體，進一步了解空氣通道、滯留時間，及氣體在注氣井與抽取井之間的分佈情形。此外，追蹤氣體從注入井口到不同深度與距離的通氣層，可監測氣體抵達目標污染移除區域的情況，亦可用以估計追蹤氣體在地下流動所需時間。Moench(1989, 1991)與 USEPA(1996)，彙整追蹤氣體試驗數據的細部評估報告，提供各位使用者參考。追蹤氣體包括 SF₆、He、CH₄ (Marley 1993)，以下個別說明其追蹤方式。

(一) 六氟化硫(SF₆)

可於現場利用電子捕獲偵測器(Electron capture detector, ECD)進行氣相色譜分析，但分析僅限於離散樣本且須符合 ECD 內的特定放射波段。亦可透過手提式氟氣烷偵測計，進行 SF₆ 的連續監測。不論何種偵測器，皆僅能提供定性而非定量資訊。

為避免因追蹤氣體的使用，造成地下環境條件的變化，故 Kampbell and Newel(1990)進行相關研究，結果顯示少量(1%)的 SF₆ 不會妨礙正丁烷的生物降解，但若有大量 SF₆ 存在時(95%)則可能造成影響。

(二) 氦氣(He)

採用熱導偵測器時常用 He 為追蹤氣體進行偵測，因為 SF₆ 與 He 的分子量，與氧氣和其他空氣成分的分子量的差異較大。但是，必須注意追蹤氣體的使用，適用於氣體擴散為主要傳輸機制，若為顯著水平對流時，其偵測效果較差。美國空軍的 BV 實場整治試驗，建議採用氦氣作為追蹤氣體(Hinchee et al., 1992)。

(三) 甲烷(CH₄)

甲烷的優點是成本較低，且利用火焰游離偵測器可以很容易持續偵測。然而，由於甲烷非為惰性氣體，當存在生物活動時，會產生或消耗甲烷造成偵測上的誤差。

三、 氣動/水力壓裂技術

土壤與岩石爆破技術，於加強低產量油井的油回收已行使多年。氣動/水力壓裂會經由爆破方式，增加土壤或岩石內的裂痕，提昇通氣層內透氣性。這個過程包含在高壓下將空氣或流體注入土壤或岩石，直到達到臨界壓力並形成裂痕。這項技術特別有助於提昇細粒土壤(例如黏土與泥砂)內的水平對流作用。

當爆破井內可同時形成垂直與水平裂痕，則得以使 SVE 抽氣井的氣流速率比非爆破井提高 25 至 40 倍(USEPA 1993e)。此外，低滲透帶通常沒有足夠氣體孔隙產生氣體流動，在透過爆破過程即可建立最佳氣體流動路徑，強化低滲透帶有限的擴散與傳輸作用。該項技術已發展多年，並有許多研究發展中心開發有效的爆破程序，以下列舉兩個美國研究發展成果說明。

(一)水力壓裂程序(USEPA 1991e)

美國環保署風險降低研究暨發展辦公室與辛辛那提大學，共同開發水力壓裂程序，該項程序可使厚達 25 mm、填滿沙粒的通氣層產生水平裂痕，其範圍自注入點起向外輻射達六公尺。利用泥漿泵將黏性沙粒混合物(稱為爆破用砂)、瓜爾膠、酵素與水份注入鑽孔。完成注入後，酵素添加物會分解灌入的黏性流體，使開啟的裂痕填滿乾淨的滲透砂。這些裂痕出現在地表以下最少 1.5 公尺的不同深度中。在石油工業進行的爆破深度，最大可達超過 6,000 公尺。

(二)土壤與岩石爆破專利

紐澤西理工學院危害性物質管理研究中心(HSMRC)開發出另一種土壤與岩石爆破過程並取得專利。這個過程藉由注入高壓空氣或其他氣體，以氣動方式爆破細粒土壤與岩石。在爆破井內的預計深度位置，放置一組專利認證的空氣噴嘴/栓塞組件，利用壓縮空氣源建立高壓脈衝，爆破特定深度的土壤。為了達到最大的爆破效果，必須謹慎選擇爆破井內的空氣噴嘴/栓塞組件的位置，確保只有黏土或淤泥曝露於噴射範圍內。由於並未將爆破用砂

注入到裂痕內，裂痕將取決於結構強度、靠近裂痕的土壤硬度，而產生不同的崩塌程度。

第三章 適用條件

不同污染改善技術有其適用之條件，因此在選擇污染改善方案之前，須事先了解影響該污染改善技術成效之重要因子以進行篩選，確保該污染改善技術能確實發揮功效。基本上，一污染改善技術之成效會受場址的特性及污染物種類性質影響。本章首先說明 SVE 適用性篩選流程，並說明各篩選條件影響污染改善成效之原因，另提供一 SVE 適用污染物快速查核表，該表中之污染物皆符合篩選流程之條件，而使用者若想進一步了解各適用污染物之物化性質及與 SVE 成效相關之參數，另可查詢本指引附件。

3.1 SVE 適用性篩選流程

SVE 的成效受場址土壤特性與污染物性質影響，土壤特性中主要影響參數為滲透性；而在污染物性質上影響最大者則為揮發性。圖 3.1-1 為 SVE 之篩選流程，其兩大篩選範疇即為場址特性與污染物性質。場址特性中又包含透氣性、土壤結構與分層、地下水位與土壤濕度；污染物性質篩選參數則包含蒸汽壓、沸點與亨利常數。以下說明各參數如何影響 SVE 成效：

一、透氣性

透氣性表示土壤間隙中，可允許空氣通過的能力，也是影響 SVE 可行性與設計最關鍵的因素之一。根據文獻指出，透氣性小於 10^{-10}cm^2 之土壤可能較不適用 SVE (USACE, 2002)。透氣性可由水力傳導係數 (hydraulic conductivity) 與內在滲透係數的函數轉換，內在滲透係數之計算方式如式 3-1，而各種土壤質地之內在滲透率表現如圖 3.1-2

$$k_i = \frac{K\mu}{\rho g} \quad \text{式 3-1}$$

其中

k_i = 內在傳導係數(cm^2)

K = 水力傳導係數(cm/sec)

μ = 動力黏滯性(dynamic viscosity of water $\text{g}/\text{cm} \cdot \text{sec}$)

ρ = 水密度(density of water, g/cm^3)

g = 重力常數(gravitational constant, cm/sec^2)

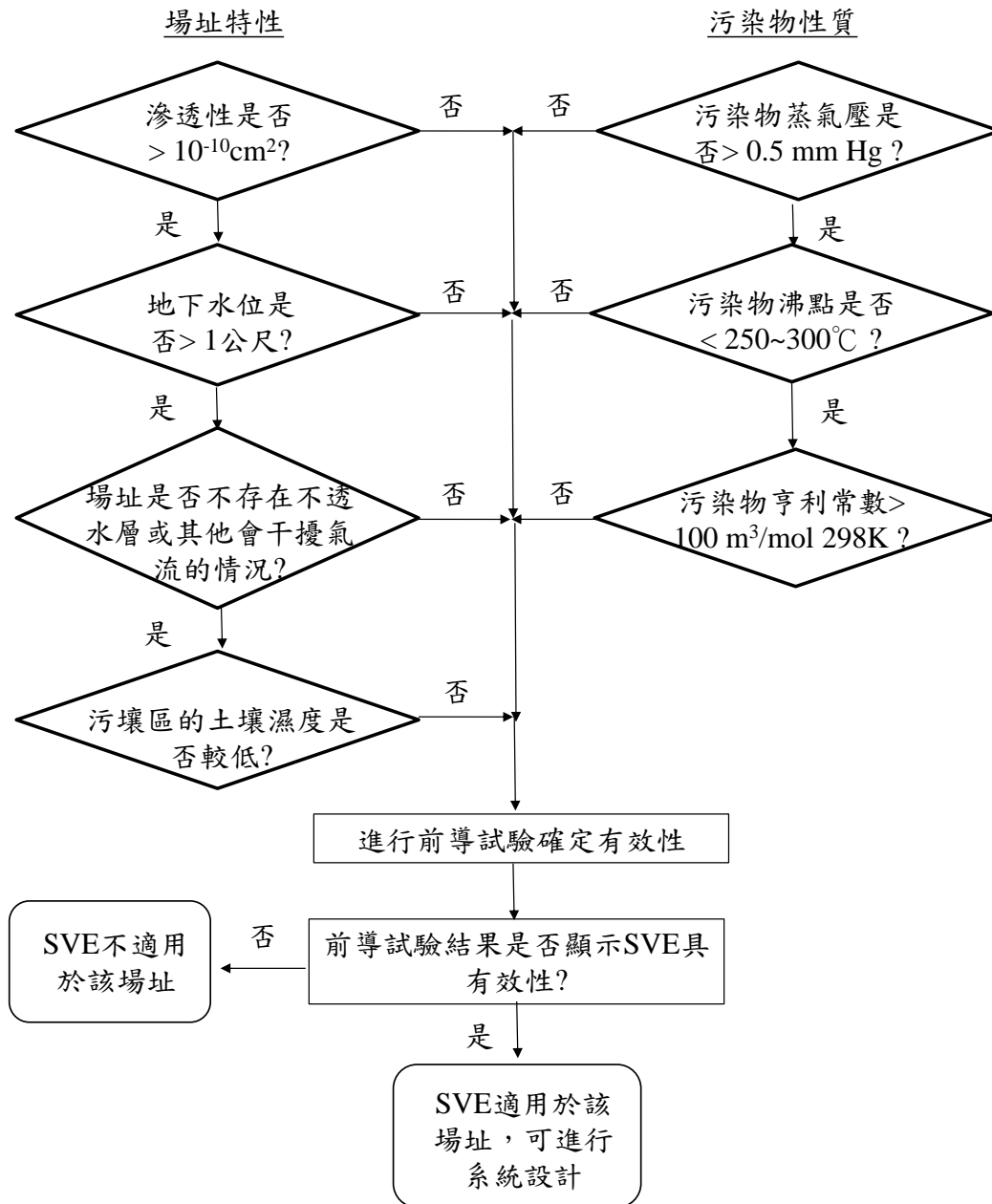


圖 3.1-1 SVE 適用性篩選流程圖

而透氣性與內在滲透性之關係可式 3-2 表示：

$$k = k_i \times k_{ra} \tag{式 3-2}$$

k = 透氣性

k_i = 內在傳導係數(cm^2)

k_{ra} = 空氣相對滲透性(relative permeability to air)

k_{ra} 可由 Burdine (1953) 和 Mualem (1976) 發展之公式計算，如式 3-3：

$$k_{ra} = (1 - S_e)^2 \left(1 - S_e^{\frac{2+\lambda}{\lambda}} \right) \tag{式 3-3}$$

