

空氣污染與噪音類

結合地面移動測繪技術溯源 - 以火燄離子化偵測法為例

黃志威*、李冠頡*、林楷傑*、盧彥廷*、李其需*、郭子豪**

摘 要

移動測繪 (Mobile Measurements) 技術依據美國環保署制定的檢測方法 OTM-33 (Other Test Method 33) 與其子方法 OTM-33A (Direct Assessment)，結合高解析儀器與全球定位系統 (Global Positioning System, GPS)，可用於污染物溯源與排放量化。OTM-33 提供濃度測繪、污染源特徵分析及排放量估算的完整框架，而 OTM-33A 則專注於快速部署，特別適用於近場小型地面源的定位與評估。此技術可記錄污染物濃度、地理位置及相關數據，進而生成空間分布圖，已成功應用於都會區、石化工業區，以及油氣開採逸散的監控。本研究盤點石化工業區移動測繪技術應用，並選擇火燄離子化偵測器 (Flame Ionization Detector, FID) 探討污染溯源的可行性。研究首先透過廠區外固定站識別污染熱點，結合氣象數據與排放特徵鎖定潛在污染源。接著，利用手持式 FID 於廠區內移動測繪，進一步限縮污染熱區，並輔以超聲波顯像儀 (Acoustic Imaging Cameras, AIC) 精準定位洩漏源。最終，透過 FID 進行定點監測，以評估修復後的洩漏改善成效。本研究展示移動測繪技術在國內石化工業區的應用情境，提出擴大應用時需考量的關鍵因素。此技術可補足固定站監測的空間覆蓋不足，為環境監測與污染治理提供有效的技術選擇。

38 結合地面移動測繪技術溯源 - 以火焰離子化偵測法為例

【關鍵字】移動測繪、污染溯源、火焰離子化偵測器、超聲波顯像儀

* 環興科技股份有限公司

工程師

** 環興科技股份有限公司

技術經理

一、前言

隨著都市化與工業化的快速發展，空氣污染問題日益嚴峻，特別是在城市與工業區，複雜的污染源分布為環境監測與管制帶來重大挑戰。傳統的固定監測站（如一般站、光化站以及特工站），雖然能提供穩定且長期的污染數據，但其空間覆蓋範圍有限，對於快速定位污染熱點與即時追蹤排放源有其不足之處，迫切需要更靈活且高效的輔助監測技術來補足空白。

參考美國環保署針對移動測繪訂定之檢測方法草案 OTM-33 及其子方法 OTM-33A，以高解析度分析儀器結合全球定位系統，為污染溯源與排放量化提供了新解決方案。OTM-33 作為一種方法框架，涵蓋 3 種主要操作模式：(1) 濃度測繪 (Concentration Mapping, CM)、(2) 污染源特徵分析 (Source Characterization, SC) 及 (3) 排放量估算 (Emissions Quantification, EQ)，能有效整合多種數據，進行多層次的污染源評估。其子方法 OTM-33A 則專注於快速部署，針對近場小型地面排放源的即時定位與排放量估算，進一步提高技術的靈活性與適用性。

本研究採用 OTM-33 框架下的移動測繪技術，透過搭載火燄離子化偵測器 (FID) 的移動平台於目標區域的道路上，結合氣象數據與高精度儀器，記錄污染物濃度、位置及相關條件，生成細緻的污染物空間分布圖。該技術適用於快速辨識未知污染源、分析其特徵以及量化排放強度，並能快速覆蓋大範圍區域，對於環境污染防制與熱點監測具有重要意義。然而，該技術在國內的實際應用仍較為有限，亟需更多實例研究來驗證其效能與適用性。

本研究於石化工業區應用移動測繪技術，探索其在台灣高密度城市與工業環境中的應用潛力。透過實地操作與技術優化，期望進一步補足傳統監測方法的不足，為空氣污染管制與政策制定提供科學依據，並促進相關技術在國內的應用。

