



## 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

# 生物質衍生水膠材料於永續土壤管理效益評估 及可行性分析

期末報告（定稿）

主辦單位：  環境部環境管理署  
專案執行單位： 國立臺灣大學／生物環境系統工程學系(所)  
專案主持人： 潘述元 副教授  
協同主持人： 王尚禮 教授  
專案執行期間： 113 年 11 月 1 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：潘述元 NO：R22                                                                                                                   |                                                                                                   |
| 計畫名稱                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 生物質衍生水膠材料於永續土壤管理效益評估及可行性分析                                                                     |                                                                                                                                  |                                                                                                   |
| 審查意見                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                | 執行單位回覆                                                                                                                           |                                                                                                   |
| <p>委員一</p> <p>1. 本計畫「生物質衍生水膠材料於永續土壤管理效益評估及可行性分析」期末報告已依原提案計畫之預定進度、項目完成相關研發工作及實驗，計畫結果及成效符合原定目標與效益。</p> <p>2. 本計畫研發之具磁性之生物質衍生水膠材料(nZVI/CS/ALG/BC)之應用具有環境友善之綠色材料性質，現階段已針對重金屬污染農地種植經濟作物(水稻、花生)時重金屬流向及質量平衡進行試驗；建議未來可針對重金屬污染農地種植植生復育(phytoremediation)物種之影響(競合與成效)近一步進行評估，以檢視生物質衍生水膠材料搭配植生復育工法之可行性與效益。</p> <p>3. 本計畫研發之生物質衍生水膠材料(nZVI/CS/ALG/BC)及各項實驗成果顯示其具有高度實場應用價值，建議後續可考量辦理模場研發實驗計畫，進一步提升本項材料未來應用與成效、協助提供重金屬污染農地多元整治方案。</p> |                                                                                                | <p>1. 感謝委員肯定。</p> <p>2. 感謝委員肯定及建議，納入後續執行項目(P. 61)。</p> <p>3. 感謝委員肯定及建議。未來於模場研發實驗計畫應須將材料穩定性及耐久性等多項效能評估考量，相關方向已納入建議作為後續辦理參考依據。</p> |                                                                                                   |
| <p>委員二</p> <p>1. 計畫進度符合原定目標。</p> <p>2. 水凝膠材料長期於土壤中，是否會對植物影響，請後續納入研究。</p> <p>3. 水凝膠材料吸附重金屬後之穩定性及後續如何去除重金屬，達到再利用，有待再研究。</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                | <p>1. 感謝委員肯定。</p> <p>2. 感謝委員建議，納入後續執行項目(P. 61)。</p> <p>3. 感謝委員建議，納入後續執行項目(P. 61)。</p>                                            |                                                                                                   |
| <p>委員三</p> <p>1. 表二、綠色土壤改良劑進行金屬固定機制、改良劑優/缺點及永續性層面。建議納入本研究之比較。</p> <p>2. 將本研究之金屬吸附量與文獻的材料進行比較(表三)。</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                | <p>1. 感謝委員的建議，納入後續執行項目，並於期末報告中建議說明 (P. 61)。</p> <p>2. 感謝委員的建議，修正為表八(P. 43~44)。</p> <p>3. 遵照辦理，已補充材料 SEM 照片，詳如報告書 P. 28~30。</p>   |                                                                                                   |



|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>3. 請補充 nZVI/CS/ALG/BC 及 CS/ALG/BC 複合材料之 SEM 照片。</p> <p>4. 如何確認 nZVI 是吸附在 CS/ALG/BC 表面或進入複合材料內部。</p> <p>5. 請補充 nZVI 在 CS/ALG/BC 表面的含量及尺寸分布。</p> <p>6. 本研究使用零價鐵，零價鐵於水相介質中極易被氧化，建議補充探討零價鐵被水相氧化的程度。</p> <p>7. 如果零價鐵被氧化，建議也可以利用還原劑將氧化鐵再次還原成零價鐵，以維持 nZVI/CS/ALG/BC 的還原活性。</p> <p>8. 表九、土壤重金屬殘留。數據顯示，複合材料對於土壤中的重金屬去除率比溶液的重金屬去除率低，這應該是與土壤競爭吸附的影響。建議補充說明。建議將表九換算成重金屬的吸附量以利比較。</p> <p>9. 在水田 / 旱田的試驗中，數據顯示 nZVI/CS/ALG/BC 在旱田的表現較佳，建議比較零價鐵氧化的氧化情形。</p> <p>10. 盆栽試驗及重金屬流向只針對鉻金屬，建議比較銅及鉛的流向。</p> | <p>4. 感謝委員的建議，納入後續執行項目，並於期末報告中建議說明(P. 61)。</p> <p>5. 感謝委員的建議，納入後續執行項目，並於期末報告中建議說明(P. 61)。</p> <p>6. 感謝委員的建議，納入後續執行項目，並於期末報告中建議說明(P. 61)。</p> <p>7. 感謝委員的建議，納入後續執行項目，並於期末報告中建議說明(P. 61)。</p> <p>8. 感謝委員的建議，已於期末報告中補充說明換算細節，並更新表九內容 (P. 45~46)。</p> <p>9. 感謝委員的建議，納入後續執行項目，並於期末報告中建議說明(P. 61)。</p> <p>10. 感謝委員的建議，納入後續執行項目，並於期末報告中建議說明(P. 61)。</p> |
| <p>委員四</p> <p>1. p.33 以建立材料於液相中的吸附容量曲線，並分析不同金屬(Pb、Cu、Cr)隨時間的平衡吸附量,顯示材料具有良好的吸附能力。建議後續研究可加入材料多次脫附再生(例如 2-5 次)後的吸附效能變化,以強化「循環材料」的論證,並評估材料重複使用的成本效益。</p> <p>2. p.45 以 2 g/100 g 土壤的施用量進行污染土壤吸附試驗,並呈現了 Pb、Cu、Cr 的去除率變化,顯示材料在固定施用量下具一定整治潛力。建議可於後續研究中加入不同施用量(如 1%、2%、3%)的比較試驗,以建立劑量反應關係,並作為未來標準作業流程(SOP)施用量之重要依據。</p> <p>3. p.49 以水田與旱田盆栽試驗的配置、入滲水蒐集方式與重金屬在各介質(作物、土壤、滲流水、材料)之流向分析,已成功建立質量平衡架構。建議未來若申請模場型計畫,可增加作物生長指標(如植株高度、乾</p>                                                               | <p>1. 感謝委員肯定及建議，納入後續執行項目，並於期末報告中建議說明 (P. 61)。</p> <p>2. 感謝委員肯定及建議，納入後續執行項目，並於期末報告中建議說明 (P. 61)。</p> <p>3. 感謝委員肯定及建議，納入後續執行項目，並於期末報告中建議說明 (P. 61)。</p>                                                                                                                                                                                            |



|                                                             |                                                           |
|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| <p>重、葉綠素或根部量),以更完整呈現水膠材料作為土壤改良劑對作物健康促進的效益。</p>              |                                                           |
| <p>委員五</p> <p>1. 期刊論文尚未完成，材料與土壤競爭吸附，這與土壤質地及其中有機質含量關係密切。</p> | <p>1. 感謝委員建議，本團隊會持續完備材料穩定性及耐久性等多項效能評估，並持續推進期刊論文發表之進度。</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   ☐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：潘述元   NO：R22                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                   |
| 計畫名稱                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 生物質衍生水膠材料於永續土壤管理效益評估及可行性分析                                                                     |                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                   |
| 審查意見                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                | 執行單位回覆                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                   |
| 委員一<br>4. 計畫進度符合原定目標，完成投稿國際研討會論文 2 篇、國內研討會論文 2 篇。<br>5. 完成開發製備具磁性之生物衍生水膠材料。<br>6. 建議期末報告，能提出最佳操作條件。<br>7. 建議後續提出經濟效益評估說明。                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                | 4. 感謝委員肯定。<br>5. 感謝委員肯定。<br>6. 感謝委員建議，已增列於章節 5.4。<br>7. 感謝委員建議，已增列於章節 5.4。                                                                                                                                        |                                                                                                   |
| 委員二<br>4. 本計畫「生物質衍生水膠材料於永續土壤管理效益評估及可行性分析」期中報告已完成國際間土壤綠色永續整治材料最新進展資訊蒐集、相關研究文獻收集與彙整、具磁性之生物質衍生水膠材料(nZVI/CS/ALG/BC) 製 備 及 nZVI/CS/ALG/BC 吸附重金屬動力學模擬試驗等研究項目，期中報告內容與成果符合原提案計畫之預定進度。<br>5. 本計畫期中報告已針對目前進程及實驗結果提出相關討論與建議，並可據以進行後續下半年研發工作之推展。<br>6. 有關具磁性之生物質衍生水膠材料(nZVI/CS/ALG/BC)於環境中應用之穩定性與使用方式(當成土壤改良劑長期置放於農地土壤或功能衰退/飽和後回收)等議題建議於本研究後續實驗中予以考量，以提升本項材料未來應用性與計畫成效。 |                                                                                                | 4. 感謝委員肯定。<br>5. 感謝委員肯定。<br>6. 感謝委員建議。本研究已於階段性成果中初步評估 nZVI/CS/ALG/BC 複合水膠材料在土壤環境下之結構穩定性與磁性回收性，後續將針對不同環境條件下材料之長期穩定性、吸附飽和後的再利用與回收方式進行進一步測試。同時亦將評估其作為土壤改良劑長期置放對土壤性質與植物生長之影響，藉此完善材料的實際應用策略與環境安全性評估，以提升本材料之可行性與整體計畫效益。 |                                                                                                   |





|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                               |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>委員三</p> <p>11. 本計劃已完成具磁性的生物質衍生水膠材料，可用於後續土壤吸附重金屬後之回收。</p> <p>12. 製備成本及環境效益評估，因考慮到污染土壤的量體及重金屬質量的去除，所以回收%和成本都應以重金屬去除量為計算依據。</p>                                                                                                                                                                                                        | <p>11. 感謝委員肯定。</p> <p>12. 感謝委員的指正與建議。本研究後續將以重金屬實際去除量作為主要效益評估指標，重新檢視材料的回收率及單位去除成本，以反映其在污染土壤整治中之真實效能。同時亦將納入材料製備過程的能耗與資源使用，進行初步環境效益與成本效益分析，藉以強化材料在大規模應用下的可行性與永續性評估。</p>                                                                          |
| <p>委員四</p> <p>4. P.32 已成功製備具應用潛力之 nZVI/CS/ALG/BC 複合材料，成果具參考價值。建議後續可考量觀察材料於不同土壤條件下之回收與再利用特性，將有助於進一步了解其應用面向，亦可作為後續模場時的技術佐證。</p> <p>5. P.38-P.44 吸附模式以常見模式為主，分析清楚明確。建議如未來經費或資料允許，可嘗試導入其他模式（如 Temkin、D-R 等）進行補充探討，或有助於更全面呈現吸附行為。</p> <p>6. P.45 擬進行之模擬盆栽試驗設計完整，已展現應用潛力。建議後續進一步規劃應用層面，或可適度思考實場推動時可能面臨之技術課題（例如施作方式、操作便利性等），做為未來擴展應用時之參考。</p> | <p>4. 感謝委員肯定。</p> <p>5. 感謝委員建議，未來經費或資料允許會嘗試 Temkin、D-R 模式去進行吸附模型分析。</p> <p>6. 感謝委員的肯定與建議。本研究後續將在既有模擬盆栽試驗基礎上，進一步評估材料於實際農田環境中之可操作性與應用模式，包含施作方式、施用劑量、混拌均勻性及材料回收機制等技術面課題。同時亦將蒐集實場操作所需的技術參數與管理條件，作為未來推廣應用與技術優化的重要參考依據，以提升材料實場導入之可行性與整治效益。</p>      |
| <p>委員五</p> <p>2. 本計畫擬利用殼聚醣/海藻酸鹽/生物炭製作成一複合材料，開發「本土化生物基水膠循環材料」，複合材料主要進行土壤中重金屬固定或去除。本計畫並將材料磁性修飾以易於從土壤中分離回收複合材料。</p> <p>3. 本計畫使用硼氫化鈉（NaBH<sub>4</sub>）為還原劑來還原鐵離子，建議評估硼氫化鈉的殘留量及其對環境可能造成的影響。</p> <p>4. 本研究使用 PEG-2000 界面活性劑目的</p>                                                                                                            | <p>2. 感謝委員肯定。</p> <p>3. 感謝委員的建議，關於硼氫化鈉（NaBH<sub>4</sub>）作為還原劑之使用，本研究後續研究針對其反應後可能殘留之硼化物進行檢測與定量分析，並評估其於環境中之穩定性與潛在影響，確保材料製備過程及應用之環境安全性。</p> <p>4. 感謝委員的建議，有關 PEG-2000 界面活性劑部分，後續研究其在反應中作為分散與穩定劑之角色，並針對不同添加量對複合材料粒徑、分散性及表面特性之影響進行實驗驗證，以建立最佳吸附</p> |



|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                              |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>及其對複合材料的影響，應有更明確的說明，特別是 PEG-2000 吸附量的調控，建議有相關實驗數據。</p> <p>5. 建議對於 nZVI/CS/ALG/BC 複合材料中的各組成比例做更完整的特性分析(33 頁)。</p> <p>6. 24 頁，請補充 Temkin 等溫吸附模型的相關說明。</p> <p>7. 氧化成氧化鐵 (<math>\text{Fe}_2\text{O}_3</math>) 會在水凝膠外層形成一層氧化球殼(圖 29)，會保護內部之 <math>\text{Fe}(0)</math>，建議應評估氧化球殼是否會影響內部 <math>\text{Fe}(0)</math> 的功用。14 頁，奈米零價鐵對部分中金屬的吸附作用。</p> <p>8. 5.2.1 建立材料於液相中吸附容量曲線。nZVI/CS/ALG/BC 及 CS/ALG/BC 對重金屬的吸附有不同的行為，其差異是否由於外層的 nZVI 結構，建議應有更明確的比較說明。</p> <p>9. 表八、Langmuir 等溫吸附模型模擬參數。CS/ALG/BC 為呈現 Pb 及 Cr 的 KL 及 <math>Q_{\text{max}}</math>，請補充。</p> <p>10. 表八、Langmuir 等溫吸附模型模擬參數。CS/ALG/BC 對於 Cu 的 <math>Q_{\text{max}}</math> 高於 nZVI/CS/ALG/BC 對於 Cu 的</p> | <p>量及其對材料性能的關聯性，提升整體研究的完整性與可重現性。</p> <p>5. 感謝委員的建議。</p> <p>6. 感謝委員的建議。</p> <p>7. 感謝委員的建議。</p> <p>8. 感謝委員的建議，已修正並重作吸附曲線實驗結果(延長吸附時間)。</p> <p>9. 感謝委員的建議，已修正並重作吸附曲線實驗結果。</p> <p>10. 感謝委員的建議，已修正並重作吸附曲線實驗結果。</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

☐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：潘述元 NO：                                                                                                                                                             |                                                                                                   |
| 計畫名稱                                                                                                                                              | 生物質衍生水膠材料於永續土壤管理效益評估及可行性評估                                                                     |                                                                                                                                                                         |                                                                                                   |
| 審查意見                                                                                                                                              |                                                                                                | 執行單位回覆                                                                                                                                                                  |                                                                                                   |
| 委員一<br>1.擬規劃添加多少種重金屬？<br>2.水凝膠重金屬含量與分析？                                                                                                           |                                                                                                | 1. 感謝委員，本計畫主要以銅、鉛、鎘為主，視試驗進度可再增加鎘、汞、鎳、砷等常見重金屬，佐證此水凝膠於重金屬污染之廣泛使用性。<br>2. 已補充於計畫書修正稿第 22 頁「4. 水膠複合材料分析」，規劃透過微波消化及 ICP-OES 進行定性定量分析。                                        |                                                                                                   |
| 委員二<br>1. 本計畫擬開發高效多功能複合材料，用於改善土壤重金屬污染，降低重金屬生物利用性<br>2. 依計畫書所述，本計畫主要擬降低重金屬污染土壤的生物有效性，污染總量並未削減。以風險而言當屬可行。但以目前的管制標準而言，污染總量並未被去除<br>3. 建議說明污染物的最終環境宿命 |                                                                                                | 1. 感謝委員肯定。<br>2. 感謝委員指教，本年度實施重點項目在於精進本土化生物基水膠循環材料製備程序（磁性回收），藉此可將吸附重金屬之水凝膠材料從土壤中取出，減少土壤重金屬含量。<br>3. 感謝委員建議，本計畫藉由吸附重金屬之水凝膠材料從土壤中取出，減少土壤重金屬含量，此外也藉由脫附將中金屬回收，實現重金屬污染物從土壤回收。 |                                                                                                   |
| 委員三<br>無                                                                                                                                          |                                                                                                | 感謝委員。                                                                                                                                                                   |                                                                                                   |
| 委員四<br>1. 試驗重金屬 Cu 及鉛。建議考量測試國內常見農地污染之重金屬物種及容易被植物吸收之重金屬物種                                                                                          |                                                                                                | 感謝委員建議。本年度計畫將透過模擬水田/旱田大盆試驗、建立土壤重金屬流向分析及質量平衡探討銅、鉛等重金屬吸附、吸收、滲流...等流向，有助於建立預防性整治之技術。                                                                                       |                                                                                                   |
| 委員五<br>1.針對土壤重金屬污染問題，設計以生物基水膠材料為基礎的修復技術，並考量可持續性，符合目前綠色技術的發展趨勢。<br>2.建議進一步研究材料多次循環使用後的效                                                            |                                                                                                | 1. 感謝委員肯定。<br>2. 感謝委員建議，遵照辦理。本計畫將持續蒐研國外水凝膠脫附再生之相關研究，調整脫附再生試驗方式，並比較其差異，使其延長使用壽命及次數。                                                                                      |                                                                                                   |



|                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>率下降程度，並考量是否有降低成本的方法。</p>                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                     |
| <p>委員六</p> <p>1.附件 7-1 專案基本資料表之經費分析總表說明人事費用應為申請補助經費(1~5 項相加)之 50%為限，而該分析表顯示本計畫申請補助經費為 1,150,000 元，而本計畫人事費用應不得超過 575,000 元，故請檢視並修正。</p> <p>2.附件 7-4 說明本計畫預估申請發明專利 1 件，惟附件 7-3 自評表中未填入預估申請專利件數，故建議重新檢視本表，並修正。</p> | <p>1. 已依據補助上限調整各項經費，並修正於申請計畫書修正稿。</p> <p>2. 感激委員提醒，已修正相關內容。</p>                                                                                                     |
| <p>委員七</p> <p>1. 本研究屬於新型材料開發與應用，具有創新性。</p> <p>2. 計畫書中反應動力、吸附模型，與施用頻率及劑量間，似乎有一個很大的 Gap 在，建議執行時，多加討論。</p>                                                                                                         | <p>1. 感謝委員肯定。</p> <p>2. 感謝委員，除了模型回歸參數外，規劃再配合土壤試驗與質量平衡的物質流分析，多重結果合併探討後，整合得到理想之材料施用頻率與劑量（報告書第 23 頁）。</p>                                                              |
| <p>委員八</p> <p>1. 宜說明與前期研究方法和預期成果之異同或精進成果？</p>                                                                                                                                                                   | <p>感謝委員指教，今年度持續蒐集國際間土壤綠色永續整治材料最新進展，精進本土化生物基水膠循環材料製備程序（磁性回收），並將研究重點放在試驗規模擴大，包括：模擬水田/旱田大盆試驗、建立土壤重金屬流向分析及質量平衡等；同時，研擬材料標準施用流程，並分析材料製備成本、程序碳排放及環境效益，以作為未來模場計畫設計參考依據。</p> |
| <p>委員九</p> <p>1.其他費：報告中無提及至台中、南投、高雄採樣目的，請補充說明。</p> <p>2.請依補助上限調整各項經費，並修正於申請計畫書修正稿。</p>                                                                                                                          | <p>1. 已於報告書第 48 頁補充說明。</p> <p>2. 已依據補助上限調整各項經費，並修正於申請計畫書修正稿。</p>                                                                                                    |



## 專案基本資料表

### 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

申請編號：

|                             |                                                                                                   |                                                                                                                           |                                    |                                                                                                    |                  |
|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|
| 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-R-R-H1-M<br>(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)                                     |                  |
| 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                      | 國立臺灣大學生物環境系統工程學系                                                                                  |                                                                                                                           |                                    |                                                                                                    |                  |
| 機構地址                        | 10617 臺北市大安區羅斯福路四段 1 號台大生工系                                                                       |                                                                                                                           |                                    |                                                                                                    |                  |
| 專案主持人                       | 潘述元                                                                                               | 職等/職稱                                                                                                                     | 副教授                                |                                                                                                    |                  |
| 協同主持人                       | 王尚禮                                                                                               | 職等/職稱                                                                                                                     | 教授                                 |                                                                                                    |                  |
| 專案名稱                        | 中文                                                                                                | 生物質衍生水膠材料於永續土壤管理效益評估及可行性分析                                                                                                |                                    |                                                                                                    |                  |
|                             | 英文                                                                                                | Evaluation of the Benefits and Feasibility Analysis of Biomass-Derived Hydrogel Materials for Sustainable Soil Management |                                    |                                                                                                    |                  |
|                             | 關鍵字                                                                                               | 水凝膠、重金屬、質量平衡、綠色永續整治                                                                                                       |                                    |                                                                                                    |                  |
| 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：潘述元                                                                                            | E-mail：sypan@ntu.edu.tw                                                                                                   | 專線：02-3366-3453<br>手機：0910-606-598 |                                                                                                    |                  |
| 專/兼任人員                      | 姓名：何恭慧                                                                                            | E-mail：jock122002@gmail.com                                                                                               | 專線：02-3366-3482<br>手機：0939-956-511 |                                                                                                    |                  |
| 經費分析總表<br>(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                                                                                                                      | 336,543                            |                                                                                                    | (1~5 項相加之 50%為限) |
|                             | 2.                                                                                                | 設備使用含維護費                                                                                                                  | 28,820                             |                                                                                                    | (與計畫實驗相關)        |
|                             | 3.                                                                                                | 耗材與主要費用                                                                                                                   | 215,575                            |                                                                                                    | (與計畫主體相關)        |
|                             | 4.                                                                                                | 其它研究相關費用                                                                                                                  | 18,062                             |                                                                                                    | (含差旅與租賃費用)       |
|                             | 5.                                                                                                | 行政管理費                                                                                                                     | 111,000                            |                                                                                                    | (1~5 項相加之 15%為限) |
|                             | 6.                                                                                                | 自籌款                                                                                                                       | 0                                  |                                                                                                    | (申請單位自行籌備款項)     |
|                             | 申請補助經費(1~5 項)                                                                                     |                                                                                                                           | 740,000                            |                                                                                                    | 總金額：740,000      |
|                             | 計畫總經費(1~6 項)                                                                                      |                                                                                                                           | 740,000                            |                                                                                                    | 總金額：740,000      |

說明：

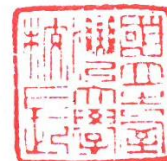
1. 本署以部份補助為原則，得指定不補助項目，不補助項目應為自籌款項，應自行核銷不得申請。
2. 非實驗性質之專案，若第一項費用編列金額超出比率，須於申請公文內向本署說明，俾利審查。
3. 補助專案經費編列自申請起經專案核准後，經費編列中各項費用單價與需求只可減少與下修。

專案主持人：

潘述元

(簽名或蓋章)

日期：114.12.11



(定稿本請蓋上申請單位大小章)





## 專案執行自評表

| 專案主持人 | 潘述元                                                                                               | 專案名稱 | 生物質衍生水膠材料於永續土壤管理效益評估及可行性分析                      |                                                                                                |                          |      |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|------|-------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|------|
| 專案類型  | <input type="checkbox"/> 先導型 <input checked="" type="checkbox"/> 研究型 <input type="checkbox"/> 模場型 |      | 專案主題                                            | <input type="checkbox"/> 調查 <input checked="" type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 其他 |                          |      |
| 項次    | 類別                                                                                                | 缺失點數 | 自評項目                                            | 執行單位檢核                                                                                         |                          | 本署審核 |
|       |                                                                                                   |      |                                                 | 是                                                                                              | 否                        |      |
| 一     | 計畫書核定修正                                                                                           | 1 點  | 依規定期限內備文提送                                      | <input checked="" type="checkbox"/>                                                            | <input type="checkbox"/> |      |
|       |                                                                                                   | 1 點  | 書面資料完整且無補件情況                                    | <input checked="" type="checkbox"/>                                                            | <input type="checkbox"/> |      |
|       |                                                                                                   | 1 點  | 報告依格式規定撰寫                                       | <input checked="" type="checkbox"/>                                                            | <input type="checkbox"/> |      |
|       |                                                                                                   | 1 點  | 依規定期限內上傳電子檔                                     | <input checked="" type="checkbox"/>                                                            | <input type="checkbox"/> |      |
|       |                                                                                                   | 1 點  | 系統資料依規定期限內登錄且資料登錄完整（含本署 SRFS 系統與國科會 GRB 系統）     | <input checked="" type="checkbox"/>                                                            | <input type="checkbox"/> |      |
| 二     | 期中及期末                                                                                             | 1 點  | 依規定期限內備文提送                                      | <input checked="" type="checkbox"/>                                                            | <input type="checkbox"/> |      |
|       |                                                                                                   | 1 點  | 書面資料完整且無補件情況                                    | <input checked="" type="checkbox"/>                                                            | <input type="checkbox"/> |      |
|       |                                                                                                   | 1 點  | 報告依格式規定撰寫                                       | <input checked="" type="checkbox"/>                                                            | <input type="checkbox"/> |      |
|       |                                                                                                   | 1 點  | 依規定期限內上傳電子檔                                     | <input checked="" type="checkbox"/>                                                            | <input type="checkbox"/> |      |
|       |                                                                                                   | 1 點  | 系統資料依規定期限內登錄且資料登錄完整（含本署 SRFS 系統與國科會 GRB 系統）     | <input checked="" type="checkbox"/>                                                            | <input type="checkbox"/> |      |
| 三     | 結案及核銷                                                                                             | 2 點  | 依規定期限至本署 BAF 系統上傳支用單據                           | <input checked="" type="checkbox"/>                                                            | <input type="checkbox"/> |      |
|       |                                                                                                   | 3 點  | 結案上傳支用單據及相關資料完整                                 | <input checked="" type="checkbox"/>                                                            | <input type="checkbox"/> |      |
| 四     | 其他                                                                                                | 4 點  | 計畫主持人配合出席本專案成果發表活動（或指定代理人如協同主持人、同專業且為助理研究員以上職等） | <input checked="" type="checkbox"/>                                                            | <input type="checkbox"/> |      |
|       |                                                                                                   | 1 點  | 計畫執行者於執行期間與單位內各處室溝通良好，行政作業效率良好。                 | <input checked="" type="checkbox"/>                                                            | <input type="checkbox"/> |      |
| 合計    |                                                                                                   | 20 點 |                                                 | 20                                                                                             |                          |      |

註：執行單位於計畫執行期間進行缺失檢核於期中及期末送本署審核，並於期末統一計算。

未依實況登錄者，由本署補登依各階段執行紀錄進行缺失點數扣款。

缺失扣款機制：

- 依結案標準，於專案執行期間，視各執行單位行政作業配合度，依「專案執行自評表」（[附件17](#)）進行績效缺失記點，缺失點數達扣款規定者，依核定總金額按比例扣款（或追繳）。
- 缺失點數達5點者總金額款項扣1.5%，缺失點數達7點者總金額款項扣3%，缺失點數達7點以上者每增加缺失1點，加扣總金額款項1%。

113 年度專案成果績效自評表

填表日期：114 年 10 月 30 日

一、專案基本資料

|        |                                                                                                  |       |                                                                                                   |
|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 專案性質   | <input checked="" type="checkbox"/> 實驗性質 <input type="checkbox"/> 非實驗性質                          | 專案類別  | <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"/> 其他   |       |                                                                                                   |
| 執行機構   | 國立臺灣大學                                                                                           | 專案主持人 | 潘述元副教授                                                                                            |
| 專案名稱   | 生物質衍生水膠材料於永續土壤管理效益評估及可行性分析                                                                       |       |                                                                                                   |
| 專案執行期程 | <input type="checkbox"/> 申請階段 <input type="checkbox"/> 期中 <input checked="" type="checkbox"/> 成果 |       |                                                                                                   |

