



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

植物微生物燃料電池系統結合生物炭技術進行綠色永續韌性整治砷污染土壤

成果報告(定稿)

主辦單位： 環境部環境管理署

專案執行單位：國立臺灣大學森林環境暨資源學系

專案主持人：官崇煜副教授

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



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
 成果報告
 審查意見回覆對照表

計畫年度	113 年度	計畫類型	<input type="checkbox"/> 先導型 <input checked="" type="checkbox"/> 研究型 <input type="checkbox"/> 模場型
計畫類別	<input type="checkbox"/> 調查 <input checked="" type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 其他	主持人：官崇煜 NO：R24	
計畫名稱	植物微生物燃料電池系統結合生物炭技術進行綠色永續韌性整治砷污染土壤		
審查意見		執行單位回覆	
委員一 1. 充分敘述本整治技術之優勢並結合淨零排放議題，頗具研究價值。 2. 構想書中強調該技術兼具植物吸存炭及產電之效益，建議透過文獻回顧先行評估兩者效益之規模，以增加達成減碳目標之說服力。		1. 感謝委員的肯定。 2. 謝謝委員的建議，已補充至文獻回顧的部分，有文獻推測植物微生物燃料電池保持高效率且面積廣大的條件下，會有每公頃年產 21 GJ 的電力，接近聯合國綠電系統的標準。	
委員二 1. 建議說明如何在實場應用，其預期處理效率、以及產電效能。		謝謝委員的建議，已補充至研究預期效益部分。此系統的運行環境包括土壤、水相，以及植物體部分。因此將實際受污染土壤的環境營造成植物微生物燃料電池系統的運行環境，不僅能達到污染物的去除，以及產電。預期將砷污染土壤處理降至標準值以下（60 mg/kg），以及接近 0.8 V 的產電效率。	
委員三 1. P1-3，有關二、本期申請補助經費，建議應補充相關經費細項，以利瞭解本計畫經費運用之合理性。 2. 針對傳統整治鎳污染地下水之處理技術，建議可將傳統技術與本案技術之優缺點比較，以利瞭解其優勢。 3. 建議宜說明研究中選用的地下水鎳污染合成水樣之樣本背景資料。		1. 謝謝委員的建議，已補充其細項。 2. 傳統地下水鎳污染多使用現地抽出至地表處理，使用物化處理的優點是反應快速，缺點為可能產生二次污染物。使用植物微生物燃料電池系統處理地下水重金屬污染較不會產生二次污染，並且有產電及綠化等功能。 3. 將會補充至報告書內文。	
委員四 1. 本研究整合植物微生物燃料電池與生物炭系統去除土壤砷污染，此研究預計的未來性除了能進行土壤復育與產電功能，也有綠化與低碳等功效，計畫內容與預期成果涵蓋範圍過大，建議應按可行內容提出。另建議應針對整體技術應用於實場時需要考量的因素如如何處理栽種之植物、經濟效益評估等進行說明。		謝謝委員的建議，本研究計畫的預期成果修正至「預期完成工作項目」部分，已將可行內容聚焦在污染物的去除、產電情況、機制探討，以及碳捕捉與碳儲存的分析。 植物產電系統應用於實場處理實際污染土後，將植物部分收割與前處理，進行生物煉製法。生物煉製會產生平台化合物與綠色能源，可取代化石燃料的使用，具有經濟效應。煉製後產生的含污染物的殘餘廢棄物，更容易有效的處	



	<p>理 (Guan, Tseng, et al., 2019)。相關內容已補充至成本效益部分。</p>
<p>委員五</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 團隊掌握本案核心技術，惟執行本案預期目標 TRL 可由 4 提升至 8，宜再評估其合理性和可行性。 2. 針對執行本案提出預計可能遭遇之困難及因應解決途徑和方法。 3. 植物微生物燃料電池系統結合生物炭技術兼具復育重金屬污染、碳捕捉、碳封儲與碳替代等功能，執行成果值得期待。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 謝謝委員的提醒與建議，已修正 TRL 的等級。 2. 已補充至申請計畫書。此實驗的影響因素有植物體個體間的差異、土壤的不均質性質、微生物與生物炭等變因。因此，必須做多重覆的實驗，並且使用統計工具進行分析。選用的植物品種對土壤砷污染的去處情況，綜合主持人的過去研究經驗與文獻，預計選用禾本科植物進行實驗。 3. 謝謝委員的肯定。
<p>委員六</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 擬測試系統建議考量未來應用於農地或是工業(運作或廢棄)場址，因系統結合水生植物與微生物燃料電池，營造類溼地的環境，此類系統於農地及工業用地不同。添加三氧化二砷 (As₂O₃) 是否符合實際場址 As 樣態。亦建議實驗土壤性質參考國內受 As 污染場址。 	<p>謝謝委員的建議，此系統如前所述，營造類溼地的環境。因此，應用在處理污染農地與污染工業用地時，必須將此用地設計成類似溼地的環境以利系統運行。查詢過文獻，確認了此配製方式是模擬土壤砷污染的方式之一。土質也是影響實驗結果，確實需要選用接近國內受污染場址性之土壤。此內容已修正至研究方法的部分。</p>
<p>委員七</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 符合徵求主題。 	<p>謝謝委員的肯定。</p>
<p>委員八</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 計畫書中說明: ""...本研究目標為證實植物微生物燃料電池技術復育砷污染土壤之可行性，分析土壤砷污染物的去除效率以及去除機制...""，但 TRL 表中也說明: ""...本人先前的研究團隊對此研究已經落實在自然環境，擴大實驗室規模接近模場試驗...""。就技術開發而言，本計畫是屬於""可行性研究""? 或是屬於 TRL 表中所述""接近實場試驗"" (而且本計畫預期可達成""TRL 8""的目標?) 2. 建議以土水污染整治的觀點討論本計畫的實務可行性。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 謝謝委員的肯定，已修正 TRL 的數據與說明。 2. 謝謝委員的建議，已修正至研究目的與重要性部分。



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 成果報告 **審查意見回覆對照表**

計畫年度	113 年度	計畫類型	<input type="checkbox"/> 先導型 <input checked="" type="checkbox"/> 研究型 <input type="checkbox"/> 模場型
計畫類別	<input type="checkbox"/> 調查 <input checked="" type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 其他	主持人：官崇煜 NO：	
計畫名稱	植物微生物燃料電池系統結合生物炭技術進行綠色永續韌性整治砷污染土壤		
審查意見		執行單位回覆	
委員一 1.計畫中製備生物炭與植物微生物燃料電池之關聯性，如何設計實驗。		謝謝委員的建議，植物微生物燃料電池土壤與生物炭的重量比擬為 95%與 5%，綜合團隊過去的研究與文獻，擬以此比例進行此研究 (Gan et al., 2024)。此內容已補充至計畫書之研究方法與步驟。	
委員二 1. 本計畫擬改善整治土壤重金屬污染，以低成本工法，改善砷污染土壤。("...利用系統的微生物、電化學與植物等元素的協同作用，提升土壤中的砷之處理效能...") 2. 本計畫建議將如何工程實務化列入評估		1. 謝謝委員的肯定。 2. 由於本團隊過往的研究曾經處理實際受污染的土壤，並取得良好的成效。本團隊也將此系統在戶外之自然環境下運行，並且依然能產電。植物微生物燃料電池系統具有構造簡單、成本較低與綠化效果，相信可應用在處理實際污染土壤。將實務化的內容補充在在預期所獲成果之產業面的「現地處理之潛力」部分。	
委員三 1.P.11-14，有關計畫中提到多個重金屬污染場址的砷濃度從 61.6 mg/kg 到 20800 mg/kg 不等，建議研究團隊可以針對不同濃度區間的污染土壤進行分組實驗，並系統性地評估植物微生物燃料電池系統對不同污染程度土壤的處理效率與機制差異，以建立處理參數數據庫，有助於後續實場應用時之參考依據。 2. P.18-20，有關計畫使用五節芒和台灣水龍作為實驗植物，建議可增加對這兩種植物在不同季節的生長狀況與處理效能的評估。由於台灣氣候特性明顯，應進一步探討季節變化對植物生長、微生物活性以及整體系統效能的影響，以確保技術在實際應用時能夠全年穩定運作，有助於提供完整的應用參考數據。 3. P.21-23，有關計畫擬使用多項貴重儀器進行分析，建議可以增加對電極表面微生物群落結構的深入分析，如使用高通量測序技術研究優勢菌種組成及其代謝途徑，並探討生物炭添加		1. 謝謝委員的建議，這個建議對本研究的進行相當重要，已將不同濃度之外源加標砷污染土壤參數補充至「研究方法與步驟」部分。 2. 謝謝委員的建議，將會定期記錄植物的生長情況，以分析植物在系統、污染土壤與各種氣候下的生理情形。後序的研究規劃，擬將系統的土壤或是電極樣品進行定序，以分析微生物活性與系統運行、植物生長與季節變化的關係。相關內容已補充至「研究方法」與「後續研究」。 3. 謝謝委員的建議，已補充至「後續研究」部分。 4. 韌性科學重視人與自然的交互作用，生態系統受自然或人為干擾後，也能安然無事，或是受創後，也能自我修復。本法以植物微生物燃料電池系統處理重金屬污染土壤，以植物、土壤、水為主體進行無二次污染物的處理。污染場址經過植物微生物燃料電池整治與處理後，不僅污染物降低至標準值，也達到綠化的效	



<p>對微生物群落的影響機制，有助於優化系統設計並提高處理效能。</p> <p>4. 本法所提韌性整治之定義為何？又本法以砷重金屬為研究對象，可否擴大應用於其他重金屬？限制條件為何？</p>	<p>果，以及生態系統的建立。日後若是另有污染物的進入，植被、微生物與電化學系統的協同機制依然能在時間內降解污染物，使土壤能達到標準值。本團隊具有將系統戶外施作的研究成果，證實此系統具有韌性功能。相關內容已補充至研究背景。本團隊也曾經使用此系統處理六價鉻污染與鎘污染物，由於部分污染物的毒性較高，限制條件方面，需選擇生命力較強的植物品種，相關內容已補充在「研究背景」與「研究方法」部分。</p>
<p>委員四</p> <p>無</p>	
<p>委員五</p> <p>實驗設計宜對應國內受 As 污染農地</p>	<p>謝謝委員的建議，已補充至「後續研究」。</p>
<p>委員六</p> <p>1. 建議補充說明「預期完成之工作項目」中提及 0.8 V 產電效率之參考依據。</p>	<p>謝謝委員的建議，已經補充至「預期完成之工作項目」。另外，依據文獻，傳統 MFCs 的輸出電壓多在 0.3 – 0.5 V (Walter et al., 2020)，本團隊的研究經驗，PMFCs 在良好的條件下，是可達到 0.8 V 的產電效率。</p>
<p>委員七</p> <p>1. 建議可以採用實際砷污染土壤進行實驗，</p> <p>2. 吸收砷之植物，如何處理？建議可以討論。</p>	<p>1. 謝謝委員的建議，這真是非常務實的建議。由於此處理系統對土壤砷污染的去除機制尚不明瞭，因此擬先以外源加標污染土壤進行實驗。為了考量實務化，日後必須要進行實際砷污染土壤的實驗。相關的內容已補充至「後續研究」。</p> <p>2. 本研究團隊曾有相關的研究成果。若是系統的植物能吸收土壤砷污染，待系統運行後，將植物生物質材料採回收收，進行生物煉製，不僅能產生綠能，也能探討砷污染物的宿命。相關內容已補充至「成果效益」。</p>
<p>委員八</p> <p>1. 土壤中除砷外，仍有其餘濃度更高的重金屬，是否會影響砷去除效率？</p> <p>2. 生物炭吸附土壤中重金屬是否具專一性？</p>	<p>1. 謝謝委員的問題，其餘濃度更高的重金屬是可能會影響系統對砷的去除率。由於本實驗先擬外源標的砷污染土壤，將不會有此問題發生。日後有機會進行實際污染土壤的整治，此點確實是需要注意的部分。</p> <p>2. 謝謝委員的問題。是的，生物炭對土壤重金屬的吸附可能具有專一性。不同種類重金屬，生物炭去除機制不同（生物炭含有多種金屬及含氧官能基）、具有專一性。包含物理吸附、沉澱、配位、離子交換、靜電交互作用。生物炭去除特定土壤重金屬的方式，隨生物質種</p>



	<p>類、氣化或裂解條件的不同而異 (Gholizadeh et al., 2021)。此內容已補充至「研究背景」部分。</p>
<p>委員九 1.報告書請雙面列印 2.設備使用含維護費：請補充說明單價及使用次數等完整資訊。</p>	<p>1. 謝謝委員的建議，本次報告書會以雙面列印。 2. 將單價與使用次數補充至「設備使用含維護費」。</p>



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 **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	<input type="checkbox"/> 先導型 <input checked="" type="checkbox"/> 研究型 <input type="checkbox"/> 模場型
計畫類別	<input type="checkbox"/> 調查 <input checked="" type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 其他	主持人：官崇煜 NO：R24	
計畫名稱	植物微生物燃料電池系統結合生物炭技術進行綠色永續韌性整治砷污染土壤		
審查意見		執行單位回覆	
<p>委員一</p> <p>1.進度符合計畫書設定項目。 2.目前僅有一周的數據，建議進行較長時間測試。 3.電極埋於基質複雜的土壤中，對其表面有何影響。</p>		<p>1.感謝委員的肯定。 2.謝謝委員的建議，未來本研究之裝置將持續運作並進行觀測。 3.裝置運行6個月，SEM呈現植物根際與微生物之影像。顯示土壤對於電極表面無太大影響，可使系統長期運作。</p>	
<p>委員二</p> <p>1.未來請提出質平計算。 2.宜提出本技術未來實場運用之可行性評估。 3.土壤含As的均勻性，是否會影響去除率？建議一併討論之。 4.成果績效自評表(一)學術面A.未說明期中達成數。 5.p.31 甘特圖宜增加預定與實際進度。 6.宜補充初步結論與後續工作項目與內容。</p>		<p>1.添加生物炭之植物微生物燃料電池系統中，試驗結束後之陽極土壤砷濃度為 57.92 ppm，植物根部砷濃度為 4.34 ppm，地上部砷濃度為 0.20 ppm。若將各部分濃度加總，可得系統內主要可量測的砷總量約 62.46 ppm。以初始 70 ppm 為基準，已量化部分 (62.46 ppm)約佔總量 89.2%。掃描式電子顯微鏡 (SEM)影像，可見不規則形態之金屬顆粒聚集現象，為砷或共伴金屬元素之沉積或吸附結構。此結果支持其餘約 10.8%之差額主要歸因於吸附沉積與形態轉化。</p> <p>2.本研究於溫室進行長期操作試驗，此溫室為透明溫室，自然太陽光的採光，接近室外的溫度變化，整個溫室的環境條件接近自然田間情境，具有良好的可模擬性與代表性。盆栽的土量為數公斤，已經超過實驗室等級的規模。系統在 70 mg/kg 砷污染濃度下穩定運行，經六個月觀測，產電表現均維持穩定，顯示裝置具長期操作潛能。因此是有機會在未來進行實場的運用。</p> <p>3.本研究係由非污染原土壤依設定濃度配置而成。為確保土壤中砷含量的均勻性，配置後經充分混合均質，並靜置浸置，使砷於土壤介質中充分吸附與分布均勻後，再進行系統裝設與試驗操作。土壤砷濃度之變化結果顯示，陽極與陰極區</p>	



	<p>域之污染土壤，砷濃度於各個參數之趨勢接近。顯示均勻性與去除率無明顯關聯性。</p> <p>4.謝謝委員的意見。已更正於期末成果報告。</p> <p>5.謝謝委員的意見。已更正於期末成果報告之甘特圖。預定與實際進度相符，達成率為100%。</p> <p>6.謝謝委員的意見。已將結論與工作項目更正於期末成果報告。</p>
<p>委員三</p> <p>1.臺灣農業生產過程也會產生農業廢棄物，建議本計畫未來可考慮將農業廢棄物製備為實驗用生物炭，納入循環經濟的一環。</p> <p>2.本計畫研究標的（砷）最終累積於哪個實驗單元（單葉鹹草植體、生物炭或是電極表面）。</p>	<p>1.謝謝委員的建議。未來有機會將以農業廢棄物製備實驗用生物炭，納入循環經濟的一環。</p> <p>2.實驗數據顯示，砷最終主要累積單葉鹹草根部。添加生物炭的組別，植物根部砷濃度為 4.34 ppm。未添加生物炭的組別，植物根部砷濃度為 1.46 ppm。</p>
<p>委員四</p> <p>1.內文中偶見錯字建議進行修改，例如中文摘要第十行，植物仍能在三價砷污染「土染」存活並且成長，應為「土壤」。</p> <p>2.結論部分與研究目標呼應不夠清楚，建議在結論段落明確回應前面所提及之研究目的，得以一目了然計畫成果與預期是否一致。</p> <p>3.建議考慮不同 pH 或其他環境參數變化下砷的形態轉變 (As(III)/As(V))對整治效能之影響？</p> <p>4.利用生物炭吸附土壤中重金屬，吸附之後生物炭的後續處理方式，及可能帶來的風險，是本研究未來發展應用的關鍵，建議予以討論之。</p> <p>5.可於未來擴大規模（如模場或中型試驗）所需設備配置與電力輸出作一規劃，以提升實務推廣潛力。</p>	<p>1.謝謝委員的建議。此項目已於成果報告修正。</p> <p>2.謝謝委員的建議。此項目已於成果報告之結論修正。</p> <p>3.謝謝委員的建議。未來有機會將以此項目作為進一步探討之研究方向。</p> <p>4.生物炭混合於土壤內，研究成果顯示重金屬可於系統運作過程被去除。</p> <p>5.謝謝委員意見。未來將進一步建立系統放大之參數設計，以形成可於實場應用的整治與能源共生規劃模式。導線逐步朝向 IP68 防水等級與採串並聯配置形成可擴展之電化學整治網絡。</p>
<p>委員五</p> <p>1.建議期中報告應補充說明目前成果及簡要結論，並建議後續進行方式或檢討可行之改善對策。</p> <p>2.本計畫對於砷去除之反應途徑應有完整之規劃，若以目前實驗規劃實難看出係因氧化還原、植物吸收或電極吸附等反應機制，建議期末應有所評估說明，以利了解後續技術應用之可行性。</p>	<p>1 謝謝委員的提醒與建議。已於成果報告更新。</p> <p>2.謝謝委員的提醒與建議。本研究之實驗結果示，植生復育及生物電化學反應之作用，為整治砷污染土壤之禮向主要機制。</p> <p>3.謝謝委員的建議。本研究已更正於成果報告，以文獻之內容佐證本研究之論點。</p>



3.報告中參考文獻共計 100 餘篇，然未見在報告中適度引用或說明，建議應符合科技報告撰寫之準則。



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
 成果報告
 審查意見回覆對照表

計畫年度	113 年度	計畫類型	<input type="checkbox"/> 先導型 <input checked="" type="checkbox"/> 研究型 <input type="checkbox"/> 模場型
計畫類別	<input type="checkbox"/> 調查 <input checked="" type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 其他	主持人：官崇煜 NO：R24	
計畫名稱	植物微生物燃料電池系統結合生物炭技術進行綠色永續韌性整治砷污染土壤		
審查意見		執行單位回覆	
<p>委員一</p> <p>1.成果自評表中(一)學術面：形成實驗室，請就本實驗室之能力部份，再加強說明。</p> <p>2.本研究在模擬自然條件之溫室中進行，未來若應用於實場，可能影響之環境因素有那些？宜有事先探討。</p> <p>3.生物碳之種類或性質，對 As 吸附之影響，宜請討論之(或 paper review)。</p>		<p>1.本實驗室已具備完成植物微生物燃料電池系統建構與重金屬整治技術所需的整合能力，包含污染土壤整備、植生復育、微生物電化學分析、生物炭材料應用與重金屬檢測，並完成研討會發表，具備獨立執行整治技術研究與產出學術成果之能力。</p> <p>2.實場應用需克服自然降水對金屬線造成鏽蝕的情況，未來可以防水材料披覆加以應對。</p> <p>3.高比表面積與高孔隙率，為生物炭吸附土壤砷的主要機制 (Wang et al., 2024; Mao et al., 2025)，此內容已新增於內文第 46 頁。</p>	
<p>委員二</p> <p>1.計畫初步成果建議進一步說明其效益在整治或能源?其適用情境為何。</p> <p>2.土壤中砷分析方法的偵測極限，是否對三價與五價砷進行定量分析。</p>		<p>1.植物微生物燃料電池系統於砷污染土壤之整治及能源供應情境為廢棄之農田。此環境為單葉鹹草之適合生長環境，亦為土壤可能含有重金屬之廠址。於此環境下，藉由植物進行光合作用及植生復育，可同時整治砷污染土壤並產生電力。</p> <p>2.本研究以 ICP-OES 進行土壤砷濃度的定量。此儀器無法針對不同價態的砷分別進行定量，故本研究以 XPS 之測定結果加以佐證三價砷與五價砷於不同鍵結能下的強度。</p>	
<p>委員三</p> <p>本計畫採用植物微生物燃料電池系統結合生物炭技術整治砷污染土壤，此系統可將光能轉換為電能，並同時進行污染土壤修復，若此技術後續能成功放大並落地應用，未來可望成為具綠色永續潛力的土壤整治技術。針對期末報告有以下建議：</p> <p>1.針對文獻回顧 3.6 章節，內文提到：「……生物炭去除機制不同(因生物炭含有多種金屬及含氧官能基)、具有專一性。……」此處專一性一詞具有疑慮。由於生物炭特性會因原料和熱解條件而異，該表述可能誤導讀者認為生物炭對污染物吸附上具選擇性或優先性。實際上，內</p>		<p>1.謝謝委員的建議。已將「專一性」一詞自內文移除。</p> <p>2.謝謝委員的建議。雖然土壤砷濃度於試驗初期便已固定，但五價砷不易遷移，植生復育需要較長的時間進行，因此報告中的討論方式仍可解釋植物生長高度降低之現象 (Corzo Remigio et al., 2023; Dilpazeer et al., 2023)。</p> <p>3.謝謝委員的建議，未來會針對此二性質定性。</p> <p>4.添加生物炭之植物微生物燃料電池系統，試驗後之陽極土壤砷濃度為 57.92 ppm，該組別植物</p>	



文所述的這些機制並非針對特定污染物具有專一性，且易受環境條件影響去除效率，建議修正用詞以避免誤解。

2. 5.1 章節中，植物生長高度於第三個月皆出現下降(圖 25)，文中將原因歸因為高濃度砷所導致的生長抑制。然而砷濃度自實驗初期即已添加，前兩個月的生長未受明顯影響，建議探討此變化是否與植物生長週期有關？

3. 文中多處提及生物炭高孔隙率與高比表面積有助於富集菌群、提高陰極還原效率、吸附土壤砷等效益，但本計畫並未提供所使用的生物炭比表面積與孔隙分析數據，使上述解釋缺乏支撐證據。若有分析結果，建議補充於 4.2 生物炭製備章節。

4. 統計分析與電壓變化結果顯示，添加生物炭可使 PMFCs 在高生物毒性基質條件下有較好的發電表現。然而，圖 34 和圖 35 顯示兩個系統之陽極與陰極的砷濃度差異卻不明顯。再結合圖 44 及圖 45 觀察，雖然生物炭的添加具有吸附砷的能力，但整體砷移除機制仍不明確，建議將質量平衡計算結果納入討論。

5. 圖 40 和圖 41 分別呈現 PMFCs 與 PMFCs + biochar 系統的陽極與陰極 XPS 分析。文中指出：「圖 41 顯示……整體而言，陽極在五價砷鍵結能區之訊號強度高於陰極，此現象顯示高含量的五價砷被固定於陽極，與生物炭的吸附作用有關」然而，此處的描述似乎未區分是否添加生物炭，對 PMFCs 和 PMFCs + biochar 系統的結果均採用相同解釋。實際比較圖 40 和 41 可發現，PMFCs 的 As(V) 峰面積高於 PMFCs + biochar，且添加 biochar 後陰極未觀察到 As(0) 訊號，同時 PMFCs + biochar 系統陽極的 As(III) 訊號更強。上述差異顯示兩個系統在砷物種分佈存在明顯不同，建議可進一步探討砷的轉化機制，以更完整說明生物炭在系統中的作用。

6. 其他修訂建議如下：(1) 3.2 和 3.3 章節內容結構相似且篇幅較短，建議合併為重金屬污染；(2) 文獻回顧中提及 C4 植物具高效的光能吸收與碳固定機制，長期穩定產電表現多優於 C3 (P.14)。惟本計畫使用之單葉鹹草未說明是屬於何種碳固定類型，建議可補充相關料。

委員四

1. 建議研究應強調明系統穩定性與量測時間，尤其是針對系統長期穩定及可靠性之評估。

2. 建議研究成果應針對光照、溫度、濕度、含水率與土壤特性等控制條間之影響，有更深入之討論。

3. 研究對於生物炭特性如孔隙度、比表面積、官

根部砷濃度為 4.34 ppm，地上部砷濃度為 0.20 ppm。加總各部分之砷濃度，可得系統內主要可量測的砷總量約 62.46 ppm。以初始 70 ppm 為基準，已量化部分 (62.46 ppm) 約佔總量 89.2%。掃描式電子顯微鏡 (SEM) 影像，可見不規則形態之金屬顆粒聚集之現象，此為砷元素之沉積或電極之吸附結構。此結果支持其餘約 10.8% 之差額歸因於吸附沉積與金屬元素之形態轉化。

5. 謝謝委員的建議。未來本研究團隊有機會將針對此項性質進行實驗並加以探討。

6.

