



社團法人

印刷品

台灣土壤及地下水環境保護協會簡訊

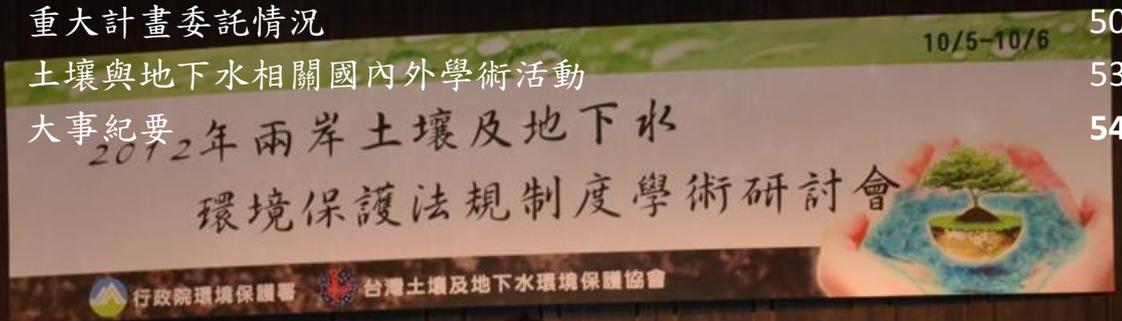
第四十五期·中華民國 101 年 12 月 31 日·TASGEP Newsletter Vol.45 2012.12.31

發行人：陳家洵
 發行所：台灣土壤及地下水環境保護協會
 地址：桃園縣中壢市中大路 300 號
 出版委員：盧至人 高志明 范康登
 總編輯：陳士賢
 編輯：林雅婷
 電話：03-4268428
 傳真：03-4263127
 電子郵件：tasgep@gmail.com
 網址：http://www.tasgep.org.tw



本期目錄

◆ 總編輯手札	1
◆ 專題報導	
● 地下水污染來源鑑定工具-環境法醫	2
● 關渡濕地砷之分布及累積	17
● 以現地加強式好氧生物復育技術處理 受氯化有機物污染之地下水關渡濕地砷之分布及累積	33
◆ 重大計畫委託情況	50
◆ 土壤與地下水相關國內外學術活動	53
◆ 大事紀要	54



總編輯手札

最近兩個月協會先後協助辦理「2012年兩岸土壤及地下水環境保護法規制度學術研討會」及「2012年土壤及地下水污染場址調查整治與管理國際研討會」，許多協會夥伴們投注了大量心力，因此45期會訊改至本月發行，本期簡訊中共有三篇文章，台大生物環境系統工程學系劉振宇教授探討了關渡濕地砷之分布及累積，該研究藉由液固相之化學分析及濕地植物各組織間之總砷濃度，探討砷可能的分布及氧化還原機制，利用土壤及水中之總砷濃度來計算濕地植物對於砷之遷移因子(translocation factor)及生物濃縮因子(bioconcentration factor)，藉以評估溼地植物體(水筆仔)內砷之生物傳輸、累積及遷移轉化機制，探討砷在關渡濕地之循環，從該研究中讓我們了解到固相、水相及植物相砷遷移的主要機制受控於不同深度之氧化還原環境之變化及其生化反應。

環境法醫是一個整合性的學門，所要研究的主要污染物涵蓋在各方面的環境介質中，如空氣、水、土壤及生物群等，其研究的範圍包括探測污染源、污染物之流佈與傳輸、環境污染對人體健康及生態之影響，其中污染的界定是以化學特性、生物影響、責任團體及法律結果來描述，臺灣大學土木工程學系徐年盛教授撰文針對幾項主要環境法醫工具，包括地電阻影像、統計分析、化學分析以及地下水污染模擬模式，介紹其應用範圍，對於國內眾多類型的污染場址，其環境污染責任歸屬判定提供了重要參考指引。台灣氯乙炔公司梁書豪博士及其團隊以現地加強式好氧生物復育技術處理受氯化有機物污染之地下水，該模場試驗採用加強式生物整治技術搭配分子生物技術檢測之概念，處理受氯乙炔及二氯乙烷污染之地下水，於短時間提升現地微生物之數量及加強現地微生物降解污染物，進而提升整治成效。

本會將於1月17日舉辦協會「第七屆第一次會員大會暨臺灣土壤及地下水環境保護產業的挑戰與展望研討會」，敬請各位會員先進踴躍參加。過去兩年簡訊的編輯工作，承蒙盧至人教授、高志明教授及范康登總經理三位編輯委員的大力協助，特此誌謝，也感謝許多協會夥伴的賜稿，隨著2013年的到來，祝福大家擁有豐碩的一年。

國立高雄師範大學生物科技系(所)



