

我國土壤及地下水整治技術發展願景

薛欣達 國立成功大學永續環境實驗所助理研究員

林威州、詹益杰 中興工程顧問股份有限公司技術經理、工程師

潘毅峰、吳怡儒 國立成功大學環境工程學系博士後研究員

龔東慶 國立成功大學永續環境實驗所副研究員

黃良銘、吳哲宏 國立成功大學環境工程學系教授、副教授

何建仁、吳雅婷 行政院環保署土污基管會組長、環境技術師

張祖恩 國立成功大學環境工程學系特聘教授

高志明 國立中山大學環境工程研究所特聘教授暨科技部環境工程學門召集人

林財富* 國立成功大學環境工程學系特聘教授暨土水協會理事長

摘 要

本文探討我國土壤及地下水汙染整治技術之發展，由國際趨勢、國內現況及社會意向等三大面向，收集資料及解析，並提出整治技術發展方向。技術解析結果顯示，污染物目前研究重點及方向，依序為含氯有機物及重金屬；整治技術及工法，發展重點包括如物化與生物技術、或搭配即時偵測技術之技術整合，環境技術驗證確認其有效性，以及考量技術之永續性趨勢；在發展藥劑方向來看，研究重點為針對新興污染物之新型氧化劑、界面活性劑及奈米零價鐵，並考量其再利用性、宿命及環境友善性。

為使完備技術發展及應用性，加強技術驗證機制及程序安全性，發展適用各種處理環境或市場特性之資料庫，亦是技術發展重要之工作方向。

關鍵字：土壤及地下水污染物、整治技術、環境技術驗證、技術及人才資料庫

一、前言

在 2000 年土壤及地下水汙染整治法通過後，我國土壤地下水(簡稱土水)汙染整治歷經 15 年的測試與發展，由承接國際技術、逐漸加入本土環境特性與經驗，進行技術改良與研發，在土水整治技術之開發與應用已經累積相當



經驗與基礎。然而，面臨國際技術之競爭，發展創新與實用性的技術，是我國土水整治界開展國內外市場重要的必備條件。由科技接受模式⁽¹⁾分別就技術提供者及使用者角度去分析(圖 1):「我們應該發展怎樣的土水整治技術?」。如圖 1(a)所示，整治業者的技術能力(口碑)會直接影響業主使用某項整治技術的意願，或經由認知有用性及易用性，造成間接的影響。而技術的時間、安全及成本風險也是重要的間接影響因子。反過來說(圖 1(b))，整治業者發展或使用整治技術意願，會受到技術整體市場價值來決定。因此，上述的問題可轉化為「是什麼決定了整體技術市場價值?」。本文試著由三個面向，包括「國際趨勢」、「國內現況」及「社會意向」去分析技術市場價值。

本文章規劃以歐盟、澳洲及美國近期重要的土水計畫報告及國際期刊重點趨勢資料來說明「國際趨勢」；以國內土水相關的科研計畫及環境技術驗證 (Environmental Technologies Verification, ETV)的發展現況來說明「國內現況」，最後再以產學研意見彙整說明「社會意向」。文中擬以現有資訊進行概括性的範圍界定，做為進一步研究或研擬相關走向之參考。

