

土壤與地下水整治要點與案例

Alistair Montgomery*、Glen Adams*、
Dean Williamson*、林榮泰**、呂榮俊***

摘要

本文論及受污染土壤與地下水的整治，其目的在於導引讀者在可能的最低經費下如何選擇合適的整治方案以完成某場址整治。

本文審視在指定工作範圍與經費下影響整治作業的主要因素，說明在美國常用的一些土壤與地下水整治處理技術，並提供計畫案例以供參考；某些常用整治技術的經費亦一併提供參考。這些經費為某些已建制完成並有許多供應廠商的處理技術，提供預算上的考量。當技術或其應用未能完全定義以及場址的特定條件而有很大的變化時，其亦可提供大約差異在十倍以內之成本估算。

【關鍵字】

1. 热處理(thermal treatment)
2. 圍堵(containment)
3. 固化/穩定化(solidification/stabilization)
4. 滲透反應式阻隔(permeable reactive barrier)

*美國西圖(CH2M HILL)總公司

**美商西圖工程顧問國際有限公司台灣分公司總經理

***美商西圖工程顧問國際有限公司台灣分公司技術部經理

一、前　　言

典型的土壤與地下水污染大多來自製程相關作業中發生的的濺漏，包括：

- 製造流程的濺溢(桶槽溢流，地面排孔等)。
- 地上或地下儲槽洩漏。
- 賯存製程廢棄物的淺池未加底襯。

污染可能最近才發生或可能已累積數年至數十年(如：未加底襯的淺池)。

不論污染原因為何，污染土壤與地下水的整治乃是遲早要面對的問題。整治理由可能是為了公眾健康或有關單位確認的生態危害，為了現廠功能的提升或擴充，或為了製造操作的關閉或地產的變賣轉移。

土壤與地下水的整治費用相當可觀。整治經費的大小視場址特定條件，污染物本身、整治時間及相關單位的法令要求而有顯著的差別。本文審視土壤與地下水整治相關的某些重要因素，其目的在於提供導引如何在特定工作範圍內以最少的經費滿足整治的要求。

二、整治要點

在進行整治前，對土壤及地下水整治規劃，包括技術、環境與法規，皆需有全方位的考量。仔細的準備可指出從技術觀點上最合理的整治方式，但可能並不符合法規上的要求，因此進而導引出另一經費較少又符合法規的方案。以下是這些要點的考量。

2.1 污染特性

某些污染物較其他污染物更易被移除與消滅。高蒸氣壓污染物，如揮發性含氯有機物之整治，可能適合於使用空氣的一些清除技術(如土壤氣體抽除(soil vapor extraction)、空氣曝氣(air sparging)、生物啜滅(bioslurping)等)加以移除。石油碳氫化合物的污染可以生物整治(bioremediation)進行。反之，低蒸氣壓污染物，如高分子量的含氯有機物或金屬，可能需要更激進的處理來破壞污染物或使污染不再擴散。

2.2 污染物的毒性、移動性與體積

污染物的毒性、移動性與體積可用以確立整治工作的需求急迫性。比方說三氯乙烯(TCE)污染了高傳導係數(Transmissivity)的地下水含水層，立即整治是必要的，因為如不及早整治，整治的花費可能會節節高昇。至於儲存在淺池但未加覆蓋又佔地好幾公頃的油狀碳氯化合物污泥可能對人體健康不構成立即危害，但是對野生動植物的顯著生態影響非得立即整治或至少得進行某種程度的中期整治。

2.3 土壤組成與地質分佈

污染土壤的組成與地表下地質分佈對土壤與地下水整治經費有顯著的影響。砂質土可在幾個月內以現地方式清除完畢；而黏土含量高或不連續黏土層的緊密土壤如以現地方式來整治可能需要好幾年，因此開挖可能是必須的。反之，緊密土壤可限制污染地下水的移動使得污染外移較不可能。在沒有含氧水回注下，含水層的還原環境可能產生某些自然條件來控制污染團的範圍或使其隨時間而縮小。在此情況下，整治經費可侷限於地下水的監測以確認自然衰減(natural attenuation)機制。

2.4 曝露途徑

污染物由污染源至接受體的曝露途徑包括直接接觸(如未加覆蓋的廢棄物堆)，藉空氣傳輸(如逸散塵土)和隨地下水流動。藉著人體健康和生態風險的管理，有時可消除其曝露途徑而不用移去污染源。在此情況下，整治可能包含覆蓋和/或植被曝露的廢棄物以阻絕直接接觸和空氣途徑，或設置泥牆(slurry wall)、水力阻隔(hydraulic barriers)或滲透性反應式阻隔(permeable reactive barrier)來阻斷地下水曝露途徑。

