



環境部環境管理署

112 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

微生物燃料電池添加混合生物炭材料去除土壤和地下水中有機氟和碳氫化合物之研究 (成果報告)

主辦單位：  環境部環境管理署
專案執行單位： 朝陽科技大學／環境工程與管理系所
專案主持人： 羅煌木教授
專案執行期間： 112 年 12 月 15 日起至
113 年 11 月 29 日止

中 華 民 國 113 年 11 月 印製









環境部環境管理署

112 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

微生物燃料電池添加混合生物炭材料去 除土壤和地下水中有機氟和碳氫化合物 之研究 (成果報告)

主 辦 單 位：  環境部環境管理署

專案執行單位： 朝陽科技大學／環境工程與管理系所

專案主持人： 羅煌木教授

專案執行期間： 112 年 12 月 15 日起至
113 年 11 月 29 日止

中 華 民 國 113 年 11 月 印製



環境部環境管理署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☐構想書 ☒申請計畫書 ☐期中報告
☐修正計畫書 ☐期末報告

審查意見回覆對照表

計畫年度	112 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：羅煌木 NO：P2
計畫名稱	微生物燃料電池添加混合生物炭材料去除土壤和地下水中有機氟和碳氫化合物之研究		
審查意見		執行單位回覆	
委員一		1. 附件 8-1 補助經費(1~5 項)為 416,000 元，檢視後已修正金額，謝謝委員的審視。	
1. 附件 8-1，申請補助經費為 0，請檢視是否為誤繕。		2. 要評估預期量化成果，首先需要確定比率的基準。對於燃料電池整治技術的提升、整治成本的降低和能源效率的提升，可以使用以下方法進行評估：	
2. 附件 8-3，本案預期量化成果為燃料電池整治技術提升 50%、降低整治成本降低 50%、提升能源效率 50%，該比率如何評估？以及比較之基準為何？請說明。		(1) 提升燃料電池整治技術 50%: 可以透過比較燃料電池在實驗室條件下和實際應用場景中的性能來評估。如果實驗室中的技術水準是基準，那麼預期提升 50% 意味著在實際應用中，該技術能夠表現出更高的效率、更快的污染物去除速度或更長的壽命。	
3. 附件 8-6 計畫目的，內容過於簡略無法了解本案之前因後果，請簡易回顧本案文獻、研究背景以及相關原理等，進而說明過去研究內容可運用到土壤及地下水整治之可行性。		(2) 降低整治成本 50%: 這可以透過比較修復一個單位面積或體積的土壤或地下水的成本來評估。預期的降低意味著採用新技術後，所需的人力、材料、能源等成本將減少一半。提升能源效率 50%：這可以透過比較單位廢棄物處理所產生的電能來評估。	
4. 附件 8-7 研究方法，請問目前預計遭遇困難及解決途徑為何？另建議以條列式呈現並重新排版，以利審查。		(3) 如果目前技術每處理一定量的廢棄物可以產生一定量的電能，那麼預期提升 50% 意味著同樣的廢棄物量可以產生更多的電能。	
5. 附件 8-9 甘特圖工作項目請以中文撰寫，另各工項進度條顏色太淺，請修正，以利審查。		比較的基準是目前已有的技術水準或實際應用情況。透過與現有技術或方法進行比較，可以確定新技術的優勢和改進之處。這樣的比較可以提供一個客觀的評估，幫助確定	
6. 附件 8-26 人事費合計(一)~(五)為 0，請修正。			
7. 附件 8-27 預計進行檢測分析 10 件，請問如何分配？及相關規劃為何？			
8. 附件 8-34 參考文獻為無，故本案之可行性依據為何？			



預期量化成果的實際意義和可行性。

3. 本計畫微生物燃料電池(MFC)應用於土壤和地下水整治。文獻表明，生物炭來自於農業和都市生活廢棄物等有機物，提供了一個可持續而有效的解決方案(Lehmann & Joseph, 2015)。當與MFCs結合時，可作為去除PFAS和碳氫化合物污染物的催化劑，MFC結合混合生物炭材料能有效去除有機氟和碳氫化合物。基於MFC原理，微生物代謝廢物產生電能。該技術可降低成本、提高能源效率，為土壤及地下水污染治理提供新思路。
4. 目前可能遭遇的困難包括技術的規模化難度、實際應用中的環境複雜性和成本管理等。解決途徑可以包括加強工程實踐與實地測試，優化設計以提高穩定性與效率，並與相關利益相關者合作以降低成本和促進技術推廣。同時，持續監測和改進技術，以適應不斷變化的環境和需求，也是解決困難的關鍵途徑。謝謝委員，將會以條列式呈現並重新排版，以利審查。
5. 謝謝委員的建議，甘特圖已修正。
6. 附件 8-26 人事費合計已修正謝謝委員。
7. 對於預計進行的 10 件檢測分析，可以根據以下方案進行分配和規劃：
 - (一)確定檢測項目：首先確定要檢測的項目和指標，例如有機氟和碳氫化合物的濃度、微生物活性等。
 - (二)樣本採集：根據研究範圍和目的，在不同地點採集土壤和地下水樣品確保樣本具有代表性。
 - (三)實驗設計：設計實驗流程和分析方法，確保準確性和可重複性。可以包括樣品前處理、檢測儀器的選擇和校正等。
 - (四)分配工作：將樣品分為不同批次，分配給不同的團隊成員或實驗室進行檢測分析。
 - (五)並行處理：盡可能採用並行處理的方式，提高效率 and 節省時間。可以同時進行不同檢測項目的處理。
 - (六)資料分析：對檢測結果進行統計分析與解讀



，比較不同樣品的差異和趨勢從中得出結論。

(七)報告撰寫：撰寫檢測報告，包括實驗方法、結果和結論，並提出可能的建議和改進方案 8.討論與回饋：將檢測結果與團隊成員和相關利害關係人討論，以取得回饋意見，並根據需要進行進一步調整和改進。

透過上述分配和規劃可以有效地進行檢測分析，並獲得準確可靠的結果，以支持研究的進展。

8.本案的可行性依據包括以下幾個方面：

(一)前期研究支持：先前的文獻和研究已經證明了微生物燃料電池（MFC）結合混合生物炭材料可以有效去除土壤和地下水中的有機氯和碳氫化合物，為本案提供了可靠的技術基礎。

(二)原理可靠性：MFC 技術利用微生物代謝廢物產生電能，已經在實驗室和一些實際應用中得到驗證，其原理具有可靠性和可操作性。

(三)技術發展趨勢：MFC 技術在環境修復領域的應用逐漸增加，越來越多的研究表明其在污染物去除和能源回收方面的潛力，顯示了技術的發展趨勢和應用前景。

(四)成本效益分析：預期通過 MFC 技術整治土壤和地下水污染能夠降低成本、提高效率，並同時產生電能，從而具有較好的成本效益，符合可持續發展的要求。

(五)實踐驗證計劃：可以制定實踐驗證計劃，在實地條件下測試和驗證 MFC 技術的可行性和效果，以進一步驗證其在實際應用中的可行性。

綜合考慮以上因素，可以認為本案具有一定的可行性，並有望在土壤和地下水整治領域發揮重要作用。



委員二

1. 本案為申請人過去國科會計畫的延伸性應用，預計使微生物燃料電池污染整治技術提升 50%、降低整治成本降低 50%、提升能源效率 50%，且計畫團隊現有技術之 TRL 自評為 2，預定達到 5，超過國內外目前最高的 TRL4 應說明相關的具體做法。
2. 欲使用來自不同有機廢棄物及 MOF/LDHs 材料製備混合生物炭電極之微生物燃料電池 (MFCs)，探討其去除有機氟化物 (或 PFAS) 和碳氫化合物 (HC) 之效能。唯 PFAS 與 HC 在環境中的濃度背景值差異非常大，應思考在實際應用時如何針對目標污染物進行精準去除，以提高實場應用性。

1. 要將微生物燃料電池 (MFC) 污染整治技術提升至 50%、降低整治成本 50%、提升能源效率 50%，並將技術的技術成熟度水平 (TRL) 從 2 提高至 5，以下是可能的具體做法：

(1) 技術改進與優化：

- 通過改進 MFC 反應器設計、優化電極材料、改進微生物種類和培養條件等方式，提高技術的去污能力和電能產生效率。
- 引入新型混合生物炭材料，提升吸附和降解有機污染物的效率，同時增強電子傳導性，促進微生物代謝產生電能。

(2) 工程實踐與場地測試：

- 在實際場地進行 MFC 技術的工程實踐和現場測試，掌握技術在真實環境中的表現和應用效果，同時驗證成本效益。
- 結合不同場地特點和環境條件，調整和優化技術應用方案，提高適用性和可操作性。

(3) 成本分析與管理：

- 進行成本分析，找出技術實施過程中的主要成本來源，並採取措施降低成本，例如優化材料使用、提高工作效率、降低維護成本等。
- 與供應商和合作夥伴合作，尋求成本優勢和資源共享，降低整治成本。

(4) 性能評估與效能提升：

- 制定嚴格的性能評估標準和指標，定期監測和評估技術的去污效果、電能產生效率和穩定性，以確保達到預期目標。
- 持續改進和優化技術，提高技術的可靠性和持續性，確保在不同條件下都能實現 50% 的提升。

通過以上具體做法，可以使 MFC 污染整治技術達到預期的提升目標，並將技術的 TRL 提高至 5，為技術的進一步推廣



	和商業化奠定基礎。 2. 在實際應用中，可利用不同有機廢棄物及 MOF/LDHs 材料製備混合生物炭電極之 MFCs，以探討其對於去除有機氟化物 (PFAS) 和碳氫化合物 (HC) 的效能。由於 PFAS 與 HC 在環境中濃度背景值差異大，可透過材料的精準選擇及操作條件的調控，針對不同污染物進行精確去除，以提升實場應用性，並確保對於目標污染物的高效處理。
委員三 1. 本研究主題國際上已有許多研究進行，請說明與國際研究上之新穎性。 2. 請補充說明代表性污染物、濃度，以及其與環境之關聯性，並加入後續實驗執行時之考量。 3. 建議考慮探討計畫可行性及其能耗。	1. 本研究在國際上的新穎性在於結合不同有機廢棄物和 MOF/LDHs 材料製備混合生物炭電極，應用於 MFCs 去除有機氟化物 (如 PFAS) 和碳氫化合物 (HC)。 2. 代表性污染物包括 PFAS 和 HC，其在環境中的濃度常受到工業活動和人類活動的影響，對生態環境和人體健康造成潛在風險。實驗執行時需考慮不同污染物的特性和濃度，以及 MFCs 操作條件的優化，以提高去除效能和確保環境安全。 3. 謝謝委員的建議計畫會充分考慮可行性和能耗，以確保技術的實用性和經濟效益。
委員四 1. 主持人近三年已發表 6 篇 SCI 期刊，建議補充代表性研究成果重要貢獻。又曾受國科會補助為 3 年期計畫菱角與廚餘等生物炭製備於生質能源增進與生物炭混凝土利用之循環經濟研究，學術研究能力或技術發展能力尚佳，足以勝任本計畫。 2. 本執行團隊除了計畫主持人，亦有四位兼任助理，其中兩位曾有菱角與廚餘等生物炭製備經驗。 3. 本計畫預估之成果績效貢獻包括學術產出國外期刊、國內研討會各一篇及技術報告、人才培育碩士 3 人及博士 1 人、新型/設計專利 1 件及促成合作 200 千元。	1. 謝謝委員的支持。 2. 其中兩位曾有菱角與廚餘等生物炭製備經驗，亦能增加計畫的執行效率。 3. 是的，本計畫預期成果包括學術論文發表於國外期刊和國內研討會各一篇，技術報告一份，培育碩士 3 人及博士 1 人，申請新型/設計專利一件，促成合作 200 千元。 4. 本研究計畫旨在將不同種類的廢棄物轉化為生物炭，如菱角殼和污泥等，同時探討利用微生物燃料電池處理受污染的土壤，並於處理過程中發電，專注於生態友善的土壤和地下水污染問題解決方案。 5. 謝謝委員的建議，後續會加以整理研究方法步驟與表 5，並增加文獻收集完整度



4. 本研究計畫旨在將不同種類的廢棄物轉化為生物炭，使用如菱角殼和污泥等材料。同時，探討使用微生物燃料電池來處理受污染的土壤並於處理過程發電，專注於土壤和地下水污染問題的生態友善解決方案。 5. 本計畫研究方法步驟說明較雜，建議加以整理研究方法步驟。而研究內容陽極槽配置不同濃度有機氟化合物與總碳氫化合物於乾淨之土壤與地下水各 1000 mL 進行混合，如表 5 所示，並未有表 5。另建議可再強化文獻蒐集之完整性。 6. 未說明預期所獲成果與貢獻，建議補充之。 7. 本研究計畫利用菱角殼、稻殼、糞便、廚餘、污泥和食品污泥進行生物炭的製備。結合創新方法，將金屬有機框架(MOFs)和層狀雙氫氧化物(LDHs)應用在極板製備，預期研究成果可為環境污染提供解決方案，並確保臺灣土壤和地下水污染整治復育使用綠色材料科技之永續處理方法具實場應用性。	6. 謝謝委員之後增加預期成果包括創新的生物炭製備技術、高效的微生物燃料電池應用成效，對土壤污染治理和可再生能源產生具體貢獻。成果將推動生態環境修復，降低土壤和地下水污染風險，同時促進能源轉型，減少碳排放。這將有助於實現環境可持續發展目標，保護生物多樣性和人類健康。 7. 謝謝委員，本研究計畫利用菱角殼、稻殼、糞便、廚餘、污泥和食品污泥進行生物炭的製備。結合創新方法，將金屬有機框架(MOFs)和層狀雙氫氧化物(LDHs)應用在極板製備，預期研究成果可為環境污染提供解決方案，並確保臺灣土壤和地下水污染整治復育使用綠色材料科技之永續處理方法具實場應用性。
委員五 1. 建議應考慮未來實際應用時所面臨之問題進行研究。	謝謝委員的建議，本研究考慮未來實際應用可能面臨的問題，包括生物炭製備的可擴展性、MOFs 和 LDHs 在極板製備中的穩定性和效率，以及實地環境條件和污染物複雜性。透過解決這些問題，確保技術在土壤和地下水污染治理中的可靠性和實用性。
委員六 1. 六、計畫目的未具體說明微生物燃料電池或混合生物炭電極材料技術於國內外研究領域現況及成果，以及結合生物燃料電池及生物炭電極之特色與優勢。 2. 附件 8-5 政策面預期量化效果:微生物燃料電池污染整治技術提升 50%、降低整治成本降低 50%、提升能源效率 50%如何獲得? 3. 研究方法與步驟說明模糊不清:表 5 未提供，表 1-4?添加馴化污泥作用? 4. 研究方法與步驟說明 1 頁文字語意不清，無法對應最佳化生物炭製備、金屬有機框架(MOFs)和層狀雙氫氧化物(LDHs)應用	1. 微生物燃料電池和混合生物炭電極材料技術在國內外研究領域備受關注。微生物燃料電池利用微生物代謝產生電能，已應用於廢水處理和能源生產。混合生物炭電極結合了生物炭的吸附特性和導電性，可提高電池性能和污染物去除效率。這些技術的結合將發揮協同作用，提高廢水處理效率，促進可持續發展。 2. 可透過以下途徑實現目標：優化反應器設計、改進電極材料、優化微生物種類和培養條件，提高去污能力和電能產生效率；優化操作參數、降低能源消耗、提高整治成本效益比，降低整治成本；加強對 MFC 技術的研



之製備等關鍵探討之合理性。	究與開發，改善電池設計、提高能源收集效率，以提升能源效率。 3. 謝謝委員，將會修正表五，表 1-4 的部分，添加馴化污泥可促進微生物燃料電池的效能提升。馴化污泥中的微生物種類和活性有助於增加 MFC 系統的生物降解能力和電流輸出。此外，馴化污泥中的微生物已經適應了特定的環境條件，能更有效地在 MFC 系統中生長和代謝有機物，進一步提高整治效率和能源收集效率。 4. 謝謝委員，後續會加強研究方法與步驟，研究方法與步驟的合理性在於對最佳化生物炭製備、金屬有機框架（MOFs）和層狀雙氫氧化物（LDHs）應用的關鍵探討。其中包括： (1) 生物炭製備優化：選擇適當原料和製備方法，考慮生物炭的吸附性和導電性，確保其在混合生物炭電極中的最佳效果。 (2) MOFs 和 LDHs 製備與應用：確定最適合微生物燃料電池極板製備的 MOFs 和 LDHs 材料，考慮其穩定性、導電性和對目標污染物的吸附性能，以確保其有效應用。 (3) 實驗設計與數據分析：採用科學的實驗設計和數據分析方法，確定最佳製備條件和應用參數，以保證研究結果的可靠性和實用性。 (4) 綜合考量與比較：綜合考慮生物炭、MOFs 和 LDHs 的特性和應用效果，通過對不同材料的比較和綜合分析，確定最佳組合以提高微生物燃料電池整治效率和能源效率。 透過合理的研究方法和步驟，可以有效探討生物炭製備和 MOFs、LDHs 應用在微生物燃料電池中的關鍵問題，為技術的優化和實際應用提供科學依據。
委員七 1. 產業面中會申請新型專利 1 件，是否為本專案補助所產出或為科技部補助計畫所產出。	1. 委員您好，本案新型專利申請為本專案補助所產出，謝謝題問。



委員八 1. 計畫主持人及本計畫執行團隊的學術研究能力佳，足以勝任本計畫。主持人及本計畫執行團隊近五年的研究績效佳。 2. 本計畫對國內土壤及地下水污染整治的貢獻有待說明。 3. 本計畫書撰寫具體完整，計畫書中已經說明本計畫的執行方式。 4. 計畫書所述的構想具可行性，但是否具有實務應用潛力仍待評估(計畫書中說明：“...預期研究成果可為環境污染提供解決方案...”，建議將可能的構思以工程觀念呈現)。 5. 計畫執行期限合理，也已經說明預期的研究成果。 6. 計畫經費編列合理。	1. 謝謝委員的支持。 2. 本計畫對國內土壤及地下水污染整治的貢獻包括以下幾個方面： (一)新技術引入：將微生物燃料電池與混合生物炭電極材料技術應用於土壤及地下水污染整治，開拓新的治理途徑，提供多元化的解決方案。 (二)綠色環保：利用廢棄物轉化為生物炭電極材料，並結合微生物燃料電池技術，實現了污染整治與能源回收的綠色環保目標。 (三)效能提升：本計畫所開發的技術能夠提高污染物去除效率、降低整治成本、提升能源效率，為國內土壤及地下水污染整治帶來新的突破和進步。 本計畫的研究成果將為國內土壤及地下水污染整治提供創新、綠色、高效的解決方案，對改善環境質量和保護公眾健康具有重要意義。 3. 謝謝委員的評比。 4. 本計畫的構想具有可行性，並擁有實務應用潛力。通過將微生物燃料電池與混合生物炭電極材料技術應用於土壤及地下水污染整治，我們可以期待解決環境污染問題。這一技術可以工程觀念呈現，例如設計和建造具有高效能和可持續性的整治系統，並將其應用於實際場地，從而實現土壤及地下水污染的有效處理和修復。透過對技術的進一步優化和實際應用，我們可以將研究成果轉化為具體的解決方案，促進環境保護和永續發展。 5. 謝謝委員的肯定與鼓勵。 6. 謝謝委員的肯定。
委員九 1. 計畫書請雙面列印。 2. 人事費： 1. 兼任人員謝旻燁、羅士涵、陳右淇、許羽芊月支酬金 7,293 元與兼任助理費 6,000 元 +933 元勞保+360 元勞退+127 元補充保費加總共 7,420 元金額不一致，請確認。 2. 兼任人員加總共 222,600 元與合計 225,600 元金額不一致，請確認。	1. 謝謝委員的提醒，計畫書將以雙面列印呈現。 2. 謝謝委員的指導，兼任人員、加總及總計已補上並確認完畢。 3. 耗材及設備使用含維護費以重新編列，謝謝委員的叮嚀。



3.總計=(一)~(四)以及人事費合計(一)~(五)未填寫金額，請補上。 4.無編列勞健保險費與退休金等費用，請確認。 3. 耗材:本署僅補助耗材品、設備使用及設備租賃等費用，故所編高溫爐及篩搖機各 1 台，請以 5 年為折舊基準攤提編列至設備使用及維護項目。	
---	--



環境部環境管理署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☐構想書

☐申請計畫書

☒進度報告

☐修正計畫書

☐成果報告

審查意見回覆對照表

計畫年度	112 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：羅煌木 NO：D8
計畫名稱	微生物燃料電池添加混合生物炭材料去除土壤和地下水中有機氟和碳氫化合物之研究		
審查意見		執行單位回覆	
1. P.9-28，述及將運用菱角殼等多種生物質製備生物炭，建議先敘明本年度實驗將執行的生物質即可。 2. P.9-30，建議增加生物炭製備成活性碳的活化劑(KOH)混合比例的說明。 3. P.9-31，所述 PVDF 製備方式，惟本次似係以 PVA 進行製備，建議修正實際製備過程。 4. P.9-32，測項 (FE-SEM) 在附件 9-45 至 47 頁中僅 LDH 材料，建議後續可增加不同材料及測項的數據。 5. P.9-34，建議補充說明進行生物相容性試驗的目的及為何選擇使用 C. elegans 作為試驗物種。 6. P.9-34，建議增加說明使用紙類來源合成垃圾作為馴養細菌的目的。 7. P.9-35，建議說明 MFC 三種模型的不同特點。 8. P.9-36，提及配製不同生物炭+LDH 和 MOF 的比例，P.9-33 中則無 MOF 材料，建議補充說明。 9. P.9-37，建議說明 GC-MS 測定何種污染物。 10.建議確認圖 5.2.1TPH 使用的溶劑。 11.PFAS 及 PAH 經配置後加入於土壤中，建議增加說明是否有測定加入土壤後的初始濃度。 12.P.9-36，誤繕鐵” 氫” 化鉀，應修正為鐵” 氟” 化鉀。		1. 謝謝委員的建議，我們會參考使用更多生物質做為活性碳製備之材料，因以往已經做過稻稈、稻殼、菱角殼等，本次研究希望能為活性碳製備之生物質提供更多資訊。 2. 已按照委員提出的建議修正活性碳與 KOH 之混合比例說明。 3. 已修正製備方式，因本實驗進行過程發現使用之 PVDF 會在過程中釋放更多的氟化物質，因此更改為 PVA。 4. 謝謝委員的建議，已增加活性碳及 LDH 之各項分析如：XRD、FTIR、SEM、BET、EA。 5. 謝謝委員的建議，因本研究經費考量取消生物性相容性試驗，未來相關實驗計畫將選用斑馬魚生物相容性試驗作為替代。 6. 已按照委員提出的建議增加使用紙類來源合成垃圾作為馴養細菌之說明。 7. 已按照委員提出的建議增加 MFC 模型說明。 8. 本研究經文獻參考為，使用 LDH 披覆於碳氫表面，而形成 MOFs 結構。(Ye et al., 2024) 9. 本研究將 GC-MS 更改為 PetroFlag 分析儀器，並用於碳氫化合物污染物檢測。 10.碳氫化合物選用市售之 95 汽油依照實驗設計之濃度添加，並添加 12mg 三氯乙烯，使碳氫化合物溶於水份，達到實驗所需之目的。 11.謝謝委員，已增加實驗前確認濃度之說明。 12.已將錯別字修正，謝謝委員。	



環境部環境管理署「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☐構想書 ☐申請計畫書 ☐進度報告
☐修正計畫書 ☒成果報告

審查意見回覆對照表

計畫年度	112 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：羅煌木	NO：D8
計畫名稱	微生物燃料電池添加混合生物炭材料去除土壤和地下水中有機氯和碳氫化合物之研究		
審查意見		執行單位回覆	
委員一		1. 原先計畫書將 PFAS 濃度分為低、中、高各別濃度，作為實驗濃度，在其中訪視聽取訪視委員的建議，因應實驗週期與盡量不購買過多的污染物，經討論後將高濃度（80 mg/L）最為 PFAS 實驗濃度。 2. 謝謝委員的建議，將會在建議補充材料應用之可行性。 3. 謝謝委員的建議，原先計畫書選用 LC-MS 進行 PFAS 濃度檢測，因前往貴重儀器中心查詢無可借用此儀器資料，並且詢問過各家檢測廠商，不接受樣品寄送或是無合格之操作人員，因此經討論後選用 IC 作為濃度檢測儀器。	
13. PFAS 的濃度高達 80 mg/L，遠高於環境濃度，建議說明其原因。 14. 本研究使用的技術材料合成等成本高，後續建議應該說明其應用的可行性。 15.5.1 節中說明 PFAS 用 IC 來檢測，似乎與一般認知不太一樣，建議應該補充說明及分析方法。		1. 原先計畫書將 PFAS 濃度分為低、中、高各別濃度，作為實驗濃度，在其中訪視聽取訪視委員的建議，因應實驗週期與盡量不購買過多的污染物，經討論後將高濃度（80 mg/L）最為 PFAS 實驗濃度。 2. 謝謝委員的建議，將會在建議補充材料應用之可行性。 3. 謝謝委員的建議，原先計畫書選用 LC-MS 進行 PFAS 濃度檢測，因前往貴重儀器中心查詢無可借用此儀器資料，並且詢問過各家檢測廠商，不接受樣品寄送或是無合格之操作人員，因此經討論後選用 IC 作為濃度檢測儀器。	
委員二		1. 謝謝委員的建議，在 4.1 節與 4.2 節補充明確實驗所使用之生物質，並明確列出 KOH 比例，圖 4.6.1 補充 PVA（聚乙醇醇）製備流程。 2. FE-SEM（場發射掃描電子顯微鏡）未來發表將會增加活性碳測試數據，以及增加 EDS（能量色散 X 射線譜）數據補充，謝謝委員的建議。其中訪視聽取訪視委員的建議，因資金考量生物相容性試驗成本較高，經過與委員的討論後，建議未來計畫有更多的資源在予以執行。使用紙類來源合成垃圾馴養細菌之目的補充至 4.7 節。 3. 三種模型各項特點及優勢補充於第 6 節，謝謝委員的建議，MOFs（金屬有機框架）相關資訊補充於 2.8 節。 4. 謝謝委員的建議，所有實驗污染物（PFAS、HC）添加至土壤與地下水樣品後都經過儀器	
3. 實驗材料與方法說明：報告中提到了將使用菱角殼等多種生物質制備生物炭。建議明確指出本年度實驗實際使用的生物質種類，並且對於每種材料的具體處理過程進行詳細描述。生物炭制備成活性炭時所用活化劑 KOH 的比例應當明確列出，以便其他研究者能夠復現實驗條件。關於 PVDF（聚偏二氟乙烯）的制備方式，如果實際使用的是 PVA（聚乙醇醇），需要在報告中修正並提供準確的制備流程。 4. 實驗數據補充：在 FE-SEM（場發射掃描電子顯微鏡）分析部分，目前僅提供了 LDH（層狀雙金屬氫氧化物）材料的數據。為了使結果更加全面，應增加不同材料以及更多相關測試項的數據。補充說明為何選擇 C.elegans		1. 謝謝委員的建議，在 4.1 節與 4.2 節補充明確實驗所使用之生物質，並明確列出 KOH 比例，圖 4.6.1 補充 PVA（聚乙醇醇）製備流程。 2. FE-SEM（場發射掃描電子顯微鏡）未來發表將會增加活性碳測試數據，以及增加 EDS（能量色散 X 射線譜）數據補充，謝謝委員的建議。其中訪視聽取訪視委員的建議，因資金考量生物相容性試驗成本較高，經過與委員的討論後，建議未來計畫有更多的資源在予以執行。使用紙類來源合成垃圾馴養細菌之目的補充至 4.7 節。 3. 三種模型各項特點及優勢補充於第 6 節，謝謝委員的建議，MOFs（金屬有機框架）相關資訊補充於 2.8 節。 4. 謝謝委員的建議，所有實驗污染物（PFAS、HC）添加至土壤與地下水樣品後都經過儀器	



作為生物相容性試驗的物種，以及這種選擇背後的科學依據。使用紙類來源合成垃圾馴養細菌的目的也需要進一步闡明，包括其對實驗結果的影響。 5. 模型與技術細節：對於 MFC（微生物燃料電池）三種模型的不同特點，應給出更詳細的解釋，以幫助理解各種模型的優勢和局限。報告中提及了配制不同比例的生物炭+LDH 和 MOF（金屬有機框架），但沒有提到 MOF 材料的具體信息。應補充相關說明，確保所有關鍵成分都被充分介紹。 6. 初始濃度測量：PFAS（全氟烷基物質）及 PAH（多環芳烴）加入到土壤中的初始濃度是否進行了測量？如果沒有，請考慮進行這些測量，以更好地評估污染物去除效果。 7. 學術成果與發表情況：項目已達成預期目標，在國內會議論文、國際期刊論文和技術報告方面都有產出。但考慮到這是一個創新性強的技術領域，建議繼續擴大研究成果的國際影響力，爭取更多的國際發表機會。 8. 行業合作與技術轉移：目前還沒有明顯的產業界資源投入或技術轉移成果。建議加強與企業的聯繫，探索潛在的合作機會，促進技術的實際應用與商業化進程。 9. 已經完成了一件新型設計專利申請，但尚未有已核准專利。未來可以關注這一領域的知識產權保護，爭取獲得授權，提升技術價值。	IC、PetroFLAG 確認實驗所需濃度，後續才進行降解吸附實驗。 5. 謝謝委員的建議未來將擴大研究成果爭取更多的國際發表機會。 6. 謝謝委員的建議，未來可針對相關企業需求調整技術方向，提升合作吸引力，同時爭取產業資金支持，推動技術商業化進程，促成實際應用。 7. 謝謝委員的建議，未來將持續關注此領域的知識產權保護，積極爭取獲得授權，提升技術價值。
委員三 4. 本研究利用柑橘皮作為生物質製備活性炭來進行實驗分析降解土壤與水污的效果，實驗結果達成其預期成效。 5. 本研究發現柑橘皮做為製備活性炭的潛力，但是在台灣的農業廢物中，柑橘皮所占比率為何，需要農政單位協助，本研究成果建議與農政單位討論實際商業運用的可能性。 6. 本研究成果若能以國內污染整治場址的污染數據做相關模擬評估，對於場址整治運用將有所助益。	感謝委員對本研究的肯定與建議。本研究證實柑橘皮作為生物質材料製備活性炭的潛力，在降解土壤與水中污染物方面表現出良好效果，達成預期成效。未來，我們將進一步優化活性炭製備技術，提升其降解效率和應用價值。同時，針對台灣農業廢棄物中柑橘皮資源的實際占比，參考建議與農政單位展開合作，評估其供應穩定性與商業化潛力，並尋求政策支持。另一方面，計畫將結合國內污染整治場址的真實數據進行模擬驗證，評估技術在不同污染條件下的可行性，



	進一步提升技術的適應性與推廣性。期望本研究成果能為污染整治提供具創新性、永續性的解決方案，並促進技術落地應用。
委員四 8. 成果績效指標多已達成，惟： ① 促成合作研究之名稱、對象、內涵，宜請說明。 ② 政策面效益 C.技術效益提昇 50%之計算基礎與方法，宜請補充。 9. Biochar 並不一定是活性碳；另，研究題目之「hybrid biochar」所指為何？請定義。 10. 目錄 7.「初步數據」似有不宜，建議改為「結果與討論」。 11. P.28 圖 7.3.7~7.3.9，LDH 特性分析之 FE-SEM，宜有比較說明。 12. 使用再生活性碳之可能性，可否初步了解？ 13. 如何透過 MFC 之精進，提昇 PFAS 之去除率。	1. 感謝委員的指導，本研究主要針對 LDH（層狀雙氫氧化物）吸附去除污染物及柑橘皮活性碳技術的應用開發與產業化進行研究，內涵包括材料最佳化與實驗場址模擬測試關於促成合作研究部分，未來實驗計畫希望與政府機關合作，達成國內實際污染整治場址試驗。關於技術效益提升 50%的計算基礎，是根據污染物去除效率的產電實驗數據對比以往無添加 LDH 之 MFC 產電效益，以進一步說明成果效益。 2. 經確認後將活性碳更改為 Activated carbon，題目之 hybrid biochar 材料所指是將 KOH 添加於生物質混合，並且活化為實驗所需之活性碳。 3. 經確認後將初步數據更改為結果與討論。 4. LDH 特性分析之 FE-SEM 說明補充至 P.31 頁，並參考其他文獻比較分析結果。 5. 本研究所指再生利用是指將石墨碳氈（Carbon felt, CF）經過去除表面污染物及經過洗淨烘乾後能再次作為 MFC 之電極極版製備使用。 6. 提升微生物燃料電池（MFC）對有機氟化物（PFAS）的吸附去除率，關鍵在於精進電極材料和微生物社群的結構。使用高效能的電極材料如活性炭、金屬有機框架（MOFs）或層狀雙氫氧化物（LDH），這些材料能提供更大的表面積，增強電子傳遞效率，從而提升微生物的降解能力和 PFAS 的吸附效果，這樣不僅能提高 MFC 的能量轉換效率，還能促進 PFAS 分子的分解。
委員五 2. P.2，前言中介紹 PFAS 污染部分，建議補充說明長鏈與短鏈不同碳數 PFAS 所可能造成的影響。	1. 謝謝委員的建議，於 2.1 節補充長鏈與短鏈不同碳數 PFAS 所可能造成的影響。 2. 謝謝委員的建議，將柑橘皮作為活性碳材料之原因將補充於前言。



3. P.10, 研究初期已蒐集多種生質材料, 建議在計劃前言先說明選擇柑橘皮作為材料的原因。 4. P.16, 建議補充說明選擇這四種 PFAS 作為污染物的考量。 5. P.31, 表 10 中的元素組成總和僅為 82.23%, 建議可詳細列出其他元素的組成。 6. P.32, 表 11 中比表面積分析僅顯示表面積數據, 建議補充孔隙大小和孔體積的資訊。 7. P.68, 建議後續可評估未來實場應用的成本效益和設置方式。 8. P.68, 建議探討 MOF 電極板在單次使用後的廢棄處理方式。 9. 封面請修改為成果報告。	3. 本研究選用 4 種 PFAS 作為污染物, 補充於 5.1 節, 選用本實驗室現有之有機氟化物進行製備, 並針對氟 (F) 元素進行污染物的檢測。 4. 謝謝委員的建議, 未來本研究將會寄送樣品至其他單位詳細列出其他元素組成。 5. 謝謝委員的建議, 比表面積分析資訊將補充至 P.32。 6. 感謝委員的建議, 未來研究將著重於實場應用的成本效益評估, 包括材料製備成本、處理規模及效能的經濟分析。同時, 將探索最佳設置方式, 如污染場址的技術佈局與操作參數, 以確保技術的實用性與經濟性, 促進實際推廣應用。 7. 謝謝委員的建議, MOF 電極板單次使用後, 可考慮通過熱處理或化學浸提回收有價成分, 並對殘渣進行穩定化處理, 以減少環境污染和資源浪費。 8. 已將封面修正為成果報告。
--	---





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		朝陽科技大學環境工程與管理系廢棄物資源化實驗室					
機構地址		台中市霧峰區吉峰東路 168 號 G-615(環管系辦)					
專案主持人		羅煌木		職等／職稱		教授	
協同主持人		無		職等／職稱		無	
專案 名稱	中文	微生物燃料電池添加混合生物炭材料去除土壤和地下水中有機氟和碳氫化合物之研究					
	英文	Study on the removal of organofluorines and hydrocarbon compounds in soil and groundwater by adding hybrid biochar to microbial fuel cells					
	關鍵字	微生物燃料電池、生物炭、有機氟化物、碳氫化合物、金屬有機框架、層狀雙氫氧化物					
執行期程		自 民 國 1 1 2 年 1 2 月 1 5 日 起 至 民 國 1 1 3 年 1 1 月 2 9 日 止					
專案主持人		Email : 專線：04-2332-3000ext.7481 姓名：羅煌木 hmlo0625@gmail.com 手機：0911126735 hmlo@cyut.edu.tw					
專兼任人員		姓名： Email : 專線： 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	218773		(1~5 項相加之 50%為限)		
	2.	設備使用含維護費	45000		(與計畫實驗相關)		
	3.	耗材與主要費用	107656		(與計畫主體相關)		
	4.	其它研究相關費用	0		(含差旅與租賃費用)		
	5.	行政管理費	44571		(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)		416000		總金額：416000		
	計畫總金額(1~6 項)		416000		總金額：416000		

專案主持人(簽名或蓋章)：_____

日期： 113/10/21



112 年度專案成果績效自評表

填表日期：113 年 10 月 21 日

一、專案基本資料

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	朝陽科技大學環境工程與管理系 廢棄物資源化實驗室		專案主持人	羅煌木	
專案名稱	微生物燃料電池添加混合生物炭材料去除土壤和地下水中有機氯和碳氫化合物之研究				
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	0	0	0	0	
		(2)研討會論文	1	0	1	100%	
	2.國外投稿 (篇數)	(1)期刊論文	1	0	1	100%	
		(2)國際研討會 論文發表	0	0	0	0	
	3.報告 (篇數)	(1)技術報告	1	0	1	0	
		(2)研究報告	0	0	0	0	
	4.專著 (本數)			0	0	0	0
	5.辦理學術 會議(場數)	(1)研討/說明會	0	0	0	0	
		(2)成果發表會	0	0	0	0	
		(3)論壇	0	0	0	0	
B 人 才 培 育	6.研發改良 技術(項數)	(1)已開發技術	0	0	0	0	
		(2)技術平台	0	0	0	0	
	7.技術獎項(項數)			0	0	0	0
	8.研發人員 (人數)	(1)碩士	3	0	3	100%	
		(2)博士	1	0	1	100%	
	9.研究團隊 (個數)	(1)跨領域團隊	0	0	0	0	
		(2)跨機構團隊	0	0	0	0	
		(3)形成研究中 心	0	0	0	0	
		(4)形成實驗室	0	0	0	0	
	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	0	0	0	0	
			新型/設計	0	0	0	0	
			合計	0	0	0	0	
		申請中	發明	0	0	0	0	
			新型/設計	1	0	1	100%	
			合計	0	0	0	0	
B 研發技術轉移	2.先期技術成果移轉	件數		0	0	0	0	
		授權金(仟元)		0	0	0	0	
		衍生利益金(仟元)		0	0	0	0	
	3.技術移轉(專利)	件數		0	0	0	0	
		授權金(仟元)		0	0	0	0	
		衍生利益金(仟元)		0	0	0	0	
	4.技術移轉(應用技術)	件數		0	0	0	0	
		授權金(仟元)		0	0	0	0	
		衍生利益金(仟元)		0	0	0	0	
	5.可移轉產業技術	(1)技術(件數)		0	0	0	0	
		(2)品種/系(件數)		0	0	0	0	
C 產學研合作	6.促成合作研究	件數		1	0	1	100%	
		金額(仟元)		200	0	200	100%	
	7.促成投資	件數		0	0	0	0	
		投資金額(仟元)		0	0	0	0	
	8.促成取得業界科專	件數		0	0	0	0	
		業界投資金額(仟元)		0	0	0	0	
9.其他指標(請自行命名)		(請自填)						



(三) 政策面

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)
項目							
A 服務 便民	1.技術服務	次數	0	0	0		
		收入(仟元)	0	0	0		
	2.諮詢服務	次數	0	0	0		
		收入(仟元)	0	0	0		
B 政策 推動	3.協助政府推動(件數)	(1)政策	0	0	0		
		(2)法規	0	0	0		
C 技術 效益	4.整治技術提升(%)		50%	0	50%	100%	
	5.整治成本降低(%)		50%	0	50%	100%	
	6.提升能源效率(%)		50%	0	50%	100%	
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.投稿期刊 1 篇、研討會論文 1 篇。 2.培育 3 名碩士生、1 名博士後研究。
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)
1.申請新型專利 1 件。 2.促成合作研究 1 件。
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、污染址管理等政策及法規研訂之參考)
1. 微生物燃料電池污染整治技術提升 50%、降低整治成本降低 50%、提升能源效率 50%



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
羅煌木	朝陽科技大學環境工程與管理系	教授	指導研究生進行實驗、討論及撰寫報告書	
羅士涵	朝陽科技大學環境工程與管理系	研究生	進行實驗，收集數據並彙整，與教授討論並撰寫報告書	
陳右淇	朝陽科技大學環境工程與管理系	研究生	進行實驗，收集數據並彙整，與教授討論並撰寫報告書	
許羽芊	朝陽科技大學環境工程與管理系	研究生	進行實驗，收集數據並彙整，與教授討論並撰寫報告書	

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	無	
2.人力	無	
3.設備	無	
4.其他資源 (請自行增列)	無	





微生物燃料電池添加混合生物炭材料去除土壤和地下水中有機氟和碳氫化合物之研究-先導專案

朝陽科技大學環境工程與管理系 羅煌木教授

中文摘要

本計畫致力於解決臺灣因工業發展導致之土壤和地下水污染問題。本研究著重於使用有機廢棄物製備活性碳電極之微生物燃料電池（Microbial Fuel Cells, MFC），探討其去除有機氟化物（Per and polyfluorinated alkyl substances, PFAS）和碳氫化合物（Hydrocarbonate, HC）之效能。活性碳之添加利用可提升污染物去除效能，並同時產生電力。本計畫探討了活性碳之特性及 MFC 之處理效率，並為可持續的修復技術創新並作出貢獻。研究計畫利用農業廢棄物進行活性碳的製備。實驗參數包括最佳化活性碳製備，並評估其對污染物去除效率之影響。本研究結合創新方法，將金屬有機框架（Metal Organic Frameworks, MOFs）和層狀雙氫氧化物（Layered double hydroxides, LDH）應用在極板製備，研究結果顯示，本次實驗產電效能提升 60%，而微生物燃料電池（MFC）對不同濃度的碳氫化合物（HC）降解具有顯著效果，當地下水中污染物濃度降低至 3 mg/L 時，降解率達 90% 以上。而對於有機氟化物（PFAS），MFC 在地下水中的吸附去除效果達到 78.11%。預期研究成果可為環境污染提供解決方案，並確保臺灣土壤和地下水污染整治復育使用綠色材料科技之永續處理方法。

關鍵詞：微生物燃料電池、活性碳、有機氟化物、碳氫化合物、金屬有機框架、層狀雙氫氧化物

Study on the removal of organofluorines and hydrocarbon compounds in soil and groundwater by adding hybrid biochar to microbial fuel cells.