謹識

中華民國一零一年十二月十七日

地下水污染來源鑑定工具 -環境法醫

徐年盛

國立臺灣大學土木工程學系教授

一、前言

台灣近年來由於經濟蓬勃發展，工商發達、社會經濟結構轉變、生活水準提昇，使得各標的用水需求量急劇增加。然而由於台灣地區水資源環境條件的先天限制，使得地面水資源的供應不斷出現問題，地下水資源的使用量急劇增加。其次，由於工業廢料堆積、掩埋與都市垃圾所滲漏出之廢污水，或惡意將廢污水注入地下水體等，造成地下水污染日益嚴重，不僅減少珍貴的水資源，也對生態環境造成衝擊。但由於地下水隱藏於地表下，不像地表水般一旦受到污染很容易被發現，因此往往為人們所忽視。

台灣的地下水資源幾已超量開發，且已成為重要之供水來源之一，當地下水一旦被污染致無法使用後，並無其他水源可供開發利用或替代。因此對地下水體尚未遭受污染區域，應亟需採取因應之水體保護措施；而對地下水體已遭受污染之地區，則應建立有效的處理措施，瞭解其污染物之範圍與程度並做後續之追蹤與處置，進而達到保護珍貴的地下水資源的目的。

地下水的主要污染物包含農藥、有機化合物、重金屬、無機離子和放射性物質等。近年來，隨著工業的迅速發展，有機化合物的使用越趨頻繁，地下水源受有機化合物污染案件頻傳，其中又以非水相液體(Non-Aqueous Phase Liquid，簡稱 NAPL)的污染最受重視，如桃園美國無線電公司(RCA)地下水受三氯乙烯 TCE 及四氯乙烯 PCE 污染，即為此類 NAPL 污染事件。

地下水污染的整治，首重污染來源鑑定，即透過現場調查、模式模擬及相關技術應用，正確評估可疑的污染來源，針對污染來源進行整治，才有可能完成地下水污染的整治工作。

二、污染來源鑑定

近年來針對污染來源鑑定已發展出一些專門的技術及學問，形成了一門專門的學科名為環境法醫(Environmental Forensics)。Forensic 與 Forum 相關，意指任何公開之討論或辯論，最常用於指稱法庭或訴訟的程序。環境法醫則可以針對與環境事務相關之調解、協商處理或任何公開調查，提供需要之事實依據。相較於傳統的環境污染調查著重於「在何處」產生「什麼污染」，及此污染事件對於環境與居民的影響與風險評估，環境法醫更關心的是「什麼人」在「何時」造成這樣的環境污染，所以環境法醫強調的是污染行為人的責任問題，其主要議題為：污染來源之檢定與污染責任之歸屬。環境法醫尋求解答之問題包含：是誰造成的污染？污染何時發生的？污染如何發生的？污染範圍如何？試驗結果的真實性如何？是否有不實的證據？人體暴露於污染的程度如何？環境法醫可以被解釋成一個著重於環境污染的科學研究，而此環境污染議題必須受法院、仲裁、公共辯論或正式辯論的約束以及基礎科學的支配，基礎科學是這些活動的基礎。

環境法醫所要研究的主要物質涵蓋在污染各方面的環境介質中，如空氣、水、土壤及生物群等。其研究的範圍包括探測污染源、污染物之流佈與傳輸、環境污染對人體健康及生態之影響，其中污染的界定是以化學特性、生物影響、責任團體及法律結果來描述。環境法醫包含的學科領域有分析化學、地質化學、大氣化學、微生物學、環境流佈評估、環境傳輸評估、整體案例研究、法律考量及其他等。由於環境法醫強調環境污染之責任歸屬與劃分，所以其必須收集足夠之證據證明污染行為人確實有污染行為，並依據污染行為之輕重裁定行為人所必需負擔之責任，依責任大小劃分其所必須支付之代價。環境法醫之證據包含：1.現場目擊者的證詞，如有證人直接目擊污染行為之發生或污染場址內的居民在某一天發現地下水中有懸浮物等，這些皆屬於現場的人證與物證。2.歷史文件記錄，如廠區的營運資料、物品的製程及所使用的化學物質、廢棄物或廢溶液的處理方式、污染周邊的工廠分佈及污染範圍內過去曾經施作過哪些工程等，這些歷史紀錄均有助於瞭解現場的狀況與污染的產生及發展過程。3.現地物理化學的量測，現場實地量測的目的在收集與分析污染物種類及污染範圍，藉以瞭解實際污染狀

況，並配合物理化學分析的方式，佐證或淘汰某些可疑污染源。以上三種證據必須交叉比對並反覆驗證以確立其正確性及可信度，以供環境法醫作為確定污染來源與污染責任歸屬的證據。