(1) 謝謝委員的建議。因 3.2 涵蓋土壤及水體之 2 種以上重金屬污染文獻探討，3.3 專注於砷元素及污染土壤及危害的介紹，故將其分為不同章節。

(2) 謝謝委員的建議。單葉鹹草為莎草科之植物，若以固碳類型區分，其屬於 C4 植物，有較 C3 植物更高的生物量與根際分泌物 (Zambelli et al., 2025)。已新增此內容於內文第 31 頁。

1. 謝謝委員的建議。

2. 謝謝委員的建議，未來有機會將針對環境條件與土壤特性之影響進一步探討。

3. 謝謝委員的建議。生物炭之性質分析與微生物之群落將成為未來有機會之探討項目。



能基等基本特性對於後續研究之重複與後續應用性，應有更深入之評估與說明。此外，微生物族群之分析與探討，應有更深入之評析，以期提升後續之應用性。



113 年度土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗申請計畫書

一、專案基本資料表

填表日期：114 年 12 月 12 日

專案性質		<input checked="" type="checkbox"/> 實驗性質 <input type="checkbox"/> 非實驗性質		專案技術編碼		LAB-S-R-C1-B <small>(如非實驗性質含氣溶劑之生物整治模場為 NLAB-S-R-C1-B，填寫請參考附件 1-4)</small>	
專案類別(單選)		<input type="checkbox"/> 先導型 <input checked="" type="checkbox"/> 研究型 <input type="checkbox"/> 模場型		研究主題		<input checked="" type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 調查 <input type="checkbox"/> 政策類或其他	
申請機構系所		國立臺灣大學森林環境暨資源學系					
機構地址		106319 臺北市大安區羅斯福路四段一號					
專案主持人		官 崇 煜		職等/職稱		副 教 授	
協同主持人				職等/職稱			
專案名稱	中文	植物微生物燃料電池系統結合生物炭技術進行綠色永續韌性整治砷污染土壤					
	英文	Plant microbial fuel cell system combined with biochar technology for green, sustainable and resilient remediation of arsenic contaminated soils					
	關鍵字	碳匯、綠色電力、輸出電壓、能源短缺、重金屬污染					
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：官崇煜		E-mail：cyguan@ntu.edu.tw		專線：02-3366-4626 手機：0912826252	
專/兼任人員		姓名：		E-mail：		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)	專案預估總經費		第一年申請經費	第二年申請經費	編列說明		
	1.	人事費用	298,052		(1~5 項相加之 50%為限)		
	2.	設備使用含維護費	34,200		(與計畫實驗相關)		
	3.	耗材與主要費用	194,650		(與計畫主體相關)		
	4.	其它研究相關費用	55,798		(含差旅與租賃費用)		
	5.	行政管理費	97,300		(1~5 項相加之 15%為限)		
	6.	自籌款			(申請單位自行籌備款項)		
	申請補助經費(1~5 項)		680,000		總金額：680,000		
計畫總經費(1~6 項)		680,000		總金額：680,000			

說明：

1. 本署以部份補助為原則，得指定不補助項目，不補助項目應為自籌款項，應自行核銷不得申請。
2. 非實驗性質之專案，若第一項費用編列金額超出比率，須於申請公文內向本署說明，俾利審查。
3. 補助專案經費編列自申請起經專案核准後，經費編列中各項費用單價與需求只可減少與下修。

專案主持人： 官崇煜 (簽名或蓋章) 日期： 2025.12.12

(定稿本請蓋上申請單位大小章)



土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案

113 年度專案成果績效自評表

二、成果績效自評表：「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	1		1	100%	中華民國環境工程學會 2025 土壤與地下水研討會-植物微生物燃料電池結合生物炭技術進行永續整治砷污染土壤與產生綠色電力
	2.國外投稿 (篇數)	(1)期刊論文	1	1	1	100%	CEJ-S-25-64750 Chemical Engineering Journal
		(2)國際研討會論文發表	1		1	100%	2025 the 7TH International Conference on Environment, Resources, and Energy Engineering Green and Resilient Remediation of Arsenic-Contaminated Soils with Synergistic Use of Plant Microbial Fuel Cells and Biochar
	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 會議(場數)	(1)研討/說明會					
		(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	8.研發人員 (人數)	(1)碩士	2	2	2	100%	2 位碩士 班學生
		(2)博士	1	1	2	100%	主持人
	9.研究團隊	(1)跨領域團隊					



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)
		(2)跨機構團隊						
		(3)形成研究中 心						
		(4)形成實驗室	1	1	1	100%		
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)	發明						
		新型/設計						
		合計						
		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	B 政策 推動					
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。
2. 參與國際研討會發表論文 1 篇、國內研討會發表論文 1 篇。
3. 培育 2 名碩士生、未來的 1 名博士生。

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. 將申請新型專利 1 件。
2. 將與產商洽談產學合作計畫。

**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
場址管理等政策及法規研訂之參考)**

- 1.務實改善整治土壤重金屬污染，以低成本將砷污染降至 60 mg/kg 的標準值以下。
- 2.增進生物處理整治土壤重金屬污染，並且不產生二次污染，兼具產電與綠化效益。





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	
1.自籌款	元	
2.人力	人/月	
3.設備		
4.其他資源 (請自行增列)	(請自填)	



中文摘要(300-500 字)

全球暖化及環境污染為當今之重要議題。植物微生物燃料電池 (Plant Microbial Fuel Cells, PMFCs) 之優勢為植物可增加碳匯，並將光能轉換為電能，進而產生綠色電力，同時進行砷污染土壤之整治。本研究以單葉鹹草 (*Cyperus malaccensis* Lam. ssp. *monophyllus* (Vahl) T. Koyama) 為植物，於溫室內透過測定輸出電壓、X 射線光電子能譜儀 (X-ray Photoelectron Spectrometer, XPS) 及植物組織砷濃度等性質，確認產電與污染整治效果。添加生物炭之閉路電壓植物微生物燃料電池系統之最高輸出電壓為 566 ± 13.21 mV。顯示生物炭的添加提高輸出電壓。XPS 結果顯示，添加生物炭之組別，其陽極在五價砷鍵結能區之訊號強度高於陰極，此現象與生物炭的吸附作用有關。添加生物炭組別之植物根部砷濃度為 4.34 ppm，未添加生物炭組別之植物根部砷濃度為 1.46 ppm。添加生物炭可提升植生復育之作用。植物微生物燃料電池系統結合生物炭技術，可於提升整治砷污染土壤的成效同時有效產生綠色電力。此外，植物進行光合作用可增加碳匯。綜上所述，此研究證實了植物微生物燃料電池系統具有改善全球暖化、能源短缺與土壤重金屬污染之潛力。結合生物炭技術，此系統可透過綠色、永續之方式進行韌性整治砷污染土壤。

關鍵字：碳匯、綠色電力、輸出電壓、能源短缺、重金屬污染



英文摘要(300-500 字)

Global warming and environmental pollution are among the most urgent challenges facing society today, calling for sustainable, multifunctional technologies that address energy shortage, carbon management, and soil contamination simultaneously. Plant microbial fuel cells (PMFCs) represent a promising bioelectrochemical approach that harnesses living plants and rhizospheric microbes to convert photosynthetically fixed carbon into green electricity while increasing carbon sink and facilitating in situ remediation of heavy metal-contaminated soils. In this greenhouse study, *Cyperus malaccensis* Lam. ssp. *monophyllus* (Vahl) T. Koyama was selected as the system plant to evaluate both electricity generation and arsenic remediation performance. System characterization included continuous monitoring of output voltage, X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) analysis of electrode surfaces, and quantification of arsenic concentrations in plant tissues. The close circuit output voltage of the PMFC systems amended with biochar reached a maximum of 566 ± 13.21 mV, demonstrating that biochar addition substantially improved electrochemical performance relative to the non-amended control, likely by enhancing microbial colonization, electron transfer pathways, and soil electrical conductivity. XPS spectra revealed that in the biochar-amended treatment, the anode exhibited stronger signal intensity in the As (V) binding energy region compared with the cathode, indicating that biochar contributed to arsenic adsorption and promoted redox transformations that favored immobilization or specific valence states at the anode interface. Plant tissue analysis showed root arsenic concentration of 4.34 ppm in the biochar-amended group versus 1.46 ppm in the non-amended group, suggesting that biochar enhanced phytostabilization or phytoaccumulation processes through improved root-microbe interactions and increased arsenic bioavailability in the rhizosphere. Integrating biochar with PMFC technology therefore augmented both green electricity production and arsenic remediation efficacy while concurrently supporting carbon fixation via plant photosynthesis. Taken together, these results demonstrate that PMFC systems combined with biochar offer a resilient and sustainable strategy for addressing global



warming, energy shortages, and heavy metal pollution by simultaneously generating renewable bioelectricity, increasing carbon sinks, and improving the efficiency of arsenic-contaminated soil remediation. Specifically, the biochar used in this experiment possessed a high specific surface area and that promoted adsorption of oxyanionic arsenic species and provided a conductive matrix for electroactive microbes, thereby enhancing extracellular electron transfer and stabilizing redox gradients within the rhizosphere. Overall, this study confirms that PMFC systems, especially when integrated with biochar, provide a highly promising, sustainable, and resilient technology capable of simultaneously generating green electricity, improving carbon capture, and remediating arsenic-contaminated soils, offering valuable insights for future large-scale applications and contributing to the mitigation of global environmental challenges.

Key words: Carbon sink, Green electricity, Output voltage, Energy shortage, Heavy metal pollution





目次

目次.....	1
圖次.....	3
表次.....	6
1. 前言.....	7
1.1 綠色永續韌性兼具低碳儲碳整治與植物微生物燃料電池技術.....	7
1.2 土壤之砷污染現況.....	8
2. 研究目的.....	10
3. 文獻探討.....	11
3.1 植物微生物燃料電池.....	11
3.1.1 植物微生物燃料電池之原理.....	11
3.1.2 植物微生物燃料電池之歷史.....	12
3.1.3 植物種類.....	14
3.1.4 植物微生物燃料電池系統之類型.....	15
3.2 重金屬污染.....	22
3.2.1 重金屬污染土壤.....	22
3.2.2 重金屬污染水體.....	22
3.3 砷重金屬污染.....	23
3.4 重金屬污染與傳統處理技術.....	23



3.5 植物與微生物電化學處理技術	24
3.6 生物炭木質纖維素材料與重金屬復育	25
4. 研究方法與過程	26
4.1 植物微生物燃料電池的架設	27
4.2 生物炭的製備	33
4.3 分析方法	33
4.4 甘特圖	35
5. 結果與討論	37
5.1 植物高度變化	37
5.2 電壓變化	39
5.3 PH 值變化	42
5.4 電導率之變化	44
5.5 土壤砷濃度之變化	46
5.6 植物碳吸存量	48
5.7 掃描式電子顯微鏡影像	48
5.8 X 射線光電子能譜儀	50
5.9 循環伏安法	52
5.10 統計分析	54
5.11 植物組織砷濃度分析	55
6. 結論	57
7. 參考文獻	58



圖次

圖 1 植物微生物燃料電池的運行原理圖.....	8
圖 2 植物微生物燃料電池系統	11
圖 3 微生物燃料電池圖	12
圖 4 雙槽式土壤微生物燃料電池	16
圖 5 雙槽式植物微生物燃料電池	17
圖 6 單槽式土壤微生物燃料電池	18
圖 7 單槽式植物微生物燃料電池	19
圖 8 空氣擴散陰極系統	20
圖 9 扁平式植物微生物燃料電池	21
圖 10 管狀植物微生物燃料電池	22
圖 11 植物微生物燃料電池微生物電化學反應示意圖.....	25
圖 12 生物炭復育砷污染土壤及水體之機制.....	26
圖 13 整體研究架構圖.....	27
圖 14 土壤與水混合	28
圖 15 生物炭與土壤及水混合	28
圖 16 石墨氈	29
圖 17 鈦線.....	29
圖 18 外部電阻	30
圖 19 土壤破碎照	31
圖 20 砷藥品	31
圖 21 單葉鹹草	32



圖 22 植物微生物燃料電池實驗圖	32
圖 23 生物炭	33
圖 24 0 mg/kg 污染物濃度閉路電壓植物微生物燃料電池之植物於四個月之生長高度	38
圖 25 70 mg/kg 五價砷濃度參數之植物於四個月之生長高度	38
圖 26 150 mg/kg 污染物濃度參數之植物於四個月之生長高度	39
圖 27 70 mg/kg 五價砷濃度之閉路電壓植物微生物燃料電池及微生物燃料電池樣之電壓於試驗四個月之變化	40
圖 28 70 mg/kg 五價砷濃度之添加生物炭及未添加生物炭之閉路電壓植物微生物燃料電池電壓於試驗四個月之變化	41
圖 29 150 mg/kg 三價砷及五價砷濃度之閉路電壓植物微生物燃料電池之電壓於試驗四個月之變化	42
圖 30 70 mg/kg 五價砷濃度系統之陽極 pH 值於試驗 4 個月之變化	43
圖 31 70 mg/kg 五價砷濃度系統之陰極 pH 值於試驗 4 個月之變化	44
圖 32 70 mg/kg 五價砷濃度系統之陽極電導率於試驗 4 個月之變化	45
圖 33 70 mg/kg 五價砷濃度系統之陰極電導率於試驗 4 個月之變化	45
圖 34 70 mg/kg 系統之陽極砷濃度於試驗 2 個月之變化	47
圖 35 70 mg/kg 系統之陰極砷濃度於試驗 2 個月之變化	47
圖 36 70 mg/kg 砷濃度之閉路電壓植物微生物燃料電池之陽極 SEM 影像	49
圖 37 70 mg/kg 砷濃度之閉路電壓植物微生物燃料電池之陰極 SEM 影像	49
圖 38 70 mg/kg 砷濃度之添加生物炭閉路電壓植物微生物燃料電池之陽極 SEM 影像	50
圖 39 70 mg/kg 砷濃度之添加生物炭閉路電壓植物微生物燃料電池之陰極 SEM 影像	50
圖 40 70 mg/kg 砷濃度之閉路電壓植物微生物燃料電池系統之陽極與陰極 XPS 比較	51



圖 41 70 mg/kg 砷濃度之添加生物炭閉路電壓植物微生物燃料電池系統之陽極與陰極 XPS 比較..... 52

圖 42 70 mg/kg 砷濃度之閉路電壓植物微生物燃料電池系統與開路電壓植物微生物燃料電池系統之循環伏安法比較 53

圖 43 70 mg/kg 砷濃度之添加生物炭與未添加生物炭閉路電壓植物微生物燃料電池系統之循環伏安法比較 54

圖 44 添加生物炭與未添加生物炭之閉路電壓植物微生物燃料電池系統植物根部砷濃度比較..... 55

圖 45 添加生物炭之閉路電壓植物微生物燃料電池系統植物根部與地上部之砷濃度比較..... 56



表次

表 1 C3 與 C4 植物比較.....	15
表 2 植物碳吸存量比較.....	48



1. 前言

1.1 綠色永續韌性兼具低碳儲碳整治與植物微生物燃料電池技術

由於環境污染與全球暖化問題是現今迫切重視的議題，面對這些問題，需要以解決環境問題、符合自然、不產生二次污染以及長期運行等重點的方式應對。另外，現代的整治觀念也因地制宜與自我修復快速等韌性思維，達到整治成功與維護生態等效果。因此，現今強調以綠色、永續與韌性整治方法進行污染處理與場址整治，為依循永續思維，兼顧符合環境、社會與經濟等面向的技術、策略與管理模式的方法。為解決全球暖化與溫室效應造成的氣候變遷問題，也提倡整治技術兼具碳捕捉、碳儲存與碳替代特性。因此，現今的土壤及地下水的工法提倡使用兼具綠色永續韌性整治與淨零排放的方式，期望達到環境污染復育，兼顧經濟與社會利益，減少對環境的衝擊，達到永續經營的理念。

生物化學技術具有綠色與永續經營的特性，在環境保護成為普世價值觀的現代，其技術愈來愈受重視。微生物電化學技術屬於生物化學技術之一，其中的植物微生物燃料電池 (Plant Microbial Fuel Cells, PMFCs) 系統結合植物與傳統微生物燃料電池，是兼具環保、綠色、永續、韌性與能源的技術，由於光合作用是植物的生理機制，植物在此過程會吸收大氣的二氧化碳，植物生長也是碳儲存的表現，因此植物微生物燃料電池也具有淨零排放的功能。植物微生物燃料電池具有植物、電化學系統、微生物、水或土壤等部分，為將太陽能轉化成電能的系統 (Bataillou et al., 2024)。系統的植物進行光合作用維持生命分泌根際有機物，土相或水相微生物將有機物分解與代謝後產生電子，電子以直接或間接傳遞到陽極，再通過外部迴路傳至陰極。以上反應會造成系統陽極與陰極的電位差，進而產生電流 (Guan and Yu, 2021)。文獻指出，若系統具有高效率的產電條件，每年可達到每公頃 21GJ 的電力，接近聯合國的傳統綠電系統的標準 (United Nations, 2001; Strik et al., 2008)。系統具有植物、微生物、土壤與電化學系統，其協同機制造成系統遭遇外力的影響時，在時間內能恢復並且持續運行。因此，系統具有綠化、綠色能源、碳捕捉、碳儲存與碳替代等功能，符合綠色、永續、韌性、低碳與儲碳思維 (圖 1)。

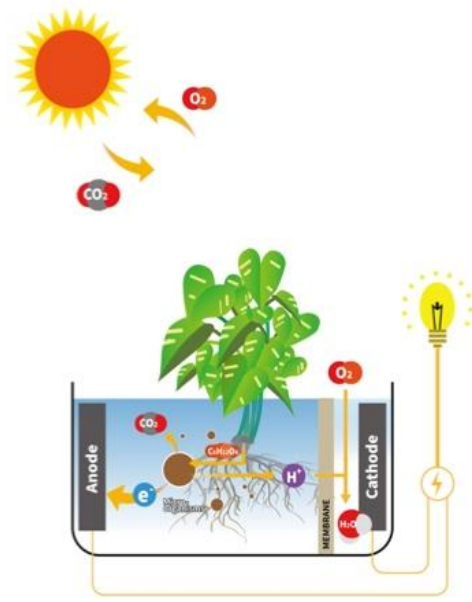


圖 1 植物微生物燃料電池的運行原理圖

1.2 土壤之砷污染現況

在台灣不僅在集水區的水質中發現砷污染，甚至在都市區的農地也時有報導相關案例。自 1970 年代以來，嘉南地區的地下水，因過度抽取導致沉降錐形成，於 1999 年善化地區調查顯示，砷濃度上升至超過 0.6 mg/L，推測原因是砂層水源過度抽取，導致泥層中含高砷的水補充進砂層。類似的情況也發生在台北市的關渡平原，2006 年 8 月當地部分農地 6 公頃土壤之砷濃度超過管制標準（環保署土基會，2006 年）。2007 年 2 月的檢測結果，顯示有 123 公頃的農地表層與深層土壤中檢出超標的重金屬砷。該污染源可能來自地熱谷附近河床中含有高濃度砷、鉛及鐵的礦物，經長期傳輸與沉積作用逐漸累積在該區農地中（環保署土基會，2007 年）。2010 年在烏山頭水庫周邊的水庫週邊的監測井測得砷濃度達到 0.056 mg/L，高於第一類地下水與第二類地下水管制標準（環保署土基會，2010 年）。

自 2004 年起，環保署（現環境部）針對可能產生土壤及地下水污染的關閉工廠進行調查，至 2008 年已確認 50 處土地存在污染風險，其中 13 處污染情事明確，包括高雄凱盛金屬廠及屏東謙有鋼鐵廠，皆發現砷及其他重金屬超標。新竹台灣木材防腐廠除土壤污染外，地下水中也確認含有砷等污染物（環保署土基會，2008 年）。2023 年，台中南屯工業用地遭檢舉違法回填廢棄物，經檢測發現砷等重金屬超標，其中砷濃度達土壤管制標準的 101 倍、監測標準的 203 倍，被要求台中市府暫緩地籍整理、權利變更登記和交接土地等重劃程序。



環境部的資料庫顯示，現今臺灣的砷污染土壤分佈在北部、中部與南部，新北市、桃園市、桃園市、新竹縣、苗栗縣、台中市、彰化縣、台南市、高雄市與屏東縣都有污染案例。污染場址多是煉油廠、農藥廠、化工廠、鋼鐵廠、煉銅廠與金屬工廠等。控制場址中，砷在污染土壤中濃度 61.6 mg/kg 到 1120 mg/kg。整治場址的污染土壤中的砷濃度 64.4 mg/kg 到 20800 mg/kg (土壤地下水污染整治網，2024 年)。由此可知，即使推行嚴格的環保法規至今，全台灣仍有部分土地有砷污染超標的情況，如以下列出的公告控制場址與整治場址，因此必須正視砷污染土壤的問題 (土壤地下水污染整治網，2024 年)。

公告為控制場址

1.場址名稱: 台灣中油股份有限公司煉製事業部桃園煉油廠

土壤污染物: 砷：78.9 mg/Kg

2.場址名稱: 台灣庵原農藥股份有限公司虎尾工廠

土壤污染物: 砷：1120 mg/Kg

3.場址名稱: 興業金屬股份有限公司

土壤污染物: 砷：684 mg/Kg

4.場址名稱: 伍棋玻璃廠有限公司

土壤污染物: 砷：97.9 mg/Kg

5.場址名稱: 國蜂鋼鐵企業股份有限公司

土壤污染物: 砷：131 mg/Kg

6.場址名稱: 台耀科技股份有限公司

土壤污染物: 砷：155 mg/Kg

7.場址名稱:彰化縣溪湖鎮西安段 0544-0000、0550-0000、0551-0000 地號(三王興展輪胎股份有限公司)

土壤污染物: 砷：61.7 mg/Kg

8.場址名稱: 欣榮建業股份有限公司所有原欣榮鋼鐵股份有限公司工廠用地



土壤污染物: 砷： 61.6 mg/Kg

公告為整治場址

1. 場址名稱: 陸昌化工股份有限公司幼獅廠

土壤污染物: 砷： 344 mg/Kg

2. 場址名稱: 宗發工業股份有限公司

土壤污染物: 砷： 123 mg/Kg

3.場址名稱: 原台灣金屬鑛業股份有限公司及其所屬三條廢煙道地區(部分)

土壤污染物: 砷： 20800 mg/Kg

4.場址名稱:三聖諦企業有限公司

土壤污染物: 砷： 64.4 mg/Kg

5. 場址名稱: 新北市新店區安和段 49、51 及 52 地號原金隆興金屬工業股份有限公司

土壤污染物: 砷： 9060 mg/Kg

6. 場址名稱: 原禮樂煉銅廠

土壤污染物: 砷： 2150 mg/Kg

2. 研究目的

本研究目標為證實植物微生物燃料電池技術復育砷污染土壤之可行性，分析土壤砷污染物的去除效率以及去除機制。系統能達到土壤復育效果以外，能進行產電、綠化以及淨零排放等功效。系統結合水生植物與微生物燃料電池，營造類溼地的環境，添加生物炭，利用系統的微生物、電化學與植物等元素的協同作用，提升土壤中的砷之處理效能，達到土壤復育的目的。另外，本研究能釐清系統去除土壤砷污染的機制，例如氧化還原作用、植物吸收、微生物分解、電極吸附與電動趨勢力現象等。由於植物微生物燃料電池具有植物、水、土壤元素，而且具有因地制宜、易與自然環境結合的特性，此研究的未來性能進行產電、綠化與低碳等功效，更期望能有高效率的土壤地下水污染的整治效果。



3. 文獻探討

3.1 植物微生物燃料電池

3.1.1 植物微生物燃料電池之原理

植物微生物燃料電池是一項具備清潔、環保與永續特性的綠色能源科技，屬於新興的清潔能源技術。植物微生物燃料電池的基本組成包括植物、基質、微生物與電化學系統，能將太陽能經由植物光合作用間接轉換為電能（圖 2）。在植物進行光合作用後，根部會釋放各類有機物質，如糖類、有機酸、酶、乙烯及二氧化碳等，這些物質釋放至植物根際區域 (Rhizosphere)——即根部周圍狹窄的土壤或基質環境，形成根際沉積物 (Rhizodeposits)，為微生物提供碳源。微生物將根際沉積物分解後產生電子。當電子於外部形成迴路時，形成電流。此裝置改良微生物燃料電池 (Microbial Fuel Cells, MFCs)，使系統能更有效並長時間運作 (Nitorisravut and Regmi, 2017; Jyoti Sarma and Mohanty, 2022; Sarma and Mohanty, 2023)。

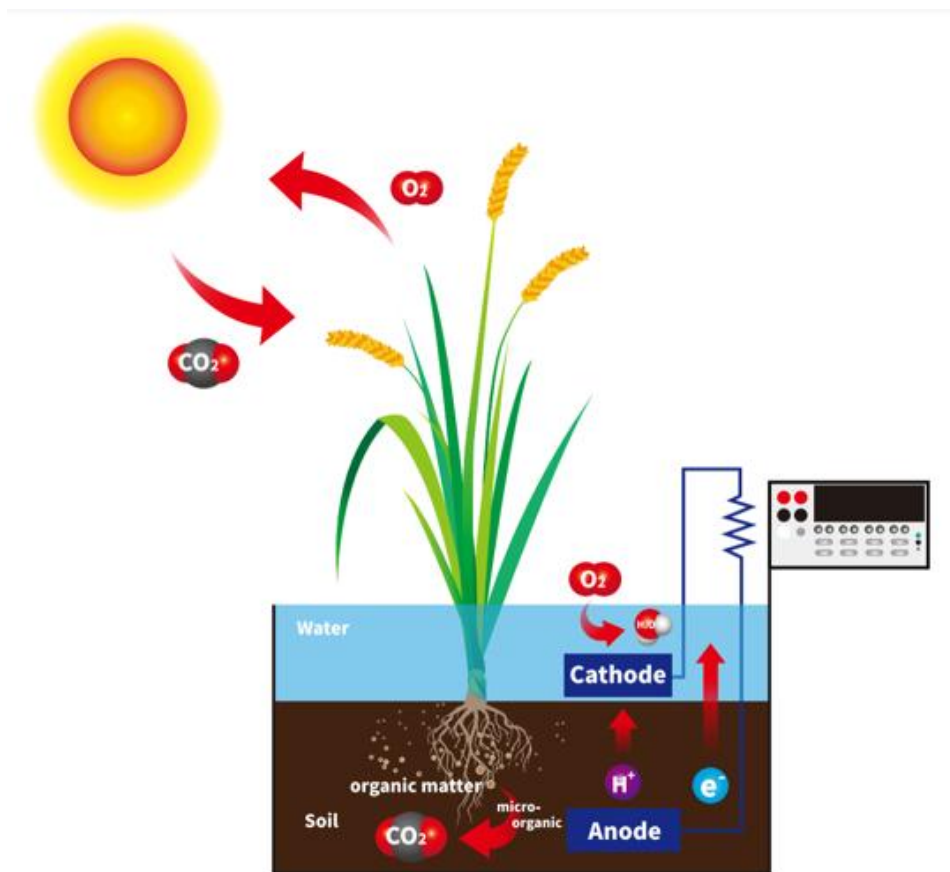


圖 2 植物微生物燃料電池系統



在這一區域中，具電化學活性的產電菌能直接代謝植物分泌的有機物。厭氧微生物在缺氧條件下分解這些有機物質，過程中產生的電子經由陽極收集，透過外部電路傳送至陰極，形成電流與電能。同時，陽極產生的氫離子穿越質子交換膜，與陰極的氧氣結合生成水。由於能源主要來自太陽，植物可持續光合作用，穩定釋放根際分泌物，維持系統運作。

此外，研究顯示，根際區域的微生物活性遠高於一般土壤區域，甚至可達數倍，因此即使不外加其他有機物質，也能持續產生電能。這顯示了植物根際分泌物對於微生物代謝與電能生成中的為重要的角色。

植物微生物燃料電池與傳統微生物燃料電池相同，具有陽極區域、陰極區域、導線、電極與微生物作用（圖 3），因此也被認為是植物結合傳統微生物燃料電池的系統。

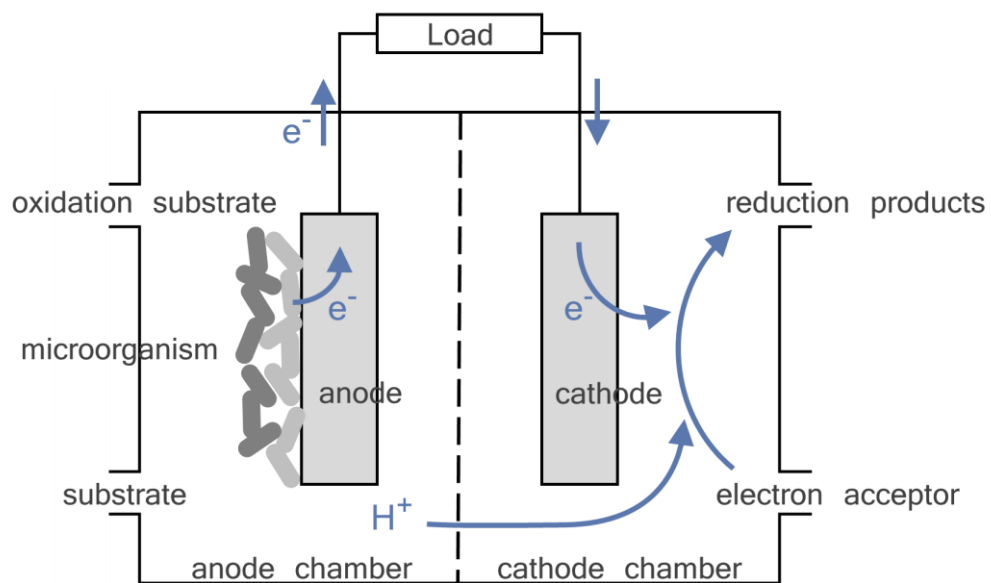


圖 3 微生物燃料電池圖

3.1.2 植物微生物燃料電池之歷史

微生物燃料電池與植物微生物燃料電池是透過可生物降解有機化合物的微生物活動來產生電力與能源的新技術。早在 1911 年，英國植物學家 Potter 就使用酵母與大腸桿菌進行實驗。他將鉑電極置入細菌培養液中，發現微生物能夠產生電力。此實驗被認為是人