其中

S_e = 有效水飽和度 (effective water saturation)

λ = Brooks-Corey pore size distribution index effective water saturation 可由式 3-4 表示：

$$S_e = \frac{S_w - S_r}{1 - S_r} \tag{式 3-4}$$

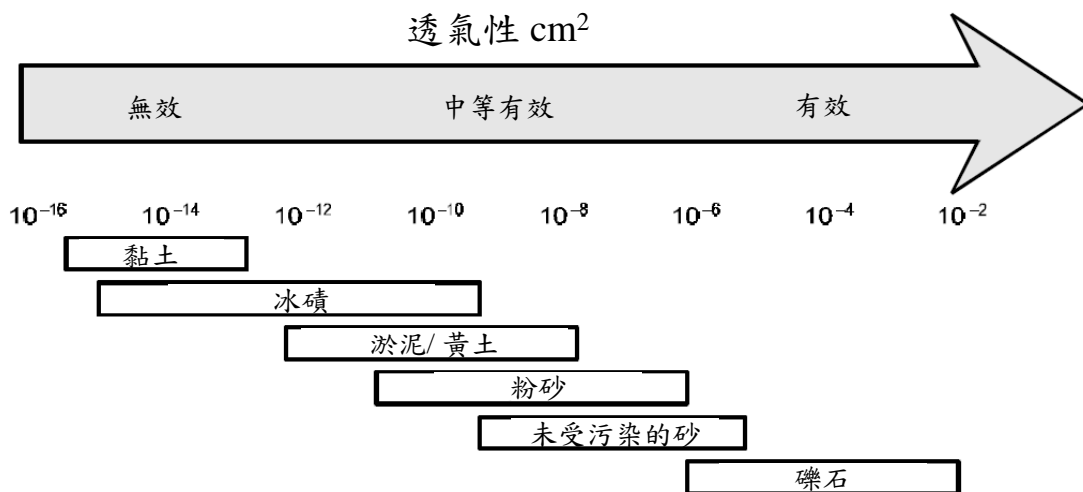
其中

S_w = 水飽和率 (water saturation)

S_r = 殘餘水飽和率 (residual water saturation)

綜合式 3-1、3-2 與 3-3，透氣性可由式 3-5 計算：

$$k_{ra} = (1 - S_e)^2 \left(1 - S_e^{\frac{2+\lambda}{\lambda}} \right) \frac{K\mu}{\rho g} \tag{式 3-5}$$



資料來源：USEPA, 2004

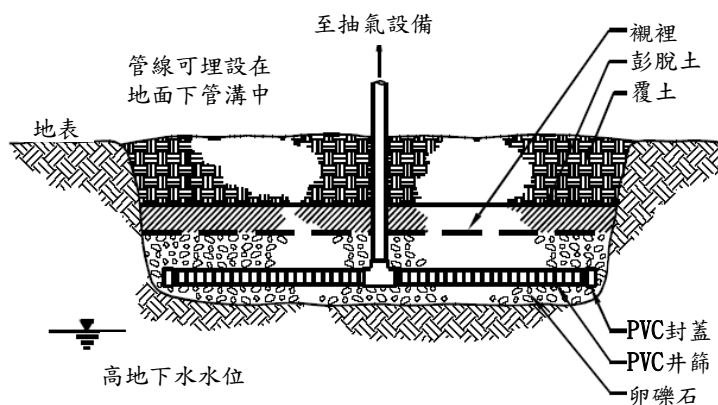
圖 3.1-2 各種土壤之土壤滲透率表現

二、 土壤結構與分層

土壤結構與分層會影響土壤氣體於地下流動的方向，若黏土中存在的微小裂隙，則其透氣性會比一般情形高。然而，若使用SVE的場址存在此種優勢流(preferential flow)，可能降低整體成效進而延長污染改善期程。此外，若場址地質有分層之情形，因其不同層間的透氣性不同，亦會使透氣性較高的土層水平氣流流動較佳，而使較不透氣的土層中的氣體流動較低。土壤的結構與分層可由土壤鑽孔試驗 (soil boring)、圓錐貫入檢試驗(cone penetrometry)、試驗井 (test pit) 之土壤剖面試驗 (soil profile examination) 等方法，皆可進一步取得物理異質性資訊。

三、 地下水位

對氣流而言，地下水位面的作用就像不滲透邊界，可用來定義通氣層的厚度。地下水位過高時，會阻礙土壤污染物在SVE抽氣時之移動性且SVE系統抽氣開篩區間可能被淹沒。因此，需將地下水位的豐枯水期變動納入篩選條件。國外文獻指出當地下水位位於地表下10公尺以下時，SVE通常有效；地下水位位於地表下1公尺至3公尺時，SVE可能需增加其他控制設施，如水平井或抽水井(如圖3.1-3)；而當地下水位距離地表1公尺以上時，SVE可能無法發揮功能(USEPA, 2004)。



資料來源：USEPA, 2004

圖 3.1-3 SVE 水平井示意圖

四、土壤濕度

土壤的含水量會影響場址特性的表現，如透氣性、與氣相分佈等，這些特性參數的變化會進一步影響使用 SVE 之整治成效。以下針對個別特性參數與整治成效的關聯性說明。

(一)透氣性

土壤中水分含量會直接影響透氣性的大小。其原因在於水會與空氣和 DNAPL 競爭土壤內的孔隙空間，導致空氣通道減少，進而影響到最終蒸氣通過不飽和層的能力，最終使系統移除能力降低。

(二)氣相分佈

土壤含水量對氣相分布有顯著影響。Farmer et al. (1980) 及 Aurelius and Brown (1987) 證明：土壤達到飽和水量時 (full water saturation)，揮發性會下降。Lighty et al. (1988) 及 Houston、Kreamer and Marwig (1989) 則依據接近水分光譜 (moisture spectrum) 之乾燥端的研究報告指出，當含水量下降時，吸入土壤的揮發性有機物會增多。原因應該是水份存在時，水分子會與污染物競爭場址內土壤可吸附的位置，水分子取代吸附於土壤表面的污染物而使污染物可被 SVE 移除。

由上可知，土壤較乾燥時雖然透氣性較高，然亦會阻礙污染物之脫附，Davies(1989)指出相對濕度介於 94%~98.5% 時較 SVE 效果較佳，低於此區間時污染物將會更緊密地結合土壤，無法迅速揮發。綜合以上文獻所述，含水飽和度偏低而有利於產生較大的相對透氣性時，然而若呈現為乾燥條件，可能會阻礙揮發性有機物的脫附，應盡可能避免(USEPA 1991d)。

五、蒸汽壓(vapor pressure)

污染物的蒸氣壓為液相或固相與氣相達到平衡狀態下的壓力，該值可表現污染物由液相或固相揮發成氣相的作用強度，當揮發作用越大即表示蒸氣壓越大，越容易被 SVE 系統抽除。一般而言，污染物蒸氣壓需大於 0.5 mm-Hg 時，SVE 較能發揮功能。

六、 沸點(boiling point)

物質之沸點為該物質之蒸汽壓與大氣壓力相等之時之溫度，沸點低於 250°C~300°C 之污染物 SVE 抽除效率較為顯著。由於油品類污染物化學組成複雜，其分類多以沸點表示，以國內常件油品污染而言，汽油類污染物沸點介於 40°C~225°C 之間，可使用 SVE 進行整治；柴油類污染物沸點介於 200°C~338°C，部分可被 SVE 系統移除，而潤滑油類因其不揮發的特性，不適合使用 SVE 進行污染改善。

七、 亨利常數(Hentry's law constant)

亨利常數 K_H 為平衡狀態下，污染物空氣中的濃度 C_v (質量/空氣體積)與溶解於液體中的濃度 C_l (質量/液體體積)之比值，如式 3-6 所示。通常污染物之亨利常數大於 100 atm 時，SVE 系統較能發揮功能。

$$K_H = \frac{C_v}{C_l} \tag{式 3-6}$$

由上述蒸汽壓、沸點與亨利常數篩選，表 3-1 列舉常見可藉由 SVE 移除之目標污染物。

表 3-1 SVE 可處理之揮發性污染物

揮發性有機鹵化物	
四氯化碳 氯苯 氯乙烷 氯仿 1, 1-二氯乙烷 1, 1-二氯乙烯 1, 2-二氯苯 1, 2-二氯乙烷 1, 2-二氯乙烯 1, 2-二氯丙烷	1, 4-二氯苯 1, 1, 1-三氯乙烷 1, 1, 2-三氯乙烷 1, 1, 2, 2-四氯乙烷 二溴乙烷 亞甲基氯 四氯乙烯 三氯乙烯 氯乙烯 揮發性有機非鹵化物
酮/呋喃	丙酮 甲乙酮 甲基異丁酮
芳香烴	苯 乙苯 苯乙烯 甲苯 間二甲苯 鄰二甲苯 對二甲苯

資料來源：選擇處理方法時，也可考量物理/化學特性與列舉化合物類似的其他化合物。(EPA 1993d)

3.2 其他 SVE 成效影響因子

3.1 節所述之七項因子為初步篩選 SVE 適用性時所用，然而尚有許多其他因子亦會影響 SVE 成效，雖無文獻指出明確之篩選條件，然考量選用 SVE 時亦需審慎評估這些因子，以確保 SVE 之成效，以下茲說明其他可能影響 SVE 成效之其他因子。

一、地下設施

在部份情況中，地下公用設施（例如雨水衛生下水道）或具備類似特徵的回填材料，可能導致 SVE 系統的氣流短路。氣流可能會集中於鄰近地下公共設施的區域，導致標的處理污染範圍卻無氣流通過情形。此外，倘若這些設施位在不飽和層內，亦可能成為自由相液體 (free-phase liquid) 與蒸氣的移動通道，這些物體的方位與幾何形狀，可能會誘導與支配液體或蒸汽的移動方向。因此，應於整治設計前取得地下公用設施的精確竣工圖說。若無法取得時，應當諮詢熟悉場址的人，並留意附近建物的地下室與可能影響氣流的其它建設。

二、地貌與地表

地貌與地表屬性會影響 SVE 系統成效。當地表存在部份建築與設施鋪面覆蓋（如建築物、道路、公用設施系統），導致場址地下環境與大氣層隔絕，沒有氣體交換作用存在時，會強化水平氣流作用 (horizontal airflow)，可提高抽氣井的影響半徑，可能會使 SVE 系統的成效提昇。整治開始前，宜檢查道路鋪面的完整性與是否存有任何裂痕，可行的話宜進行修補。相反的，透水地表則會提高大氣層空氣進入地下的量，可能產生短流效應，降低 SVE 抽除成效。