三、環境法醫工具

環境法醫是一種全面的、整體的環境事務調查、辯證與處理，涵蓋多種不同的學科以及各式新舊的評估工具，其中地下水模式即為利用現場的物理化學量測資料以評估污染來源及責任歸屬的工具。Morrison(2000)對環境法醫的工具進行一系列的回顧，這些工具要應用在實際的環境官司或訴訟上作為一個有效的法醫證據，使用者必須對工具有徹底的瞭解，以下就幾項主要環境法醫工具之應用進行介紹，包含有地電阻影像、統計分析、化學分析以及地下水污染模擬模式。

1. 地電阻影像

楊潔豪等人(2002)以石化工業區重質非水相液體(Dense NAPL，簡稱DNAPL)棄置場發生之滲漏作為探測目標，以二維及三維地電阻影像法(RIP)探測，探討DNAPL入滲地下，經整治後DNAPL之殘留量在地層中分佈情形。研究結果發現受DNAPL污染的地層呈現高電阻異常現象，數處有高電阻區反應帶，疑似為DNAPL滲漏之污染團。

2. 統計分析

Rong(2000)回顧四種常用於分析環境資料的統計方法(信心區間、相關係數、回歸分析與變異數分析)，並以實際案例說明其應用之問題。信心區間法的問題在於假設資料呈常態分佈，但實際上常呈對數常態分佈。相關係數之問題在於使用大範圍的資料時，數值大的會把數值小的影響蓋過，造成相關係數偏斜。回歸分析則在輸入之不確定性會影響模式預測結果。變異數分析會有接受簡易假設而得強結論的問題。若在分析過程中未辨識出這些問題，將得到很不一樣的結論，與實際狀況不符。McNab(2001)在收集三個場址的有機氯化物污染團資料後，利用統計工具分析，發現其污染趨勢均相似，顯示氯化物的污染有其固定的

型態，可以此作為辨識是否遭受氯化物污染之依據。

3. 化學分析

污染物進入地下水後，會在現地環境中逐步分解成不同的化學物質，因此對水中的化學物質進行分析，可以得知不同成分的濃度以推估污染物進入地下水之時間。Gauthier and Murphy(2003)評估此法之不確定性，不確定性來自濃度量測的誤差。實際應用在現地所得之注入時間僅為一平均的注入時間，因為污染物與水並非同一時間就可以全部接觸到，所以水解有快有慢。Oudijk(2003)以氟氯碳化合物(CFCs)及氙之含量推估含氯有機化合物污染團進入地層之時間。此方法最早是用來作地下水補助時間之推估，因為 CFCs 及氙為過去半世紀因人類使用而存在大氣中的穩定物質，在降水的過程中和雨水一起進入地表以下。所以若污染物注入過程中地下水也同時在補助，則可由水中之 CFCs 及氙推估污染注入時間。

近來同位素分析，尤其是穩定碳同位素分析，被廣泛應用於鑑定與監測污染源及污染物傳輸過程，結果顯示同位素分析確實是一個很可靠的環境法醫工具。Slater(2003)討論了多個同位素分析之結果，並以一個揮發性有機物污染之地下水案例說明穩定同位素在應用上的限制性，針對其他種地下水污染物，仍有相同的限制。

黃德坤等人(2004)，利用環境法醫技術以鑑定石油碳氫化合物的污染源及判定洩漏時間。藉由實際的案例，結合歷史資料、化學指紋圖的比對、風化過程、碳同位素分析、特定生物指標化合物分析、多環芳香烴之特性分析及硫化物含量等資料進行污染源的鑑定工作。研究結果顯示，未受風化的新鮮油品可以利用氣相層析質譜圖進行指紋圖的比對，尤其對凝結油及原油常可以得到很好的結果。對於煉製成品油或受到風化作用的油品則由於其指紋圖與初始樣品有極大的差異，因此指紋圖不適合作為唯一的鑑定工具，必須配合 pristane/phytane 的比值及異構物的分析，才能獲得可靠的結果。此外，穩定同位素及生物指標化合物具有來源特徵與不易受風化效應的影響，在污染源鑑定上具有關鍵性的地位。Oudijk(2005)同時利用同位素分析、化學成分分析與地下水流模式評估汽油的洩

漏歷程，以及污染來源為單點或多點之洩漏。其分析原則可是用於美國之地下儲油槽滲漏問題。

張尊國等(2010)研究臺北關渡平原農地污染問題，檢測灌溉水源與土壤的鉛同位素比值，經空間群集分析，並藉由地理資訊系統展示，比對歷史的圖層資料以鑑定砷及鉛的來源。結果顯示，因天然地球化學特性，地熱谷溫泉砷及鉛含量偏高，而關渡平原農地東南側熱區之土壤則是過去引用地熱谷水源灌溉長期累積，導致今日農地砷及鉛濃度異常。