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

| 目標達成程度               |                  |                  | 申請<br>預估數 | 期中<br>達成數 | 成果<br>達成數 | 結案後半<br>年達成率 | 備註<br>(說明未達成<br>原因或學術產<br>出發表名稱)       |
|----------------------|------------------|------------------|-----------|-----------|-----------|--------------|----------------------------------------|
| 項目                   |                  |                  |           |           |           |              |                                        |
| A<br>學術產<br>出及活<br>動 | 1.國內投稿<br>(篇數)   | (1)論文            | 0         | 0         | 0         |              |                                        |
|                      |                  | (2)研討會論文         | 1         | 2         | 2         |              | 已接受發表 (農<br>業工程年會暨研<br>討會、環工年會<br>研討會) |
|                      | 2.國外投稿<br>(篇數)   | (1)期刊論文          | 1         | 0         | 0         |              | 已完成撰寫準備<br>投出 JHM 期刊。                  |
|                      |                  | (2)國際研討會<br>論文發表 | 1         | 2         | 2         |              | 已接受發表<br>(PAWEES 2025;<br>ACS 2025)    |
|                      | 3.報告<br>(篇數)     | (1)技術報告          | 0         | 0         | 0         |              |                                        |
|                      |                  | (2)研究報告          | 0         | 0         | 0         |              |                                        |
|                      | 4.專著 (本數)        |                  | 0         | 0         |           | 0            |                                        |
|                      | 5.辦理學術<br>會議(場數) | (1)研討/說明會        | 0         | 0         | 0         |              |                                        |
|                      |                  | (2)成果發表會         | 0         | 0         | 0         |              |                                        |
|                      |                  | (3)論壇            | 0         | 0         | 0         |              |                                        |
|                      | 6.研發改良<br>技術(項數) | (1)已開發技術         | 0         | 0         | 0         |              |                                        |
|                      |                  | (2)技術平台          | 0         | 0         | 0         |              |                                        |
|                      | 7.技術獎項(項數)       |                  | 0         | 0         | 0         |              |                                        |
| B<br>人才<br>培育        | 8.研發人員<br>(人數)   | (1)碩士            | 0         | 0         | 0         |              |                                        |
|                      |                  | (2)博士            | 1         | 1         | 1         |              | 何恭慧                                    |
|                      | 9.研究團隊<br>(個數)   | (1)跨領域團隊         | 0         | 0         | 0         |              |                                        |
|                      |                  | (2)跨機構團隊         | 0         | 0         | 0         |              |                                        |
|                      |                  | (3)形成研究中         | 0         | 0         | 0         |              |                                        |



| 目標達成程度             |  |          | 申請<br>預估數 | 期中<br>達成數 | 成果<br>達成數 | 結案後半<br>年達成率 | 備註<br>(說明未達成原因或學術產出發表名稱) |
|--------------------|--|----------|-----------|-----------|-----------|--------------|--------------------------|
| 項目                 |  |          |           |           |           |              |                          |
|                    |  | 心        |           |           |           |              |                          |
|                    |  | (4)形成實驗室 | 1         | 1         | 1         |              |                          |
| 10.其他指標<br>(請自行命名) |  |          | 無         | 無         | 無         |              |                          |

(二) 產業面

| 目標達成程度   |                  |             | 申請<br>預估數 | 期中<br>達成數 | 成果<br>達成數 | 結案後半<br>年達成率 | 備註<br>(說明未達成原因或專利、技術轉移相關詳細資料) |
|----------|------------------|-------------|-----------|-----------|-----------|--------------|-------------------------------|
| 項目       |                  |             |           |           |           |              |                               |
| A 智慧財產權  | 1.專利<br>(件數)     | 已發明         | 0         | 0         | 0         |              |                               |
|          |                  | 核准新型/設計     | 0         | 0         | 0         |              |                               |
|          |                  | 合計          | 0         | 0         | 0         |              |                               |
|          |                  | 申請發明        | 0         | 0         | 0         |              |                               |
|          |                  | 請核准新型/設計    | 0         | 0         | 0         |              |                               |
|          |                  | 合計          | 0         | 0         | 0         |              |                               |
| B 研發技術轉移 | 2.先期技術<br>成果移轉   | 件數          | 0         | 0         | 0         |              |                               |
|          |                  | 授權金(仟元)     | 0         | 0         | 0         |              |                               |
|          |                  | 衍生利益金(仟元)   | 0         | 0         | 0         |              |                               |
|          | 3.技術移轉<br>(專利)   | 件數          | 0         | 0         | 0         |              |                               |
|          |                  | 授權金(仟元)     | 0         | 0         | 0         |              |                               |
|          |                  | 衍生利益金(仟元)   | 0         | 0         | 0         |              |                               |
|          | 4.技術移轉<br>(應用技術) | 件數          | 0         | 0         | 0         |              |                               |
|          |                  | 授權金(仟元)     | 0         | 0         | 0         |              |                               |
|          |                  | 衍生利益金(仟元)   | 0         | 0         | 0         |              |                               |
|          | 5.可移轉<br>產業技術    | (1)技術(件數)   | 0         | 0         | 0         |              |                               |
|          |                  | (2)品種/系(件數) | 0         | 0         | 0         |              |                               |
| C        | 6.促成合作           | 件數          | 0         | 0         | 0         |              |                               |





| 項目 \ 目標達成程度 |                   |            | 申請<br>預估數 | 期中<br>達成數 | 成果<br>達成數 | 結案後半年<br>達成率 | 備註<br><br>(說明未達成原因或專利、技術轉移相關詳細資料) |
|-------------|-------------------|------------|-----------|-----------|-----------|--------------|-----------------------------------|
| 產學研<br>合作   | 研究                | 金額(仟元)     | 0         | 0         | 0         |              |                                   |
|             | 7.促成投資            | 件數         | 0         | 0         | 0         |              |                                   |
|             |                   | 投資金額(仟元)   | 0         | 0         | 0         |              |                                   |
|             | 8.促成取得<br>業界科專    | 件數         | 0         | 0         | 0         |              |                                   |
|             |                   | 業界投資金額(仟元) | 0         | 0         | 0         |              |                                   |
|             | 9.其他指標<br>(請自行命名) |            | (請自填)     | 無         | 無         | 無            |                                   |

## (三) 政策面

| 目標達成程度<br>項目      |                  |        | 申請預<br>估數 | 期中<br>達成數 | 成果<br>達成數 | 結案後半年<br>達成率 | 備註<br>(說明未達成原因或其他詳細資料) |
|-------------------|------------------|--------|-----------|-----------|-----------|--------------|------------------------|
| A<br>服務<br>便民     | 1.技術服務           | 次數     | 0         | 0         | 0         |              |                        |
|                   |                  | 收入(仟元) | 0         | 0         | 0         |              |                        |
|                   | 2.諮詢服務           | 次數     | 0         | 0         | 0         |              |                        |
|                   |                  | 收入(仟元) | 0         | 0         | 0         |              |                        |
| B<br>政策<br>推動     | 3.協助政府推動<br>(件數) | (1)政策  | 0         | 0         | 0         |              |                        |
|                   |                  | (2)法規  | 0         | 0         | 0         |              |                        |
| C<br>技術<br>效益     | 4.整治技術提升(%)      |        | 0         | 0         | 0         |              |                        |
|                   | 5.整治成本降低(%)      |        | 0         | 0         | 0         |              |                        |
|                   | 6.提升能源效率(%)      |        | 0         | 0         | 0         |              |                        |
| 7.其他指標<br>(請自行命名) |                  | (請自填)  | 無         | 無         | 無         |              |                        |



### 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

|                                                                                                                                                                                                                              |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>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)</b>                                                                                                                                                                                       |
| 1. 已發表國際研討會論文 2 篇、國內研討會論文 2 篇。<br>2. 已培育 1 名博士生。                                                                                                                                                                             |
| <b>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)</b>                                                                                                                                                                                        |
| 1. 開發製備具磁性之生物質衍生水膠材料方法一式。<br>2. 開發應用此複合材料於土壤重金屬固定流程一式。<br>3. 建立土壤重金屬流向分析與質量平衡。                                                                                                                                               |
| <b>政策面(如整治費用降低、特定污染物整治效益提升、或提供政府作為監測/管制標準、污染查核、場址管理等政策及法規研訂之參考)</b>                                                                                                                                                          |
| 1. 務實改善土壤重金屬整治程序，降低成本並提升重金屬處理率及回收率。<br>2. 增進低污染、低排放、資源循環之整治方式，對綠色永續整治有正面的助益。<br>3. 促進我國 2050 淨零轉型目標，特別係提升「資源循環零廢棄」戰略量能。<br>4. 開發高效多功能複合材料於改善土壤重金屬污染，降低重金屬生物利用性，對污染場址具場置有正面助益，屬於「資源循環零廢棄」。<br>5. 配合參與相關成果活動及填報研究績效與專利研發追蹤調查表。 |

### 四、主要研究人力

| 姓名  | 服務機構/系所       | 職稱    | 在本研究專案內擔任之具體工作性質、項目及範圍     | 執行期間               |
|-----|---------------|-------|----------------------------|--------------------|
| 潘述元 | 國立臺灣大學<br>生工系 | 副教授   | 專案主持人，負責計畫推動、督導、執行、管理、成果報告 | 113/11/1~114/11/30 |
| 王尚禮 | 國立臺灣大學<br>農化系 | 教授    | 協同主持人                      | 113/11/1~114/11/30 |
| 何恭慧 | 國立臺灣大學<br>生工系 | 博士候選人 | 兼任人員，負責樣品分析                | 113/11/1~114/11/30 |



## 五、產業界資源投入表

專案執行若有與產業界合作，請執行單位依實際量化成果填寫於欄位中。

| 投入資源類別 | 數量   | 說明 |
|--------|------|----|
| 1.自籌款  | 0 元  | 無  |
| 2.人力   | 0 人月 | 無  |
| 3.設備   |      | 無  |
| 4.其他資源 |      | 無  |





## 研究成果中文摘要

本研究計畫執行期程為一年，開發「本土化生物基水膠循環材料」，利用殼聚糖/海藻酸鹽/生物炭製作成一複合材料，進行土壤中重金屬固定或去除，並將材料磁性修飾以易於從土壤中分離回收複合材料。本研究透過此複合材料之重金屬吸附容量吸附土壤重金屬；此外，磁性化材料能更有利於從土壤中將其分離；再者，水凝膠作為土壤改良劑，可實現土壤營養鹽與水分保持之功能，減少農業非點源污染，並增加作物與土壤健康程度，兼顧綠色永續整治目標。本計畫主要研究目標包括：(一)持續蒐集國際間土壤綠色永續整治材料最新進展，精進本土化生物基水膠循環材料製備程序；(二)進行模擬水田/旱田大盆試驗，建立土壤重金屬流向分析及質量平衡；(三)建立複合材料之反應動力學與等溫吸附模型，評估生物基水膠循環材料之環境穩定性，研提施用頻率及劑量等標準施用流程；(四)進行材料製備成本分析，評估程序碳排放及環境效益（例如：作物安全、土壤保水、土壤健康、氣候變遷土壤韌性提升等面向）。

本計畫已成功製備殼聚糖/海藻酸鈉/生物炭水凝膠球珠(CS/ALG/BC)材料，製備方法透過在殼聚糖溶液中加入氯化鈣，一來是形成晶球狀水凝珠，二來是利用殼聚糖在外層再形成一層保護結構。此保護結構能穩定水凝膠球珠結構，避免其因烘乾後碎裂，且浸泡水中亦能回復到原本體積。隨後，取烘乾後的CS/ALG/BC 球珠，經與界面活性劑在硫酸鐵溶液混和攪拌 1 小時使 Fe(II) 吸附於球珠上，接著在通氮氣的厭氧環境下，緩慢滴入 NaBH<sub>4</sub> 還原劑將 Fe(II) 還原成 Fe(0)，成功製備負載奈米級零價鐵殼聚糖/海藻酸鈉/生物炭水凝膠球珠 (nZVI/CS/ALG/BC)。雖然奈米級零價鐵容易氧化成氧化鐵 (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)，但會在水凝膠外層形成一層氧化球殼，此球殼能保護內部之 Fe(0)。針對 nZVI/CS/ALG/BC 材料進行液相重金屬吸附試驗結果顯示，吸附容量隨著吸附時間的增加而提升，在前 60 分鐘材料吸水後吸附點位增加，吸附速率在 60 分鐘至 2 天加快，約 2 至 4 天後達到相對穩定之吸附容量（趨於飽和）。當重金屬初始濃度越高時，材料能夠達到的吸附容量也越高。在測試的最高初始濃度下，吸附容量 Q<sub>e</sub> 以質量計，鉛 (Pb) 最高達 41.70 mg/g，銅 (Cu) 達 30.66 mg/g，鉻 (Cr) 達 16.03 mg/g。吸附動力學模擬結果，偽二階動力學模型的 R<sup>2</sup> 值在 0.9924~0.9982 之間，結果顯示此材料吸附模式以化學吸附為主，作用機制包含沉澱、電子交換或形成共價鍵。Freundlich 等溫吸附模型的 R<sup>2</sup> 值極高 (0.9943~0.9999)，表示材料吸附形式以多層吸附為主，且材料表面的吸附點位分布不均勻。根據 Freundlich 模型的分析，銅 (Cu) 和鉻 (Cr) 的吸附強度大於鉛 (Pb)。





關於使用實際受污染土壤（污染型態以鉻、鉛及銅為主）吸附試驗中，吸附速率在 14~21 天後漸減；當複合材料添加量為 2.0 克/100 克 土壤時，經過 28 天後，重金屬的去除率分別為：鉛約 27%、銅約 25%、鉻約 21%。作物盆栽試驗探討重金屬於土壤系統中之流向與分布，預期水凝膠材料能達到韌性整治之效果。試驗組添加 1g 水凝膠/100g 土壤。在對照組中，因重金屬（鉻）為離子態，約有 93~95% 之重金屬容易隨著入滲水滲流離開土壤環境。於實驗組中施用水凝膠材料後，關於材料本身吸附輸入鉻之總量，水田盆栽試驗組約為 7.0%，旱田盆栽試驗組約為 12%。綜合以上，此研發材料施用可明顯降低鉻金屬於滲流水中之含量（水田盆栽試驗組減少約 6%；旱田盆栽試驗組減少 11%）、土壤累積量減少（水田盆栽試驗組減少 22%；旱田盆栽試驗組減少 25%），以及作物吸收量也減少（水田盆栽試驗組減少 50%；旱田盆栽試驗組減少 33%）。



## 研究成果英文摘要

This research project is the development of "localized biomass-based hydrogel recycling materials" is planned. A material made from chitosan/alginate/biochar will be created and magnetically modified to fix or remove heavy metals from soil. This study aims to use the heavy metal adsorption capacity of this material to adsorb heavy metals from soil. Additionally, the magnetic modification facilitates easier separation of the material from the soil. Furthermore, hydrogels can serve as soil amendment, achieving nutrient and moisture retention in the soil, reducing non-point source pollution in agriculture, and enhancing crop and soil health, thereby aligning with the goal of green and sustainable remediation. The main research objectives of this project include: (1) continuously collecting the latest international developments in green and sustainable soil remediation materials to improve the preparation process of localized biomass-based hydrogel recycling materials; (2) conducting large-scale pot experiments simulating paddy/upland fields to establish heavy metal flow analysis and mass balance in soil; (3) establishing the reaction kinetics and isothermal adsorption models of the material to evaluate the environmental stability of the biomass-based hydrogel recycling material and proposing standard application procedures, including application frequency and dosage; (4) conducting a cost analysis of material preparation and evaluating carbon emissions and environmental benefits of the process (e.g., crop safety, soil moisture retention, soil health, and enhanced soil resilience to climate change).

This project successfully fabricated chitosan/sodium alginate/biochar hydrogel beads (CS/ALG/BC). The preparation method involved adding calcium chloride to a chitosan solution, which not only induced the formation of spherical hydrogel beads but also created an additional protective chitosan layer on the surface. This protective layer stabilized the hydrogel structure, preventing cracking after drying and enabling the beads to re-swell to their original volume upon immersion in water. The dried CS/ALG/BC beads were then mixed with a surfactant in a ferrous sulfate solution and stirred for one hour to allow Fe(II) adsorption onto the beads. Under a nitrogen atmosphere, sodium borohydride ( $\text{NaBH}_4$ ) was slowly added as a reducing agent to convert Fe(II) to Fe(0), yielding nano zero-valent iron-loaded hydrogel beads (nZVI/CS/ALG/BC). Although nano zero-valent iron tends to oxidize into iron oxide ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), an oxidized shell forms on the outer layer of the hydrogel, protecting the Fe(0) core from further oxidation. Liquid-phase adsorption experiments for heavy metals demonstrated that the adsorption capacity of nZVI/CS/ALG/BC increased with contact time. During the first 60 minutes, water absorption expanded the number of available adsorption sites, accelerating the



rate between 60 minutes and 2 days, and reaching a relatively stable capacity (near saturation) after 2–4 days. Higher initial metal concentrations led to greater adsorption capacities. At the highest tested concentrations, the equilibrium adsorption capacities ( $Q_e$ ) reached 41.70 mg/g for Pb, 30.66 mg/g for Cu, and 16.03 mg/g for Cr. Kinetic modeling showed that the pseudo-second-order model fitted best, with  $R^2$  values ranging from 0.9924 to 0.9982, indicating that chemisorption dominated through mechanisms such as precipitation, electron exchange, or covalent bonding. The Freundlich isotherm model also exhibited high  $R^2$  values (0.9943–0.9999), suggesting multilayer adsorption on heterogeneous surfaces. According to Freundlich analysis, the adsorption intensity followed the order  $\text{Cu} > \text{Cr} > \text{Pb}$ . In contaminated soil adsorption tests (mainly containing Cr, Pb, and Cu), adsorption rates declined after 14–21 days. When 2.0 g of composite material was added per 100 g of soil, the removal efficiencies after 28 days were approximately 26.50% for Pb, 24.56% for Cu, and 21.38% for Cr. A pot experiment was conducted to investigate the migration of heavy metals in soil systems and evaluate the hydrogel's potential for resilient remediation. In the experimental group (1 g hydrogel/100 g soil), 93–94.5% of ionic Cr leached out with percolating water in the control group, whereas in hydrogel-treated soils, the material adsorbed about 7.0% (paddy soil) and 12% (upland soil) of the total Cr input. Application of the hydrogel reduced Cr concentrations in leachate by 5.8% (paddy) and 10.8% (upland), decreased soil accumulation by 22% (paddy) and 25% (upland), and lowered plant uptake by 50% (paddy) and 33% (upland), demonstrating the material's effectiveness in mitigating heavy metal mobility within soil systems.



## 目錄

|                                          |       |
|------------------------------------------|-------|
| 專案基本資料表.....                             | VI    |
| 113 年度專案成果績效自評表.....                     | VII   |
| 研究成果中文摘要 .....                           | XIV   |
| 研究成果英文摘要 .....                           | XVI   |
| 目錄 .....                                 | XVIII |
| 圖目錄 .....                                | XX    |
| 表目錄 .....                                | XXII  |
| 第一章、前言.....                              | 1     |
| 第二章、研究目的 .....                           | 3     |
| 第三章、文獻探討 .....                           | 5     |
| 3.1 永續韌性整治 .....                         | 5     |
| 3.2 土壤綠色永續整治材料.....                      | 7     |
| 3.3 應用綠色複合材料進行大盆栽試驗及重金屬質量平衡模式.....       | 14    |
| 第四章、研究方法與過程 .....                        | 17    |
| 4.1 整體研究架構.....                          | 17    |
| 4.2 精進本土化生物基水膠循環材料製備程序.....              | 18    |
| 4.2.1 生物基水膠循環材料製備程序 .....                | 18    |
| 4.2.2 生物基水膠循環材料吸附試驗 .....                | 19    |
| 4.2.3 生物基水膠循環材料吸附動力學模擬與等溫吸附模型模擬 .....    | 19    |
| 4.3 進行模擬水田/旱田盆栽試驗，建立土壤重金屬流向分析及質量平衡 ..... | 21    |
| 4.3.1 模擬盆栽試驗 .....                       | 21    |
| 4.3.2 質量平衡模型 .....                       | 23    |
| 4.4 進行製備成本、程序碳排放及環境效益評估及標準作業流程.....      | 25    |
| 第五章、結果與討論 .....                          | 27    |
| 5.1 製備含磁性之生物基水膠材料製備.....                 | 27    |
| 5.2 研析水膠材料吸附重金屬效率及模式.....                | 31    |
| 5.2.1 建立材料於液相中吸附容量曲線 .....               | 31    |
| 5.2.2 建立材料吸附重金屬之動力學模型 .....              | 33    |
| 5.2.3 建立材料等溫吸附模型 .....                   | 39    |
| 5.2.4 受污染土壤吸附試驗 .....                    | 45    |
| 5.3 作物盆栽試驗.....                          | 49    |



|                                 |           |
|---------------------------------|-----------|
| 5.3.1 盆栽試驗前置作業 .....            | 49        |
| 5.3.2 盆栽試驗及重金屬流向分析與質量平衡 .....   | 52        |
| <b>5.4 成本分析並研擬材料標準施用流程.....</b> | <b>57</b> |
| 5.4.1 成本分析.....                 | 57        |
| 5.4.2 研擬材料標準施用流程 .....          | 58        |
| <b>第六章、結論與建議 .....</b>          | <b>59</b> |
| 6.1 結論 .....                    | 59        |
| 6.2 建議 .....                    | 61        |
| <b>第七章、參考文獻 .....</b>           | <b>62</b> |
| <b>第八章、附錄.....</b>              | <b>65</b> |





## 圖目錄

|                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 圖一、(左)基於自然解方土壤修復之環境、經濟和社會效益；(右)永續土壤管理概念                                                              | 1  |
| 圖二、過去研究成果及今年度工作重點差異說明                                                                                | 3  |
| 圖三、硫化亞鐵奈米顆粒木質素水凝膠複合材料吸附土壤中鎘之機制據                                                                      | 7  |
| 圖四、文獻中運用 NZVI/PCS 複合材料吸附土壤中鎘之機制                                                                      | 8  |
| 圖五、使用工業廢鐵屑和殼聚糖製備複合材料以穩定受砷污染土壤                                                                        | 8  |
| 圖六、開發一種自分離之核殼球吸附土壤中之鎘並用磁鐵將其從土壤中回收                                                                    | 9  |
| 圖七、開發水分散性殼聚糖/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> 奈米複合材料吸附 PB <sup>2+</sup> 和 CU <sup>2+</sup> 並分離、再生、循環利用 | 9  |
| 圖八、製作殼聚糖與海藻酸水凝膠珠之流程                                                                                  | 10 |
| 圖九、針鐵礦奈米顆粒改性生物炭 (FBC) 固定共污染土壤的 AS(V)和 CD (II)                                                        | 11 |
| 圖十、殼聚糖基水凝膠微球的製備和形成機制                                                                                 | 11 |
| 圖十一、黃原膠/殼聚糖生物膜製備示意圖                                                                                  | 12 |
| 圖十二、奈米零價鐵 (NZVI) 吸附重金屬機制                                                                             | 12 |
| 圖十三、液相金屬還原法製備 NZVI                                                                                   | 13 |
| 圖十四、聚丙烯/殼聚糖酸/生物炭複合材料同時改善氮循環和固定重金屬                                                                    | 14 |
| 圖十五、(上)抽穗期植株生長情形比較；(下)栽培結束時植物根部的重金屬累積                                                                | 14 |
| 圖十六、水稻田中重金屬鎘的物質流向                                                                                    | 15 |
| 圖十七、盆栽種植生菜分析土壤重金屬流向試驗配置                                                                              | 15 |
| 圖十八、盆栽種植油菜生長 30 天後照片                                                                                 | 16 |
| 圖十九、本計畫研究架構圖                                                                                         | 17 |
| 圖二十、殼聚糖/海藻酸鈉/生物炭水凝膠球珠 (CS/ALG/BC) 製作流程                                                               | 18 |
| 圖二十一、負載奈米級零價鐵之步驟                                                                                     | 19 |
| 圖二十二、本計畫進行模擬水田/旱田大盆試驗及質量平衡模式示意圖                                                                      | 21 |
| 圖二十三、本計畫進行盆栽試驗之示意圖                                                                                   | 22 |
| 圖二十四、本研究進行重金屬質量平衡示意圖                                                                                 | 23 |
| 圖二十五、本計畫研擬運用新穎複合材料進行土壤污染整治之流程                                                                        | 25 |
| 圖二十六、殼聚糖/海藻酸鈉/生物炭水凝膠球珠 (CS/ALG/BC) 製作                                                                | 27 |
| 圖二十七、殼聚糖/海藻酸鈉/生物炭水凝膠球珠 (CS/ALG/BC) 顯微鏡影像                                                             | 28 |
| 圖二十八、殼聚糖/海藻酸鈉/生物炭水凝膠球珠 (簡稱 CS/ALG/BC) 結構                                                             | 28 |
| 圖二十九、本計畫負載奈米級零價鐵過程之剪影                                                                                | 29 |
| 圖三十、NZVI 載於殼聚糖/海藻酸鈉/生物炭水凝膠球珠 (CS/ALG/BC) 之電子顯微鏡                                                      |    |



## 圖目錄

|                                                       |    |
|-------------------------------------------------------|----|
| (SEM) 影像 .....                                        | 30 |
| 圖三十一、奈米級零價鐵殼聚醣/海藻酸鈉/生物炭水凝膠球珠(簡稱 NZVI/CS/ALG/BC)       |    |
| 結構示意 .....                                            | 30 |
| 圖三十二、NZVI/CS/ALG/BC 的吸附容量曲線：(A) CU；(B) PB；(C) CR..... | 32 |
| 圖三十三、應用偽一階動力學模型模擬 NZVI/CS/ALG/BC 吸附重金屬：(A) CU、(B)     |    |
| PB、(C) CR.....                                        | 34 |
| 圖三十四、應用偽二階動力學模型模擬 NZVI/CS/ALG/BC 吸附重金屬：(A) CU、(B)     |    |
| PB、(C) CR.....                                        | 36 |
| 圖三十五、應用 LANGMUIR 等溫吸附模型模擬結果：(A)CU；(B) PB；(C) CR ..... | 40 |
| 圖三十六、應用 FREUNDLICH 等溫吸附模型模擬結果：(A)CU；(B) PB；(C) CR...  | 42 |
| 圖三十七、土壤重金屬殘留隨時間減少 .....                               | 47 |
| 圖三十八、盆栽試驗配置 .....                                     | 50 |
| 圖三十九、盆栽試驗施行情況 .....                                   | 53 |
| 圖四十、分析對照組（未添加材料）CR 流向 .....                           | 54 |
| 圖四十一、實驗組（添加材料）CR 流向 .....                             | 55 |



## 表目錄

|                                           |    |
|-------------------------------------------|----|
| 表一、本研究計畫甘特圖 .....                         | 4  |
| 表二、綠色土壤改良劑進行金屬固定機制、改良劑優/缺點及永續性層面 .....    | 5  |
| 表三、彙整 NZVI/CS/ALG/BC 材料吸附容量 .....         | 31 |
| 表四、NZVI/CS/ALG/BC 吸附重金屬偽一階動力學模型模擬結果 ..... | 35 |
| 表五、NZVI/CS/ALG/BC 吸附重金屬偽二階動力學模型模擬結果 ..... | 37 |
| 表六、LANGMUIR 等溫吸附模型模擬參數 .....              | 41 |
| 表七、應用 FREUNDLICH 等溫吸附模型模擬參數 .....         | 43 |
| 表八、各種生物質衍生物吸附材料用於重金屬去除之熱力學模型參數 .....      | 43 |
| 表九、土壤重金屬殘留情況 .....                        | 46 |
| 表十、本計畫建立盆栽試驗配置說明 .....                    | 51 |
| 表十一、土壤、滲流水、作物及水凝膠材料累積重金屬含量 .....          | 55 |

