

# 中華民國第 62 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

佳作

052607

探討海藻酸鈉晶球與甜菜紅素晶球移除重金屬  
離子之能力

學校名稱：臺中市立臺中第二高級中等學校

作者： 高二 吳浩宇 高二 陳竑睿 高二 安喬駿	指導老師： 顏伯昌
-----------------------------------	--------------

關鍵詞：甜菜紅素、海藻酸鈉、重金屬

## 摘要

本研究應用海藻酸鈉和甜菜紅素螯合重金屬能力及海藻酸鈉交聯作用製作海藻酸鈉晶球。並將富含甜菜紅素的火龍果汁稀釋液與海藻酸鈉混合後做成甜菜紅素晶球，比較兩種晶球在不同條件下移除銅金屬離子能力，得知兩者在不同濃度之銅離子溶液中靜置 40 分鐘反應可達平衡。且由溫度效應、酸鹼效應及濃度效應之實驗結果得知在 25°C，pH=5，不論 100 或 1000 ppm  $\text{Cu}^{2+}$ ，皆為甜菜紅素晶球移除率較海藻酸鈉晶球優。不過當高溫、強酸及保存多天的條件下甜菜紅素晶球的移除能力會逐漸下降。另外，比較晶球在 25°C，pH=7 下，移除 1000 ppm 不同重金屬離子( $\text{Co}^{2+}$ 、 $\text{Ni}^{2+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$ )之能力，得知甜菜紅素晶球的移除率皆優於海藻酸鈉晶球；此外，海藻酸鈉晶球移除能力為  $\text{Co}^{2+} \cong \text{Cu}^{2+} > \text{Ni}^{2+}$ ；而甜菜紅素晶球移除能力為  $\text{Cu}^{2+} > \text{Ni}^{2+} > \text{Co}^{2+}$ 。

## 壹、研究動機

在台灣經濟快速發展下，許多工業如電鍍業、染料業、都會排放重金屬至環境中，像銅、鎘、鉻、鉛、汞這些金屬是有毒性的，因為它們進入生物體中，無法被分解，會累積在生物體中造成疾病。銅是使用最廣泛的金屬之一，它經常出現在含有金屬污染的工業廢水中，危害生態。以傳統的去重金屬法，有化學交換法、離子交換法、逆滲透法、薄膜過濾法、化學沉澱法，這些方法，價格高和處理後廢棄物不易處理。根據第 53 屆科展「『蔗』麼『C』力-利用甘蔗渣-碳粉移除重金屬離子」<sup>[1]</sup>，利用甘蔗渣、碳粉混合在一起，可移除水中的銅離子。而在另一篇第 60 屆科展「紅得發紫---以簡易光譜儀分析火龍果肉之甜菜紅素特性」<sup>[2]</sup>中，大量存在火龍果肉中，呈現紫紅色的甜菜紅素，可與銅離子配位形成錯合物。另一篇科展「晶球世紀」<sup>[3]</sup>中發現，海藻酸鈉所製成的晶球對銅離子也有移除能力。因此本次的研究是製作出甜菜紅素與海藻酸鈉複合晶球(簡稱為甜菜紅素晶球)，並比較甜菜紅素晶球與海藻酸鈉晶球對銅離子的移除效率，希望藉由此實驗得到晶球移除銅離子之最佳參數，並應用於移除其他重金屬離子( $\text{Co}^{2+}$ 、 $\text{Ni}^{2+}$ )。

## 貳、研究目的

- 一、製作出海藻酸鈉晶球與組成比例不同之甜菜紅素晶球
- 二、研究海藻酸鈉晶球移除銅離子之環境條件：銅離子濃度、浸泡時間、溫度、pH、晶球質量、晶球存放時間
- 三、研究甜菜紅素晶球移除銅離子之環境條件：銅離子濃度、浸泡時間、溫度、pH、晶球質量、晶球存放時間
- 四、比較海藻酸鈉晶球與甜菜紅素晶球之實驗結果，並找出甜菜紅素晶球移除銅離子之最佳條件
- 五、將甜菜紅素晶球應用在移除其他重金屬離子( $\text{Co}^{2+}$ 、 $\text{Ni}^{2+}$ )

## 參、研究設備及藥品

### 一、藥品

藥品名稱	來源	藥品名稱	來源
海藻酸鈉	Alfa Aesar	銅(II)AAS 標準液 1000 ppm	AccuStandard
氯化鈣	景明	鈷(II)AAS 標準液 1000 ppm	AccuStandard
硫酸銅(II)	島久	鎳(II)AAS 標準液 1000 ppm	AccuStandard
氯化氫	福元	二苯胺基脲	WS Simpson
硫酸鎳(II)	CHONEYE	0.1M 甜菜紅素標準液	Sigma-Aldrich
醋酸鈷(II)	DAEJUNG	甜菜紅素	火龍果肉
EDTA	PANREAC		

### 二、實驗設備

燒杯	容量瓶	電子天秤	安全吸球	布氏漏斗
抽濾瓶	50 mL 針筒	離心機	分度吸量管	恆溫槽
秤量紙	滴管	磁石攪拌加熱器	試樣瓶	量筒
洗滌瓶	比色管	pH 測量儀 (PASCO)	分光光度計 (Vernier)	

## 肆、研究過程

### 一、名詞解釋

#### (一) 比爾定律(Beer law)

當一束平行單色光垂直通過某一均勻非散射的吸光物質時，其吸光度  $A$  與吸光物質的濃度  $c$  及光路徑長  $b$  成正比。

$$A = -\log \frac{I}{I_0} = \epsilon \cdot b \cdot c$$

$\epsilon$  : 吸光係數，與物質種類有關

$b$  : 光路徑長

$c$  : 物質濃度

(式一)

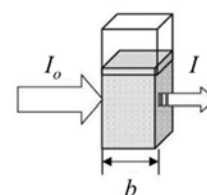


圖 4-1 比爾定律示意圖

#### (二) 檢量線

使用分光光度計可測出不同物質之吸收波長，得到該物質之最大吸收峰吸光度，根據比爾定律，物質濃度與最大吸收峰吸光度成正比，因此我們透過測量不同濃度溶液之最大吸收峰吸光度，來求得一條高度正相關之直線，該直線稱為檢量線。

#### (三) 重金屬離子之移除率

$$\left. \begin{aligned} \text{殘留率}\% &= \frac{[\text{重金屬離子}]_{\text{吸附後}}}{[\text{重金屬離子}]_{\text{吸附前}}} \times 100\% = \frac{A_{\text{吸附後}}}{A_{\text{吸附前}}} \times 100\% \\ \therefore \text{移除率}\% &= 100\% - \text{重金屬殘留率}\% \end{aligned} \right\} \text{(式二)}$$

### 三、文獻探討

#### (一) 海藻酸鈉晶球

根據文獻「令人驚奇的分子料理是這樣來的：食品科學中的晶球技術」<sup>[1]</sup>中提到海藻酸鈉（圖 4-2）是提煉自褐藻的天然多糖類聚合物，當海藻酸鈉溶液滴入氯化鈣中後， $\text{Ca}^{2+}$ 會取代  $\text{Na}^+$ 的角色，並且抓住海藻酸鈉分子之間的羧基— $\text{COOH}$ ，使得分子間的聯結性更強，此稱交聯作用（cross-linking）（圖 4-3），可讓分子形狀更為固定，流動性降低而固化，形成一種半透膜，產生穩定的球形，這正是所謂的晶球。

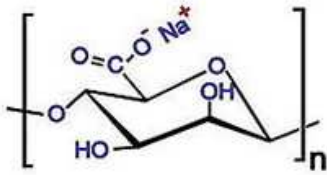


圖 4-2 海藻酸鈉結構<sup>[1]</sup>

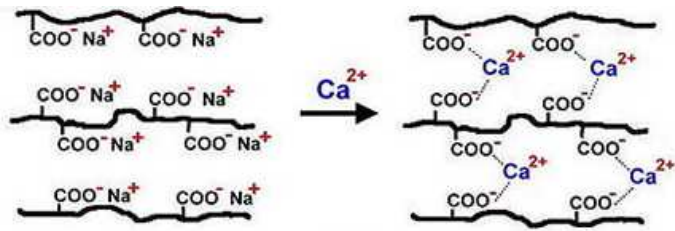


圖 4-3 海藻酸鈉與  $\text{Ca}^{2+}$ 發生交聯作用<sup>[2]</sup>

根據第 55 屆科展「晶球世紀」<sup>[3]</sup>中提到海藻酸鈉分子上的羧基— $\text{COOH}$ 和羥基— $\text{OH}$ ，能與二價離子結合，形成螯合物，故本次實驗除了將海藻酸鈉作為晶球載體的材料外，另可作為移除重金屬的材料

#### (二) 甜菜紅素

根據第 60 屆科展「紅得發紫---以簡易光譜儀分析火龍果肉之甜菜紅素特性」<sup>[4]</sup>中得知火龍果肉色澤鮮紅多汁，是因其中富含水溶性的甜菜紅素，甜菜紅素為一種 1,7-重氮七聚物結構的衍生物（圖 4-4），由甜菜醛胺酸（betalamic acid）與環多巴（cyclo-Dopa）結合而成，為弱酸性，呈粉紅色至紅紫色溶液，會受光、氧氣、溫度、pH 值及金屬離子而分解，pH 值為 4.0~5.0 時結構最為穩定，pH 值大於 11.0，易破壞糖苷結構生成甜菜黃(Betaxanthin)（圖 4-5）。而在甜菜紅素分子結構裡，有胺基與羧基，可提供電子對與金屬離子配位，稱之為螯合，就像螃蟹的螯夾住金屬離子，形成  $\text{M}^{2+}$ -甜菜紅素錯合物（圖 4-6）

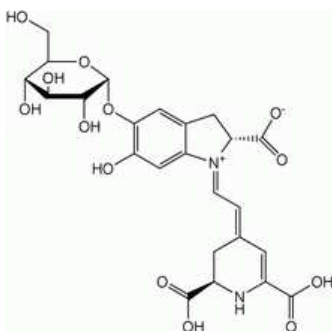


圖 4-4 甜菜紅結構

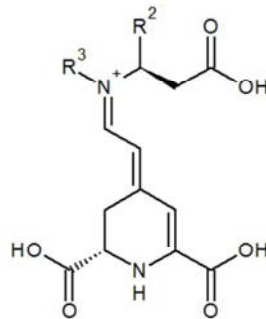


圖 4-5 甜菜黃結構

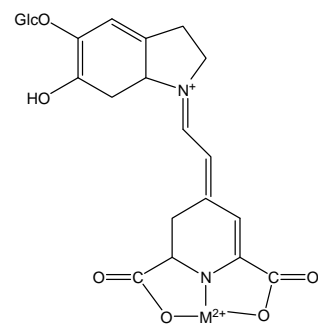


圖 4-6  $\text{M}^{2+}$ -甜菜紅素錯合物結構

### (三) 二苯胺基脲

分子式為  $C_{13}H_{12}N_2O$  (圖 4-7)，本身是一種無色稜狀晶體，根據第 55 屆科展「晶球世紀」<sup>[3]</sup>中提到，其暴露於空氣中外表會呈現紅色，微溶於水，易溶於丙酮、氯仿，因此本實驗利用丙酮來配置二苯胺基脲溶液。由於  $Ni^{2+}$  吸光度低，但在加入二苯胺基脲後呈現明顯的酒紅色，因此本實驗以二苯胺基脲作為  $Ni^{2+}$  之顯色劑。

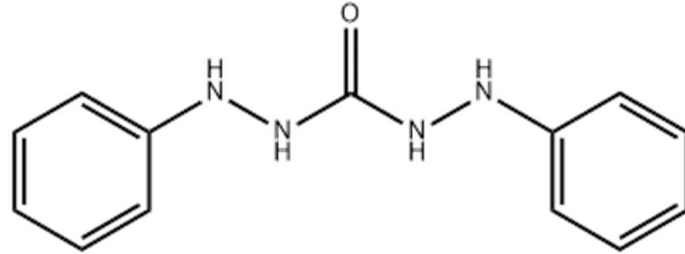


圖 4-7 二苯胺基脲結構

### 三、實驗架構

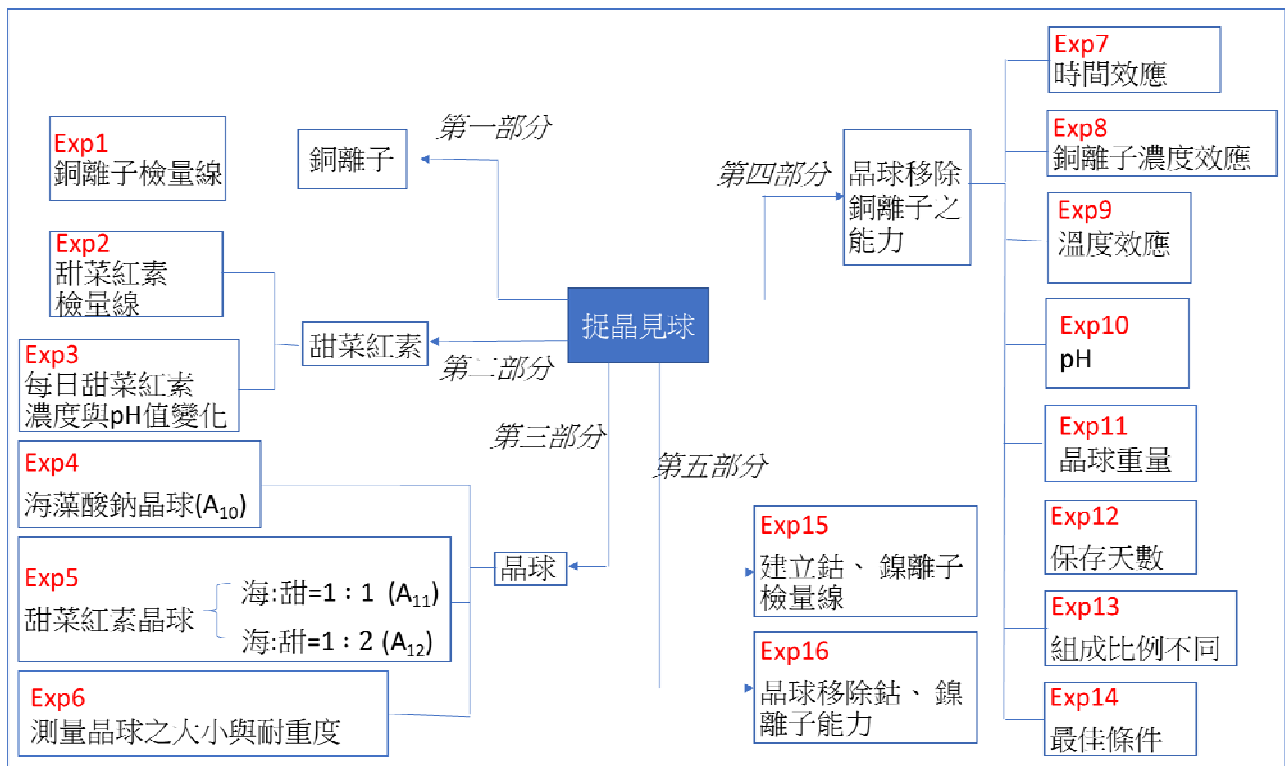


圖 4-8 實驗架構圖

## 伍、研究方法

### 【第一部分：銅離子】

#### 一、銅離子檢量線製作(實驗一)

##### (一)步驟

- 步驟 1-1 將硫酸銅 AAS 標準液 1000 ppm 分別稀釋至 800、600、400、200、100、80、60、40、20、10 ppm。
- 步驟 1-2 將每瓶溶液加入 EDTA，靜置 1 天後，離心，取澄清液，測量溶液吸收度。
- 步驟 1-3 以分光光度計測量 1000 ppm  $\text{Cu}^{2+}$  之全光譜圖，得最大吸收峰波長  $\lambda_{max}$ 。
- 步驟 1-4 使用分光光度計以  $\lambda_{max}$  測量各濃度  $\text{Cu}^{2+}$  之吸收度。
- 步驟 1-5 將步驟 1-4 數據複製至 Excel 檔，製作濃度與吸收度之散布圖並畫出回歸直線，求得檢量線。

##### (二)圖例說明



(a)步驟 1-1  $\text{Cu}^{2+}$  溶液



(b)步驟 1-2 加入 EDTA 粉末



(c)步驟 1-3 分光光度計測量

圖 5-1

### 【第二部分：甜菜紅素】

#### 二、製作甜菜紅素檢量線(實驗二)

##### (一)步驟

- 步驟 2-1 將 0.1 M 標準甜菜紅素溶液分別稀釋至 0.01、0.008、0.006、0.004、0.002、0.001 M。
- 步驟 2-2 以分光光度計測量 0.01 M 甜菜紅素之全光譜圖，得最大吸收峰波長  $\lambda_{max}$ 。
- 步驟 2-3 使用分光光度計以  $\lambda_{max}$  測量各濃度甜菜紅素之最大吸收峰吸收度。
- 步驟 2-4 將步驟 2-3 數據複製至 Excel 檔，製作甜菜紅素濃度與吸收度之散布圖並畫出回歸直線，求得檢量線。

