

經濟部



重金屬

土壤及地下水污染預防與整治技術手冊



經濟部工業局 編印

序

「土壤及地下水污染整治法」(以下簡稱土污法)自 89 年 2 月公布施行以來，環保署為展現處理土壤及地下水污染問題之決心，已陸續針對具有污染潛勢場址及廢棄工廠，進行土壤及地下水污染調查及查證工作，並依法公告列管污染場址，以妥善處理土壤及地下水污染問題。此外，環保署為預防土水污染及釐清污染責任，於土污法第 8 條第 1 項規定，指定公告事業用地移轉時，讓與人必須提供土壤污染檢測資料予受讓人；另於同法第 9 條規定，指定公告事業於設立、停業、歇業前，應檢具用地土壤污染檢測資料報請所在地主管機關備查後，始得向目的事業主管機關申報相關事宜，以建立指定公告事業用地之控管機制。為符合環保法規規定，以預防、處理土壤及地下水污染問題，產業所面對的土壤及地下水污染問題已漸趨複雜。

本局為提升國內產業土壤及地下水污染預防、應變、調查與整治之能力，95 年度委託財團法人台灣產業服務基金會與中興工程顧問股份有限公司，並邀請國內具執行土水污染預防、調查、整治豐富經驗專家學者，共同編製光電材料及元件製造業與鋼鐵冶煉業二行業及重金屬污染類型之土壤及地下水污染預防及整治技術手冊。本技術手冊為協助產業針對重金屬污染類型進行土壤及地下水污染預防與整治工作，透過蒐集國內外相關調查研究成果、技術應用及案例，彙整編撰整合性土壤及地下水污染預防與整治技術手冊，並對土壤及地下水污染之來源及污染物特性、預防與監測、污染調查、整治技術、整治工程實施程序、土污法對產業影響與因應對策等議題，並提供國內外相關預防、調查與整治案例等，以提升業者保護土壤及地下水資源之知識與能力，達到企業永續經營之目標。

本技術手冊編撰過程，承蒙各編審委員及撰稿者竭盡所長的提供相關寶貴經驗與案例，並於百忙之中全力參與編輯及審稿工作，使本手冊得以付梓，謹致上最誠摯之謝忱。

經濟部工業局謹識
中華民國 95 年 12 月

重金屬土壤及地下水污染 預防與整治技術手冊

目錄

	頁次
第一章 前言	1
第二章 重金屬污染來源及污染特性	3
2.1 污染來源	3
2.2 污染物特性	10
2.3 重金屬污染型態及在環境中的傳輸方式	14
第三章 土壤及地下水污染預防與監測	19
3.1 廠內環境管理及污染評估	19
3.1.1 環境管理	19
3.1.2 污染評估	21
3.2 工廠污染預防措施	24
3.2.1 污染預防管理原則	24
3.2.2 污染預防措施	25
3.3 土壤及地下水品質監測計畫研擬	28
3.4 緊急應變計畫	30
3.4.1 因應緊急事件之準備	30
3.4.2 緊急應變	31
第四章 重金屬土壤及地下水污染調查	37
4.1 污染調查應考慮事項	37
4.1.1 採樣目的	37
4.1.2 採樣的代表性	38
4.1.3 採樣的限制	38
4.2 擬定土壤及地下水污染調查計畫	39
4.2.1 場址概念模式之建立	39
4.2.2 訂定土壤及地下水採樣計畫	42
4.3 土壤及地下水採樣方式與檢測方法	44
4.3.1 選擇採樣工具	44

4.3.2	採樣點配置	48
4.3.3	樣品保存與分析方法	50
4.4	快速篩試工具之應用	51
4.5	土壤及地下水污染調查案例介紹	55
4.5.1	重金屬土壤快速篩試案例介紹	55
4.5.2	土壤污染調查案例介紹	56
4.5.3	土壤及地下水污染調查案例介紹	57
4.6	專業機構聘請	58
第五章	土壤及地下水重金屬污染整治技術	63
5.1	土壤污染整治技術	63
5.1.1	固化/穩定化法	63
5.1.2	玻璃化法	75
5.1.3	土壤清洗與酸洗法	77
5.1.4	高溫分離法	80
5.1.5	現地土壤沖洗法	81
5.1.6	整治列車技術	85
5.2	地下水污染整治技術	87
5.2.1	沉澱及共沉澱法	87
5.2.2	薄膜過濾法	89
5.2.3	吸附法	91
5.2.4	離子交換法	93
5.2.5	透水性反應牆	95
5.3	適用同時整治土壤與地下水污染之整治技術	103
5.3.1	電動力法	103
5.3.2	植生復育法	114
5.4	整治案例介紹	122
5.4.1	土壤清洗法整治案例	122
5.4.2	翻轉稀釋及土壤酸洗法整治案例	123
第六章	土壤及地下水污染整治工程實施程序	149
6.1	整治技術可行性評估與選擇	149
6.2	控制與整治計畫研擬	157

6.3	環保機關控制與整治計畫審查與驗證作業程序	164
6.4	整治施工承包商評估及選擇	166
第七章	土污法對產業影響及因應對策	169
7.1	土壤及地下水污染整治費之徵收	169
7.2	工廠土地移轉、設立、停業或歇業之土壤污染檢測規定	173
7.3	工廠遭土污法列管之作業程序與因應對策	180
7.4	土污法相關訴願程序或行政訴訟	186
	名詞索引	193

圖目錄

	頁次
圖 3-1 工廠土壤及地下水品質監測計畫工作流程範例	30
圖 3-2 工廠緊急應變處理流程	32
圖 4-1 以圖示方法展示油品污染場址概念模式	40
圖 4-2 以水文地質剖面圖展示油品污染場址概念模式(水文地質概念模式)	40
圖 4-3 污染暴露途徑(人類為受體)之場址概念模式	41
圖 4-4 土壤採樣流程	43
圖 4-5 地下水採樣流程	43
圖 4-6 土鑽採樣組及現場使用狀況	45
圖 4-7 直接貫入鑽機現場操作狀況	46
圖 4-8 中空螺旋鑽機現場操作狀況	46
圖 4-9 鑽堡現場操作狀況	47
圖 4-10 貝勒管現場操作狀況	47
圖 4-11 工廠地下水監測井配置範例	49
圖 4-12 各型攜帶式 X 射線螢光偵測器	53
圖 4-13 DMA-80 汞分析儀	54
圖 4-14 台南市某明膠工廠周圍使用狀況及採樣位置示意圖	56
圖 4-15 國內某金屬表面處理廠土壤及地下水採樣配置圖	58
圖 5-1 現地穩定化及穩定/固化處理技術	68
圖 5-2 離地穩定/固定化處理流程示意圖	75
圖 5-3 現地穩定/固定化處理流程示意圖	75
圖 5-4 酸洗法流程示意圖	79
圖 5-5 現地沖洗法示意圖	82
圖 5-6 金屬污染土壤整治技術處理成本範圍	85
圖 5-7 沉澱及共沉澱處理系統	87
圖 5-8 薄膜過濾系統	90
圖 5-9 吸附處理系統	91
圖 5-10 離子交換系統	93
圖 5-11 典型透水性反應牆示意圖	95

圖 5-12	各類型透水性反應牆	98
圖 5-13	透水性反應牆之設計方法	100
圖 5-14	透水性反應牆之設計流程圖	101
圖 5-15	電動力法處理原理示意圖	104
圖 5-16	植生復育處理機制	114
圖 5-17	美國 Small-Arms Range 鉛污染場址物理分離程序	122
圖 5-18	美國 Small-Arms Range 鉛污染場址土壤酸溶出處理程序	123
圖 5-19	污染改善工程實施流程圖	125
圖 5-20	翻土稀釋改善作業流程示意圖	126
圖 5-21	酸洗設備及廢水處理系統流程圖	129
圖 5-22	酸洗設備及廢水處理立面配置圖	130
圖 5-23	翻土稀釋污染改善工程現場工作流程	134
圖 5-24	水平混合稀釋示意圖	135
圖 5-25	酸淋洗法示意圖(一)	137
圖 5-26	固定式酸淋洗法示意圖(二)	137
圖 5-27	固定式酸淋洗操作流程圖	138
圖 5-28	廢水處理系統設備	140
圖 6-1	整治調查與可行性評估的流程與工作內容	150
圖 6-2	初步篩選與細部分析準則間之關係	154
圖 6-3	污染改善完成驗證作業流程	165
圖 7-1	環保署網格法進行採樣佈點之規劃流程	175
圖 7-2	環保機關工廠土壤及地下水污染場址管制作業流程	180
圖 7-3	初評辦法之評估程序	185
圖 7-4	行政爭訟流程圖	187
圖 7-5	訴願案件流程處理簡圖	188

表目錄

	<u>頁次</u>
表 2-1 常見電鍍的金屬及其鍍浴種類	5
表 2-2 土壤及地下水污染整治法第 8 條第 1 項之事業及檢測污染物項目	7
表 2-3 土壤重金屬之監測基準、管制標準、五級監測值與五級農地優先整治值	10
表 3-1 TDK 公司 2004 年土壤污染整治情況	20
表 3-2 政府機關水文地質資料內容及來源	22
表 3-3 電鍍業常見的預防洩漏方法	28
表 4-1 土壤採樣方法適用之地質特性	45
表 4-2 土壤採樣方法適用之污染物種類	45
表 4-3 土壤採樣配置方式比較表	48
表 4-4 重金屬土壤及地下水樣品最少需要量與保存方法	50
表 4-5 重金屬土壤及地下水檢測方法	51
表 4-6 XRF 重金屬偵測極限與我國土壤污染監測基準與管制標準	53
表 5-1 可能影響穩定化作用的因素	71
表 5-2 可能影響固化作用的因素	72
表 5-3 固化/穩定化處理一般類別污染物污染土壤及污泥之有效程度	74
表 5-4 元素在矽酸玻璃中之大約溶解度	76
表 5-5 現地沖洗法建造特性資料	84
表 5-6 整治列車技術彙整	86
表 5-7 沉澱/共沉澱法經濟分析案例	89
表 5-8 透水性反應牆處理技術的種類	96
表 5-9 美國電動力現地整治及實場研究	111
表 5-10 國內電動力法處理重金屬污染土壤之相關研究	113
表 5-11 植生復育技術概述	115
表 5-12 高累積植物物種	116
表 5-13 植生技術之優缺點分析	118
表 5-14 植生技術經濟分析案例	119
表 5-15 整治經費整理表	132

表 5-16	酸洗處理經費整理表	132
表 5-17	公告場址重金屬污染濃度超過管制標準倍數之地號數	133
表 5-18	各項污染改善工法之適用性比較	142
表 6-1	土壤與地下水污染控制計畫與整治計畫之內容	157
表 6-2	承包商選擇之特殊考量因子範例	167
表 7-1	符合土污法第 11 條第 1 項之新投資於預防土壤、地下水污染 有直接效益之設備或工程項目	172
表 7-2	環境場址潛在污染評估之最少土壤採樣點數	174
表 7-3	國內可能產生重金屬污染之產業、相關製程及其應檢測污染物 之項目	176
表 7-4	土污法第 8、9 條規定之相關問題與因應對策	177

第一章 前言

政府為使產業做好污染預防與整治工作，於「土壤及地下水污染整治法」(以下簡稱土污法)中加重污染行為人之責任，並訂定相關刑罰之規定，例如違反其規定所應盡之義務，因而致人於死或重傷之處罰，故意污染土地，因而致人於死或重傷之處罰，對於依該法作成之文書，為虛偽記載者之處罰，不遵行主管機關之停止作為、停業、部分或全部停工等規定之處罰，對法人或自然人科處罰金之處罰等。此外，自土污法公布施行以來，業者對於土污法相關法令之規定，可能會因為專業能量不足及認知上的落差，而在執行上遭遇到困難，從而因違反法令遭受環保單位處分。

土壤及地下水污染不僅會影響企業的形象與商譽，如工廠經環保機關公告為土壤及地下水污染場址時，對企業經營的影響與衝擊更大，將使土地市價減少，妨礙土地利用，減低銀行融資意願。為謀求事業永續發展，企業宜建置環境管理與查核系統，並納入土壤及地下水污染預防與整治，以長期、持續有系統的監督土壤及地下水品質狀況。

爰此，經濟部工業局積極推動產業進行土壤及地下水污染預防工作，以降低土壤及地下水污染風險。然而土壤與地下水污染預防、調查與整治技術跨越眾多專業領域，且國內相關資訊較為缺乏，經濟部工業局彙整相關污染預防、調查與整治技術資料，提供產業於規劃、執行或選用相關污染預防、調查與整治技術時，能有完整資訊得以參考。

土壤與地下水污染預防工作應從源頭上管制污染物，使其不進入土壤及地下水。土壤及地下水污染來源包括「氣相」的空氣污染物、「固相」的污染物、及「液相」的污染廢液與廢水，因此做好空氣污染防制、廢水處理、廢棄物貯存與處置工作，並加強廠區工安管理以避免意外事件，加強監測土壤及地下水的品質，切斷污染物進入土壤及地下水的途徑，就有很大的機會達到污染預防的目標。此外，當土壤及地下水污染事件發生時，廠方應採取那些緊急應變措施、如何立即阻絕污染來源、減輕污染危害或避免污染擴大、如何進行污染調查、選擇相關之整治技術等，可能並不十分清楚。因此，企業需要對其所屬員工進行教育訓練，增加其相關的知識。

經濟部工業局有感於業界對土壤及地下水污染預防與整治相關知識之需求，因此特彙編本手冊，供產業界人士參考。本手冊為「重金屬土壤及地下水污染預防與整治技術手冊」，撰寫之內容主要為提供產業相關人士閱讀，但對於手冊中之污染預防、調查技術、整治技術等相關資訊，因同樣適用於其他各行業，亦可提供其他產業相關人士參考。本手冊先由重金屬污染來源及污染物特性說

起，進而說明其污染預防、污染調查、整治技術、整治工程實施程序等。最後，本手冊亦以業者之角度，針對土污法之整治費徵收、土地移轉，主管機關公告指定事業之設立、停業、歇業時，應提出用地土壤檢測之規定，土壤及地下水污染場址列管作業程序說明，包括當事業被通知查證或改善、被列為控制或整治場址時，於適法狀況下之因應對策，以及對者對主管機關所做處分提出訴願或行政訴訟之程序等相關資訊，供產業界人士參考使用。

第二章 重金屬污染來源及污染特性

隨著工業發展迅速，人們對重金屬的使用過度，工業廢液與不明廢棄物堆放場址之滲出水，導致過量重金屬無法為環境所負荷。工業製程所使用原物料、動力的不同，產生的廢水量與水質種類極為複雜，尤其是含有重金屬之廢液，一但排入河川後造成水體生態的影響，進一步更影響了農業灌溉用水及民生用水，若人們長期飲用含重金屬水源就會造成累積性的中毒。若一旦入滲至土壤中，則有經淋洗而使廢水得以進入地下含水層的可能，造成地下水源的污染。然而，不同產業中，經由不同製程及後續產品的處理程序，所產生廢水中包含的重金屬種類與性質差異甚大，所導致的環境及生物的危害的程度與範圍並不相同，例如，重金屬的冶煉廠，採用的礦不同，就會導致廢水中含砷、銅、鋅、鎳、鐵、錳量的差別；染製業則產生銅、鉻、鎘、鋅、鎳、汞；電鍍工業廢水則含有鉻、鎘、鋅。舉凡各項可能造成重金屬污染的產業，不外乎電子業、電鍍業、塑膠工業、印刷電路板業、金屬建築工業和其他簇不及備載，都是造成土壤不同程度的重金屬污染的元兇。行政院環境保護署(以下簡稱環保署)所列管的重金屬主要有砷、鎘、鉻、汞、鎳、鉛、鋅及銅等 8 種。本章將彙整重金屬污染來源與污染物特性，以及污染傳輸方式等作一說明。

2.1 污染來源

由於各產業製程須依據產品設計需求而決定，故廢水及廢棄物種類隨製程改變而有相當大的變化，本節將針對不同產業所產生的廢水及廢棄物分別介紹。

廢水來源：

一、皮革整製工廠廢水

依據行政院主計處所公布之「行業標準分類」所定義的皮革整製業為「凡從事皮革、毛皮之鞣製、硝製、染整、梳整、壓花、上漆、上蠟，或以熟製皮革下腳為原料從事磨碎、壓製等行業均屬之。」其製程大致上為兩大步驟：

- (一) 鞣製：浸水→削肉→浸灰、脫毛→脫灰、酵解→浸酸→鞣製→擠水。
- (二) 染色：脫脂→中和→再鞣→染色→加脂削油、鉻鞣、浸酸、染色加脂、固酸。

其製程中主要產生的重金屬廢水為用來處理皮革、皮套、皮衣等的鹽基性硫酸鉻。

二、塗料、染色工廠廢水

依據行政院主計處所公布之「行業標準分類」所定義的塗料、染料及顏料製造業為：「凡從事塗料、染料及顏料製造及分裝之行業均屬之。瓷釉、油墨之製造亦歸入本類。」其製程大致上為兩大步驟：

- (一) 染料顏料製造：乾燥、研磨/混合。
- (二) 油墨及塗料製造業生產流程：攪拌、研磨、混合。

其廢水中重金屬來源主要來自塗料中的鎘黃、鎘紅、鉛白等發色材料，以及染色過程中所需用到的重鉻酸鉀、醋酸鉛、硫酸鐵等媒染劑，以及含有重鉻酸鉀與硫酸銅等後處理劑。

三、金屬表面處理業^[1]

金屬表面處理係指金屬經初步加工成型後，進一步修飾美化其表面，或改變其表面之機械性質、物理化學性質等之各種操作處理過程。其定義為：「從事金屬及其製品之表面磨光、電鍍、鍍著、塗覆、噴焊、烤漆、染色、壓花、發藍、上釉及其他化學處理、塑膠製品表面電鍍之事業。」

(一) 電鍍

在各項金屬表面處理業的製程上，電鍍為最主要產生重金屬廢水及廢棄物的過程，其製程一般包括 4 道步驟：

1. 拋光與研磨

此過程中金屬機械製造廠之研磨細粉直接混入排水中在排出口附近沉積，不會被帶到很遠的地方。

2. 前處理

此過程所產生的廢液以各種酸液的混合液為主。

3. 電鍍

電鍍為金屬表面處理業所有程序中，產生重金屬廢液最主要的來源，而依據產品需求不同，所使用的鍍浴種類亦有所差異，表 2-1 為常見的電鍍金屬及其鍍浴種類。其中，值得留意的焦磷酸銅浴，因為焦磷酸根本身為一還原劑，一旦洩漏到含水層可能會影響含水層的氧化還原態；而表中所列常見的鍍鉻浴都是以六價鉻為基礎，其中普通鍍鉻浴摻入少量陰離子，如亞硫酸根(SO_3^{2-})作為催化劑，因此一旦進入土壤中，會遭到淋洗而進入含水層，造成六價鉻的污染。

電鍍為金屬表面處理業的一環，其所產生的廢液種類與濃度會因為不同加工方式而有所差異，台灣地區的電鍍廠主要以中、小型為主。電鍍過程中所產生的廢水及污泥，所含的重金屬種類包含銅、鉻、鋅及鎳等。

4. 後處理

此過程所產生的重金屬廢液主要是以鉻酸為主的廢液。

表 2-1 常見電鍍的金屬及其鍍浴種類^[1]

電鍍金屬類別	鍍浴種類	備註
鍍銅	■ 氰化銅浴 ■ 硫酸銅浴 ■ 焦磷酸銅浴 ■ 氟硼酸銅浴	■ 氰化銅浴與硫酸銅浴廣被使用
鍍鎳	■ 瓦茲鎳浴 ■ 半光澤浴 ■ 光澤鎳浴 ■ 氨基磺酸浴	■ 瓦茲鎳浴廣被使用 ■ 瓦茲鎳浴組成包括硫酸鎳、少量氯化物和硼酸 ■ 半光澤浴與光澤浴的基本組成與瓦茲鎳浴類似，只是多加光澤劑
裝飾保護性鍍鉻	■ 普通鍍鉻浴 ■ 混合鍍鉻浴 ■ 自動調節鍍鉻浴	■ 普通鍍鉻浴採用硫酸根為催化劑的鉻酸溶液 ■ 混合鍍液採用硫酸根與氟離子作催化劑的鉻酸溶液 ■ 以硫酸鋇與氟矽酸鉀作為催化劑的鉻酸溶液
工業用鍍鉻	■ 普通鍍鉻浴	■ 採用普通鍍鉻浴
鍍鋅	■ 鹼性氰化物鍍鋅 ■ 鹼性鋅酸鹽鍍鋅浴 ■ 硫酸鹽鍍鋅浴	■ 鹼性氰化物鍍鋅浴的效果最佳，過去最廣被使用
鍍錫	■ 硫酸亞錫浴 ■ 氟硼酸亞錫浴 ■ 氨基磺酸鹽鍍錫	■ 硫酸亞錫浴最廣被使用
鍍錫鉛合金	■ 氟硼酸鹽鍍錫合金	■ 氟硼酸鹽溶液最廣被使用
鍍金	■ 鹼性氰化物鍍金浴 ■ 酸性和中性鍍金浴 ■ 亞硫酸鹽鍍金浴	■ 鹼性與酸性氰化物均以 $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ 存在
鍍銀	■ 氰化鍍銀浴 ■ 硫代硫酸鹽鍍銀浴	■ 氰化鍍銀浴仍最廣被使用

(二) 陽極處理及化學電鍍

陽極處理所產生的重金屬廢液主要以鉻酸為主，而化學電鍍則以鎳及銅廢液為主。

四、半導體製造業^[2]

依據行政院主計處所公布之「行業標準分類」所定義的半導體製造業之定義為：「凡從事半導體製造之行業均屬之。包括以下：晶圓製造、電晶體製造、閘流體製造、記憶體製造、積體電路(IC)製造、積體電路(IC)測試封裝等7項製程均屬於半導體製造業之範圍。」

半導體產業中經製程後所產生的廢水中其種類複雜，使用大量酸液及有機溶劑，而主要產生重金屬廢液的程序為電鍍程序，其包含的化學物質有銅、鎳、鋅、鉛、銀、氰化物、氟化物等。

五、印刷電路板業^[3]

印刷電路板製程可分為裁板、表面處理、內層印刷、壓合、鑽孔、鍍通孔、乾膜、線路鍍銅、蝕刻、濕膜、噴錫/鍍金、文字印刷以及品檢等程序，其製程十分複雜與細密，所使用到的化學藥劑種類繁多，而其製程所產生的廢水除了含有多種有機污染物之外，更蘊含大量的銅、鉛及鎳等重金屬。

六、礦產之開採

在採礦或煉製過程中，含重金屬之微塵容易飄散於大氣中，之後經過沉降而進入到土壤中，而採礦所排出的廢水、廢棄物依照所開產的礦區而有所不同，這些污染物質都有可能受到淋洗而使所含的重金屬滲入土壤。

表 2-2 列出土壤及地下水整治法中與重金屬有關的各項事業定義、主要製程以及其污染物檢測項目，另外環保署為明確定義土壤污染，於 90 年 11 月公告「土壤污染管制標準」與「土壤污染監測基準」，將其列管的 8 種重金屬之監測基準、管制標準列於表 2-3 中。

表 2-2 土壤及地下水污染整治法第 8 條第 1 項之事業及檢測污染物項目^[4]

項	事業		定義	主要製程	檢測項目
一	廠房、其他附屬設施所在之地及空地面積達 100 平方公尺以上之工廠	皮革、毛皮整製業	從事皮革、毛皮之鞣製、硝製、染整、梳整、壓花、上漆、上蠟或以熟製皮革下腳為原料從事磨碎、壓製等之事業。	皮革、毛皮鞣製製程	鉻
				塗飾或染色製程	鋅、鉻、鎘、鉛、銅、VOC
				其他製程	鉻
		基本化學工業	以化合、分解、分餾、蒸發、萃取等物理或化學反應方法產製無機或有機基本化學原料之事業。但氧氣、氮氣、氫氣之空氣分離；高壓氣體罐裝；氫氣之純化及二氧化碳製造之事業除外。	基本化學工業製程	VOC、SVOC、TPH、砷、鎘、鉻、銅、汞、鎳、鉛、鋅
		石油化工原料製造業	從事以石油或天然氣產製石化基本原料及中間產品之事業。	石油化工原料製造	VOC、SVOC、TPH、砷、鎘、鉻、銅、汞、鎳、鉛、鋅
		合成樹脂及塑膠製造業	從事高分子聚合物如合成樹脂、塑膠等化學合成製造之事業。	合成樹脂及塑膠製造	鎘、汞、鉻、鉛、鎳、鋅、銅、砷、SVOC、VOC、TPH
		農藥及環境衛生用藥製造業	從事農業及環境衛生用藥原體及成品製造、加工調配、分裝之事業。	使用砷、有機砷為原料製造農藥及環境衛生用藥製程	VOC、SVOC、農藥、砷
				使用汞、有機汞為原料製造農藥及環境衛生用藥製程	VOC、SVOC、農藥、汞
				使用銅為原料製造農藥及環境衛生用藥製程	VOC、SVOC、農藥、銅

表 2-2 土壤及地下水污染整治法第 8 條第 1 項之事業及檢測污染物項目(續 1)

項	事業		定義	主要製程	檢測項目
一 (續)	廠房、其他附屬設施所在之地及空地面積達 100 平方公尺以上之工廠	石油煉製業	從事以礦產原油、頁岩、瀝青砂等，分餾提煉有機溶劑及瀝青，由煤及天然氣產製類似分餾物等之事業。	石油煉製製程	砷、鎘、鉻、銅、汞、鎳、鉛、鋅、VOC、SVOC、TPH
		鋼鐵冶鍊業	從事礦砂之冶鍊以生產生鐵、合金鐵及直接還原鐵（如海綿鐵、熱鐵塊），或再以生鐵、直接還原鐵或廢鋼精鍊成碳素鋼、合金鋼等事業。	煉焦製程	VOC、TPH
				煉鐵製程	鉛、鋅、TPH
				轉爐煉鋼製程	鉛、鋅、TPH
				電弧爐煉鋼製程	鋅、鉛、鎘、銅、鉻、鎳、TPH
		金屬表面處理業	從事金屬及其製品之表面磨光、電鍍、鍍著、塗覆、噴焊、烤漆、噴漆、染色、壓花、發藍、上釉及其他化學處理、塑膠製品表面電鍍之事業。	使用有機溶劑之製程	鎘、鉻、銅、鎳、鉛、鋅、VOC
				化成、電鍍製程	鎘、鉻、銅、汞、鎳、鉛、鋅
				塗裝製程	鎘、鉻、銅、鉛、鋅、VOC
				其他製程	鎘、鉻、銅、鉛、鋅
		半導體製造業	從事各種半導體製造之事業。	半導體製造製程	砷、鎘、鉻、銅、汞、鎳、鉛、鋅、VOC、SVOC
二	電力供應業	印刷電路板製造業	從事印刷電路板製造之事業。	印刷電路板製造製程	鎳、銅、鉛、鉻、VOC
		電池製造業	從事電池製造之事業。	非汞電池製造	鎳、鎘、鉛、銅、鋅、VOC
				汞電池製造	鎳、鎘、鉛、銅、鋅、汞、VOC
			從事火力發電（不包含天然氣發電）之事業。	燃煤機組發電製程	鉛、砷、汞、TPH、PCBs
				燃油機組發電製程	鉛、TPH、PCBs

表 2-2 土壤及地下水污染整治法第 8 條第 1 項之事業及檢測污染物項目(續 2)

項	事業	定義	主要製程	檢測項目
三	廢棄物處理業	1. 公民營廢棄物處理機構、事業廢棄物共同處理機構及依據廢棄物清理法第 28 條第 1 項第 3 款第 3 目至第 5 目規定設置廢棄物處理設施之機構。 2. 中央主管機關依廢棄物清理法第 18 條第 3 項指定公告一定規模以上應回收廢棄物之處理業；但不包含處理非屬應回收農藥廢容器以外之廢容器處理業。	1. 各處理設施均屬之。 2. 但許可處理項目中僅含 C-05、C-06(感染性事業廢棄物)、D-01(動植物性廢棄物)、D-02(廢塑膠)、D-03(廢橡膠)、D-04(廢玻璃、陶瓷、磚、瓦及黏土廢棄物)、D-05(土木及建築廢棄物)、D-06(廢紙)、D-07(廢木材)、D-08(廢纖維)、D-18(一般垃圾)項目者除外。	砷、汞、鎘、鉻、銅、鎳、鉛、鋅、VOC、SVOC
			應回收廢機動車輛處理	銅、鎳、鉛、鋅
			應回收廢電子電器類處理	銅、鎳、鉛、鋅
			應回收廢資訊物品類處理	銅、鎳、鉛、鋅
			應回收潤滑油類處理	TPH、鉛、鋅
			應回收鉛蓄電池類處理	鉛、鋅
			應回收農藥廢容器類處理	VOC、SVOC、農藥、砷、汞、銅
			應回收廢日光燈類處理	汞

註 1：表中 VOC 包括苯、甲苯、乙苯、二甲苯、四氯化碳、氯仿、1,2-二氯乙烷、1,2-二氯丙烷、順-1,2-二氯乙烯、反-1,2-二氯乙烯、三氯乙烯、四氯乙烯、氯乙烯等 13 項；SVOC 則包括 1,2-二氯苯、1,3-二氯苯、3,3'-二氯聯苯胺、六氯苯、2,4,5-三氯酚、2,4,6-三氯酚、五氯酚等 7 項；農藥則包括阿特靈、可氣丹、二氯二苯基三氯乙烷(DDT)及其衍生物、地特靈、安特靈、飛佈達、毒殺芬、安殺番等 8 項；TPH 表示總石油碳氫化合物；PCBs 表示多氯聯苯。

註 2：表中各指定公告事業若擁有儲存石油原油或液態石油製品(包括「石油製品認定基準」所列之汽油、柴油、輕油、航空燃油、煤油、燃料油等)之儲油設備者，則檢測項目至少應包括苯、甲苯、乙苯、二甲苯及 TPH。

註 3：附表之檢測項目，得依各指定公告事業實際運作時可能產生含土壤污染管制標準所規定之污染物項目，由土地移轉讓受雙方協議定之。

表 2-3 土壤重金屬之監測基準、管制標準、五級監測值與五級農地優先整治值^[4]

項目	管制標準		監測基準		五級監測值	五級農地優先整治值
	一般用地	食用作物農地	一般用地	食用作物農地		
砷	60	-	30	-	> 60	> 60
鎘	20	5	10	2.5	> 10	> 10
鉻	250	-	175	-	> 16	> 40
銅	400	200	220	120	> 100	> 180
汞	20	5	10	2	> 20	> 20
鎳	200	-	130	-	> 100	> 200
鉛	2,000	500	1,000	300	> 120	> 200
鋅	2,000	600	1,000	260	> 80	> 300

2.2 污染物特性

一、鉻

鉻熔點為 1,900 °C、沸點 2,642 °C，鉻主要用於鋼鐵、電鍍、皮革等工業，主要污染來源為皮革染整、不鏽鋼、金屬電鍍及化學藥品等製造業。元素鉻在地殼岩石組成中排名第 21 名，主要的物種型態有三價鉻(Cr(III))與六價鉻(Cr(VI))兩種，三價鉻主要存在於礦物中，與鐵錳氧化物共存^[5]，六價鉻具有極高的毒性，其具有強氧化力，於人體內溶解度大，且其較三價鉻擴散性大，可穿透細胞膜，其毒性遠大於三價鉻，其主要來自工業污染廢水中，為氧化情況下穩定的鉻形式；而三價鉻則對人類的危害較小，且為生物體的必要元素。攝入大量六價鉻所引起的影響是急性腎小管損傷，碰觸皮膚會引起皮膚表面潰爛，六價鉻已被美國環保署 IRIS (Integrated Risk Information System) 歸類為 A Group，為已證實的人體致癌物。^[6]

自然界中鉻酸鹽很少見，當其在水中出現時，表示已受到工業廢水污染。三價鉻在水環境中相當容易形成氧化物、氫氧化物、磷酸鹽沉澱或共沉澱，或是被水中懸浮固體所吸附，而在土壤中則因為其存在形式為陽離子，因此容易被土壤中表面帶負電荷的礦物所吸附；相反地，六價鉻存在於自然界中的型態主要是 CrO_4^{2-} 、 HCO_4^- 及 $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ 等陰離子型態^[7]，在土壤中的反應主要有吸附、淋洗至地下水、和還原成移動性較低的三價鉻。

二、銅

銅為世界上利用量第三大之金屬元素，其熔點 $1,083^{\circ}\text{C}$ ，沸點 $2,590^{\circ}\text{C}$ ，是熱及電之良導體，自然界地殼中同濃度約為 70 mg/kg ，主要用於電鍍、電子、印刷電路等方面之工業，而銅的人為污染來源主要包括採礦業、銅純化業、都市垃圾焚化爐以及電鍍業，電鍍廠多採用硫酸銅或氯化銅鍍浴。

銅為人體必需元素之一，美國環保署 IRIS 歸類為非致癌物^[8]，但人體若吸入銅微粒會刺激上呼吸道，產生不適或導致化學性灼傷；若以口服途徑進入人體則會導致嘔吐，且慢性中毒有導致貧血、白內障以及視力衰退的可能。

銅在於環境中有 Cu(I) 及 Cu(II) 兩種氧化態，在環境中可能生成碳酸銅、氧化銅、氫氧化銅等沉澱，亦有可能與鐵生成氧化物共沉澱^[9]。銅離子在含水層或土壤中的移動性與一般重金屬陽離子相似，容易被土壤中表面帶負電荷的礦物所吸附而降低其移動性。在土壤中，銅的物種包括土壤溶液中的離子與錯合物、可交換性銅、和腐植質生成錯合物、吸附在黏土礦物與鐵、鋁、錳氧化物表面、以及銅的化合物。

三、鎳

鎳的熔點為 $1,453^{\circ}\text{C}$ ，沸點 $2,732^{\circ}\text{C}$ ，主要用途為鋼鐵之添加物、金屬合金，主要的污染來源為鎳電鍍工廠之廢水，近年來電池與電子產品及石化燃料的使用亦為污染來源之一。鎳用於電鍍時多使用瓦茲鎳鍍浴，其成分含硫酸鎳及少數的硼酸與其他各中光澤劑。鎳離子對人體的毒性危害主要是會造成細胞組織壞死，引起過敏性接觸性皮膚炎，雖然美國環保署尚未完成鎳離子的致癌性評估，但是近年來有研究發現鎳精煉廠工人的喉癌、腸癌、組織肉瘤的發生機率都有增加的趨勢。

鎳元素具有 0、+1、+2、+3 價等氧化態，其在環境中以帶正二價的鎳離子為唯一穩定組態，在自然環境中也以 Ni^{2+} 為主要型態。由於土壤中的有機酸、鐵鋁錳氧化物與黏土礦物表面對鎳離子有較強的吸附力，因此其在土壤中的移動性較差，且其生物有效性也相當低，對植物危害較低。

四、鋅

鋅的熔點為 419.6°C ，沸點 907°C ，鋅主要用於金屬之防蝕、合金生產、顏料、還原劑，主要污染來源為電鍍業所產生的廢水所造成。鋅離子本身為人體所需的必要元素之一，許多與生長發育有關的人體生化反應都需要有鋅的參與，且非致癌物，但過量則可能傷害人體造血及免疫

系統。

鋅在環境中主要以 Zn(II) 為主要存在的形式，其物種型態可分為溶解態、土壤或底泥中的可交換態、有機物結合的錯合態，以及吸附或沉澱在礦物表面；而在水中的鋅離子主要則是以 $\text{Zn(H}_2\text{O)}_6^{2+}$ 為主^[10]。鋅在土壤中可與有機質形成穩定錯合物，與其他二價重金屬離子相同，有機物、鐵鋁錳氧化物與黏土礦物都是環境中對鋅主要的吸附劑，其在環境中的含量通常決定於鋅的累積量。另外，由於鋅的磷酸鹽具有低溶解度，因此在土壤中施用磷肥可以促進鋅的固定，降低其生物有效性。

五、鎘

鎘的熔點為 320.9°C ，沸點 767°C ，為第 67 豐富的元素。鎘的主要污染來源包括了工業採礦和冶金有關，在國內主要來自硬脂酸鎘製程廢水、鎘電鍍工廠所排放的廢水或污泥、以及塗料、染色工廠所排放的廢水。過量的鎘暴露會引起腎、肺、肝、骨和生殖效應以及癌症，對呼吸系統及心血管系統也有造成危害的可能性。

一般土壤中鎘濃度小於 1 mg/kg ，其在土壤水溶液或水環境中的物種，取決於環境的 pH 值以及可與鎘形成錯合物的有機或無機陰離子濃度^[11]。土壤中對鎘的吸附反應多呈不可逆性，因此鎘會在土壤中累積，其在土壤中的移動性較銅和鋅高；而在底泥和懸浮固體中，則主要受到鐵錳氧化物所吸附。

六、鉛

鉛的熔點為 327.5°C ，沸點 $1,740^\circ\text{C}$ ，主要使用於鉛蓄電池、彈藥、電纜護套、鉛箱及焊接材料。與其它重金屬相比，鉛的天然來源遠低於人為的污染。主要的污染來源包括含鉛汽油燃燒所造成的大氣沉降、油漆、含鉛廢料及廢水等。鉛對兒童影響最大的是中樞神經的發育，在血中鉛低濃度之下即可發生心智發展較同年齡兒童差，而當血中鉛濃度超過 $25\text{ }\mu\text{g dl}^{-1}$ ，即可能阻斷血紅素的合成引起貧血。

鉛具有 +2 和 +4 價兩種氧化態，而在自然環境中以 Pb(II) 為主要存在的形式^[12]。在表面水體或土壤溶液中，鉛離子的活性主要受到環境的 pH 及碳酸根離子活性所控制，在碳酸根離子存在下，游離鉛離子濃度甚低，當 pH 降低時則會使鉛離子濃度增加。另外，與鋅離子相同，鉛的磷酸鹽溶解度低，因此亦可施用磷肥來固定土壤中的鉛^[13]。

吸附反應為控制土壤溶液中鉛離子濃度的主要機制之一，如同其他重金屬陽離子，有機物、鐵鋁錳氧化物與黏土礦物亦為鉛的主要吸附劑^[14]

，且鉛與土壤中的腐植酸有相當強的結合能力，所形成的錯合物相當穩定，不易受 pH 值變化所影響。另外，當環境中為還原狀態或是有機酸存在而使得氧化物溶解時，吸附於氧化物上的鉛也會被釋放出來，而會導致鉛的移動性及生物有效性增加，增加其危害性。

七、汞

環境中人為的汞污染主要來自石化燃料的燃燒、冶礦、廢棄物的焚化以及含有水銀(如電池、溫度計)商品的使用等。汞俗稱水銀，銀白色液態金屬，具有腐蝕性，是對人體健康危害極大而且環境污染持久的有毒物質。在汞的長期暴露下可能產生四肢不自主抖動的症狀，且會傷害腦部、腎臟及肺部。急性的汞中毒會在數小時內頭痛、胸悶、噁心、嘔吐、腹瀉，甚至意識不清以及腎傷害等。

汞在環境中主要有元素態、二價汞離子、有機汞、固態微粒的汞等型態，其中，元素態汞具有揮發性。其在環境中的傳輸途徑包含從水體與土壤表面的揮失，以及從大氣中沉降至地表上。汞在環境中的傳輸會受到化學型態與環境因子的條件而有所差異，在水溶液或土壤溶液中，主要以 Hg(II) 和有機汞的形式存在，而在土壤中則以 Hg(II) 為主。

八、砷

土壤當中的砷污染來源並非以工業污染為主，而主要是以農業上的殺蟲劑、除草劑與肥料的使用，而工業上的來源則包含了化工、礦產以及煉焦等行業。一般水體或土壤中的微量砷多半是由土壤母質風化而來。若砷引起急性中毒，其呼吸道的症狀有咳嗽、胸痛、呼吸困難及眼花、頭痛，還有胃腸症狀發生之前會有極端虛弱的症狀。三價砷中毒引起的急性中毒是由於粘膜嚴重的發炎和微血管通透性大量增加。基於砷的毒性、與人類曝露，砷在美國國家優先管制有害物質中排名第一，而國際癌症研究組織將砷列為致癌物之一。

砷在水體中或土壤中的物種型態包含有機與無機型態兩大類，其中以無機型態的五價砷(砷酸鹽)與三價砷(亞砷酸鹽)為最主要存在的型態^[15]，而五價砷與三價砷之間在環境中相對的分布情形受環境中 pH 值與氧化還原電位所決定。一般而言，三價砷比五價砷具有較高的移動性與毒性，因此危害較五價砷大。

砷在土壤中的吸附行為主要受鐵鋁氧化物含量、黏土礦物含量、pH 值、以及氧化還原電位等因子決定。

2.3 重金屬污染型態及在環境中的傳輸方式^[1]

一、土壤中重金屬污染物傳輸機制

(一) 重金屬污染物在土壤中之動態變化

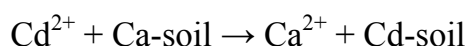
重金屬污染物在土壤中存在的型態是決定其在土壤中是否容易移動，是否會向下擴散最主要的關鍵。重金屬物質在土壤中的型態其實相當的複雜，在探討其在土壤中的傳輸，我們可以將重金屬在土壤中的型態簡單的分為三大類：可交換離子態、結合態與固定態。可交換離子態為最容易在土壤中移動也是最容易被植物所吸收的型態；結合態則是指重金屬物質在土壤中與碳酸鹽、水合氧化物、有機物質以及硫氧化物結合，會伴隨著土壤中這些物質而移動，且會緩慢釋出的型態；而固定態為重金屬最不容易移動，與其他物質形成沉澱，或是存在於黏粒及原生礦物之中，植物也最不容易吸收的型態。

重金屬污染物在土壤中的型態，最主要的影響因子為土壤的酸鹼度與氧化還原電位，且酸鹼度的影響又較氧化還原電位的影響顯著，不同的金屬離子有其對應的範圍。一般而言，正常土壤的 pH 值在 5 至 7 之間，氧化還原電位介於 400 至 -200 mV。大部分的金屬離子在 pH 5 以下，氧化還原電位小於 100 mV 的土壤中溶解度較高。亦即，在酸性、還原狀態的土壤中，金屬離子較容易移動。

不同種類的重金屬污染物與不同性質的土壤之間會產生各種不同的物理、化學、生物作用，在探討土壤的重金屬污染問題時，我們最主要關切的是土壤對重金屬物質的吸附能力，是否容易因淋洗而移動擴散，重金屬物質的型態是否會轉變等，以下簡介 7 種不同的作用方式。

1. 交換作用

由於金屬離子的半徑大小與土壤結構組成成分物質的離子半徑大小相似，而產生的取代反應，例如金屬鎘離子(離子半徑 0.103 nm)與土壤表面的鈣離子(離子半徑 0.11-0.12 nm)的交換作用：



2. 吸附作用

泛指土壤表面對金屬離子的固定作用，為影響重金屬在土壤中的行為及生物有效性最重要的作用方式，包含陽離子交換作用(非特異性吸附)、特異性吸附、有機物結合及共沉澱等作用。土壤膠

體因具有極大之比表面積與表面電荷，因此能吸附重金屬離子，為眾金屬被自液相移送到固相的重要作用。

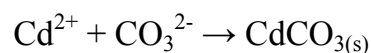
一般而言，細質地及高有機質含量之土壤具有較大的吸附力。土壤中主要作為吸附劑的物質為鐵鋁氧化物、黏土礦物與有機物等，當土壤中這些吸附劑含量增加時，常常也伴隨著有重金屬的累積。影響重金屬吸附的因子包含了 pH、溫度、離子強度、吸附劑之表面積以及有機質與黏粒含量^[16]，隨著環境條件的改變，原本吸附在土壤粒子表面的重金屬也有發生脫附反應的可能，使得重金屬可隨土壤溶液的移動而在環境介質中傳輸。

3. 溶解作用

重金屬污染物以固體型態之鹽類進入土壤中，其在土壤中具有一定之溶解度，金屬離子會因而溶解釋出。重金屬在環境中的溶解度代表其在環境中的遷移能力，故溶解度大的重金屬其遷移能力相對較大^[17]。一般而言，重金屬隨其物種不同而有不同的溶解度，如氫氧化物、氧化物、硫化物、碳酸鹽以及磷酸鹽化合物為難溶物質，氯化物及硫酸鹽化合物則屬於易溶物質；而重金屬的物種分布與溶解度受到環境中 pH、氧化還原電位、溫度、離子強度等因子的影響而有所變動。

4. 沉澱作用

金屬陽離子與土壤中的陰離子作用形成不可溶性之固體沉澱，此時污染物在土壤中之移動性及生物有效性會降低很多。例如金屬鎘離子與土壤中的碳酸根離子形成不可溶的碳酸鎘沉澱：



5. 傳輸作用

植物根部會吸收土壤中的養分元素供其利用，若眾金屬污染物在土壤中，是以可溶性的型態存在，則植物亦有可能將其吸收利用。

植物主要是靠質流(mass flow)與擴散作用(diffusion)吸收土壤中的養分，此傳輸作用之影響因子包括土壤質地、有機物含量、pH、導水度、擴散係數、降雨量及蒸發散量等。

6. 氧化還原反應

金屬離子在土壤中由於土壤環境狀態的改變，金屬離子會有氧化或還原的變化，而氧化還原作用受到環境中溶氧量所控制，在

土壤環境當中，由於微生物對有機碳的利用，使得土壤中的含氧量隨著土壤深度的不同而形成濃度梯度。

在土壤環境中，重金屬多半存在於有機物、鐵錳氧化物、硫化物上，當這些化合物因氧化還原反應而發生溶解作用時，重金屬也隨之由固相中釋放至液相中，亦可因吸附或沉澱等作用而被土壤粒子固定於表面。

7. 轉變作用

污染物之物種(species)發生改變，改變方式包含下列 4 項：

- (1) 無機污染物之水解或錯合反應。
- (2) 無機污染物之氧化還原反應。
- (3) 無機污染物之生物分解反應(微生物)。
- (4) 有機污染物之非生物分解反應(水解及光分解及揮發作用)。

(二) 重金屬污染物與土壤結合力之比較

重金屬污染物在土壤中的型態可細分為以下 6 種不同的型態，其與土壤的結合力並不相同，這個性質影響了重金屬污染物在土壤中的移動性。

1. 水溶性部分(最弱)：最容易溶解於環境中，危害最大。
2. 可交換性(最弱)：最容易溶解於環境中，危害最大。
3. 有機物錯合性：部分可被微生物分解後溶解於環境中，危害不可忽視。
4. 碳酸鹽鍵結性：此型態的重金屬在土壤中的移動性不高，但仍能夠被植物吸收利用。
5. 氧化物鍵結性：此種型態的重金屬被固定於土壤的鐵錳氧化物中，移動性低且植物也難以吸收利用，須經由化學、微生物作用或 pH 值較低的狀態下才會提高其移動性。
6. 結晶構造鍵結性(最強)：最難溶解於環境中，幾乎無害。

(三) 與重金屬污染物宿命有關之土壤性質

1. pH 值影響污染物之溶解度，大部分的金屬離子在 pH5 以下的土壤中溶解度較高。
2. 有機物含量污染物主要之吸附作用之一，土壤有機物含量越高越容易形成錯合物，對環境危害越少。
3. 黏粒含量

污染物之吸附位置及轉變之主要部分，土壤黏粒含量越高越容易被吸附固定，對環境危害越少。

4. 質地等級

影響土壤之通氣與排水及污染物之移動、吸附及轉變，砂質地之土壤，通氣與排水越好，污染物之移動越快。黏質地之土壤，通氣與排水較差，污染物之移動不易，較不易污染環境及地下水。

5. 黏土礦物種類

影響污染物移動及吸附，不同黏土礦物種類有不同之吸附量及吸附位置，因此會影響污染物之吸附量及未來之宿命。

6. 污染物之特性與污染情況

重金屬鉛較不易溶解及移動，不易污染農作物之品質及污染地下水。重金屬銅易與土壤中之有機物質形成錯合物，如有機物少則易溶解及移動於土壤中，較易污染農作物之品質及污染地下水。重金屬鎘與鋅則在一般土壤條件下，易溶解及移動於土壤中，較易污染農作物之品質及污染地下水。

二、地下水中重金屬污染物反應機制

污染物在地下水中會進行各類不同的反應，包括物理、化學與生物等反應，並會影響污染物傳輸速度及總量，這些反應包括：

(一) 吸附反應(遲滯作用)

重金屬污染物會與含水層中的土壤吸附(adsorption)，導致傳輸的速度減慢，這種現象稱為遲滯作用(retardation effect)。此外，帶正電的金屬離子更因大部分土壤表面是帶負電，因此二者間之吸附力更強。

(二) 化學反應

污染物在含水層中可能發生的化學反應包括各類水化學的氧化還原反應。

(三) 生物反應

含水層中有各式各樣的微生物，在適當的條件下，微生物可利用污染物進行代謝反應，包括好氣與厭氧反應。

參考文獻

1. 經濟部工業局，金屬表面處理業土壤及地下水污染預防與整治技術手冊，民國 94 年 12 月。
2. 經濟部工業局，半導體業土壤及地下水污染預防與整治技術手冊，民國 94 年 12 月。
3. 經濟部工業局，印刷電路板業土壤及地下水污染預防與整治技術手冊，民國 94 年 12 月。
4. 土壤及地下水污染整治法(<http://w3.epa.gov.tw/epalaw/docfile/144050.doc>)。
5. McGrath, S. P., Smith, S. 1990. Chromium and nickel. Heavy metals in soils. B. J. Alloway. New York, John Wiley and Sons: 125-150.
6. 美國環保署 IRIS 網站資料(<http://www.epa.gov/iris/subst/0144.htm>)。
7. Kotas, J., Stasicka, Z. 2000. Chromium occurrence in the environment and methods of its speciation. Environmental Pollution. 107: 263-283。
8. 美國環保署 IRIS 網站資料(<http://www.epa.gov/iris/subst/0368.htm>)。
9. Baker, D. E. 1990. Copper. Heavy metals in soils. B. J. Alloway. New York, John Wiley and Sons: 151-176.
10. Kiekens, L. 1995. Zinc. Heavy metals in soils. B. J. Alloway. New York, John Wiley and Sons: 263.
11. Alloway, B. J. 1995. Heavy metals in soils. New York, John Wiley and Sons: 102.
12. Davies, B. E. 1995. Lead. B. J. Alloway. London, Blackie Academic and Professional.
13. Ma, Q. Y., Logan, T. J., Traina, S.J. 1995. Lead immobilization from aqueous solutions and contaminated soils using phosphate rocks. Environmental Science and Technology .29: 1118-1126.
14. Gnandi, K., Tobschall, H. J. 2002. Heavy metals distribution of soils around mining sites of cadmium-rich marine sedimentary phosphorites of kpogame and hahote. Environmental Geology. 41: 593-600.
15. Cullen, W. R., Reimer, K. J. 1989. Arsenic speciation in the environment. Chemical Reviews. 89: 713-764.
16. Horowitz, A. J., Elrick, K. A. 1987. The relation of stream sediment surface area, grain size, and composition of trace element chemistry. Applied Geochemistry 2: 437-451.
17. Han, F. X., Banin, A., Kingery, W. L., Triplett, G. B., Zhou, L. X., Zheng, S. J., Ding, W. X. 2003. New approach to studies of heavy metal redistribution in soil. Advances in Environmental Research. 8: 113-120.

