

屏東縣第66屆國民中小學科學展覽會 作品說明書

科 別：化學科

組 別：國小組

作品名稱：「菱」污染的「銅」網打盡：原態菱角殼之淨水研究

關 鍵 詞：菱角、重金屬污染、農業廢棄物

編號：A3009

摘要

本研究旨在開發一種「免燒炭、原態利用」的環保淨水技術，將廢棄菱角殼轉化為吸附重金屬的濾材。我們跳過高溫耗能的製炭程序，直接利用日曬乾燥與果汁機物理粉碎，極大化菱角殼的接觸面積。實驗分為「靜態浸泡」與「動態加壓過濾」兩大活動，並利用分光光度計定量分析溶液中銅、鈷離子的殘留濃度。

研究結果顯示，未經過炭化的「菱角殼膜」展現出最強大的吸附潛力。在浸泡 288 小時後，殼膜對鈷離子的清除率高達 64.54%，甚至超越了市售活性碳的 63.94%；在銅離子實驗中，殼膜的清除率（51.52%）也與活性碳（49.68%）旗鼓相當。在動態加壓測試中，增加至 4 層粉末時，殼膜對鈷離子的清除率亦能達到 55.04%。本研究證實，原態菱角殼內部的天然官能基具備優異的化學吸附能力。這套方法操作簡單、不需耗電燒炭，成功將農業廢棄物變身為高效能的環保濾材，極具居家推廣與循環經濟的價值。

壹、前言

一、研究動機

身為土生土長的屏東人，假日有時跟家人前往車城福安宮拜拜時，常會看到沿途販售現煮菱角的攤販。吃完菱角後，剩下的大量菱角殼通常只能當作一般垃圾丟棄並送進焚化爐。這讓我們思考，這些堅硬的農業廢棄物除了丟棄之外，是否有其他實質再利用的可能？

另一方面，我們在與日本水俣第二小學的跨國視訊交流中，聽日本同學介紹了 1956 年當地因重金屬污染而引發的「水俣病」歷史。這不僅呼應了我們在社會課本上學到的台灣「鎘米事件」與「綠牡蠣事件」，更讓我們警覺到水中重金屬對環境與人體的嚴重威脅。因此，我們靈機一動，思考是否能將廢棄的菱角殼應用於水質淨化，將惱人的農業廢棄物轉化為能吸附重金屬的環保濾材。**{與教材之關聯}:** (社會 Ca-III-1:都市化與工業化會改變環境，也會引發環境問題。)

經查閱文獻發現，目前處理菱角殼的常見作法，是將其經過 700°C~1000°C 的高溫熱裂解，製成「生物炭 (Biochar)」來吸附污染物。然而，高溫製炭的過程也會需要消耗能源並產生碳排，若要在一般校園或家庭環境中推廣，有其實作上的困難與門檻。

基於上述原因，本研究想進一步探討：如果不經過高溫碳化，直接使用「原態」的菱角殼，是否也能有效吸附水中的重金屬？我們期望能找出一種步驟簡單、不需額外高溫耗能的農業廢棄物淨水方法。**{與教材之關聯}:** (自然 INa-III-1 物質是由微小的粒子所組成，而且粒子不斷的運動。INb-III-7 植物各部位的構造和所具有的功能有關，有些植物產生特化的構造以適應環境。INe-III-5 常用酸鹼物質的特性，水溶液的酸鹼性質及其生活上的運用。)

二、研究目的

本研究旨在探討「原態菱角殼」作為低成本重金屬吸附劑之可行性，並系統性地分析菱角殼不同部位與操作條件對吸附效能之影響。具體研究目的如下：

（一）探討原態菱角殼對水中重金屬之「廣泛吸附潛力」（從銅離子延伸至鈷離子）

本研究首先以重金屬污染源「銅離子（硫酸銅）」作為測試對象。在初步實驗證實原態菱角殼確實具備吸附銅離子的能力後，為進一步驗證此材料是否具備「廣泛的重金屬吸附潛力」（而非僅對單一金屬有效），本研究於後期主動追加「鈷離子（氯化亞鈷）」進行延伸對照實驗，藉此全面評估其應用價值。

（二）探討菱角殼「完整原態」、「外殼」與「內膜」之吸附能力差異

將廢棄菱角殼精細解剖，分離出堅硬的「外果皮（外殼）」與薄膜狀的「種皮（內膜）」，並與未經分離的「完整原態」菱角殼進行對照。透過控制變因實驗，比較三者對水中重金屬的化學吸附效能，藉此釐清不同植物部位的淨水差異，找出最佳的吸附材料

（三）找出「浸泡吸附法」的最佳反應時間

為了設計出簡單易用的淨水流程，我們模擬泡茶的浸泡方式，讓粉末與廢水充分接觸。透過測試不同的浸泡時間對水質淨化程度的影響，找出吸附銅離子最有效率的時間點。

（四）建立「快速且有效」的加壓過濾淨水模式

為了克服菱角殼粉末太細、傳統重力過濾容易阻塞且非常耗時的缺點，本研究嘗試開發加壓過濾技術。我們期望利用加壓的方式，不僅能為實驗取得清澈的檢測濾液，更能藉此建立一套「快速、有效、不卡粉」的淨水流程，大幅提升未來在實際生活應用上的便利性與效率。

（五）比較菱角殼粉末與市售「活性炭」的淨水效能差異

將市售的「活性炭粉末」作為實驗對照組，並借用實驗室的「分光光度儀」測量吸收度，評估原態菱角廢棄物是否能達到甚至取代部分商業濾材的淨水效果。

（六）評估農業廢棄物「原態利用」的環保價值

綜合實驗數據，希望能證明這種不需消耗大量熱能與電力的「原態粉末淨水法」，不僅操作簡單，還能減少傳統燒製菱殼炭所產生的碳排放，落實廢棄物再利用的環保目標。

三、文獻探討

（一）菱角的植物學特性與產地

1. 定義與品種分類

根據教育部之《重編國語辭典修訂本》定義與相關文獻記載，菱角又稱「龍角」，

英名為 Water caltrop，學名為 *Trapa natans* L.，屬於柳葉菜科的一年生水生作物。其原產於中國大陸南方及長江流域，台灣地區的栽培歷史最早可追溯至日據時代由大陸引入。(劉民卿，1998)

依據呂紹妤(2024)之文獻整理，台灣現今常見的栽培品種主要分為「二角菱」與「四角菱」。其中，「二角菱」為台灣主要的本土栽種品種，盛產於秋季(9-11月)，果肉鬆軟綿密；「四角菱」則多於夏季(5-10月)生產，果肉口感較脆。此外，新鮮菱角的果肉富含高量澱粉，不僅可直接充當糧食或入菜，亦可進一步加工製成菱角酒、菱角醬等副產品，用途十分多元。

2. 產地與經濟規模

台灣的菱角產地高度集中。根據農業部(2023)統計與呂紹妤(2024)的資料顯示，台南市為全台最大產區，種植面積近 480 公頃，其中又以台南市官田區最為著名，年產量高達 5,528 公噸，具極高之農業經濟價值。然而，伴隨大量果肉產出而來的，是可觀的菱角殼廢棄物，這為本研究的廢物再利用提供了最佳契機。

3. 菱角果實之解剖與構造

根據植物學定義，菱角屬於核果狀的堅果，其構造由外而內主要可分為：

- **外果皮與中果皮：**即俗稱的「菱角殼」。質地堅硬且木質化，含有大量木質素與纖維素。(林弘萍，n.d.)
- **種皮：**即俗稱的「菱角膜」。這是一層緊貼於果肉外層的薄膜，質地輕薄且具有多酚類物質。基於此構造差異，本實驗推測不同部位之化學成分將對重金屬吸附產生不同效能，故將實驗材料細分為「外果皮(外殼)」與「種皮(內膜)」進行系統性探討。

(二) 菱角殼的現行處理技術—「菱殼炭」

1. 發展背景與廢棄物問題 台南市官田區為台灣最大的菱角產地，年產量約 6,000 公噸，但隨之而來的是每年約 3,000 公噸的廢棄菱角殼。根據林弘萍(n.d.)指出，這些廢棄物對環境造成了兩大負擔：

- **難以分解：**菱角殼含有高量的「木質素(Lignin)」，自然分解需耗時 1 至 2 年，難以透過一般堆肥方式處理。
- **環境衛生與空汙：**菱角殼形狀不規則，堆積時容易產生空隙積水，成為蚊蟲孳生的溫床。過去農民常採用露天燃燒處理，卻因此產生濃煙與嚴重的空氣污染。為解決此問題，官田區公所與產學界合作，提出了「廢物再利用，垃圾

變烏金」的概念，將廢棄菱角殼轉化為具經濟價值的「菱殼炭（Biochar）」，期望以此落實循環經濟。

2. 製炭之前置作業與含水率控制

根據劉安倫紀錄，菱角入爐碳化前需耗費大量時間與空間進行前置作業。收集來的菱角殼需集中在廣大的曬穀場，依照天氣狀況進行約 5 天的曝曬，使含水率降至 13~14% 才能進行後續製程。在實際操作上，為精準掌握含水量並提升效率，通常採用「分行曝曬」取代整片攤平，讓菱角殼在翻動時能與空行互換位置，受熱更為均勻。

3. 製炭工藝與科學原理

- **原料優勢**：雖然菱角殼難以分解，但其「高木質素」成分反而是製作生物炭的優勢。在缺氧的高溫環境下，木質素能轉化為穩定的石墨結構達到固碳效果。
- **製程技術與關鍵溫度**：目前主要採用「上方點火法（TLUD）」。燃燒過程中，溫度會迅速上升至 700°C 進入無煙燃燒；當燒至系統底部時，溫度更可高達 1000°C 進行高溫淬煉。