##### (二)圖例說明



步驟 2-1 甜菜紅素溶液

圖 5-2

### 三、測量每日甜菜紅素濃度與 pH 值之變化(實驗三)

#### (一)步驟

- 步驟 3-1 將火龍果果皮去掉，將果肉榨成汁後，用濾網將籽篩出。
- 步驟 3-2 將火龍果汁倒入離心管中，放入離心機裡，待離心完成後，將液體取出，過濾掉果膠，取得實驗所需之果汁原液。
- 步驟 3-3 用分度吸量管取出 1 mL 原液，置入容量瓶後加水至 25 mL，製成稀釋液。
- 步驟 3-4 測量果汁稀釋液之最大吸收峰值，再以檢量線得稀釋液中甜菜紅素濃度。
- 步驟 3-5 將步驟 3-4 所得濃度乘 25 倍，算出果汁原液之甜菜紅素濃度。
- 步驟 3-6 再將果汁原液中甜菜紅素按比例稀釋至 0.1 M，以便後續實驗使用。
- 步驟 3-7 將果汁稀釋液放置於通風環境，維持室溫 25 °C。
- 步驟 3-8 使用分光光度計每日測量果汁稀釋液吸收度變化，計算甜菜紅素濃度衰減變化，測量為期 5 天。
- 步驟 3-9 使用 pH Meter 每日計測量果汁稀釋液之 pH 值衰減變化，測量為期 5 天。

#### (二)圖例說明

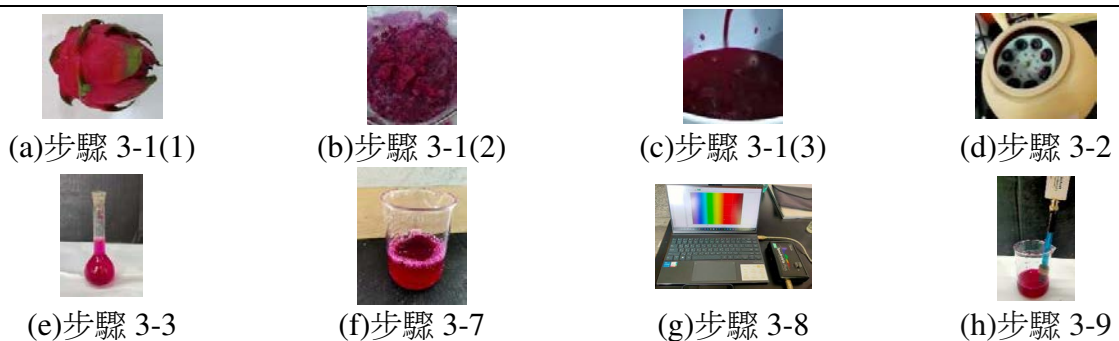


圖 5-3

### 【第三部分：製作品球】

### 四、製作海藻酸鈉晶球(實驗四)

#### (一)步驟

- 步驟 4-1 取 21.6 g 的海藻酸鈉粉末與約 800 mL 的水置入燒杯中，加熱攪拌至完全溶解，待冷卻，再將溶液倒入容量瓶中，加水至 1000 mL，製得 0.1 M  $\text{CaCl}_2$  溶液，以便後續實驗使用。
- 步驟 4-2 取 11.1 g 的  $\text{CaCl}_2$  粉末與約 800 mL 的水置入燒杯中，加熱攪拌至完全溶解，待冷卻，再將溶液倒入容量瓶中，加水至 1000 mL，製得 0.1 M  $\text{CaCl}_2$  水溶液，以便後續實驗使用。
- 步驟 4-3 將 0.1 M 海藻酸鈉溶液裝入容量為 50 mL 的針筒中，緩緩擠壓針筒，以一滴為單位滴入  $\text{CaCl}_2$  水溶液中。
- 步驟 4-4 過濾步驟 4-3 之溶液，可得到海藻酸鈉晶球(編號 A<sub>10</sub>)。

#### (二)圖例說明

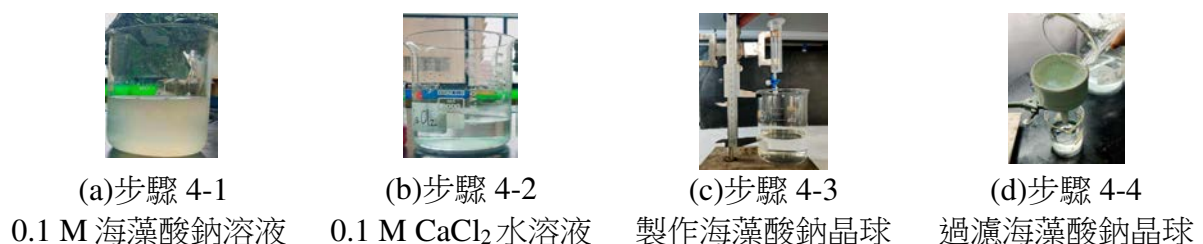


圖 5-4



## 五、製作甜菜紅素晶球(實驗五)

### (一)步驟

- 步驟 5-1 取 50 mL 0.1 M 海藻酸鈉溶液與 50 mL 0.1 M 甜菜紅素混和。
- 步驟 5-2 將步驟 5-1 之混和溶液裝入容量為 50 mL 的針筒中，緩緩擠壓針筒，以一滴為單位滴入  $\text{CaCl}_2$  水溶液中。
- 步驟 5-3 過濾步驟 5-2 溶液，可得到海藻酸鈉與甜菜紅素含量比為 1:1 之甜菜紅素晶球(編號  $A_{11}$ )。
- 步驟 5-4 將步驟 5-1 甜菜紅素的體積分別更換為 100、150、200、250 mL，重複上述步驟可製作不同組成之甜菜紅素晶球( $A_{12}$ 、 $A_{13}$ 、 $A_{14}$ 、 $A_{15}$ )。

### (二)圖例說明



(a)步驟 5-2~5-4  
製作甜菜紅素晶球



(b)步驟 5-3  
過濾甜菜紅素晶球

圖 5-5

## 六、測量晶球之大小與耐重度(實驗六)

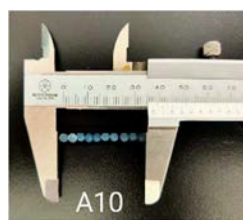
### (一)步驟

- 步驟 6-1 觀察海藻酸鈉晶球( $A_{10}$ )與甜菜紅素晶球( $A_{11}$ 、 $A_{12}$ 、 $A_{13}$ 、 $A_{14}$ 、 $A_{15}$ )外觀。
- 步驟 6-2 取 10 顆  $A_{10}$  晶球，使用電子秤測量總質量，計算每顆晶球平均質量大小。
- 步驟 6-3 將 10 顆  $A_{10}$  晶球整齊排成一列後，使用游標尺測量總長度，計算每顆晶球平均直徑大小。
- 步驟 6-4 再將 4 顆  $A_{10}$  平均置於在玻片四角落，取一空燒杯壓於晶球上，使用滴定管逐滴加水入燒杯中，待晶球開始形變，停止加水。
- 步驟 6-5 測量含水燒杯之總重，計算出每顆  $A_{10}$  平均耐重度。
- 步驟 6-6 取甜菜紅素晶球( $A_{11}$ 、 $A_{12}$ 、 $A_{13}$ 、 $A_{14}$ 、 $A_{15}$ )，重複步驟 6-1 至步驟 6-5。

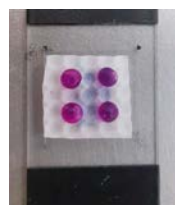
### (二)圖例說明



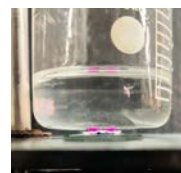
(a)步驟 6-2



(b)步驟 6-3



(c)步驟 6-4



(d)步驟 6-4



(e)步驟 6-4

圖 5-6



## 【第四部分】晶球移除銅離子之能力

### 七、時間效應 (實驗七)

#### (一)步驟

步驟 7-1 以容量瓶配製 100 ppm、1000 ppm 之  $\text{Cu}^{2+}$  溶液。

步驟 7-2 將海藻酸鈉晶球( $A_{10}$ )以 1.0 g 為單位分裝多瓶。

步驟 7-3 取 8 瓶晶球( $A_{10}$ )分別裝入 50 mL 100 ppm  $\text{Cu}^{2+}$  溶液，置於恆溫槽，溫度控制在 25 °C，靜置 20、40、60、120 分鐘後觀察。

步驟 7-4 另取 8 瓶晶球( $A_{10}$ )裝入 50 mL 1000 ppm  $\text{Cu}^{2+}$  溶液，置於恆溫槽，溫度控制在 25 °C，靜置 20、40、60、120 分鐘後觀察。

步驟 7-5 取甜菜紅素晶球( $A_{11}$ )，重複步驟 7-2 至步驟 7-4。

步驟 7-6 達指定的反應時間後，取其液體並加入 1.0 g EDTA，靜置 1 天。

步驟 7-7 取出步驟 7-6 之溶液，並測量溶液之吸收度。

步驟 7-8 比較反應前後溶液之吸收度，求得  $\text{Cu}^{2+}$  移除率。

#### (二)圖例說明



(a)步驟 7-1

$\text{Cu}^{2+}$  溶液

(左 100 ppm；右 1000 ppm)



(b)步驟 7-2~7-5

分裝多瓶晶球

(上排  $A_{10}$ ；下排  $A_{11}$ )



(c)步驟 7-3~7-5

25 °C，靜置至指定時間

圖 5-7

### 八、銅離子濃度效應 (實驗八)

#### (一)步驟

步驟 8-1 以容量瓶配製 100、200、400、600、800、1000 ppm 之  $\text{Cu}^{2+}$  溶液。

步驟 8-2 將海藻酸鈉晶球( $A_{10}$ )與甜菜紅素晶球( $A_{11}$ )以 1.0 g 為單位分裝多瓶。

步驟 8-3 再將瓶每晶球分別裝入 50 mL 種 6 不同濃度  $\text{Cu}^{2+}$  溶液，置於恆溫槽，溫度控制在 25 °C，靜置 1 小時後觀察。

步驟 8-4 取甜菜紅素晶球( $A_{11}$ )，重複步驟 8-2 至步驟 8-3。

步驟 8-5 重複步驟 7-6 至步驟 7-8。

### 九、溫度效應 (實驗九)

#### (一)步驟

步驟 9-1 以容量瓶配製 100 ppm、1000 ppm 之  $\text{Cu}^{2+}$  溶液。

步驟 9-2 將海藻酸鈉晶球( $A_{10}$ )以 1.0 g 為單位分裝多瓶。

步驟 9-3 取 4 瓶晶球( $A_{10}$ )分別裝入 50 mL 100 ppm 之  $\text{Cu}^{2+}$  溶液，置於恆溫槽，溫度分別控制在 5、25、35、45 °C，靜置 1 小時後觀察。

步驟 9-4 取 4 瓶晶球( $A_{10}$ )分別裝入 50 mL 1000 ppm 之  $\text{Cu}^{2+}$  溶液，置於恆溫槽，溫度分別控制在 5、25、35、45 °C 靜置 1 小時後觀察。

步驟 9-5 取甜菜紅素晶球( $A_{11}$ )，重複步驟 9-2 至步驟 9-4。

步驟 9-6 重複步驟 7-6 至步驟 7-8。

## 十、酸鹼效應 (實驗十)

### (一)步驟

步驟 10-1 以容量瓶配製  $2.0 \times 10^{-5}$ 、 $2.0 \times 10^{-4}$ 、 $2.0 \times 10^{-3}$ 、 $2.0 \times 10^{-2}$  M 之 HCl 溶液

步驟 10-2 以容量瓶配製 200、2000 ppm 之  $\text{Cu}^{2+}$  溶液。

步驟 10-3 取等體積 200 ppm  $\text{Cu}^{2+}$  與步驟 9-1 之溶液等體積混和，配製 pH=2、3、4、5 之 **100 ppm**  $\text{Cu}^{2+}$  溶液。

步驟 10-4 取等體積 2000 ppm  $\text{Cu}^{2+}$  與步驟 9-1 之溶液等體積混和，配製 pH=2、3、4、5 之 **1000 ppm**  $\text{Cu}^{2+}$  溶液。

步驟 10-5 將海藻酸鈉晶球(A<sub>10</sub>)以 1.0 g 為單位分裝多瓶。

步驟 10-6 取 10 瓶晶球(A<sub>10</sub>)分別裝入 50 mL 步驟 9-3 不同 pH 值之 **100 ppm**  $\text{Cu}^{2+}$  溶液，置於恆溫槽，溫度控制在 25 °C，靜置 1 小時後觀察。

步驟 10-7 取 10 瓶晶球(A<sub>10</sub>)分別裝入 50 mL 步驟 10-4 不同 pH 值之 **1000 ppm**  $\text{Cu}^{2+}$  溶液，置於恆溫槽，溫度控制在 25 °C，靜置 1 小時後觀察。

步驟 10-8 另取甜菜紅素晶球(A<sub>11</sub>)，重複步驟 10-5 至步驟 10-7。

步驟 10-9 重複步驟 7-6 至步驟 7-8

### (二)圖例說明



(a) 步驟 10-3 200 ppm  $\text{Cu}^{2+}$



(b) 步驟 10-4 2000 ppm  $\text{Cu}^{2+}$

圖 5-8

## 十一、晶球重量效應 (實驗十一)

### (一)步驟

步驟 11-1 以容量瓶配製 100 ppm、1000 ppm 之  $\text{Cu}^{2+}$  溶液。

步驟 11-2 分別將海藻酸鈉晶球(A<sub>10</sub>)以 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 g 分裝多瓶。

步驟 11-3 取 5 瓶不同重量之晶球(A<sub>10</sub>)分別裝入 50 mL **100 ppm** 之  $\text{Cu}^{2+}$  溶液，置於恆溫槽，溫度控制在 25 °C，靜置 1 小時後觀察。

步驟 11-4 取 5 瓶不同重量之晶球(A<sub>10</sub>)分別裝入 50 mL **1000 ppm** 之  $\text{Cu}^{2+}$  溶液，置於恆溫槽，溫度控制在 25 °C，靜置 1 小時後觀察。

步驟 11-5 另取甜菜紅素晶球(A<sub>11</sub>)，重複步驟 11-2 至步驟 11-4。

步驟 11-6 重複步驟 7-6 至步驟 7-8。

### (二)圖例說明



(a) 步驟 11-2

以 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 g 分裝多瓶



(b) 步驟 11-3、11-4  
25 °C，靜置 1 小時

圖 5-9

## 十二、保存不同天數之晶球(實驗十二)

---

### (一)步驟

- 步驟 12-1 以容量瓶配製 100 ppm、1000 ppm 之  $\text{Cu}^{2+}$  溶液。
- 步驟 12-2 將海藻酸鈉晶球( $A_{10}$ )以 1.0 g 為單位，分裝多瓶，在 25 °C 的環境下分別放置 1~5 天。(放置 1~5 天之晶球編號依序為( $A_{10}$ 、 $B_{10}$ 、 $C_{10}$ 、 $D_{10}$ 、 $E_{10}$ )。
- 步驟 12-3 觀察各晶球( $A_{10}$ 、 $B_{10}$ 、 $C_{10}$ 、 $D_{10}$ 、 $E_{10}$ )之外觀。
- 步驟 12-4 達保存時間後，將海藻酸鈉晶球( $A_{10}$ 、 $B_{10}$ 、 $C_{10}$ 、 $D_{10}$ 、 $E_{10}$ )裝入 50 mL 100 ppm 之  $\text{Cu}^{2+}$  溶液，置於恆溫槽，溫度控制在 25 °C，靜置 1 小時後觀察。
- 步驟 12-5 達保存時間後，將海藻酸鈉晶球( $A_{10}$ 、 $B_{10}$ 、 $C_{10}$ 、 $D_{10}$ 、 $E_{10}$ )裝入 50 mL 1000 ppm 之  $\text{Cu}^{2+}$  溶液，置於恆溫槽，溫度控制在 25 °C，靜置 1 小時後觀察。
- 步驟 12-6 另取甜菜紅素晶球( $A_{11}$ )，重複步驟 12-2 至步驟 12-5。  
(放置 1~5 天之晶球編號依序為( $A_{10}$ 、 $B_{10}$ 、 $C_{10}$ 、 $D_{10}$ 、 $E_{10}$ )。
- 步驟 12-6 重複步驟 7-6 至步驟 7-8。
- 

## 十三、組成比例不同之甜菜紅素晶球(實驗十三)

---

### (一)步驟

- 步驟 13-1 以容量瓶配製 100 ppm、1000 ppm 之  $\text{Cu}^{2+}$  溶液。
- 步驟 13-2 將實驗 5 之海藻酸鈉晶球( $A_{12}$ )裝入 50 mL 100 ppm 之  $\text{Cu}^{2+}$  溶液，置於恆溫槽，溫度控制在 25°C，靜置 1 小時後觀察。
- 步驟 13-3 將實驗 5 之海藻酸鈉晶球( $A_{12}$ )裝入 50 mL 1000 ppm 之  $\text{Cu}^{2+}$  溶液，置於恆溫槽，溫度控制在 25°C，靜置 1 小時後觀察。
- 步驟 13-4 重複步驟 7-6 至步驟 7-8。
- 

## 十四、綜合實驗七至實驗十二之最佳實驗條件下，探討晶球對銅離子之移除力(實驗十四)

---

### (一)步驟

- 步驟 14-1 以實驗七~十二之數據分析海藻酸鈉晶球( $A_{10}$ )移除  $\text{Cu}^{2+}$  移除率最高之實驗條件(反應時間、 $\text{Cu}^{2+}$  濃度、溫度、pH 值、晶球質量)
- 步驟 14-2 取  $A_{10}$  最佳實驗參數進行  $\text{Cu}^{2+}$  移除實驗。
- 步驟 14-3 取海藻酸鈉晶球( $A_{11}$ )，重複步驟 14-1~14-2。
- 步驟 14-4 重複步驟 7-6 至步驟 7-8。
- 步驟 14-5 重複步驟 14-1~14-4 十次。
-

