



地下水 污染整治 與 健康風險評估

王聖璋／淡江大學水資源及環境工程學系 助理教授

高雨瑄／國家實驗研究院科技政策研究與資訊中心 助理研究員

梁菁萍／輔英科技大學護理系 教授

陳瑞昇／國立中央大學應用地質研究所 特聘教授

地下水為臺灣社會與經濟發展重要的水資源，水質優劣程度將影響用水安全與人體健康，因此地下水污染預防與整治為重要的水資源保護工作，本文綜整臺灣現行的地下水水質監測與管理制度、盤點地下水污染現況與主要的整治方法，並彙整地下水污染傳輸與健康風險等評估方法，以杜絕地下水污染持續發生，未來地下水水質保護工作需因應氣候變遷造成的水資源調配問題，以擬定地下水資源管理策略，並研擬地下水水質與水量雙管齊下的管理政策，以利地下水資源永續利用。

前言

地下水資源為全球重要的水資源，主要做為民生、農漁畜牧、工業等用水標的之水源，因此地下水水量穩定與水質安全是水資源永續利用之重要關鍵因素，然而地下水水質經常受人為活動排放廢污水，並藉由自然水文循環之降雨與入滲等過程而造成水質改變、甚至劣化的情形（圖 1），當地下水污染物質濃度超過特定標準數值時，則視為地下水污染且需進行適當的整治與改善，以避免污染藉由抽用途徑造成可能的人體健康危害，因此地下水污染調查評估與整治調適等工作，已屬國際間高度關注之水資源永續發展議題，以臺灣而言，每年約有 32% 總用水量需仰賴地下水，因此人為活動與地下水水質之交互關係更受重視，地下水水質保護工作行之有年，並已累積豐碩成果，本文主要綜整臺灣地下水污染之監測與管理制度、污染現況、整治方法、污染傳輸模式、健康風險評估等重點，以利未來產官學研各界之工作推展。

地下水污染監測與管理制度

臺灣近二十年來已藉由地下水水文地質、水位、水質等地下水環境資料之監測蒐集，並提供各類型的

地下水環境資訊平臺，達到地下水水資源永續經營之目標。由於地下水業務面向廣泛，各部會依法定職掌進行相關工作執行，其中掌管地下水污染業務單位為行政院環境保護署（以下簡稱環保署）土壤及地下水污染整治基金管理會（以下簡稱土污基金會），為掌握臺灣地下水水質背景狀況，自民國 84 年起即針對各地下水分區設置區域性監測井，並辦理定期維護及採樣檢測工作，提供全國地下水污染潛勢與水質管理資訊，歷年水質監測資料亦公開於「環境水質監測年報」；此外，為釐清各類型地下水污染場址及高污染潛勢地區地下水污染狀況，自民國 90 年起陸續針對廢棄與運作中工廠、編定工業區、加油站與地上／地下儲槽系統、公告事業用地管理等設置場置性監測井，並依需求辦理污染潛勢調查、查證與改善工作，歷年污染場址資料亦公開於「土壤及地下水污染整治網」。

由於早期臺灣民眾對於土壤及地下水污染認知不足，因此在 70、80 年代陸續出現土壤及地下水污染事件，例如各縣市陸續發現鎘米問題、美國無線電公司桃園廠（RCA）地下水含氯污染、及臺南中石化（前臺鹼公司）戴奧辛污染等，為加強預防及整治土壤及地下水污染，故政府以確保土地及地下水資源永續利

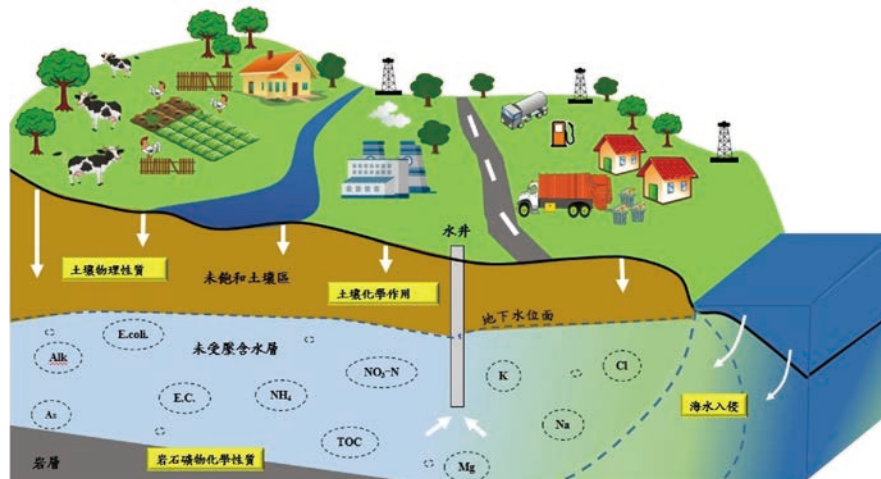


圖 1 地下水水質受自然過程與人為活動影響示意

用，改善生活環境，維護國民健康為目標，於民國 89 年公布施行「土壤及地下水污染整治法」（以下簡稱土污法），並於民國 92、99 年歷經二次修正歷程，目前土污法共分八章 57 條，內容對於土壤及地下水之防治措施、調查評估措施、管制措施、整治復育措施、財物及責任、罰則及附則等均有詳細規定。此外，為落實土污法規範事項，故環保署亦依據訂定相對應之子法及行政規則等，除可對民眾產生實質法律效果，亦能使政府單位施政有所依據，並協助環保單位行使裁量權，目前土污法相關子法與行政規則等共計包括 20 項法規命令、5 項相關公告及 39 項行政規則，而為妥善管理及運用土壤及地下水污染整治基金（以下簡稱土污基金），並推動土壤及地下水污染整治與預防等相關工作，於民國 90 年成立「土壤及地下水污染整治基金管理委員會」，目前地下水污染整治工作施政重點包括 (1) 健全完備法規制度，強化行政管理體系、(2) 檢討基金收支情形，提升經費執行成效、(3) 擴大辦理調查工作，及早發現潛在污染、(4) 結合各級行政團隊，共同推動整治復育、(5) 提昇本土專業能力，擴大民間共同參與。

綜觀臺灣地下水污染監測與管理工作已歷經 20 餘年，重點工作包括監測井網規劃、定期監測制度、高污染潛勢調查、監測井生命週期管理、污染管制標準檢討、新興污染物調查、監測資料分析與應用等，各項工作成果概述如下。

