

中華民國第 56 屆中小學科學展覽會  
作品說明書

---

國中組 化學科

第三名

030204

變吧！變吧！七彩霓虹燈！

--探討靛胭脂的氧化還原

學校名稱：高雄市立五福國民中學

作者：  國二 藍世璵  國二 陳柏安  國二 伍德源	指導老師：  劉芝吟  許芳雪
---	-----------------------------

關鍵詞：靛胭脂、紅綠燈反應、綠化

## 摘要

食用藍色色素靛胭脂的氧化還原反應有綠、紅和黃色變化，故稱紅綠燈反應。為研究此反應，本實驗自製簡易光度計與搖動機器人控制搖動溶液的幅度，降低手搖的誤差，並將兩者裝置組合以利量測反應時間、減少誤差。實驗結果可知葡萄糖與氫氧化鈉濃度越大反應越快，兩者混合後為使每次循環變色時間差異小，需先靜置約 10 分鐘，以形成足夠的葡萄糖酸。當我們更改還原劑種類，發現果糖的烯醇化速率比半乳糖及葡萄糖快，故變色時間最短。最後我們希望藉由減少化學試劑用量保護環境，嘗試以維生素 C 作為還原劑、小蘇打取代對環境較為傷害的氫氧化鈉，成功綠化使靛胭脂還原，但限於溶液 pH 值而僅能出現藍色轉變為黃綠色，若要出現中間態紅色則需要提高 pH 值。

## 壹、實驗動機

在上課時，理化老師做了一個變色實驗，搖盪一個黃色溶液就變為鮮豔的紅色，再搖大力一點顏色漸變為綠色，靜置一段時間後綠色轉為紅色再進一步回復成黃色，重複搖盪又可以一直重複，它的變色現象讓我們非常好奇。於是我們在網路上尋找相關資料時，原來這就是「紅綠燈反應」，利用食用藍色色素的靛胭脂氧化還原可以顯現多種顏色，色彩豐富。科展上有很多研究同樣為氧化還原的藍瓶反應，但研究紅綠燈反應卻較少，這激發了我們想研究這個題材的衝動，因此我們選擇這些反應做為這次實驗的主題。除了探討葡萄糖與靛胭脂的反應，並想知道是否有其他辦法可以使靛胭脂有重複變色的效果，甚至是更為環保的氧化還原方法。

## 貳、研究目的

- 一、自製簡易可攜帶的光度計
  - 1.比較自製光度計與 SP20 的靛胭脂檢量線
  - 2.尋找自製光度計最佳光源
  - 3.尋找最佳反應條件
- 二、以分光光度計 SP20 探討不同濃度氫氧化鈉與葡萄糖對紅綠燈反應速率的影響。
- 三、以自製光度計，探討葡萄糖、半乳糖、果糖對靛胭脂氧化還原的影響。
- 四、以自製光度計探討不同鹼性強弱對靛胭脂氧化還原的影響。
- 五、研究綠化藍瓶、紅綠燈反應的條件。

## 參、研究原理

### 一、分光光度計原理

分光光度計常用於分析水中化合物，其原理是利用紫外光或可見光的燈管，經過分光稜鏡或是光柵，經狹縫選擇其波長，此特定波長的光線射入此樣品，一部分的光線會被樣品吸收，剩下的光線會通過。根據比爾定律， $A = \epsilon bc$  ( $A$ :吸收度， $\epsilon$ :莫耳吸收係數， $b$ :光徑長， $c$ :樣品莫耳濃度)，濃度  $c$  與吸收度  $A$  成正比。若樣品濃度愈濃則透過的光愈少，其穿透度減少，吸收值增加。若我們針對已知莫耳吸收係數的溶液，透過測量光吸收度便能推算出溶液濃度。而本實驗欲觀察指示劑的褪色，可依據分光光度計的吸收值有效觀察其反應情形。

### 二、葡萄糖與氫氧化鈉作用原理

在鹼性條件下，葡萄糖被離子化並互變異構體為直鏈醛，接著形成一個烯二醇陰離子中間體。此陰離子形成一種酮醛—糖基化酶，可以使染料褪色。若搖動試管引入氧氣進入溶液，氧化染料使之形成氧化態，可以不斷重複上述過程，為一個可逆反應。在過量的氫氧化物的存在下可切割酮醛，最終得到葡萄糖酸的鈉鹽。

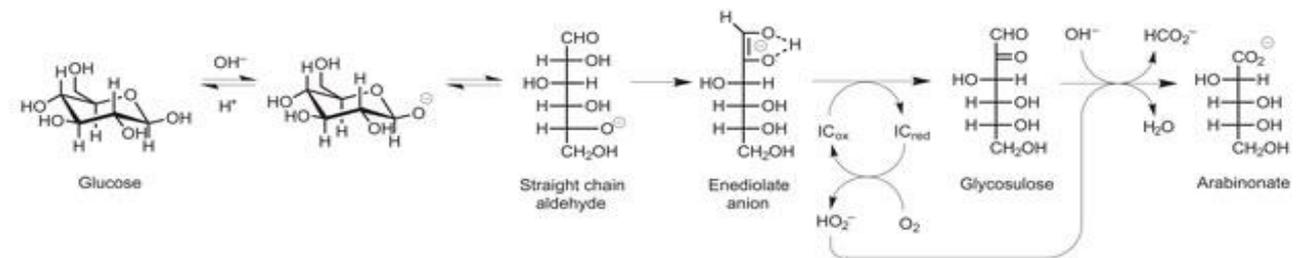


圖 3-1.葡萄糖與氫氧化鈉反應圖

### 三、紅綠燈反應原理

靛胭脂(indigo carmine)在台灣為食用藍色色素 2 號，本身為酸鹼指示劑及氧化還原指示劑。在鹼性溶液中，空氣中的氧氣使其氧化變成綠色(氧化態)，又因為葡萄糖先將靛胭脂還原成紅色的中間產物，再還原成黃色的還原態，因此有綠、紅、黃三種顏色，故此反應被稱為紅綠燈反應。

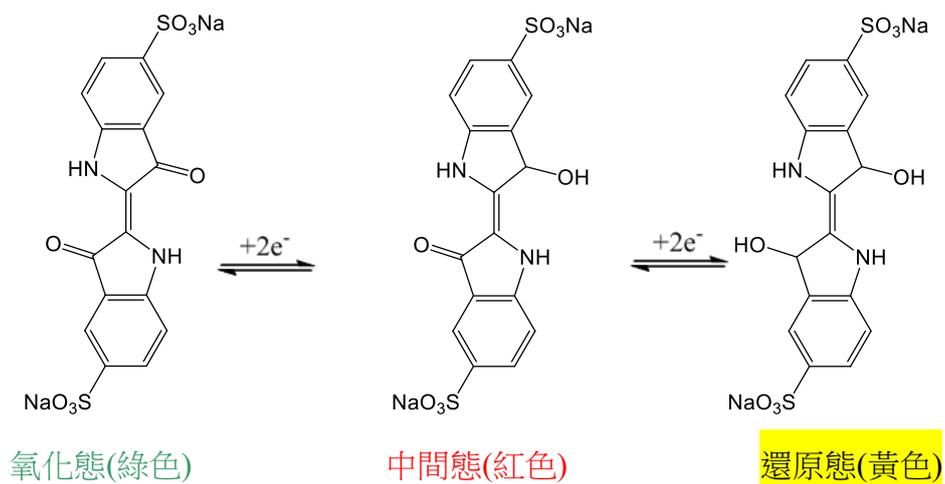
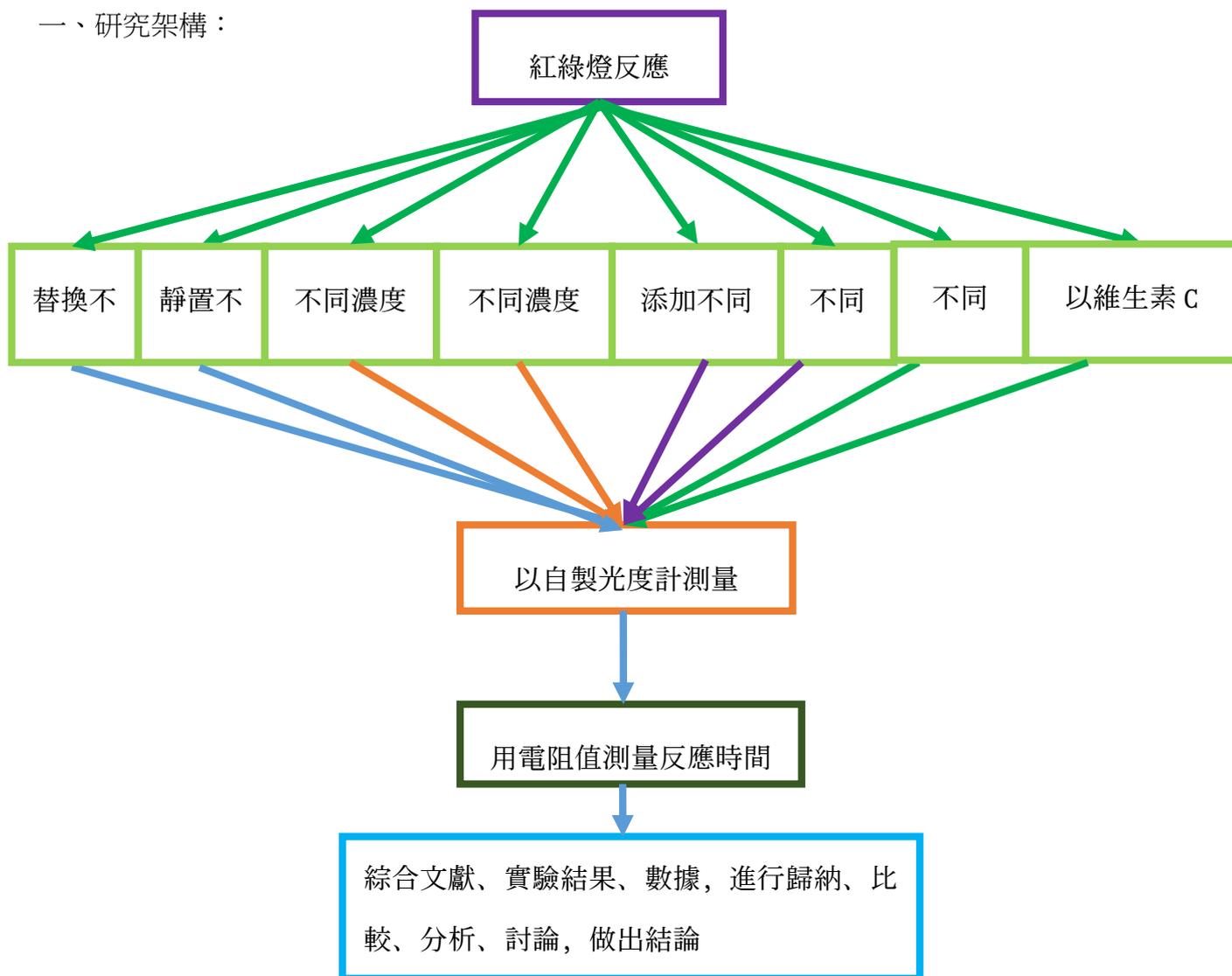