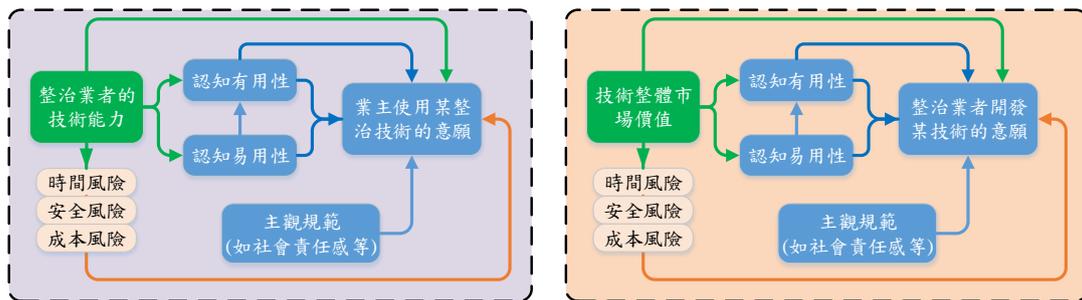


圖 1 科技接受模式⁽¹⁾(a)業主使用某整治技術意願；(b)整治業者開發某技術意願

二、研究架構

如圖 2 所示，國際趨勢搜集國外科研究計畫包括歐盟 FP7-ENVIRONMNET 計畫 UPSOIL (Sustainable Soil Upgrading by Developing Cost effective, Biogeochemical Remediation Approaches) (2015 年 04 出版)⁽²⁾ 及 FP7-NMP 計畫 NANOREM (Taking Nanotechnological Remediation Processes from Lab Scale to End User Applications for the Restoration of a Clean Environment) (2013-02-01~2017-01-31)⁽³⁾、澳洲 CRC-CARE (Cooperative Research Centre for Contamination Assessment and Remediation of the

Environment) “2013-2014 年度報告”⁽⁴⁾、美國環保署 Brownfields Road Map to Understanding Options for Site Investigation and Cleanup Fifth Edition (2012 年出版)⁽⁵⁾。另外，近五年國際期刊研究趨勢則參考 2011-2015 年自 Elsevier 出版社的 Engineering Village 資料庫。國內現況係蒐集國內括環保署(EPA)及科技部(MOST)近五年來之執行計畫進行分析及 ETV 發展現況進行重點性說明。另外，社會意向係參考國內 2014 年產學研近年來相關會議結論進行彙整分析。為說明來源資料之特性，表 1 就上述來源資料之可信賴度、完整度、時間、空間及技術有效性進行分數之評比，分數愈小，表示愈可信賴及愈有效。

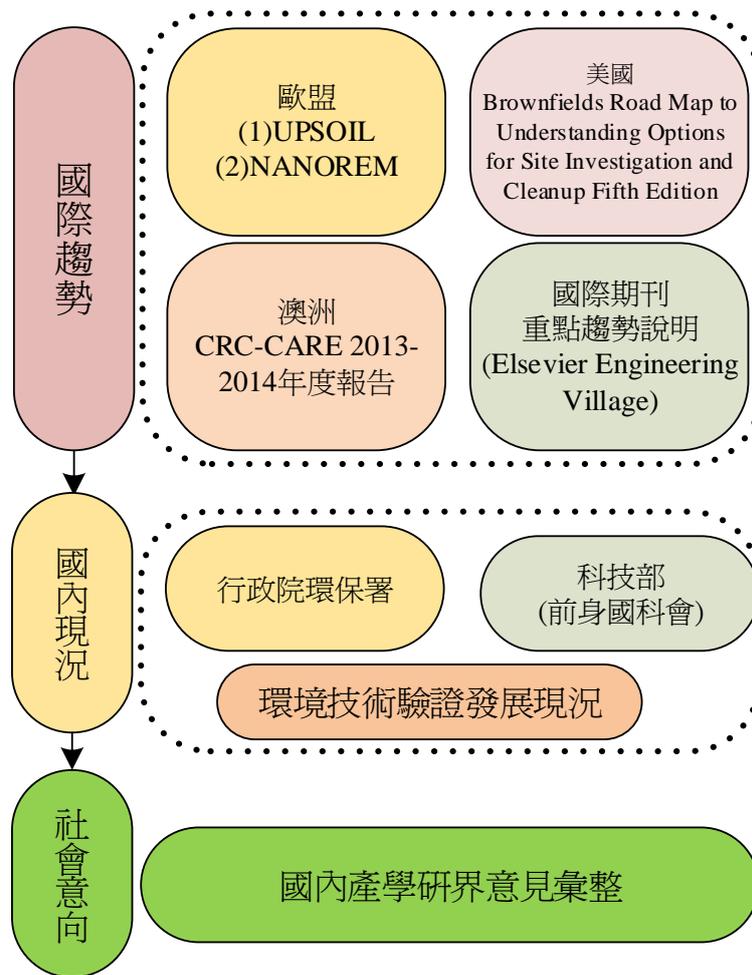


圖 2 本文之資料結構及研究架構



表 1 來源分析資料品質分數表

項目	國際趨勢				國內現況			社會意向	
	歐盟	澳洲	美國	期刊	EPA	MOST	ETV	產業	學界
可信賴度 ^a	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)
完整度 ^b	(2)	(1)	(1)	(3)	(1)	(1)	(1)	(2)	(2)
時間有效性 ^c	(1)	(1)	(2)	(2)	(3)	(3)	(1)	(1)	(1)
空間有效性 ^d	(1)	(1)	(1)	(2)	(1)	(1)	(2)	(1)	(1)
技術有效性 ^e	(2)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(2)	(2)	(2)