三、污染深度

污染深度會影響 SVE 系統的可行性與設計。若污染只限定在地表，其他污染改善技術可能較 SVE 合適；而當污染深度位在飽和帶，單獨採用 SVE 則較不可行。場址採用 SVE 時須留意其污染深度會影響井的形式（水平或垂直）、井篩的開篩長度與其他設計因素。

四、 污染體積

受污染土壤的體積會影響 SVE 是否可行。若污染體積較小，其他整治方案（例如開挖與離場處理, excavation and offsite disposal）可能較符合成本效益。此外，受污土壤的體積也會造成許多系統設計差異，如井的數量、鼓風機的尺寸、尾氣處理系統容量等。

五、 場外蒸氣相來源

在判定 SVE 系統的可行性與設計時，必須考慮蒸氣相(vapor phase)污染物是否可能由場外入侵。若發現有明顯的場外蒸氣相污染移入場內時，系統設計必須考慮注氣井或其他預防方法。

六、 是否存在非水相液體

應判斷場址內是否存在非水相液體(NAPL)。在地下水樣本發現浮油(free product) 時，通常表示地下水中含有非水相液體污染物。由於非水相液體會與空氣及土壤水分 (soil moisture) 競爭不飽和層內的孔隙空間，降低透氣性而導致污染改善成效不如預期。此外，非水相液體亦為不斷釋放污染之污染源。有報告指出，不飽和層殘餘飽和度，大約介於 15% 至 50% 的孔隙空間 (USEPA 1989c)。

另一方面，若疑似有 DNAPL 存在時，應注意使用 SVE 整治可能會提高 DNAPL 污染物遷移到更深層區域的風險。舉例而言，一場址之 DNAPL 原本可能停留在地下水位之上的破碎岩床內，然而隨著抽氣作用，可能導致深層 DNAPL 流入抽氣井內，甚至流入飽和層。

七、 土壤異質性

不飽和層內污染物的異質性，為影響 SVE 操作成效的重要關鍵，包含空間變化 (spatial variation)、分層 (layering)、孔隙率 (porosity)、含水量 (moisture content) 等分佈。操作 SVE 系統時，這些變化可能會影響氣流流場 (airflow pattern)，最終影響不飽和層內的污染物回收率。例如，當不飽和層土壤為粗粒土壤層與細粒土壤層交錯組成時，氣流可能只會在粗粒土壤層中移動，因為細粒土壤層孔隙較少，導致期間的移動速率較慢之故。

八、有機碳比例 (f_{oc})

土壤內有機碳比例 (f_{oc}) 會影響特定化合物分配為氣相或液相的能力。若土壤有機碳比例偏高，污染物由土壤顆粒分布至周圍孔隙空間的量較低；比例偏低時，則污染物移至周圍孔隙空間的量會提昇。

3.3 其他選用考量因子

一、 整治目標

不論使用何種整治方案，皆須使該污染場址之污染物濃度低於污染場址管制標準。因此，若經初步評估無法透過 SVE 整治，使污染物濃度達管制標準下，則應考量使用其他整治工法。各土壤及地下水污染管制標準，請參考環保署公告之土壤污染管制標準（環署土字第 1000008495 號令），及地下水污染管制標準（環署土字第 1020109478 號令）。

二、 污染行為人要求

根據土壤及地下水污染整治法(以下簡稱土污法)規定，不論土壤及地下水污染場址採取應變必要措施、或公告為控制場址、公告為整治場址，皆應個別根據第七條、第十三條或第十四條，命污染行為人或潛在污染責任人採取應變必要措施、提送控制計畫書、提送整治計畫書。因此，污染行為人的要求，對於場址整治方案的定讞實為相當重要之考量因素。以下簡列污染行為人常見之關切重點。

(一) 整治成本與期程

其中一種成本控制的方式是延長整治時程，將成本分攤至年度成本。拉長資本成本時間的方式，對嚴格運用年度預算的污染行為人特別具有吸引力。由於極端的天候條件，通常會增加現場活動所需要的成本與時間，因此部份污染行為人，會要求現場工作必須在溫和氣候下進行，以上諸如情況，皆會影響整治成本與時程。

(二) 土地未來使用

對於污染場址完成污染改善後之使用則是另外一項考量。若場址位於市區或繁榮地段，污染行為人可能盡可能考量使用較直接、較快速的之整治工法。

三、 永續性

此外，自民國 101 年環保署推廣「綠色及永續導向型整治」至今，已邁入積極發展綠色調查與整治技術，並積極推廣與普及化環境、社會及經濟友善之整治作業。污染行為人的認知，導向於整治對於鄰近社區的衝擊減緩，要求整治規劃應盡可能避免場址進出次數、及對目前正在進行作業對土地的破壞達到最少等。亦或許在整治過程中，將利用景觀改善與降低噪音等要求納入整治設計內，建構友善整治環境與社區關係。

第四章 整治效能評估

SVE 係將土壤中高揮發性污染物移除，其整治效能可透過採樣、污染物參數的監測及估算，做進一步分析。本章將說明進行整治效能評估時所使用的方式，並闡述評估結果分析。在污染改善作業完成關閉整治系統後，避免反彈效應產生應持續監測作業等相關內容說明。

4.1 評估策略

土壤氣體抽除操作過程可透過幾項績效指標，評估抽氣效能與污染改善情形，在進行指標項目監測與採樣分析過程中，需注意以下事項。

一、 全程監測與紀錄

整治效能的評估，不可等到系統操作作業後期才開始，應隨系統操作過程中不間斷的維持例行性監測並詳實紀錄。將每次取樣與分析的數據結果建立該場址操作資料庫，以利定期監測並確保系統係維持正常之預期方式進行污染改善。

二、 符合品保品管制

現場採樣工作、實驗室分析皆應參考環檢所網頁上公告之標準方法進行(網址：<http://www.niea.gov.tw/>)，確保其作業符合品保品管。如採樣工具清洗、空白樣本製作、儀器校正、標準品配製等。避免因為取樣或分析過程的缺失，產生不可靠的整治效能評估結果。

4.2 評估方式

整治效能評估方式，可由污染改善前後之移除總質量、土壤中之污染物殘餘量判定、單井抽氣量效能或抽除之土壤氣體濃度監測推估。可用之污染整治效能評估方式及應用原理，彙整如表 4.2-1，使用者應視場址實際需求選用適當之評估方式。

表 4.2-1 整治效能評估方式彙整表

評估方式	原理	應檢測項目
移除污染總量推估	污染改善前後污染物總量的差異。然而，以總移除污染物質質量評估污染改善作業情況，僅可作為其中一項評估指標，無法全面性代表全場址改善作業執行成效	抽除氣體樣品 尾氣排放樣品
土壤污染物殘餘量	整治效能的評估可藉由土壤污染物總移除量推估，相反地在預估已知的目標土壤污染物移除總量之下，可藉由土壤中污染物殘餘量評估現階段的整治成效。	土壤樣品
單井抽氣量與效能評估	取得井場內污染物濃度，可評估整治場址局部區域土壤污染殘餘量的分布。在操作後期，針對場址污染濃度較高之井場單元，可提升該區之抽氣操作量或增加高污染濃度區域之抽氣井數量，以增加高污染區域之污染移除率。	井頭污染濃度樣品

4.3 評估結果分析

不論係透過上述何種方式進行評估，皆可作為整治成效的參考依據。然而，為了確保污染改善狀態的確認，建議可將不同評估方式結果進行比對分析，避免因估算上的疏失導致污染改善現況的誤判。如將抽氣濃度及抽氣量換算之污染物移除量、土壤採樣結果換算之移除總質量，進行污染物移除率的比對分析，如圖 4.3-1。

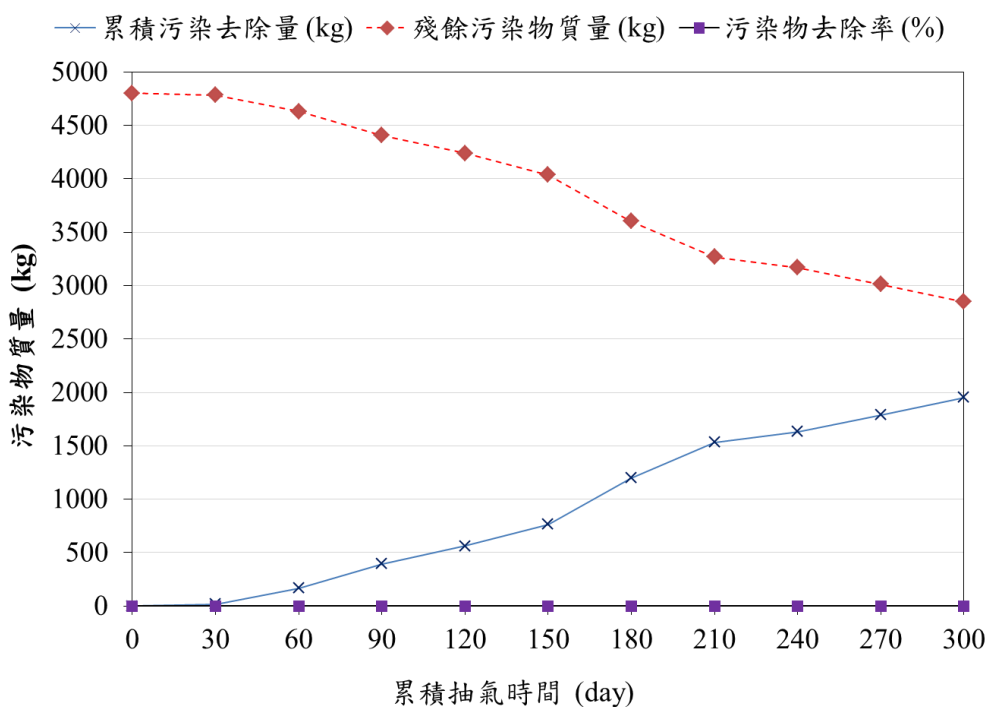


圖 4.3-1 土壤污染移除量比對分析圖(範例)

4.4 系統關閉

經整治效能評估後，確認場址內之污改移除已完成，可低於土壤管制標準，即可進行系統關閉作業。然而，為了避免土壤中有殘餘污染再釋出，應研擬長期監測計畫，並隨時注意是否有反彈效應發生，導致污染物濃度回升現象。為避免污染物反彈效應產生，應針對目標移除污染物濃度持續監測，且須留意採樣與分析的方式，皆需符合品保品管規範。