監測井網規劃

為掌握臺灣地下水背景水質狀況，前臺灣省環保

處於民國 82 年籌辦「台灣省地下水水質監測井網整體規劃」工作，自民國 84 年至 91 年陸續設置 431 口背景水質監測井（即區域性監測井），考量部分縣市尚未規劃完整背景水質監測井網，故於民國 102 年至 107 年辦理區域性監測井補充設置工作，目前已設置 455 口區域性背景水質監測井。背景監測井網規劃主要採平均每 50 平方公里設置一口區域性監測井為原則，規劃方法係利用美國環保署於 1985 年發展之 DRASTIC 系統，衡量 7 項水文地質參數（地下水位深度、淨補注量、含水層介質、土壤質地、地形坡度、未飽和含水層介質、水力傳導係數），並同時考量國內 4 項人為社會經濟活動參數（土地利用、人口密度、可疑地下水污染源、地下水抽水量），評估各地區污染潛勢指標，並規劃區域性監測井網數量及位置，監測井深度則以最易受地表污染影響之第一含水層為原則。

定期監測制度

區域性監測井自民國 91 年起即辦理定期地下水水質檢測工作，監測項目隨地下水污染監測／管制標準研修而陸續新增，目前監測項目包含一般水質項目、重金屬、揮發性有機物及其他項目等共計 50 項，而為有效運用監測經費，自民國 99 年起依據合格率、趨勢分析、監測井代表性等因素，逐年評估並逐口調整監測頻率，至今已累積超過 40 萬筆地下水水質檢測數據，每年度監測成果公開發於「環境水質監測年報」，歷年相關數據亦公開發於「全國環境水質監測資訊網」，供民眾查詢及下載使用。由歷年水質監測結果統計，顯示全國地下水符合監測標準比率（意即合格率）平均皆達 90%

以上，其中以氨氮、鐵、錳、及其他鹽化水質項目符合監測標準比率較低，故環保署已針對經常性超標項目探討其發生成因，並逐年繪製污染空間分布潛勢釐清歷年變化趨勢，相關研究成果及制度訂定彙整如表 1 所示。

高污染潛勢調查

有鑑於常見的地下水污染途徑為高污染潛勢事業之有害物質或廢水排放、儲槽或管線洩漏等，因此針對各類型地下水污染場址及高污染潛勢區，目前共計 1,900 餘口持續監測之污染調查監測井（即場置性監測井），以做為地下水污染調查與查證之用。由於污染源頭管理為地下水污染預防之重要工作，以工業區為例，依土污法第 6 條第 3 項及「目的事業主管機關檢測土壤及地下水備查作業辦法」規定，特定工業區、

科技園區、加工出口區等應定期檢測土壤及地下水品質狀況，並辦理申報備查程序，目前全國 162 處工業區申報備查率已達 100%。此外，為加速推動工業區污染場址調查改善及完備環境品質監測備查作業，彙整工業區監測現況、申報備查案件審核情形及污染場址公告列管狀況進行條件式分級，分別以紅燈、橘燈、黃燈及綠燈表示工業區土壤及地下水品質監測管理現況，相關成果亦公開於「工業區預警燈號管理系統」，目前共計有 5 處紅燈、16 處橘燈、21 處黃燈及 120 處綠燈，各項燈號分級方式及管理目標如表 2 所示。

監測井生命週期管理

由於監測井設置所費不貲且程序嚴謹，為提升既有地下水水質監測井之功能性與代表性，環保署已陸

表 1 地下水不合格率較高之水質項目及管理制度

水質項目	特性	研究成果及管理制度
氮	<ul style="list-style-type: none"> ● 情況普遍且來源複雜，對人體尚無立即性危害 ● 屬低毒性、影響適飲性物質 	<ul style="list-style-type: none"> ● 應用穩定同位素研析成因，並跨單位研擬氮源頭管理策略 ● 內政部營建署持續推動污水下水道建設計畫，提升公共污水下水道普及率 ● 水保處針對工業廢水加嚴事業廢水排放標準及劃定總量管制區 ● 農委會加強宣導合理化施肥管理
砷、鐵、錳	<ul style="list-style-type: none"> ● 砷具致癌性；鐵、錳則屬影響適飲性物質 ● 屬天然背景物質 	<ul style="list-style-type: none"> ● 鐵、錳僅屬地下水水質特性，因此與列管地下水污染控制或整治較無關 ● 建立地下水砷污染來源判定流程 ● 劃定臺灣地下水砷濃度潛勢範圍
氯鹽、硫酸鹽、總硬度、總溶解固體	<ul style="list-style-type: none"> ● 為海水組成成分且集中沿海地區 ● 屬影響適飲性物質 	<ul style="list-style-type: none"> ● 水質項目超過監測標準推測成為海水入侵及感潮河段影響所致 ● 劃定地下水鹽化潛勢範圍 ● 建立地下水鹽化預警監測井網

表 2 工業區土壤及地下水品質監測分級燈號及管理目標

分級燈號	燈號分級方式	管理目標
紅燈	區內有污染情形且已擴散至區外	<ul style="list-style-type: none"> ● 風險評估與管理 ● 阻斷污染源 ● 加強周界預警 ● 避免污染持續擴大
橘燈	限於區內有污染情形	<ul style="list-style-type: none"> ● 完備周界預警 ● 風險評估與管理 ● 追查污染來源降低污染程度
黃燈	區內污染均已公告列管及執行改善工作	● 加速污染改善作業
	歷年檢測均未超過管制標準惟尚未完備備查檢測申報規定	● 完備污染檢測機制及申報備查事宜
綠燈	已符合備查辦法檢測申報規定（檢測資料獲主管機關備查確認）且檢測結果均未超過管制標準；屬低污染產業已認定免檢測	<ul style="list-style-type: none"> ● 潛在污染源管理 ● 背景濃度管理
-	工業區僅編訂尚未開發	<ul style="list-style-type: none"> ● 園區開發動態追蹤 ● 提早監測掌握環境背景

資料來源：行政院環境保護署工業區預警燈號管理系統 (<https://sgwref.epa.gov.tw/sgcm/dispPageBox/SecmHp.aspx?ddsPageID=SGCMHP>)