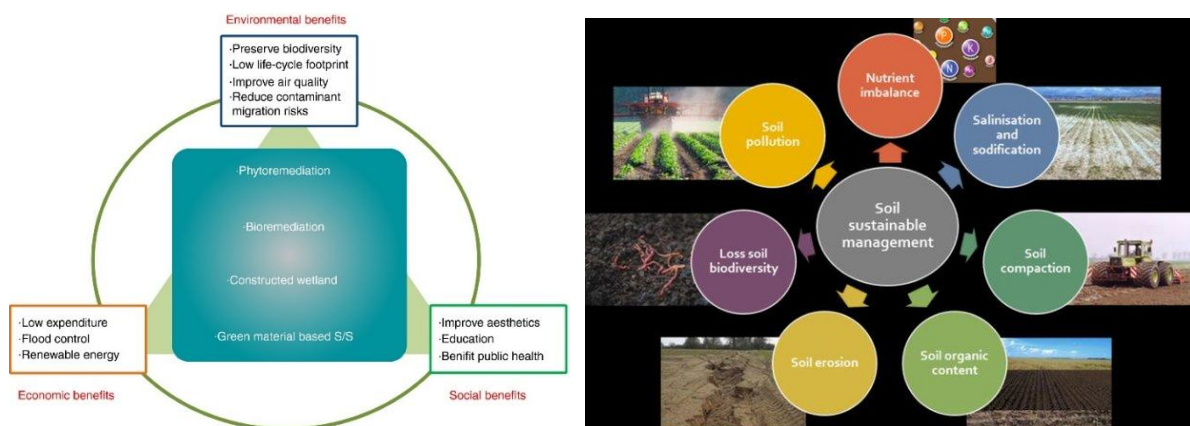


表目錄



## 第一章、前言

土壤中積累重金屬對作物安全及生態系產生潛在風險，威脅土壤資源之永續利用和管理。儘管許多修復技術，例如固定、土壤沖洗、電修復和化學氧化/還原等可用於土壤中重金屬固定、去除或解毒，但對環境、社會和經濟的影響與這些傳統方法相關影響阻礙其永續性。隨著「綠色永續整治（Green and Sustainable Remediation，簡稱 GSR）」發展，許多研究以更永續作法極大化環境效益，包括使用循環資材、採用基於自然解方（Nature-Based Solutions，簡稱 NbS）及節約能源等。NbS 定義為「受自然啟發和支持的解決方案，具有成本效益，同時提供環境、社會和經濟效益，並有助於增強抵禦能力」。於土壤復育及修復領域中，包括植物修復（利用植物）、生物修復（微生物）和人工濕地（整個濕地生態系統）；此外，與傳統的水泥基固化/穩定相比，使用天然或廢棄物衍生的綠色材料（例如天然礦物和生物炭）進行固定還可以提供環境、社會和經濟效益 [1]。另一方面，「永續土壤管理（Sustainable Soil Management，簡稱 SSM）」概念近年由歐盟執委會提出，係指以保護、恢復和改善土壤品質為目標，涉及土壤保持、改良、恢復、施肥和健康之農業活動，常見可採取管理措施（例如：耕地轉草地、稻稈還田、減少耕犁和覆蓋作物），增加農地土壤之碳儲量 [2]。



資料來源：（左）[1]；（右）[2]。

圖一、（左）基於自然解方土壤修復之環境、經濟和社會效益；（右）永續土壤管理概念



## 第一章、前言





## 第二章、研究目的

## 第二章、研究目的

本計畫基於本團隊前（111-112）年度執行成果，於 111 年度方法直接使用原料皆為商業化學品進行合成，112 年度開發生物質廢棄物資源化複合材料製備程序轉為從農業剩餘資材（蝦殼）當原料，萃取其殼聚醣當作原料，開發生物質衍生炭水凝膠複合材料，並使用受污染土壤重金屬吸附，建立複合材料之反應動力學與等溫吸附模型，並初步進行材料脫附再生測試。今（113）年度持續蒐集國際間土壤綠色永續整治材料最新進展，精進本土化生物基水膠循環材料製備程序（朝向改質複合材料使得後續易於從土壤中分離回收），並將研究重點放在試驗規模擴大，包括：模擬水田/旱田大盆試驗、建立土壤重金屬流向分析及質量平衡等；同時，研擬材料標準施用流程，並分析材料製備成本、程序碳排放及環境效益，以作為未來模場計畫設計參考依據。



圖二、過去研究成果及今年度工作重點差異說明

本研究計畫主要研究目標包括：

- 持續蒐集國際間土壤綠色永續整治材料最新進展，精進本土化生物基水膠循環材料製備程序。
- 進行模擬水田/旱田大盆試驗，建立土壤重金屬流向分析及質量平衡。
- 建立複合材料之反應動力學與等溫吸附模型，評估生物基水膠循環材料之環境穩定性，研提施用頻率及劑量等標準施用流程。
- 進行材料製備成本分析，評估程序碳排放及環境效益（例如：作物安全、土壤保水、土壤健康、氣候變遷土壤韌性提升等面向）。

本研究計畫執行甘特圖詳如表一所示，執行重點包括：蒐集國際間土壤綠色永續整治材料最新進展，精進本土化生物基水膠循環材料製備程序；模擬水田/旱

第二章、研究目的

田大盆試驗，建立土壤重金屬流向分析及質量平衡；研擬材料標準施用流程，並分析材料製備成本、程序碳排放及環境效益等。執行方法詳如第四章所說明。

表一、本研究計畫甘特圖

| <div>年月</div> <div>工作項目</div>                                                                                                                                                                                                                                | 1   | 2   | 3   | 4                                                                                        | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  | 13   | 備註 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|----|
| 蒐集國際間土壤綠色永續整治材料進展                                                                                                                                                                                                                                            |     |     |     |                                                                                          |     | ※   |     |     |     |     |     |     |      |    |
| 製備生物基水膠循環材料                                                                                                                                                                                                                                                  |     |     |     |                                                                                          |     |     | ※   |     |     |     |     |     |      |    |
| 複合材料性質分析                                                                                                                                                                                                                                                     |     |     |     |                                                                                          |     |     | ※   |     |     |     |     |     |      |    |
| 複合材料之反應動力學與等溫吸附模型                                                                                                                                                                                                                                            |     |     |     |                                                                                          |     |     | ※   |     |     |     |     |     |      |    |
| 模擬水田/旱田大盆試驗                                                                                                                                                                                                                                                  |     |     |     |                                                                                          |     |     | ※   |     |     |     | ※   |     |      |    |
| 土壤重金屬流向分析及質量平衡模型                                                                                                                                                                                                                                             |     |     |     |                                                                                          |     |     |     |     |     |     |     | ※   |      |    |
| 成本分析                                                                                                                                                                                                                                                         |     |     |     |                                                                                          |     |     |     |     |     |     |     | ※   |      |    |
| 研擬材料標準施用流程                                                                                                                                                                                                                                                   |     |     |     |                                                                                          |     |     |     |     |     |     |     | ※   |      |    |
| 期中/期末報告                                                                                                                                                                                                                                                      |     |     |     |                                                                                          |     |     | ※   |     |     |     |     | ※   | ※    |    |
| 工作進度估計百分比<br>( 累 積 數 )                                                                                                                                                                                                                                       | 10% | 15% | 20% | 25%                                                                                      | 35% | 45% | 55% | 60% | 70% | 80% | 90% | 95% | 100% |    |
| 預定查核點                                                                                                                                                                                                                                                        | 期中  |     |     | 1. 完成國際間土壤綠色永續整治材料進展文獻蒐集<br>2. 完成生物基水膠循環材料製備及性質分析<br>3. 完成複合材料之反應動力學與等溫吸附模型<br>4. 進行大盆試驗 |     |     |     |     |     |     |     |     |      |    |
|                                                                                                                                                                                                                                                              | 成果  |     |     | 1. 完成大盆試驗<br>2. 完成土壤重金屬流向分析及質量平衡模型<br>3. 完成成本分析並研擬材料標準施用流程                               |     |     |     |     |     |     |     |     |      |    |
| 說明：<br>1、 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。<br>2、 「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。<br>3、 「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。<br>4、 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。 |     |     |     |                                                                                          |     |     |     |     |     |     |     |     |      |    |

第三章、文獻探討

3.1 永續韌性整治

過去受污染土壤被認為是危險廢棄物，由於實施成本較低，掩埋是最常見之處理法，然這種做法是由於錯誤地將污染土壤等同於廢棄物，從而將廢棄物處理技術應用於土壤修復。於 2000 年代初期，「綠色修復」(Green Remediation) 概念出現，除以清潔土壤為最終目標之外，此概念還旨在減少污染本身和所採用修復技術對環境之影響。為了實現這些目標，需要對修復專案的每個階段之環境、社會、經濟和技術部門進行全面評估，此即為創新「綠色永續整治」(Green and Sustainable Remediation，簡稱 GSR) 之核心原則，考慮永續修復項目的環境效益、生命週期影響、節能、資源回收、廢棄物再利用和社會經濟影響，提出所選技術應確保環境和人類安全及永續性，因此，應使用適當工具對修復方法之永續性，進行定性和定量評估。自 2010 年代至今，GSR 原則再被提升為「永續韌性整治」(Sustainable Resilient Remediation，簡稱 SRR)，強調氣候變遷影響對於土壤污染預防或整治所造成之衝擊，及如何因應氣候變遷適當調整相關作為。

常見綠色土壤改良劑有生物炭、工業廢棄材料、天然礦物、金屬氧化物以及綠色合成製備奈米材料。Wang 等人 [1] 將常見之綠色土壤改良劑依據金屬固定機制、改良劑優/缺點及永續性層面做探討及分析，詳如表二所示。

表二、綠色土壤改良劑進行金屬固定機制、改良劑優/缺點及永續性層面

| 材料   | 金屬固定機制                                                     | 優點                                                                                        | 限制                                                                       | 永續性層面                                                                                                                                                                      |
|------|------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 生物炭  | <div>➢ 表面錯合</div> <div>➢ 靜電交互作用</div> <div>➢ 與礦物質共沉澱</div> | <div>● 生物質廢棄物的利用，包括作物殘渣、木材、動物廢棄物和污水污泥</div> <div>● 易於製造（即熱解）</div> <div>● 功能可調，孔洞發達</div> | <div>● 受污染生物質衍生之生物炭在施用於土壤後可能會釋放金屬</div> <div>● 生物炭含有多環芳烴，可釋放到土壤環境中</div> | <div>● 環境—生物炭將碳儲存在地下、生物炭固定重金屬、提高作物產量等。</div> <div>● 社會—職業風險高，社會接受度低。</div> <div>● 經濟—生物炭是一種廢棄物衍生材料。生物炭的生產成本通常低於每噸 500 美元。成本甚至可能低至每噸 50 美元。生物炭製造過程中產生的生物油和合成氣可用作清潔能源。</div> |
| 煤粉煤灰 | <div>➢ 與粉煤灰中金屬氧化物的表面錯合沉澱</div> <div>➢ 石灰作用</div>           | 每年產生大量的粉煤灰（即 7.8 億噸）。將粉煤灰施用於土壤提供一種正確處理方法                                                  | 粉煤灰本身可能受到重金屬和各種有機污染物污染                                                   | <div>● 環境—煤粉灰的應用增加了金屬和有機污染物釋放到環境中的風險。</div> <div>● 社會—職業風險高，社會接受度低。</div> <div>● 經濟—成本極低，每噸低於 40 美元，甚至免費。</div>                                                            |



## 第三章、文獻探討

| 材料   | 金屬固定機制                                                                                                        | 優點                                                                                                                | 限制                                                                                                              | 永續性層面                                                                                                                                                                                                                                                    |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 赤泥   | <ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 與赤泥中金屬氧化物之表面錯合沉澱</li> <li>➢ 石灰作用</li> </ul>                          | 每年產生大量赤泥(即 1.2 億噸)。將赤泥施用於土壤提供正確處理赤泥的方法                                                                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 赤泥施入土壤後重金屬釋放</li> <li>● 赤泥通常具有較高 pH 值 (即 &gt; 12), 不適合砷污染土壤</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 環境—赤泥應用增加金屬釋放到環境之風險。這種土壤改良劑的高 Na 含量 (即高達 <math>6,090 \text{ mg kg}^{-1}</math>) 和高 pH 值會導致土壤鹽分升高, 並使土壤 pH 值上升到不可接受的水平 (即 &gt; 9)。</li> <li>● 社會—職業風險高, 社會接受度低。</li> <li>● 經濟—成本極低, 每噸低於 40 美元, 甚至免費。</li> </ul> |
| 黏土礦物 | <ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 表面錯合</li> <li>➢ 羥基(-OH)沉澱</li> <li>➢ 離子交換</li> <li>➢ 浸灰作用</li> </ul> | 粘土礦物在自然界中蘊藏豐富                                                                                                     | 未改質黏土表現出較差之金屬穩定性能                                                                                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 環境—基於黏土固定化對土壤造成的干擾很小; 然而, 單獨使用黏土可能無法有效穩定金屬。</li> <li>● 社會—某些類型的黏土礦物 (如坡縷石) 可能對人類致癌。</li> <li>● 經濟—成本相對較低, 每噸 12 美元至 162 美元不等。</li> </ul>                                                                        |
| 氧化鐵  | <ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 表面錯合</li> <li>➢ 沈澱</li> </ul>                                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 同時固定含氧陰離子和金屬陽離子非常有用, 特別是對於被砷和重金屬污染土壤</li> <li>● 鐵氧化物在自然界中含量豐富</li> </ul> | 無文獻記載                                                                                                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 環境—氧化鐵已被證明是最有效且具有長期有效性的土壤改良劑。</li> <li>● 社會—職業風險小, 社會接受度高。</li> <li>● 經濟—成本相對較低, 每噸低於 100 美元。</li> </ul>                                                                                                        |
| 氧化鎂  | <ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 沉澱</li> <li>➢ 凝固</li> </ul>                                          | MgO 水合作用促進金屬封裝和化學沉澱                                                                                               | MgO 施用會導致機械強度和土壤 pH 值升高, 不適合農業土壤的修復                                                                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 環境—長期來看, 水合產物 <math>\text{Mg}(\text{OH})_2</math> 可有效穩定金屬。</li> <li>● 社會—職業風險小。</li> <li>● 經濟—成本相對較高, 通常在每噸 500 美元以上。</li> </ul>                                                                                |
| 奈米材料 | <ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 氧化還原</li> <li>➢ 沉澱</li> <li>➢ 表面錯合</li> </ul>                        | 對重金屬具有高反應性                                                                                                        | 與其應用相關的生態風險不容忽視                                                                                                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>● 環境—修復效果優異, 但生態風險較高。</li> <li>● 社會—社會接受度低。</li> <li>● 經濟—成本較高, 阻礙實際應用。</li> </ul>                                                                                                                                |

資料來源：[1]。

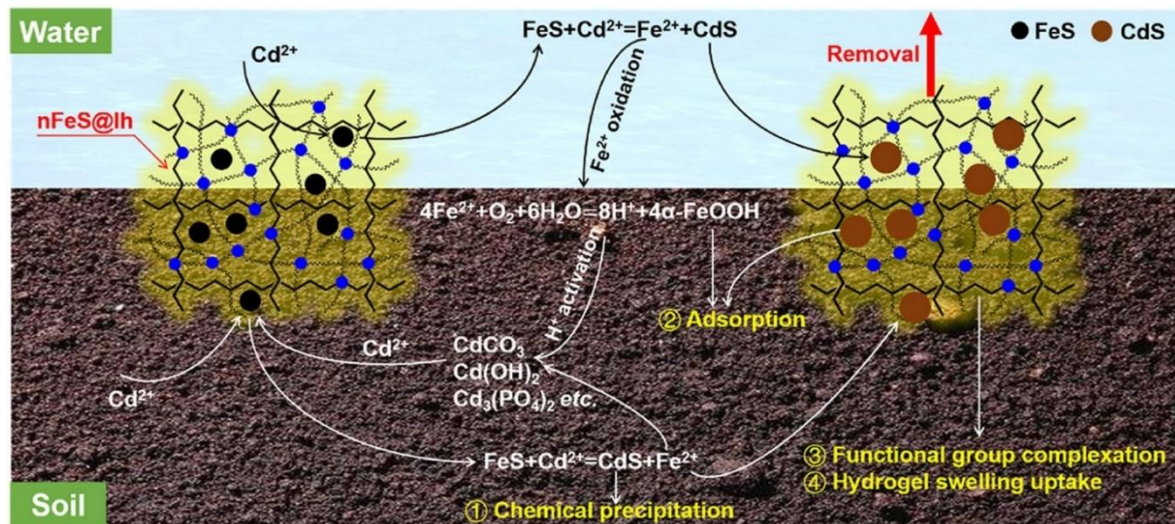




### 3.2 土壤綠色永續整治材料

近年來國際間應用水凝膠技術於固定及除去水與土壤中重金屬的研究已發展成熟，從水凝膠的原材料的選擇、材料製程與表面修飾改良，也朝向永續整治之方向前進。許多研究也將水凝膠材料加入鐵元素（例如：零價鐵、氧化鐵、亞鐵離子等），一方面可利用鐵元素本身的磁性，透過磁吸方式將水凝膠材料從土壤或水中取出；另一方面鐵元素對植物生長有益，可透過離子交換之方式進入土壤中。

Liu 等人 [3] 開發硫化亞鐵（FeS）奈米顆粒木質素水凝膠複合材料。木質素基水凝膠繼承木質素的天然機械強度和環境穩定性，FeS 奈米粒子有效吸附  $\text{Cd}^{2+}$ ，並透過產生  $\text{H}^+$  增強  $\text{Cd}^{2+}$  從土壤中吸附。複合材料之高吸附容量（ $833.3 \text{ g kg}^{-1}$ ）歸因於四種機制，包括透過化學反應沉澱硫化鎘（CdS）、木質素錯合、水凝膠膨脹、和奈米顆粒吸附，詳如圖三所示。



資料來源：[3]

圖三、硫化亞鐵奈米顆粒木質素水凝膠複合材料吸附土壤中鎘之機制據

相似地，Li 等人 [4] 開發負載奈米級零價鐵/新型多孔纖維素/殼聚糖複合球（nZVI/PCS，圖四），用於去除水溶液中的  $\text{Cd}(\text{II})$  和整治污染土壤中的鎘，nZVI/PCS 中之  $\text{Fe}(0)$  和氨基透過沉澱或錯合作用在去除  $\text{Cd}(\text{II})$  方面具重要影響，研究結果顯示，nZVI/PCS 可顯著增強鎘之固定化，使整治後污染土壤中大多數可交換鎘，轉化為鐵鎂單鍵氧化物和有機物。



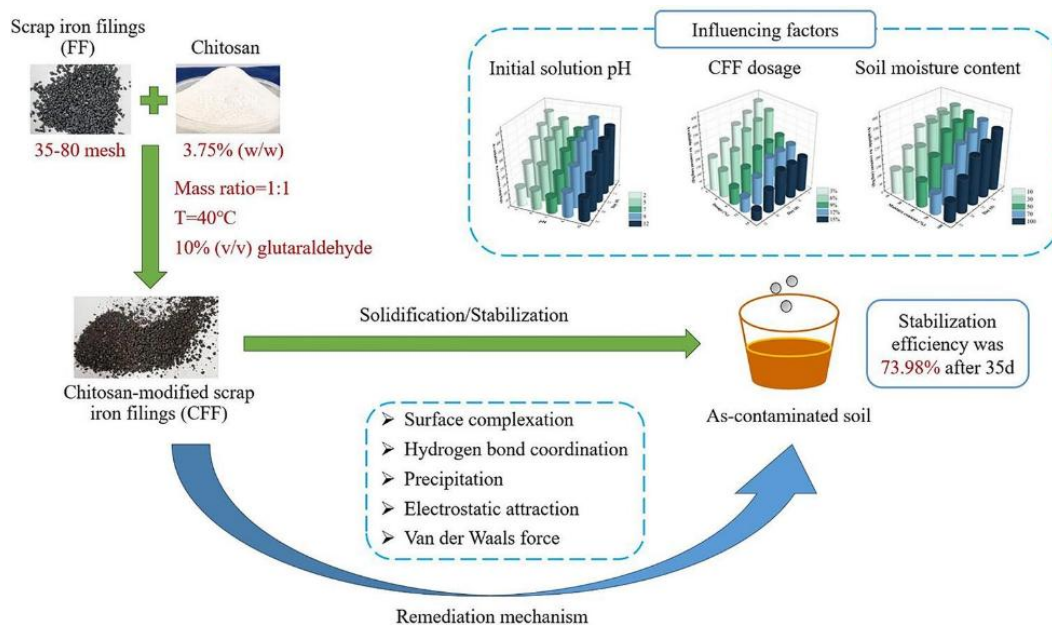
## 第三章、文獻探討



資料來源：[4]

圖四、文獻中運用 nZVI/PCS 複合材料吸附土壤中鎘之機制

Xu 等人 [5] 使用工業廢鐵屑和殼聚糖，製備殼聚糖改質廢鐵屑複合材料，以穩定受砷污染土壤（圖五）。最佳製備條件為殼聚糖濃度 3.75%（w/w）、殼聚糖與廢鐵屑比 1：1、最佳改性溫度 40 °C、鐵屑粒徑 35~80 目、10% 戊二醛交聯 6 h，砷穩定化效率約為 74%。吸附行為與偽二階動力學模型和 Langmuir 等溫吸附模型一致，於 pH=5~6 時達到最佳吸附效果。複合材料穩定砷之機制包括表面錯合、氫鍵協同作用、沉澱、靜電吸引和凡得瓦力等。



資料來源：[5]

圖五、使用工業廢鐵屑和殼聚糖製備複合材料以穩定受砷污染土壤

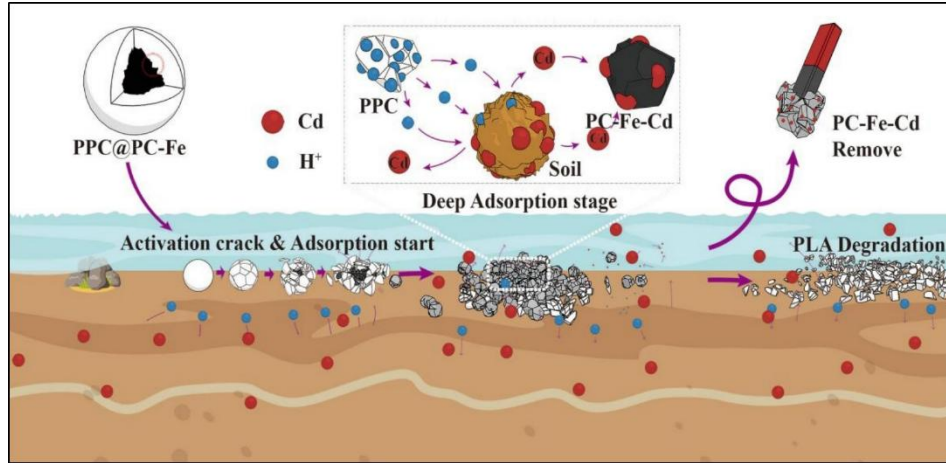
Hu 等人 [6] 開發一種自分離之核殼球，將活化和吸附結合在一個載體中，以有效地從土壤中去鎘。當將核殼球球體應用於水稻田等被水淹沒的土壤時，殼





## 第三章、文獻探討

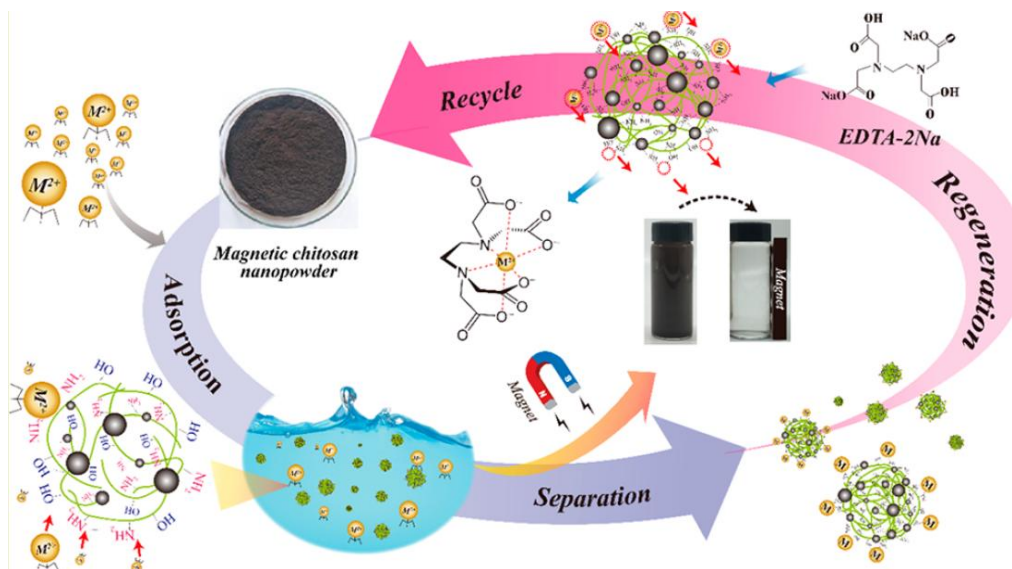
會逐漸釋放活化劑（檸檬酸）與土壤中鎘結合；同時，部分暴露之內芯（殼聚糖水凝膠/ $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ）於吸水後膨脹，加速殼體解體，導致芯殼完全分離。完全暴露之核心可有效地捕獲遷移到水中之活化重金屬，吸附完成後，藉由內芯中  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ，用磁鐵將帶有  $\text{Cd}^{2+}$  之核心從土壤中回收，詳如圖六所示。



資料來源：[6]

圖六、開發一種自分離之核殼球吸附土壤中之鎘並用磁鐵將其從土壤中回收

Pu 等人 [7] 利用殼聚糖和不同鐵離子之前驅體，採共沉澱合成法開發水分散性殼聚糖/ $\text{Fe}_3\text{O}_4$  奈米複合材料。於  $\text{pH} = 5.5$  和溫度  $25^\circ\text{C}$  時， $\text{Pb}^{2+}$  和  $\text{Cu}^{2+}$  吸附容量分別約為  $113.4 \text{ mg/g}$  和  $92.3 \text{ mg/g}$ 。隨後，透過磁性將複合材料分離回收，並藉由  $\text{EDTA-2Na}$  洗滌方法再生，使用五次後表現出更高之穩定性和可重複使用性，概念示意圖詳如圖七所示。



