

## 環境檢測

# 環境鑑識科學及其應用：回顧與展望

阮國棟\*、顏春蘭\*\*、蘇國澤\*\*\*  
顏己鳴\*\*\*\*、李孝軍\*\*\*\*\*、吳婉怡\*\*\*\*\*

## 摘要

環境鑑識科學係結合各種檢測分析技術及地質化學、環境輸送及擴散模式等跨領域工具，達到指紋辨識及污染源確認等目的，在環境管理或執法裁罰上是強有力的科學依據，應用面也日益拓展中。本文透過期刊論文、書籍、網站、國際研討會等資源搜尋整理，以應用面向(油品鑑識、加油站污染、漏油事件、各類工廠、各類環保設施、非法棄置、緊急應變、含氯有機溶劑土壤地下水污染、各類環境介質污染物鑑識等)為經，輔以科學面向(數學模式、遙測空照、年輪化學、微生物學、採樣方法、分析誤差、數據處理、統計方法、標準參考物質、法庭訴訟、公害爭端等)為緯，交互回顧過去 10 年之發展軌跡並前瞻未來發展趨勢。

**【關鍵字】**環境鑑識、油品、污染源、土壤、地下水、採樣 地球化學、儀器分析、GC-IRMS、GC×GC、LC-MS-MS、LA-ICP-MS

\*行政院環境保護署環境檢驗所 所長

\*\*行政院環境保護署環境檢驗所 副所長

\*\*\*行政院環境保護署環境檢驗所 主任秘書

\*\*\*\*行政院環境保護署環境檢驗所 科長

\*\*\*\*\*行政院環境保護署環境檢驗所 秘書

## 一、前　言

環境法醫(environmental forensics)成為研討會主題並成立學會及出版專書，均以Dr. Robert Morrison 自 2000 年倡導起，我國環保署正式正名為「環境鑑識技術」亦在 2000 年之後。所以過去 10 年(2000~2010 年)可謂環境鑑識技術萌芽茁壯的「黃金十年」。

1.行政院環境保護署環境檢驗所成功鑑識案件<sup>[1]</sup>：包括

- (1)中石化安順廠土壤地下水五氯酚及戴奧辛調查(2004 年)
- (2)隆顥科技公司廢棄物樣品調查(2004 年)
- (3)桃園立昌窯業廢溶劑案件(2005 年)
- (4)彰化線西鄉及高雄大寮鄉廢棄集塵灰調查(2005 年)
- (5)竹圍漁港海上浮油鑑識(2006 年)
- (6)南投中寮鄉非法棄置集塵灰(2006 年)
- (7)電弧爐集塵灰流向清查及指紋分析(2006 年)
- (8)石門水庫集水區非法棄置廢棄物(2006 年)
- (9)彰化伸港鄉棄置廢棄物(2007)
- (10)台電 7 處火力電廠飛灰及底灰指紋分析(2008 年)
- (11)二仁溪不明廢棄物鑑識(2008 年)
- (12)霧裡溪沿岸地下水鉻污染調查(2009 年)
- (13)臺南市港務局空地遭棄置爐渣調查(2009 年)
- (14)桃園幸太砂石場爐渣鑑識(2009 年)
- (15)台南縣後壁鄉農地污染(2010 年)
- (16)臺南縣新化鎮洋子段空地廢棄污泥鑑識(2010 年)
- (17)臺南縣台 61 線棄置爐渣來源鑑識(2010 年)

上述 17 個案例，均達到追蹤或確認污染源之目的，對維護環境及社會公平正義，遏阻環境犯罪，已發揮正面之作用。

2.環境檢驗所成立逾 20 年，在檢測技術及鑑識技術之能力建置及基礎建設上已有初步成果<sup>[2]</sup>：

- (1)因應國內急迫議題，在台北舉辦 2 場國際研討會(2003, 2005 年)
- (2)將廢棄物管制中心特性資料轉化匯入指紋資料庫(2002 年~)
- (3)執行「環境污染物指紋建檔綱要計畫」(2003 年)
- (4)9 行業指紋資料建置(2004 年)
- (5)6 行業指紋資料建置(2005 年)
- (6)10 行業指紋資料建置(2006 年)
- (7)穩定性同位素分析鑑識技術建置(2004 年~)
- (8)訂定「非法棄置事業廢棄物場址污染源追查與鑑識作業要點」(2006 年)
- (9)9 種行業採樣鑑定手冊(2006 年)
- (10)環境污染物指紋資料庫建置及維護(2004 年~)

## 二、環境鑑識應用面

### 2.1 油品、加油站及漏油事件

#### 1. 油品

全球各地不同地區產製的汽油，其碳、氫的同位素比的範圍分別為 8‰ 及 85‰，結合碳及氫同位素比，形成二維指紋，可以有效區分不同來源之汽油(O'Sullivan, 2008)<sup>[3]</sup>。利用汽油添加的氧化劑(oxygenates)來斷定汽油的年代為常用的方法。例如二次大戰前美國中西部汽油添加乙醇，到 1980 年，則用其他氧化劑取代被淘汰的四乙基鉛。其他最有名為 MTBE(從 1979 年 7 vol%，1981 年汽油中加劑 11 vol%，1988 年增加到 15 vol%，直到 1992 年因清空法的要求而提高到 17 vol%)，許多州則在 2000 年開始禁止在汽油中添加 MTBE，TBA(tertiary butyl alcohol)是 MTBE(methyl tertiary butyl ether)生物代謝物，若在土壤檢測出 TBA 或 MTBE，則代表汽品是在 1980 年以後產製者(Petrisor, 2006)<sup>[4]</sup>。MTBE 滲入地下水移動速度比 BTEX 快，在地下水中也不易被生物分解，若在地下水污染團(plume)中，BTEX 污染團比 MTBE 污染團更長，則肯定至少有 2 種不同的汽油洩漏事件(Davidson, 2000)<sup>[5]</sup>。MTBE 雖然確定在 1980 年以後使用，但因為無所不在，所以要確定污染來源，還是要用每一化合物有特異性的穩定性同

位素才能確認污染源(使用 GC-IRMS 儀器)(Oudijk, 2008)<sup>[6]</sup>。利用 GCIRMS 測定 4 種樣品，包括購自化學品供應商純的 MTBE、MTBE 溶於水、MTBE 溶於汽油以及取自美國各地 10 個添加有 MTBE 汽油樣品，討論其  $\delta$ -D 值(碳及氫)的精確度及準確度(Smallwood, 2001)<sup>[7]</sup>。

Liu(2009)<sup>[8]</sup>利用 3 維螢光光譜儀(3D Fluorescence Spectroscopy)及氣相層析質譜儀(GC-MS)分析 5 種油類(重柴油、原油、柴油、汽油、潤滑油)的 9 種市售油品，發現觀察 25 種主要的 PAH 分佈型態(distribution patterns)是鑑別每一種油類及個別油品最好的方法，2~4 個環的 PAH 易被風化，5~6 個環的 PAH 則適合做為指紋標記。Wade(2003)<sup>[9]</sup>指出 PS-6 汽油係在 1970 年代開始到 1977 為止的一種汽油配方，並非如報導係在 1984/1985 為無鉛汽油之代表性配方。Boehm(2002)<sup>[10]</sup>認為總有機碳(Total Organic Carbon, TOC)是鑑定碳氫化合物指紋全方位方法(holistic approach)中很重要的工具，在海洋底質中多重碳氫化合物來源之區分研究上，尤其重要，本文為應用在威廉王子灣(Prince William Sound)及阿拉斯加海灣(Gulf of Alaska)水底底質(benthic sediments)PAH 來源之辨識。Schmidt(2002)<sup>[11]</sup>指出油類常以風化程度、是否添加鉛、以及類似 MTBE 添加劑、配方改變等做為污染年代的辨識，但這些方法常遇到限制而無法成功應用。用氣相層析儀(GC)並依據 1970 年以後產製普通(regular)及中級(mid-grade)汽油的配方為逐漸增加芳香族而減少正常的烷烴類(alkanes)之通則，在以後 30 年中間各種配方趨勢曲線可以用來推估汽油生產的年代。Wang(2002)<sup>[12]</sup>利用多重準則辨識加拿大魁北克 3 個未知油品樣品，是否來自同一來源，用 GC-FID-MS 判讀圖譜，得知 2 個樣品來自同一來源，另一個則不同。Alimi(2003)<sup>[13]</sup>則將碳氫化合物燃料污染物的指紋做了文獻回顧，包括實驗室最新的指紋技術及真實應用案例。

Oudijk(2005)<sup>[14]</sup>應用同位素、化學成分比例，地下水水流速率等等多種技術於 1 處案例研究，作者認為此種方法可以應用到全美 50 州及加勒比海屬地上。Kaplan(2003)<sup>[15]</sup>針對有機殘留物(可能是含氯溶劑、油品或其他)溢散到環境中的時間推估，提出 2 種方法。一為同位素碳 14 方法，可推估到 5 萬年前；另一為氨基酸外消旋作用速率(the rate of amino acid racemization)，可用來推估蛋白質

有機物到 10 萬年前。在使用含鉛汽油的年代中(1964 至 1984)，則可經由  $\delta^{206}\text{Pb}/\delta^{207}\text{Pb}$  的比值改變做推斷。區分石化原生(petrogenic)及高溫產生(pyrogenic)的 PAHs 在美國法庭訴訟工業水道底質清理費用由誰支付，變成很重要的證據，Boehm(2008)<sup>[16]</sup>指出烷基碳數(number of alkyl carbons)的相對豐富度(relative abundance)可以用來辨識二者差異。 $C_0\text{-}C_4$  呈接近常態分配， $C_2$  有高峯的為石化原生 PAHs 特徵， $C_0\text{-}C_4$  呈急速遞減， $C_0$  有高峯的為燃燒或裂解產生的 PAHs 特徵，所舉案例為 1989 年美國超級基金場址(Hylebos Waterway, Commencement Bay Sediment Superfund Site.)

