

第十九屆旺宏科學獎 成果報告書



參賽編號：SA19-199

作品名稱：

更靈敏的快速檢測法應用於

探討 Cu^{2+} 在不同環境的沉澱移除條件

More Sensitive and Fast Test Applied for Removal of Copper(II)

Ion by Precipitation Method in Different Conditions

姓名：鄭宇廷

關鍵字：螯合、EDTA、沉澱曲線

摘要.....	1
壹、研究動機.....	2
貳、研究目的.....	2
肆、研究方法-研究設計.....	3
一、實驗架構.....	3
二、濃度計算.....	4
三、比爾定律.....	4
四、各種螯合基與 Cu^{2+} 結合之錯合物.....	5
伍、研究過程與方法.....	6
一、實驗一、熟練本研究基本實驗技巧並配製 0.1 M 氫氧化鈉水溶液.....	6
二、實驗二、探討硫酸銅水溶液的沉澱曲線.....	6
三、實驗三、繪製硝酸銅及氯化銅水溶液的沉澱曲線.....	7
四、實驗四、配製肉眼所見無色的銅離子水溶液.....	7
五、實驗五、尋找 Cu^{2+} -EDTA 的最大吸收波長.....	8
六、實驗六、探討 EDTA 的添加量對 Cu^{2+} -EDTA 在 740 nm 吸收強度的影響.....	8
七、實驗七、配合實驗四、五及六之實驗結果建立本研究之銅離子微量檢量線.....	9
八、實驗八、探討實驗一~三中三種銅鹽經過不同 pH 處理下的廢液並以實驗四~六建立 之方法檢測其殘存銅離子的吸收度.....	10
九、實驗九、探討水中酒石酸鹽對銅離子的影響.....	11
十、實驗十、探討移除酒石酸銅中的銅離子的方法.....	12
十一、實驗十一、探討水中檸檬酸鹽對銅離子的影響.....	12
十二、實驗十二、探討除沉澱法以外可移除含螯合劑之廢液中銅離子的其他方法之一.....	13
十三、實驗十三、探討除沉澱法以外可移除含螯合劑之廢液中銅離子的其他方法之二.....	13
陸、研究過程與初步結果.....	14
討論一、探討硫酸銅、硝酸銅及氯化銅水溶液的氫氧化銅沉澱曲線.....	14
討論二、肉眼所見透明無色的銅離子水溶液濃度大約為何.....	15
討論三、 Cu^{2+} 以及 Cu^{2+} -EDTA 的吸收光譜意義.....	16
討論四、探討 EDTA 的添加量對 Cu^{2+} -EDTA 在 740 nm 吸收強度的影響.....	16
討論五、建立本研究之銅離子微量檢量線.....	17
討論六、探討銅鹽經過不同 pH 處理下的廢液並以本研究建立之高靈敏檢量方法檢測其 殘存銅離子的吸收度。.....	18
討論七、探討水中含有酒石酸鹽時對銅離子沉澱過程的影響.....	21
討論八、配合實驗九之實驗結果計算酒石酸銅由沉澱法移除銅離子之移除率.....	23
討論九、探討廢液中含有螯合劑對無電電鍍析出銅原子的影響.....	25
討論十、探討廢液中含有螯合劑對有電電鍍析出銅原子的影響.....	26
柒、目前結論.....	27
捌、未來規劃與展望.....	27
捌、參考資料.....	30
附錄-本研究數據.....	I

摘要

工業的發展使得重金屬廢液日益激增，而其中又以銅、鎳的廢液最為嚴重。目前，去除水中銅離子可使用氫氧根沉澱法，即形成 $\text{Cu}(\text{OH})_{2(s)}$ 經沉降過濾來淨化水質。本研究利用 NaOH 對 Cu^{2+} 滴定的方法繪製 $\text{Cu}(\text{OH})_2$ 沉澱曲線，並使用本研究建立之「靈敏且能快速定量銅離子之方法」監控不同 pH 值沉澱處理之銅廢液中殘存的 $[\text{Cu}^{2+}]$ 數據，證明 pH=7 時能有效移除水中銅離子。

實驗發現一般校用分光光度計就算使用其最大吸收波長 800 nm、光徑 1 cm 來偵測水體銅離子水溶液的 $[\text{Cu}^{2+}]$ ，偵測極限約為 128 ppm 且靈敏度相當差。經過測試發現：當加入 EDTA(乙二胺四乙酸)螯合銅離子可以使其吸光係數大幅上升，具有顯色增強效果，並且當 EDTA 達飽和時吸光度具有再現性，應用於製作不同濃度的檢量線 ($A=0.0007[\text{Cu}^{2+}]+0.0076$) 時能下修偵測極限至 16 ppm。過去文獻使用 EDTA-2Na 的缺點是須採用耗時的「光度滴定方法」，本研究選擇難溶性 EDTA，以其在水中易達飽和的條件，建立「高靈敏度」的微量銅離子檢測法。

本研究建立具信度之檢量線搭配事先以模擬銅廢液繪製的沉澱曲線，發現中性時可以有效移除銅離子，但是當水中有氯離子時，會嚴重影響沉澱法除去水中銅離子的效果。

事實上，廢水不只含有銅離子，考慮基質效應，水中可能還具有常見的食品添加劑例如酒石酸鹽、檸檬酸鹽等。實驗發現銅廢液中若含有酒石酸鹽並且 pH 值在 6 以上時無法直接使用沉澱法處理，可以採取調整 pH 至 3，移除率為 94.2%；而銅廢液中若含有較高濃度檸檬酸鹽(濃度高於銅離子)，則酸鹼處理均無效，廢液只能透過「有電電鍍法」來去除銅離子(無電電鍍只能用來處理無螯合基的水體銅離子)。

實驗也進一步以本研究類似方法來研究水體鎳離子，從沉澱曲線可以發現：中性條件並無法有效移除鎳離子；在開發 $[\text{Ni}^{2+}]$ 定量法的部分，實驗發現：鎳離子在 256 ppm 時肉眼就難以辨識(而銅離子則是 128 ppm 才透明無色)，在含有鎳離子水中添加飽和的 EDTA 也可提升其吸收係數，並且製作檢量線，但偵測極限受限。有鑑於文獻指出水中雙金屬對生物致死量下修的危害性，本研究結果可以提供未來在重金屬廢液處理研究的新方向。

Abstract

Nowadays, the development of heavy industry make pollution of Copper ions increased day by day. At present, the precipitation method is be used to remove Copper ions in waste. $\text{Cu}(\text{OH})_{2(s)}$ in waste could be removed by sedimentation filtration, thus, the water quality would be purified.

In our study, using the titration of NaOH to Cu^{2+} to draw the precipitation curve, also apply the way founded in this study to monitor $[\text{Cu}^{2+}]$ in waste when pH value is different. We found Copper ions can be efficiently removed at pH7.

The experiment found that the detection limit of bare copper solution $[\text{Cu}^{2+}]$ is 128 ppm. When added EDTA as a developer, the detection limit can be revised down to 16 ppm (using 740 nm detection line together with the calibration line $A = 0.0007 [\text{Cu}^{2+}] + 0.0076$).

According to papers, Using of EDTA-2Na has the disadvantage of the time-consuming "photometric titration method". In this study, selecting soluble EDTA , and the "high sensitivity" trace Copper ions detection method was established based on its easy saturation in water.

On the other hand, the experiment found that the Copper waste solution contains Acid Tartrate, the pH value is above 6, and cannot be directly treated by precipitation, but can adjust the pH to 3 with a removal rate of (94.2%); if the copper waste solution contains with high concentration of Citrate, the waste liquid can only be treated by electrolytic plating

壹、研究動機

高中課本所教的沉澱反應是將兩杯溶液混合就可以馬上觀察到混濁現象，而老師建議我們可以利用「滴定方式」來更深入了解銅離子進行沉澱的過程。之所以對這個題材感興趣，是曾經在電視上看過某工廠非法傾倒廢水的新聞，這些廢水本身無色無味，卻被檢驗出含銅超標，從此處可以知道，經過肉眼所觀察到的廢液顏色並不能實際表示銅離子的存在與否，如何從完全澄清的廢液中檢驗含銅的實際濃度，就成了本研究的目標。學校的實驗設備有限，只有波長範圍在 400-800 nm 的分光光度計，實驗希望開發出靈敏度高並且簡單快速操作的方法，參考高中沉澱、螯合物及酸鹼滴定實驗單元的概念，探討如何克服以難溶性 EDTA 作為顯色劑遇到的困難，並在合理情況下建立標準檢量線，以推算出銅廢液在不同 pH 處理下水中殘存銅離子濃度，進而解釋氫氧化銅沉澱曲線應用於廢水處理的意義。另一方面，高中課程提到斐林、多倫試劑等能於鹼性下存在的銅離子螯合物，故當水中存在螯合基將導致一般沉澱法在移除水中銅離子時失效，我們也針對此問題作深入探究。

貳、研究目的

1. 使用銅鹽模擬銅廢水並探討其以強鹼滴定之氫氧化銅沉澱曲線。
2. 建立以難溶性 EDTA 作為螯合劑檢驗水中微量銅離子的方法。
3. 建立標準銅離子微量檢量線。
4. 以研究建立之方法及檢量線監控不同 pH 處理之廢液中的銅離子濃度，並探討氫氧化銅沉澱曲線的意義。
5. 探討當水中有酒石酸鹽或是檸檬酸鹽對本研究移除銅離子的影響。
6. 以本研究類似方法來研究水體鎳離子的沉澱曲線及定量法

參、研究設備及器材

一、藥品

名稱	學名	化學式	來源
硫酸銅	Copper sulfate	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	立統
氯化銅	Copper chloride	$\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	立統
硝酸銅	Copper nitrate	$\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	立統
氫氧化鈉	Sodium hydroxide	NaOH	立統
乙二胺四醋酸二鈉	EDTA 2Na	$\text{C}_{10}\text{H}_{16}\text{N}_2\text{O}_8\text{Na}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	立統
去離子水	Deion water	H_2O	立統
酒石酸鉀鈉	Potassium sodium tartrate	$\text{C}_4\text{H}_4\text{KNaO}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	立統
檸檬酸鈉	Sodium citrate	$\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	立統

二、設備或器材

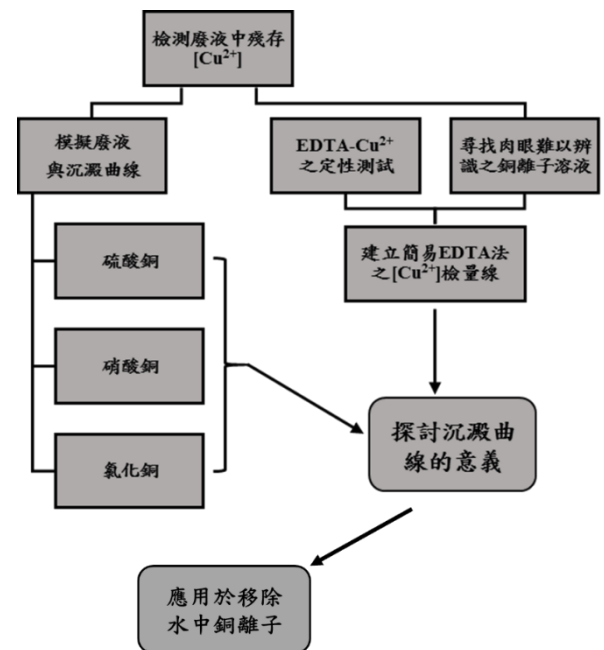
名稱	學名	名稱	學名
----	----	----	----

燒杯	Beaker	洗滌瓶	Wash bottle
漏斗	Funnel	定量瓶	Graduated flask
滴管	Drop	試管架	Tube holder
濾紙	Filter paper	酸鹼計	pH meter
試管	Tube	磁石攪拌器	Stirring hot plane
秤量紙	Weight paper	磁石	Stir bar
防風電子秤	Balance	刻度吸量管	Pipette
分光光度計	Spectrophotometer	光度計樣品槽	Test cell

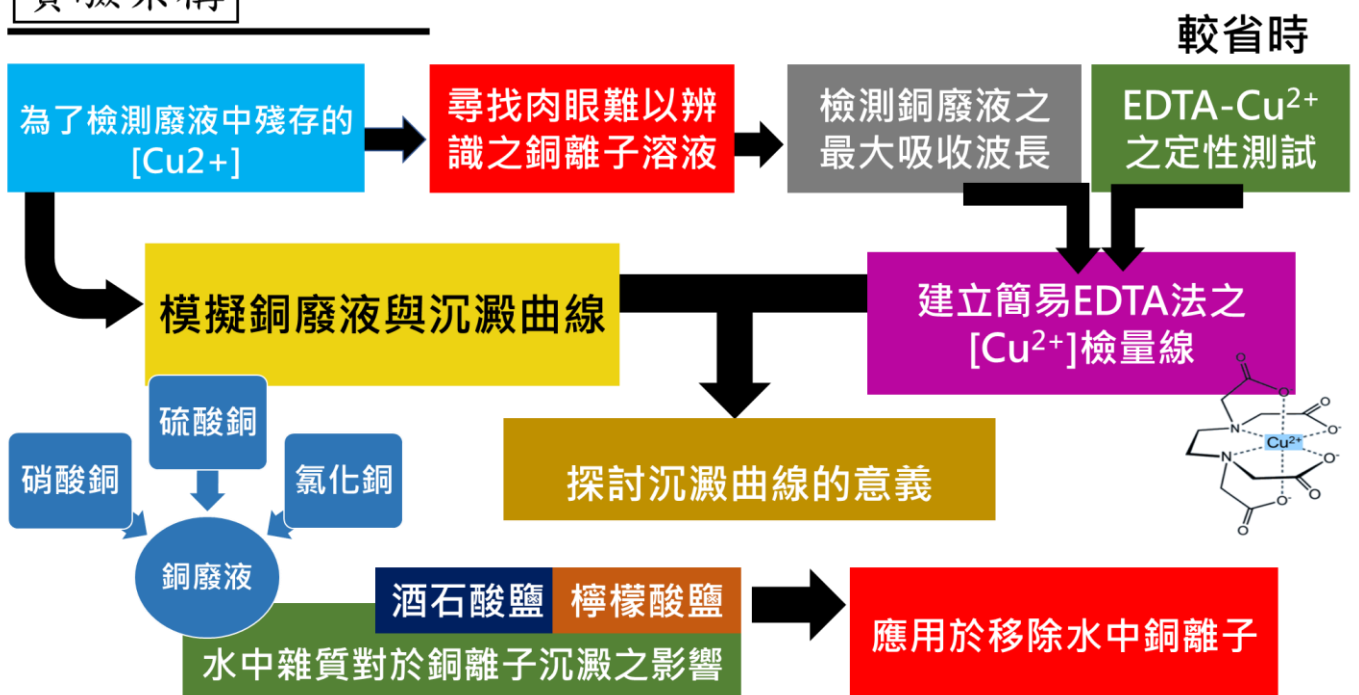
肆、研究方法-研究設計

一、實驗架構

研究為探討銅廢液經過不同鹼處理後得到之廢液，可以藉由本實驗建立之方法檢驗其殘存銅離子含量，並驗證氫氧化銅沉澱曲線的科學意義。實驗以三種不同銅鹽水溶液作為模擬廢液，並以酸鹼滴定法繪製出其沉澱曲線並找到沉澱點與沉澱終點。為了使 EDTA 成為定量水中微量銅離子的利器，做了一系列控制與掌握錯合物吸光值的定性測試，並歸納實驗條件使最終建立的微量檢量線可以滿足比爾定律，並且可以在較低的偵測極限下定量水中 ppm 等級的銅離子。針對水中含有螯合基(常見的食品添加劑有酒石酸、檸檬酸)存在時，亦進行一系列驗證，找出移除銅離子的新解法。



實驗架構



二、濃度計算

(一) 體積莫耳濃度 C_M

1. 定義：每公升的溶液中含有溶質的莫耳數。
例如 0.1 M 的氫氧化鈉水溶液代表每 1 公升的水溶液中含有 0.1 莫耳的 NaOH。
2. 公式： $C_M = \frac{\text{溶質莫耳數}(mole)}{\text{溶液公升數}(L)}$ 。單位：莫耳/公升(簡單記為 M)，念作 Molar。