4. 碳化後的吸附原理

菱角殼經過高溫碳化後能有效淨化水質，主要歸功於其物理與化學特性的改變：

- **物理結構**：熱裂解過程去除了揮發性物質，留下了高比表面積與豐富的多孔隙結構，提供了大量的物理吸附空間。
- **化學官能基**：碳化過程會在材料表面形成豐富的官能基，如羧基（-COOH）、羟基（-OH）。這些基團能與水中的重金屬離子發生化學反應，進而達到吸附的效果。

5. 現行製程的限制與挑戰

儘管「菱殼炭」成效顯著，但此技術在推廣上仍面臨以下具體門檻：

- **高溫耗能與技術門檻**：製程需達 700°C~1000°C，消耗大量熱能，且碳化系統設計涉及流體力學計算，較難在一般家庭或校園中簡易複製。
- **工序繁複與造粒成本**：入爐前需經過 5 至 6 天的曝曬控制含水率。針對粉塵問題，研發團隊還必須利用海藻酸鈉與乳酸鈣進行「造粒」以增強機械強度，大幅墊高了生產成本。

（三）吸附與加壓過濾原理及本研究採用之方法

1. 物理分離技術—利用「壓力差」之快速過濾法

「過濾」是指使水流過一介質，以去除其中所含雜質的過程。對於極細的粉末，若僅依靠液體自身重量進行「重力過濾」，容易發生孔隙阻塞且耗時極長。因此，本研究參考國立臺灣大學化學系（n.d.）之實驗教學原理，導入「壓力差（Pressure difference）」的概念。無論是減壓過濾或是「加壓過濾」，其核心原理皆是利用濾膜兩側的壓力差，使液體在雙重作用下加速通過濾材，以達到「快速分離液體與固體沉澱物」的目的。

2. 化學去除技術—吸附（Adsorption）

「吸附」是一種發生在固體與液體交界面的化學或物理現象。當具有高比表面積的固體接觸到液體時，水中的重金屬離子會被吸引並結合在固體表面上。此效能取決於「接觸面積」與「反應時間」。

3. 本研究探討之兩種過濾處理法：「批次吸附」以及「加壓過濾」

本實驗結合了化學與物理技術，設計兩種淨水流程：

- **第一階段【批次吸附】**：將菱角殼打碎成「粉末狀」，投入汙染水體中攪拌。將材料的「物理比表面積」最大化，給予表面官能基最充足的化學反應空間，藉此「抓住」水中的銅離子。
- **第二階段【加壓過濾】**：本研究希望利用加壓過濾技術。藉由壓力差強迫水體快速通過濾膜，將吸附飽和的粉末與淨化後的水瞬間分離，取得極度清澈的濾液供光學測量。

（四）國內外農業廢棄物之吸附研究（聚焦於銅離子）

為尋求「不經高溫碳化」之原態廢棄物吸附潛力，本研究團隊透過數位 AI 工具（NotebookLM）的協助，透過 AI 與指導老師翻譯回顧了 Weng 與 Wu（2012）發表於國際期刊之文獻。該研究證實，未經高溫熱裂解的鳳梨葉，僅需經過簡單的「物理研磨（粒徑小於 0.149 mm）」，對水中銅離子即展現出優異的吸附效能。

研究指出，其吸附機制主要仰賴植物天然構造中豐富的表面化學官能基（如：-COOH、-OH），能與重金屬離子產生化學上的「錯合作用」。這為本研究提供了強而有力的背書：若能透過「物理粉碎」極大化比表面積，即使不經過耗能的碳化程序，理應也具備極佳的重金屬化學去除潛力。

（五）重金屬污染物之選擇：從硫酸銅到氯化亞鈷的延伸探究

1. 重金屬「銅」之環境危害與法規標準

本實驗鎖定「銅（Cu）」作為指標物。根據臨床毒物學文獻指出，人體攝入過量銅會嚴重刺激消化道；長期累積更會損害肝腎功能，甚至產生類似威爾森氏症的神經毒性病變。基於其高度危害性，我國環境部已嚴格規範飲用水中銅含量限值不得超過 1.0 mg/L。(環境部，2024)

2. 模擬污染源之評估與優勢—硫酸銅（CuSO₄）

考量操作安全性，本研究選用「硫酸銅」作為模擬污染源，其具有兩大科學優勢：

- **化學特性穩定**：溶於水後完全解離出銅離子，能穩定模擬廢水環境。
- **光學與可視化優勢**：含有高濃度銅離子的水溶液會呈現明顯的「水藍色」。此特性不僅能透過「肉眼比色」直觀判斷初步吸附效果，其特定波長的吸光特性，更為後續引入「分光光度計」定量分析奠定了完美的基礎。

3. 後期延伸測試目標：氯化亞鈷（Cobalt Chloride）

在完成銅離子的初步測試後，我們萌生了進一步的科學疑問：「菱角殼的吸附力是只對銅有效，還是對其他重金屬也通用？」因此，我們決定追加第二種重金屬進行廣效性驗證。我們選用了「鈷（Co）」，過量鈷會引起心臟衰竭與甲狀腺異常；且氯化亞鈷溶於水後呈現鮮明的「粉紅色」，同樣能完美配合分光光度計（波長 510nm）進行吸收度測量，是做為延伸對照實驗的完美選擇。

（六）水質濃度檢測技術—分光光度計之原理與應用

1. 從「定性觀察」到「定量分析」

為消弭肉眼視覺的主觀誤差，並精確評估菱角殼不同部位粉末與對照組（活性碳）之間的微小吸附差異，本研究於「加壓過濾」取得澄清濾液後，進一步引入化學實驗室標準儀器——「分光光度計（Spectrophotometer）」，將吸附效果轉化為精準的「定量數據」。

2. 檢測原理與比爾-朗伯定律（Beer-Lambert Law）

根據(化學基礎實驗技能：十七、分光光度儀)操作手冊指出，其運作原理是利用特定波長光線照射溶液，並將穿透後的光線強度轉化為「吸收度（Absorbance, A）」。結合分析化學中的「比爾-朗伯定律」，當光線穿過溶液時，溶液的「濃度」與其「吸收度」會呈現正比關係。換言之，若粉末成功吸附了銅離子，濾液變淡，儀器測得的吸收度數值亦會隨之精確降低。

3. 檢量線之建立與應用

透過預先測量多組已知濃度的硫酸銅標準液，可建立標準檢索線（檢量線）。藉此，可將測得的吸收度直接換算為銅離子的「實際殘留濃度（ppm）」，使實驗結果具備高度的學術嚴謹性。

（七）歷屆科展與相關研究之彙整與差異分析

為確立本研究之核心價值與創新性，我們分析了近15年的中小學科展及相關學術界關於「菱角」之研究文獻。經歸納整理，過往研究主題主要涵蓋「食品加工」、「色素應用」、「高溫活性碳製備」與「有機物吸附」等四大類別，詳細比較如下表所示：

主題	研究摘要及內容	來源
菱角變身秀	乾燥方式會影響 粉末顆粒大小，其中以日晒法所得到的粉末最細。	第50屆中小學科學展覽會 化學科 高雄市左營區舊城國民小學
再現菱色	本研究在探討利用微波加熱進行菱角殼色素萃取與染布的可行性，及尋找菱角色素新的應用方式，希望能更有效利用菱角殼。結果顯示菱角色素適合用來當天然顏料。	第52屆中小學科學展覽會 化學科 高雄市左營區舊城國民小學
果皮資材之再利用—水果纖維作為醫藥原料的探討	柚子皮纖維和菱角殼纖維吸附植物油及豬油能力均良好，菱角殼在多項試驗結果均有最佳表現，若能與有機農法結合發展，不僅能將果皮再利用，開發成相關保健食品，更能提升果皮經濟價值、兼顧生態環境保護。	第57屆 農業與食品學科 臺中市立臺中女子高級中等學校
農業廢棄物合成活性碳並討論其吸附效能之表現	本研究只以甘蔗渣進行活性碳之製備，乃因其原料較近且較易取得。因此若有機會，本團隊將會就「各種農業廢棄物製成活性碳」之效益差別來進行研究。多數人選用椰子殼、菱角殼、花生殼	第62屆全國中小學科展作品 化學科 國立虎尾高級中學

	等，結合文獻可推測製備活性碳需要軟、可壓縮製品且具有低的密度之農業廢棄物，如稻殼、大豆殼等。	
探討菱角澱粉糊化性質及晶球化作用	探討不同烘乾溫度做出的菱角澱粉特性，以及了解添加海藻酸鈉和乳酸鈣產生的菱角晶球特性，希望對菱角晶球了解可以提供菱角粉被加工利用的機會	第62屆中小學科學展覽會 化學科 高雄市左營區舊城國民小學
水熱法製備菱角殼活性碳條件對染料吸附能力之影響	本研究運用水熱碳化綠色製程將廢棄菱角殼製備成菱角活性碳，探討水與菱角殼比例、水熱時間與 KOH 用量對組織與吸附亞甲基藍之影響。菱角活性碳之比表面積在1246~1590 m ² /g、微孔體積在0.06~0.215 cm ³ /g，平均孔徑大小在2.07~2.56 nm。水熱時間增加會造成表面積與微孔體積的下降。此外，水的比例增加會導致表面積、平均孔徑與微孔體積的下降	崑山科技大學109材料工程學類 學術論文，研究生:郭宸茵
淨菱碳排の蚵學研究	本研究成功結合農業循環材料-菱殼炭與漁業循環材料-牡蠣殼水泥，以食品科學的方式找出取代市售高碳排水泥的科學研究。	第64屆中小學科學展覽會 生活與應用科學(三)科 臺南市立官田國民中學