類歷史上第一個微生物燃料電池的雛形 (Potter, 1911)。然而，接下來的 55 年間，生物電化學技術並未有重大突破 (Lewis, 1966)。直到 20 世紀末，關於生物電化學技術的研究才逐漸增加。1980 年代，研究人員開始使用人工電化學媒介來促進微生物與電極之間的電子傳遞。一些研究團隊在陽極加入硫化物、苯並噻二嗪、中性紅等電子媒介，這些物質能夠接受細菌細胞內的電子並將其傳遞至電極，藉此提升發電效能。1985 年，Thruston 的研究團隊使用硫化物作為雙室微生物燃料電池的氧化還原媒介，並以變形桿菌 (*Proteus Vulgaris*) 作為催化劑，評估葡萄糖氧化所產生的庫倫效率 (Thruston et al., 1985)。

1999 年，有研究人員發現即使不使用電子媒介，微生物燃料電池仍可產生電力，這在生物電化學領域中是一項重大突破。Kim 及其團隊證實，不需外加媒介，電子也能從細菌細胞轉移至電極。在首次不需媒介的微生物燃料電池實驗中，使用 Fe(III) 為電子受體，懸浮態的腐敗希瓦氏菌 (*Shewanella Putrefaciens* IR-1) 於以乳酸為主要碳源的條件下，能不需氧化還原媒介便產生電力。2003 年，另一項生物電化學技術的突破是發現硫還原地杆菌 (*Geobacter Sulfurreducens*)、金屬還原地杆菌 (*Geobacter Metallireducens*) 與鐵還原紅菌 (*Rhodospirillum Rubrum*) 能直接將細胞內部電子傳遞至細胞外，即使在未產生高電流的條件下仍可運作。這些微生物不僅可直接進行細胞內外的電子轉移，也能附著在陽極上生長，以提升系統穩定性與庫倫效率 (Bond and Lovley, 2003)。

此外，陽極與陰極中的微生物，如肺炎克雷伯氏菌 (*Klebsiella Pneumoniae*) 與盤狀螺旋菌 (*Leptothrix Discophora*)，也會影響生物電化學系統的發電效率 (Rhoads et al., 2005)。在無需媒介的微生物燃料電池被發現後，研究人員對生物電化學領域的興趣大增，尤其是在廢水處理方面，因為無媒介微生物燃料電池提供了一種更具實用性與潛力的方法，可利用不同設計與材料將廢水中的有機污染物去除並同時產生電力 (Liu and Logan, 2004; Liu et al., 2004; Min and Logan, 2004; Rabaey et al., 2005; Aelterman et al., 2006; Logan et al., 2007)。未來，微生物燃料電池技術可能成為解決能源短缺與廢水處理問題的方案。因此，微生物燃料電池領域作為一種替代能源與綠色廢水處理技術，逐漸受到重視。

沉積物型微生物燃料電池的設計是將陰極與陽極分別置於空氣-液體交界處與沉積物中。當沉積物中的微生物分解有機物時產生電子，這些電子經由外部電路傳送至陰極，進而產生電力。2006 年，有研究團隊將沉積物微生物燃料電池應用於海洋氣象監測站，以提供資料傳輸所需的微量電力 (Lovley, 2006)。Dumas 的團隊在海洋中部署沉積物微生物燃料電池，持續運作了 125 天與 18 天 (Dumas et al., 2007)。Rezaei 等人則在海洋沉積物中設置了單室沉積物微生物燃料電池 (Rezaei et al., 2007)。2010 年，有研究團隊使用湖泊沉積物作為材料，在淡水條件下運作沉積物微生物燃料電池 (Song et al., 2011)。

土壤中含有多種微生物 (產電菌)、糖分與由動植物腐爛累積的營養物質 (Ringelberg et al., 2011)。土壤是一種廣泛分布且易於取得的巨大發電資源。因此，土壤與微生物燃料



電池的結合也能產生電力。由於土壤微生物燃料電池在陽極與陰極處進行氧化還原反應，人們也將其應用於土壤整治領域。2011年，Huang 等人使用管狀擴散陰極微生物燃料電池對受酚污染的土壤進行修復。2014年，Deng 的團隊構建了無膜的單室土壤微生物燃料電池以促進微生物活動 (Deng et al., 2014)。2015年，Jian 的團隊使用土壤微生物燃料電池來處理受 Cd^{2+} 污染的土壤。

植物與細菌在將太陽能轉換為電能方面扮演了關鍵角色。人們可將植物與生物電化學系統結合，創造出植物微生物燃料電池。植物微生物燃料電池的概念最早由 De Schampelaire 與 Strik 的研究團隊於 2008 年提出 (De Schampelaire et al., 2008; Strik, Hamelers, et al., 2008)。他們的研究證明植物的根際分泌物可作為微生物的底物，在植物微生物燃料電池中產生電力。2008年，一些研究人員使用水稻於植物微生物燃料電池中，進行可持續能源的研究。在 2010 年，Helder 等人使用不同的植物種類在多個植物微生物燃料電池 (PMFCs) 中評估了生物電力與生物質的產量 (Helder et al., 2010)。2013 年，Helder 等人將植物微生物燃料電池在冬季中應用於屋頂 (Helder et al., 2013)。2016 年，Habibul 等人利用植物微生物燃料電池去除液相中的六價鉻 (Cr(VI)) (Nuzahat Habibul et al., 2016)。2019 年，Guan 團隊使用濕地植物與植物微生物燃料電池結合，整治受重金屬污染的土壤。部分研究者也利用植物微生物燃料電池探討多環芳香烴 (PAH) 與土壤中油品的降解 (Zhao et al., 2019)。

3.1.3 植物種類

在植物微生物燃料電池系統中，植物的生理狀態對系統產電效能及有機物合成具有關鍵影響。過去研究指出，有機物從植物體內運輸至根部的速率、根際沉積物的特性，均會直接決定系統的產電效率 (Bombelli et al., 2013)。此外，植物的光合作用途徑也是重要影響因子。根據碳固定的方式，植物可分為 C3、C4 及 CAM 類型。C3 植物的光合作用效率相對較低，光能利用率不如 C4 植物，且在光合作用過程中能量損失較多 (Brown, 1978)。C4 植物則因擁有高效的光能吸收與碳固定機制，即使在高光照下也不易達到飽和，因而展現出更優異的光合作用產能。至於 CAM 植物，雖能適應嚴苛環境如乾旱條件，但其生長速度緩慢、生物質產量有限。從長期穩定性、產電效益及對環境的適應能力等面向分析，多數 C4 植物的表現普遍優於 C3 植物。C3 與 C4 植物比較 (表 1) (Chong et al., 2025)。



表 1 C3 與 C4 植物比較

Criteria	C3 Plants	C4 Plants
Habitat	Grows in cool or wet environment	Grow in hot or dry environment
Optimal photosynthetic temperature	20-25°C	Around 30°C
Photorespiration	High	Does not occur
Rate of Photosynthesis	Low, as photosynthesis does not occur when stomata are close.	High, as photosynthesis occurs even when stomata are close.
Rate of rhizodeposition	Low	High

3.1.4 植物微生物燃料電池系統之構型

植物微生物燃料電池與傳統土壤微生物燃料電池的構型包括雙槽室系統、單槽室系統、空氣擴散陰極系統及其他配置方式。

雙槽式土壤微生物燃料電池與植物微生物燃料電池系統

雙槽室系統包括三個部分：一個陰極室、一個陽極室，以及一個作為隔離功能的質子交換膜 (圖 4) (Lu et al., 2025)。土壤被裝設於陽極室並保持高含水量，土壤微生物分解有機物產生質子與電子。質子與電子分別透過導線與離子交換膜到達陰極，進行還原反應。透過這些過程，土壤微生物燃料電池便能產生電力。由於離子交換膜能防止陰極室的電子受體擴散至陽極室，雙室系統有助於維持陽極室的厭氧環境。

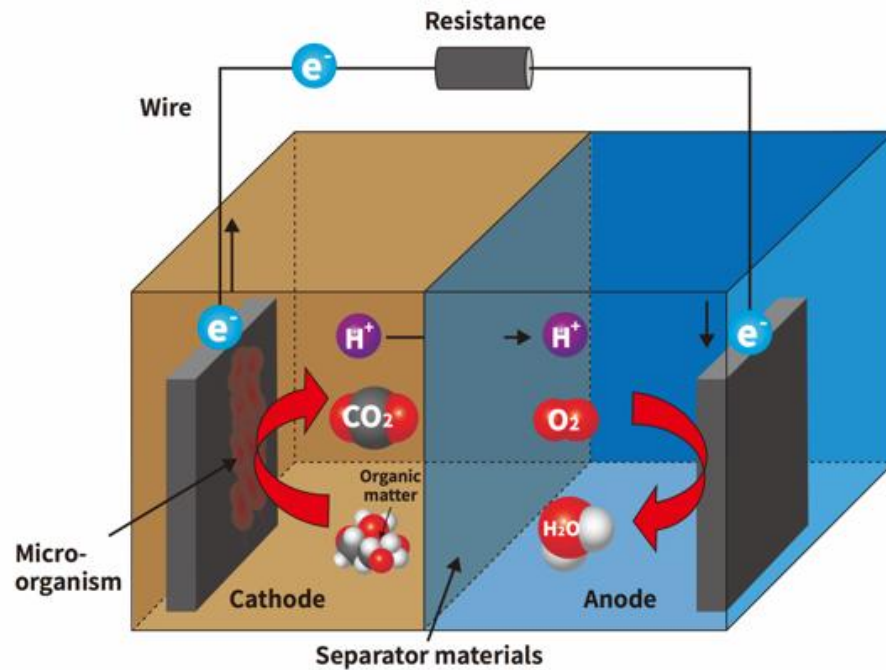


圖 4 雙槽式土壤微生物燃料電池 (Lu et al., 2025)

此結構最初由 Strik 等人採用，為雙槽式植物微生物燃料電池系統，利用陽極與陰極室間的陽離子交換膜作為隔離 (圖 5) (Strik, Hamelers, et al., 2008)。此外，研究人員在植物微生物燃料電池中使用多種材料，例如作為電極材料的碳氈、作為植物生長支持與電流收集材料的石墨顆粒，以及作為電子受體的鐵氫化物或氧氣。此構型已被應用於筆者的研究中，用以評估植物微生物燃料電池的運作機制。

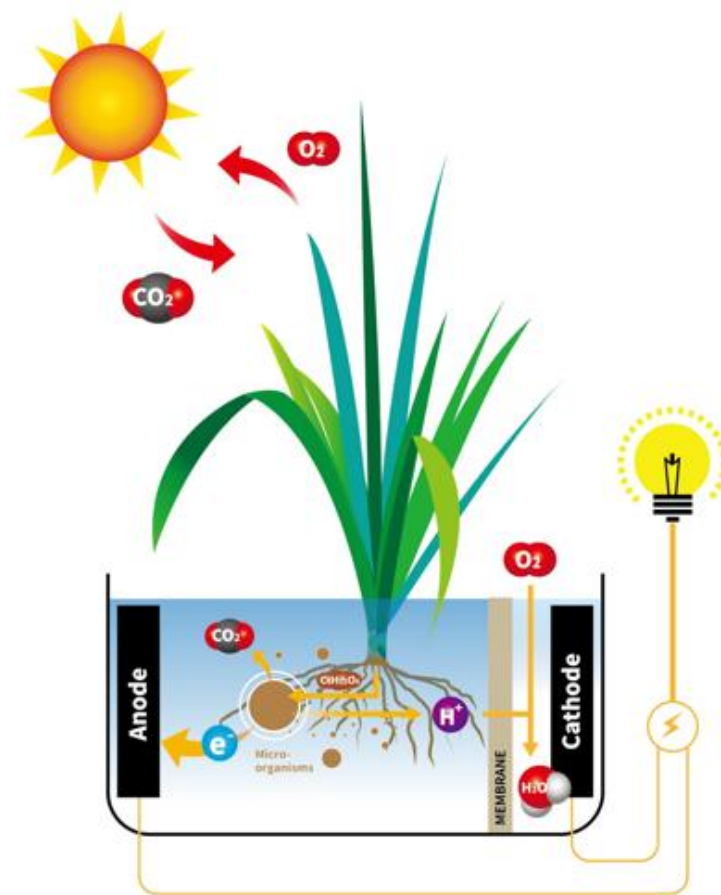


圖 5 雙槽式植物微生物燃料電池 (Strik, Hamelers, et al., 2008)

單槽室土壤微生物燃料電池與植物微生物燃料電池系統

在此構型中，陽極與陰極均埋於淹水土壤中，並浸沒於水層內 (圖 6) (Goto et al., 2015)。當電子與氫離子與水中溶解的氧氣在陰極結合生成水後，透過還原反應，土壤微生物燃料電池便可產生電力 (Helder et al., 2013)。單槽式系統不使用離子交換膜，因此成本較雙槽式系統低。此外，此系統以氧氣為電子受體，因此是一種綠色且永續的發電方式。然而，與雙槽系統相比，此構型具有較高的內部阻抗及較弱的厭氧效果，因其依賴土壤阻隔水中氧氣進入陽極區域。

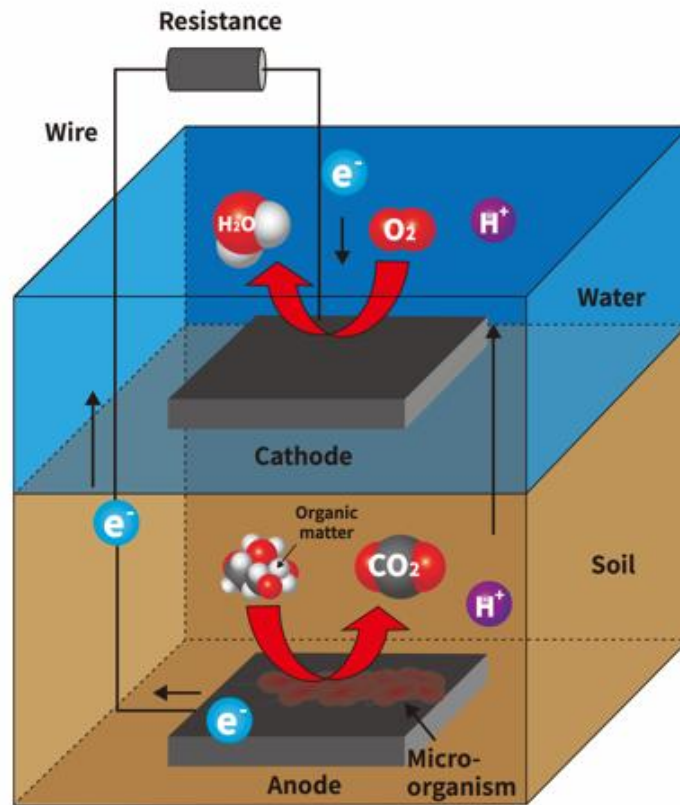


圖 6 單槽式土壤微生物燃料電池 (Goto et al., 2015)

由於許多植物微生物燃料電池研究是基於沉積物微生物燃料電池進行的，因此此種 PMFC 構型與沉積物微生物燃料電池相同，即陽極與陰極室無隔離 (圖 7) (Helder et al., 2013)。陽極通常設置於植物根部以利收集電子，而陰極則設於水氣界面或土壤表面，以利利用氧氣作為電子受體 (Helder et al., 2013; Goto et al., 2015)。

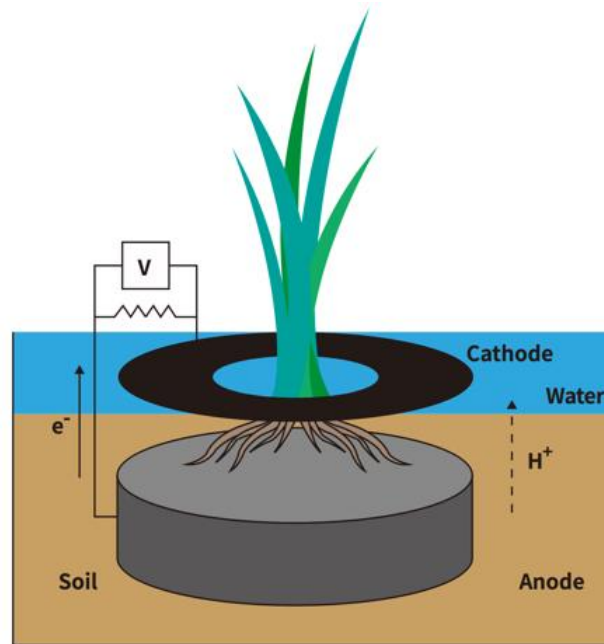


圖 7 單槽式植物微生物燃料電池 (Helder et al., 2013)

空氣擴散陰極系統

此構型的陽極室一側為陽離子交換膜，另一側為空氣擴散陰極，使用空氣中的氧氣作為電子受體 (圖 8) (Wang et al., 2012)。由於陰極緊貼於離子交換膜，電極間距較短，因此內部阻抗低。離子交換膜有助於維持陽極室的厭氧環境。在部分空氣擴散陰極系統的應用與研究中，系統所設的管狀結構可提升膜的利用效率 (Wang et al., 2012)。

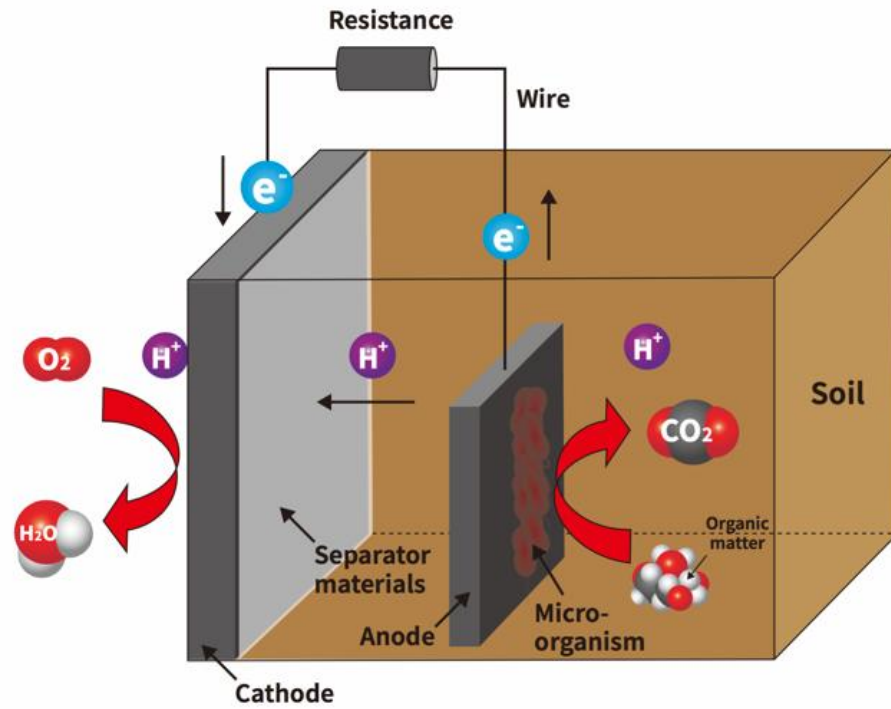


圖 8 空氣擴散陰極系統 (Wang et al., 2012)

其他植物微生物燃料電池構型

由於植物微生物燃料電池中陽極與陰極的距離短，一些研究人員設計出扁平型植物微生物燃料電池構型，旨在降低系統的內部阻抗並提升發電效率 (圖 9) (M. Helder et al., 2012)。在此設計中，膜垂直放置，以增加栽培空間中的膜面積 (M. Helder et al., 2012)。與文獻中其他設計相比，扁平型植物微生物燃料電池的發電效率更高。

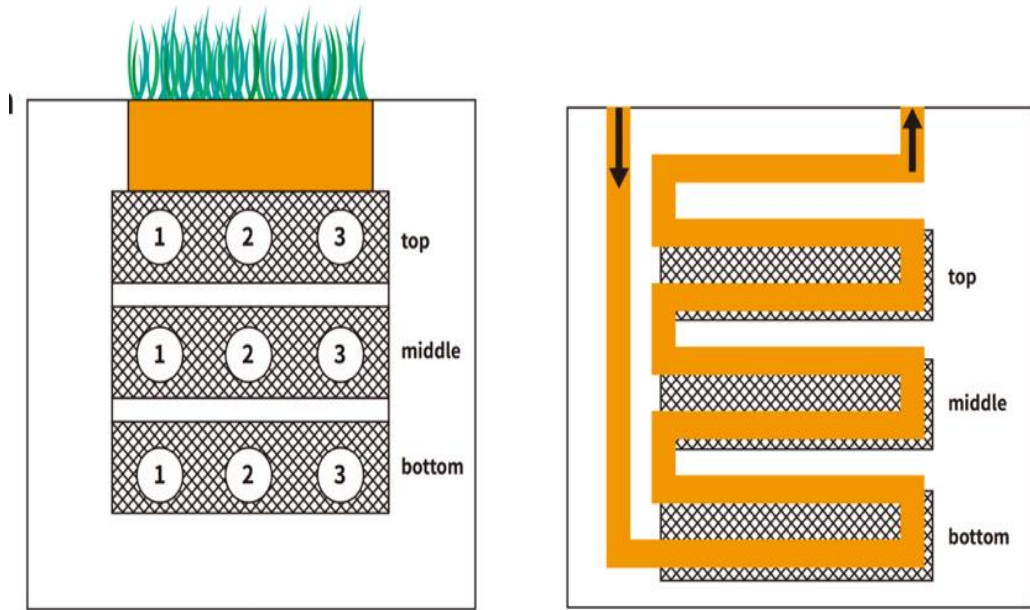


圖 9 扁平式植物微生物燃料電池 (M. Helder et al., 2012)

Timmers 團隊設計了一種新型植物微生物燃料電池構型。此管狀植物微生物燃料電池使用碳氈作為電極材料，因此能顯著降低電極材料的使用量與成本 (圖 10)(Timmers et al., 2013)。由於電極體積較小，管狀植物微生物燃料電池可減少對自然環境中土壤 (如水田與濕地)的干擾。在某些地區，此構型被認為更具實用性。

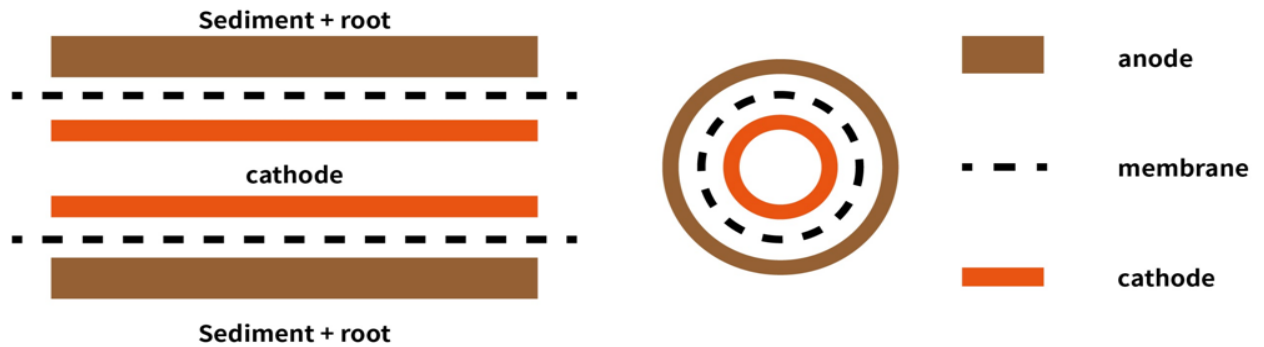


圖 10 管狀植物微生物燃料電池 (Timmers et al., 2013)

3.2 重金屬污染

3.2.1 重金屬污染土壤

工業革命後，工廠數量不斷增加，進而使廢水支排放量及廢棄物之製造量增加 (Chen et al., 2022; Jiang et al., 2023)。未妥善處理之廢水及污染物進入土壤中，對土壤之生態系造成嚴重威脅 (Lai et al., 2016); (Han et al., 2024)。受重金屬汙染的土壤肥度會降低，進而影響植物生長，最終降低糧食產量，影響人類的生活。因此，土壤重金屬汙染 (Soil Heavy Metal Pollution, HMP) 逐漸受到重視 (Lehmann et al., 2020; Khan et al., 2021; Wang et al., 2023)。其中，土壤中常見之重金屬為鉻與銅。

鉻因為具有優良性質，因此其於工業上被廣泛應用。傳統紡織工業及電子業皆常使用鉻。(Li et al., 2018; Ukhurebor et al., 2021)。六價及三價為常見之鉻的型式。六價鉻毒性高且易遷移 (Zeng et al., 2019)，其易對細胞造成危害 (Karimi-Maleh et al., 2021)。六價鉻之高生物累積性，經食物鏈而危害人體。六價鉻使作物之生長狀況變差，並於進入人體後致癌或造成器官損傷 (Xiang et al., 2021; Yang et al., 2023)。三價鉻之毒性雖低於六價鉻，然其可藉由氧化還原反應，形成毒性較高之六價鉻，對土壤及生態造成危害 (Ma et al., 2024)。研究指出，中國特定區域因工廠廢水之不當排放，進而造成土壤之六價鉻含量超標 (Wang et al., 2020)。

土壤中之銅來自礦產之開採與金屬冶煉之製程 (Wu et al., 2010; Kumar et al., 2021)。土壤中的銅一價及二價形式為主，高濃度的銅對土壤、生態與人體皆存在威脅 (Woldetsadik et al., 2017; Zeng and Han, 2020)。

3.2.2 重金屬污染水體

地下水、河川及湖泊等水體，污染情形有趨於嚴重。此現象歸因於工業廢水與農業廢水之排放 (Chen et al., 2025)，進而提高水體中之污染物濃度。水體中之多項污染物，以重金屬為近年相對嚴重之危害項目 (Rajamohan et al., 2024)。採礦及冶金使重金屬進入水體



之中 (Soltani et al., 2017; Basem et al., 2024)。此外，發展電子產業、建築工業及醫療工業的過程，皆廣泛使用礦物及重金屬，進而提高重金屬廢棄物進入水體中之可能性 (Li et al., 2023)。常見之水體中之重金屬為鋅，鋅對人體、環境及生態皆存在危害 (Zheng et al., 2021)，對水體中之生態系亦會造成負面影響。

水體中之微生物生長情況，易因其中高濃度之鋅而變差 (Paulsson et al., 2000)。微生物分解水體中之溶解性有機物 (Dissolved Organic Matter, DOM)，並將溶解性有機物與自體產生之生物質 (Biomass) 合併，具碳循環及能量流動之功能。水體中高濃度的鋅影響物質循環，進而對食物鏈造成危害 (Seto et al., 2013)。

3.3 砷重金屬污染

土壤中的砷主要以正三價及正五價之無機形式存在。其中，正五價的砷，在適當的環境下，可經由氧化還原反應轉換為三價砷 (Kawa et al., 2019)。天然及人為為土壤中之砷的主要來源。火山噴發 (Volcanic Eruptions) 為天然來源之一項實例。人為來源與工業產品之生產及製造有關 (Xu et al., 2021)。研究指出，中國特定地區之土壤中累積高含量的砷 (Feng and Na, 2022)。當砷經由食物鏈進到人體後，將對腦神經系統及呼吸系統造成危害，並引發烏腳病的症狀 (Rehman et al., 2021)。除了對人體造成危害之外，土壤中之砷亦會被植物根際吸收，並累積於職務之組織內，進而經由攝食作用危害其他生物 (Sandhi et al., 2022)。土壤中高濃度的砷降低土壤肥力 (Fertility)，並危害土壤中之微生物生存 (Yan and Zhang, 2021)。

3.4 重金屬污染與傳統處理技術

金屬污染因其高度毒性、長時間殘留於環境及難以分解的特性，一直是全球環境治理的重要議題。這類污染物具有生物累積與不可逆性，對土壤與生態系統造成嚴重破壞，不僅導致土壤肥力下降、農作物產量減少，還會經由地下水、地表水進入食物鏈，最終威脅動植物與人類健康 (Tchounwou et al., 2012)。