續針對監測井設置、維護、廢井等生命週期制度，發布相對應之原則、手冊及規範等，供各級環保機關遵循。在監測井設置前應提出「監測井設置規劃報告」，妥善評估井址周遭環境及水文地質狀況，評估選用合適工法及材料等，而進行監測井設置則應符合「地下水水質監測井設置作業原則」規定內容辦理。為使監測井得以持續發揮監測功效，並延長使用年限，環保單位應依「地下水水質監測井維護管理作業參考手冊」辦理外部巡查維護、內部功能檢查、及內部功能維護等工作，另針對具井況不良情形，致採樣監測功能喪失之監測井，或受天然或人為外力因素破壞或設置不當，造成交互污染等可立即判定需廢井之情形，則依「地下水水質監測井廢井作業規範」辦理，避免監測井成為地下水污染之通道。

污染管制標準檢討

為防止地下水污染惡化，所訂定之地下水污染管制標準，自民國 90 年發布施行後，考量國際趨勢及國內產業發展，已於地下水中發現部分新興產業產生之有害物質，由於具有潛在健康風險之虞，已於民國 98 年、100 年及 102 年增訂監測／管制項目與標準，共完成三次條文的修正。目前訂定管制項目之類別包括單環芳香族碳氫化合物（4 項）、多環芳香族碳氫化合物（1 項）、氯化碳氫化合物（21 項）、農藥（8 項）、重金屬（10 項）、一般項目（3 項）及其他污染物（3 項）。而以地下水污染預防目的，所訂定之地下水污染監測標準，其監測項目除包含管制項目外，亦包含背景與指標水質項目（9 項），且監測值為管制值之二分之一；此外，由於地下水存在自然環境背景物質，依據地下水污染監測／管制標準第 2 條規定，環保署已於 102 年公告附件「地下水背景砷濃度潛勢範圍及來源判定流程」，若位於潛勢範圍之地下水，其含砷地下水之使用方式須依各類地下水用水標的，各事業單位主管機關應配合相關水質標準或用水需求，研擬合宜之水質淨化處理方式與地下水抽取深度、用水量等。

新興污染物調查

由於地下水通常為環境污染物質最終受體，又為國內主要的用水來源之一，因此在訂定地下水污染管制標準之項目與限值需考量國內其他環境管制標準，例如放流水、飲用水、土壤等相關標準列管項目及標準值，考量毒性及關注化學物質、環境用藥、農藥管

理等源頭管制方式。目前針對尚未列管為地下水污染監測標準項目，如持久性污染物、環境賀爾蒙、塑化劑等，環保署自 100 年起分階段完成我國六大產業（占全國產值約 57%）地下水品質調查，同時蒐集國內外資料，建立「地下水優先關切物質清單（Candidate Contamination List, CCL）」，並陸續調查新興產業與關切物質的基線資料。目前地下水優先關切物質清單共計 163 項，考量國內產業變化情形、原物料使用狀況、環境傳輸流布機制、毒理化特性等因子，逐年辦理國內地下水基線資料調查，以做為未來地下水污染管制標準修訂之參考。

資料分析與應用

歷年國內已彙整水質監測井基本資料、水質監測成果、監測井維護狀況等，以及污染場址之基本資料、定期監測資料、整治計畫書、列管歷程及狀態等，累積龐大的數據與文字資料，鑑於近年巨量資料分析技術興起，各領域對於資料清理、數據分析、視覺化呈現、機器學習等皆有重大進展。在地下水品質領域，近年研究以水質監測井及污染場址資料為基礎，利用地理統計分析各類水質議題污染潛勢分布地圖，並搭配其他高污染潛勢事業及水污列管等資訊，利用環域分析進行污染調查並建置監測預警網等工作，此外，針對部分水質經常性偏高議題，亦採用隨機森林與類神經網路等機器學習方法，歸納分析地下水水質長期遭受影響之主要原因，因此地下水相關資料分析與應用將逐步涵蓋跨單位資訊整合、資訊揭露、資料開放等議題，為未來政府施政與產業發展的重要趨勢。

地下水污染現況

依據環保署土壤及地下水污染整治網之污染場址查詢資料，截至 110 年 7 月底止，歷年地下水污染場址共計 327 處，列管狀態場址數量如圖 2 所示，以公告為控制場址數量最多、共計 114 處，其次為公告解除控制場址（102 處）及公告為整治場址（82 處）；而場址類別數量如圖 3 所示，以工廠數量最多、共計 164 處，其次為加油站（111 處）、其他（37 處）；而以縣市別區分之場址數量如圖 4 所示，以高雄市、桃園市、臺南市分別位居前三名，其次為臺中市、彰化縣、新北市，上述 6 個縣市之歷年地下水污染場址數量皆大於 20 處。此外，以列管狀態區分之不同場址類型地下