表 1：歷屆菱角相關科展作品分析表(自行整理)

(八) 文獻綜合差異分析與本研究之創新方向

1. 歷屆研究之三大盲點

綜合上述文獻與歷屆科展觀察可知，目前對於菱角殼的研究普遍存在三大盲點：過度依賴高耗能的「高溫碳化」技術、應用層面多侷限於「食品與民生」，且在汙染防治上缺乏針對「重金屬」的深入探討。

2. 本研究之創新突破與具體方向

看了前面這些前人的研究，我們發現普遍的淨水方法往往太複雜又耗能。因此，我們決定走一條「不浪費電、最自然」的環保新路線，希望打破「一定要高溫燒成炭」的舊觀念！基於此創新理念，本研究的具體實驗方向規劃如下：

方向一：打破碳化迷思，探討「原態粉碎」與「植物構造」之靜態吸附效能

跳過耗能的高溫碳化步驟，改用家裡都有的「果汁機」，直接將廢棄的菱角殼進行物理粉碎。進一步將菱角殼精細分離為「外果皮（堅硬外殼）」與「種皮（薄薄內膜）」兩組。在完全不破壞天然成分的「原態」下，透過「靜態浸泡（批次吸附）」，探討不同植物構造對重金屬的化學吸附能力。

方向二：模擬多道濾心，開發「加壓過濾」的動態淨水模式

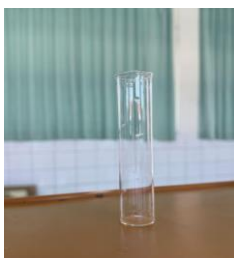
為突破單純靜態浸泡的限制，本研究進一步模擬市售淨水器的「多道濾心」設計。初期以硫酸銅為汙染源，後期擴展至氯化亞鈷，利用大容量針筒結合棉花與菱角殼粉末，打造出 1 至 4 層的動態「加壓過濾」裝置。透過測試廢水瞬間穿透不同層數濾材時的淨化效果，期望建立一套大家在家就能輕鬆 DIY、適合居家推廣的簡易環保淨水器雛形。

方向三：引入「標準對照組」與「光學儀器」進行精確定量

為了證明我們的方法具有實用性，同步引入市售的「活性炭粉末」一較高下，作為高標準的實驗對照組；並且使用「分光光度計」來測量濾液之吸收度，透過標準檢量線換算精確的殘留濃度數字。我們希望用真實的科學數據證明：「不用燒成炭的菱角殼粉末」真的能把重金屬吸乾淨，展現其取代高耗能濾材的永續價值。

貳、研究設備及器材

一、測量工具

			
1.樣本瓶	2.量筒	3.大針筒	4.果汁機

			
5.秤重儀	6.試管架	7.保鮮袋	8.秤量紙
			
9.滴管	10.分光光度計	11.比色管	12.紗布棉花

表 2：測量工具圖(圖片皆自行拍攝)

二、藥品與材料

			
1.硫酸銅結晶	2.活性碳粉末	3.菱角殼外膜	4.菱角殼內殼
			
5.菱角殼	6.菱角殼、外膜、內殼打碎成粉末後		

表 3：藥品與材料圖(圖片皆自行拍攝)

參、研究過程與方法

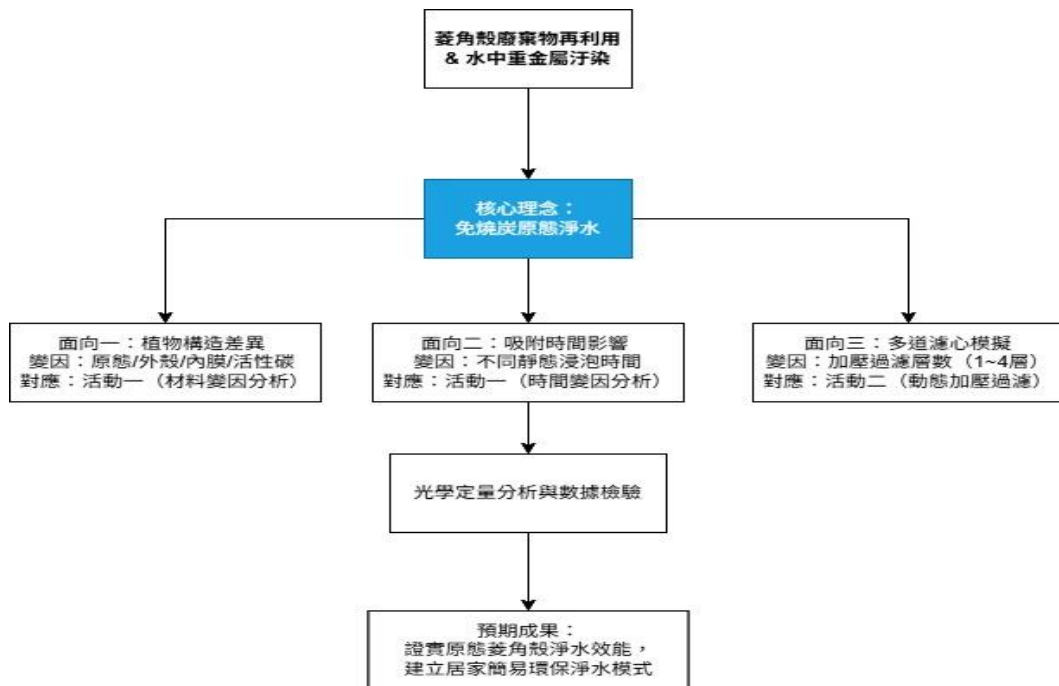


圖1:研究架構圖(自行製作)

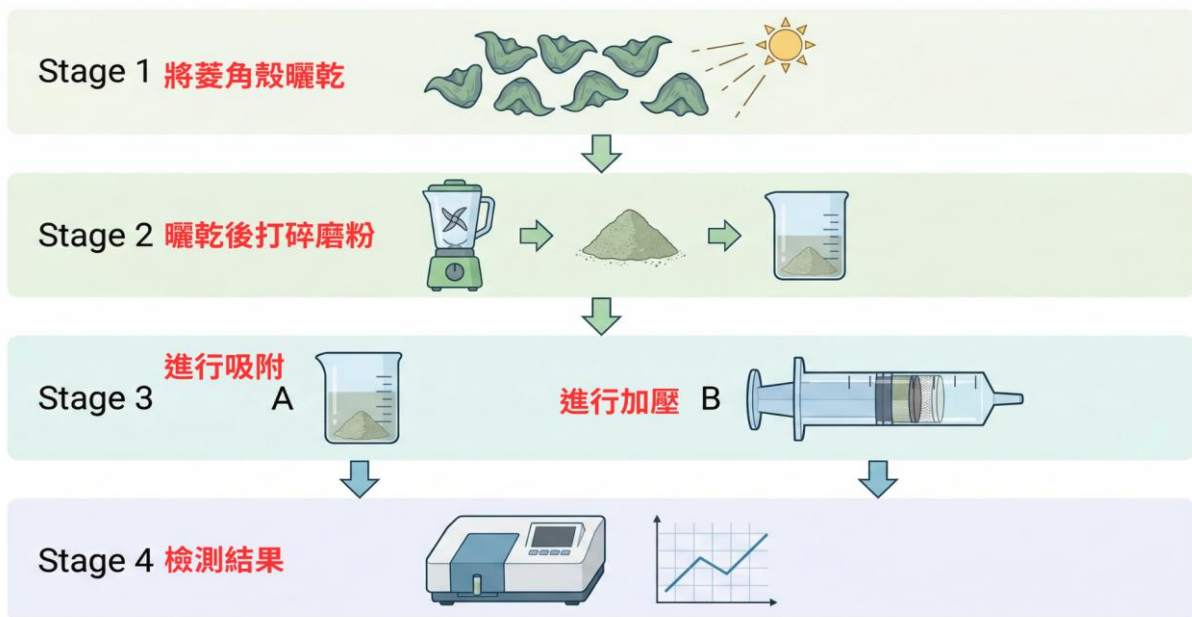


圖2:實驗流程圖(AI 製作圖示、自行編排)

一、第一階段：實驗前置準備（材料收集與前處理）

1. 文獻回顧與研究流程設計

- 上網搜尋國內外文獻與科展歷屆作品，確立「免燒炭、原態淨水」之研究方向。
- 規劃「菱角構造解剖」、「批次吸附」與「加壓過濾」之完整實驗流程。

2. 原料取得、構造解剖與防潮保存

- 線上訂購：為取得穩定的實驗材料，我們透過線上管道向菱角農訂購廢棄菱角殼。

- 日曬控制：如文獻建議，我們將菱角殼均勻鋪平置於太陽下曝曬，確實進行濕度控制，直至表面完全無水分為止，以利後續的加工處理。
- 精細解剖：將曬乾後的菱角殼以人工方式仔細剝離，精確分離出「薄外膜（種皮）」與「內殼（堅硬外果皮）」兩個不同的植物構造部位。
- 嚴格防潮控制：為避免空氣中的濕度干擾後續粉末秤重的準確性（確保實驗的控制變因絕對一致），我們將分離後的各部位分別裝入密封容器中，並特別加入「乾燥劑」，妥善保存於乾燥處備用。

二、第二階段：實驗材料製備與污染源配製

1. 原態物理粉碎

- 取出乾燥保存的菱角殼各部位，不經過任何高溫碳化程序，直接使用家用「果汁機」進行高速物理粉碎。

2. 實驗變因之精確秤重

- 實驗前，準備好所有玻璃燒杯、量筒、攪拌棒等器材。
- 使用高精密電子秤，依據預設的實驗參數，精準秤取各組別所需之菱角殼粉末重量，並分別裝入標記好的實驗材料杯中（例如：外殼組、內膜組、活性炭對照組）。