第五章 案例解析

為使使用者進一步了解前述章節內容之實際應用情形，本章以我國南部某大型石化廠場址作為案例，說明土壤氣體抽除之選取邏輯與操作成效。以下說明場址背景、SVE 設計流程、操作與維護與污染改善成效。

5.1 場址背景

南部某石化廠因其製程廢油水貯存池與管線年久失修而破損洩漏，使污染物滲漏至地下並往下游方向擴散，形成一地下水污染帶。因水位變化造成土壤污染問題，主要標的污染物為苯及乙苯。本場址之污染情形與水文地質資料說明如下：

一、地質與土壤特性

本場址內之土壤主要為矽質黏土、矽質細砂間隔組成，從地表以下 1~2 公尺為道路鋪面與回填材料等；接著其下為黏土質矽土、矽土質黏土及矽土質細砂等不均夾層，直至約地下 3~4 公尺處。從地下 3~4 公尺開始則普遍為細砂夾中砂層，其透水性良好。

二、水文地質

本場址地表 4 公尺以下地質以中、細砂為主；2~3 公尺則為泥質細砂及黏土為主。依場址地質孔隙率調查結果，主要污染範圍為砂層地質，平均孔隙率約為 35%，水力傳導係數(K) 約介於 0.0014 cm/s 至 0.0092 cm/s 範圍內。

三、地下水水位

本場址歷年 1 至 3 月屬枯水期，地下水位高程約介於距地表約 4.0~4.4 公尺，地下水流向係由東→西；歷年 7 月至 9 月為豐水期，地下水位約介於地表下 2.4~5.0 公尺，地下水流向主要係由東南→西北。

四、污染範圍

由歷年調查結果，本場址土壤污染範圍涵蓋未飽和層及飽和含水層，污染土壤面積約為 2,016 平方公尺，污染土壤深度約為 5 公尺，

總污染土壤體積為 10,080 立方公尺，依土壤採樣結果，最高土壤污染物濃度為苯 14.3 mg/kg、乙苯 4,320 mg/kg。

5.2 SVE 適用性

由第三章之 SVE 適用性篩選流程圖可知，本場址地下水位大於地表下 1 公尺且地層透水性良好，故在場址特性上 SVE 為適用之污染改善技術；另一方面，在污染物性質上，本場址主要標的污染物苯及乙苯，為常見輕質油品，屬揮發性有機非鹵化物，主要特性為高揮發性且易燃，依污染物理特性，污染物蒸氣壓大於 0.5 mm-Hg、沸點小於 200°C 且亨利常數大於 100 atm，亦適合以 SVE 作為污染改善技術。

5.3 規劃設計

一、井場配置與抽氣量計算

依據污染調查結果劃定本場址之整治區域，長約為 48 公尺、寬約 42 公尺，整治面積約為 2,016 平方公尺。由本場址整治前之模場試驗結果可知，觀測井所能測得最小真空壓距離抽氣井之最遠距離約為 3.3 公尺，因此本場址之土壤抽氣井以影響半徑 3 公尺為設計依據，經計算後取 72 口次為抽氣井設置數量。單井之抽氣量以孔隙體積交換體積進行計算後，單井抽氣量為 2.48CFM，考慮土壤氣體抽除實場操作時之能量損耗，因此額外增加 20%之餘裕量作為單井設計抽氣量，故單井設計抽氣量規劃為 3.0 CFM。由於本場址豐枯水期地下水位變動區間為地表下 2.4~5.0 公尺，可供土壤氣體抽除之未飽和層厚度約 4.5 公尺。依據本場址水文地質特性，土壤氣體抽除井開篩區間規劃為地表下 1~4 公尺。

本場址 SVE 系統總抽氣量應為 $3.0 \text{ CFM} \times 72 \text{ 口次} = 216 \text{ CFM}$ ；取 220 CFM(即等於 104 L/s)作為井場總設計抽氣量，而井場系統之總摩擦損失 H_f 以 590 mmH₂O 進行計算。由上述可知本案例之井場總抽氣量之需求至少須大於 104 L/s，而總摩擦損失 H_f 則為 590 mmH₂O(經單位換算後為 43.38 mmHg)。依此計算結果與鼓風機性能曲線進行比對篩選，進而篩選出符合設計需求之鼓風機型式為 70.9 mm Hg 下，可

提供 142 L/s 之流量。

二、尾氣處理設備設計

於本場址中因抽除之氣體乙苯含量佔 70% 以上，具有高濃度揮發性有機物之特性，因此規劃透過尾氣處理設施，利用活性碳顆粒吸附劑吸附揮發性有機物。接著，再利用高溫蒸汽脫附污染物質，隨後透過冷凝設備回收液相油品做進一步處理。

三、廢水處理系統設計

於本案例中之土壤氣體抽除冷凝水及尾氣冷凝回收設備之廢水，會先經由廢水收集管統一輸送至油水分離設備進行浮油相及液相之分離。經分離後可將自由相液體另行收集並回收至工廠製程區進行再利用；廢水部分則統一收集後再導入套裝式活性碳廢水處理系統進行廢水處理，並經採樣檢測合乎放流水標準後，始得將處理後之廢水排放。

5.4 設備操作與維護

本場址為保持設備正常運轉及評估土壤氣體抽除效能，乃辦理定期操作巡查及監測工作，並針對系統設備辦理例行性操作保養及維護工作，以確保整治工作辦理落實。本場址定期監測工作項目包含真空負壓測定、抽除氣體濃度與排放水及尾氣濃度。設備維護保養及異常與故障排除工作項目則包含抽氣井場、抽氣設備、管線與尾氣設備之維護。

5.5 整治效能評估

本場址 SVE 抽氣工作每日操作 23 小時停機 1 小時，尾氣處理設備則配合土壤氣體抽除設備操作以 24 小時連續運轉。SVE 井場每日平均抽氣量約為 5,500~6,500 m³，SVE 操作期間，均定期針對土壤氣體抽除主機之出風口端進行土壤氣體採樣，並送實驗室測定揮發性有機化合物濃度。本場址預估 SVE 操作前初始污染質量約為 57,685 kg，隨整治操作過程逐漸移除土壤污染物質，茲將本場址操作期間每月累積土壤氣體抽出量，及每月平均土壤氣體測定濃度，繪製如圖 5.5-1；而經質量平衡計算而得之每月土壤氣體污染移除量及累積污染移除量趨勢則彙製於圖 5.5-2。

由圖 5.5-2 可知，土壤氣體濃度於操作過程呈現緩慢下降趨勢，操作中
 期(操作第 25 個月後)污染濃度削減趨勢較為明顯，而操作後期之土壤氣體
 濃度削減趨勢則趨於平緩。此外，對照土壤氣體污染移除量趨勢圖，則可
 發現於操作初期因土壤氣體濃度較高，因此有較高之污染移除質量，而隨
 著操作時間增加，自土壤抽氣操作工作中期開始，因土壤氣體濃度大幅削
 減而造成每月土壤污染移除量有減少之趨勢，至操作後期由抽氣量及氣體
 濃度換算累積污染移除量約接近 50 噸(超過 80% 移除率)。

本場址操作至今累計共抽除 4,287 倍土壤孔隙體積氣體，且於操作後
 期之土壤氣體濃度已降至 1,000 ppm 以下，而由污染濃度變化趨勢圖則可
 看出土壤氣體濃度已呈現緩慢下降之狀態，判斷已處於操作末期之拖尾現
 象。未來可考慮規劃輔以其他整治工法如土壤氣體注氣法或蒸氣注入法等
 技術，以增加土壤中殘餘污染物質移動性，加速污染移除與回收工作。

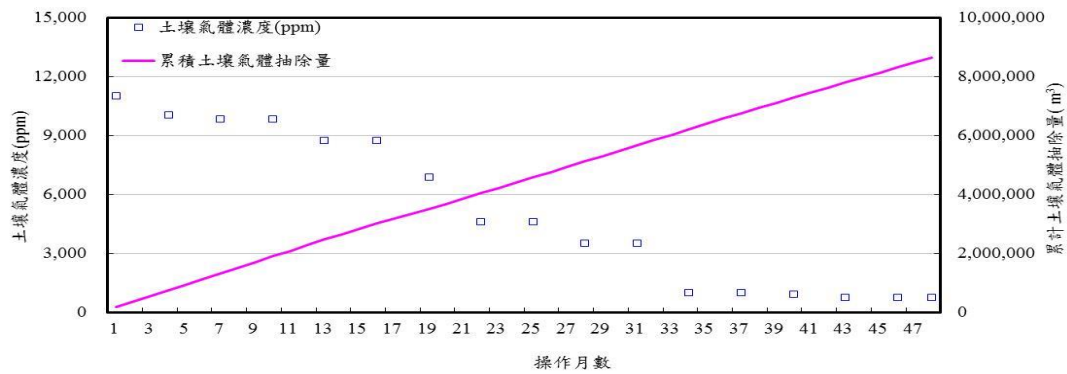


圖 5.5-1 土壤抽氣量與氣體濃度變化趨勢圖

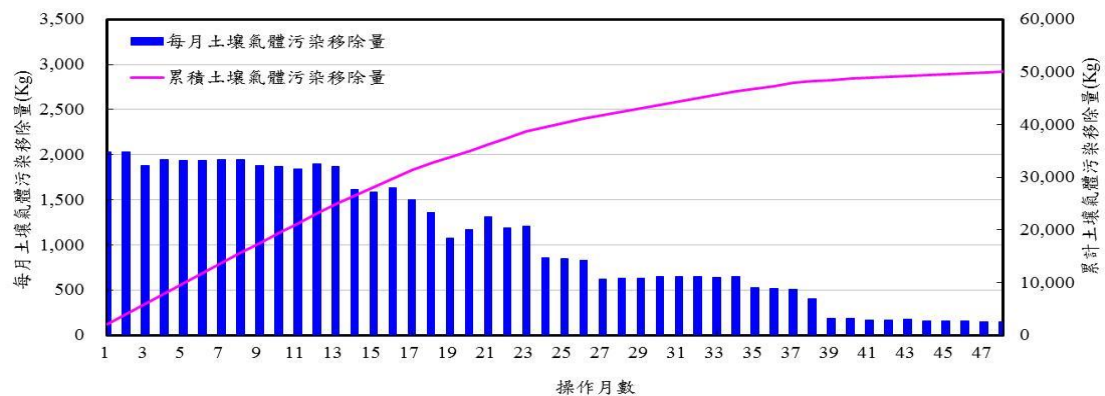


圖 5.5-2 單月與累積污染移除趨勢圖

除抽除氣體濃度監測外，本場址於整治過程定期針對不飽和層土壤進行採樣監測。由整治操作前之土壤背景濃度調查結果，比對土壤抽氣操作後 48 個月土壤污染濃度變化結果可知，土壤中乙苯初始濃度約為 3,000~5,000 mg/kg，經過土壤氣體抽除處理操作後，未飽和層土壤污染範圍已逐漸縮小且濃度大幅削減，以土壤污染濃度估算整體污染移除率約達 70~80%。地表下 3 公尺內之未飽和層土壤污染平均濃度已降低至 1,000 mg/kg 以下。