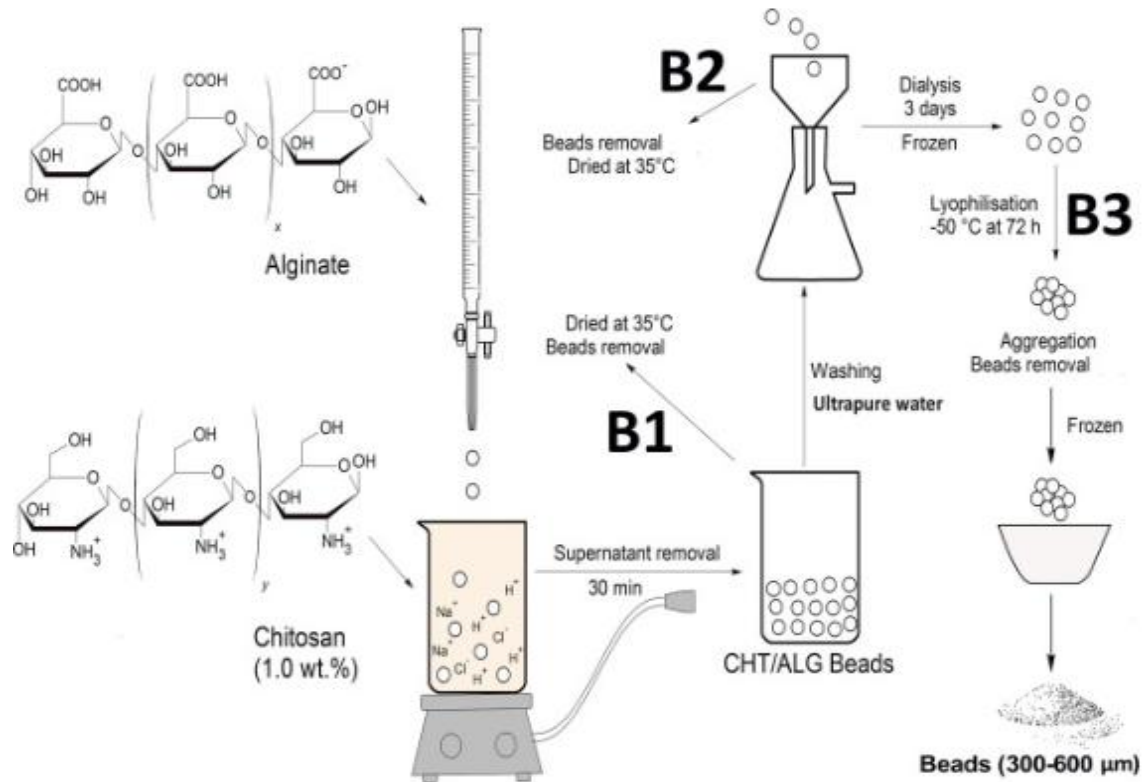
資料來源：[7]

圖七、開發水分散性殼聚糖/ $\text{Fe}_3\text{O}_4$  奈米複合材料吸附  $\text{Pb}^{2+}$  和  $\text{Cu}^{2+}$  並分離、再生、循環利用



### 第三章、文獻探討

Facchi 等人 [8] 於製作水凝膠過程中，利用殼聚糖與海藻酸鈉形成水凝膠，提供三種方式進行比較，詳如圖八。結果顯示，於添加  $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$  ( $8 \pm 3$  nm) 顯著改變複合材料之表面形貌，而磁性複合材料水凝膠於 pH 6.0 時表現出磁性和  $-76.8$  mV 介達電位；此外，此磁性複合材料之最大吸附容量 ( $Q_m$ ) 約為  $234.8 \text{ mg g}^{-1}$ 。



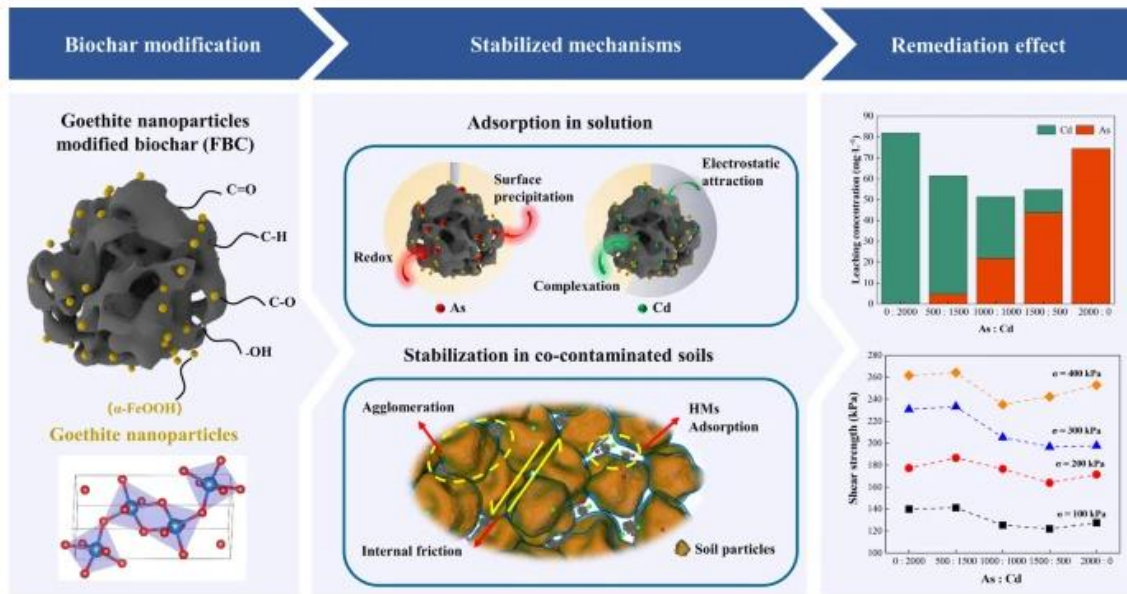
資料來源：[8]

圖八、製作殼聚糖與海藻酸水凝膠珠之流程

Feng 等人 [9] 開發針鐵礦納米顆粒改性生物炭（簡稱 FBC），嘗試解決傳統生物炭通常用於處理不同電荷重金屬共污染有效性較弱之挑戰。FBC 主要透過氧化還原和表面沉澱固定  $\text{As(V)}$ ，同時透過靜電吸引和錯合固定  $\text{Cd(II)}$ ，導致土壤團聚，最終使污染土壤表面更粗糙，滑動摩擦更強。FBC 對  $\text{As(V)}$  和  $\text{Cd(II)}$  之最大吸附容量分別約為  $32.0 \text{ mg/g}$  和  $129.3 \text{ mg/g}$ 。此外，受污染土壤中所需之 FBC 劑量通常比受污染水中所需之 FBC 劑量高約 57%。FBC 促進團聚體 ( $0.25\sim 2 \text{ mm}$ ) 之形成和混合污染土壤之剪切強度，分別提高 21.4% 和 8.3%，如圖九。



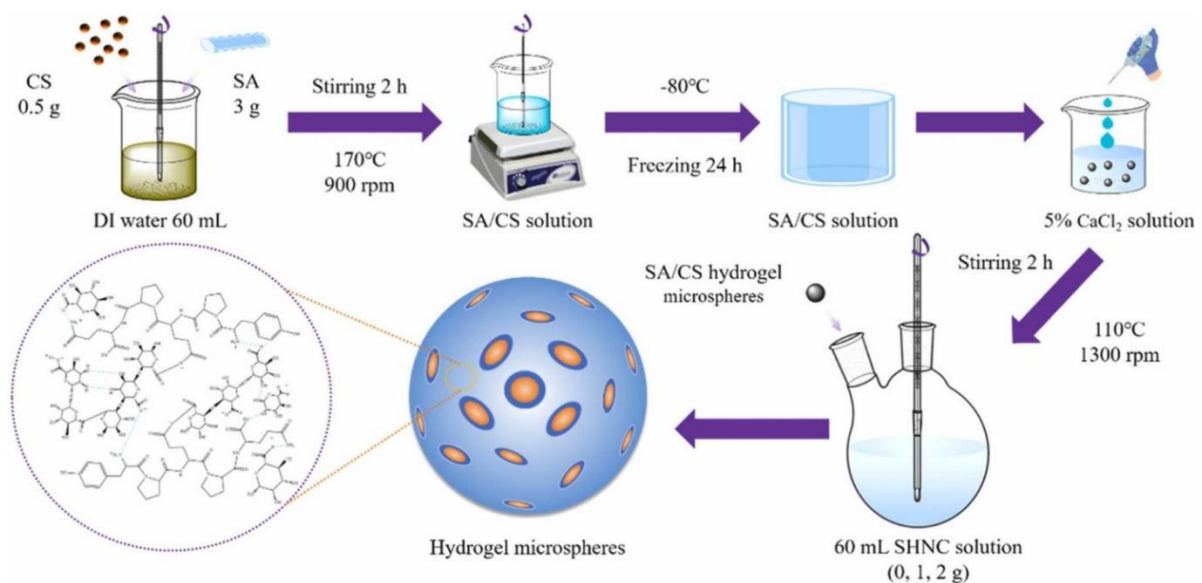
## 第三章、文獻探討



資料來源：[9]

圖九、針鐵礦納米顆粒改性生物炭（FBC）固定共污染土壤的 As(V)和 Cd(II)

Yu 等人 [10] 採用離子交聯法制備大豆殼納米纖維素/海藻酸鈉/殼聚糖（SHNC/SA/CS）水凝膠微球，製作過程如圖九。利用水凝膠微球吸附廢水中存在之 Pb(II)和 Cu(II)，表現出優異韌性（18.67 MPa）和親水性（21.43°±0.65°）及吸附性能（去除率 80%）。



資料來源：[10]

圖十、殼聚糖基水凝膠微球的製備和形成機制

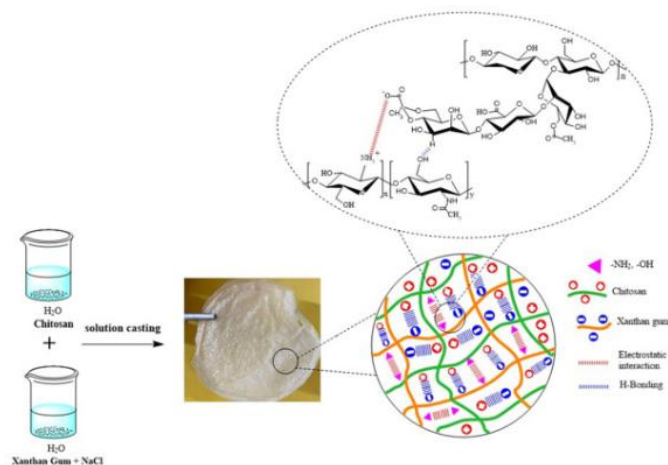
Rahmatpour 等人 [11] 開發一種以黃原膠（Xanthan Gum）和殼聚糖被自組裝物理交聯成可生物降解之水凝膠膜，詳如圖十一。處理水中的 Cd<sup>2+</sup>、Ni<sup>2+</sup>和 Cu<sup>2+</sup>





### 第三章、文獻探討

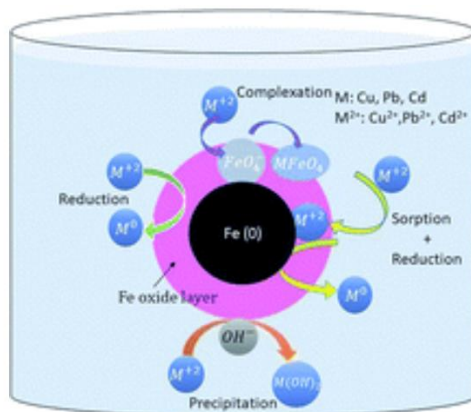
離子，對於 25 °C 時  $\text{Cd}^{2+}$ 、 $\text{Ni}^{2+}$  和  $\text{Cu}^{2+}$  離子，最大單層吸附容量分別為 152.3、144.8 和 139.7 mg/g；此外，生物膜能夠再生，允許金屬離子連續五個循環吸附和脫附。



資料來源：[11]

圖十一、黃原膠/殼聚糖生物膜製備示意圖

奈米金屬鐵 (nZVI) 一直被研究作為處理重金屬污染廢水之新手段，金屬鐵  $\text{Fe}(0)$ ，亦稱為零價鐵，於水相介質中極易被氧化，此氧化過程涉及電化學反應發生，具有陽極和陰極反應。陽極反應涉及鐵之溶解（形成可溶性離子產物或不溶性氧化物/氫氧化物），並與陰極上可氧化還原物質之還原結合。根據 Tarekegn 等人 [12] 研究，奈米零價鐵 (nZVI) 具有  $\text{Fe}(0)$  核心和鐵氧化物外殼，其中核心具有還原能力，外殼作為化學吸附和靜電相互作用的反應位點。還原、吸收、沉澱和礦化等機制在使用 nZVI 去除水相中的重金屬時發揮了作用。於高 pH 值下，氧化鐵殼帶負電荷並吸引金屬離子等陽離子。反應後，重金屬被隔離在固體 nZVI 表面，詳如圖十二所示。



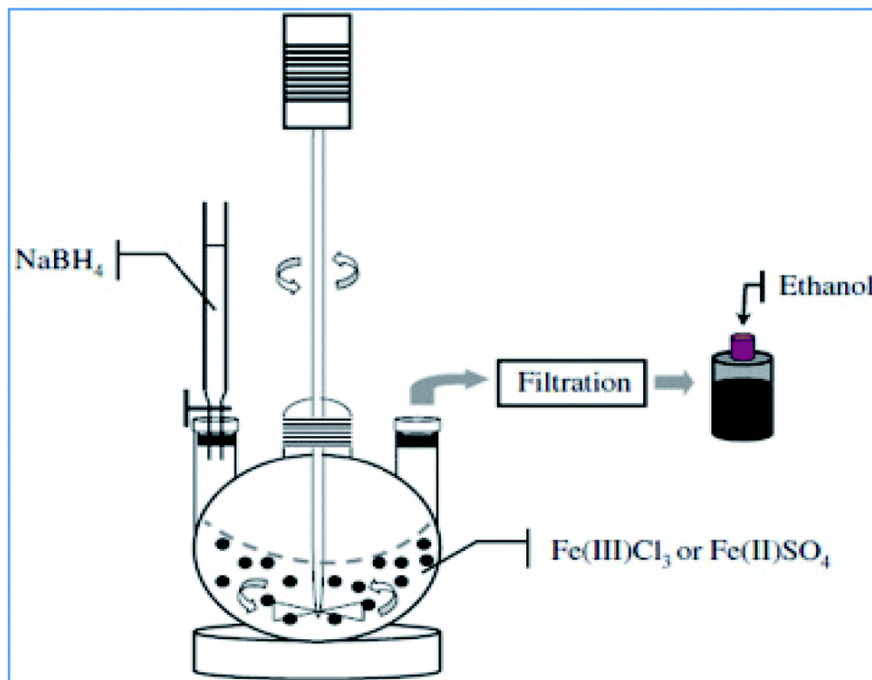
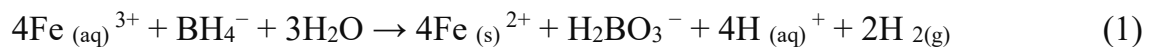
資料來源：[12]

圖十二、奈米零價鐵 (nZVI) 吸附重金屬機制



## 第三章、文獻探討

奈米零價鐵 (nZVI) 製備合成可透過將鐵鹽或化合物與強還原劑 (例如硼氫化鈉 ( $\text{NaBH}_4$ )) 發生反應來實現，將濃乙醇和  $\text{NaBH}_4$  製備之硼氫化物溶液於厭氧條件下劇烈攪拌，同時緩慢加入鐵 (三價鐵或亞鐵) 鹽溶液中。將產生之黑色沉澱物真空過濾，用去離子水或乙醇洗滌後進行乾燥，詳如公式(1)~(3)所示， $\text{Fe(III)}$ 還原為  $\text{Fe(II)}$ ；然後在過量還原劑存在下轉化為 nZVI [12]，如圖十三所示。



資料來源：[12]

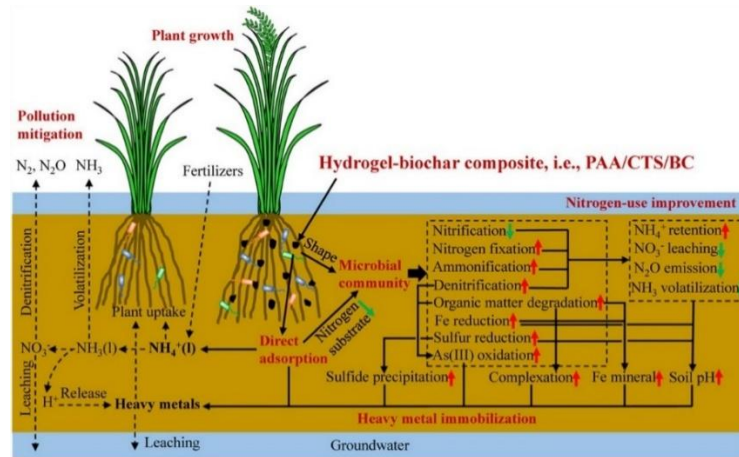
圖十三、液相金屬還原法製備 nZVI





### 3.3 應用綠色複合材料進行大盆栽試驗及重金屬質量平衡模式

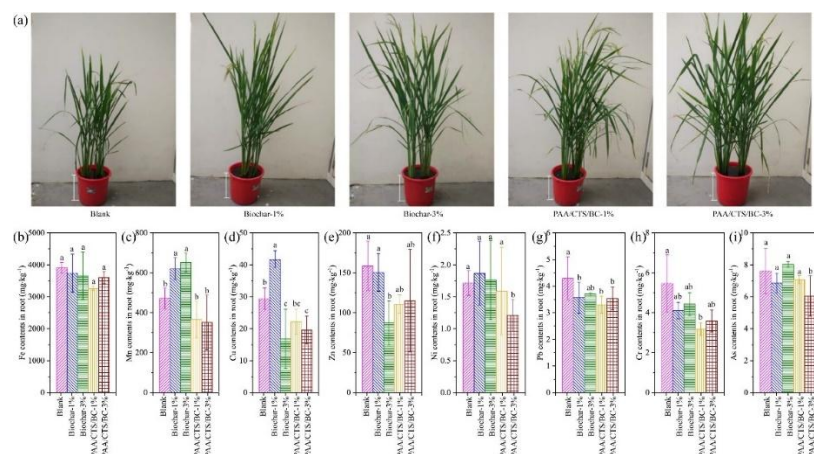
根據 Zhang 等人 [20] 研究，聚丙烯/殼聚醣/生物炭複合材料顯著促進土壤氮氣保留，並減少水稻種植過程中硝酸鹽積累，以及減少溫室氣體  $N_2O$  排放和空氣污染物  $NH_3$  排放，詳如圖十四所示。



資料來源：[20]

圖十四、聚丙烯/殼聚醣/生物炭複合材料同時改善氮循環和固定重金屬

於土壤中添加生物炭和聚丙烯/殼聚醣/生物炭複合材料顯著刺激水稻生長，添加生物炭和聚丙烯/殼聚醣/生物炭複合材料改良土壤，使水稻植株長得高且抽穗早，詳如圖十五(上)，因此，其根系、稻稈和穀粒之重量最終顯著增加，而水稻根部重金屬含量見圖十五(下)。整體而言，添加聚丙烯/殼聚醣/生物炭複合材料改善土壤根部重金屬（Fe、Mn、Cu、Zn、Ni、Pb、Cr、As）含量明顯低於對照組土壤。聚丙烯/殼聚醣/生物炭複合材料對植物根部重金屬累積的抑製作用強於生物炭，代表聚丙烯/殼聚醣/生物炭複合材料可以有效降低重金屬的生物可利用性和植物的吸收。



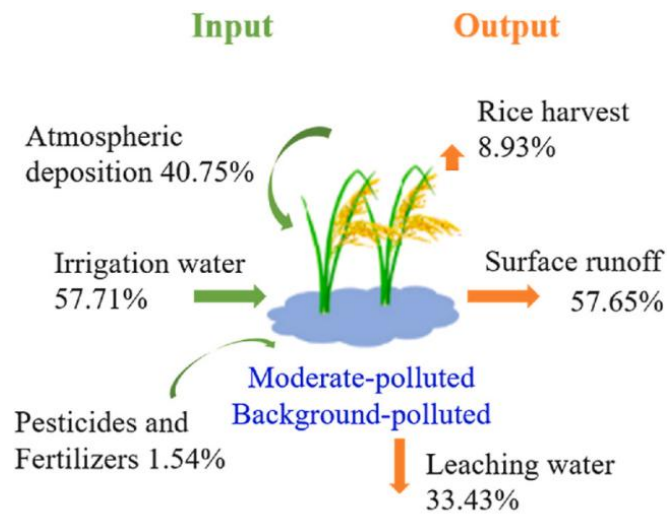
資料來源：[20]

圖十五、(上)抽穗期植株生長情形比較；(下)栽培結束時植物根部的重金屬累積



### 第三章、文獻探討

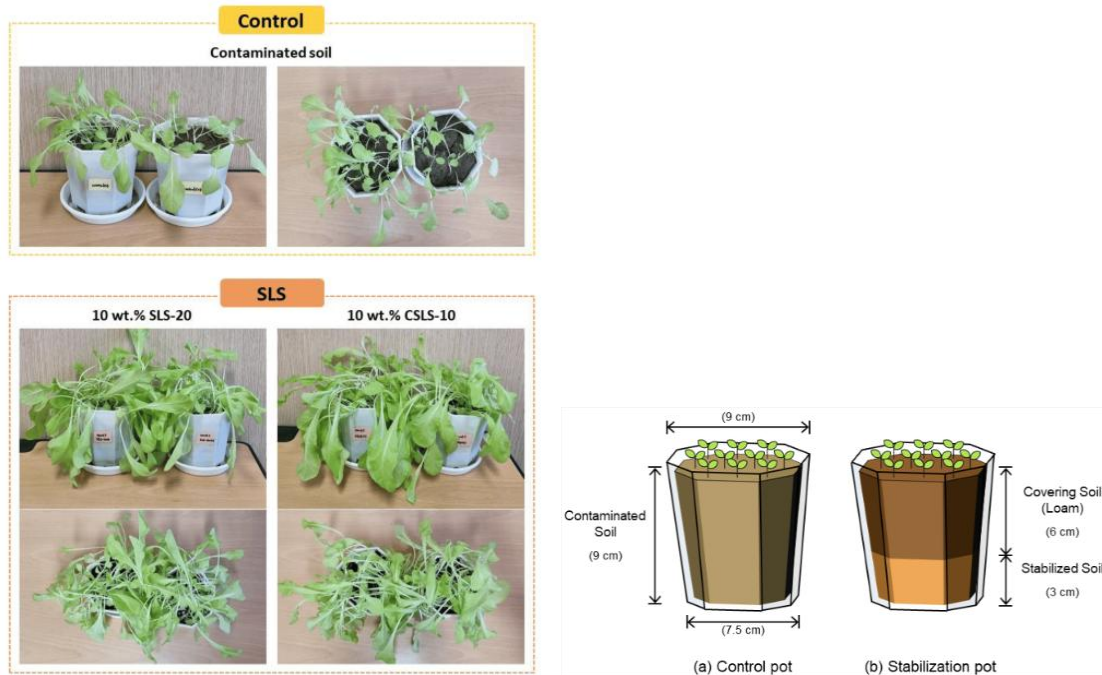
Mi 等人 [21] 研析水稻田中重金屬鎘物質之流向，詳如圖十六所示。研究結果發現：農藥、化學肥料、大氣沉降和灌溉水是農田土壤鎘之主要輸入途徑，而地表逕流、淋溶水和植物植體是農田土壤鎘之主要輸出途徑。



資料來源：[21]

圖十六、水稻田中重金屬鎘的物質流向

Park 等人 [22] 研究利用扇貝殼和海星去固定土壤重金屬，透過利用盆栽種植生菜，分析土壤重金屬流向，試驗配置詳如圖十七。根據研究結果，土壤鎘累積的主要來源來自灌溉水（約 55~61%），而主要移出為地表逕流（約 56~60%），透過該重金屬流向分析更能有效整治及防範重金屬污染。



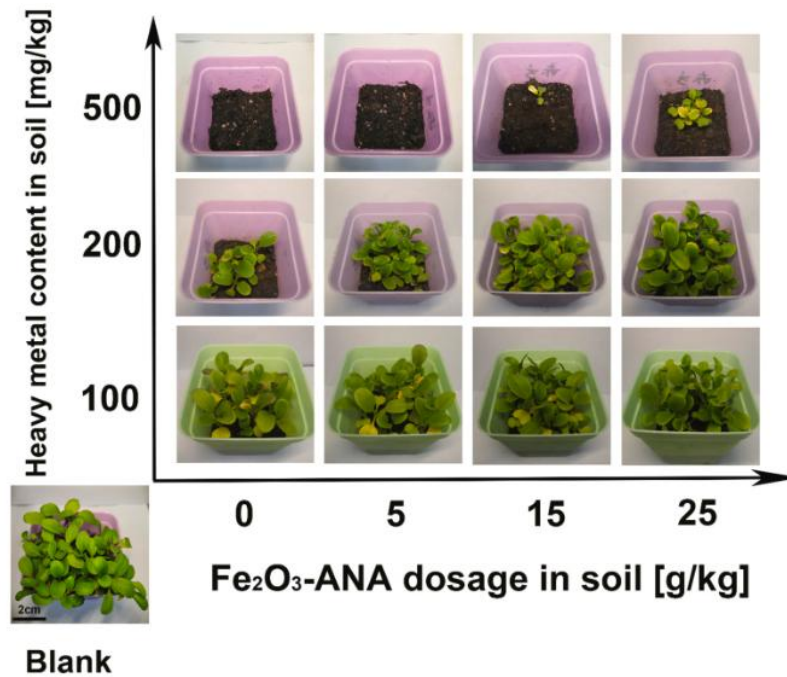
資料來源：[22]

圖十七、盆栽種植生菜分析土壤重金屬流向試驗配置



### 第三章、文獻探討

根據 Yang 等人 [23] 研究，利用鹼性廢棄物赤泥回收氧化鐵，並修復土壤重金屬污染。此研究比較不同土壤重金屬濃度與氧化鐵-沸石施用量，觀察盆栽種植之油菜 30 天後生長情況，詳如圖十八所示。研究結果顯示：隨著添加更多的  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -ANA， $\text{Cr}^{3+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{AsO}_2^-$  和  $\text{Pb}^{2+}$  之移動率降低。這些結果顯示  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -ANA 具有良好的土壤修復能力，同時可抑制重金屬在油菜中的生物積累並減少重金屬從土壤向生物圈的移動。



資料來源： [23]

圖十八、盆栽種植油菜生長 30 天後照片





## 第四章、研究方法與過程

本計畫旨在精進生物基水膠循環材料製備程序，並模擬水田/旱田大盆試驗，建立土壤重金屬流向分析及質量平衡；同時，研擬材料標準施用流程，並分析材料製備成本、程序碳排放及環境效益，以作為未來模廠計畫設計參考依據。本計畫整體研究架構及各工作項目之研究方法說明於後：

### 4.1 整體研究架構

本研究計畫架構圖如圖十九所示，執行重點包括：蒐集國際間土壤綠色永續整治材料最新進展，精進本土化生物基水膠循環材料製備程序；模擬水田/旱田大盆試驗，建立土壤重金屬流向分析及質量平衡；研擬材料標準施用流程，並分析材料製備成本、程序碳排放及環境效益等。



資料來源：本團隊繪製。

圖十九、本計畫研究架構圖

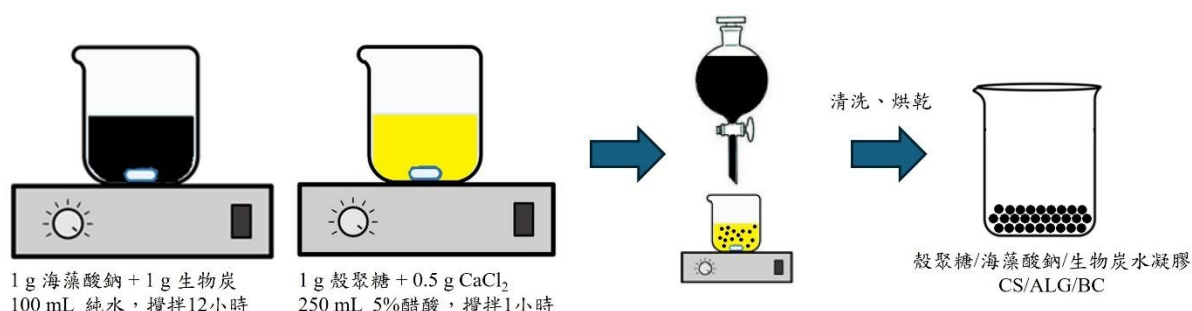


## 4.2 精進本土化生物基水膠循環材料製備程序

本研究將生物基水膠複合材料添加鐵進行磁性改質，並結合綠色化學原則，避免使用對環境有毒性之交聯劑。本研究將開發殼聚糖/海藻酸鈉/生物炭水凝膠球珠（CS/ALG/BC），透過將材料負載奈米零價鐵的方式行層新型材料奈米零價鐵/殼聚糖/海藻酸鈉/生物炭水凝膠（nZVI/CS/ALG/BC），一則是增加磁性，二則是奈米零價鐵對部分中金屬也有吸附作用