備註：
^a完全實測(1)；部分假設下驗證(2)；部分假設下未驗證(3)；有經驗評估(4)；無經驗評估(5)
^b樣本數及時間充足(1)；樣本數較少但時間充足(2)；樣本數充足但時間效率(3)；樣本數及時間不足(4)；樣本數及時間不足且未完成(5)
^c三年內(1)；六年內(2)；十年內(3)；十五年內(4)；超過十五年或不可考(5)
^d目標區之研究(1)；包含目標區之大區域平均(2)；相似區域之資料(3)；部分相似(4)；不同區域或不可考(5)
^e可應用之土水技術(1)；研發中之土水技術(2)；研發中可能應用於土水技術(3)；預期可類比之環境技術(4)；不同之環境技術(5)

三、國際趨勢

(一) 歐盟重要大型計劃

歐盟目前估計約有 25 萬處土地污染場址需進行整治，其型態主要為有機污染物如含氯碳氫化合物(chlorinated aliphatic hydrocarbons, CAHs)及總石油碳氫化合物(total petroleum hydrocarbons, TPH)，其次是經常與採礦及金屬加工冶煉相關的重金屬污染物。Resource Efficient Europe 建議遲至 2050 年，歐盟不應該有土地被封存。

1. UPSOIL

USOIL 係針對有機污染場址以化學及生物現址整治技術開發為主，同時考量重金屬的移動性及生物的可利用性，其問題定位於目前生化整治技術低成本效益及無法回復土壤達永續利用。其重點四個展望面向包括「智慧整合整治技術：結合現地生物化學整治技術」、「系統驅動注入技術：整合污染物即時偵測及現地注入技術」、「選擇性藥劑技術：與有機污染物完全反應，但不影響土壤之新型處理藥劑」及「回饋驅動技術：整合即時偵測及模擬，回饋於所有整治技術之調控」。

2. NANOREM

該計畫希望透過嚴謹地研究流程，確保奈米材料使用於污染場址整治的安全性，這個 1400 萬歐元的四年跨國大型計劃目標計有：

- (1) 鑑定出最合適的奈米整治技術，並發展較低成本及可商業化之生產

技術，以便應用於大規模污染場址；

(2) 決定地表下奈米顆粒移動和遷移的潛能及可能造成的危害，並發展一個廣用型的工具箱(tool box)，來進行地表下奈米顆粒之現地觀測；

(3) 強化利害關係人間之對話，來確保及分享符合最終消費者和監管者的需求之計畫研究與驗證成果；

(4) 提供具代表性規模之現地場址應用實例，以驗證整治成本與成果、及奈米顆粒宿命與傳輸現象。

(二)澳洲 CRC-CARE “2013-2014 年度報告”

CRC CARE 係依澳洲政府 Cooperative Research Centre Programme 支持設置。該組織重點發展方向包括有，最佳實行政策、精進測量與調查、風險評估不確定性最小化及潔淨技術等四大層面，依 2013-2014 年度報告⁽³⁾中新技術面之發展成果包括：

1. 技術類：(1) 新型地下水柴油污染生物降解技術，並整合生物感測器進行監測；(2) 高濃度石油碳氫化合物污染緻密黏土泥砂底泥的新型綠色整治方法；(3) 處理廢水中含三丁錫(tributyltin)的技術
2. 材料類：(1) 可熱循環再生之氨吸附劑；(2) 去除致癌性 PAHs 及 benzo(a)pyrene (BaP)毒性的酵素；(3)可去除含油的碳氫化合物之“綠色奈米顆粒”；(4) 可回收碳氫化合物之認證材料(National Measurement Institute, NMI)

(三)美國環保署 Brownfields Road Map to Understanding Options for Site Investigation and Cleanup Fifth Edition

