

中華民國第 64 屆中小學科學展覽會  
作品說明書

---

高級中等學校組 化學科

團隊合作獎

050206

「Cu」、「LA」ter, my 「FREUND」—探討海藻酸鈉晶球吸附銅離子的最佳吸附條件及以等溫線與動力學方程式分析吸附現象

學校名稱： 國立新竹女子高級中學

|                         |              |
|-------------------------|--------------|
| 作者：<br>高二 葉庭瑜<br>高二 劉家宇 | 指導老師：<br>郭俊廷 |
|-------------------------|--------------|

關鍵詞： 海藻酸鈉晶球、等溫吸附模型、動力學分析

## 摘要

我們的實驗延續上次小論文（韓語軒等，2023）<sup>[1]</sup>以海藻酸鈉晶球吸附銅離子作為研究主題，並比較了各項變因（海藻酸鈉濃度、成形時間、吸附時間、是否搖晃、溫度、吸附之硫酸銅濃度）下的吸附效果，嘗試找出最佳吸附條件。

經過實驗，我們將數據經擬一級、擬二級動力學方程式分析後，以理論的吸附速率回推，得出吸附 90 分鐘已達吸附極限值的 99 %；同時繪製出兩方程的線性圖片，比較  $R^2$  值後判定此吸附更接近擬二級吸附。以不同濃度硫酸銅的結果代入 Langmuir 與 Freundlich 等溫方程後，也呈現良好的線性關係，可以用於分析我們的實驗結果。

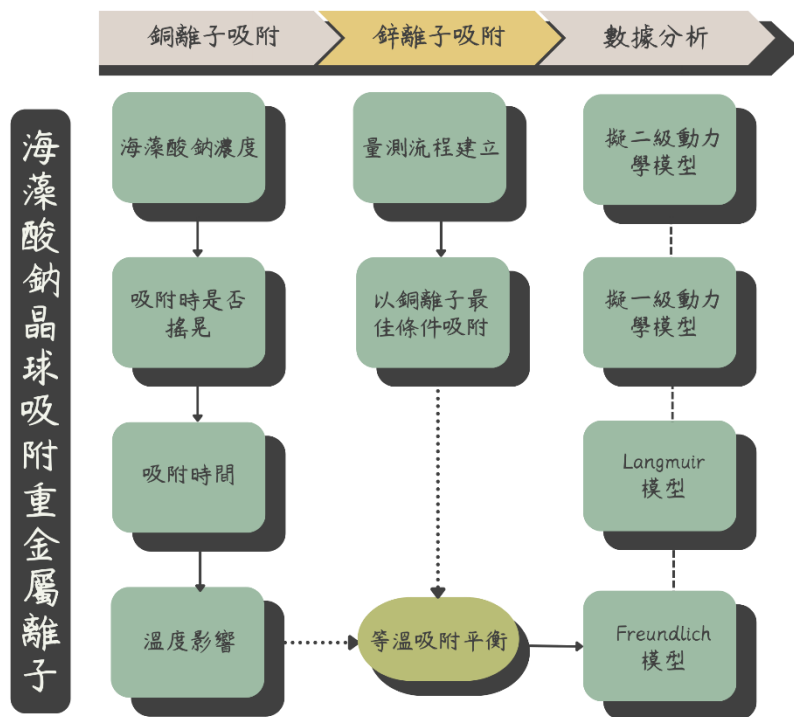
## 壹、前言

### 一、研究動機

近年來，水汙染已成為不可忽視的議題，全國環境水質監測資訊網<sup>[2]</sup>顯示各大縣市河流的監測數據，鉛、銅、鋅、鎳、鉻等金屬離子為主要汙染源，而在高中實驗室中最常見的兩種金屬離子分別是銅離子與鋅離子。過量的銅離子會造成嘔吐、肝腎損傷等健康問題；過量之鋅則對農業影響較大，甚至可能使土壤失去活性。因此我們選擇以鋅與銅作為海藻酸鈉晶球吸附之離子，並研究最佳吸附條件。然而，在過去許多類似的研究中，皆只有呈現最終實驗結果，並未分析吸附的過程，故我們利用幾個常見的等溫線與動力學方程式擬合數據，探討海藻酸鈉晶球的吸附特性。

### 二、研究目的（如圖一）

- （一） 探討海藻酸鈉晶球吸附硫酸銅水溶液之最佳條件
- （二） 以 Langmuir 與 Freundlich 等溫吸附線分析海藻酸鈉晶球在硫酸銅與硫酸鋅水溶液吸附過程
- （三） 以擬一級、擬二級動力學分析海藻酸鈉晶球在硫酸銅與硫酸鋅水溶液吸附過程

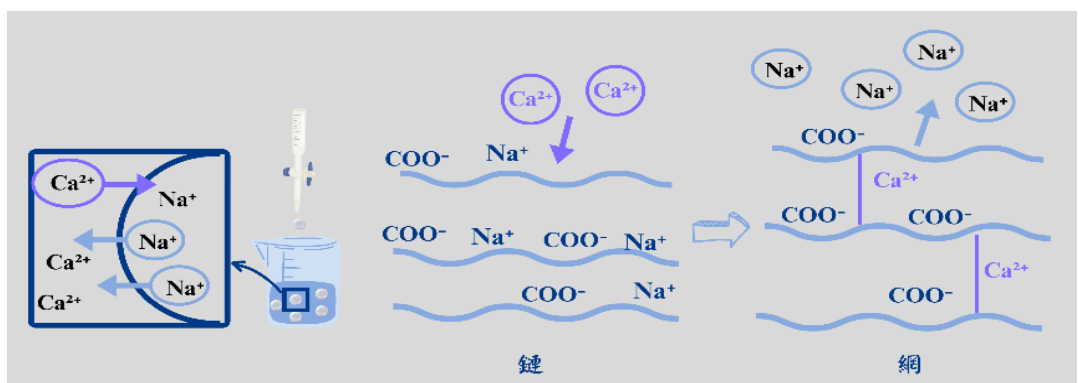


圖一、研究架構圖（研究者繪製）

### 三、文獻回顧

#### （一） 海藻酸鈉晶球的形成（交聯作用）

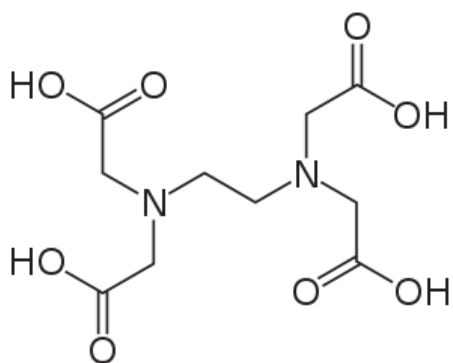
在海藻酸鈉溶液滴入氯化鈣水溶液的瞬間，溶液中鈣離子會取代原本結合在海藻酸鈉羧酸根上的鈉離子，而二價鈣離子會與海藻酸鈉鏈狀結構中不同區域的羧酸根結合，使原本為鏈狀的海藻酸鈉交聯成更加穩固的網狀構造，最後形成透明膜或晶球。



圖二、交聯作用示意圖（研究者繪製）

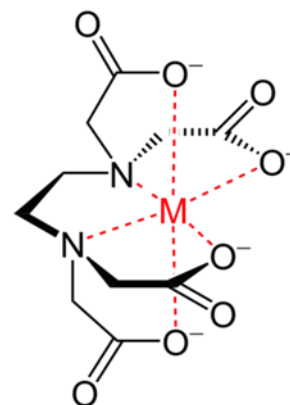
## (二) 螯合作用應用—吸附金屬離子、鋅離子定量

1. 吸附金屬離子：將已經與  $\text{Ca}^{2+}$  結合的海藻酸鈉晶球，浸泡在  $\text{Cu}^{2+}$  或  $\text{Zn}^{2+}$  中，羧酸根原本如同螃蟹的螯一般將  $\text{Ca}^{2+}$  抓住，浸泡在溶液中一陣子後， $\text{Ca}^{2+}$  將置換成  $\text{Cu}^{2+}$  或  $\text{Zn}^{2+}$ ，從而達到吸附溶液中重金屬離子的效果。
2. 鋅離子定量：因為鋅離子無色，本身無法透過可見光紫外光光譜儀定量其濃度，所以我們改使用錯合滴定定量鋅離子濃度。以羊毛銻黑 T 作為指示劑，當其與鋅離子結合時呈現紫紅色，沒有與鋅離子結合的羊毛銻黑 T 則為藍色，而因為 EDTA 與鋅離子的螯合能力比羊毛銻黑 T 來的強，當溶液轉變為紫色時即為滴定終點。透過 EDTA 螯合鋅離子的反應式： $\text{EDTA}(\text{Na})_2 + \text{Zn}^{2+} \rightarrow \text{EDTA}(\text{Zn}) + 2\text{Na}^+$ ，利用標準 EDTA 溶液計算水溶液中剩餘的鋅離子含量。



圖三、EDTA 結構式<sup>[3]</sup>

(圖片來源：維基百科—乙二胺四乙酸)



圖四、EDTA 與金屬螯合物示意圖<sup>[4]</sup>

(圖片來源：維基百科—螯合物)

## (三) 比爾定律（銅離子定量）：

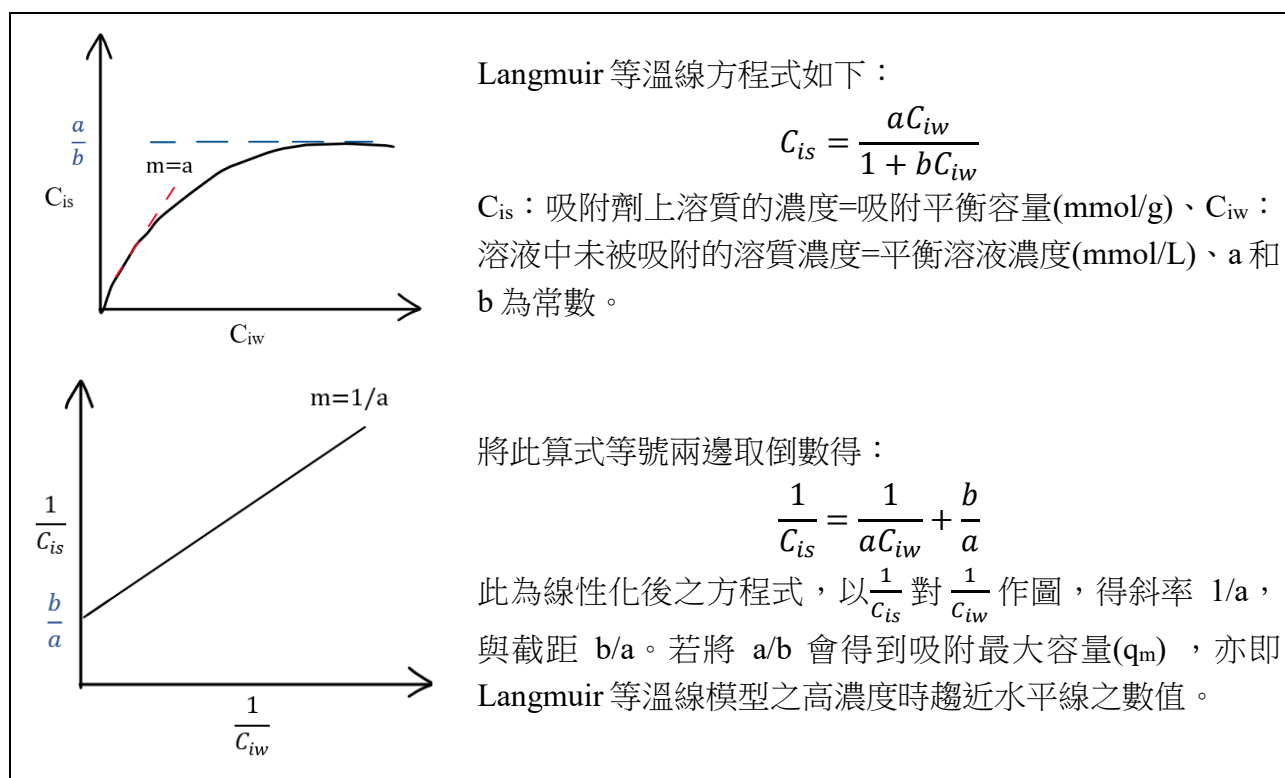
光線在通過溶液時會被特定物質吸收，導致光強度在經過溶液後會減少，吸光度可以透過光強度通過溶液前後的比值取對數而得： $A = -\log_{10} \frac{I}{I_0}$ （A：吸光度、I：通過溶液後的光強度、 $I_0$ ：通過溶液前的光強度），而吸光值會受到溶液中吸光物質的莫耳消光係數、該物質濃度與光線經過溶液的距離影響，故比爾定律的公式為  $A = \epsilon b C$ （A：吸光度、b：光徑長、C：溶液濃度、 $\epsilon$ ：該物質之莫耳消光係數）。我們便能利用比爾定律定量溶液中銅離子含量。

銅離子本身為淡藍色，在可見光紫外光光譜儀中 810 nm 的波長中有最大吸收峰，而若使  $\text{Cu}^{2+}$  與  $\text{NH}_3$  結合可形成深藍色的銅氨錯離子( $\text{Cu}(\text{NH}_3)_4^{2+}$ )，其反應式為： $\text{Cu}^{2+}(\text{aq}) + 4\text{NH}_3(\text{aq}) \rightarrow \text{Cu}(\text{NH}_3)_4^{2+}(\text{aq})$ ，此時的吸收峰波長藍移至 605 nm，在相同濃度時具有更明顯的顏色，意即銅氨錯離子比起銅離子具有更高的消光係數，可以提升光譜儀偵測銅離子含量的靈敏度。

#### (四) 等溫吸附模型—Langmuir 模型與 Freundlich 模型<sup>[5]</sup>

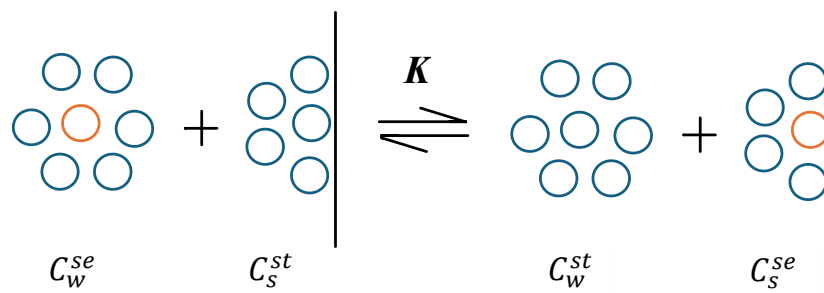
##### 1. Langmuir 等溫吸附模型：

Langmuir 認為吸附劑是表面單層吸附的，且吸附劑上的每一個吸附點位的大小與能量皆相同，吸附點位之間不會相互影響。在符合 Langmuir 模型的吸附圖示（如圖五）。在稀薄溶液時，吸附劑上吸附質的濃度會與溶液當中吸附質的濃度成正比，而當溶液中的吸附質濃度愈高，吸附劑上吸附質的濃度會愈趨近於飽和，從此假設來看，代表吸附劑表面的所有吸附點位都已經占滿了。



圖五、Langmuir 等溫方程式圖（研究者繪製）

而根據 Langmuir 的假設，我們可以將吸附模型用以下示意圖表示：



圖六、平衡常數在吸附過程之示意圖（研究者繪製）

其中藍色為溶劑分子、橘色為吸附質、直線則為吸附劑的表面（有固定的位點）

吸附質從溶劑中吸附到吸附劑上的過程（如圖六）可以用以下平衡常數表達：

$$C_w^{se} + C_s^{st} \rightleftharpoons C_w^{st} + C_s^{se}, K = \frac{C_s^{se} C_w^{st}}{C_w^{se} C_s^{st}}$$

其中， $C_w^{se}$ 代表溶液中的吸附質濃度、 $C_s^{st}$ 代表吸附劑上的溶劑濃度、 $C_w^{st}$ 代表溶液中的溶劑濃度、 $C_s^{se}$ 代表吸附劑上的吸附質濃度。

由於 $C_w^{st}$ 幾乎不變，將其視為常數與  $K$  合併，故平衡常數可再簡化表示成

$$K' = \frac{K}{C_w^{st}} = \frac{C_s^{se}}{C_w^{se} C_s^{st}}, \text{再透過吸附劑表面總濃度 } (C_{total}) \text{ 固定 } C_{total} = C_s^{se} + C_s^{st}, \text{ 將}$$

$$\text{其帶入 } K' \text{ 可得右式：} K' = \frac{K}{C_w^{st}} = \frac{C_s^{se}}{C_w^{se} C_s^{st}} = \frac{C_s^{se}}{C_w^{se} \times (C_{total} - C_s^{se})}$$

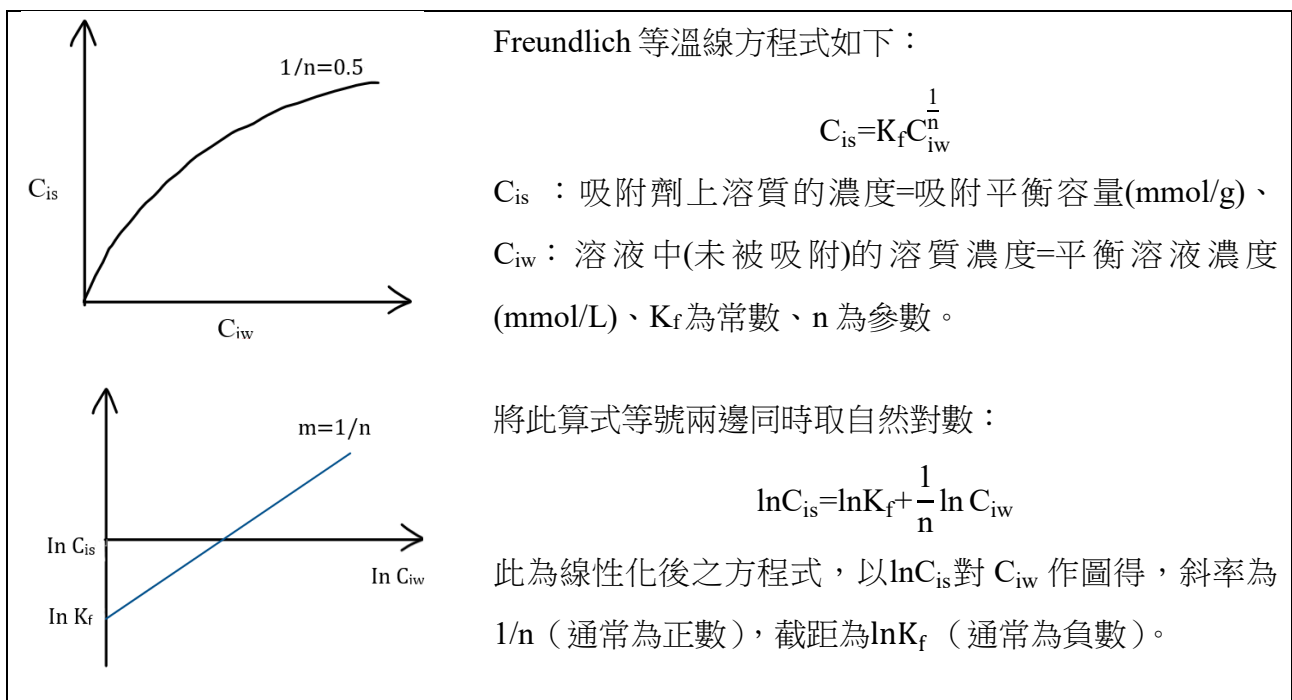
重新整理後得：

$$C_s^{se} = \frac{K' \times C_{total} \times C_w^{se}}{1 + K' C_w^{se}} \quad (\text{Langmuir 原方程式：} C_{is} = \frac{a C_{iw}}{1 + b C_{iw}})$$

與原本 Langmuir 方程相互比對得知常數之意義， $a$  為親和力因素( $C_{total} * K'$ )，而  $b$  吸附平衡常數( $K'$ )。

## 2. Freundlich 等溫吸附模型：

Freundlich 經驗方程式認為吸附劑表面為不均勻且可多層吸附，點位之間會互相影響，符合 Freundlich 模型的吸附圖示（圖七）。與 Langmuir 等溫吸附方程相同的是，吸附劑上吸附質的濃度隨著溶液濃度增加而提升，斜率逐漸下降。然而，在稀薄溶液時，圖形並沒有線性關係，且溶液在高濃度時，吸附劑上吸附質的濃度會以略微的幅度提高，故曲線不會趨於水平，由此可推測，吸附劑並沒有吸附最大容量，表面會不斷提供點位給吸附質。