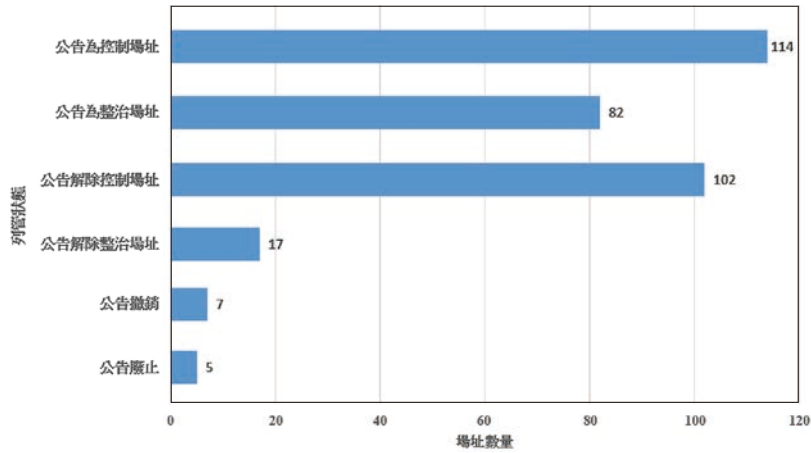


圖 2 依列管狀態區分之地下水污染場址數量

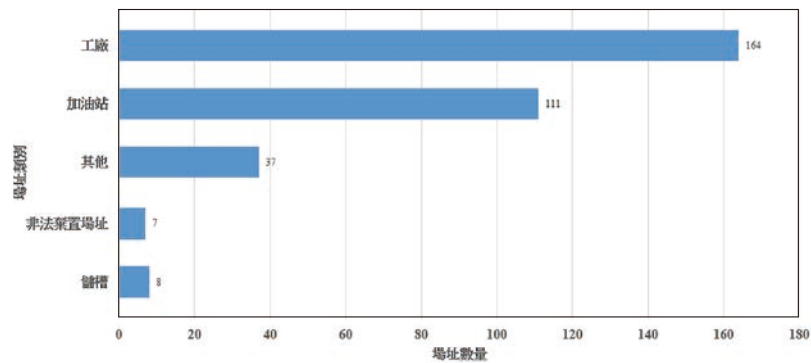


圖 3 依場址類型區分之地下水污染場址數量

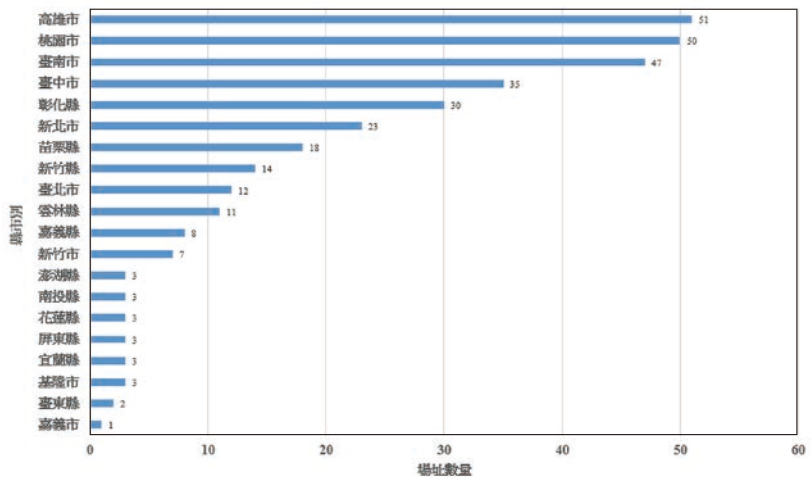


圖 4 依縣市別區分之地下水污染場址數量

水污染場址數量（圖 5），顯示公告為控制／整治場址以工廠數量最多，其次為加油站及其他，而公告解除控制／整治場址則以加油站數量最多，其次則為工廠及其他，說明加油站之地下水污染整治較工廠容易被解除列管；此外，以縣市區分不同場址類型列管情形而言，由圖 6 顯示場址數量大於 10 處之縣市別，除臺南市、臺北市、雲林縣等 3 個縣市之加油站數量高於

工廠外，其餘縣市之工廠數量皆高於加油站，包括高雄市、桃園市、臺中市、彰化縣、新北市、苗栗縣、新竹縣等 7 個縣市。而依列管狀態為公告為控制／整治場址並依縣市別區分之不同地下水污染場址類型，由圖 7 顯示公告為控制場址以臺中市、桃園市、高雄市分別位居前三名，而公告為整治場址則以桃園市、高雄市、彰化縣分別位居前三名。

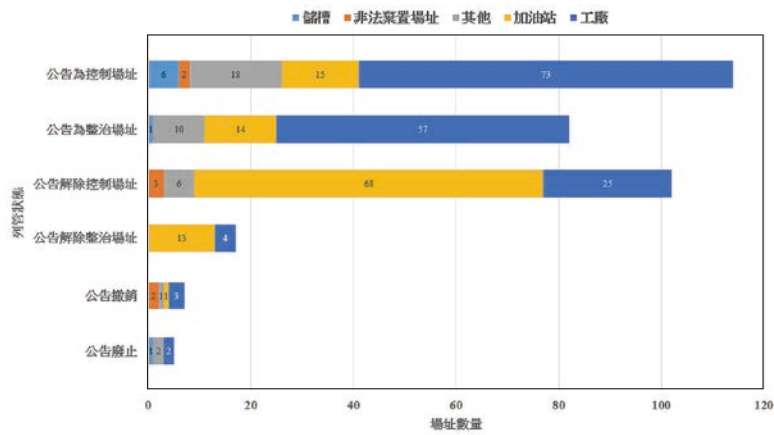


圖 5 依列管狀態區分之不同場址類型地下水污染場址數量

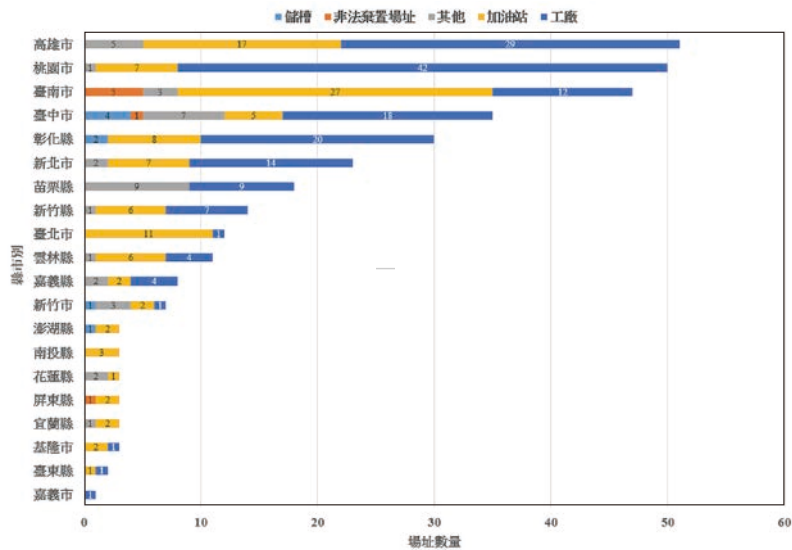


圖 6 依縣市別區分之不同場址類型地下水污染場址數量
(列管狀態包含公告為整治/控制場址、公告解除整治/控制場址、公告撤銷/廢止)

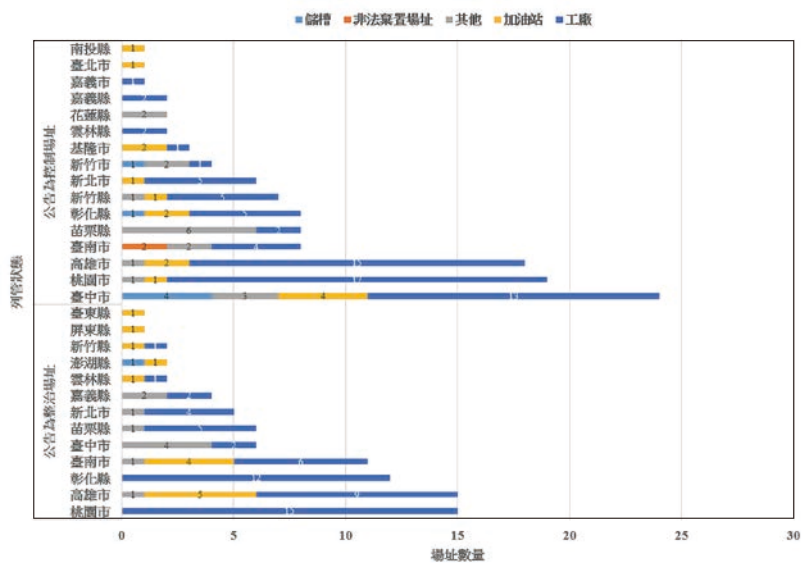


圖 7 依縣市別區分之不同場址類型地下水污染場址數量
(列管狀態為公告為整治/控制場址)