圖 3-2 靛胭脂變色反應

### 肆、研究架構、器材及方法

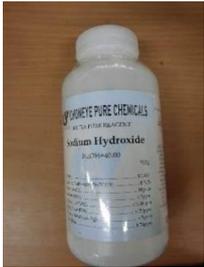
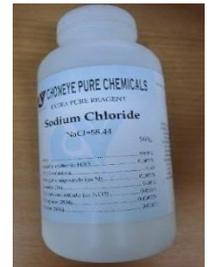
一、研究架構：



二、研究器材：

			
三用電表	直流電源供應器	鎖牙式 LED 燈	
			
分光光度計 SP20	電子天秤	光敏電阻	
			
燒杯	錐形瓶	滴量管+安全吸球	量瓶

三、實驗藥品：

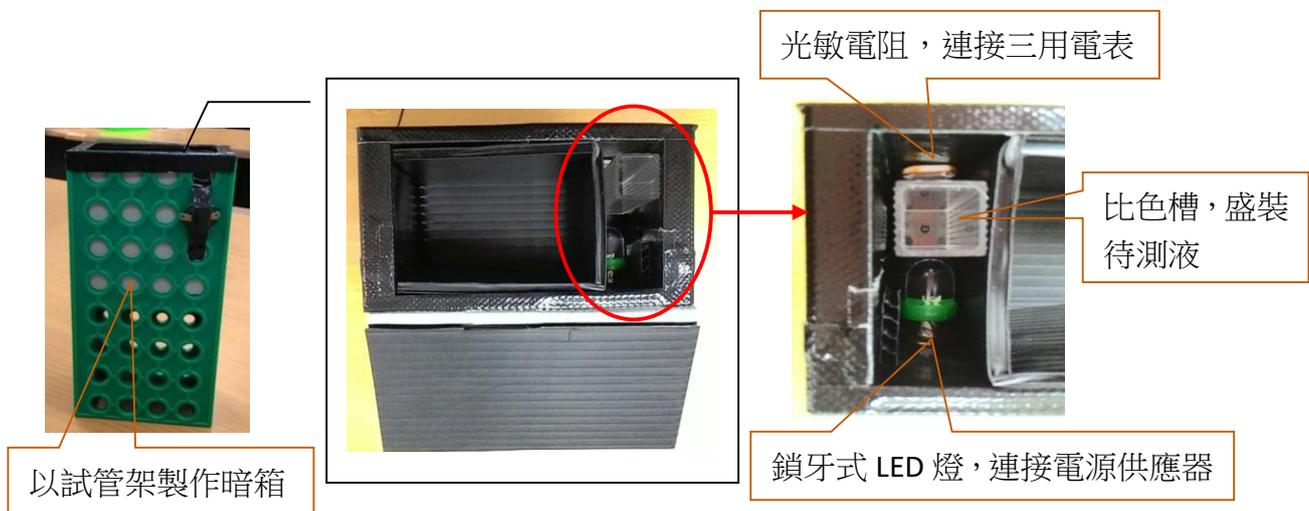
			
葡萄糖	氫氧化鈉	亞甲藍液	靛胭脂
			
碳酸氫鈉(小蘇打)	維生素 C	硫酸銅	氯化鈉

## 伍、實驗步驟

### 一、實驗一：設計並製作自製光度計

因為紅綠燈反應有兩段變色範圍，而學校的 SP20 無法儲存數據，只能設定單一光源且數值會一直跳動，故我們希望可以設計一儀器，可以連續記錄反應時間。如何量化溶液的顏色轉變及深淺是本實驗最重要的部分，故我們使用光敏電阻作為接受器，並以三用電表連接測量電阻值。我們發現搖動溶液的劇烈程度也會影響變色時間，因此製作一組搖動機器人裝置來代替手搖，以降低實驗誤差。

#### (一)自製光度計



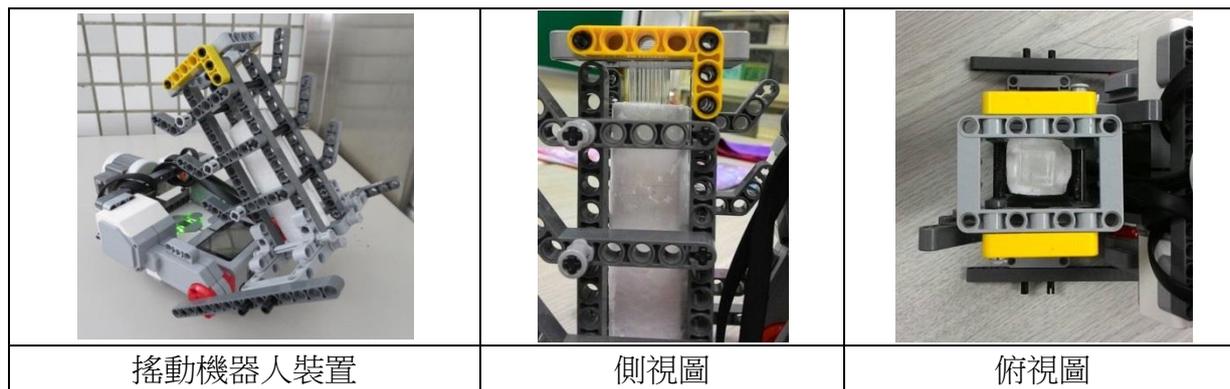
#### 1.說明：

- (1)鎖牙式 LED 燈源：替換光色方便，以適應不同反應，且鎖牙 LED 容易固定光源較穩定，誤差較小。
- (2)可連接電腦：以便長時間連續計時。
- (3)以比色槽盛裝溶液，用量少。且方形容器較不易因折射造成測量上的誤差。

#### 2.靛胭脂檢量線的製作：比較自製光度計與 SP20

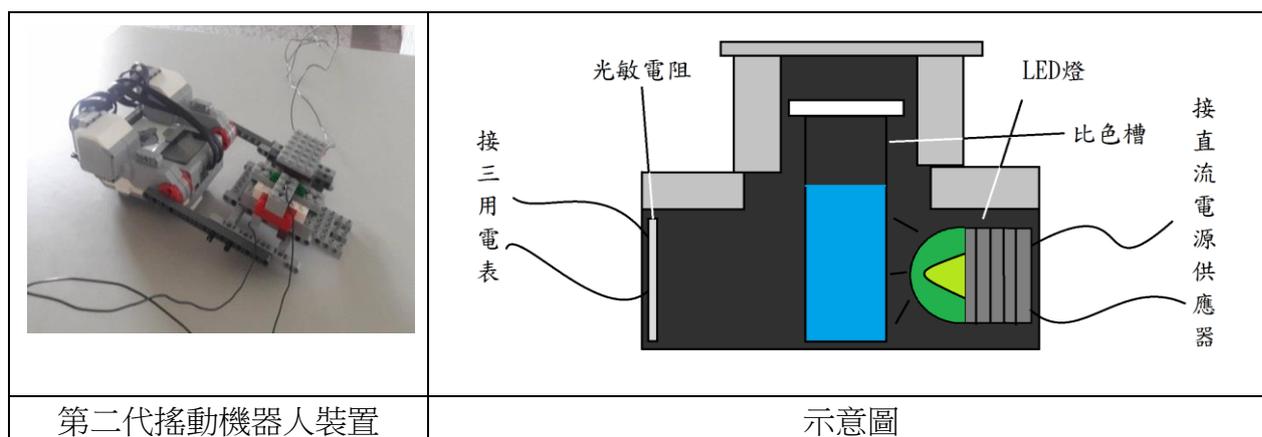
- (1)配置 0.00125、0.0025、0.0050、0.0075、0.0100、0.0125% 的靛胭脂溶液，以 SP20 波長 611nm 測量並記錄其吸收值 A，再以自製光度計接紅光記錄其電阻值。
- (2)將兩者數據，以吸收值或電阻值為縱軸，靛胭脂濃度為橫軸做出檢量線。

(二)第一代自製搖動機器人裝置：設定每次搖動 30 下。



為了固定震盪的頻率，我們曾嘗試以磁石攪拌反應，但因此方法無法溶入足夠氧氣，故我們仍以上下搖動反應為主。大多數科展報告都是以手搖來振盪反應，但因為手搖誤差大，故我們以樂高拼裝出搖盪機器人來搖晃比色槽，並輸入程式控制電力以及搖晃次數為 30 次，使之變色。搖晃完後再取出放入自製光度計，觀察並記錄數據。

(三)第二代自製光度計結合搖動機器人裝置：設定每次搖動 30 下。



因為部分反應醌胭脂變色過快，在機器人搖晃後欲移到自製光度計測量的過程中就變色了，為了解決此問題，第二代機器人結合光源以及光敏電阻於機器人上，可以邊搖邊測量，減少移取樣品中間的時間誤差。

## 二、實驗二：尋找適合自製裝置測量紅綠燈反應的光源

(一)溶液配置：配置 5%葡萄糖溶液及 0.5M 氫氧化鈉溶液進行實驗。

(二)尋找測量紅綠燈反應最佳光源

1.取 2ml 5%葡萄糖及 0.5M 氫氧化鈉的混合液置入比色槽中

2.加入 0.2ml 濃度為 0.2%的靛胭脂溶液

3.以振盪機器人搖晃比色槽後，以藍光 LED 燈照射樣品，以三用電表測量光敏電阻之電阻值，並將數據作圖。

4.其中步驟 3 的光源分別換為綠光、黃光、紅光以及白光，重複 1~3 步驟。

### 三、實驗三：葡萄糖與氫氧化鈉混合溶液靜置時間對紅綠燈反應快慢的影響

#### (一)名詞解釋：

1.循環次數：是指同一溶液由綠轉為黃色之後再搖盪回綠色，靜置之後又回到黃色，稱為第二次循環，以此類推。

2.重複實驗：是指反應之後再取同樣條件的新溶液重複再做一次。

#### (二)實驗步驟

1. 取等比例混合 0.5M 氫氧化鈉溶液與 5%葡萄糖的溶液靜置 5 分鐘。
2. 將步驟 1 溶液取 2ml，以及 0.2%的靛胭脂 0.2ml 加入比色槽中。
3. 將比色槽放入二代機器人中搖盪 30 下，並以電腦連續紀錄三用電表測量的數值。
4. 數值趨緩後再重新步驟 3，共循環 5 次。
5. 重複實驗步驟 1~4 兩次，再將三次的反應時間取平均值並計算標準差。
6. 依序將步驟 1 的靜置時間調整為 10、15、20 分鐘，並各重複步驟 1~5。