## 【第五部分】晶球移除其他重金屬能力

### 十五、建立 $\text{Co}^{2+}$ 、 $\text{Ni}^{2+}$ 檢量線 (實驗十五)

#### (一)步驟

- 步驟 15-1 將醋酸鈷(II)、硫酸鎳 AAS 標準液 1000 ppm 分別稀釋至 800、600、400、200、100 ppm。
- 步驟 15-2 醋酸鈷(II)加入 1.0 g EDTA 與硫酸鎳滴入 10 滴二苯胺基脲作為顯色劑，靜置 1 天後，取澄清液，測量溶液吸收度。
- 步驟 15-3 以分光光度計測量 1000 ppm  $\text{Co}^{2+}$ 與  $\text{Ni}^{2+}$ 之全光譜圖，得最大吸收峰波長  $\lambda_{max}$ 。
- 步驟 15-4 使用分光光度計以  $\lambda_{max}$ 測量各溶液之各濃度之吸收度。
- 步驟 15-5 將步驟 15-4 數據複製至 Excel 檔，製作濃度與吸收度之散布圖並畫出回歸直線，求得檢量線。

#### (二)圖例說明



步驟 15-1 配製  $\text{Co}^{2+}$ 、 $\text{Ni}^{2+}$ 溶液

圖 15-1

### 十六、晶球移除不同重金屬能力 (實驗十六)

#### (一)步驟

- 步驟 16-1 分別以容量瓶配製 1000 ppm  $\text{Co}^{2+}$ 、 $\text{Ni}^{2+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$ 溶液。
- 步驟 16-2 取 3 瓶海藻酸鈉晶球(A<sub>10</sub>)分別裝入 50 mL 1000 ppm  $\text{Co}^{2+}$ 、 $\text{Ni}^{2+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$ 溶液，置於恆溫槽，溫度控制在 25°C，靜置 1 小時後觀察。
- 步驟 16-3 另取甜菜紅素晶球(A<sub>11</sub>)，重複步驟 16-2。
- 步驟 16-4 1 小時後，分別取出液體，並在  $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Co}^{2+}$ 加入 1.0 g EDTA， $\text{Ni}^{2+}$ 滴入 10 滴二苯胺基脲，靜置 1 天。
- 步驟 16-5 取出步驟 16-4 之溶液，並測量溶液之吸收度。
- 步驟 16-6 比較反應前後溶液之吸收度，求得  $\text{Co}^{2+}$ 、 $\text{Ni}^{2+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$ 之移除率。

#### (二)圖例說明



步驟 16-2 25°C，靜置 1 小時

圖 16-1

## 陸、研究結果與討論

### 【第一部分：銅離子】

#### 一、建立 $\text{Cu}^{2+}$ 檢量線(實驗一)

##### (一) 實驗結果

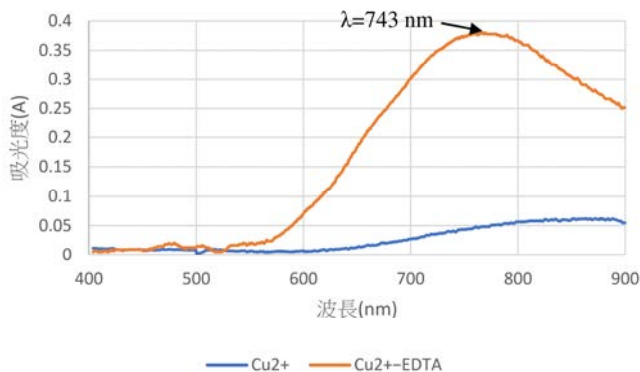


圖 6-1：1000 ppm  $\text{Cu}^{2+}$  及 1000 ppm  $\text{Cu}^{2+}$ -EDTA 溶液之吸收光譜

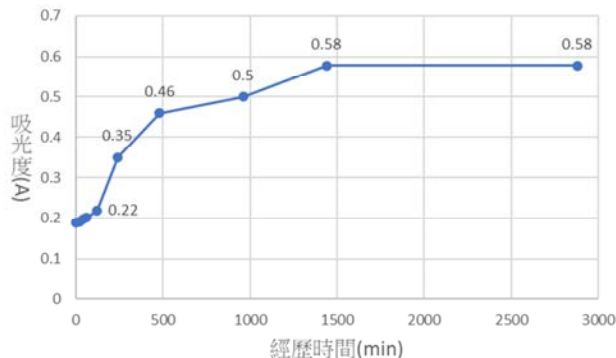


圖 6-2：整合時間對吸收度的影響

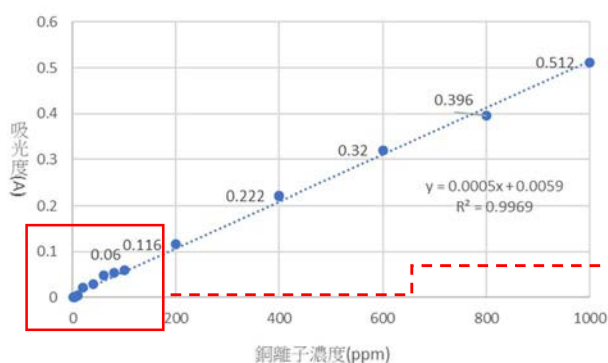


圖 6-3：1~1000 ppm  $\text{Cu}^{2+}$ -EDTA 之檢量線

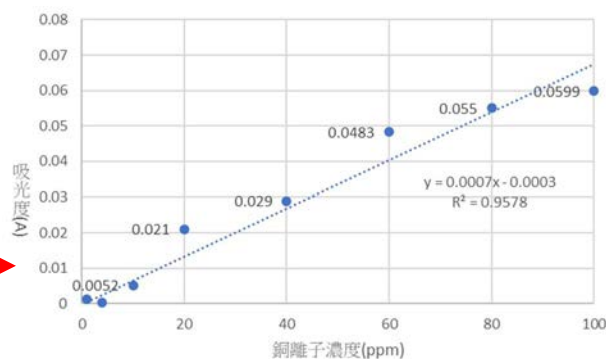


圖 6-4：1~100 ppm  $\text{Cu}^{2+}$ -EDTA 之檢量線

##### (二) 說明與討論

1. 由圖 6-1 得知未與顯色劑反應的  $\text{Cu}^{2+}$  溶液在 400~900 nm 的吸收度偏低，不易使用分光光度計來定量水中的  $\text{Cu}^{2+}$ 。因 EDTA 與  $\text{Cu}^{2+}$  螯合後(本實驗稱為  $\text{Cu}^{2+}$ -EDTA 溶液)，會提高溶液吸收度(圖 6-2)，故本實驗使用 EDTA 作為銅離子溶液的顯色劑，藉以提高分光光度計偵測微量  $\text{Cu}^{2+}$  濃度的靈敏度。
2. 由圖 6-1 得知 1000 ppm  $\text{Cu}^{2+}$ -EDTA 溶液之最大吸收峰坐落在波長為 743 nm，且由圖 6-2 可知溶液在波長為 743 nm 的吸收度會隨整合時間越久而達到最大值，本研究所提  $\text{Cu}^{2+}$ -EDTA 溶液皆為  $\text{Cu}^{2+}$  與 EDTA 螯合 1 日後之溶液。
3. 圖 6-3 與圖 6-4 顯示 10 ppm~1000 ppm  $\text{Cu}^{2+}$  經顯色後，溶液在波長為 743 nm 時的吸收度與  $\text{Cu}^{2+}$  濃度有高度正相關。故本研究可透過檢量線方程式將吸收度換算成  $\text{Cu}^{2+}$  濃度。

## 【第二部分：甜菜紅素】

### 二、建立甜菜紅素檢量線(實驗二)

#### (一) 實驗結果

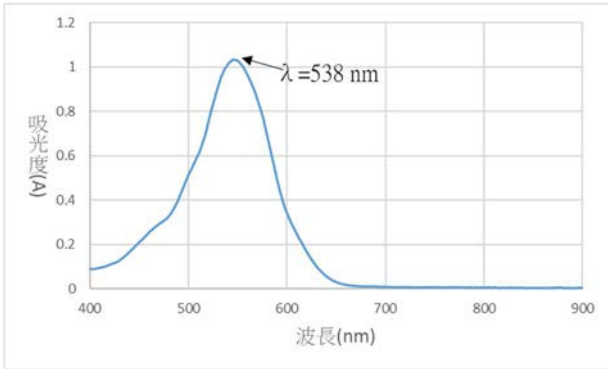


圖 6-5：0.01 M 甜菜紅素溶液之吸收光譜

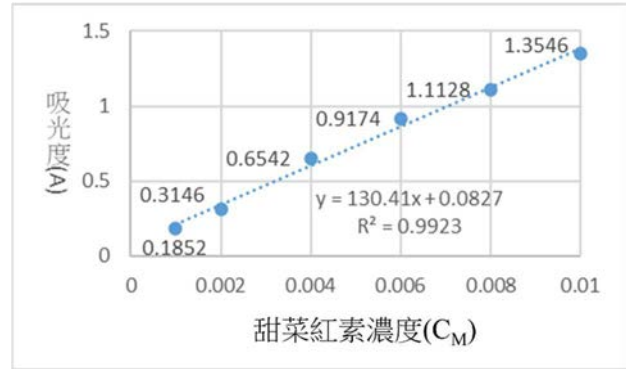


圖 6-6：0.001~0.01 M 甜菜紅素溶液之檢量線

#### (二) 說明與討論

1. 圖 6-5 可知 0.01 M 甜菜紅素溶液之最大吸收峰坐落在波長為 538 nm，圖 6-6 顯示甜菜紅素溶液在波長為 538 nm 時的吸收度與甜菜紅素濃度有高度正相關。
2. 故本研究可透過檢量線方程式將吸收度換算成甜菜紅素濃度。

### 三、每日甜菜紅素濃度與 pH 值之變化(實驗三)

#### (一) 實驗結果

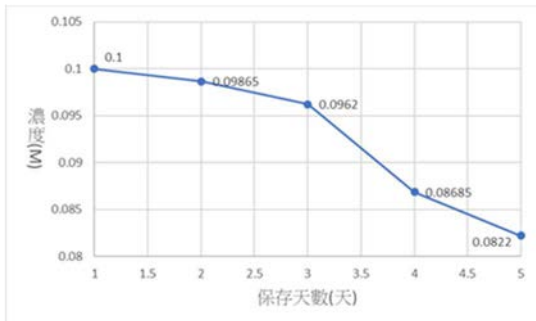


圖 6-7：果汁稀釋液之甜菜紅素濃度變化圖

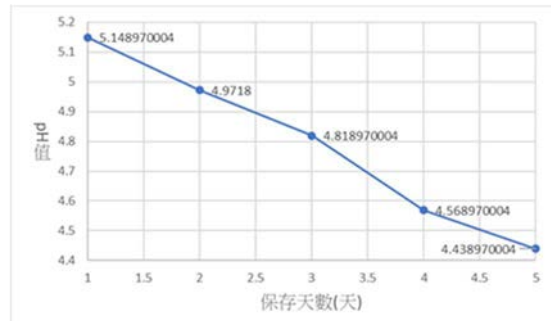


圖 6-8：果汁稀釋液之甜菜紅素 pH 值變化圖

#### (二) 說明與討論

1. 圖 6-7 與圖 6-8 顯示火龍果汁稀釋液的甜菜紅素濃度與 pH 值在第 1 天(當天)皆最大值，隨著保存天數越多，甜菜紅素濃度與 pH 值皆會變小，溶液逐漸酸敗。
2. 本研究只取當日之火龍果汁加以稀釋至甜菜紅素為 0.1 M，以便後續實驗使用。






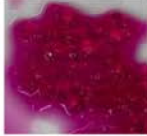


### 【第三部分：製作晶球】

#### 四、探討晶球外觀、大小及耐重度(實驗四、五、六)

##### (一) 實驗結果

表 6-1 各晶球之外觀、大小及耐重度比較表

	A <sub>10</sub>	A <sub>11</sub>	A <sub>12</sub>	A <sub>13</sub>	A <sub>14</sub>	A <sub>15</sub>
照片						
外觀	白色球形	深紅色球形	深紅色球形	深紅色不規則形	深紅色不規則形	深紅色不規則形(接近液態)
質量(g/顆)	0.0396	0.0304	0.0375	0.0421	0.0336	0.0396
直徑(mm)	3.55	3.30	3.25	3.50	3.20	3.55
耐重度(g/顆)	33.70	28.75	22.75	13.50	7.00	1.50

註 1：晶球平均質量 =  $\frac{10 \text{顆晶球總質量}}{10}$ ；晶球平均直徑長度 =  $\frac{10 \text{顆晶球成列總長度}}{10}$

註 2：晶球耐重度 =  $\frac{\text{含水燒杯總重}}{4}$

##### (二) 說明與討論

1. 由表 6-1 可知當海藻酸鈉占比越低，晶球越無法成形，且耐重度也較差。
2. 故本研究探討甜菜紅素晶球以 A<sub>11</sub> 與 A<sub>12</sub> 為主。

### 【第四部分】晶球移除 Cu<sup>2+</sup>之能力

#### 五、移除時間效應(實驗七)

##### (一) 實驗結果：低濃度 Cu<sup>2+</sup>溶液 (100 ppm)

表 6-2：100 ppm Cu<sup>2+</sup> 溶液之吸收光譜數據

晶球種類	海藻酸鈉晶球 A <sub>10</sub>				甜菜紅素晶球 A <sub>11</sub>			
	20	40	60	120	20	40	60	120
時間(min)								
吸收度(初)	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065
吸收度(末)	0.025	0.025	0.024	0.023	0.024	0.024	0.022	0.022
移除率(%)	61.5	61.5	63.1	64.6	63.1	63.1	66.2	66.2



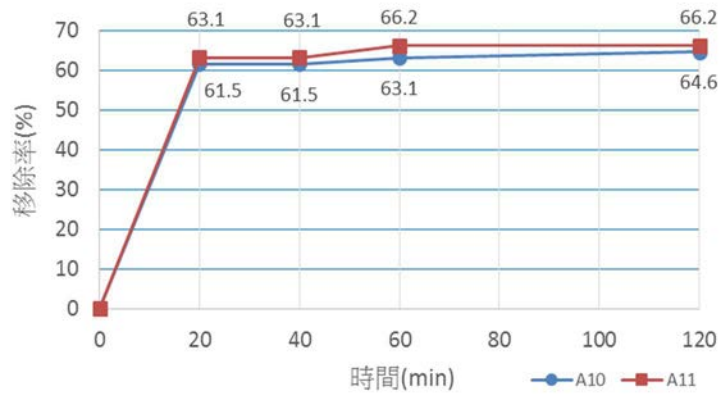


圖 6-9：不同反應時間對移除率的影響 (100 ppm Cu<sup>2+</sup>)

(二) 說明與討論

1. 表 6-2 及圖 6-9 顯示在低濃度(100 ppm)的 Cu<sup>2+</sup>溶液中，A<sub>10</sub> 及 A<sub>11</sub> 在 20 分鐘的移除率皆高於 60%，兩者移除率相近，但 A<sub>11</sub> 仍略大於 A<sub>10</sub>。
2. A<sub>10</sub> 在 60 分鐘移除率為 63.1%，但 60 分鐘之後移除率仍逐步增加。而 A<sub>11</sub> 在 60 分鐘的移除率已達最高峰，為 66.2%，之後移除率大致不變，逐漸達平衡。
3. 故本研究以「60 分鐘」作為探討晶球與 100 ppm Cu<sup>2+</sup>之反應時間。

(三) 實驗結果：高濃度 Cu<sup>2+</sup>溶液 (1000 ppm)

表 6-3：1000 ppm Cu<sup>2+</sup> 溶液之吸收光譜數據

晶球種類	海藻酸鈉晶球 A <sub>10</sub>				甜菜紅素晶球 A <sub>11</sub>			
	20	40	60	120	20	40	60	120
時間(min)	20	40	60	120	20	40	60	120
吸收度(初)	0.565	0.565	0.565	0.565	0.565	0.565	0.565	0.565
吸收度(末)	0.391	0.390	0.391	0.394	0.264	0.228	0.229	0.227
移除率(%)	30.8	31.0	30.8	30.3	53.3	59.6	59.5	59.8

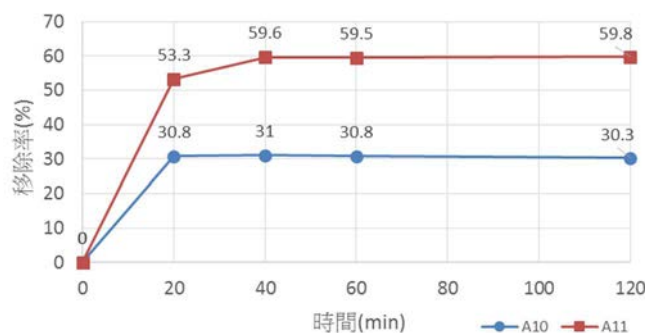


圖 6-10：不同反應時間對移除率的影響 (1000 ppm Cu<sup>2+</sup>)

(四) 說明與討論

1. 由表 6-3 及圖 6-10 得知高濃度(1000 ppm)的 Cu<sup>2+</sup>溶液中，在相同反應時間，A<sub>11</sub> 對 Cu<sup>2+</sup>的移除率皆高於為 A<sub>10</sub>。
2. A<sub>10</sub> 在 20 分鐘的移除率為 30.8%，而 A<sub>11</sub> 在 40 分鐘的移除率達 59.6%，之後移除率變化不大，逐漸達平衡，且在 40 分鐘後，A<sub>11</sub> 移除率約為 A<sub>10</sub> 1.9 倍。
3. 本研究以「60 分鐘」作為探討晶球與 1000 ppm Cu<sup>2+</sup>之反應時間。