4. 案例分析

Liu and Ball(1999)分析美國德拉威州空軍基地污染案件，地底下的阻水層受到含氯有機溶劑污染，污染物主要透過上頭之含水層以擴散方式進入。污染物濃度分佈及地層的擴散與吸附特性被用來估計在地層介面上污染物進入歷程，採用最小方差法求最佳解。求解過程中，假設污染物釋放濃度隨時間而變。評估結果與土壤採樣結果相符，提供了環境法醫論證之依據。但結果也顯示環境法醫的問題是一個高度複雜的問題，結果包含許多的不確定性，在下結論之前需謹慎考慮，並參照任何可得的資訊，交互比對以為佐證，作較為全盤的考量及評估。

Michalak and Kitanidis(2004)應用地質統計反向模式，鑑定上述德拉威州空軍基地的污染源。此區域地下含水層受到四氯乙烯及三氯乙烯等含氯溶劑的污染，Michalak and Kitanidis 以地質統計的概念推估其污染歷程，並計算其信心區間。最後，再以蒙地卡羅法配合拉格朗乘數以控制計算之污染物濃度之正確性。Marryott 等人(2000)將 Superfund 場址復育地下水的成本，對多個污染者進行分配。這樣複雜的問題往往需要花費許多時間與金錢來決定債務的分配，針對多個重疊的或混合的污染團，提出一個公平分配整治成本的方法。

MTBE 污染範圍受到地下水流速、延散度與自然衰減之影響。Tong and Rong(2002)利用 Domenico 解析模式來描述 MTBE 污染團之水平分佈型態，並推估污染團之長度。模式應用在 90 個洛杉磯的地下儲槽洩漏，利用量測之濃度資料檢定模式之參數(包括縱向延散度、地下水流速與降解常數)，再以校正好的模式污染源位置到污染團最邊緣的距離。由相關係數分析得知，污染團的長度與污

染源注入濃度相關性很低，與縱向延散度、水力梯度、地下水流速低度相關，與降解常數中度相關。Moomaw 等人(2003)評估美國亞利桑納州 Pinal Creek Aquifer 的重金屬污染，將多個污染來源之重金屬釋放加以量化，以劃分不同污染源之污染責任。其使用達西定律或者是地下水流速資料及復育目標重金屬之總量，計算每個污染來源之貢獻量。其計算結果與實際量測相符。

5. 地下水模式

應用地下水模式進行污染源檢定時，含水層的參數檢定及污染特徵辨識是兩個主要工作。Wagner(1992)發展以非線性 maximum likelihood estimation(MLS)同時最佳化參數及鑑定污染源的方法。其輸入之監測值包含水頭與污染物濃度。最佳化結果可由一階之不確定性分析評估其可靠度以及水流與傳輸模式的正確性。模式同時最佳化二維地下水系統的水力傳導係數、有效孔隙率、縱向與橫向延散度、邊界流量與污染物釋放濃度、污染源位置與污染物釋放歷程，並計算模擬誤差的統計特性。

Skaggs and Kabala(1995)以 quasi-reversibility (QR)法解反向時間之污染物傳輸方程式，用以推估地下水污染歷程。Skaggs and Kabala 比較 QR 法與 Tikhonov regularization(TR)法，QR 法的好處為使用方便且允許傳輸參數隨時空而改變，但在模擬結果的正確性上以 TR 法表現較佳。Woodbury and Ulrych(1996)發展 minimum relative entropy(MRE)求解方法，以反向推估一維地下水污染物的釋放歷程與傳輸過程。在理想的監測下，確實可藉由 MRE 得到正確的釋放歷程，在監測誤差很大的狀況下，推估結果仍能包含污染物釋放的主要趨勢。當污染來源及釋放歷程確定後，亦能以機率的概念預估未來污染物的流向與分佈，MRE 推估結果也確實可描述污染物之傳輸。

Alapati and Kabala(2000)以非線性最小方差法藉由污染濃度之量測推估污染團之釋放歷程。其假設水流為一維流動，污染來自單一污染源的釋放。雖然求解結果對於監測誤差與污染範圍非常敏感，但仍可以合理描述污染的釋放歷程。經過多次數值實驗分析後，非線性最小方差法特別適用在污染物瞬間大量注入的情況下。Neupauer 等人(2000)以一個一維虛擬案例比較兩種鑑定污染源的方法：

Tikhonov regularization (TR) and minimum relative entropy (MRE)。比較結果顯示，若濃度監測沒有誤差，則兩種方法皆可適切描述污染釋放歷程；但在有監測誤差的情況下 TR 法運作較好，其原因為 TR 法所需輸入之參數不像 MRE 那樣主觀。但是 MRE 模式可以判定不同區域所監測得到之資訊是否有助於污染歷程鑑定，可用以評估監測之有效與否，TR 模式則無法提供這些資訊。