(二) 百萬分點濃度 ppm

1. 定義：每公斤的溶液中含有溶質的毫克數。
例如 10 ppm 的銅離子水溶液代表每 1 公斤的水溶液中含有 10 毫克的銅離子。
2. 公式： $C_{ppm} = \frac{\text{溶質毫克數}(mg)}{\text{溶液公斤數}(kg)} \approx \frac{\text{溶質毫克數}(mg)}{\text{溶液公升數}(L)}$ 。單位：ppm = parts per million。

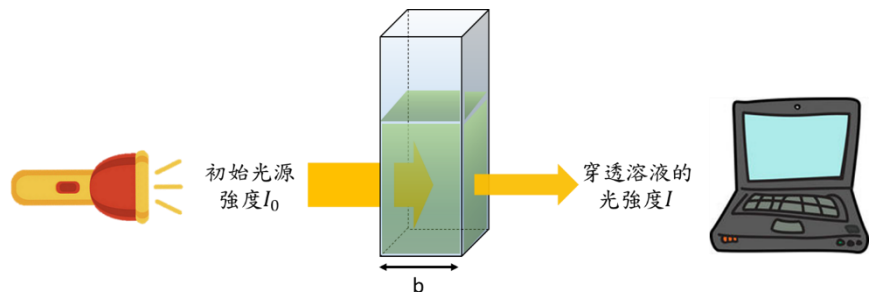
三、比爾定律

(一) 穿透率(Transmittance)

$$T = I/I_0$$

經過數學轉換

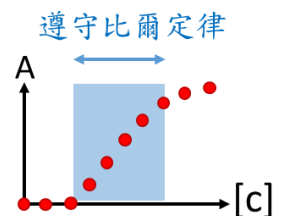
$$\text{定義吸收度 } A = -\log T$$



例如 $A=1$ 與 $A=2$ 表示兩個不同濃度的溶液其吸光程度差 10 倍。

(二) 吸收度(Absorbance)

1. 公式 $A = \epsilon b [c]$ ：吸收度在特定濃度範圍與物質濃度成正比。
 ϵ 稱為吸光係數：與物質種類有關。
 b 稱為光徑：通常為 1 cm。
 $[c]$ 是物質的濃度：單位通常為體積莫耳濃度 M。



2. 當吸收度與物質濃度呈現正比關係稱為比爾定律(Beer's law)
 - ✓ 當物質濃度過高會使物質吸收度偏離正比關係。
 - ✓ 物質的吸收度低於儀器的偵測極限時會導致實驗誤差。
 - ✓ 遵守比爾定律者才適合做為檢驗物質濃度的光度檢量線。

(三) 移除率計算(Removal)

實驗發現 1A 以下的銅離子水溶液，遵守比爾定律，因此移除前後，水中剩下的銅離子比例為

$$\text{殘留率} = \frac{[\text{銅離子}]_{\text{移除後}}}{[\text{銅離子}]_{\text{移除前}}} = \frac{A_{\text{移除後}}}{A_{\text{移除前}}}$$

因此可計算得

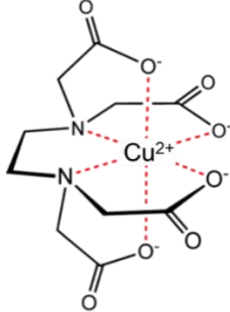
$$\text{移除率}\% = 100\% - \text{殘留率} = \frac{A_{\text{移除後}}}{A_{\text{移除前}}} \times 100\%$$

四、各種螯合基與 Cu^{2+} 結合之錯合物

(一) 乙二胺四乙酸(EDTA)與 Cu^{2+} 螯合形成錯合物 Cu^{2+} -EDTA

1. 配位情形

EDTA 屬於六牙基的配位子，容易以六個化學鍵將金屬離子緊密螯合在中心，形成的化合物稱為配位化合物，又稱錯合物。

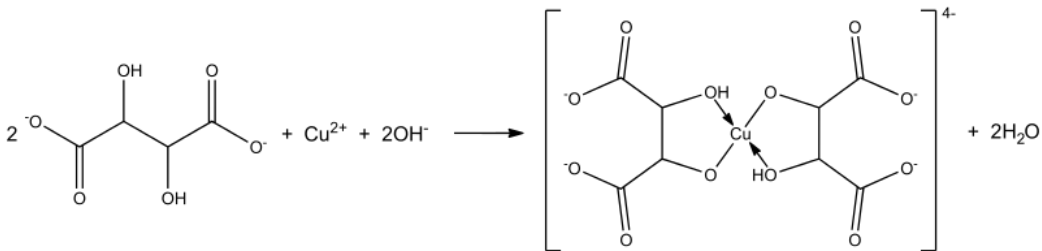


2. 配位效應

當 EDTA 與 Cu^{2+} 結合之後，會改變銅離子原本的顏色以及吸光值，本實驗利用 EDTA 作為增強顯色劑，藉此提高分光光度計偵測微量銅離子濃度的靈敏度。

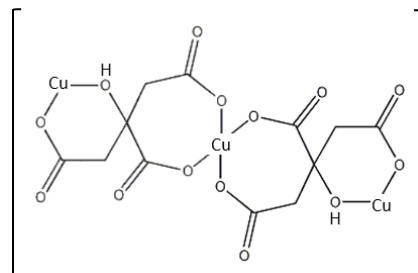
(二) 酒石酸根與 Cu^{2+} 螯合形成錯合物 $[\text{Cu}(\text{C}_4\text{H}_3\text{O}_6)]^{4-}$

酒石酸根屬於雙牙基的配位子，利用羧基旁的兩個羥基 OH 來螯合銅離子，形成的錯合物中酒石酸根與銅離子比例為 2 : 1。



(三) 檸檬酸根與 Cu^{2+} 螯合形成錯合物 $[\text{Cu}_3(\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7)_2]$

檸檬酸根屬於雙牙基的配位子，不過其與銅離子的螯合屬於二聚體(dimer)，嚴格來說，檸檬酸根與銅離子的螯合沒有特定的比例，不是所有的銅離子配位環境都相同。



伍、研究過程與方法

一、實驗一、熟練本研究基本實驗技巧並配製 0.1 M 氫氧化鈉水溶液

(一) 步驟

步驟 1-1 校正天平，調整天平兩個前腳使平衡氣泡回歸到圈內。

步驟 1-2 秤取 1.000 g 氫氧化鈉，以手指點晃方式慢慢裝填至精準的重量。

步驟 1-3 配製 0.100 M 的氫氧化鈉水溶液。將秤好的氫氧化鈉溶於適量的水，再以定量瓶稀釋至總體積 250 mL。

(二) 圖例說明



步驟 1-1
校正過程



步驟 1-2
秤取鹼



步驟 1-3
配製溶液

二、實驗二、探討硫酸銅水溶液的沉澱曲線

(一) 步驟

步驟 2-1 將 0.500 g 硫酸銅置於燒杯內並加入約 40 g 水中使其完全溶解，配製成硫酸銅水溶液。(pH 約為 3.0)

步驟 2-2 架設滴定攪拌裝置，將實驗一配製好的 0.100 M 氫氧化鈉水溶液裝填至滴定管中，調整滴定管到燒杯上方；另外以夾子固定玻璃電極，使玻璃圓球完全沒入硫酸銅水溶液的液面，然後啟動磁石攪拌器。

步驟 2-3 配製 0.100 M 的氫氧化鈉水溶液。將秤好的氫氧化鈉溶於適量的水，再以定量瓶稀釋至總體積 250 mL。

步驟 2-4 紀錄已使用的鹼液體積以及酸鹼計上對應的 pH 值，並畫出沉澱曲線。

(二) 圖例說明



步驟 2-1
配製銅鹽



步驟 2-2
架設裝置



步驟 2-3
開始滴定



步驟 2-4
紀錄體積

三、實驗三、繪製硝酸銅及氯化銅水溶液的沉澱曲線

(一) 步驟

步驟 3-1 將 0.500 g 硝酸銅置於燒杯內並加入約 40 g 水中使其完全溶解，配製成硝酸銅水溶液。(pH 約為 4.0)

步驟 3-2 架設滴定攪拌裝置，將實驗一配製好的 0.100 M 氫氧化鈉水溶液裝填至滴定管中，調整滴定管到燒杯上方；另外以夾子固定玻璃電極，使玻璃圓球完全沒入銅離子溶液的液面，然後啟動磁石攪拌器。

步驟 3-3 配製 0.100 M 的氫氧化鈉水溶液。將秤好的氫氧化鈉溶於適量的水，再以定量瓶稀釋至總體積 250 mL。

步驟 3-4 紀錄已使用的鹼液體積以及酸鹼計上對應的 pH 值，並畫出沉澱曲線。

步驟 3-5 將 0.500 g 氯化銅置於燒杯內並加入約 40 g 水中使其完全溶解，配製成氯化銅水溶液。(pH 約為 4.0)

步驟 3-6 仿照步驟 3-1~3-4 之方法，畫出沉澱曲線。

四、實驗四、配製肉眼所見無色的銅離子水溶液

(一) 步驟

步驟 4-1 在 100 mL 水中進行定性測試，逐漸添加 0.030、0.040、0.050、0.075、0.100、0.200 g 的硫酸銅並測試肉眼所能辨識之藍色。

步驟 4-2 取 0.050 g 硫酸銅溶於適量水，再以定量瓶稀釋至總體積 100 mL。
(0.050 g/100 mL = 128 ppm[Cu²⁺])

(二) 圖例說明



步驟 4-1

肉眼可見銅離子定性測試
由左而右依序為 0.030、0.040、0.050、
0.075、0.100、0.200 (g/100 mL 水)



步驟 4-2

配製 128 ppm 銅離子水溶液

五、實驗五、尋找 Cu^{2+} -EDTA 的最大吸收波長

(一) 步驟

步驟 5-1 取 128 ppm 銅離子水溶液(肉眼看不出顏色)加入過量 EDTA 並攪拌至底部出現沉澱。

步驟 5-2 以重力過濾法過濾不溶物，並將溶液移至光度計樣品槽內。

步驟 5-3 以飽和 EDTA 水溶液作為背景液將分光光度計在每次不同波長 400~800 nm 測量吸收度前均作一次歸零動作。

步驟 5-4 測量 Cu^{2+} -EDTA 在不同波長 400~800 nm 吸收度，找到最大吸收波長，以提升之後檢測銅離子之靈敏度。

(二) 圖例說明



步驟 5-1
左為加入 EDTA
前；右為加入
EDTA 後



步驟 5-2
重力過濾法



步驟 5-3
左為 EDTA 飽和溶
液；右為 Cu^{2+} -
EDTA 飽和溶液



步驟 5-4
測量吸收度

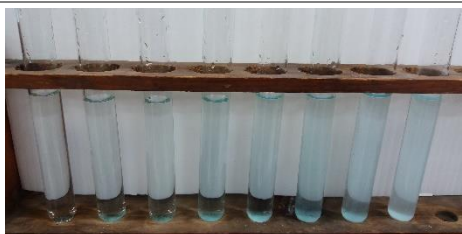
六、實驗六、探討 EDTA 的添加量對 Cu^{2+} -EDTA 在 740 nm 吸收強度的影響

(一) 步驟

步驟 6-1 取 128 ppm 銅離子(肉眼看不出顏色)水溶液 10 mL 分別加入不同量 0、0.005、0.010、0.020、0.030、0.050、0.070 g、0.150 的 EDTA，以重力過濾法取其澄清液。

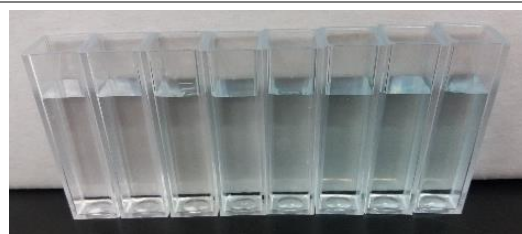
步驟 6-2 以波長 740 nm 的光測量澄清液吸收度。

(二) 圖例說明



步驟 6-1

由左而右為加入不同克數 0、0.005、0.010、0.020、0.030、0.050、0.070 g、0.150 的 Cu^{2+} -EDTA 溶液(未過濾前)



步驟 6-2

由左至右為加入 0~0.150 g EDTA 過濾後的澄清液

七、實驗七、配合實驗四、五及六之實驗結果建立本研究之銅離子微量檢量線

(一) 步驟

步驟 7-1 配製 0、2、4、8、16、32、64、128、256、512、1024、2048 ppm 的銅離子水溶液。

硫酸銅	0.050 g	0.100 g	0.800 g	其餘的濃度以比例混合稀釋方法配製。
溶液體積	100 mL	100 mL	100 mL	
[Cu ²⁺]	128 ppm	256 ppm	2048 ppm	

步驟 7-2 加入過量 EDTA 攪拌並過濾成為 Cu²⁺-EDTA 飽和溶液。

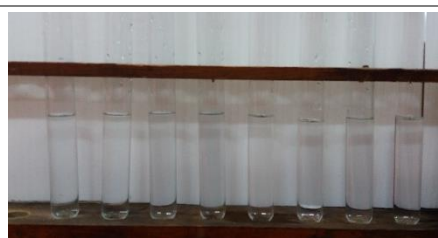
步驟 7-3 以 740 nm 光源測量吸收度，並記錄吸收度與銅離子濃度的關係，依此關係建立標準檢量線。

(二) 圖例說明



步驟 7-1

不同濃度的銅離子水溶液由左而右依序為 256、128、64、32、16、8、4、2 ppm



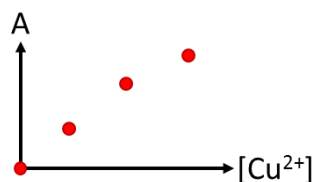
步驟 7-2

不同濃度的銅離子水溶液由左而右依序為 256、128、64、32、16、8、4、2 ppm



步驟 7-3

不同濃度銅離子配成 Cu²⁺-EDTA 飽和溶液



步驟 7-4

以分光計得到的吸收度 A 為縱軸，溶液之銅離子 [Cu²⁺] 為橫軸建立關係



八、實驗八、探討實驗一~三中三種銅鹽經過不同 pH 處理下的廢液並以實驗四~六建立之方法檢測其殘存銅離子的吸收度

(一) 步驟

步驟 8-1 調整(1)硫酸銅(2)硝酸銅(3)氯化銅之銅廢液至 pH=4~10 並均勻收集至試管內。

步驟 8-2 將沉澱物過濾，並將濾液收集至另一批試管內。

步驟 8-3 將上步驟所得濾液配製成飽和 EDTA 溶液。

步驟 8-4 過濾未溶解的 EDTA 後使用分光光度計測量試管中溶液的吸光度。

步驟 8-5 利用檢量線將吸光度轉換成殘存銅離子濃度。

(二) 圖例說明



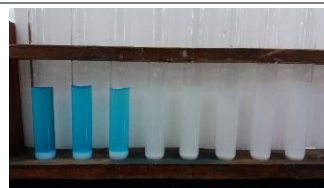
步驟 8-1-(1)

經過鹼處理之硫酸銅廢液收集



步驟 8-2-(1)

除去 $\text{Cu}(\text{OH})_2$ 固體
(鹼處理之硫酸銅廢液)



步驟 8-3-(1)

飽和 Cu^{2+} -EDTA
(鹼處理之硫酸銅廢液)



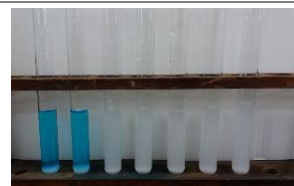
步驟 8-1-(2)

經過鹼處理之硝酸銅廢液收集



步驟 8-2-(2)

除去 $\text{Cu}(\text{OH})_2$ 固體
(鹼處理之硝酸銅廢液)



步驟 8-3-(2)

飽和 Cu^{2+} -EDTA
(鹼處理之硝酸銅廢液)



步驟 8-1-(3)