地下水污染整治方法

由上述地下水污染現況顯示臺灣最常發生地下水污染的場址類型為工廠及加油站，前者以重金屬及含氯有機物（氯烯類、氯烷類、氯苯類）污染為主、後者以總石油碳氫化合物、BTEX（benzene, toluene, ethylbenzene, xylene）、甲基第三丁基醚（Methyl tert-butyl ether, MTBE）污染為主，各類污染物與污染場址的整治技術篩選時，應考量技術可行性、污染範圍及程度、場址水文地質概況、調查與整治經費、整治時間及期程、對周遭環境與社會經濟影響等，再藉由小範圍先導試驗，依其結果進行全面性評估後，決定最終採用之整治技術，並於整治過程依整治成效進行檢討與調整。

環保署於民國 104 年依據不同污染物項目及不同污染介質，陸續訂定相對應之整治技術篩選與評估指導手冊，其中適用於地下水污染項目之整治工法，主要參考「土壤及地下水重金屬污染整治作業參考指引」、「土壤及地下水油品類污染整治作業參考指引」、「土壤及地下水比水重非水相液體污染整治作業參考指引」等正式文件，目前國內外常用且可行的地下水污染整治技術，以現地處理技術為主，大致可依其整治工法實施之類別區分為：(1) 生物法（Biological Treatment）、(2) 物理／化學法（Physical／Chemical Treatment）、(3) 熱處理法（Thermal Treatment），地下水污染現地生物整治法（In-Situ Bioremediation）包括加強好氧生物整治法（Enhanced Aerobic Bioremediation）、監測式自然衰減法（Monitored Natural Attenuation, MNA）等兩類，而地下水污染現地物理／化學整治法則包括空氣注入法（Air Sparging）、雙相抽除法（Dual-phase

Extraction）、井內氣提法（In Well Air Stripping）、抽出處理法（Pump And Treat）、現地化學氧化法（In-Situ Chemical Oxidation, ISCO）、現地透水性反應牆（In Situ Permeable Reactive Barrier, PRB）、開挖及圍堵（Excavation and Containment）等，其整治方法概略比較如表 3 所示。

綜整臺灣地下水污染整治方式以現地化學氧化法（ISCO）最為常見，近年來廣泛應用於石油碳氫化合物與含氯有機溶劑之污染場址，其原理是將氧化劑注入地下環境中，於現地氧化地下水與土壤中的污染物，使其降解、破壞為較不具危險的二氧化碳、水及無機鹽類，除轉換目標污染物，也降低其質量、移動性及毒性，常見氧化劑包含過氧化氫、過錳酸鹽、過硫酸鹽、臭氧等。現地化學氧化法優勢為適用的處理污染物類型廣泛，且相較其他技術，可在短時間降解污染物，但其氧化時間與效果受地質條件及氧化劑特性之影響甚鉅。

地下水整治成效良窳之關鍵在於選用的整治反應機制與污染物的適當接觸，因此，於正確的時間與位置致使污染物與反應物接觸為各種整治方法選用之首要評估重點，於現場執行地下水污染整治工作時，常以添加微生物或化學反應物以降低地下水污染濃度，然添加之反應物常因自身活性過大、或於現地環境快速消耗、或短時間釋放濃度過高等情形，而造成反應物無法長時間維持於地下水環境，導致灌注影響範圍限縮、且與預期成效差異甚遠。綜上所述，近年來國內外持續發展地下水污染整治之生物或化學方法，透過反應物之溶解性、時效性或反應性等抑制作用，使反應物緩慢釋放於地下水之中，再搭配物理性之地下水流場控制方式，可確保反應物在地下水中有足夠的

表 3 地下水污染整治方法比較

整治技術	關鍵因子	整治期程	成本
加強好氧生物整治法	場址規模、污染物特徵與數量、水文地質條件	視場址特徵而定	中
監測式自然衰減法	測試規劃費用、環境監測及場址管理	視場址特徵而定	中
空氣注入法	受污染表面積、受污染地下水深度	平均期程低於 3 年	低
雙相抽除法	土壤性質、受污染地基深度	平均期程 3~10 年	高
井內氣提法	受污染地表面積（影響建井數）、設備處理效率	平均期程大於 10 年	高
抽出處理法	受污染地表面積、設備處理效率	平均期程低於 3 年	高
現地化學氧化法	氧化劑種類、氧化劑再生可行性、污染物特性、注入方法	平均期程為 1~3 年	中
現地透水性反應牆	污染物種類及特徵、反應牆規劃設計及建造	平均期程大於 10 年	高
開挖及圍堵	污染場址規模、土壤性質、開挖方法	平均期程大於 10 年	高

資料來源：彙整自環保署 107 年「污染場址綠色及永續導向型整治試辦與推廣計畫」

反應停留時間，以降低地下水污染整治之灌注成本，並有效提升地下水污染整治效率。

地下水污染傳輸評估

污染物在地下環境系統遷移受到天然過程或人為活動造成的各種物理、化學與生物過程影響而改變濃度或轉化成其它不同污染物，因此了解不同時間與空間的污染物的濃度大小與空間分布為地下水水質管理與減緩地下水污染的核心，任何減緩地下水污染的整治或控制措施都需要能預測在相對應的整治或控制活動下污染物宿命與傳輸行為。地下水污染物宿命傳輸模式為以數學方法描述近似真實世界地下水污染物的遷移行為，地下水污染物宿命傳輸模式藉由控制體積的質量守恆概念，並納入影響地下水系統中污染物遷移等各種物理、化學與生物過程各種現象關係，以量化地下水污染物的遷移行為與時空分布，對於相關地下水污染的調查、預防與整治控制方案的選擇與設計皆扮演重要的關鍵角色，且做為地下水污染健康風險評估的重要依據。

