

# 中華民國第 65 屆中小學科學展覽會

## 作品說明書

---

高級中等學校組 環境學科

052611

誰是清道夫？生活中的除『銅』妙『劑』大對決

學校名稱：桃園市立內壢高級中等學校

作者：  高二 謝侑倫  高二 黃宇潔  高二 莊詠程	指導老師：  林玫君
---	------------------

關鍵詞： 吸附劑、銅離子、吸附率

## 摘要

本研究以生活中易取得的材料或廢材作為金屬離子的吸附劑，由實驗結果發現，蚵殼粉、蛋殼粉及碳酸鈣的吸附效果都比有機物吸附劑更佳，吸附率皆達 83%，而單位重量的吸附量以碳酸鈣的 14.16 mg / g 效果最好，吸附劑的重量增加會提升吸附率，且第一小時內的吸附提升最為顯著。高溫或鹼性的環境吸附效果較好。在多種金屬離子的競爭吸附，銅離子的吸附均下降，但碳酸鈣受影響較小。與離子交換樹脂的處理方法比較，發現蚵殼粉、蛋殼粉和碳酸鈣在低濃度銅離子水溶液的吸附效果都較佳，且上述三者吸附劑的吸附效果皆較電鍍法佳。因此，運用實驗結果設計一款自動化吸附裝置，期待能為家鄉工廠林立造成的環境汙染盡一份貢獻。

## 壹、研究動機

隨著工業化發展，重金屬汙染已成為我們面臨的嚴重環境問題之一。近年來，隨著環保意識的提升，政府開始重視相關環境議題，對於工廠排廢制定相關法律規範。新聞曾報導台灣的彩色河流，身為一個生活在中壢工業區附近的我們對此感受很深，也曾經在路邊等公車時看到排水溝不尋常顏色的液體排出，因而興起想研究重金屬離子去除的想法。再者，結合 108 課綱化學（全）所提綠色化學指標以及 SDGs 永續相關議題，可以看到多項議題內容的目標都在解決環境汙染的問題，像是 SDGs 11 減少都市對環境的影響、SDGs 12 負責化學品和廢物的管理、SDGs 15 保護和恢復陸地和淡水生態系統。減少重金屬汙染是其中之一重要議題，為了能實踐解決此問題，我們想利用生活中易取得的材料或是廢材，針對「水中銅離子的去除」作變因探討，並嘗試針對研究結果，設計可實際應用的裝置，為家鄉工廠林立可能造成的環境汙染盡一份貢獻。

## 貳、研究目的

- 一、不同濃度硫酸銅、硫酸鎳、硫酸鈷水溶液之銅離子的吸收度、導電度 ( $\mu\text{S} / \text{cm}$ ) 及 TDS (ppm) 是否有相似趨勢
- 二、探討生活中不同有機物、無機物作為吸附劑對硫酸銅水溶液之銅離子的吸附效果
- 三、探討不同重量的吸附劑對硫酸銅水溶液之銅離子的吸附效果
- 四、探討不同吸附時間下，吸附劑對硫酸銅水溶液之銅離子的吸附效果差異
- 五、以 Langmuir 等溫吸附模型探討吸附劑對硫酸銅水溶液之銅離子的最大吸附量
- 六、比較不同溫度環境下，吸附劑對硫酸銅水溶液之銅離子的吸附效果
- 七、比較不同酸鹼環境下，吸附劑對硫酸銅水溶液之銅離子的吸附效果
- 八、探討吸附劑在其他重金屬離子同時存在的情況下，對硫酸銅溶液之銅離子的吸附效果
- 九、比較吸附劑與現行工業重金屬去除法（離子交換樹脂）的吸附效果
- 十、比較吸附劑與電鍍法的去除銅離子效果
- 十一、設計能因應各種條件下有效去除銅離子的自動化吸附裝置

## 參、研究設備及器材

### 一、設備及器材（由作者自行拍攝）



圖 3-1 紫外可見光分光光度計



圖 3-2 PASCO spectrometer



圖 3-3 電子秤



圖 3-4 容量瓶



圖 3-5 研鉢



圖 3-6 篩網



圖 3-7 燒杯

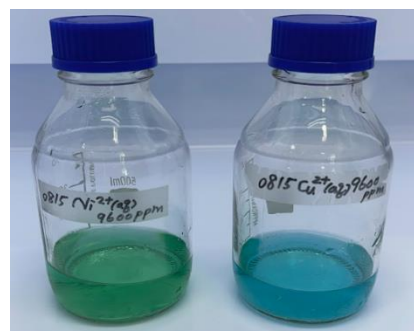


圖 3-8 血清瓶



圖 3-9 樣品瓶



圖 3-10 藥匙



圖 3-11 滴管



圖 3-12 電鍍裝置



圖 3-13 水浴槽

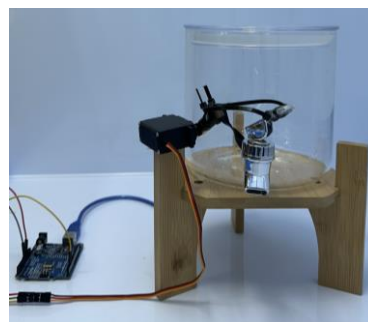


圖 3-14 玻璃淨化桶、木架



圖 3-15 杜邦線、Arduino uno 板、伺服馬達、USB 線



圖 3-16 SEM 掃描式電子顯微鏡  
(拍攝者：游博文)

## 二、實驗藥品、材料



圖 3-16 硫酸銅、硫酸鎳、硫酸鈷、碳酸鈣

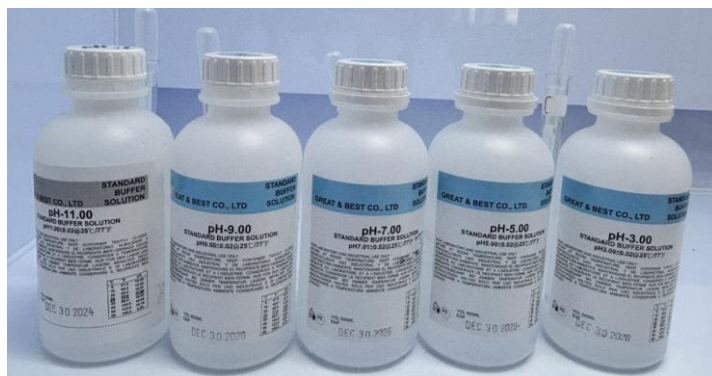


圖 3-17 緩衝液



圖 3-18 蛋殼粉



圖 3-19 薑粉



圖 3-20 蝦殼碎片



圖 3-21 蚵殼粉



圖 3-22 活性炭



圖 3-23 紅茶葉



圖 3-24 綠茶葉



圖 3-25 絲瓜絡屑

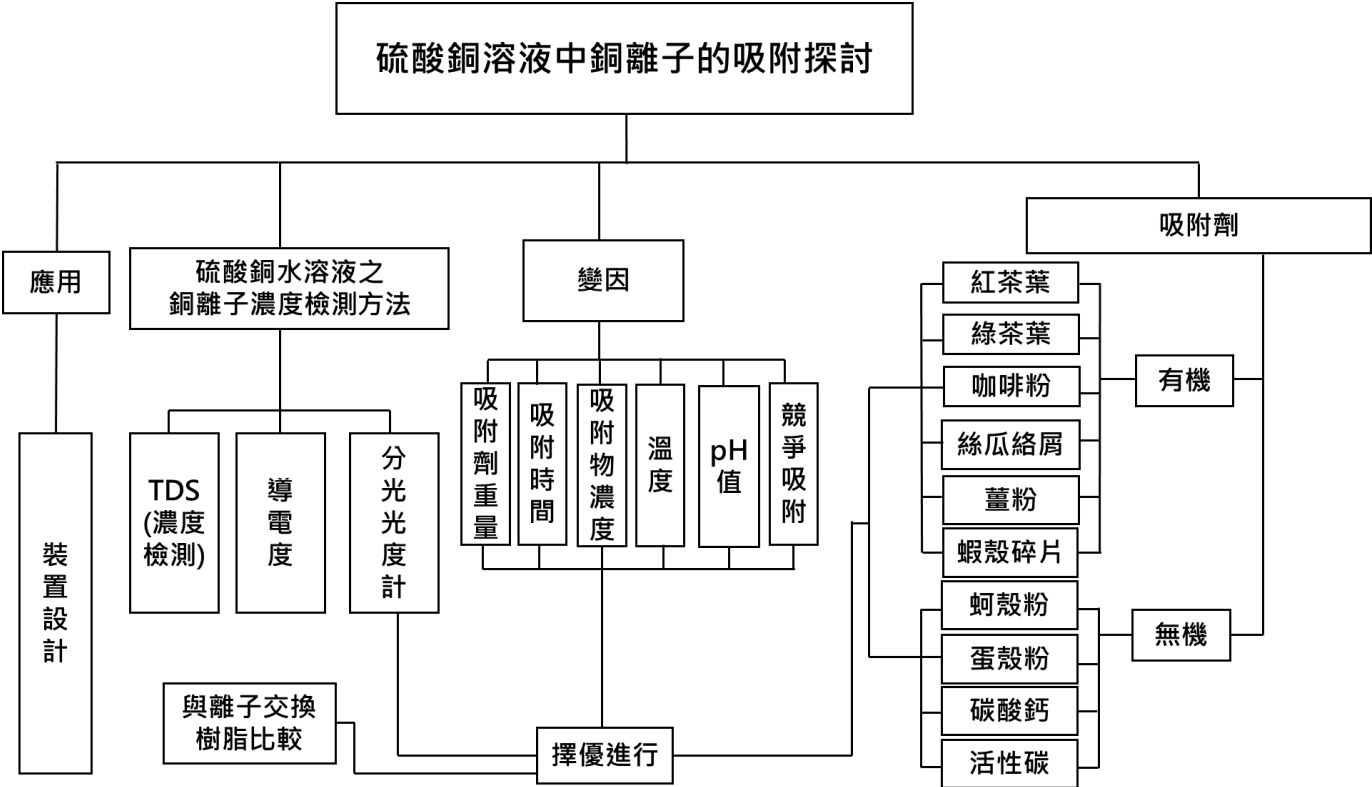


圖 3-26 咖啡粉

肆、研究過程及方法

一、探究過程

(一) 研究架構



(由作者自行製作)



## (二) 探究問題及流程

### 問題一：

不同濃度的硫酸銅、硫酸鎳和硫酸鈷之濃度與吸收度是否成線性關係？



### 實驗一

選用顏色明顯的硫酸銅、硫酸鎳和硫酸鈷配製成不同濃度(100 ppm~10000 ppm 區間)的水溶液，分別測量吸收度、導電度、TDS 做成檢量線，觀察其趨勢相關性。

### 問題二：

使用生活中的有機物、無機物是否能夠有效吸附銅離子？



### 實驗二

取紅茶葉、綠茶葉、咖啡粉、絲瓜絡屑、薑粉、蝦殼碎片、蚵殼粉、蛋殼粉、碳酸鈣、活性碳分別浸泡至 1000 ppm 的硫酸銅水溶液中，比較不同種類的吸附效果。

### 問題三：

吸附劑的重量是否影響對重金屬離子的吸附效果，以多少吸附劑的重量能達到最有效利用？



### 實驗三

取實驗二吸附效果較佳的吸附劑，分別以 1、2、3、4、5 及 6 克的重量浸泡在 1000 ppm 及 10000 ppm 的硫酸銅水溶液中，比較不同重量的吸附效果。

### 問題四：

吸附劑在不同吸附時間長短，是否影響吸附劑對重金屬離子的吸附效果？



### 實驗四

取實驗二吸附效果較佳的吸附劑，在不同吸附時間（每一小時測一次，共八次）吸附 1000 ppm、10000 ppm 硫酸銅水溶液，比較不同時間吸附效果。

### 問題五：

是否能利用吸附劑在不同濃度的硫酸銅水溶液下之結果，探討出吸附劑的吸附極限？



### 實驗五

取實驗二吸附效果較佳的吸附劑，浸泡在 1000 ppm~10000 ppm 的硫酸銅水溶液，並且以 Langmuir 等溫吸附模型探討最大吸附量。

### 問題六：

吸附劑在不同溫度下，是否對硫酸銅水溶液也有相同的吸附效果？



### 實驗六

取實驗二中吸附效果較佳的吸附劑，在溫度 0°C、25°C、50°C、75°C、100°C 的環境吸附 1000 ppm、10000 ppm 硫酸銅水溶液，比較不同環境溫度的吸附效果。



**問題七：**

吸附劑在不同 pH 值環境下，是否對硫酸銅水溶液也有相同的吸附效果？



**實驗七**

取實驗二中吸附效果較佳的吸附劑，於 pH 1、3、5、7、9、11 的環境吸附 1000 ppm、10000 ppm 硫酸銅水溶液，比較不同酸鹼環境的吸附效果。

**問題八：**

吸附劑在混和鎳離子及鈷離子的硫酸銅水溶液，是否存在吸附效果的差異？



**實驗八**

取實驗二中吸附效果較佳的吸附劑，進行「 $\text{Cu}^{2+}$ 與 $\text{Ni}^{2+}$ 」、「 $\text{Cu}^{2+}$ 與 $\text{Co}^{2+}$ 」和「 $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Ni}^{2+}$ 與 $\text{Co}^{2+}$ 」競爭吸附，是否影響吸附劑對銅離子的吸附效果。

**問題九：**

實驗二中吸附效果較佳的吸附劑與市面上工業重金屬去除的離子交換樹脂哪個效果比較好？



**實驗九**

比較實驗二中吸附效果較佳的碳酸鈣、蛋殼粉及蚵殼粉與現行工業重金屬去除法：離子交換樹脂的吸附效果。

**問題十：**

實驗二中吸附效果較佳的吸附劑與工業上常用電鍍法比較哪個效果比較好？



**實驗十**

比較實驗二中吸附效果較佳的碳酸鈣、蛋殼粉及蚵殼粉與現行工業常用電鍍法的去除效果。

**問題十一：**

能否根據上述實驗結果設計出一個自動化去除硫酸銅水污染的裝置？



**實驗十一**

設計一款可以吸附硫酸銅水溶液中銅離子的裝置並自動化收集淨化後的水，並因應上述實驗中不同因素，選擇適合的吸附劑，達到去除銅離子之最佳效果。

## 二、文獻探討

### (一) 吸附劑吸附原理

吸附原理指氣體、液體或溶解的固體顆粒，與固體表面分子間相互作用而附著在上面的過程，可分成物理吸附及化學吸附。物理吸附和化學吸附常同時發生，通常是多種作用的綜合結果，可能因當下條件而影響其吸附方式。在吸附過程中達平衡時可用方程式來描述，如 Langmuir 等溫線方程式。<sup>1</sup> 本實驗亦是此原理，下表說明物理吸附及化學吸附特性的差別。<sup>2</sup>

特性	物理吸附	化學吸附
吸附力	弱	強
作用溫度	低溫，吸附力 $\propto 1/\text{溫度}$	高溫，吸附力 $\propto \text{溫度}$ (至飽和為止)
被吸附物特性	沒有選擇性	選擇性高，有化學鍵才發生吸附
可逆性	可逆（脫附）	不可逆
原理比較	以凡得瓦力作為吸引力	產生化學鍵結

### (二) 導電度（計）原理

在溶液中電流是通過離子流動的方式來傳輸，感應器藉由此特性，可以測量出溶液的導電能力，溶液中的離子濃度越高，導電能力就越強。感應器是在實際測量導電係數  $G$ ，定義：電阻的倒數；通常會以導電率  $C$  來推得導電係數  $G$ ，公式如下：<sup>3</sup>

$$C = G \cdot k_c \quad G: \text{電導係數} (\mu\text{S} \cdot \text{cm}) \quad C: \text{導電率} (\mu\text{S}) \quad k_c: \text{測試瓶常數} (\text{cm}^{-1})$$

### (三) TDS（計）原理

利用「水的導電性」推測水中溶解的無機物和有機物總量。TDS 值高代表水中含導電性離子（如：鈉、鉀、氯）越多；反之，TDS 數值越低，代表水中含有的導電性離子越少。除了導電性離子數量會影響 TDS 值之外，溫度也都會影響 TDS 值。<sup>4</sup>

### (四) 分光光度計法

分光光度計的應用原理，主要是溶液中的物質在光的照射下，對光產生的吸收效應，然而物質對光的吸收是具有選擇性的，各種物質有不同的吸收波長。當單一色光射入溶液時，光的能量將減弱，減弱的光能量強度和溶液物質的濃度有比例關係，即符合比爾—朗伯定律。

#### 1. 比爾—朗伯定律

描述一平行單色光垂直通過均勻非散射吸光物質時，吸光度與吸光物質濃度及吸收層厚度成正比，適用所有吸光物質（氣體、固體、液體、分子、原子和離子）。此外，需定義光吸收度。當樣品溶液被光線照射，部份光線會被樣品溶液吸收，穿透的光強度由原本光入射線強度  $I_0$  降為  $I_1$ ，此時則稱光的透射比  $T$ （Transmittance）。<sup>5</sup>

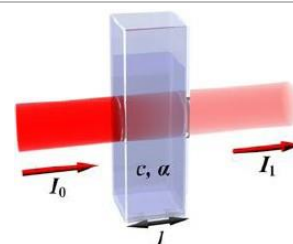
項目	內容	項目	內容
A	光的吸收度	$I_0$	通過樣品前的光強度
$\epsilon (\text{M}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1})$	(莫耳) 吸收係數	$I_1$	通過樣品後的光強度
b (cm)	光徑長	T	光的透射比
C	溶液的濃度		

$$\text{公式： } T = I_1/I_0$$

$$A = \epsilon b c = -\log T$$

圖一、比爾定律吸收光路徑的示意圖

(圖片來源：WIKIPEDIA Beer-Lambert law)



### (五) Langmuir 等溫吸附方程式

由 Langmuir 在 1916 年由一固體表面吸附氣體分子而推導出的公式，目前被廣泛應用於固體吸附的實驗中。

$$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e}$$

$q_e$ : 吸附劑平衡吸附量(mg/g);  $q_m$ : 吸附劑最大吸附量(mg/g);  $C_e$ : 重金屬離子平衡濃度(mg/L);  $K_L$ : Langmuir 吸附常數(L/mg)。

將上列公式經推導後，可列成下式： $\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{q_m} + \frac{1}{q_m K_L}$ ，以  $C_e/q_e$  對  $C_e$  作圖，可得方程式的斜率與截距及作圖（圖 4-9），經運算後，可依序求得  $q_m$  與  $K_L$  值。<sup>19</sup>

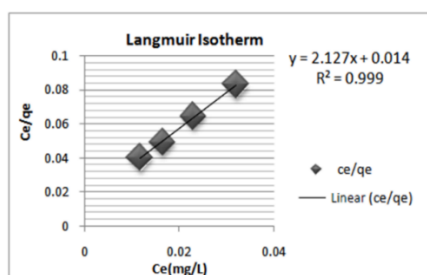


圖 4-10

圖片來源：SciEP<sup>12</sup>

### (六) 吸附率

$$\text{吸附率}(\%) = [(\text{初始濃度} - \text{實驗後濃度}) / \text{初始濃度}] \times 100\% \quad ^9$$

### (七) 吸附位點

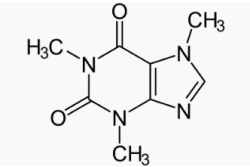
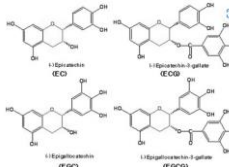
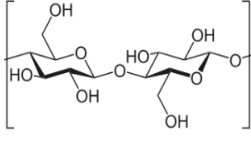
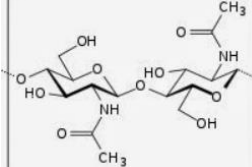
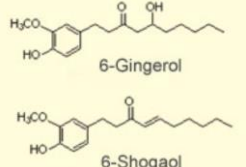
指材料表面或孔隙結構中的特定位置，這些位置有吸附原子、離子和分子的能力。每個位點只能吸附一個原子、離子或分子，該位點被佔據後，則不再吸附。<sup>6</sup>

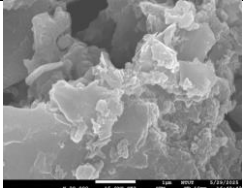
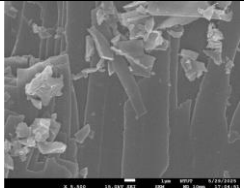
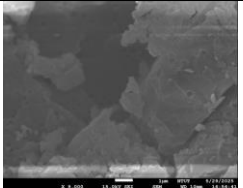
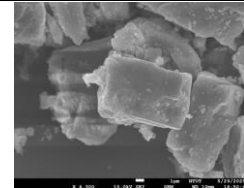
### (八) 電鍍原理<sup>20</sup>

電鍍是一種電解反應，其原理是將電能轉換為化學能：透過電流通過電解質水溶液，使兩極產生氧化還原反應。在電鍍過程中，待鍍物作為負極，透過還原作用使金屬離子沉積於表面，而金屬材料則作為正極，在氧化反應中釋出金屬離子，進一步補充電鍍液中的離子濃度。以電鍍銅為例：



### (九) 吸附劑結構

 <p>圖 4-1</p> <p>圖源： 維基百科<sup>13</sup></p>	 <p>圖 4-2</p> <p>圖源： 營養初健身<sup>14</sup></p>	 <p>圖 4-3</p> <p>圖源： 維基百科<sup>15</sup></p>	 <p>圖 4-4</p> <p>圖源： 小小整理網站<sup>16</sup></p>	 <p>圖 4-5</p> <p>圖源： 島津公司官網<sup>17</sup></p>
<p>咖啡粉 (咖啡因)</p>	<p>紅茶葉、綠茶葉 (兒茶素)</p>	<p>咖啡粉、薑粉、 絲瓜絡屑 (纖維素)</p>	<p>蝦殼碎片 (幾丁質)</p>	<p>薑粉 (薑醇、薑酚)</p>

			
圖 4-6 拍攝者：游博文	圖 4-7 拍攝者：游博文	圖 4-8 拍攝者：游博文	圖 4-9 拍攝者：游博文
活性碳 SEM	蚵殼粉 SEM	蛋殼粉 SEM	碳酸鈣 SEM

#### (十) Zeta Potential (界達電位)

界達電位<sup>9</sup>是指懸浮於液體中的微粒在移動時，其表面附近滑動面上的電位。當粒子因吸附離子或官能基解離而帶電，會在其周圍形成電雙層。而其可反映分散穩定性，絕對值大表示粒子間有較強的電荷斥力，有助於保持分散、不易凝聚；絕對值小，反之。