二、文獻回顧

移動測繪技術在空氣污染監測中具有重要應用，特別是在都市空氣污染監測、煉油與石化工業區，以及油氣開採等場域中。在大城市和都市區域，移動測繪技術能提供高解析度的空氣品質數據，用於識別污染熱點，並評估交通和工業活動對空氣品質的影響。以 Apte et al. (2017) 的研究為例，他們利用移動測繪技術，將高時間解析度污染測量平台安裝在 Google 街景車輛上，對美國加州奧克蘭市的街道進行多次採樣，生成高達 30 公尺空間解析度的年平均日間 NO、NO₂ 和黑碳濃度分布圖。結果顯示，污染物濃度在局部區域具有顯著的空間變化，同一城市的主要道路或是工業區污染物濃度可能比郊區高出 5~8 倍，污染物分布不平均。相較於傳統固定監測站數公里的空間解析度，此方法以 30 公尺空間解析度準確識別污染熱點並有效填補空氣品質監測的數據缺口，對公共健康和環境政策具有重要意義。

在煉油與石化工業區，移動測繪技術同樣發揮關鍵作用。例如，Knighton et al. (2012) 使用配備質子轉移反應質譜儀（NO⁺ 試劑離子）的 Aerodyne 移動實驗室，對美國休士頓運河區的固特異 - 德州石化設施周邊進行了實地測量，檢測到 1, 3- 丁二烯 (30 ppbv) 和苯乙烯 (15 ppbv) 的顯著濃度熱區。研究結合風向及德州環保署 (TECQ) 的固定站監測數據，並使用高斯點源煙流模型估算排放速率，結果與官方排放清冊吻合，證明了移動測繪技術在石化工業區污染溯源與量化排放量的可行性。此外，Thoma et al. (2023) 探討了環氧乙烷 (EO) 在工業設施內的排放特徵及次世代排放測量技術 (Next Generation Emission Measurement, NGEM) 的應用。他們利用光腔衰盪光譜儀 (CRDS) 進行移動測繪與固定多點監測，發現設施內的四個主要 EO 排放區域，涵蓋偶發性排放（如鐵路車廂切換和反應器清洗）及持續性排放（如轉移泵和廢水排放口）。偶發排放濃度高達 500 ppbv 顯示設施內存在短暫的高污染排放事件，移動數據超過檢測下限（MDL，約 1.2 ppbv）則顯示污染排放持續發生。此研究不僅揭示 EO 排放的多樣性，亦顯示高解析度移動測繪技術在補足數據缺口與推進 NGEM 方法開發上的應用潛力。

在油氣開採區域，移動測繪技術在甲烷等溫室氣體的排放監測中展現高度應用價值。例如，Brantley et al. (2014) 利用 OTM-33A 移動測繪方法，對德州、科羅拉多州和懷俄明州 3 大油氣盆地的 210 個生產場地進行短期甲烷排放量化研究。結果顯示，甲烷排放速率 (g/s) 在 3 大盆地中呈對數常態分布，與天然氣產量正相關，但產量變異僅能解釋 10% 的排放變異，顯示設備設計與維護對排放具有重要影響；本研究提供關於油氣生產場地甲烷排放的重要數據，為未來減排策略與設備優化提供參考依據。此外，Rella et al. (2015) 使用移動通量平面 (MFP) 系統，對德州 Barnett 頁岩區近 200 個井場的甲烷排放進行測量與分析。在受測井場中，115 個場址顯示非零排放，且排放分布呈高度偏態；進一步分析顯示，50% 的總排放來自於 6.6% 的最高排放井場，而 22% 的最高排放井場則貢獻 80% 的總排放，顯示排放源的集中性特徵。透過 MFP 系統，可迅速識別高排放井場，並提供高解析度排放數據，具有高效率、低成本且大範圍部署的優勢。綜上所述，移動測繪技術能有效捕捉污染數據，為空氣品質管理提供科學依據，在都市環境、石化工業區與油氣開採場域均展現廣泛應用潛力（如表 1）。

表 1 移動測繪應用場景

應用場景	說明	目的	污染物
1. 都市空氣污染監測	大城市和都市區域，特別是需要高解析度空氣品質數據的地區	識別污染熱點、評估交通和工業活動對空氣質量的影響	VOCs、NO _x 、O ₃ 、PM _{2.5} 和 PM ₁₀
2. 煉油與石化工業區	大規模工業設施周邊，如煉油廠、化工廠等	評估邊界範圍內的污染排放分布，特別是工廠排放的影響	VOCs（如苯、甲苯、乙烯）、硫化物（如 H ₂ S）、氨氣（NH ₃ ）
3. 油氣開採區	天然氣田、油氣井和相關的管道輸送設施	量化甲烷洩漏與溫室氣體排放，支持甲烷減排行動	甲烷、非甲烷揮發性有機化合物 (NMVOC)

