

第十六屆旺宏科學獎 成果說明書

參賽編號：

作品名稱：「碳」「熄」致「螢」--碳量子點的螢光應用

姓名：陳冠呈

關鍵詞：碳量子點、葉綠素、螢光

作品名稱

「碳」「熄」致「螢」--碳量子點的螢光應用

摘要

本篇作品主要研究以微波反應合成碳量子點，並探討其螢光特性。首先將尿素:檸檬酸=1:1 混合溶液，以 480 瓦微波 270 秒，再以 pH=12 的條件下透析，可得發出藍色螢光的碳量子點。此碳量子點在 pH 小於 7 時螢光減弱，在 pH 大於 8 時有較穩定的螢光強度，在加入不同的金屬陽離子時只有 Hg^{2+} 會完全淬熄，再加入 I 後又會發生螢光，故碳量子點可做為 Hg^{2+} 偵測器，其偵測極限約在 $6 \times 10^{-4} \text{ M}$ ，使用 Hg^{2+} 及 I 可對碳量子點的螢光進行開關。將葉綠素與量子點混合可得發出紫色螢光的溶液，發現在汞離子濃度為 $7 \times 10^{-4} \text{ M}$ 時紫色螢光已遭淬熄。且在 675 nm 的部分汞離子在 $2 \times 10^{-5} \sim 7 \times 10^{-4} \text{ M}$ 呈現相當標亮的線性，可用於汞離子的檢量。 Ba^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 會對混合溶液的 423 nm 螢光淬熄，但卻不會影響 675 nm 螢光，利用此特性我們可調控螢光光色，沒加離子時呈紫色，加入 Ba^{2+} 等離子時呈紅色，而加入汞離子時則呈無色。

壹、 研究動機

在化學課時，老師提到了石墨烯、奈米碳管、 TiO_2 光觸媒等奈米材料，在材料的尺度在奈米等級時，其性質與塊材將會截然不同，例如奈米金的顏色，就不再是金色，而會是紅、紫等不同的顏色^[1]，而且在高一下時我們從葉子中將葉綠素 a、葉綠素 b、胡蘿蔔素、葉黃素分離，並做螢光分析實驗，發現葉綠素 a 是綠色的，但卻發出紅色螢光，其吸收與放光的波峰位置都不一樣，這讓我們對螢光的反應機制感到十分有趣。而在搜尋資料時，我們偶然發現了碳量子點，也就是碳的奈米粒子，它的合成方法並不困難，且具有螢光，於是就開始投入研究它的實驗中。

貳、 研究目的

- 一、合成及純化碳量子點
- 二、探討 pH 值與碳量子點的螢光的關係
- 三、探討陽離子與碳量子點螢光的交互作用
- 四、探討葉綠素 a 與碳量子點的交互作用
- 五、探討碳量子點葉綠素 a 混合溶液與汞離子的交互作用

參、 研究設備及器材

一、 器材

燒杯	量筒	滴管	透析膜 (1000 D)
石英比色槽 UV cell	層析管	試管	圓底燒瓶
玻棒	漏斗	刮杓	精密電子秤
毛細管	TLC 片	容量瓶	微波爐
254/365 nm 紫外光燈	減壓旋轉濃縮機	研鉢	相機

二、 儀器

- (一)紫外光-可見光分光光譜儀 Metertech SP8001
- (二)螢光光譜儀 Metertech F99pro

三、 藥品

尿素	檸檬酸	葡萄糖	硫酸銅
硝酸鉛	硝酸鋇	硝酸鋅	硝酸鎳
硫酸錳(II)	硫酸鐵	碘	碘化鉀
葉子	無水硫酸鈣	矽膠(100 目)	PEG-200

肆、 研究原理

一、量子點(Quantum Dots)^[2]

量子點是典型的奈米材料代表，可以寫為「具量子特性之奈米粒子」。量子特性是指如原子具有分離的能階，當原子組成了巨觀的材料後，量子的特性會組合成新的性質，也就是我們熟知的一般材料性質，如銅原子組合成銅塊後，才是常用的導電電線。如果材料接近原子尺度時(約 1~100 nm, 約數十~數千個原子組成)，此材料的粒子會有類似原子的量子特性，故稱之為量子點。在介觀尺度的量子點，電子態密度不同於塊材，其介於原子與塊材之間，具有類似原子的能階，在實驗上可觀察到類似原子能階的分離的光譜，因此量子點的光、電、

磁性質不同於一般我們所熟知的巨觀性質，另一方面，量子點的能態密度隨著其尺寸大小而變，也就是說光、電、磁性質可以單純的由尺寸變化來改變。

對半導體量子點而言，尺寸變小之後，電子電洞會受到侷限，復合（Recombination）機率變大，發光效率也變高，在另一方面，能帶邊緣的能態密度變小，連續之能帶產生了分裂，故其能隙（Energy Gap）將會變大，發光波長藍移，換句話說，只要能控制尺寸，即能控制發光波長。以上所說之量子點特性，即量子點侷限效應（QCE, Quantum Confinement Effect）或量子點尺寸效應（QSE, Quantum Size Effect）。

碳量子點近年來為奈米材料的一顆新星，除了具有優秀的光學性質，還有良好的水溶性、低毒性、高穩定性、成本低等優點，因此被廣泛應用在很多領域，特別是在光催化、生物感測器的開發、螢光材料等應用。

二、吸光度

1. Beer-Lambert Law 又稱比爾定律^[3]，是光吸收的基本定律。一束單色光照射於一樣品溶液後，因為樣品吸收了一部份的光能，造成透射光的強度減弱，再加上樣品溶液的濃度愈大，吸收的光能愈大，則光強度的減弱就愈顯著。其關係為：

$$A = -\log_{10} \frac{I_t}{I_0} = \log_{10} \frac{1}{T} = K \cdot l \cdot c$$

其中：

A：吸光度； I_0 ：入射光的強度； I_t ：透射光的強度；T：透射比，或稱透光度；K：吸收係數，或稱消光係數；l：吸收樣品的厚度，一般以 cm 為單位；C：樣品溶液的濃度，單位可以是 g/L 或 mol/L。

2. 比爾-朗伯定律的物理意義：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 及吸收樣品厚度 l 成正比。

三、螢光機制^[2]

螢光是一種光致發光現象。當某種常溫物質經較高能量的入射光照射後，此物質因吸收光能使電子進入激發態，但因電子激發態上的不穩定，會立即回到穩定的基態位置，並放出光子。通常放射光的波長比入射光的波長還要長，在可見光波段；而且一旦停止入射光，發光現象也隨之立即消失。具有此種性質之放射光就被稱之為螢光。

伍、研究過程或方法

實驗一、合成及純化碳量子點

(一)、不同原料製造碳量子點^{[4][5][6]}

1. 利用以下三種配方利用微波反應合成碳量子點固體

配方	1	2	3
溶液	3.125 M C ₆ H ₁₂ O _{6(aq)} 4 mL+ 85 % H ₃ PO ₄ 20 mL	1 M 尿素 5 mL+ 1 M 檸檬酸 5 mL	2 g C ₆ H ₁₂ O _{6(aq)} 3 mL+ PEG-200 10 mL
微波反應條件	160 W , 140s	480W , 4min30sec	540 W , 2 min