2.5 地產的最終使用

地產的最終使用基本上決定場址整治的程度。對於那些將再開發為住家或輕工業的場址，土壤及地下水將必須清除至住宅區標準。由於低污染的要求，整治量可能會較大。如果低花費的場外掩埋方案不可行，較先進(與可能的高花費)的處理技術將是必須的。

對於營運中的工廠場址，可接受較高的污染，整治量因而降低，可以進行較簡易的整治方式。如果能顯示污染物的移動途徑不存在，長期的機構化之控制(institutional control)(例如監測)可予進行。

2.6 環境影響

在某些情況下，清除作業可能引起更多的問題。在新澤西州有個案例，抽出與處理(Pump and treat)被選為地下水整治方案。然而，此方案的地下水抽除系統會抽乾臨近濕地並嚴重地影響附近種植小紅莓農場的操作。於是改採不需抽水的空氣曝氣方案以避免此類環境影響。

在某些情況下，整治會造成環境資源的損失，例如建造一現地掩埋場。處理技術的選擇有時可增進社會的總環境利益，例如在內布拉斯加州使用穩定化的技術來整治精煉鉛廢棄物而在已經穩定化之廢棄物上建造了一座市立公園。

2.7 法規與公眾接受度

整治方式的選擇需為政府法規單位及地方人士所能接受，而接受與否可能與實際技術毫無關係。在喬治亞州有一案例，法規單位指定使用熱處理法來處理被殺蟲劑污染的一小量土壤。地方團體關切煙道氣中可能的毒性氣體(戴奧辛(dioxins)和夫喃(furans))，結果以場外掩埋來處置污染的土壤。整治作業因而延遲一年對地主造成不少損失。

目前有為數不少的整治工作是利用有機覆蓋(草皮、樹木與植物)鋪設於已掩埋之廢棄物上，以提供較低的關場經費和終極的環境利益。有些政府單位接受此一方式，但有些不接受。在此情況下，整治計畫應包含一教育計畫以期獲得相關單位對所提議場址關閉方式的許可。

三、土壤整治案例

表 1 列出某些土壤整治案例。處理技術的編排是由左至右，列於左邊為較建制完全之技術(established technologies)而創新技術(innovative technologies)則列於右邊。表 1 字母”I”指已執行的技術；”A”指可使用的其他技術；”NA”指不適用於此場址的技術。已使用的整治技術和其他可以使用之技術在以下案例中將會加以描述。案例並提供相關意見：如何進行整治和如何由教訓中學習使得下次類似案例工作能進行得更有效率且花費更少。

3.1 某木材處理場址，美國紐約州

表 1 所列位於紐約州之某廢棄木材處理場址，目前是經由 CERCLA 法案通稱為超級基金進行整治。場址的土壤及地下水由於經年累月的木材處理操作被木馏油 (creosote)所污染。

3.1.1 整治方式

土壤整治方式(開挖、熱處理和場內回填)是由美國環境保護署遵循各種可能整治方式的可行性研究中所選取。本場址其他可行的整治方式包括：

- 土壤開挖和場外掩埋
- 固化/穩定化和回填
- 生物整治和場內回填

土壤開挖和場外掩埋可能需要對挖出的廢棄物進行某種形式的固化以吸附浮現的液體。掩埋和固化或穩定化將不會減少廢棄物量，然而廢棄物量卻經常是法規單位對控制此類型場址整治的一個主要議題。由於地處高緯度，經由生物整治來破壞污染物可能過於緩慢且難以執行，並且可能無法處理土壤至人體健康風險所需求的低污染量。

表 1 選擇土壤處理技術案例

場址描述	土壤處理技術								現地圍堵
	開挖	現地處理	場外掩埋	場內回填	場熱處理	固化/穩定化	加強乾化	生物整治	
廢棄木材處理場址。由於製程濺溢與不良廢棄物管理造成土壤與地下水受到 PAH 的污染。該場址危害人體健康。	I	NA	A	I	A	I	A	NA	NA
美國某大煉油廠。煉油製程廢棄物從二十世紀初即貯存在於淺式池內。政府進行挖泥，以維持河道暢通，但使用了被油污染的填土在土地再利用作業上。	A	I	A	NA	A	I	A	NA	A
廢棄場址土壤及地下水受殺蟲劑污染。位處偏遠農業區。地方人士活躍的參與清除作業。	I	NA	I	I	A	A	NA	NA	A