3. 配製模擬重金屬廢水

- 調配污染源：精確量取硫酸銅晶體並溶於純水中，調製出本實驗所需之特定濃度的模擬重金屬廢水，裝於大燒杯中備用，以利後續進行各項吸附與過濾實驗。

(一).前置作業

			
1.活性炭秤重	2.放置量筒後歸零	3.倒入內殼粉秤重	4.測量完畢安置
			
5.標記各針筒名稱	6.倒入膜粉秤重	7.測量後倒入針筒	8.測量完畢安置

			
9.秤重硫酸銅粉末	10.硫酸銅水溶液配置	11.量取所需溶液量	

表 4：前置作業流程(圖片皆自行拍攝)

三、第三階段:實驗設計與進行

為了全面探討免燒炭原態菱角殼對水中重金屬（銅離子）的去除效能，並進一步開發出居家可行的簡易淨水裝置，本研究將實驗分為「靜態吸附探討」與「動態加壓過濾」兩大活動進行：

(一)活動一: 探討「不同材料與部位」之靜態批次吸附效能差異

- **目的：**比較原態菱角殼的不同構造與市售活性碳，在自然浸泡狀態下對水中銅離子的化學吸附能力；並進一步了解「不同浸泡時間」對各材料吸附效果的影響（吸附速率探討）。
- **研究方法：**
 - ◆ **操縱變因：**(1) 過濾材料種類（共 4 組：原態菱角殼粉末、菱角外膜粉末、菱角內殼粉末、市售活性碳粉末）；(2) 靜態浸泡時間（設定為 0 小時、24 小時、168 小時、288 小時，共四個採樣點）。
 - ◆ **控制變因：**每一組的材料重量（固定為 10 克）、硫酸銅水溶液的初始濃度（2g 硫酸銅溶於 250 mL 水）、調配好的硫酸銅水溶液體積（固定為 50 mL）、環境溫度。
 - ◆ **實驗步驟簡述：**
 - （1）使用高精密電子秤，分別秤取等重量的四種實驗材料（原態、外膜、內殼、活性碳），放入四個標示好的實驗燒杯中。
 - （2）將精確調配好的硫酸銅水溶液，等量倒入各燒杯中，隨即展開靜態的「批次浸泡吸附」反應，並開始統一計時。
 - （3）**【第一次採樣】：**當浸泡時間達到第一個設定點時，立刻從各組燒杯中抽取少許定量的混濁溶液，進行基本固液分離，取得並標示第一階段的澄清濾液

樣本。

(4)【第二次採樣】：燒杯中剩餘的溶液繼續保持靜態浸泡。當時間達到第二個設定點時，再次抽取溶液並進行固液分離，取得第二階段的澄清濾液樣本。其餘採樣方法相同。

(5)【最終檢測】：將收集到的所有濾液樣本，統一送入「分光光度計」測量吸收度，換算殘留濃度，藉此比較四種材料在不同時間下的真實吸附實力。

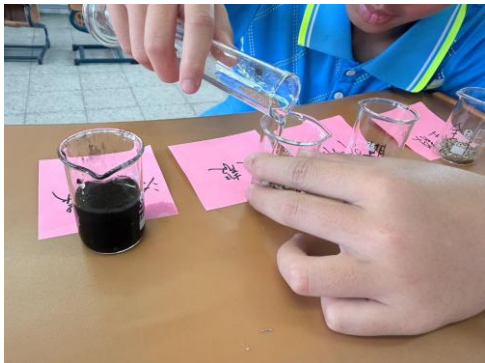
(二).吸附實驗	
	
1.已標記完畢的內容物	2.滴取所需容量
	
3.倒入燒杯中	4.開始進行吸附

表 4：吸附實驗流程(圖片皆自行拍攝)

(二)活動二:探討「加壓過濾層數」對銅離子去除率之影響

- 目的：模擬真實淨水器濾心設計，測試利用針筒進行「加壓過濾」時，不同材料結合不同「過濾層數（1 至 4 層）」，對水質淨化效果的提升程度。
- 研究方法：
 - ◆ 操縱變因：(1) 濾材種類（原態、外膜、內殼、活性炭）；(2) 加壓過濾層數（1 層、2 層、3 層、4 層）。

- ◆ **控制變因：**每一層的粉末重量（10 克）、每一層的棉花厚度(2 球)、推動針筒的加壓力道（盡量保持一致）、硫酸銅水溶液的初始濃度（2g 硫酸銅溶於 250 mL 水）、每次注入的硫酸銅水溶液濃度與體積(20ml)。

- ◆ **實驗步驟簡述：**

（1）**【第一層測試】：**準備 4 支相同規格的大容量塑膠針筒作為加壓過濾裝置。在各針筒底部先鋪上等量的一層棉花，接著分別填入第一層的四種實驗材料（原態、外膜、內殼、活性碳）。注入定量（20 mL）的硫酸銅水溶液後，用活塞進行「加壓過濾」，分別收集過濾液作為四組材料的「單層過濾樣本」。

（2）**【第二層測試】：**在剛才的 4 支針筒材料上方，再次鋪上一層棉花，並分別加入第二層等量的對應實驗材料。再次注入定量的硫酸銅溶液並加壓過濾，分別收集四組的「雙層過濾樣本」。

（3）**【第三、四層測試】：**以此類推，於 4 支針筒中同步堆疊第三層（棉花＋材料）與第四層（棉花＋材料），並分別收集加壓過濾後的澄清濾液樣本。

（4）**【最終檢測】：**將所有收集到的濾液樣本，統一送入「分光光度計」測量吸收度，換算殘留濃度，藉此分析「過濾層數」與「不同材料」對除銅率的交互影響。

(三).加壓過濾實驗(第一層)	
	
1.已標記完畢的內容物	2.滴取所需硫酸銅溶液容量
	
3.倒入針筒內	4.快速進行加壓

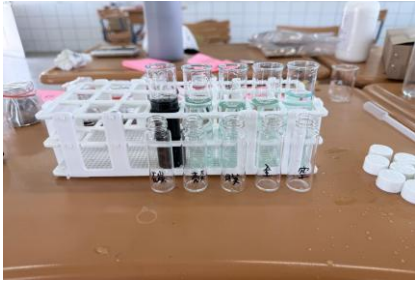
(三).加壓過濾實驗(第一層)	
	
5.加壓至密封	6.完成所有加壓
	
7.滴取至樣本瓶	8.完成所有樣本蒐集

表 5：加壓過濾實驗流程(圖片皆自行拍攝)

(四)加壓過濾實驗(第二三四層)	
	
1.安裝兩層過濾	2.將硫酸銅水溶液倒入針筒內
	
3.進行加壓	4.加壓至密封

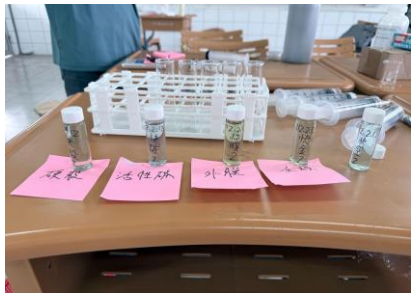
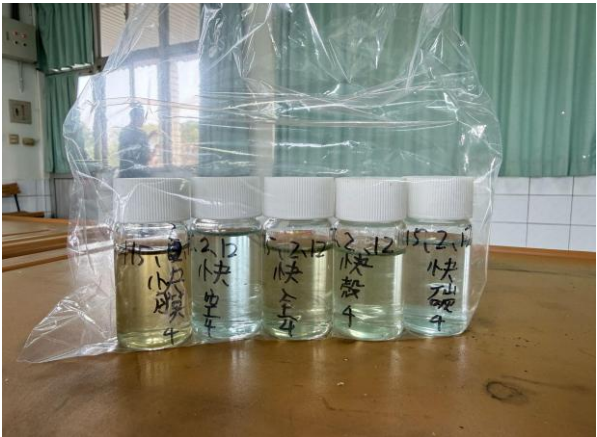
	
5.滴取至樣本瓶	6.完成樣本蒐集
	
7.安裝三層過濾(依序完成步驟一至五)	8.安裝四層過濾(依序完成步驟一至五)
	
9.樣本瓶蒐集(三層)	10.樣本瓶蒐集(四層)

表 6：加壓過濾實驗流程(圖片皆自行拍攝)

四、第四階段：樣本分析與數據收集（光學精密檢測）

在完成所有吸附與加壓過濾實驗（活動一與活動二）後，我們將收集到的所有澄清濾液樣本，統一進行科學化的精密測量，具體分析步驟如下：

1. 學習分光光度計原理與操作規範

- 在正式上機前，我們先行研讀並學習分光光度計之光學原理（即比爾-朗伯定律 Beer-Lambert Law），了解「溶液濃度越高、光線吸收度越強」的科學基礎，並在指導下熟悉高階光學儀器的正確操作與安全規範。

2. 儀器暖機與基準歸零（Blanking）

- 開啟「分光光度計」進行暖機，並依據硫酸銅的藍色特性，將儀器設定至專屬的吸收波長。
- 在測量樣本前，先將裝有「純水」的比色管放入儀器中進行「歸零（Absorbance = 0）」，扣除水與容器本身的背景干擾，確保後續測量數值的絕對精確。

3. 樣本移置與比色管清潔（Cuvette Handling）

- 取出潔淨的石英或塑膠比色管（Cuvette），將收集到的各組濾液樣本小心移入管中，約裝至三分之二滿。

4. 上機測量吸收度（Absorbance）

- 將裝有樣本的比色管放入分光光度計的樣品槽中（確認透光面與光束方向平行）。
- 待儀器數值穩定後，讀取並記錄該樣本的「吸收度（Abs）」數值。依序完成所有樣本（包含活動一與活動二）的檢測。