### 四、實驗四：氫氧化鈉及葡萄糖濃度對反應時間的影響

#### (一)氫氧化鈉濃度對紅綠燈反應時間的影響

1. 取等比例混合 0.25M 氫氧化鈉溶液與 5%葡萄糖的溶液靜置 10 分鐘。
2. 將步驟 1 溶液取 2ml，以及 0.2%的靛胭脂 0.2ml 加入比色槽中。
3. 將比色槽放入二代機器人中搖盪 30 下，並以電腦連續紀錄三用電表測量的數值。
4. 重複步驟 1~3 兩次，再將三次的反應時間數據取平均值並計算標準差。
5. 將步驟 1 的氫氧化鈉溶液濃度調整為 0.5M、0.75M、1.00M，並重複步驟 1~4。

#### (二)葡萄糖濃度對紅綠燈反應時間的影響

1. 步驟同(一)，固定氫氧化鈉溶液濃度為 0.5M，改變葡萄糖濃度為 1、2、3、4 以及 5 %，觀察其反應時間。

五、實驗五：以自製光度計，探討葡萄糖、半乳糖、果糖對紅綠燈反應的影響。

(一)配置 1%的葡萄糖、半乳糖及果糖水溶液。

(二)取等比例 0.25M 氫氧化鈉溶液與 1%葡萄糖的溶液混合並靜置 10 分鐘。

(三)取步驟(二)溶液 2ml，以及 0.2%的靛胭脂 0.2ml 加入比色槽中。

(四)將比色槽放入二代機器人中搖盪 30 下，並以三用電表測量數值，電腦連續紀錄數據。

(五)數值趨緩後再重新步驟(四)，共循環 5 次。

(六)重複實驗共兩次，再將三次的反應時間數據取平均值並計算標準差。

(七)將步驟(一)的葡萄糖變更為半乳糖、果糖，並重複實驗。

六、實驗六：觀察不同鹼性濃度及靛胭脂量對紅綠燈反應顏色的影響。

(一)溶液鹼性濃度的影響

取三支試管皆加入 1.5ml 的 5%葡萄糖溶液，再依序同時加入 0.05M、0.25M 以及 1.25M 的氫氧化鈉 1.5ml，靜置後再加入 0.04ml 的 0.2%靛胭脂，搖盪後錄影觀察顏色變化。

(二)靛胭脂量的影響

靛胭脂的量更改為 0.1ml 及 0.2ml，重複步驟(一)。

七、實驗七：以自製光度計尋找綠化紅綠燈反應的最佳條件

本實驗想找出對環境傷害較少、用量節省且易取得的藥品，替代對生態有害的高鹼性氫氧化鈉作為綠化實驗的目標。但文獻多以綠化常見的氧化還原反應－藍瓶反應為主，藍瓶反應是以亞甲基藍作為氧化還原指示劑，其氧化態是藍色，還原態是無色，變色原理與本實驗相似，對靛胭脂的氧化還原有其幫助，值得參考，故本實驗先以亞甲基藍找出合適的還原劑用量，再以最佳條件綠化靛胭脂。

## (一)藍瓶反應

### 1. 參考文獻八配置 ABCD 四種溶液如表 5-1

表 5-1 綠化溶液配置成分表

溶液	混合物量				
	維他命 C	小蘇打	NaCl	CuSO <sub>4</sub>	蒸餾水
A	1.2g	40mg	—	—	150ml
B	1.2g	40mg	0.25g	—	150ml
C	1.2g	40mg	—	10mg	150ml
D	1.2g	40mg	0.25g	10mg	150ml

- (1) 個別取 ABCD 四種溶液於不同比色槽中，再分別加入 0.2%亞甲基藍液 0.2ml，觀察並記錄 ABCD 四種溶液變色時間及情形。
- (2) 取可重複循環變色的 C 溶液 3ml，逐次添加 10mg 小蘇打至有良好變色效果。
- (3) 承(2)，以良好變色效果之小蘇打添加量，重新配置 D 溶液進行實驗。

## (二) 靛胭脂反應

- (1) 承(一)藍瓶反應的結果，以 C 溶液改添加靛胭脂進行實驗。
- (2) 取 C 溶液 3ml，加入 0.2%的靛胭脂 0.2ml，觀察並記錄溶液變色時間及情形。
- (3) 添加不同量 1M 氫氧化鈉於 C100\*<sup>1</sup> 溶液中，觀察 0.2%靛胭脂 0.1ml 的還原情形。

\*<sup>1</sup>: C100 溶液是指每 3ml C 溶液中含小蘇打量為 100 mg

## 陸、實驗結果與討論

### 一、實驗一：以分光光度計 SP20 與自製光度計比較其應用性

#### (一)實驗結果

表 6-1. 靛胭脂檢量線實驗數據

靛胭脂濃度 (%)	0.00125	0.0025	0.005	0.0075	0.01	0.0125
sp20 量測結果 吸收值(A)	0.343	0.693	1.336	1.849	2.423	OL* <sup>2</sup>
自製光度計 量測結果 (kΩ)	0.73	1.14	1.97	2.90	4.03	5.13

\*<sup>2</sup>:OL 是指 overload，超出讀取範圍而無法測得數值

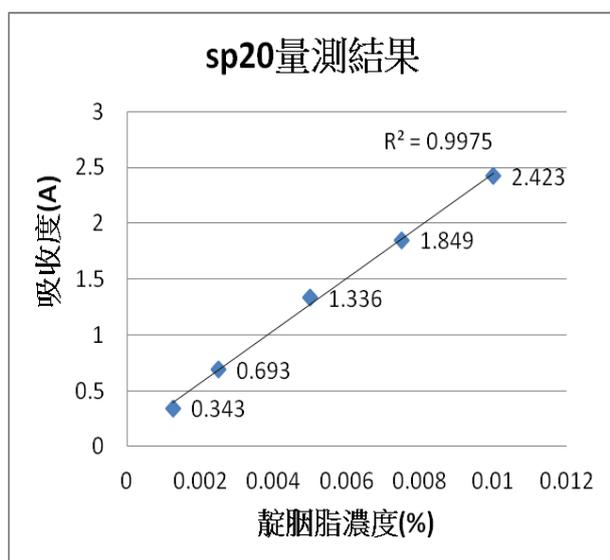


圖 6-1.SP20 靛胭脂檢量線

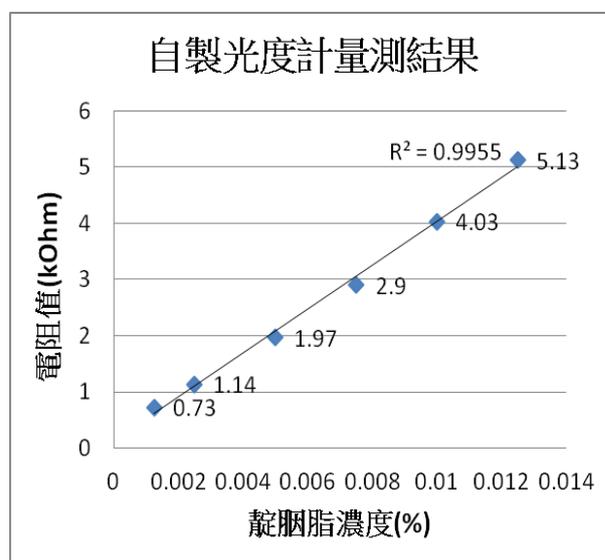


圖 6-2.自製光度計靛胭脂檢量線

#### (二)討論

因 SP20 與自製光度計測量出來的單位不同，故無法疊圖比較，但可以由趨勢及  $R^2$  值看出自製光度計是可精準做出靛胭脂檢量線，且以 SP20 測量靛胭脂 0.0125% 會超出讀取範圍而無法測得數值，但自製光度計卻仍可測量並且符合趨勢。根據本實驗結果，靛胭脂的濃度是與電阻值成正比，故用來測量靛胭脂濃度以及實驗的顏色深淺是相當可行的方法。