Mahar and Datta(1997)提出三階段污染源鑑定程序，首先由任意位置的濃度監測，以非線性最佳化模式推估污染源位置、強度及注入時間；第二階段以第一階斷辨識結果進行監測井網最佳化設計。最後，再以此監測井網監測污染物濃度分佈，利用監測資料再行污染源鑑定。由於監測增加，所以提高了鑑定結果之正確性。此三階段污染源鑑定程序為一動態過程，藉由新設監測井不斷增加資訊，鑑定污染源後再最佳化監測井網，以達確實掌握污染物來源及分佈為止。Mahar and Datta(2000,2001)發展一最佳化模式，以水流及傳輸方程式作為限制式，輸入值為監測濃度，配合非線性程式計算最佳估計之污染源特性。此模式同時最佳化含水層參數與污染源位置。作者以二維數值案例評估模式之正確性，結果可鑑定得到污染源、污染注入強度與污染釋放歷程。Aral 等(2001)將污染源特性之問題公式化成一非線性優選模式，結合水流與污染物傳輸模式，發展非線性之最佳化模式，以推估污染源與污染釋放歷程。其最佳化目標函數為模式模擬之污染物濃度與實際監測值之差異最小。為了減少重複模擬所造成的計算負擔，Aral 等提出漸進式基因演算邏輯，以提升計算效率。數值實驗結果顯示，此工具確實可用於有效地鑑定污染源。

Neupauer and Wilson(2001)以反向機率的方法描述歷史的污染物傳輸，反向位置的機率代表了在污染物被偵測到以前的某一時刻污染物在某一位置上的可能性，而反向傳輸時間機率代表污染物從上游位置跑到下游監測井處所可能花費的時間，這些機率皆提供了污染來源的部分訊息。反向機率的控制方程式可由原本的水流與傳輸控制方程式推導而得，所得方程式會多出一個負載項，裡頭包含機率的型態(反向位置或反向傳輸時間)與取樣裝置(抽水井或監測井)。此伴隨方程式也可用以推估未來污染物的傳輸與分佈情形。最後，此方法以一個二維的虛

擬實驗驗證可行。陳卓然等(2002)首先透過調查與資料蒐集，瞭解土壤及地下水污染災害之項目與情況，再依地質、地形及地下水之資料分析土壤及地下水污染之可能情形。最後根據至少三個以上地下污染鑽探取樣之濃度情況，藉由污染傳輸模式之數值模擬分析求得各地下污染鑽探井之污染濃度分佈等值線。整合各鑽探井之污染濃度等值線，藉由公切圓包絡線圓心或公切橢圓包絡線之焦點定出污染源之可能位置。Bagtzoglou(2003)提出反向時間粒子追蹤法，透過序率方法將變異數最小化，以逆推得先前某一時刻之污染物分佈情形，並估計最可能之污染源。此法應用在一維的守恆或非守恆污染物傳輸上極為成功。

地下水污染常來自事業有毒廢氣物的隨意傾倒、排放管線老舊破損、廢液回收桶或地下儲存槽滲漏等。一般得藉由污染濃度的監測配合傳輸模式才能反向建立污染的過程，但在含水層水流與傳輸參數未知的狀況下，要確實找到污染源是很困難的。Singh and Datta(2004)應用類神經演算法於地下水污染源鑑定問題，同時估計含水層參數(水力傳導係數、孔隙率、延散度)及污染源位置。其方法以不同的污染注入濃度及隨時間變化的濃度監測產生訓練樣本，透過樣本訓練調整類神經演算網絡，最後以一個虛擬的濃度監測分佈驗證其方法可行。而且在包含很大的監測誤差下，仍可以得到合理之污染來源估計。

Michalak and Kitanidis(2004)以監測之污染物目前的分佈情形，利用地下水流與傳輸模式結合地質統計與伴隨狀態法，逆向推估過去歷史的污染物空間分佈。其方法將傳統假設僅有單一污染來源擴展到同時推估多個污染源，每個污染源之注入濃度皆不相同，並且將其應用至非均質的含水層進行驗證。Michalak and Kitanidis 選用 MODFLOW 與 MT3DMS 模式作為水流及傳輸之模擬，對一個虛擬的二維非均質含水層地下水污染進行污染源鑑定，鑑定結果顯示若污染物之現況污染濃度監測越準確，即監測誤差越小，推估所得之多個污染源及不同污染強度之分佈越正確。同時藉由地質統計的方法，可以評估鑑定結果之不確定性，同樣地若監測誤差越大，結果之不確定性越大。

