

中華民國第 58 屆中小學科學展覽會  
作品說明書

---

國中組 物理科

第二名

030103

混出美麗新視界

學校名稱：臺南市立後甲國民中學

|                                  |                             |
|----------------------------------|-----------------------------|
| 作者：<br><br>國一 魏渝睿<br><br>國一 歐陽宇彤 | 指導老師：<br><br>胡維娟<br><br>李宜勳 |
|----------------------------------|-----------------------------|

關鍵詞：光的三原色、顏料三原色、  
顏色的混合與分解

## 摘要

本研究主要透過光的三原色(紅色、綠色、藍色)來分析顏料顏色。首先將紅、綠及藍三色發光二極體的光經過障礙物，觀察到光的三原色及顏料三原色(洋紅色、青色、黃色)的混合現象與關聯，藉此建立以光的三原色來分析顏料顏色的技術，並做為原色示範教學。其次，以混色色卡為樣品，量測紅、綠、藍光之反射功率，並利用光的三原色比重將顏料顏色用數值表示，也就是量化。最後，從顏料三原色量到的紅、綠、藍光之反射率，可模擬出不同比例顏色混合下的紅、綠、藍原色比重，與實驗相符，以此方法可以獲得某一顏料顏色的洋紅色、青色、黃色原色組成比例。基於此研究，我們提出顏色混合比例分析儀的構想，並驗證便宜的光敏電阻可做為此構想的量測工具。

## 壹、研究動機

我們曾經在自然課學到光的三原色是紅色(red, R)、綠色(green, G)、藍色(blue, B)，在美術課學過色彩的三原色是洋紅色(magenta, M)、黃色(yellow, Y)、青色(cyan, C)，但我們覺得很奇怪，同樣是三原色，為什麼還有分成光的三原色和顏料(或稱色料)三原色？這兩者又有何差別呢？此外，像美術課在調顏料顏色時，有個問題也是常困擾我們，就是如何將一個特定的顏色用顏料三原色來組成？另外，顏料顏色可否用光的三原色來分解呢？這也是我們感到有興趣的地方。

就我們所知，所謂的「原色」指不能透過其他顏色的調配得到的「基本色」，從一個特定顏色中得到其原色的比例，這就是「分解」顏色；反之，用原色的特定比例去組合成一種顏色，就是「混合」顏色，例如：要顏料三原色調出紫色色彩，就要將洋紅色和青色以某一特定比例混合即可以調出；但若要用光的三原色去調出紫光，就必須利用紅色的光加上藍色的光來合成，而且不同的混合比例會形成不同的紫色。所以我們的研究過程會先探討顏料的三原色與光的三原色的關聯性，從中我們發現可以利用光的三原色來探討顏料的組成，因此，我們將建立用光的三原色來分析顏料混合比例的技術，來了解顏色分解和混合(動機與構想如圖 1-1 所示)。像人眼看到顏料的顏色，是因為人眼接收到經顏料反射後的光而形成，顏色的界定容易因人而異，所以我們希望將顏料的顏色量化來進行研究探討，使用的技術就是去量

取一種顏料顏色反射光中光三原色的反射功率，再利用光的三原色之比重來將顏色定量，以此比重來分辨顏色的差異，進一步討論如何利用洋紅色、黃色、青色顏料三原色混合出我們特定目標的顏色。基於這研究基礎，我們提出簡單的「顏色混合比例分析儀」之構想，以協助在顏料調配成所需顏色的過程(如美術課、油漆調色等)，給予定量建議。