## 2. 加油站及漏油事件

海上漏油(oil spill)往往造成生態損害，遙測(remote sensing techniques)對大面積污染情況之掌握有其特殊優越性。中國大連海洋大學針對 5 種不同油品，利用光譜特性(spectral characteristics)原理的中解析度影像分光放射計(moderate resolution imaging spectroradiometer, MODIS)，監測在 2007 年發生在黎巴嫩(Lebanon)的貯槽漏油事件(Ma, 2009)<sup>[17]</sup>。油品及來源鑑識，必須有軟體資料庫做比對，Staniloae(2001)<sup>[18]</sup>利用 GC 及 IR 圖譜配合資料庫軟體(具備各種原油、汽柴油燃料等已知油品及來源的資料)運算，可以顯現 2 個結果，一為根據計算相似度得出未知樣品可能的種類；一為可能的來源。Philp(2002)<sup>[19]</sup>則利用 GC IRMS、GC 及 GCMS 等儀器，鑑識漏油及石化煉製產物的可能來源，對於石油煉製品的風化及自然衰減的判斷有所助益。石化類污染土壤場址的土壤氣體(soil gas)監測，經常會出現有高濃度的甲烷(CH<sub>4</sub>)，Lundegard(2000)<sup>[20]</sup>整合地質、地球化學及土地利用等資訊，討論天然及人為的甲烷來源。2 個案例研究顯示一處汽油漏油地區的甲烷來自天然生成；另一處原油漏油土壤的甲烷來源係不飽和層(vadose zone)生物分解油質所生成。

加拿大環境部 Wang(2006)<sup>[21]</sup>用 GCMS 定量石油中生物標記(biomarkers)，生物標記是石油中存在的非常重要的碳氫化合物群組，目前偵測限值可達 ppm 及 ppb 程度。相對於石油中的烷烴或芳香族類化合物，生物標記化合物在環境中更不易被分解，而且在不同地質條件及不同年代形成的生物標記物質會有不同的生物標記指紋，也因此藉由儀器分析化學組成可以判別油品種類及來源，

對於風化狀況及分解狀況也有科學解釋。漏油與石油開採運輸長期以來都是國際關注大事，Daling(2002)<sup>[22]</sup>指出過去 10 年以來大家普遍使用於漏油鑑識的「Nordtest Methodology」(普遍應用於北歐、歐洲、美加各國)面臨修訂。「Nordtest Methodology 漏油鑑定修訂計畫」係由挪威的國家漏油鑑定實驗室(National Oil Spill Identification Labs.)與瑞典、芬蘭、丹麥及美國的巴特爾紀念研究所(Battelle Memorial Institute)合作，從定量診斷比值(quantitative diagnostic ratios)、採樣、樣品處理、背景參考樣品、GC-FID 及 GC-MS-SIM 數據處理、地質化學等角度提出修訂建議。Davis(2005)<sup>[23]</sup>研究加拿大育空河白馬(Whitehorse)附近煉油廠場址案例，該場址在二次大戰時曾有過 11 個月的煉油操作，但做為油品運送站更長達 60 年以上，利用 EDID(Earliest Demonstrable Inception Date)、LPID(Latest Possible Initiation Date)的年代判斷法對長期污染歷史的場址是有用的工具。EDID 及 LPID 則以空照及同位素( $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  比值及 n-C<sub>17</sub> : Pristane 比值)、添加劑(MTBE、TAME、MMT、MTEL、TEL、TML 等)為依據。另 2 案例分別為紐約市日內瓦加油站(Galperin, 2007)<sup>[24]</sup>及紐澤西州哥倫布市貨車燃料供應站(Galperin, 2008)<sup>[25]</sup>。

日內瓦加油站於 1990 年發現地下水非水相液體(non-aqueous phase liquid, NAPL)污染團(plume)面積有 1200 平方呎，1994 年採取 3 個樣品進行各種 BTEX 組成、添加氧化劑成分(oxygenated blending agent)分析，根據分析數據判斷有 4 種汽油成份在不同年代污染該場址，1 種是在採樣 5 年前、2 種是在採樣 5~10 年前漏出、1 種是在 1980-1984 年期間造成污染。哥倫布市案例亦為地下水發現 NAPL，在 3 次不同時間取樣 7 個樣品進行柴油組成及風化程度診斷(diagnostic ratio)，充分證據顯示場址有 2 次不同時間的污染事件發生，一是在供應站財產買賣(2000 年 3 月)之前，另一則在財產過戶之後發生。針對非技術人員所舉的 2 個加油站污染的環境鑑識技術案例<sup>[26]</sup>，可以在 USEPA 的網站上下載([www.nepis.epa.gov/Adobe/PDF/30006HLT.PDF](http://www.nepis.epa.gov/Adobe/PDF/30006HLT.PDF))。案例中在一街之隔的 2 個加油站，地下水或土壤污染責任歸屬可依油品來源(油品混合配方不同)及風化程度不同鑑別出來。例如加油站 B 的油品供應來源係富含異烷屬化合物(isoparaffins)，例如 2,2,4<sup>-</sup>，2,3,4<sup>-</sup> 及 2,33<sup>-</sup>三甲基戊烷(B 煉油廠特徵)，而加油站 A 使用 A 煉油

廠油品則不具此特徵，地下水污染團的樣品具加油站 B 的組成特徵，因此認定 B 站應負責任。柴油燃料則為另一案例，柴油中硫的含量不同時期有不同規定，例如美國 2 號柴油燃料 1922 年時規定 < 15,000ppm(但實際上為引擎著想，皆 < 5,000ppm)，1993 年規定 < 500ppm(1933 年之前，車用柴油 2 號硫含量應 < 2,500ppm)，2006 年以後為 < 15ppm，此等含硫量的改變，是足以做為污染發生年代的鑑識之用。案例中貨車停靠站柴油燃料在 1993 年 10 月所有權有轉移，經比對 NAPL 樣品及各項資訊，發現 25 個 NAPL 樣品及 8 種販售柴油 2 號樣品的含硫量均 < 500ppm，少有樣品含硫量 > 500ppm，以及 1997 年之後 NAPL 厚度增加，因此判定污染責任應由新買主負責。

## 2.2 含氯有機溶劑及高氯酸鹽等

### 1. 含氯有機溶劑

Doherty(2000)<sup>[27,28]</sup>介紹四氯化碳(CTC)、四氯乙烯(PCE)、三氯乙烯(TCE)及 1,1,1-三氯乙烷(TCA)在美國的生產歷史，以及在工業上的應用，OCTC 最早用在乾洗，後來被 PCE 取代，因蒙特婁議定書的關係，在 1990 年代，CTC 已經被禁用。Oudijk(2003)<sup>[29]</sup>利用傳統水文學推估地下水回注定年法(age-dating techniques)，以氟氯碳化合物(CFC)及氚(tritium)做為年代標記(age marker)，判定紐澤西州北方一處工業區的 TCE 及 PCE 的污染場址。CFC 及 H<sub>3</sub>均為人類製造物質，超過半世紀使用後溢散在大氣中，再經降雨等回注到土壤地下水。用 <sup>3</sup>H/<sub>He</sub> 同位素法，估計污染發生 31~32 年，用 CFC 方法推估，污染發生 32~35 年，大致相符。Gauthier(2003)<sup>[30]</sup>利用 1,1-二氯乙烯(DCE)與 1,1,1 三氯乙烷(TCA)之比值做地下水污染團(plume)的定年(age-dating)並討論其不確定性。理論上，DCE 是 TCA 為地下水中的水解(hydrolysis)產物，DCE 與 TCA 的比值說明水解發生的時間長短，間接指出 TCA 排到地下水的釋出時間。水解速率與水溫有關，必須在實驗室中平行取得水解速率常數，或經實際場址定期取得水樣實測而得。Sauer(2003)<sup>[31]</sup>研究美國西維吉利亞州一處汽油(LANPL)場址及加州一處煤渣(coal tar, DNAPL)場址。利用地下水 NAPL 樣品中 50 種汽油碳氫化合物之組成範圍分析，包括 paraffin, isoparaffin 及 olefin compounds(烯烴化合物)等，並