### 4.2.1 生物基水膠循環材料製備程序

首先是製備殼聚糖/海藻酸鈉/生物炭水凝膠球珠（CS/ALG/BC）的過程，如圖二十所示。先秤取 1 g 海藻酸鈉及 1 g 生物炭，用 100 mL 之純水溶解，因為海藻酸鈉溶解速率較慢，需攪拌至少 12 小時才不會結塊，最終呈現黑色稠狀液體。再來秤取 1 g 殼聚糖及 0.5 g 氯化鈣加到 250 mL 5 %醋酸溶液攪拌溶解（可以加溫至 60 度加速溶解）。待兩溶液皆溶解完畢，將海藻酸鈉溶液緩慢滴入殼聚糖溶液，因為海藻酸鈉溶液與殼聚糖溶液會形成不溶解之凝膠物，雖形狀不固定，但藉由海藻酸鈉與鈣離子會形成結構穩定之球膜，將海藻酸鈉與殼聚糖包覆，形成質地穩定的凝膠球珠，將球珠撈起，以純水與酒精清洗後放入烘箱（60 度）烘乾一天後，可得到殼聚糖/海藻酸鈉/生物炭水凝膠球珠（CS/ALG/BC）。此球珠吸水性佳，吸水後膨脹保水性佳，且內含生物炭幫助吸附重金屬。



資料來源：本團隊繪製。

圖二十、殼聚糖/海藻酸鈉/生物炭水凝膠球珠（CS/ALG/BC）製作流程

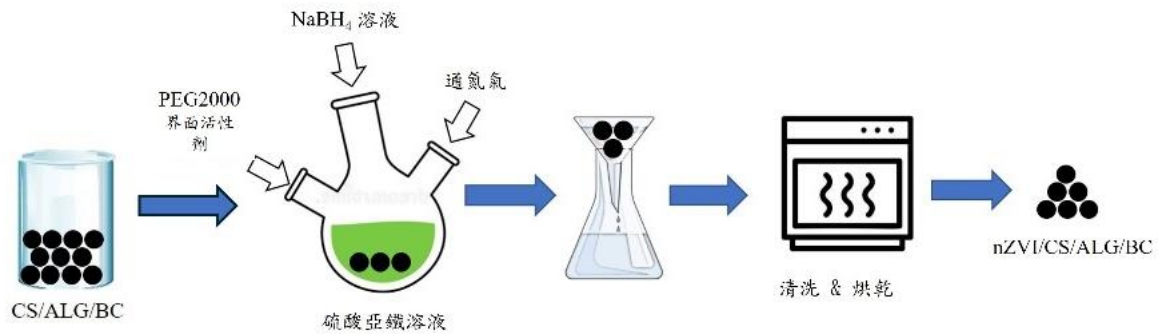
隨後，本計畫進行負載奈米級零價鐵於材料上，步驟說明如圖二十一所示。首先，準備 70 mL、濃度為 0.3 M 的硼氫化鈉（ $\text{NaBH}_4$ ）溶液；接著，配置濃度為 0.1 M 的硫酸亞鐵溶液，使用 100 mL 體積比為 3:7 的乙醇與去離子水（ $\text{EtOH}:\text{H}_2\text{O}$ ）混合溶劑。然後，將 1 g 的殼聚糖/海藻酸鈉/生物炭（CS/ALG/BC）水凝膠珠與 1 g PEG-2000 界面活性劑加入硫酸亞鐵溶液中。攪拌 1 小時後，通入氮氣（厭氧環境）並緩慢滴加  $\text{NaBH}_4$  溶液。反應完成後，將撈出後使用去離子水與乙醇各洗





#### 第四章、研究方法與過程

滌三次，最後將產物放入烘箱乾燥 24 小時，即可獲得奈米零價鐵/殼聚糖/海藻酸鈉/生物炭水凝膠 (nZVI/CS/ALG/BC) 複合材料。



資料來源：本團隊繪製。

圖二十一、負載奈米級零價鐵之步驟

#### 4.2.2 生物基水膠循環材料吸附試驗

首先分別配置濃度為 100、200 與 400 mg/L 的  $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$  與  $\text{Cr}^{3+}$  重金屬溶液。接著，取 1 g 已製備之 nZVI/CS/ALG/BC 複合材料，分別加入 100 mL 上述任一濃度的重金屬離子溶液中。反應過程中，於不同時間點 (0、5、10、20、30、40、50、60、80、100、120、150、180、210、240 分鐘) 各取 1 mL 溶液，並以去離子水稀釋至 10 mL。最後，使用電感耦合電漿發射光譜儀 (ICP-OES) 分析溶液中  $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$  與  $\text{Cr}^{3+}$  之含量變化，以及觀察是否有鐵進入溶液中。

#### 4.2.3 生物基水膠循環材料吸附動力學模擬與等溫吸附模型模擬

關於吸附動力學，本研究使用偽一階 (Pseudo-First-Order) 與偽二階 (Pseudo-Second-Order) 動力模型，描述重金屬於土壤中吸附固定行為與速率。偽一階與偽二階動力學模型常用來描述重金屬之吸附機制，其線性表示式分別如下所示：

$$\ln(Q_e - Q_t) = \ln Q_e - K_1 t \quad (4)$$

$$\frac{t}{Q_t} = \frac{1}{K_2 Q_e^2} + \frac{t}{Q_e} \quad (5)$$

其中， $Q_e$  ( $\text{mmol g}^{-1}$ ) 表示平衡時重金屬吸附量， $Q_t$  ( $\text{mmol g}^{-1}$ ) 表示在  $t$  時間吸附之重金屬重量。 $K_1$  ( $\text{min}^{-1}$ ) 與  $K_2$  ( $\text{g mmol}^{-1} \text{min}^{-1}$ ) 分別表示偽一階與偽二階反應模型之速率常數。

等溫吸附模型係用於研究定溫下吸附材和金屬離子之間在動態平衡相互作用與行為，其中，常見以 Langmuir 和 Freundlich 等溫吸附模型被認為是大多數金屬



#### 第四章、研究方法與過程

與殼聚糖水凝膠情況之最佳熱力學模型。本計畫規劃使用 Langmuir、Freundlich 及 Temkin 等溫吸附模型，計算此複合材料之相關熱力學性質。

Langmuir 等溫吸附模型基於三個基本假設：(1) 所有活性位點上之吸附可能性及親和力相同，即均勻吸附；(2) 僅為單層吸附；(3) 每個吸附點位不受其他相鄰點位影響其吸附能力。Langmuir 模型如下表示：

$$Q_e = \frac{K_L Q_{max} C_e}{1 + K_L C_e} \quad (6)$$

其中， $Q_{max}$  ( $\text{mmol g}^{-1}$ ) 為最大吸附量， $C_e$  ( $\text{mmol L}^{-1}$ ) 為達到吸附平衡時溶液內的重金屬濃度， $Q_e$  ( $\text{mmol g}^{-1}$ ) 為達到吸附平衡時的吸附量， $K_L$  ( $\text{g mmol}^{-1}$ ) 為 Langmuir 吸附平衡常數。根據 Febrianto 等人 [24] 研究， $K_L$  值隨溫度增加代表著該吸附過程之化學吸附占主導地位，而該過程為吸熱反應；反之， $K_L$  值隨溫度升高而降低意味著物理吸附機制占主導地位，而該過程為放熱性質。此外，吸附平衡參數 ( $R_L$ )，公式如式(7)：

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L C_e} \quad (7)$$

其中，吸附平衡參數 ( $R_L$ ) 表示該過程是有利的 ( $0 < R_L < 1$ )、不利的 ( $R_L > 1$ )、線性的 ( $R_L = 1$ ) 或不可逆的 ( $R_L = 0$ ) [25]。

Freundlich 等溫吸附模型解釋多層吸附，並假設吸附位點本質上是異質的，且發生非理想吸附。Freundlich 等溫吸附模型如下所示：

$$Q_e = K_F C_e^{\frac{1}{n}} \quad (8)$$

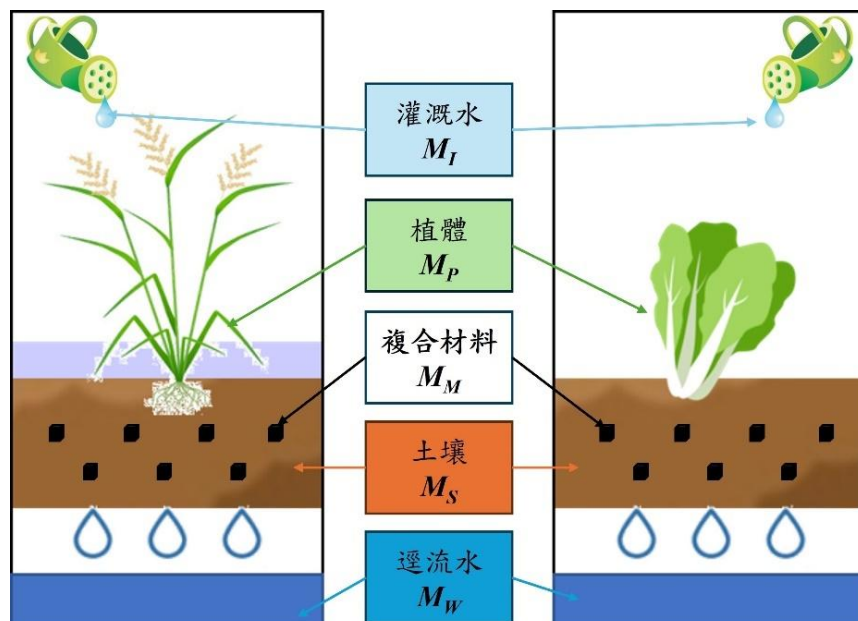
其中， $K_F$  ( $\text{mmol g}^{-1}$ ) 為指標性常數，用以描述吸附材之可能最大吸附量； $1/n$  ( $0 \sim 1$ ) 為反應吸附材之吸附強度。對於有利吸附過程，其  $n$  值在 1~10 間，描述測量吸附物和吸附材之間的相互作用： $n$  越大，吸附材和吸附物之間的相互作用力越大；而對於  $n$  值小於 1 的情況，吸附作用幾乎可以忽略 [24]。



### 4.3 進行模擬水田/旱田盆栽試驗，建立土壤重金屬流向分析及質量平衡

#### 4.3.1 模擬盆栽試驗

本項目係進行模擬水田/旱田大盆試驗，建立土壤重金屬流向分析及質量平衡，重點環境介面包括：土壤 ( $M_s$ )、灌溉水 ( $M_I$ )、滲流/逕流水 ( $M_w$ )、作物植體 ( $M_p$ ) 與水凝膠複合材料 ( $M_M$ ) 等（詳如圖二十二所示），土壤重金屬污染以銅與鉛為標的。



資料來源：本團隊繪製。

圖二十二、本計畫進行模擬水田/旱田大盆試驗及質量平衡模式示意圖

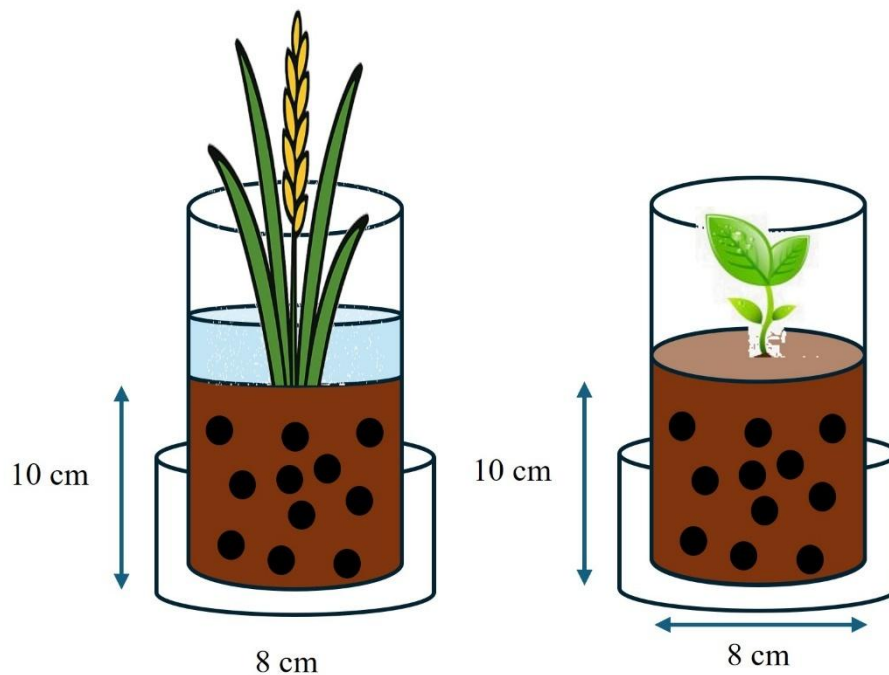
於模擬水田試驗，本項目以二期稻作 120 天（4 月至 8 月，溫度約 30 °C）；於模擬旱田試驗，本項目以落花生、小白菜（易吸收重金屬作物）為試驗作物。測量種植前土壤 ( $M_s^0$ )、灌溉水 ( $M_I^0$ )、水凝膠複合材料 ( $M_M^0$ ) 的重金屬含量，試驗後測量各環境介面之重金屬含量，分析重金屬物質流，並建立質量平衡模型，分析各項環境介面之流動參數；同時，觀察土壤中其他營養鹽含量，包括有機碳、氮、磷等元素。

前期，需將作物進行育苗，將水稻種子放置於營養液中生根並置於光線充足處，約成至超過 10 cm（不含根）後移株至小盆中，每盆兩株。小白菜及花生利用穴盤及培養土進行育苗，將種子直接浸泡在流動水中一段時間之後，取出種子將水瀝乾後再進行播種，種子的浸種時間約 2 小時。浸泡後的種子播種於穴盤中，澆水後移至黑暗通風處等待發芽，發芽後移至光線充足地方，持續每日澆水直



#### 第四章、研究方法與過程

至本葉長至 2~3 片時，此時根系飽滿，便可移株至小盆中。每組實驗使用水稻、小白菜、花生各七組，盆栽示意圖如圖二十三所示。



資料來源：本團隊繪製。

圖二十三、本計畫進行盆栽試驗之示意圖

此階段實驗分為兩種類型，一為受污染土壤整治型，將小盆（盆底有數個小洞為逕流水出口端）填入高度約 10 cm 之受污染之土壤（本次研究以銅鉛為主要討論污染標的物），每日以 10 mL 去離子水灌溉每個盆栽（確保重金屬污染源為土壤），各組試驗分別施用 nZVI/CS/ALG/BC 複合材料，觀察重金屬流向之差異。

二為韌性整治型，將小盆（盆底有數個小洞為逕流水出口端）填入高度約 10 cm 之空白土壤，每日以 10 mL 1 ppm  $Pb^{2+}$  溶液灌溉每個盆栽（為我國灌溉水標準值 10 倍，確保重金屬污染源為灌溉水源），各組試驗分別施用 nZVI/CS/ALG/BC 複合材料，觀察重金屬流向之差異。

測量種植前土壤 ( $M_s^0$ )、灌溉水 ( $M_I^0$ )、水凝膠複合材料 ( $M_M^0$ ) 的重金屬含量，試驗後測量各環境介面之重金屬含量，分析重金屬物質流，並建立質量平衡模型，分析各項環境介面之流動參數；同時，觀察土壤中其他營養鹽含量，包括有機碳、氮、磷等元素。



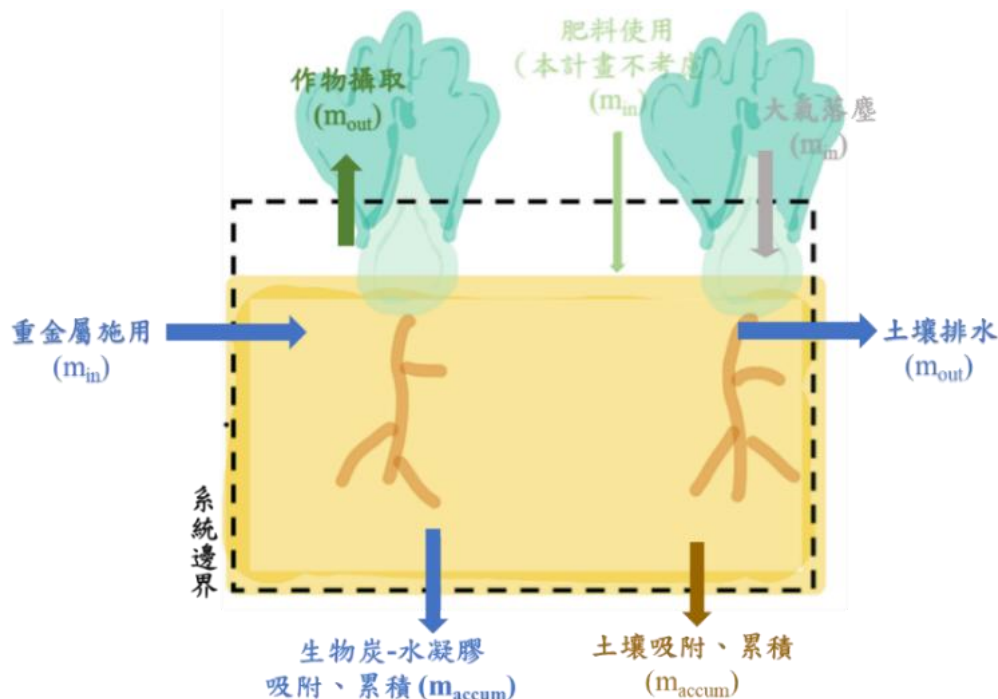


### 4.3.2 質量平衡模型

關於質量平衡模型，本研究建立重金屬於土壤中之質量平衡模式，詳如圖二十四所示。土壤中重金屬質量平衡模式可由式（9）所得：

$$\frac{dM}{dt} = \sum \dot{m}_{in} - \sum \dot{m}_{out} - \dot{m}_{accum} \quad (9)$$

其中， $M$  為單位土壤面積之重金屬總量 ( $\text{mg}/\text{cm}^3$ )， $t$  為時間（設定為天，縮寫 day）， $\dot{m}$  為質量流率 ( $\text{mg}/\text{cm}^3/\text{day}$ )，下標 in 代表重金屬引入途徑、out 代表重金屬排出途徑、及 accum 代表重金屬累積途徑。當  $\dot{m}_{accum}$  大於 0 時（正值），代表土壤中重金屬累積濃度增加；反之，當  $\dot{m}_{accum}$  小於 0 時（負值），代表土壤中重金屬濃度減少。



資料來源：本團隊繪製。

圖二十四、本研究進行重金屬質量平衡示意圖

本研究進行盆栽試驗各介面採樣分析方式，說明如下：

1. 土壤採樣與分析：本計畫採集盆栽土壤，乾燥後透過微波輔助王水消化法（NIEAS301 61.B），約 0.5 g 樣本以濃度 3.2% 以上之王水（鹽酸：硝酸 = 3：1, v/v）約 10 mL 混合物進行重金屬萃取，稀釋 5 倍，並使用 0.22  $\mu\text{m}$  濾膜過濾，再透過 ICP 量化水樣中重金屬濃度。
2. 肥料、灌溉水及滲流/逕流水分析：本計畫水質分析項目包括重金屬（使用 ICP-OES）、陰陽離子（使用 IC）、pH 及導電度等；水中重金屬可分為「水溶液相」





#### 第四章、研究方法與過程

及「懸浮固體」，經過  $0.22\ \mu\text{m}$  之聚酯纖維過濾器過濾，而液體部分加入數滴濃  $\text{HNO}_3$ ，直接以 ICP-OES 分析重金屬；固體顆粒物烘乾後，透過微波輔助王水消化法(NIEA S301 61.B)，以濃度 3.2%以上王水(鹽酸:硝酸 = 3:1, v/v) 10 mL 進行消化，稀釋 5 倍並過濾至  $0.22\ \mu\text{m}$ ，再使用 ICP-OES 分析各項重金屬濃度。

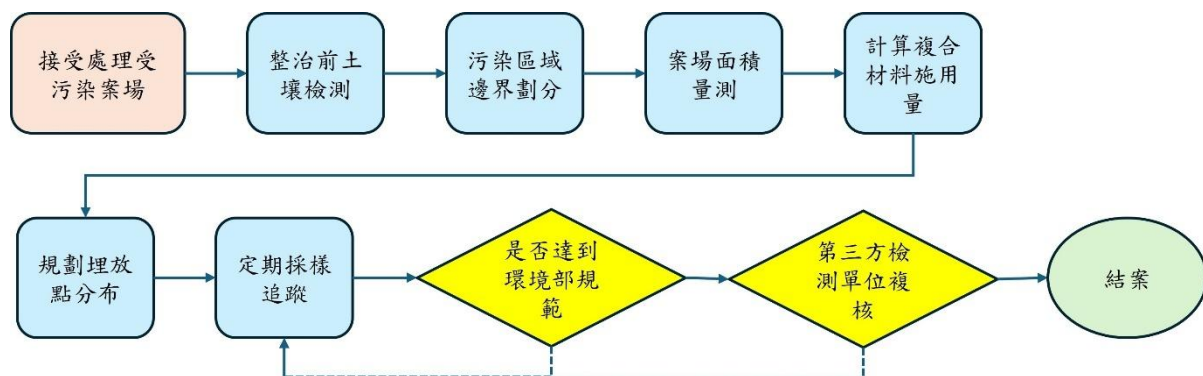
3. 作物植體分析：本計畫將稻米不同部分（含穀類、莖桿及根系）、旱作不同部分（含根及葉）分別進行採樣收集，農作物樣品先以自來水洗滌，再以去離子水沖洗，接著將所有樣品置於  $60\ ^\circ\text{C}$  烘箱中乾燥 72 小時。乾燥後測量質量，隨後使用植體研磨機，將樣品研磨成小塊，取 0.5 g 樣本，以微波輔助消化法，加入 10 mL 之酸消化液（硝酸:過氧化氫 = 4:1, v/v）放置 1 小時後，置入微波消化機，設定於 10 分鐘加熱至  $165\ ^\circ\text{C}$  並持續 20 分鐘，混合物進行重金屬萃取，稀釋 5 倍並過濾至  $0.22\ \mu\text{m}$ ，隨後上機 ICP-OES 分析重金屬濃度。
4. 水膠複合材料分析：本計畫取約 1.0 g 水膠複合材料以濃度 3.2%以上之王水（鹽酸：硝酸 = 3：1, v/v）10 mL 混合物進行重金屬萃取，稀釋 5 倍，並使用  $0.22\ \mu\text{m}$  濾膜過濾，透過 ICP-OES 量化重金屬濃度。
5. 本研究忽略農藥及大氣落塵對於重金屬質量平衡之影響。



#### 4.4 進行製備成本、程序碳排放及環境效益評估及標準作業流程

本計畫規劃進行材料製備成本分析，評估程序碳排放及環境效益，例如：作物安全、土壤保水、土壤健康、氣候變遷土壤韌性提升等面向。於經濟分析方面，本計畫成本計算方式包含單位材料（每克）化學品使用費用、能源使用（例如：使用設備電費、生物炭燒製高溫爐電費）以及溶劑使用，並比較材料製程碳排，根據吸附效率，以生命週期評估（LCA）整治產生之碳排及環境足跡，並與熱處理整治及化學處理整治差異。本計畫將材料製作流程標準化後，計算製程原料成本以及製程能耗產生之碳排，並比較處理原生物廢棄物所產生之成本與碳排，探討環境、經濟效益評估，可望達到廢棄生物質資源循環與減少碳排的目標。本計畫使用生命週期評估軟體規劃為 Simapro，使用資料庫為 ecoinvent v3.0，量化方法為 Environmental Footprint。

另一方面，本計畫將根據本土化生物基水膠循環材料性質，及其對於土壤重金屬施用效益（包括重金屬穩固化），建議此材料施用土壤於標準作業流程，並研擬將生物質衍生炭水膠複合材料應用於土壤重金屬固定等土壤永續韌性治理相關策略及方案，整治策略流程詳如圖二十五所示。透過動力學模型及等溫吸附模型的回歸參數，再配合土壤試驗與質量平衡的物質流分析，多重結果合併探討後整合得到理想之材料施用頻率與劑量。



資料來源：本團隊繪製。

圖二十五、本計畫研擬運用新穎複合材料進行土壤污染整治之流程

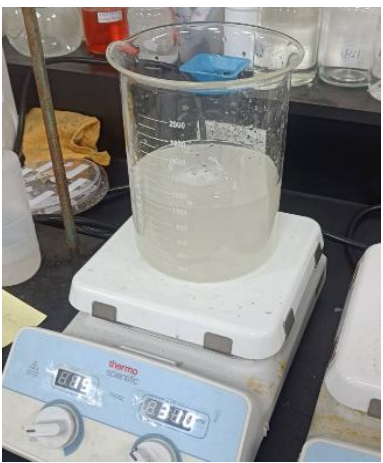
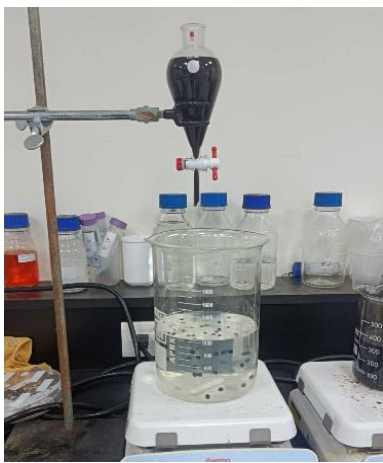


## 第四章、研究方法與過程

第五章、結果與討論

5.1 製備含磁性之生物基水膠材料製備

本計畫今年度已成功製備殼聚醣/海藻酸鈉/生物炭水凝膠球珠(CS/ALG/BC)材料，關於方法論與操作之細節詳如第 4.2.1 節，主要材料製備過程與相關剪影摘錄如圖二十六所示。

|                                                                                     |                                                                                     |                                                                                       |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|   |   |   |
| 海藻酸鈉/生物炭溶液                                                                          | 殼聚醣溶液                                                                               | 水凝膠珠形成                                                                                |
|  |  |  |
| 過濾清洗                                                                                | 烘乾，體積縮小                                                                             | 浸泡後體積回復                                                                               |

圖二十六、殼聚醣/海藻酸鈉/生物炭水凝膠球珠（CS/ALG/BC）製作

殼聚醣與海藻酸鈉在水溶液中可形成凝膠狀物體，但其結構較鬆散，難以自成穩定球體。為改善此缺點，本研究利用海藻酸鈉與鈣離子溶液的交聯作用，形成晶球狀水凝膠珠。然而，單純由海藻酸鈉與鈣離子形成的晶球，在烘乾過程中容易脆裂，導致材料完整性下降，限制其應用。