## 六、銅離子濃度效應(實驗八)

### (一) 實驗結果

表 6-4：不同濃度  $\text{Cu}^{2+}$  溶液之吸收光譜數據

晶球種類	海藻酸鈉晶球 A <sub>10</sub>						甜菜紅素晶球 A <sub>11</sub>					
	濃度(ppm)	100	200	400	600	800	1000	100	200	400	600	800
吸收度(初)	0.065	0.116	0.222	0.320	0.396	0.565	0.065	0.116	0.222	0.320	0.396	0.565
吸收度(末)	0.024	0.039	0.089	0.123	0.186	0.391	0.022	0.038	0.087	0.119	0.175	0.229
移除率(%)	63.1	66.3	60	61.6	53	30.8	66.2	67.1	60.9	62.8	55.8	59.5

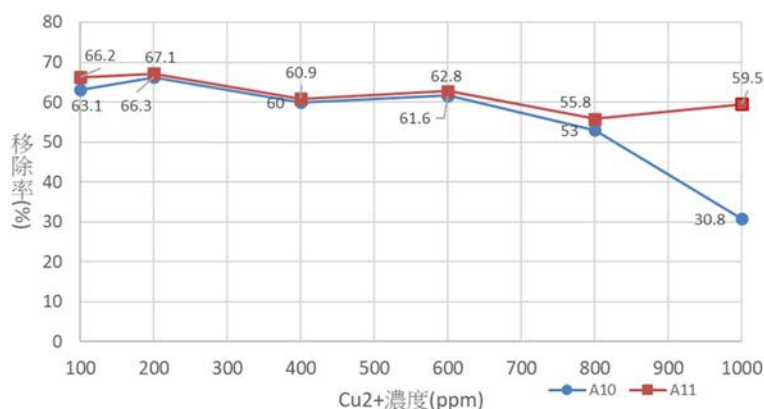


圖 6-11：不同  $\text{Cu}^{2+}$  濃度對移除率的影響

### (二) 說明與討論

1. 從表 6-4 及圖 6-11 得知 A<sub>10</sub> 在 200 ppm 的  $\text{Cu}^{2+}$  溶液中的移除能力最好，移除率為 66.3%，在 1000 ppm 的  $\text{Cu}^{2+}$  溶液中的移除能力最差，移除率為 30.8%。
2. 從表 6-4 及圖 6-11 得知 A<sub>11</sub> 是在 200 ppm 的  $\text{Cu}^{2+}$  溶液中的移除能力最好，移除率為 67.1%，在 800 ppm 的  $\text{Cu}^{2+}$  溶液中的移除能力最差，移除率為 55.8%。
3. 在 100 ~ 800 ppm  $\text{Cu}^{2+}$  下，A<sub>10</sub> 與 A<sub>11</sub> 對銅離子的移除率相近，但 1000 ppm  $\text{Cu}^{2+}$  下，A<sub>10</sub> 對銅離子的移除率明顯下降，只剩下為 30.8%，但 A<sub>11</sub> 移除率在高濃度  $\text{Cu}^{2+}$  無明顯下降，仍為 59.5%，且 A<sub>11</sub> 移除率約為 A<sub>10</sub> 1.93 倍。推測其原因為按照勒沙特列原理， $\text{Cu}^{2+}$  濃度越高，則 A<sub>11</sub> 與  $\text{Cu}^{2+}$  的螯合趨勢越大，移除量( $\text{Cu}^{2+}$  濃度×移除率)越大，故綜合移除量增加及  $\text{Cu}^{2+}$  濃度增加，導致移除率變化幅度不大。

## 七、溫度效應 (實驗九)

### (一) 溫度效應(100 ppm $\text{Cu}^{2+}$ 溶液)

表 6-5：不同溫度下，100 ppm  $\text{Cu}^{2+}$  溶液之吸收光譜數據

晶球種類	海藻酸鈉晶球 A <sub>10</sub>				甜菜紅素晶球 A <sub>11</sub>			
溫度(°C)	5	25	35	45	5	25	35	45
吸收度(初)	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065
吸收度(末)	0.026	0.024	0.023	0.02	0.025	0.022	0.028	0.027
移除率(%)	60	63.1	64.5	69.2	61.5	66.2	56.9	58.5

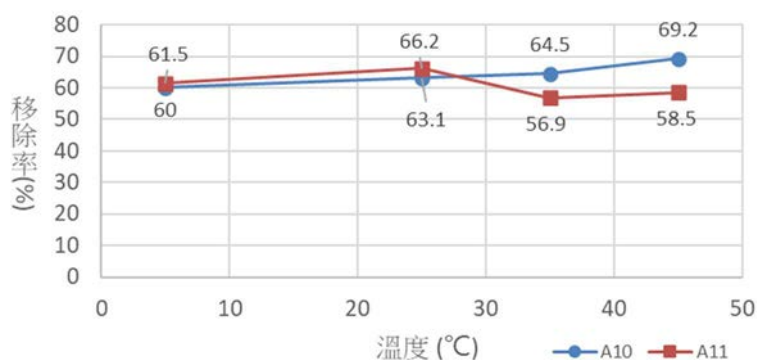


圖 6-12：溫度效應對移除力的影響 (100 ppm  $\text{Cu}^{2+}$ )

### (二) 說明與討論

1. 由表 6-5 及圖 6-12 得知 A<sub>10</sub> 在低濃度(100 ppm)  $\text{Cu}^{2+}$  溶液中，低溫(5°C)的移除率為 60%，高溫(45°C)的移除率為 69.2%，相較於常溫(25°C)的移除率 63.1%，低溫的移除率約為常溫的 0.95 倍，高溫的移除率約為常溫的 1.09 倍，可知 A<sub>10</sub> 在低濃度(100 ppm)的  $\text{Cu}^{2+}$  中，在越高溫的環境移除能力越好，推測其原因為海藻酸鈉晶球內的羧基與  $\text{Ca}^{2+}$  鍵結變弱(圖 4-3)，促使羧基與  $\text{Cu}^{2+}$  螯合的機率變大，故隨溫度越高，移除力變高。
2. 由表 6-5 及圖 6-12 得知 A<sub>11</sub> 在低濃度(100 ppm)  $\text{Cu}^{2+}$  溶液中，在低溫(5°C)的移除率為 61.5%，高溫(45°C)的移除率為 58.5%，相較於常溫(25°C)的移除率 66.2%，低溫的移除率約為常溫的 0.93 倍，高溫的移除率約為常溫的 0.88 倍，可知 A<sub>11</sub> 在低濃度(100 ppm)的  $\text{Cu}^{2+}$  中，於高溫及低溫的移除能力都比常溫下差，尤其是高溫移除能力更差，推測其原因為甜菜紅素在高溫時，其結構可能易被破壞，因此螯合能力減弱，導致移除能力變弱。

(三) 溫度效應(1000 ppm Cu<sup>2+</sup> 溶液)

表 6-6：不同溫度下，1000 ppm Cu<sup>2+</sup> 溶液之吸收光譜數據(A<sub>10</sub>)

晶球種類	海藻酸鈉晶球 A <sub>10</sub>				甜菜紅素晶球 A <sub>11</sub>			
溫度(°C)	5	25	35	45	5	25	35	45
吸收度(初)	0.565	0.565	0.565	0.565	0.565	0.565	0.565	0.565
吸收度(末)	0.459	0.391	0.381	0.351	0.230	0.229	0.232	0.248
移除率(%)	18.8	30.8	32.5	37.8	59.3	59.5	58.9	56.1

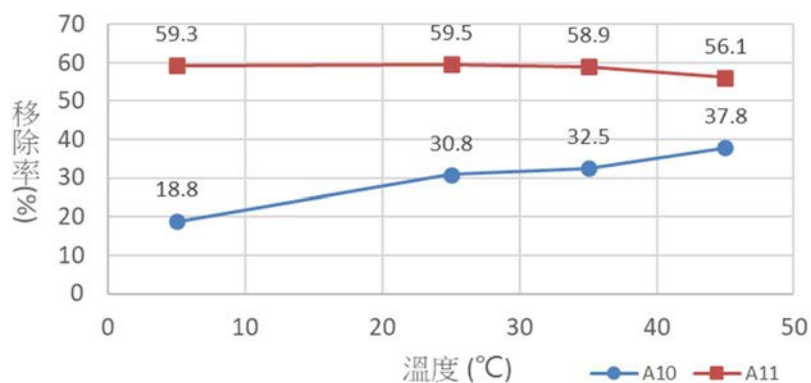


圖 6-13：溫度效應對移除力的影響 (1000 ppm Cu<sup>2+</sup>)

(四) 說明與討論

1. 由表 6-6 及圖 6-13 得知 A<sub>10</sub> 在高濃度(1000 ppm) Cu<sup>2+</sup>溶液中，低溫(5°C)的移除率為 18.8%，高溫(45°C)的移除率為 37.8%，相較於常溫(25°C)的移除率 30.8%，低溫的移除率約為常溫的 0.61 倍，高溫的移除率約為常溫的 1.22 倍，可知在 45°C 以內，A<sub>10</sub> 在高濃度(1000 ppm)的 Cu<sup>2+</sup>中，越高溫移除能力越好，推測其原理與低濃度同。
2. 由表 6-6 及圖 6-13 得知 A<sub>11</sub> 在高濃度(1000 ppm)銅離子溶液中，低溫(5°C)的移除率為 59.3%，高溫(45°C)的移除率為 56.1%，相較於常溫(25°C)的移除率 59.5%，低溫的移除率約為常溫的 0.99 倍，高溫的移除率約為常溫的 0.94 倍，可知在 45°C 以內，A<sub>11</sub> 在高濃度(1000 ppm)的 Cu<sup>2+</sup>中，低溫與常溫的移除率相近下，但高溫移除能力逐漸下降，推測其原理與低濃度同。

## 八、酸鹼效應(實驗十)

(一) 實驗結果：低濃度  $\text{Cu}^{2+}$  溶液 (100 ppm  $\text{Cu}^{2+}$  溶液)

表 6-7：在 pH=2~7 下，100 ppm  $\text{Cu}^{2+}$  溶液之吸收光譜數據

晶球種類	海藻酸鈉晶球 A <sub>10</sub>						甜菜紅素晶球 A <sub>11</sub>					
pH 值	2	3	4	5	6	7	2	3	4	5	6	7
吸收度(初)	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065
吸收度(末)	0.024	0.023	0.021	0.016	0.013	0.024	0.049	0.046	0.022	0.006	0.018	0.022
移除率(%)	63.1	64.0	67.7	75.0	80.0	63.1	24.6	29.2	66.2	90.7	72.3	66.2

註：此處 pH 值為配製  $\text{Cu}^{2+}$  溶液所使用溶劑之 pH，例如以蒸餾水配製  $\text{Cu}^{2+}$  溶液，即標示 pH=7。

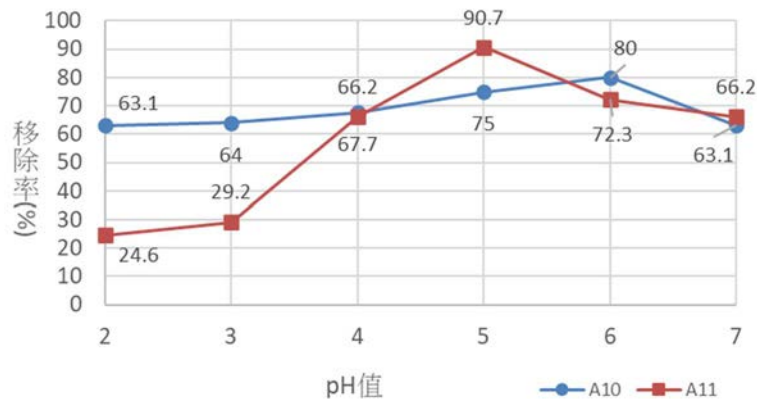


圖 6-14：酸鹼效應對移除力的影響 (100 ppm  $\text{Cu}^{2+}$ )

(二) 說明與討論

1. 因鹼性溶液下， $\text{Cu}^{2+}$  會與  $\text{OH}^-$  發生沉澱，因此本實驗不討論。
2. 由表 6-7 及圖 6-14 得知 A<sub>10</sub> 在不同酸性環境下配製的低濃度(100 ppm)銅離子中，A<sub>10</sub> 在 pH=6 的除效果最好，移除率為 80%，約為 pH=7 的 1.27 倍，pH=2 的移除效果最差，移除率為 63.1%，約與 pH=5.5，推測其原因為強酸溶液中的大量  $\text{H}^+$  會與  $\text{Cu}^{2+}$  競爭與晶球反應，因此 A<sub>10</sub> 移除  $\text{Cu}^{2+}$  能力下降。
3. 由表 6-7 及圖 6-14 得知 A<sub>11</sub> 在不同酸性環境下配製的低濃度(100ppm)銅離子中，A<sub>11</sub> 在 pH=5 的除效果最好，移除率為 90.7%，約為 pH=7 的 1.37 倍，pH=2 的移除效果最差，移除率為 24.6%，約為 pH=7 的 0.37 倍，根據文獻<sup>[8]</sup>提及甜菜紅素於 pH=4.0~5.0 結構最穩定，與銅離子螯合能力最佳，故 A<sub>11</sub> 在 pH=5 的移除效果最好，但在強酸環境下(pH=2~3)甜菜紅素結構會被破壞，故移除  $\text{Cu}^{2+}$  能力下降。

(三) 實驗結果：高濃度  $\text{Cu}^{2+}$  溶液 (1000 ppm  $\text{Cu}^{2+}$  溶液)

表 6-8：在 pH=2~7 下，1000 ppm  $\text{Cu}^{2+}$  溶液之吸收光譜數據

晶球種類	海藻酸鈉晶球 A <sub>10</sub>						甜菜紅素晶球 A <sub>11</sub>					
pH 值	2	3	4	5	6	7	2	3	4	5	6	7
吸收度(初)	0.565	0.565	0.565	0.565	0.565	0.565	0.565	0.565	0.565	0.565	0.565	0.565
吸收度(末)	0.31	0.312	0.312	0.254	0.296	0.391	0.516	0.495	0.215	0.045	0.057	0.229
移除率(%)	44.4	45.1	44.8	55.0	47.6	30.8	8.7	12.4	61.9	92.0	89.9	59.5

註：此處 pH 值為配製  $\text{Cu}^{2+}$  溶液所使用溶劑之 pH，例如以蒸餾水配製  $\text{Cu}^{2+}$  溶液，即標示 pH=7。

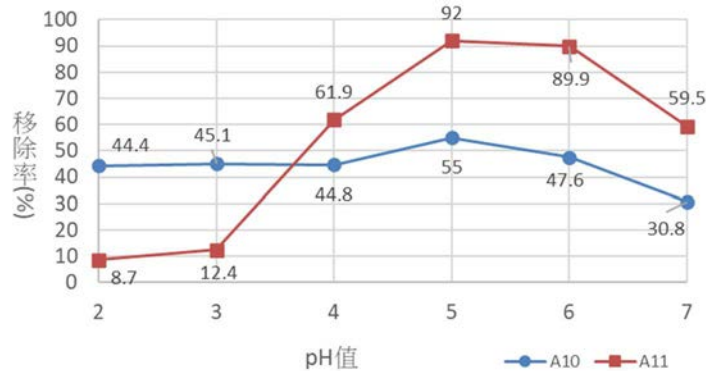


圖 6-15：酸鹼效應對移除力的影響 (1000 ppm  $\text{Cu}^{2+}$ )

(四) 說明與討論

1. 因鹼性溶液下， $\text{Cu}^{2+}$  會與  $\text{OH}^-$  發生沉澱，因此本實驗不討論。
2. 由表 6-8 及圖 6-15 得知 A<sub>10</sub> 在不同酸性環境下配製的高濃度(1000 ppm)  $\text{Cu}^{2+}$  中，A<sub>10</sub> 在 pH=5 的除效果最好，移除率為 55%，約為 pH=7 的 1.79 倍，pH=2 的移除效果最差，移除率為 44.4%，約為 pH=7 的 1.44 倍，推測其原理與低濃度同。
3. 由表 6-8 及圖 6-15 得知 A<sub>11</sub> 在不同酸性環境下配製的高濃度(1000 ppm)  $\text{Cu}^{2+}$  中，A<sub>11</sub> 在 pH=5 的除效果最好，移除率為 92%，約為 pH=7 的 1.54 倍，pH=2 的移除效果最差，移除率為 8.7%，約為 pH=7 的 0.15 倍，推測其原理與低濃度同。
4. 在 pH=5，1000 ppm  $\text{Cu}^{2+}$  溶液下，A<sub>11</sub> 的移除率約為 A<sub>10</sub> 1.67 倍。

## 九、晶球重量效應 (實驗十一)

### (一) 實驗結果：晶球重量效應 (100 ppm $\text{Cu}^{2+}$ 溶液)

表 6-9：不同重量晶球，100 ppm  $\text{Cu}^{2+}$  溶液之吸收光譜數據

晶球種類	海藻酸鈉晶球 A <sub>10</sub>					甜菜紅素晶球 A <sub>11</sub>				
晶球重量(g)	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
吸收度(初)	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065
吸收度(末)	0.03	0.027	0.024	0.02	0.024	0.032	0.028	0.023	0.021	0.024
移除率(%)	53.8	58.5	63.1	69.2	63.1	50.8	56.9	64.6	67.7	66.2
移除效率 (移除率/克)	269	146.3	105.2	86.5	63.1	253.8	142.3	107.7	84.6	66.2

