

有機污染土壤整治技術簡介

中興大學土壤環境科學系 施養信

國內外有多起重大土壤及地下水污染案例，皆對大地造成難以回復的傷害，使得土壤與地下水污染整治技術已成為目前國內外上最被關注的環保課題。針對不同污染物種類而言，污染廠址可以分為有機與無機污染兩大類。無機污染廠址大部分為重金屬污染之農田，整治技術目前主要以稀釋法與酸洗法為主。有機污染廠址的整治技術呢？因為有機污染物物理化學特性較複雜，而且其在場址中之移動行為受場址個別環境的影響較大，整治與調查技術皆須因地制宜。

由於目前土壤及地下水有機污染問題日益嚴重，國內已有九個加油站、五個儲槽、五個工廠、與五個其他之公告之控制廠址，三個公告之整治廠址。而美國去年則新增列出 29 個污染廠址，其中 25 個為有機污染廠址與整治技術如下表一：

表一 有機污染整治技術與美國污染廠址案例

整治技術	場址名稱	污染物名稱	整治時間
土壤氣體萃取法 (Soil Vapor Extraction)	六個不同地區的乾洗工廠 場址	含氯溶劑、 BTEX and/or TPH	1992 年 11 月至 1997 年夏天
注氣吹除法 (Air Sparging)	十個不同地點之場址	含氯溶劑	隨場址而變
	McClellan 空軍基地	含氯溶劑、 BTEX and/or TPH	1999 年 5 月至 2000 年 11 月
生物復育 (Bioremediation)	Altus 空軍基地	含氯溶劑	2000 年 7 月進 行中
	Offutt 空軍基地	含氯溶劑	2000 年 8 月完 工
	海軍武器工業儲備工廠	含氯溶劑	1999 年 10 月至

			2000年9月
	四個不同地點之乾洗工廠場址	含氯溶劑、 BTEX and/or TPH	2002年1月至 2003年1月
熱脫附法 (Thermal Desorption)	美國西岸場址	殺蟲劑/除草劑	1995年4月至8月
	工業乳膠超級基金場址	殺蟲劑/除草劑	1999年4月至 2000年6月
電阻加熱法 (Electrical Resistive Heating)	Avery Dennison	含氯溶劑	1999年12月至 2000年11月
	Fort Richardson	含氯溶劑	1999年7月至 10月
	Cape Canaveral 空軍基地	含氯溶劑	1999年8月至 2000年7月
熱導法(Conductive Heating)	某化學製造場所	含氯溶劑	1997年7月至 12月
固化/穩定化 (Solidification/Stabilization)	Koppers 公司	PAHs	2001年9月至 12月
化學還原法 (Chemical Reduction)	Marshall 航太中心	含氯溶劑	2000年7月至 今
化學氧化法 (Chemical Oxidation)	兩個乾洗工廠場址	含氯溶劑	1998年8月至 2002年4月
	Cape Canaveral 空軍基地	含氯溶劑	1999年9月至 2000年4月
滲透性反應牆 (Permeable Reactive Barrier)	多個 DoD 場址	含氯溶劑	不同日期， 〈例如：Moffett 與 Seneca 進行 至 2001 年〉
Lasagna™	Paducah 氣體擴散工廠	含氯溶劑	1999年12月至 2001年12月
土壤氣體萃取法/自然衰減法 (SVE/Monitored Natural Attenuation)	三個不同地點之乾洗工廠 場址	含氯溶劑	1996年至2002 年4月
土壤氣體萃取法/注氣吹除法 (SVE/Air Sparging)	三個不同地點之乾洗工廠 乾洗場址	含氯溶劑	1995夏天至 2001年8月
地下動態氣提/水熱解氧化法 (Dynamic Underground)	Savannah River 廠址 321-M 溶劑儲存槽地區	含氯溶劑	2000年9月至 2001年9月

Stripping/Hydrous Pyrolysis Oxidation)			
蒸汽加強萃取與土壤氣體萃取法 (Steam Enhanced Extraction/SVE)	A.G.通訊系統業	含氯溶劑、 BTEX and/or TPH	1995 年 9 月至 1999 年 11 月
電阻加熱法與土壤氣體萃取 (Electrical Resistive Heating/SVE)	ICN 藥廠	含氯溶劑	2000 年 5 月至 2001 年 12 月
抽取處理法/土壤氣體萃取法/ 多相萃取法 (Pump and Treat/SVE/ Multi Phase Extraction)	七個不同地點之乾洗工廠 場址	含氯溶劑、 BTEX and/or TPH	1991 年至 2000 年 4 月

資料來源: Abstracts of Remediation Case Studies Volume 7, 2003.

