

# 第二十二屆旺宏科學獎

## 作品說明書

科 別：化學科

組 別：高級中等學校組

作品名稱：自製光度計進行肥料含磷濃度探討

關 鍵 詞：磷銻鉬藍化合物濃度、自製光度計、肥料

編 號：SA22-028

## 摘要

本研究由探究實作課程觀察綠豆生長為起點最後發展出自製光敏檢測箱檢驗肥料磷含量。我們發現種植綠豆時若添加 4.5mg/L~6mg/L 肥料可以使綠豆相較對照組根、莖多生長 46%，為了求得肥料中確切磷含量，我們進行三種磷鎘鉬藍化合物檢驗法(實驗三)，而最佳呈色試劑為 50ml 的 2.5 M 硫酸溶液、5ml 的  $2 \times 10^{-4}$  M 酒石酸鎘鉀溶液、15ml 的 0.03 M 鉬酸鉍溶液、30ml 的 0.1 M 維生素丙溶液。是高中實驗室最佳檢驗方法，並且由實驗(二)求出波長 850nm 可得最佳吸收度，同時我們用 0.5、2、5 mg/L 含磷溶液進行 900 分鐘測量，發現磷濃度越高平衡所需時間越長，5 mg/L 是 0.5mg/L 的 35 倍。最後利用指星筆為光源自製簡易、快速之光敏磷偵測儀器，其相關係數高達 0.996 的高度相關。

## 壹、前言

### 一、動機

在探究實作課程的時候，老師叫我們觀察綠豆生長情形並且不同變因對綠豆生長情況的影響，並找出對綠豆的影響變因，而其中一個變因是不同濃度的肥料。而在植物的生長中，磷為不可或缺的營養成分。對此，我們受到啟發，想透過不同濃度之含磷肥料，觀察其對綠豆生長的影響。為了得知肥料中的含磷濃度，在參考完文獻後，我們決定透過呈色反應並以學校中的分光光度計來推測其含磷濃度。而分光光度計是較昂貴且不是隨手可得的，因此我們希望可以製作出能代替分光光度計的器材，在面對未知濃度的肥料時，也能初步地用其推出磷含量，預估此肥料對綠豆之影響。

### 二、目的

- (一) 觀察含磷肥料濃度與綠豆生長的關聯
- (二) 以標準方法測試與建立實驗流程
- (三) 自製光敏檢測箱測量磷濃度
- (四) 分析兩者之間的關聯性

### 三、文獻回顧

#### (一) 磷肥對植物生長的影響

磷是植物生長的必需元素之一，也是構成細胞核酸的重要成分，對細胞分裂、碳水化合物的合成、蛋白質的合成、植物呼吸作用效率都有密切的關係。植物缺乏磷時，葉片明顯變小且呈暗綠色，葉片成熟遲緩，葉柄呈紅色或紫色，葉柄、葉片、果實上會發生斑點，根系數量減少，並呈現褐色。

## (二) 標準檢驗總磷方法--維生素丙比色法

水樣會先以硫酸 (Sulfuric acid,  $H_2SO_4$ ) 和過硫酸銨 (Ammonium persulphate,  $(NH_4)_2S_2O_8$ ) 進行處理，使水中不同的磷酸鹽類 (phosphates,  $PO_4^{3-}$ ) 轉變為正磷酸鹽 (Orthophosphate) 再加入鉬酸銨 (Ammonium molybdate,  $H_8MoN_2O_4$ )、酒石酸銻鉀 (Antimony potassium tartrate,  $C_8H_4K_2O_{12}Sb_2$ )、維生素丙 (Vitamin C,  $C_6H_8O_6$ ) 等使其最後呈現藍色溶液。其中，加入硫酸是為了提供酸性環境，加入酒石酸銻鉀能使其進行呈色反應，維生素丙則為還原劑。溶液中的磷酸根 ( $PO_4^{3-}$ ) 先與鉬酸銨在酸性環境下結合形成磷鉬酸銨 (ammonium phosphomolybdate,  $(NH_4)PO_4 \cdot 12MoO_3$ ) 的複合物，再與酒石酸銻鉀反應並經過維生素丙還原後形成藍色錯合物 (molybdenum-blue complex)。在這還原過程中，部分鉬離子 ( $Mo^{6+}$ ) 會被維生素丙還原，使鉬離子的價數會由無色正六價 ( $Mo^{6+}$ ) 轉變為藍色正五價 ( $Mo^{5+}$ )，而溶液之顏色會依照磷酸鹽的濃度呈現深淺變化。最後以分光光度計於波長 826 nm 處測其吸光度，建立檢量線後，再依據檢量線推導出未知磷濃度，如肥料之含磷濃度。

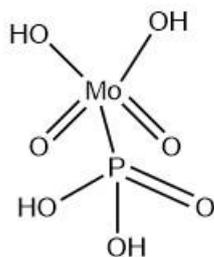
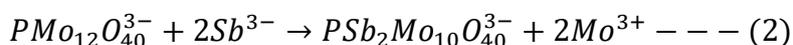
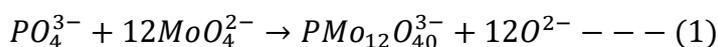


圖 (1)：磷鉬酸結構

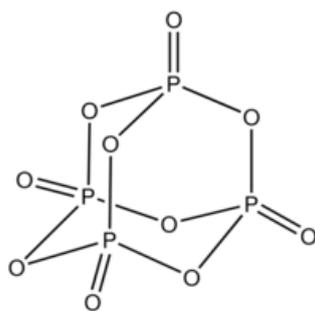


圖 (2)：五氧化二磷結構

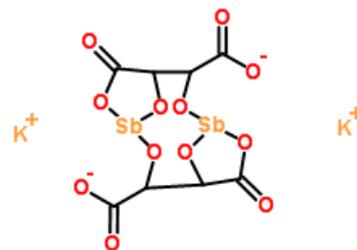


圖 (3)：酒石酸銻結構

## (三) 光譜儀基本原理:分光光度法

分光光度法是用來測定某物質在特定波長或一定波長範圍下對光的吸收度，其吸光度  $A = -\log\left(\frac{I}{I_0}\right)$  為一個大於等於零的實數；一般而言落在 0 至 2 之間，其中 0 所代表的意義即為完全無吸收，2 則代表有百分之九十九的光通過時被吸收了。之所以要定義吸收度，是因為光的穿透度，並不與濃度和光徑長呈完全負相關。例如光穿過兩杯一樣的溶液，在第一杯被吸收了 50%，並不會穿過第二杯後就會全部被吸收。而只有吸收度，是與光徑長、濃度呈正比的。例如光穿過兩杯一樣的溶液，在第一杯被吸收了 50%，那麼就相當於對於第

二杯的入射光只有 50%，那麼自然第二杯就該只吸收 25%，其吸收的總光量 只有增加一半，然而其總吸收度確實增加了一倍。

，其中  $A$  代表吸光度、 $I$  代表入射的單色光強度、 $I_0$  代表透射的單色光強度。利用特定波長的單色光分別透過標準溶液與待測溶液，比較其吸光度，可作定量分析。

而根據分光光度法的原理，我們發展出一個以手機燈為光源、光敏感測器為接收器，並配合電腦的 Arduino 程序運算處理的光敏檢測箱。

#### (四) 光敏電阻

當有光線照射時，電阻內原本處於穩定狀態的電子受到激發，成為自由電子。當光線變強時，會有更多的自由電子開始流動，因此電流 ( $I$ ) 會上升，當提供的電壓值 ( $V$ ) 固定，根據  $V = I \times R$  可知，光線越強電阻值會越低，而光線變弱時則反之。

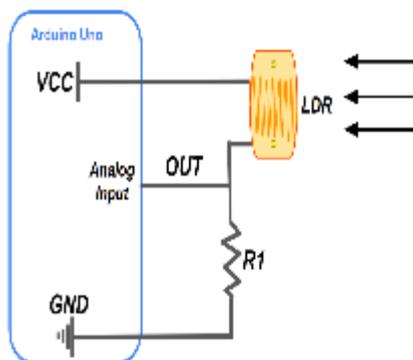


圖 (4) : Arduino 接線圖

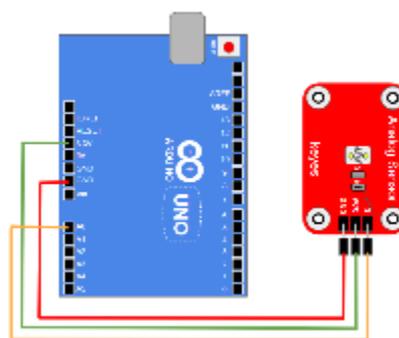


圖 (5) : Arduino 線路圖

#### (五) 反應速率:

由高中選修化學反應速率章節，我們學到反應速率跟反應物濃度、溫度、催化劑、本質有關，而本次實驗亦想探討濃度對反應速率的影響，而濃度對反應速率的影響根據物質不同會有不同程度貢獻，把影響度以反應級數表示，例如

$CO(g) + Cl_2(g) \rightarrow COCl_2(g)$   $R = k[Co][Cl_2]^2$ ，又反應速率  $RCO:RCl_2:RCOCl_2 = 1:1:1$  根據文獻可以知道我們所使用的鉬藍法是一種測量磷總量，利用酸化後正磷酸鹽與鉬酸鉍反應成磷鉬(V)化合物，磷鉬(V)錯合物再與氧化維生素丙生成藍色磷鉬(VI)錯合物，利用分光光度計偵測藍色磷鉬(VI)錯合物吸收度，反推樣品磷含量，但藍色磷鉬(VI)錯合物複雜屬於多酸系列，因此我們初略利用藍色磷鉬(VI)錯合物吸收度正比於我們的產物濃度，表示法如下：

$R \propto [PO_4Mo(V)_x]^m \propto [PO_4Mo(VI)_x]^m \propto$  吸收度，只觀察吸收度隨時間變化。

## 貳、 研究設備及器材

### 一、 設備儀器

分光光度計



圖 (6) : T60 分光光度計

### 二、 實驗藥品

酒石酸銻鉀 ( $C_8H_4K_2O_{12}Sb_2$ )、維生素丙 ( $C_6H_8O_6$ )、磷酸二氫鉀 ( $KH_2PO_4$ )、硫酸 ( $H_2SO_4$ )、鉬酸銨 ( $H_8MoN_2O_4$ )、鹽酸 ( $HCl$ )、肥料(益欣超磷鉀)、綠豆

### 三、 實驗器材

去離子水、燒杯、量筒、定量瓶、玻棒、漏斗、濾紙、三角燒瓶、微量滴管、離心管、塑膠比色管、溫度計、指星筆

### 四、 自製檢測箱器材

黑色風扣板、剪刀、美工刀、保麗龍膠、iphone 13、光敏感測器、杜邦線、Arduino Uno、Arduino 軟體

## 參、 研究過程或方法

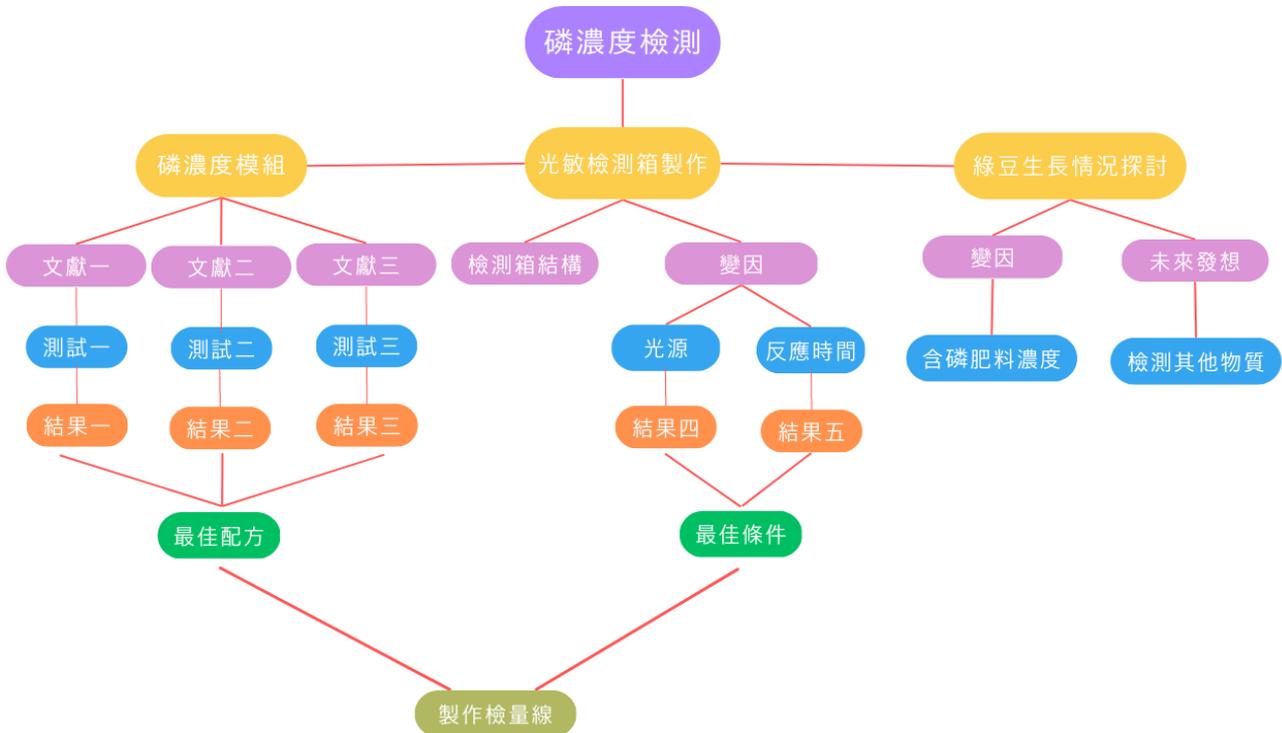


圖 (7) : 實驗進行流程圖

如圖 (7) , 本研究進行了五項實驗 :

