




環境部環境管理署

112 年度土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案

建立台灣本土土壤中塑膠微粒 定性定量方法之研究 成果報告

主辦單位：環境部環境管理署
專案執行單位：國立臺灣大學／環境工程學研究所
專案主持人：林逸彬教授
專案執行期間：112 年 12 月 15 日起至
113 年 11 月 29 日止

中 華 民 國 113 年 12 月 印製



環境部環境管理「土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案」

☐構想書 ☒申請計畫書 ☐期中報告
☐修正計畫書 ☐期末報告

審查意見回覆對照表

| | | | |
|--|--|---|---|
| 計畫年度 | 112 年度 | 計畫類型 | <input type="checkbox"/> 先導型 <input checked="" type="checkbox"/> 研究型 <input type="checkbox"/> 模場型 |
| 計畫類別 | <input checked="" type="checkbox"/> 調查 <input type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 其他 | 主持人：林逸彬 NO：R3 | |
| 計畫名稱 | 建立台灣本土土壤中塑膠微粒定性定量方法之研究 | | |
| 審查意見 | | 執行單位回覆 | |
| 委員一 1. 目前對於塑膠微粒並無相關規範，建議後續實驗完成後，可建立相關檢測方法。 2. 實驗過程是否確認塑膠微粒之狀態，如受損問題。 | | 委員一 1. 謝謝委員建議，本研究單位預期可經由計畫之研究結果，推動建立相關土壤塑膠微粒之分析流程。 2. 謝謝委員的審查，實驗過程經有機質去除後之塑膠微粒樣品，會以立體顯微鏡輔助判讀，以進一步確認處理流程中塑膠微粒是否發生形態改變，以選定適宜之處理程序。 | |
| 委員二 1. 實驗方法說明清楚合理，唯操作使用時 H2O2 是否可在分選過濾時有效分離塑膠微粒與同時上浮的泡沫浮渣，排除秤重時造成的誤差？ | | 委員二 1. 謝謝委員的審查，經有機質去除後含塑膠微粒之樣品在塑膠微粒密度分選中僅是針對不同比重種類之塑膠微粒進行分選，初步評估殘留之浮渣不影響分選效果。 | |
| 委員三 1. 後續計畫研究時，建議說明本技術與國際上之相互比較進展。 2. 計畫中並請分析塑膠微粒，對於土壤環境之影響，提供政策參考。 | | 委員三 1. 謝謝委員的建議，本研究會於後續研究報告中對國際相關技術結果進行比較說明。 2. 謝謝委員的意見，文獻中已指出塑膠微粒存在於土壤中可能會吸附並傳輸有機污染物、影響土壤的物理化學性質與植物生長，並降低物種多樣性，然本計畫因期程關係，僅能聚焦於塑膠微粒在土壤中之分析方法的建立。 | |



委員四

1. 主持人近三年已發表 6 篇 SCI 期刊，其代表研究重點與成果主要可分為水中微量金屬分析與方法開發及高級氧化處理相關研究。又近三年主持人獲補助研究計畫 3 件，著墨離場土壤重金屬污染整治及地下水中含氯污染物去除等研究，足以勝任本專案計畫。
2. 本計畫預估之成果績效貢獻包括學術產出國外期刊、國內研討會各一篇及人才培育研發人員 2 位。
3. 本執行團隊除了計畫主持人，亦有三位兼任助理，建議強化研究團隊相關經驗。
4. 本研究擬將自行配置含有不同塑膠微粒之土壤樣品，使用消化常用之氧化劑或酸性藥劑測試常見土壤之有機質去除效果，評估土壤中塑膠微粒之定性定量分析技術之可行性，以驗證整體分離技術操作方法對各式塑膠的有效性。研究方法與步驟尚具體詳盡，且文獻蒐集具完整度。
5. 本研究計畫申請補助經費耗材與主要費用偏高，建議調整經費。
6. 本研究計畫可提供政府推動建立相關土壤塑膠微粒之分析流程，對後續實場塑膠微粒調查有正面的助益。又實驗之結果有利於對後續相關塑膠微粒材料之使用訂定更全面之規範。

委員五

1. 建議應考慮未來應用時所遇到的困難進行研究。

委員四

1. 謝謝委員的審核與肯定。
2. 謝謝委員的審查。
3. 謝謝委員的審查，本研究團隊另有相關在水環境系統中之塑膠微粒研究經驗，可輔助本研究計畫之執行。
4. 謝謝委員的審查，本團隊會依研究規劃流程逐步進行研究分析，以驗證整體分離技術操作方法對各式塑膠的有效性。
5. 謝謝委員的審核，本研究以依據最終經費核定，調降耗材與主要費用。
6. 謝謝委員委員的審查，本研究預期可由研究結果提供有效塑膠微粒在土壤環境之分離程序選用參考，以利建立後續實場土壤塑膠微粒調查流程。

委員五

1. 謝謝委員的建議，初步評估在未來實際應用時，可能會遇到檢測土壤樣本含有影響塑膠微粒檢測之物質，因此在方法建構過程中會加以留意哪類型物質在此方法下具有干擾，並找出去除干擾之方法。此外，實場塑膠微粒之型態可能較不規則性，惟本研究屬



| | |
|--|--|
| | 於開發階段仍先以型態較單一之微粒進行，可將此項困難列為後續研究評估。 |
| <p>委員六</p> <p>1. 紅土、黃土及黑土不足以代表台灣土壤化學性質，土壤顏色也不一定能代表 pH、CEC、土壤有機質。土壤化學性質與礦物成分、植物/作物生長有關，土壤化學性質的確會影響萃取與分析。建議採集台灣主要代表性土壤作為測試基質。</p> <p>2. 個人認為塑膠微粒不屬於土基會主要任務:土壤是最終受體，塑膠微粒若要管制，應是塑膠使用減量，不是管制或改善土壤中塑膠微粒。</p> | <p>委員六</p> <p>1. 謝謝委員的建議，因台灣各地土壤化學性質差異大，本研究雖初步選用組成型態較單一之陽明山紅土、常見之砂質土以及市面上常見之培養黑土作為測試，但同時會進行各土壤之特性分析，以此特性做為後續有機質去除與分選效率之對照參數，以初步釐清各土壤化學性質與礦物質的影響，以利後續進一步採集台灣主要代表性土壤作為測試基質。</p> <p>2. 謝謝委員的意見，本研究並非以土壤塑膠微粒管控為目標，因塑膠微粒可間接影響所有生態環境，主要是著重在已受塑膠微粒污染土壤之盤查與後續使用調查進行方法開發研究。</p> |
| <p>委員七</p> <p>1. 本計畫執行如何確認塑膠微粒分析計量的準確性。</p> | <p>委員七</p> <p>1. 謝謝委員的審查，實驗過程中添加之塑膠微粒會特別經過定量，因此可比對實驗前後添加數量的差異，進行準確的計量分析。</p> |
| <p>委員八</p> <p>1. 計畫主持人及本計畫執行團隊的學術研究能力佳，足以勝任本計畫。主持人及本計畫執行團隊近五年的研究績效佳。</p> <p>2. 本計畫對國內土壤及地下水污染整治的推動有貢獻。</p> <p>3. 本計畫書撰寫具體完整，計畫書中已經說明本計畫的執行方式。</p> <p>4. 計畫書所述的構想具可行性，且具有實務應用潛力(本計畫擬建立相關土壤塑膠微粒之分析流程，對後續實場塑膠微粒調查有正面的助益)。</p> | <p>委員八</p> <p>1. 謝謝委員的審核。</p> <p>2. 謝謝委員的審核，本研究團隊期望透過本計畫，完善建立相關土壤塑膠微粒之分析流程。</p> <p>3. 謝謝委員的審查，本研究團隊會依計畫書之內容執行持續進行相關研究。</p> <p>4. 謝謝委員的審核，本研究團隊希望透過本計畫之研究結果，提供後續實場塑膠微粒調查之可參考技術。</p> <p>5. 謝謝委員的審查，本研究預期可經由研究過程持續精進與產業面相關之研究成果與貢獻。</p> |



5. 計畫執行期限合理，也已經說明預期的研究成果(計畫書中說明:本研究暫無產業面預期成果，但研究結果搭配多種光學及物化分析儀器，可與相關產業進行連結，提供產業精進技術研發)。

6. 計畫經費編列合理。

6. 謝謝委員的審核，本計畫將依最終之經費編列微調整體計畫編列。



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 | 112 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 checked="" type="checkbox"/> 調查 <input type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 其他 | 主持人：林逸彬 NO：B2 | |
| 計畫名稱 | 建立台灣本土土壤中塑膠微粒定性定量方法之研究 | | |
| 審查意見 | | 執行單位回覆 | |
| <p>委員一</p> <p>1. 本計畫以國外已有關於土壤與底泥中塑膠微粒分析方法的發表文章所提技術為基礎，採集臺灣三種土壤進行實驗以進行方法的調整。因實際土質種類多，實驗結果應綜合比較國內外不同土質對土壤與底泥中塑膠微粒分析方法的影響，及相應的干擾排除方法，以提出合適的分析技術供後續檢測方法的訂定與實際樣品的分析應用。</p> <p>2. 式子（4-3）中的 r 代表意義應說明。</p> <p>3. 在分析過程中，會有長時間的加溫乾燥等程序，應製表說明所選用幾種塑膠的操作溫度、融點等基本物化資訊。</p> | | <p>委員一</p> <p>1. 謝謝委員的意見，本單位已彙整國外技術成果於前期文獻回顧中，並在結果討論中依據不同土壤與塑膠微粒偵測之影響進行討論，以期提供較適之初步檢測方法。</p> <p>2. 謝謝委員的審核，式（4-3）中 r 為土壤有機質比，可參閱式（4-1）。</p> <p>3. 謝謝委員的建議，本研究已將不同塑膠材質之密度(g/cm³)、熔點(°C)及耐熱溫度(°C)等特性彙整於表 4-1。</p> | |
| <p>委員二</p> <p>1. 本案「建立台灣本土土壤中塑膠微粒定性定量方法之研究」期中報告內容及已完成之研究工作項目及相關成果符合原計畫預定進度。</p> <p>2. 本案期中報告內容所提出之討論與建議已涵蓋研究中心議題與範疇，有利於下半年研發工作之推展。</p> <p>3. 本案期中報告已針對土壤中塑膠微粒定性定量方法中有機質之干擾及排除(有機質消化、移除)方式進行實驗並說明相關成果，亦根據現有成果說明如何提升計畫後續執行之規劃事項，其結論與建議事項符合計畫設定之目標。</p> | | <p>委員二</p> <p>1. 謝謝委員的審核，本單位會依照工作項目完成後續內容。</p> <p>2. 謝謝委員的審核，本單位已依期中報告所得內容，繼續執行下半年度之研究。</p> <p>3. 謝謝委員的審查。</p> <p>4. 謝謝委員的建議，本單位將會視最終研究成果，評估能否對簡易快速操作方法提供需求性建議。</p> | |



| | |
|---|--|
| <p>4. 有關台灣本土土壤中塑膠微粒定性定量方法之建立，建議於本案後續研發工作(或未來研發計畫)中針對是否具有機會將複雜、精細之實驗室量測方法改良為簡易快速之快篩方法(土壤中塑膠微粒快篩試劑)之可能性，以利田野調查分析應用之需求。</p> | |
| <p>委員三</p> <p>1. 土壤有機質(SOM)為植物有機體經天然風化降解之殘餘物，結構上屬高分子膠體，分子量由上千到數萬都有。在土壤分析上若須定量多採強氧化法(Walkley-Black法)或高溫燃燒法，才能破壞 SOM。雙氧水(Fenton 法)以及硝酸相對而言都是屬於弱氧化劑，作用為改變 SOM 特性，例如改變分子結構、氧化、降低疏水性、斷鍵成較小分子等，以重量法來可能無法呈現雙氧水(Fenton 法)以及硝酸對 SOM 之效應。</p> <p>2. 如本報告中文獻回顧，國內外已有多許多土壤或底泥中塑膠微粒之調查成果，建議比對與討論本報告成果與文獻研究採用之去除 SOM 干擾方法差異與進步之處。</p> <p>3. 試驗土壤分析重金屬之理由？</p> | <p>委員三</p> <p>1. 謝謝委員的審查，本研究因綜合考量操作流程和塑膠粒子的破壞性，選定以重量法進行有機質評估，後續會針對塑膠微粒回收情況等成果，針對此部分之影響進行統整討論。</p> <p>2. 謝謝委員的建議，已彙整部分土壤或底泥中塑膠微粒之成果於表 3-4，以利進行結果比對。</p> <p>3. 謝謝委員的審查，土壤中金屬成分分析僅供本試驗了解土壤特性，以利在實驗流程中判斷可能的干擾(如使用 Fenton 法時的催化影響等)，已將此研究結果移至附表進行參閱。</p> |
| <p>委員四</p> <p>1. 本研究採用配置的含塑膠微粒土壤，如何代表反應台灣本土土壤的特性，配置各種塑膠微粒，實驗設計採均質污染或非均質污染，請說明，兩者對於實驗分析具有不同的影響性，目前使用的分析方法參考文獻及出處請在本文中說明，本分研究報告在研究設計，沒有註明文獻出處，是否為本研究所開發的新方法？實驗 QA&QC？</p> <p>2. 後續工作規劃建議提出較為明確的內容，與預定完成的工作如何進行查核請明列實驗內容組數，以及後續如何確認方法可行性。</p> | <p>委員四</p> <p>1. 謝謝委員的審核，由於本研究尚處於前期方法開發建立階段，故實驗設計上以多種土壤搭配實際採樣土壤作為代表性土壤，並同時搭配幾種常見塑膠微粒以額外添加方式配置樣品作為目標物進行測試，屬於均質實驗設計。本研究中使用之研究方法與設計係參考搭配部分文獻進行調整使用，已於報告書中標明出處。方法建置過程亦同時分析各階段之控制組實驗以確保分析品質。</p> <p>2. 謝謝委員的建議，已在工作項目中詳列研究中使用之材料與各組實驗內容，以利判定方法開發過程之整體可行性。</p> |



委員五

1. 專案執行進度符合期中預定查核點之工作項目內容。
2. 請問本計畫所研究開發的方法，是否有國際間的文獻可資參引？
3. 文中提及本次計畫採用尼羅紅染劑進行染色，建議可評估是否會因其他物質也被染色，而影響定量結果。
4. 第 43 頁，文中所提臺灣耕地土壤有機質普遍落在 30% 以下，與本次研究採用土壤(紅土、砂質土、培養黑土)之有機質含量較具差異，且耕地土壤成分可能更複雜，建議亦可評估有機質消化實驗應用於實際耕地土壤之成效。
5. 第 46 頁說明芬頓試劑造成之土壤重量損失較低，建議可評估是否係因試劑中鐵離子沉澱導致。
6. 建議後續可比較再生塑膠與研究中所使用塑膠微粒之差異性。
7. 專案基本資料表請於定稿補上學校章。

委員五

1. 謝謝委員的審查。
2. 謝謝委員的審查，本研究中使用之開發方法係參考搭配部分文獻進行設計，已於報告書中標明出處。
3. 謝謝委員的建議，在實驗設計中有進行多組濾紙與土壤控制實驗，以確認尼羅紅染劑染色之影響問題。
4. 謝謝委員的建議，為更加釐清台灣實際土壤之情況，本研究於最後實驗階段將採用實際採樣土壤進行分析，以提升整理方法開發之實際成效。
5. 謝謝委員的建議，消化過程中試劑添加之鐵離子確實會造成沉澱而影響實際土壤重量，有鑑於各方法間之有機物去除效率差異不大，本研究最終選定直接以過氧化氫作為反應試劑。
6. 謝謝委員的建議，本研究可規劃在方法開發完整後對再生塑膠之特性和流佈進行深入研究。
7. 謝謝委員的審核，會於期末報告最終定稿同時加蓋學校章。



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 | 112 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 checked="" type="checkbox"/> 調查 <input type="checkbox"/> 整治 <input type="checkbox"/> 其他 | 主持人：林逸彬 NO：B2 | |
| 計畫名稱 | 建立台灣本土土壤中塑膠微粒定性定量方法之研究 | | |
| 審查意見 | | 執行單位回覆 | |
| 委員一 | | 委員一 | |
| 1. 本研究主要針對特定類型的土壤樣本進行土壤樣品中塑膠微粒的分析與定量，雖然使用了不同的分選方法，但小粒徑塑膠微粒的回收率仍然不足，特別是對於 PP 和 PVC 的回收效果不佳。就開發分析方法的應用面上，建議比較說明本方法與文獻中以發表的其他方法相比的優缺點、準確度等說明。 | | 1. 謝謝委員的建議，相關補充內容已呈現在 5-5 討論中。 | |
| 2. 建議在未來研究中，增加來自不同土壤類型的樣本的測試，以評估方法的適用度並獲得更全面的塑膠微粒分佈數據。 | | 2. 謝謝委員的建議，後續會評估其他不同特性的土壤之適用度，以利環境土壤檢測之方法開發。 | |
| 3. 學術產出及活動、人才培育等尚否符預期。 | | 3. 目前皆在預期之中。 | |
| 委員二 | | 委員二 | |
| 1. 本計畫「建立台灣本土土壤中塑膠微粒定性定量方法之研究」之成果報告，已完成之工作項目，符合原提案計畫之規劃項目與進度。 | | 1. 謝謝委員的審核。 | |
| 2. 本計畫成果報告之研究結論顯示:過氧化氫為較佳之試劑；使用氯化鈣和氯化鋅溶液對總回收率影響不顯著且紅土回收率優於砂質土，最高分別可達 104%及 53%；對於 PVC 回收成效以氯化鈣溶液較佳，但整體回收率偏低，因此本計畫目前研究方法仍有回收率不足之缺陷。建議研發團隊可於後續辦理相關研究時探討提升回收率對策。 | | 2. 謝謝委員的建議，後續研究會再針對回收率的部分做優化。 | |
| 3. 建議研發團隊後續若將針對本項研究進一步延伸探討，後續計畫可考慮納入對於： | | 3. 謝謝委員的建議，後續會再進行評估。 | |
| 1. 台灣地區不同土壤質地或不同地理區域土壤中塑膠微粒分布(定量)進行調查研 | | | |



| | |
|---|---|
| <p>究。</p> <p>2. 不同土壤質地土壤中塑膠微粒傳輸特性進行研究。</p> | |
| <p>委員三</p> <p>1. 本研究擬建立土壤塑膠微粒之定性定量方法，但實驗成果塑膠微粒定量回收率不足，與 34 頁表 3-2 文獻研究可達 85% 以上仍有一段差距。建議除了討論及比較自行建立的各種前處理法及測試國內土壤對塑膠微粒定量回收率之影響，也可以與文獻使用之方法比對，了解原因。亦有助於後續調整方法之參考。</p> | <p>委員三</p> <p>1. 謝謝委員建議，相關補充內容已呈現在 5-5 的討論中，將會納入後續方法優化當中。</p> |
| <p>委員四</p> <p>1. 本研究與實驗室採用不同土壤模擬塑膠微粒，進行定量定性分析，是否比較實際都市及非都市區域的結果，雖然文獻回顧找到不同的資訊，然而建議應針對實驗室控制土壤與實際土壤的比較，作為實驗分析方法的檢定比較。</p> <p>2. PVC 回收率偏低，然而其為塑膠應用大宗，因其特性與經濟性流佈較廣，請提出具體建議未來如何提升 PVC 定性定量方法。</p> | <p>委員四</p> <p>1. 謝謝委員建議，後續研究會針對實體土壤採樣進行分析，比較其差異性和限制性。</p> <p>2. 謝謝委員建議，相關內容已補充在 5-5 的討論中。</p> |
| <p>委員五</p> <p>1. 專案執行進度符合工作項目成果預定查核點內容。</p> <p>2. 建議可補充有關第 47 頁工作項目內容中，後續預計於國際期刊論文投稿之規劃。</p> <p>3. 本案期末報告內容及結論與建議，有利於後續其他有關建立土壤塑膠微粒定性定量方法研究之發展。</p> <p>4. 勘誤部分：</p> <p>(1)第 53 頁 5-3 第一段與電子顯微鏡進行初步進行判定。… 文字似有重複。</p> <p>(2)封面及內頁報告名稱建請將”期末報告”修正為”成果報告”。</p> | <p>委員五</p> <p>1. 謝謝委員的審核。</p> <p>2. 謝謝委員的建議。</p> <p>3. 謝謝委員的審核和肯定。</p> <p>4. 謝謝委員的審核，已針對錯誤修改。</p> |