三、研究方法

本研究盤點煉油與石化工業區移動測繪溯源技術，綜合考量應用場景、監測物種、靈敏度及時間解析度等因素。經比較後，選定火燄離子化偵測法 (FID) 作為示範技術，並規劃溯源流程為 4 個步驟：(1) 廠外環境濃度監測、(2) 廠內污染熱區標定、(3) 污染源直接量測、(4) 洩漏即時修復。執行流程如表 2。

表 2 溯源流程

步驟	工具	說明
1. 廠外環境濃度監測	固定站	由廠外固定站監測環境濃度，掌握長期趨勢以鎖定嫌疑廠區
2. 廠內熱區標定	移動測繪	以移動平台搭載檢測儀器，於廠內行經大範圍區域，快速篩查出污染熱區
3. 污染源直接量測	巡檢工具	根據污染源特性，選定合適的儀器標定洩漏源
4. 洩漏即時修復	FID	以 FID 監控修復過程的濃度變化，確認改善情形

3.1 環境濃度監測設備

固定監測站設備的選用須考量監測物種、靈敏度、時間解析度、空間覆蓋範圍及適用場景等因素。不同設備比較如表 3，摘要說明如下：

表 3 固定站設備比較

特性	GC-FID (光化站)	OP-FTIR	Online TD-GC-MS	PTR-TOF-MS
監測物種 範圍	VOCs、 部分 HAPs	VOCs、 無機氣體	VOCs (尤其是 HAPs)	VOCs、 無機氣體
靈敏度	高	中等	高	極高
時間 解析度	1 小時	2~5 分鐘	1 小時	數十秒
空間覆蓋 範圍	定點	數百公尺	定點	定點或移動測繪
適用場景	定點源監測與溯源	開放區域監測	定點源監測與溯源	高時空分辨監測 與動態分析
限制	無法依需求更改位置，共析物干擾	受環境條件 影響大	須定期維護， 非即時	設備昂貴， 同重物干擾

- 1. GC-FID：主要監測光化前驅物 (VOCs)，具高精度計量能力，但僅涵蓋部分芳香烴類的空氣污染物及異味污染物，較難全面應對污染監測需求。
- 2. OP-FTIR：適用大範圍快速篩查，但易受環境條件干擾，監測穩定性較低。
- 3. Online TD-GC-MS：具備高精度定量能力，適用於源解析，但時間解析度較長（約 1 小時）。
- 4. PTR-TOF-MS：具高靈敏度與即時監測能力適用於移動測繪，但設備昂貴。

3.2 移動測繪設備

移動測繪技術要求高時間解析度與抗震設計，主要設備比較如下：

- 1. PTR-MS 及 CRDS：高敏感度，可針對特定物種監測。
- 2. FID：針對總碳氫化合物 (THC) 量測，在國內廣泛用於設備元件檢測，具高度普及性。

依照應用場景（如都市空氣污染監測、煉油與石化工業區、油氣開採等）及污染物種選用適當設備，比較如表 4。

表 4 移動測繪設備比較

應用場景	污染物種	移動測繪設備	時間解析度	偵測極限
1. 都市空氣污染監測	NO, NO ₂ , PM _{2.5} , PM ₁₀ , 黑碳 (BC)	高靈敏度 NO _x 分析儀、光學粒徑計 (如 aethalometer)	1 秒 ~ 1 分鐘	NO ₂ 約 1 ppb , BC 約 0.01 μg/m ³
2. 煉油與石化工業區	VOCs (如苯、甲苯、1,3- 丁二烯)、硫化物 (H ₂ S)、NO _x	PTR-MS、CRDS、FID (火焰離子檢測器)	1 秒 ~ 1 分鐘	VOCs 約 0.1 ppb , H ₂ S 約 0.3 ppb
3. 油氣開採	甲烷 (CH ₄)、乙烷 (C ₂ H ₆)、VOCs	CRDS、激光氣體分析儀 (TILDAS)	1 秒 ~ 10 秒	CH ₄ 約 0.1 ppb , C ₂ H ₆ 約 0.5 ppb

3.3 污染源直接量測設備

污染源標定主要透過攜帶式洩漏偵測設備（巡檢設備），包括：

- 1. 手持式 FID 及光離子偵測器 (PID)：近距離偵測（數公分內），檢測速度較慢但靈敏度高（PID 可達 ppb，FID 可達 ppm）。
- 2. 光學氣體成像儀 (OGI) 與超聲波顯像儀 (AIC)：可遠距離偵測（數十公尺），檢測速度快但靈敏度相對較低。

