上傳時間：2025年12月18日下午 01:11

# 環境部環境管理署

## 113 年度土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案

# 科學園區地下水體中短鏈與新穎全氟化合物之研究

## 期末報告(定稿)

主　辦　單　位　：　環境部環境管理署

專 案 執 行 單 位　：　國立台灣大學／環境工程學研究所

專　案　主　持　人　：　林郁真 特聘教授

專 案 執 行 期 間　：　113 年 11 月 01 日起至
114 年 11 月 30 日止

中 華 民 國 114 年 12 月 印製

上傳時間：2025年12月18日下午 01:11

# 土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案

■申請計畫書 □期中報告
□修正計畫書 □成果報告

## 審查意見回覆對照表

| | | | |
|---|---|---|---|
| 計畫年度 | **113 年度** | 計畫類型 | □先導型 ■研究型 □模場型 |
| 計畫類別 | ■調查 □整治 □其他 | | 主持人：林郁真 NO：R12 |
| 計畫名稱 | 科學園區地下水體中短鏈與新穎全氟化合物之研究 | | |

| 審查意見 | 執行單位回覆 |
|---|---|
| 委員一<br><br>1. 有關參考文獻及後續分析方法等資料，建議提供辛醇-水分配係數(Kow)或半衰期等資訊，以比較短鍊及新穎 PFAS 與一般常見之 PFAS 之性質差異，以作為可能影響地下水系統之參考依據。 | 委員一<br><br>謝謝委員的建議，我們在計畫書的表一提供辛醇-水分配係數(Kow)及半衰期等資訊。 |
| 委員二<br><br>1. 主持人研究傑出。<br><br>相關分析技術國內已經建立。 | 委員二<br><br>1. 謝謝委員的認可。<br><br>儘管目前國內已建立長鏈及短鏈全氟及多氟烷基物質 (PFAS) 的分析技術，但僅有本研究團隊所發現的新穎 PFAS（如 FBSA、FBSAA、FBSE 和 FBSEE diol），國內外仍沒有相關的萃取及分析方法。此外，現階段台灣對於地下水中短鏈和新穎 PFAS 的調查仍屬空白，且針對地下水中新穎 PFAS 的萃取、分析方法仍尚未完備。因此，本計畫的新穎之處在於針對地下水中新穎 PFAS 進行萃取、分析方法的優化，並且提供科學園區周遭地下水的首批環境數據，具有前瞻性。本計畫的預期結果將有助於了解地下水的污染狀況，並為未來的污染防治策略提供科學依據。 |

| | |
|---|---|
| | |
| 委員三<br><br>1. 國內目前對於地下水中短碳鏈與新穎 PFAS 的調查仍屬空白，本計畫有助於鑑定出 PFAS 的潛在污染源，研究成果值得期待。<br><br>2. P1-11，本團隊已在半導體廠廢水及污水處理廠之放流水檢測出短鏈及新穎 PFAS ，預計於科學園區附近的地下水監測井為主做為採樣點，建議宜說明採樣點之評選機制為何，如高污染產業聚集密度、污水廠檢測濃度等。 | 委員三<br><br>1. 謝謝委員的認可。<br><br>2. 採樣點的選點順序已在計畫中說明，其順序為：<br><br>(1) 高科技廠附近<br><br>(2) 後端污水處理廠附近<br><br>(3) 放流水下游河川附近<br><br>3. 不同深度 |
| 委員四<br><br>本計畫屬於調查性報告，建議可以多增加本計畫所提分析方法之創新與新穎性以及與目前現有方法之差異與如何解決相關污染問題之研究方案。 | 委員四<br><br>謝謝委員的建議。儘管目前國內已建立長鏈及短鏈全氟及多氟烷基物質 (PFAS) 的分析技術，但僅有本研究團隊所發現的新穎 PFAS（如 FBSA、FBSAA、FBSE 和 FBSEE diol），國內外仍沒有相關的萃取及分析方法。此外，現階段台灣對於地下水中短鏈和新穎 PFAS 的調查仍屬空白，且針對地下水中新穎 PFAS 的萃取、分析方法仍尚未完備。因此，本計畫的新穎之處在於針對地下水中新穎 PFAS 進行萃取、分析方法的優化，並且提供科學園區周遭地下水的首批環境數據，具有前瞻性。本計畫的預期結果將有助於了解地下水的污染狀況，並為未來的污染防治策略提供科學依據。 |

| | |
|---|---|
| 委員五<br><br>研究主題符合環境部政策有關水體中新穎全氟及多氟化合物流佈與宿命分析且研究團隊已有分析半導體光電廠之廢水及其後端污水處理廠之排放水中短鏈與新穎 PFAS 之經驗，應可達成擬定之預期目標及成果。 | 委員五<br><br>1. 謝謝委員的認可。 |
| 委員六<br><br>本計畫擬對科學園區附近的地下水體調查短鏈與新穎全氟化合物的濃度分佈。此項研究是國內近幾年熱門話題，建議收集及參酌國內相關調查成果來規劃計畫擬執行的內容。 | 委員六<br><br>1. 目前國內有關短鏈及新穎 PFAS 於地下水中之調查仍屬空白。<br><br>本團隊已在半導體廠廢水及污水處理廠之放流水檢測出短鏈及新穎 PFAS，因此本次計畫將規劃以這個半導體廠所在的中部科學園區台中園區為起點，並延伸調查其附近之地下水監測井，這將會是國內第一筆新穎 PFAS 在環境分析之第一筆數據。 |
| 委員七<br><br>對了解高科技產業園區含氟有機物釋放與國際鏈結。 | 委員七<br><br>謝謝委員的審核。 |
| 委員八<br><br>1. 本計畫你探討地下水中全氟及多氟化合物流佈與宿命分析，並藉以檢討半導體產業污染潛勢。該類型產業的污染潛勢是國內產業污染特性之一，值得評估。<br><br>本研究是分析方法的建構，擬以高性能液相層析串聯質譜儀分析技術，建立全氟及多氟化合物分析方法。 | 委員八<br><br>1. 謝謝委員的認可。<br><br>謝謝委員的審核。 |

上傳時間：2025年12月18日下午 01:11

# 土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案

□申請計畫書　□期中報告

## 審查意見回覆對照表

■修正計畫書　□成果報告

| | | | |
|---|---|---|---|
| 計畫年度 | **113 年度** | 計畫類型 | □先導型 ■研究型 □模場型 |
| 計畫類別 | ■調查　□整治　□其他 | 主持人：**林郁真** | NO：R12 |
| 計畫名稱 | 科學園區地下水體中短鏈與新穎全氟化合物之研究 | | |

| 審查意見 | 執行單位回覆 |
|---|---|
| 委員一<br><br>1. 是否也對非標的含氟物質分析(non-target analysis )納入。<br><br>2. 地下水中短鏈PFAS來源是否來自科學園區，宜謹慎解讀。 | 委員一<br><br>**1.** 謝謝委員的建議，本計畫不會分析非目標污染物。本團隊已在中部科學園區台中園區的半導體廠廢水及污水處理廠之放流水使用非目標污染物分析方法檢測出短鏈及新穎 PFAS，因此本次計畫將延伸調查範圍，規劃以這些短鏈及新穎 PFAS 為本計畫之目標污染物，調查地下水監測井中是否有這些污染物的存在，這將會是國內第一筆新穎 PFAS 在環境分析之第一筆數據。<br><br>**2.** 謝謝委員的建議，目前除了分析短鏈 PFAS 外，我們也會參考新穎 PFAS 是否檢測出與否進行比較，來判斷是否有其他潛在的其他排放源。 |
| 委員二<br><br>1. 本計畫希望藉由調查科學園區附近地下水中的短鏈與新穎 PFAS 濃度，以完整評估科學園區周邊地下水的污染現況，強化國內對地下水中 PFAS 監測的資訊空缺。能提供園區地下水的微量 PFAS 物質的現況。<br><br>2. 建議說明監測所得與園區製程或原物料之間的關係。 | 委員二<br><br>1. 謝謝委員的認可。<br><br>2. 目前新穎 PFAS 可能只有半導體廠的製程相關（如特定表面活性劑或化學品的使用），符合世界半導體理事會於今年七月宣布禁用長鏈 PFAS，本計畫所分析之新穎 PFAS 可能是製程所使用之原物料或其轉化產物。<br><br>3. 謝謝委員的建議，我們已將採樣地下水監測井的代表性補充於附件 7-14。內容如下：(A) 高科技廠後端之污水處理廠放流水排放點之河川附近地下水監測井、(B) 放流水河川下游之監測井及 (C) 不同深度。各採樣點的 |

| | |
|---|---|
| 3. 建議說明採樣監測井的代表性。 | 分布如圖一所示，其中採樣點 2 及 3 為何川放流水之排放點附近地下水監測井、採樣點 1 為放流水河川下游之地下水監測井、採樣點 4 及 5 為何川放流水之排放點上游，預期當作地下水之背景濃度。 |
| 委員三<br><br>無 | 委員三<br><br>謝謝委員的認可。 |
| 委員四<br><br>1. 地下水預定調查點(p7-14 圖 1)可能距離科學園區或排放口 距離 太遠，因稀釋與吸附效應或是未位於下游，造成短鍊或全氟化物調查井中濃度偏低或測不出。 | 委員四<br><br>1. 謝謝委員的提醒。目前所選擇之地下水監測井為距離污水排放點最近的距離。 |
| 委員五<br><br>1. 建議採樣點評選機制需更清晰，特別是高科技廠、污水處理廠與下游河川的具體範圍與標準。<br><br>2. 本計畫於可能遇到的困難（如樣品保存穩定性、短鏈 PFAS 的低檢測量等），其解決方案的描述略為簡略，建議可多補充說明。<br><br>**3.** 地下水採樣之策略，地點及深度應能具代表性。<br><br>**4.** 題目是否增加「分布之研究」。 | 委員五<br><br>1 及 3. 謝謝委員的建議，我們已將採樣地下水監測井的代表性補充於附件 7-14。內容如下：(A) 高科技廠後端之污水處理廠放流水排放點之河川附近地下水監測井、(B) 放流水河川下游之監測井及 (C) 不同深度。各採樣點的分布如圖一所示，其中採樣點 2 及 3 為何川放流水之排放點附近地下水監測井、採樣點 1 為放流水河川下游之地下水監測井、採樣點 4 及 5 為何川放流水之排放點上游，預期當作地下水之背景濃度。另一方面，為了評估現地地質條件可能對地下水造成的影響，將在同一口井內於不同深度採集地下水樣本，以比較不同深度的 PFAS 濃度是否受到地質變化的影響。採樣將以地下水位作為基準點，並選定不同深度進行取樣（例如 0 公尺、-1 公尺、-5 公尺等深度），採樣數將依現地地質條件做適當的調整。<br><br>**2**. 謝謝委員的建議，已在附件 7-20 補充，內容包含：增加檢測、樣品保存與穩定性、短鏈 PFAS 的低檢測量及污染來源分析挑戰等，並提供可能的解決方案。 |

| | |
|---|---|
| | **4**. 謝謝委員的建議。目前的計畫題目將不做更動，但之後的期刊發表將會把這個建議納入考量。 |
| 委員六<br><br>1. 建議加強說明附件 7-19「預計可能遭遇之困難及解決途徑」之面對困難因應對策。 | 委員六<br><br>1. 謝謝委員的建議，已在附件 7-20 補充，內容包含：增加檢測、樣品保存與穩定性、短鏈 PFAS 的低檢測量及污染來源分析挑戰等，並提供可能的解決方案。 |
| 委員七<br><br>**1.** 計畫可以建立背景資料及分析方法。<br><br>**2.** 建議可以往上游源頭討論，偵測出之含氟化合物可能來源。 | 員七<br><br>**1.** 謝謝委員的建議，本計畫將會記錄現地水質參數作為背景資料，如 pH、電導度及溶氧等。另外，本計畫也將會針對地下水樣對目前的方法進行最佳化。<br><br>**2.** 本團隊已在半導體廠廢水及污水處理廠之放流水檢測出短鏈及新穎 PFAS，因此本次計畫將規劃以這個半導體廠所在的中部科學園區台中園區為起點，並延伸調查其附近之地下水監測井，這將會是國內第一筆新穎 PFAS 在環境分析之第一筆數據。 |
| 委員八<br><br>1. 如何確保採樣位置的代表性，以利追蹤或釐清可能污染來源? | 委員八<br><br>**1.** 謝謝委員的建議，我們已將採樣地下水監測井的代表性補充於附件 7-14。內容如下：(A) 高科技廠後端之污水處理廠放流水排放點之河川附近地下水監測井、(B) 放流水河川下游之監測井及 (C) 不同深度。各採樣點的分布如圖一所示，其中採樣點 2 及 3 為何川放流水之排放點附近地下水監測井、採樣點 1 為放流水河川下游之地下水監測井、採樣點 4 及 5 為何川放流水之排放點上游，預期當作地下水之背景濃度。<br><br>**2.** 另外，目前除了分析短鏈 PFAS 外，我們也會參考新穎 PFAS 是否檢測出與否進行比較，來判斷是否有其 |

| | |
|---|---|
| | 他潛在的其他排放源。 |
| 委員九<br><br>**1.** 請依補助上限調整各項經費，並修正於申請計畫書修正稿。 | 委員九<br><br>1. 本計畫將依補助上限調整經費分配，確保符合補助條件並於修正版中更新相關內容。 |

# 土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案

□申請計畫書　■期中報告

## 審查意見回覆對照表

□修正計畫書　□成果報告

| | | | |
|---|---|---|---|
| 計畫年度 | **113 年度** | 計畫類型 | □先導型 ■研究型 □模場型 |
| 計畫類別 | ■調查　□整治　□其他 | | 主持人：林郁真　NO：R12 |
| 計畫名稱 | 科學園區地下水體中短鏈與新穎全氟化合物之研究 | | |

| 審查意見 | 執行單位回覆 |
|---|---|
| 委員一<br><br>1. 地下水水文地質資料宜充分連結污染推估分析： 建議補充園區周邊含水層特性、水流方向及地層剖面資訊，以支持樣點上下游關係與污染傳輸模式之研判。<br><br>2. 採樣頻率與樣本數量略顯不足： 現有採樣井數及時點限制資料之代表性與統計意義，建議增加時序採樣（如至少一次補充採樣），以呈現濃度變異趨勢與季節性影響。<br><br>3. 分析方法創新但部分定量基礎尚不明確： 雖整體偵測技術具高靈敏度，惟部分新興 PFAS 缺乏內標準品支持，需補充說明其定量誤差範圍及處理策略。<br><br>4. 缺乏統計與地理分布分析呈現： 建議補強數據之變異性描述、群聚性評估及圖表呈現(如等濃度圖、箱型圖等)，以提升資料解釋力與政策參考價值。<br><br>5. 樣品保存與品質控管程序應更明確揭示： 包含樣品保存條件、溫控紀錄與儲存期限等，應補述以符合法規與品質保證要求。<br><br>6. 污染來源推估尚未建立初步分析架構： 建議 | 委員一<br><br>1. 謝謝委員的建議，已於期末報告將含水層特性、地質頗面資訊補充到 4.3 小節(第 41 頁)。<br><br>2. 由於本次計畫核定經費有限，加上針對 PFAS 所需之新穎 PFAS 藥品價格（如 500 mg FBSE 的價格高達 98,000 元）相當昂貴，因此樣本數量方面有所限制。不過在觀測井的選點上，我們已選擇具代表性的地點，包括遠離污水處理廠排放口的對照井，以及三口位於排放口附近的地下水井，以期初步掌握其分布情形。<br><br>3. 謝謝委員的建議，已於期末報告將 QA/QC 補充於 4.3 小節(第 40 頁)。<br><br>4. 謝謝委員建議，我們已於期末報告將地理分布圖片補充至圖表十、並於 4.3 小節(第 41 頁)分析及討論。<br><br>5. 謝謝委員的建議，我們已於期末報告在 4.2 小節 (第 25, 26 頁)補充樣品保存。<br><br>6. 謝謝建議，我們已於期末報告在 4.3 小節補充污染源推估初步分析架構，並以長鏈、短鏈及新穎 PFAS 的成分分析推估 PFAS 污染源。 |

| | |
|---|---|
| 評估導入多變數統計（如主成分分析）、同位素指紋分析或比對潛在排放源化學特徵，以利未來熱點區域之辨識。<br><br>7. 加入風險初評觀點： 雖目前濃度屬低至亞 ppt 等級，但建議可初步引入風險指標（如 hazard quotient）與國際標準對照（如 US EPA、WHO），作為政策研議與風險溝通基礎。<br><br>8. 採樣點代表性說明加強： 應補充選點標準與其與園區設施、水體流向等之關聯，確保其能反映園區污染潛勢。 | 7.謝謝委員的建議，我們已於期末報告 4.4 小節討論風險評估(第 51 頁)。<br><br>8.謝謝委員的建議，我們已於期末報告的圖表十補充地理位置及分析濃度，藉而討論污染潛勢。 |
| 委員二<br><br>1. PFAS 受到國內外所關注，本研究以科學員園區進行研究，具有其重要性。<br><br>2. 本研究已經完成地下水採樣，並進行部分分析，計畫進度符合原先規劃。<br><br>3. 本研究另已建立分析流程，亦符合原先規劃。<br><br>4. 由於台灣半導體生產的重要性，本研究擬討論 PFAS 與半導體生產間關係，值得肯定，建議這一部份有詳細推論分析步驟與方法。 | 委員二<br><br>1, 2, 3. 謝謝委員。<br><br>4. 謝謝委員的建議，我們已於期末報告的 4.3 節推論科學園區污水處理廠排放水及地下水體之間的關係。 |
| 委員三<br><br>1. 目前已是期中報告，請修正報告 p.3「預計自.114 年 1 月 1 日起...」等未來式字眼。<br><br>2. 部分委員意見於「修正計畫書」或「申請計畫書」中有缺漏或呈現方式需調整以提升可讀性。<br><br>3. 4.2 節萃取方法中（1）其他 PFAS 回收率皆介於 60%-140%，但 FBSA 回收率僅有 32.47%，請說明是否有提升空間？(2)錯字:「香」對回收率請修正。 | 委員三<br><br>1. 謝謝委員的提醒，已改為「自 114 年 1 月 1 日起」。<br><br>2. 謝謝委員的提醒，已調整上述委員意見的排版。<br><br>3. (1) 因 FBSEE diol 內含有 FBSA、PFBSi 內含有 PFBA，故本次 SPE 已將 FBSA、長鏈及短鏈 PFAS 及其他新穎 PFAS 的檢量線分開分析及萃取，並得到 FBSA 之回收率提升至 74%。<br>(2) 已修改相對回收率錯字。 |

| | |
|---|---|
| 4. 請說明本分析方法適用樣品類型與分析干擾排除方式，及綜合討論調查分析結果與國外相關文獻分析測得 PFAS 物種與數值間的相應性。 | 4. 為避免長鏈及短鏈 PFAS、FBSA 及其他新穎 PFAS 之間的分析干擾，本研究採分開配置 SPE 處理程序，有效提升分析準確性。實驗結果顯示各物種之回收率介於 73.4% 至 112.6% 之間，其中長鏈及短鏈 PFAS (除了 GenX 及 PFBSi) 均具備一對一之同位素內標準品，確保定量結果具高信賴度。 |
| 委員四<br><br>本計畫預期執行目標為檢測科學園區附近地下水中的短鏈與新穎 PFAS 濃度，了解短鏈 PFAS 及替代品對於科學園區附近地下水體的影響，研究科學園區附近地下水體是否受到新穎全氟化合物的污染，補足國內對於地下水中 PFAS 監測研究的知識空缺，與國際接軌。期中進度為應完成分析方法優化及地下水水樣採集，並已陸續處理地下水樣品(已完成前處理)，其相關項目執行工作狀況，皆符合查核點目標。 | 委員四<br><br>謝謝委員 |
| 委員五<br><br>1. 本研究主軸為建立多種全氟與多氟化物(PFAS)之檢測方法，涵蓋長鏈、短鏈及新型替代化合物，應用於地下水污染之監測分析。特別針對短鏈與新穎性 PFAS，檢測技術較長鏈 PFAS 發展晚，建議於計畫中說明不同 PFAS 於儀器分析上的儀器偵測極限(IDL)、含蓋前處理的方法偵測極限(MDL)，目前表格九顯示的定量極限(LOQ)全部的化合物都一樣，這樣無法呈現各種不同 PFAS 在建立方法時的差異與困難以供未來研究者建立方法時參考。<br><br>2. 請探討地下水樣品中可能干擾新穎 PFAS 檢測的水質特性，與其它環境介質相較應該注意哪些特點，請歸納地下水樣品前處理與儀器參數設定上需特別注意之處，以提供後續研究者建立 PFAS 檢測技術時之參考依據。 | 委員五<br><br>1. 謝謝委員的建議，目前已修正表格九，本計畫以偵測極限 (LOD)及定量極限 (LOQ)表示。<br><br>2. 新穎 PFAS 容易受到 pH 影響，因此不同的地下水其 pH 可能影響水中新穎 PFAS 濃度。另一方面，鹽類亦會影響新穎 PFAS 濃度，鹽類濃度越高，干擾越大。<br><br>3. 過濾膜的影響。不同的過濾膜可能會造成 PFAS 的吸附。如 PTFE、PVDF 等濾膜。 |