重金屬污染土壤與水體治理技術方法可依操作方式分為：現地整治 (In-Situ Remediation)、現場/離地整治 (Ex Situ/On-Site Treatment) 與離場整治 (Off-Site Treatment) (Liu et al., 2021; Hussain et al., 2022)。技術原理則可進一步分為五大類：物理、化學、生物、電化學與熱處理 (Khalid et al., 2017)。物理復育技術透過稀釋、去除或分離，降低污染濃度，例如表面覆蓋、鋼材或膨潤土隔離屏障 (Mulligan et al., 2001)。化學復育則藉由添加改良劑，改變污染物的化學型態，以降低生物有效性與遷移潛力。生物復育與植物復育運用微生物的代謝或植物的吸收能力，清除土壤中的重金屬 (Agarwal et al., 2007; Aken et al., 2010)。電化學技術 (如電動遷移) 則利用電場促使污染物向收集區遷移，而熱處理 (如熱脫附、熔融固化) 透過高溫使污染物揮發或玻璃化封存。若依據整治目標則可分為三



類，隔離型 (Containment-Based)可透過覆蓋或包覆防止污染擴散，轉化型 (Transformation-Based)改變污染物化學性質以降低毒性，例如穩定化與固定。移除型 (Transport-Based)將污染物從污染區域中抽出或沖洗掉 (Liu et al., 2018)。

在水體污染治理的具體方式包含抽出處理法 (Pump and Treat)、空氣注入法 (Air Sparging)、井內氣提法 (In-Well Air Stripping)，以及生物復育 (Bioremediation) (Gomes et al., 2013)。這些方法各有特點：抽出處理能防止重金屬再度污染水源，但對脆弱地層可能造成結構破壞 (Hussain et al., 2022)。空氣注入法適用於揮發性與非揮發性有機污染物，但對含水層結構要求較高 (Haris et al., 2020)。土壤整治方法則涵蓋土壤開挖 (Soil Excavation)、化學氧化 (In-Situ Chemical Oxidation)、土壤清洗法 (Soil Washing)、土壤淋洗法 (Soil Flushing)、土壤固化法 (Solidification)、土地耕作法 (Sand Farming)、生物整治法 (Bioremediation)、生物通氣法 (Bioventing)、植物整治法及熱脫附 (Thermal Desorption) 等工法。這些技術各具優缺點，例如化學氧化可處理多種污染物，但部分氧化劑反應速率高且持久性不佳。土壤清洗法之優點為整治時間間短，缺點為對於受多種重金屬污染之土壤，洗滌劑不易選擇。生物整治法之優點為相較於化學整治法，可避免有機溶劑之使用，缺點為其處理時間較長 (Aelterman et al., 2006; Aken et al., 2010)。

隨著技術的發展，一些處理方法的結合，產生的協同作用可能有更高的去除重金屬的效率。特別是在植物與微生物整治結合方面，研究顯示，某些微生物能增強植物對重金屬的耐受性與吸收能力 (Ma et al., 2011)。微生物接種技術可顯著提升植物對鎳的吸收量 (Ma et al., 2009)。因此，植物與微生物的協同作用充分發揮了生物處理的優勢，為植物微生物燃料電池等新興技術處理重金屬污染提供了有力基礎依據。

3.5 植物與微生物電化學處理技術

台灣位在低緯度，全島屬於亞熱帶與熱帶，因此平均氣溫較高，尤其是低海拔地區，幾乎沒有過零度以下的氣溫。多種植物能全年維持生命，有些植物甚至在冬季也能成長。台灣處於季風氣候區，高溫多雨的氣候是適合許多植物與微生物成長的環境。因此，台灣的氣候條件非常適合發展長時間運行的植物微生物燃料電池系統。近年微生物電化學技術在開始廣泛地應用在多種領域，如處理污染、鹽土治理與產生能源等。植物微生物燃料電池也用於處理重金屬廢水，系統的微生物電化學機制、氧化還原以及植物吸收使水中重金屬污染物濃度下降，達到處理水中重金屬污染 (N. Habibul et al., 2016)。另外，溼地環境具有植物、微生物、水相與固相元素，因此微生物燃料電池容易結合人工溼地。有研究表明，微生物燃料電池結合降低人工溼地水中的污染物，例如有機物濃度與化學需氧量 (Ren et al., 2021)。植物微生物燃料電池在土相中具有有氧化還原、微生物電化學、電動驅勢現象與植物吸附等機制，因此處理重金屬污染的效率會比傳統植物復育與微生物燃料



電池來得高 (Guan, Hu, et al., 2019)。植物微生物燃料電池以微生物電化學反應復育受重金屬污染之土壤 (圖 11) (Chong et al., 2025)。

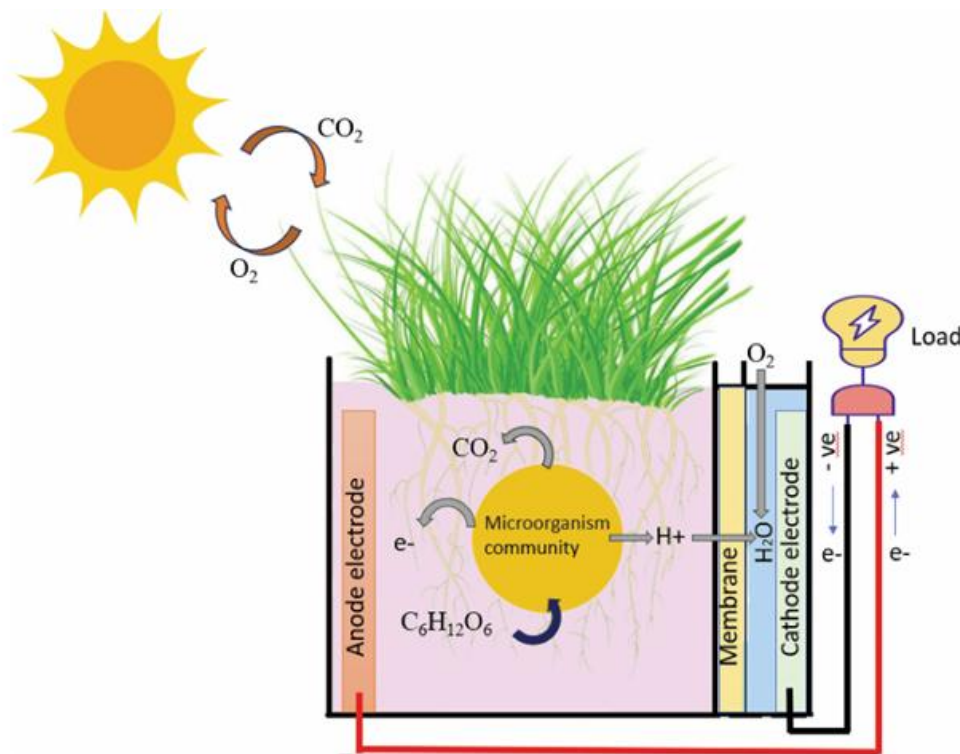


圖 11 植物微生物燃料電池微生物電化學反應示意圖 (Chong et al., 2025)

3.6 生物炭木質纖維素材料與重金屬復育

生物炭 (Biochar) 是一種有機材料透過熱解製備的多孔碳質產品，包括植物、污泥與廢棄物。由於生物炭可由多種材料搭配多元製備參數，因此生物炭材料具有廣泛特性處理重金屬污染物。生物炭擁有大的比表面積，因此具有較高的重金屬容量以進行較大量的物理性吸附。生物炭具有不同官能基，因此可和重金屬進行絡合反應。生物炭的添加若提升土壤的酸鹼度，會導致土壤中重金屬沉澱。生物炭也能降低重金屬的流動性，改變氧化還原狀態等功能 (Paz Ferreira et al., 2014)。對於土壤中不同種類重金屬，生物炭去除機制不同 (因生物炭含有多種金屬及含氧官能基)。包含物理吸附 (Physical Sorption)、沉澱 (Precipitation)、配位 (Complexation)、離子交換 (Ion Exchange)、靜電交互作用 (Electrostatic Interaction)。生物炭去除特定土壤重金屬的方式，隨生物質種類、製備過程的氣化或裂解條件的不同而異 (Gholizadeh and Hu, 2021)。生物炭以多項機制復育砷污染土壤及水體 (圖 12) (Vithanage et al., 2017)。因此，生物炭也被認為是有效地處理土壤重



金屬污染的生物性材料。若是將生物炭添加至植物微生物燃料電池系統，可能有增加微生物活性、氧化還原反應以及植物的生長，以達到更高效的重金屬污染整治效果。

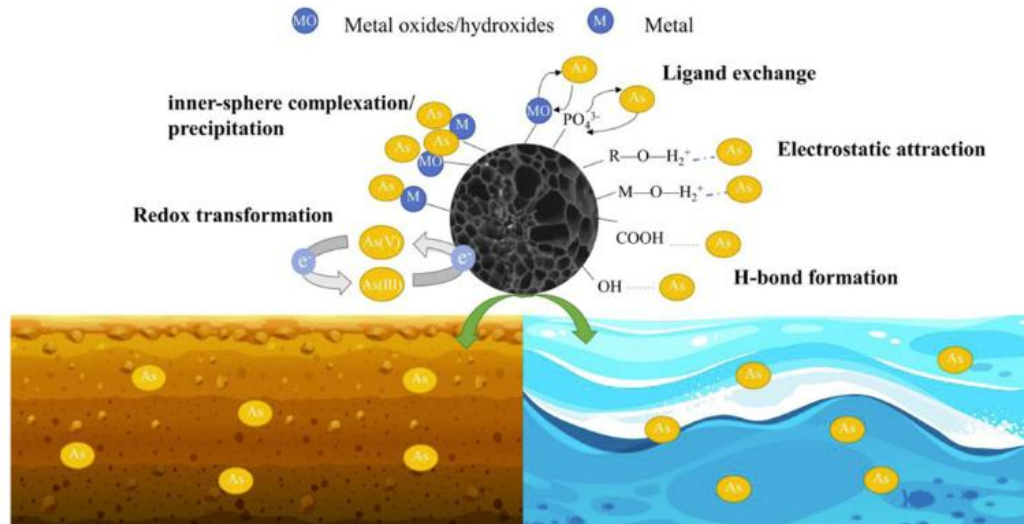


圖 12 生物炭復育砷污染土壤及水體之機制 (Vithanage et al., 2017)

4. 研究方法與過程

本研究進行土壤採樣與分析土壤物化性質，建立植物微生物電化學結合生物炭的技術。主要工作內容為，植物微生物燃料電池技術處理模擬砷污染土壤，比較不同的實驗參數去除砷污染之效果，以及系統對碳的吸存量，再建立最佳的操作條件。期間進行反應機制與應用性的探討，最後評估植物微生物燃料電池復育土壤砷污染的可行性 (圖 13)。

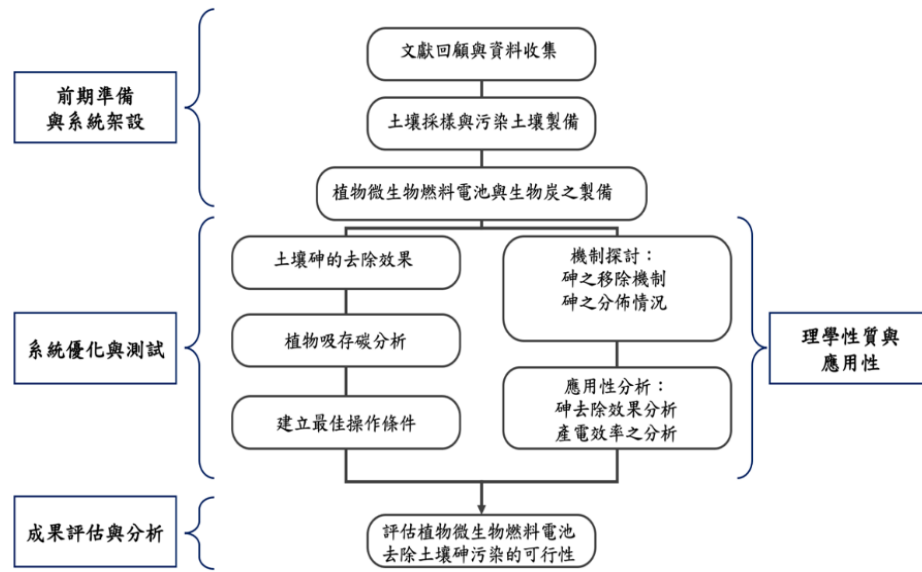


圖 13 整體研究架構圖

4.1 植物微生物燃料電池的架設

植物微生物燃料電池系統由聚氯乙烯 (Polyvinyl Chloride, PVC) 盆栽組成，盆栽內含 3.2 公斤土壤與 2.88 公升的水 (圖 14)，生物炭之實驗參數擬以 0.64 公斤 (2%) 均勻混入 3.14 公斤 (98%) 的土壤與 2.83 公升的水中 (圖 15)。使用石墨碳氈作為陽極和陰極材料 (圖 16)，並以鈦線於其中交織 (圖 17)。使用 1000Ω 的外部電阻 (圖 18) 將鈦絲連接到土面的陰極，建立閉路與開路等電路條件 (Gan et al., 2024)。



圖 14 土壤與水混合



圖 15 生物炭與土壤及水混合



圖 16 石墨氈

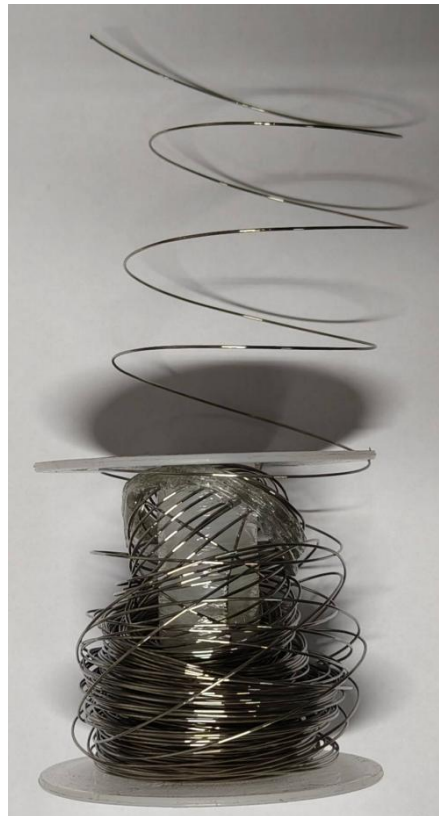


圖 17 鈦線



圖 18 外部電阻

本實驗的土壤取樣於台灣的未受污染的自然土壤，土壤進行風乾並通過 2 mm 的桌上型高速粉碎機 (RT-34) 破碎後 (圖 19)，再進行砷的加標配製工作。加標配製工作中，使用玻棒將土壤與不同濃度的七水合砷酸二鈉 ($\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$) 粉末與亞砷酸鈉 (AsNaO_2) 粉末混合 1 小時，分別以 0、70 與 150 mg/kg 之砷污染土壤等參數進行配置 (圖 20)，再將加標土壤樣品平衡 1 個月，再將電極等電化學系統置入盆栽，再種植物植株。此實驗在國立臺灣大學農場溫室進行，因此具有遮蔽風雨的效果。所有照明、溫度和日照時間都隨自然而變化。系統中的水分會被植物吸收以及蒸發，每天晚上進行水分的補充。



圖 19 土壤破碎照

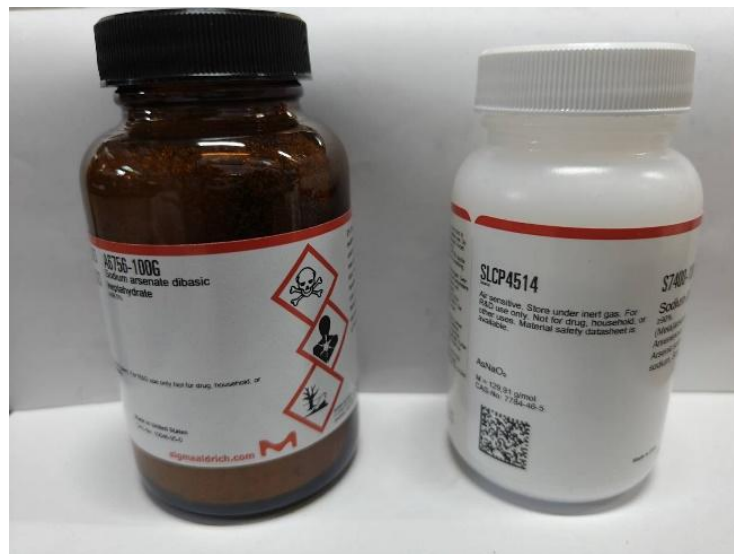


圖 20 砷藥品

單葉鹹草 (*Cyperus malaccensis* Lam. ssp. *monophyllus* (Vahl) T. Koyama) 為植物微生物燃料電池用植物，其為水生植物，其具有生長速度快、高生物量、高密度根系與生命力較強等特性 (圖 21)。本實驗中，將水生植物的幼苗在溫室中培養一個月，挑選出相似大小的健康植株並剪裁至 10 cm 後，種植在植物微生物燃料電池系統 (圖 22)。單葉鹹草為莎



草科之植物，若以固碳類型區分，其屬於 C4 植物，有較 C3 植物更高的生物量與根際分泌物 (Zambelli et al., 2025)。



圖 21 單葉鹹草

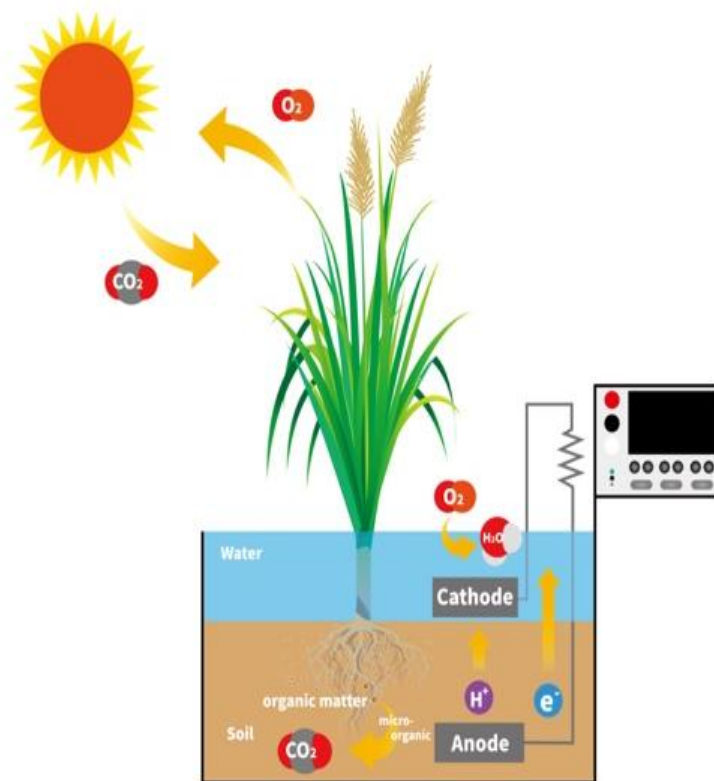


圖 22 植物微生物燃料電池實驗圖



4.2 生物炭的製備

木質纖維素材料為生物質材料，在自然界蘊藏量巨大。並且富含纖維素、半纖維素與木質素，因此是製備生物炭的優良材料。由於現代講求循環經濟與廢棄物資源化，擬取木質廢棄物材料為製備生物炭之原料 (圖 23)。將木顆粒加入石英管中，並將其放入多段控溫焙燒爐。將木顆粒由室溫 (25 °C)於 20 min 升溫至 105 °C，並通以純度 99.9 %之氮氣。於 105 °C持溫 40 min，並以 10 °C/ min 之速率升溫至 600 °C。於 600 °C持溫 60 min，並冷卻至室溫。將樣品進行去離子水清洗，經過濾與乾燥即完成生物炭的製備。



圖 23 生物炭

4.3 分析方法

土壤理化性質的測量項目有 pH 值、電導率 (EC)和土壤砷濃度，三項性質皆需定期在系統運行時間採樣與分析。根據 2015 年環檢所的官方方法 (NIEA S102.63B)對系統土壤採樣，再將土壤樣品保存在-20°C的冰箱中待後續的分析。以 2001 年環檢所的電極法 (NIEA S410.62C)分析土壤 pH 值，將土壤樣品與去離子水混合與固液分離後取其上清液，使用 MeterLab 公司之 pH 計 (PHM210)測量上清液的 pH 值。以 SUNTEX 公司之導電度計 (SC-210)測量土壤的電導率 (NIEA W203.51B)，土壤添加去離子水維持適當比例後，將樣品以離心機達到固液分離後以濾紙過濾得到水樣品，再使用導電度計測量濾液的電導率。土壤砷濃度以砷化氫原子吸收光譜法 (NIEA S301.61B)測量，土壤樣品先與鹽酸和硝酸均勻混合，再配合微波加熱進行消化前處理。以 MARS 6 公司之微波消化器 (CEM)所得消化液稀釋至 0.2 L 後，以 PerkinElmer 公司之感應耦合電漿原子發射光譜儀 (ICP-OES) (Optima 2100DV)分析。



定期會在系統運行時段測量系統中植物的生長情況，擬使用捲尺等測量工具每個月分測量植物的高度，並且搭配季節的變化，以評估植物在微生物電化學運行時與砷污染土壤環境中的生長情形。

此系統的產電以數據採集器 (DAQ 7700, Keithly, USA) 進行連續 24 小時的監測，以每分鐘的頻率記錄系統的輸出電壓。

將植株樣本的地上部採集後以純水沖洗。隨後將植株樣本置於 50°C 烘箱乾燥一日並經秤植體乾重。取植體乾重 1.00 克置於坩鍋送入高溫爐 (CARBOOLITE TF 112/60/150)，加熱至攝氏 600°C 並持溫 2 h。隨後再秤量其殘留灰分重量，將灰化前之植體乾重與灰分重相減，此為植體有機質重量，並乘上有機質含碳係數，以此方式計算植物碳吸存量。

本研究自植物微生物燃料電池系統中取出陽極石墨氈及陰極石墨氈，並以純水清洗。隨後以 glutaraldehyde 進行前固定，以 osmium tetroxide (OsO_4) 進行後固定，隨後進行乙醇序列脫水。最後進行臨界乾燥及表面鍍金，並將樣品以碳膠帶黏貼於載台上，送入掃描式電子顯微鏡 (Scanning Electron Microscope, SEM) (Jeol, JSM-5410) 進行分析。

本研究自植物微生物燃料電池系統中取出陽極石墨氈及陰極石墨氈，並以純水清洗。隨後將石墨氈置於 50°C 的烘箱內一日。待樣品乾燥後，進行高能量化學分析電子能譜儀 (X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS) (Quantes, ULVAC-PHI) 分析，測定石墨氈表面的砷價態。

先將參考電極與陽極電線接於植物微生物燃料電池系統之陽極鈦金屬導線上，並將陰極電線接於系統之陰極鈦金屬導線上，並以電化學分析儀 (Model 1000C, CH Instrument) 設定 5 次迴圈進行測定。

自裝置中取得植物根部與地上部組織，以純水清洗乾淨，並放入 $103 \pm 2^\circ\text{C}$ 之烘箱去除水分。以砷化氫原子吸收光譜法 (NIEA S301.61B) 測量，植物樣品先與鹽酸和硝酸均勻混合，再配合微波加熱進行消化前處理。以 MARS 6 公司之微波消化器 (CEM) 所得消化液稀釋至 0.4 L 後，以感應耦合電漿原子發射光譜 (ICP-MS) (Agilent 7700x) 進行植物組織砷濃度定量。



4.4 甘特圖

年月 \ 工作項目	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	備註
資料收集與文獻回顧	█	█											
採集土壤與前處理		█	█										
製備生物炭		█	█										
植物微生物燃料電池實驗													
植物微生物燃料電池之架設			█	█									
砷污染之去除效果與產電情況				█	█	█	※						
分析污染物去除與產電機制				█	█	█	█	█					
碳儲存與最佳化參數的建立													
碳儲存量與統計分析								█	█	█			
研討會與國際期刊之發表									█	█	※		
成果報告之撰寫										█	█	█	
工作進度估計百分比	5%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	75%	80%	90%	100%	
(累 積 數)													



預定查核點	期中	<p>項目：土壤重金屬砷之去除效率、系統產電效果、最佳操作條件</p> <p>說明：植物微生物燃料電池系統去除污砷污染物之可行性之確定</p>
	成果	<p>項目：土壤重金屬砷之去除效率、去除污染之機制、碳儲存能力</p> <p>說明：確認系統可進行韌性永續整治土壤砷污染</p>

說明：

工作項目請視專案性質及需要自行訂定。預定進度以粗線表示其起迄日期。

「工作進度百分比」欄係為配合管考作業所需，累積百分比請視工作性質就以下因素擇一估計訂定：(1)工作天數，(2)經費之分配，(3)工作量之比重，(4)擬達成目標之具體數字。

「預定查核點」，請在條形圖上標明※符號，並在「預定查核點」欄具體註明關鍵性工作要項。

以 12 個月作規劃，其中期中報告書初稿提送要件需達計畫執行進度 50%以上，成果報告書初稿需於計畫結束前 1 個月提送。

註：表格不敷使用時，請自行增列。



5. 結果與討論

5.1 植物高度變化

植物微生物燃料電池系統架設後在溫室中運行。圖 24 顯示，試驗三個月後，不含污染物之閉路電壓植物微生物燃料電池系統之植物，由初始高度 10 cm 生長至 87.43 ± 2.93 cm。試驗第四個月，植物高度下降至 74 ± 5.43 cm。第三個月至第四個月，植物高度降低源自於葉片頂端的枯萎及凋零。此現象與系統土壤中的養分被植物根際吸收 (Silver et al., 2021; Bhardwaj et al., 2024)。圖 25 顯示，70 mg/kg 五價砷濃度之閉路電壓植物微生物燃料電池系統之植物，由初始高度 10 cm 生長至 102.03 ± 0.6 cm，並於試驗第四個月下降至 94.95 ± 9.18 cm。70 mg/kg 五價砷濃度之閉路電壓植物微生物燃料電池系統之植物，由初始高度 10 cm 生長至 97.39 ± 1.75 cm，並於試驗第四個月下降至 81.43 ± 5.02 cm。70 mg/kg 五價砷濃度之傳統植生復育系統之植物，由初始高度 10 cm 生長至 105.3 ± 1.63 cm，並於試驗第四個月下降至 83.25 ± 8.41 cm。添加生物炭之 70 mg/kg 五價砷濃度閉路電壓植物微生物燃料電池系統之植物，由初始高度 10 cm 生長至 113.65 ± 2.12 cm，並於試驗第四個月下降至 89.7 ± 5.08 cm。四個組別之植物高度皆於試驗前三個月持續升高，並於試驗第四個月降低。此現象與植物根際吸收土壤中的砷有關 (Finnegan and Chen, 2012; Mohamed et al., 2025)。圖 26 顯示，150 mg/kg 三價砷濃度之閉路電壓植物微生物燃料電池系統之植物，由初始高度 10 cm 生長至 93.34 ± 1.4 cm，並於試驗第四個月下降至 73.03 ± 4.2 。150 mg/kg 五價砷濃度之閉路電壓植物微生物燃料電池系統之植物，由初始高度 10 cm 生長至 99.49 ± 0.87 cm，並於試驗第四個月下降至 87.1 ± 5.54 。圖 26 顯示，所有系統之植物高度皆於試驗前三個月至遞增，並於試驗第四個月降低，此現象與高濃度的砷抑制植物生長有關 (Li et al., 2009)。150 mg/kg 五價砷濃度之閉路電壓植物微生物燃料電池系統之植物生長高度高於 150 mg/kg 三價砷濃度之閉路電壓植物微生物燃料電池系統之植物，顯示植物於五價砷的環境中，較其於三價砷的環境中，有更佳之生長情形。此現象歸因於五價砷對於植物之毒性小於三價砷對於植物之毒性 (Finnegan and Chen, 2012)。