英文摘要

Abstract

The study focuses on removing organofluorines (PFAS) and hydrocarbon compounds (HC) using microbial fuel cells (MFC) with hybrid biochar electrodes derived from diverse organic waste. The integration of biochar enhances pollutant removal efficiency while concurrently generating electricity. The comprehensive plan investigates biochar characteristics, MFC efficiency, and the collaborative effort aims to contribute to sustainable remediation and technological innovation. The study envisions utilizing water chestnut shells, rice husks, manure, kitchen waste, sewage sludge, and food sludge for biochar production. Experimental parameters include optimizing biochar concentrations and assessing the impact on pollutant removal efficiency. The research combines innovative approaches, such as Metal-Organic Frameworks (MOFs) and Layered Double Hydroxides (LDH), in electrode fabrication. The study demonstrates that the power generation efficiency in this experiment increased by 60%, and the microbial fuel cell (MFC) showed a significant degradation effect on hydrocarbons (HC) at varying concentrations. When the concentration of pollutants in groundwater was reduced to 3 mg/L, the degradation rate exceeded 90%. For per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS), the MFC achieved an adsorption and removal efficiency of 78.11% in groundwater. The anticipated results of this research are expected to provide solutions for environmental pollution and ensure the sustainable treatment of soil and groundwater remediation in Taiwan using green material technologies.

Keyword : Microbial fuel cells, biochar, organofluorines, hydrocarbon compounds, Metal-Organic Frameworks, Layered Double Hydroxides



目錄

中文摘要.....	I
英文摘要.....	II
目錄.....	III
圖目錄.....	V
表目錄.....	IX
1.前言.....	1
1.1 研究源起.....	1
1.2 研究目的.....	1
2.文獻探討與分析.....	2
2.1 PFAS 在土壤與地下水中的污染.....	2
2.2 碳氫化合物在土壤與地下水中的污染.....	4
2.3 廢棄物生物質衍生之生物炭.....	5
2.4 微生物燃料電池之金屬功能化活性碳電極.....	5
2.5 垂直與水平微生物燃料電池復育.....	6
2.6 土壤與地下水中污染之微生物燃料電池復育.....	6
2.7 層狀雙氫氧化物 (LDH).....	7
2.8 金屬有機框架 (MOFs).....	7
2.9 厭氧細菌.....	7
3.研究規劃.....	8
4.研究方法.....	10
4.1 生物質之準備.....	10
4.2 多孔活性碳的製備.....	10
4.3 LDH 和 MOFs 的合成.....	13
4.4...碳氫電極材料.....	13
4.5 奈米材料表徵.....	14
4.6 MOFs 碳氫電極製備.....	15



4.7 污泥微生物馴養	16
5.樣品製備	16
5.1 PFAS 溶液製備	16
5.2 碳氫化合物 (HC) 溶液製備	17
6.微生物燃料電池 (MFC) 實驗設置	18
6.1 實驗參數	18
6.2 分析儀器	19
6.3 實驗濃度	20
6.4 實驗電壓量測方法	22
6.5 研究進度及預期完成之工作項目 (甘特圖)	24
7.結果與討論	25
7.1 LDH 特性分析-傅立葉轉換紅外線光譜儀(FTIR)	25
7.2 LDH 特性分析-X 光繞射儀(XRD)	27
7.3 LDH 特性分析-場發式電子顯微鏡(FE-SEM)	28
7.4 活性碳特性分析-元素分析儀(EA)	31
7.5 活性碳特性分析-比表面積分析儀(BET)	32
7.6 馴養微生物污泥	33
7.7 電壓趨勢	35
7.8 不同 LDH 製備 MOFs 活性碳碳氈微生物燃料電池電壓趨勢	47
7.9 極化曲線	48
7.10 LDH 活性碳碳氈微生物燃料電池極化曲線	60
7.11 MFC 污染物降解後之濃度	61
7.12 探討微生物燃料電池污染物之降解後濃度	65
7.13 MFC 極版再生利用	66
8.結論	67
9.建議	68
參考文獻	69



圖目錄

圖 2.2.1 正矩陣因子分解模型識別出的多環芳香烴 (PAHs) 來源輪廓，以及臺灣商業港口表層沉積物中的 PAHs 的 TEQ*-RQ 值和風險水平 (Chih-Feng Chen 等，2020)。	4
圖 2.2.2 臺灣土壤地下水污染場址(資料來源:土壤及地下水污染整治網)	5
圖 3.1.1 臺灣受污染的土壤中之 MFC 利用模型	8
圖 4.2.1 實驗流程圖	11
圖 4.2.2 生物炭製備流程圖	12
圖 4.6.1 PVA 聚合物溶液製備流程圖	15
圖 4.6.2 電極製備流程圖	16
圖 5.1.1 PFAS 溶液製備流程圖	17
圖 7.6.1 每日監測之馴養微生物污泥 pH 值	33
圖 7.6.2 每日監測之馴養微生物污泥 ORP 值	33
圖 7.6.3 每日監測之馴養微生物污泥 EC 值	34
圖 7.7.1 NiAl LDH 之地下水 PFAS 污染 MFC 電壓趨勢圖(第 15 天，1.439V)	35
圖 7.7.2 NiAl LDH 之土壤 PFAS 污染 MFC 電壓趨勢圖(第 4 天，1.335 V)	35
圖 7.7.3 ZnAl LDH 之地下水 PFAS 污染 MFC 電壓趨勢圖(第 4 天，1.54 V)	36
圖 7.7.4 ZnAl LDH 之土壤 PFAS 污染 MFC 電壓趨勢圖(第 12 天，1.486 V)	36
圖 7.7.5 MgAl LDH 之地下水 PFAS 污染 MFC 電壓趨勢圖(第 18 天，1.163 V)	37
圖 7.7.6 MgAl LDH 之土壤 PFAS 污染 MFC 電壓趨勢圖(第 20 天，1.279 V)	37
圖 7.7.7 NiAl LDH 之地下水 HC 污染 MFC 電壓趨勢圖-高濃度(第 19 天，1.286 V)	38
圖 7.7.8 NiAl LDH 之土壤 HC 污染 MFC 電壓趨勢圖-高濃度(第 20 天，1.253 V)	38



圖 7.7. 9 ZnAl LDH 之地下水 HC 污染 MFC 電壓趨勢圖-高濃度(第 20 天,1.383 V)	39
圖 7.7. 10 ZnAl LDH 之土壤 HC 污染 MFC 電壓趨勢圖-高濃度(第 7 天, 1.063 V)	39
圖 7.7. 11 MgAl LDH 之地下水 HC 污染 MFC 電壓趨勢圖-高濃度(第 18 天,1.318V)	40
圖 7.7. 12 MgAl LDH 之土壤 HC 污染 MFC 電壓趨勢圖-高濃度(第 18 天,1.322 V)	40
圖 7.7. 13 NiAl LDH 之地下水 HC 污染 MFC 電壓趨勢圖-中濃度(第 19 天,1.373 V)	41
圖 7.7. 14 NiAl LDH 之土壤 HC 污染 MFC 電壓趨勢圖-中濃度(第 15 天, 1.379 V)	41
圖 7.7. 15 ZnAl LDH 之地下水 HC 污染 MFC 電壓趨勢圖-中濃度(第 16 天,1.318 V)	42
圖 7.7. 16 ZnAl LDH 之土壤 HC 污染 MFC 電壓趨勢圖-中濃度(第 19 天, 1.55 V)	42
圖 7.7. 17 MgAl LDH 之地下水 HC 污染 MFC 電壓趨勢圖-中濃度(第 18 天,1.21 V)	43
圖 7.7. 18 MgAl LDH 之土壤 HC 污染 MFC 電壓趨勢圖-中濃度(第 17 天,1.321 V)	43
圖 7.7. 19 NiAl LDH 之地下水 HC 污染 MFC 電壓趨勢圖-低濃度(第 20 天,1.04 V)	44
圖 7.7. 20 NiAl LDH 之土壤 HC 污染 MFC 電壓趨勢圖-低濃度(第 16 天, 1.047 V)	44
圖 7.7. 21 ZnAl LDH 之地下水 HC 污染 MFC 電壓趨勢圖-低濃度(第 18 天,1.363 V)	45



圖 7.7. 22 ZnAl LDH 之土壤 HC 污染 MFC 電壓趨勢圖-低濃度(第 18 天, 1.261 V)	45
圖 7.7. 23 MgAl LDH 之地下水 HC 污染 MFC 電壓趨勢圖-低濃度(第 6 天, 1.392 V)	46
圖 7.7. 24 MgAl LDH 之土壤 HC 污染 MFC 電壓趨勢圖-低濃度(第 20 天, 1.283 V)	46
圖 7.9. 1 NiAl LDH PFAS 地下水極化曲線	48
圖 7.9. 2 NiAl LDH PFAS 土壤極化曲線	48
圖 7.9. 3 ZnAl LDH PFAS 地下水極化曲線	49
圖 7.9. 4 ZnAl LDH PFAS 土壤極化曲線	49
圖 7.9. 5 MgAl LDH PFAS 地下水極化曲線	50
圖 7.9. 6 MgAl LDH PFAS 土壤極化曲線	50
圖 7.9. 7 NiAl LDH HC 地下水極化曲線-高濃度	51
圖 7.9. 8 NiAl LDH HC 土壤極化曲線-高濃度	51
圖 7.9. 9 ZnAl LDH HC 地下水極化曲線-高濃度	52
圖 7.9. 10 ZnAl LDH HC 土壤極化曲線-高濃度	52
圖 7.9. 11 MgAl LDH HC 地下水極化曲線-高濃度	53
圖 7.9. 12 MgAl LDH HC 土壤極化曲線-高濃度	53
圖 7.9. 13 NiAl LDH HC 地下水極化曲線-中濃度	54
圖 7.9. 14 NiAl LDH HC 土壤極化曲線-中濃度	54
圖 7.9. 15 ZnAl LDH HC 地下水極化曲線-中濃度	55
圖 7.9. 16 ZnAl LDH HC 土壤極化曲線-中濃度	55
圖 7.9. 17 MgAl LDH HC 地下水極化曲線-中濃度	56
圖 7.9. 18 MgAl LDH HC 土壤極化曲線-中濃度	56



圖 7.9. 19 NiAl LDH HC 地下水極化曲線-低濃度	57
圖 7.9. 20 NiAl LDH HC 土壤極化曲線-低濃度	57
圖 7.9. 21 ZnAl LDH HC 地下水極化曲線-低濃度	58
圖 7.9. 22 ZnAl LDH HC 土壤極化曲線-低濃度	58
圖 7.9. 23 MgAl LDH HC 地下水極化曲線-低濃度	59
圖 7.9. 24 MgAl LDH HC 土壤極化曲線-低濃度	59
圖 7.11. 1 碳氫化合物(HC)土壤降解後之濃度-高濃度	61
圖 7.11. 2 碳氫化合物(HC)地下水降解後之濃度-高濃度	61
圖 7.11. 3 碳氫化合物(HC)土壤降解後之濃度-中濃度	62
圖 7.11. 4 碳氫化合物(HC)地下水降解後之濃度-中濃度	62
圖 7.11. 5 碳氫化合物(HC)土壤降解後之濃度-低濃度	63
圖 7.11. 6 碳氫化合物(HC)地下水降解後之濃度-低濃度	63
圖 7.11. 7 有機氟化合物(PFAS)土壤降解後之濃度	64
圖 7.11. 8 有機氟化合物(PFAS)地下水降解後之濃度	64



表目錄

表 1 有機氟成分及其特性	3
表 2 實驗計畫目標及工作時程進度	9
表 3 實驗設備.....	11
表 4 碳氈規格與性質.....	12
表 5 碳氈電極元素含量表	12
表 6 MOF 與 LDH 之合成方式.....	13
表 7 MOF/LDH/AC-PVA@carbon foam 電極製備方法	14
表 8 土壤與地下水污染濃度配置	20
表 9 微生物燃料電池比例配置表	20
表 10 柑橘皮活性碳之元素分析	31
表 11 柑橘皮活性碳之比表面積分析.....	32



1. 前言

1.1 研究源起

隨著臺灣工業化和經濟發展，工商業活動對環境造成的影響急劇上升，造成水、空氣、廢棄物等污染，尤其是土壤和地下水污染(Chen *et al.*, 2020; Wu *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2020)。這種多方面的污染不僅威脅著環境，並危及生態系統平衡和人類健康安全。因此，受管制標準嚴格規範之土壤和地下水污染物，包括重金屬、單環和多環芳香烴、殺蟲劑和有機污染物(Chang *et al.*, 2018; Li & Zhang *et al.*, 2022)。本研究使用柑橘皮作為活性碳之生物質來源提供更多生物質製備之可行性，並著重於環境中普遍存在的有機氟化物（PFAS）和碳氫化合物（HC）污染之問題。

1.2 研究目的

1. 探討將層狀雙氫氧化物（LDH）結合碳氫製成 MOFs，並添加柑橘皮活性碳應用於極板製備。
2. 探討微生物燃料電池（MFC）對於有機氟化物（PFAS）與碳氫化合物（HC）之吸附去除能力及產電效益。
3. 探討將層狀雙氫氧化物（LDH）應用於提升微生物燃料電池的穩定性與性能。

隨著工業快速發展，全氟辛酸（Perfluorooctanoic acid, PFOA）和全氟辛烷磺酸（Perfluorooctane sulfonic acid, PFOS）等（Per/Poly fluoro alkyl substances, PFAS）及碳氫化合物（例如總石油烴和三氯乙烯）會滲透到土壤和地下水中。PFAS 以其持久性和穩定性聞名，其半衰期較長，會帶來嚴重的健康風險。攝取或接觸 PFAS 會對健康造成不良影響，包含發育問題、免疫系統破壞和潛在的致癌風險。同時，許多工業製程中普遍存在的碳氫化合物對人類健康和環境構成威脅，其影響範圍包括呼吸系統問題、土壤和水污染等。

傳統修復方法通常依賴物理和化學處理，而這樣的修復方式也遇到多種挑戰，包含地形變化、化學殘留和需考量更高的環境風險(Singh *et al.*, 2020)。為此，本研究開創了一種新方法，將微生物燃料電池（MFCs）與活性碳電極結合。活性碳來自於農業和都市生活廢棄物等有機物，提供了一個可持續而有效的解決方案 (Lehmann & Joseph, 2015)。當與 MFC 結合時，可作為去除 PFAS 和碳氫化合物污染物的催化劑，同時產生電力。活性碳和 MFCs 之間的協同作用不僅解決了污染問題，更符合綠色材料和可持續修復之循環經濟目標。

此外，本計畫設想從不同有機物製備生物炭，其中包含柑橘皮、菱角殼、稻殼、家禽和牲畜糞便、生熟廚餘、污泥和食物污泥 (Ahmad *et al.*, 2021)。本次通



過將活性碳添加到不同 MOFs 之極板中，進行實驗探討最佳化去除效能。本研究的創新之處在於結合微生物燃料電池（MFC）、活性碳和功能性金屬氧化物之可行方法，此方法可在污染減緩和能源生成方面取得潛勢效能（Li *et al.*, 2018）。該研究不僅在技術創新方面做出貢獻，並可在產業發展、國家科學研發和培養研究人才方面有所突破。

2. 文獻探討與分析

本研究深入探討臺灣農業、都市和工業有機廢棄物，研究將活性碳納入微生物燃料電池（MFC）以發電和去除土壤及地下水污染的潛力。相關的文獻回顧為了解有機廢棄物、活性碳性質及其在污染修復中的應用提供了堅實的基礎。以下介紹了一些關鍵文獻及其貢獻，這些文獻為本研究提供了理論基礎和實證支持，將有助於更深入地了解有機廢棄物處理、活性碳物化特性以及 MFC 應用於土壤和地下水污染去除之潛力。

2.1 PFAS 在土壤與地下水中的污染

有關土壤和地下水中的 PFAS 污染的文獻說明了與全氟烷基和聚全氟烷基物質（表 1）相關之環境問題。PFAS 包括超過 1400 種已識別之種類，特別是全氟辛酸（PFOA）和全氟辛烷磺酸（PFOS），對環境和人類健康構成重大威脅（Wang *et al.*, 2017）。該文獻回顧現有之研究，其研究重點在於亞洲地區（Wang *et al.*, 2020）。由於缺乏綜合性研究和資料整理，該文獻專門探討水體中 PFAS 之污染，包括地表水、飲用水和地下水（Suja *et al.*, 2019）。並討論 PFAS 研究的挑戰，其中包含理解其毒性、制定方針和解決空白數據（USEPA, 2016）。該文獻強調需要擴大研究範圍，探索 PFAS 作為干擾內分泌系統之化學物質及其對健康影響之衝擊（Butt *et al.*, 2019）。該文獻對實驗室分析之局限性及缺乏 PFAS 污染的研究進行分析（Jin *et al.*, 2021），本研究針對含氟離子污染物做為 PFAS 之定義污染物，並強調需要對土壤和地下水中吸附去除之 PFAS 污染提出解決方案，以保護該地區的環境品質和公共健康。

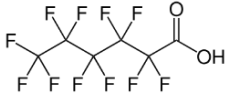
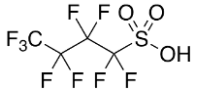
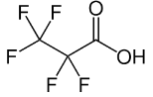
長鏈和短鏈的 PFAS（全氟和多氟烷基物質）在環境中所造成的影響有所不同，主要體現在它們的化學性質、環境持久性、毒性和去除難度上：

長鏈 PFAS 通常指的是含有較長碳鏈的化合物（如 PFOS、PFOA），它們在環境中更具穩定性，且不容易降解，這使得它們在土壤和水體中可持續存在較長時間。由於其較高的脂溶性，長鏈 PFAS 容易在生物體內積累，並且可能通過食物鏈傳遞，對人體和野生動物造成長期健康風險，如肝臟毒性、免疫系統損害以及內分泌干擾等。



短鏈 PFAS（如 PFBA、PFBS）則相對較短的碳鏈結構，它們在環境中較為穩定，但比長鏈 PFAS 的去除更容易，並且通常具有較低的生物累積性。儘管如此，短鏈 PFAS 仍具有一定的水溶性，並且由於其在水中的溶解度較高，可能會更容易擴散到水體中，造成較廣泛的污染。短鏈 PFAS 的毒性雖然通常較低，但在某些情況下仍可能對生物健康造成影響，特別是對水生生物或人類的肝臟和腎臟功能有潛在危害。

表 1 有機氟成分及其特性

Organofluorine Pollutants	Toxicity	Half-life	Solubility in Water (mg/L)
Perfluorooctanoic Acid (PFOA) (C₈F₁₇COOH) MW: 414.07 g/mol 	Carcinogenicity, Reproductive effects, and liver toxicity	Above 1year	1
Perfluorooctanesulfonic Acid (PFOS) (C₈F₁₇SO₃H) MW: 500.07 g/mol 	Developmental and reproductive effects, and liver toxicity	Above 1year	1
Perfluorohexanoic Acid (PFHxA) (C₆F₁₃COOH) MW: 438.06 g/mol 	Developmental and reproductive effects	Above 1year	5-10
Perfluorobutanesulfonic Acid (PFBS) (C₄F₉SO₃H) MW: 299.05 g/mol 	Acute level	Above 1year	100-500
Perfluoropropanoic Acid (PFPrA) (C₃F₇COOH) MW: 296.05 g/mol 	Developmental and reproductive effects	Above 1month	5-10



2.2 碳氫化合物在土壤與地下水中的污染

工業進步導致氯化烴（CHs）進入土壤和地下水的濃度增加，引起人們對環境污染議題的關切（Gong *et al.*, 2021）。這類污染物包括一系列多樣的物質，包括三氯乙烯（TCE）、多氯聯苯（PCBs）、雙對氯苯基三氯乙烷（DDT）、四氯乙烯（PCE）以及含氯揮發性有機化合物（Cl-VOC）。和氣狀污染物，如四氯化碳（ CCl_4 ）和氯仿（ CCl_3 ）（Shen *et al.*, 2022）。由於氯化烴不易分解及具有毒性，對人類造成嚴重威脅，會引起中樞神經系統紊亂、肝臟和腎臟損害及致癌風險（Ban *et al.*, 2019；國家環境衛生研究所，2006）。監管機構如美國環保署（USEPA）、歐盟和中國環保部（MEP）確認特定的氯化烴為優先污染物。例如，TCE 被美國環保署識別為危險污染物，其在飲用水中的含量有嚴格的限制標準（GB36600-2018；GB15618-2018）為解決土壤和地下水中之氯化烴，文獻特別強調在此領域進行研究開發的迫切性（國家環境衛生研究所，2006；GB36600-2018；GB15618-2018）。

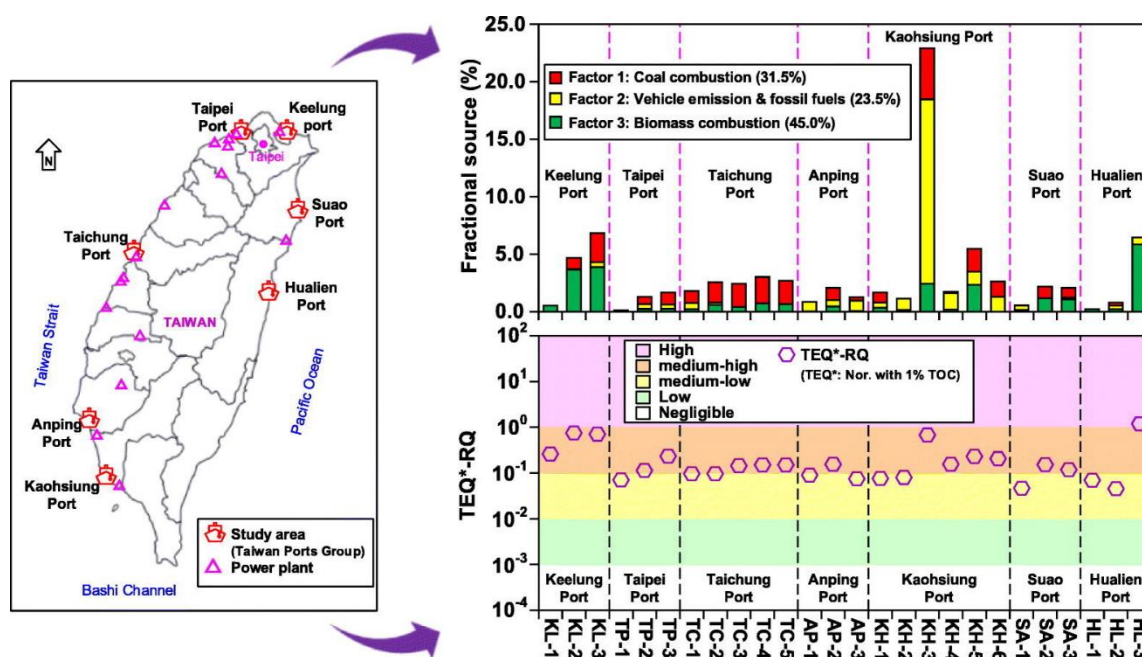


圖 2.2.1 正矩陣因子分解模型識別出的多環芳香烴（PAHs）來源輪廓，以及臺灣商業港口表層沉積物中的 PAHs 的 TEQ*-RQ 值和風險水平（Chih-Feng Chen 等，2020）。

陳志峰等人在 2020 年於臺灣商業港口進行的研究調查了表層底泥中的多環芳香烴（PAH）污染。利用正矩陣分解模型，研究確定了污染來源，並通過毒性當量商數（TEQ）值和風險商數（RQ）評估了風險。該研究的見解對於管理 PAH 污染並在港口環境中制定有效的修復策略至關重要。目前臺灣污染場址如圖 2-2.2 所示，圖中所示之場址主要為總石油碳氫化合物。

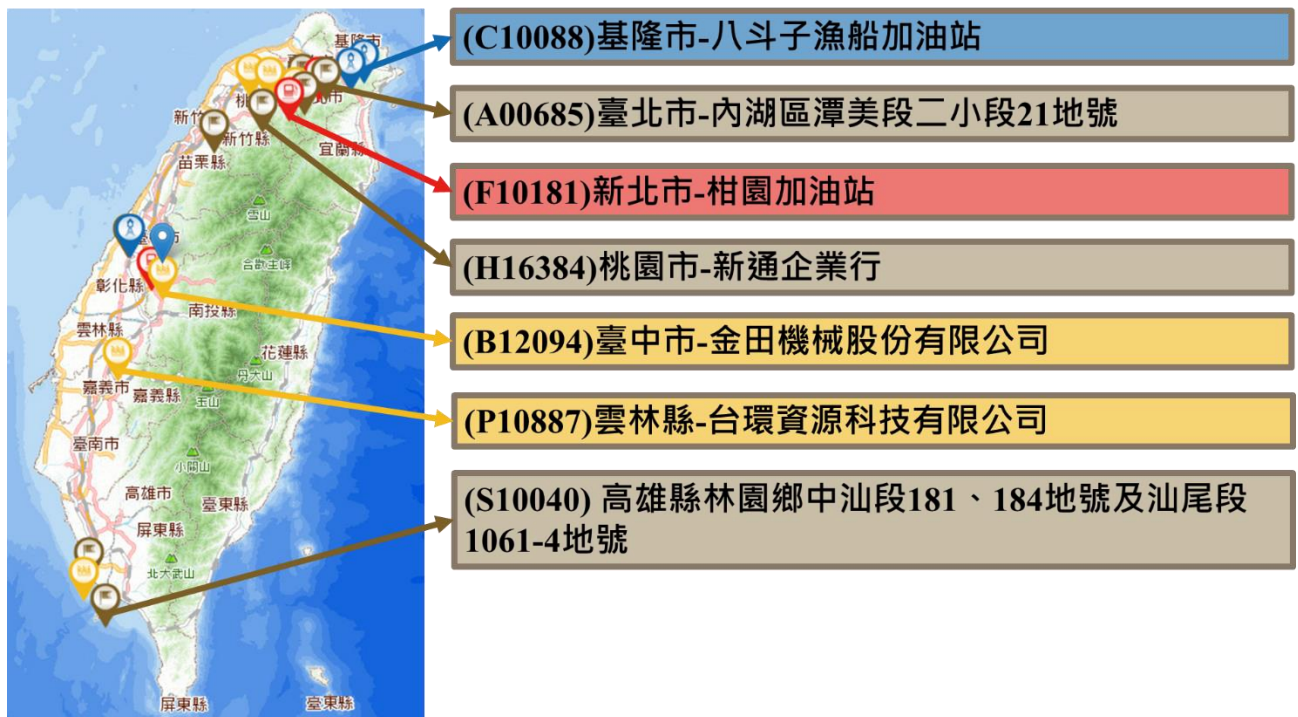


圖 2.2.2 臺灣土壤地下水污染場址(資料來源:土壤及地下水污染整治網)

2.3 廢棄物生物質衍生之生物炭

豐富的農業廢棄物生物質 (AWB)，包括來自各種農業活動的殘渣和諸如糞肥之類的副產品，為可持續資源利用提供了重要機會 (Smith *et al.*, 2020)。這種廢棄物包括植物材料，如秸稈、葉子和外殼，以及加工副產品，如稻殼和水果皮，整年都在不斷生成 (Jones & Brown, 2018)。然而，AWB 往往面臨著被低效率利用和處置不當之情況，這對環境造成了影響。AWB 的化學組成包括纖維素、半纖維素和木質素聚合物，具有可觀的能源和材料潛力 (Johnson, 2019)。為了解決這個問題，迫切需要探索可持續的途徑來回收和重複使用 AWB，尤其是聚焦於能源轉換 (Miller & White, 2021)。從 AWB 中回收能源不僅能應對環境問題，還符合全球轉向可再生資源的趨勢，有助於發展中國家的經濟發展，並強調生物能源在促進可持續性和應對能源危機方面的關鍵作用 (Brown *et al.*, 2022)。

2.4 微生物燃料電池之金屬功能化活性碳電極

由廢棄生物質製成之活性碳在微生物燃料電池 (MFC) 應用中引起了顯著的關注，因為它是通過熱化學轉換製成的碳豐富物質 (Smith *et al.*, 2019)。這篇綜述探討了活性碳在 MFC 系統中的多面角色，強調因低成本、高比表面積和多孔結構等特性而提升其性能 (Brown *et al.*, 2020)。作為有效的電極或催化劑，活性



碳在 MFC 中既有助於發電，又可應用於污染物的處理 (Miller *et al.*, 2021)。該文獻指出調查不同類型活性碳功率輸出之變化，詳細介紹活性碳在 MFC 系統之應用，並分析活性碳應用於 MFC 中更廣泛之環境和經濟影響 (White *et al.*, 2022)。此文獻旨在了解使用活性碳增強 MFC 性能，提供具有更高效及成本效益活性碳材料之見解 (Jones *et al.*, 2023)。該文獻將活性碳定位為可持續發展的途徑，並在 MFC 系統下可面對能源、環境和經濟的需求與挑戰。

2.5 垂直與水平微生物燃料電池復育

本研究著重於最佳化微生物燃料電池 (MFC) 的配置，考慮了垂直和水平兩種設計 (Anderson *et al.*, 2020)。通常在土壤 MFC 中，陰極電極水平放置在土壤表面，由於土壤含水量的原因，維持穩定的空氣接觸存在挑戰 (Smith *et al.*, 2019)。為了解決這個問題，研究提出更實用之設置，將電極垂直於地面，確保空氣接觸 (Brown *et al.*, 2020)。此外，研究探討了陰極電極性能的增強，並闡明與空氣接觸之電極面積 (Miller *et al.*, 2021)。水平 MFC 為有機污染物在陽極室中被微生物氧化成電子與質子，電子透過外部電阻移動而質子透過質子交換膜移動至陰極室與氧氣結合形成 H_2O (White *et al.*, 2022)。雖然 MFC 在廢水處理、能量回收、氮去除和污泥減量方面表現出潛力，但於實際應用層面上仍然困難 (Jones *et al.*, 2023)。各種具有想像及創新的 MFC 配置已被開發，但可擴展性仍然是一個挑戰。文獻強調了對更大規模模塊的需求，和討論 MFC 效率提升，並說明在實際 MFC 應用中需要立方級模塊的必要性 (Gupta *et al.*, 2023)。

2.6 土壤與地下水中污染之微生物燃料電池復育

微生物燃料電池(MFC)技術提供了一種有前景的解決方案，可以在修復土壤和地下水污染的同時發電 (Rabaey *et al.*, 2007)。MFC 的潛力擴展到對應全球性挑戰，如氣候變化、水資源短缺、能源需求和土地危機 (Logan *et al.*, 2006)。MFC 由陰極、陽極、質子交換膜和外部電路組成，利用高效能的微生物來降解和礦化各種污染物 (Guerrini *et al.*, 2019)。具體而言，某些細菌充當生物催化劑，將有機和無機物氧化為 CO_2 ，並在陽極產生電子及質子 (Rabaey *et al.*, 2007)。在無氧條件下，這些電子流動產生電流，其中包括電活性細菌或各種運輸體和奈米線的直接和間接機制 (Logan *et al.*, 2006)。此創新技術在污染物修復方面具有相當之潛力，並提供可持續之解決方案，更具有發電效益。



2.7 層狀雙氫氧化物 (LDH)

層狀雙氫氧化物(layered double hydroxides; LDH)，是一種層狀無機材料，其表面帶有正電性，層狀結構主體中具有可交換的陰離子，具備離子交換的特性，因此可應用作為污染物吸附劑 (Zhao *et al.*, 2021)。LDH 具有許多出色特點：易於表面修飾、可調節電荷、可控的層間距、良好的催化效能、陰離子交換酸鹼和熱穩定性(Chen *et al.*, 2022)。

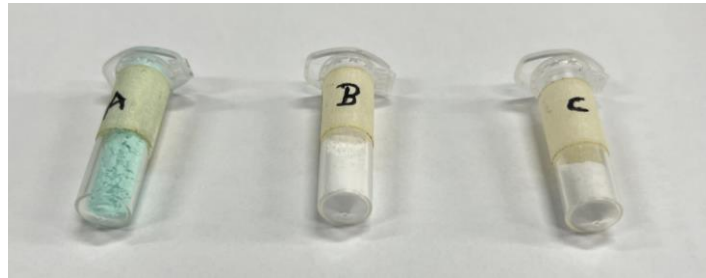


圖 2.7.1 A (NiAl LDH)、B (ZnAl LDH)、C (MgAl LDH)

2.8 金屬有機框架 (MOFs)

金屬有機框架 (MOFs) 通常由金屬離子 (如鋁、鎳、鋅等) 與有機配體 (如氨官能基、羧基官能基、醇基官能基) 組成 (韋汶言, 2020)。碳氈表面含有羧基官能基 (Fang *et al.*, 2016)，將表面披覆含有金屬離子材料，使電極改質 (改變材料的特性並提高性能及功率) 作為金屬有機框架 (MOFs) (歐昀庭, 2024)。

1. 碳氈可以與金屬有機框架結構結合，形成新的材料組合。
2. MOFs 複合材料可以作為 MFC 陽極極版的材料。
3. 可以降低活化內阻和膜阻抗。
4. 從而加速電子轉移和系統的導電性，從而提高 MFC 的性能。(陳俊峰, 2023)

2.9 厭氧細菌

一般微生物可生存的 pH 值為 3 ~ 10，嗜氧性細菌可生存的 ORP 值為 +200~+800 mV，厭氧性細菌則為 -700~+100 mV (毫伏) 之間 ORP 值在 -700 mV 至 +800 mV 之間 (黃鈺茹、許順堯、黃登福, 2008)。厭氧菌適合生長溫度介於 20-43 °C，為常溫菌，若操作溫度超過 45 °C，活性將迅速下降 (Dosta *et al.*, 2008)。由於厭氧菌的生長世代周期較長，使得該程序與其他生物處理程序相比較難執行，故厭氧細菌程序操作溫度應盡量在中溫 (30-35 °C) 進行 (蓋書慧, 2009)。



3. 研究規劃

此研究計劃旨在將不同種類的廢棄物轉化為活性碳，使用如柑橘皮、菱角殼和污泥等材料。同時，探討使用微生物燃料電池來處理受污染的土壤並於處理過程發電，專注於土壤和地下水污染問題的生態友善解決方案（表 2）。

- I. 調查農業、都市和工業有機廢棄物轉化為活性碳的過程。
- II. 選用菱角殼、稻殼、柑橘皮、家禽和牲畜糞便、生熟廚餘、污泥和食品污泥。
- III. 將微生物燃料電池（MFC）整合到受 PFAS 和碳氫化合物污染的土壤中，觀察去除效率和發電（圖 3.1）。
- IV. 目標土壤污染物：碳氫化合物、有機氟化合物。
- V. 利用受污染站附近的未受污染土壤，在 MFC 實驗中配置不同的 PFAS、碳氫化合物和重金屬濃度。
- VI. 進行一年期研究，將 MFC 與活性碳結合，使用活性碳和石墨碳氈來修復受 PFAS 和碳氫化合物污染的土壤和地下水。
- VII. 在受污染場址附近的未受污染土壤中進行實驗，在 MFC 實驗中改變碳氫化合物及 PFAS 之濃度。
- VIII. 解決當前土壤和地下水污染中的挑戰，揭示物理和化學處理的限制和風險。
- IX. 呈現使用 MFC 修復環境之優勢及其去除與吸附污染物並同時發電。
- X. 提供詳細的研究方法和實驗步驟。
- XI. 說明土壤和地下水修復中使用環保解決方法的必要性。
- XII. 了解活性碳和 MFC 作為土壤與地下水污染處理的可持續技術之潛力。

