

# 我國土壤及地下水污染整治之 未來發展方向

何建仁\*

## 摘要

為解決國內土壤及地下水污染問題，環保署長期以來即致力於完備土水法規命令之建置，促使大眾重視土地品質之維護，並積極調查各類污染場址，引進各種調查、整治技術，加強產官學合作研發，推動國際交流及建立風險評估機制，以多元化誘因加速土水污染場址之調查及改善，期望達到土地再生之目標。本篇文章包含國內土污法修訂重點及其影響、調查技術未來發展方向及整治技術未來發展方向，在單一整治技術無法滿足場址復育情況下，結合綠色整治發展綠色整治列車系統為目前發展趨勢，不但可使整治技術應用上更具環境友善性，亦可加速場址之整治時程。

【關鍵字】土污法、污染場址、風險評估、綠色整治

---

\*環保署土污基管會技術審查組 組長

## 一、前言

為解決國內土壤及地下水污染問題，環保署長期以來即致力於完備土水法規命令之建置，積極調查各類污染場址，引進各種調查、整治技術，加強產官學合作研發，推動國際交流及建立風險評估機制，以多元化誘因加速土水污染場址之調查及改善。

## 二、土污法修訂重點及其影響

### 2.1 土污法修正重點

土污法 89 年 2 月 2 日公布施行後，於 92 年 1 月 8 日配合行政程序法之施行進行部份條文修正，並於 99 年 2 月 3 日修正全文公布施行。修正內容主要包括：增加底泥品質及污染管制、強化改善及整治責任、建構土壤及地下水監控網路、建立土壤及地下水環境專業制度、運用健康風險工具訂定整治目標、增加場址資訊來源、擴大基金用途、加強土地關係人責任以及修正罰則內容。嚴謹規範事業用地移轉、事業設立、變更與歇業之土壤污染評估調查及檢測資料之提送，而在污染土地之釋出或開發，則提供了較完備之機制與規範，有利於加速場址整治與利用。施行細則亦配合於 99 年 12 月進行修正。

### 2.2 土污法對土地開發之影響

土污法第 17 條與第 24 條已原則性的建立污染土地准予再開發的法令依據，針對控制與整治場址給予進行再開發的途徑，對污染土地配合開發可以較具彈性方式進行整治。另第 51 條也規範污染土地開發之限制與回饋機制，提供污染土地釋出再利用更具多元化之方式。

過去土污法僅規範配合土地開發再利用可專案核定整治目標，但對於整治目標專案核定後之管制缺乏機制，現土污法第 24 條第 4 項規定：「整治場址之土地，因配合土地開發而為利用者，其土壤、地下水污染整治目標，得由中央主管機關會商有關機關核定。核定整治目標後之整治場址土地，不得變更開發利用方式；其有變更時，應先報請中央主管機關會商有關機關核定，並依其他法令變更其開

發利用計畫後，始得為之。整治場址污染物之濃度低於核定之整治目標而解除管制或列管後，如有變更開發利用時，直轄市、縣（市）主管機關應就該場址進行初步評估，並依第十二條規定辦理。」新增之土污法規定，已核定之整治目標於都市計畫變更後，應重新報請中央主管機關會商有關機關核定，其目的係為避免已核定之整治目標不符原規劃使用狀況，造成污染危害風險變高。另依土地開發利用方式所訂之整治目標完成整治而解除列管或管制後，若其再變更土地開發利用規劃時，因場址土地已非整治場址，無法爰用本項前段整治場址之規定，故增訂所在地主管機關應就該場址進行初步評估後，視初步評估結果，再依本法相關規定辦理。

污染土地開發回饋金繳納至土污基金方面，原土污法第 46 條係規範土地開發行為人在整治場址公告解除列管且土地開發計畫實施前，應按該土地變更後之當年度公告現值加 4 成為基準，核算原整治場址土壤污染面積之現值，依其百分之 30 之比率，繳入土壤及地下水污染整治基金。現土污法第 51 條新增除外規定，土地開發行為人於直轄市、縣(市)主管機關提出整治計畫之日前，已提出整治計畫並完成者，不在前述規範之範圍，亦即無須繳納費用至土污基金(表 1)，此除外條件提供有意願進行土地開發之業者，提高完成污染場址整治之誘因，可加速我國污染土地之再生作業。

表 1 土污法修正前後對污染土地開發之規定

項目	土污法修正前	土污法修正後
法令內容	<p>整治場址之污染管制區範圍內屬污染行為人或污染土地關係人之土地，不得變更編定或為違反土壤及地下水污染管制區管制事項之利用。</p> <p>土地開發行為人於前項土壤及地下水整治場址公告解除列管且土地開發計畫實施前，應按該土地變更後之當年度公告現值加 4 成為基準，核算原整治場址土壤污染面</p>	<p>整治場址之污染管制區範圍內屬污染行為人、潛在污染責任人或污染土地關係人之土地，不得變更<u>土地</u>使用分區、編定或為違反土壤及地下水污染管制區管制事項之利用。</p> <p>土地開發行為人於前項土壤及地下水整治場址公告解除列管且土地開發計畫實施前，應按該土地變更後之當年度公告現值加 4 成為基準，核算原整治場址土壤污染面積之現值，依其百分之 30 之比率，繳入土壤及地下水污染整治基金。<u>但土地開發行為人於直轄</u></p>

## 92 我國土壤及地下水污染整治之未來發展方向

項目	土污法修正前	土污法修正後
	積之現值，依其百分之 30 之比率，繳入土壤及地下水污染整治基金。	市、縣(市)主管機關提出整治計畫之日前，已提出整治計畫並完成者，不在此限。
規定項目	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 整治場址不得變更編定。</li> <li>■ 土地開發計畫併同污染整治計畫提出者，於開發計畫實施前應繳納費用至土污基金。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 整治場址不得變更土地使用分區及編定。</li> <li>■ 土地開發計畫併同污染整治計畫提出者，於開發計畫實施前應繳納費用至土污基金。但在主管機關提出整治計畫前即自行提出並完成整治計畫者，無須繳納。</li> </ul>