以某些烷基芳香族碳氫化合物的水中溶解度特定(由 PIANO 分析取得，P = paraffin，I = isoparafin，A = aromatic，N = naphthene，O = olefin compounds)比值，做為診斷比值(diagnostic ratios)或碳氫比值(hydrocarbon ratios)，此等比值在地下水 NAPL 來源認定上很有用。在西維吉利亞案例，下游診斷比值與汽油站之比值一樣，表示在含水層輸送過程中診斷比值沒變，下游污染來自上游。在加州案例中，診斷比值產生變化，表示遠端污染不一定來自 coal tar 場址，多種不同的診斷指標，將有助於污染源之鑑識。針對氯乙烯(Vinyl Chloride, VCM)的鑑識技術，Shouakar-Stash(2009)<sup>[32]</sup>開發新的方法，稱為連續流同位素質譜儀(Continuous Flow-Isotope Ratio Mass Spectrometry, FC-IRMS)，特殊的收集器收集<sup>m/z</sup>比為 64 及 62 的範圍。應用在意大利北部 Ferrara 市附近一處 VC 污染的砂質含水層場址，測定 VC 同位素指紋 <sup>37</sup>Cl 及 <sup>13</sup>C，顯示現址之 VC 並非原工廠氯乙烯製品，而係現址其他石化產品的分解產物。同時，也證實在地下水流動過程中，VC 的天然衰減(生物作用)。McNab(2001)<sup>[33]</sup>強調重污染場址地下水團的行為，當特定場址地下水污染團(plume)受到其他不同場址地下水污染團交互影響之際，最好要由共同的行為機制(例如還原脫氯作用)找出特定場址與其他不同場址的差異，本文提出如何將含氯化合物污染團之行為自其他多樣性污染場址的統計資料中區分出來。

## 2.高氯酸鹽(perchlorate)及氯苯

Motzer<sup>[34]</sup>利用 IRMS，分析  $\delta^{37}\text{Cl}$  及  $\delta^{18}\text{O}$ ，可鑑別高氯酸鹽中的陰離子  $\text{ClO}_4^-$ 。繪製二維的  $\delta^{37}\text{Cl}$  及  $\delta^{18}\text{O}$  可鑑別人造(anthropogenic)或天然(geogenic)來源。間接分析方法包括高氯酸鹽中不純物的同位素鑑定，例如溶解性硝酸鹽的  $\delta^{15}\text{N}$  及  $\delta^{18}\text{O}$ ，固體或溶解的硝酸鋨的 <sup>87</sup>Sr 與 <sup>86</sup>Sr 比值。另外，若要鑑別由河川水或雨水帶來不同地下水的回注，水中穩定性同位素  $\delta^{18}\text{O}$  及  $\delta^2\text{H}$  的分析，也有助益；氚及氦(<sup>3</sup>He)的同位素分析，亦有助於估計地下水污染發生的時間。Duncan(2005)<sup>[35]</sup>針對美國加州聖地牙哥地區 Atacama 沙漠 Mission Valley Formation 的土壤地下水做調查分析。利用 USDA 及 USEPA 的採樣及前處理方法，XRD(X-ray diffraction)、PLM(polarized light microscopy)、SEM 及穩定性同位素(<sup>37</sup>Cl / <sup>35</sup>Cl，<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr，<sup>17</sup>O/<sup>16</sup>O)以及替代物(硝酸鹽、鈉、氯化物、磷酸鹽、

鋨等)、地質分析(石灰石、鹽湖地殼、磷酸鹽礦等)等工具，實驗顯示當地為天然形成的高氯酸鹽，與其他硝酸，硫酸，氯化物等無關，Slater(2010)<sup>[36]</sup>針對多重來源產生溶解性高氯酸鹽的鑑識，以南加州從前飛彈推進器測試場為對象，使用地下水模式、地下水環境條件、同位素指紋等方法。研究指出此址以水力控制(hydraulic control)，而且在同樣的水文地質盆地有多處高氯酸鹽的來源。Mancini(2008)<sup>[37]</sup>針對苯及氯苯污染地下水做來源鑑定，使用穩定碳及氫( $\delta^{13}\text{C}$  及  $\delta^2\text{H}$ )的方法。

## 2.3 各類工廠(煤電廠、煤氣廠、煉鋁、煉鋼、木材防腐、鉛蓄電池、空內外空間)

### 1. 燃煤電廠及煤氣廠

美國康乃狄克州 New Haven 有一處曾經運轉近 100 年的燃煤電廠場址，土地中多種 PAHs 濃度超過州政府各項標準。Stout(2004)<sup>[38]</sup>回顧過去電廠及附近發展之歷史文件並採取 66 組土壤樣品，進行總石油碳氫化合物(Total TPH)及細部 PAH 指紋分析，對長期污染場址案例而言，結合文件探討及指紋分析是有效的作法。Saber(2006)<sup>[39]</sup>研究一湖底底泥 PAH 濃度升高，認為附近一處已停止運轉的煤氣廠(manufactured gas plant, MGP)為最有可能的污染源。從取自 MGP 土壤樣品及湖泊底泥樣品做化合物指紋比對(GC/FID 及 GC/MS)，証實與 MGP 廠之焦油土壤(tarry soil)的 PAH 分布相似。但以 GC-IRMS 分析，底泥樣品不盡吻合，說明湖底污染至少有一部分非完全來自 MGP 廠(Saber, 2005)<sup>[40]</sup>。

### 2. 煉鋁及煉鋼廠

Booth(2005)<sup>[41]</sup>回顧現代鋁還原廠中 PAHs 的形成、環境中的轉化及鑑識方法，包括製程改善對生成 PAHs 的影響，指出許多既有的資料庫可能已不適用。Almaula(2005)<sup>[42]</sup>討論各種煉鋼製程，包括電弧爐(electric arc furnace, EAF)、鼓風爐(blast furnace)、氧化爐(basic oxygen furnace)，及其 PAHs 可能來源。

### 3. 木材防腐、鉛蓄電池廠及空內外空間

用木餾油或雜酚油(creosote compounds)做木材處理，這些木餾油之來源係經由煤焦油(coal tar)蒸餾而得。Murphy(2005)<sup>[43]</sup>指出木材處理廠 PAHs 之來源：

85%來自木餾油，主要為2~4個環的化合物。木餾油的移動性及生物分解性差異很大，決定於環的數目及烷化程度。其來源可用化學指紋分布及同位素分析，底質之定年亦可判定何時釋放到地面水體。Machemer(2007)<sup>[44,45]</sup>鑑識住宅區及汽車電池製造廠附近未擾動土壤的鉛污染來源，由於汽車排氣也會有鉛污染(未全面實施無鉛汽油前)，所以要釐清鉛的來源必須規劃各種地點的採樣外，針對鉛蓄池廠的灰塵，尚有其他元素(例如銻 Sb 及錫 Sn)成份佐證，遠離鉛蓄電池廠2.4公里遠的馬路，其土壤含鉛量及特徵則用來區隔場址可能混合汽車排氣所含有的鉛成分。 $Pb-Sb-Sn$  粒子及  $Pb$  氧化物粒子可以提供推估土壤中類似的濃度比，推估結果顯示住宅區及未攬動土地大部分(>80%)的鉛來自附近的電池廠。Hawthorne(2008)<sup>[46]</sup>追蹤室內及室外空氣的苯(benzene)濃度，發現室內濃度一般低於大氣(室外)濃度。從室內、室外及土壤氣體3種樣態中採取66個氣體樣品，顯示室內苯來自室外，而非來自土壤揮發性苯。

## 2.4 各類環保設施(動物排泄物厭氧池、焚化爐附近、地下水天然衰減場址之直接證據)

### 1. 厭氧池塘及焚化爐

Mariappan(2009)<sup>[47]</sup>從13處動物排泄物厭氧池塘同位素測定， $\delta^{15}N-NH_4^+$ 值在2.0到59.1%之範圍； $\delta^{15}N$ -總凱氏氮(TKN)其 $\delta^{15}N-TKN$ 的測值在每一個厭氧池塘中並沒有顯著統計上的差異；在厭氧池塘上方1.5公尺之樣品 $\delta^{15}N-NH_4^+$ 的空間差異不大(差異係數<5%)。Kim(2009)<sup>[48]</sup>研究南韓地區多重污染源地區某有害廢棄物焚化爐附近之土壤樣品中的PCDDs/PCDFs的來源配比，為了來源鑑別，土壤樣品與可能來源(工廠排氣、汽機車、五氯酚及氯化硝基酚)的所有同類物(congener profiles)及異構物(isomer profiles)均做比對。多變數分析(主成分分析及層級群聚分析)及多重回歸分析結果，排氣、五氯酚、氯化硝基酚的貢獻配比約為2~89%，9~62%，1~86%，範圍相當大。