土壤及地下水除污染物具多樣性外，污染場址的地質、現地利用狀況、土壤地下水傳輸等差異性，都增加整治的複雜度及決策的困難度。美國環保署彙整其調查與整治經驗，繪製褐地規劃藍圖(Brownfields Road Map)，著重於提供決策訂定的方針，並發展模式評估場址特性、污染物分布，以利選擇合適之整治工法。此外，在相關網站中建立綜合資料庫，使用者可依不同污染物種類於各類場址類型中搜尋不同調查技術及整治技術的應用情況(圖 3)。

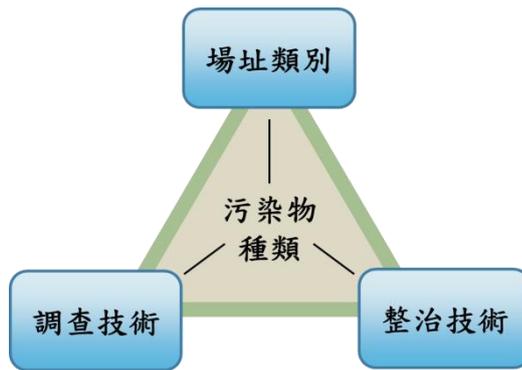


圖 3 褐地規劃藍圖污染物與對應技術資料庫架構

(四)國際期刊研究趨勢

本研究收集 2011-2015 年的國際期刊資料，顯示期刊文章中常見的土壤及地下水污染處理技術，與“bio”關鍵字相關約佔 37%。考量現地處理之合宜性，較少進行單一施作，多與包括氧化劑、界面活性劑、零價鐵、電動力、滲透性反應牆及汽提等多種物化方法結合運用。其中與生物整治關聯性又以界面活性劑較高。進一步了解各項技術所對應處理之土水污染物，主要以油品及含氯等兩項有機化合物之研究頻率較高(~60%)。而以有機污染物作為主軸，化學氧化法的相關實廠研究與應用一步步朝向高效能、具持久性、施作便利性及環境友善性。(6-9)

四、國內現況

(一)科技部及環保署土水相關研究計畫

圖 4(a)為科技部計畫近年來所選用的目標污染物類別，主要包括有機物(78%)及重金屬(22%)，其中，有機物又以含氯有機物最具代表性(~59%)。整治技術以物化(81%)及生物處理(19%)為主。圖 4(b)為近年環保署的學研計畫比例，其中重金屬與有機物的比例約為 1:4，與科技部計畫相似。而有機物的處理技術(如圖 5)，以物化(47%)與生物(42%)方法為主且比例相近，而其餘 11%係物化與生物整合技術。

另外，自 2012 年起，環保署計畫中，環境法醫等分析篩檢技術等研究有逐年增加的趨勢，該類別技術可有效精進污染場址相關參數的確認與查驗技術，提升調查成果與整治技術施用可行性。