圖七、Freundlich 等溫方程式圖（研究者繪製）

在 Freundlich 吸附等溫線模型中， $1/n$  為吸收強度參數，數值介在 0 與 1 之間，並在等於 0.5 時，完全貼合 Freundlich 吸附等溫線模型；數值越高代表吸收強度也越強。

$K_f$  為比例常數（單位： $(\text{mmol/g})/(\text{mmol/L})^{1/n}$ ）正比於吸附容量， $K_f$  越大吸附劑能吸收越多吸附質。

## (五) 動力學反應方程式<sup>[6]</sup>

### 1. 擬一級動力學

擬一級動力學反應呈現化學反應速率與反應物濃度一次方的關係。

擬一級動力學方程式：

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t)$$

對此方程式作積分，得出下列方程式，並以  $\ln(q_e - q_t)$  對  $t$  作散布圖，此圖的趨勢線斜率為  $-k_1$ 。

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t$$

( $k_1$ ：吸附速率常數(1/min)、 $q_t$ ：某特定時間海藻酸鈉的吸附量(mg/g))

### 2. 擬二級動力學

擬二級動力學反應會呈現反應速率與某反應物濃度的平方關係。

擬二級動力學方程式：

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2$$

對此方程式作積分，即可得線性關係，以  $\frac{t}{q_t}$  對  $t$  作散布圖，並由趨勢線斜率  $\frac{1}{q_e}$

推得吸附劑平衡容量、由截距  $\frac{1}{k_2 q_e^2}$  推得吸附速率常數  $k_2$ 。

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e}$$

## 貳、研究設備與器材

### 一、藥品

硫酸銅 (CuSO<sub>4</sub>)、海藻酸鈉 (Sodium alginate, SA)、氯化鈣 (CaCl<sub>2</sub>)、氨水 (NH<sub>3</sub>)、硫酸鋅 (ZnSO<sub>4</sub>)、乙二胺四乙酸二鈉 (Na<sub>2</sub>EDTA)、羊毛鉻黑 T (Eriochrome Black T, EBT)、氯化銨 (NH<sub>4</sub>Cl)。



## 二、器材

分光光度計 (OPTIZEN POP)、恆溫箱 (LM-450D)、電子秤、燒杯、容量瓶、滴定管、抽濾裝置、微量分注器、電磁加熱攪拌器、漏斗、離心機、離心管、濾紙、試管。

## 參、研究過程與方法

### 一、建立標準流程

- (一) 製備海藻酸鈉水溶液、1 %氯化鈣水溶液與 0.04 M 硫酸銅與硫酸鋅水溶液。
- (二) 使用滴定管逐滴將海藻酸鈉水溶液滴入氯化鈣水溶液中靜置。
- (三) 取出晶球後，用蒸餾水清洗並以抽濾裝置與紙巾吸除多餘水分。
- (四) 將 5 g 晶球放入 20 mL、0.04 M 硫酸銅水溶液中，在恆溫箱放置一段時間。
- (五) 取出被吸附後的硫酸銅水溶液，並將水溶液離心。
- (六) 將離心後的硫酸銅水溶液添加等體積 3 M 氨水，使用分光光度計測量在 605 nm 的吸光值（同一組數據測量三至四次，並以平均值呈現結果）。

### 二、海藻酸鈉吸附重金屬離子實驗最佳化

- (一) 比較不同濃度海藻酸鈉晶球吸附銅離子效果  
將標準流程步驟（一）改為配製 0.5 %、1 %、2 %、3 %、4 %、5 %之海藻酸鈉水溶液（其他不同變因實驗皆配製 5 %）。其餘部分依標準流程實驗。
- (二) 比較搖晃與否對海藻酸鈉晶球吸附銅離子效果  
將標準流程步驟（四）改為將晶球分別放入同溫度下有或沒有搖晃的恆溫箱內（其他不同變因實驗皆以 120 rpm 搖晃）。其餘部分依改良後標準流程進行實驗。
- (三) 比較不同吸附時間下海藻酸鈉晶球吸附銅離子效果  
將標準流程步驟（四）改為將晶球分別靜置於 20 mL 硫酸銅 15、30、60、90、120、180、240 分鐘（其他不同變因實驗皆靜置 90 分鐘）。其餘部分依改良後標準流程進行實驗。

(四) 比較不同溫度海藻酸鈉晶球吸附銅離子效果

將標準流程步驟(四)改為將晶球放置於 25 °C、35 °C、45 °C 的 20 mL 硫酸銅(其他不同變因實驗皆置於 25 °C)。其餘部分依改良後標準流程進行實驗。

(五) 海藻酸鈉晶球吸附硫酸鋅水溶液實驗

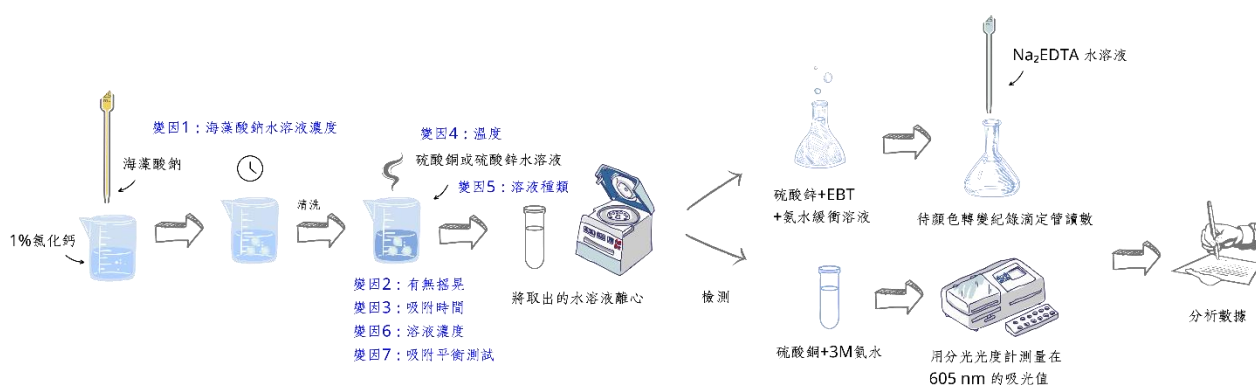
1. 將標準流程步驟(五)的吸附溶液改為硫酸鋅(5 %海藻酸鈉晶球、在氯化鈣靜置 10 分鐘、吸附 90 分鐘、吸附時搖晃、吸附溫度為 25°C)。
2. 將被吸附過後硫酸鋅水溶液取出，並加入適量氨水緩衝溶液與羊毛銨黑 T。
3. 利用標準  $\text{Na}_2\text{EDTA}$  溶液滴定，待顏色轉變紀錄滴定量，並計算鋅離子濃度。

(六) 海藻酸鈉晶球在不同濃度之硫酸銅水溶液吸附

將步驟(四)中的晶球分別放置於 0.02 M、0.04 M、0.08 M、0.16 M、0.32 M 及 0.64 M 的 20 mL 硫酸銅水溶液，在恆溫箱搖晃 1 至 10 天，並在第一、第四、第十天取出測量。

(七) 取得海藻酸鈉晶球吸附硫酸銅水溶液平衡容量

將步驟(四)改為將晶球分別靜置於 20mL 硫酸銅 1 至 10 天，每天取出水溶液，並測量吸附後濃度。其餘部分依改良後標準流程進行實驗。



圖八、實驗流程圖(研究者繪製)

### 三、數據分析

#### (一) 檢量線製作

先配製出 0.64 M 的硫酸銅溶液，再分別稀釋為 0.32 M、0.16 M、0.08 M、0.04 M、0.02 M。測量吸光值後，便可得出以濃度對應吸光值之檢量線。

#### (二) 動力學、等溫線代數解釋

在動力學分析中，我們會用到的變數與常數如下：

1. 該時刻（某分鐘）海藻酸鈉晶球的銅離子吸附量（ $q_t$ ，單位：mmol/g）
2. 平衡時海藻酸鈉晶球的銅離子飽和吸附容量（ $q_e$ ，單位：mmol/g）
3. 反應速率常數（ $k_1$ ，單位：1/min）與（ $k_2$ ，單位：g/mmol\*min）
4. 反應速率方程計算：反應速率（ $R$ ，單位：g\*mmol\*min<sup>-1</sup>）、反應物濃度（ $A(q_e - q_t)$ ，單位：mmol/g）

在吸附模型分析中，我們會用到的變數與常數如下：

1. 吸附平衡時，吸附劑上溶質的濃度（ $C_{is}$ ，單位：mmol/g）
2.  $C_{is}$ 計算：溶液初始濃度（ $C_{iw}^0$ ，單位：mmol）、吸附劑質量（ $m_s$ ，單位：g）、溶液體積（ $v_w$ ，單位：L）
3. 吸附平衡時，溶液中未被吸附的溶質濃度（ $C_{iw}$ ，單位：mmol/g）
4. 吸附劑最大的吸附容量（ $q_m$ ，單位：mmol/g）
5. 常數  $a$ 、 $b$ 、 $K_f$ ；參數  $n$

#### (三) 擬二級動力學方程式

透過實驗最佳化中的第 2 個實驗，我們能藉此分析海藻酸鈉晶球吸附銅離子的反應速率是否接近二級反應，透過檢量線換算得知各時刻時的銅離子濃度，並以公式  $q_t = (C_{iw}^0 - C_{iw}) \cdot \frac{v_w}{m_s}$  得出  $q_t$ ，再將  $t/q_t$  並對  $t$  做圖，即可從斜率推得平衡時海藻酸鈉晶球的銅離子飽和吸附容量（ $q_e$ ），並由截距反推二級的速率常數（ $k_2$ ），如圖九-1。再將速率常數（ $k_2$ ）帶入反應速率方程  $R = k_2 [A]^2$ 。

(四) 擬一級動力學方程式

透過步驟(三)將實驗數據進行擬二級運算後，能藉此求得  $q_e$ ，將  $q_e$  與  $q_t$  的差值取自然對數，並將其對時間  $t$  作圖，即可從斜率中得到一級的速率常數，如圖九-2。

(五) Langmuir 吸附等溫線

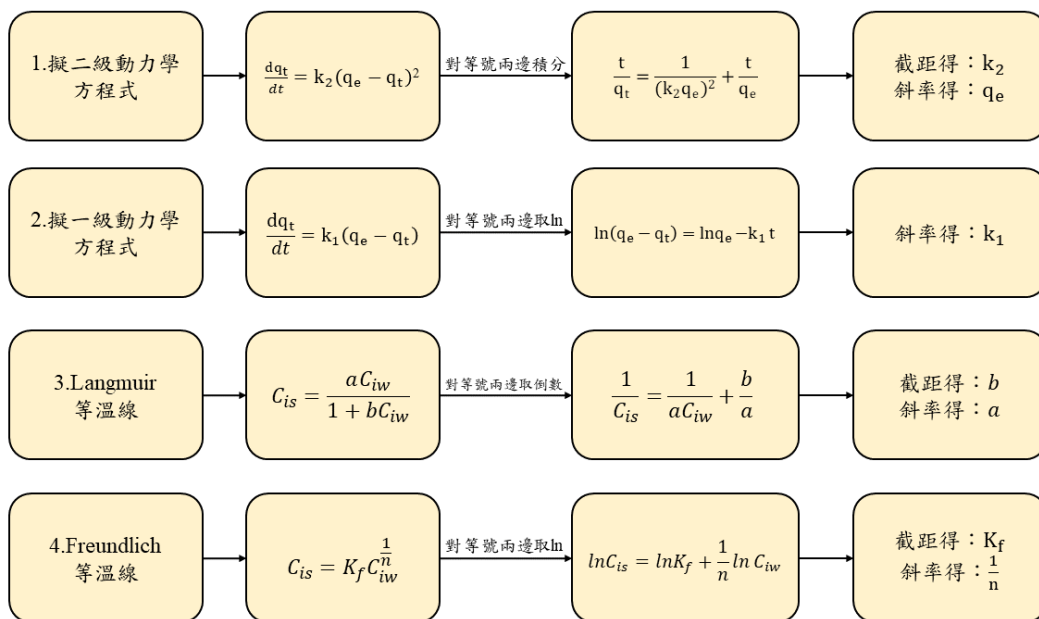
透過步驟(一)檢量線換算得出吸附平衡時溶液濃度 ( $C_{iw}$ )，利用公式

$$C_{is} = (C_{iw}^0 - C_{iw}) \cdot \frac{V_w}{m_s}$$

得出  $C_{is}$ ，將  $C_{is}$  對  $C_{iw}$  作圖，此圖為 Langmuir 尚未線性化的方程式。再以  $1/C_{is}$  對  $1/C_{iw}$  作圖可得線性化的 Langmuir 等溫方程，可先從斜率得到常數  $a$ ，並由截距得到常數  $b$ ，將  $b$  除以  $a$  得吸附劑最大吸附容量( $q_m$ )，如圖九-3。

(六) Freundlich 吸附等溫線

透過步驟(五)以檢量線得出  $C_{is}$ ，將  $C_{is}$  對  $C_{iw}$  作圖，此圖為 Freundlich 方程式尚未線性化的圖形。再將  $C_{is}$  與  $C_{iw}$  皆取自然對數並作圖則可得線性化的 Freundlich 等溫方程，由斜率求得  $n$ ，而由截距可求得常數  $K_f$ ，如圖九-4。



圖九、計算過程示意圖 (研究者繪製)

## 肆、研究結果

### 一、建立標準流程

目前的實驗步驟為改變了以下幾項後得出的最佳流程。

- (一) 起初以玻璃滴管人工滴 100 顆晶球分裝，但人為操作會導致晶球重量不同，經修正後，我們統一滴定製作後，再各秤 5 g 分裝。(如圖十)
- (二) 原先會直接將過濾後的晶球放入硫酸銅水溶液中吸附，但表面殘留水分會影響吸光值判定，進而影響實驗測量結果產生誤差，經修正後，我們以抽濾裝置吸取大部分水分，再以紙巾擦拭。(如圖十一)
- (三) 經過海藻酸鈉晶球吸附後的硫酸銅水溶液會有部分海藻酸鈉碎屑，沉澱在溶液底部或懸浮在溶液中，從而影響吸光值。為避免受到懸浮液的影響，我們在檢測吸光值之前都會對取出的硫酸銅溶液，離心五分鐘後，再取上清液做測量。(如圖十二)



圖十、滴定晶球  
(研究者拍攝)



圖十一、抽濾過程  
(研究者拍攝)

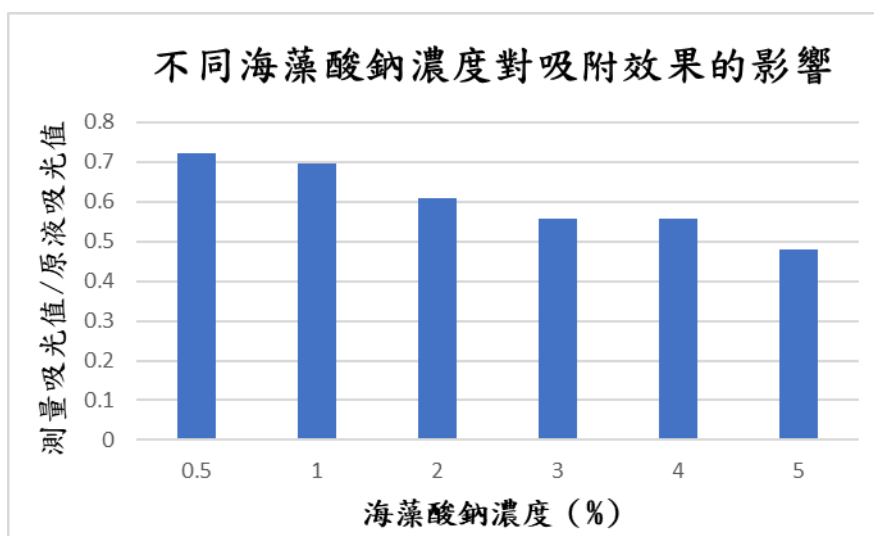


圖十二、沉澱  
(研究者拍攝)

- (四) 進行吸附平衡實驗時需將溶液放在恆溫箱數日，硫酸銅溶液會因水分蒸發導致後續吸收值測量時，硫酸銅濃度同時受晶球吸附與水分蒸發的雙重影響。為避免蒸發影響，我們會先秤量放置前的重量，並包上保鮮膜進行吸附實驗。待取出後，再以蒸餾水補足蒸發的水分。實驗結果也顯示，放置在 25°C 恆溫箱 4 天，溶液重量皆減少 0.8 至 1.2 克之間，而溫度較高或時間較久者重量減少更多。

## 二、海藻酸鈉晶球吸附重金屬離子實驗最佳化

### (一) 比較不同濃度海藻酸鈉晶球吸附銅離子效果的影響



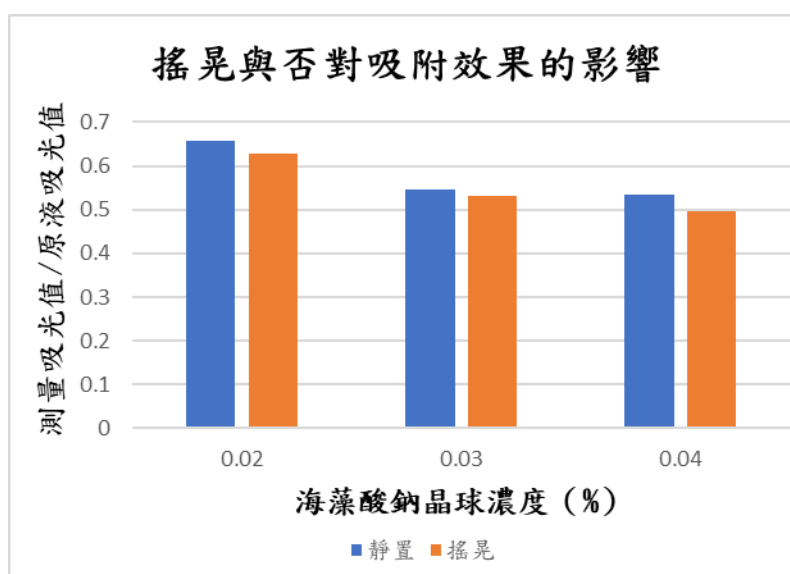
圖十三、不同海藻酸鈉濃度對吸附效果影響長條圖（研究者繪製）

表一、不同海藻酸鈉濃度對吸附效果數據表

| 濃度 (%)          | 0.5*  | 1*    | 2     | 3     | 4     | 5     |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 測量吸光值/<br>原液吸光值 | 0.721 | 0.697 | 0.610 | 0.557 | 0.560 | 0.481 |

\*註：0.5%僅實驗一次，1%僅實驗二次，其餘濃度皆四次以上

### (二) 比較搖晃與否對海藻酸鈉晶球吸附銅離子效果的影響

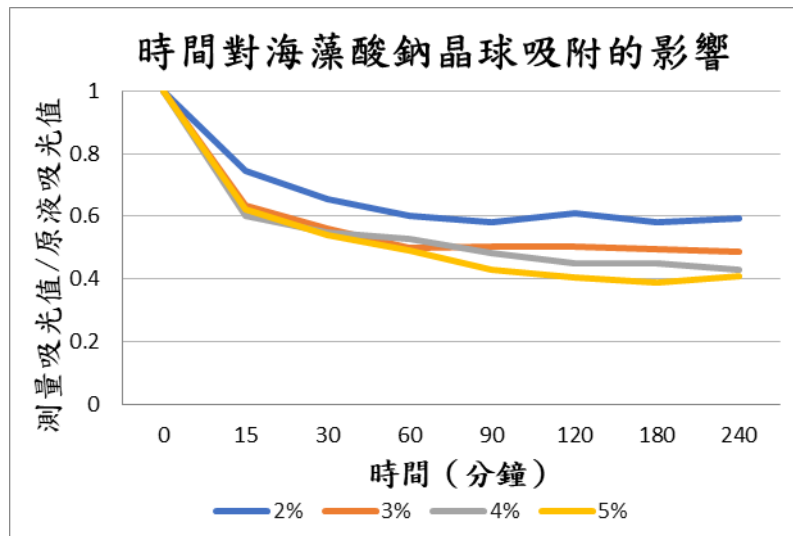


圖十四、搖晃與否對海藻酸鈉晶球吸附效果長條圖（研究者繪製）

表二、搖晃與否對海藻酸鈉晶球吸附效果數據表

| 海藻酸鈉濃度 (%)       | 2 %   | 3 %   | 4 %   |
|------------------|-------|-------|-------|
| 測量吸光值/原液吸光值 (靜置) | 0.656 | 0.54  | 0.534 |
| 測量吸光值/原液吸光值 (搖晃) | 0.627 | 0.532 | 0.496 |