### 2. 監測式自然衰減(monitored natural attenuation, MNA)土壤或地下水場址

Martus(2010)<sup>[49]</sup>指出利用鑑定代謝(生物作用)產物的指紋特徵(signature metabolites)可以提供MNA場址最直接的證據，這是過去15年來沒有在現址上

做到的事。噴射燃料污染場址案例是第一宗報告有關現場研發生物分解 C<sub>4</sub>-C<sub>7</sub> 芳香族污染物生成芳香族酸產物的直接証據。此等鑑識工具包括穩定性同位素、生成物鑑定及定量、微生物鑑定及定量，生成物降解比例等，有助於場址之管理、訴訟及成本合理化。Coffin(2008)<sup>[50]</sup>利用放射性碳及穩定性同位素分析，確認石化污染物在不飽和水層的自然衰減作用，場址地點在維吉利亞州的 Norfolk 海軍基地。測定土壤氣體樣品的 CO<sub>2</sub> 及 CH<sub>4</sub> 的同位素比值，顯示 <sup>14</sup>C 較少的 CH<sub>4</sub> 為甲烷化碳氫化合物的生物降解產生的 CH<sub>4</sub>，比較污染團(plumes)影響地區的 CO<sub>2</sub> 與背景 CO<sub>2</sub>，顯示有 90%左右的 CO<sub>2</sub> 來自石化污染物，亦即污染團中的污染物成為微生物的主要碳源，證明 MNA 真實發生在此一場址。

## 2.5 各類環境介質(飲用水水源、河川水體、土壤地下水、底質等)鑑識 案例

### 1. 飲用水水源及地面水體

2000 年 5 月加拿大針對大腸桿菌 0157 : H7 爆發擴大事件，進行被污染的飲用水配水系統調查，目的在了解水供應系統受害程度、環境鑑識技術結合水文地質研究、環境傳輸評估、基因特徵、污染物傳輸及宿命等。Danon-Schaffer(2001)<sup>[51]</sup>描述了 Walkerton 供水系統調查的經過。沖積含水層(allurial aquifer)經常會受到硝酸鹽(nitrate)的污染。Palau(2010)<sup>[52]</sup>利用同位素(<sup>13</sup>C, <sup>15</sup>N 及 <sup>18</sup>O)評估其來源及動向，有時也會受到四氯乙烯(PCE)的污染，同位素工具一樣可以用上。硝酸鹽 2 個可能來源為家庭化糞池及氮肥料工廠，PCE 則來自 1000 尺上游地下水的流入。Iqbal(2008)<sup>[53,54]</sup>研究路易士安那河域及岸邊環境中的 PAHs，辨別那些來自天然，那些部分來自人為污染。經 3 年期間 3540 個樣品的收集分析(GCMS)，採樣站劃分為 4 區(petrogenic, phrogenic, biogenic, diagenetic)，利用主成分分析法(principal components analysis)，可以將 PAHs 多重來源予以區分出那些是 petrogenic 那些來自 pyrogenic 或 biogenic 或 diagenetic。Silva(2002)<sup>[55]</sup>利用 N 及 O 的同位素研究都會區硝酸鹽的來源。都會區地面水或地下水的硝酸鹽污染源可能來自化糞池、污水管裂縫或肥料施作，實測地為美國德州 Austin 及華盛頓州的 Tacoma 城。

## 2. 土壤地下含水層及底質

Qin(2009)<sup>[56]</sup>利用 GC-ECD 及 GC-NCI-MS 做有機氯農藥的土壤殘留量分析，20 個有機氯農藥(OCPS)土壤樣品，經索式萃取及固相萃取後上線分析，偵測極限 GC-ECD 為  $0.027\text{--}0.098 \mu\text{g}/\text{kg}$ ，GC-NCI-MS 為  $1.5 \times 10^{-4}\text{--}2.4 \times 10^{-3} \mu\text{g}/\text{kg}$ ，Spiked sample 平均回收率 GC-ECD 為 70.0~127%，GC-NCI-MS 為 73.0~122%，結果顯示 GC-NCI-MS 比 GC-ECD 更靈敏，選擇性也更高。Helgen(2003)<sup>[57,58,59]</sup>定量研究美國亞利桑那州 Pinal 河含水層金屬質量分布的整體架構，分三篇文章報導。從上百個地點 60 多萬監測井紀錄以及地球化學指紋，區分出三個不同來源區：一為 1926 年開始( $70 \text{ mg/l Cl}$ ， $200 \text{ mg/l Cu}$ ， $3,000\text{--}9,000 \text{ mg/l Fe}$ )，一為 1962 年開始( $30\text{--}200 \text{ mg/l Cl}$ ， $1,500\text{--}3,500 \text{ mg/l Cu}$ ， $< 500 \text{ mg/l Fe}$ )，另一為最近(1992-2001 年)礦區操作( $30\text{--}70 \text{ mg/l Cl}$ ， $\sim 1,000 \text{ mg/l Cu}$ ， $\sim 2,000 \text{ mg/l Fe}$ )。起初酸性礦水流經沖積層之流速為每天 0.5 公尺，後來逐漸增加酸性釋出液流速為每天 2.3 公尺，因為沖積層的緩衝能力已經用罄。Zemo(2009)<sup>[60]</sup>利用根源 PAHs(parent PAHs)的鑑識做為底質 PAHs 來源配比的判斷，應用於 Pacific Northwest 的案例，為少數利用根源 PAHs 辨識來源的報導。包括區分 petrogenic(石化)及 pyrogenic(燃燒或裂解)等來源。作者利用根源 PAHs 比值，做為一家過去從事木材處理廠的離岸底質 PAHs 來源分布的鑑識，該木材處理廠座落於美國西北太平洋沿岸高度工業化港口。假設木材處理廠是底質所有 PAHs 的來源，然此一假設涉及整治底質費用的分攤，在訴訟中馬上遭到質疑。但底質整治已經完成，鑑識必須依賴過去存在的根源 PAHs 的資料。根據 2000 年 Yunker 及 2005 Costa and Sauer 的文獻，底質中 PAHs 區分為來自木材處理廠的木餾油(creosote)及來自工業區水道最常見的“都會區背景”來源(亦即 pyrogenic 及 petrogenic 來源的混合物)，此一方法做為整治費用分攤之依據。阿拉斯加州威廉王子灣與阿拉斯加灣北部由於長期工業活動及天然石化類碳氫化合物的背景，加上漏油事件，使得底質污染來源之配比相當複雜。Page(2002)<sup>[61]</sup>利用全套完整的方法(holistic approach)，可以將 1991，1999 及 2000 的資料，運用最小平方法得到一些當地底質的污染來源的大概配比資訊。Mudge(2002)<sup>[62]</sup>利用 NOAA 數據重新計算威廉王子灣底質問題。Barreira(2007)<sup>[63]</sup>則研究葡萄牙 Ria Formosa Lagoon 底質的

PAHs 濃度及來源，區分其交通燃燒源或石化來源。

## 2.6 原料使用，非法棄置及緊急應變

### 1.原料使用

Lee(2008)<sup>[64]</sup>經過 5 年研究，偵測印刷電路版上使用鹵化溶劑的殘留量，將有助於執行取締違規使用導致臭氧層破洞的物質。

### 2.非法棄置

Ruffel(2009)<sup>[65]</sup>報導 2 個案例，可以引用地質物質排除或聯結嫌疑犯。針對非法棄置運送車輛的後檔板(tailgate) 壓條上不同地質物，使無法有不在場(alibi)的證明。另一案例為在嫌犯褲子上取得一組非尋常的礦物質，提供環保執法官員偵察非法棄置場的聯結。Ruffel(2009)<sup>[66]</sup>利用透地雷達(ground-penetrating radar)評估北愛爾蘭 4 處非法棄置之場址。Stout(2007)<sup>[67]</sup>利用物性(比重、顯微鏡、磁性、沉浮行為)、化性(化學指紋、生物標記)等鑑定類瀝青物及爐渣物，此案例在加州，較接近環檢所過去許多案例。