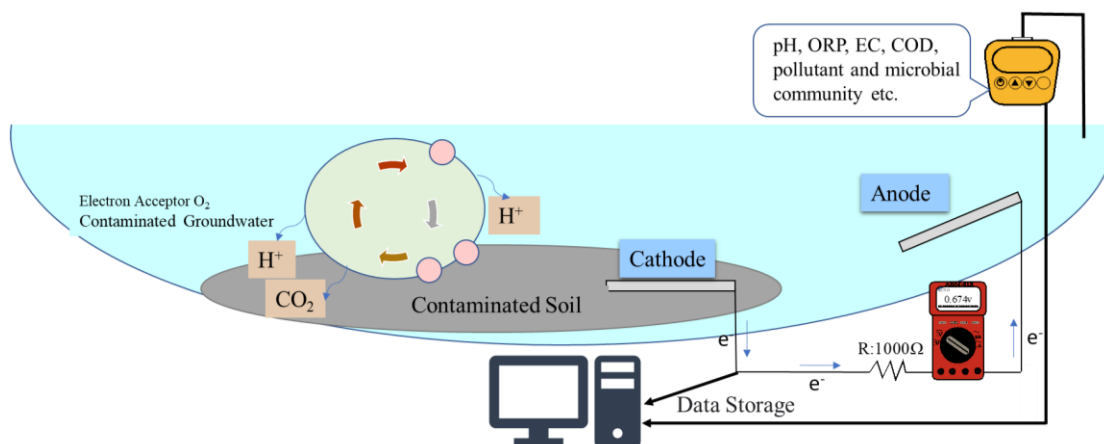


圖 3.1.1 臺灣受污染的土壤中之 MFC 利用模型



表 2 實驗計畫目標及工作時程進度

Month	Objective	Tasks and Milestones	Characterization Name	Instrument Name
1-2	Biomass Preparation	Collect diverse biomass sources Dry at 105°C for 24 hrs Crush to <1 mm using RT-N12SFSC crusher Compost kitchen waste Anaerobic digestion for manure, sludge Analyze biomass characteristics	Moisture Content, Ash Content, Volatile Content, Calorific Value	Balance, Oven, RT-N12SFSC Crusher
2-4	Porous Biochar Preparation	- Pretreat biomass: clean, wash, dry, Weigh and mix with KOH, Heat at controlled rates (0-100°C/min) to 250, 500, 750°C Dry activated biochar for later use Characterize biochar: EA, FE-SEM, FTIR, XRD, ICP-OES, BET, etc.	Elemental Analysis, Morphology, Functional groups, Crystallinity, Inorganic elements, Surface area	EA Instrument, FE-SEM, FTIR, XRD, IC, BET Instrument, PetroFLAG
5-7	LDH and MOF Synthesis	Synthesize UiO-66, MIL-100, HKUST-1, Mg-Al LDH, Zn-Al LDH, Fe-Cr LDH Characterize each material and write synthesis methods and optimizing parameters	Crystallinity, functional groups, purity, morphology, Surface area.	XRD, FTIR, SEM, BET
8-9	Electrode Fabrication	- Combine activated porous carbon, LDHs, MOFs in optimized ratios Prepare PVA solution in NMP Apply composite onto carbon foam using doctor-blading Dry and solidify at optimized conditions Compress and activate PVA	Composite Formation, Polyvinyl alcohol, PVA Preparation, Electrode Coating, Drying and Solidification, Electrode Compression and Formation,	MFC Lab Setup, Doctor-blading Equipment, Oven, Compression Tool, Thermal Treatment Setup



			PVA Activation and Polymerization	
10-11	Nanomaterial Characterization	Analyze elemental composition and microstructure using EA and FE-SEM Investigate chemical bonds with FTIR Examine crystalline arrangements with XRD Assess porosity through BET analysis Utilize ICP-OES for metallic component quantification	Elemental Analysis, Morphology, Functional groups, Crystallinity, Surface area, Inorganic elements.	EA Instrument, FE-SEM, FTIR, XRD Instrument, BET Instrument, ICP-OES Instrument

4. 研究方法

4.1 生物質之準備

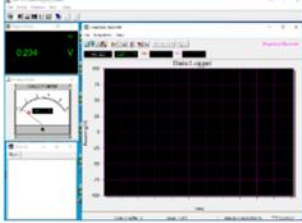
常見之生物質，包括菱角殼、柑橘皮、稻殼、家禽和牲畜糞便、生熟廚餘、污水污泥和食品污泥，本次實驗選用柑橘皮作為生物質。首先，將收集之生物質在 105 °C 的溫度下乾燥 24 小時，以降低水分含量。

隨後，使用乾基破碎機（RT-N12SFSC）將其破碎至小於 1mm。對柑橘皮進行厭氧消化，溫度在 35 °C 到 55 °C 之間。並對生物質進行特性分析，水分含量平均為 10%，灰分含量為 15%，揮發分含量約為 70%，熱值約為 20 MJ/kg。此過程為生產符合特定需求的生物質，同時考慮了其利用效率和環境因子。

4.2 多孔活性碳的製備

生物質來源，以往已使用過菱角殼、稻殼、牲畜糞便，本次實驗使用柑橘皮製備活性碳。在此過程中，首先是生物質預處理目的是為了清除表面油質及灰塵，收集之材料使用去離子水初步清洗，然後在 105 °C 烘箱放置 24 小時以獲得乾基材料。在初步處理後，為生物質準備活化混合物。將量測之乾燥的生物質 200 g，加入 0.1 莫耳（5 g）氫氧化鉀（KOH）活化劑與 100 mL 去離子水調配製成。根據每種材料來源的獨特特性，調整 KOH 與生物質之比例。此步驟奠定了活化過程的基礎，並增強活性碳的多孔結構和吸附能力。隨後，活化過程為將生物質+KOH 混合物以升溫速率（0-100 °C/min）加熱至 750 °，製成活性碳。

表 3 實驗設備

實驗設備及軟體			
			
pH、ORP、EC Meter	萬用電表	電阻控制器	監測軟體
			
排水集氣法	電子天秤	烘箱	高溫爐

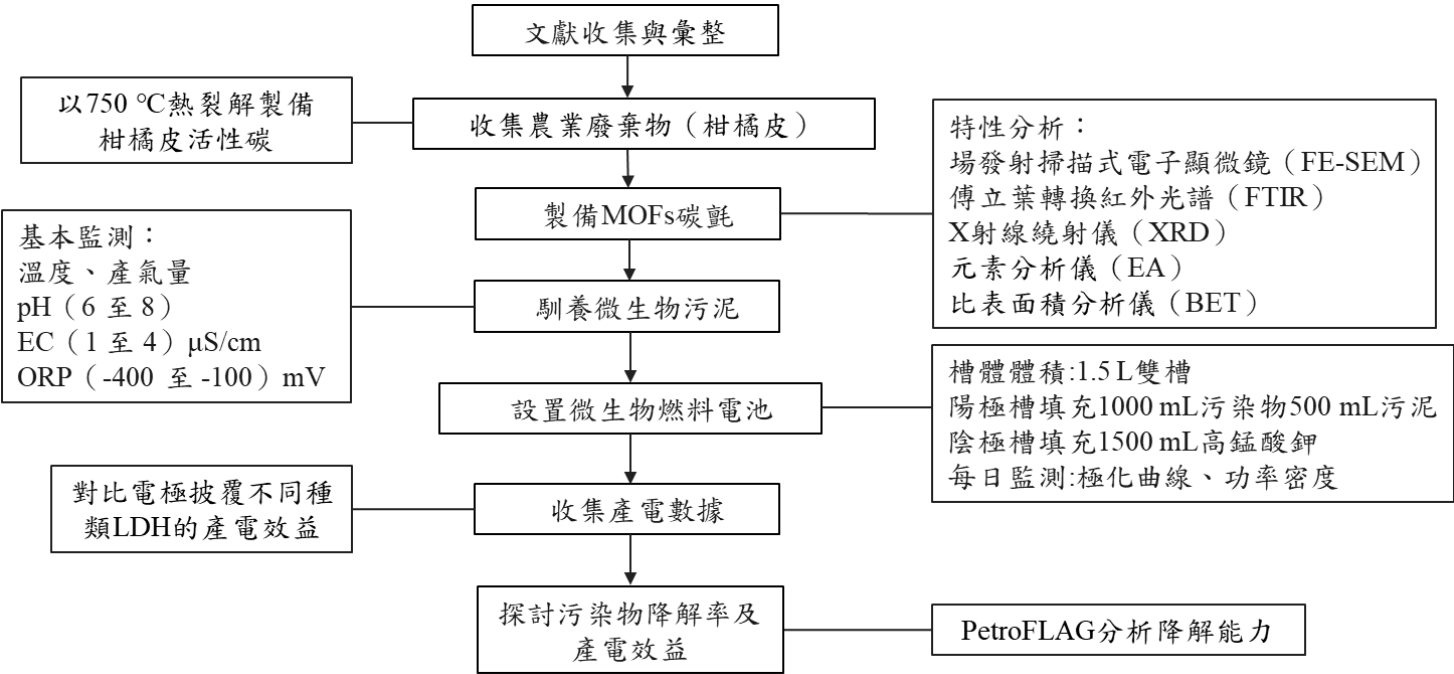


圖 4.2.1 實驗流程圖

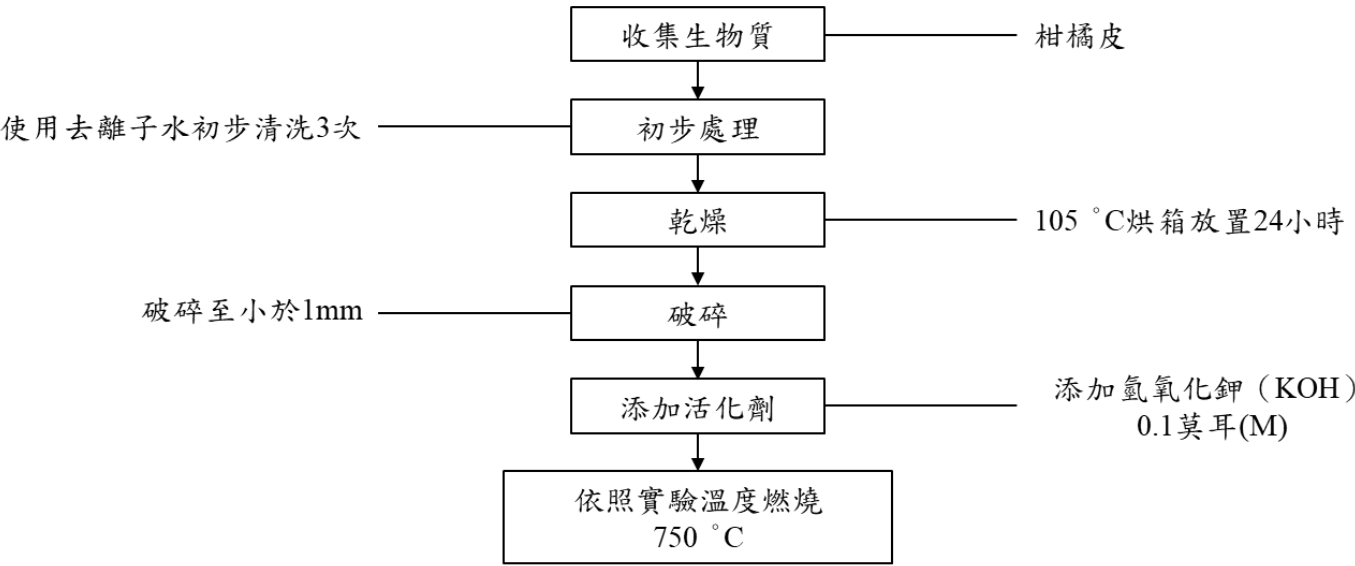


圖 4.2. 2 活性碳製備流程圖

表 4 碳氈規格與性質

電極種類	圖示	尺寸及來源	基本性質	
碳氈		碳能科技 8cm×1cm×6 cm	表面電阻	2.4Ω
			纖維直徑	9μm
			密度	0.085 g cm ⁻³
			碳含量	88-92 %
			熱傳導係數 W m ⁻¹ × k	0.06-0.08

表 5 碳氈電極元素含量表

電極	含量 %
碳 (C)	91.83%
氮 (N)	0.76%
氧 (O)	7.41%
總量	100.00%

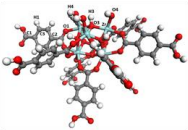
4.3 LDH 和 MOFs 的合成

將生物炭與先進材料結合來改善環境污染，將專注於三種 MOFs 和三種 LDH（表 6）。表 3 概述了製備和測試實驗生物碳複合材料並探索污染物去除之潛力。

表 6 MOF 與 LDH 之合成方式

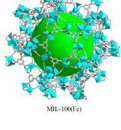
Material	Synthesis Method	Biochar Incorporation Method	Temp. (°C)	Duration	Characterization
UiO-66 (Ediati <i>et al.</i> , 2019)	Solvothermal	Dry Mixing	500	6 hours	XRD, FTIR, SEM, BET, Elemental analysis
MIL-100 (Simon <i>et al.</i> , 2019)	Hydrothermal	Co-pyrolisis	700	8 hours	
HKUST-1 (Lestari <i>et al.</i> , 2016)	Solvothermal	Impregnation	600	5 hours	
Mg-Al LDH (Sriram <i>et al.</i> , 2020)	Coprecipitation	Wet Mixing	Room Temp	24 hours	XRD, FTIR, TEM, Elemental Analysis
Zn-Al LDH (Abderrazek <i>et al.</i> , 2016)	Hydrothermal	Dry Ball Milling	400	12 hours	
Fe-Cr LDH (Bahrami <i>et al.</i> , 2022)	Coprecipitation	Wet Impregnation	300	10 hours	

UiO-66



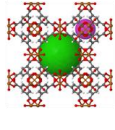
$C_{48}H_{28}O_{32}Zr_6$

MIL-100



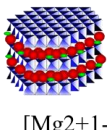
$Fe_{30}(H_2O)_2OH(BTC)_2$

HKUST-1



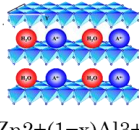
$C_{18}H_6Cu_3O_{12}$

Mg-Al LDH



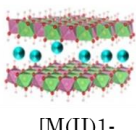
$[Mg_{2+}1-xAl^{3+}_3+x(OH)_2]^{x+}(Am^-)_{x/m} \cdot nH_2O$

Zn-Al LDH



$[Zn_{2+}(1-x)Al^{3+}_3+x(OH)_2]^{x+}(CO_3^{2-})_x/2 \cdot yH_2O$

Fe-Cr LDH



$[M(II)1-xM(III)_x(OH)_2]^{x+}[An^-]_{x/n} \cdot mH_2O$

4.4 碳氈電極材料

在電極製作過程中，多孔活性碳、金屬有機骨架（MOFs）和層狀雙氫氧化物（LDH）根據實驗優化的預定比例精心結合（表 7）。這種混合旨在實現均勻混合，這是提高複合材料整體性能的關鍵因素。同時製備了 PVA 聚合物溶液，確保達到後續電極製作的最佳黏著度。隨後的步驟涉及使用塗覆技術，如刮刀塗佈或旋轉塗佈，將這種複合混合物應用於碳泡沫基材上。這個細緻的過程確保了複合材料的均勻分佈，並著重於量化塗層層的厚度以保持一致性。隨後，塗層基材在



爐中經歷乾燥和固化。通過最佳化乾燥時間和溫度，並行電極壓縮，對碳泡沫基材上的複合材料進行製備，以了解所需的電流密度，並增強複合材料的微生物附著和緊密性。最後，通過對複合塗層碳泡沫進行控制條件之熱處理 PVA 活化和聚合，確保溫度和去除期程等參數得到最佳化（Kothandam *et al.*, 2023）。

表 7 MOF/LDH/AC-PVA@carbon foam 電極製備方法

Process Stage	Method/Parameter	Optimizing Parameters
Composite Formation	Mixing activated porous carbon, MOFs, and LDHs	Ratios based on experimental optimization (e.g., 1:1:1 by weight)
PVA Polymer Solution Preparation	Dissolving PVA	PVA concentration is 15% for optimal viscosity
Electrode Coating	Application on carbon foam substrate	Doctor-blading method with a uniform layer thickness of 100 μm
Drying and Solidification	Oven drying at controlled temperature	Dry at 80°C for 4 hours to evaporate the solvent and solidify the composite
Electrode Compression	Applying pressure for adhesion and density	Apply a pressure of 5 MPa for enhanced adhesion and density
PVA Activation and Polymerization	Controlled thermal treatment	Heat at 150°C for 2 hours to activate and polymerize PVA

4.5 奈米材料表徵

在此研究中，對材料進行特性分析。包括元素分析儀以及場發射電子顯微鏡（FE-SEM）在內的全面分析揭示了活性多孔碳、MOFs、LDHs 的複雜結構。利用傅立葉變換紅外光譜（FTIR），我們深入研究了化學鍵，而 X 射線繞射分析（XRD）揭示了結晶排列，而元素分析儀（EA）有助於確定元素組成，BET 表面積分析可了解材料之孔隙度。



4.6 MOFs 碳氈電極製備

在本實驗中，我們使用聚乙烯醇(PVA)與超純水製備聚合物溶液，具體操作流程如下：稱取 300 mg 的聚乙烯醇，並將其溶解於 100 mL 的超純水中，隨後在磁石攪拌器的幫助下進行加熱與攪拌。將溫度設定為 80°C，持續攪拌 2 小時，直到溶液表面呈現黏稠狀態，最終成功製備出均勻的 PVA 聚合物溶液。此製備過程通過適當的加熱與攪拌，確保 PVA 能夠完全溶解並形成穩定的聚合物溶液。

聚乙烯醇(PVA)是一種水溶性聚合物，廣泛應用於生物醫學、藥物傳遞系統和環保材料等領域。PVA 的溶解性能受溫度影響顯著，在較高溫度下，PVA 鏈段的運動性增加，使其更易於水中溶解。根據文獻得知 PVA 的完全溶解溫度通常在 80°C 至 90°C 之間，因此本次實驗選擇在 80°C 下加熱攪拌，這有助於提高聚合物鏈段的水合速率，最終形成穩定的聚合物溶液。此外，磁石攪拌器的使用可以確保溶液中的 PVA 均勻分散，避免聚合物團聚現象的發生，從而提高溶液的均勻性和穩定性。

該製備過程中的溫度和攪拌時間是影響 PVA 溶液性質的關鍵因素。過低的溫度或過短的攪拌時間會導致 PVA 無法完全溶解，從而影響最終溶液的均勻性與穩定性，適當的加熱與攪拌，從而製備出具有良好溶液性質的 PVA 聚合物溶液。

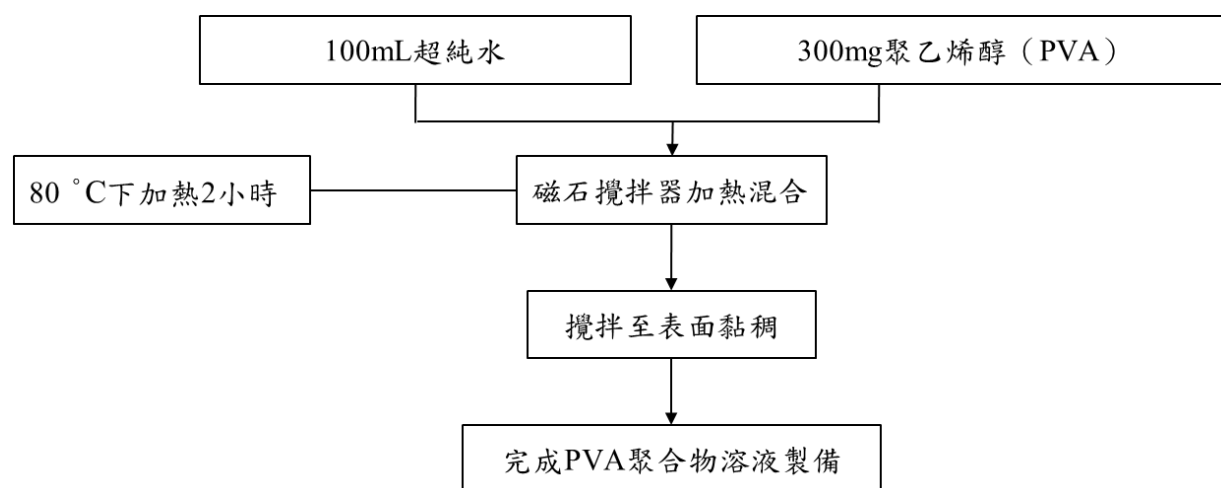


圖 4.6. 1 PVA 聚合物溶液製備流程圖

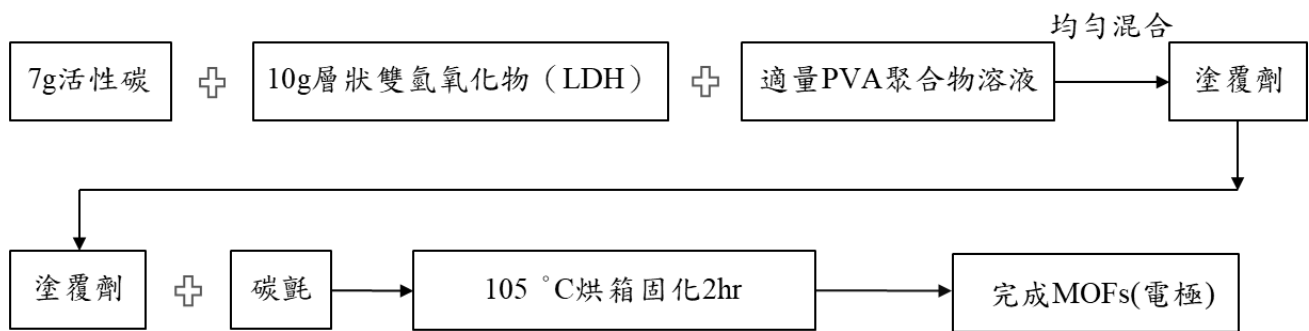


圖 4.6.2 電極製備流程圖

4.7 污泥微生物馴養

材料: 透明塑膠容器(6000cc)、塑膠軟管、軟木塞、污泥、合成垃圾

合成垃圾配比: A4 紙 18g、報紙 18g、紙箱 21g、940mL 去離子水

污泥樣品取至福田水資源回收中心，與合成垃圾進行混合，做為微生物之養份來源，以合成垃圾作為馴養菌種之基質，藉由長時間以合成垃圾為碳源之馴化方式，培養出具可分解合成垃圾之厭氧混合菌種 (Khuthadzo *et al.*, 2022)。並填充至容器中，使用軟木塞封口，以軟管連接置產氣瓶中，方便記錄產氣量，將其放置控溫箱保存 (溫度控制在 35 上下)。總計有 8 桶的污泥樣品。

5. 樣品製備

5.1 PFAS 溶液製備

PFAS 溶液是通過在 1000 mL 超純水中溶解以量取之實驗室現有之有機氟化物樣品 (PFAS) 進行製備，包括 20 mg 的全氟庚酸 (Perfluoroheptanoic acid, PFHpA) ($C_7HF_{13}O_2$)、20 mg 的全氟庚酸胺 (Perfluoroheptanoate ammonium, PFH ammonium) ($C_7H_4F_{13}NO_2$)、20 mg 的全氟己酸 (Perfluorohexanoic acid, PFHxA) ($C_6HF_{11}O_2$)、20 mg 的全氟丁酸 (Perfluorobutanoic acid, PFBA) ($C_4HF_7O_2$) 使用磁石攪拌器混合 30 分鐘，確保均勻分佈，完成溶液製備後進行 IC 檢測確認溶液為實驗所需濃度。

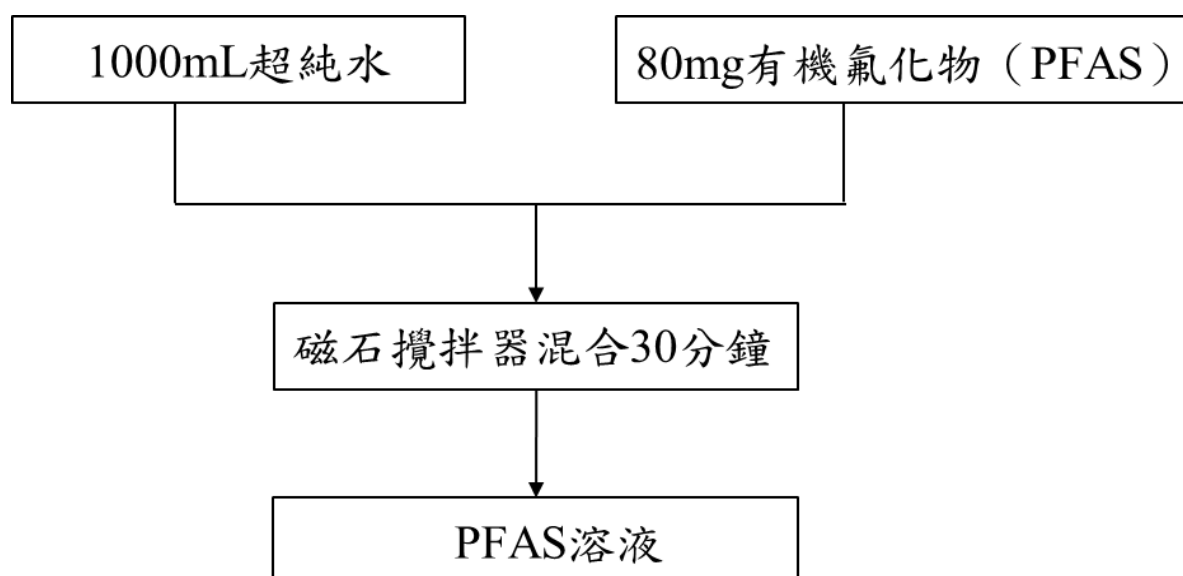


圖 5.1. 1 PFAS 溶液製備流程圖

5.2 碳氫化合物 (HC) 溶液製備

碳氫化合物溶液是將 1000mL 超純水與依照實驗濃度進行調整的碳氫化合物 (HC) 和 12 mg 的三氯乙烯。將溶液在震盪器上震盪 45 分鐘，以達到均勻性，完成製備 HC 溶液後使用 PetroFlag 儀器，確認樣品為實驗所需濃度。

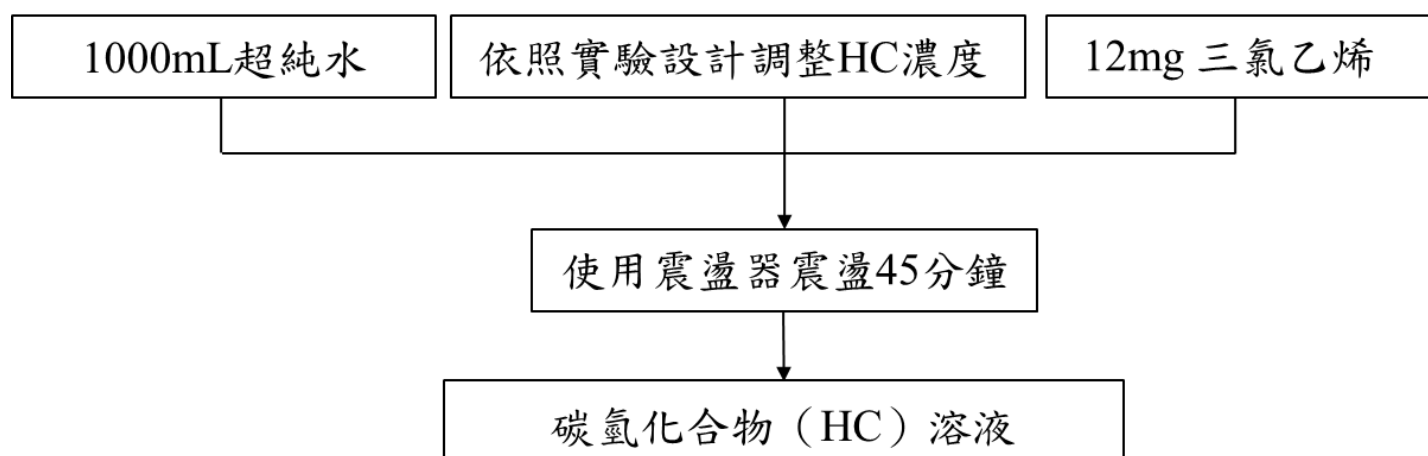


圖 5.2. 1 碳氫化合物 (HC) 溶液製備流程圖



6. 微生物燃料電池（MFC）實驗設置

利用微生物燃料電池（MFC）技術進行土壤和地下水污染物去除。第一個模型（圖 6-3.1）採用水平的固-固雙層配置，強調在固體物的污染物降解和電力生成。第二個模型（圖 6-3.2）引入了一個固-液相雙層系統，針對固體和液體兩相中的污染物，以提高整體 MFC 處理污染物之效率。第三個模型（圖 6-3.3），垂直結構的設計能夠提升供氧效率，同時最大化微生物附著面積，提高微生物降解有機物的效率。提升注重對多樣環境條件的通用性和可擴展性。通過嚴格的定量評估，包括污染物去除效率、微生物活動和電力生成，這些模型旨在優化性能。創新之處在於它們的適應性，可在環境修復方面取得顯著進展。預期結果可了解污染物的去除，並提供專利申請及學術期刊發表。

6.1 實驗參數

利用水平雙槽和垂直雙槽 MFC 的混合系統，實驗設置側重於使用塗覆碳氈之活性碳極板去除吸附 PFAS、總石油烴等污染物。主要的實驗參數包括最佳化電極配置、活性碳比例和基質濃度。研究涵蓋有機廢物類型的變化，探討其對 MFC 性能和污染物去除效率的影響。測量電極電位、電流密度和功率輸出，以評估電力生成效率。

實驗使用雙槽微生物燃料電池，工作體積 1.5 L (10 × 10 × 18 公分)。微生物燃料電池之陽極與陰極極板以鐵夾和銅線連接，並連接一外接電阻(1000 Ω)與三用電錶(ABM 817A)。電壓(Voltage, V)與電流(Current, I)以三用電錶進行量測，並以電壓監測軟體(BRUA-85Xa, Bs-Software)紀錄資料。

微生物燃料電池試驗以雙槽工作體積，極板混搭配置碳氈、燒結自製活性碳如：柑橘皮、菱角殼、生廚餘與熟廚餘等極板(8cm*6cm)，質子交換膜採用(DuPont™, Nafion117)，厚度為 183μm。陰極槽置入高錳酸鉀(0.2mg/L)電子接受者。

於反應槽 35±2°C之恆溫箱中，陽極槽配置不同濃度有機氟化合物與總碳氮化合物於乾淨之土壤與地下水各 1000 mL 進行混合，如表 8 所示。並加入馴養污泥 500 g，及 7 g 生物炭，以不同配置進行實驗比較分析，農業廢棄物活性碳與 LDH（層狀雙金屬氫氧化物）及 MOFs（金屬有機骨架）等添加之微生物燃料電池並探討其去除污染與產電之效能。擬添加利用金屬氧化物為

MgAl LDH： $\text{Mg}_2\text{Al}(\text{OH})_6(\text{CO}_3)_{0.5} \cdot n\text{H}_2\text{O}$

ZnAl LDH： $\text{Zn}_{1-x}\text{Al}_x(\text{OH})_2(\text{CO}_3)_x \cdot n\text{H}_2\text{O}$

NiAl LDH： $\text{Ni}_{1-x-y}\text{Al}_x(\text{OH})_2(\text{CO}_3)_{x/2} \cdot n\text{H}_2\text{O}$



每日監測酸鹼值(pH)、氧化還原電位(ORP)、導電度(EC)等，紀錄每日電壓與功率密度並進行極化曲線繪製。

功率密度繪製以電阻調整器調整外接電阻，逐步由 3000 k Ω 調整到 1 Ω ，將其對應之電流與電壓加以紀錄（第 7 天與第 14 天測試兩次），以繪製極化曲線。將每一控制調整電阻對應之電流與電壓相乘，即可獲得電功率，再除以極板面積，即可獲得功率密度(mW/m^2)。將已獲得之各對應電壓、電流密度與功率密度，再加以繪製極化曲線(X 橫軸為電流密度，Y 兩縱軸為電壓與功率密度)。由極化曲線，可獲得各種極板配置之微生物燃料電池操作效能。

進行電化學分析，繪製伏安圖與奈奎斯特圖並進行比較分析及探討碳氫化合物與有機氟化合物污染之去除效率。

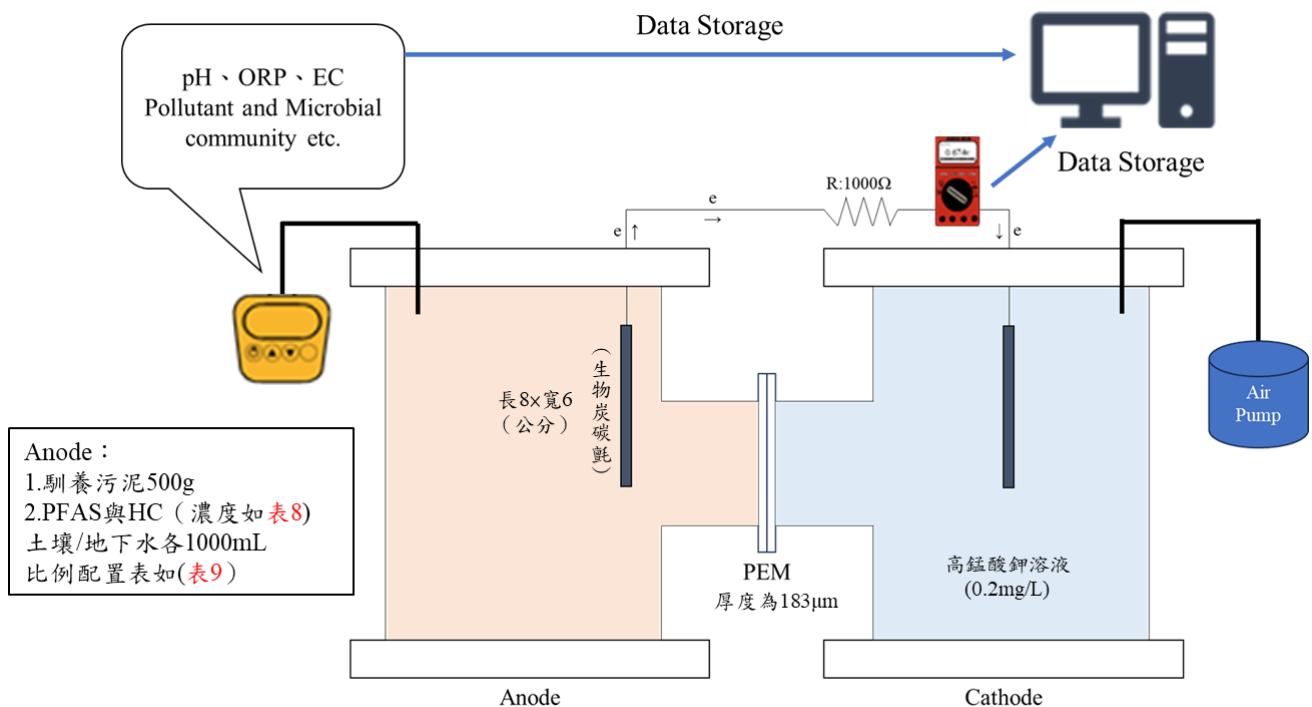


圖 6.1.1 位於 $35\pm 2^\circ\text{C}$ 恆溫箱中之燃料電池模型

6.2 分析儀器

實驗分析使用一套分析儀器來表徵 MFC 的性能並闡明污染物去除效率。使用標準探針測量 pH、氧化還原電位和電導率等參數。通過 PetroFLAG 檢測碳氫化合物及透過 IC 分析有機氟化合物等方法定量污染物濃度。此方法可確保 MFC 系統在污染物去除和電力生成方面的性能有透徹的了解。



本實驗使用儀器包括元素分析儀 EA、比表面積分析儀 BET、FTIR、XRD、FE-SEM、PetroFLAG、IC 等。

6.3 實驗濃度

本實驗所用之污染濃度，如表 8 所示。依據國家相關標準，以低、中、高污染濃度實驗。

表 8 土壤與地下水污染濃度配置

	地下水			土壤		
	濃度(mg/L)			濃度(mg/kg)		
總石油碳氫化合物	3	10	100	1000	10000	100000
有機氟化合物	80			80		

表 9 微生物燃料電池比例配置表

陽極			陰極	
接種物	活性碳添加	極板	電子接受者	極板
馴養污泥500g + 污染土1000g	柑橘皮活性碳4g	MOFs 碳氈	高錳酸鉀0.2g/L	碳氈
馴養污泥500g + 污染水1000mL				