5. 濃度換算與去除率計算

- 將記錄下來的吸收度數值，代入實驗前製作好的「硫酸銅標準檢量線，利用線性方程式換算出水中真實殘留的銅離子濃度（克/毫升）。
- 最後，將初始濃度扣除殘留濃度，計算出各組菱角殼材料的「重金屬去除率（%）」，作為後續圖表繪製與結論分析的科學依據。

(五)樣本分析	
	
1.學習分光光度計原理	1.學習分光光度計原理
	

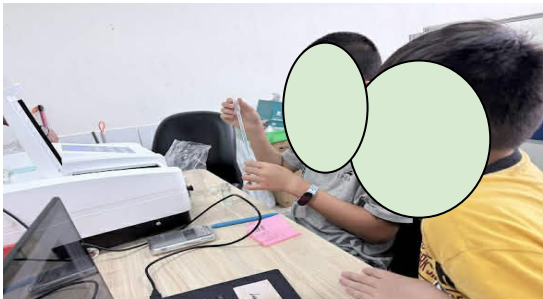
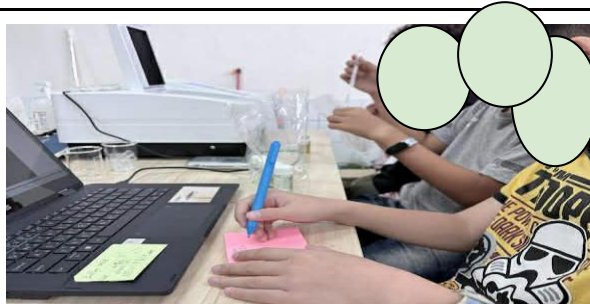
2.學習使用分光光度計	3.拿出比色管
	
4.用比色管加入要測量的溶液	5.把比色管放入分光光度計
	
6.測量吸收值	7.記錄結果

表 7：樣本分析流程(圖片皆自行拍攝)

重複以上方法，以氯化亞鈷進行分析。

肆、研究結果

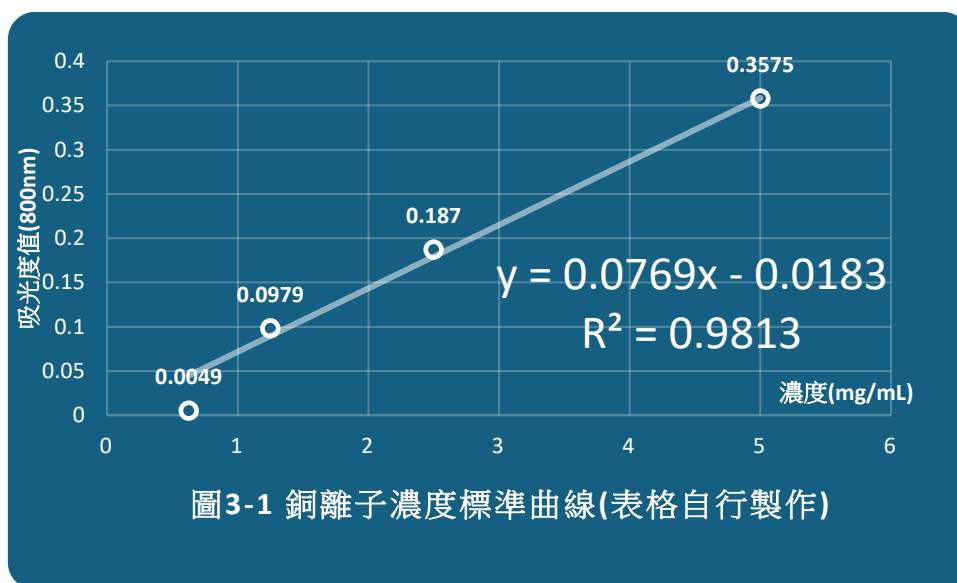
一、硫酸銅之銅離子濃度標準濃度曲線製作

- (一) 我們首先將 2 克的硫酸銅溶解在 400 毫升的水中，製造出 5 毫克/毫升的硫酸銅標準溶液，之後對半稀釋依序成為 2.5 毫克/毫升、1.25 毫克/毫升、0.625 毫克/毫升濃度的硫酸銅水溶液。
- (二) 使用水當成校正後，測定銅離子吸收光譜在 800nm，測量以上不同濃度的銅離子濃度之吸光度值，做成標準曲線。
- (三) 吸光度值：

表8-1 銅離子標準濃度之吸光度值

銅離子濃度	0.625 毫克/毫升	1.25 毫克/毫升	2.5 毫克/毫升	5 毫克/毫升
800nm 吸光值	0.0049	0.0979	0.1870	0.3575

(四) 銅離子標準濃度曲線：



1. 標準銅離子濃度線性方程式為： $y = 0.0769x - 0.0183$ ， $R^2 = 0.9813$ ，顯示有很高的相關。
2. 可利用此線性方程式計算之後的銅離子濃度變化。

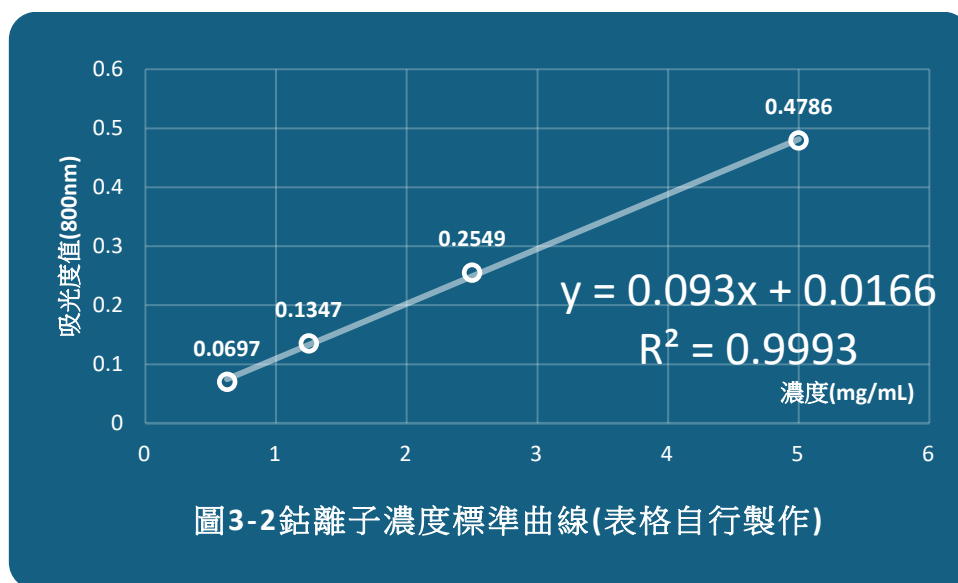
二、氯化亞鈷之鈷離子濃度標準濃度曲線製作

- (一) 我們首先將 2 克的氯化亞鈷溶解在 400 毫升的水中，製造出 5 毫克/毫升的硫酸銅標準溶液，之後對半稀釋依序成為 2.5 毫克/毫升、1.25 毫克/毫升、0.625 毫克/毫升濃度的氯化亞鈷水溶液。
- (二) 使用水當成校正後，測定鈷離子吸收光譜在 510nm，測量以上不同濃度的鈷離子濃度之吸光度值，做成標準曲線。
- (三) 吸光度值：

表8-2 鈷離子標準濃度之吸光度值

銅離子濃度	0.625 毫克/毫升	1.25 毫克/毫升	2.5 毫克/毫升	5 毫克/毫升
510nm 吸光值	0.0697	0.1347	0.2549	0.4786

(四) 鈷離子標準濃度曲線：



1. 標準鈷離子濃度線性方程式為： $y = 0.093x + 0.0166$ ， $R^2 = 0.9993$ ，顯示有很高的相關。
2. 可利用此線性方程式計算之後的鈷離子濃度變化。

三、一般浸泡法之菱角殼各部位、活性碳與空白組之吸附銅離子比較

表9-1 一般浸泡法之比較(銅離子吸附)

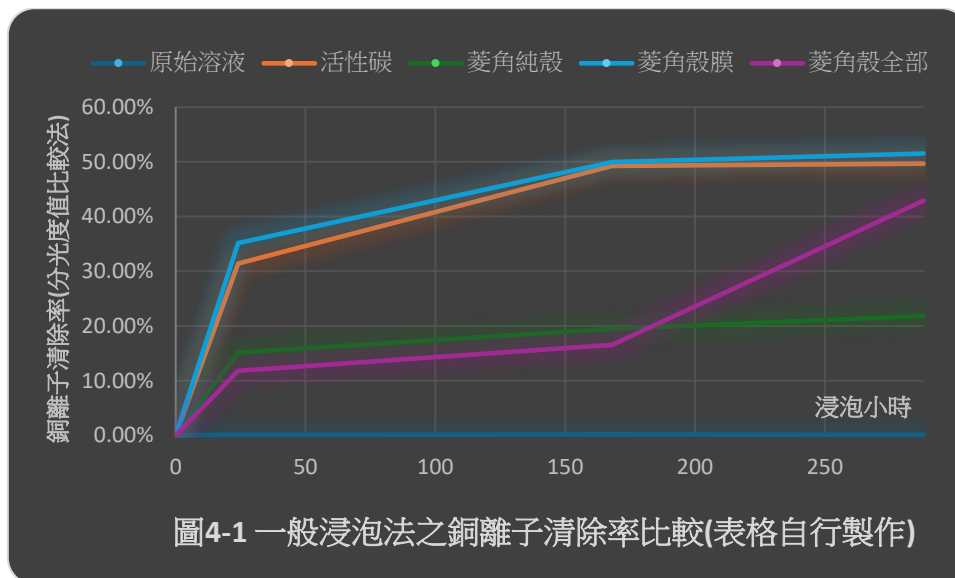
部位/處理	5 毫克/毫升 硫酸銅水溶液	活性碳	菱角純殼	菱角殼膜	菱角殼全部
0 小時	0.3573	0.3573	0.3573	0.3573	0.3573
24 小時	0.3571	0.2451	0.3033	0.2318	0.3152
168 小時	0.3567	0.1813	0.2879	0.1789	0.2982
288 小時	0.3571	0.1799	0.2794	0.1733	0.2041