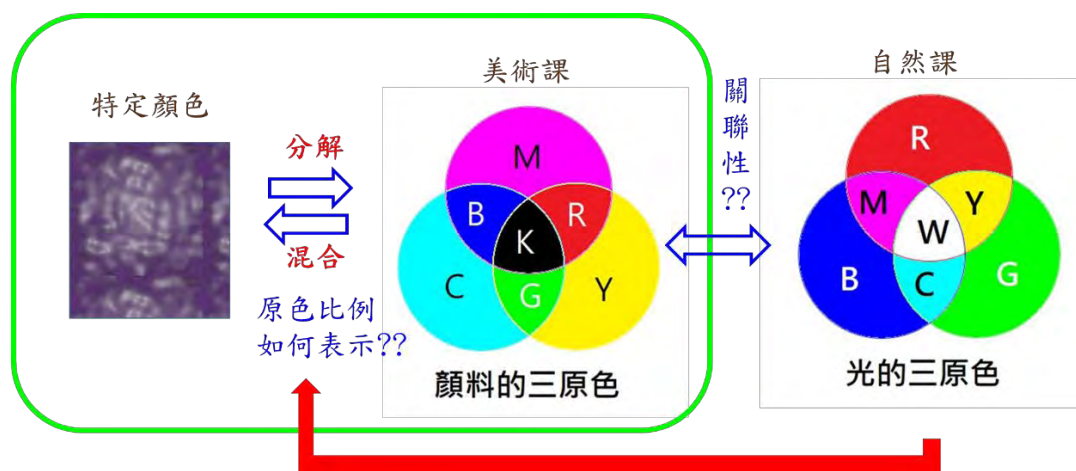


圖 1-1 研究動機與構想示意圖

## 貳、研究目的

- (一) 探討光的三原色與顏料三原色的混合及兩者之間的關聯。
- (二) 利用光的三原色來分解顏料的顏色，得到三原色的比重，進一步將顏色定量化。
- (三) 探討不同偵測器對顏色分解過程的影響，並且測試便宜的光敏電阻是否可以應用到顏色混合比例分析儀上。
- (四) 利用實驗量得的光三原色之比重，進行顏色的混合，討論顏色的還原特性。
- (五) 利用光的反射率的特性，計算分析結果，並與實驗相對應。

## 參、研究設備及器材

### (一) 實驗器材:

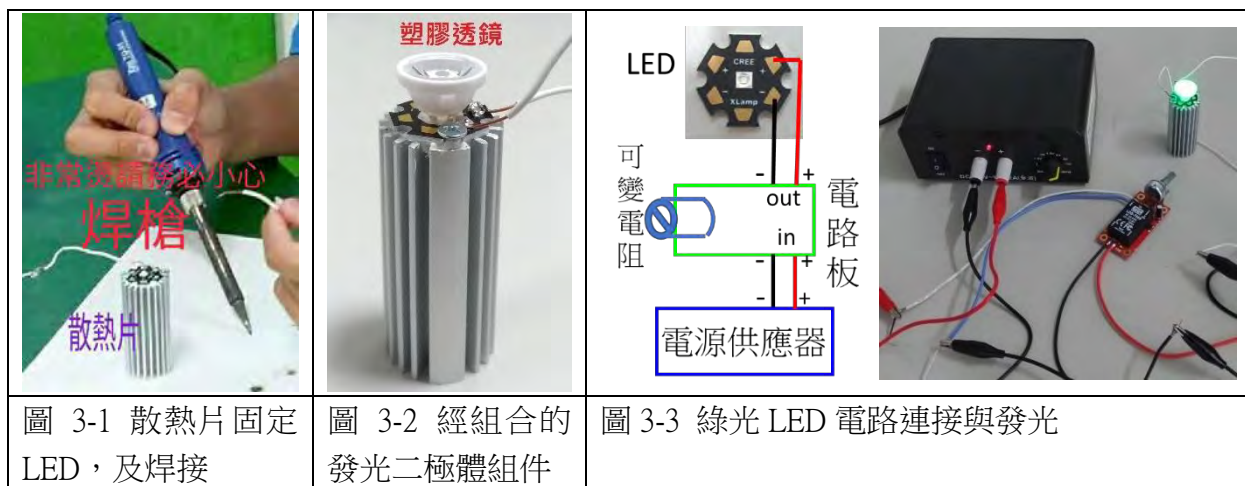
|   |   |  |   |
|---|---|--|---|
|    |    |    |    |
| 發光二極體(LED)  | LED 夾具  | LED 用電路板   | 電源供電器   |
|    |    |    |    |
| 濾波片   | 色卡  | 樣品架  | 凸透鏡   |
|   |   |   |   |
| 底板  | 支撐座與壓條  | 光敏電阻   | 三用電表  |
|  |  |  |  |
| 光功率計  | 麵包板   | 鱷魚夾  | 護目鏡   |