### 2.3 土壤污染評估調查及檢測資料之變革

原土污法第 8 條規定土地移轉前要進行土壤污染調查，但該條文並不具強制性，並未要求提送至主管機關，亦無相關罰責，僅為宣示性質，以致執行成效不彰，無法達到立法原意。土污法修法後，將第 8 條由宣示性修訂為強制性之條文，即公告之事業用地於土地移轉時，須提出土壤污染調查評估及檢測資料，並提送主管機關備查，未依規定完成備查者，將處以 15 萬元以上 75 萬元以下之罰鍰，並與污染行為人、潛在污染責任人等負有污染整治相關費用支出之連帶責任。不僅課與土地讓與人具有提供土地品質狀況資料之義務，更有助於土地交易雙方充分瞭解土地品質後，再進行交易，長久而言對於買賣雙方之權益較有保障，第 8 條修正前後之對照表如表 2。

原土污法第 9 條規定，指定公告事業於設立、停業或歇業前，應提送事業用地土壤污染調查評估及檢測資料至主管機關備查，現將原提送至主管機關備查之方式改採審查之機制，主管機關將事業所提送之資料進行實質審查而非備查。因此，未來事業必須注意其所提送之資料品質，以避免延誤向目的事業主管機關申辦相關作業之時程。目前土污法第 11 條規定，所提出之土壤污染評估調查及檢測資料必須先經過環境工程技師、應用地質技師或其他相關技師簽證，才可提送至主管機關。另除原有之事業設立與歇業 2 個時機點外，亦增加事業進行變更前也必須提送資料之規定，包變更經營者、產業類別及營業用地範圍等 3 種情況，第

9 條修訂前後之對照表如表 3。

此外，土污法第 9 條亦授權環保署訂定土壤污染評估調查及檢測資料之內容、申報時機、應檢具之文件、評估調查方法、檢測時機、評估調查人員資格、訓練、委託、審查作業程序及其他應遵行事項之辦法。環保署遂於 100 年間陸續公告：土壤及地下水污染整治法第 8 條第 1 項之事業(100.01.03.修正)、土壤及地下水污染整治法第 9 條第 1 項之事業(100.01.03.修正)、土壤污染評估調查人員管理辦法(100.05.09.訂定)、土壤污染評估調查及檢測資料審查收費標準(100.05.24.訂定)、土壤污染評估調查及檢測作業管理辦法(100.10.21.訂定)。因此，未來提送土壤污染評估調查及檢測資料進行審查，必須繳交審查費用<sup>[1]</sup>，而過去對於調查評估執行人員並無資格或條件上之限制，土污法修正後授權對於調查評估人員資格的限制，包括必須要接受相關之課程訓練，經過考試合格後取得調查評估人員資格，後續亦必須定期接受訓練，以維持其調查評估人員資格<sup>[2]</sup>。另外，對於調查評估的執行方式、提送資料格式等均有完整之法令規範，並增加未來以網路傳輸方式提送資料<sup>[3]</sup>。

表 2 土污法 99 年修訂前後第 8 條規定差異

項目	修正前第 8 條	修正後第 8 條
管制方式	無需申報 (由讓予人提供予受讓人)	需向所在地主管機關辦理備查
申報時機	土地移轉時	土地移轉時
罰責	無	<ul style="list-style-type: none"> <li>■按次處罰</li> <li>■未依規定完成備查者，將被處以 15 萬元以上 75 萬元以下之罰鍰，並與污染行為人、潛在污染責任人等負有污染整治相關費用支出之連帶責任</li> </ul>
責任	與場址土地所有人相同	就主管機關所執行適當措施、應變必要措施、污染範圍調查及評估、整治等支出，與污染行為人、潛在污染責任人負連帶清償責任

表 3 土污法 99 年修訂前後第 9 條規定差異

項目	修正前第 9 條	修正後第 9 條
管制方式	向所在地主管機關辦理備查	報請所在地主管機關審查
申報時機	事業設立、停業、歇業前	<ul style="list-style-type: none"> <li>■事業設立前</li> <li>■變更經營主體前</li> <li>■變更產業類別前</li> <li>■變更用地範圍前</li> <li>■事業歇業前</li> </ul>
評估者資格	無限制	採技師簽證，對評估者學、經歷進行要求，必須通過相關考試取得資格
罰責	處新台幣 20 萬元以上 100 萬元以下之罰鍰	<ul style="list-style-type: none"> <li>■按次處罰</li> <li>■未依規定完成審查者，將被處以 15 萬元以上 75 萬元以下之罰鍰</li> </ul>

## 2.4 污染土壤離場處理

污染土壤離場處理為目前污染場址經常使用之整治方法，為避免污染土壤之棄置或未妥善處理處置而產生二次污染，並有效控管污染場址採離場處理方式受污染土壤之流向，掌握污染土壤運送過程與最終去向，以利規劃污染土壤再利用方式與技術，建立污染土壤之離場清運與處理之管制有其必要性。因應污染場址改善之土壤離場處理需求，99 年 12 月 31 日發布施行之土壤及地下水污染整治法施行細則納入污染土壤離場處理相關規定(表 4)，採取之應變必要措施、控制計畫、整治計畫如採行土壤離場處理者，應提報土壤離場之處理方式及設施、管制措施等規劃內容，並納入控制、整治計畫等計畫書中進行核定。因應土污法施行細則之規定，環保署目前正研擬土壤離場處理相關管理方式，將污染土壤離場清運作業、處理作業相關規範納入土污法相關子法中，建立污染土壤離場清運申報相關作業方式，以達到污染土壤妥善處理處置之目標。

表 4 土污法修訂對污染土壤離場處理之影響

項目	土污法修正前	土污法修正後
法令 內容	無直接之規定	<p>施行細則：</p> <p>第五條 依本法第七條第五項或第十五條第一項第八款規定採取之應變必要措施，如採行土壤離場處理者，應提報下列資料：</p> <p>一、土壤離場之處理方式及設施。 二、管制措施。</p> <p>第十四條 依本法...提出之土壤、地下水污染控制計畫(以下簡稱污染控制計畫)，其內容應包括下列事項：</p> <p>七、污染控制目標及方法。如採行土壤離場處理者，應包含土壤離場之處理方式與設施及管制措施等。</p> <p>第二十條 本法第二十二條所定土壤、地下水污染整治計畫，其內容應包括下列事項：</p> <p>七、整治方法。如採行土壤離場處理者，應包含土壤離場之處理方式與設施及管制措施。</p>
規定 項目	<p>■土壤離場為控制、整治計畫或應變必要措施之一部分，應依核定計畫或措施內容辦理</p>	<p>■明訂控制、整治計畫或應變必要措施涉及土壤離場時應提出執行方式之規劃內容</p>