經過鹼處理之氯化銅廢液收集



步驟 8-2-(3)

除去 $\text{Cu}(\text{OH})_2$ 固體
(鹼處理之氯化銅廢液)



步驟 8-3-(3)

飽和 Cu^{2+} -EDTA
(鹼處理之氯化銅廢液)

九、實驗九、探討水中酒石酸鹽對銅離子的影響

(一) 步驟

步驟 9-1 將 2.5 g 硫酸銅置於燒杯內並加入約 90 g 水中使其完全溶解，配製成硫酸銅水溶液。(pH 約為 3.0)

步驟 9-2 將 2.82 g 酒石酸鉀鈉置於燒杯內並加入約 90 g 水中使其完全溶解，配製成酒石酸鉀鈉水溶液。

步驟 9-3 配製 0.100 M 的氫氧化鈉水溶液。將秤好的氫氧化鈉溶於適量的水，再以定量瓶稀釋至總體積 250 mL。

步驟 9-4 架設滴定攪拌裝置，將實驗一配製好的 0.100 M 氫氧化鈉水溶液裝填至滴定管中，調整滴定管到燒杯上方；另外以夾子固定玻璃電極，使玻璃圓球完全沒入硫酸銅水溶液的液面，然後啟動磁石攪拌器。

步驟 9-5 紀錄已使用的鹼液體積以及酸鹼計上對應的 pH 值，並畫出整合曲線。

(二) 圖例說明



步驟 9-1
秤重



步驟 9-2
配製



步驟 9-3



步驟 9-4
架設裝置



步驟 9-5
配製溶液



步驟 9-5
紀錄體積

十、實驗十、探討移除酒石酸銅中的銅離子的方法

(一) 步驟

步驟 10-1 配置 1.0 M 的 H_2SO_4 溶液。

步驟 10-2 取實驗九螯合後的銅離子廢液，加入硫酸調整 pH 值。

步驟 10-3 觀察溶液在 pH 值在何處時沉澱並記錄。

步驟 10-4 過濾後取出，並測量吸收度，檢視銅離子是否析出。

步驟 10-5 計算移除率。

(二) 圖例說明



步驟 10-2
調 pH 值



步驟 10-3
紀錄沉澱時的 pH 值



步驟 10-4
檢測吸收度

十一、實驗十一、探討水中檸檬酸鹽對銅離子的影響

(一) 步驟

步驟 11-1 將 2.5 g 硫酸銅置於燒杯內並加入約 100 g 水中使其完全溶解，配製成硫酸銅水溶液。(pH 約為 3.0)

步驟 11-2 將 2.94 g 檸檬酸鈉置於燒杯內並加入約 90 g 水中使其完全溶解，配製成檸檬酸鈉水溶液。

步驟 11-3 配製 0.100 M 的氫氧化鈉水溶液。將秤好的氫氧化鈉溶於適量的水，再以定量瓶稀釋至總體積 250 mL。

步驟 11-4 架設滴定攪拌裝置，將實驗一配製好的 0.100 M 氫氧化鈉水溶液裝填至滴定管中，調整滴定管到燒杯上方；另外以夾子固定玻璃電極，使玻璃圓球完全沒入硫酸銅水溶液的液面，然後啟動磁石攪拌器。

步驟 11-5 紀錄已使用的鹼液體積以及酸鹼計上對應的 pH 值，並畫出螯合曲線。

(二) 圖例說明



步驟 11-1



步驟 11-2



步驟 11-3

十二、實驗十二、探討除沉澱法以外可移除含螯合劑之廢液中銅離子的其他方法之一
--無電電鍍

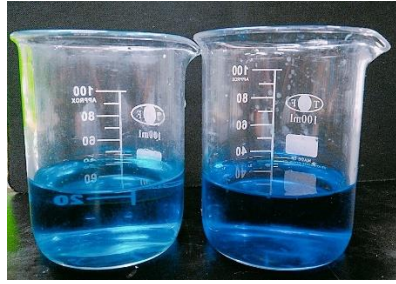
(一) 步驟

步驟 12-1 取實驗十(酒石酸銅)及十一(檸檬酸銅)pH 值為 7 的澄清廢液。

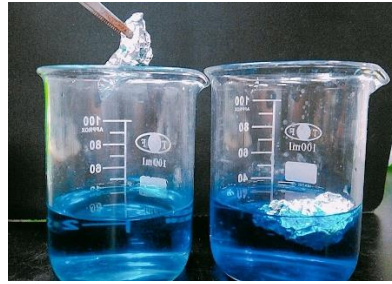
步驟 12-2 取鋁箔紙摺疊使其霧面朝外後分別加入其中。

步驟 12-3 靜置一段時間後觀察其變化。

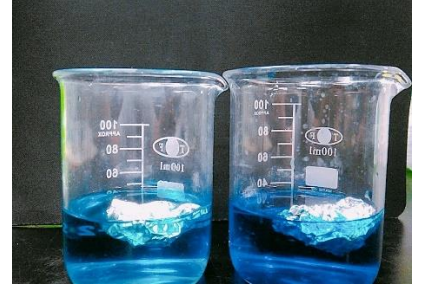
(二) 圖例說明



步驟 12-1
取出澄清液



步驟 12-2
加入鋁箔



步驟 12-3
觀察是否褪色

十三、實驗十三、探討除沉澱法以外可移除含螯合劑之廢液中銅離子的其他方法之二
--有電電鍍

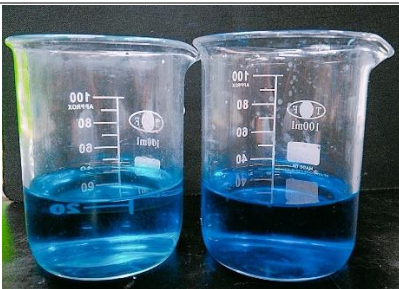
(一) 步驟

步驟 13-1 取實驗十(酒石酸銅)及十一(檸檬酸銅)pH 值為 7 的澄清廢液。

步驟 13-2 加入正負電極後通 18 V 直流電(正極為碳棒，負極為銅線)。

步驟 13-3 靜置一段時間後觀察其變化。

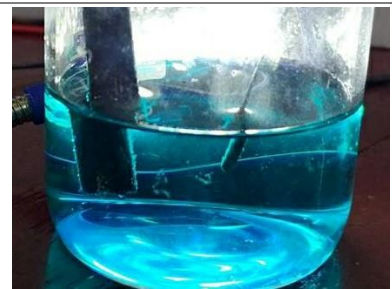
(二) 圖例說明



步驟 13-1
取出澄清液



步驟 13-2
進行電鍍電解



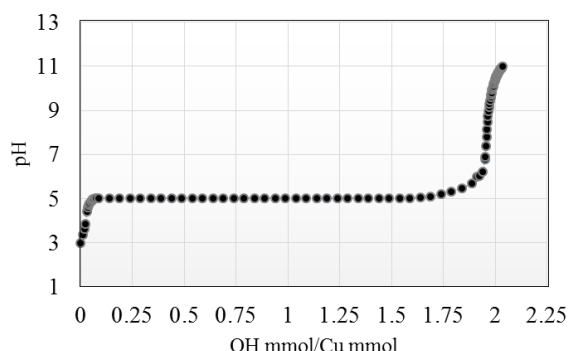
步驟 13-3
碳棒為電解水
紅色銅在銅棒上析出

陸、研究過程與初步結果

討論一、探討硫酸銅、硝酸銅及氯化銅水溶液的氫氧化銅沉澱曲線

(一) 硫酸銅的氫氧化銅沉澱曲線

從實驗的滴定曲線來看，銅離子與強鹼形成沉澱的起始沉澱點約在 $\text{pH}=5$ ，在此 pH 下滴加更多的鹼並無法使 pH 繼續提升，表示強鹼正在與銅離子做結合。當水中的銅離子與強鹼結合達到飽和時，若添加更多的強鹼則會使水溶液 pH 迅速上升，大約可以推論此沉澱物接近完全沉澱的點應該是在曲線恰垂直上升的位置，即 $\text{pH}=6.0\sim 7.0$ 附近。



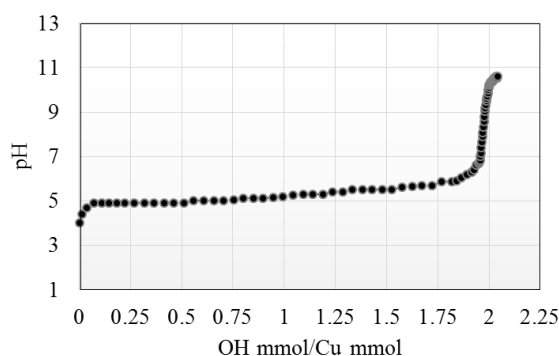
【圖】 硫酸銅受鹼沉澱之曲線

實驗小記：實驗發現當 pH 升到 5.0 以前， pH 值都不會有向下降的情形，當 pH 升到 5 的瞬間， pH 值就會開始跳動，推論此時開始發生化學變化，溶液的外觀也開始出現混濁， pH 會緩慢下降，但是滴加強鹼時又會回升到 5.0 左右，過程不小心滴加過多的強鹼，但 pH 也不會爆衝，頂多到達 $\text{pH}=5.2$ 又會再迅速降到 5.0 以下，控制滴加鹼的速率，其 pH 會維持在 $\text{pH}=5.0$ 很長一段時間，當發現加入微量鹼卻有較大幅度的 pH 跳動時，就開始放慢滴加鹼的速率，並調高攪拌的轉速，然後約在 $\text{pH}=6.5\sim 7.0$ 之間會突然爆衝到 $\text{pH}=8.0$ 甚至以上，直到 $\text{pH}=9.0$ 之後才緩和下來，並以固定比例逐漸上升 pH 。

(二) 硝酸銅的氫氧化銅沉澱曲線

將銅鹽改為硝酸銅，重複相同的實驗，得到的滴定曲線與前者相近，沉澱點在 $\text{pH}=5$ ，並在 $\text{pH}=7.0$ 附近曲線有垂直上升現象。

實驗小記：發現硝酸銅水溶液的酸鹼初始值 $\text{pH}=4$ 比硫酸銅水溶液未滴定前的酸鹼值 $\text{pH}=3$ 要高。在 OH/Cu 莫耳比例大於 1 以上後，溶液 pH 值下降的趨勢會慢很多，即使放慢添加鹼的速率，其 pH 仍會逐漸抬升，不過上升幅度並不大，大約也是在 $\text{pH}=6.5$ 之後有一個明顯的暴衝，直到 $\text{pH}=9$ 之後又再緩和下來。



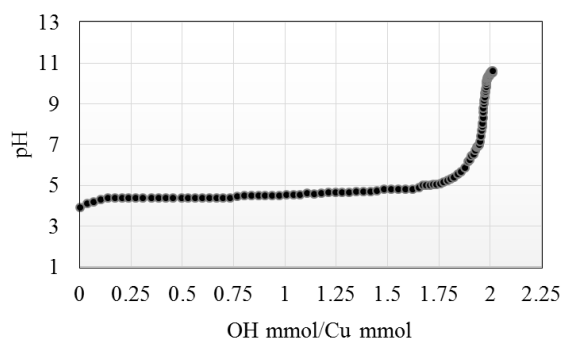
【圖】 硝酸銅受鹼沉澱之曲線

(三) 氯化銅的氫氧化銅沉澱曲線

將銅鹽改為氯化銅，重複相同的實驗，得到的滴定曲線與前兩者相近，沉澱點在 $\text{pH}=4.8$ ，並在 $\text{pH}=7.0$ 附近曲線有垂直上升現象。

實驗小記：氯化銅的沉澱點比前兩者稍低，不過曲線的趨勢非常相近，調整 pH 值的過程，沉澱物顏色仍然是氫氧化銅之顏色，實驗判斷沉澱點之差異可能是溶液中陰離子的影響，不過本研究並無法確定原因。

實驗還發現鹼處理調整至 $\text{pH}5$ 的氯化銅廢液，無法以濾紙過濾氫氧化銅沉澱，經過老師說明推測，其沉澱顆粒太小(屬於膠體溶液)，在後來的實驗數據也發現水中含有 Cl 離子，會導致沉澱偏差，經過討論推測 Cl 可能與 Cu^{2+} 有作用力。



【圖】 硝酸銅受鹼沉澱之曲線



【圖】 硝酸銅不同 pH 值下沉澱結果
由左而右為 4,5,6,7,8,9,10

由(一)~(三)總結，銅離子的沉澱點約在 $\text{pH}=5$ 附近，沉澱終點約在 $\text{pH}=7$ 附近。

討論二、肉眼所見透明無色的銅離子水溶液濃度大約為何

本研究目的在探討是否能偵測鹼處理後肉眼所見無色之廢液中銅離子殘存濃度，實驗發現在預先配製的不同銅離子溶液中濃度小於 128 ppm 之溶液，肉眼最難以辨識(由於拍照的關係，圖片效果並不清楚)。

之後的實驗會先固定以 128 ppm 銅離子溶液為定性測試樣本。

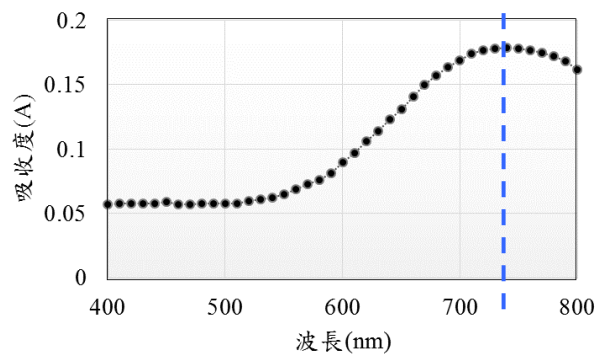


【圖】 肉眼可見銅離子定性測試

由左而右依序為
0.030、0.040、0.050、0.075、0.100、0.200 (g

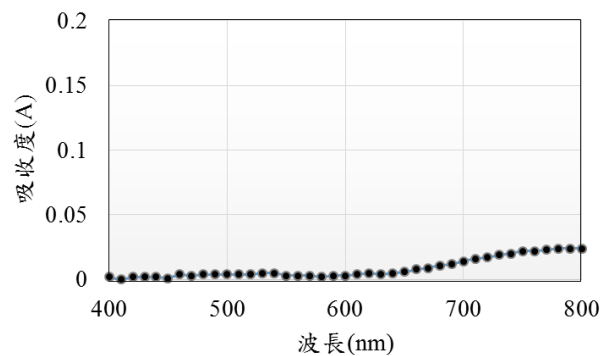
討論三、Cu²⁺以及 Cu²⁺-EDTA 的吸收光譜意義

如右圖為 Cu²⁺-EDTA 在 400~800 nm 的波長掃描光譜，最大吸收波長為 740 nm，為求之後實驗有較好的靈敏度，選擇波長 740 nm 作為偵測 Cu²⁺-EDTA 之吸光度參數。實驗也發現只溶有 EDTA 的水溶液在 740 nm 的吸收度相當弱，但為了在定量實驗上能更準確，之後測量吸收度的實驗仍須扣除飽和 EDTA 水溶液的背景液吸收值。



【圖】錯合物 Cu²⁺-EDTA 的吸收光譜

除此之外我們也逐點測量了水中只含 Cu²⁺且相同濃度下銅離子水溶液在 400~800 nm 的波長掃描光譜，從圖可以觀察到其吸收值偏低，由此可見，直接使用分光計來定量水中銅離子明顯是不可行的，更加凸顯本研究加入 EDTA 作為顯色的實用性。