污染源鑑定結果作為後續污染整治計畫的評估與擬定及污染責任之歸屬是一個很重要的依據。而污染源之鑑定需要求解反向問題而得，以梯度法求最佳解

是常用的方法之一，雖然此方法可適用某些狀況但其求解效率低限制了方法的應用性。Mahinthakumar and Sayeed(2005)於是將梯度法結合基因演算法，利用基因演算法大範圍搜尋的優點，先找到最佳解之可能位置，再以梯度法進行小區域的搜尋，提升了求解的效率。此混合方法被應用在一個複雜的三維問題中求解污染源位置。

徐年盛等(2005)根據現場地質鑽探資料、水文地質分析及地下水檢測結果，利用三維地下水污染傳輸模式，模擬評估污染物於地下水系統中之可能傳輸情形及未來分布狀況。其建立地下水污染源鑑定程序，並以實例驗證了其應用於地下水污染案件產源追蹤之可行性。追蹤之程序分為兩階段，第一階段為利用地下水水流模式追蹤污染源位置與污染物注入流量，所需輸入資料包括地質鑽探資料、水文地質參數資料、地下水水位監測、初始與邊界條件及污染源位置、污染物注入流量。輸入完畢，進行 MODFLOW 或 FEMWATER 數值模式之模擬，並將模擬結果與地下水水位監測資料比對及據以校正污染源位置與污染物注入流量，以達地下水模擬水位與監測水位相符，即完成第一階段之追蹤，得污染源位置與污染物注入流量。第二階段是利用地下水污染物傳輸模式追蹤污染物注入濃度及污染物排放時間。根據初始條件、邊界條件及水文地質參數及污染排放時間、污染物注入濃度，進行 MT3DMS 或 LEWASTE 數值模式模擬，並將模擬結果與地下水水質監測資料比對及據以校正污染排放時間與污染物注入濃度，以達地下水模擬水質與監測水質相符，即完成第二階段之追蹤，得污染排放時間與污染物注入濃度，地下水污染之污染源追蹤程序完成。

在實際案例的污染源鑑定過程中發現，國內之地下水污染場址調查資料主要為地下水水質的監測資料，這些資料只能用來確定污染範圍與可疑污染來源，卻無法知道含水層中地下水流動與污染物傳輸的情形。要確定地下水中污染物的傳輸，需知道含水層的地質分佈與其水文地質參數，這些資料必須由地層鑽探、抽水實驗與示蹤劑試驗而得，有了這些資料可以初步瞭解污染物的傳輸，再配合數值模式模擬並視覺化呈現其結果，才能確定污染物傳輸情形。在確定所建立之污染場址模擬模式足以代表現場水流與污染物傳輸之後，如果鑑定結果仍與實際

監測資料不符，顯示應有部分高污染濃度區域未被監測到，或者有些地下水流況改變的地方沒有水位監測，這時需增加水質與水位的監測以確定高污染區的位置以及真實的地下水流流況。而後再以此增加的監測調整模式輸入，比較模擬水流與污染物傳輸是否符合監測，並以此符合現地污染物傳輸情形之模式逆向追蹤鑑定污染源。

表 1 環境法醫工具整理

環境法醫工具	參考文獻	評估方法	污染源鑑定
地電阻影像	楊潔豪等人(2002)	地電阻影像法	污染源位置
統計分析	Rong(2000)	信心區間、相關係數、回歸分析與變異數分析	
	McNab(2001)	統計分類	污染物成分
化學分析	Gauthier and Murphy(2003)	TCA、DCE 比例分析	污染注入時間
	Oudijk(2003)	CFCs 及氫含量分析	污染注入時間
	Slater(2003)	穩定碳同位素分析	污染源位置、污染歷程
	黃德坤等人(2004)	化學指紋圖比對	污染物成分、污染源位置
	Oudijk(2005)	同位素分析、化學成分分析	污染歷程
	張尊國(2010)	同位素分析、空間群集分析	污染源位置
案例分析	Liu and Ball(1999)	最小方差法	污染注入濃度
	Michalak and Kitanidis(2004)	地質統計反向模式	污染歷程
	Marryott 等人(2000)		污染源位置、污染注入濃度
	Rong(2002)	Domenico 解析模式	污染物分佈
	Moomaw 等人(2003)		污染注入濃度
地下水模式	Wagner(1992)	非線性最大近似估計法	污染源位置、污染歷程
	Skaggs and Kabala(1995)	半反轉法、Tikhonov 正規化法	污染歷程
	Woodbury and Ulrych(1996)	最小相對熵值法	污染源位置、污染歷程
	Alapati and Kabala(2000)	非線性最小方差法	污染歷程
	Neupauer 等人(2000)	最小相對熵值法、Tikhonov 正規化法	污染歷程
	Mahar and Datta(1997)	非線性最佳化、監測井網最佳化設計	污染源位置、污染物分佈
	Mahar and Datta(2000,2001)	非線性最佳化	污染源位置、污