本案例於進行土壤氣體抽除工作一段時間後，即以場址土壤氣體濃度、土壤污染濃度與尾氣冷凝回收設備之冷凝回收量估計污染移除量，並將其由土壤污染濃度估算之初始濃度與殘餘濃度等相關資料進行量化比對如圖 5.5-3。

觀察圖 5.5-3 中各項變化趨勢可知，本場址累積污染移除量約 40,000~50,000 kg。整體來看，本場址利用土壤氣體抽除技術，已成功移除接近 80% 場址污染物質，且針對抽除尾氣有效冷凝回收目標污染物並進行再利用，達到預期之場址整治目標，後續將持續操作並搭配適當整治技術，進一步達成整治目標。

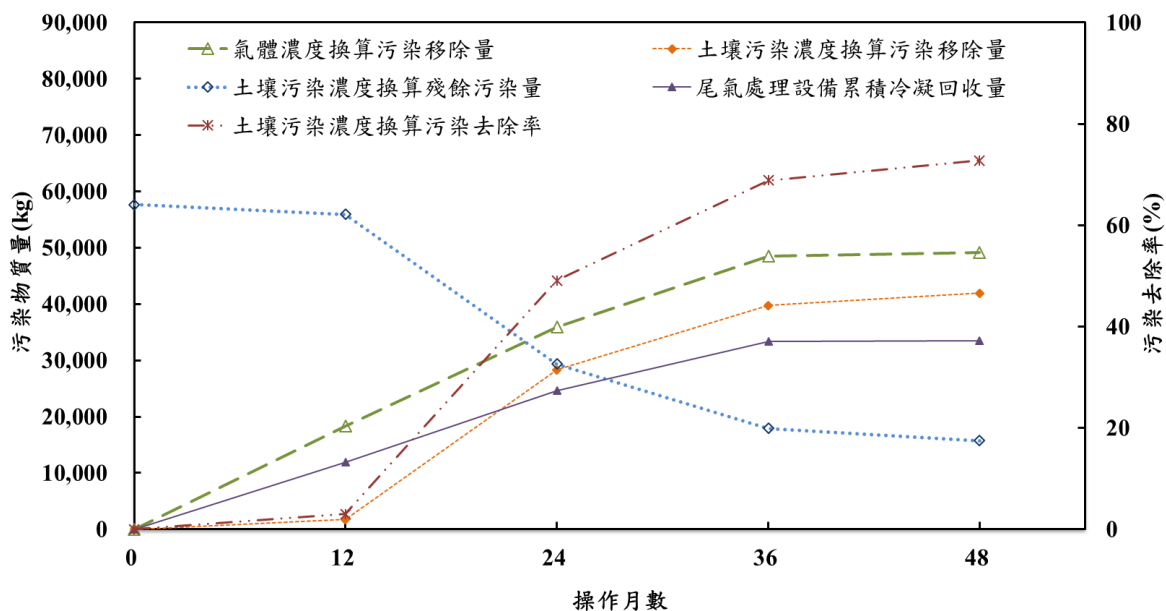


圖 5.5-3 土壤污染移除量及移除率變化趨勢圖

參考文獻

- Adams, Smith and Basile 1992 Adams, T. V., Smith, G., and Basile, A. 1992. Evaluating DNAPL Removal in a Low Permeability Porous Media Using Steam Enhanced Vapor and Groundwater Extraction. Patent Pending, References N. 92-09-G023.
- AFCEE 1994a Air Force Center for Environmental Excellence (AFCEE). 1994a. Bioventing Performance and Cost Summary. Brooks Air Force Base, TX. 14 pp.
- Alvarez-Cohen et al., 1992 Alvarez-Cohen, L., McCarty, P. L., Boulygina, E., Hanson, R. S., Brusseau, G. A., and Tsien, H. C. 1992. Characterization of a methane-utilizing bacterium from a bacterial consortium that rapidly degrades trichloroethylene and chloroform. *Applied and Environmental Microbiology*. 58:1886-93.
- Aurelius and Brown 1987 Aurelius, M. W., and Brown, K. W. 1987. Fate of spilled xylene as influenced by soil moisture content. *Water, Air, and Soil Pollution*. 36:23-31.
- Baker, Hayes, and Friebie 1995 Baker, R. S., Hayes, M. E., and Frisbie, S. H. 1995. Evidence of preferential vapor flow during in situ air sparging. In: Hinchee, R.E., R.N Miller, and P.C. Johnson (eds.) *In Situ Aeration: Air Sparging, Bioventing, and Related Remediation Processes*. Battelle Press, Columbus, OH. pp. 63-73.
- Blaske and Gates 1986 Blake, S. B., and Gates, M. M. 1986. Vacuum enhanced hydrocarbon recovery: a case study. *Proceedings: Petroleum Hydrocarbons and Organic Chemicals in Ground Water*. Houston, TX. November 1986. NGWA/API, Dublin, OH. pp. 709-21.
- Brown and Fraxedas 1991 Brown, R. A., and Fraxedas, R. 1991. Air sparging - extending volatilization to contaminated aquifers. *Proceedings: Symposium on Soil Venting*. EPA/600/R-92/174. Houston, TX. April 29-May 1, 1991.
- Burdine 1953 "Burdine, N. T. 1953. "Relative permeability calculations from pore size distribution data," *Journal of*
- Davies 1989 Davies, S. H. 1989. The influence of soil characteristics on the sorption of organic vapors. *The Workshop on Soil Vacuum Extraction*. R.S. Kerr Environmental Research Laboratory, Ada, OK. April 27-28, 1989.
- Farmer et al. 1980 Farmer, W. J., Yang, M. S., Letey, J., and Spencer, W. F. 1980. Land Disposal of Hexachlorobenzene Wastes: Controlling Vapor Movement in Soil. EPA/600/2-80/119. USEPA Office of Research and Development.
- Hinchee et al., 1992 Hinchee, R. E., and Ong, S. K. 1992. A rapid in situ respiration test for measuring aerobic biodegradation rates of hydrocarbons in soil. *J. Air Waste Manage. Assoc.* 42:1309.
- Houston, Kreamer ,and Marwig 1989 Houston, S. L., Kreamer, D. K., and Marwig, R. 1989. A batch-type testing method for determination of adsorption of gaseous compounds on partially saturated soils. *Journal of Testing and Evaluation*. ASTM. 12(1): 3-10.
- Johnson et al. 1993 "Johnson, R. L., Johnson, P. C., McWhorter, D. B., Hinchee, R. E., and Goodman, I. 1993. *FOCUS: An*

-
- Johnson, Palmer, Keely 1987 Johnson, R. L., Palmer, C. D., and Keely, J. F. 1987. Mass transfer of organics between soil, water and vapor phases: implications for monitoring, biodegradation and remediation. Proceedings: Petroleum Hydrocarbons and Organic Chemicals in Ground Water. November 1987. NWWA/API, Dublin, OH. pp. 473-507.
- Kampbell and Newel 1990 Kampbell, D. H., and Newell, B. 1990. Microbial activity of aliphatic hydrocarbon utilizers in the presence of sulfur hexafluoride or trichloroethylene vapors. Poster presentation: Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory Ground-Water Seminar. Oklahoma City, OK.
- Kittel et al. 1994 Kittel, J. A., Hinchee, R. E., Hoeppe, R., and Miller, R. 1994. Bioslurping - vacuum-enhanced freeproduct recovery coupled with bioventing: a case study. Proceedings: Petroleum Hydrocarbons and Organic Chemicals in Ground Water. Houston, TX. November 2-4, 1994. NGWA/API, Dublin, OH. 15 pp.
- Lighty et al. 1988 Lighty, J. S., Silcox, G. D., Pershing, D. W., and Cundy, V. A. 1988. On the fundamentals of thermal treatment for the cleanup of contaminated soils. Proceedings: Air Pollution Control Association 81st Annual Meeting. Dallas, TX. June 19-24, 1988.
- Marley 1992 Marley, M. C. 1992. Removing gasoline from soil and groundwater through air sparging. Remediation. Spring 1992. pp. 121-31.
- Marley 1993 Marley, M. C. 1993. Evaluation of vadose zone air flow pathways utilizing tracer gases and the subsequent implications on vapor extraction system design. In: Calabrese, E. J., and Kostecki, P. T. (eds.). Hydrocarbon Contaminated Soils. Volume III. Lewis Publishers, Chelsea, MI. pp. 379-401.
- Moench 1989 Moench, A. F. 1989. Convergent radial dispersion: a LaPlace transform solution for aquifer tracer testing. Water Resources Research. 25(3):439-47.
- Moench 1991 Moench, A. F. 1991. Convergent radial dispersion: a note on evaluation of the LaPlace transform solution. Water Resources Research. 27(12):3261-4.
- Mualem 1976 "Mualem, Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media.
- Novak, Young, and Forsling 1993 Novak, J. T., Young, R. G., and Forsling, S. 1993. Bioavailability of contaminants sorbed to soil organic matter. Proceedings: Petroleum Hydrocarbons and Organic Chemicals in Ground Water. Houston, TX. November 10-12, 1993. NGWA/API, Dublin, OH. pp. 335-49.
- Sayles et al., 1992 Sayles, G. D., Hinchee, R. E., Brenner, R. C., Vogel, C. M., and Miller, R. N. 1992. In-situ bioventing: two USEPA and Air Force sponsored field studies. Proceedings: USEPA/Air and Waste Management Association Sponsored International Symposium: In-Situ Treatment of Contaminated Soil and Water. Cincinnati, OH. February 3-6, 1992. 10 pp.
- Udell 1996 Udell, K.S. 1996. Heat and Mass Transfer in Clean-Up of Underground Toxic Wastes, Advances in Heat Transfer Research, C-L. Tien (ed.) Begell House, Inc., New York.
- USACE 2002 Engineering and design for soil vapor extraction and bioventing, USACE
-