### 3.緊急應變

Grange(2009)<sup>[68]</sup>探討化學物質突發性隨意擴散或與氣象有關的事件，能繪製污染物分布的地圖，對風險暴露評估或整治計畫都很需要。採用 DART (自動採樣直接分析，direct analysis in real time)及飛行時間質譜儀(Time of flight mass spectrometer)，以阿斯比靈或咖啡因粉末示範在污染場址半定量繪圖的可行性。

Chang(2009)<sup>[69]</sup>以 OP-FTIR 及環保署法定擴散模式(AERMOD)做為某一製藥廠臭味負荷評估的工具。OP-FTIR 的資訊是該廠的特定指紋，與 AERMOD 模式結合，可以預測該廠影響的地區及污染物擴散的方向。

### 三、環境鑑識科學面

#### 3.1 模式、遙測空照、化學、生物學、分析儀器等

##### 1.環境鑑識科學回顧、模式及遙測

Morrison(2000)<sup>[70][71]</sup>在 2000 年初成立學會，發行期刊，到台灣舉辦研討會(2003 年及 2005 年)，並將過去科技做整體回顧，可謂環境鑑識的開創者，功不可沒。在 2000 年至 2010 年也陸續更新出版了專書，奠定了專業聲望。Brilis(2000)<sup>[72,73]</sup>則以遙測工具為主題，應用在環境鑑識，分為傳統方法及數值分析法，傳統航照起源於 1930 年代，演變到現在精確的全球衛星定位，數位立體圖像之發展，Grip(2000)<sup>[74]</sup>指出發展的軌跡。Morrison(2000)<sup>[75]</sup> 介紹侵蝕模式(corrosion models)、分解模式(degradation model)、製程、生物標記、同位素、污染物傳輸模式、添加氧化劑等均為環境鑑識定年及污染源確認的工具。

##### 2.年輪化學、生物學

Balouet(2007)<sup>[76,77]</sup> 介紹年輪化學(dendrochemistry)及年輪生態學(dendroecology)應用在環境鑑識領域的理論基礎及案例研究。年輪生態學是利用年輪型態去評估樹林年齡及它們成長的環境因素，在氣象學上已有很好的發展及應用。應用在污染物排放年代及特徵的評估，一樣具有潛力。本文介紹 6 個案例，包括成功應用於石化產品及含氯劑洩漏的實例。年輪年代學應用已超過百年，它可以提供我們有關氣象、人類活動、洪水、火災、土石流以及其他種種地理及生物的活動記錄。但在法庭上以 dendrochemistry 一詞代表使用化學檢測方法較容易討論及被接受。Pattnaik(2005)<sup>[78]</sup>討論結合微生物及法醫科學，形成微生物法醫學(microbial forensics)，應用在生物恐怖行動的偵察防患。先進的分子生物技術，分子種系學(molecular phylogeny)、全基因體定序(whole genome sequencing)、微陣列分析(microarray analysis)、DNA 指紋(DNA fingerprinting)等均可提供可靠的結果。

##### 3.分析化學及儀器

Wait(2000)<sup>[79]</sup>回顧有機分析技術在環境鑑識化學演進的情形。在 1950 年代早期，飲用水中有機物分析定量及定性技術需求已有共識，並在 1960 年代逐漸

建立。GC-MS 在 1970 年代發展，使第一時間在法庭上呈現科學性的數據達到可被接受的程度。到了 1990 年代之後，急速發展儀器性能及統計方法。從 1990 到 2010 年環境檢測及鑑識技術的黃金發展年代也不過 20 年左右。Lundegard(2003)<sup>[80]</sup>提出超臨界液體萃取做為土壤碳氫化合物分析鑑定的前處理方法。Cochran(2010)<sup>[81]</sup>提出用選擇性 GC 管柱測定環境介質中戴奧辛及呋喃的來源及動向。Kujawinski(2002)<sup>[82]</sup>利用電灑離子化 FT-ICR 串聯質譜儀(ESI-FT-ICR-MS)分析鑑定環境中混合污染物(mixture or complex)，若有需要還可再結合 NMR(nuclear magnetic resonance)設備分析極性大分子有機物。Frysinger(2002)<sup>[83]</sup>提出二維(GC×GC)分離鑑定方法。Pearce(2002)<sup>[84]</sup>則用多層氣相皮托管(Multi-Level Vapor Phase Piezometers)做為土壤氣體或地下水監測長期監測用，在加拿大一處曾經是加油站的現址執行測試，量測不同深度(0.75, 1.5, 2.25, 3.0 公尺)土壤氣體監測井的總石油濃度(TPH)，氧及 CO<sub>2</sub> 濃度。Kennedy(2002)<sup>[85]</sup>利用電腦控制操作的掃瞄式電子顯微鏡做重金屬(土壤樣品)的定性測量。SEM-EDS(Energy Dispersive Spectroscopy)已經常用於一般研究及實務上。Dablin(2002)<sup>[86]</sup>則使用各種萃取方法，SEM，XRD，化學分析等方法，分析超級基金土壤樣品中各種重金屬含量。Ghazi(2004)<sup>[87]</sup>利用雷射剝離(Laser Ablation)串連 ICP-MS 測定 Pb 濃度，配合同位素鉛(204Pb, 206Pb, 207Pb, 208Pb)及汞的同位素測定(202Hg, 204Hg)做為干擾校正，可以針對多層繪圖晶片(layered paint chip)中的放射性鉛的不同來源做出推論。Grange(2001)<sup>[88]</sup>認為離子組成分析(Ion Composition Elucidation, ICE)更容易在法庭或向陪審團解釋，可以應用在三級污水處理廠放流水中萃取出非常微量的化合物，可以量測出 5 種數值用來決定離子組成並確認化合物，排除一些不正確的圖譜比對。

### 3.2 採樣、樣品代表性、分析誤差、數據處理、統計方法及標準參考物質(SRMs)等

#### 1. 採樣及樣品代表性

Warren(2005)<sup>[89]</sup>討論樣品代表性經常與法規有關聯，巨觀及微觀的樣品代表性觀念與美國 EPA 品質系統的關聯。Gilbert(2005)<sup>[90]</sup>指出要得到有代表性數

據所必要的採樣設計(sampling design)。設計合理的採樣要有合適的場址觀念模式(conceptual model)，以及費用合理性。不同目的有不同的採樣設計，論文舉出幾種例子。Nocerino(2005)<sup>[91]</sup>指出採樣要能代表母體(例如整治場址)有一些注意事項，例如 Gy 理論、母體不均質程度等。Saxton(2005)<sup>[92,98]</sup>說明美國 EPA 針對 Permethrin 殺蟲劑及土壤樣品處理技術流程，提供標準化採樣流程。Feenstra(2005)<sup>[93]</sup>討論在 NAPL 污染源要採到代表性土壤樣品所面臨的挑戰，建議可以用混合樣品等方法克服。Stelling(2005)<sup>[94]</sup>指出固體廢棄物的異質性，在執行法律的檢測上如何做好採樣工作，測值統計與規範現值計算均要明確。Cattle(2004)<sup>[95]</sup>討論環境採樣與法規執行如何取得一致性的系統性作法。澳洲新南威爾斯環境保護局(NSW EPA)轄下的環境鑑識及分析科學部門(Environmental Forensic and Analytical Science Section)發展一套獨特的未知有害物質樣品的處理流程。Raia(2004)<sup>[96]</sup>討論環境鑑識調查含各種混合碳氫化合物組成的環境樣品的流程。Ramsey(2005)<sup>[97]</sup>認為評估樣品代表性是任何環境調查很重要的因子，必須在下結論之前，慎重予以審視。作者提出一套評估樣品代表性的方法學。

## 2. 誤差、數據處理及統計方法

Bruya(2005)<sup>[99]</sup>討論 PAH 分析的可能誤差，在執行鑑識調查時，評估檢測誤差是非常重要的工作。作者分前處理、分析步驟及誤差檢視及管理方法 3 部分討論。Short(2002)<sup>[100]</sup>討論漏油事件鑑識調查工作與在取得碳氫化合物檢測數據後如何做數據整理及解讀。利用一階損失速率(the simple first-order loss-rate)的假設動力學現象(可由數據整理而得)，應用在 PAHs 的風化損失，並以 4 個實際案例的應用做說明。Mattuck(2005)<sup>[101]</sup>說明如何取得有代表性的數據來進行風險評估，Risk assessment 為目的的採樣代表性，必須考慮到接受者(receptors)、暴露面積、暴露介質、暴露途徑及場址內的居住情況等。Composite samples 雖能減少樣品數，但樣品中的差異情形則無從得知。Johnson(2002)<sup>[102]</sup>提出環境鑑識中最新的多變異化學計量方法(Multivariate Chemometric Method)，討論主成分分析法及各種受體模式的優劣點及可能的陷阱等。Morgan(2006)<sup>[103]</sup>介紹英格蘭及威爾斯的 2 個土壤及底質的地質化學分析鑑識案例，利用 ICP-MS、AAS/Dionex 儀器及 canonical discriminant function analysis 及 hierarchical cluster analysis 等統