I—已執行, A—其他, NA—不適用

3.1.2 效果和教訓學習

熱處理是成功的整治方式因為它能符合整治要求的土壤處理又能持續操作而不超出的煙道氣排放標準，表二列出本場址經過處理土壤與清除標準的比較。

表 2 污染土壤和經過處理土壤與整治標準的比較

化合物	進料濃度 ($\mu\text{g/kg}$)	處理土壤濃度 ($\mu\text{g/kg}$)	整治標準 ($\mu\text{g/kg}$)
Benzo(a)anthracene	30,000	<330	8,000
Benzo(a)pyrene	14,000	<330	1,000
Benzo(b)fluoranthene	27,000	<330	8,000
Benzo(k)fluoranthene	8,500	<330	8,000
Dibenzo(a,h)anthracene	<1,700	<330	1,000
Indeno(1,2,3-cd)pyrene	5,000	<330	8,000
總 PAH	N/A	<1,980	50,000

註：上述經過處理土壤濃度為規定熱處理的要求(試燒分析為在主要處理單元(PTU)土壤出口溫度600°F)。

熱處理單元使用直接燃燒(direct-fired)低溫熱脫附系統(LTTD)，其污染物在主要處理單元(PTU)中進行脫附而在第二處理單元(STU)中進行燃燒。

本場址熱處理成功的主要因素是在於進料土壤的混合與加強乾化(enhanced drying)以降低其濕度。進料濕度如由 10% 增至 24% 會使得處理量由 18 噸/小時降至 10 噸/小時以及等量提昇的處理費用。

表 3 列出本場址土壤中這些參數的變動。單是混合與乾化的步驟就增加了熱處理系統 50% 的處理量(throughput rate)和減少了 15% 的處理經費，此尚不包含由於工期縮短所節省的經費。

表 3 開挖處理的土壤與廢棄物組成範圍

開挖土壤與廢棄物	濕度 (%)	熱值 (BTU/lb)
上層土壤至 1 公尺深度	9-12	140-630
有機腐植層，地下 1 至 1.5 公尺	22	400
細砂/粉土/黏土	11-18	160-250
類似岩漿的聚合體	11-17	850-2,800
產品飽和土壤	15-25	2,000-3,000
瀝青球	0	7,300



進料土壤的混合操作

本場址 LTTD 系統煙道氣的處理流程包括一分離器以移除粗塵土，一個 STU 以燃燒污染物，一個淬冷塔(quench tower)以降溫煙道氣和一個袋式集塵器(baghouse)以移除煙囪排放前的細塵土。有時由於 STU 的溫度變異進料必須減半。此問題對於其他場址高濃度污染物應可經由安裝 STU 於袋式集塵器之後而加以避免。此裝置應可經由移除系統內的一些熱量以避免由於清除 STU 熱凝塵土所造成的停工而達到更穩定的處理量。

3.2 某大煉油廠，美國德州

本煉油廠場址位於德州，其整治工作是根據資源保護與回收法案(RCRA)地產轉移與關閉部份的要求訂定的。本場址總面積 1,700 公頃，同時包括了可能對生態與人體健康風險造成危害的約 10 處優先地區(淺池、儲池、掩埋場和水道)以及目前為確定污染特性與範圍和可能排放所進行研究的約 80 處場址。

3.2.1 整治方式

10 處優先地區的其中 4 處已執行了中期和/或最終修正行動方案。使用的技術為：

- 設置鋼板阻隔以進行圍堵
- 進行固化/穩定化坑洞和掩埋場內的廢棄物
- 進行整合，固化和覆蓋一現地掩埋場的廢棄物

由於涉及大量的廢棄物和受衝擊媒介，本場址任何形式的開挖和處理方案將會造成主要的財務負擔。因此，整治工作集中於曝露途徑的清除而非消滅污染。

約有 600,000 立方公尺的油狀污泥廢棄物在 4 個地點使用現地混合技術進行固化。此工作首先在實驗室使用不同的添加物(水泥和石灰窯塵土、飛灰、稻殼等)進行測試。結果證實藥劑的使用是經費的主要部份，同時認為使用特殊設備可以加強混合效率而減少藥劑的用量。現場的測試也使用了不同形式的混合設備和技術。最後，以傳統挖土機混合廢棄物與水泥的簡單技術證實是最符合經濟效益。