## 2.5 調整費基結構

為改善現行收費制度費基偏重石化業的不合理現象，環保署已於 100 年 3 月公布修正後的第 4 版收費辦法。在費基的調整上，擴大徵收對象，包含既有化學物質、重金屬銅、鎳、鋼胚、煤，及 13 項業別事業廢棄物皆被納入徵收對象。在結構上，前 20 大繳費業者佔應繳總額亦由 95.6% 降低為 78.9%<sup>[4]</sup>，此一結果亦顯示，新的收費辦法確實改善了過往費基偏重石化業的情況。然而，業者多認定新收費辦法為制度調整的過渡做法；換言之，業者仍期待未來在整體制度上能有所轉變，而不只是著重於費基調整。

## 2.6 其他影響

土污法第 6 條規定：工業區、加工出口區、科學工業園區、環保科技園區、農業科技園區及其他經中央主管機關公告之特定區域之目的事業主管機關，應定期檢測土壤及地下水狀況，另作成資料送環保局備查。另土污法修正後要求河川、灌溉渠道、湖泊、水庫及其他經中央主管機關公告之特定地面水體之目的事業主管機關，應定期檢測底泥品質狀況，送環保署備查。未來各類工業區底泥之調查、檢測分析及風險評估工作都將扮演重要之角色。

# 三、調查技術未來發展方向

## 3.1 未來調查技術之使用

土污基管會自成立以來，為落實土壤及地下水污染整治的決心，以農地調查為起點，將調查對象依序擴大至加油站及大型儲油槽、廢棄工廠、非法棄置場址、運作中工廠、航空站、軍事營區及工業區等，未來更期望以「污染預防」為根本，著手進行土壤及地下水保育的工作。

由前述調查計畫之執行，隨著調查經驗的累積，因應各類型污染案件需求，土壤及地下水污染調查使用的調查方法及技術也依個案需求而逐年進步與更新。

由於地下環境的土壤、地下水污染情形具隱晦不明特性，因此欲發現污染或進一步掌握污染分佈，實為非常困難的挑戰，必須藉由實際的調查、透過採樣及檢測分析進行了解。綜觀現階段國內外土壤、地下水污染調查技術發展趨勢，均

以直接貫入(direct push)技術為使用主流，並以快速調查評估及多面相調查、多功能合一為研發導向。

調查技術之進步，有助於提升土壤及地下水污染調查的精度，環保署未來將廣泛應用快速篩試技術、地球物理探測及環境法醫鑑識等 3 方法。

## 3.2 快速篩試技術

### 3.2.1 攜帶式 GC/MS (portable mass spectrometer)

儀器原理以薄膜分離氣體樣品，將氣體離子化，以特有專利之質譜儀分析，與資料庫比對後，得知受測氣體之成分及濃度，可現地立即分析氣體中之 VOC 及 SVOC，設備之偵測極限為 < 5 ppb。可應用於整治場址調查、未知氣體之緊急分析、火災或縱火現場調查。以往土壤間隙氣體，於現場常用 FID/PID 分析，當有高濃度讀值時，無法判定為甲烷、丙烷或油品洩漏之揮發氣體，應用攜帶式 GC/MS 可於現場立即分析判定，輔助土壤採樣調查。

### 3.2.2 戴奧辛快速篩測

戴奧辛傳統檢測方法雖然相當準確，卻耗時、成本昂貴及技術門檻過高等問題，因此，節省調查時效且能爭取決策機制時間之戴奧辛快速篩檢技術，成為後續全面普查之工具。近年來世界各主要環保先進國家多已開始建立戴奧辛快速篩檢法，目前市面上戴奧辛的快速篩檢以生物篩檢為主，包括 AhR-PCR 篩檢法 (procept 法)、酵素免疫分析法(ELISA 法)及化學活化冷光酵素基因表現法(CALUX 法)等 3 種。

Procept 法建置成本較低，分析及操作時間較短，但耗材較貴，且此法 2007 年才被公告為美國標準方法，相較於其他篩檢方法，屬於較新穎方法，因此相關文獻研究較少，但人員實驗操作細節問題尚未趨臻完善，整體穩定性仍有改善空間。

ELISA 法建置門檻低，無須昂貴的儀器設備，操作方式簡單，分析時間短，分析人員亦無須細胞培養技術訓練，一般代檢業現有的設備即可快速地測出土壤戴奧辛是否超過法規標準或高濃度戴奧辛，但此法偵測極限較高，適用基質較少，且樣品的戴奧辛同源物濃度分佈不同時，ELISA 法測值的偏差幅度也不盡相同，

## 98 我國土壤及地下水污染整治之未來發展方向

因此 ELISA 法適用於同一種同源物之篩檢。若同時有多種戴奧辛同源物存在，則必須找出修正因子，將測值乘上該修正因子，方能得出較接近 HR GC/MS 化學分析之測值。

CALUX 法在國外已廣泛應用，雖然其建置及操作門檻皆較高，但與 HR GC/MS 數據相關性佳，靈敏度與成熟度高，適用基質範圍廣，對於國內戴奧辛調查領域有較大助益，惟此法專利費高，國內目前亦有學術單位持續發展本土化 CALUX 技術。上述各主要戴奧辛篩檢方法與 HRGC/MS 之比較整理如表 5。

目前環保署已公告 CALUX 為戴奧辛篩檢方法，後續將評估應用戴奧辛篩測技術，搭配化學法 HRGC/MS 的標準檢測分析，逐步進行土壤戴奧辛篩測調查，建立本土化篩測技術資料。未來當污染事件發生時，即可先進行初步篩測，再挑選出接近或已超過管制標準的污染樣本，進一步利用化學分析檢測，以「先篩後檢」的調查模式，解決戴奧辛污染分析之時效問題。