# 土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案

□申請計畫書　□期中報告

## 審查意見回覆對照表

□修正計畫書　■成果報告

| | | | |
|---|---|---|---|
| 計畫年度 | **113 年度** | 計畫類型 | □先導型 ■研究型 □模場型 |
| 計畫類別 | ■調查　□整治　□其他 | | 主持人：林郁真　NO：R12 |
| 計畫名稱 | 科學園區地下水體中短鏈與新穎全氟化合物之研究 | | |

| 審查意見 | 執行單位回覆 |
|---|---|
| 委員一<br><br>執行團隊對前期（申請書、期中報告）的審查意見回覆完整且具體，顯著提升了報告的科學嚴謹度與資料完整性。特別是針對 PFAS 分析準確度的挑戰，團隊已透過調整萃取程序及補充 QA/QC 資料來克服，使數據具有較高的可信度。 定稿報告中應在「結論」或「未來展望」段落，明確說明當前數據對於全面評估科學園區污染流佈的侷限性，並建議未來應增加時序採樣，以捕捉濃度變異趨勢和季節性影響，以供後續政策研議參考。 | 委員一<br><br>感謝委員的意見。<br><br>目前已在 5.2 建議的第一項「長期監測中部科學園區周邊之地下水」，加入「本研究初步觀察到新穎與短鏈 PFAS 對地下水的衝擊與影響。但由於本研究僅為一次性採樣，無法掌握中部科學園區周邊地下水受新穎 PFAS 污染之長期變化趨勢。建議未來能以年為單位，甚至是以季為單位，長期監控中部科學園區周邊地下水的短鏈與新穎 PFAS 濃度變化，並觀察 PFAS 污染的趨勢和季節性影響，以供後續政策研議參考。」 |
| 委員二<br><br>1. P. 43 的統計 t 檢定，建議與統計學者商討，其原因為空白樣品測得的數值，為 0 或者為無法測出，在此情況下，合適的統計檢定差異為何?<br><br>2. P. 55 說明 G0 的井水樣本超過規範，其可能原因為何?應否採行管理機制?<br><br>3. P. 58 的建議事項 3 為源頭管理，建議更明確說明應管理那些因子。 | 委員二<br><br>1. 本研究採用 t 檢定（Student’s t-test），主要目的在於評估空白樣品中目標 PFAS 訊號的變異性，以確認萃取方法及儀器訊號的穩定度。空白樣品的平均濃度乘上 t 值，可代表空白樣品在 95% 信心水準下的最高可能訊號值（濃度值）。若實際樣品的訊號低於此值，即可能為偽陽性。因此，在本計畫中，所有低於空白樣品平均值乘以 t 值的樣品，其濃度均判定為 N.D.。<br><br>2. 雖然本研究資料仍不足以明確判定 G0 樣本 |

| | |
|---|---|
| | 濃度超過規範之原因，但除傳統長鏈 PFAS 外，短鏈 PFAS 亦於 G0 樣本中測得相對較高之濃度，因此有必要對 G0 地區之 PFAS 污染濃度進行長期監測。相關建議已補充納入本文第 5.2 節。<br><br>3. 謝謝委員的意見。<br><br>我們已於內文（P.58）補充「如減少其使用，或在排出前增加能有效去除 PFAS 之處理程序」等建議。 |
| 委員三<br><br>1. 對於強調何種「創新萃取分析方法」應說明，並可評估專利佈局的可能性。<br><br>2. 整份報告中有很多不同 PFAS 物種的縮寫，請建置一個中英對照（含英文全名與縮寫），以提升可讀性。<br><br>3. 報告中說明前處理程序使用 PVDF 薄膜過濾會造成分析樣品的損失，但 p.17「圖表二」中卻使用 0.22 μm PVDF filter，請確認正確性。<br><br>4. 表格十四中各分析水質資料請以加粗黑底標示超標數值以利閱讀。 | 委員三<br><br>1. 謝謝委員的意見。<br><br>本計劃中的新穎 PFAS 的萃取方法已在 2024 年發表，並在此計畫的過程中進一步優化。<br><br>2. 謝謝委員的意見。<br><br>本文已於表五中完整列出目標 PFAS 之中文名稱、英文全名及其縮寫。<br><br>3. 雖然在期中報告中曾提及 0.22 μm PVDF 濾膜可能影響回收率，但本研究團隊後續的實驗結果顯示，在內標校正後，PVDF 濾膜對回收率的影響可忽略不計。此外，對於尚無內標的新穎 PFAS，其在通過 PVDF 濾膜後的濃度亦未顯著下降。因此，採用 0.22 μm PVDF 濾膜於本計畫中仍屬適當。<br><br>4. 謝謝委員的意見。<br><br>已於表格十四，將超過指標的項目，以加粗黑底標示。 |

| | |
|---|---|
| 委員四<br><br>1. 美國飲用水標準除了PFOA、PFOS外，另有HFPO-DA、PFNA、PFBS、PFHxS,建議可以一併納入第五章結論與建議的內文中。<br><br>2. 建議收集類似科學園區產業的地下水濃度分佈文獻增加論文內容。 | 委員四<br><br>1. 謝謝委員的意見。<br><br>本研究已參考美國 EPA 所提出之危害指數（Hazard Index, HI），將 HFPO-DA、PFNA、PFBS 及 PFHxS 納入分析與討論，相關之詳細分析結果詳見第 4.4 節（P.55）。<br><br>2. 謝謝委員的意見。<br><br>已經將其它產業周邊地下水的文獻加入內文中（P.2）。 |
| 委員五<br><br>1. 本研究為何僅進行一次採樣？目前呈現的資料量不多。團隊已於四月完成採樣，期中報告即已有相同內容，請說明期中至期末期間具體完成了哪些工作。<br><br>2. 第二章的內容以列點呈現，缺乏段落的敘述。請改寫為完整段落，以提升可讀性。研究目的共有九項，但其中第一點與第三點並不明確屬於「研究目的」。第一點不是目的，而第九點「確保研究品質與結果」為所有研究的基本要求，不應列為研究目的。建議重新檢視與調整研究目的的結構與內容並與研究標題與結論相呼應。<br><br>3. 研究結果顯示 G0 站位距離放流水排放口最遠，但其長鏈與短鏈 PFAS 濃度卻均高於其他點位。請補充此現象的成因分析。 | 委員五<br><br>1. 謝謝委員的意見。<br><br>本計劃的採樣次數與位置，完全依照計劃書執行。相較於一般針對傳統長鏈 PFAS 之例行性監測計畫，本計畫為全球首度探討新穎 PFAS 流布情形之研究，在分析技術門檻與人力投入上均顯著較高，且需額外耗費時間進行 QA/QC 確認及質譜圖譜之判讀。儘管本計畫核定經費有限，加上新穎 PFAS 標準品成本相當高(例如 500 mg FBSE 的價格即高達 98,000 元)，本研究仍選取具代表性之採樣點進行分析。綜合本計畫成果與其他相關研究結果，可顯示地下水層中短鏈 PFAS 污染議題亟需更多關注，具有研究與管理上的重要性。未來若能獲得更多經費支持，將可於不同季節進行科學園區周邊地下水採樣，以更完整觀察新穎 PFAS 在地下水中的時序變化。<br><br>此外，有關期中至期末報告期間的工作進度，本研究團隊均依據計畫書 3.4 所列之甘特圖執行，陸續完成數據分析、成果報告撰寫及國際期刊論文投稿，完全符合原訂期 |

| | |
|---|---|
| | 程。具體執行情形如下：<br><br>a.數據分析：由於環境基質複雜，加上目標 PFAS 濃度多落於 ng/L 等級，在判讀 MS/MS 圖譜時必須格外謹慎，且需投入大量人力與時間。期中報告結束後，本研究團隊投入約兩個月逐一核對所有目標 PFAS 之子離子對圖譜，以確保數據之準確性。<br><br>b. 成果報告撰寫：完成數據分析後，本研究團隊補充相關水井資訊，依據分析結果撰寫成果報告，並參考台灣及美國相關標準進行地下水風險評估，進而提出對新穎 PFAS 之管理建議。<br><br>c. 國際期刊論文投稿：在完成成果報告後，本研究團隊將本計畫成果與團隊其他相關研究整合，整理撰寫成期刊論文。該論文已於 2025 年 12 月 8 日投稿至水領域的頂尖期刊《Water Research》。此研究在傳統長鏈 PFAS 被管制的現在，不僅是台灣，更是前國際上少見的短鏈與新穎 PFAS 興起趨勢之前瞻研究。<br><br>2. 謝謝委員的意見。<br><br>我們已將第二章內容以段落敘述方式重新改寫，以提升其可讀性，並已刪除不適當的研究目的（P.7）。<br><br>3. 雖然本研究資料仍不足以明確判定 G0 樣本濃度超過規範之原因，但除傳統長鏈 PFAS 外，短鏈 PFAS 亦於 G0 樣本中測得相對較高之濃度，因此有必要對 G0 地區之 PFAS 污染濃度進行長期監測。相關建議已補充納入本文第 5.2 節。 |

上傳時間：2025年12月18日下午 01:11

上傳時間：2025年12月18日下午 01:11

# 專案基本資料表

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 專案性質 | ■實驗性質 □非實驗性質 | | 專案類別(單選) | □先導型■研究型□模場型 |
| 研究主題 | ■調查 □整治 □其他 | | | |
| 申請機構系所 | 國立臺灣大學環境工程學研究所 | | | |
| 機構地址 | 台北市大安區舟山路 71 號 | | | |
| 專案主持人 | 林郁真 | | 職等／職稱 | 特聘教授 |
| 協同主持人 | | | 職等／職稱 | |
| 專案名稱 | 中文 | 科學園區地下水體中短鏈與新穎全氟化合物之研究 | | |
| | 英文 | Occurrence on Short-Chain and Novel Per- and Polyfluoroalkyl Substances in the Groundwater of Science Parks | | |
| | 關鍵字 | 全氟與多氟烷基物質、新穎全氟化物、短鏈全氟化物、地下水、流布 | | |
| 執行期程 | 自民國 113 年 11 月 1 日起至民國 114 年 11 月 30 日止 | | | |
| 專案主持人 | 姓名：林郁真 | Email：yuchenlin@ntu.edu.tw | | 專線：02-33664386<br>手機：0988-002143 |
| 專兼任人員 | 姓名： | Email： | | 專線：<br>手機： |

經費分析總表(僅模場試驗專案需填寫兩年度金額)

| 專案預估經費 | | 第一年金額 | 第二年金額 | 編列說明 |
|---|---|---|---|---|
| 1. | 人事費用 | 395,804 | | (1~5 項相加之 50%為限) |
| 2. | 設備使用含維護費 | 0 | | (與計畫實驗相關) |
| 3. | 耗材與主要費用 | 311,818 | | (與計畫主體相關) |
| 4. | 其它研究相關費用 | 18,272 | | (含差旅與租賃費用) |
| 5. | 行政管理費 | 94,106 | | (1~5 項相加之 15%為限) |
| 6. | 自籌款 | 0 | | (自行籌備款項) |
| 申請補助金額(1~5 項) | | 820,000 | | 總金額：820,000 |
| 計畫總金額(1~6 項) | | 820,000 | | 總金額：820,000 |

專案主持人(簽名或蓋章)：林郁真　　日期：12/11/2025

上傳時間：2025年12月18日下午 01:11

# 113 年度專案成果績效自評表

## 一、 專案基本資料

填表日期： 104 年 7 月 12 日

| | | | |
|---|---|---|---|
| 專案性質 | ■實驗性質 □非實驗性質 | 專案類別 | □先導型■研究型□模場型 |
| 研究主題 | □整治 ■調查 □其他 | | |
| 執行機構 | 國立臺灣大學環境工程學研究所 | 專案主持人 | 林郁真 |
| 專案名稱 | 科學園區地下水體中短鏈與新穎全氟化合物之研究 | | |
| 專案執行期程 | □申請階段 □期中 ■成果 | | |

## 二、 成果績效自評

「計畫總預估數」應與計畫審查核定值相符，請執行單位依實際達成之量化成果填寫於欄位中。

### （一）學術面

| 項目 \ 目標達成程度 | | | 申請預估數 | 期中達成數 | 成果達成數 | 結案後半年達成率 | 備註（說明未達成原因或學術產出發表名稱） |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A 學術產出及活動 | 1.國內投稿（篇數） | (1)論文 | | | | | |
| | | (2)研討會論文 | | | | | |
| | 2.國外投稿（篇數） | (1)期刊論文 | 1 | 0 | 0 | | |
| | | (2)國際研討會論文發表 | | | | | |
| | 3.報告（篇數） | (1)技術報告 | | | | | |
| | | (2)研究報告 | | | | | |
| | 4.專著 (本數) | | | | | | |
| | 5.辦理學術 | (1)研討/說明會 | | | | | |

| 項目 \ 目標達成程度 | | | 申請預估數 | 期中達成數 | 成果達成數 | 結案後半年達成率 | 備註（說明未達成原因或學術產出發表名稱） |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 會議(場數) | (2)成果發表會 | | | | | |
| | | (3)論壇 | | | | | |
| | 6.研發改良技術(項數) | (1)已開發技術 | | | | | |
| | | (2)技術平台 | | | | | |
| | 7.技術獎項(項數) | | | | | | |
| B人才培育 | 8.研發人員(人數) | (1)碩士 | 2 | 3 | 3 | | |
| | | (2)博士 | 1 | 1 | 1 | | |
| | 9.研究團隊(個數) | (1)跨領域團隊 | | | | | |
| | | (2)跨機構團隊 | | | | | |
| | | (3)形成研究中心 | | | | | |
| | | (4)形成實驗室 | | | | | |
| 10.其他指標(請自行命名) | | (請自填) | | | | | |

（二）產業面

| 項目 \ 目標達成程度 | | | | 申請預估數 | 期中達成數 | 成果達成數 | 結案後半年達成率 | 備註（說明未達成原因或專利、技術轉移相關詳細資料） |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A 智慧財產權 | 1.專利(件數) | 已核准 | 發明 | | | | | |
| | | | 新型/設計 | | | | | |
| | | | 合計 | | | | | |
| | | 申請中 | 發明 | | | | | |
| | | | 新型/設計 | | | | | |
| | | | 合計 | | | | | |
| B 研發技術轉移 | 2.先期技術成果移轉 | 件數 | | | | | | |
| | | 授權金(仟元) | | | | | | |
| | | 衍生利益金(仟元) | | | | | | |
| | 3.技術移轉(專利) | 件數 | | | | | | |
| | | 授權金(仟元) | | | | | | |
| | | 衍生利益金(仟元) | | | | | | |
| | 4.技術移轉(應用技術) | 件數 | | | | | | |
| | | 授權金(仟元) | | | | | | |
| | | 衍生利益金(仟元) | | | | | | |
| | 5.可移轉 | (1)技術(件數) | | | | | | |

| 項目 \ 目標達成程度 | | | 申請預估數 | 期中達成數 | 成果達成數 | 結案後半年達成率 | 備註（說明未達成原因或專利、技術轉移相關詳細資料） |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 產業技術 | (2)品種/系(件數) | | | | | |
| C 產學研合作 | 6.促成合作研究 | 件數 | | | | | |
| | | 金額(仟元) | | | | | |
| | 7.促成投資 | 件數 | | | | | |
| | | 投資金額(仟元) | | | | | |
| | 8.促成取得業界科專 | 件數 | | | | | |
| | | 業界投資金額(仟元) | | | | | |
| 9.其他指標(請自行命名) | | (請自填) | | | | | |

## （三）政策面

| 項目 ＼ 目標達成程度 | | | 申請預估數 | 期中達成數 | 成果達成數 | 結案後半年達成率 | 備註（說明未達成原因或其他詳細資料） |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **A 服務便民** | 1.技術服務 | 次數 | | | | | |
| | | 收入(仟元) | | | | | |
| | 2.諮詢服務 | 次數 | | | | | |
| | | 收入(仟元) | | | | | |
| **B 政策推動** | 3.協助政府推動(件數) | (1)政策 | | | | | |
| | | (2)法規 | | | | | |
| **C 技術效益** | 4.整治技術提升(%) | | | | | | |
| | 5.整治成本降低(%) | | | | | | |
| | 6.提升能源效率(%) | | | | | | |
| 7.其他指標(請自行命名) | | (請自填) | | | | | |

三、 請依前述學術面、產業面、政策面等預期量化成果，具體敘明研究成果對本署政策推動之助益。（200 字為限）

| |
|---|
| **學術面(如國內外研討會、期刊投稿件數、或人才培育碩博士生說明)** |
| 1. 投稿國際期刊 1 篇。<br>2. 培育 3 名碩士生、1 名博士生，參與研究之人員將協助文獻蒐集，了解國內地下水中 PFAS 之分析現況、學習以 SPE 萃取方法濃縮地下水、操作高效液相層析儀串聯質譜儀、熟悉數據分析，而後協助樣品採樣、數據分析，獲得水體中微量污染物分析之相關知識。 |
| **產業面(如合作研發產業、申請專利、洽談技術移轉廠商件數說明)** |
| 本研究暫無產業面預期成果。 |
| **政策面(如整治費用降低、特定污染物整治效益提升、或提供政府作為監測/管制標準、污染查核、場址管理等政策及法規研訂之參考)** |
| 研究成果可提供政府作為監測/管制標準、污染查核、場址管理等政策及法規研訂之參考。為水質監測及水處理策略奠定基礎，減少 PFAS 對環境與健康的長期危害。 |

## 四、主要研究人力

請依照「專案主持人」、「協同主持人」、「專任人員」、「兼任人員」及「臨時工」等類別之順序分別填寫

| 姓名 | 服務機構/系所 | 職稱 | 在本研究專案內擔任之具體工作性質、項目及範圍 | 執行期間 |
|---|---|---|---|---|
| 林郁真 | 國立臺灣大學/環境工程學研究所 | 特聘教授 | 計畫之規劃、推動、分析結果之評估及發表 | 113.11.01~114.11.30 |
| 王宥翔 | 國立臺灣大學/環境工程學研究所 | 博士生 | 採樣、研究資料及儀器分析 | 114.02.01~114.03.31 |
| 王煥緯 | 國立臺灣大學/環境工程學研究所 | 碩士生 | 資料蒐集及分析、採樣、儀器分析及執行此研究計畫 | 114.01.01~114.11.30 |
| 賴昕辰 | 國立臺灣大學/環境工程學研究所 | 碩士生 | 資料蒐集及分析、儀器分析及執行此研究計畫 | 114.01.01~114.11.30 |
| 吳權恩 | 國立臺灣大學/環境工程學研究所 | 碩士生 | 資料蒐集及分析、儀器分析及執行此研究計畫 | 114.02.01~114.11.30 |

## 五、產業界資源投入表

專案執行若有與產業界合作，請執行單位依實際量化成果填寫於欄位中。

| 投入資源類別 | 數量 | 說明 |
|---|---|---|
| **1.自籌款** | **元** | |
| **2.人力** | **人月** | |
| **3.設備** | | |
| **4.其他資源**<br>**(請自行增列)** | **(請自填)** | |

上傳時間：2025年12月18日下午 01:11

上傳時間：2025年12月18日下午 01:11

# 中文摘要

全氟及多氟化合物（PFAS）因其特性，被廣泛應用於各類產品中，對環境與人體健康構成潛在風險。隨著長鏈 PFAS 逐步遭到管制，短鏈與新穎 PFAS 作為為替代品，引起各界的高度關注。本研究針對中部科學園區周邊四口地下水監測井進行多深度採樣，分析 16 種 PFAS 濃度，以評估對地下水體的影響。樣品經由固相萃取法處理，並使用高效液相層析串聯質譜儀進行分析，搭配 11 種內標準品，偵測極限 0.1–0.2 ppt，回收率介於 73%至 126%，展現高靈敏度與準確性。結果顯示，長鏈 PFAS 如 PFOA 與 PFOS 在所有井位中皆被檢出，其中最大濃度達 50 ppt，短鏈 PFAS 中以 PFBS 濃度最高，達百 ppt 等級；新穎 PFAS 中則檢出 FBSE，其僅於鄰近污水排放口的水井中被檢出，顯示排放源之關聯性。分層水樣分析亦發現，PFAS 已明顯向下遷移，進入地下含水層。風險評估結果顯示，採樣點 G0 發現 PFOA 與 PFOS 合計超過我國環境部飲用水標準；依照美國健康建議值，除 GenX 外，所有監測化合物皆於各井位中被檢出，PFOA 在所有樣點均超標，PFOS 亦有三處超標。儘管各井的 Hazard Index 低於 1，但 PFBS 濃度普遍偏高亦值得關注。新穎 PFAS 雖未納入現行法規，然其廣泛檢出已突顯其風險。本研究為國內首例針對新穎 PFAS 於園區周邊地下水體中分布與滲入行為之系統性調查，對後續監測機制與風險管理具有重要參考價值。

上傳時間：2025年12月18日下午 01:11

# 英文摘要

Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) are extensively used in industrial processes and consumer products due to their remarkable chemical stability and water-repellent properties, but these same characteristics pose potential risks to both ecosystems and human health. As regulatory pressure has curtailed long-chain PFAS, industry has increasingly turned to short-chain and emerging PFAS alternatives—whose persistence and mobility in the environment remain a growing concern. In this study, we collected depth-profiled groundwater samples from four monitoring wells surrounding a central Taiwan science park to quantify sixteen PFAS compounds and assess the influence of a nearby wastewater treatment plant. Samples were prepared via weak anion-exchange solid-phase extraction and analyzed by HPLC-MS/MS against eleven isotopically labeled internal standards, achieving detection limits of 0.1–0.2 ppt and recoveries between 73% and 126%. Long-chain PFAS such as PFOA and PFOS were detected in every well, with maximum concentrations reaching 50 ppt, while among short-chain PFAS, PFBS appeared at the highest levels (hundreds of ppt). The novel PFAS FBSE was only found in wells closest to the discharge point, underscoring its source linkage. Geological profiling and layered sampling revealed clear PFAS migration into deeper aquifer zones. Risk assessment showed that combined PFOA and PFOS in samples from G0 sampling point exceeded Taiwan’s drinking-water standard (>50 ppt), and, by U.S. health advisory guidelines, PFOA surpassed recommended levels at all sites (with PFOS also exceeding thresholds at three locations). Although all hazard indices remained below 1, the generally elevated PFBS concentrations warrant close attention. While emerging PFAS are not yet regulated, their consistent detection highlights potential future exposure risks. This investigation represents the first systematic study of emerging PFAS distribution and transport in groundwater around a Taiwanese science park, offering critical insights for ongoing monitoring and risk-management strategies.

上傳時間：2025年12月18日下午 01:11

# 目次

**圖次** ……VI

**表次** ……VII

**第一章** 前言與文獻探討 ……1

**第二章** 研究目的 ……7

**第三章** 研究方法與過程 ……9

**3.1.** 採樣地點 ……9

**3.2.** 採樣步驟 ……14

**3.3.** 分析方法 ……14

**3.3.1.** 固相萃取法 ……14

**3.3.2.** 高效液相層析串聯質譜儀分析 ……15

**3.4.** 研究進度及預期完成之工作項目（甘特圖） ……20

**第四章** 結果與討論 ……21

**4.1.** 分析方法優化 ……21

**4.1.1.** 檢量線之偵測極限 ……21

**4.1.2.** 萃取方法之建立 ……21

**4.2.** 地下水採樣及前處理 ……28

**4.3.** 科學園區地下水體中短鏈與新穎全氟化合物之濃度分析 ……43

**4.4.** 地下水體中全氟化合物之風險評估 ……55

**第五章** 結論與建議 ……57

**5.1.** 結論 ……57

**5.2.** 建議 ……58

**第六章** 參考文獻 ……59

上傳時間：2025年12月18日下午 01:11

# 圖次

**圖表一**、本計畫採樣之中部科學園區台中園區附近地下水監測井樣點地圖 ..... 10

**圖表二**、本計畫規劃之短鏈及新穎 PFAS 採樣、固相萃取及分析標準流程圖 ... 17

**圖表三**、添加 100 μg/L (a) 新穎 PFAS, (b) 短鏈 PFAS 及 (c) 長鏈 PFAS 之去離子水樣品的質譜圖 ..... 25

**圖表四**、本計畫採樣之地下水監測井 ..... 31

**圖表五**、G1 (B00003) 鎮平國小 地下水監測井現場採樣照片 ..... 33

**圖表六**、G2 (L00011) 大肚國小 地下水監測井現場採樣照片 ..... 35

**圖表七**、G3 (N00316) 伸東國小 地下水監測井現場採樣照片 ..... 37

**圖表八**、G4 (L00010) 龍港國小(台中市) 地下水監測井現場採樣照片 ..... 39

**圖表九**、實驗室地下水水樣固相萃取程序前處理照片 ..... 42

**圖表十**、科學園區地下水體中(a) 傳統長鏈、(b)短鏈及 (c) 新穎 PFAS 濃度 ... 50

**圖表十一**、四個國小的地下水體中 PFAS 濃度 ..... 52

**圖表十二**、地下水監測井附近鑽孔地質柱狀圖 ..... 54

上傳時間：2025年12月18日下午 01:11

# 表次

**表格一**、污水處理廠中測得的全氟化物濃度 ..... 5

**表格二**、地表水中測得的全氟化物濃度 ..... 5

**表格三**、地下水中測得的全氟化物濃度 ..... 6

**表格四**、採樣點之座標及其採樣深度 ..... 9

**表格五**、本計畫預分析之新穎及一般全氟及多氟化合物之名稱、縮寫、化學式、log $K_{OW}$*、半衰期及分子結構 (*PFAS 的 log $K_{OW}$ 使用 ACD/Labs 軟體根據化學結構進行估算。)..... 11

**表格六**、高效液相層析儀之層析條件。 ..... 16

**表格七**、PFAS 及其質譜儀分析參數。 ..... 18

**表格八**、計畫甘特圖..... 20

**表格九**、以 HPLC-MS/MS 測定 PFAS 之停留時間、儀器偵測極限 (Instrumental Detection Limit, IDL)和方法偵測極限 (Method Detection Limit, MDL)及定量極限 (Limit Of Quantitation, LOQ)..... 26

**表格十**、以 HPLC-MS/MS 測定 PFAS 之絕對回收率與相對回收率。 ..... 27

**表格十一**、地下水採樣作業基本資訊與路線規劃表 ..... 28

**表格十二**、空白樣品 95%信賴水準下之信賴區間。 ..... 43

**表格十三**、四個國小的地下水體中 PFAS 濃度 (ppt) ..... 45

**表格十四**、地下水體中藉由台美飲用水標準風險評估 ..... 56

上傳時間：2025年12月18日下午 01:11

上傳時間：2025年12月18日下午 01:11



# 第一章　前言與文獻探討

全氟及多氟烷基物質（Per- and polyfluoroalkyl substances, PFAS）是一類具高化學穩定性的人工合成化合物，廣泛應用於工業和消費品中，涵蓋範圍包括泡沫滅火器、不沾鍋、紡織品、食品包裝、半導體及電子產品等 (Herzke et al., 2012)。PFAS 的分子結構以碳-氟鍵（Carbon–fluorine bond, C-F bond）為基礎，這使其在環境中極難降解，具有持久性和生物累積性，因此被譽為「永遠的化學物質」(Cousins et al., 2020; Klöpffer, 1994)。其中，全氟辛酸（Perfluorooctanoic acid, PFOA）和全氟辛烷磺酸（Perfluorooctanesulfonic acid, PFOS）尤其受到關注。這兩種長鏈 PFAS 因其對人類健康的潛在威脅，如肝臟損害、甲狀腺疾病及癌症風險，導致國際社會日益加強對其管制 (Blake and Fenton, 2020; Ojo et al., 2021)。