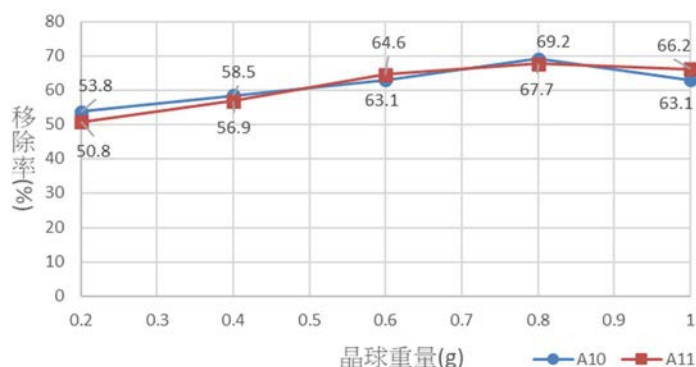


圖 6-16：晶球重量對移除力的影響 (100 ppm  $\text{Cu}^{2+}$ )

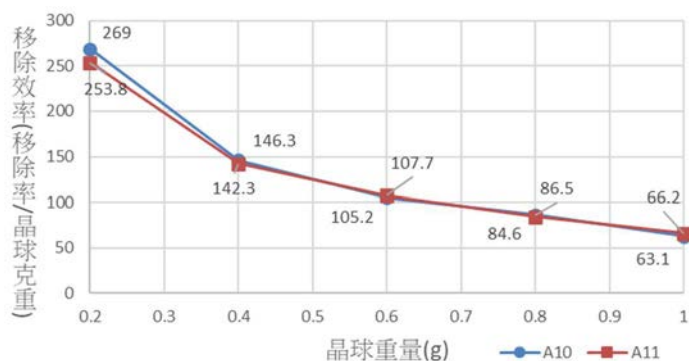


圖 6-17：晶球重量對移除效率的影響 (100 ppm  $\text{Cu}^{2+}$ )

### (二) 說明與討論

1. 由表 6-9、圖 6-16 與圖 6-17 得知 A<sub>10</sub> 在低濃度(100 ppm)  $\text{Cu}^{2+}$  中，0.8 g 的移除率最高，為 69.2%，為 1.0 g 的 1.1 倍，但就移除效率來看，0.2 g 的移除效率最高，移除效率為最低的 1.0 g 之 4.26 倍。
2. 由表 6-9、圖 6-16 與圖 6-17 得知 A<sub>11</sub> 在低濃度(100 ppm)  $\text{Cu}^{2+}$  中，0.8 g 的移除率最高，為 67.7%，為 1.0 g 的 1.02 倍，但就移除效率來看，0.2 g 的移除效率最高，移除效率為最低的 1.0 g 之 3.83 倍。
3. 不管 A<sub>10</sub> 或 A<sub>11</sub> 在晶球用量越多的情況之下，其配位基個數越多，能整合的  $\text{Cu}^{2+}$  越多，故移除率均變大。



(三)實驗結果：晶球重量效應(1000 ppm Cu<sup>2+</sup> 溶液)

表 6-10：不同重量晶球，1000 ppm Cu<sup>2+</sup> 溶液之吸收光譜數據

晶球種類	海藻酸鈉晶球 A <sub>10</sub>					甜菜紅素晶球 A <sub>11</sub>				
晶球重量(g)	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
吸收度(初)	0.565	0.565	0.565	0.565	0.565	0.565	0.565	0.565	0.565	0.565
吸收度(末)	0.432	0.406	0.368	0.382	0.391	0.247	0.264	0.258	0.247	0.229
移除率(%)	23.5	28.1	34.9	32.4	30.8	56.3	53.3	54.3	56.3	59.5
移除效率 (移除率/克)	117.1	70.4	58.1	54.2	30.8	281.4	133.2	90.6	70.4	66.2

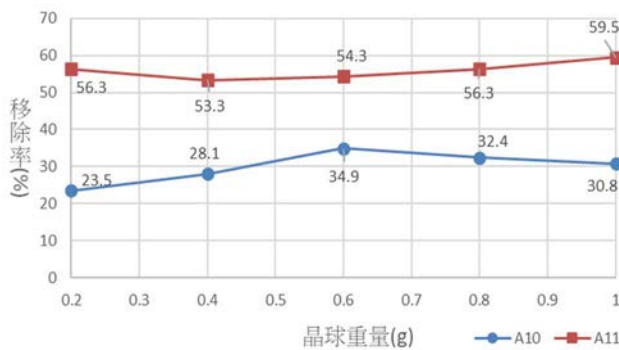


圖 6-18：晶球重量對移除力的影響  
(1000 ppm Cu<sup>2+</sup>)

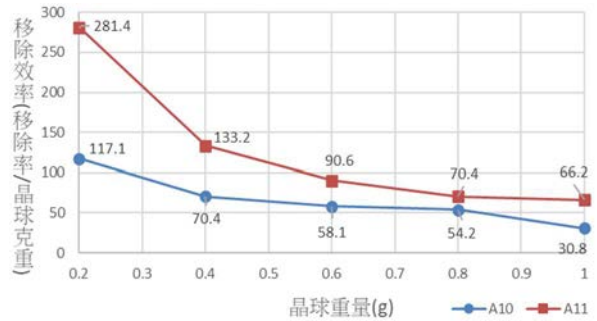


圖 6-19：晶球重量效應移除力比較圖  
(1000 ppm Cu<sup>2+</sup>)

(四)說明與討論

1. 由表 6-10、圖 6-18 與圖 6-19 得知 A<sub>10</sub> 在高濃度(1000 ppm) Cu<sup>2+</sup> 中，0.6 g 的移除率最高，為 34.9%，為 1.0 g 的 1.13 倍，但就移除效率來看，0.2 g 的移除效率最高，移除效率為最低的 1.0 g 之 3.8 倍。
2. 從表 6-10、圖 6-18 與圖 6-19 得知 A<sub>11</sub> 在高濃度(1000 ppm) Cu<sup>2+</sup> 中，1.0 g 的移除率最好，為 59.5%，但就移除效率來看，0.2 g 的移除效率最高，移除效率為最低的 1.0 g 之 4.25 倍。
3. 其解釋原理如同低濃度。

## 十、測量保存不同天數的甜菜紅素晶球移除 $\text{Cu}^{2+}$ 之能力 (實驗十二)

(一)實驗結果：保存不同天數(100 ppm  $\text{Cu}^{2+}$  溶液)

表 6-11：晶球保存不同天數，100 ppm  $\text{Cu}^{2+}$  溶液之吸收光譜數據

保存天數(天)	1(A <sub>10</sub> )	2(B <sub>10</sub> )	3(C <sub>10</sub> )	4(D <sub>10</sub> )	5(E <sub>10</sub> )	1(A <sub>11</sub> )	2(B <sub>11</sub> )	3(C <sub>11</sub> )	4(D <sub>11</sub> )	5(E <sub>11</sub> )
吸收度(初)	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065
吸收度(末)	0.024	0.022	0.02	0.016	0.014	0.022	0.019	0.023	0.024	0.024
移除率(%)	63.1	66.9	69.2	75.4	78.4	66.2	70.8	64.6	63.3	63.3

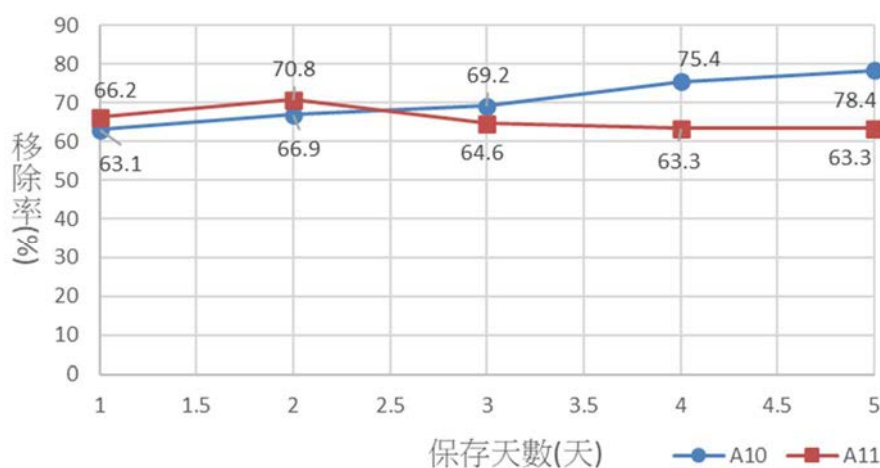


圖 6-20：保存不同天數對移除效率的影響 (100 ppm  $\text{Cu}^{2+}$ )

(二)說明與討論

1. 從表 6-11 及圖 6-20 可得知保存 5 天後的 E<sub>10</sub> 在低濃度(100 ppm)銅離子溶液移除率最佳，為 78.4%，與第一天 A<sub>10</sub> 的移除率 63.1% 比較，E<sub>10</sub> 移除能力約是 A<sub>10</sub> 之 1.24 倍，而依每日趨勢來看，在常溫下前 5 天的海藻酸鈉晶球對於低濃度(100 ppm)  $\text{Cu}^{2+}$  溶液移除能力越好，推測其原因為海藻酸鈉晶球會隨時間脫水後質量減輕，因此 1.0 g 的晶球海藻酸鈉量比例增加，故移除能力越好。
2. 從圖 6-20 及表 6-11 可得知保存 2 天後的 B<sub>11</sub> 在低濃度(100 ppm)  $\text{Cu}^{2+}$  溶液移除率最佳為 70.8%，與第一天 A<sub>10</sub> 的移除率 66.2% 比較，E<sub>11</sub> 移除能力約是 A<sub>11</sub> 之 1.07 倍，而第 3~5 天的移除能與 A<sub>11</sub> 差不多，由此可見在常溫下保存第 2 天的甜菜紅素晶球對於低濃度(100 ppm)  $\text{Cu}^{2+}$  溶液移除能力越好，而之後的移除能力則沒明顯變化，推測是因為在第 2 天時火龍果汁稀釋液自身會酸化，甜菜紅素的反應環境趨近於 pH=5(參考圖 6-8)，依實驗十的實驗結果得知甜菜紅素在 pH=4~5 時結構最穩定，故移除率上升，但第 3~5 天，甜菜紅素濃度大幅下降(參考圖 6-7)，因此在移除能力下降。
3. 若在相同保存日期，實驗結果顯示甜菜紅素晶球在低濃度(100 ppm)  $\text{Cu}^{2+}$  溶液移除率不如海藻酸鈉晶球。

(三)實驗結果：保存不同天數(1000 ppm Cu<sup>2+</sup> 溶液)

表 6-12：晶球保存不同天數，1000 ppm Cu<sup>2+</sup> 溶液之吸收光譜數據

保存天數(天)	1(A <sub>10</sub> )	2(B <sub>10</sub> )	3(C <sub>10</sub> )	4(D <sub>10</sub> )	5(E <sub>10</sub> )	1(A <sub>11</sub> )	2(B <sub>11</sub> )	3(C <sub>11</sub> )	4(D <sub>11</sub> )	5(E <sub>11</sub> )
吸收度(初)	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65
吸收度(末)	0.45	0.4	0.403	0.41	0.37	0.26	0.2	0.19	0.18	0.19
移除率(%)	30.8	38.5	38.0	36.9	43.1	60.0	69.2	70.7	72.3	70.6

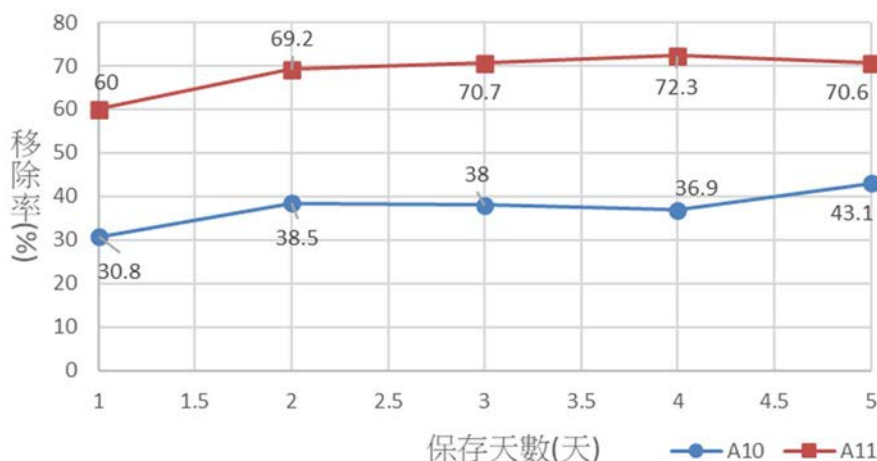


圖 6-21：保存不同天數對移除效率的影響 (1000 ppm Cu<sup>2+</sup>)

(四)說明與討論

1. 從表 6-12 及圖 6-21 可得知保存 5 天後的 E<sub>10</sub> 在高濃度(1000 ppm) Cu<sup>2+</sup>溶液移除率最高，為 42.3%，與第一天 A<sub>10</sub>的移除率 30.8%比較，E<sub>10</sub> 移除能力約是 A<sub>10</sub> 之 1.34 倍，而依每日趨勢來看，在常溫下前 5 天的海藻酸鈉晶球對於高濃度(1000 ppm) Cu<sup>2+</sup>溶液移除能力越好，推測其原理與低濃度同。
2. 從表 6-12 及圖 6-21 可得知保存 4 天後的 D<sub>11</sub> 在高濃度(1000 ppm) Cu<sup>2+</sup>溶液移除率最高，為 72.3%，與第一天 A<sub>11</sub>的移除率 59.5%比較，E<sub>11</sub> 移除能力約是 A<sub>11</sub> 之 1.21 倍，而依每日趨勢來看，在常溫下保存前 2~5 天的甜菜紅素晶球對於高濃度(1000 ppm) Cu<sup>2+</sup>溶液移除能力差異不大，其原因同低濃度(100 ppm)，推測其原理與低濃度同。
3. 若在相同保存日期，實驗結果顯示甜菜紅素晶球在高濃度(1000 ppm) Cu<sup>2+</sup>溶液移除率大幅勝過海藻酸鈉晶球，且分別為 1.95、1.8、1.86、1.96、1.64 倍。

## 十一、組成比例不同之晶球附銅離子之能力(實驗十三)

(一)實驗結果：組成比例不同之晶球 (100 ppm  $\text{Cu}^{2+}$  溶液)

表 6-13：組成比例不同之晶球，100 ppm  $\text{Cu}^{2+}$  溶液之吸收光譜數據

晶球種類	A <sub>10</sub>	A <sub>11</sub>	A <sub>12</sub>
吸收度(初)	0.065	0.065	0.065
吸收度(末)	0.024	0.022	0.004
移除率(%)	63.1	66.2	93.8

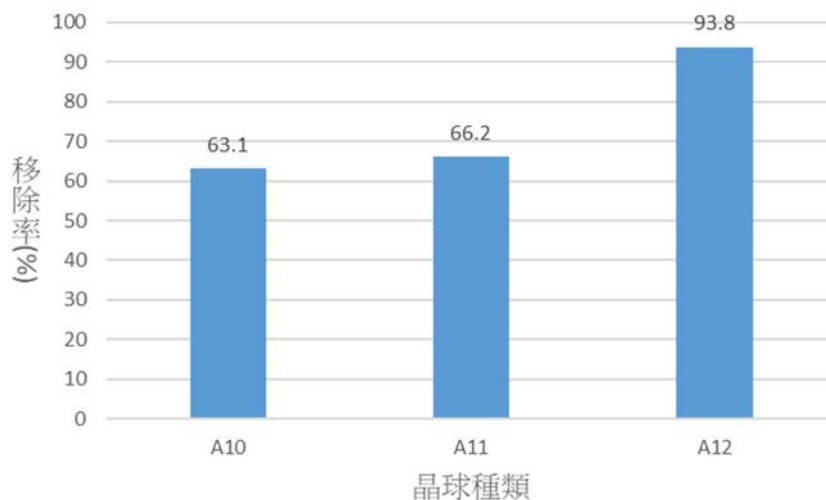


圖 6-22：組成比例不同之晶球對吸附率的影響 (100 ppm  $\text{Cu}^{2+}$  溶液)

(二)說明與討論：

從表 6-13 及圖 6-22 可得知在 25°C，於低濃度(100 ppm)  $\text{Cu}^{2+}$ 溶液中，A<sub>10</sub>的移除率為 63.1%，A<sub>11</sub>的移除率為 66.2%，略大於 A<sub>10</sub>，但 A<sub>12</sub> 移除率大幅度上升，為 93.8%，約 A<sub>10</sub> 之 1.49 倍，A<sub>11</sub> 之 1.42 倍，推測其原因為 A<sub>12</sub> 中的甜菜紅素量較多，可移除的  $\text{Cu}^{2+}$  量較多。

(三)實驗結果：組成比例不同之晶球 (1000 ppm Cu<sup>2+</sup> 溶液)

表 6-14：組成比例不同之晶球，1000 ppm Cu<sup>2+</sup> 溶液之吸收光譜數據

晶球種類	A <sub>10</sub>	A <sub>11</sub>	A <sub>12</sub>
吸收度(初)	0.565	0.565	0.565
吸收度(末)	0.391	0.229	0.225
移除率(%)	30.8	59.5	60.2