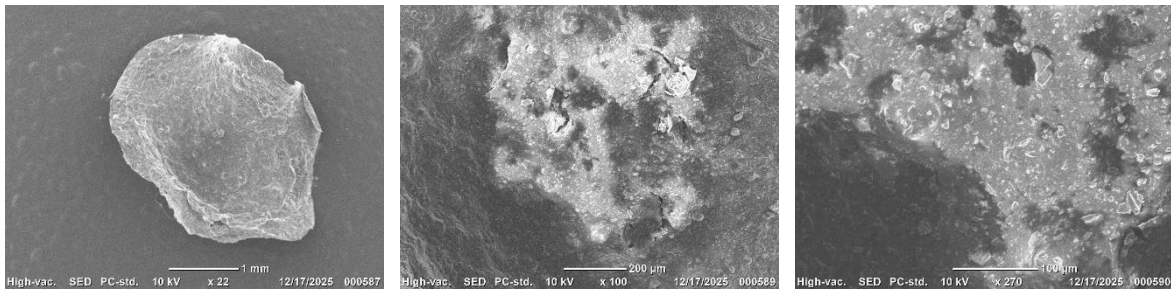
為解決此問題，本計畫在殼聚醣溶液中加入氯化鈣，使其在形成晶球狀水凝





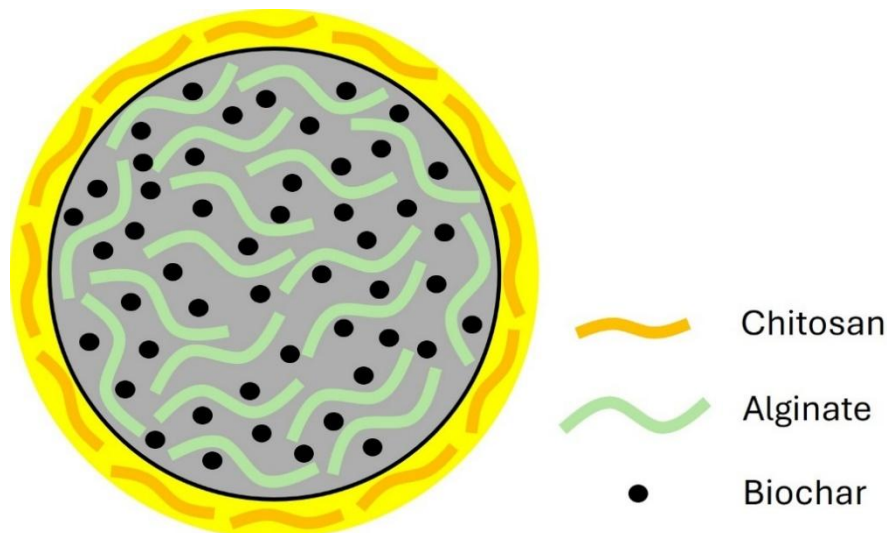
## 第五章、結果與討論

珠的同時，殼聚醣能在晶球外層形成一層保護結構。此保護層不僅能提高水凝膠球珠的乾燥穩定性，防止碎裂，亦能在再次浸水膨潤時恢復原始體積，保持球珠的結構完整性與功能性。進一步在複合材料中摻入生物炭（BC），可提供更多孔隙結構與吸附位點，增強重金屬吸附能力。圖二十七為殼聚醣/海藻酸鈉/生物炭水凝膠球珠（CS/ALG/BC）之電子顯微鏡（SEM）影像，以瞭解複合材料表面型態與結構情況。



圖二十七、殼聚醣/海藻酸鈉/生物炭水凝膠球珠（CS/ALG/BC）顯微鏡影像

整體而言，所製備的殼聚醣/海藻酸鈉/生物炭水凝膠球珠（CS/ALG/BC）兼具結構穩定性與吸附功能，其設計理念與結構示意如圖二十八所示，充分展現了材料在乾燥-膨潤循環及重金屬吸附應用中的可靠性。



資料來源：本團隊繪製。

圖二十八、殼聚醣/海藻酸鈉/生物炭水凝膠球珠（簡稱 CS/ALG/BC）結構

隨後，本研究進行負載奈米級零價鐵（nZVI）於殼聚醣/海藻酸鈉/生物炭水凝膠球珠（CS/ALG/BC）之製備步驟。首先，將烘乾後的 CS/ALG/BC 球珠與界面活性劑混入硫酸亞鐵（ $\text{FeSO}_4$ ）溶液中，攪拌反應 1 小時，使  $\text{Fe}^{2+}$  離子均勻

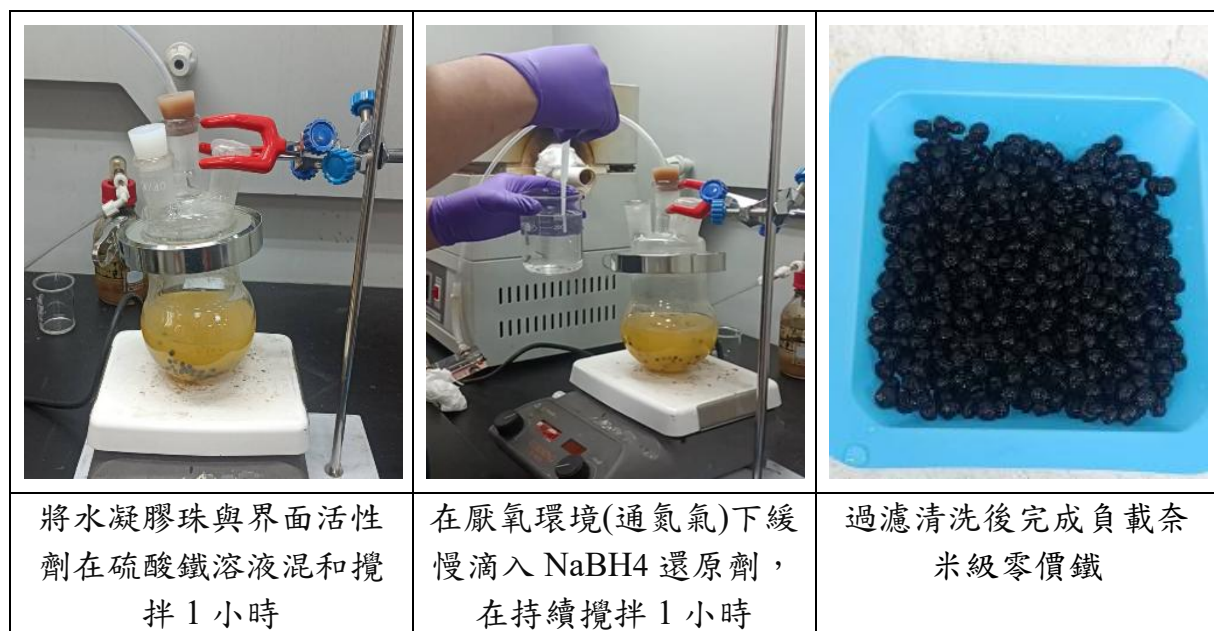




## 第五章、結果與討論

吸附於水凝膠球珠表面。為避免  $\text{Fe}^{2+}$  被氧化，本步驟通入氮氣以排除溶液中氧氣，維持系統厭氧環境。在此條件下，緩慢滴加硼氫化鈉 ( $\text{NaBH}_4$ ) 還原劑，使吸附於球珠表面的  $\text{Fe}^{2+}$  被還原生成零價鐵 ( $\text{Fe}^0$ )。完成還原反應並充分攪拌 1 小時後，將球珠撈出，依次使用純水與乙醇清洗三次，以去除未反應的化學試劑與雜質，最後烘乾，即可得到負載奈米級零價鐵之殼聚醣/海藻酸鈉/生物炭水凝膠球珠（簡稱 nZVI/CS/ALG/BC）。

該複合材料兼具水凝膠的膨潤吸附特性、生物炭的多孔結構，以及奈米級零價鐵的還原活性，能有效吸附及還原水中或土壤中之重金屬離子與污染物。整個製備過程及最終材料成果示意如圖二十九所示，顯示球珠表面均勻負載 nZVI，結構穩定且適合後續土壤或水體修復應用。

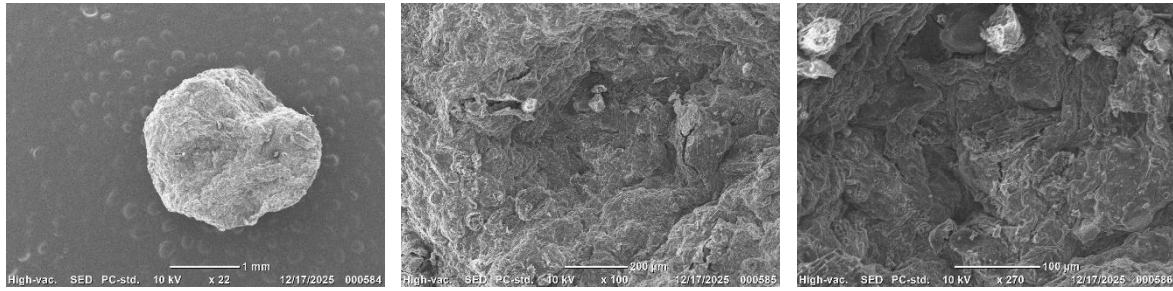


圖二十九、本計畫負載奈米級零價鐵過程之剪影

奈米級零價鐵 (nZVI) 在空氣或水中極易被氧化生成氧化鐵 ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )；然而，當 nZVI 載於殼聚醣/海藻酸鈉/生物炭水凝膠球珠 (CS/ALG/BC) 中時，材料外層會形成一層薄薄的氧化球殼，能有效保護內部  $\text{Fe}^0$  不被進一步氧化。這種保護機制不僅維持了球珠內部的還原活性，也提升了材料的乾燥與儲存穩定性。因此，烘乾後的 nZVI/CS/ALG/BC 球珠呈現淡紅棕色，主要由外層形成的氧化鐵組成，而球珠內部仍保有奈米級零價鐵，可在後續重金屬吸附與還原過程中發揮功能。圖三十為 nZVI 載於 CS/ALG/BC 電子顯微鏡 (SEM) 影像，以可瞭解附載前後關於複合材料表面型態與結構情況差異。

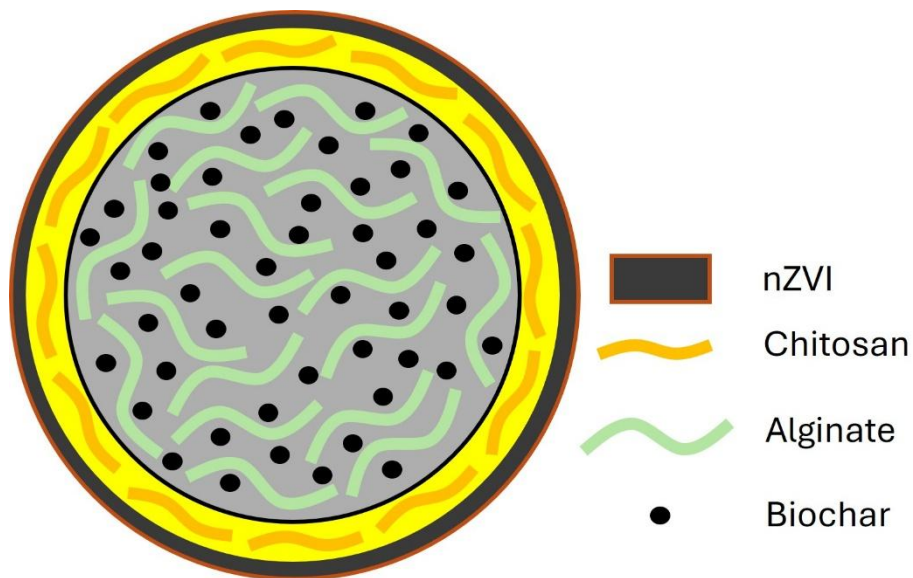


## 第五章、結果與討論



圖三十、nZVI 載於殼聚糖/海藻酸鈉/生物炭水凝膠球珠（CS/ALG/BC）之電子顯微鏡（SEM）影像

該複合材料兼具水凝膠的膨潤與吸附特性、生物炭的多孔結構，以及 nZVI 的化學還原能力，使其在環境修復應用中既穩定又高效。其結構示意如圖三十一所示，可清楚觀察內部 nZVI 與外層氧化球殼之分佈特徵。



資料來源：本團隊繪製。

圖三十一、奈米級零價鐵殼聚糖/海藻酸鈉/生物炭水凝膠球珠（簡稱 nZVI/CS/ALG/BC）結構示意

5.2 研析水膠材料吸附重金屬效率及模式

5.2.1 建立材料於液相中吸附容量曲線

本計畫針對 nZVI/CS/ALG/BC 複合材料進行重金屬溶液吸附試驗，以評估其對 Cu<sup>2+</sup>、Pb<sup>2+</sup>及 Cr<sup>3+</sup> 等金屬離子的吸附特性。材料吸附容量隨時間變化的曲線如圖三十二所示，可明顯觀察到吸附過程分為幾個階段。前 60 分鐘，材料吸水膨潤，使表面積增加，活化更多吸附位點，因此吸附容量呈現緩慢上升。隨後在 60 分鐘至 2 天期間，吸附速率加快，顯示材料與金屬離子之間發生強烈化學吸附及離子交換作用。約 2~4 天後，吸附容量逐漸趨於穩定，如表三所示，表示材料表面吸附位點已接近飽和。

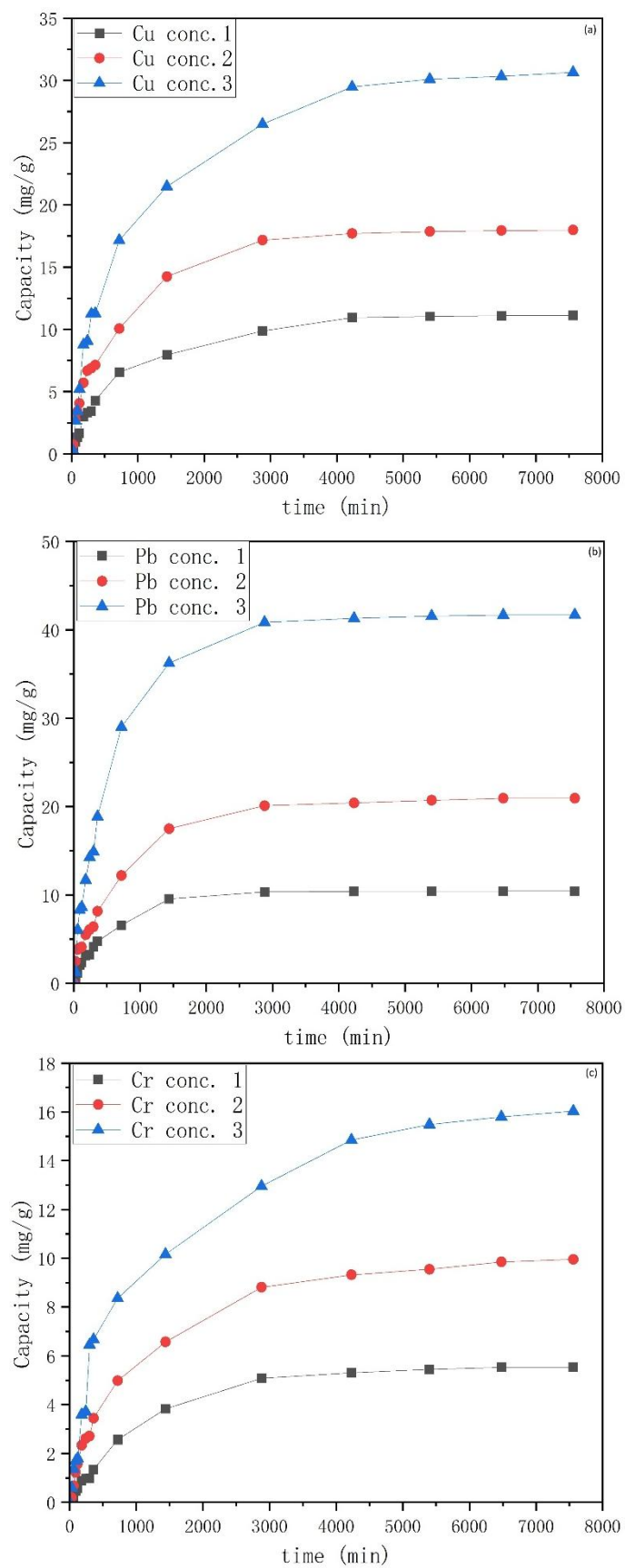
此外，實驗結果顯示，重金屬初始濃度越高，nZVI/CS/ALG/BC 材料所達到的最大吸附容量亦越高，反映材料對高濃度金屬離子具有良好的吸附潛力。整體而言，吸附曲線提供了材料吸附速率與平衡特性的完整實驗數據，為後續動力學模型及等溫吸附模型分析提供基礎，同時亦可作為材料在不同濃度環境下應用之參考依據，驗證其在重金屬固定與污染控制上的有效性。

表三、彙整 nZVI/CS/ALG/BC 材料吸附容量

| 項目                          | 銅     |       |       | 鉛     |       |       | 鉻     |       |       |
|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 初始濃度(mg/L)                  | 131.3 | 255.3 | 498.9 | 106.2 | 217.5 | 437.8 | 64.7  | 127.4 | 260.4 |
| 吸附量 Q <sub>e</sub> (mg/g)   | 11.12 | 17.99 | 30.66 | 10.43 | 20.96 | 41.70 | 5.54  | 9.96  | 16.03 |
| 吸附量 Q <sub>e</sub> (mmol/g) | 0.176 | 0.283 | 0.483 | 0.050 | 0.101 | 0.201 | 0.107 | 0.192 | 0.308 |



## 第五章、結果與討論



圖三十二、nZVI/CS/ALG/BC 的吸附容量曲線：(a) Cu；(b) Pb；(c) Cr



### 5.2.2 建立材料吸附重金屬之動力學模型

本研究採用偽一階 (Pseudo-First-Order) 與偽二階 (Pseudo-Second-Order) 動力學模型，分析重金屬在土壤中之吸附與固定行為，並探討其反應速率特性。偽一階動力學模型以  $\ln(Q_e - Q_t)$  對時間  $t$  作圖，分析結果如圖三十三所示，回歸線斜率之絕對值為速率常數  $K_1$  ( $\text{min}^{-1}$ )。依據表四所列結果，nZVI/CS/ALG/BC 複合材料對重金屬之吸附動力學模擬中，決定係數 ( $R^2$ ) 介於 0.964~0.997，顯示模型回歸良好。其  $K_1$  值分別為：

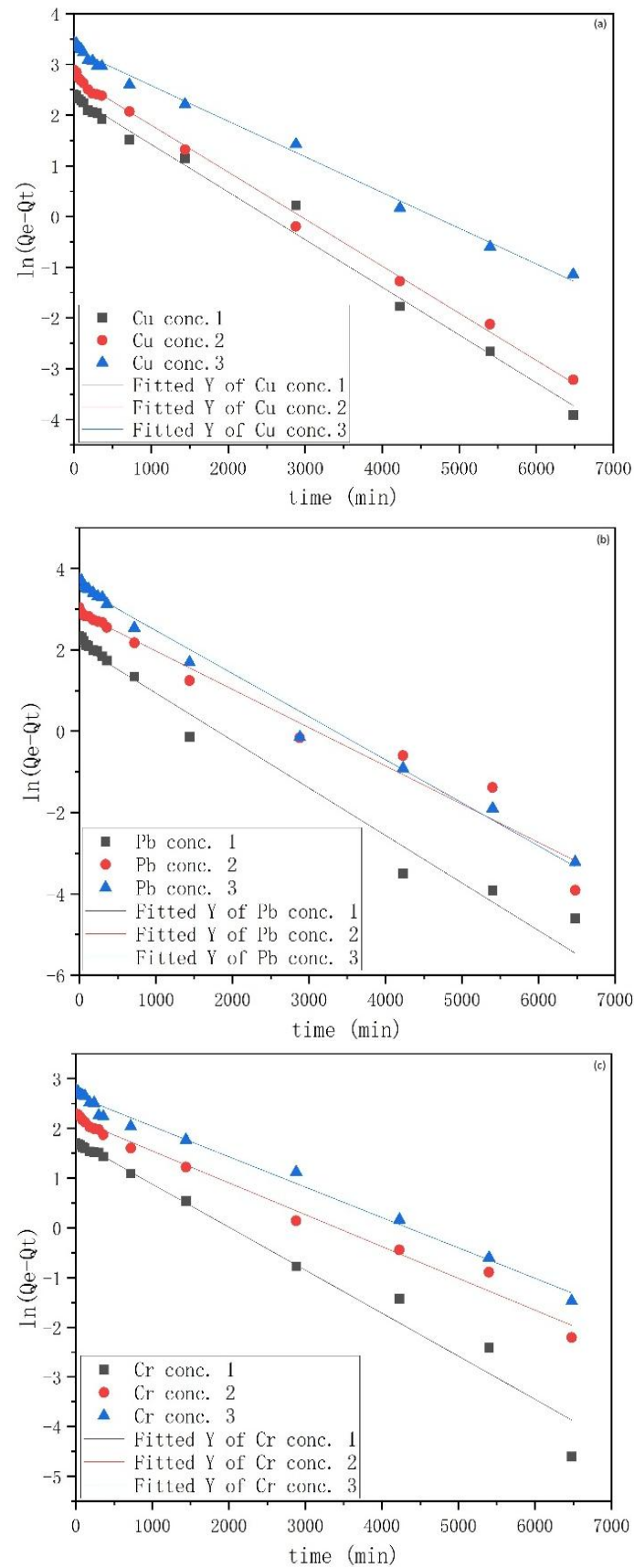
- Cu :  $7.0 \times 10^{-4} \sim 9.4 \times 10^{-4} \text{ min}^{-1}$
- Pb :  $9.4 \times 10^{-4} \sim 1.2 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$
- Cr :  $6.1 \times 10^{-4} \sim 8.7 \times 10^{-4} \text{ min}^{-1}$

上述結果顯示：不同金屬間之吸附速率存在差異，以鉛吸附速率最高、銅與鉻速度次之且彼此間速度差異不顯著。





## 第五章、結果與討論



圖三十三、應用偽一階動力學模型模擬 nZVI/CS/ALG/BC 吸附重金屬：(a) Cu、  
(b) Pb、(c) Cr



## 第五章、結果與討論

表四、nZVI/CS/ALG/BC 吸附重金屬偽一階動力學模型模擬結果

| 材料                 | 重金屬 | 動力學參數                  | 初始濃度                  |                      |                       |
|--------------------|-----|------------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|
|                    |     |                        | Conc.1                | Conc. 2              | Conc. 3               |
| nZVI/<br>CS/ALG/BC | Cu  | $R^2$                  | 0.9921                | 0.9971               | 0.9943                |
|                    |     | $k_1(\text{min}^{-1})$ | $9.4 \times 10^{-4}$  | $9.3 \times 10^{-4}$ | $7.0 \times 10^{-4}$  |
|                    | Pb  | $R^2$                  | 0.9637                | 0.9732               | 0.9699                |
|                    |     | $k_1(\text{min}^{-1})$ | $1.17 \times 10^{-3}$ | $9.4 \times 10^{-4}$ | $1.06 \times 10^{-3}$ |
|                    | Cr  | $R^2$                  | 0.9786                | 0.9889               | 0.9902                |
|                    |     | $k_1(\text{min}^{-1})$ | $8.7 \times 10^{-4}$  | $6.4 \times 10^{-4}$ | $6.1 \times 10^{-4}$  |

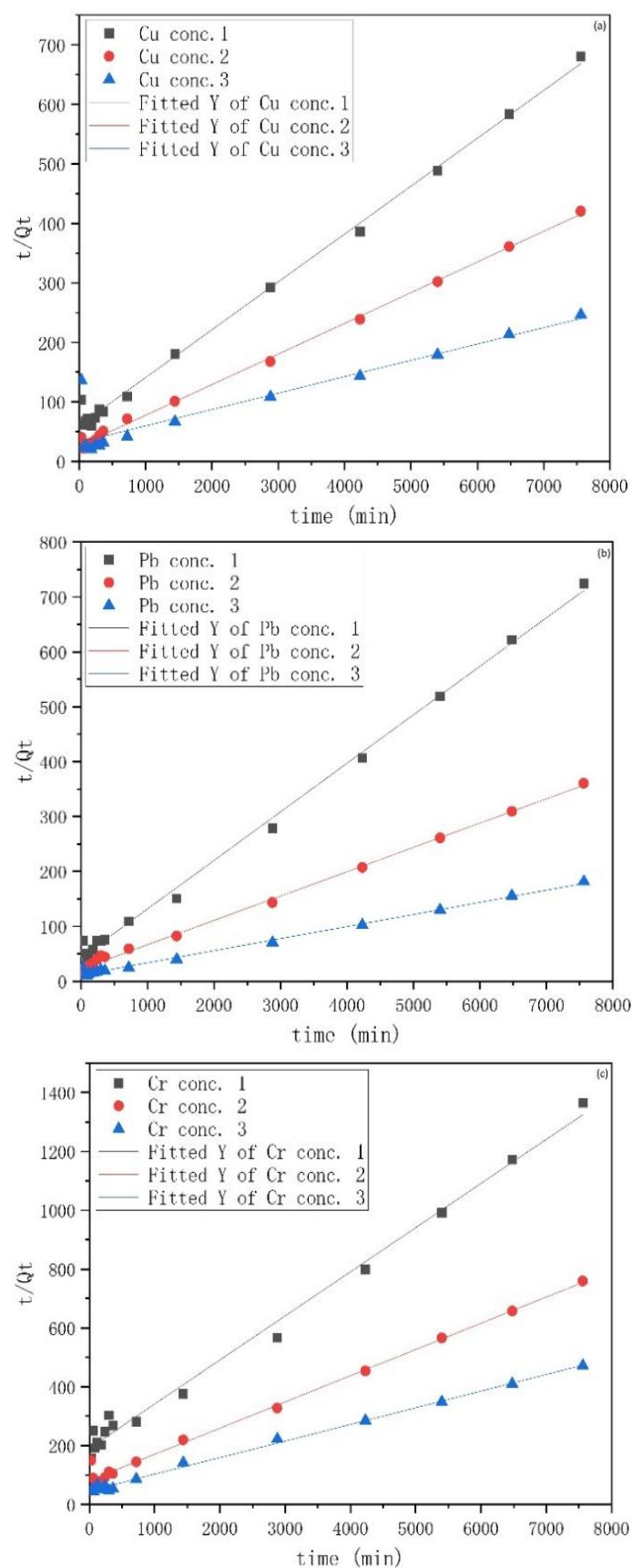
關於 nZVI/CS/ALG/BC 複合材料對重金屬吸附之動力學分析結果如圖三十四所示，其偽二階動力學模型回歸結果列於表五。由實驗數據可知，nZVI/CS/ALG/BC 對  $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$  與  $\text{Cr}^{3+}$  的吸附行為皆呈現高度線性相關，其中決定係數 ( $R^2$ ) 多介於 0.992~0.998 之間，僅有一組數據略低為 0.860，顯示整體模型回歸度極佳，符合偽二階動力學模型的特徵。該結果意味著吸附過程主要受化學吸附控制，而非僅為物理性表面吸附。

進一步比較速率常數( $k_2$ )可發現， $\text{Cu}^{2+}$  為  $2.3 \times 10^{-5} \sim 1.1 \times 10^{-4} \text{ g} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ ， $\text{Pb}^{2+}$  為  $4.3 \times 10^{-5} \sim 1.8 \times 10^{-4} \text{ g} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ ， $\text{Cr}^{3+}$  則介於  $6.9 \times 10^{-5} \sim 1.2 \times 10^{-4} \text{ g} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 。此結果顯示不同金屬離子在材料表面具有差異性的反應速率與結合傾向， $\text{Pb}^{2+}$  的吸附速率最高，推測與其離子半徑及電荷密度有關，使其更易與 nZVI 或 CS/ALG 基質中的官能基（例如： $-\text{OH}$ 、 $-\text{NH}_2$ 、 $-\text{COOH}$ ）發生化學鍵結。

綜合上述分析可發現：nZVI/CS/ALG/BC 複合材料對三種重金屬皆展現出顯著的化學吸附特性，主要機制可能包括金屬離子與零價鐵間之電子轉移還原反應、與有機官能基形成配位鍵，以及氫氧化物沉澱生成等。此吸附模式能有效促進重金屬固定與穩定化，並有助於降低其在環境中之生物可利用性與遷移潛勢，顯示該材料於污染土壤修復中具應用潛力。



## 第五章、結果與討論



圖三十四、應用偽二階動力學模型模擬 nZVI/CS/ALG/BC 吸附重金屬：(a) Cu、  
(b) Pb、(c) Cr

第五章、結果與討論

表五、nZVI/CS/ALG/BC 吸附重金屬偽二階動力學模型模擬結果

| 材料                 | 金屬 | 動力學參數                                                  | 初始濃度                  |                       |                      |
|--------------------|----|--------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|
|                    |    |                                                        | Conc.1                | Conc. 2               | Conc. 3              |
| nZVI/<br>CS/ALG/BC | Cu | R <sup>2</sup>                                         | 0.9961                | 0.9982                | 0.8596               |
|                    |    | k <sub>2</sub> (g mg <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup> ) | 1.06x10 <sup>-4</sup> | 1.01x10 <sup>-4</sup> | 2.3x10 <sup>-5</sup> |
|                    | Pb | R <sup>2</sup>                                         | 0.9973                | 0.9971                | 0.9953               |
|                    |    | k <sub>2</sub> (g mg <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup> ) | 1.81x10 <sup>-4</sup> | 8. 9x10 <sup>-5</sup> | 4.3x10 <sup>-5</sup> |
|                    | Cr | R <sup>2</sup>                                         | 0.9924                | 0.9926                | 0.9964               |
|                    |    | k <sub>2</sub> (g mg <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup> ) | 1.18x10 <sup>-4</sup> | 9.7x10 <sup>-5</sup>  | 6.9x10 <sup>-5</sup> |