112 年度土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗

一、專案基本資料表

申請編號：（由本署填寫）

| | | | | | |
|-----------------------------|---|---|----------------------------|--|----------------------------------|
| 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-I-N1-M (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 type="checkbox"/> 整治 <input checked="" type="checkbox"/> 調查 <input type="checkbox"/> 政策類或其他 | |
| 申請機構系所 | 國立臺灣大學環境工程學研究所 | | | | |
| 機構地址 | 台北市大安區舟山路 71 號 | | | | |
| 專案主持人 | 林逸彬 | | 職等／職稱 | 教授 | |
| 協同主持人 | | | 職等／職稱 | | |
| 專案名稱 | 中文 | 建立台灣本土土壤中塑膠微粒定性定量方法之研究 | | | |
| | 英文 | Development of qualitative and quantitative methods for microplastic analysis of soil | | | |
| | 關鍵字 | 土壤、塑膠微粒、定性定量、方法開發 | | | |
| 執行期程 | 自民國 112 年 12 月 15 日起至民國 113 年 11 月 29 日止 | | | | |
| 專案主持人 | 姓名：林逸彬 | | E-mail：yipinlin@ntu.edu.tw | | 專線：02-33664380 手機：0978-665878 |
| 專/兼任人員 | 姓名： | | E-mail： | | 專線： 手機： |
| 經費分析總表 (僅模場試驗專案需填寫兩年度金額) | 專案預估總經費 | | 第一年申請經費 | 第二年申請經費 | 編列說明 |
| | 1. | 人事費用 | 313,170 | | (1~5 項相加之 50%為限) |
| | 2. | 設備使用含維護費 | 54,450 | | (與計畫實驗相關) |
| | 3. | 耗材與主要費用 | 540,167 | | (與計畫主體相關) |
| | 4. | 其它研究相關費用 | 0 | | (含差旅與租賃費用) |
| | 5. | 行政管理費 | 160,200 | | (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) | | 1,067,987 | | 總金額：1,067,987 |
| | 計畫總經費(1~6 項) | | 1,067,987 | | 總金額：1,067,987 |

專案主持人：_____（簽名或蓋章） 日期：





土壤及地下水污染整治基金補助研究與模場試驗專案

112 年度專案成果績效自評表

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

(一) 學術面

| 項目 \ 目標達成程度 | | | 申請 預估數 | 期中 達成數 | 成果 達成數 | 結案後半年 達成率 | 備註 (說明未達成 原因或學術產 出發表名稱) |
|----------------------|------------------|------------------|-----------|-----------|-----------|--------------|--|
| A 學術產 出及活 動 | 1.國內投稿 (篇數) | (1)論文 | | | | | |
| | | (2)研討會論文 | 1 | 0 | 1 | | 將發表於 30th KKNN Sympo- sium on Environ- mental En- gineering |
| | 2.國外投稿 (篇數) | (1)期刊論文 | 1 | 0 | 0 | | 將於結案 後半年內 完成投稿 |
| | | (2)國際研討會 論文發表 | | | | | |
| | 3.報告 (篇數) | (1)技術報告 | | | | | |
| | | (2)研究報告 | | | | | |
| | 4.專著(本數) | | | | | | |
| | 5.辦理學術 會議(場數) | (1)研討/說明會 | | | | | |
| | | (2)成果發表會 | | | | | |
| | | (3)論壇 | | | | | |
| | 6.研發改良 技術(項數) | (1)已開發技術 | | | | | |
| | | (2)技術平台 | | | | | |
| | 7.技術獎項(項數) | | | | | | |
| B 人才 培育 | 8.研發人員 (人數) | (1)碩士 | 2 | 2 | 2 | | |
| | | (2)博士 | | | | | |
| | 9.研究團隊 (個數) | (1)跨領域團隊 | | | | | |
| | | (2)跨機構團隊 | | | | | |
| | | (3)形成研究中 心 | | | | | |
| | | (4)形成實驗室 | | | | | |



| 項目 \ 目標達成程度 | | 申請 預估數 | 期中 達成數 | 成果 達成數 | 結案後半年 達成率 | 備註 (說明未達成 原因或學術產 出發表名稱) |
|--------------------|-------|-----------|-----------|-----------|--------------|----------------------------------|
| 10.其他指標 (請自行命名) | (請自填) | | | | | |



(二) 產業面

| 項目 \ 目標達成程度 | | | 申請 預估數 | 期中 達成數 | 成果 達成數 | 結案後半年 達成率 | 備註 (說明未達成原因或專利、技術轉移相關詳細資料) |
|---------------|--------------|-------------|-----------|-----------|-----------|--------------|-------------------------------|
| A 智慧財產權 | 1.專利(件數) | 已核准 | 發明 | | | | |
| | | | 新型/設計 | | | | |
| | | | 合計 | | | | |
| | | 申請中 | 發明 | | | | |
| | | | 新型/設計 | | | | |
| | | | 合計 | | | | |
| B 研發技術轉移 | 2.先期技術成果移轉 | 件數 | | | | | |
| | | 授權金(仟元) | | | | | |
| | | 衍生利益金(仟元) | | | | | |
| | 3.技術移轉(專利) | 件數 | | | | | |
| | | 授權金(仟元) | | | | | |
| | | 衍生利益金(仟元) | | | | | |
| | 4.技術移轉(應用技術) | 件數 | | | | | |
| | | 授權金(仟元) | | | | | |
| | | 衍生利益金(仟元) | | | | | |
| | 5.可移轉產業技術 | (1)技術(件數) | | | | | |
| | | (2)品種/系(件數) | | | | | |
| | C 產學研合作 | 6.促成合作研究 | 件數 | | | | |
| 金額(仟元) | | | | | | | |
| 7.促成投資 | | 件數 | | | | | |
| | | 投資金額(仟元) | | | | | |
| 8.促成取得業界科專 | | 件數 | | | | | |
| | 業界投資金額(仟元) | | | | | | |
| 9.其他指標(請自行命名) | | (請自填) | | | | | |



(三) 政策面

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

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

| |
|---|
| 學術面(如國內外研討會、期刊投稿件數、或人才培育碩博士生說明) |
| 1. 投稿期刊 1 篇、參與國內研討會發表論文 1 篇。 2. 培育 2 名碩士生，參與研究之人員將模擬台灣本土土壤環境，測試多種塑膠微粒分選流程，搭配多種儀器分析操作，建立塑膠微粒於土壤中之分析方法及限制。 |
| 產業面(如合作研發產業、申請專利、洽談技術移轉廠商件數說明) |
| 1. 本研究暫無產業面預期成果，但研究結果搭配多種光學及物化分析儀器，可與相關產業進行連結，提供產業精進技術研發。 |
| 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) |
| 1. 可提供政府推動建立相關土壤塑膠微粒之分析流程，對後續實場塑膠微粒調查有正面的助益。 2. 實驗之結果有利於對後續相關塑膠微粒材料之使用訂定更全面之規範。 |





中文摘要

塑膠微粒係指粒徑小於 5 mm 以下之塑膠碎片，其已在大多數環境水體中被檢測到，近年來，在土壤或底泥中也被發現有塑膠微粒的存在。塑膠微粒可能會吸附有機污染物並累積在土壤中，影響有機污染物在地下水中的傳輸。有關環境中塑膠微粒之檢測方法，在水相中主要以傅立葉轉換紅外線光譜儀與拉曼光譜儀之定性定量方法為主，以及使用染劑配合螢光、立體顯微鏡之定量方法。在土壤與底泥中，需先以氧化劑去除有機質以防止其在分析過程對光譜與染劑的干擾，並結合水相的偵測方法，評估土壤中塑膠微粒之定性定量分析技術之可行性，以驗證整體分離技術操作方法對各式塑膠的有效性。

本研究首先以富含鋁、鐵等金屬成分之紅土及砂質土為土壤樣品，研究發現過氧化氫為目前去除土壤有機質干擾之較佳試劑，且所測試之 PP、PVC、HDPE、PET 及 PA66 等大顆粒塑膠(2-3 mm)未受到試劑破壞。接續以更小粒徑的 PP、PVC 及 PE 塑膠 (20~600 μm) 摻入土壤作為試樣，並以高密度之氯化鈣及氯化鋅鹽類溶液進行塑膠分選，研究結果顯示在兩種土壤中以氯化鈣為分選液，並經兩次分選下有較佳之分選回收成效。粒徑約 600 μm 之 PE 採肉眼辨識，回收率達九成；更小粒徑之 PP、PVC 採螢光顯微鏡進行染色計數確認回收率，PP 之回收率以 104 % 為最佳，PVC 之回收率最高僅 56%。調查實際農田土壤之塑膠微粒，平均每克之土壤約含有 600 顆塑膠粒，且至少存在有 PP 及 PE 塑膠。本研究目前之方法仍有回收率不足之問題尚待克服，因此後續建議增加分選次數及分選液密度，以提升塑膠顆粒之回收率。





英文摘要

Plastic debris with a size smaller than 5 mm are termed “microplastics”. Microplastics have been detected in natural waters, soils, and sludges. Microplastics could be harmful due to their physical and chemical properties. Regarding the detection of microplastics in the environment, fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) and Raman spectroscopy are mainly used for qualitative and quantitative analysis, and fluorescence microscopy and stereomicroscopy are also applied recently. This study aims to develop a method for the detection of microplastics in soil samples.

Sandy soil and laterite soil were chosen as soil matrix in this study. Hydrogen peroxide was found to be the most effective reagent to digest soil organic matter, and polypropylene (PP), polyvinyl chloride (PVC), high density polyethylene (HDPE), polyethylene terephthalate (PET) and polyamide 66 (PA66) plastic were not damaged by the reagent. Smaller sizes of PP, PVC and PE microplastics were then spiked in the sandy and laterite soil, and high-density solutions including calcium chloride (CaCl_2) and zinc chloride (ZnCl_2) were used to extract microplastics from the digesting solution. The results showed that CaCl_2 was the better separation solution, and two cycles of separation could achieve better recovery efficiencies. PE with a size around 600 μm was visually identified, with an average recovery of 90 %. PP and PVC with size ranging 20-80 μm and 20-300 μm , respectively, were counted using dye-assisted fluorescent microscopy. The optimal recovery of PP was 104 %, while that of PVC was only 56 %. The qualitative and quantitative detection of microplastic for actual farmland soil was conducted. There were approximately 600 microplastics per gram of soil, and PP and PE plastics were both found using μ -FTIR analysis. Since the current method still has limitations in the recovery, it is recommended to increase the separation cycles and use a separation solution with a higher density in the future to improve the recovery.

目錄

第一章 前言 25

第二章 研究目的 27

第三章 文獻探討 29

 3-1 土壤有機質去除 29

 3-2 塑膠微粒檢測方法 31

 3-3 塑膠微粒實場採樣分析 35

第四章 研究方法與過程 37

 4-1 研究流程與目的 37

 4-2 工作項目 38

 4-3 工作進度甘特圖 47

第五章 結果與討論 49

 5-1 土壤基本特性 49

 5-2 消化方法對土壤及其有機質去除之影響 50

 5-3 消化方法對塑膠微粒之影響 53

 5-4 塑膠微粒添加溶液控制試驗 55

 5-5 分選流程對塑膠微粒回收之影響 57

 5-6 實場土壤塑膠微粒檢測分析 65

 5-7 實場土壤中塑膠微粒之定性分析 66

 5-8 結論與建議 68

第六章 參考文獻 69

附錄 76





圖次

| | |
|--|----|
| 圖 3-1、土壤塑膠汙染採樣分布圖 | 36 |
| 圖 4-1、研究流程圖 | 37 |
| 圖 4-2、本研究使用之土壤 | 38 |
| 圖 4-3、有機質測定流程 | 40 |
| 圖 4-4、有機質去除實驗流程 | 42 |
| 圖 4-5、塑膠微粒分離流程 | 43 |
| 圖 4-6、定量分析流程圖 | 44 |
| 圖 4-7、塑膠微粒定量示意圖 | 45 |
| 圖 5-1、土壤有機質含量 | 49 |
| 圖 5-2、土壤在不同消化處理後之總去除 | 50 |
| 圖 5-3、土壤在不同消化處理後之有機質去除率 | 51 |
| 圖 5-4、芬頓試劑反應後之產物 | 52 |
| 圖 5-5、塑膠添加溶液單位體積顆粒數 | 56 |
| 圖 5-6、土壤控制組定量結果 | 57 |
| 圖 5-7、採螢光定量之含 PP 或 PVC 塑膠顆粒土壤經分選後的濾紙 | 58 |
| 圖 5-8、採肉眼辨識之含 PE 顆粒土壤分選過濾後結果 | 58 |
| 圖 5-8、含不同塑膠之砂質土經氯化鈣分選定量下之回收率 | 59 |
| 圖 5-9、含不同塑膠之紅土經氯化鈣分選定量下之回收率 | 60 |
| 圖 5-10、含不同塑膠之砂質土經氯化鋅分選定量下之回收率 | 61 |
| 圖 5-11、含不同塑膠之紅土經氯化鋅分選定量下之回收率 | 62 |
| 圖 5-12、土壤背景訊號 | 64 |
| 圖 5-13、田土塑膠顆粒分析 | 65 |
| 圖 5-14、田土中塑膠顆粒定性分析之 μ -FTIR 圖譜 | 66 |
| 圖 5-15、顯微影像下之塑膠顆粒 | 67 |
| 圖 5-16、添加塑膠微粒之田土定性分析之 μ -FTIR 圖譜 | 67 |





表次

表 3-1、偵測方法比較 31

表 3-2、以光譜分析塑膠微粒之文獻統整 34

表 4-1、塑膠顆粒(大粒徑) 38

表 4-2、塑膠顆粒(小粒徑) 39

表 4-3、不同激發光下塑膠的螢光表現 45

表 5-1、土壤總去除率(%) 50

表 5-2、有機質去除率(%) 51

表 5-3、重量差異百分比(%) 53

表 5-4、SEM 下之塑膠微粒 54

表 5-5、乙醇溶劑影響 55

表 5-6、不同土壤和塑膠經氯化鈣分選定量下之顆粒數 60

表 5-7、不同土壤和塑膠經氯化鋅分選定量下之顆粒數 62





第一章 前言

隨著環保再利用與循環經濟等議題的興起，可重複使用與環境耐受性高之產品逐漸被開發使用，此類產品通常以塑膠原料製成。大量塑膠製品經使用與丟棄後，可能受到環境物理化學作用而老化，進而分裂為較小的塑膠碎片，其中，塑膠微粒係指粒徑小於 5 mm 之塑膠碎片。環境介質中塑膠微粒的存在已在國內外受到廣泛研究，但大多數研究範疇著重在水體中塑膠微粒的含量與種類(Pivokonsky et al., 2018; Johnson et al., 2020; Tong et al., 2020; Wang et al., 2020)。近年來，陸續有國外學者開始調查並發現塑膠微粒也廣泛存在於底泥與土壤中，已有調查研究顯示塑膠微粒的含量濃度為分別為底泥 14 \#g^{-1} (Dronjak et al., 2022)、郊區土壤 461 \#kg^{-1} (Zhou et al., 2022)、及農業土壤 $240\text{-}3660 \text{ \#kg}^{-1}$ (Lang et al., 2022)。

土壤中之塑膠微粒主要來自棄置於環境的塑膠廢棄物，經環境長期作用而破碎(Cohen and Radian, 2022)，亦或是存在於污水中，經處理程序後沉降於污泥，後因污泥富含營養價值被使用於堆肥，使得塑膠微粒累積於土壤中，亦或是透過暴雨逕流由都市雨水系統傳輸到環境土壤中(Yang et al., 2021)。塑膠微粒除了會吸附並傳輸有機污染物外(Bhagwat et al., 2021; Kapelewska et al., 2021; Yang et al., 2022)，特定種類的塑膠微粒目前也被發現會影響土壤的物理化學性質，進而影響整體生態環境，例如：Boots et al. (2019)發現高密度聚乙烯(HDPE)塑膠微粒會使土壤 pH 從 pH=6.98 降低至 pH=6.36，且生長在含有塑膠微粒土壤的蚯蚓(rosytipped earthworm)，其體重也有顯著減輕；此外，塑膠微粒亦影響植物的生長，Lian et al. (2022)發現種植於摻入聚乳酸(PLA)塑膠微粒土壤的大豆(Glycine max L.)，其根長度比生長於未摻入塑膠微粒以及摻入聚乙烯(PE)塑膠微粒的大豆較短；同時塑膠微粒也影響植物酵素活性，Awet et al. (2018)發現聚苯乙烯(PS)奈米塑膠微粒會影響土壤中的微生物群以及酵素活性。

有鑑於塑膠微粒在土壤介質中所造成不同面向的影響與風險暴露，有必要對土壤環境中之塑膠微粒進行更深入的盤查。然而，國內對於土壤中塑膠微粒的分離與分析技術仍待發展與建立，相對國外已發展的方法，台灣土壤具有不同的物化特性，未必適用國外建議的方法。因此，建立有效適用台灣土壤環境塑膠微粒分析鑑定方法為重要的一環。





第二章 研究目的

欲了解台灣本土土壤中塑膠微粒的流佈、含量及大小，需評估包含塑膠微粒於土壤中之分離技術與塑膠微粒分析鑑定技術在內的操作方法。因此本計畫之研究目的如下：

- 1.評估不同土壤有機物去除方法，確保塑膠微粒分析不受干擾。
- 2.探討不同高鹽水溶液與密度分離次數對於分離塑膠微粒之影響。
- 3.探討螢光顯微鏡配合染劑之塑膠微粒檢測法對土壤樣品之適用性。