### (二) 發光二極體(light emitting diode, LED)的組裝

- (1) 發光二極體是由 CREE 公司製造,有紅光(630nm)、綠光(525nm)、藍光(450nm)及白光(6700K)四種不同的元件。
- (2) 先將發光二極體背面塗上散熱膏,再鎖在散熱片上,散熱膏可增加熱傳到散熱片的效果,並預防溫度過熱;然後在正負極接點焊上電線,如圖 3-1,最後再利用有黏性的散熱矽膠將塑膠透鏡(發散角 10 度)黏上,得到圖 3-2 中有收光及散熱功能的發光二極體組件。
- (3) 將電源供應器、電路板及發光二極體組件依序串接(圖 3-3 的左圖),電路板提供兩個主要功能,一是產生穩定電流,另一是電路板的可變電阻可控制發光強弱;依照電路板使用

說明，電路板標示” in” 的接線接到電源供應器，電路板標示” out” 的接線接到發光二極體組件，注意正極接正極，負極接負極。

(4) 將電源供應器開啟點亮發光二極體，圖 3-3 中的右圖為綠光發光情形，以下是我們實驗得到讓 LED 發光的最低伏特數：R(紅色)9V，G(綠色)9V，B(藍色)6V，W(白光)6V。發光後，我們可利用電路板上的可變電阻控制光的強弱。



## 肆、研究過程與方法

### (一)基本原理

三原色可區分為光的三原色及顏料的三原色，光的三原色為紅色(R)、綠色(G)及藍色(B)，當兩道不同顏色的光同時存在，這兩道光的光譜是相加效應，也就是說同時會被我們看到，紅光加綠光成黃光，綠光加藍光成青光，藍光加紅光成洋紅光，如果紅、綠、藍同時混合，就會成為白色(white,W)光，如圖 4-1 左半邊的光三原色相加圖。

而顏料顏色的產生是因為部分顏色的光被物體吸收，而反射出沒被吸收光所呈現的顏色，所以光譜上是相減效應，也就是減掉被吸收的光。顏料的三原色為青色(C)、洋紅色(M)以及黃色(Y)，像黃色之所以會產生，是因為它吸收白光(=紅光+綠光+藍光)中的藍光分量，反射紅光及綠光的部分，紅色與綠色相疊後，即會形成黃色光，並反射至人眼中，所以我們認為物體是黃色。同樣洋紅色顏料吸收了白光中綠光的部分，剩紅光與藍光被反射，產生了洋紅色；青色顏料吸收白光中紅光的部分，並反射綠光及藍光成青色。當黃色顏料加上洋紅色顏料時，黃色顏料會吸收藍光，而洋紅色顏料會吸收綠光，白光中的藍光和綠光被吸收扣除後剩紅光，所以黃色顏料加上洋紅色顏料會成紅色，同樣的原理，洋紅色顏料加上青色顏料會成藍色，

青色顏料加上黃色顏料會成綠色，如圖 4-1 的右半邊所畫，把顏料三原色混合則所有光都被吸收，所以呈現黑色(black)，由於黑色的第一個字母 B 與藍色相同，所以將黑色標示為 K。由於光的混合是屬於相加作用，而顏料混合是屬於相減作用，顏色的三原色分別對應到某一光三原色被吸收減去，所以我們稱光的三原色及顏料的三原色是互補色的關係，例如黃色顏料吸收藍光，黃色與藍色互為互補色。