## 第五章、結果與討論





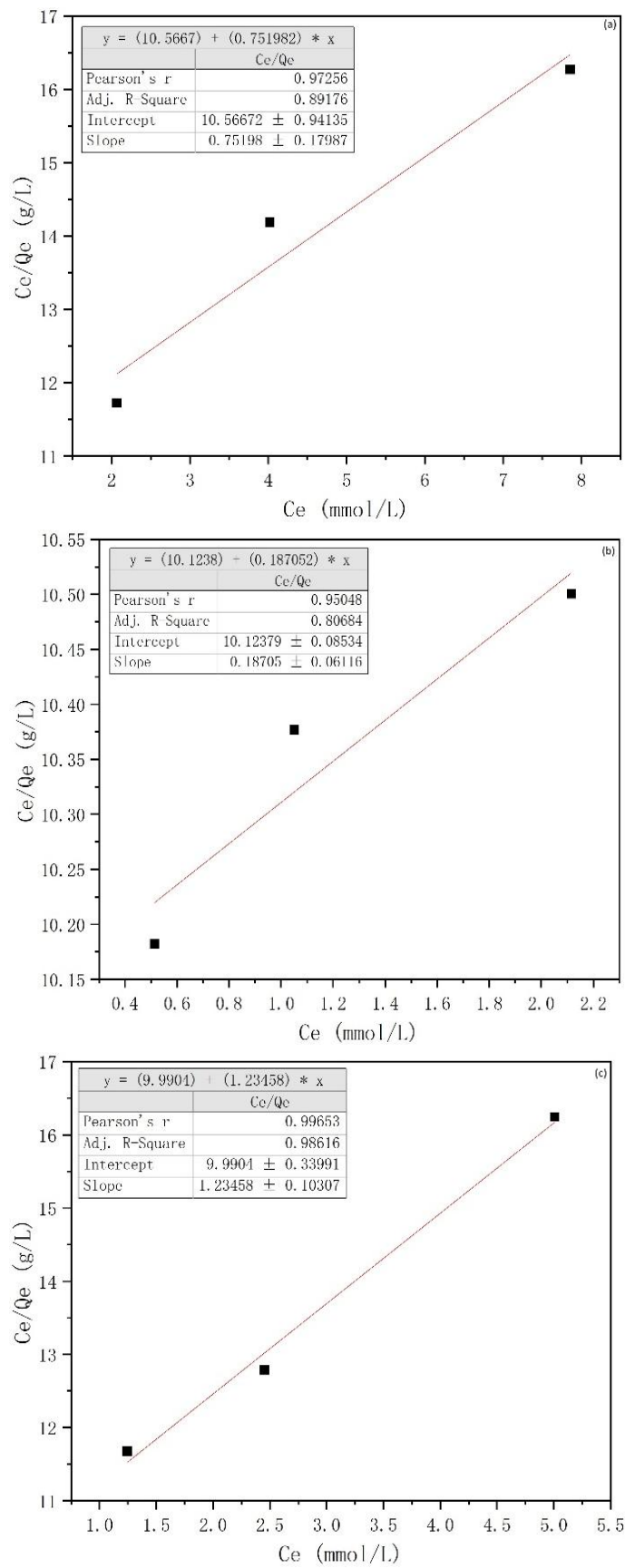
### 5.2.3 建立材料等溫吸附模型

本研究進一步使用 Langmuir 與 Freundlich 等溫吸附模型，計算 nZVI/CS/ALG/BC 複合材料之吸附熱力學性質與最大吸附容量。以 Langmuir 模型為例，將  $C_e/Q_e$  對平衡濃度  $C_e$  作線性回歸，結果如圖三十五所示，各項模擬參數列於表六。回歸結果之決定係數 ( $R^2$ ) 介於 0.903~0.993，顯示 Langmuir 模型能較好地描述材料對重金屬單層吸附之特性。

根據模擬計算，不同重金屬對材料之最大吸附容量 ( $Q_{\max}$ ) 存在差異，其中  $\text{Cu}^{2+}$  為 1.33 mmol/g、 $\text{Pb}^{2+}$  為 5.35 mmol/g、 $\text{Cr}^{3+}$  為 0.81 mmol/g。此結果顯示，複合材料對  $\text{Pb}^{2+}$  之吸附能力最強，可能與其離子半徑、電荷密度及與材料表面官能基的親和力較高有關；相對而言， $\text{Cr}^{3+}$  吸附量較低，顯示其與材料表面位點的結合能力相對較弱。

綜合而言，Langmuir 模型結果支持材料吸附過程以單層化學吸附為主的假設，並可用於估算材料在不同重金屬污染條件下之理論吸附上限，為後續實務應用與材料劑量設計提供依據。

第五章、結果與討論



圖三十五、應用 Langmuir 等溫吸附模型模擬結果：(a)Cu；(b) Pb；(c) Cr



## 第五章、結果與討論

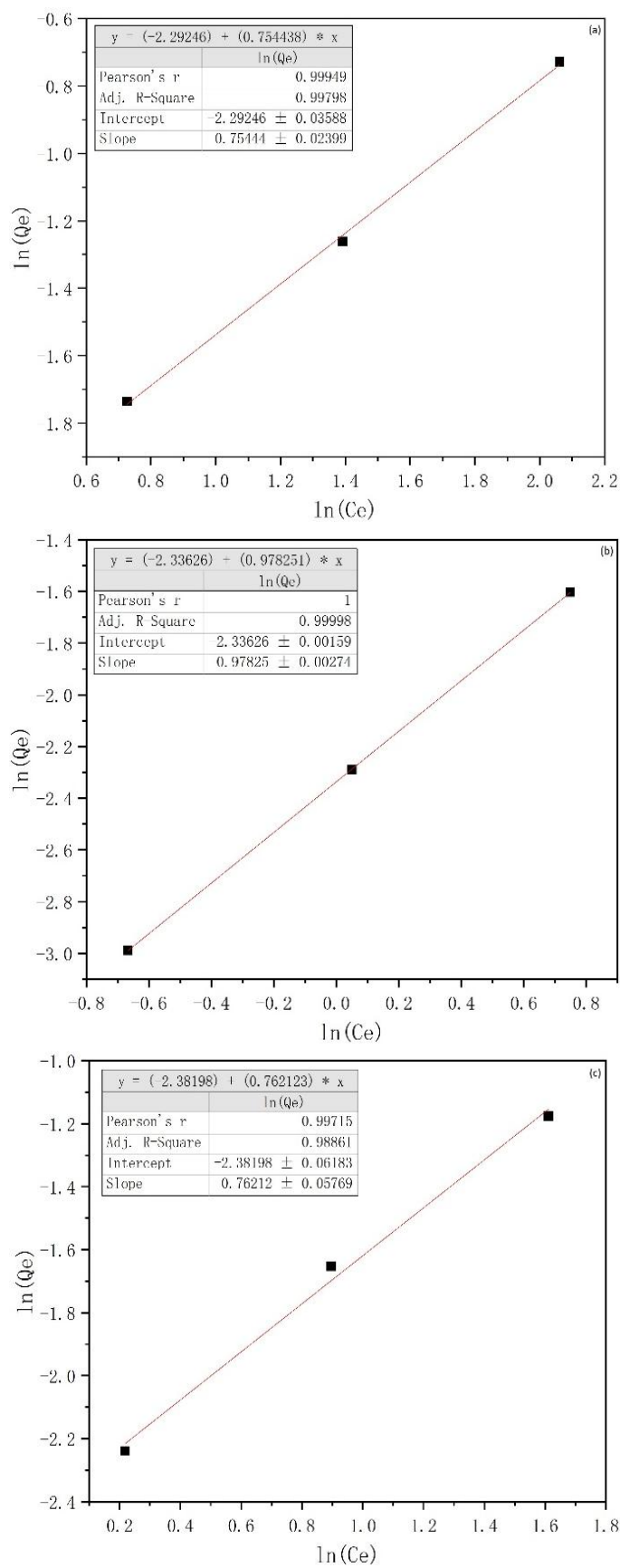
表六、Langmuir 等溫吸附模型模擬參數

| 材料             | 重金屬 | $R^2$  | $K_L$  | $Q_{\max}$ (mmol/g) |
|----------------|-----|--------|--------|---------------------|
| nZVI/CS/ALG/BC | Cu  | 0.9459 | 0.0712 | 1.33                |
|                | Pb  | 0.9034 | 0.0185 | 5.35                |
|                | Cr  | 0.9931 | 0.1236 | 0.81                |

應用 Freundlich 等溫吸附模型分析結果，以  $\ln Q_e$  (吸附平衡量) 對  $\ln C_e$  (平衡濃度) 作線性回歸，所得回歸曲線如圖三十六所示，各項模擬參數詳列於表七。由回歸結果可知，其決定係數 ( $R^2$ ) 介於 0.994~0.999 之間，顯示 Freundlich 模型能高度描述 nZVI/CS/ALG/BC 複合材料之吸附行為，證明吸附過程屬於非理想多層吸附模式，且材料表面吸附位點分布不均勻。此特徵反映了材料表面存在多種活性官能基 (如羥基、胺基與羧基)，能與不同金屬離子形成多重化學結合與配位。

Freundlich 模型中的常數  $n$  可用以表示吸附強度與吸附劑與吸附物間之相互作用。一般而言，當  $n$  值介於 1~10 之間時，表示為有利吸附過程，且  $n$  值越大，代表吸附劑與吸附物間的親和力越強、反應越趨穩定；若  $n$  值小於 1，則顯示吸附作用極為微弱或可忽略。根據本研究模擬結果，三種重金屬中，Cu 與 Cr 的  $n$  值均高於 Pb，顯示其在材料表面具有較高的吸附親和性與結合能。此現象可能與金屬離子半徑、電荷密度及其在溶液中之水合半徑有關，使  $\text{Cu}^{2+}$  與  $\text{Cr}^{3+}$  更容易與材料表面官能基形成穩定的化學鍵結或表面配位結構。

第五章、結果與討論



圖三十六、應用 Freundlich 等溫吸附模型模擬結果：(a)Cu；(b) Pb；(c) Cr



## 第五章、結果與討論

表七、應用 Freundlich 等溫吸附模型模擬參數

| 材料             | 金屬 | R <sup>2</sup> | K <sub>F</sub> (mmol g <sup>-1</sup> ) | 1/n  |
|----------------|----|----------------|----------------------------------------|------|
| nZVI/CS/ALG/BC | Cu | 0.9990         | 0.1010                                 | 1.33 |
|                | Pb | 0.9999         | 0.0967                                 | 1.02 |
|                | Cr | 0.9943         | 0.0924                                 | 1.31 |

表八彙整文獻中各種生物質衍生物吸附材料用於重金屬去除之熱力學模型參數，包括黏土-纖維素生物複合材料、纖維素/殼聚糖多孔球、海藻酸鈉/聚苯胺奈米纖維等。綜合分析可知，nZVI/CS/ALG/BC 複合材料對多種重金屬離子均展現出異質性吸附特徵，並以化學吸附為主導機制，吸附過程可能同時包含離子交換、表面沉澱與電子轉移反應。此結果與偽二階動力學模型所揭示的化學吸附趨勢相符，進一步證實該材料在重金屬固定與穩定化應用上具高度潛力，尤其在多金屬共存之環境條件下，仍能保持良好吸附效率與選擇性。

表八、各種生物質衍生物吸附材料用於重金屬去除之熱力學模型參數

| 吸附材料                                            | 重金屬    | pH | 初始濃度<br>(mg/L) | 最大吸附容<br>量 (mg/g) | 熱力學模型                    | 參考文獻 |
|-------------------------------------------------|--------|----|----------------|-------------------|--------------------------|------|
| 黏土-纖維素生物<br>複合材料                                | Pb(II) | 6  | 50             | 389.78            | Langmuir                 | [13] |
| 殼聚糖/纖維素纖<br>維複合材料                               | Cd(II) |    | 50             | 115.96            | Langmuir                 |      |
| 纖維素/殼聚糖多<br>孔球                                  | Co(II) | 6  | 20             | 23.6              | Langmuir                 | [14] |
| 海藻酸鹽/蒙脫石                                        | Cu(II) | 5  | 700            | 75.8              | -                        | [15] |
| 生物炭/鈣-海藻酸                                       | Pb(II) | 6  | 100            | 244.6             | Langmuir &<br>Freundlich | [16] |
| 海藻酸鈉/聚苯胺<br>奈米纖維                                | Zn(II) | -  | 100            | 120               | Langmuir                 | [17] |
| 磁性殼聚糖奈米<br>粒子                                   | Cr(VI) | 3  | 100            | 78.63             | Freundlich               | [18] |
| 羧甲基殼聚糖/丙<br>烯酸/氧化鐵                              | Pb     | -  | 200            | 113.38            | Langmuir                 | [7]  |
|                                                 | Cu     |    |                | 92.37             |                          |      |
| 多孔殼聚糖珠負<br>載 MnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> 奈 | Cd(II) | 5  | 200            | 155.10            | Langmuir                 | [6]  |
|                                                 | Cu(II) | -  | 20             | 43.94             | Langmuir                 | [19] |
|                                                 | Cd(II) |    | 5              | 9.73              |                          |      |



第五章、結果與討論

| 吸附材料                                                                   | 重金屬     | pH | 初始濃度<br>(mg/L) | 最大吸附容<br>量 (mg/g) | 熱力學模型      | 參考文獻 |
|------------------------------------------------------------------------|---------|----|----------------|-------------------|------------|------|
| 米顆粒                                                                    | Pb(II)  |    | 20             | 11.98             |            |      |
| 磁性殼聚糖/海藻<br>酸鹽/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> @SiO <sub>2</sub><br>水凝膠 | Pb(II)  | 6  | 180            | 245.28            | Langmuir   | [8]  |
| nZVI/殼聚糖/海藻<br>酸鹽/生物炭水凝<br>膠                                           | Cu(II)  | 6  | 100~400        | 11.12~30.66       | Freundlich | 本研究  |
|                                                                        | Pb(II)  |    | 100~400        | 10.43~41.70       |            |      |
|                                                                        | Cr(III) |    | 60~250         | 5.54~16.03        |            |      |



#### 5.2.4 受污染土壤吸附試驗

本研究為評估 nZVI/CS/ALG/BC 複合材料對受污染土壤中重金屬的固定與去除效能，將以鉻 (Cr)、鉛 (Pb) 及銅 (Cu) 為主要污染源的土壤各取 100 克，分別置於五組容器中，並依序添加 0、0.5、1.0、1.5 與 2.0 克之複合材料。為模擬自然濕潤條件，每組樣品均加入 100 mL 去離子水作為初始含水量，之後每 7 日再補灌 100 mL 去離子水，同時進行一次採樣。每次實驗均設置五組平行樣，以確保數據之重現性與代表性，其平均值結果如表九所示。

由實驗結果可見 (圖三十七)，nZVI/CS/ALG/BC 複合材料對三種重金屬均展現出良好吸附與固定效果，且隨著材料添加量增加，重金屬去除率明顯上升。於試驗前期 (7 天內)，吸附速率較快，顯示材料表面具有大量可反應活性位點。至 14~21 天後，吸附速率逐漸降低，主要原因可能為材料表面官能基逐漸被金屬離子占據，或因沉澱與鍵結反應達平衡而降低反應驅動力。

整體而言，於 21 天後，Cu 的去除率約為 5.84~24.56%、Pb 約為 8.05~26.50%、Cr 約為 5.78~21.38%。其中 Pb 的去除率最高，顯示其與材料中官能基 (如羧基、胺基及羥基) 具有較高的結合親和力；而 Cr 與 Cu 之吸附相對較低，推測與其離子形態穩定性及氧化還原電位有關。此外，此案例使用之土壤鉛含量大約是鉻的 10 倍，大約是銅含量的 36 倍，因此雖然材料在水相環境中吸附強度為  $Cu > Cr > Pb$ ，但考量到土壤與各種金屬之結合親和力不同以及此案例之鉛含量較高，因此吸附容量差異較大，未來後續可利用混合離子溶液來判斷競爭吸附之影響。

綜合結果顯示，nZVI/CS/ALG/BC 複合材料能有效降低受污染土壤中重金屬的可動性與可提取性，且其吸附行為呈現典型的化學吸附特徵，主要受離子交換、沉澱及還原反應所主導。此結果驗證該材料具備良好的長期穩定性與應用潛力，適合用於農地及污染場址之重金屬修復。



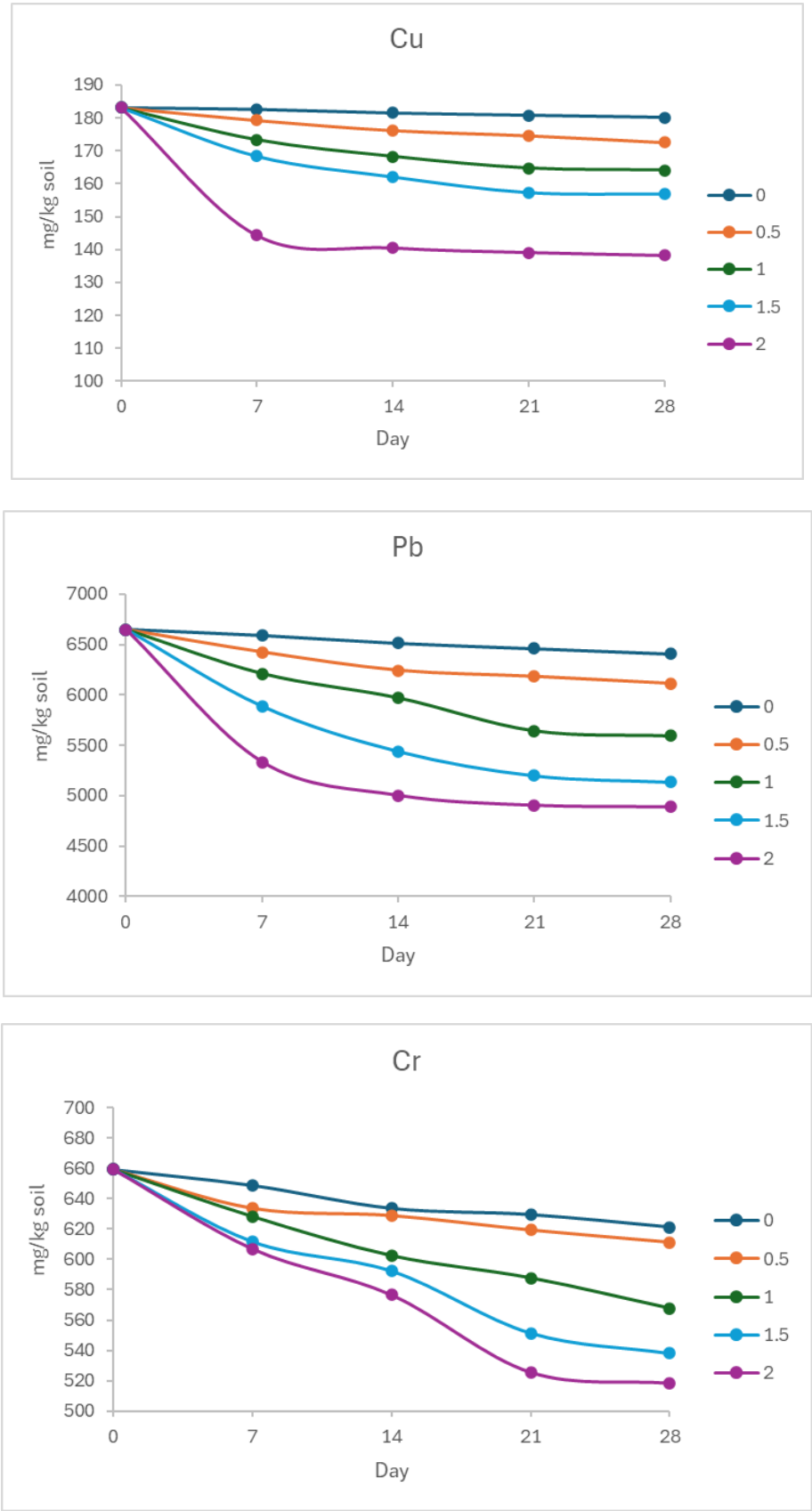
## 第五章、結果與討論

表九、土壤重金屬殘留情況

| 金屬種類                 | 材料/100 g<br>土壤 | 試驗天數   |        |        |        |        | 去除率<br>(%) | 吸附容量<br>(mg/g) |
|----------------------|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|------------|----------------|
|                      |                | 0 天    | 7 天    | 14 天   | 21 天   | 28 天   |            |                |
| <b>Cu</b><br>(mg/kg) | 0.0            | 183.2  | 182.7  | 181.5  | 180.8  | 180.1  | 1.69       | -              |
|                      | 0.5            | 183.2  | 179.3  | 176.2  | 174.6  | 172.5  | 5.84       | 1.52           |
|                      | 1.0            | 183.2  | 173.4  | 168.3  | 164.7  | 164.1  | 10.43      | 1.60           |
|                      | 1.5            | 183.2  | 168.4  | 162.1  | 157.3  | 156.9  | 14.36      | 1.55           |
|                      | 2.0            | 183.2  | 144.3  | 140.5  | 139.1  | 138.2  | 24.56      | 2.10           |
| <b>Pb</b><br>(mg/kg) | 0.0            | 6648.6 | 6589.2 | 6512.8 | 6461.1 | 6409.3 | 3.60       | -              |
|                      | 0.5            | 6648.6 | 6425.7 | 6244.3 | 6182.8 | 6113.3 | 8.05       | 59.20          |
|                      | 1.0            | 6648.6 | 6211.8 | 5971.2 | 5644.5 | 5593.5 | 15.87      | 81.58          |
|                      | 1.5            | 6648.6 | 5888.3 | 5439.2 | 5198.0 | 5133.4 | 22.79      | 85.06          |
|                      | 2.0            | 6648.6 | 5334.4 | 5002.0 | 4902.4 | 4886.9 | 26.50      | 76.12          |
| <b>Cr</b><br>(mg/kg) | 0.0            | 659.4  | 648.9  | 633.7  | 629.6  | 621.3  | 5.78       | -              |
|                      | 0.5            | 659.4  | 633.8  | 629.0  | 619.4  | 611.3  | 7.29       | 2.00           |
|                      | 1.0            | 659.4  | 628.4  | 602.5  | 587.8  | 567.7  | 13.91      | 5.36           |
|                      | 1.5            | 659.4  | 611.8  | 592.4  | 551.4  | 538.0  | 18.41      | 5.55           |
|                      | 2.0            | 659.4  | 607.0  | 576.6  | 525.6  | 518.4  | 21.38      | 5.15           |



第五章、結果與討論



圖三十七、土壤重金屬殘留隨時間減少



## 第五章、結果與討論





### 5.3 作物盆栽試驗

本試驗之主要目的在於模擬一般農田於灌溉過程中因水源受重金屬污染所造成的環境風險，探討污染水體中重金屬進入農田後於土壤、滲流水、作物體內及本研究所製備之水凝膠材料間的遷移與累積行為。此模擬系統旨在重現實際農地中長期低濃度污染累積的情境，以評估污染物在農田環境中之動態分布與固定潛勢。研究中所使用的 CS/ALG/BC 水凝膠材料結合殼聚醣（CS）與海藻酸鈉（ALG）的高親水性與多官能基特性，並摻入具吸附能力與孔隙結構的生物炭（BC），可同時提供物理吸附與化學鍵結位點。此外，材料具有良好的生物相容性與環境穩定性，適合應用於農業生態系中，減少二次污染風險。

透過此試驗，期望能評估水凝膠材料在不同農田條件下對重金屬離子之吸附、固定與緩釋效果，並觀察其對滲流水及作物吸收之抑制作用。最終目標在於驗證該材料於污染農地中能否達到「韌性整治」之目的，即在維持農作物正常生長與土壤生態平衡的同時，有效降低重金屬的生物可利用性與環境移動性，達成永續農業與綠色修復的雙重效益。

#### 5.3.1 盆栽試驗前置作業

本計畫於盆栽試驗啟動前，完成前置作業，包括容器選擇、土壤處理與秤重、以及育苗準備等工作。目前盆栽試驗配置如表十所示，主要操作與成果整理如下：

1. 盆栽容器選擇與配置：選用 PET 材質 700 mL 容器，於容器底部鑽設 5 個小孔，並鋪設細紗網以防土壤顆粒掉入滲流水中，模擬土壤滲流出口。為收集滲流水，每個盆栽外套一個 360 mL PET 容器，如圖三十六所示，形成上盆土壤與下盆滲流水的雙層系統，可便於後續水質與重金屬濃度分析。
2. 盆栽數量：設置水稻 20 盆與花生 10 盆，依不同作物生長特性與試驗需求配置，以利統計與重金屬累積分析。
3. 土壤處理與準備：採購空白土壤（陽明山土），經烘乾後過篩（0.5 mm），將土壤填入盆栽中，土層深度維持 10 公分。依不同作物的養分需求，添加相應肥料，同時將水凝膠吸附材料按 1 g/100 g 土壤比例均勻混入土壤中，再潤濕土壤，確保養分與材料均勻分布，利於植物吸收與材料重金屬固定效能的發揮。
4. 育苗作業：



## 第五章、結果與討論

- 甲、水稻：將種子放置於鐵網上，鐵網微浸於營養液中以促進生根，置於光線充足處。待芽長至 10 cm (不含根) 以上時，每盆移植 2 株，共計 60 株。
- 乙、花生：種子先在流動水中浸泡約 2 小時，再播種於穴盤培養土中，澆水後放置於黑暗通風處促進發芽。當幼苗本葉長至 2~3 片且根系發育飽滿後，移植至小盆中，每盆 1 株，共 10 株。
5. 整體前置作業確保盆栽試驗的均一性、材料分布均勻及育苗健康度，為後續灌溉、重金屬累積及材料吸附效能評估奠定穩定基礎。



圖三十八、盆栽試驗配置



## 第五章、結果與討論

表十、本計畫建立盆栽試驗配置說明

| 作物         | 水稻                         |                            | 花生                         |                            |
|------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 污染源        | 灌溉水                        | 灌溉水                        | 灌溉水                        | 灌溉水                        |
| 土壤         | 空白土壤                       | 空白土壤                       | 空白土壤                       | 空白土壤                       |
| 灌溉水        | 1 mg/L Cr <sup>3+</sup> 溶液 | 1 mg/L Cr <sup>3+</sup> 溶液 | 1 mg/L Cr <sup>3+</sup> 溶液 | 1 mg/L Cr <sup>3+</sup> 溶液 |
| 肥料<br>(每組) | 0.05 g-N                   | 0.05 g-N                   | 0.015 g-N                  | 0.015 g-N                  |
| 苗          | 3 株                        | 3 株                        | 1 株                        | 1 株                        |
| 吸附材料       | -                          | 1g/ 100g 土                 | -                          | 1g/ 100g 土                 |
| 組數         | 10                         | 10                         | 5                          | 5                          |



### 5.3.2 盆栽試驗及重金屬流向分析與質量平衡

本試驗以「預防性韌性整治」為目標，旨在模擬農田於灌溉過程中因水體受到底濃度重金屬污染而產生的潛在風險，藉以評估水凝膠材料對污染遷移與累積的抑制效果。試驗設計參考一般農田環境條件，分別建立水田盆栽試驗與旱田盆栽試驗兩種栽培系統，並以含總鉻濃度 1 mg/L 的污染水作為灌溉來源，此濃度為灌溉水質標準限值（0.1 mg/L）之十倍，以模擬長期受污染水灌溉之情境。