第三章 文獻探討

3-1 土壤有機質去除

由於土壤當中的有機質會對後續在定性定量的分析流程產生干擾，特別是在將塑膠微粒從土壤中分離的流程中，因為有機質密度約落在 $1\sim 1.4\text{ g/cm}^3$ ，和大部分塑膠微粒之密度相近，且在後續進行定量計算時，容易產生誤判，因此多數文獻建議先行去除以降低干擾(Yang et al., 2021)。有文獻指出將樣品先加入 30 %過氧化氫，做一次有機質氧化的前處理可以減少後續分選殘留的雜質(Li et al., 2019)。

常見之土壤有機質含量測定方法有 Walkley-Black 法(Walkley and Black, 1934; Walkley, 1947)及燃燒損失法(Loss on ignition, LOI)(Hurley et al., 2018; Roper et al., 2019)，Walkley-Black 法係利用硫酸與重鉻酸鉀氧化土壤中有機質，再利用亞鐵離子逆滴定以定量已被氧化的有機質量，然而 Walkley-Black 法無法完全去除有機質，因此在計算時須乘上校正係數避免低估有機質含量，且已有研究顯示 Walkley-Black 法無法預估總有機碳 $>8\%$ 的樣品(De Vos et al., 2007)；LOI 方法程序操作簡單且便宜，也能避免鉻金屬的使用，然而高溫能燃盡有機碳也會揮發部分無機碳，因此需避免使用過高溫度以及過長的燃燒時間，過去研究發現以 360°C 燃燒兩個小時較能避免無機碳的揮發，以準確量測有機碳含量(Salehi et al., 2011)。以高溫燃燒雖能去除大部分有機質的干擾，但也有可能會影響存在於土壤中之塑膠微粒的物化特性，因此若要有效檢測土壤中塑膠微粒則可搭配使用氧化劑，在水相環境下去除，其有機質去除效率可配合 LOI 之結果估算。

目前國外已發展的土壤有機質去除法主要利用過氧化氫、芬頓試劑(Fenton's reagent)為主(Hurley et al., 2018; Lang et al., 2022; Chandrakanthan et al., 2024; Li et al., 2019; Liu et al., 2019)，芬頓試劑除過氧化氫外，需額外加入亞鐵離子作為催化劑生成氫氧自由基如式(3-1)(Tagg et al., 2017)，其氧化力較強且能快速反應去除有機質。



Duesterberg et al. (2008)研究結果顯示 pH 較低(pH 2.5-3)的狀況下芬頓試劑的氧化能力也會大幅提升。除過氧化氫、芬頓試劑外，也有少部分研究使用酸性試劑(如 HNO_3)(Scheurer and Bigalke, 2018)、鹼性試劑(如 NaOH 和 KOH)，雖能



有效去除大部分有機物、脂肪酸，但其有腐蝕特定種類塑膠的疑慮(Qiu et al., 2016; Hurley et al., 2018)，因此應避免使用過高濃度的酸(Li et al., 2020)。Hurley et al. (2018b)的研究顯示各種不同方法去除土壤有機質干擾之結果，以芬頓試劑效果最好，30%(v/v)過氧化氫配合高溫其次，以強鹼處理效果最差。反應試劑濃度和溫度的選擇為決定去除效率和是否破壞塑膠顆粒的重要參數，濃度太高的試劑會有腐蝕塑膠顆粒的疑慮，但如果選擇較溫和的方式處理往往會耗費大量時間，因此如何設計既能有高處理效率又能不破壞塑膠顆粒的情形下的處理條件變得至關重要。然而，在台灣目前尚未有研究說明上述各種處理方法的有效性及適用性。



3-2 塑膠微粒檢測方法

塑膠微粒充斥在環境中，舉凡海水、底泥、土壤等皆有塑膠微粒的蹤跡，塑膠微粒的檢測多半包含觀測其數量、外觀型態、化學組成、顆粒大小及是否有無額外添加物等資訊，由於微粒粒徑普遍小於肉眼可觀察的等級，在檢測的精準度上面臨很大的挑戰。過往已有大量相關研究調查方法建立在水相與底泥的分析，通常會結合兩種以上的分析儀器來滿足大部分的資訊，在塑膠微粒形態、數量、大小和外觀上的分析多半仰賴電子顯微鏡、立體顯微鏡或螢光顯微鏡等視覺辨識法，透過放大後的影像搭配圖像辨識軟體進行計數得知顆粒數量(Li et al., 2019；Scheurer and Bigalke, 2018)；在微粒之化學組成和塑膠種類方面的偵測方法則大致可經由熱分析和光譜分析兩種進行偵測原理獲得資訊(Ye et al., 2022)。表 3-1 彙總不同類型之塑膠微粒偵測方法，部分方法簡易原理與使用經驗闡述如下。

表 3-1、偵測方法比較

| | 視覺辨識 | 熱分析 | 光譜分析 |
|-------|--|--|--|
| 代表性方法 | <ul style="list-style-type: none">• 肉眼• 立體顯微鏡• 螢光顯微鏡 | <ul style="list-style-type: none">• 氣相層析質譜儀• 熱重力分析儀 | <ul style="list-style-type: none">• 拉曼光譜儀• 傅立葉紅外光譜儀 |
| 獲取資訊 | 外型、大小、數量 | 化學組成、重量 | 種類 |
| 操作限制 | 耗時、誤判情形 | 破壞性方法 | 具有機質、水分干擾 偵測極限問題 |

• 視覺辨識

螢光顯微鏡 (Fluorescence microscope)

螢光顯微鏡適合辨識肉眼不易分辨的顆粒，塑膠微粒經染色陰乾後在螢光顯微鏡下可以透過特定波長區段之激發光照射，使其發出螢光，藉此標記塑膠微粒，利於定量觀察，其中以疏水性之尼羅紅(Nile red)為目前分析塑膠微粒最常使用的染劑。Konde et al. (2020)使用不同濃度的尼羅紅染劑、不同的烘乾時間和溫度等對螢光表現進行比較，研究結果指出使用濃度 20 µg/mL 的尼羅紅染劑，以 50℃烘乾 10 分鐘，有最佳的螢光強度。Erni-Cassola et al. (2017)利用尼羅紅染色偵測 20~1000 nm 的塑膠微粒，並應用於實測底泥環境中。研究顯示將 PE、



PS、PP、PET、PVC 和 PC 等塑膠顆粒置於 PCTE 濾紙進行染色，選用綠光(激發光波長 460 nm，發射光波長 525 nm)對於有機質有較弱的螢光反應，大部分塑膠微粒的呈現效果也比較好，疏水性較好的 PE、PP、PS 等塑膠有較佳的螢光表現。

- **熱分析**

- 氣相層析質譜儀 (gas chromatography–mass spectrometry (GC/MS))**

層析法通常會搭配熱裂解(pyrolysis)和熱萃取(thermal extraction desorption, TED)等裝置做為前置處理，使用高溫熱裂解塑膠顆粒後吸附在固相試劑，再進行熱脫附把產物送入氣相層析管柱，經化合物極性性質在不同時間自管柱溶析，再送入質譜儀分析，透過質譜圖資料庫比對，判斷塑膠聚合物的種類和重量 (Watteau et al., 2018)。Dumichen et al. (2017) 採集環境土壤樣本，用高溫熱萃取後以 GC-MS 分析以快速得知環境樣本中的塑膠種類，分析 100 mg 的樣品耗時 2-3 小時，但此方式無法對塑膠微粒進行定量檢測。

- 熱重力分析儀 (Thermogravimetric Analyzer (TGA))**

熱重力分析儀利用在持續升溫下，樣品中化學成分會在不同溫度下分解或蒸發所造成的重量損失，與分解產生的氣體送入質譜儀後可進行成分組成分析。David et al. (2018)用熱重力分析儀搭配質譜儀的方法，在不做篩選、研磨等前處理的情況下分析土壤中的 PET 塑膠含量，並測得土壤中有 0.2~4.6 %重量的塑膠顆粒。相較於 TED-GC/MS，此方法具有成本低、更大量分析樣品量等優點。儘管熱分析法可以快速得知環境樣本中塑膠微粒之質量濃度，但卻有無法獲得其數量、大小和型態等資訊的缺點。

- **光譜分析**

光譜分析一般分為兩種，分別為傅立葉紅外光譜儀和拉曼光譜儀，以在水相的定性分析技術較為成熟(Blasing and Amelung, 2018；Ye et al., 2022)。在進行光譜分析前，須先進行烘乾、過篩、分離、有機質去除等流程以利後續分析。

文獻中通常以粒徑 5 mm 或 1 mm 等濾篩先將大顆粒移除，並將土壤樣品進行烘乾。從土壤中分離塑膠顆粒可以密度分離、油分離及泡沫浮選法等進行 (Moller et al., 2020)。密度分離法利用加入密度較高之鹽水溶液，如氯化鈉 (NaCl)、氯化鋅 (ZnCl₂)、氯化鈣 (CaCl₂)、碘化鈉 (NaI) 等，使塑膠上浮來分離土壤與塑膠 (Hurley et al., 2018；Li et al., 2018；Dronjak et al., 2022；Lang et al., 2022；Chandrakanthan et al., 2024；Rhee et al., 2024)。氯化鈉雖具成本低、分離效果好的優點，但其密度僅有 1.2 g/cm³，不利密度較高之塑膠(如 PVC)的分離。使用密度 1.5 g/cm³ 之分選溶液較能避免雜質，且也能讓大部分塑膠上浮，提高回收率。



此外，Hurley et al. (2018)發現少部分密度高之塑膠微粒需進行兩次以上分選才能有較高的回收率，因此密度分選的次數也是分析土壤塑膠分佈的關鍵因素。油分離是將樣本加入油和水進行充分混和後，疏水性的塑膠顆粒會從土壤底泥中分離並進入到油層，經過濾使其輕易被蒐集(Crichton et al., 2017)。泡沫浮選法透過氣泡會將疏水性的塑膠顆粒上浮來分離較親水性的土壤，但效率並不佳(Imhof et al., 2012)。表 3-2 彙整以光譜分析方式測定土壤中較大塑膠微粒之文獻與回收結果。

-傅立葉紅外光譜 (Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR))

當紅外光與化合物接觸，因為不同官能基振動能量的差異，在偵測器上形成不同的干涉圖譜。依照材料特性和光源路徑，模式分為穿透、反射和衰減式全反射三種。辨識較小的塑膠需要用到 μ -FTIR，其偵測極限最小僅可到 10 μm ，具有可保留樣品外觀、高精確度、高敏感度及官能基資料庫豐富等優點，不過容易受水分和其他有機物干擾 (Chen et al., 2020)。

-拉曼光譜儀 (Raman):

拉曼光譜屬於振動光譜的一種，使用固定波長激發光和分子作用產生散射光，因能量差會改變光的頻率產生拉曼位移的圖譜，不同分子組成即有不同的譜線，藉由資料庫比對出聚合物的種類。顯微拉曼光譜儀可偵測粒徑最小至 1 μm ，和傅立葉光譜一樣具有非破壞樣品外觀的優點，然而，其容易受到有機和無機物的螢光背景干擾，且產生訊號相對弱，導致有辨識率不高的缺點 (Anger et al., 2018; Hu et al., 2022)。

• 其他輔助方式

掃描式電子顯微鏡-能量散射光譜儀 (SEM-EDS)

掃描式電子顯微鏡具有可產生高解析度成像優點，能觀察樣品表面特性，容易分辨塑膠和其他有機物的差異性；能量散射光譜儀利用電子束激發產生的特性光譜來分析材料的元素組成，兩者儀器的結合即能夠檢測塑膠種類，目前此方法應用於奈米塑膠的檢測。Mehdinia et al. (2020)用 SEM-EDS 得到清晰的塑膠顆粒外觀影像，搭配顯微拉曼光譜儀和顯微鏡，偵測出在每公斤底泥中有 25~330 個約 250~500 nm 的塑膠顆粒。



表 3-2、以光譜分析塑膠微粒之文獻統整

| 樣品 | 消化方式 | 分選方式 | 辨識方式 | 平均回收率 | 參考文獻 |
|---|---|--|--------------------------------|----------|------------------------------|
| 50 g \pm 100 顆 MPs (PP、PE、PET: 500 μ m ~2000 μ m) | 30 % H ₂ O ₂ / 60 °C / 48 h | ZnCl ₂ (1.5 g/cm ³) 靜置分離 6 h | ATR-FTIR 定性，立體顯微鏡看型態、數量 | 87~98 % | (Hu et al., 2024) |
| 10 g \pm 30 顆 MPs (PE、PET: 322~850 μ m) | Fenton reagent | NaI (1.8 g/cm ³) 靜置 24 h，並分選 2-3 次 | ATR-FTIR 定性，顯微鏡放大 20 倍看型態、數量 | 83~98 % | (Hurley et al., 2018) |
| 200 g \pm 10 顆 MPs (PE、PP、PVC、PET、PS、EPS: <1000 μ m) | 35 % H ₂ O ₂ 室溫 7 d | NaI+NaCl (1:1/1.5 g/cm ³) 用曝氣裝置混合再靜置 5 min 後分離 | ATR-FTIR 定性、肉眼計數 | >90 % | (Han et al., 2019) |
| 50 g \pm 10 顆 MPs (PP: 500 μ m) | 65 % HNO ₃ / 90 °C / 48 h | 27% NaCl (1.2 g/cm ³) 混和 10 min、離心分離 30 min (3450 G) 倒出上澄液 | ATR-FTIR 定性、影像計數 | 93~98 % | (Scheurer and Bigalke, 2018) |
| 50 g \pm MPs (PE、PP、PS、PA、PET: 1500 μ m) | 30 % H ₂ O ₂ / 70 °C | 7.5 M 的 NaI 混合 1 h 後，沉降 48 h | ATR-FTIR，立體顯微鏡相片用 ImageJ 計數、大小 | -- | (Li et al., 2019) |
| 50 g \pm 20 顆 MPs (PE、PP、PS、PA、ABS、PET、PC、PMMA: 300~2000 μ m) | 30 % H ₂ O ₂ / 60 °C | NaBr (1.55 g/cm ³) 加氧化流程總耗時三天 | ATR-FTIR 定性，立體顯微鏡定量 | 85~100 % | (Liu et al., 2019) |



3-3 塑膠微粒實場採樣分析

針對塑膠微粒在國內水體中之採樣分析，Kunz et al. (2023)以台中市烏溪作為採樣地點，以研究從鄉村到都市地區的塑膠微粒豐富度。實驗結果顯示幾乎所有樣本中均含有塑膠微粒，主要塑膠微粒類型為聚乙烯（PE）和聚丙烯（PP），其他聚合物類型如聚苯乙烯（PS）、聚氯乙烯（PVC）、乙烯-醋酸乙烯酯（EVA）、聚醯胺（PA）和聚甲醛（POM）也有少量出現。數量最高為 229.8 ± 104.9 個/立方公尺，且發現塑膠微粒的平均數量與人口密度呈現高度正相關。採集到的樣本中塑膠微粒粒徑範圍為 0.18 mm 至 3.87 mm，且約 70 % 顆粒粒徑小於 1 mm。

針對塑膠微粒在土壤中的分析，Zhou et al. (2022)於中國南京市長江流域之都會區土壤進行採樣，先用濾篩蒐集粒徑小於 5 毫米之土樣，不同於大部分文獻先進行有機質消化再密度分選之順序，此研究先將土樣和氯化鋅溶液進行充分混和，待其沉澱 24 小時後，取上澄液至濾膜，重複數次確保塑膠微粒均蒐集於濾膜上。再用 30% 過氧化氫以 50°C 浸泡 72 小時來氧化殘留在濾膜上之有機質，經過濾烘乾後，透過立體顯微鏡進行型態觀察和定量，並搭配 μ -FTIR 判斷塑膠種類。研究結果顯示，土壤樣品塑膠微粒含量為每公斤土壤平均約 461 個塑膠微粒，多為纖維和碎片狀型態，有 32% 為 PET、20.5% 為 PP 20.5%；小尺徑顆粒(< 250 μ m)占了 38.1%，大尺徑顆粒(3~5 mm)僅 1.1%。

Yang et al. (2021) 整理了 2016-2020 年期間 29 篇文獻中的土壤採樣數據，繪製出全球塑膠污染分布圖(圖 3-1)。研究調查顯示，在中國、智利、德國、瑞士、美國等國家進行類似的土壤採樣分析，作為全球塑膠產量佔比達 30 % 的中國，針對沿海地區、農田等場所進行了多項土壤塑膠微粒採樣分析，發現污染程度較輕的土壤每公斤含約 10 個塑膠微粒，而污染嚴重的場址每公斤可超過 40,000 個塑膠微粒，與當地的土地利用方式有密切相關。在澳洲工業區的土壤樣本中，每公斤土壤檢測到 300 至 6,900 個塑膠微粒。這些土壤中的塑膠微粒主要由聚乙烯（PE）和聚丙烯（PP）構成，此外還有聚苯乙烯（PS）、聚對苯二甲酸乙二醇酯（PET）、聚氯乙烯（PVC）和聚醯胺（PA）等其他塑膠。從形態上看，這些塑膠微粒多為纖維狀和碎片狀，粒徑多數小於一毫米。

基本上，文獻中土壤中塑膠微粒的檢測共同點都是去除干擾定性之有機物，多數都使用顯微鏡及光譜儀來進行定性定量，因此，本研究會以文獻為基礎，建立出一套分析與鑑定方法，以利後續對土壤塑膠微粒污染進行評估。



建立台灣本土土壤中塑膠微粒定性定量方法之研究

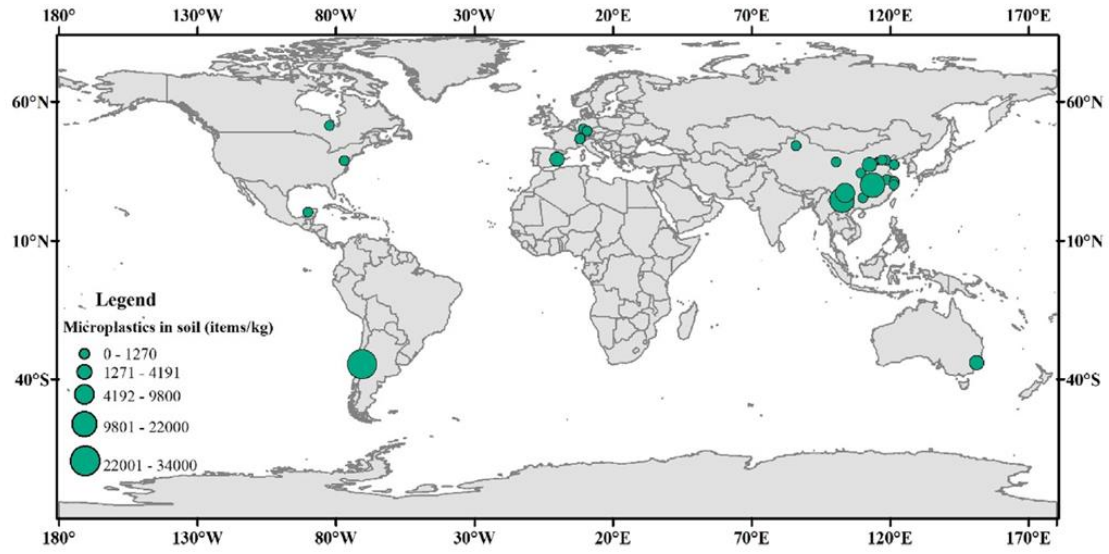


圖 3-1、土壤塑膠汙染採樣分布圖

(Yang et al., 2021)