-
- USEPA 1989c USEPA. 1989c. Laboratory Investigation of Residual Liquid Organics from Spills, Leaks, and the Disposal of Hazardous Wastes in Groundwater. EPA/600/6-90/004. New Mexico Institute of Mining and Technology, Socorro, NM.
- USEPA 1991c USEPA. 1991c. Guide for Conducting Treatability Studies Under CERCLA, Soil Vapor Extraction. EPA/540/2-91/019A.
- USEPA 1991d USEPA. 1991d. Soil Vapor Extraction Technology Reference Handbook. EPA/540/2-91/003. Prepared by: Pederson, T. A., and Curtis, J. T., of Camp Dresser & McKee, Inc. Office of Research and Development.
- USEPA 1991e USEPA. 1991e. Proceedings: Symposium on Soil Venting. EPA/600/R-92/174. Houston, TX. April 29-May 1, 1991. Office of Research and Development. 334 pp.
- USEPA 1993e USEPA. 1993e. Hydraulic Fracturing Technology, Technology Demonstration Summary. EPA/540/SR-93/505.
- USEPA 1996 U.S.EPA. 1996. Assessing UST Corrective Action Technologies: Diagnostic Evaluation of In-Situ SVEBased System Performance, EPA/600/R-96/041, March 1996.
- USEPA 1997a U.S. EPA, 1997. Analysis of Selected Enhancement for Soil Vapor Extraction. EPA-542-R-97-007. OSWER.
- USEPA 1997b U.S. EPA 1997. How Heat Can Enhance In-situ Soil and Aquifer Remediation: Important Chemical Properties and Guidance on Choosing the Appropriate Technique, EPA/540/S-97/502
- USEPA 1998 U.S. EPA, 1998. Steam Injection for Soil and Aquifer Remediation, EPA/540/S-97/505
- USEPA 2004 U.S. EPA, 2004. How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites- A guide for corrective action reviewers, EPA 510-R-04-002
- Wackett et al. 1989 Wackett, L. P., Brusseau, G. A., Householder, S. R., and Hanson, R. S. 1989. Survey of microbial oxygenases: trichloroethylene degradation by propane-oxidizing bacteria. Applied and Environmental Microbiology. 55:2960-4.
- Wilson and Wilson 1985 Wilson, J. T., and Wilson, B. H. 1985. Biotransformation of trichloroethylene in soil. Applied and Environmental Microbiology. 49:242-3.
- 賴宜欣, 2007 電阻加熱處理應用於污染源整治之案例
-

土壤氣體抽除整治技術作業
參考指引
(附件)

出版年份：民國 104 年 8 月
出版單位：行政院環境保護署
EPA-25-III-06B-2015-001

附件 常見污染物物化特性表

進行 SVE 系統設計時，除了場址特性的考量外，最為重要的就是污染物的特性。為提供使用者蒐集污染物特性資料的便利，本指引彙整常見污染物物化特性相關表格，提供各位使用者參考，或用以評估其他所需相關參數。本附件提供各種污染物物化特性表，目錄如下。

附件表-1	部份污染物物化特性表	2
附件表-2	PCE 與相關化合物物化特性表	3
附件表-3	TCA 與相關化合物之物化特性表	4
附件表-4	燃料類化合物物化特性表	5
附件表-5	有機化合物亨利常數表	7
附件表-6	TPH 化合物物理及化學特性表	9
附件表-7	化合物亨利常數表	16

附件表-1 部份污染物物化特性表

化合物名稱	分子量 (M _w) g/mol	沸點 (T _b) K	蒸氣壓 (P _v ⁰) atm	平衡蒸氣壓 (C _{est}) mg/l
n-Pentane	72.2	309	0.57	1700
n-Hexane	86.2	342	0.16	560
Trichloroethane	133.4	348	0.132	720
Benzene	78.1	353	0.1	320
Cyclohexane	84.2	354	0.1	340
Trichloroethylene	131.5	360	0.026	140
n-Heptane	100.2	371	0.046	190
Toluene	92.1	384	0.029	110
Tetrachloroethylene	166	394	0.018	130
n-Octane	114.2	399	0.014	65
Chlorobenzene	113	405	0.012	55
p-Xylene	106.2	411	0.0086	37
Ethylbenzene	106.2	411	0.0092	40
m-Xylene	106.2	412	0.008	35
o-Xylene	106.2	417	0.0066	29
Styrene	104.1	418	0.0066	28
n-Nonane	128.3	424	0.0042	22
n-Propylbenzene	120.2	432	0.0033	16
1,2,4-Trimethylbenzene	120.2	442	0.0019	9.3
n-Decane	142.3	446	0.0013	7.6
Dibromochloropropane	263	469	0.0011	11
n-Undecane	156.3	469	0.0006	3.8
n-Dodecane	170.3	489	0.00015	1.1
Naphthalene	128.2	489	0.00014	0.73
Tetraethyl	323	dec.@473K	0.0002	2.6

沸點：在 1 大氣壓的絕對壓力下，污染物的沸點

蒸氣壓：在絕對溫度 293K 下的蒸氣壓

dec. decomposes

文獻: Johnson, Kembrowski, and Colthart (1988). "Practical screening models for soil venting applications." In: *Proceedings of NWWA/-API; Conference on Petroleum Hydrocarbons and Organic Chemicals in Groundwater*. Houston, TX. Reprinted by permission of NGWA.

附件表-2 PCE 與相關化合物物化特性表

	PCE C ₂ Cl ₄	TCE C ₂ HCl ₃	1,1-DCE C ₂ H ₂ Cl ₂	t-1,2-DCE C ₂ H ₂ Cl ₂	c-1,2-DCE C ₂ H ₂ Cl ₂	vc C ₂ H ₃ Cl
分子量 (g/mol)	165.85	131.4	96.95	96.95	96.95	62.5
液體密度 (g/cm ³)	1.625	1.46	1.214	1.257	1.284	0.9121 ³
熔點 (K)	250.6	200	150.4	223.6	191.5	119.2
沸點 (K)	394	360	304.6	320.7	333.2	259.6
蒸氣壓 (mm-Hg)	14	69 ¹	500	5.3	2.7	2300
水溶解度 (mg/l)	150	1100 ¹	400	6300	3500	1100
log K _{ow}	3.14	2.42	2.13	2.09	1.86	1.23
K _{oc} (l/kg)	665	160 ²	65	59	35	8.2
亨利常數 (atm.m ³ /mol)	0.023	0.0103 ¹	0.154	0.0066 ¹	0.0075 ¹	0.695

註：所有數值皆於 293K 下量測，以下部份數值除外

1 298K 下量測值

2 From Lyman et al.(1982) Handbook of Chemical Property Estimation Methods

3 利用比重量測

文獻：Arthur D. Little, Inc. (1987). The installation restoration program toxicology guide, Volume 1. Section 2:1-16.

附件表-3 TCA 與相關化合物之物化特性表

	1,1,1-TCA C₂H₃Cl₃	1,1-DCA C₂H₄Cl₂	CA C₂H₅Cl
分子量 (g/mol)	133.42	98.97	64.52
液體密度 (g/cm ³)	1.325	1.175	0.921 ¹
熔點 (K)	240	176.3	132.15
沸點 (K)	347	330.3	285.5
蒸氣壓 (mm-Hg)	100	182	1000
水溶解度 (mg/l)	950	5500	5700
log K _{ow}	2.49	1.79	1.43
K _{oc} (l/kg)	152	30	14.9
亨利常數 (atm.m ³ /mol)	0.0276 ²	0.0057 ²	0.011

註：所有數值皆於 293K 下量測，以下部份數值除外

1. 298K 下量測值
2. From Lyman et al.(1982) Handbook of Chemical Property Estimation Methods

附件表-4 燃料類化合物物化特性表

化合物名稱	分子量	溶解度	K _{oc}	Log K _{ow}	VP	參考文獻
n-Alkanes	142.28	61			1555.33	////A
n-Butane						
n-Decane	170.33	0.009 (20)			2.7	/B///B
n-Dodecane	86.18	0.0037	5500000	7.06	0.3	/A/C/C/A
n-Hexane	100.2	9.5	3830	3.9	121.24	/D/C/C/C/ A
n-Heptane	128.25	2.4 (20)			35.55	/B///A
n-Nonane	114.23	0.07 (20)			3.22	/B///B
/n-Octane	72.15	0.0657	73000	4.00	10.46	/E/C/E/A
n-Pentane	184.35	38.5			424.38	/D///A
n-Tridecane	156.31	0.013				/B///
n-Undecane	456.31				1 (32.7)	///B
Isoalkanes	156.31					///
2-Methyldecane						
2-Methylhexane	100.2				51.9	////A
2-Methylpentane	86.18	13.8			171.5	/D///A
2,4-Dimethylhexane	114.23				23.32	////A
2,5-Dimethylhexane	114.23					///
2,2,3-Trimethylpentane	114.23		36000	4.87		//C/C/
2,2,4-Trimethylpentane	114.23	0.56	36000	5.02		/B/C/E/
3-Methylhexane	100.2					///
3-Methylpentane	86.18		3830	3.9		//C/C/
3,4-Dimethyloctane	142.28					///
4-Methylheptane	114.23					///
Isobutane	58.12	48.9				/D///A
Isododecane	170.33					///
Isopentane	72.15	47.7	900	2.3	574.89	/E/C/E/A
Isoundecane	156.31					///
Cycloalkanes	126.24		50500	5.02		//C/C/
1,3,5-Trimethylcyclohexane						
Cyclohexane	84.16	55.6	1330	3.44	77.55	/E/C/E/A
Methylcyclohexane	98.19	14 (20)	6070	4.1	144	//C/C/B
Methylcyclopentane	83.15	42.7	1400	2.35		/E/C/E/
Alkenes	56.11				760 (0.9)	///B
2-Methyl-2-butene	70.13					///

附件表-4 燃料類化合物物化特性表(續)

