

第六章 污染改善與預防

6.1 污染場址公告與緊急應變

6.1.1 公告污染場址流程

依據土污法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，並依相關環境保護法規管制污染源及調查環境污染情形。而當前述場址經查證達污染管制標準時，則須依場址污染狀況進行管制（公告污染場址之流程示意圖如下圖 6.1-1 所示）。目前污染場址公告列管狀況可分為：

一、污染控制場址

依土污法第 11 條第 2 項規定，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（以下簡稱控制場址）。控制場址未經公告為整治場址者，所在地主管機關應命污染行為人擬訂污染控制計畫，並送所在地主管機關核定後實施。

二、污染整治場址

依土污法第 11 條第 2 項規定，控制場址經初步評估後，有嚴重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，由中央主管機關公告為土壤、地下水污染整治場址（以下簡稱整治場址）；並於中央主管機關公告後七日內將整治場址列冊，送各該直轄市、縣（市）政府鄉（鎮、市、區）公所及地政事務所提供閱覽。

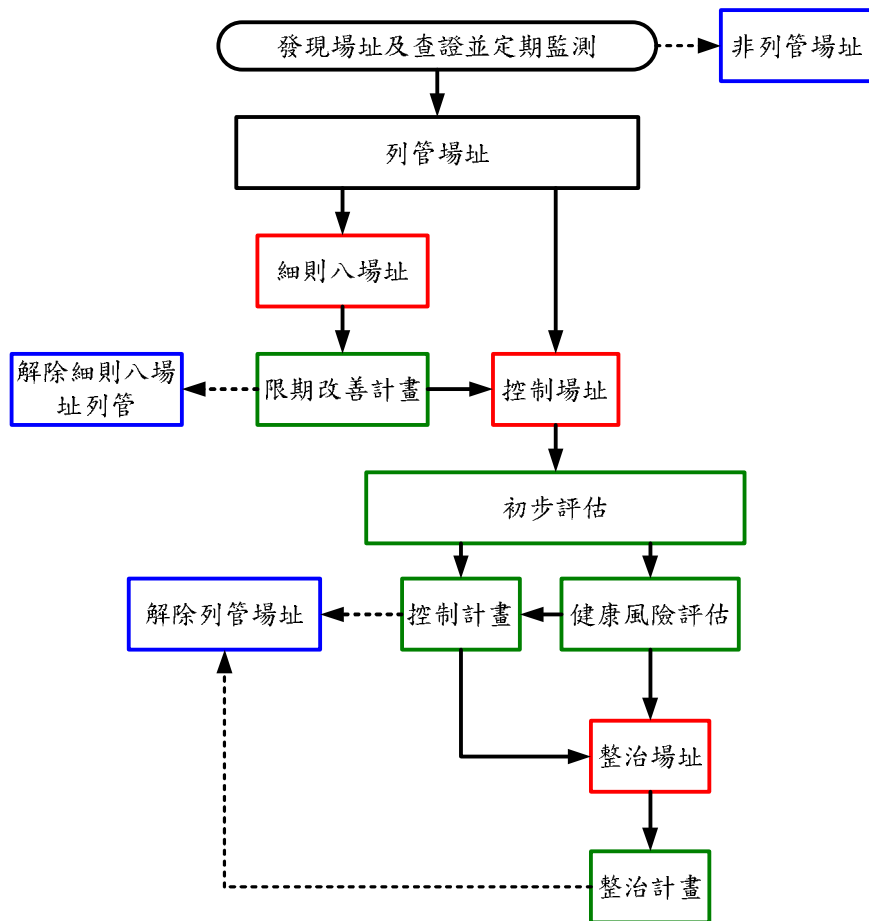


圖 6.1-1 公告污染場址之流程示意圖

6.1.2 緊急應變措施

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，採取下列應變必要措施：

- 一、命污染行為人停止作為、停業、部分或全部停工。
- 二、依水污染防治法調查地下水污染情形，並追查污染責任；必要時，告知居民停止使用地下水或其他受污染之水源，並得限制鑽井使用地下水。
- 三、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。
- 四、豎立告示標誌或設置圍籬。
- 五、會同農業、衛生主管機關，對因土壤污染致污染或有受污染之虞之農漁產品進行檢測；必要時，應會同農業、衛生主管機關進行管制或銷燬，並對銷燬之農漁產品予以相當之補償，或限制農地耕種特定農作物。
- 六、疏散居民或管制人員活動。

七、移除或清理污染物。

八、其他應變必要措施。

6.2 污染場址列管統計

6.2.1 控制場址公告列管情形

於 98 年度控制場址公告列管增列 64 處，其中 31 處為農地、13 處加油站、13 處工廠，非法棄置場址 2 處，儲槽 1 處，其他 4 處，詳如下圖 6.2-1 所示。依據地理位置分佈，以台中縣 21 處（約 1.37 公頃）為最多，其中 20 處為農地污染；其次為桃園縣 6 處（0.73 公頃）、彰化縣 5 處（4.85 公頃）、雲林縣為 5 處（2.21 公頃），詳如下圖 6.2-2 所示。

此外，常見之土壤污染物以總石油碳氫化合物之污染場址為數最多，共計有 18 處；重金屬鉛污染則有 16 處；其他如鋅、銅、鉻、鎳則皆有超過 10 處污染場址。另一方面，在 15 處地下水污染物場址中，則共計有 9 處場址發現苯污染情形。