實驗 (一) 探討不同濃度含磷肥料對綠豆的生長影響

實驗 (二) 標準磷溶液的配置與不同檢測法

實驗 (三) 磷溶液的檢量線製作

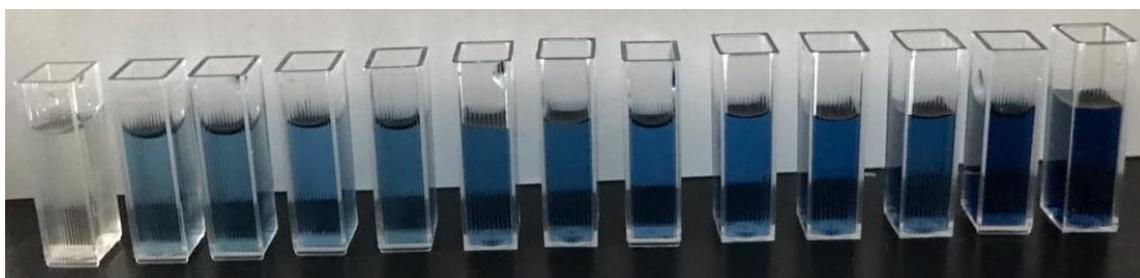
實驗 (四) 光敏檢測箱的製作與變因探討

實驗 (五) 實際應用於檢測肥料磷濃度

## 一、 實驗(一):不同濃度含磷肥料對綠豆的生長影響

### (一)綠豆的種植

- 1.在網路商場上購買種植綠豆所用之含磷肥料，我們選擇的品名為益欣超磷鉀，商品如圖(9)，其含磷成分為磷酸二氫鉀。
- 2.分別取 0、0.044、0.132、0.219、0.307、0.351、0.395、0.439、0.527、0.615、0.702、0.790、0.878 g 之含磷肥料，加入蒸餾水至 1 公升將其溶解，得到相對應濃度 0、0.5、1.5、2.5、3.5、4、4.5、5、6、7、8、9、10 mg P/L 溶液，各濃度肥料溶液如圖(8)。
3. 配置出此 13 種含磷肥料溶液後使用奶酪盒為容器，將上蓋及下蓋組合作為盛裝容器，並在上層擺放綠豆處鋪上一片圓形濾紙。
- 4.分別種植 13 組綠豆，每組種植 10 顆綠豆並將其平均分散在容器中。
- 5.在容器下層處倒入各濃度含磷肥料溶液 26ml，使其水位高度恰好碰到綠豆底部，濾紙則有保持濕潤之用，上述綠豆種植方式如圖(10)。



圖(8)由左至右為濃度低至高的含磷肥料溶液圖



圖(9)所購買之含磷肥料圖



圖(10)綠豆種植方式圖

### (二)種植結果的觀察

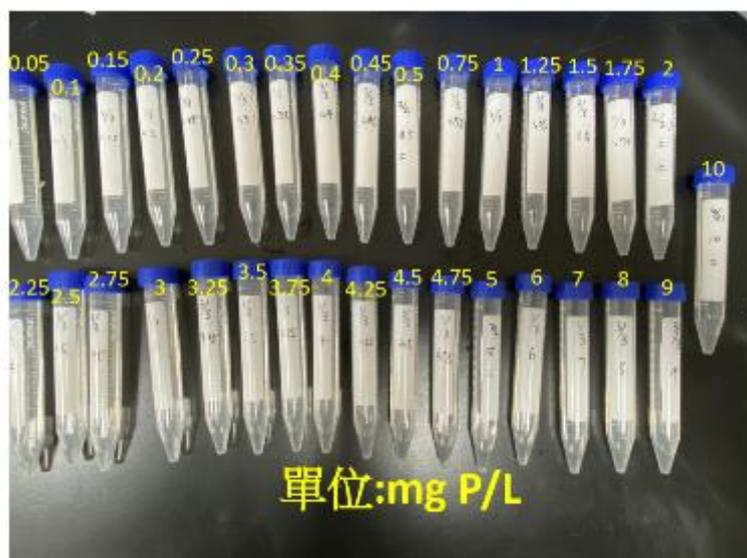
- 1.使用手機每天拍攝綠豆生長情形，並測量其根部的生長長度。
- 2.在記錄下各濃度下每顆綠豆的根與莖的生長高度後，計算出每個濃度下的生長平均長度，繪製成長條圖，將以分析。

## 二. 實驗(二):標準磷溶液的配置與不同檢測法

在尚未了解磷溶液的各種特性下，我們希望透過此實驗，瞭解磷溶液不同檢測方式的結果，以利作為我們日後實驗時變因設定的參考。

### (一) 標準磷溶液的配置

- 1.配置標準磷溶液，以去離子水溶解 0.045 克磷酸二氫鉀後，再倒入量瓶中並加入蒸餾水至 100 毫升稀釋成 0.0033 M，稱為**磷溶液(I)**。
- 2.取 0.00125、0.0125、0.025、0.0375、0.05、0.0625、0.075、0.0875、0.1、0.1125、0.125、0.25、0.375、0.5、0.625、0.75、0.875、1、1.125、1.25、1.5、1.75、2、2.25、2.5 毫升的磷溶液(I)滴入各量瓶內，並加入蒸餾水至 25 毫升，得到 0.005、0.05、0.5、0.1、0.15、0.2、0.25、0.3、0.35、0.4、0.45、1、1.5、2、2.5、3、3.5、4、4.5、5、6、7、8、9、10 mg P/L，25 種不同磷濃度溶液，稱為**磷溶液(II)**。



圖(11)以離心管裝取各濃度磷溶液(II)

### (二) 加入呈色試劑後不同濃度磷溶液的反應時間

- 1.依磷溶液(二)之配製方式，分別配製出濃度為 0.5、2、5 mgP/L 之磷溶液做為檢驗樣本。
- 2.取 2 ml 上述濃度樣本之磷溶液倒入比色管，取呈色試劑(III) 0.33 ml 分別加入各比色管。
- 3.在加入呈色試劑後，將各樣本溶液立刻放入分光光度計中，以每兩分鐘測一次吸光度的測量頻率偵測 15 小時，觀察不同濃度磷溶液加入呈色試劑後對反應時間有何影響。

### (三) 使用分光光度計掃描波長的選擇

為了得知在偵測磷溶液之吸光度時，分光光度計的全波長(200-900 nm)掃描下，在何種波段下所偵測出來的吸光效果最佳，我們設計此變因，以利之後實驗的進行。

1.以濃度 5 mgP/L 為樣本，取 2 ml 該樣本之磷溶液倒入比色管，取呈色試劑 ( III ) 0.33 ml 加入比色管。

2.待反應完全後，將其放入分光光度計中，使用全波段 (200~900 nm) 的波長進行掃描，觀察掃描後哪個波長下的吸光效果最佳。

#### (四)反應速率級數

在我們知道溶液顏色藍色物質是因為磷鉬多酸錯合物生成後，我們想知道反應何時達平衡，因此進行長時間觀察，條件為波長 826 nm、每 10 分鐘取點、測量時間為儀器最高限度 900 分鐘，希望藉由實驗找出吸光度與反應速率級數的關係。

### 三. 實驗 (三):磷溶液的檢量線製作

#### (一)呈色試劑的配置

在參考完文獻[1][2][3]後，我們發現每個文獻中對於維生素丙法的步驟有些許差異，因此我們皆進行測試，來找出較適合進行的做法。

#### 1. 測試一：根據台師大科教中心-科學教育月刊中的水池營養中的 SPY--磷[1]

(1) 配置 2.5 M 硫酸溶液、 $5.12 \times 10^{-3}$  M 酒石酸銻鉀溶液、0.03 M 鉬酸銨溶液、0.1 M 維生素丙溶液。

(2) 將 50 毫升硫酸溶液、5 毫升酒石酸銻鉀溶液、15 毫升鉬酸銨溶液及 30 毫升維生素丙溶液依次混合後，得到 100 毫升的呈色試劑，稱為呈色試劑 ( I )。

#### 2. 測試二：依據行政院環保署的水中磷檢測方法[2]

(1) 配置 2.5 M 硫酸溶液、 $4.7 \times 10^{-3}$  M 酒石酸銻鉀溶液、0.03 M 鉬酸銨溶液、0.1 M 維生素丙溶液

(2) 將 50 毫升硫酸溶液、5 毫升酒石酸銻鉀溶液、15 毫升鉬酸銨溶液及 30 毫升維生素丙溶液依次混合後，得到 100 毫升的呈色試劑，稱為呈色試劑 ( II )。

#### 3. 測試三：根據技術士技能檢定化學職類乙級術科測試應檢參考資料中的總磷比色定量[3]

(1) 配置 2.5 M 硫酸溶液、 $2 \times 10^{-4}$  M 酒石酸銻鉀溶液、0.03 M 鉬酸銨溶液、0.1 M 維生素丙溶液。

(2) 將 50 毫升硫酸溶液、5 毫升酒石酸銻鉀溶液、15 毫升鉬酸銨溶液及 30 毫升維生素丙溶液依次混合後，得到 100 毫升的呈色試劑，稱為呈色試劑 ( III ) 製成溶液。

3.將磷溶液 ( II ) 裝入塑膠離心管中。

### (三) 呈色反應的檢測

分別取 6 ml 磷溶液 (II) 與 1 ml 呈色試劑 (I)、(II)、(III) 混合，並等待鉬藍產生而呈現藍色溶液，分別稱之為**測試液 (I)、(II)、(III)**，反應如圖 (12) 所示。

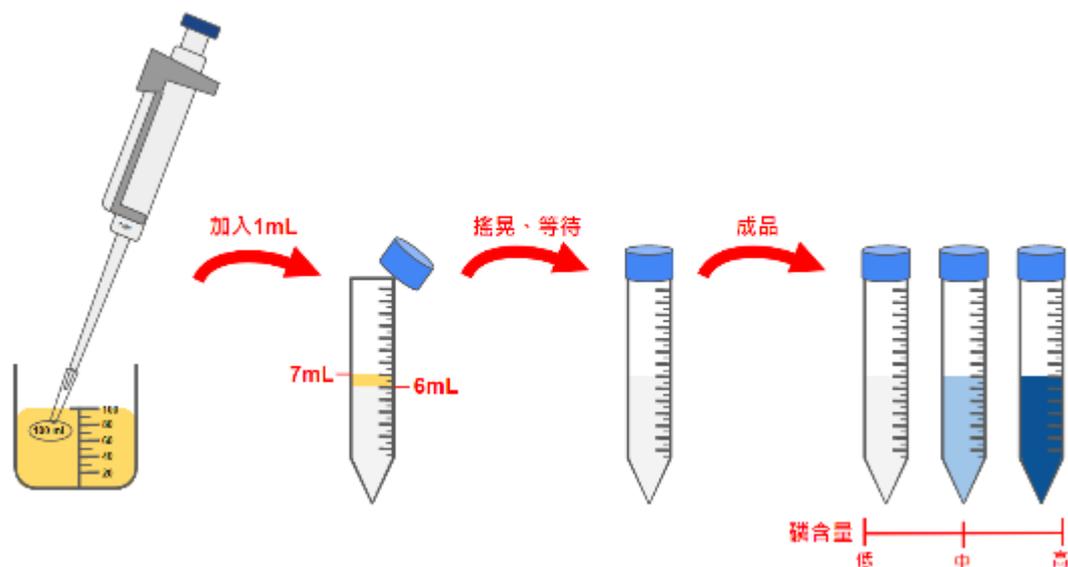


圖 (12)：呈色反應進行之示意圖

### (四) 磷溶液檢量線的製作

1. 使用測試三的呈色試劑(三)方法配置出呈色試劑。
2. 分別取濃度為 0.35、0.5、1.5、2.5、3.5、4.5、5、6、8 (mg P/L) 之**磷溶液(II)** 2ml 裝入比色管中，並在各管中加入 0.33ml 之呈色試劑，製成待測溶液。
3. 使用分光光度計做出檢量線。
4. 測試檢量線的準確度：  
取已知濃度的磷溶液(10mg P/L)之樣本，代入上述所製成的檢線，測量出其吸光度後，並推算出其濃度。