(三) 比較不同吸附時間下海藻酸鈉晶球吸附銅離子效果

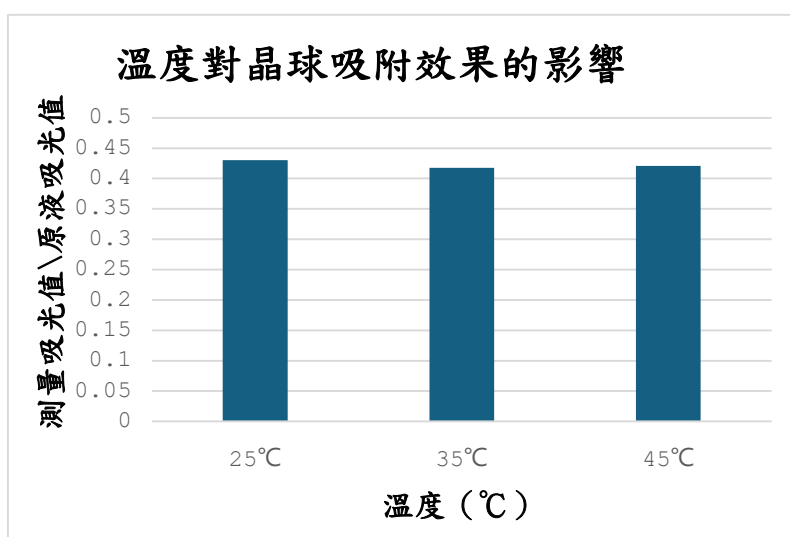


圖十五、吸附時間對海藻酸鈉晶球吸附效果折線圖 (研究者繪製)

表三、吸附時間對海藻酸鈉晶球吸附效果數據表

| 分鐘<br>濃度 | 15    | 30    | 60    | 90    | 120   | 180   | 240   |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 2 %      | 0.744 | 0.656 | 0.603 | 0.579 | 0.608 | 0.582 | 0.595 |
| 3 %      | 0.633 | 0.561 | 0.5   | 0.504 | 0.502 | 0.494 | 0.487 |
| 4 %      | 0.602 | 0.55  | 0.525 | 0.483 | 0.451 | 0.449 | 0.427 |
| 5 %      | 0.622 | 0.539 | 0.492 | 0.429 | 0.405 | 0.388 | 0.41  |

(四) 比較不同溫度海藻酸鈉晶球吸附銅離子效果

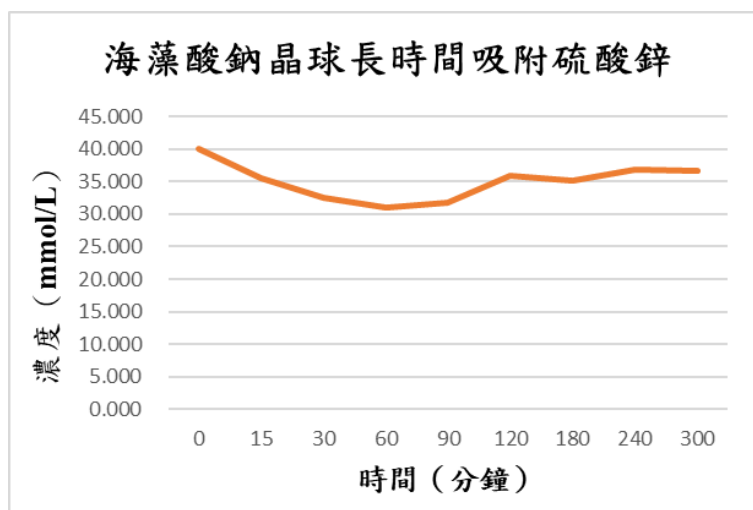


圖十六、溫度對海藻酸鈉晶球吸附效果長條圖 (研究者繪製)

表四、溫度對海藻酸鈉晶球吸附效果數據表

| 溫度 (°C)     | 25    | 35    | 45    |
|-------------|-------|-------|-------|
| 測量吸光值/原液吸光值 | 0.430 | 0.418 | 0.421 |

(五) 海藻酸鈉晶球吸附硫酸鋅水溶液實驗流程表



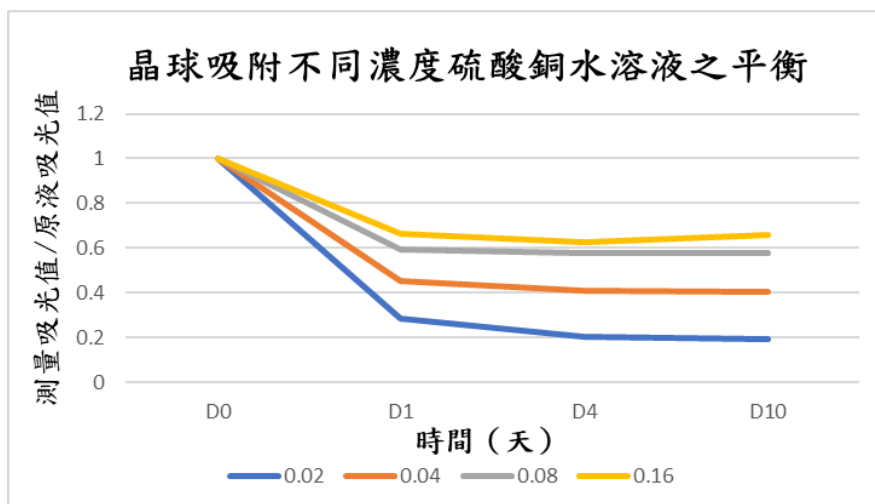
圖十七、海藻酸鈉晶球長時間吸附硫酸鋅水溶液折線圖 (研究者繪製)

表五、海藻酸鈉晶球長時間吸附硫酸鋅水溶液數據表

| 時間 (分鐘)  | 15     | 30     | 60     | 90     | 120    | 180    | 240    | 300    |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 濃度(mmol) | 35.500 | 32.583 | 31.000 | 31.667 | 35.917 | 35.139 | 36.750 | 36.583 |



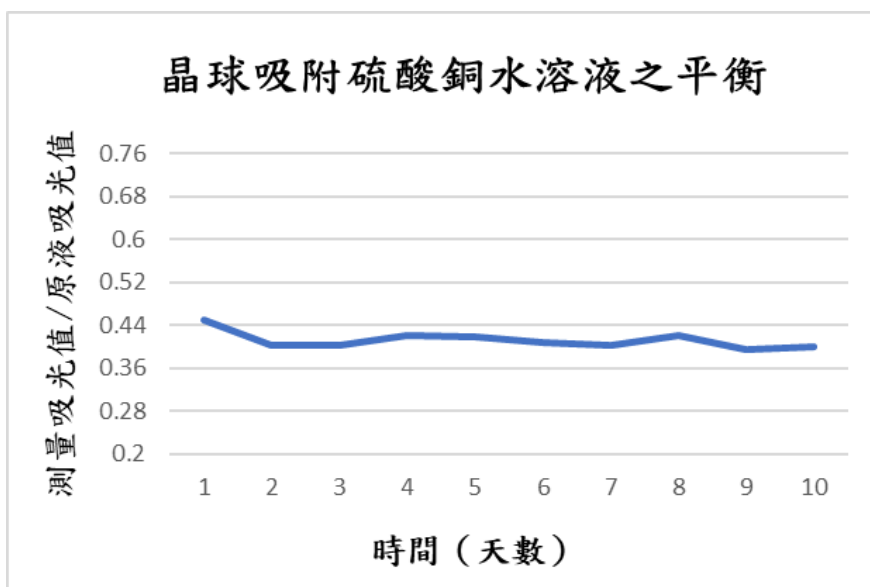
(六) 取得海藻酸鈉晶球吸附硫酸銅水溶液平衡容量



圖十八、海藻酸鈉晶球吸附不同濃度硫酸銅水溶液平衡之折線圖（研究者繪製）

表六、海藻酸鈉晶球吸附不同濃度硫酸銅水溶液平衡數據表

| 天數 \ 濃度(M) | 0.02  | 0.04  | 0.08  | 0.16  | 0.32  | 0.64  |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| D1         | 0.285 | 0.455 | 0.591 | 0.665 | -     | -     |
| D4         | 0.205 | 0.407 | 0.578 | 0.627 | 0.782 | 0.728 |
| D10        | 0.192 | 0.403 | 0.579 | 0.657 | -     | -     |



圖十九、海藻酸鈉晶球吸附硫酸銅水溶液之平衡折線圖（研究者繪製）

表七、海藻酸鈉晶球吸附硫酸銅水溶液之平衡數據

|                 |       |       |       |       |       |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 天數              | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     |
| 測量吸光值/<br>原液吸光值 | 0.449 | 0.401 | 0.402 | 0.420 | 0.418 |
| 天數              | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    |
| 測量吸光值/<br>原液吸光值 | 0.443 | 0.444 | 0.452 | 0.436 | 0.438 |

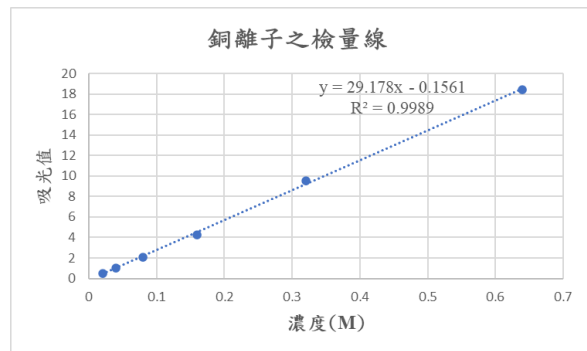
### 三、數據分析

#### (一) 檢量線製作 (圖二十)

在測量 0.16M、0.32M 與 0.64M 時，由於其吸光值會超出分光光度計檢測範圍，故我們先將其稀釋再進行檢測。表八中的吸光值為透過稀釋倍率換算的結果。

表八、濃度對應吸光值之數據表

| 濃度(M) | 吸光值   |
|-------|-------|
| 0.02  | 0.517 |
| 0.04  | 1.03  |
| 0.08  | 2.059 |
| 0.16  | 4.254 |
| 0.32  | 9.568 |
| 0.64  | 18.4  |



圖二十、銅離子檢量線 (研究者繪製)

## 伍、討論

### 一、海藻酸鈉吸附重金屬離子實驗最佳化

#### (一) 不同海藻酸鈉(SA)濃度對吸附效果的影響

在進行銅離子吸附實驗前，我們認為海藻酸鈉濃度會對晶球的吸附能力造成影響，且濃度越高吸附能力越好，故從濃度 0.5 % 開始製作，並依序增加濃度到 5 %。第一次實驗過程中我們確定了 0.5 % 和 1 % 的晶球不易成形，即交聯作用後晶球無法形成球狀（如圖二十二），推論為低濃度的海藻酸鈉羧酸根不足，使其不能形成夠穩定之網狀結構，故後續不再重複其濃度實驗。而在實驗中，我們發現 5 % 晶球吸附銅離子的效果最佳，我們推測原因為越高濃度的海藻酸鈉有越多羧酸根可螯合銅離子，且能交聯成更穩固的網狀結構。如圖二十一，0.5 % 晶球密度較低，因此浮在水面上；而 1 % 晶球密度與氯化鈣水溶液相似，因此分散在整杯溶液中。然而，海藻酸鈉的溶解度有限，製作 5 % 海藻酸鈉溶液已具有挑戰，故我們不往更高濃度進行實驗。



(由左至右依序為：3%、2%、1%、0.5%)

圖二十一、不同濃度海藻酸鈉晶球  
(研究者拍攝)



圖二十二、1 % 晶球不易成形圖  
(研究者拍攝)

#### (二) 比較搖晃與否對海藻酸鈉晶球吸附銅離子效果的影響

由於在多處實驗流程中涉及搖晃或攪拌的步驟，因此我們想探討若在吸附的同時進行搖晃，是否會提升吸附的速率或能力，且我們預測搖晃會增加晶球的吸附能力。

由圖十四可得知，無論海藻酸鈉晶球濃度為何，搖晃的吸附效果皆較靜置的效果為佳，推測是因搖晃使晶球吸附表面均勻接觸溶液，增加海藻酸鈉吸附點位與銅離子的碰撞機會，同時符合實驗（一）的結果，海藻酸鈉晶球濃度愈高，銅離子的吸附量也愈多。

### （三） 比較不同吸附時間下海藻酸鈉晶球吸附銅離子效果

我們以 2 %、3 %、4 %、5 % 等海藻酸鈉晶球，分別進行銅離子吸附實驗，吸附時間為 15、30、60、90、120、180、240 分鐘，以尋找最適當的吸收時間。由圖十五得知，四種濃度的海藻酸鈉晶球在 15 分鐘前皆有顯著的銅離子吸附效果，且隨著時間皆有持續吸附的現象，並在約 90 分鐘後趨於穩定，雖然後續仍能持續吸附銅離子，但已不如前 90 分鐘的吸收效果明顯，因此綜合吸附效果與時間成本的考量，我們選擇以 90 分鐘作為最佳吸附時間。另一部分，我們知道 90 分鐘尚未達到吸附平衡，在後續實驗中，我們還會再以日為單位觀察海藻酸鈉晶球吸附銅離子的平衡濃度。

### （四） 比較不同溫度海藻酸鈉晶球吸附銅離子效果

欲探討環境溫度對於海藻酸鈉吸收銅離子效果的影響，我們分別在 25 °C、35 °C、45 °C 進行吸附實驗，由圖十六可知，溫度對海藻酸鈉晶球吸附並未有太大的影響，各組之間吸附效果只有極小的差距。然而，在我們過去研究中，曾發現隨著溫度越高效果越差（韓語軒等，2023）<sup>[1]</sup>。但這就如同我們在實驗（一）中提到的，水分蒸發其實亦會對結果造成影響，我們推測除了高溫會破壞晶球結構，在吸附的過程水可能會汽化成水蒸氣，使檢測出來的數值隨溶液中銅離子濃度增加，造成我們當時認為高溫的吸附效果較差。

#### (五) 海藻酸鈉晶球吸附硫酸鋅水溶液實驗流程

在海藻酸鈉晶球吸附硫酸鋅水溶液的實驗中，我們發現滴定出的數據並未有像晶球吸附硫酸銅水溶液持續下降並達到平衡的趨勢（如圖十七），而是呈現上下起伏的吸附效果。經過討論，發現在實驗過程中檢測的環節有些問題，因為晶球在吸附硫酸鋅水溶液時，會將鈣離子釋出並與鋅離子結合，但 EDTA 在 pH=10 的緩衝環境下，同時會和鈣離子與鋅離子錯合，進而無法從滴定數據中判斷結果，以表五為例，在 90 分鐘前硫酸鋅水溶液濃度似乎有持續下降，但到 120 分鐘卻又急遽回升。由於測出結果的不準確，無法將此數據代入動力學模型分析，故在未來我們會嘗試找出可以測定硫酸鋅水溶液濃度的方法。

#### (六) 取得海藻酸鈉晶球吸附硫酸銅水溶液平衡容量

為了在後續的實驗中透過 Langmuir 與 Freundlich 等溫吸收模型探討海藻酸鈉晶球吸附銅離子的微觀情形，我們配製不同濃度的硫酸銅水溶液，並拉長海藻酸鈉晶球浸泡在硫酸銅溶液的時間，進行長時間的銅離子吸附實驗。起初我們只測量 0.02 至 0.16 M 的平衡量，後來新增了 0.32 M 與 0.64 M，由於已經確定在第四天能達到吸附平衡，故此二濃度直接吸收四天做為平衡量的數據。由圖十九可得知，5 %海藻酸鈉晶球大約在第四天就接近吸附平衡，且一定量的晶球在硫酸銅水溶液濃度低時吸附效果較好，反之亦然。推測造成此現象的原因是因為海藻酸鈉的吸附點位有限，因此銅離子濃度雖增加，吸收量卻無法因此上升，從而在表格中觀察到在較高濃度銅離子時海藻酸鈉具有較低的吸收效果。

## 二、數據分析

我們參考先前的小論文<sup>[7]</sup>，使用兩種方式分析海藻酸鈉晶球吸收銅離子的過程。第一、我們將透過實驗二各種濃度的海藻酸鈉晶球於不同時間下吸附銅離子的實驗分析其吸收情況較接近何種動力學模型。第二、我們針對吸收銅離子效果最好的 5 %海藻酸鈉晶球進行吸附模型的分析，探討 5 %海藻酸鈉晶球較接近單層吸附的 Langmuir 模型或是多層吸附的 Freundlich 模型。

(一) 檢量線製作

進行分析之前，我們有製作硫酸銅濃度與吸光值的檢量線，得到檢量線（圖二十），公式為： $y = 29.178x - 0.1561$ 。

(二) 動力學分析

所有由擬一級動力學方程式算出之  $q_e$  與  $R^2$  皆遠小於擬二級，我們推論海藻酸鈉晶球吸附硫酸銅現象主要較吻合擬二級動力學方程式。然而，因為我們是利用擬二級公式所得之  $q_e$  帶入擬一級，故無法確定是否是因  $q_e$  本身就不正確而造成的誤差。為了解決上述問題，我們讓晶球吸附硫酸銅水溶液 10 天，以確保達到吸附平衡。

由圖十九可知，以 5 % 海藻酸鈉晶球吸附 0.04 M 硫酸銅水溶液在第二天即達到平衡。若以第十天數據作為最終吸附平衡，則可得出吸附平衡量的實驗值為 0.094416(mmol/g)，與擬二級動力方程式所得的理論值 0.129730291 (mmol/g) 較為接近，故可證明此吸附現象適合用擬二級動力學解釋。

表九、不同濃度海藻酸鈉晶球動力學之  $q_e$ 、 $k_2$  和  $k_1$  比較圖

| 海藻酸鈉濃度      | 2 %         | 3 %         | 4 %         | 5 %         |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| $q_e$ (擬二級) | 0.101757349 | 0.115874855 | 0.125104775 | 0.129730291 |
| $k_2$       | 3.694419697 | 2.920548214 | 1.28448484  | 1.366022689 |
| $k_1$       | 0.014       | 0.0105      | 0.0103      | 0.0112      |

由表九可知，吸附容量隨著海藻酸鈉濃度的提升也跟著增加，代表濃度高的海藻酸鈉晶球有更多點位可以吸附硫酸銅。

表十、海藻酸鈉 2 %晶球原始與擬二級數據

|                         |             |        |        |       |        |        |        |
|-------------------------|-------------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|
| 時間 (min)                | 15          | 30     | 60     | 90    | 120    | 180    | 240    |
| 吸光值/原液                  | 0.744       | 0.656  | 0.603  | 0.579 | 0.608  | 0.582  | 0.595  |
| $q_t$ (mmol/g)          | 0.079       | 0.091  | 0.099  | 0.102 | 0.098  | 0.102  | 0.100  |
| $t/q_t$ (min*g/mmol)    | 188.9       | 328.0  | 607.7  | 882.1 | 1223.9 | 1771.4 | 2404.1 |
| $q_e$ (mmol/g)<br>(擬二級) | 0.101757349 |        |        |       |        |        |        |
| $k_2$ (g/mmol*min)      | 3.694419697 |        |        |       |        |        |        |
| $\ln(q_e-q_t)$          | -3.801      | -4.577 | -5.802 |       | -5.597 | -8.847 | -6.252 |
| $k_1$ (1/min)           | 0.014       |        |        |       |        |        |        |
| $q_e$ (mmol/g)<br>(擬一級) | 0.013499536 |        |        |       |        |        |        |

表十一、海藻酸鈉 3 %晶球原始與擬二級數據

|                         |             |        |        |        |        |        |        |
|-------------------------|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 時間 (min)                | 15          | 30     | 60     | 90     | 120    | 180    | 240    |
| 吸光值/原液                  | 0.633       | 0.561  | 0.5    | 0.504  | 0.502  | 0.494  | 0.487  |
| $q_t$ (mmol/g)          | 0.095       | 0.104  | 0.113  | 0.112  | 0.113  | 0.114  | 0.115  |
| $t/q_t$ (min*g/mmol)    | 158.5       | 287.1  | 531.7  | 801.4  | 1065.9 | 1583.4 | 2093.6 |
| $q_e$ (mmol/g)<br>(擬二級) | 0.115874855 |        |        |        |        |        |        |
| $k_2$ (g/mmol*min)      | 2.920548214 |        |        |        |        |        |        |
| $\ln(q_e-q_t)$          | -3.851      | -4.476 | -5.803 | -5.636 | -5.716 | -6.120 | -6.694 |
| $k_1$ (1/min)           | 0.0105      |        |        |        |        |        |        |
| $q_e$ (mmol/g)<br>(擬一級) | 0.012674033 |        |        |        |        |        |        |