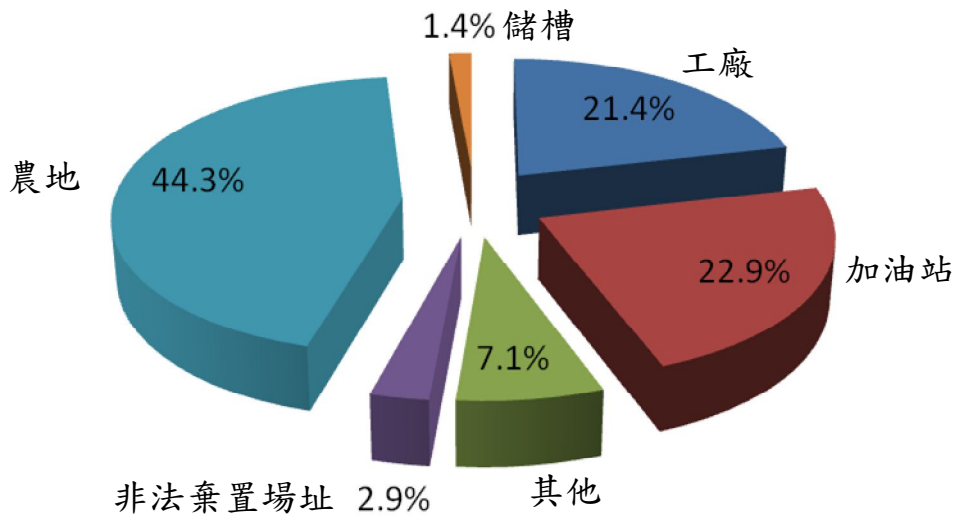


圖 6.2-1 98 年各類型新增公告污染控制場址類型分佈情形

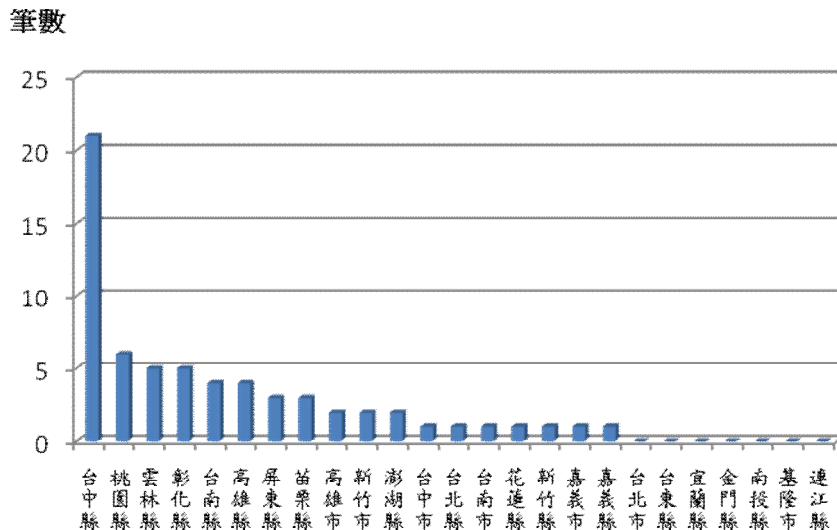


圖 6.2-2 98 年度各縣市新增公告污染控制場址類型分佈情形

由圖 6.2-2 可得知台中縣為控制場址公告列管增列大宗，其主要增列場址包含兩大區塊，其一為烏日鄉同安厝段農地污染案（統合案件序號 IC00022），包含場址數為 10 處農地，面積為 3,838 平方公尺，過去主要為農業種植水稻，但遭受重金屬污染（以銅、鉛為主）；另一區塊為三角子段農地（統合案件序號 IC00027），包含場址數為 5 處農地，面積為 7,643 平方公尺，過去主要為農業種植水稻及西瓜等作物，遭受重金屬污染（以鎘、鋅為主），地上之食用作物均須剷除、銷毀，並強制停耕至改善完成為止，停耕期間則予以補償停耕補償。

6.2.2 整治場址公告列管情形

於 98 年度整治場址公告列管增列 6 處，分別位於高雄縣兩處、台北縣、台南縣、高雄市與屏東縣各一處，詳細整治情形如下表 6.2-1 所示，由表可知 98 年度新增整治場址類型大多為加油站與工廠。

表 6.2-1 98 年度新增列管整治場址清單

| 主管機關 | 場址面積 (m ²) | 場址類別 | 使用情形 | 土壤污染物 | 地下水 污染物 | 列管日期 |
|------|---------------------------|------|--|------------------------|------------|-----------|
| 台北縣 | 1973 | 工廠 | 本場址於 61 年至 84 年間原為益成化學工業股份有限公司所在，經營顏料製造事業，現土地所有權人係為泰仕電子工業股份有限公司。廠房目前閒置中。 | 鉻;鉛;鋅 | | 2009/1/23 |
| 台南縣 | 1164 | 加油站 | 目前由永信加油站股份有限公司經營永信加油站，從事 92 無鉛、95 無鉛及高級柴油加油業務 | 苯;總石油碳 氫化合物 | 苯 | 2009/4/10 |
| 屏東縣 | 719.64 | 加油站 | 加油站營業 | 苯;總石油碳 氫化合物 | 苯;甲 苯;奈 | 2009/2/27 |
| 高雄市 | 7197 | 工廠 | 該地號上原為由台灣中油股份有限公司第四加氫脫硫工場，已於 94 年 12 月前停工。 | 苯;總石油碳 氫化合物;二 甲苯 | | 2009/4/9 |
| 高雄縣 | 4792 | 其他 | 荒地 | 總石油碳氫 化合物 | | 2009/5/22 |
| 高雄縣 | 3365 | 加油站 | 經營加油站 | 總石油碳氫 化合物 | 苯 | 2009/4/20 |