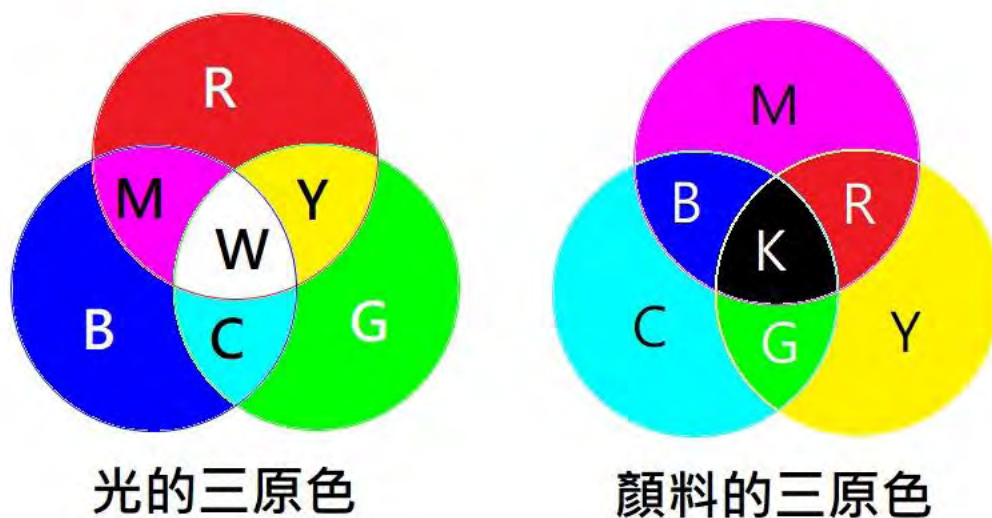


圖 4-1 光與顏料的三原色

我們可以利用一些簡單的數學運算，來表示顏色的合成，用【R】表示紅色的光強度、用【G】表示綠色的光強度、用【B】表示藍色的光強度，從光的三原色特性，我們知道白光【W】=【R】+【G】+【B】。顏料三原色的組成為青、洋紅及黃色，黃色顏料反射黃光【Y】，他的光強度可以用【Y】=【R】+【G】這個數學式來表示，同理洋紅光【M】的光強度就能用【M】=【R】+【B】來表示，也可以將青色光【C】的光強度用【C】=【G】+【B】來表示。

當某一個顏色的光，透過兩個濾波片，將會等於那兩個濾波片穿透率的乘積，例如：將兩個【R】濾波片重疊，通過這兩個濾波片的光就只有【R】，當【R】濾波片和【G】濾波片重疊時，就沒有光透過這兩個濾波片，因為【R】濾波片只能讓紅光穿過，【G】濾波片只能讓綠光穿過；當光穿過【R】濾波片時，只有紅光能經過，而紅光再穿過【G】濾波片，由於紅色的光無法穿過【G】濾波片，所以沒有任何光穿過這兩個濾波片。

如果我們用 \* 來表示兩個濾波片穿透率的乘積，可得到下列的數學式：(參考資料 3)

$$【R】 * 【R】 = 【R】$$

$$\mathbf{[G] * [G] = [G]}$$

$$\mathbf{[B] * [B] = [B]}$$

$$\mathbf{[R] * [G] = [G] * [B] = [B] * [R] = [K]}$$

【K】代表黑色，也就是沒有光穿透。

兩顏料原色混合可以想成兩次反射作用，類似兩個濾波片穿透率的乘積，配合前面顏料三原色的組成，可以得到下列的數學式:

$$\mathbf{[C] * [M]}$$

$$\mathbf{= ([G] + [B]) * ([B] + [R])}$$

$$\mathbf{= [G] * [B] + [G] * [R] + [B] * [B] + [B] * [R]}$$

$$\mathbf{= [B]}$$

$$\mathbf{[M] * [Y]}$$

$$\mathbf{= ([B] + [R]) * ([R] + [G])}$$

$$\mathbf{= [B] * [R] + [B] * [G] + [R] * [R] + [R] * [G]}$$

$$\mathbf{= [R]}$$

$$\mathbf{[Y] * [C]}$$

$$\mathbf{= ([R] + [G]) * ([G] + [B])}$$

$$\mathbf{= [R] * [G] + [R] * [B] + [G] * [G] + [G] * [B]}$$

$$\mathbf{= [G]}$$

$$\mathbf{[C] * [M] * [Y]}$$

$$\mathbf{= ([G] + [B]) * ([B] + [R]) * ([R] + [G])}$$

$$\mathbf{= [B] * ([R] + [G])}$$

$$\mathbf{= [B] * [R] + [G] * [B]}$$

$$\mathbf{= [K]}$$

這部分的討論主要目的在了解原色混合變化的大概輪廓，是將光的三原色與顏料三原色假設是理想狀況，也就是紅、綠、藍光的光譜彼此間緊密連接沒有重疊，且整個頻帶範圍的強度都一樣，實際上，像【M】及【Y】顏料以 0.98:0.02 混合，顏色會很接近標準的洋紅色，但還是可以看出不同，也就是泛稱的”洋紅色”實際上還是涵蓋許多不一樣的顏色，因此，