## 四. 實驗 (四)：光敏檢測箱的製作與變因探討

### (一). 光敏檢測箱的製作

#### 1. 搭建箱體結構

以黑色風扣板搭建一個中空長方體，並將其內部分成左、中、右三部分，其結構敘述如下：

左為 Arduino 面板與光敏元件放置處、中為比色管放置處、右為光源放置處，如圖 (13)、圖 (14) 所示。

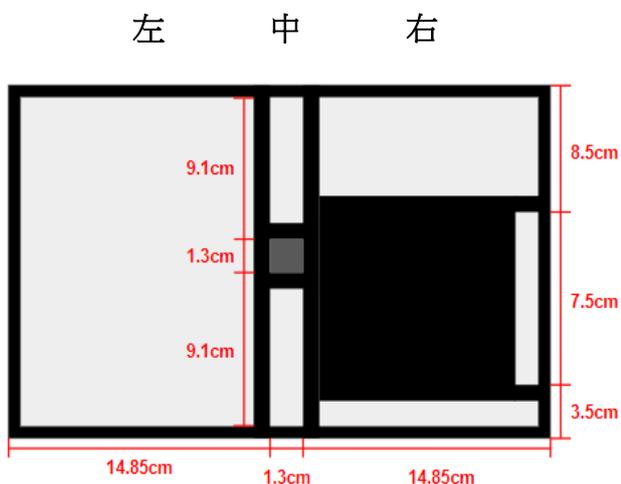


圖 (13)：檢測箱結構俯視圖

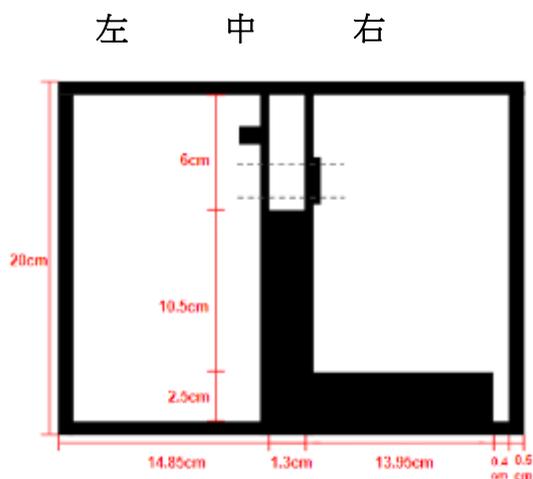


圖 (14)：檢測箱結構側視圖

## 2. 安裝 Arduino 面板與光敏元件

將 Arduino Uno 固定在左邊部分的底部，並在左側紙板開一個小孔，使 USB 線通過，以及將光敏元件固定在預先黏好的黑紙板上，最終成品如圖 (15) 和圖 (16)。

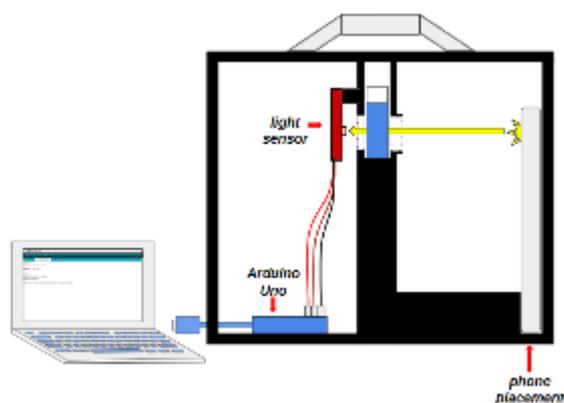


圖 (15)：檢測箱成品側面圖

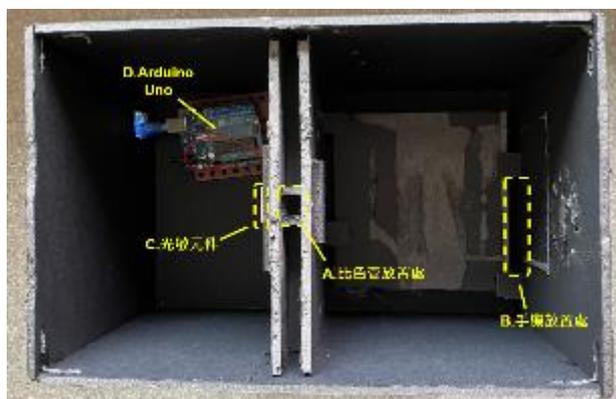


圖 (16)：檢測箱實際俯視畫面

## 3. Arduino 程式

我們寫了一個重複指令，如圖 (13)、圖 (14)。在第 0~1 秒為準備期，將上一輪數據與變數歸零，而第 2~31 秒為測量期，在這 30 秒內以每 0.2 秒紀錄一次數值，共取得 150 值

並將其計算平均，而最終結果會顯示於序列埠監控視窗，第 32~33 秒則是緩衝期，準備開始下一輪。

```
1  const int SENSOR_PIN = A0;          // 传感器数据输入引脚
2  const int PREPARE_TIME = 3;         // 准备时间, 单位: 毫秒
3  const int MEASURE_TIME = 10;        // 测量时间, 单位: 毫秒
4  const int BUFFER_TIME = 3;          // 缓冲时间, 单位: 毫秒
5  const int SAMPLE_INTERVAL = 15;     // 采样间隔, 单位: 毫秒
6  const int NUM_SAMPLES = 150;        // 采样次数
7
8  void setup() {
9      Serial.begin(9600); // 初始化序列通信
10     pinMode(A5, OUTPUT);
11 }
12
13 void loop() {
14     digitalWrite(A5, 1);
15     // 准备期
16     delay(3);
```

圖(17) : Arduino 程式碼(上)

```
18     // 清空变量
19     float sum = 0.0;
20     float reading = 0.0;
21
22     // 测量期
23     for (int i = 0; i < NUM_SAMPLES; i++) {
24         reading = analogRead(SENSOR_PIN);
25         sum += reading;
26         delay(6);
27     }
28
29     // 计算平均值
30     float average = sum / NUM_SAMPLES;
31
32     // 输出平均值到串口监视器
33     Serial.println(average);
34
35     // 缓冲期
```

圖(18) : Arduino 程式碼(下)

## (二).光敏檢測箱變因探討

### 改變光源

我們原本打算用 826nm 的光、手電筒光、540nm 指星筆作為我們的光源，但因為 826nm 的光我們無法獲得，故我們取手電筒光、540nm 的指星筆作為我們的比較光源。再觀察何者做出的檢量線相關係數較高，較適合用於我們的光敏檢測箱。

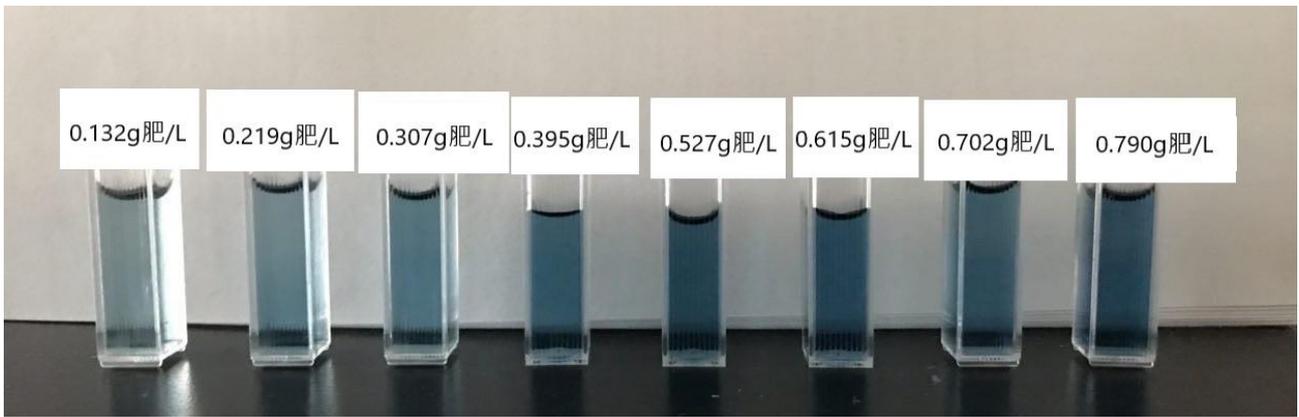
## 五、 實驗(五) : 實際應用於檢測肥料磷濃度

為了完成本研究的宗旨，此實驗將使用實驗(四)所自製之光敏檢測箱，實際用來檢測不同濃度含磷肥料溶液的光強度，並與分光光度計之檢測結果進行比較，進而得知使用自製光敏感測箱取代光光度計是否具可行性。

### (一)含磷肥料溶液配置

分別取 0.132、0.219、0.307、0.395、0.527、0.615、0.702、0.79 g 肥料/L 溶液，其相對應之含磷量分別為 1.5、2.5、3.5、4.5、6、7、8、9 mgP/L。取各樣本 2 ml 並加入呈色試劑

(三)0.33ml，配置完之溶液如圖(19)。



圖(19) 8種濃度之含磷肥料溶液配置完成圖

## (二)使用分光光度計做含磷肥料溶液檢量線

- 1.分別取步驟(一)中濃度樣本 2 ml 裝入比色管中，加入呈色試劑 ( III ) 0.33 ml，待其反應完全後，放入分光光度計中。
- 2.將各濃度樣本在 826 nm 下掃描，分別測得其吸光度數值。
- 3.用所得數據製成回歸直線，得到其相關係數後，該線便為含磷肥料溶液在分光光度計下的檢量線。
- 4.為了檢視回歸直線的準確度，額外配置 0.968、1.144、1.32、1.496 g 肥料 P/L 之磷溶液，其含磷濃度分別為 11、13、15、17 mgP/L，取 2 ml 裝入比色管，加入呈色試劑 ( III ) 0.33 ml，待其反應完全後，放入分光光度計中檢測其光強度。
- 5.將以知濃度帶入檢量線後，觀察其反推濃度的準確度，認定檢量線是否精確。

## (三)使用自製光敏檢測箱做含磷肥料溶液檢量線

- 1.取步驟(一)中濃度樣本 2 ml 裝入比色管中，加入呈色試劑 ( III ) 0.33 ml，待其反應完全後，放入自製光敏檢測箱的比色管放置處。
- 2.以波長 540 nm 之綠色指星筆做為光源進行照射，分別測得在光敏電阻接收下光強度數值。
- 3.用所得數據製成回歸直線，得到其相關係數後，該線便為含磷肥料溶液在自製光敏檢測箱下的檢量線。
- 4.為了檢視回歸直線的準確度，同樣使用 0.968、1.144、1.32、1.496 g 肥料 P/L 之磷溶液，其含磷濃度分別為 11、13、15、17 mgP/L，取 2 ml 裝入比色管，加入呈色試劑 ( III ) 0.33 ml，待其反應完全後，放入分光光度計中檢測其光強度。
- 5.使用已知濃度反推求檢量線準確度後，比較兩檢量線，探討自製光敏檢測箱是否在取代分光光度計上具可行性。

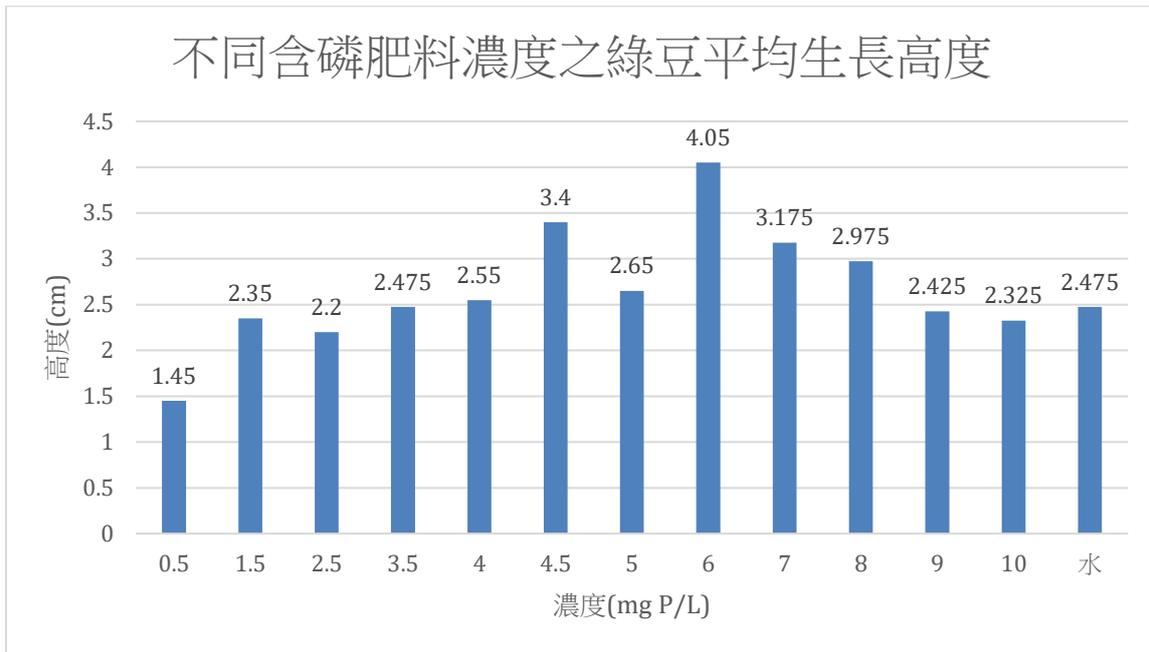
## 肆、 研究結果

### 一. 實驗(一): 不同濃度含磷肥料對綠豆的生長影響

表(1) 綠豆在各濃度之含磷肥料下種植 12 天的每天平均生長高度(cm)