6.3 改善結果與分析

6.3.1 控制場址改善成果

控制場址整治流程依據土污法第 12 條規定由各級主管機關訂定初步評估方法，提出健康風險評估報告，評析是否危害健康及環境；進一步提出控制計畫，經審查後才得依控制計畫執行控制工作，接續執行驗證計畫，經驗證完成後，方可向所在地主管機關申請解除控制場址，詳細流程如下圖 6.3-1 所示。

依圖 6.3-1 的場址整治流程可整理得 99 年 1 月 10 日止控制場址執行進度：包含有 139 處正提出控制計畫中，12 處正審查控制計畫中，287 處執行控制計畫中，32 處完成驗證，詳細說明如下表 6.3-1 所示。

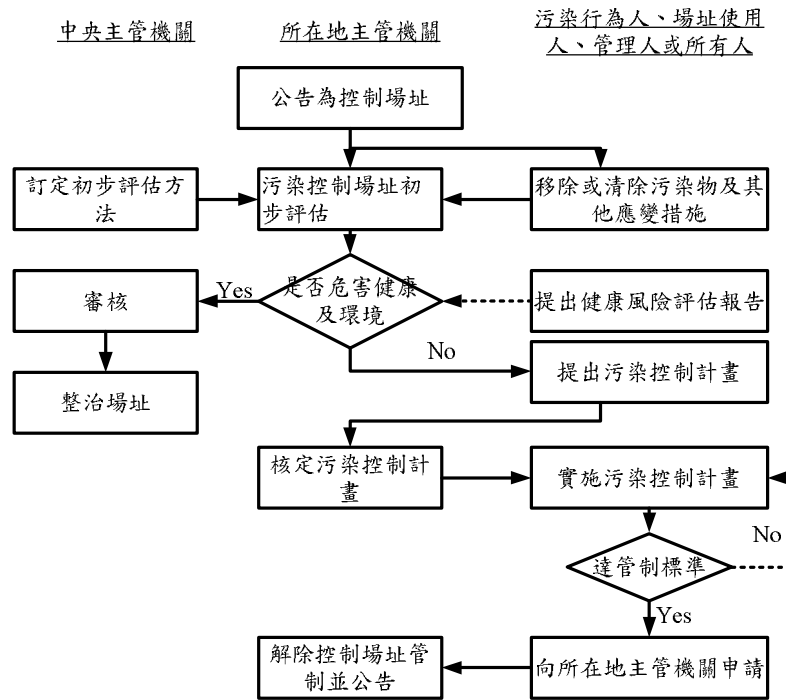


圖 6.3-1 場址控制流程圖

表 6.3-1 控制場址改善情形統計表

| 列管狀態 | 場址類別 | 農地 | 加油站 | 儲槽 | 工廠 | 非法棄置場址 | 其他 | 總計 |
|------|-------------|-------|-----|----|----|--------|----|-------|
| | 目前進度 | | | | | | | |
| 控制場址 | 目前並無進度 | 150 | 6 | 0 | 9 | 2 | 1 | 168 |
| | 提出初步評估結果中 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 3 | 5 |
| | 清除廢棄物中 | 0 | 0 | 0 | 2 | 3 | | 5 |
| | 提出健康風險評估報告中 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| | 提出控制計畫中 | 127 | 4 | 0 | 6 | 0 | 2 | 139 |
| | 審查控制計畫中 | 0 | 6 | 0 | 5 | 0 | 1 | 12 |
| | 執行控制計畫中 | 228 | 26 | 4 | 23 | 0 | 6 | 287 |
| | 控制期滿待驗證 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| | 驗證計畫審核中 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 2 |
| | 執行驗證中 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 |
| | 完成驗證 | 31 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 32 |
| | 控制期滿未完成控制 | 39 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| | 完成控制並解除列管 | 1,482 | 6 | 1 | 7 | 1 | 2 | 1,499 |
| 小計 | | 2,060 | 53 | 6 | 54 | 6 | 15 | 2,194 |

統計時間：截至 99/01/10 止

6.3.2 整治場址改善成果

污染場址公告為整治場址後，依土污法第 14 條規定整治場址之污染行為人或潛在污染責任人，應於直轄市、縣（市）主管機關通知後三個月內，提出土壤、地下水污染調查及評估計畫，經直轄市、縣（市）主管機關核定後據以實施。詳細流程如下圖 6.3-2 所示。

依圖 6.3-2 整治流程可整理得至 99 年 1 月 10 日止整治場址執行進度，包含 3 處土壤、地下水調查及評估結果審核通過，3 處執行土壤、地下水調查及評估計畫中，10 處執行整治計畫中，詳細說明如下表 6.3-2 所示。