這些技術是什麼呢?我們簡單敘述其中一些整治技術原理如下:

(一) 土壤氣體萃取(Soil Vapor Extraction ; SVE)

其另外的名稱有土壤氣提法、現地揮發法、加強揮發法、或真空萃取法，此技術為典型之物理處理方式，主要原理是利用抽氣井將土壤抽氣產生真空狀態，而土壤氣體隨壓力濃度梯度而產生的氣體流動，使有機污染物從土壤中擴散並揮發成氣體並流動至抽氣井，最後從抽氣井中抽出處理。抽出氣體視需要進行氣液分離與後續處理。SVE 適用於通氣性大致良好(黏粒低於 40%，含水量低於 50%)之土壤，污染物具較高揮發性(亨利常數 >0.01)。整治費用與廠址大小與水文地質特性有關，估計每處理一立方米土壤約需 10~50 美元 (EPA, 1999; 阮國棟與邵信，1990；車明道，1999)。

(二) 熱脫附(Thermal Desorption)

此技術為一種加熱式的物理處理方式，主要原理是污染土壤加熱使其水分與有機污染物揮發成氣體，並收集作後續處理。可分為低溫熱脫附(90~320°C)及高溫熱脫附(320~560°C)兩種，一般而言，溫度愈高愈容易脫附不易揮發之污染物。土壤需先經過脫水處理，而高黏粒及有機物質含量高之土壤，將使處理時間變長。一般來說溫度越高越容易脫附分子量大且不易揮發的污染物。處理費用每公噸土壤約需 45~330 美元(EPA, 1999)。

(三) 加熱式土壤蒸汽萃取技術(Thermally Enhanced SVE)

本技術結合土壤蒸汽萃取技術與土壤加熱技術，因加熱使土壤中揮發性有機污染物如含氯溶劑加速揮發及移動，而易被 SVE 系統所移除。加熱系統一般有四種方式：(1) 蒸汽注入、(2) 熱空氣注入、(3) 插入電極通電、及 (4) 無線電波加熱法。整治時間與廠址中土壤及地下水特性及污染物種類有關，費用約

30~130 美元(USDOE, 1995；車明道，1999))。

(四) 化學氧化(Chemical Oxidation)

此技術為典型之化學處理方式，利用氧化劑將難分解有機物直接氧化為 CO₂ 及 H₂O。須留意有機污染物降解後子產物之毒性，氧化劑於土壤中之傳輸受限於土壤特性，而影響整治成本與成效(車明道，1999)。

(五) 現地固化/穩定化(In-Situ Solidification/Stabilization)

將固化劑直接注入現地土壤中，使污染物被緊密包圍，或是直接加入穩定劑與土壤中污染物發生化學反應而降低其移動性。本技術傳統上針對重金屬有效，但針對有機污染物亦在發展與測試中。處理時間與費用視處理深度而定，礫石層地質因藥劑不易充分混合而可能不適用。淺層固化/穩定化費用約 50~80 美元/m³，深層固化/穩定化每立方米費用約 190~330 美元(EPA, 1999；車明道，1999)。

(六) 加強生物復育法(Enhanced Bioremediation)

此技術可謂一種生物處理方式，主要原理是在污染土壤加入適當營養成分，如水分、養分、氧氣，以促進土壤中污染物之生物分解。若僅利用土壤中現存之微生物稱之為生物刺激法，若加入外來微生物則稱之為生物放大法。有時需要依土壤與污染物之特性，加入共代謝物、外來微生物及界面活性劑，目前已有商品化之添加劑如釋氧物質、釋氫物質可供使用。每立方米土壤約需花費 30~100 美元 (EPA, 1995)。

(七) 自然衰減法(Natural Attenuation)

此技術可謂一種綜合性處理方式，主要藉由土壤中污染物經稀釋、分散、揮發、生物分解、吸附及化學反應等作用自然分解的過程。此方法需長期監測調查而非所謂的不整治(No Action)，適用於較深不易挖出之污染土壤(Brady et al.,1998)。

由上述之整治技術與表一可知，單一整治技術漸漸地無法完全達到較嚴格整治的要求，整治工期皆以年為單位且不易達到整治目標，所以結合多項技術以克服土壤空間異質之特性已在進行中。例如加熱式土壤蒸汽萃取技術即結合土壤蒸汽萃取技術與土壤加熱技術，表一中也有七個案例是採用兩種以上之整治技術。不論何種技術，皆需要視場址之土壤及地下水特性與污染物種類而選擇最有效之處理方法，而且隨科技的演進，新穎之整治技術也尚持續在開發中，新的整治技術尚需大家一起努力。

參考資料:

Brady, P. V., M. V. Brady and D. J. Borns. 1998. Natural Attenuation : CERCLA, RBCA's and the Future of Environmental Remediation. Lewis Publishers, Boca Raton, FL.

EPA. 1995. Remediation case Studies: Bioremediation, Federal Remediation Technologies Roundtable Report, EPA/542/R-97/002.

EPA. 1999. Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide.

USDOE. 1995. Six Phase Soil Heating, Innovative Technology Summary Report, Office of Environmental Management and Office of Science and Technology, U. S. Department of Energy.

阮國棟、邵信。1990。受污染土壤之清理復原技術，第二屆土壤污染防制研討會論文集。

車明道。1999。土壤受氯化碳氫化合物之整治技術與問題評析，第六屆土壤污染防制研討會論文集。