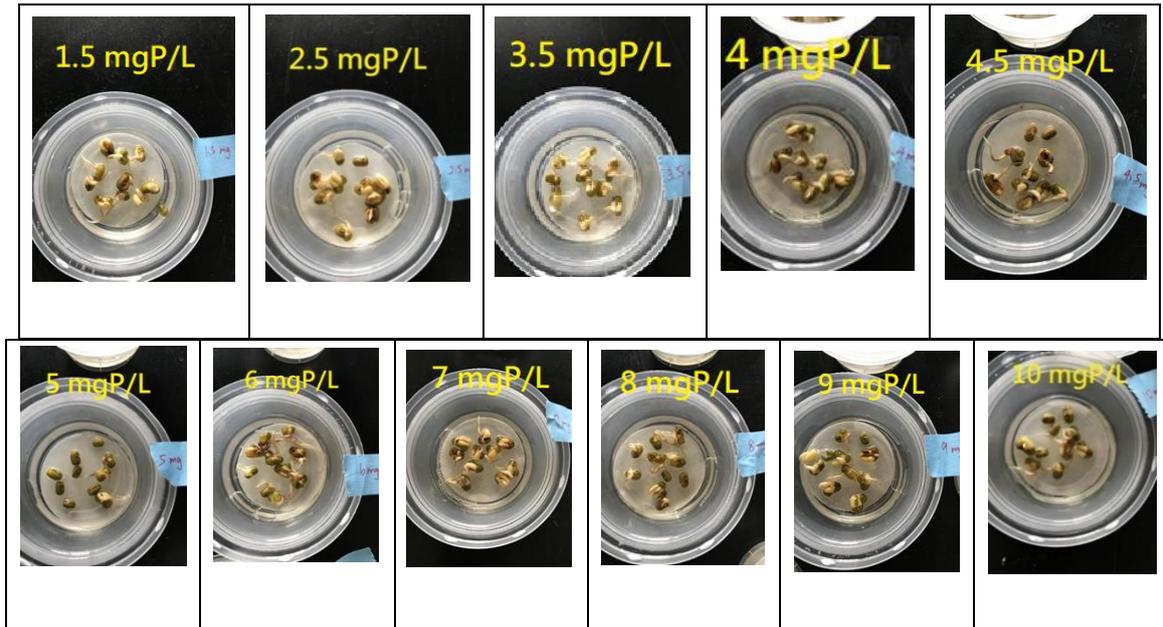
濃度 mgP/L \ 天數	0.5	1.5	2.5	3.5	4	4.5
一	0.5	0.8	0.4	0.45	0.3	1.2
二	0.85	1.4	1.05	1.1	0.7	1.9
三	1.3	1.8	1.35	1.45	1.3	2.35
四	1.7	2.2	1.55	2.5	2.4	3.5
五	2.1	2.5	2.15	2.8	2.6	4.2
六	2.3	2.6	2.4	2.7	3.65	4.6
七	2.4	3.1	2.65	2.9	3.7	4.8
八	2.6	3.6	3.4	3.5	3.9	4.75
九	3	3.4	3.8	3.7	4.2	4.6
十	3.5	3.8	3.4	3.65	4.3	4.85
十一	3.1	3.7	3.9	3.95	4.5	5.3
十二	2.4	3.9	4	4.5	4.8	5.6

濃度 mgP/L \ 天數	5	6	7	8	9	10	水
一	0.5	1.4	0.55	0.65	0.45	0.45	1
二	1.6	1.9	0.95	2.1	1	0.8	1.2
三	2.15	3.25	1.9	2.15	1.25	1.7	1.5
四	3.4	3.75	2.5	3.1	2.4	2.1	2.2
五	3.6	4.2	2.8	3.2	2.5	2.3	2.4
六	3.8	4.55	4.2	3.5	3.1	2.5	2.5
七	4.3	4.6	3.7	4.2	3.5	3.6	2.6
八	4.65	5.6	4.5	4.3	4.1	3.7	3.1
九	4.8	5.8	4.2	4.7	3.9	4.1	3.4
十	5.2	6	5.6	5.2	4.2	4.3	3.6
十一	5.6	6.2	5.7	5.1	4.3	4	4.3
十二	4.8	6.7	5.8	5.3	4.4	4.2	4.6

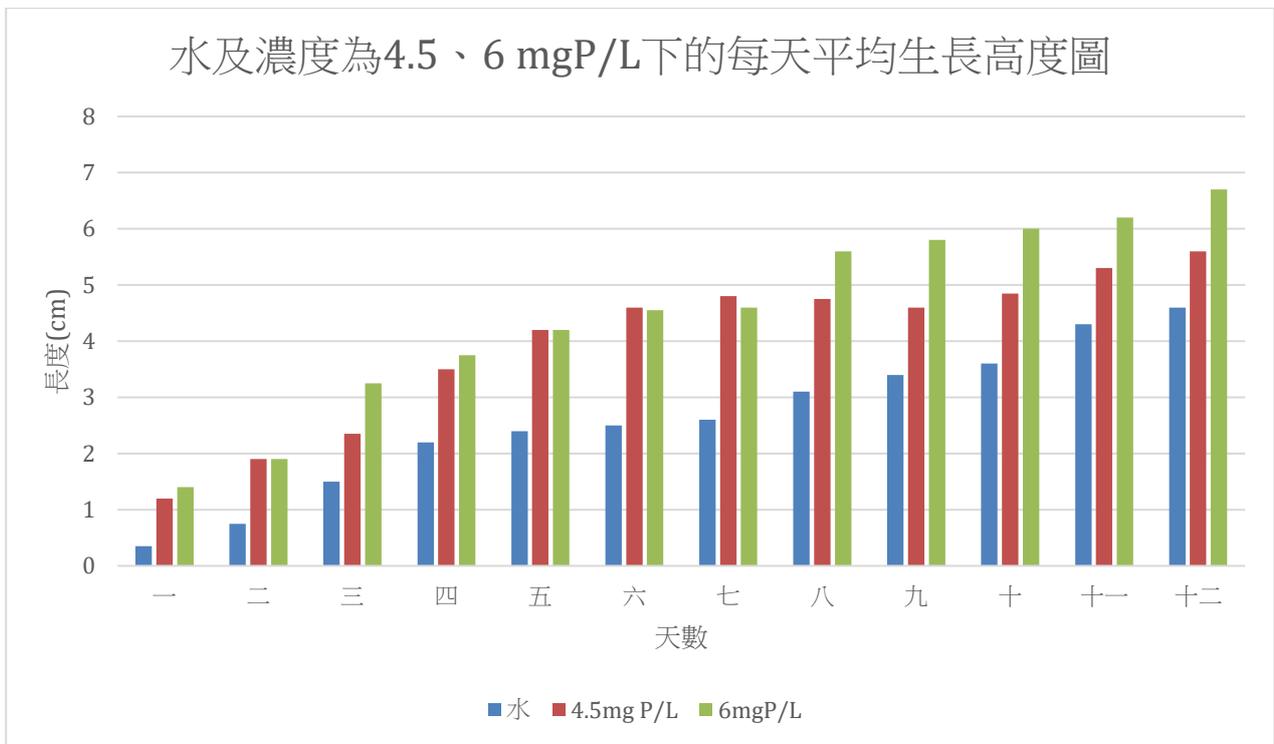


圖(20) 不同含磷肥料濃度之 12 天綠豆平均生長高度圖

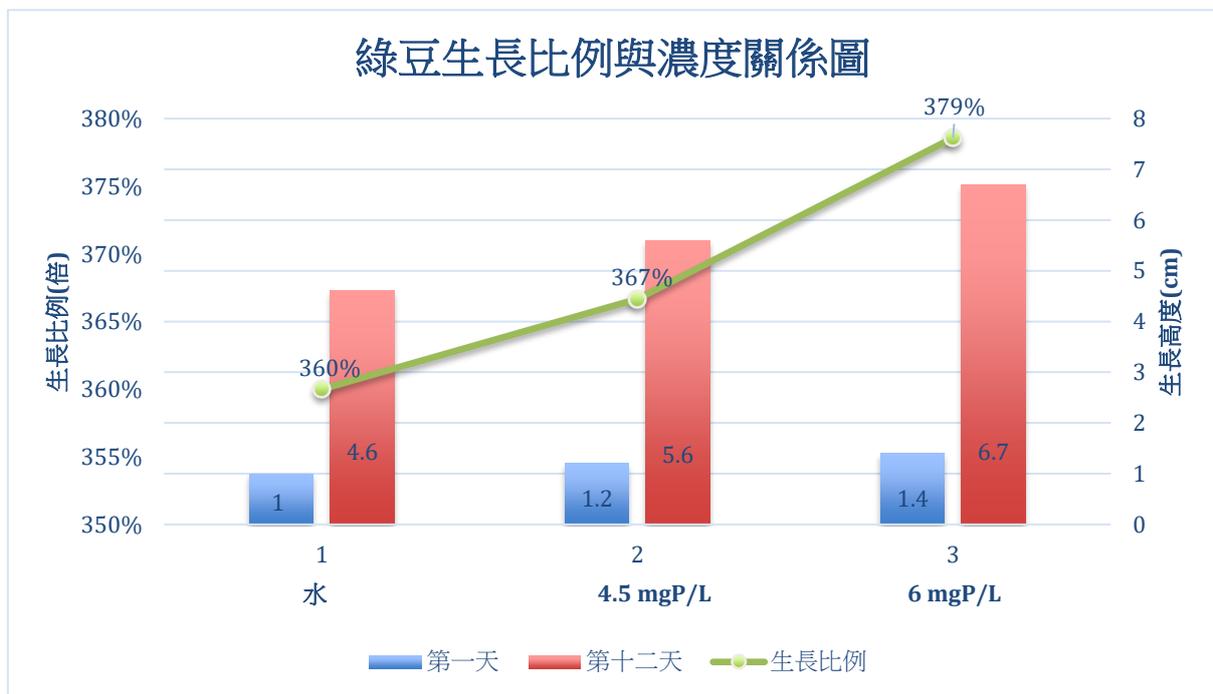
由圖(20)可知，綠豆在含磷濃度為 6 mgP/L 時，平均生長高度為 4.05 cm，生長情形最佳；其次為濃度 4.5 mgP/L 的含磷肥料，其平均生長高度為 3.4 cm；生長情形最差的則為濃度 0.5 mgP/L 的 1.45 cm。



表(2) 以第五天為例之綠豆實際生長圖



圖(21) 為綠豆在生長情況最佳、次佳的濃度及水在十二天中的生長情形



圖(22) 為綠豆在生長情況最佳、次佳的濃度及水在十二天中的生長比例

我們把最好的兩種磷含量分別是 4.5 mg/L 與 6.0 mg/L 與水做比較可以得到下列結果:

1. 在第一天的生長，含磷肥料的綠豆莖與根都比對照組水多生長 20%與 40%，表示磷可以促進植物生長，這跟我們查到的文獻資料符合；在第 12 天時，我們計算水、4.5 mg/L 與 6.0 mg/L 綠豆生長比例，

$$\text{生長比例} = \frac{\text{綠豆第十二天生長高度} - \text{第一天生長高度}}{\text{第一天生長高度}} \times 100\%$$

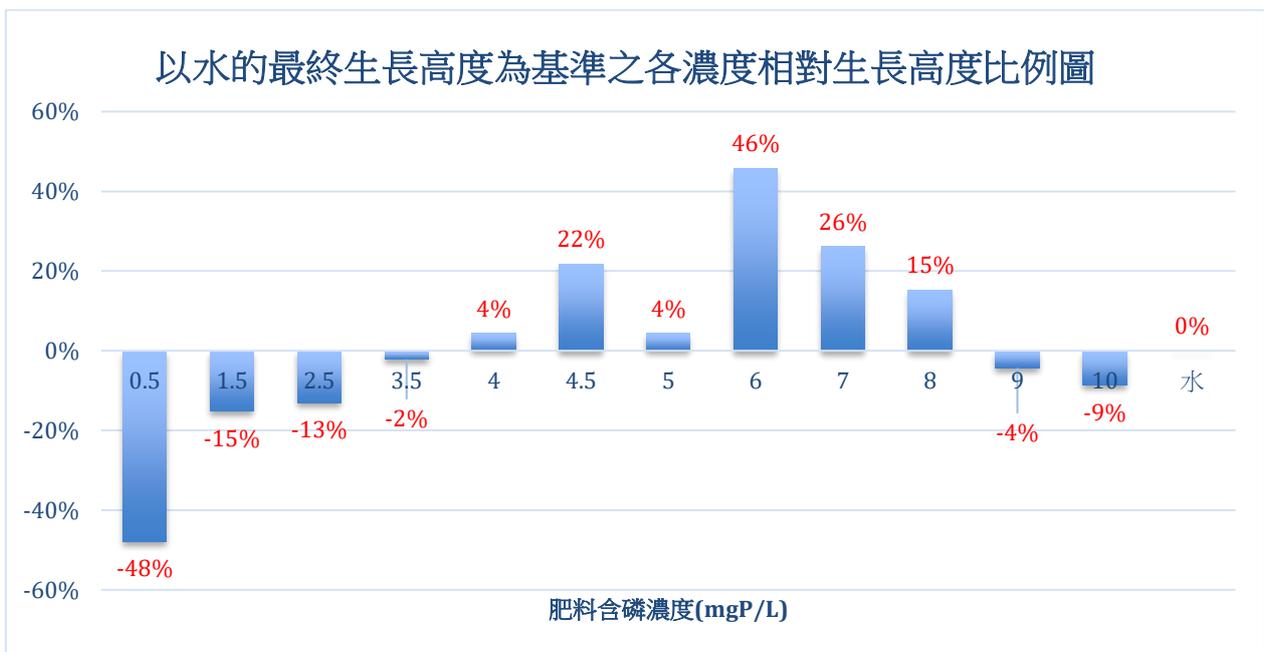
所以三者生長比例如下:

$$\text{水對綠豆的生長比例} = \frac{4.6 - 1.0}{1} \times 100\% = 3.6、$$

$$4.5 \text{ mg/L 磷肥料對綠豆生長比例} = \frac{5.6 - 1.2}{1.2} \times 100\% = 3.67$$

6.0 mg/L 磷肥料對綠豆生長比例 =  $\frac{6.7 - 1.4}{1.4} \times 100\% = 3.79$ ，我們發現 6.0 mg/L 生長比例最高，表示若植物再生長中添加磷元素有助植物發芽與生長。

2. 添加 6 mg/L 磷肥料的綠豆最後生長比例為水的  $\frac{6.7 - 4.6}{4.6} \times 100\% = 45.6\%$ ，將近 50%，表示如果有增加適合濃度的磷肥可以使植物生長獲得更多營養素促使植物生長。