Aral 等(2001)	非線性優選模式、漸進式 基因演算邏輯	染歷程 污染源位置、污 染歷程
Neupauer and Wilson(2001)	反向機率法	污染歷程
陳卓然等(2002)	公切圓包絡線	污染源位置
Bagtzoglou(2003)	反向時間粒子追蹤法	污染源位置、污 染歷程
Singh and Datta(2004)	類神經演算法	污染源位置
Michalak and Kitanidis(2004)	地質統計、伴隨狀態法	污染源位置、污 染注入濃度
Mahinthakumar and Sayeed(2005)	梯度法、基因演算法	污染源位置
徐年盛、張德鑫、劉宏仁 (2005)	禁忌演算法、模擬退火法	污染源位置、污 染歷程

四、結論

由相關技術回顧可知，在環境法醫領域中，有許多舊有或新式的分析工具可用於污染源鑑定與責任歸屬。這些工具包含統計分析、化學分析、地球物理量測以及數值模式分析，每個工具的應用包含多方種方法，在統計分析中可採用信心區間法、回歸分析與變異數分析；化學分析法中有化學指紋圖比對、風化過程、碳同位素分析、特定生物指標化合物分析、化學成分比例分析、化學物質的可得性及其化學製程、獨家專利的添加劑等；地球物理量測有航拍圖、地電阻影像與紅外線掃瞄；數值模式分析應用在地下水污染源鑑定問題上，主要使用地下水流模式與污染物傳輸模式正向模擬污染物之傳輸情形，而反向追蹤污染源的方法是使用數值模式配合數值求解方法如有非線性最大近似估計法、半反轉法、Tikhonov 正規化法、最小相對熵值法、非線性最小方差法、非線性優選法、漸進式基因演算邏輯、反向機率法、公切圓包絡線、反向時間粒子追蹤法、類神經演算法、地質統計法、伴隨狀態法、梯度法、基因演算法等等，而反向推求污染源位置、污染物注入濃度、污染歷程及污染責任分配。每種工具在有充分的已知條件下，如地質結構已知、土壤方式已知、初始條件確定、邊界條件確定、可疑污染來源已知等，皆可獨立運作而追蹤得到污染源。

而以模式追蹤污染源之優勢在於模式計算快速，短時間內可以進行多種不

同參數組合與污染物分佈的模擬，得到一個最符合現有監測的模擬場址；但也可能面臨現場水文參數資料不足、邊界條件未知、水質監測有限等等的問題，導致模擬結果無法與實際狀況相符或模擬結果雖然與監測相符但參數卻極不合理。要避免這種狀況發生，唯有進行更仔細的場址特徵調查，或輔以其他污染源檢定方法，增加更多有關污染源特性的資訊，如此才有可能真正找到污染來源。

對於實際污染的案例而言，由單一的法醫工具所提供的資訊往往是不足的，所以其評估結果通常只做為證據的一部份，再與其他工具鑑定之結果比對與拼湊之後，才能逐步還原真實污染的過程。所以環境法醫是一個整合性的學門，由各種不同領域使用不同工具，針對與環境事務相關之調解、協商處理或任何公開調查，提供需要之事實依據，以作為環境污染之責任歸屬與劃分。

五、參考文獻

1. 楊潔豪、鐘進渝、游峻一、陳叔君，「地電阻影像法研究地層電阻率與 DNAPL 間關係」，第一屆海峽兩岸土壤與地下水污染研討會論文集，I a-04，2002。
2. 陳卓然、林士誠、陳福勝，「橢圓包絡線焦點法界定地下污染源之可能位置」，第一屆海峽兩岸土壤與地下水污染研討會論文集，I a-18，2002。
3. 黃德坤、陳大麟、林舜隆、羅文杰，「環境法醫技術應用在油污染源之鑑定」，工業污染防制，第 91 期，23，2004。
4. 徐年盛、張德鑫、劉宏仁，「地下水污染擴散模式建立之研究」，行政院環境保護署環境檢驗所委託計畫，2005。
5. 張尊國、沈川洲、陳聖堃、羅允杰、鄭百佑、徐貴新、林聖淇，「以鉛同位素組成特徵探討臺北關渡平原農地污染來源」，農業工程學報，第 56 期，第 1-10 頁，2010。
6. Alapati, S. and Z.J. Kabala, "Recovering the release history of a groundwater contaminant using a non-linear least-squares method", *Hydrological processes*, 14(6), 1003-1016, 2000