後續我們會發展量化方法及理論運算分析來進行區別與詳細探討。

## (二)研究架構

依照研究動機的敘述，本研究依序分成原色分析、顏色分解及顏色混合三部分，主要內容如流程圖(圖 4-2)所示，並將實驗步驟分敘於後。

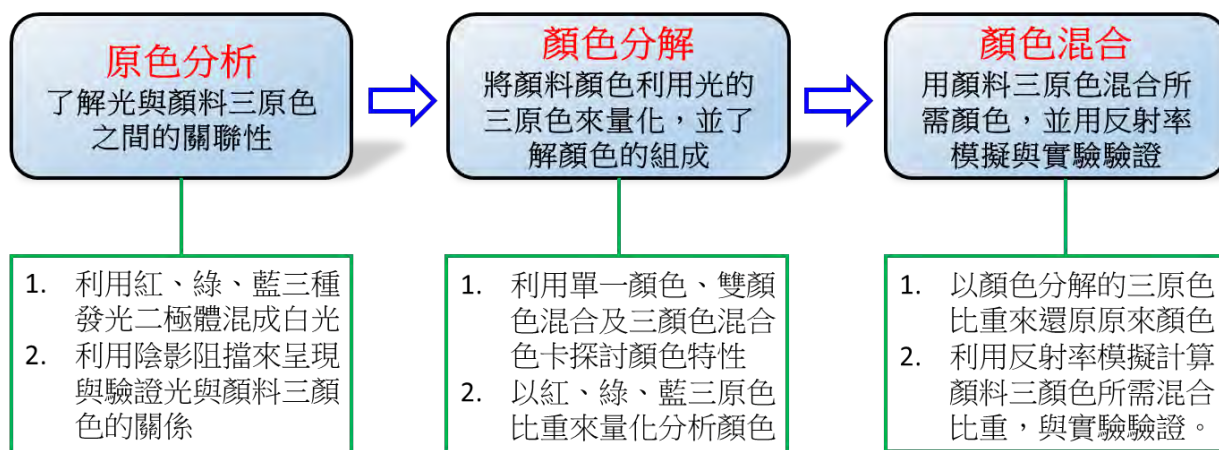


圖 4-2 研究架構流程圖

## (三)原色分析實驗步驟(架構圖如 4-3 所示)

- (1) 將紅、綠、藍發光二極體組件鎖在支撐架上，依圖 3-3 將發光二極體組件串接電路板及電源供應器，同時可開啟發光二極體，開始進行顏色基本特性的分析實驗。
- (2) 我們先將紅、綠、藍的發光二極體朝白牆照射，調整發光二極體的照射方向，使三種顏色照射範圍重疊，在三種顏色光共同重疊的位置放入白紙當障礙物，改變障礙物與白牆間的距離，觀察影像的顏色變化。



圖 4-3 原色分析的實驗架構

## (四)顏色分解實驗步驟



這部分研究，我們會利用光敏電阻及光功率計作為光偵測的元件，除了研究顏色的分解外，我們也想知道在顏色混色中，數十元的光敏電阻是不是有能力取代昂貴的光功率計，所以第一部分會先量測光敏電阻及光功率的對應，第二部分再進行顏色分解。

#### 1.量測光敏電阻及光功率關係的步驟:

- (1) 白色發光二極體經透鏡聚光，將光功率計的偵測頭放在透鏡成像位置。
- (2) 藉由調整電路板的可變電阻，我們可以調整發光二極體發光強度，因為可變電阻上沒有刻度，所以，我們在發光二極體正負端，用鱷魚夾並聯接到三用電表，選電壓檔來讀取發光二極體上的電壓。
- (3) 由於光敏電阻對不同顏色有不同的反應能力，為保持相同的量測條件，所以我們在光經透鏡之後，需先擺放紅濾波片，量取紅光功率。
- (4) 調整可變電阻，同時讀取三用電表電壓及光功率計的功率並紀錄，可以得到加在發光二極體的電壓與輸出功率的關係。
- (5) 將光敏電阻取代光功率計，用三用電表電阻檔來讀取光打到光敏電阻後的電阻值，紀錄發光二極體的電壓與光敏電阻的電阻值，跟上一步驟的功率值對照，可以得到紅光時光敏電阻與光功率的關係。
- (6) 接續更換綠及藍濾波片，量得綠光及藍光光敏電阻與光功率的關係。