#### 三、實驗操作方法

實驗一	目的	選用顏色明顯的硫酸銅、硫酸鎳、硫酸鈷配製成不同濃度（100 ppm～10000 ppm）的水溶液，分別測量吸收度、導電度及 TDS 做成檢量線，觀察其趨勢相關性。
	原理	吸收度利用不同濃度的重金屬，在特定吸收波長（硫酸銅：810 nm）的吸光度不同，做成吸收度對濃度的檢量線。 導電度是基於溶液中帶電離子的濃度與其遷移能力，當溶液中重金屬離子濃度越高，離子傳導能力越強，導電度也相應增加。 TDS 是利用水的導電性推測水中溶解的無機物和有機物總量。TDS 值高代表水中含導電性離子越多。
	步驟	(1) 取硫酸銅 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 19.53 克，加水至 500 克，配製成 10000 ppm (2) 依比例稀釋成 100、200、300、400、500、600、800、1000、2000、3000、4000、5000、6000 和 8000 ppm 的重金屬水溶液 (3) 將每個濃度取 30 mL 於燒杯中，逐一操作(4)～(5) (4) 個別取一定量（3.5 mL）的重金屬水溶液，放入分光光度計中，測量其波段之光譜 (5) 燒杯剩餘重金屬水溶液以導電度計、TDS 計測量三次平均，作成趨勢圖 (6) 取 22.25 克硫酸鎳、取 12.60 克硫酸鈷重複操作(1)～(5)
實驗二	目的	探討不同種類的吸附劑（有機：紅茶葉、綠茶葉、咖啡粉、絲瓜絡屑、薑粉、蝦殼碎片；無機物：蚵殼粉、蛋殼粉、碳酸鈣、活性碳、活性碳）吸附 1000 ppm 硫酸銅水溶液的吸附效果。
	原理	吸附劑與溶液中溶質（如 $\text{Cu}^{2+}$ ）之間的物理或化學相互作用，使重金屬離子被吸附劑表面或內部結構固定，從而降低溶液中金屬離子的濃度，吸附效果取決於吸附劑的種類、表面性質、孔隙結構及與金屬離子的親和性。
	步驟	(1) 準備吸附材料：紅茶葉、綠茶葉、咖啡粉、絲瓜絡屑、薑粉、蝦殼碎片、蚵殼粉、蛋殼粉、碳酸鈣和活性碳各 5 克 (2) 將不同吸附材料浸泡於 1000 ppm、30 mL 的硫酸銅水溶液中 (3) 設置浸泡時間為 1 小時 (4) 浸泡後，取出 3.5 mL 浸泡後的液體，用分光光度計進行吸收度測量 (5) 將測量後所得的吸收度轉換成濃度 ppm (6) 通過吸收度及濃度，比較不同材料對銅離子的吸附效果

實驗三	目的	探討實驗二中吸附效果較佳的碳酸鈣、蛋殼粉及蚵殼粉在不同重量（1、2、3、4、5 及 6 克）下，對 1000 ppm 及 10000 ppm 硫酸銅水溶液的吸附效果。
	原理	因吸附劑是透過離子交換、沉澱反應、表面配位鍵結等方式吸附重金屬離子。當吸附劑量增加時，可提供更多吸附位點及表面積。
	步驟	(1) 分別準備 1、2、3、4、5 及 6 克的吸附劑碳酸鈣、蛋殼粉及蚵殼粉 (2) 將吸附劑分別浸泡在濃度 1000 ppm 及 10000 ppm 且 30 mL 硫酸銅水溶液 (3) 設置浸泡時間為 1 小時 (4) 浸泡後，取出 3.5 mL 浸泡後的液體，用分光光度計進行吸收度測量 (5) 逐一操作(1)~(4)三次 (6) 將測量後所得的吸收度平均並轉換成濃度 ppm (7) 通過吸收度及濃度，比較吸附劑在不同重量對硫酸銅水溶液的吸附效果
實驗四	目的	探討實驗二中吸附效果較佳的碳酸鈣、蛋殼粉及蚵殼粉在不同吸附時間（每一小時測一次，共八次），吸附 1000 ppm、10000 ppm 硫酸銅水溶液的變化趨勢。
	原理	浸泡時間的長短可能也會影響吸附重金屬的能力，因此將實驗二中吸附效果較佳的吸附劑進行吸附實驗，且進行每小時的樣本測量，觀察並分析時間長短會不會影響吸附劑的吸附效果。
	步驟	(1) 準備各 10 克的碳酸鈣、蛋殼粉及蚵殼粉，並以 5 公克分別置入不同燒杯 (2) 將吸附劑分別浸泡在濃度 1000 ppm 及 10000 ppm 且 30 mL 硫酸銅水溶液 (3) 並每一小時測取出 3.5 mL 浸泡後的液體，用分光光度計進行吸收度測量 (4) 設置浸泡時間為 8 小時，共取 9 次 (5) 逐一操作(1)~(4)三次 (6) 將測量後所得的吸收度平均並轉換成濃度 ppm (7) 通過吸收度及濃度，比較吸附劑在不同吸附時間對硫酸銅水溶液吸附效果
實驗五	目的	探討實驗二中吸附效果較佳的碳酸鈣、蛋殼粉及蚵殼粉吸附不同濃度的銅離子結果與 Langmuir 等溫吸附模型探討最大吸附量。
	原理	透過繪製 $C_e/q_e$ 對 $C_e$ 的線性關係圖，可求得最大吸附量 $q_m$ 與 Langmuir 平衡常數 $K_L$ ，進一步分析吸附劑對重金屬離子的吸附能力，並評估其在吸附重金屬應用中的潛力。
	步驟	(1) 準備各 40 克的碳酸鈣、蛋殼粉及蚵殼粉，並以 5 公克分別置入不同燒杯中 (2) 將吸附劑分別浸泡在濃度 1000、2000、3000、4000、5000、6000、8000 及 10000 ppm、30 mL 硫酸銅水溶液 (3) 設置浸泡時間為 1 小時 (4) 浸泡後，取出 3.5 mL 浸泡後的液體，用分光光度計進行吸收度測量 (5) 逐一操作(1)~(4)三次 (6) 將測量後所得的吸收度平均並轉換成濃度 ppm (7) 將數據分別轉換成 $C_e$ 及 $q_e$ 並帶入 Langmuir 方程式作圖探討最大吸附量
實驗六	目的	探討實驗二中吸附效果較佳的碳酸鈣、蛋殼粉及蚵殼粉在不同溫度（0°C、25°C、50°C、75°C、100°C）下，吸附 1000 ppm、10000 ppm 硫酸銅水溶液的吸附效果。
	原理	因不同的溫度環境會影響吸附劑與重金屬離子之間的物理或化學相互作用，當溫度變化時，會影響吸附平衡、吸附速率及吸附容量，也可能影響溶液中重金屬離子的水合狀態與吸附劑表面官能基的活性，進而影響吸附效果。

	步驟	<p>(1) 準備各 50 克的碳酸鈣、蛋殼粉及蚵殼粉，並以 5 公克分別置入燒杯中</p> <p>(2) 將吸附劑分別浸泡在濃度 1000 ppm 及 10000 ppm、30 mL 硫酸銅水溶液並放於 25°C、50°C、75°C 及 100°C 的水域槽，0°C 環境則以冰塊水靜置</p> <p>(3) 設置浸泡時間為 1 小時</p> <p>(4) 浸泡後，取出 3.5 mL 浸泡後的液體，用分光光度計進行吸收度測量</p> <p>(5) 逐一操作(1)~(4)三次</p> <p>(6) 將測量後所得的吸收度平均並轉換成濃度 ppm</p> <p>(7) 通過吸收度及濃度，比較吸附劑在不同溫度對硫酸銅水溶液的吸附效果</p>
	目的	探討實驗二中吸附效果較佳的碳酸鈣、蛋殼粉、及蚵殼粉在不同 pH 值（3、5、7、9、11）下，吸附 1000 ppm、10000 ppm 硫酸銅水溶液的吸附效果。
	原理	因 pH 值會影響重金屬離子的存在型態、吸附劑表面電荷及吸附機制，進而影響吸附效果。像是不同 pH 值下，硫酸銅水溶液之銅離子可能以沉澱態存在。
實驗七	步驟	<p>(1) 準備各 50 克的碳酸鈣、蛋殼粉及蚵殼粉，並以 5 公克分別置入不同燒杯中</p> <p>(2) 準備 pH3、pH5、pH7、pH9 及 pH11 緩衝液 10 mL</p> <p>(3) 分別將緩衝液加入濃度 1000 ppm 及 10000 ppm、30 mL 硫酸銅水溶液</p> <p>(4) 將吸附劑分別浸泡於混和後的水溶液</p> <p>(5) 設置浸泡時間為 1 小時</p> <p>(6) 浸泡後，取出 3.5 mL 浸泡後的液體，用分光光度計進行吸收度測量</p> <p>(7) 逐一操作(1)~(6)三次</p> <p>(8) 將測量後所得的吸收度平均並轉換成濃度 ppm</p> <p>(9) 通過吸收度及濃度，比較吸附劑在不同 pH 值對硫酸銅水溶液的吸附效果</p>
	目的	探討實驗二中吸附效果較佳的碳酸鈣、蛋殼粉及蚵殼粉，吸附進行「Cu <sup>2+</sup> 與 Ni <sup>2+</sup> 」、「Cu <sup>2+</sup> 與 Co <sup>2+</sup> 」和「Cu <sup>2+</sup> 、Ni <sup>2+</sup> 與 Co <sup>2+</sup> 」競爭吸附，是否影響吸附劑對銅離子的吸附效果。
	原理	不同離子對於不同物質有不同的抓附能力，進而可能會改變到吸附劑的吸附傾向，因此取實驗二中附效果較佳的碳酸鈣、蛋殼粉及蚵殼粉在不同重金屬離子溶液下其競爭吸附能力的關係。
實驗八	步驟	<p>(1) 準備各 15 克的碳酸鈣、蛋殼粉及蚵殼粉，並以 5 公克分別置入不同燒杯中</p> <p>(2) 依實驗一的步驟配製 1000 ppm 的硫酸鎳水溶液及硫酸鈷水溶液</p> <p>(3) 將 15 mL 的 1000 ppm 硫酸銅水溶液與 15 mL 的 1000 ppm 硫酸鎳水溶液配成混合溶液並重複 3 次</p> <p>(4) 將 15mL 的 1000 ppm 硫酸銅水溶液與 15 mL 的 1000 ppm 硫酸鈷水溶液配成混合溶液並重複 3 次</p> <p>(5) 將 10 mL 的 1000 ppm 硫酸銅水溶液、10 L 的 1000 ppm 硫酸鎳水溶液與 10 L 的 1000 ppm 硫酸鈷水溶液配成混合溶液並重複 3 次</p> <p>(6) 將(3)~(5)的混合溶液分別倒入裝有碳酸鈣、蛋殼粉及蚵殼粉的燒杯</p> <p>(7) 重複步驟(1)~(6)三次</p> <p>(8) 水溶液濃度改為 10000 ppm，重複步驟(1)~(7)三次</p> <p>(9) 將測量後所得的吸收度平均並轉換成濃度 ppm</p> <p>(10) 通過吸收度及濃度，比較吸附劑在 Ni<sup>2+</sup>與 Co<sup>2+</sup>環境下，是否會影響其對硫酸銅中的 Cu<sup>2+</sup>的吸附效果</p>
	目的	
	原理	



實驗九	目的	比較實驗二中吸附效果較佳的碳酸鈣、蛋殼粉及蚵殼粉與現行工業重金屬去除法（離子交換樹脂）的吸附效果。
	原理	市售的離子交換樹脂就具有去除重金屬的功能，利用實驗得出最好效果的吸附劑去與離子交換樹脂做比較，觀察是否在吸附效果上更具優勢。
	步驟	(1) 準備各 10 克的離子交換樹脂、碳酸鈣、蛋殼粉及蚵殼粉，並以 5 公克分別置入同燒杯中 (2) 將吸附劑分別浸泡在濃度 1000 ppm 及 10000 ppm、30 mL 硫酸銅水溶液 (3) 設置浸泡時間為 1 小時 (4) 浸泡後，取出 3.5 mL 浸泡後的液體，用分光光度計進行吸收度測量 (5) 逐一操作(1)~(4)三次 (6) 將測量後所得的吸收度平均並轉換成濃度 ppm (7) 通過吸收度及濃度，比較離子交換樹脂和碳酸鈣、蛋殼粉及蚵殼粉對硫酸銅水溶液的吸附效果
實驗十	目的	比較實驗二中的吸附效果較佳的碳酸鈣、蛋殼粉及蚵殼粉與現行重金屬常用的電鍍比較去除重金屬的效果。
	原理	現行常用的電鍍是一種利用電解原理將金屬離子附著在物體表面的技術，利用實驗得出最好效果的吸附劑去與電鍍做比較，觀察是否在吸附效果上更具優勢。
	步驟	(1) 準備濃度 1000 ppm 及 10000 ppm、30 mL 硫酸銅水溶液置於同燒杯中 (2) 準備長寬為 2*3 cm 的銅片及鈦片各三片 (3) 以電子秤測量銅片電鍍前質量 (4) 將銅片及鈦片放至硫酸銅水溶液中，並以正極連接銅片；以負極連接鈦片 (5) 設置穩定電流 1.6 A，電鍍 1 小時 (6) 電鍍後，取出銅片 (7) 逐一操作(1)~(6)三次 (8) 將測量後所得的電鍍後質量減電鍍前質量平均，並換算成去除率
實驗十一	目的	設計一款可以吸附硫酸銅水溶液的裝置，並自動化定時收集濾液，且因應上述實驗中不同影響因子，選擇適合的吸附劑，達到去自動化去除銅離子之最佳效率。
	步驟	(1) 將 Arduino uno 板、杜邦線、伺服馬達、USB 線組裝起來，並與電腦連接，並撰寫程式，使馬達轉動。(初版) <pre> #include &lt;Servo.h&gt; Servo MyServo; void setup() {   MyServo.attach(3); // Attach the servo to pin 3 } void loop() {   int secs = 3600;   MyServo.write(0); // Move to 0 degrees   delay(1000*secs); // Wait for 1 hr   MyServo.write(90); // Move to 90 degrees   delay(120000); // Wait for 120 second }           </pre> (2) 將馬達、玻璃淨化桶與木架子結合製成裝置 (3) 選定蚵殼粉、蛋殼粉、碳酸鈣其一加入桶子



圖 4-11 自動化裝置成品  
(由作者自行組裝、拍攝)



## 伍、研究結果

※測量數值說明：測量數值皆為三次有效測量結果並取平均。

**實驗一**、選用顏色明顯的硫酸銅、硫酸鎳、硫酸鈷配製成不同濃度（100 ppm~10000 ppm）的水溶液，分別測量吸收度、導電度及 TDS 做成檢量線，觀察其趨勢相關性。

**硫酸銅：**

濃度 (ppm)	100	200	300	400	500	600	800	1000
測量方法								
吸收度 $\lambda=810\text{nm}$	0.010	0.010	0.021	0.033	0.055	0.059	0.099	0.138
導電度 ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	393.3	569.7	783.0	931.7	1107.3	1252.3	1569.3	1906.3
TDS (ppm)	263.0	385.3	528.7	616.0	670.0	813.7	1009.3	1237.3
濃度 (ppm)		2000	3000	4000	5000	6000	8000	10000
測量方法								
吸收度 $\lambda=810\text{nm}$		0.314	0.502	0.677	1.061	1.239	1.411	1.808
導電度 ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )		2716.7	3956.7	5336.7	6750.0	7760.0	9200.0	10770.0
TDS (ppm)		2116.7	2656.7	3393.3	4140.0	4803.3	6036.7	7776.7

**硫酸鎳：**

濃度 (ppm)	100	200	300	400	500	600	800	1000
測量方法								
吸收度 $\lambda=704\text{nm}$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.007
導電度 ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	438.0	681.3	879.3	1086.3	1296.3	1429.3	1749.3	2083.3
TDS (ppm)	319.0	467.3	584.7	726.7	876.3	970.7	1165.0	1406.7
濃度 (ppm)		2000	3000	4000	5000	6000	8000	10000
測量方法								
吸收度 $\lambda=704\text{nm}$		0.027	0.058	0.093	0.126	0.156	0.227	0.294
導電度 ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )		3476.7	4866.7	6120.0	7346.7	8430.0	10326.7	12350.0
TDS (ppm)		2370.0	3293.3	4166.7	4890.0	5633.3	6936.7	8130.0

**硫酸鈷：**

濃度 (ppm)	100	200	300	400	500	600	800	1000
測量方法								
吸收度 $\lambda=490\text{nm}$	0.000	0.003	0.013	0.015	0.020	0.029	0.039	0.049
導電度 ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	413.0	610.3	834.7	1034.0	1235.7	1429.3	1751.3	2073.3
TDS (ppm)	285.0	410.3	567.3	694.7	824.7	954.7	1158.7	1390.0
濃度 (ppm)		2000	3000	4000	5000	6000	8000	10000
測量方法								
吸收度 $\lambda=490\text{nm}$		0.095	0.143	0.182	0.217	0.268	0.353	0.409
導電度 ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )		3636.7	4860.0	6070.0	7310.0	8366.7	10576.7	12436.7
TDS (ppm)		2426.7	3093.3	4043.3	4906.7	5636.7	6970.0	8363.3

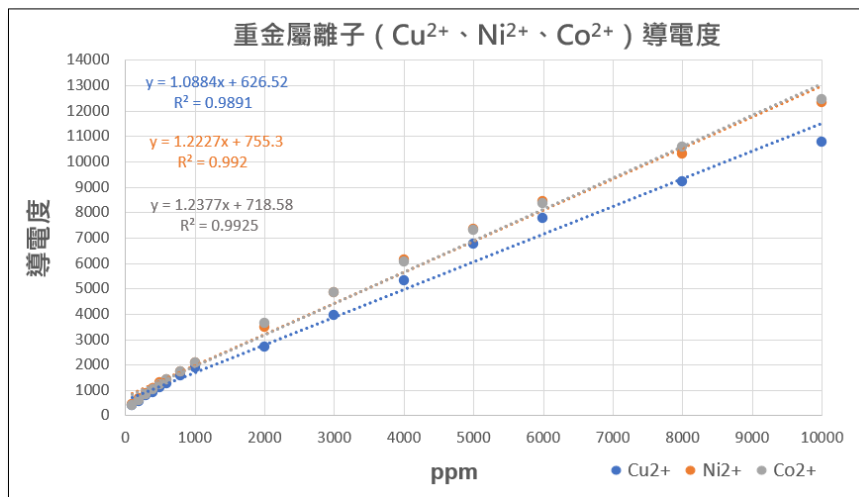


圖 5-1 重金屬離子 ( $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Ni}^{2+}$ 、 $\text{Co}^{2+}$ ) 導電度 (由作者自行繪製)

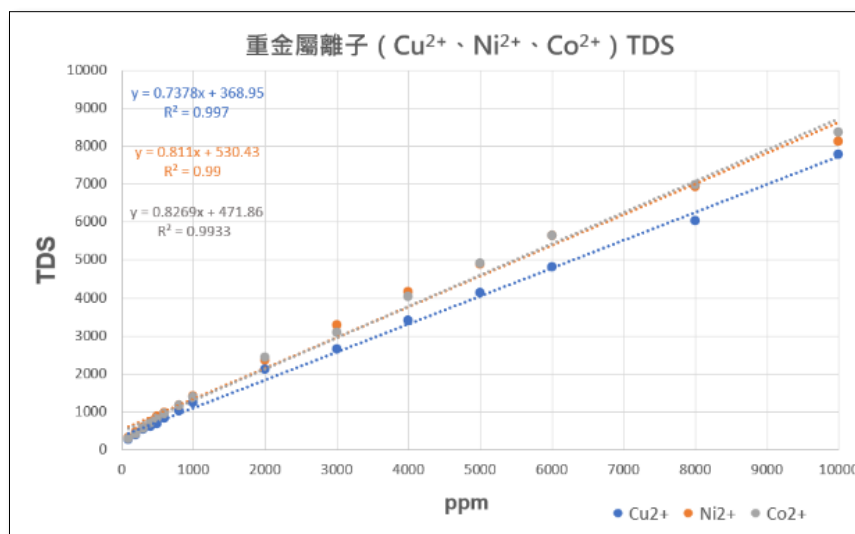


圖 5-2 重金屬離子 ( $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Ni}^{2+}$ 、 $\text{Co}^{2+}$ ) TDS (由作者自行繪製)

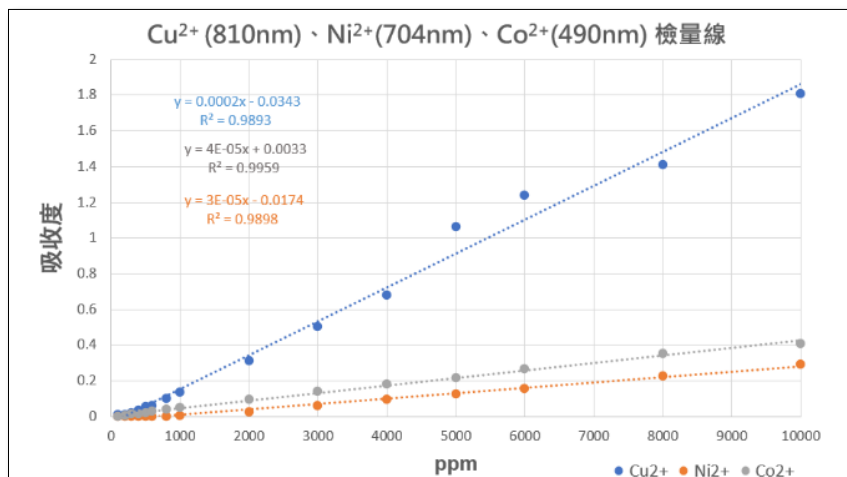


圖 5-3 重金屬離子 ( $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Ni}^{2+}$ 、 $\text{Co}^{2+}$ ) 檢量線 (由作者自行繪製)

#### 實驗結果說明：

由作圖結果發現，硫酸銅、硫酸鎳、硫酸鈷水溶液隨濃度上升，吸收度、導電度與 TDS 的測量數值亦增加，呈現線性關係，且高度正相關。也因三種離子皆具顏色，後面實驗由分光光度計吸收度來檢驗吸附情形。

**實驗二**、探討不同種類的吸附劑（有機物：紅茶葉、綠茶葉、咖啡粉、絲瓜絡屑、薑粉；無機物：蝦殼碎片、蚵殼粉、蛋殼粉、碳酸鈣、活性碳）吸附 1000 ppm 硫酸銅水溶液的吸附效果。

有機物				無機物			
吸附劑	吸收度	濃度 ppm	吸附率 %	吸附劑	吸收度	濃度 ppm	吸附率 %
紅茶葉	0.163	987	1	蚵殼粉	0.000	172	83
綠茶葉	0.166	1002	0	蛋殼粉	0.000	172	83
咖啡粉	0.082	582	42	碳酸鈣	0.000	172	83
絲瓜絡屑	0.046	400	60	活性碳	0.075	547	45
薑粉	0.144	892	11				
蝦殼碎片	0.139	867	13				

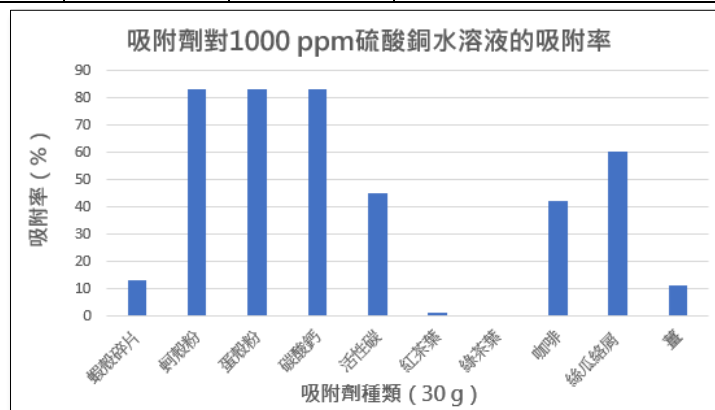


圖 5-4 吸附劑對 1000 ppm 硫酸銅水溶液的吸附率（由作者自行繪製）

**實驗結果說明：**

由實驗結果發現紅茶葉、綠茶葉、薑粉、蝦殼碎片的吸附率皆在 15%之下，而咖啡粉、絲瓜絡屑、蚵殼粉、蛋殼粉、碳酸鈣、活性碳其吸附率皆在 40%之上，其中又以蚵殼粉、蛋殼粉、碳酸鈣的吸附率最高且皆達到 83%。