其中，OGI 的偵測下限與物種相關，約 5,000 ppm 以上。AIC 可偵測 20 kHz~100 kHz 的超音波範圍，高於人耳可聽頻率 (20 KHz)。設備比較如表 5。實務上，依靈敏度、應用場景與使用限制選擇適用設備，並可搭配不鏽鋼桶採樣與氣相層析 / 質譜儀進行更精確的定性 / 定量分析。

表 5 巡檢設備比較

偵測原理	優點	缺點	較佳偵測範圍
手持式 FID	測值準確，通用於各 VOCs 濃度異常偵測	檢測速度較慢，1 天檢測量約 400 點	1~20,000 ppm
PID 檢漏儀	輕便，偵測靈敏度高，製程區測值代表周遭可能有設備元件洩漏	相較於 FID 對物種具通用性，PID 具選擇性，而於設備元件檢測較受限	1 ppb~15,000 ppm
光學氣體成像儀 (OGI)	檢測距離遠，可於數公尺外測得洩漏	開機時間長（約 10 分鐘）、靈敏度較差、易受熱源干擾（如蒸氣管線）、顯示判定吃力	與物種有關，約 5,000 ppm 以上
超聲波顯像儀 (AIC)	檢測範圍廣、距離遠，可於數公尺外測得洩漏	受背景噪音干擾而須排除，不適用低壓系統洩漏，操作技術要求高故人員須培訓	20~100 kHz

四、結果與討論

4.1 案例分析

4.1.1 溯源案例考量

1. 廠外環境濃度監測：考量國內光化站及特工站監測網較完整，故挑選其測項為溯源物種。
2. 移動測繪設備：目前國內尚未導入具抗震性的 CRDS 或 PTR-MS，因此本研究先用 FID 進行移動測繪。然而，由於 FID 對物種不具選擇性，在石化園區道路進行測繪時，可能會受到多種石化原料的干擾，導致數據解釋困難。為確保 FID 測得的污染物為單一物種，且考量 FID 偵測靈敏度較高，廠外監測可能無濃度梯度，故案例選擇於乙炔罐裝廠廠區內執行。
- (1) 巡檢工具：考量罐裝場高壓容器洩漏特性，選用 AIC 巡檢。
- (2) 修復過程監控：選用 FID 於定點近距離監控。

執行流程 4 步驟的設備選定整理如表 6。

表 6 溯源案例選定設備比較

步驟	選定設備	時間 解析度	選定原因
1. 廠外環境濃度監測	GC-FID	1 小時	國內光化站、特工站監測站網較完整
2. 廠內熱區標定	手持式 FID	1 秒	目前國內雖有 PTR-MS 及 CRDS，但尚未引入避震系統及應用於移動測繪 擇定物種單純之氣體灌裝廠，排除多項物種之化工製程
3. 污染源直接量測	超聲波顯像儀	1 秒	考量乙炔罐裝廠高壓洩漏特性而選用
4. 洩漏即時修復	手持式 FID	1 秒	國內常用於設備元件檢測，設備普及度高

4.1.2 廠外環境濃度監測

依據國內空氣品質指標 (AQI) 管理方式，設定乙炔濃度閾值，以紅（300 ppbv 以上）、橘（60~300 ppbv）、黃（30~60 ppbv）、綠（30 ppbv 以下）圖像化展示 111 年乙炔濃度的時空變化（如圖 1）。各光化站、特工站之乙炔日最大小時值熱點圖如圖 1，x 方向為 111 年 1 月 1 日至 111 年 12 月 31 日逐日，y 方向為測站別。分析結果顯示，光化站行動 06 站 (X)、林園特工站汕尾里站 (Y) 為污染熱區。由 X、Y 測站污染玫瑰圖（如圖 2、圖 3）顯示，其異常高值主要出現在北風時段，比對上風處工廠原料清單，發現 A、B 2 家乙炔灌裝廠為可能逸散源（如圖 4）。