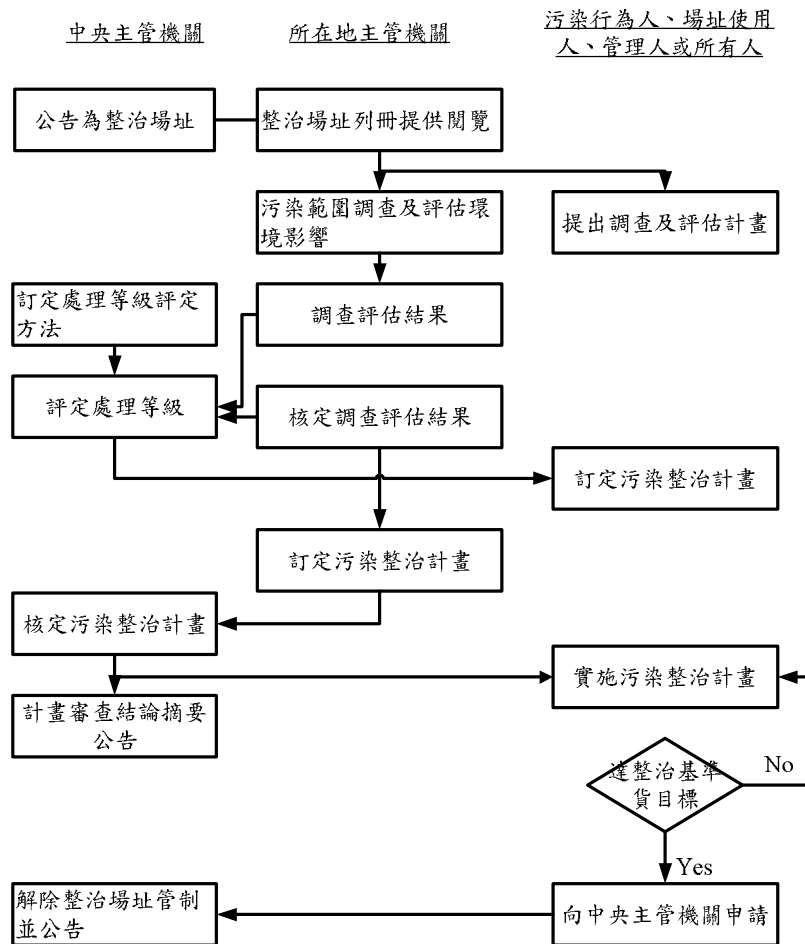


圖 6.3-2 場址整治流程圖

表 6.3-2 整治場址改善情形統計表

| 列管 狀態 | 場址類別 | 農地 | 加油 站 | 儲槽 | 工廠 | 非法棄 置場址 | 其 他 | 總計 |
|----------|----------------------------|----|---------|----|----|------------|--------|----|
| | 目前進度 | | | | | | | |
| 整治 場址 | 目前並無進度 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| | 提出土壤、地下水 調查及評估計畫中 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| | 審查土壤、地下水 調查及評估計畫中 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 2 |
| | 執行土壤、地下水 調查及評估計畫中 | 0 | 0 | 1 | 2 | 0 | 0 | 3 |
| | 審核土壤、地下水 調查及評估計畫結 果中 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| | 土壤、地下水調查 及評估結果審核通 過 | 0 | 1 | 0 | 0 | 2 | 0 | 3 |
| | 提出整治計畫中 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| | 審查整治計畫中 | 0 | 3 | 0 | 2 | 0 | 0 | 5 |
| | 執行整治計畫中 | 0 | 7 | 1 | 1 | 0 | 1 | 10 |
| | 整治期滿待驗證中 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 小計 | | 0 | 16 | 2 | 6 | 2 | 2 | 28 |

統計時間：截至 99/01/10 止

6.3.3 整治場址改善技術簡介

受污染場址是否需要整治復育，須先評估是否有污染物釋出而進入環境中，以及污染物釋出的總量與釋出時間，其次是瞭解污染物釋出後之傳輸路徑，與生物可能接觸的暴露風險推估，再判定場址是否須加以整治。目前針對土壤污染整治（Remediation），已發展出各類物理、化學及生物的方法以去除土壤中有害因子或降低其毒性。就污染物處理實施場所劃分，可分為現地（In-situ）、現場（On-site）與離場（Off-site）三種；實施方法之原理又可分為生物、物理/化學、熱處理及整治列車（Treatment Train）。

物理/化學方法是利用污染物或被污染介質之物化特性，達到破壞、分離或穩定污染物的目的。經費與效果間的比例較佳，且時程較短。物理方法如活性碳處理（Activated Carbon Treatment）、氣提單元法（Air Stripping）、阻絕法（Capping）、破裂法（Fracturing）焚化法（Incineration）、現地淋洗法（In-Situ Flushing）、現地熱處理（In-Situ Thermal Treatment Method）、地下水抽出處理法（Pump and Treat）、土壤開挖（Soil Excavation）、土壤間隙蒸氣抽除法（Soil Vapor Extraction）、地下水注氣法（Air Sparging）、加熱脫附處理法（Thermal Desorption）；化學方法如化學去鹵素法（Chemical Dehalogenation）、土壤清洗法（酸洗）（Soil Washing）、化學氧化法（Chemical Oxidation）、透水性反應牆法（Permeable Reactive Barriers）、固化與安定化法（Solidification/Stabilization）、玻璃化法（Vitrification）。

生物整治原理是利用自然作用去除污染物，通常利用以污染物為食物之微生物進行清理工作。費用較便宜，但時程較長，且成效較難評估，如生物整治法（Bioremediation）、監測式自然衰減法（Monitored Natural Attenuation）、植物整治法（Phytoremediation）、生物堆法（Biopile）、生物通氣法（Bioventing）。