為了應對 PFAS 造成的環境和健康風險，各國及國際組織相繼推出相關法規。2009 年，斯德哥爾摩公約將 PFOS 列為持久性有機污染物 (UNPE, 2009)，2019 年又將 PFOA 納入同一類別 (UNPE, 2019)。此外，2022 年，全氟己烷磺酸（Perfluorohexane sulfonic acid, PFHxS）也被列入公約附件 A，要求停止生產並禁用 (UNPE, 2022)，並計畫在 2025 年將長鏈全氟羧酸（Perfluorinated carboxylic acid, PFCAs, C9 至 C21）納入附件 A 的管制範圍 (UNEP, 2023)。美國環保署（U.S. EPA）於 2016 年制定了 PFOS 和 PFOA 的飲用水建議標準，初定為 70 奈克每公升 (ng/L) (U.S.EPA, 2016a; b)，並於 2024 年進一步降低至 4 ng/L (U.S.EPA, 2024)。這些法規反映了國際社會對 PFAS 污染問題的高度重視。

然而由於 PFAS 的化學結構難以被污水處理廠去除，使其能夠在環境中長期存在。例如在義大利米蘭市區的污水處理廠中，檢測到多種全氟羧酸與全氟磺酸，包括短鏈的 PFPeA 與長鏈的 PFBS，總濃度範圍介於 13,400 至 107,000 ng/L，顯示該地區具有顯著的商業與工業排放來源 (Moneta et al., 2023)。在中國，一項涵蓋 148 座市政污水處理廠的大規模調查中，普遍於進出水中檢出 PFPeA、PFOA 與 PFOS，進水濃度範圍為 105 至 316 ng/L，即便經過處理，出水中仍可檢測到 14.8 至 31.3 ng/L，顯示處理程序後仍存在殘留 (Mu et al., 2022)。而在台灣新竹科學園區的工業廢水處理廠中，PFOA、PFHxS 與 PFOS 的濃度分別高達 517.3 ng/L、2406.7 ng/L 與 6050 ng/L，顯示這些全氟化物主要來自高科技產業的排放 (Lin et al., 2010)，污水處理廠中測到 PFAS 的文獻彙整在**表格一**。另一方面，在中國長江支流漢江與青島市的城市河川中，PFBS、PFOA 與 PFBA 為主要檢出污染物。其中，青島部分監測站點的 PFAS 總濃度高達 292.2 ng/L，其中以 PFBS 濃度最高，達 256.8 ng/L，顯示都市排放為主要污染來源 (Lu et al., 2022)。在波蘭的奧得河中，PFBA 為最主要成分，其在 14 種 PFAS 總濃度中占比最高，整體

濃度範圍介於 7.6 至 68.0 ng/L (Zarębska et al., 2024)。於萊茵河流域，檢測到 PFBA 濃度為 1.15 至 335 ng/L，PFBS 為 0.22 至 153 ng/L，PFPeA 為 0.66 至 69.5 ng/L，PFHxA 為 0.62 至 49.6 ng/L，PFHpA 則為 0.12 至 8.79 ng/L，顯示此區域以短鏈 PFAS 為主，且主要來自工業活動 (Möller et al., 2010)；另在中國的湯遜湖湖水中，也發現以短碳鏈 PFAS 為主，其中 PFBS 與 PFBA 濃度分別高達 3,660 ng/L 與 4,770 ng/L，顯示顯著的人為影響 (Zhou et al., 2013)。此外，在荷蘭一座多氟化物生產工廠的下游河川中，GenX 濃度高達 812 ng/L，並伴隨檢出多種未知結構的全氟與多氟化合物 (Gebbink et al., 2017)。在台灣，本研究團隊於 2010 年於新竹地區的客雅溪與南門溪中亦檢測到 PFOS 與 PFHxA，最高濃度分別為 293 ng/L 與 406 ng/L，顯示都市與工業活動對地表水質造成影響 (Lin et al., 2010)。上述提及之地表水中測到 PFAS 的文獻彙整在**表格二**。這些化學物質的持久性加劇了其在環境中的積累，最終可能通過水循環進入地下水系統。地下水是全球最重要的水資源之一，尤其在乾旱或水資源匱乏的地區，地下水更是飲用水、農業灌溉和工業用水的重要來源。在全球範圍內，地下水為全球超過一半的人口提供了飲用水 (Fienen and Arshad, 2016; Giordano, 2009; Margat and Van der Gun, 2013)，特別是在美國、印度、非洲某些地區和中東，地下水的使用至關重要 (Ranjan et al., 2009; Scanlon et al., 2023)。例如，美國明尼蘇達州超過 75 %的居民依賴地下水作為主要飲用水來源 (Ryker, 2003; Smith and Westenbroek, 2015)。在印度，由於地表水資源的匱乏，地下水被大量抽取以滿足農業和飲用水需求。而這也使得 PFAS 在地下水中的污染越來越需要被重視。在德國，工業區附近的地表水檢測顯，PFAS 濃度達到數十至數百 ng/L 不等，這些地區多為金屬電鍍廠、化工廠等使用 PFAS 的工業設施 (Löbbecke, 2024)。日本的某些工業區也出現類似情況，地下水中 PFOS 和 PFOA 的檢測濃度達到 ng/L 等級 (Xu et al., 2013)。在中國華北平原地區的污染場址中，地下水樣本中 PFAS 總濃度最高可達 3,776.8 ng/L，主要以 PFOA 為主，另亦檢出 PFHpS 等其他成分，顯示當地地下水已受到顯著污染 (Liu et al., 2022)。在澳洲墨爾本一處都市垃圾掩埋場周邊，地下水中 PFOS 濃度高達 4,800 ng/L，PFHxS 亦達 280 ng/L，突顯廢棄物處理設施亦為 PFAS 的重要排放源 (Hepburn et al., 2019)。印度方面，在恆河流域與金奈地區的地下水中亦檢測到 PFBS 與 PFOA，其濃度分別可達 136.3 ng/L 與 77.6 ng/L，顯示 PFAS 污染具有全球性擴散的趨勢 (Koulini and Nambi, 2024; Sharma et al., 2016)。在韓國的洛東江周邊，也發現其工業區所洩漏的 PFAS 污染附近的地下水水源，且短鏈 PFAS 濃度較長鏈 PFAS 的高(Yong et al., 2021)。位於中國佛山市的染色工業，其周邊地下水亦發現高濃度 PFAS，且四碳的 PFBS 在所有地下水皆有測得，且平均濃度高達 429 ng/L(Wu et al., 2025)。在台灣，本研究團隊於 2015 年在台北、新北及新竹

上傳時間：2025年12月18日下午 01:11



地區之地下水中，亦檢測到 PFHxA 與 PFHpA，濃度分別介於 2.7 至 240.0 ng/L 及 0.2 至 46.3 ng/L 之間。進一步分析發現，地下水中 PFAS 濃度的對數值與碳鏈長度之間呈現負相關 (Lin et al., 2015)。上述地下水中測到 PFAS 的文獻彙整在表格三。另一方面，消防泡沫（Aqueous Film-Forming Foam, AFFF）的廣泛使用被認為是 PFAS 污染地下水的主要原因之一。在法國，針對 AFFF 頻繁使用場域周邊的地表水進行監測時，發現 PFBA 與 PFBS 的濃度分別介於 4–45 ng/L 與 4–138 ng/L，PFPeA 濃度範圍為 0.66–69.5 ng/L，PFHxA 介於 4–178 ng/L，而 PFHpA 則為 4–80 ng/L。 (Dauchy et al., 2017)。AFFF 中含有大量的 PFOS 和 PFOA，這些化學物質在消防演習和實際滅火過程中進入環境水體，最終滲透至地下水層 (Houtz et al., 2013; Johnson et al., 2022)。值得注意的是，這些檢測出的 PFAS 污染不僅來自於直接的工業排放和消防泡沫的使用，還可能來自被污染的土壤滲透至地下水層。

在台灣，PFAS 的環境污染問題也開始受到關注，尤其是對於地下水的污染風險。根據現有的環境監測數據，台灣的飲用水質標準目前預計針對三種 PFAS 化合物進行監測，即 PFOA、PFOS 和 PFHxS，要求 PFOA 與 PFOS 濃度合計小於 50 ng/L、PFOS 與 PFHxS 濃度合計小於 70 ng/L (中華民國行政院環境部, 2024)。此外，根據環境部環境管理署土壤及地下水污染整治基金管理會（土基會）在 112 舉辦的「全氟及多氟烷基物質管理現況暨未來展望研討會」的報告所提到，103 年到 111 年針對科學園區、紡織業及其他產業周邊的地下水中，長鏈 PFAS 的檢出頻率相對較高，特別是 PFOA 和 PFOS，濃度範圍在 5.3 至 40.2 ng/L 之間 (環境部環管署土基會蔡惠珍, 2023)。然而，目前台灣在 PFAS 的監測仍有缺漏，特別是在短鏈全氟化合物（如全氟丁酸（Perfluorobutanoic acid, PFBA）、全氟丁烷磺酸（Perfluorobutane sulfonic acid, PFBS）等）的監測上，這可能導致環境風險的低估。

短鏈 PFAS，如 PFBA 和 PFBS，由於較低的生物累積性和較短的半衰期，常被視為較安全的替代品，並廣泛應用於工業和消費品中。然而，對其環境與健康影響的研究仍然有限，這些替代品的長期影響尚未得到充分關注 (Haug, 2019)。隨著國際法規加強對長鏈 PFAS 的管控（如斯德哥爾摩公約和歐盟 REACH 法規），各國逐步使用短鏈 PFAS 替代品。然而，儘管短鏈 PFAS 的生物累積性較低，但它們在水體中的擴散速度快，且化學穩定性強，使得它們難以被自然降解，對生態環境構成潛在風險 (Kim et al., 2022; Lenka et al., 2021; Li et al., 2020; Smaili and Ng, 2023)。此外，由於其較高的水溶性，這些化合物不易被土壤或底泥吸附，更容易進入地下水系統 (Ateia et al., 2019; Brendel et al., 2018; Lin et al., 2015)。國際研究顯示，特別是在使用 AFFF（含氟滅火劑）的地區，地下水中已檢測到短

鏈 PFAS 的痕跡 (Brendel et al., 2018; Høisæter et al., 2019)。今年本研究團隊針對台灣半導體業廢水及污水處理廠放流水進行深入調查，發現四碳全氟化合物，如全氟丁烷磺醯胺乙醇（Perfluorobutane sulfonamidoethanol, FBSE）（如**表格五**）——這些我們將其稱之為新穎 PFAS，其中 FBSE、全氟丁烷磺醯胺 (Perfluorobutane sulfonamdie, FBSA) 與全氟丁烷磺醯胺二乙醇 (Perfluorobutane sulfonamido diethanol, FBSEE diol)，其最高濃度分別高達 482 μg/L、141 μg/L 與 83.5 μg/L，遠高於一般常見長鏈 PFAS 僅有 ng/L 等級的濃度，超出千倍以上。此外，三種超短鏈 PFAS——三氟乙酸（TFA）、全氟丙酸（PFPrA）與三氟甲磺酸（TFMS）——亦在所有樣本中被檢出，濃度範圍介於 0.004 至 19.9 μg/L。進一步分析顯示，FBSE 及其衍生物在總 PFAS 濃度中占比高達 90 %，而傳統學界關注的 PFAS 僅佔約 10 % (Chen et al., 2024a; Chen et al., 2024b)。這一結果顯示，這些新穎 PFAS 可能通過污水處理廠的放流水滲入土壤，進而進入地下水系統，對當地環境構成潛在威脅。

雖然短鏈 PFAS 在全球範圍內的應用不斷擴大，但對於這些替代品在環境中的流佈與影響，國內外的研究仍然較為匱乏。特別是在亞洲地區，針對短鏈 PFAS 的環境監測數據較少，這使我們對這些物質的長期影響缺乏充分了解。台灣目前對於地下水中短碳鏈與新穎 PFAS 的調查仍屬空白。尤其近年來台灣所自豪的半導體產業，就仰賴著這些替代全氟化合物的使用。由於部分半導體業者已自願停用 PFOA 和 PFOS，可能會轉而改使用短鏈 PFAS，故短鏈 PFAS 排放量將可能增加。根據 112 年事業廢水特性調查及污染防治管理計畫成果報告針對科學園區、工業區之事業及污水下水道系統進行調查，發現 PFBA 是檢出率最高的短鏈 PFAS，其 PFBA 的最高濃度達到 0.942 μg/L，且檢出頻率達 100 % (環境部水質保護司, 2023)。這些結果顯示，工業排放、科學園區以及其他化工相關產業可能是短鏈 PFAS 污染的主要來源。

因此，本計畫希望針對科學園區附近的地下水體進行深入研究，調查短鏈與新穎全氟化合物的濃度分佈，評估科學園區所使用的短鏈與新穎 PFAS 是否滲透至地下水。通過此研究，期望能補足國內對於地下水中短鏈 PFAS 監測研究的知識空缺，並通過分析的結果評估短鏈 PFAS 之潛在污染源。本計畫的結果將對於未來台灣如何應對常見及新穎 PFAS，並制定更全面的 PFAS 監測標準具有重要意義。台灣作為半導體產業的龍頭，除了在半導體產業上發光發熱，並且也應在環境保護方面的研究與國際接軌，為國際間做一個好的示範，以為世界各國的研究及環境治理政策提供重要的依據。

上傳時間：2025年12月18日下午 01:11



**表格一**、污水處理廠中測得的全氟化物濃度

| 污水處理廠 | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 國家 | 地點 | 測得全氟化物 | 濃度範圍 (ng/L) | 引用文獻 |
| 義大利 | 米蘭市區污水處理廠 | PFPeA、PFBS 等 | 13,400–107,000 | (Moneta et al., 2023) |
| 中國 | 148 座市政污水處理廠 | PFPeA、PFOA、PFOS | 進水: 105–316；出水: 14.8–31.3 | (Mu et al., 2022) |
| 台灣 | 新竹科學園區工業廢水處理廠 | PFOA、PFHxS、PFOS | 517.3、2406.7、6050 | (Lin et al., 2010) |

**表格二**、地表水中測得的全氟化物濃度

| 地表水 | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 國家 | 地點 | 測得全氟化物 | 濃度範圍 (ng/L) | 引用文獻 |
| 中國 | 青島市城市河川 | PFBS、PFOA、PFBA | ΣPFAS: 28.3–292.2；PFBS: 256.8（最高） | (Lu et al., 2022) |
| 波蘭 | 奧得河（Oder River） | PFBA（占比最高）、Σ14 PFAS | 7.6–68.0 | (Zarębska et al., 2024) |
| 德國 | 萊茵河流域 | PFBA、PFBS、PFPeA、PFHxA、PFHpA | PFBA: 1.15–335；PFBS: 0.22–153 | (Möller et al., 2010) |
| 中國 | 湯遜湖 | PFBS、PFBA | PFBS: 3660；PFBA: 4770 | (Zhou et al., 2013) |
| 荷蘭 | PFAS 工廠下游河川 | GenX、未知 PFAS 結構 | GenX: 812 | (Gebbink et al., 2017) |
| 台灣 | 客雅溪與南門溪 | PFOS、PFHxA | PFOS: 293；PFHxA: 406 | (Lin et al., 2010) |
| 法國 | AFFF 操作場址周邊地表水 | PFBA、PFBS、PFPeA、PFHxA、PFHpA | 4–178（各物質有所不同） | (Gebbink et al., 2017) |

**表格三**、地下水中測得的全氟化物濃度

| 地下水 | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 國家 | 地點 | 測得全氟化物 | 濃度範圍 (ng/L) | 引用文獻 |
| 中國 | 華北平原污染場址 | PFOA、PFHpS、ΣPFAS | 0.22–3776.8 | (Liu et al., 2022) |
| 澳洲 | 墨爾本垃圾掩埋場附近 | PFOS、PFHxS | PFOS: 4800；PFHxS: 280 | (Hepburn et al., 2019) |
| 印度 | 恆河與金奈地區 | PFBS、PFOA | PFBS: 136.3；PFOA: 77.6 | (Koulini and Nambi, 2024; Sharma et al., 2016) |
| 台灣 | 台北、新北與新竹地區 | PFHxA、PFHpA | PFHxA: 2.7–240；PFHpA: 0.2–46.3 | (Lin et al., 2015) |

上傳時間：2025年12月18日下午 01:11



# 第二章　研究目的

本計畫的研究目標為建立有效萃取新穎 PFAS 與分析新穎 PFAS 濃度之方法，並在計畫執行過程中改善部分目標 PFAS 回收率偏低之技術問題。藉此優化之萃取與分析方法，本計畫檢測科學園區周邊地下水體內 PFAS 污染濃度，並分析不同地下水井位置及不同深度中短鏈與新穎 PFAS 的濃度關聯。最後，本計畫以獲得之研究成果，提出相關單位改善短鏈及新穎 PFAS 污染之建議，並作為後續研究階段方法調整與執行重點的依據。

上傳時間：2025年12月18日下午 01:11

上傳時間：2025年12月18日下午 01:11



# 第三章　研究方法與過程

## 3.1. 採樣地點

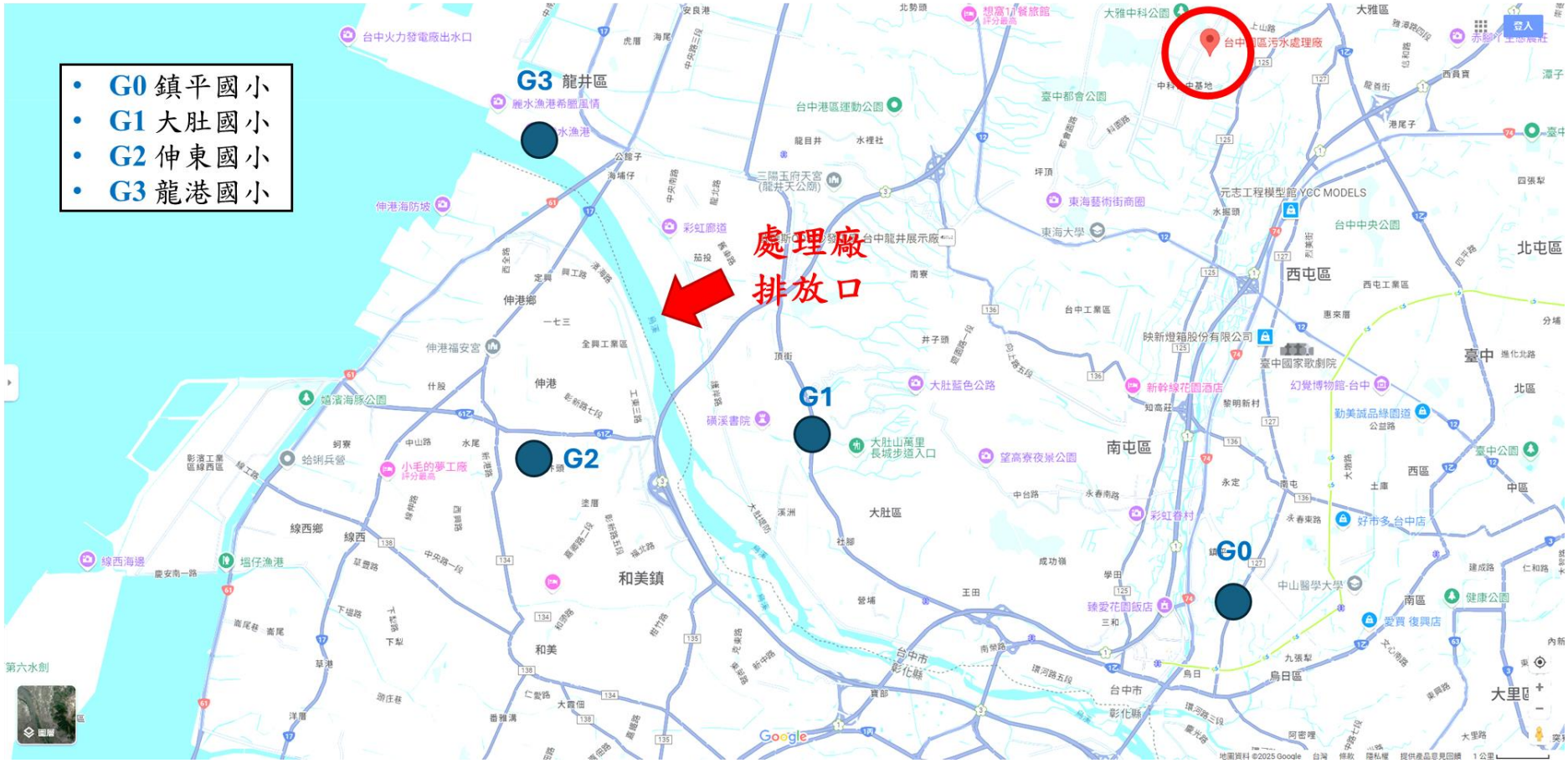
在中部科學園區台中園區附近選取了 4 個地下水監測井作為採樣點，選點順序如下：(A) 高科技廠後端之污水處理廠放流水排放點之河川附近地下水監測井、(B) 放流水河川下游之監測井及 (C) 不同深度。各採樣點的分布如**圖表一**所示，其中採樣點 G0 距離何川放流水之排放點較遠，預期當作地下水之背景濃度，採樣點 G1 到 G3 則為河川放流水附近之地下水監測井，目的為評估放流水排放至河川後河川滲流水對地下水之影響。另一方面，為了評估現地地質條件可能對地下水造成的影響，將在同一口井內於不同深度採集地下水樣本，以比較不同深度的 PFAS 濃度是否受到地質變化的影響。採樣將以地下水位作為基準點，並選定不同深度進行取樣（例如 -1 公尺及 -3 公尺等深度），採樣過程中將詳細紀錄各採樣點的資訊，包括座標、採樣深度，以及地下水水樣的基本水質參數，表格四為採樣點之座標及其採樣深度。

**表格四**、採樣點之座標及其採樣深度

| 採樣點 | 天氣 | 座標 | | 採樣深度 (公尺) |
|---|---|---|---|---|
| | | 經度 | 緯度 | |
| G0-鎮平國小 | 晴天 (32 ºC) | 120.628461º E | 24.122006º N | -1* |
| G1-大肚國小 | 晴天 (32 ºC) | 120.545822º E | 24.153768º N | -1, -3 |
| G2-伸東國小 | 晴天 (32 ºC) | 120.496296º E | 24.146633º N | -1, -3 |
| G3-龍港國小 | 晴天 (32 ºC) | 120.501368º E | 24.199050º N | -1, -3 |

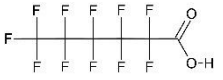
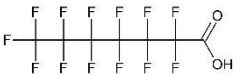
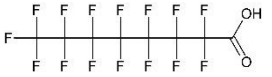
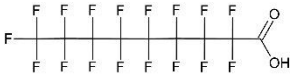
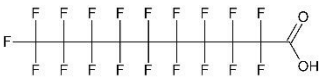
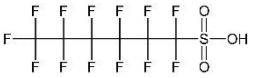
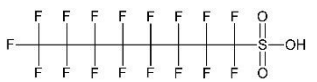
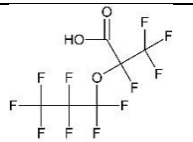
*G0-鎮平國小的地下水監測井深度只有 2 公尺，因此只取 1 公尺深度。

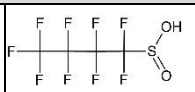
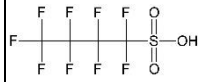
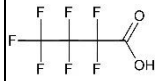
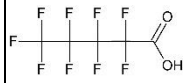
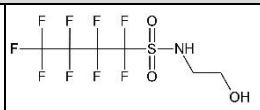
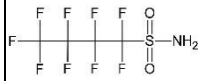
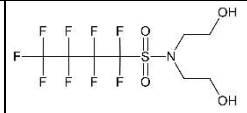
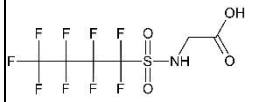
# 中部科學園區台中園區附近地下水採樣