## 二、實驗二：尋找適合自製裝置測量紅綠燈反應的光源

### (一)實驗結果

反應條件：5%葡萄糖 1ml，0.5M 氫氧化鈉 1ml，0.2%靛胭脂 0.2ml

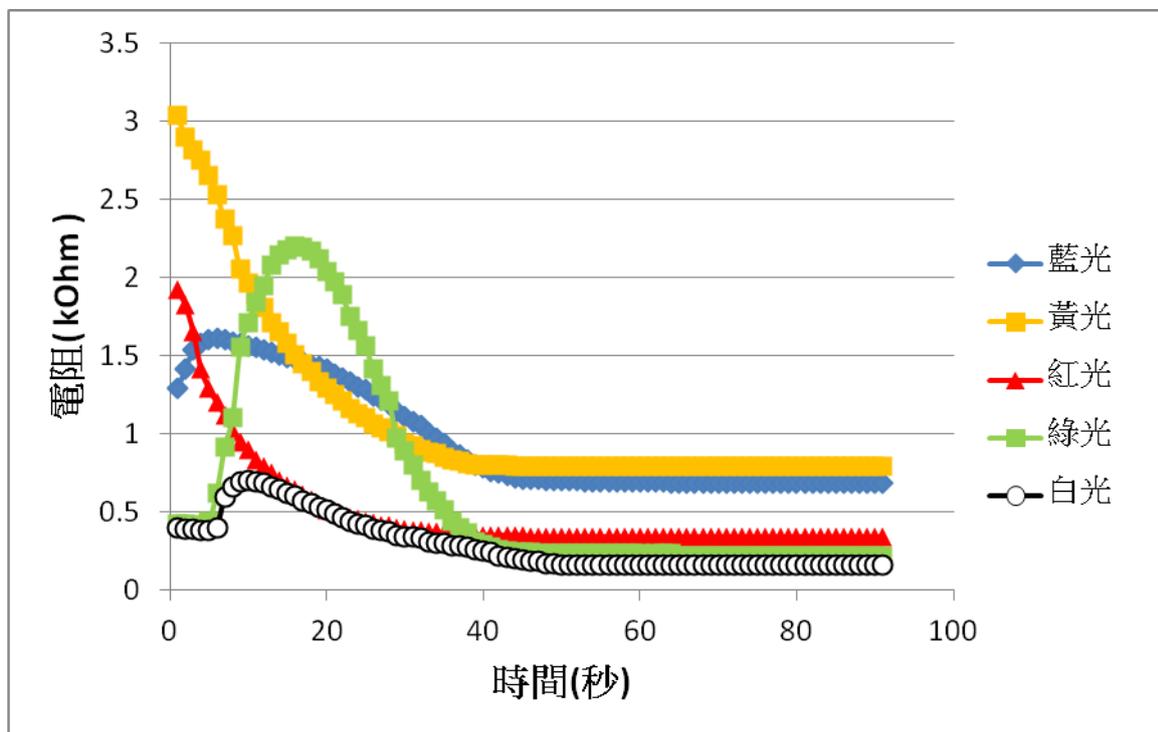


圖 6-3.各色光源在 0.5M 氫氧化鈉及 5%葡萄糖紅綠燈反應反應時間與的電阻值關係圖

### (二)討論

1. 我們針對各色 LED 燈作光譜分析，除白光為混色光之外，其他光源較為單純，對應之波長如下圖 6-4，我們將圖整理為表 6-3。

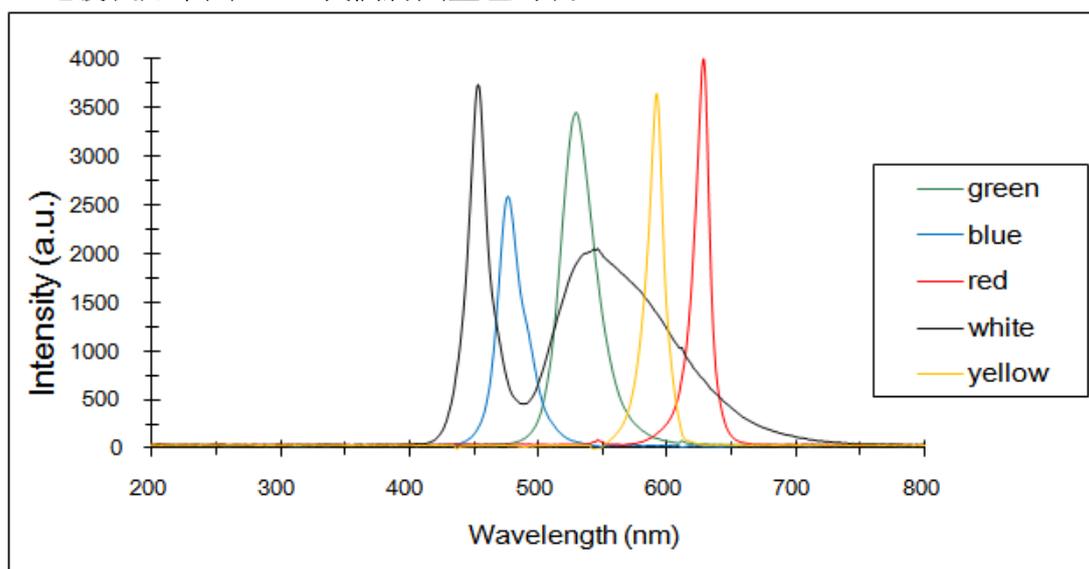


圖 6-4. 各色光源的波長與強度關係圖

表 6-2.各色 LED 對應波長

光源	藍光	黃光	紅光	綠光	白光
波長(nm)	476	591	628	529	453, 546

2.本實驗的靛胭脂顏色轉變如下圖

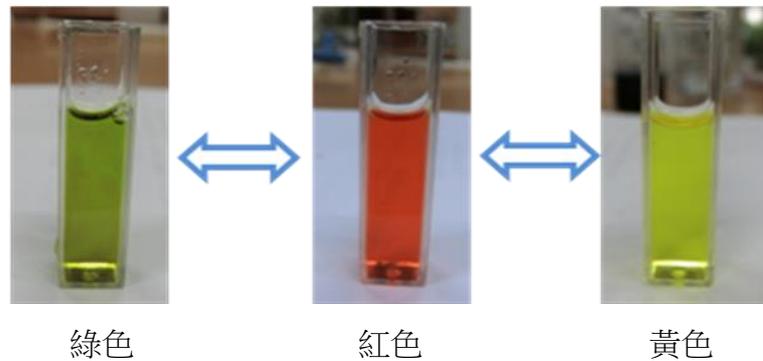


圖 6-5.紅綠燈反應的顏色變化

3.我們可以根據圖 6-3 各色光源電阻值趨勢分成兩部分：

(1)電阻值沒有起伏直接下降：紅光及黃光

各色光源出廠時亮度不一，如黃色 LED 電阻值高於紅色是因黃光 LED 的亮度較紅光弱，故以下我們僅討論單一光源的電阻值趨勢，不探討亮度的影響。溶液一開始為綠色，根據光的三原色原理，紅光無法通過透明綠色溶液，光敏電阻無法接收到光，故電阻值為最高。接著溶液顏色轉紅色，通過的紅光變多，照射在光敏電阻的光愈強電阻值便下降。依圖 6-4 可知黃光橫跨紅光及綠光波長，故溶液反應的綠色和紅色都可以透過部分黃光，且電阻值漸漸下降。

(2)電阻值上升後下降：藍光、綠光及白光

白光的電阻值最低，這是因為白光為所有光源裡亮度最強，但因為光亮度太強，導致電阻值差距小不易觀察。藍光及綠光都先上升後下降可出現最高峰，此高峰即是溶液顏色最深，也就是反應由綠色轉變為紅色，而綠光可通過綠色溶液，故一開始電阻值低，等到溶液轉紅色，光無法通過，電阻值大幅上升，待溶液轉為黃色時電阻大幅下降，故我們以綠光作為光源，可量測到明顯的電阻值變化及較易判讀變色時間及效果。

### 三、實驗三：葡萄糖與氫氧化鈉混合溶液靜置時間對紅綠燈反應快慢的影響

#### (一) 實驗結果

反應條件：5%葡萄糖 1ml，0.5M 氫氧化鈉 1ml，0.2%靛胭脂 0.2ml

表 6-3. 葡萄糖與氫氧化鈉混合溶液不同靜置時間的紅綠燈反應顏色轉變所需秒數

靜置時間	實驗次數	循環變色次數綠轉紅時間(秒)					循環變色次數綠轉黃時間(秒)				
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
5分	1	37	11	14	10	10	96	67	68	57	56
	2	25	11	12	10	14	76	61	59	47	48
	3	15	11	9	10	14	68	47	40	34	51
	平均	26	11	12	10	13	80	58	56	46	52
	標準差	11	0	3	0	2	14	10	14	12	4
10分	1	19	8	9	9	10	90	63	56	54	53
	2	18	16	14	11	9	86	66	54	45	43
	3	14	10	10	9	8	60	50	47	38	32
	平均	17	11	11	10	9	79	60	52	46	43
	標準差	3	4	3	1	1	16	9	5	8	11
15分	1	19	13	10	9	6	74	70	61	56	53
	2	23	9	10	12	10	92	64	55	53	45
	3	14	9	10	10	10	58	48	46	44	30
	平均	19	10	10	10	9	75	61	54	51	43
	標準差	5	2	0	2	2	17	11	8	6	12
20分	1	23	10	9	8	7	93	62	63	59	53
	2	16	12	10	9	7	64	55	48	36	38
	3	13	10	9	8	6	78	47	41	35	34
	平均	17	11	9	8	7	78	55	51	43	42
	標準差	5	1	1	1	1	15	8	11	14	10

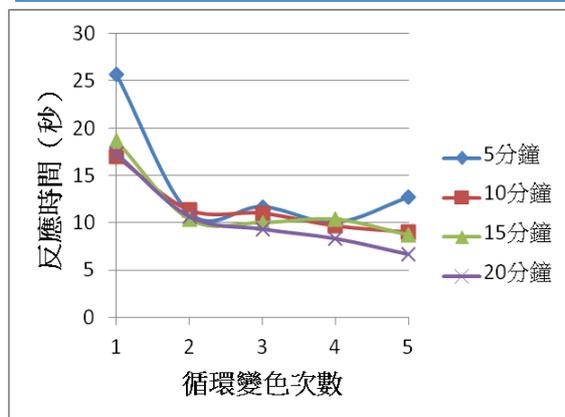


圖 6-6. 綠轉紅循環次數與反應時間關係圖

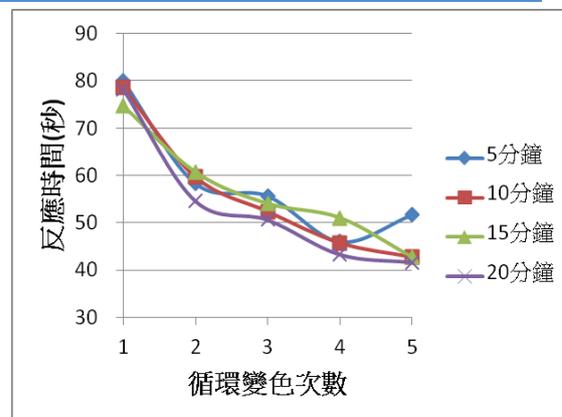


圖 6-7. 綠轉黃循環次數與反應時間關係圖

## (二) 討論

1. 綠轉紅比起綠轉黃的反應時間標準差要小很多，大多數都在 10 以內，這是因為綠色為搖盪後的低點（圖 6-8 綠色圓圈），而轉成紅色為圖中的最高點（紅色圓圈），都是可以相當簡易且明確的判讀，再現性良好；但紅轉黃的曲線較為平緩，難以判斷，故差異較大。故我們接下來都討論綠轉紅的反應時間。

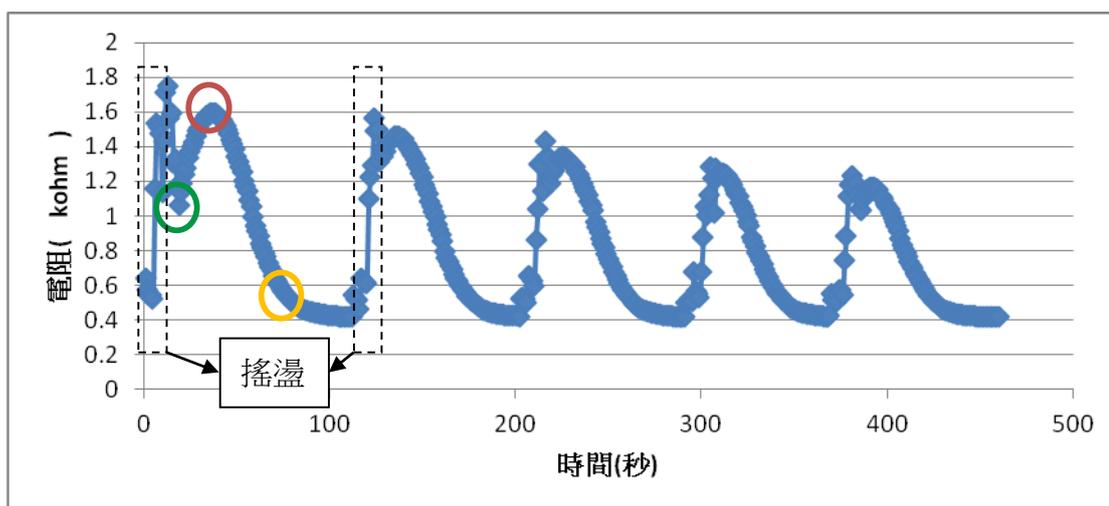


圖 6-8. 0.5%葡萄糖與 0.5M 氫氧化鈉混合液靜置 10 分鐘並循環 5 次的反應時間關係圖

2. 每次循環時的最大電阻值（即綠轉紅）有下降的趨勢，一般常見的化學反應系統大都直接往平衡的狀態進行，而後即形成動平衡的狀態，不再有巨觀上的變化；我們搖盪靛胭脂改變平衡使之有顏色變化，但反應再多次最後還是會趨向平衡，也就是無法再變色。
3. 第一次反應時間明顯高於其他次，我們推測是因為葡萄糖與氫氧化鈉必須先作用成葡萄糖酸，才能進行反應。第一次反應時只有反應物，尚未產生生成物故達平衡時所需時間較長。
4. 由圖 6-6 可以看出除了靜置 5 分鐘所需反應時間較長之外，綠色轉紅色不論是在 10、15 以及 20 分鐘靜置數據皆很相近，故最佳靜置時間取 10 分鐘。