表十二、海藻酸鈉 4 %晶球吸附實驗效果分析

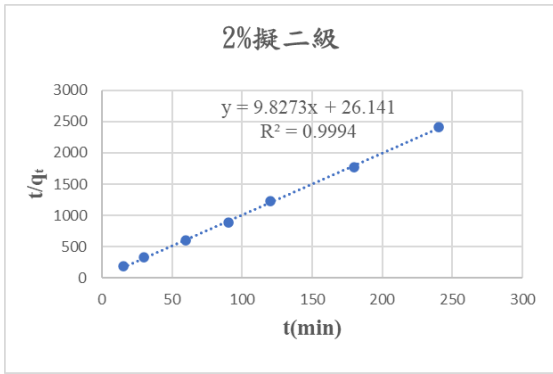
|                         |             |        |        |        |        |        |        |
|-------------------------|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 時間 (min)                | 15          | 30     | 60     | 90     | 120    | 180    | 240    |
| 吸光值/原液                  | 0.602       | 0.55   | 0.525  | 0.483  | 0.451  | 0.449  | 0.427  |
| $q_t$ (mmol/g)          | 0.099       | 0.106  | 0.109  | 0.115  | 0.120  | 0.120  | 0.123  |
| $t/q_t$ (min*g/mmol)    | 151.7       | 283.0  | 548.3  | 781.3  | 1003.6 | 1501.9 | 1953.4 |
| $q_e$ (mmol/g)<br>(擬二級) | 0.125104775 |        |        |        |        |        |        |
| $k_2$ (g/mmol*min)      | 1.28448484  |        |        |        |        |        |        |
| $\ln(q_e-q_t)$          | -3.641      | -3.958 | -4.156 | -4.613 | -5.197 | -5.248 | -6.100 |
| $k_1$ (1/min)           | 0.0103      |        |        |        |        |        |        |
| $q_e$ (mmol/g)<br>(擬一級) | 0.026906161 |        |        |        |        |        |        |

表十三、海藻酸鈉 5 %晶球原始與擬二級數據

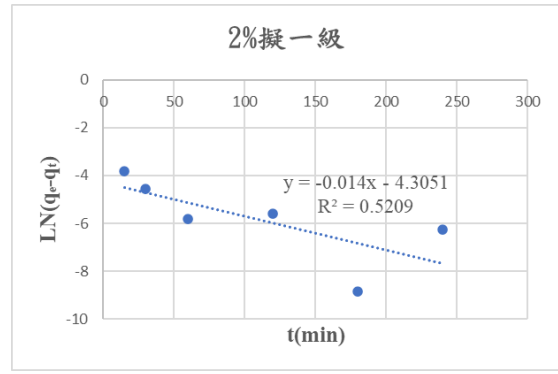
|                         |             |        |        |        |        |        |        |
|-------------------------|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 時間 (分鐘)                 | 15          | 30     | 60     | 90     | 120    | 180    | 240    |
| 吸光值/原液                  | 0.622       | 0.539  | 0.492  | 0.429  | 0.405  | 0.388  | 0.41   |
| $q_t$ (mmol/g)          | 0.096       | 0.108  | 0.114  | 0.123  | 0.126  | 0.128  | 0.125  |
| $t/q_t$ (min*g/mmol)    | 156.0       | 279.0  | 526.5  | 734.2  | 953.3  | 1404.0 | 1917.0 |
| $q_e$ (mmol/g)<br>(擬二級) | 0.129730291 |        |        |        |        |        |        |
| $k_2$ (g/mmol*min)      | 1.366022689 |        |        |        |        |        |        |
| $\ln(q_e-q_t)$          | -3.393      | -3.807 | -4.149 | -4.942 | -5.559 | -6.488 | -5.395 |
| $k_1$ (1/min)           | 0.0112      |        |        |        |        |        |        |
| $q_e$ (mmol/g)<br>(擬一級) | 0.026040559 |        |        |        |        |        |        |



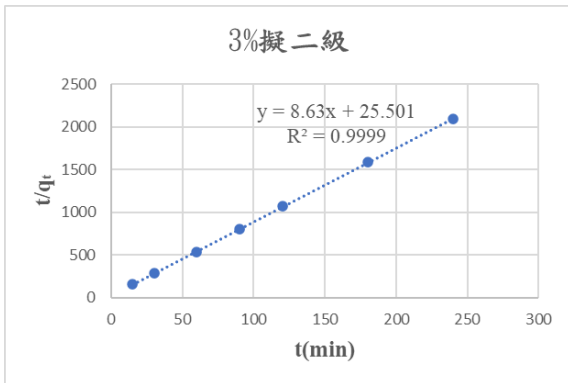
(本頁之圖表皆為研究者自行繪製)



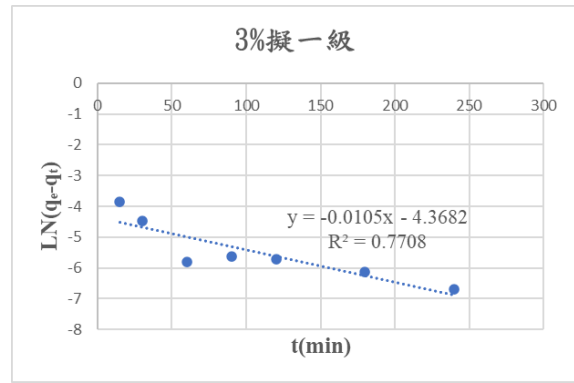
圖二十三、2%晶球作擬二級數據圖



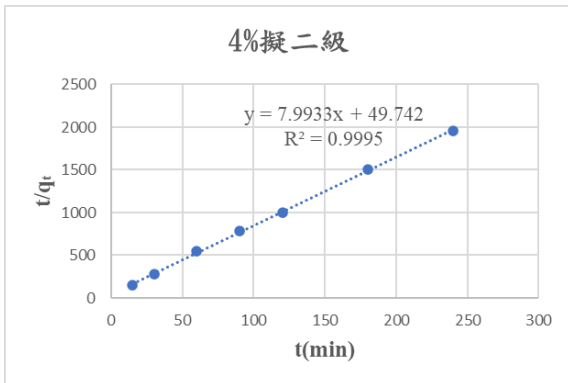
圖二十四、2%晶球作擬一級數據圖



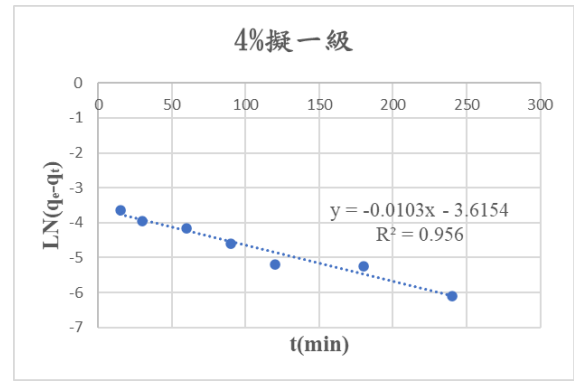
圖二十五、3%晶球作擬二級數據圖



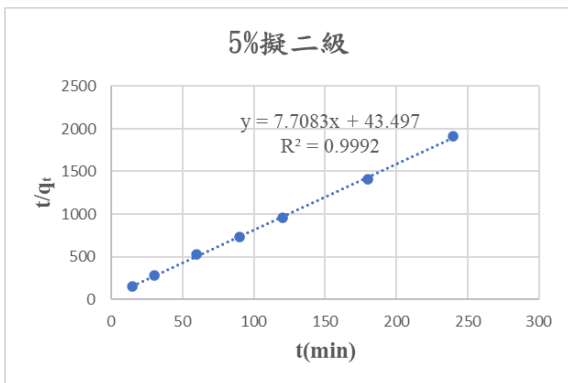
圖二十六、3%晶球作擬一級數據圖



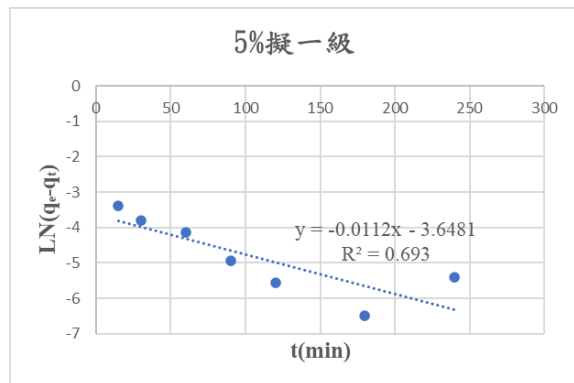
圖二十七、4%晶球作擬二級數據圖



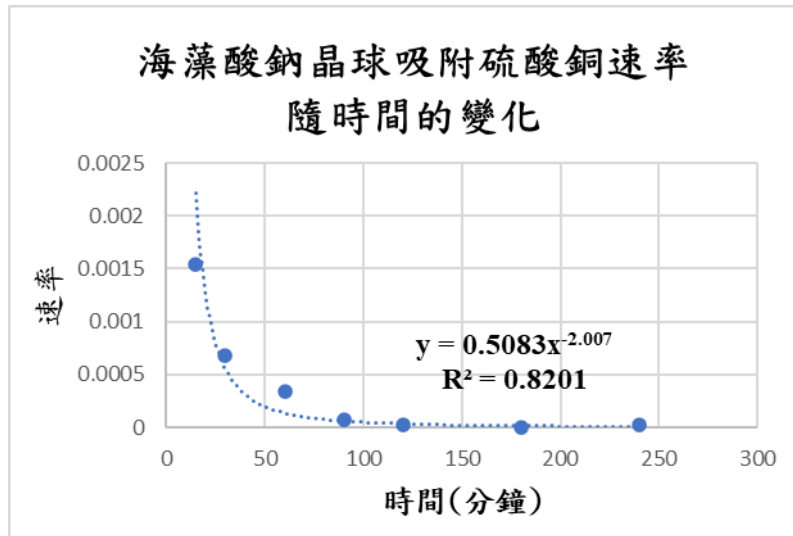
圖二十八、4%晶球作擬一級數據圖



圖二十九、5%晶球作擬二級數據圖



圖三十、5%晶球作擬一級數據圖



圖三十一、5 %海藻酸鈉晶球吸附硫酸銅水溶液速率隨時間變化圖（研究者繪製）

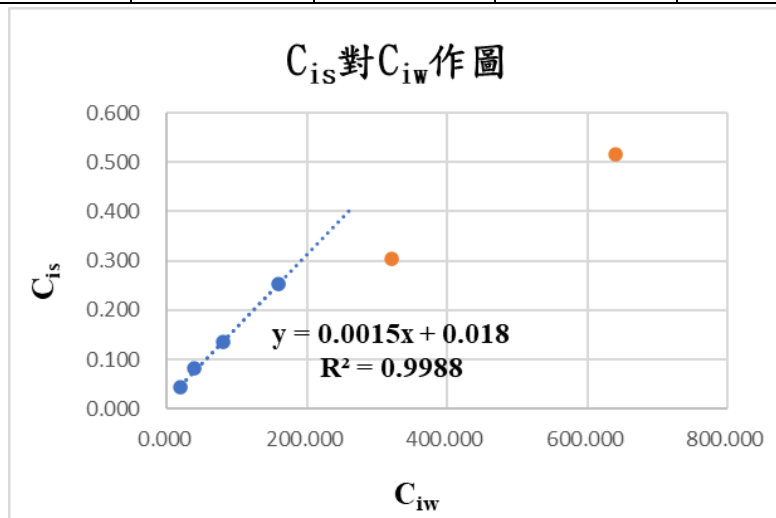
由此圖得出時間與吸附速率的關係，由線下面積可得 5 %海藻酸鈉晶球在不同時間的吸附量。  $\int_{0.01}^{\infty} 0.5083x^{-2.007} dx$  得在 0.01 分鐘到無限久時的吸附量約為

$$\int_{0.01}^{90} 0.5083x^{-2.007} dx \text{ 得在 0.01 分鐘到 90 分鐘時的吸附量約為 } 52.124,$$

兩者極為接近，故就此分析中，90 分鐘後的吸附時間並不會對吸附效果有太大的影響。

表十四、 $C_{is}$  與  $C_{iw}$  數據

|          |        |        |        |         |         |         |
|----------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
| $C_{is}$ | 0.044  | 0.081  | 0.136  | 0.253   | 0.303   | 0.515   |
| $C_{iw}$ | 20.000 | 40.000 | 80.000 | 160.000 | 320.000 | 640.000 |



圖三十二、 $C_{is}$  對  $C_{iw}$  散佈圖（研究者繪製）

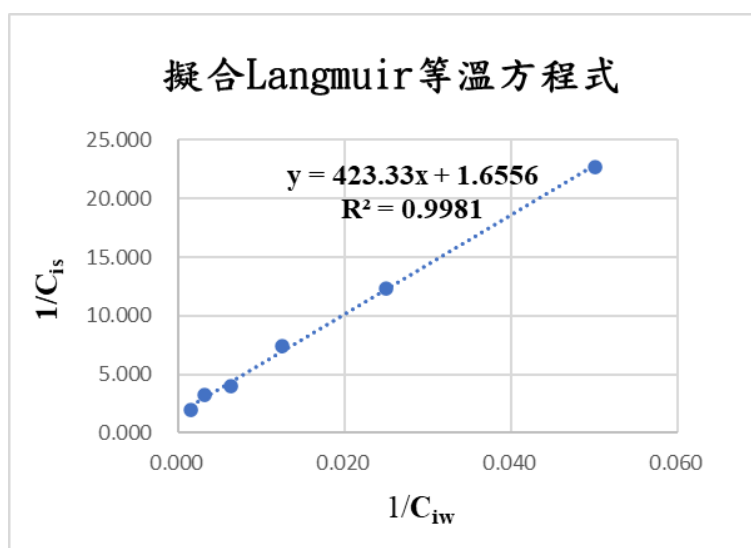
以  $C_{is}$  對  $C_{iw}$  作圖，水溶液濃度在 0.02 M 到 0.16 M 之間有呈現線性化關係，故

與 Langmuir 等溫方程式低濃度時呈現之圖形相符，可進而分析出溶液在此濃度範圍時還未接近 a/b 的 Langmuir 吸收最大值；而在後續的濃度則出現有弧度且逐漸趨緩的曲線關係，推測其已接近飽和容量，吸附效果漸緩。

表十五、海藻酸鈉 5 % 晶球 Langmuir 數據

|                         |         |        |       |       |       |       |
|-------------------------|---------|--------|-------|-------|-------|-------|
| $1/C_{is}$              | 22.701  | 12.337 | 7.380 | 3.948 | 3.299 | 1.940 |
| $1/C_{iw}$              | 20.0    | 40.0   | 80.0  | 160.0 | 320.0 | 640.0 |
| a                       | 0.00236 |        |       |       |       |       |
| b                       | 0.00391 |        |       |       |       |       |
| $a/b = q_m$<br>(mmol/g) | 0.604   |        |       |       |       |       |

### (三) 等溫方程分析

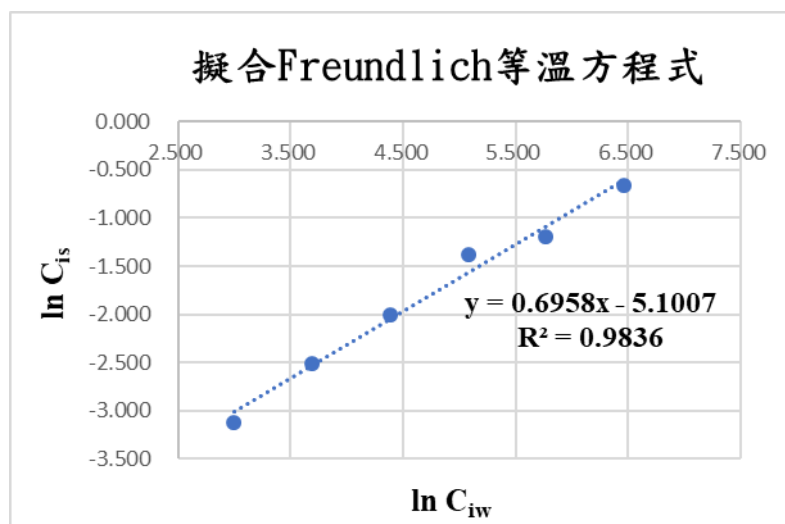


圖三十三、Langmuir 線性等溫方程式（研究者繪製）

將數據擬合 Langmuir 線性等溫方程式，並以  $\frac{1}{C_{is}}$  對  $\frac{1}{C_{iw}}$  作圖，由斜率推得常數 a 為 0.00236，吸附平衡常數 b 為 0.00391，並由此二常數得出吸附劑之吸附最大量為 0.604(mmol/g)。將  $q_m$  與前面利用動力學方程式得出的  $q_e$  比較，吸附劑之吸附最大量約為吸附平衡容量的 5 倍，由此可知，5 % 海藻酸鈉晶球實際吸附效能約 21 %。線性化 Langmuir 等溫方程式之  $R^2$  為 0.9981，吸附劑在濃度為 0.02 M 與 0.16 M 硫酸銅水溶液之間，應主要以化學吸附為主。

表十六、海藻酸鈉 5 %晶球 Freundlich 數據

|              |        |        |        |        |        |        |
|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $\ln C_{is}$ | -3.122 | -2.513 | -1.999 | -1.373 | -1.194 | -0.663 |
| $\ln C_{iw}$ | 2.996  | 3.689  | 4.382  | 5.075  | 5.768  | 6.461  |
| $1/n$        | 0.696  |        |        |        |        |        |
| $K_f$        | 0.006  |        |        |        |        |        |



圖三十四、Freundlich 線性等溫方程式（研究者繪製）

將數據擬合 Freundlich 線性等溫方程式，並以 $\ln C_{is}$ 對 $\ln C_{iw}$ 作圖，由斜率推得  $1/n$  吸收強度參數為 0.696，大於 0.5 代表其吸收強度較強；比例常數  $K_f$  為 0.006。線性化 Freundlich 等溫方程式之  $R^2$  為 0.9836，略低於 Langmuir 的  $R^2$  值，與前述假設相同。但由於兩等溫方程之  $R^2$  相當接近，推測是因為 5 %海藻酸鈉晶球為多層吸附，但在溶液為低濃度(0.02 M 至 0.64 M)時，溶質只與吸附劑最表層的點位吸附，故同時與此兩種等溫吸附方程式吻合。

## 陸、結論

### 一、結論

#### (一) 實驗最佳化結果

吸附效果最佳的條件為：5%海藻酸鈉、搖晃、放置 90 分鐘、吸附溫度 25°C。

#### (二) 等溫模型分析

5%海藻酸鈉晶球吸附 0.02 M 至 0.64 M 硫酸銅水溶液現象 Langmuir 方程式之  $R^2$  值略大於 Freundlich 方程式。

#### (三) 動力學模型分析

5%海藻酸鈉晶球吸附 0.04 M 硫酸銅水溶液現象較符合擬二級動力方程式。

### 二、未來展望

由於在實驗二之（五）的實驗中發現，吸附鋅離子時滴定數據會被晶球中的鈣離子所影響，進而無法得知溶液中鋅離子的含量。為了有效分辨鋅離子與鈣離子，我們將採取兩種方向優化滴定實驗。第一種是透過沉澱法分離鋅離子與鈣離子，查詢沉澱物的溶度積常數與金屬離子與 EDTA 錯合的錯合物形成常數，將鈣離子的干擾去除。第二種則是改變滴定時緩衝溶液的 pH 值，找到適當的酸鹼值範圍，使 EDTA 只與其中一種離子進行錯合。

我們先針對第一種方法進行探討，我們選擇使用硫離子做為沉澱劑，我們認為在混合溶液中加入硫離子能有效使鋅離子沉澱，而不使鈣離子沉澱。只要在同一組鈣鋅離子混合樣品中添加硫離子，並比較添加前後的滴定數據，就能反推鋅離子的含量。為了驗證此方法可行，我們是做了以下實驗，步驟如下：

(一) 配置 0.04M 硫酸鋅水溶液、0.04M 氯化鈣水溶液與 0.01M 硫化鈉水溶液。

(二) 配置對照組：在錐形瓶內將 10mL 硫酸鋅水溶液與 10mL 氯化鈣水溶液混合，並加入 5mL 蒸餾水、5mL 氨水緩衝溶液與適量指示劑。

(三) 配置實驗組：同步驟 2，但將 5mL 蒸餾水改為 5mL 硫化鈉水溶液。

(四) 分別以 0.02M EDTA 水溶液滴定兩種溶液並記錄其數據。

我們得到的實驗結果為對照組所需 EDTA 體積為 19.5mL，實驗組則是滴定了 13.5mL，若加入硫離子後能使所有鋅離子沉澱，其所需體積應為對照組的一半（9.75mL），且在我們以為已經滴定到滴定終點，過一段時間，溶液顏色又會從藍色變回紫紅色，我們推測是原本沉澱的硫化鋅又重新溶於溶液中，被 EDTA 螯合。除此之外，未加硫化鈉之溶液因沒有沉澱，故呈現較透明的顏色，而有加硫化鈉之溶液則因沉澱產生白色混濁的現象（如圖三十五、圖三十六）。