**圖表一**、本計畫採樣之中部科學園區台中園區附近地下水監測井樣點地圖

**表格五**、本計畫預分析之長鏈、短鏈及新穎全氟及多氟化合物之名稱、縮寫、化學式、log $K_{OW}$*、半衰期及分子結構 (*PFAS 的 log $K_{OW}$ 使用 ACD/Labs 軟體根據化學結構進行估算。)

| 中文名稱 | 英文名稱 | 縮寫 | 化學式 | log $K_{OW}$ | 半衰期(天) | 分子結構 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 長鏈全氟化合物 | | | | | | |
| 全氟己酸 | Perfluorohexanoic acid | PFHxA | $C_5F_{11}COOH$ | 5.97 | 32 |  |
| 全氟庚酸 | Perfluoroheptanoic acid | PFHpA | $C_6F_{13}COOH$ | 6.86 | 464 |  |
| 全氟辛酸 | Perfluorooctanoic acid | PFOA | $C_7F_{15}COOH$ | 7.75 | 902 |  |
| 全氟壬酸 | Perfluorononanoic acid | PFNA | $C_8F_{17}COOH$ | 8.64 | 1417 |  |
| 全氟癸酸 | Perfluorodecanoic acid | PFDA | $C_9F_{19}COOH$ | 9.53 | 3743 |  |
| 全氟己烷磺酸 | Perfluorohexanesulfonic acid | PFHxS | $C_6F_{13}SO_3H$ | 5.25 | 1661 |  |
| 全氟辛烷磺酸 | Perfluorooctanesulfonic acid | PFOS | $C_8F_{17}SO_3H$ | 7.03 | 1241 |  |
| 六氟環氧丙烯二聚酸 | Hexafluoropropylene oxide dimer acid | HFPO-DA (GenX) | $C_6HF_{11}O_3$ | 8.12 | 3.38 |  |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 短鏈全氟化合物 | | | | | | |
| 全氟丁亞磺酸 | Perfluorobutanesulfinic acid | PFBSi | $C_4HF_9O_2S$ | 4.11 | 43 |  |
| 全氟丁磺酸 | Perfluorobutane sulfonate | PFBS | $C_4HF_9O_3S$ | 3.68 | 26 |  |
| 全氟丁酸 | Perfluorobutanoic acid | PFBA | $C_3F_7COOH$ | 3.93 | - |  |
| 全氟戊酸 | Perfluoropentanoic acid | PFPeA | $C_4F_9COOH$ | 5.29 | - |  |
| 新穎全氟化合物 | | | | | | |
| 全氟丁烷磺醯胺乙醇 | Perfluorobutane sulfonamidoethanol | FBSE | $C_6H_6F_9NO_3S$ | 4.00 | - |  |
| 全氟丁烷磺醯胺 | Perfluorobutane sulfonamdie | FBSA | $C_4H_2F_9NO_2S$ | 4.29 | - |  |
| 全氟丁烷磺醯胺二乙醇 | Perfluorobutane sulfonamido diethanol | FBSEE diol | $C_8H_{10}F_9NO_4S$ | 4.15 | - |  |
| 全氟丁烷磺醯胺乙酸 | Perfluorobutane sulfonamido acetic acid | FBSAA | $C_6H_4F_9NO_4S$ | 4.68 | - |  |

長鏈全氟化合物包含傳統全氟化合物 (legacy PFAS): PFNA, PFOA, PFOS 及 PFHxS。

上傳時間：2025年12月18日下午 01:11



## 3.2. 採樣步驟

本方法的採樣步驟遵循環境部國家環境研究院公告之微洗井地下水採樣標準程序（NIEA W103.54B），進行水樣採集。採樣設備包含：水位計、pH 計、導電度計、溶氧計、氧化還原電位計、濁度計、溫度計，以及微洗井專用設備（包含微型貝勒管及微流量抽水泵）、採樣設備、樣品容器、過濾裝置及濾膜等。

微洗井操作：採樣以微型貝勒管進行，將貝勒管置於井篩中間區域取得水樣，並採用微流量（約 0.1-0.5 公升/分鐘）抽水，避免擾動井水並保留原生水層特性。

水質參數穩定性確認：在微洗井過程中，連續量測 pH、導電度、溶氧等水質參數，並確保三次測量結果穩定達標後方可進行正式採樣，以確保樣品代表性。

樣品收集與保存：將水樣盛裝於 PP 或 PE 材質的樣品瓶中，置於保冰袋以維持低溫。記錄樣品的採樣者、採樣時間、採樣地點，以及所有測量參數。

## 3.3. 分析方法

本計畫參考環境部國家環境研究院公告的液相層析串聯質譜法（NIEA W542.51B）作為分析方法，並針對短鏈及新型 PFAS 的萃取與分析流程進行優化。樣品前處理採用固相萃取（Solid Phase Extraction, SPE）技術，使用 WAX 萃取匣，隨後結合高效液相層析串聯質譜及負離子電噴灑游離（ESI）介面進行地下水樣品分析。分析步驟如**圖表二**所示：

### 3.3.1. 固相萃取法

下列為本團隊建立之使用以 WAX 萃取匣進行環境水樣之 SPE 標準流程：

1. 地下水以 PP 或 PE 採樣瓶進行採樣。運送至實驗室後，先以 0.2 μm 濾膜過濾，以去除水中固態雜質，並以甲酸或氨水調整 pH 至 3，保存至 4 ℃冰箱中。
2. 進行固相萃取時，WAX 萃取匣先以 6 mL 含有 2 %氨水之甲醇與 6 mL 甲醇分別流洗，再以 6 mL 之去離子水流洗，以達活化效果。
3. 待測水樣以量筒取 500 mL 倒入容器中，添加適量內標準品（如：PFOA-13C8）。使用抽氣幫浦以 3 至 5 mL/min 之流速，使水樣流經 WAX 萃取匣。最後，以 3 mL 之 0.1 %甲酸水溶液清洗萃取匣，接著加入 2 mL 去離子水清洗萃取匣。抽乾固相萃取匣約 15 分鐘。

上傳時間：2025年12月18日下午 01:11



4. 於乾燥的固相萃取匣加入 6 mL 甲醇進行沖提，並蒐集沖提液。再加入 6 mL 含有 2 % 氨水之甲醇沖提萃取匣，並合併蒐集上述之沖提液。
5. 沖提液於 37 °C 下吹氮濃縮至接近乾燥，加入 0.3 mL 的甲醇回溶，以 Vortex 溶解均勻，再加入 0.2 mL 去離子水，以 Vortex 溶解均勻後，經由 0.2 μm 孔徑之 PVDF 濾頭過濾之。

### 3.3.2. 高效液相層析串聯質譜儀分析

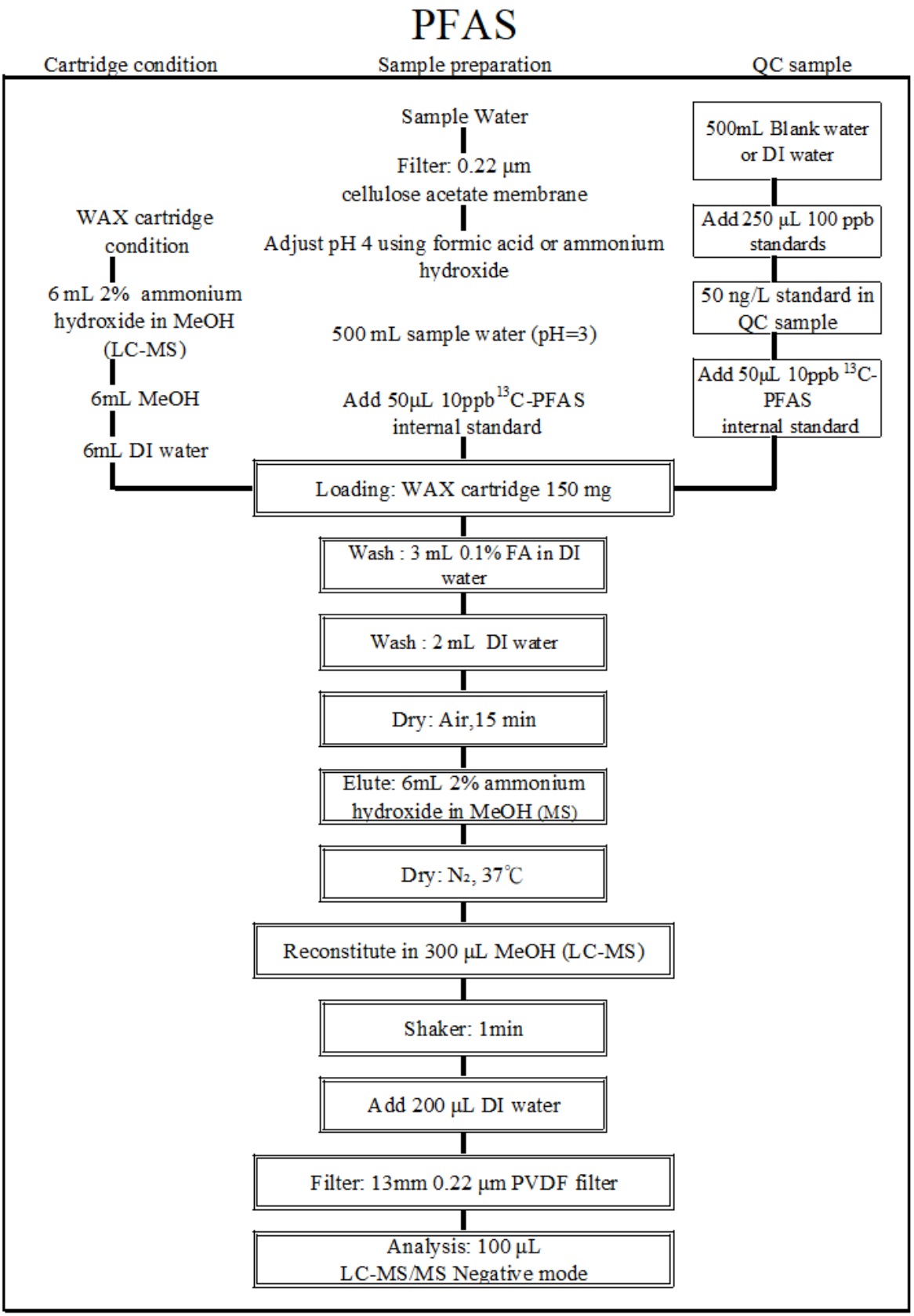
本計畫使用高效液相層析儀串聯質譜儀（HPLC–MS/MS，Agilent 1200 模組，Agilent，Palo Alto，CA，USA），搭配 AB SCIEX API-4000 串聯式四極桿質譜儀（AB SCIEX，Foster City，CA，USA），並使用負電模式電灑游離介面（ESI Negative mode）進行質譜定量分析。在層析部分，如**表格六**所示，樣品注射體積為 100 μL，並以 Phenomenex Luna (C18(2) 150 × 2 mm, 3 μm) 層析管柱作為固定相，流速為 250 μL/min，移動相則使用含有 5 mM 醋酸銨的去離子水與 5 mM 醋酸銨的質譜等級甲醇進行層析。**表格七**為 PFAS 及其質譜儀分析參數，質譜部分則採用多重反應監測（MRM）模式獲取離子碎片，停留時間設為 ±20 ms，並在停留時間之前以單質量解析度進行測量。

上傳時間：2025年12月18日下午 01:11



**表格六**、高效液相層析儀之層析條件。

| Novel PFAS analysis | | | | |
|---|---|---|---|---|
| ESI: Negative mode | | | | |
| Injection volume: 100 µL | | | | |
| Column: Phenomenex Luna C18(2) 150 x 2 mm 3 µm | | | | |
| Mobile phase A: 5 mM AA in DI | | | | |
| Mobile phase B: 5 mM AA in MeOH (LC-MS) | | | | |
| Step | Total Time (min) | Flow Rate (µl/min) | A (%) | B (%) |
| 0 | 0.00 | 250 | 98.0 | 2.0 |
| 1 | 0.25 | 250 | 60.0 | 40.0 |
| 2 | 12.00 | 250 | 0.0 | 100.0 |
| 3 | 15.00 | 250 | 0.0 | 100.0 |
| 4 | 16.50 | 250 | 98.0 | 2.0 |
| 5 | 20.50 | 250 | 98.0 | 2.0 |




**圖表二**、本計畫規劃之短鏈及新穎 PFAS 採樣、固相萃取及分析標準流程圖

**表格七**、PFAS 及其質譜儀分析參數。

| Compounds | Precursor Ion | MRM | DP (volts) | EP (volts) | CE (volts) | CXP (volts) | Internal Standard |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Long Chain PFAS | | | | | | | |
| PFUnA | 563 | 269 | -37.7 | -10 | -27.7 | -14.1 | |
| | | 319 | -37.7 | -10 | -25 | -5.7 | |
| PFDA | 513 | 269 | -26 | -10 | -33.2 | -4.8 | M6PFDA |
| | | 469 | -26 | -10 | -26 | -11.6 | |
| PFNA | 463 | 169 | -27.2 | -10 | -39.1 | -8.8 | M9PFNA |
| | | 219 | -27.2 | -10 | -28.9 | -9.9 | |
| PFOA | 413 | 169 | -25 | -10 | -15 | -7 | M8PFOA |
| | | 369 | -25 | -10 | -28.5 | -9.1 | |
| PFHpA | 363 | 119 | -20.3 | -10 | -34.2 | -6.1 | M4PFHpA |
| | | 169 | -20.3 | -10 | -35.2 | -11.8 | |
| PFHxA | 313 | 119 | -28.4 | -10 | -35 | -8.6 | M5PFHxA |
| | | 269 | -28.4 | -10 | -24 | -4.8 | |
| PFOS | 499 | 80 | -60 | -10 | -46.2 | -4.8 | M8PFOS |
| | | 99 | -60 | -10 | -51.3 | -8 | |
| PFHxS | 399 | 80 | -42.2 | -10 | -75.9 | -3 | M3PFHxS |
| | | 119 | -42.2 | -10 | -48.6 | -18.3 | |
| HFPO-DA | 285 | 169 | -78 | -10 | -11 | -27 | |
| | | 185 | -20 | -10 | -21 | -27 | |
| Short Chain PFAS | | | | | | | |
| PFPeA | 263 | 157 | -29 | -10 | -24.6 | -7.8 | M5PFPeA |
| | | 219 | -29 | -10 | -15.6 | -9.1 | |

上傳時間：2025年12月18日下午 01:11



| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| PFBA | 213 | 69 | -28.8 | -10 | -31.2 | -7.4 | M4PFBA |
| | | 169 | -28.8 | -10 | -14.9 | -8.2 | |
| PFBS | 299 | 80 | -61.2 | -10 | -60.4 | -4.9 | M3PFBS |
| | | 99 | -61.2 | -10 | -48.1 | -5.8 | |
| PFBSi | 283 | 219 | -42.5 | -10 | -16 | -16 | |
| | | 83 | -42.5 | -10 | -28 | -12.5 | |
| Novel PFAS | | | | | | | |
| FBSEE diol | 446 | 166 | -45 | -10 | -17 | -26 | |
| | | 136 | -45 | -10 | -24 | -19.5 | |
| FBSAA | 356 | 298 | -34 | -10 | -30 | -33 | |
| | | 219 | -34 | -10 | -33 | -23 | |
| FBSE | 342 | 65 | -16 | -10 | -37 | -10.5 | |
| | | 122 | -16 | -10 | -25 | -8 | |
| FBSA | 298 | 78 | -17 | -10 | -31 | -10 | |
| | | 219 | -17 | -10 | -25.5 | -11 | |

## 3.4. 研究進度及預期完成之工作項目（甘特圖）

如**表格八**所示，依本計畫按照之時程，現階段進行資料蒐集與彙整、分析方法優化、地下水採樣、儀器分析，與 PFAS 於地下水中的流布分析。詳細內容將於下章節說明。

**表格八**、計畫甘特圖

| 年月<br>工作項目 | 113/12 | 114/01 | 114/02 | 114/03 | 114/04 | 114/05 | 114/06 | 114/07 | 114/08 | 114/09 | 114/10 | 114/11 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 資料蒐集與彙整 | ■ | ■ | | | | | | | | | | |
| 分析方法優化 | | | ■ | ■ | | | | | | | | |
| 地下水採樣 | | | | | ■ | | | | | | | |
| 儀器分析 | | | | | | ■ | | | | | | |
| 數據分析 | | | | | | | ■ | ■ | | | | |
| 成果報告撰寫 | | | | | | | | | ■ | ■ | | |
| 國際期刊論文投稿 | | | | | | | | | | | ■ | ■ |
| 工作進度估計百分比<br>（累積數） | 10% | 15% | 25% | 30% | 40% | 50% | 60% | 70% | 75% | 80% | 90% | 100% |

| | | |
|---|---|---|
| 預定查核點 | 期中 | 1. 確認是否完成地下水水樣採集。<br>2. 檢視已取得的初步檢測數據。<br>3. 初步評估執行過程的挑戰與瓶頸，並提出解決方案。 |
| | 成果 | 1. 全面蒐集並分析數據，審核檢測結果，涵蓋不同地下水井位置及不同深度中短鏈與新穎 PFAS 的濃度分布。<br>2. 檢視科學園區地下水體內 PFAS 污染流佈的詳細評估，並對於污染的流佈範圍及宿命分析提出結論性結果，為未來治理策略提供依據。<br>3. 總結本計畫對科學園區 PFAS 污染的研究成果，提供具體數據支援及政策建議，並指出未來在地下水污染管理中的應用價值和推廣潛力。 |

上傳時間：2025年12月18日下午 01:11



# 第四章　結果與討論

目前已完成本計畫之預期成果，包含期中：完成分析方法優化及地下水水樣採集，並已陸續處理地下水樣品；期末：全面蒐集並分析數據，審核檢測結果，涵蓋不同地下水井位置及不同深度中短鏈與新穎 PFAS 的濃度分布、檢視科學園區地下水體內 PFAS 污染流佈的詳細評估及總結本計畫對科學園區 PFAS 污染的研究成果，提供具體數據支援及政策建議。本次期末報告分為以下四章節進行討論，包含 4.1. 分析方法優化、4.2. 地下水採樣及前處理、4.3. 科學園區地下水體中短鏈與新穎全氟化合物之濃度分析及 4.4. 地下水體中全氟化合物之風險評估。

## 4.1. 分析方法優化

### 4.1.1. 檢量線之偵測極限

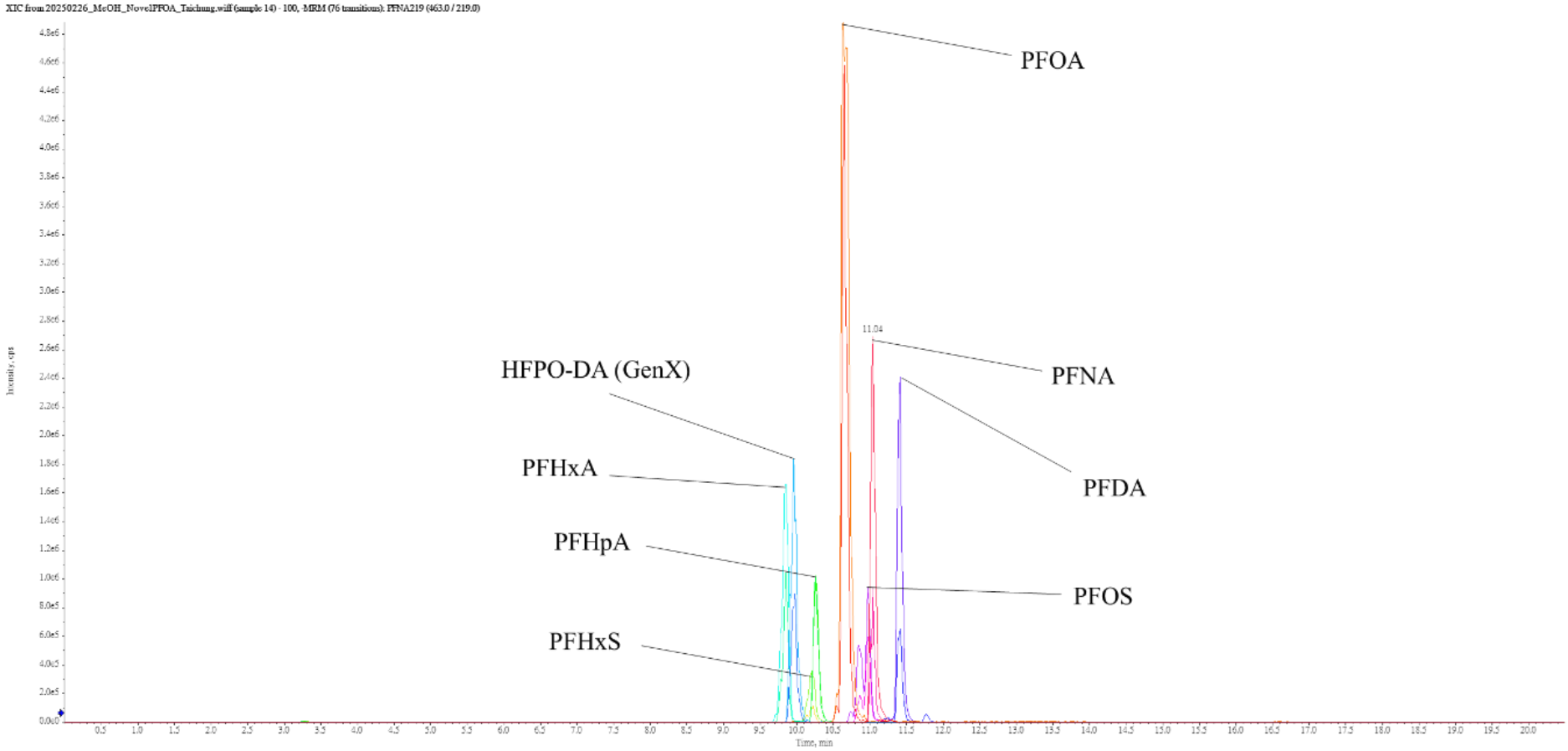
本研究於地下水樣品進行 PFAS 分析時，額外添加濃度為 1 μg/L 的質譜同位素標準品（Mass-Labelled PFAS, MPFAS），內標準品包含 M6PFDA、M9PFNA、M8PFOA、M4PFHpA、M5PFHxA、M5PFPeA、M4PFBA、M8PFOS、M3PFHxS 與 M3PFBS，以進行定量校正與品質控制。為評估分析方法靈敏度，進一步針對各 PFAS 標準品計算偵測極限（Limit of Detection, LOD）與定量極限（Limit of Quantitation, LOQ），結果列於**表格九**。LOD 代表在整體分析流程（含 SPE 前處理）下可靠偵測的最低濃度（訊雜比 S/N > 3），本研究所得 PFAS 之 LOD 為 0.1 – 0.2 ng/L；LOQ 則定義為可穩定且準確定量的最低濃度（訊雜比 S/N > 10），與 LOD 相同亦為 0.1 – 0.2 ng/L。由於部分新穎 PFAS（如 FBSE、FBSA 等）目前尚無對應質譜內標準品，因此分析此類化合物時未添加內標。在質譜分析方面，除 PFPeA 與 PFBA 僅具有單一碎裂離子外，其餘 PFAS 均具備兩個以上的碎裂離子對，可用於定性與定量判讀。相關質譜圖如**圖表三**所示，分別顯示於去離子水樣品中添加 100 μg/L 之 (a) 長鏈 PFAS、(b) 短鏈 PFAS 與 (c) 新穎 PFAS 的質譜結果。