表 5 不同戴奧辛檢測方法比較表

方法 項目	HRGC/MS 法	DR-CALUX®法	Procept®法	ELISA 法
方法型態	傳統化學分析法	生物快速篩檢法	生物快速篩檢法	生物快速篩檢法
認可	國家標準方法	歐盟認可& 國家標準方法	美國環保署認可	美國環保署認可
分析時程	約 21 天	約 7 天	約 3~5 天	約 3~5 天
適用基質	所有樣品基質	所有樣品基質	土壤、底泥	土壤、底泥
優點	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 方法準確高</li> <li>● 可測同源物</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 基質適用廣泛</li> <li>● 與化學法相關性好</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 建置成本低</li> <li>● 可大量分析樣品</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 建置成本低</li> <li>● 操作簡易</li> <li>● 可大量分析樣品</li> </ul>
缺點	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 分析成本高</li> <li>● 分析時程長</li> <li>● 設備昂貴</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 無法測同源物</li> <li>● 人員需具備細胞培養技術</li> <li>● 專利費用高</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 靈敏度較低</li> <li>● 無法測同源物</li> <li>● kit 較貴</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 靈敏度較低</li> </ul>

資料來源：修改自環檢所陳元武科長，開發本土戴奧辛生物快速篩選法的重要性<sup>[5]</sup>

### 3.3 地球物理探測技術

#### 3.3.1 透地雷達法(ground penetrating radar, GPR)

GPR 法與反射震測法或聲納法等地球物理探測技術頗為相似，主要原理是藉著發射雷達波 (radar wave) 訊號，並利用雷達波碰到地層因介電常數差異而產生反射波，分析反射波來回所需要的時間、波型、振幅等資料，來判別反射體的性質與位置。此一反射訊號為地面上的接收器所接收、放大、數位化後，記錄成原始資料，經由室內資料處理後，可以研判地下構造、地下水位、層面、地下異常物分佈狀況及地下管線等。

加油站儲槽皆存放大量油品，且地下管線相當複雜，為避免造成工安問題並有效的完成污染調查工作，在場址管線有疑慮的情況下，可應用透地雷達釐清地下管線及結構物之分布情況，以避免現場鑽井或採樣過程中破壞地下管線及結構物。根據以往國內探測經驗，透地雷達天線使用頻率越高、波長越短，對於淺層物質解析度則較佳；反之，當使用天線頻率越低時、波長越長，探測深度也隨頻率降低而增加，解析度則隨著波長增加而變差。由於現場探測目標及環境差異，導致所採用之頻率需由現場施測後再行調整。

#### 3.3.2 電容耦合地電阻探測系統 (capacitively coupled resistivity system - Ohm mapper)

其方法原理係利用直流電經電極棒通入地下量測地層電阻率，並以電性區分地層。舉凡地層岩性、組成礦物、顆粒大小、地層含水狀況、水中之含鹽度，皆為影響地層電阻率之因素，故直流電阻法所測得之電阻率資料，配合地質狀況及鑽探的分析結果，可正確地研判水位、含水層、阻水層（或滯水層）分佈、地層岩性構造及地層中之異常區（如污染訊號）。

加油站場址可應用 Ohm mapper 系統進行全場測勘，透過電偶極線連接內含光纖的棒子，再用電偶極線分別與發射器、接受器連接，由電偶極線內導體扮演電容器的導電極板，而大地則扮演另一個導電極板，通過的交流電頻率約 16.5KHz，電壓為交替變化，對不同極板之間會產生電子流動變化，而對大地這一塊極板則引起交流電流得以測量地層之視電阻值，進而瞭解淺層地下污染概況。

### 3.4 環境法醫鑑識技術

環保署近年來在各類型污染場址調查案中，污染行為人之追償及證據保全扮演愈益重要之角色，因而積極建置環境法醫鑑識技術。

#### 3.4.1 穩定性同位素

穩定性同位素常應用於地球化學領域判別地殼與地幔發展過程之有力證據，主要利用放射性同位素衰變至穩定核種後，經質譜儀檢測其同位素組成，進而協助瞭解地質結構成因與生成年代，建立地球演化的架構。而「同位素示蹤法」具有不易隨外在物理、化學環境改變物質本身同位素組成的特性，及高度的異源鑑別和評價環境變遷趨勢的能力，因此可作為鑑識來源之依據釐清污染來源。環保署在追查鉛米形成原因時，即應用 Pb206、207 及 208 等同位素鑑識污染源。

#### 3.4.2 指紋圖譜

指紋圖譜分析(fingerprinting)是利用化學儀器如氣相層析儀、氣相層析質譜儀(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)、高效能液相層析儀(high-performance liquid chromatography, HPLC)、紅外線光譜儀(infrared spectroscopy, IR)等分析儀器，建立油品(包括目標污染物與待比對之標準品)的所有成份的圖譜，達到定性、定量及分辨其化學組成的目的。Zemo et al. (1995)<sup>[6]</sup>指出，應用指紋圖譜比對(辨識)可確認不同的油品型態，例如汽油、柴油、燃料油或是漁業用油，若有足夠樣品，此方法甚至可區別出洩漏事件是單一偶發事件，或是連續的事件，或者是一個或多個污染源的持續洩漏。

加油站開放民營以來，國內加油站數量已達 2,700 多家，然因國內油品市場競爭激烈，加油站經營主體更換頻繁，於經營主體轉換過程中，如未能完整進行地下環境污染調查作業，往往造成污染責任無法釐清問題，並衍生許多法律訴訟之爭議案件。而國內一般加油站所販售的油品以汽油與柴油為主，但加油站所販售油品是由原油經過加工煉製後所獲得的石油產品，由於石油產品是一種成分複雜的混合物，因此可應用環境法醫概念，來建立指紋圖譜鑑識方法，以作為未來主管機關在污染鑑識上之參考。惟油品氣候化對指紋圖譜之辨識影響極大，環保署未來將另以同位素方法作為油品環境法醫方法。