#### 四、實驗四：氫氧化鈉及葡萄糖濃度對反應時間的影響

##### (一) 氫氧化鈉濃度對紅綠燈反應快慢的影響

表 6-4. 氫氧化鈉與 5% 葡萄糖溶液紅綠燈反應綠轉紅反應時間

反應時間(秒)	氫氧化鈉濃度(M)			
	0.25	0.5	0.75	1
第 1 次	41	19	9	10
第 2 次	30	18	10	11
第 3 次	32	14	10	9
平均	34	17	10	10
標準差	6	3	1	1

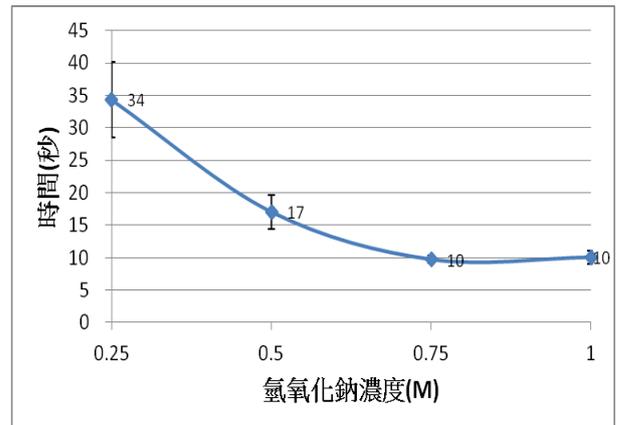


圖 6-9. 氫氧化鈉與 5% 葡萄糖溶液紅綠燈反應綠轉紅反應時間關係圖

##### (二) 葡萄糖濃度對紅綠燈反應快慢的影響

表 6-5. 葡萄糖與 0.5M 氫氧化鈉溶液紅綠燈反應綠轉紅反應時間

反應時間(秒)	葡萄糖濃度(%)				
	1	2	3	4	5
第 1 次	76	28	18	20	19
第 2 次	85	32	35	20	18
第 3 次	72	37	31	20	14
平均	78	32	28	20	17
標準差	7	5	9	0	3

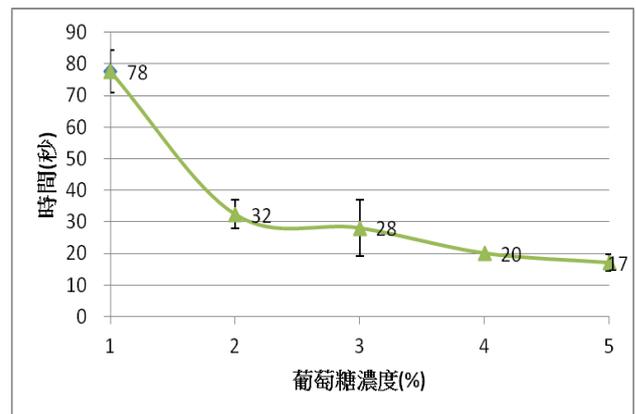


圖 6-10. 葡萄糖與 0.5M 氫氧化鈉溶液紅綠燈反應綠轉紅反應時間關係圖

##### (三) 討論

1. 濃度較低的反應，在搖晃後會有一段時間維持綠色，而 5% 的反應因反應較快，搖晃後幾乎立即變色，故沒有較 1~4% 明顯的綠色平穩期。
2. 氫氧化鈉濃度與葡萄糖濃度越大對紅綠燈反應速率越快，這是因為濃度越大，單位體積的分子越多，碰撞機會就大，形成反應的機率增加，故縮短反應時間。

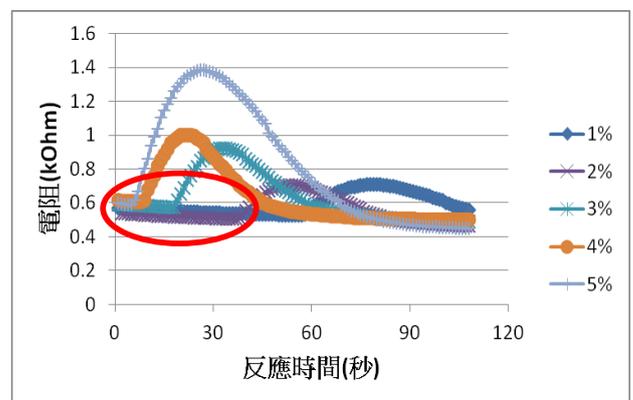


圖 6-11. 葡萄糖與 0.5M 氫氧化鈉循環第 1 次反應時間快慢

## 五、實驗五：以自製光度計探討葡萄糖、半乳糖、果糖對紅綠燈反應的影響

### (一)實驗結果

表 6-6. 1%醣類與 0.25M 氫氧化鈉溶液的紅綠燈綠轉紅反應時間

反應時間 (秒)		循環次數				
		第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次
葡萄糖	第 1 組	185	55	49	55	-* <sup>3</sup>
	第 2 組	194	69	45	63	-
	第 3 組	211	51	53	69	-
	平均	<b>197</b>	<b>58</b>	<b>49</b>	<b>62</b>	-
	標準差	<b>13</b>	<b>9</b>	<b>4</b>	<b>7</b>	-
半乳糖	第 1 組	89	29	27	29	30
	第 2 組	97	31	31	33	44
	第 3 組	101	36	35	20	28
	平均	<b>96</b>	<b>32</b>	<b>31</b>	<b>27</b>	<b>34</b>
	標準差	<b>6</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>7</b>	<b>9</b>
果糖	第 1 組	69	19	24	28	23
	第 2 組	79	15	19	21	20
	第 3 組	70	18	22	24	25
	平均	<b>73</b>	<b>17</b>	<b>22</b>	<b>24</b>	<b>23</b>
	標準差	<b>6</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>3</b>

\*<sup>3</sup>:為溶液顏色太淺，曲線過於平緩，導致無法判斷最高點

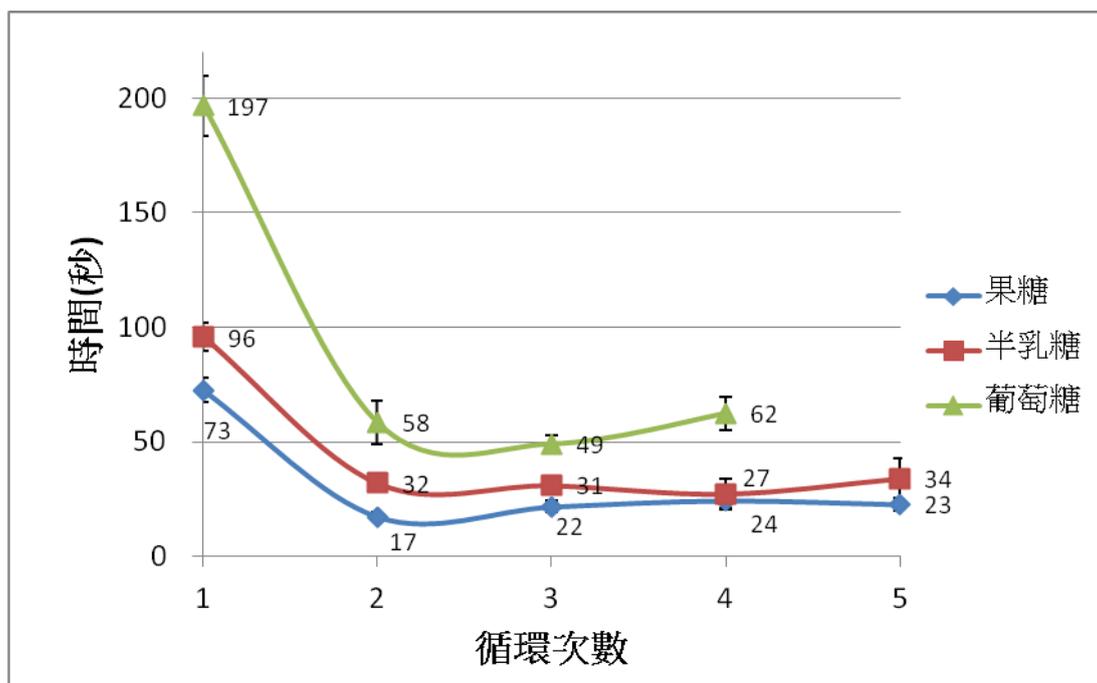


圖 6-12. 1%醣類與 0.25M 氫氧化鈉溶液的紅綠燈反應綠轉紅反應時間關係圖

## (二)討論

1.本實驗一開始以 5%醣類與 0.5M 氫氧化鈉實驗，但因為果糖反應過快，數據如圖 6-13，無法看出紅綠燈反應時綠轉紅時的最高點，這可能是因為靛胭脂在最後一次搖盪停止的過程就已經由綠色轉紅色，或是使用我們的自製機器人搖動 30 下仍無法將其氧化至綠色氧化態。我們認為是果糖的還原性太強，於是我們降低果糖濃度為 1%，氫氧化鈉濃度為 0.25M 重複實驗，發現可使用機器人搖盪至變為綠色，並且明顯觀察出綠轉紅的時間點，故以此來討論不同醣類的還原靛胭脂的快慢。