化合物名稱	分子量	溶解度	K _{oc}	Log K _{ow}	VP	參考文獻
Aromatics	120.19					////
1-Methyl-3-ethylbenzene						
1-Methyl-3-n-propylbenzene	134.22					////
1,2,3-Trimethylbenzene	120.19	2150	4.65			//C/C/
1,2,4-Trimethylbenzene	120.19	57.6	2150	3.65		/E/C/C/
1,3,5-Trimethylbenzene	120.19	2150	3.65	1.73		//C/C/A
1,2,3,4-Tetramethylbenzene	134.22					////
Benzene	78.11	1760	65	2.13	75.2	/E/C/C/A
Ethylbenzene	106.17	152	1200	3.34	7.08	/D/F/F/A
Isopropylbenzene	120.19	50.1	3.43			/E//E/
Toluene	92.14	515	240	2.69	21.84	/E/C/C/A
Xylenes	106.17	175	700	3.16	6/16	/E/C/C/A
PAHs	142.2	27	3570	3.87		B/B/C/C/
1-Methylnaphthalene						
2-Methylnaphthalene	142.2	3570	3.87			B//C/C/
Acenaphthene	154.21	4.09	5250	3.98	0.0016 (25)	B/E/F/F/F
Acenaphthylene	152.2	3.93	2890	3.72	0.03	B/B/F/F/F
Anthracene	178.23	1.29	13500	4.45	0.00024	B/B/C/E/ F
Chrysene	228.2	0.006	220000	5.61	0.000000063 (25)	B/B/F/F/F
Naphthalene	128.16	31.7	962	3.3	0.09 (25)	B/E/C/C/ F
Phenanthrene	178.22	1.24	16000	4.45	0.00094 (25)	B/E/F/F/F
Pyrene	202.24	0.15	44000	4.88	0.0000025 (25)	B/E//E/F

註

分子量/溶解度/K_{oc}/log K_{ow}/VP，參考文獻來源

A. EPA, 1989d.

B. Verschueren (1983).

C. IRP (1987).

D. Guard et al. (1983).

E. Lyman, Rechl, and Rosenblatt (1982).

F. A. D. Little (1981).

VP 為蒸氣壓(vapor pressure)，為純化合物於 20°C 測量之 mm-Hg，若有特殊溫度測量則標注於格中
溶解度皆於 198K 下測量，若非則標注於格中

附件表-5 有機化合物亨利常數表

化合物	H	t (K) ^a	Compound	H	t (K) ^a
Chlorinated Nonaromatics			Monocyclic and Polycyclic Aromatics		
Benzene	0.0055	298	Naphthalene	0.00046	298
Chlorobenzene	0.0036	293/298	Acenaphthene	0.000091	298
o-Dichlorobenzene	0.0019	293	Acenaphthylene	0.0015	293/298
m-Dichlorobenzene	0.0036	298	Anthracene	0.000086	298
p-Dichlorobenzene	0.0031	298	Phenanthrene	0.00023	298
1,2,4-Trichlorobenzene	0.0023	298			
Methyl chloride	0.04	293	Hexachlorobenzene	0.00068	293/298
Methyl bromide	0.2	293	Toluene	0.0067	293
Methylene chloride	0.002	293/298	Ethylbenzene	0.0066	293
Chloroform	0.0029	293	o-Xylene	0.005	298
Bromodichloromethane	0.0024	293/295	m-Xylene	0.007	298
Dibromochloromethane	0.00099	293/295	p-Xylene	0.0071	298
Bromoform	0.00056	293	1,2,3-Trimethylbenzene	0.0032	298
Dichlorodifluoromethane	3	298	1,2,4-Trimethylbenzene	0.0059	298
Trichlorofluoromethane	0.11	293	1,3,5-Trimethylbenzene	0.006	298
Carbon tetrachloride	0.023	293	Propylbenzene	7.00E-03	298
Chloroethane	0.15	293	Isopropylbenzene	0.0013	298
1,1-Dichloroethane	0.0043	293	1-Ethyl-2-methylbenzene	0.0043	2.98E+02
1,2-Dichloroethane	0.00091	293	1-Ethyl-4-methylbenzene	0.005	2.98E+02
1,1,1-Trichloroethane	0.03	298	n-Butylbenzene	0.013	298
1,1,2-Trichloroethane	0.00074	293	Isobutylbenzene	0.033	298
1,1,2,2-Tetrachloroethane	0.00038	293	sec-Butylbenzene	0.014	298
Hexachloroethane	0.0025	293/295	tert-Butylbenzene	0.012	298
Vinyl chloride	0.081	298	1,2,4,5-Tetramethylbenzene	0.025	298
1,1-Dichloroethene	0.19	298/293	1-Isopropyl-4-methylbenzene	0.008	298
1,2-trans-Dichloroethene	0.067	293	n-Pentylbenzene	0.006	298
Trichloroethene	0.0091	293	Pesticide and Related Compound and PCBs		
Tetrachloroethene	0.0153	293	Ethylene dibromide (EDB) ^b	0.00082	298
1,2-Dichloropropane	0.0023	293	trans-Chlordane	0.000094	298
rans-1,3-Dichloropropene	0.0013	293/298	Heptachlor	0.004	298

附件表-5 有機化合物亨利常數表(續)

Hexachlorocyclopentadiene	0.016	298	Heptachlor epoxide	0.00039	298
Hexachlorobutadiene	0.026	293	2,3,7,8-TCDD	0.0021	--
Chlorinated Ethers			Aroclor 1016 ^c	0.00033	298
Bis(chloromethyl)ether	0.00021	293/298	Aroclor 1221 ^c	0.00017	298
Bis(2-chloroisopropyl)ether	0.00011	293	Aroclor 1242 ^c	0.002	298
4-Chlorophenylphenylether	0.00022	293	Aroclor 1248 ^c	0.0036	298
4-Bromophenylphenylether	0.0001	293/298	Aroclor 1254 ^c	0.0026	--

文獻：Mabey et al. (1982) and Mackay and Shiu (1981)

a 若有兩個溫度值時，前者表示當測量到微氣壓時，第二個溫度則表示為溶解度的溫度

b 蒸氣壓資料操考自 Stull (1947)，溶解度資料參考自 Stephen and Stephen (1963)

c 混和平均值

附件表-6 TPH 化合物物理及化學特性表

化合物	分子量	水溶解度 Mg/L 298K	比重	蒸氣壓 mm-Hg 298K	亨利常數 m ³ /mol 298K	Diffusivity cm ² /s	K _{oc} mL/g	Log K _{ow}	Fish BCF L/kg	表面水 T _{1/2} 天
Alcohols										
Ethyl alcohol	46.07	280,000	0.789	59	1.20E-05	0.12368	0.3	3.1	0.34	
Methyl alcohol	32	300,000	130	2.00E-05	0.16211	0.1	1.5	2.3		
t-Butyl alcohol	74.1		0.788	42		0.09752		0.37		
Cycloalkanes										
Cyclopentane	70.14	160	0.751	42.4	1.90E+01					
Methyl cyclohexane	98.19	14	0.77	6.18	4.30E+01					
Cycloalkenes										
Cyclohexene	84.16	55	(20° C)	0.779						
Cyclopentene	68.12		0.77	77	(20° C)					
Chlorinated Aliphatics										
1,2-Dichloroethane	99	7,986-8,650	1.23	87	1.30E-03	0.09451	65	1.48-2.13	5.6	28-180
Dibromoethane	187.88	4.32 (30° C)	2.701	17 (30° C)						
1,1-Dichloroethane	99	5,060	1.1757	182.1	5.90E-03	0.0959	30.2	1.79		
Ether										
Methyl-t-butyl ether (MTBE)	88	4,800	0.74	250	5.90E-03	0.10172	41	1.2	1.5	28-180
Ketones										
Methyl isobutyl	100.2	20,400	8.02E-01	14.5	9.40E-05	0.07588	19 to 106	1.19		

附件表-6 TPH 化合物物理及化學特性表(續)

化合物	分子量	水溶解度 Mg/L 298K	比重	蒸氣壓 mm-Hg 298K	亨利常數 m ³ /mol 298K	Diffusivity cm ² /s	K _{oc} mL/g	Log K _{ow}	Fish BCF L/kg	表面水 T _{1/2} 天
Methyl Alkanes										
2,3-Dimethylbutane	86.7	19.1		31.3	1.30E+02					
2,3-Dimethylpentane	100.21	5.25		9.18	1.80E+02					
2,4-Dimethylpentane	100.21	5.5								
3,3-Dimethylpentane	100.21	5.94								
2-Methylheptane	114.23									
3-Methylheptane	114.23	0.792		2.6	3.8E+02					
4-Methylheptane	114.23									
2-Methylhexane	100.21	2.54		8.78	3.5E+02					
3-Methylhexane	100.21	4.95		8.21	2.4E+02					
4-Methyloctane	128.26	0.115		0.903	1.0E+03					
2-Methylpentane	86.17	13	0.654	28.2	1.7E+02					
3-Methylpentane	86.17	13.1	0.6645	25.3	1.7E+02					
2,2,4-Trimethylhexane	128.26									
2,2,5-Trimethylhexane	128.26	1.15		2.21	3.5E+02					
2,3,3-Trimethylhexane	128.26									
2,3,5-Trimethylhexane	128.26									
2,4,4-Trimethylhexane	128.26									
2,2,3-Trimethylpentane	114.23									
2,2,4-Trimethylpentane	114.23	2.44		6.56	3.3E+02					
2,3,3-Trimethylpentane	114.23									
2,3,4-Trimethylpentane	114.23	2.3		3.6	1.9E+02					

附件表-6 TPH 化合物物理及化學特性表(續)

化合物	分子量	水溶解度 Mg/L 298K	比重	蒸氣壓 mm-Hg 298K	亨利常數 m ³ /mol 298K	Diffusivity cm ² /s	K _{oc} mL/g	Log K _{ow}	Fish BCF L/kg	表面水 T _{1/2} 天
Methyl Alkenes										
2-Methyl-1-butene	70.14		0.65							
2-Methyl-2-butene	70.14		0.668							
3-Methyl-1-butene	70.14	130	0.648	120	5.50E+01					
2-Methyl-1-pentene	86.16	78	0.6817							
2-Methyl-2-pentene	86.16									
3-Methyl-cis-2-pentene	86.16									
3-Methyl-trans-2-pentene	86.16			0.67						
4-Methyl-cis-2-pentene	86.16			0.67						
4-Methyl-trans-2-pentene	86.16									
Monocyclic Aromatic Hydrocarbons										
Benzene	78	1.78	0.88	95	5.50E-03	9.30E-02	49 to 100	1.56 to 2.15	5.2	5
Butylbenzene	134		0.86	1 (23° C)	1,500					
n-Butylbenzene	134	50	0.86	1 (23° C)	1.30E+00					
sec-Butylbenzene	134	30.9	0.87	1.5 (20° C)	1.40E+00					
t-Butylbenzene	134	34	0.862	1.1 (20° C)	1.20E+00					
1,2-Diethylbenzene	136						1,500			
1,3-Diethylbenzene	136						1,500			
Ethylbenzene	106	152 to 208	0.87	9.5	8.70E-03	6.70E-02	95 to 260	3.05 to 3.15	37.5	3