挖土機進行穩定化

3.2.2 效果和教訓學習

現地固化的油狀廢棄物產生了類似土塊的物質其壓縮強度足夠支撐混合設備。同時發現混入廢棄物下約 0.3 公尺的未壓縮土壤可明顯地改進混合物中乾固體含量使得所需的水泥量有實質的降低(為 8 至 12 的重量百分比相較於實驗測試的 25 %)。最終此區的復育包括了覆蓋乾淨土壤和植被。所使用的穩定化程序，雖然有效可是由於涉及的用量造成高花費。表一所列的其他技術，目前正在探討的包括進一步乾化以強化不加化學藥劑廢棄物的整合，和直接置放在乾廢棄物上的有機植被(植物整治)以分解污染物和防止剝蝕。這些技術希望能降低約 10 倍的經費於關閉剩餘的優先行動場址。另一考慮的創造方式為建造最大的優先行動地區為濕地以處理煉油操作的排放水。廢棄物區與生產操作的結合實質上降低了關閉費用同時也提供了污染物自然分解程序(生物整治)發生所需的時間。

3.3 某廢棄殺蟲劑場址，美國喬治亞州

治亞州的某廢棄殺蟲劑場址是當地農業使用所需殺蟲劑的一個混合用的堆置場所。一連串擁有者的操作造成了土壤與地下水的污染。本場址的整治是其中一位擁有者在美國環保署命令下經由超級基金法案所執行。

3.3.1 整治方式

美國環保署指定的土壤整治方案是開挖移除污染源和現地熱處理以消滅污染物。現地圍堵亦為一可行技術方案，但此技術可能造成環境損失。污染源的移除已使得本場址回復至原先的農作環境。

事實上，由於地方社區的阻力，現地熱處理整治未被使用。最終執行的整治方式為場外掩埋所開挖的土壤，因此其花費較少於熱處理。

3.3.2 表現和教訓學習

本場址關閉工作的一個主要項目為確定必須移除的污染源量以防止污染物經由地下水流動而移至場外。此工作的完成是使用數學模式來預估污染源經一已知距離至地下水的污染傳輸。根據 Kriging 模式 GEO-EASE 的統計來決定場址採樣計畫的污染土壤範圍。結合了此模式的結果與其他模式(未飽和層模式 – SWMS-2D；地下水水流模式 – MODFLOW；和宿命與傳輸模式 – MT3D)來計算地下水的衝擊。結果是土壤開挖量由 15,000 立方公尺減少至 7,500 立方公尺。或許本工作最大的教訓學

172 土壤與地下水整治要點與案例

習是在整個整治過程中結合『主事者』的想法(擁有者、包商、法令單位和社區)，結果是明顯的加速關閉期程(由原預期之 8 年減少至 3 年)和降低花費(由原先估計的 1 千 8 百萬美元節省了 6 百萬美元)。

四、地下水整治案例

表 4 列出某些清除地下水的處理技術。如同土壤，這些技術在左行為排名如先前常用的技術(如：抽出與處理)，右邊則為最新技術(如：現地處理和自然衰減)。

表 4 選擇地下水處理技術案例

場址描述	地下 水 處 理 技 術						
	抽出與 處理	空氣曝氣與 生物啜滅	井內 迴流	NAPL 移除	滲透反應 式阻隔	現地 處理	自然 衰減
某廢棄木材處理場址。 地下水污染物為含氯殺蟲劑以及使用於殺蟲劑混合操作溶劑中之揮發碳氫化合物。	I	NA	NA	I	A	A	A
某廢棄場址。土壤和地下水受殺蟲劑污染。位處偏遠農業區。地方人士活躍地參與清除作業。	A	NA	NA	NA	I	A	A
某營運中之飛機場址。 淺、中層含水層地下水受揮發性含氯碳氫化合物污染。	A	A	I	NA	A	A	A

I—已執行，A—其他，NA—不適用，NAPL—非水相液體

一直到 1994 會計年度，在約 94% 的超級基金整治行動中的地下水整治工作，EPA 指定抽出與處理為唯一的地下水整治方案。抽出與處理的高花費在於清除至最高濃度極限標準值(MCLs)需很長的時間。如果非水相液體(NAPL)存在而污染物持

續流入地下水以及地上處理廠需長期操作，清除所需的時間與花費將會相當可觀。在某些情況下，可移除某些 NAPL(如果可能的話)和使用植物(植物整治)處理污染水來加速整治期程。另外情況是使用更創新的現地處理和圍堵技術來降低花費，假如場址的含水層特性和自然發生的地質化學條件適合這些技術的成功應用。