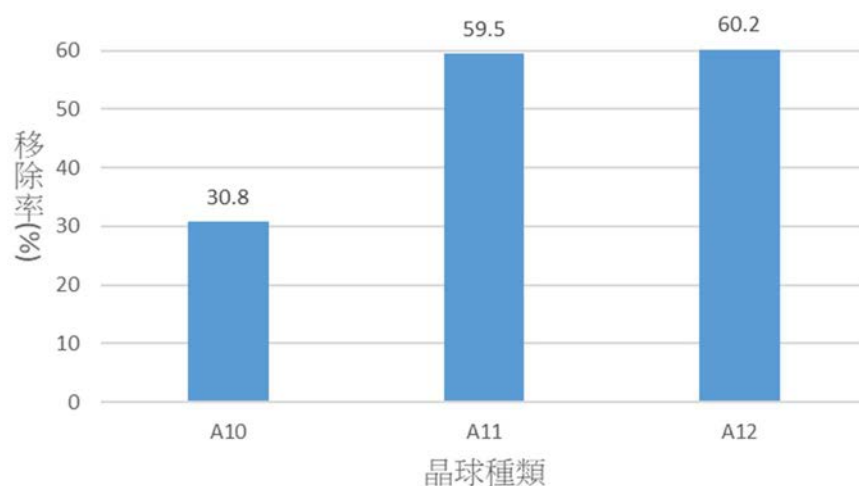


圖 6-23：組成比例不同之晶球對移除率的影響 (1000 ppm Cu<sup>2+</sup> 溶液)

(四)說明與討論：

從表 6-14 及圖 6-23 可得知在 25°C，於高濃度(1000 ppm) Cu<sup>2+</sup>溶液中，A<sub>10</sub> 移除率約為 30.8%，A<sub>11</sub> 與 A<sub>12</sub> 的移除率大幅上升，分別為 59.5%與 60.2%，分別為 A<sub>10</sub> 之 1.93 倍與 1.95 倍，其解釋原理同低濃度。

## 十二、綜合實驗七至實驗十二之最佳實驗條件下，探討晶球對 $\text{Cu}^{2+}$ 之移除力 (實驗十四)

### (一)分析結果

綜合實驗七至實驗十二之實驗結果，取晶球 A<sub>10</sub> 及 A<sub>11</sub> 對  $\text{Cu}^{2+}$  具有最佳移除力之實驗條件，可得表 6-15 與 6-16，再以表格內實驗參數進行實驗。

表 6-15：於低濃度(100 ppm) $\text{Cu}^{2+}$ ，晶球對移除  $\text{Cu}^{2+}$  之各項最佳參數

	時間(分)	溫度(°C)	pH 值	晶球質量(克)	保存天數
A <sub>10</sub>	60	45	6	0.8	5
A <sub>11</sub>	60	25	5	0.8	2

表 6-16：於低濃度(1000 ppm) $\text{Cu}^{2+}$ ，晶球對移除  $\text{Cu}^{2+}$  之各項最佳參數

	時間(分)	溫度(°C)	pH 值	晶球質量(克)	保存天數
A <sub>10</sub>	60	45	5	0.6	5
A <sub>11</sub>	60	25	5	1.0	4

### (二)實驗結果

表 6-17：以表 6-15 實驗參數探討晶球移除 100 ppm  $\text{Cu}^{2+}$  溶液之吸收光譜數據

晶球種類	海藻酸鈉晶球 A <sub>10</sub>					甜菜紅素晶球 A <sub>11</sub>				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
次數	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
吸收度(初)	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065
吸收度(末)	0.014	0.017	0.019	0.025	0.015	0.015	0.015	0.015	0.019	0.015
移除率(%)	78.5	74.2	70.4	72.3	77.1	77.5	77.5	77.4	70.6	77.4
平均移除率	74.12%					75.73%				
標準差	0.0334					0.0291				

### (三)說明與討論

A<sub>10</sub> 在低濃度(100 ppm) $\text{Cu}^{2+}$  溶液中以各項實驗最佳條件反應，平均移除率為 74.12%，為一般環境(反應 60 分鐘，25°C，pH=7，1.0 g 晶球)的 1.19 倍，A<sub>11</sub> 則是 75.73%，為一般環境的 1.14 倍，而兩者移除  $\text{Cu}^{2+}$  能力相差不多。

### (四)實驗結果

表 6-18：以表 6-16 實驗參數探討移除 1000 ppm  $\text{Cu}^{2+}$  溶液之吸收光譜數據

晶球種類	海藻酸鈉晶球 A <sub>10</sub>					甜菜紅素晶球 A <sub>11</sub>				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
次數	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
吸收度(初)	0.565	0.565	0.565	0.565	0.565	0.565	0.565	0.565	0.565	0.565
吸收度(末)	0.355	0.375	0.352	0.356	0.351	0.171	0.179	0.191	0.191	0.171
移除率(%)	37.2	33.7	37.6	37	37.9	69.8	68.4	66.1	66.1	69.8
平均移除率	36.69%					68.04%				
標準差	0.0171					0.020				

### (五)說明與討論

A<sub>10</sub> 在高濃度  $\text{Cu}^{2+}$ (1000 ppm) 以各項實驗最佳條件反應，平均移除率為 36.69%，為一般環境(反應 60 分鐘，25°C，pH=7，1.0 g 晶球)的 1.19 倍，A<sub>11</sub> 則是 68.04%，為一般環境的 1.15 倍，而 A<sub>11</sub> 移除  $\text{Cu}^{2+}$  能力約是 A<sub>10</sub> 之 1.85 倍。

## 【第五部分】晶球移除其他重金屬能力

### 十三、建立 $\text{Co}^{2+}$ 、 $\text{Ni}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{3+}$ 檢量線 (實驗十五)

#### (一) 實驗結果

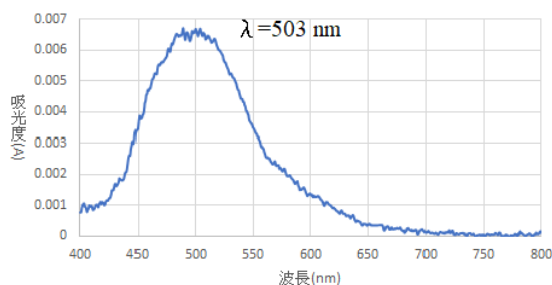


圖 6-24： $\text{Co}^{2+}$ -EDTA 吸收光譜圖

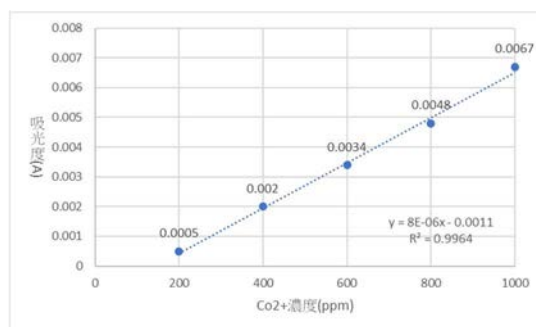


圖 6-25： $\text{Co}^{2+}$ -EDTA 檢量線

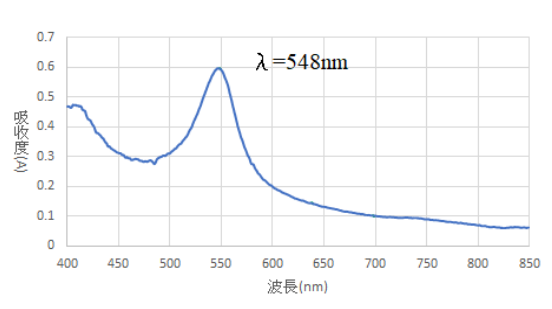


圖 6-26： $\text{Ni}^{2+}$ - $\text{C}_{13}\text{H}_{12}\text{N}_2\text{O}$  吸收光譜圖

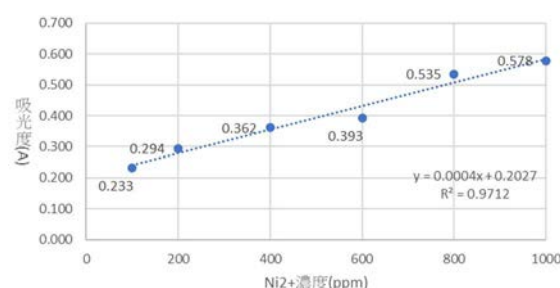


圖 6-27： $\text{Ni}^{2+}$ - $\text{C}_{13}\text{H}_{12}\text{N}_2\text{O}$  檢量線

#### (二) 說明與討論

- 由圖 6-24、6-26 可得知  $\text{Co}^{2+}$  與  $\text{Ni}^{2+}$  溶液加入顯色劑後，最大吸收峰分別為 503 nm、548 nm。
- 由圖 6-25、6-27 可得知溶液濃度 200~1000 ppm 與其吸收度呈高度正相關。但  $\text{Co}^{2+}$  在 200 ppm 以下之最大吸收峰之吸收度太低，不易測量。

### 十四、探討晶球移除不同重金屬( $\text{Co}^{2+}$ 、 $\text{Ni}^{2+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$ )之能力 (實驗十六)

#### (一) 實驗結果：在 25°C，pH=7，移除 1000 ppm 不同重金屬離子

表 6-19：1000 ppm 不同重金屬( $\text{Co}^{2+}$ 、 $\text{Ni}^{2+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$ )溶液之吸收光譜數據

晶球種類	海藻酸鈉晶球 $A_{10}$			甜菜紅素晶球 $A_{11}$		
	$\text{Co}^{2+}$	$\text{Ni}^{2+}$	$\text{Cu}^{2+}$	$\text{Co}^{2+}$	$\text{Ni}^{2+}$	$\text{Cu}^{2+}$
重金屬種類	$\text{Co}^{2+}$	$\text{Ni}^{2+}$	$\text{Cu}^{2+}$	$\text{Co}^{2+}$	$\text{Ni}^{2+}$	$\text{Cu}^{2+}$
吸收度(初)	0.0067	0.578	0.565	0.0067	0.578	0.565
吸收度(末)	0.0046	0.531	0.284	0.0041	0.378	0.215
移除率(%)	31.3	18	30.8	38.8	56.1	59.5

#### (二) 說明與討論

- 由表 6-19 得知在 25°C，pH=7，海藻酸鈉晶球  $A_{10}$  對 1000 ppm  $\text{Co}^{2+}$ 、 $\text{Ni}^{2+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$  之移除率分別為 31.3%、18%、30.8%，晶球移除  $\text{Co}^{2+}$ 、 $\text{Ni}^{2+}$  能力約為  $\text{Cu}^{2+}$  之 1.02、0.58 倍，可見  $A_{10}$  對此三種不同重金屬離子移除能力為  $\text{Co}^{2+} \cong \text{Cu}^{2+} > \text{Ni}^{2+}$ 。



2. 由表 6-19 得知在 25°C，pH=7，甜菜紅素晶球 A<sub>11</sub> 對 1000 ppm Co<sup>2+</sup>、Ni<sup>2+</sup>、Cu<sup>2+</sup> 之移除率分別為 38.8%、56.1%、59.5%，晶球移除 Co<sup>2+</sup>、Ni<sup>2+</sup> 能力約為 Cu<sup>2+</sup> 之 0.65、0.94 倍，可見 A<sub>11</sub> 對此三種不同重金屬離子移除能力為 Cu<sup>2+</sup>>Ni<sup>2+</sup>>Co<sup>2+</sup>。
3. 推測兩者移除其他重金屬離子能力不同原因為海藻酸鈉是使用羧基及羥基螯合重金屬離子，而甜菜紅素則是使用羧基及胺基進行螯合，故對於同一種重金屬離子之螯合能力不同。

## 柒、結論

一、火龍果汁中的甜菜紅素濃度及液體 pH 值會隨時間有下降。

### 二、【時間效應】

A<sub>10</sub> 及 A<sub>11</sub> 皆在 40 分鐘左右反應達平衡，兩者對於低濃度(100 ppm)Cu<sup>2+</sup> 移除能力相差不多。在高濃度(1000 ppm)Cu<sup>2+</sup> 中 A<sub>11</sub> 的移除能力勝過 A<sub>10</sub>，且 A<sub>11</sub> 移除率約為 A<sub>10</sub> 1.9 倍。

### 三、【濃度效應】

A<sub>10</sub> 在 100 ppm Cu<sup>2+</sup> 中移除能力最好，1000 ppm Cu<sup>2+</sup> 移除能力最差，A<sub>11</sub> 在 100 ppm Cu<sup>2+</sup> 移除能力最好，800 ppm Cu<sup>2+</sup> 移除能力最差，但 A<sub>11</sub> 的移除能力皆比 A<sub>10</sub> 佳。且在 1000 ppm Cu<sup>2+</sup> 下，A<sub>11</sub> 移除率約為 A<sub>10</sub> 1.93 倍。

### 四、【溫度效應】

溫度於 5°C~45°C 時，A<sub>10</sub> 在越高溫，其移除 Cu<sup>2+</sup> 能力越好。但 A<sub>11</sub> 則是在常溫(25°C) 移除 Cu<sup>2+</sup> 能力最好。

### 五、【酸鹼效應】

A<sub>10</sub> 及 A<sub>11</sub> 皆在弱酸環境下移除力變好，但在強酸環境下移除力會變差，而在強酸環境下 A<sub>11</sub> 比 A<sub>10</sub> 移除能力差。但在 pH=5，1000 ppm Cu<sup>2+</sup>，A<sub>11</sub> 的移除率約為 A<sub>10</sub> 1.67 倍。

### 六、【晶球保存天數效應】

A<sub>10</sub> 在放存越久的環境下移除能力越好。但 A<sub>11</sub> 則是在低濃度(100 ppm) Cu<sup>2+</sup> 中放置越久移除能力下滑至小於 A<sub>10</sub>；A<sub>11</sub> 在高濃度(1000 ppm) Cu<sup>2+</sup> 中則是在第 2 天移除能力最好，其餘時間與第 1 天差不多，且移除能力皆大於 A<sub>10</sub>。

### 七、【綜合實驗七至實驗十二之最佳實驗條件下】

A<sub>10</sub> 及 A<sub>11</sub> 依不同變因之最佳實驗條件分別進行 5 次最佳條件實驗下，A<sub>11</sub> 移除 Cu<sup>2+</sup> 能力遠大於 A<sub>10</sub>，約是 A<sub>10</sub> 之 1.85 倍。

### 八、【探討晶球移除不同重金屬(Co<sup>2+</sup>、Ni<sup>2+</sup>、Cu<sup>2+</sup>)之能力】

在 25°C，pH=7，甜菜紅素晶球 A<sub>11</sub> 的移除 1000 ppm Co<sup>2+</sup>、Ni<sup>2+</sup>、Cu<sup>2+</sup> 能力皆優於海藻酸鈉晶球 A<sub>10</sub>；此外，海藻酸鈉晶球 A<sub>10</sub> 移除能力為 Co<sup>2+</sup>≅Cu<sup>2+</sup>>Ni<sup>2+</sup>；而甜菜紅素晶球 A<sub>11</sub> 移除能力為 Cu<sup>2+</sup>>Ni<sup>2+</sup>>Co<sup>2+</sup>。

## 捌、未來與展望

- 一、火龍果果汁可能含有其他物質會影響銅離子移除力，希望能改良甜菜紅素的純化方法以達到重金屬的最佳移除力。
- 二、希望能找出更適合的農業廢棄物製作甜菜紅素，例如火龍果皮、甜菜根也富含甜菜紅素，未來可朝其他不同材料探討移除率。
- 三、能對甜菜紅素的最佳保存條件吸附銅離子後的晶球做深入探討，例如：如何再生並重複使用。

## 玖、參考資料

1. 泛科學(2019)。令人驚奇的分子料理是這樣來的：食品科學中的晶球技術
2. 國立台中教育大學 NTCU 科學教育與應用學系科學遊戲實驗
3. 湯宣擎(2015)。中華民國第 55 屆全國科展「晶球世紀」
4. 謝宜臻、涂旭哲、劉佳哲(2020)。中華民國第 60 屆全國科展「紅得發紫---以簡易光譜儀分析火龍果肉之甜菜紅素特性」
5. 吳佳蓉、陳彥劭、吳郁婷(2016)。中華民國第 56 屆全國科展「目不轉晶」
6. 范哲綸、曾新凱(2013)。中華民國第 53 屆全國科展「『蔗』麼『C』力」
7. 鄭宇廷(2020)。第十九屆旺宏科學獎「更靈敏的快速檢測法應用於探討  $\text{Cu}^{2+}$  在不同環境的沉澱移除條件」
8. 高宜蓁、余巧庭、劉宥汶(2020)。中華民國第 60 屆全國科展「以自組修飾光學檢測儀器探討甜菜紅的特性及與銅鉛離子的作用」
9. 黃嫻瑀、曹家豪、吳沛璇、林璟醇(2003)。中華民國第 43 屆全國科展「小小晶球真奇妙」

## 【評語】 052607

- 一、 本作品比較甜菜紅素晶球與海藻酸鈉晶球，在不同條件下移除銅金屬離子的能力。實驗參數包括銅離子濃度、溫度、pH值等。本作品相對於過去類似研究，雖然過去收集實驗資料是比較完整，建議可以對於提升應用與科學實驗的創新性。
- 二、 本研究應用海藻酸鈉和甜菜紅素螯合重金屬能力及海藻酸鈉交聯作用製作海藻酸鈉晶球。並將富含甜菜紅素的火龍果汁稀釋液與海藻酸鈉混合後做成甜菜紅素晶球，比較兩種晶球在不同條件下移除銅金屬離子能力，具有地方特性之研究屬性。
- 三、 多以原始實驗數據計算與比較移除率為主，缺乏深入的理論假說與論證，請說明每個實驗是幾次重複，並標明其標準偏差，較能顯現實驗結果的再現性。
- 四、 內文敘述建議將 A10 與 A11 還原為海藻酸鈉晶球與甜菜紅素晶球，能增加讀者理解度。研究報告以條列出八項結論，較像是結果的總整理，建議將研究成果的主要亮點，以文字敘述整理成結論，將更簡潔清楚。