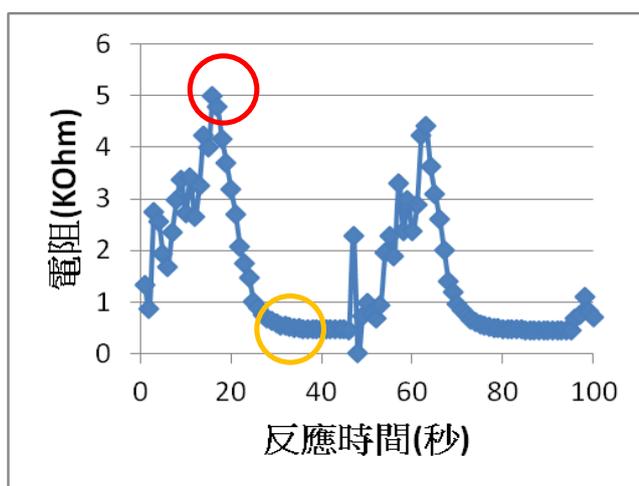


圖 6-13. 5%果糖與0.5M氫氧化鈉紅綠燈反應時間與電阻值關係圖，無法判斷出綠色位置

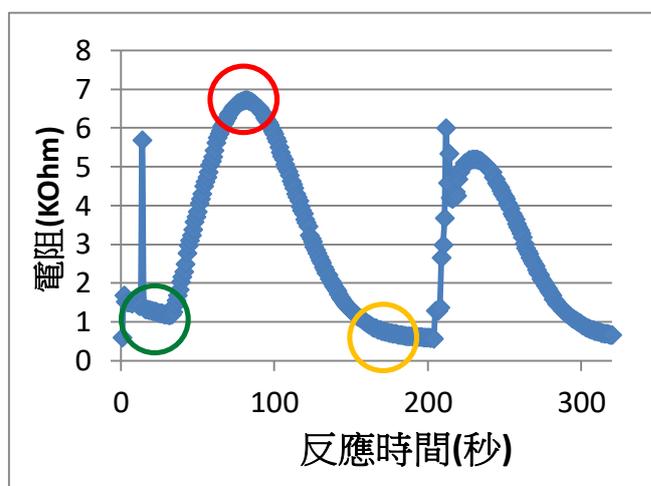


圖 6-14. 1%果糖與 0.25M 氫氧化鈉紅綠燈反應時間與電阻值關係圖

- 2.由圖 6-12，可以知道果糖為還原劑時反應是三者中最快的。
- 3.果糖反應速率較快的原因可能是在結構，單醣是帶有兩個以上的羥基的醛或酮，它們的化學式為 $(CH_2O)_n$ ，當碳數為 6 時稱六碳糖，最普通的六碳糖為葡萄糖、半乳糖、果糖，葡萄糖和半乳糖為醛醣類，果糖為酮醣類。醣類中可以與斐林試液或多倫試液反應的醣稱為還原醣，葡萄糖、半乳糖、果糖都具有還原性。所有的單醣皆含有醛或羧基，而且在稀鹼性溶液中（即斐林試液或多倫試液的條件），醛醣與酮醣是以烯二醇做中間物達成平衡。以果糖為例在稀鹼性溶液中，會同分異構成葡萄糖(醛糖)及甘露糖(醛糖)。既然酮醣在稀鹼性溶液中有部分會變成醛糖，而醛糖和酮糖可以被氧化成羧酸。

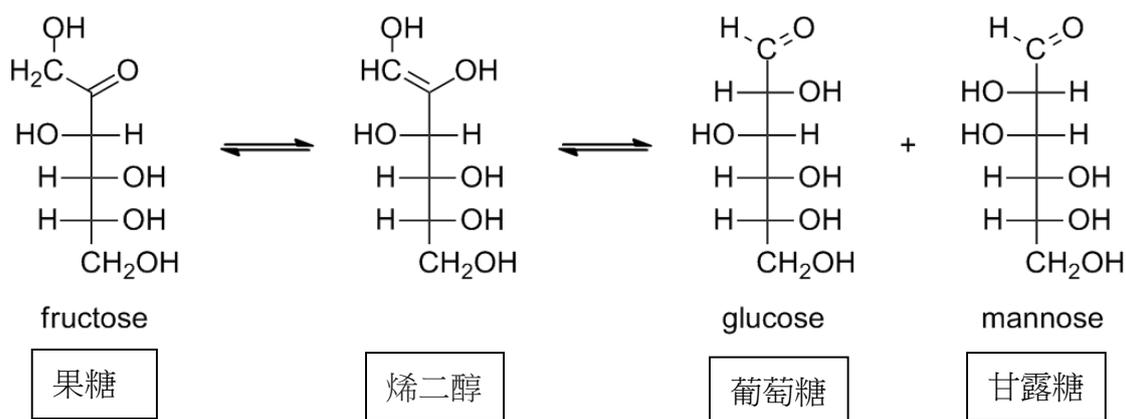


圖 6-15. 果糖轉換圖

單糖在實驗中的反應速率均取決於它們的烯醇化速率，而果糖的烯醇化速率相較於葡萄糖十倍，這正是果糖在還原性試驗中比葡萄糖更為活潑的原因。且葡萄糖進行烯醇化反應的活化熵 $\Delta S$ 、活化自由能 $\Delta G$ 、活化焓 $\Delta H$ 及活化能 $E$ 數值均高於果糖，故反應會比果糖慢。

表 6-7. 葡萄糖與果糖活化函數值(kcal/mol)

	$\Delta H$	$\Delta S$	$\Delta G$	$E$
葡萄糖	26.5	15	22	29.2
果糖	22.5	3	21.5	26.8

六、實驗六：觀察不同鹼性濃度及靛胭脂量對紅綠燈反應顏色的影響。

(一)變色觀察

下列每張照片中三支試管由左至右依序為 1.5ml 的 0.05M、0.25M、1.25M 氫氧化鈉溶液加 1.5ml 的 5%葡萄糖，再加入 0.2%靛胭脂之變色情形。

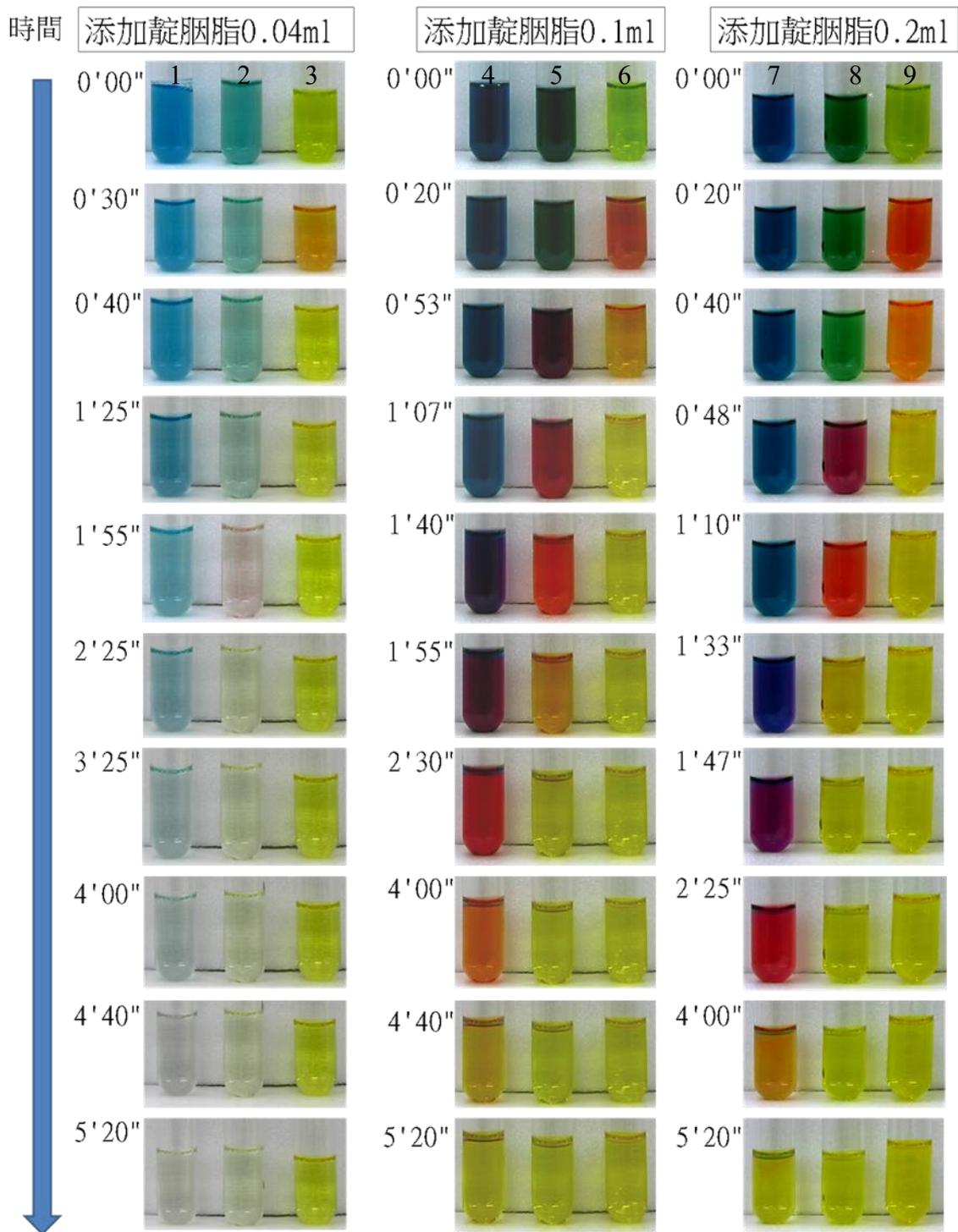


圖 6-16.靛胭脂量與不同氫氧化鈉濃度下之顏色變化

(二)討論：

1. 氫氧化鈉 0.05M 褪色時間較其他濃度溶液長，但顏色較豐富。能有多層次顏色變化是因為靛胭脂本身兼具酸鹼指示劑與氧化還原指示劑，在不同鹼性濃度下會有不同的顏色，根據文獻七我們可以知道這些美麗的顏色變化與溶液的 pH 值有關。