2. 反應完成後，在燒杯中加入 10 mL 水，以 365 nm 紫外光燈照射，並比較三種配方的螢光特性

(二)、用不同比例的原料合成碳量子點

1. 將尿素、檸檬酸分別以莫耳數比 1:1、3:1、5:1 混合並固定兩者總莫耳數相加為 0.012 mole 再加入 10 ml 水後，以 480 W 微波 4 分 30 秒。
2. 反應完成後，在燒杯中加入 10 mL 水，以 365 nm 紫外光燈照射，並比較其異同 (之後實驗以 1:1 的比例進行實驗)。

(三) 以管柱層析法純化碳量子點

1. 調整展開液中乙醇和丙酮體積比例 (1:2、2:1、1:3、3:1)，使微波混合產物在 TCL 片中，最亮的物質其 R_f 約在 0.5。(實驗結果 乙醇:丙酮=3:1)
2. 使用步驟 1.的展開液及矽膠對實驗一的混合物進行管柱層析。
3. 測量純化完的物質其吸收及螢光光譜。

(四)、以透析法純化碳量子點

1. 將微波混合產物加入 10 mL 水後，稀釋 60 倍後取 8 mL 置入透析膜中。
2. 將透析膜置入 2000 mL pH=12 的氫氧化鈉水溶液中進行透析，每 8 hr 更換氫氧化鈉水溶液一次，透析三天。
3. 測量純化完的物質其吸收及螢光光譜。

實驗二、探討 pH 值與碳量子點的螢光的關係

1. 取 10 mL 碳量子點溶液，測量其 pH 值、吸收光譜及螢光光譜。
2. 加入 2 μ L 1 M HNO₃，並測量其 pH 值、吸收、螢光。
3. 重覆步驟 2.，直至 pH 及螢光變化不大。

4. 以 1 M NaOH 進行反滴定，每次加入 2 μL ，至當量點附近時改以 1 μL 滴定，同時記錄其 pH 值、吸光、螢光。

實驗三、 探討離子與碳量子點螢光的交互作用

1. 配製 0.1 M Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Ba^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Zn^{2+} 及 0.02 M Hg^{2+} 的溶液。
2. 取 2 mL 碳量子點溶液(pH 值為 7.4)與離子 10 μL (Hg^{2+} 取 50 μL)混合，並測量溶液的螢光光譜。
3. 取 2 mL 碳量子點溶液，每次加入 6 μL Hg^{2+} (0.02 M)，測量溶液的吸收及螢光光譜直至螢光淬熄。
4. 將步驟 3 溶液每次加入 6 μL I(0.1 M)，測量溶液的吸收及螢光光譜。

實驗四、探討葉綠素 a 與碳量子點的交互作用

1. 以丙酮萃取植物葉子中的葉綠素。
2. 以正己烷：乙酸乙酯=3：1 的展開液對步驟 1.的萃取液進行層析分離出葉綠素 a。
3. 利用迴旋濃縮機將葉綠素 a 溶液的溶劑抽乾，再加入丙酮溶液後，測量葉綠素 a 的丙酮溶液其吸收及螢光光譜。
4. 將碳量子點溶液與 12 烷基苯磺酸鈉(0.2 %)等體積混合後與溶於丙酮的葉綠素溶液以不同比例(1:1.8、1:1.5、1:2)混合均勻並測量其吸收及螢光光譜。

實驗五、 探討碳量子點-葉綠素 a 混合溶液與汞離子的交互作用

1. 將碳量子點溶液與 12 烷基苯磺酸鈉(0.2 %)等體積混合，再與葉綠素溶液混合並調整螢光強度使兩者螢光強度相當(約 1:1.8)。
2. 取步驟 1.的溶液 2 mL，再加入 10 μL 同濃度的不同離子及 Hg^{2+} 50 μL 並測量吸收、螢光光譜。
3. 取步驟 1.的溶液 2 mL，再加入不同體積的 Hg^{2+} 並測量吸收、螢光光譜。