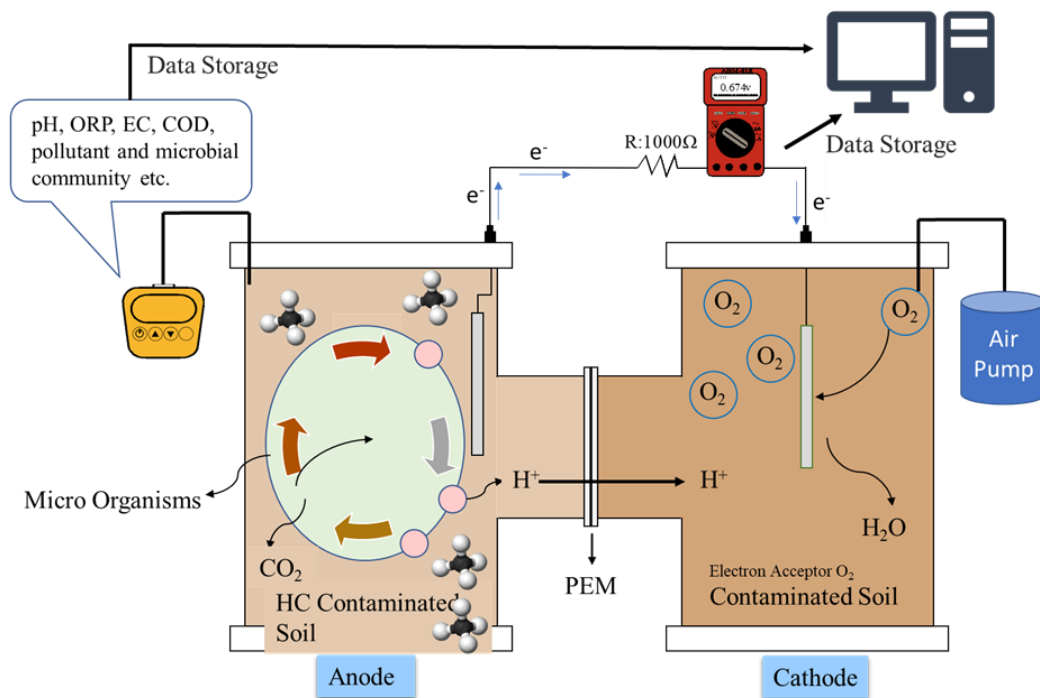


圖 6.3. 1 固相雙層水平 MFC 設計

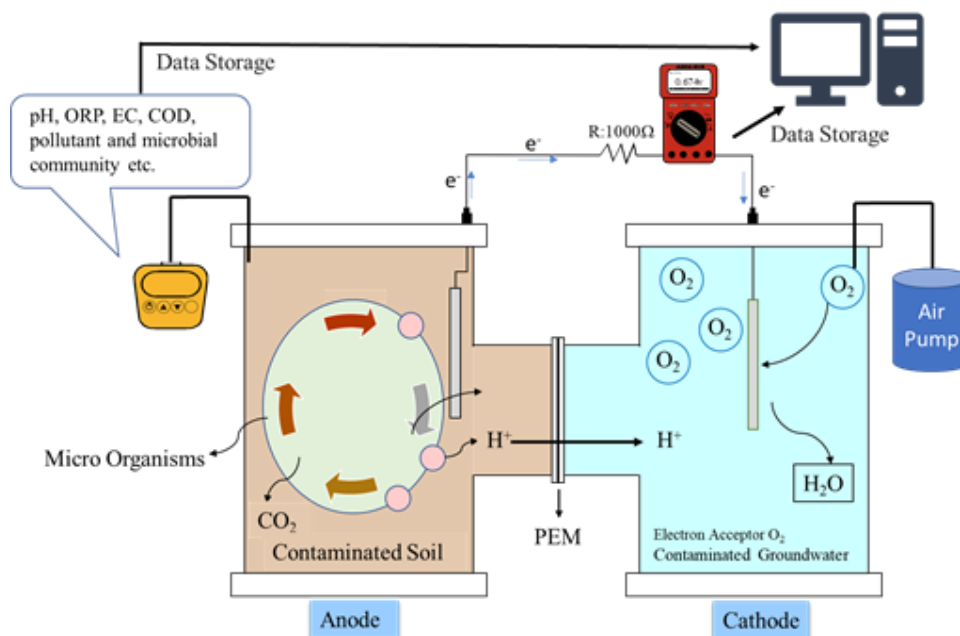


圖 6.3. 2 固-液相雙層水平 MFC 設計

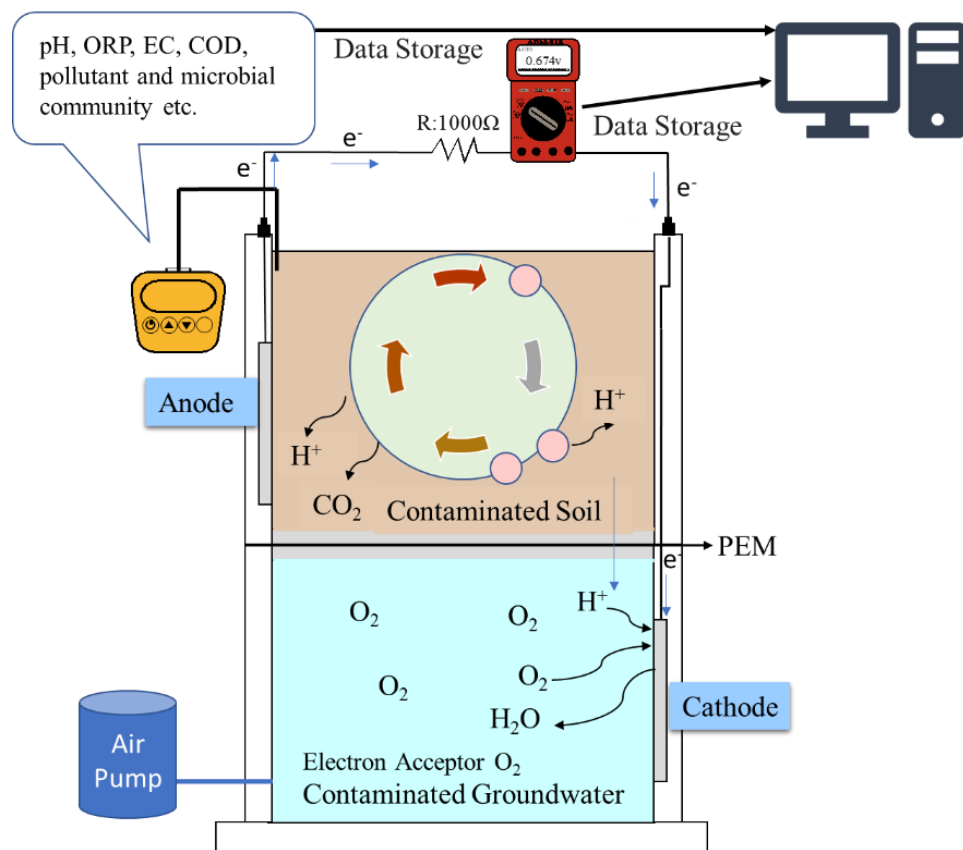


圖 6.3. 3 固-液相雙層垂直 MFC 設計

6.4 實驗電壓量測方法

利用雙槽 MFC 的混合系統，實驗設置使用 LDH 塗覆碳氈之活性碳極板吸附及去除 PFAS、總石油烴等污染物。主要實驗參數包括最佳化電極配置、活性碳比例和基質濃度，研究涵蓋有機廢物類型的變化，探討其對 MFC 性能和污染物去除效率的影響。測量電極電位、電流密度和功率輸出，以評估電力生成效率。

- 1.微生物燃料電池之陽極與陰極極板以鐵夾與銅線連接。
- 2.連接外接電阻(1000 Ω)與三用電錶(ABM 817A)。
- 3.電壓(Voltage, V)與電流(Current, I)以三用電錶進行量測。
- 4.以電壓監測軟體(BRUA-85Xa, Bs-Software)紀錄資料。

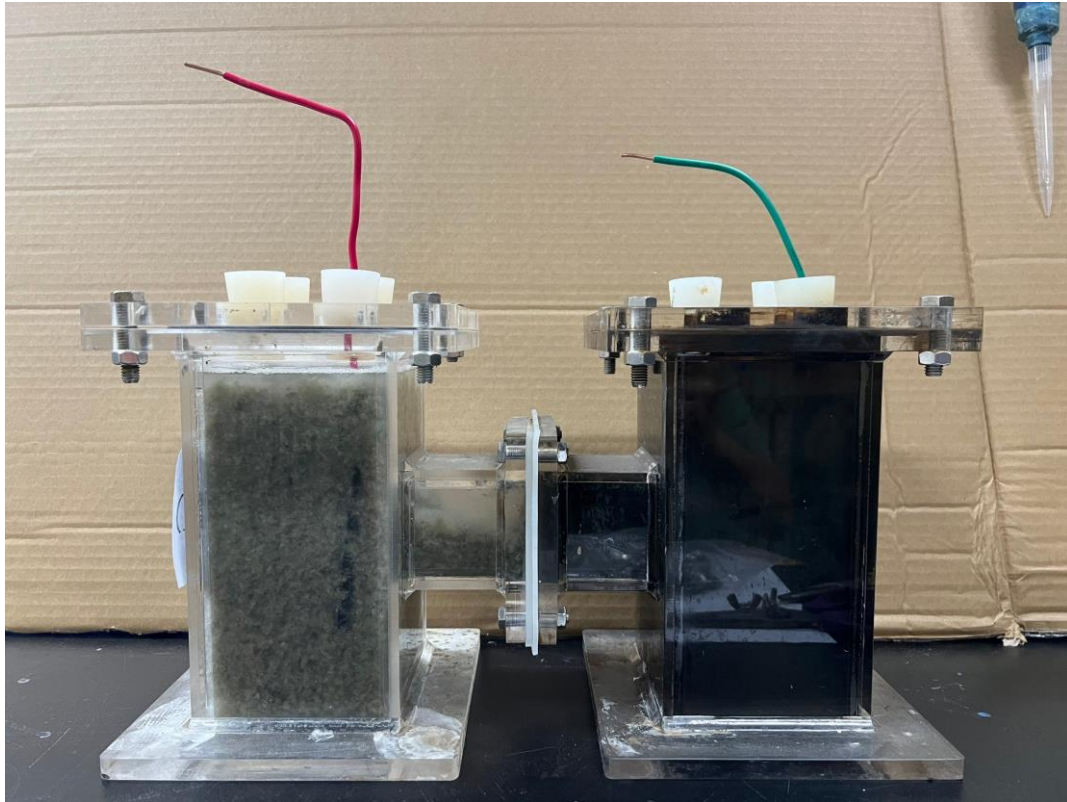


圖 6.4.1 地下水污染 MFC

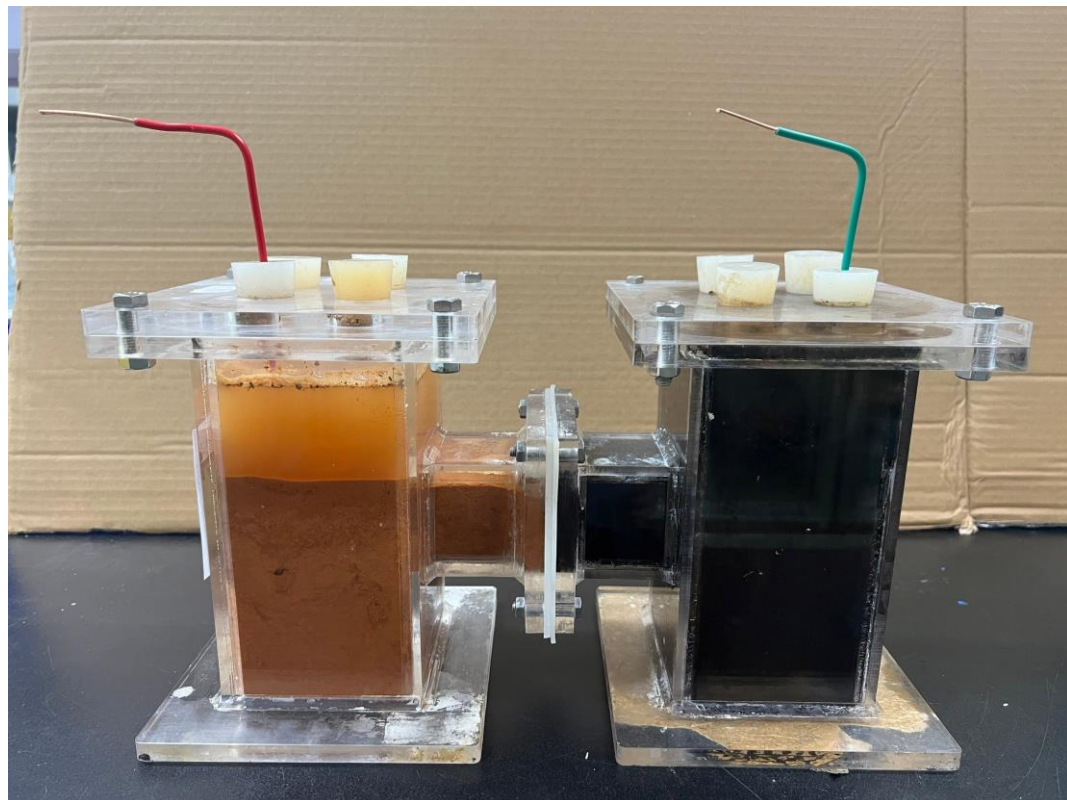


圖 6.4.2 土壤污染 MFC



6.5 研究進度及預期完成之工作項目（甘特圖）

年月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	備註
工作項目													
生物質製備													已完成
多孔生物炭的製備													已完成
LDH 和 MOF 合成													已完成
電極製造													已完成
奈米材料表徵													已完成
MFC 實驗													已完成
報告寫作													已完成
工作進度估計百分比 (累積數)	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %	65 %	70 %	85 %	100 %	100 %	100 %	
預定查核點	期末		完成實驗及報告寫作										
	成果		收集微生物燃料電池產電數據及吸附去除率並撰寫成果報告										



7. 結果與討論

7.1 LDH 特性分析-傅立葉轉換紅外線光譜儀(FTIR)

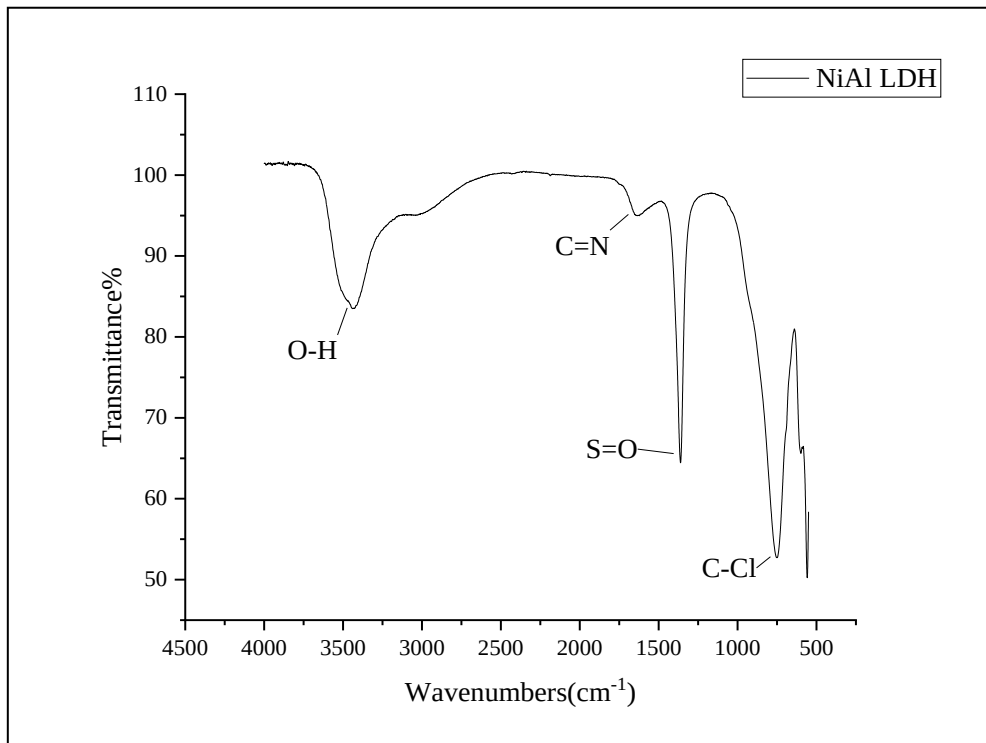


圖 7.1. 1 NiAl LDH 之 FTIR 圖

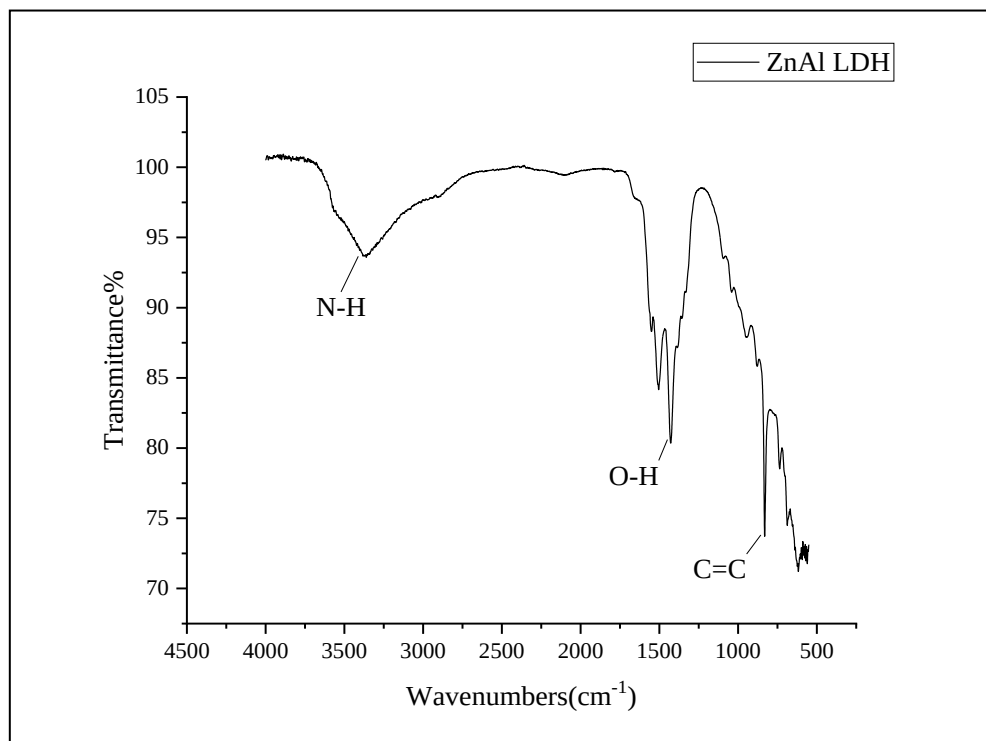


圖 7.1. 2 ZnAl LDH 之 FTIR 圖

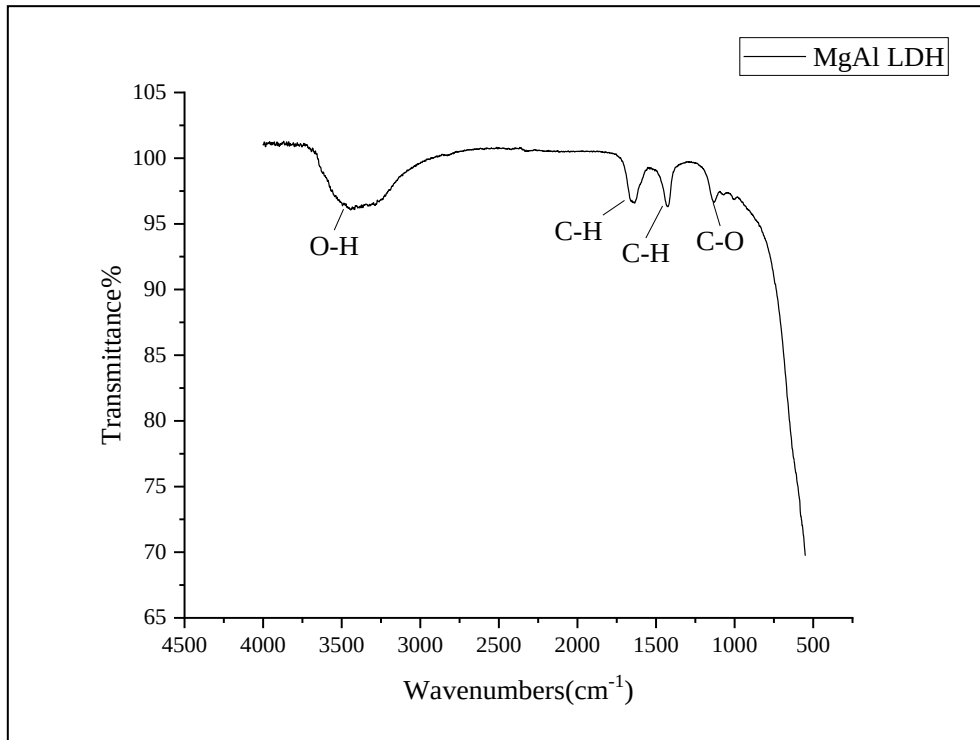


圖 7.1. 3 MgAl LDH 之 FTIR 圖

圖 7-1.1 結果顯示 NiAl LDH FTIR

- 461.116 cm^{-1} (O-H)拉伸，可判別為醇。 1662.338 cm^{-1} (C=N)拉伸，可判別為亞胺。 1365.837 cm^{-1} (S=O)拉伸，可判別為磺酸酯。 761.2623 cm^{-1} (C-Cl)拉伸，可判別為鹵化物。

圖 7-1.2 結果顯示 ZnAl LDH FTIR

- 3394.102 cm^{-1} (N-H)拉伸，可判別為胺。 1432.851 cm^{-1} (O-H)彎曲，可判別為羧酸。 832.6155 cm^{-1} (C=C)彎曲，可判別為烯烴。

圖 7-1.3 結果顯示 MgAl LDH FTIR

- 3472.687 cm^{-1} (O-H)拉伸，可判別為醇。 1668.124 cm^{-1} (C-H)彎曲，可判別為芳香化合物。 1440.565 cm^{-1} (C-H)彎曲，可判別為烷烴。 1145.991 cm^{-1} (C-O)拉伸，可判別為醚。

透過 FTIR 分析，我們從中得知 ZnAl、NiAl、MgAl 三種 LDH 各項官能基能有助於電子轉移效率且能夠提高微生物附著性及生物催化活性，其中芳香環官能基與醚基官能基可以提高材料的穩定性和導電性，有助於提高 MFC 的性能且能夠促進氧化還原反應，分析結果與 Wei 等人一致 (Wei *et al.*, 2023; Yahiya *et al.*, 2022; Mansour *et al.*, 2022)。



7.2 LDH 特性分析-X 光繞射儀(XRD)

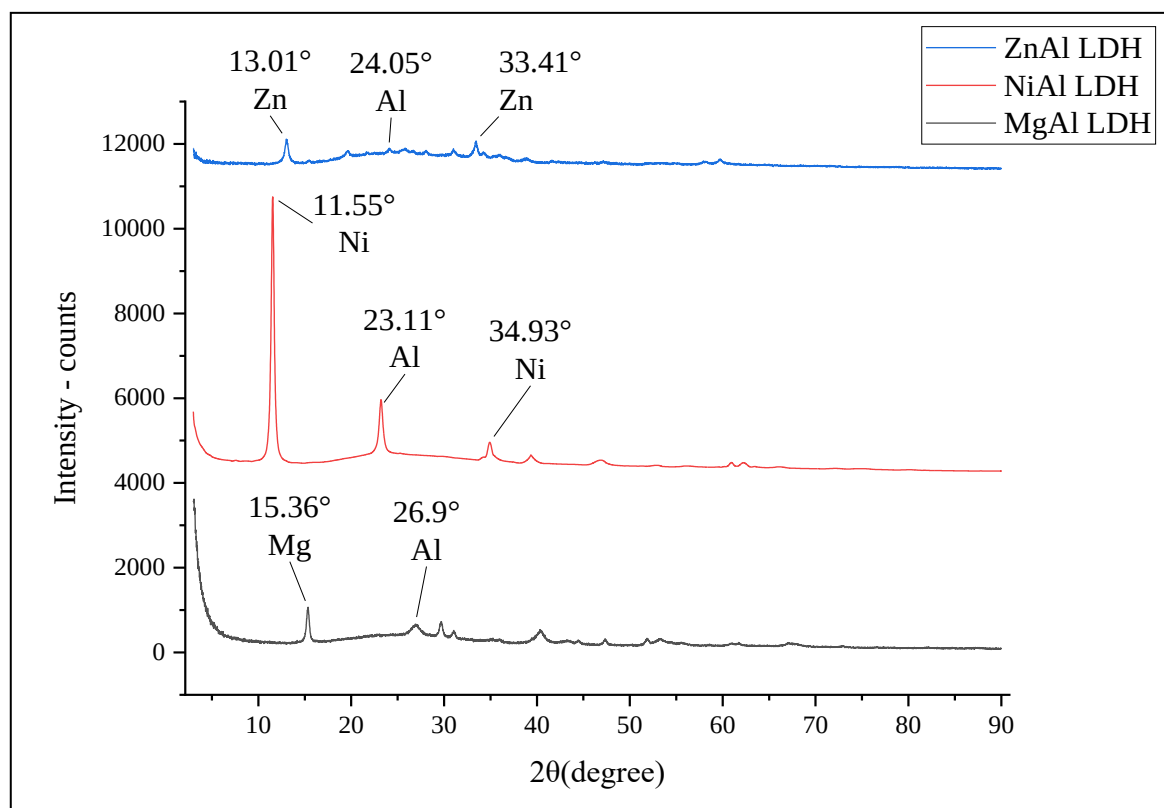


圖 7.2.1 LDH 之 XRD

利用 X 射線光繞射儀(XRD)分析 LDH，分別是 ZnAl LDH、NiAl LDH、MgAl LDH。本次 X 射線光繞射儀(XRD)分析對照國際衍射數據中心(International Center for Diffraction Data, ICDD)的標準衍射峰圖譜結合 MDI Jade 軟體分析整合圖根據衍射波峰數據圖譜對照取得上述試體之成分。

ZnAl LDH 在 2-Theta(Degree)=13.01°、24.05°、33.41°出現之衍射峰對應鋅、鋁，鋅成分，其中 13.01°產生最高峰直，33.41°(012)代表為板狀六方相晶面形成花狀結構(Yahiya *et al.*, 2023)。

NiAl LDH 在 2-Theta(Degree)=11.55°、23.11°、39.93°出現之衍射峰對應鎳、鋁，鎳成分，其中 11.55°(003)產生最高峰代表水滑石晶面(Han *et al.*, 2023)。

MgAl LDH 在 2-Theta(Degree)=15.36°、26.9°出現之衍射峰對應鎂、鋁成分，其中 15.36°產生最高峰直，其次 26.9°(002)代表為板狀六方相晶面形成花狀結構(Manea *et al.*, 2023)。

透過 XRD 分析，我們得知三種 LDH 呈現層狀晶體結構，此結構判斷能有效提升 MFC 電極的導電性，有望提高電子的轉移能力與產電效益，本次實驗與以往無添加 LDH 之 MFC 相比，提升了約 60%的效能。



7.3 LDH 特性分析-場發式電子顯微鏡(FE-SEM)

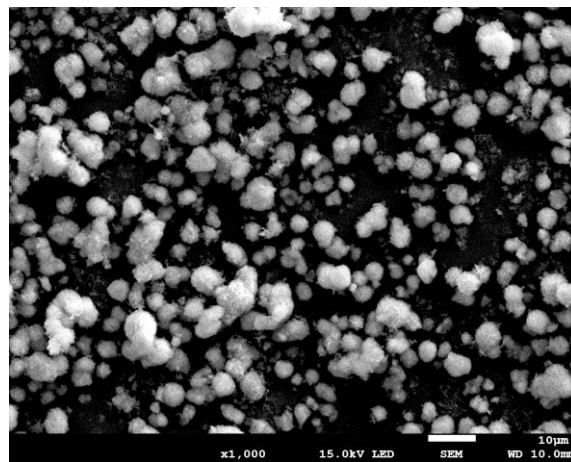


圖 7.3. 1 NiAl LDH 1000x

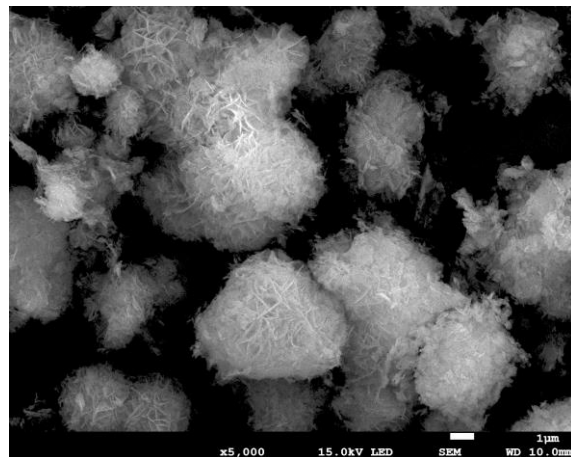


圖 7.3. 2 NiAl LDH 5000x

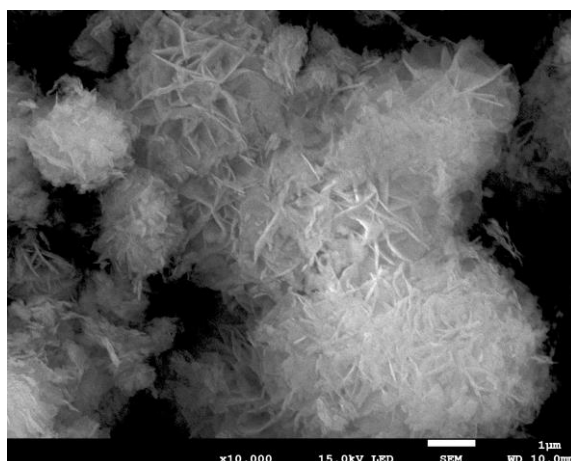


圖 7.3. 3 NiAl LDH 10000x

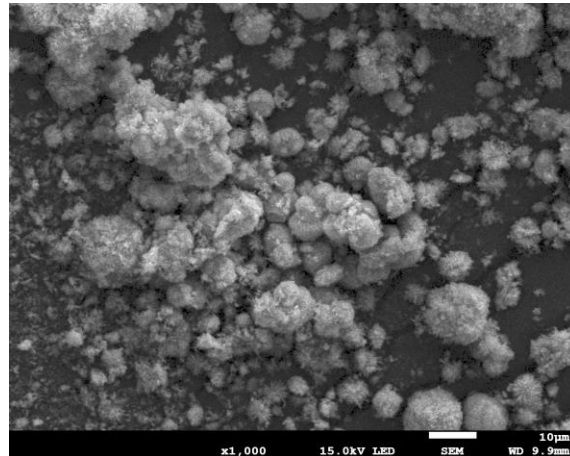


圖 7.3.4 ZnAl LDH 1000x

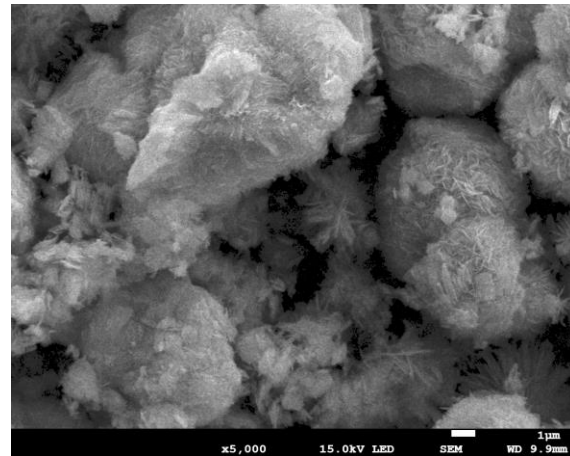


圖 7.3. 5 ZnAl LDH 5000x

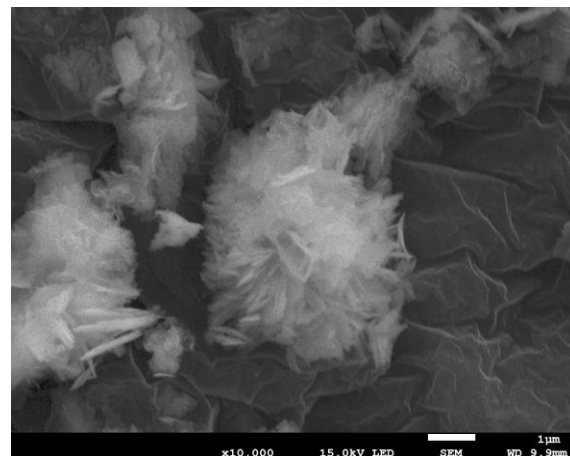


圖 7.3. 6ZnAl LDH 10000x

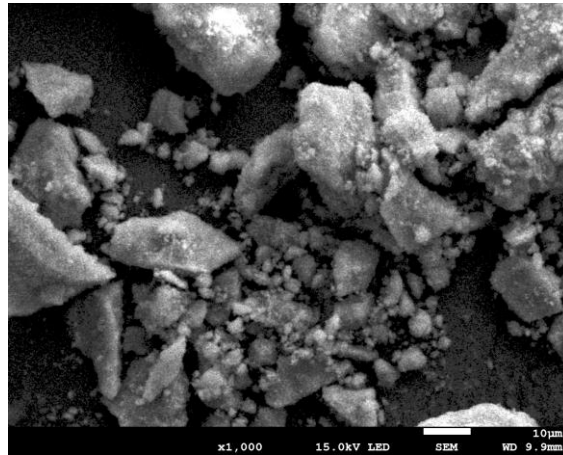


圖 7.3. 7 MgAl LDH 1000x

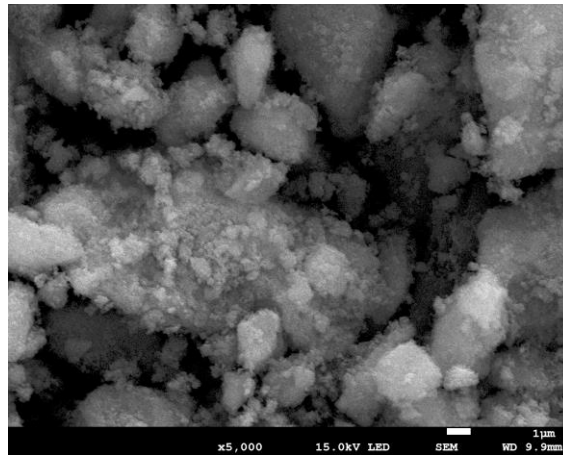


圖 7.3. 8 MgAl LDH 5000x

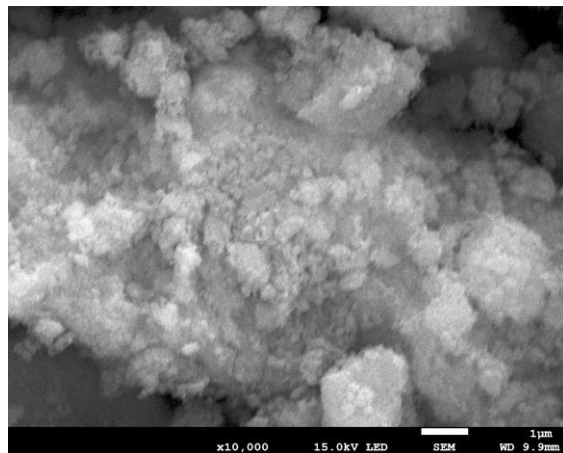


圖 7.3. 9 MgAl LDH 10000x



本研究使用場發射掃描式電子顯微鏡(FE-SEM)分析三種 LDH 之結構，LDH 中 MgAl 及 ZnAl 具有層狀之結構，並可觀察到孔洞表面完整而他們的結構更加粗糙、更加清晰的棱角以及更多孔洞的表面結構能更加有利於吸附，然而 NiAl LDH 表面呈現不規則的奈米結構，其結構則為複合材料提供了離子傳輸通道並且加速了離子擴散的速率，三種 LDH 之結構孔洞結果與韓偉、陳俊峰等人研究結果一致(Chen *et al.*, 2024 ; Han *et al.*, 2023)。透過 SEM 分析，成果得知 MgAl、ZnAl 表面呈現層狀之結構，NiAl 表面則呈現奈米顆粒結構，判斷是三種 LDH 表面結構能夠使微生物提高附著力能更牢固的附著在電極表面，這為微生物提供更多的附著與生長空間，並形成穩定的生物膜從而提高 MFC 的穩定性。

7.4 活性碳特性分析-元素分析儀(EA)

表 10 柑橘皮活性碳之元素分析

樣品	N(%)	C(%)	H(%)
柑橘皮活性 碳 750 °C	1.9	78.02	1.883
	S(%)	C/N(%)	C/H (%)
	0.427	41.099	41.43

於 750℃ 條件下製成之柑橘皮活性碳，其元素分析如下：氮 1.9%、碳 78.02%、氮 1.883%、硫 0.427%、碳氮比 41.099%及碳氮比 41.43%。本研究針對柑橘皮於 750℃ 下製備的活性碳進行元素分析，結果顯示其碳含量高達 78.02%，表明經過高溫炭化處理後，柑橘皮中的有機物質大部分轉化為碳，有助於吸附性能的提升。氮含量為 1.9%，可增強其在催化反應中的活性，例如在氧還原反應和能源儲存裝置中的應用。氮含量為 1.883%，表示材料經過充分的炭化，具有穩定的結構。

此外，硫的含量為 0.427%，雖然較低，但硫的存在具有會賦予材料吸附含硫化合物的選擇性。該活性碳的碳氮比（C/N）為 41.099%，顯示其氮含量適中，有助於提升電化學性能；碳氮比（C/H）為 41.43%，進一步證明材料具有高碳穩定性和低含氮量。

7.5 活性碳特性分析-比表面積分析儀(BET)

表 11 柑橘皮活性碳之比表面積分析

樣品	表面積(m ² /g)
750 °C 柑橘皮活性碳	327.7391

比表面積分析結果如表 12 所示，在本研究中探討以柑橘皮製備活性碳的可行性，並通過熱裂解技術對其進行加工，結果顯示，熱裂解溫度對活性碳的比表面積有著顯著影響。特別是當熱裂解溫度達到 750°C 時，所製得的柑橘皮活性碳比表面積達到 327.7391 m²/g，表明此溫度下的活性碳具有較佳的孔隙結構與吸附性能。這與 Deng 等人（2024 年）的研究結果相符，他們指出，隨著熱裂解溫度的升高，活性碳的表面積顯著增加，這是由於較高的熱裂解溫度有助於更多的揮發性物質釋放，從而增加孔隙結構的發展(Yu *et al.*, 2021)。

此外，柑橘皮作為製備活性碳的原材料，具有來源廣泛且成本低廉的優勢，因此許多研究學者選擇使用柑橘皮來製備活性碳。Yu 等人（2021 年）在其研究中強調，利用農業廢棄物如柑橘皮來製備活性碳，不僅有效解決了農業廢棄物處理困難的問題，同時也展示了這種資源回收方式在環境保護和廢棄物管理中的巨大潛力。通過熱裂解技術，不僅可以有效轉化廢棄物，還能製備具有高表面積與良好吸附特性的活性碳，這對於水處理、空氣淨化等應用具有廣泛的前景。

活性碳的應用範圍極廣，特別是在環境領域中，被廣泛用於吸附有害氣體、去除水中的污染物等。因此，選擇合適的原材料與製備工藝，能夠提高活性碳的性能及其應用價值。柑橘皮作為一種易於獲取且價格低廉的廢棄物，為活性碳製備提供了一種可持續的解決方案。本研究展示了柑橘皮作為製備活性碳的潛力，並為進一步優化製備方式及提升活性碳性能。