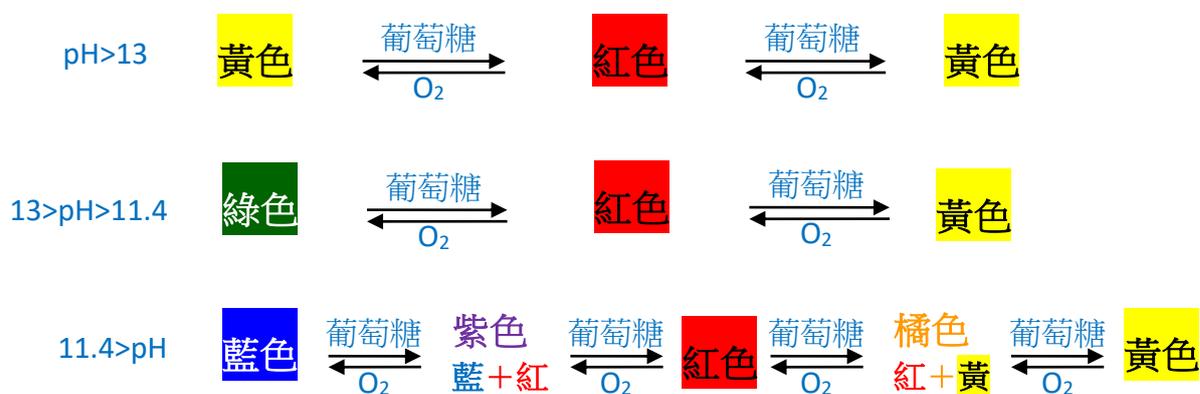


圖 6-17.靛胭脂在不同 pH 值之顏色變化

- 而靛胭脂在不同 pH 值下，一開始呈現顏色不同，進行氧化還原反應後也會有不同的變色情形。當 pH 值大於 13 時，靛胭脂在強鹼下為黃色，再經還原變為紅色，最後為黃色；當 pH 值介於 13 和 11.4 之間時，靛胭脂在中鹼性下為綠色，氧化還原後變為紅色，最後還原態為黃色；在 pH 值小於 11.4 時，靛胭脂在低鹼性下為藍色，接著變為紫色，再變成紅色然後轉為橘色，最後又變成黃色，可有如此多變的顏色是因為反應速率較慢，可以清楚觀察到中間顏色的轉變。
2. 我們好奇為什麼靛胭脂的結構改變就會影響其顏色，原來化學分子的顏色來自於發色團，當分子吸收某特定可見光的波長，可見光的能量傳遞給發色團，其電子會因為吸收能量從基態躍遷至激發態，而發色團是指在分子中的某個兩個分子軌域的能量差落在可見光譜的範圍上的區域。發色團中的許多不同結構是造成發色團吸收光譜特定範圍波長的因素。增長或是增加越多不飽和鍵於共軛系統中會趨向吸收較長波長的光。
  3. 同樣添加 0.04ml 的靛胭脂，最後還原的靛胭脂黃色深淺卻不一，這說明鹼性不夠強，無法有足量葡萄糖酸，導致有部分的靛胭脂無法完全被還原。

## 七、實驗七：以自製光度計尋找綠化紅綠燈反應的最佳條件

我們找到綠化藍瓶的文獻，為了減量使用強鹼氫氧化鈉，文獻使用較環保的維生素 C 當作還原劑，鹼性物質改為對人體及環境較無傷害的弱鹼性小蘇打，並配置下列溶液做為比較，我們也針對硫酸銅及氯化鈉的添加做探討。

### (一)綠化藍瓶反應 part1

表 6-8.綠化溶液配置質量(依照文獻八配置)

溶液	反應物量				
	維他命 C	小蘇打	NaCl	CuSO <sub>4</sub>	蒸餾水
<b>A</b>	1.2g	40mg	—	—	150ml
<b>B</b>	1.2g	40mg	0.25g	—	150ml
<b>C</b>	1.2g	40mg	—	10mg	150ml
<b>D</b>	1.2g	40mg	0.25g	10mg	150ml

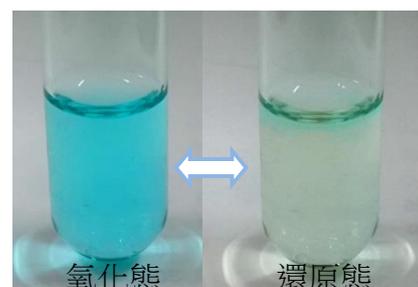


圖 6-18.綠化藍瓶反應

#### 分析與討論:

- 1.未加銅離子的 A、B 溶液，在第二次反應顏色就變淺且無法再重複變色，導致無法以自製光度計測量。
- 2.加入硫酸銅之 C、D 溶液則可以多次褪色。

### (二)綠化藍瓶反應 part2

每次取可重複循環變色的 C 溶液 3ml，逐次添加 10mg 小蘇打至有良好變色效果。當每 3ml C 溶液中小蘇打含量為 X mg，即定義此溶液為 CX，例: 3ml C 溶液中含小蘇打量為 70 mg，即定義此溶液為 C70，以此類推...

表 6-9.綠化藍瓶反應，溶液 C、D 的反應時間(單位:秒)

循環次數 溶液種類	1	2	3	4	5
<b>C70</b>	221	121	61	58	48
<b>C80</b>	262	71	55	53	53
<b>C90</b>	11	8	11	9	9
<b>C100</b>	40	26	18	52	34
<b>D90</b>	122	124	46	109	45

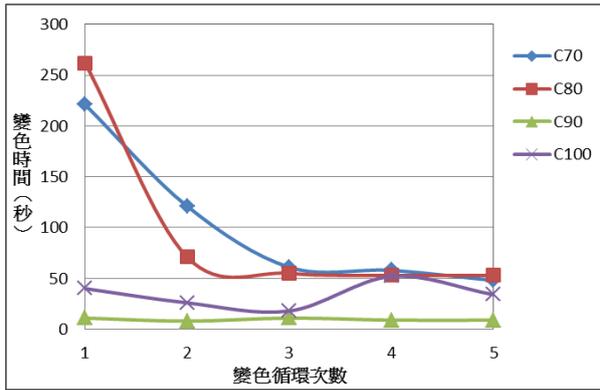


圖 6-19.綠化藍瓶反應，不同小蘇打含量之 C 溶液的反應時間關係圖。

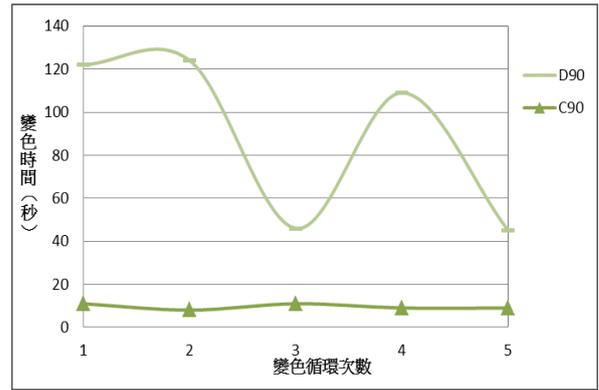


圖 6-20.綠化藍瓶反應，相同小蘇打含量之 C、D 溶液的反應時間關係圖。

### 分析與討論:

- 由圖 6-19 可看出，當每 3ml C 溶液中小蘇打含量愈多，反應愈快，其中以 C90 的變色最快，可見鹼性強弱會影響反應速率。
- 由圖 6-20 比較相同小蘇打含量之 C、D 溶液，則以未加 NaCl 的 C90 反應較快。

### (三)綠化靛胭脂

#### 1.以 C、D 溶液綠化靛胭脂

- (1)以 3mlC90 綠化 0.2%靛胭脂 0.2ml，其顏色變化如圖 6-21 所示，但因為綠化實驗是使用弱鹼的小蘇打，而不是強鹼的氫氧化鈉，故一開始顏色為藍色漸變成黃綠色。

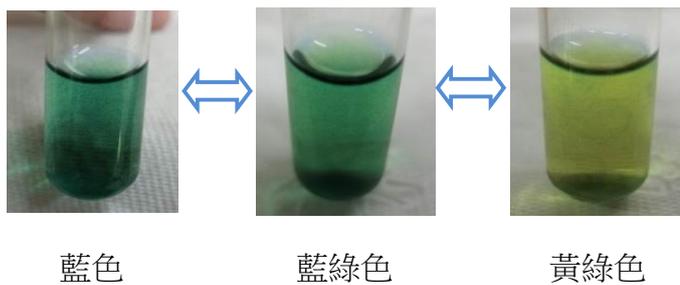


圖 6-21. 靛胭脂以維生素 C 及小蘇打綠化的顏色變化

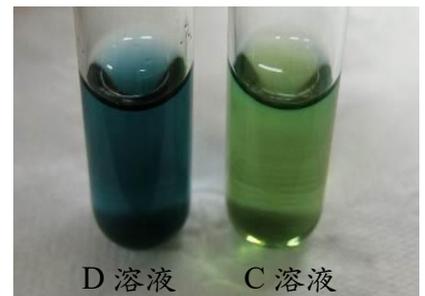


圖 6-22. C、D 溶液在同時間變色狀況，C 明顯褪色較快。

- (2)根據實驗三靜置實驗以葡萄糖作為還原劑的紅綠燈實驗中，靛胭脂的顏色循環多次後顏色會一直變淡，但在綠化實驗靛胭脂的顏色轉淡速率緩慢，需一小時以上才會褪色，且可以持續變色至五天。
- (3)同時搖動添加靛胭脂的 C、D 溶液後靜置情形如圖 6-22，觀察顏色變化，明顯看

出 C 溶液變色較快，可見未添加 NaCl 有利於增快反應速率。

(4)在綠化靛胭脂的實驗中，以 C90 溶液進行實驗，溶液顏色由藍色漸變成黃綠色每次約需 20~30 分鐘，即使逐次添加小蘇打，顏色仍僅能由藍色漸變成黃綠色。

(5)實驗四中所觀察到的靛胭脂多彩的變色效果，在此綠化實驗中卻顯得單調許多，我們也試著減少靛胭脂的添加量，溶液顏色則由藍綠漸變成橘色。

## 2. C100 溶液加入 NaOH 還原靛胭脂

為了讓單調的靛胭脂綠化實驗呈現更多彩的顏色，我們取 3mlC100 溶液，加入 0.2%靛胭脂 0.1ml，下列每張照片中五支試管由左至右依序為添加 0.5ml、0.6ml、0.7ml、0.8ml 及 0.9ml 的 1M 氫氧化鈉，觀察其顏色變化。