而熱處理原理是利用加熱處理，達到分離或加速分離污染物的目的，費用偏高，但時程較短，且需動用較大機具，耗費之能量較高。另外整治技術連用序列則是採用多種整治方法，同時或分階段進行整治工作，結合多種整治方式之優點，有效降低經費，或縮短整治期程。

土壤整治技術種類繁多，以下就多種土壤污染整治技術詳細介紹。

一、物理/化學處理技術

(一)浮油回收技術 (Oil Recovery) (Fetter, 1999, Bedient et al., 2000)

由於浮油均為比水輕非水相液體 (LNAPL) 因此後續使用 LNAPL 回收做為代表。LNAPL 回收技術包括單一汞浦回收、雙汞浦回收、表面刮除及真空加強式抽除法 (Vacuum Enhanced Recovery) 等，以下分別討論。

1. 汞浦抽取回收法

利用汞浦抽取回收共可分 3 種方式，即單一汞浦、雙汞浦回收及表面汞浦。單一汞浦法將汞浦介於油水介面，同時抽出油與水，缺點為地下水量大，且造成抽油乳化現象。雙汞浦回收法中依汞浦置於較深處，抽取地下水以降低水位，使油流至井中，由另一汞浦抽至地面，因此油與水較容易分離。表面汞浦則須挖掘一個壕溝至地下水面以下，使地下水流出變成與大氣接觸，再由表面汞浦抽出，缺點為必須考慮作業安全與人員暴露問題。

2. 真空抽除法 (Hoepfel and Place, 1998)

真空抽除法將控油管放在油與空氣的介面，利用真空將油抽出地面的一項技術。與汞浦回收方式比較，本法較易抽出毛細管區的油液，抽出之地下水量也較少，並可增加生物分解及氣提回收作用。本法並可在油液回收近完成時，迅速改成土壤氣體抽除法繼續進行整治。

(二)現地化學氧化法 (In-situ chemical oxidation, ISCO)

現地化學氧化法是指將氧化劑送入地下，以轉換目標污染物，並降低其質量、移動性及毒性的方法。該方法可以單獨使用，並且可以與其他處理方法 (如生物整治法) 合併使用。此法最適用於高濃度地下水污染團區 ($>10\text{mg/L}$)，若用於低污染團區 ($>1\text{mg/L}$) 雖然可行，但須考慮成本問題。此法之反應速率有許多因素之影響，包括溫度、pH 值、污染物濃度、催化劑、副產物、背景水質即有機質等。而氧化劑與污染物之

接觸則受某些因素主導，即注入方法與均質性，以及土壤中還原性物質的多寡。

實務應用 - 台灣中部某污染場址

本案例場址位於台灣中部某一石化儲槽區，該場址自民國 78 年動工興建後即作為化學品倉儲作業用途，儲槽總容積為 6 萬公秉，曾儲存過數種化學品，其中屬地下水污染管制標準所管制之項目有甲苯、氯乙烯及 1,2-二氯乙烷。經調查發現場址之地下水受到揮發性有機物污染，且污染濃度超過地下水污染管制標準數百倍或數千倍以上，污染物包括甲苯（最高初始濃度 240 mg/L）、氯乙烯（最高初始濃度 22.2 mg/L）及 1,2-二氯乙烷（最高初始濃度 1,980 mg/L）等。

該場址地表下之地層可分為 RC 鋪面（10-20 公分）、回填層（平均厚度約 1.0 公尺）、砂土質細砂或中細砂層（平均厚度約 9.0 公尺）、及砂土質細砂層或中細砂偶夾砂質砂土及砂土質黏土薄層（厚度超過 20 公尺）。該場址之平均地下水位近海平面，因受潮汐影響地下水流向及流速不定。

本案例採用化學氧化法、土壤間隙蒸氣抽取與地下水注氣法進行整治，其中化學氧化法係運用於高污染區域，藉由監測井與簡易注入井直接注入調配化學氧化劑（Fenton 與高錳酸鉀），利用污染物與化學藥劑直接接觸反應，達到去除效果。

整治期程自民國 93 年 9 月至 94 年 12 月，累計添加藥劑約 450 公噸稀釋化學藥劑。依據改善作業後之最近一次地下水調查結果，該場址之地下水污染物濃度已低於管制標準，並經地方環保局審查解除本場址之管制。（資料來源：本署「土壤及地下水受比水重非水相液體污染場址之調查、驗證作業及整治工作等技術參考手冊」）

(三)現地淋洗法 (In-situ flushing)

由於傳統抽出處理法 (Pump and Treat) 對於污染物去除須要很長的時間，因此侵入性更強的方法逐漸被引進到地下水處理。此法使用溶劑注入 (injection) 或入滲 (infiltration) 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。其應用原理與抽取處理法類似，但是改以適當之混合液體取代水做為沖洗液，藉由沖洗液的注入可改變土壤及地下水與污染物之吸脫副特性、氧化還原狀態、介面張力、酸鹼狀態及分配、溶解、沉澱狀態等，達到增加污染物溶解度，造成污染物與溶液型成乳液或產生化學反應，促使原本吸附在土壤中或以液體形式存在之污染物容易隨地下水移動，造成污染物之去除。

(四)現地熱處理法 (In-situ thermal treatment)