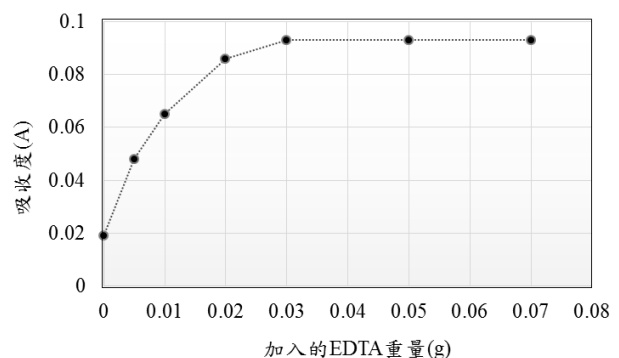


【圖】裸銅離子 Cu²⁺的吸收光譜

備註：最大吸收峰往短波長位移，會反射越多藍光，使溶液從青色轉變成深藍色。

討論四、探討 EDTA 的添加量對 Cu²⁺-EDTA 在 740 nm 吸收強度的影響

從右圖中可知，隨著加入的 EDTA 越多，EDTA 與銅離子螯合生成的錯合物對 740 nm 的吸收度越高，當加入過量的 EDTA 時，吸收度呈現最大值，並維持一個定值。有鑑於此，為了屏除此效應的影響，我們之後的實驗會使用飽和的 EDTA 溶液來偵測吸光值。



【圖】EDTA 添加量對溶液顏色影響

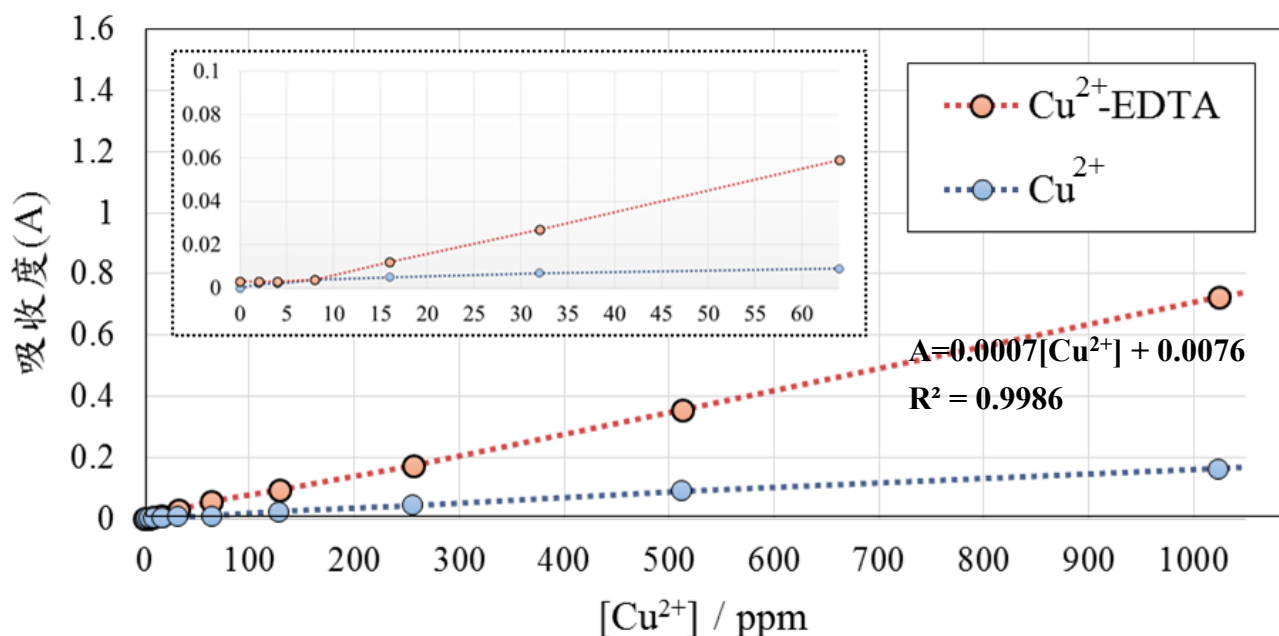
不同於過去文獻使用水溶性較好的 EDTA-2Na，本實驗選用難溶鹽 EDTA，好處在於只要微量的 EDTA 就可以達到飽和條件，當 Cu²⁺-EDTA 溶液達到飽和後，其在 740 nm 光源下的吸收度會達到最大值，利於之後實驗所建立的檢量線可以直接使用該數據來推論水中銅離子濃度。

p.s.

雖然 EDTA 在不同 pH 值下的螯合能力不同，即使 EDTA 達到飽和後仍具有誤差，但是本實驗部分著重於：當 EDTA 尚未飽和之前，其誤差將更大，因此，保持 EDTA 在溶液中的飽和狀態必須是本研究定量銅離子方法的首要條件！

討論五、建立本研究之銅離子微量檢量線

使用飽和 EDTA 與 Cu^{2+} 螯合所建立之方法適用於偵測 $[\text{Cu}^{2+}] = 16 \sim 2048 \text{ ppm}$ ，在此濃度區間遵守比爾定律，因此可以作為監控廢液處理的微量檢量線。本實驗部分比較有無添加 EDTA 之銅離子溶液在 740 nm 的吸光度比較。



【圖】 Cu^{2+} -EDTA 所建立之銅離子檢量線

表格中紅體字不遵守比爾定律

(一)直接測量水中微量銅離子吸收度並利用比爾公式換算得到 $[\text{Cu}^{2+}]$ 的方法並不適宜

【表】未加入 EDTA 的 Cu^{2+} 檢量溶液在 740 nm 的吸光值

$[\text{Cu}^{2+}]$ (ppm)	0	2	4	8	16	32
吸收度(A)	0	0.002	0.001	-0.002	0.003	0.004
$[\text{Cu}^{2+}]$ (ppm)	64	128	256	512	1024	2048
吸收度(A)	0.006	0.019	0.044	0.09	0.162	0.323

從以上圖表發現，當銅離子溶液濃度小於 128 ppm 時，已經是分光計的偵測極限(濃度與吸收度關係不遵守比爾定律)，大於 128 ppm 時雖然滿足比爾定律，但由於吸收度對濃度的變化太小，並不適合用來作為微量檢量線，故以直接測量吸收度來偵測低濃度銅離子不可行。

(二)使用本研究之方法來偵測 $[\text{Cu}^{2+}]$ 的靈敏度較高

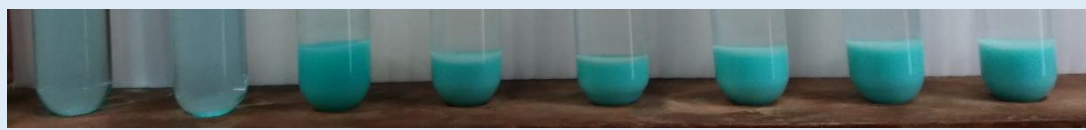
【表】加入 EDTA 後的 Cu^{2+} -EDTA 檢量溶液在 740 nm 的吸光值

$[\text{Cu}^{2+}]$ (ppm)	0	2	4	8	16	32
吸收度(A)	0.003	0.003	0.003	0.004	0.012	0.027
$[\text{Cu}^{2+}]$ (ppm)	64	128	256	512	1024	2048
吸收度(A)	0.059	0.093	0.172	0.356	0.723	1.336

使用飽和的 EDTA 與 Cu^{2+} 形成 Cu^{2+} -EDTA 可以有效提高吸光值，增加偵測銅離子的靈敏度，銅離子的偵測極限可以到達 16 ppm，而有效提高微量檢量線的偵測範圍。

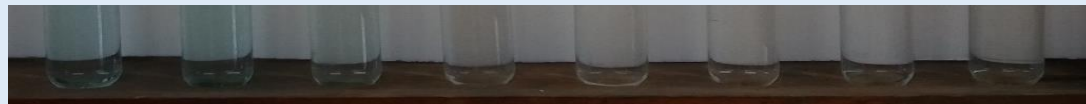
討論六、探討銅鹽經過不同 pH 處理下的廢液並以本研究建立之高靈敏檢量方法檢測其殘存銅離子的吸收度。

(一) 硫酸銅經過沉澱處理後的實驗程序照片



pH3 pH4 pH5 pH6 pH7 pH8 pH9 pH10

【圖】不同 pH 沉澱處理後之**硫酸銅**廢液



pH3 pH4 pH5 pH6 pH7 pH8 pH9 pH10

【圖】將沉澱物過濾後之澄清液



pH3 pH4 pH5 pH6 pH7 pH8 pH9 pH10

【圖】澄清液加入 EDTA 至飽和並過濾後得之待測液



【圖】收集之氫氧化銅沉澱

(二) 硝酸銅經過沉澱處理後的實驗程序照片



pH4 pH5 pH6 pH7 pH8 pH9 pH10

【圖】不同 pH 沉澱處理後之**硝酸銅**廢液



pH4 pH5 pH6 pH7 pH8 pH9 pH10

【圖】將沉澱物過濾後之澄清液



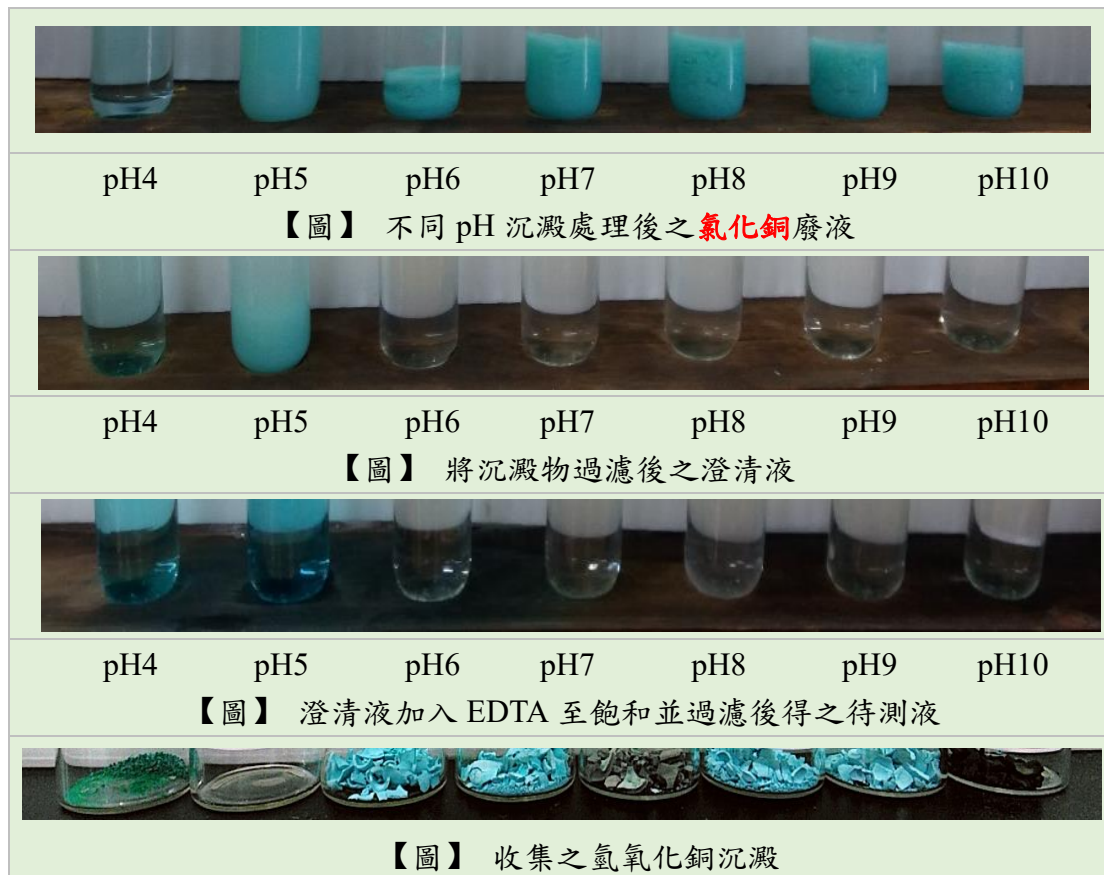
pH4 pH5 pH6 pH7 pH8 pH9 pH10

【圖】澄清液加入 EDTA 至飽和並過濾後得之待測液



【圖】收集之氫氧化銅沉澱

(三) 氯化銅經過沉澱處理後的實驗程序照片



(四)不同銅鹽模擬之廢液經過不同 pH 沉澱後並經過本研究建立之方法得到的待測液，將吸收度以檢量線回歸 $A = 0.0007[Cu^{2+}] + 0.0076$ 推算，得到各樣本的殘存銅離子濃度如下表

硫酸銅水溶液

pH	pH3	pH4	pH5	pH6	pH7	pH8	pH9	pH10
吸收度(A)	1.138	1.012	0.895	0.034	0.011	0.004	0.003	0.004
$[Cu^{2+}]/ppm$	-	1434	1267	38	<16	<16	<16	<16

硝酸銅水溶液

pH	pH4	pH5	pH6	pH7	pH8	pH9	pH10
吸收度(A)	1.747	0.824	0.038	0.010	0.004	0.005	0.004
$[Cu^{2+}]/ppm$	-	1166	43	<16	<16	<16	<16

氯化銅

pH	pH4	pH5	pH6	pH7	pH8	pH9	pH10
吸收度(A)	1.089	0.943	0.046	0.025	0.021	0.020	0.012
$[Cu^{2+}]/ppm$	-	1336	54	25	19	18	<16

從上表得知，硫酸銅與硝酸銅廢液以強鹼調整至中性後，可使銅離子濃度下降至 16 ppm (偵測極限)以下，氯化銅廢液並不適合使用沉澱法來有效去除銅離子。

利用本研究建立之方法監控水中殘存銅離子濃度的變化，結果與沉澱曲線吻合，證明使銅離子能有效形成沉澱的 pH 值介在 pH=6~7 之間。

- 5 參考資料
- 6 外部連結

結構 [編輯]

無水CuCl₂為變形氯化銅結構。由於姜-泰勒效應的緣故，涉及一對配體時，一個d電子定域在強反鍵的分子軌道中，因此大多數銅(II)化合物都與理想的八面體型結構有偏差。在CuCl₂(H₂O)₂中，銅為高度變形的八面體構型，被兩個水分子和四個氯離子配體所包圍，配體環與其他Cu原子不對稱橋聯。^[1]

性質 [編輯]

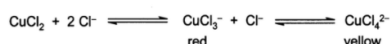
氯化銅在水溶液中生成藍色的[Cu(H₂O)₆]²⁺和黃紅色的鹵素配離子[CuCl_{2+x}]^{x-}。濃的CuCl₂溶液中含有這些帶色離子，呈混合色綠色；稀溶液的顏色則與溫度有關，100°C時為綠色，室溫下為藍色。^[2] 氯化銅在火焰中發出藍綠色光。

氯化銅為弱的路易斯酸，也是溫和的氧化劑。其結構中含有扁平CuCl₄的多聚長鏈。

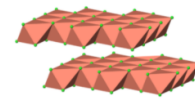
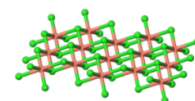
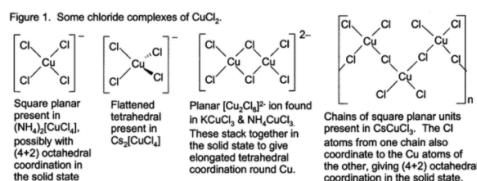
1000°C時分解為CuCl和Cl₂：



氯化銅與鹽酸或其他含氯離子的化合物反應，生成配離子CuCl₃⁻和CuCl₄²⁻。^[3]



某些配離子的鹽可以從水溶液中結晶出來，結構可以有很多種：



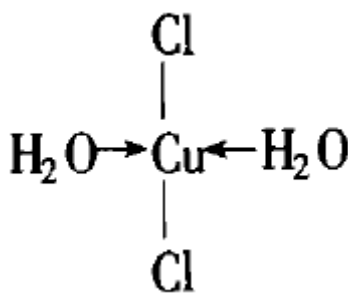
IUPAC名 Copper(II) chloride Cupric chloride	
別名	氯化銅(II)
識別	
CAS號	7447-39-4 (無水) ✓ 10125-13-0 (二水) ✓
PubChem	24014
ChemSpider	148374
SMILES	顯示▼
InChI	顯示▼
InChIKey	ORTQZVOHEJQUHG-LRIOHBSEAE
ChEBI	49553
DTCS	Cl 7000000