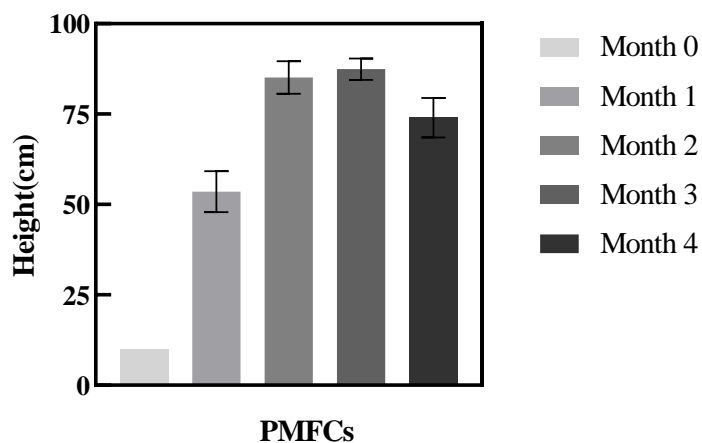


圖 24 0 mg/kg 污染物濃度閉路電壓植物微生物燃料電池之植物於四個月之生長高度

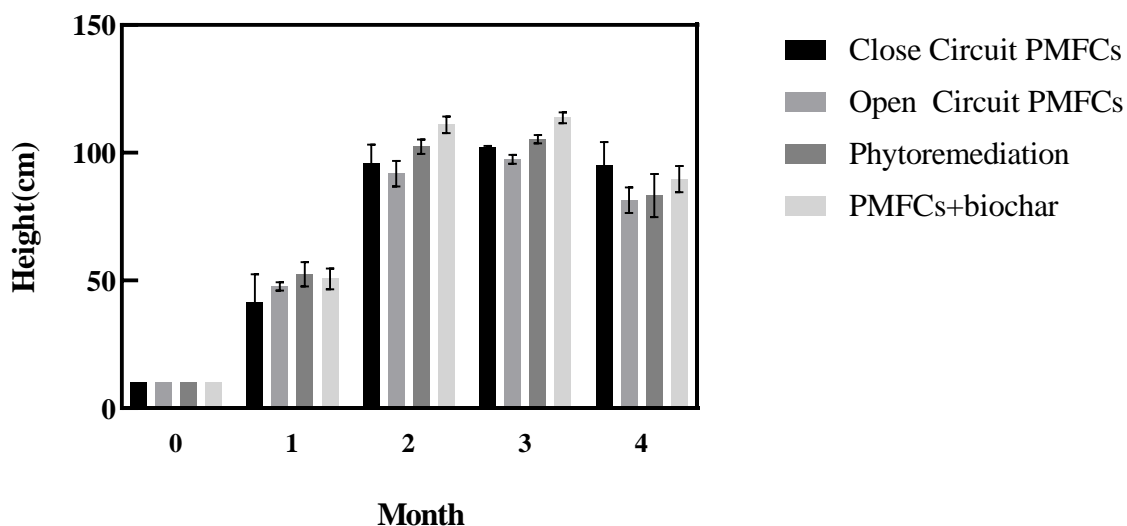


圖 25 70 mg/kg 五價砷濃度參數之植物於四個月之生長高度

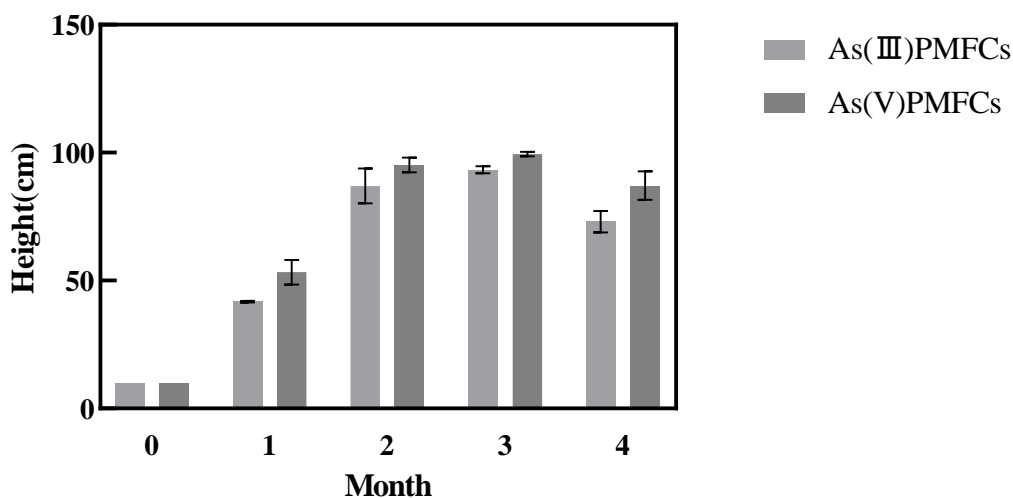


圖 26 150 mg/kg 污染物濃度參數之植物於四個月之生長高度

5.2 電壓變化

圖 27 顯示，試驗前 48 日，70 mg/kg 五價砷濃度之閉路電壓微生物燃料電池系統之輸出電壓高於閉路電壓植物微生物燃料電池系統之輸出電壓。70 mg/kg 五價砷濃度之閉路電壓微生物燃料電池系統之輸出電壓先由 89 ± 4.13 mV 上升至 553 ± 7.92 mV，隨後其輸出電壓下降至 112 ± 16.2 mV。70 mg/kg 五價砷濃度之閉路電壓植物微生物燃料電池之輸出電壓，先由 40 ± 8.94 mV 上升至 302 ± 6.43 mV，隨後下降至 21 ± 5.26 mV。試驗第 49 日起，閉路電壓植物微生物燃料電池系統之輸出電壓高於閉路電壓微生物燃料電池系統之輸出電壓。閉路電壓微生物燃料電池系統之輸出電壓由 69 ± 8.21 mV 下降至 22 ± 20.56 mV。相較之下，閉路電壓植物微生物燃料電池系統之輸出電壓由 78 ± 22.84 mV 先上升至 193 ± 3.54 mV，隨後其輸出電壓下降至 42 ± 39.87 mV。試驗前 48 日，閉路電壓微生物燃料電池系統之輸出電壓高於閉路電壓植物微生物燃料電池系統之輸出電壓。此現象源自於試驗初期，植物根際之徑向氧 (Radical Oxygen Loss, ROL) 釋出，當氧氣被傳遞至陽極區域，將抑制厭氧菌生長，近而降低植物微生物燃料電池系統之輸出電壓 (Marjolein Helder et al., 2012; Greenman et al., 2024)。試驗第 49 日起，閉路電壓植物微生物燃料電池系統之輸出電壓高於閉路電壓微生物燃料電池系統之輸出電壓。此現象與微生物燃料電池系統之土壤中養分為微生物消耗，使微生物可利用之碳



源減少，以及植物微生物燃料電池之組別，植物根際分泌有機物，供土壤中之微生物利用有關 (Timmers et al., 2010; Uria-Molto et al., 2022)。圖 28 顯示，添加生物炭之 70 mg/kg 五價砷濃度閉路電壓植物微生物燃料電池系統之輸出電壓，高於未添加生物炭之閉路電壓植物微生物燃料電池系統之輸出電壓。試驗期間，添加生物炭之閉路電壓植物微生物燃料電池系統之最高輸出電壓為 566 ± 13.21 mV，該組別之最低輸出電壓為 78 ± 18.25 mV。未添加生物炭之 70 mg/kg 五價砷濃度之閉路電壓植物微生物燃料電池系統之最高輸出電壓為 302 ± 6.43 mV，該組別之最低輸出電壓為 14 ± 3.49 mV。添加生物炭之閉路電壓植物微生物燃料電池系統輸出電壓高於未添加生物炭之組別原因為，生物炭的高孔隙率與高比表面積為電化學活性菌提供附著點，使生物膜 (Biofilm) 被穩定建立，進而強化電子傳遞途徑與其長期穩定性，提高輸出電壓 (Gan et al., 2024; Onyelowe et al., 2025)。

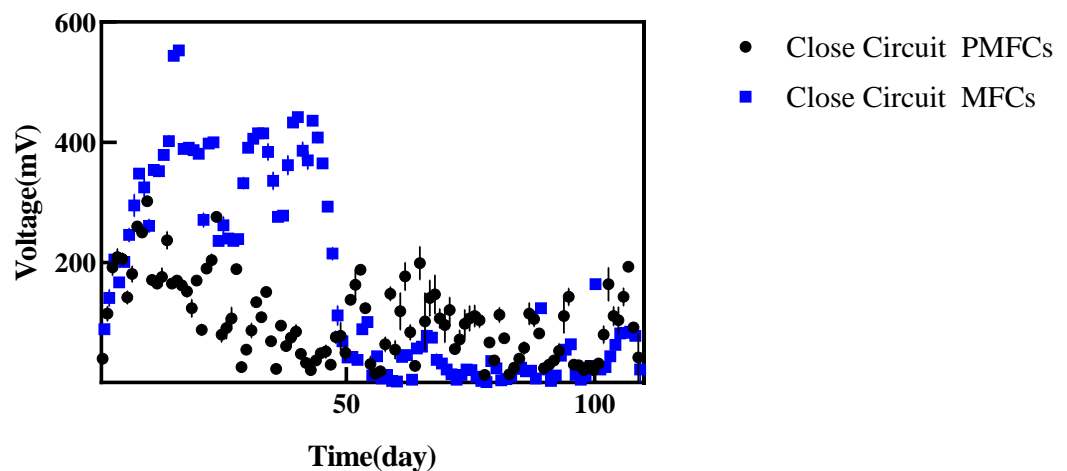


圖 27 70 mg/kg 五價砷濃度之閉路電壓植物微生物燃料電池及微生物燃料電池樣之電壓於試驗四個月之變化

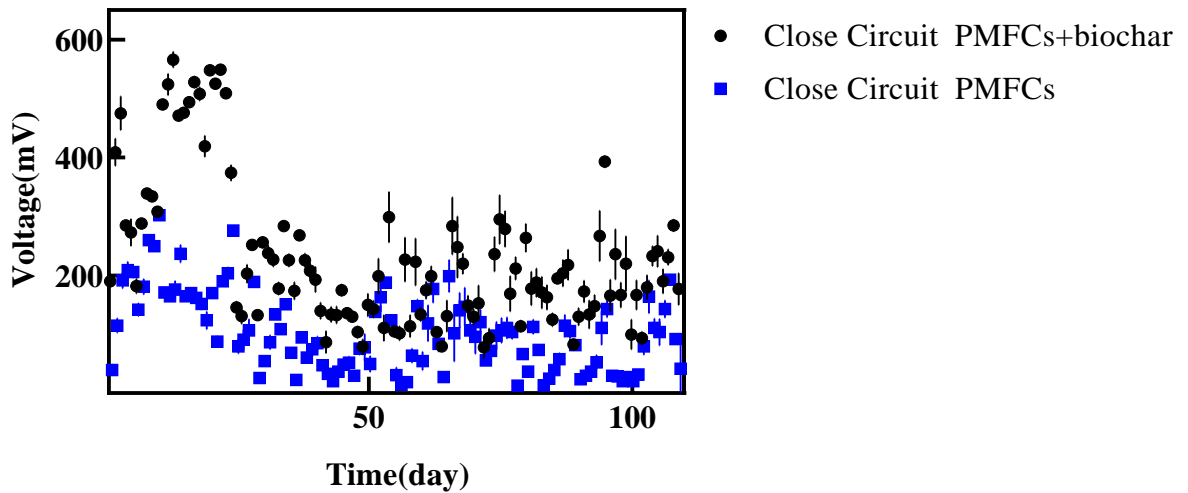


圖 28 70 mg/kg 五價砷濃度之添加生物炭及未添加生物炭之閉路電壓植物微生物燃料電池電壓於試驗四個月之變化

圖 29 顯示，150 mg/kg 三價砷濃度之閉路電壓植物微生物燃料電池系統之最高輸出電壓為 771 ± 13.77 mV，該組別最低之輸出電壓為 194 ± 2.81 mV。150 mg/kg 五價砷濃度之閉路電壓植物微生物燃料電池系統之最高輸出電壓為 346 ± 4.58 mV，該組別之最低輸出電壓為 16 ± 2.04 mV。150 mg/kg 三價砷之閉路電壓植物微生物燃料電池之輸出電壓高於五價砷之閉路電壓植物微生物燃料電池輸出電壓。由於三價砷具有較高的氧化電位，容易釋出較高的能量，因此 150 mg/kg 三價砷之閉路電壓植物微生物燃料電池系統有較高的輸出電壓 (Ahsan et al., 2023; Wu et al., 2024)。

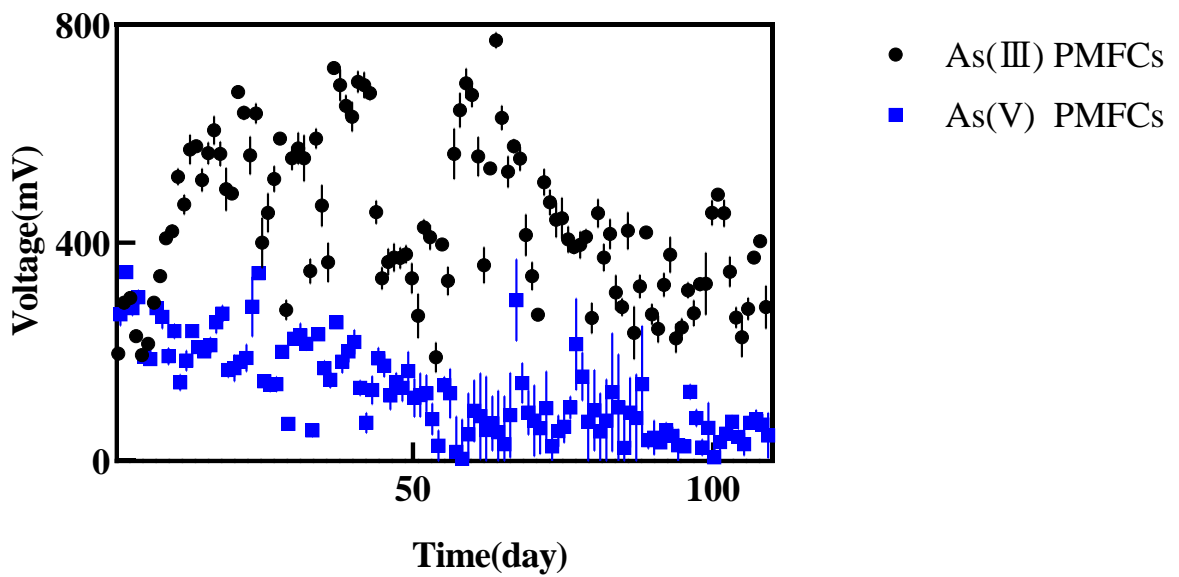


圖 29 150 mg/kg 三價砷及五價砷濃度之閉路電壓植物微生物燃料電池之電壓於試驗四個月之變化

5.3 pH 值變化

土壤 pH 的變化部分，圖 30 顯示，閉路電壓植物微生物燃料電池之陽極 pH 值先由 5.86 ± 0.097 上升至 6.08 ± 0.19 ，再下降至 4.95 ± 0.06 ，隨後上升至 5.48 ± 0.21 。閉路電壓植物微生物燃料電池之陽極 pH 值由 6.01 ± 0.017 下降至 3.79 ± 0.25 。添加生物炭之閉路電壓植物微生物燃料電池陽極 pH 值先由 6.16 ± 0.033 上升至 6.3 ± 0.1 ，再下降至 5.33 ± 0.17 ，隨後上升至 6.56 ± 0.13 。未添加生物炭與添加生物炭的植物微生物燃料電池系統於試驗初期 pH 值皆上升，此趨勢源自試驗初期系統中酸性產物較少 (Jiang et al., 2016)。試驗中期三個組別之 pH 值皆遞減，此現象源自於微生物群落的建立，使系統中累積較多的有機酸 (Jiang et al., 2016)。試驗後期末添加生物炭與添加生物炭的植物微生物燃料電池系統呈現陽極 pH 值上升，與微生物燃料電池持續下降的趨勢形成對比。植物微生物燃料電池的組別，存在根際釋放的氧氣及有機根系分泌物，此條件促進氨化及反硝化作用，使氨 (NH_3) 及氫氧根 (OH^-) 被生成，中和土壤中的質子，導致後期 pH 值回升 (Kaku et al., 2008; D. P. Strik et al., 2011)。相比之下，微生物燃料電池缺乏植物根際的持續輸入與氮循環動態，產生的質子 (H^+) 持續累積，故系統之 pH 值隨試驗時間的延長而遞減 (Awadhesh Shukla et al., 2004; Logan et al., 2006)。生物炭本身的鹼性釋放效應會逐步提升陽極區域的 pH 值。木質基生物炭在熱解過程中會保留鹼性礦物質，例如 K^+ 及 Ca^{2+} 。這些陽離子隨試驗時間延長緩慢



釋放至土壤中，對酸性環境產生中和作用，故添加生物炭之植物微生物燃料電池系統最後一個月之陽極 pH 值高於未添加生物炭之組別 (Yuan et al., 2011; Wijitkosum et al., 2025)。圖 31 顯示，閉路電壓植物微生物燃料電池之陰極 pH 值先由 5.935 ± 0.058 上升至 6.315 ± 0.19 ，再下降至 5.165 ± 0.19 。閉路電壓微生物燃料電池之陰極 pH 值由 5.99 ± 0.118 下降至 3.52 ± 0.138 。添加生物炭之閉路電壓植物微生物燃料電池之陰極 pH 值先由 6.155 ± 0.044 上升至 6.45 ± 0.27 ，接著下降至 5.61 ± 0.155 ，最後上升至 6.7 ± 0.017 。試驗初期，未添加生物炭與添加生物炭之閉路電壓植物微生物燃料電池之 pH 值皆上升，此趨勢與土壤於試驗初期僅含有少量酸性產物有關。試驗中期，三個組別之 pH 值皆隨試驗時間延長而遞減，此趨勢與微生物產生大量酸性有機物有關。試驗後期，未添加生物炭的植物微生物燃料電池系統之 pH 值遞減 (Jiang et al., 2016)。相較之下，添加生物炭之植物微生物燃料電池系統之 pH 值遞增。此現象源自於陰極還原反應之效率不佳，此現象好發於系統持續運作長時間之後。氧氣供應成效不佳之情況下，將造成副反應產生過氧化氫 (H_2O_2)，使陰極區域之 pH 值下降 (Logan et al., 2006)。生物炭具有高孔隙率之特性，使氧氣於陰極區域之滯留時間延長，進而提高陰極還原反應之進行效率，減少酸性副產物之生成。因此，添加生物炭之植物微生物燃料電池系統於試驗後期之 pH 值高於未添加生物炭之組別，且呈現遞增之趨勢 (Biederman and Harpole, 2013)。

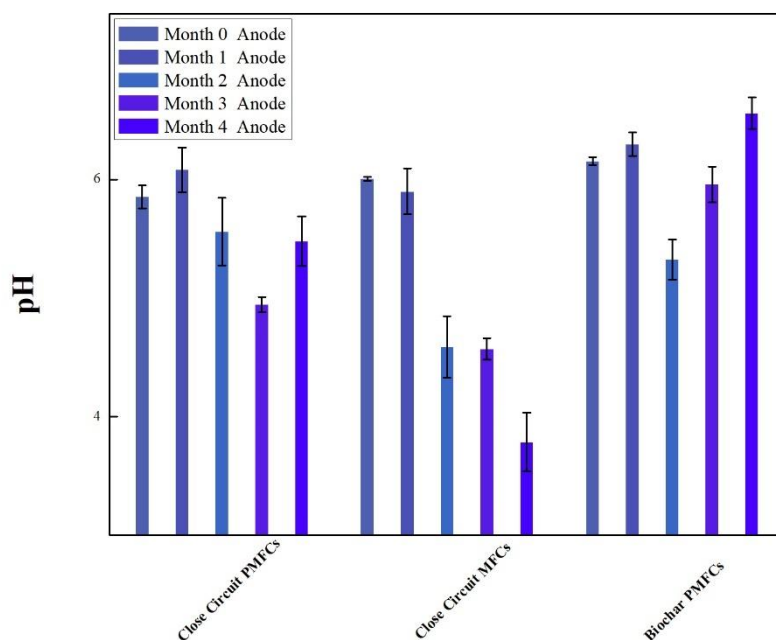


圖 30 70 mg/kg 五價砷濃度系統之陽極 pH 值於試驗 4 個月之變化

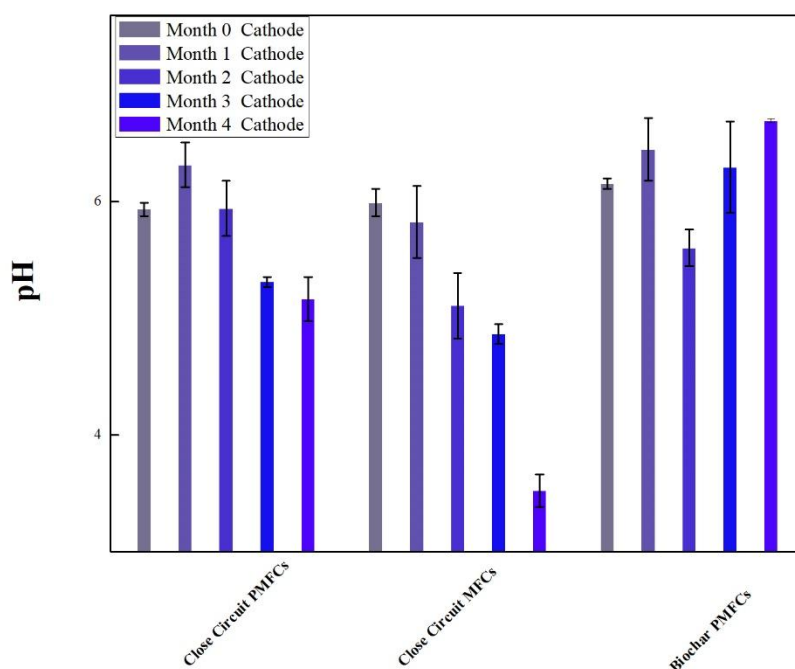


圖 31 70 mg/kg 五價砷濃度系統之陰極 pH 值於試驗 4 個月之變化

5.4 電導率之變化

圖 32 顯示，閉路電壓植物微生物燃料電池系統之陽極電導率先由 196.93 ± 11.36 下降至 76.475 ± 5.3 。隨後上升至 211.5 ± 20.36 。閉路電壓微生物燃料電池系統之陽極電導率由 168.3 ± 1.4 下降至 127 ± 3.35 。添加生物炭之閉路電壓植物微生物燃料電池系統陽極電導率先由 195.45 ± 4.1 下降至 129.1 ± 10.15 ，隨後上升至 149.03 ± 6.63 ，最後下降至 113.05 ± 1.67 。未添加木質生物炭的植物微生物燃料電池組別，其陽極電導率在初期呈現持續下降趨勢，約數月後突然驟增。此現象與以下因素相關。初期電導率下降與系統不穩定，近而使電子傳遞效率降低有關 (Marjolein Helder et al., 2012)。試驗中期陽極電導率的持續降低，此現象與微生物消耗營養鹽有關。試驗後期源自於植物根際分泌物的變化。文獻指出，植物根際分泌物在試驗初期造成土壤酸化。隨著植物生長和根系發育，分泌物的組成和量可能發生變化，從而提升陽極區域的 pH 值及電導率。故試驗後期電導率上升 (Aulakh et al., 2001; Ashok Shukla et al., 2004)。相較之下，閉路電壓微生物燃料電池系統的陽極電導率持續下降。此現象源自土壤中的營養鹽為土中的微生物所消耗。添加生物炭的植物微生物燃料電池系統中，整體而言陽極電導率持續下降。初期電導率下降與系統尚未穩定建立，因而降低電子傳遞效率。試驗中期電導率小幅度回升，此現象與生物炭孔隙釋放陽離子，提高土壤中的營養鹽含量有關。試驗後期由於植物根際有機物種類轉變，新種類的有機物與生物炭交互作用後，營造出的環境條件微生物尚未適應，因此影響整體電子傳遞效率，進而降低陽極電導率 (D. P. B. T. B. Strik et al., 2011; Seifan and Berenjian, 2019)。圖 33 顯示，閉路電壓植物微生物燃料電池的組別，



其陰極之電導率由 189.28 ± 9.73 上升至 216 ± 10.39 。閉路電壓微生物燃料電池的組別，其陰極之電導率由 199.78 ± 4.15 下降至 113.95 ± 6.41 。添加生物炭之閉路電壓之閉路電壓植物微生物燃料電池組別，其陰極之電導率 213.75 ± 1.5 下降至 113.95 ± 6.41 。整體而言，三個組別之陰極電導率皆呈現上下波動之趨勢。三個組別之試驗初期陰極電導率皆下降，此現象與不穩定之系統影響營養鹽傳遞至陰極有關 (Marjolein Helder et al., 2012)。試驗後期，閉路電壓植物微生物燃料電池之陰極電導率有別於其餘兩個組別，其電導率上升。此趨勢源自於植物根際分泌物種類轉變後，微生物於此系統中有良好之適應性 (Wetser et al., 2015; Mani et al., 2020)。

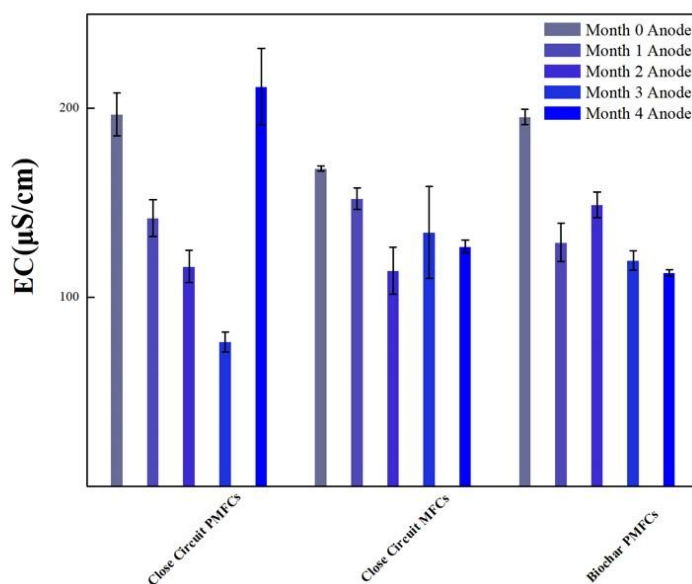


圖 32 70 mg/kg 五價砷濃度系統之陽極電導率於試驗 4 個月之變化

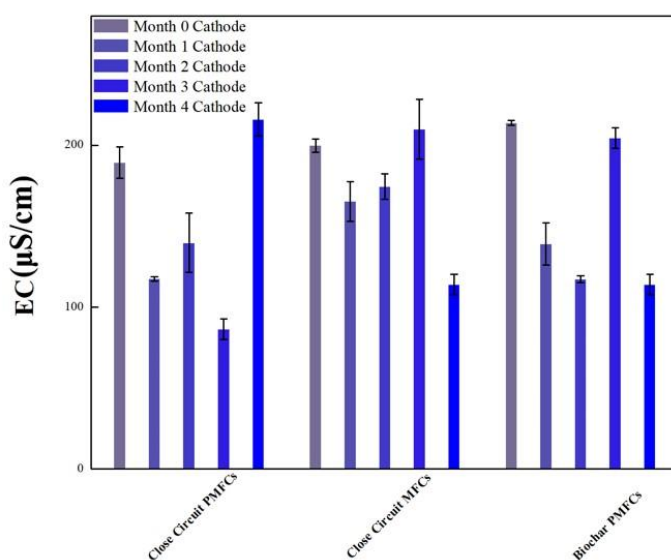


圖 33 70 mg/kg 五價砷濃度系統之陰極電導率於試驗 4 個月之變化



5.5 土壤砷濃度之變化

圖 34 顯示，閉路電壓植物微生物燃料電池系統之陽極砷濃度由初始值 70 mg/kg 下降至 57.99 ± 0.01 mg/kg。開路電壓植物微生物燃料電池系統之陽極砷濃度由初始值 70 mg/kg 下降至 58.48 ± 0.04 mg/kg。閉路電壓微生物燃料電池系統之陽極砷濃度由初始值 70 mg/kg 下降至 59.72 ± 0.1 mg/kg。開路電壓微生物燃料電池系統之陽極砷濃度由初始值 70 mg/kg 下降至 61.87 ± 1.68 mg/kg。添加生物炭之閉路電壓植物微生物燃料電池系統陽極砷濃度由初始值 70 mg/kg 下降至 57.92 ± 0.008 mg/kg。結果顯示，閉路電壓植物微生物燃料電池之系統陽極砷濃度低於開路電壓植物微生物燃料電池之系統陽極砷濃度。由於閉路電壓之系統中存在生物電化學反應可促進砷的遷移，故閉路電壓植物微生物燃料電池之系統陽極砷濃度較低 (Sun et al., 2022; J. Zhang et al., 2022)。植物微生物燃料電池系統之陽極砷濃度低於微生物燃料電池之系統，此現象源自於植生復育之作用。植物根際吸附土壤中的砷，進而降低土壤中的砷濃度 (Besedin et al., 2024; Huslina et al., 2024)。添加生物炭之閉路電壓植物微生物燃料電池系統陽極砷濃度低於未添加生物炭之閉路電壓植物微生物燃料電池之系統陽極砷濃度。由於生物炭具有高孔隙率之特性，故其可吸收土壤中的砷，進而降低土壤砷濃度 (Pathak et al., 2024; Sharma et al., 2024; Zhang et al., 2025)。圖 35 顯示，閉路電壓植物微生物燃料電池系統之陰極砷濃度由初始值 70 mg/kg 下降至 60.21 ± 0.05 mg/kg。開路電壓植物微生物燃料電池系統之陰極砷濃度由初始值 70 mg/kg 下降至 62.34 ± 0.01 mg/kg。閉路電壓微生物燃料電池系統之陰極砷濃度由初始值 70 mg/kg 下降至 62.14 ± 0.02 mg/kg。開路電壓微生物燃料電池系統之陰極砷濃度由初始值 70 mg/kg 下降至 63.01 ± 1.74 mg/kg。添加生物炭之閉路電壓植物微生物燃料電池系統陰極砷濃度由初始值 70 mg/kg 下降至 61.8 ± 0.01 mg/kg。高比表面積與高孔隙率，為生物炭吸附土壤砷的主要機制 (Wang et al., 2024; Mao et al., 2025)。結果顯示，經過兩個月的試驗後，所有組別之砷濃度皆低於初始濃度 70 mg/kg。閉路電壓植物微生物燃料電池之系統陰極砷濃度低於開路電壓植物微生物燃料電池之系統陰極砷濃度。由於閉路電壓之系統中存在生物電化學反應可促進砷的遷移，故閉路電壓植物微生物燃料電池之系統陽極砷濃度較低 (Sun et al., 2022; J. Zhang et al., 2022)。植物微生物燃料電池系統之陰極砷濃度低於微生物燃料電池之系統，此現象源自於植生復育之作用。植物根際吸附土壤中的砷，進而降低土壤中的砷濃度 (Besedin et al., 2024; Huslina et al., 2024)。添加生物炭之閉路電壓植物微生物燃料電池系統陰極砷濃度高於未添加生物炭之閉路電壓植物微生物燃料電池之系統陰極砷濃度。生物炭有助於砷氧化菌的生長，砷氧化菌可將土壤中陰極已被還原的三價砷氧化成五價砷。五價砷較三價砷更容易遷移至陰極，故添加生物炭之閉路電壓植物微生物燃料電池系統陰極砷濃度高於未添加生物炭之閉路電壓植物微生物燃料電池之系統陰極砷濃度 (Otsuka et al., 2023)。