**實驗三**、探討實驗二中吸附效果較佳的碳酸鈣、蛋殼粉及蚵殼粉在不同重量（1、2、3、4、5 及 6 克）下，對 1000 ppm 及 10000 ppm 硫酸銅水溶液的吸附效果

<div> <div>重量 (g)</div> <div>濃度 (ppm)</div> <div>吸附劑種類</div> </div>			1	2	3	4	5	6
蚵殼粉	1000 ppm	吸收度	0.119	0.091	0.085	0.056	0.006	0.010
		濃度	767	628	595	452	203	220
		吸附率 (%)	23	37	41	55	80	78
	10000 ppm	吸收度	1.732	1.691	1.624	1.560	1.325	1.320
		濃度	8832	8628	8292	7970	6797	6770
		吸附率 (%)	12	14	17	20	32	32
蛋殼粉	1000 ppm	吸收度	0.140	0.145	0.126	0.124	0.122	0.119
		濃度	870	895	802	793	783	765
		吸附率 (%)	13	11	20	21	22	24
	10000 ppm	吸收度	1.714	1.653	1.626	1.613	1.562	1.568
		濃度	8740	8437	8300	8238	7982	8012
		吸附率 (%)	13	16	17	18	20	20
碳酸鈣	1000 ppm	吸收度	0.130	0.104	0.069	0.037	0.002	0.003
		濃度	823	692	515	355	183	185
		吸附率 (%)	18	31	49	65	82	82
	10000 ppm	吸收度	1.736	1.686	1.580	1.439	1.256	1.258
		濃度	8853	8602	8072	7368	6453	6460
		吸附率 (%)	11	14	19	26	35	35

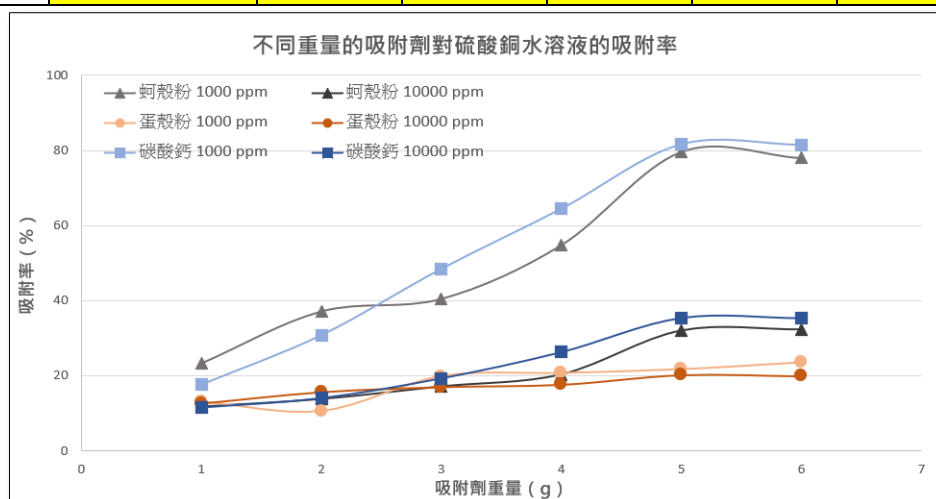


圖 5-5 不同重量的吸附劑對硫酸銅水溶液的吸附率（由作者自行繪製）

#### 實驗數據說明：

由實驗結果可知，三種吸附劑不論在 1000 ppm 或 10000 ppm 的硫酸銅水溶液中其吸附率皆隨著吸附劑的重量增加而增加，但當重量達 5、6 克時，吸附率的變動幅度不大（1%~2%內），因此往後我們的實驗皆使用 5 公克的吸附劑進行實驗。

**實驗四**、探討實驗二中吸附效果較佳的碳酸鈣、蛋殼粉及蚵殼粉在不同吸附時間（每一小時測一次，共八次），吸附 1000 ppm、10000 ppm 硫酸銅水溶液的變化趨勢。

時間 (hr) 濃度 (ppm) 吸附劑種類			0	1	2	3	4	5	6	7	8
蚵殼粉	1000 ppm	吸收度	0.439	0.000	0.008	0.000	0.009	0.000	0.000	0.005	0.000
		濃度	862	172	212	172	217	172	172	197	172
		吸附率 (%)	14	83	79	83	78	83	83	80	83
	10000 ppm	吸收度	3.000	0.837	0.733	0.847	0.501	0.220	0.221	0.237	0.000
		濃度	9212	4357	3837	4407	2677	1272	1227	1357	172
		吸附率 (%)	8	56	62	56	73	87	88	86	98
蛋殼粉	1000 ppm	吸收度	0.661	0.038	0.000	0.076	0.000	0.000	0.002	0.000	0.001
		濃度	862	362	172	172	172	172	182	172	177
		吸附率 (%)	14	64	83	83	83	83	82	83	82
	10000 ppm	吸收度	3.000	1.549	1.204	1.185	0.867	0.865	0.869	0.810	0.817
		濃度	9212	7917	6192	6097	4507	4497	4517	4227	4257
		吸附率 (%)	8	21	38	39	55	55	55	58	57
碳酸鈣	1000 ppm	吸收度	0.319	0.004	0.121	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
		濃度	862	192	182	172	172	172	172	172	172
		吸附率 (%)	14	81	82	83	83	83	83	83	83
	10000 ppm	吸收度	3.000	1.049	0.131	0.097	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
		濃度	9212	5417	827	657	172	172	172	172	172
		吸附率 (%)	8	46	92	93	98	98	98	98	98

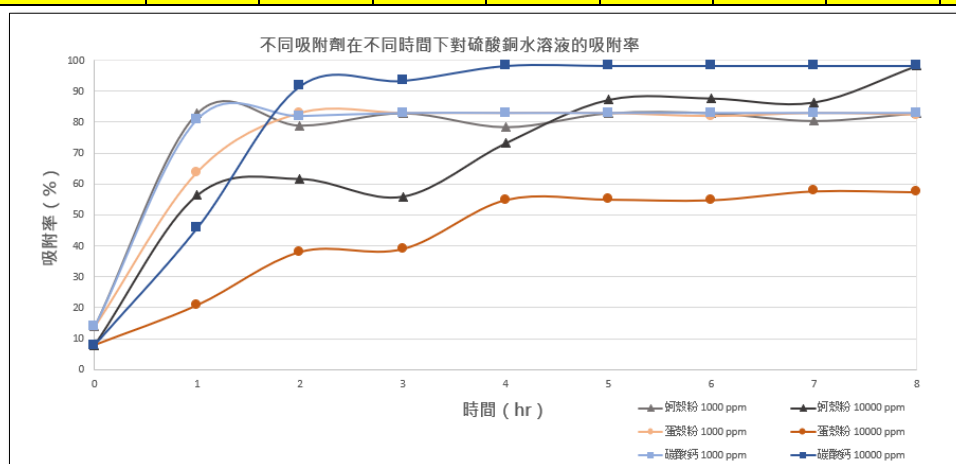


圖 5-6 不同吸附劑在不同時間下對硫酸銅水溶液的吸附率（由作者自行繪製）

#### 實驗數據說明：

由實驗結果發現在濃度 1000 ppm 時，三種吸附劑在第一個小時吸附率皆至少上升 50%，有最大的上升趨勢，而在濃度 10000 ppm 時，三種吸附劑的在第一個小時吸附率上升趨勢也較大，因此往後實驗我們皆以 1 小時為吸附時間。

**實驗五**、實驗二中吸附效果較佳的碳酸鈣、蛋殼粉及蚵殼粉吸附不同濃度的銅離子結果與 **Langmuir** 等溫吸附模型探討最大吸附量。

濃度 ppm 吸附劑種類		1000	2000	3000	4000	5000	6000	8000	10000
蚵殼粉	吸收度	0.000	0.170	0.382	0.507	0.710	0.821	1.007	1.204
	濃度 ppm	172	1022	2082	2707	3722	4277	5207	6192
蛋殼粉	吸收度	0.000	0.294	0.558	0.729	0.914	1.078	1.327	1.526
	濃度 ppm	172	1642	2662	3717	4742	5632	7407	9112
碳酸鈣	吸收度	0.000	0.262	0.455	0.564	0.709	0.830	1.016	1.286
	濃度 ppm	172	1482	2447	2992	3717	4322	5252	6602

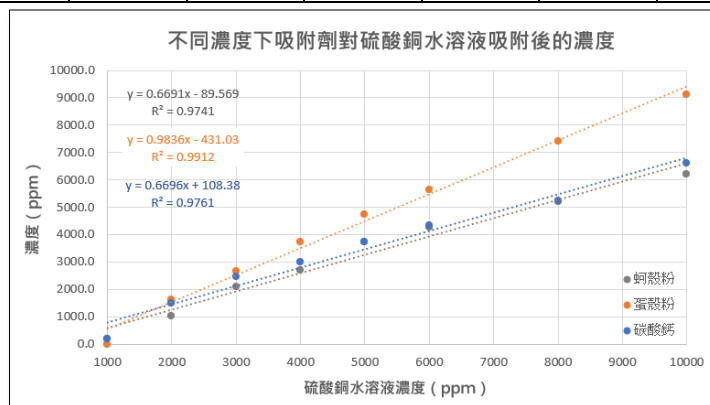


圖 5-7 不同濃度下吸附劑對硫酸銅水溶液吸附後的濃度（由作者自行繪製）

Langmuir 參數		$q_m$ (mg/g)	$K_L$ (1/mg)
蚵殼粉		13.8504	0.00455
蛋殼粉		4.2052	0.07574
碳酸鈣		14.1643	0.00162

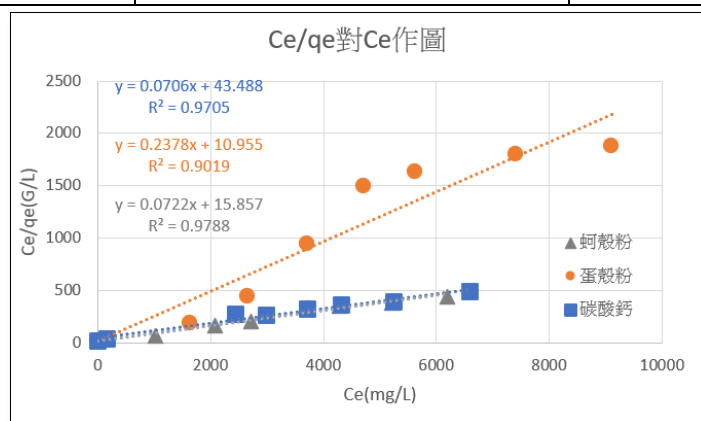


圖 5-8  $C_e/q_e$  對  $C_e$  的圖（由作者自行繪製）

#### 實驗數據說明：

由實驗結果推得  $C_e$  與  $q_e$ ，並作  $C_e/q_e$  對  $C_e$  的圖，以計算出  $q_m$ ，發現**碳酸鈣**在每公克下吸附硫酸銅水溶液之銅離子的重量最大，約達到 14.2mg/g，略大於**蚵殼粉**，而**蛋殼粉**在單位質量下所能吸附的硫酸銅水溶液之銅離子的重量最小。

**實驗六**、探討實驗二中吸附效果較佳的碳酸鈣、蛋殼粉及蚵殼粉在不同溫度（0℃、25℃、50℃、75℃、100℃）下，吸附 1000 ppm、10000 ppm 硫酸銅水溶液的吸附效果。

溫度 (°C) 吸附劑種類、濃度 (ppm)			0	25	50	75	100
蚵殼粉	1000 ppm	吸收度	0.117	0.132	0.050	0.040	0.070
		濃度	757	832	422	372	522
		吸附率 (%)	24	17	58	63	48
	10000 ppm	吸收度	1.653	1.204	0.474	0.020	0.083
		濃度	8437	6192	2542	272	587
		吸附率 (%)	16	38	75	97	94
蛋殼粉	1000 ppm	吸收度	0.161	0.142	0.122	0.121	0.073
		濃度	977	882	782	777	537
		吸附率 (%)	2	12	22	22	46
	10000 ppm	吸收度	1.541	1.526	0.420	0.250	0.120
		濃度	7877	7802	2272	1422	772
		吸附率 (%)	21	22	77	86	92
碳酸鈣	1000 ppm	吸收度	0.139	0.116	0.083	0.059	0.081
		濃度	867	752	587	467	577
		吸附率 (%)	13	25	41	53	42
	10000 ppm	吸收度	1.801	1.286	0.158	0.003	0.081
		濃度	9177	6602	962	187	577
		吸附率 (%)	8	34	90	98	94

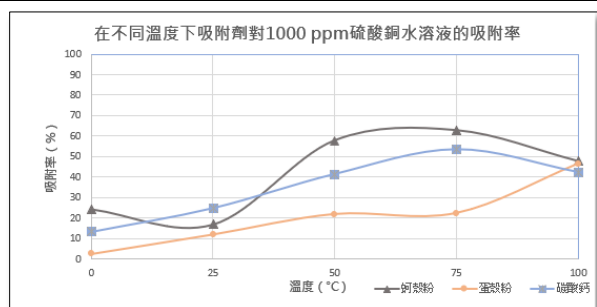


圖 5-9 在不同溫度下吸附劑對 1000 ppm 硫酸銅水溶液的吸附率（由作者自行繪製）

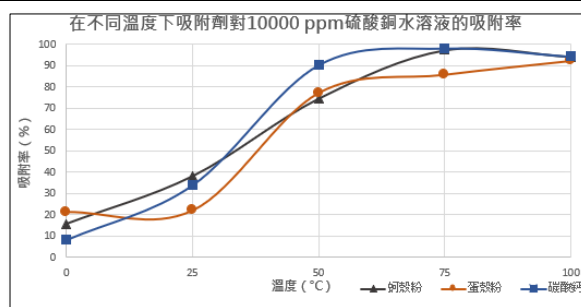


圖 5-10 在不同溫度下吸附劑對 10000 ppm 硫酸銅水溶液的吸附率（由作者自行繪製）

#### 實驗數據說明：

由實驗結果可知，在 1000 ppm 及 10000 ppm 的硫酸銅水溶液中，碳酸鈣、蛋殼粉及蚵殼粉吸附率趨勢皆隨溫度上升而變大。而在 10000 ppm 濃度下，三種吸附劑的吸附率隨溫度變化較 1000 ppm 明顯，且吸附率皆可達 90% 以上。其中，蚵殼粉及碳酸鈣在 75℃ 時，吸附率最大；蛋殼粉在 100℃ 時，吸附率最大。



**實驗七**、探討實驗二中吸附效果較佳的碳酸鈣、蛋殼粉、及蚵殼粉在不同 pH 值（3、5、7、9、11）下，吸附 1000 ppm、10000 ppm 硫酸銅水溶液的吸附效果。

pH 值			3	5	7	9	11
吸附劑種類、濃度 (ppm)							
蚵殼粉	1000 ppm	吸收度	0.037	0.012	0.000	0.000	0.000
		濃度	357	232	172	172	172
		吸附率 (%)	64	77	83	83	83
	10000 ppm	吸收度	1.487	1.404	0.854	0.956	0.922
		濃度	7607	7192	4442	4952	4782
		吸附率 (%)	24	28	56	50	52
蛋殼粉	1000 ppm	吸收度	0.103	0.098	0.013	0.016	0.006
		濃度	687	662	237	252	202
		吸附率 (%)	31	34	76	75	80
	10000 ppm	吸收度	1.887	1.686	1.250	1.197	1.198
		濃度	9607	8602	6422	6157	6162
		吸附率 (%)	4	14	36	38	38
碳酸鈣	1000 ppm	吸收度	0.108	0.093	0.053	0.039	0.008
		濃度	712	637	437	367	212
		吸附率 (%)	29	36	56	63	79
	10000 ppm	吸收度	1.823	1.748	1.353	1.222	1.270
		濃度	9287	8912	6937	6282	6522
		吸附率 (%)	7	11	31	37	35

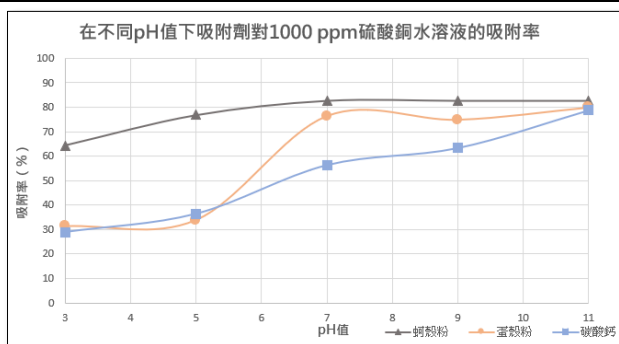


圖 5-11 在不同 pH 值下吸附劑對 1000 ppm 硫酸銅水溶液的吸附率（由作者自行繪製）

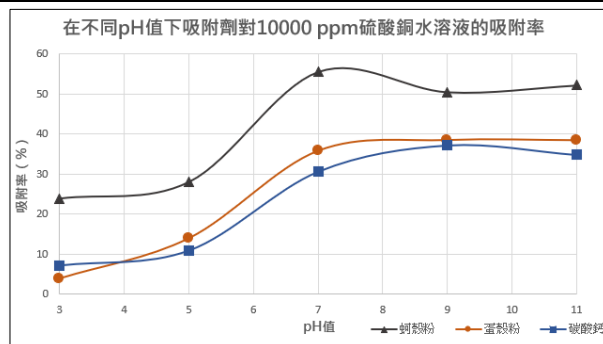


圖 5-12 在不同 pH 值下吸附劑對 10000 ppm 硫酸銅水溶液的吸附率（由作者自行繪製）

#### 實驗數據說明：

由實驗結果發現蚵殼粉、蛋殼粉及碳酸鈣在 1000 ppm 及 10000 ppm 的硫酸銅水溶液中，吸附率呈現隨 pH 值上升而增大的趨勢，而在 1000 ppm 濃度下，三種吸附劑的吸附率隨 pH 值變化較 10000 ppm 濃度明顯。其中蚵殼粉在 1000 ppm 或 10000 ppm 且在 pH11 時的吸附率為 83%與 52%皆是最大，由此可知在鹼性環境下，蚵殼粉吸附率最大。

**實驗八**、探討實驗二中吸附效果較佳的碳酸鈣、蛋殼粉及蚵殼粉，吸附進行「 $\text{Cu}^{2+}$ 與 $\text{Ni}^{2+}$ 」、「 $\text{Cu}^{2+}$ 與 $\text{Co}^{2+}$ 」和「 $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Ni}^{2+}$ 與 $\text{Co}^{2+}$ 」競爭吸附，是否影響吸附劑對銅離子的吸附效果。

濃度 (ppm)、 離子種類 (含競爭)			吸附劑種類	蚵殼粉	蛋殼粉	碳酸鈣
$\text{Cu}^{2+}$	333	吸收度		0.000	0.000	0.000
		濃度		172	172	172
		$\text{Cu}^{2+}$ 吸附率 (%)		48	48	48
	3333	吸收度		0.394	0.540	0.434
		濃度 ppm		2141	2871	2340
		$\text{Cu}^{2+}$ 吸附率 (%)		36	14	30
	500	吸收度		0	0	0
		濃度		172	172	172
		$\text{Cu}^{2+}$ 吸附率 (%)		66	66	66
	5000	吸收度		0.710	0.914	0.709
		濃度 ppm		3722	4742	3717
		$\text{Cu}^{2+}$ 吸附率 (%)		26	5	26
$\text{Cu}^{2+}$ $\text{Ni}^{2+}$	500	吸收度		0.052	0.036	0.008
		濃度		432	352	212
		$\text{Cu}^{2+}$ 吸附率 (%)		14	30	58
	5000	吸收度		0.935	0.964	0.938
		濃度		4847	4992	4862
		$\text{Cu}^{2+}$ 吸附率 (%)		3	0	3
$\text{Cu}^{2+}$ $\text{Co}^{2+}$	500	吸收度		0.028	0.014	0.000
		濃度		312	242	172
		$\text{Cu}^{2+}$ 吸附率 (%)		38	52	66
	5000	吸收度		0.868	0.954	0.903
		濃度		4512	4942	4687
		$\text{Cu}^{2+}$ 吸附率 (%)		10	1	6
$\text{Cu}^{2+}$ $\text{Ni}^{2+}$ $\text{Co}^{2+}$	333	吸收度		0.031	0.018	0.000
		濃度		327	262	172
		$\text{Cu}^{2+}$ 吸附率 (%)		2	21	48
	3333	吸收度		0.596	0.607	0.558
		濃度		3152	3207	2962
		$\text{Cu}^{2+}$ 吸附率 (%)		5	4	11

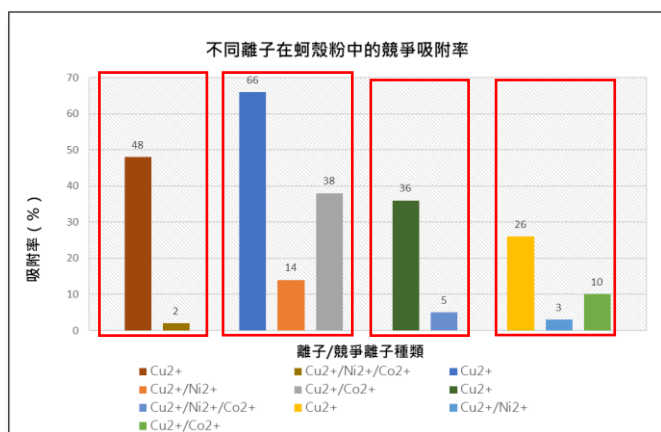


圖 5-13 不同離子在蚵殼粉中的競爭吸附率  
(由作者自行繪製)

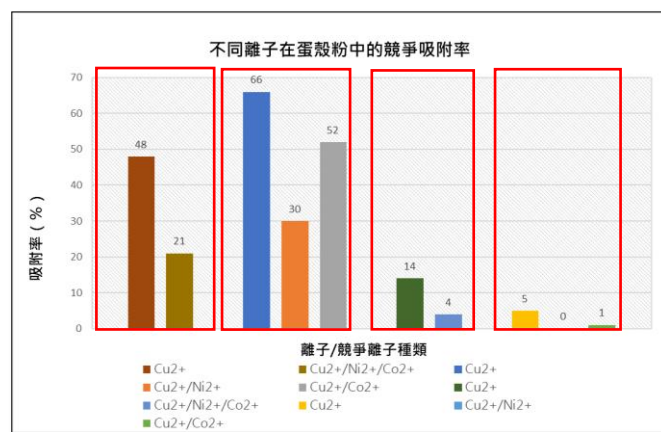


圖 5-14 不同離子在蛋殼粉中的競爭吸附率  
(由作者自行繪製)

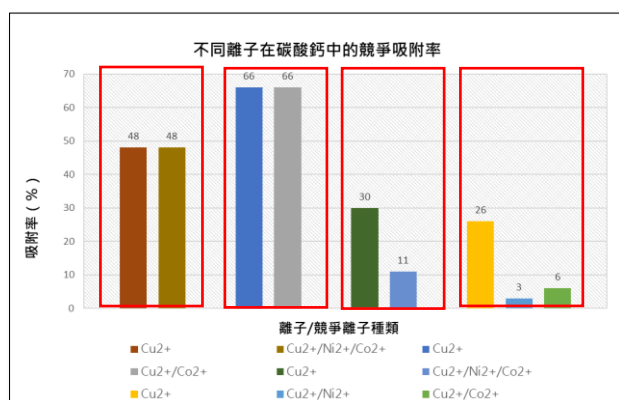


圖 5-15 不同離子在碳酸鈣中的競爭吸附率 (由作者自行繪製)

#### 實驗數據說明：

由實驗結果發現蚵殼粉與蛋殼粉在進行「Cu<sup>2+</sup>與 Ni<sup>2+</sup>」、「Cu<sup>2+</sup>與 Co<sup>2+</sup>」和「Cu<sup>2+</sup>、Ni<sup>2+</sup>與 Co<sup>2+</sup>」競爭吸附時的吸附率較吸附單一 Cu<sup>2+</sup>低。而碳酸鈣在小濃度 (333 ppm、500 ppm) 的競爭吸附時，與單一吸附 Cu<sup>2+</sup>的吸附率相差不大。