<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%B0%AF%E5%8C%96%E9%93%9C>

經由查詢可知

氯化銅在水溶液中生成藍色的水體銅離子[Cu(H₂O)₆]²⁺和黃紅色的鹵素配離子[CuCl_{2+x}]^{x-}

只要水中有高濃度氯離子存在(因為模擬廢液加入的是氯化銅，所以氯離子濃度是銅離子的兩倍)，平衡後水中就必定有部分的銅離子與氯離子結合並以原子團的方式存在，

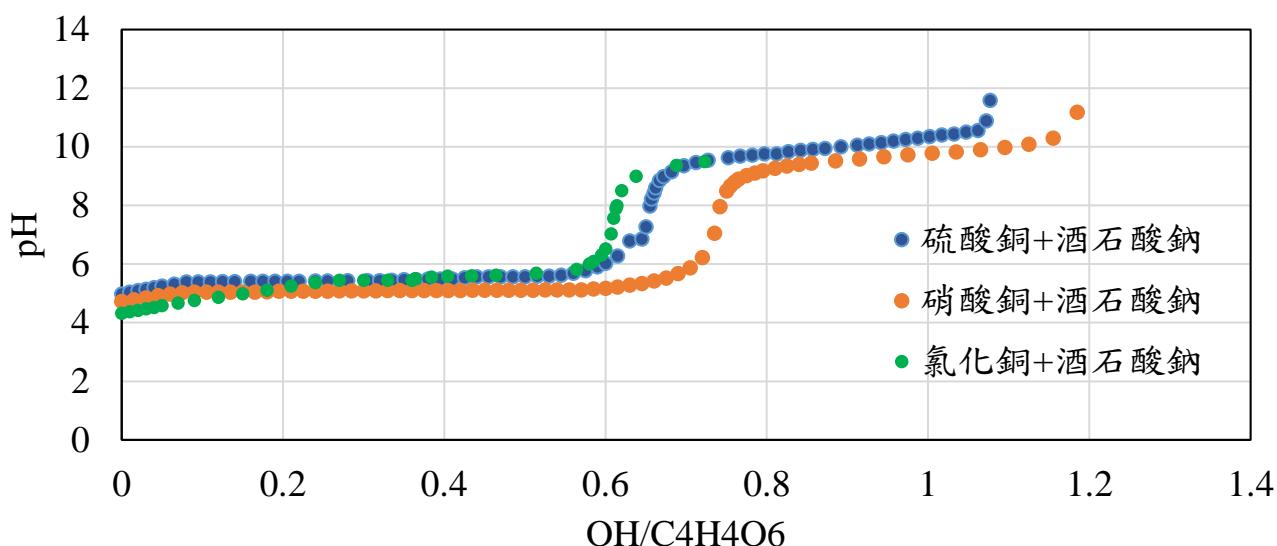
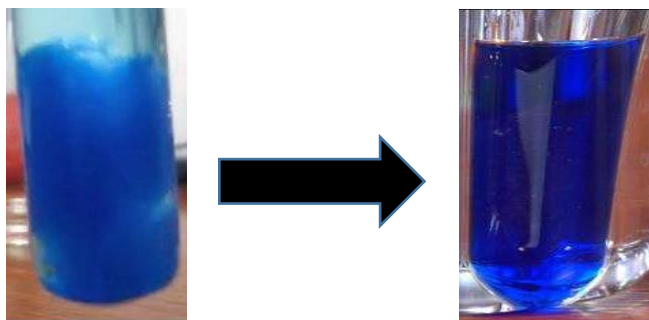


我們認為這是鹼性沉澱法受到干擾的原因。

值得一提的是，氯化銅固體的顏色也明顯與硫酸銅、硝酸銅不同。這與氯離子、銅離子間具有特別的作用力有關。



討論七、探討水中含有酒石酸鹽時對銅離子沉澱過程的影響



【圖】 酒石酸銅的螯合曲線

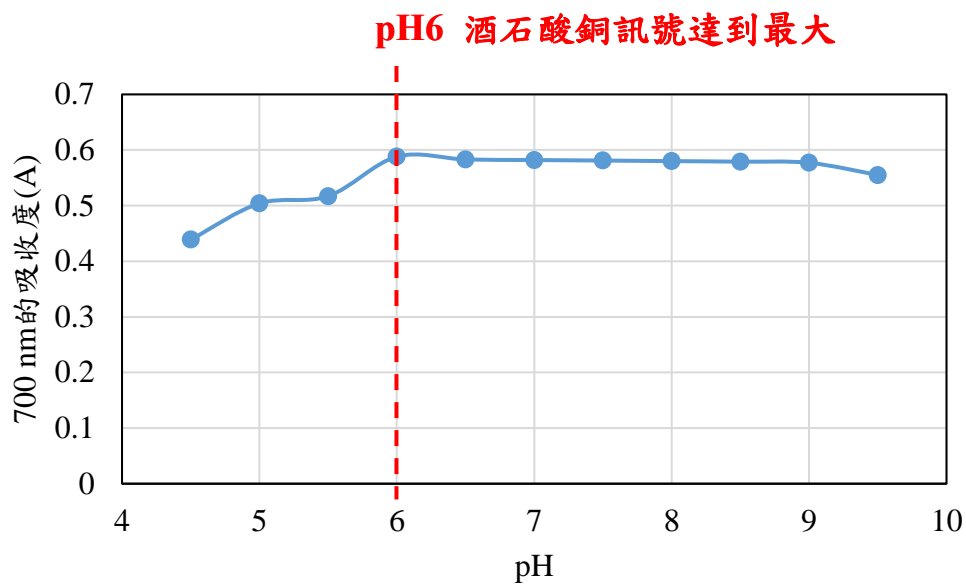
本實驗探討酒石酸根對銅離子螯合的影響。從實驗的滴定曲線來看，銅離子與酒石酸根形成沉澱的起始沉澱點約在 $\text{pH} = 5$ 附近，在此 pH 下滴加更多的鹼並無法使 pH 繼續提升，表示酒石酸根正在與銅離子螯合。

澄清酒石酸鉀鈉水溶液與澄清銅離子水溶液，混合後形成淡藍色固體懸浮液。溶液中以酒石酸根與銅離子以 2 : 1 比例存在於水溶液系統，此時 pH 值為 4.3。後逐漸加入 1 M 的 NaOH 時水溶液中的固體開始溶解而逐漸澄清，此時 pH 值為 5.5。再繼續添加 NaOH，過程 pH 幾乎沒有改變，溶液的藍色加深並且達完全澄清，此時 pH 值為 6.0。達此點後，隨著 NaOH 的加入，溶液 pH 有急遽上升的現象，直到約 $\text{pH}=9.0$ 才緩和下來。因此推測溶液在 $\text{pH}=5.5\sim 6.0$ 期間，所加入的 OH 用於提供酒石酸根螯合銅離子的環境，也就是跟酒石酸根做螯合。達 $\text{pH}=6.0$ 之後，再加入更多的 OH 就會增加水中的氫氧根濃度，進而支配溶液 pH 值，所以才出現急遽上升現象。由此曲線圖監控酒石酸根與銅離子螯合的過程，發現螯合發生的活化 pH 為 5.5，而完全螯合點在 $\text{pH}=6.0$ ，螯合曲線的結果與光度滴定的證據相吻合。實驗選擇酒石酸銅的最大吸收波長 700 nm 為偵測手段，在 $\text{pH}5.5$ 到 $\text{pH}6.0$ 的吸收度顯著提升代表酒石酸根與銅離子的螯合趨勢大為增加，可說明此 pH 範圍正是酒石酸銅形成的初始環境。證明：銅廢水中若含有足量酒石酸根，且廢液之 $\text{pH}>6.0$ ，則選擇使用中性環境($\text{pH}=7$)來沉澱移除水中銅離子沒有效果。

【表】 不同 pH 時酒石酸銅混合溶液經離心後後濾液的吸收度

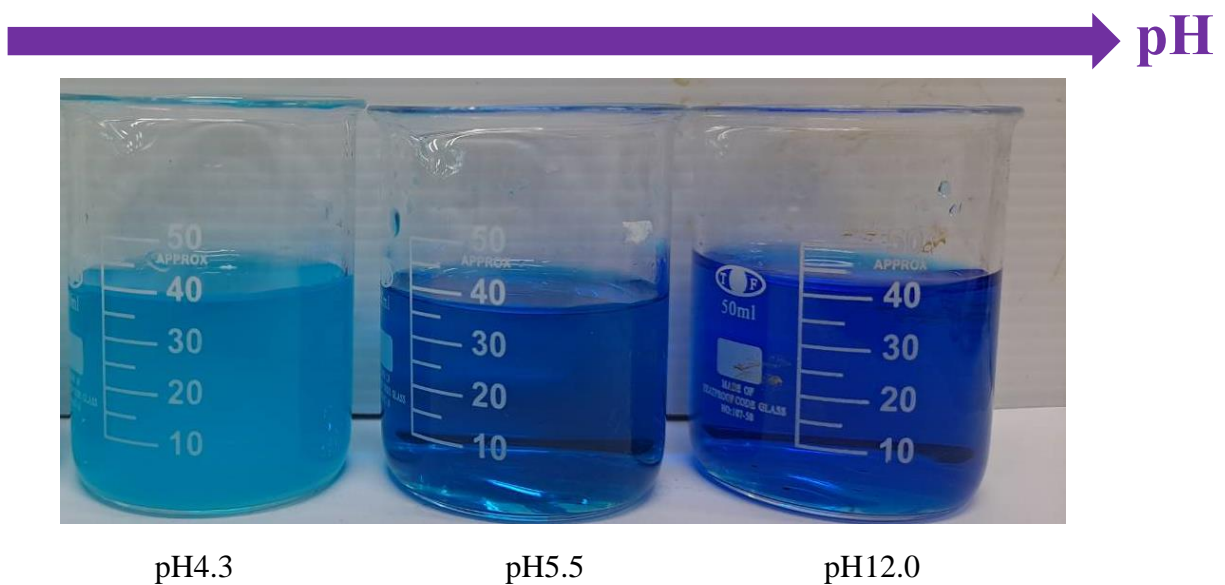
pH	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0
濾液 $A_{700\text{ nm}}$	0.499	0.504	0.507	0.588	0.583	0.582
pH	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10.0
濾液 $A_{700\text{ nm}}$	0.581	0.580	0.579	0.577	0.555	0.421

備註：pH9.0 以上吸收度出現下降是由於溶液被大量鹼液稀釋的緣故。



【圖】 酒石酸銅的整合光度滴定曲線

隨著加入的鹼越多，它會逐漸恢復澄清並且



討論八、配合實驗九之實驗結果計算酒石酸銅由沉澱法移除銅離子之移除率

實驗發現藉由調整 pH 至酸性約 4.34 時，酒石酸銅會分離使氫氧化銅沉澱，並在 pH 值 2 以下時氫氧化銅再度溶回於水，因此，實驗將 pH 值調至 4、3、2 並計算其移除率。

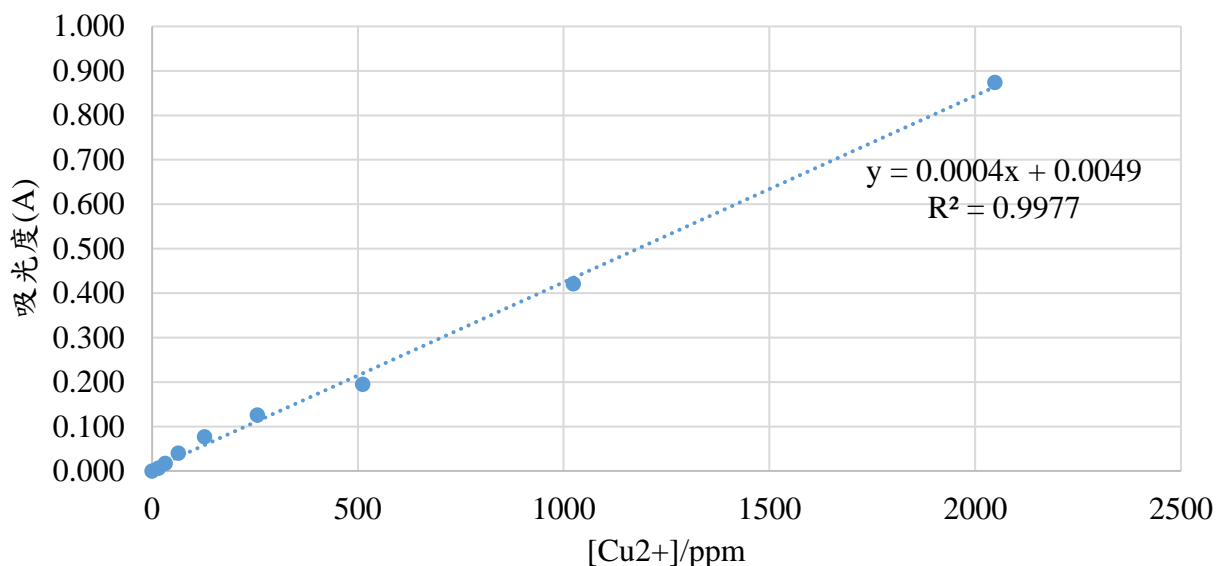
附註：

酒石酸銅之銅離子微量檢量線：

使用酒石酸根與 Cu^{2+} 螯合所建立之方法適用於偵測 $[\text{Cu}^{2+}] = 16 \sim 2048 \text{ ppm}$ ，在此濃度區間遵守比爾定律，並以最大吸收波長 700 nm 偵測吸光度。

表 加入酒石酸鉀鈉的 Cu^{2+} 檢量溶液在 700 nm 的吸光值

$[\text{Cu}^{2+}](\text{ppm})$	0	8	16	32	64
吸收度(A)	0.000	0.002	0.006	0.017	0.040
$[\text{Cu}^{2+}](\text{ppm})$	128	256	512	1024	2048
吸收度(A)	0.077	0.126	0.195	0.421	0.874