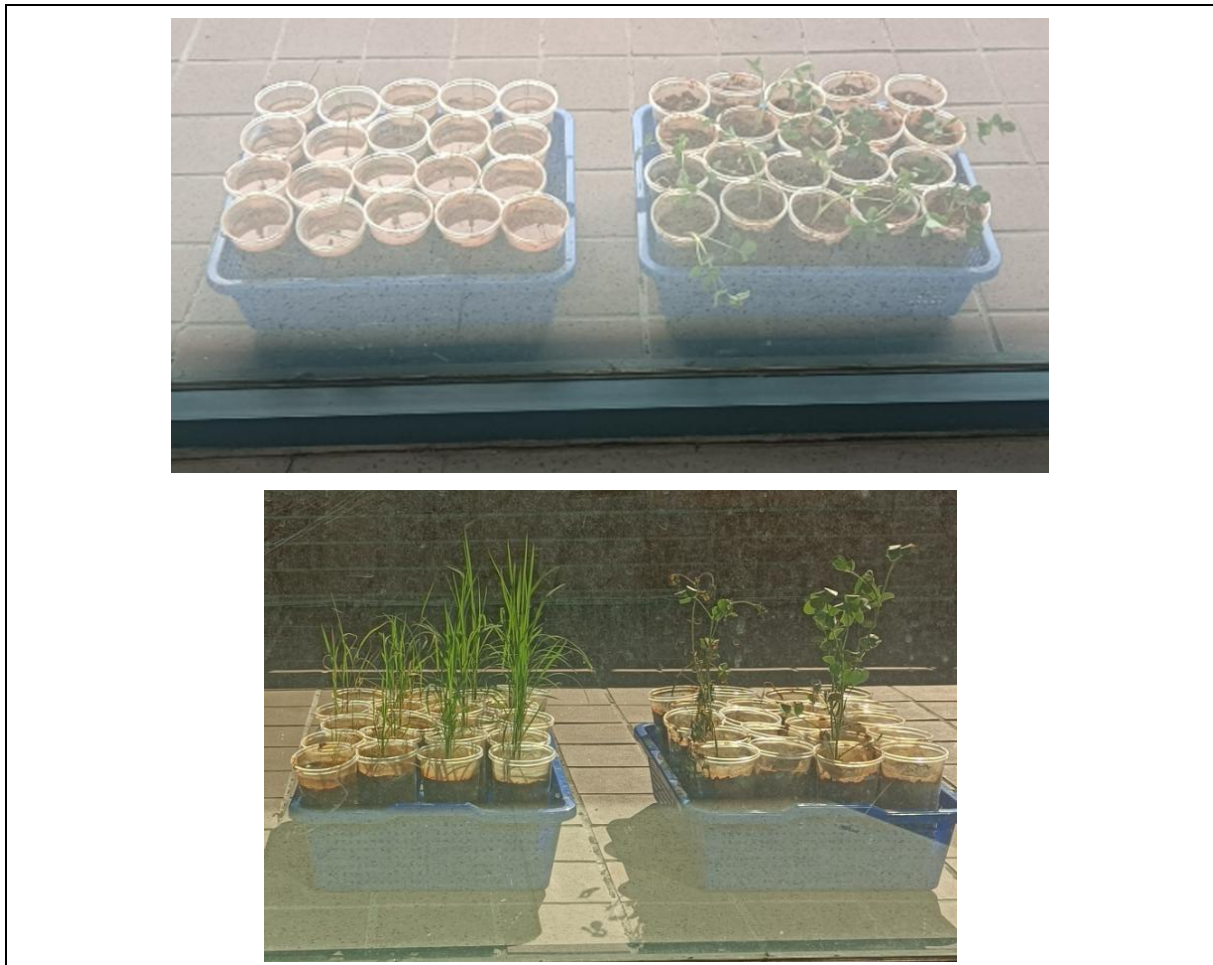
試驗共設兩組處理條件：對照組為未添加任何水凝膠材料之自然狀態，以反映污染水進入土壤系統後之自然遷移與累積情形；實驗組則於每盆土壤中（400 g）均勻混入 4 g 水凝膠材料，相當於每 100 g 土壤添加 1 g 材料。該比例係根據前期吸附試驗與材料吸附飽和量推估，可兼顧材料效能與成本效益。

實驗期間以固定頻率進行污染水灌溉，並定期採集土壤、滲流水與作物樣品，進行重金屬濃度分析，以建立完整的質量平衡及流向分布。藉由對比兩組間重金屬在不同介質中的含量變化，可進一步評估水凝膠材料在減少污染物滲流損失、降低作物吸收及固定於土壤中的效果。最終目標在於驗證此材料於農地環境中可行之「預防性韌性整治」應用潛力，為污染風險管理與永續農業提供具體技術依據。配置如圖三十九。





## 第五章、結果與討論



圖三十九、盆栽試驗施行情況

灌溉水量設定為水田盆栽試驗組（水稻）每週 5 日以污染水灌溉，每次 100 mL，其餘 2 日則以自來水灌溉 100 mL，以模擬水田環境中連續受污染水源灌溉的情況；而旱田組（花生）則每週 3 日以污染水灌溉 50 mL，其餘日以自來水灌溉 50 mL，以反映旱作農田間歇受污染水源影響的情境。整體試驗期為一個月（28 天），經換算後，水田盆栽試驗組每盆灌溉水體中累積添加之鉻(Cr)總量為 2 mg，而旱田組則為 1 mg，以確保不同灌溉條件下之金屬累積量具可比性。

於試驗結束後（第 28 天）進行採樣，包含土壤、滲流水、作物組織（根、莖、葉）及水凝膠材料，經消化與分析後計算各介質中之重金屬含量，相關結果如表十一所示。由於此次試驗所添加之重金屬為離子態，容易隨水流滲出，因此在對照組（未添加材料）中，約 93~94.5%的鉻以滲流水形式流失，顯示污染離子在無吸附介質時具高度流動性。

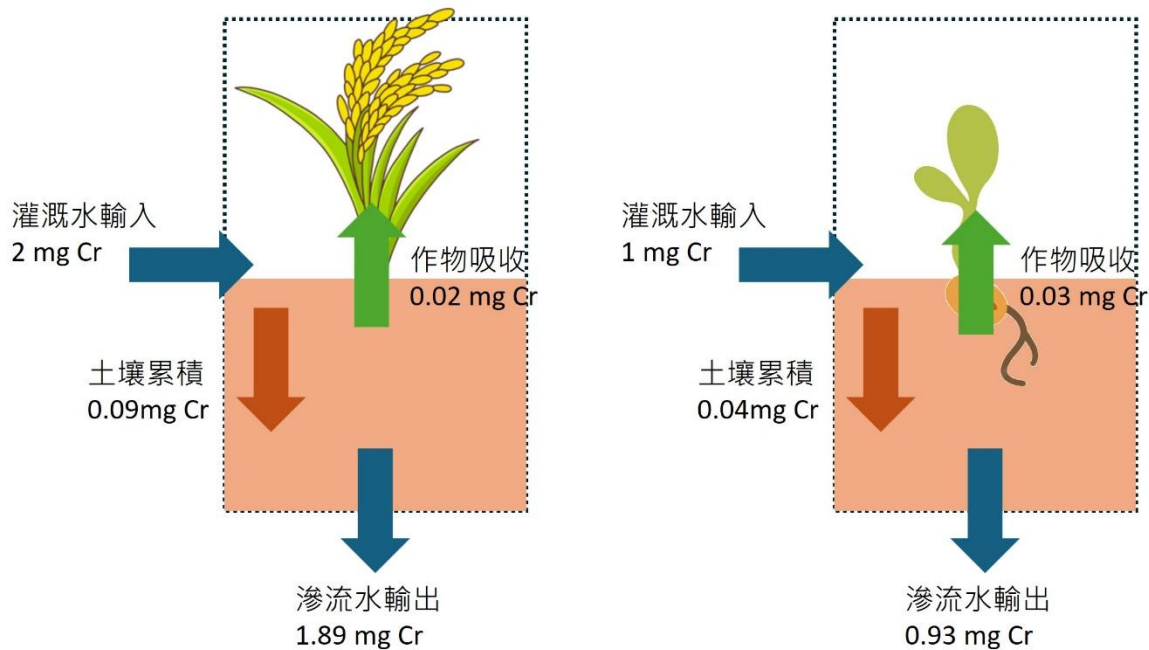
如圖四十所示，於未添加水凝膠材料的對照組中，鉻離子主要隨滲流水排出，顯示其在土壤－水體系統中具有高度流動性與潛在外逸風險。水田盆栽試驗組滲





## 第五章、結果與討論

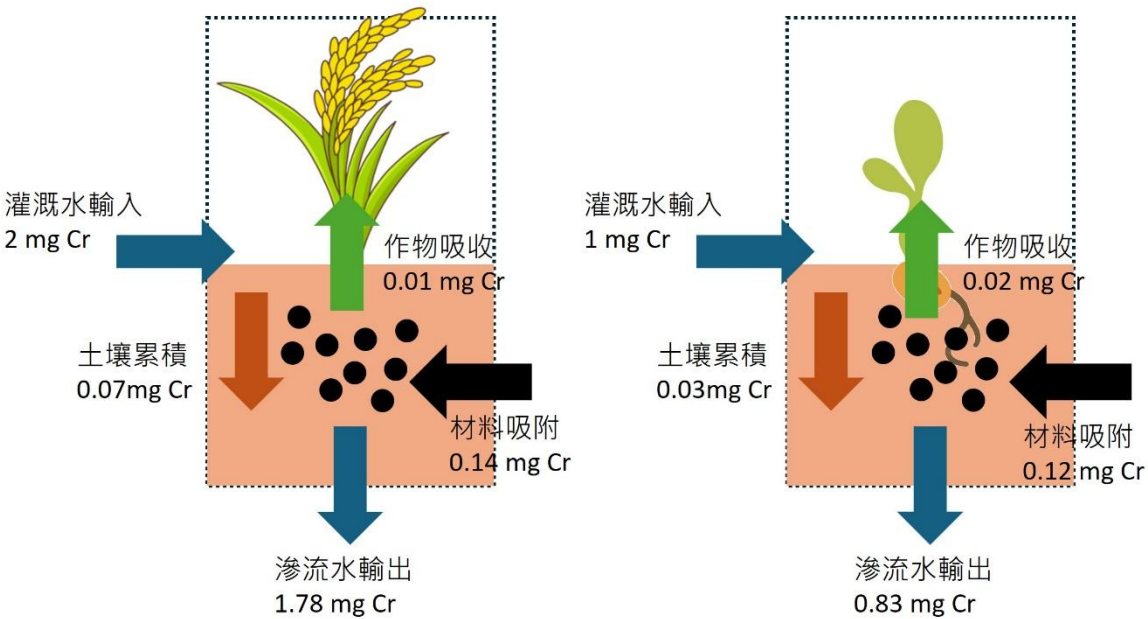
流輸出達 1.89 mg Cr，旱田盆栽試驗組為 0.93 mg Cr，顯示重金屬主要透過滲流水路徑流失，而非被固定於土壤或吸收進入作物體內。相對而言，作物吸收與土壤累積量僅占總輸入量的少部分（作物吸收低於 5%，土壤累積低於 10%），代表污染金屬的可移動性高，容易造成下游水體或農地的再污染。



圖四十、分析對照組（未添加材料）Cr 流向

施用 nZVI/CS/ALG/BC 複合水凝膠後，鉻離子於系統內的流向與分布明顯改變，詳如圖四十一所示。材料吸附輸入鉻總量之 ~7.0%（水田盆栽試驗組）至 12%（旱田盆栽試驗組），顯示該複合材料能在不同含水條件下穩定固定重金屬，且在旱田盆栽試驗（間歇灌溉）條件下表現更佳。受此吸附作用影響，滲流水中鉻濃度明顯降低，水田組下降約 5.8%，旱田盆栽試驗組下降約 10.8%；同時土壤中鉻累積量分別下降 22% 與 25%，顯示材料可有效抑制重金屬於土壤孔隙水間的遷移。

第五章、結果與討論



圖四十一、實驗組（添加材料）Cr 流向

表十一、土壤、滲流水、作物及水凝膠材料累積重金屬含量

| 鉻流向    |                 | 水田（水稻 $n = 10$ ）     |                     | 旱田（花生 $n = 5$ ）     |                     |
|--------|-----------------|----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|        |                 | 對照組                  | 實驗組                 | 對照組                 | 實驗組                 |
| 輸<br>入 | 灌溉水 $M_I$ (mg)  | 2                    | 2                   | 1                   | 1                   |
|        | 土壤累積 $M_S$ (mg) | 0.09±0.02<br>(4.5%)  | 0.07±0.01<br>(3.5%) | 0.04±0.01<br>(4.0%) | 0.03±0.01<br>(3.0%) |
|        | 滲流水 $M_W$ (mg)  | 1.89±0.11<br>(94.5%) | 1.78±0.05<br>(89%)  | 0.93±0.09<br>(93%)  | 0.83±0.10<br>(83%)  |
|        | 作物吸收 $M_P$ (mg) | 0.02±0.03<br>(1.0%)  | 0.01±0.01<br>(0.5%) | 0.03±0.03<br>(3.0%) | 0.02±0.01<br>(2.0%) |
|        | 材料吸附 $M_M$ (mg) | -                    | 0.14±0.03<br>(7.0%) | -                   | 0.12±0.05<br>(12%)  |

備註：減少比例 = (對照組-實驗組)/實驗組

此外，作物體內鉻含量也顯著減少，水田盆栽試驗組下降約 50%，旱田盆栽試驗組下降約 33%，顯示材料除能降低鉻的環境流動性外，亦可抑制其生物可利用性與植物吸收風險。整體而言，CS/ALG/BC 水凝膠材料於模擬農田環境中展現出優異的吸附與固定性能，能有效降低重金屬於水體－土壤－植物系統間之傳



## 第五章、結果與討論

輸比例。此結果不僅驗證材料在水田盆栽試驗與旱田盆栽試驗條件下之穩定效能，更突顯其於農地重金屬預防性韌性整治之應用潛力，對提升農田灌溉水質安全與維護綠色農業永續發展具重要意義。

5.4 成本分析並研擬材料標準施用流程

5.4.1 成本分析

本研究於完成水凝膠材料之製作程序後，進一步將各步驟操作流程標準化，並據此估算整體製程之原料與能源成本，以評估其經濟可行性。詳細成本項目與計算結果彙整如表十二所示。由試驗結果可知，從蝦殼（約 3 g）中提取殼聚醣，每克成品之成本約為新台幣 11.4 元，與市售試藥級殼聚醣（Sigma Aldrich）每克約 92 元相比，實驗室自製成本僅為其約十分之一，顯示以廢棄蝦殼為原料可大幅降低生產費用，並兼具資源再利用與環境永續的雙重效益。另一方面，生物炭（BC）之製備成本估算約為每克 7.67 元，主要成本來源為高溫燒製過程中的能源消耗與原料處理。整體複合材料（約 4.5 g）之藥品原料成本則約為新台幣 81 元，換算後製備每克 nZVI/CS/ALG/BC 水凝膠材料的成本約為 18 元。

綜合評估結果顯示，本研究所開發之水凝膠材料在製程上具良好可操作性與成本效益。相較於商業化材料，其低成本與高效能特性使其更適合應用於大面積農地或中低污染場址之重金屬整治。未來若能透過原料批量化處理與能源回收技術優化，預期成本可進一步降低，展現出推動綠色修復與循環農業之實際應用潛力。

表十二、本計畫比較複合材料合成之成本

| 項目           | 化學品             | 用量     | 成本(新台幣) |
|--------------|-----------------|--------|---------|
| 殼聚醣<br>(1 g) | 濃鹽酸             | 4.8 mL | 2.02    |
|              | 氫氧化鈉            | 7.2 g  | 9.36    |
|              | 合計              |        | 11.38   |
| 生物炭<br>(1g)  | 氫氧化鉀            | 0.5 g  | 6.66    |
|              | 濃鹽酸             | 2.4 mL | 1.01    |
|              | 合計              |        | 7.67    |
| 複合材料         | 海藻酸鈉            | 1 g    | 2.12    |
|              | 醋酸              | 2 mL   | 2.4     |
|              | 氯化鈣             | 0.5g   | 2.6     |
|              | 硫酸亞鐵            | 1.6 g  | 18.1    |
|              | 硼氫化鈉            | 0.4 g  | 21.6    |
|              | PEG2000         | 0.1 g  | 3.2     |
|              | 酒精              | 100 mL | 12      |
|              | (再加上殼聚醣和生物炭) 合計 |        | 81.07   |



### 5.4.2 研擬材料標準施用流程

本小節研擬將本研究開發之生物基水膠循環材料，應用於土壤重金屬固定與永續韌性治理的實務策略與推動方案。整體構想係以「污染監測—材料施用—成效追蹤—循環再利用」為核心流程，建立永續綠色修復體系。流程說明如下：

- 先期規劃階段：應首先針對污染場址進行全面性土壤檢測，確認主要污染重金屬種類、含量及分布特性，作為後續材料劑量與佈設規劃的依據。完成污染分布分析後，需進行地界劃分與污染區面積測定，依據污染濃度與土地面積，計算所需施用之水凝膠複合材料量。
- 材料施用設計階段：此複合材料施放方式可採直接混入、條帶式埋設或表層覆蓋等模式，並輔以注水操作以促進材料膨潤與吸附反應。
- 污染整治階段：應依場址大小合理設置採樣點，並以每七天為一週期進行監測採樣，追蹤土壤、滲流水及植物組織中重金屬濃度變化。若監測結果顯示仍高於法定標準，應適度補充複合材料或調整施用密度；當濃度降至法規限值以下時，應委託第三方公正檢測單位進行複驗，確認整治成效後方可結案。

本研究所開發之生物基水膠循環材料兼具吸附、固定與回收特性，可廣泛應用於輕度及中度污染農地之修復，不僅能有效降低土壤中重金屬的生物可利用性，也能抑制其向作物體內的轉移。此外，該材料亦具預防性整治潛力，特別適用於灌溉水體可能受污染之農田，以降低長期累積造成的風險，達成「防治並重、動態管理」之韌性整治目標。未來研究將針對使用後材料的回收與再利用進行探討，特別是吸附重金屬後複合材料的安全移除、再生利用或資源化處理技術之開發，以建立完整的生物基材料循環機制，最終達成綠色修復與循環農業永續發展的雙重效益。





## 第六章、結論與建議

### 6.1 結論

本計畫重要結論包括：

#### 1. 複合材料製備成功與結構穩定性

- 本計畫成功製備負載奈米級零價鐵的殼聚醣/海藻酸鈉/生物炭水凝膠球珠（nZVI/CS/ALG/BC）複合材料。
- 製備過程中，透過在殼聚醣溶液中加入氯化鈣，使球珠外層形成保護結構，有效穩定水凝膠球珠，避免烘乾後碎裂，且在浸泡水中可恢復原本體積。雖然奈米級零價鐵容易氧化，但在水凝膠外層形成的氧化球殼能保護內部  $\text{Fe}^0$ ，保持材料的還原活性與功能性。

#### 2. 液相吸附容量高且受初始濃度影響

- nZVI/CS/ALG/BC 材料對重金屬（ $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Cr}^{3+}$ ）的吸附容量隨時間增加而提升。
- 在液相吸附試驗中，重金屬初始濃度越高，材料所達到的最大吸附容量也越高。於測試的最高初始濃度下，吸附容量（以質量計）分別為：鉛（Pb）41.70 mg/g、銅（Cu）30.66 mg/g、鉻（Cr）16.03 mg/g。
- 吸附過程中，前 60 分鐘材料吸水膨潤加速吸附反應，約 2 至 4 天後達到相對穩定的飽和狀態。

#### 3. 重金屬吸附模式以化學多層吸附為主

- 動力學分析顯示，偽二階模型對 nZVI/CS/ALG/BC 吸附重金屬的回歸較佳（ $R^2$  大部分介於 0.9924~0.9982），表示吸附以化學作用為主，作用機制可能包括沉澱、電子交換或共價鍵形成。
- 等溫吸附模型中，Freundlich 模型  $R^2$  值極高（0.9943~0.9999），顯示吸附以多層形式進行，且材料表面吸附點分布不均。根據 Freundlich 模型分析， $\text{Cu}^{2+}$  與  $\text{Cr}^{3+}$  的吸附強度高於  $\text{Pb}^{2+}$ 。

#### 4. 受污染土壤中重金屬去除率顯著

- 以鉻、鉛、銅為主的受污染土壤吸附試驗中（添加量 2.0 g/100 g 土壤，經過 28 天），nZVI/CS/ALG/BC 展現顯著去除效果。
- 各重金屬去除率分別為：Pb 約 27%、Cu 約 25%、Cr 約 21%。吸附速率在 14~21 天後開始逐漸下降，顯示材料在土壤中亦能穩定發揮吸附功能。

#### 5. 展現韌性整治效果，減少重金屬流動與作物吸收



## 第六章、結論與建議

- 於模擬農田環境（水田與旱田）之盆栽試驗中，施用水凝膠材料（1 g/100 g 土壤）達到預期韌性整治效果。材料吸附輸入鉻總量 7%（水田組）至 12%（旱田盆栽試驗組），有效減少鉻在環境中的流動與累積。
- 滲流水中鉻含量下降（水田組盆栽試驗減少 5.8%；旱田盆栽試驗組減少 10.8%）、土壤累積量降低（水田盆栽試驗組減少 22%；旱田盆栽試驗組減少 25%），以及作物吸收量顯著減少（水田盆栽試驗組減少 50%；旱田盆栽試驗組減少 33%），顯示該材料在重金屬韌性整治與預防性應用上具有良好潛力。



## 6.2 建議

本計畫建議包括：

1. 針對完整稻作生長期（120~180 天）內進行長期試驗，擴大不同操作環境，例如：不同施用比例（例如 1%、2%、3%）、提升重金屬施用量以及比較其他重金屬（銅、鉛）等，評估其對土壤累積及作物吸收量之影響，並分析氣溫及其他現地環境因子對吸附效能及作物植體（例如植株高度、乾重、葉綠素或根部量）之影響。
2. 進行綠色土壤改良劑優/缺點及永續性層面綜合評估，並評估水凝膠材料於不同環境條件下之穩定性，確認其應用耐久性（吸脫附試驗）；同時，評估材料多次脫附再生之效能變化，以及其成本效益分析。
3. 擴大等溫吸附模式（例如：Temkin、Dubinin – Radushkevich 等）模擬分析，結合材料鑑定（例如：SEM、nZVI 分布及氧化程度）與分析，以全面解析材料之吸附（金屬固定）行為與機制。



## 第七章、參考文獻

1. Wang, L., et al., A review of green remediation strategies for heavy metal contaminated soil. *Soil Use and Management*, 2021. 37(4): p. 936-963.
2. Environnement, A., Evaluation Support Study on the Impact of the CAP on Sustainable Management of the Soil. Final Report, 2020.
3. Liu, Y., et al., Nano-FeS incorporated into stable lignin hydrogel: A novel strategy for cadmium removal from soil. *Environ Pollut*, 2020. 264: p. 114739.
4. Li, B., et al., Remediation of Cd (II) ions in aqueous and soil phases using novel porous cellulose/chitosan composite spheres loaded with zero-valent iron nanoparticles. *Reactive and Functional Polymers*, 2022. 173.
5. Xu, Y., et al., Chitosan-modified iron fillings materials for remediation of arsenic-contaminated soil. *Chemical Engineering Journal*, 2024. 486.
6. Hu, T., et al., Self-separating core-shell spheres with a carboxymethyl chitosan/acrylic acid/Fe(3)O(4) composite core for soil Cd removal. *Carbohydr Polym*, 2024. 343: p. 122428.
7. Pu, S., et al., In Situ Coprecipitation Formed Highly Water-Dispersible Magnetic Chitosan Nanopowder for Removal of Heavy Metals and Its Adsorption Mechanism. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2018. 6(12): p. 16754-16765.
8. Facchi, D.P., et al., New magnetic chitosan/alginate/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@SiO<sub>2</sub> hydrogel composites applied for removal of Pb(II) ions from aqueous systems. *Chemical Engineering Journal*, 2018. 337: p. 595-608.
9. Feng, C., et al., Geo-environmental and mechanical behaviors of As(V) and Cd(II) co-contaminated soils stabilized by goethite nanoparticles modified biochar. *Biochar*, 2023. 5(1).
10. Yu, K., et al., A novel chitosan-based hydrogel microspheres for efficient heavy metal-ion adsorption. *Materials Today Communications*, 2024. 41.
11. Rahmatpour, A. and A.H. Alizadeh, Biofilm hydrogel derived from physical crosslinking (self-assembly) of xanthan gum and chitosan for removing Cd(2+), Ni(2+), and Cu(2+) from aqueous solution. *Int J Biol Macromol*, 2024. 266(Pt 2): p. 131394.



## 第七章、參考文獻

12. Tarekegn, M.M., A.M. Hiruy, and A.H. Dekebo, Nano zero valent iron (nZVI) particles for the removal of heavy metals (Cd(2+), Cu(2+) and Pb(2+)) from aqueous solutions. *RSC Adv*, 2021. 11(30): p. 18539-18551.
13. Abu-Danso, E., et al., Synthesis of clay-cellulose biocomposite for the removal of toxic metal ions from aqueous medium. *J Hazard Mater*, 2020. 381: p. 120871.
14. Zhuang, S., K. Zhu, and J. Wang, Fibrous chitosan/cellulose composite as an efficient adsorbent for Co(II) removal. *Journal of Cleaner Production*, 2021. 285.
15. Wittmar, A.S.M., J. Klug, and M. Ulbricht, Cellulose/chitosan porous spheres prepared from 1-butyl-3-methylimidazolium acetate/dimethylformamide solutions for Cu(2+) adsorption. *Carbohydr Polym*, 2020. 237: p. 116135.
16. Shawky, H.A., Improvement of water quality using alginate/montmorillonite composite beads. *Journal of Applied Polymer Science*, 2010. 119(4): p. 2371-2378.
17. Biswas, S., et al., Process Optimization Study of Zn<sup>2+</sup> Adsorption on Biochar-Alginate Composite Adsorbent by Response Surface Methodology (RSM). *Water*, 2019. 11(2).
18. Karthik, R. and S. Meenakshi, Removal of Cr(VI) ions by adsorption onto sodium alginate-polyaniline nanofibers. *Int J Biol Macromol*, 2015. 72: p. 711-7.
19. Li, H., et al., Kinetics, thermodynamics, and equilibrium of As(III), Cd(II), Cu(II) and Pb(II) adsorption using porous chitosan bead-supported MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2021. 31(6): p. 1107-1115.
20. Zhang, L. and Y. Guan, Microbial investigations of new hydrogel-biochar composites as soil amendments for simultaneous nitrogen-use improvement and heavy metal immobilization. *J Hazard Mater*, 2022. 424(Pt A): p. 127154.
21. Mi, Y., et al., Machine learning method for predicting cadmium concentrations in rice near an active copper smelter based on chemical mass balance. *Chemosphere*, 2023. 319: p. 138028.
22. Park, S.H., et al., Effects of Scallop Shells and Starfish (*Asterias amurensis*) on Stabilization of Metalloid (As) and Heavy Metal (Pb and Zn)-Contaminated Soil. *Agronomy*, 2024. 14(8).





## 第七章、參考文獻

23. Yang, D., et al., Transferring waste red mud into ferric oxide decorated ANA-type zeolite for multiple heavy metals polluted soil remediation. J Hazard Mater, 2022. 424(Pt A): p. 127244.
24. Febrianto, J., et al., Equilibrium and kinetic studies in adsorption of heavy metals using biosorbent: a summary of recent studies. J Hazard Mater, 2009. 162(2-3): p. 616-45.
25. B. Meroufel, O.B., M. Benyahia, Y. Benmoussa, M.A. Zenasni, Adsorptive removal of anionic dye from aqueous solutions by Algerian kaolin: Characteristics, isotherm, kinetic and thermodynamic studies. Journal of Materials and Environmental Science 2013. 4: p. 482-491.



## 第八章、附錄