**實驗九**、比較實驗二中吸附效果較佳的碳酸鈣、蛋殼粉及蚵殼粉與現行工業重金屬去除法 (離子交換樹脂) 的吸附效果。

吸附劑種類/濃度 ppm	吸收度	吸附後濃度	吸附率 (%)
離子交換樹脂	1000	0.065	867
	10000	0.504	2692
蚵殼粉	1000	0.000	172
	10000	1.204	6192
蛋殼粉	1000	0.000	172
	10000	1.526	7802
碳酸鈣	1000	0.000	172
	10000	1.286	6602

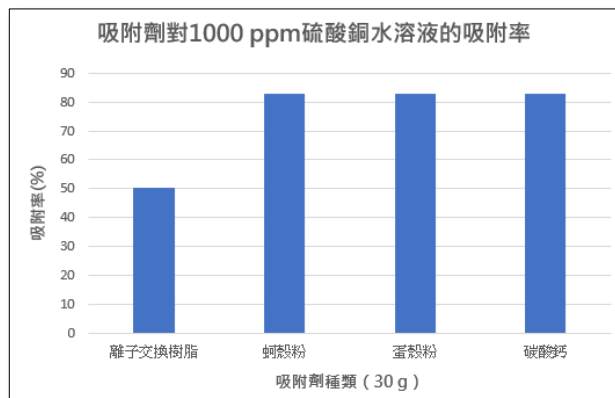


圖 5-16 吸附劑對 1000 ppm 硫酸銅水溶液的吸附率（由作者自行繪製）

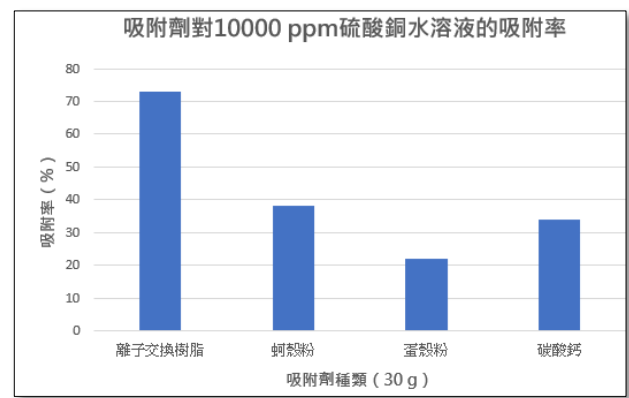


圖 5-17 吸附劑對 10000 ppm 硫酸銅水溶液的吸附率（由作者自行繪製）

#### 實驗數據說明：

由實驗結果可知，在 1000 ppm 的硫酸銅水溶液時蚵殼粉、蛋殼粉和碳酸鈣的吸附率比離子交換樹脂大；而在 10000 ppm 的硫酸銅水溶液時，離子交換樹脂的吸附率較三種吸附劑大。

**實驗十**、比較實驗二中的吸附效果較佳的碳酸鈣、蛋殼粉及蚵殼粉與現行重金屬常用的電鍍比較去除重金屬的效果。

吸附劑種類/濃度 ppm		吸收度	吸附後濃度	吸附率 (%)
蚵殼粉	1000	0.000	172	83
	10000	1.204	6192	38
蛋殼粉	1000	0.000	172	83
	10000	1.526	7802	22
碳酸鈣	1000	0.000	172	83
	10000	1.286	6602	34
重金屬去除法/濃度 ppm		電鍍前重量(g)	電鍍後重量(g)	去除率 (%)
電鍍法	1000	6.73	6.77	1
	10000	6.85	6.93	2

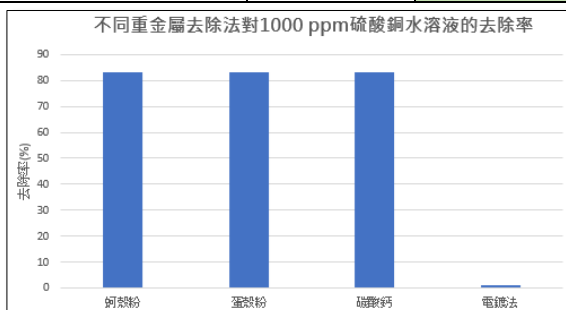


圖 5-18 不同重金屬去除法對 1000 ppm 硫酸銅水溶液的吸附率（由作者自行繪製）

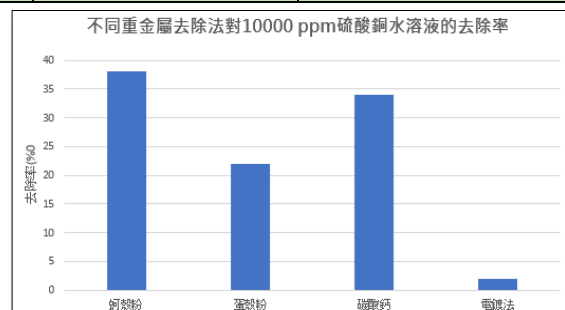


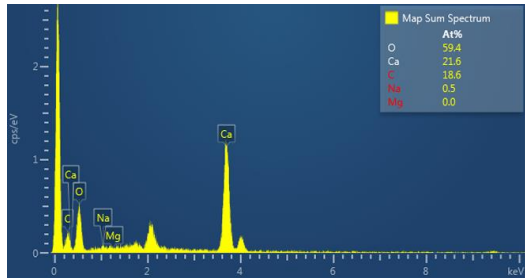
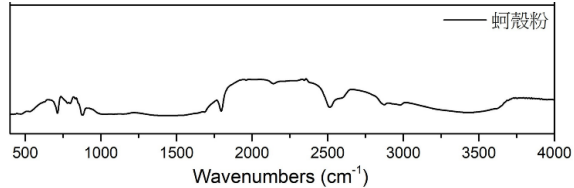
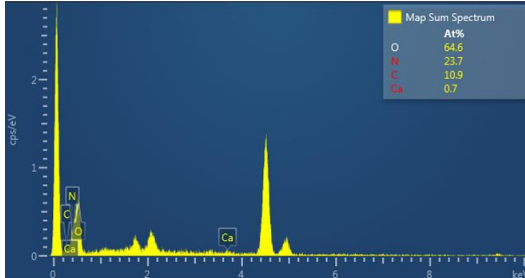
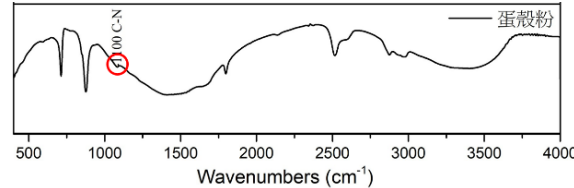
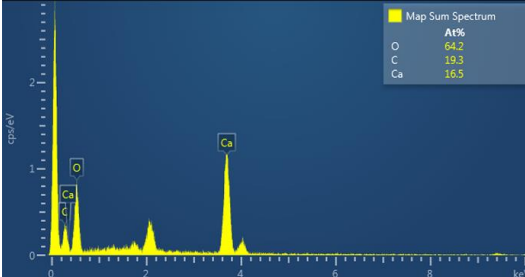
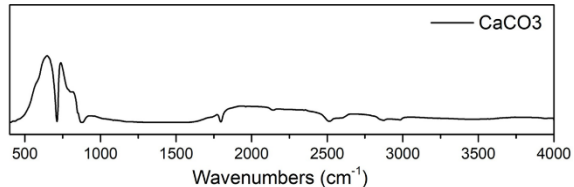
圖 5-19 不同重金屬去除法對 10000 ppm 硫酸銅水溶液的吸附率（由作者自行繪製）

#### 實驗數據說明：

由實驗結果可知，電鍍法在 1000、10000 ppm 去除率分別只達 1%及 2%，顯示去除硫酸銅水溶液中的銅離子效果明顯較蚵殼粉、蛋殼粉及碳酸鈣差。

## 陸、討論

- 一、在實驗一中，我們運用三種測量方式（吸收度、導電度、TDS）去檢驗硫酸銅、硫酸鎳、硫酸鈷水溶液在 100 ppm~10000 ppm 的濃度區間，是否呈現線性關係，由檢測結果可看出吸收度、導電度、TDS 均隨濃度越高而量測數值越大，經作圖後，顯示其具有高度線性關係，三種溶液皆有顏色，因此我們皆以分光光度計測量吸收度作為往後的測量工具。
- 二、由實驗二的結果推測咖啡粉（咖啡粉、纖維素）（如圖 4-1）、紅茶葉（兒茶素）、綠茶葉（兒茶素）（如圖 4-2）、絲瓜絡屑（纖維素）、薑粉（纖維素）（如圖 4-3）、蝦殼碎片（幾丁質）（如圖 4-4）這類有機物的表面上含有許多官能基，上述六者有機物其表面的官能基導致吸附位點的空位減少，因此吸附效果較無機物差。而上述六者有機物其表面的官能基，例如羥基（ $-OH$ ）會與硫酸銅水溶液中的銅離子產生共價配位鍵，因而吸附住銅離子，其中紅茶葉、綠茶葉、薑粉、蝦殼碎片因其上含有較多無法與銅離子產生配位鍵的官能基，例如甲基（ $CH_3-$ ）、胺基（ $NH_2-$ ），因此吸附率較低。纖維素上含有許多羥基（ $-OH$ ），而咖啡粉與絲瓜絡屑因纖維素含量較多，吸附效果較紅茶葉、綠茶葉、薑粉、蝦殼碎片好，其中絲瓜絡屑所含有的纖維素比例約占 55%~90%比咖啡渣所含纖維素 50%多，因此絲瓜絡屑吸附效果是有機物中吸附效果最好的。無機物中的蚵殼粉、蛋殼粉、碳酸鈣，吸附率高達 83%，因其表面上不存在官能基且含有許多細小孔洞（如圖 4-7）（如圖 4-8）（如圖 4-9），故其吸附效果較表面上含有少量羰基（ $C=O$ ）、羧基（ $COOH$ ）、羥基（ $-OH$ ）的活性碳（如圖 4-6）好。
- 三、由實驗三的結果，我們推論其可能原因是當 1 小時內蚵殼粉、蛋殼粉、碳酸鈣隨重量增加時，其表面上所含有的吸附位點增多，因此吸附率隨之上升，但當重量達 5、6 克時，蚵殼粉、蛋殼粉、碳酸鈣吸附效果達到極限，以致銅離子的濃度變化將不再有太大變動。
- 四、由實驗四的實驗結果，我們推論其可能原因是第一個小時蚵殼粉、蛋殼粉、碳酸鈣有最多無吸附任何物質的吸附位點，因此可吸附較多的硫酸銅水溶液中的銅離子，故吸附率較高，但 10000 ppm 在第一小時的吸附率上升趨勢並不是最大，但為了實驗的方便性，我們皆以 1 小時為吸附時間。
- 五、由實驗五的實驗結果，我們發現作圖的結果與文獻的 Langmuir 圖型（圖 4-10）趨勢相符。可得知碳酸鈣的每公克所能吸附的銅離子毫克數最多，與下方 EDS 的元素分析圖（圖 6-1~6-3）比對，推測碳酸鈣最好的原因是碳酸鈣相對蛋殼粉所含元素較單純，FTIR 圖顯示無其他官能基（圖 6-5、6-6），吸附位點未被佔據；而蚵殼粉 FTIR 圖（圖 6-4）中顯示也未含有官能基，但 EDS 的元素分析圖（圖 6-1）中顯示含有少量鈉元素，因此最大吸附量略低於碳酸鈣；蛋殼粉則因表面上已含有 C-N 鍵結（圖 6-5），則 C-N 鍵結不會再與銅離子產生配位共價鍵，加上 C-N 鍵結會佔據吸附位點，因此最大吸附量明顯較其他二者低。

	EDS 元素分析圖（元素比）	FTIR 官能基分析圖
蚵殼粉	 <p>圖 6-1 蚵殼粉元素分析圖</p>	 <p>圖 6-4 蚵殼粉 FTIR 官能基分析圖</p>
蛋殼粉	 <p>圖 6-2 蛋殼粉元素分析圖</p>	 <p>圖 6-5 蛋殼粉 FTIR 官能基分析圖</p>
碳酸鈣	 <p>圖 6-3 碳酸鈣元素分析圖</p>	 <p>圖 6-6 碳酸鈣 FTIR 官能基分析圖</p>

圖片來源：游博文測量拍攝

六、由實驗六的結果，我們由吸附率隨溫度上升而變大的趨勢推測蚵殼粉、蛋殼粉、碳酸鈣應是化學吸附，且三種吸附劑（蚵殼粉、蛋殼粉、碳酸鈣）在高溫時，於 1000 ppm 或 10000 ppm 的硫酸銅水溶液中，吸附效果皆提升，然而 10000 ppm 濃度較 1000 ppm 明顯，因此在大濃度的硫酸銅水汙染處理時，提高吸附時環境溫度，可更有效提升吸附效果。其中，以蚵殼粉及碳酸鈣在 75°C 時吸附效果最好；蛋殼粉在 100°C 時吸附效果最好。

七、由實驗結果我們推測可能原因為，隨著 pH 值上升，蚵殼粉、蛋殼粉、碳酸鈣表面的負電性隨之上升，因而更容易吸附住硫酸銅水溶液中的銅離子，而蚵殼粉因帶的負電性較其他二者大(如圖 6-7 Zeta potential 結果所示)，對於銅離子的吸附效果較強，因此不論在 1000、10000 ppm 的硫酸銅水溶液中吸附效果皆較其他二者好。又在 1000 ppm 的濃度下，吸附率隨 pH 值上升較 10000 ppm 明顯，因此在實際處理小濃度的硫酸銅水汙染時，提高吸附時 pH 值，可更有效提升吸附效果。其中，在鹼性、中性環境下，以蚵殼粉作為吸附劑吸附效果最好。



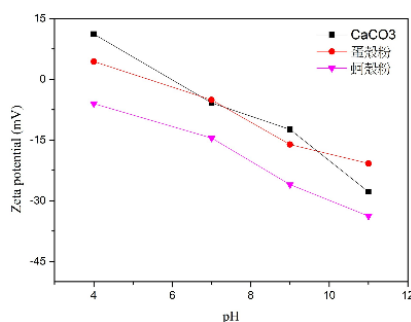


圖 6-7 Zeta potential (界達電位) (圖片來源：游博文測量拍攝)

- 八、整體去除效果以在單純  $\text{Cu}^{2+}$  環境下的吸附率最高，不論是同時有兩種或三種金屬離子 ( $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Ni}^{2+}$ 、 $\text{Co}^{2+}$ ) 並存的情況，三種吸附劑 (碳酸鈣、蚶殼粉、蛋殼粉) 對在單純  $\text{Cu}^{2+}$  環境下的吸附率明顯高於有  $\text{Ni}^{2+}$  與  $\text{Co}^{2+}$  同時存在的環境，顯示競爭吸附下，將降低吸附劑吸附能力。然而在相同的操作條件下，以碳酸鈣相對蚶殼粉、蛋殼粉對  $\text{Cu}^{2+}$  具有較強的吸附親和力，受到  $\text{Ni}^{2+}$ 、 $\text{Co}^{2+}$  的影響較小。
- 九、由實驗九的結果可知，離子交換樹脂較適合應用於大濃度；而蚶殼粉、蛋殼粉和碳酸鈣較適合應用於小濃度，因此在實際用方面，我們可以將受銅離子污染較嚴重的污水，先經離子交換樹脂吸附後，在以蚶殼粉、蛋殼粉和碳酸鈣其一吸附劑吸附，以達到最佳吸附效果。
- 十、從實驗十結果可知，使用電鍍法對硫酸銅溶液中銅離子的去除率在 1000 ppm 和 10000 ppm 的濃度下分別僅為 1% 和 2%，顯著低於蚶殼粉、蛋殼粉及碳酸鈣的吸附效果。我們推測由於電鍍目的多為金屬表面處理而非大量去除金屬離子。若電鍍物面積小、反應時間有限，或在處理低濃度金屬離子水溶液 (1000 和 10000 ppm) 時，離子濃度不足，導致還原反應速率緩慢，也影響沉澱效率，其去除效果有限。

## 柒、結論

- 一、硫酸銅、硫酸鎳、硫酸鈷水溶液皆會隨濃度上升，而使吸收度、導電度與 TDS 的測量數值亦增加，且呈高度線性關係，顯示其有相似的趨勢。
- 二、無機物中的蚶殼粉、蛋殼粉、碳酸鈣吸附效果最好，吸附率皆達到 83%，比有機物咖啡粉、紅茶葉、綠茶葉、絲瓜絡屑、薑粉、蝦殼碎片與無機物中的碳酸鈣吸附效果佳。
- 三、重量、時間變因
  1. 重量：隨著吸附劑重量增加，吸附率亦隨之上升，但當重量達到 5、6 克時，吸附率趨於平緩，達到吸附極限。
  2. 時間：在吸附的第一個小時，吸附率上升幅度最大，然而延長吸附時間的效果提升有限，可透過控制吸附時間以提高操作效率。
- 四、透過 Langmuir 等溫吸附方程式，計算出碳酸鈣在每公克下所能吸附硫酸銅水溶液中的銅離子的重量最多，達到 14.16 毫克。



## 五、溫度、pH 值變因

1. 以溫度而言，在溫度 75°C 時，不論小濃度（1000 ppm）、大濃度（10000 ppm）蚵殼粉、碳酸鈣 吸附效果皆最好；三種吸附劑的吸附效果在大濃度（10000 ppm）較小濃度（1000 ppm）明顯。
2. 以 pH 值而言，在 pH 值 11 時，蚵殼粉 的吸附效果最好，吸附率達 83%；三種吸附劑的吸附效果在小濃度（1000 ppm）較大濃度（10000 ppm）明顯。

六、在有  $\text{Ni}^{2+}$ 、 $\text{Co}^{2+}$  競爭吸附的環境下，三種吸附劑對硫酸銅水溶液中的銅離子的吸附能力皆會降低，其中碳酸鈣 受到的影響較小，顯示在有  $\text{Ni}^{2+}$ 、 $\text{Co}^{2+}$  競爭吸附的環境下，應選擇碳酸鈣作為吸附劑，尤其是在小濃度（1000 ppm）下。

## 七、與現行工業上常用去除銅離子方法比較

1. 離子交換樹脂 在吸附大濃度（10000 ppm）的硫酸銅水溶液的吸附能力較好，而蚵殼粉、蛋殼粉、碳酸鈣 在吸附小濃度（1000 ppm）的硫酸銅水溶液的吸附能力較好，可將硫酸銅污染的水溶液，先經離子交換樹脂處理，再使用吸附劑進一步處理，以達最佳去除效果。
2. 電鍍法 在去除大濃度（10000 ppm）或小濃度（1000 ppm）的硫酸銅水溶液時的去除效果皆較蚵殼粉、蛋殼粉、碳酸鈣 的吸附效果差距甚大。

八、未來展望：綜合上述，蚵殼粉、蛋殼粉 和 碳酸鈣 在不同影響因子下，吸附硫酸銅水溶液之銅離子有一定的效用，而用於自製吸附裝置中的吸附劑，做成類似於餅狀，可更準確固定吸附劑的表面積，且方便替換新的吸附劑。此外，實驗中發現無機吸附劑效果比有機物吸附劑好，具體原因能透過儀器分析表面結構（孔洞大小、官能基種類），可進一步改質材料，讓不同種類的吸附劑效果再提升。

## 捌、參考資料

### 網路資料

1. Yuan, G. D., Theng, B. K. G., Churchman, G. J., & Gates, W. P. (2013). Clays and Clay Minerals for Pollution Control. *Developments in Clay Science*, 5, 587–644.  
<https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/desorption>
2. 牛頓中文百科全書. (n.d.). 吸附  
<https://www.newton.com.tw/wiki/%E5%90%B8%E9%99%84>
3. 廣天國際有限公司：導電度計說明書（型號：CON-BTA）  
<https://kuangtien.yida-design.com.tw/d/file603f0e8e72c5d.pdf?n1=>
4. SwissAquaTechnologies (2024) TDS 是什麼？TDS 數值越低表示水質越適合飲用嗎？  
<https://swissaqua.tw/tdsiswhat/>
5. 中央研究院：可見分光光度計使用手冊（型號：7205 型）  
<https://pse.is/7a4lnk>
6. Alsharif, M. A. (2025). *Understanding adsorption: Theories, techniques, and applications*.  
<https://www.intechopen.com/online-first/1209166?form=MG0AV3>
7. 橫濱國立大學 (2024)。成功從咖啡渣多醣類中獲得寬度約 2 奈米的全纖維素奈米纖維。  
<https://www.ynu.ac.jp/hus/example20240628.html>

8. Otsuka 大塚科技股份有限公司：界達電位量測原理介紹  
[https://www.otsuka-tw.com/technical\\_articles-detail/](https://www.otsuka-tw.com/technical_articles-detail/)
9. Alhijazi, M., Safaei, B., Zeeshan, Q., Asmael, M., Eyvazian, A., & Qin, Z. (2020). *Recent developments in Luffa natural fiber composites: Review. Sustainability*, 12(18), 7683.  
<https://www.mdpi.com/>
10. Hinke, M. T., Nys, Y., Gautron, J., Mann, K., Rodriguez-Navarro, A. B., & McKee, M. D. (2012). The eggshell: Structure, composition and mineralization. *Frontiers in Bioscience*, 17, 1266–1280 [The eggshell: structure, composition and mineralization](#)
11. Wu, Q., Chen, J., Clark, M., & Yu, Y. (2014). Adsorption of copper to different biogenic oyster shell structures. *Applied Surface Science*, 311, 264–272.  
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.05.062>
12. umar, U., Vibhute, B., Sharma, N., & Sahay, A. (2022). Efficient removal of methylene blue dye by alkaline-treated banana stem biochar through adsorption method. *Applied Ecology and Environmental Sciences*, 10(4), 236-243.  
[Efficient Removal of Methylene Blue Dye by Alkaline-treated Banana Stem Biochar through Adsorption Method](#)
13. 維基百科 (n.d.) 咖啡因. 維基百科, 自由的百科全書. 於 2025 年 3 月 8 日檢索  
<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E5%92%96%E5%95%A1%E5%9B%A0>
14. 博弈營養師 (2024, March 23) 【兒茶素】茶葉中重要物質, 2 功效告訴你喝茶也助於減肥. 營養師杯蓋.  
[https://nutrueifood.com/?s=%E5%85%92%E8%8C%B6%E7%B4%A0&e\\_search\\_props=d1d645-2572](https://nutrueifood.com/?s=%E5%85%92%E8%8C%B6%E7%B4%A0&e_search_props=d1d645-2572)
15. 維基百科 (n.d.) 纖維素. 維基百科, 自由的百科全書. 於 2025 年 3 月 8 日檢索  
<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E7%BA%A4%E7%BB%B4%E7%B4%A0>
16. 小小整理網站 (2013, April) 多醣 (polysaccharides) 小整理網站 *Smallcollation*. 於 2025 年 3 月 8 日檢索  
<https://smallcollation.blogspot.com/2013/04/polysaccharides.html#gsc.tab=0>
17. 島津公司 (n.d.) 薑中所含薑醇及薑酚的快速高解析度分析. 島津公司官方網站. 於 2025 年 3 月 8 日檢索 <https://www.shimadzu.com.tw/industries/small-molecule-pharmaceutical/crude-drugs/1407high-speed-with-high-resolution-analysis-of-gingerol-and-shogaol-in-ginger/index.html>