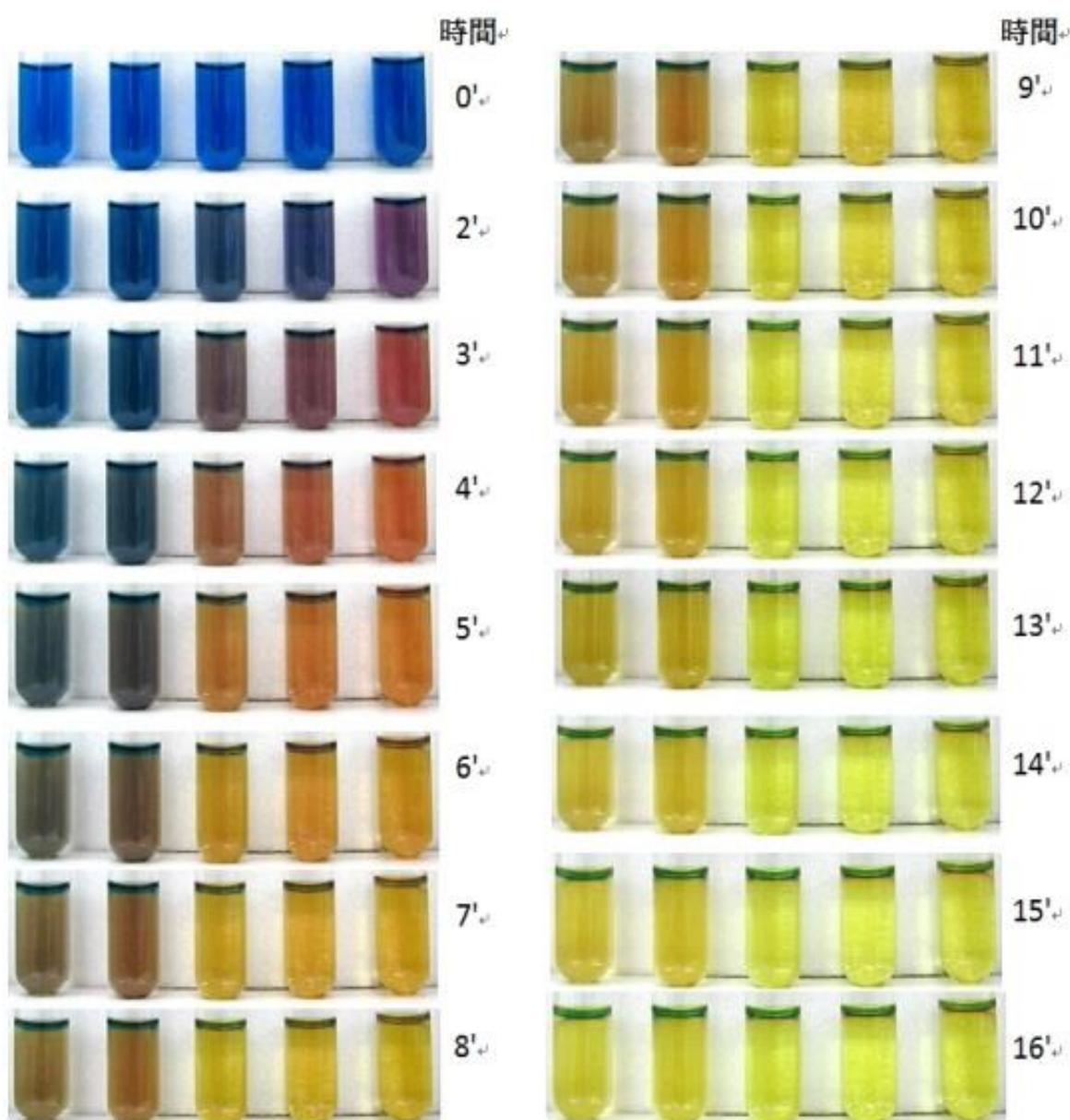


圖 6-23. C100 添加氫氧化鈉還原靛胭脂的顏色變化

### 實驗觀察分析：

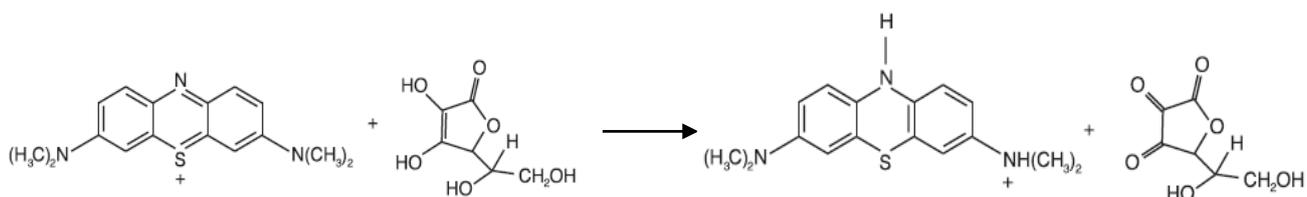
- (1) 起始溶液顏色皆為藍色，正可說明比起傳統以葡萄糖及氫氧化鈉還原靛胭脂的 pH 值較低。
- (2) 當添加 0.7ml 的 1M 氫氧化鈉溶液，成功出現紅色的靛胭脂中間態，有別於維生素 C 還原靛胭脂時僅出現藍綠色及黃綠色。

### (四)討論：

#### 1. 添加物的功用：

##### (1) 添加維生素 C

綠化反應中我們想到最常使用的還原劑就是維生素 C，維生素 C 還原力強，極易被氧化而成去氫型維生素 C，而亞甲基藍被還原之後顏色及從藍色轉無色，維生素 C 濃度越濃，指示劑還原的速度更快，但相對的指示劑也越不容易氧化回氧化態。其反應式如下：



亞甲基藍氧化態(藍色) + 維生素 C  $\longrightarrow$  亞甲基藍還原態(無色) + 去氫型維生素 C

圖 6-24. 維生素 C 氧化還原反應式

##### (2) 添加銅離子

維生素 C 是生活中很常見的抗氧化劑，由實驗得知它可將氧化態亞甲基藍(藍色)還原成還原態(無色)，但難用搖的方式將還原態的亞甲藍氧化回藍色，故根據文獻我們加入銅離子催化氧氣將還原態亞甲基藍氧化成氧化態亞甲基藍，同時銅離子也可以加速催化氧化態亞甲基藍的還原，根據我們的觀察加入銅離子的溶液在還原過後的溶液中會略帶有黃色，氧化態亞甲基藍濃度越濃，藍色就會越深，還原時的黃化也會加深，這是因為銅離子也會加速維生素 C 的氧化。

##### (3) 添加氯離子

氯化鈉的氯離子，會使反應時間加長，所以可以用來調控氧化還原的速度。

2.C90、C100 溶液皆可以快速還原亞甲基藍，可見 pH 值影響其綠化的還原速率。

3.綠化靛胭脂無法顯現出我們所期望的綠紅黃顏色，添加了 1M 氫氧化鈉溶液 0.7ml 後可成功出現紅色，我們取飽和小蘇打溶液與 C100 溶液添加 0.7ml 的 1M 氫氧化鈉測其 pH 值，發現飽和小蘇打水溶液 pH 值僅 8.6，無論添加再多小蘇打，pH 值仍低於添加氫氧化鈉溶液，故要以此維生素 C 加小蘇打而不添加氫氧化鈉方法綠化靛胭脂，無法出現紅色中間態是相當合理的。

表 6-10 . 綠化實驗溶液 pH 值

	飽和小蘇打溶液	3mlC100+ 0.7ml1M 氫氧化鈉
pH 值	8.6	9.6

## 柒、結論

- 一、自製光度計優點為方便可攜，可以控制搖晃幅度及次數，長時間自動記錄而不間斷，方便觀察靛胭脂顏色起伏，最重要的是可以即時測量，減少誤差，與用手搖的方式相較之下有較好的再現性。
- 二、葡萄糖和氫氧化鈉反應速率第一次最慢是因為葡萄糖正與氫氧化鈉進行反應，是因為大量的電子正準備轉移，進行氧化還原反應。根據實驗兩者混合後靜置約 10 分鐘以上，可減小每次重複變色的時間差。
- 三、藉由第二代機器人可以連續紀錄靛胭脂在振盪之後的電阻值變化，來判斷對應每次循環變色的顏色深淺變化，一開始反應的顏色會較深，接著會漸漸變淺，最後無法再由還原態的黃色回到氧化態，趨於平衡而不變色。
- 四、葡萄糖與氫氧化鈉濃度愈大，紅綠燈反應速率也愈快。
- 五、比較還原劑為葡萄糖、半乳糖、果糖的實驗結果，果糖氧化還原速率最快，是由於果糖烯醇化速率較快。
- 六、靛胭脂在不同鹼性濃度下顯現的顏色皆為不同，在鹼性較低環境時還原反應的變色由藍、紫、紅、橘變為黃色，推測是因反應速率慢，故可比其他兩種氫氧化鈉濃度更清楚看到顏色變化。
- 七、綠化實驗中維生素 C 是還原劑，取代葡萄糖；小蘇打是代替氫氧化鈉提供鹼性環境，且日常生活方便取得，對環境傷害較小，可減少化學藥劑使用。其中添加銅離子可催化反應，添加氯離子則增長反應時間。
- 八、綠化藍瓶實驗較葡萄糖與氫氧化鈉溶液傳統方法的每次反應時間較為穩定一致，且可持續變色至五天。
- 九、我們成功綠化藍瓶反應，靜置時間越久，反應速率越快，而且當綠化溶液內的碳酸氫鈉含量達 90mg/3mlC 溶液時，綠化效果最好。
- 十、文獻中較少研究綠化紅綠燈反應，但我們以相似的條件下成功綠化靛胭脂的氧化還原反應，但實驗結果僅能讓靛胭脂由藍色漸變為黃綠色。若要利用維生素 C 還原靛胭脂，必須添加氫氧化鈉控制 pH 值在 9.6 以上才可能成功出現紅色中間態。

## 捌、未來展望

在表演或教學演示等用途上所用靛胭脂的氧化還原反應，大多都為了加快反應時間而添加強鹼，這樣對操作者是一個安全上的疑慮，也有傷害環境的隱憂。希望在未來可以使用綠化過的靛胭脂實驗演示，不只可以減低對環境的傷害，同時兼顧安全性，更可以減少實驗藥品的浪費，而且可重複使用多次，是對環境保護的一點貢獻。雖然以維生素 C 及小蘇打綠化靛胭脂，礙於小蘇打最大濃度的 pH 值無法使其顯現紅色中間態，必須添加氫氧化鈉才能重現其多彩的變色效果，但具還原性的物質有許多，盼未來能用多一點的綠色化學，來保護環境。

## 玖、參考資料

- 一、蔣皓哲等(2013)。振盪藍色小精靈。中華民國第 53 屆中小學科學展覽會，花蓮縣。
- 二、曾國輝(1995)。觀念叢書－化學平衡，台北市：建弘出版社。
- 三、陳韋丞等(2011)。DCPIP 變色比一比，中華民國第 51 屆中小學科學展覽會，宜蘭市。
- 四、簡榮均等(2008)。搖哩!搖勒!變色水。中華民國第 48 屆中小學科學展覽會，宜蘭市。
- 五、李庭君等(2011)。藍瓶真好“醇”—亞甲藍對酵母菌呼吸作用之探討。中華民國第 51 屆中小學科學展覽會，宜蘭縣
- 六、陳柏廷等(2012)。還原醣的彩虹-探討醣與鹼之應用。中華民國第 52 屆中小學科學展覽會。新北市。
- 七、廖旭茂等(2015)。探究「紅綠燈」示範實驗的多彩顏色。國立大甲高級中學，教育部高中化學教育中心。
- 八、Whitney E. Wellman and Mark E. Noble. 2003. **Greening the blue bottle**. Journal of Chemical Education 80(5) : 537-540.

## 【評語】 030204

靛胭脂在鹼性條件下較不穩定，在氧化還原循環中逐漸被破壞，顏色淡化，可以試改用其他較弱的鹼類，看看其穩定性能否獲得改善。改用維他命 C 產生之顏色改變則較不明顯。總的而言，表達清晰有條理值得推薦。