第三章 土壤及地下水污染預防與監測

由於土壤及地下水污染會影響企業的形象與商譽，因此解決此問題的最佳方案即為盡量避免污染土壤與地下水，也就是做好污染預防工作，從源頭上管制污染物使其不進入土壤及地下水。土壤及地下水污染來源包括「氣相」的空氣污染物、「固相」的污染物、及「液相」的污染廢液與廢水，因此做好空氣污染防制、廢水處理、廢棄物貯存與處置工作，並加強廠區工安管理以避免意外事件，加強監測土壤及地下水的品質，切斷污染物進入土壤及地下水的途徑，就有很大的機會達到污染預防的目標。本章將分別就廠內環境管理及污染評估、工廠污染預防措施、土壤及地下水環境品質計畫研擬及土壤及地下水污染緊急應變計畫研擬等4個部分，說明如下。

3.1 廠內環境管理及污染評估

3.1.1 環境管理

工業污染和災害所導致的公害事件，不僅易引發民眾的嫌惡心理因素，圍廠抗爭，亦可能危及勞工健康，進而影響工廠的運作。如工廠經環保機關公告為土壤及地下水污染場址時，對企業經營的影響與衝擊更大，妨礙土地利用，減低銀行融資意願。為謀求事業永續發展，企業宜建置環境管理與查核系統，並納入土壤及地下水污染預防與整治，以長期、持續有系統的監督並考核企業內部環境管理績效。

一、環境風險管理

企業應自行評估工廠運作所可能產生之環境風險，建立環境風險管理機制，企業可參考下列原則評估工廠發生土壤及地下水污染之風險：

(一) 高風險

1. 缺乏有效控制污染物滲漏與洩漏至環境的基礎設施，如：
 - (1) 地上儲槽未設置防溢設施、截流溝、緊急應變設備等。
 - (2) 未設置收集或防止危害性物質污染地下水體與土壤之設備或措施，如未於油品或化學品可能洩漏地區或逕流水易含有油污之雨、排水系統處，設置陰井或油水分離系統。
 - (3) 危害性物質之專門貯存場所未能避風、擋雨、地面堅固及設置二次阻絕設施。
2. 無法預防與偵測污染物滲漏或洩漏至地下環境，如：
 - (1) 危害性物質運作時，應避免直接接觸土壤，液態物質未貯存於二

次阻絕系統內。

(2) 未於危害性物質運作或貯存區周圍設置測漏設備或地下水監測井。

(二) 中度風險

1. 在工廠運作管理上，環境風險管理責任不明確，如：

(1) 防溢設施、截流溝未指派專人負責巡視、檢視及定期保養維修。

(2) 洩漏物未指定專人負責清理。

2. 管理上，未有效提供最新工業標準與法令規定。

(三) 低風險：不符合良好工業實務(good practice)，但導致環境危害之可能性低。

二、土壤污染風險管理案例介紹^[1]

日商 TDK 公司將工廠土地發生土壤污染風險的評估標準與結果納入公司環境風險管理系統中，該評估標準期能確認出該公司內部土壤污染預防工作的優先順序，以有效地執行環境風險管理的工作。

自 2001 年起，該公司旗下工廠於關廠或遷廠時，進行土壤調查，對於發現污染的工廠則進行整治，2004 年完成 1 家工廠的整治工作，2005 年則進行 2 家工廠的整治工作，如表 3-1 所示。

表 3-1 TDK 公司 2004 年土壤污染整治情況^[1]

工廠名稱	關廠或遷廠時間	調查項目	調查結果概要	整治方法	整治進度
TDK 由利本庄第二工廠舊址	2004 年 10 月	重金屬	廠內部分土壤鉛超過標準	移除處理被污染土壤	2004 年 10 月完成
市川工廠舊址	2004 年 1 月	重金屬	廠內部分土壤鉛超過標準	移除處理被污染土壤	2005 年開始整治
成田工廠	營運中	重金屬	地下水中硒超過標準	地下水抽出處理(pump and treat)	2005 年 4 月開始整治

3.1.2 污染評估

工廠運作可能造成污染的污染物種類，工廠所處地理位置的水文地質特性及可能的污染傳輸途徑，均是污染評估的重要考量，包括監測井的設計與環境調查評估的程序。

一、污染源

工廠要執行土壤及地下水污染預防工作，首先需由工廠本身之運作特性、潛在污染源及土地使用情形開始瞭解，進一步針對廠內可能具污染潛勢之區域，於平時特別注意並予記錄，以減少可能污染之產生。工廠可能的土壤及地下水污染源，包括：

- (一) 製程反應槽洩漏、管線破裂。
- (二) 地上或地下儲槽洩漏。
- (三) 油品與化學品裝卸。
- (四) 廢污水集水池、污水坑與廢水處理場。
- (五) 雨、排水系統。
- (六) 有害事業廢棄物暫存區。
- (七) 有害事業廢棄物非法棄置、掩埋。
- (八) 化糞池。

二、工廠水文地質特性

利用地質鑽探及設井所取得的資訊，可以瞭解及描述工廠水文地質的特性，包括工廠的地質與地層特性，以及定義水文地質特性，如地下水坡降與流向。於進行初步污染評估或調查時，如廠區內未曾進行地質鑽探或設井工作，可參考政府機關調查之區域性水文地質或鑽探資料，如表 3-2 所示，瞭解工廠的水文地質特性。

含水層中砂及黏土的產狀、層面及接觸面的關係是影響污染物傳輸的重要因素，薄層黏土會使地下水水流分離、減緩或改變其方向，進而使污染團向水平及垂直方向延伸。地下水水質因流過污染區域或不同質地的地層有所改變，而未受污染的工廠，可能會因上游工廠的污染源，而污染地下水。污染物的移動與擴散的時間愈長，污染的範圍愈大，污染評估或調查的範圍也變得更大、更複雜、更昂貴。

表 3-2 政府機關水文地質資料內容及來源

項目	資料內容	來源
地質	- 場址所在地地質圖 - 地質狀況描述	- 經濟部中央地質調查所鑽探資料 - 經濟部中央地質調查所網站(區域性地質) - 水利署「水文水資源資料管理供應系統」水資源資料查詢
地表水水文	所屬河川流域、水位、流速、流量	- 台灣河川流域圖 - 水利署「水文水資源資料管理供應系統」水資源資料查詢
地下水水文	- 附近區域水文地質剖面圖 - 地下水流向之季節變化 - 地下水水位面之季節變化 - 地下水流速、導水係數、孔隙率 - 含水層型態、厚度、範圍	水利署「水文水資源資料管理供應系統」水資源資料查詢
地下水使用情形	- 附近民眾使用地下水情形 - 附近其他地下水抽水井汲取狀況	水利署「水文水資源資料管理供應系統」水權資料查詢

土壤鑽孔及監測井設置可取得工廠基本的水文地質資料，設置監測井時可取得土壤柱狀圖及化學分析採樣資料。若欲取得場置性地下水水力坡降及流向之資料，則至少須設置 3 口地下水監測井，其中 1 口監測井須設於地下水之上游，另 2 口設置於地下水之下游。

三、重金屬在環境中的傳輸

重金屬污染物的移動除了受到地下水流速、土壤粒徑、孔隙率等土壤性質之影響外，重金屬是否能被土壤吸附，以及吸附的強度，影響移動速度甚大。通常吸附力愈強，則重金屬愈易留在土壤顆粒上，故移動慢。由於土壤顆粒多數帶負電荷，因此帶正電荷的重金屬離子，如鉛、汞、鎘、鎳、鈷等，易被土壤吸附而不易移動，而逐漸於土壤表面或洩漏處形成累積的狀況。此外，重金屬進入土壤後，會與土壤中的有機物或微生物體形成穩定錯合物，但也可能被小分子有機物鉗合住而帶著離開土壤。此外，氧化與還原作用會使重金屬溶解度降低或升高，而影響其在土壤中的停留時間，通常重金屬污染物在還原態下移動較快。

四、場址污染評估

企業對瞭解其工廠、作業活動及併購案有關環境議題之興趣日益提高。這些環境議題與相關商業活動結果可藉由使用場址與組織環境評估 (Environmental Assessment of the Site and Organization, EASO)^[6] 或環境場址評估 (environmental site assessment, ESA) 之標準方法評估。該等評估可

於作業活動中，或於資產併購或撤資(divestiture)時進行，並可作為更廣泛商業評估的一部分，以釐清及保護企業本身的權益。近年來，因 RCA 的案例，部分國內金融機構對不動產之抵押貸款有了「污染預防」的考量與要求，以避免抵押之不動產因污染問題而失去抵押之價值^[7]。

(一) 污染評估之目的

執行土壤及地下水污染估與調查之目的，包括：

1. 背景調查。
2. 潛在污染源調查及確認。
3. 污染確認調查。
4. 污染範圍調查。
5. 基本調查。
6. 特殊目的(如環保機關/民意之考量)。
7. 早期預警系統。

(二) 污染評估之方法

初步污染評估旨在確認可能之污染源、污染物種類、傳輸途徑及潛在受體，以作為工廠後續污染預防措施、污染調查或早期預警或監測系統規劃之用。

參考美國材料及試驗協會(American Society for Testing and Materials，以下簡稱 ASTM)第一階段場址評估(ASTM E1527)^[8]，初步污染評估之調查，至少須包括下列工作：

1. 工廠之土地使用歷史及目前使用狀況。
2. 污染物移動路徑評估。
3. 場址所有人及員工訪談。
4. 區域地質及水文地質調查。
5. 敏感受體調查。
6. 工廠及其周圍土地使用狀況勘察。
7. 相關環境報告之審閱。
8. 場址相關紀錄之審閱。

執行工廠初步污染調查工作之人員需有豐富的土壤及地下水相關知識及實務經驗，否則調查結果可能無法明確評估工廠本身及附近地區之潛在污染源，進而誤導後續工作的規劃，或誤判場址的污

染狀況，進而造成企業本身的損失。

3.2 工廠污染預防措施

由於國內各項環保法規已趨完整，環保觀念亦趨於成熟，再加上民眾環保意識高漲，近年來除了少數不肖業者故意棄置或排放污染物，絕大部分的土壤及地下水污染事件均為在業者不知情的狀況下，或因工廠發生意外事件所發生，其中又以地下儲槽或管線洩漏最常發生。

一般而言，工廠要執行土壤及地下水污染預防工作，首先需由工廠本身之運作特性、潛在污染源及土地使用情形開始瞭解。本節將分別就污染預防管理原則與污染預防措施等 2 個部分，說明如下。

3.2.1 污染預防管理原則

產業所產生的污染物，如未妥善處理，將造成環境污染。業者宜依工廠的運作特性，將土壤及地下水污染預防納入工廠之環境管理系統中。

一、污染預防基本原則

土壤及地下水污染預防管理之基本原則如下：

- (一) 承諾採購(affirmative procurement)：使用替代品、安全與可回收之原物料。
- (二) 減少水的使用，或使用乾式製程。
- (三) 減少或避免雨、排水系統流過廠區、貯存區或高污染潛勢區。
- (四) 廢棄物回收、利用。
- (五) 隔離潛在污染源傳輸至土壤、地下水之途徑。
- (六) 污染預防與緊急應變之職工訓練。

二、污染預防自我體檢

土壤及地下水污染預防應先經過妥善的規劃，以便認識問題的本質，研擬對應的對策和方案，工廠可依下列程序自我體檢，並研擬對策與方案：

- (一) 瞭解有關污染防治之環保法令與相關規定。
- (二) 自評：工廠要執行土壤及地下水污染預防工作，首先需由工廠本身之運作特性、潛在污染源及土地使用情形開始瞭解，進一步針對廠內可能具污染潛勢之區域，於平時就特別注意並予記錄。
- (三) 納入工廠環境管理系統。
- (四) 研判污染問題的防治方案。

(五) 防治方案評估與衡量成本效益。

三、洩漏預防與管制計畫

工廠自行評估廠內運作有污染洩漏之虞時，宜針對廠內潛在污染源制定洩漏預防與管制計畫，計畫內容可包括：

- (一) 設備設計：如儲槽及管線材質規格，鋪設 Epoxy 防漏。
- (二) 操作程序：如化學品置放、貯存及運作作業管制。
- (三) 預防保養技術。
- (四) 建造技術：明管、防震設計。
- (五) 職工訓練。
- (六) 洩漏應變能力。
- (七) 替代品與替代製程。
- (八) 新技術的應用。
- (九) 調整廠區或設備配置。
- (十) 洩漏預防管制措施與計畫。
- (十一) 有害事業廢棄物清理應變計畫。
- (十二) 地面逕流與入滲管制系統。
- (十三) 工廠地理位置與使用分區。

3.2.2 污染預防措施

廠內建立明確的污染預防措施，是達成土壤及地下水污染預防目標最簡單且最有效的作法，業者可朝物料管理、有害事業廢棄物貯存、儲槽管線定期維護與檢測、預防儲槽管線洩漏管理措施與預防水質污染擴散等方向著手，分述如下：

一、物料管理

工廠本身所使用的原物料種類極多，且多數化學品原物料本身即具毒性或危害性，所以有效管理化學品原物料，是降低環境污染的關鍵。針對廠區內的原物料管理上，提供下列管理要點以供參考：

- (一) 廠區內化學品的存放，應有特定的場所或貯放方式，室外避免放置化學原料、廢棄物、空桶及閒置設備。
- (二) 化學品包裝應完整，且應有適當的標示(品名、保管人、危害性等)，並備妥相關之物質安全資料表(MSDS)資料文件。

- (三) 人行通路不得置放化學物質，尤其是具危害性化學物質、危害性氣體及易燃易爆物質等。
- (四) 開封過的原料應加蓋或袋口捆束，防止粉塵、原料逸散或揮發等。
- (五) 化學品貯存應注意相容性問題，不相容物質不可放在一起，以避免發生爆炸、火災等意外事故；易燃物質應遠離火源。
- (六) 除正常情況外，應考慮在異常狀況發生時，原物料有傾倒、破裂、撞擊、震動等之可能性，以及發生該等情事時對環境可能的影響。

在工廠作業面的管理上，提供參考如下：

- (一) 工作場所應力求整潔，地面上不可有散落的原物料、油污及廢棄物。
- (二) 工作場所內，原物料、廢棄物及中間產品應區隔放置，並進行妥善標示。
- (三) 工作場所內各類設備或裝置應能適當的維護，以防止異常操作，並避免不正常的廢氣、廢機油或其他污染情事發生。

二、有害廢棄物貯存

在廢棄物貯存方面，有害事業廢棄物與一般事業廢棄物必須分開貯存，且所有的貯存設備都要有明顯的中文標示，貯存的容器與廢棄物必須相容，以防發生容器破裂或廢棄物溢出的情形。貯存設施必須考慮如何防止地表水的入滲。如果貯存設施不可避免會有廢水、廢氣、惡臭等污染的產生，必須妥善的收集並處理以防止對於環境的污染發生。且有害事業廢棄物應注意該項廢棄物貯存期限以 2 年為限，如果貯存時間會超過時限必須取得地方主管機關同意。廢棄物的分類與貯存方式應該要依照其特性資源回收與清理的方法與來決定貯存的容器，並考量廢棄物的相容性。在內襯的材質選擇上，必須依照廢棄物的性質去使用合適之容器或儲槽之材質。如果為大型儲槽，還必須考慮周圍環境與受撞擊、地震等外力時會造成的傷害，來決定儲槽之設計與材料。防止廢液之洩漏也是十分重要之課題，大型的儲槽應該設有液位量測、液位計與防止洩漏等裝置，以便能即時察覺異常或於意外發生時切斷廢液繼續流入。為了預防儲槽發生洩漏時所造成的環境污染，一般都會於儲槽外加設洩漏液收集設施及超過總容量 10% 以上的暫存系統，且必須定期量測儲槽之壁厚，以防止洩漏之發生。

三、儲槽管線定期維護與檢測

工廠應訂定管理規則、規定及要點，由現場單位執行定期維護與檢

測廠內所有儲槽管線。

(一) 儲槽

1. 定期檢查槽體是否有洩、滲漏之情形；發現洩漏、腐蝕或功能降低時，應考量修護，必要時更換儲槽。
2. 檢查槽體基座、連接處、被覆或塗層、防溢堤壁體與管線系統定期維護相關零件、閥門與設備，避免失去功能。
3. 暴雨、地震或大量洩漏時(後)，檢查露天儲槽擋油堤或防溢堤沖刷與溢流的情形。
4. 監測：定期巡查、自動檢查、監測系統，如漏油偵測器、閉路電視監視系統(CCTV)...等。
5. 定期進行非破壞檢測如陰極防蝕接點檢查、試壓等。

(二) 管線

1. 地面產線

- (1) 避免機械性損壞，地面管線應有適當的支撐與標示。
- (2) 為降低破裂所造成洩漏之影響，可裝置低壓偵測器(low-pressure sensor)與安全停機閥門(safety shut-down valve)。

2. 地下管線

- (1) 任一段管線可目視時，應檢視其外觀是否有損壞之情形，如有鏽蝕時，應進行檢測或進行矯正。
- (2) 管線新建、修改、重遷或更換時，應進行檢查、測漏與試壓。

3. 腐蝕預防(含內部及外部)

陰極防蝕電位量測、緊密電位檢測、智慧型 PIG 檢測、管線更新與記錄保存。

4. 巡查

- (1) 注意管線週邊地形、地物之變化。
- (2) 廠內施工時，應確認管線位置是否在施工範圍內並告知施工單位。

四、洩漏預防

在洩漏預防方面，工廠應檢視製程槽體與管線的配置情形，擬定可採行的預防方法。以電鍍業為例，常見的電鍍工廠洩漏的地方包括電鍍槽體、過濾機等附屬設備、廢水收集管線與處理系統、藥液貯存桶等 4

大類，其常見的預防方法如表 3-3 所示。

表 3-3 電鍍業常見的預防洩漏方法^[9]

項目	預防方法
電鍍槽體	· 使用耐蝕材質 · 加強維修保養工作 · 避免槽體受損 · 定期汰舊換新
過濾機等附屬設備	· 過濾機之水管接頭使用耐酸鹼材質套管 · 過濾機之水管高於電鍍浴槽以避免虹吸作用 · 儘量降低接頭數目，以減少洩漏機會 · 固定過濾機的軟管，避免洩漏 · 少量外洩之機油或過濾液需以桶子承接 · 設備定期維修保養
廢水收集管線與處理槽體	· 避免廢水收集管線受碰撞，於必要時加以覆蓋保護 · 減少管線接頭處 · RC 或磚造處理槽體以環氧樹脂塗裝或內襯 FRP 等防蝕材質，以防止微細裂縫 · PE 等槽體應加以補強，防止槽體變形而造成洩漏
藥液貯槽(桶)	· 儲槽(桶)應減少接頭處，以減少洩漏 · PE 等材質之儲桶構造應適當補強，防止其槽體變形而造成洩漏 · 選用適當儲存材質之儲槽(桶)

五、預防水質污染擴散

國內主要的土壤重金屬污染事件多與水質污染有關，且多肇因於受污染地區附近的工廠透過地區灌溉渠道之引水，所造成的農地污染。國內農田重金屬污染案例，包括桃園縣高銀化工公司鉛鎘污染案，桃園基力化工公司鎘污染案，彰化縣和美鎮東西二圳重金屬污染案，彰化縣花壇鄉白沙村染整、電鍍污染案，雲林縣台灣色料廠 PVC 安定劑、顏料類及硬脂酸鎘污染案，以及台中縣大里市大突寮段農田重金屬污染案等。此外，民國 93 年間，國內南部某電鍍廠亦曾發生因廢水排放管線破裂洩漏，致廢水沿排放管線流至鄰地，造成土壤重金屬污染之案例。因此，我國重金屬土壤及地下水污染防治工作上，應首重水污染防治的工作，並避免重金屬經廢水排放的途徑，擴散至周圍環境中，進而透過食物鏈影響到人體健康。

3.3 土壤及地下水品質監測計畫研擬

當洩漏生於地下環境時，初期不易察覺污染，俟發現時，通常污染情形已達相當嚴重程度。因此，工廠為確切瞭解及掌握廠內地下環境品質，及做

好土壤及地下水污染防治工作，可委託專業顧問或檢測機構辦理土壤及地下水品質監測計畫。

一、計畫目標

工廠為執行土壤及地下水品質監測的功能，主要的目標如下：

- (一) 藉由監測結果，及早瞭解廠區水文地質特性、土壤及地下水可能污染現象。
- (二) 釐清及界定工廠與周圍工廠間之土壤及地下水污染權責。
- (三) 建立長期監測調查系統，作為預警與查核之依據。

二、工作內容

工廠土壤及地下水品質監測計畫之主要工作內容如下：

- (一) 基本資料之蒐集與研判。
- (二) 地質調查與建立水文地質概念模式。
- (三) 土壤可能污染源調查分析。
- (四) 水質監測井之規劃與設置。
- (五) 地下水水質定期採樣與分析，如於豐、枯水期各 1 次。
- (六) 土壤及地下水環境綜合研判分析。
- (七) 後續工作規劃與建議。

工作計畫執行一般分為二階段，第一階段為瞭解地下水位狀況及土壤污染潛勢之普查，第二階段則依第一階段現場調查結果進行詳細調查，並進行土壤及地下水環境品質狀況綜合研判分析，最後提出後續工作規劃與建議。土壤及地下水品質監測計畫工作流程之範例，如圖 3-1 所示。。

有關土壤採樣點及地下水監測井的配置、深度與頻率之規劃、採樣工具選擇、分析方法、快速篩試工具的應用與專業機構的聘請等，請參考本手冊第四章之說明。

三、監測結果處理與分析

工廠土壤及地下水品質監測結果會與環保署於 90 年 11 月 21 日發布之「土壤污染監測基準」、「地下水污染監測基準」、「土壤污染管制標準」與「地下水污染管制標準」之相關項目之基準值或標準值進行比較分析，相關法規可於環保署環保法規網站(網址：<http://w3.epa.gov.tw/epalaw/index.aspx>)下載。

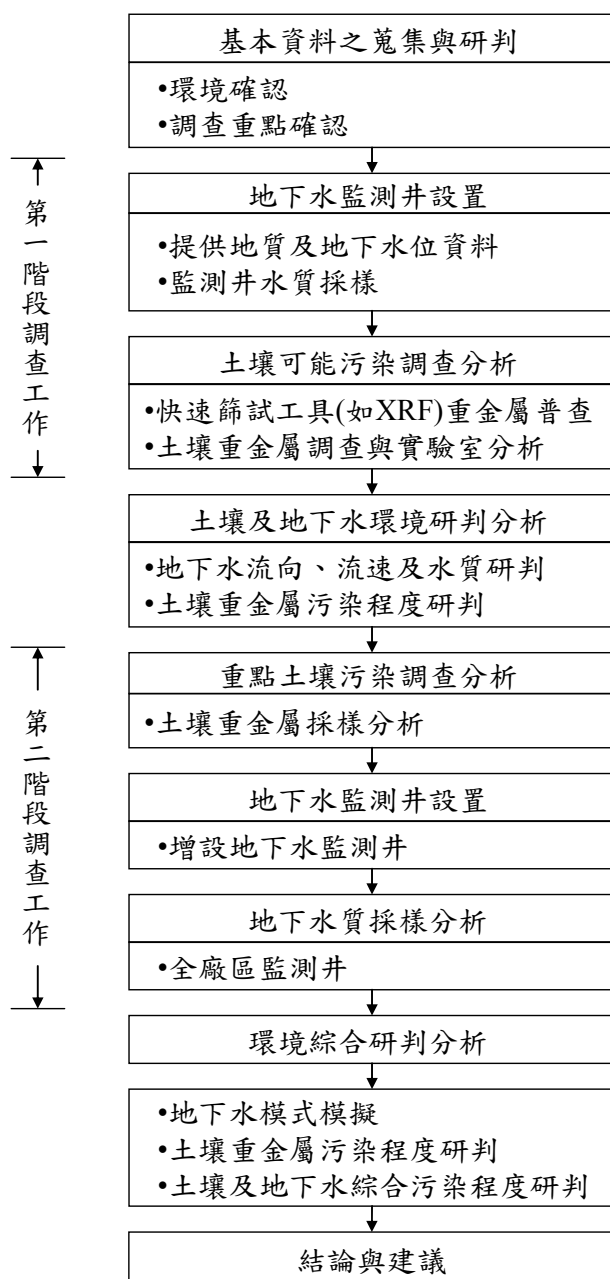


圖 3-1 工廠土壤及地下水品質監測計畫工作流程範例

3.4 緊急應變計畫

3.4.1 因應緊急事件之準備

一、成立應變工作小組

視工廠規模大小成立適當規模應變工作小組，並指定專人負責，以處理意外污染事件及污染預防等相關事宜。

二、通報體系

意外污染事件之通報應納入工廠工安、環保通報系統中，於緊急事

件發生時，現場員工應快速通報。同時，平時應建立與環保工安與警政單位聯繫之管道。

三、應變或搶救器材及設備

- (一) 工廠應自行檢視其作業特性與需要配置土壤及地下水污染應變或搶救器材及設備。
- (二) 工廠應設置應變或搶救器材及設備之種類與數量清單，並辦理定期檢查及保養維護。

四、訓練及演習

- (一) 工廠應將污染物洩(滲)漏污染事件列入年度應變演習計畫，且每年應至少辦理應變演習及教育訓練 1 次。
- (二) 工廠應參考歷次污染物洩(滲)漏污染事件與應變演習情形檢討缺失，並作有效的矯正及預防措施。

3.4.2 緊急應變

土壤及地下水意外污染緊急事件發生時，第一步驟應儘速掌握狀況，包括外洩量或滲漏量、滲漏物質與特性調查、污染源水文地質特性、地理及地形特徵等。此外，評估洩漏與滲漏物質的可能傳輸途徑，迅速找出發生洩漏或滲漏之儲槽、管線或機具設備等，並停止其運作，以有效抑制洩(滲)漏源之持續外洩。同時，於污染擴散與傳輸途徑儘速設置攔截與回收設備，避免污染擴散至廠區外，造成環境公害事件。於土壤或地下水檢測結果發現有超過管制標準值時，應評估是否須進一步進行整治。在現況的掌握上可參考本手冊第 3.3 節「土壤及地下水品質監測計畫研擬」的執行及預警監測結果，瞭解廠區水文地質特性與地下水流向。

緊急應變流程如圖 3-2 所示，工作內容說明如下：

一、現場勘查及初步調查

意外污染事件發生後，應儘速成立應變工作小組並完成現場勘查及初步調查，必要時可聘請專業顧問或顧問機構協助進行，工作的重點包括：

- (一) 取得污染區域之廠區配置圖及工廠鄰近場址之地圖，必要時於現場繪製。
- (二) 審視工廠運作紀錄，包括固定污染源監測紀錄、廢水處理設施監測及運作紀錄、廢棄物清理計畫書及毒性化學物質運作等相關資料，以及土壤及地下水品質監測紀錄。

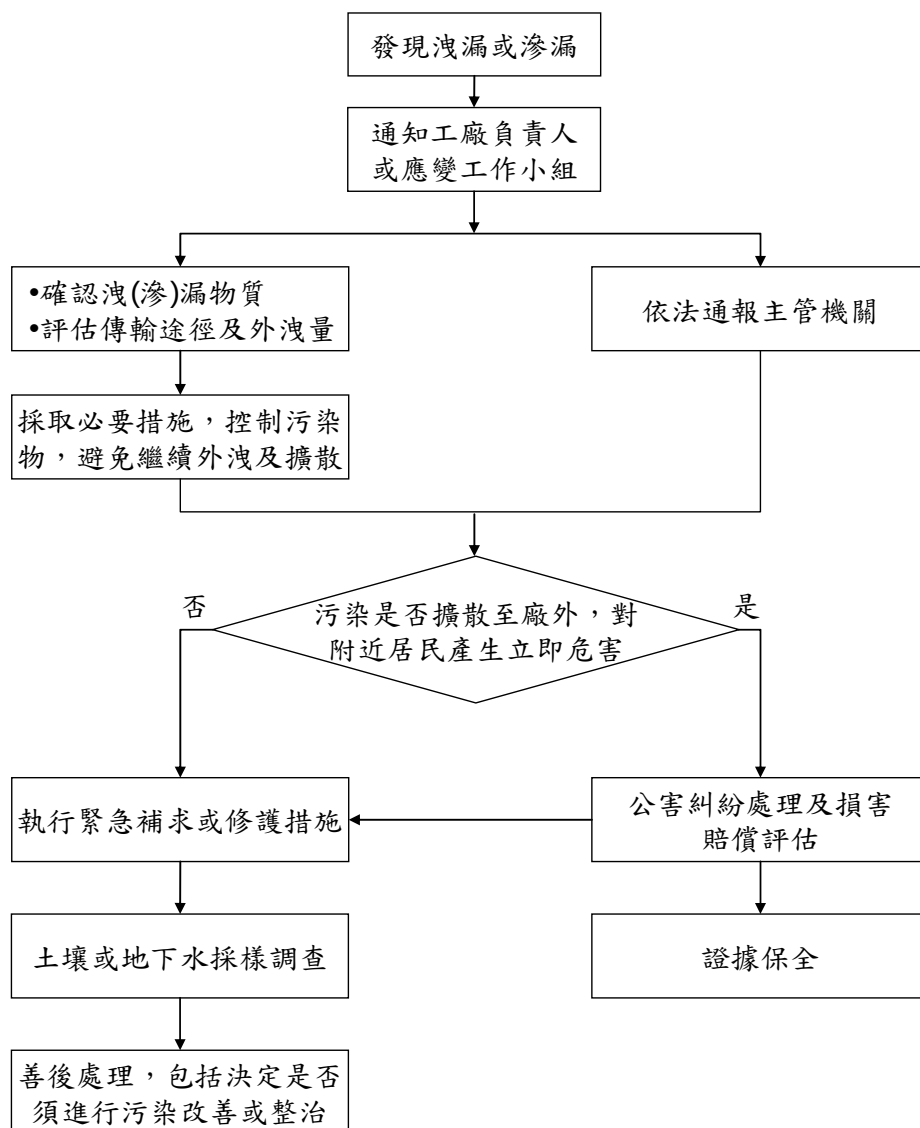


圖 3-2 工廠緊急應變處理流程

- (三) 檢視環境管理計畫評估之高污染潛勢區名單，藉由人員現場勘查、或適當儀器之檢測以確認。除非有明顯證據確認出污染源，後續調查工作不應中斷。另外，洩漏或滲漏可能係 1 個以上污染源所造成。
- (四) 初步調查結果、現場測定儀器或樣品檢驗結果研判污染情形，如需進一步執行污染調查，應訂定調查計畫或採樣計畫書並進行採樣分析。
- (五) 當污染屬實，如有立即危害人體健康及破壞生態環境之虞時，應及早採取緊急應變必要措施。

二、採取緊急應變措施之時機^[10]

土壤及地下水污染事件發生時，應變工作小組應先判定污染情形是否會威脅到人體健康或生態環境，並採取適當緊急必要措施，以降低、

減小、安定、緩和或排除污染物之排放、洩漏或滲漏，或潛在污染物排放、洩漏或滲漏之威脅，或來自兩者之危害結果。採取緊急處理必要措施之時機，包括：

- (一) 污染擴散至廠區外，飲用水供應系統(如污染場址附近居民使用地下水做為飲用水來源)已遭受污染或有污染之虞時。
- (二) 鐵桶、儲槽或容器中之毒性化學物質、有害廢棄物、油品或污染物，有可能導致持續洩漏或滲漏之威脅時。
- (三) 地面上含有高濃度之毒性化學物質、有害廢棄物、油品或污染物，且有移動、影響作業人員健康之虞時。
- (四) 遇到會導致毒性化學物質、有害事業廢棄物、油品或污染物移動或排放之氣候條件時(如颱風、豪雨、洪水等)。
- (五) 中央或地方環保機關政策性決定應採取應變之其他可能的污染物排放時。
- (六) 其他可能危害人體健康或破壞生態環境之情況或因素發生時。

三、緊急應變措施

緊急應變通常要求在發現洩漏、滲漏或監測結果發現超過污染監測基準後即刻展開，主要為收集洩(滲)漏物質、控制污染源、防止繼續擴散的發生，以減輕污染對人體健康與環境的影響。

(一) 污染減輕措施

1. 控制洩漏污染源，如停止疑似洩(滲)漏油槽或管線之使用，或抽除化學品或油品。
2. 設置障礙物(如攔油索、土堤)或土壤表面設置覆蓋物以阻絕污染物擴散及保護環境敏感點。
3. 停止抽用地下水。

(二) 污染物移除作業：移除廠區內高污染土壤，以減少該地區的污染擴散。

(三) 如地下水污染擴散至廠區外時，應提供居民替代飲用水。

(四) 其他相關措施，包括：

1. 污染區以警示帶隔離。
2. 築堤防護。
3. 設置截水溝或攔污索。
4. 管制截排水、污水、廢水系統。

5. 儲槽或管線密閉測試。

6. 覆蓋或遮蓋污染物。

工廠緊急應變所採取的緊急必要措施應講求時效性及機動性，現場工作人員或應變工作小組日常即應加以演練、檢查及熟悉計畫內容，以加強對緊急狀況之應變能力及正確的處理程序，並熟練安全防護器材的使用。

四、善後處理

(一) 儘速檢討發生污染的原因與研討矯正預防之改善對策，包括如進一步調查證實土壤及地下水檢測結果超過管制標準值時，應考量選定後續污染改善與整治方案，以避免殘留污染物的擴散。

(二) 追蹤管制矯正預防之改善對策辦理情形，防範類似污染事件再度發生。

(三) 污染事件經妥善應變處理後，應即行恢復工廠運作之相關作業。

(四) 應變處理所衍生的廢水、油污、廢棄物或受污染土壤應妥善處理。

五、公害糾紛處理及損害賠償評估

(一) 循環保署「公害糾紛處理法」(91.06.26)之規定辦理。

(二) 污染事件發生時應立即拍照蒐證，並確實掌握污染現況及實際損害狀況。

(三) 必要時委託國內學術研究機構進行污染現況調查及損害賠償評估。

參考文獻

1. TDK, TDK Sustainability Report 2005, 2005.
2. USEPA, Ground Water Issue—Light Nonaqueous Phase Liquids, July 1995.
3. Ministry for the Environment New Zealand, Guidelines for Assessing and Managing Petroleum Hydrocarbon Contaminated Sites in New Zealand, October 1999.
4. API, Underground Spill Cleanup Manual (API 1628).
5. USEPA, Estimating Potential for Occurrence of DNAPL at Superfund Sites, January 1992.
6. 中國國家標準, 環境管理—場址與組織之環境評估, CNS 14015, 民國 92 年 11 月。
7. 環保署, 環境場址評估作業行政指引建制計畫, 民國 92 年 4 月。
8. ASTM, Standard Practice for Environmental Site Assessments: Phase I Environmental Site Assessment Process, E 1527-05, 2005.
9. 經濟部工業局, 金屬表面理業整合性污染防治技術手冊, 民國 91 年 5 月。
10. 環保署, 土壤及地下水污染整治工作之規劃及技術支援計畫—第三冊 土壤及地下水污染事件應變處理參考手冊, 民國 93 年 4 月。

第四章 重金屬土壤及地下水污染調查

工廠因土壤及地下水環境品質或污染之不同調查需求，及污染發生的原因與工廠運作現況之不同，其調查策略與採樣方法亦有所不同。本章介紹如何進行污染調查規劃之步驟與內容，包括場址概念模式之建立，說明採樣器具與快速篩試之選用原則及注意事項。當調查工作複雜時，則可考慮聘請在此領域具有專長及經驗之專業機構，本章亦將提供專業機構聘請之原則。此外，並以國內外執行的案例加以介紹說明。

4.1 污染調查應考慮事項

工廠面對土壤及地下水污染調查時，有許多必須考慮的因素，如採樣的目的、樣品的代表性、採樣的限制等。

4.1.1 採樣目的

一、一般採樣目的^[1]

理想的採樣設計務必於採樣時已建立某些目的與假設，或建立場址概念模式。一般採樣目的可歸納為：

- (一) 追查某一污染源的污染特徵。
- (二) 瞭解某一污染場址之污染特性及其污染範圍。
- (三) 判斷某一污染事件其污染層面是否已超過環境涵容能力之閾值(threshold value)。
- (四) 確認高污染區域(hot spot)之位置或污染團之記敘。
- (五) 估算採樣母體的平均污染特性或具有某些污染特性的比例多寡。
- (六) 監測環境污染狀況改變之趨勢。

二、符合法規規定

依土污法相關規定，與工廠有關之土壤及地下水污染採樣、調查工作大致可分為場址背景調查及污染範圍調查 2 種，茲說明如下：

(一) 場址背景調查

土污法第 8 條第 1 項規定：「中央主管機關指定公告之事業所使用之土地移轉時，讓與人應提供土壤污染檢測資料。」，土污法第 9 條規定：「中央主管機關指定公告之事業於設立、停業或歇業前，應檢具用地之土壤污染檢測資料，報請所在地主管機關備查後，始得向目的事業主管機關申辦有關事宜。」因此，中央主管機關指定公告之事業所使用之土地移轉時，或事業於設立、停業或歇業前，應

進行場址土壤污染調查工作，以及早發現工廠內可能之污染來源及污染狀況。此外，產業為避免不慎購入污染土地，或於租用受污染土地後捲入污染糾紛，或出售土地後發生污染責任問題，於租賃、買賣土地前宜進行土壤污染調查，以釐清污染責任^[2]。

(二) 污染範圍調查

土污法第 11 條規定：「...控制場址未經公告為整治場址者，所在地主管機關得依實際需要，命污染行為人提出污染控制計畫。」，同法第 12 條規定：「整治場址之污染行為人或污染土地關係人，得於各級主管機關進行調查評估前，提出土壤、地下水調查及評估計畫，...」，及第 16 條規定：「整治場址之污染行為人應依第十二條之調查評估結果，訂定土壤、地下水污染整治計畫...」，因此，於環保機關完成查證及公告場址為控制、整治場址後，污染行為人均需進行場址土壤及地下水污染調查工作，以研判污染來源及調查評估污染範圍。

4.1.2 採樣的代表性^[1]

所採集到的樣品應具有實質上的證據，以及採樣過程之週全性。包括：

- 一、何處採(where to take samples)：採樣位置的經緯度。
- 二、何時採(when to take samples)：採樣的起始時間和終止時間，以及採樣時間的時段間隔。
- 三、採多少樣品(how many samples to take)：需採多少個樣品及多重的樣品。

4.1.3 採樣的限制^[1]

選擇採樣設計可能的限制有 4 種：

- 一、採樣/分析的限制：包括量測儀器於現場或實驗室技術的靈敏度及選擇性的要求，以及現場技術執行於低溫、高濕度，或於某個季節或天氣型態的樣品採集能力。
- 二、時間/進度的限制：包括季節性的限制，如暴露與季節的關係。
- 三、地理的限制：包括如可能無法採樣，及任何可能妨礙準確識別採樣位置的地理障礙(如河川、圍籬等)。
- 四、經費的限制：需考量整體資料收集程序如從野外樣品採集、運送、保存，到分析樣品、資料輸入及確認等整體成本之支出。

4.2 擬定土壤及地下水污染調查計畫

擬定初步土壤及地下水污染調查計畫時，必須建立場址概念模式(site conceptual model, SCM)，作為擬定土壤及地下水污染調查計畫之依據。

4.2.1 場址概念模式之建立

業者進行工廠地下環境調查前，可先建立場址概念模式，瞭解工廠內之潛在污染物、傳輸途徑與受體間之關係，做為後續地下環境調查與採樣佈點之依據，並以最具成本效益之採樣分析方式，確認污染物之存在。

一、場址概念模式內容與應掌握重點

(一) 場址概念模式之內容

場址概念模式之內容包括場址之地質、地下水流場、污染源、傳輸途徑與受體之圖解與說明等，並含定性與定量的資訊，以作為測試模式與假設的正確性。場址概念模式不斷地透過建立、測試及依調查資料更新與對場址進一步瞭解，所構成的互動過程，並隨著污染場址概念模式的成熟，可增進人們對場址概念模式的信心。

(二) 建立場址概念模式應注意事項^[3]

1. 避免過於複雜。
2. 基於測試及調查資料的更新，可能發現所採用的假設是錯誤的。
3. 假設與不確定性應被清楚的描述與界定。
4. 由於可取得的資料有限，污染場址概念模式不可能完整地描述場址的實際情形，僅為摘要、概念式地描述場址的情形。
5. 部分資訊可能會產生相互衝突的情形，需進一步蒐集資料或進行檢測，予以驗證。

二、場址概念模式之類型

場址概念模式之類型，依所彙整資料之情形可分為敘述、圖示與關聯圖等 3 種方式^[4]，來展現個別污染場址概念模式。摘要說明各類型場址概念模式如下：

(一) 敘述(narrative description)

依資料彙整與研析之結果，以文字敘述的方式，說明場址的污染狀況，內容因資料彙整程度之不同，詳細程度亦有所不同，敘述內容將摘要說明污染源與受體間相互關係與可能產生的影響。對於污染狀況非常單純的場址，以敘述方式即可說明場址污染物傳輸之概念。

(二) 圖示(pictorial presentation)

以圖示方式展示污染場址概念模式，應包括污染場址概念模式主要的構成要素：污染源、受體、污染源與受體間之相關性(如污染傳輸途徑與機制)。污染場址概念模式以圖示方法展示，容易讓人們瞭解場址污染物傳輸的概念，有關油品污染場址概念模式圖示之範例，如圖 4-1 所示。此外，亦有以污染場址水文地質剖面圖，展現土壤、地下水污染與水文地質關係之水文地質概念模式，如圖 4-2 所示。

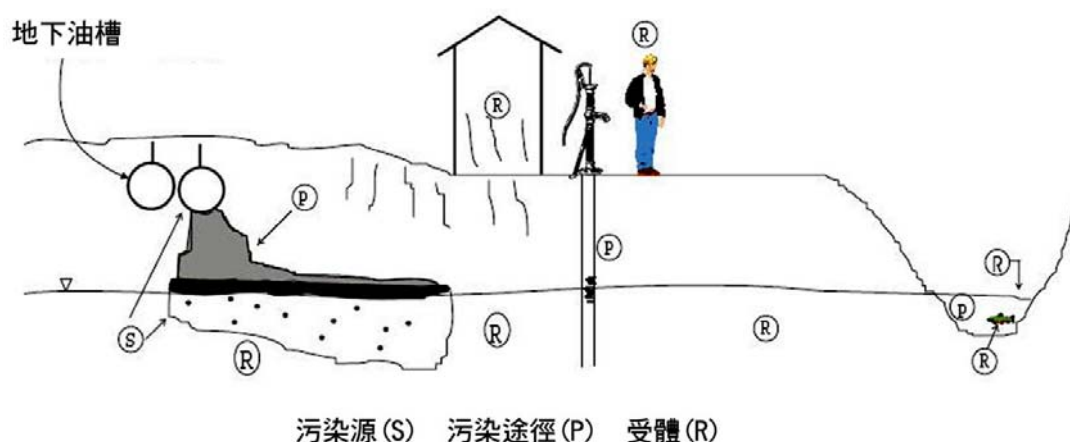


圖 4-1 以圖示方法展示油品污染場址概念模式

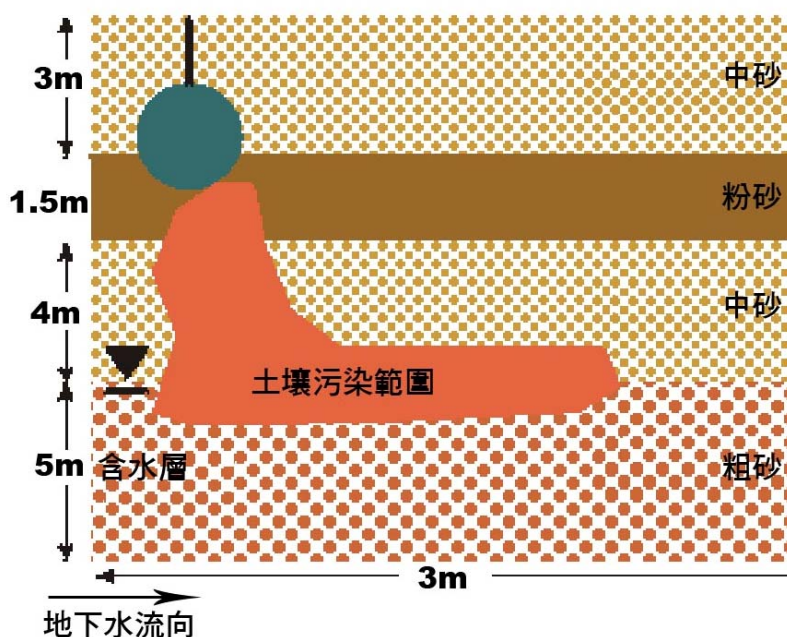


圖 4-2 以水文地質剖面圖展示油品污染場址概念模式(水文地質概念模式)

(三) 關聯圖(graphical presentation)

關聯圖可以簡要地呈現出完整與不完整的污染暴露途徑，圖 4-3 為單一土壤污染源、污染暴露途徑(人類為受體)之場址概念模式。調查過程中可能會確認出間接污染源(secondary source)或間接污染途徑(secondary pathway)，可依實際資料蒐集與彙整情形，該等污染源與污染途徑加入關聯圖中。此類型污染場址概念模式常用於人體健康風險評估作業。

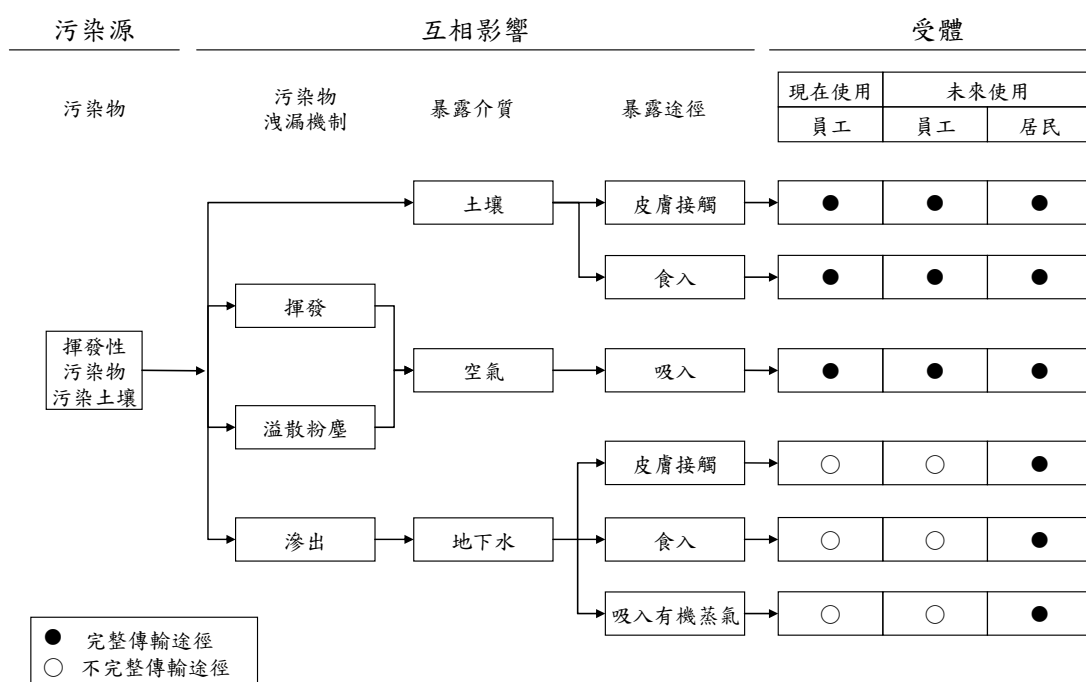


圖 4-3 污染暴露途徑(人類為受體)之場址概念模式

三、場址概念模式之效益

(一) 確認資料缺口，做為後續調查工作方向

由於調查初期取得的資料有限，在初步場址概念模式建立後，尚有許多資料須進一步蒐集與釐清，須透過進一步的文獻資料蒐集，及(或)擬定土壤及地下水採樣分析計畫，以取得調查所需的場址置性資料。

(二) 研判污染流布與污染範圍

由資料蒐集至初步現場調查完成後，調查工作人員除完成建立工廠初步的污染場址概念模式外，並已完成場址配置圖及採樣分析作業，可建立調查初期污染場址概念模式，隨著計畫土壤、地下水污染調查的完成，可進一步更新場址概念模式。將場址配置圖、地

下水等水位線、污染物等濃度線與水文、地質剖面圖等予結合，可以協助研判污染流布與污染範圍，以及土壤及地下水採樣點的規劃。

(三) 提供降低或阻斷污染對環境或人體健康危害之因應措施規劃構想

於場址初步現勘、調查完成後，建立如圖 4.1.2-3 之污染源、傳輸途徑、受體之關聯圖，關聯圖可呈現場址目前、近期與可預見未來土地的使用情形，當確立污染源、傳輸途徑、受體間的關係時，且評估污染會立即或短期內對受體造成影響時，則應採取切斷污染源與受體間傳輸途徑之必要因應措施或進行整治工程，以降低污染對環境或人體健康的危害。

4.2.2 訂定土壤及地下水採樣計畫

採樣為環境分析工作第一階段，最先也是最重要的工作項目之一，所有環境介質最終檢測結果的判定，端賴採樣時是否得到代表性的樣品。土壤及地下水採樣計畫之訂定可以分成下列幾個部分。

- 一、採樣計畫「目的」之確定：採樣計畫目的之確認，可以避免不必要之採樣，進而有效的擬定採樣計畫。
- 二、現場勘察：包含現場勘察之時間、參與人員、所需工具及如何記錄等，現場勘察之判斷及所獲得之資料，可以有效降低不必要之採樣數目，降低執行計畫之費用，達到採樣目的。
- 三、採樣計畫書擬定：以現場探勘之結果，進行採樣計畫之安排及計畫書之擬定，採樣計畫書之內容需包含採樣目的、執行及工作之內容、現場工安衛生、預期進度等部分。
- 四、經費需求之估算：採樣經費主要包含採樣工具購置、車輛運輸、樣品運送、樣品保存等，而這些費用會受到樣品數量及分析項目之影響。
- 五、簽約：確定採樣之數量，並確定採樣之進度。
- 六、採樣前之準備：顧問機構或環境檢驗室採樣人員之準備項目須包含採樣工具、地圖、車輛、路線安排及採樣記錄等。
- 七、現場採樣及前處理：進行現場採樣必須詳細記錄樣品之名稱、採樣時間、採樣人員等，所採集之樣品必須以規定加以保存(如 4°C 冷藏)，並進行必要之品管動作(如野外空白、設備空白及運送空白)，樣品之清點及移交必須確實，樣品之前處理則須注意受污染之問題。土壤及地下水採樣流程分別如圖 4-4 與圖 4-5 所示。

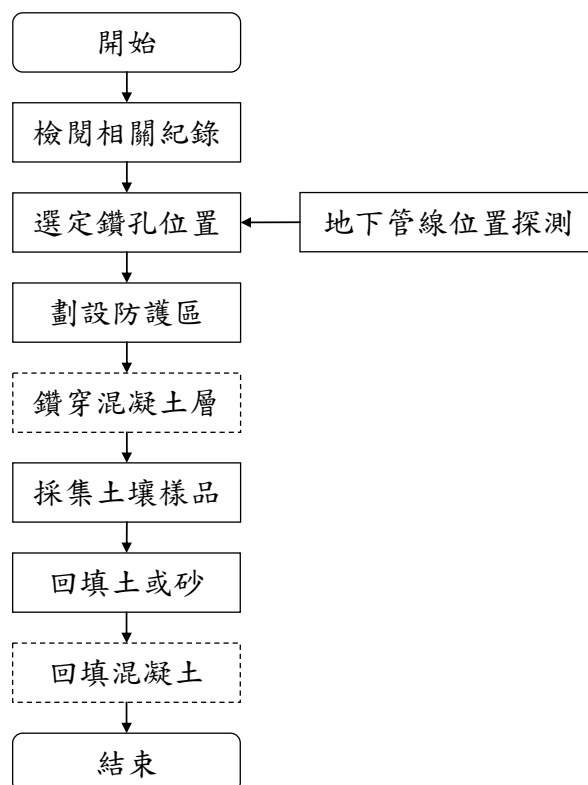
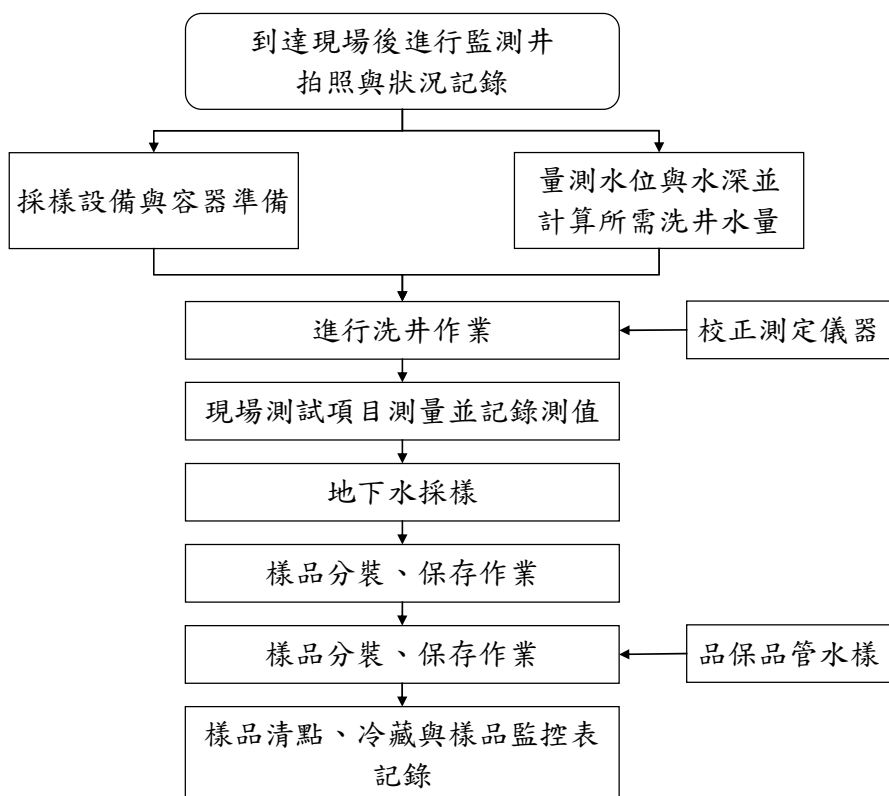


圖 4-4 土壤採樣流程

圖 4-5 地下水採樣流程^[5]

八、實驗室分析：實驗室的品保及品管程序亦是影響檢測結果最終判斷的重要工作。因此，唯有從採樣運送、接收至分析各個階段皆依據採樣計畫之品保規劃書運作，才能得到正確的檢測數據及調查結果判斷。與數據品質相關的事項包括：

- (一) 依特定目的擬定之採樣計畫。
- (二) 採集到代表性的樣品。
- (三) 樣品妥善處理及保存。
- (四) 樣品標示及交接監視紀錄。
- (五) 現場採樣之品保品管措施。
- (六) 合格人員使用適當的採樣工具。

九、數據處理與分析研判：利用品保規劃及統計分析等工具，確認分析數據之可信度。

十、撰寫調查報告書及污染評估：利用分析之結果可以評估是否達到調查目的，得知調查場址之污染情況，並依此結果進行後續工作。

4.3 土壤及地下水採樣方式與檢測方法

事業於進行土壤及地下水污染採樣與檢測時，須依據環保署公告之「土壤採樣方法」、「監測井地下水採樣方法」及「地下水水質監測井設置規範」辦理，茲就採樣工具之選擇、採樣點配置及檢測方法等，說明如下。

4.3.1 選擇採樣工具

依照採樣目的、污染物種類、採樣深度及採樣機具之不同，可以分成淺層土壤採樣、深層土壤與地下水採樣，淺層土壤採樣之深度通常小於 2 公尺，而深層土壤及地下水採樣深度則可能大於 10 公尺。

一、淺層土壤採樣工具

依環檢所「土壤採樣方法」，常用於土壤污染調查之採樣工具包括：

- (一) 採樣鏟(hand-held shovel)。
- (二) 土鑽採樣組(hand-held auger)。
- (三) 劈管採樣器(split-barrel sampler)。
- (四) 薄管採樣器(thin-walled tubes sampler)。
- (五) 活塞式採樣器(piston rod soil sampler):利用採樣器內的活塞造成適當的真空，以採集具流動性的樣品(如湧砂)。
- (六) 雙套管採樣器(dual tube soil sampler):具有內、外二組螺桿，內螺桿前端接採樣襯管，同時直接貫入土中，土樣即進入襯管中。

其中，常用於重金屬淺層土壤採樣調查工具為土鑽(auger)，如圖 4-6 所示，但此種工具僅限重金屬污染土壤採樣分析，土壤之採樣深度包含表土(surface soil，0~15 公分)及底土(subsurface soil，15~30 公分)，最大採樣深度(maximum reliable depth)視地質條件而定約為 2~6 公尺。



圖 4-6 土鑽採樣組及現場使用狀況

土壤採樣方法適用之地質特性及適用之污染物種類如表 4-1 及表 4-2 所示。

表 4-1 土壤採樣方法適用之地質特性^[6]

採樣方法	黏土層	粉砂層	砂層	湧砂 含水層	礫石層	一般土壤 特性
劈管採樣法	✓	✓	✓	×	○	✓
活塞式採樣法	✓	✓	✓	✓	✓	✓
雙套管採樣法	✓	✓	✓	○	○	✓
薄管採樣法	✓	○	×	×	×	○
手動採樣法	✓	✓	✓	×	○	✓

註：依採樣法的普遍性、效率與適用性程度，依序建議：✓屬「推薦使用」，○屬「適用」，×屬「不適用」。

表 4-2 土壤採樣方法適用之污染物種類^[6]

採樣方法	揮發性有機物 (VOCs)	半揮發性有機物 (BNAs)	農藥	重金屬
劈管採樣法	✓	✓	○	○
活塞式採樣法	✓	✓	○	○
雙套管採樣法	✓	✓	○	○
薄管採樣法	○	○	○	○
手動採樣法	×	✓	✓	✓

註：依採樣法的普遍性、效率與適用性程度，依序建議：✓屬「推薦使用」，○屬「適用」，×屬「不適用」。

二、深層土壤及地下水採樣鑽探設備

利用鑽機鑽孔方式進行深層土壤及地下水採樣，利用重鉋、旋鑽、氣鉋等方式鑽孔，鑽至目標深度，再利用採樣設備採集特定深度的土壤樣本，或設置臨時井、簡易井與標準井，採集地下水樣本。鑽機之選擇須考慮水文地質條件、預算、可操作空間等。各式鑽機分別敘述如下：

(一) 直接貫入鑽機(Powerprobe 或 Geoprobe)：鑽孔時不需使用循環流體，其操作狀況如圖 4-7。

1. 使用方法：以氣錘方式鑽孔，孔徑約 1.5-3 吋。
2. 適用地層：土壤粒徑小於採樣器開口直徑一半之地層皆可。
3. 深度：視地質條件而定約在 10~30 公尺。
4. 優點：土壤擾動小，樣品代表性高，如圖 4-7(b)所示。



(a)鑽機



(b)採樣套管

圖 4-7 直接貫入鑽機現場操作狀況

(二) 中空螺旋鑽機：鑽孔時不需使用循環流體，其操作狀況如圖 4-8。

1. 使用方法：以旋轉方式鑽孔，孔徑約 4-8 吋。
2. 適用地層：不飽和含水層。
3. 深度：視地質條件而定約在 20~30 公尺。
4. 優點：操作便利，可於中空鑽頭內直接採樣。



(a)鑽孔



(b)設井

圖 4-8 中空螺旋鑽機現場操作狀況

(三) 鑽堡：鑽孔時需使用循環流體，其操作狀況如圖 4-9。

1. 使用方法：以氣鎚及旋轉方式鑽孔，孔徑約 4-6 吋。
2. 適用地層：適用於難以鑽探地層。
3. 深度：20 公尺至 100 公尺以上。
4. 優點：動量大，速度快，以套管保護孔壁。
5. 缺點：鑽孔時需使用高壓空氣或水；機具較大，搬運成本較高，且需注意土壤交叉污染問題。



圖 4-9 鑽堡現場操作狀況

三、地下水採樣設備

依 94 年 12 月 14 日環檢所修正公告之「監測井地下水採樣方法」(NIEA W103.53B)，地下水污染調查之採樣工具包括貝勒管與抽水泵。分別說明如下：

(一) 貝勒管(bailer)

貝勒管材質以鐵氟龍材質較佳。國內地下水採樣以貝勒管為採樣設備為主，現場操作狀況如圖 4-10。



圖 4-10 貝勒管現場操作狀況

(二) 抽水機^[7]

抽水機須為可調整抽水率並可提供穩定抽水率(0.1~0.5 L/min)，材質應不與待測物發生化學反應或吸附脫附作用，抽水時不致產生氣提、氣曝及濁度增加等現象者為宜，可選用氣囊式或離心式沉水式抽水機。

4.3.2 採樣點配置

土壤採樣點與地下水監測井配置方式，分別說明如下：

一、土壤採樣點配置

依據場址特性、污染情況，常用的土壤污染調查之採樣點配置方式包括：主觀判斷採樣、分區採樣、系統及網格採樣、應變叢集採樣與混合採樣。各種土壤採樣配置方式之比較如表 4-3 所示。詳細規劃設計可參考環檢所公告之「土壤採樣方法」與「環境採樣規劃設計」，相關資料可於環檢所網站(網址 <http://www.niea.gov.tw>)下載。國內工廠土壤採樣以主觀判斷採樣(或環境場址評估)與系統及網格採樣之應用案例較多。

表 4-3 土壤採樣配置方式比較表

採樣方法	執行方式	適用條件
主觀判斷採樣	須由對場址狀況及欲採集樣品性質非常清楚之人員，依據專業判斷選擇採樣。	1. 小區域污染範圍或確知污染源位置。 2. 少樣品數(小於 20 個樣品)選擇性採樣。 3. 有歷史資料可供研判。 4. 供研究使用有時間及經費之限制。
簡單隨機採樣	將調查區域劃分成許多小單位，依序給於連續編號，再依亂數表隨機採樣。	1. 調查區域內污染分布均勻。 2. 樣品數至少 20 個以上。 3. 結果具統計意義。 4. 方法簡單。 5. 採樣準確度及精確度較高。
分區採樣	廢棄物污染性質明顯地分成數層，將調查區區分成數個均質小分區，以各分區面積權重分配採樣數，再進行各小區之(隨機)採樣。	1. 因土壤地質、風向或地下水等變異，造成污染物分布影響時。 2. 已充分了解污染物分布情形，其分層現象明顯。 3. 若每調查區內之差異越小，精確度越高。 4. 可求得各層之估算值。
系統及網格採樣	隨機取出第一個樣品，其後在一定時間或空間間隔下，依序取出其他樣品。	1. 污染物質任意分布或有模糊層化現象時。 2. 屬週期性或定期性採樣作業。 3. 系統/網格採樣依序採樣，故較方便。 4. 污染物分布均勻時，可得較高精確度。
應變叢集採樣	利用初步大範圍的系統調查結果，再逐步趨向高污染區作較細密的採樣，適用於界定污染範圍。	1. 可決定污染物範圍。 2. 較能專注於高污染源區域。 3. 可額外提供觀測特性，增加研究的整體價值。
混合採樣	對個別樣品等量均勻混合，再由混合樣品取出待分析樣品。	1. 綜合簡單隨機採樣及階段式採樣優點。 2. 較節省人力經費。

二、地下水監測井配置

由於標準式監測井設置費用高，無法配置太多採樣品，規劃單位視場址之地下水水文、地質特性、規劃監測井之設置分布，以充分掌握地下水污染狀況。一般工廠監測井配置方式包括，於潛在污染源(如地上型儲槽、地下儲油槽、廢水處理場、有害事業廢棄物貯存設施等)上游設置監測井，以瞭解地下水水質之背景濃度，下游監測井則以瞭解污染物洩、滲漏情形，可檢測出污染物時，則須進一步評估污染狀況，再依污染團分布情形與地質條件，規劃設置地下水監測井配置位置及設置井篩深度。地下水監測井配置範例，如圖 4-11 所示。

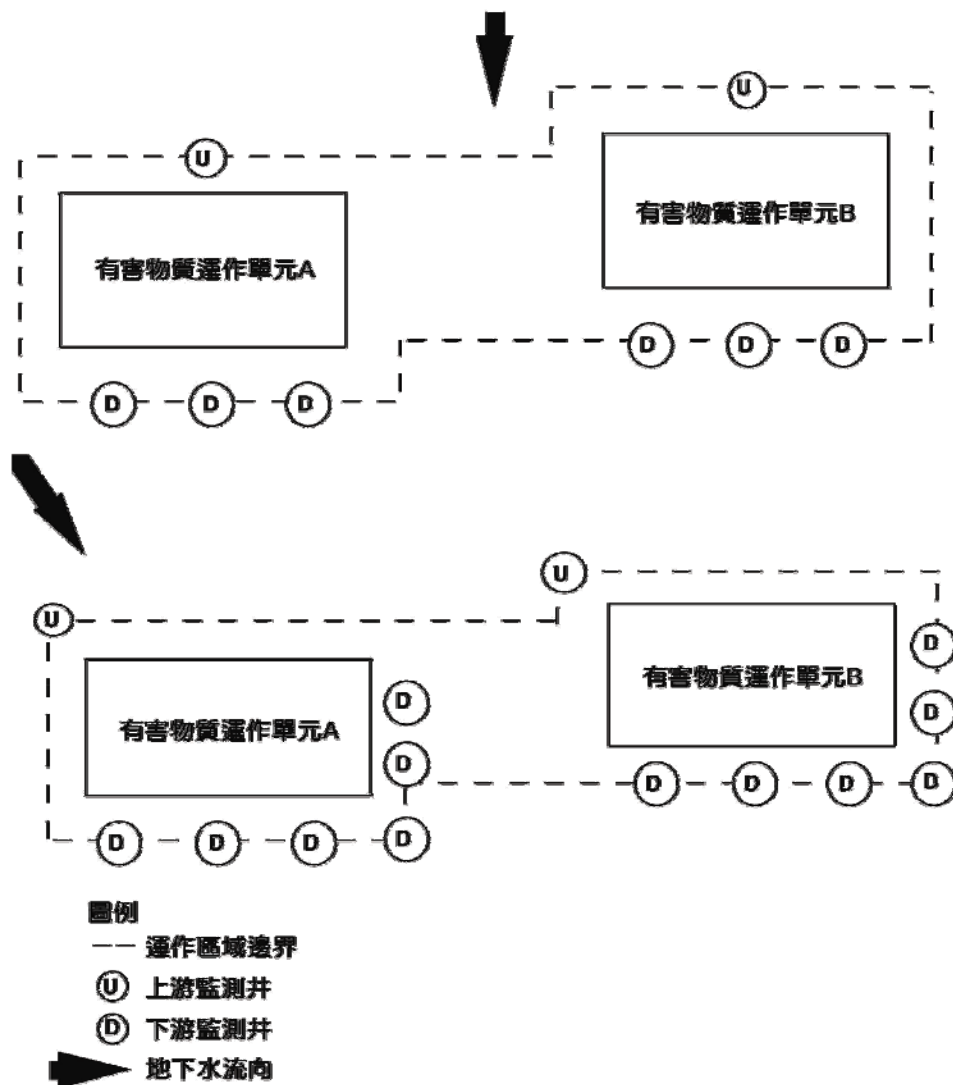


圖 4-11 工廠地下水監測井配置範例^[8]

4.3.3 樣品保存與分析方法

土壤及地下水樣品最少需要量與保存方法、檢測方法，可參照環檢所所公告之標準方法，分別彙整如表 4-4、表 4-5 所示。業者在選擇相關檢測方法時，應上環檢所網站(網址 <http://www.niea.gov.tw>)下載最新的檢測方法，以免誤用。