第四章 研究方法與過程

4-1 研究流程與目的

根據本研究文獻回顧與方法設計，本研究將透過以下實驗規劃設計模擬土壤存在塑膠微粒之情形，並評估後續進行塑膠微粒分離流程與定性定量方法之可行性。整體的研究流程如下圖 4-1 所示。

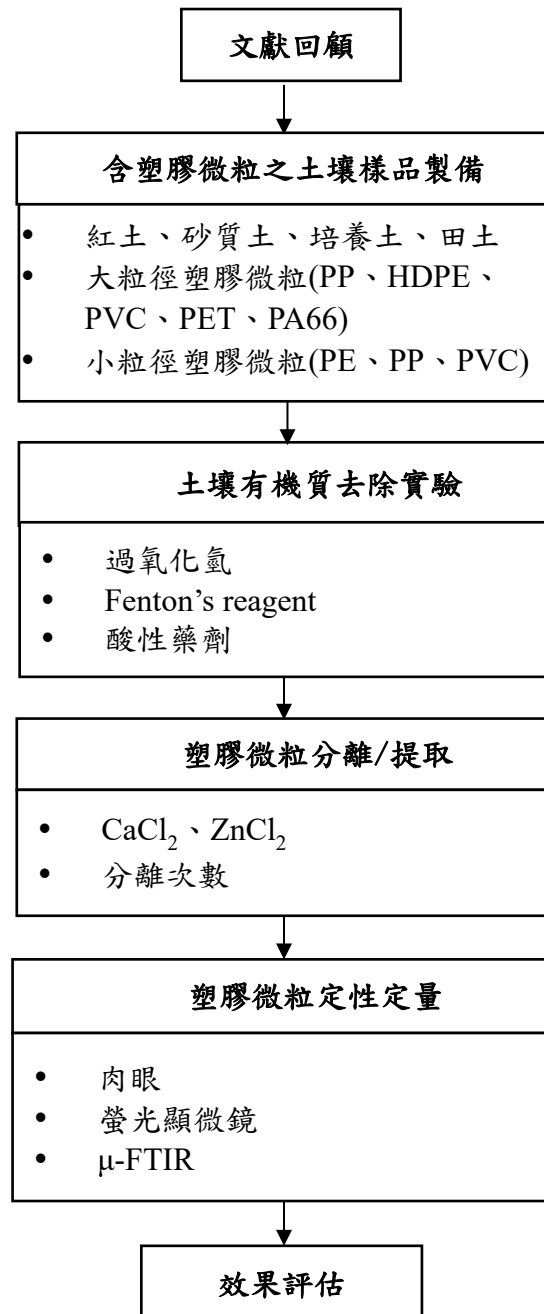


圖 4-1、研究流程圖



4-2 工作項目

針對上述的研究目的與流程，本計畫將包含以下幾個重要的實驗工作項目：

(一) 材料選用

圖 4-2 為本研究所使用的土壤，左至右依序為紅土、砂質土、培養黑土、田土，紅土來源來自陽明山，土壤偏酸性，可代表台灣偏酸性的土壤；砂質土壤質地疏鬆，排水性良好，可以代表部分台灣農地的栽培土；黑色培養土具有高成分有機質和含水量，可以代表台灣有機質豐富的土壤；田土為實際自台大農場挖取的土壤，可代表台灣農業用土，在本研究中其為方法建立後的測試用土。



圖 4-2、本研究使用之土壤

表 4-1 彙整本研究觀察消化試劑對於塑膠顆粒影響使用的大粒徑塑膠顆粒之密度、熔點與耐熱溫度之物化特性，選用塑膠種類包含聚丙烯(PP)、高密度聚乙烯(HDPE)、聚氯乙烯(PVC)、聚乙烯對苯二甲酯(PET)及尼龍樹脂(PA66)，塑膠樣品來自龍成塑膠及華世億公司。外觀顏色上除 PP 為灰色外，其餘皆為黑色；顆粒大小約落在 2 至 3 mm，符合塑膠微粒的定義；形態上僅 PVC 是圓形顆粒，其餘皆偏向圓柱顆粒。

表 4-1、塑膠顆粒(大粒徑)

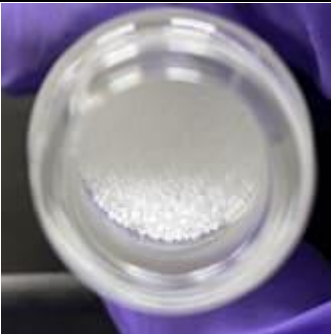
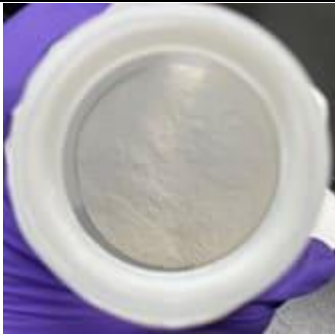

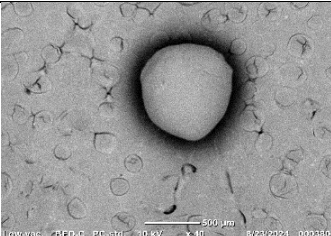
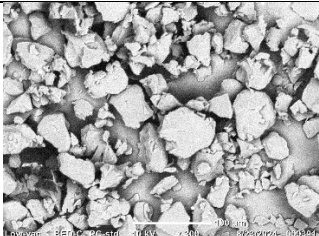
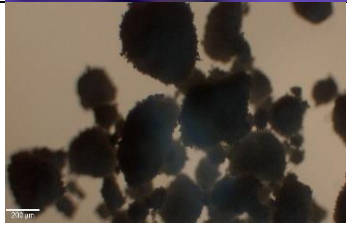
| | PP | HDPE | PVC | PET | PA66 |
|------------------------|---------|--------|---------|---------|--------|
| 密度(g/cm ³) | 0.91 | 0.96 | 1.39 | 1.35 | 1.15 |
| 熔點(°C) | 160 | 350 | 100~260 | 200~230 | 268 |
| 耐熱溫度(°C) | 100~140 | 90~110 | 60~80 | 60~85 | 60~100 |
| 外觀 | | | | | |



第四章

為了貼近實務上更小粒徑的偵測需求與判定本研究選定偵測儀器之分析可行性，新增了PE、PP和PVC等粒徑小於1毫米的塑膠微粒，其粒徑大小與外觀型態彙整如表 4-2 所示。PE 微粒呈現圓珠狀，而 PP 和 PVC 多偏向不規則碎粒狀。在後續配置為土壤樣品階段，含有 PE 的試樣將每次取 10 顆加入土壤樣品，而含有粒徑小於 500 μm 的 PVC 和 PP 土壤試樣，由於顆粒不易取樣計算，因此會以溶液的方式添加於土壤中。配置方式為秤取 5 mg 的塑膠至 50 mL 的乙醇，經磁石均勻攪拌後，首先經多次取樣分析測定一定乙醇體積量下之塑膠微粒數量，在製備含塑膠微粒土壤試樣時，將取 0.5 mL 加入定量土壤樣品中，且每次添加一批次至土壤樣品時會進行一次控制組直接取樣至濾紙上過濾，以作為後續計算回收率之基準。

表 4-2、塑膠顆粒(小粒徑)

| | PE | PP | PVC |
|------|---|---|---|
| 粒徑大小 | 約 600 μm | 約 20~80 μm | 約 20~300 μm |
| 外觀 |  |  |  |
| 顯微影像 |  |  |  |
| 放大倍率 | X40 | X200 | X100 |



(二) 土壤特性分析

土壤之特性分析將包含土壤酸鹼值、金屬成分、有機質含量。土壤酸鹼值測定參考 NIEA S410.62C 土壤酸鹼值測定方法以分析土壤 pH 值，使用 NIEA S321.65B 土壤重金屬檢測方法對土壤樣品中之金屬含量進行分析，首先使用微波消化法將固相土壤轉為溶液態，再以感應耦合電漿原子發射光譜儀(inductively coupled plasma optical emission spectrometry, ICP-OES 測定土壤中金屬種類和含量，再換算金屬在土壤中之含量。土壤之有機質含量以 LOI (Loss-on-ignition)進行估算，精秤適量土壤至小數點以下四位，並置於 105°C 烘箱下乾燥至恆重，得到乾燥土壤，精取乾燥土壤 2 g(M0)至坩堝，使用高溫爐在 360 °C 下鍛燒兩小時以去除有機質，經冷卻後秤其重量(F1)，其重量差(Loss-on-ignition, LOI)即可估算土壤有機質比(r) (式 4-1)，步驟流程如圖 4-3 所示。

$$r = \frac{M0 - F1}{M0} \quad (4-1)$$



圖 4-3、有機質測定流程

(三) 土壤有機質去除實驗

因土壤樣品本身含有有機質、鹽類、金屬及灰分等，其對於塑膠微粒的分離及分析有極大的干擾性，因此土壤樣品需先進行消化去除有機質。本研究先以不加塑膠微粒之土壤進行控制組測試，分別以過氧化氫、芬頓試劑以及硝酸進行土壤有機質消化，三種試劑及其對應之操作條件如下所述：

a. 過氧化氫



第四章

精秤乾燥土壤 1 克(M0)，加入 7.5 毫升之過氧化氫(30 % v/v)並維持溫度 60°C 於 100 rpm 震盪。

b. 芬頓試劑

芬頓試劑主要由 30% v/v 過氧化氫(H₂O₂)與亞鐵離子(Fe²⁺)催化劑組成，取 20 g 結晶硫酸亞鐵溶於 1 L 之 DI 水中配置為水溶液以作為催化試劑(Tagg et al., 2017)。精秤乾燥土壤 1 克(M0)，先加入亞鐵離子催化試劑，並使用濃硫酸調降 pH 至 3 左右，再加入過氧化氫，在總試劑量為 7.5 毫升下使 Fe²⁺/H₂O₂ 莫耳比為 1:1，反應條件在室溫下用磁石混和攪拌，並搭配水域系統以防反應溫度過高。

c. 硝酸

精秤乾燥土壤 1 克(M0)，加入 7.5 毫升之 1 M 硝酸並將反應維持在溫度 60°C，於 100 rpm 震盪以進行反應。

研究所選用之四種土壤，搭配上上述三種試劑方法經反應 18 小時後，搭配抽氣過濾裝置取出到於濾紙，先以烘箱在 105°C 下烘乾 3 小時至恆重，秤得經試劑消化後重量(M1)，透過下式 4-2 式可計算消化過程中之土壤重量總去除率(R_s)，再經由高溫爐在 360 °C 下鍛燒兩小時去除剩餘有機質，取出得反應後重(M2)，經由式 4-3 計算經有機質去除處理後之有機質去除率(R_o)。由於在消化過程中，會把無機物等物質氧化，因此在有機物去除率計算上是用土壤總有機質含量和剩餘未被去除之有機質的差計算而得，詳細之有機質去除實驗步驟流程如圖 4-4 所示。

$$R_s (\%) = \frac{M1-M0}{M0} \times 100 \quad (4-2)$$

$$R_o (\%) = \frac{M0 \times r - (M2 - M1)}{M0 \times r} \times 100 \quad (4-3)$$

此外，為了評估實際樣本在進行有機質去除程序時，土壤中的塑膠微粒是否會受到試劑破壞而影響後續定性定量分析，本研究亦將五種塑膠顆粒進行上述消化試劑的浸泡，將已知重量的塑膠顆粒各五顆個別在上述反應條件後，取出用試劑水沖洗 3 次，在 45°C 下乾燥 12 小時後取出秤重，將以消化前後塑膠微粒之重量差異及搭配掃描式電子顯微鏡(Scanning electron microscope, SEM)之表面微觀影像變化，輔以判斷塑膠微粒受試劑破壞的程度。

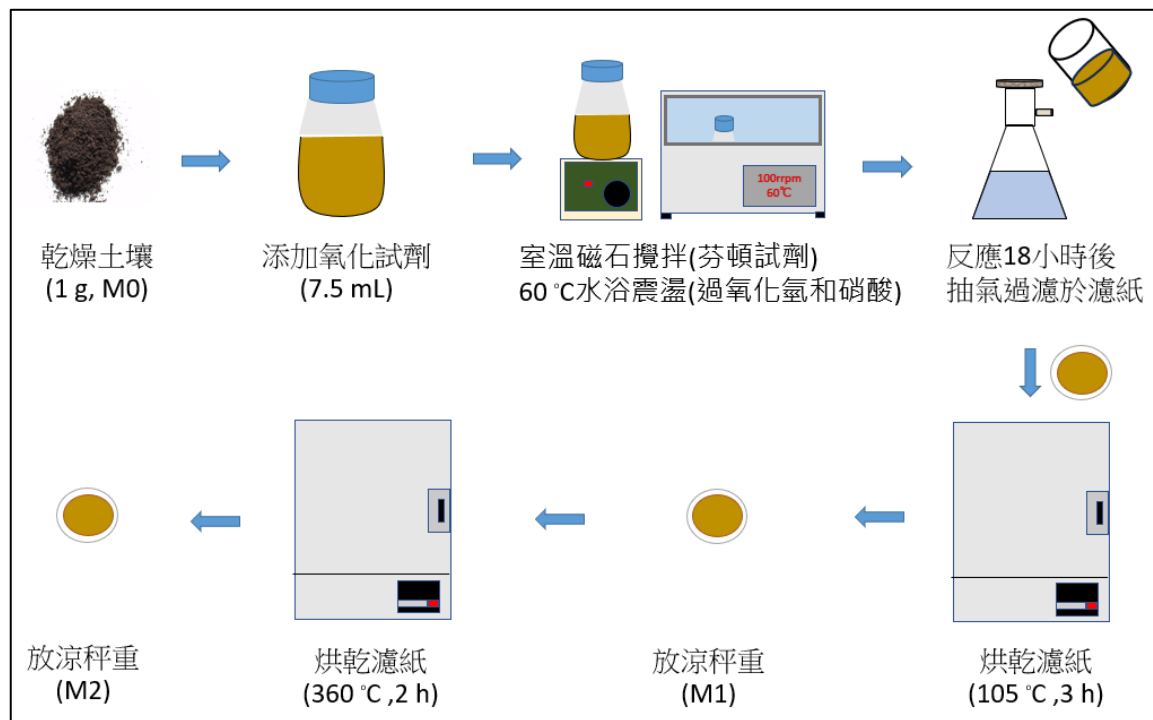


圖 4-4、有機質去除實驗流程

(四) 塑膠微粒分離方法

在摻雜有塑膠微粒之土壤樣品，經有機質去除後，理論上僅剩餘灰分或其他難以分解的雜質，其中也包含了塑膠微粒，這些塑膠微粒與灰分可利用密度分選 (density separation) 的方式將塑膠微粒分離至上澄液。塑膠微粒的密度依種類而不同 (PE 密度約 0.94 g/cm^3 、PP 密度約 0.9 g/cm^3 、PVC 密度約 1.4 g/cm^3)，PE 和 PP 本身密度較低，容易浮於水面上，而 PVC 的密度較水重的塑膠會沉於水底不易分離，本研究將選用氯化鈣水溶液 (CaCl_2 , $1.36\sim 1.5 \text{ g/cm}^3$)、氯化鋅 (ZnCl_2 , $1.36\sim 1.5 \text{ g/cm}^3$) 為密度溶液對進行密度梯度分選，由於 PE 和 PP 塑膠密度均小於 1 g/cm^3 ，為了減少藥品使用，將調配密度至 1.36 g/cm^3 ，PVC 由於其密度高於 1.3 g/cm^3 ，研究設計上須提高溶液密度至 1.5 g/cm^3 。

本研究中完整之土壤有機質與塑膠分離流程如圖 4-5 所示，將上述水溶液加入經有機物去除之土壤樣品中，劇烈搖晃使其充分混勻後，進行離心可使溶液形成分層，經密度分選後所得之水溶液上澄液，可以過濾方式進行固液分離，將含有塑膠微粒之上澄液過濾至玻璃纖維濾紙，收集固體待後續分析，經此一流程即可將塑膠微粒從土壤中進行分離。以外，文獻指出高密度的塑膠微粒需



第四章

要至少兩次以上的密度梯度分選才能有較佳的回收率，因此亦需考慮密度分離次數與回收率之關係，在密度分選流程中將比較 1-2 次分離流程之塑膠微粒回收效率。

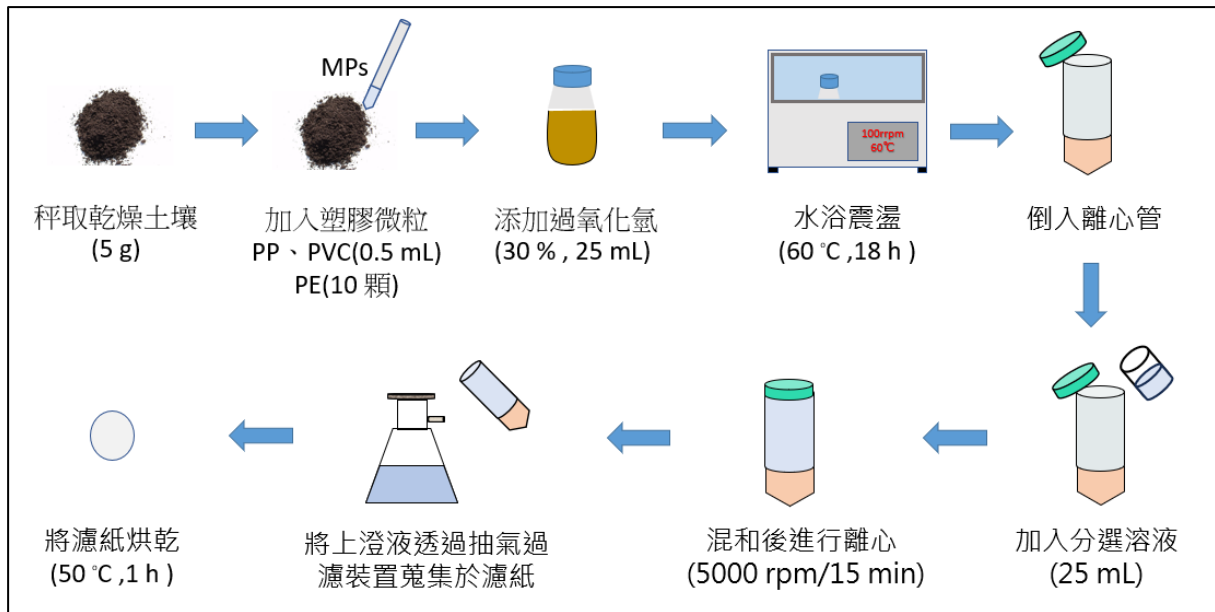


圖 4-5、塑膠微粒分離流程

(五) 塑膠微粒之定性定量分析

a. 定量分析

將上述蒐集到塑膠顆粒之濾紙之顆粒粒徑大小分別進行不同方式之定量，粒徑大於 500 μm 的 PE 顆粒採用肉眼觀察計數；無法用肉眼判斷的 PP 和 PVC，則適合採用尼羅紅染劑配合螢光顯微鏡進行定量以利計數。尼羅紅染劑依不同研究有不同的配置法，甲醇與丙酮最常使用，Konde et al. (2020) 研究表示，利用丙酮與乙醇以 1:1 比例做為溶劑配置的尼羅紅能夠避免有機溶劑對塑膠微粒表面的破壞，因此選用乙醇丙酮的混合溶劑配置尼羅紅染色塑膠微粒。塑膠微粒經上述程序由土壤中分離到玻璃纖維濾紙上後，先將濾紙在 50 °C 下烘乾去除多餘水分，再以上述配置的尼羅紅滴至濾紙上以對塑膠微粒進行染色，完成染色後再將濾紙置於烘箱於 50 °C 使染劑充分附著到塑膠微粒上，取出後放置於抽氣櫃陰乾以待使用螢光顯微鏡分析，收集至濾紙上之塑膠微粒樣品之定量分析流程如圖 4-6 所示。