### 3.4.3 示蹤劑

示蹤試驗在過去 20 多年，被廣泛應用在水文地質概念模式上。為量化複雜之地下水的流動及溶質傳輸機制，各種不同的天然示蹤劑(environmental tracer)與人工示蹤劑(artificial tracer)的技術已被陸續開發及使用。示蹤試驗基本上是在不同的介質(如裂隙或孔隙介質)的鑽孔中及穩定或非穩定流場內，以瞬間(step/pulse input)或連續(continuous)方式將不同種類示蹤劑注入，如自然梯度(natural gradient)或強迫梯度(forced gradient)法，並於其他鑽孔中回收及記錄示蹤劑濃度隨時間變化之關係，再以此定量的結果來分析地下水的流場(flow pattern)及傳輸(transport mechanism)特性與參數。

目前共有 4 種類型的示蹤劑可在現場調查使用<sup>[7]</sup>，包括非反應型(non-reactive)、分配型(partitioning)、介面型及生物地化型(bio-geochemical)等四種。非反應型指用於模擬水力特性而不參與反應之示蹤劑，例如常用之氦、溴離子；分配型只會溶入於 NAPLs 之示蹤劑，常用者包含直鏈醇類、甲基醇類、溶解氣體(如氦-222)等，可用於測試 NAPLs 的體積；介面型指會累積於 NAPLs 表面，常用之示蹤劑如離子型界面活性劑、大型分子醇類等，可判定 NAPLs 的表面積；生物地化型可判定生物或非生物分解之化合物，常用如醣、苯甲酸(benzoate)等。另外，亦有利用兩種示蹤劑估算地下油類及 NAPLs 量的分溶井間示蹤劑試驗(partitioning interwell trace test, PITT)<sup>[8]</sup>，主要將兩種示蹤劑注入污染區，其中一種會與 NAPLs 反應，另一種不會，在下游抽水後分析示蹤劑濃度，並量測 2 種示蹤劑出現的時間差，即可推估兩井間 NAPLs 的數量。

除前述介紹的技術外，另有一些研發中或較不成熟的技術「直接偵測技術」，直接偵測技術包含多深度擴散源偵測技術、錐形穿透試驗技術、色帶非溶解向採樣器(RNS)等<sup>[9]</sup>。多深度擴散源偵測技術是於地表下不同深度設置擴散源(diffusion cell)，並連接地面上資料處理器偵測與記錄，測定各深度 VOC 及溶氧濃度，不但可節省傳統採樣分析所需時間與經費，而且可建立污染物在地下三維分佈狀況，或應用於土壤及地下水污染整治成效的長期性連續監測。錐型穿透試驗(CPT)是傳統的土木與地工技術，主要利用直接推進(direct push)工具與載具，將錐形穿透器(cone penetrometer)往地層推擠，並以感應器測量頂端壓力(tip pressure)，經換算

## 102 我國土壤及地下水污染整治之未來發展方向

分類土壤質地及畫出地層剖面圖。穿透速率通常約 15 m/hr，但最高可達 70 m/hr。RNS 是一種連續性直接採樣裝置，主要在井孔中置入一彈性薄膜，薄膜外有一層疏水性吸色帶能吸附 NAPLs，此色帶含有粉狀油性染料(如 Sudan IV)，會溶於 NAPLs 而呈現亮紅色，將色帶翻轉抽離地下，觀察亮紅色位置即可了解有無 NAPLs 出現及其位置。

### 3.5 其他快篩技術

環保署近年應用多種快篩技術於各類場址調查如：XRF、火炸藥分析、PAH 及含氮農藥應用於軍事場址調查，TPH test kit 應用於加油站場址調查，含氮揮發性有機化合物氣體快篩調查技術等。

## 四、整治技術未來發展方向

### 4.1 整治技術之使用演進

土壤及地下水整治作業除需考量污染物質的特性、濃度、整治時程、整治經費、整治成效等，另需因應環境相容性及民眾接受度等因素進行整治工法的調整。目前商業上常用的整治工法眾多，如欲有系統地區分工法，多依污染處理機制發生之空間位置而定，大致區分為現地整治（in situ remediation）、離地/現場整治（ex situ/on-site treatment）、離場整治（off site treatment）。而整治的原理大致包括物理處理、化學處理、生物復育等技術，並區分為針對土壤或地下水污染（主要環境介質）及整治衍生之其他環境介質（如廢氣、廢污水）之處理，透過對污染物型態與場址環境特性等條件，選擇適合的整治工法。

然而，儘管土壤及地下水污染整治技術已發展超過 30 年，並可藉由在化工、農化、生化、礦冶、地工、應用地質等領域新開發技術之套用，然實際回顧地下水環境整治技術的發展亦能理解，地下環境易受地表活動之污染影響，要徹底之清除處理很困難，其原因不外乎：地下環境與污染傳輸的複雜性、法令與環境道德認知的問題與整治技術的可行性。如污染場址適逢特殊的水文地質，往往一旦遭受污染，對於污染源(hot spot)及其範圍就發生難以界定的困難，遑論去整治或清除污染。因此應認知：整治技術開發的速度很可能無法跟上污染的速度。故對於

傳統環境工程領域中空、水、廢、毒技術之穩定發展與創新，更有其必要性。

土壤及地下水污染處理技術之演進，約在 1980 年代以受污染環境介質之離地處理：土壤採開挖處理、地下水抽出處理 (pump & treat)，至 1990 年代起逐漸重視現地處理技術，包括應用現地生物復育技術 (bioremediation) 到 1990 年代中末期，零價鐵金屬 (zero-valent iron, ZVI) 材料的透水性反應牆 (permeable reactive barrier) 的開發、現地化學氧化 (in situ chemical oxidation, ISCO)、電動力法 (electrokinetics) 等技術之開發與模場測試成功後，才讓地下環境的整治技術有了較多樣的選擇。

國內常用的土壤整治技術有土壤開挖法 (soil excavation)、土壤翻轉稀釋法 (attenuation)、現地化學氧化法 (in situ chemical oxidation)、土壤清洗法 (soil washing)、土壤淋洗法 (soil flushing)、土壤氣體抽除法 (soil vapor extraction, SVE)、土壤固化法 (solidification)、土地耕作法 (and farming)、生物整治法 (bioremediation)、生物通氣法 (bioventing)、植物整治法及熱脫附 (thermal desorption) 等。而常用之地下水整治工法有抽出處理法 (pump and treat)、空氣注入法 (air sparging)、井內氣提法 (in-well air stripping) 及生物復育法 (bioremediation) 等。以國內現況而言，較常應用於土壤污染整治之技術以土壤氣體抽除法、土耕法、開挖移除、固化、翻轉稀釋等為主；地下水污染整治之技術則以抽出處理、空氣注入、生物復育等為主。