計方法做數據處理及解讀。Mudge(2007)<sup>[104]</sup>提出多變異統計方法在環境鑑識上的應用。Dong(2000)<sup>[105]</sup>曾在 2003 年台北召開的環境法醫研討會中發表類似論文，討論環境數據分析使用統計方法及可能的陷阱。4 種常用的統計方法包括 percentile and confidence interval、correlation coefficient、regression analysis 以及 analysis of variance(ANOVA)。

### 3. 標準參考物質(Standard Reference Material)

Posten(2007)<sup>[106]</sup>指出美國 NIST(National Institute of Standards and Technology)在 SRMs 開發的成果，作為環境中各種介質有機物鑑定的標準參考品。例如家庭灰塵中的有機污染物(SRM2585)、柴油粒狀物(SRM 16506)、河川底質的 PCBs(SRM19396)、煤渣中混合的 PAHs(SRM1597a)、人類血清中的 PCBs、農藥 PBDEs、Dioxin/Furans 等(SRM15986)。

## 3.3 法庭訴訟、公害爭端之科學證據

### 1. 支持法庭訴訟的工具、專家意見及責任理論

Ram(2000)<sup>[107]</sup>指出環境訴訟支持團隊如何以特殊技巧及工具，改變判決結果及減少爭訟費用的負擔。相關專家必須具備的科學專長或見解，包括：水文地質學、毒理學、微生物學、化學、工程學及安全方面的知識，溝通技巧也非常重要。Ries(2005)<sup>[108]</sup>討論美國在 1993 年高等法院建立聯邦法庭篩選專家(避免垃圾專家)的門檻原則(稱為 Daubert gatekeeping)。作者討論自 1993 年來的 12 年間，曾經受到影響的案例。Aronovsky(2000)<sup>[109]</sup>討論美國各項法律(RCRA、CERCLA 等)的法律責任，造成許多法律爭端，例如地下水污染團(plumes)可能背後複雜的責任歸屬鑑定問題。

## 3.4 其他資源：書籍、研討會、網站等

### 1. 書籍，請參閱參考資料<sup>[110-115]</sup>。

### 2. 研討會及網站，請參閱參考資料<sup>[116-120]</sup>。

## 四、結語及展望

- 1.法網恢恢，疏而不漏。天下沒有完美的犯罪，凡走過必留蛛絲馬跡。環境鑑識技術提供偵察環境犯罪的有用資訊。
- 2.環境鑑識技術類似一組「工具箱」，使用者在箱外挑選每一個案狀況最佳的工具，取得證據，供執法者做正確判斷。
- 3.環境鑑識技術是檢測技術的延伸、整合，環檢所今後在既有的檢驗基礎上，會持續進行個案鑑識技術的突破，以及必要的能力建置，達成國家環境檢驗支持環境保護工作的政策目標。

## 五、參考資料

- 1.環境檢驗所，有關環境污染物指紋資料庫建置之後續辦理情形，所務會議報告案，2010 年。
- 2.阮國棟，我國環境檢驗與鑑識技術，化工技術，第 206 期，2010 年 5 月。
- 3.Gwen O'Sullivan, et.al., Investigation of the Range of Carbon and Hydrogen Isotopes Within a Global Set of Gasolines, Environmental Forensics, p.166-176, April, 2008.
- 4.Ioana G. Petrisor, et.al., Use of Oxygenates to Date a Gasoline Release, Environmental Forensics, p.103-104, July, 2006.
- 5.James M. Davidson, et.al., Using the Gasoline Additive MTBE in Forensic Environmental Investigations, Environmental Forensics, p.31-36, Jan., 2000.
- 6.Gil Oudijk, Compound-Specific Stable Carbon Isotope Analysis of MTBE in Groundwater Contamination Fingerprinting Studies : The Use of Hydrogeologic Principle to Assess Its Validity, Environmental Forensics, p.40-54, Jan., 2008.
- 7.Barbara J. Smallwood, et.al., The Use of Stable Isotopes to Differentiate Specific Source Markers for MTBE, Environmental Forensics, p.215-221, Sep., 2001.
- 8.Yu Liu, et.al., Oil Fingerprinting by Three- Dimensional (3D) Fluorescence

- Spectroscopy and Gas Chromatography-Mass Spectrometry(GC-MS), Environmental Forensics, p.324-330, Dec., 2009.
9. Michael J. Wade, History and Composition of ps-6 Gasoline -Implications to Age-Dating Gasoline Contamination, Environmental Forensics, p.89-92, March, 2003.
- 10.P.D. Boehm, et.al., Total Organic Carbon, an Important Tool in an Holistic Approach to Hydrocarbon Source Fingerprinting, Environmental Forensics, p.243-250, Dec., 2002.
- 11.Gene W. Schmidt, et.al., A Technique for Estimating the Age of Regular/Mid-grade Gasolines Released to the Subsurface Since the Early 1970's, Environmental Forensics, p.145-162, April, 2002.
- 12.Zhendi Wang, et.al., Using Multiple Criteria for Fingerprinting Unknown Oil Samples Having Very Similar Chemical Composition, Environmental Forensics, p.251-262, Dec., 2002.
- 13.Hossein Alimi, et.al., Fingerprinting of Hydrocarbon Fuel Contaminants: Literature Review, Environmental Forensics, p.25-38, March, 2003.
- 14.Gil Oudijk, Fingerprinting and Age-Dating of Gasoline Releases- A case study, Environmental Forensics, p.91-99, March, 2005.
- 15.Issaac R Kaplan, Age Dating of Environmental Organic Residues, Environmental Forensics, p.95-141, June, 2003.
- 16.Paul Boehm, et.al., Identification and Allocation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs), [www.exponent.com](http://www.exponent.com), vol.4, 2008.
- 17.Long Ma, et.al., Oil Spill Monitoring Based on Its spectral Characteristics, Environmental Forensics, p.317-323, Dec., 2009.
- 18.Dumitru Staniloae, et.al., Pattern Recognition Based Software for Oil Spills Identification by Gas-Chromatography and IR Spectrophotometry, Environmental Forensics, p.363-366, Dec., 2001.
- 19.R Paul Philp, et.al., The Use of the Isotopic Composition of Individual

- Compounds for Correlating spilled Oils and Refined Products in the Environment with Suspected sources, Environmental Forensics, p.341-348, Dec., 2002.
- 20.Paul D. Lundegard, et.al., Soil Gas Methane at Petroleum Contaminated Sites: Forensic Determination of Origin and Source, Environmental Forensics, p.3-10, Jan., 2000.
- 21.Zhendi Wang et.al., Forensic Fingerprinting of biomarkers for Oil Spill Characterization and Source Identification, Environmental Forensics, p.105-146, July, 2006.
- 22.Per S. Daling, et. al., Improved and Standardized Methodology for Oil Spill Fingerprinting, Environmental Forensics, p.263-278, Dec., 2002.
- 23.Andy Davis, et. al., Use of Geochemical Forensics to Determine Release Eras of Petrochemicals to Groundwater, Whitehorse, Yukon, Environmental Forensics, p. 253-271, Sep., 2005.
- 24.Yakov Galperin, et. al., Forensic Environmental Geochemistry in Dispute Resolution-Case History1: Age-Dating a Gasoline Plume at a Service Station in Geneva, New York, Environmental Forensics, p.339-349, Oct., 2007.
- 25.Yakov Galperin, et. al., Forensic Environmental Geochemistry in Dispute Resolution-Case History 2: Differentiating Sources of Diesel Fuel in a Plume at a Fueling Station, Environmental Forensics, p.55-62, Jan., 2008.
- 26.Environmental Forensics case studies for the non-technical person,  
[www.nepis.epa.gov](http://www.nepis.epa.gov)
- 27.Richard E. Doherty, A History of the Production and Use of Carbon Tetrachloride, Tetrachloroethylene, Trichloroethylene, and 1,1,1-Trichloroethane in the USA: Part I-Historical Background; Carbon Tetrachloride and Tetrachloroethylene, Environmental Forensics, p.69-81, Jan., 2000.
- 28.Richard E. Doherty, Part II- TCE and 1,1,1 TCA, Environmental Forensics, p. 83-93, Jan., 2000.
- 29.Gil Oudijk, Estimating the Minimum Age of a Chlorinated Solvent Plume in