在未來我們會持續嘗試優化沉澱法，使其能更精準的排除鈣離子的干擾。另一部分則是選用適當的緩衝溶液進行實驗。



圖三十五、鋅鈣溶液滴定 EDTA 前  
（左側為加入硫化鈉之溶液）  
（研究者拍攝）



圖三十六、鋅鈣溶液滴定 EDTA 後  
（左側為加入硫化鈉之溶液）  
（研究者拍攝）

## 柒、參考文獻資料

- 一、韓語軒、葉庭瑜、劉家宇（2023）。「銅」歸於「晶」—探討海藻酸鈉晶球對銅離子的吸附能力。[1]
- 二、全國環境水質監測資訊網。河川水質監測。 <https://reurl.cc/E4d6Wg>。 [2]
- 三、維基百科。乙二胺四乙酸。 <https://reurl.cc/70voG5>。 [3]
- 四、維基百科。螯合物。 <https://reurl.cc/qVj8xy>。 [4]
- 五、Severtson Colloids and Polymer Composites Lab(2020 /12 /17)。 Lecture 7:Adsorption and the Langmuir and Freundlich Models。 YouTube。 [5]
- 六、Y.S. HO，C.C. CHIANG，(2001)Adsorption 7 Sorption Studies of Acid Dye by Mixed Sorbents，Kluwer Academic Publishers，The Netherlands，pp. 139–147。 [6]
- 七、葉庭瑜、劉家宇、韓語軒（2024）。「溫固」而知「吸」—以等溫線與動力學方程式分析海藻酸鈉晶球之吸附現象。 [7]

## 【評語】 050206

此一研究工作實驗做得蠻仔細的，在數據分析上也很有邏輯，而且有分析反應動力學。以下有一點建議：因為晶球研究相對多，也有吸附離子的探討，建議可以跳脫大多人研究過的材料，好好利用團隊的分析能力，探索未知的領域。



## 作品簡報

「Cu」 「LA」ter, my 「FREUND」 —

探討海藻酸鈉晶球吸附銅離子的最佳吸附條件

及以等溫線與動力學方程式分析吸附現象

# 壹、摘要

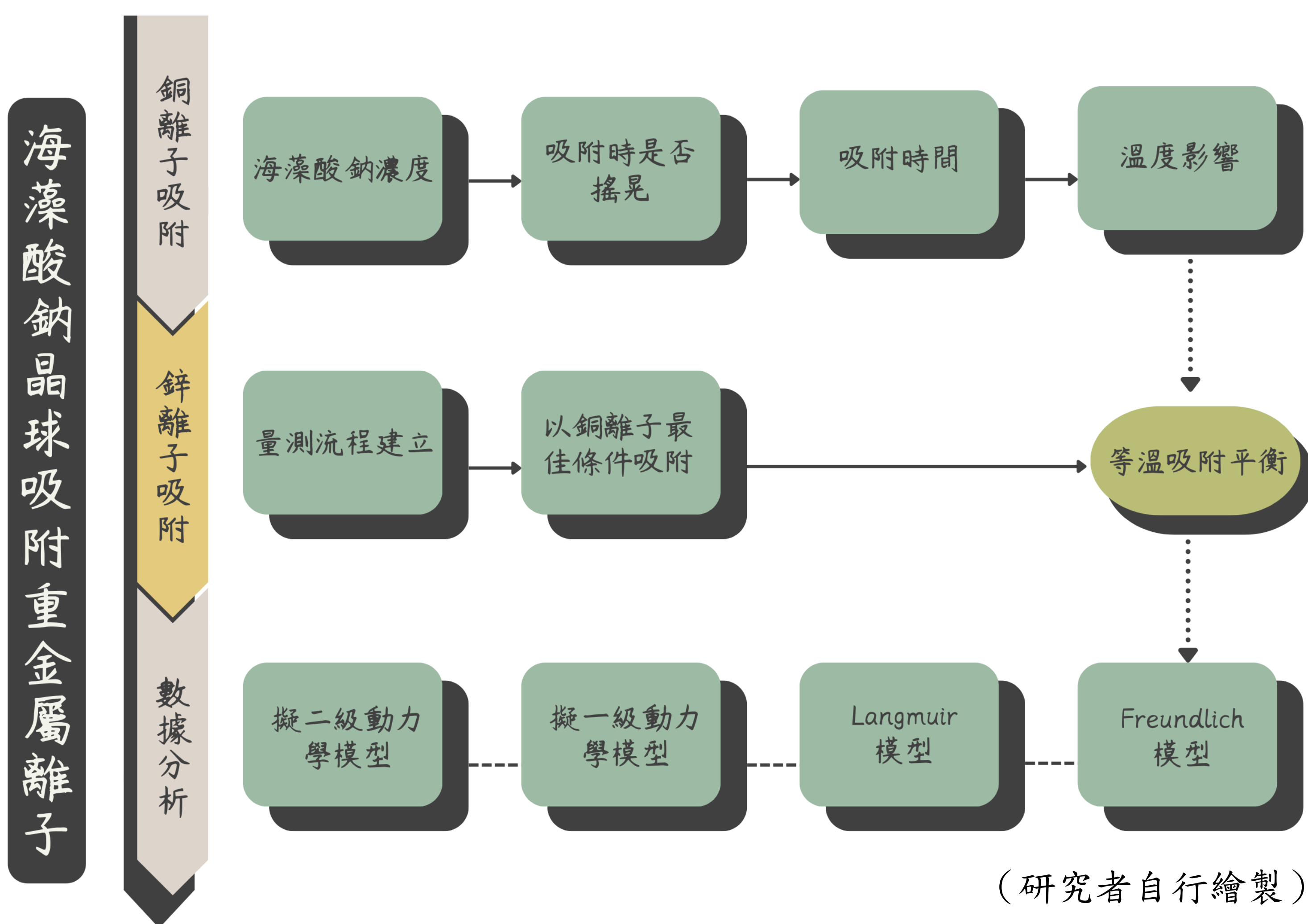
我們的實驗延續上次小論文<sup>[1]</sup>以海藻酸鈉晶球吸附銅離子作為研究主題，並比較了各項變因下的吸附效果，嘗試找出最佳吸附條件。經過實驗，並將數據經動力學方程式分析後，以理論吸附速率回推，得出吸附90分鐘已達吸附極限值的99%；繪製出兩動力學方程式的線性圖，比較R<sup>2</sup>值後也判定此吸附更接近擬二級吸附。以不同濃度硫酸銅的結果代入等溫方程後，也呈現良好線性關係，有助於了解吸附過程。

# 貳、研究動機

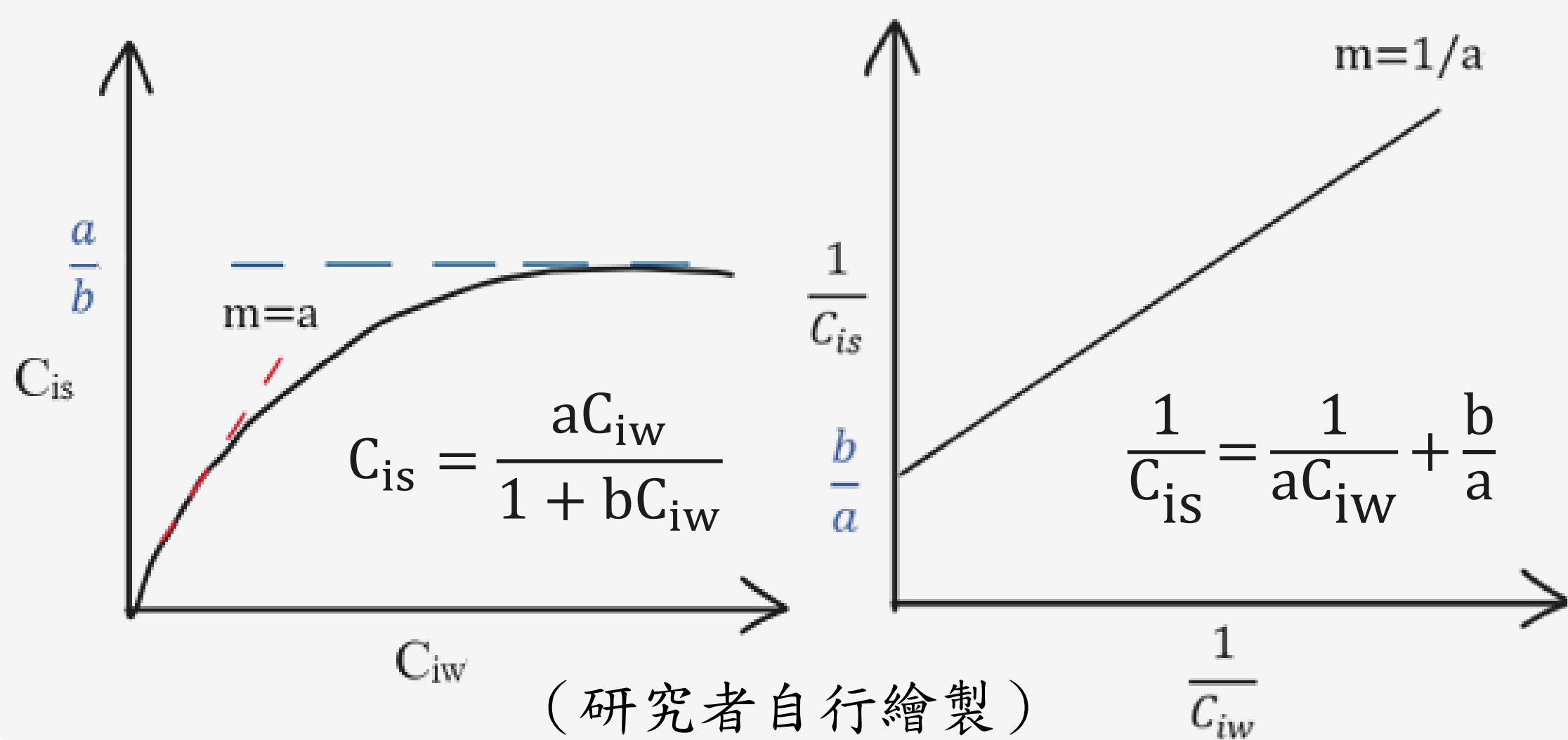
近年來，水汙染已成為不可忽視的議題。因資料顯示過量的銅與鋅離子會對人體或農業造成影響，我們選擇以鋅與銅作為海藻酸鈉晶球吸附之離子，並研究最佳吸附條件。然而，在過去許多類似的研究中，皆只有呈現最終實驗結果，並未分析吸附的過程，故我們利用幾個常見的等溫線與動力學方程式擬合數據，探討海藻酸鈉晶球的吸附特性。

# 參、研究目的

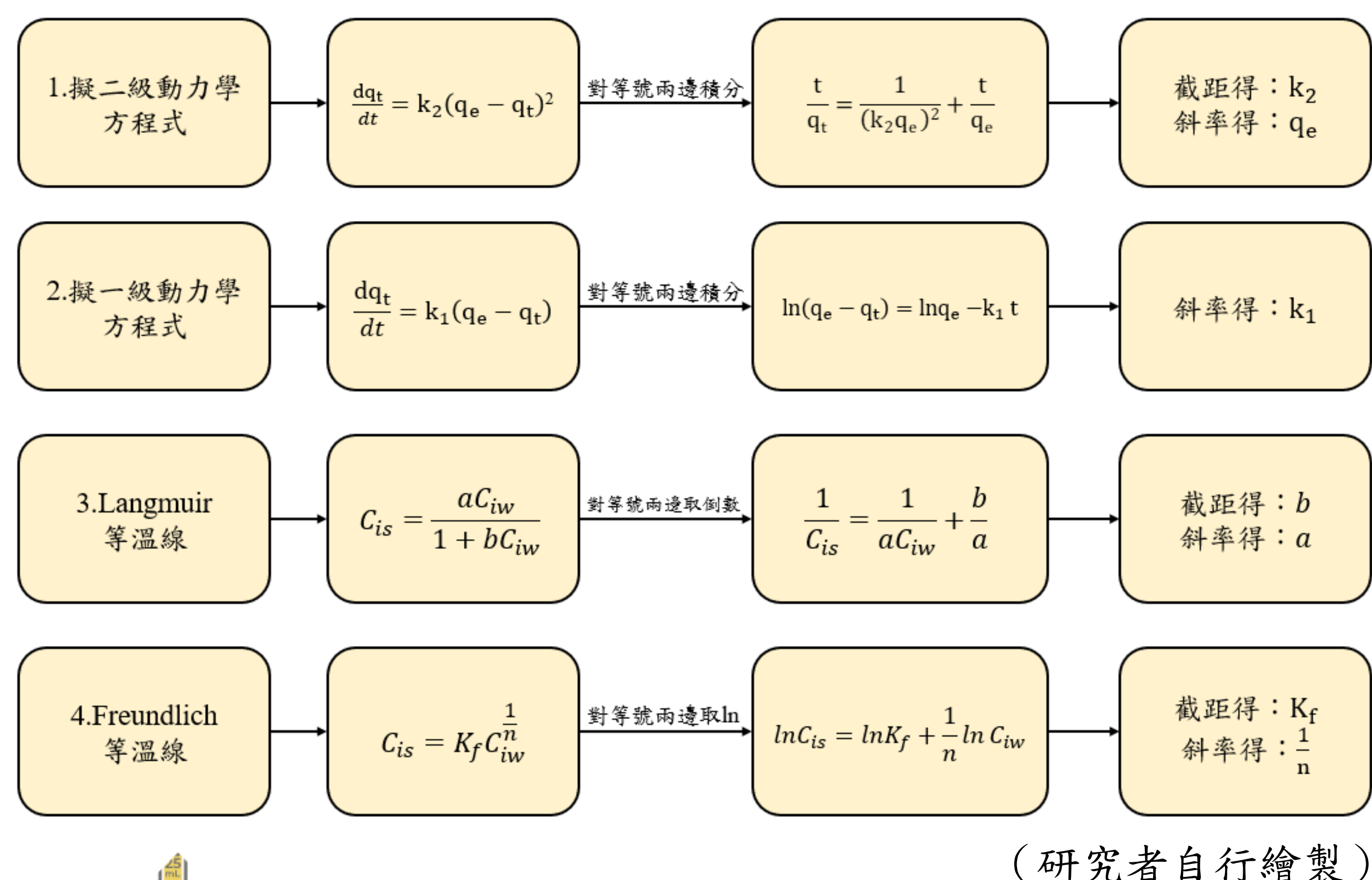
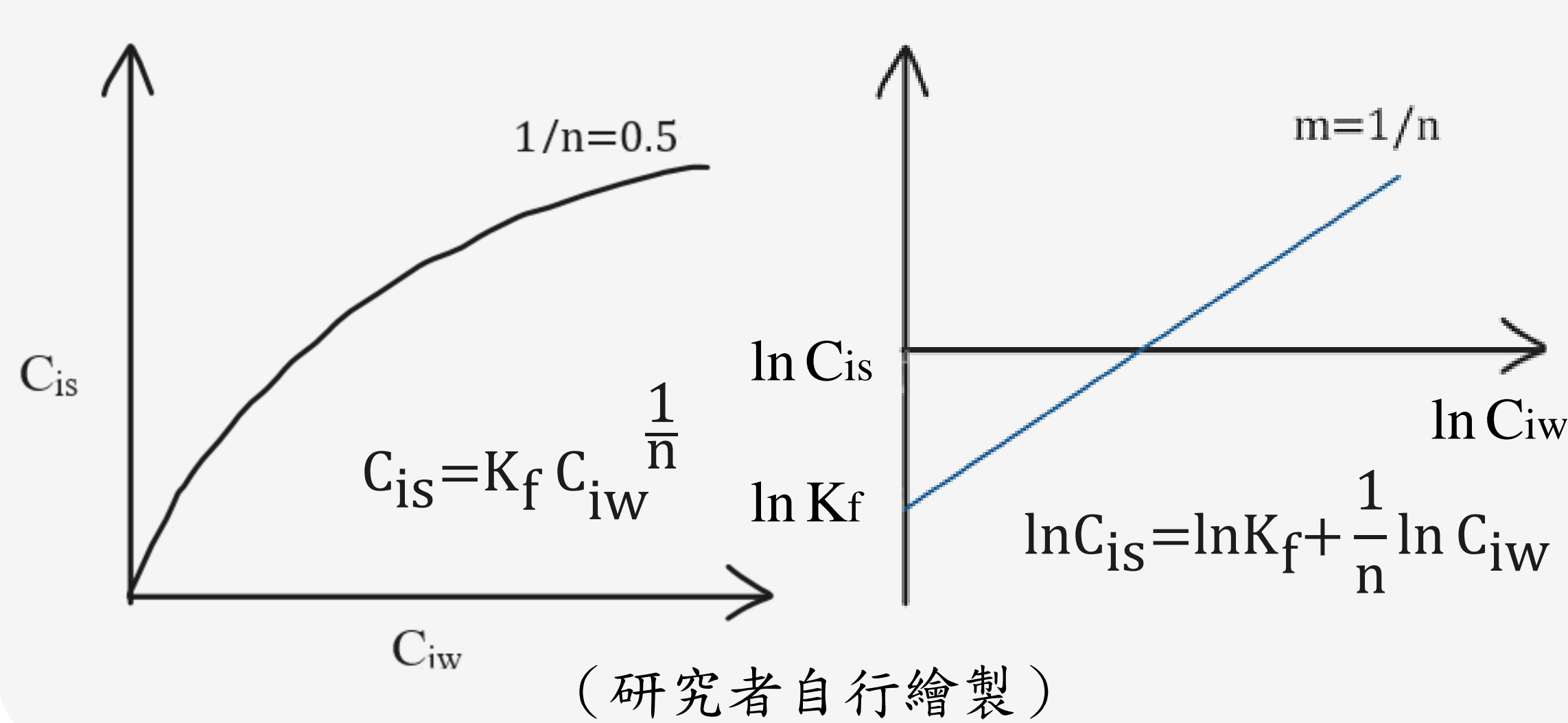
- (一)、探討海藻酸鈉晶球吸附硫酸銅水溶液之最佳條件
- (二)、以兩種等溫吸附模型分析海藻酸鈉晶球在硫酸銅與硫酸鋅水溶液吸附過程
- (三)、以擬一級、擬二級動力學分析海藻酸鈉晶球在硫酸銅與硫酸鋅水溶液吸附過程