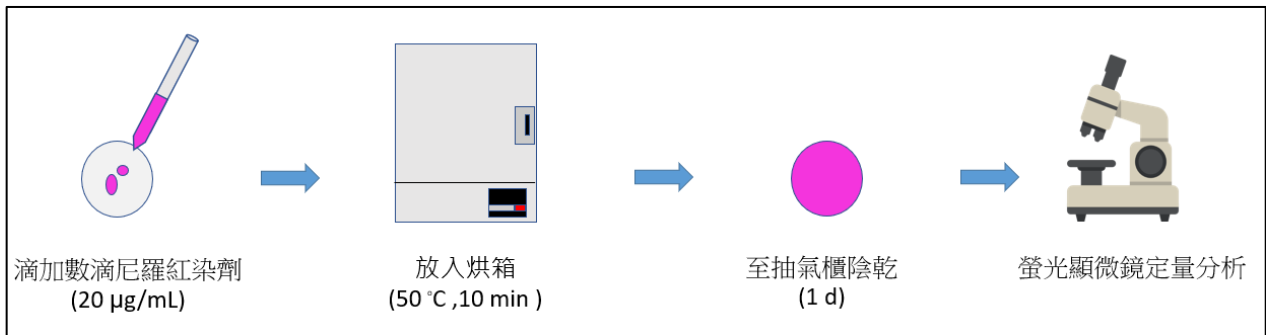
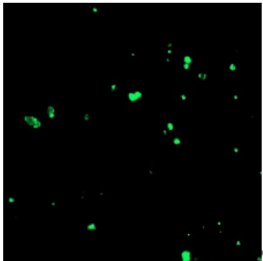
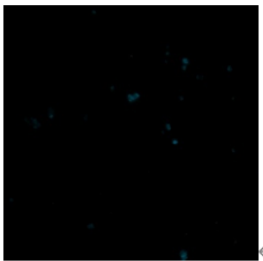
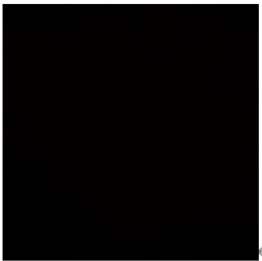


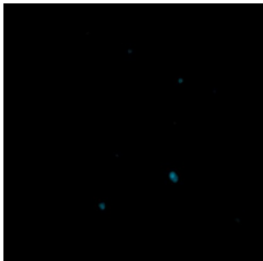
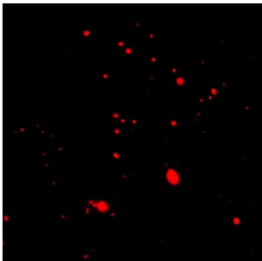



圖 4-6、定量分析流程圖

將濾紙放置於螢光顯微鏡上可以透過特定波長區段之激發光照射，附著於塑膠微粒上之尼羅紅染劑，會因不同種類的塑膠微粒而有些許不同的發射光，根據文獻，PP 塑膠在發射光波長 534 nm 有最好的發光強度，PVC 塑膠則是在波長 606 nm 有較好的發光強度(Konde et al., 2020)。本研究初步以不同發光濾片對 PP 和 PVC 樣本進行測試，可發現在不同的激發光波段會有不同的發光效果(如表 4-3 所示)，根據螢光效果判斷，本研究選定以藍光激發(波段 450~490 nm)作為定量 PP 塑膠之激發波段，以綠光激發(波段 525~575 nm) 作為定量 PVC 之激發波段。欲進行定量的濾紙首先會被分成小網格(區域)，每個區域分別以激發光照射後進行螢光訊號收集，最終再將各區域圖片進行整合，取得完整濾紙之螢光定量結果，再以 ImageJ 經由圖像顏色閾值計數對發出螢光的顆粒數進行塑膠微粒的定量(如圖 4-7)。本研究中顏色閾值設定為 30，觀測粒徑面積設定為 $1 \mu\text{m}^2$ 至無限大，除觀察形狀外，也可透過投影影像面積回推計算其粒徑，此方法可快速定量樣品中的塑膠微粒數量，可透過計算摻入塑膠微粒之回收率，判定此方法是否對土壤樣品有效。

表 4-3、不同激發光下塑膠的螢光表現

| | GFP 濾片 激發光 450~490nm 發射光 500~550nm | CFP 濾片 激發光 400~460nm 發射光 500~600nm | Cy3 濾片 激發光 525~575nm 發射光 570~640 nm | Cy5 濾片 激發光 625~655nm 發射光 665~715 nm |
|-----|--|--|---|--|
| PP |  |  |  |  |
| PVC |  |  |  |  |

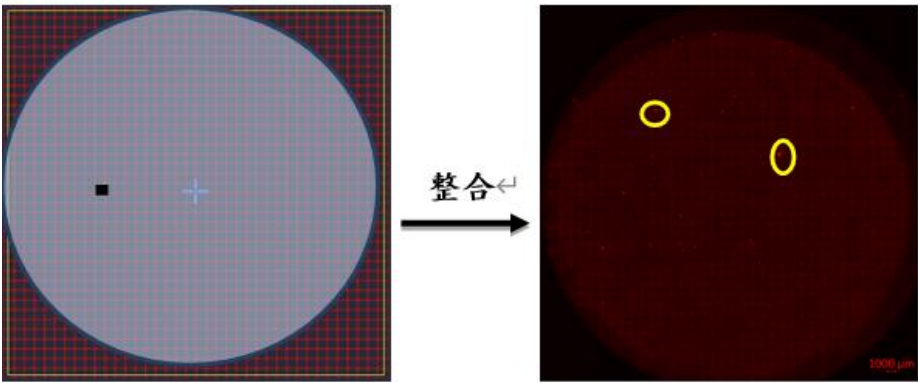


圖 4-7、塑膠微粒定量示意圖

b. 定性分析

在定性部分將採用顯微傅立葉紅外光譜儀判斷塑膠種類，利用塑膠特定的表面官能基不同，再根據紅外光會有不同的吸收波長而有特徵光譜，因此各塑膠種類之特徵光譜資料庫的建立尤為重要，以利後續定性進行。



建立台灣本土土壤中塑膠微粒定性定量方法之研究

本研究將選測實際採集之田土，透過方法建立流程中較佳的消化、分選方法，進行 μ -FTIR 掃描顆粒光譜的輔助鑑定，檢測田土樣品上之塑膠種類。利用紅外線照射特定塑膠顆粒取得特定頻譜後，再透過與資料庫比對進行塑膠微粒的判別。為取得高訊躁比(特徵峰明顯)圖譜，將使用銀或氧化鋁等之低干擾材質濾紙，也要盡量避免濾紙上雜質和水分對定性上的干擾。



第四章

4-3 工作進度甘特圖

| 工作項目 | 年月 | | | | | | | | | | | | | 備註 |
|------------------------|--------|-------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--|----|
| | 112/12 | 113/1 | 113/2 | 113/3 | 113/4 | 113/5 | 113/6 | 113/7 | 113/8 | 113/9 | 113/10 | 113/11 | | |
| 資料蒐集與文獻回顧 | | | | | | | | | | | | | | |
| 土壤特性分析 | | | | | | | | | | | | | | |
| 土壤塑膠微粒樣品製備 | | | | | | | | | | | | | | |
| 土壤有機質去除實驗 | | | | | | | | | | | | | | |
| 不同塑膠微粒消化測試 | | | | | | | | | | | | | | |
| 不同分選溶液試驗 | | | | | | | | | | | | | | |
| 不同分選次數試驗 | | | | | | | | | | | | | | |
| 塑膠微粒定量分析 | | | | | | | | | | | | | | |
| 塑膠微粒定性分析 | | | | | | | | | | | | | | |
| 成果報告撰寫 | | | | | | | | | | | | | | |
| 國際期刊論文投稿 | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | |
| 工作進度估計百分比 (累 積 數) | 5% | 10% | 20% | 30% | 45% | 55% | 65% | 75% | 85% | 90% | 95% | 100% | | |
| 預定查核點 | 期中 | | 1. 土壤特性與有機質含量分析 2. 土壤有機質去除之方法選用 3. 含土壤樣品之有機質去除效率評估 | | | | | | | | | | | |
| | 成果 | | 1. 含土壤樣品之塑膠分選溶液測試 2. 操作次數與分選效率之影響 3. 土壤樣品之塑膠微粒定性定量方法檢測程序之適用性。 | | | | | | | | | | | |



建立台灣本土土壤中塑膠微粒定性定量方法之研究

說明：

- 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。
- 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。
- 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。
- 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 1.5 個月提送。



第五章 結果與討論

5-1 土壤基本特性

土壤之有機質通常源自於植物、動物及微生物殘體，在不同氣候、植被下，有機質含量有很大的差異。圖 5-1 為對實驗中欲使用之四種土壤進行有機質測定的結果，其中培養黑土有較高的有機質，其有機質含量高達 75%，紅土、砂質土和田土之有機質含量則分別約為 2.2%、0.9% 和 4.7%。砂質顆粒含量較高的土壤之有機質量會較低，約落在 3% 以下，依據台灣農業部資訊，台灣耕地土壤有機質普遍落在 30% 以下，少數不肥沃土則落在 3% 以下，由於培養黑土之有機質不符合台灣大多數土壤的標準，而且多半會搭配其他土種一起使用，與環境土壤的土質有所落差，因此後續塑膠微粒分離實驗將不會採用培養黑土。其他土壤相關資訊如酸鹼度和金屬成分等分析呈現於附錄。

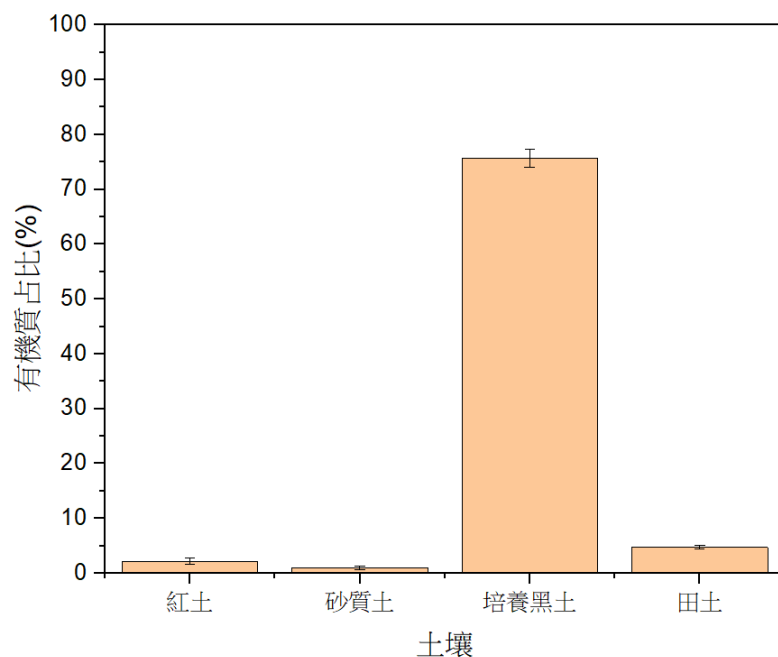


圖 5-1、土壤有機質含量



5-2 消化方法對土壤及其有機質去除之影響

紅土、砂質土、培養黑土及田土四種土壤以三種試劑進行消化程序後，其土壤重量總去除率(R_s)及有機質去除率(R_o)分別如圖 5-2、表 5-1 及圖 5-3、表 5-2 所示。

由圖 5-2 及表 5-1 之實驗結果可以發現，培養黑土對三種試劑較有顯著消化反應的情形，這可能和本身有機質豐富度較高的原因有關，扣除培養黑土，其餘土壤對於單純以硝酸試劑進行時，土壤重量削減較大，土壤重量總去除率約落在 10~15%，可能原因為部分無機顆粒溶解所致。

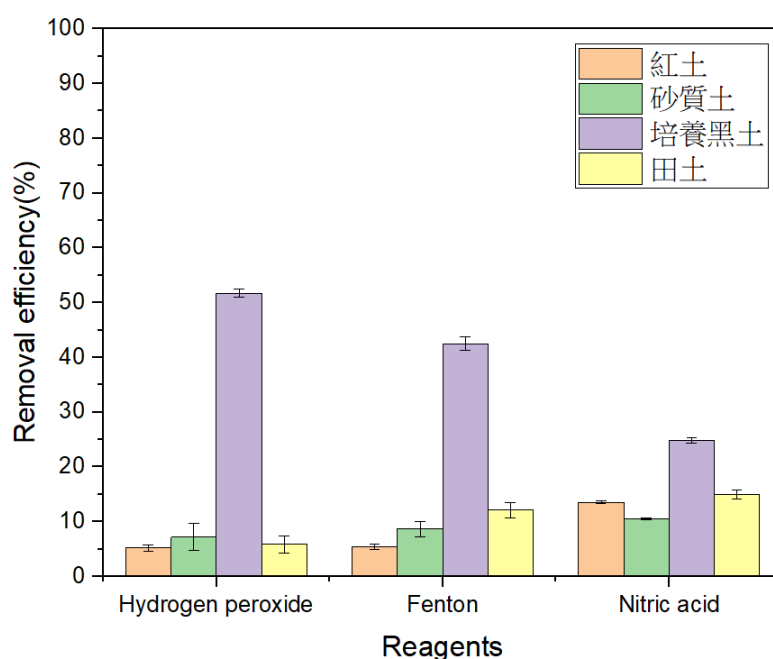


圖 5-2、土壤在不同消化處理後之重量總去除

表 5-1、土壤重量總去除率(%)

| 試劑/土壤種類 | 紅土 | 砂質土 | 培養黑土 | 田土 |
|---------|------|------|------|------|
| 過氧化氫試劑 | 5.2 | 7.2 | 51.7 | 5.8 |
| 芬頓試劑 | 5.4 | 8.7 | 42.5 | 12.1 |
| 硝酸試劑 | 13.5 | 10.5 | 24.8 | 15.0 |



第五章

針對土壤中有機質的去除，依照數據結果(圖 5-3 及表 5-2)判斷，芬頓試劑對於紅土、砂質土、培養黑土及田土之有機質去除率分別約為 62 %、30 %、38 % 及 60 %，此結果和文獻得出芬頓試劑之去除率結果相符(Hurley et al., 2018)。但是經過芬頓反應後的混和物表面會浮一層薄膜(如圖 5-4)，初步判斷會對後續分選造成干擾，加上三種試劑中對於整體去除效果來看沒有特別顯著，因此單一藥劑使用的過氧化氫試劑方法可能為較優之選擇。

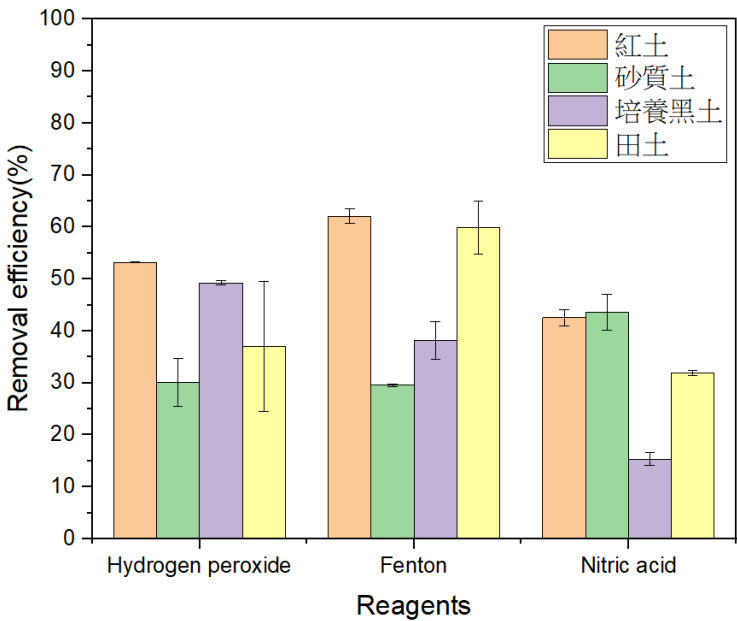


圖 5-3、土壤在不同消化處理後之有機質去除率

表 5-2、有機質去除率(%)

| 試劑/土壤種類 | 紅土 | 砂質土 | 培養黑土 | 田土 |
|---------|------|------|------|------|
| 過氧化氫試劑 | 53.2 | 30.1 | 49.2 | 37.0 |
| 芬頓試劑 | 62.1 | 29.6 | 38.2 | 59.8 |
| 硝酸試劑 | 42.6 | 43.6 | 15.3 | 31.9 |