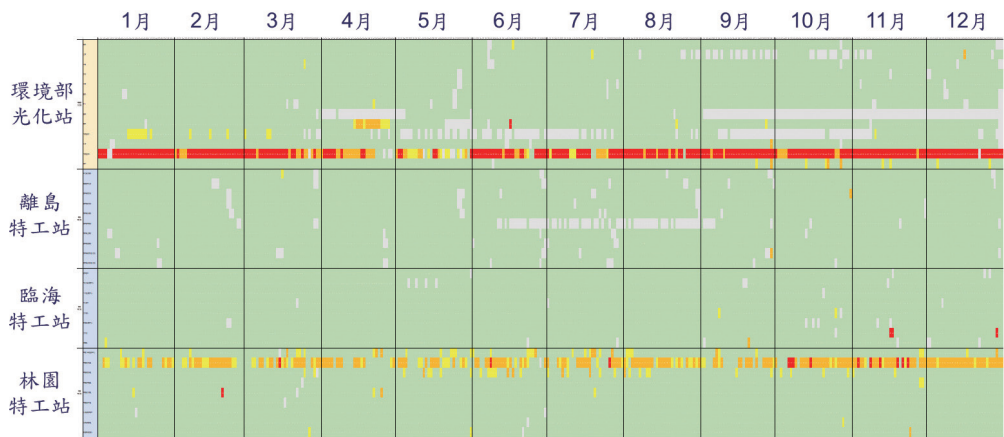


圖 1 111 年逐日乙炔濃度（日最大小時值）熱點圖

（註：原彩圖請至產業綠色資訊網站下載 <https://sdd.nat.gov.tw/eta/index.aspx>）

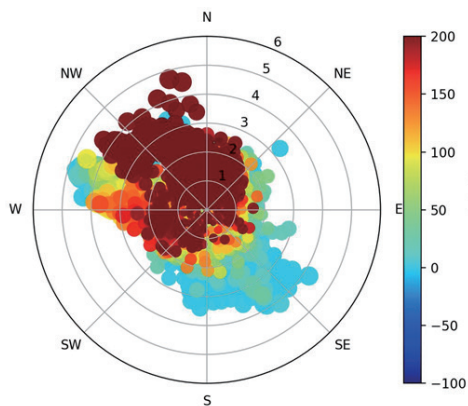


圖 2 光化站 (X) 乙炔污染玫瑰圖

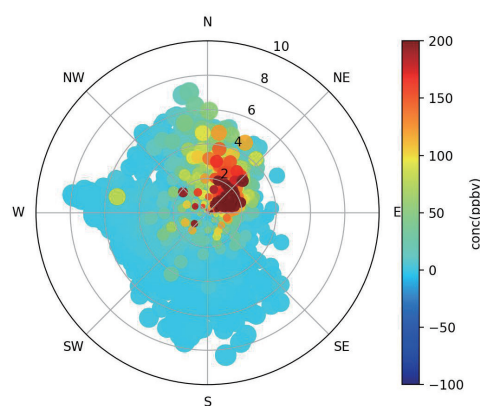


圖 3 林園特工站 (Y) 乙炔污染玫瑰圖



圖 4 A、B 工廠與固定站相對位置圖

4.1.3 移動測繪

依據固定站數據，針對 A、B 廠進行移動測繪（如圖 5、圖 6），軌跡線色塊對應的 VOCs 濃度為紅（300 ppmC 以上）、橘（60~300 ppmC）、黃（30~60 ppmC）、綠（30 ppmC 以下）。結果顯示，A、B 2 廠的熱區皆為灌裝區與實瓶區（出貨區），分別標註於圖中位置 1 和位置 2。因 A 廠較無濃度梯度，B 廠污染熱區較為顯著，因此進一步進行污染源標定。



圖 5 A 廠乙炔熱區標定圖



圖 6 B 廠乙炔熱區標定圖

4.1.4 污染源直接量測與修復

傳統工廠常以聲音來源或肥皂水泡泡測試洩漏點，然而該方法效率低且即時性不足；本研究考量高壓鋼瓶洩漏特性，改用 AIC 進行高壓氣體洩漏偵測，以迅速定位洩漏來源，如圖 7 所示。以 AIC 巡視 A 廠過程，發現實瓶區有偵測出高頻聲音來源，以手持式 FID 進行定點量測，結果顯示某一鋼瓶有閥件洩漏情形，測得濃度為 68 ppmC，如圖 8 所示。另巡視 B 廠過程中，由於 B 廠污染熱區較為顯著，以 AIC 迅速定位 B 廠洩漏源後，以手持式 FID 進行定點量測，結果顯示 VOCs 濃度高達 1,300 ppmC。修復期間因拆卸洩壓閥，濃度升至 4,500 ppmC，最終修復完成後濃度下降至 33 ppmC（如圖 9），證實減量效果。