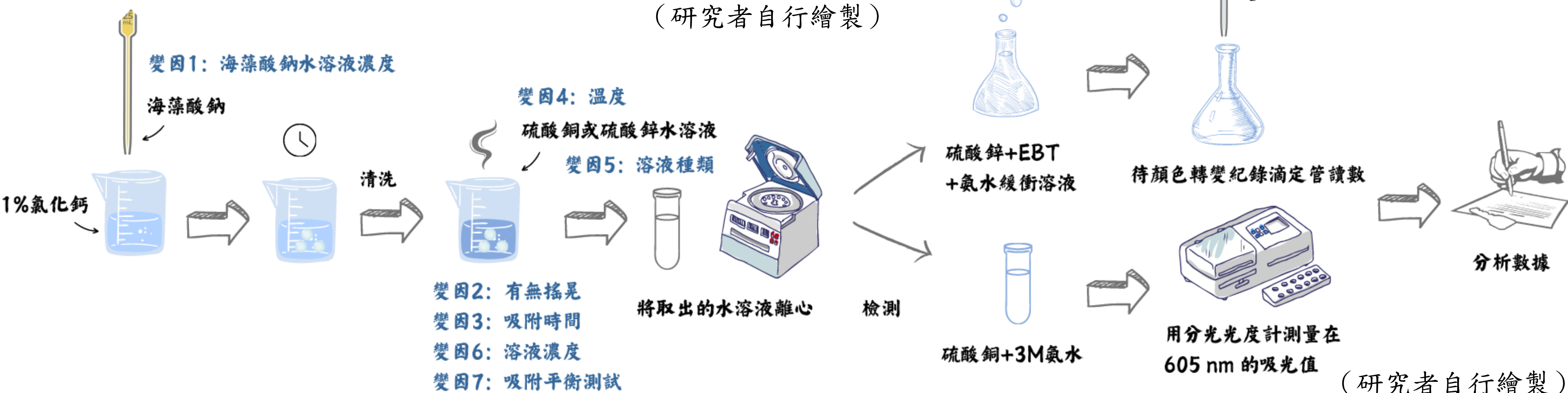
## Langmuir 模型



## Freundlich 模型

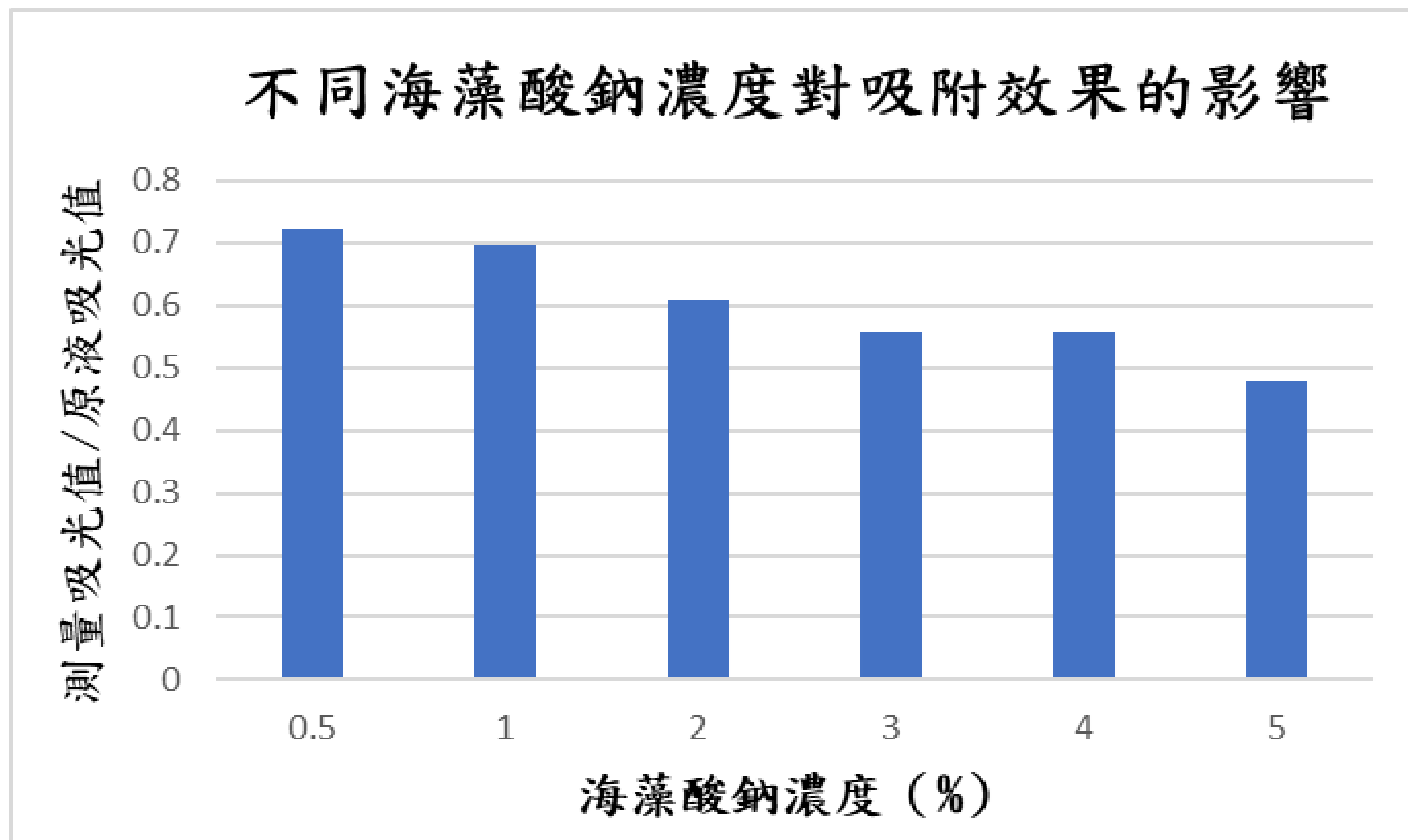


- C<sub>is</sub>：吸附劑上溶質的濃度=吸附平衡容量(mmol/g)
- C<sub>iw</sub>：溶液中未被吸附的溶質濃度=平衡溶液濃度(mmol/L)
- a, b, K<sub>f</sub>為常數
- n為參數



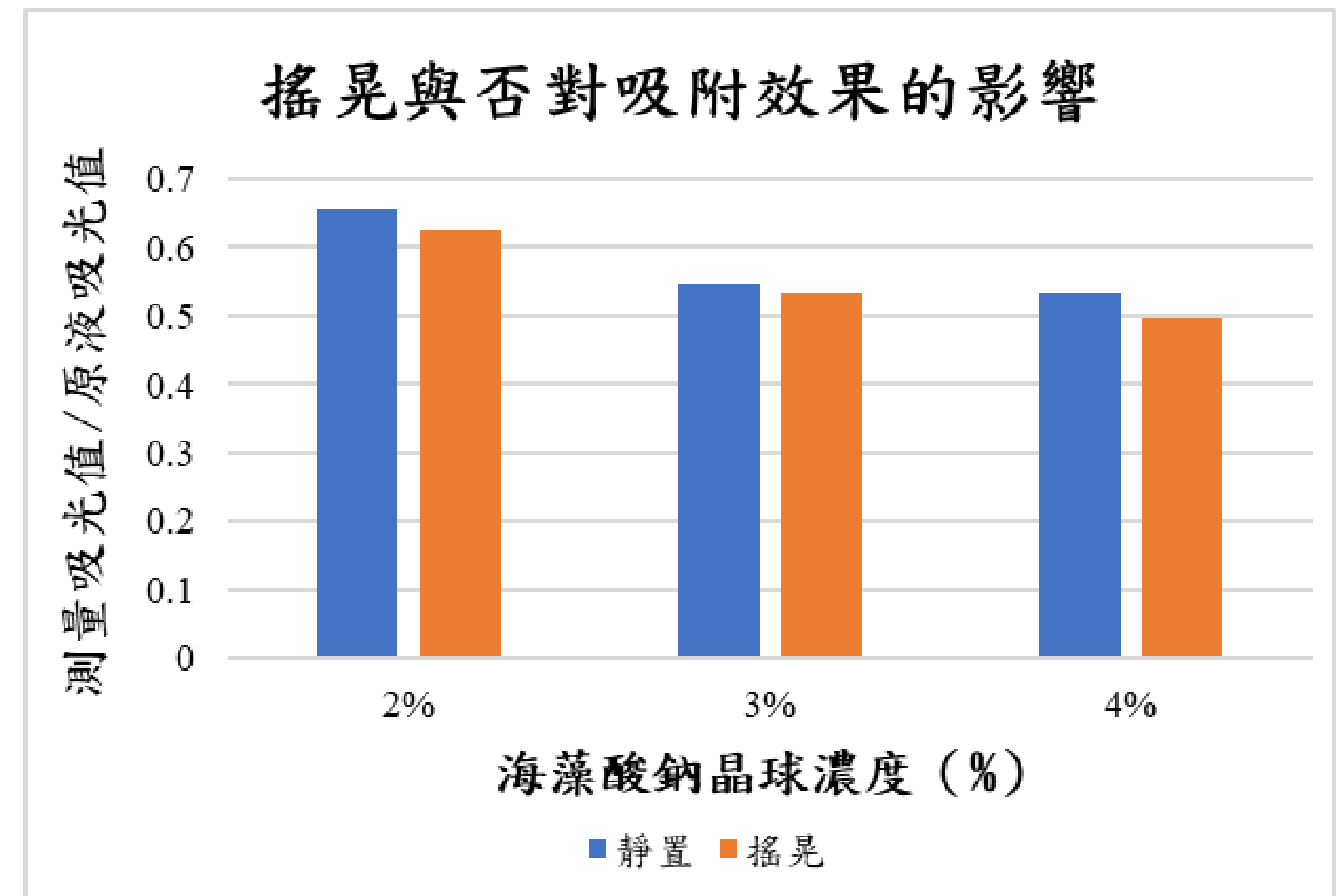
## 肆、研究結果

(一) 比較不同濃度海藻酸鈉晶球吸附銅離子效果的影响



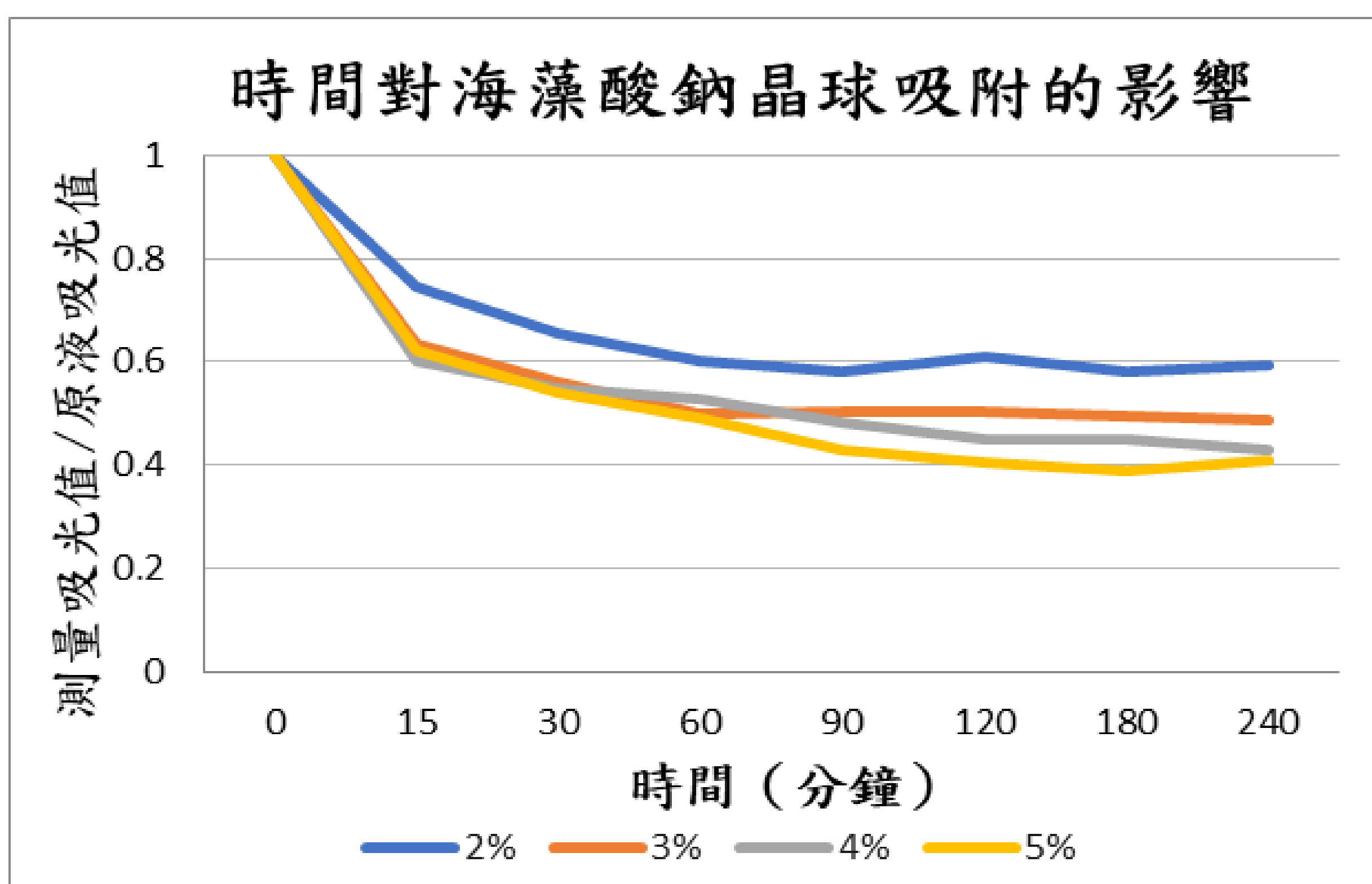
| 濃度 (%)      | *0.5  | *1    | 2     | 3     | 4     | 5     |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 測量吸光值/原液吸光值 | 0.721 | 0.697 | 0.610 | 0.557 | 0.560 | 0.481 |

(二) 比較搖晃與否對海藻酸鈉晶球吸附銅離子效果的影响



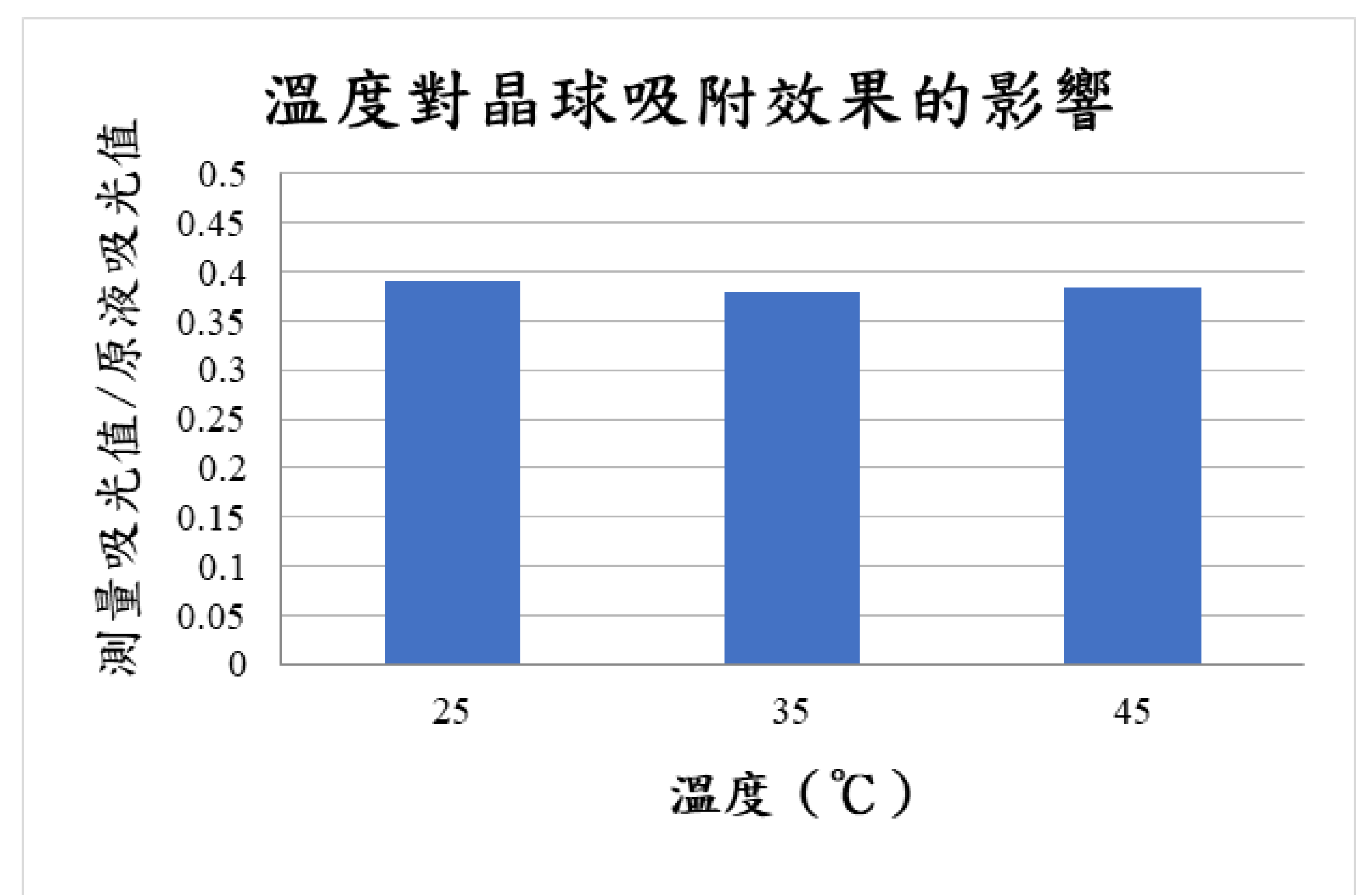
| 海藻酸鈉濃度 (%)       | 2%    | 3%    | 4%    |
|------------------|-------|-------|-------|
| 測量吸光值/原液吸光值 (靜置) | 0.656 | 0.540 | 0.534 |
| 測量吸光值/原液吸光值 (搖晃) | 0.627 | 0.532 | 0.496 |

(三) 比較不同吸附時間下海藻酸鈉晶球吸附銅離子效果



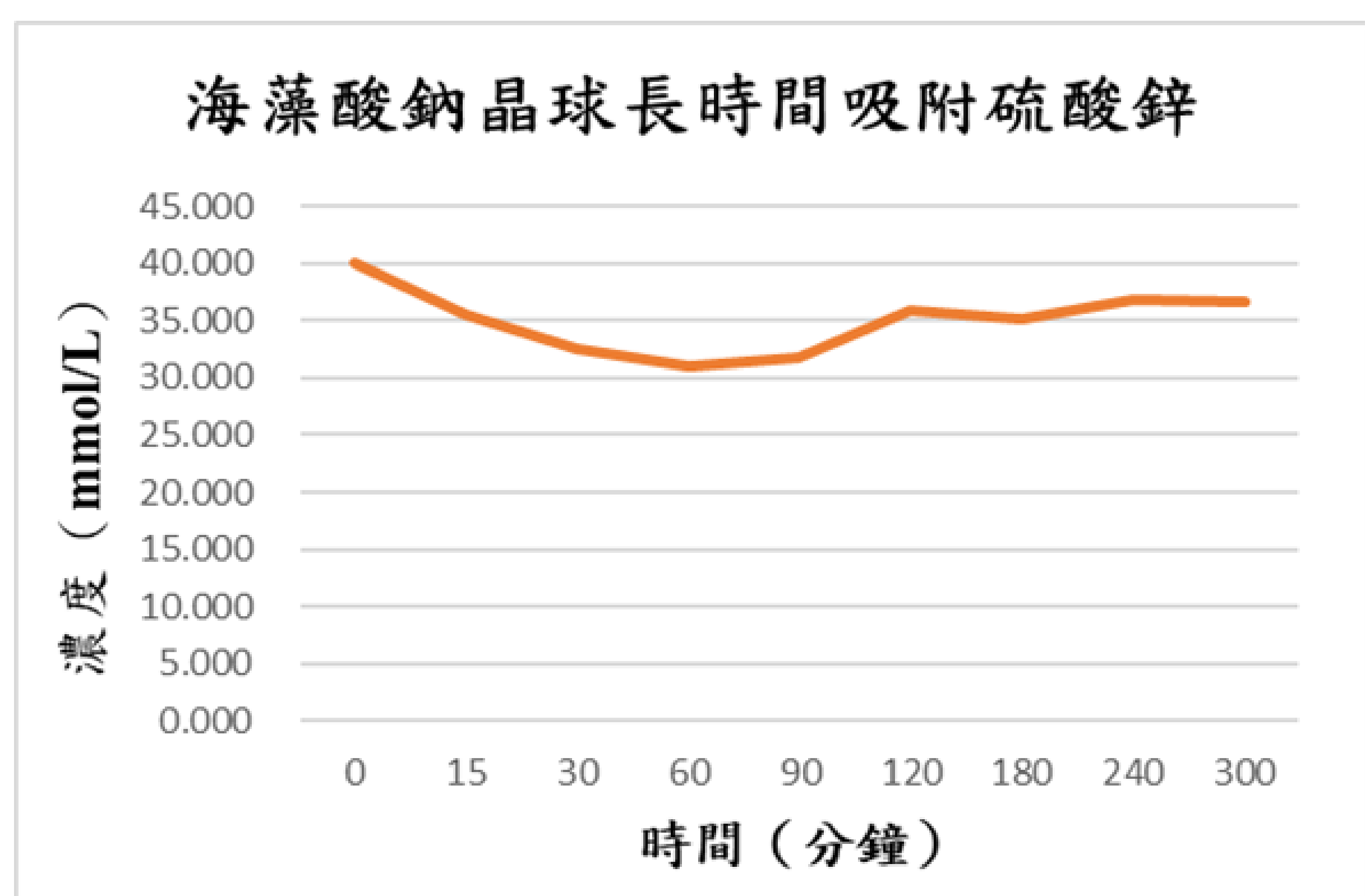
| 分鐘 \ 濃度 | 15    | 30    | 60    | 90    | 120   | 180   | 240   |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 2       | 0.744 | 0.656 | 0.603 | 0.579 | 0.608 | 0.582 | 0.595 |
| 3       | 0.633 | 0.561 | 0.500 | 0.504 | 0.502 | 0.494 | 0.487 |
| 4       | 0.602 | 0.550 | 0.483 | 0.483 | 0.451 | 0.449 | 0.427 |
| 5       | 0.622 | 0.539 | 0.492 | 0.429 | 0.405 | 0.388 | 0.410 |