#### 4.2 地下水長效性反應物質之開發

地下水現地整治效率的關鍵在於「反應機制與污染物之接觸效率」，不管是採用生物復育或化學性氧化還原，最終促成污染物分解或移除之發生仍是在正確的時間地點有污染物與反應物質接觸而產生反應。不論是生物添加、或是現地化學氧化常用之氧化劑，為實際應用於整治時，添加之反應物質或助劑，往往因自身活性過大、現地土壤其他天然成本之消耗或吸附、短時間濃度釋放過大等因素，而無法長時間維持效率，致使其灌注於地下後影響半徑偏小，除需經常或密集灌注外，發生地表空間限制時亦不利整治之操作。

在生物復育上常用的釋氧劑 (如油品之氧化降解)、釋氫劑 (如生物還原脫

## 104 我國土壤及地下水污染整治之未來發展方向

氮反應)均屬於加強生物復育技術中不可或缺的一環,近來國際上之商業產品趨勢多以強調其長效性,透過對於其溶解性或反應性之抑制而產生緩慢釋放(slow release)效果。直接之好處即為降低灌注成本與灌注頻率,並藉由自然或人為流場的控制而達到分散於涵蓋整治範圍之面狀效果,並能持續足夠之反應停留時間。

在化學氧化方面,過去現地化學氧化常用之氧化劑如過氧化氫、臭氧及過錳酸鹽等,其中過氧化氫及臭氧無法長時間存在於地表下,使其應用於整治時,無法有較佳之影響半徑。相較於過氧化氫及臭氧,過錳酸鹽雖可較長時間存在於地表下,惟其具有顏色,且應用時會產生二氧化錳沉澱,易造成地下環境孔隙阻塞之問題。過硫酸鹽為近年來發展之新型氧化劑,具有氧化性高、溶解度高,且可長時間存在於地表下等優點。在整治應用上,若能以高溶解性長效型氧化劑進行,不但可增大整治井之影響半徑,氧化劑長時間存在亦有助於處理因地質條件異質性所造成之潛在局部高污染區域。

由於目前國內實場尺度尚未見到應用案例,但可由其原理特性推測為極具潛力之地下水整治技術。但相對於整治材料奈米化後是否對地下環境之生態與水資源等特性產生影響,也是伴隨本項技術開發時值得關注的課題。

### 4.3 綠色及永續整治之推廣

#### 4.3.1 綠色整治之意義

綠色整治(green remediation)並不是一種新式的整治技術,而是國際上近年來逐漸形成在污染整治上的管理觀念。「綠色整治」概念最早由美國環保署提出,首份綠色整治技術入門指引(Technology Primer)於2008年4月發表:“Green remediation: Incorporating Sustainable Practices into Site Remediation of Contaminated Sites”(EPA 542-R-08-002, April 2008)。摘錄該文件首頁對綠色整治之文字描述:「The practice of “green remediation” uses these strategies to consider all environmental effects of remedy implementation for contaminated sites and incorporates options to maximize the net environmental benefit of cleanup actions.」

(考量場址整治所產生的各種環境效益,並納入各項可用選項,使整治產生的淨環境效益達到最大化),可作為綠色整治的定義。

既然「綠色整治」並非一種新的整治技術，何以值得重視？我們可由環境保護意識與環境管理行動之發展歷程觀察，環保行動係由早期因應工業文明之公害處理、污染防治一直演變到現在提倡的永續發展及永續未來。同樣地對於土壤及地下水之污染整治工程，亦開始著重於各項資源之配置與環境整體利益。綠色整治提倡依場址特徵、污染調查結果決定整治技術後，於後續規劃及執行細部工作時，能進一步納入節能、減碳考量，並致力於降低整治過程中之廢氣、廢水及廢棄物之產生，以避免爲了整治一處污染場址，反而將污染物擴散及引起其他環境介質的新污染，形成對整體環境利益的損害。

綠色整治實質上就是將環境保護及復育責任之執行面連結到綠色資本主義（natural capitalism）、生態足跡（ecological footprint），並將綠色生產之生命週期分析及系統導向等方式運用於整治工程規劃及設計。除此以外，綠色整治觀念亦可擴及到污染場址之管理策略。美國環保署提倡對於污染場址採取綠色整治應注意在下列 6 項核心因素採取最佳管理實務（best management practices, BMPs）包括：

- 1.能源需求(energy requirements)
- 2.廢氣排放(air emissions)
- 3.對水資源的衝擊(impacts on water)
- 4.對土地及生態系統的衝擊(impacts on land and ecosystems)
- 5.材料的消耗與廢棄物的產量(material consumption and waste generation)
- 6.長期的環境保護與復育( long-term stewardship actions)

根據美國環保署綠色整治入門手冊之內容及所介紹的綠色整治應用案例，以下分別概述此 6 個核心因素所考量之內容與考量最佳管理實務(BMPs)下之可能作法：

以能源需求而言，綠色整治著重在：提倡使用高效能設備並維持其最佳效率、定期評估能源效率最佳化策略、考慮設置再生能源設施等 3 方面。具體之內容包括：儘量於現地提升利用被動式能源（passive-energy）的比率，並增加整治之能源使用效率，如熱處理整治系統中利用廢熱回收、使用能源效率較高之設備、選擇低耗能的技術或工法，並加強對於高耗能設備之定期檢討與提昇能源利用效

## 106 我國土壤及地下水污染整治之未來發展方向

率，以減少對傳統外部輸送進來的能源(如輸電網 (grid electricity) 及燃料)的依賴。

以廢氣排放而言，綠色整治提倡應盡量減少使用消耗大量燃料之設備、使用潔淨的燃料與改善柴油引擎、減少毒性或優先管制空氣污染物(臭氧、粒狀物、一氧化碳、氮氧化物、硫氧化物及鉛)，具體的方式包括柴油設備使用低含硫量柴油、更有效率地使用重型設備並善加保養、作業流程應妥善規劃以減少設備運轉及怠轉的時間、儘量減少含污染物粉塵的排放等。