表 4-4 重金屬土壤及地下水樣品最少需要量與保存方法^[9,10]

檢測項目		最少 樣品量	容器	保存方法	最長保存期 限
土壤	砷、鎘、鉻、 銅、鉛、鎳、 鋅	100 g	玻璃或塑膠袋 (瓶)	室溫	180天
	汞	100 g	玻璃或塑膠袋 (瓶)	4 ± 2 °C 冷藏	28天
地下水	一般金屬 (鎘、鉻、銅、 鉛、鎳、鋅)	200 mL	以1+1硝酸洗淨 之塑膠瓶	加硝酸使水樣之 pH < 2。 (若測定溶解性金屬，須於 採樣後立刻以 0.45μm之薄 膜濾紙過濾，並加硝酸使濾 液之pH < 2)。加酸後之水樣 應貯藏於4 ± 2 °C 下。	180天
	砷	—	以 1 + 1 硝酸 洗淨之塑膠瓶	水樣於採集後應立即添加 濃硝酸使水樣之 pH 值小 於 2。	180天
	六價鉻	300 mL	塑膠瓶	暗處，4 °C 冷藏。	24小時
	汞	500 mL	預先以低汞含 量濃硝酸或超 純濃硝酸(1+1) 溶液洗淨之下 列容器： 1. 石英或鐵氟 龍(TFE)。 2. 聚丙烯或聚 乙烯材質且 具聚乙烯蓋 之容器。 3. 硼矽玻璃材 質之容器。	添加濃硝酸使水樣之 pH 值小於 2，加酸後之水樣宜 貯藏於約 4 °C。或每 1 L 水樣中添加 2 mL 含 20 % (W/V)重鉻酸鉀之低汞含量 濃硝酸或超純濃硝酸溶液 (1：1)，並置於無污染之冷 藏庫(4 °C)中保存。	若水樣中含 數 mg/L 濃度 之汞時，其保 持穩定之期 限為 35 天， 但當水樣中 汞濃度僅為 0.001mg/L 範 圍時，應於採 樣後儘速分 析。

註：請上環檢所網站(網址 <http://www.niea.gov.tw>)，查閱最新公告之檢測方法。

表 4-5 重金屬土壤及地下水檢測方法^[11]

檢測類別	檢測項目	檢測方法
土壤	鎘、鉻、銅、 鎳、鉛、鋅	- 土壤中重金屬檢測方法－王水消化法(NIEA S321.63B) - 石墨爐式原子吸收光譜法(NIEA M113.00C) - 火焰式原子吸收光譜法(NIEA M111.00C) - 感應耦合電漿原子發射光譜法(NIEA M104.01C)
	汞	- 土壤中總汞－冷蒸氣原子吸收光譜法(NIEA M317.01C) - 感應耦合電漿原子發射光譜法(NIEA M104.01C)
	砷	- 土壤中砷檢測方法－砷化氫原子吸收光譜法(NIEA S310.62C) - 石墨爐式原子吸收光譜法(NIEA M113.00C) - 火焰式原子吸收光譜法(NIEA M111.00C) - 感應耦合電漿原子發射光譜法(NIEA M104.01C)
地下水	鎘、鉻、銅、 鎳、鉛、鋅	- 水中金屬檢測方法－石墨爐式原子吸收光譜法(NIEA W303.51A) - 水中銀、鎘、鉻、銅、鐵、錳、鎳、鉛及鋅檢測方法－火焰式原子吸收光譜法(NIEA W306.52A) - 水中金屬及微量元素檢測方法－感應耦合電漿原子發射光譜法(NIEA W311.51B)
	六價鉻	水中六價鉻檢測方法－APDC 螯合 MIBK 萃取原子吸收光法(NIEA W321.51A)
	汞	水中汞檢測方法－冷蒸氣原子吸收光譜法(NIEA W330.52A)
	砷	- 水中砷檢測方法－自動化連續流動式氫化物原子吸收光譜法(NIEA W434.53B) - 水中砷檢測方法－批次式氫化物原子吸收光譜法(NIEA W435.52B)

註：請上環檢所網站(網址 <http://www.niea.gov.tw>)，查閱最新公告之檢測方法。

4.4 快速篩試工具之應用

美國環保署於 1998 年推動以績效為評估基準之檢測系統(performance based measurement system, PBMS)，期使檢測方法選擇具有變通性，加速新的檢測技術之核准，以及發展及使用具經濟效益之方法。^[12]

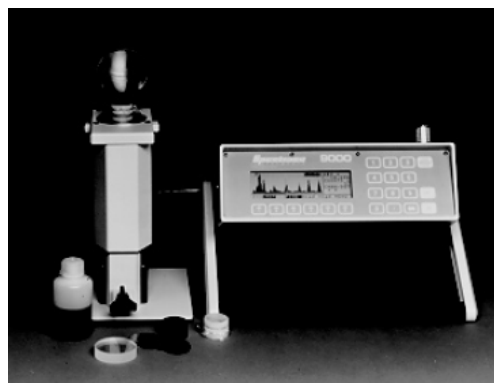
國內傳統重金屬檢測大都藉由傳統實驗室檢測方法，其分析雖相當準確，但相對的也較昂貴、耗時，自 2004 年以來，美國環保署就 10 餘種土壤

重金屬污染現地檢測技術提出驗證報告^[13,14,15]，該等現地檢測技術可在短時間內於現地測得的數據，除可初步篩選及判斷高污染區外，亦可應用於整治階段，快速瞭解整治情形，如業者欲在短時間內，過濾篩選大面積土壤品質時，可考量應用該等技術。茲就重金屬快速篩試技術中，曾在國內應用之 X 射線螢光偵測器(X-ray fluorescence，以下簡稱 XRF)與直接汞分析儀(direct mercury analyzer，DMA)等 2 項重金屬污染土壤現地檢測法，介紹如下：

一、X 射線螢光偵測器(XRF)

XRF 之原理為利用 X-光束照射經前處理後之土壤，激發土壤中重金屬原子，當原子自激發態回到基態時，偵測所釋放出來的螢光，經由分光儀分析其能量與強度後，可提供土壤中重金屬元素種類與含量，具有快速、非接觸、非破壞性及多元素分析等特點。美國使用之各式攜帶式 XRF 如圖 4-12 所示，包括 TN Spectrace 9000、Metorex X-MET 2000、NITON XLi/XLt-700、Scitec MAP Spectrum Analyzer 等。該等 XRF 製造廠，原設計 XRF 係為偵測油漆中的重金屬鉛，之後，再研究改良 XRF 偵測其他重金屬，為偵測不同重金屬物質，不同型式 XRF 機型，一般會使用一種以上的放射源，如 Fe-55、Cd-109、Am-241 或 Cm-244。其中，NITON 公司所生產之 XL 系列 XRF 為國內土壤污染調查作業中較常使用之機型，以 NITON XL 700S 為例，其所使用的放源為 Fe-55、Cd-109、Am-241。

針對我國土壤及地下水污染管制法所管制之重金屬項目，XRF 在無干擾物情形下，其偵測極限如表 4-6 所示。XRF 偵測極限受重金屬種類、偵測器型式、放射源種類及放射源強度、測量時間、基質(如土壤或沉積物)物化特性及原子間光譜等之影響，特別是基質樣品之同質性(homogeneity)對檢測數據的影響最為顯著。一般而言，經數值迴歸分析(regression analysis)後，重金屬 XRF 檢測數據與相關實驗室檢測數據之相關係數，砷、銅、鉛、鋅為 0.90 以上，鉻為 0.70 以上，一般 XRF 之檢測數據會高估鉻濃度之情形。



(a) TN Spectrace 9000



(b) Metorex X-MET 2000



(c) NITON XLi/XLt-700



(d) Scitec MAP Spectrum Analyzer

圖 4-12 各型攜帶式 X 射線螢光偵測器^[16]

表 4-6 XRF 重金屬偵測極限與我國土壤污染監測基準與管制標準

重金屬 項目	XRF 偵測極限 ^[17,18] (mg/kg)	土壤污染監測基準 (mg/kg)	土壤污染管制標準 (mg/kg)
砷	40	30	60
鎘	100	10(食用作物農地之監測 基準值為 2.5)	20(食用作物農地之監測 基準值為 5)
鉻	150	175	250
銅	50	220(食用作物農地之監測 基準值為 120)	400(食用作物農地之監測 基準值為 200)
汞	30	10(食用作物農地之監測 基準值為 2)	20(食用作物農地之監測 基準值為 5)
鎳	50	130	200
鉛	20	1,000(食用作物農地之監 測基準值為 300)	2,000(食用作物農地之監 測基準值為 500)
鋅	50	1,000(食用作物農地之監 測基準值為 260)	2,000(食用作物農地之監 測基準值為 600)

XRF 多應用於土壤污染之現地調查工作，可先篩選出高污染潛勢區，以及整治作業時，施工單位可先行驗證初步整治成效，可節省大量實驗室之檢測費用。以上述 2004 年美國環保署土壤汞污染現地檢測技術驗證報告 NITON XLi/XLt-700 之 XRF 機型為例^[13]，由 2 位技術人員，依據

美國環保署標準方法 Method 6200，檢測 197 組土壤及底泥樣品，平均檢測費用(含人事費)約 60 元美金／樣品(約新台幣 2,000 元／樣品)，可同時檢測 26 種重金屬(含我國法規規定之 8 種重金屬)濃度，相關於國內合格檢測機構之檢測我國土污法管制之 8 種重金屬所需之費用約新台幣 20,000 元，可節省大量檢測費用。此外，由於 XRF 檢測所需的時間短，依前例，NITON XLi/XLt-700 之平均檢測時間(含樣品準備時間)為 5.3 分鐘／樣品。環檢所於 95 年 1 月 18 日公告「土壤和底泥中元素濃度快速篩選方法－攜帶式 X-射線螢光光譜儀分析法」(NIEA S322.60C)，並於 95 年 4 月 15 日起實施。

二、直接汞分析儀(DMA-80)

DMA-80 直接汞分析儀(如圖 4-13)之原理為樣品經乾燥及熱脫附後，使汞從樣品中釋出，熱脫附後之產物經流動氧氣流送至觸媒還原反應器後，被氧氣流載送至含金汞齊器(amalgamator)，其中汞即可被選擇性地補集。接著快速升溫，以放出汞蒸氣，攜帶汞蒸氣的氧氣流最後通過單一波長原子吸收光譜儀光徑上之吸收槽，由 253.7 nm 波長之吸收值(波峰高度或面積)偵測樣品中汞的濃度。

由上述 2004 年美國環保署土壤汞污染現地檢測技術驗證報告^[15]，DMA-80 汞分析儀檢測相同 197 組土壤及底泥樣品，其偵測極限介於 0.049 至 0.068 mg/kg 間；由 1 位技術人員，依據美國環保署標準方法 Method 7473，平均檢測時間約 8 分鐘(包括儀器校正與樣品準備的時間)，平均檢測費用(含人事費)約 35.9 元美金／樣品(約新台幣 1,150 元／樣品)，相關於國內合格檢測機構以冷蒸氣原子吸收光譜法(NIEA M317)檢測汞重金屬，檢測 1 個樣品需新台幣 3,000 元以上的費用而言，採用此法亦可節省大量檢測費用。未來，環檢所公告「固體與液體樣品中總汞檢測方法－熱分解汞齊原子吸收光譜法(M318.00C)」後，此方法因檢測時間短、費用低、偵測極限遠低於國內土壤污染監測基準及管制標準(詳表 4-6)，此外，DMA-80 汞分析儀檢可於野外環境中進行檢測，未來，將較現行傳統檢測方法更具優勢。



圖 4-13 DMA-80 汞分析儀(圖片來源：Milestone 公司網站)

DMA-80 直接汞分析儀為符合美國環保署標準方法 Method 7473，以及符合環檢所「固體與液體樣品中總汞檢測方法－熱分解汞齊原子吸收光譜法(M318.00C)」方法之檢測儀器。DMA-80 直接汞分析儀適用於分析實驗室與野外環境中固體、液體樣品中汞的檢測，可在無需樣品化學前處理情況下，偵測土壤、底泥、底部沉積物、污泥類物質、廢液、地表水、地下水、生物組織中之總汞(有機和無機)的含量。

4.5 土壤及地下水污染調查案例介紹

以下分別就國內重金屬土壤快速篩試、土壤污染調查、土壤及地下水污染調查案例，介紹說明如下。

4.5.1 重金屬土壤快速篩試案例介紹

一、X 射線螢光偵測器調查案例^[19,20]

本調查案例係依國內歷年農地土壤重金屬污染調查結果，選取其中超過農地土壤重金屬含量五級標準之 2 公頃農地，調查農地主要污染物為銅、鋅、鉛與鎳，調查人員以手動式採土器於現地採集不同水平及垂直佈點位置的土壤，將土壤樣品置入夾鏈袋內，以 XRF 先行進行偵測工作，總計偵測 176 個土壤樣品，並從中選擇 XRF 檢測值最高之 40 個樣品，送實驗室以王水消化法進行全量分析工作。檢測結果顯示，XRF 儀器檢測數據與土壤性質、量測時間及重金屬的種類有關；隨著測試時間增加，設備偵測限值可有效降低至一穩定值；銅、鋅、鉛與實驗室分析結果有較佳之相關性，線性迴歸 R^2 值分別為 0.989、0.974 及 0.927，鎳並無一定關係存在。調查結果顯示，汞偵測時間為 60-70 秒之偵測極限為 13 mg/kg，偵測時間 110-130 秒之偵測極限為 10 mg/kg。

此外，彰化縣農地土壤重金屬污染控改善計畫，亦曾利用 XRF 檢測受污染土壤。該計畫農地主要受重金屬鉻銅鋅鎳污染，整治單位將 30 個土壤樣品分別由 XRF 與實驗室 ICP 方法進行分析比較，由檢測結果發現，土壤中銅與鋅二種重金屬之相關性極高，線性迴歸 R^2 值分別為 0.987 及 0.997；而鉻及鎳之相關性極低， R^2 值分別為 0.112、及 0.196。

二、直接汞分析儀調查案例^[21]

台北市某土壤汞污染整治場址，場址面積約 3 公頃，86 年 2 月發現該場址受重金屬汞污染，最高污染濃度 504.1 mg/kg。整治單位於 89 年 7 月 25 日提出整治計畫書，同年 8 月 9 日，監督小組同意以熱脫附處理法進行場址整治工作，90 年 11 月正式進行整治。

整治單位為確保每日受污染土壤熱脫附處理之成效，以 DMA-80 直接汞分析儀進行每日處理前、後採樣分析工作，並配合整治計畫書每處理 100 m³ 污染土壤之驗收作業，經執行小組採樣後，由整治單位分樣送合格檢測機構進行土壤樣品分析(檢測方法 NIEA M317.00C)，以確保熱脫附系統之處理成效。土壤處理後月平均濃度以 DMA-80 直接汞分析儀檢測結果介於 0.15~8.42 mg/kg 之間，檢測機構檢測結果介於 0.02~7.62 mg/kg 之間。其中，91 年 5 月 7 日樣品檢測結果，環保局重金屬汞之檢測數據為 4.41 mg/kg，DMA-80 為 4.18 mg/kg，而整治單位委託之檢測機構之檢測數據為 0.02 mg/kg。由於 DMA-80 檢測結果與檢測機構之相關性極高，整治單位於 92 年 1 月後，改採由 DMA-80 直接汞分析儀之數據，做為內部處理成效之稽核依據。

4.5.2 土壤污染調查案例介紹^[22]

台南市某明膠工廠於 91 年 9 月經民眾陳情本場址旁窪地有污染狀況，環保署南區督察大隊爰於 91 年 9 月 26 日前往稽查，勘查時發現堆肥醱酵池有惡臭逸散大氣，且廢皮露天棄置窪地，現場並無適當防制措施，南區督察大隊遂依空污法第 31 條及廢清法第 36 條告發。

91 年 12 月初又有民眾陳情本場址北側窪地疑似有堆置廢棄物，致有重金屬污染周圍魚塢情事，環保署於 91 年 12 月 4 日通知顧問公司於 91 年 12 月 5 日會同環保署土污基管會現場勘查，並協助進行採取現場堆肥物(疑似廢棄物)，並進行土壤採樣及檢驗工作，採樣點詳圖 4-14，採樣原則說明如下：

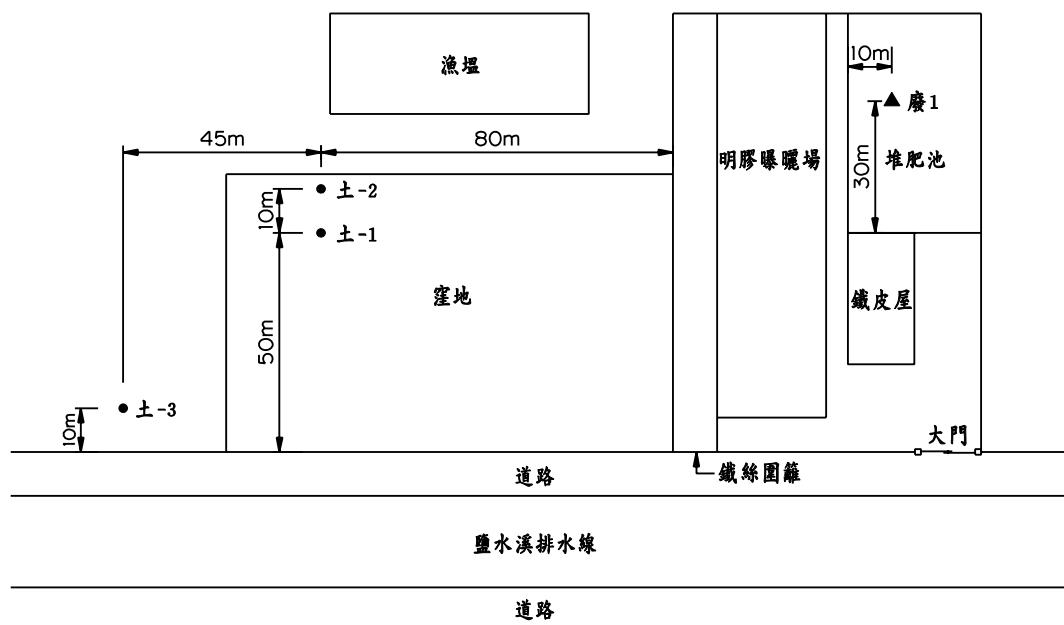


圖 4-14 台南市某明膠工廠周圍使用狀況及採樣位置示意圖^[22]

- 一、本場址負責人稱堆肥池鋪設有 RC 鋪面，深度約 180 公分，惟該堆肥已久未檢驗，採樣人員於該處採取約 1 公斤污泥(樣品編號為廢-1)，依事業廢棄物毒性特性溶出程序(TCLP)分析，分析項目為重金屬、pH 值及含水率，重金屬分析項目包括汞、鉛、鎘、鉻、六價鉻及砷。
- 二、依民眾陳情疑似污染源為場址東北側，堆置堆肥成品之窪地，經勘查後發現該窪地地表為堆肥物與土壤混合物，故於該窪地以混樣取 1 點土壤(樣品編號為土-1，以 5 點混樣)，另窪地近魚塢處(目視為原土)亦以混樣取 1 點土壤(土-2，以 5 點混樣)，兩者採樣深度均為表土 0~15 公分，分析項目為土壤中汞、砷、銅、鎘、鉛、鋅、鉻、鎳等重金屬及 pH、含水率等。
- 三、為瞭解背景土壤重金屬含量，採樣人員另於距窪地約 45m 處另採集表土背景土壤 1 點(樣品編號為土-3，以 5 點混樣)，分析項目則同前土-1 及土-2 樣品所述。

檢驗結果顯示該場址堆肥池內堆肥物以 TCLP 進行重金屬檢測之結果均未超過有害事業廢棄物認定標準；惟窪地內之土壤樣品鉻含量超過土壤污染管制標準。環保署另於 92 年 11 月 17 日再至該場址再進行土壤及廢棄物檢測分析，分析結果顯示堆肥物堆置區開挖部分之土壤之鉻濃度 1,100 mg/kg 超過土壤污染管制標準 250 mg/kg，顯示該地區土壤已遭鉻金屬污染。

4.5.3 土壤及地下水污染調查案例介紹^[23]

國內某金屬表面處理業，廠房共劃分為 2 個廠，主要從事鐵線、鋼線、鋼釘、鋼索鐵釘、不鏽鋼線等生產。其表面處理製程包括前處理、塗裝(含刷、噴、浸等)、電鍍、無電鍍(化學鍍)、陽極處理、熱浸鍍鋅等。工廠歇業後，環保署於 94 年 3 月進行土壤及地下水污染調查，調查重點包括疑似污水處理設施、疑似鍍槽、製程區、地下貯槽、油狀液體貯池、酸液槽等。樣品監測項目原則以重金屬為主，並於油狀液體貯池區增加土壤 TPH 檢測，另地下水樣品則以重金屬、VOCs、總酚及 TOC 為主，總計採取 10 組土壤樣品及 3 組地下水樣品。調查結果顯示，一廠土壤鋅濃度偏高，第二階段調查區域鎖定一廠之酸液槽至疑似污水處理設施區附近為重點，面積區約 900 平方公尺，以 7.5 公尺×20 公尺長方形網格方式佈點，土壤樣品分析項目包括：重金屬、氰化物；地下水分析項目包括：重金屬、VOCs、氰化物、總酚、TOC 等。採樣點配置如圖 4-15 所示。

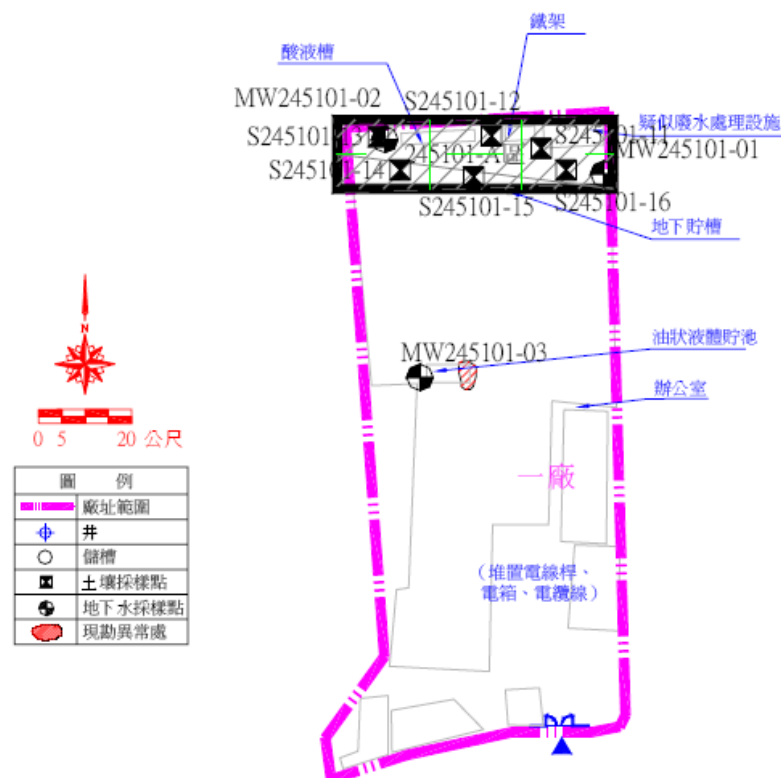


圖 4-15 國內某金屬表面處理廠土壤及地下水採樣配置圖^[23]

檢測結果中，疑似污水處理設施西側於 RC 鋪面下方之土壤採樣點 S245101-12(0.0~0.3 公尺)銅濃度 3,260 mg/kg 超過管制標準 400 mg/kg、鋅濃度 2,040 mg/kg 超過管制標準 2,000 mg/kg、及鉛濃度 1,070 mg/kg 超過監測基準 1,000 mg/kg；另地下水採樣點 MW245101-02 之鎘濃度 0.030 mg/L 超過監測基準 0.025 mg/L。

4.6 專業機構聘請

土壤及地下水污染調查所需執行的工作及涉及的專業相當複雜，需要有足夠的教育訓練與工作經驗，以及具有相關法令規定、環境科學與技術、商業營運的技術與環境考量、設施運作與評估技巧等知識與能力。因此，工廠可考慮聘請在此領域有專長及經驗之專職顧問、學者、工程顧問公司與檢驗公司協助，或共同組成專業調查團隊。

專業機構的工作項目，包括：

- 一、進行場址現場勘察或環境場址評估。
- 二、規劃及撰寫土壤及地下水污染調查評估方案或採樣計畫。
- 三、執行現地鑽探並採集土壤及地下水樣品。
- 四、地下水水質監測井設置及定期維護。

- 五、由環保署認可之檢驗機構進行分析。
- 六、撰寫土壤及地下水調查評估及樣品分析檢測報告。
- 七、評估土壤及地下水污染情形，以及評估污染潛勢。
- 八、水文地質調查與建立水文地質模式。
- 九、人體健康風險評估。
- 十、提供工廠人員教育訓練。

學者專家之聘請需考慮其專長、專業之領域範圍及從事相關工作之經驗等，可以由環保署(網址：<http://atftp.epa.gov.tw/scholar>)、行政院國家科學委員會(網址：http://nscnt07.nsc.gov.tw/WRS/personal_search.asp)或是行政院公共工程委員會(網址：<http://plan3.pcc.gov.tw/expert/new>)查詢相關之資料，該等網站中，可查詢學者專家之服務單位、學歷與專長等資料，業者可再透過學者專家的服務單位，進一步與學者專家取得聯繫的方式。

委託工程顧問公司及檢測機構進行土壤或地下水之調查需考慮其相關工作之經驗及執行成果，可以由環檢所網站(網址：<http://niea.epa.gov.tw>)查詢合格檢測機構之基本資料；或透過地方主管機關或台灣土壤及地下水環境保護協會(網址：<http://www.tasgep.org.tw/home.htm>)查詢或洽詢相關之資料；或利用行政院公共工程委員會「政府電子採購網」站(網址：<http://web.pcc.gov.tw>)，查詢「政府採購資料公告系統」之決標公告，可取得得標廠商名稱、廠商地址、與廠商電話等資料。

參考文獻

1. 環檢所，環境採樣規劃設計，民國 94 年 7 月 30 日。
2. 張西龍、吳一民，土壤及地下水污染調查原則與實務介紹，台灣土壤及地下水環境保護協會簡訊，第 18 期。民國 95 年 1 月 10 日。
3. UK Environment Agency, Groundwater Protection: Policy and Practice Part 2 – Technical Framework.
4. USACE Engineer Manual, Conceptual Site Models for Ordnance and Explosives (OE) and Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste (HTRW) Projects (EM 1110-1-1200), February 3, 2003.
5. 環檢所，監測井地下水採樣方法(NIEA W103.53B)，民國 95 年 3 月 15 日。
6. 環檢所，土壤採樣方法(NIEA S102.61B)，民國 94 年 11 月 30 日。
7. 陳家洵，微洗井採樣方法簡介，台灣土壤及地下水環境保護協會簡訊，第 15 期。民國 94 年 5 月 4 日。
8. USEPA RCRA, Superfund & EPCRA Call Center Training Module - Introduction to: Groundwater Monitoring (40 CFR Parts 264/265, Subpart F), EPA530-K-02-010I, October 2001.
9. 環檢所，土壤檢測方法總則(NIEA S103.60C)，民國 91 年 1 月 17 日。
- 10.環檢所，水質檢測方法總則(NIEA W102.51C)，民國 94 年 6 月 15 日。
- 11.環檢所網站(網址 <http://www.niea.gov.tw>)。
- 12.Federal Register Notice, Waste Management System; Testing and Monitoring Activities; Final Rule: Methods Innovation Rule and SW-846 Final Update IIIB, June 14, 2005.
- 13.USEPA, Innovative Technology Verification Report – Field Measurement Technology for Mercury in Soil and Sediment – NITON's XLi/XLt 700 Series X-Ray Fluorescence Analyzers (EPA/600/R-03/148), May 2004.
- 14.USEPA, Innovative Technology Verification Report–Field Measurement Technology for Mercury in Soil and Sediment–Metroex's X - MET 2000 X-Ray

- Fluorescence Technology (EPA/600/R-03/149), May 2004.
15. USEPA, Innovative Technology Verification Report – Field Measurement Technology for Mercury in Soil and Sediment – Milestone Inc.'s Direct Mercury Analyzer (DMA)-80 (EPA/600/R-04/012), May 2004.
 16. USEPA Superfund Innovative Technology Evaluation (SITE) website.
(<http://www.epa.gov/ORD/SITE/>)
 17. USEPA, Field Portable X-ray Fluorescence Spectrometry for the Determination of Elemental Concentrations in Soil and Sediment (Method 6200), January 1998.
 18. 環檢所，土壤和底泥中元素濃度快速篩選方法－攜帶式 X-射線螢光光譜儀分析法(NIEA S322.60C)，民國 95 年 1 月 18 日。
 19. 吳曉芬、劉文堯、陳冠宏，X 射線螢光偵測器(FPXRF)於重金屬污染土壤現地篩選之應用，第一屆海峽兩岸土壤與地下水污染整治研討會，民國 91 年 9 月 4~5 日。
 20. 彰化縣環境保護局，彰化縣農地土壤重金屬含鉻銅鋅鎳(不含鎘)污染控制場址之污染改善計畫期末報告(初稿)，民國 93 年 7 月 20 日。
 21. 林文楨，某化工整治工作執行成果報告，九十二年度「土壤及地下水污染整治業務檢討會」會議資料，行政院環境保護署，民國 92 年 11 月 13~14 日。
 22. 環保署，土壤及地下水污染事緊急應變案例探討－附冊四 我國土壤及地下水污染事件緊急應變案例探討，民國 93 年 4 月。
 23. 環保署，全國廢棄工廠土壤及地下水污染潛勢調查計畫，民國 94 年 11 月。

第五章 土壤及地下水重金屬污染整治技術

本章將針對重金屬污染，蒐集國內外土壤及地下水整治技術相關資訊，供產業界參考，分別就各項技術介紹、適用性、成本分析等內容進行介紹，最後並提供國內外相關整治案例。土壤整治技術包括固化/穩定化法、玻璃化法、土壤清洗與酸洗法、高溫分離法及現地土壤沖洗法；地下水整治技術則包括污染地下水經現地抽除後，所採用之沉澱及共沉澱法、薄膜過濾法、吸附法、離子交換法，以及透水性反應牆；可同時處理土壤及地下水污染之電動力法與植生復育法。

5.1 土壤污染整治技術

5.1.1 固化/穩定化法^[1-4]

固化處理方式(solidification)指以包覆壓縮有害之污染物使污染物之毒性溶出及流動性降至最低，並將其匣限於固化體中，此過程亦稱匣限化(encapsulation)；穩定化處理(stabilization)是指利用化學劑與有害之污染物混合或反應，使污染物有害成分穩定或降低其危害性之處理方法。固化/穩定化技術(solidification/stabilization, S/S)乃是經由減少污染物與外界接觸之表面積或降低有害之污染土壤、污泥或廢棄物滲透性及溶出性的處理方式，此技術已被廣泛應用並證實能夠有效地降低多種污染物之移動性，可處理之污染物質例如：重金屬、特定放射性廢料、部分有機污染物等物質。一般而言，固化/穩定化方式較適用於處理非揮發性之重金屬。普遍應用於固化/穩定化處理之藥劑或物質有：波特蘭水泥(Portland cement)、生石灰(quicklime)或石灰石(limestone)、飛灰(fly ash)、有機黏接劑(organic binders)(例如：柏油)、上述物質之混合物等物質。有害污染物與固化/穩定化藥劑之混合可應用於離地整治，即以批次或連續式操作之方式，或應用於現地整治污染土壤，以連續式注入操作方式進行。有害污染顆粒物質直接與添加藥劑進行包匣作用，稱為內匣限或微匣限(micro-encapsulation)；若有害污染物顆粒或已經微匣限處理之物質由整體外圍包裹密封之方式聚集污染物，則稱為外匣限或巨匣限(macro-encapsulation)。

固化/穩定化法利用化學藥劑與污染物結合可達到以下目的^[5]：

- 藉由形成固體物改變廢棄物之物理性質
- 降低污染物溶解度
- 降低廢棄物接觸表面積
- 藉低廢棄物透水性以減少與水體接觸的機會

一、固化/穩定化處理之基本原理^[3,4]

(一) 水相穩定化/固化(aqueous stabilization/solidification)

早期固化/穩定化處理技術是指水相中之穩定化及固化，因為化學反應只在水相中發生，然而普遍在文獻中只稱作穩定化及固化。此項技術漸漸的被區分為單獨穩定化處理及膠結穩定/固化合併處理(cementitious S/S)。穩定化程序中需加入化學藥劑使污染物產生強大的物化力量，將污染物轉變成較不具水溶性、不溶出、不具移動性及轉變成無毒性之結構體，因此，於固化/穩定化合併處理過程所添加之膠結黏接劑或固化劑通常也提供穩定化所需之藥劑。

1. 穩定化(stabilization)

(1) 金屬及無機污染物之穩定化

為達到金屬及無機污染物穩定化，其應用之方式有：ProFix™ 法及可溶性磷酸鹽安定法(soluble phosphates)。此 2 種方法概述如下：

- ProFix™ (EnvironGuard, Inc., Houston, Texas, USA)

即以稻穀灰(rice hull ash)為主要原料之商業化產品，其成分為非定型(amorphous)、生物性矽土(biogenetic silica)。稻穀灰具有吸附功能並可與鹼反應，當存在於鹼性環境下會產生溶解性矽酸鹽，其與有毒之金屬離子作用後形成低溶解度之金屬矽化物，可增加金屬之穩定性，避免有毒金屬之移動。

- 可溶性磷酸鹽安定法

此法是利用加入含有磷酸鹽之藥劑，使其與污染土壤中之重金屬形成金屬複合物，此磷酸鹽金屬複合物通常於一般 pH 環境中具有低溶解性，因此而降低重金屬之移動性，然而對某些特定金屬之複合(例如鎘)則需高 pH 之環境，此時強鹼可一併加入以控制 pH，由於磷酸鹽複合金屬並不形成一固體物，而為膠體顆粒狀，因此磷酸鹽之使用可同時加入固化劑以加強處理後之固化物理性質。

(2) 降低有機污染物之移動性

早期針對於土壤或污泥中低濃度之有機污染物常添加活性碳配合安定/固化程序，降低其移動性，以達到 TCLP 溶出試驗之規定。然而，依據較新之 TCA (total constituent analysis)測試方法，此類添加物質(如活性碳)並不能有效降低污染物之移動性。

因此，陸續有多項新穎之有機污染物穩定程序及藥劑被研發並應用，其中包含：

- 橡膠顆粒(rubber particulate)

商業化產品主要由磨細的橡膠材質顆粒特製而成，此材質對於處理半揮發和非揮發性有機物非常有效，例如：殺蟲劑、除草劑和多氯聯苯，此外，也可用於處理某些特定揮發性有機物及有機金屬化合物。經由 TCA 檢測方法測試發現：KAX-100TM 橡膠顆粒可有效應用於約 60 多種有害性有機物之穩定化。

- 有機黏土(organo-clays)

有機黏土是由 4 個鋁離子取代黏土礦物中的 I A 和 II A 族金屬離子，如此可增長層狀矽酸鹽和金屬離子之間的距離，使有機物能在矽酸鹽層之間被鉗合，提升黏土對有機物的親和力，以更強的力量和有機物分子結合。此方法至今仍不斷革新，許多國外代處理公司(例如：Silicate Technology Corporation (STC)，International Waste Technologies (IWT)、Hazcon 及 Soliditech 等公司)皆可提供完整的現場實際有機黏土處理技術。

2. 膠結穩定/固化處理(cementitious S/S)

膠結穩定/固化處理藉由無機固化劑的特性與廢棄物反應，形成一物化性質穩定的擬似礦物(pseudo-mineral)固體結構，使固體物之質地與土壤及岩石類似。

大部分商業化的膠結穩定/固化處理皆利用類似波特蘭水泥(Portland cement)予以固化之方式，波特蘭水泥是以石灰石和黏土或其他矽酸鹽混合物於高溫燃燒形成為水泥熟料(cement clinker)，而後將其研磨成粉狀製成；而以卜作蘭反應(Pozzolanic reaction)為基礎之固化方式則是添加如飛灰(fly ash)或水泥窯灰(kiln dusts)等物質，其中含有較多二氧化矽及氧化鋁，而些微有別於波特蘭水泥固化。而在這些化學反應中，水為不可缺少的角色，其可提供化學反應中水合反應所需之水量。以下列舉幾項傳統市面上常見的固化程序，星號部分為現今應用上較重要的方式：

- (1) 以波特蘭水泥為基礎(主要組成為水泥)*
- (2) 波特蘭水泥/石灰

- (3) 波特蘭水泥/黏土
- (4) 波特蘭水泥/飛灰*
- (5) 波特蘭水泥/可溶性矽酸鹽*
- (6) 石灰/飛灰*
- (7) 水泥或石灰、水泥窯灰*
- (8) 爐灰

以下列舉 3 項膠結固化程序之化學反應及使用方式：

- (1) ProFix™：其反應原理已於上述 5.1.1 節、一、(一)中陳述。

主要可用於以下 2 種廢棄物處理程序：

- 當進行硬化之化學反應時，需要以物理吸附方式除去低固體含量廢棄物中多餘的水分。
- 廢棄物中微溶性的金屬化合物可能會隨時間而逐漸地溶解於水中，ProFix™ 之存在會持續產生可溶性矽酸鹽，因此當金屬自廢棄物中溶出時，即便可反應生成金屬矽酸鹽物種，予以固化沉澱。

ProFix™ 因具有高吸附量、多孔性結構及巨大表面積，因此也能用於固定有機物。其中部分灰渣由於含有高達 5% 的含碳量，因此其具有類似活性碳的吸附功能。

- (2) Chemfix

美國 Chemfix 公司之方法為將溶解性矽酸鹽類及矽酸鹽沉降劑(silicate setting agent)，如水泥、石灰、石膏等，在控制狀態下與廢棄物產生反應，而生成高穩定性易成粉末之結構。國內有固化廠有此技術之應用實例。

- (3) 水淬爐渣(cement-slag)

爐渣常合併使用於多種穩定化程序中，或和其他試劑共同使用。當煉鐵高爐中所產生之爐渣，於高溫時經噴水快速冷卻形成水淬爐渣，其中含矽、鈣、鋁等具有活性之玻璃質成分，經搗碎成細粉後可取代部分水泥作為混凝土的膠結材料，水淬爐渣可藉水泥水化後產生之氫氧化鈣進行波特蘭反應，生成具有膠結性之矽鈣膠體。另外，因為爐渣中含有亞鐵離子及還原態含硫化合物，使其可做為金屬的還原劑，某些在還原狀態較不具移動性的金屬則可利用此一特性得以還原並達到穩定固化，例如：將六價

鉻還原成三價鉻予以沉澱並降低毒性。然而經緩慢冷卻而形成結晶的高爐爐渣(例如：常溫下自然冷卻的爐渣)則無法產生膠結凝固反應。

3. 現地穩定化及穩定/固化處理(in-situ stabilization and S/S)

在現地穩定/固化的應用中，利用專門的機具開鑿、鑽孔，將穩定/固化試劑注入受污染土壤區域。現地和離地穩定/固化各有其優缺點，對於淺層污染地區或大型機具無法進入的場址，由於離地處理方式對於試劑的混合添加及品質有較好的控制，因此較具可行性；而對於深層的污染及大規模之整治範圍，現地處理則較為適用，可利用開鑿機具將固化試劑和受污染土壤直接混合，如此可降低整治所需的成本。

如圖 5-1 所示，經由一垂直、空心管柱，將稀泥狀之穩定/固化藥劑以螺旋槳葉打入受污染土壤。圖所示土鑽設備可產生高達 41,500 kg-m 的扭力，能有效的將污染土壤和藥劑均勻混合，使其獲得良好處理，處理深度通常可達 30 公尺，而影響範圍直徑可達 4.3 公尺。後續再將圓筒狀處理範圍移動至其他區域，以涵蓋所有污染範圍區域，則即可有效處理整個污染場址。當使用斗篷狀集氣罩覆蓋於開挖土壤鑽孔機具上方，則可有效控制或收集現地穩定/固化處理時，管柱處理區域所產生的揮發性或微粒物質。

對於離地處理方式，前處理及固定化通常必須分成兩步驟來進行，然而，對於現地處理方式而言，則可兩步驟同時進行，例如：應用於金屬固化程序之前處理時，可藉由注入氧化劑以移除有機污染物，降低其含量，如此可減少處理成本。

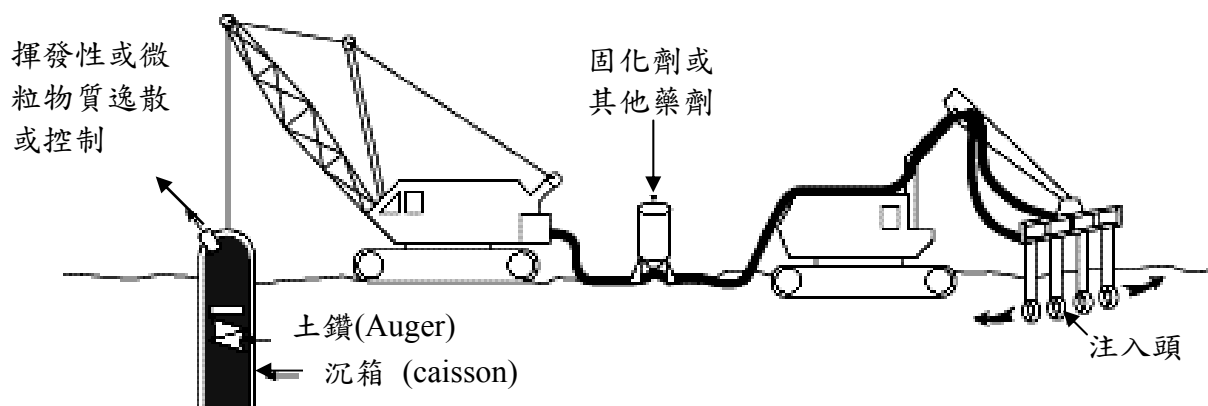
土鑽形式的現地穩定/固化處理系統在以下兩種情況非常適用：

- (1) 在必須同時控制揮發性有機物及臭氣逸散的污染場址
- (2) 當污染源位於深度超過 7.6 公尺之深層土壤，或傳統挖掘機具使用受到限制時。土鑽形式的處理方式對於垂直和水平的處理位置皆能有效地掌控。

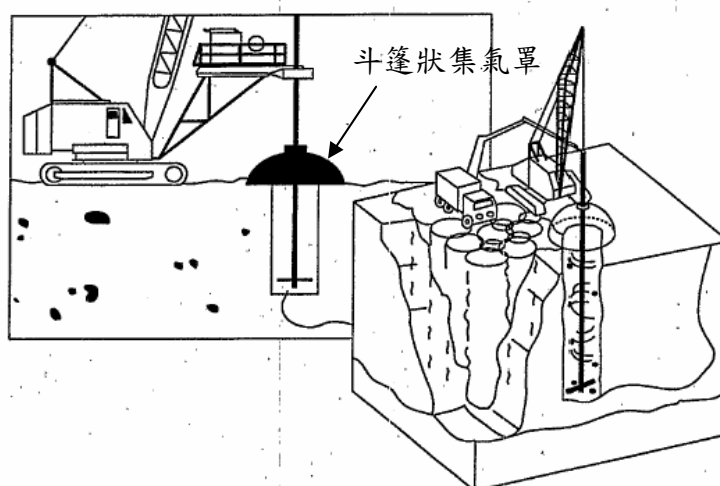
(二) 聚合物穩定/固定化(polymer stabilization/solidification)

聚合物穩定/固定化能以液態聚合物在相對較低之溫度下，將廢棄物包覆或與其結合，經過冷卻、凝固之後，形成固體狀產物。雖然聚合物主要用於固化程序，然而聚合物與其他穩定劑混合後之應

用，仍可歸納為穩定/固定化技術。聚合物穩定/固定化不論在離地或現地皆可進行。



(a) 現地穩定化及穩定/固化處理示意圖^[6]



(b) 使用斗篷狀護罩之現地穩定化及穩定/固化示意圖^[3]

圖 5-1 現地穩定化及穩定/固化處理技術

聚合物依其使用目的可分為 2 種：

1. 熱塑性固化劑(thermoplastic binder)

熱塑性固化劑具有直鏈狀分子結構，經加熱後形成熔融狀態之流體，而冷卻後會固化硬化。聚乙烯(polyethylene)、硫化聚合物(sulfur polymer)、瀝青(bitumen)皆屬熱塑性固化劑。當熱塑性固化技術用於微匣限時，須將熔融之固化劑與廢棄物混合，使較小之廢棄物顆粒散佈於熔融之聚合物中，經冷卻形成堅硬的固體。若應用於巨匣限時，則需將廢棄物置於承裝廢棄物之容器中，再將熔融之

熱塑性固化劑倒入，待聚合物冷卻後，即可形成一層聚合物固體物包覆於廢棄物質外圍。

2. 熱固性固化劑(thermosetting binder)

熱固性固化劑為多種液態物質成分的結合，例如：聚合物單體(monomer)、催化劑(catalyst)、促進劑(promoter)，始能進行聚合反應，並硬化形成固體。熱固性固化劑無法具有可流動狀態，於固化硬化過程中，該物質原有的特性將會改變。常用於廢棄物固化處理的熱固性固化樹脂有乙烯酯苯乙烯(vinyl ester-styrene)、聚酯苯乙烯(polyester-styrene)及環氧樹脂(epoxy)，不僅可應用於微匣限或巨匣限中，也能夠用於現地穩定/固定化處理。此項熱固性固化聚合程序於商業化的應用已超過 20 年以上，故在此只針對例如現地穩定/固定化等較新穎的應用作介紹。

(1) 聚乙烯(polyethylene)

聚乙烯是一種結晶過程緩慢、熔融溫度相對較低的熱塑性物質，由乙烯氣體聚合生成，可藉由改變結構產生不同性質的產物。例如高密度聚乙烯(high-density polyethylene，下稱 HDPE)是由較少分支的長鏈聚合物組成，如此可使聚合物各層之間緊密結合。典型的 HDPE 密度介於 $0.94\sim 0.96\text{ g/cm}^3$ 之間。而低密度聚乙烯(low-density polyethylene，下稱 LDPE)則由高度分支的長鏈聚合而成，每 1,000 個碳原子當中約有 10~20 個支鏈，如此可使各層各自分散，形成較鬆散的結構。典型 LDPE 密度介於 $0.91\sim 0.93\text{ g/cm}^3$ 之間，相較於高密度聚乙烯，LDPE 具有較低的熔點(LDPE 熔點： 120°C ，HDPE 熔點： 180°C)和較低的熔融後之黏滯度，因此 LDPE 較容易應用於廢棄物的匣限作用處理。聚乙烯可抵抗多種化學物質和溶劑、冷熱溫度變化、微生物分解。

(2) 硫聚合水泥(sulfur polymer cement, SPC)

硫聚合水泥，又稱硫聚合物(sulfur polymer)，由美國 Bureau of Mines 公司(USBM)為處理石油提煉過程所產生的硫化物及含二氧化硫(SO_2)排放氣體處理後之產物，所研發之專利產品，其商業名稱為 Cement 2000，此產品即將 5%(重量比)的二環戊二烯(dicyclopentadiene)與硫元素結合製造而成，二環戊二烯主要是用以抑制固相間之不穩定性。硫聚合水泥為一熱塑性材質，而非水硬化水泥，具有相對較低之熔點， 120°C ，和較低之熔融黏滯度，25 厘泊(cP)，因此容易在加熱攪拌混合器中操作。相較於水硬化

之波特蘭水泥，硫聚合水泥有幾項優點，例如：其壓縮力及張力為波特蘭水泥的 2 倍，且可在數小時內達到最大的結合強度，不需數週的反應時間。添加硫聚合水泥所製成的混凝土可抵抗大部分的酸性和鹽類物質的侵蝕，一般所知會破壞水硬性水泥結構的硫酸鹽，其對硫聚合水泥產物的影響相當小，甚至無任何影響。經測試暴露於 10^8 里達(rad)之 γ 射線照射後的硫聚合水泥，在結構體物理特性上並無明顯改變。

(3) 熱固性聚合物(thermosetting polymers)

熱固性聚合物是由未飽和的單體(例如：methacrylates)經過一連串的聚合反應所生成。聚合反應的起始作用階段通常是經由化學催化劑或由促進劑來推動反應進行。連接 2 個氧原子之間的化學鍵一旦斷裂，將會產生含有不成對電子、高活性的自由基，自由基打斷單體中的雙鍵，而開始進行鍵結，此階段即為單體持續加入主鍵的反應，當單體耗盡或長鏈兩端相結合時，反應即停止。溫度、催化劑與促進劑的結合及其濃度，及其他添加物的存在(例如廢棄物)皆會影響反應速率。凝膠時間(gel time)為樹脂黏滯度快速增加直到無法流動時所需的時間，會因製造廠商或催化劑、促進劑種類不同而有差異。

熱固性聚合樹脂在許多離地與現地之應用皆證實具有極高的耐久性，因黏滯性低(3~300 cp)，使其應用於現地時容易注入土壤層中；而當樹脂和廢棄物粒料結合成聚合水泥時，將可產生極佳的抗壓強度(可承受 48.3 MPa 以上的壓力，但須視其土壤粒料型態而定)。在污染場址經現地處理所形成的聚合水泥能有效抵抗具破壞性物質(例如酸或鹼)、溫度及濕度之變化、微生物降解，及 10^8 rad 之輻射，並且具有小於 2×10^{-11} cm/sec 的水力傳導係數及低溶出性。熱固性聚合物之使用與熱塑性聚合物不同的是，當熱固性聚合物一旦聚合，便無法予以改變。

聚合物穩定/固化程序主要的優點之一為能夠廣泛應用於不同類型的廢棄物。任何穩定/固化的應用及選擇必需考量許多因素，例如：廢棄物特性、廢棄物體積、處理及後續處置成本，及法規管制要求等。對於聚合物匣限技術，某些特定因素會影響聚合物種類之選擇(例如：有機或無機，熱塑性或熱固性)，及處理方式的選擇(例如：微匣限或巨匣限，現地或離地)，其中更包含廢棄物本身之物化特性、處理後產物之最終處置、處置場址貯存

廢棄物之標準、最終產物的穩定性、資金和操作成本、原料來源、處理程序難易度及可靠性。

二、限制因素

有關離地固化/穩定化法使用的缺點或限制，分述如下^[7,8]：

- (一) 環境的條件會影響長期固定之污染物質。
- (二) 固化/穩定化的過程會增加最終產物的體積。
- (三) 有些污染物質在固化/穩定化的過程中會呈現不穩定的狀態，故使用此法時必須加以選擇。
- (四) 時間的長短對固化/穩定化產物的影響是無法證明的，所以必須對固化/穩定化的產物加以長時間的觀測。

影響此法的適用性包括：土壤的特性、土壤顆粒的大小、含水量、重金屬的濃度、硫酸鹽的含量、有機物的含量、密度、滲透性、自由壓縮力等，另外，相對於此法的成本與其他的整治技術比較之下屬於中等，其約每公噸 110 美元，其中包含了開挖的成本。

表 5-1 及表 5-2 分別介紹可能影響穩定化及固化作用常見之因素。

表 5-1 可能影響穩定化作用的因素^[4]

影響因素	可能的影響
揮發性有機物	反應產生之熱促使有機物質揮發，無法有效降低 VOC 之移動性；含有揮發性污染物的土壤或污泥加入穩定劑前，須以熱處理除去水分及揮發性物質。
使用酸性吸附劑處理金屬氫氧化物	使金屬溶出。
使用酸性吸附劑處理氰化物	釋出氰化氫。
使用酸性吸附劑處理含硫廢棄物	釋出硫化氫。
使用鹼性吸附劑處理含有銨鹽之廢棄物	釋出氨氣。
使用鹼性吸附劑(含有方解石(calcite)或石灰石(dolomite)等碳酸鹽)處理酸性廢棄物	可能產生具發火性(pyrophoric)之廢棄物。
使用含矽之吸附劑(例如土壤及飛灰)處理含氫氟酸之廢棄物	可能產生溶解性氟矽酸鹽類物質(fluorisilicate)。
酸性溶液中存在會產生可溶性鈣鹽(例如：氯化鈣、醋酸鈣，或碳酸氫鈣)的陰離子	陽離子交換反應：由固化/穩定化產物中溶出鈣、增加水泥滲透性、增加交換反應速率。
鹵化物之存在	易從水泥或石灰中溶出。

表 5-2 可能影響固化作用的因素^[4]

影響因素	可能的影響
有機化合物	有機物可能會干擾廢棄物和無機固化劑的結合。
半揮發性有機物或多環芳香族碳氫化合物	有機物可能會干擾廢棄物的結合。
油脂	油脂會包覆顆粒，降低廢棄物和接著劑顆粒的結合。
細質微粒	由於細質微粒(通過#200 篩網的不可溶顆粒)會包覆較大顆粒物質，降低廢棄物顆粒和固化劑或其他試劑的結合。
鹵素	阻礙固化物質形成，容易由水泥或波特蘭水泥固化物質中釋出，或使熱塑性固化物質脫水。
錳、錫、鋅、銅、鉛之可溶性鹽類	對各金屬鹽類之存在，其各所需硬化時程的差異性，將可導致最終結構體之穩定性或降低產物的物理結合力量，增加金屬滲出的風險。
氰化物	氰化物干擾廢棄物的結合。
矽酸鈉、硼酸鹽、磷酸鹽、碘酸鹽、硫化物及碳水化合物	減緩固化或硬化時程，減弱最終固化產物的強度。
硫酸鹽	減緩硬化時程，並導致水泥穩定/固定化之產物膨脹或碎裂。於熱塑性的固化程序中，造成脫水及再水化(rehydrate)，而使結構物破裂。
酚	高酚含量會導致壓縮力明顯減弱。
煤或褐煤	煤和褐煤會影響固化程序及最終產物的強度。
硼酸鈉、硫酸鈣、重鉻酸鉀及碳水化合物	矽酸鈣和鋁酸水合物的形成會阻礙波特蘭水泥固化反應。
非極性有機物(油脂、芳香族碳氫化合物、多氯聯苯)	影響水泥、波特蘭水泥，或有機聚合物的硬化，降低結構物長期的耐久性。對於熱塑性固化物質，高溫將使有機物揮發。
極性有機物(醇、酚、有機酸、乙二醇)	高濃度的酚會減弱硬化程度，降低水泥、波特蘭固化物質的短期及長期耐久性。熱塑性固定/穩定化將會造成有機物揮發，而乙醇會減弱波特蘭水泥固化物之硬化。
固體有機物(塑膠、瀝青、樹脂)	對尿素甲醛聚合物之形成效果不佳，或許也會對其他聚合物之硬化程度有影響。
氧化劑(次氯酸鈉、過錳酸鉀、硝酸，或重鉻酸鉀)	對於熱塑性及有機聚合固化物存在可能會破壞結構體，或導致起火燃燒。

表 5-2 可能影響固化作用的因素(續)^[4]

影響因素	可能的影響
金屬(鉛、鉻、鎘、砷、汞)	如果金屬濃度過高，將延長硬化所需時間。
硝酸鹽、氰化物	將延長硬化時間，降低以水泥為基礎之穩定化產物的耐久性。
鎂、錫、鋅、銅、鉛之可溶性鹽類	使無機物質之最終固化產物膨脹或破裂，使結構體曝露更多表面積，增加金屬溶出可能性。
降低整體 pH 值之環境及廢棄物特性	導致最終結構物退化。
凝結劑(例：氯化鐵)	影響水泥及波特蘭水泥固化物之硬化。
土壤中超過 0.01% 或水中超過 150 mg/L 之可溶性硫酸鹽	硫將破壞水泥固化產物。
土壤中超過 0.5% 或水中超過 2,000 mg/L 之可溶性硫酸鹽	硫將嚴重地破壞水泥固化產物。
脂肪族及芳香族碳氫化合物	延長水泥所需硬化時間。
含氯有機物	如果濃度過高，將延長水泥硬化時間，並降低耐久性。
金屬之鹽類及複合物	延長水泥或黏土/水泥的硬化時間，並降低耐久性。
無機酸	降低水泥(第一類波特蘭水泥)或黏土/水泥的耐久性。
無機鹼	降低黏土/水泥的耐久性。氫氧化鉀和氫氧化鈉會降低第三類和第四類特蘭水泥的耐久性。

三、小結

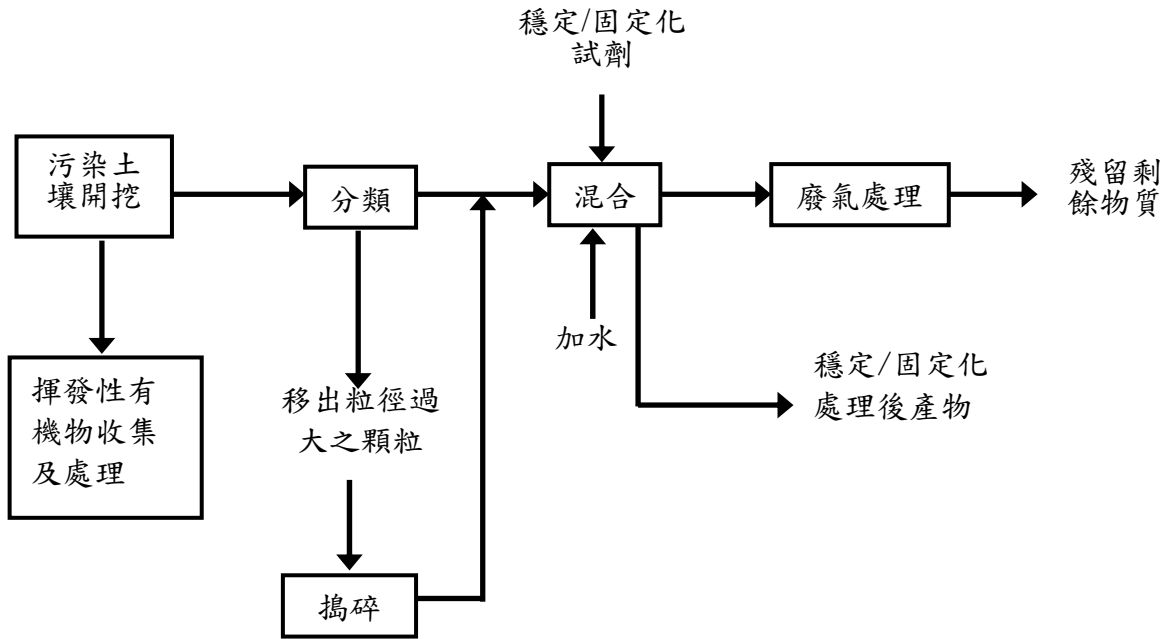
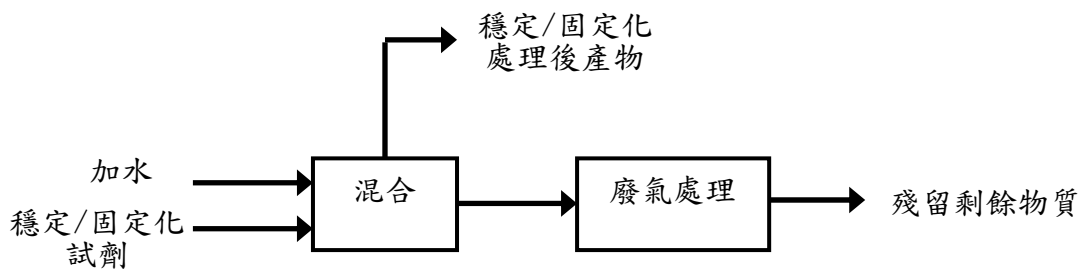
針對固化/穩定化技術應用於一特定污染土壤之處理，必須經由初步之可行性試驗(treatability test)方可得知此整治方式之預期處理成效及其實際應用之可行性，因此，處理方式及程序之取決依各污染場址之特有地質土壤特性而定。由於固化/穩定化處理屬於中短期之中間整治技術，對於此技術長期(大於 5 年)之整治成效便難以於整治前評估認定，因此，對於整治後長時間之土壤特性及穩定/固定化處理後污染物性質之變化，須進行長期監測以確定是否仍舊符合原先所設定之整治標準。