圖 7 超聲波顯像儀快速定位壓力鋼瓶乙炔洩漏



圖 8 A 廠實瓶區壓力鋼瓶乙炔洩漏



圖 9 FID 定點監控 B 廠乙炔灌裝鋼瓶之修復

4.2 本案例執行經驗檢討

本案例使用多重且具互補性技術達到污染溯源功能，包括固定站熱點調查、手持式 FID 於工廠移動測繪，及超聲波顯像儀標定污染源。依據本案例執行經驗，未來若要擴大應用，必須注意事項檢討如下：

1. 多物種干擾：本研究以物種單純之氣體灌裝廠為案例，然而大部分石化工廠之化學物種複雜，使得測量 TVOC 之 FID 測值受到干擾，無法準確定量。雖然 PTR-MS 及 CRDS 具有檢測特定物種的能力，但是其價格昂貴且操作、維護不易，若是退而求其次使用 FID，建議於高值路段搭配鋼桶採樣分析，掌握污染指紋，提升數據的完整性。
2. GPS 選用考量：本研究於甲、乙廠同步使用手機 GPS 與 FID 內建 GPS 進行移動測繪（見圖 10、圖 11）。結果顯示，FID 之 GPS 受限於僅能接收衛星訊號，受建築遮蔽影響較大，而手機 GPS 除衛星訊號外，還可輔助 Wi-Fi 及行動通訊定位，因此測繪路線相對精準。石化廠內特定區域工安要求嚴格，手持式 FID 配置的 GPS 記錄器具備防爆設計，然而 GPS 手機之防爆功能可能需要額外購置。
3. 適用於地面逸散源：本研究依據 OTM-33 及 OTM-33A 進行地面逸散源測繪，惟高架排放源（如高煙囪或高架管線洩漏）可能無法進入測繪範圍（如圖 12），因此針對高空排放源仍需採用不同技術，如於煙道下風處架設太陽能空品感測器於工廠頂樓，以掌握高空污染情形。
4. 風場影響：污染源與移動測繪設備之間可能受風向風速影響（如圖 13）。本研究進行近場監測，當日風速接近靜風，影響較小，未來應考量風場因素以提升測繪精度。
5. 作業安全：本研究測得廠內乙炔濃度最高約 1,300 ppmC，遠低於工安偵測器觸發閾值（30% 爆炸下限 (LEL)，乙炔 LEL 約為 2.5%），因此未觸發警報，確保測繪作業安全。

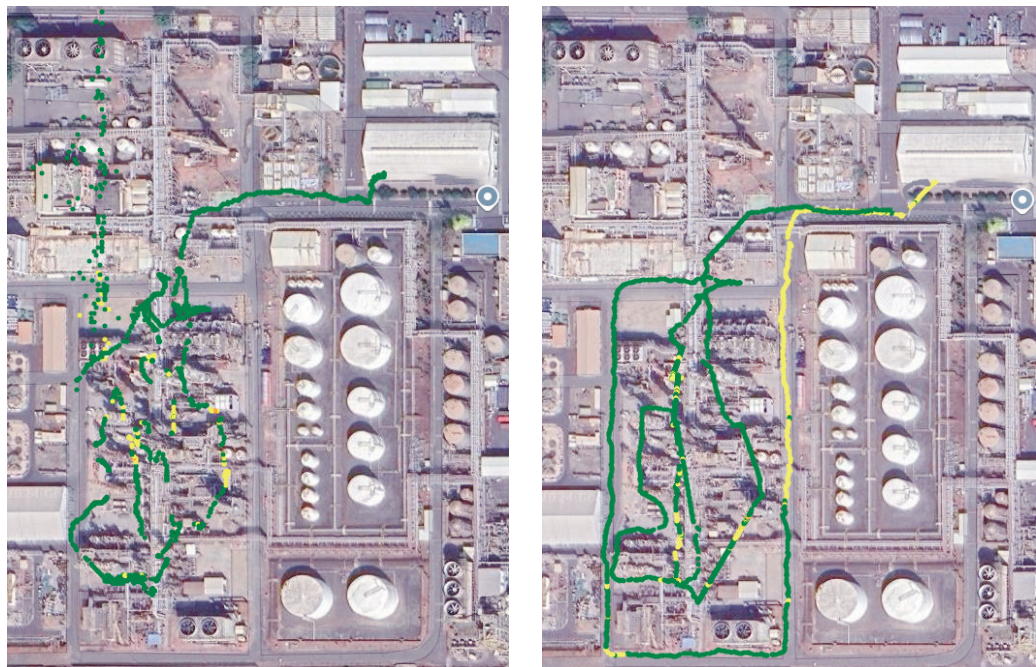
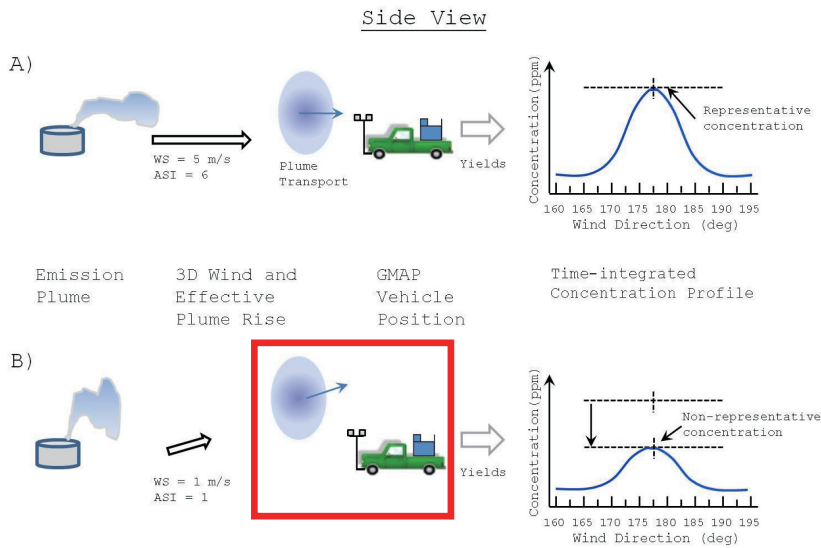