### 4.1.2. 萃取方法之建立

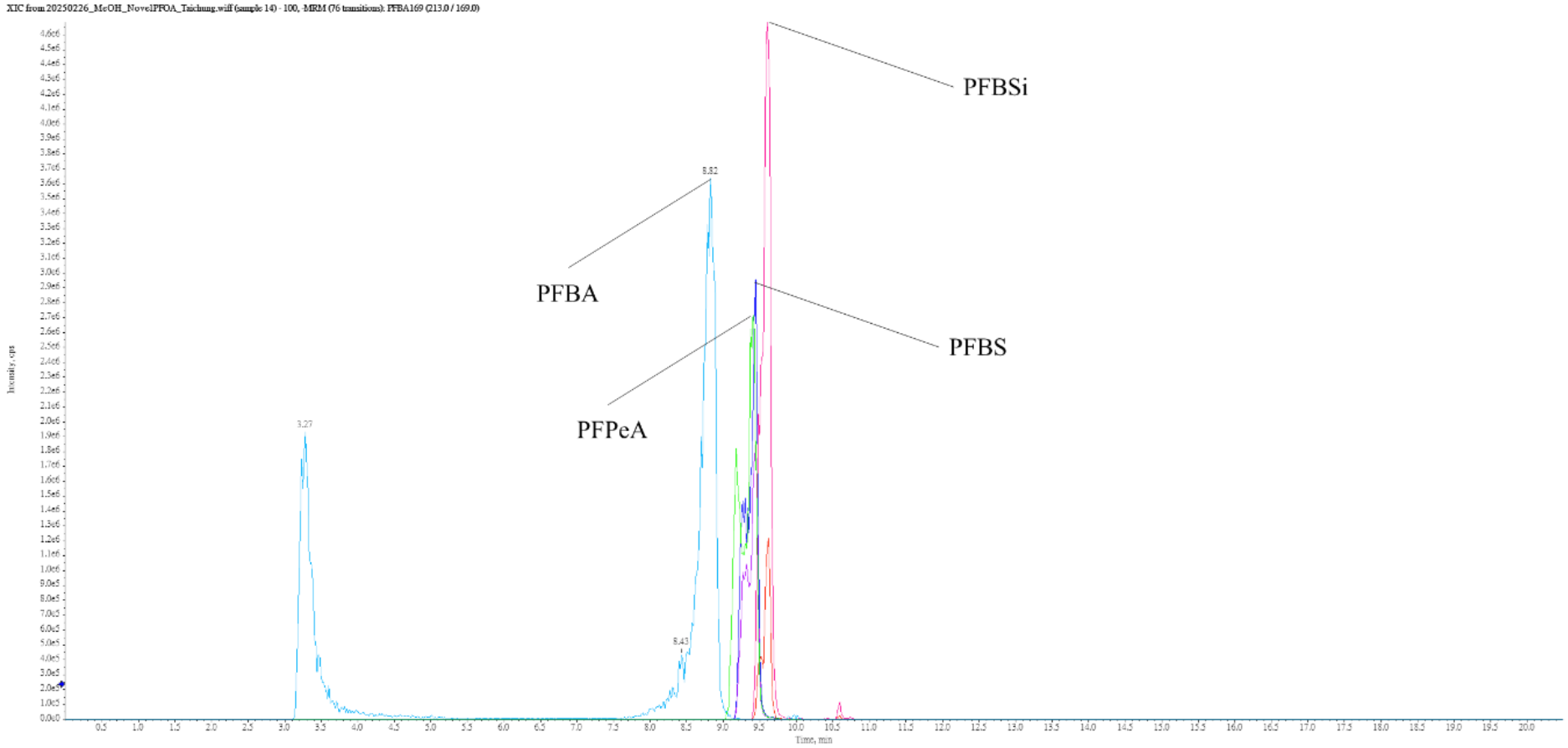
本研究建立 PFAS 於地下水樣品之固相萃取分析方法，採用**圖表二**所列 PFAS 物種作為目標化合物，並將其標準品加入去離子水中，配置成 10 ng/L 之水溶液。樣品經由 WAX 型 SPE 匣進行萃取並濃縮至 10 μg/L，再使用 MPFAS（質譜內標準品）進行校正，以評估其絕對回收率與相對回收率。由於部分 PFAS 標準品之

間存在交叉干擾，例如：(1) FBSEE diol 標準品中可檢出 FBSA、(2) PFBSi 標準品中可檢出 PFBA，因此在標準品配置過程中，將長鏈及短鏈 PFAS、FBSA 類及其他新穎 PFAS 分為三組分別配置，並獨立建立各自之檢量線，以降低干擾影響。回收率分析結果如**表格十**所示。以 WAX 萃取匣處理，並經內標校正後（若是無對應之內標準品，則使用絕對回收率），整體地下水樣品之回收率範圍為 73.4% 至 125.6%，顯示本研究所建立的萃取方法具良好的穩定性與準確性，適合應用於環境水樣中 PFAS 的定量分析。

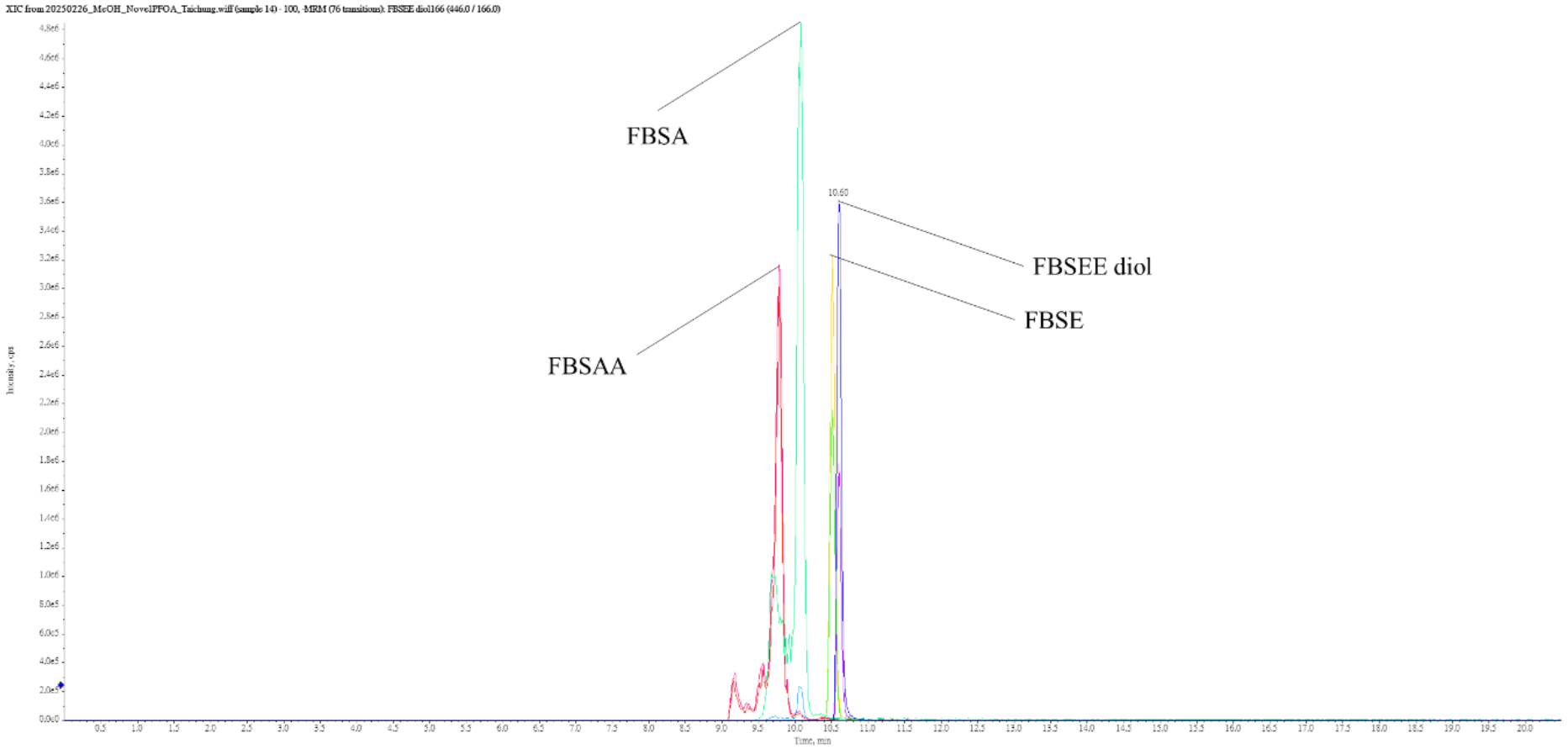
(a) 長鏈 PFAS


XIC from 20250226_MeOH_NovelPFOA_Taichung.wiff (sample 14) - 100, -MRM (76 transitions): PFNA219 (463.0 / 219.0)
Intensity, cps
Time, min
11.04
PFOA
PFNA
PFDA
PFOS
HFPO-DA (GenX)
PFHxA
PFHpA
PFHxS

(b)短鏈 PFAS


XIC from 20250226_MeOH_NovelPFOA_Taichung.wiff (sample 14) - 100, MRM (76 transitions): PFBA169 (213.0 / 169.0)
Intensity, cps
Time, min
PFBSi
PFBA
PFBS
PFPeA
8.82
3.27
8.43

(c) 新穎 PFAS




**圖表三**、添加 100 µg/L (a) 長鏈 PFAS, (b) 短鏈 PFAS 及 (c) 新穎 PFAS 之去離子水樣品的質譜圖

**表格九**、以 HPLC-MS/MS 測定 PFAS 之停留時間、偵測極限 (Detection of Limit, LOD)及 定量極限 (Limit Of Quantitation, LOQ)

| Group | Name | Retention Time (min) | LOD (ng/L) | LOQ (ng/L) |
|---|---|---|---|---|
| Long Chain PFAS | | | | |
| PFUnA (C11) | PFUnA269 | 13.97 | 0.1 | 0.1 |
| PFDA (C10) | PFDA269 | 13.47 | 0.2 | 0.2 |
| PFNA (C9) | PFNA219 | 13.04 | 0.1 | 0.1 |
| PFOA (C8) | PFOA169 | 12.5 | 0.1 | 0.1 |
| PFHpA (C7) | PFHpA119 | 11.98 | 0.1 | 0.1 |
| PFHxA (C6) | PFHxA119 | 11.12 | 0.2 | 0.2 |
| PFOS (C8) | PFOS80 | 13.02 | 0.1 | 0.1 |
| PFHxS (C6) | PFHxS80 | 11.93 | 0.2 | 0.2 |
| HFPO-DA (GenX C6) | HFPO-DA169 | 11.43 | 0.1 | 0.1 |
| Short Chain PFAS | | | | |
| PFPeA (C5) | PFPeA219 | 10.15 | 0.2 | 0.2 |
| PFBA (C4) | PFBA169 | 8.85 | 0.2 | 0.2 |
| PFBS (C4) | PFBS80 | 10.34 | 0.1 | 0.1 |
| PFBSi (C4) | PFBSi219 | 10.67 | 0.1 | 0.1 |
| Novel PFAS | | | | |
| FBSEE diol (C4) | FBSEE diol166 | 12.23 | 0.1 | 0.1 |
| FBSAA (C4) | FBSAA219 | 11.12 | 0.1 | 0.1 |
| FBSE (C4) | FBSE65 | 12.18 | 0.1 | 0.1 |
| FBSA (C4) | FBSA119 | 11.6 | 0.1 | 0.1 |

上傳時間：2025年12月18日下午 01:11



**表格十**、以 HPLC-MS/MS 測定 PFAS 之絕對回收率與相對回收率。

| Group | Internal Standard (IS) | Absolute recovery (%) (絕對) | Relative recovery (%) (相對) |
|---|---|---|---|
| Long Chain PFAS | | | |
| PFUnA (C11) | - | 89.40% | - |
| PFDA (C10) | - | 73.40% | - |
| PFNA (C9) | M9PFNA (C9) | 99.30% | 101.80% |
| PFOA (C8) | M8PFOA (C8) | 104.70% | 113.13% |
| PFHpA (C7) | M4PFHpA (C7) | 96.60% | 101.10% |
| PFHxA (C6) | M5PFHxA (C6) | 100.50% | 108.07% |
| PFOS (C8) | M8PFOS (C8) | 64.10% | 92.50% |
| PFHxS (C6) | M3PFHxS (C6) | 79.90% | 100.57% |
| HFPO-DA (GenX, C6) | - | 77.80% | - |
| Short Chain PFAS | | | |
| PFPeA (C5) | M5PFPeA (C5) | 112.60% | 125.60% |
| PFBA (C4) | M4PFBA (C4) | 76.20% | 105.33% |
| PFBS (C4) | M3PFBS (C4) | 99.70% | 107.20% |
| PFBSi (C4) | - | 87.90% | - |
| Novel PFAS | | | |
| FBSEE diol (C4) | - | 82.50% | - |
| FBSAA (C4) | - | 89.10% | - |
| FBSE (C4) | - | 106.10% | - |
| FBSA (C4) | - | 74.40% | - |

## 4.2. 地下水採樣及前處理

本研究針對中部科學園區台中園區及其周邊區域，規劃進行地下水監測井之採樣作業，目的在於釐清污水處理廠放流水對附近地下水體中短鏈及新穎 PFAS 之潛在污染影響。為確保採樣作業合法、合規且具代表性，計畫團隊事前已正式行文至台中市政府環境保護局及彰化縣政府環保局，說明研究目的與採樣需求，並表達預計於 114 年 3 月至 5 月期間進行烏溪兩岸之地下水採樣行動。

獲得回覆後，環保局表示採樣當日可由其所委任之監測單位協助會同。實際採樣作業於 114 年 4 月 21 日順利完成。為提升效率與控管採樣時程，本次作業採雙路線平行方式進行，將四口監測井分為兩條動線完成各自之取樣，樣品採樣以 1 公升之聚丙烯（PP）瓶具採樣，事先以 RO 水沖洗一次後並加入 5 %甲醇進行震盪，使用去離子水潤洗後自然晾乾，以確保採樣容器未受背景汙染。各採樣點之行程與協同單位詳見**表格十一**：

**表格十一**、地下水採樣作業基本資訊與路線規劃表

| 採樣日期 | 採樣地點 | 監測井編號 | 行程時間 | 所屬路線 | 協同單位／參與人員說明 |
|---|---|---|---|---|---|
| 114/04/21（一） | G0 鎮平國小 | (B00003) | 09:00–12:00 | 路線一 | 本單位監工、中環科技採樣人員、台中市環保局監測人員 |
| 114/04/21（一） | G1 大肚國小 | (N00316) | 13:00–16:00 | 路線一 | 本單位監工、中環科技採樣人員、台中市環保局監測人員 |
| 114/04/21（一） | G2 伸東國小 | ( L00010) | 09:00–12:00 | 路線二 | 本單位監工、中環科技採樣人員、彰化縣環保局監測人員 |
| 114/04/21（一） | G3 龍港國小 | (L00011) | 13:00–16:00 | 路線二 | 本單位監工、中環科技採樣人員、台中市環保局監測人員 |

- 路線一：G0-鎮平國小 → G1 大肚國小
- 路線二：G2-伸東國小 → G3 龍港國小

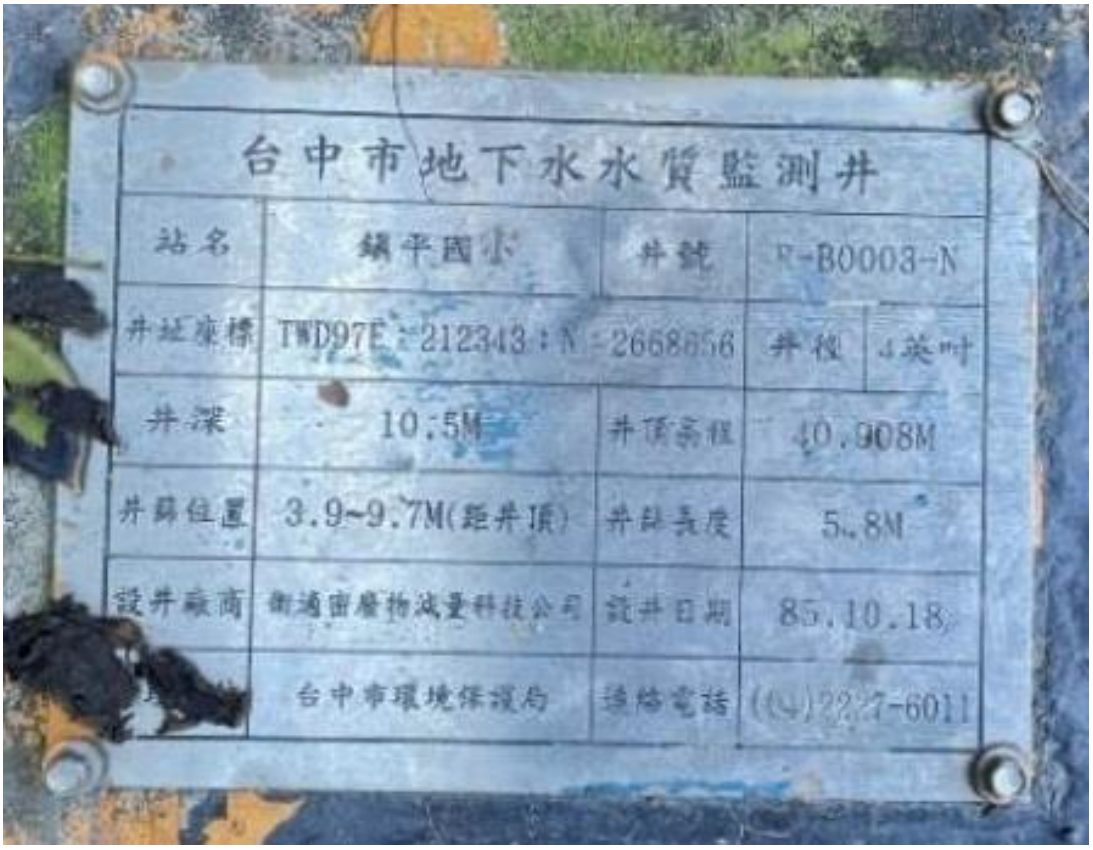
各監測井之現場採樣情形與實驗室前處理作業過程，已詳實記錄並拍攝，相關影像資料詳見**圖表四**至**圖表九**。現場採樣後立即置放於 4 ºC 保冰箱中避光保存，並於當日晚上送達實驗室。到達實驗室後樣品立即置於 4˚C 冷藏環境中靜置保存，並於 4 月 22 日開始 SPE 程序，步驟詳見**圖表二**。

當日參與人員包括：

1. 本單位（計畫主持機構——台大環工所林郁真團隊）派任之現場監工人員；
2. 本單位所委任之採樣單位——中環科技事業股份有限公司派遣之技術人員；
3. 台中市與彰化縣政府環保局委託之第三方監測單位人員。

整體採樣作業流程符合環境部之微洗井地下水採樣標準程序（NIEA W103.54B），並依現場條件完整紀錄水位、採樣深度、水質參數及採樣時間，為後續分析提供可靠樣品來源與比對基準。

G0-鎮平國小



G1-大肚國小




G2-伸東國小



G3-龍港國小




**圖表四**、本計畫採樣之地下水監測井

科學園區地下水體中短鏈與新穎全氟化合物之研究







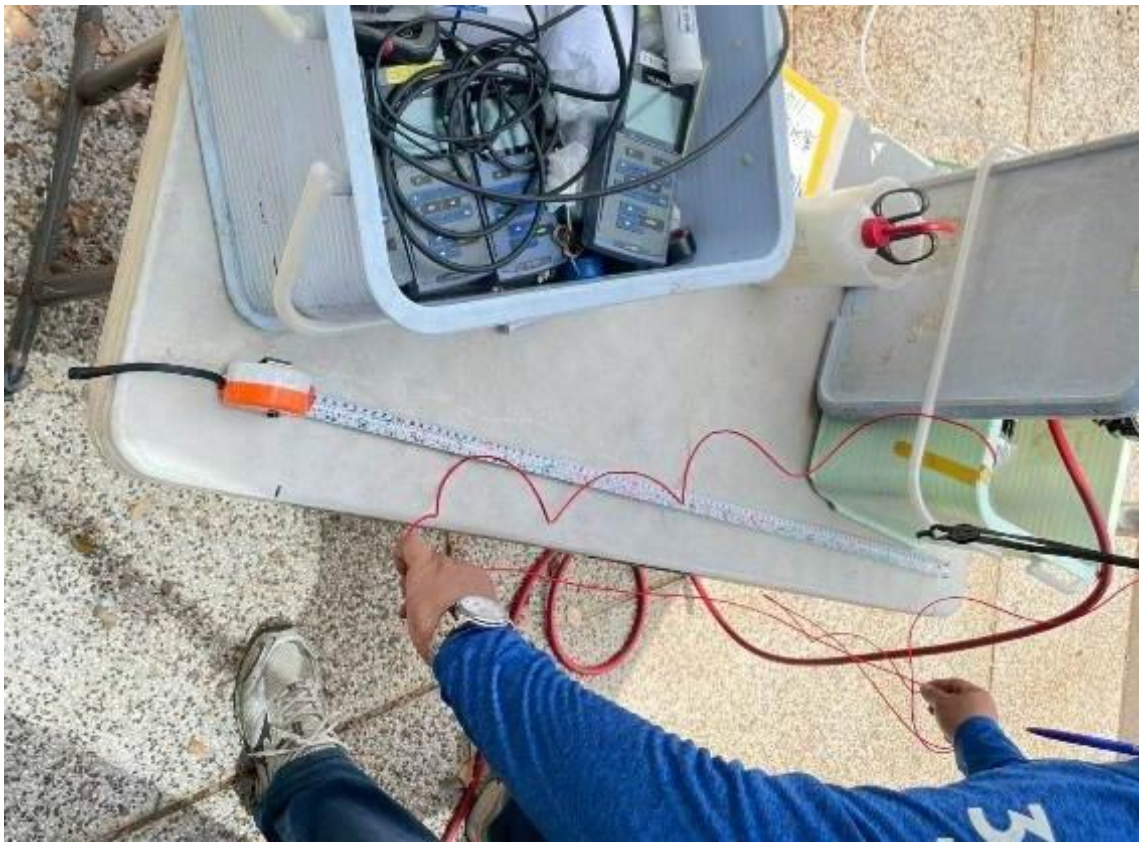




**圖表五**、G0-鎮平國小 (B00003) 地下水監測井現場採樣照片


NWG1140190
大肚國小
114.4.21


台中市地下水水質監測井
站名
大肚國小
井號
井址座標
TWD97 E：203960;N：2672233
井深
31.38公尺
井頂高程
井篩位置
27.7~31.1公尺(距井頂)
井篩長度
3.4公尺
設井廠商
衛適密廢物減量科技公司
設井日期
85.10.13
管理單位
台中市政府環境保護局
連絡電話
(04)2229-4025