在考量固化/穩定化技術之選用、設計、處理成效及其處理之最終產物時，所需考慮之因子包含污染物之物化特性、處理程序所需之設施、最終產物之管理、相關法規規定、經濟效益等。與污染場址相關之考量

因子包括場址位置、天候狀況、水文資訊等。針對可行性試驗，必須進行之分析測試包含有機/無機物分析、滲出性試驗、滲透度、單軸抗壓強度試驗、最終產物及滲出液毒性滲出試驗、凍融及乾/溼風化循環試驗(freeze/thaw and wet/dry weathering cycle tests)等。表 5-3 概述固化/穩定化技術應用於各類別污染物污染之土壤及污泥之處理有效程度。圖 5-2 及圖 5-3 則分別為離地及現地穩定/固定化處理方式之流程圖。

表 5-3 固化/穩定化處理一般類別污染物污染土壤及污泥之有效程度^[4]

	污染物群組	有效程度 (土壤及污泥)	註解：
有機物質	鹵化揮發性物質	□	■：適用 ▼：可能適用 □：不適用
	非鹵化揮發性物質	□	
	鹵化半揮發性物質	■	
	非鹵化半揮發性物質	■	
	多氯聯苯	▼	
	農藥	▼	
	戴奧辛/呋喃	▼	
	有機氰化物	▼	
無機物質	有機腐蝕物質	▼	
	揮發性金屬	■	
	非揮發性金屬	■	
	石棉	■	
	放射性廢料	■	
	無機氰化物	■	
反應性物質	無機腐蝕物質	■	
	氧化劑	■	
	還原劑	■	

圖 5-2 離地穩定/固定化處理流程示意圖^[4]圖 5-3 現地穩定/固定化處理流程示意圖^[4]

5.1.2 玻璃化法

一、技術介紹

玻璃化法(vitrification)為將廢棄物於高溫下處理之技術(高於 1,000°C)，使有機污染物和可燃性物質經由熱分解或燃燒程序以達到穩定/固定化的目的。玻璃化法與其他固化方式的不同之處在於所需熱能之供給方式的不同。主要應用於玻璃化法的加熱方式包括電漿加熱(plasma heating)、電熱加熱(electric heating)、化石燃料燃燒(fossil fuel combustion)、感應加熱(induction)和微波加熱(microwave heating)等方式。

現地和離地(離地處理：高溫熔爐燃燒處理方式)之電熱玻璃化處理方法具有相同的基礎理論，皆以電力產生足夠的熱能以熔融含有矽成分的

廢棄物質(silica-based)，而經高溫緩慢冷卻後形成含有非揮發性及不可燃物種之玻璃質物質。在現地玻璃化(in-situ vitrification)應用上，揮發性和可燃性有機污染物將被加熱而揮發，在確認污染土壤中所含之污染物種類後，通常可將石墨電極置入土壤形成一正方形之電能加熱區域。處理深度取決於電極的長度及可供應的電力。土壤在置入電極並通電之後，逐漸被電力所轉換之熱能升溫並熔融，一般土壤可被加熱到 1,600~1,800 °C。停止供電之後，受熱土壤逐漸冷卻而呈現玻璃化狀態。現行玻璃化技術可產生重達 1,400 公噸的土壤玻璃結塊，而處理深度可達 20 英尺^[9]。在玻璃化過程中，當有機污染物被熱解而轉換為氣相時，則須經由廢氣處理設備的收集、移除或分解有害氣體，使排放氣體符合排放標準。

現地玻璃化法必須破壞污染物或降低其移動性，因此其中受熔融物質必須含有足夠的鹽類(alkali content)(1.4~15 %)以保持電導度和熔融溫度間的平衡。太多的鹽類(> 15 %)會提高電導度使電熱設備產生的電流無法達到足夠的熱度；而鹽類過少將使導電度不足，並導致較高的熔融溫度。大多數的天然土壤皆含有足夠的鹽類以做為現地玻璃化處理之所需含量；然而在某些特殊場址，若土壤中鹽度不足，可藉由注入含鹽類之水溶液，或加入他種土壤及化學物質以彌補鹽類之缺乏。

玻璃化法為一項具吸引力的技術，因其可處理多種類型之廢棄物。除此之外，幾乎週期表中的每種元素或多或少皆能溶解於玻璃中，表 5-4 顯示元素在以矽質為主要成分之玻璃狀物質中的相對溶解度。只要選擇適當的玻璃化系統(例如分別以矽、鋁、磷或鉛為主要成分)，將可增加廢棄物處理之負荷量，並可因此減少最終產物的體積。

表 5-4 元素在矽酸玻璃中之大約溶解度^[3]

溶解度	金屬
少於 0.1%(重量比)	銀、氫、金、溴、氫、氦、汞、碘、氫、氮、氖、鉍、鉑、銻、氬、鈦、氫
介於 1~3%之間(重量比)	砷、碳、氯、鉻、硫、銻、硒、錫、鎢、鎢
介於 3~5%之間(重量比)	溴、鈷、銅、錳、鉬、鎳、鈦
介於 5~15%之間(重量比)	鈾、氟、鈷、鎢、鈷、鎢、鈷、硼、鎢
介於 15~25%之間(重量比)	鋁、硼、鉍、鈣、鉍、鐵、鈣、鉍、鋁、鎂、鈉、鎢、鈉、鋁、鈉、鋁
超過 25%(重量比)	矽、磷、鉛

一般而言，對於液態有機廢棄物，以傳統焚化程序處理的效能比使用玻璃化處理較佳。表列之金屬中，唯有汞無法以任何玻璃化技術處理，因其具有較低的蒸發溫度，在處理過程中，將會完全地被蒸發，並須經由廢氣處理設備予以收集、移除；而含其他表列之金屬的廢棄物則均可以玻璃化技術處理。

二、適用性分析

現地與離地玻璃化相較之下，現地處理方式有下列幾項優點：

- (一) 現地玻璃化可於較高溫度下進行，相較於一般熔爐的操作溫度， $1,100\sim 1,400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，現地玻璃化溫度可達 $1,600\sim 2,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。於熔爐加溫程序中，為避免縮短離地熔爐耐火內襯之壽命，化學藥劑必須在處理中途加入於廢棄物中，使熔爐中的溫度降低。除此之外，每隔一段時間便必須關掉熔爐以更新熔爐耐火內襯，現地玻璃化因不需使用耐火內襯而無此項限制，且處理程序中不需要添加任何藥劑而能節省處理成本。
- (二) 相較於離地處理，現地玻璃化可於較高溫度下進行，因此可產生穩定度較高的玻璃化產物，而減少化學物質溶出性並降低玻璃的風化速率。
- (三) 現地玻璃化能使最終產物有較高的體積減少量，因為過程中無需添加任何額外物質或藥劑。
- (四) 現地玻璃化無須經過前處理即可處理大多數污染物質，也不須為了熔爐進料的尺寸限制，而改變廢棄物之體積。
- (五) 現地玻璃化可應用於深層之污染土壤(20 英尺以上)。
- (六) 現地玻璃化最終產物為一大型玻璃結塊廢棄物，比起熔爐的處理產物，通常有較小的比表面積，因此可降低風化程度和化學物質溶出性。現地玻璃化可減少公共和環境之安全風險，因處理後之產物可留置於原地，無需進行移除，而熔爐之處理方式對於處理後之產物則需較嚴格的管理，並進行污染物移除清運。

5.1.3 土壤清洗與酸洗法

一、土壤清洗法

(一) 技術介紹

土壤清洗法(soil washing)係將土壤挖除後，利用以水溶液為主的系統，將附著在土壤顆粒上之污染物與土壤分開，沖洗的過程中會

將較細的泥土、泥沙粒子與較粗的沙子及砂礫土壤粒子分開，且將污染物集中於較小體積的土壤以便能更進一步處理及處置，所以重力分離對於去除高比重的重金屬(如鉛)顆粒而言是有效的。

土壤清洗法已廣泛地應用於歐美，美國最早於 1993 年紐澤西州之 King of Prussia 場址實際應用本技術進行污染場址整治，依據美國環保署之資料顯示，截至 2002 年，美國有 8 個超級基金場址曾經運用此一技術，且多採移動式設施，在歐洲則有移動式及固定式 2 種土壤清洗設施；在美國，土壤清洗技術係移除或洗滌土壤中大部分污染物，以減少必須進一步處理污染土壤的量，通常土壤清洗技術必須配合其他處理技術，方能達到土壤污染整治目標。荷蘭 Heidemij 公司最早於 1983 年利用本技術進行土壤污染整治工作，在歐美國家，經土壤清洗技術處理後之土壤回填至污染場址中，衍生之污泥及廢棄物則送至中間處理場或最終處置場處理^[10]。

(二) 影響因素

影響土壤清洗技術進行土壤污染整治所需之期程，主要與下列因素有關：

1. 粉土、黏土及污泥在污染土壤中之數量。
2. 土壤污染物之種類及數量。
3. 土壤洗淨設備之處理容量。

二、酸洗法

(一) 技術介紹

一般而言，受重金屬污染之土壤可採用酸洗法處理。酸洗法係以稀酸溶液(如稀鹽酸、檸檬酸、磷酸、醋酸等)作為受重金屬污染土壤之萃取劑，當酸性萃取劑淋洗受污染土壤時，使其與土壤中之重金屬發生作用，並將重金屬於酸液中溶出。酸洗法為一種使用酸性萃取劑來達到分離土壤中重金屬之化學處理技術。

(二) 方法步驟

酸洗法技術之處理流程，一般可分為前處理、萃取、淋洗分離、淋洗廢酸再生或處理、後處理等 5 個步驟，如圖 5-4 所示，各步驟說明如下：

1. 前處理

土壤經自然風乾後，先去除其中所含之植物殘體及篩除礫石。

2. 萃取

針對欲萃取之重金屬，選擇適當之酸液(如稀鹽酸、檸檬酸、醋酸、磷酸等)及調配成為適當濃度之酸性萃取劑。受污染土壤經與酸性萃取劑作用後，使土壤中之重金屬於酸液中溶出。

3. 淋洗分離

土壤與酸性萃取劑作用完成後，以水淋洗土壤，使土壤與萃取劑分離。

4. 淋洗廢酸再生或處理

土壤與酸性萃取劑作用完成後產生之淋洗廢酸，可經再生處理回收酸液供循環再生使用，並回收重金屬；或將淋洗廢酸逕予處理，不回收酸液及重金屬，其處理後產生之重金屬污泥，則予固化做最終處置。

5. 後處理

受重金屬污染之土壤經以酸淋洗處理後，需加入鹼劑(如碳酸鈣)以中和處理後土壤之酸性，使得進行後續回填處理。

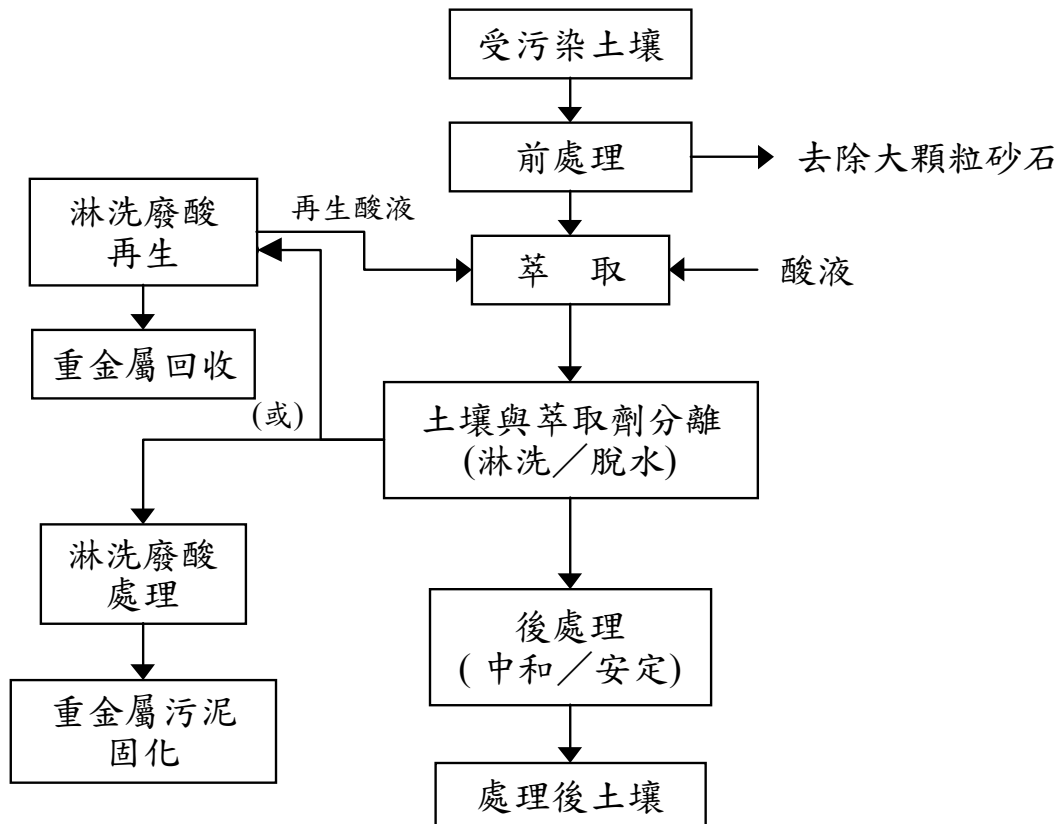


圖 5-4 酸洗法流程示意圖^[10]

5.1.4 高溫分離法

一、技術介紹

高溫分離法(pyrometallurgical recovery)係利用溫度提升來達到重金屬萃取及再利用目的，而此高溫技術增加反應速率，因而降低最終產物體積^[10]。高溫分離法通常分為兩大程序，第一程序主要包括烘乾、蒸餾、熔鍊等三大步驟，此程序通常會產生重金屬熔渣，因而可以進行重金屬回收再利用；第二種程序主要是包括高溫萃取及固定化技術，此程序將使揮發性金屬與土壤分離而轉化到飛灰的部分，而在飛灰部分的重金屬將予以固定化而取代回收再利用，因此在此技術中，重金屬並無法回收再使用。

以高溫爐進行污染土壤處理，通常需要很有效的熱傳效應，以使得在排放廢氣中，減少粒狀污染物的排放。為達到此目的土壤顆粒的均勻化即變成影響高溫分離技術一個重要的因素。當處理土壤中含有大量的土塊及礫石將會降低土壤熱傳的效應，為求使顆粒均勻化，如進行顆粒粒徑分離或者將大顆粒的土壤變成小顆粒球狀的前處理步驟是必要的。小顆粒的土壤其實也不利於高溫分離程序之進行，因為將增加排放粒狀污染物的含量。因此，進流的土壤介質有時需要進行球狀處理的設施，及達到顆粒均勻化的目的。因此，在進行高溫處理時，通常會加入還原劑，及提供足夠的空氣流量，以使得土壤的顆粒能與處理的藥劑及污染物質達到充分接觸的程序，以改善在反應器及氣體流況的情形^[10]

由於汞的沸點只有 357 °C 遠較於砷、鎘、鉛、鉻等四種重金屬來的低，而汞只要經過烘乾、蒸餾的程序，就可以得到高溫分離的效果。而對於上述其他 4 種重金屬，由於其沸點較高，因此要達到良好高溫分離技術的效果，通常要加入還原劑、助熔劑以增加熔化的效率，及得到良好熱能的來源。高溫爐的溫度通常低於待處理金屬的沸點，這是由於有助熔劑(如鈣的存在)，因此才可以在未達到沸點的情形下得以熔解，如鎘、鉛等揮發性金屬將會在尾氣加以收集；而如鉻及鎳等非揮發性金屬，則將以熔解性金屬的型態在高溫爐後加以收集。至於雜質部分，將以爐渣形式予以收集後再進行後續的處理^[10]。因此，高溫分離法排放物之型態通常可分為固體、液體及氣態等 3 種形式。

二、處理場址需求

由於高溫分離設備係屬於非移動性設備，因此高溫分離法是離地(ex-situ)土壤整治技術，因此，污染場址與處理廠之距離，便成為決定處理成本的重要因素；由於處理設備之限制，其對於污染土壤的處理量必

須有合理處理時間，因此處理廠的儲存容積及處理設施的需求需加以考量；另高溫處理法後續所排出的污染物，必須要有空氣污染防制設備加以處理。

三、適用性分析

- (一) 高溫分離法通常很少單獨使用，多與土壤清洗法一起使用，達到濃縮土壤中污染物的目的。
- (二) 適用高溫分離法污染土壤之濃度(如：鉛、鎘、鉻)，通常要高達5-20%。
- (三) 適用於污染濃度低，但是容易得以還原或揮發之重金屬污染土壤之整治，如汞。
- (四) 適用於回收極具有經濟效益的金屬污染土壤，如黃金及白金。如文獻所示，回收1公噸的鎘的價錢是5,950元美金；1公噸的鉻是7,830元美金；1公噸的鉛是700~780元美金；1公噸的砷50~250元美金；1公噸的汞是約5,295~8,490元美金。

四、處理種類

1997年止，在美國有35個工廠用高溫分離法處理重金屬污染土壤，其中7個處理廠回收汞，另外16個處理廠進行鉛的回收，至於其他處理廠是進行其他重金屬的回收。適合處理的廢棄物種類，包括：

- (一) 含鎘電池
- (二) 含汞廢棄物
- (三) 三酸電池
- (四) 含汞廢水及底泥的處理
- (五) 含鉛廢液
- (六) 含鋅廢液
- (七) 含汞廢液

5.1.5 現地土壤沖洗法

一、技術介紹

現地土壤沖洗法(in-situ soil flushing)是指使用化學藥劑注入到受污染的土壤或地下水，並在下游抽取出地下水沖洗液及污染物之混合物，然後在地面處理後再排放或再注入的一種方法^[11]。其方法的示意如圖5-5。藉由沖洗液的注入，可改變地下水/土壤與污染物之吸脫附特性、氧化

還原狀態、界面張力、酸鹼狀態及分配、溶解、沉澱狀態等，達到增加污染物溶解度，造成污染物與溶液形成乳液(emulsion)或產生化學反應，促使原吸附在土壤中或以不溶解型式(NAPL)存在之污染物易隨地下水移動，造成污染物之去除。

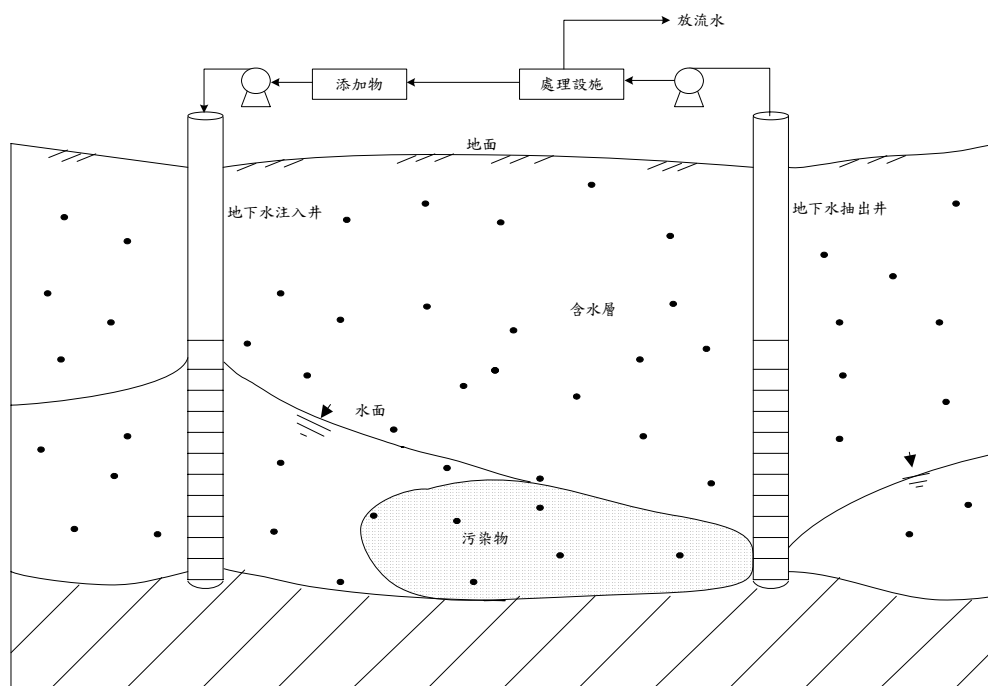


圖 5-5 現地沖洗法示意圖^[12]

對於重金屬之去除，常見的沖洗液包括界面活性劑、酸及螯合劑。其中界面活性劑可同時用於有機物及重金屬之移除，其由親水基及疏水基兩部分所組成，當其濃度在水中超過臨界微胞濃度時，界面活性劑分子中的疏水部分會同時朝內，而使親水基朝外與水接觸形成微胞(micelle)結構。微胞型態增加疏水性有機物於水中溶解度或分配，並可與土壤競爭有機污染物，形成水溶液中的污染物表現濃度(apparent concentration)大幅增加；微胞表面若帶有負電荷，則可因靜電力相吸作用，將重金屬吸附於界面活性劑表面^[13,14]，而達到移除之目的。由於陽離子性的界面活性劑易與土壤表面吸附，因此通常用於土壤沖洗液的界面活性劑為非離子性或陰離子性^[15]。而酸及螯合劑的沖洗法主要是用於處理重金屬，在天然含水層 pH 值下，金屬容易吸附在土壤表面，藉由稀釋酸溶液的注入，改變地下水 pH 值將使重金屬脫附而變成較易移動。螯合劑的注入則可與土壤表面競爭重金屬，因而將重金屬離子拉至移動相（水溶液中）。通常常用之酸溶液包括硫酸、鹽酸及硝酸，常用之螯合劑則包括

EDTA 及 DTPA^[15]。

二、技術適用性與優點^[15]

化學藥劑注入法適用於處理各類不同的污染物，配合不同工程注入技術，可適用的地質條件也頗廣。其優點敘述如下：

- (一) 無須開挖，建造成本比傳統之抽取處理法低。
- (二) 配合適當之注入技術，例如深層土混合法(deep soil mixing)與土壤破裂法(soil fracturing)，可以深入其他技術無法達到之區域。
- (三) 沖洗法對於吸附性以及低溶解性污染物尤其有效。

三、技術限制^[15]

- (一) 如何將沖洗藥劑注入與污染物接觸，是一大挑戰。受限於擴散效果，低滲透性地質影響半徑可能僅限於注入井附近。
- (二) 污染深度範圍大，或地質分層複雜，較難將化學藥劑注入到污染區域。
- (三) 反應後之產物毒性待進一步研究。
- (四) 沖洗法可能會造成污染擴散，本身造成之環境污染問題，以及土壤需氧量(SOD)使成本大幅增加問題均待克服。

四、小結

在現地沖洗法的部分，依對此項技術的現況評估報告^[12]顯示，至 1998 年 11 月止，全美國至少有 64 個現址使用經驗，其中 42 個為模場，22 個為實場研究，若單以實場而言，全美國已有 24 個執行中或完成的計畫。以沖洗液種類而言，實場中有 5 個使用界面活性劑，若包含示範場則有 35 個使用界面活性劑，24 個使用其他沖洗劑；主要目標污染物則以含氯碳氫化合物，DNAPL(重質非水相液相污染物)及 BTEX(苯、甲苯、乙苯及二甲苯)為最多，其餘如石油碳氫化合物、PAHs、PCBs 及重金屬場址亦均在 10 個以上。表 5-5 為典型現地沖洗法使用之相關參數及去除效果。由表中可看出，沖洗液體積使用介於 3~12 個孔隙體積(pore volume, PV)間，處理的污染物的效果則視污染物種類而定，但較大分子的污染物(如 PCBs 及 PAHs)仍有較難達到高去除效果的現象。

沖洗藥劑注入法的成本視反應物成本、整治目標、反應物再生可行性、污染物特性、注入方法及處理深度等因素而定。例如，利用 Fenton 法處理小體積的 NAPL(<1,816 公斤)，其單價為 220 美元/公斤，但處理更小體積的 NAPL 時(<454 公斤)，其單價高達 1,542 美元/公斤^[15]。若考慮現地沖洗法，文獻建議每一公斤土壤處理成本約為 75-210 美元之間，

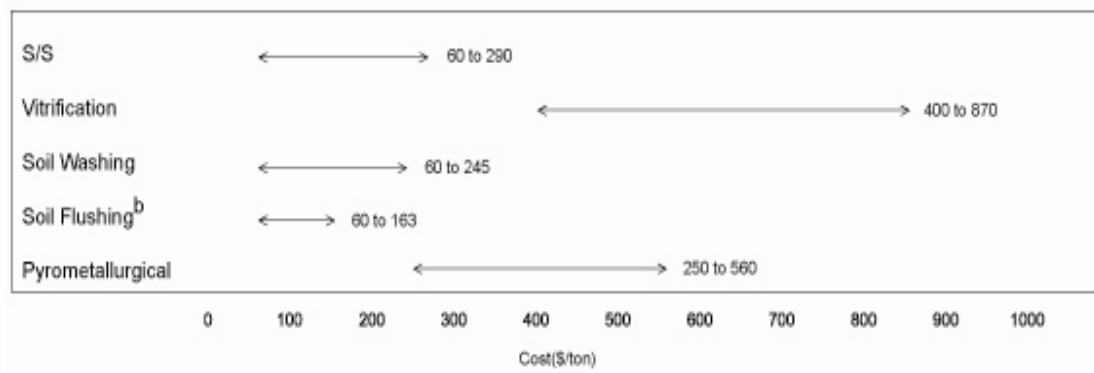
與其他現地方法，如現地固化穩定化、蒸氣注入及加強生物整治法的處理費用相當^[11]。

表 5-5 現地沖洗法建造特性資料^[15]

場址 (污染/測試面積)	污染物及濃度 (mg/L)	沖洗劑	注入量	注入方式	處理效果
Dupont Site,德州 (7.6×10.7 m)	CCl ₄ : 1,000 mg/L	界面活性劑	12 PV	地下水抽出、與介面活性劑混合、再注入	CCl ₄ : 214 mg/L
GE 場址，密西根州 (直徑 3 m,深 1.5 m)	PCBs : 6,000 mg/L 油 : 67,000 mg/L	界面活性劑	5.7 PV + 2.3 PV	—	10 %去除 + 14 %去除
Quebec, 加拿大 (1,800 m ³ 土壤)	含氯碳氫化物 (200,000 mg/kg)	界面活性劑	—	—	回收 37.6 m ³ (50 天) 回收 160,000 kg (二期) 回收 86 %
Quebec, 加拿大 (4.3×4.3 m)	DNAPL (55,000 mg/kg)	界面活性劑	水 : 1.34 PV Polymer : 0.9 PV 界面活性劑 : 0.9 PV 水 : 1.6 PV	—	回收 86 %
Traverse City 密西根州	TCE DCE BTEX	界面活性劑	2,044 L 溶液	單一 borehole 供注入與抽出	增加 40-90 倍 溶解度
木材處理， Laramie, 懷俄明州 空軍基地， 猶他州	重油 (93,000 mg/L) NAPL (佔 7%孔隙)	界面活性劑 鹼液 Polymer 共溶劑 70% 乙醇 12% 正戊醇 25% 水	— 10 PV	—	95 %去除 主要污染物： >90 %去除 DNAPL： >75 %去除
荷蘭 (6,000 m ² , 4-5m 深 1)	Cd : 5-20 mg/kg (共約 725 kg)	0.001M HCl	—	—	大多數樣品 < 2.5 mg/kg

5.1.6 整治列車技術

圖 5-6 提供固化/穩定化法、玻璃化法、土壤清洗與酸洗法、高溫分離法、及現地土壤沖洗法等 5 種金屬污染土壤整治技術單一處理時之處理成本範圍。整治列車(treatment train)技術概念之引進可大幅提升整治技術之處理效率。所謂整治列車係對於受污染場址採取 2 種以上之處理程序，除可提升處理效能，亦可降低整治費用。其包含土壤前處理、物理分離程序(以減少處理量)、後續殘渣及排放氣體之處理、以及其他可提升處理效能之技術，表 5-6 提供固化/穩定化法、玻璃化法、土壤清洗與酸洗法、高溫分離法、及現地土壤沖洗法等整治技術之整治列車處理程序。



^b: Costs reported in US\$/yd³, assumed soil density of 100 lb/ft³

圖 5-6 金屬污染土壤整治技術處理成本範圍^[3]

表 5-6 整治列車技術彙整^[3]

	固化/穩定化 ^a	玻璃化法 ^a	土壤清洗與酸洗法	高溫分離法	現地土壤沖洗法
前處理					
土壤挖掘	E,P	I,E	✓	✓	
去除礫石	E,P	E	✓	✓	
減容	E,P	E	✓	✓	
調整酸鹼度	I,E,P				
還原作用(如 Cr^{6+} 還原至 Cr^{3+})	I,E				
氧化作用(如 As^{3+} 氧化至 As^{5+})	I,E				
去除有機物	I,E				
土壤顆粒物理分離程序	I,E,P	E	✓	✓	
去除水分	P	E		✓	
降低揮發性金屬之揮發性(如 As_2O_3 轉化至 $\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$)		E			
加入高溫還原劑				✓	
顆粒均勻化程序				✓	
沖洗液輸送及萃取系統					✓
設立阻絕層	I,E,P	I	✓		✓
後處理/殘渣管理					
土壤殘渣處理	I,E,P	E		✓	
設立阻絕層	I,E,P	I,E			✓
排放氣體處理	I,E,P	I,E		✓	
場址鋪面以利後續使用	P				
萃取液回收金屬程序(如離子交換等)			✓		
滲出液之處理與再利用			✓	✓	
沖洗殘渣之固化/穩定化			✓		
固相程序之殘渣處理			✓		
液相程序之殘渣處理			✓		✓
爐渣及飛灰之固化/穩定化				✓	
爐渣及玻璃化產品再製建材		E			
金屬/金屬化合物再利用				✓	
金屬/金屬化合物再處理				✓	
沖洗液處理/處置					✓

^a 處理技術又區分為三類：I=現址程序；E=離地程序；P=聚合物微匣限(離地程序)

5.2 地下水污染整治技術

5.2.1 沉澱及共沉澱法

一、技術介紹

沉澱法係使用化學藥劑直接將溶解態之污染物轉化為非溶解狀態之程序；而共沉澱法係將膠凝態(colloidal form)或懸浮態(suspend form)之污染物與其他沉澱物(外加化學藥劑)結合後而沉澱之程序。因此沉澱及共沉澱法必須包含下列步驟：

- (一) 將處理之化學藥劑與待處理液充分混合；
- (二) 藉由沉澱及共沉澱機制，或兩者兼具，產生固體物；
- (三) 進行固體物與處理液分離程序。

圖 5-7 為典型之沉澱及共沉澱法之處理程序，其視需要進行氧化及還原之前處理程序，然後進行 pH 值調整及添加沉澱劑或膠凝劑，經適當時間反應後，再經由過濾或沉澱機制將固體物與澄清液分離。常使用之化學藥劑包括：

- (一) 鐵鹽(如氯化鐵、硫酸鐵、氫氧化鐵)
- (二) 硫酸銨、硫酸鎂、硫酸銅
- (三) 氫氧化鋁
- (四) 石灰、氫氧化鈣
- (五) 硫化物

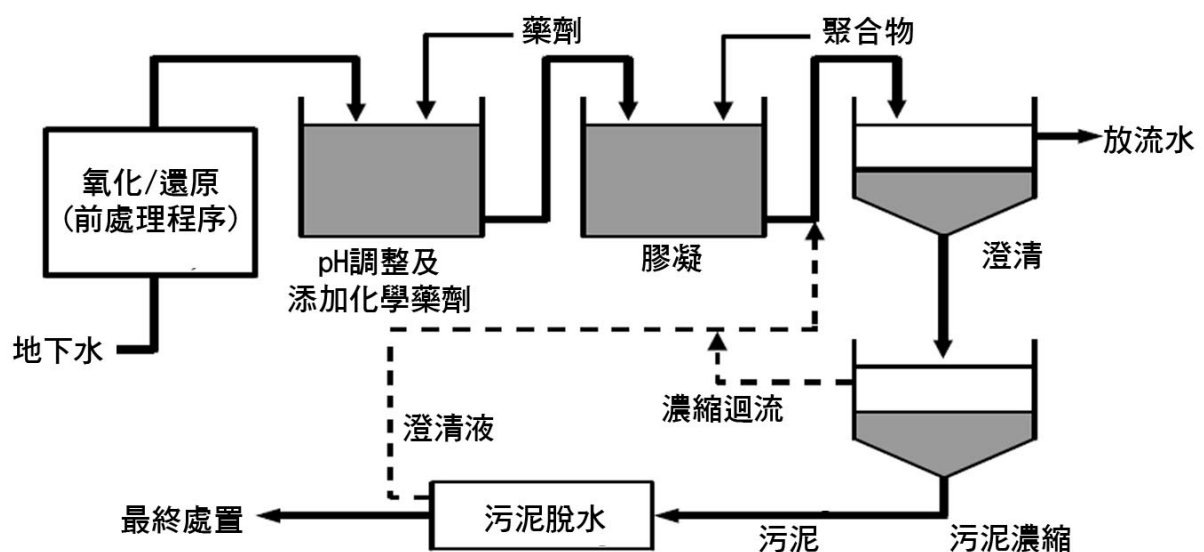


圖 5-7 沉澱及共沉澱處理系統^[16]

二、影響因素^[10,17]

- (一) 重金屬氧化態：由於重金屬之氧化態影響其溶解度、移動性、降解性等性質，因此也影響其處理效能。如以砷(As)為例，As(III)之溶解性較高，將降低沉澱及共沉澱法之處理效率，因此若將其氧化為As(V)將提升處理效率。而砷金屬之溶解度尚與 pH 值、金屬化合物型態、及其他共存離子之影響。
- (二) pH 值：環境酸鹼度與重金屬存在型態有密切關係，應在重金屬溶解度最小之酸鹼度環境下進行，方可使沉澱及共沉澱法處理效率最適化。
- (三) 其他共存離子：其他離子之存在將直接影響處理效率。對於以氯化鐵為膠凝劑處理砷金屬之程序中，如硫酸根存在時，將與氯化鐵反應，而降低砷金屬之去除效率，然而若鈣或鐵離子之存在，則將提升此程序之去除效率。

三、技術適用性及優缺點^[17]

- (一) 沉澱及共沉澱法為一離地處理技術。
- (二) 適合受污染之地下水、滲出水、礦區排放水、地表水、工廠廢水、及自來水之處理。
- (三) 處理後將會產生污泥，需進行脫水及最終處置，將衍生處理經費之增加。
- (四) 由於化學藥劑之存在及重金屬污染物本身之濃縮作用，此法處理後產生之污泥極有可能成為有害性廢棄物，須經固化/穩定化等技術處理後，再進行最終處置。

四、成本分析

沉澱/共沉澱技術之經費資料相當有限，茲彙整美國 3 個受到砷、1,2-二氯乙烷(1,2-dichloroethane)、氯乙烯(vinyl chloride)場址之經費分析資料如表 5-7 所示。其中 Vineland Chemical Company 案例之經費係依整治列車所有經費進行估算，因此，年維修費高達美金 4 百萬元。

影響處理經費之因素包括^[10,17,19]：

- (一) 化學藥劑種類：化學藥劑屬於沉澱/共沉澱技術所需之耗材，將影響處理費用，如使用次氯酸鈣將較過錳酸鉀較為便宜。
- (二) 化學藥劑劑量：處理費用將隨著化學藥劑劑量增加而增加，且由於化學藥劑劑量增加，亦將導致污泥產量增加，而又將增加污泥處理費用。

(三) 處理目標值：不同之處理程序可達到不同之處理目標，當要求目標愈高，愈需要結合多種處理程序，自然將提升處理費用。

(四) 污泥處理量：沉澱/共沉澱技術所產生之污泥可能視為有害廢棄物，需進行後續處理，以維護環境，因此此處理費用亦應列入經費估算項目。

表 5-7 沉澱/共沉澱法經濟分析案例^[16, 18]

場址	處理量	污染物	設備費	年維修費	單位廢水處理費
Vineland Chemical Company	1,400 加侖/分鐘	砷	—	US\$ 4 百萬元	—
Winthrop Landfill	65 加侖/分鐘	砷、1,2-二氯 乙烷、氯乙烯	US\$ 2 百萬元	US\$ 25 萬元	—
Energized Substation in Florida	44 百萬加侖	砷	—	—	US\$ 0.0006 元/加侖

5.2.2 薄膜過濾法

一、技術介紹

所謂薄膜過濾為利用半滲透性薄膜來分離水相污染物(圖 5-8)，而此半滲透性薄膜對於通過物質具選擇性。薄膜過濾分為 4 種形式：微過濾(microfiltration)、超過濾(ultrafiltration)、奈米過濾(nanofiltration)、逆滲透(RO)，以上 4 種程序均需施加壓力再利用污染物粒徑與薄膜孔徑之差異而達到分離之目的^[20]。施加壓力大小與污染物顆粒尺寸有關，奈米過濾與逆滲透需施加較高之壓力(50~150 psi)，而微過濾與超過濾則僅需 5~100 psi 之壓力^[17]，低壓程序係以物理篩除(sieving)機制去除污染物，而高壓程序則以在薄膜表面之化學擴散(chemical diffusion)機制去除污染物^[17]。

微過濾則通常與沉澱/共沉澱法共同處理與固體物結合之金屬，其適合去除分子量大於 50,000 或粒徑大於 0.05 μm 之顆粒；對於溶解於水中且顆粒相當小之金屬(如砷)，只有奈米過濾及逆滲透可有效除之^[17]，逆滲透為一高壓程序，主要移除與總溶解固體物結合之金屬離子，其適合去除分子量之範圍介於 1~20,000 (the molecular cut off)；奈米過濾亦為一高壓程序，適合處理造成硬度之二價金屬離子，其適合去除分子量之範圍介於 150~20,000 (the molecular cut off)。

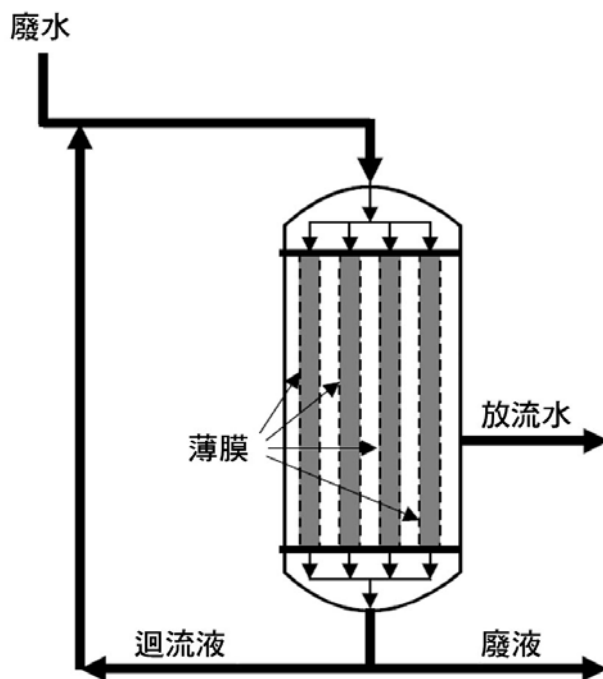


圖 5-8 薄膜過濾系統^[16]

二、影響因素

- (一) 懸浮性固體物、高分子量溶解性固體物、有機物、及膠凝物：左列這些物質之存在將造成薄膜垢化(fouling)現象，而降低處理效率。
- (二) 重金屬氧化態：不同氧化態之重金屬顆粒尺寸有異，因而影響處理效率，如 As(V)之薄膜過濾處理效率較 As(III)為佳，乃因 As(V)較 As(III)為大而容易被薄膜過濾之故。
- (三) pH：環境酸鹼度將影響薄膜表面之帶電性，進而影響薄膜對重金屬之吸附效能。
- (四) 溫度：處理液溫度較低時將減低薄膜流通量(membrane flux)，而降低處理效率，此時可提升系統壓力或增加薄膜面積來克服之。

三、技術適用性及優點

- (一) 薄膜過濾廣泛適合處理溶解性污染物及懸浮性固體物。
- (二) 適合受污染之地下水、地表水、工廠廢水、及自來水之處理。
- (三) 逆滲透及奈米過濾不須添加化學物質及可達到分離效果。
- (四) 薄膜過濾系統可採連續或批次操作。
- (五) 處理效率將受到處理液中污染物及其他固體物、有機物之影響，因此較適合用於處理雜質較少之水體，如地下水與自來水。
- (六) 薄膜過濾通常當作其他技術之後續處理程序，以達到處理目標值。

四、成本分析

影響處理經費之因素包括^[17,20,21]：

- (一) 薄膜過濾種類：不同種類之薄膜將直接影響處理成本。
- (二) 處理液特性：視處理液濃度及雜質特性而定，可能在進行薄膜過濾前，需進行前處理，亦將增加處理成本。
- (三) 處理後廢液特性：視廢液濃度而定，可能在進行最終處置前需進行其他處理程序。
- (四) 影響薄膜過濾性能因素：在本節「二、影響因素」所提及之情形皆影響處理成本。

5.2.3 吸附法

一、技術介紹

吸附技術係採用吸附劑置於固定床管柱中，使待處理液經過吸附劑表面達到濃縮，而降低液相濃度(圖 5-9)。吸附技術有時會與沉澱/共沉澱、離子交換、過濾共同使用，然而吸附往往成為最主要去除機制。當吸附劑達到飽和，則需進行反沖洗、再生、中和、洗滌等 4 步驟之再生程序，以維持吸附劑效能。常用之吸附劑為：

- (一) 活性鋁(activated alumina)^[20]

可利用氫氧化鈉進行再生，中和液則採用硫酸，進行此程序將產生污泥，需進行後續處理。

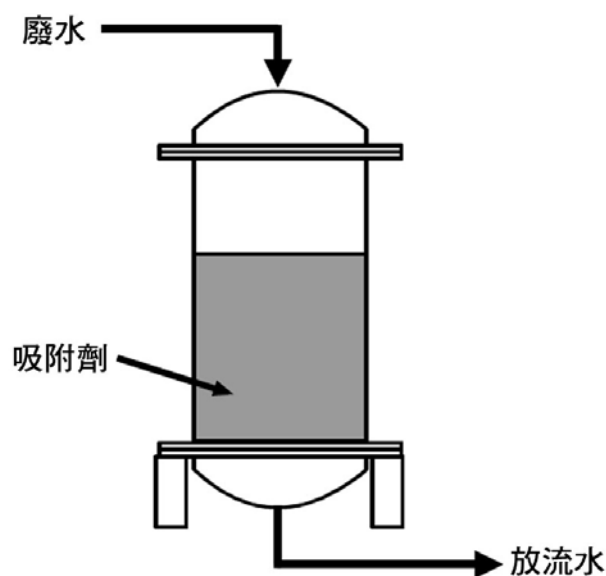


圖 5-9 吸附處理系統^[16]

(二) 活性碳(activated carbon)^[22]

大多用於地下水及自來水中有機物之移除，將活性碳與銅離子或鐵離子進行反應後，將可用於砷之吸附，其吸附量分別為 0.048 g/g-Cu-AC 及 0.2 g/g-Fe-AC。

(三) 粒狀銅-鋅複合金屬

(四) 粒狀氫氧化鐵、氧化鐵砂^[17]

可被利用於自來水中砷之移除，且通常與氧化、沉澱/共沉澱、離子交換或過濾一同使用，其再生程序與活性碳類似，利用氫氧化鈉再生，再以強酸(如：硫酸)中和即可。

(五) 經界面活性劑改質之沸石

將沸石與界面活性劑(如：hexadecyltrimethylammonium bromide)反應，其對於砷之吸附量達 0.0055 g/g。

二、影響因素^[20,22,23]

- (一) 垢化：總懸浮固體物、有機物、固體物、二氧化矽及雲母之存在，皆會引起吸附劑垢化，阻塞流體通過及減少接觸時間，因而降低處理效率。
- (二) 重金屬氧化態：文獻顯示，吸附效率受重金屬氧化態之影響，如 As(V) 之吸附處理效率較 As(III) 為佳。
- (三) 處理流量：增加吸附處理單元之流量時，將降低污染物之吸附。
- (四) 待處理液 pH 值：依污染物特性而定，調整適當之 pH 值可達到最大吸附效率，如以活性鋁(activated alumina)處理砷廢水，在酸性情形下吸附較佳。

三、技術適用性及優點

- (一) 適合受污染之地下水及自來水之處理。
- (二) 待處理水中若總懸浮固體物、有機物、二氧化矽存在時，將造成吸附劑垢化，影響吸附效能。
- (三) 活性碳再生多以熱脫附為主，後續需裝設空氣污染防制設備，以處理揮發性金屬蒸氣。
- (四) 競爭吸附將降低吸附效率，對於金屬而言之吸附優先順序為：
 $\text{Th}^{4+} > \text{Fe}^{3+} > \text{Al}^{3+} > \text{Cu}^{2+} > \text{Ba}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Cs}^+ > \text{Rb}^+ > \text{K}^+ > \text{Li}^+ > \text{Na}^+$
對於類金屬(如：砷)化合物，其吸附優先順序為：
 $\text{OH}^- > \text{H}_2\text{AsO}_4^- > \text{Si}(\text{OH})_3\text{O}^- > \text{F}^- > \text{HSeO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{H}_3\text{AsO}_3$

四、成本分析

文獻顯示^[22]，以吸附技術處理受金屬污染水體，處理成本約為 US\$0.003~0.76/gallon。影響處理經費之因素包括^[20,22,24]：

- (一) 污染物濃度：若有許多高濃度之競爭性污染物存在，則需增加置換及再生頻率，以維持吸附效能，此舉將增加處理成本。
- (二) 吸附劑耗用量：若無法再生使用之吸附劑，則需進行處理，因此若再生效果不佳之吸附劑，將衍生較高之吸附劑費用。
- (三) 影響吸附性能因素：在本節「二、影響因素」所提及之情形皆影響處理成本。

5.2.4 離子交換法

一、技術介紹

離子交換法係一種物理/化學分離技術，將液相中污染離子與固相中離子進行交換，進而達到液相淨化之目的(圖 5-10)。而此固相介質稱為離子交換樹脂，其係合成聚合物，表面帶有許多官能基，可與污染離子進行交換，其主要有 4 種型態^[17]：

- (一) 強酸型
- (二) 弱酸型
- (三) 強鹼型
- (四) 弱鹼型

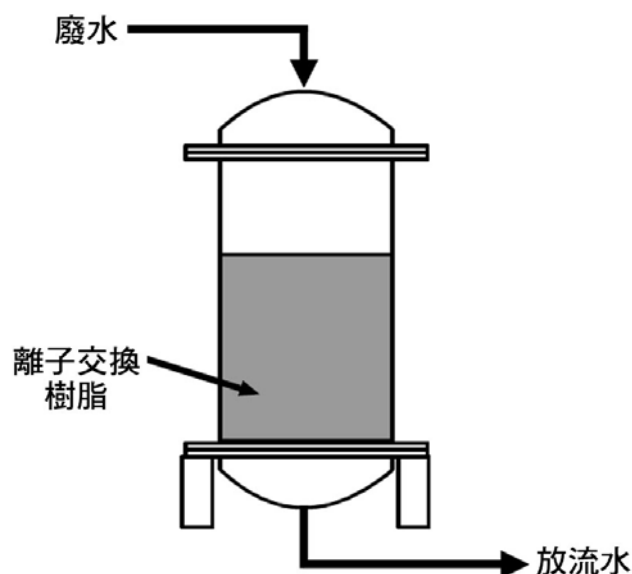


圖 5-10 離子交換系統^[16]

強酸型及弱酸型離子交換樹脂主要用於處理陽離子，而強鹼型及弱鹼型離子交換樹脂主要用於處理陰離子。因此對於重金屬而言，應使用強酸型及弱酸型離子交換樹脂，而對於類金屬(如砷)，因其以陰離子型態存在於液相，故以鹼型離子交換樹脂進行處理，尤以強鹼型為佳。

離子交換樹脂達到飽和時，必須定期再生，以維持交換能力，再生程序有 3 個步驟：

- (一) 反沖洗
- (二) 再生
- (三) 洗滌

一般而言，當處理達 300~60000 個離子交換柱體積後，樹脂需進行再生，而再生液通常可重複使用 25 次後再進行處理，最後洗滌步驟僅需數個柱體積即可^[20]。

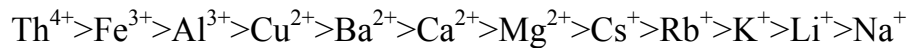
離子交換管柱可串聯使用，以減低再生頻率，通常前端處理之管柱先進行再生，再生後置於後端使用。

二、影響因素^[17,20,23]

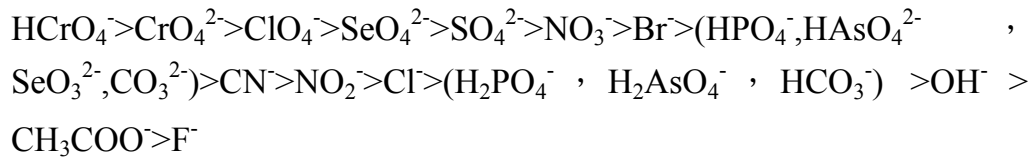
- (一) 重金屬氧化態：文獻顯示，處理效率受重金屬氧化態之影響，如 As(III) 無法以離子交換法移除之。
- (二) 競爭性離子之存在：當競爭性離子存在時，將與待處理金屬競爭樹脂位置，導致需增加再生頻率，方可維持處理效能。
- (三) 垢化：總懸浮固體物、有機物、鈣及鐵之存在，皆會引起離子交換樹脂垢化，阻塞流體通過及減少接觸時間，因而降低處理效率。
- (四) 待處理液 pH 值：依污染物特性而定，調整適當之 pH 值可達到最大離子交換效率，如以強鹼氯離子型樹脂，對於砷廢水處理之最佳 pH 值為 6.5~9，在此範圍外處理時，去除效率明顯下降。

三、技術適用性及優點

- (一) 適合受污染之地下水、地表水及自來水之處理。
- (二) 待處理水中若總懸浮固體物、有機物、鈣及鐵存在時，將造成樹脂垢化，影響處理效能。
- (三) 若使用氯離子型交換樹脂，處理液將含高濃度氯離子，造成腐蝕性；離子交換程序亦會降低處理液 pH 值。
- (四) 廢棄樹脂含有大量金屬，需進行妥善處理，以維護環境。
- (五) 置換能力將影響處理效能，對於金屬離子而言，置換優先順序為：



對於類金屬(如：砷、硒)化合物，其置換優先順序為：



四、成本分析

處理成本資料並不完善，茲將影響處理經費之因素彙整如下^[17]：

- (一) 樹脂再生頻率：再生頻率愈高，將可減少廢棄樹脂處理費用及操作費用。
- (二) 競爭性離子存在：硫酸根(SO_4^{2-})會與砷競爭樹脂位置，將增加樹脂再生頻率，造成操作費用增加。
- (三) 影響離子交換性能因素：在本節「二、影響因素」所提及之情形皆影響處理成本。

5.2.5 透水性反應牆

一、技術介紹

透水性反應牆(permeable reactive barrier, PRB)，係指於受污染場址地下建造一個永久性、半永久性或可替代的單元，於單元中置入反應的材料，令受污染地下水，流經此處理單元，如圖 5-11 所示。

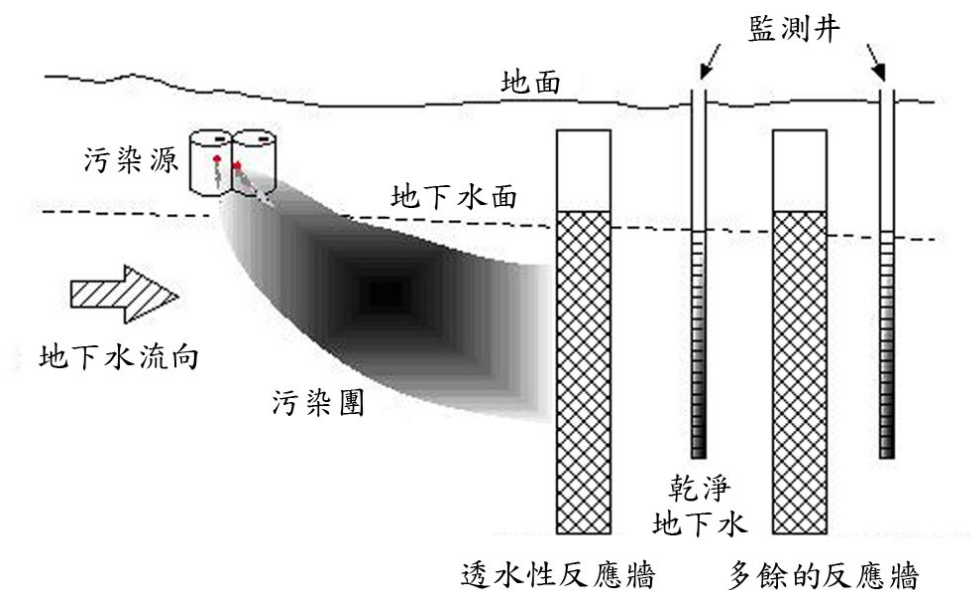


圖 5-11 典型透水性反應牆示意圖^[25]

污染物與處理單元中反應性材料會產生物理、化學或生物作用，在現地中被破壞或固定，藉由使用不同的材料，透水性反應牆可處理不同的有機或無機污染物，常見的反應牆可分成吸附/吸收、沉澱及降解性等3種^[25]，其可處理之污染物種類及反應性材料，詳見表5-8。吸附/吸收性材料可用於處理無機物或有機物，例如活性碳、沸石及有機性皂土等均曾被測試於有機物之處理；泥炭土、鐵氧化物、離子交換樹脂、Chitosan beads及沸石等，均曾用於無機物之處理。沉澱性處理牆用於重金屬之去除，主要是藉由改變區域性環境狀況，例如pH值或氧化還原電位，形成低溶解性的金屬氧化物，造成沉澱。通常使用之反應性材料包括鐵鹽、磷酸鹽、飛灰、石灰及零價金屬等。降解性的反應牆則包括生物降解及非生物降解等2種，前者包括例如使用釋氧劑(oxygen releasing compound)增加水中溶氧，以達到降解水中汽油相關污染物(如苯、甲苯、乙苯等)之目的，或利用固定態微生物達到去除水中污染物的方法。此外，使用鋸木屑作為碳源，以去除硝酸鹽也曾被使用。另一方面，非生物性的降解，最常見的是使用零價鐵降解水中含氯碳氫化合物，亦有研究顯示零價鐵可用於還原水中硝酸鹽^[25]。

表 5-8 透水性反應牆處理技術的種類^[25]

污 染 物	反 應 型 態	反 應 物 材 料
有 機 物		
含氯碳氫化合物	降解	零價鐵
芳香羥化合物		固定態微生物
硝基苯		氧氣釋放化合物
多氯聯苯		聯二亞硫酸鹽
多環芳香羥		
	吸收/吸附	沸石(zeolite)
		有機性皂土(organobentonite)
		活性碳
無 機 物		
重金屬	吸收/吸附	泥碳土(peat)
放射性元素		鐵氧化物
硝酸鹽		皂土
	沉澱	沸石
		零價鐵
		聯二亞硫酸鹽
		石灰岩
	降解(硝酸鹽)	堆肥、木屑

二、技術適用性與優點

透水性反應牆適用於處理 VOCs、SVOCs 以及無機物，但對於 LNAPL 效果則較不佳。透水性反應牆具有下述幾項優點：

- (一) 建造成本比傳統之抽取處理法低。
- (二) 安裝設置及阻絕污染物比其他處理技術比較快速。
- (三) 安裝設置過程簡單，只和該地區土壤型態有關。
- (四) 低操作成本，不需要連續額外輸入能量。
- (五) 低維護成本，設置後，只需要定期監測地下水及更換處理單元。
- (六) 較少之場址表面破壞及人力成本。
- (七) 現地處理，沒有廢水排放問題。

而在技術上有以下限制：

- (一) 反應材料有反應容量限制，可能需定期更換材料。
- (二) 透性可能因為金屬鹽類沉澱或生物活動副產物增加而降低。
- (三) 可能因為現行施工技術與成本，而使反應牆深度與寬度受限。
- (四) 處理材料之成本。
- (五) 通常僅適用於地下水中溶解性污染物。

三、透水性反應牆之設計與施工

(一) 透水性反應牆之類型

反應牆的建造上，一般可分為連續式反應牆(continuous reactive barrier)及漏斗通道式反應牆(funnel and gate system)兩大類。然而通常可分成 4 種型式的安排^[15]，如圖 5-12 所示。連續式反應牆，整個單元均填充反應性材料，如圖 5-12(a)；漏斗通道式反應牆則包含不透水牆及污染物通道，漏斗部分代表低透水性材料，可導引地下水流至透水較高的反應牆(通道)中，以節省反應材料的用量，如圖 5-12(b)；多門式反應牆，用於污染團較寬的情況下，如圖 5-12(c)所示；多重反應材料式的反應牆，可填充不同特性材料，以處理多種污染物或達到更好的處理效果，如圖 5-12(d)所示。有關反應牆之安排，可參考 Starr and Cherry^[26]。該文章對漏斗與通道之比例，地下水流速、流向之關係，均利用二維地下水模擬軟體做過分析，提供進一步場址概念的資訊。

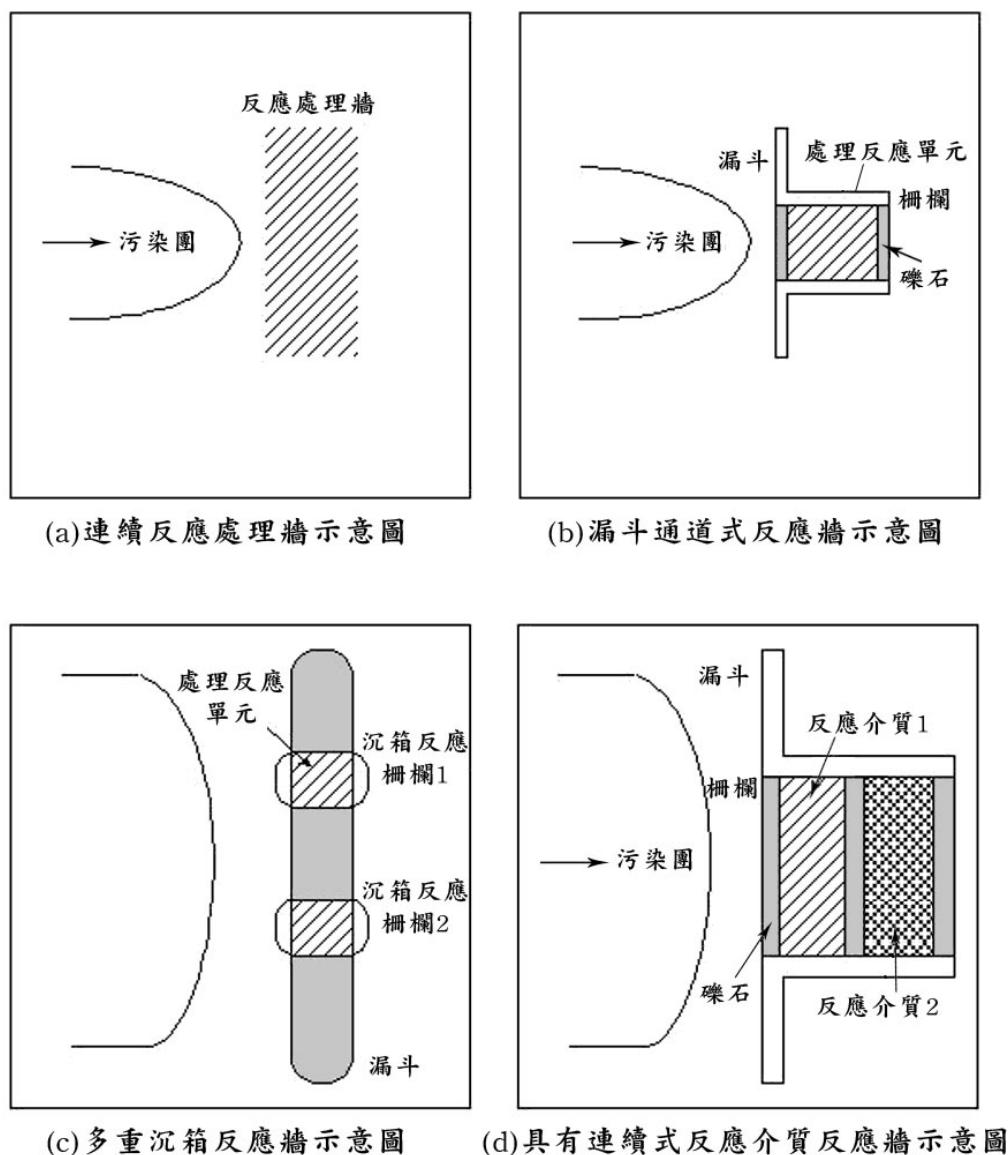


圖 5-12 各類型透水性反應牆^[15]