4.1 應用於廢棄木材處理場址的抽出與處理技術

本木材處理場址使用的抽出與處理系統包含了相分離以分開固體，NAPL 和水以及粒狀活性碳吸附以移除水溶性污染物。圖 1 示整個處理流程。

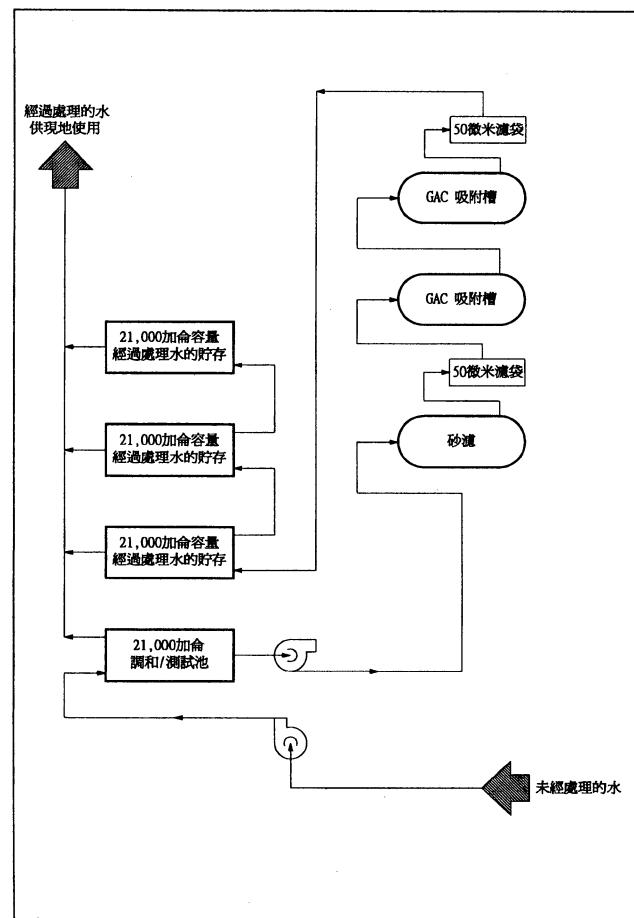


圖 1 GCL 超級基金場址 - 廢水處理系統流程圖

本場址目前使用此技術於土壤開挖的污水處理。使用經過處理水來潤濕土壤並控制現地揚塵可以明顯的節省經費。在污染源完全移除後，地下水清除才會進行，而清除方式目前仍懸而未決。如表 4 所示，自然的滲透反應式阻隔，現地處理和自然衰減都是可接受同時比抽出與處理技術花費較少的方案。三個方案中，位於場址邊界的反應式阻隔可以減輕場外衝擊可能是對地下水清除最適合的長期整治方案。

4.2 應用於廢棄殺蟲劑場址的滲透反應式阻隔技術

廢棄殺蟲劑場址的地下水污染物為二甲苯、乙苯和某些有機氯殺蟲劑，主要是六氯環己烷(HCH)的同分異構物，亦稱為六氯化苯(BHC)。Lindane 是 BHC 的 γ 同分異構物，同時地下水中的 α 和 β BHC 亦超過風險基準的安全值。

4.2.1 整治方式

美國環保署在決策記錄(ROD)中指定的地下水整治方案中，抽出處理系統是以回抽井收集污染的地下水和以內瀘管道(infiltration galleries)處置經過處理的地下水。然而在執行土壤整治期間，其它的地下水整治技術已有較好的發展同時收集了更多場址地下水污染特性與傳輸的數據。這些數據指出由於地下水的傳導係數條件，地下水處理率將會在 10 公升/分鐘的級數，因此傾向現地處理方式。

場址條件指出滲透反應式阻隔(或稱為漏斗和門系統(funnel and gate system))將有下列的好處：

- 由於所有的設施為地下化，因此比抽出與處理系統有較低的視覺衝擊。
- 無空氣排放

由於沒有移動零件、電動馬達、鼓風機、風扇或泵浦，因此比抽出與處理有較低的操作維修費用

由於污染源移除後的清除速率為地下水傳導係數所控制，漏斗與門系統達到場址清除程度所需的時間與抽出與處理系統不相上下。

1998 年設計，建造和開工測試一個為期 6 個月的漏斗與門系統模廠。漏斗是指皂土阻隔泥牆。門是指地下水流經的三座粒狀活性碳(GAC)格區。格區視需要可以串連或並連，GAC 媒介亦可視需要以其他的媒介取代。目前估計 GAC 媒介將每年一換，此頻率將隨時間而遞減。