#### 書籍資料

18. Knopf, D. A. (2021). Technical note: Adsorption and desorption equilibria from statistical thermodynamics and rates from transition state theory. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(20), 15725.
19. 周豐志、吳淑姿、余世宗 (2017)。低分壓下二氧化碳吸附劑之吸附動力學探討。 *科學與工程技術期刊*, 13 (2)。
20. 高中化學翰林版 108 課綱高中化學 (全)、選修化學 (IV)、選修化學 (V)

#### 科展資料

21. 詹昀臻、劉若婕 (2018)。反「薑」一「金」—探討薑黃素對於金屬離子的螯合作用，中華民國 57 屆中小學科學展覽會。
22. 吳婉綺、林君徽、林雅婷、蘇琳詒 (2005)。生物濾水器—文蛤、牡蠣重金屬吸附能力，中華民國 44 屆中小學科學展覽會。
23. 練鴻裕、林孟頌、陳詩桓 (2013)。甲若殼以結素重金屬汙染—甲殼素吸附重金屬，中華民國 52 屆中小學科學展覽會。
24. 王秉旭 (2014)。農業廢棄物再利用-吸附重金屬離子之研究，中華民國 53 屆中小學科學展覽會。
25. 林易叡、賴柏丞、林韋辰 (2012)。膜力奇蹟—以蛋殼膜粉吸附重金屬離子與色素之研究，中華民國 51 屆中小學科學展覽會。

## 【評語】 052611

本作品以蚵殼粉、蛋殼粉等廢料與碳酸鈣，作為金屬離子的吸附劑，探討吸附率、單位重量之吸附量，獲知銅離子與多種重金屬離子之競爭吸附資料，並與離子交換樹脂之處理效果比較。研究中選擇多種不同吸附材進行實驗，若能說明吸附材的選擇依據以及重金屬濃度設定的理由，將可讓研究目的性更清晰。

相關問題如下：

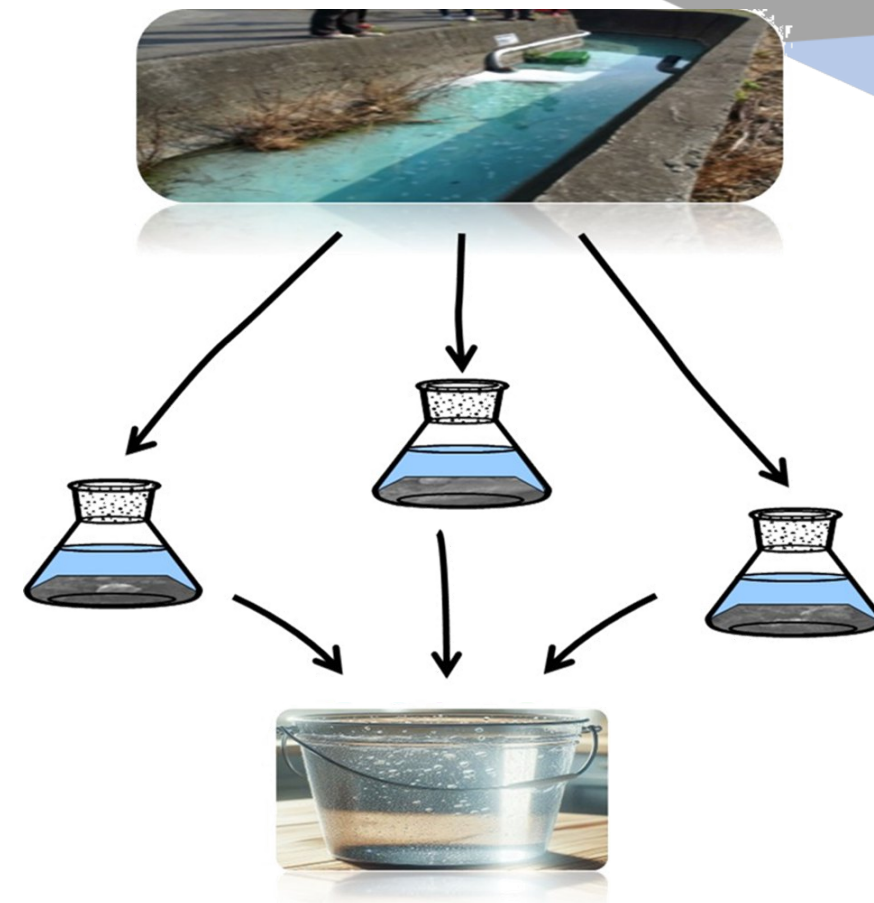
1. pH 值對金屬離子吸附的影響需要考量沉澱的問題，例如  $\text{Cu}^{2+}$  在  $\text{pH}>6$  時會有大量氫氧化物的沉澱。
2. 圖中的不同柱狀圖需為不同實驗條件或物種，若為相同標示，例如： $\text{Cu}^{2+}$ ，會引起困擾。
3. 討論中的論述有些與理論相左，建議可以查閱相關文獻以釐清論述，同時也可將所得結果與文獻結果比較，以瞭解自身所得結果與他人結果的異同。
4. 檢量線可能在低濃度與高濃度區間展現不同線性斜率，目前檢量線跨越濃度範圍太大，可考慮分區取得線性相依性。
5. 表需要有表說。

6. 為何吸附溫度越高，吸附量越大？

7. 請再確認-NH<sup>2</sup>與Cu<sup>2+</sup>配位能力。

作品海報

# 誰是清道夫？



生活中的除『銅』妙『劑』大對決





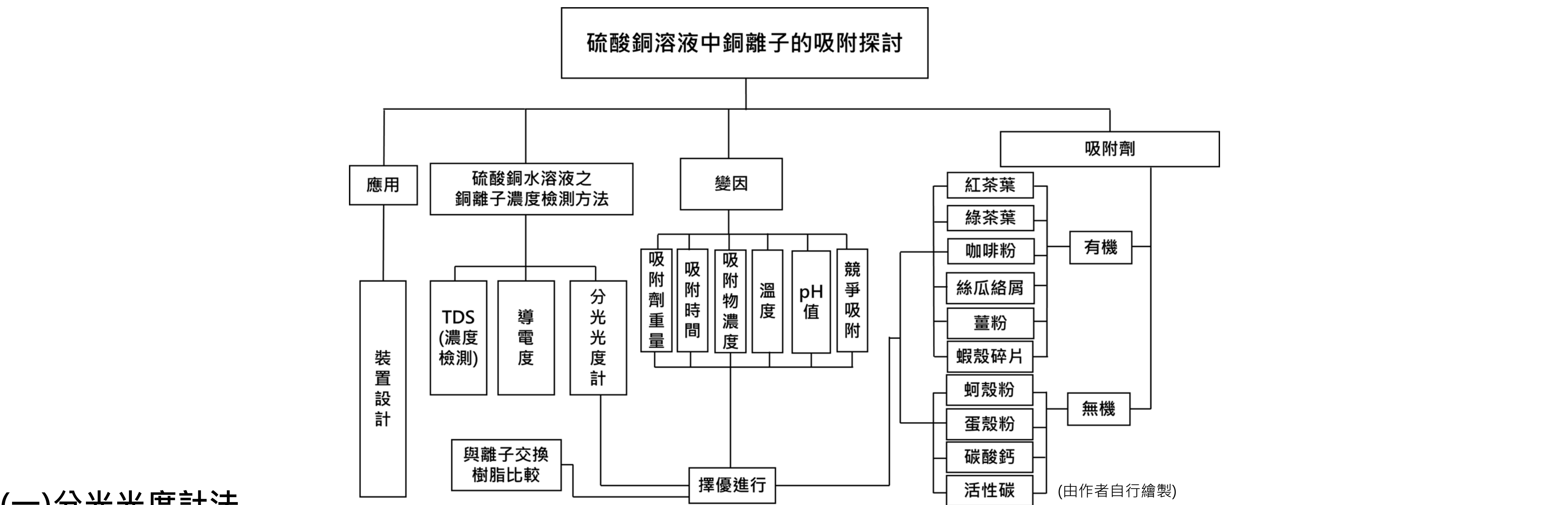
# 研究動機

隨著工業化發展，重金屬汙染已成為我們面臨的嚴重環境問題之一。近年來，隨著環保意識的提升，政府開始重視相關環境議題，對於工廠排廢制定相關法律規範。新聞曾報導台灣的彩色河流，身為一個生活在中壢工業區附近的我們對此感受很深，也曾經在路邊等公車時看到排水溝不尋常顏色的液體排出，因而興起想研究重金屬離子去除的想法。再者，結合108課綱化學（全）所提綠色化學指標以及SDGs永續相關議題，可以看到多項議題內容的目標都在解決環境污染的問題，像是SDGs 11減少都市對環境的影響、SDGs 12負責化學品和廢物的管理、SDGs 15保護和恢復陸地和淡水生態系統。減少重金屬汙染是其中之一重要議題，為了能實踐解決此問題，我們想利用生活中易取得的材料或是廢材，針對「水中銅離子的去除」作變因探討，並嘗試針對研究結果，設計可實際應用的裝置，為家鄉工廠林立可能造成的環境汙染盡一份貢獻。

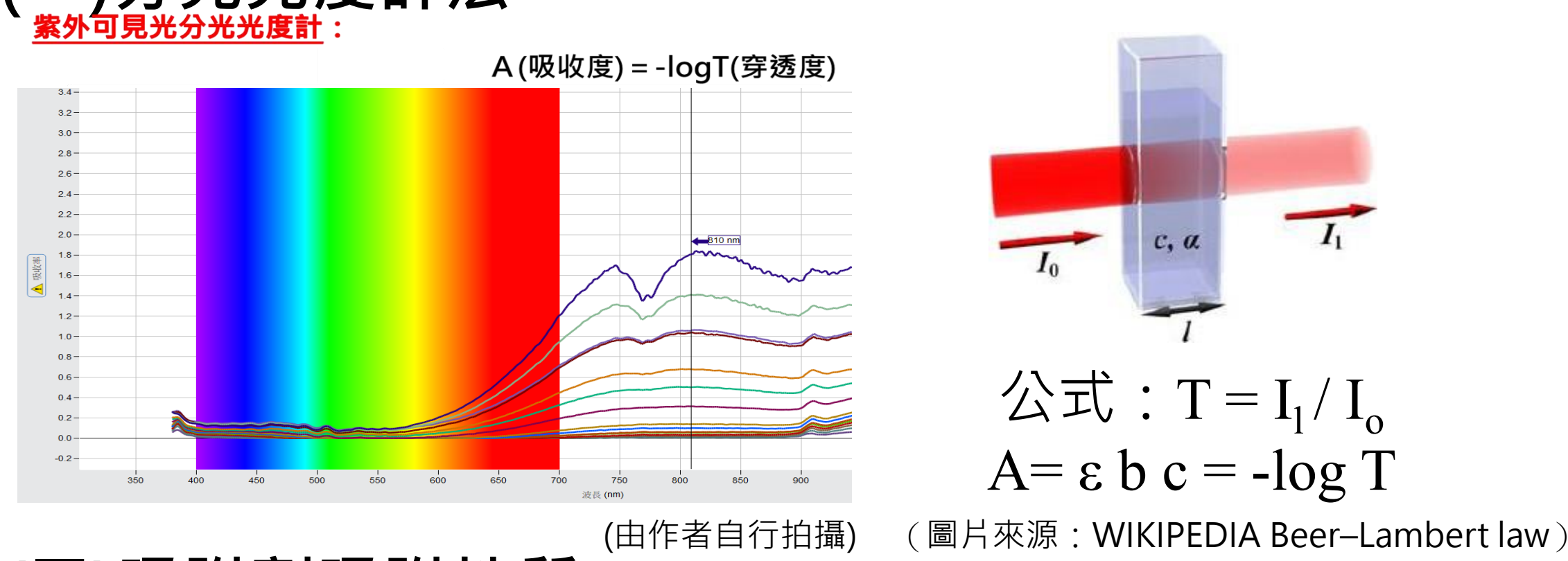
# 研究目的

- 一、不同濃度硫酸銅、硫酸鎳、硫酸鈷水溶液之銅離子的吸收度、導電度及TDS是否有相似趨勢（實驗一）
- 二、探討生活中不同有機物、無機物作為吸附劑對硫酸銅水溶液之銅離子的吸附效果（實驗二）
- 三、探討不同重量、不同吸附時間，吸附劑對硫酸銅水溶液之銅離子的吸附效果（實驗三、實驗四）
- 四、以Langmuir等溫吸附模型探討吸附劑對硫酸銅水溶液之銅離子的最大吸附量（實驗五）
- 五、比較不同溫度、酸鹼環境下，吸附劑對硫酸銅水溶液之銅離子的吸附效果（實驗六、實驗七）
- 六、探討吸附劑在其他重金屬離子同時存在的情況下，對硫酸銅溶液之銅離子的吸附效果（實驗八）
- 七、比較吸附劑與現行工業重金屬去除法（離子交換樹脂、電鍍法）的去除效果（實驗九、實驗十）
- 八、設計能因應各種條件下有效去除銅離子的自動化吸附裝置（實驗十一）

# 實驗研究架構及研究方法



## (一)分光光度計法



## (二)吸附劑吸附性質

特性	物理吸附	化學吸附
吸附力	弱	強
作用溫度	低溫，吸附力 $\propto 1/\text{溫度}$	高溫，吸附力 $\propto \text{溫度}$ （飽和為止）
被吸附物特性	沒有選擇性	選擇性高，有化學鍵才發生吸附
可逆性	可逆（脫附）	不可逆
原理比較	以凡得瓦力作為吸引力	產生化學鍵結

## (三)Langmuir等溫吸附方程式

公式： $q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e}$

推導後： $\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{q_m} + \frac{1}{q_m K_L}$

$q_e$ ：吸附劑平衡吸附量(mg/g)； $q_m$ ：吸附劑最大吸附量（mg/g）；

$C_e$ ：重金屬離子平衡濃度(mg/L)； $K_L$ ：Langmuir 吸附常數（L/mg）。

以 $C_e / q_e$ 對 $C_e$ 作圖，可得方程式的斜率與截距及作圖後，可依序求得 $q_m$ 與 $K_L$ 值。

## (四)吸附率

吸附率 = [  $\frac{(\text{初始濃度} - \text{實驗後濃度})}{\text{初始濃度}}$  ] ×100%

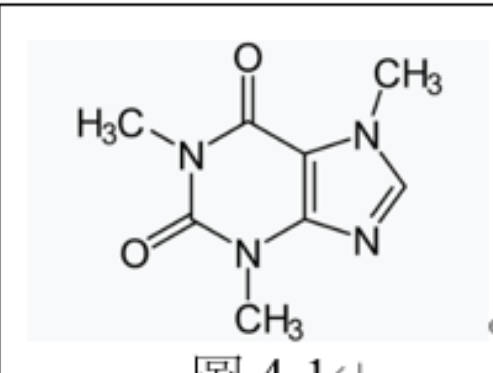
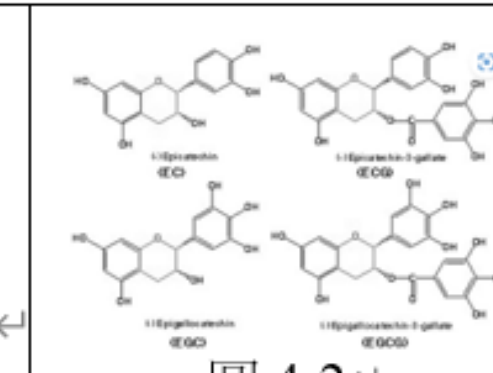
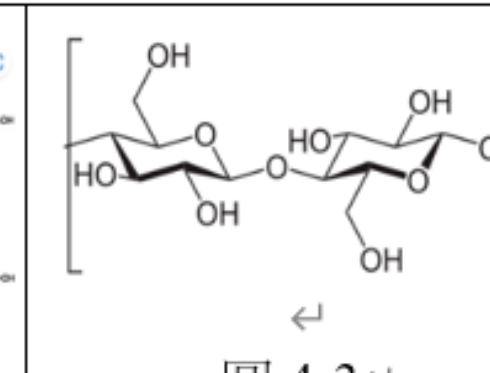
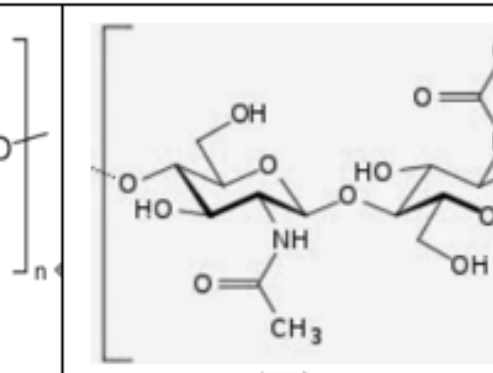
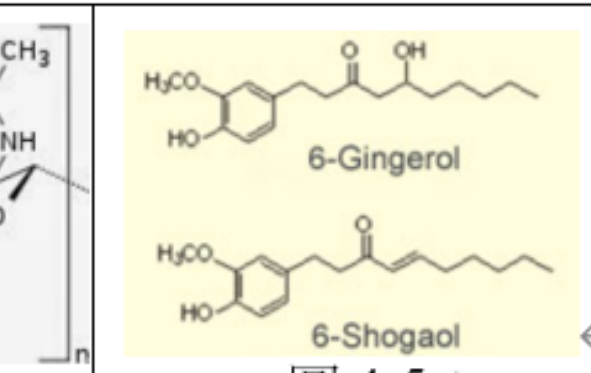
## (五) 吸附位點

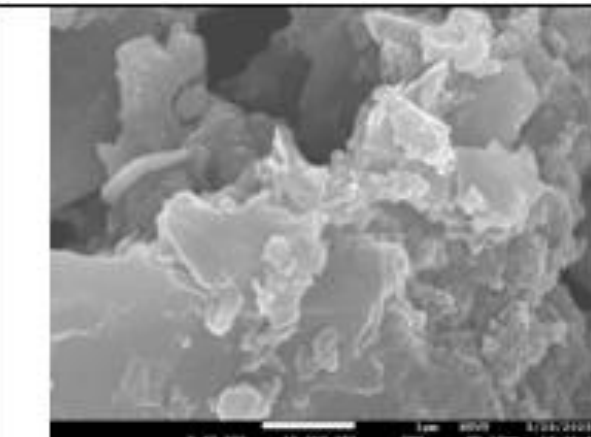
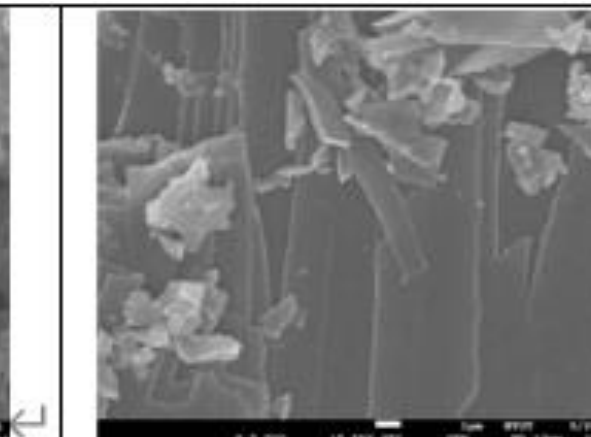
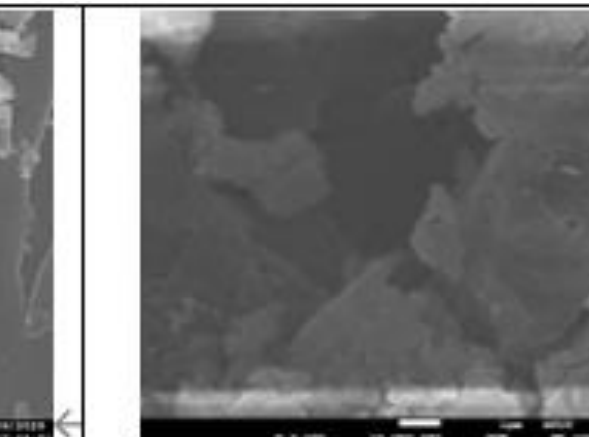
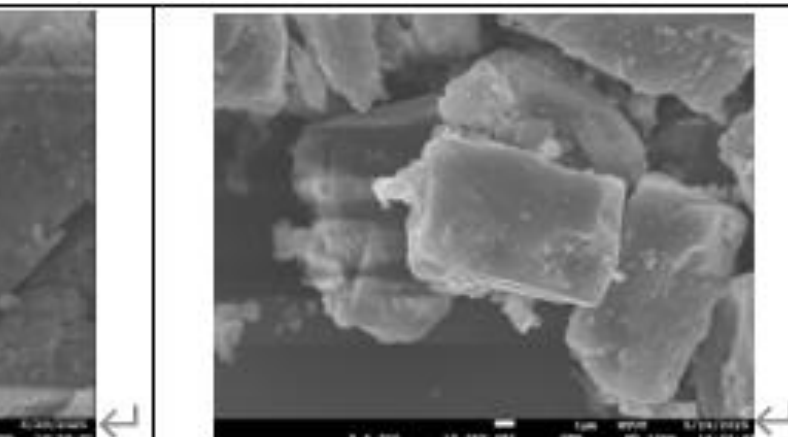
指材料表面或孔隙結構中的特定位置，這些位置有吸附原子、離子和分子的能力。每個位點只能吸附一個原子、離子或分子，該位點被佔據後，則不再吸附。

## (六) Zeta Potential（界達電位）

界達電位是指懸浮於液體中的微粒在移動時，其表面附近滑動面上的電位。當粒子因吸附離子或官能基解離而帶電，會在其周圍形成電雙層。而其可反映分散穩定性，絕對值大表示粒子間有較強的電荷斥力，有助於保持分散、不易凝聚；絕對值小，反之。

## (七)吸附劑結構

 圖 4-1 圖源：維基百科 13	 圖 4-2 圖源：營養初健身 14	 圖 4-3 圖源：維基百科 15	 圖 4-4 圖源：小小整理網站 16	 圖 4-5 圖源：島津公司官網 17
咖啡粉 (咖啡因)	紅茶葉、綠茶葉 (兒茶素)	咖啡粉、薑粉、絲瓜絡屑 (纖維素)	蝦殼碎片 (幾丁質)	薑粉 (薑醇、薑酚)

 圖 4-6 拍攝者：游博文	 圖 4-7 拍攝者：游博文	 圖 4-8 拍攝者：游博文	 圖 4-9 拍攝者：游博文
活性碳 SEM	蚵殼粉 SEM	蛋殼粉 SEM	碳酸鈣 SEM