7.6 馴養微生物污泥

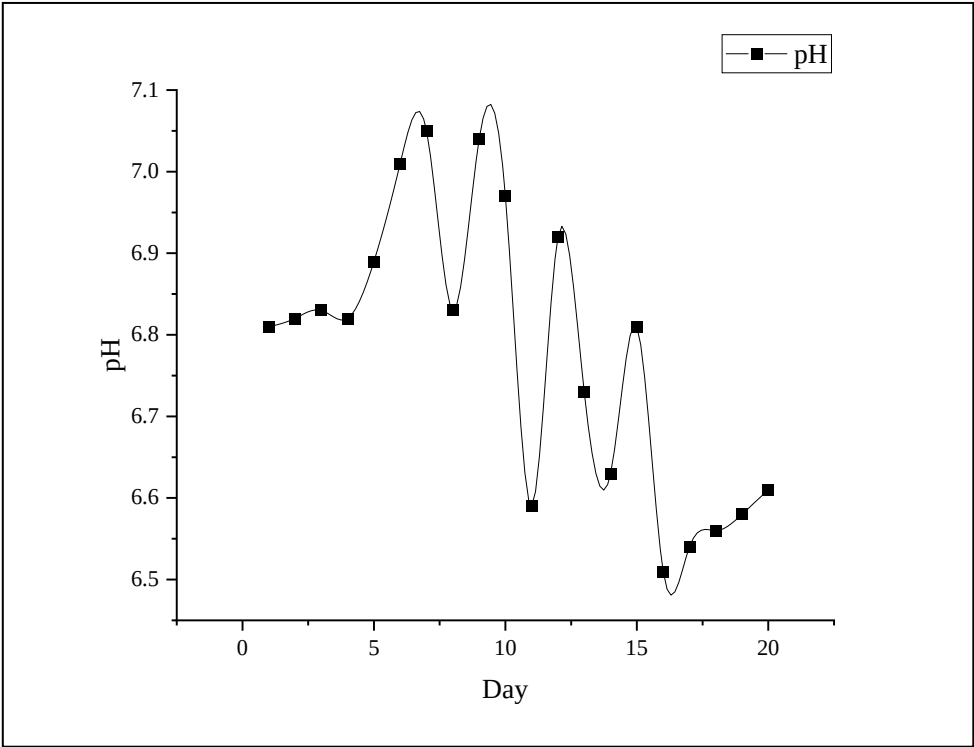


圖 7.6. 1 每日監測之馴養微生物污泥 pH 值

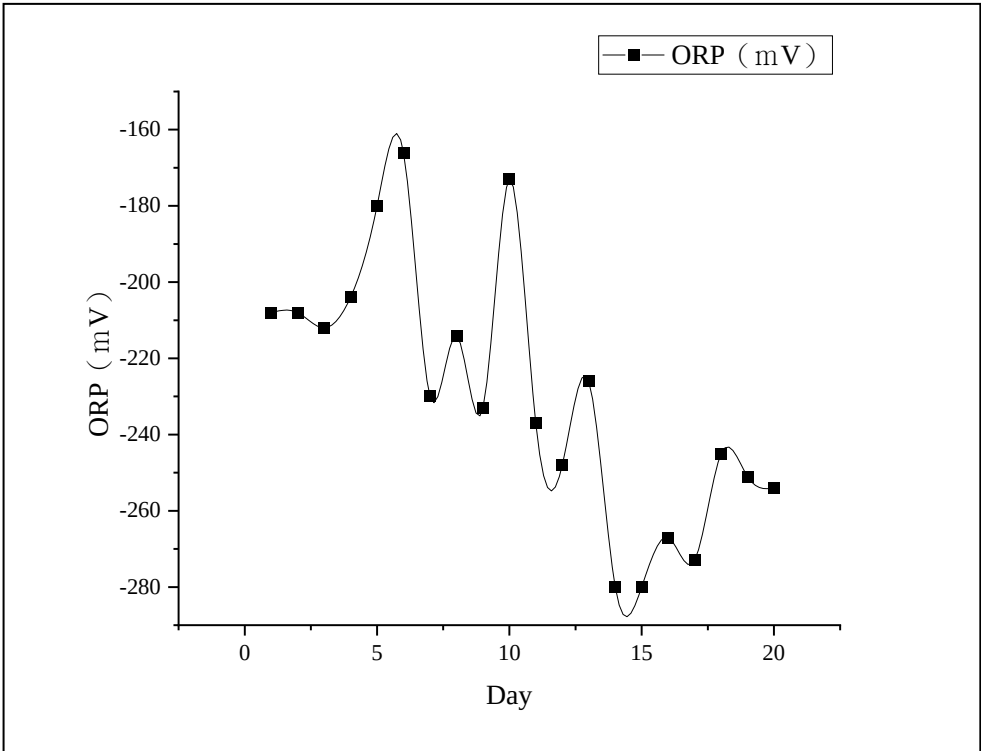


圖 7.6. 2 每日監測之馴養微生物污泥 ORP 值

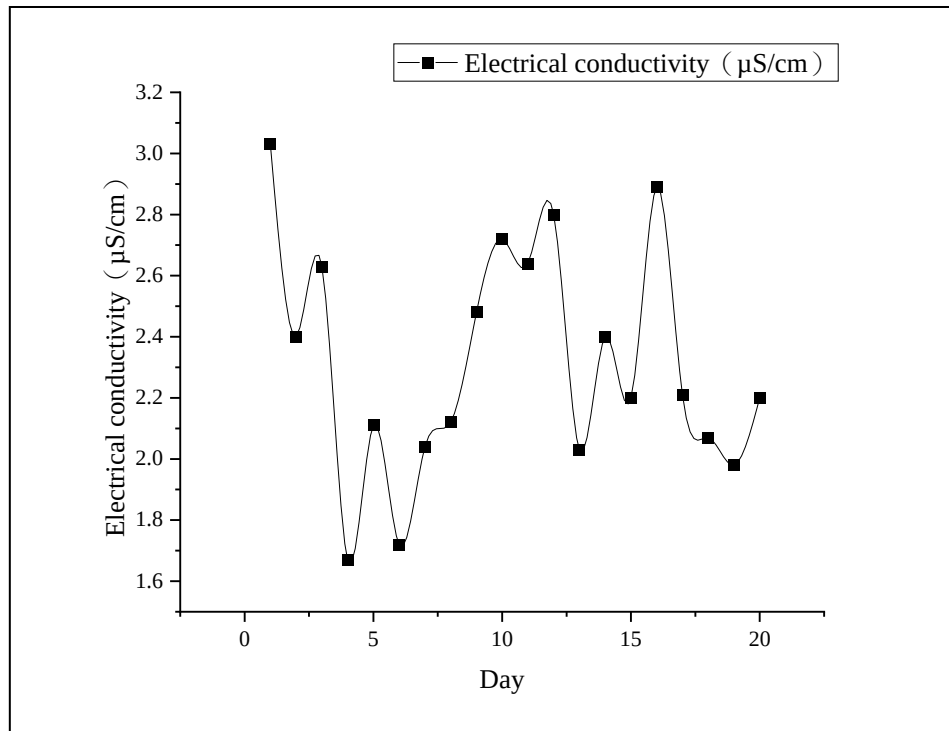


圖 7.6.3 每日監測之馴養微生物污泥 EC 值

本次實驗進行每日監測之馴養微生物污泥 pH、ORP、EC，如圖 7.6.1 至圖 7.6.3 所示，馴養微生物污泥每日監測數值如下：馴養微生物污泥之 pH 數值位於 6.5 至 7.1 之間、馴養微生物污泥之 ORP 數值位於-280mV 至-160mV 之間、馴養微生物污泥之 EC 數值位於 $1.6 \mu\text{S/cm}$ 至 $3.2 \mu\text{S/cm}$ 之間。

馴養微生物污泥之 pH、ORP 和 EC 數值均位於適合微生物生長理想範圍內，顯示該環境條件成功提供了有利於微生物代謝與繁殖的穩定支持，適中的 pH 值確保了微生物的代謝反應(Liang *et al.*, 2024)，而 ORP 值進一步表明微生物污泥存在氧化還原條件(Zhang *et al.*, 2012)，有助於厭氧性微生物的生長。EC 則反映了水中電解質含量的多寡(環境部，2020)，能夠提供穩定的電壓輸出。

這些數據不僅確保了微生物污泥的生長範圍和穩定性，還為後續的處理應用提供了基礎數據。持續的進行每日監測與調整可以使污泥微生物保持長期穩定運行，有助於實現污染物的有效去除和產電效益。因此，通過本次實驗所建立之監控系統，可以有效評估和優化污泥系統的操作條件，進一步提高處理效率和再生能源的可行性。



7.7 電壓趨勢

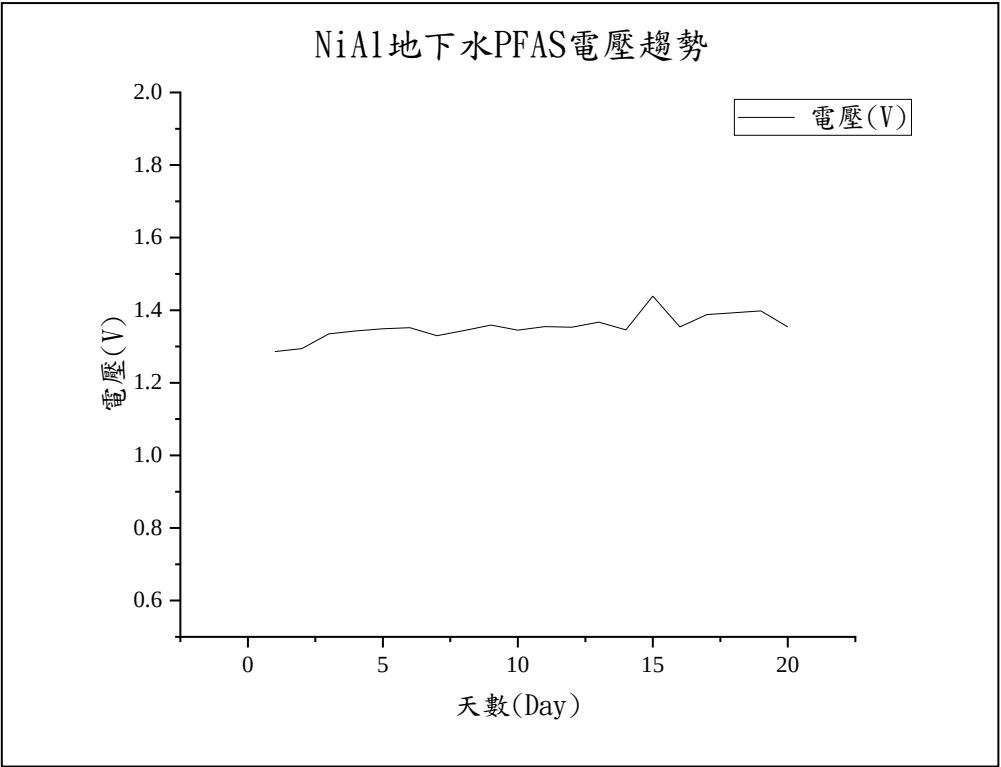


圖 7.7. 1 NiAl LDH 之地下水 PFAS 污染 MFC 電壓趨勢圖(第 15 天，1.439V)

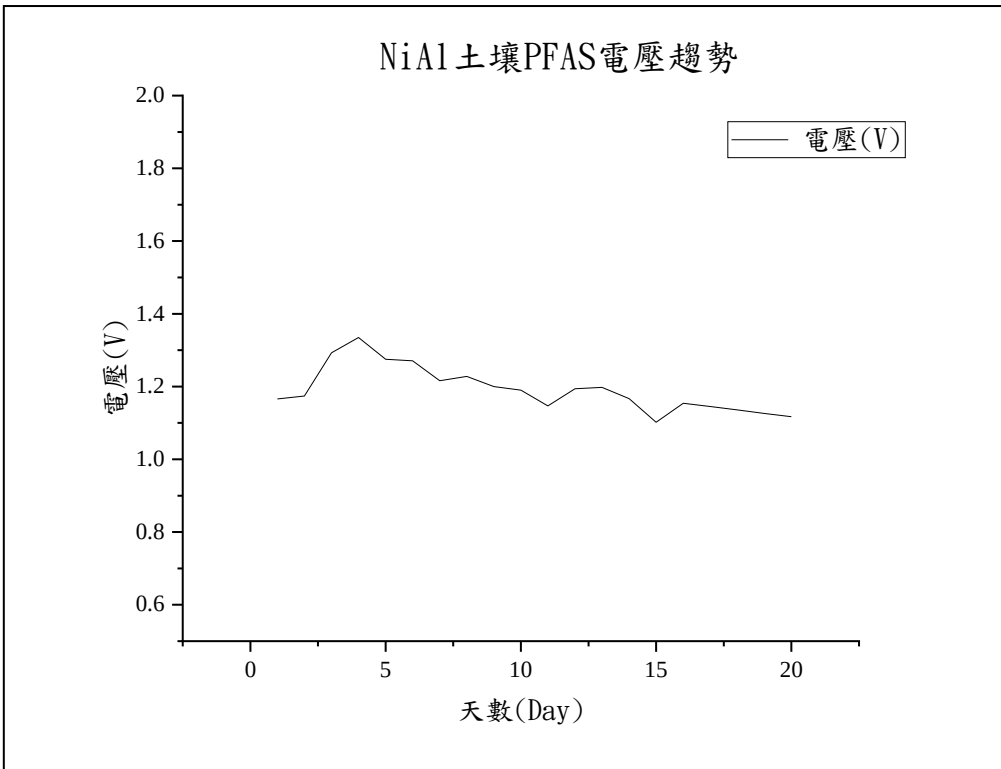


圖 7.7. 2 NiAl LDH 之土壤 PFAS 污染 MFC 電壓趨勢圖(第 4 天，1.335 V)

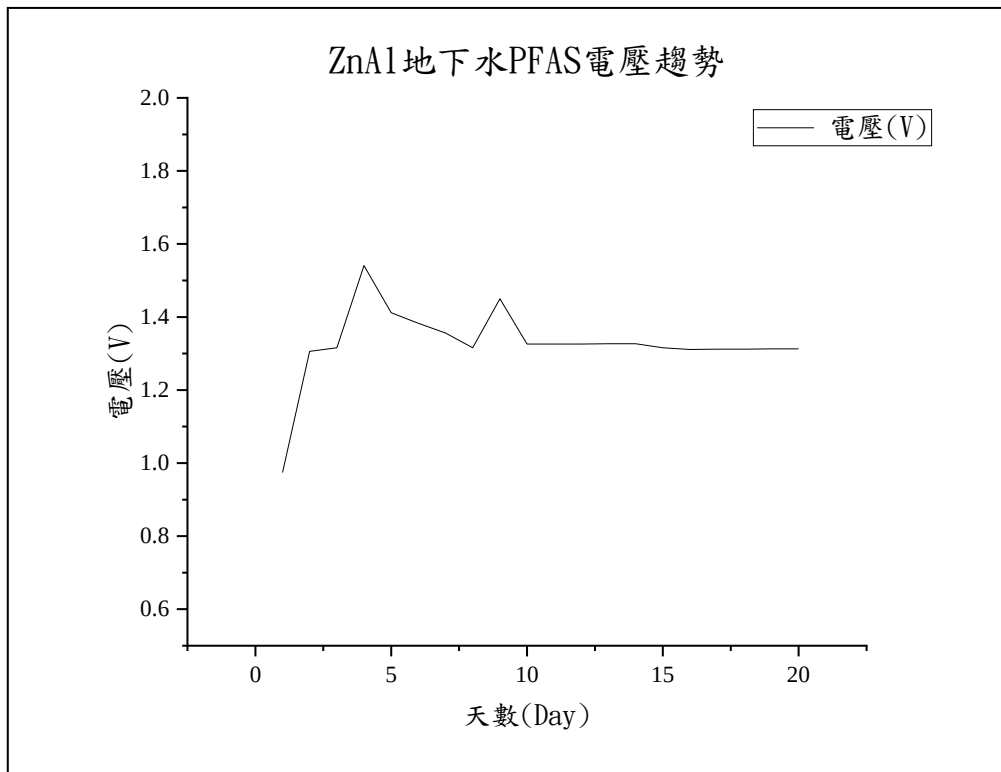


圖 7.7. 3 ZnAl LDH 之地下水 PFAS 污染 MFC 電壓趨勢圖(第 4 天，1.54 V)

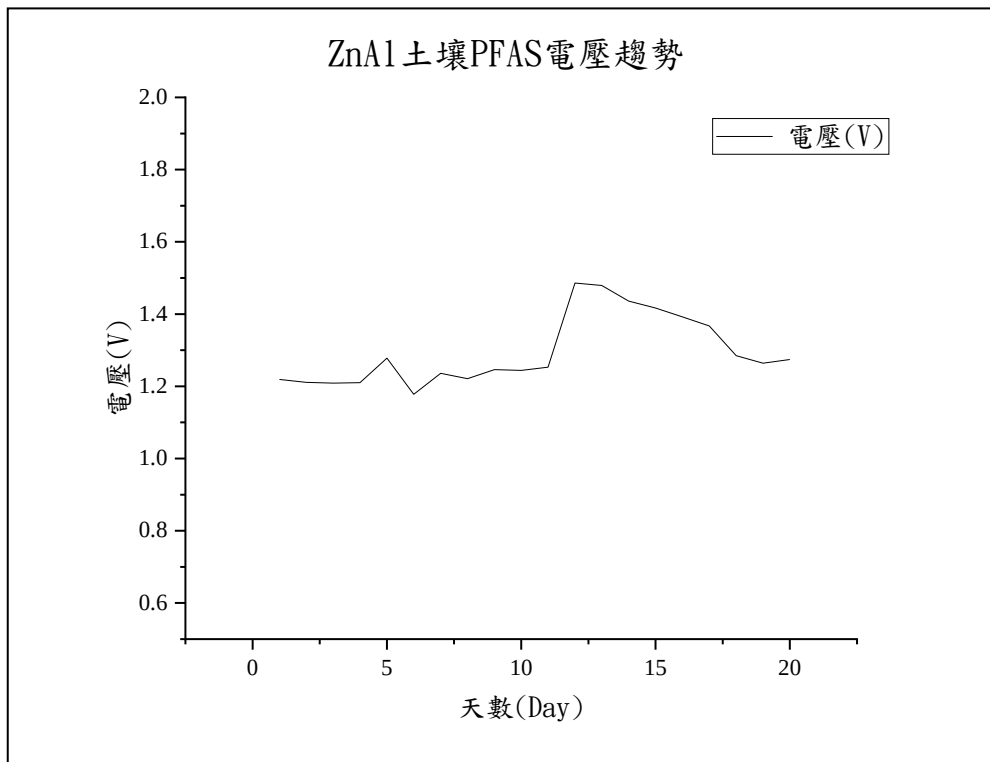


圖 7.7. 4 ZnAl LDH 之土壤 PFAS 污染 MFC 電壓趨勢圖(第 12 天，1.486 V)

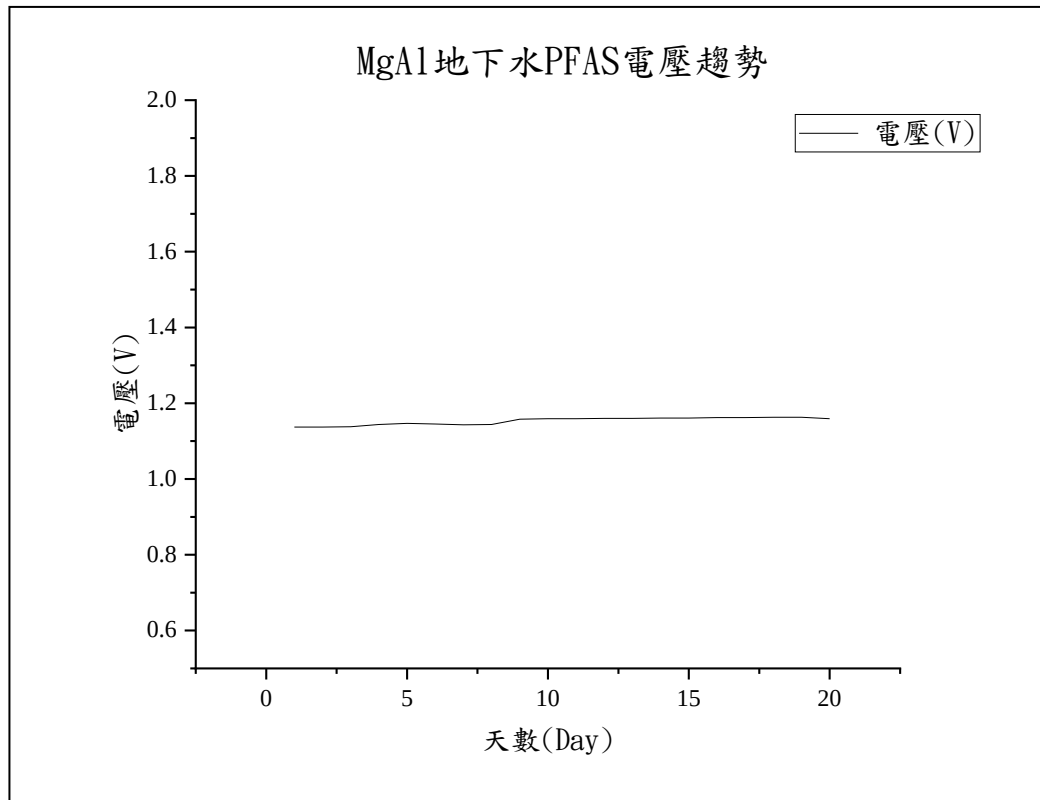


圖 7.7. 5 MgAl LDH 之地下水 PFAS 污染 MFC 電壓趨勢圖(第 18 天，1.163 V)

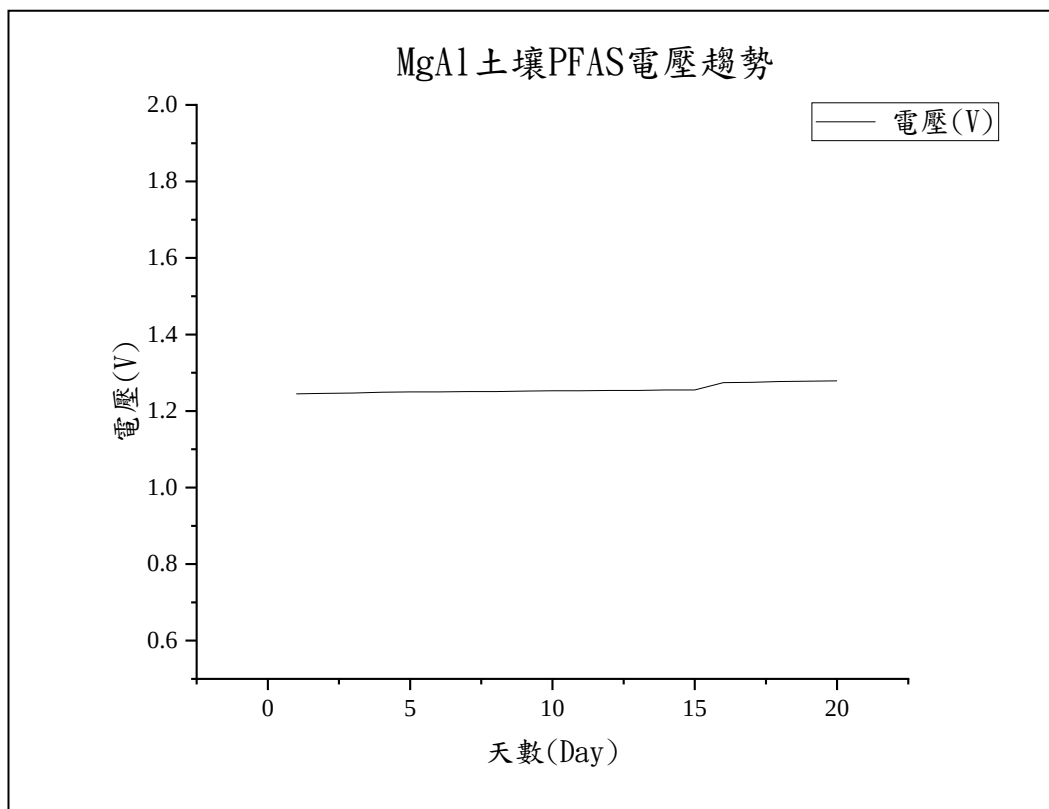


圖 7.7. 6 MgAl LDH 之土壤 PFAS 污染 MFC 電壓趨勢圖(第 20 天，1.279 V)

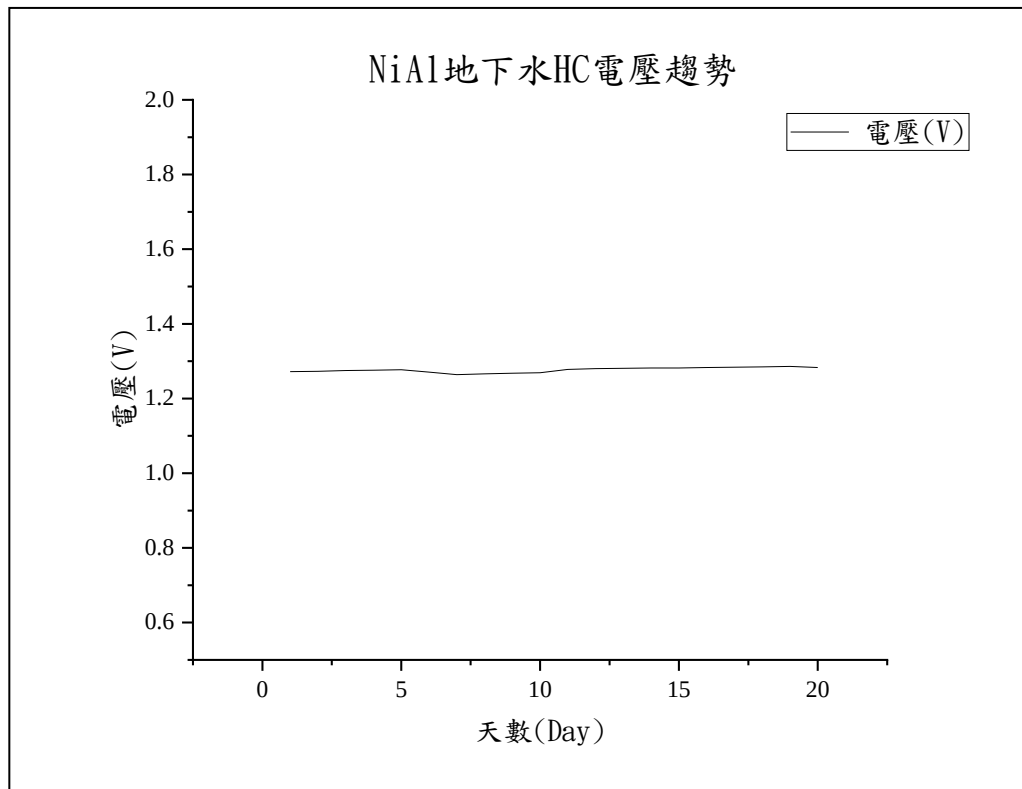


圖 7.7. 7 NiAl LDH 之地下水 HC 污染 MFC 電壓趨勢圖-高濃度(第 19 天, 1.286 V)

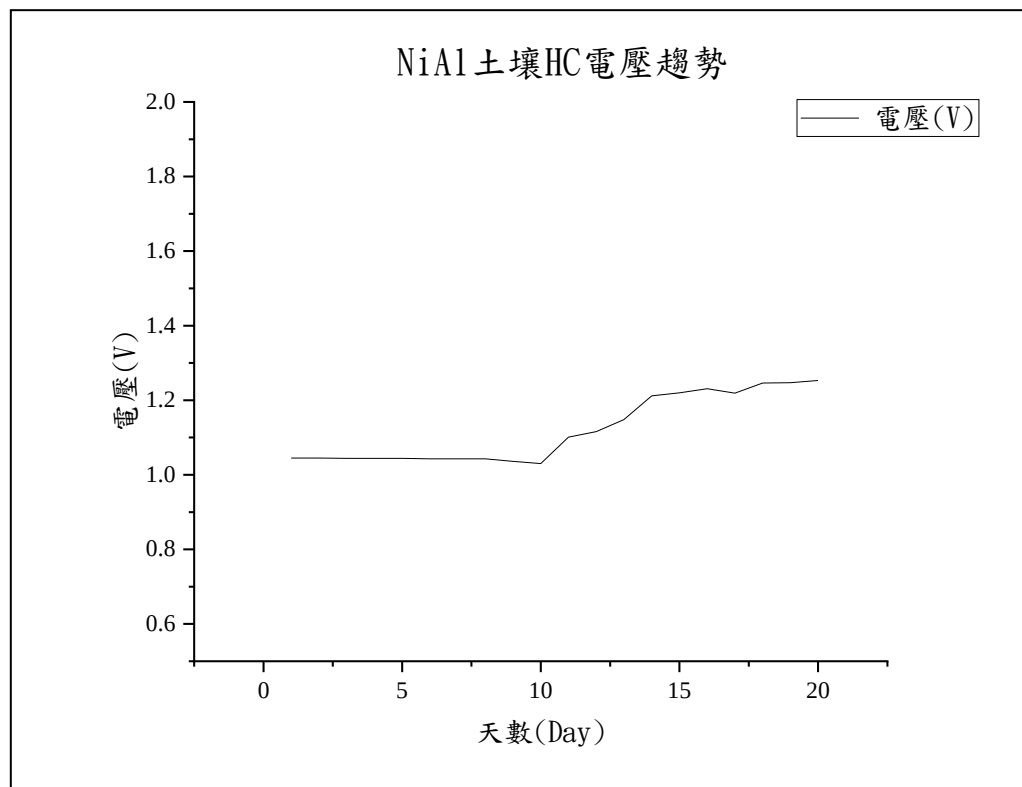


圖 7.7. 8 NiAl LDH 之土壤 HC 污染 MFC 電壓趨勢圖-高濃度(第 20 天, 1.253 V)

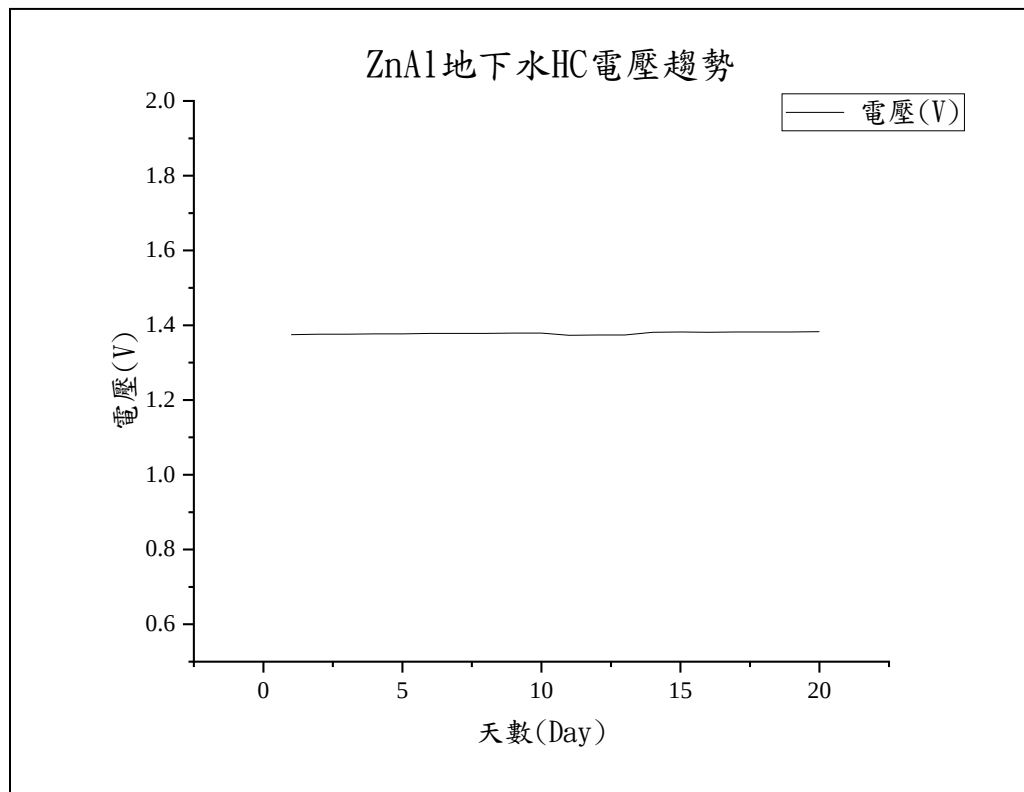


圖 7.7. 9 ZnAl LDH 之地下水 HC 污染 MFC 電壓趨勢圖-高濃度(第 20 天, 1.383 V)

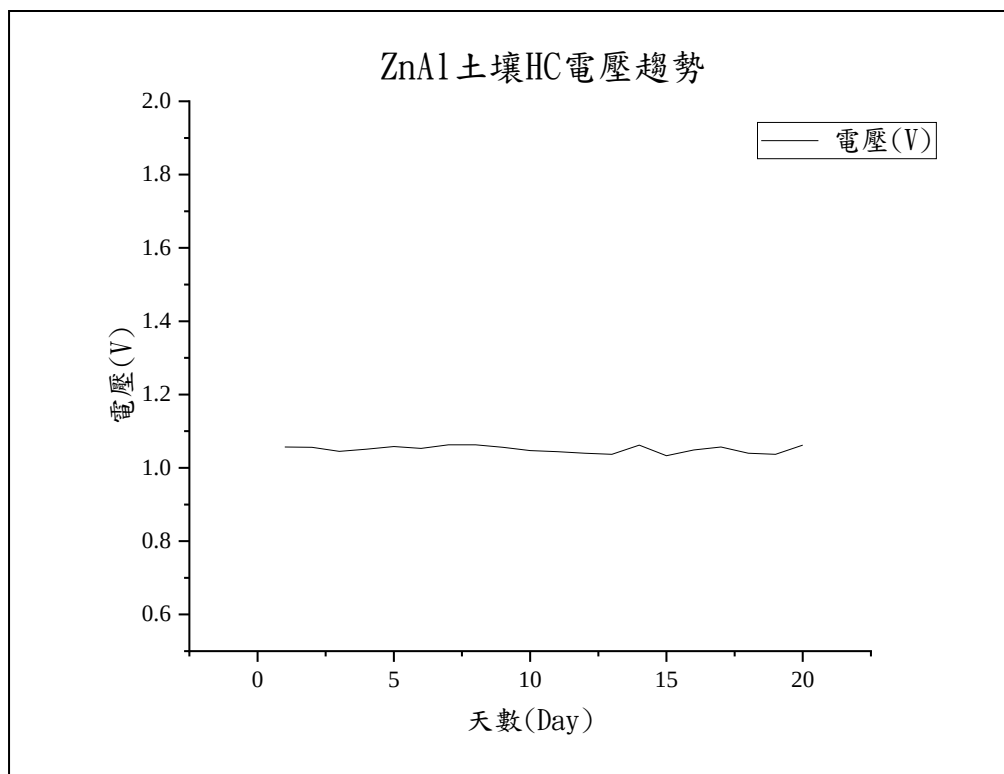


圖 7.7. 10 ZnAl LDH 之土壤 HC 污染 MFC 電壓趨勢圖-高濃度(第 7 天, 1.063 V)

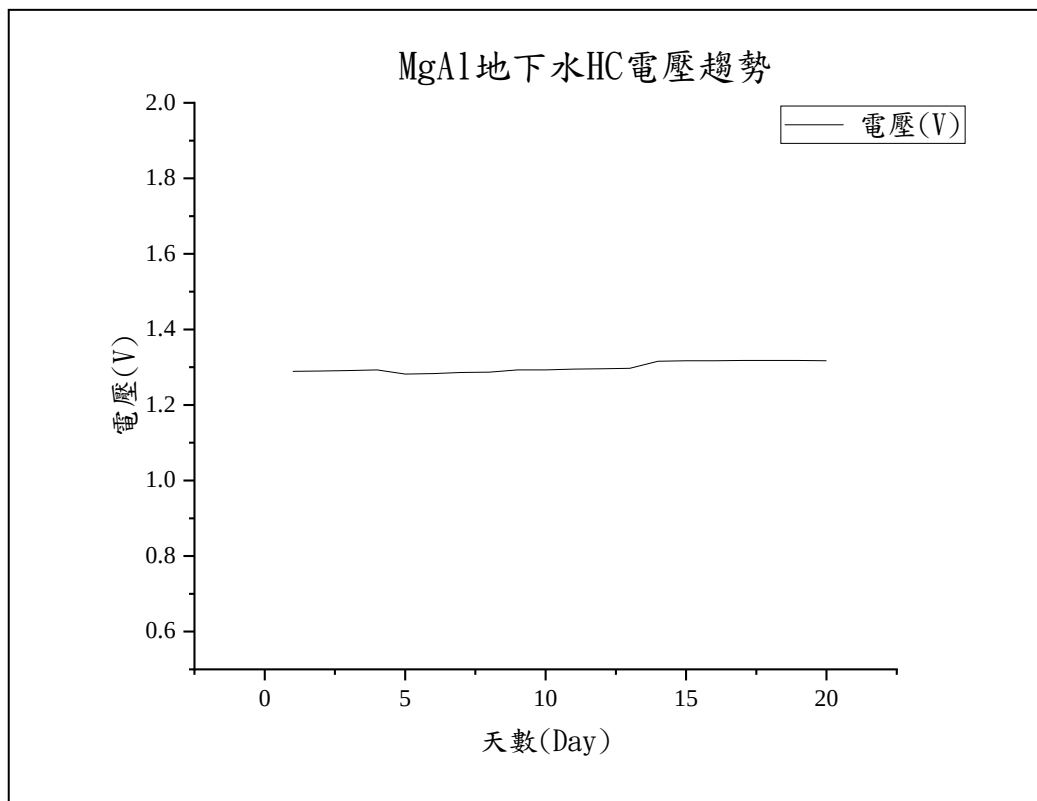


圖 7.7. 11 MgAl LDH 之地下水 HC 污染 MFC 電壓趨勢圖-高濃度(第 18 天, 1.318V)

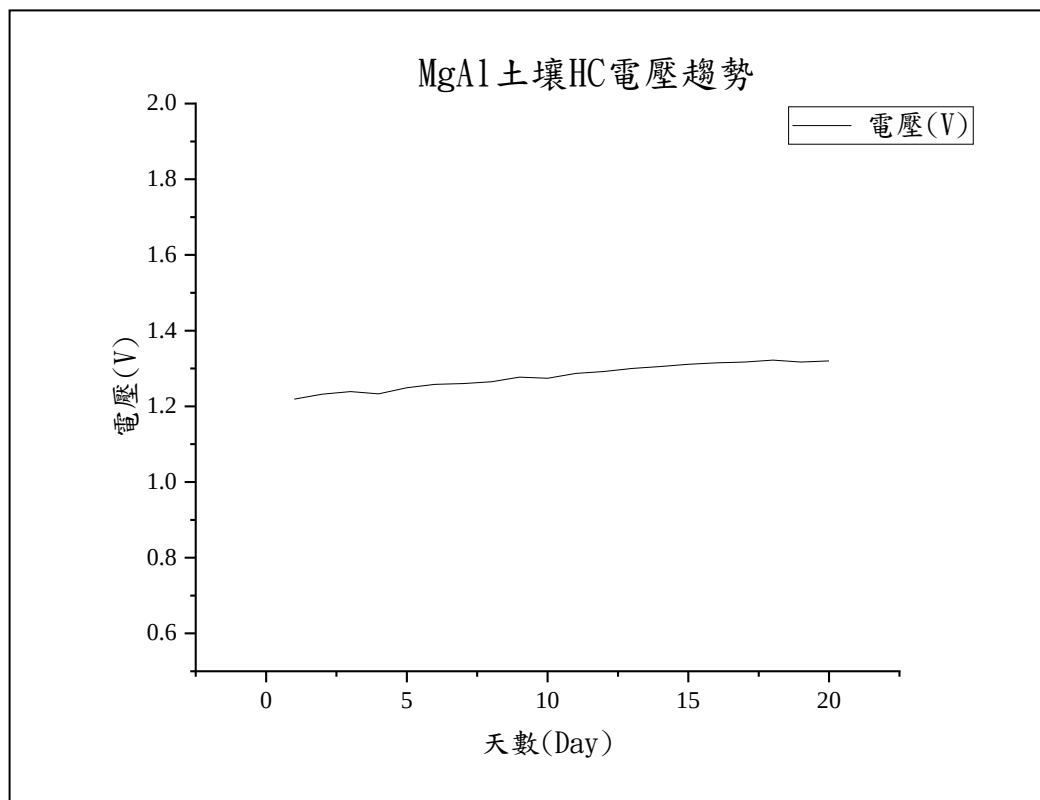


圖 7.7. 12 MgAl LDH 之土壤 HC 污染 MFC 電壓趨勢圖-高濃度(第 18 天, 1.322 V)