(吸光度值)

表9-2 一般浸泡法之銅離子清除百分率(吸光度值比較法)

部位/處理	5 毫克/毫升 硫酸銅水溶液	活性碳	菱角純殼	菱角殼膜	菱角殼全部
0 小時	0.06%	0.06%	0.06%	0.06%	0.06%
24 小時	0.11%	31.44%	15.16%	35.16%	11.83%
168 小時	0.22%	49.29%	19.47%	49.96%	16.59%
288 小時	0.11%	49.68%	21.85%	51.52%	42.91%

(吸光度值比較法)



這份圖表展示了在長時間（約 288 小時）的一般浸泡法下，不同材料對銅離子清除率的隨時間變化趨勢。以下為針對圖 4-1 的實驗數據小結：

實驗小結：一般浸泡法之銅離子清除率分析

1. 初期吸附速率差異顯著

- **高效能組別：**菱角殼膜與活性碳在浸泡的前 24 小時內展現了極強的吸附能力，清除率迅速攀升至約 32% 至 35%。
- **低效能組別：**菱角純殼與菱角殼全部在初期的表現較為緩慢，24 小時時的清除率僅落在 12% 至 15% 之間。

2. 長期清除效能與最終表現

- **殼膜優勢持續：**隨著浸泡時間增長，菱角殼膜始終保持領先地位，最終清除率達到約 52%，略高於活性碳的 50%。
- **殼全部的後期追趕：**菱角殼全部在浸泡 168 小時後出現明顯的斜率提升，最終清除率追趕至約 43%；而菱角純殼則在約 22% 處趨於飽和。
- **對照組表現：**原始溶液的清除率全期維持在 0% 附近，排除離子自發性沉澱的可能。

3. 銅離子與鈷離子浸泡法之對比觀察

若將此圖與「鈷離子浸泡法」（圖 4-1）對照：

- **清除上限差異：**同樣使用菱角殼膜，對鈷離子的最終清除率可達約 64%，而對銅離子則約為 52%，顯示該材料對鈷離子具有更強的親和力或吸附容量。
- **材料一致性：**菱角殼膜在兩項實驗中均表現出媲美或優於活性碳的潛力，證實其作為生物吸附劑的廣泛適用性

四、一般浸泡法之菱角殼各部位、活性碳與空白組之吸附鈷離子比較

表10-1 一般浸泡法之比較(鈷離子吸附)

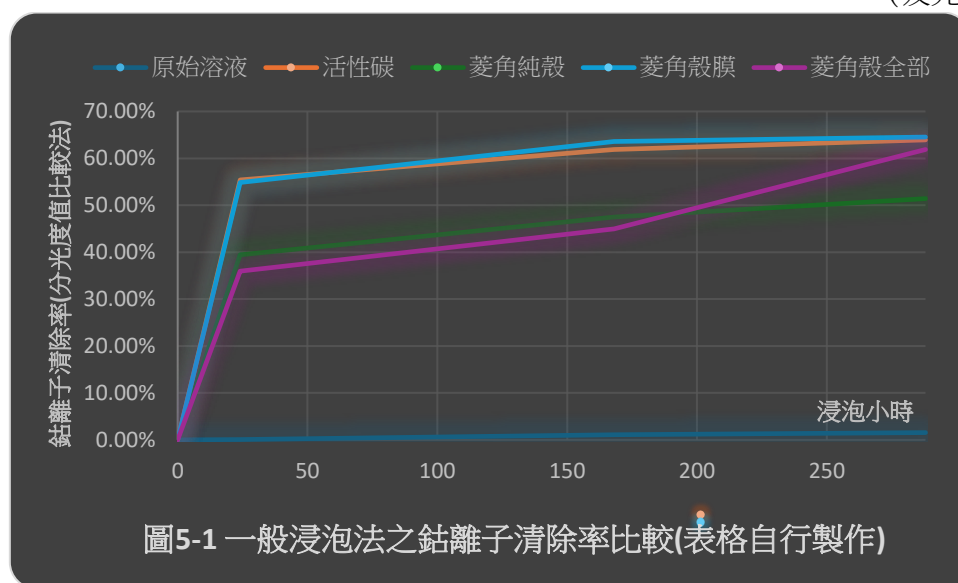
部位/處理	5 毫克/毫升 氯化亞鈷水溶液	活性碳	菱角純殼	菱角殼膜	菱角殼全部
0 小時	0.4786	0.4786	0.4786	0.4786	0.4786
24 小時	0.4782	0.2133	0.2899	0.2159	0.3066
168 小時	0.4733	0.1824	0.2513	0.1742	0.2633
288 小時	0.4712	0.1726	0.2325	0.1697	0.1824

(吸光度值)

表10-2 一般浸泡法之鈷離子清除百分率(吸光度值比較法)

部位/處理	5 毫克/毫升 氯化亞鈷水溶液	活性碳	菱角純殼	菱角殼膜	菱角殼全部
0 小時	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
24 小時	0.08%	55.43%	39.43%	54.89%	35.94%
168 小時	1.11%	61.89%	47.49%	63.60%	44.99%
288 小時	1.55%	63.94%	51.42%	64.54%	61.89%

(吸光度值比較法)



實驗小結：一般浸泡法之鈷離子清除率分析

1. 初始階段具備極高清除效率

- **快速吸附：** 所有測試材料（活性碳、菱角殼膜、菱角純殼、菱角殼全部）在浸泡的前 24 小時內，清除率皆呈現爆發性成長，均達到 35% 至 55% 之間的水平。
- **初期效能排序：** 在浸泡初期，菱角殼膜與活性碳的表現最為接近且優異，清除率迅速突破 50%。

2. 長時間浸泡下的吸附穩定性與飽和

- **穩定增長趨勢：**隨著浸泡時間延長（24 至 288 小時），各材料的清除率增速放緩，進入平台期，顯示吸附位點逐漸趨於飽和。
- **最終清除效能：**到達實驗末期（約 288 小時），**菱角殼膜**的清除率最高（約 **64%**），略微領先活性碳。而**菱角殼全部**在後期追趕速度較快，最終與菱角殼膜、活性碳處於同一領先梯隊。
- **最低效能材料：**菱角純殼在長時間浸泡後的清除率穩定在約 **50%** 左右，雖然仍具吸附力，但明顯低於殼膜及活性碳組別。

3. 與對照組（原始溶液）之對比

- **低自發沉降：**原始溶液在無吸附材料的情況下，長時間浸泡後的清除率幾近於 **0%**，證明實驗觀測到的離子減少完全是由於測試材料的吸附作用所致。

五、快速加壓法之菱角殼各部位、活性碳與空白組之吸附銅離子比較

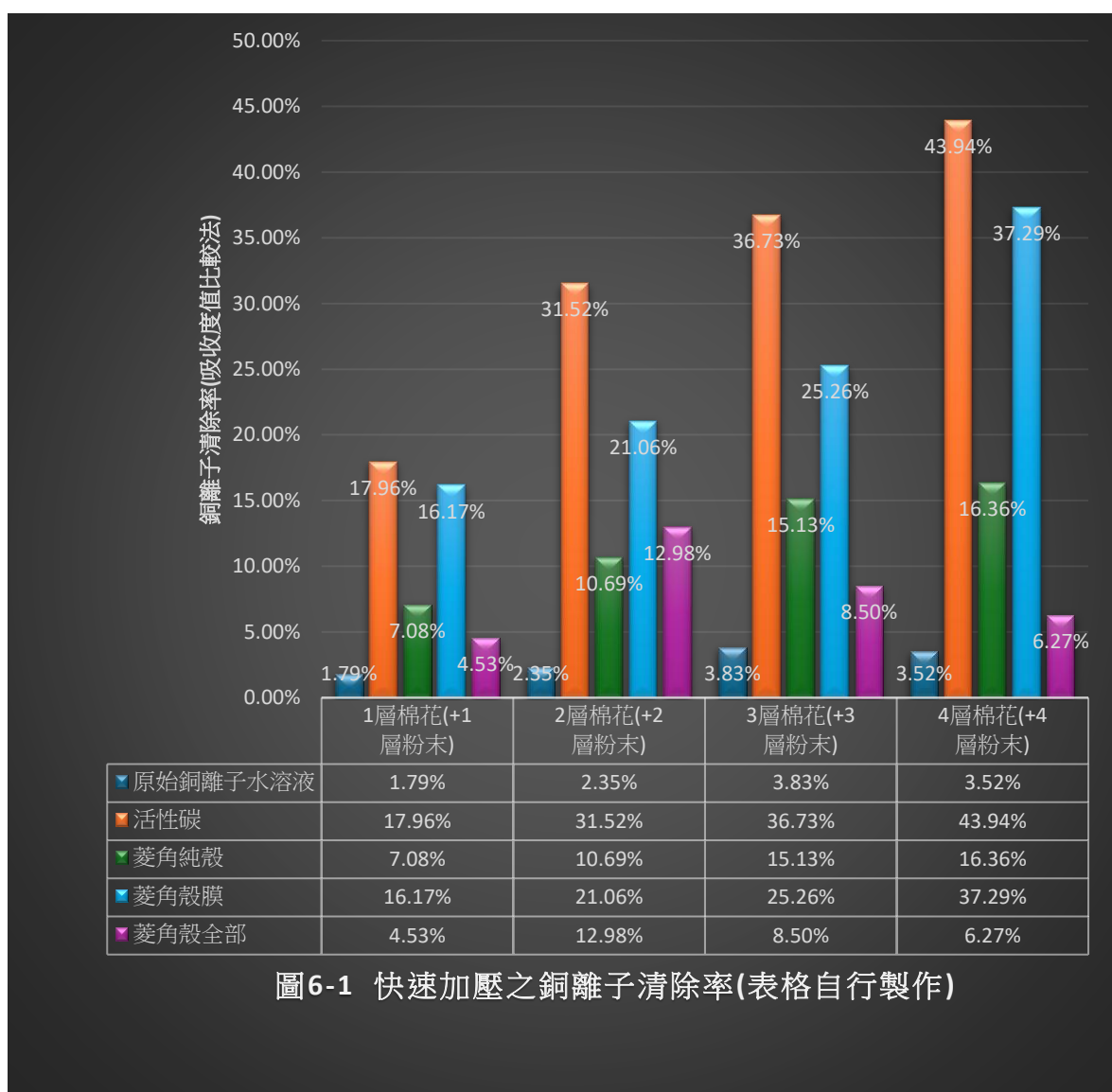
表11-1 快速加壓法(銅離子吸光度值)