- Groundwater with Chlorofluorocarbon (CFC) and Tritium Methodologies: A Case Study, Environmental Forensics, p.81-88, Dec., 2007.
- 30.Thomas D. Gauthier, et. al., Age Dating Groundwater Plumes Based on the Ratio of 1,1-Dichloroethylene to 1,1,1-Trichloroethane: An Uncertainty Analysis, Environmental Forensics, p. 205-213, Sep., 2003.
- 31.Ted C. Sauer, et. al., Fingerprinting of Gasoline and Coal Tar NAPC Volatile Hydrocarbons Dissolved in Groundwater, Environmental Forensics, p.319-329, Dec., 2003.
- 32.Orfan Shouakar-Stash, et. al., Analysis of Compound-Specific Chlorine Stable Isotopes of Vinyl Chloride by Continuous Flow-Isotope Ratio Mass Spectrometry (FC-IRMS), Environmental Forensics, p. 299-306, Dec., 2009.
- 33.Walt W. McNab Jr. et. al., Forensic Analysis of Chlorinated Hydrocarbon Plumes in Groundwater: a Multi-site Perspective, Environmental Forensics, p.313-320, Dec., 2001.
- 34.William E. Motzer, et. al., Stable and Other Isotope Techniques for Perchlorate Source Identification, Environmental Forensics.
- 35.P. Brent Duncan, et. al., Forensic Identification of Anthropogenic and Naturally Occurring Sources of Perchlorate, Environmental Forensics, p.205-215 Jun, 2005.
- 36.Steve Slaten, et. al., Integrated Environmental Forensics for Evaluating the Extent of Dissolved Perchlorate Originating from Multiple Sources, Environmental Forensics, p72-93, March, 2010.
- 37.Silvia A. Mancini, et. al., Source Differentiation for Benzene and Chlorobenzene Groundwater Contamination : A Field Application of Stable Carbon and Hydrogen Isotope Analysis, Environmental Forensics, p.177-186, April, 2008.
- 38.Scott A. Stout, et. al., Historical and Chemical Assessment of the sources of PAHs in Soils at a Former Coal-Burning Power Plant, New Haven, Connecticut, Environmental Forensics, p.195-211, Dec., 2004.
- 39.Dian Saber, et.al., Environmental Forensics Investigation in Sediments near a

- Former Manufactured Gas Plant Site, Environmental Forensics, p.65-75, March, 2006.
- 40.Diane L. Saber, et. al., Applications of Forensic Chemistry to Environmental Work, J. Ind Microbial Biotechnol.p.665-668, 2005.
- 41.Pieter Booth, et. al., A Review of the Formation, Environmental Fate, and Forensic Methods for PAHs from Aluminum Smelting Processes, Environmental Forensics, p.133-142, June, 2005.
- 42.Satish Almula, Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Steelmaking, Environmental Forensics, p.143-150, June, 2005.
- 43.Brian L. Murphy, et. al., Environmental Forensics Aspects of PAHs from Wood Treatment with Creosote Compounds, Environmental Forensics, p.151-159, June, 2005.
- 44.Steven D. Machemer, et. al., Source Identification of Lead Contamination in Residential and Undisturbed Soil Adjacent to a Battery Manufacturing Facility (Part 1), Environmental forensics, p.77-95, Jan., 2007.
- 45.Steven B. Machemer, et. al., Source Apportionment of Lead Contamination in Residential, Undisturbed, and Roadside Soil (Part 2), Environmental Forensics, p. 97-105, Jan., 2007.
- 46.Steven B. Hawthorne, et.al., Tracing Contributions of Benzene from Outdoor to Indoor Air, Environmental Forensics, p96-106, Jan., 2008.
- 47.Sadayappan Mariappan, et. al., Variability of Anaerobic Animal Waste Lagoon delta 1.5N Source Signature, Environmental Forensics, p.18-25, March, 2009
- 48.Jae-Sik Kim, et. al., Source Apportionment of Polychlorinated Dibenzo -p-Dioxins (PCDDs) and Polychlorinated Dibenzofurans (PCDFs) in Soil Around a Hazardous Waste Incinerator in Multi-Sources Region, Environmental Forensics, p.132-143, June, 2009.
- 49.Peter Martus, et.al., Metabolite Analysis as Direct Proof of Biodegradation : Experience from Monitored Natural Attenuation (MNA) Projects, Environmental

- Forensics, p.94-101, March, 2010.
- 50.Richard B. Coffin, et.al., Radiocarbon and Stable Carbon Isotope Analysis to Confirm Petroleum Natural Attenuation in the Vadose Zone, Environmental Forensics, p.75-84, Jan., 2008.
- 51.Monica N. Danon- Schaffer, Walkerton's Contaminated Water Supply System : A Forensic Approach to Identifying the Source, Environmental Forensics, p.197-200, Sep., 2001.
- 52.Jordi Palau, et. al., Use Environmental Isotopes ( $^{13}\text{C}$ ,  $^{15}\text{N}$ , and  $^{18}\text{O}$ ) for Evaluating Source and Fate of Nitrate and PCE in an Alluvial Aquifer, Environmental Forensics, p.237-247, Sep., 2010.
- 53.Javed Iqbal, et.al., Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Louisiana Rivers and Coastal Environmental : Source Fingerprinting and Forensics Analysis, Environmental Forensics, p.63-74, Jan., 2008.
- 54.Javed Iqbal, et. al., Source of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Louisiana River and Coastal Environmental : Principal Components Analysis, Environmental Forensics, p.310-319, Oct., 2008.
- 55.S. R. Silva, et. al., Forensic Applications of Nitrogen and Oxygen Isotopes in Tracing Nitrate Sources in Urban Environmental, Environmental Forensics, p.125-130, June, 2002.
- 56.Qin Banghui, et. al., Residual Analysis of Organochlorine Pesticides in Soil by GC —ECD and GC-NCI-MS, Environmental Forensics, p.331-335, Dec., 2009.
- 57-59. S. Helgen, et. al., Elements Influencing Cost Allocation in the Pinal Creek Aquifer, Arizona, USA. Part I-III , Environmental Forensics, p.255-269, Dec., 2003.
- 60.Dawn A. Zemo, Use of Parent Polycyclic Aromatic Hydrocarbon(PAH)Proportions to Attribute PAH Sources in Sediments : A Case Study from the Pacific Northwest, Environmental Forensics, p.229-239, Sep., 2009.
- 61.Davis S. Page, et . al., A Holistic Approach to Hydrocarbon Source Allocation in the Subtidal Sediments of Prince William Sound, Alaska, Embayments,

- Environmental Forensics, p.331-340, Dec., 2002.
- 62.Stephen M. Mudge, et. al., Aspects of Hydrocarbon Fingerprinting Using PLS-New Date From Prince William Sound, Environmental Forensics, p.323-329, Dec., 2002.
- 63.Luisa A. Barreira, et. al., Concentration and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Sediments from the Rio Formosa Lagoon, Portugal, Environmental Forensics, p.231-243, July, 2007.
- 64.Richard N. Lee, et. al., Detection of Banned and Restricted Ozone-Depleting Chemicals in Printed Circuit Boards, environmental Forensics, p.320-339, Oct., 2008.
- 65.Alastair Ruffell, et. al., Forensic Geology in Environmental Crime : Illegal Waste Movement & Burial in Northern Ireland, Environmental Forensics, p.208-213, Sep., 2009.
- 66.Alastair Ruffell, et. al., Applications of Geophysical Techniques in Identifying Illegally Buried Toxic Waste, Environmental Forensics, p.196-207, Sep., 2009.
- 67.Scott A. Stout, Characterization and Source of Unknown “Tar-like Material” and “Slag ” in a Former Oil Field in Compton, California,, Environmental Forensics, p.265-282, July, 2007.
- 68.Andrew H. Grange, Rapid Semi-Quantitative Surface Mapping of Airborne-Dispersed Chemicals Using Mass Spectrometry, Environmental Forensics, p.183-195, Sep., 2009.
- 69.Wen-Shing Chang, et. al., Odor Load Investigation for a pharmaceutical Plant by Open Path Fourier Transform Infrared(OP-FTIR and EPA Regulatory Dispersion Model(AZRMOD),Environmental Forensics, p.82-91, March, 2009.
- 70.Robert D. Morrison, Critical Review of Environmental Forensic Techniques : Part I , Environmental Forensics, p.157-173, Jan., 2000.
- 71.Robert D. Morrison Critical Review of Environmental Forensic Techniques : Part II , Environmental Forensics,p.175-195, Jan., 2000.
- 72.George M. Brilis, et. al., Remote Sensing Tools Assist in Environmental Forensics:

- Part I -Traditional Methods, Environmental Forensics, p. 63-67, Jan., 2000.
- 73.George M. Brilis, et. al., Remote Sensing Tools Assist in Environmental Forensics:  
Part II -Digital Tools, Environmental Forensics, p.223-229, Sep., 2001.
- 74.Wayne M. Grip, et. al., Application of Aerial Photography and Photogrammetry in  
Environmental Forensic Investigations, Environmental Forensics, p.121-129, Jan.,  
2000.
- 75.Robert D, Morrison, Application of Forensic Techniques for Age Dating And  
Source Identification in Environmental Litigation, Environmental Forensics,  
p.131-153, Jan., 2000.
- 76.Jean-Christophe Balouet, et. al., Applied Dendroecology and Environmental  
Forensics: Characterizing and Age Dating Environmental Releases, Fundamentals  
and Vase Studies, Environmental Forensics, p.1-17, Jan., 2007.
- 77.Jean-Christophe Balouet, et. al., Use of Dendrochronology and Dendrochemistry in  
Environmental Forensics: Does It meet the Daubert Criteria ? Environmental  
Forensics, p.268-276, Dec., 2009.
- 78.Priyabrata Patnaik, et. al., Microbial Forensics: Applications in Bioterrorism,  
Environmental Forensics, p.197-204, June, 2005.
- 79.A. Dallas Wait, Evolution of Organic Analytical Methods in Environmental  
Forensic Chemistry, Environmental Forensics, p.37-46, Jan., 2000.
- 80.Paul D. Lundegard, et. al., Supercritical Fluid Extraction for Forensic Analysis of  
Hydrocarbons in Soil, Environmental Forensics, p.313-317, Dec., 2003.
- 81.Jack Cochran, Environmental Forensics- Using Selective GC Columns to  
Determine Sources and Fate for Chlorinated Dioxins and Furans in the Environment,  
[www.blog.restek.com/](http://www.blog.restek.com/) p = 1475, Sep., 2010.
- 82.Elizabeth B. Kujawinski, Electrospray Ionization Fourier Transform Ion Cyclotron  
Resonance Mass Spectrometry(ESI FT-ICR MS) : Characterization of Complex  
Environmental Mixtures, Environmental Forensics, p.207-206, Dec., 2002.
- 83.Glenn S Frysinger, et. al., GC×GC-A new Analytical Tool for Environmental

- Forensics, Environmental Forensics, p.27-34, Jan., 2002.
- 84.P. Pearce, et. al., Long Term Monitoring of Hydrocarbon Contamination Using Multi-Level Vapor phase Piezometers, Environmental Forensics, p.163-177,March, 2002.
- 85.Stephen K. Kennedy, et. al., Speciation and Characterization of Heavy Metal-Contaminated Soils Using Computer- Controlled Scanning Electron Microscopy, Environmental Forensics, p.131-143, June, 2002.
- 86.Cheryl L. Dahlin, et. al., Sequential Extraction Versus Comprehensive Characterization of Heavy Metal Species in Brownfield Sols, Environmental Forensics, p.191-21, March, 2002.
- 87.A. Mohamad Ghazi, et.al., Environmental Forensic Application of Lead Isotope Ratio Determination: A case Study Using Laser Ablation Sensor ICP-MS(LA-ICP-MS)Environmental Forensics, p.97-108, June, 2004.
- 88.Andrew H. Grange, et al., Ion Composition Elucidation(ICE) : An Investigative Tool For Characterization and Identification of Compounds of Regulatory Importance, Environmental Forensics, p.61-74, Jan., 2001.
- 89.John Warren, Representativeness of Environmental Samples, Environmental Forensics, p.21-25, March, 2005.
- 90.Richard O. Gilbert, et. al., Role of Sampling Design in Obtaining Representative Data, Environmental Forensics, p.27-33, March, 2005.
- 91.John M. Nocerino, et. al., Role of Laboratory Sampling Devices and Laboratory Subsampling Methods in Representative Sampling Strategies, Environmental Forensics, p.35-44, March, 2005.
- 92.George N. Saxton, et al., Permethrin Insecticide and Soil Sample Handling Techniques of State Regulatory Agencies, Environmental Forensics, p.327-333, Dec., 2005.
- 93.Stanley Feenstra, Soil Sampling in NAPL Source Zones : Challenges to Representativeness, Environmental Forensics, p.57-63, March, 2005.

- 94.Marion A. Stelling, et.al., Heterogeneity Of Contaminants in Solid Waste Materials Sampled for Compliance Testing, Environmental Forensics, p.231-239, Sep., 2005.
- 95.J.A. Cattle, et.al., Identification and Matching of Environmental Samples for Regulatory Purposes : A Systematic Approach, Environmental Forensics, p.185-194, Dec., 2004.
- 96.Joseph C. Raia, et.al., Evaluation of Environmental Samples Containing Heavy Hydrocarbon Components in Environmental Forensic Investigation, Environmental Forensics, p.21-32, March, 2004.
- 97.Charles A. Ramsey, et al., A Methodology for Assessing Sample Representativeness, Environmental Forensics, p.71-75, March, 2005.
- 98.George N. Saxton, et.al., A survey of Soil Sample Handling Procedures of State Pesticide Regulatory Agencies, Environmental Forensics, p.105-108, Jan., 2005.
- 99.James E. Bruya, et.al., Discussion of the Error Associated with PAH Analyses, Environmental Forensics, p.175-185. June, 2005.
- 100.Jeffrey W. Short, Oil Identification Based on Goodness-of-Fit Metric Applied to Hydrocarbon Analysis Results, Environmental Forensics, p.349-355, Dec., 2002.
- 101.Rosemary Mattuck, et.al., Data Representativeness for Risk Assessment, Environmental Forensics, p.65-70, March, 2005.
- 102.Glenn W. Johnson ,et.al., State of the Art Report on Multivariate Chemometric Methods in Environmental Forensics, Environmental Forensics, p.59-79, Jan., 2002.
- 103.Ruth M. Morgan,et.al., Data Interpretation in Forensic Sediment and Soil Geochemistry , Environmental Forensics, p.325-334, Dec., 2005.
- 104.Stephen M. Mudge, Multivariate Statistical Methods in Environmental Forensics, Environmental Forensics, p.155-163, Jan., 2007.
- 105.Yue Rong, Statistical Methods and Pitfalls in Environmental Data Analysis, Environmental Forensics, p.213-220, Jan., 2000.
- 106.Dianne L. Poster,et. al., New Developments in Standard Reference Materials

## 108 環境鑑識科學及其應用：回顧與展望

- (SRMs) for Environmental Forensics, Environmental Forensics, p.181-191, Jan., 2007.
- 107.Neil Ram ,The Tools of Environmental Litigation Support: How Environmental Litigation Support Teams Employ a Unique Set of Skills and Tools to Improve the Outcome and Reduce the Cost of Legal Disputes, Environmental Forensics, p.25-30, Jan., 2000.
- 108.David G Ries,et.al., Expert Opinions in Environmental Litigation: Gatekeeping Twelve Years after Daubert , Environmental Forensics, p.219-229,Sep., 2005.
- 109.Ronlad G Aronovsky, Liability Theories in Contaminated Groundwater Litigation, Environmental Forensics, p.97-116, Jan., 2000.
- 110.Patrick J. Sullivan, Franklin J. Agardy, Richard K. Traub, Pratical Environmental Forensics: Process and Case Histories, John Wiley & Sons, Inc., 2000.
- 111.Ioana G. Petrisor and Yvan Razafindrataandra Environmental Forensics – the Investigation and Role of Evidence, publicated in France.
- 112.Zhendi Wanf, Scott Stout, Oil Spill Environmental Forensics: Fingerprinting and Source Identification, 2008.
- 113.Brian Murphy and Robert Morrison, Introduction to Environmental Forensics, 2nd edition, Academic Press, 2007.
- 114.Robert Morrison and Brian Murphy, Environmental Forensics: Contaminant Specific Guide, 2006.
- 115.Hester, R. E and Harrison, R.M, Environmental Forensics, Royal Society of Chemistry, 2008.
- 116.University of Massachusits Amherst, 2005.  
DNA Fingerprinting – Tools of Tomorrow's Forensics- Environmental Forensics Methods for Soil Gas and Vapor Intrusion Investigations.
- Differentiation of PAHs from Coal, Creosole, and Combustion-related Background Sources in Stream Sediments.
- 117.The Geological Society, Dec. 16, 2010. Environmental Forensics

118. USEPA, Oct., 27, 2010, Internet Seminar([www.clu-in.org/conf/tio/stableisotope3](http://www.clu-in.org/conf/tio/stableisotope3) and4)Application of Stable Isotope Analysis to Environmental Forensics (Part 3) and to Understand the Degradation of Chlorinated Organic Contaminants (Part 4).

119. Integrated Science & Technology, Inc.

([www.integratedscience.com/environmental/overview.htm](http://www.integratedscience.com/environmental/overview.htm))

IST provides its forensics clients with technical breadth, multi disciplinary analysis, and state-of-the-art presentation skill.

120. Internation Network of Environmental Forensics([www.inefconference.com/](http://www.inefconference.com/))

Advances in Environmental Forensics, Calgary, 2009, 2<sup>nd</sup> conference will be held in Cambridge, 2011.