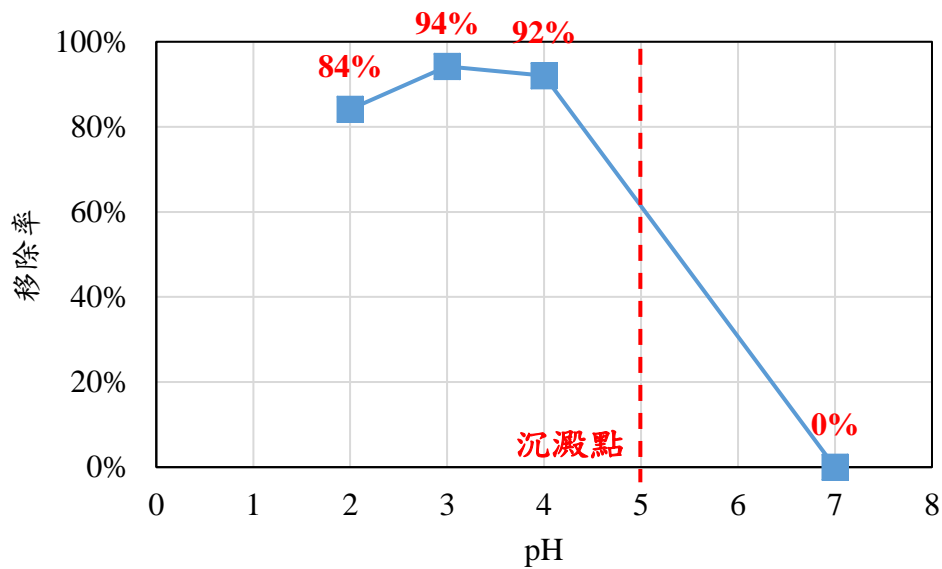


【圖】酒石酸銅對銅離子濃度的檢量線

【表】酒石酸銅在不同 pH 值下之 Cu^{2+} 移除率

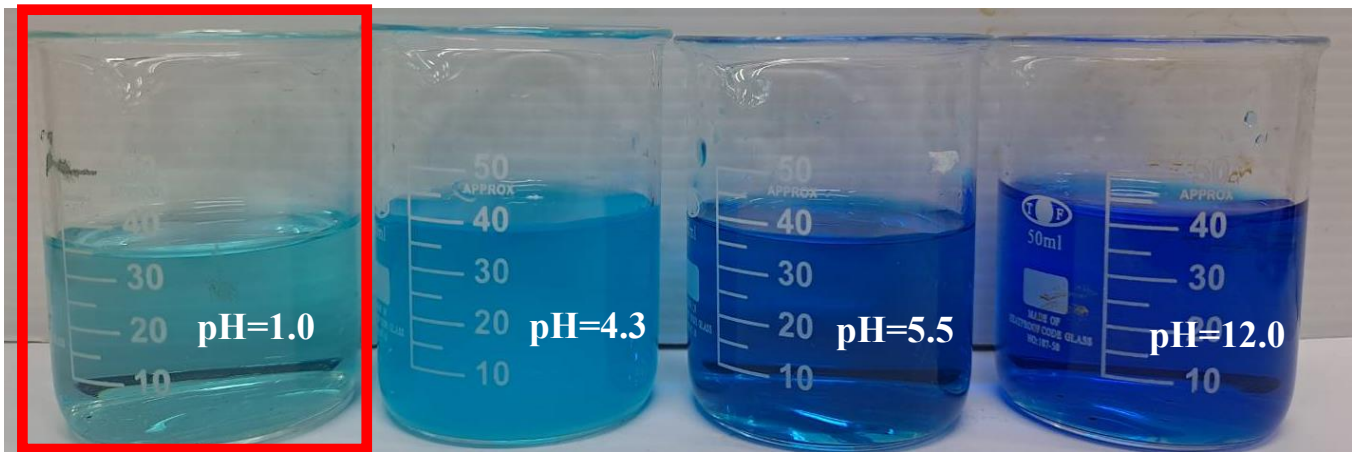
pH	吸光度(A)	移除率
2	0.326	0.841
3	0.118	0.942
4	0.163	0.920
7	2.035	0

$$\text{移除率} = 1 - \frac{\text{其他pH值的吸收度}}{\text{pH7時的吸收度}}$$



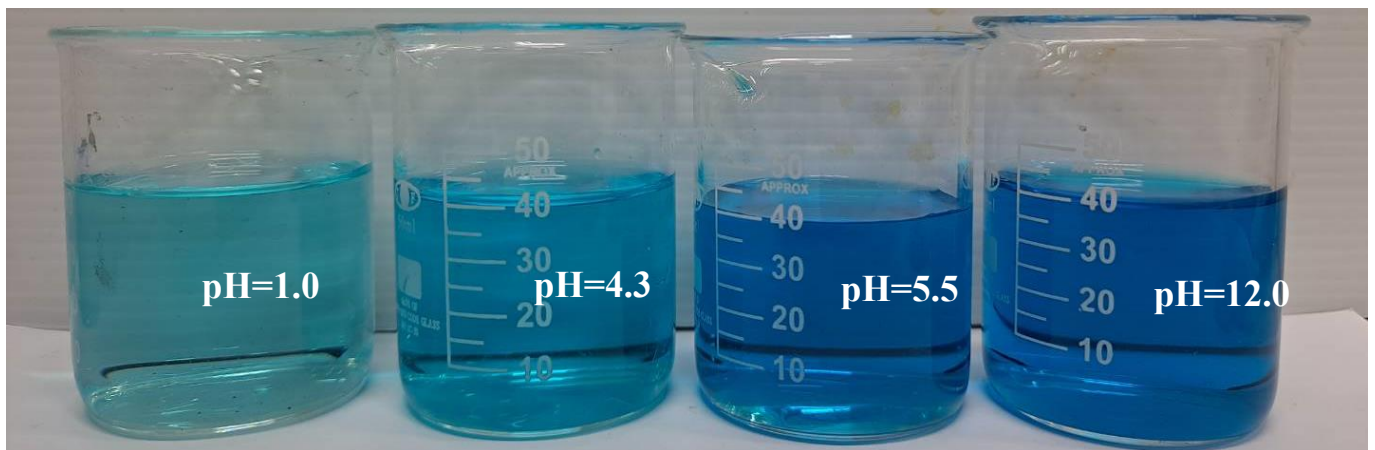
【圖】酒石酸銅在不同 pH 值下之 Cu^{2+} 移除率

澄清



【圖】酒石酸銅在不同 pH 值下之外觀

結論 1：酒石酸銅在約 pH 值 3 時能達到最好的移除效果，在 pH 值 2 時可能因部分銅離子溶回於水而使移除率下降。

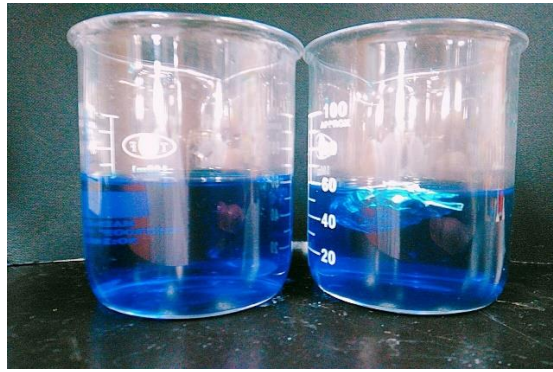


【圖】檸檬酸銅在不同 pH 值下之外觀

結論 2：檸檬酸銅無論在酸性或鹼性下，均無法沉澱。

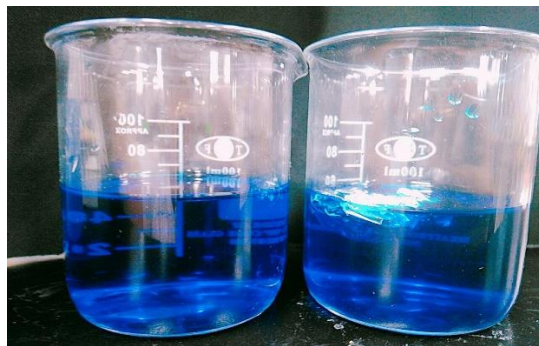
討論九、探討廢液中含有螯合劑對無電電鍍析出銅原子的影響

由圖中兩杯溶液比較可發現，不論是否加入鋁箔紙，對含有酒石酸根之硫酸銅溶液皆無顯著影響。



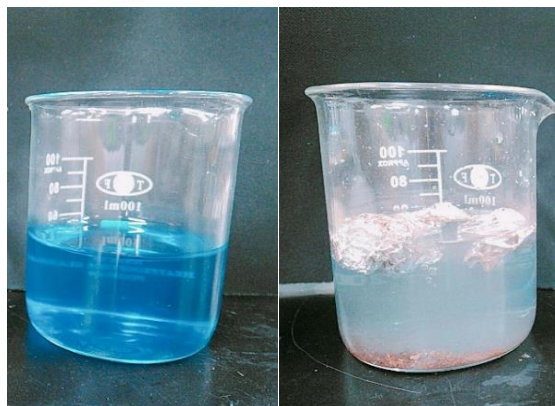
【圖】左為實驗十(酒石酸銅)pH 值為 7 的澄清廢液。
右為實驗十(酒石酸銅)pH 值為 7 的澄清廢液加入鋁箔紙。

由圖中兩杯溶液比較可發現，不論是否加入鋁箔紙，對含有酒石酸根之硫酸銅溶液皆無顯著影響。



【圖】左為實驗十一(檸檬酸銅)pH 值為 7 的澄清廢液。
右為實驗十一(檸檬酸銅)pH 值為 7 的澄清廢液加入鋁箔紙。

比較兩者可發現，在沒有酒石酸根及檸檬酸根等螯合劑的影響下，鋁箔紙可有效使銅離子水溶液電解。



【圖】左為加入鋁箔紙之硫酸銅水溶液。
右為未加入鋁箔紙之硫酸銅水溶液。

結果：

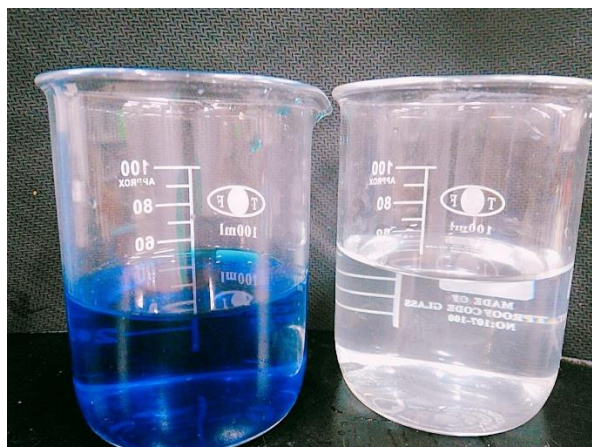
由圖可知不論銅離子與檸檬酸根或酒石酸根螯合，皆無法藉由無電電鍍方法析出銅原子

討論十、探討廢液中含有螯合劑對有電電鍍析出銅原子的影響



通以 9V 的電壓

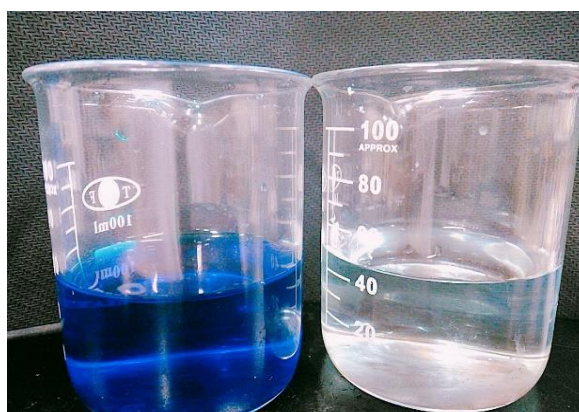
由圖中兩杯溶液比較可發現，進行有電電鍍後，可使含有酒石酸根之硫酸銅溶液有效析出銅離子。



左圖為實驗十(酒石酸)pH 值為 7 的澄清廢液。

右圖為實驗十(酒石酸)pH 值為 7 的澄清廢液進行有效電鍍後的結果。

由圖中兩杯溶液比較可發現，進行有電電鍍後，可使含有檸檬酸根之硫酸銅溶液有效析出銅離子。



左圖為實驗十一(檸檬酸)pH 值為 7 的澄清廢液。

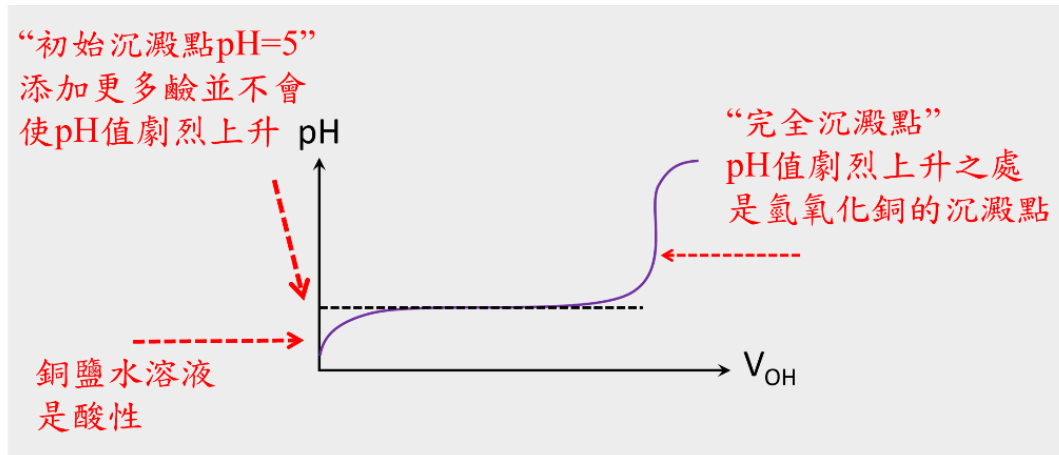
右圖為實驗十一(檸檬酸)pH 值為 7 的澄清廢液進行有效電鍍後的結果。

結論

由圖可知不論銅離子與檸檬酸根或酒石酸根螯合，皆可用有電電鍍的方法有效析出銅離子。

柒、目前結論

1. 本研究以鹼滴定法繪製之氫氧化銅沉澱曲線初步證明氫氧化銅沉澱終點在 pH=7 附近。

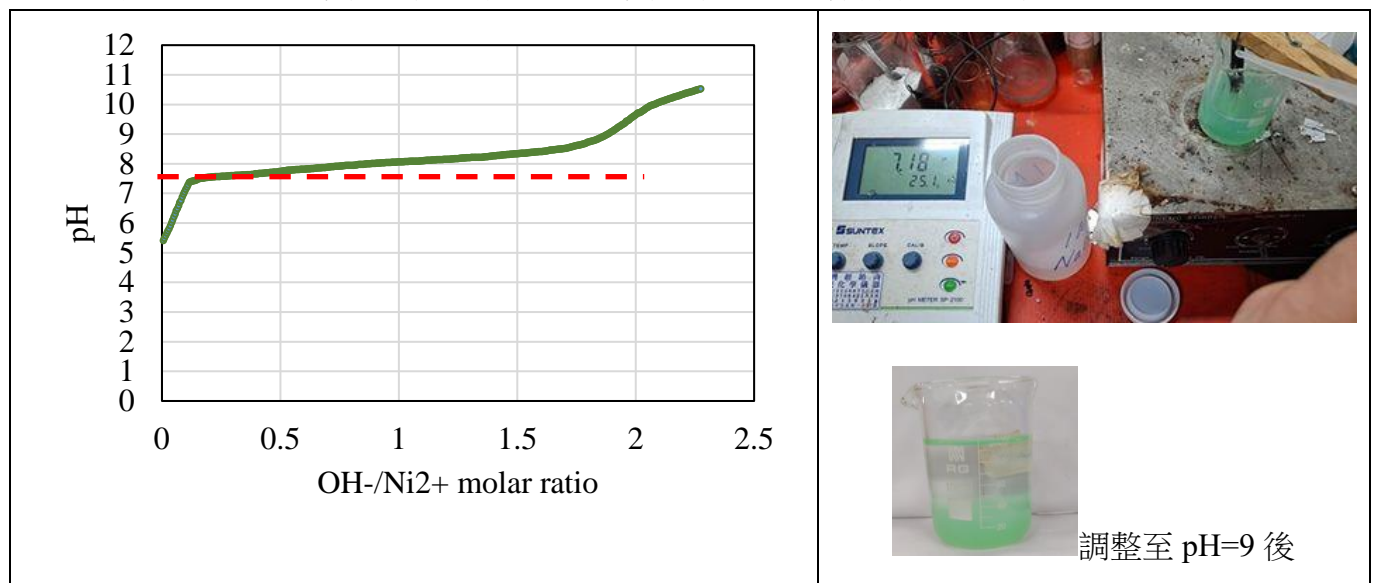


2. 硫酸銅以及硝酸銅模擬之廢液適合使用強鹼沉澱法來移除銅離子，而氯化銅則不適合。經查詢，推測水中具有 $[CuCl_n(H_2O)_{4-n}]$ 的存在，氯離子在水中可能以配位基的方式存在。
3. 在銅離子水溶液中加入 EDTA 至飽和所得到的吸收度值可用於銅離子定量測試。
4. 實驗發現以 740 nm 波長的光能偵測的裸銅離子濃度極限只到 128 ppm，當加入 EDTA 時可以提升靈敏度(配合檢量線 $A = 0.0007[Cu^{2+}] + 0.0076$)，使偵測的濃度極限下修至 16 ppm。
5. 使用本研究建立之方法以及銅離子微量檢量線，監控不同 pH 值處理之廢液樣本的殘存銅離子濃度，結果與氫氧化銅沉澱曲線吻合，證明有效移除水中銅離子的 pH=6~7 之間。
6. 水中含有螯合基酒石酸根時，且 pH 在 6 以上時，溶液無法使用沉澱法移除銅離子。實驗發現，先調整至 pH=3，可破壞部分酒石酸根與銅離子的螯合， Cu^{2+} 移除率為(94.2%)。
7. 水中含有檸檬酸根，銅離子將無法透過調整 pH 來移除，只能使用電解電鍍法。
8. 將本研究的方法套用至研究鎳離子，發現鎳離子不適用沉澱法，因為其無法在中性附近沉澱，若強行調整至高鹼，則會產生過多強鹼廢液。
9. 本研究開發之飽和 EDTA 定量金屬離子的方法在 Ni^{2+} 上受到局限性，偵測極限只有 256 ppm。