伍、研究結果

實驗一、 合成及純化碳量子點

(一)、 不同原料製造碳量子點

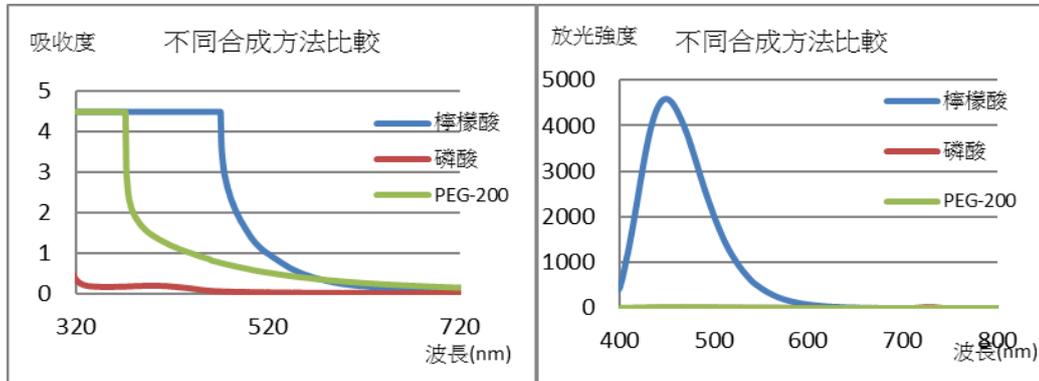


圖 1、以不同配方進行微波反應後，測量吸收及螢光光譜

左為吸光，右為放光

說明: 以檸檬酸尿素合成之碳量子點在 440 nm 有最大螢光強度。

(二)、 用不同比例的原料合成碳量子點

表一、尿素與檸檬酸以不同比例混合進行微波

	尿素:檸檬酸 1:1	尿素:檸檬酸 3:1	尿素:檸檬酸 5:1
左為日光燈下，右為波長 365 nm 紫外燈照射			

(三) 以管柱層析法純化碳量子點

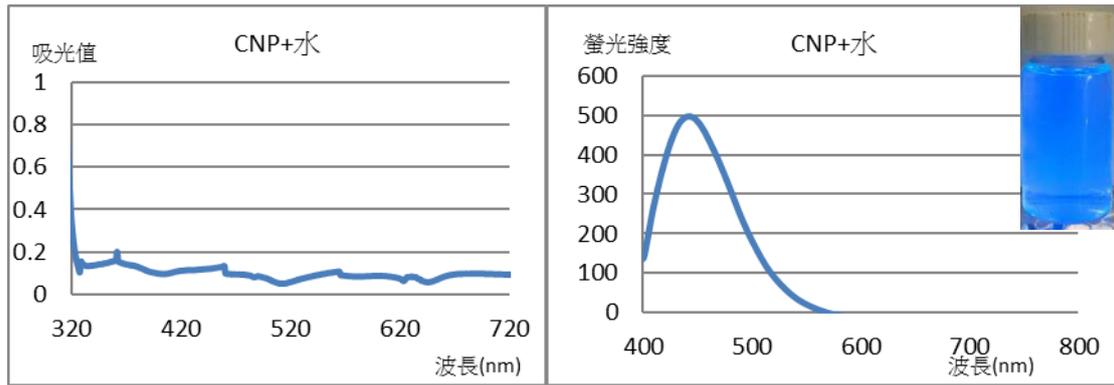


圖 2、用乙醇丙酮體積比=2:1 溶液溶解微波後碳量子點進行層析
左為吸光，右為放光

說明：在波長 442 nm 處檸檬酸放光強度 497.12

(四)、以透析法純化碳量子點

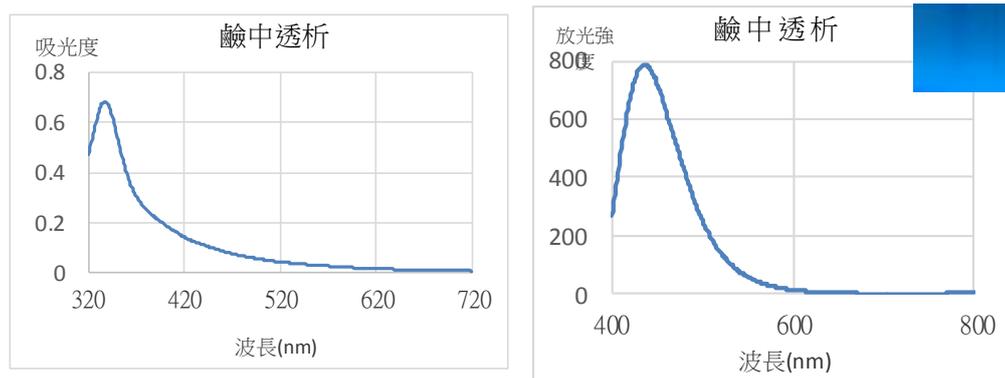


圖 3、在 pH 值 12 時進行透析三天後

左為吸光，右為放光

說明：在波長 443 nm 處檸檬酸放光強度 769.35

實驗二、探討 pH 值與碳量子點的螢光的關係

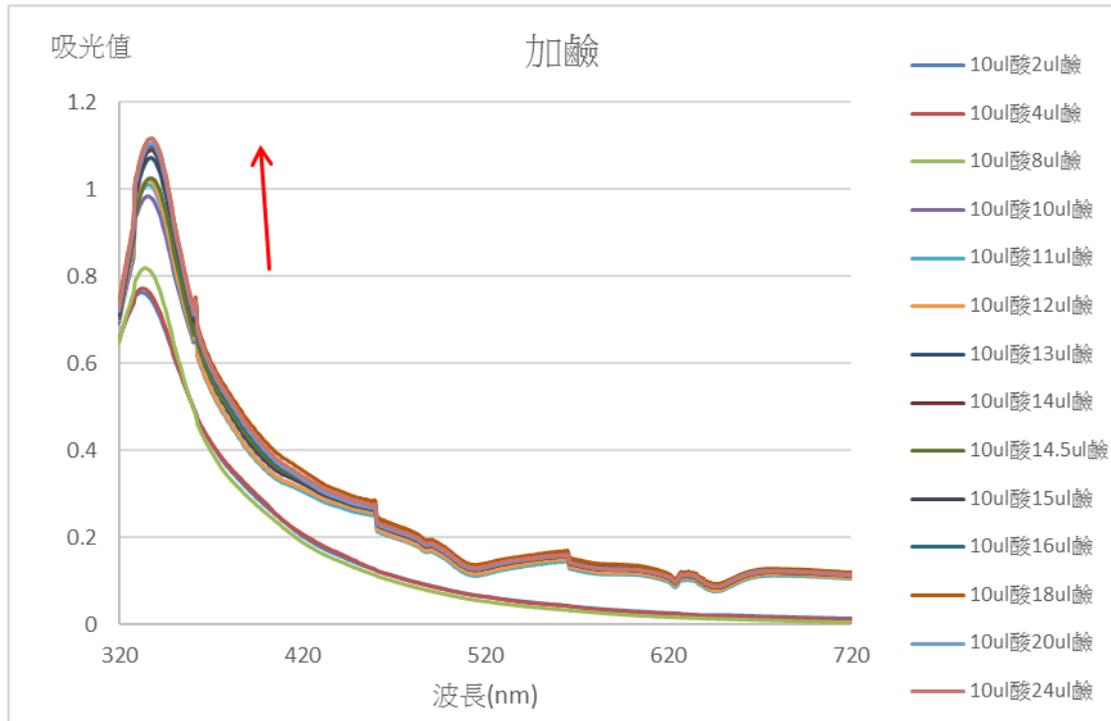


圖 4a、將透析完的碳量子點加入 1 M HNO₃ 10 uL 再加入 1 M NaOH 24 uL 的吸光圖

說明：加入鹼後吸光值上升(紅色箭頭為變化趨勢)

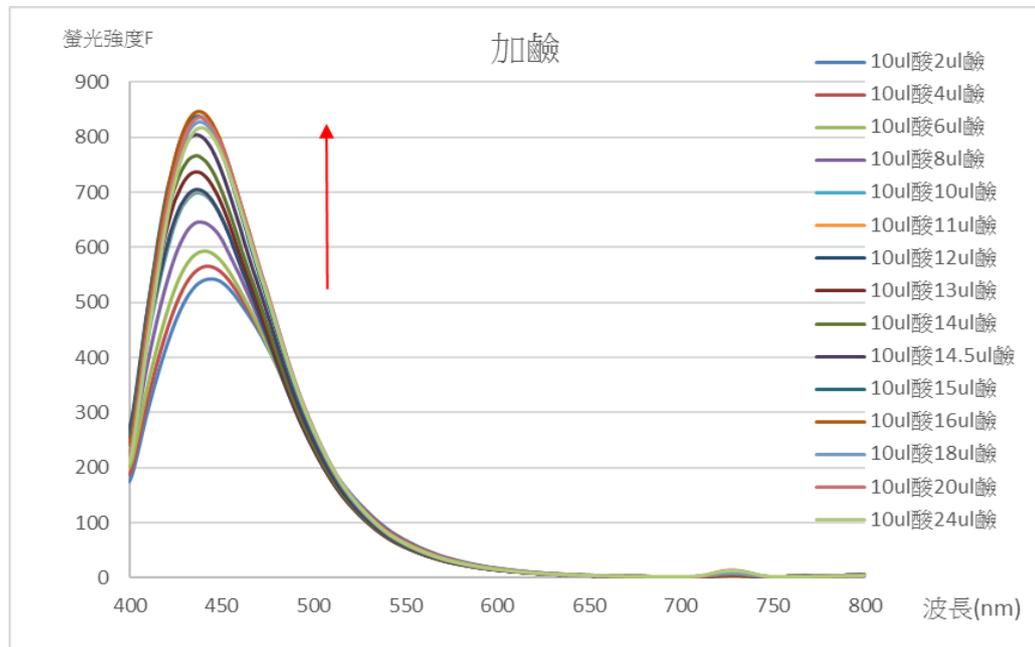


圖 4b、將透析完的碳量子點加入 1 M HNO₃ 10 uL 再加入 1 M NaOH 24 uL 的放光圖

說明：加入鹼後放光強度上升(紅色箭頭為變化趨勢)