處理的結果整合如以下表 5。

表 5 滲透反應式阻隔之成果

參 數	進水濃度($\mu\text{g/L}$)	出水濃度($\mu\text{g/L}$)
二甲苯	10,000-16,000	<1
乙苯	1,000-4,000	<1
甲苯	100-800	<1
α -BHC	0.3-1.1	<0.05
β -BHC	0.1-1.8	<0.05
γ -BHC	0.2-1.2	<0.05
Ethoprop	6-30	<0.5

表 5 所顯示的結果為一年內持續達成目標，因此環保署正在修正 ROD 以滲透反應式阻隔來取代抽出與處理系統。

4.3 某飛機場址的井內迴流

在美國維吉尼亞州的某海軍飛機場址進行井內迴流技術的模廠。此技術的優點為在井內剝除地下水中的揮發性有機物而不用把水帶到地面上。井內的空氣剝除消除了地面污水處理廠的需要和經過處理水排放的許可。而在氣流中的污染物可經由空氣除污系統包括氣相 GAC 或氧化系統加以破壞或移除。

4.3.1 表現和教訓學習

表 6 整合維吉尼亞場地模廠試驗所達成的濃度下降。

表 6 井內迴流模廠試驗的 CVOC 下降

化合物	起始濃度($\mu\text{g/L}$)	四週後($\mu\text{g/L}$)	八週後($\mu\text{g/L}$)
順-1,2 二氯乙烷	4,600	34	17
反-1,2 二氯乙烯	27	2.3	BDL(1.0)
總 CVOC	4,627	39.5	21.1

註：BDL(1.0)－測試極限以下，極限值為 $1.0 \mu\text{g/L}$

CVOC－含氯揮發性有機化合物

井內流速－20 升/分鐘

數據顯示 CVOC 濃度在八週內迅速下降。根據這些結果，在佛羅里達州另一個含 CVOC 的飛機場址最近也裝置了第二個系統。新系統包括了四口井，兩口位於非侷限上層含水層，另兩口位於侷限下層含水層。截至目前的經驗顯示侷限含水層對迴流經過處理水的困難度高於上層含水層。

此技術能否成功的應用端視當地含水層及地質條件。技術供應商有實質份量的設計數據可資料用，然而技術的成功取決於各個場址的特定條件。

五、整治技術經費

下列表 7 整合了本文論及的土壤與地下水整治技術在美國的經費。

表 7 典型的土壤與地下水整治經費

處理流程	經費範圍
土壤	
熱處理	TPH；\$20-\$50 美元/噸 多氯聯苯和戴奧辛：\$50-\$150 美元/噸
場外掩埋	視地點與廢棄物組成而定；每噸\$30 至\$100 美元
生物整治	視起始污染物和清除目標值而定；每噸\$20 至\$50 美元
固化／穩定化	每噸\$20 至\$50 美元，現地處理通常花費較低
土壤氣體抽除(SVE)	視土壤條件而定，對小至中型場址通常花費在\$100,000 至 \$250,000 美元範圍
地下水	
抽出與處理	經費範圍頗大，收集系統每英畝\$50,000 至\$150,000 美元；處理系統每 400 升需\$10 至\$30 美元。
井內迴流	每口井設置費為\$30,000 至\$50,000 美元。操作維修視污染物濃度和使用的空氣處理系統而定。某些計畫每月經費\$15,000 至 \$20,000 美元。
滲透反應式阻隔	對一個長 1,000 呎，寬 3 呎，深 10 呎的牆約\$1 百萬美元。
空氣曝氣和生物啜減	類似 SVE，對小至中型場址為\$100,000 至\$250,000 美元。

如表所示，建制較完全的技術涉及開挖和處理，由於不少廠商可提供資訊，其估計的範圍較接近，至少可以單價計。現地處理由於場址特定條件的影響經費變化

較大。然而如果這些技術的應用完全考量場址關閉的非技術部份，關閉經費經常可以明顯的降低。

六、結論

在美國土壤與地下水整治技術會繼續趨向低經費。同時在圍堵和現地處理技術能有效應用時，強調這些技術的使用。如此的轉移對這些專案的主事者包括場址擁有者，法規單位和社區都是有益的，同時可提供合理經費於必要的環境復育整治方式。