建立台灣本土土壤中塑膠微粒定性定量方法之研究



圖 5-4、芬頓試劑反應後之產物



5-3 消化方法對塑膠微粒之影響

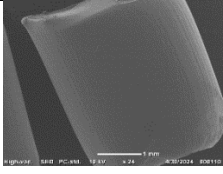
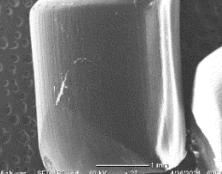
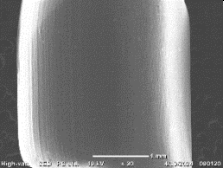
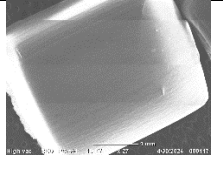
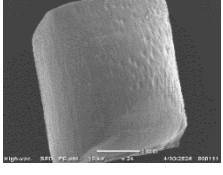
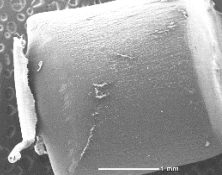
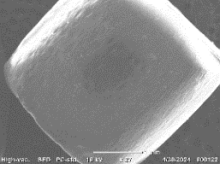
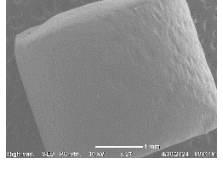
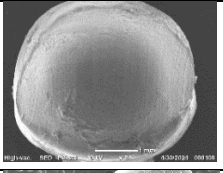
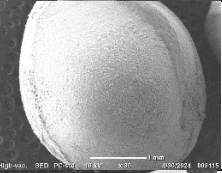
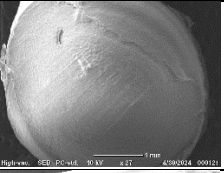
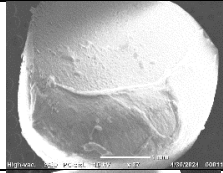
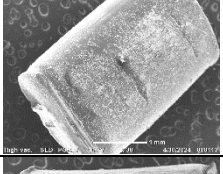
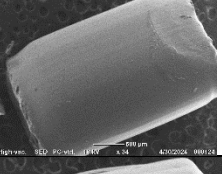
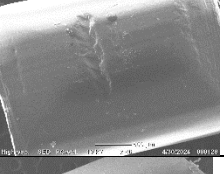
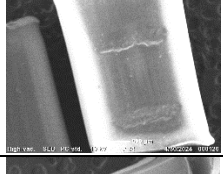
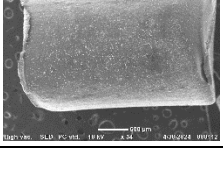
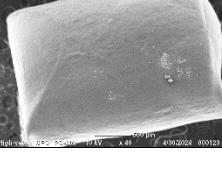
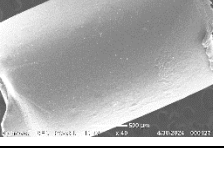
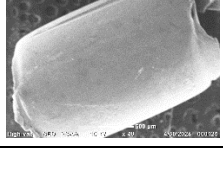
針對不同消化試劑對塑膠微粒的影響，本研究以重量差異百分比與電子顯微鏡進行初步判定。表 5-3 為塑膠顆粒經過消化程序前後之重量差異結果，除 PA66 塑膠外，大部分塑膠微粒之重量變化量皆小於 1%，僅 HDPE 塑膠經芬頓試劑反應後有較明顯的變化，可能是實驗誤差或部分鐵離子的吸附所造成。文獻指出 PA66 塑膠受到消化試劑影響重量會有些微增加的情形 (Hurley et al., 2018)，與此次試驗結果相符，且 PA66 本身之適用操作溫度(operating temperatures)低於 PP、PET 等材料 (PET: 120 °C; PP: 100 °C; PA: 85 °C) (Sujathan et al., 2017)，反應使用之溫度亦可能使 PA66 性質較易受到影響

表 5-4 為塑膠微粒經消化處理前後之 SEM 照片，依照顆粒型態和表面紋路判斷，未受消化程序之顆粒外觀即有些微紋路和粗糙表面，受消化程序反應後，整體並無明顯變化，因此初步判斷塑膠顆粒在本研究設計之消化程序下並無明顯微粒結構被破壞之現象。經由土壤與塑膠微粒受消化方法影響之綜合判斷，本研究中將選定以過氧化氫試劑當作後續去除土壤樣品中有機質干擾的選擇方法。

表 5-3、重量差異百分比(%)

| 試劑/塑膠種類 | PP | PVC | HDPE | PET | PA66 |
|---------|--------|--------|-------|--------|-------|
| 過氧化氫 | 0.724 | -0.339 | 0.000 | 0.982 | 1.099 |
| 芬頓試劑 | 0.000 | -0.773 | 3.987 | 0.147 | 3.381 |
| 硝酸試劑 | -0.114 | 0.000 | 0.429 | -0.541 | 3.559 |

表 5-4、SEM 下之塑膠微粒

| 塑膠種類 | 未經消化程序 | 過氧化氫處理 | 芬頓試劑處理 | 硝酸試劑處理 |
|------|---|---|--|---|
| PP |  |  |  |  |
| HDPE |  |  |  |  |
| PVC |  |  |  |  |
| PET |  |  |  |  |
| PA66 |  |  |  |  |



5-4 塑膠微粒添加溶液控制試驗

在接續進行分選流程時，將採用小顆粒微粒進行添加以製備土壤試樣，因此執行流程前須進行相關背景控制實驗以決定每批次塑膠微粒添加量並排除使用溶劑的干擾，確保有效計算方法流程中塑膠回收率，提升最後定量結果的有效性。

(一) 溶劑空白

本研究因使用乙醇作為分散 PP 及 PVC 塑膠微粒之介質溶劑，溶劑空白為評估乙醇在螢光顯微鏡下是否會有螢光表現的情形，方法為將不含塑膠微粒之乙醇溶液 0.5 mL 滴加在濾紙上，經染色後進行螢光定量。實驗結果如表 5-5 所示，可以發現乙醇溶液內有些許顆粒會被辨識到，特別是在激發光 450~490 nm 下有較多的顆粒，可能的原因為原先盛裝乙醇溶液的容器為 PP 塑膠製品，因此有塑膠顆粒污染的可能性。

表 5-5、乙醇溶劑影響

| | 激發光 450~490 nm | 激發光 525~570 nm |
|-------|----------------|----------------|
| 平均顆粒數 | 170 | 8 |
| 標準差 | 49.8 | 2.9 |

(二) 塑膠微粒添加量測試

由於本研究採用的 PP、PVC 塑膠顆粒難以肉眼辨識，因此採用溶液法進行添加，實驗首先將 5 mg 的塑膠微粒加入 50 mL 的乙醇進行磁石攪拌，為得知單位體積溶液的 PP 或 PVC 塑膠顆粒數分布，進行三重複的試驗。圖 5-5 為兩者的添加定量結果，PP 塑膠部分在用玻璃吸量管取 1 mL 於濾紙過濾，經染色後採用藍光激發，所得顆粒數約在 14,000 顆；PVC 塑膠部分，以玻璃吸量管取 0.5 mL 於濾紙過濾，經染色後採用綠光激發，所得顆粒數約在 10,000 顆，本研究依此結果設定為後續實驗之添加量。



建立台灣本土土壤中塑膠微粒定性定量方法之研究

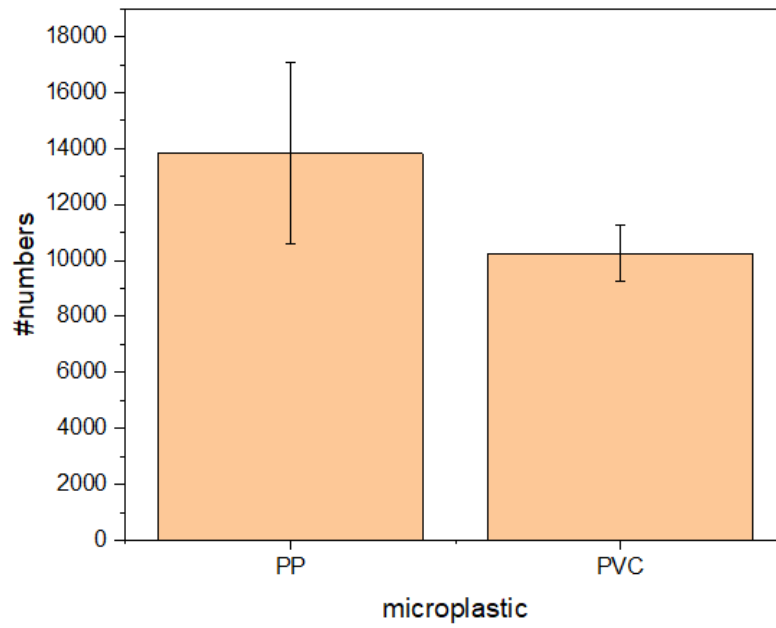


圖 5-5、塑膠添加溶液單位體積顆粒數



5-5 分選流程對塑膠微粒回收之影響

(一) 土壤控制

為了確認本研究選定使用幫助測試塑膠微粒含量回收成效之砂質土和紅土土壤材料是否有螢光干擾表現，首先進行不添加塑膠微粒的土壤控制組測試。圖 5-6 為兩種土壤經過氧化氫消化和密度 1.36 g/cm^3 的氯化鈣溶液一次分選後，在不同激發光波段下所能觀察到之顆粒定量結果，結果顯示 5 g 紅土在兩種波長平均分別約有 775 和 336 的個顆粒數，5 g 砂質土則有 287 和 619 個，這些被辨識出的螢光顆粒可能來自土壤有機顆粒及塑膠微粒，由於土壤購置時採用塑膠包裝，推估也是塑膠微粒污染可能的來源之一。接續實驗將以此結果，分別以兩種土壤混合三種塑膠 (PP、PVC、PE) 搭配兩種分選溶液(氯化鈣、氯化鋅)，進行回收率的分析 and 比較。

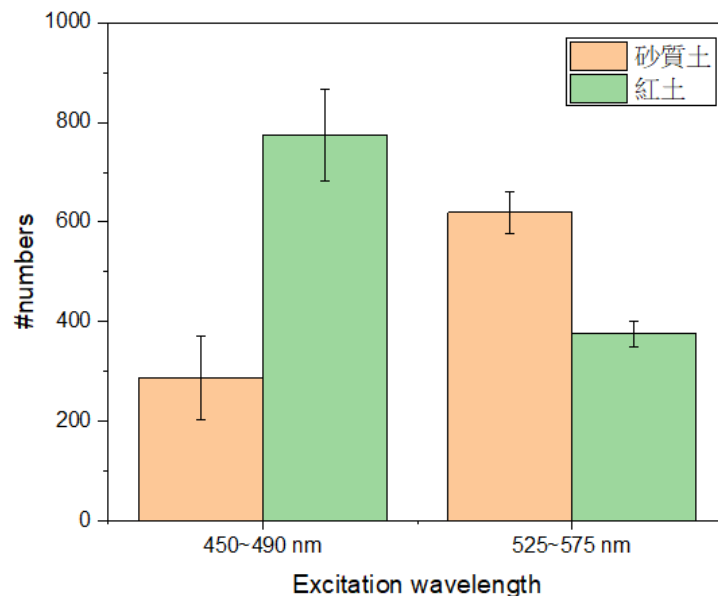


圖 5-6、土壤控制組定量結果



(二) 氯化鈣分選(密度 1.36~1.5 g/cm³) 定量分析

圖 5-7 和圖 5-8 分別為含塑膠微粒土壤經分選過濾至濾紙後之情形，可明顯觀察到因 PP 和 PVC 塑膠微粒尺徑較小無法以肉眼識讀，需以螢光顯微鏡進行輔助測定(圖 5-7)，而含有 PE 之分選過濾樣品則可以肉眼辨識直接辨識計算(圖 5-8)。

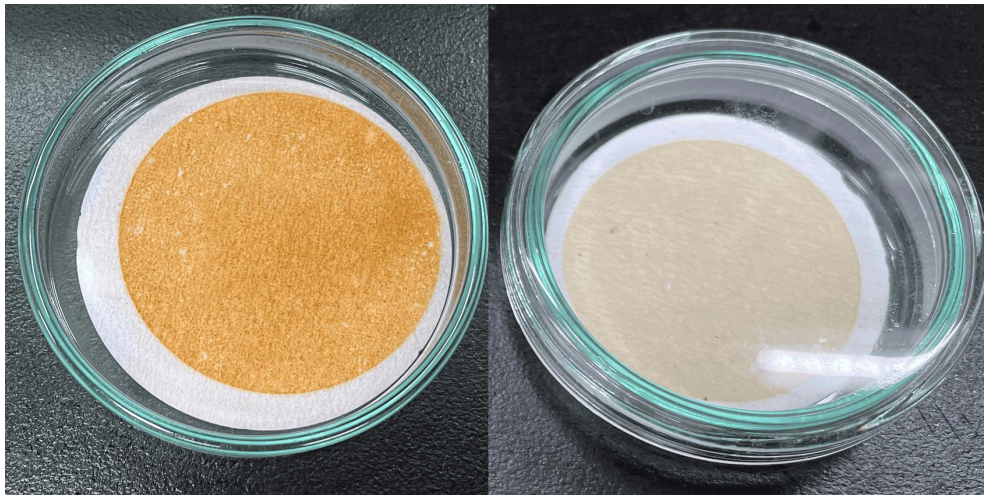


圖 5-7、採螢光定量之含 PP 或 PVC 塑膠顆粒土壤經分選後的濾紙

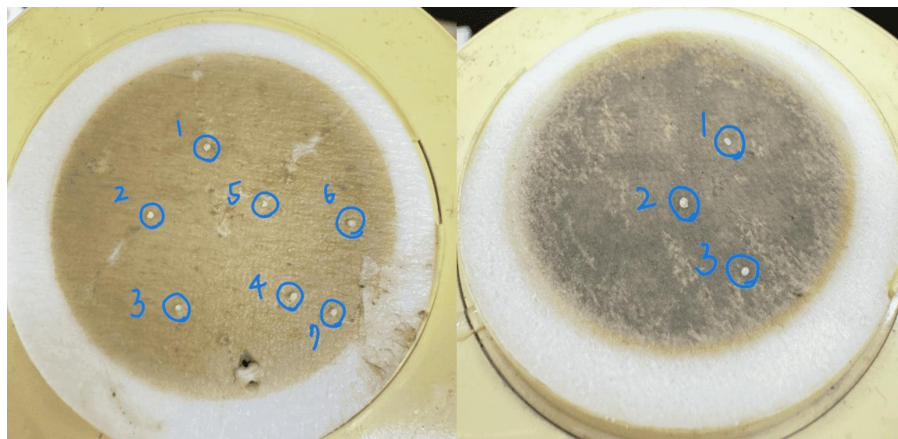


圖 5-8、採肉眼辨識之含 PE 顆粒土壤分選過濾後結果



第五章

圖 5-8 和圖 5-9 分別為含有塑膠微粒之砂質土和紅土以氯化鈣溶液進行一次和二次分選下 PP、PVC、PE 的定量回收結果，其相應之原始添加量與測得顆粒數量彙整於表 5-6。含有 PP 之土壤選用密度為 1.36 g/cm^3 之溶液，含有 PVC 之土壤在第一次分選以密度為 1.36 g/cm^3 之溶液進行，第二次則提升至密度為 1.5 g/cm^3 。

在 PP 和 PVC 方面，綜觀來看，單批次回收率普遍落在 50 % 以下。在砂質土的分離結果中，相比於總回收率僅 37% 之含 PVC 土壤，含 PP 土壤總回收率略提升至 53%；在紅土的分離結果方面，PP 總回收率高達近 90%，PVC 則約 56%，均高於砂質土的結果。本研究推測由於紅土有較高的有機質含量，其土壤控制組的結果在定量 PP 的激發光也呈現比較高的顆粒數量(圖 5-6)，因此推測有部分螢光數量是被高估的。此外，因 PVC 為密度較高之塑膠，在兩次分選過程中有提升分選溶液密度，造成有第二次之回收率高於第一次之情況，由於 PVC 在現階段之回收率仍較低，評估後續可藉由再提升分選溶液之密度以獲得較高的回收成效。

以肉眼辨識含 PE 顆粒土壤之結果來看，第一次分選即有近八成的回收率，總回收率也可達到九成以上，在實驗中多數會有一成(一顆顆粒)無法成功被蒐集，推測是卡在底層或黏在管壁的土壤上，無法有效分離。

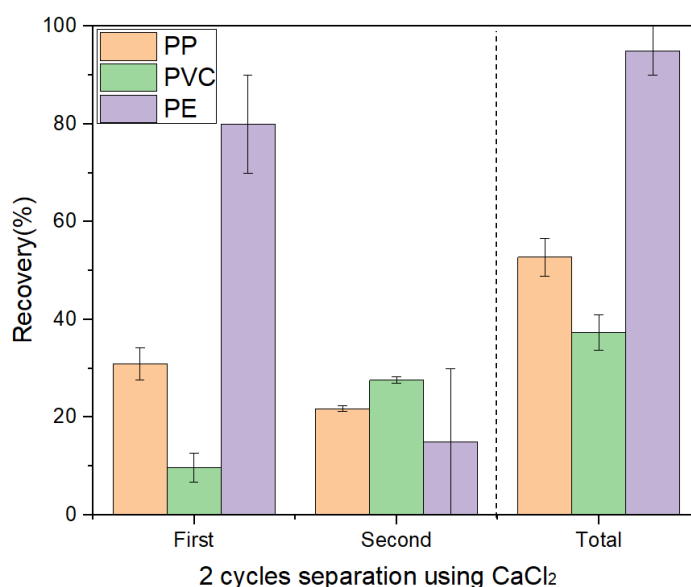


圖 5-8、含不同塑膠之砂質土經氯化鈣分選定量下之回收率

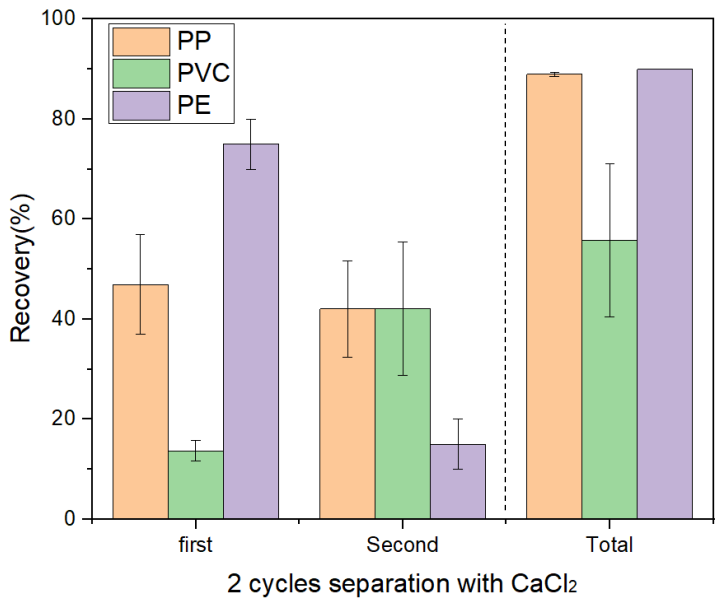


圖 5-9、含不同塑膠之紅土經氯化鈣分選定量下之回收率

表 5-6、不同土壤和塑膠經氯化鈣分選定量下之顆粒數

| 土壤 | 塑膠材質 | 分選第一次 | 分選第二次 | 總共/原始 |
|-----|------|-------|-------|-------------|
| 砂質土 | PP | 3866 | 2523 | 6389/11292 |
| | PP | 3123 | 2398 | 5521/11292 |
| | PVC | 968 | 2149 | 3117/7611 |
| | PVC | 513 | 2050 | 2563/7611 |
| | PE | 9 | 0 | 9/10 |
| | PE | 7 | 3 | 10/10 |
| 紅土 | PP | 6431 | 3667 | 10098/11292 |
| | PP | 4170 | 5832 | 10002/11292 |
| | PVC | 893 | 2188 | 3081/7611 |
| | PVC | 1196 | 4219 | 5415/7611 |
| | PE | 7 | 2 | 9/10 |
| | PE | 8 | 1 | 9/10 |