捌、未來規劃與展望

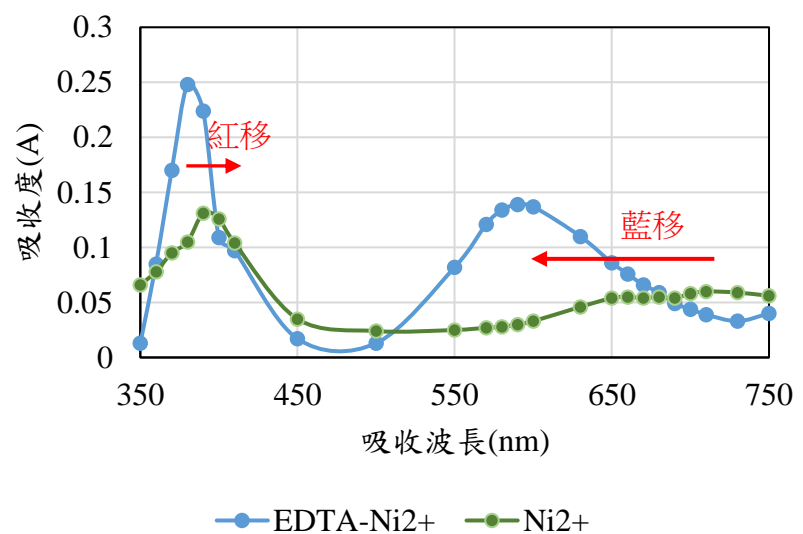
1. 本研究在運用層面，改良過去以 EDTA-2Na 光度滴定相當耗時的缺點，找到直接添加飽和 EDTA 粉體後離心取得濾液，並搭配簡易的分光光度計即可快速知道 $[Cu^{2+}]$ 結果，是本研究的賣點。研究完整討論氫氧化銅沉澱滴定曲線意義，也探討了沉澱法移除銅離子的使用限制，考慮「基質效應」，也就是當水中存在食物常見添加劑如：酒石酸、檸檬酸等，或是具有氯離子，均會影響直接沉澱法移除銅離子的效果。而醋酸銅則有兩個滴定緩衝點 pH5(沉澱點)與 pH9。
2. 由於文獻提到，銅離子的排放標準須 <3 ppm，研究將朝向維持排放中性水的前提，並下降殘存銅離子濃度。未來可望以大學端儀器 AA(火焰原子光譜)、ICP(感應耦合電漿原子發射光譜)等科學上較具公信力且較精確的結果，輔助驗證本研究開發以飽和 EDTA- Cu^{2+} 建立之高靈敏檢量線準確度。

3. 針對兩種以上金屬離子廢液混合物的共沉澱處理方法。根據我們的經驗，B 族的鐵鈷鎳銅鋅中，鐵與鈷離子在水中水解趨勢較大，也就是鐵或鈷離子沒辦法在水中待太久(即使水溶液是酸性)，故鐵或鈷離子也不易造成較廣泛或是長時間的汙染(因為時間一久水中的離子濃度就會下降而形成沉澱物)，但是鎳、銅或鋅離子則不同，只要水溶液 $\text{pH} \ll 4$ 就幾乎不會發生水解而沉澱。根據文獻 Toxic Effects of Copper, Zinc, and Nickel Ions to Paramecium and Daphnia 所提到鎳、銅及鋅離子同時存在水中時可能具有協同效應，導致生物致死的濃度下修，因此未來探討同時移除水中具有聯合毒性的金屬離子的研究是必要的。
4. 承上觀點，如下是硫酸鎳 NiSO_4 的沉澱曲線，本研究發現， Ni^{2+} 被沉澱的活化 $\text{pH}=7.5$ 左右，比 Cu^{2+} 高($\text{pH}=5$)， Ni^{2+} 完全沉澱的 pH 至少須至 8.5，表示如果 Ni^{2+} 、 Cu^{2+} 共存時，要使用沉澱法移除，最後廢液就會變成鹼性，資料顯示： Ni^{2+} 容易吸附在其他金屬氧化物上。未來可望進一步探討事先在水中加入生物孔洞碳材(例如菱角殼炭，菱殼炭具摻雜氮元素)，希望能夠藉此大部份改變其共沉澱點，最後在移除水中重金屬離子後，能夠保持廢液呈中性。

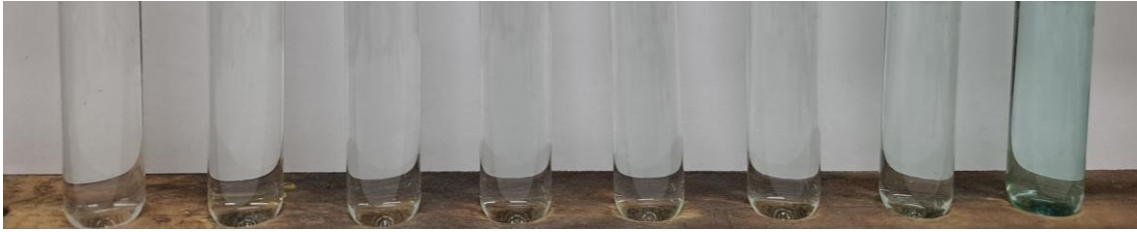


5. 承上觀點，本研究無法使用飽和 EDTA 來探究 Ni^{2+} 的濾液，只能適用於 Cu^{2+}

如圖是 EDTA- Ni^{2+} ，可以知道我們能複製 EDTA- Cu^{2+} 的經驗來使 Ni^{2+} 顯色，根據數據顯示當 $[\text{Ni}^{2+}]=256 \text{ ppm}$ 時，就會幾乎透明無色，然後 $[\text{Cu}^{2+}]=128 \text{ ppm}$ 才會使肉眼所見無色。由此可知，偷倒 Ni^{2+} 廢液比 Cu^{2+} 還要難被發現。吸收峰位移的結果導致 EDTA- Ni^{2+} 會從綠色變成藍色，色深也有增強效果。初步測試中，EDTA- Ni^{2+} 的偵測極限比 EDTA- Cu^{2+} 大很多，表示若複製本研究飽和 EDTA- Ni^{2+} 方法，無法偵測到 ppm 等級的 $[\text{Ni}^{2+}]$ 。



【圖】 Ni^{2+} 吸收光譜



【圖】不同 Ni²⁺濃度(8、16、32、64、128、256、512、1024 ppm)



【圖】不同 Ni²⁺濃度(8、16、32、64、128、256、512、1024 ppm)加入 EDTA 後



【圖】不同 Ni²⁺濃度(8、16、32、64、128、256、512、1024 ppm)加入 EDTA 後的濾液

表格中紅體字不遵守比爾定律

【表】加入飽和 EDTA 的 Ni²⁺檢量溶液在 380 nm 的吸光值

[Ni ²⁺](ppm)	0	8	16	32	64
吸收度(A)	0	0.0026	0.037	0.036	0.043
[Ni ²⁺](ppm)	128	256	512	1024	2048
吸收度(A)	0.053	0.059	0.107	0.194	-

【表】加入飽和 EDTA 的 Ni²⁺檢量溶液在 600 nm 的吸光值

[Ni ²⁺](ppm)	0	8	16	32	64
吸收度(A)	0	0.018	0.030	0.025	0.029
[Ni ²⁺](ppm)	128	256	512	1024	2048
吸收度(A)	0.029	0.025	0.057	0.105	-

實驗發現，偵測 Ni²⁺-EDTA 有兩種波長可以選擇，必須選擇 600 nm 作為偵測波長，才會符合比爾定律，而偵測極限為 256 ppm。

與銅離子相較，相同離子濃度下，鎳離子本身的吸光係數較小，與 EDTA 螯合後，吸光係數雖然有所提升，但是訊號仍較 Cu²⁺-EDTA 弱。所以本研究方法用於偵測微量[Ni²⁺]會受到侷限性。

捌、參考資料

1. 楊桂芳 (2002)，以光度滴定法測定銅離子含量，竹南高中。
2. 李國維 (1999)，一「銅」珍惜水資源，桃園農工
3. 化學實驗室操作規範 (2012)，佳通科技有限公司。
4. (2014)，利用光度滴定法測定水中二價銅離子濃度，崑山科技大學環境工程系
5. 黃進益 (1998)，電化學的原理及運用，高立圖書有限公司。
6. 周珊珊 (1999)，重金屬廢棄物回收處理技術，工業汙染第 70 期，第 131-151 頁。
7. 楊萬發 (1992)，水及廢水處理化學，茂昌圖書有限公司，第 36-39 頁。
8. 林世民 (2007)，表面處理業減廢及回收處理技術，工業技術研究院化學工業研究所 1997 年廢水處理技術研討會。
9. 周志豪 (2005)，利用超音波與電化學法處理螯合性含銅廢水，朝陽科技大學環境工程與管理系。
10. 梁德明 (2002)，含螯合重金屬廢水處理技術運用與案例研究，產業環保工程實務研討會論文集，經濟部工業局。
11. 吳春吉 (2006)，竹科放流水中銅及砷來源追蹤分析及其對香山海域養殖區牡蠣影響之探討。國立中央大學環境工程研究所。
12. 江孟玲 (2011)，分析化學 I，台科大圖書股份有限公司。
13. 江孟玲 (2011)，分析化學 II，台科大圖書股份有限公司。
14. 謝榮忠 (2008)，基礎化工，全華圖書股份有限公司。
15. 行政院環境保護署 (2016)。放流水標準 [公告]。行政院環境保護署。取自：
<http://ivy5.epa.gov.tw/epalaw/docfile/060060.pdf>。
16. 網路資源：<https://www.ptt.cc/bbs/Chemistry/M.1310662103.A.207.html>

附錄-本研究數據

硫酸銅滴定沉澱曲線原始數據 0.5/250*1000 mmol

每次滴數	累進滴數	累進毫升	OH mmol	Cu/OH 比例	pH 值	每次滴數	累進滴數	累進毫升	OH mmol	Cu/OH 比例	pH 值
0	0	0	0	0	3.00	20	635	31.75	3.175	1.587	5.02
5	5	0.25	0.025	0.012	3.35	20	655	32.75	3.275	1.637	5.07
3	8	0.4	0.04	0.020	3.62	20	675	33.75	3.375	1.687	5.11
2	10	0.5	0.05	0.025	3.85	20	695	34.75	3.475	1.737	5.21
2	12	0.6	0.06	0.030	4.40	20	715	35.75	3.575	1.787	5.32
2	14	0.7	0.07	0.035	4.60	20	735	36.75	3.675	1.837	5.45
2	16	0.8	0.08	0.040	4.73	20	755	37.75	3.775	1.887	5.70
2	18	0.9	0.09	0.045	4.81	10	765	38.25	3.825	1.912	6.00
2	20	1	0.1	0.050	4.88	5	770	38.5	3.85	1.925	6.05
2	22	1.1	0.11	0.055	4.93	5	775	38.75	3.875	1.937	6.23
2	24	1.2	0.12	0.060	4.97	5	780	39	3.9	1.950	6.79
2	26	1.3	0.13	0.065	4.99	1	781	39.05	3.905	1.952	6.90
2	28	1.4	0.14	0.070	5.01	1	782	39.1	3.91	1.955	7.40
2	30	1.5	0.15	0.075	5.02	1	783	39.15	3.915	1.957	7.80
5	35	1.75	0.175	0.087	5.02	1	784	39.2	3.92	1.960	8.15
20	55	2.75	0.275	0.137	5.02	1	785	39.25	3.925	1.962	8.46
20	75	3.75	0.375	0.187	5.02	1	786	39.3	3.93	1.965	8.74
20	95	4.75	0.475	0.237	5.02	1	787	39.35	3.935	1.967	8.98
20	115	5.75	0.575	0.287	5.02	1	788	39.4	3.94	1.970	9.14
20	135	6.75	0.675	0.337	5.02	1	789	39.45	3.945	1.972	9.30
20	155	7.75	0.775	0.387	5.02	1	790	39.5	3.95	1.975	9.45
20	175	8.75	0.875	0.437	5.02	1	791	39.55	3.955	1.977	9.61
20	195	9.75	0.975	0.487	5.02	1	792	39.6	3.96	1.980	9.72
20	215	10.75	1.075	0.537	5.02	1	793	39.65	3.965	1.982	9.80
20	235	11.75	1.175	0.587	5.02	1	794	39.7	3.97	1.985	9.93
20	255	12.75	1.275	0.637	5.02	1	795	39.75	3.975	1.987	10.02
20	275	13.75	1.375	0.687	5.02	1	796	39.8	3.98	1.990	10.11
20	295	14.75	1.475	0.737	5.02	1	797	39.85	3.985	1.992	10.21
20	315	15.75	1.575	0.787	5.02	1	798	39.9	3.99	1.995	10.30
20	335	16.75	1.675	0.837	5.02	1	799	39.95	3.995	1.997	10.36
20	355	17.75	1.775	0.887	5.02	1	800	40	4	2.000	10.42
20	375	18.75	1.875	0.937	5.02	1	801	40.05	4.005	2.002	10.49

20	395	19.75	1.975	0.987	5.02	1	802	40.1	4.01	2.005	10.53
20	415	20.75	2.075	1.037	5.02	1	803	40.15	4.015	2.007	10.58
20	435	21.75	2.175	1.087	5.02	1	804	40.2	4.02	2.010	10.64
20	455	22.75	2.275	1.137	5.02	1	805	40.25	4.025	2.012	10.68
20	475	23.75	2.375	1.187	5.02	1	806	40.3	4.03	2.050	10.72
20	495	24.75	2.475	1.237	5.02	1	807	40.35	4.035	2.017	10.78
20	515	25.75	2.575	1.287	5.02	1	808	40.4	4.04	2.020	10.8
20	535	26.75	2.675	1.337	5.02	1	809	40.45	4.045	2.022	10.83
20	555	27.75	2.775	1.387	5.02	1	810	40.5	4.05	2.025	10.87
20	575	28.75	2.875	1.437	5.02	1	811	40.55	4.055	2.027	10.9
20	595	29.75	2.975	1.487	5.02	1	812	40.6	4.06	2.030	10.93
20	615	30.75	3.075	1.537	5.02	1	813	40.65	4.065	2.032	10.96

硝酸銅滴定沉澱曲線原始數據 0.5/242*1000 mmol

每次滴數	累進滴數	累進毫升	OH mmol	Cu/OH 比例	pH 值	每次滴數	累進滴數	累進毫升	OH mmol	Cu/OH 比例	pH 值
0	0	0	0	0	4.00	10	781	39.05	3.905	1.890	6.20
5	5	0.25	0.025	0.012	4.40	10	791	39.55	3.955	1.914	6.30
10	15	0.75	0.075	0.036	4.70	5	796	39.8	3.98	1.926	6.40
15	30	1.5	0.15	0.072	4.90	5	801	40.05	4.005	1.938	6.60
15	45	2.25	0.225	0.108	4.90	5	806	40.3	4.03	1.950	6.70
15	60	3	0.3	0.145	4.90	1	807	40.35	4.035	1.952	6.75
15	75	3.75	0.375	0.181	4.90	1	808	40.4	4.04	1.955	6.84
16	91	4.55	0.455	0.220	4.90	1	809	40.45	4.045	1.957	7.00
20	111	5.55	0.555	0.268	4.90	1	810	40.5	4.05	1.960	7.13
20	131	6.55	0.655	0.317	4.90	1	811	40.55	4.055	1.962	7.39
20	151	7.55	0.755	0.365	4.90	1	812	40.6	4.06	1.965	7.65
20	171	8.55	0.855	0.413	4.90	1	813	40.65	4.065	1.967	7.90
20	191	9.55	0.955	0.462	4.90	1	814	40.7	4.07	1.969	8.06
20	211	10.55	1.055	0.510	4.90	1	815	40.75	4.075	1.972	8.32
20	231	11.55	1.155	0.559	5.00	1	816	40.8	4.08	1.974	8.59
20	251	12.55	1.255	0.607	5.00	1	817	40.85	4.085	1.977	8.80
20	271	13.55	1.355	0.655	5.00	1	818	40.9	4.09	1.979	9.02
20	291	14.55	1.455	0.704	5.00	1	819	40.95	4.095	1.981	9.17
20	311	15.55	1.555	0.752	5.05	1	820	41	4.1	1.984	9.32
20	331	16.55	1.655	0.801	5.10	1	821	41.05	4.105	1.986	9.51
20	351	17.55	1.755	0.849	5.10	1	822	41.1	4.11	1.989	9.60
20	371	18.55	1.855	0.897	5.10	1	823	41.15	4.115	1.991	9.71