因此描述地下水污染物於地下環境的遷移與分布為執行調查與整治工作前的重要工作，數值解與解析解模式即為瞭解污染物於地下環境遷移與分布之有效工具，根據 McGuire *et al.* [1] 分析美國 45 個含氯有機物地下水污染場址中，發現有 60% 的污染場址使用解析解或數值解模式進行污染場址分析工作。數值解模式可用於三維污染物遷移模擬及較複雜的幾何形狀、水文地質或生物地質化學反應問題，數值解模式的使用者需具備較完整的地下水相關領域專業知識，而解析解模式的優點為解在時間與空間都是連續，且相對應的解析解的計算程式在執行污染物遷移模擬的穩定性非常高，且參數較少、使用門檻較低、無需長期的模式學習經驗，因此為非常適用使用者初步評估的有效工具。

目前國際上已有許多具圖形使用者或視窗界面的解析解計算工具，3DADE (Leij [2]) 與 N3DADE 為美國農業部 (US Department of Agriculture) 所發展的以 Leij *et al.* [3,4] FORTRAN 計算程式；AT123D 是以 Yeh [5] 解析解為基礎的計算程式，相對於 3DADE 與 N3DADE 而言，AT123D 有較大的污染源選用彈性，污染源可考量點、線、平面與立方體等幾何形狀；AT123D AT (Burnell *et al.* [6]) 針對數值積分進行改善

並發展使用者介面 [7]；此外，美國環保署 BIOSCREEN (Newell *et al.* [8]) 與 BIOCHLOR (Aziz *et al.* [9]) 為著名的解析解計算程式，BIOSCREEN 與 BIOCHLOR 都是以 Domenico [10] 近似解析解為主，前者主要適用於碳氫污染物，後者適用含氯污染物自然衰減；ATRANS 為 Neville [11] 所發展的程式，其考慮一個長方形污染源，利用疊加原理 ATRANS 可以考慮比 BIOSCREEN 更複雜的污染源；HYDROSCAPE (Funk *et al.* [12]) 則是以 BIOSCREEN-AT 的解析解，且採 MATLAB 計算程式，屬於友善的使用者介面。上述的解析解計算工具除 BIOCHLOR 為多物種解析解模式外，其它皆為單一物種解析解模式描述四氯乙烯之還原脫氯反應，依序降解為三氯乙烯、1,1-二氯乙烯、順-1,2-二氯乙烯、反-1,2-二氯乙烯、氯乙烯、乙烯，於此降解過程之各項中間產物可能形成新的危害物質，甚至比原始污染物的毒性更高，因此 BIOCHLOR 之多物種解析解模式為常用的地下水含氯污染自然衰減模式，然而 BIOCHLOR 模式存在大延散係數的誤差問題，且所有物種皆採相同的遲滯因子，由於遲滯因子主要與含水層介質及污染物物化性質有關，此亦為此模式產生顯著誤差的關鍵。近年全新的多物種解析解模式不斷發展，Liao *et al.* [13] 考慮各物種不同的遲滯因子，亦解決較大的延散係數造成的誤差問題，搭配友善的圖形使用者介面 (Graphical User Interface, GUI)，以利使用者之參數輸入與結果輸出等操作。

上述模式之地下水水流皆以 Darcy 定律描述，依據質量守恆原理，飽和含水層地下水流動控制方程式如下。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + q_s = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

其中 h 為水頭； K_{xx} 、 K_{yy} 與 K_{zz} 分別為沿著 x 、 y 與 z 方向的水力傳導係數 [L/T]； t 為時間 [T]； q_s 為單位體積之抽水或注水流通量 [1/T]； S_s 為比貯水率 [1/L]。此式配合適當初始與邊界條件可求解水頭 $h(x, y, z)$ 隨時間與空間分布，進而計算地下水滲流速度 (seepage velocity) 如下。

$$\begin{aligned} v_x &= -\frac{K_{xx}}{\phi} \frac{\partial h(x, y, z, t)}{\partial x} \\ v_y &= -\frac{K_{yy}}{\phi} \frac{\partial h(x, y, z, t)}{\partial y} \\ v_z &= -\frac{K_{zz}}{\phi} \frac{\partial h(x, y, z, t)}{\partial z} \end{aligned} \quad (2)$$

由 Darcy 定律所得之流速為污染物移流傳輸 (advective transport)，代表各質點與地下水流具有相同的遷移速度，然而實際上由於含水層介質異質性將造成污染物非均勻流動情形，因此以 Fick 定律為基礎的水力延散 (hydrodynamic dispersion) 理論可描述此非均勻流動情形，因此整合移流與延散理論而得之控制方程式如下。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left(\phi D_{xx} \frac{\partial C}{\partial x} + \phi D_{xy} \frac{\partial C}{\partial y} + \phi D_{xz} \frac{\partial C}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial x} (\phi v_x C) \\ & \frac{\partial}{\partial y} \left(\phi D_{yx} \frac{\partial C}{\partial x} + \phi D_{yy} \frac{\partial C}{\partial y} + \phi D_{yz} \frac{\partial C}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial y} (\phi v_y C) \\ & \frac{\partial}{\partial z} \left(\phi D_{zx} \frac{\partial C}{\partial x} + \phi D_{zy} \frac{\partial C}{\partial y} + \phi D_{zz} \frac{\partial C}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial z} (\phi v_z C) \\ & + C_s q_s + \sum_{n=1}^N R_n = \frac{\partial \phi C}{\partial t} \end{aligned} \quad (3)$$

此處 C 為濃度 [M/L^3]， C_s 為抽水或注水的濃度 [M/L^3]， $\sum_{n=1}^N R_n$ 為由 N 個化學反應產生的單位時間單位體積之質量 [M/L^3T]， D_{ij} 為水力延散係數張量 (tensor) [L^2/T]。依據上述移流與延散的解析解模式可

快速推估污染物與其降解產物共存的濃度變化情形，Liao *et al.* [13] 依據 BIOCHLOR 之模擬案例，以多物種污染傳輸解析解推估四氯乙烯及其降解產物之分布情形 (圖 8)。因此，地下水污染傳輸模擬為污染評估與整治過程之重要工作，以掌握污染傳輸分布並可做為健康風險評估的參考基礎。