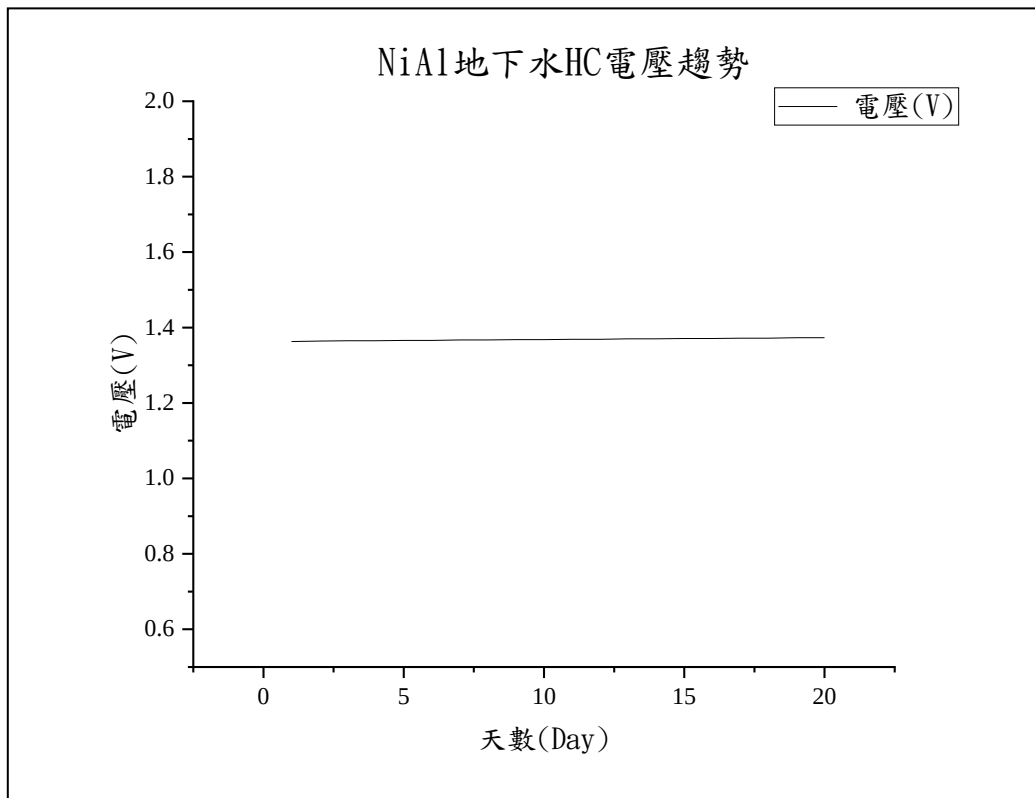


圖 7.7. 13 NiAl LDH 之地下水 HC 污染 MFC 電壓趨勢圖-中濃度(第 19 天, 1.373 V)

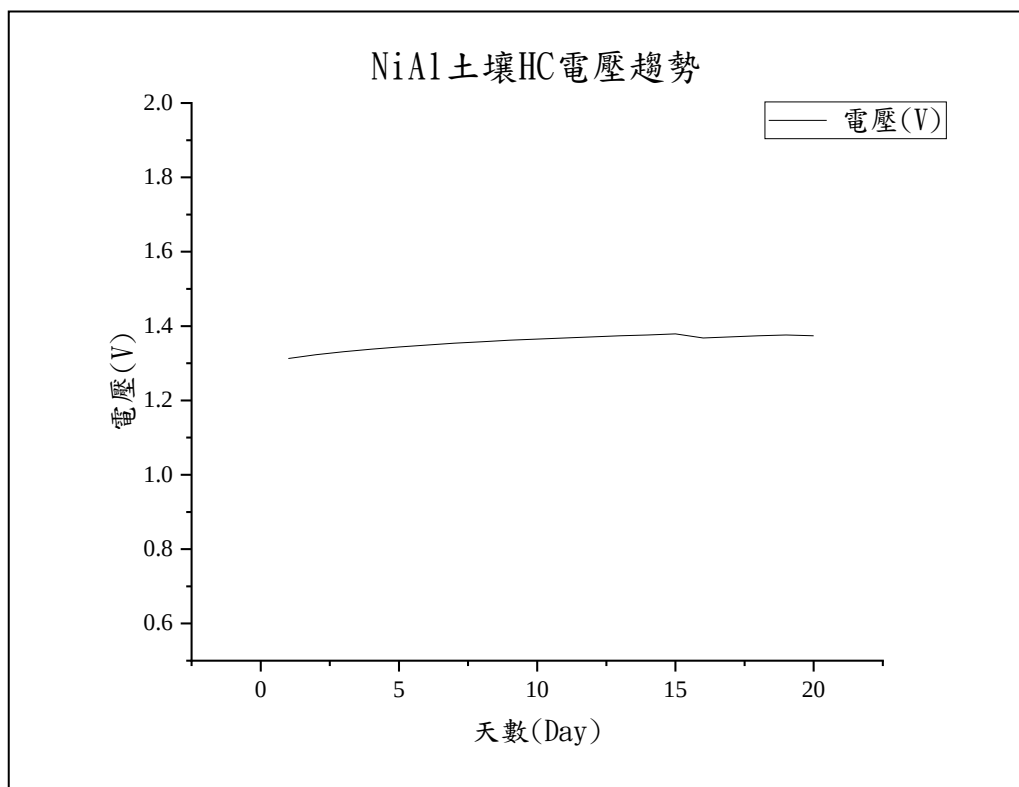


圖 7.7. 14 NiAl LDH 之土壤 HC 污染 MFC 電壓趨勢圖-中濃度(第 15 天, 1.379 V)

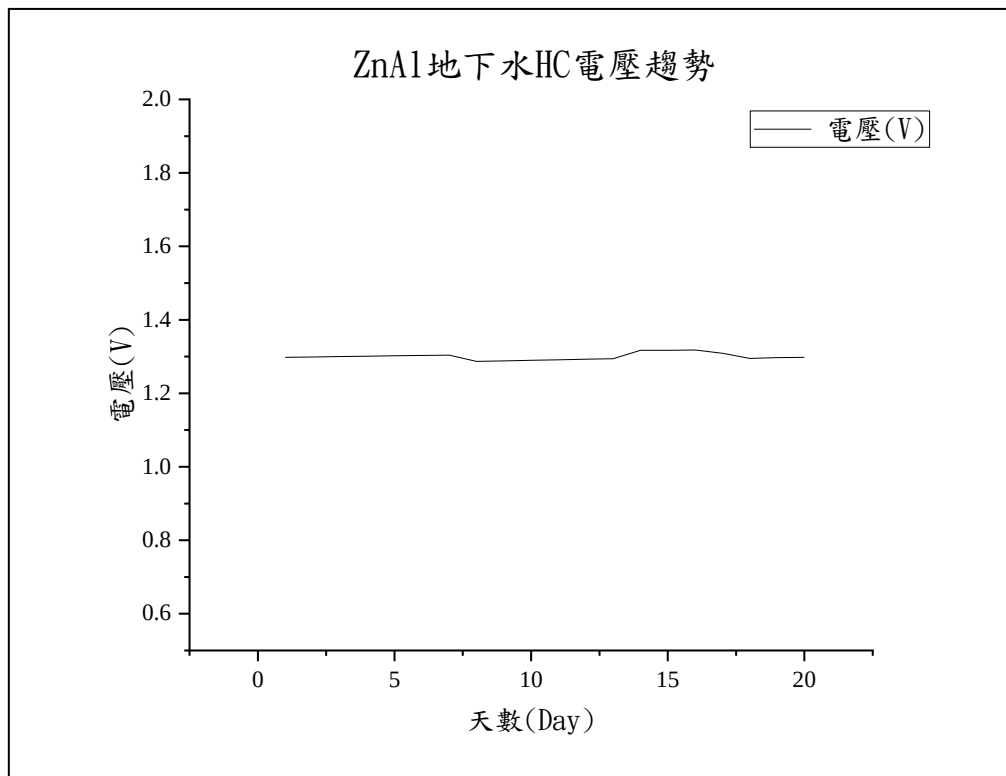


圖 7.7. 15 ZnAl LDH 之地下水 HC 污染 MFC 電壓趨勢圖-中濃度(第 16 天, 1.318 V)

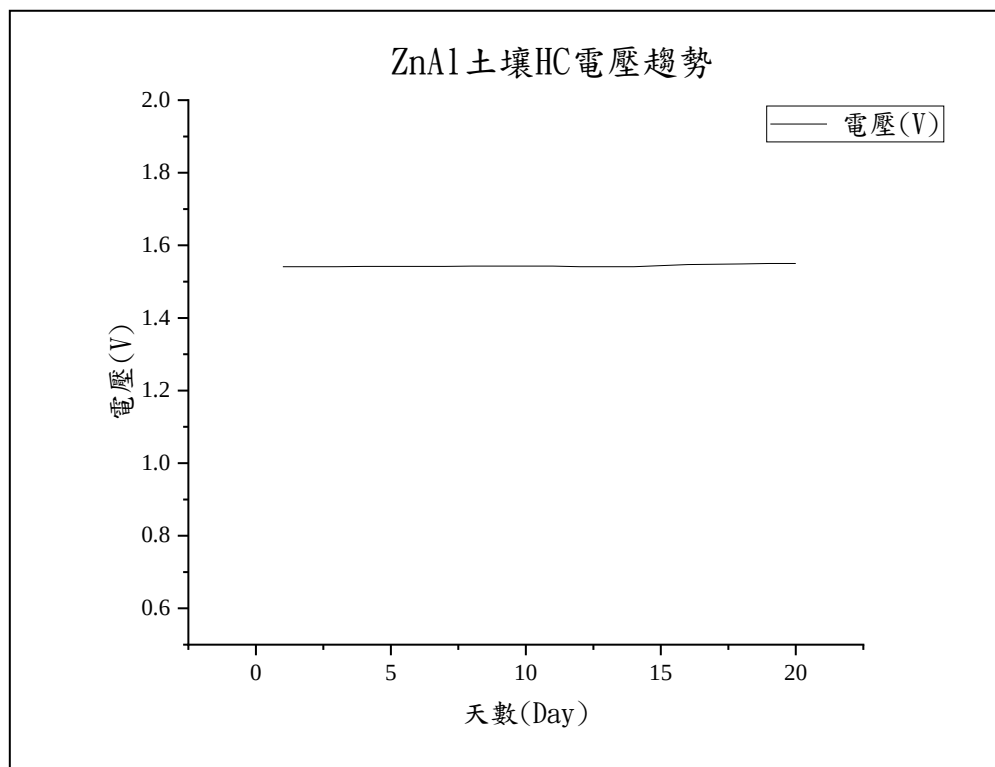


圖 7.7. 16 ZnAl LDH 之土壤 HC 污染 MFC 電壓趨勢圖-中濃度(第 19 天, 1.55 V)

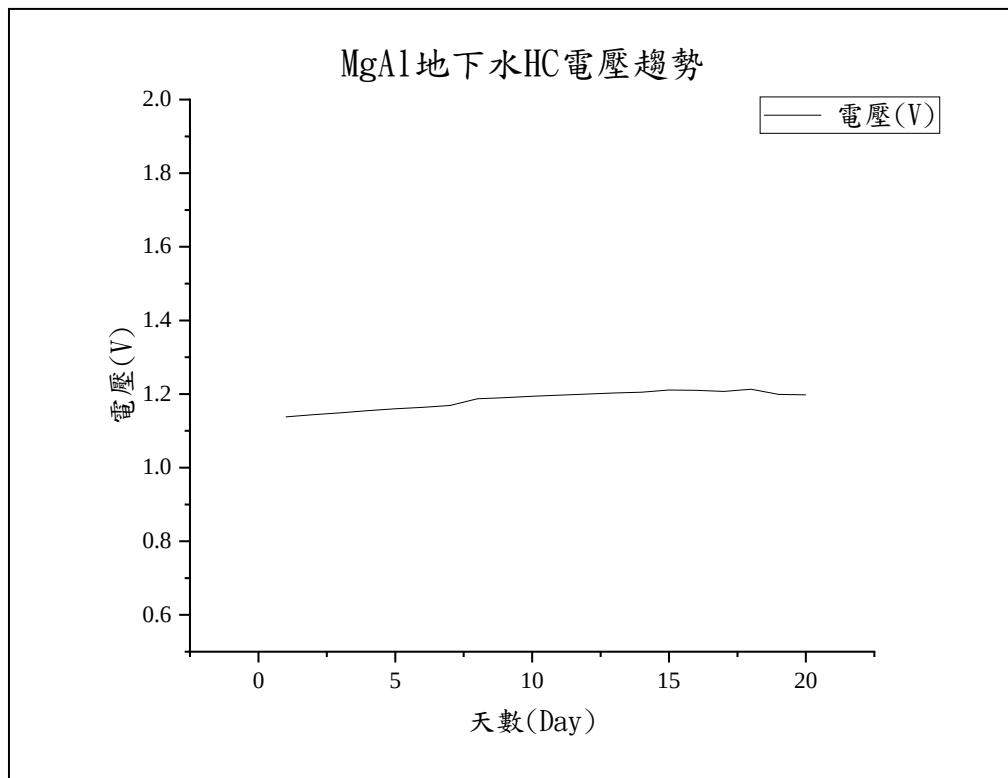


圖 7.7. 17 MgAl LDH 之地下水 HC 污染 MFC 電壓趨勢圖-中濃度(第 18 天, 1.21 V)

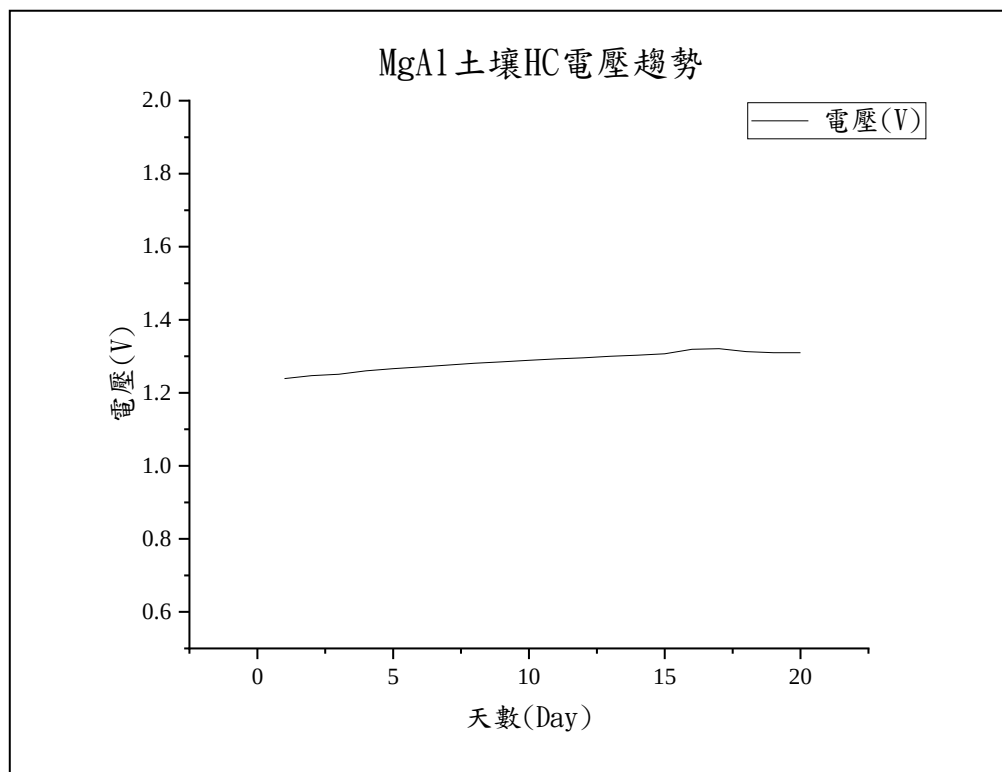


圖 7.7. 18 MgAl LDH 之土壤 HC 污染 MFC 電壓趨勢圖-中濃度(第 17 天, 1.321 V)

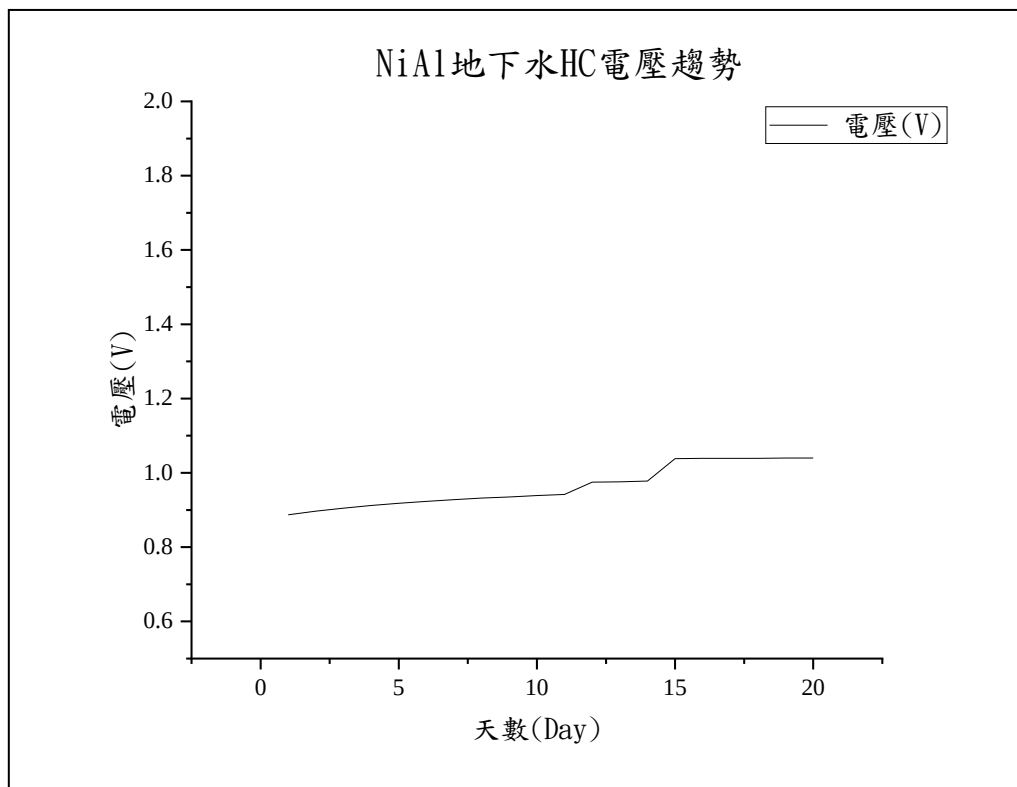


圖 7.7. 19 NiAl LDH 之地下水 HC 污染 MFC 電壓趨勢圖-低濃度(第 20 天, 1.04 V)

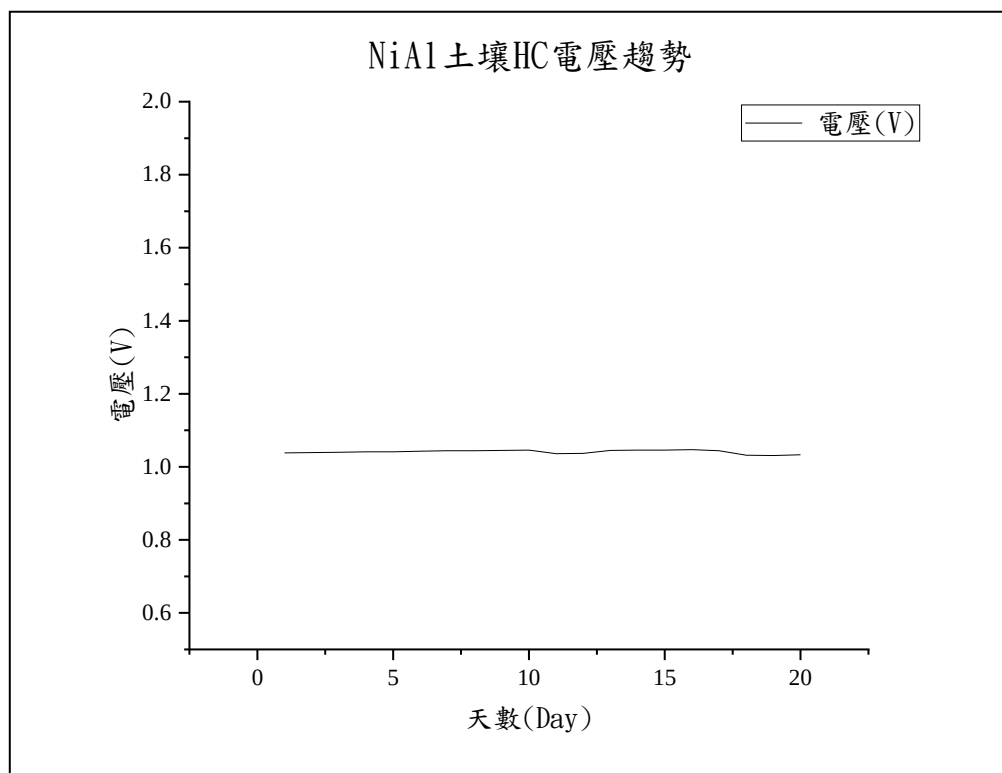


圖 7.7. 20 NiAl LDH 之土壤 HC 污染 MFC 電壓趨勢圖-低濃度(第 16 天, 1.047 V)

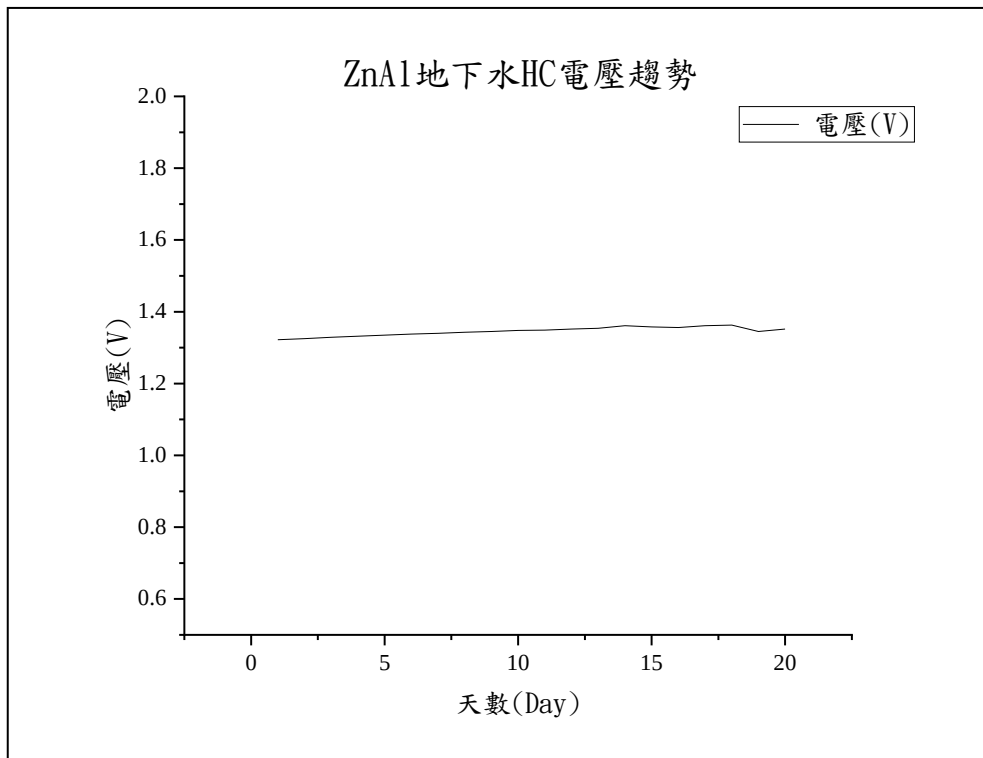


圖 7.7. 21 ZnAl LDH 之地下水 HC 污染 MFC 電壓趨勢圖-低濃度(第 18 天，1.363 V)

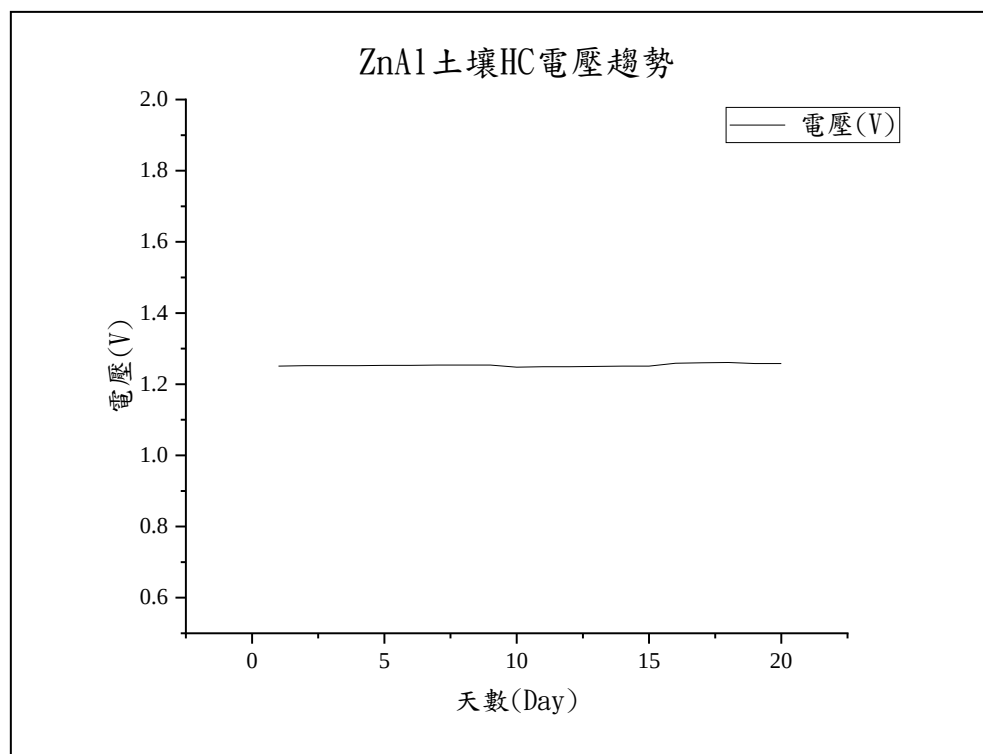


圖 7.7. 22 ZnAl LDH 之土壤 HC 污染 MFC 電壓趨勢圖-低濃度(第 18 天，1.261 V)

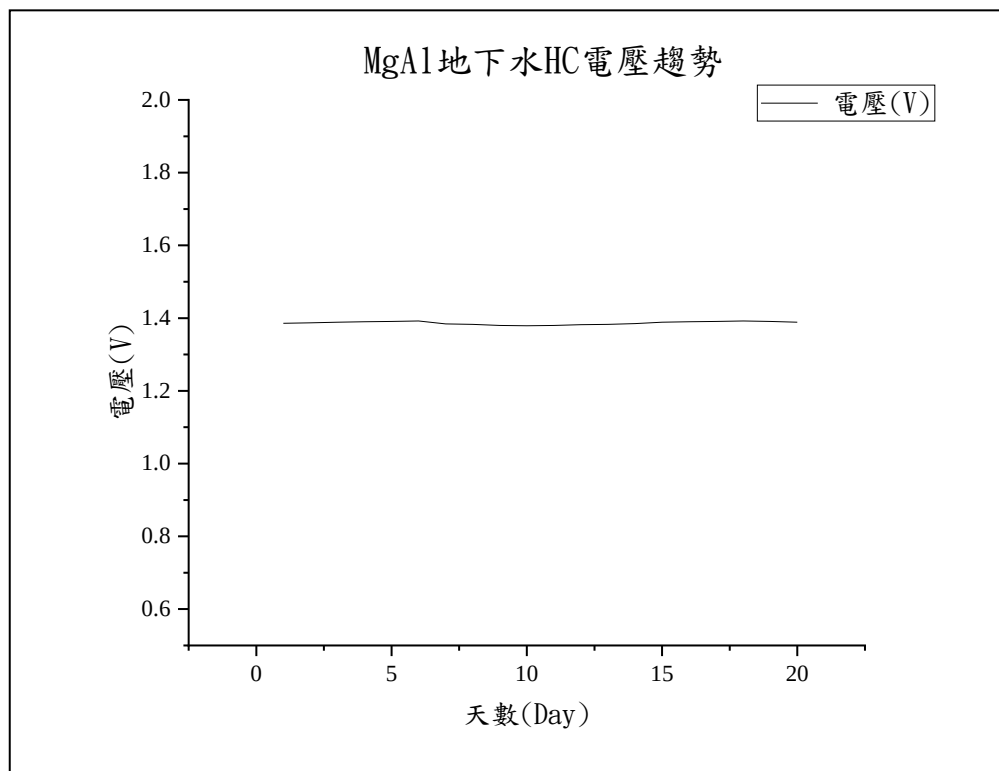


圖 7.7. 23 MgAl LDH 之地下水 HC 污染 MFC 電壓趨勢圖-低濃度(第 6 天, 1.392 V)

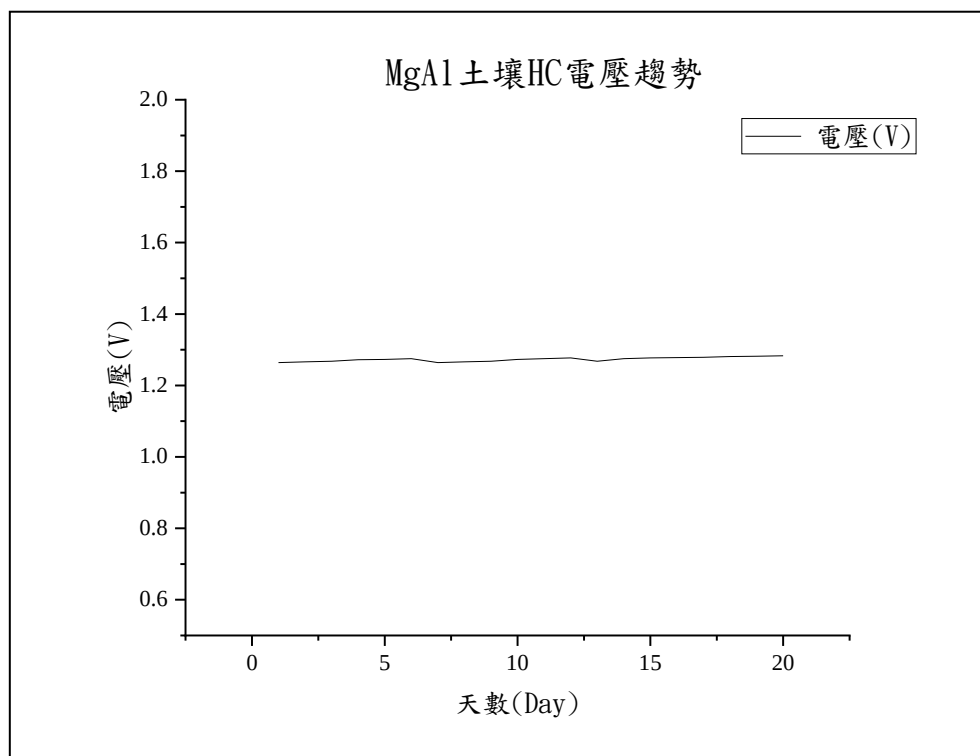


圖 7.7. 24 MgAl LDH 之土壤 HC 污染 MFC 電壓趨勢圖-低濃度(第 20 天, 1.283 V)



7.8 不同 LDH 製備 MOFs 活性碳碳氈微生物燃料電池電壓趨勢

圖 7.7.1 至圖 7.7.24 為土壤及地下水污染 MFC 電壓趨勢圖，相較於以往實驗無添加 NiAl LDH 與 ZnAl LDH、MgAl LDH 之地下水污染及土壤污染 MFC，MFC 綜合效能提升約 60%效能 (李慶昱，2015)，電池實驗週期(20 天)因應場地受限使用 4 組 MFC 為限。

本研究微生物燃料電池搭配不同 LDH 之 PFAS 電壓趨勢如圖 7.7.1 至圖 7.7.6 所示，此次實驗期程共 20 天，起始電壓數據分別為 1.439V、1.335V、1.54V、1.486V、1.163V、1.279V。而本次實驗電壓由高至低依序為：ZnAl LDH 之地下水>ZnAl LDH 之土壤>NiAl LDH 之地下水>NiAl LDH 之土壤>MgAl LDH 之土壤>MgAl LDH 之地下水。

研究微生物燃料電池搭配不同 LDH 之 HC(高濃度)電壓趨勢如圖 7.7.7 至圖 7.7.12 所示，此次實驗期程共 20 天，起始電壓數據分別為 1.286V、1.253V、1.383V、1.063V、1.318V、1.322V。而本次實驗電壓由高至低依序為：ZnAl LDH 之地下水> MgAl LDH 之土壤> MgAl LDH 之地下水> NiAl LDH 之地下水> NiAl LDH 之土壤> ZnAl LDH 之土壤。

研究微生物燃料電池搭配不同 LDH 之 HC(中濃度)電壓趨勢如圖 7.7.13 至圖 7.7.18 所示，此次實驗期程共 20 天，起始電壓數據分別為 1.373V、1.379V、1.318V、1.55V、1.213V、1.321V。而本次實驗電壓由高至低依序為：ZnAl LDH 之土壤> NiAl LDH 之土壤> NiAl LDH 之地下水> MgAl LDH 之土壤> ZnAl LDH 之地下水> MgAl LDH 之地下水。

研究微生物燃料電池搭配不同 LDH 之 HC(低濃度)電壓趨勢如圖 7.7.19 至圖 7.7.24 所示，此次實驗期程共 20 天，起始電壓數據分別為 1.04V、1.047V、1.363V、1.261V、1.392V、1.283V。而本次實驗電壓由高至低依序為：MgAl LDH 之地下水> ZnAl LDH 之地下水> MgAl LDH 之土壤> ZnAl LDH 之土壤>NiAl LDH 之土壤>NiAl LDH 之地下水。

總結實驗顯示，產電效果最佳的是 ZnAl LDH 在地下水及土壤的應用，並且 Sangrulkar 等人指出，使用活性碳所製作的電極會隨著熱裂解溫度的升高，輸出電壓的穩定性會提高 (Sangrulkar *et al.*, 2023)。由於此次實驗為連續式，每天需要補充高錳酸鉀，補充過程中陽極室暴露於空氣中，導致形成不完全厭氧狀態，這使得產電菌的活性快速下降，因此電壓下降起伏幅度較大。



7.9 極化曲線

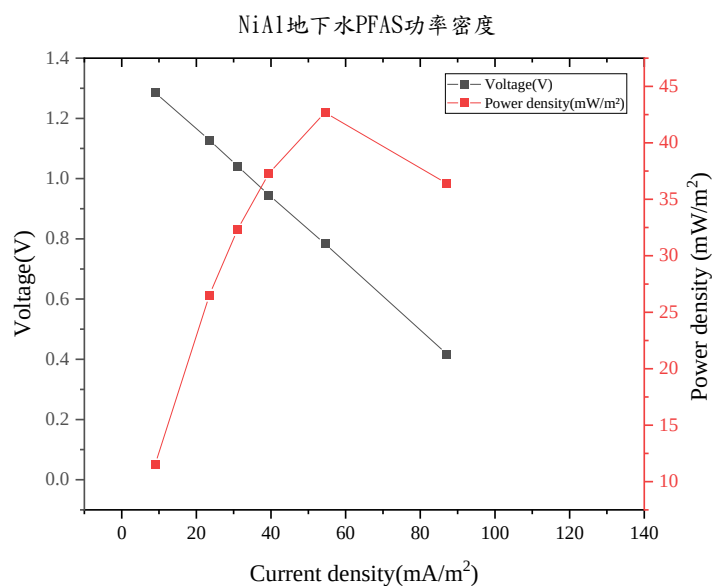


圖 7.9. 1 NiAl LDH PFAS 地下水極化曲線

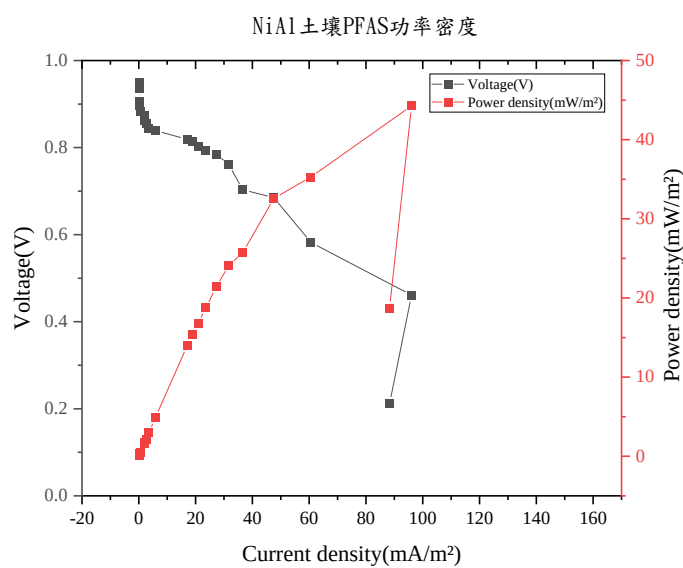


圖 7.9. 2 NiAl LDH PFAS 土壤極化曲線

圖 7.9.1 至圖 7.9.2 為 NiAl-LDH PFAS 土壤及地下水污染 MFC 功率密度圖，NiAl-LDH PFAS 地下水污染最高電壓 0.784V，功率密度為 42.68 mW/m²，NiAl-LDH PFAS 土壤污染最高電壓 0.461V，功率密度為 44.27 mW/m²。