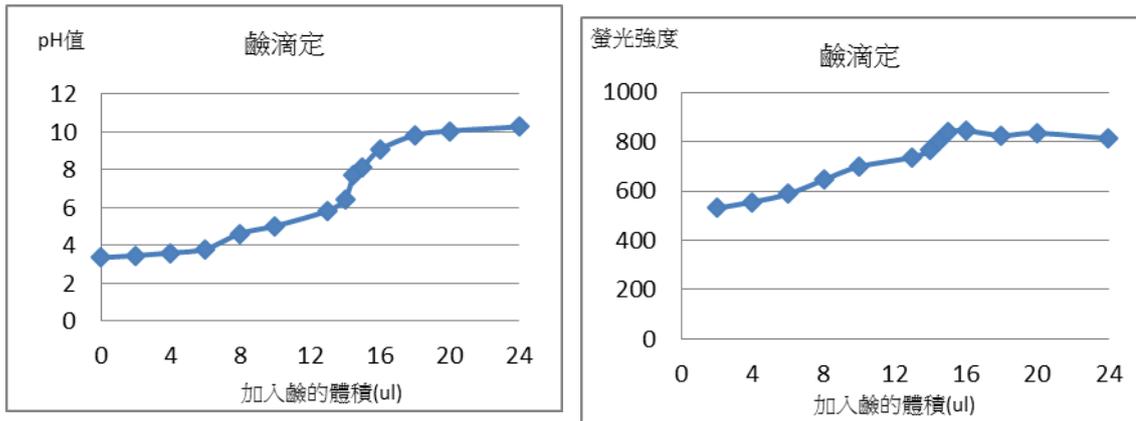


圖 5、加入鹼後 pH 值變化(左) 放光強度變化(右)

實驗三、 探討離子與碳量子點熒光的交互作用

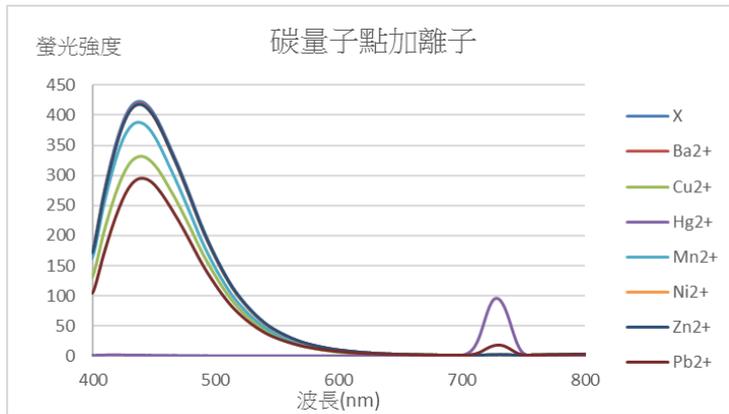


圖 5、碳量子點溶液(pH 值為 7.4)與離子 10 uL(Hg²⁺取 50 uL)混合
說明: 由此圖可發現碳量子點偵測汞的專一性強

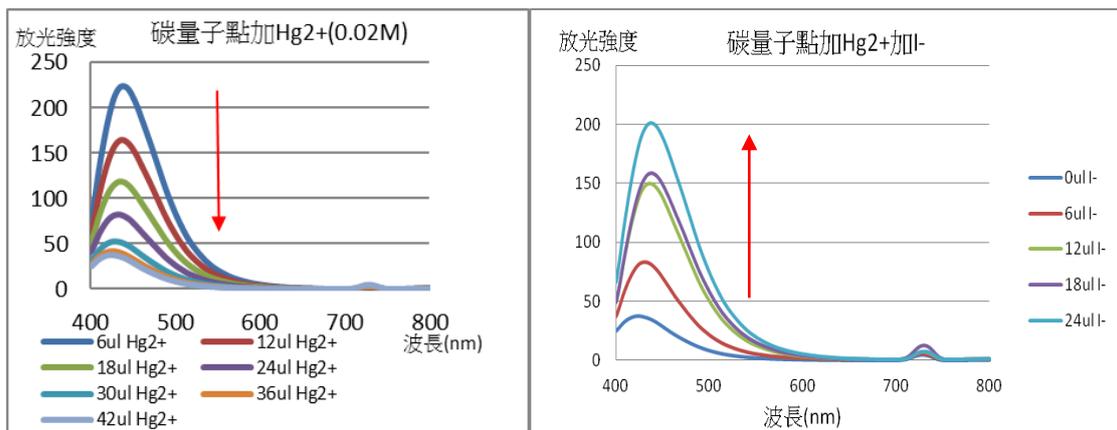


圖 6、碳量子點加入不同體積的汞後再加入碘離子的放光變化

左為加汞離子放光圖，右為加碘離子放光圖

說明: 加入汞的體積越多時，放光強度都有明顯下降，而加入碘離子的體積越多

時，放光強度都有明顯上升

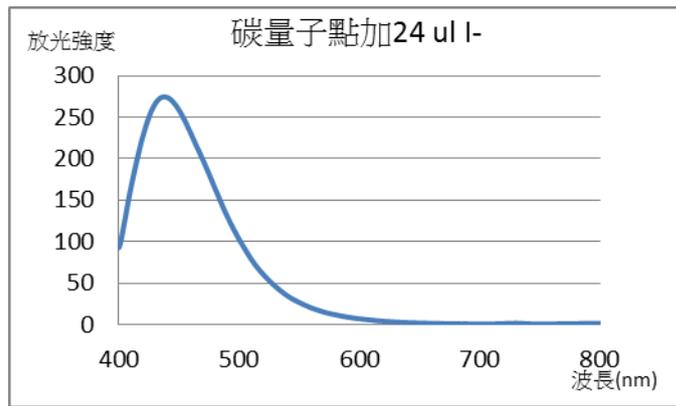


圖 10、碳量子點加 24 uL I⁻

實驗四、探討葉綠素 a 與碳量子點的交互作用

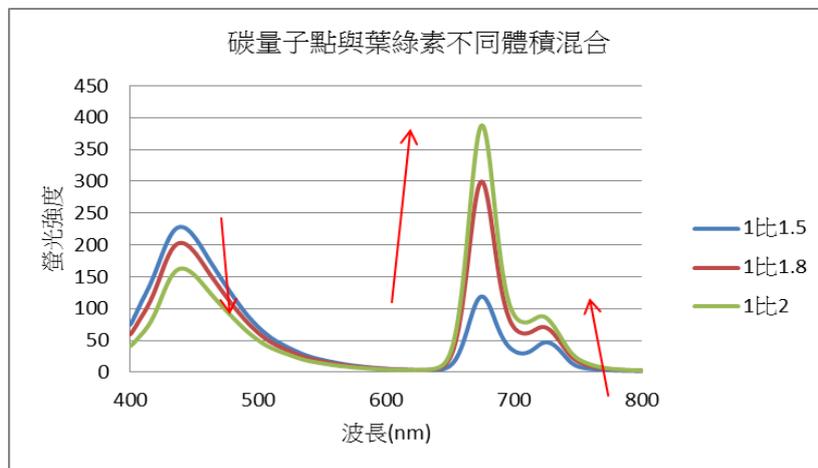


圖 7、碳量子點與葉綠素 a 以不同比例混合(12 烷基苯磺酸鈉為 0.05%)