健康風險評估與風險管理

有鑑於地下水為臺灣重要的水資源，受污染的地下水可能直接或間接影響人體健康，因此健康風險評估為地下水污染調查與整治過程中的重要工作，其利用跨域知識或技術以評估對人體健康具危害性的污染物質，經釋放到環境中而被人體經由食入、吸入或皮膚吸收等暴露途徑而對人體健康所產生影響之可能性。依美國國會於 1983 年公布之「聯邦政府風險評估」報告 (The Red Book, Risk assessment in the federal government: Managing the process, National Research Council of the National Academy of Sciences, NAS-

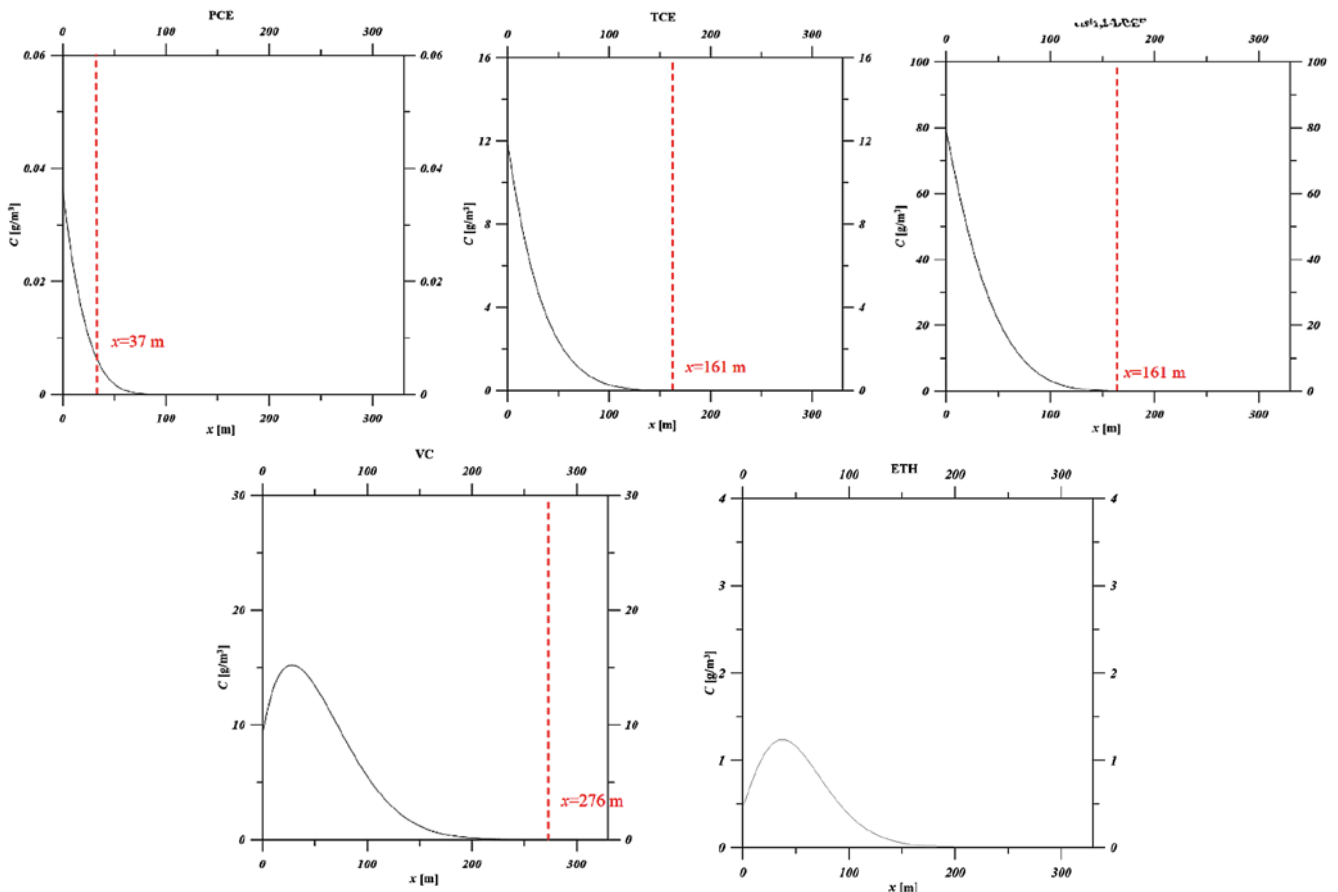


圖 8 利用 Liao *et al.* [13] 解析解模式模擬地下水四氯乙烯及其降解產物濃度隨位置變化之模擬結果 (紅色虛線代表濃度符合污染管制標準時之位置)

NRC)中指出「風險評估涵蓋要素包括依據流行病學、臨床、毒理學及環境研究之評估結果，來描述潛在之不良健康效應，並從這些結果外推及估計在某種暴露狀況下對於人體健康之影響種類及程度；判斷暴露於不同強度、時間之族群數量及特性，以歸納出公共衛生問題與影響族群程度」。美國環保署 (US EPA^[14]) 與國際癌症研究署 (IARC^[15]) 將化學物質的致癌性分別區分為五大類與四大類，美國環保署將四氯乙烯、三氯乙烯與氯乙烯歸類為 Group A (對人類為致癌物質)，IARC 則將三氯乙烯與氯乙烯歸類為 Group 1 (人類致癌性的證據充足)、四氯乙烯歸類為 Group 2A (人類可能致癌物，流行病學資料有限，但是動物實驗資料充足)，由此足見含氯污染物毒性可能造成人體健康危害 (表 4)。

表 4 USEPA 與 IARC 針對含氯烯類所進行的分類

污染物	USEPA	IARC
PCE	Group A	Group 2A
TCE	Group A	Group 1
DCE	-	-
VC	Group A	Group 1
ETH	Group D	Group 3