7. Aral, M.M., J.B. Guan, and M.L. Maslia, "Identification of contaminant source location and release history in aquifers", *Journal of Hydrologic Engineering*, 6(3), 225-234, 2001
8. Bagtzoglou, A.C., "On the nonlocality of reversible-time particle tracking methods", *Environmental Forensics*, 4, 215-225, 2003
9. Gauthier, T.D. and B.L. Murphy, "Age dating groundwater plumes based on the ratio of 1,1-dichloroethylene to 1,1,1-trichloroethane: An uncertainty analysis", *Environmental Forensics*, 4, 205-213, 2003
10. Liu, C.X. and W.P. Ball, "Application of inverse methods to contaminant source identification from aquitard diffusion profiles at Dover AFB, Delaware", *Water Resour. Res.*, 35(7), 1975-1985, 1999
11. Mahar, P.S. and B. Datta, "Optimal identification of ground-water pollution sources and parameter estimation", *Journal of water resources planning and management*, 127(1), 20-29, 2001
12. Mahinthakumar, G.K. and M. Sayeed, "Hybrid genetic algorithm - Local search methods for solving groundwater source identification inverse problems", *Journal of water resources planning and management*, 133(1), 45-57, 2005
13. Marryott, R.A., G.P. Sabadell, D.P. Ahlfeld, R.H. Harris, and G.F. Pinder, "Allocating remedial costs at superfund sites with commingled groundwater contaminant plumes", *Environmental Forensics*, 1, 47-54, 2000
14. McNab, W.W., "Forensic analysis of chlorinated hydrocarbon plumes in groundwater: A multi-site perspective", *Environmental Forensics*, 2(4), 21-28, 2001
15. Michalak, A.M., and Kitanidis, P.K., "Application of geostatistical inverse modeling to contaminant source identification at Dover AFB, Delaware", *Journal of hydraulic research*, 42, 9-18, 2004
16. Michalak, A.M., and P.K. Kitanidis, "Estimation of historical groundwater

- contaminant distribution using the adjoint state method applied to geostatistical inverse modeling”, *Water Resour. Res.*, 40(8), 2004
17. Morrison, R.D., “Critical review of environmental forensic techniques: Part I”, *Environmental Forensics*, 1(4), 157-173, 2000
 18. Moomaw, C., A. Davis, and S. Helgen, “Elements influencing cost allocation in the Pinal Creek Aquifer, Arizona, USA. Part III: Quantifying metal releases from multiple sources”, *Environmental Forensics*, 4, 287-303, 2003
 19. Neupauer, R.M. and J.L. Wilson, “Adjoint-derived location and travel time probabilities for a multidimensional groundwater system”, *Water Resour. Res.*, 37(6), 1657-1668, 2001
 20. Neupauer, R.M., B. Borchers, and J.L. Wilson, “Comparison of inverse methods for reconstructing the release history of a groundwater contamination source”, *Water Resour. Res.*, 36(9), 2469-2475, 2000
 21. Oudijk, G., “Estimating the minimum age of a chlorinated solvent plume in groundwater with chlorofluorocarbon (CFC) and tritium methodologies: A case study”, *Environmental Forensics*, 4, 81-88, 2003
 22. Oudijk G., “Fingerprinting and age-dating of gasoline releases - A case study”, *Environmental Forensics*, 6, 91-99, 2005
 23. Rong, Y., “Statistical methods and pitfalls in environmental data analysis”, *Environmental Forensics*, 1, 213-220, 2000
 24. Sadeghipour, J. and Yeh, W.W-G., “Parameter Identification of Groundwater Aquifer Models: A Generalized Least Squares Approach”. *Water Resources Research*, 20(7), 971-979, 1984
 25. Skaggs, T.H. and Z.J. Kabala, “Recovering the history of a groundwater contaminant plume-Method of quasi-reversibility”, *Water Resour. Res.*, 31(11), 2669-2673, 1995
 26. Slater, G.F., “Stable isotope forensics - When isotopes work”, *Environmental*

Forensics, 4, 13-23, 2003

27. Tong, W.X. and Y. Rong, “Estimation of methyl tert-butyl ether plume length using the Domenico analytical model”, *Environmental Forensics*, 3, 81-87, 2002

28. Wagner, B.J., “Simultaneous parameter estimation and contaminant source characterization for coupled groundwater flow and contaminant transport modeling”. *Journal of Hydrology*, 135, 275-303, 1992

Woodbury, A.D. and T.J. Ulrych, “Minimum relative entropy inversion: Theory and application to recovering the release history of a groundwater contaminant” , *Water Resour. Res.*, 32(9), 2671-2681, 1996.

【作者簡介】



徐年盛，美國加州大學洛杉磯校區土木與環工系(水利工程)博士。曾任美國SIMONS LI & ASSOCIATES 顧問公司水資源部高級工程師，以及國立臺灣大學土木工程系副教授，目前為國立臺灣大學土木工程系教授。擅長地下水及污染傳輸(Ground Water Flow & Contaminant Trans)、水資源系統分析(Water Resources System Analysis)及水文學(Hydrology)。

電話: (02)3366-4270

電子信箱: nsshue@ntu.edu.tw