(三) 氯化鋅分選(密度 1.36~1.52 g/cm³) 定量分析

圖 5-10 和圖 5-11 分別為含有塑膠微粒之砂質土和紅土以氯化鋅溶液進行一次和二次分選下 PP、PVC、PE 的定量回收結果，其相應之原始添加量與測得顆粒數量彙整於表 5-7。含有 PP 之土壤選用密度為 1.36 g/cm³ 之溶液，含有 PVC 之土壤以密度為 1.5 g/cm³ 之溶液進行。

在含有 PP 和 PVC 之土壤，總體而言在紅土分離的效果相較於在砂質土的結果好很多。含 PP 之砂質土的總回收率約 45 %，紅土則達 104 %，此結果與使用氯化鈣進行分選的結果類似，推論紅土的部分有些微高估的可能性；含 PVC 之土壤其回收率結果普遍較低，砂質土和紅土的回收率分別為 27 %和 36 %，皆未過半，可能與 PVC 本身密度和分選溶液選用密度差距不大有關。

在以肉眼判讀之含 PE 土壤分選的結果中，其總回收率在兩種土壤中基本上與氯化鈣分選的效果沒有太大的落差，在砂質土和紅土的回收率分別為 90 %和 80 %，在紅土中些微降低的影響可能是因為離心作用導致部分顆粒黏附於土壤上，無法順利分離。

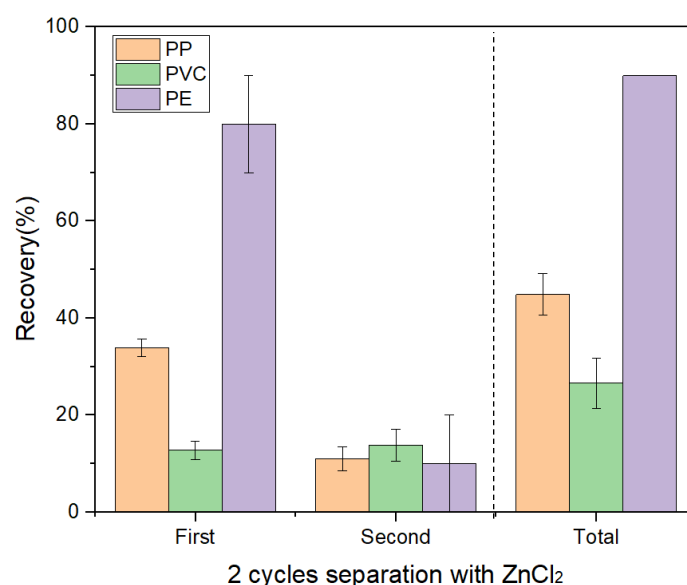


圖 5-10、含不同塑膠之砂質土經氯化鋅分選定量下之回收率



建立台灣本土土壤中塑膠微粒定性定量方法之研究

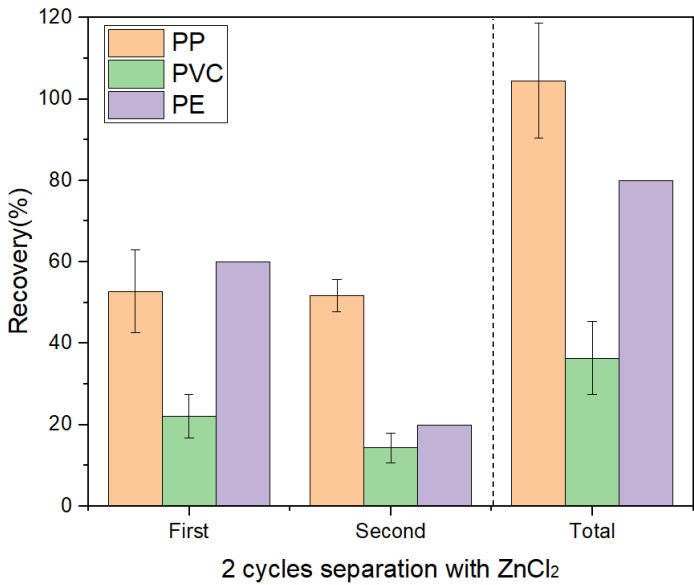


圖 5-11、含不同塑膠之紅土經氯化鋅分選定量下之回收率

表 5-7、不同土壤和塑膠經氯化鋅分選定量下之顆粒數

| 土壤 | 塑膠材質 | 分選第一次 | 分選第二次 | 總共/原始 |
|-----|------|-------|-------|-----------|
| 砂質土 | PP | 1738 | 461 | 2199/5421 |
| | PP | 1937 | 732 | 2669/5421 |
| | PVC | 528 | 379 | 907/3602 |
| | PVC | 393 | 618 | 1011/3602 |
| | PE | 7 | 2 | 9/10 |
| | PE | 9 | 0 | 9/10 |
| 紅土 | PP | 2307 | 2591 | 4898/5421 |
| | PP | 3411 | 3018 | 6429/5421 |
| | PVC | 601 | 387 | 988/3602 |
| | PVC | 988 | 647 | 1635/3602 |
| | PE | 6 | 3 | 9/10 |
| | PE | 6 | 1 | 7/10 |



本研究經由上述的分選過程方法建立，根據結果綜整以下幾點進行討論：

1. 小粒徑塑膠總回收率普遍不高：

相較於大粒徑的 PE 能用肉眼觀察統計，小粒徑的 PP 和 PVC 其數量統計只能仰賴螢光定量結果，容易存在較大的分析誤差，除了紅土混合 PP 的組合能超過 90 % 外，其他普遍總回收率約落在 30 % ~ 60 %，回收率低的原因可能和次數不足或是離心造成部分顆粒被黏附在土壤裡，無法成功被分離等因素有關。以肉眼辨識的 PE 結果來說，分選液的密度是足以使其浮在上澄液，但多組分析上會有一顆消失在液體的情形，若添加的顆粒數更多，可能會有不少顆粒被埋沒。因此除了增加分選次數外，採用離心或是靜置等方式進行分離可能亦是後續需加以衡量之點。

2. PVC 回收率普遍較低

數據上 PVC 的定量結果普遍低於 PP 的結果，原因可能和其高密度、螢光染色等因素有關。PVC 分選液的密度為 1.5 g/cm^3 ，稍高於 PVC 的 1.39 g/cm^3 ，理論上顆粒皆能浮起，但兩者在密度差異不夠多的情況下，其上浮的力量就不會太高；另一個可能和本身螢光反應弱有關，由於尼羅紅染劑屬於疏水性染劑，PVC 相較於其他非極性的 PP、PE，屬於螢光反應較弱的極性材質，濾紙上其他雜質可能會影響其螢光反應，因此螢光的效果就不佳，後續可能需要加以評估使用其他染劑之可能性，並提高分選液的密度，以增加 PVC 的回收率。

3. 兩種分選液比較

本研究使用的氯化鋅和氯化鈣密度皆落在 $1.36\sim1.5 \text{ g/cm}^3$ ，比較同密度下的分選效果差異，由結果來看，並沒有哪一個分選液有明顯較好的效果，但後續若要選擇更高密度的分選液來提升回收率，氯化鈣由於其溶解度不高的關係，其最大密度僅能到 1.5 g/cm^3 左右(濃度約 7 M)；氯化鋅極容易潮解，其溶解度也較高，能配置密度 1.8 g/cm^3 的溶液，但相對價格較為昂貴，對於環境危害也較高，由於環境大多數塑膠如 PP、PE 等的密度普遍小於 1.1 g/cm^3 ，因此本研究認為在綜合考量下，選用氯化鈣即能夠應付環境中多數塑膠的分離。

4. 土壤基質影響

經過分選後的濾紙，往往上面還有很多雜質和細小顆粒，這些或多或少都會影響定量的結果，Sturm et al. (2021)指出大多數天然顆粒如木屑、幾丁質等，在發射光 $505\sim555 \text{ nm}$ 下會有較弱的螢光反應，因此使用這波段的光較能避免計算到非塑膠顆粒的顆粒。儘管如此，由土壤控制實驗得知，土壤中疑似其他種類的顆粒仍然有機會有機會有螢光反應並被影像軟體計數到，如圖 5-12。因此若要優



化回收的塑膠比例，可能需排除土壤背景的干擾，調整前期氧化劑和氧化方式的使用和搭配。

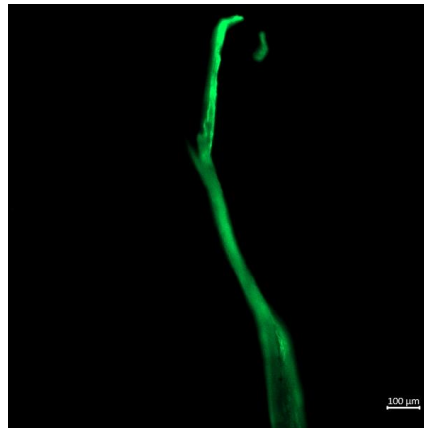


圖 5-12、土壤背景訊號

5. 與其他文獻的結果比較

多數文獻分離土壤塑膠微粒的方式是採用立體顯微鏡進行顆粒統計，以 Hu et al. (2024)為例，其土壤樣本採多階段式的氧化等前處理，將背景雜質幾乎完全去除，採用的塑膠微粒為肉眼可見的尺寸，在計算回收率上採用已知的數量做添加，因此回收率大部分可達到八成；相較於本研究所使用的方法，採用的塑膠微粒是肉眼看不到的尺寸，添加的塑膠數量完全仰賴螢光定量的結果，會有計算上的誤差，加上背景雜質的影響，整體回收率就相對不高。後續方法上可能需要針對染色和添加方法進行優化，以提升準確率。



5-6 實場土壤塑膠微粒檢測分析

綜合上述有機質去除與密度分選測試所得結果，本研究在實際環境樣品測試中，以台大農場採集的田土搭配過氧化氫消化方法，並以密度 1.5 g/cm^3 氯化鈣分選液分選兩次的方法，透過光源選擇可涵蓋較多塑膠的激發波長 $450\sim490 \text{ nm}$ ，來檢測環境樣本中的塑膠微粒，田土實際採樣分析結果如圖 5-13 所示。在無額外添加塑膠微粒的情況下， 5 g 田土經兩次分選後的可透過螢光分析之塑膠微粒顆粒數約近 3000 個 (600 \#/g)，第一次分選可偵測到約 1750 個顆粒，形態上也有觀察到纖維狀和碎片狀等塑膠微粒，此結果明顯高於在砂質土壤和紅土的背景分析結果(圖 5-6)。Kumar et al. (2020) 提到多數農業土壤受到的塑膠污染多半來自於裝載肥料、用具的塑膠膜和纖維等，在實場採樣中，種類大多數含有 PP、PE 等，以目前使用之掃描波段來看，PP 和 PE 的激發光皆落於此範圍，因此初步判斷涵蓋此類塑膠，後續將搭配使用 $\mu\text{-FTIR}$ 輔助判定結果加以確認。

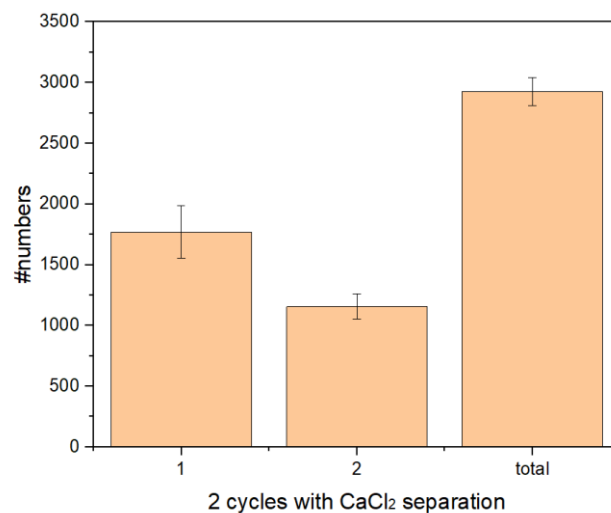


圖 5-13、田土塑膠顆粒分析



5-7 實場土壤中塑膠微粒之定性分析

本研究首先將經分選後的田土樣本以 μ -FTIR 反射模式進行單顆粒塑膠定性分析，並與已知塑膠圖譜進行對照，結果如圖 5-14 所示。雖實際從土壤中分離之塑膠顆粒仍存有部分背景雜訊干擾，但在田土塑膠樣本中找到之紅外光譜訊號可與已知圖譜中 PP 和 PE 特徵訊號吻合，代表田土樣品中確實存在有 PP、PE 等顆粒。

此外，為了區分並驗證現階段研究流程之可行性，本研究額外添加含有 PP 及 PVC 之塑膠顆粒於田土中，同樣進行有機質消化和分選方法後，對分選之顆粒進行定性分析，在顯微光譜儀下可成功觀測搜尋到之顆粒影像如圖 5-15，經與已知塑膠圖譜比對(圖 5-16)，可確認塑膠種類有 PP 及 PVC。

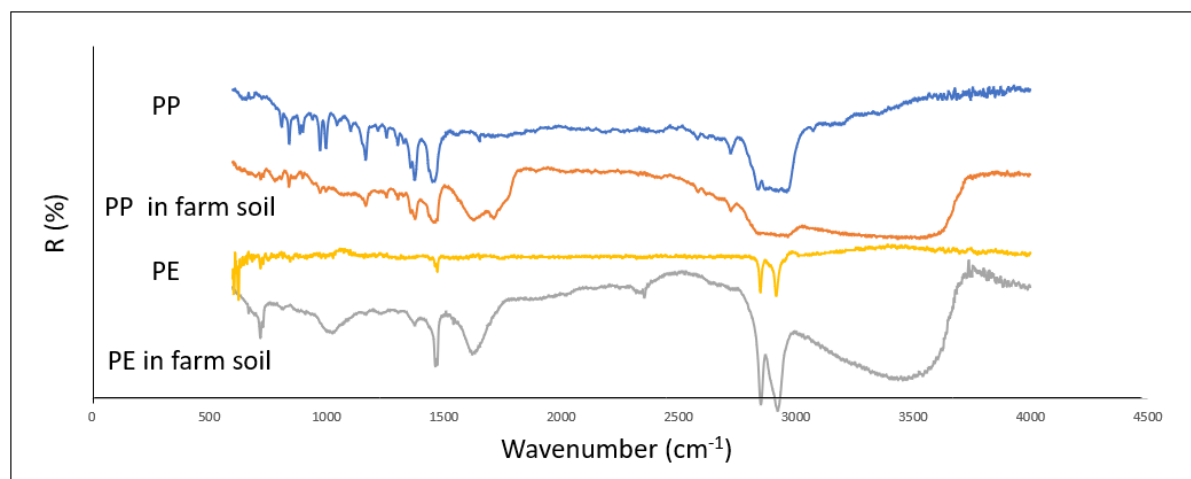


圖 5-14、田土中塑膠顆粒定性分析之 μ -FTIR 圖譜



第五章

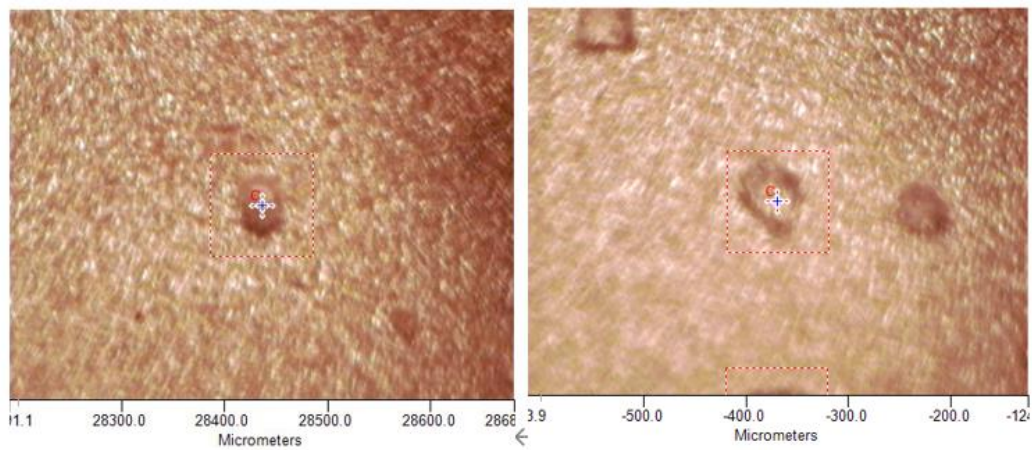
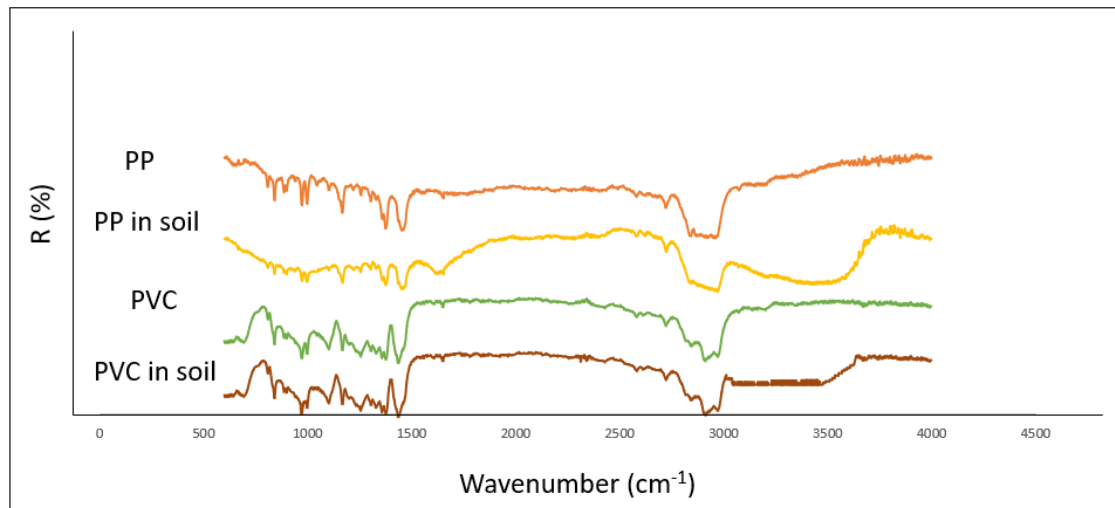