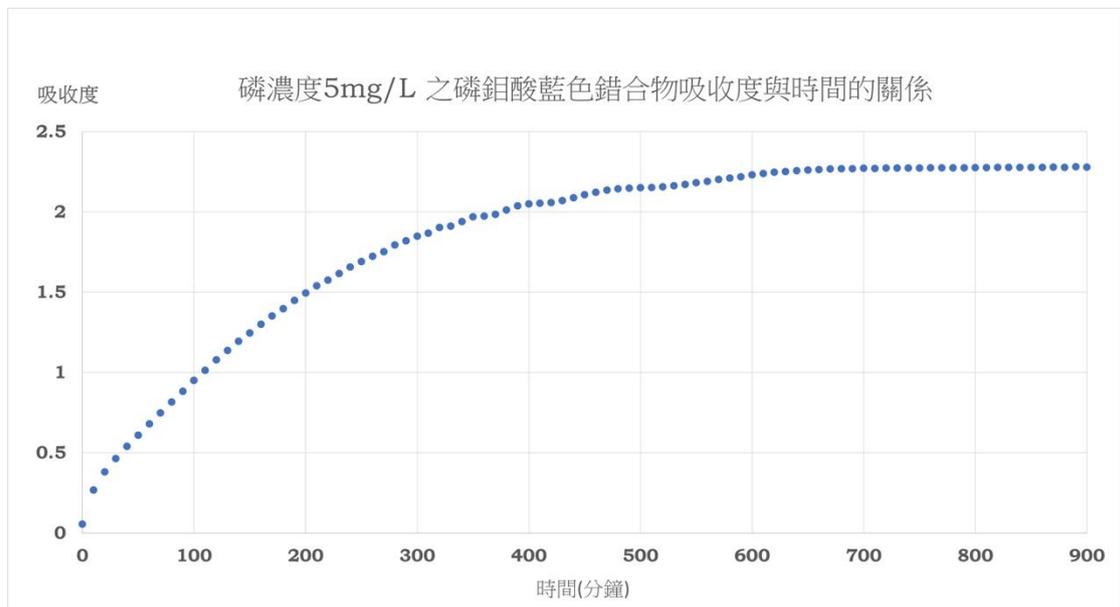


圖(23) 為以水的最終生長高度為基準之各濃度相對生長高度比例圖

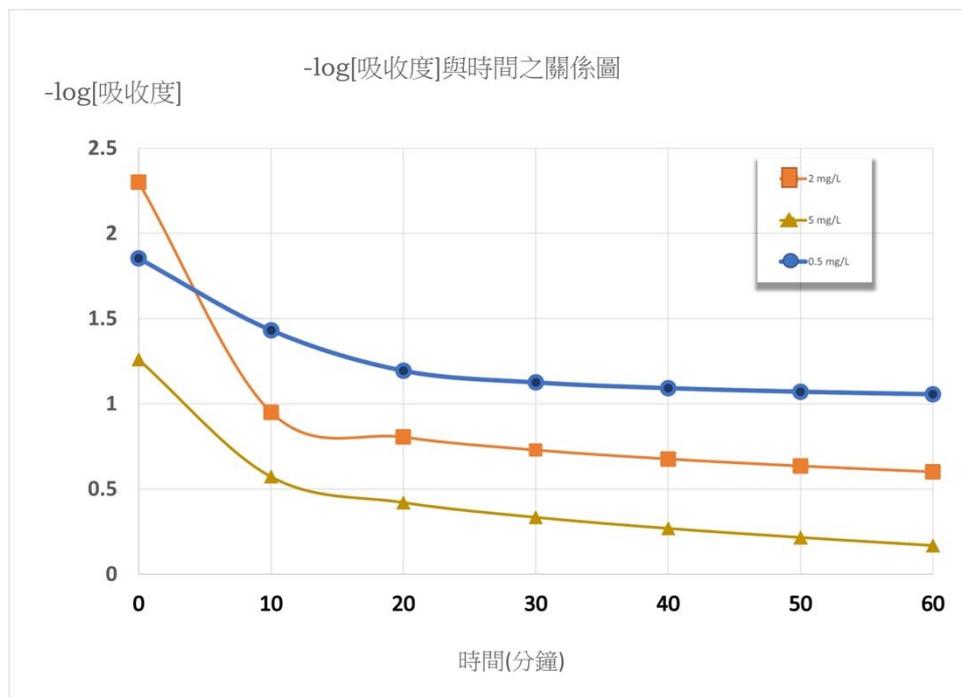
肥料含磷濃度與綠豆的生長情形並非呈現正相關。由圖(23)可知，濃度為 0.5~3.5 mgP/L 時，結果為負成長；濃度為 4.5、6~8 mg P/L 時，結果呈現正成長；而濃度高達 9、10 mgP/L 時，結果則是負成長。

## 二. 實驗 (二): 標準磷溶液的配置與不同檢測法

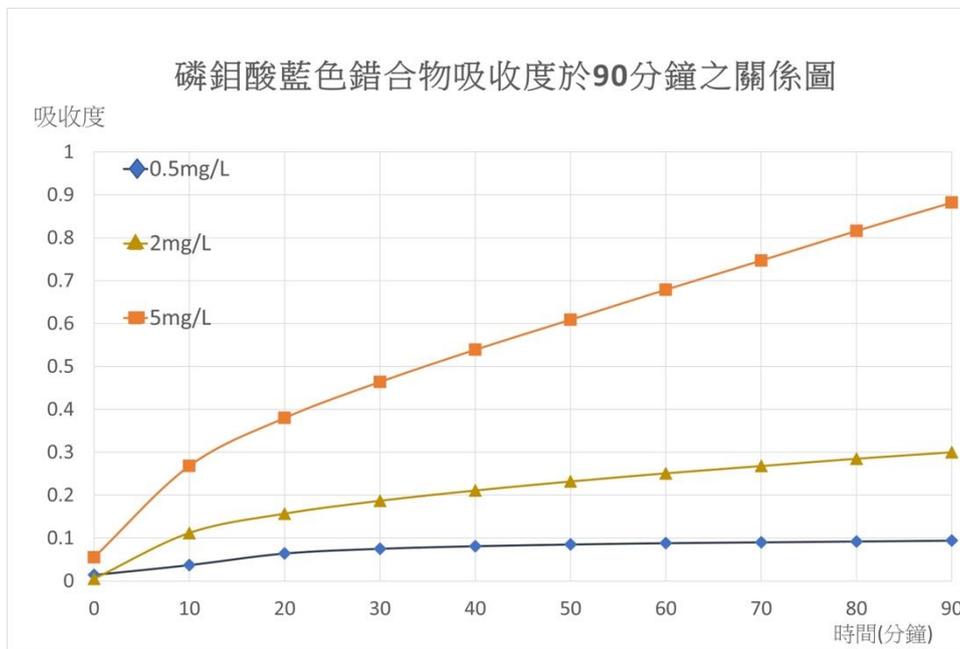
(一) 加入呈色試劑後不同濃度磷溶液的反應時間



圖(24) 濃度為 5 mgP/L 含磷溶液之橙色時間與吸光度關係圖



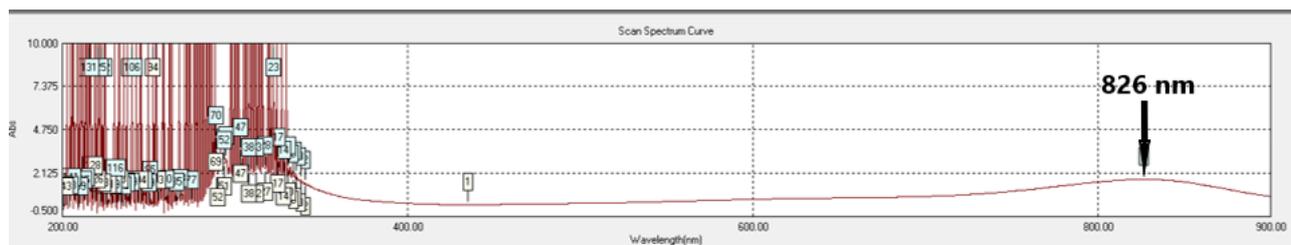
圖(25) 濃度為 0.5 mgP/L、2 mgP/L 與 5 mgP/L 含磷溶液反應級數  $-\log[\text{吸光度}]$  分析圖



圖(26) 磷鉬酸藍色錯合物於 90 分鐘內吸收度變化圖

磷溶液(II)為 5mg/L 樣品在時間 600 分鐘達吸收度 2.3 達平衡，其他濃度 2 mg/L 樣品、0.5 mg/L 樣品分別是 400 分鐘、100 分鐘達吸收度平衡，由圖(41)可知當磷濃度越高，磷鉬(V)酸鉍的濃度也越高再與還原劑維生素丙反應所得磷鉬(VI)酸鉍之時間較長、最後吸收度也越高，2 mg/L 樣品達平衡的時間是 0.5 mg/L 7 倍、2 mg/L 1.75 倍，與濃度非正比關係，我們利用高中化學知識把磷濃度 0.5mg/L、2 mg/L、5mg/L 吸收度取  $-\log[\text{吸收度}]$  後得到圖(25)，其  $R^2$  值小於 0.7，所以我們推判斷可能非一級反應，推測其反應過程可能非一步反應，涉及多步驟所以不易求得反應級數。觀察圖(26)可以發現溶液的吸光度與時間呈正相關，表示隨著藍色錯合物磷鉬(V)酸鉍增加吸收度也增加，以磷濃度 5 mg/L 為例反應時間到 600 分鐘後的吸光度會大致達穩定值，吸光度變化量隨時間上升量極低，視為儀器誤差值之內。我們也發現不論是低濃度或高濃度期反應都是初期最快，以 2 mg/L 的吸收度為例，分解度 ( $\alpha$ ) 為 75% 的反應大約在 170 分鐘左右完成，磷濃度越低分解度 75% 的時間越短，因此我們覺得如果要用鉬藍法偵測工廠瞬間排放量必須在 90 分鐘之內完成圖(26)，而我們的實驗要偵測肥料磷濃度則必須等 400 分鐘後測量準確性比較高。

## (二)使用分光光度計掃描波長的選擇



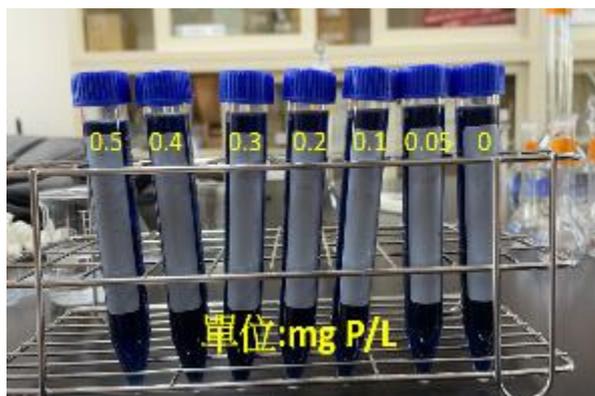
圖(27) 使用分光光度計以全波段 200~900 nm 掃描下的吸光效果

我們偵測全波段，在扣除 200~400 nm 波長時的不穩定吸光度值，當波長為 826 nm 時，吸光度(Abs 值)最高。因此在日後使用分光光度計進行實驗時，掃描的波長參數設定皆在 826 nm 下進行。

### 三. 實驗(三):磷溶液的檢量線製作

#### 一. 測試液(I)

測試發現測試液(I)濃度由 0 mg/L 到 0.5 mg/L 皆呈現藍色，並沒有因為磷濃度多寡而產生顏色差異，其中 0 mg P/L 水樣中不含磷，但仍然變成藍色。我們認為可能是實驗誤差，或是溶液最低測量值所導致，故我們反覆進行此實驗，結果還是一樣。實驗中也有利用去離子水配置以排除其它離子的影響，但依舊有相同的誤差，因此捨棄測試液(I)，尋找其他方式。結果如圖(28)所示。



圖(28): 呈色反應中所配置出的測試液(I)

#### (二) 測試液(II)

測試液(II) 0~0.5 mg/L 也均是呈現一樣的藍色，沒有像預期中呈現深到淺的現象，但從圖(21)可看見，雖然測試液(I)與測試液(II)均呈藍色，但(I)的藍色深度大於(II)的，測試液(II)的顏色較淺較清澈。

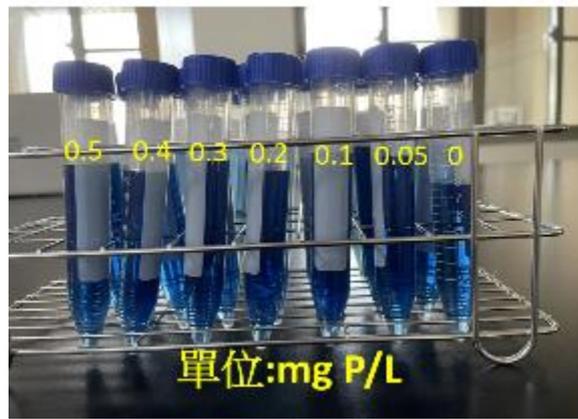


圖 (29) : 呈色反應中所配置出的測試液 (II)

### (三) 測試液 (III)

不同於測試液 (I)、測試液 (II)，測試液 (III) 有呈現藍色深淺的變化，如圖 (22) 所示。可以看出 0 mg P/L 與 0.5 mg P/L 兩個水樣有稍微的顏色差異，0.5 mg P/L 有非常淡的藍色，而為了使差異更加明顯，另外拿 5 mg P/L 水樣來比較，可看出水樣確實有依磷酸鹽濃度產生不同深淺的藍色變化，因此我們認為依照測試三的步驟較適合我們的實驗。