部位/處理	5 毫克/毫升 硫酸銅水溶液	部位/處理	活性碳	菱角純殼	菱角殼膜	菱角殼全部
1 層棉花	0.3511	1 層棉花 (+1 層粉末)	0.2933	0.3322	0.2997	0.3413
2 層棉花	0.3491	2 層棉花 +2 層粉末	0.2448	0.3193	0.2822	0.3111
3 層棉花	0.3438	3 層棉花 +3 層粉末	0.2262	0.3034	0.2672	0.3271
4 層棉花	0.3449	4 層棉花 +4 層粉末	0.2004	0.2990	0.2242	0.3351

(吸光度值)

表11-2 快速加壓法之銅離子清除百分率(吸光度值比較法)

部位/處理	5 毫克/毫升 硫酸銅水溶液	部位/處理	活性碳	菱角純殼	菱角殼膜	菱角殼全部
1 層棉花	1.79%	1 層棉花 (+1 層粉末)	17.96%	7.08%	16.17%	4.53%
2 層棉花	2.35%	2 層棉花 +2 層粉末	31.52%	10.69%	21.06%	12.98%
3 層棉花	3.83%	3 層棉花 +3 層粉末	36.73%	15.13%	25.26%	8.50%
4 層棉花	3.52%	4 層棉花 +4 層粉末	43.94%	16.36%	37.29%	6.27%



實驗小結：不同材料對銅離子清除率之比較分析

1. 銅離子清除率隨層數增加而穩定提升

- **層級正相關：** 實驗數據顯示，大多數材料對銅離子的清除率會隨著過濾層數（1 層至 4 層）的增加而提高。
- **物理攔截基礎：** 原始銅離子水溶液（對照組）在單純通過棉花層時，清除率由 1.79% 微幅提升至 3.52%，顯示物理過濾對銅離子的直接清除作用有限，主要仍需依賴材料的吸附特性。

2. 活性碳在銅離子清除上表現最為優異

- **最強吸附材料：** 在所有測試組別中，**「活性碳」**展現了最強的銅離子清除能力，其清除率從單層的 17.96% 顯著增長至四層時的 43.94%。

- **效能顯著領先：**與其他生物質材料相比，活性碳在各個層數階段均維持最高的清除效率，體現了其作為成熟工業吸附劑的優勢。

3. 菱角殼膜為最具潛力的生物吸附材料

- **生物質表現差異：**在菱角相關材料中，「菱角殼膜」的表現最為突出，四層時清除率可達 37.29%，僅次於活性碳。
- **結構與效能關聯：**菱角殼膜的清除效果遠優於「菱角純殼」（16.36%）及「菱角殼全部」（6.27%），說明菱角殼膜含有更有效的吸附位點或官能基來捕捉銅離子。

4. 特殊現象觀察

- **清除率飽和或下降：**值得注意的是，「菱角殼全部」在四層時的清除率（6.27%）反而低於兩層（12.98%），這可能暗示在快速加壓環境下，過厚的混合材料層可能產生了側流現象或材料孔隙被堵塞，導致效率下降。

六、快速加壓法之菱角殼各部位、活性碳與空白組之吸附鈷離子比較

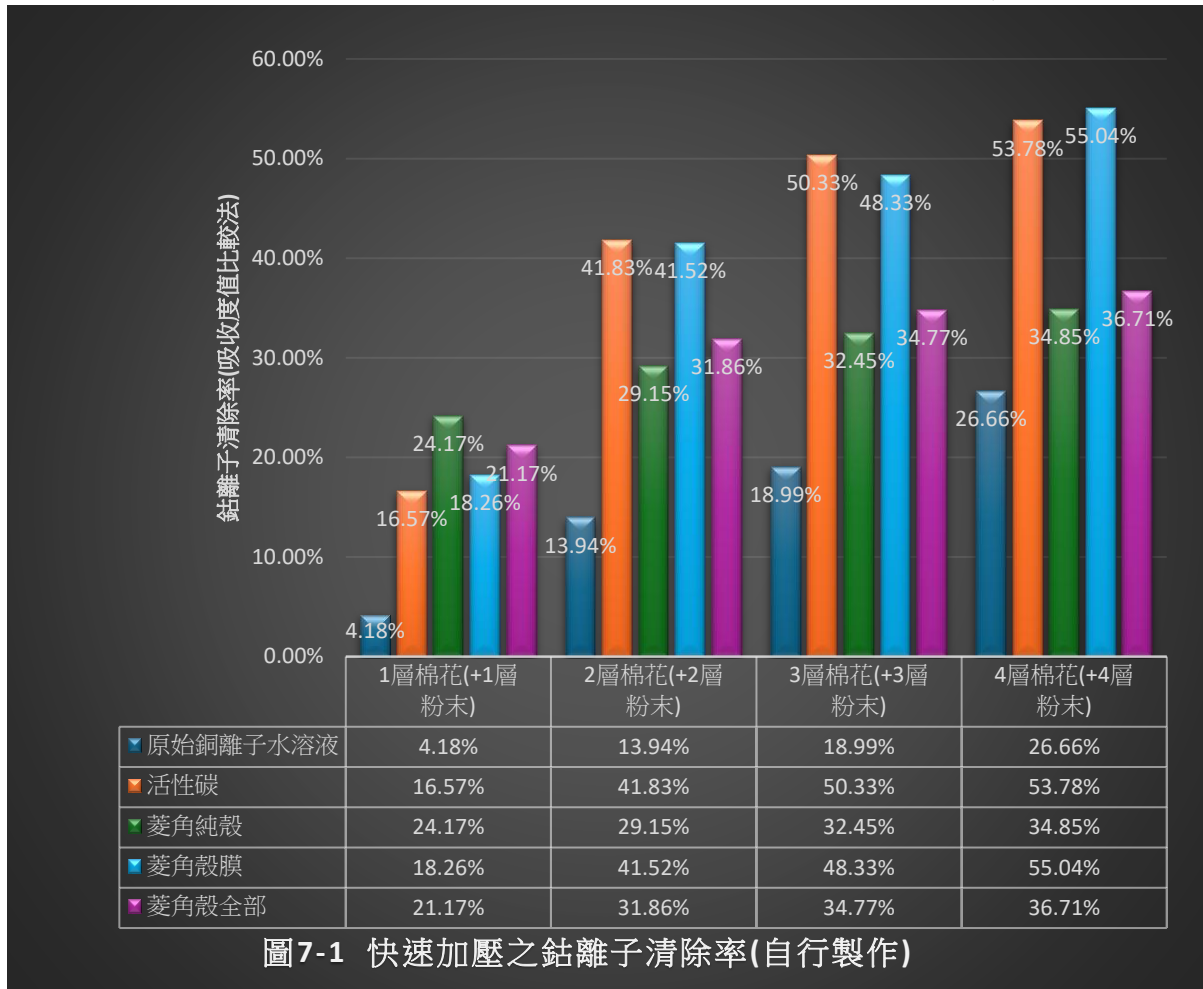
表12-1 快速加壓法(鈷離子吸光度值)

部位/處理	5 毫克/毫升 氯化亞鈷溶液	部位/處理	活性碳	菱角純殼	菱角殼膜	菱角殼全部
1 層棉花	0.4586	1 層棉花 +1 層粉末	0.3993	0.3629	0.3912	0.3773
2 層棉花	0.4119	2 層棉花 +2 層粉末	0.2784	0.3391	0.2799	0.3261
3 層棉花	0.3877	3 層棉花 +3 層粉末	0.2377	0.3233	0.2473	0.3122
4 層棉花	0.3510	4 層棉花 +4 層粉末	0.2212	0.3118	0.2152	0.3029

(吸光度值)

表12-2 快速加壓法之鈷離子清除百分率(吸光度值比較法)