碳量子點與葉綠素 a 以不同比例混合

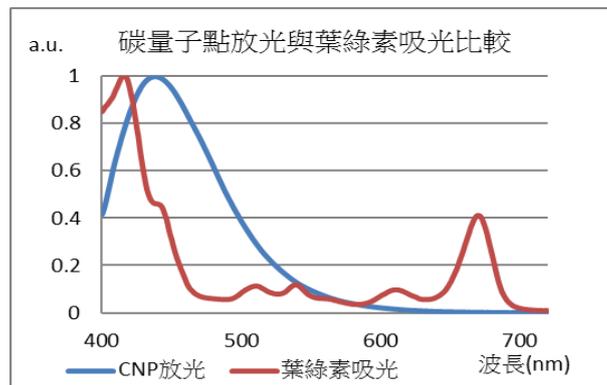


圖 8、量子點放光與葉綠素吸光疊圖(在 423 nm 處有較多重疊)

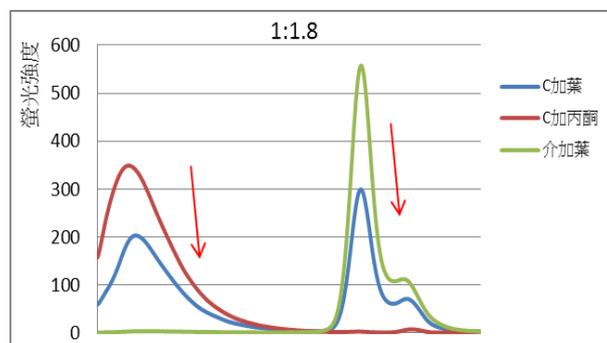


圖 9、碳量子點與葉綠素 a 以 1:1.8 比例混合與空白試劑作比較(12 烷基苯磺酸鈉為 0.05%)左為碳量子點放光圖(波峰在 444 nm)，右為葉綠素放光圖(波峰在 677 nm)

實驗五、 探討碳量子點-葉綠素 a 混合溶液與不同離子的交互作用

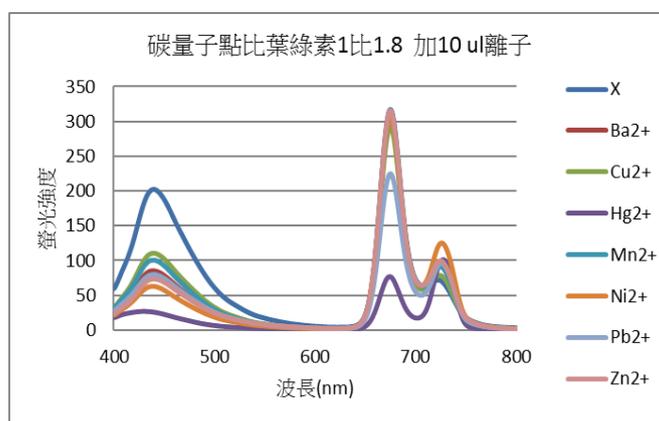


圖 10、加入不同離子的等亮混合物

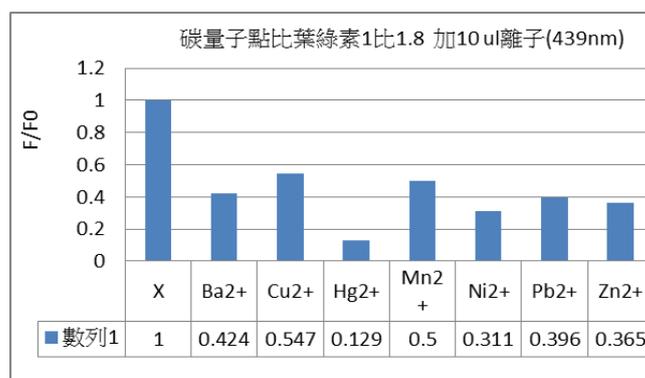


圖 11、不同離子對混合物中碳量子點之放光波長的萃熄效果 (12 烷基苯磺酸鈉為 0.05%)

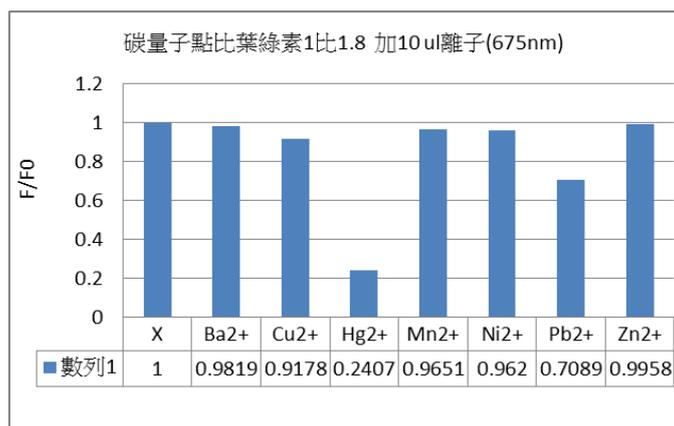


圖 12、不同離子對混合物中葉綠素 a 之放光波長的萃熄效果
(12 烷基苯磺酸鈉為 0.05%)

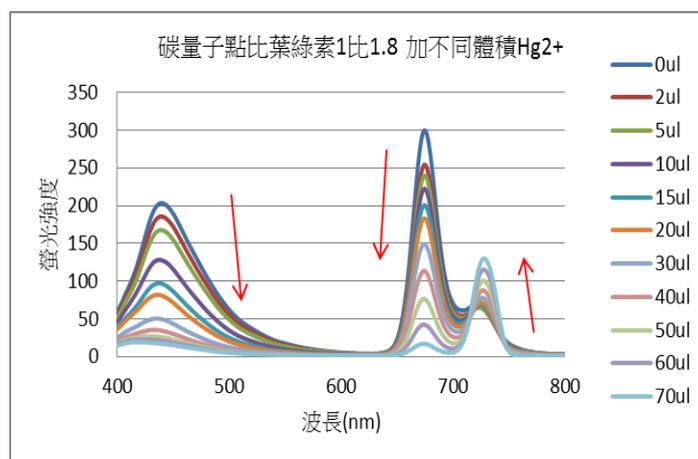
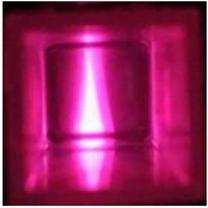
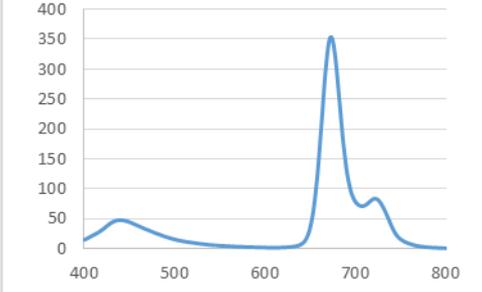
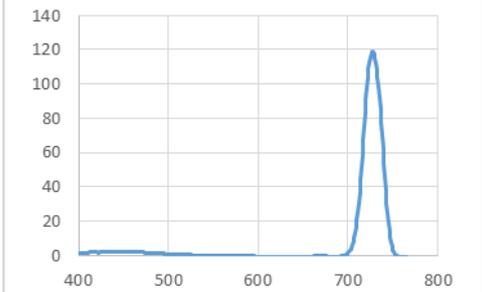


圖 13、汞離子對混合物之放光波長的萃熄效果(12 烷基苯磺酸鈉為 0.05%)