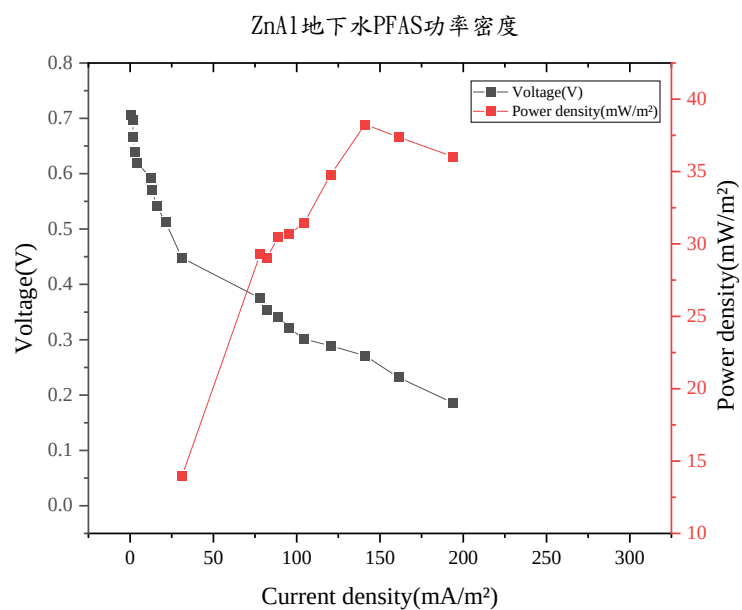


圖 7.9. 3 ZnAl LDH PFAS 地下水極化曲線

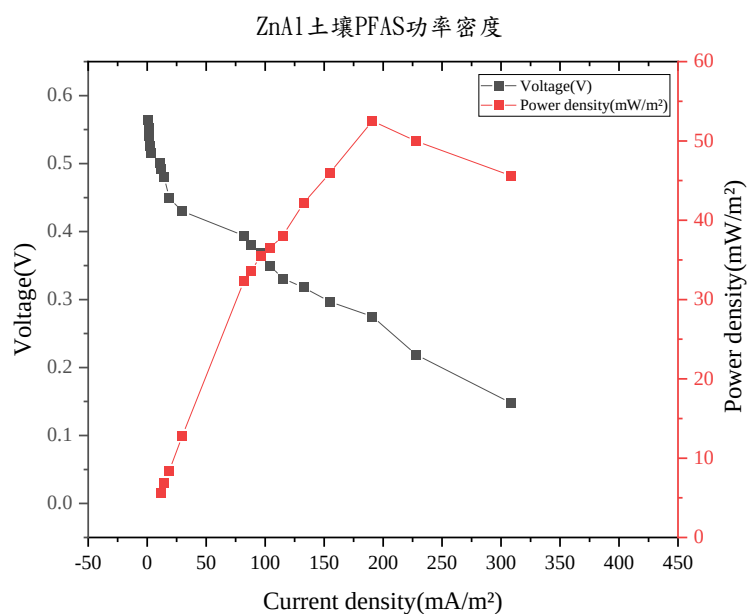


圖 7.9. 4 ZnAl LDH PFAS 土壤極化曲線

圖 7.9.3 至圖 7.9.4 為 ZnAl-LDH PFAS 土壤及地下水污染 MFC 功率密度圖，ZnAl-LDH PFAS 地下水污染最高電壓 0.271V，功率密度為 38.25 mW/m²，ZnAl-LDH PFAS 土壤污染最高電壓 0.275V，功率密度為 52.51 mW/m²。

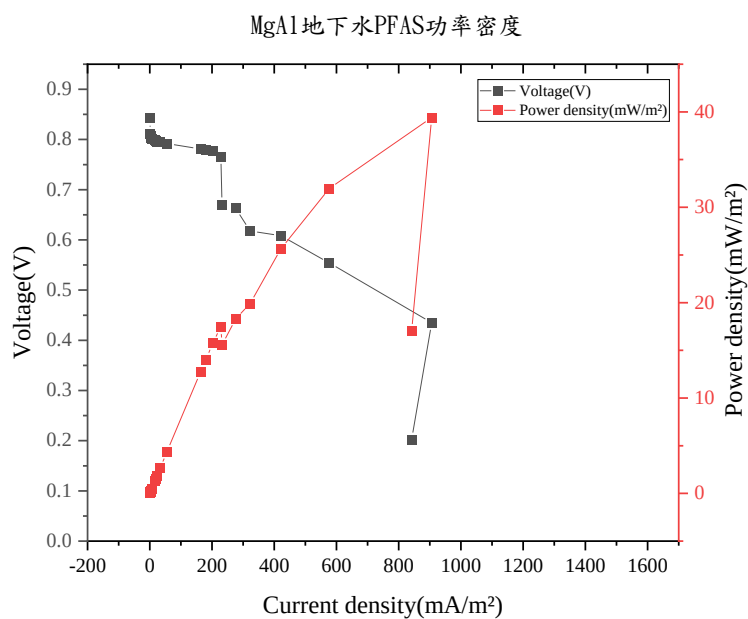


圖 7.9. 5 MgAl LDH PFAS 地下水極化曲線

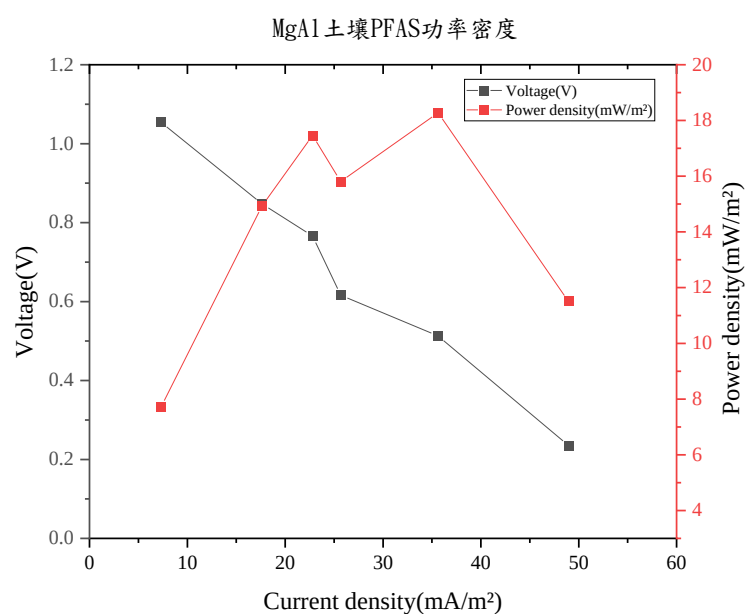


圖 7.9. 6 MgAl LDH PFAS 土壤極化曲線

圖 7.9.5 至圖 7.9.6 為 MgAl-LDH PFAS 土壤及地下水污染 MFC 功率密度圖，MgAl-LDH PFAS 地下水污染最高電壓 0.435V，功率密度為 39.42 mW/m²，MgAl-LDH PFAS 土壤污染最高電壓 0.513V，功率密度為 18.27 mW/m²。

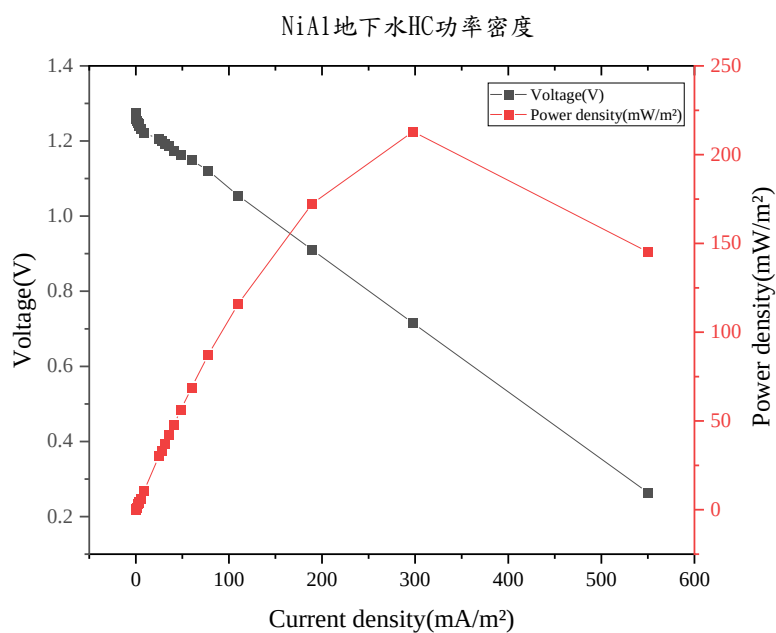


圖 7.9. 7 NiAl LDH HC 地下水極化曲線-高濃度

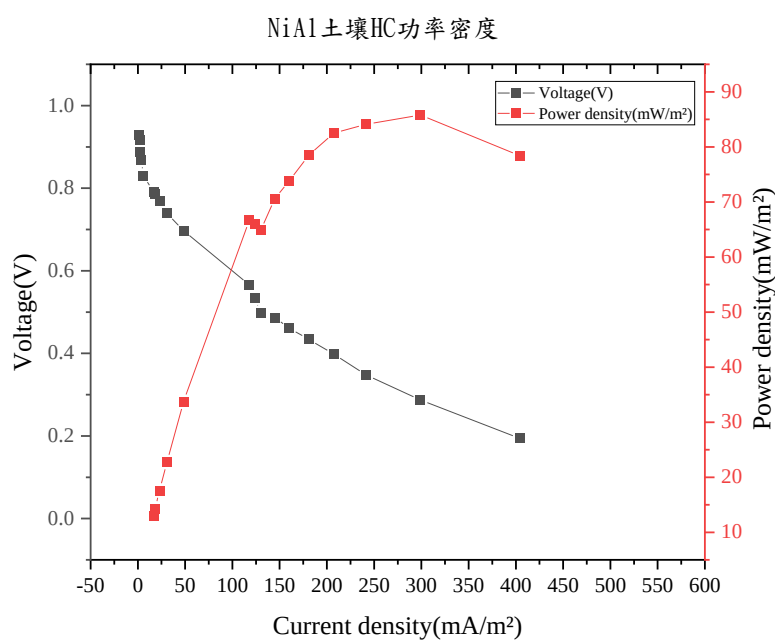


圖 7.9. 8 NiAl LDH HC 土壤極化曲線-高濃度

圖 7.9.7 至圖 7.9.8 為 NiAl-LDH HC 土壤及地下水污染 MFC 功率密度圖，NiAl-LDH HC 地下水污染最高電壓 0.784V，功率密度為 42.68 mW/m²，NiAl-LDH HC 土壤污染最高電壓 0.287V，功率密度為 85.8 mW/m²。

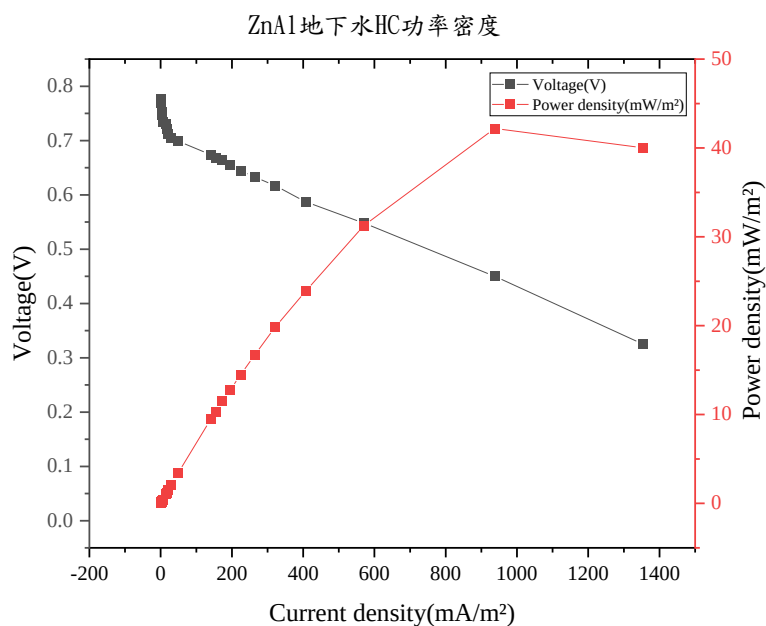


圖 7.9.9 ZnAl LDH HC 地下水極化曲線-高濃度

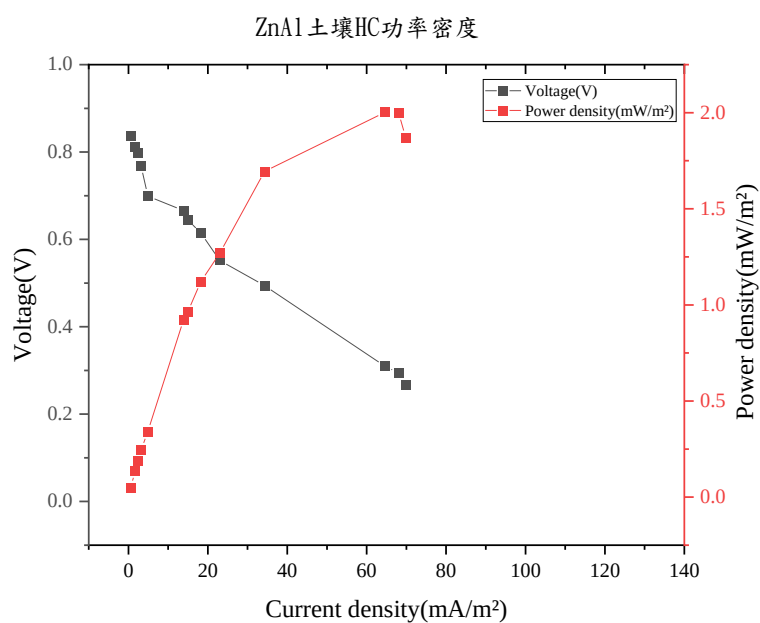


圖 7.9.10 ZnAl LDH HC 土壤極化曲線-高濃度

圖 7.9.9 至圖 7.9.10 為 ZnAl-LDH HC 土壤及地下水污染 MFC 功率密度圖，ZnAl-LDH HC 地下水污染最高電壓 0.45V，功率密度為 42.18 mW/m²，ZnAl-LDH HC 土壤污染最高電壓 0.294V，功率密度為 20 mW/m²。

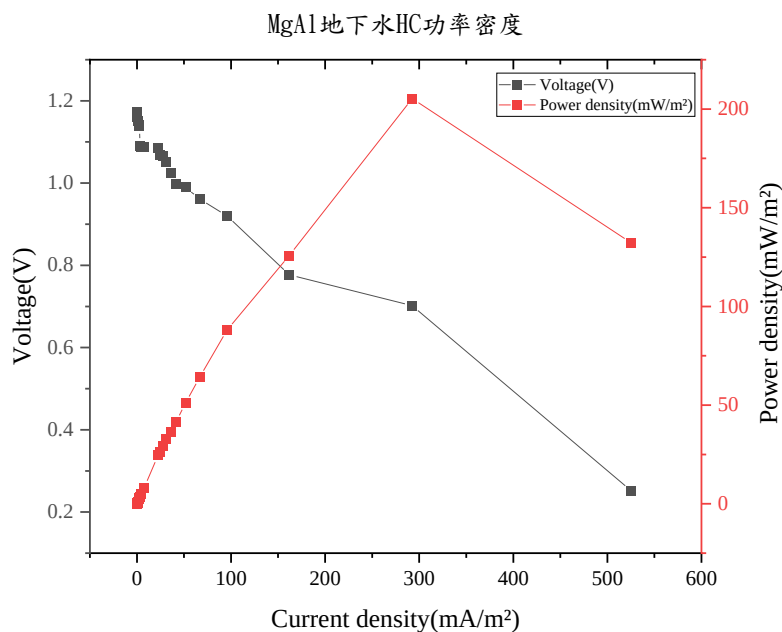


圖 7.9. 11 MgAl LDH HC 地下水極化曲線-高濃度

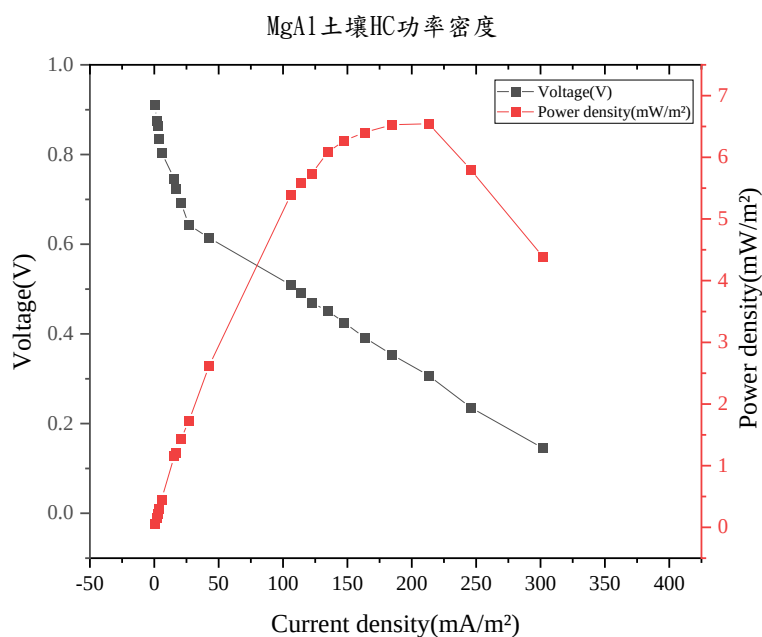


圖 7.9. 12 MgAl LDH HC 土壤極化曲線-高濃度

圖 7.9.11 至圖 7.9.12 為 MgAl-LDH HC 土壤及地下水污染 MFC 功率密度圖，MgAl-LDH HC 地下水污染最高電壓 0.702V，功率密度為 205.33 mW/m²，MgAl-LDH HC 土壤污染最高電壓 0.307V，功率密度為 65.45 mW/m²。

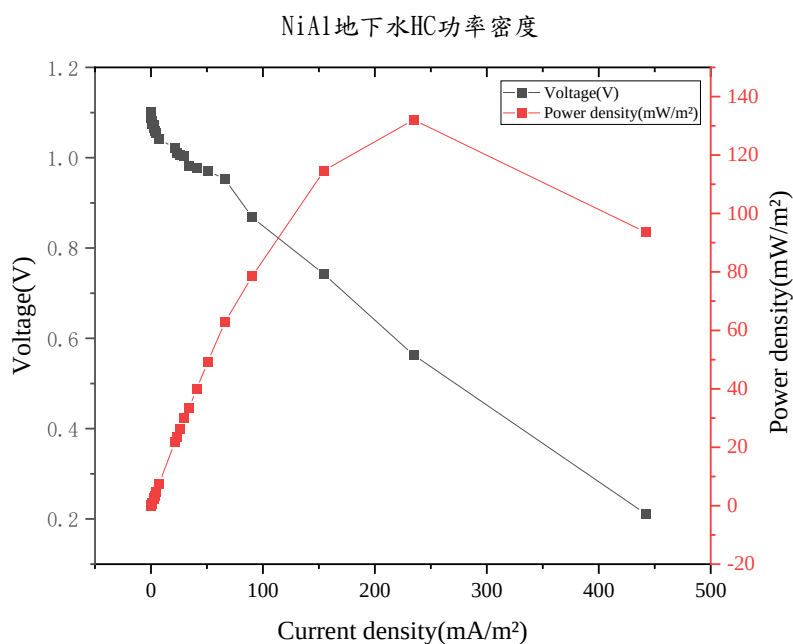


圖 7.9. 13 NiAl LDH HC 地下水極化曲線-中濃度

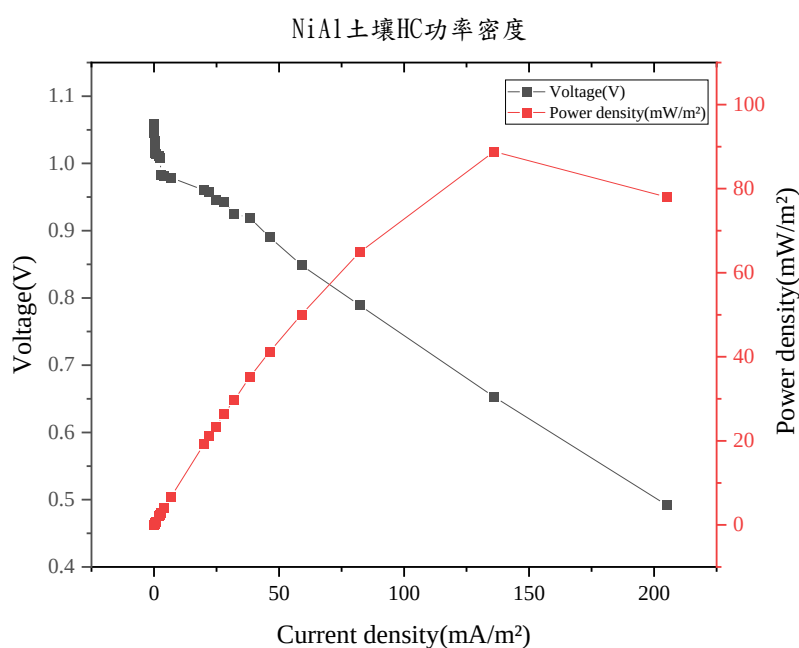


圖 7.9. 14 NiAl LDH HC 土壤極化曲線-中濃度

圖 7.9.13 至圖 7.9.14 為 NiAl-LDH HC 土壤及地下水污染 MFC 功率密度圖，NiAl-LDH HC 地下水污染最高電壓 0.563V，功率密度為 132.07 mW/m²，NiAl-LDH HC 土壤污染最高電壓 0.653V，功率密度為 88.83 mW/m²。

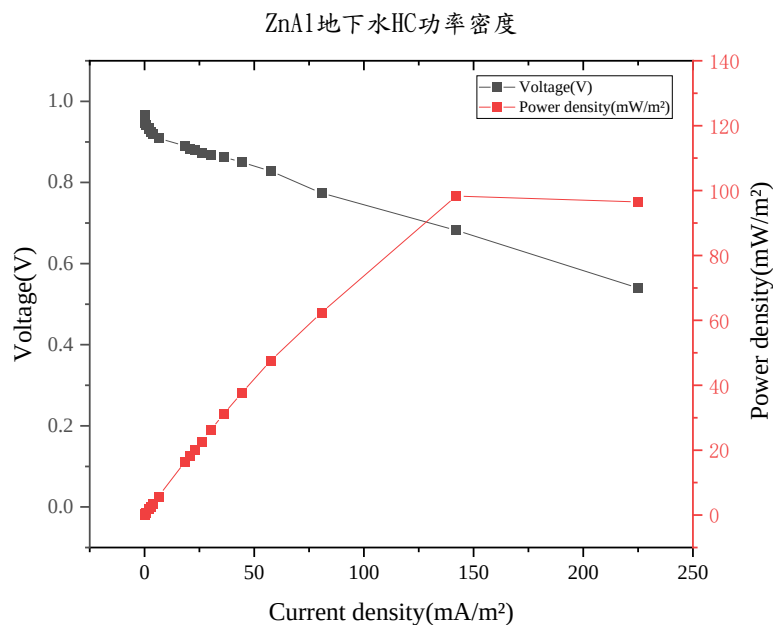


圖 7.9. 15 ZnAl LDH HC 地下水極化曲線-中濃度

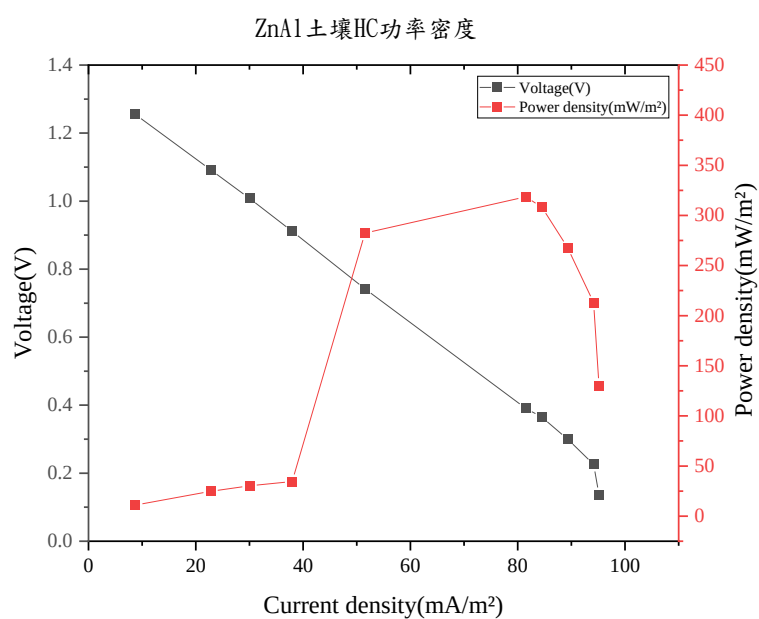


圖 7.9. 16 ZnAl LDH HC 土壤極化曲線-中濃度

圖 7.9.15 至圖 7.9.16 為 ZnAl-LDH HC 土壤及地下水污染 MFC 功率密度圖，ZnAl-LDH HC 地下水污染最高電壓 0.682V，功率密度為 98.31 mW/m²，ZnAl-LDH HC 土壤污染最高電壓 0.391V，功率密度為 318.5 mW/m²。

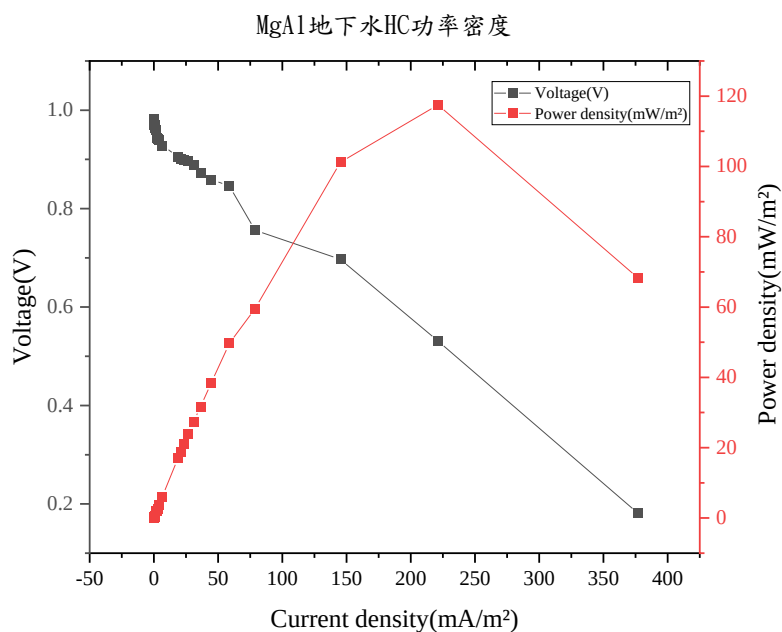


圖 7.9. 17 MgAl LDH HC 地下水極化曲線-中濃度

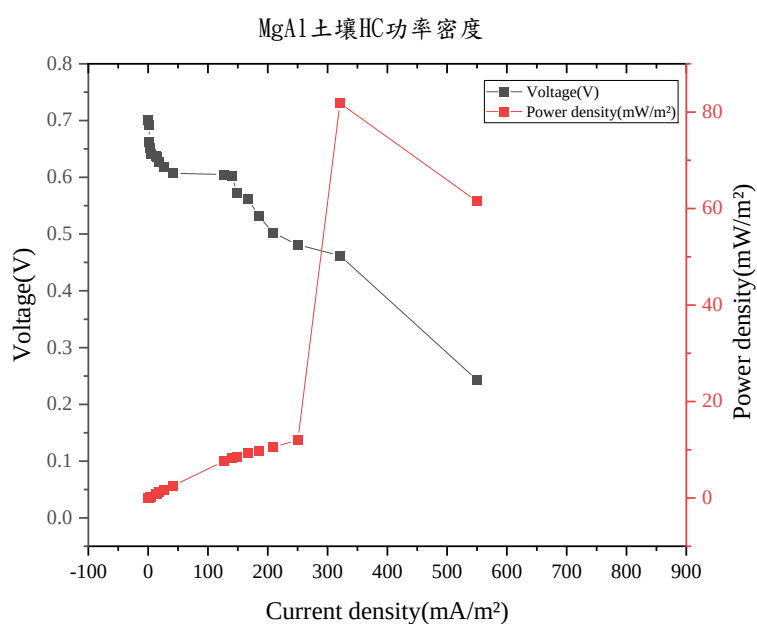


圖 7.9. 18 MgAl LDH HC 土壤極化曲線-中濃度

圖 7.9.17 至圖 7.9.18 為 MgAl-LDH HC 土壤及地下水污染 MFC 功率密度圖，MgAl-LDH HC 地下水污染最高電壓 1.129V，功率密度為 178.76 mW/m²，MgAl-LDH HC 土壤污染最高電壓 0.426V，功率密度為 81.82 mW/m²。

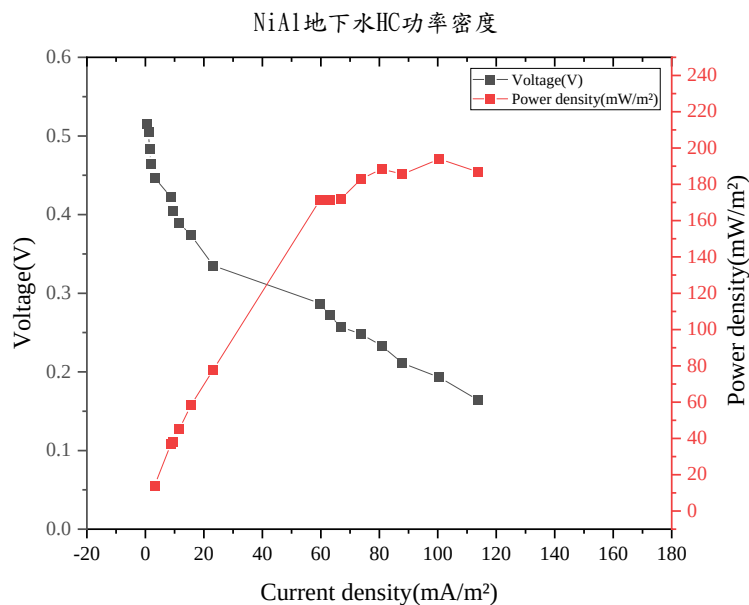


圖 7.9. 19 NiAl LDH HC 地下水極化曲線-低濃度

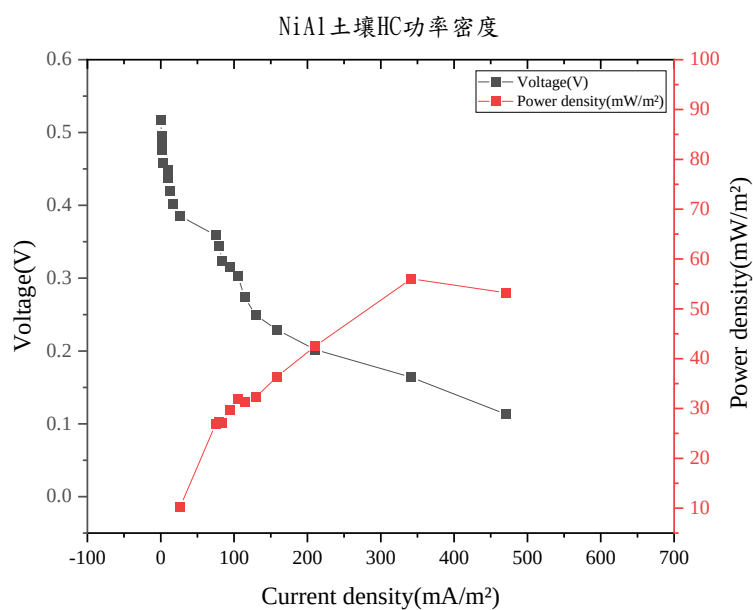


圖 7.9. 20 NiAl LDH HC 土壤極化曲線-低濃度

圖 7.9.19 至圖 7.9.20 為 NiAl-LDH HC 土壤及地下水污染 MFC 功率密度圖，NiAl-LDH HC 地下水污染最高電壓 0.193V，功率密度為 194 mW/m²，NiAl-LDH HC 土壤污染最高電壓 0.164V，功率密度為 56.03 mW/m²。

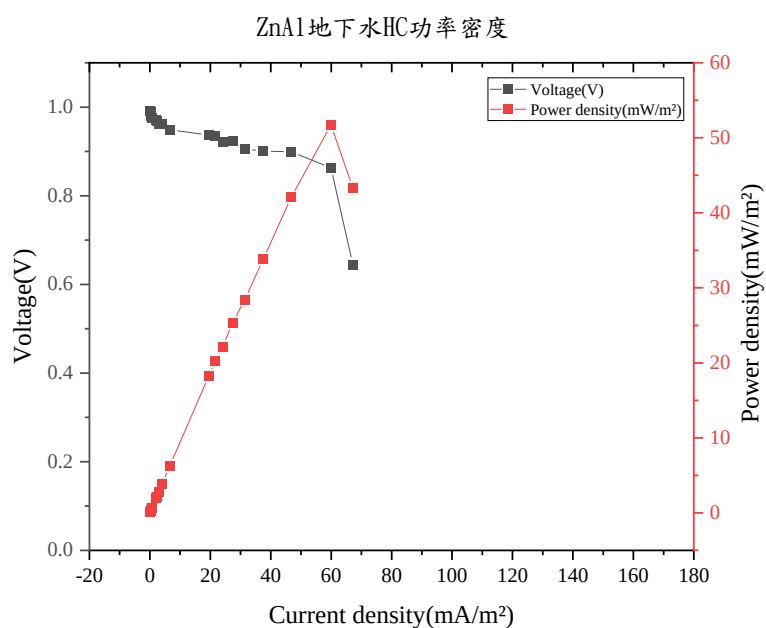


圖 7.9. 21 ZnAl LDH HC 地下水極化曲線-低濃度

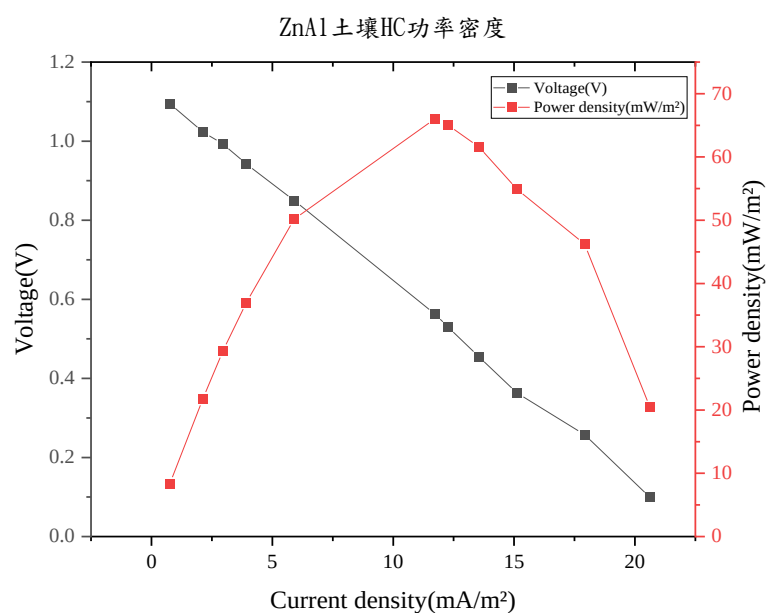


圖 7.9. 22 ZnAl LDH HC 土壤極化曲線-低濃度

圖 7.9.21 至圖 7.9.22 為 ZnAl-LDH HC 土壤及地下水污染 MFC 功率密度圖，ZnAl-LDH HC 地下水污染最高電壓 0.863V，功率密度為 51.72 mW/m^2 ，ZnAl-LDH HC 土壤污染最高電壓 0.563V，功率密度為 66.03 mW/m^2 。

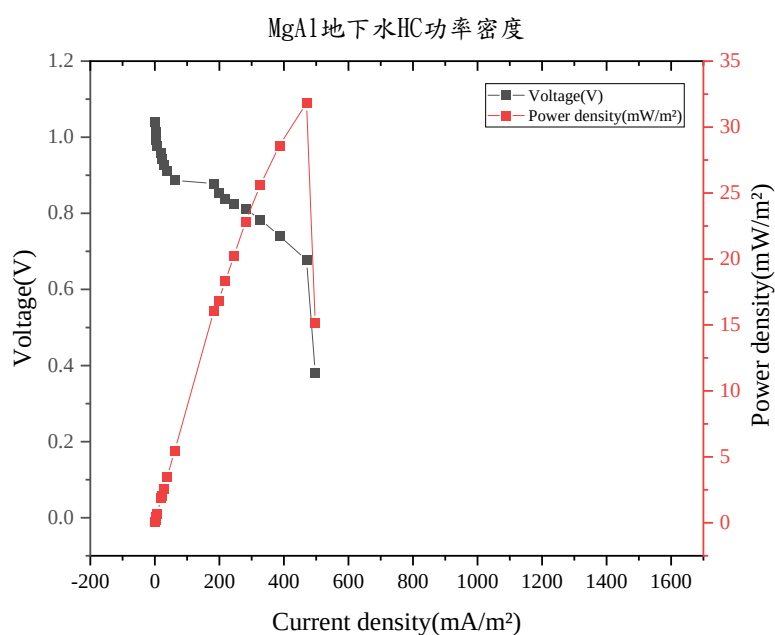


圖 7.9. 23 MgAl LDH HC 地下水極化曲線-低濃度

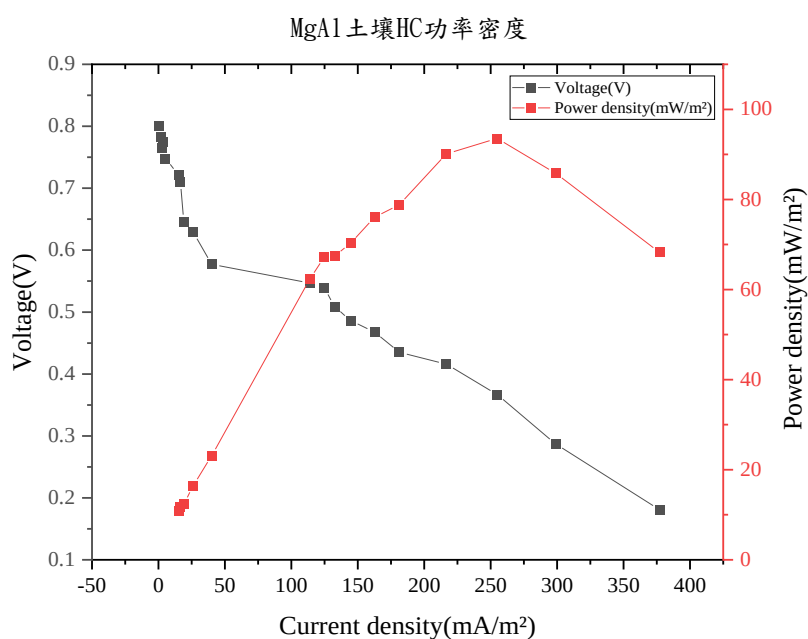


圖 7.9. 24 MgAl LDH HC 土壤極化曲線-低濃度

圖 7.9.23 至圖 7.9.24 為 MgAl-LDH HC 土壤及地下水污染 MFC 功率密度圖，MgAl-LDH HC 地下水污染最高電壓 0.677V，功率密度為 31.82 mW/m²，MgAl-LDH HC 土壤污染最高電壓 0.367V，功率密度為 93.53 mW/m²。



7.10 LDH 活性碳碳氈微生物燃料電池極化曲線

本研究微生物燃料電池搭配不同批覆 LDH 活性碳碳氈之極化曲線 如圖 7.9.1 至圖 7.9.24 所示，本次實驗期程共計 20 天。實驗結果表明，功率密度最高者 ZnAl LDH HC 土壤污染（中濃度）最高電壓 0.391V，功率密度為 318.5 mW/m²，其次為 NiAl LDH HC 地下水污染（低濃度）最高電壓 0.193V，功率密度為 194 mW/m²，再者為 MgAl LDH HC 地下水污染（中濃度）最高電壓 1.129V，功率密度為 178.76 mW/m²。

研究所使用的活性碳結合 LDH 製成 MOF 電極，不僅在產電效能及功率密度上取得了顯著成果，還展示了其在微生物燃料電池中的優勢。活性碳具有高比表面積和良好的導電性，使其能與微生物建立良好的相容性，這一特性有助於促進微生物的生長與電子的有效傳遞，從而提升微生物燃料電池的整體效能(Manasa *et al.*, 2022)。除了提升電子傳遞效率之外，活性碳還能提供更多的活性位點，增強微生物與電極的相互作用，進一步優化了系統的電化學性能。