部位/處理	5 毫克/毫升 氯化亞鈷溶液	部位/處理	活性碳	菱角純殼	菱角殼膜	菱角殼全部
1 層棉花	4.18%	1 層棉花 (+1 層粉末)	16.57%	24.17%	18.26%	21.17%
2 層棉花	13.94%	2 層棉花 +2 層粉末	41.83%	29.15%	41.52%	31.86%
3 層棉花	18.99%	3 層棉花 +3 層粉末	50.33%	32.45%	48.33%	34.77%
4 層棉花	26.66%	4 層棉花 +4 層粉末	53.78%	34.85%	55.04%	36.71%



實驗小結：不同材料對鈷離子清除率之比較分析

1. 鈷離子清除率隨層數增加而提升

- 層級效應顯著：無論使用哪種材料，鈷離子的清除率均隨著粉末層數（從 1 層增加至 4 層）的遞增而同步成長。
- 物理攔截與吸附：即使是「原始銅離子水溶液」（對照組），在單純增加棉花層數的情況下，清除率也從 4.18% 提升至 26.66%，顯示過濾層數的增加有助於物理性攔截。

2. 菱角殼膜展現最佳清除效果

- 最優材料：在所有測試材料中，「菱角殼膜」在 4 層粉末的條件下表現最為優異，清除率達到 55.04%。
- 超越活性碳：在多層數（3 層與 4 層）的情況下，菱角殼膜的清除能力皆略高於傳統吸附材料「活性碳」（其最高清除率為 53.78%），顯示菱角殼膜具備極佳的生物吸附潛力。

3. 菱角不同部位的清除效能差異

- 效能排序：整體而言，對鈷離子的清除能力排序為：菱角殼膜 > 活性碳 > 菱角殼全部 > 菱角純殼。
- 結構優勢：菱角殼膜的效能明顯優於菱角純殼（34.85%），推測殼膜中可能含有更豐富的官能基或更細緻的微孔結構，有利於與金屬離子結合。

伍、討論

討論一：廢物利用大對決——菱角殼真的能贏過專業的「活性炭」嗎？

【問題】：我們在實驗中發現，沒有燒成炭的「菱角殼膜」，吸附能力竟然跟工廠做的「活性炭」差不多，甚至在清除鈷離子時還小贏一點點，這是為什麼呢？

【我們討論後的回答】：

- 雖然我們沒有像工廠一樣用高溫去燒菱角殼，但菱角殼的「內膜」天生就有很多厲害的成分，像是木質素和纖維素。
- 這些天然成分表面有很多像「小勾子」一樣的化學基團（羧基和羥基），它們不用燒焦，就能主動把水裡的重金屬離子勾住。
- 再加上我們用果汁機把它打得很細，增加了接觸面積，所以這群「原態」的環保尖兵，實力完全不輸給昂貴的活性炭！

討論二：加壓過濾的祕密——為什麼東西加越多層，效果不一定越好？

【問題】：在做「快速加壓」實驗時，我們發現把「菱角殼全部」加到四層厚，清除銅離子的效果竟然比兩層還要差，這不是越厚越強嗎？

【我們討論後的回答】：

- 這就是科學有趣的地方！當我們把不同大小的粉末（硬殼+薄膜）疊得太厚時，裡面可能會擠得太緊或不均勻。
- 當我們用針筒「強力加壓」時，水流會因為中間太擠了，乾脆找旁邊比較鬆的縫隙鑽過去，這叫作「側流現象」。
- 因為水流跑偏了，沒有真的經過粉末層去被吸附，所以雖然材料變多了，效果反而變差。這告訴我們，過濾器的設計「剛剛好」才是最科學的！

討論三：未來小科學家的環保夢——這項研究在生活中可以怎麼用？

【問題】：我們測試了「銅離子」跟「鈷離子」，發現菱角殼對這兩種金屬的清除率不一樣，這對我們製作「簡易淨水器」有什麼啟發？

【我們討論後的回答】：

- 實驗告訴我們，菱角殼對「鈷離子」的親和力比較強（最高可以清掉 64%），而「銅離子」稍微低一點（約 52%）。
- 這代表每一種生物材料都有它的「專長」，未來如果要在不同污染的地方用，我們就要挑選對的材料。

- 最重要的是，這證明了我們不用浪費電、浪費瓦斯去燒炭，只要用家裡的**果汁機**和**大針筒**，就能做出環保的淨水器。
- 我們希望這能讓大家知道，路邊常見的「農業廢棄物」其實是藏在垃圾桶裡的烏金！

陸、結論

- 一、**原態菱角殼具備顯著的淨水潛力** 研究證實，不需要經過耗能的高溫燒炭程序，直接將原態菱角殼物理粉碎後，即可有效吸附水中的銅離子與鈷離子。這打破了傳統認為一定要製成「生物炭」才有吸附能力的迷思。
- 二、**菱角「內膜」是吸附重金屬的核心部位** 在不同部位的對照實驗中，「菱角殼膜（內膜）」的表現最為突出。在長時間浸泡下，其對銅離子的清除率約 **52%**，對鈷離子更可達約 **64%**，效能甚至超越了市售的活性碳。
- 三、**浸泡法在 24 小時內即可發揮大部分效能** 透過「浸泡吸附法」觀察發現，所有材料在浸泡的前 24 小時內都會出現爆發性的吸附成長，清除率迅速達到 **35% 至 55%**。這顯示原態粉末與廢水接觸初期即有極高的反應速率。
- 四、**加壓過濾能建立「快速且有效」的淨水模式** 利用大針筒進行「加壓過濾」，可以克服粉末過細導致重力過濾緩慢的問題。實驗顯示，隨著過濾層數增加，清除率通常會隨之提升，其中活性碳與菱角殼膜在 4 層過濾下表現最穩定。
- 五、**具備高度的環保與居家推廣價值** 本研究成功利用家用的「果汁機」與「大針筒」，開發出低成本、免燒炭的簡易淨水裝置雛形。這不僅落實了農業廢棄物（菱角殼）的循環再利用，更減少了傳統製炭過程的碳排放，符合永續環保的目標。

柒、參考資料及其他

- 台大醫院環境及職業醫學部（2021年10月19日）。常見重金屬對人體危害。取自：
https://www.hch.gov.tw/?aid=626&pid=66&page_name=detail&iid=628
- 呂紹妤（2020年10月28日）。台南官田菱角—從綠寶田農場認識生態友善紅菱。拾間。取自：
<https://ms-harvest.com/post20241116/>
- 余灌祐、郭原銘、馮軍棠、黃文陽、蔡景鵬、賴宥榕（2012）。再現「菱」色（中小學科學展覽會作品說明書）。取自：
<https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/52/pdf/080215.pdf>
- 林弘萍（2023）。菱殼炭循環經濟發展歷程。臺灣網路科教館。取自：
<https://www.ntsec.edu.tw/liveSupply/detail.aspx?a=6829&cat=6843&lid=17193>
- 林杰樑（無日期）。常見重金屬中毒。綠十字健康網。取自：
https://www1.cgmh.org.tw/intr/intr2/c31570/greencross/www.greencross.org.tw/toxin/heavy-metal/heavy_metal.html

- 施朝桂（2019）。水熱菱角殼製備高比表面積活性碳及其應用（碩士論文）。崑山科技大學材料工程系。
- 高苡瑄、楊俐玟、莊杰叡（2021）。「碳」為觀止—回收式生物炭吸附光解膠囊（中小學科學展覽會作品說明書，作品編號：030211）。取自：<https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/61/pdf/NPHSF2021-030211.pdf>
- 國家環境毒物研究中心（2021年3月30日）。銅。取自：<https://nehrc.nhri.edu.tw/2021/03/30/%E9%8A%85/>
- 國立臺灣大學化學系（無日期）。七、減壓過濾。臺大化學系教學網。取自：<https://teaching.ch.ntu.edu.tw/gclab/wp-content/uploads/tech-減壓過濾.pdf>
- 教育部（無日期）。菱角。教育部重編國語辭典修訂本。取自：<https://dict.revised.moe.edu.tw/dictView.jsp?ID=65549>
- 教育部（無日期）。過濾。教育百科（國語辭典簡編本）。取自：<https://pedia.cloud.edu.tw/Entry/Detail/?title=%E9%81%8E%E6%BF%BE&search=%E9%81%8E%E6%BF%BE>
- 郭宸茵（2021）。水熱法製備菱角殼活性碳條件對染料吸附能力之影響（碩士論文）。崑山科技大學材料工程系。
- 彰化縣衛生局（2018年2月26日）。認識重金屬檢測。取自：<https://www.chshb.gov.tw/node/219112294#gsc.tab=0>
- 勢動科技（2017年9月5日）。認識分光光度計（一）原理與設計概念。取自：<https://www.acttr.com/tw/tw-report/tw-report-technology/335-tw-tech-spectrophotometer-principle-concept.html>
- 農業部（無日期）。認識菱角。食農教育資訊整合平台。取自：https://fae.moa.gov.tw/map/food_item.php?type=AS01&id=320
- 農業部（2022年10月27日）。菱殼變烏金 菱炭用處多。農業兒童網。取自：https://kids.moa.gov.tw/theme_data.php?theme=kids_learning&sub_theme=A02&id=183
- 環境部（2024年11月25日）。飲用水水質標準。環境部主管法規查詢系統。取自：<https://oaout.moenv.gov.tw/law/LawContent.aspx?id=FL015512>
- 劉安倫（2022年5月24日）。炭索官田廢棄菱角殼再造變烏金。台灣肥料股份有限公司。取自：<https://www.taifer.com.tw/PublicationArticleDetailC004000.aspx?Cond=87f62b93-2d26-48e4-9f42-2483a6d0d341>
- Weng, C. H., & Wu, Y. C. (2012). Potential low-cost biosorbent for copper removal: Pineapple leaf powder. *Journal of Environmental Engineering*, 138(8), 841 – 849.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000424](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000424)