表 2、碳量子點葉綠素 a 混合溶液(1:3)與不同濃度汞離子作用螢光照片

加入混合物離子	外觀	顏色	對應光譜 (縱軸：螢光強度；橫軸：波長)
無		紫色	

Ba ²⁺ (5*10 ⁻⁴ M)		紅色	
Hg ²⁺ (5*10 ⁻⁴ M)		無色	

陸、討論

1. 實驗一之(一)中，三種方法合成出的量子點，僅配方 2 出現了高亮度的螢光，之後實驗都以此法合成碳量子點。
2. 實驗一之(一)中，我們嘗試對檸檬酸溶液及尿素溶液進行微波，但微波完溶液皆為透明澄清，以 365 nm 紫外燈照射，也無螢光(如圖 11)，證實螢光物質非檸檬酸或尿素微波後的螢光，而是兩者進行微波反應後所生成之新物質。

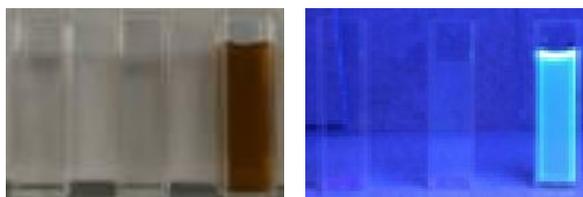


圖 14、溶液微波反應後外觀。由左至右依序為尿素溶液、檸檬酸溶液、尿素檸檬酸 1:1 混合溶液，左為日光燈下，右為波長 365 nm 紫外燈照射

3. 實驗一之(二)中，以不同的比例可以調整產物的放光顏色，其中尿素檸檬酸 1:1 反應後其螢光為藍色，5:1 反應後其顏色為藍綠色。3 組實驗中，以 1:1 的組合放的光最亮，之後實驗都以此比例合成碳量子點(如表 1)。

4. 實驗一之(三)中，使用層析法分離出來的量子點，特徵吸收在 362 nm，最大放光波長在 442 nm(如圖 2)。實驗一之(四)中，使用透析法分離出來的量子點，吸收在 342 nm，最大放光波長在 443 nm(如圖 3)，與文獻^[4]相差不多(以乙二醇檸檬酸溶液微波合成，特徵吸收約 360 nm，最大放光在 457 nm)。證實此二種方法，皆可成功分離螢光物質。但我們在進行透析實驗時，發現透析膜外的溶液亦有藍色螢光，那層析法分離出來的螢光物質會是分子量大於 1000 的量子點嗎？
5. 實驗一之(四)中，我們嘗試對層析法純化物質及透析法純化物質(1000 dalton 透析膜)進行 TLC 分析(如圖 12)，發現透析法純化物質幾乎停在原點，我們再對層析法純化物質進行透析，一段時間後發現，會發出藍色螢光的物質都已在透析膜外了。碳量子點其粒徑約在 3 nm^[4]，其分子量應超過 1000，而層析法純化物質皆穿過透析膜，其分子量應小於 1000，可以認定它應該是會發出藍色螢光的有機小分子。

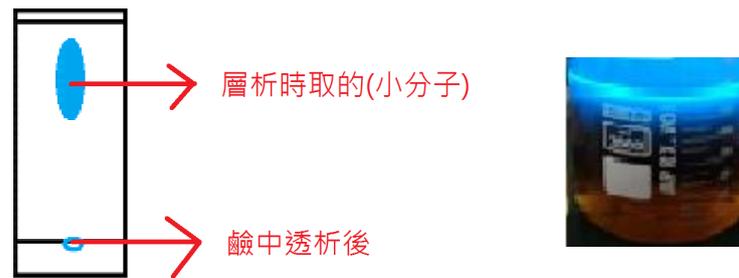


圖 15、左圖為層析純化物質及透析純化物質跑 TLC 片之結果，右圖為層析完的螢光物質再進行一天透析後，膜外溶液發出的螢光圖(照射 365 nm 紫外燈)。

6. 實驗一之(四)透析時，因以檸檬酸為反應物，故反應後為弱酸性，再進行透析三天後，顏色明顯變深，螢光亮度也大符下降，透析膜上更有許多褐色顆粒沉澱。推測因量子點表面帶有羧酸根^[7](如圖 13)，在酸性條件中碳量子點為中性粒子，其相互撞擊而聚集使粒徑變大，因此無法以此方法透析。故我們將透析液及微波完成的產物 pH 值調為 12 再進行透析，可使碳量子點表面帶負電荷(羧酸根)，避免碳量子點聚集，以此方法分離的量子點靜置多天後仍不會聚集亦維持一定的螢光亮度，因此之後實驗的碳量子點都採用此法分離。

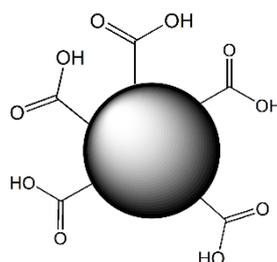


圖 16、量子點表面帶羧基示意圖

7. 碳量子點表面帶有羧酸根，不知氫離子的解離是否對碳量子點螢光造成影響，所以我們進行實驗二酸鹼滴定，結果發現碳量子點在鹼中的吸收及螢光皆較酸中來得強，pH 值愈低則螢光強度愈小，而在 pH > 8 時螢光強度無太大改變(如圖 14)。

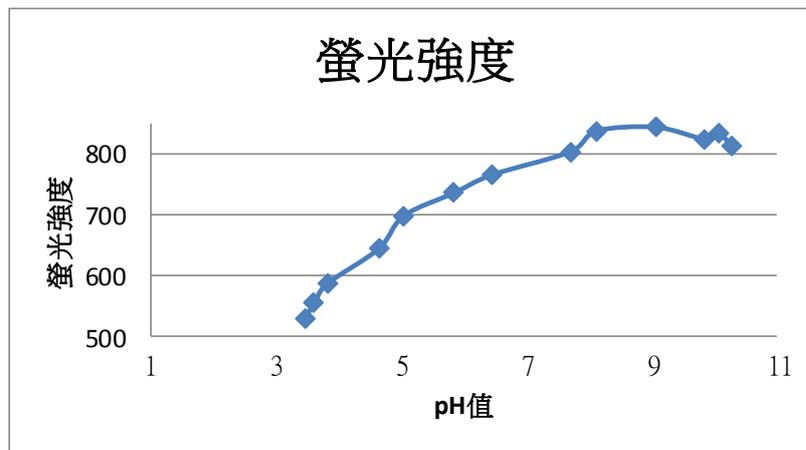


圖 17、pH 3 的碳量子點加入不同體積 NaOH

8. 考慮陽離子在鹼中易沉澱，所以實驗三中將透析完之鹼性碳量子點加入 HNO₃ 溶液至 pH 值為 7.4 再加入離子測量，結果完全淬熄的有 Hg²⁺，其他離子對碳量子點螢光並無明顯削弱 (如圖 15)，顯示碳量子點螢光對汞離子具有專一性，故碳量子點可以做為汞離子偵測器。