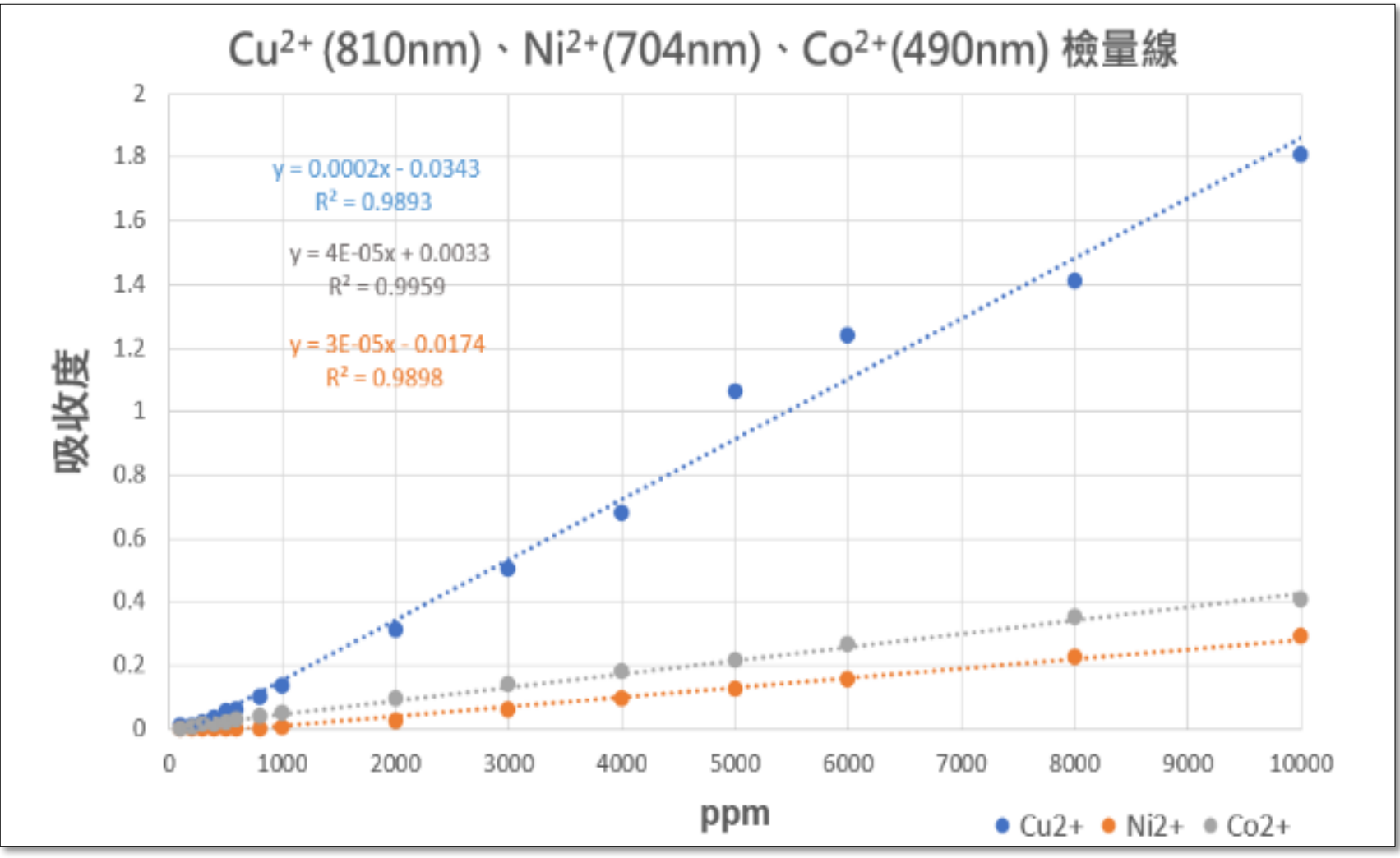
# 實驗研究藥品、器材



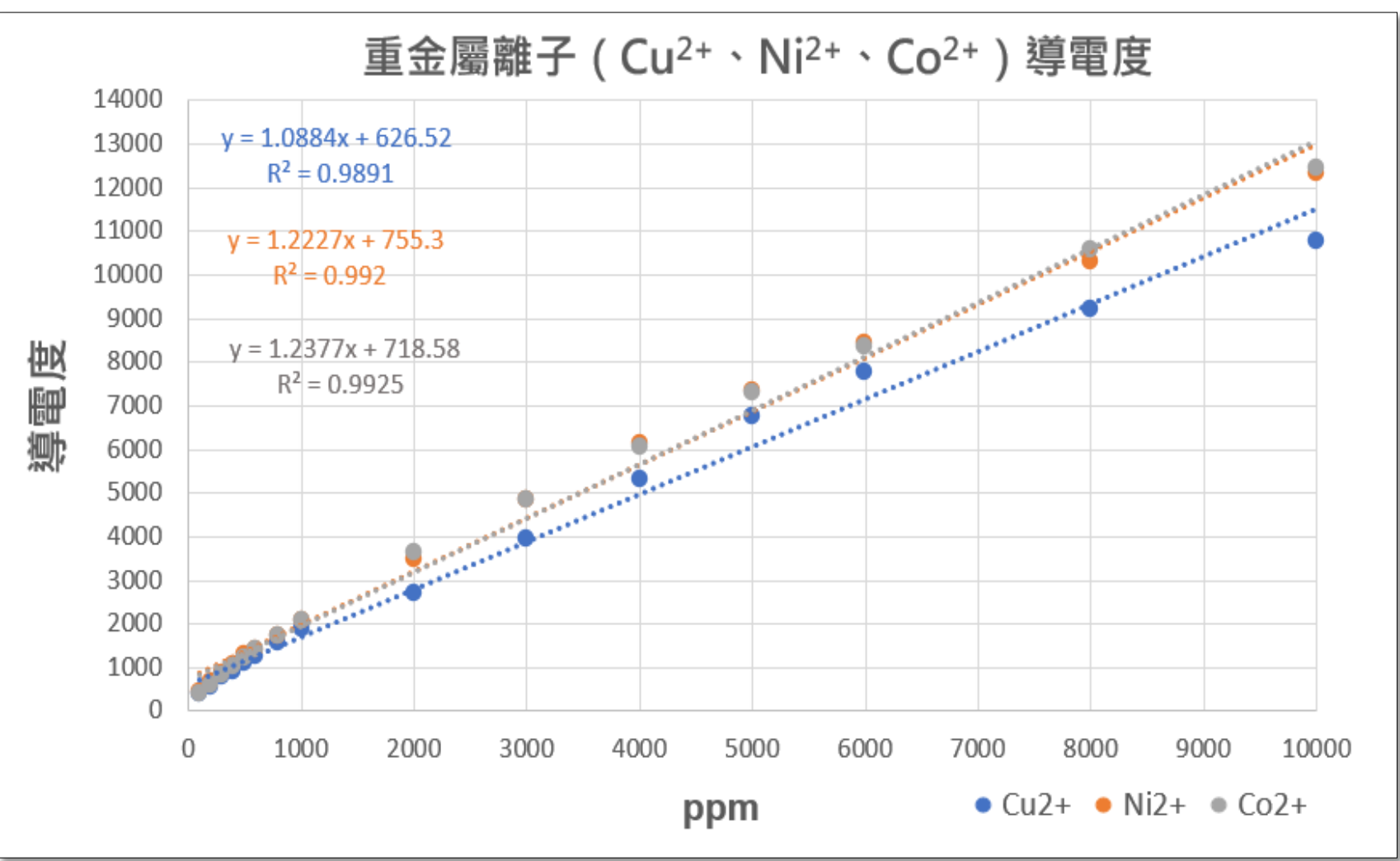


# 實驗結果與討論

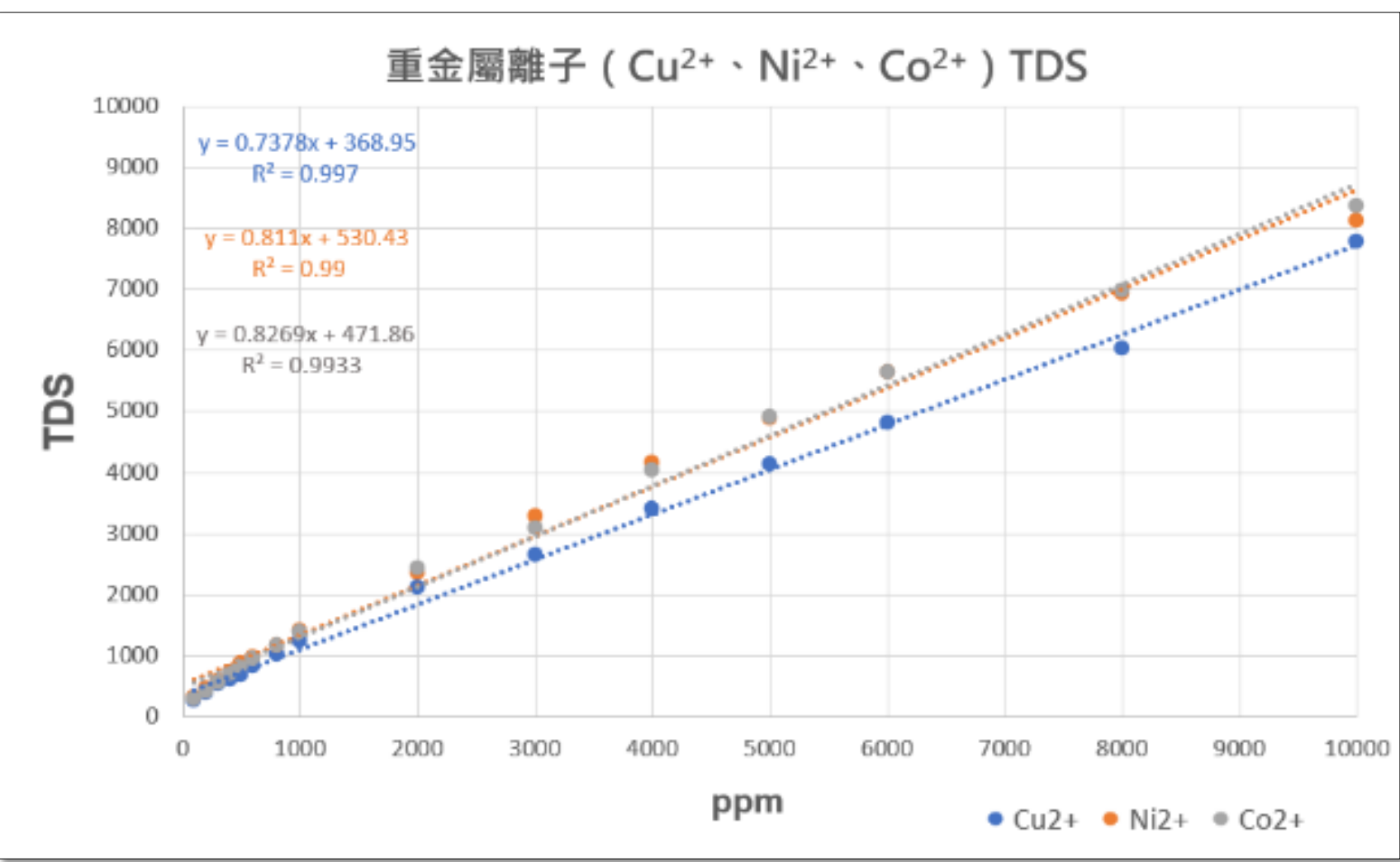
【實驗一】配製硫酸銅、硫酸鎳、硫酸鈷不同濃度 ( 100 ppm~10000 ppm ) 的水溶液，製作吸收度、導電度及TDS檢量線。



(由作者自行繪製)



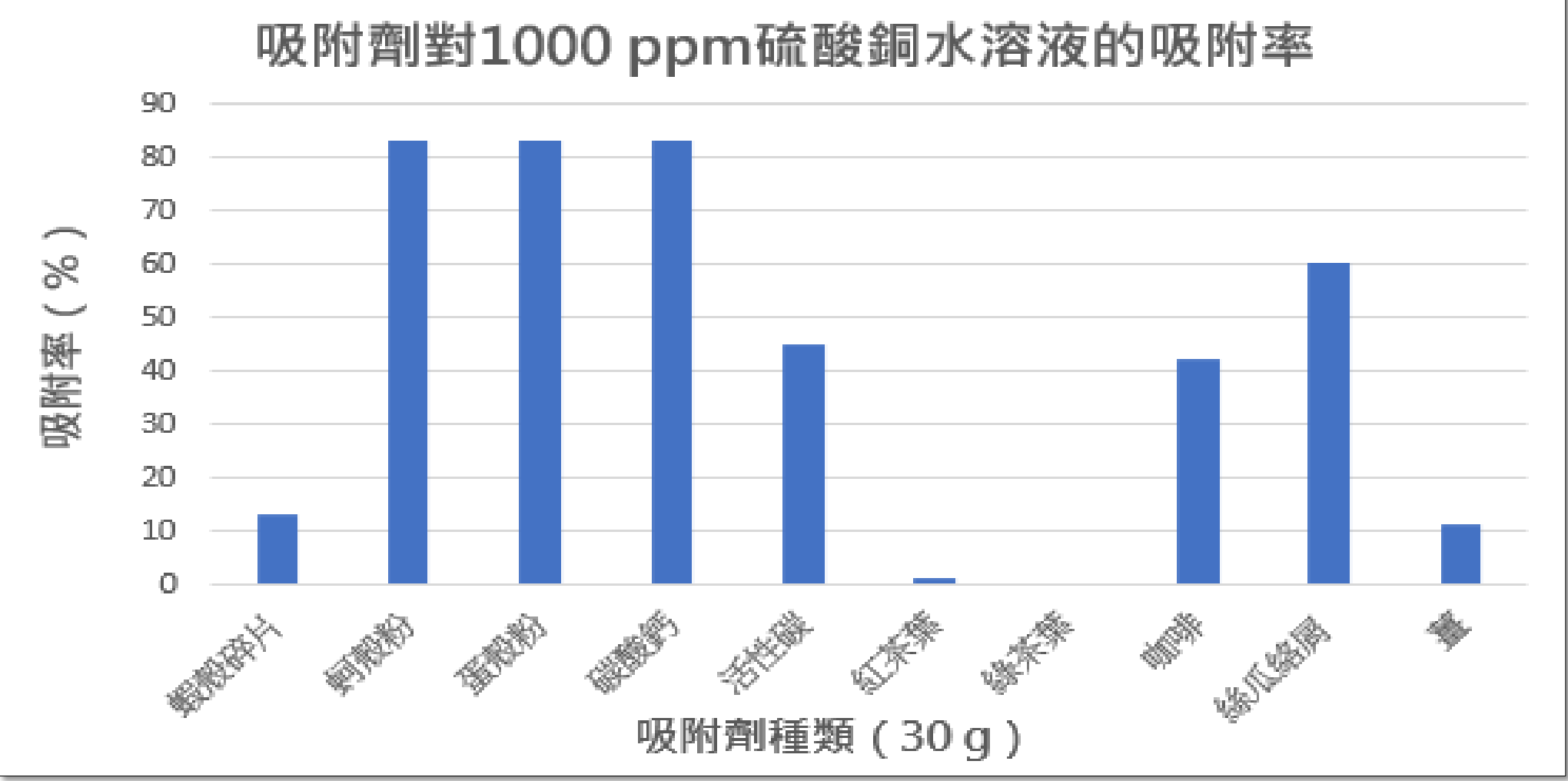
(由作者自行繪製)



(由作者自行繪製)

【實驗二】同種類的吸附劑 ( 有機物：紅茶葉、綠茶葉、咖啡粉、絲瓜絡屑、薑粉；無機物：蝦殼碎片、蚵殼粉、蛋殼粉、碳酸鈣、活性炭 ) 吸附1000 ppm硫酸銅水溶液的吸附效果。

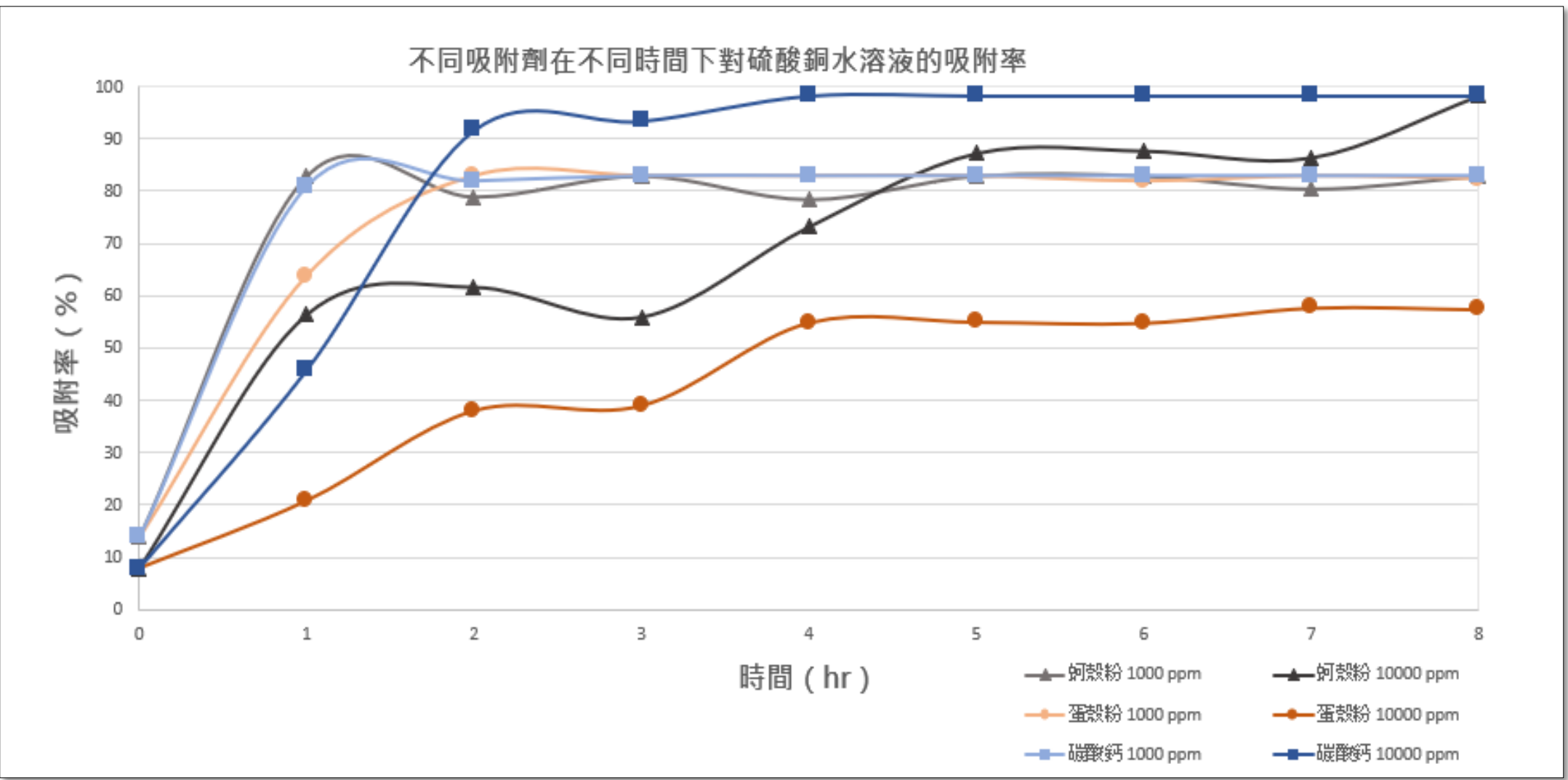
有機物		無機物	
吸附劑	吸附率	吸附劑	吸附率
紅茶葉	1	蚵殼粉	83
綠茶葉	0	蛋殼粉	83
咖啡粉	42	碳酸鈣	83
絲瓜絡屑	60	活性炭	45
薑粉	11		



(由作者自行繪製)

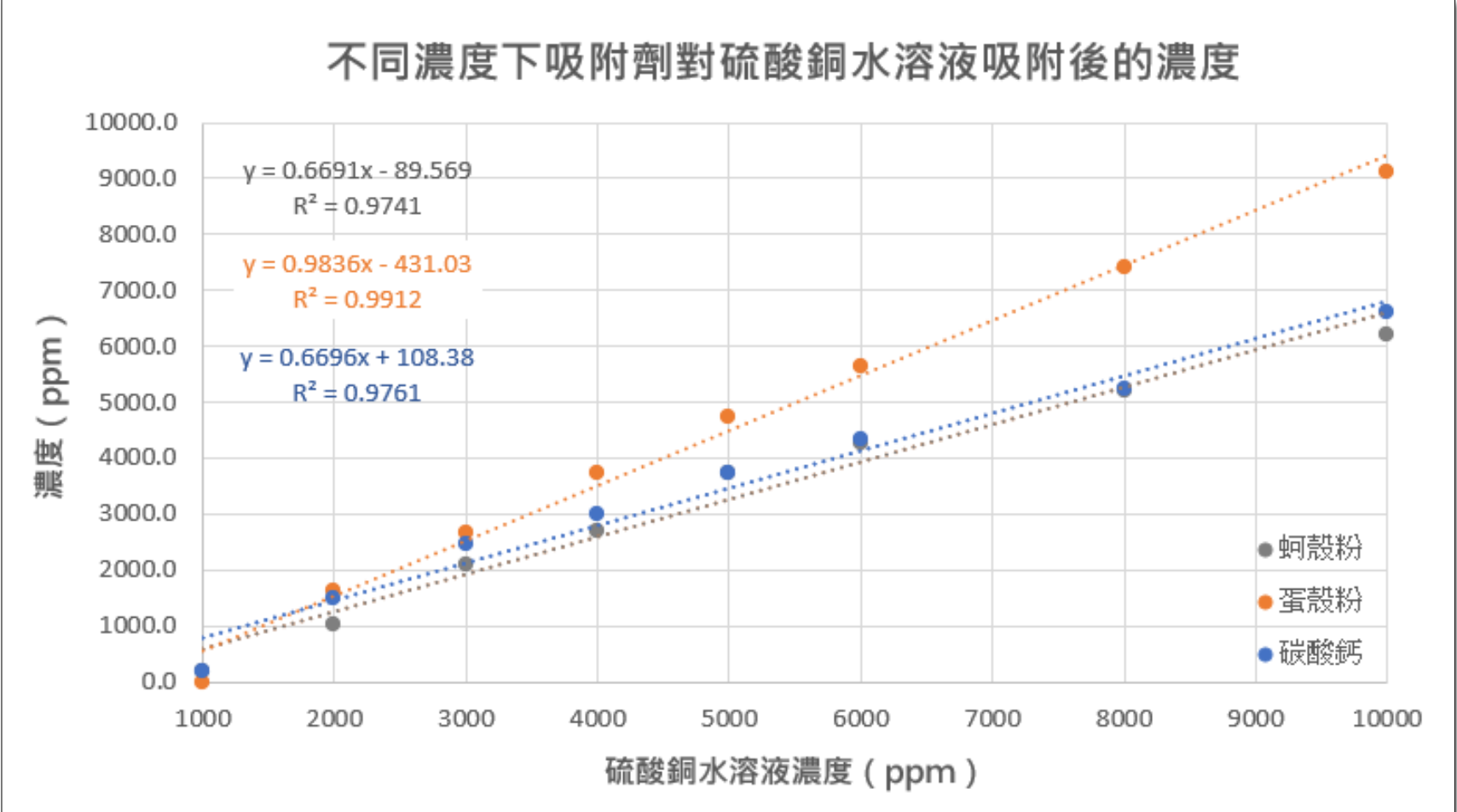
【實驗四】吸附效果較佳的碳酸鈣、蛋殼粉及蚵殼粉在不同吸附時間 ( 每一小時測一次，共八次 )，對1000 ppm及10000 ppm硫酸銅水溶液的吸附效果。

時間 ( hr )		時間 ( hr )									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	
吸附劑種類		吸附率 %	14	83	79	83	78	83	83	80	83
蚵殼粉	10000 ppm		8	56	62	56	73	87	88	86	98
	1000 ppm		14	64	83	83	83	83	82	83	82
蛋殼粉	10000 ppm		8	21	38	39	55	55	55	58	57
	1000 ppm		14	81	82	83	83	83	83	83	83
碳酸鈣	10000 ppm		8	46	92	83	98	98	98	98	98