根據 Su 等人（2022）的研究，活性碳作為電極材料不僅具備優秀的導電性和穩定性，還能有效降低微生物燃料電池的內部電阻，這對於提升燃料電池的產電能力至關重要。LDH 材料能提供穩定的電子傳遞通道，從而增強系統的產電效能。同時，活性碳的多孔結構有利於增加微生物的附著面積，促進微生物的繁殖和代謝，最終達到提升長期穩定性與產電持久性的效果(Su *et al.*, 2022)。這些特性使活性碳成為微生物燃料電池中極具潛力的電極材料。

7.11 MFC 污染物降解後之濃度

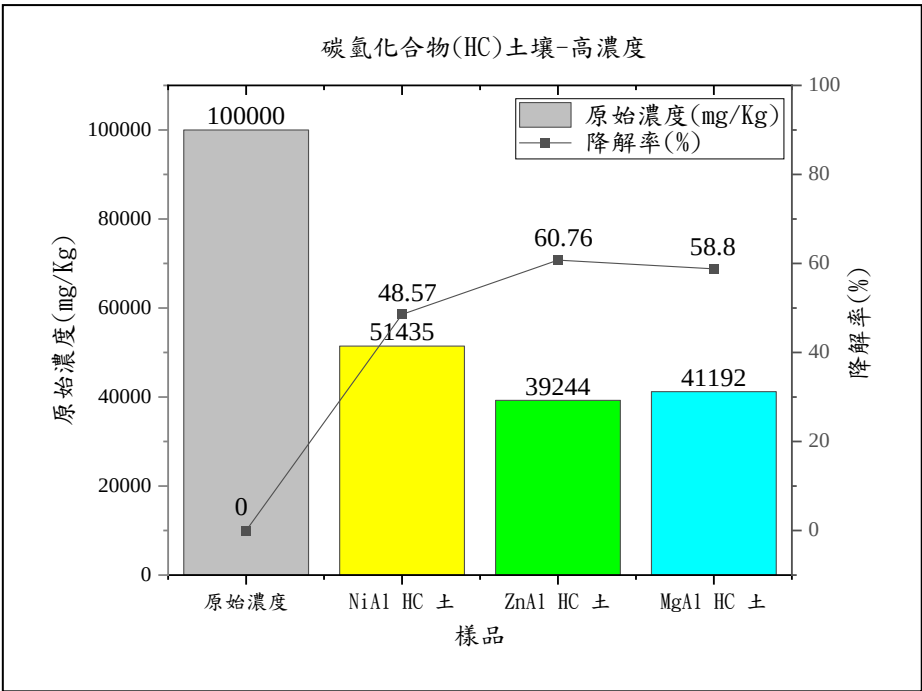


圖 7.11. 1 碳氫化合物(HC)土壤降解後之濃度-高濃度

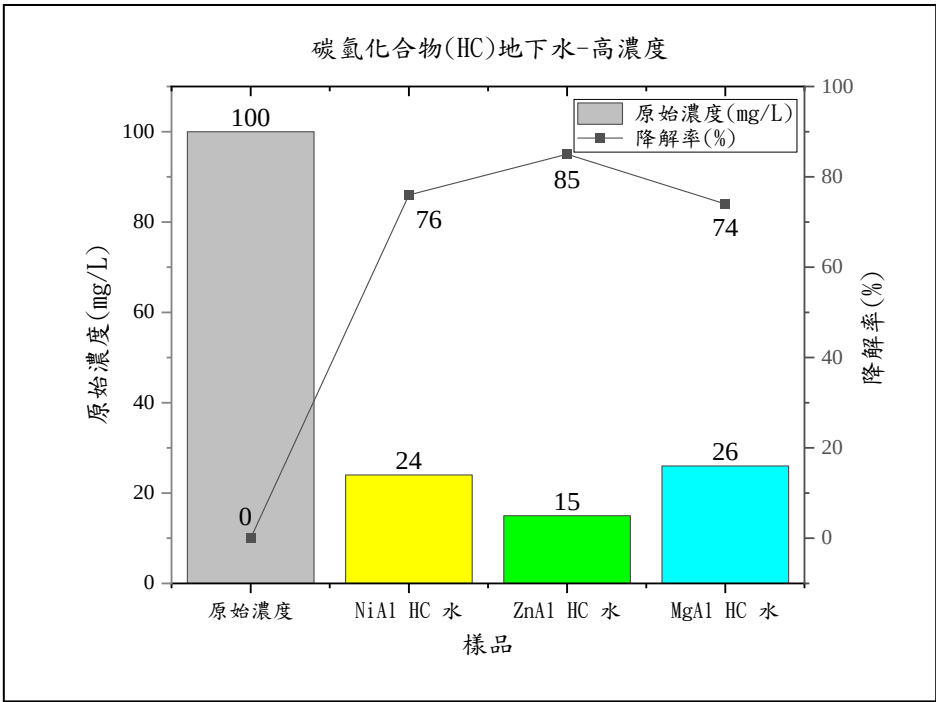


圖 7.11. 2 碳氫化合物(HC)地下水降解後之濃度-高濃度

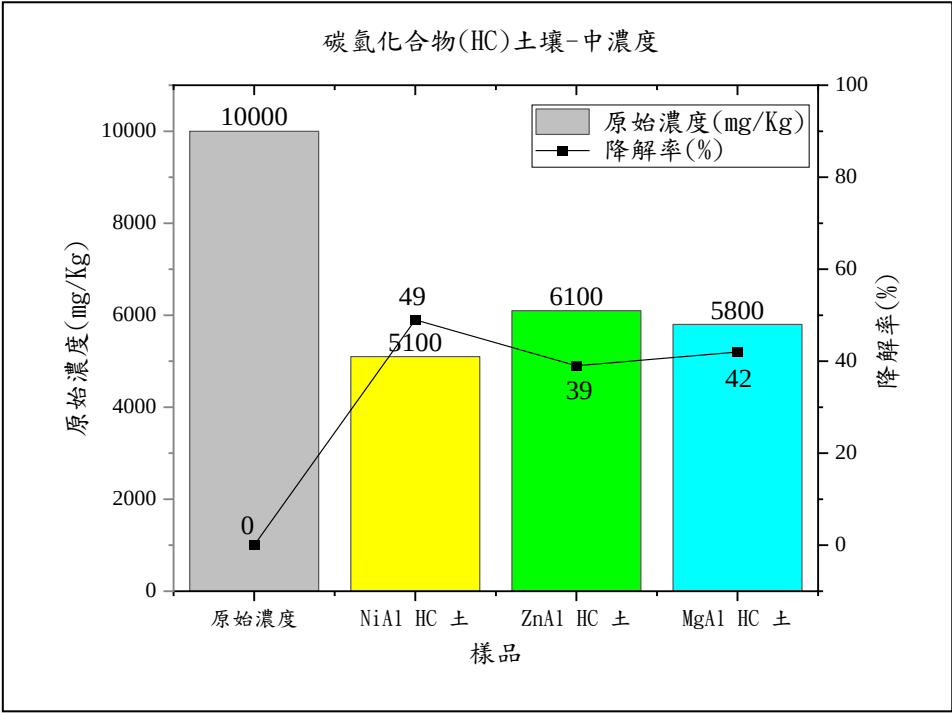


圖 7.11. 3 碳氫化合物(HC)土壤降解後之濃度-中濃度

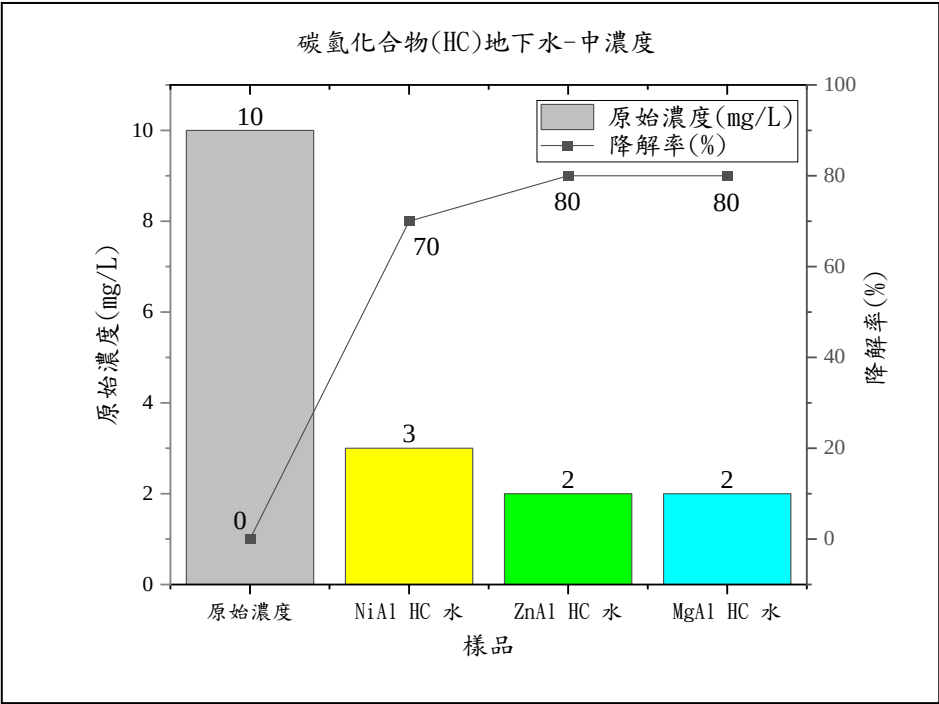


圖 7.11. 4 碳氫化合物(HC)地下水降解後之濃度-中濃度

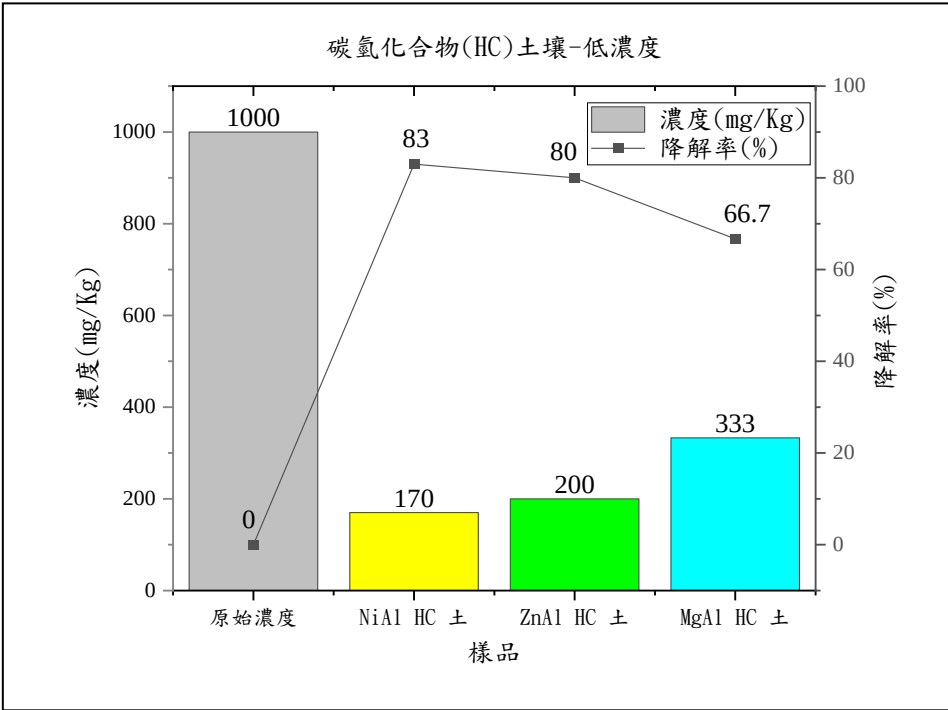


圖 7.11. 5 碳氫化合物(HC)土壤降解後之濃度-低濃度

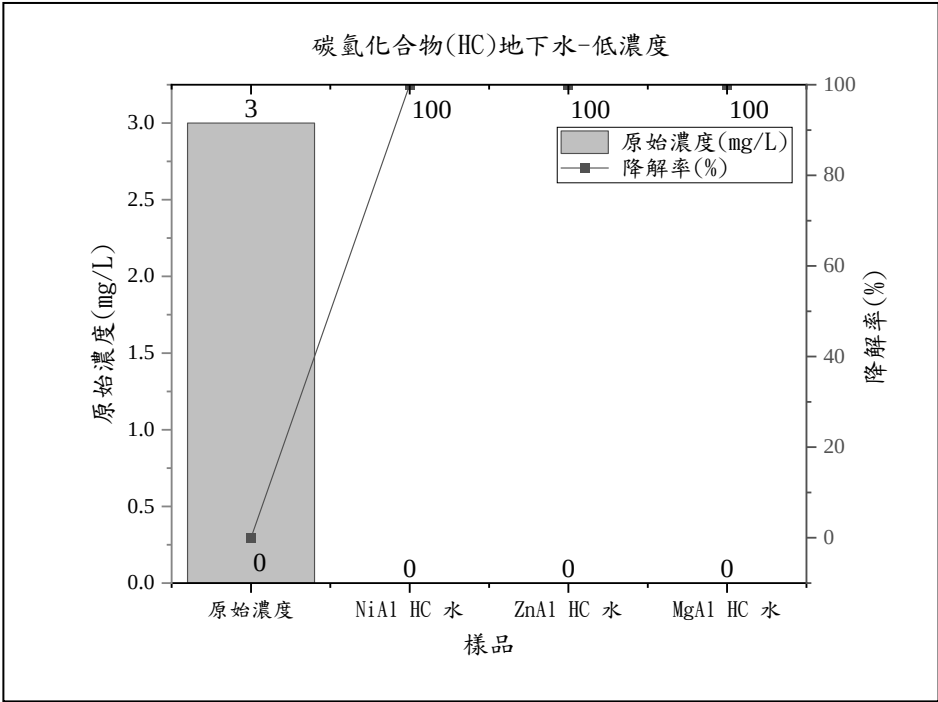


圖 7.11. 6 碳氫化合物(HC)地下水降解後之濃度-低濃度

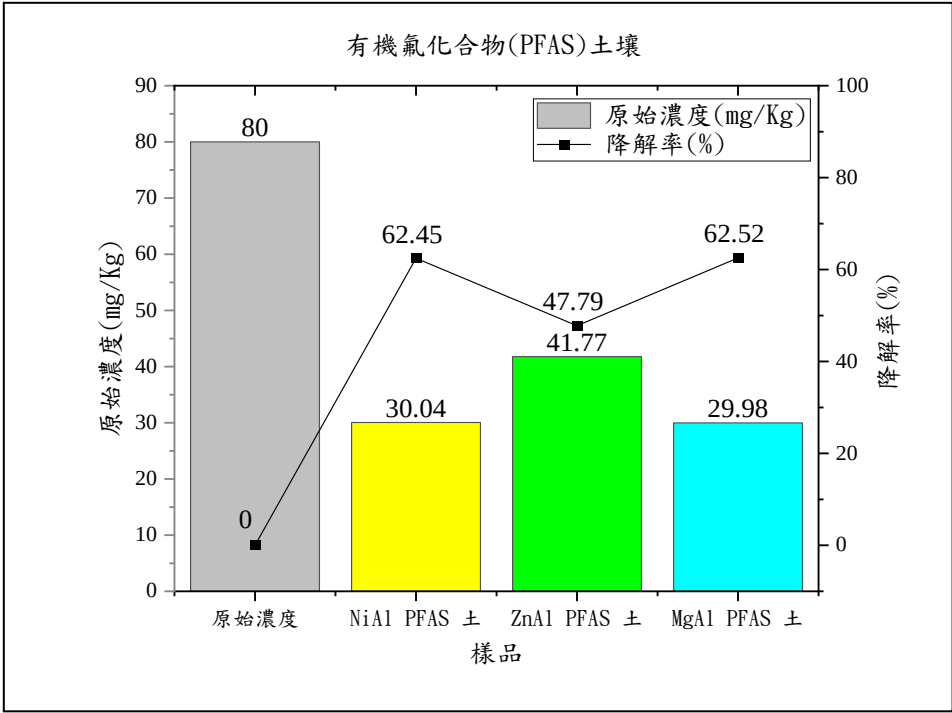


圖 7.11. 7 有機氟化合物(PFAS)土壤吸附去除後之濃度

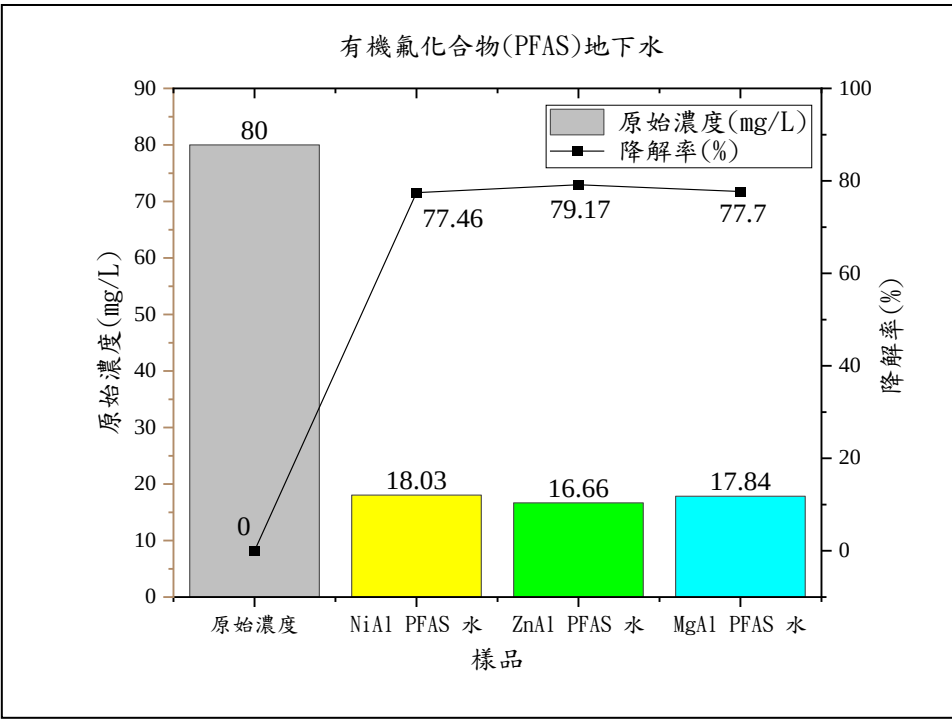


圖 7.11. 8 有機氟化合物(PFAS)地下水吸附去除後之濃度



7.12 探討微生物燃料電池污染物之降解後濃度

本研究使用微生物燃料電池搭配不同 LDH 及(高濃度)之碳氫化合物 (HC)，並使用 PetroFLAG 儀器分析並探討其降解效果，如圖 7.11.1 至圖 7.11.2 所示，本次實驗期程共計 20 天。實驗結果顯示，HC 土壤污染平均降解濃度達到 43957 mg/kg 與原始濃度相比約 56.04%降解率，地下水污染平均降解濃度達到 21.67 mg/L 與原始濃度相比約 78.33%降解率，結果表明在土壤的降解能力更佳。

使用微生物燃料電池搭配不同 LDH 及(中濃度)之碳氫化合物 (HC)，探討其降解效果，如圖 7.11.3 至圖 7.11.4 所示，本次實驗期程共計 20 天。實驗結果顯示，HC 土壤污染平均降解濃度達到 4667 mg/kg 與原始濃度相比約 53.3%降解率，地下水污染平均降解濃度達到 2.33 mg/L，與原始濃度相比約 76.7%降解率，結果表明在地下水的降解能力更佳。

使用微生物燃料電池搭配不同 LDH 及(低濃度)之碳氫化合物 (HC)，探討其降解效果，如圖 7.11.5 至圖 7.11.6 所示，本次實驗期程共計 20 天。實驗結果顯示，HC 土壤污染平均降解濃度達到 234.3 mg/kg 與原始濃度相比約 76.57%降解率，地下水污染平均降解濃度達到 3 mg/L 與原始濃度相比約 100%降解率，結果表明在地下水的降解能力更佳。

使用微生物燃料電池搭配不同 LDH 及 80mg/L 之有機氟化物 (PFAS)，探討其吸附去除效果，如圖 7.11.7 至圖 7.11.8 所示，本次實驗期程共計 20 天。實驗結果顯示，PFAS 土壤污染平均吸附去除濃度達到 33.91 mg/kg 與原始濃度相比約 57.61%降解率，地下水污染平均吸附去除濃度達到 17.51 mg/L 與原始濃度相比約 78.11%降解率，結果表明在地下水的降解能力更佳。

針對高濃度碳氫化合物，研究發現土壤中碳氫化合物的降解率為 56.04%，地下水中的降解率則達到 78.33%，表明微生物燃料電池對高濃度污染物的降解能力在地下水環境中更為有效。中濃度碳氫化合物的實驗結果顯示，土壤中的降解率約為 53.3%，地下水中的降解率為 76.7%，與高濃度的結果相似，地下水中污染物的降解效率略高於土壤。在低濃度碳氫化合物的情況下，地下水的降解效果尤為顯著，達到了 100%的完全降解，而土壤中的降解率則為 76.57%。這些結果表明，隨著碳氫化合物濃度的降低，地下水中的降解能力逐漸顯示出其優勢，特別是在低濃度污染情況下，地下水的降解效果最佳。

對於有機氟化物 (PFAS)，雖然降解的難度較碳氫化合物大，但經 LDH 極板材料吸附去除實驗後仍發現，土壤中的 PFAS 去除率約為 57.61%，地下水中的去除率達 78.11%。使用 LDH 材料對於 PFAS 具有一定的吸附去除潛力 (Zhao *et al.*, 2021)，尤其是在地下水中，去除效果明顯優於土壤。



7.13 MFC 極版再生利用

本實驗所使用之微生物燃料電池電極，用於吸附去除地下水與土壤中污染，MOF 電極板單次使用後，可通過熱處理或化學浸提回收有價成分，並對殘渣進行穩定化處理，以減少環境污染和資源浪費。在實驗結束後可使用化學混凝沉澱法處理電極表面氟離子污染物 (Zhang *et al.*, 2022)，將碳氈表面去除污染物後再經去離子水清洗，進行高溫燒結（去除表面有機污染物），此方法同時能將電極所吸附之污染物分離收集且能使電極達成再生利用之目標。

參考作者(Ye *et al.*, 2024)的製備方法，首先將碳氈 (Carbon felt, CF) 浸泡在體積比為 3:1 的濃硫酸和濃硝酸混合物中，並將該碳氈置於燒杯溶液中浸泡 12 小時，以實現對 CF 的初步氧化處理。此步驟可有效增加碳氈表面的氧官能基，有助於後續的製備操作。浸泡過程完成後，使用大量去離子水將 CF 洗滌 3 次，並且在每次洗滌後進行超音波振盪 20 分鐘，以確保 CF 中殘留的硫酸和硝酸被徹底清除，避免其影響後續的反應效果和材料性能。

接下來，將清洗乾淨的 CF 轉移至裝有濃硝酸的燒瓶容器中，並在 100°C 條件下使用磁石攪拌器進行攪拌 2 小時。此攪拌步驟進一步增強了碳氈的表面氧化程度，使其表面親水性顯著提高。完成回流後，需再次使用蒸餾水和無水乙醇交替洗滌，直至洗滌液呈中性，確保徹底去除碳氈表面的酸性物質及其它可能殘留的雜質，從而為後續應用提供一個乾淨且具良好親水性和活性反應的極板材料，即可再次製備為微生物燃料電池之電極材料。



8. 結論

本次實驗將活性碳及 LDH 披覆於市售碳氈製成 MOFs 結構極版，作為微生物燃料電池之陽極室電極，並探討其產電效率及吸附去除有機氟化物 (PFAS) 與降解碳氫化合物 (HC) 之效能。綜合各項分析，可以整理出以下結論：

1. 透過各項儀器分析，ZnAl、NiAl、MgAl 三種 LDH 的官能基、表面結構與層狀晶體結構不僅有助於提高電子轉移效率、促進微生物附著及生物催化活性，還能提供穩定的生物膜和增強導電性，從而提升微生物燃料電池(MFC)的穩定性和性能。
2. 實驗產生最高電壓依序為：ZnAl 土壤 (HC 中濃度) > ZnAl 地下水 (PFAS 濃度) > ZnAl 土壤 (PFAS 濃度)；功率密度依序為：ZnAl 土壤 (HC 中濃度) > NiAl 地下水 (HC 低濃度) > MgAl 地下水 (HC 中濃度)。
3. 本研究透過電壓趨勢及功率密度得出 LDH 材料對於提升微生物燃料電池 (MFC) 的效能顯著，尤其是 ZnAl LDH 在污染土壤及地下水中的應用展現了最佳的產電效果和穩定性，儘管實驗過程中陽極室暴露於空氣導致不完全厭氧環境，影響了電壓穩定性，未來若能優化此環節，有望能進一步提升 MFC 的穩定運行效果，推動其在實際環境的應用發展。
4. 透過添加 LDH 材料的 MFC 系統觀察其降解污染物能力，研究表明微生物燃料電池對各個不同碳氫化合物 (HC) 污染物濃度的降解能力都有顯著的效果，隨著碳氫化合物濃度的降低，地下水與土壤中的降解能力逐漸顯示出其優勢，並且微生物燃料電池在吸附去除有機氟化物 (PFAS) 污染時，尤其是在地下水環境中，具有更加優秀的吸附去除效果。
5. 使用柑橘皮活性碳結合 LDH 製成之 MOFs 結構極版，具備良好的導電性和高比表面積，有助於增強微生物燃料電池的電極反應，從而提高電子轉移效率，提升整體產電能力。這一方法不僅促進了農業廢棄物的再利用，減少環境負荷，同時也為微生物燃料電池的性能優化提供了一種低成本且環保的替代材料。
6. 本實驗利用柑橘皮製備活性碳作為微生物燃料電池 (MFC) 之電極，成功將農業廢棄物轉化為可再利用材料，不僅有效提升了 MFC 的產電效能，還可展現出其在環境友好技術中的應用潛力。



9. 建議

本次實驗將活性碳及 LDH 披覆於市售碳氈製成 MOFs，並作為微生物燃料電池之陽極室電極，並探討其產電效率及去除有機氟化物（PFAS）和碳氫化合物（HC）之效能。綜合數據及結論，可以歸納出以下未來實驗建議：

1. 首先，可以進一步優化柑橘皮活性碳的製備工藝，探討不同活化方法（如化學活化或物理活化）對其孔隙結構、導電性及表面化學性的影響，以進一步提升微生物燃料電池（MFC）的電極效能。同時，應對不同條件下的活性碳進行長期穩定性測試，確保其在實際應用中的持續產電能力。
2. 其次，未來實驗可以考慮將其他廢棄物（如稻殼、廚餘等）製備為活性碳，並將其作為 MFC 的電極材料，以比較不同材料在產電性能及污染物降解效果上的差異，探索農業廢棄物再利用的更多可能性。此外，應研究不同廢棄物材料在不同污染物降解環境中的適應性，尤其是針對難降解的有機污染物如有機氟化合物（PFAS）。
3. 再者，建議未來在實驗中探討微生物燃料電池與其他環境修復技術的結合，如電化學反應或催化劑輔助降解，從而進一步提升污染物降解效率。對於更複雜的多重污染環境，應測試 MFC 在多種污染物同時存在下的降解能力，以驗證其應用於實際複合污染環境的可行性。
4. 未來實驗可進一步優化 MFC 的設計與組態，如電極結構、膜材料以及模具配置等，並進行更大規模的現場試驗，評估 MFC 在真實環境中的效能表現及應用潛力。這些探索將有助於推動微生物燃料電池技術的實際應用與商業化。
5. 最後，本研究雖採用創新技術與高效材料，但其製備成本較高，可能限制實際應用範圍。建議未來進一步優化材料合成工藝，降低成本，同時評估技術在大規模污染修復中的經濟效益與操作可行性，提升實際推廣價值。此外，可探索替代性低成本材料以維持性能並兼顧經濟性。



參考文獻

1. 環境部環境管理署土壤及地下水污染整治網 <https://sgw.moeenv.gov.tw/public>
2. Abderrazek, K., Najoua, F. S., & Srasra, E. (2016). Synthesis and characterization of [Zn–Al] LDH: Study of the effect of calcination on the photocatalytic activity. *Applied Clay Science*, 119, 229–235.
3. Ahmad, M., *et al.* (2021). Biochar-mediated remediation of heavy metals from wastewater and soil. *Journal of Environmental Management*, 277, 111414.
4. Anderson, J., *et al.* (2020). "Optimizing Microbial Fuel Cell Configurations for Soil Remediation." *Environmental Science and Technology*, 45(7), 2871–2877.
5. ant, D., Van Bogaert, G., Diels, L., & Vanbroekhoven, K. (2010). A review of the substrates used in microbial fuel cells (MFC) for sustainable energy production. *Bioresource technology*, 101(6), 1533-1543.
6. Bahrami, H., Mejmarian, M., Jafari, H., & Rasekh, F. (2022). Synthesis of new Fe/Cr LDH for removal of Hg^{2+} ion from aqueous solutions and adsorption study using smartphone-based colorimetry. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 18, 100702.
7. Ban, Y., Xu, S., Shang, H., Gao, J., & Zhang, M. (2019). Behavior of Chlorinated Solvent DNAPLs in Low Permeability Formations: A Review. *Groundwater*, 57(1), 15–26.
8. Brown, A., *et al.* (2020). "Practical Considerations in Soil Microbial Fuel Cell Design: An Overview." *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 876, 114571.
9. Brown, M., *et al.* (2022). Bioenergy and economic development in developing countries. *Energy Policy*, 155, 112-120.
10. Brown, R., *et al.* (2020). Enhancing microbial fuel cell performance through the use of waste-derived biochar. *Journal of Power Sources*, 265, 145-152.
11. Butt, C.M., Muir, D.C., Mabury, S.A. (2019). Biotransformation pathways of fluorotelomer-based polyfluoroalkyl substances: A review. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 38(2), 342-353.
12. Chen, Y., *et al.* (2020). Environmental impacts of industrialization: A case study in Taiwan. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(30), 37715–37725.



13. Chen, C.-F., Ju, Y.-R., Lim, Y. C., Wang, M.-H., Albarico, F. P. J. B., & Dong, C.-W. (2022). Potential sources and toxicity risks of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments of commercial ports in Taiwan. *Marine Pollution Bulletin*, 181, 113924.
14. Ediaty, R., Zulfa, L. L., Nugroho, K. A., Mukminin, A., Sulistiono, D. O., Nadjib, M., & Kusumawati, Y. (2019). One-pot solvothermal synthesis and characterization of UiO-66/HKUST-1 composites. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 578, 012072.
15. GB15618-2018 (Standard of the People's Republic of China). Ambient air quality standard. Jones, A., & Brown, B. (2018). *Agricultural waste management: Problems, processes, and approaches*. CRC Press.
16. Gomis, M. I., *et al.* (2020). Environmental exposure of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) and human health: A comprehensive review of PFAS sources and pathways. *Environment International*, 143, 105941.
17. Guerrini, E., Grattieri, M., Faggianelli, A., & Cristiani, P. (2019). Microbial fuel cells: A versatile technology for wastewater treatment and bioenergy production. *Chemical Engineering Journal*, 360, 1553-1566.
18. Gupta, M., *et al.* (2023). "Microbial Fuel Cells: A Promising Approach for Efficient Pollutant Remediation and Sustainable Energy Generation." *Frontiers in Microbiology*, 14, 683702.
19. Iller, J., & White, A. (2021). Bioenergy and its role in the global shift towards renewable resources. *Journal of Sustainable Energy*, 8(2), 45-52.
20. Jin, Y.H., Liu, W., Sato, I., Nakayama, S.F., Sasaki, K., Saito, N., *et al.* (2021). Occurrence of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) in surface water from major rivers in Japan. *Environmental Pollution*, 268(Part A), 115749.
21. Johnson, C. (2019). Utilizing agricultural waste for sustainable bioenergy production. *Renewable Energy*, 141, 1104-1110.
22. Jones, C., *et al.* (2023). Biochar in microbial fuel cells: A review of applications and performance variations. *Frontiers in Energy Research*, 8, 125.
23. Jones, H., *et al.* (2023). "Challenges and Opportunities in the Practical Application of Microbial Fuel Cells for Environmental Solutions." *Environmental Science: Water Research & Technology*, 9(4), 501–519.



24. Kothandam, G., Singh, G., Guan, X., Lee, J. M., Ramadass, K., Joseph, S., Benzigar, M., Karakoti, A., Yi, J., Kumar, P., & Vinu, A. (2023). Recent Advances in Carbon-Based Electrodes for Energy Storage and Conversion. *Advanced Science*, 10(18).
25. Kwok, K. Y., & Yamazaki, E. (2021). Emerging contaminants in the environment: Risk, regulation, and knowledge gaps. *Chemosphere*, 263, 127926.
26. Lehmann, J., & Joseph, S. (2015). Biochar for environmental management: An introduction. In *Biochar for environmental management: Science, technology and implementation* (2nd ed., pp. 1-12). Routledge.
27. Lestari, W. W., Adreane, M., Purnawan, C., Fansuri, H., Widiastuti, N., & Rahardjo, S. B. (2016). Solvothermal and electrochemical synthetic method of HKUST-1 and its methane storage capacity. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 107, 012030.
28. Li Y, Zhang M, Li S, Lv R, Chen P, Liu R, Liang G, Yin L. The Use of the Nematode *Caenorhabditis elegans* to Evaluate the Adverse Effects of Epoxiconazole Exposure on Spermatogenesis. *Int J Environ Res Public Health*. 2016 Oct 8;13(10):993.
29. Li, X., *et al.* (2018). A review on biochar-based catalysts for direct hydrotreatment of crude bio-oil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 1266-1282.
30. Liu, Y., *et al.* (2019). Occurrence, fate, and ecological risk of emerging contaminants in wastewater treatment plants and receiving rivers in Yangzhou, China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 182, 109389.
31. Logan, B. E., Hamelers, B., Rozendal, R., Schröder, U., Keller, J., Freguia, S., ... & Rabaey, K. (2006). Microbial fuel cells: methodology and technology. *Environmental science & technology*, 40(17), 5181-5192.
32. Miller, J., *et al.* (2021). Environmental and economic impacts of biochar application in microbial fuel cells: A comprehensive review. *Renewable Energy*, 150, 1125-1133.
33. Miller, S., *et al.* (2021). "Enhancing Cathode Performance in Soil Microbial Fuel Cells Using Copper-based Materials." *Electrochimica Acta*, 391, 138993.



34. National Institute of Environmental Health. (2006). Toxicological profile for chloroethane. GB36600-2018 (Standard of the People's Republic of China). Environmental quality standard for hazardous waste land.
35. Rabaey, K., Rodríguez, J., Blackall, L. L., Keller, J., & Gross, P. (2007). Microbial ecology meets electrochemistry: electricity-driven and driving communities. *The ISME journal*, 1(1), 9-18.
36. Shen, J., Sun, H., Wang, H., Ding, L., Xu, Y., Zhang, Z., & Wang, T. (2022). Concentrations and potential health risks of polychlorinated biphenyls in farmland soils of a typical electronics waste dismantling area. *Chemosphere*, 287(Pt 2), 132248.
37. Simon, M.A., Anggraeni, E., Soetaredjo, F.E. *et al.* Hydrothermal Synthesis of HF-Free MIL-100(Fe) for Isoniazid-Drug Delivery. *Sci Rep* 9, 16907 (2019).
38. Singh, R., *et al.* (2020). Recent advancements in the role of nanomaterials in the remediation of emerging contaminants. *Journal of Hazardous Materials*, 401, 123402.
39. Smith, A., *et al.* (2019). Biochar as a cost-effective and efficient electrode material in microbial fuel cells. *Environmental Science & Technology*, 45(8), 3569-3575.
40. Smith, R. P., *et al.* (2020). Sustainable agriculture: Definitions and terms. *American Journal of Alternative Agriculture*, 5(1), 34-36.
41. Smith, R., *et al.* (2019). "Horizontal Soil Microbial Fuel Cells: A Review." *Frontiers in Environmental Science*, 7, 189.
42. Sriram, G.; Uthappa, U.T.; Losic, D.; Kigga, M.; Jung, H.-Y.; Kurkuri, M.D. Mg–Al-Layered Double Hydroxide (LDH) Modified Diatoms for Highly Efficient Removal of Congo Red from Aqueous Solution. *Appl. Sci.* 2020, 10, 2285.
43. Suja, F., Pramanik, B.K., Govil, P., Sharma, S. (2019). Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in the environment: Mobile sources and transport mechanisms. *Chemosphere*, 219, 545-562.
44. US EPA (United States Environmental Protection Agency). (2016). Health Effects Support Document for Perfluorooctanoic Acid (PFOA).



45. Wang, S., *et al.* (2020). Occurrence and distribution of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in environmental matrices around a fluorochemical manufacturing plant in Fuxin, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(27), 34080–34090.
46. Wang, Y., Liu, W., Tao, H., Sun, Y., Chen, Z., & Zuo, Y. (2017). Perfluorooctanoic acid stimulates ovarian cancer cell migration, invasion via ERK/NF- κ B/MMP-2/9 pathway. *Toxicology Letters*, 280, 175-182.
47. Wang, Z., DeWitt, J.C., Higgins, C.P., Cousins, I.T. (2020). A never-ending story of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs)? *Environmental Science & Technology*, 54(18), 11483–11492.
48. White, E., *et al.* (2022). "Horizontal Microbial Fuel Cells for Soil Pollution Remediation: An Experimental Study." *Journal of Power Sources*, 523, 230218.
49. White, M., *et al.* (2022). Biochar as a catalyst for power generation and contaminant treatment in microbial fuel cells. *Journal of Environmental Management*, 198, 15-22.
50. Wu, J., *et al.* (2021). Health risks associated with environmental pollution in industrial areas of Taiwan. *Environmental Research*, 192, 110308.
51. Marimon-Bolívar, W., Tejeda-Benítez, L. P., Núñez-Avilés, C. A., & De León-Pérez, D. D. (2019). Evaluation of the in vivo toxicity of green magnetic nanoparticles using *Caenorhabditis elegans* as a biological model. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 12, 100253. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enmm.2019.100253](https://doi.org/10.1016/j.enmm.2019.100253)
52. Morsy, K., Fahmy, S., Mohamed, A., Ali, S., El-Garhy, M., & Shazly, M. (2019). Optimizing and Evaluating the Antihelminthic Activity of the Biocompatible Zinc Oxide Nanoparticles Against the Ascaridid Nematode, *Parascaris equorum* In Vitro. *Acta Parasitologica*, 64(4), 873-886. <https://doi.org/10.2478/s11686-019-00111-2>
53. Tao, Z., Zhou, Q., Zheng, T., Mo, F., & Ouyang, S. (2023). Iron oxide nanoparticles in the soil environment: Adsorption, transformation, and environmental risk. *Journal of Hazardous Materials*, 459, 132107. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.132107](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.132107)