圖 10 甲廠 GPS 定位比較（左圖僅衛星訊號，右圖另含 Wifi 訊號）



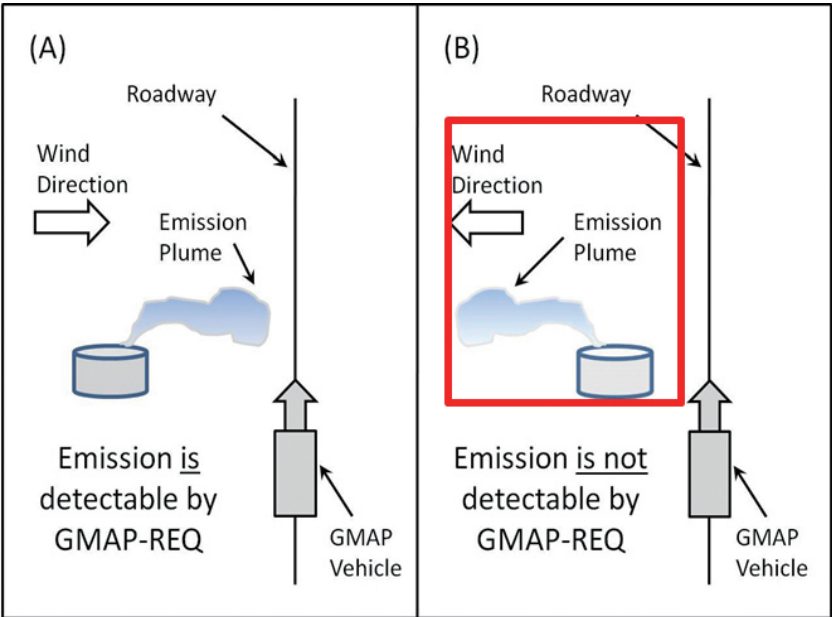
圖 11 乙廠 GPS 定位比較（左圖僅衛星訊號，右圖另含 Wifi 訊號）

52 結合地面移動測繪技術溯源 - 以火燭離子化偵測法為例



資料來源：OTM 33 及 OTM 33A

圖 12 排放高度影響



資料來源：OTM 33 及 OTM 33A

圖 13 風向干擾

五、結論與建議

本研究透過固定站監測與移動測繪技術，驗證了火焰離子化偵測法 (FID) 在氣體洩漏溯源中的應用成效。研究結果顯示，透過固定站長期數據可有效辨識污染熱區，再以移動測繪技術於廠區內進行高時空解析度的污染分布調查，能迅速鎖定高濃度區域並進一步定位洩漏源。FID 雖對物種選擇性有限，但於單一污染物主導的場域（如乙炔罐裝廠）具備高度實用性；搭配超聲波顯像儀 (AIC) 進行污染源直接量測，可精確掌握洩漏位置並即時監控修復成效，有效提升污染防治效率。