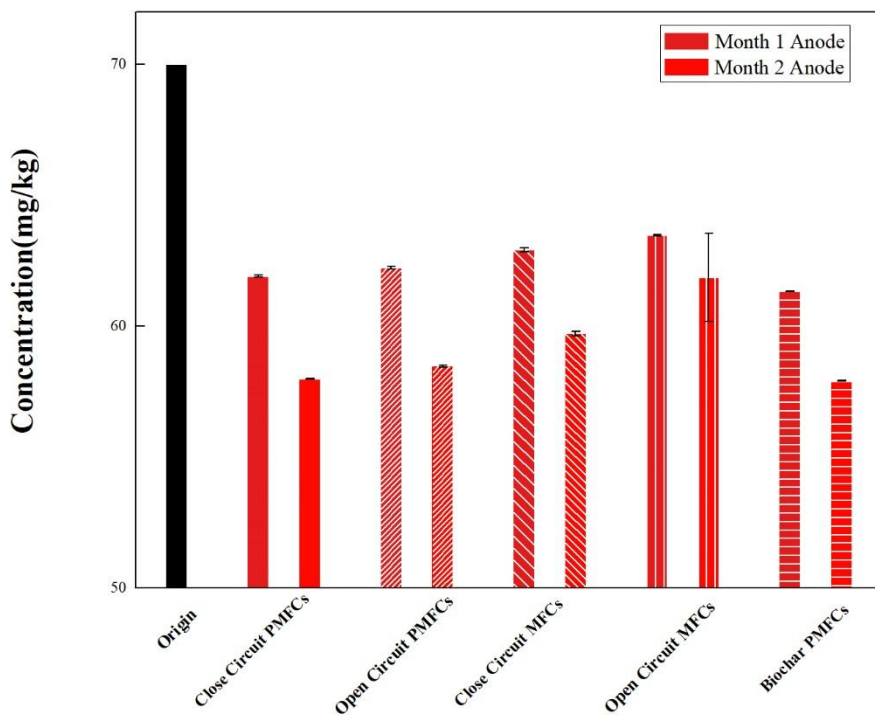


圖 34 70 mg/kg 系統之陽極砷濃度於試驗 2 個月之變化

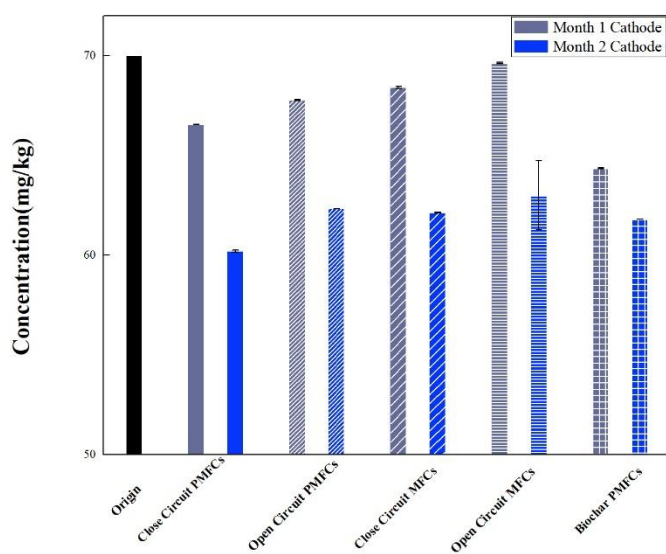


圖 35 70 mg/kg 系統之陰極砷濃度於試驗 2 個月之變化



5.6 植物碳吸存量

表 2 顯示，不含污染物的閉路電壓植物微生物燃料電池系統之植物碳吸存量為 $21.99 \text{ g stem}^{-1}\text{yr}^{-1}$ 。70 ppm 砷濃度的閉路電壓植物微生物燃料電池系統之植物碳吸存量為 $24.31 \text{ g stem}^{-1}\text{yr}^{-1}$ 。添加生物炭之 70 ppm 砷濃度的閉路電壓植物微生物燃料電池系統之植物碳吸存量為 $24.28 \text{ g stem}^{-1}\text{yr}^{-1}$ 。結果顯示，砷濃度的差異及添加生物炭與否，與植物之碳吸存量無顯著關聯性 (Joseph et al., 2021; Rahman et al., 2023; Mandal et al., 2024; Su et al., 2025a)。

表 2 植物碳吸存量比較

Group	Carbon Sequestration ($\text{g stem}^{-1}\text{yr}^{-1}$)
0 ppm close circuit PMFCs	21.99
70 ppm close circuit PMFCs	24.31
70 ppm close circuit PMFCs + biochar	24.28

5.7 掃描式電子顯微鏡影像

圖 36 為陽極之石墨氈 SEM 影像。圖片中之絲狀之交錯且不規則排列結構為石磨氈之組成纖維。此結構可供微生物生長及提供電子傳遞介質。圖片中的白色點為微生物菌落與試驗初期形成之生物膜。在植物微生物燃料電池系統的陽極環境中，植物根際分泌物被厭氧微生物利用及分解。這些電化學活性菌 (Electrochemically Active Bacteria, EAB) 附著在石墨氈的碳纖維表面並形成生物膜。電化學活性菌在此反應，將電子傳遞至電極以產生電流，圖片正中央之白色絲狀結構為植物根際 (Liang et al., 2020; Dhillon et al., 2022; Luo et al., 2023)。圖 37 為陰極之石墨氈 SEM 影像。圖中的白色點狀物質為電極表面的沉積物。圖片中長條狀、類似棒狀或橢圓形的結構，其長度在微米級別，與桿菌 (Bacilli) 的形態和大小吻合。植物微生物燃料電池系統中，電極表面為微生物附著和進行反應之區域。雖然陰極的主要反應是還原，但仍有許多微生物在陰極形成生物膜，參與或促進反應。因此長條狀的影響可能為桿菌 (H. Zhang et al., 2022; Lovecchio et al., 2024)。

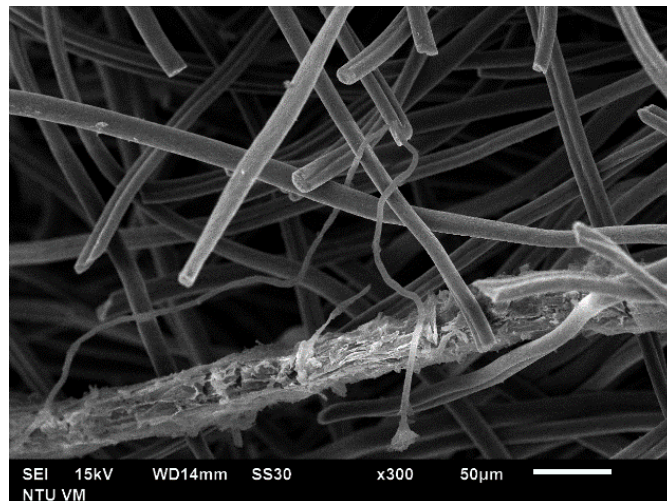


圖 36 70 mg/kg 砷濃度之閉路電壓植物微生物燃料電池之陽極 SEM 影像

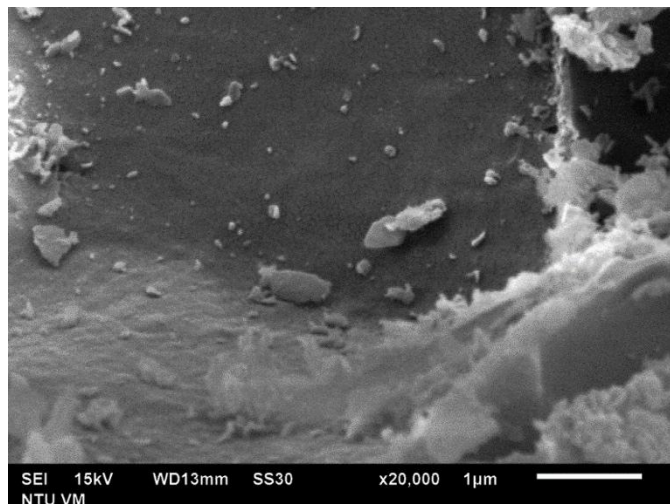


圖 37 70 mg/kg 砷濃度之閉路電壓植物微生物燃料電池之陰極 SEM 影像

圖 38 為添加生物炭之植物微生物燃料電池系統陽極影像。圖中可見絲狀之陽極石墨氈纖維。纖維之間之白色條狀物為植物根際。植物根際分泌有機物至土壤中，作為微生物之碳源，微生物將有機物分解後產生電子，電子形成迴路後產生電流 (Timmers et al., 2012; Griškonis et al., 2020)。圖 39 為添加生物炭之植物微生物燃料電池系統陰極影像。圖中附著在石墨氈纖維表面和縫隙中，形狀不規則、表面粗糙且具多孔性的顆粒，為生物炭。生物炭的高比表面積特徵，能作為微生物的附著點，同時提高陰極的導電性並有效吸附氧氣，進而加速陰極的氧氣還原反應 (Oxygen Reduction Reaction, ORR)。圖中許多圓形與近似球形的顆粒為球菌 (Cocci)。在植物微生物燃料電池系統的陰極，微生物形成生物膜促進電化學反應 (Ramanaiah et al., 2021; S. Zhao et al., 2023)。

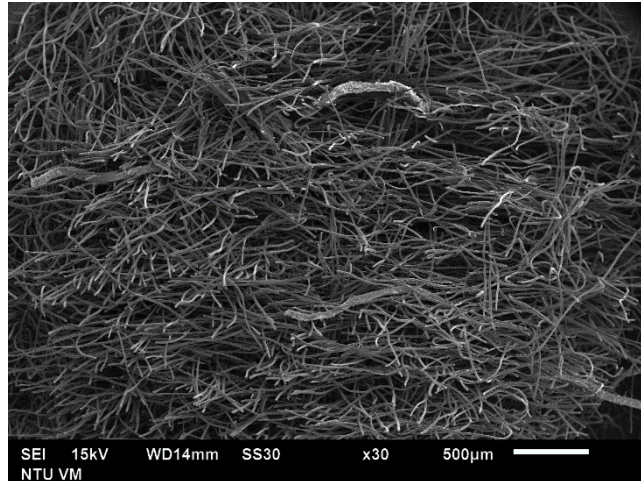


圖 38 70 mg/kg 砷濃度之添加生物炭閉路電壓植物微生物燃料電池之陽極 SEM 影像

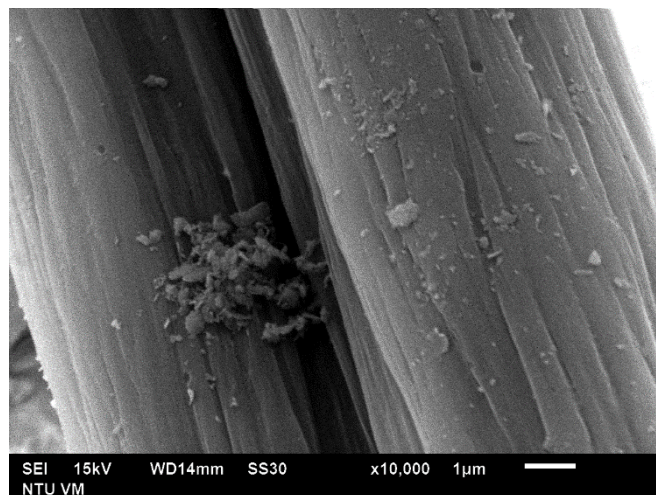


圖 39 70 mg/kg 砷濃度之添加生物炭閉路電壓植物微生物燃料電池之陰極 SEM 影像

5.8 X 射線光電子能譜儀

文獻指出，砷的 45.0 eV 以上的高鍵結能區域，為 As (V) 之區間。圖 40 顯示之高鍵結能區為 52-55 eV。陽極砷的高鍵結能區訊號強度高於陰極，顯示陽極存在較陰極多的 As (V)，如 As_2O_5 或砷酸鹽。此現象與閉路條件下，電化學反應有效進行，使陽極氧化反應持續進行，將 As (III) 氧化成 As (V)。電化學反應的進行使微生物有效傳遞電子並將 As (III) 氧化成 As (V) (Upadhyaya et al., 2010; Guo et al., 2021; Cheng et al., 2022)。45-48 eV 為 As (III) 的鍵結能區域，41.0-41.5 eV 為 As (0) 的鍵結能區域。由於陽極在對應 As (III) 與 As (0) 的鍵結能區段沒有顯著峰值，故陽極元素態 As (0) 與 As (III) 的比例相對不高。整體而



言，陽極以 As (V) 為主要之砷價態，其次為 As (III)，元素態 As (0) 為三種價態的砷中比例最低者。陰極高鍵結能區段之 As (V) 訊號強度低於陽極。陰極 45-48 eV 之 As (III) 鍵結能區段訊號強度高於陽極，顯示陰極較陽極有更高比例的 As (III)。此現象與陰極還原反應的進行有關 (Lepikash et al., 2024; Toczyłowska-Mamińska et al., 2025)。陰極 41.0-41.5 eV 之 As (0) 鍵結能區段訊號強度高於陽極，顯示陰極較陽極有更高比例的 As (0)。此現象與電化學作用下，驅使陰極還原反應，形成元素態固體砷沉積於電極材料表面有關 (Yuan et al., 2022)。整體而言，陰極以 As (V) 為主要之砷價態，其次為 As (III)，元素態 As (0) 為三種價態的砷中比例最低者 (Ohki et al., 2005; Guo et al., 2018; Guo et al., 2021)。圖 41 顯示，陽極與陰極 52-55 eV 的高鍵結能區域，訊號強度最高。此趨勢顯示陽極與陰極之 As (V) 為比例最高之砷價態。45-48 eV 為 As (III) 的鍵結能區域，其訊號強度為陽極與陰極中次高者，此趨勢顯示 As (III) 亦為陽極與陰極高比例的砷價態。41.0-41.5 eV 為 As (0) 的鍵結能區域。此鍵結能區間之訊號強度最低，顯示 As (0) 為陽極與陰極比例最低之砷價態。整體而言，陽極在五價砷鍵結能區之訊號強度高於陰極，此現象顯示高含量的五價砷被固定於陽極，與生物炭的吸附作用有關 (Z. Wang et al., 2021; Yang et al., 2021; Wang et al., 2022; Ahn et al., 2023; Mondal et al., 2024)。

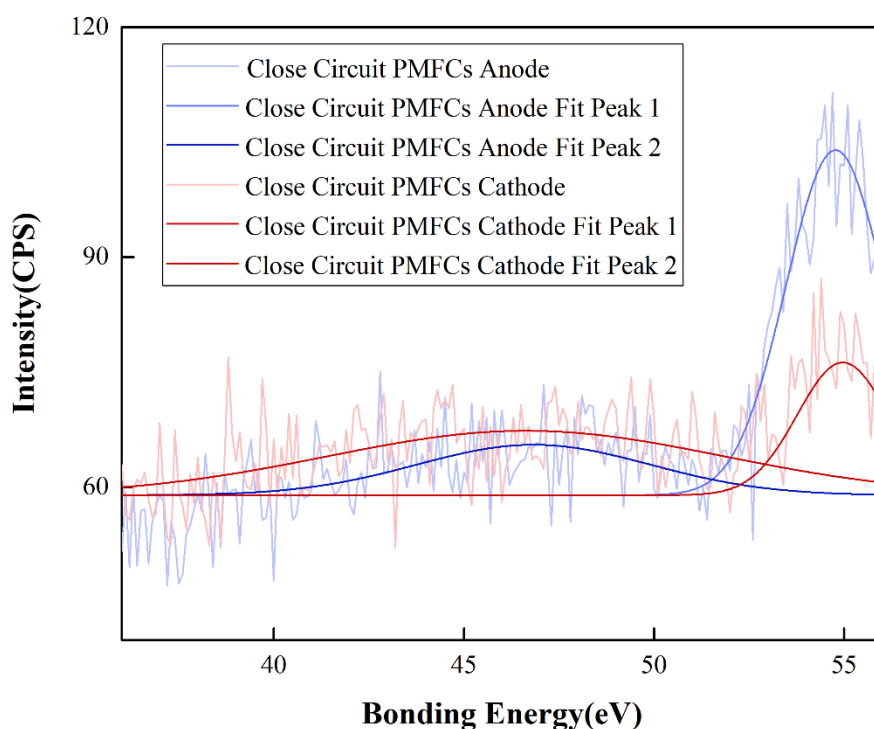


圖 40 70 mg/kg 砷濃度之閉路電壓植物微生物燃料電池系統之陽極與陰極 XPS 比較

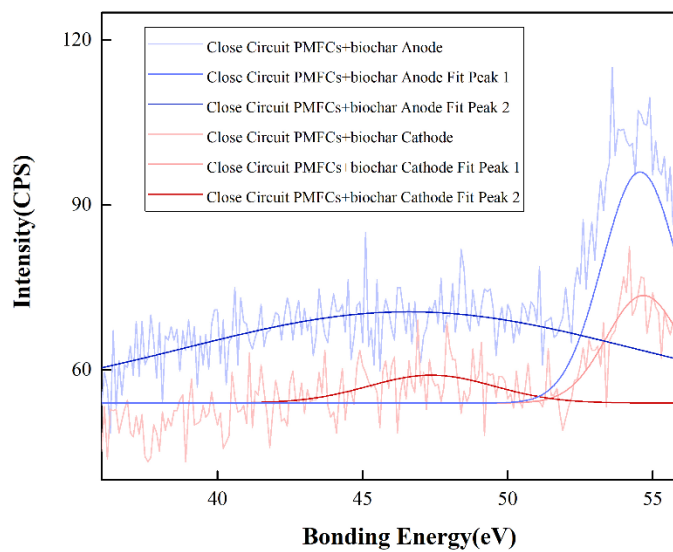


圖 41 70 mg/kg 砷濃度之添加生物炭閉路電壓植物微生物燃料電池系統之陽極與陰極 XPS 比較

5.9 循環伏安法

圖 42 顯示，閉路電壓植物微生物燃料電池系統呈現近似葉狀的曲線，此為電容 (Capacitance) 的特徵。相較之下，開路電壓植物微生物燃料電池系統呈現近似斜直線。結果顯示，閉路的條件下，植物微生物燃料電池系統有較高的電荷儲存能力。相較之下，開路條件的植物微生物燃料電池系統電荷儲存能力較差，電化學活性較低。兩參數的極限電流相似，閉路條件的最高電流約為 $+2.4\text{ A}$ ，其最低電流為 -2.4 A 。開路條件的最高電流約為 $+2.4\text{ A}$ ，其最低電流為 -2.6 A 。儘管極值接近，但其背後的機制有所區別。閉路條件下，電流的傳遞和大的迴路面積是電極界面電化學反應和電容充放電的結果。此現象反映了植物微生物燃料電池系統在運作狀態下良好的電子轉移效率。開路條件下，極小的迴路面積顯示，此時的電流主要由系統的歐姆電阻所支配。開路條件系統運行時，電極處於熱力學平衡狀態，缺乏外部電子消耗，故無法激發微生物的細胞外電子轉移 (EET) 活性。閉路條件與開路條件之掃描方向相反，此現象與電流的運行機制不同。閉路條件主要與電極界面的充放電有關，此現象對應曲線面積反映電容現象。開路條件下，電極不進行



實質性的電化學反應，故此時電容被抑制。此狀態下電流與電位的變化遵守歐姆定律，為線性關係，與純電阻有關。閉路條件下，電極處於動態電位，促進了電極與微生物之間的電子交換，從而展現出其電荷儲存能力並產生較高的電流。開路狀態下的循環伏安法的曲線則反映了系統的靜態內部電阻 (Hu et al., 2019; Jadhav et al., 2021; Q. Wang et al., 2021; Fang et al., 2023; Chen et al., 2024; Meena et al., 2024; Zhao et al., 2024)。圖 43 顯示，兩個參數皆呈現近似葉狀的曲線，為電容的特徵。此結果顯示，閉路電壓植物微生物燃料電池系統具有儲存電荷的能力。固定掃描速率的條件下，電流與電位所圍成的圖形面積與系統的電容成正比。圖 43 之添加生物炭參數較未添加之參數有更大的電流與電位圍成面積，此結果顯示，添加生物炭提升了閉路電壓植物微生物燃料電池系統的電容。在電位掃描的極限值-1.0 V 與+1.0 V，添加生物炭參數的峰值電流分別為-4.0 A 與+4.0 A，未添加生物炭之參數的峰值電流分別為-2.8 A 與+2.8 A。結果顯示，添加生物炭的參數在電位掃描的極限值的數值較高，其具有較未添加生物炭參數更快的電極反應速率或更低的電荷轉移電阻。生物炭高孔隙率與高比表面積的特性，使微生物的附著點增加，增加生物膜的附著位點，增加了電極與電解質接觸面積，最終提升電子轉移效率。生物炭高孔隙率的特性有利於電解質離子的吸附與脫付，最終提升電容特性 (Huggins et al., 2014; Wang et al., 2018; Patwardhan et al., 2022; Shuai Zhao et al., 2023; Pandya et al., 2025)。

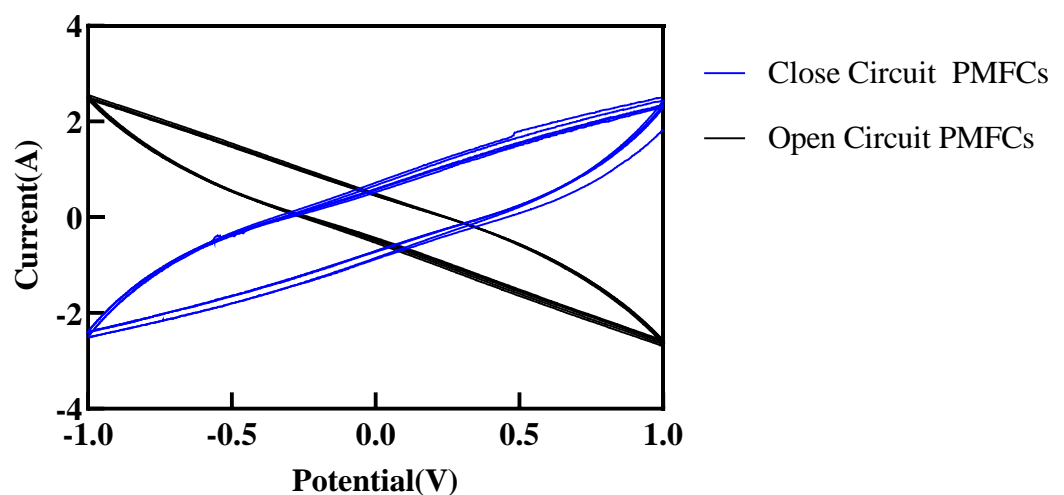


圖 42 70 mg/kg 砷濃度之閉路電壓植物微生物燃料電池系統與開路電壓植物微生物燃料電池系統之循環伏安法比較

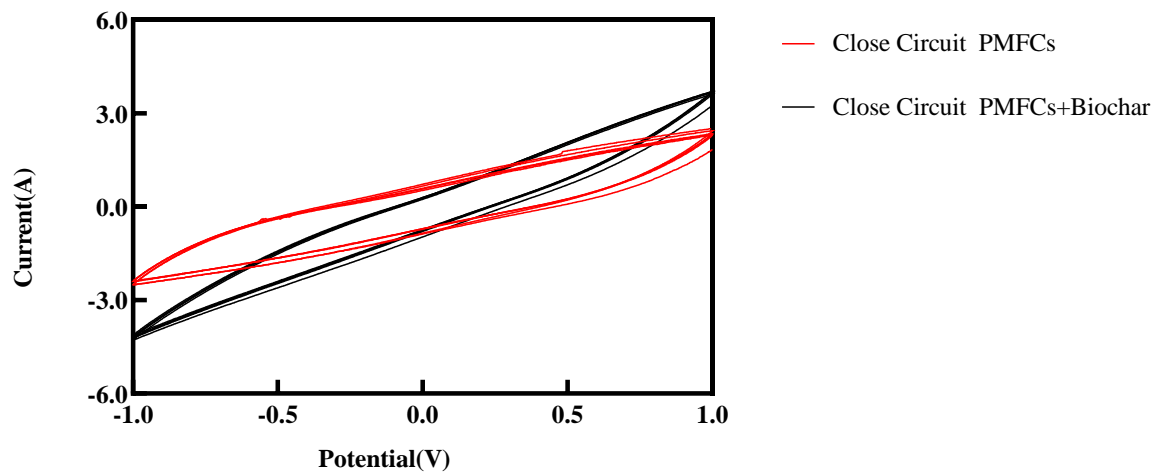


圖 43 70 mg/kg 砷濃度之添加生物炭與未添加生物炭閉路電壓植物微生物燃料電池系統之循環伏安法比較

5.10 統計分析

以植物微生物燃料電池系統與微生物燃料電池系統作為獨立組別進行變異數分析。ANOVA 結果顯示，不同組別之差異達高度顯著 ($F(6, 756) = 112.145, p < 0.001$)，顯示不同處理條件對電壓輸出有顯著影響。結果顯示，植物的存在、砷濃度及生物炭添加等處理條件可能對系統輸出電壓產生顯著影響。Tukey HSD 結果顯示，70 mg/kg 砷濃度之添加生物炭閉路電壓植物微生物燃料電池系統之平均電壓顯著高於此組別之未添加生物炭組別。兩組別之平均電壓差異為 129.35 mV (SE = 15.44, $p < 0.001$, 95% CI [83.72, 174.98])。此結果顯示，在相同污染物濃度的條件下，添加生物炭之組別輸出電壓較未添加生物炭之組別高 1.25 倍，且 70 mg/kg 砷濃度之添加生物炭閉路電壓植物微生物燃料電池系統之平均電壓與不含污染物之閉路電壓植物微生物燃料電池系統之平均電壓接近，其平均值分別為 233.06 mV 與 231.30 mV。此結果顯示，添加生物炭可使含有砷的閉路電壓植物微生物燃料電池系統之輸出電壓成效與無污染之參數接近。此結果充分顯示，生物炭在砷污染環境下具顯著之整治與提升電壓之作用。高孔隙率、多孔結構，可吸收與固定砷離子，減少其於植物根際之生物可利用性。生物炭的良好導電性可提升土壤基質的電子傳遞效率。生物炭表面提供電化學活性菌穩定的附著點，可維持微生物多樣性與其代謝活性及固定生物膜，進而提升為生物細胞外之電子傳遞效率 (Zhang et al., 2024; Singh et al., 2025; Su



et al., 2025b)。整體而言，Tukey HSD 統計結果顯示，生物炭的添加，對於 70 mg/kg 砷濃度的閉路電壓植物微生物燃料電池系統具有顯著的影響，可有效提升輸出電壓並改善系統的穩定性。