(二) 反應牆的設計

反應牆的設計，首先必須了解受污染場址現地之特性，包括水文、地質及化學特性。由污染團大小、地下水移動方向及速度、含水層之透水性及邊界等，才可決定反應牆之位置與大小。除場址特性外，反應牆設計需考慮的幾個重要參數包括：反應材料的選擇(包含材料種類、粒徑分布及混合成分)，反應牆內之停留時間及反應區的大小(配合更換期限)。材料的選擇主要考慮污染物的種類，設計上通常可由可行性研究取得所需要之參數。例如可藉由批次性實驗求得材料之反應性，如降解半衰期、吸附動力及吸附量等；由地下水

管柱實驗模擬現地下水流速及反應牆內的停留時間，並且可同時得到污染物沉澱或飽和所達到的時間，以及水質變化的情形。另一方面，文獻中亦可得到反應動力參數，例如針對零價鐵對含氯碳氫化合物進行降解動力文獻回顧^[34]。

詳細設計規範可參考國外相關報告，如參考美國貝泰(Battelle)公司之設計指引，並參酌其他相關論文與報告，描述透水性反應牆之詳細設計規範^[35]。整個透水性反應牆設計方法及詳細流程圖，包括初期場址評估、場址特性、反應介質選擇、處理能力試驗、模式和工程設計、建造方法、監測計畫等，其步驟可參考圖 5-13 及 5-14。

(三) 反應牆的建造

反應牆的建造方法多數系統使用傳統開挖及回填的方式，將反應性材料放入地下系統中，但近年來則開始有直接注入的方法。傳統開挖及回填的方式具有較好之品質管制與較易成功裝設反應牆之優點，相對而言直接注入法則有可達深度較深、處理牆較薄、污染土壤產生量少、機具較小等優點^[28]。

傳統開挖及回填的方式用於建造不透水牆的部分（漏斗部分）的施工法，則較為使用的包括鋼板樁及泥漿牆法。此外，尚包括溝渠機，深層土混合，高壓噴漿及垂直水力破裂等方法。傳統的開挖方法可使用怪手等機具進行，一般開挖機具大約可挖至 35-70 英尺左右的深度。通常淺的溝渠也許不需要支撐，但多數的反應牆在回填材料前，通常必須使用合適的支撐方法，包括結構牆（例如溝箱）及泥漿等 2 種方法。溝箱是開挖處理牆反應單元時最常用的方法，該法是利用多孔式或鐵網的箱子作為溝渠的支撐，但該法在最終施工階段需時較久，造成經濟上的不利，因此有其他方法，例如沉箱法、連續溝渠機及生物可分解泥漿法等。使用泥漿法作為溝渠回填前的支撐，通常在經濟成本上較節省，但常用的皂土泥漿會阻塞透水性反應牆，必須使用生物可分解的聚合物泥漿作為支撐（例如由豆類製造而成之 Guar Gum，是一種天然食物添加劑）。此種泥漿與反應性材料待埋入地下後，可生物分解形成多孔性介質，作為反應牆材料的一部分。溝渠機通常用於開挖較淺的溝渠，大約在 20-30 英尺左右，開挖寬度則約為 12-36 英尺間。藉由溝箱的安裝，溝渠機施工時可同時放入反應性材料。

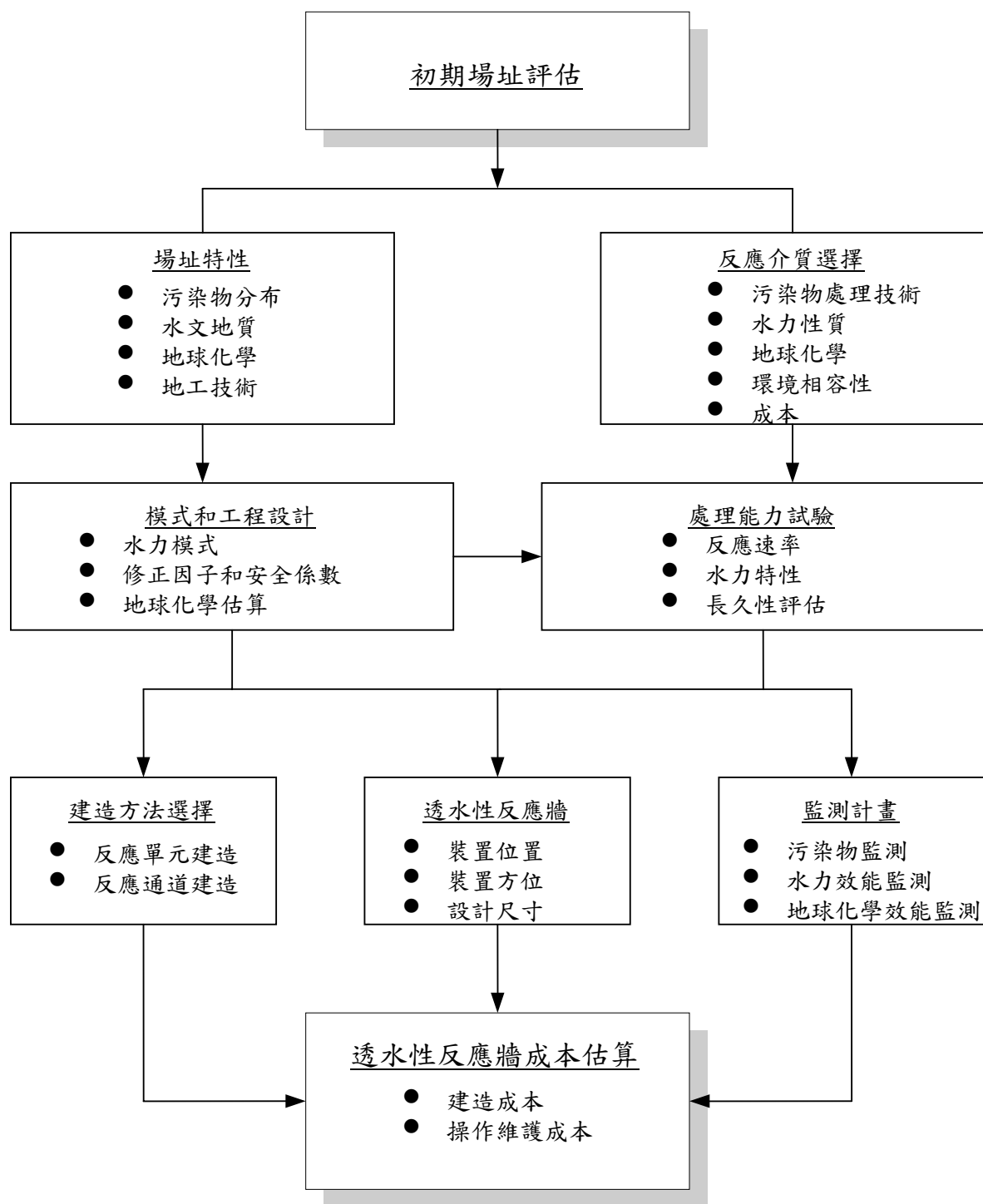
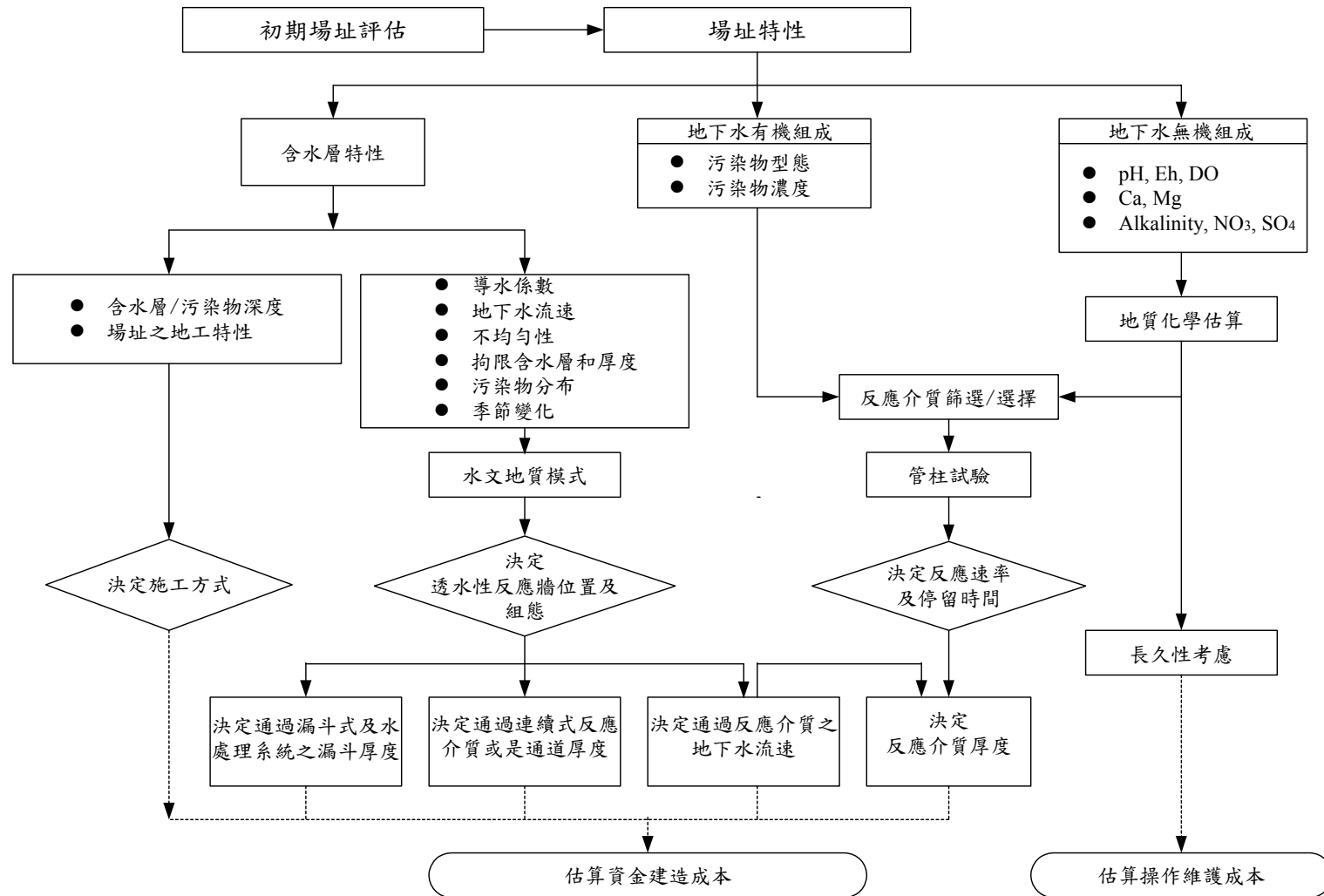


圖 5-13 透水性反應牆之設計方法^[2]

圖 5-14 透水性反應牆之設計流程圖^[2]

深土混合法係由日本開始使用^[29]，主要是利用大型螺旋鑽(直徑約 3-8 英呎)鑽入土中同時注入皂土及水或水泥、皂土及水的泥漿，以建造不透水阻隔牆，亦可以用於注入鐵顆粒與生物可分解性泥漿。高壓注入法則是常用於建築工地中，作為注入薄漿以改善地質穩定的方法，也曾被用於做不透水牆的方式，其優點在於可靠近管線或石塊等阻隔物的邊緣施工，且設備小，搬運費用低。該方法係在鑽頭附近加入噴頭，一旦鑽至適當深度後，地面上的泵即增加壓力使泥漿注入，小的土壤顆粒會被帶至地面，而粗顆粒土壤及泥漿則留在地下。若在取出噴頭時進行旋轉並噴漿的動作，則噴出的材料會形成 3-7 英呎直徑大小的柱子，視注入量及抽出速度而定，反應性的材料可佔柱子的 75 % 左右。若噴頭取出時不作旋轉，則僅大約 5 英吋的薄牆。鐵粒及 Guar gum(一種天然食物添加劑)的混合漿作注入劑，包括柱形牆及薄牆均已成功應用於現地場址中，其配合之方法，除上述方法外，利用水力破裂的方式也曾成功測試過。

(四) 成本分析

透水性反應牆的設置成本主要包括 3 個部分，即反應性材料費、通道設置費及漏斗部分的設置費。視使用材料、與裝置尺寸而定，整個場址之設置費常介於美金 3 至 150 萬元間^[15]。一般而言，以較淺層的不透水牆部分，其設置費約介於每平方英呎美金 10-25 元之間。反應性材料費用的估算，首先須了解反應性材料用量，可藉由反應動力配合地下水流速等特性，進行估算。在通道裝設費用部分，一般是以體積進行估算，經由單位面積所需通道的體積方式，再乘以單位即可得到成本數值。一般而言，每一立方英碼約需美金 75-400 元，此部分在整個成本上佔重要的一部分。若依美國地下水整治技術中心 (Groundwater Remediation Technology Analysis Center, GWRTAC) 統計 30 個使用本技術之場址，平均每個場址約為 45 萬美金。

(五) 反應牆水質監測^[30]

當透水性反應牆已經設計和裝置完成，該場址必須設置適當的監測系統，藉由地下水採樣和分析污染物，以確認污染物已經被反應介質降解，其處理過後之地下水必須符合相關法規的需求。另一方面，監測系統也可以評估透水性反應牆之設計操作效能。根據監測系統的功能類別，監測系統可分成，符合性監測 (compliance monitoring) 和操作性監測 (performance monitoring) 兩大類，前者主要

在於監測受污染場址地下水中污染物是否超過法規限值，通常包含一般水質項目(如 pH 值、比電導度、鹼度等)監測及降解產物的監測。在設計監測系統時，除上、下游外，井的數目視場址及整治系統而定，但應能保障受污染地下水不會由阻絕牆及反應牆之上下或左右流至下游。在靠近反應牆區的下流監測井應保持足夠的距離，以避免採樣時由不同來源的水造成混合的情形，但也不應在下游太遠處，以免必須耗費太久時間才可判定反應牆的效果。在反應牆上游的監測井也不可離牆太近，以免採樣時由牆中抽取出的水，造成代表性不足。

操作性監測則主要在於透水性反應牆及不透水牆本身的監測，以了解操作與設計間之差異，並評估處理系統之物理、化學及礦物性質隨時間之改變狀況。與合格性監測不同，操作性監測的監測井通常設於透水牆(或阻絕牆)內或非常接近的地方，由於處理區域一般很小，因此取樣體積上通常比傳統地下水採樣(例如符合性監測樣品)小很多。一般而言，直徑小(例如 2/3 英吋)且井篩短 (<1 英呎)的井或管群可用於此種操作。監測井的設置在較深的透水牆中也滿困難的，例如僅數個百分比的偏差即可能使井在較深的位置跑出牆外，但可用一些簡單的化學參數(例如比電導度)來判定井是否仍在牆中。此外，污染物的降解及轉換，地球化學的指標，處理牆內沉澱物及微生物的累積，甚至於水力特性的變化，也均是反應牆操作性監測的重點。

5.3 適用同時整治土壤與地下水污染之整治技術

5.3.1 電動力法

在污染場址的物理、化學或生物整治技術中，電動力整治技術為一種新穎的現地整治技術，可直接於污染場址現地將污染物加以移除、處理或侷限。一般而言，電動力法具有以下之優點：(1)能於現地將污染物由污染介質中去除；(2)不受污染物種類限制；(3)可有效控制電滲透流之流向；(4)高移除效率及具安全性；(5)對於低滲透性之土壤其處理效果亦十分顯著^[31]；(6)具有與其他整治技術搭配之彈性。在過去十餘年來，電動力法持續地吸引了研究人員及政府官員的注意，並嘗試將此種技術應用於污染場址整治方面，先前多應用於低滲透性土壤重金屬污染物之移除，後續又有用於有機污染物之去除，或搭配其他技術將污染土壤中有害物質去除^[32-38]。由於電動力技術操作毋需大規模開挖，適用於無機或有機污染物種，且無生物毒害之問題，在國外已

有許多應用成功的案例，以下即針對其理論基礎及操作條件等逐一介紹，以提供未來現地應用之參考。

一、技術介紹

電動力法的原理係將正負電極置於待處理之污染場址中，施加適當大小之直流電壓或電流後，藉由陰、陽電極間生成之電場作用，驅使帶正電荷之離子被吸引到負極（陰極）；相反地，帶負電荷之離子則向正極（陽極）移動；此外，實驗證實溶解性非離子物種另可藉由電滲透流之傳輸，藉以引導土壤中電解質溶液之移動，進而達到去除土壤中污染物的目的，其原理示意如圖 5-15 所示^[39]。

電動力技術不僅適用於飽和層土壤，亦可應用於不飽和層土壤，其中，污染物質之傳輸方向與量，則受污染物濃度、污染離子移動性、土壤結構與性質及土壤孔隙水界面化學與傳導性所影響。電動力整治技術的主要作用機制包括：(1)電滲透、(2)外在水力梯度、(3)酸鋒(acid front)趨向陰極處之擴散及陰、陽離子向其相反電性電極移動所造成之平流(advection)作用、以及(4)電動力操作過程中，在電極鄰近的電解反應等，但通常必須考量的兩個範疇則是：電動力傳輸—包括電滲透、電遷移與電泳等 3 種主要之傳輸機制，以及土體中誘發之電化學反應^[40]。此外，利用電動力技術將污染物藉由前述之作用向電極遷移後，可再利用電析、沉降或共沉降、離子交換樹脂或近電極處抽水等方式將污染物種予以去除。

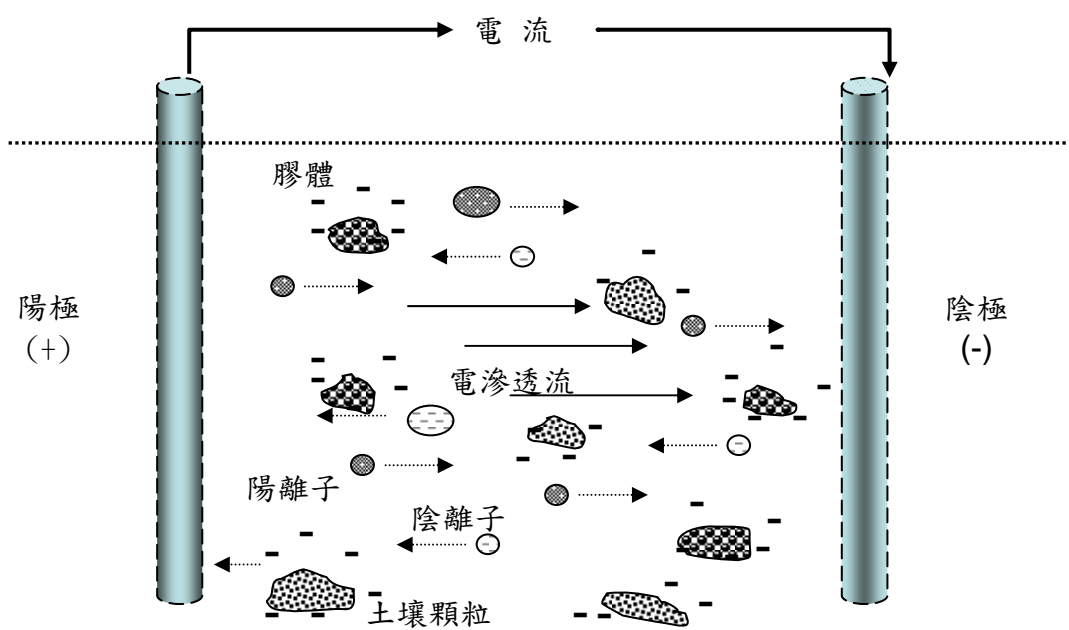
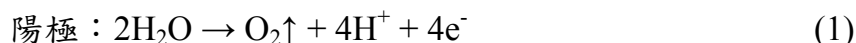


圖 5-15 電動力法處理原理示意圖^[39]

(一) 電解反應：電動力法進行時，陽極槽產生氧化反應，以致大量氫離子之持續累積，使得 pH 值將降至 2 左右(式 1)，而陰極槽產生還原反應，大量之氫氧離子而使 pH 值升至 12 左右(式 2)。陽極端產生之氫離子，會隨電滲透流向，往陰極移動。因酸性溶液之流動，將逐漸降低土壤之緩衝能力，有改變污染物在土壤中分布關係之可能。處理後污染物將隨電滲透流匯集於電極端，可抽取去除之或藉其他方法處理(如生物分解)。



(二) 電滲透流率：土壤顆粒之土壤之物化特性、操作流質、電壓等因素為影響電滲透處理的重要因子。電滲透流率 Q_e (mL/d)，可以式 3 表示：

$$Q_e = \frac{\zeta \varepsilon q}{4\eta L} \cdot \frac{E}{L} \cdot A \quad (3)$$

式中， L =土壤管柱長(length of soil core，cm)；

A =截面積(cross-section area， cm^2)；

E =電位差(potential difference，Volt)；

ζ =界達電位(zeta potential，mV)；

η =流體黏滯係數(viscosity of fluid)；

ε =流體介電常數(dielectric constant of fluid)；

q =經驗常數(與土壤特性有關)。

而電滲透流率 Q_e 又可修正成類似達西公式：

$$Q_e = K_e \cdot i_e \cdot A \quad (4)$$

上式， K_e =電滲透係數(EO permeability， $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)，一般而言，介於 10^{-5} 至 $10^{-6} \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 之間，高 K_e 值顯示高含水量。

i_e =電位梯度(potential gradient， V/cm)。

(三) 質量傳輸：應考慮污染物受擴散、離子移動，電滲透流動，水流動向，液固相間之反應(諸如吸附、溶解、氧化還原反應)等影響如 5 式所示：

$$J_i = D_i^* \nabla(-C_i) + \left(\frac{|Z_i|}{Z_i} \right) C_i \mu^* \nabla(-V) + C_i k_e \nabla(-V) + C_i K_h \nabla(-h) + \frac{1-\phi}{\phi} \frac{\partial(\rho_s c_{is})}{\partial t} \pm k_i c_i \quad (5)$$

$$\text{式中, } \mu^* = \frac{D^* z F}{RT}; \quad D^* = D \cdot \tau \cdot \phi;$$

C_i = 某 i 物質濃度(mg/cm³),

t = 時間(sec);

V = 孔隙流速(interstitial velocity, cm/sec);

r = 固體密度(g/cm³);

C_{is} = i 物質在固體中濃度(mg/cm³);

k = 化學降解速率(1/sec); T = 絕對溫度(°K);

f = 孔隙度(porosity); t = 迴流係數(tortuosity factor);

R = 氣體常數(1.987 cal/°K-mole);

K_h = 水力傳導係數(hydrodynamic conductivity, cm/sec),

m^* = 有效離子移動係數(effective ion mobility),

D^* = 有效擴散係數(effective diffusion coefficient, cm²/sec),

D = 自由溶液中離子擴散係數(diffusion coefficient of ion in free solution, cm²/sec),

因此在電動力處理過程中, 控制質量傳輸之重要土壤因子, 如土壤 pH 值, 土壤界達電位(表面電荷), 土壤粒徑, 土壤中污染物的含量, 土壤對污染物吸附特性, 及控制操作流質之成分、電壓、電極槽之 pH 值應列入考慮並加以分析^[37]。

經由電極對建立化學電場後, 產生若干反應, 主要可分為兩部分:(1)因施加電位而發生的反應, 例如: 電滲透(electroosmotic flow)、離子遷移(ionic migration)、水的電解(electrolysis of water)、電泳(electrophoresis)、在陰極的電沉積反應(electrodeposition at the cathode); (2)不論是否施加電位均會發生的反應, 例如: 吸附/脫附(sorption / desorption)、錯合/沉澱(complexation/precipitation)、酸鹼反應(acid-base reactions)、擴散(diffusion)^[40,41]。在現地復育應用上, 電動力法除可適用於各種污染土壤外, 對於低滲透性之土壤(例如: 淤泥及黏土等)尤具優勢; 此外, 適用之污染種類相當廣泛, 包括: 重金屬、有機污染物、輻射核種及具毒性陰離子等, 此整治技術可同

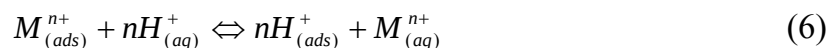
時處理飽和層及不飽和層土壤，其處理費用亦較一般傳統技術為低。除此之外，電動力技術亦具有水文控制功能及可與其他整治方法組合之特性。

二、電動力法去除機制

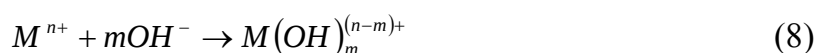
電動力法造成土壤中污染物之去除機制有以下 4 種：離子遷移：為離子於孔隙間移動；電滲透流：環境介質中流體之移動，施加電壓時水分子之移動；電泳：為帶電顆粒之移動，包括膠體或微胞；電解：電場所造成水分子分解之化學反應等，土壤系統(包括：土壤顆粒、孔隙流體及空氣)在電場作用下，帶電荷離子向其相反電性的電極移動，在離子移動的同時拖曳水分子移動，藉此引導孔隙流體的移動，而形成電滲透流^[42]。

一般而言，在水-土壤系統中，土壤顆粒表面通常帶負電荷，因此，電滲透流的流動方向為由陽極向陰極流動。造成電滲透流現象主要係由於水具有很高的介電常數(dielectric constant)及容易與其他離子形成水合離子(hydrated ion)的特性，一個陽離子可以和數個水分子帶負電的一端連結形成穩定的排列，至於陰離子的水合作用並不明顯，因此，陽離子往陰極移動的同時也使得水分子往陰極移動。電動力法之化學反應完整程序如下敘述^[43]：

- (一) 陽極表面進行氧化反應，產生氫離子(H^+)
- (二) 陰極表面進行還原反應，產生氫氧離子(OH^-)：
- (三) 陽極產生的氫離子藉由離子遷移(ion migration)效應、電滲透效應、水力坡降及濃度擴散(concentration diffusion)的作用下，循著孔隙往陰極流動。
- (四) 氫離子在往陰極輸送時，移動的過程中，會不斷地與土壤所吸附的陽離子污染物進行離子交換反應：



- (五) 土壤中的孔隙流體因電滲透、水頭及濃度擴散而往陰極流動，故重金屬因孔隙流體的流動而被帶出土壤，達到淨化土壤的目的。
- (六) 陰極除了電解水反應外，亦會發生勻相與非勻相兩種反應。其中勻相反應包含了 H^+ 與 OH^- 中和反應與重金屬離子的錯合反應：



非勻相反應包含重金屬離子的沉澱反應與還原反應：



事實上，這些反應對整個處理程序具有關鍵性的影響。例如，沉澱反應所形成的固體顆粒也許會累積在土壤孔隙中，直至填滿整個通道而造成堵塞。

三、電動力法之影響因子

影響電動力技術之污染物移除因子主要包括：鄰近電極之化學反應、土壤含水率或飽和度、土壤組成、pH 值及其梯度、污染物種類與濃度及施加之電流密度等。

(一) 鄰近電極之化學反應

於電動力進行時，鄰近電極處所產生極化現象，將造成能量傳輸的障礙，因而降低污染物移除之效率。極化現象包括：活性極化(activation polarization)、濃度極化(concentration polarization)及歐姆極化(ohmic polarization)等^[44,45]。活性極化主要來源為電極反應期間，由於中間物的產生，或電極上因產生氣體而吸附於電極上，影響電極的電位差而使電極的反應速率變慢，造成電極之電阻增加。濃度極化則為電動力技術操作時，兩電極處的電解質濃度與最初平衡值不同，形成一濃度梯度而致電極之電位改變之現象。另外，當電極表面附有一層雜質（例如金屬電極之氧化物、不溶性鹽類、油脂或其他金屬等）時，會造成電極之電阻增加，此現象稱為電阻極化或歐姆極化。上述 3 種極化現象為電動力操作過程電流密度降低之可能原因。

(二) 土壤含水率

土壤之含水率之多寡將影響電動力法對於污染物種移除之成效，為保持合適之操作狀態，有人會在陽極處連續地注入清潔劑或清水，以確保污染物得持續由陰極處移出^[44]。

(三) 土壤型態與結構

由於土壤不同物化特性之影響，將使其整治成效受到影響，例如 pH 值之變化、水解及氧化/還原反應等。Krishna 等人^[46]曾針對 3 種不同型態的土壤進行電動力實驗，結果發現，當土壤的碳酸鹽含量較高時，會阻礙酸鋒的形成，因此，處理過程中土體呈鹼性；而當土壤的碳酸鹽含量較低時，明顯地會有酸鋒的形成，且土壤由陽

極處至陰極處產生 pH 值變化梯度。因此，若土壤的碳酸鹽含量較低，將有助於陽離子於土壤表面脫附並隨電滲透流移出土體。此外，Vane 與 Zang^[39]亦曾針對高嶺土與皂土等不同種類之黏土進行土壤顆粒界達電位對於電滲透流率影響之探討，結果發現黏土於 pH=5 時電滲透流為 pH=3 時之 3 倍，若能選擇適當的電解液條件（例如：較低之離子強度、較高之 pH 值及較低之二價陽離子濃度等）將有助於電滲透流的增加。

(四) pH 值及其梯度

當水電解反應所生成之 H^+ 離子與 OH^- 離子未被移除或中和時，將顯著影響土體之界達電位、物種溶解度、離子狀態與電荷數及污染物種之吸附等。此外，在低 pH 值狀態下，將有助於金屬性污染物種之脫附，並形成可溶性之化合物，增進其移除效果。Lee 與 Yang^[47]曾利用電解液迴流方式控制處理液之 pH 值，進行電動力整治受鉛污染之高嶺土試驗，藉此避免電滲透流之降低與重金屬之沉積。試驗結果顯示於迴流過程中，黏土 pH 值之降低速率明顯減緩，以 1.1 L/min 迴流速率可將陽極槽液 pH 值由 2 增加至 4、陰極槽液 pH 值由 12 降至 8。此外，陰極槽液中之鉛明顯地鍍於電極表面，並未沉積、吸附或進入測試的黏土中。然而，當 pH 值過低將致使界達電位極性之改變，而使電滲透流改向。為增進污染物種之移除成效，如何控制合適之 pH 值是電動力法成功應用的重要因素。

(五) 污染物種類與濃度

電動力法對於高溶解性無機離子物種之移除尤具成效，即使是低滲透性土壤仍具效果；對於不溶解性或非離子性之有機物種，則可利用其電化學反應機制或其他改善技術（例如界面活性劑之添加）達到整治成效。電動力技術對於高濃度污染物之整治，通常需要較長之操作時間。此外，不同之金屬初始濃度與土壤吸附容量，將使得土壤表面之負電荷降低，並於 pH 值達零電位點時，轉變為帶正電，相同地，陰離子之化學吸附將使土壤顆粒表面負電荷增加。另外，文獻中曾針對土壤中離子物種對電動力影響效應進行研究^[48]，發現當土壤中 Al^{3+} 含量較高時， Al^{3+} 遷移至陰極時受到高 pH 值環境的影響會形成停滯，直至被 H^+ 再度溶解，此結果並造成土體前段部分擴散現象及電泳效應的不明顯與電位梯度平緩，而於土體中後段部分擴散現象及電泳效應則明顯劇降，電位梯度變得明顯。

(六) 施加之電流密度

Hamed 等人^[49]以不同電流密度針對高嶺土探討電滲透流流率，在經由施加 0.123 mA/cm^2 至 0.615 mA/cm^2 等不同電流密度的結果發現，施加的電流密度愈大，其電滲透流流率愈大，並可減短達到預定的電滲透流流率之時間，及縮短酸鋒由陽極至陰極所需的時間。

四、電動力法之應用

電動力法已被美國環保署列為整治 DNAPLs 污染黏質土壤場址之可行性技術之一^[41,50]，且已經成為商業化的整治技術；於國外研究方面，電動力法用於處理現地受污染土壤之場址且效果顯著，表 5-9 為美國電動力現地處理受重金屬污染土壤之案例及研究^[51]，其處理污染物大多為重金屬污染土壤，然經電動力處理後之去除率可達 35-100%。國內雖仍在起步階段，但對於污染場址現地復育，或實驗室規模試驗電動力參數之探討，皆有相當多之研究，主要處理之污染物為鎳、銅、鋅、鉛、鎘及鉻等，其操作條件彙整如表 5-10。

表 5-9 美國電動力現地整治及實場研究^[51]

研究單位	土壤特性	電極間距	電極埋入深度	電壓 / 電流大小	操作流質	污染場址規模	污染物	處理時間	處理前、後污染物濃度	處理費用
Electrokinetics, Inc. (EK)-CADEX™ Electrode System	高嶺土	N/A	3 呎	N/A	特殊試劑	長 60 呎、寬 30 呎、深 3 呎	鉛	6-8 個月	處理前 1000-5000 ppm	N/A
Environmental & Technology Services (ETS)	黏土	N/A	N/A	10-15 A	N/A	長 200 呎、寬 200 呎、深 70 呎	VOCs BTEX TPH	3-12 個月	處理後 N/A 處理前 VOC : 10-30 ppm BTEX : 3000 ppm 處理後 VOC : < 0.1 ppm BTEX : < 40 ppm TPH : < 35 ppm	\$17-50/噸
Isotron Corporation-ELECTROSORB™ Process	砂及高嶺土混合	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	鈾、汞	N/A	處理前 汞 : 10-20 ppm 處理後 鈾 : 50% -90% 移除	N/A
Consortium of Monsanto, DuPont and General Electric-Lasagna™ Process	含礫石及砂之黏土	2-7呎	15 呎	100-140 40-45 A	V N/A	長 15 呎、寬 10 呎、深 15 呎	TCE	4-36 個月	處理前 1 ppm-1760 ppm 處理後 < 1.5 ppm	\$40-90/英畝
Geokinetics International, Inc. (GII) – Pool Process	黏土	5-10 呎	0.3-3.3 呎	5-20 0.5-1.0 A	V 酸、鹼	長 23 呎、寬 10 呎、深 3.3 呎	鎘、銅、鎳、鉛、鋅	2-18 個月	處理前 (ppm) 鎘 : 600 銅 : 500-1000 鎳 : 860 鉛 : 300-5000 鋅 : 2600 處理後 (ppm) 鎘 : < 50 銅 : < 250 鎳 : < 80 鉛 : < 75 鋅 : < 300	
Isotron Corporation – SEECTM Pad Technology and ELECTROSORBTM Process	高嶺土、砂	4-5呎	2 呎	90-100 40-50 A	V 檸檬酸、碳酸鹽	長 9 呎、寬 8 呎、深 2 呎	鈾、汞	20-40 天	處理前 鈾 : 600 ppm 處理後 鈾 : > 99% 移除	N/A
Lynntech, Inc.	黏土	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	鉻、鉛、鹵化物	3-9 個月	處理前 N/A 處理後 鉛 : 65% 移除	\$65 -125/英畝

表 5-9 美國電動力現地整治及實場研究^[51] (續一)

研究單位	土壤特性	電極間距	電極埋入深度	電壓 / 電流大小	操作流質	污染場址規模	污染物	處理時間	處理前、後污染物濃度	處理費用
Sandia National Laboratories (SNL)	飽和度 25% 之未飽和土壤黏土	N/A	15 呎	N/A	氯化鈉	700-1000 立方呎、深 15 呎	鈾、鉻	4-12 個月	處理前 鉻：25-10000 ppm 處理後 鉻：75% -90% 移除	\$50-150/噸
Geokinetics International, Inc. (GII) – Pool Process		5-10呎	0.3-3.3 呎	5-20 V 0.5-1.0 A	酸、鹼	長 230 呎、寬 10 呎、深 3.3 呎	鎘、銅、鎳、鉛、鋅	2-18 個月	處理前 鎘：600 ppm 銅：500-1000 ppm 鎳：860 ppm 鉛：300-5000 ppm 鋅：2600 ppm 處理後 鎘：< 50 ppm 銅：< 250 ppm 鎳：< 80 ppm 鉛：< 75 ppm 鋅：< 300 ppm	N/A
Massachusetts Institute of Technology (MIT)	高嶺土	20公分	1.5 公分	20 V	醋酸	實驗室土壤管柱，長 200 mm 直徑 32 mm	鋅、酚	9-60 天	處理前 鋅：500 ppm 酚：45-450 ppm 處理後 鋅：98% 移除 酚：94% 移除	\$20-30/噸
Electro-Petroleum, Inc. and Lehigh University	高嶺土砂、黏土	N/A	N/A	30 V 1.5 A	EDA、去離子水	實驗室管柱；長 7.62 公分、深 3.55 公分	鈾、錒、鉍、鉻、鈷、鎘、汞、鉛、鎳、鋅、碳氫化合物	24-170 小時	處理前 鈾：10-100 ppm 錒、鉍：1000 ppm 鉻：3000 ppm 汞：5-130 ppm 鎳：1000 ppm 鉛：15000 ppm 鋅：22500 ppm 處理後 鈾：30-80% 移除 錒、鉍：70-100% 移除 鉻、鎳：94-95% 移除 汞、鉛：60-85% 移除 鋅：35-65% 移除	\$37.5/英畝

表 5-10 國內電動力法處理重金屬污染土壤之相關研究

作者	操作流質	研究內容	污染物	操作條件
洪肇嘉等人 (1998a) ^[52]	陽離子萃取液為 1M 氯化鎂， 陰離子萃取液為 0.5M 的磷酸氫二鈉	電動法復育鉻、鎘、鉛污染土壤之 研究	鉻、鎘、鉛	1. 電位坡降為 1 V/cm，處理時間為 5 天 2. 土壤種類 (石英砂及高嶺土) 3. 電極材質 (惰性石墨電極及不鏽鋼網電極) 4. 污染物種類：陽離子(鎘及鉛)及陰離子(六價鉻)
洪肇嘉等人 (1998b) ^[53]	2.5mM 之重鉻酸鉀 及三價鉻、鉛、鎘等 硝酸鹽類	電動法附加水流去除鎘、鉻、鉛污 染土壤之研究	鉻、鎘、鉛	1. 電位坡降為 1 V/cm 2. 改變電極方向 3. 污染物種類 (鉻、鎘、鉛) 4. 流速 (1.0×10^{-3} 及 1.0×10^{-4}) 5. 溫度 (15 °C 及 30 °C)
洪肇嘉、紀吉鴻 (1999) ^[54]	去離子水	重金屬處理污染土壤之二維尺度 研究	鎘	1. 電場強度 10.5V 2. 靜止系統及流動系統 (流動水流，外圍補注及中間抽取)
張坤森 (1998) ^[55]	去離子水	發展改良式電動力學技術整治鎘 污染土壤之研究	鎘	1. 電壓 (25 V、50 V、100 V、200 V) 2. 土壤種類 (砂、高嶺土、蒙脫土)
張坤森等人 (1999) ^[56]	去離子水	以改良式電動力技術整治桃園縣 鎘、鉛污染土壤之研究	鎘、鉛	1. 定電壓 200 V 2. 添加 Fe(NO ₃) ₃ 、電解酸液、超音波」之前處理
張坤森等人 (2000) ^[57]	去離子水	利用超音波及電動力技術促進 鎘、鉛污染土壤整治之研究	鎘、鉛	1. 土壤種類 (砂土、高嶺土、蒙脫土、觀音土系及蘆竹土) 2. 超音波震盪時間 5~30 min 3. 定電壓 (50 V 及 100 V)
張坤森等人 (2001) ^[58]	HCl、citric acid、電 解酸液、EDTA、SDS 及去離子水	觀音及蘆竹鎘、鉛污染土壤之整合 式復育技術研究	鎘、鉛	1. 定電壓 100 V 2. 萃取液：HCl、citric acid、電解酸液、EDTA、SDS 及 去離子水
張坤森、劉世樑 (2004) ^[59]	地下水	表面處理業重金屬污泥之電動力 整治技術及成效評估研究	重金屬	1. 二階段定電壓：初期 10 V (第 1-4 天)、中後期 40 V (第 5-11 天) 2. 處理時間為 11 天
黃嘉貞、薩支高 (2000) ^[60]	去離子水	以電動法復育受鎘污染土壤之模 場 2D 試驗	鎘	1. 定電壓 32 V 2. 通電時間分別為 1~30 天
林世平等人 (2004) ^[61]	地下水	改良電壓操作方式對電動力處理 受污染底泥之影響	底泥	1. 定電壓分別為 16.0 及 24.0V 2. 處理時間為 48 及 96 hr
章日行等人 (2004) ^[62]	不同 EDTA 之鈉鹽 溶液	循環改良式電動力法復育鎘與鉛 污染之土壤	鎘、鉛	1. 操作流質：不同 EDTA 之鈉鹽 2. 定 pH 值、導電度及電流 3. 處理時間為 21 天

5.3.2 植生復育法

植生復育(phytoremediation)係利用植物以達到移除、濃縮及溶解環境污染物，因此所有受植物影響且有助於污染物清除之生物、化學、物理程序均可稱為植生復育^[63]。植物本身進行多種新陳代謝反應，亦具有相當顯著之吸附容量、及與土壤間具有離子選擇性之傳輸系統，因此其可調整適應於環境中重金屬及有機污染物之存在，植物根部組織由於提供大量之比表面積，故對土壤中污染物之汲取多由此區域開始，因此植物可藉由根部降解有機污染物及減緩其移動，亦可將重金屬由土壤中濃縮至植物莖、葉部而達到去除污染物之目的。植生復育處理機制如圖 5-16 所示，其除污物理程序主要包含：

- 控制水力坡降，減低地下水流速，減少污染物之擴散速率。
- 加速有機物降解或伴隨根層微生物的作用而促進降解。
- 使無機污染物能在植物部分達到濃縮的目的。
- 本身污染物與植物的組織達到吸附的情形。
- 有機污染物將自根層吸附後至葉部揮發，而擴散至大氣。

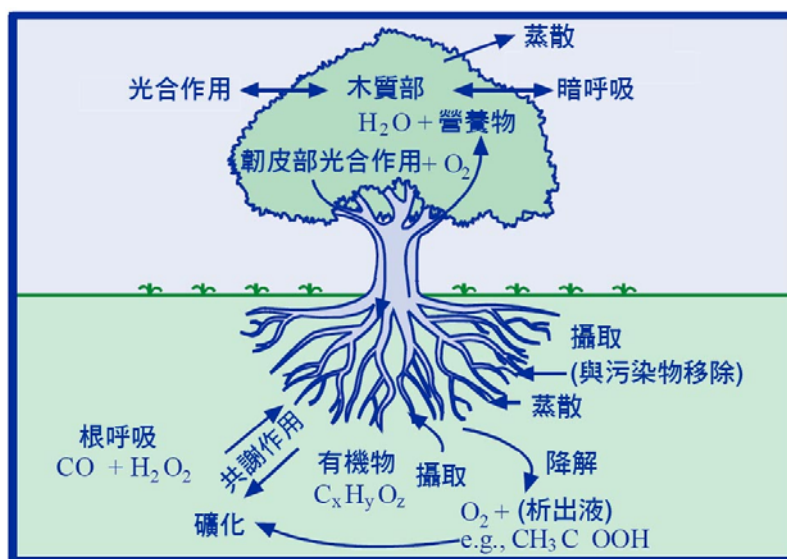


圖 5-16 植生復育處理機制^[64]

一、技術介紹

植物與微生物共生的關係可以想像成生物反應器一個自然平衡的機制，而此平衡機制控制微生物降解地下污染物的所需環境條件及物質，當提供太陽能、二氧化碳、水、無機營養物質，植物本身提供很多在生物分解工程上所需之條件而達到去除污染物，而其僅需極低花費^[65]。選擇植生復育物種所需的條件包含下列：根部的成長速率及範圍、蒸散速

率、適應污染物的能力、植物在整治場址中得以生長適宜的能力。植生復育技術概述整理如表 5-11 所示，依據其不同之應用性可區分為植物萃取(phytoextraction)、植物穩定(phytostabilization)及根層過濾(rhizofiltration)等 3 類，植物選擇之指標包括：

- (一) 生長速率及產量
- (二) 蒸散能力
- (三) 具降解功能酵素之產生
- (四) 根部區域生長深度
- (五) 對污染物之容忍力
- (六) 生物累積能力

表 5-11 植生復育技術概述^[66]

技術特性 ● 適用受重金屬污染且適合栽種植物之場址。 ● 處理深度僅至植物根部區域。 ● 所需時間較其他整治技術為長。 ● 植物品種適用性隨著污染物種而異。		
植物萃取 (phytoextraction)	植物穩定 (phytostabilization)	根層過濾 (rhizofiltration)
<u>定義</u> ：將污染物由土壤汲取至根部及地表上之植物組織，而此植物組織將定期收割再進行後續處理。	<u>定義</u> ：利用根部滲出液化學物質，減低污染物之流動性，使污染物之化學物質固著於土壤與根部界面；提高土壤酸鹼值可助於重金屬污染物穩定化。	<u>定義</u> ：根層過濾主要是利用植物根部對於重金屬進行吸附、濃縮、及沉澱以處理受污染水。
<u>技術應用現況</u> ：烏克蘭已針對核反應金屬污染場址採用此技術進行實場實驗；美國紐澤西州及俄亥俄州亦進入實場實驗階段。	<u>技術應用現況</u> ：研究正進行中。	<u>技術應用現況</u> ：已普遍應用於人工溼地處理受污染水。
<u>應用性</u> ：研究發現鎳及鋅為最容易被植物汲取；而銅及鎘之初步研究結果亦顯示處理效率頗佳。	<u>應用性</u> ：重金屬應用範圍廣泛，尤其對鉛、鉻及汞最為有效。	<u>應用性</u> ：其對於處理大量且低濃度重金屬之廢水，非常具經濟效益，處理重金屬種類廣泛。
<u>備註</u> ：處理經費依污染濃度、污染深度、植栽數量及後續處理費用而定。	<u>備註</u> ：場址需進行長期維護工作。	<u>備註</u> ：僅可適用於地下水及廢水之處理。

(一) 植物萃取

植物萃取技術係使用高累積植物(hyperaccumulator plant)將土壤中金屬濃縮至根部及地表上之植物組織^[63,67,68]，所謂之高累積植物定義為葉部含有 0.01% (乾基)以上之鎘，或 0.1% (乾基)以上之鎳、鈷、銅、鉻，或 1% (乾基)以上之鋅、錳之物種，而與金屬污染濃度無關^[67,69]。高累積植物之生長受到地域環境之影響^[67,69]，文獻顯示，在新英格蘭、菲律賓、古巴、巴西發現適合處理鎳之高累積植物，在歐洲及亞洲發現處理鎳及鋅之高累積植物，植物物種及對應污染物彙整如表 5-12 所示。

由於高累積植物具有生物質量高產率特性，因此當其達到萃取土壤重金屬之目的後，此濃縮重金屬之植物組織需經過完善處理，才不致對環境造成危害，同時亦應注意落葉之處理，以免重金屬經由落葉與土壤之接觸，又回到土壤傳輸途徑。

表 5-12 高累積植物物種^[67,69]

重金屬	植物物種	葉部重金屬含量(%，乾基)	生長國別
鈷	<i>Haumaniastrum robertii</i> (蒿莽草屬)	1	薩伊
銅	<i>Aerolanthus biformifolius</i>	1	歐洲
鎳	<i>Phyllanthus seroentinus</i> (葉下珠屬)	3.8	新英格蘭
	<i>Alyssum bertoloni</i> (亭薺類植物) and 50 other species of alyssum	> 3	歐洲南部及土耳其
	<i>Sebertia acuminata</i>	25	新英格蘭
	<i>Stackhousia tryonii</i>	4.1	澳洲
鉛	<i>Brassica juncea</i>	< 3.5	印度
鋅	<i>Thlaspi calaminare</i> (蘆葦葉薺)	< 3	德國
	<i>Viola species</i> (堇菜屬)	1	歐洲

(二) 植物穩定

植物穩定係利用植物限制土壤中金屬的移動性及生物利用性。理想上而言，具備植物穩定功能之整治植物應該能容忍高濃度之重金屬，且藉由吸附、沉澱、複合作用或改變金屬價數而使減低其在土壤中之移動性。同時該類植物之組織亦應具備有對重金屬低濃縮之特性，如此可防止重金屬累積於莖、葉部，而成為有害性的廢棄

物。此外，該類植物除可以將重金屬穩定存在土壤外，其實可以減少土壤的沖蝕及底土的移動。研究顯示，白楊樹(*Popolar*)是植物穩定功能最好的深根性植物，其根部可以達到土壤下數公尺的範圍，能將重金屬穩定於土壤部分，當其他整治技術不具經濟效益時，植物穩定技術可以列為重要替代處理技術選項之一。在英國被發現許多植物可以達到植物穩定的功能，例如：

1. *Agrostis tenuis*,cv Parys：用於處理受銅污染之土壤。
2. *Agrosas tenuis*,cv Coginan：用於處理受鉛及鋅污染之酸性土壤。
3. *Festuca rubra*,cv Merlin：用於處理受鉛及鋅污染之鹼性土壤。

(三) 根層過濾

根層過濾主要是利用植物根部對於重金屬進行吸附、濃縮、及沉澱以處理受污染水。主要使用是陸生植物而非水生植物，因為陸生植物有長且纖細的根部系統，具備有大量的比表面積，可達到上述去除重金屬污染物的目的。根層過濾所移除重金屬的步驟中，並未包含任何生物程序，因此利用此作用來移除污染物的速率要比植物萃取來的低。利用根層過濾最被大家所熟悉例子為人工溼地的建造，其對於處理大量且低濃度重金屬廢水，非常具有經濟效益，已成功用於受污染水及滲出水的處理。

植物根部的析出物可能為有機物或無機物，根部析出物的碳成分來自於植物吸收二氧化碳，之後再以醣類型態存在，1-40%之光合作用產物都有可能從植物的根部釋放到土壤。根層析出物有機部分以許多形式存在，包括單醣、氨基酸、有機酸、酚類^[70]。植物析出物在現地整治扮演的功能尚未被研究出來。研究顯示，所扮演的角色可能為營養物、抗生素或化學反應的誘導者，植物的根部會藉由傳送氧氣或改變土壤的透水性來影響土壤氧化還原的能力，另外植物可以藉由蒸散系統及根部析出物持續釋出保水性的有機物質，可以改變土壤水體的水面關係。

二、性能及經濟分析

各項植生技術之優缺點分析彙整如表 5-13。以植物萃取為例，其處理效能可藉由比較污染物濃度、污染土量、植物生質產率、及植物累積重金屬容量而獲得，每單位面積所需去除污染物之植物生質量(W_b)及處理年限(T)計算如下：

$$W_b = W_m / F \quad (11)$$

式中 W_b ：每單位面積所需去除污染物之植物生質量(公噸/英畝)；

W_m ：每單位面積之重金屬污染總量(公噸/英畝)

F ：累積因子，每單位重量之植物生質量所濃縮之重金屬量

$$T = W_b / R \quad (12)$$

式中 T ：處理年限(年)

R ：植物產率(公噸/英畝/年)

表 5-13 植生技術之優缺點分析^[64]

植生技術		優點	缺點
機制	植物		
植物萃取	樹木	高生質(biomass)產率	● 將污染物由地層轉移至地表 ● 重金屬累積於植物組織，需進行後續處理。
	草類	高累積性	● 低生質(biomass)產率及減緩生長速率 ● 重金屬累積於植物組織，需進行後續處理。
	農作物	高生質(biomass)產率及提升生長速率	● 當草食動物食用後，污染物將進入食物鏈而危及人類。 ● 重金屬累積於植物組織，需進行後續處理。
植物穩定		無後續污染植物處理問題	● 由於重金屬被圍堵於土壤局部區域，而並未移除，因此污染場址需進行長期監控及維護工作。
根層過濾		金屬去除效果佳	● 僅可處理水相污染物 ● 重金屬累積於植物組織，需進行後續處理。

利用植生復育技術的目的通常是降低有害場址整治的費用，此技術的整體經濟分析須包含植栽的植種、植栽收割及後續生長之植物生長所需處理之費用。植生技術通常與其他技術共同串聯使用，使得植生技術在整個經濟效益分析上也愈顯困難。其經濟分析項目可分為 12 類^[64]：

- (一) 場址整理費用(site preparation)
- (二) 法規許可證照費用(permitting and regulatory requirements)
- (三) 初設設備(capital equipment)

- (四) 啟動及固定費用(start-up and fixed costs)
- (五) 人事費(labor)
- (六) 消耗材料費用(consumables and supplies)
- (七) 水電費用(utilities)
- (八) 廢水處理及處置費用(effluent treatment and disposal)
- (九) 廢棄物運送及處置費用(residual waste shipping, handling, and disposal costs)
- (十) 分析費用(analytical services)
- (十一) 維修費用(maintenance and Modification)
- (十二) 封場費用(demobilization)

表 5-14 為以一 200,000 平方英尺受三氯乙烯(TCE)污染場址之經濟分析案例，以分析費用(37.1%)、人事費(23.2%)及法規許可證照費用(11.8%)所需費用最高。

表 5-14 植生技術經濟分析案例 (面積：200,000ft²；污染物：三氯乙烯)^[64]

類別	費用(美金，元)	總費用百分率(%)
(1)場址整理費用		
資料蒐集	2,500	
地層特性	5,000	
地下水井設置	24,000	
整地	3,700	
植栽	2,500	
灌溉系統設立	4,250	
其他	1,250	
小計	42,650	9.1%
(2)法規許可證照費用		
許可證	5,000	
報告	50,000	
小計	55,000	11.8%
(3)初設設備		
中央數據資料收集器及其 相關設備	4,900	
壓力轉換器(10 組)	18,000	
土壤水監測探針(18 組)	6,000	
植物滲出液量探針及資料 收集器	3,593	
小型氣象站	3,000	
地下水採樣設備	1,240	
小計	37,833	8.1%

表 5-14 植生技術經濟分析案例(面積：200,000ft²；污染物：三氯乙烯)(續)

類別	費用(美金，元)	總費用百分率(%)
(4)啟動及固定費用		
小計	3,783	0.8%
(5)人事費		
植栽維護人力	28,000	
監測及採樣人力	80,000	
小計	108,000	23.2%
(6)消耗材料費用		
灌溉系統材料	2,000	
肥料及土壤改良劑	3,000	
除草劑及農藥	2,000	
樹木(960 株)	480	
工具房	2,000	
其他	10,000	
小計	19,480	4.2%
(7)水電費用		
電力	12,000	
水費	900	
小計	12,900	2.8%
(8)廢水處理及處置費用		
小計	0	0.0%
(9)廢棄物運送及處置費用		
污染土處置	7,500	
小計	7,500	1.6%
(10)分析費用		
地層特性監測	38,445	
每年監測費用(10 年)	134,400	
小計	172,885	37.1%
(11)維修費用		
灌溉系統維修	1,000	
監測井之維修與更新	4,000	
小計	5,000	1.1%
(12)封場費用		
棄井作業(5 口)	1,050	
小計	1,050	0.2%
總計	466,051	

三、影響因素

假若整治場址中的污染物深度非常接近地表，且其擴散性不大，並且對人體的危害性極低，其實植生復育技術是非常具有潛力的整治技術。其影響整治復育效率的因子有二：

(一) 場址特性

植生復育技術的處理效率通常被限制在根部生長區域之表土附近，因此影響植生復育的最重要限制因子就是根部的深度，通常在地表下 20-100 公分，當然實際深度要依據植物及土壤之型態決定，所以最適合利用植生復育的污染場址必須是污染物位於表土附近。而土壤的種類，在於植物去除重金屬物質扮演著重要的角色，因此在選取植物之前，可能必須先做污染特性的調整，可能包括土壤的 pH 值、營養成分、測試生物活性，如此才可更加瞭解此場址是否能執行植生復育的技術。當然除了土壤本身的特性外，尚有天候、灌溉水的頻率及是否加以施肥，也都影響到植物生長的情形，同時也影響到污染物去除的效率。

(二) 污染物特性

受重金屬低度及中度污染的場址最適合種植高累積性的植物。研究發現，最難被植物所吸收或穩定為鉛金屬，若將土壤特性進行調整，如降低 pH 值及減少磷酸鹽和硫酸鹽的含量，就可提升鉛金屬之處理效率^[70]。土壤特性將影響植物的生長情形，所以進行整治前，應先對當地的土壤特性及植栽先行測試，方可選取最適的處理條件。

四、未來研究方向

目前植生復育技術並未全面商業化使用，宜針對此技術在安全上、法規制度層面進行深入的探討，方能將植生復育技術建立為一個可行且標準化的整治復育技術，屆時此技術會成為具有經濟性、非侵害性、太陽能動力及具有現地處理特性之環境友善技術。根據 1994 年美國國防部「Summary Report of a Workshop on Phytoremediation Research Needs」報告指出，植生復育技術未來 3 個重要研究方向如下：

(一) 研究污染物之汲取、傳輸及累積之機制

有關於植生復育的研究於物理方面、生化方面及遺傳學的程序上應進行深入探討，因為這方面的研究將有助於更加瞭解重金屬於植物中的吸附及傳輸的機制，以便於我們可以選取最適合的植物來進行整治。

(二) 高累積性植物在遺傳學方面的評估

從遺傳學的角度及分子生物工程技術面，積極進行植物篩選技術的研究，以便培育適合的品種來進行污染場址的植生復育。

(三) 實場評估及有效性測試

應積極進行植生復育實場的整治，以便提供完善的技術資料，

俾於建立實場技術操作標準手冊，以便讓許多研究學者及業者加以遵循。

5.4 整治案例介紹

5.4.1 土壤清洗法整治案例

土壤清洗法已廣泛地應用於歐美，處理費用約美金 100~250 元/公噸，約新台幣 3,500~8,600 元/公噸。在歐洲則有移動式及固定式 2 種土壤清洗設施，在歐洲固定式土壤清洗技術市場較成熟的國家，其整治費用單價約美金 25~125 元/公噸(約台幣 850~4,300 元/公噸)。

美國 Joint Small-Arms Range 土壤重金屬鉛污染場址，經土壤物理分離/酸溶出(physical separation and acid leaching)系統處理，處理約 3,500 mg/kg 鉛之污染土壤，污染土壤濃度下降至 200 mg/kg，而 TCLP 檢驗之鉛濃度則下降至大約為 2 mg/L，推估處理 10,000 噸污染土壤之平均處理成本(含開挖費用)其單價約美金 169 元/噸(約新台幣 6,000 元/噸)。物理分離系統如圖 5-17 所示。