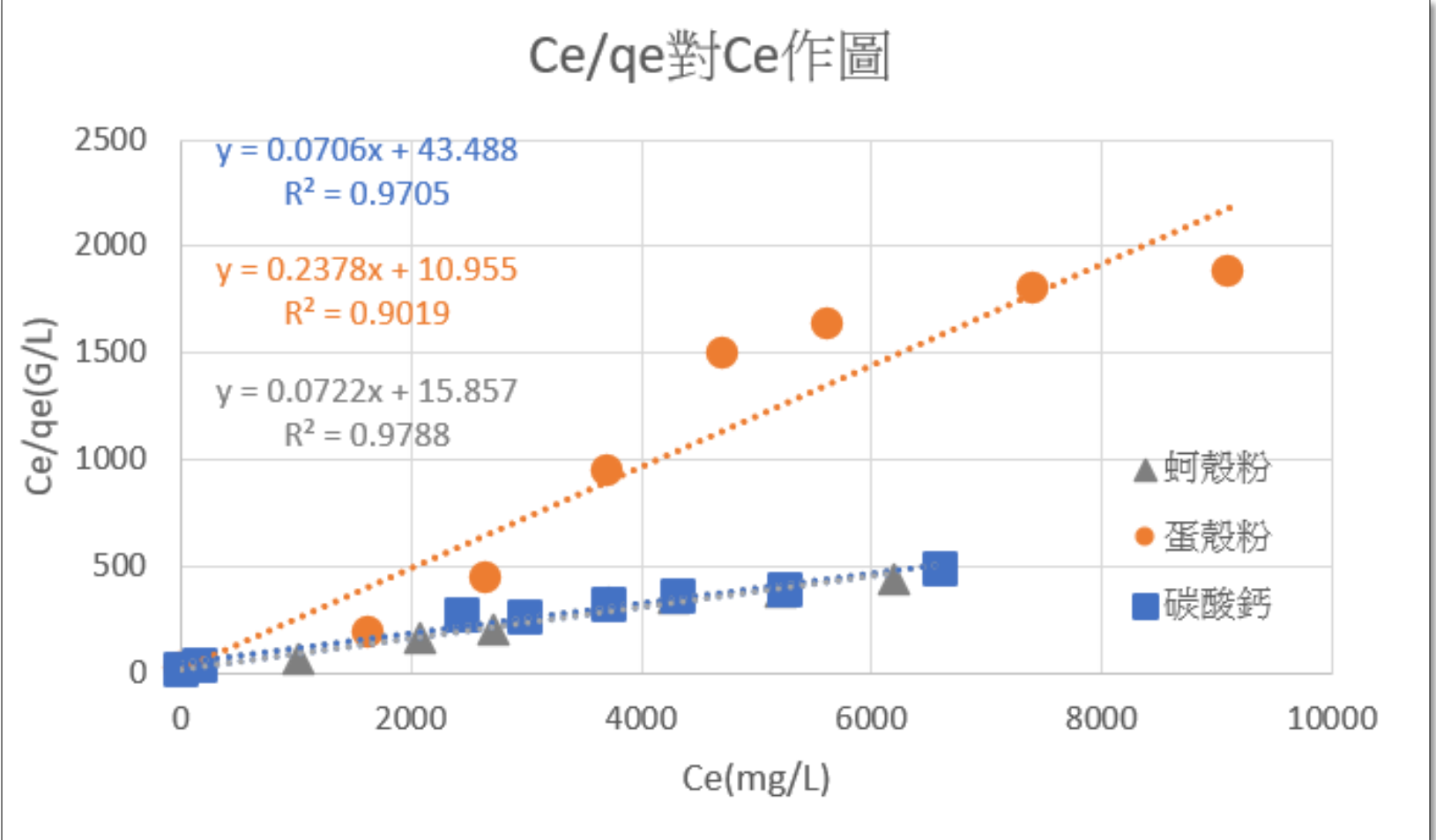


(由作者自行繪製)

【實驗五】吸附效果較佳的碳酸鈣、蛋殼粉及蚵殼粉吸附不同濃度的銅離子結果與Langmuir等溫吸附模型探討最大吸附量。



(由作者自行繪製)

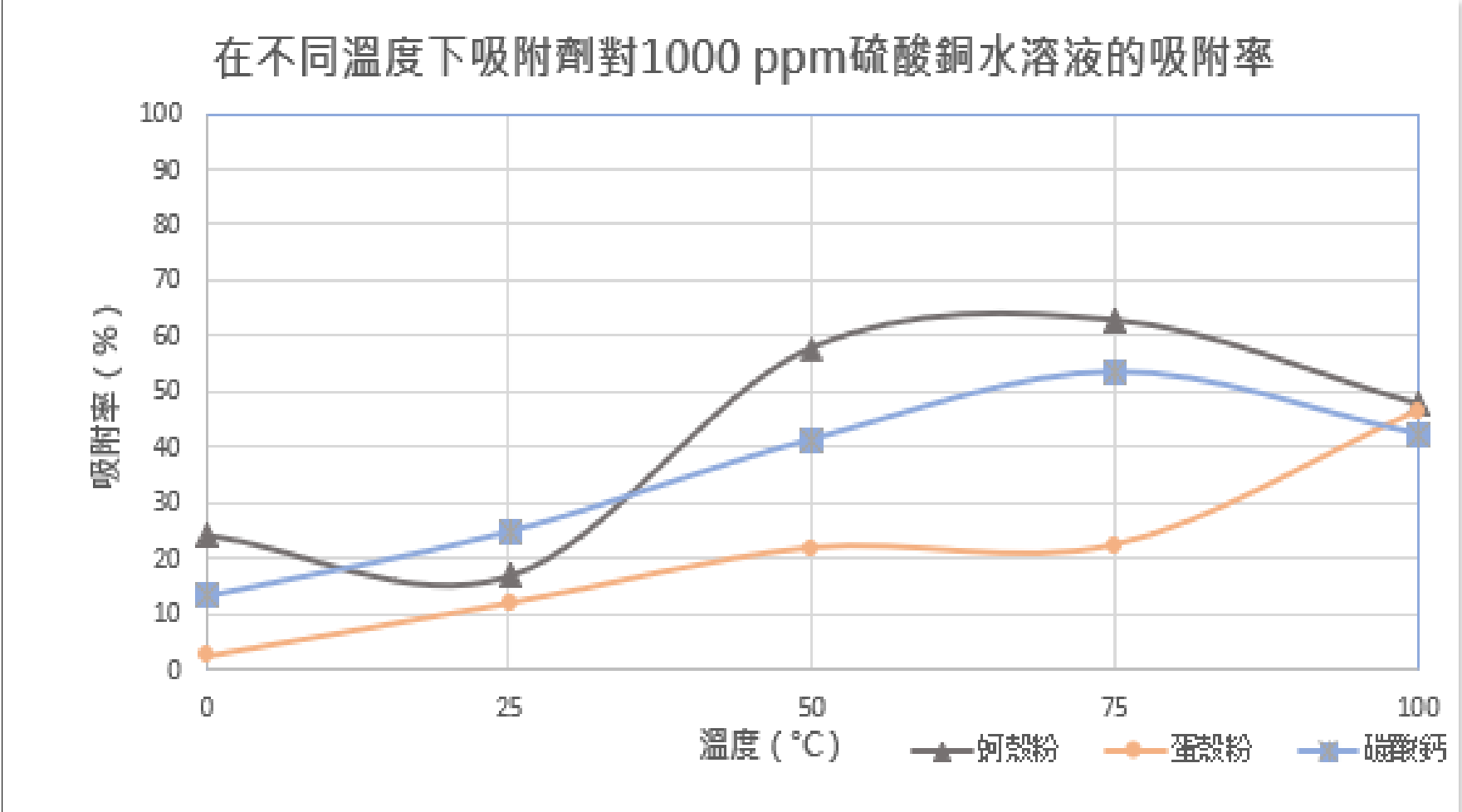


(由作者自行繪製)

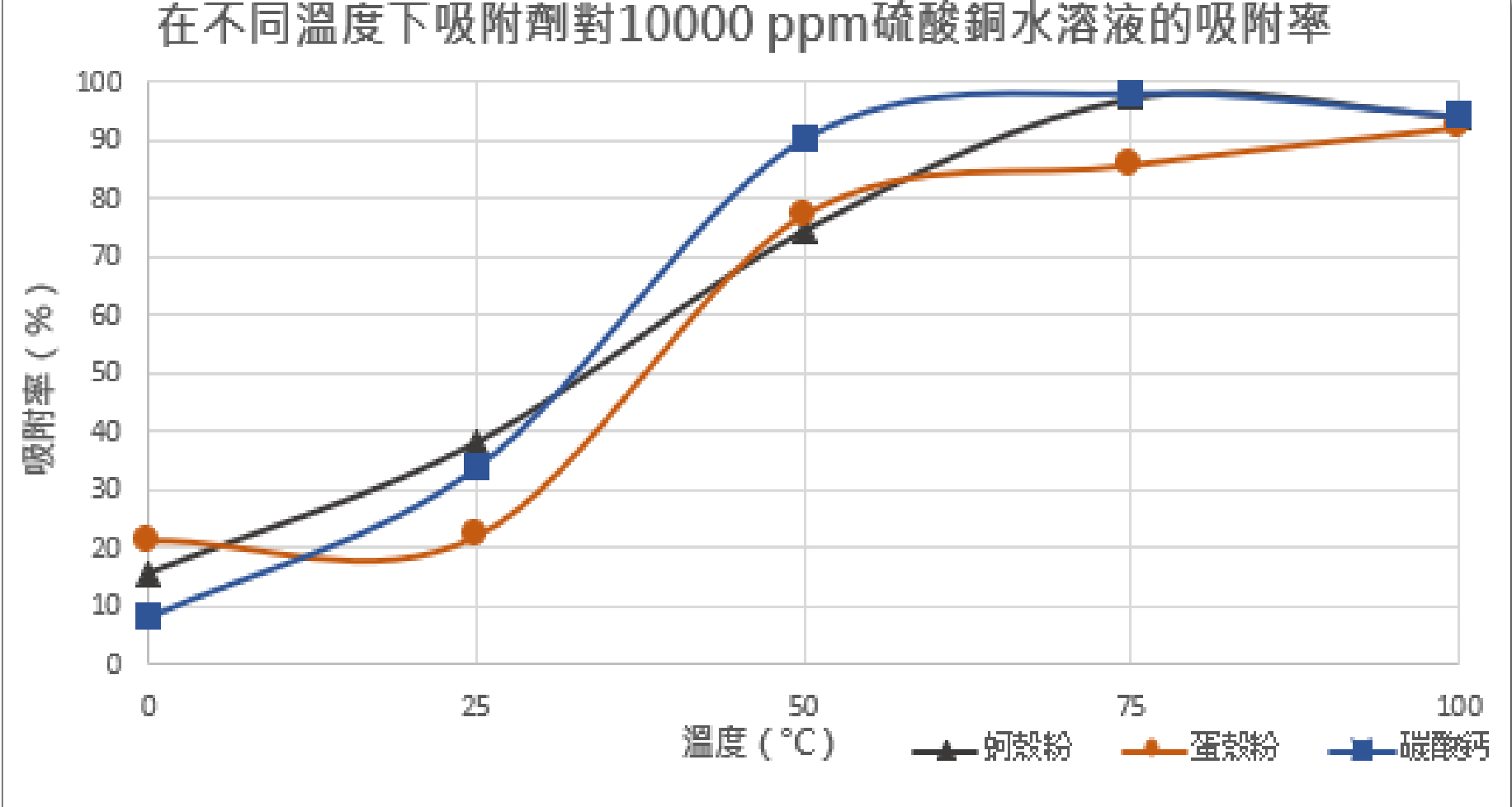
Langmuir 參數		$q_m$ (mg/g)	$K_L$ (1/mg)
吸附劑種類			
蚵殼粉		13.8504	0.00455
蛋殼粉		4.2052	0.07574
碳酸鈣		14.1643	0.00162

【實驗六】吸附效果較佳的碳酸鈣、蛋殼粉及蚵殼粉在不同溫度 ( 0℃、25℃、50℃、75℃、100℃ ) 下，吸附1000 ppm、10000 ppm硫酸銅水溶液的吸附效果。

溫度 ( °C )		吸附劑種類					
		0	25	50	75	100	
蚵殼粉 蛋殼粉 碳酸鈣	1000 ppm	吸 附 率 %	24	17	58	63	48
	10000 ppm		16	38	75	97	94
	1000 ppm		2	12	22	22	46
	10000 ppm		21	22	77	86	92
	1000 ppm		13	25	41	53	42
	10000 ppm		8	34	90	98	94



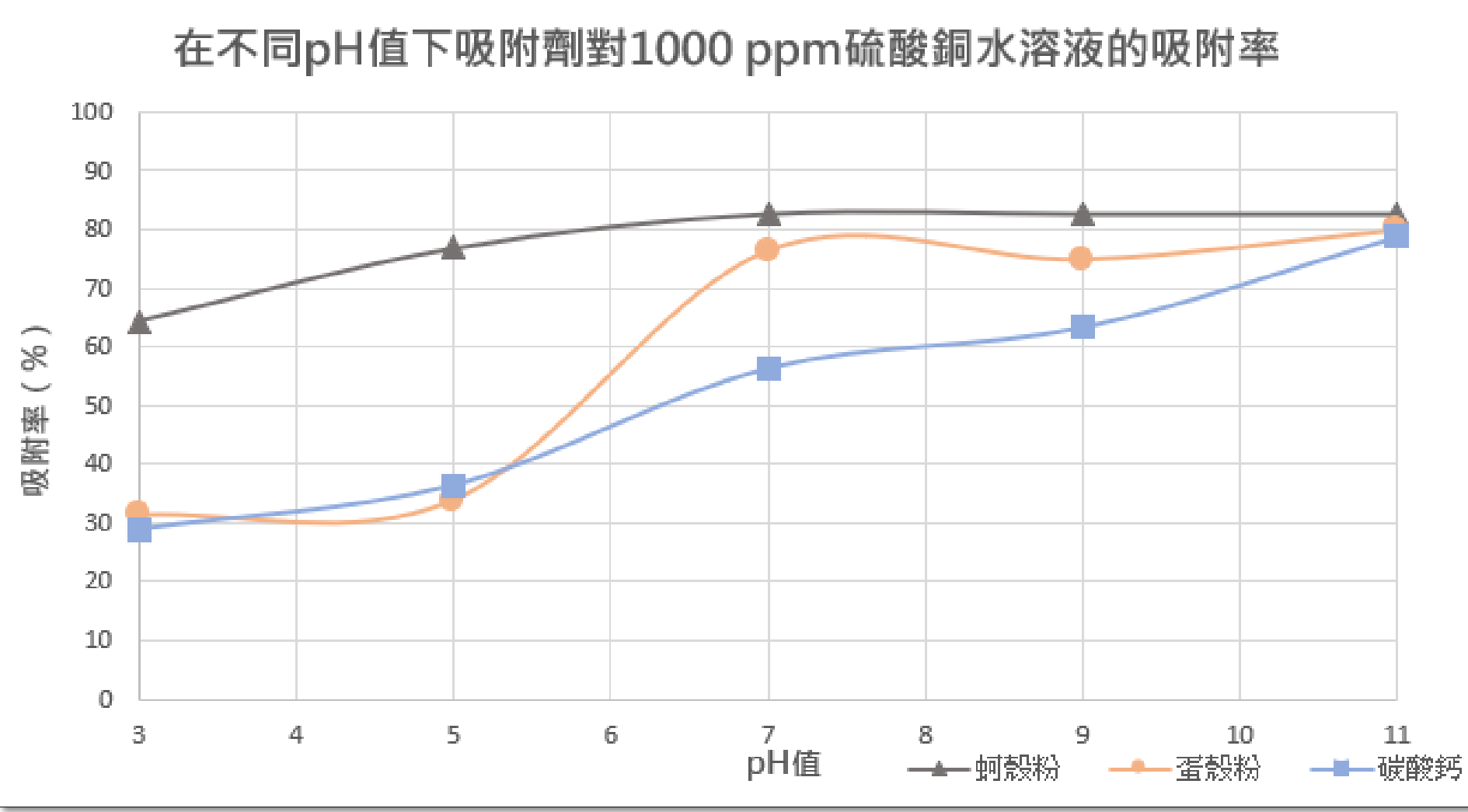
(由作者自行繪製)



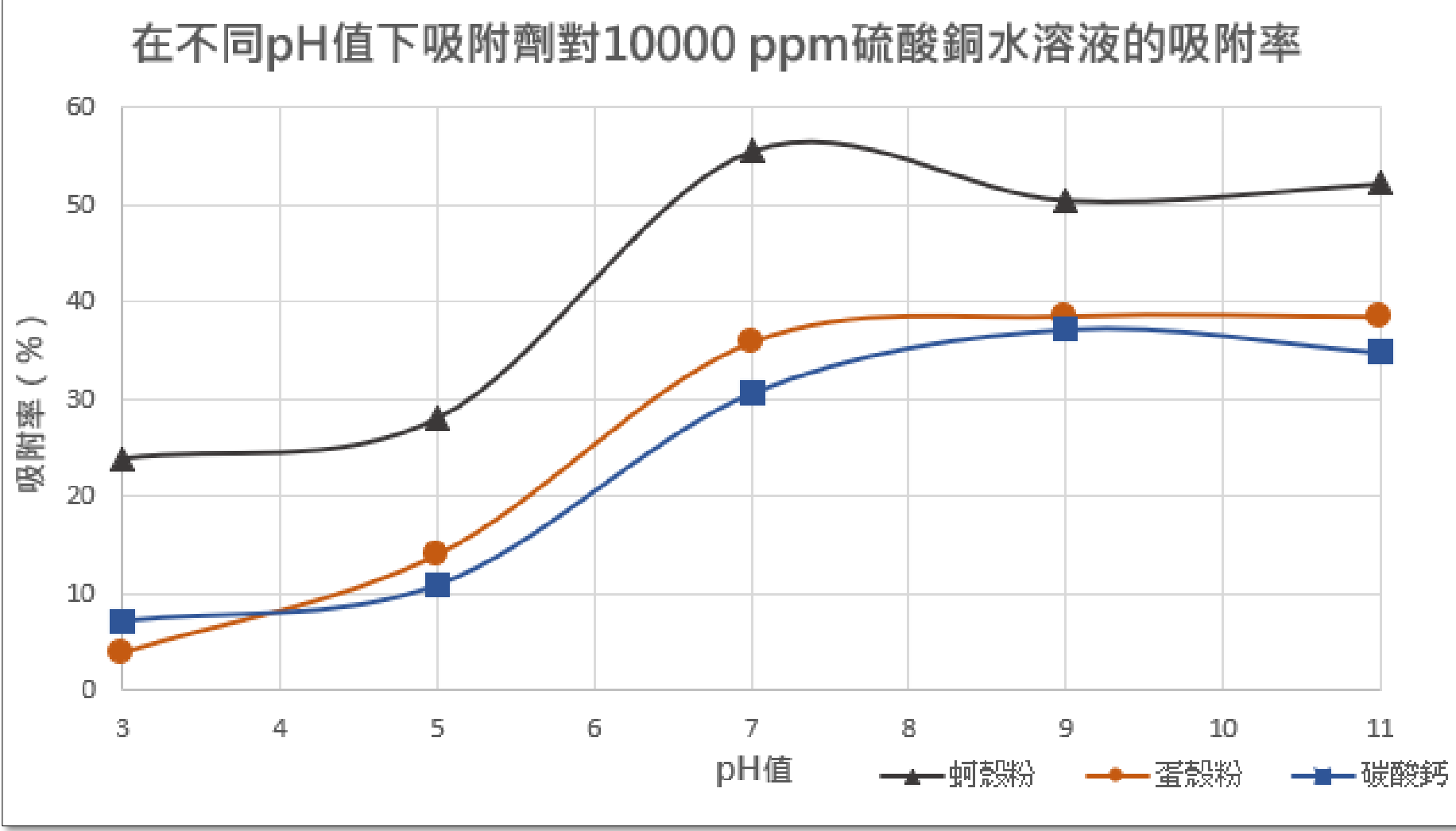
(由作者自行繪製)

【實驗七】附效果較佳的碳酸鈣、蛋殼粉及蚵殼粉在不同pH值 ( 3、5、7、9、11 ) 下，吸附1000 ppm、10000 ppm硫酸銅水溶液的吸附效果。

pH值			3	5	7	9	11
吸附劑種類							
蚵殼粉	1000 ppm	吸 附 率 %	64	77	83	83	83
	10000 ppm		24	28	56	50	52
蛋殼粉	1000 ppm		31	34	76	75	80
	10000 ppm		4	14	36	38	38
碳酸鈣	1000 ppm		29	36	56	63	79
	10000 ppm		7	11	31	37	35



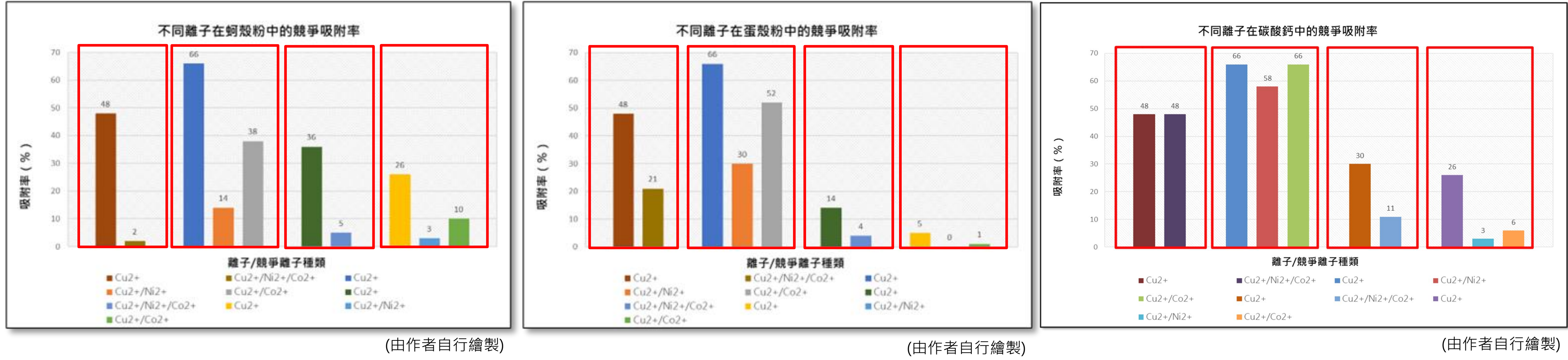
(由作者自行繪製)



(由作者自行繪製)