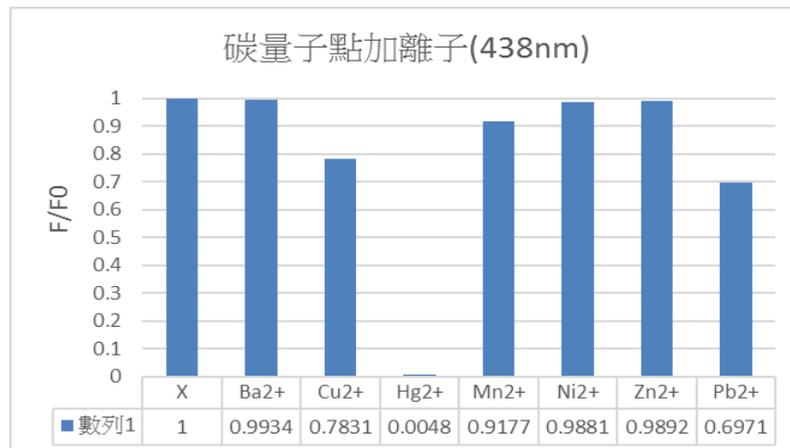


圖 18、碳量子點加入不同離子的螢光強度 F 除以沒有添加離子的碳量子點螢光強度 F0。

9. 在汞離子濃度在 $0 \sim 6 \times 10^{-4}$ M 時，汞離子濃度對螢光強度呈現相當好的線性關係，而濃度再更高時，螢光強度下降趨勢漸緩，其偵測極限約在 6×10^{-4} M。(如圖 16)

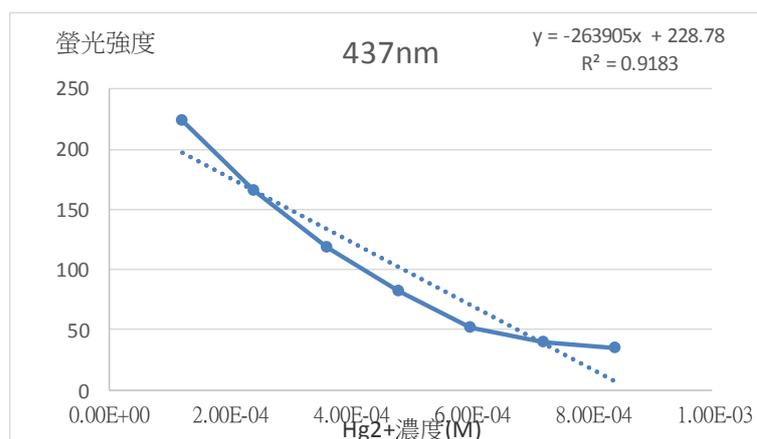


圖 19、碳量子點加入不同體積之 Hg^{2+}

10. 碳量子點表面羧酸根可能會吸附汞離子而淬熄螢光，因此我們嘗試加入 I⁻ 離子使汞離子沉澱而恢復螢光(圖 17)。加入碘離子後，可觀察到溶液生成橘色 HgI_2 沉澱，且加入碘離子的量與螢光強度呈線性關係。我們可以利用汞離子及碘離子來進行碳量子點螢光的開關，當加入汞離子時，螢光淬熄，再加入碘離子時，螢光又再度出現。

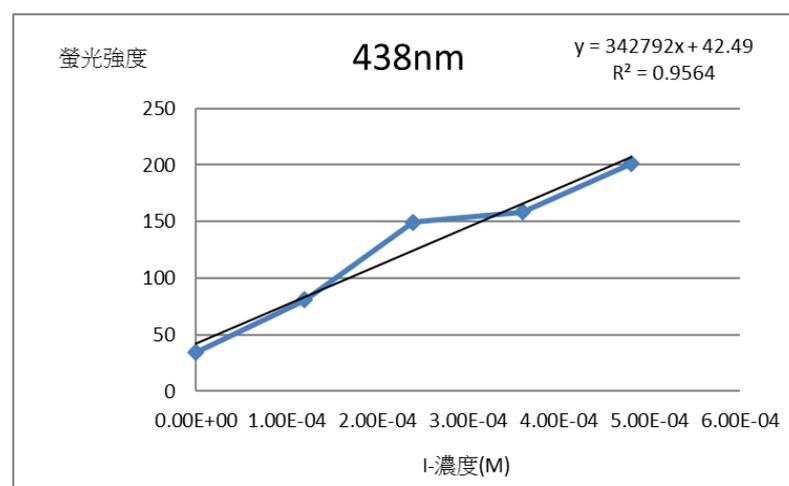


圖 20、加入汞離子後之碳量子點，再加入 I⁻ 離子

11. 實驗四中，我們以層析法分離葉綠素 a，分離後的葉綠素 a 特徵吸收在 419

nm 及 673 nm，與文獻^[8]相符。

12. 將葉綠素的丙酮溶液與水 1:1 混合後觀察其每五分鐘的螢光變化，發現其亮度會逐漸往下掉，推測是葉綠素不溶於水故生成沉澱而使螢光減弱，為了克服這個問題，我們在溶液中加入 0.1% 了十二烷基苯磺酸鈉，發現葉綠素的丙酮溶液在加入了適量的水後，其亮度都可以維持不會往下掉且量子點在加入此介面活性劑後亦不會影響其螢光特性。
13. 因量子點螢光與葉綠素 a 的吸收在 423 nm 處有較大程度的重疊，所以我們猜測量子點可以藉由能量轉移增強葉綠素螢光^[9]，故我們在實驗四中將量子點與葉綠素 a 以不同比例混合，並觀察螢光光色，發現在量子點:葉綠素 =1:1.8 時，會發出紫色的螢光(圖 7)。我們另外做量子點混合丙酮=1:1.8 及水混合葉綠素 a=1:1.8 的螢光光譜做為對照組(圖 9)，發現量子點螢光的確有減弱，而葉綠素 a 的螢光卻也同時減弱。
14. 為了了解汞離子是否也會對碳量子點加葉綠素 a 混合溶液的紫色螢光造成影響我們進行了實驗五，發現在汞離子濃度為 7×10^{-4} M 時，碳量子點與葉綠素 a 的螢光已遭淬熄。且在 675 nm 的部分汞離子在 $2 \times 10^{-5} \sim 7 \times 10^{-4}$ M 呈現相當漂亮的線性，這使得此混合溶液對汞離子的濃度在此範圍內進行檢量。

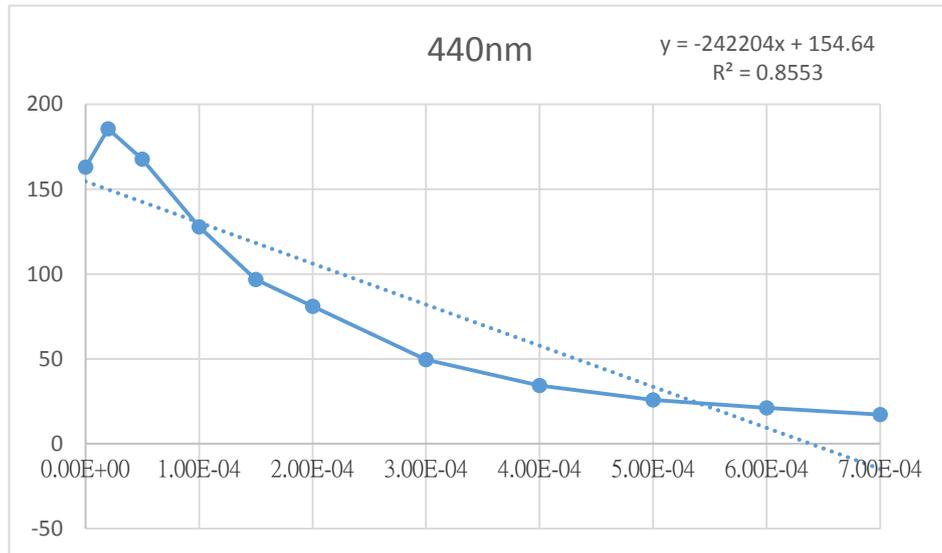


圖 21、混合物中 440 nm 波長加入汞離子的變化
汞離子對混合物中碳量子點之放光波長的淬熄效果(12 烷基苯磺酸鈉為 0.05%)