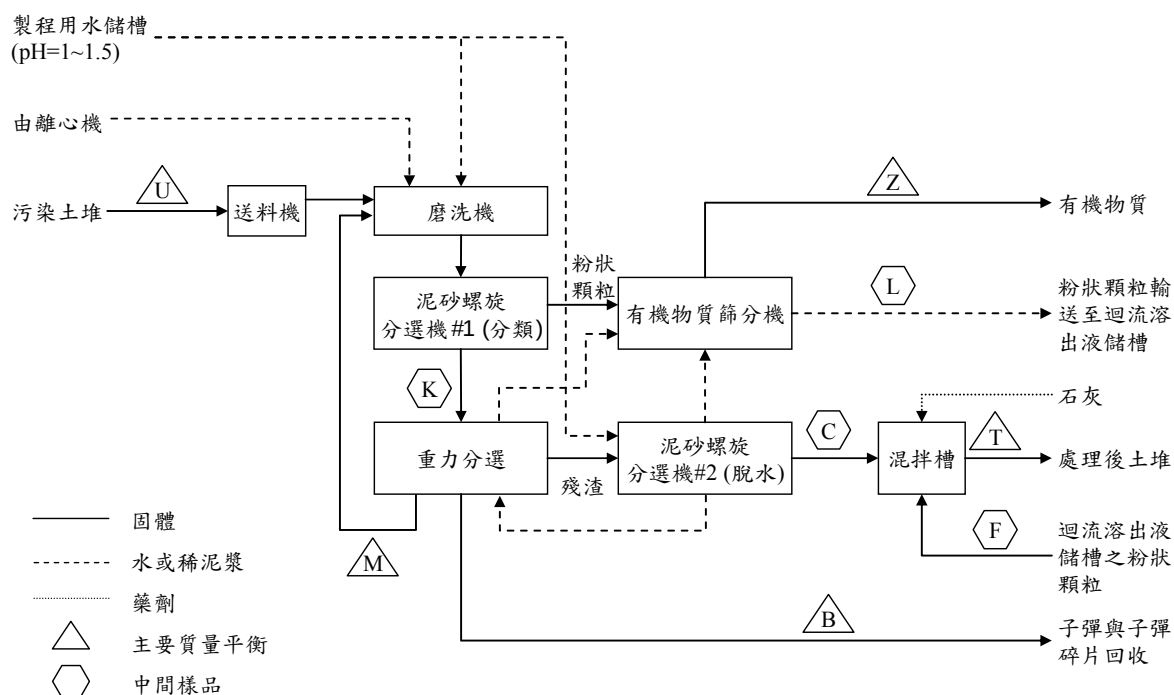


圖 5-17 美國 Small-Arms Range 鉛污染場址物理分離程序^[71]

5.4.2 翻轉稀釋及土壤酸洗法整治案例

一、國外整治案例

美國 Joint Small-Arms Range 土壤重金屬鉛污染場址挖除的污染土壤，經土壤物理分離/酸溶出系統處理(該系統使用鹽酸做為溶出劑)，投入含有約 3,500 mg/kg 鉛之污染土壤，經過此系統處理後，污染的土壤中含有的總鉛濃度下降至 200 mg/kg，而 TCLP 檢驗之鉛濃度則下降至大約為 2 mg/L，該場址採用 Brice Environmental Services Corporation (BESCORP) 之技術，推估處理 10,000 公噸污染土壤之平均處理成本(結合開挖費用)其單價約美金 169 元/公噸，約新台幣 6,000 元/公噸，酸洗液回收系統分別如圖 5-18 所示。

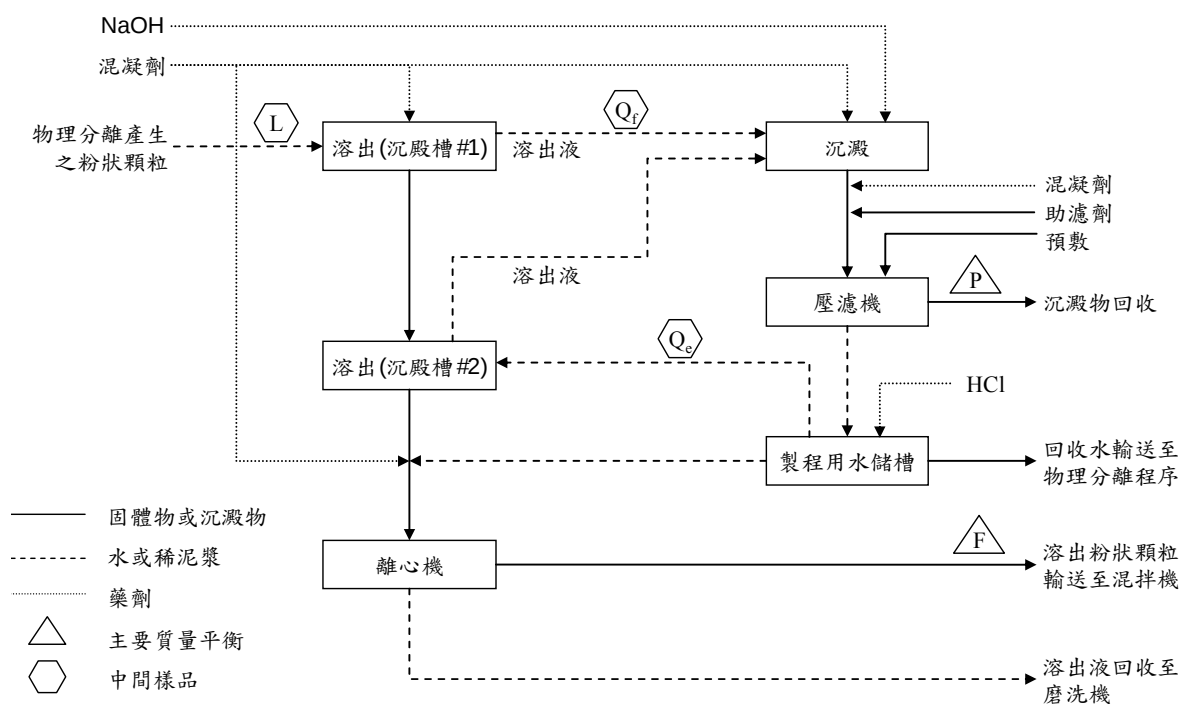


圖 5-18 美國 Small-Arms Range 鉛污染場址土壤酸溶出處理程序^[71]

二、國內整治案例 A^[72]

(一) 場址背景

北部某縣市 D、F 二工區場址計有 44 筆地號(面積約為 10.36 公頃)主要為鉻、銅、鋅、鎳等重金屬污染之農地，其中 F 區中約有 0.98 公頃之農地亦有重金屬鎘、鉛之污染，D 區污染調查初步結果顯示鉻的最高濃度為 1,560 mg/kg(為土壤污染管制標準值 6.24 倍)，銅的最高濃度為 1,360 mg/kg(為土壤污染管制標準值 2.72 倍)，

鋅的最高濃度為 1,360 mg/kg(為土壤污染管制標準值 2.72 倍)，鎳的最高濃度為 583 mg/kg(為土壤污染管制標準值 2.97 倍)；F 區污染調查初步結果顯示鉻的最高濃度為 1,730 mg/kg(為土壤污染管制標準值 6.91 倍)，銅的最高濃度為 582 mg/kg(為土壤污染管制標準值 2.91 倍)，鋅的最高濃度為 661 mg/kg(為土壤污染管制標準值 1.10 倍)，鎳的最高濃度為 706 mg/kg(為土壤污染管制標準值 3.53 倍)，而其中 0.98 公頃發現鎘、鉛之存在，鎘的最高濃度為 18.9 mg/kg(為土壤污染管制標準值 3.78 倍)，鉛的最高濃度為 606 mg/kg(為土壤污染管制標準值 1.21 倍)。整治目標為改善至土壤污染管制標準以下，恢復農地農用原則，即鎘 5 mg/kg、鉻 250 mg/kg、銅 200 mg/kg、鎳 200 mg/kg、鉛 500 mg/kg 及鋅 600 mg/kg。

(二) 整治方法

除 F 區約有 0.98 公頃之農地受重金屬鎘、鉛之污染，其污染改善方式採「土壤酸洗法」搭配「土壤翻土混合稀釋法」處理外，其餘 9.38 公頃主要為鉻、銅、鋅、鎳等重金屬污染之農地，污染改善方式採「土壤翻土混合稀釋法」處理，改善工程實施流程如圖 5-19 所示。

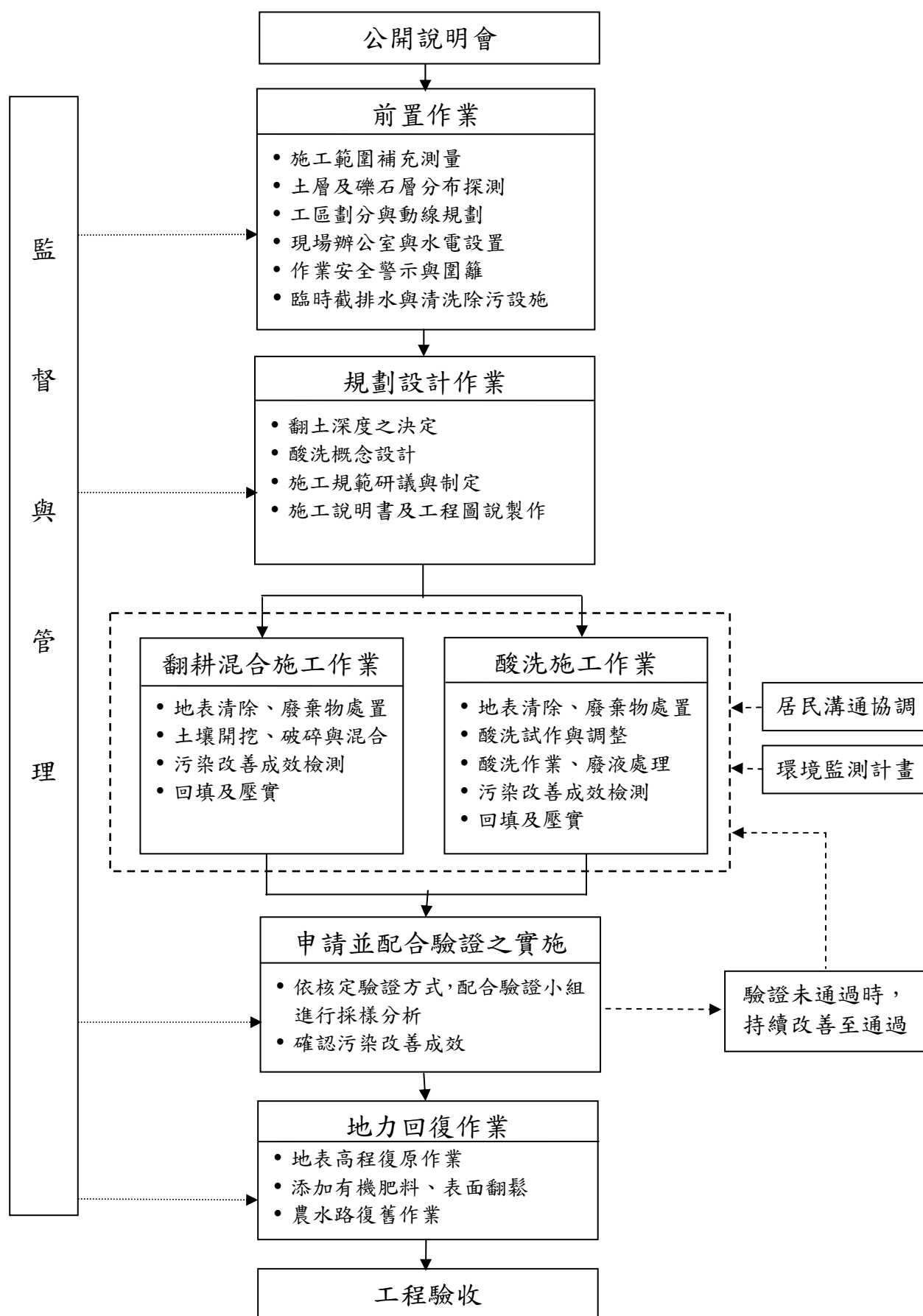
1. 翻耕混合工程

(1) 翻土深度

最經濟之開挖翻土深度將可大幅降低處理土方數量，使得單位污染土方分配到較多資源而可得到較佳之混合稀釋效果。此外，如表土層下有礫石層，因礫石混拌稀釋之效果差，且無法做為農耕用土，因此最大開挖深度係以礫石層為限。

本計畫乃根據下列程序決定每一坵塊最經濟之開挖深度。

- 配合現場淺層土樣(0~30 cm)及深層土樣(30~60 cm)濃度調查結果，估算該區域之各類重金屬平均污染濃度。選出各類重金屬中污染最嚴重者，計算以此類重金屬稀釋至管制標準以下之最低需求土壤量，做為選定開挖深度之依據。
- 依據計畫執行期間實際開挖研判，本區農田地表下 1.0~1.5 m 之土層主要為無機性沉澱並含極細砂土(ML)，為避免開挖深度超過 1.5 m 而破壞該具有保水功能之土層，影響後續地力之恢復，因此開挖深度除考量污染濃度外，最大開挖深度原則上將以 1.5 m 為限。

圖 5-19 污染改善工程實施流程圖^[72]

- 為避免開挖深度超過礫石層，而使未來恢復耕作不易，因此若開挖遇礫石層，亦停止往下開挖。
- 依據前置作業之土層分布探測成果，以及最大開挖深度原則限定為 1.0 m，估算該開挖區域是否有足夠土方量可供稀釋，為避免因跨地號混合稀釋而導致新增加重金屬污染種類，以各地號為單位進行混合，不跨地號調配。

(2) 土壤開挖、破碎與混合作業

本計畫之土壤破碎及混拌詳細作業程序如圖 5-20 所示，說明如下：

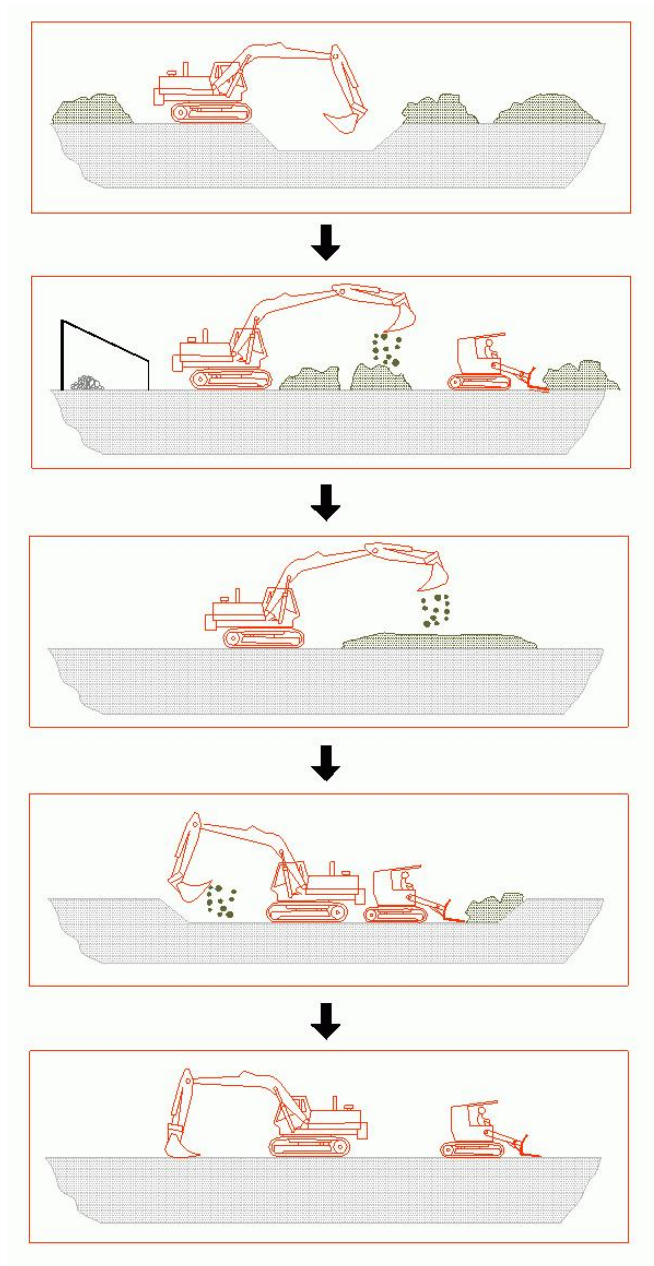


圖 5-20 翻土稀釋改善作業流程示意圖

- 農地土壤開挖時先以挖土機挖開、掘鬆不搬移，大致堆置於現地，以利迅速施工產生大範圍之曝曬與風乾，減少土壤之含水量。
- 待土塊外觀顏色顯示較乾燥後，以挖土機配合推土機進行破碎與混合作業，利用挖土機以舉高挖斗使土壤垂直落下，產生破碎、混合與分散之效果，殘留未破碎之土塊，再以挖土機挖斗予以壓碎。並配合推土機碾壓破碎及進行土方水平之調度移動。
- 作業中若遇黏土成分較高不易以步驟 2 進行破碎時，則視需要輔以特製篩床，將土壤垂直落下於篩網架台上，土塊破碎而通過篩網，殘留於篩網上的大型土塊，再以挖土機挖斗予以壓碎，讓全數土塊均變成小顆粒的土壤通過篩網。當鋼製篩床下方的土壤堆滿後，即利用挖土機或推土機搬運移動至已處理區。

2. 土壤酸洗法

(1) 概念設計

本計畫採取批次式全浸泡式混合攪拌，處理時將污染土壤置入反應槽，與萃取液充分接觸反應後，再進行固液分離。分離之酸洗處理後土壤，經添加適當鈣鎂肥（農用石灰）調理酸鹼性後再予回填回農地，再配合全區翻耕混合工程與原現地土壤混合，並經採樣檢驗以確認污染整治效果。

(2) 酸洗及廢水處理系統

依據模場試驗之酸萃取液之配比及其效率、固液分離、廢液處理之測試結果後，進行酸洗及廢水處理系統之規劃與設計。

● 系統設計特性

本系統之主要特性如下：

- 採全浸泡式混合攪拌之酸洗方式。
- 採批次式處理，每槽每批次處理土壤量達 1.8 m^3 ，每批次酸洗流程約 2~2.5 小時。共設置 2 座酸洗反應槽，每日 4~5 批次，最大設計處理量約 18 m^3 。
- 處理時將污染土壤置入反應槽，與萃取液充分接觸反應後，以重力沉降方式進行固液分離。
- 酸液為重複回收使用，每日最後一批酸洗廢液才進入廢水處

理系統處理。

- 廢水處理系統為零排放設計，經三級處理後清水回收，僅產生化學混凝沉澱污泥，經太空包裝袋後以有害事業廢棄物方式依廢清法規定，委託合格之甲級清除處理機構清運處理。

圖 5-21 為本計畫之酸洗設備與廢水處理系統圖。相關反應槽或儲槽需耐酸並具足夠強度，以不鏽鋼製或 FRP 製或 PP（聚丙烯）製為主。酸洗液之更新、廢液之排出均由泵輸送，並設置控制盤。其立面配置圖如圖 5-22 所示

● 廢水處理

現場廢液處理設施之處理程序如圖圖 5-22 所示，系統組成及功能敘述如下：

- 酸洗土水調勻暨初沉槽：

酸洗流程係約每 2~2.5 小時一批，每槽每批次處理土約 1.8 m³，排出酸洗廢液約 3 m³，每槽每日作業 4~5 批次，前 3~4 批次反應後之酸液回收重複使用並適時予以補充未酸洗之新調配酸液至足量以確保酸洗效果，最後一批次產生之酸洗廢液才進入廢水處理系統進行處理。

- pH 調整暨還原槽：

本槽設 pH 控制器控制酸/鹼加藥機加藥。加入 NaOH 調整 pH 值並進行其他化學反應，本槽設空氣攪拌與廢水輸送泵聯動，設 pH 偵測控制器控制 NaOH 之加藥量。

- 混凝槽：

經初步反應之廢水於本槽中加入 PAC 幫助膠羽形成，本槽設空氣攪拌與廢水輸送泵聯動。

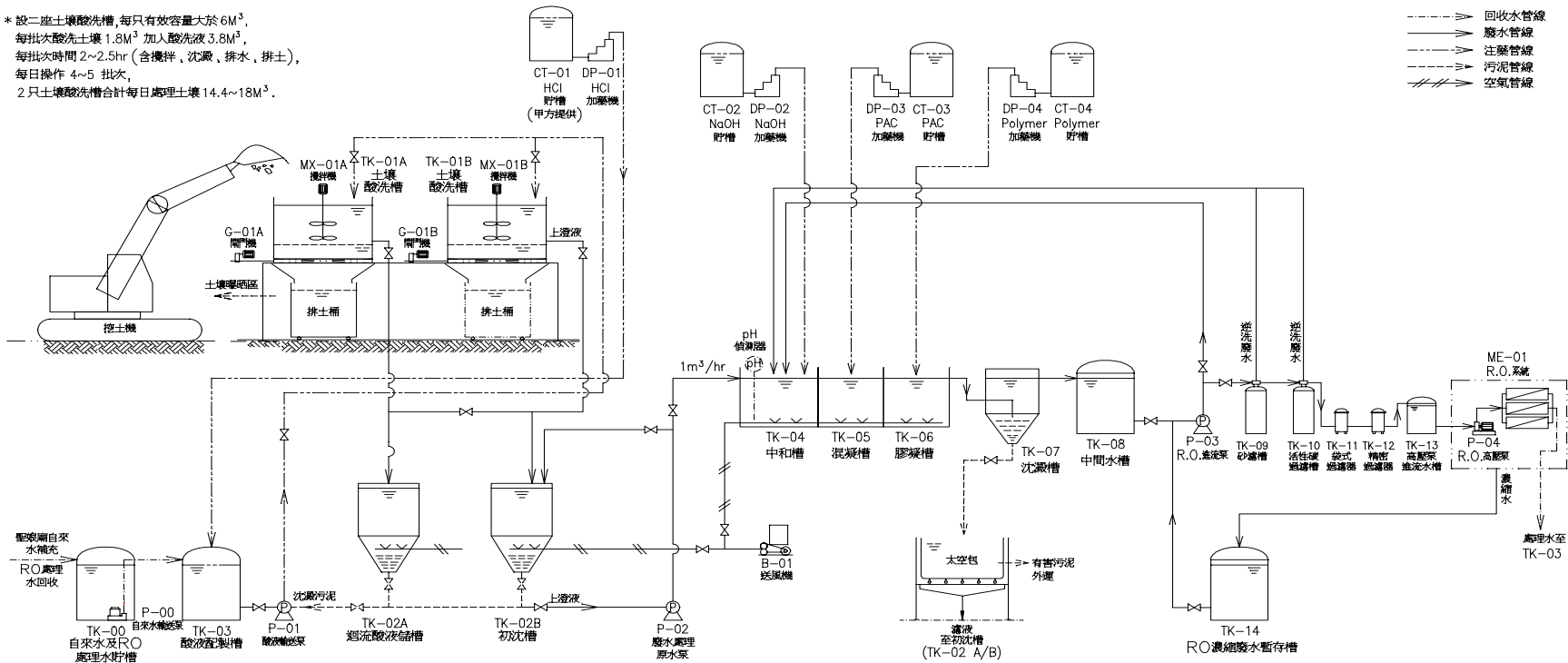
- 膠凝槽：

經混凝反應之廢水於本槽中加入高分子助凝劑，使膠羽凝集成較大粒，增加沉降速度，本槽設空氣攪拌與廢水輸送泵聯動，同時 polymer 加藥機亦與其聯動。

- 沉澱槽：

快混/膠凝所形成化學膠羽在沉澱槽沉降，上澄液重力排至中間水槽，廢棄污泥管線設手動閥，定期手動排泥至太空包濾乾後運離。

* 設二座土壤酸洗槽,每只有有效容量大於 $6M^3$,
每批次酸洗土壤 $1.8M^3$ 加入酸洗液 $3.8M^3$,
每批次時間 $2\sim 2.5hr$ (含攪拌、沈澱、排水、排土),
每日操作 4~5 批次,
2 只土壤酸洗槽合計每日處理土壤 $14.4\sim 18M^3$.



設備名稱	酸液輸送泵	廢水處理原水泵	RO進流泵	RO高壓泵	HCl加藥機	NaOH加藥機	PAC加藥機	Polymer加藥機	閘門機	攪拌機	鼓風機	RO機組
設備編號	P-01	P-02	P-03	P-04	DP-01	DP-02	DP-03	DP-04	G-01A/B	MX-01A/B	B-01	ME-01

設備名稱	RO進流泵	土壤酸洗槽A/B	迴流酸液儲槽	初沈槽	補充水製液配槽	中和槽	混凝槽	膠凝槽	沈澱槽	中間水槽	砂濾槽	碳濾槽	袋濾器	精密過濾器	高壓泵進流水槽	RO濃縮廢水暫存槽	HCl藥槽	NaOH藥槽	PAC藥槽	Polymer藥槽
設備編號	TK-00	TK-01A/B	TK-02A	TK-02B	TK-03	TK-04	TK-05	TK-06	TK-07	TK-08	TK-09	TK-10	TK-11	TK-12	TK-13	TK-14	CT-01	CT-02	CT-03	CT-04

圖 5-21 酸洗設備及廢水處理系統流程圖

- 註：
 1. 單位:mm。
 2. 高程(GL.)以地面為基準。
 除另有標示者外。

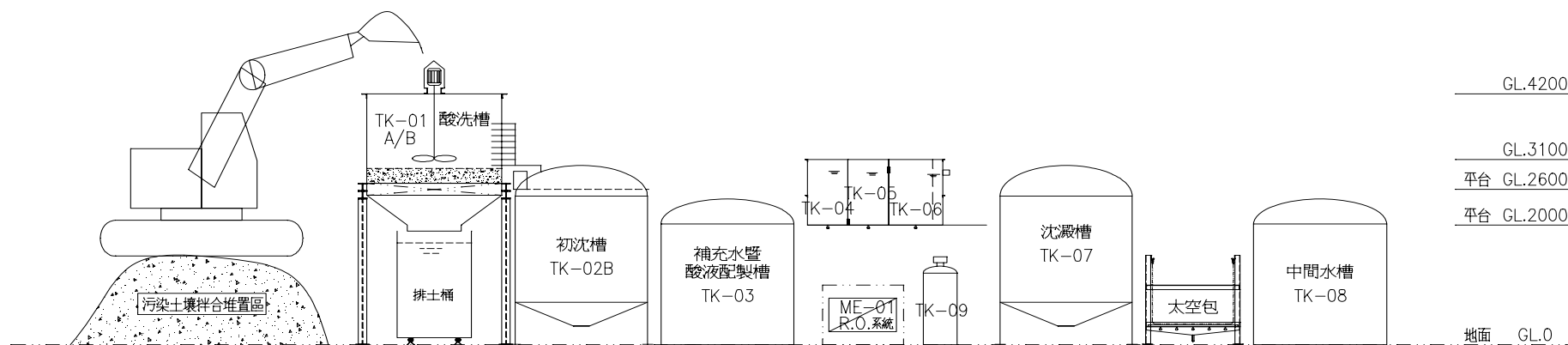


圖 5-22 酸洗設備及廢水處理立面配置圖

— 中間水槽：

經化學混凝沉降後之上澄液收集至本中間水槽，準備泵送至後續單元處理。

— 砂濾槽：

沉澱槽上澄液進入 RO 機組前先以砂濾降低水中懸浮固體，以保護 RO 機組。

— RO 機組：

經化學混凝沉澱無法去除之重金屬離子，在本單元中以適單之 RO 機組將其去除。

— 補充水槽：

經 RO 機組處理後之處理水全數回收於本槽中，以作為調配酸液之稀釋水源。

(一) 整治效益

經驗證後均達到整治目標。

(二) 肥力恢復作業

土壤回填後將採取每 40~45 公分厚度分層壓實。確實分層回填壓實後，必須將表層約 30 公分之壓實土壤，以翻鬆機械進行翻鬆及破碎，偶有較大土塊以人工撿拾破碎，並配合施肥設備進行表層根域範圍 0~30 公分施加有機肥，以確保其仍具足夠之肥力，以恢復其可耕種需求。有機肥係採用台肥一號有機質肥料(成分含氮素 1.5 % 以上、磷酐 3.0 % 以上、氧化鉀 2.0 % 以上)進行肥力補充。依據肥力分析結果，D 區之每公頃添加肥料量為 2,000 公斤，D 區之每公頃添加肥料量為 5,000 公斤。

(三) 成本估算

D、F 二工區之整治經費（含稅）約新台幣 9,307,725 元整，詳表 5-15 及 5-16 計算說明。

表 5-15 整治經費整理表^[72]

費用項目	計算說明	費用，元
一.直接費用		
(一)人事及管理費用		
1.人事費用		317,500
2.管理費用		63,500
小 計		380,500
(二)其他直接費用		
1.土壤重金屬採樣與分析費	97 點次 × 4,500 元/點次	436,500
2.土壤其他項目採樣與分析費	乙式	50,000
3.補充測量與鑑界	11.34 公頃 × 5,000 元/公頃	56,700
4.工地設施與便道設置	乙式	50,000
5.工址地表清除與整理	11.34 公頃 × 5,000 元/公頃	56,700
6.翻土混合稀釋工程施工	100,000 立方 × 45 元/立方	4,500,000
7.酸洗工程施工	詳表 6-2	2,830,000
8.田間復原工程施工(含購買肥料)	11.34 公頃 × 40,000 元/公頃	453,600
9.印刷費	乙式	50,000
小 計		8,483,500
合 計	(一)+(二)	8,864,500
二.營業稅		443,225
三.總計	一+二	9,307,725

表 5-16 酸洗處理經費整理表^[72]

項次	工作項目	單位	數量	單價（元）	複價（元）
一、模場試驗		式	1	250,000	250,000
二、設備製造組裝					1,500,000
1.	酸洗設備租賃維護	式	1	350,000	350,000
2.	廢水處理設備租賃維護	式	1	1,000,000	1,000,000
3.	整地及不透水布鋪設	式	1	50,000	50,000
4.	圍籬、截排水	式	1	100,000	100,000
三、操作費用					540,000
1.	藥品費	式	1	25,000	25,000
2.	土壤開挖回填搬運費	式	1	45,000	45,000
3.	挖土機	月	1.5	140,000	210,000
4.	水電費	月	2	30,000	60,000
5.	廢水處理設備操作費	式	1	150,000	150,000
7.	安全衛生設備費	式	1	30,000	30,000
四、施工前補充細密調查費		式	1	250,000	250,000
伍、環境監測費		式	1	200,000	200,000
六、污泥處理費		式	1	90,000	90,000
總 計					2,830,000

三、國內整治案例 B^[73]

(一) 場址背景

本計畫工作範圍主要針對中部某縣市轄區內農地土壤重金屬鎘超過管制標準之約 20.5 公頃區域(以坵塊區分)進行土壤污染改善工作，總地號筆數約有 96 筆，污染情形如表 5-17 所示。其中，鉻、鎘、銅污染程度在 2 倍標準以下約佔七成農地，然值得注意的是有將近 11.2%的農地鎘污染程度大於 8 倍標準；而鋅、鎳污染程度在 3 倍標準以下亦約佔七成農地。整治時間 1 年，預計整治目標為將土壤中鎘金屬濃度降低至土壤污染監測基準以下，其他重金屬濃度降低至土壤污染管制標準以下。

表 5-17 公告場址重金屬污染濃度超過管制標準倍數之地號數

超過管制標準倍數 (以食用作物標準比較)	超過管制標準倍數之地號數				
	鉻 250 mg/kg	鎘 5 mg/kg	銅 200 mg/kg	鋅 600 mg/kg	鎳 200mg/kg
<2 倍	74	64	69	56	47
2 倍~3 倍	6	19	7	15	19
3 倍~4 倍	5	2	6	7	9
4 倍~5 倍	4	1	4	2	7
5 倍~6 倍	4	0	2	3	5
6 倍~7 倍	2	2	2	6	3
7 倍~8 倍	1	0	3	4	2
>8 倍	2	10	5	5	6
合計	96	96	96	96	96

(二) 整治方法

1. 土壤翻轉稀釋法

遭受重金屬污染之農地，其重金屬種類為鎘、汞、鉛者，且鎘重金屬濃度小於 10 mg/kg (面積約 15.44 公頃)，採用「土壤翻轉稀釋法」為主要處理方式。土壤翻轉稀釋法」主要是針對污染之表土(0~15 公分)及裡土(15~30 公分)，配合未污染之深層土(>30 公分)加以混合稀釋，以達到重金屬土壤管制標準(非鎘污染)或監測基準(鎘污染)以下，其工作流程如圖 5-23 所示。

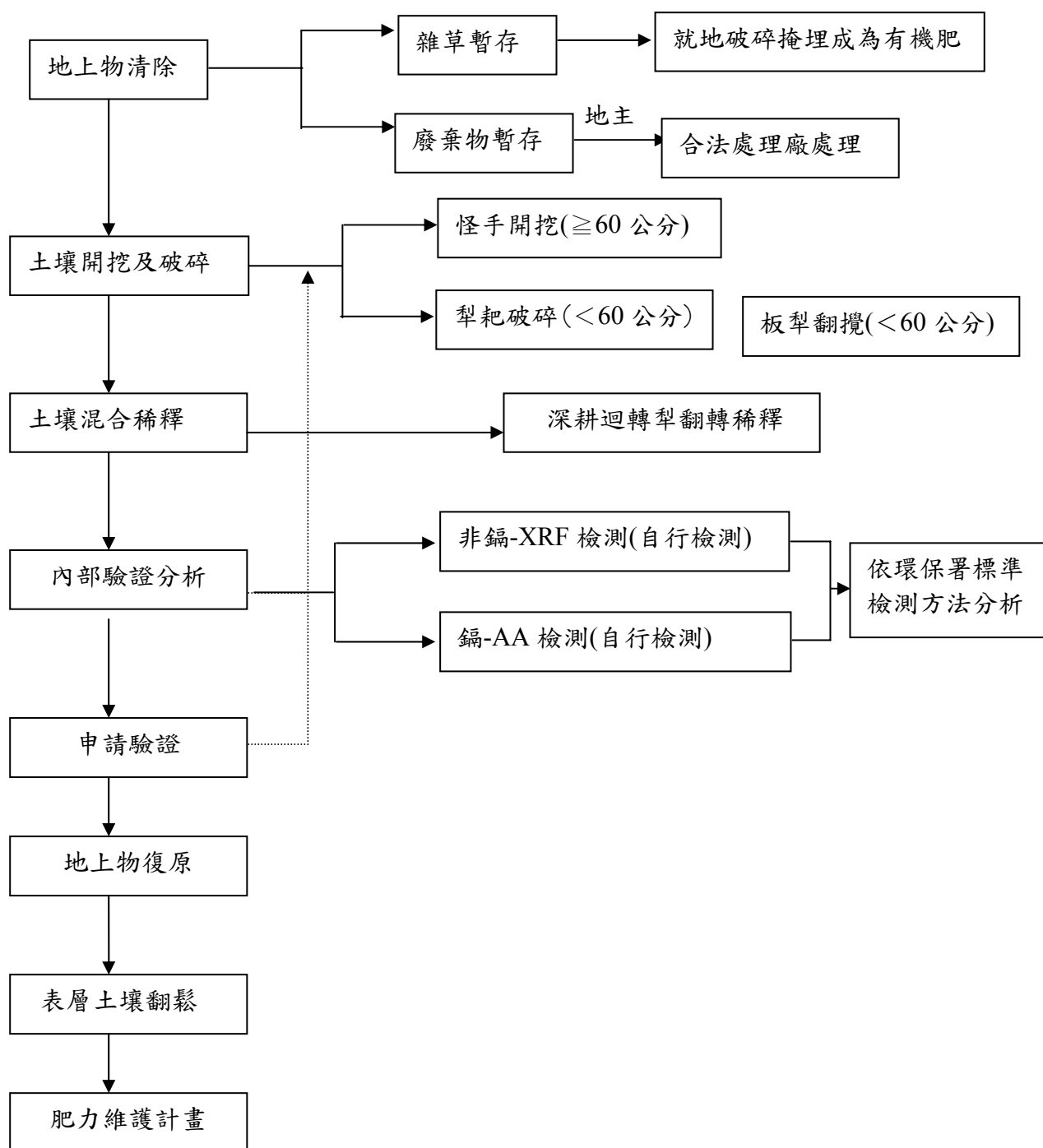


圖 5-23 翻土稀釋污染改善工程現場工作流程

(1) 混合稀釋作業

- 水平混合稀釋作業

針對高污染濃度污染改善區，由於農地重金屬污染濃度過高，導致污染改善開挖深度超過 2 公尺，因此需先進行水平混合作業使污染濃度降至 5 倍以內。計算高污染濃度區之土壤(0~30 公分)與低(無)污染濃度之土壤混合稀釋比例(土方量)進行堆置混合作業，再將混合後之土壤平均回填後進行垂直混合稀釋如圖 5-24 所示。

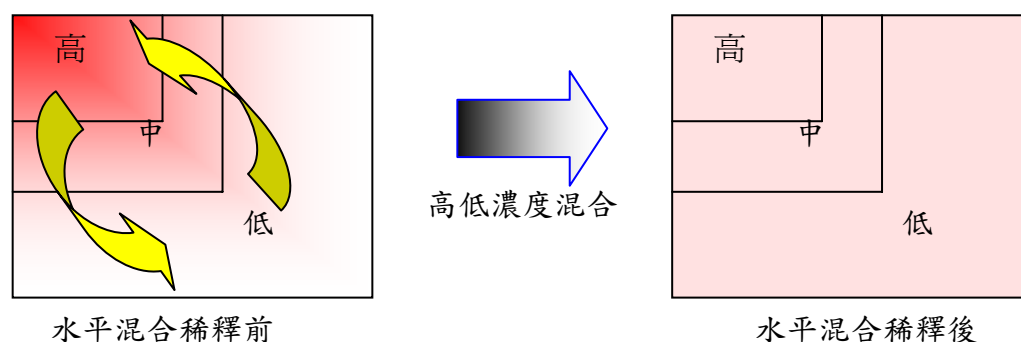


圖 5-24 水平混合稀釋示意圖

- 垂直混合作業

針對中低污染濃度污染改善區，開挖深度低於 2 公尺之污染場址進行垂直混合翻轉稀釋作業，利用怪手將地表受污染之土壤與深層乾淨之土壤充分混合，以達到降低污染濃度的成效。

(2) 污染改善成效評估

污染改善過程中，分批進行樣品採樣分析，以瞭解污染改善結果，對於仍超過管制標準，則持續進行改善。現場污染改善成效分析方面採用原子吸收光譜儀(AA)及 X 射線螢光偵測器(XRF)進行重金屬濃度檢測，或採取土樣樣品，送至實驗室進行感應耦合電漿光譜儀(ICP)檢測分析。

AA 自我檢核方式，針對翻土稀釋控制場址，進行 1 個土壤樣品檢測，以掌握翻土均勻程度及污染改善情形。XRF 自我檢核方式，初期每個坵塊分析樣品(約 5~10 個)，中後期待工法成熟後降低至每個坵塊 1~5 個樣品。

2. 固定式土壤酸淋洗法

遭受重金屬污染之農地，其重金屬種類為鎘、汞、鉛者，且鎘

重金屬濃度大於 10 mg/kg 者(面積約 5.02 公頃)，污染土方共 980 立方公尺，為避免同批次進行酸淋洗土方量過大，無法因應突發事件之應變(如豪大雨、颱風)及場址現場使用空間之考量，將酸洗土壤作業分為 3 批次進行。

(1) 場址污染改善作業

- 需酸淋洗之土壤於搬運前，先以迴轉犁先進行破碎及混合之作業，減少因土壤粒徑差異過大降低酸淋洗之效果。破碎後之土壤搬運至酸淋洗作業場址，依據各地號分別堆放至待酸淋洗平台上，各地號之間以木板作為區隔。
- 於待酸淋洗土堆區四周挖掘集酸溝，寬 0.4 m、深 0.5 m。並於待酸淋洗土堆平台末端挖掘 8×2×0.7 m 之儲酸槽。集酸溝及儲酸槽均鋪上不透水布，使酸淋洗時滲出之酸液能匯流至儲酸槽。
- 於廢水處理區、混酸區進行槽桶之架設及各項管線馬達配裝。
- 進行配墊盤、電纜及控制室之裝設。
- 於待酸淋洗之土堆上，架設水平之淋洗管線，淋洗管線每隔 10~30 cm 開鑿一小孔，使淋洗之酸液能均勻淋灑土堆上。於待酸淋洗土堆中每隔 1 m 插入 1 inch 之透水管，使酸液能藉由之垂直透水管均勻入滲土壤中。

(2) 酸淋洗作業

固定式酸淋洗法示意圖詳見圖 5-25 及圖 5-26。操作流程圖如圖 5-27。

- 酸淋洗作業前，先以清水進行試車，確認各設備運轉正常後，在進行實際運轉。
- 每一批次土堆進行酸淋洗前，先淋洗 0.02% 10 公噸之過氧化氫於土堆上，改變土壤中之重金屬氧化還原態，以利後續之酸淋洗成效。
- 配置混合酸液(0.1 M 鹽酸 + 5.2×10^{-6} M 檸檬酸)，混合好之酸液儲放於混酸槽中備用。
- 混合好之酸液以輸酸馬達輸送，藉由淋洗管線均勻淋洗於土堆上，每日淋洗 10~20 公噸之酸液。
- 淋洗之酸液滲透過土壤後，廢水之部分導入廢水系統中處理，處理好之清水供後續調配酸液使用。

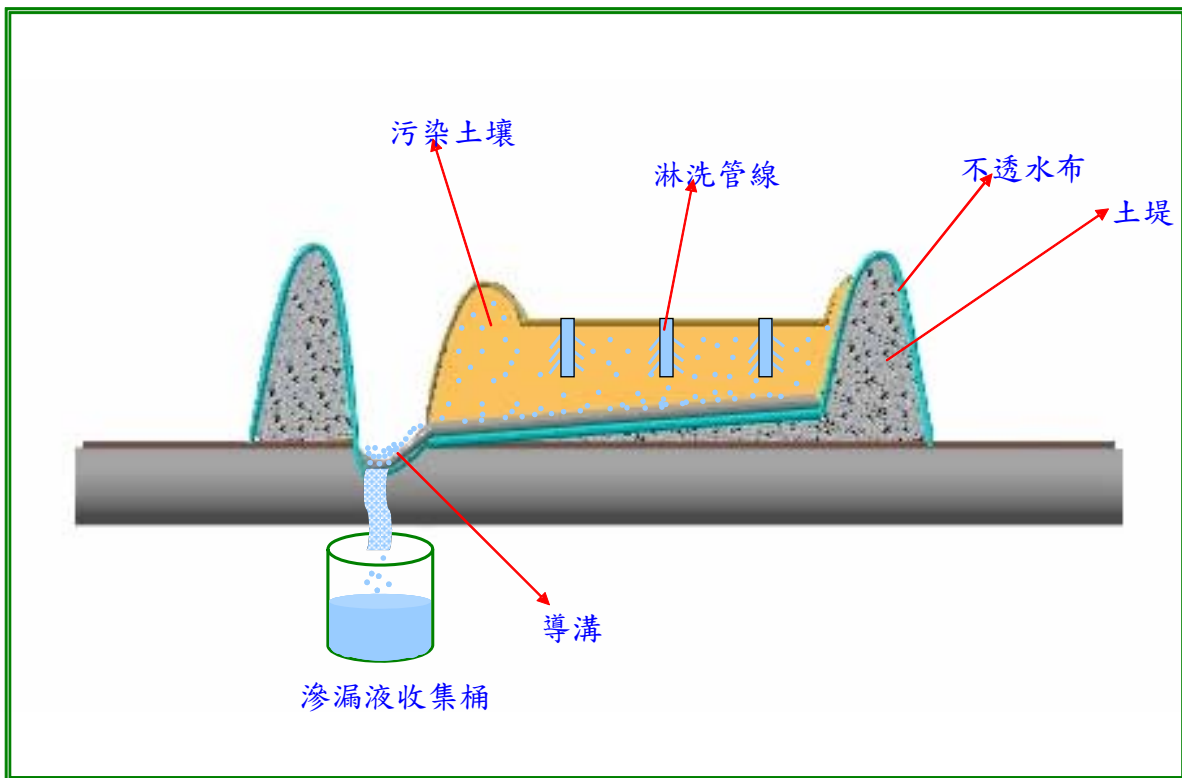


圖 5-25 酸淋洗法示意圖(一)

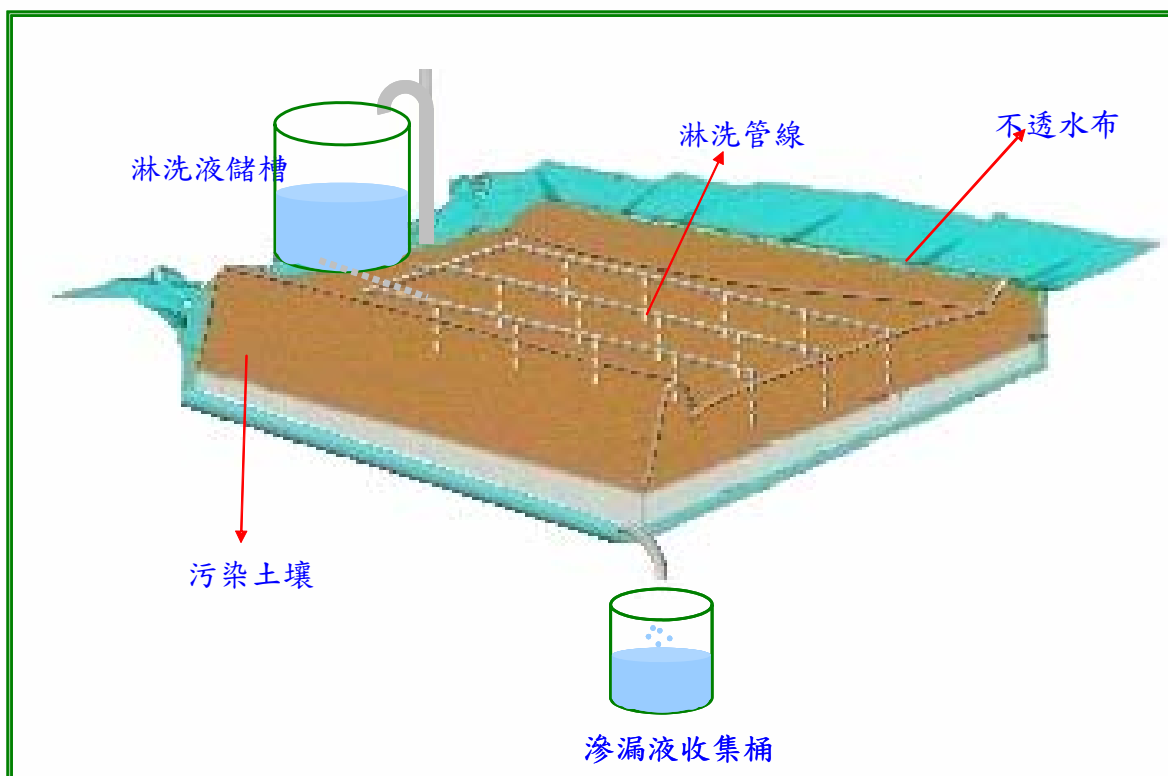


圖 5-26 固定式酸淋洗法示意圖(二)

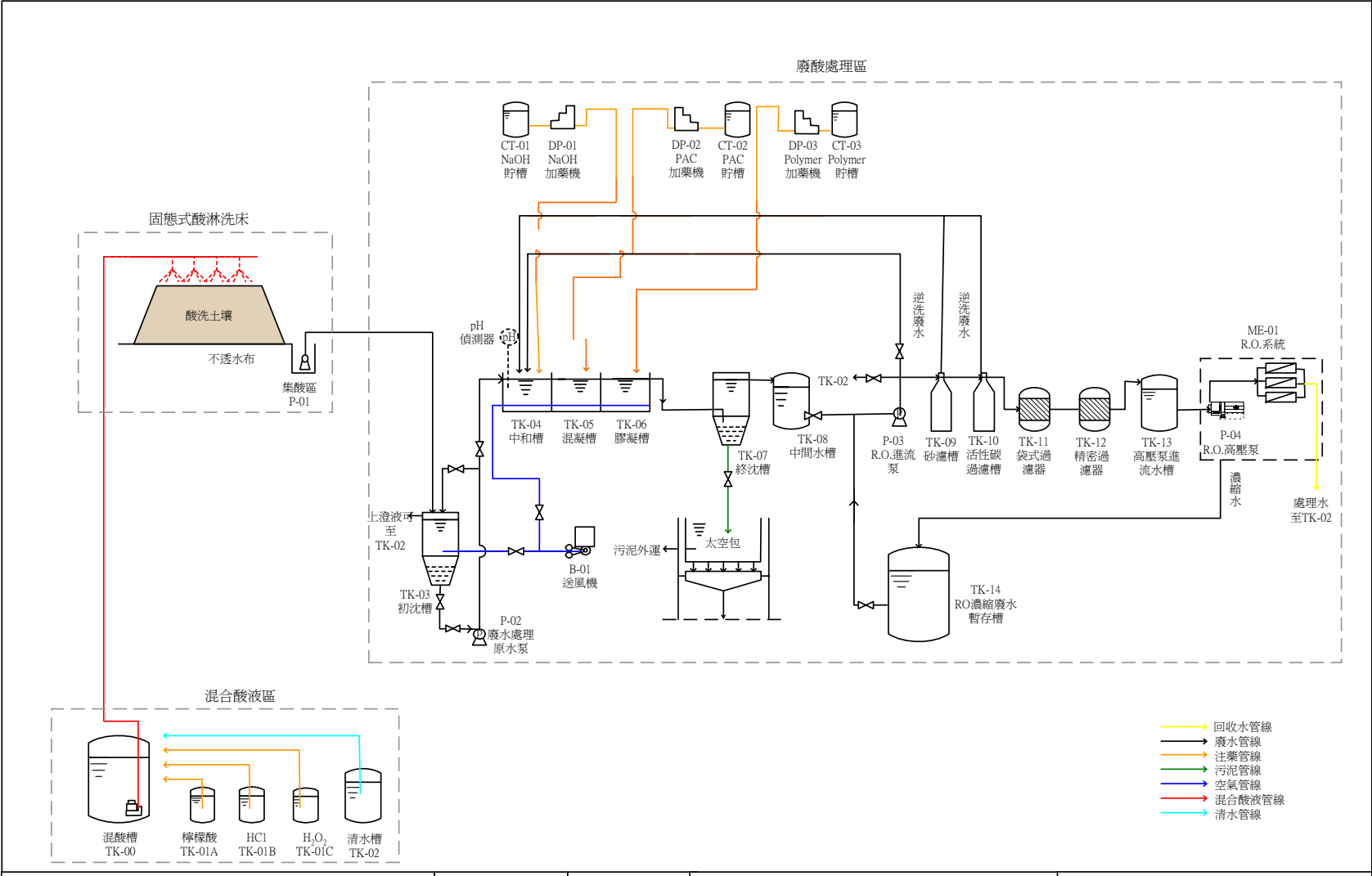


圖 5-27 固定式酸淋洗操作流程圖

- 於淋洗作業期間，以 AA、XRF 及 ICP 進行內部成果檢測，以確認污染改善之成效。
- 檢測結果如重金屬鎘濃度仍超過 10 mg/kg，重複進行酸淋洗，以增加酸淋洗之效果。如檢測結果重金屬鎘濃度低於 10 mg/kg 時，則停止酸淋洗作業，以 30 公噸清水進行土壤之清洗，主要之目的有 3 項：
 - 淋洗清水可進一步去除土壤中殘留之重金屬，加強酸淋洗之效果。
 - 進過酸淋洗之土壤 pH 值偏低，利用清水淋洗可調整土壤之 pH 值，減少後需土壤調整酸鹼度所需要添加之石灰量。
 - 固定式酸淋洗作業所使用的酸液主要為鹽酸，酸淋洗之過程部分之氯離子會殘留於土壤中，利用清水淋洗可有效洗出易溶於水中之氯離子，避免過量之氯離子殘留於土壤中可能造成農民耕種之問題。

(3) 廢水處理

針對固定式酸淋洗產生之廢水，導入廢水系統中，廢水之處理流程如圖 5-28 所示。

- 儲酸槽之廢水經沉水馬達抽移至初沈槽，先進行初步之固液相分離後，將上層之澄清液部分，再導入後續之處理單元，以降低後續單元之固體負荷。
- 廢水經初步沉降後，導入中和槽中，利用 NaOH 先調整廢水 pH 值至 9 左右，以利後續混凝沉降。
- 調整完之廢水導入混凝槽中，加入 PAC 幫助膠羽之產生。
- 經過混凝槽之廢水再導入膠凝槽中，加入 polymer 作為助凝劑，加強混凝之效果。
- 處理後之廢水導入沉澱槽中，上層澄清液部分溢流至中間槽。沉澱之污泥，排泥至污泥重力脫水太空包架台，以太空包裝袋後，利用重力去除部分之水分後，太空包之污泥委託合格之廠商外運處理。
- 澄清液部分以砂濾去除澄清液中殘餘之懸浮微粒，以保護後續之 RO 逆滲透機組。



圖 5-28 廢水處理系統設備

- 最後以 RO 逆滲透機組，將部分不易沉降分離之鹽度去除，產生之清水，回收至混酸區供調配酸液之清水來源，作業期間達到廢水零排放。

(4) 復原作業及後續翻土稀釋作業

- 完成酸淋洗作業之土堆移回原地號。
- 酸洗後之土壤進行 pH 值之檢測，依據檢測之結果添加石灰使土壤之 pH 值回復至 6.5~7。
- 進行每坵塊酸洗污染改善土壤與未酸洗污染改善土壤翻土稀釋作業(依照翻土稀釋標準作業方法)
- 翻土稀釋改善作業自行驗證部分
 - 以 XRF 進行非鎘重金屬濃度檢測(3~5 點/坵塊)。
 - 以 AA 原子吸收光譜法進行鎘濃度檢測(1~3 點/坵塊)
 - 確認各重金屬濃度已低於本計畫之管制標準，即提請驗證公司申請驗證。

(三) 整治效益

均達整治目標。

(四) 肥力恢復作業

1. 通過驗證單位驗證後之坵塊進行污染改善後肥力檢測作業。內容如下：
 - (1) 於每一筆經酸洗處理後地號之土壤，採取混合土樣(總計 16 個樣品)，分析土壤質地及石灰需要量。
 - (2) 並對於酸淋洗後之土壤與底土進行翻轉稀釋改善後之表土，採取混合土樣(約 25 個樣品)分析土壤質地、有機質、有效性磷、交換性鉀、交換性鈣、交換性鎂、微量原素(鐵、錳、銅、鋅及硼)等含量。
2. 利用前兩項分析資料針對各地號土壤不同污染改善方法提出肥力恢復方法，包括有機肥料及化學肥料之施用量；建議依據行政院農業委員會編印之「作物施肥手冊」，施以有機肥料與化學肥料至中級以上。

(五) 改善工法比較及成本估算

各工法比較及成本估算如表 5-18 所示。

表 5-18 各項污染改善工法之適用性比較

項目	翻土稀釋工法	固定式酸淋洗工法	排土客土工法
適用重金屬污染程度	針對中低污染之土壤(約 1~4 倍重金屬管制標準)	可處理鎘高污染之土壤(約 4 倍以上重金屬管制標準)	適用不同之重金屬污染程度
污染改善作業期程	中等(每組機具人力污染改善 1 公頃之農地約需 20 天)	較長(每批次約需 1 個月淋洗時間)	最短(只需排土客土作業運輸時間)
適用重金屬污染項目	對於移動性較佳之重金屬(鎘)稀釋效果較差	對於不同重金屬萃取效果不相同(鎘效果最佳)	適用各種重金屬污染
環境背景因子影響因素	● 黏質土壤稀釋效果較差 ● 地下水層或礫石層過高則無足夠之稀釋土方來源 ● 土壤背景重金屬濃度較高時翻土稀釋效果較差	● 黏質土壤稀釋效果較差 ● 重金屬與土壤鍵結型態影響酸淋洗效果	● 影響之因素較少
場址設備需求	無場址設備需求	需足夠之固定式酸淋洗設備架設環境	無場址設備需求
污染改善費用支出	污染改善費用最低(每公頃約 50 萬元)	污染改善費用較高(固定成本約 300 萬元、變動成本每立方公尺約 5,000 元)	如土壤檢測結果屬有害廢棄物，污染改善費用最高(有害廢棄物每噸約 1.5 萬元) 如土壤檢測結果屬無害廢棄物，含分析費用、排土運費、客土土壤購買及客土運費、怪手開挖整地等支出項目，每立方公尺土壤排客土費用約 1,800 元

參考文獻

1. 經濟部工業局，金屬表面處理業土壤及地下水污染預防與整治技術手冊，民國 94 年 12 月。
2. 經濟部工業局，土壤及地下水污染整治技術手冊 - 石化業，民國 92 年 6 月。
3. USEPA, Innovative site remediation technology. Design & Application. Volume 4. Stabilization/Solidification, EPA 542-B97-007, 1997.
4. USEPA, Engineering Bulletin Solidification/Stabilization of Organics and Inorganics, EPA /540/S-92/015, 1993.
5. USEPA, Technology alternatives for the remediation of soils contaminated with As, Cd, Cr, Hg, and Pb, EPA/540/S97/500, 1997.
6. Federal Remediation Technologies Roundtable (FRTR), Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide, Version 4.0 Ch. 3-2 In Situ Physical/Chemical Treatment – 4.9 Solidification/Stabilization, 2005.
7. USEPA, Best Management Practices (BMPs) for Soil Treatment Technologies : Suggested Operational Guidelines to Prevent Crossmedia Transfer of Contaminants During Clean-UP Activities, EPA OSWER, EPA-530-R-97-007, 1997.
8. USEPA, Abstracts of Remediation Case Studies, EPA-542-R-00-006, 2000.
9. 葉琮裕，污染土壤現地玻璃化處理技術，環檢所雙月刊，第 57 期，民國 90 年 11 月。
10. USEPA, Contaminants and Remedial Options at Selected Metal-Contaminated Sites, EPA/540/R/95/512, 1995.
11. Roote, D.S. In Situ Flushing, Technology Overview Report, Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center, Pittsburgh, PA, USA, 1997.
12. Roote, D.S. In Situ Flushing, Technology Status Report, Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center, Pittsburgh, PA, USA, 1998.
13. Doong, R. A., Wu, Y. W. and Lei, W. G. Surfactant enhanced remediation of cadmium contaminated soil. Water Sci. Technol. 37, 65-71, 1998.
14. Navis, B. T., Sabatini, D. A., Shiau, B. J. and Harwell, J. H. Surfactant enhanced remediation of subsurface chromium contamination. Wat. Res. 30, 511-520, 1996.
15. Yin, Y., and Allen, H.E. In Situ Chemical Treatment, Technology Evaluation Report, Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center, Pittsburgh, PA, USA, 1999.
16. USEPA, Arsenic Treatment Technologies for Soil, Water and Waste, EPA-542-R-02-004, 2002.
17. USEPA, Technologies and Costs for Removal of Arsenic From Drinking Water. EPA-R-00-028. Office of Water. http://www.epa.gov/safewater/ars/treatments_and_costs.pdf, 2000.