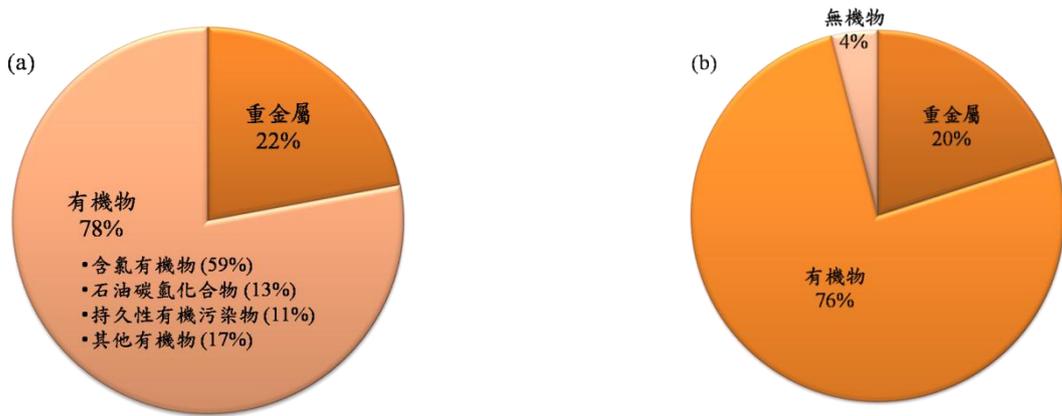


圖 4 (a)科技部；(b)環保署於 2005-2013 年土水學研計畫中污染物類別

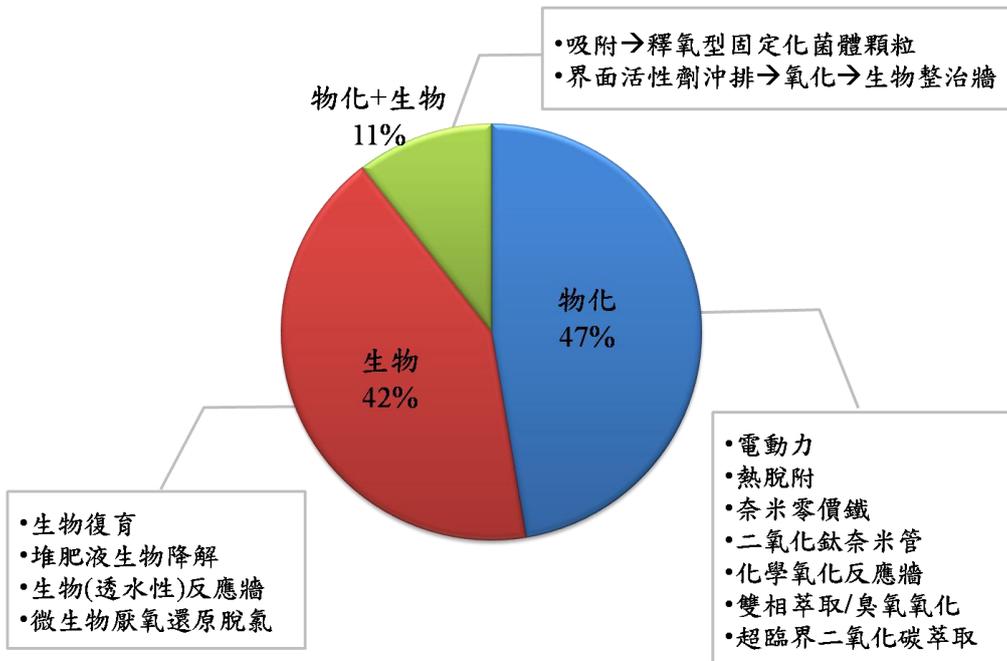


圖 5 環保署於 2005-2013 年土水學研計畫中有機物處理技術



(二) ETV 發展現況

國外部份國家，如歐盟、美國、加拿大及中國大陸等國，為確認相關環保設備及技術成效，已建立一套完整之 ETV，除可透過技術廠商提供之書面資料進行審查外，亦可直接辦理實場測試，直接確認技術成效。

環保署於 2013 至 2014 年推動「土壤及地下水污染整治技術研發中心及技術驗證管理計畫」⁽¹⁰⁾，建議未來在推動 ETV 時，亦可建立相關採購辦法以優先採購受驗證之環境技術。該計畫建議國內設立整治技術中心來執行 ETV 相關工作，並可參考歐盟之驗證方式，將書面驗證程序與實場/模場驗證程序同時並存。廠商在申請技術驗證時可選擇是否要進行實場驗證程序(如表 3 所示)或只完成書面驗證即可。而該二種選擇其驗證時程、成本及效力亦有所不同。

表 3 整治技術分級(書面/實場)驗證方式建議

驗證程序	驗證流程	驗證成果	特色
書面驗證	資格審查 → 數據資料 → 最終數據 → 發布驗證	1. 驗證聲明 2. 整治技術普級標章	1. 時程較短 2. 成本較低 3. 標章效力較弱
書面+實場驗證	資格審查 → 數據 → 實場測試 → 最終 → 發布	1. 驗證聲明 2. 整治技術特級標章	1. 時程較長 2. 成本較高 3. 標章效力較強

五、社會意向

無論國際趨勢為何，政策走向仍需不斷的檢討。為了解社會團體，對於整治技術發展之方向，本文彙整 2014 年土壤及地下水相關⁽¹⁰⁾產業座談會、學術咖啡論壇、業界顧問群會議及專家諮詢會議重點，如表 4 所示。