**圖表六**、G1-大肚國小 (L00011) 地下水監測井現場採樣照片

科學園區地下水體中短鏈與新穎全氟化合物之研究









**圖表七**、G2-伸東國小 (N00316) 地下水監測井現場採樣照片

科學園區地下水體中短鏈與新穎全氟化合物之研究



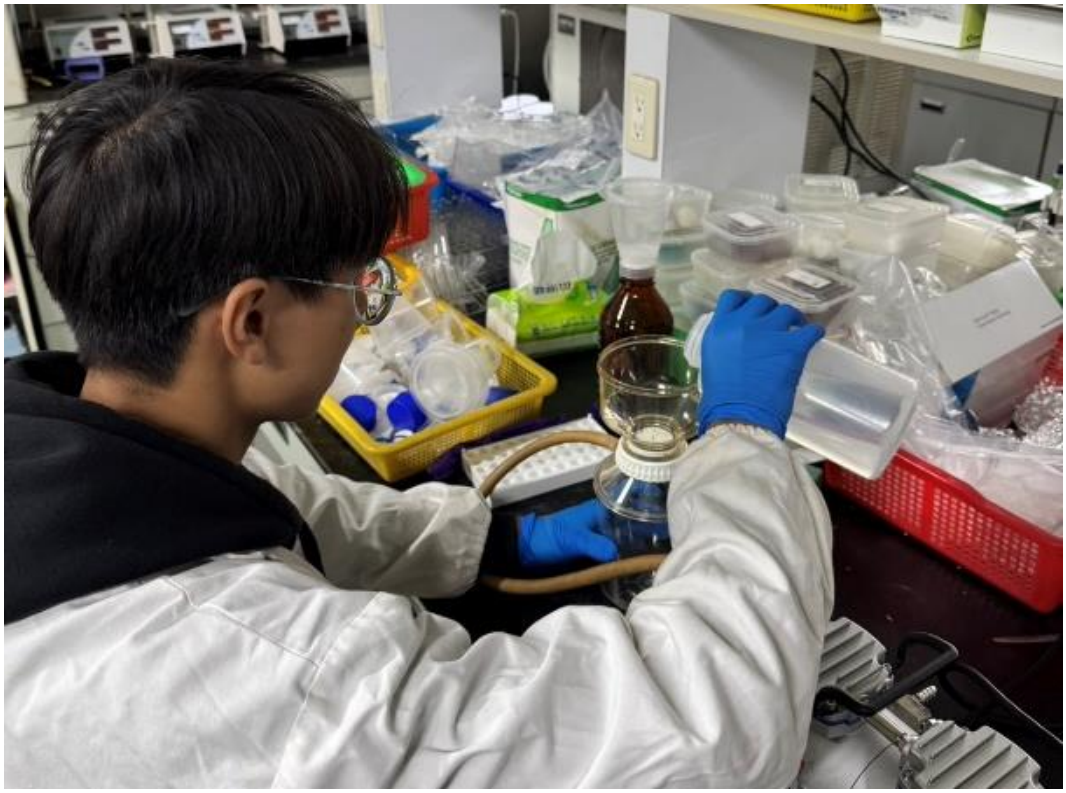






**圖表八、G3-龍港國小(台中市) (L00010)  地下水監測井現場採樣照片**

(a) 過濾



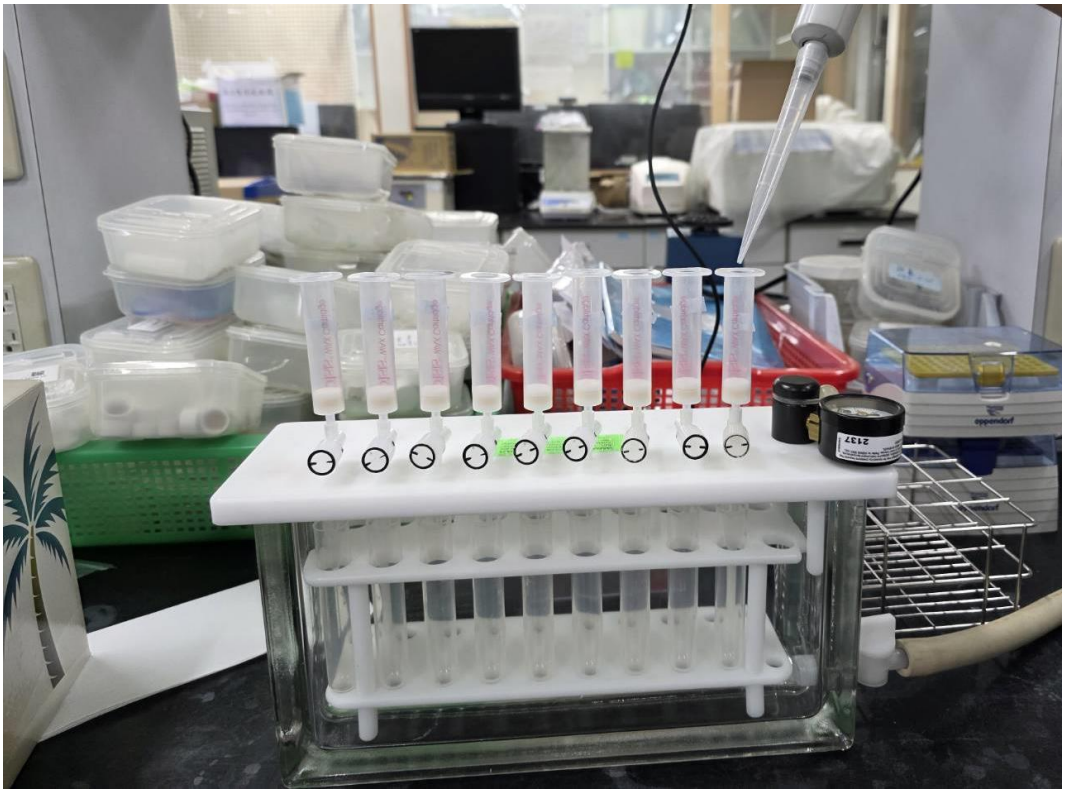
(b) 進樣



上傳時間：2025年12月18日下午 01:11



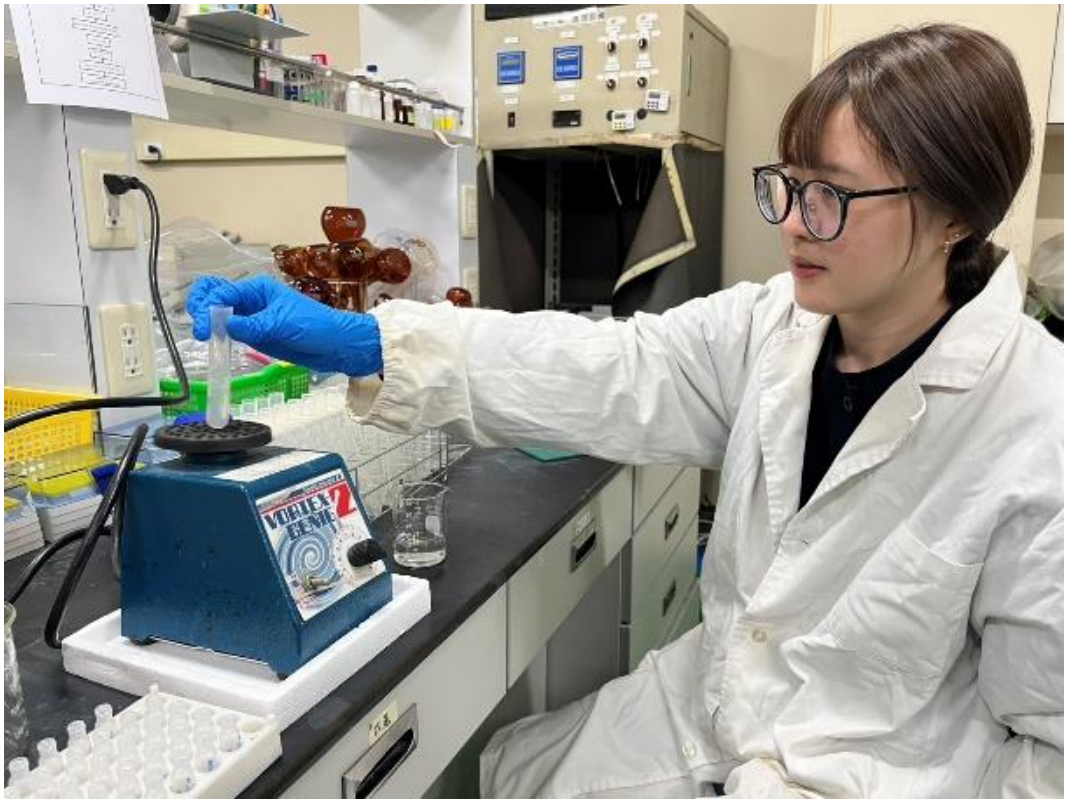
(c) 洗脫



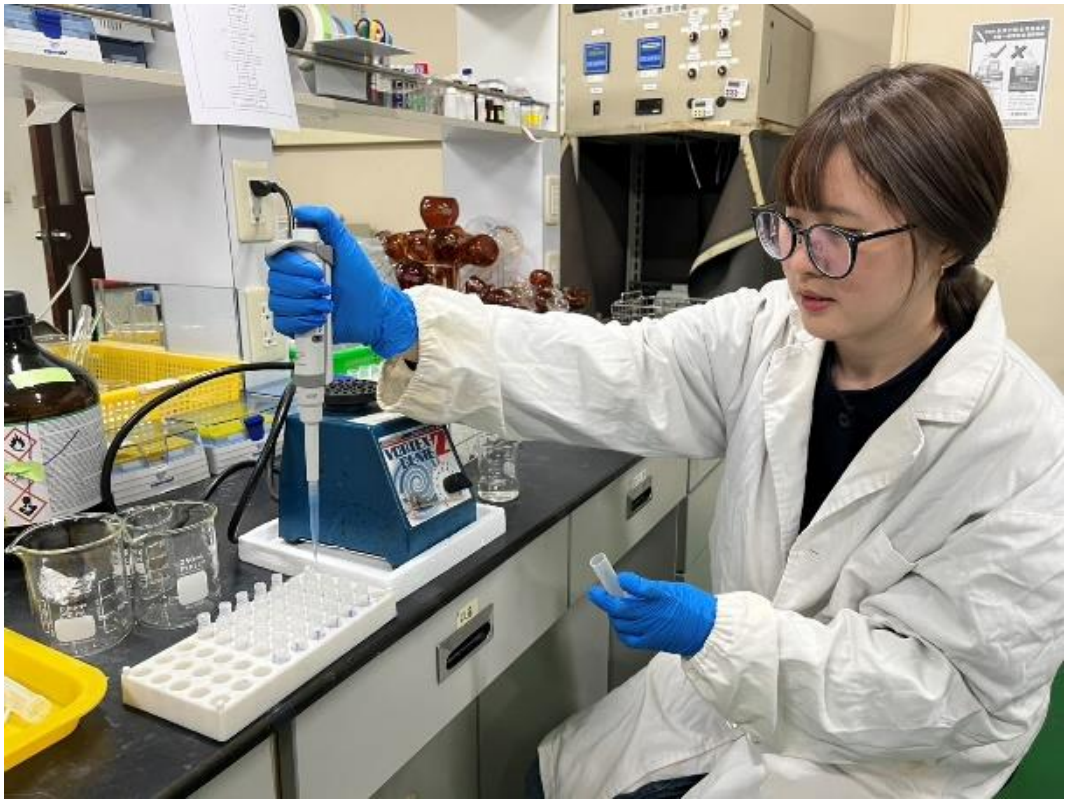
(d) 吹氮加熱



(e) 回溶



(f) 過濾取樣



**圖表九**、實驗室地下水水樣固相萃取程序前處理照片

上傳時間：2025年12月18日下午 01:11



## 4.3. 科學園區地下水體中短鏈與新穎全氟化合物之濃度分析

為提升分析數據的準確性與可信度，本研究將空白樣品與待測樣品一同經由固相萃取進行前處理，並使用相同條件進行後續分析。結果如**表格十三**所示，空白樣品中檢測出多項待測物，包括 PFOA、PFBA、PFOS、PFBS、FBSE 及 PFBSi，顯示前處理或儀器分析過程中可能存在背景干擾。為有效扣除背景訊號對實際濃度判定之影響，本研究採用 t 檢定（Student's t-test）進行統計推論，以建立空白樣品之信賴區間，作為後續扣除背景值之依據。t 檢定使用之公式如下：

$$\bar{x} - \frac{t \cdot s}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{x} + \frac{t \cdot s}{\sqrt{n}}$$

其中，$\mu$ 為真實平均值、$\bar{x}$ 為空白樣品測得的算術平均值，$t$ 為 T 檢定之統計因子，$s$ 為測量數據的標準差，$n$ 為空白樣品數。當空白樣品數為 3 時，以 95%信賴水準下，其 $t$ 值為 4.3。依據上述公式，計算所得各化合物之信賴區間列示於**表格十二**，並作為後續資料校正之依據。待測樣品濃度需扣除對應之信賴上限值後，方列入**表格十三**，作為真實濃度之估計結果。

**表格十二、**空白樣品 95%信賴水準下之信賴區間。

| PFAS | μ (ppt) |
|---|---|
| **PFOA** | 0 < μ < 1.26 |
| **PFBA** | 0 < μ < 0.58 |
| **PFOS** | 0 < μ < 8.56 |
| **PFBS** | 0 < μ < 0.93 |
| **FBSE** | 0 < μ < 0.19 |
| **PFBSi** | 0.08 < μ < 0.28 |

本研究透過**圖表十**與**圖表十一**分析科學園區周邊地下水中 PFAS 的分布情形。**圖表十(a)**顯示，長鏈 PFAS——PFHxA、PFHpA、PFOA、PFNA、PFHxS 與 PFOS 在所有監測井皆有被測出，濃度分別為 1.45 - 18.99 ng/L、0.90 - 11.45 ng/L、4.31 – 23.40 ng/L、0.18 – 0.79 ng/L、1.01 - 4.72 ng/L 與< LOQ – 50.15 ng/L。其中以 PFOA 與 PFOS 的濃度最高。而 PFDA 僅有 G0、G1 與 G3 監測井中的濃度超過 LOQ，濃度範圍為< LOQ – 0.34 ng/L；PFUnA 僅有 G1 監測井一米處有測出 0.15 ng/L；GenX 則是在所有的監測井中皆無測出。從分析結果來看，傳統長鏈 PFAS，如 PFOA、PFOS 等，由於已普遍存在於工業與生活來源，污染已擴散至整個區域，因此在不同地點的監測井中皆能測出。

**圖表十(b)**顯示，短鏈 PFAS——PFBS、PFBA 及 PFPeA 在所有監測井皆有測出，其濃度分別為 11.89 - 102.78 ng/L、9.95 - 110.42 ng/L 與 1.13 – 13.01 ng/L。而 PFBSi 僅在 G0 (8.76 ng/L)與 G2 一米處(0.78 ng/L)的地下水水樣測出高於 LOQ 的濃度。根據分析結果可知，PFBS 與 PFBA 在 G0、G2 與 G3 監測井的所有深度，濃度皆高於傳統長鏈 PFAS，在 G0 的濃度甚至超過 100 ng/L。這顯示短鏈 PFAS 開始取代傳統長鏈 PFAS，成為地下水體中主要的 PFAS 污染。

如**圖表十(c)** 所示，FBSE、FBSA、FBSEE diol 與 FBSAA 在中部科學園區放流水周邊監測井（G1-3）中的濃度分別為 0.13 - 7.69 ng/L、< LOQ – 0.39 ng/L、< LOQ – 0.55 ng/L 與 N.D. - 1.76 ng/L。相較之下，在距離中部科學園區放流水較遠的 G0，新穎 PFAS 皆未測出。此結果搭配上本團隊的相關研究成果：(1) 中部科學園區位於烏溪放流口上游的表水，未檢測出新穎 PFAS；(2) 放流口下游的表水，檢測出顯著的新穎 PFAS 污染，支持本計畫之假設——科學園區污水處理廠為新穎 PFAS 之排放源，並已影響周邊地下水。

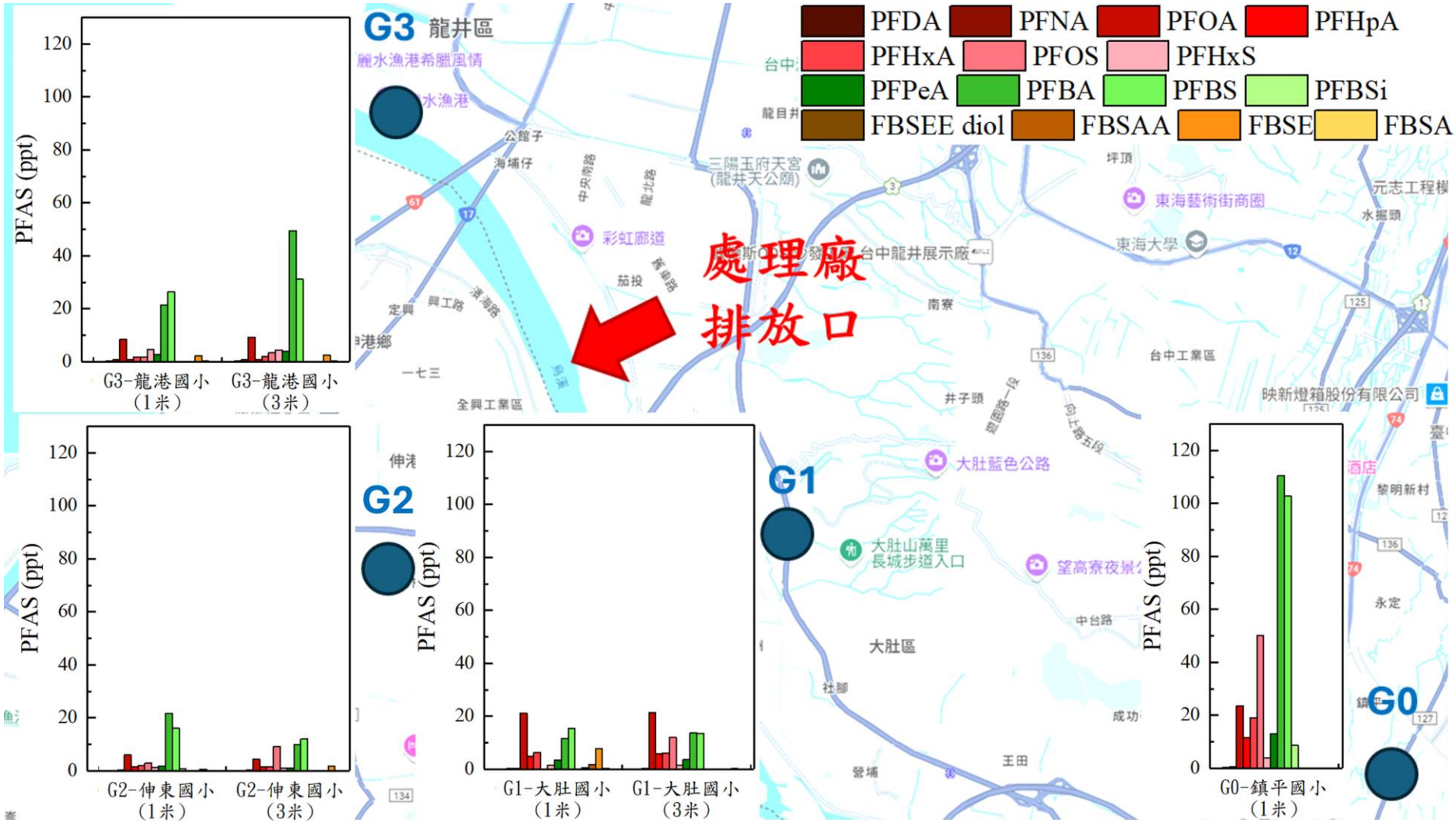
至於地質結構與 PFAS 濃度間的關係，可藉由**圖表十二**地下水監測井附近的鑽孔地質柱狀圖與**圖表十至十一**，發現長鏈、短鏈與新穎 PFAS 在地下水中的濃度與地質結構、深度無顯著關係。此外，儘管 G0-3 的地質有所差異，但皆能觀測到短鏈與新穎 PFAS 的滲入，這代表作為傳統長鏈 PFAS 替代物的短鏈與新穎 PFAS 對環境與大眾的風險開始顯現，急需後續的關注。

表格十三、四個國小的地下水體中 PFAS 濃度 (ppt)

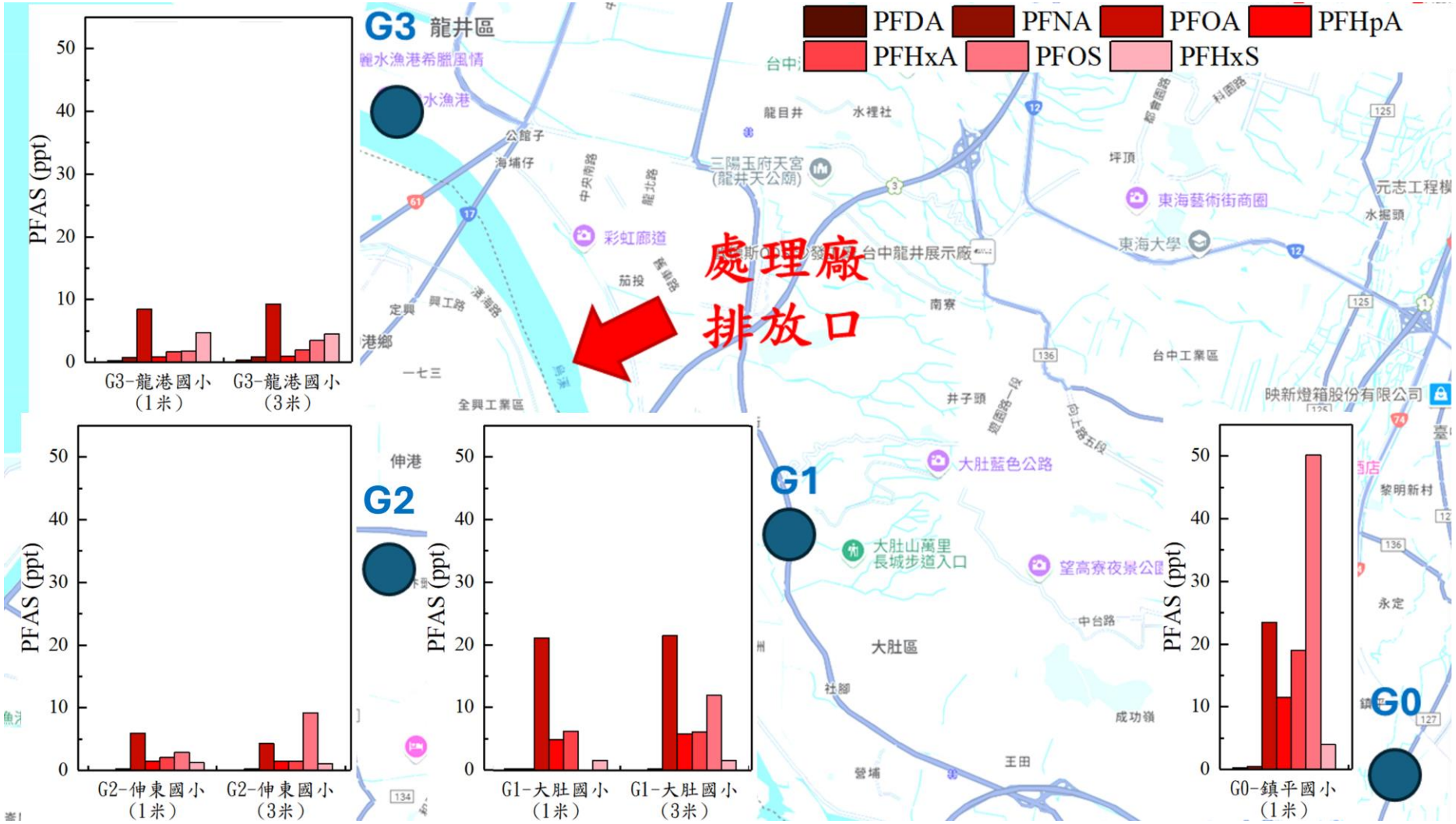
| Sample Name | LOQ | Blank 1 | Blank 2 | Blank 3 | G0-鎮平（1 米） | G1-大肚 (1 米) | G1-大肚 (3 米) | G2-伸東 (1 米) | G2-伸東 (3 米) | G3-龍港 (1 米) | G3-龍港 (3 米) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **長鏈全氟化合物** | | | | | | | | | | | |
| **PFHxA** | 0.2 | N.D. | N.D. | N.D. | 18.99 | 6.19 | 6.11 | 2 | 1.45 | 1.68 | 1.92 |
| **PFHpA** | 0.1 | N.D. | N.D. | N.D. | 11.45 | 4.92 | 5.76 | 1.4 | 1.38 | 0.86 | 0.90 |
| **PFOA** | 0.1 | 0.88 | 0.46 | 0.34 | 23.40 | 21.14 | 21.47 | 5.92 | 4.31 | 8.41 | 9.23 |
| **PFNA** | 0.1 | N.D. | N.D. | N.D. | 0.46 | 0.23 | 0.24 | 0.18 | 0.2 | 0.73 | 0.79 |
| **PFDA** | 0.2 | N.D. | N.D. | N.D. | 0.25 | 0.27 | < LOQ | < LOQ | < LOQ | 0.26 | 0.34 |
| **PFUnA** | 0.1 | N.D. | N.D. | N.D. | < LOQ | 0.15 | N.D. | < LOQ | N.D. | < LOQ | N.D. |
| **PFHxS** | 0.2 | N.D. | N.D. | N.D. | 3.95 | 1.6 | 1.55 | 1.24 | 1.01 | 4.72 | 4.48 |
| **PFOS** | 0.1 | 0.46 | 4.11 | 4.5 | 50.15 | < LOQ | 11.95 | 2.83 | 9.12 | 1.73 | 3.42 |
| **HFPO-DA (GenX)** | 0.1 | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. |
| **短鏈全氟化合物** | | | | | | | | | | | |
| **PFBSi** | 0.1 | 0.14 | 0.18 | 0.22 | 8.76 | < LOQ | < LOQ | 0.78 | < LOQ | < LOQ | N.D. |
| **PFBS** | 0.1 | 0.7 | 0.42 | 0.61 | 102.78 | 15.45 | 13.42 | 16.02 | 11.89 | 26.28 | 31.15 |
| **PFBA** | 0.2 | 0.32 | 0.21 | < LOQ | 110.42 | 11.61 | 13.66 | 21.68 | 9.95 | 21.5 | 49.47 |