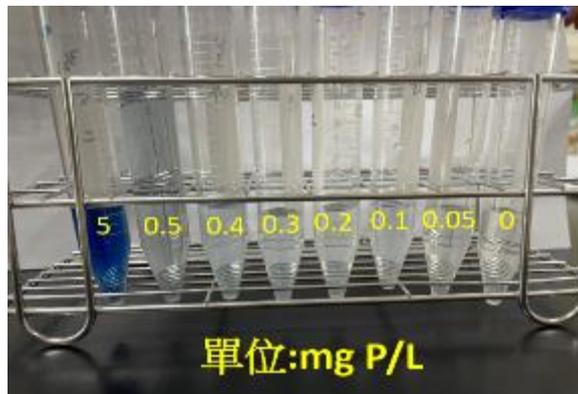
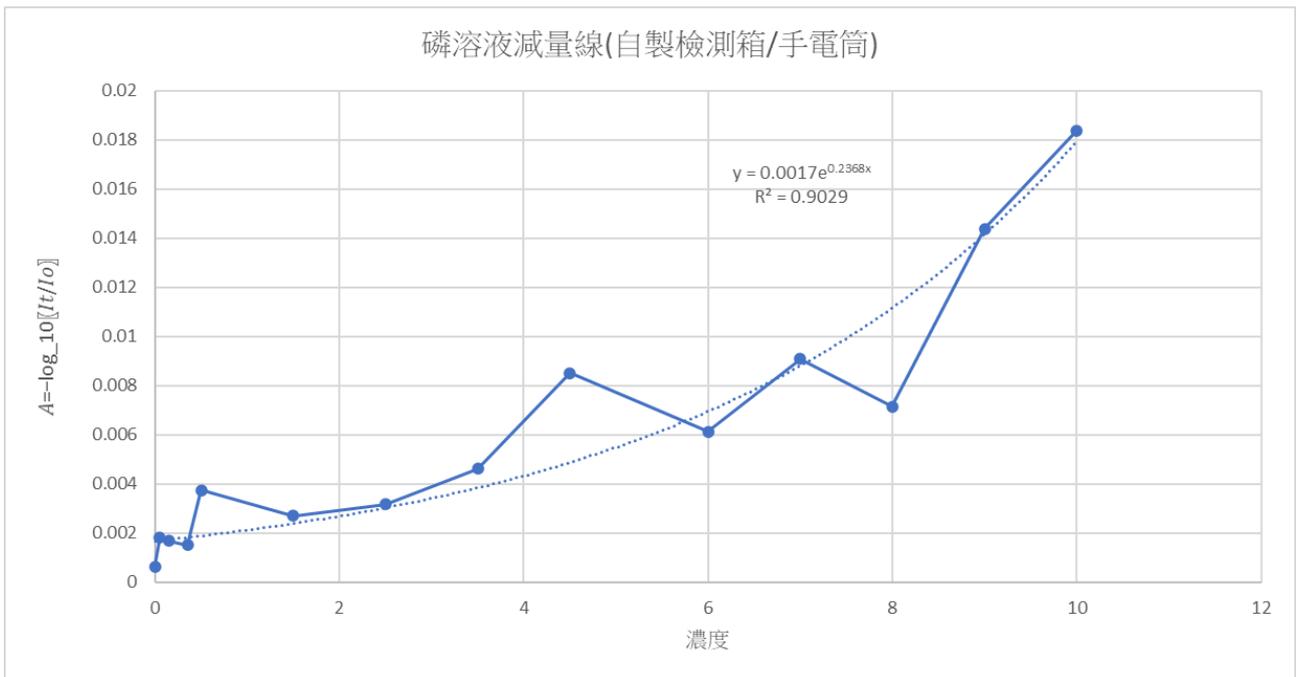


圖 (30) : 呈色反應中所配置出的測試液(III)

#### 四. 實驗(四):光敏檢測箱的製作與變因探討

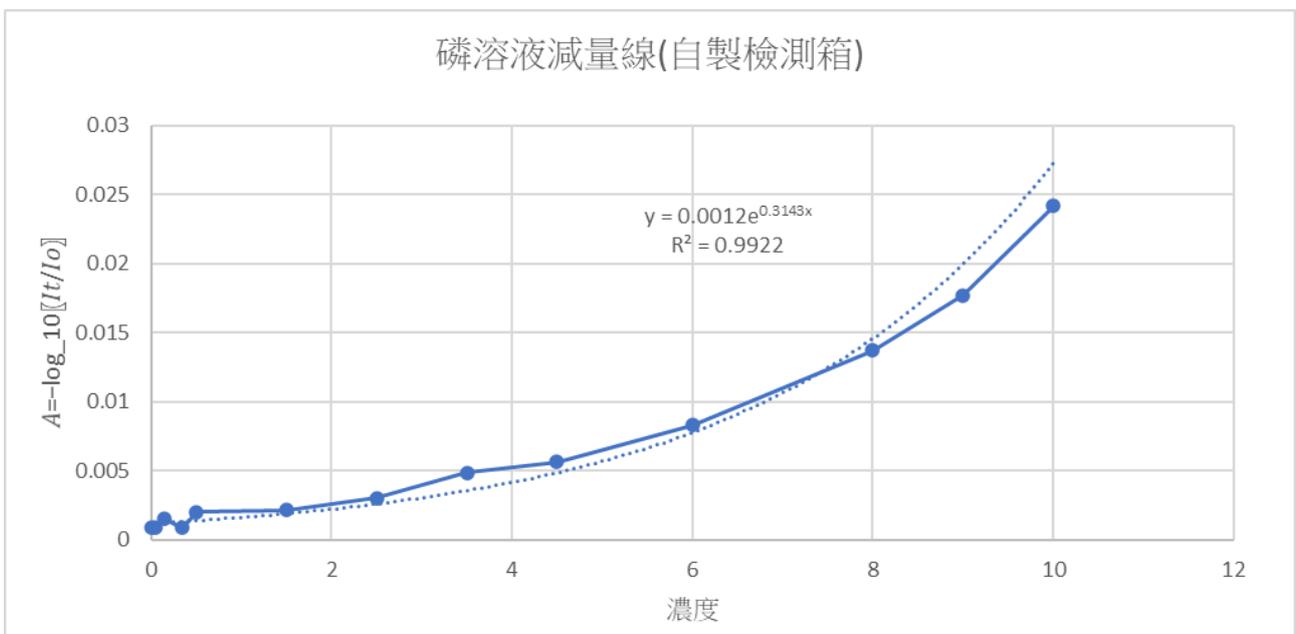
##### (二).光敏檢測箱變因探討

##### 光源的選擇



圖(31) 自製檢測箱之含磷溶液檢量線(手電筒)

觀察圖(31)時可發現,使用手電筒作為檢測光源時,其大多數的測量結果皆不在預測線上,故無法準確的測定溶液濃度。



圖(32) 自製檢測箱之含磷溶液檢量線(指星筆)

而觀察圖(32)時可發現,使用指星筆作為我們檢測箱的光源時,其測量結果與趨勢線誤差

小，其測量結果大致都在趨勢線附近，相關係數也有高達 0.9922。

在分別得到指星筆與手電筒作為光源的檢量線後，我們將 0.968、1.144、1.32、1.496 g 肥料 P/L 之磷溶液放入自製的光敏檢測箱中測量吸光度，並將得到的數值帶入檢線中推算濃度。將指星筆作為光源所推算出的濃度為 0.957、1.151、1.302、1.488 g 肥料 P/L。如圖(32)。而將手電筒作為光源推算出的濃度為 0.853、1.420、1.153、1.622 g 肥料 P/L。如圖 (31)。

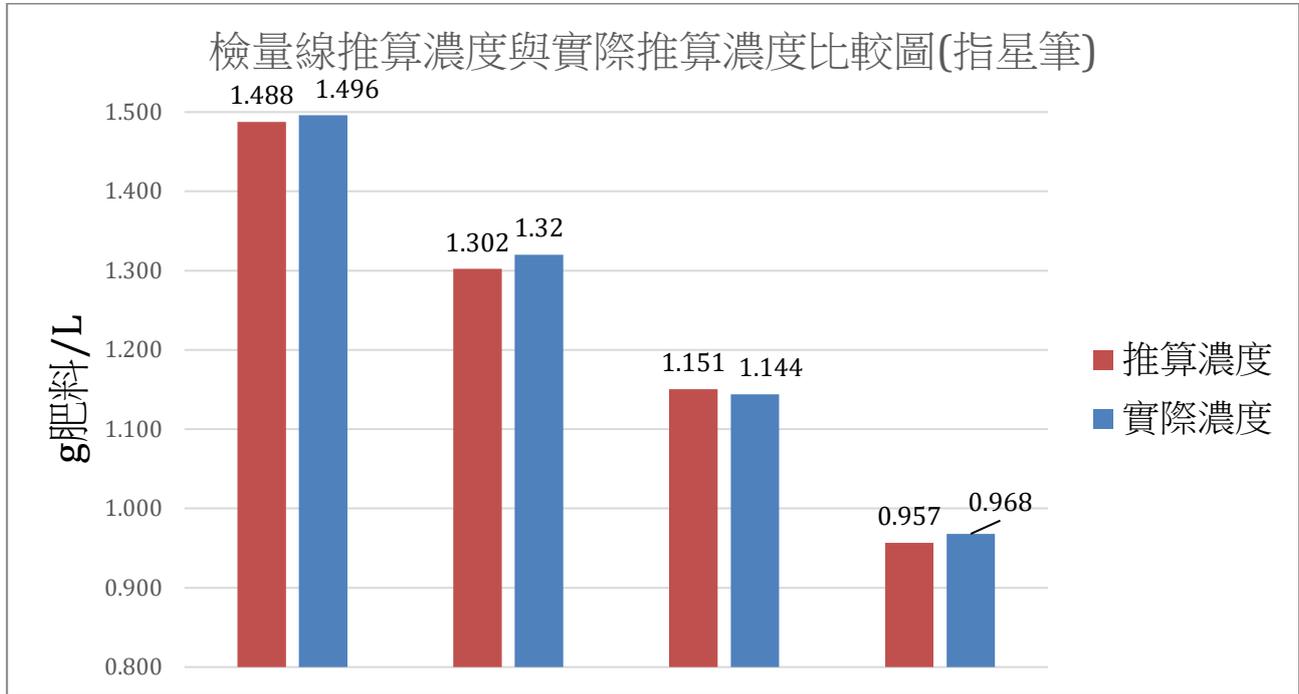


圖 (33) 檢量線推算濃度與實際濃度比較圖 (指星筆)