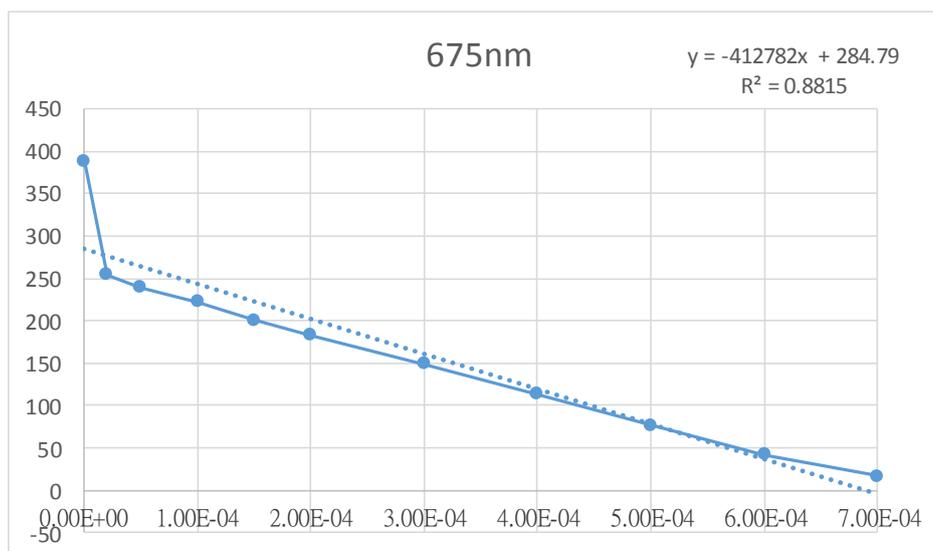


圖 22、混合物中 675 nm 波長加入汞離子的變化

汞離子對混合物中葉綠素 a 之放光波長的淬熄效果(12 烷基苯磺酸鈉為 0.05%)

15. 為了了解其它離子是否也會對碳量子點加葉綠素 a 混合溶液(1:1.8)的紫色螢光造成影響，我們添加了其它同的陽離子溶液(Ba^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Zn^{2+})進行測試，發現汞離子會使螢光完全淬熄，而其它離子皆對 423 nm 的量子點螢光造成淬熄。(如圖 10~圖 12)，但對 675 nm 的葉綠素螢光卻無太大的影響。
16. 我們將碳量子點加葉綠素 a 混合溶液的比例進行了調整，發現在碳量子點比葉綠素 a 在 1:3 時，加入了 Ba^{2+} ，可以將 423 nm 螢光淬熄而呈現紅色螢光，而加入了 Hg^{2+} 可使螢光完全淬熄，我們可藉由加入不同的離子而調控螢光光色亦可應用於離子偵測，沒有離子時呈紫色，加入 Ba^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 離子時呈紅色，加入汞離子時則呈無色。

柒、結論

- 一、 實驗一中，將尿素:檸檬酸=1:1 混合溶液，以 480 瓦微波 4 分 30 秒，再以 pH=12 的條件下透析，可得發出藍色螢光的碳量子點。
- 二、 實驗二中，我們對碳量子點溶液進行酸鹼滴定，發現在碳量子點螢光在低 pH 值時螢光會減弱，而 pH 值大於 8 時，螢光強度變化不大。
- 三、 實驗三中，我們使用不同離子加入碳量子點溶液，發現只有汞離子會造成螢光淬熄，其他離子對碳量子點螢光並無明顯削弱，顯示碳量子點螢光對汞離子具有專一性，故碳量子點可以做為汞離子偵測器，其偵測極限約在 6×10^{-4} M。
- 四、 實驗三中，利用碘離子與汞離子發生沉澱，而讓被汞離子淬熄的螢光又再度發生，我們成功的以碘離子(I⁻)與汞離子的添加，做出了量子點的螢光開

關。

- 五、 實驗四及實驗五中，我們混合了葉綠素 a 及碳量子點，而使混合溶液發生紫色螢光，而在 $7 \times 10^{-4} \text{M}$ 汞離子濃度時，可以對紫色螢光完全淬熄，且在 $2 \times 10^{-5} \sim 7 \times 10^{-4} \text{M}$ 呈現相當標亮的線性，可應用於汞離子濃度的檢量。
- 六、 Ba^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 會對混合溶液的 423 nm 螢光淬熄，但卻不會影響 675 nm 螢光，利用此特性我們可調控螢光光色，沒加離子時呈紫色，加入 Ba^{2+} 等離子時呈紅色，而加入汞離子時則呈無色。

捌、未來展望

1. 以檸檬酸及尿素所合成的碳量子點具有高螢光強度，對汞離子具有專一性，可針對此特性開發偵測汞離子的偵測器。
2. 碳量子點表面具有羧酸根，可針對此進行官能基修飾，讓碳量子點可與其他陽離子、陰離子或發光團交互作用，或許能有新的發現。

玖、參考資料

1. 奈米黃金, 維基百科,
<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%A5%88%E7%B1%B3%E9%BB%83%E9%87%91>
2. 徐晨皓、胡焯淳*, 利用植物廢棄物合成含奈米碳點的螢光物質, 科學教育月刊 第 374 期 中華民國 103 年 11 月, 41-48
3. 比爾-朗伯定律, 維基百科,
<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%AF%94%E5%B0%94-%E6%9C%97%E4%BC%AF%E5%AE%9A%E5%BE%8B>
4. Fangkai Du, Fang Zeng, Yunhao Ming, Shuizhu Wu, Carbon dots-based fluorescent probes for sensitive and selective detection of iodide. *Microchim Acta*, **2013**, 180:453. DOI10.1007/s00604-013-0954-2
5. Jia-MingLiu, Li-pingLin, Xin-XingWang, LiJiao, Zn(H₂O)₂ EDTA modulated luminescent carbon dots as fluorescent probes for fluoride detection. *Analyse*, **2013**, 138, 278-283
6. SourovChandra, PradipDas, SouravBag, DipranjanLaha and PanchananPramanik, Synthesis, functionalization and bioimaging applications of highly fluorescent. *Nanoscale*, **2011**, 3. 1533-1540
7. Sheila N. Baker* and Gary A. Baker*, Luminescent Carbon Nanodots : Emergent

Nanolights, *Angew.Chem.*, **2010**, 49, 6726-6744

8. Chlorophyll, 英文維基百科, <https://en.wikipedia.org/wiki/Chlorophyll>
9. 螢光共振能量轉移(FRET), 維基百科, https://en.wikipedia.org/wiki/F%C3%B6rster_resonance_energy_transfer
10. 螢光, 維基百科, <https://en.wikipedia.org/wiki/Fluorescence>