- 18 Miller, J.P., Hartsfield, T.H., Corey, A.C. and Markey, R.M. In Situ Environmental Remediation of and Energized Substation. EPRI. Palo Alto, CA. Report No. 1005169, 2001.
- 19 MSE Technology Applications, Inc. Arsenic Oxidation Demonstration Project - Final Report. January 1998. <http://www.arsenic.org/PDF%20Files/Mwtp-84.pdf>
- 20 USEPA, Regulations on the Disposal of Arsenic Residuals from Drinking Water Treatment Plants. EPA-600-R-00-025, 2000. <http://www.epa.gov/ORD/WebPubs/residuals/index.htm>
- 21 USEPA, Office of Research and Development. Arsenic & Mercury - Workshop on Removal, Recovery, Treatment, and Disposal, EPA-600-R-92-105, 1992.
- 22 Twidwell, L.G., et al. Technologies and Potential Technologies for Removing Arsenic from Process and Mine Wastewater. Presented at "REWAS'99." San Sebastian, Spain, September 1999. <http://www.mtech.edu/metallurgy/arsenic/REWASAS%20for%20proceedings99%20in%20word.pdf>
- 23 USEPA, Arsenic Removal from Drinking Water by Ion Exchange and Activated Alumina Plants. EPA 600-R-00-088. Office of Research and Development, 2000. <http://www.epa.gov/ncepi/Catalog/EPA600R00088.html>
- 24 Federal Remediation Technologies Roundtable, Federal Remediation Technologies Reference Guide and Screening Manual, Version 3.0. March 30, 2001. http://www.frtr.gov/matrix2/top_page.html.
25. Vidic, R. D. and Pohland, F. G. Treatment Walls, Technology Evaluation Report, Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center, Pittsburgh, PA, USA, 1996.
- 26 Starr, R. C. and Cherry, J. A. In Situ Remediation of Contaminated Ground Water: The Funnel-and-Gate System, Ground Water, 32, 465-476, 1994.
27. Johnson, T. L., Scherer, M. M. and Tratnyek, P. G. Kinetics of Halogenated Organic Compound Degradation by Iron Metal, Environ. Sci.Technol., 30, 2634-2640, 1996.
28. ITRC, Advanced Techniques on Installation of Iron Based Permeable Reactive Barriers and Non-iron Based Barrier Treatment Material By Permeable Reactive Barrier Wall Team of the ITRC, 2002. http://www.cluin.org/conf/itrc/advprb_032102/
29. LaGrega, M.D., Buckingham, P.L. and Evans, J.C. The Environmental Resources Management Group. Hazardous Waste Management. McGraw-Hill, Singapore, 1994.
- 30 USEPA, Permeable Reactive Barrier Technologies for Contaminant Remediation, EPA-600-R-98-125, 1998.
31. Acar, Y. B. and Alshawabkeh, A. N. Principals of Electrokinetic Remediation. Environmental Science and Technology, 27(4): 2638~2647, 1993.
32. Banerjee, S., Horng, J. J. and Ferguson, J. F. Field Experience with Electrokinetics at a Superfund Site. Transportation Research Record 1312:

- 167~174, 1991.
33. Bruell, C. J., Segall, B. A. and Walsh, M. T. Electro-osmotic Removal of Gasoline Hydrocarbons and TCE from Clay. *Journal of Environmental Engineering*, 118(1): 68~83, 1992.
 34. Higgins, T. E., Halloran, A. R. and Petura, J. C. Traditional and Innovative Treatment Methods for Cr(VI) in Soil. *Journal of Soil Contamination*, 6(6): 767~797, 1996.
 35. Ho, V. S., Sheridan, W., Athmer, C. J., Heitkamp, M. A., Brackin, J. M., Weber, D. and Brodsky, P. H. Integrated In Situ Soil Remediation Technology: the LasagnaTM Process. *Environmental Science and Technology*, 29(10): 2528~2534, 1995.
 36. Shapiro, A. P. and Probst, R. E. Removal of Contaminants from Saturated Clay by Electroosmosis. *Environmental Science and Technology*, 27(2): 283~291, 1993.
 37. Virkutyte, J., Sillanpää, M. and Latostenmaa, P. Electrokinetic Soil Remediation-Critical Overview. *The Science of the Total Environment*, 289(1): 97~121, 2002.
 38. Yu, J. W. and Neretnieks, I. Theoretical Evaluation of a Technique for Electrokinetic Decontamination of Soils, *Journal of Contaminant Hydrology*, No. 4, Vol. 26, pp. 291~299, 1997.
 39. Vane, M. L. and Zang, G. M. Effect of Aqueous Phase Properties on Clay Particle Zeta Potential and Electro-osmotic Permeability: Implications for Electro-kinetic Soil Remediation Processes. *Journal of Hazardous Materials*, 55(3): 1~22, 1997.
 40. Acar, Y. B., Gale, R. J., Alshawabkeh, A. N., Marks, R. E., Puppala, S., Bicka, M. and Parker, R. Electrokinetic Remediation: Basics and Technology Status. *Journal of Hazardous Materials*, 40(2): 117-137, 1995.
 41. USEPA, Superfund Innovative Technology Evaluation Program, Technology Profiles 10th Ed. EPA/540/R-99/500a, Vol. 1, pp. 194-195; 202-203; 224-225, 1999.
 42. Shapiro, A. P., Renaud, P. C., and Probst, R. F. Preliminary Studies on the Removal of Chemical Species from Saturated Porous Media by Electroosmosis. *Physicochemical Hydrodynamics*, 11(56): 785-802, 1989.
 43. 鄭孟嘉,「以電化學方法處理受鎘、鉛污染土壤之研究」,國立臺灣大學化學工程學研究所,民國 89 年。
 44. Yu, J. W. and Neretnieks, I. Theoretical Evaluation of a Technique for Electrokinetic Decontamination of Soils. *Journal of Contaminant Hydrology*, 4(26): 291~299, 1997.
 45. 紀吉鴻,「電動法結合徑向電場及抽取系統處理重金屬污染土壤之實驗室研究」,國立雲林科技大學環境與安全工程技術研究所碩士論文,民國 88 年。
 46. Krishna, R. R., Parupudi, U. S., Devulapalli, S. N. and Xu, Y. C. Effects of Soil Composition on the Removal of Chromium by Electrokinetics. *Journal of*

- Hazardous Materials, 55(3): 135~158, 1997.
47. Lee, H. H. and Yang, J. W. A New Method to Control Electrolytes pH by Circulation System in Electrokinetic Soil Remediation. Journal of Hazardous Materials, 77(3): 227~240, 2000.
 48. Wada, S. I. And Umegaki, Y. Major Ion and Electrical Potential Distribution in Soil Under Electrokinetic Remediation. Environmental Science and Technology, 35(11): 2151~2155, 2001.
 49. Hamed, J. T., Acar, Y. B. and Gale, R. J. Pb(II) Removal from Kaolinite Using Electrokinetics. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 122(3): 241~271, 1991.
 50. Powell, R. M., Blowe, D. W., Fillham, R. W., Schultz, D., Divavec, T., Plus, R. W., Vogan, J. L., Powell, P. D., and Landis, R. Permeable Reactive Barrier Technologies for Contaminant Remediation, USEPA, EPA/600/R-98/125, 1998.
 51. Acar, Y. B., Alshawabkeh, A. N. and Parker, R. A. Theoretical and Experimental Modeling of Multi-Species Transport in Soils Under Electric Fields”, USEPA Project Summary, EPA/600/SR-97/054, 1997.
 52. 洪肇嘉、吳惠銘、紀吉鴻、陳錕榮，「電動法復育鎘、鉻、鉛污染土壤之研究」，中華民國環境工程年會第十三屆廢棄物處理技術研討會，民國 87 年。
 53. 洪肇嘉、紀吉鴻，「重金屬處理污染土壤之二維尺度研究」，中華民國環境工程年會第十四屆廢棄物處理技術研討會，民國 88 年。
 54. 洪肇嘉、陳建忠、王銘鴻、楊宜霖，「電動法附加水流去除鎘、鉻、鉛污染土壤之研究」，中華民國環境工程年會第十三屆廢棄物處理技術研討會，民國 87 年。
 55. 張坤森，「發展改良式電動力學技術整治鎘污染土壤之研究」，中華民國環境工程年會第十三屆廢棄物處理技術研討會，民國 87 年。
 56. 張坤森、許博銘、張家豪、段繼梅，「以改良式電動力技術整治桃園縣鎘、鉛污染土壤之研究」，中華民國環境工程年會第十四屆廢棄物處理技術研討會，民國 88 年。
 57. 張坤森、鍾孟儒、吳坦璟、陳南蘋、呂易蒼，「利用超音波及電動力技術促進鎘、鉛污染土壤整治之研究」，中華民國環境工程年會第十五屆廢棄物處理技術研討會，民國 89 年。
 58. 張坤森、陳玉秋、陳雨楓、張怡頻、巫慧瑜、廖悅辰，「觀音及蘆竹鎘、鉛污染土壤之整合式復育技術研究」，中華民國環境工程年會第十六屆廢棄物處理技術研討會，民國 90 年。
 59. 張坤森、劉世樑、蔡品萱、黃振維、謝雅玲、楊弘傑，「表面處理業重金屬污泥之電動力整治技術及成效評估研究」，第二屆土壤及地下水處理技術研討會，民國 93 年。
 60. 黃嘉貞、薩支高，「以電動法復育受鎘污染土壤之模場 2D 實驗」，第十五屆廢棄物處理技術研討會，民國 89 年。
 61. 林世平、廖文彬、賴冠君、洪敬堯，「改良電壓操作方式對電動力處理受污

- 染底泥之影響」，第二屆土壤及地下水處理技術研討會，民國 93 年。
62. 章日行、唐政宏、黃明正、盧建宏、鍾秉倫，「循環改良式電動力法復育鎘與鉛污染之土壤」，第二屆土壤及地下水處理技術研討會，民國 93 年。
 63. Cunningham, S.D. and Berti., W.R. Remediation of Contaminated Soils with GreenPlants: An Overview, In Vitro Cell. Dev. Biol. Tissue Culture Association. 29: 207-212, 1993.
 64. USEPA, Phytoremediation of Groundwater at Air Force Plant 4 Carswell, Texas, EPA/540/R-03/506, 2003.
 65. Stomp, A.M. Genetic improvement of tree species for remediation of hazardous wastes: Vitro Cellular Development Biology, 29, 227-232, 1993.
 66. USEPA, Recent developments for in-situ treatment of metal contaminated soils, contract number: 68-W5-0055., 1997.
 67. Raskin, I. and others. Bioconcentration of Metals by Plants, Environmental Biotechnology. 5:285-290, 1994.
 68. Kumar, P.B.A. and others. Phytoextraction: The Use of Plants to Remove Metals from Soils. Environmental Science & Technology. 29: 1232-1238, 1995.
 69. Baker, A.I.M. and Brooks, R.R. Terrestrial Higher Plants Which Hyperaccumulate Metallic Elements - A Review of Their Distribution, Ecology, and Phytochemistry, Biorecovery. 1: 81-126, 1989.
 70. Salt, D. E., and others. A noval strategy for the removal of toxic metals from the Environment Using Plants. Biotechnology, 13: 463-474, 1995.
 71. Technology Application Analysis-Physical Separation and Acid Leaching: A Demonstration of Small-Arms Range Remediation at Fort Polk, Louisiana, June 3,1997.
 72. A 場址土壤重金屬污染控制場址改善計畫整治完成報告書，民國 93 年 8 月。
 73. B 場址土壤重金屬污染控制場址改善計畫整治完成報告書，民國 93 年 8 月。

第六章 土壤及地下水污染整治工程實施程序

當充分瞭解土壤及地下水特定污染物的適用整治技術之後，未來整治工程實施的程序將包括進行整治技術可行性評估與選擇，慎選整治計畫規劃設計與施工承包廠商，同時需研擬並提送污染場址控制或整治計畫，以供相關環保機關審查。在污染場址整治完成後，相關環保機關將進行驗證作業的程序，以作為污染場址公告解除列管或需後續進行環境監測的依據。

6.1 整治技術可行性評估與選擇

一、整治技術選擇的目標

國內在訂定整治技術選擇的目標時可參考美國環境保護署(USEPA)在超級基金(Superfund)計畫的架構下，對於整治技術的選取訂定了以下基本的目標宣言^[1]：

「整治技術選取過程的目標是要選擇可以保護人類健康與環境，可長期維持該項保護，並將未處理之廢棄物質能降至最低的整治方案」。

而要達成此目標，所選取整治方案應能夠：

- (一) 結合處理技術、工程控制及法令制度上的控管(如用水與行動限制等)以達成目標；
- (二) 在實際可行的前提下，首先處理場址所造成的主要威脅；
- (三) 當污染物難處理或技術不可行時，或需超出合理的處理期限經費時，能夠隔絕主要的威脅(隔絕有時比處理更實際)；
- (四) 對於次要低程度的威脅，首先考慮採取隔絕再用處理方案進行；
- (五) 當有創新技術得以提供對等或更好的處理效能、產生更低的負面衝擊或更低的建置成本時，應該考慮採用該類技術；
- (六) 在整治完成時，須對該場址進行復原工作(如道路、建築物、地下水等)。

歸納以上對於整治技術選取之目標與原則的描述，技術選取的考量應具備幾項因素要點：

- (一) 必須考量場址現況、水文地質及污染物特性，認定主要及次要威脅的程度。
- (二) 必須確認場址整治目標值，由法規的管制標準值或藉由健康風險評估結果訂定。
- (三) 必須實際可行及具備合理性的經費成本。

(四) 整治方案可能需要多種技術的整合或分階段式的進行。

(五) 應不斷思考採用創新技術的可能性。

二、整治技術選擇的流程

整治技術選擇前所需要的基本要件包括整治調查(remedial investigation, RI)與可行性評估(feasibility study, FS)，其流程與工作內容大致可歸納如圖 6-1 所示。整個過程包括整治調查與可行性評估等 2 種基本機制。整治調查乃在收集數據用以了解場址狀況、決定污染物的特性、評估污染對人體與環境造成之健康風險，以及用於執行處理能力測試估算處理技術的成效與費用。而可行性評估的部分則用於整治行動方案的開發、篩選與細部評估分析。實際應用上，RI 與 FS 階段的分野並不是如此清晰，因為兩者幾乎是同時進行，而且所得結果均有相互關係，並會影響最終的整治技術選擇。

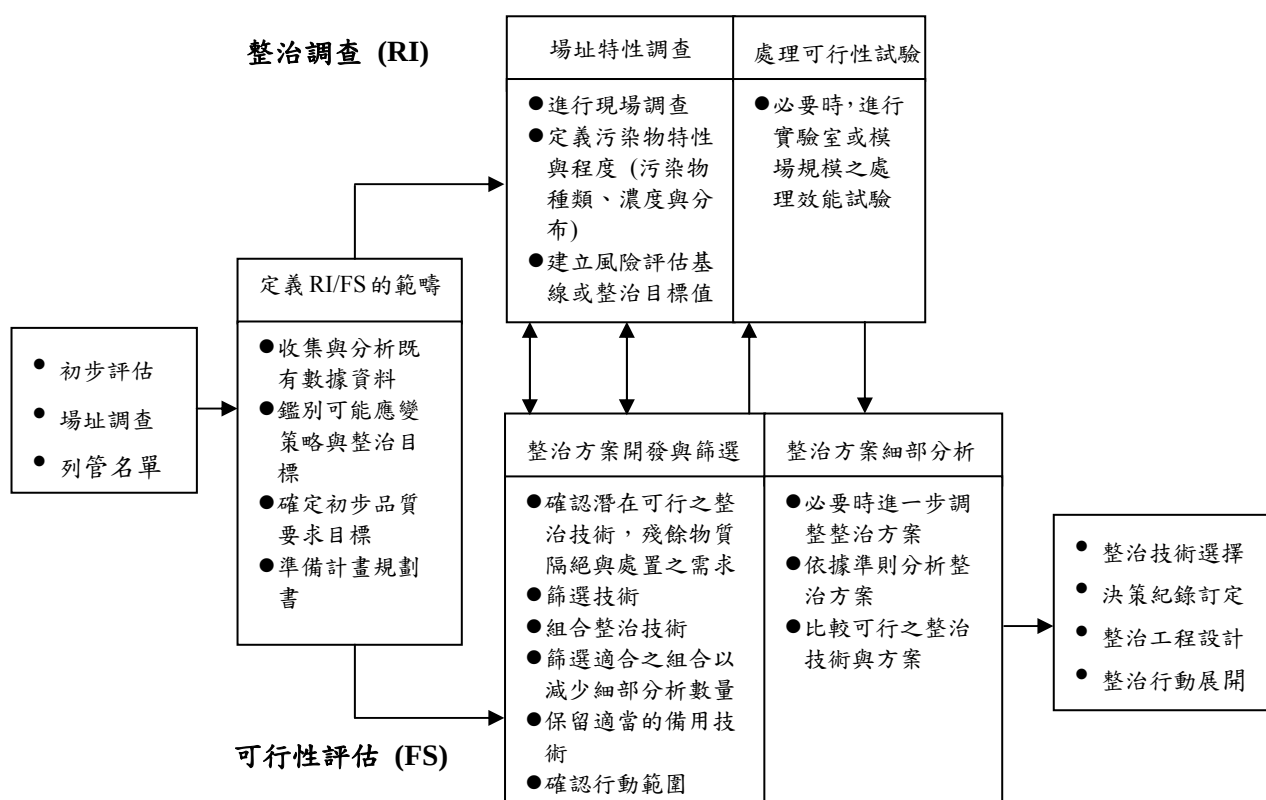


圖 6-1 整治調查與可行性評估的流程與工作內容^[2]

一個污染場址的公告是經過各個階段的調查與確認，環境場址評估(environmental site assessment, ESA)的初步調查與環境介質採樣分析，經過科學數據與制度法規的認定。因此在整治技術的選擇前，首先需要進行 RI/FS 範疇的定義，收集與分析以前調查的既有數據資料，鑑認可能應變的策略與整治行動的目標，確定初步品質要求的整治目標值，以及開始準備整治行動的計畫書。

整治調查(RI)中進行場址特性調查，是整治技術與整治方案篩選與規劃的基石。例如在土污法的第 12 條與第 16 條，以及土壤與地下水污染整治法施行細則(以下簡稱施行細則)第 21 條中，均明訂整治計畫應根據場址調查評估結果擬訂之。此外在施行細則第 17 條中，在調查工作完成後 3 個月內，應提出相關之整治計畫。場址特性調查的工作包括依既有的資料進行更詳細且必要的現場採樣、檢測與數據分析，而且現場採樣可以分階段執行，以使調查工作成果可被用於微調整治計畫的範疇，並進一步使採樣分析能更切合需求。數據品質目標也可隨著調查工作的進行適切的修訂，藉以增加對場址的了解程度與降低調查所需時間與費用。傳統場址調查可以分階段進行採樣與檢測來達成調查之目的，但由現地工作至實驗室檢測結果的取得，通常需要數週時間，而當所得之分析結果不能滿足場址調查需求時，有可能需要再重行採樣。為能有效的降低場址特性調查的時間與費用，快速場址調查評估已逐漸成為趨勢^[3]，其中包括美國環保署積極推廣的三合系統(triad system)。三合系統是依環境整治效益決策所發展的系統，除了場址評估的整合系統性規劃與動態工作計畫(dynamic work plan)之外，更融入現地測試技術，以強化現場決策的規劃方法，其主要的精神是在最短的時間內，以最經濟的方式，得到符合品質要求的資料。當這些資料快速取得時，可明確定義污染物特性與程度，判斷污染物的種類、濃度與實際的分布。

此外，依據土污法第 17 條的規定，因地質條件、污染物特性或污染整治技術等因素，無法整治至污染物濃度低於地下水污染管制標準者，得依環境影響與健康風險評估結果，提出地下水污染整治目標，而主管機關亦積極推動以健康風險評估為基準的整治目標訂定指引。因此，場址調查所得的資訊除了可以支持並決定具備應用潛力的整治技術，同時也可以協助場址的健康風險評估工作之進行。藉由調查結果得以訂定風險評估之基線，以鑑別既有或潛在的風險，由於此項評估可以鑑別場址對於環境之主要威脅，因此也可以提供在可行性評估機制中，評估整治方案的成效。

可行性評估機制中整治方案的開發與篩選工作是在確認潛在可行之整治技術，以及判斷是否有殘餘物質與未處理廢棄物的隔絕與處置之需求，以技術之有效性、建置操作難易度與成本為基準篩選整治技術，同時依技術特性組合成為可用於場址的操作單元。整治技術可以依照污染介質(如地下水)、特定污染區域(如嚴重污染區塊)或整個場址做為規劃之依據。實務上，應該依照可能日後殘留污染物、需長期管理、未處理廢棄物需阻絕處置的條件，發展與考量多樣的整治方案，最高階的整治方案可以將場址整治到免除長期管理(包括監測)的必要性，最低階則可以僅涉及處理主要污染物(即針對場址所造成之主要環境威脅)的整治技術組合。

如果既有的場址特性、污染物特性與已知的處理技術不足以適當地評選整治技術時，則可能需要進行處理可行性試驗，以評估特定的整治技術。一般而言，處理可行性試驗可藉由實驗室規模試驗，收集到評估技術可行性所需的資訊，有時甚至需要進行模場規模試驗才能取得必要的效能資料與較佳之成本分析資訊，進而在詳細分析過程中得以選擇適合的整治技術。

一旦取得足夠的資訊，即可依據整治目標與法規要求等條件，針對不同整治技術或技術組合進行互相比較，此即為整治方案細部分析階段。在比較整治技術時，除考慮個別整治技術之優勢與缺點外，分析過程中亦應考慮場址本身限制所必須妥協之關鍵，而在技術層面與策略層面取得平衡。必要時，須依詳細分析結果進一步調整整治方案，最終分析結果的彙整將提供決策者選擇合乎法規與整治目的需求的適當整治技術。

三、整治技術選擇的步驟

在整治調查與可行性評估之後，將進行整治技術的選擇步驟，經過一連串討論與評估，訂定決策紀錄(record of decision)，之後進行整治工程設計，展開實際的整治工程。整治工程設計及整治工程進行期間均可對整治技術重新評估選擇，但篩選評估的過程均不能背離該遵守的原則。

(一) 篩選評估準則

整治技術方案篩選分析可依據效能評估、可履行性評估與成本評估 3 大項廣泛的基準進行。在進入細部分析的階段，整治技術可與特定考量準則及其個別的因素對比，例如美國環保署即列出 9 大準則^[4]做為對應的項目，其中包括：

1. 整體對人體健康與環境的保護；
2. 符合適用性或相關合理的要求(applicable or relevant and appropriate requirements, ARARs) (如法規要求)；
3. 長期整治成效與永久性；
4. 整治處理後能降低污染物之毒性、移動性與其體積；
5. 短期整治成效；
6. 可履行性；
7. 整治成本費用；
8. 主管機關接受程度；
9. 社區與民眾的接受度。

篩選時所採用的基準與上述 9 項準則之間的關係則可以進一步以圖 6-2 加以說明。因此進行整治技術選擇評估時，執行可行性評估的人應對於各項準則有相當程度的了解，才能在分析時確實掌握方向。整治技術抉擇的門檻因素包括必須能對人體健康與環境進行保護與符合適用性或相關合理的要求品質，以作為選擇的基本條件；第 3 項至第 7 項準則為主要衡量因素，作為權衡各項選擇的主要協調要素；而主管機關與民眾的接受度將作為選擇修正的因素，將參考公眾意見或有新資訊、新穎技術而變更。以下將繼續針對篩選評估的 3 大基準進行說明。

1. 效能評估

篩選評估的關鍵面向是各種整治技術在保護人體健康與環境的成效。每一項整治技術應該就其可達到之降低污染物毒性、移動性或體積成效加以評量，同時短期與長期效應均要被列入考量。所謂的短期效應是指工程營造與建置期間，而所謂的長期效應則是指整治行動完成之後的期間。至於污染物毒性、移動性或體積降低成效是指採用該項整治技術所能改變的有害污染物或受污染介質之特性以及所能降低與之相關的威脅或風險。

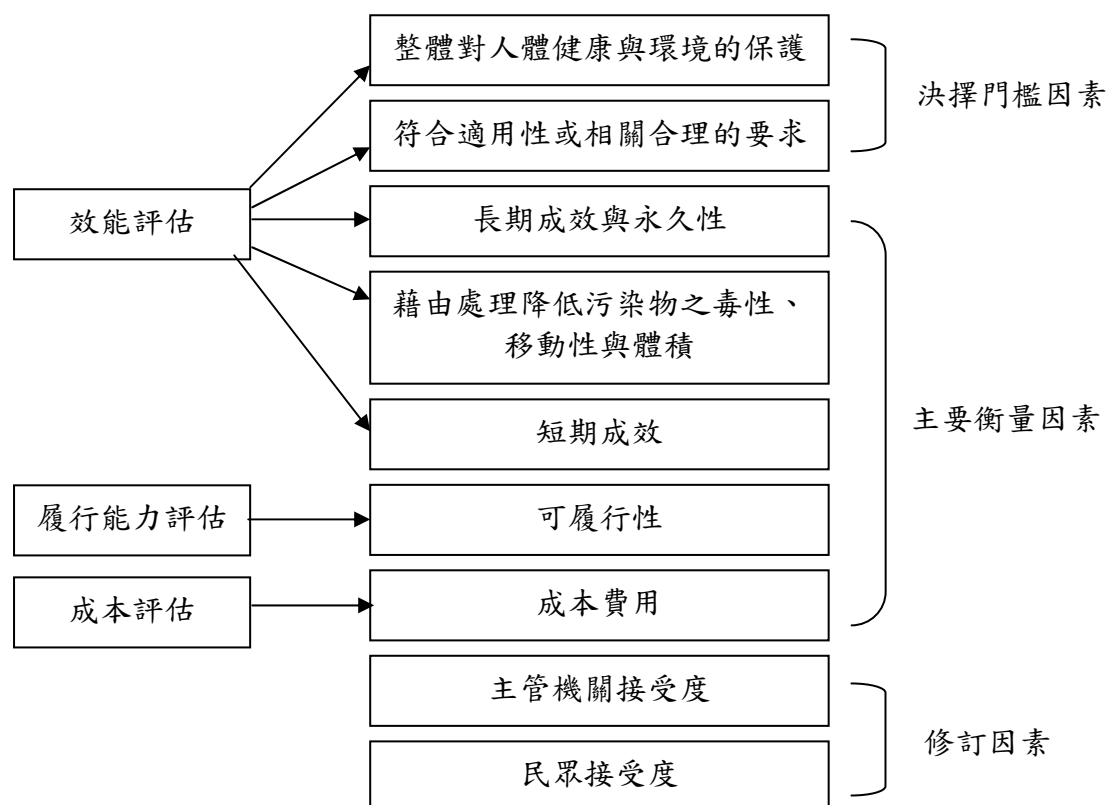


圖 6-2 初步篩選與細部分析準則間之關係 ^[2]

2. 履行能力評估

可履行性在評估過程中是用於評量特定場址條件下，適切之程序選項的組合，其包括建造、操作與維護整治行動的技術與行政之可行性評量。所謂技術可行性是指得以建造、穩定操作與符合技術專屬之程序規範(包括操作、維護、更換與監控整治技術的各項技術單元)。行政可行性則是指能取得其他主管單位許可的能力、整治技術的可取得性、具備後續需貯存或處置的容量，以及能獲得特殊設備與專家的需求。

當一項整治技術被認定不可行，通常在初步篩選即被排除，而不會被進一步的考慮。對行政可行性的負面影響因素，通常會涉及透過協調的方式來降低對整治技術之負面衝擊，但並不一定會將該項整治技術排除。

3. 成本評估

整治技術篩選另一項評估基準為成本評估，而評估的項目包括整治方案的規劃設計費、整治工程硬體設備費用、整治工程操作維護費（需考量稅率及通貨膨脹因素），以及後續週期性費用，如整治設備的故障或更換、系統設備的拆解與場址的復原、應變計畫及後續監測計畫等。花費成本的因素將決定污染物的整治目標值，同時

決定該技術是否具不實用性，但有時也會因場址關係人的財務狀況或場址的現值而改變整治成本評估結果。由於在篩選整治技術時所存在之各項因素數據的不確定性，一般而言在訂定決策記錄時，整治成本一般估算偏差會在-10%至+15%之間，屬於合理的範圍，而在整治行動時對成本的估算在細部分析下，其偏差範圍會擴大到-30%到+50%之間^[5]。成本評估過程中，應該納入敏感度分析，以確保掌握偏差範圍，而敏感度分析項目應包括整治行動的有效期限、操作維護費用、整治期間的時程、場址的特性(如污染物數量)及通貨膨脹等因素。場址整治計畫的基本資料可利用美國發展的歷史費用分析系統(historical cost analysis system, HCAS)輸入，該系統同時能將整治工作區分結構(work breakdown structure, WBS)逐一分項進行費用分類，方便整體成本費用的估算。而一般實際經驗各項整治技術的花費可參考美國環保署整理的資料庫 Vendor Information System for Innovative Treatment Technologies (VISITT) database^[6]，該資料庫 6.0 版中含括 204 個廠商資料及 325 個新穎處理技術的使用，廣為跨國際人士所使用，資料庫中針對整治計畫的經驗、費用進行列舉說明；而對於較特定技術的單價則可參考美國環保署的文獻^[7]。在經過成分的細部分析後，整治技術方可作為整治方案的選擇。

(二) 篩選考量要項

整治技術的選擇除了依據以上的準則評估外，亦需考量以下特定的要項：

1. 考量因子包括主要及次要威脅污染物的特性與污染程度，受污染介質的種類與體積數量，以及場址的現狀，如建築物及道路等與土地使用型態，場址區域地理環境及氣象等因素。
2. 污染處理所使用的方式包括現地處理、現場處理、離場處理模式，有些處理技術僅適用於特定模式，而並不適用於其他。
3. 部分次要威脅低程度污染物有時可使用隔絕方法，避免污染的傳輸，同時隔絕亦可減少整治工程直接處理所需的耗費，而處理所剩下的殘餘物與未處理的廢棄物質或許有處置的必要性，其運送距離與方法皆列為評估項目。
4. 整治工程期間所產生的空氣污染排放，以及設備尾氣處理之必要性皆列為評估的要項，其不僅牽涉到人體的健康風險問題，同時也影響整治技術的成本考量。

5. 技術執行的困難度與達成整治目標所需時程的評估，整治的時程可能受整治技術之限制，如設備大小與處理量、最大處理成效以及處理系統的取得難易度所影響。
6. 法令許可及其所產生的限制，諸如整治程序的尾氣處理所可能需要的排放許可，以及產生的廢水排放至工業區綜合污水處理廠的污染物(如化學需氧量)總量限制問題，均屬於此類的考量因素。

(三) 整治技術組合之可行性

當個別整治技術經過 RI/FS 的篩選，及利用上述基準與考量要項的評估後，認定場址污染整治方案或許需要使用多項技術結合成為整治列車，在同時或分階段執行整治工作。然而並非所有整治技術都適合或適用於整治列車中，例如整治技術中使用的電動力法可涵蓋於整治列車中，但具有可獨立操作的特質之植生復育及固化/穩定化技術則不必要具備於整治技術組合中。美國政府機關所組合的單位 The Federal Remediation Technologies Roundtable (FRTR)^[8]曾探討並結論出現地及非現地整治技術篩選的結果並做成資料矩陣，針對不同污染物質特性，將可能使用的整治技術除了依發展應用的狀況、殘餘物產生的可能性、硬體經費或操作維護費較著重的狀況、目前已可利用性、系統操作維護的可靠性、整治所需時間、整體費用進行評價區分等級，此外亦將個別整治技術列為整治列車組合的可能性明確定義說明。因此由各項整治技術如何結合成為整治列車，考量的因素如下所列：

1. 整治技術的獨立性。
2. 整治技術結合時連結介面的可靠性。
3. 各項整治技術的互補性，用以處理不同污染物。
4. 是否減少殘餘物質與未處理廢棄物質數量。
5. 整治技術結合時是否更容易操作與維護。
6. 整治技術結合時是否更容易達成整治目標。
7. 結合後是否可節省經費與時程。

6.2 控制與整治計畫研擬

一、法令依據

依據土污法第 11 條之規定[9]，在主管機關對於有土壤與地下水污染之虞的場址進行調查評估後，如發現污染物濃度超過污染管制標準，則該場址將被公告為「控制場址」，另若經過初步評估程序，確對國民健康及環境造成威脅時，則可報請中央主管機關審核，公告為「整治場址」。依實際需要，主管機關得命污染行為人提出控制計畫。

另依土污法中第 16 條之規定，污染行為人在場址公告為整治場址後，應依據場址調查評估結果（土污法第 12 條），訂定土壤與地下水整治計畫，並經主管機關審查核定後，據以實施。

二、控制計畫的研擬

土壤與地下水污染控制或整治計畫的內容，分別於施行細則^[10]第 14 條與第 21 條中有明確之規範，其應包含之事項如表 6-1 所列。

於 93 年 8 月環保署分別公布「土壤及地下水污染控制計畫撰寫指引」與「土壤及地下水污染整治計畫撰寫指引」，進一步將相關計畫書之研擬以及應包括之內容提供明確的準則。

表 6-1 土壤與地下水污染控制計畫與整治計畫之內容

事項	控制計畫	整治計畫
計畫提出者、撰寫者及執行者資料	✓	✓
計畫大綱		✓
場址基本資料	✓	✓
場址現況及污染情形	✓	✓
污染物、污染範圍及污染程度	✓	✓
整治基準或整治目標		✓
污染控制及防治方法	✓	
整治方法		✓
污染監測方式 (計畫)	✓	✓
污染防治計劃		✓
工地安全衛生管理 (計畫)	✓	✓
控制結果之驗證方式	✓	
整治完成之驗證計畫		✓
整治經費預估		✓
計畫執行期程	✓	✓
其他經主管機關指定之事項	✓	✓

下就污染控制計畫相關之研擬內容說明之：

(一) 計畫提出者、撰寫者及執行者資料

計畫提出者可為控制場址污染行為人、所在地主管機關、計畫實施者為或法人提出者。惟若由法人為計畫提出者則應提供法人、負責人及專案經理人之資料。計畫撰寫者為計畫提出者或委由他人(如技師事務所、顧問公司、工程公司等)負責撰寫。計畫執行者同樣可由計畫提出者自行執行或委由他人(技師事務所、顧問公司、工程公司及其他國內外相關單位或機構)執行。惟不論是撰寫或執行是委由他人負責者，均應提出與執行人之委辦證明文件及其相關資料(公司證照、負責人資料、營業項目、相關經驗與實績等)。

(二) 場址基本資料

相關場址之基本資料應包括場址公告資料、場址名稱及地址、地號或位置、污染行為人資料以及場址配置。其次應詳細說明目前之營運狀況，諸如潛在產生污染之製程、原物料、產品與廢棄物等均需對其生命週期循環提供正確的資訊，亦有利於場址污染源的判別。

此外，應提供場址相關之歷史資料，包括場址沿革與歷史調查資料等。依照撰寫指引的要求，歷史資料的回溯期間至少 10 年。特別是過去曾發生之緊急應變事件、調查與監測資料與違反環保法規之事件。若因人事變動或相關資料未能符合回溯期間之需求，可以採用訪談久任人員的方式，補充相關資料不足之處。

(三) 場址現況及污染情形

相對於場址歷史資訊的說明，於此應先針對場址之現有條件加以說明，說明內容至少應包括地理條件、地質條件、氣象條件、水文與水質狀況的描述，以及週界環境敏感受體的鑑別與分析，並對目前之污染情形簡要說明，此項資料應能顯現場址的特性為重點。

(四) 污染物、污染範圍及污染程度

本項應針對污染的狀況進行詳盡的描述，重點包括關切污染物及其特性與污染範圍及污染程度。利用場址調查結果(歷史數據與補充調查)說明污染的狀況(污染範圍與污染源)。同時，依據污染物特性及場址特徵，說明土壤系統及地下水系統的污染情形及污染物的行為。以土壤系統而言，應分為土壤及土壤氣體兩部分說明，地下水系統應分為溶解相、污染源以及自由相(若存在)說明。接著整合

土壤與地下水系統資訊，進行推估分析(如利用數值模式)，藉以描繪出污染範圍與可能的擴散狀況。

(五) 污染控制及防治方法

應分別說明土壤污染及地下水污染的污染控制及防治方法。污染控制所採取之處理技術，若無場址先導試驗資料可佐證，至少應採擷國內外相關實場、模場文獻資料評估說明處理效率等技術的可行性。

污染控制及防治方法說明內容應包括：

1. 控制方法說明。
2. 控制方法細部規劃。
3. 控制方法的經費預估。
4. 污染防治計畫。

同時對於控制計畫執行期間的二次污染控制與預防措施之規劃應一併考量，以防範場址在控制計畫執行期間對環境造成負面之影響。

(六) 污染監測方式

監測計畫應包括場址污染監測計畫與場址周圍環境監測計畫，前者為針對場址內土壤與地下水之監測計畫，後者則為場址邊界外的監測計畫(如場址放流水質、地表水質、空氣品質、施工噪音與振動等)。此外，監測計畫亦需注意控制方案所需之設備、儀器、機械、材料及相關設施等，在運作期間，可能對污染場址及其周圍環境生態所產生的影響。

另外，監測計畫內容應說明監測點數目及其相關位置、環境監測類別、採樣頻率、樣品採樣方法、檢測方法與程序、品保品管及樣品運送程序等，而監測檢驗測定均應依土污法第 10 條及相關規定辦理。

(七) 工地安全衛生管理

控制計畫執行期間應依「勞工安全衛生法」等相關規定訂定工地安全衛生計畫，擬定安全衛生工作守則，詳列安全衛生注意事項、實施作業環境測定，並防範人為意外與災害發生及對於緊急事故之應變措施等。此外，應妥慎規劃有關人員參觀之安全及場址保全工作。

(八) 控制結果的驗證方式

控制結果的驗證方式是為驗證控制過程是否依據控制計畫內容所訂定各階段期程執行及場址污染物濃度是否達到控制計畫之目標。驗證事項之查核方法是由控制計畫實施單位提出，經監督小組審查同意後執行。監督小組亦得提出相關、合適之查核方法，以補不足之處。所應提出驗證內容至少應說明：

1. 驗證單位
2. 關切污染物之控制計畫目標
3. 各階段之驗證項目與方法

相關之驗證作業程序之詳細說明，請見 6.3 節。

(九) 計畫執行期程

控制計畫期程的規劃，應說明控制計畫設計與執行所需時間、達到計畫目標之期程以及實際操作與運作時間。同時應設定計畫執行期間之里程碑，以利進度查核。

三、整治計畫的研擬

由表 6.2-1 可見，污染整治計畫書的內容與污染控制計畫書有多項相同或類似之項目，同時規範整治目標、整治方法與整治成效等整治計畫核心項目，例如整治目標即為整治技術篩選的重要準則(見 6.1 節)。以下即就污染整治計畫相關之研擬內容加以說明。

(一) 計畫提出者、撰寫者及執行者資料

計畫提出者可為整治場址污染行為人、所在地主管機關、計畫實施者為或法人提出者。惟若由法人為計畫提出者則應提供法人、負責人及專案經理人之資料。計畫撰寫者為計畫提出者或委由他人(如技師事務所、顧問公司、工程公司等)負責撰寫。計畫執行者同樣可由計畫提出者自行執行或委由他人(技師事務所、顧問公司、工程公司及其他國內外相關單位或機構)執行。惟不論是撰寫或執行是委由他人負責者，均應提出與執行人之委辦證明文件及其相關資料(公司證照、負責人資料、營業項目、相關經驗與實績等)。

(二) 計畫大綱

計畫大綱是針對整治計畫書之內容進行摘要性的描述，主要應擷取的內容包括：

1. 場址名稱及地址、地號或位置

2. 污染物及污染情形
3. 污染物整治基準或整治目標
4. 整治方法概述
5. 整治計畫期程

(三) 場址基本資料

場址基本資料應包括場址公告資料、場址名稱及地址、地號或位置、污染行為人資料以及場址配置。其次應詳細說明目前之營運狀況，諸如潛在產生污染之製程、原物料、產品與廢棄物等均需對其生命週期循環提供正確的資訊，亦有利於場址污染源的判別。

此外，應提供場址相關之歷史資料，包括場址沿革與歷史調查資料等。依照撰寫指引的要求，歷史資料的回溯期間至少 10 年。特別是過去曾發生之緊急應變事件、調查與監測資料與違反環保法規之事件。若因人事變動或相關資料未能符合回溯期間之需求，可以採用訪談久任人員的方式，補充相關資料不足之處。

(四) 場址現況及污染情形

相對於場址歷史資訊的說明，於此應先針對場址之現有條件加以說明，說明內容至少應包括地理條件、地質條件、氣象條件、水文與水質狀況的描述，以及週界環境敏感受體的鑑別與分析，並對目前之污染情形簡要說明，此項資料應能顯現場址的特性為重點。

(五) 污染物、污染範圍及污染程度

本項應針對污染的狀況進行詳盡的描述，重點包括關切污染物及其特性與污染範圍及污染程度。利用場址調查結果(歷史數據與補充調查)說明污染的狀況(污染範圍與污染源)。同時，依據污染物特性及場址特徵，說明土壤系統及地下水系統的污染情形及污染物的行為。以土壤系統而言，應分為土壤及土壤氣體兩部分說明，地下水系統應分為溶解相、污染源以及自由相(若存在)說明。接著整合土壤與地下水系統資訊，進行推估分析(如利用數學模式)，藉以描繪出污染範圍與可能的擴散狀況。

(六) 整治基準或整治目標

此項內容應包括以下各子項之說明：

1. 整治基準或整治目標
2. 整治基準或整治目標之研擬說明，必要時可以採用風險評估的研擬

方式

(七) 整治方法

整治方法的說明應針對整治技術與實際場址特性之相容性與可行性(處理技術若無場址先導試驗資料可佐證，至少應採擷國內外相關實場、模場文獻資料評估說明處理效率等技術的可行性)。當提出人為污染行為人或污染土地關係人時，其說明項目應包括：

1. 整治篩選方法說明
2. 整治方法細部規劃

若整治計畫是由所在地主管機關提出時，其說明項目應包括：

1. 整治方法篩選比較並經過評估標準或準則之分析以選擇最佳場址整治方案
2. 最佳整治方案的結論與細部設計規劃

如遇特殊情況導致無法進行模場試驗或需更詳細資料時，造成無法辦理整治方法細部規劃或決定整治方法時，可說明理由，經主管機關同意後，另定期提出整治方法細部規劃。

(八) 污染監測計畫

監測計畫應包括場址污染監測計畫與場址周圍環境監測計畫，前者為針對場址內土壤與地下水之監測計畫，後者則為場址邊界外的監測計畫(如場址放流水質、地表水質、空氣品質、施工噪音與振動等)。此外，監測計畫亦需注意控制方案所需之設備、儀器、機械、材料及相關設施等，在運作期間，可能對污染場址及其周圍環境生態所產生的影響。

另外，監測計畫內容應說明監測點數目及其相關位置、環境監測類別、採樣頻率、樣品採樣方法、檢測方法與程序、品保品管及樣品運送程序等，而監測檢驗測定均應依土污法第 10 條及相關規定辦理。

(九) 污染防治計畫

應說明整治計畫執行期間對空氣污染、水污染、噪音與振動或其他污染等問題所實施之預防措施，以防範污染場址在整治期間因整治工程而造成二次污染與對環境之傷害。

(十) 場址安全衛生計畫

整治計畫執行期間應依「勞工安全衛生法」等相關規定訂定工

地安全衛生計畫，擬定安全衛生工作守則，詳列安全衛生注意事項、實施作業環境測定，並防範人為意外與災害發生及對於緊急事故之應變措施等。此外，應妥慎規劃有關人員參觀之安全及場址保全工作。

(十一) 整治完成之驗證計畫

整治結果之驗證方式是為驗證整治過程是否依據整治計畫內容所訂定各階段期程執行，以及場址污染物濃度是否達到整治計畫之目標。驗證事項之查核方法是由整治計畫實施單位提出，由監督小組審查同意後執行。監督小組亦得提出相關、合適之查核方法以補不足之處。所應提出驗證內容至少應說明：

1. 驗證單位
2. 標的污染物之整治計畫目標
3. 各階段之驗證項目與方法

相關之驗證作業程序之詳細說明，請見 6.3 節。

驗證程序同時應說明為整體驗收或分階段驗收，並提出驗證事項及驗證方法。驗證項目與方法則應區分為土壤污染、地下水污染。

(十二) 整治經費預估

除了應推估整治方案所需總金額、每年操作維護(O&M)費用及目前總價值、折舊率(標準折舊率 7%) 等，說明整治年限中所需之經費。此外亦須說明整治經費來源，且若為使用土壤及地下水污染整治基金者，則應說明預估整治經費。

(十三) 整治期程

整治計畫期程的規劃，應說明整治計畫設計與執行所需時間、達到計畫目標之期程以及實際操作與運作時間，同時應設定計畫執行期間之里程碑以利進度查核。

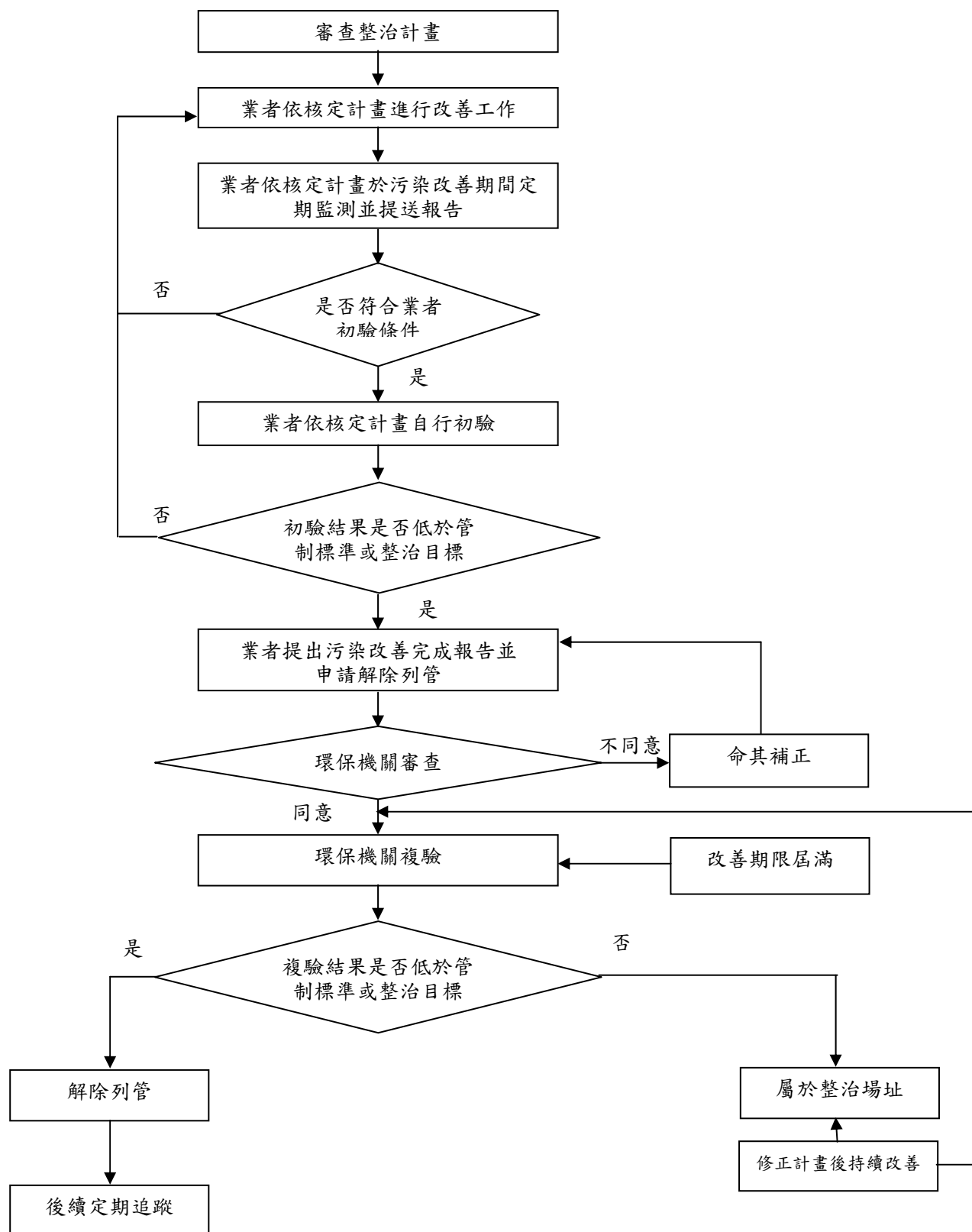
有關污染控制計畫與污染整治計畫研擬的進一步說明，建議可參考環保署相關之撰寫指引^{[11][12]}。

6.3 環保機關控制與整治計畫審查與驗證作業程序

環保機關於業者提出污染控制或污染整治計畫時，針對場址調查結果與改善方法的合理性與可行性進行審查，同時依據污染控制計畫撰寫指引與污染整治計畫撰寫指引之內容，審查其中污染改善完成之驗證計畫或方式之完整性。相關的驗證作業流程如圖 6-3 所示。

原則上，驗證計畫是併同污染控制與污染整治計畫審查，而控制計畫或整治計畫經過主管機關審查核定之後，業者即可進行改善或整治工程的進行，並定期提供監測資料，監測頻率一般可為月報或季報的方式訂定之，監測項目則應以污染控制與污染整治計畫中所定之標的污染物為主。

業者在進行初驗之前應在改善期間至少有 3 次的監測結果低於管制標準或整治目標方可符合初驗的條件，且每次的間隔至少要達 1 個月以上，以確認污染物沒有濃度回升(rebound)的狀況。如果初驗結果合格，即可提出污染改善完成報告，申請解除列管。經主管機關或審查小組核定後，且通過複驗之機制，即完成驗證之程序。惟當複驗結果未能符合管制標準或整治目標的要求時，則需持續進行改善。倘若為控制場址，則將再次進行初評，並依現況判定應以污染場址或控制場址予以列管。

圖 6-3 污染改善完成驗證作業流程^[13]

6.4 整治施工承包商評估及選擇

一、考量重點

整治工程規劃設計與建置規模取決於所需執行之調查工作與採用之整治工法而有相當程度的差異，同時依據所訂定之整治目標，所承擔之風險亦有不同的，因此在評估施工承包商的過程應著重於經濟面、技術面、工程品質與風險承擔能力。以下有關承包商之評估與選擇方法，主要是參考美國專案管理學會之專案管理指引^[14]。

二、承包商的選擇

在選擇承包商的流程之中，除了最基本的成本或價格之外，還應需要評估下列可能因素：

- (一) 雖然價格是重要考量，但即時交付成品的能力同樣會影響成本，如果事實上承包商無法及時交付產品，其所涉及之內部與外部失敗成本應被納入考量，而所建議的最低價格就未必是最低成本。
- (二) 建議書為評估承包商的重要依據，其內容往往分成技術面(方法)與商業面(價格)二大部分，二者應該單獨評估。
- (三) 關鍵產品或關鍵技術的提供能力。
- (四) 可依據初步建議書篩選合格的承包商，然後再以更詳盡與更全面的建議書進行評估。

至於選擇與評估承包商的主要依據包括：

- (一) 計畫建議書的品質。
- (二) 承包商過所提供之服務的樣品或案例，以此做為評估其能力與產品品質。另可審查承包商組織過去來往的歷史紀錄。
- (三) 選擇評估要件用於評定承包商之建議，並可以量化之標準予以評分，而常用的要件包括對於整治工程之需求的了解、總成本或生命週期、技術能力、計畫管理能力與財物實力等。
- (四) 企業組織的策略往往也會影響評估的思維。

於選擇承包商時可以採用的工具與技巧亦相當多元，例如透過合約協商的方式清楚規範責任與權限、適用的條款與法律、技術和經營管理方法以及價格等。為能進一步量化評估的數據，可以採用加權系統，突顯真正重要之考量因素，並減少個人偏見影響對承包商的選擇。

建構篩選系統主要是透過對於評估要件設定最低的需求，發揮初步篩選的功能，例如於邀標書中設定計畫參與人員資格、承包商之資本額

、保險要求等。在成本估算上，可以於內部制定獨力估算的能力，並依承包商之工作說明書進行獨立估算，若與承包商之落差過大，即可顯示工作明書不夠明確或是在工作內容期望上有所誤解，可以即早對於價格進行協商，依照其特質，此獨立估算的價格可稱為合理成本預估值。在確定所選擇承包商後，即應透過合約管理(合約泛指合約、協議書、採購單或備忘錄等)，讓雙方的共識落實於法律層面，透過合約方能建立雙方之法律關係，並以文件保證承包商之服務能夠滿足已經辨識之需求。

除了以上一般性的考量之外，針對整治技術篩選與方案的擬定過程，各階段亦有其較特殊之因素(如法規需求、技術條件等)，可以在承包商的評估程序中一併納入，茲於表 6-2 中列出部分的因子作為參考。

表 6-2 承包商選擇之特殊考量因子範例

整治技術/方案工作階段	特定考量因素
定義 RI/FS 的範疇	• 專業人員之廣度 • 對於法規之熟悉程度 • 風險鑑別與管理策略之成熟度
場址特性調查	• 土壤與地下水採樣認證 • 土壤與地下水分析認證 • 評估人員資格專業證明 • 對品保/品管的認知與負責態度
整治技術開發與篩選	• 相關整治技術的建置經驗 • 整治技術之掌握度 • 具備修改技術與工程建置之能力 • 技術研究與開發之能力
可處理性測試	• 實驗室規模驗證能力 • 模場建置之能力與經驗
整治技術細部分析	• 所掌握之核心技術的多元性 • 整治技術整合能力 • 對於整治目標達成之承諾度
整治行動階段	• 具備類似整治計畫經驗 • 具有整治技術與設備 • 具備計畫執行的熱誠度、配合度與承諾度

參考文獻

1. USEPA, 1997. Rules of Thumb for Superfund Remedy Selection, Office of Solid Waste and Emergency Response, EPA 540-R-97-013.
2. USEPA, 1988. Guidance for Conducting Remedial Investigations and Feasibility Studies Under CERCLA, EPA/540/G-89/004, OSWER Directive 9355.3-01.
3. USEPA, 1997. Expedited Site Assessment Tools For Underground Storage Tank Sites-A Guide For Regulators, EPA 510-9-97-001, United States Environmental Protection Agency, Washington DC, USA.
4. USEPA, 1990. A Guide to Selection of Superfund Remedial Actions, Office of Solid Waste and Emergency Response, 9355.0-27FS.
5. US Army Corps of Engineers, 2001. A Guide to Preparing and Reviewing Remedial Action Reports of Cost and Performance, EP 1110-1-19.
6. USEPA, Vendor Information System for Innovative Treatment Technologies (VISITT) database, Technology Innovative Office.
7. USEPA, 1998. The Guide to Documenting and Managing Cost and Performance Information for Remediation Projects, EPA 542-B-98-007.
8. The Federal Remediation Technologies Roundtable (FRTR), 1997. The Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide, Version 3.
9. 行政院環境保護署，土壤及地下水污染整治法，民國 92 年 1 月。
10. 行政院環境保護署，土壤及地下水污染整治法施行細則，民國 90 年 10 月。
11. 行政院環境保護署，土壤及地下水污染控制計畫撰寫指引，民國 93 年 8 月。
12. 行政院環境保護署，土壤及地下水污染整治計畫撰寫指引，民國 93 年 8 月。
13. 行政院環境保護署，油品類儲槽系統污染改善完成驗證參考作業手冊，民國 95 年 5 月。
14. PMI, 2000. Project Management Body of Knowledge-2000 Edition, Project Management Institute, Newtown Square, PA 19073-3299 USA..