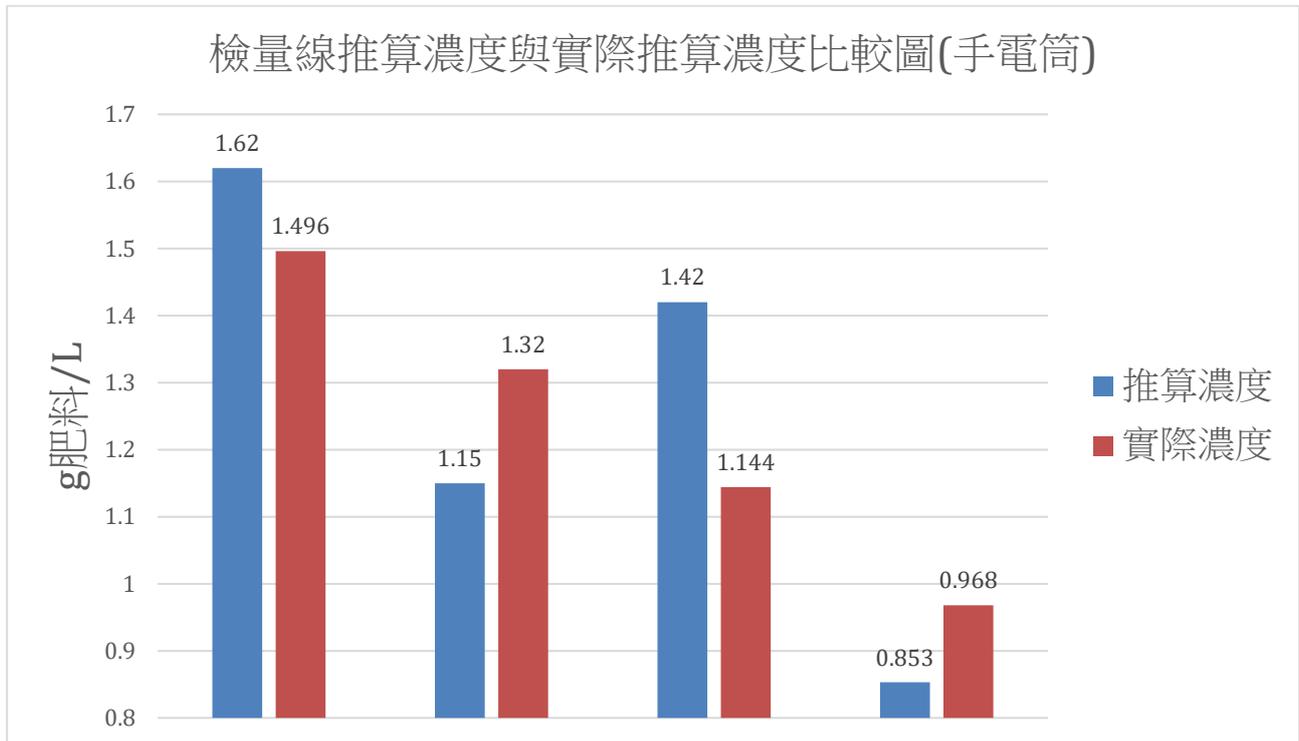
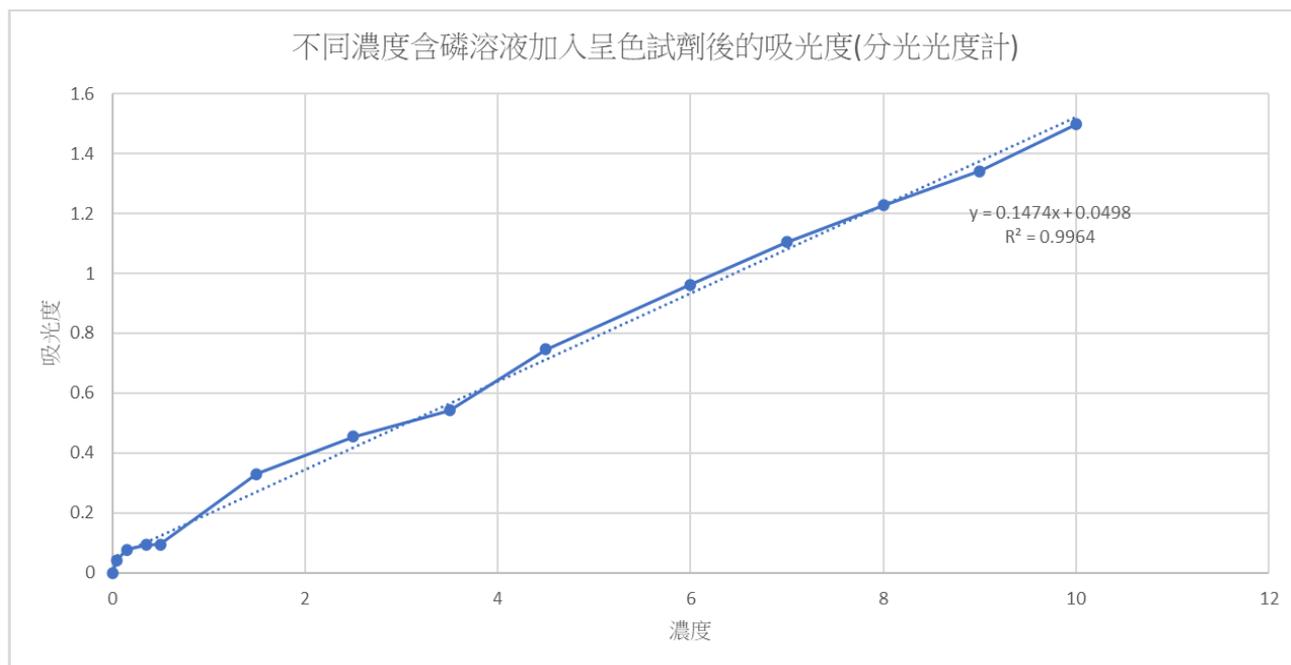


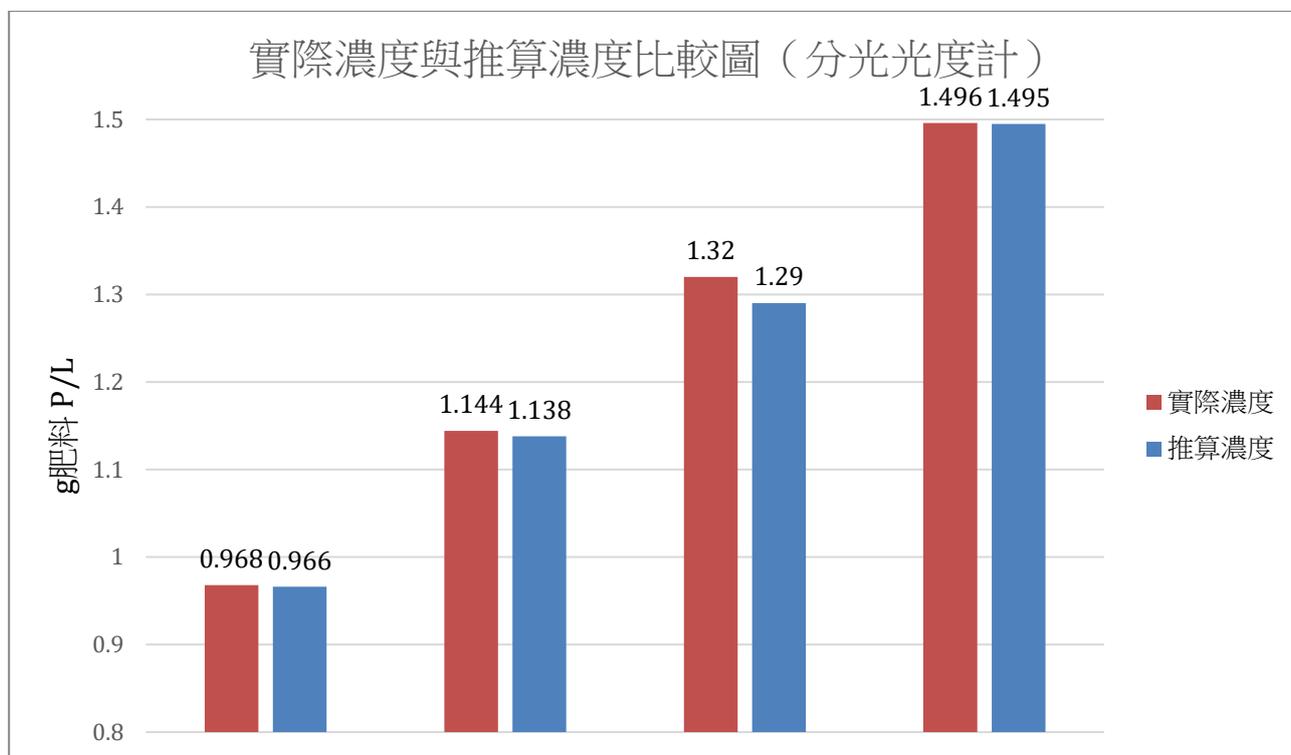
圖 (34) 檢量線推算濃度與實際濃度比較圖 (手電筒)

## 五. 實驗(五): 實際應用於檢測肥料磷濃度

### (二)使用分光光度計做含磷肥料溶液檢量線



圖(35) 分光光度計製作的肥料溶液檢量線



圖(36) 實際濃度與推算濃度比較圖(分光光度計)

由圖(35)可知, 使用分光光度計檢測含磷肥料之檢量線的R值高達0.9964。

而為了測試檢量線的準確度, 我們也將濃度為0.968、1.144、1.32、1.496 g肥/L的含磷肥料溶液帶入檢量線中, 檢量線推出的結果為0.966、1.138、1.29、1.495, 如圖(36)。因此我們認為由分光光度計製作的檢量線是準確的。

### (三)使用自製光敏檢測箱做含磷肥料溶液檢量線

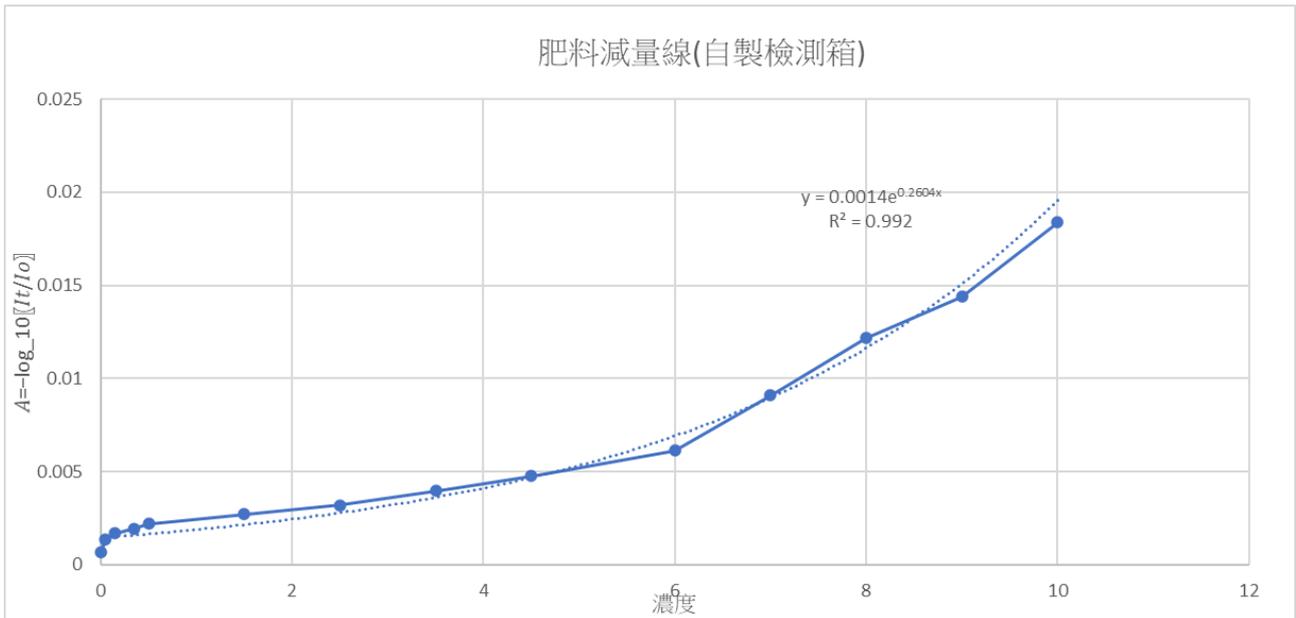


圖 (37) 指星筆在自製檢測箱製作的含磷溶液減量線

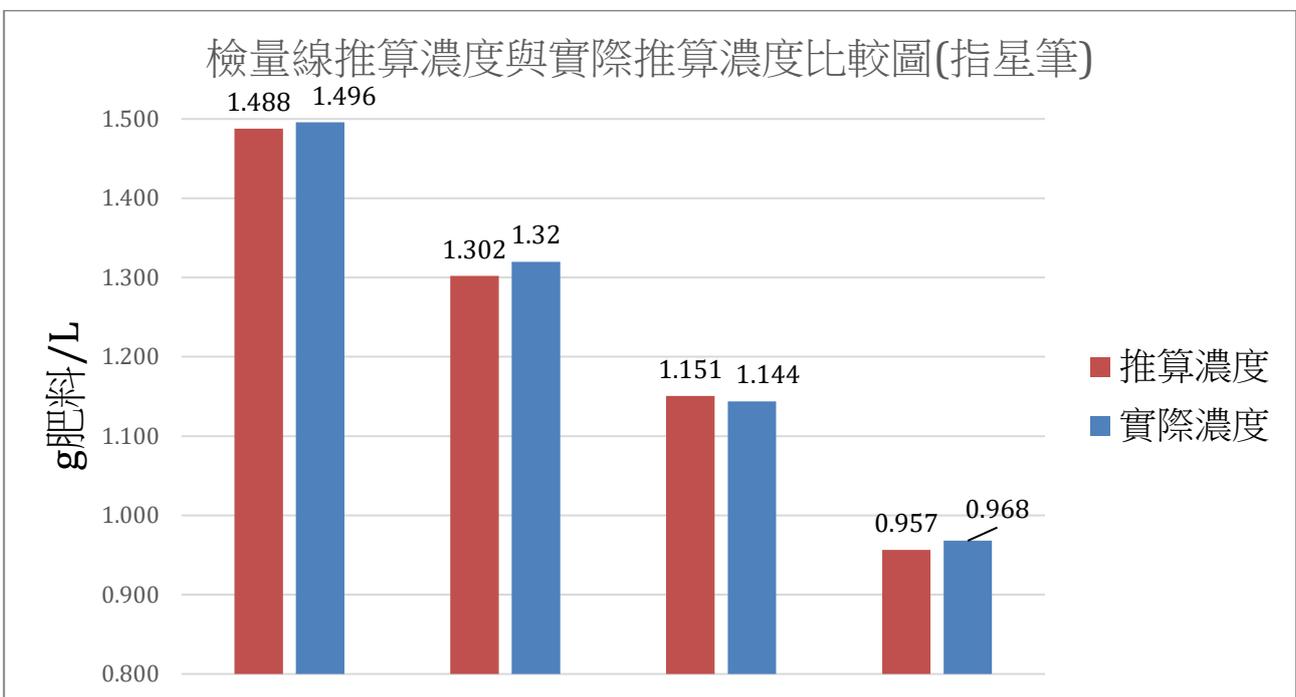
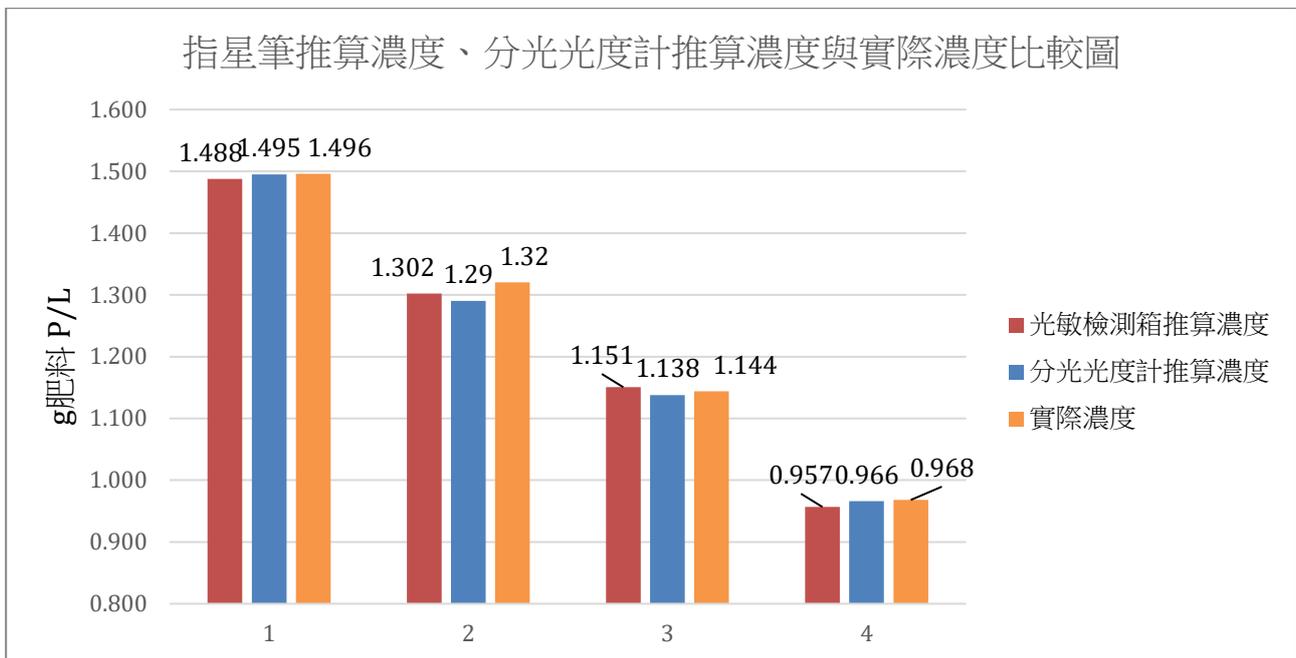