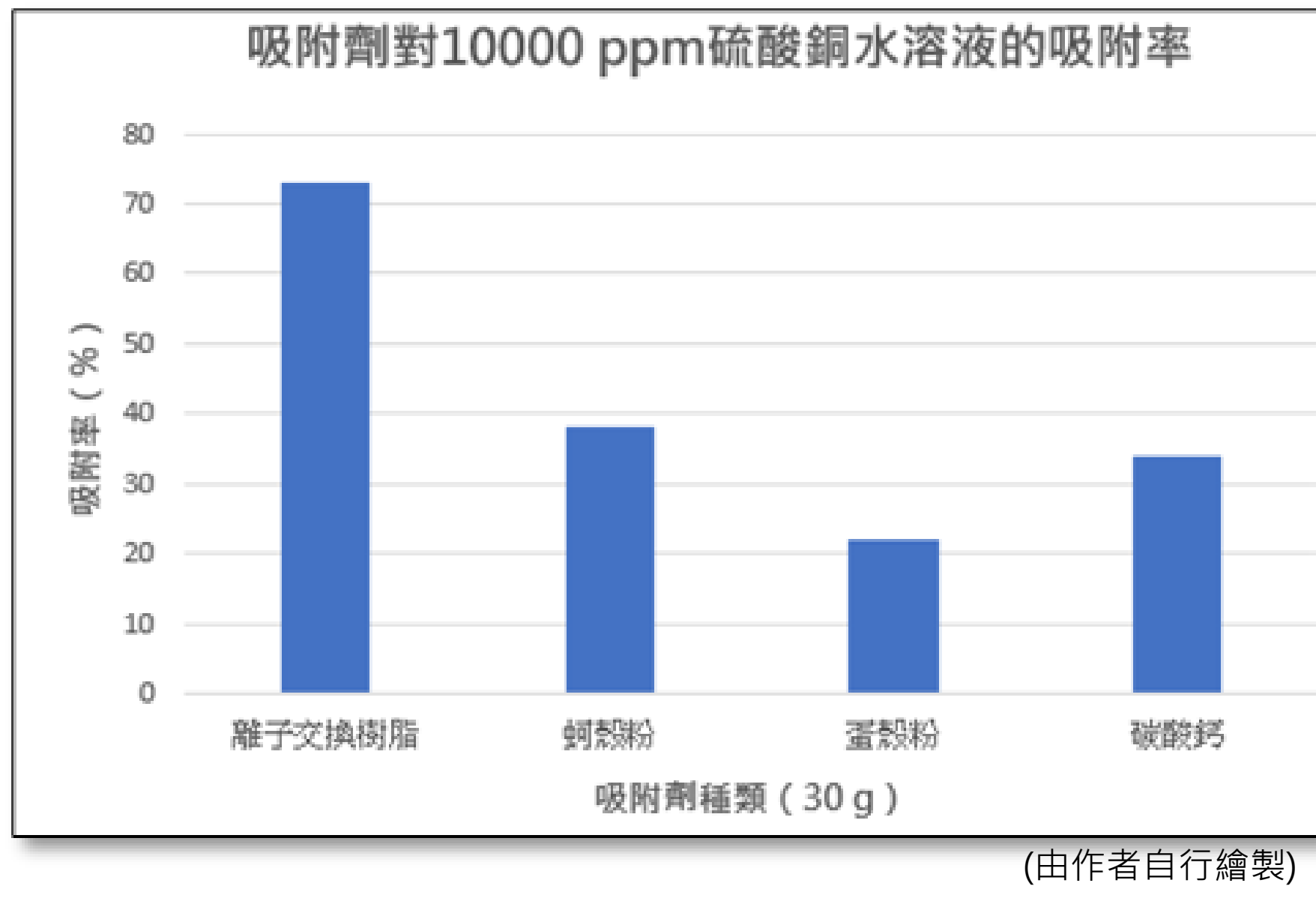
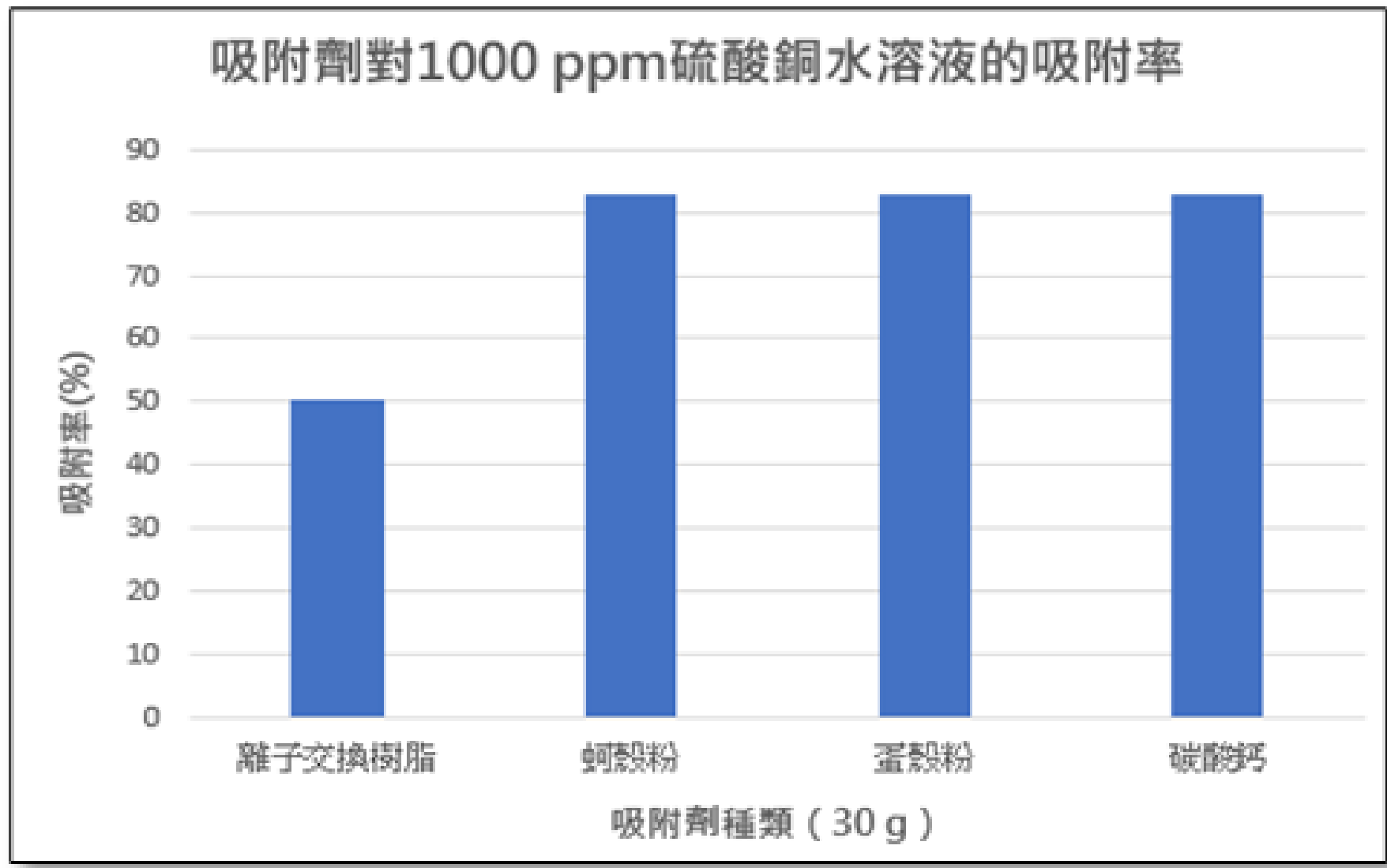


【實驗八】吸附效果較佳的碳酸鈣、蛋殼粉及蚵殼粉，吸附進行「Cu<sup>2+</sup>與Ni<sup>2+</sup>」、「Cu<sup>2+</sup>與Co<sup>2+</sup>」和「Cu<sup>2+</sup>、Ni<sup>2+</sup>與Co<sup>2+</sup>」競爭吸附，是否影響吸附劑對銅離子的吸附效果。



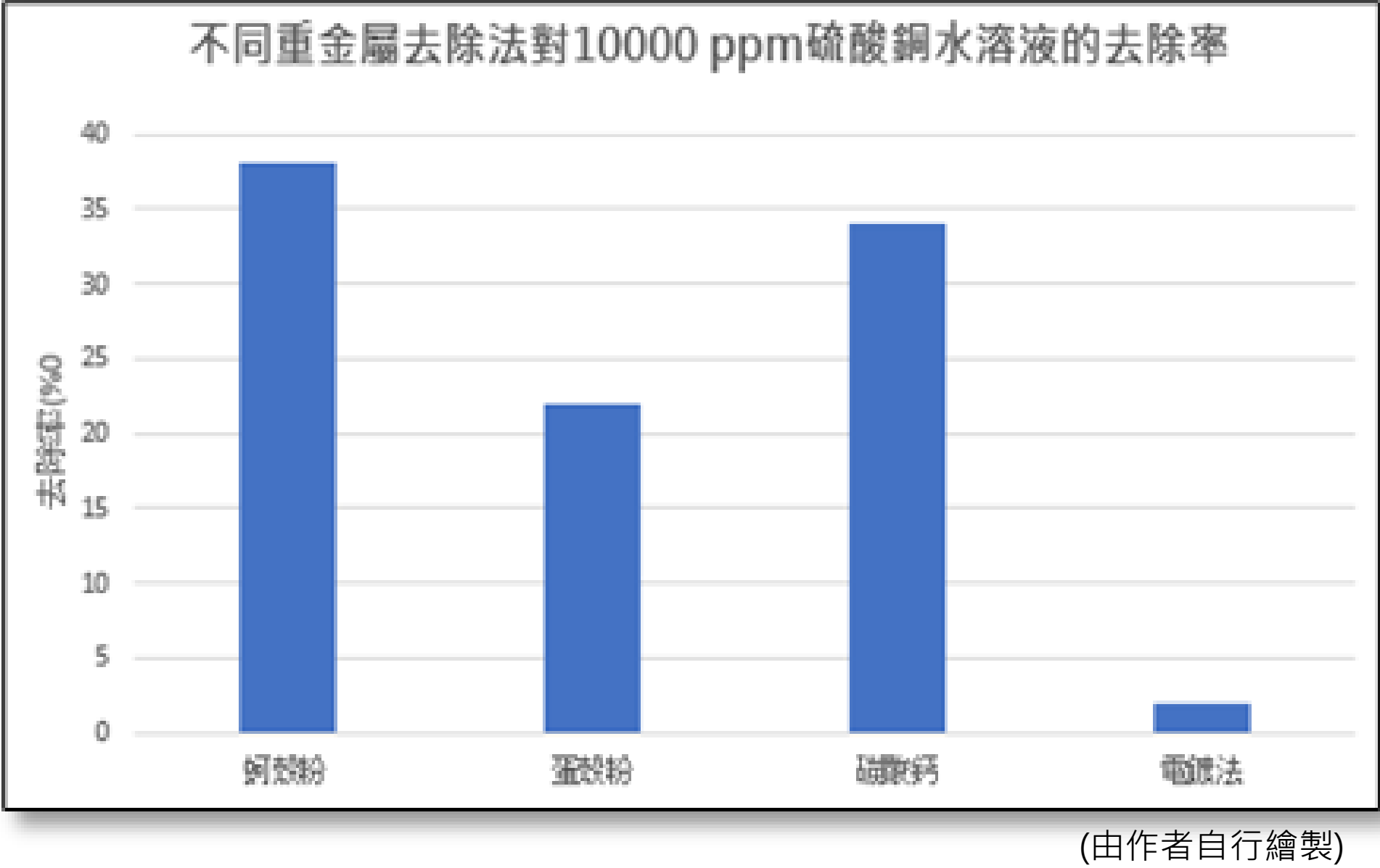
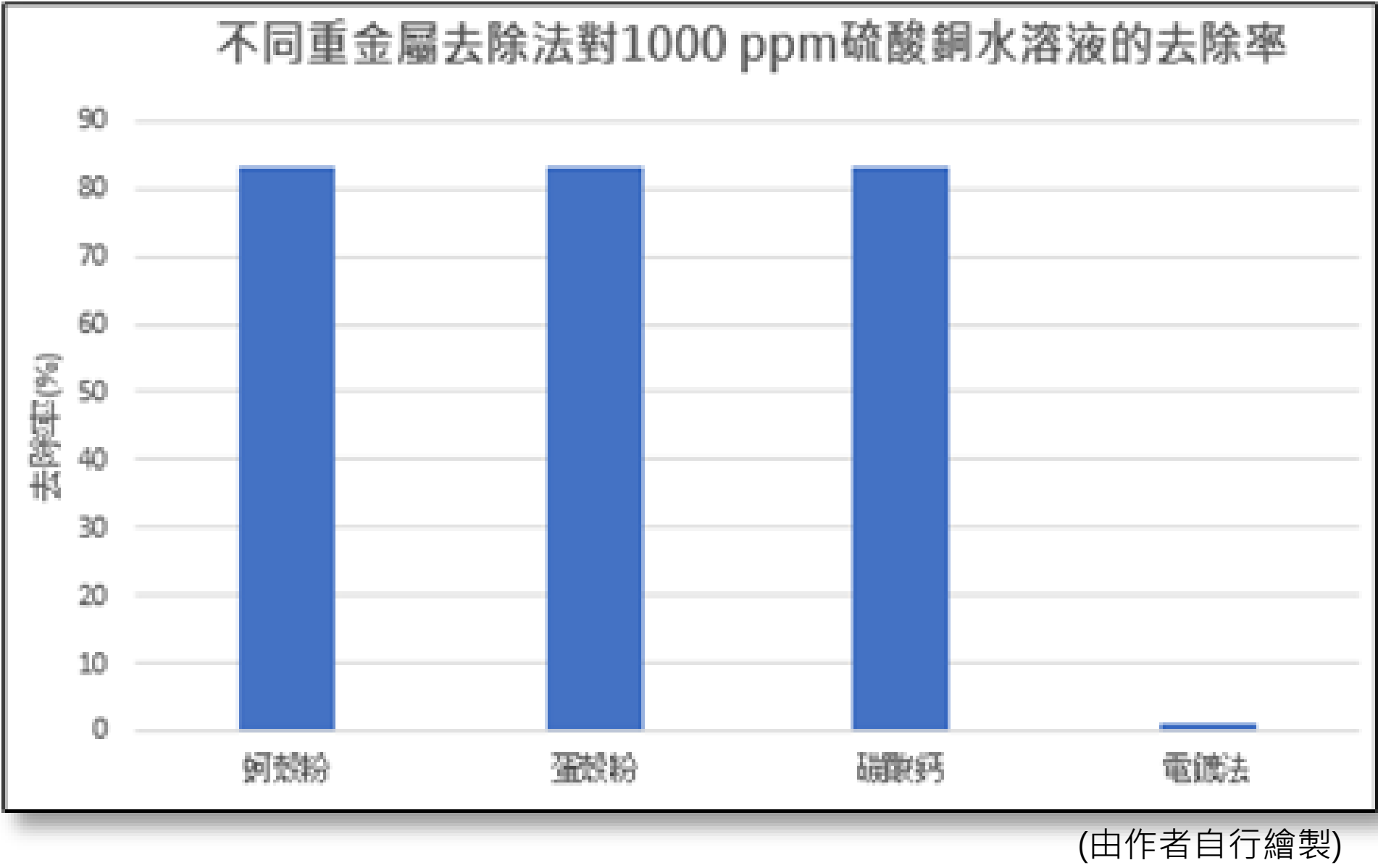
【實驗九】比較實驗二中吸附效果較佳的碳酸鈣、蛋殼粉及蚵殼粉與現行工業重金屬去除法（離子交換樹脂）的吸附效果。

吸附劑種類		吸附率%
離子交換樹脂	1000 ppm	50
	10000 ppm	73
蚵殼粉	1000 ppm	83
	10000 ppm	38
蛋殼粉	1000 ppm	83
	10000 ppm	22
碳酸鈣	1000 ppm	83
	10000 ppm	34

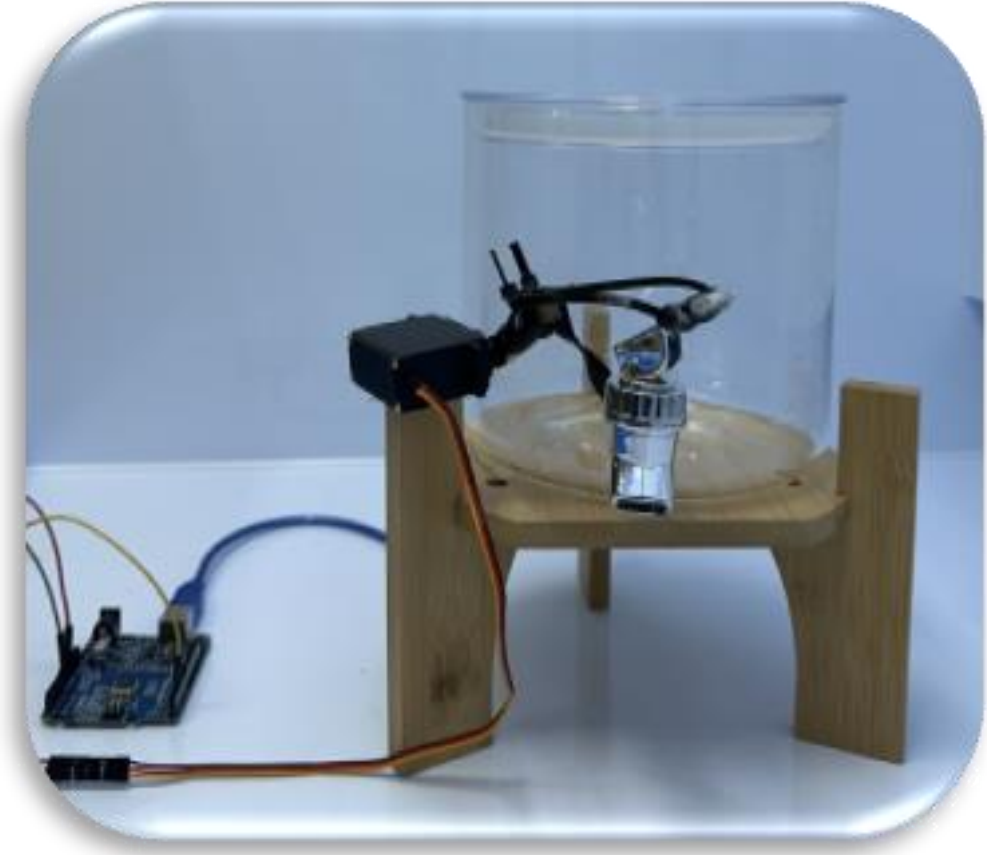


【實驗十】比較實驗二中的吸附效果較佳的碳酸鈣、蛋殼粉及蚵殼粉與現行重金屬常用的電鍍比較去除重金屬的效果。

吸附劑種類		吸附率 ( % )
蚵殼粉	1000	83
	10000	38
蛋殼粉	1000	83
	10000	22
碳酸鈣	1000	83
	10000	34
重金屬去除法		去除率 ( % )
電鍍法	1000	1
	10000	2



【實驗十一】設計一款可以吸附硫酸銅水溶液的裝置，並自動化定時收集濾液，且因應上述實驗中不同影響因子，選擇適合的吸附劑，達到去自動化去除銅離子之最佳效率。



(由作者自行拍攝)

## 結論

一、無機物中的蚵殼粉、蛋殼粉、碳酸鈣吸附效果最好。

二、重量、時間變因

1. 重量：隨著吸附劑重量增加，吸附率亦隨之上升，但當重量達到5、6克時，達到吸附極限。

2. 時間：在吸附的第一個小時，吸附率上升幅度最大然而延長吸附時間的效果提升有限。

三、我們透過Langmuir等溫吸附方程式，計算出碳酸鈣在每公克下所能吸附硫酸銅水溶液中的銅離子的重量最多達到約14.16毫克。

四、溫度、pH值變因

1. 溫度：在75℃時，不論1000 ppm、10000 ppm 蚵殼粉、碳酸鈣吸附效果皆最好；三種吸附劑的吸附效果在10000 ppm較1000 ppm明顯。

2. pH值：在pH值11時，蚵殼粉的吸附效果最好，吸附率達83%；三種吸附劑的吸附效果在1000 ppm較10000 ppm明顯。

五、競爭吸附的環境下，碳酸鈣受到的影響較小。

六、與現行工業上常用去除銅離子方法比較

1. 離子交換樹脂：在吸附大濃度的硫酸銅水溶液的吸附能力較好，而蚵殼粉、蛋殼粉、碳酸鈣在吸附小濃度的硫酸銅水溶液的吸附能力較好。

2. 電鍍法：電鍍法在大濃度或小濃度的硫酸銅水溶液的去除效果皆比蚵殼粉、蛋殼粉、碳酸鈣的吸附效果。

未來展望：

1.吸附劑做成類似於餅狀，可更準確固定吸附劑的表面積

2.分析有機和無機吸附劑差異並改質以提升吸附效果

## 參考文獻

網絡資料

- Yuan, G. D., Theng, B. K. G., Churchman, G. J., & Gates, W. P. (2013). Clays and Clay Minerals for Pollution Control. Developments in Clay Science, 5, 587–644. <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/desorption>
- 中華中文百科全書 (n.d.). 吸附. <https://www.newton.com.tw/wiki/%E5%90%88%E9%99%84>
- 廣天源有限公司：導電度計說明書（型號：CON-BTA）<https://kuangtienyida-design.com.tw/d/file603f0e872c5d.pdf?n1=>
- SwissAquaTechnologies（2024）TDS是什麼？TDS數值越低表示水質越適合飲用嗎？<https://swissaqua.tw/tdsiswhat/>
- 中央研究院：可見光光度計使用手冊（型號：7205型）<https://pse.is7a.link>
- Alsharif, M. A. (2023). Understanding adsorption: Theories, techniques, and applications. <https://www.intechopen.com/online-first/1209166?form=MG0AV3>
- 廣濟獨立大學（2024）：成功從咖啡渣多餘糖中獲得電度的2克米的全糖糖果茶冰凍糖。 <https://www.you.ac.jp/hus/example20240628.html>
- Otsuka大塚科技股份有限公司：界線電位量測原理介紹[https://www.otsuka-tw.com/technical\\_articles-detail/](https://www.otsuka-tw.com/technical_articles-detail/)
- Alhijazi, M., Safaei, B., Zeeshan, Q., Asmael, M., Eyvazian, A., & Qin, Z. (2020). Recent developments in Luffa natural fiber composites: Review. Sustainability, 12(18), 7683.
- Hineke, M. T., Nys, Y., Guitron, J., Mann, K., Rodriguez-Navarro, A. B., & McKee, M. D. (2012). The eggshell: Structure, composition and mineralization. Frontiers in Bioscience, 17, 1266–1280
- Wu, O., Chen, J., Clark, M., & Yu, Y. (2014). Adsorption of copper to different biogenic oyster shell structures. Applied Surface Science, 311, 264–272. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.05.062>
- Umar, U., Vibhute, B., Sharma, N., & Sahay, A. (2022). Efficient removal of methylene blue dye by alkaline-treated banana stem biochar through adsorption method. Applied Ecology and Environmental Sciences, 10(4), 236–243.
- 維基百科 (n.d.). 咖啡渣. <https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E5%92%96%E5%95%A1%E5%98%A0>
- 博克特雜誌 (2024, March 23) 【兒茶素】茶葉中重要物質，2功效告訴你喝茶也助於減肥. 營養師林燕
- 維基百科 (n.d.). 纖維素. <https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E7%8A%A4%E7%BB%B4%E7%B4%A0>
- 小小整理網站 (2013, April) 多糖 (polysaccharides) 小整理網站 [Smallcollation](https://smallcollation.blogspot.com/2013/04/polysaccharides.html#gsc.tab=0). 於2025年3月8日檢索<https://smallcollation.blogspot.com/2013/04/polysaccharides.html#gsc.tab=0>
- 萬澤公司 (n.d.). 薑中所含薑醇及薑酚的快速高解析度分析. 萬澤公司官方網站. 於2025年3月8日檢索

書籍資料

- Knopf, D. A. (2021). Technical note: Adsorption and desorption equilibria from statistical thermodynamics and rates from transition state theory. Atmospheric Chemistry and Physics, 21(20), 15725.
- 吳漢志，吳漢波，金世宗（2017）。從分離二氧化碳吸附劑之吸附動力學探討。科學與工程技術期刊，13（2）。
- 高中化學翰林版108課綱高中化學（全），選修化學（IV），選修化學（V）

科展資料

- 劉鈺臻，劉若謙（2018）。反「薑」—「金」。探討薑素對於金屬離子的聚合作用。中華民國57屆中小學科學展覽會。
- 吳麗婷，林若微，林雅婷，蘇琳如（2005）。生物濾水器：文蛤、牡蠣厝金屬吸附能力。中華民國44屆中小學科學展覽會。
- 陳鴻裕，陳孟碩，陳詩桓（2013）。甲殼殼以結晶重金屬汙染。甲殼殼吸附重金屬。中華民國52屆中小學科學展覽會。
- 王樂恩（2014）。農業廢棄物再利用-吸附重金屬離子之研究。中華民國53屆中小學科學展覽會。
- 林朝暉，賴怡宏，林雅庭（2012）。臘力荷讓—以蛋殼膜粉吸附重金屬離子與色素之研究。中華民國51屆中小學科學展覽會。