(四) 比較不同溫度海藻酸鈉晶球吸附銅離子效果



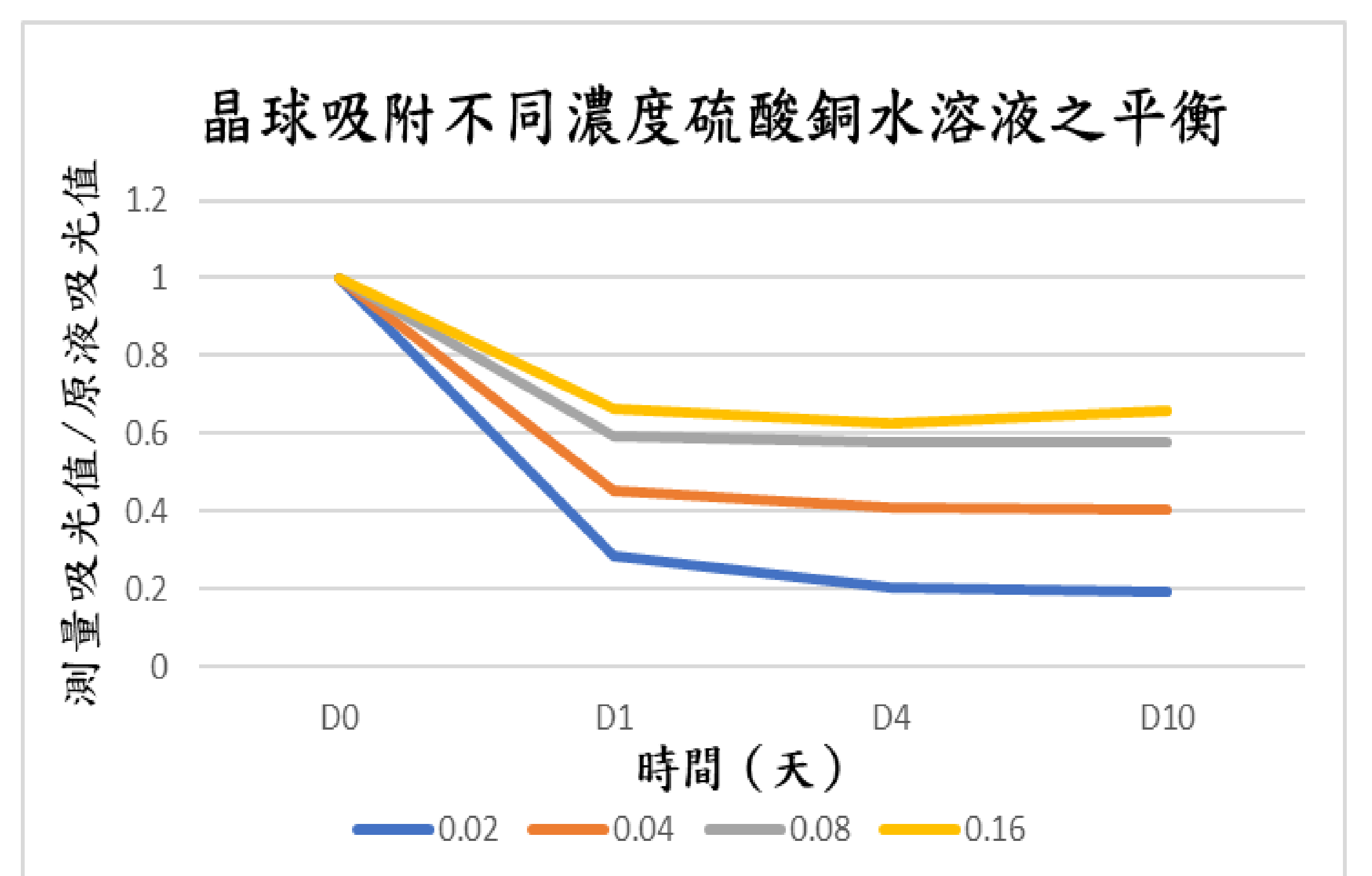
| 溫度 (°C)     | 25    | 35    | 45    |
|-------------|-------|-------|-------|
| 測量吸光值/原液吸光值 | 0.430 | 0.418 | 0.421 |

(五) 海藻酸鈉晶球長時間吸附硫酸鋅水溶液實驗



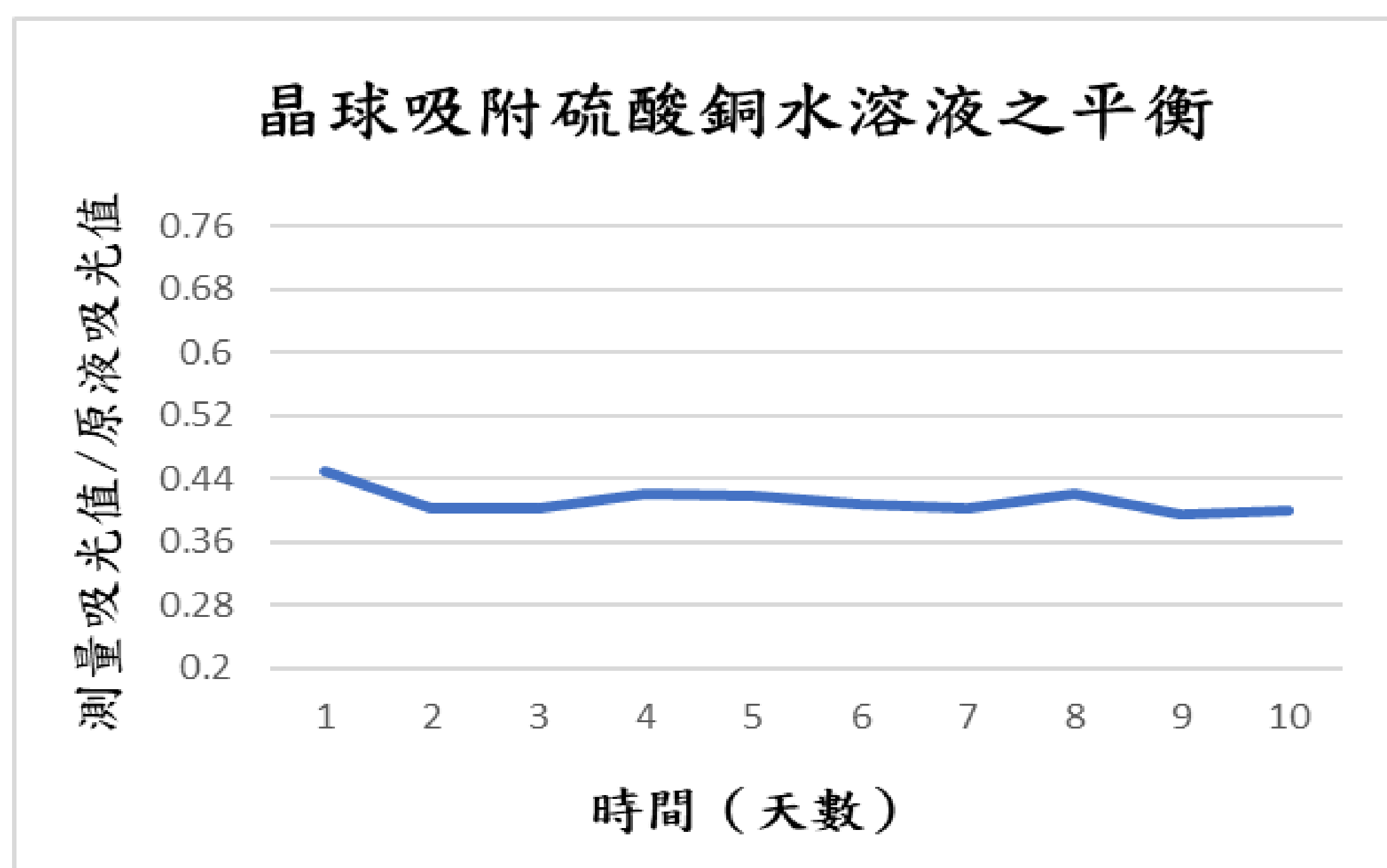
| 分鐘     | 15     | 30     | 60     | 90     |
|--------|--------|--------|--------|--------|
| mmol/L | 35.500 | 32.583 | 31.000 | 31.667 |
| 分鐘     | 120    | 180    | 240    | 300    |
| mmol/L | 35.917 | 35.139 | 36.750 | 36.583 |

(六) 海藻酸鈉晶球吸附硫酸銅水溶液平衡容量



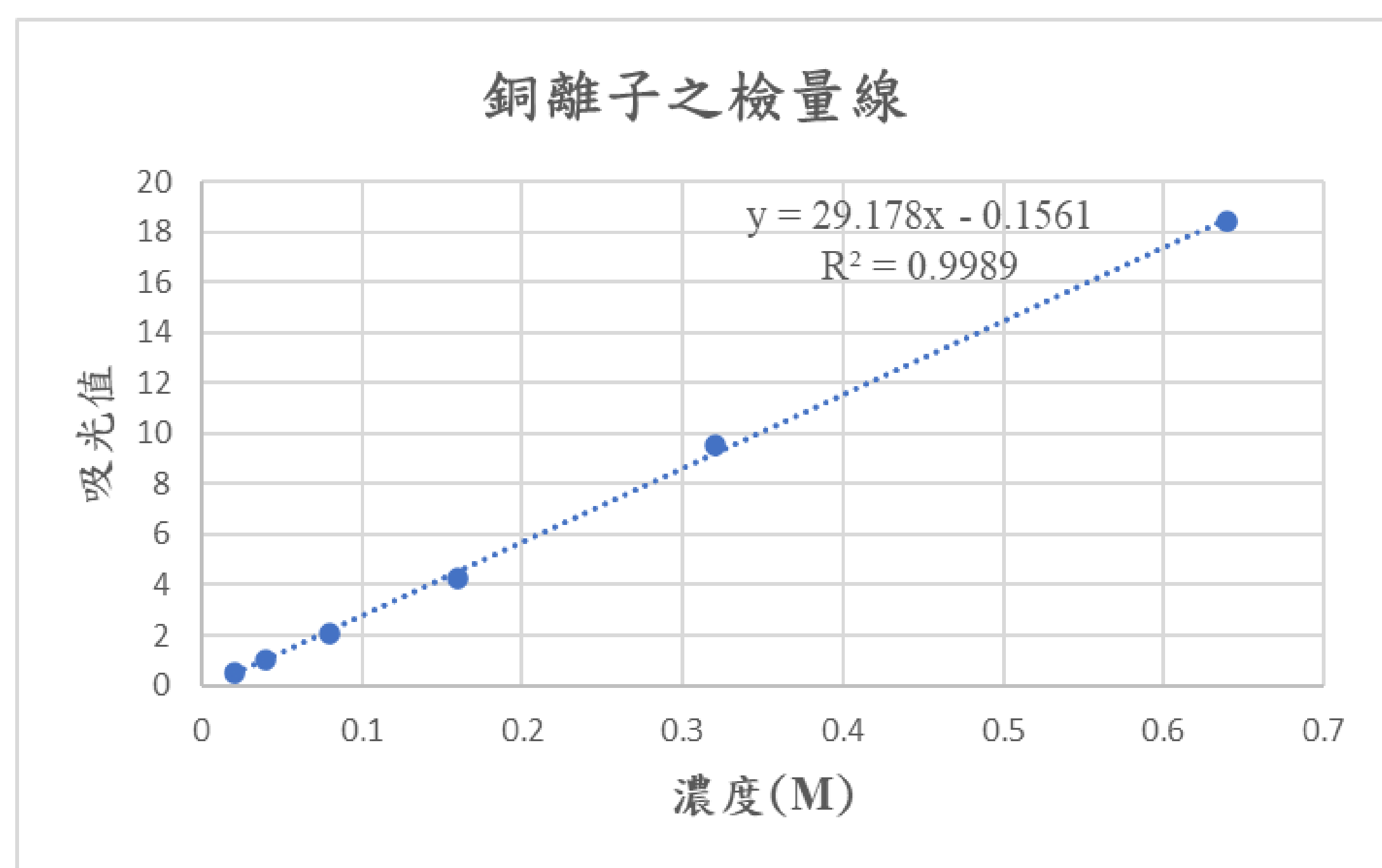
| 天數 \ M | 0.02  | 0.04  | 0.08  | 0.16  | 0.32  | 0.64  |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| D1     | 0.285 | 0.455 | 0.591 | 0.665 | -     | -     |
| D4     | 0.205 | 0.407 | 0.578 | 0.627 | 0.782 | 0.728 |
| D10    | 0.192 | 0.403 | 0.579 | 0.657 | -     | -     |