5.11 植物組織砷濃度分析

圖 44 結果顯示，添加生物炭組別之植物根部砷濃度為 4.34 ppm，未添加生物炭組別之植物根部砷濃度為 1.46 ppm。顯示添加生物炭組別之植物根部砷濃度高於未添加生物炭之組別。此結果顯示，生物炭的添加可藉由改善土壤結構、增加土壤有機碳含量等方式，促進植物生長，進而提升植生復育之作用 (Meng et al., 2023; Wei et al., 2024; Xu et al., 2024; Sun et al., 2025)。圖 45 結果顯示，添加生物炭組別之植物根部砷濃度為 4.34 ppm，其地上部之砷濃度為 0.2 ppm。顯示添加生物炭組別之植物根部砷濃度高於其地上部之砷濃度。此結果顯示，植生復育之作用下，砷主要遷移並累積於植物根部 (Bhutiani et al., 2015; Allevato et al., 2019; Ha et al., 2025)。

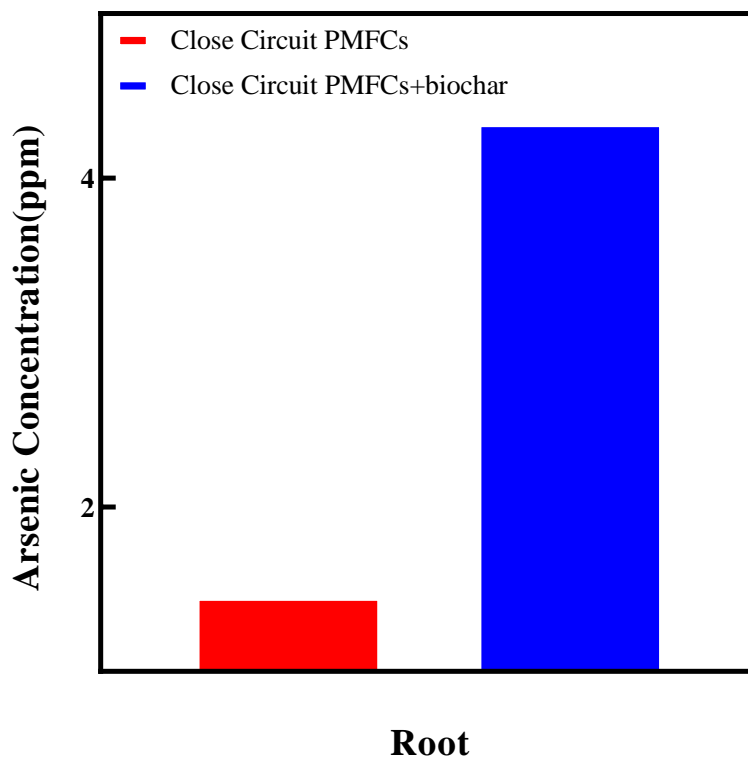


圖 44 添加生物炭與未添加生物炭之閉路電壓植物微生物燃料電池系統植物根部砷濃度比較

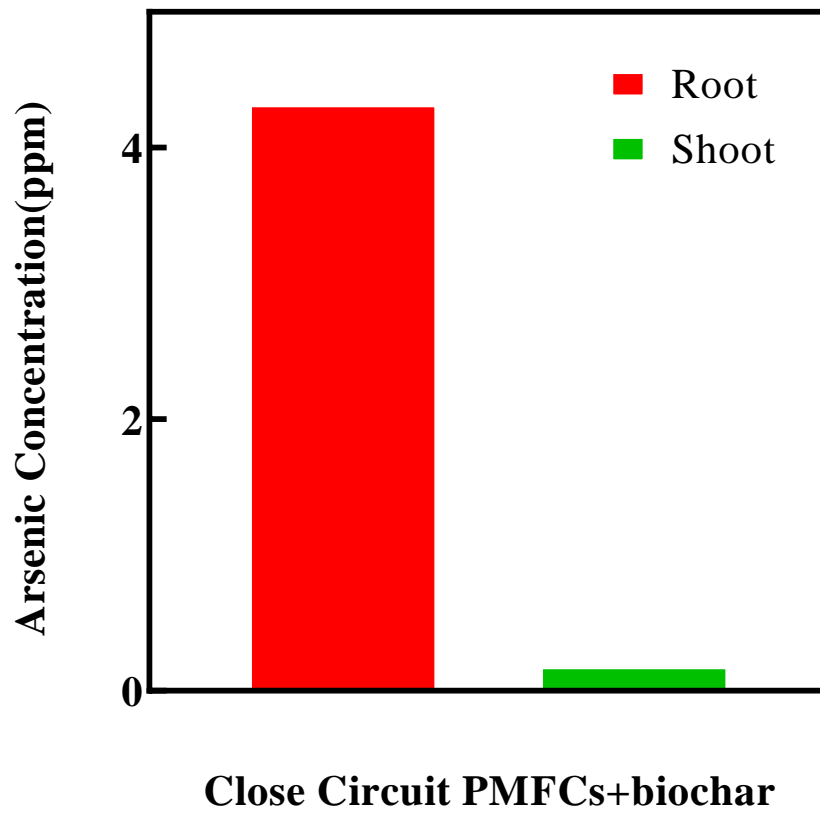


圖 45 添加生物炭之閉路電壓植物微生物燃料電池系統植物根部與地上部之砷濃度比較



6. 結論

植物生長高度結果顯示，添加生物炭的參數之植物生長高度較高。此結果顯示，生物炭的添加提高土壤微生物的活性，進而促進植物的生長。輸出電壓結果顯示，不含污染物之條件下，植物微生物燃料電池系統於試驗第 47 日後高於微生物燃料電池系統，顯示植物的存在對於產生電力之成效較佳。70 mg/kg 五價砷濃度之參數結果顯示，添加生物炭之組別輸出電壓高於未添加之組別。Tukey HSD 統計結果顯示，此條件下添加生物炭之組別輸出電壓較未添加生物炭之組別高 1.25 倍。此結果顯示，添加生物炭對於電力產生具有提升之成效。150 mg/kg 砷濃度之條件下，三價砷之參數較五價砷之輸出電壓高。此結果顯示，植物微生物燃料電池系統在較高生物毒性之基質條件下，有較好之電力產生成效。砷濃度變化結果顯示，70 mg/kg 砷濃度條件下，植物微生物燃料電池系統之砷濃度低於微生物燃料電池系統之砷濃度，顯示植生復育可降低土壤砷濃度。70 mg/kg 砷濃度條件下，閉路電壓系統之砷濃度低於開路電壓系統之砷濃度。此結果顯示，生物電化學反應可促進砷污染土壤的整治。SEM 結果顯示，植物根際、球菌及桿菌存在於電極材料表面。結果顯示，植物與微生物對於電力產生與砷污染土壤的整治置關重要。XPS 結果顯示，添加生物炭之參數，其陽極五價砷鍵結能區之訊號強度高於陰極，顯示生物炭之吸附作用，使五價砷被固定於陽極。循環伏安法結果顯示，添加生物炭參數較未添加之參數有更大的電流與電位圍成面積。此結果顯示，添加生物炭提升了閉路電壓植物微生物燃料電池系統的電容。在電位掃描的極限值，添加生物炭的組別，在電位掃描的極限值的數值較高，顯示其具有較未添加生物炭之組別更快的電極反應速率或更低的電荷轉移電阻。生物炭高孔隙率與高比表面積的特性，增加了電極與電解質接觸面積，最終提升電子轉移效率。生物炭高孔隙率的特性有利於電解質離子的吸附與脫附，最終提升電容特性。植物根部組織砷濃度結果顯示，添加生物炭之閉路電壓植物微生物燃料系統較未添加生物炭組別高。此結果顯示生物炭的添加促進植生復育之作用。添加生物炭之組別，植物根部之砷濃度高於其地上部組織。此結果顯示，植生復育的作用下，砷主要遷移至植物根部。

植物微生物燃料電池系統結合生物炭技術，可有效提升產生綠色電力之成效並促進植物根部對於砷的吸附。此外，植物進行光合作用可增加碳匯。綜上所述，此研究證實了植物微生物燃料電池系統具有多元性功能，具有改善全球暖化、能源短缺與整治土壤重金屬污染之潛力。結合生物炭技術，此系統可透過綠色、永續之方式進行韌性生綠色能源。期望能增加此系統之應用規模與使用場域，對淨零排放作出更大的貢獻，改善能源匱乏之問題並落實環境保護。



7. 參考文獻

環保署土基會 (2006 年) 台北市北投區關渡平原農地土壤含砷過高報導說明。環保新聞專區，行政院環保署。

環保署土基會 (2007 年) 台北市北投區關渡平原部分農地土壤及農作物砷含量過高乙案說明。環保新聞專區，行政院環保署。

環保署土基會 (2010 年) 台北市北投區關渡平原農地土壤含砷過高報導說明。環保新聞專區，行政院環保署。

環保署土基會 (2008 年) 環保署調查 13 處廢棄工廠土地遭受污染。行政院環保署，環保新聞專區。

全國環境水質監測資訊網 (2024 年) 場址查詢。行政院環保署。

環檢所 (2001) 導電度計法 (NIEA W203.51B1)。行政院環保署。

環檢所 (2009) 土壤酸鹼測定方法-電極法 (NIEA S410.62C)。行政院環保署。

環檢所 (2019) 土壤中重金屬檢測方法—微波輔助王水消化法 (NIEA S301.61B)。行政院環保署。

環檢所 (2015) 土壤採樣方法 (NIEA S102.63B)。行政院環保署。

Aelterman, P., Rabaey, K., Pham, H. T., Boon, N., and Verstraete, W. (2006). Continuous Electricity Generation at High Voltages and Currents Using Stacked Microbial Fuel Cells. *Environmental Science and Technology*, 40, 33883394.

Agarwal, S., Al Abed Souhail, R., and Dionysiou Dionysios, D. (2007). In Situ Technologies for Reclamation of PCB-Contaminated Sediments: Current Challenges and Research Thrust Areas. *Journal of Environmental Engineering*, 133, 10751078.

Ahn, Y. Y., Kim, J., and Kim, K. (2023). Catalytic behavior of nitrous acid for acetaminophen transformation during the freezing process. *Journal of Hazardous Materials*, 456, 131652.

Ahsan, M., Bin Mukhlis, M. Z., Khatun, N., and Hasnat, M. A. (2023). pH dependent electro-oxidation of arsenite on gold surface: Relative kinetics and sensitivity. *Heliyon*, 9, 14192.

Aken, B. V., Correa, P. A., and Schnoor, J. L. (2010). Phytoremediation of polychlorinated



- biphenyls: new trends and promises. *Environ Sci Technol*, 44, 27672776.
- Allevato, E., Mauro, R. P., Stazi, S. R., Marabottini, R., Leonardi, C., Ierna, A., and Giuffrida, F. (2019). Arsenic Accumulation in Grafted Melon Plants: Role of Rootstock in Modulating Root-To-Shoot Translocation and Physiological Response. *Agronomy*, 9, 828.
- Aulakh, M. S., Wassmann, R., Bueno, C., Kreuzwieser, J., and Rennenberg, H. (2001). Characterization of Root Exudates at Different Growth Stages of Ten Rice (*Oryza sativa* L.) Cultivars. *Plant Biology*, 3, 139148.
- Basem, A., Jasim, D. J., Majdi, H. S., Mohammed, R. M., Ahmed, M., Al-Rubaye, A. H., and Kianfar, E. (2024). Adsorption of heavy metals from wastewater by chitosan: A review. *Results in Engineering*, 23, 102404.
- Bataillou, G., Ondel, O., and Haddour, N. (2024). 900-Days long term study of plant microbial fuel cells and complete application for powering wireless sensors. *Journal of Power Sources*, 593, 233965.
- Besedin, J. A., Khudur, L. S., Netherway, P., Krohn, C., Juhasz, A. L., Huslina, F., Besedin, D. A., Jansrihibul, K., Nahar, K., and Ball, A. S. (2024). Phytostabilisation of arsenic contaminated gold mine waste using the native species *Juncus usitatus*, *Poa labillardieri* and *Themeda triandra*. *Discover Civil Engineering*, 1, 103.
- Bhardwaj, R. L., Parashar, A., Parewa, H. P., and Vyas, L. (2024). An Alarming Decline in the Nutritional Quality of Foods: The Biggest Challenge for Future Generations' Health. *Foods*, 13.
- Bhutiani, R., Khanna, D. R., Tyagi, B., Tyagi, P., and Kulkarni, D. (2015). Assessing environmental contamination of River Ganga using correlation and multivariate analysis. *Pollution*, 1, 265273.
- Biederman, L. A., and Harpole, W. S. (2013). Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis. *GCB Bioenergy*, 5, 202214.
- Bombelli, P., Iyer, D. M., Covshoff, S., McCormick, A. J., Yunus, K., Hibberd, J. M., Fisher, A. C., and Howe, C. J. (2013). Comparison of power output by rice (*Oryza sativa*) and an associated weed (*Echinochloa glabrescens*) in vascular plant bio-photovoltaic (VP-BPV) systems. *Appl Microbiol Biotechnol*, 97, 429438.
- Bond, D. R., and Lovley, D. R. (2003). Electricity production by *Geobacter sulfurreducens* attached to electrodes. *Appl Environ Microbiol*, 69, 15481555.
- Brown, R. H. (1978). A Difference in N Use Efficiency in C3 and C4 Plants and its Implications



- in Adaptation and Evolution. *Crop Science*, 18.
- Chen, J., Liao, H., Duan, J., Chen, C., Zhu, G., Zhu, X., Lan, L., Li, Z., and Yue, W. (2024). Thionated stereoisomer enhance the mixed conduction, ambient stability and mechanical deformability for high-performance small molecular n-type organic electrochemical transistors. *Chemical Engineering Journal*, 480, 148128.
- Chen, L., Zhou, M., Wang, J., Zhang, Z., Duan, C., Wang, X., Zhao, S., Bai, X., Li, Z., Li, Z., and Fang, L. (2022). A global meta-analysis of heavy metal(loid)s pollution in soils near copper mines: Evaluation of pollution level and probabilistic health risks. *Science of The Total Environment*, 835, 155441.
- Chen, W., Li, X., Yao, W., Fedin, V. P., and Gao, E. (2025). Fluorescence and electrochemical detection of pollutants utilizing a Keggin-type Zn(II)-polyoxometalate. *Polyhedron*, 267, 117360.
- Cheng, J., Xu, H., Tang, Z., and Guo, J. (2022). Simultaneous arsenic(III) anaerobic oxidation with bioelectricity generation in microbial fuel cells. *Desalination and Water Treatment*, 264, 6271.
- Chong, P. L., Chuah, J. H., Chow, C. O., and Ng, P. K. (2025). Plant microbial fuel cells: A comprehensive review of influential factors, innovative configurations, diverse applications, persistent challenges, and promising prospects. *International Journal of Green Energy*, 22, 599648.
- Corzo Remigio, A., Harris, H. H., Paterson, D. J., Edraki, M., and van der Ent, A. (2023). Chemical transformations of arsenic in the rhizosphere–root interface of *Pityrogramma calomelanos* and *Pteris vittata*. *Metallomics*, 15.
- De Schamphelaire, L., Van den Bossche, L., Dang, H. S., Höfte, M., Boon, N., Rabaey, K., and Verstraete, W. (2008). Microbial fuel cells generating electricity from rhizodeposits of rice plants. *Environ Sci Technol*, 42, 30533058.
- Deng, H., Wu, Y. C., Zhang, F., Huang, Z. C., Chen, Z., Xu, H. J., and Zhao, F. (2014). Factors Affecting the Performance of Single-Chamber Soil Microbial Fuel Cells for Power Generation. *Pedosphere*, 24, 330338.
- Dhillon, S. K., Dziegielowski, J., Kundu, P. P., and Di Lorenzo, M. (2022). Functionalised graphite felt anodes for enhanced power generation in membrane-less soil microbial fuel cells††Electronic supplementary information (ESI) available. *RSC Sustainability*, 1, 310325.
- Dilpazeer, F., Munir, M., Baloch, M. Y. J., Shafiq, I., Iqbal, J., Saeed, M., Abbas, M. M.,



- Shafique, S., Aziz, K. H. H., Mustafa, A., and Mahboob, I. (2023). A Comprehensive Review of the Latest Advancements in Controlling Arsenic Contaminants in Groundwater. *Water*, 15, 478.
- Dumas, C., Mollica, A., Féron, D., Basséguy, R., Etcheverry, L., and Bergel, A. (2007). Marine microbial fuel cell: Use of stainless steel electrodes as anode and cathode materials. *Electrochimica Acta*, 53, 468473.
- Fang, M., Qiao, L., Wu, M., Ye, Y., Yang, M., Liu, S., Zhang, H., and Ma, X. (2023). Hydrogen-bond-rich composite membrane with improved conductivity and selectivity for flow battery. *Journal of Power Sources*, 563, 232815.
- Feng, Y., and Na, L. (2022). Gray water footprint evaluation of arsenic in Central China: from the perspective of health risk theory. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194.
- Finnegan, P. M., and Chen, W. (2012). Arsenic toxicity: the effects on plant metabolism. *Front Physiol*, 3, 182.
- Gan, S., Chen, B., Li, L., Sushkova, S., and Garg, A. (2024). Effect of Three Different Types of Biochar on Bioelectricity Generated from Plant Microbial Fuel Cells under Unsaturated Soil Condition. *ACS Appl Bio Mater*, 7, 65546567.
- Gholizadeh, M., and Hu, X. (2021). Removal of heavy metals from soil with biochar composite: A critical review of the mechanism. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9, 105830.
- Gomes, H. I., Dias Ferreira, C., and Ribeiro, A. B. (2013). Overview of in situ and ex situ remediation technologies for PCB-contaminated soils and sediments and obstacles for full-scale application. *Science of The Total Environment*, 237260.
- Goto, Y., Yoshida, N., Umeyama, Y., Yamada, T., Tero, R., and Hiraishi, A. (2015). Enhancement of electricity production by graphene oxide in soil microbial fuel cells and plant microbial fuel cells. *Front Bioeng Biotechnol*, 3, 42.
- Greenman, J., Thorn, R., Willey, N., and Ieropoulos, I. (2024). Energy harvesting from plants using hybrid microbial fuel cells; potential applications and future exploitation. *Front Bioeng Biotechnol*, 12, 1276176.
- Griškoniš, E., Ilginis, A., Jonuškienė, I., Raslavičius, L., Jonynas, R., and Kantminienė, K. (2020). Enhanced Performance of Microbial Fuel Cells with Anodes from Ethylenediamine and Phenylenediamine Modified Graphite Felt. *Processes*, 8, 939.
- Guan, C. Y., Hu, A., and Yu, C. P. (2019). Stratified chemical and microbial characteristics between anode and cathode after long-term operation of plant microbial fuel cells for



- remediation of metal contaminated soils. *Sci Total Environ*, 670, 585594.
- Guan, C. Y., Tseng, Y. H., Tsang, D. C. W., Hu, A., and Yu, C. P. (2019). Wetland plant microbial fuel cells for remediation of hexavalent chromium contaminated soils and electricity production. *J Hazard Mater*, 365, 137145.
- Guan, C. Y., and Yu, C. P. (2021). Evaluation of plant microbial fuel cells for urban green roofs in a subtropical metropolis. *Sci Total Environ*, 765, 142786.
- Guo, J., Cheng, J., Wang, J., and Hu, S. (2021). Simultaneous Removal of Trivalent Arsenic and Nitrate Using Microbial Fuel Cells. *Processes*, 9, 673.
- Guo, L. L., Zheng, H., Lyu, Y. L., Liu, L. Y., Kong, F., and Wang, S. R. (2018). Trends in atmospheric particles and their light extinction performance between 1980 and 2015 in Beijing, China. *Chemosphere*, 205, 5261.
- Ha, N. T. H., Hieu, D. T., Anh, H. T. P., Hien, P. T., Nga, T. T. H., Anh, B. T. K., Hai, N. T., Duong, D. B., Duong, V. H., Duc, N. A., and Kim, K. W. (2025). Arsenic and Heavy Metals in Soils and Plants near Sulfide Mines: Implications for Phytoremediation and Phytomanagement. *Environ Manage*, 75, 376391.
- Habibul, N., Hu, Y., Wang, Y. K., Chen, W., Yu, H. Q., and Sheng, G. P. (2016). Bioelectrochemical Chromium(VI) Removal in Plant-Microbial Fuel Cells. *Environmental Science and Technology*, 50, 38823889.
- Habibul, N., Hu, Y., Wang, Y. K., Chen, W., Yu, H. Q., and Sheng, G. P. (2016). Bioelectrochemical Chromium(VI) Removal in Plant-Microbial Fuel Cells. *Environ Sci Technol*, 50, 38823889.
- Han, R., Liu, W., and Xu, Z. (2024). The constraint of soil Zn isotope compositions by diverse land utilizations: Evidence from geochemical fingerprint in a typical karst area.
- Haris, S., Qiu, X., Klammler, H., and Mohamed, M. M. (2020). The use of micro-nano bubbles in groundwater remediation: A comprehensive review. *Groundwater for Sustainable Development*, 11, 100463.
- Helder, M., Strik, D. P., Hamelers, H. V. M., and Buisman, C. J. N. (2012). The flat-plate plant-microbial fuel cell: the effect of a new design on internal resistances. *Biotechnology for Biofuels*, 5, 70.
- Helder, M., Strik, D. P. B. T. B., Hamelers, H. V. M., Kuhn, A. J., Blok, C., and Buisman, C. J. N. (2010). Concurrent bio-electricity and biomass production in three Plant-Microbial Fuel Cells using *Spartina anglica*, *Arundinella anomala* and *Arundo donax*. *Bioresource Technology*, 101, 35413547.



- Helder, M., Strik, D. P. B. T. B., Hamelers, H. V. M., Kuijken, R. C. P., and Buisman, C. J. N. (2012). New plant-growth medium for increased power output of the Plant-Microbial Fuel Cell. *Bioresource Technology*, *104*, 417423.
- Helder, M., Strik, D. P. B. T. B., Timmers, R. A., Raes, S. M. T., Hamelers, H. V. M., and Buisman, C. J. N. (2013). Resilience of roof-top Plant-Microbial Fuel Cells during Dutch winter. *Biomass and Bioenergy*, *51*, 17.
- Hu, Z., Xu, L., Song, Z., Li, J., and Ouyang, M. (2019). A semiempirical dynamic model of reversible open circuit voltage drop in a PEM fuel cell. *International Journal of Energy Research*, *43*, 25502561.
- Huggins, T., Wang, H., Kearns, J., Jenkins, P., and Ren, Z. J. (2014). Biochar as a sustainable electrode material for electricity production in microbial fuel cells. *Bioresource Technology*, *157*, 114119.
- Huslina, F., Khudur, L. S., Shah, K., Surapaneni, A., Netherway, P., and Ball, A. S. (2024). Mine Site Restoration: The Phytoremediation of Arsenic-Contaminated Soils. *Environments*, *11*.
- Hussain, A., Rehman, F., Rafeeq, H., Waqas, M., Asghar, A., Afsheen, N., Rahdar, A., Bilal, M., and Iqbal, H. M. N. (2022). In-situ, Ex-situ, and nano-remediation strategies to treat polluted soil, water, and air - A review. *Chemosphere*, *289*, 133252.
- Jadhav, D. A., Carmona Martínez, A. A., Chendake, A. D., Pandit, S., and Pant, D. (2021). Modeling and optimization strategies towards performance enhancement of microbial fuel cells. *Bioresource Technology*, *320*, 124256.
- Jiang, Y., Hu, B., Shi, H., Yi, L., Chen, S., Zhou, Y., Cheng, J., Huang, M., Yu, W., and Shi, Z. (2023). Pollution and risk assessment of potentially toxic elements in soils from industrial and mining sites across China. *Journal of Environmental Management*, *336*, 117672.
- Jiang, Y. B., Zhong, W. H., Han, C., and Deng, H. (2016). Characterization of Electricity Generated by Soil in Microbial Fuel Cells and the Isolation of Soil Source Exoelectrogenic Bacteria. *Front Microbiol*, *7*, 1776.
- Joseph, S., Cowie, A. L., Van Zwieten, L., Bolan, N., Budai, A., Buss, W., Cayuela, M. L., Graber, E. R., Ippolito, J. A., Kuzyakov, Y., Luo, Y., Ok, Y. S., Palansooriya, K. N., Shepherd, J., Stephens, S., Weng, Z., and Lehmann, J. (2021). How biochar works, and when it doesn't: A review of mechanisms controlling soil and plant responses to biochar. *GCB Bioenergy*, *13*, 17311764.