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **PFPeA** | 0.2 | N.D. | N.D. | N.D. | 13.01 | 3.4 | 3.66 | 1.63 | 1.13 | 2.6 | 3.99 |
| **新穎全氟化合物** | | | | | | | | | | | |
| **FBSE** | 0.1 | N.D. | < LOQ | 0.11 | < LOQ | 7.69 | 0.13 | 0.55 | 1.79 | 2.1 | 2.46 |
| **FBSA** | 0.1 | N.D. | N.D. | N.D. | < LOQ | 0.39 | 0.2 | < LOQ | < LOQ | 0.25 | 0.24 |
| **FBSEE diol** | 0.1 | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | 0.55 | < LOQ | 0.1 | 0.18 | < LOQ | 0.15 |
| **FBSAA** | 0.1 | N.D. | N.D. | N.D. | N.D. | 1.76 | < LOQ | 0.12 | N.D. | N.D. | < LOQ |

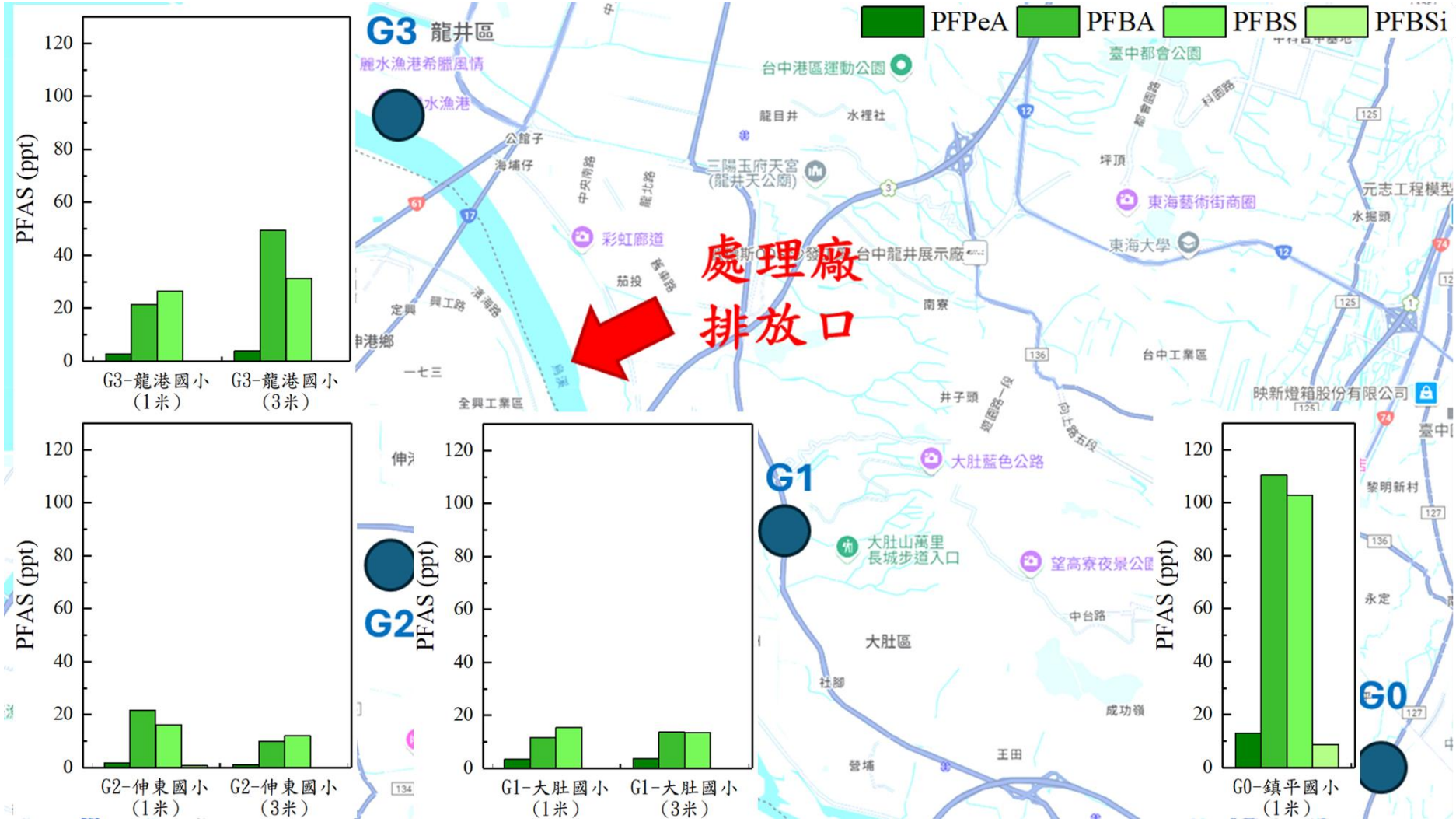
(a) 科學園區地下水體中 PFAS 濃度

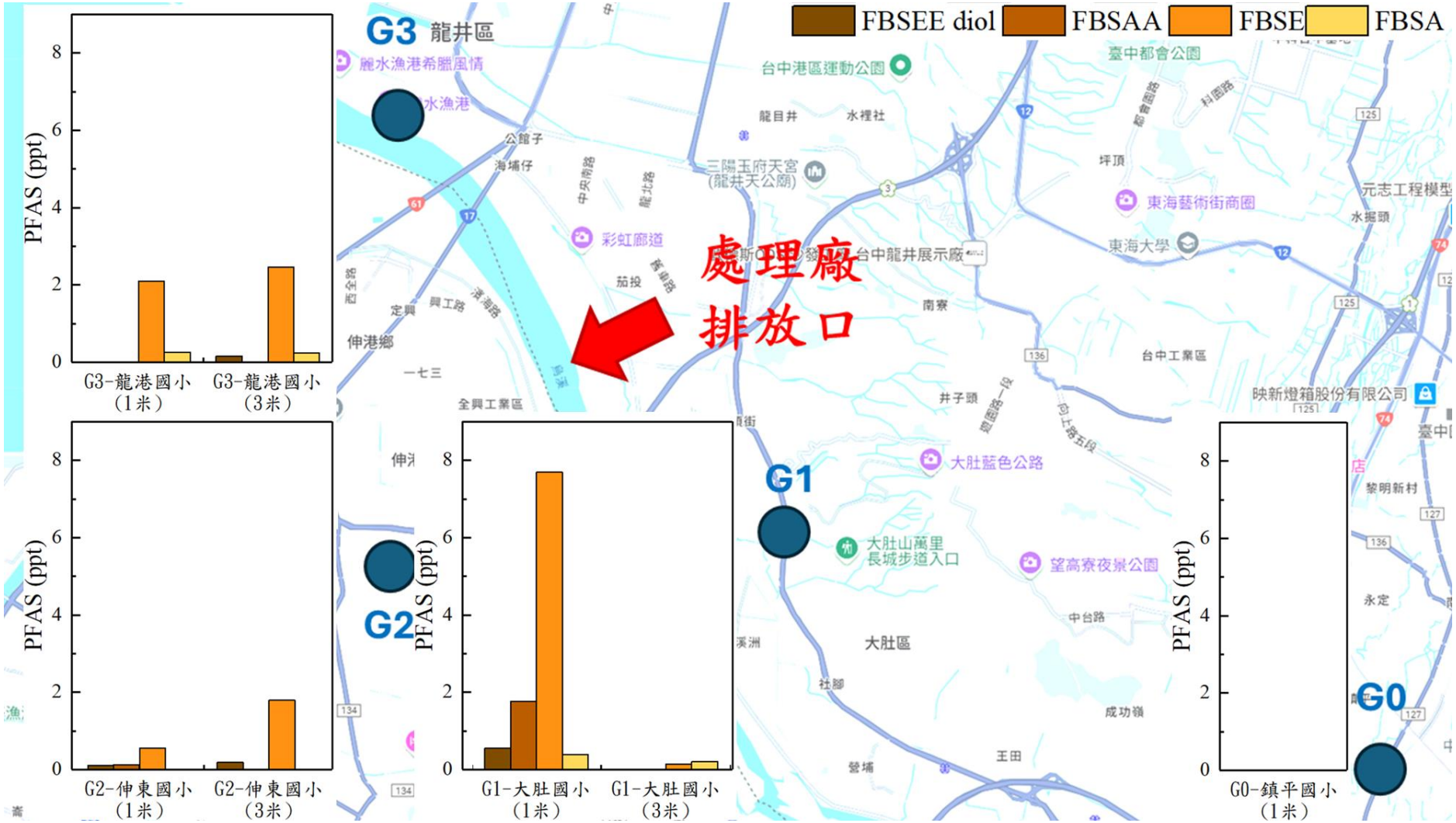


(b) 科學園區地下水體中長鏈 PFAS 濃度



(c)科學園區地下水體中短鏈 PFAS 濃度





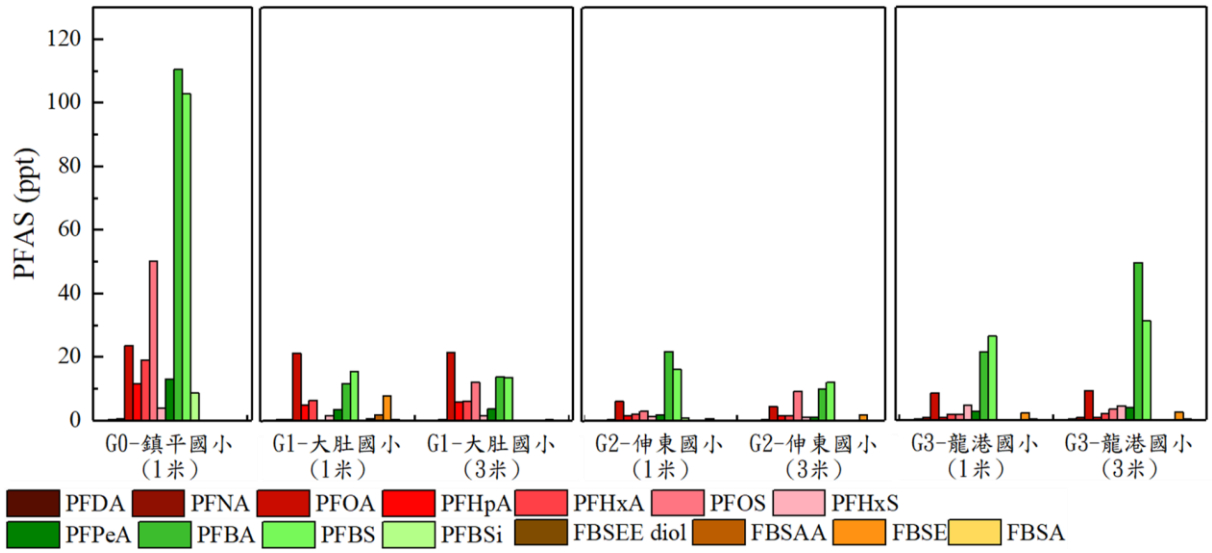

(d)科學園區地下水體中新穎 PFAS 濃度

**圖表十**、科學園區地下水體中(a) 全部、(b)長鏈、(c)短鏈及 (d) 新穎 PFAS 濃度

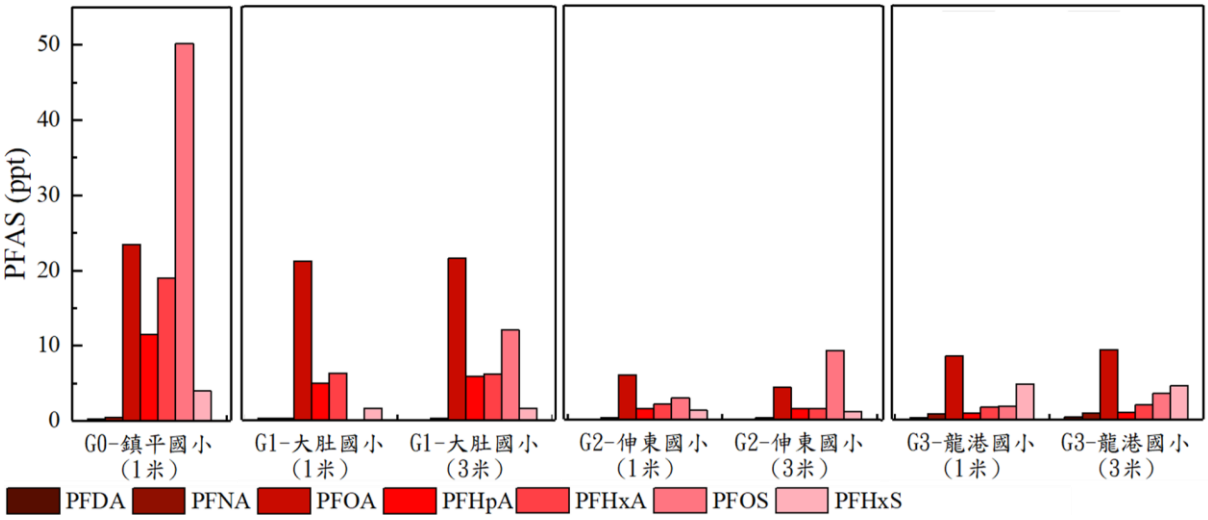
上傳時間：2025年12月18日下午 01:11



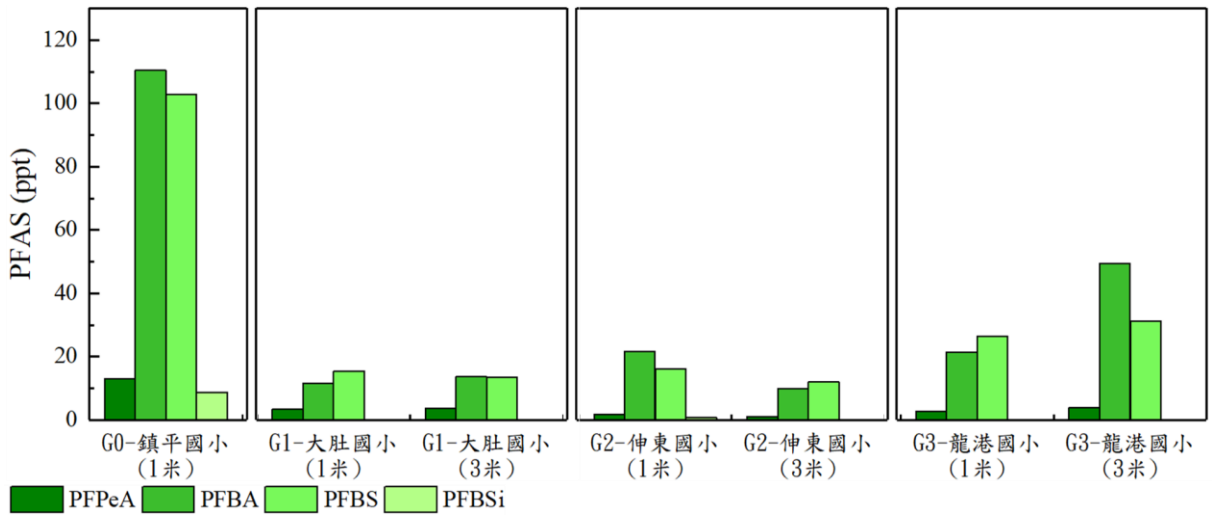
(a) 四個國小的地下水體中 PFAS 濃度



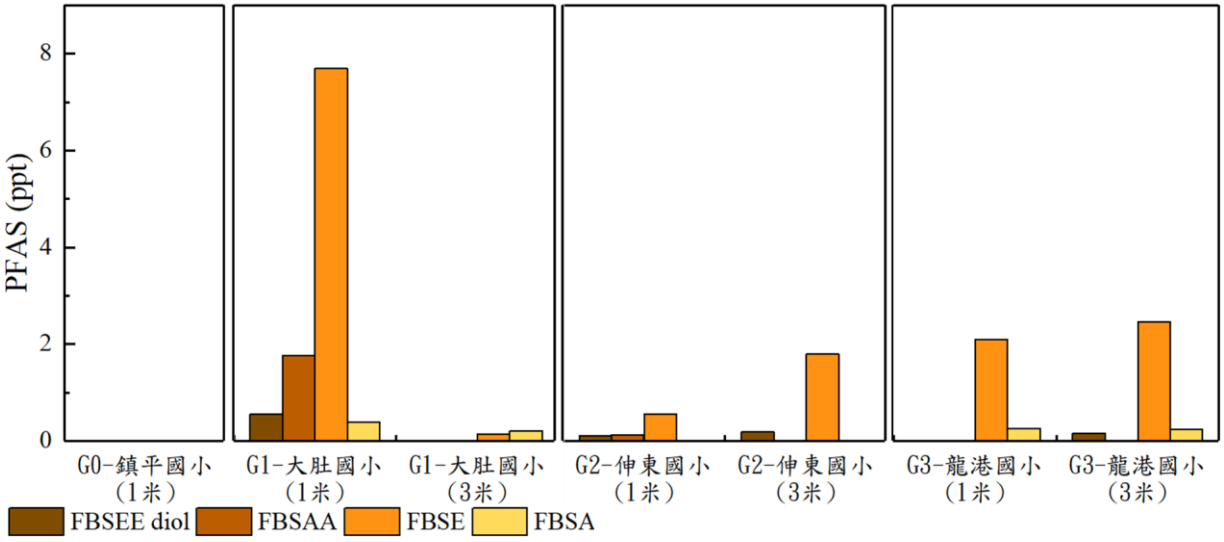

(b) 四個國小的地下水體中長鏈 PFAS 濃度




(c) 四個國小的地下水體中短鏈 PFAS 濃度

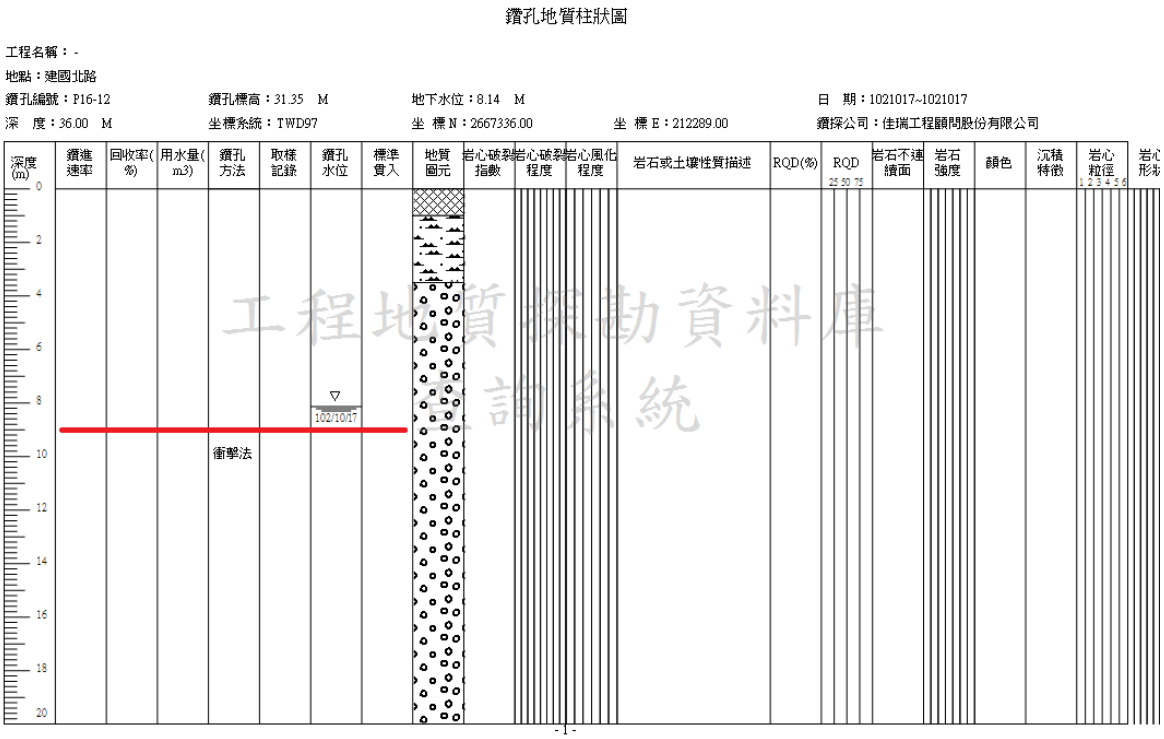


(d) 四個國小的地下水體中新穎 PFAS 濃度




**圖表十一**、四個國小的地下水體中 PFAS 濃度

(a)G0-鎮平國小附近鑽孔地質柱狀圖



上傳時間：2025年12月18日下午 01:11



## (b)G1-大肚國小附近鑽孔地質柱狀圖 -1

鑽孔地質柱狀圖

工程名稱：-
地點：台中市大肚區
鑽孔編號：#22-2　　鑽孔標高：-0.30　M　　地下水位：24.86　M　　日　期：1130605~1130617
深　度：30.04　M　　坐標系統：WGS84　　坐　標 N：24.146644　　坐　標 E：120.553706　　鑽探公司：紀齡營造有限公司

| 深度(m) | 回收率(%) | 鑽孔方法 | 取樣記錄 | 鑽孔水位 | 標準貫入 | 地質圖元 | 岩石或土壤性質描述 | 顏色 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 99 | 鋼索取樣法 | | | 100/10 | | 卵礫石層；偶夾薄至厚層粉土質砂；卵礫石主要為石英岩質與砂岩質；含量約60%~80%；巨礫至細礫；圓形至次角形；最大粒徑為30公分；基質為粉土質細至粗砂，卵礫石支撐；(GM) | 黃棕 |
| 2 | 98 | | | | 100/8 | | | |
| | 100 | | | | 100/5 | | | |
| 4 | 98 | | | | 100/9 | | | |
| | 98 | | | | 100/7 | | | |
| 6 | 100 | | | | 100/6 | | | |
| | 100 | | | | 100/6 | | | |
| 8 | 100 | | | | 100/5 | | | |
| | 99 | | | | 100/6 | | | |
| 10 | 99 | | | | 100/7 | | | |
| | 99 | | | | 100/5 | | | |
| 12 | 99 | | | | 100/6 | | | |
| | 99 | | | | 100/5 | | | |
| 14 | 99 | | | | 100/6 | | | |
| | 99 | | | | 100/6 | | | |
| 16 | 99 | | | | 100/4 | | | |
| | 98 | | | | 100/4 | | 30.04 M | |
| 18 | 99 | | | | | | | |
| 20 | 100 | | | | | | | |