## (七) 晶球吸附硫酸銅水溶液長時間平衡



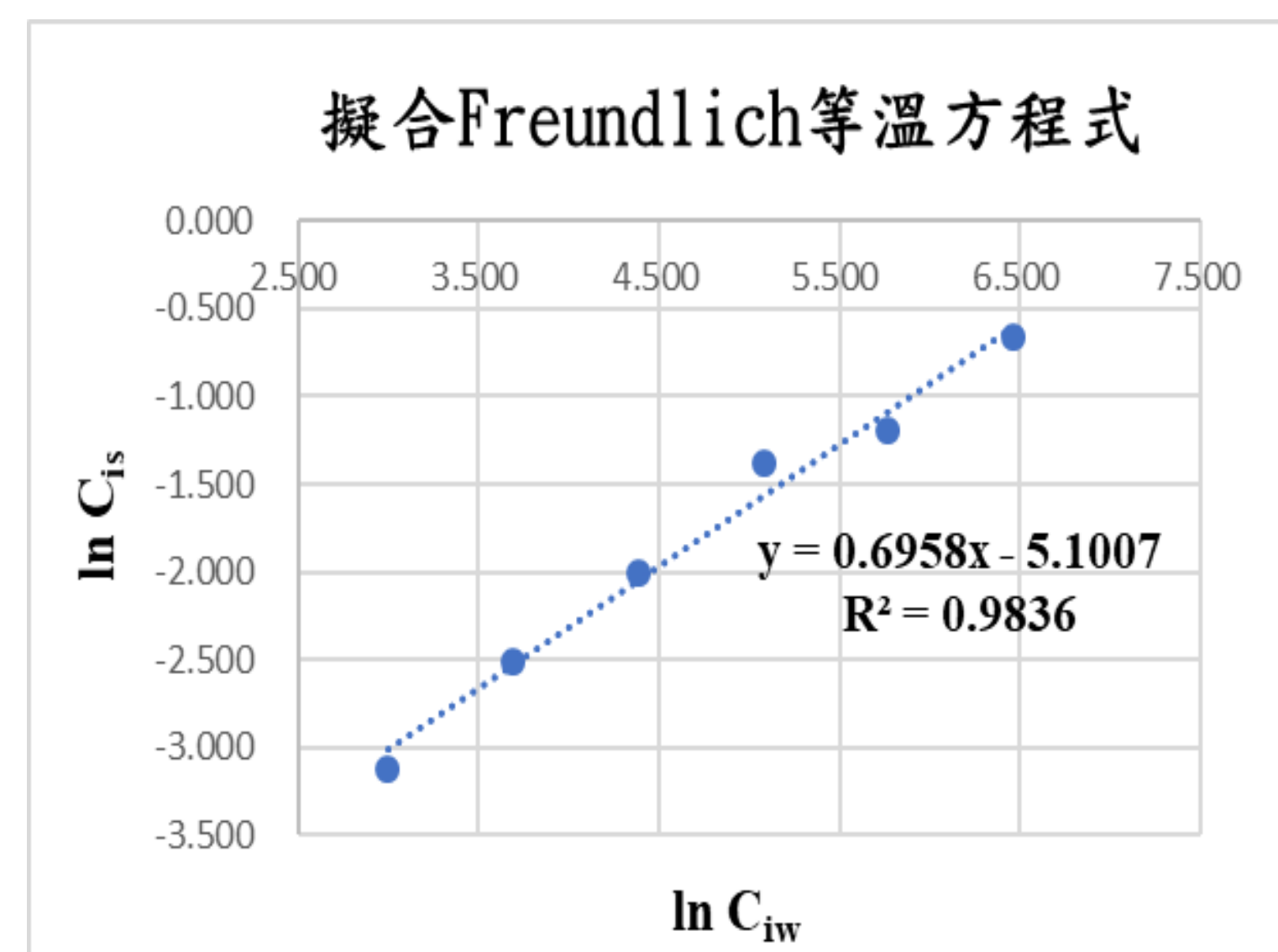
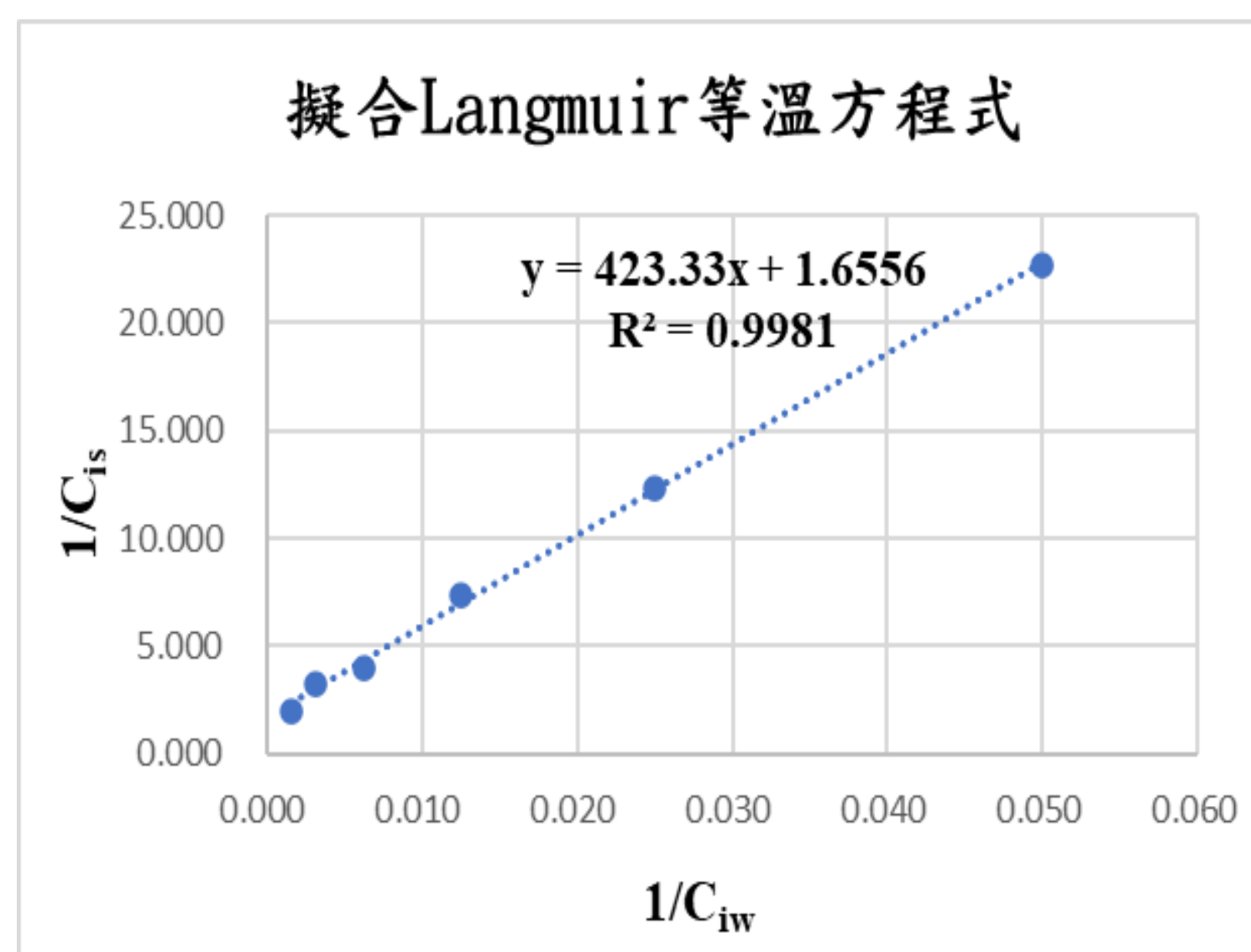
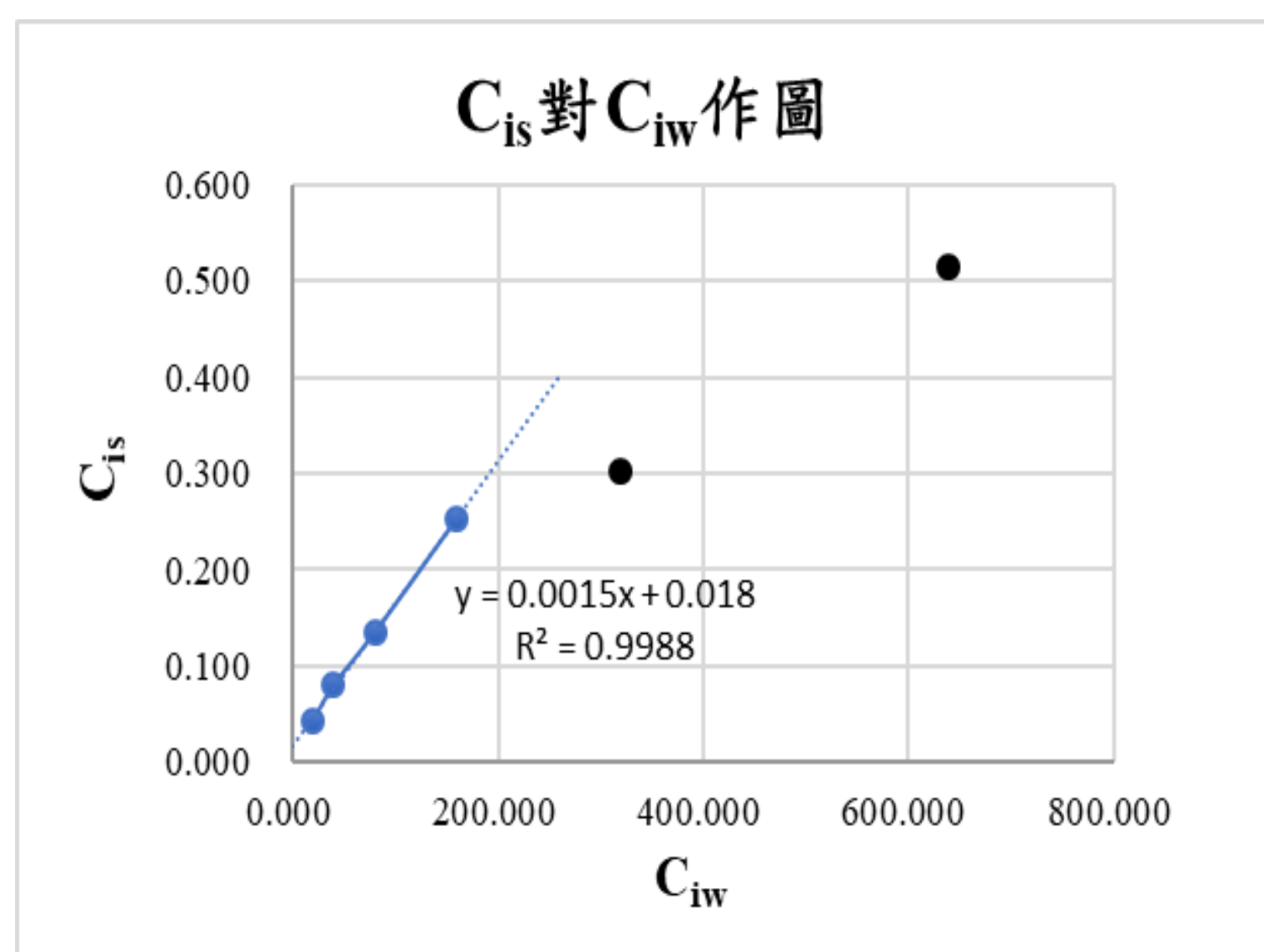
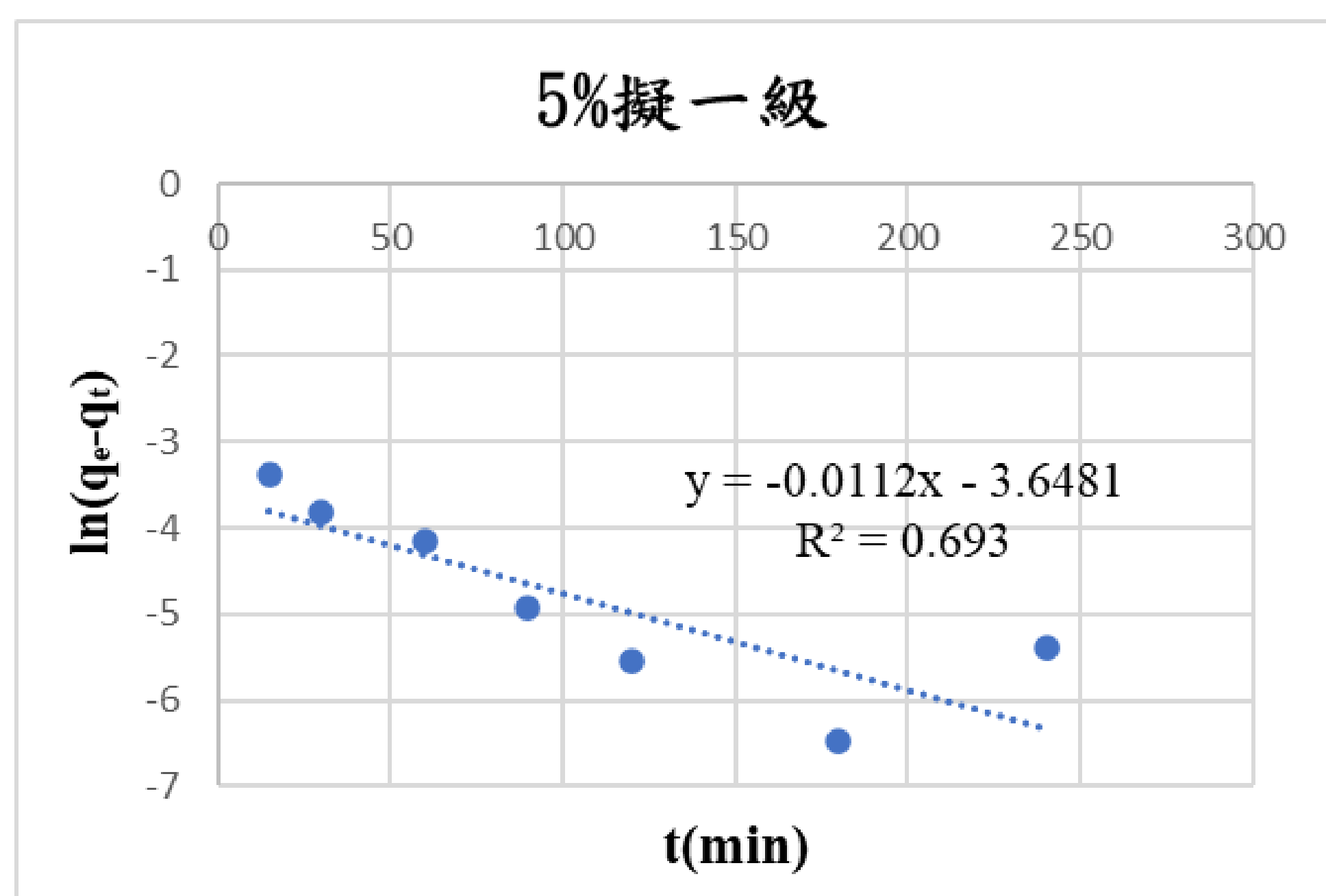
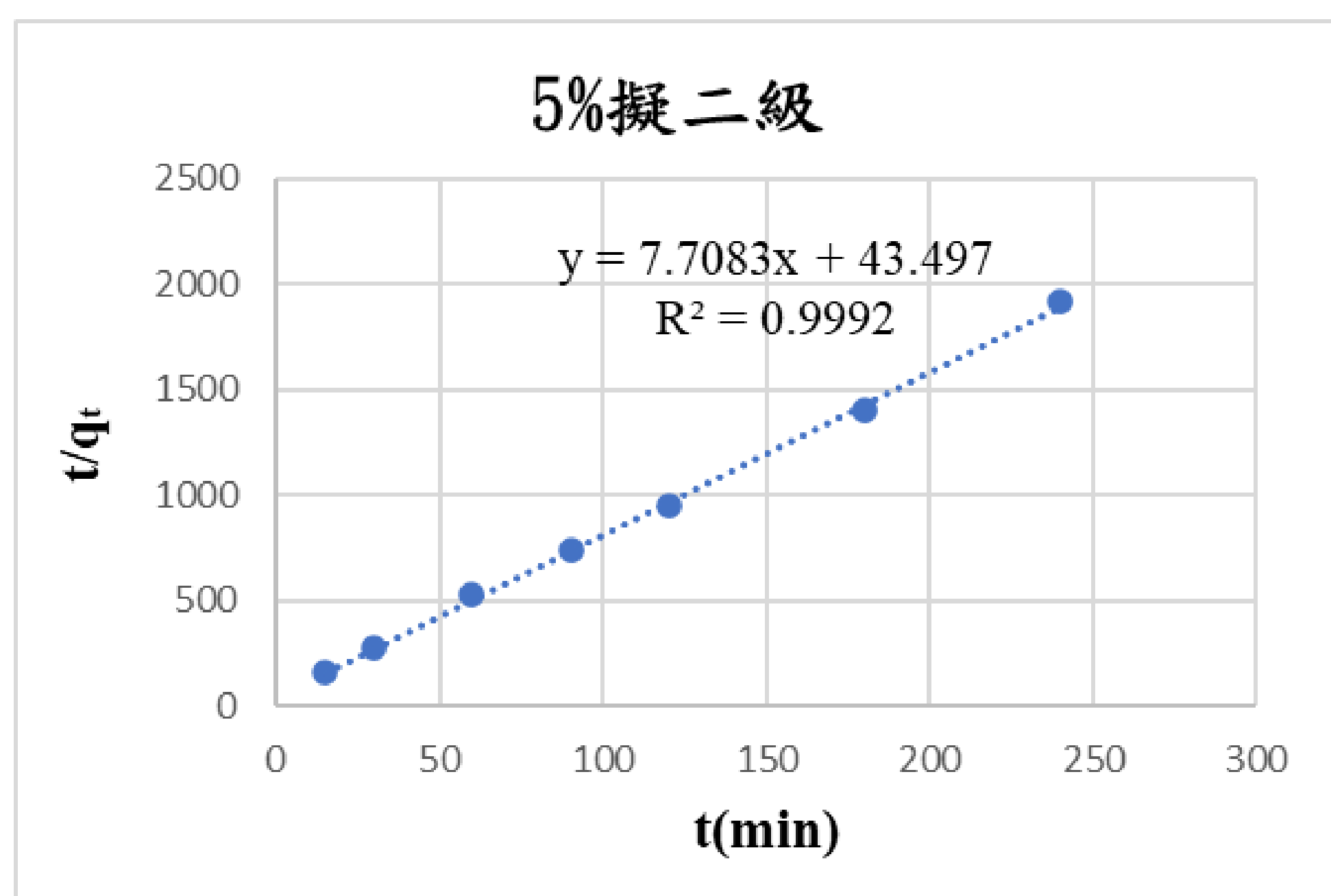
|             |       |       |       |       |       |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 天數          | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     |
| 測量吸光值/原液吸光值 | 0.449 | 0.401 | 0.402 | 0.420 | 0.418 |
| 天數          | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    |
| 測量吸光值/原液吸光值 | 0.443 | 0.444 | 0.452 | 0.436 | 0.438 |

## (八) 銅離子檢量線



|       |       |      |       |        |        |       |
|-------|-------|------|-------|--------|--------|-------|
| 濃度(M) | 0.02  | 0.04 | 0.08  | 0.16   | 0.32   | 0.64  |
| 吸光值   | 0.517 | 1.03 | 2.059 | 4.254* | 9.568* | 18.4* |

## 伍、討論



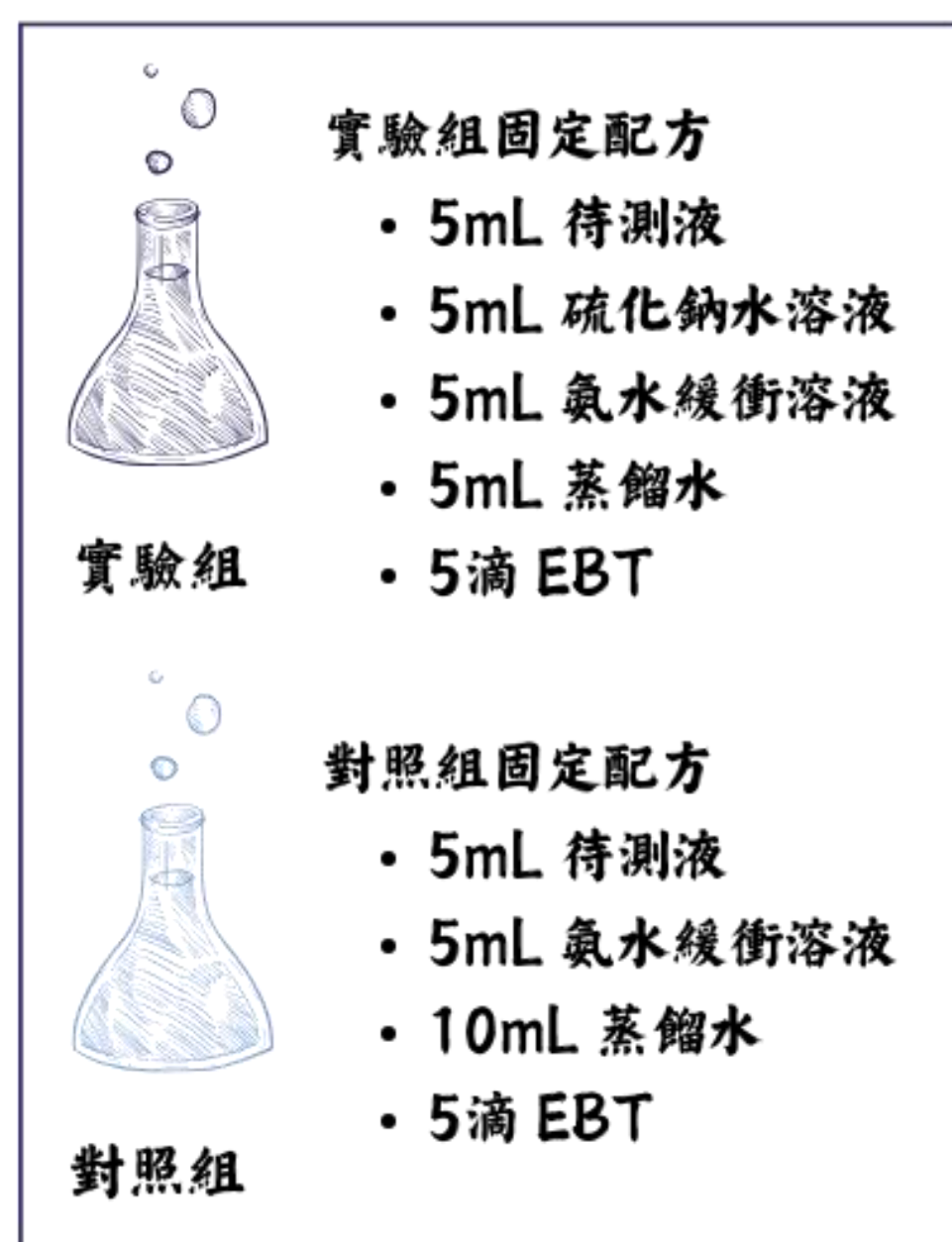
## 陸、結論

### 一、結論

- （一）、吸附效果最佳的條件為：5%海藻酸鈉、搖晃、放置90分鐘、吸附溫度25°C。
- （二）、5%海藻酸鈉晶球吸附0.02 M至0.64 M硫酸銅水溶液現象中，Langmuir方程式R<sup>2</sup>值略大於Freundlich方程式。
- （三）、5%海藻酸鈉晶球吸附0.04 M硫酸銅水溶液現象較符合擬二級動力學方程式。

### 二、未來展望

(研究者自行繪製、拍攝)



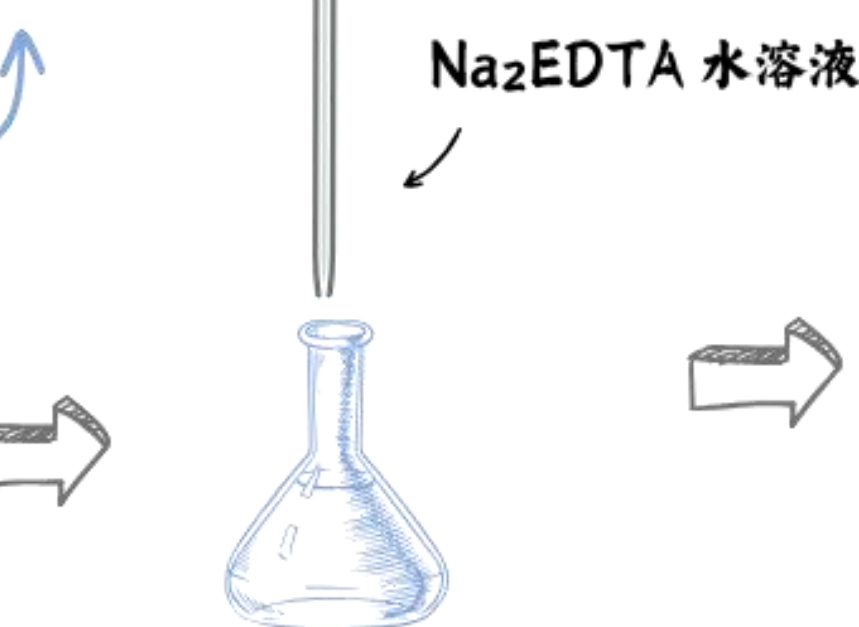
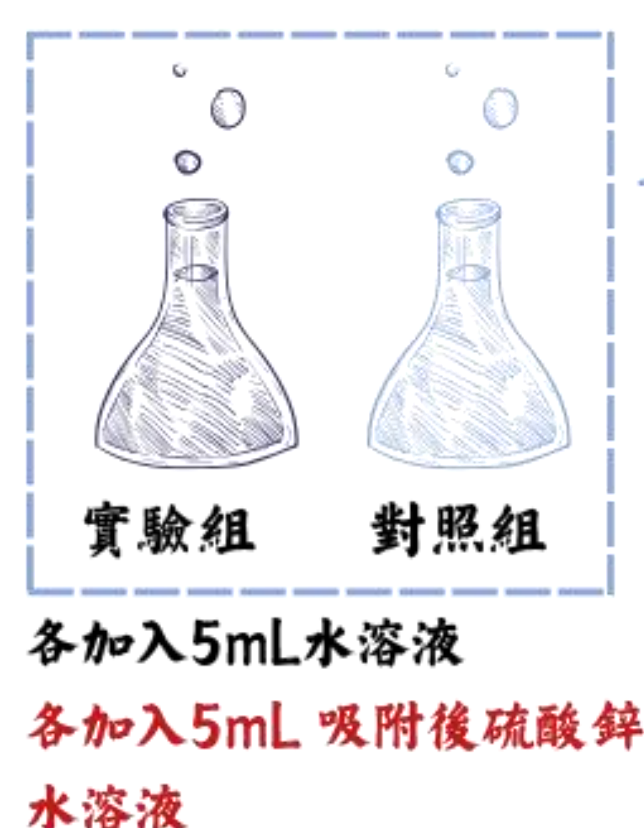
1. 晶球釋出鈣離子之實驗
2. 鋅離子吸附實驗

變因1: 吸附時間  
變因2: 溶液濃度

將晶球放入20mL蒸餾水  
將晶球放入20mL硫酸鋅水溶液中



檢測



對照組減實驗組之數據  
即為所要測得離子的量

## 柒、參考文獻資料

- 一、韓語軒、葉庭瑜、劉家宇 (2023)。「銅」歸於「晶」—探討海藻酸鈉晶球對銅離子的吸附能力。[1]
- 二、全國環境水質監測資訊網。河川水質監測。https://reurl.cc/E4d6Wg。[2]
- 三、Severtson Colloids and Polymer Composites Lab(2020/12/17)。Lecture 7: Adsorption and the Langmuir and Freundlich Models。YouTube。[3]
- 四、Y.S. HO, C.C. CHIANG, (2001) Adsorption and Sorption Studies of Acid Dye by Mixed Sorbents, Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, pp. 139-147。[4]
- 五、葉庭瑜、劉家宇、韓語軒 (2024)。「溫固」而知「吸」—以等溫線與動力學方程式分析海藻酸鈉晶球之吸附現象。[5]