將高溫蒸氣注入或是利用電阻加熱、熱傳導加熱、電波頻率、高溫熱空氣或熱水的方式將熱導入受污染土壤中，促使土壤或地下水溫度提升，以使污染物更容易溶解、揮發或移動，以利於整治。熱處理方法可應用於建築物下即不適合開挖地區、地下水面下、無法開挖之深層污染區，只要熱能可以被傳送到的深度均可適用。熱處理法通常對受油品污染地下水具有良好之處理效果，但該方法可能會改變現地微生物型態，變成有利於嗜熱性微生物生長，且可能會造成污染物往更深層移動或擴散開，故使用上須小心。熱處理法對於汽油、燃料油均有成功之現地處理案例，國內則有中石化安順廠實場試驗。

(五)土壤間隙蒸氣抽除法 (Soil Vapor Extraction, SVE)

土壤間隙蒸氣抽除法 (Soil Vapor Extraction, SVE) 係針對不飽和層或通氣層 (Vadose Zone) 土壤中高揮發性污染物進行整治之方法。本技術利用真空抽氣，使存在於土壤中之污染物產生揮發作用，污染物由固相或液相轉移為氣相，並因抽氣井使污染區土壤產生負壓，使污染物隨土壤氣體往抽氣井方向移動，而被抽出，被抽除土壤氣體可進行回收或經處理後排放。此技術於操作時，常在表面上覆蓋一層不透水布，以避免產生短流現象，並增加影響半徑及處理效率。土壤氣體抽除系統最基本的配置是利用傳統的鑽井方式，設置一個或多個垂直井，場址如未設置鋪面 (如混凝土或瀝青鋪面)，一般井篩頂部設置在地面一公尺以下，以避免產生空氣短流的現象，抽氣井的運作可採連續式或間歇運作的方式。土壤氣體抽除法其他

應用方式，包括將土壤加熱，以增加土壤氣體抽除的處理效率，由於增加有限的處理效率必須耗用大量的能源，其經濟可行性較低，為其缺點。土壤氣體抽除法另一應用方式，包括利用地下水抽出處理法，將地下水水位降低，增加土壤氣體抽的有效深度。土壤氣體抽除法不適用於低揮發性或低亨利定律常數之污染物，亦不適合處理水分含量高或黏土質之土壤，更不適用於低透氣性的土壤環境中。雖可以運用工程技術克服上述不利的條件，但會顯著增加整治之經費。一般來說，土壤氣體抽除法已被成功地運用在處理位於中度透氣性及高透氣性土壤中含有揮發性污染物成分，並被大量運用在含氯溶劑污染的場址中。截至 1999 年底，共有 196 個美國超級基金場址選用土壤氣體抽除法為其整治技術。

(六)地下水抽出處理法 (Pump and Treat)

地下水抽出處理法是一項針對飽和層地下水中溶解性污染物之整治方法，並兼具控治污染團之擴散，因此本法除可歸類為整治技術外，亦可歸類為圍堵 (containment) 技術，與水力隔絕方法類似。此法包括兩部分，即抽取井與地面處理設備。抽取井的設計視場址特性而定，而地面處理設備則視污染物特性而定，通常地下水一旦抽出後，其處理方法與廢水處理差異不大。此法整治期程一般都很長，且往往在停止抽水後會有濃度回升的現象，因此常有抽取一段時間後停止一段時間後再抽水之操作。

實務應用 - 台灣北部某土壤及地下水污染場址

本案例係位於台灣北部某工業區內，被鄰近工廠鐵路、農田及民宅所包圍。該場址因過去製程產生的含四氯乙烯廢水處理不當，及四氯乙烯使用不慎造成洩漏，導致土壤及部分區域地下水污染。

依據地質鑽探資料顯示，該場址位於由河川沉積物形成之土層，由地表至深約 150 公尺由砂層及黏土層交錯而成，包含多層含水層，經調查確認為第一含水層遭四氯乙烯污染，其他深層含水層未受到污染。地下水調查發現，第一含水層之地下水流流向為東南往西或西北向，地下水位在地面下約 4 至 6

公尺之砂泥及黏土層中；流通係數(transmissivity)為 1,700 m²/日，土壤之滲透係數為 66 公尺/日。

本案例針對場址污染源處之污染土壤直接採用土壤開挖清理方式，地下水污染帶採抽出處理方式，而場址內次要污染則採持續監測及自然降解。場址內地下水清理是由土壤氣體抽取、地下水抽氣、地下水抽出處理所組合而成，其中地下水抽除系統主要是以抽出處理為主，抽氣及注氣為輔；在土壤污染源周邊區域及地下水流向下游，場址內佈置數口抽水井，以阻絕含四氯乙烯污染物擴散至場址外下游地區，並配合曝氣系統進行後段廢水處理，以收受由地下水抽水井抽出之含四氯乙烯地下水。廢水處理後回收，用於場址內冷卻及消防用水使用，部分則放流。地下水清理期程為民國 90 年至 95 年，共計自地下水中清出含四氯乙烯污染物約 610 公斤。依據地下水質監測資料結果顯示，地下水中污染濃度皆已低於清理目標值（50 µg/L）。（資料來源：本署「土壤及地下水受比水重非水相液體污染場址之調查、驗證作業及整治工作等技術參考手冊」）