第七章 土污法對產業影響及因應對策

本章將說明有關土污法中有關整治費徵收、工廠土地移轉、設立、停業或歇業之土壤污染檢測規定、土壤或地下水污染場址之列管作業程序，以及土污法相關訴願程序或行政訴訟等，以業者之角度，提出當事業被通知查證、被通知改善、被列為控制、整治場址，或進行土地移轉、設立、停業、歇業時，於各種適法狀況下之因應對策，供產業界人士參考使用。

7.1 土壤及地下水污染整治費之徵收

土污法第 22 條之規定：「中央主管機關為整治土壤、地下水污染，得對指定公告之化學物質，依其產生量及輸入量，向製造者及輸入者徵收土壤及地下水污染整治費」。據此，環保署遂依據法律之授權，公告「土壤及地下水污染整治費收費辦法」（以下簡稱收費辦法）及「土壤及地下水污染整治費徵收種類與收費費率」，並自 90 年 11 月 1 日起施行。

土壤及地下水污染整治費申報作業相關說明如下：

一、徵收對象

整治費收費對象為環保署指定公告之 6 類 125 種化學物質，包括 51 種石油系有機物、33 種含氯碳氫化合物、17 種非石油系有機化合物、2 種農藥類安殺番及苯甲氯、20 種重金屬及重金屬化合物及其他類 2 種氰化鈉及氰化鉀等之製造或輸入者。

二、整治費費率

請至行政院環保署土壤及地下水污染整治基金會(以下簡稱土基會)網站(網址：<http://ww2.epa.gov.tw/SoilGW/index.asp>)查詢。

三、整治費繳納

整治費採按季徵收，徵收對象每年 1 月、4 月、7 月及 10 月底前自行申報繳納前季整治費，每季申報時依規定格式填具土壤及地下水污染整治費申報書、化學物質產生量與整治費申報明細(只輸入未產製之業者免填)或(及)化學物質輸入量與整治費申報明細，連同化學物質產生量統計報表或化學物質進口報單及繳費收據影本，寄至土基會。或於每季徵收期限之當月(例如 4 月 1 日至 4 月 30 日申報 1 月至 3 月之整治費)經由網路申報，網址為 <http://soilweb.utrust.com.tw/>，再將繳費收據影本及產製報表(僅輸入者免附)寄至土基會。

四、整治費計算

$$\begin{aligned}\text{整治費費額} &= \Sigma[\text{當季個別化學物質應繳納整治費費額(元)}] \\ &= \Sigma[\text{化學物質產生量或輸入量(公噸)} \times \text{費率(元/公噸)} \times \\ &\quad (1 - \text{免徵比例})]\end{aligned}$$

若繳費人未於期限內繳納費用，應依土污法第 33 條及收費辦法第 13 條規定加計利息。

五、整治費繳納方式

應繳納整治費金額由繳費人自行計算，並至金融機構以匯款方式繳費，匯入中央銀行國庫局。每季正常申報之 1 筆手續費(金融機構所稱手續費包括手續費與金資中心應付帳款兩部份)採內含方式(內含於應繳整治費內)，繳費義務人需先向銀行詢問手續費後，將應繳納整治費扣除手續費金額填入匯出匯款金額欄位。亦即每季由環保署僅負擔 1 筆手續費，第 2 筆以上(例如原繳款金額不足，再匯 1 次或補繳整治費等)之匯款手續費由繳費人負擔。繳款人將繳費收據影本與申報資料一併寄至環保署申報，繳費收據正本留存做為列報費用之用。

六、整治費申報

(一) 免徵比例之申請

對指定公告化學物質之產製者，依據收費辦法第 6 條規定，繳費人得檢具應徵收整治費化學物質之產製原料及製程內容說明，詳列直接產製原料已繳納整治費之成本百分比，連同免徵比例申請書及繳費收據與直接產製原料已繳納整治費證明書向環保署申請核定免徵比例。免徵比例經核定後，若製程及物種費率未更改，可繼續沿用。

(二) 出口退費申請

依收費辦法第 9 條，已繳納整治費之化學物質於出口時，其繳費人得依當季實際出口數量，檢具出口報單及該化學物質已繳納整治費單據，向環保署申請退還其已繳納整治費費額之 95%，並得充作其後應繳納費額之一部分。

若出口化學物質適用經核定之免徵比例扣抵整治費者，其直接產製原料繳納之整治費得併入其已繳納整治費費額計算出口退費。

申請出口退費者，若直接產製原料向已繳納整治費之業者購買，出口業者應提出整治費轉嫁證明；無法提出轉嫁證明，則依出口業者實際繳納之整治費費額計算出口退費。

(三) 溢繳退費申請

依收費辦法第 4 條，溢繳者，充作其後應繳費額之一部分。依收費辦法第 8 條，繳費人歇業、停業或停止中央主管機關指定公告化學物質之製造或輸入者，應自事實發生之日起 30 日內檢具其應繳納整治費之結算資料，並檢附環保署核發之溢繳通知，向環保署申請停止徵收並退還溢繳之費額。

(四) 整治費繳費結算不足之催繳

依收費辦法第 4 條，經中央主管機關審查，其結算不足者，應於次季補足其差額。

(五) 逾期末申報之催告

為恪盡事業之環境與社會責任，逾期末申報整治費時，請事業單位收到催告通知時，儘速繳費申報(逾期者依土污法第 33 條及收費辦法第 13 條論處)。

(六) 投保環境損害責任險或等同效益之保險者年度退費申請

依收費辦法第 10 條，繳費人投保環境損害責任險或等同效益保險，得以會計年度為計算單元，填具退費申請書，於每年 6 月 1 日起至 7 月 31 日止，檢具保險契約書及前一年度保險費繳費單據，向環保署提出申請；經審查核定者，其退費金額，以其前一年度實際繳納整治費費額之 5%為上限，並得充作其後應繳納費額之一部分。

(七) 新投資於預防土壤及地下水污染有直接效益之設備或工程年度退費申請

依收費辦法第 11 條，繳費人新投資於預防土壤、地下水污染有直接效益之設備或工程所支出費用，得以會計年度為計算單元，填具退費申請書於每年 6 月 1 日起至 7 月 31 日止，檢具相關投資內容說明及前一年度費用支出證明文件，向環保署提出申請。其退費金額，以其前一年度實際繳納整治費費額之 20%為上限，並得充作其後應繳納費額之一部分。符合新投資於預防土壤、地下水污染有直接效益之設備或工程項目如表 7-1 所示。

表 7-1 符合土污法第 11 條第 1 項之新投資於預防土壤、地下水污染有直接效益之設備或工程項目

工程項目	細項分類
一、儲槽區、加油站之洩漏預防	(一) 儲槽本體及儲槽區以塑脂塗裝及包覆、鋪設防漏材質、陰極防蝕處理，以達到預防洩漏之目的，相關材料費及施工工程費。 (二) 攔污設施。 (三) 擋油堤。
二、置放區地面阻絕設施	(一) 攔污設施及油水分離設施。 (二) 水溝閘欄。
三、廢水、廢液處理設施	(一) 輸送管線之防漏設施(例如：管溝增設鋼筋混凝土護槽、防溢堤)。 (二) 處理設施之防漏設備部分(例如：內部包覆、鋪設相關特殊材質等)。
四、廢棄物、污泥、廢水及廢液之儲存設施	(一) 廢水槽防漏設備部分(例如：內部包覆、鋪設相關特殊材質等)。 (二) 攔污設施。
五、金屬粉塵逸散預防	粉塵收集系統。
六、其它	前述所列 5 項之細項分類以外，符合收費辦法第 11 條規定之工程。

(八) 免繳納整治費之情形

依據收費辦法第 12 條，繳費人有下列情形之一者，得免繳納整治費：

1. 進口指定公告之化學物質，未經加工即轉口輸出，且未辦理通關手續者。
2. 進口指定公告之化學物質屬廣告品或貨樣者。
3. 當季應繳納整治費費額，未達新台幣一百元者。
4. 其他經中央主管機關指定公告者。

7.2 工廠土地移轉、設立、停業或歇業之土壤污染檢測規定

鋼鐵冶鍊業之廠房、其他附屬設施所在之土地及空地面積達 100 平方公尺以上，為土污法第 8 條第 1 項及第 9 條規定之指定公告之事業。業者為避免因出售污染土地引起糾紛，及發生污染責任問題，於工廠土地移轉、設立、停業或歇業前，應依法進行土壤污染檢測，不僅可釐清污染責任，亦為企業應盡之社會義務。

一、土壤污染檢測資料

依土污法施行細則第 7 條規定，土污法第 9 條所定之「土壤污染檢測資料」應包含下列項目：

(一) 事業基本資料

事業名稱及負責人、統一編號、地址、地政編號、土地使用類別、廠區配置圖、土地使用人、管理人或所有人及聯絡方式等。

(二) 事業運作情形

生產製程、使用原料、產品、污染來源、污染物種類與成分、處理情形及相關污染防治措施。

(三) 檢測及分析結果

檢測項目、採樣檢測方法、檢測數量及品保品管等。

(四) 檢測機構

機構名稱、地址及許可文件影本。

(五) 其他經主管機關指定之資料

為便於事業準備相關應檢具文件，茲依據施行細則第 7 條所定項目，訂定「土壤污染檢測資料」格式、內容及填寫說明供事業及相關單位參考。

二、工廠用地土壤污染檢測

(一) 委託執行單位

業者可考量委託專家顧問、技術顧問機構或檢測機構，協助工廠進行地土壤污染檢測相關工作，並依土污法第 10 條之規定，應委託經環檢所許可之檢測機構進行檢測，合格檢測機構資料可至環檢所網站(網址：<http://www.niea.gov.tw>)查詢。

在委託專家顧問、技術顧問機構或檢測機構之資格條件上，除土壤檢測分析工作須委由許可之檢測機構外，土污法對相關專業人員及機構尚未訂定相關資格條件。業者暫可依據專業人員及機構所

提出之人員學經歷、過去曾執行環境場址評估或土壤、地下水污染調查工作之實績經驗等資料，選擇適當的專業人員及機構辦理。

(二) 土壤採樣方式

環保署為協助業者執行土壤污染檢測，研擬「環境場址潛在污染評估辦理事業用地污染檢測參考指引」與「網格法辦理事業用地土壤污染檢測參考指引」，供業者參考選用，相關參考指引可至環保署土基會網站(網址：<http://ww2.epa.gov.tw/SoilGW/index.asp>)下載。

1. 環境場址潛在污染評估辦理事業用地污染檢測參考指引

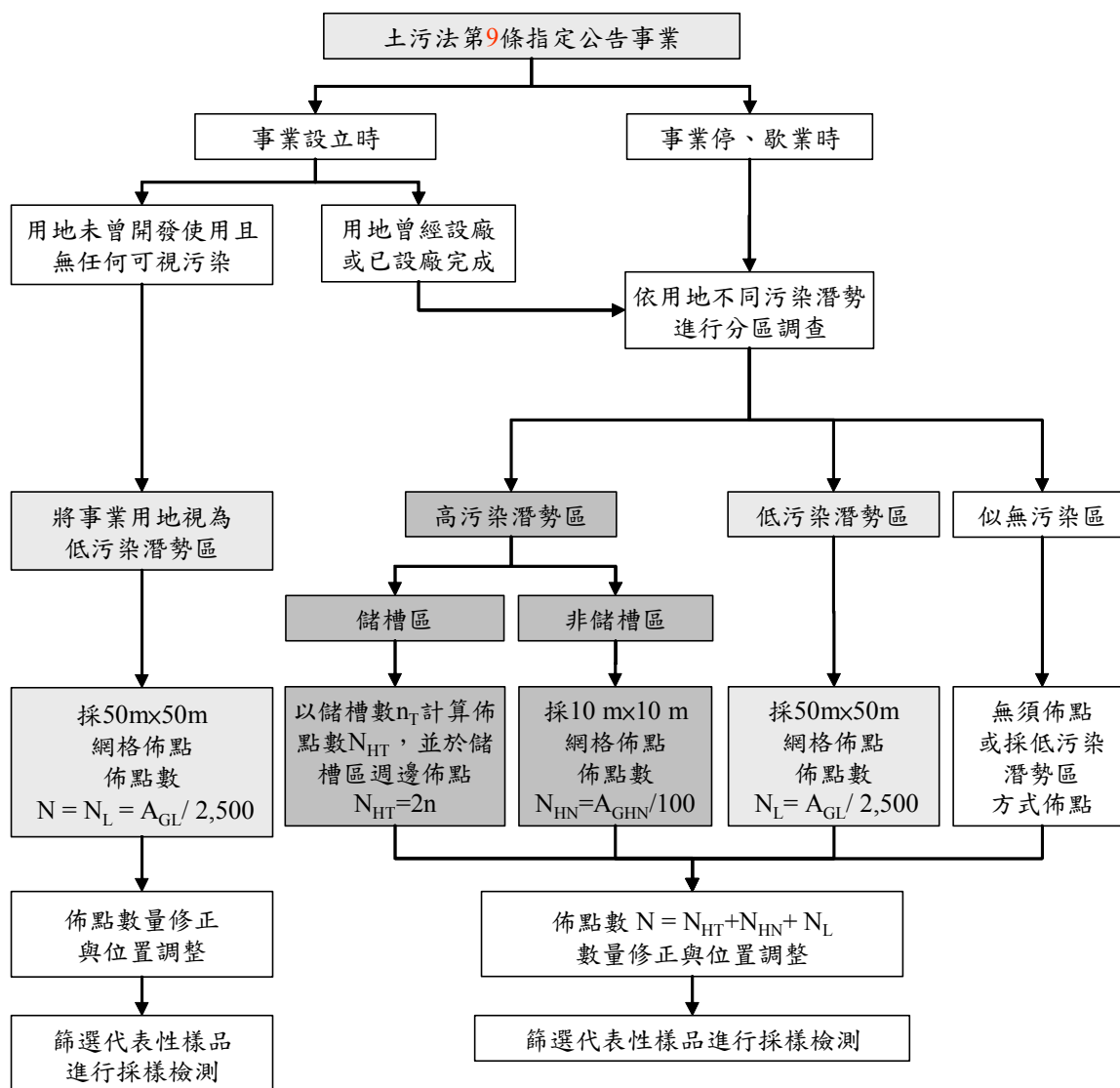
依環保署「環境場址潛在污染評估辦理事業用地污染檢測參考指引」建議之最少土壤採樣點數如表 7-2 所示。

表 7-2 環境場址潛在污染評估之最少土壤採樣點數^[1]

事業用地面積(A)	最少採樣點數
$A < 100$ 平方公尺	2
$100 \text{ 平方公尺} \leq A < 500$ 平方公尺	3
$500 \text{ 平方公尺} \leq A < 1,000$ 平方公尺	4
$1,000 \text{ 平方公尺} \leq A$	10

2. 網格法辦理事業用地土壤污染檢測參考指引

針對已設廠或曾經使用過之事業用地，可依其土地使用狀況與污染潛勢劃分為高污染潛勢區、低污染潛勢區與似無污染區分別進行調查規劃，分區規劃亦可參考「以環境場址潛在土壤污染評估辦理事業用地土壤污染檢測參考指引」執行資料審閱、場址勘查與訪談等程序後，綜合評析規劃。若事業於設立時，其用地未曾開發使用且無任何可視之污染，則得參考低污染潛勢區之網格調查方式辦理。有關網格法(儲槽區除外)採樣佈點之規劃流程如圖 7-1 所示。



A_{GHN} ：以10m×10m網格所涵蓋高污染潛勢區內非儲槽區之網格面積

A_{GL} ：以50m×50m網格所涵蓋低污染潛勢區之網格面積

N_{HN} ：高污染潛勢區內非儲槽區10m×10m網格佈點數

N_{HT} ：儲槽區佈點數

N_L ：低污染潛勢區50m×50m網格佈點數

N ：總佈點數

n_T ：總儲槽數

面積單位：平方公尺

註1：於採樣過程中，若發現由土壤外觀可明顯研判其物化性質異於場址或附近土壤性質時即應參採高污染潛勢區之調查佈點方式辦理或調整佈點數量與位置。

註2：土污法第8條第1項之指定公告事業若採本方式進行調查採樣時，採樣佈點數與檢測項目得依事業製程與用地現況特性，由土地移轉雙方自行協議決定。

圖 7-1 環保署網格法進行採樣佈點之規劃流程^[2]

(三) 土壤污染檢測項目擇定

1. 依據環保署 93 年 12 月 7 日修正公告之「土壤及地下水污染整治法第八條第一項之事業」及「土壤及地下水污染整治法第九條之事業」之附表，國內可能產生重金屬污染之產業，及其相關製程、應檢測污染物之項目，彙整如表 7-3 所示。

表 7-3 國內可能產生重金屬污染之產業、相關製程及其應檢測污染物之項目

事業	主要製程	檢測項目
皮革、毛皮整製業	皮革、毛皮鞣製製程	鉻
	塗飾或染色製程	鋅、鉻、鎘、鉛、銅、VOC
	其他製程	鉻
基本化學工業	基本化學工業製程	砷、鎘、鉻、銅、汞、鎳、鉛、鋅、VOC、SVOC、TPH
石油化工原料製造業	石油化工原料製造	砷、鎘、鉻、銅、汞、鎳、鉛、鋅、VOC、SVOC、TPH
合成樹脂及塑膠製造業	合成樹脂及塑膠製造	鎘、汞、鉻、鉛、鎳、鋅、銅、砷、SVOC、VOC、TPH
農藥及環境衛生用藥製造業	使用砷、有機砷為原料製造農藥及環境衛生用藥製程	砷、VOC、SVOC、農藥
	使用汞、有機汞為原料製造農藥及環境衛生用藥製程	汞、VOC、SVOC、農藥
	使用銅為原料製造農藥及環境衛生用藥製程	銅、VOC、SVOC、農藥
石油煉製業	石油煉製製程	砷、鎘、鉻、銅、汞、鎳、鉛、鋅、VOC、SVOC、TPH
鋼鐵冶鍊業	煉鐵製程	鉛、鋅、TPH
	轉爐煉鋼製程	鉛、鋅、TPH
	電弧爐煉鋼製程	鋅、鉛、鎘、銅、鉻、鎳、TPH
金屬表面處理業	使用有機溶劑之製程	鎘、鉻、銅、鎳、鉛、鋅、VOC
	化成、電鍍製程	鎘、鉻、銅、汞、鎳、鉛、鋅
	塗裝製程	鎘、鉻、銅、鉛、鋅、VOC
	其他製程	鎘、鉻、銅、鉛、鋅
半導體製造業	半導體製造製程	砷、鎘、鉻、銅、汞、鎳、鉛、鋅、VOC、SVOC
印刷電路板製造業	印刷電路板製造製程	鎳、銅、鉛、鉻、VOC
電池製造業	非汞電池製造	鎳、鎘、鉛、銅、鋅、VOC
	汞電池製造	鎳、鎘、鉛、銅、鋅、汞、VOC

2. 經評估，工廠未曾運作可能產生土壤污染管制項目之化學物質時，則可考量不進行土壤檢測，惟如曾運作土壤污染管制項目以外，且國內、外研究發現具有危害人體健康之化學物質時，則考量檢測該污染物項目。

三、土污法第 8、9 條相關問題與因應對策

有關土污法第 8、9 條相關問題與因應對策，如表 7-4 所示。

表 7-4 土污法第 8、9 條規定之相關問題與因應對策^[3]

問題	因應對策
一、若事業新增購或是新租用一塊地新設製程廠房，這是否屬於新設立範圍？若是屬於新設立範圍，那所採樣的範圍是否應該涵蓋舊有廠區還是以新廠區為主？	若事業於廠區外新增購或租用一塊地新設廠房者，除需辦理工廠登記外，亦符合土污法第 9 條設立前之時機。若事業於原廠區用地內新(擴)建廠房設施，且該廠房已符合工廠管理輔導法需重新申請工廠設立或登記者，則應針對該新(擴)建用地於整地施工前完成土壤污染檢測。
二、事業變更登記產業類別或產品增減時，是否亦需提具土壤污染檢測資料備查？若是的話，是否每一次辦理變更登記就必須整個廠區檢測一次？	依土污法第 9 條之規定，僅規範設立、停業或歇業前應進行用地土壤污染檢測，條文中並未將變更之時機納入，故事業僅進行基本資料之變更(如廠名、負責人姓名等)時，並不需提送土壤污染檢測資料備查之動作，惟若事業變更內容已符合各目的事業主管機關法規所規定應重新辦理設立之許可、登記、申請執照等相關行為時(如事業變更登記產業類別並需依工廠管理輔導法第 16 條第 3 項重新辦理設立許可或登記)，且變更後重新登記之事業類別屬於土污法第 9 條指定公告事業，則應進行用地土壤污染檢測及備查作業。
三、若事業將土地出租，是否受土污法第 8 條土地移轉應提供土壤污染檢測資料之規範？	土地承租如無涉及土地所有權(物權)之移轉，則不受土污法第 8 條之規範。惟為保障土地所有人之自身權益，建議以契約約定方式，要求土地承租人或使用人於終止租(使)用時提供土壤檢測資料以釐清污染責任。若承租人為環保署指定公告之 18 類事業，則所承租之土地移轉時，土地所有權人(即讓與人)應依土污法第八條規定提供土壤污染檢測資料。

表 7-4 土污法第 8、9 條規定之相關問題與因應對策^[3] (續 1)

問題	因應對策
四、若事業於土地移轉時依規定提供土壤污染檢測資料，內容與規格符合第 9 條資料規定之要求，且檢測後至下一事業新設立前無任何運作行為，則新設事業是否得以援用上一手事業提供之土壤污染檢測資料，不受 6 個月期限之限制？	土壤污染檢測作業之完成應於報請所在地主管機關備查前 6 個月內為之，惟事業若符合下列所有情形，且經所在地主管機關同意者，得於土壤污染檢測資料中載明理由後，不受 6 個月限制： 1. 自採樣日起用地內無從事任何運作行為。 2. 採取適當圍籬、區隔、監視或防護措施，確保無排放、洩露、灌注或棄置污染物於事業用地範圍內。 3. 毗鄰用地無潛在污染源存在，並可能導致污染物擴散傳輸至事業用地範圍內。 4. 檢測當時之事業與備查時之事業，其類別、製程及運作特性均相同。
五、公告附表所列之檢測項目並非所有事業皆有使用或產生，是否皆需檢測？若事業製程並不在公告範圍中，則應如何擇定檢測項目？	由於各事業之運作歷史、特性和使用原物料不盡相同，故建議事業應將相關運作資料委由具相關學經歷之專業人員或技術機構進行評析後，擇定應檢測之污染物項目。若評估後事業用地確未曾運作某項檢測項目，則可於「土壤污染檢測資料」中載明理由；但除規定之檢測項目外，事業亦應依其實際運作狀況增加污染物項目之檢測。此外針對土地移轉之時機，其土壤檢測項目建議由土地移轉雙方協議定之。
六、土壤污染調查採樣方式是否一定需依照網格法或環境場址潛在土壤污染評估(ESA)方式辦理？	有關環保署提供之「環境場址潛在土壤污染評估辦理事業用地土壤污染檢測參考指引」及「網格法辦理事業用地土壤污染檢測參考指引」僅供參考，事業仍應依其運作特性選擇適合之方式辦理土壤污染調查檢測。若經評估後有其他更適合之調查方式，則事業亦得參採，惟須於土壤污染檢測資料中提出說明。
七、事業用地位於廠辦大樓 2 樓以上無用地可供採樣，應如何進行檢測？	若事業場所全部用地均位於建築物內之 2 樓以上，而無土地可供土壤採樣，並經評估後確認事業用地確無污染之虞時，則可於土壤污染檢測資料中具明理由並檢附相關資料，送所在地主管機關備查。

表 7-4 土污法第 8、9 條規定之相關問題與因應對策^[3] (續 2)

問題	因應對策
八、事業機構若有執行土壤污染檢測工作需要時，可以委託哪些單位辦理？	依土污法第 10 條第 1 項規定，土壤及地下水污染檢測作業應委託由環保署核可的檢測機構執行。至於執行調查評估規劃之人員或機構，現行土污法中尚未限定其資格條件，惟建議事業宜委由具環境場址評估或土壤地下水污染調查實務經驗之專家或技術機構辦理場址評估與採樣規劃工作，可獲得較具客觀性及代表性之結果。而相關人員或機構之資格條件，於環保署「環境場址潛在土壤污染評估辦理用地土壤污染檢測參考指引」中有說明，事業可於選擇時參考。
九、相關參考指引中提及土壤調查檢測的部分較多，而在地下水方面卻較少，檢測範圍是否應包括地下水在內？	土污法第 8 條及第 9 條僅規範提具用地土壤污染檢測資料，並未包括地下水，因此相關調查參考指引及檢測資料之內容並未將地下水污染物納入。但建議事業可依本身製程特性與用地狀況，增加地下水調查檢測，以更完整掌握用地環境狀況。
十、目的事業主管機關若無停歇業之相關規定，則停歇業前是否仍須進行土壤污染檢測並將檢測資料提送備查？	進行土壤污染檢測之意義在於藉由用地之調查檢測，儘早瞭解土壤污染狀況及作好預防或整治工作，於土地有污染情事發生時，可作為釐清污染責任之參考依據。 另按照土污法第 9 條之公告內容，停業或歇業前之檢測時機並不僅限於向目的事業主管機關申辦停業或歇業時才需進行土壤檢測，而是包括事實認定情形；即只要事業事實上終止營業(運)或無繼續生產、製造、加工前，即需完成土壤污染檢測資料及提送所在地主管機關備查。
十一、土污法第 9 條是否有溯及既往？目前營運中之事業是否僅需於停、歇業前辦理土壤檢測即可？	土污法第 9 條之實施並無溯及既往的規定，指定公告事業於 94 年 1 月 1 日(含)後辦理設立、停業或歇業時，始須依據土污法第 9 條規定辦理。 此外，運作中之事業若無重新設立、停業或歇業之行為，則無立即進行土壤污染檢測之必要，惟為瞭解事業本身用地之土壤環境狀況，建議平時亦可進行調查檢測，以及早發現可能問題，並因應處置。

7.3 工廠遭土污法列管之作業程序與因應對策

工廠因超過土壤及地下水污染管制標準時，環保機關依土污法之相關規定進行工廠土地列管，其列管作業流程如圖 7-2 所示。列管作業大致可分為調查查證、控制整治及解除管制第 3 階段，各階段與業者相關之規定，包括工廠遭土水污染時可採取之應變措施、工廠被通知查證時之因應對策、工廠遭公告控制或整治場址之因應對策等，說明如下。

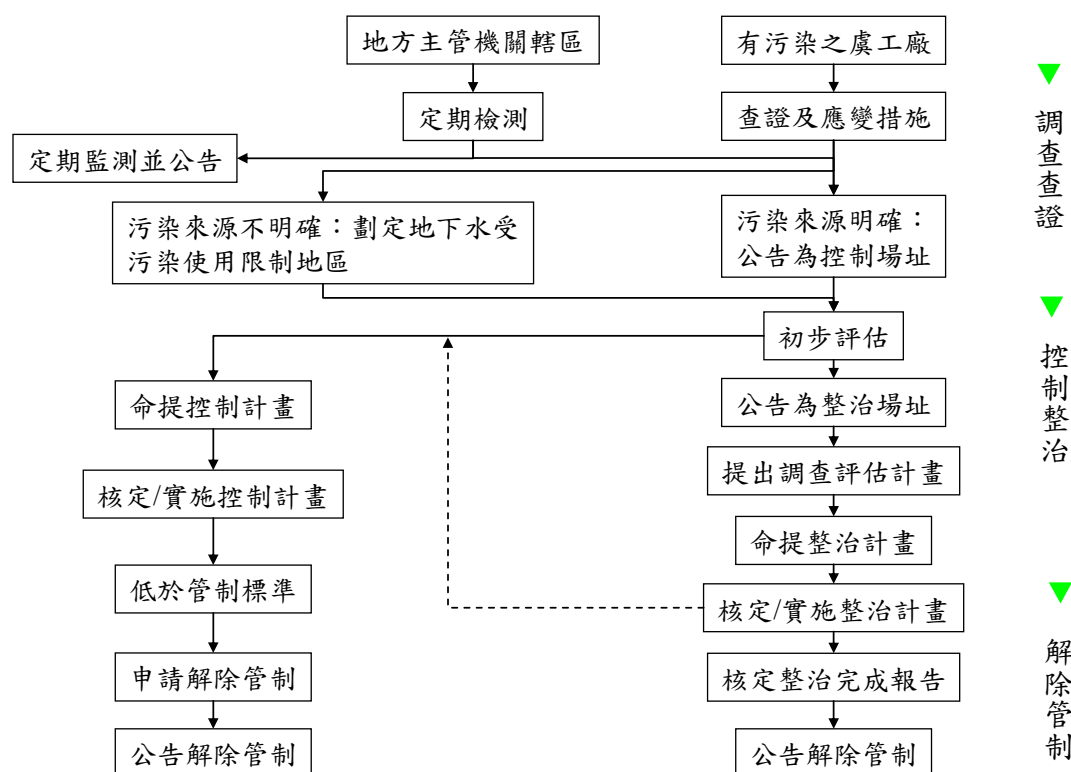


圖 7-2 環保機關對工廠土壤及地下水污染場址管制作業流程

一、工廠遭土水污染時可採取之應變措施

(一) 土污法規定

1. 土污法第 7 條第 5 項：「各級主管機關為查證工作時，發現土壤、地下水因受污染而有影響人體健康、農漁業生產或飲用水水源之虞者，應命污染行為人、場所使用人、管理人或所有人採取緊急必要措施，以減輕污染影響或避免污染擴大。」
2. 土污法第 13 條第 1 項規定，所在地主管機關為減輕污染危害或避免污染擴大，應依控制場址或整治場址實際狀況，採取應變必要措施，同條第 2 項規定所在地主管機關對於下列之應變必要措施，得命污染行為人為之。
 - (1) 提供必要之替代飲水或通知自來水主管機關優先接裝自來水。

(2) 豎立告示標誌或設置圍籬。

(3) 移除或清理污染物。

(4) 其他應變必要措施。

(二) 罰則

1. 刑法與罰金

土污法第 26 條：「違反第七條第五項未採取必要措施或不遵行所在地主管機關依第十三條第一項第一款、第二項所為之命令，因而致人於死者，處無期徒刑或七年以上有期徒刑，得併科新臺幣五百萬元以下罰金。致重傷者，處三年以上十年以下有期徒刑，得併科新臺幣三百萬元以下罰金。」

2. 連續處罰

土污法第 32 條：「未遵行第七條第五項、第十三條第二項之命令者，處新臺幣二十萬元以上一百萬元以下罰鍰，並得按次處罰。」

(三) 因應對策

工廠發現土壤及地下水遭污染時，首先應確認土壤及地下水污染來源及原因，若是因廠內製程或處理設施洩漏所造成，應立即進行修補或阻斷污染來源，避免持續洩漏，造成污染擴大；事業對已遭污染之土壤或地下水，應確認可能污染範圍及影響，決定是否需採取污染相關控制或圍堵措施，或依土污法第 7 條第 5 項採取之「緊急必要措施」，請參考本技術手冊第 3.4 節「緊急事件準備及應變」之相關說明。

二、工廠被通知查證時之因應對策

(一) 土污法規定

1. 土污法第 7 條第 1 項，各級主管機關得派員攜帶證明文件，進入公私場所，為下列查證工作，並得命場所使用人、管理人或所有人提供有關資料：

(1) 調查土壤、地下水污染情形及土壤、地下水污染物來源。

(2) 進行土壤、地下水或相關污染物採樣。

(3) 會同有關機關採集農漁產品樣本。

2. 土污法第 11 條第 1 項規定：「各級主管機關對於有土壤或地下水污染之虞之場址，應即進行查證，...」。

(二) 罰則

土污法第 32 條第 1 項：「規避、妨礙或拒絕依第七條第一項...所為之查證、命令或應配合之事項者，處新臺幣二十萬元以上一百萬元以下罰鍰，並得按次處罰。」

(三) 因應對策

當環保機關通知業者要進廠查證時，於查證前，工廠宜召開會議，針對廠內運作可能產生污染及地下水污染之情形，再次進行檢視及巡查，並完成相關資料準備。如發現污染情形，應即採取緊急應變措施。於查證時，應指派人員陪同環保機關人員，以全程掌握查證情形，必要時，於環保機關進行採樣之同時，業者可請求進行樣品分樣及檢測，並留存查證及現勘紀錄。於查證後，環保機關如通知業者樣品超過管制標準，擬公告場址為控制場址時，如事業分樣樣品未超過管制標準，事業可請求再次進行採樣檢測；或於環保機關公告場址為控制場址前，請求環保機關依土污法施行細則第 8 條規定，同意事業限期採取適當措施，以改善污染情形。

環保機關進行查證時，因其採樣點數有限，故通常無法掌握場址之污染情形，因此，事業應參考環保機關於查證時之採樣檢測資料，依已完成之檢測結果及工廠實際之運作狀況，研判污染來源，並進一步調查評估污染範圍。有關土壤及地下水污染範圍調查評估工作，請參考本技術手冊第四章「土壤及地下水污染調查」之相關說明。

事業於完成污染改善後，需請環保機關再次進行污染場址之驗證。此外，依土污法施行細則第 8 條第 2 項規定，污染場址因採取適當措施，致土壤、地下水污染情形減輕，並經所在地主管機關查證其土壤、地下水污染物濃度低於土壤、地下水污染管制標準者，得不公告為控制場址。

三、工廠遭公告控制場址之因應對策

(一) 土污法規定

1. 環保局公告控制場址

土污法第 11 條第 2 項：「...場址之土壤污染或地下水污染來源明確，其土壤或地下水污染物濃度達土壤或地下水污染管制標準者，所在地主管機關應公告為土壤、地下水污染控制場址，...」

2. 業者提出控制計畫

土污法第 11 條第 4 項：「控制場址未經公告為整治場址者，所在地主管機關得依實際需要，命污染行為人提出污染控制計畫，經所在地主管機關核定後實施。」

3. 業者申請解除控制場址管制

土污法第 11 條第 5 項：「...控制場址之土壤或地下水污染控制計畫實施後，如土壤或地下水污染物濃度低於土壤或地下水污染管制標準時，得向所在地主管機關申請解除控制場址之管制並公告之。」

4. 環保局核准解除控制場址之管制

土污法第 20 條第 1 項：「土壤、地下水污染控制計畫...之實施者，應於土壤、地下水污染整治完成後，準用第十六條第一項或第二項之程序，將其整治完成報告報請所在地...主管機關核准。」經核准後，並依同條第 2 項第 1 款之規定，解除控制場址之管制。

(二) 罰則

土污法第 36 條：「污染行為人違反第十一條第四項...，處新臺幣一百萬元以上五百萬元以下罰鍰，並通知限期補正或改善，屆期未補正或改善者，按日連續處罰。」

(三) 因應對策

業者應依土污法施行細則第 14 條之規定，提出污染控制計畫，其內容應包括下列事項：

1. 計畫提出者、撰寫者及執行者資料。
2. 場址基本資料。
3. 場址現況及污染情形。
4. 污染物、污染範圍及污染程度。
5. 污染控制及防治方法。
6. 污染監測方式。
7. 工地安全衛生管理。
8. 控制結果之驗證方式。
9. 計畫執行期程。
10. 其他經主管機關指定之事項。

另有關土壤及地下水污染控制計畫撰寫指引(93.08.26)，可由環保署環保法規網頁(網址：<http://w3.epa.gov.tw/epalaw/index.aspx>)下

載。

土壤及地下水污染控制計畫經所在地主管機關核定後實施，事業於完成污染改善後，請環保機關進行污染場址之驗證。依土污法相關規定，申請解除控制場址之管制。

四、工廠遭公告整治場址之因應對策

(一) 土污法規定

1. 環保署公告整治場址

土污法第 11 條第 2 項：「...控制場址經初步評估後，有危害國民健康及生活環境之虞時，所在地主管機關應報請中央主管機關審核後公告為土壤、地下水污染整治場址...」

2. 初步評估

環保署於 95 年 3 月 29 日修正「土壤及地下水污染控制場址初步評估辦法」(以下簡稱初評辦法)，除增訂控制場址公告為整治場址之場址特性及污染影響等評估條件外，初評辦法第 6 條及第 7 條並允許污染場址之污染行為人及土地使用人、管理人或所有人得以健康風險評估結果，送所在地主管機關審查污染場址是否仍須公告為整治場址並管制，以及相關審查流程，以作為所在地主管機關是否須報請中央主管機關公告為整治場址之依據，其流程如圖 7-3 所示。

3. 業者提出調查評估計畫

土污法第 12 條第 2 項：「整治場址之污染行為人或污染土地關係人，得於各級主管機關進行調查評估前，提出土壤、地下水調查及評估計畫，經所在地主管機關核定後辦理；其調查評估結果，應報請所在地主管機關核定。」

4. 業者提出整治計畫

土污法第 16 條第 1 項：「整治場址之污染行為人應依第十二條之調查評估結果，訂定土壤、地下水污染整治計畫，經所在地主管機關審查核定後據以實施...。」

5. 環保局核准整治場址之列管

土污法第 20 條第 1 項：「土壤、地下水...污染整治計畫之實施者，應於土壤、地下水污染整治完成後，準用第十六條第一項或第二項之程序，將其整治完成報告報請...中央主管機關核准。」，經核准後，並依同條第 2 項第 1 款之規定，解除控制場址之管制。

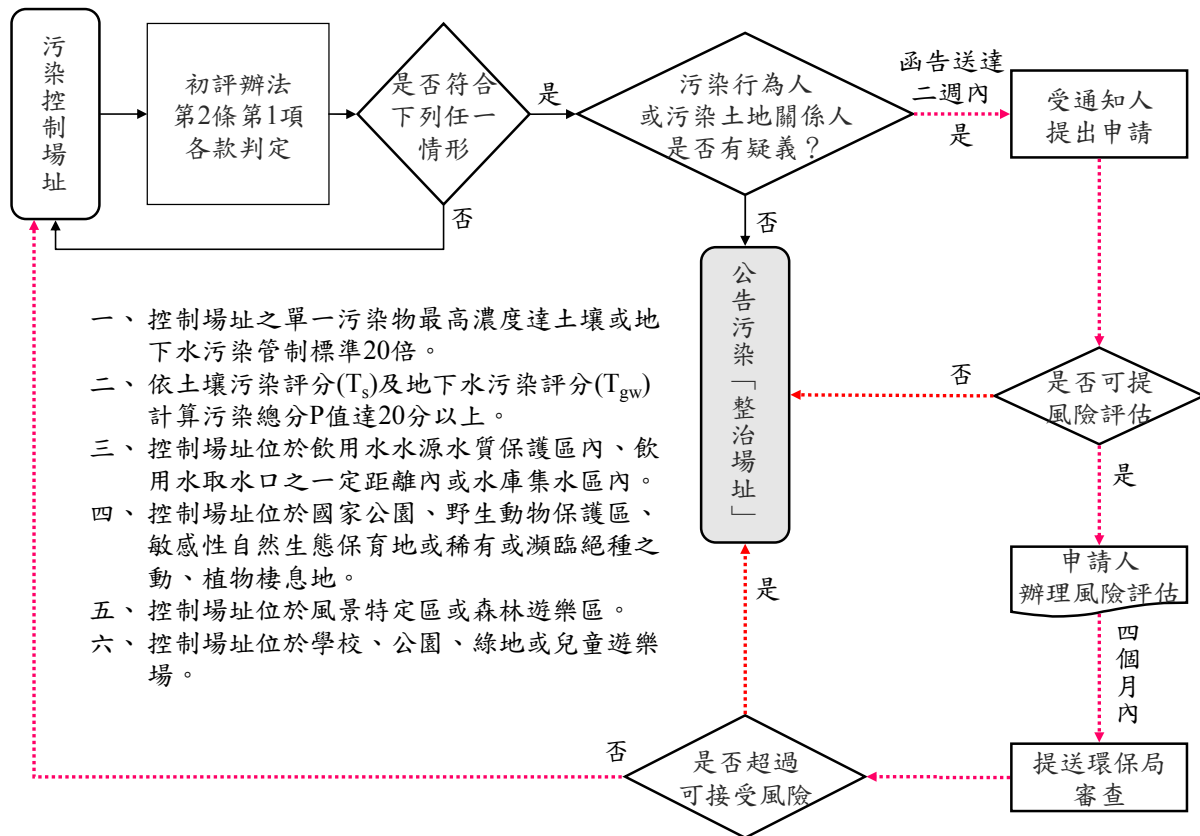


圖 7-3 初評辦法之評估程序

(二) 罰則

土污法第 36 條：「污染行為人違反...第十六條第一項...，處新臺幣一百萬元以上五百萬元以下罰鍰，並通知限期補正或改善，屆期未補正或改善者，按日連續處罰。」

(三) 因應對策

業者應依土污法施行細則第 21 條之規定，提出污染整治計畫，其內容應包括下列事項：

1. 計畫提出者、撰寫者及執行者之資料。
2. 計畫大綱。
3. 場址基本資料。
4. 場址現況及污染情形。
5. 污染物、污染範圍及污染程度。
6. 整治基準或整治目標。
7. 整治方法。
8. 污染監測計畫。
9. 污染防治計畫。

- 10.場址安全衛生計畫。
- 11.整治完成之驗證計畫。
- 12.整治經費預估。
- 13.整治期程。
- 14.其他經主管機關指定之事項。

另有關土壤及地下水污染整治計畫撰寫指引(93.08.26)，可由環保署環保法規網頁(網址：<http://w3.epa.gov.tw/epalaw/index.aspx>)下載。

土壤及地下水污染整治計畫經所在地主管機關核定後實施，事業於完成整治後，請環保機關進行污染場址之驗證。依土污法相關規定，申請解除整治場址之列管。

7.4 土污法相關訴願程序或行政訴訟

有關行政爭訟程序流程如圖 7-4，並說明如下：

一、訴願

訴願案件流程處理，如圖 7-5 所示。訴願相關表格文件，包括訴願書、委任書、參加訴願申請書、言詞辯論申請書、陳述意見申請書、閱覽卷宗申請書、訴願撤回申請書與訴願代表人選任書等，可由環保署訴願審議委員會網站下載。

(一) 訴願時機

人民對行政機關之行政處分，認為違法或不當，致損害其權利或利益時，得提起訴願。

(二) 訴願期間

提起訴願應自行政機關之行政處分書達到之次日起，於 30 日內繕具訴願書並送達原處分機關。

(三) 訴願之受理機關

1. 不服鄉(鎮、市)公所之行政處分者，向縣(市)政府提起訴願。
2. 不服縣(市)政府所屬各級機關之行政處分者，向縣(市)政府提起訴願。
3. 不服縣(市)政府之行政處分者，向中央主管部、會、行、處、局、署提起訴願。

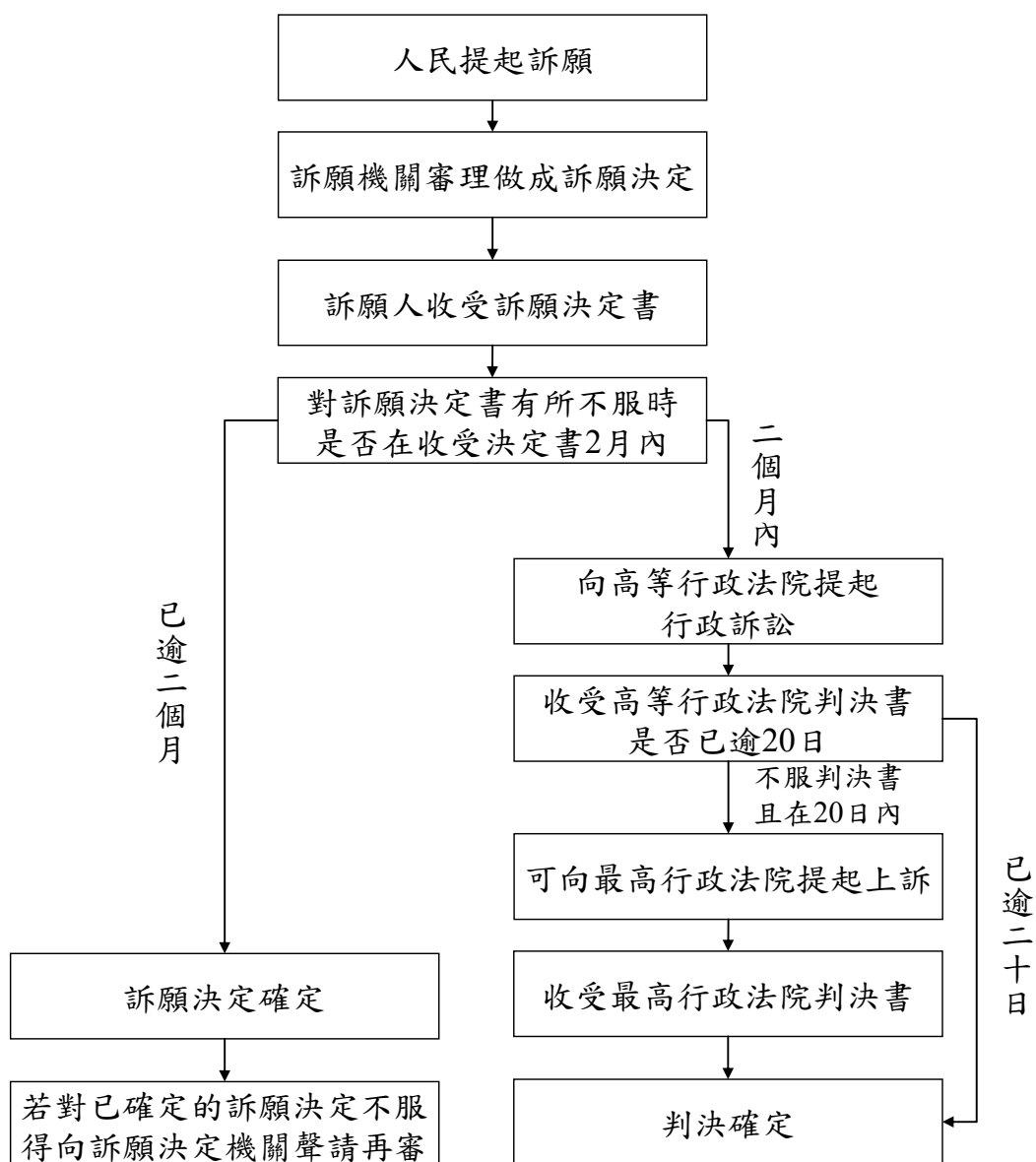


圖 7-4 行政爭訟流程圖^[4]

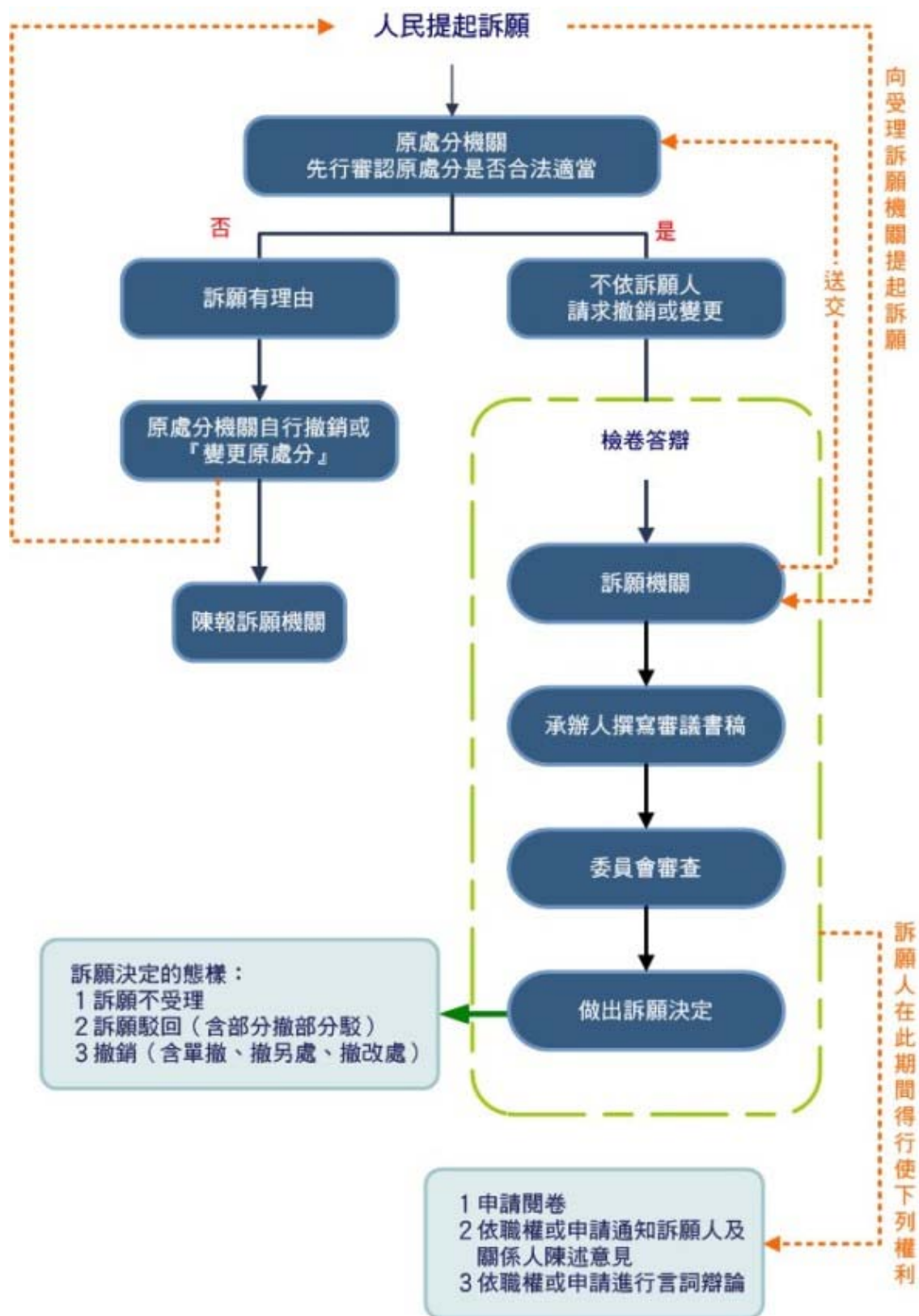


圖 7-5 訴願案件流程處理簡圖^[4]

4. 不服直轄市政府所屬各級機關之行政處分者，向直轄市政府提起訴願。
5. 不服直轄市政府之行政處分者，向中央主管部、會、行、處、局、署提起訴願。
6. 不服中央各部、會、行、處、局、署所屬機關之行政處分者，向各部、會、行、處、局、署提起訴願。
7. 不服中央各部、會、行、處、局、署之行政處分者，向主管院提起訴願。
8. 不服中央各院之行政處分者，向原院提起訴願。

(四) 訴願書應記載事項

1. 載明訴願人姓名、出生年月日、住居所、身分證明文件字號，如有法人或其他設有管理人或代表人之團體，其名稱、事務所、或營業所及管理人或代表人之姓名、出生年月日、住居所。
2. 多人共同訴願時，應選出三人以下之代表人，並檢附代表委任書。
3. 原行政處分機關之全銜。
4. 訴願請求事項。(如原處分撤銷或原處分某一部分撤銷等等)
5. 訴願之事實及理由。
6. 收受獲知悉行政處分之年、月、日。
7. 受理訴願之機關。
8. 證據。其為文書者，應添具繕本或影本。
9. 年、月、日。
10. 訴願人簽名蓋章，如有代表人或代理人亦同。

(五) 訴願書附件

訴願應附原處分書影本。

(六) 訴願之補充理由及說明：

訴願人提起訴願後，對於事實及理由有不充足時，在審決之前隨時得提出訴願補充理由。又訴願人認為訴願書不足敘明事實及理由時，可至訴願會請求陳訴意見，以說明訴願案件之事實及理由使承辦人員對案情能有更充分的瞭解。

二、不服訴願決定之後續處理方式

行政救濟制度，分為訴願、行政訴訟二級。如果不服訴願之決定，

或訴願機關於人民提起訴願後 3 個月內不為決定，或延長訴願決定期間逾 2 個月仍不為決定者，人民即得向高等行政法院提起行政訴訟，無須再經過訴願之程序，如不服高等行政法院之裁判者，得向最高行政法院上訴或抗告。

當訴願決定確定後，不服該訴願決定，依訴願法再審制度的設計，只要有下列情形之一者，得向原訴願決定機關申請再審：

- (一) 適用法規顯有錯誤者。
- (二) 決定理由與主文顯有矛盾者。
- (三) 決定機關之組織不合法者。
- (四) 依法令應迴避之委員參與決定者。
- (五) 參與決定之委員關於該訴願違背職務，犯刑事上之罪者。
- (六) 訴願之代理人，關於該訴願有刑事上應罰之行為，影響於決定者。
- (七) 為決定基礎之證物，係偽造或變造者。
- (八) 證人、鑑定人或通譯就為決定基礎之證言、鑑定為虛偽陳述者。
- (九) 為決定基礎之民事、刑事或行政訴訟判決或行政處分已變更者。
- (十) 發現未經斟酌之證物或得使用該證物者。

申請再審，原則上應自訴願決定確定時起算 30 日內為之。

三、行政訴訟第一審

(一) 起訴：

- 1. 起訴應向管轄之高等行政法院提出訴狀為之。
- 2. 起訴狀應使用司法狀紙，並表明下列事項：

(1) 當事人：

- A. 當事人為自然人者，應記載當事人姓名、性別、年齡、身分證明文件字號、職業及住所或居所。
- B. 當事人為法人、機關或其他團體者，應記載其名稱及所在地、事務所或營業所。
- C. 有法定代理人、代表人或管理人者，應記載其姓名、性別、年齡、身分證明文件字號、職業及住所或居所，及其與法人、機關或團體之關係。
- D. 有訴訟代理人者，應記載其姓名、性別、年齡、身分證明文件字號、職業及住所或居所。

- (2) 起訴之聲明。
 - (3) 訴訟標的及其原因事實。
 - (4) 附屬文件及其件數，如經訴願程序者，應附具決定書。
 - (5) 高等行政法院。
 - (6) 年、月、日。
3. 當事人、法定代理人、代表人、管理人或訴訟代理人應於訴狀內簽名或蓋章，如以指印代替簽名時，應由他人代寫姓名，記明其事由並簽名。
 4. 訴狀內宜記載適用程序上有關事項、證據方法及其他準備言詞辯論之事項。

(二) 起訴狀應按被告人數附具起訴狀繕本。

(三) 起訴有無逾越法定期限，以高等行政法院收受訴狀之時間為準。

四、行政訴訟第二審

(一) 上訴理由：

1. 對於高等行政法院之終局判決不服，須以其違背法令為理由，始得向最高行政法院上訴。
2. 判決不適用法規或適用不當者，為違背法令。
3. 有下列情形之一者，其判決當然違背法令：
 - (1) 判決法院之組織不合法者。
 - (2) 依法律或裁判應迴避之法官參與裁判者。
 - (3) 行政法院於權限之有無辨別不當或違背專屬管轄之規定者。
 - (4) 當事人於訴訟未經合法代理或代表者。
 - (5) 違背言詞辯論公開之規定者。
 - (6) 判決不備理由或理由矛盾者。

(二) 上訴：

1. 上訴應向原判決之高等行政法院提出上訴狀為之。
2. 上訴狀應使用司法狀紙，並表明下列事項：
 - (1) 當事人。
 - (2) 高等行政法院判決及對於該判決上訴之陳述。
 - (3) 對於高等行政法院判決不服之程度，及應如何廢棄或變更之聲明。

- (4) 上訴理由；並應附具關於上訴理由之必要證據。
 - (5) 行政法院。
 - (6) 年、月、日。
 - 3. 當事人、法定代理人、代表人、管理人或訴訟代理人應於訴狀內簽名或蓋章，如以指印代替簽名時，應由他人代寫姓名，記明其事由並簽名。
 - 4. 上訴狀內未表明上訴理由者，上訴人應於提起上訴後 20 日內提出理由書於原高等行政法院，未提出者，原高等行政法院會直接裁定駁回上訴。
 - 5. 對簡易訴訟事件之判決提起上訴，須經最高行政法院之許可，因此必須在上訴理由中具體表明該訴訟事件所涉及之原則性法律見解。
- (三) 上訴狀應按被上訴人(對造)人數附具上訴狀繕本。
- (四) 上訴期間：
- 1. 提起上訴，應在第一審判決送達後之 20 日內為之。
 - 2. 上訴有無逾越上訴期間，以行政法院收受上訴狀之時間為準。

參考文獻

- 1. 環保署，環境場址潛在污染評估辦理事業用地污染檢測參考指引。
- 2. 環保署，網格法辦理事業用地土壤污染檢測參考指引。
- 3. 環保署，土壤及地下水污染整治法第 8 條第 1 項及第 9 條指定公告事業執行土壤污染檢測宣導手冊，民國 94 年 12 月。
- 4. 環保署訴願審議委員會網站(網址：<http://atftp.epa.gov.tw/peti/epa/Index.htm>)

名詞索引

二劃	頁數
X 射線螢光偵測器(X-ray fluorescence)	52, 53, 55, 135
三劃	
三合系統(triad system)	151
土壤及地下水污染控制計畫撰寫指引	157
土壤及地下水污染整治費	169
土壤污染檢測資料	173
土壤物理分離/酸溶出(physical separation and acid leaching)	122, 123
土壤清洗法(soil washing)	77, 122
土壤需氧量(SOD)	83
土壤翻土混合稀釋法	124
土鑽採樣組(hand-held auger)	44, 45
四劃	
中空螺旋鑽機	46
介電常數(dielectric constant)	107
分區採樣	48
水力坡降	22, 107, 114
水力傳導係數	70, 106
水相穩定化/固化(aqueous stabilization/solidification)	64
五劃	
主觀判斷採樣	48
可行性評估(feasibility study, FS)	149, 150~153
可行性試驗(treatability test)	73, 74, 152
巨匣限(macro-encapsulation)	63, 68~70
六劃	
交換作用	14
地下水監測	49
安全衛生計畫	162
有機黏土(organo-clays)	65
七劃	
污染預防	24
污染團	49
行政爭訟程序	186
行政訴訟	190
匣限化(encapsulation)	63
吸附反應	12, 17

吸附作用	14, 16
吸附法	91
含金汞齊器(amalgamator)	54
沉澱作用	15
沉澱法	87~89
決策紀錄(record of decision)	152
系統及網格採樣	48
貝勒管(bailer)	47

八劃

固化/穩定化技術(solidification/stabilization, S/S)	63, 73, 74, 156
固化處理方式(solidification)	63
奈米過濾(nanofiltration)	89, 90
底土(subsurface soil)	45
承諾採購(affirmative procurement)	24
抽水機	48
直接汞分析儀(direct mercury analyzer, DMA)	52, 54~56
直接貫入鑽機	46
表土(surface soil)	45, 57, 133, 141

九劃

垢化(fouling)	90, 92, 94
活性碳(activated carbon)	64, 66, 92, 96
活性鋁(activated alumina)	91, 92
活塞式採樣器(piston rod soil sampler)	44
洩漏預防	27
玻璃化法(vitrification)	75, 76, 85, 86
重質非水相液相污染物(DNAPL)	83

十劃

根層過濾(rhizofiltration)	115, 117, 118
氧化還原反應	15~17, 105
逆滲透(RO)	89, 90, 139, 141
高污染區域(hot spot)	37

十一劃

控制場址	38, 61, 135, 157, 158, 164, 182~184
採樣計畫	42
採樣鏟(hand-held shovel)	44
混合採樣採樣	48
現地土壤沖洗法(in-situ soil flushing)	81, 85
現地穩定化及穩定/固化處理(in-situ stabilization and S/S)	67, 68
符合性監測(compliance monitoring)	102, 103
連續式反應牆(continuous reactive barrier)	97

十二劃

透水性反應牆(permeable reactive barrier, PRB)	95~103
場址概念模式(site conceptual model, SCM)	37, 39~41
場址與組織環境評估(EASO)	22
植生復育(phytoremediation)	114, 115, 118, 120, 121
植物萃取(phytoextraction)	115~118
植物穩定(phytostabilization)	115~118
訴願	186~190
超級基金(Superfund)	78, 149
超滲濾(ultrafiltration)	89
間接污染途徑(secondary pathway)	41
間接污染源(secondary source)	41

十三劃

傳輸作用	15
微匣限(micro-encapsulation)	63, 68~70
微波加熱(microwave heating)	75
微過濾(microfiltration)	89
感應加熱(induction)	75
溶解作用	15
電泳	104
電動力法	103~110, 113
電解反應	104, 105, 109
電滲透	104~106
電滲透流率	105, 109
電漿加熱(plasma heating)	75
電熱加熱(electric heating)	75
電遷移	104

十四劃

漏斗通道式反應牆(funnel and gate system)	97
監測計畫	28, 29
緊急應變	30~32
網格法	174, 175
網格法辦理事業用地土壤污染檢測參考指引	174
腐蝕預防	27
酸洗法	77~79, 85, 86, 123, 124, 127
酸鋒(acid front)	104, 108, 110
閥值(threshold value)	37

十五劃

劈管採樣器(split-barrel sampler)	44
-----------------------------	----

暴露途徑	41
膠結穩定/固化處理(cementitious S/S)	65
十六劃	
操作性監測(performance monitoring)	102, 103
整治列車(treatment train)	85, 86, 88, 156
整治場址	2,38,55,115,120, 157,169,180,182, 184,186
整治費申報	170
整治費計算	170
整治費費率	169
整治費繳納	169
整治費繳納方式	170
整治調查(remedial investigation , RI)	150~152
濃度回升(rebound)	164
遲滯作用(retardation effect)	17
十七劃	
應變叢集採樣	48
環境風險管理	19
環境場址評估(Environmental Site Assessment , ESA)	22,151
環境場址潛在污染評估辦理事業用地污染檢測參考指引	174
薄管採樣器(thin-walled tubes sampler)	44
薄膜過濾法	89
簡單隨機採樣	48
十八劃	
轉變作用	16
雙套管採樣器(dual tube soil sampler)	44
十九劃	
穩定化處理(stabilization)	63
二十劃	
釋氧劑(oxygen releasing compound , ORC)	96
二十二劃	
驗證計畫	157, 163, 164
二十七劃	
鑽堡	47

重金屬土壤及地下水污染預防與整治技術手冊／江東法等編撰----初版，----臺北市：工業局，民 95

面；公分

含參考書目

ISBN-13：978-986-00-7823-7 (平裝)

ISBN-10：986-00-7823-8 (平裝)

1.土壤污染 — 防制 2.地下水 — 污染 — 防制

445.94

95024281

重金屬土壤及地下水污染預防與整治技術手冊

出版日期：中華民國九十五年十二月初版

發行人：陳昭義

總編輯：陳吉宏

審查委員：李芳胤、林華宇、陳尊賢 (依姓氏筆劃排列)

編撰：江東法、何國華、林怡青、袁菁、張家銘、陳呈芳、劉敏信、
魏顯祥 (依姓氏筆劃排列)

發行所：經濟部工業局

台北市信義路三段 41-3 號

TEL：(02)2754-1255

FAX：(02)2704-0160

<http://www.moeaidb.gov.tw>

出版所：經濟部工業局

台北市信義路三段 41-3 號

TEL：(02)2754-1255

FAX：(02)2703-0160

<http://www.moeaidb.gov.tw>

中興工程顧問股份有限公司

台北市松山區 105 南京東路五段 171 號 14 樓

TEL：(02)2769-8388

FAX：(02)2763-4555

<http://www.sinotech.com.tw>

印刷承製：正楷有限公司

工本費：新台幣肆佰元整

版權所有 翻印必究

GPN：1009503788

ISBN：978-986-00-7823-7