有鑑於含氯污染物殘留相形成長期的地下水污染源區與其致癌性，故需藉由健康風險評估估算其造成之健康危害，依據土污法第 24 條第 2 項規定整治場址

如因地質條件、污染物特性或污染整治技術等因素，而無法整治污染物濃度符合土壤、地下水管制標準者，可依環境影響與健康風險評估結果，提出土壤、地下水整治目標，此法規顯示健康風險評估於地下水污染場址管理與改善等過程扮演相當重要的角色。健康風險評估以危害鑑定 (Hazard Identification)、劑量反應評估 (Dose Response Assessment)、暴露評估 (Exposure Assessment)、風險特徵描述 (Risk Characterization) 為四個基本架構 (圖 9)，其中危害鑑定主要以現有的概略資料建立場址概念模型，包括污染源位置、場址周邊水文地質、可能的關切污染物質、影響的受體等；劑量反應評估主要以劑量 - 反應曲線計算污染物劑量效應因子，並將污染物毒性分為致癌性 (carcinogenic) 與非致癌性 (non-carcinogenic)；而暴露評估為探討關切污染物質經由各種途徑進入人體的可能性，須以危害鑑定所得的場址概念模型之暴露途徑與場址水文地質特性選擇適宜的宿命傳輸模式 (如前節所述)，藉以估計污染物於環境介質之流布情形、及污染物之受體接受濃度，再以此濃度與暴露因子計算各種暴露途徑之受體吸收污染物的劑量 (即暴露劑量)；最終之風險特徵描述則是綜合前述三個步驟進行綜合評估，以估計污染物影響人體健康的風險程度與影響方式，並依此擬定風險管理策略。綜整前述地下水污染調查與整治過程中涵蓋的污染傳輸模擬與



圖 9 健康風險評估架構

(<https://www.epa.gov/risk/conducting-human-health-risk-assessment>)

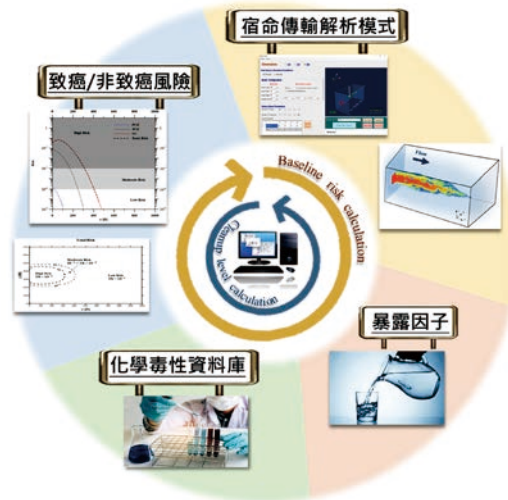


圖 10 應用污染傳輸模式進行健康風險評估之架構

健康風險，目前臺灣已積極發展地下水含氯溶劑污染場址健康風險評估平台，其架構包括污染物傳輸解析、本土化暴露因子與化學毒性資料庫、致癌與非致癌風險計算、互動式圖形使用者界面等（圖 10），此發展將有助於各界對於地下水污染造成健康風險危害的認知，並提升風險溝通與管理的有效性。

未來展望

面對全球極端氣候的影響，地下水勢必扮演水文循環過程可永續利用之水資源的角色，而隨著都市化擴張與經濟發展趨勢，部分地區的高度密集人為活動亦將顯著影響地下水水質優劣，因此地下水水質保護應受更高度的關注，以臺灣而言，未來地下水水質保護工作重點應為氣候變遷調適之地下水資源永續利用策略，建議推動方向包括研擬地下水水質與水量並重的管理政策、強化以用水需求為導向的水質監測與污染預警方法、建立地下水資源分級分區之開發與保育制度、持續發展本土化污染調查評估與整治技術等，以利地下水資源利用與國家永續發展。

參考文獻

1. McGuire, T.M., Newell, C.J., Looney, B.B., Vangeas, K.M., and Sink, C.H. (2004), Historical analysis of monitored natural attenuation: A survey of 191 chlorinated solvent site and 45 solvent plumes. *Remiat. J.* 15, 99-122.
2. Leij, F.J. and Bradford, S.A. (1994), 3DADE: A computer program for evaluating three dimensional equilibrium solute transport in porous media. Research no. 134. USDA, ARS, Riverside, CA: US Salinity Laboratory.
3. Leij, F.J., Skaggs, T.H., and van Genuchten, M.T. (1991), Analytical solutions for solute transport in three-dimensional semi-infinite porous

- media. *Water Resour. Res.*, 27, 2719-2733.
4. Leij, F.J., Toride, N, and van Genuchten, M.T. (1993), Analytical solutions for non-equilibrium solute transport in three-dimensional porous media. *J. Hydrol.* 151, 193-228.
5. Yeh, G.T. (1981), AT123D: Analytical transient one-, two-, and three-dimensional simulation of waste transport in the aquifer system. ORNL-5602. Oak Ridge, Tennessee: Oak Ridge National Laboratory.
6. Burnell, D.K., Lester, B.H., and Mercer, J.W., (2012), Improvements and corrections to AT123D code. *Groundwater*, 50, 943-953.
7. Burnell, D.K., Cooper, J, Xu, J, and Burden, D.S. (2016), Graphical user interface for AT123D-AT solute transport model. *Groundwater*, 54, 313-314.
8. Newell, C.J., McLeod, R.K., and Gonzales, J.R. (1996), BIOSCREEN natural attenuation decision support system, user's manual version 1.3. US, EPA: National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development.
9. Aziz, C.E., Newell, C.J., Gonzales, J.R., Haas, P.E., Clement, T.P., and Sun, Y. (2000), BIOCHLOR natural attenuation decision support system, user's manual version 1.0. EPA/600/R-00/008. Washington, DC: US EPA Office of Research and Development.
10. Domenico, P.A. (1987), An analytical model for multidimensional transport of a decaying contaminant species. *Journal of Hydrology*, 91, 49-58.
11. Neville, C, SS Papadopoulos & Associates, Inc. (1998), ATRANS: Analytical solutions for three-dimensional solute transport from a patch source Version 2. Bethesda, Maryland: SS Papadopoulos & Associates Inc.
12. Funk, S.P., Hnatyshin, D, and Alessi, D.S. (2017), HYDROSCAPE: A new versatile software program for evaluating contaminant transport in groundwater. *Software X* 6, 261-266.
13. Liao, Z.Y., Suk, H, Liu, C.W., Liang, C.P., and Chen, J.S. (2021), Exact analytical solutions to three-dimensional multispecies advection-dispersion equations coupled with a sequential first-order degradation reaction network. *Advances in Water Resource*, 155, 104018.
14. US EPA (Environmental Protection Agency), 1999, Guidelines for carcinogen risk assessment (review draft). Risk Assessment Forum, Washington, DC. NCEA-F-0644. Available from: <http://www.epa.gov/ncea/raf/cancer.htm>.
15. IARC (International Agency for Research on Cancer), (1994). IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Vol. 60. Some industrial chemicals. Lyon, France: IARC; pp. 13-33.