本研究的技術應用與成果重點如下：

1. 監測策略優化：固定站監測與移動測繪互補，兼顧長期趨勢與即時熱區鑑別，提升污染源調查的全面性。
2. 技術選擇與多元感測整合：依據場域特性選用 FID 作為核心監測設備，並結合 AIC 等多元感測技術，發揮儀器互補優勢，精確定位洩漏源並即時監控修復成效，顯著提升污染溯源效率與防治成效。
3. 應用推廣潛力：本研究模式可作為石化工業區及其他高風險場域污染防治之參考，具備推廣與標準化應用價值。

建議事項：

1. 推動移動測繪技術標準化與規範制定：建議主管機關及產業界共同推動移動測繪技術於工業區污染溯源之標準操作流程 (SOP) 與檢測規範，提升污染熱區鑑別與應變效率，補足現有固定監測站空間覆蓋之不足。
2. 整合多元感測技術，強化污染源監控與管理：鼓勵工業區及廠商導入 FID、AIC、OGI 等多元感測設備，建立分層監控與即時回饋機制，針對高風險區域定期巡檢與即時修復，提升污染源管理成效。
3. 建立污染熱區長期監測與預警制度：建議針對已鑑別之污染熱區，規劃長期監測與維護計畫，結合 AI 與大數據分析，發展即時預警系統，協助工廠及管理單位及早發現異常排放並迅速處理，降低環境與安全風險。

本研究成果可為工業區氣體洩漏溯源技術發展提供實證依據，並協助主管機關與產業界優化污染監測與管理策略，強化工業污染防治效能，促進環境永續與公共安全。

參考文獻

- Thoma, E., and Squier, B. (2014). OTM 33 Geospatial Measurement of Air Pollution, Remote Emissions Quantification (GMAP-REQ) and OTM33A Geospatial Measurement of Air Pollution-Remote Emissions Quantification-Direct Assessment (GMAP-REQ-DA), U.S. Department of Environmental Protection Office of Research, Cincinnati, OH.
- U.S.EPA, Next Generation Emission Measurement (NGEM) Research for Fugitive Air Pollution, <https://www.epa.gov/air-research/next-generation-emission-measurement-ngem-research-fugitive-air-pollution>
- <https://louisvilleky.gov/government/air-pollution-control-district/epa-air-toxics-monitoring-project-louisville>
- Apte, J. S., Messier, K. P., Gani, S., Brauer, M., Kirchstetter, T. W., Lunden, M. M., ... & Hamburg, S. P. (2017). High-resolution air pollution mapping with Google street view cars: exploiting big data. *Environmental science & technology*, 51(12), 6999-7008.
- Messier, K. P., Chambliss, S. E., Gani, S., Alvarez, R., Brauer, M., Choi, J. J., ... & Apte, J. S. (2018). Mapping air pollution with Google Street View cars: Efficient approaches with mobile monitoring and land use regression. *Environmental science & technology*, 52(21), 12563-12572.
- Knighton, W. B., Herndon, S. C., Wood, E. C., Fortner, E. C., Onasch, T. B., Wormhoudt, J., ... & Jones, M. (2012). Detecting fugitive emissions of 1, 3-butadiene and styrene from a petrochemical facility: An application of a mobile laboratory and a modified proton transfer reaction mass spectrometer. *Industrial & engineering chemistry research*, 51(39), 12706-12711.

Brantley, H. L., Thoma, E. D., Squier, W. C., Guven, B. B., & Lyon, D. (2014). Assessment of methane emissions from oil and gas production pads using mobile measurements. *Environmental science & technology*, 48(24), 14508-14515.

Rella, C. W., Tsai, T. R., Botkin, C. G., Crosson, E. R., & Steele, D. (2015). Measuring emissions from oil and natural gas well pads using the mobile flux plane technique. *Environmental science & technology*, 49(7), 4742-4748.

林楷傑、黃志威、郭子豪、吳宜展、黃溢銓 (2024)，導入 AI 技術強化石化廠監控實現即時洩漏偵測與防範，綠色技術與工程實務研討會，1-88。