工程地質探勘資料庫查詢系統

- 1 -

## (c)G1-大肚國小附近鑽孔地質柱狀圖 -2

鑽孔地質柱狀圖

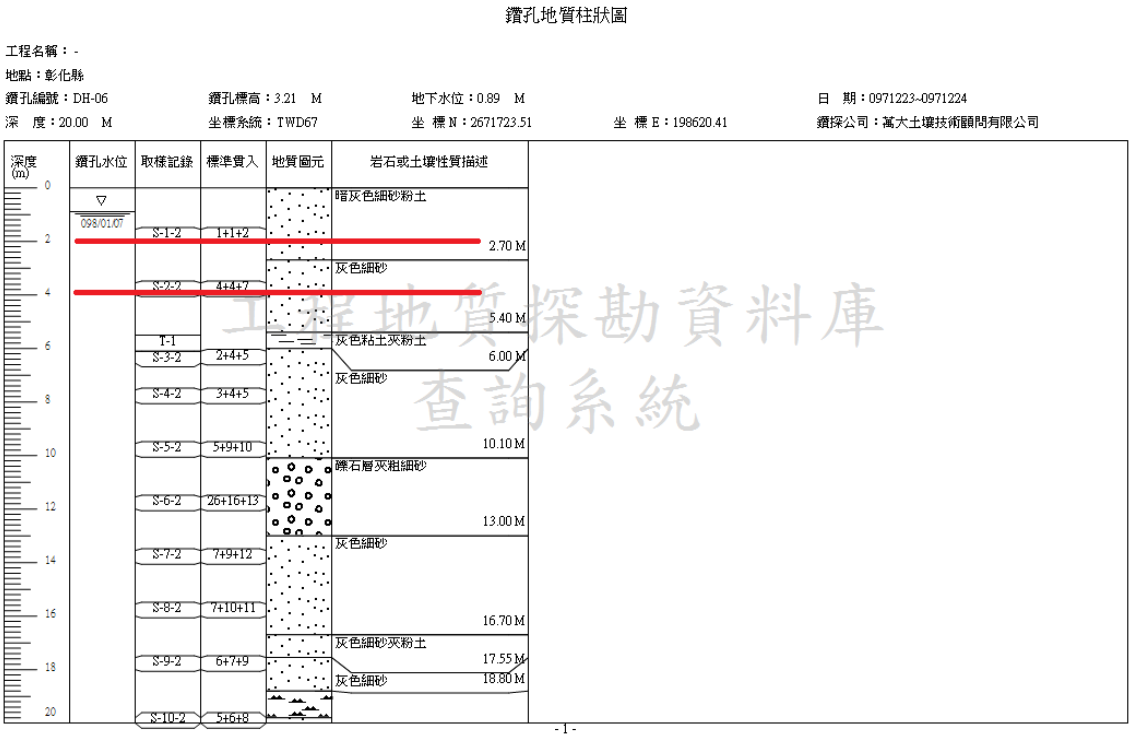
工程名稱：-
地點：台中市大肚區
鑽孔編號：#22-2　　鑽孔標高：-0.30　M　　地下水位：24.86　M　　日　期：1130605~1130617
深　度：30.04　M　　坐標系統：WGS84　　坐　標 N：24.146644　　坐　標 E：120.553706　　鑽探公司：紀齡營造有限公司

| 深度(m) | 回收率(%) | 鑽孔方法 | 取樣記錄 | 鑽孔水位 | 標準貫入 | 地質圖元 | 岩石或土壤性質描述 | 顏色 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 20 | 98 | 鋼索取樣法 | | ▽ 113/06/22 | 100/4 | | 卵礫石層；偶夾薄至厚層粉土質砂；卵礫石主要為石英岩質與砂岩質；含量約60%~80%；巨礫至細礫；圓形至次角形；最大粒徑為30公分；基質為粉土質細至粗砂，卵礫石支撐；(GM) | 黃棕 |
| | 100 | | | | 100/7 | | | |
| 22 | 99 | | | | 100/6 | | | |
| | 99 | | | | 100/5 | | | |
| 24 | 98 | | | | 100/7 | | | |
| | 99 | | | | 100/7 | | | |
| 26 | 99 | | | | 100/5 | | | |
| | 100 | | | | 100/4 | | 30.04 M | |
| 28 | 100 | | | | | | | |
| | 100 | | | | | | | |
| 30 | | | | | | | | |
| 32 | | | | | | | | |
| 34 | | | | | | | | |
| 36 | | | | | | | | |
| 38 | | | | | | | | |
| 40 | | | | | | | | |

工程地質探勘資料庫查詢系統

- 2 -

## (d)G2-伸東國小附近鑽孔地質柱狀圖




## (e)G3-龍港國小附近鑽孔地質柱狀圖




**圖表十二、地下水監測井附近鑽孔地質柱狀圖**

上傳時間：2025年12月18日下午 01:11



## 4.4. 地下水體中全氟化合物之風險評估

在台灣，中南部及沿海地區的地下水資源扮演關鍵角色，廣泛應用於農業灌溉、漁業養殖、工業製程與民生用水，甚至直接作為飲用水來源。隨著 PFAS 對環境與人類健康的影響日益受到重視，地下水中 PFAS 污染問題已成為環境與公共衛生的焦點。根據我國環境部目前訂定的暫行指標，PFOA 與 PFOS 的合計濃度不得超過 50 ppt，PFOS 與 PFHxS 合計不得超過 70 ppt。依此標準，在本研究所分析的地下水監測井中，僅有 G0-鎮平國小（1 米）的井水樣本 PFOA 與 PFOS 合計達 73.55 ppt，超過 50 ppt 上限，其餘井位均符合台灣現行規範。

相較之下，2024 年美國環保署（EPA）公告的全國性飲用水法規則更為嚴格：PFOA 與 PFOS 的最大容許濃度（MCL）為 4 ppt，PFNA、PFHxS 與 HFPO-DA（GenX）則為 10 ppt。同時，EPA 也針對 PFNA、PFHxS、PFBS 及 GenX 的混合暴露風險，設立「危害指數」（Hazard Index, HI），當 HI 值超過 1 即視為具有潛在健康風險，其公式如下：

$$HI\ MCL = \left(\frac{[HFPO\text{-}DA_{water}]}{[10\ ppt]}\right) + \left(\frac{[PFBS_{water}]}{[2000\ ppt]}\right) + \left(\frac{[PFNA_{water}]}{[10\ ppt]}\right) + \left(\frac{[PFHxS_{water}]}{[10\ ppt]}\right) = 1$$

如**表格十四**，依據本研究數據與美國環保署飲用水標準比較結果如下：

1. PFOA：所有地下水井濃度（4.31 – 23.40 ppt）均超過 4 ppt，不符合美國 MCL 規範。

2. PFOS：三處樣點超過 4 ppt，包括 G0-鎮平國小（50.15 ppt）、G1-大肚國小井 3 米深（11.95 ppt）及 G2-伸東國小 3 米深（9.12 ppt）。

3. PFNA、PFHxS、GenX：各井濃度皆低於 10 ppt，符合 MCL 要求。

4. HI 值：依 EPA 計算方式，所有樣點的 HI 均低於 1，其中以龍港國小 1 米井（HI ≈ 0.56）與 3 米井（HI ≈ 0.54）最高。

儘管 HI 值未達風險門檻，但觀察可見 PFBS 濃度偏高，在龍港、大肚等井位皆有顯著數值，可能形成長期累積暴露的潛在問題。此外，有鑑於短鏈 PFAS 毒性不比傳統 PFAS 低，故地下水中高濃度的短鏈 PFAS 與穩定檢出新穎 PFAS，具有潛在風險，需持續監測與評估因此，建議對濃度超標或接近標準值的井位（如 G0-鎮平、G1-大肚與 G3-龍港國小）加強定期監測，並進行污染來源追蹤與控制措施。未來亦應導入更全面的健康風險評估架構與暴露途徑分析，以提升地下水資源的保護力度與永續利用潛力

此外，本研究亦對數種新穎 PFAS 進行檢測，包括 FBSEE diol、FBSE、FBSA 及 FBSAA 等。目前這些物質尚未被美國或台灣飲用水法規納管，其毒理特性、環境行為及健康風險仍有待釐清。值得注意的是，FBSE 在靠近科學園區污水處理廠放流處的監測井中被檢出，反映該處為潛在污染源。由於現行污水處理技術對新穎 PFAS 的去除效率不佳，其在環境中的穩定性與長距離傳輸特性可能導致未來的潛在暴露風險。因此，建議加強對新穎 PFAS 之毒理學研究與環境監測，並評估是否將常見新穎 PFAS 納入潛在監控名單。同時，推動產業源頭減量與加強排放控管，提升污水處理系統的 PFAS 去除效率，降低高科技產業活動對周邊居民健康與生態系統造成的潛在衝擊。

**表格十四**、地下水體中藉由台美飲用水標準風險評估

| (ppt) | G0-鎮平 (1 米) | G1-大肚 (1 米) | G-1 大肚 (3 米) | G2-伸東 (1 米) | G2-伸東 (3 米) | G3-龍港 (1 米) | G3-龍港 (3 米) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 中華民國環境部 (飲用水水質標準全氟化物 PFAS 限值) | | | | | | | |
| PFOA + PFOS < 50 | **73.55** | 21.14 | 33.42 | 8.75 | 13.43 | 10.14 | 12.65 |
| PFOS + PFHxS < 70 | 54.10 | 1.60 | 13.5 | 4.07 | 10.13 | 6.45 | 7.90 |
| US EPA (PFAS National Primary Drinking Water Regulation) | | | | | | | |
| PFOA < 4 | **23.40** | **21.14** | **21.47** | **5.92** | **4.31** | **8.41** | **9.23** |
| PFOS < 4 | **50.15** | 0 | **11.95** | 2.83 | **9.12** | 1.73 | 3.42 |
| PFHxS < 10 | 3.95 | 1.60 | 1.55 | 1.24 | 1.01 | 4.72 | 4.48 |
| PFNA < 10 | 0.46 | 0.23 | 0.24 | 0.18 | 0.20 | 0.73 | 0.79 |
| HFPO-DA < 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| US EPA (PFAS National Primary Drinking Water Regulation Hazard Index) | | | | | | | |
| PFNA | 0.46 | 0.23 | 0.24 | 0.18 | 0.20 | 0.73 | 0.79 |
| PFHxS | 3.95 | 1.60 | 1.55 | 1.24 | 1.01 | 4.72 | 4.48 |
| PFBS | 102.78 | 15.45 | 13.42 | 16.02 | 11.89 | 26.28 | 31.15 |
| HFPO-DA (GenX) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Hazard Index (HI) < 1 | 0.49 | 0.19 | 0.19 | 0.15 | 0.13 | 0.56 | 0.54 |

上傳時間：2025年12月18日下午 01:11



# 第五章　結論與建議

## 5.1. 結論

1. 本計畫成功建立具高靈敏度與準確性的分析方法，可以同時檢測 16 種 PFAS 化合物，且偵測極限達 0.1 – 0.2 ppt，回收率為 73% – 126%。
2. 傳統長鏈 PFAS——PFOA 與 PFOS 在所有監測井中皆有測出。全部監測井中的 PFOA 皆超過美國 EPA 訂定的飲用水標準，PFOS 則是在 G0、G1、G2 監測井中的濃度超過美國 EPA 訂定的飲用水標準。此外，G0 的 PFOA 與 PFOS 總濃度超出我國飲用水水質標準。
3. 短鏈 PFAS 在所有監測井中皆有測出，且 PFBS 與 PFBA 濃度在 G0、G2 與 G3 監測井的所有深度，皆高於傳統長鏈 PFAS，在 G0 的濃度甚至超過 100 ng/L。這顯示短鏈 PFAS 開始取代傳統長鏈 PFAS，成為地下水體中主要的 PFAS 污染。
4. 新穎 PFAS 僅出現在污水廠排放口周邊的監測井中(G1-3)，且結合本團隊相關研究——烏溪中的新穎 PFAS 濃度亦在排放口的下游處增加，顯示新穎 PFAS 污染與科學園區的排放有關。
5. 無關地質結構，短鏈與新穎 PFAS 已滲入地下水層。
6. 有鑑於短鏈 PFAS 毒性不比傳統 PFAS 低，地下水中高濃度的短鏈 PFAS 與穩定檢出新穎 PFAS，具有潛在風險，需持續監測與評估

## 5.2. 建議

### 1. 長期監測中部科學園區周邊之地下水

本研究初步觀察到新穎與短鏈 PFAS 對地下水的衝擊與影響。但由於本研究僅為一次性採樣，無法掌握中部科學園區周邊地下水受新穎 PFAS 污染之長期變化趨勢。建議未來能以年為單位，甚至是以季為單位，長期監控中部科學園區周邊地下水的短鏈與新穎 PFAS 濃度變化，並觀察 PFAS 污染的趨勢和季節性影響，以供後續政策研議參考。

### 2. 持續監測 G0 井中的 PFAS 濃度

鑑於本計畫中 G0 井測得之 PFAS 濃度超過相關規範，因此建議持續監測 G0 井中 PFAS 的濃度變化，並與周邊潛在污染來源進行比較分析，以釐清 PFAS 之可能污染來源。

### 3. 增加監測區域

有鑑於科學園區遍布全台，新穎 PFAS 可能已污染全台多處的地下水源。為了全面地評估新穎 PFAS 所造成的風險，建議未來針對其它科學園區，如南部科學園區，監測周邊地下水的短鏈與新穎 PFAS 濃度。

### 4. 源頭管制

有鑑於中部科學園區為地下水中新穎 PFAS 的污染源，因此對科學園區內的廠商管制其短鏈及新穎 PFAS 的排放，如減少其使用，或在排出前增加能有效去除 PFAS 之處理程序，將能有效減緩新穎 PFAS 對地下水的污染。

上傳時間：2025年12月18日下午 01:11



# 第六章　參考文獻

Ateia, M., Arifuzzaman, M., Pellizzeri, S., Attia, M.F., Tharayil, N., Anker, J.N. and Karanfil, T. 2019. Cationic polymer for selective removal of GenX and short-chain PFAS from surface waters and wastewaters at ng/L levels. Water Research 163, 114874.

Blake, B.E. and Fenton, S.E. 2020. Early life exposure to per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) and latent health outcomes: A review including the placenta as a target tissue and possible driver of peri- and postnatal effects. Toxicology 443, 152565.

Brendel, S., Fetter, É., Staude, C., Vierke, L. and Biegel-Engler, A. 2018. Short-chain perfluoroalkyl acids: environmental concerns and a regulatory strategy under REACH. Environmental Sciences Europe 30(1), 9.

Chen, Y.-J., Wang, R.-D., Shih, Y.-L., Chin, H.-Y. and Lin, A.Y.-C. 2024a. Emerging Perfluorobutane Sulfonamido Derivatives as a New Trend of Surfactants Used in the Semiconductor Industry. Environmental Science & Technology 58(3), 1648-1658.

Chen, Y.-J., Yang, J.-S. and Lin, A.Y.-C. 2024b. Comprehensive nontargeted analysis of fluorosurfactant byproducts and reaction products in wastewater from semiconductor manufacturing. Sustainable Environment Research 34(1), 14.

Cousins, I.T., DeWitt, J.C., Glüge, J., Goldenman, G., Herzke, D., Lohmann, R., Ng, C.A., Scheringer, M. and Wang, Z. 2020. The high persistence of PFAS is sufficient for their management as a chemical class. Environmental Science: Processes & Impacts 22(12), 2307-2312.

Dauchy, X., Boiteux, V., Bach, C., Rosin, C. and Munoz, J.-F. 2017. Per- and polyfluoroalkyl substances in firefighting foam concentrates and water samples collected near sites impacted by the use of these foams. Chemosphere 183, 53-61.

Fienen, M.N. and Arshad, M. 2016. The international scale of the groundwater issue. Integrated groundwater management: concepts, approaches and challenges, 21-48.

Gebbink, W.A., van Asseldonk, L. and van Leeuwen, S.P.J. 2017. Presence of Emerging Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFASs) in River and Drinking Water near a Fluorochemical Production Plant in the Netherlands. Environmental Science & Technology 51(19), 11057-11065.

Giordano, M. 2009. Global groundwater? Issues and solutions. Annual review of Environment and Resources 34(1), 153-178.

Haug, L. 2019. Approaches to integrating the toxicology and epidemiology evidence on PFAS. Environmental Epidemiology 3, 210.

Hepburn, E., Madden, C., Szabo, D., Coggan, T.L., Clarke, B. and Currell, M. 2019. Contamination of groundwater with per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) from legacy landfills in an urban re-development precinct. Environmental Pollution 248, 101-113.

Herzke, D., Olsson, E. and Posner, S. 2012. Perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in consumer products in Norway – A pilot study. Chemosphere 88(8), 980-987.

Houtz, E.F., Higgins, C.P., Field, J.A. and Sedlak, D.L. 2013. Persistence of Perfluoroalkyl Acid Precursors in AFFF-Impacted Groundwater and Soil. Environmental Science & Technology 47(15), 8187-8195.

上傳時間：2025年12月18日下午 01:11



Johnson, G.R., Brusseau, M.L., Carroll, K.C., Tick, G.R. and Duncan, C.M. 2022. Global distributions, source-type dependencies, and concentration ranges of per- and polyfluoroalkyl substances in groundwater. Science of The Total Environment 841, 156602.

Kim, J., Xin, X., Mamo, B.T., Hawkins, G.L., Li, K., Chen, Y., Huang, Q. and Huang, C.-H. 2022. Occurrence and Fate of Ultrashort-Chain and Other Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) in Wastewater Treatment Plants. ACS ES&T Water 2(8), 1380-1390.

Klöpffer, W. 1994. Environmental Hazard- Assessment of chemicals and products. Environmental Science and Pollution Research 1(2), 108-116.

Koulini, G.V. and Nambi, I.M. 2024. Occurrence of forever chemicals in Chennai waters, India. Environmental Sciences Europe 36(1), 60.

Löbbecke, D.S. 2024 PFAS: The poison of the century.

Lenka, S.P., Kah, M. and Padhye, L.P. 2021. A review of the occurrence, transformation, and removal of poly- and perfluoroalkyl substances (PFAS) in wastewater treatment plants. Water Research 199, 117187.

Li, F., Duan, J., Tian, S., Ji, H., Zhu, Y., Wei, Z. and Zhao, D. 2020. Short-chain per- and polyfluoroalkyl substances in aquatic systems: Occurrence, impacts and treatment. Chemical Engineering Journal 380, 122506.

Lin, A.Y.-C., Panchangam, S.C. and Ciou, P.-S. 2010. High levels of perfluorochemicals in Taiwan's wastewater treatment plants and downstream rivers pose great risk to local aquatic ecosystems. Chemosphere 80(10), 1167-1174.

Lin, Y.-C., Lai, W.W.-P., Tung, H.-h. and Lin, A.Y.-C. 2015. Occurrence of pharmaceuticals, hormones, and perfluorinated compounds in groundwater in Taiwan. Environmental Monitoring and Assessment 187(5), 256.

Liu, R., Zhong, B., Li, X., Zheng, K., Liang, H., Cao, J., Yan, X. and Lyu, H. 2022. Analysis of groundwater changes (2003–2020) in the North China Plain using geodetic measurements. Journal of Hydrology: Regional Studies 41, 101085.

Lu, G., Shao, P., Zheng, Y., Yang, Y. and Gai, N. 2022. Perfluoroalkyl Substances (PFASs) in Rivers and Drinking Waters from Qingdao, China. International Journal of Environmental Research and Public Health 19(9), 5722.

Möller, A., Ahrens, L., Surm, R., Westerveld, J., van der Wielen, F., Ebinghaus, R. and de Voogt, P. 2010. Distribution and sources of polyfluoroalkyl substances (PFAS) in the River Rhine watershed. Environmental Pollution 158(10), 3243-3250.

Margat, J. and Van der Gun, J. (2013) Groundwater around the world: a geographic synopsis, Crc Press.

Moneta, B.G., Feo, M.L., Torre, M., Tratzi, P., Aita, S.E., Montone, C.M., Taglioni, E., Mosca, S., Balducci, C., Cerasa, M., Guerriero, E., Petracchini, F., Cavaliere, C., Laganà, A. and Paolini, V. 2023. Occurrence of per- and polyfluorinated alkyl substances in wastewater treatment plants in Northern Italy. Science of The Total Environment 894, 165089.

Mu, H., Li, J., Chen, L., Hu, H., Wang, J., Gu, C., Zhang, X.-x., Ren, H.-q. and Wu, B. 2022. Distribution, source and ecological risk of per- and polyfluoroalkyl substances in Chinese municipal wastewater treatment plants. Environment International 167, 107447.

Ojo, A.F., Peng, C. and Ng, J.C. 2021. Assessing the human health risks of per- and polyfluoroalkyl substances: A need for greater focus on their interactions as mixtures. Journal of Hazardous Materials 407, 124863.

上傳時間：2025年12月18日下午 01:11



Ranjan, P., Kazama, S., Sawamoto, M. and Sana, A. 2009. Global scale evaluation of coastal fresh groundwater resources. Ocean & Coastal Management 52(3), 197-206.

Ryker, S.J. (2003) Arsenic in Ground Water: Geochemistry and Occurrence. Welch, A.H. and Stollenwerk, K.G. (eds), pp. 165-178, Springer US, Boston, MA.

Scanlon, B.R., Fakhreddine, S., Rateb, A., de Graaf, I., Famiglietti, J., Gleeson, T., Grafton, R.Q., Jobbagy, E., Kebede, S., Kolusu, S.R., Konikow, L.F., Long, D., Mekonnen, M., Schmied, H.M., Mukherjee, A., MacDonald, A., Reedy, R.C., Shamsudduha, M., Simmons, C.T., Sun, A., Taylor, R.G., Villholth, K.G., Vörösmarty, C.J. and Zheng, C. 2023. Global water resources and the role of groundwater in a resilient water future. Nature Reviews Earth & Environment 4(2), 87-101.

Sharma, B.M., Bharat, G.K., Tayal, S., Larssen, T., Bečanová, J., Karásková, P., Whitehead, P.G., Futter, M.N., Butterfield, D. and Nizzetto, L. 2016. Perfluoroalkyl substances (PFAS) in river and ground/drinking water of the Ganges River basin: Emissions and implications for human exposure. Environmental Pollution 208, 704-713.

Smaili, H. and Ng, C. 2023. Adsorption as a remediation technology for short-chain per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) from water – a critical review. Environmental Science: Water Research & Technology 9(2), 344-362.

Smith, E.A. and Westenbroek, S.M. 2015 Potential groundwater recharge for the State of Minnesota using the Soil-Water-Balance model, 1996-2010, pp. 85-, Reston, VA.

U.S.EPA 2016a U.S. Environmental Protection Agency. Office of Water. Drinking Water Health Advisory for Perfluorooctane Sulfonate (PFOS), EPA 822-R-16-004.

U.S.EPA 2016b U.S. Environmental Protection Agency.Office of Water. Drinking Water Health Advisory for Perfluorooctanoic Acid (PFOA), EPA 822-R-16-005.

U.S.EPA 2024 Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) Final PFAS National Primary Drinking Water Regulation.

UNEP 2023 UNEP/POPS/POPRC.18/11/Add.4 Draft risk management evaluation: long-chain perfluorocarboxylic acids, their salts and related compounds.

UNPE 2009 Decision of the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants: SC-4/17: Listing of Perfluorooctane Sulfonic Acid, its Salts and Perfluorooctane Sulfonyl Fluoride.

UNPE 2019 SC-9/12: Listing of perfluorooctanoic acid (PFOA), its salts and PFOA-related compounds.

UNPE 2022 The Conference of the Parties listed PFHxS, its salts and PFHxS-related compounds in Annex A to the Stockholm Convention (decision SC-10/13).

Wu, J., Cai, Y., Xu, C., Yang, G., Zhang, H., Meng, X.-Z., Lei, J. and Zhang, S. 2025. Co-occurrence behaviors of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) and heavy metals in the groundwater of dyeing industrial sites in southern China. Ecotoxicology and Environmental Safety 303, 118925.

Xu, X.L., Xu, H.Y., Zhang, D.Y., Shen, X.Y., Tong, G.Z., Lu, Y. and Wang, W. 2013. Occurrence of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) and Perfluorooctanoate (PFOA) in Aquatic Systems from Asia. Applied Mechanics and Materials 295-298, 513-519.

Yong, Z.Y., Kim, K.Y. and Oh, J.-E. 2021. The occurrence and distributions of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in groundwater after a PFAS leakage incident in 2018. Environmental Pollution 268, 115395.

上傳時間：2025年12月18日下午 01:11



Zarębska, M., Bajkacz, S. and Hordyjewicz-Baran, Z. 2024. Assessment of legacy and emerging PFAS in the Oder River: Occurrence, distribution, and sources. Environmental Research 251, 118608.

Zhou, Z., Liang, Y., Shi, Y., Xu, L. and Cai, Y. 2013. Occurrence and Transport of Perfluoroalkyl Acids (PFAAs), Including Short-Chain PFAAs in Tangxun Lake, China. Environmental Science & Technology 47(16), 9249-9257.

中華民國行政院環境部 2024 飲用水水質標準第三條之一修正條文.

環境部水質保護司 (2023) 112 年事業廢水特性調查及污染防治管理計畫成果報告.

環境部環管署土基會蔡惠珍 2023 PFAS 在土壤及地下水調查之國際趨勢、國內情形及展望.