圖 (38) 指星筆在自製檢測箱測出之濃度與實際濃度比較圖

由圖(37)可知檢量線的 R 值高達 0.992，而為了測試檢量線的準確度，我們也將濃度為 0.968、1.144、1.32、1.496 g 的含磷肥料溶液帶入檢量線中，檢量線推出的結果為 0.957、1.151、1.302、1.488，如圖(38)。若將數值以四捨五入取到小數點後第二位，則最大誤差值不超過±0.02。

### (四)比較自製檢測箱與分光光度計之含磷肥料溶液檢測結果



圖(39)指星筆推算濃度、分光光度計推算濃度與實際濃度比較圖

由圖(39)可知，分光光度計所推算的濃度取四捨五入至小數點後第二位與實際濃度完全相同。而將光敏檢測箱所推算的濃度取四捨五入至小數點後第二位與實際濃度誤差值不超過不超過 $\pm 0.02$ 。故我們認為我們光敏檢測箱是便於攜帶且可進行初步濃度推算的儀器。

## 伍、 討論

### 一. 實驗(一)：

由圖(21)中可以發現，綠豆在不同含磷濃度的肥料中，濃度與生長高度並不是呈現正比的線性關係。因此我們認為，當濃度過低與過高時，生長效果反而是不好的。而在每天觀察測量綠豆的生長高度時，我們發現數據有時會有下降的情形，經觀察後發現，未發芽的綠豆容易有發霉的情形如圖(40)，因此我們上網查詢各種原因，發現綠豆吸濕性強，這才導致發霉。這些發霉的綠豆並不會列入每天的長度紀錄中。



圖(40)為綠豆種植時發霉實際圖

## 二. 實驗(二):

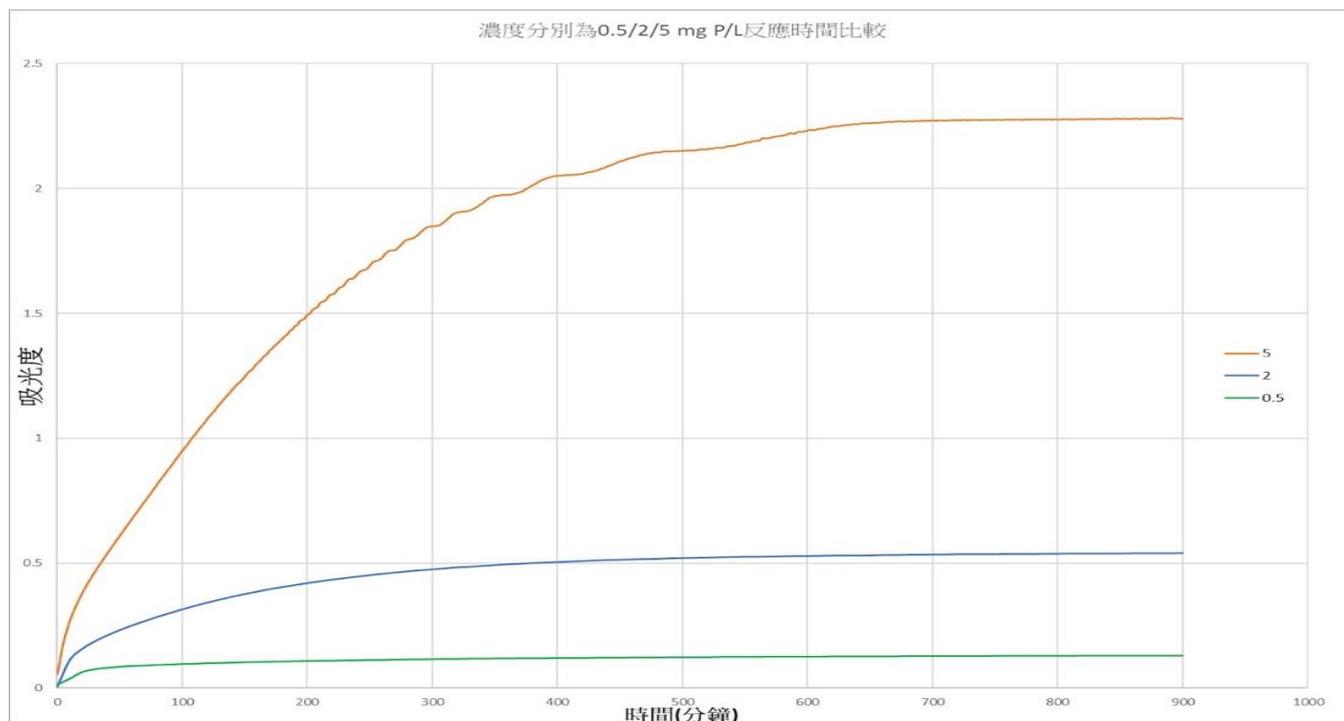


圖 (41) 濃度分別為 0.5/2/5 mg P/L 反應時間比較

根據圖(41)，我們發現：

- (一) 濃度不同，所需的反應時間也不同。溶液磷濃度越高，完全反應所需的時間越長。反之，溶液磷濃度越低，所需的完全反應時間越短。

我們推論濃度越高，反應物越多，故需要的反應時間就越長。

- (二) 濃度越高，單位時間內的顏色深淺變化起伏較大。反之，濃度越低單位時間內的顏色深淺變化起伏較小。

我們推論呈色試劑中的鉬離子為過量試劑，因此當含磷溶液濃度越高時，反應物越多，使得單位時間內反應較劇烈。

## 三 實驗(三):

在配置磷濃度模組當中，我們測試了三種配法，僅測試三有依磷濃度不同呈現藍色的深淺變化，在此推測兩個原因：

- (一) 比較後發現，在呈色試劑 (I) 和 (II) 的實驗配置中，酒石酸銻鉀濃度都高於呈色試劑 (III) 的濃度，經查找資料後發現，在碩博士論文網中的利用鉬藍法測定土壤萃取液中磷之可能誤差探討[11]提到，當酒石酸銻鉀濃度大於 **3 mM** 時，將明顯影響呈色，而測試一中的酒石酸銻鉀濃度為 **5.1 mM**，測試二的則是 **4.7mM**，並且由圖

(20)、圖 (21) 可以看到**測試液 (I)** 的顏色比**測試液 (II)** 深，從此可以確定原因確實與酒石酸銻鉀濃度過高有關，所以我們實驗所用的濃度為 0.27mM.

(二) 推測可能是因為在配置磷標準溶液和呈色試劑時，容器沒有用熱鹽酸清洗，造成殘留在杯壁上的物質干擾。

#### 四 實驗(四)：

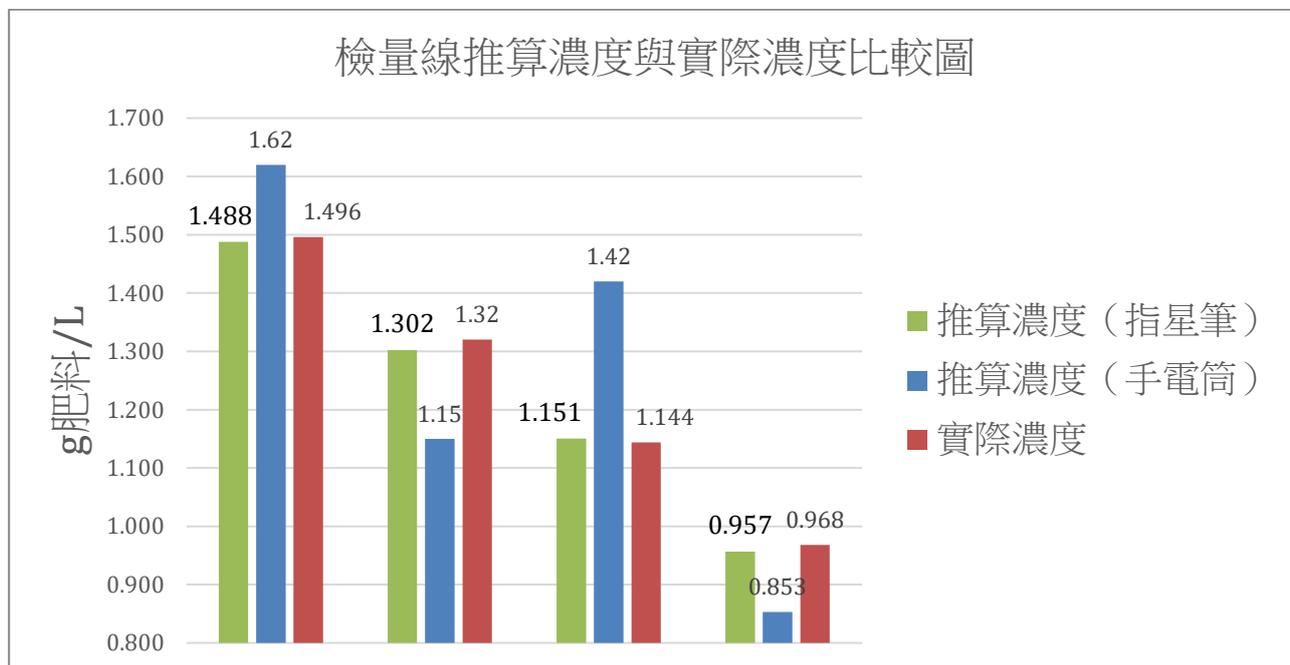


圖 (42) 比較指星筆和手電筒光源測出數值與實際之差距關係圖

由圖(42)可發現，手電筒與指星筆作為光敏檢測箱的光源會對檢量線的製作有極大的影響。使用 540nm 的指星筆作為光源是效果最好的。而我們推測：

指星筆的光光強較高，而當發光體的光強度高時，其光線較為集中，有聚光的效果；相對的，手電筒的光強較低，方光時其光線較為分散而有了泛光的效果。

而當光源有泛光的情形時，物體的受光便會較不均勻，可能因此導致照射後的吸光效果的數值不準確。

#### 未來展望：

- (一) 將此光敏檢測箱延伸應用於更多呈色法的檢測。
- (二) 將此方法應用在自由地運用至生活中
- (三) 將光敏檢測箱縮小
- (四) 避免其他因素影響綠豆生長
- (五) 尋找可以測定更廣範圍之比色法，避免測定物質因此設限

## 陸、參考文獻資料

- [1] 曾承俊 涂瀚嶸 陳歆昀 溫杰勳 李雅婷。水池營養中的 SPY--磷。苗栗縣立興華高級中學。  
<https://reurl.cc/lvQ5W6>
- [2] 行政院環境保護署 (2018 年 2 月 13 日)。水中磷檢測方法—分立式分析系統。  
<https://reurl.cc/8WAx5y>
- [3] 技術士技能檢定化學職類乙級術科測試應檢參考資料  
<https://reurl.cc/rQbyp1>
- [4] 每日頭條 (2018 年 2 月 7 日)。磷肥的功效和作用?。每日頭條。  
<https://kknews.cc/zh-tw/agriculture/v29kryq.html>
- [5] Baidu 百科。分光光度法。<https://baike.baidu.hk/item>
- [6] 維基百科。比爾-朗伯定律。<https://reurl.cc/Y808Xo>
- [7] 石鳳城(2009 年 2 月 25 日)。水質分析與檢測( p.287-307 )。新文京開發出版股份有限公司。
- [8] 盧明智、盧映宇 (2012)。感測器應用與線路分析(第十五章)。全華圖書股份有限公司。
- [9] 何盈德、陳亭瑋、廖芳淳(2013)。逆境求生-幫助綠豆在“鹽逆境”中生長的實驗與研究。
- [10] Baidu 百科。豆芽病害發生的原因。<https://reurl.cc/xl6rqb>
- [11] 宋祥葳 (2003)。利用鉬藍法測定土壤萃取液中磷之可能誤差探討。國立台灣大學。  
<https://hdl.handle.net/11296/z48uv6>