20	391	19.55	1.955	0.946	5.15	1	824	41.2	4.12	1.994	9.85
20	411	20.55	2.055	0.994	5.20	1	825	41.25	4.125	1.996	10.00
20	431	21.55	2.155	1.043	5.25	1	826	41.3	4.13	1.998	10.10
20	451	22.55	2.255	1.091	5.30	1	827	41.35	4.135	2.001	10.20
20	471	23.55	2.355	1.139	5.30	1	828	41.4	4.14	2.003	10.25
20	491	24.55	2.455	1.188	5.30	1	829	41.45	4.145	2.006	10.30
20	511	25.55	2.555	1.236	5.40	1	830	41.5	4.15	2.008	10.35
20	531	26.55	2.655	1.285	5.40	1	831	41.55	4.155	2.011	10.35
20	551	27.55	2.755	1.333	5.50	1	832	41.6	4.16	2.013	10.40
20	571	28.55	2.855	1.381	5.50	1	833	41.65	4.165	2.015	10.40
20	591	29.55	2.955	1.430	5.50	1	834	41.7	4.17	2.018	10.40
20	611	30.55	3.055	1.478	5.50	1	835	41.75	4.175	2.020	10.45
20	631	31.55	3.155	1.527	5.50	1	836	41.8	4.18	2.023	10.50
20	651	32.55	3.255	1.575	5.60	1	837	41.85	4.185	2.025	10.55
20	671	33.55	3.355	1.623	5.65	1	838	41.9	4.19	2.027	10.55
20	691	34.55	3.455	1.672	5.70	1	839	41.95	4.195	2.030	10.57
20	711	35.55	3.555	1.720	5.70	1	840	42	4.2	2.032	10.60
20	731	36.55	3.655	1.769	5.85	1	841	42.05	4.205	2.035	10.55
20	751	37.55	3.755	1.817	5.85	1	842	42.1	4.21	2.037	10.55
10	761	38.05	3.805	1.841	5.90	1	843	42.15	4.215	2.000	10.55
10	771	38.55	3.855	1.865	6.05	1	844	42.2	4.22	2.042	10.60

氯化銅滴定沉澱曲線原始數據

每次滴數	累進滴數	累進毫升	OH mmol	Cu/OH 比例	pH 值	每次滴數	累進滴數	累進毫升	OH mmol	Cu/OH 比例	pH 值
0	0	0	0	0	3.92	10	980	49	4.9	1.6709	5.00
20	20	1	0.1	0.034	4.10	10	990	49.5	4.95	1.687	5.00
20	40	2	0.2	0.068	4.20	10	1000	50	5	1.705	5.00
20	60	3	0.3	0.102	4.30	10	1010	50.5	5.05	1.722	5.05
20	80	4	0.4	0.136	4.40	10	1020	51	5.1	1.739	5.05
20	100	5	0.5	0.170	4.40	10	1030	51.5	5.15	1.756	5.10
20	120	6	0.6	0.204	4.40	10	1040	52	5.2	1.773	5.15
20	140	7	0.7	0.238	4.40	10	1050	52.5	5.25	1.790	5.25
20	160	8	0.8	0.272	4.40	10	1060	53	5.3	1.807	5.32
20	180	9	0.9	0.306	4.40	10	1070	53.5	5.35	1.824	5.40
25	205	10.25	1.025	0.349	4.40	10	1080	54	5.4	1.841	5.55
20	225	11.25	1.125	0.383	4.40	10	1090	54.5	5.45	1.858	5.67
20	245	12.25	1.225	0.417	4.40	10	1100	55	5.5	1.875	5.85

20	265	13.25	1.325	0.451	4.40	10	1110	55.5	5.55	1.892	6.17
25	290	14.5	1.45	0.494	4.40	5	1115	55.75	5.575	1.901	6.25
20	310	15.5	1.55	0.528	4.40	5	1120	56	5.6	1.909	6.45
20	330	16.5	1.65	0.562	4.40	5	1125	56.25	5.625	1.918	6.54
20	350	17.5	1.75	0.596	4.40	5	1130	56.5	5.65	1.926	6.72
20	370	18.5	1.85	0.630	4.40	5	1135	56.75	5.675	1.935	6.87
20	390	19.5	1.95	0.664	4.40	3	1138	56.9	5.69	1.940	6.90
20	410	20.5	2.05	0.699	4.40	2	1140	57	5.7	1.943	6.95
20	430	21.5	2.15	0.733	4.40	2	1142	57.1	5.71	1.947	7.00
20	450	22.5	2.25	0.767	4.45	2	1144	57.2	5.72	1.950	7.15
20	470	23.5	2.35	0.801	4.50	2	1146	57.3	5.73	1.953	7.42
20	490	24.5	2.45	0.835	4.50	2	1148	57.4	5.74	1.957	7.70
20	510	25.5	2.55	0.869	4.50	2	1150	57.5	5.75	1.960	7.90
20	530	26.5	2.65	0.903	4.50	1	1151	57.55	5.755	1.962	8.06
20	550	27.5	2.75	0.937	4.50	1	1152	57.6	5.76	1.964	8.32
20	570	28.5	2.85	0.971	4.50	1	1153	57.65	5.765	1.965	8.59
20	590	29.5	2.95	1.005	4.55	1	1154	57.7	5.77	1.967	8.80
20	610	30.5	3.05	1.040	4.55	1	1155	57.75	5.775	1.969	9.02
20	630	31.5	3.15	1.074	4.55	1	1156	57.8	5.78	1.970	9.17
20	650	32.5	3.25	1.108	4.60	1	1157	57.85	5.785	1.972	9.32
20	670	33.5	3.35	1.142	4.58	1	1158	57.9	5.79	1.974	9.51
20	690	34.5	3.45	1.176	4.60	1	1159	57.95	5.795	1.976	9.60
20	710	35.5	3.55	1.210	4.65	1	1160	58	5.8	1.977	9.71
20	730	36.5	3.65	1.244	4.65	1	1161	58.05	5.805	1.979	9.85
20	750	37.5	3.75	1.278	4.65	1	1162	58.1	5.81	1.981	10.00
20	770	38.5	3.85	1.312	4.65	1	1163	58.15	5.815	1.982	10.10
20	790	39.5	3.95	1.346	4.68	1	1164	58.2	5.82	1.984	10.20
20	810	40.5	4.05	1.381	4.70	1	1165	58.25	5.825	1.986	10.25
20	830	41.5	4.15	1.415	4.70	1	1166	58.3	5.83	1.988	10.30
20	850	42.5	4.25	1.449	4.75	1	1167	58.35	5.835	1.989	10.35
20	870	43.5	4.35	1.483	4.80	1	1168	58.4	5.84	1.991	10.35
20	890	44.5	4.45	1.517	4.80	1	1169	58.45	5.845	1.993	10.40
20	910	45.5	4.55	1.551	4.80	1	1170	58.5	5.85	1.994	10.40
20	930	46.5	4.65	1.585	4.80	1	1171	58.55	5.855	1.996	10.40
20	950	47.5	4.75	1.619	4.80	1	1172	58.6	5.86	1.998	10.45
20	970	48.5	4.85	1.653	4.90	1	1173	58.65	5.865	1.999	10.50

銅離子與酒石酸根的螯合曲線

硫酸銅					硝酸銅					氯化銅				
滴數	累進滴數	NaOH 體積 mL	OH/C 4H4O6	pH	滴數	累進滴數	NaOH 體積 mL	OH/C 4H4O6	pH	滴數	累進滴數	NaOH 體積 mL	OH/C 4H4O6	pH
0	0	0	0	4.98	0	0	0	0	4.72	0	0	0	0	4.32
20	20	1	0.01	5.04	30	30	1.5	0.015	4.78	20	20	1	0.01	4.38
20	40	2	0.02	5.10	30	60	3	0.03	4.85	20	40	2	0.02	4.42
20	60	3	0.03	5.14	30	90	4.5	0.045	4.92	20	60	3	0.03	4.47
20	80	4	0.04	5.19	30	120	6	0.06	4.98	20	80	4	0.04	4.52
20	100	5	0.05	5.25	30	150	7.5	0.075	5.02	20	100	5	0.05	4.58
30	130	6.5	0.065	5.32	30	180	9	0.09	5.04	40	140	7	0.07	4.67
30	160	8	0.08	5.39	30	210	10.5	0.105	5.04	40	180	9	0.09	4.76
30	190	9.5	0.095	5.39	30	240	12	0.12	5.04	60	240	12	0.12	4.87
30	220	11	0.11	5.39	30	270	13.5	0.135	5.04	60	300	15	0.15	4.99
30	250	12.5	0.125	5.40	30	300	15	0.15	5.04	60	360	18	0.18	5.11
30	280	14	0.14	5.40	30	330	16.5	0.165	5.04	60	420	21	0.21	5.25
40	320	16	0.16	5.41	30	360	18	0.18	5.05	60	480	24	0.24	5.37
30	350	17.5	0.175	5.41	30	390	19.5	0.195	5.07	60	540	27	0.27	5.45
30	380	19	0.19	5.41	30	420	21	0.21	5.07	60	600	30	0.3	5.45
30	410	20.5	0.205	5.41	30	450	22.5	0.225	5.07	60	660	33	0.33	5.45
30	440	22	0.22	5.41	30	480	24	0.24	5.07	60	720	36	0.36	5.45
40	480	24	0.24	5.42	30	510	25.5	0.255	5.07	8	728	36.4	0.364	5.5
30	510	25.5	0.255	5.42	30	540	27	0.27	5.09	40	768	38.4	0.384	5.56
50	560	28	0.28	5.43	30	570	28.5	0.285	5.09	40	808	40.4	0.404	5.59
50	610	30.5	0.305	5.44	30	600	30	0.3	5.09	60	868	43.4	0.434	5.6
30	640	32	0.32	5.44	30	630	31.5	0.315	5.09	60	928	46.4	0.464	5.62
30	670	33.5	0.335	5.45	30	660	33	0.33	5.10	100	1028	51.4	0.514	5.69
30	700	35	0.35	5.47	30	690	34.5	0.345	5.10	100	1128	56.4	0.564	5.82
30	730	36.5	0.365	5.47	30	720	36	0.36	5.10	32	1160	58	0.58	6
30	760	38	0.38	5.49	30	750	37.5	0.375	5.10	10	1170	58.5	0.585	6.09
30	790	39.5	0.395	5.49	30	780	39	0.39	5.10	20	1190	59.5	0.595	6.31
30	820	41	0.41	5.49	30	810	40.5	0.405	5.10	10	1200	60	0.6	6.52
30	850	42.5	0.425	5.53	30	840	42	0.42	5.10	14	1214	60.7	0.607	7.03
30	880	44	0.44	5.57	30	870	43.5	0.435	5.11	7	1221	61.05	0.610	7.56
30	910	45.5	0.455	5.57	30	900	45	0.45	5.11	5	1226	61.3	0.613	7.89
30	940	47	0.47	5.57	30	930	46.5	0.465	5.11	2	1228	61.4	0.614	7.99
30	970	48.5	0.485	5.57	30	960	48	0.48	5.11	13	1241	62.05	0.620	8.5
30	1000	50	0.5	5.57	30	990	49.5	0.495	5.11	35	1276	63.8	0.638	9

30	1030	51.5	0.515	5.59	30	1020	51	0.51	5.11	100	1376	68.8	0.688	9.37
30	1060	53	0.53	5.59	30	1050	52.5	0.525	5.12	70	1446	72.3	0.723	9.5
30	1090	54.5	0.545	5.62	30	1080	54	0.54	5.12					
30	1120	56	0.56	5.69	30	1110	55.5	0.555	5.12					
30	1150	57.5	0.575	5.77	30	1140	57	0.57	5.12					
30	1180	59	0.59	5.90	30	1170	58.5	0.585	5.15					
20	1200	60	0.6	6.03	30	1200	60	0.6	5.17					
30	1230	61.5	0.615	6.28	30	1230	61.5	0.615	5.22					
30	1260	63	0.63	6.79	30	1260	63	0.63	5.28					
30	1290	64.5	0.645	6.86	30	1290	64.5	0.645	5.34					
10	1300	65	0.65	7.27	30	1320	66	0.66	5.42					
10	1310	65.5	0.655	7.98	30	1350	67.5	0.675	5.52					
5	1315	65.75	0.657	8.22	30	1380	69	0.69	5.67					
5	1320	66	0.66	8.43	30	1410	70.5	0.705	5.87					
5	1325	66.25	0.662	8.60	30	1440	72	0.72	6.22					
10	1335	66.75	0.667	8.85	30	1470	73.5	0.735	7.05					
10	1345	67.25	0.672	8.98	15	1485	74.25	0.742	7.96					
20	1365	68.25	0.682	9.15	15	1500	75	0.75	8.49					
30	1395	69.75	0.697	9.36	10	1510	75.5	0.755	8.67					
30	1425	71.25	0.712	9.46	10	1520	76	0.76	8.80					
30	1455	72.75	0.727	9.54	10	1530	76.5	0.765	8.90					
50	1505	75.25	0.752	9.63	20	1550	77.5	0.775	9.02					
30	1535	76.75	0.767	9.68	20	1570	78.5	0.785	9.11					
30	1565	78.25	0.782	9.72	20	1590	79.5	0.795	9.18					
30	1595	79.75	0.797	9.76	30	1620	81	0.81	9.27					
30	1625	81.25	0.812	9.76	30	1650	82.5	0.825	9.34					
30	1655	82.75	0.827	9.84	30	1680	84	0.84	9.40					
30	1685	84.25	0.842	9.88	30	1710	85.5	0.855	9.44					
30	1715	85.75	0.857	9.91	60	1770	88.5	0.885	9.52					
30	1745	87.25	0.872	9.95	60	1830	91.5	0.915	9.59					
40	1785	89.25	0.892	10.00	60	1890	94.5	0.945	9.66					
40	1825	91.25	0.912	10.05	60	1950	97.5	0.975	9.73					
30	1855	92.75	0.927	10.10	60	2010	100.5	1.005	9.78					
30	1885	94.25	0.942	10.14	60	2070	103.5	1.035	9.83					
30	1915	95.75	0.957	10.20	60	2130	106.5	1.065	9.90					
30	1945	97.25	0.972	10.25	60	2190	109.5	1.095	9.98					
30	1975	98.75	0.987	10.30	60	2250	112.5	1.125	10.09					
30	2005	100.2	1.002	10.35	60	2310	115.5	1.155	10.30					
30	2035	101.7	1.017	10.40	60	2370	118.5	1.185	11.18					

30	2065	103.2	1.032	10.44
30	2095	104.7	1.047	10.50
30	2125	106.2	1.062	10.56
20	2145	107.2	1.072	10.88
10	2155	107.7	1.077	11.58

EDTA-Ni²⁺吸收光譜

吸收波 長(nm)	未加 EDTA	加 EDTA
350	0.013	0.066
360	0.085	0.078
370	0.17	0.095
380	0.248	0.105
390	0.224	0.131
400	0.109	0.126
410	0.097	0.104
450	0.017	0.035
500	0.013	0.024
550	0.082	0.025
570	0.121	0.027
580	0.134	0.028
590	0.139	0.03
600	0.137	0.033
630	0.11	0.046
650	0.086	0.054
660	0.076	0.055
670	0.066	0.054
680	0.059	0.055
690	0.049	0.054
700	0.044	0.058
710	0.039	0.06
730	0.033	0.059
750	0.04	0.056