圖 5-15、顯微影像下之塑膠顆粒

圖 5-16、添加塑膠微粒之田土定性分析之 μ -FTIR 圖譜



5-8 結論與建議

本研究初步建立土壤塑膠微粒之定性定量方法，首先執行會干擾後續定性定量的土壤背景基質去除實驗並選擇較適合的消化方式，接續比較不同分選液和次數對於塑膠偵測和回收的差異與影響，根據現階段所得之實驗結果，提出初步結論、操作建議與後續的可再執行之實驗建議：

1. 在土壤有機質去除試驗中，綜合考量去除率與藥劑使用，以過氧化氫為現階段較佳之試劑，且在測試過程中塑膠顆粒也未受到試劑破壞。
2. 以 PP 塑膠微粒分選來看，使用氯化鈣和氯化鋅溶液對總回收率影響不顯著，且紅土回收率優於砂質土，最高分別可達 104 %及 53 %；對於 PVC 回收成效以氯化鈣溶液較佳，但整體回收率偏低，紅土及砂質土分別為 56 %及 37 %；PE 樣品則因使用肉眼觀測計數，整體回收率較佳。
3. 土壤背景基質以現階段的去除方法，仍有部分未去除並殘留於濾紙，可能會影響螢光定量計數的準確性。
4. 綜合實驗結果，本階段建立之方法為先使用過氧化氫作為消化流程的試劑，再以氯化鈣(密度 1.5 g/cm^3)當作分選溶液，經兩次分選可提升塑膠顆粒回收率。
5. 以田土作為方法建立後之實測樣本，檢測出平均顆粒約 3000 個 (600 #/g)，並經由定性分析確認含有 PP 及 PE 等塑膠種類。
6. 現階段之方法仍有回收率不足之缺陷，因此後續建議增加分選次數及分選液密度，可增加塑膠顆粒之回收度。



第六章 參考文獻

- Anger, P.M., von der Esch, E., Baumann, T., Elsner, M., Niessner, R., Ivleva, N.P., 2018. Raman microspectroscopy as a tool for microplastic particle analysis. *TrAC Trends in Analytical Chemistry* 109, 214-226.
- Awet, T.T., Kohl, Y., Meier, F., Straskraba, S., Grün, A.L., Ruf, T., Jost, C., Drexel, R., Tunc, E., Emmerling, C., 2018. Effects of polystyrene nanoparticles on the microbiota and functional diversity of enzymes in soil. *Environ Sci Eur* 30, 11.
- Bhagwat, G., Tran, T.K.A., Lamb, D., Senathirajah, K., Grainge, I., O'Connor, W., Juhasz, A., Palanisami, T., 2021. Biofilms Enhance the Adsorption of Toxic Contaminants on Plastic Microfibers under Environmentally Relevant Conditions. *Environmental Science & Technology* 55, 8877-8887.
- Blasing, M., Amelung, W., 2018. Plastics in soil: Analytical methods and possible sources. *Sci Total Environ* 612, 422-435.
- Boots, B., Russell, C.W., Green, D.S., 2019. Effects of Microplastics in Soil Ecosystems: Above and Below Ground. *Environmental Science & Technology* 53, 11496-11506.
- Chandrakanthan, K., Fraser, M.P., Herckes, P., 2024. Microplastics are ubiquitous and increasing in soil of a sprawling urban area, Phoenix (Arizona). *Science of The Total Environment* 906, 167617.
- Chen, Y., Wen, D., Pei, J., Fei, Y., Ouyang, D., Zhang, H., Luo, Y., 2020. Identification and quantification of microplastics using Fourier-transform infrared spectroscopy: Current status and future prospects. *Current Opinion in Environmental Science & Health* 18, 14-19.
- Cohen, N., Radian, A., 2022. Microplastic Textile Fibers Accumulate in Sand and Are Potential Sources of Micro(nano)plastic Pollution. *Environmental Science & Technology* 56, 17635-17642.



- Crichton, E.M., Noël, M., Gies, E.A., Ross, P.S., 2017. A novel, density-independent and FTIR-compatible approach for the rapid extraction of microplastics from aquatic sediments. *Analytical Methods* 9, 1419-1428.
- David, J., Steinmetz, Z., Kucerik, J., Schaumann, G.E., 2018. Quantitative Analysis of Poly(ethylene terephthalate) Microplastics in Soil via Thermogravimetry-Mass Spectrometry. *Anal Chem* 90, 8793-8799.
- De Vos, B., Lettens, S., Muys, B., Deckers, J.A., 2007. Walkley–Black analysis of forest soil organic carbon: recovery, limitations and uncertainty. *Soil Use and Management* 23, 221-229.
- Dronjak, L., Exposito, N., Rovira, J., Florencio, K., Emiliano, P., Corzo, B., Schuhmacher, M., Valero, F., Sierra, J., 2022. Screening of microplastics in water and sludge lines of a drinking water treatment plant in Catalonia, Spain. *Water Research* 225, 119185.
- Duesterberg, C.K., Mylon, S.E., Waite, T.D., 2008. pH Effects on Iron-Catalyzed Oxidation using Fenton's Reagent. *Environmental Science & Technology* 42, 8522-8527.
- Dumichen, E., Eisentraut, P., Bannick, C.G., Barthel, A.K., Senz, R., Braun, U., 2017. Fast identification of microplastics in complex environmental samples by a thermal degradation method. *Chemosphere* 174, 572-584.
- Erni-Cassola, G., Gibson, M.I., Thompson, R.C., Christie-Oleza, J.A., 2017. Lost, but Found with Nile Red: A Novel Method for Detecting and Quantifying Small Microplastics (1 mm to 20 µm) in Environmental Samples. *Environ Sci Technol* 51, 13641-13648.
- Han, X., Lu, X., Vogt, R.D., 2019. An optimized density-based approach for extracting microplastics from soil and sediment samples. *Environ Pollut* 254, 113009.
- Hu, B., Guo, P., Han, S., Jin, Y., Nan, Y., Deng, J., He, J., Wu, Y., Chen, S., 2022. Distribution characteristics of microplastics in the soil of mangrove restoration



- wetland and the effects of microplastics on soil characteristics. *Ecotoxicology* 31, 1120-1136.
- Hu, H., Qiang, L., Xu, J., Li, G., Cheng, J., Zhong, X., Zhang, R., 2024. Enhanced microplastic retrieval efficiency from cultivated soil samples through optimized pre-treatment in density-based extraction. *Soil and Tillage Research* 242.
- Hurley, R.R., Lusher, A.L., Olsen, M., Nizzetto, L., 2018. Validation of a Method for Extracting Microplastics from Complex, Organic-Rich, Environmental Matrices. *Environ Sci Technol* 52, 7409-7417.
- Imhof, H.K., Schmid, J., Niessner, R., Ivleva, N.P., Laforsch, C., 2012. A novel, highly efficient method for the separation and quantification of plastic particles in sediments of aquatic environments. *Limnology and Oceanography: Methods* 10, 524-537.
- Johnson, A.C., Ball, H., Cross, R., Horton, A.A., Jurgens, M.D., Read, D.S., Vollertsen, J., Svendsen, C., 2020. Identification and Quantification of Microplastics in Potable Water and Their Sources within Water Treatment Works in England and Wales. *Environmental Science & Technology* 54, 12326-12334.
- Kapelewska, J., Klekotka, U., Żadziłko, E., Karpińska, J., 2021. Simultaneous Sorption Behaviors of UV Filters on The Virgin and Aged Micro-High-Density Polyethylene under Environmental Conditions. *Science of The Total Environment* 789, 147979.
- Konde, S., Ornik, J., Prume, J.A., Taiber, J., Koch, M., 2020b. Exploring the potential of photoluminescence spectroscopy in combination with Nile Red staining for microplastic detection. *Mar Pollut Bull* 159, 111475.
- Kumar, M., Xiong, X., He, M., Tsang, D.C.W., Gupta, J., Khan, E., Harrad, S., Hou, D., Ok, Y.S., Bolan, N.S., 2020. Microplastics as pollutants in agricultural soils. *Environ Pollut* 265, 114980.



- Kunz, A., Schneider, F., Anthony, N., Lin, H.-T., 2023. Microplastics in rivers along an urban-rural gradient in an urban agglomeration: Correlation with land use, potential sources and pathways. *Environmental Pollution* 321, 121096.
- Lang, M., Wang, G., Yang, Y., Zhu, W., Zhang, Y., Ouyang, Z., Guo, X., 2022. The occurrence and effect of altitude on microplastics distribution in agricultural soils of Qinghai Province, northwest China. *Science of The Total Environment* 810, 152174.
- Li, L., Li, M., Deng, H., Cai, L., Cai, H., Yan, B., Hu, J., Shi, H., 2018. A straightforward method for measuring the range of apparent density of microplastics. *Science of The Total Environment* 639, 367-373.
- Li, Q., Wu, J., Zhao, X., Gu, X., Ji, R., 2019. Separation and identification of microplastics from soil and sewage sludge. *Environ Pollut* 254, 113076.
- Li, X., Chen, L., Ji, Y., Li, M., Dong, B., Qian, G., Zhou, J., Dai, X., 2020. Effects of chemical pretreatments on microplastic extraction in sewage sludge and their physicochemical characteristics. *Water Research* 171, 115379.
- Lian, Y., Liu, W., Shi, R., Zeb, A., Wang, Q., Li, J., Zheng, Z., Tang, J., 2022. Effects of polyethylene and polylactic acid microplastics on plant growth and bacterial community in the soil. *Journal of Hazardous Materials* 435, 129057.
- Liu, M., Song, Y., Lu, S., Qiu, R., Hu, J., Li, X., Bigalke, M., Shi, H., He, D., 2019. A method for extracting soil microplastics through circulation of sodium bromide solutions. *Sci Total Environ* 691, 341-347.
- Mehdinia, A., Dehbandi, R., Hamzehpour, A., Rahnama, R., 2020. Identification of microplastics in the sediments of southern coasts of the Caspian Sea, north of Iran. *Environ Pollut* 258, 113738.
- Moller, J.N., Loder, M.G.J., Laforsch, C., 2020. Finding Microplastics in Soils: A Review of Analytical Methods. *Environ Sci Technol* 54, 2078-2090.



- Pivokonsky, M., Cermakova, L., Novotna, K., Peer, P., Cajthaml, T., Janda, V., 2018. Occurrence of microplastics in raw and treated drinking water. *Science of the Total Environment* 643, 1644-1651.
- Qiu, Q., Tan, Z., Wang, J., Peng, J., Li, M., Zhan, Z., 2016. Extraction, enumeration and identification methods for monitoring microplastics in the environment. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 176, 102-109.
- Rhee, H., Jeong, S., Lee, H., Cho, M.G., Choi, D.S., 2024. Rapid detection and identification of microplastics from nonchemically treated soil with CARS microspectroscopy. *Environ Pollut* 342, 123080.
- Roper, W.R., Robarge, W.P., Osmond, D.L., Heitman, J.L., 2019. Comparing Four Methods of Measuring Soil Organic Matter in North Carolina Soils. *Soil Science Society of America Journal* 83, 466-474.
- Salehi, M.H., Beni, O.H., Harchegani, H.B., Borujeni, I.E., Motaghian, H.R., 2011. Refining Soil Organic Matter Determination by Loss-on-Ignition. *Pedosphere* 21, 473-482.
- Scheurer, M., Bigalke, M., 2018. Microplastics in Swiss Floodplain Soils. *Environ Sci Technol* 52, 3591-3598.
- Sturm, M.T., Horn, H., Schuhen, K., 2021. The potential of fluorescent dyes-comparative study of Nile red and three derivatives for the detection of microplastics. *Anal Bioanal Chem* 413, 1059-1071.
- Sujathan, S., Kniggendorf, A.-K., Kumar, A., Roth, B., Rosenwinkel, K.-H., Nogueira, R., 2017. Heat and Bleach: A Cost-Efficient Method for Extracting Microplastics from Return Activated Sludge. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 73, 641-648.
- Tagg, A.S., Harrison, J.P., Ju-Nam, Y., Sapp, M., Bradley, E.L., Sinclair, C.J., Ojeda, J.J., 2017. Fenton's reagent for the rapid and efficient isolation of microplastics from wastewater. *Chemical Communications* 53, 372-375.



- Tong, H.Y., Jiang, Q.Y., Hu, X.S., Zhong, X.C., 2020. Occurrence and Identification of Microplastics in Tap Water from China. *Chemosphere* 252.
- Walkley, A., 1947. A Critical Examination of a Rapid Method for Determining Organic Carbon in Soil—EFFECT of Variation in Digestion Conditions and of Inorganic Soil Constituents. *Soil Science* 63, 251-264.
- Walkley, A., Black, I.A., 1934. AN EXAMINATION OF THE DEGTJAREFF METHOD FOR DETERMINING SOIL ORGANIC MATTER, AND A PROPOSED MODIFICATION OF THE CHROMIC ACID TITRATION METHOD. *Soil Science* 37.
- Wang, Z.F., Lin, T., Chen, W., 2020. Occurrence and Removal of Microplastics in an Advanced Drinking Water Treatment Plant (ADWTP). *Science of the Total Environment* 700.
- Watteau, F., Dignac, M.-F., Bouchard, A., Revallier, A., Houot, S., 2018. Microplastic Detection in Soil Amended With Municipal Solid Waste Composts as Revealed by Transmission Electronic Microscopy and Pyrolysis/GC/MS. *Frontiers in Sustainable Food Systems* 2.
- Yang, L., Zhang, Y., Kang, S., Wang, Z., Wu, C., 2021. Microplastics in soil: A review on methods, occurrence, sources, and potential risk. *Science of The Total Environment* 780, 146546.
- Yang, X.D., Gong, B., Chen, W., Qian, C., Du, M., Yu, H.Q., 2022. In-Situ Quantitative Monitoring the Organic Contaminants Uptake Onto Suspended Microplastics in Aquatic Environments. *Water Research* 215, 118235.
- Ye, Y., Yu, K., Zhao, Y., 2022. The development and application of advanced analytical methods in microplastics contamination detection: A critical review. *Sci Total Environ* 818, 151851.



第六章

Zhou, Y., Wang, J., Zou, M., Yin, Q., Qiu, Y., Li, C., Ye, B., Guo, T., Jia, Z., Li, Y., Wang, C., Zhou, S., 2022. Microplastics in urban soils of Nanjing in eastern China: Occurrence, relationships, and sources. *Chemosphere* 303, 134999.



附錄

一、土壤基本特性

-酸鹼度

表 1 為三種土壤之酸鹼度結果，可觀察到紅土土壤偏酸性，土壤 pH5.2，砂質土與培養黑土之土壤 pH 分別為 7.6 與 7.8，皆屬偏中性區間。

表 1、土壤酸鹼度

| 土壤種類 | 紅土 | 砂質土 | 培養黑土 |
|--------|------|------|------|
| 溫度(°C) | 26.0 | 25.8 | 26.1 |
| pH | 5.17 | 7.62 | 7.79 |

-金屬成分

圖 1 為三種土壤經王水微波消化溶解後所測定換算之土壤金屬含量，總體而言，三種土壤可以測到的金屬相當多元，包含有鋁、鐵、銅、鉻、鎘、鎳、錳、鉛、鋅、鈣、鎂和鉀等 18 種元素(表 2)。其中紅土和砂質土的金屬含量組成較為類似且豐富，皆以鋁含量為最多，可達 70-100 g/kg，以一般土壤中的鋁約占重量 8%，相當於每公斤土壤有 80 克的鋁，紅土之鋁含量略高於平均值，含量相對多鐵、鉀及鎂元素，濃度落在 10-40 g/kg，其餘元素含量大致落在 10-500 mg/kg 的範圍；培養黑土因無機物含量較低，部分金屬未被檢出，相對只在鈣、鎂和鉀等元素含量較高，以鈣濃度接近 20 g/kg 為最高，鉀大約 10 g/kg 為次，其餘多低於 1 g/kg 為主。此外，所有土壤之金屬濃度皆符合土壤污染管制標準。

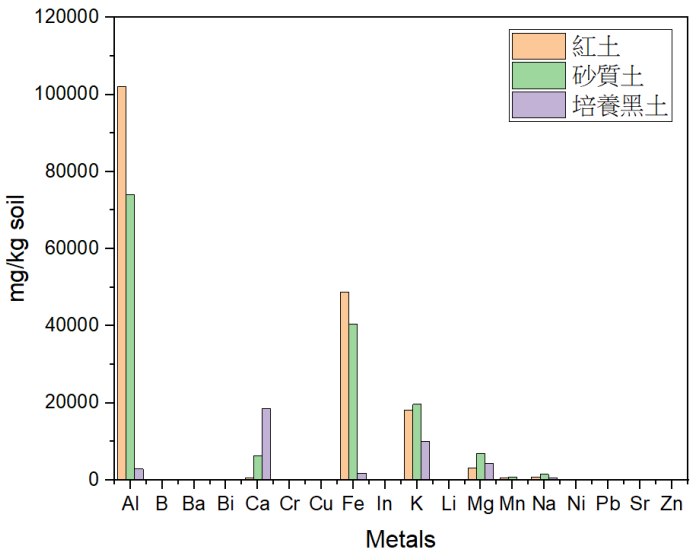


圖 1、土壤中金屬含量



第六章

表 2、土壤金屬含量(mg/kg-soil)

| 金屬/土壤種類 | 紅土 | 砂質土 | 培養黑土 |
|---------|----------|---------|---------|
| Al | 102057.6 | 73963.6 | 2848.2 |
| B | 161.8 | 130.6 | 202.2 |
| Ba | 183.7 | 206.9 | 23.2 |
| Bi | 21.7 | 20.1 | 53.4 |
| Ca | 553.2 | 6317.5 | 18563.4 |
| Cr | 66.4 | 34.7 | - |
| Cu | 21.3 | 23.9 | - |
| Fe | 48749.1 | 40548.1 | 1830.2 |
| In | 2.2 | 6.8 | - |
| K | 18094.2 | 19649.7 | 9985.7 |
| Li | 33.2 | 33.8 | 4.8 |
| Mg | 3096.2 | 6864.2 | 4350.6 |
| Mn | 474.3 | 699.3 | 235.7 |
| Na | 795.3 | 1479.3 | 589.4 |
| Ni | 15.8 | 14.1 | - |
| Pb | 93.3 | 65.5 | - |
| Sr | 7.4 | 44.1 | 65.5 |
| Zn | 96.0 | 118.8 | 28.2 |



建立台灣本土土壤中塑膠微粒定性定量方法之研究

專案執行自評表

| 專案主持人 | 林逸彬 | 專案名稱 | 建立台灣本土土壤中塑膠微粒定性定量方法之研究 | | | |
|-------|---|------|---|--|--------------------------|------|
| 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 checked="" type="checkbox"/> 調查 <input 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 | | | | |

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：

1. 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）。



第六章

2. 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%。