- 五、 比較海藻酸鈉及甜菜紅素去除廢水中銅污染的實驗設計，結果顯示二者具有不同能力的去除效應其中甜菜紅素晶球效果較佳。但是建議應說明銅濃度採用 1000 及 100 mg/L，對於常見重金屬污染廢水濃度略高，在使用上是否符合實際狀況。
- 六、 甜菜紅素的在本實驗以火龍果肉，而非火龍果皮，是否在一開始有分析過兩者甜菜紅素含量的差異，若能以果皮進行實驗可達到農業廢棄物資源化的循環經濟功效，未來可在做進一步的實驗分析。

## 作品簡報

# 探討海藻酸鈉晶球與甜菜紅素晶球 移除重金屬離子之能力

科別：環境學科

組別：高級中等學校組

# 壹、研究動機

在台灣經濟快速發展下，許多工業如電鍍業、染料業、都會排放重金屬至環境中，像銅、鎘、鉻、鉛、汞這些金屬是有毒性的，因為它們進入生物體中，無法被分解，會累積在生物體中造成疾病。銅是使用最廣泛的金屬之一，它經常出現在含有金屬污染的工業廢水中，危害生態。

根據第53屆科展「『蔗』麼『C』力-利用甘蔗渣-碳粉吸附重金屬離子」，得知利用甘蔗渣、碳粉混合在一起，可移除水中的銅離子。根據第60屆科展「紅得發紫---以簡易光譜儀分析火龍果肉之甜菜紅素特性」，得知大量存在火龍果肉中，呈現紫紅色的甜菜紅素，可與銅離子配位形成錯合物。根據第55屆科展「晶球世紀」，得知海藻酸鈉所製成的晶球對銅離子也有移除能力。

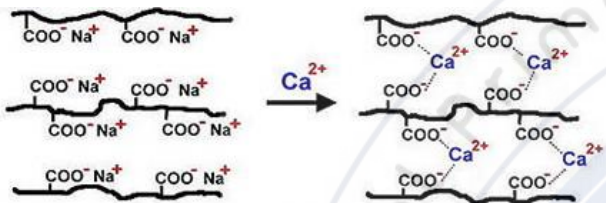
因此本次的研究是製作出甜菜紅素與海藻酸鈉複合晶球(簡稱為甜菜紅素晶球)，並比較甜菜紅素晶球與海藻酸鈉晶球對重金屬離子的移除效率，希望藉由此實驗得到晶球移除銅離子之最佳參數，並應用於移除其他重金屬離子。

# 貳、研究目的

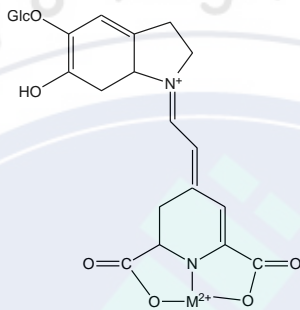
1. 製作出海藻酸鈉晶球與組成比例不同之甜菜紅素晶球
2. 研究海藻酸鈉晶球與甜菜紅素晶球吸附 銅離子之環境條件：銅離子濃度、浸泡時間、溫度、pH、晶球質量、晶球存放時間
3. 比較海藻酸鈉晶球與甜菜紅素晶球之實驗結果，並找出甜菜紅素晶球移除銅離子之最佳條件
4. 將甜菜紅素晶球應用在移除其他重金屬 離子



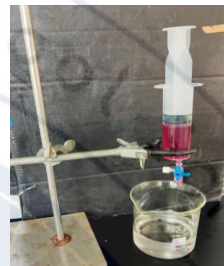
# 參、研究原理



圖一、海藻酸鈉與  $\text{Ca}^{2+}$  發生交聯作用



圖二、 $\text{M}^{2+}$ -甜菜紅素錯合物結構



圖三、製作甜菜紅素晶球

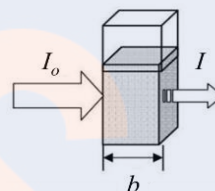


圖四、過濾甜菜紅素晶球

$$A = -\log \frac{I}{I_0} = \varepsilon \cdot b \cdot c$$

$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon : \text{吸光係數, 與物質種類有關} \\ b : \text{光路徑長} \\ c : \text{物質濃度} \end{array} \right.$

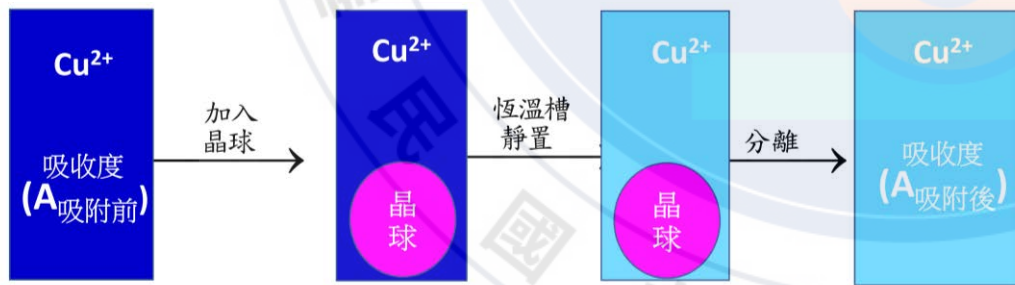
(式一)



圖五、比爾定律示意圖



圖六、分光光度計測量



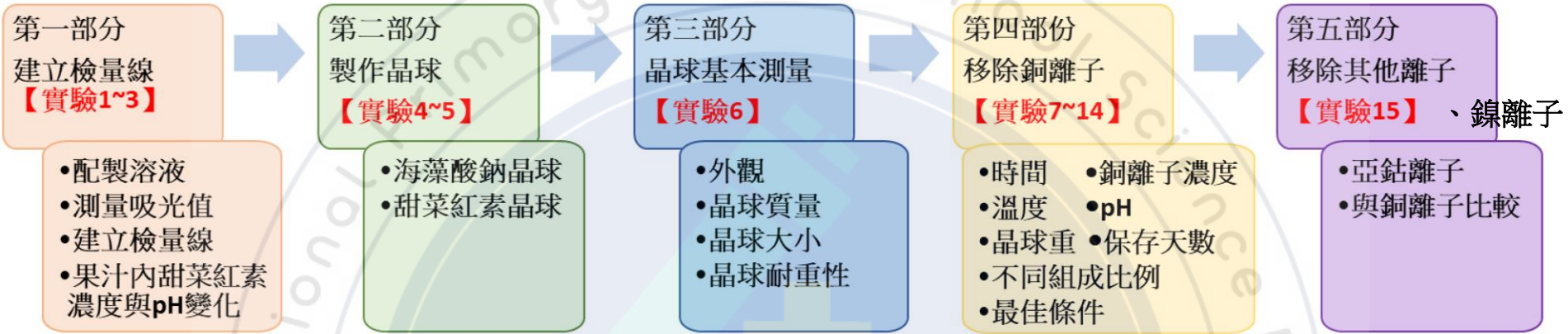
圖七、實驗流程示意圖

$$\text{殘留率}\% = \frac{[\text{重金屬離子}]_{\text{吸附後}}}{[\text{重金屬離子}]_{\text{吸附前}}} \times 100\% = \frac{A_{\text{吸附後}}}{A_{\text{吸附前}}} \times 100\%$$

$$\therefore \text{移除率}\% = 100\% - \text{重金屬殘留率}\%$$

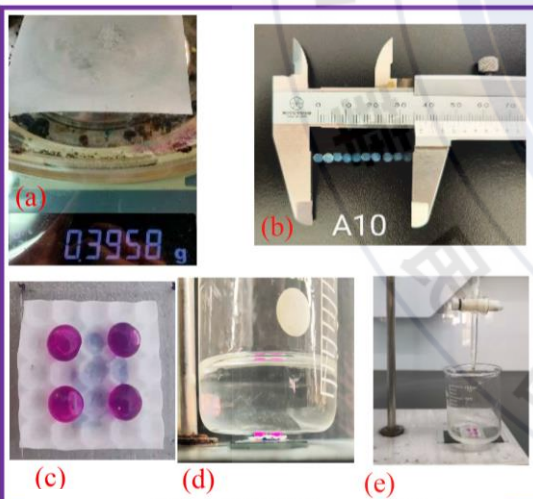
(式二)

# 肆、研究過程及方法



圖八、實驗架構圖

## 【第二、三部分】製作品球與晶球之基本測量



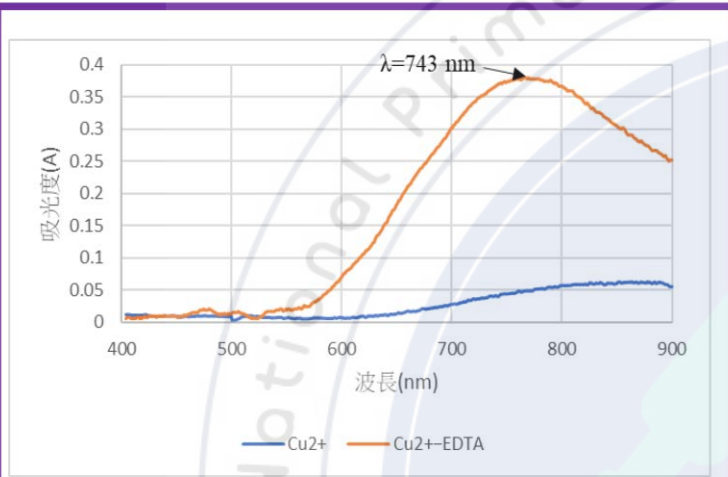
圖九、測量晶球質量(a)、直徑(b)、耐重度(c)~(e)

	A10	A11	A12	A13	A14	A15
照片						
外觀	白色 球形	深紅色 球形	深紅色 球形	深紅色 不規則形	深紅色 不規則形	深紅色 不規則形
質量(g/顆)	0.0396	0.0304	0.0375	0.0421	0.0336	0.0396
直徑(mm)	3.55	3.30	3.25	3.50	3.20	3.55
耐重度(g/顆)	33.70	28.75	22.75	13.50	7.00	1.50

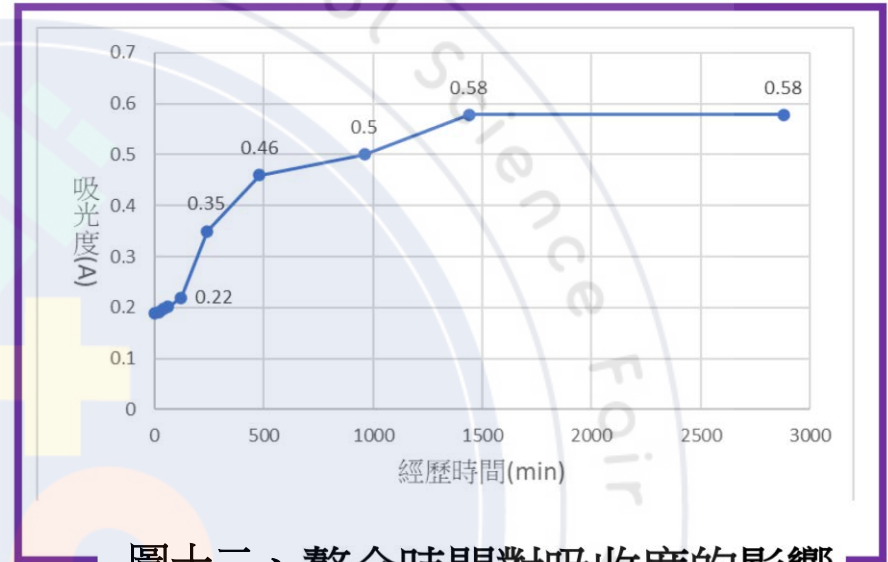
圖十、各晶球之外觀、大小及耐重度

# 伍、研究結果與討論

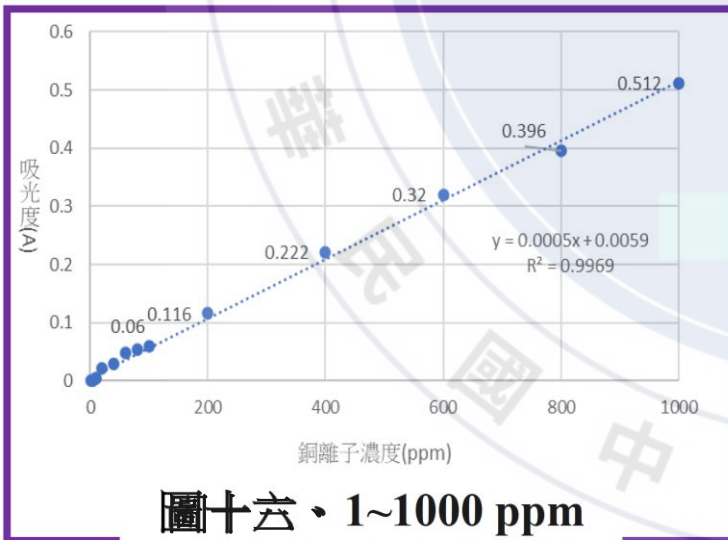
## 【第一部分】建立銅離子溶液之檢量線



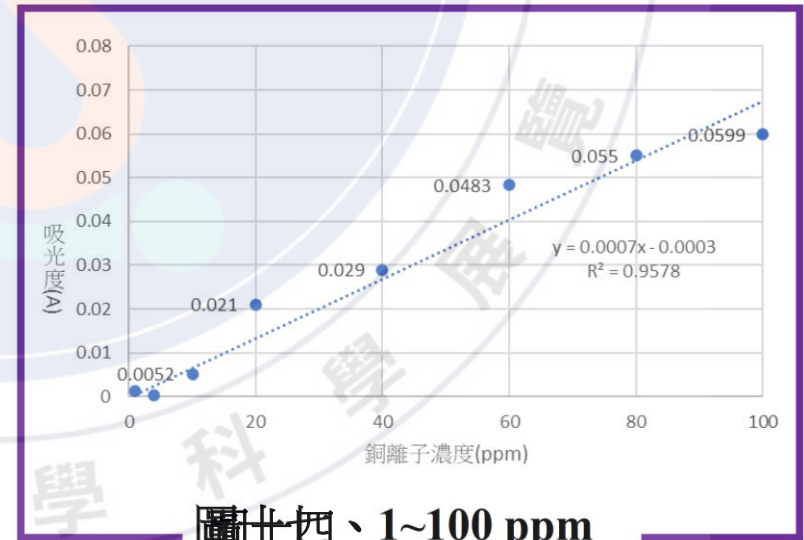
圖十一、1000 ppm  $\text{Cu}^{2+}$ 及1000 ppm  $\text{Cu}^{2+}$ -EDTA溶液之吸收光譜



圖十二、螯合時間對吸收度的影響



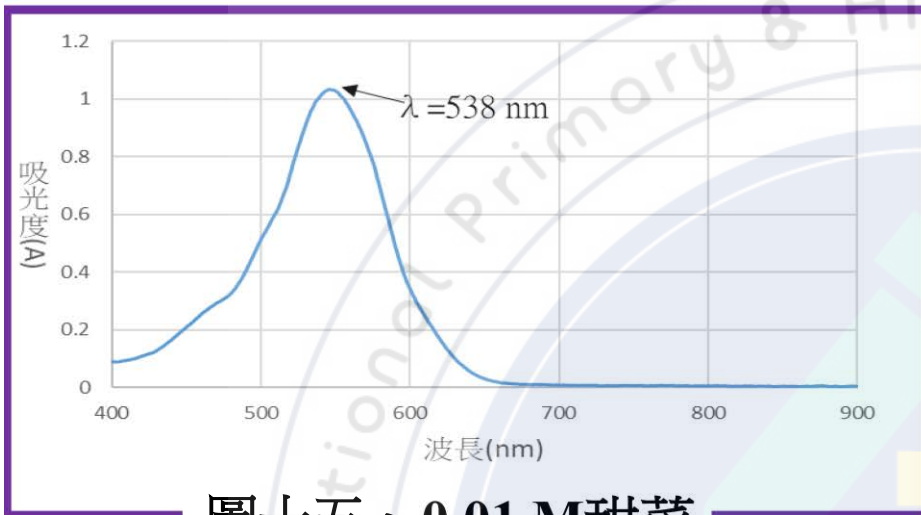
圖十六、1~1000 ppm  $\text{Cu}^{2+}$ -EDTA之檢量線



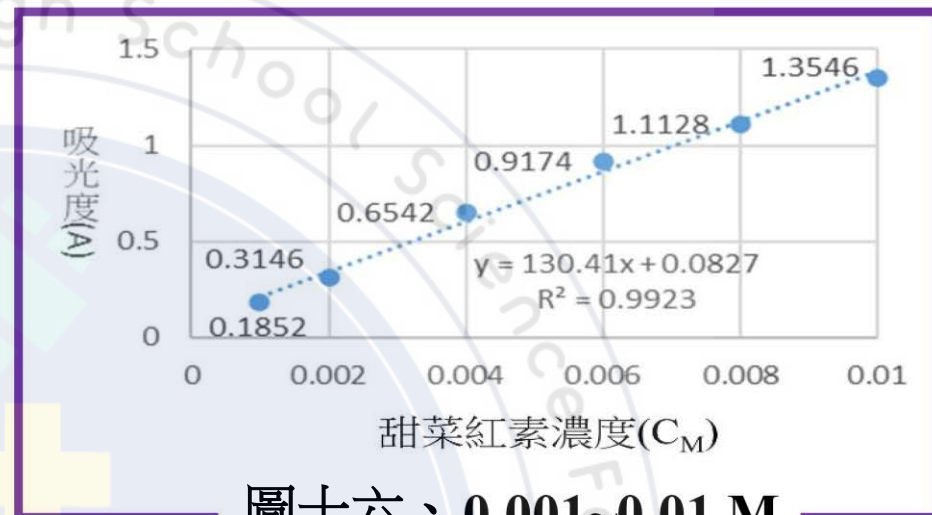
圖十四、1~100 ppm  $\text{Cu}^{2+}$ -EDTA之檢量線