(七)地下水注氣法（Air Sparging，AS）

地下水注氣法是一個現地整治技術，藉由注入空氣在地下水中產生氣泡，將水中污染物氣提出到不飽和層中，再藉由空氣抽取設備（SVE）將氣體抽至地面處理。由於注入空氣之緣故，因此可以增加地下水中即不飽和層中氧氣濃度，也可提升污染物之生物降解作用。此整治法主要去除之污染物為揮發性有機物及部分的燃料油，然此整治法在操作不佳時，氣體分布不均勻可能會造成污染團擴大，此方法通常需要數年的時間才能達到整治的效果。

(八)還原劑注入法（Reducing agent injection method）

此整治法利用化學藥劑的注入，使地下環境中變成還原條件，當氧化還原敏感的污染物流至該區域時，可被降解成二氧化碳或毒性較低物質，或是形成沉澱。還原劑注入法通常包含三個階段，即注入、反應及抽取反應物或產物。在注入階段中，主要須考慮的問題在於如何輸送反應物到地下去與土壤中的

鐵產生反應，形成一個長期的還原環境。因此，場址特性如孔隙度、導水性及含水層厚度等關係反應物注入量的參數必須事先了解，且污染團分布區域大小也必須預先得知。此外，亦須考慮金屬移動、處理物造成阻塞以及溶氧降低等問題，在還原環境下會造成某些原本吸附或沉澱性金屬釋出，如鐵、砷、錳等，但是在實場測試中，並未發現超過法規標準之問題。反應物回收物也需要考慮，實場測試回收率偏低，由於連二亞硫酸鹽最終產物為硫酸根，因此需考慮法規之要求。另外，實場測試也並未發現因阻塞造成之傳輸受導影響。

(九)現地透水性反應牆 (In-situ Permeable Reactive Barrier, PRB)

現地透水性反應牆 (In-situ Permeable Reactive Barrier, PRB) 為近幾年來所發展之新技術。由於大眾逐漸認知到抽取處理法及其他傳統上須於地面上處理污染物之系統無法在現地環境中執行之限制，因此現地透水性反應牆技術廣受矚目。現地透水性反應牆之設計主要在地下水污染團下游設置一不透水的障壁，藉由此不透水障壁將污染團引導至位於其內之滲透性、半滲透性或可置換的柵欄。在此反應 (處理) 柵欄中，會進行目標污染物之處理。處理過後之地下水流出柵欄後，再沿著其自然水流方向行進。由於水流是藉由地下水水力坡降流經柵欄，因此此系統亦稱為被動式處理牆 (passive treatment walls)。若污染團非常狹窄，可設置一與污染團等寬之滲透性反應渠，如此便不用設置非滲透相障壁引導水流。現地反應牆所需用到的機械系統非常少，甚至不需要，因此可減少長時間操作及維修之花費，降低許多整治計畫之費用 (Borden and Kao, 1992)。

二、生物處理技術

生物整治指以微生物將污染物降解或轉移成較低毒性或無毒的型態，藉此降低或排除污染物。將受污染的土壤挖除後施以生物處理，最大優點就是各項影響生物處理的因子都可以人為控制，如：pH、氮、磷、含氧，且不易受到場址的影響。

一般生物整治技術分為現地 (In-situ) 及離地 (Ex-situ) 處理，現地生物整治是現今最受生物整治專家注重的方法，因現地整治

期間不需挖掘地下水位以上土壤，且對大範圍污染區域只需以打氣、處理等重複操作步驟，可節省大量成本且在污染現場即可操作。

(一)生物漱洗法 (Bio-slurping)

生物漱洗法又稱多相抽除法 (Multi-phase Extraction)、真空加強式抽除法 (Vacuum Enhanced Extraction)，主要於污染區土壤上方，設置回收井，於井中設置泵，以移除土壤及地下水中不同型態的污染物質，包括液態之地下水自由相 (Free Product)、溶解相，以及不飽和土壤層中氣態之揮發性有機物等物質，屬於油、水、氣可同時抽除處理之整治技術。應用於回收揮發性有機化合物或石油碳氫化合物等輕質非水溶相液態污染物 (LNAPL)，屬於真空加強式脫水回收 (Vacuum-enhanced Dewatering Recovery) 的一種處理技術。其主要為結合真空抽除/回復、蒸氣萃取及生物通氣三種機制所組成的技術方式，以同時回收油品物質與進行未飽和層之土壤之生物復育，從水位或毛細邊緣移除自由油相 LNAPLs，蒸氣抽除從地下水位線以上區域移除高揮發性蒸氣而生物漱洗為刺激生物降解未飽和區和毛細區域之低揮發性碳氫化合物。生物漱洗法可增加油品物質回收之效率，而不需抽出大量地下水，也就是真空吸引式幫浦能使 LNAPLs 昇離地下水位，並離開未飽和層。比水輕石油碳氫化合物是微生物良好的碳源，利用生物漱洗法提高地下水含氧量之優勢，適當提供微生物生長所需之營養鹽，馴養活化現地之微生物進行污染物之分解。其能在不須抽取大量的地下水的情況下，就可增進自由移動性污染物質的回收效率。

(二)土耕法 (Land Farming)

土耕法是一種經由生物降解受石油碳氫化合物污染的土壤整治方法。這種方法廣泛的包括挖掘淺層受污染之土壤，並利用通氣或是添加營養鹽、濕度、礦物質等條件提高好氧微生物活性，進而利用微生物降解污染物的技術。提高微生物之活性，將可使吸附在土壤中的石油污染物藉由微生物的呼吸作用進行降解。如果污染層較淺 (小於地面下三呎)，則不須經由