附件表-6 TPH 化合物物理及化學特性表(續)

化合物	分子 量	水溶解度 Mg/L 298K	比 重	蒸氣壓 mm-Hg 298K	亨利常數 m ³ /mol 298K	Diffusi ty cm ² /s	K _{oc} mL/g	Log K _{ow}	Fish BCF L/kg	表 面 水 T _{1/2} 天			
Isobutylbenzene	134.2	10.1	0.24	3.30E+00									
eip-Isopropylbenzene	120	50 (20° C)	0.86 2	3.2 (20° C)	1.00E-02			3.66		2			
n-Pentylbenzene	149						2,520						
Propylbenzene	120.2	60		0.449	7.00E-01								
n-Propylbenzene	120	60 (15° C)	0.86 2	2.5 (20° C)	0.0056 (15° C)			3.57 3.68	to				
1,2,3,4-Tetramethylbenzene	215.9	4.31		0.00876	2.60E-01		1,500						
Polycyclic Aromatic Hydrocarbons													
Anthracene	178	0.030 0.1125	to	1.24	1.7 E-5 1.95E-4	to	6.50E-05	5.90E-02	16000 to 26000	4.34 4.54	TO	30	0.071/ 0.024
Benzo(a)pyrene	252	0.0038 0.004	to	1.35	5.50E-09		<2.4E-6	4.70E-02	398000 to 1900000	5.81 6.50	to	30	0.015/ 0.046
Benzo(b)fluoranthene	252	0.0012		ND	5.00E-07		1.20E-05	4.40E-02	550,000	6.57		ND	0.36
Benzo(e)pyrene	252							4.70E-02					
1,2-Dimethylnaphthalene	158								4,230				
1,3-Dimethylnaphthalene	158								4,230				
Fluoranthene	202	0.206 0.373	to	1.25	0.000005		1.70E-02	4.20E-02	5.22	1,150		0.875	2.6
Fluorene	166	1.66 to 1.98	1.2	1E-3 to 1E-2	2.10E-04		5.70E-02	5,000		4.12 4.38	to	30	32

附件表-6 TPH 化合物物理及化學特性表(續)

化合物	分子 量	水溶解度 Mg/L 298K	比 重	蒸氣壓 mm-Hg 298K	亨利常數 m ³ /mol 298K	Diffusi ty cm ² /s	K _{oc} mL/g	Log K _{ow}	Fish BCF L/kg	表 面 水 T _{1/2} 天
Methylnaphthalene	142	27								
1-Methylnaphthalene	142	28	1.02 5	ND	ND	ND	ND	ND	129	ND
2-Methylnaphthalene	142	25	1.00 1	0.045	3.40E-04	6.20E- 02	7400 to 8500	3.86 to 4.11	190	ND
Naphthalene	128	30 to 34	1.16	2.3E-01 8.7E-01	to 4.60E-04	8.20E- 02	550 to 3160	3.2 to 4.7	10.5	0.5
Phenanthrene	178	0.71 to 1.29	1.18	0.00068	2.60E-05	5.40E- 02	5250 to 38900	4.2 to 4.6	30	0.125/ 1.04
Pyrene	202	0.013 to 0.171	1.27	6.85E-07 2.5E-06	to 1.10E-05	5.00E- 02	46000 to 135000	4.88 to 30	0.028/0.0 85	
Simple Alkanes										
n-Butane	58.13	61	0.6	1.82E+03	9.60E-01					
Decane	148.2 8	0.008								
n-Decane	148.2 8	0.052		1.31	7.00E+00					
Dodecane	170.3 3	0.0037		0.0118	7.50E+00					
n-Dodecane	170.3 3									
n-Eicosane	282.6	0.0019		2.67E-06	2.90E-01					
n-Heptane	100.2 1	3		0.515	2.30E+00					

附件表-6 TPH 化合物物理及化學特性表(續)

化合物	分子 量	水溶解度 Mg/L 298K	比 重	蒸氣壓 mm-Hg 298K	亨利常數 m ³ /mol 298K	Diffusi ty cm ² /s	K _{oc} mL/g	Log K _{ow}	Fish BCF L/kg	表 面 水 T _{1/2} 天
n-Hexadecane	226.4	0.00628		0.00917	2.30E+01					
n-Hexane	86	18 (20° C)	0.66	0.012 (20° C)	7.70E-01	7.50E-02	890	2.77	ND	ND
Isobutane	58.13	48.19		2,678	1.20E+00					
Isopentane	72.15	48		695	1.40E+00					
n-Nonane	128.2	0.07		4.281	5.00E+00					
n-Octadecane	254.4	0.0021		2.50E-05	2.90E+00					
n-Octane	114.2	0.66		14	3.00E+00					
n-Pentane	72.15	35		513	1.30E+00					
Propane	44.09	63	0.58	64						
n-Tetradecane	190.3	0.00696		0.0095	1.10E+00					
Undecane	156.3	0.044		0.39	1.90E+01					
n-Undecane	156.3									
Simple Alkenes										
2-Butene		210								
cis-2-Butene	56.1		0.6							
trans-2-Butene	56.1		0.64							

附件表-6 TPH 化合物物理及化學特性表(續)

化合物	分子 量	水溶解度 Mg/L 298K	比 重	蒸氣壓 mm-Hg 298K	亨利常數 m ³ /mol 298K	Diffusi ty cm ² /s	K _{oc} mL/g	Log K _{ow}	Fish BCF L/kg	表 面 水 T _{1/2} 天
cis-3-Heptene	98	9								
trans-3-Heptene	98									
cis-2-Hexene	84	50	0.86							
trans-2-Hexene	84	50	0.86							
cis-3-Hexene	84									
trans-3-Hexene	84									
1-Pentene	70.14	150		85	4.00E+01					
2-Pentene	70.14	203		66	2.30E+01					
cis-2-Pentene	70.14									
trans-2-Pentene	70.14									

BCF : Bioconcentration factor

T_{1/2} : 半生期

文獻 : Heath, J. S., Koblis, K., Sager, S. L., and Day, C. (1993). Risk assessment for total petroleum hydrocarbons. Calabrese, E. J., and Kostecki, P. T. (eds.). *Hydrocarbon Contaminated Soils - Volume III*. Lewis Publishers, Chelsea, MI. pp. 267-301. Reprinted by permission of Lewis Publishers, an imprint of CRC Press, Boca Raton, FL.

附件表-7 化合物亨利常數表

化合物	283 K	289 K	293 K	298 K	303 K
Nonane	17.21519	20.97643	13.80119	16.92131	18.69235
n-Hexane	10.24304	17.46626	36.70619	31.39026	62.70981
2-Methylpentane	29.99747	29.35008	26.31372	33.72	34.08841
Cyclohexane	4.43291	5.32869	5.81978	7.23447	8.96429
Chlorobenzene	0.10501	0.11884	0.14175	0.14714	0.19014
1,2-Dichlorobenzene	0.07015	0.06048	0.06984	0.06417	0.09527
1,3-Dichlorobenzene	0.09511	0.09769	0.12222	0.11649	0.16964
1,4-Dichlorobenzene	0.09124	0.09177	0.10767	0.12957	0.15637
o-Xylene	0.12266	0.15267	0.19704	0.19905	0.25164
p-Xylene	0.18076	0.20427	0.26813	0.30409	0.37988
m-Xylene	0.17689	0.20976	0.24859	0.30409	0.35656
Propylbenzene	0.24446	0.30915	0.36623	0.44143	0.55072
Ethylbenzene	0.1403	0.19073	0.24983	0.32208	0.42209
Toluene	0.16397	0.20807	0.23071	0.2624	0.3248
Benzene	0.14203	0.16409	0.1879	0.21581	0.28943
Methylethylbenzene	0.15106	0.17762	0.2091	0.22807	0.30953
1,1-Dichloroethane	0.15838	0.192	0.23404	0.25545	0.31194
1,2-Dichloroethane	0.05035	0.05498	0.06111	0.05763	0.06995
1,1,1-Trichloroethane	0.41532	0.48635	0.60692	0.71119	0.84819
1,1,2-Trichloroethane	0.01678	0.02664	0.03076	0.03719	0.05346
cis-1,2-Dichloroethylene	0.1162	0.13787	0.14965	0.18556	0.23114
trans-1,2-Dichloroethylene	0.2539	0.29815	0.35625	0.38625	0.4864
Tetrachloroethylene	0.3641	0.46943	0.58614	0.69892	0.98487
Trichloroethylene	0.23154	0.28208	0.35002	0.4169	0.51454
Tetralin	0.03228	0.04441	0.05654	0.07643	0.10773
Decalin	3.01266	3.53977	4.40641	4.78211	7.99952
Vinyl chloride	0.64557	0.71049	0.90207	1.08313	1.12556
Chloroethane	0.32666	0.40515	0.45727	0.49456	0.57484
Hexachloroethane	0.25522	0.23641	0.24568	0.34129	0.41405
Carbon tetrachloride	0.63696	0.80776	0.96442	1.20575	1.51951
1,3,5-Trimethylbenzene	0.17344	0.19454	0.23736	0.27507	0.38711
Ethylene dibromide	0.01291	0.0203	0.02536	0.02657	0.03216

附件表-7 化合物亨利常數表(續)

化合物	283 K	289 K	293 K	298 K	303 K
1,1-Dichloroethylene	0.66278	0.85851	0.90622	1.0586	1.27832
Methylene chloride	0.06025	0.07147	0.10143	0.12098	0.14512
Chloroform	0.07403	0.09854	0.13801	0.17207	0.2227
1,1,2,2-Tetrachloroethane	0.0142	0.00846	0.03035	0.01022	0.02814
1,2-Dichloropropane	0.05251	0.05329	0.07898	0.14592	0.11497
Dibromochloromethane	0.01635	0.01903	0.04282	0.04823	0.0611
1,2,4-Trichlorobenzene	0.05552	0.04441	0.07607	0.07848	0.11939
2,4-Dimethylphenol	0.35678	0.28504	0.41986	0.2015	0.15074
1,1,2-Trichlorotrifluoroethane	6.62785	9.0926	10.18462	13.0384	12.90375
Methyl ethyl ketone	0.01205	0.01649	0.0079	0.00531	0.00442
Methyl isobutyl ketone	0.02841	0.01565	0.01206	0.01594	0.02734
Methyl cellosolve	1.89798	1.53517	4.8221	1.26297	1.53277

文獻：USEPA (1991d). (Adapted from Howe, Mullins, and Rogers (1986))