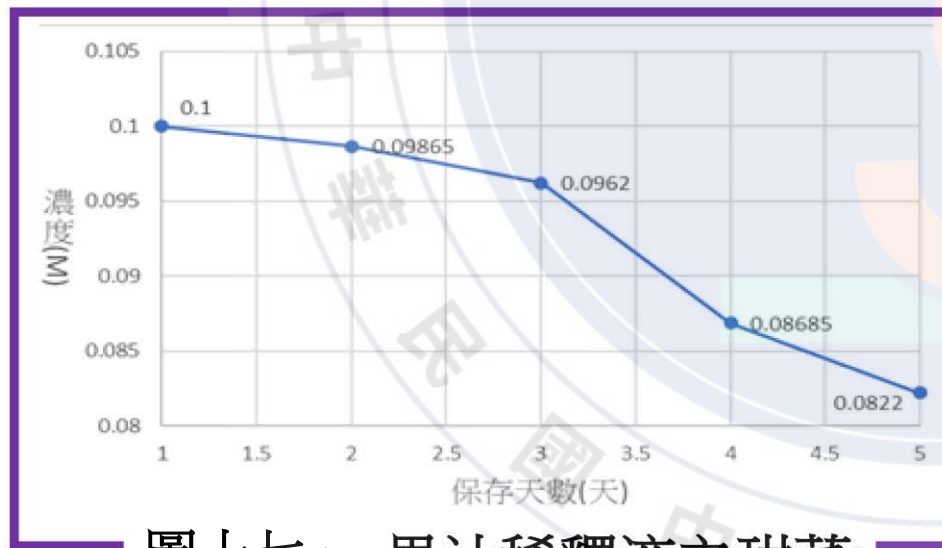
# 【第一部分】建立甜菜紅素溶液之檢量線



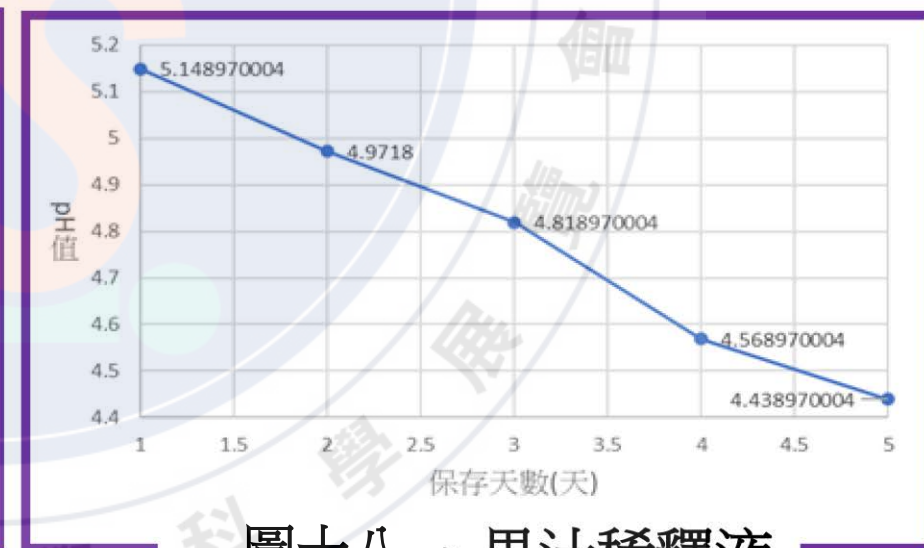
圖十五、0.01 M甜菜紅素溶液之吸收光譜



圖十六、0.001~0.01 M甜菜紅素溶液之檢量線

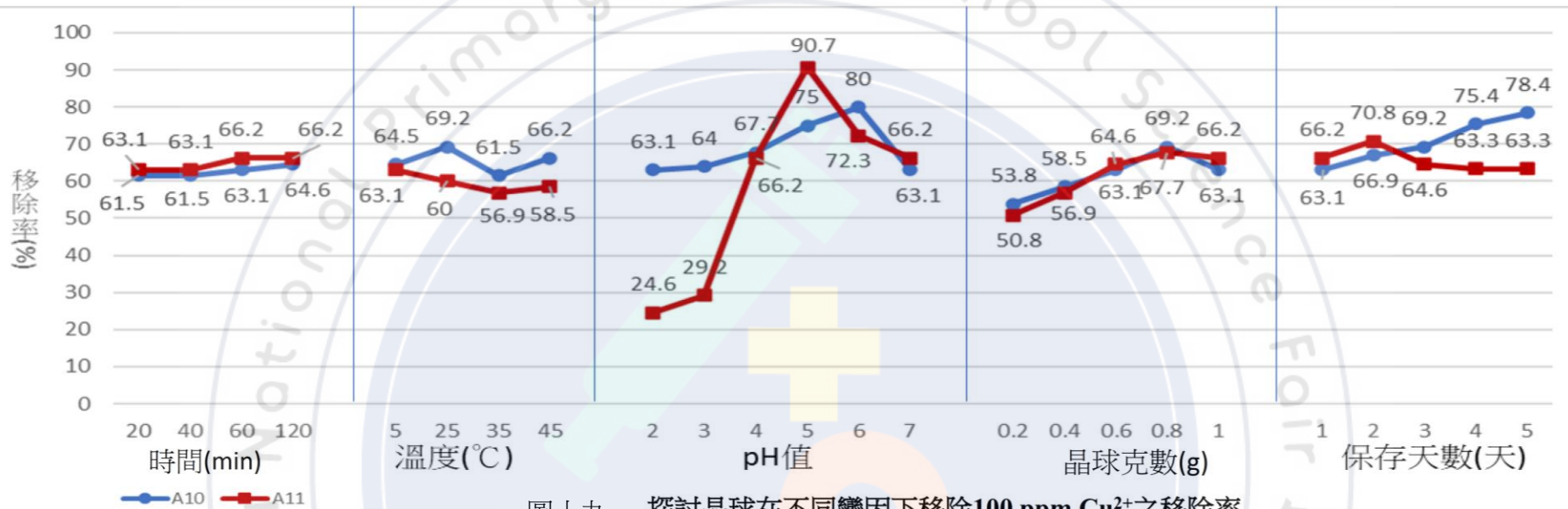


圖十七、果汁稀釋液之甜菜紅素濃度變化圖

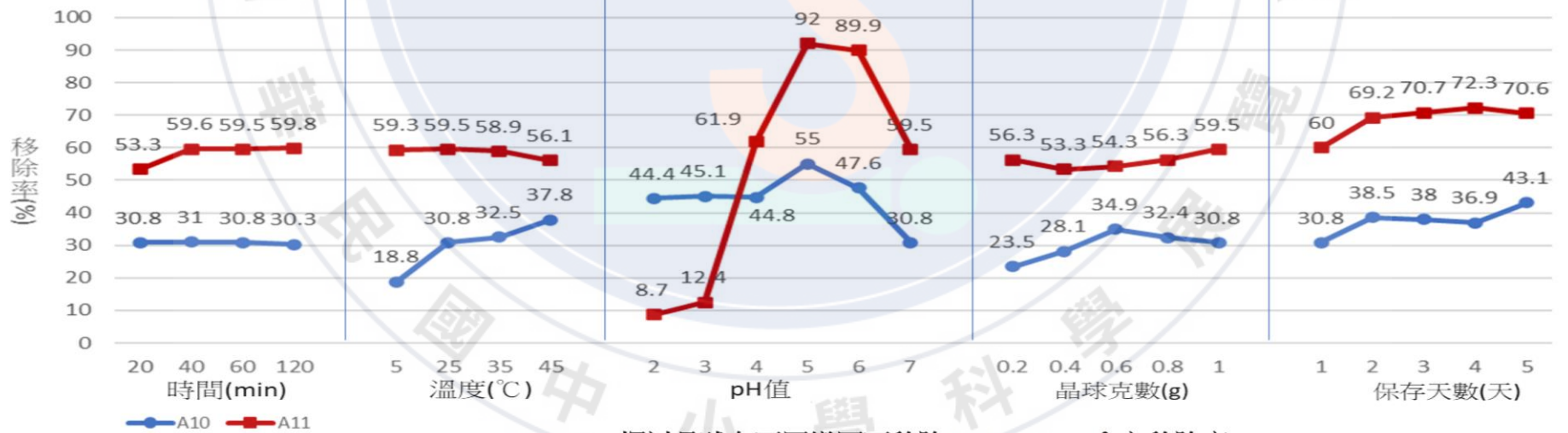


圖十八、果汁稀釋液之甜菜紅素pH值變化圖

# 【第四部分】晶球移除Cu<sup>2+</sup>之能力



圖十九、探討晶球在不同變因下移除100 ppm Cu<sup>2+</sup>之移除率



圖二十、探討晶球在不同變因下移除1000 ppm Cu<sup>2+</sup>之移除率

(a)100ppm

	時間(分)	溫度(°C)	pH 值	晶球質量(克)	保存天數
A <sub>10</sub>	60	45	6	0.8	5
A <sub>11</sub>	60	25	5	0.8	2

(a)100ppm

晶球種類	海藻酸鈉晶球 A <sub>10</sub>					甜菜紅素晶球 A <sub>11</sub>				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
次數										
吸收度(初)	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065	0.065
吸收度(末)	0.014	0.017	0.019	0.025	0.015	0.015	0.015	0.015	0.019	0.015
移除率(%)	78.5	74.2	70.4	72.3	77.1	77.5	77.5	77.4	70.6	77.4
平均 移除率	<b>74.12%</b>					<b>75.73%</b>				
標準差	<b>0.0334</b>					<b>0.0291</b>				

圖二十一、晶球對移除100 ppm Cu<sup>2+</sup>之各項最佳參數



(b)1000ppm

	時間(分)	溫度(°C)	pH 值	晶球質量(克)	保存天數
A <sub>10</sub>	60	45	5	0.6	5
A <sub>11</sub>	60	25	5	1.0	4

(b)1000ppm

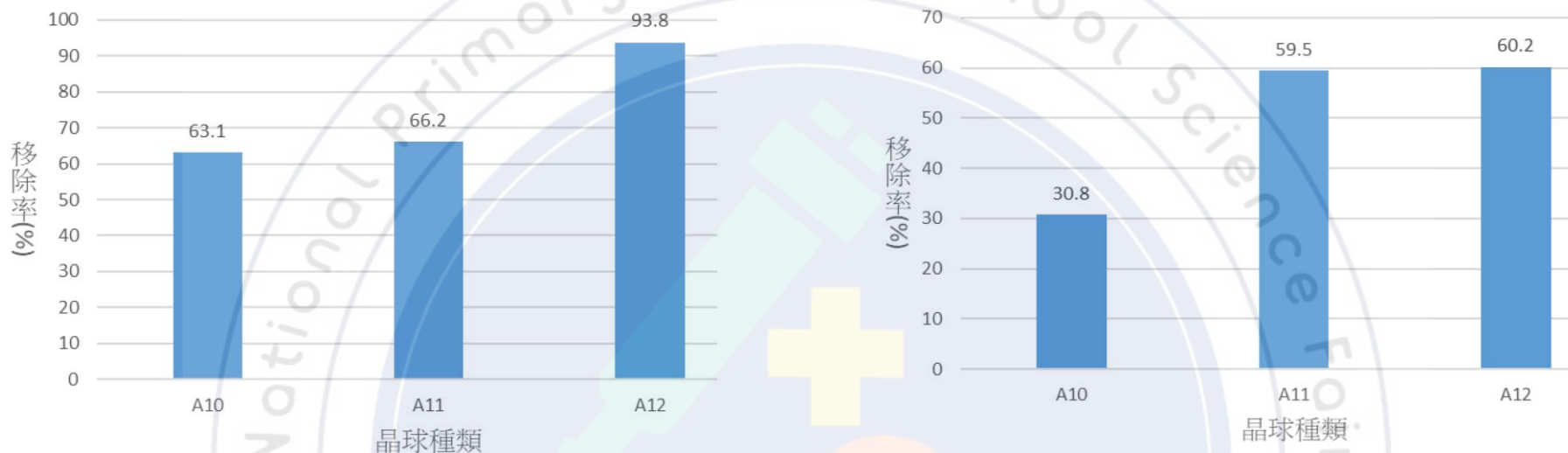
晶球種類	海藻酸鈉晶球 A <sub>10</sub>					甜菜紅素晶球 A <sub>11</sub>				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
次數										
吸收度(初)	0.565	0.565	0.565	0.565	0.565	0.565	0.565	0.565	0.565	0.565
吸收度(末)	0.355	0.375	0.352	0.356	0.351	0.171	0.179	0.191	0.191	0.171
移除率(%)	37.2	33.7	37.6	37	37.9	69.8	68.4	66.1	66.1	69.8
平均移 除率	<b>36.69%</b>					<b>68.04%</b>				
標準差	<b>0.0171</b>					<b>0.020</b>				

圖二十二、晶球對移除1000 ppm Cu<sup>2+</sup>之各項最佳參數



(a) 100ppm

(b) 1000ppm



圖二十三、組成比例不同之晶球對移除力的影響

### 【第五部分】晶球移除其他重金屬能力

晶球種類	海藻酸鈉晶球 A <sub>10</sub>			甜菜紅素晶球 A <sub>11</sub>		
	Co <sup>2+</sup>	Ni <sup>2+</sup>	Cu <sup>2+</sup>	Co <sup>2+</sup>	Ni <sup>2+</sup>	Cu <sup>2+</sup>
吸收度(初)	0.0067	0.578	0.565	0.0067	0.578	0.565
吸收度(末)	0.0046	0.531	0.284	0.0041	0.378	0.215
移除率(%)	31.3	18	30.8	38.8	56.1	59.5

圖二十四、晶球對移除1000 ppm 不同重金屬溶液之能力

# 陸、結論

1. 甜菜紅素含量比例越高，晶球越無法成形，且耐重性越差
2. 比較海藻酸鈉晶球(A<sub>10</sub>)與甜菜紅素晶球(A<sub>11</sub>)移除銅離子之能力

操作變因	100 ppm Cu <sup>2+</sup>	1000 ppm Cu <sup>2+</sup>
時間效應	兩者移除能力相差不多	A <sub>11</sub> 移除能力勝過 A <sub>10</sub>
濃度效應	兩者移除能力相差不多	A <sub>11</sub> 移除能力勝過 A <sub>10</sub>
溫度效應	在 25°C，A <sub>11</sub> 移除能力勝過 A <sub>10</sub>	在 25°C，A <sub>11</sub> 移除能力勝過 A <sub>10</sub>
酸鹼效應	在 pH=5，A <sub>11</sub> 移除能力勝過 A <sub>10</sub>	在 pH=5，A <sub>11</sub> 移除能力勝過 A <sub>10</sub>
晶球重量效應	兩者移除能力相差不多	A <sub>11</sub> 移除能力勝過 A <sub>10</sub>
晶球保存天數效應	A <sub>11</sub> 放置越久，移除能力下滑，第三天後，移除能力較 A <sub>10</sub> 差	A <sub>11</sub> 移除能力勝過 A <sub>10</sub>
各項實驗最佳條件	兩者移除能力相差不多	A <sub>11</sub> 移除能力勝過 A <sub>10</sub>

3. 組成比例不同之晶球對Cu<sup>2+</sup>之移除率，以A<sub>12</sub>移除能力最佳，A<sub>10</sub>最差。
4. 在25°C，pH=7，甜菜紅素晶球A<sub>11</sub>的移除1000 ppm Co<sup>2+</sup>、Ni<sup>2+</sup>、Co<sup>2+</sup>能力皆優於海藻酸鈉晶球A<sub>10</sub>。海藻酸鈉晶球A<sub>10</sub>移除能力為Co<sup>2+</sup>≅Cu<sup>2+</sup>> Ni<sup>2+</sup>；而甜菜紅素晶球A<sub>11</sub>移除能力為Cu<sup>2+</sup>>Ni<sup>2+</sup>>Co<sup>2+</sup>。

# 柒、未來與展望

1. 火龍果果汁可能含有其他物質會影響銅離子移除力，希望改良甜菜紅素的純化方法以達到重金屬的最佳移除力。
2. 希望找出更適合的農業廢棄物製作甜菜紅素，例如火龍果皮、甜菜根，未來可朝其他不同材料探討重金屬移除率。
3. 如何再生並重複使用甜菜紅素晶球。
4. 將甜菜紅素晶球應用於移除其它重金屬離子。

## 捌、參考資料

1. 湯宜擎(2015)。中華民國第55屆全國科展「晶球世紀」
2. 謝宜臻、涂旭哲、劉佳哲(2020)。中華民國第60屆全國科展「紅得發紫---以簡易光譜儀分析火龍果肉之甜菜紅素特性」
3. 吳佳蓉、陳彥劭、吳郁婷(2016)。中華民國第56屆全國科展「目不轉晶」
4. 范哲綸、曾新凱(2013)。中華民國第53屆全國科展「『蔗』麼『C』力」
5. 高宜蓁、余巧庭、劉宥汶(2020)。中華民國第60屆全國科展「以自組修飾光學檢測儀器探討甜菜紅的特性及與銅鉛離子的作用」
6. 黃佩瑀、曹家豪、吳沛璇、林璟醇(2003)。中華民國第43屆全國科展「小小晶球真奇妙」