挖掘土壤，即可有不錯的生物活性。但若是污染土壤深超過五呎，則土壤則必須經由挖掘的方式以增加溶氧。目前已證實土耕法對於受石油污染場址之土壤，有良好的處理效果。輕質的石油產物（例如：汽油），可經由土耕法翻堆過程中（例如：進行耕或犁的方式）之蒸發作用移除，也可藉由微生物降解機制去除。

(三)生物堆肥法 (Biopiles)

生物堆肥 (Biopiles)，亦稱為生物單房 (Biocells)、生物堆積 (Bioheaps)、生物土堆 (Biomounds) 與堆肥堆 (Compost Piles)。其運用生物降解的機制來減低挖掘土壤中受石油成份污染之污染物濃度，此技術牽涉到污染土壤堆積至堆 (piles) 或是單房 (cells) 與通入氣體或是添加礦物質、營養鹽與濕度控制等，藉此促進土壤中好氧微生物之活性；藉由微生物之呼吸作用加強微生物之活性以降解吸附之石油產品成分 (Petroleum-Product Constituents)。生物堆與土耕法 (Landfarms) 是相似的，兩者皆位於地表面上，工程建造的系統一般是使用來自空氣中的氧氣以促進好氧細菌的生長與再生能力，接著，減低石油污染物吸附在土壤中。當土耕藉由耕種或犁田供應氣體，則生物堆積供氣大部分常藉由強迫供應空氣的方式，經由注入或是抽取的方式來驅使氣體通過遍佈堆中所放置的開槽或多孔的管道系統。

(四)生物通氣法 (Bioventing)

生物通氣法是改良現地生物復育的方法，可加速對石油碳氫化合物的快速生物降解。此法是將空氣打入受污染區域的地下水層，整個系統有足夠氧氣讓微生物生長並對污染物進行降解，不需要另行抽除水面上的污染物 (Hinchee, 1994)。生物通氣法主要是以現地微生物降解吸附於不飽和層土壤之有機污染物，毛細現象區域邊緣 (Capillary Fringe) 及飽和層 (Saturated Zone) 土壤則不適用。生物通氣法通常以萃取井 (Extraction Wells) 或是注入井 (Injection Wells) 的方式，將空氣或氧氣導入不飽和層內，加強現地微生物之活性；另外，如有需要亦可添加營養鹽，以增進生物降解速率。

(五)生物泥漿法 (Biosludge)

生物泥漿法是一種固液混合系統，可用於處理高濃度溶解性之有機污染物。主要是藉由添加大量水分，使欲處理之污泥或土壤呈泥漿狀態，利用混合攪拌幫助自然微生物 (resident microorganisms) 與污染物在反應槽中接觸，反應槽之設計可為單槽或多段，以批次或連續操作進行，並輔以曝氣、添加無機營養鹽、界面活性劑、控制 pH 及溫度等方式進一步促進微生物對有機污染物的分解效果，此技術可用以單獨使用，或結合其他生物、物理及化學技術以處理污染物。生物泥漿的原理為有機污染物由固相傳輸到液相中，並在液相中被微生物所分解利用後，固液相中有機物的分配再次達到新的平衡，如此周而復始，使泥漿反應不斷的進行。因此，泥漿法的第一個限制因子是有機物在固液相間的質傳速率，操作上可由界面活性劑的添加及攪拌來改善。另一個限制因子是液相中有機物之生物分解作用，操作上則是以曝氣、營養鹽的添加及 pH 與溫度的控制，來增加微生物的活性；而攪拌及曝氣也可以增加微生物和污染物接觸的機會。

目前國內利用生物技術進行之相關整治案例，多以處理含氯有機化合物 (四氯乙烯、三氯乙烯等) 整治為主，多利用厭氧還原環境處理，如 RCA 場址以 HRC (氫釋放劑) 及糖蜜 Molasses 建立加強式脫氯降解 (ERD) 處理；以及北縣某場址以 Emulsified Oil (精緻蔬菜油) 注入地下水體處理受三氯乙烯污染之地下水。

(六)監測式自然衰減法 (Monitored Natural Attenuation, MNA)

監測式自然衰減法是一個可信賴的自然衰減程序。而自然衰減程序為環境中自然發生的一種過程，此過程可減少環境污染物之重量、毒性、移動性、體積或濃度。其機制包括有延散 (dispersion)、稀釋 (dilution)、吸附/吸持 (sorption)、揮發 (volatilization)、化學與生化穩定化及生物衰減 (biodegradation)，經由其中一種或多種的機制有效減低污染物濃度，以達到降低污染物對環境及人類健康危害的目的。因

此，自然衰減處理是指利用土壤及地下水中之生物、物理及化學等機制將污染物去除。在整治期間需持續監測場址環境和污染濃度之變化。自然衰減法是一種被動式之整治方法，因為自然衰減程序是在沒有人為的干預下發生。自然衰減在任何污染場址都會發生，只是發生程度的不同。自然衰減的程度將因污染物的種類、污染場址土壤或地下水的物理、化學及生物特性等的影響而有所不同。而自然衰減也並非是一個不行動（no action）之整治方法。在大多數的案例中，自然衰減常被用來彌補傳統整治技術之不足，當污染來源移除後，便以自然生物處理完成清除工作。執行自然衰減處理有別於傳統技術可允許污染物些許殘留於地下水中，而是將污染物完全分解。