為降低對水資源的衝擊，綠色整治應朝向：減少原水 (fresh water) 使用及作業中回收水量最大化、處理廢水再利用(如澆灌)、使用原生植物植生以減少或免除澆灌、避免影響鄰近水體水質。具體之作法包括儘可能減少使用原水廢水回收再利用、設置雨水貯存池、控制地表逕流及懸浮物、整治方案降低對於地下水之品質劣化之影響(如使用現地化學處理之評估應更慎重)、對於地下水污染整治盡量避免無效率之抽水處理、工區綠美化應以種植當地適應性較佳之原生植物以減少灌溉管理之水資源消耗等。

為降低對土地及生態系統的衝擊，綠色整治提倡儘量減少使用具破壞性的現地整治技術、儘量減少對土壤或動植物生長環境的影響、採用具生態可復育性高的技術、降低工程施工噪音及其他環境物理之影響(例如夜間施工之照明光害可能對當地夜棲性敏感生物產生影響)等；更長遠之規劃考量必須更著重於整治後土地資源的永續利用。

以材料的消耗與廢棄物的產量而言，綠色整治著重於盡量使用低廢棄物產量的技術、回收及可資源化再利用之材料(包括如場址現地拆除後之營建廢棄物)、儘量減少使用未受污染的土壤或移除未受污染的土壤、對於地下水採樣可多使用被動式的採樣設備(如吸附管)以減少廢棄物(拋棄式水管、汲水器等)的產量。

以長期的環境保護與復育而言，綠色整治在整體環境系統上致力於減少二氧化碳、甲烷及其他溫室氣體的排放，長期之整治工作應採行可與未來土地再開發結合的資源與能源管理策略、採用利於長期整治及未來經濟發展的可再生能源系統、設計可重複使用的整治設備、鼓勵社區長期參與場址整治活動。甚至利用場址空間設置生產潔淨能源(clean energy)之裝置，於整治場址提高碳固定量(carbon

sink) 之措施 (如植生、種樹)。

#### 4.3.2 綠色整治之推動

美國環保署爲了推廣綠色整治的觀念，將聯邦政府及州政府相關政策及專案的資訊彙整於網頁 (<http://cluoin.org/greenremediation/index.cfm>)；此外美國環保署目前亦已草擬出一份如何要求應用綠色整治原則之契約範本。據此歸納出對於污染整治場址之應用綠色整治觀念的 4 個不同工作階段，分別是：

第一階段：拆解、移除

第二階段：整治及廢棄物清除處理

第三階段：土地再利用的設計及施工

第四階段：永續利用及長期環境保護及復育

舉例來說，第一階段：拆解、移除階段，可以推廣回收或再利用拆解的物質、儘可能於場址內再利用這些物質、考量土地未來用途及再利用已有的基礎建設、保存及再利用具歷史價值的建築物、使用潔淨的柴油、低含硫量的燃料及控制噪音、儘可能保持當地原生植被及土壤。第二階段：整治及廢棄物清除處理階段，可以推廣使用潔淨的燃料、使用可再生能源 (例如太陽能、風力及甲烷)，改進選定整治策略的能源使用效率、選用低耗資源及對空氣、水、週遭土地及大眾健康影響低的整治技術 (例如植物整治法)、選用可恢復土壤品質及生態系統的整治技術；若條件適合的話，透過土壤改良及種植植物達到吸存二氧化碳的目的。第三階段：土地再利用的設計及施工階段，可以推廣應用能源之星 (energy star)、節能環保設計標準 (LEED) 及綠色景觀美化 (green scapes) 的原則於既存及新建的建築物，以再利用既存的結構物及回收的工業材料的方式降低對環境的影響，利用天然的系統 (例如綠屋頂 (green roofs)、人工沼澤地及溼地) 管理雨水，運用智慧型成長 (smart growth) 的原則-更平衡的土地利用方式、適合步行的鄰里環境及增加開放空間、改善生態環境以促進生物多樣性並提供野生物棲息及遊戲的環境。第四階段：永續利用、長期環境保護及復育階段，可以推廣於製造及維修時與使用建築物及土地時，減少使用毒性物質、減少廢棄物的產生、適當的管理廢棄物、回收舊物質；如果廢棄物仍停留在場址內，持續以工程方式或

## 108 我國土壤及地下水污染整治之未來發展方向

行政管制措施管理該場址，利用節水系統減少水的用量並種植當地原生植被以減少灌溉水量，盡力提升能源使用的效率及再生能源的使用比例，採取適當措施以防止再次污染。

這 4 個階段與過去思維相較，顯然有很大之改變，傳統環工專業人員對於污染整治執行之參與多停留於第二階段，第三階段則以開發單位及土地所有人為主，甚至並沒有考量第四階段，面對國土集約利用較美國無過之而無不及之我國而言，值得吾人深思。

對於我國綠色整治之推動，依據前述 6 核心思維進行技術篩選，符合綠色整治之技術或方法包括：(1)使用被動式整治技術如生物復育、植生復育、人工濕地、被動式反應牆及監測性自然衰減法；(2)使用破壞性最小之現地技術，如加強現地生物復育、土壤氣體抽除處理等；(3)使用對土壤及棲地之擾動最小之技術，如現地植物整治復育技術等；及(4)使用廢棄物產生量最小之技術，如避免開挖及抽水之現地技術。

綠色整治更深層之意義在納入對污染土地整治永續利用及活化（sustainable site reuse or revitalization）之思考，最大優點為對未開發綠地（green space）之保護，減少新開發區衍生之基礎建設以達資源節約與溫室氣體排放減少，並可使國土利用率達到最佳化。

## 五、結語

環保署將過去多年來執行土污法所遭遇之問題及窒礙難行之處予以修正，對於污染責任之認定、土地污染預防、污染整治方式、造成污染之處分等均有許多之修正，除賦予民眾對於所擁有、使用的土地之保護更嚴格之義務外，未來場址之改善與再生得以更加之順暢，且將污染土壤離場管理制度化，提供污染場址整治一個快速之方式。綜觀土污法修正後整體架構與內容，其修正內容採用責任加重、罰責加嚴之原則，來促使大眾重視土地品質之維護，對污染場址之改善或整治，亦希望達到整治與土地再生之目標。