表 4 2014 年土水相關會議相關重點說明

項目		重點概述
業界 (35 家 71 人 次)	策略	(一)定位已有核心技術且立即或提昇後可適用於大陸市場；(二)定位進入東南亞土水市場需求之技術 (三)持續擴大商業化及累積臺灣的土水人才；(四)建置本土化有特色之技術資料庫並分析後定位發展重點。
	技術	(一)引進歐、美新技術後轉型為本土化核心技術；(二)技術整合包裝(整體技術)輸出；(三)小而美的技術發展，如材料、配件、地工技術及鑑定技術等；(四)複雜場址如含氫地下水或複合污染物之調查整治管理；(五)大陸土壤重金屬處理技術。
學界 (81 位)	策略	(一)調查與整治技術同等重要發展；(二)強化經理人角色；(三)應往風險角度及綠色永續整治的發展方向；(四)對開發中國家輸出上游的監測技術；(五)強化產學合作及互信機制；(六)強化外交及技術交流。
	技術	(一)傳統酸洗法的取代技術；(二)具成本效益之綠色整治；(三)具實場測試之核心技術；(四) DNALP 整治技術開發；(五)具即時偵測之工法驗證技術；(六)重金屬污染土壤管理再利用策略。

七、結論與建議

由國際趨勢、國內現況及社會意向來看，國內外社群在研究污染物、整治技術與工法及發展之藥劑所注重方向，並無太大的差異性。含氫有機物及重金屬為國內外研究污染物重點；在整治技術與工法上，整合性技術，例如物化與生物技術、或是搭配即時偵測技術，為發展重點，除配合環境技術驗證確認其有效性外，並應考量環境永續性；第三個研發重點包括，針對新興污染物之新型氧化劑、界面活性劑、奈米零價鐵等化學藥劑與材料，及生物藥劑及整治方法之開發，發展時並須考量材料再利用性、方法之整合性及環境友善及永續性。除前述三個研究重點方向外，加強技術驗證機制及程序安全性，並發展與建置適用各種處理環境或市場特性之技術與人才資料庫，亦是未來發展的重要工作。



參考文獻

1. Davis, F.D., Perceived Usefulness, Perceived Ease of Use, and User Acceptance of Information Technology, *MIS Quarterly*, 13(3), 319-340 (1989).
2. UPSOIL (Sustainable Soil Upgrading by Developing Cost-effective, Biogeochemical Remediation Approaches) Final Report Summary, European Commission, 2015.
3. NANOREM (Taking Nanotechnological Remediation Processes from Lab Scale to End User Applications for the Restoration of a Clean Environment) (2013-02-01~2017-01-31) Final Report Summary, European Commission, 2015.
4. CRC CARE Annual Report 2013/2014, Department of Industry, Australian Government, 2015.
5. Brownfields Road Map to Understanding Options for Site Investigation and Cleanup Fifth Edition, USEPA, 2012
6. Fang, S.C.; Lo, S.L., Persulfate oxidation activated by peroxide with and without iron for remediation of soil contaminated by heavy fuel oil: Laboratory and pilot-scale demonstrations, *Applied Mechanics and Materials*, 121-126, 2546-2556 (2012).
7. de Weert, J.P.A., Keijzer, T.J.S., and van Gaans, P.F.M., Lowering temperature to increase chemical oxidation efficiency: The effect of temperature on permanganate oxidation rates of five types of well defined organic matter, two natural soils, and three pure phase products, *Chemosphere*, 117, 94-103 (2014).
8. Rauscher, L., Sakulthaew, C., and Comfort, S., Using slow-release permanganate candles to remediate PAH-contaminated water, *Journal of Hazardous Materials*, 241-242, 441-449 (2012).
9. Stoin, U., Mojon, A., and Sasson, Y., Fast and complete in situ mineralization of contaminated soils using a novel method for superoxide generation, *RSC Advances*, 5, 6571-6577 (2015).
10. 「土壤及地下水污染整治技術研發中心及技術驗證管理計畫」結案報告，環保署委託台灣土壤及地下水環境保護協會，2014。

參考網址：

1. 歐盟 NanoRem：<http://www.nanorem.eu/>
2. 歐盟 upsoil：<http://www.upsoil.eu/>
3. 澳洲 CRCCARE：<http://www.crccare.com/>
4. 美國環保署 Brownfields Road Map：<http://www.brownfieldstsc.org/roadmap/>
5. 財團法人國家實驗研究院科技政策研究與資訊中心：<http://www.stpi.narl.org.tw/>