- Jyoti Sarma, P., and Mohanty, K. (2022). A novel three-chamber modular PMFC with bentonite/flyash based clay membrane and oxygen reducing biocathode for long term sustainable bioelectricity generation. *Bioelectrochemistry*, 144, 107996.
- Kaku, N., Yonezawa, N., Kodama, Y., and Watanabe, K. (2008). Plant/microbe cooperation for electricity generation in a rice paddy field. *Appl Microbiol Biotechnol*, 79, 4349.
- Karimi Maleh, H., Ayati, A., Ghanbari, S., Orooji, Y., Tanhaei, B., Karimi, F., Alizadeh, M., Rouhi, J., Fu, L., and Sillanpää, M. (2021). Recent advances in removal techniques of Cr(VI) toxic ion from aqueous solution: A comprehensive review. *Journal of Molecular Liquids*, 329, 115062.
- Kawa, Y. K., Wang, J., Chen, X., Zhu, X., Zeng, X. C., and Wang, Y. (2019). Reductive dissolution and release of arsenic from arsenopyrite by a novel arsenate-respiring bacterium from the arsenic-contaminated soils. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 143, 104712.
- Khalid, S., Shahid, M., Niazi, N. K., Murtaza, B., Bibi, I., and Dumat, C. (2017). A comparison of technologies for remediation of heavy metal contaminated soils. *Journal of Geochemical Exploration*, 182, 247268.
- Khan, S., Naushad, M., Lima, E. C., Zhang, S., Shaheen, S. M., and Rinklebe, J. (2021). Global soil pollution by toxic elements: Current status and future perspectives on the risk assessment and remediation strategies – A review. *Journal of Hazardous Materials*, 417, 126039.
- Kumar, V., Pandita, S., Singh Sidhu, G. P., Sharma, A., Khanna, K., Kaur, P., Bali, A. S., and Setia, R. (2021). Copper bioavailability, uptake, toxicity and tolerance in plants: A comprehensive review. *Chemosphere*, 262, 127810.
- Lai, C. Y., Wen, L. L., Shi, L. D., Zhao, K. K., Wang, Y. Q., Yang, X., Rittmann, B. E., Zhou, C., Tang, Y., Zheng, P., and Zhao, H. P. (2016). Selenate and Nitrate Bioreductions Using Methane as the Electron Donor in a Membrane Biofilm Reactor. *Environ Sci Technol*, 50, 1017910186.
- Lehmann, J., Bossio, D. A., Kögel Knabner, I., and Rillig, M. C. (2020). The concept and future prospects of soil health. *Nat Rev Earth Environ*, 1, 544553.
- Lepikash, R., Lavrova, D., Stom, D., Meshalkin, V., Ponamoreva, O., and Alferov, S. (2024). State of the Art and Environmental Aspects of Plant Microbial Fuel Cells' Application. *Energies*, 17, 752.
- Lewis, K. (1966). Symposium on bioelectrochemistry of microorganisms. IV. Biochemical fuel



- cells. *Bacteriol Rev*, 30, 101113.
- Li, H., Yao, J., Sunahara, G., Min, N., Li, C., and Duran, R. (2023). Quantifying ecological and human health risks of metal(loid)s pollution from non-ferrous metal mining and smelting activities in Southwest China. *Science of The Total Environment*, 873, 162364.
- Li, M., Zhou, S., Xu, Y., Liu, Z., Ma, F., Zhi, L., and Zhou, X. (2018). Simultaneous Cr(VI) reduction and bioelectricity generation in a dual chamber microbial fuel cell. *Chemical Engineering Journal*, 334, 16211629.
- Li, R. Y., Ago, Y., Liu, W. J., Mitani, N., Feldmann, J., McGrath, S. P., Ma, J. F., and Zhao, F. J. (2009). The rice aquaporin Lsi1 mediates uptake of methylated arsenic species. *Plant Physiol*, 150, 20712080.
- Liang, Y., Zhai, H., Liu, B., Ji, M., and Li, J. (2020). Carbon nanomaterial-modified graphite felt as an anode enhanced the power production and polycyclic aromatic hydrocarbon removal in sediment microbial fuel cells. *Science of The Total Environment*, 713, 136483.
- Liu, H., and Logan, B. E. (2004). Electricity Generation Using an Air-Cathode Single Chamber Microbial Fuel Cell in the Presence and Absence of a Proton Exchange Membrane. *Environmental Science and Technology*, 38, 40404046.
- Liu, H., Ramnarayanan, R., and Logan, B. E. (2004). Production of Electricity during Wastewater Treatment Using a Single Chamber Microbial Fuel Cell. *Environmental Science and Technology*, 38, 22812285.
- Liu, J. W., Wei, K. H., Xu, S. W., Cui, J., Ma, J., Xiao, X. L., Xi, B. D., and He, X. S. (2021). Surfactant-enhanced remediation of oil-contaminated soil and groundwater: A review. *Sci Total Environ*, 756, 144142.
- Liu, L., Li, W., Song, W., and Guo, M. (2018). Remediation techniques for heavy metal-contaminated soils: Principles and applicability. *Sci Total Environ*, 633, 206219.
- Logan, B., Cheng, S., Watson, V., and Estadt, G. (2007). Graphite fiber brush anodes for increased power production in air-cathode microbial fuel cells. *Environ Sci Technol*, 41, 33413346.
- Logan, B. E., Hamelers, B., Rozendal, R., Schröder, U., Keller, J., Freguia, S., Aelterman, P., Verstraete, W., and Rabaey, K. (2006). Microbial Fuel Cells: Methodology and Technology. *Environmental Science and Technology*, 40, 51815192.
- Lovecchio, N., Giuseppetti, R., Bertuccini, L., Columba Cabezas, S., Di Meo, V., Figliomeni, M., Iosi, F., Petrucci, G., Sonnessa, M., Magurano, F., and D'Ugo, E. (2024).



- Hydrocarbonoclastic Biofilm-Based Microbial Fuel Cells: Exploiting Biofilms at Water-Oil Interface for Renewable Energy and Wastewater Remediation. *Biosensors (Basel)*, *14*.
- Lovley, D. R. (2006). Bug juice: harvesting electricity with microorganisms. *Nat Rev Microbiol*, *4*, 497508.
- Lu, X., Li, X., Qi, H., Chen, C., and Jin, W. (2025). Enhanced pollution control using sediment microbial fuel cells for ecological remediation. *Bioresource Technology*, *418*, 131970.
- Luo, J., Tian, W., Jin, H., Yang, J., Li, J., Wang, Y., Shen, W., Ren, Y., and Zhou, M. (2023). Recent advances in microbial fuel cells: A review on the identification technology, molecular tool and improvement strategy of electricigens. *Current Opinion in Electrochemistry*, *37*, 101187.
- Ma, L., Chen, N., Feng, C., and Yang, Q. (2024). Recent advances in enhanced technology of Cr(VI) bioreduction in aqueous condition: A review. *Chemosphere*, *351*, 141176.
- Ma, Y., Prasad, M. N., Rajkumar, M., and Freitas, H. (2011). Plant growth promoting rhizobacteria and endophytes accelerate phytoremediation of metalliferous soils. *Biotechnol Adv*, *29*, 248258.
- Ma, Y., Rajkumar, M., and Freitas, H. (2009). Isolation and characterization of Ni mobilizing PGPB from serpentine soils and their potential in promoting plant growth and Ni accumulation by Brassica spp. *Chemosphere*, *75*, 719725.
- Mandal, J., Sharma, P. K., Mondal, D., Wood, M. D., Hutchinson, S. M., Kirby, J., and Srivastava, P. (2024). Meta-Analysis of Biochar as an Amendment for Arsenic Mitigation in Paddy Soils. *Current Pollution Reports*, *10*, 105118.
- Mani, P., V T, F., Bowman, K., T S, C., Keshavarz, T., and Kyazze, G. (2020). Development of an electroactive aerobic biocathode for microbial fuel cell applications. *Environmental Microbiology Reports*, *12*, 607612.
- Mao, X., Liu, Y., and Long, S. (2025). Research progress on adsorption mechanisms and regeneration applications of modified biochar for heavy metals in wastewater. *Desalination and Water Treatment*, *324*, 101399.
- Meena, R., Pareek, A., and Gupta, R. (2024). A comprehensive Review on interfacial delamination in photovoltaic modules. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *189*, 113944.
- Meng, Y., Shen, Y. W., Meng, W. W., Wang, X. Q., Li, Z. X., Liu, K. C., and Dai, H. C. (2023). [Effect of Biochar on Agricultural Soil Aggregates and Organic Carbon: A Meta-



- analysis]. *Huan Jing Ke Xue*, 44, 68476856.
- Min, B., and Logan, B. E. (2004). Continuous Electricity Generation from Domestic Wastewater and Organic Substrates in a Flat Plate Microbial Fuel Cell. *Environmental Science and Technology*, 38, 58095814.
- Mohamed, H. I., Ullah, I., Toor, M. D., Tanveer, N. A., Din, M. M. U., Basit, A., Sultan, Y., Muhammad, M., and Rehman, M. U. (2025). Heavy metals toxicity in plants: understanding mechanisms and developing coping strategies for remediation: a review. *Bioresources and Bioprocessing*, 12, 95.
- Mondal, S., Dilly Rajan, K., Rathinam, M., Neppolian, B., and Vattikondala, G. (2024). Enhanced photocatalytic degradation of tetracycline using NiCo–BiVO₄ nanocomposite under visible light irradiation: A noble-metal-free approach for water remediation. *Chemosphere*, 350, 141012.
- Mulligan, C. N., Yong, R. N., and Gibbs, B. F. (2001). Remediation technologies for metal-contaminated soils and groundwater: an evaluation. *Engineering Geology*, 60, 193207.
- Nitorisavut, R., and Regmi, R. (2017). Plant microbial fuel cells: A promising biosystems engineering. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 8189.
- Ohki, A., Nakajima, T., Sakaguchi, Y., Iwashita, A., and Takanashi, H. (2005). Analysis of arsenic and some other elements in coal fly ash by X-ray photoelectron spectroscopy. *Journal of Hazardous Materials*, 119, 213217.
- Onyelowe, K. C., Ebid, A. M., Ramos Jiménez, R. B., Kamchoom, V., Vishnupriyan, M., and Arunachalam, K. P. (2025). Modeling suction of unsaturated granular soil treated with biochar in plant microbial fuel cell bioelectricity system. *Sci Rep*, 15, 1439.
- Otsuka, Y., Araki, T., Suzuki, Y., Nakamura, M., Kamimura, N., and Masai, E. (2023). High-level production of 2-pyrone-4,6-dicarboxylic acid from vanillic acid as a lignin-related aromatic compound by metabolically engineered fermentation to realize industrial valorization processes of lignin. *Bioresource Technology*, 377, 128956.
- Pandya, B., Chaudhari, L., and Vaghela, N. R. (2025). Enhanced Performance of a Microbial Fuel Cell Using Double Oxidant-Treated Carbon Felts. *Electrochem*, 6, 12.
- Pathak, S. K., Singh, S., Rajput, V. D., Shan, S., and Srivastava, S. (2024). Sulfur-modified tea-waste biochar improves rice growth in arsenic contaminated soil and reduces arsenic accumulation. *iScience*, 27, 111445.
- Patwardhan, S. B., Pandit, S., Kumar Gupta, P., Kumar Jha, N., Rawat, J., Joshi, H. C., Priya, K., Gupta, M., Lahiri, D., Nag, M., Kumar Thakur, V., and Kumar Kesari, K. (2022).



- Recent advances in the application of biochar in microbial electrochemical cells. *Fuel*, 311, 122501.
- Paulsson, M., Nyström, B., and Blanck, H. (2000). Long-term toxicity of zinc to bacteria and algae in periphyton communities from the river Göta Älv, based on a microcosm study. *Aquatic Toxicology*, 47, 243257.
- Paz Ferreira, J., Lu, H., Fu, S., Méndez, A., and Gascó, G. (2014). Use of phytoremediation and biochar to remediate heavy metal polluted soils: a review. *Solid Earth*, 5, 6575.
- Rabaey, K., Clauwaert, P., Aelterman, P., and Verstraete, W. (2005). Tubular Microbial Fuel Cells for Efficient Electricity Generation. *Environmental Science and Technology*, 39, 80778082.
- Rahman, M. M., Das, A. K., Sultana, S., Ghosh, P. K., Islam, M. R., Keya, S. S., Ahmed, M., Nihad, S. A. I., Khan, M. A. R., Lovell, M. C., Rahman, M. A., Ahsan, S. M., Anik, T. R., Fnu, P., Tran, L. S. P., and Mostofa, M. G. (2023). Biochar potentially enhances maize tolerance to arsenic toxicity by improving physiological and biochemical responses to excessive arsenate. *Biochar*, 5, 71.
- Rajamohan, R., Ruby Raj, M., Selvamani, T., Murali Krishnan, M., Govindasamy, C., Murugan, M., and Rok Lee, Y. (2024). Chemosensor material as a metal–organic framework with potassium-based perylene tetracarboxylic acid for copper and lead detection. *Journal of Molecular Liquids*, 408, 125376.
- Ramanaiah, S. V., Cordas, C. M., Matias, S., and Fonseca, L. P. (2021). In Situ Electrochemical Characterization of a Microbial Fuel Cell Biocathode Running on Wastewater. *Catalysts*, 11, 839.
- Rehman, M. U., Khan, R., Khan, A., Qamar, W., Arafah, A., Ahmad, A., Ahmad, A., Akhter, R., Rinklebe, J., and Ahmad, P. (2021). Fate of arsenic in living systems: Implications for sustainable and safe food chains. *Journal of Hazardous Materials*, 417, 126050.
- Ren, B., Wang, T., and Zhao, Y. (2021). Two-stage hybrid constructed wetland-microbial fuel cells for swine wastewater treatment and bioenergy generation. *Chemosphere*, 268, 128803.
- Rezaei, F., Richard, T. L., Brennan, R. A., and Logan, B. E. (2007). Substrate-enhanced microbial fuel cells for improved remote power generation from sediment-based systems. *Environ Sci Technol*, 41, 40534058.
- Rhoads, A., Beyenal, H., and Lewandowski, Z. (2005). Microbial Fuel Cell using Anaerobic Respiration as an Anodic Reaction and Biomineralized Manganese as a Cathodic



- Reactant. *Environmental Science and Technology*, 39, 46664671.
- Ringelberg, D. B., Foley, K. L., and Reynolds, C. M. (2011). Electrogenic capacity and community composition of anodic biofilms in soil-based bioelectrochemical systems. *Appl Microbiol Biotechnol*, 90, 18051815.
- Sandhi, A., Yu, C., Rahman, M. M., and Amin, M. N. (2022). Arsenic in the water and agricultural crop production system: Bangladesh perspectives. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 5135451366.
- Sarma, P. J., and Mohanty, K. (2023). Development and comprehensive characterization of low-cost hybrid clay based ceramic membrane for power enhancement in plant based microbial fuel cells (PMFCs). *Materials Chemistry and Physics*, 296, 127337.
- Seifan, M., and Berenjian, A. (2019). Microbially induced calcium carbonate precipitation: a widespread phenomenon in the biological world. *Appl Microbiol Biotechnol*, 103, 46934708.
- Seto, M., Wada, S., and Suzuki, S. (2013). The effect of zinc on aquatic microbial ecosystems and the degradation of dissolved organic matter. *Chemosphere*, 90, 10911102.
- Sharma, G., Verma, Y., Lai, C. W., Naushad, M., Iqbal, J., Kumar, A., and Dhiman, P. (2024). Biochar and biosorbents derived from biomass for arsenic remediation. *Heliyon*, 10, 36288.
- Shukla, A., Suresh, P., Berchmans, S., and Rajendran, A. (2004). Biological Fuel Cells and Their Applications. *Current Science*, 87.
- Shukla, A., Suresh, P., Berchmans, S., and Rajendran, A. P. (2004). Biological fuel cells and their applications. *Current Science*, 87, 455468.
- Silver, W. L., Perez, T., Mayer, A., and Jones, A. R. (2021). The role of soil in the contribution of food and feed. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, 376, 20200181.
- Singh, P., Saraswat, A., and Maiti, A. (2025). Enhanced arsenic immobilization from contaminated soil to crops, carbon sequestration, and soil fertility using laterite Biochar composites. *Sci Rep*, 15, 17933.
- Soltani, N., Keshavarzi, B., Moore, F., Sorooshian, A., and Ahmadi, M. R. (2017). Distribution of potentially toxic elements (PTEs) in tailings, soils, and plants around Gol-E-Gohar iron mine, a case study in Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 1879818816.
- Song, T. S., Yan, Z. S., Zhao, Z. W., and Jiang, H. L. (2011). Construction and operation of freshwater sediment microbial fuel cell for electricity generation. *Bioprocess Biosyst*



Eng, 34, 621627.

- Strik, D. P., Timmers, R. A., Helder, M., Steinbusch, K. J., Hamelers, H. V., and Buisman, C. J. (2011). Microbial solar cells: applying photosynthetic and electrochemically active organisms. *Trends Biotechnol*, 29, 4149.
- Strik, D. P. B. T. B., Hamelers, H. V. M., Snel, J. F. H., and Buisman, C. J. N. (2008). Green electricity production with living plants and bacteria in a fuel cell. *International Journal of Energy Research*, 32, 870876.
- Strik, D. P. B. T. B., Hamelers, H. V. M., Snel, J. F. H., and Buisman, C. J. N. (2008). Green electricity production with living plants and bacteria in a fuel cell. *International Journal of Energy Research*, 32, 870876.
- Strik, D. P. B. T. B., Timmers, R. A., Helder, M., Steinbusch, K. J. J., Hamelers, H. V. M., and Buisman, C. J. N. (2011). Microbial solar cells: applying photosynthetic and electrochemically active organisms. *Trends in Biotechnology*, 29, 4149.
- Su, Q., Du, Z., Huang, X., Hassan, M. U., and Altihani, F. A. (2025a). Managing Arsenic Pollution from Soil–Plant Systems: Insights into the Role of Biochar. *Plants*, 14.
- Su, Q., Du, Z., Huang, X., Hassan, M. U., and Altihani, F. A. (2025b). Managing Arsenic Pollution from Soil–Plant Systems: Insights into the Role of Biochar. *Plants*, 14, 1553.
- Sun, J., Tu, S., Lu, X., and Li, X. (2025). Coupling of Biochar and Manure Improves Soil Carbon Pool Stability, Pore Structure, and Microbial Diversity. *Agronomy*, 15, 1384.
- Sun, Y., Wang, H., Long, X., Xi, H., Biao, P., and Yang, W. (2022). Advance in remediated of heavy metals by soil microbial fuel cells: Mechanism and application. *Front Microbiol*, 13, 997732.
- Taiwan EAL (2009) Electrode method, Environmental Protection Administration, Executive Yuan, Taiwan. NIEA S410.62C.
- Taiwan EAL (2013) Atomic spectrometry method, Environmental Protection Administration, Executive Yuan, Taiwan. NIEA M104.02C.
- Taiwan EAL (2015) Soil sampling method, Environmental Protection Administration, Executive Yuan, Taiwan. NIEA S102.63B.
- Taiwan EAL (2018) Aqua agilent digestion method, Environmental Protection Administration, Executive Yuan, Taiwan. NIEA S301.61B.
- Taiwan TARI (2023) Conductivity meter method, Council of Agriculture, Executive Yuan, Taiwan. TARI (TARI S101.1B).
- Tchounwou, P. B., Yedjou, C. G., Patlolla, A. K., and Sutton, D. J. (2012). Heavy metal toxicity



- and the environment. *Exp Suppl*, 101, 133164.
- Timmers, R. A., Strik, D. P., Hamelers, H. V., and Buisman, C. J. (2010). Long-term performance of a plant microbial fuel cell with *Spartina anglica*. *Appl Microbiol Biotechnol*, 86, 973981.
- Timmers, R. A., Strik, D. P. B. T. B., Hamelers, H. V. M., and Buisman, C. J. N. (2012). Characterization of the internal resistance of a plant microbial fuel cell. *Electrochimica Acta*, 72, 165171.
- Timmers, R. A., Strik, D. P. B. T. B., Hamelers, H. V. M., and Buisman, C. J. N. (2013). Electricity generation by a novel design tubular plant microbial fuel cell. *Biomass and Bioenergy*, 51, 6067.
- Toczyłowska Mamińska, R., Mamiński, M. Ł., and Kwasowski, W. (2025). Microbial Fuel Cell Technology as a New Strategy for Sustainable Management of Soil-Based Ecosystems. *Energies*, 18.
- Ukhurebor, K. E., Aigbe, U. O., Onyancha, R. B., Nwankwo, W., Osibote, O. A., Paumo, H. K., Ama, O. M., Adetunji, C. O., and Siloko, I. U. (2021). Effect of hexavalent chromium on the environment and removal techniques: A review. *Journal of Environmental Management*, 280, 111809.
- Upadhyaya, G., Jackson, J., Clancy, T. M., Hyun, S. P., Brown, J., Hayes, K. F., and Raskin, L. (2010). Simultaneous removal of nitrate and arsenic from drinking water sources utilizing a fixed-bed bioreactor system. *Water Research*, 44, 49584969.
- Uria Molto, N., Costa, R. D., Nunziata, C., Santiago, S., Guirado, G., Muñoz Berbel, X., and Kowalski, L. (2022). Self-contained and integral microbial fuel cells as portable and sustainable energy sources for low-power field devices. *Electronic Journal of Biotechnology*, 57, 44-51.
- Vithanage, M., Herath, I., Joseph, S., Bundschuh, J., Bolan, N., Ok, Y. S., Kirkham, M. B., and Rinklebe, J. (2017). Interaction of arsenic with biochar in soil and water: A critical review. *Carbon*, 113, 219230.
- Walter, X. A., Greenman, J., and Ieropoulos, I. A. (2020). Microbial fuel cells directly powering a microcomputer. *Journal of Power Sources*, 446, 227328.
- Wang, C. T., Sangeetha, T., Ding, D. Q., Chong, W. T., and Yan, W. M. (2018). Implementation of surface modified carbon cloth electrodes with biochar particles in microbial fuel cells. *International Journal of Green Energy*, 15, 789794.
- Wang, F., Huo, L., Li, Y., Wu, L., Zhang, Y., Shi, G., and An, Y. (2023). A hybrid framework for



- delineating the migration route of soil heavy metal pollution by heavy metal similarity calculation and machine learning method. *Science of The Total Environment*, 858, 160065.
- Wang, H., Chen, N., Feng, C., Deng, Y., and Gao, Y. (2020). Research on efficient denitrification system based on banana peel waste in sequencing batch reactors: Performance, microbial behavior and dissolved organic matter evolution. *Chemosphere*, 253, 126693.
- Wang, J., Wei, Z. P., Chu, Y. X., Tian, G., and He, R. (2022). Eutrophic levels and algae growth increase emissions of methane and volatile sulfur compounds from lakes. *Environmental Pollution*, 306, 119435.
- Wang, Q., Hu, Z., Xu, L., Li, J., Gan, Q., Du, X., and Ouyang, M. (2021). A comparative study of equivalent circuit model and distribution of relaxation times for fuel cell impedance diagnosis. *International Journal of Energy Research*, 45, 1594815961.
- Wang, X., Cai, Z., Zhou, Q., Zhang, Z., and Chen, C. (2012). Bioelectrochemical stimulation of petroleum hydrocarbon degradation in saline soil using U-tube microbial fuel cells. *Biotechnology and Bioengineering*, 109, 426433.
- Wang, Y., Chen, L., Zhu, Y., Fang, W., Tan, Y., He, Z., and Liao, H. (2024). Research status, trends, and mechanisms of biochar adsorption for wastewater treatment: a scientometric review. *Environmental Sciences Europe*, 36, 25.
- Wang, Z., Yuan, L., Liang, G., and Gu, A. (2021). Mechanically durable and self-healing superhydrophobic coating with hierarchically structured KH570 modified SiO₂-decorated aligned carbon nanotube bundles. *Chemical Engineering Journal*, 408, 127263.
- Wei, J., Li, Y., Li, J., Yan, W., Yin, Q., Jiang, H., Li, Z., Jiang, J., Li, Y., Yao, Y., and Zhang, L. (2024). A 2-year pure biochar addition enhances soil carbon sequestration and reduces aggregate stability in understory conditions. *Sci Rep*, 14, 30122.
- Wetser, K., Sudirjo, E., Buisman, C. J. N., and Strik, D. P. B. T. B. (2015). Electricity generation by a plant microbial fuel cell with an integrated oxygen reducing biocathode. *Applied Energy*, 137, 151157.
- Woldetsadik, D., Drechsel, P., Keraita, B., Itanna, F., and Gebrekidan, H. (2017). Heavy metal accumulation and health risk assessment in wastewater-irrigated urban vegetable farming sites of Addis Ababa, Ethiopia. *International Journal of Food Contamination*, 4, 9.
- Wu, C., Luo, Y., and Zhang, L. (2010). Variability of copper availability in paddy fields in relation to selected soil properties in southeast China. *Geoderma*, 156, 200206.



- Wu, P. C., Hou, C. H., and He, Z. (2024). Electrochemically-assisted intensification of As(III) removal through integrated alkalization and oxidation process. *Journal of Hazardous Materials*, 476, 135025.
- Xiang, M., Li, Y., Yang, J., Lei, K., Li, Y., Li, F., Zheng, D., Fang, X., and Cao, Y. (2021). Heavy metal contamination risk assessment and correlation analysis of heavy metal contents in soil and crops. *Environmental Pollution*, 278, 116911.
- Xu, P., Wang, Q., Duan, C., Huang, G., Dong, K., and Wang, C. (2024). Biochar addition promotes soil organic carbon sequestration dominantly contributed by macro-aggregates in agricultural ecosystems of China. *J Environ Manage*, 359, 121042.
- Xu, Y., Lu, Q., Li, J., Wan, L., Chen, S., and Lu, Y. (2021). Effect of humus on the remediation of arsenic-contaminated soil by electrokinetic technology. *Environmental Technology and Innovation*, 21, 101297.
- Yan, B., and Zhang, X. (2021). Current status, causes and harm of soil arsenic pollution. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 769, 022034.
- Yang, S., Sun, L., Sun, Y., Song, K., Qin, Q., Zhu, Z., and Xue, Y. (2023). Towards an integrated health risk assessment framework of soil heavy metals pollution: Theoretical basis, conceptual model, and perspectives. *Environmental Pollution*, 316, 120596.
- Yang, W., Zhou, M., Mai, L., Ou, H., Oturan, N., Oturan, M. A., and Zeng, E. Y. (2021). Generation of hydroxyl radicals by metal-free bifunctional electrocatalysts for enhanced organics removal. *Science of The Total Environment*, 791, 148107.
- Yuan, H., Huang, Y., Jiang, O., Huang, Y., Qiu, D., Gustave, W., Tang, X., and Li, Z. (2022). Removal of Arsenate From Groundwater by Cathode of Bioelectrochemical System Through Microbial Electrosorption, Reduction, and Sulfuration. *Front Microbiol*, 13, 812991.
- Zambelli, A., Nocito, F. F., and Araniti, F. (2025). Unveiling the Multifaceted Roles of Root Exudates: Chemical Interactions, Allelopathy, and Agricultural Applications. *Agronomy*, 15, 845.
- Zeng, J., and Han, G. (2020). Preliminary copper isotope study on particulate matter in Zhujiang River, southwest China: Application for source identification. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 198, 110663.
- Zeng, Q., Hu, Y., Yang, Y., Hu, L., Zhong, H., and He, Z. (2019). Cell envelop is the key site for Cr(VI) reduction by *Oceanobacillus oncorhynchi* W4, a newly isolated Cr(VI) reducing bacterium. *Journal of Hazardous Materials*, 368, 149-155.



- Zhang, D., Lin, J., Luo, J., Sun, S., Zhang, X., Ma, R., Peng, J., Ji, F., Zheng, S., Tian, Z., and Ma, N. (2024). Rapid immobilization of arsenic in contaminated soils by microwave irradiation combined with magnetic biochar: Microwave-induced electron transfer for oxidation and immobilization of arsenic (III). *Sci Total Environ*, 919, 170916.
- Zhang, H., Yan, Q., An, Z., and Wen, Z. (2022). A revolving algae biofilm based photosynthetic microbial fuel cell for simultaneous energy recovery, pollutants removal, and algae production [Original Research]. *Frontiers in Microbiology*, Volume 13, 2022.
- Zhang, J., Jiao, W., Huang, S., Wang, H., Cao, X., Li, X., and Sakamaki, T. (2022). Application of microbial fuel cell technology to the remediation of compound heavy metal contamination in soil. *Journal of Environmental Management*, 320, 115670.
- Zhang, X., Wei, L., Yang, C., Xie, Y., and Niu, J. (2025). Iron-loaded biochar for dual remediation of arsenic-contaminated saline-alkali soil. *Environmental Technology and Innovation*, 40, 104459.
- Zhao, L., Deng, J., Hou, H., Li, J., and Yang, Y. (2019). Investigation of PAH and oil degradation along with electricity generation in soil using an enhanced plant-microbial fuel cell. *Journal of Cleaner Production*, 221, 678683.
- Zhao, P., Wang, J., Sun, L., Li, Y., Xia, H., and He, W. (2024). Optimal electrode configuration and system design of compactly-assembled industrial alkaline water electrolyzer. *Energy Conversion and Management*, 299, 117875.
- Zhao, S., Wang, X., Wang, Q., Sumpradit, T., Khan, A., Zhou, J., Salama, E. S., Li, X., and Qu, J. (2023). Application of biochar in microbial fuel cells: Characteristic performances, electron-transfer mechanism, and environmental and economic assessments. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 267, 115643.
- Zhao, S., Wang, X., Wang, Q., Sumpradit, T., Khan, A., Zhou, J., Salama, E. S., Li, X., and Qu, J. (2023). Application of biochar in microbial fuel cells: Characteristic performances, electron-transfer mechanism, and environmental and economic assessments. *Ecotoxicol Environ Saf*, 267, 115643.
- Zheng, J., Noller, B., Huynh, T., Ng, J., Taga, R., Diacomanolis, V., and Harris, H. (2021). How the population in Mount Isa is living with lead exposure from mining activities. *The Extractive Industries and Society*, 8, 123134.