就我國而言，新穎技術之推動核心目前仍以政府與學界為主，對於商業市場之

參與程度相較仍低。探究其主因在於成本效益的問題，目前國內土壤及地下水整治工程市場上之每污染單位處理成本尚不及歐美日等環保先進國家之一半（此即為商業市場上業主可接受之污染整治成本），或由專業人力待遇約為其 25%~40%間即可窺見一二；而我國又為環境技術領域之後進者，技術開發亦顯著落後於前述諸國，顯示新穎技術完全自國外引進不易達成之原因與民間之接受度息息相關。目前唯有加強國內之產官學合作，並鼓勵民間專業從業機構強化其新技術研發，環保署近年已開始推動與國內學界合作開發於污染整治領域之新穎技術。

此外，單一的整治技術常無法應付現地複雜的狀況或滿足各個場址復育之需求。因此，土壤及地下水之整治方式若以結合性的整治列車技術進行，較易達污染物完全去除之目的。例如，結合化學氧化法及生物復育法整治有機物污染場址，往往較此二種方法單獨使用時佳，化學氧化法可克服生物復育法上的一些限制（如毒性抑制及持久性污染物），可將複雜之有機污染物氧化成較為簡單之物質後，降低毒性或增加溶解性，再由地下生物接續進行處理。目前之污染整治與發展以整合各類技術於場址不同之時間、空間予以系統化之執行，故如何充分運用既有的成熟調查與整治技術，並進一步研發及引進新技術之互相結合，同時能針對國內環境、國情予以落實為本土化具成本效益之技術，實為刻不容緩的工作。

綠色整治技術雖為一較新之整治概念，惟目前某些應用之整治技術已相當程度符合其條件。若能結合整治列車及綠色整治之概念，將現有技術進行整合成，發展出一綠色整治列車系統，不但可使整治技術應用上更具環境友善性，亦可加速場址之整治時程。

環保署在未來推動綠色整治工作上，必須解決下列問題：

#### 1. 法規標準與場址解列程序之彈性化

我國現行法制對於污染場址判定與整治解除之法規標準與程序尚缺乏彈性，因此在整治技術選擇上實以成本效益、降低污染物濃度為主，對環境之友善為末。因此在技術選擇上，某些快速有效但顯然並不符合綠色整治核心思維之技術，如污染土壤開挖移除後固化、土壤焚化或熱處理、土壤化學清洗（酸鹼及氧化劑）、現地化學氧化等傳統有效方案，仍然是優先考量之選項。現行對於整治效益之評量即便在環保單位亦未能考量整體效益，整治達成之思維仍停留在符合

## 110 我國土壤及地下水污染整治之未來發展方向

法規剛性標準為主，許多安定之重金屬污染物再進行開挖擾動或翻轉稀釋即為一例。

又因為整治成效驗證並不納入關於綠色整治之最佳管理實務 (BMPs) 思維與評鑑，故而對於整治決策中採取考量綠色整治之理由係以直接成本為主，並未納入綠色整治之其他多重效益層面或環境整體效益分析中。

此外，現行對於污染場址之後續開發仍停留於污染整治與開發利用分開辦理之情形，土壤及地下水污染整治法規中之「整治與開發併行辦理」、褐地開發機制終尙未能取得普遍共識。列管與解列程序之僵化造成綠色整治推動背景之欠缺。

### 2. 再生能源之開發受限現行國家能源政策

綠色整治的觀念亦可應用於規劃及執行細部的整治工作，尤其近年來燃料及電力的價格上漲，致使整治經費增加，另外節能減碳為目前環境保護的重點工作，低耗能及低碳排放成為規劃及執行細部整治工作的重要項目。此外，若配合生產清潔能源，另可取代傳統石化能源以減少溫室氣體的排放。由於許多褐地、超級基金場址、RCRA 場址及荒地可以考慮作為生產清潔能源的場所，以提高原本缺乏利用價值土地的經濟價值。因此，美國環保署與國家再生能源實驗室曾分析全國廢棄的礦場、褐地、超級基金場址及 RCRA 場址的狀況後，製作出具有風力發電太陽能發電、生質能發電潛力區域的地圖。其中有 3,235 個場址總面積達 1,360 萬英畝的土地位於郊區，320 萬英畝的土地為廢棄的礦場，相當具有潛力。美國環保署對其他方案之研究，如評估利用添加有機質進行土壤改良及種植植物的方式達到固定二氧化碳的效益。

對於我國綠色整治納入再生能源之開發，可能受限於現行國家能源政策之不確定，世界各國對於再生能源技術發展之初期，皆予以適當之補貼、或保障收購電價等方式以提高裝置者之意願。但我國目前因欠缺對於能源開發之整體規劃策略，包括風力發電、太陽能發電之收購費用均使有意願投資者望而卻步，或觀望、或夭折，污染場址究竟以褐地身份提供廉宜之土地成本參與，或是以昂貴之再生能源取代傳統之電力網路，著實值得深思。

## 參考文獻

- 1.土壤污染評估調查及檢測資料審查收費標準，行政院環境保護署，民國 100 年 5 月。
- 2.土壤污染評估調查人員管理辦法，行政院環境保護署，民國 100 年 5 月。
- 3.土壤污染評估調查及檢測作業管理辦法，行政院環境保護署，民國 100 年 10 月。
- 4.行政院環境保護署土壤及地下水污染整治基金管理會，99-100 年度土壤及地下水污染整治費申報、審理、稽核等相關作業計畫期末報告，行政院環境保護署，2011。
- 5.陳元武，開發本土戴奧辛生物快速篩選法的重要性，生物化學酵素冷光基因表現法技術研討會，2010。
- 6.Zemo, D., Bruya, J., and Graf, T., *GW. Monitor.& Remediation* 14, “The application of petroleum hydrocarbon fingerprint characterization in site investigation and remediation.”, p.147-156, 1995.
- 7.中華民國環境工程學會編印，土壤與地下水污染整治：原理與應用，中華民國環境工程學會，p.171-213，2008。
- 8.經濟部工業局編印，土壤及地下水污染整治技術手冊～評估調查及監測，經濟部，p.5-1～5-68，2004。
- 9.環境保護署環境檢驗所，土壤採樣方法(NIEA S102.61B)，環保署，2005。