#### 2.顏色分解成三原色分量的量測步驟(架構圖如 4-4 所示)

- (1) 同樣用白光經透鏡聚焦，在透鏡後方成像的位置加上樣品架，此為待測樣品擺放位置，先在其上方放上白紙來對光。
- (2) 入射光以斜向方式入射，從反射定律，光會在法線另一邊以同樣的角度的反射出射，為了不要量測反射白光，我們在正向法線方向適當距離上放置一凸透鏡來收集光。
- (3) 光聚焦後，將光打入功率計的偵測頭，移動偵測頭至讀取到能量最大值後，再固定在底板上。
- (4) 在收光透鏡與偵測頭中間，放置濾波片架，後續會分別放上紅、綠、藍濾波片進行實驗。
- (5) 將樣品座的白紙換為色卡，進行不同系列的色卡量測，先將聚焦點聚在色卡上，從無濾波片開始，接著依序換為紅、綠、藍三種濾波片，量測各種濾波片下的反射功率，將所得數據以 EXCEL 畫出進行分析與討論。

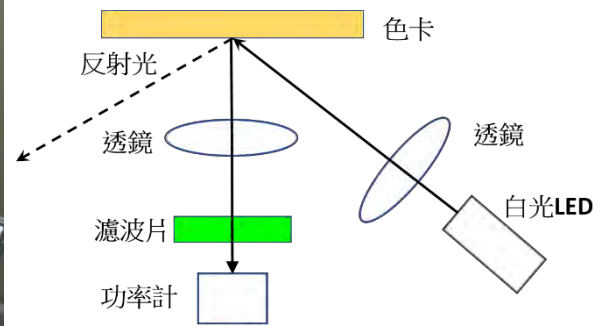


圖 4-4 利用功率計進行顏色分解的實驗架設

- (6) 依序以不同混合比例的單一顏色色卡、雙顏色色卡及三顏色色卡進行實驗量測。
- (7) 完成光功率計的量測後，將光功率計改成光敏電阻同樣進行色卡的量測，如圖 4-5，並將數據以 EXCEL 畫出進行分析與討論。

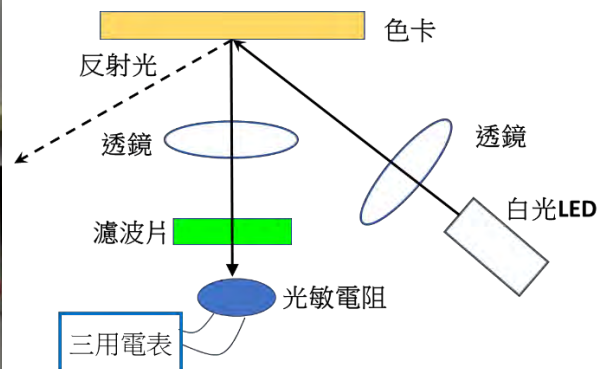
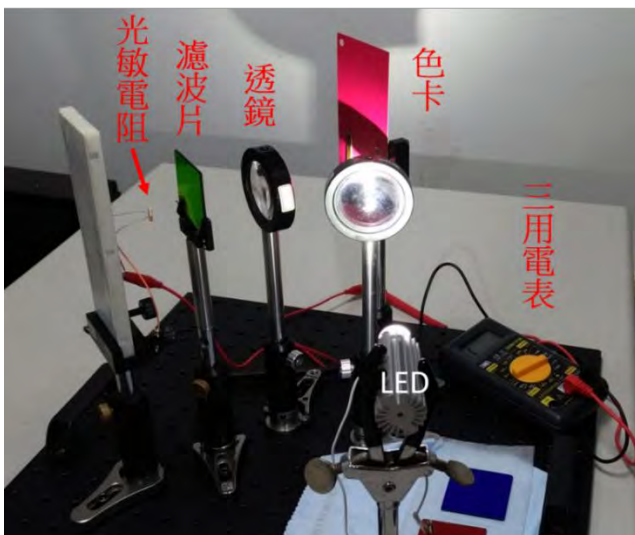


圖 4-5 利用光敏電阻進行顏色分解的實驗架設

#### (五)顏色混合實驗步驟(架構圖如 4-6 所示)

- (1) 先固定好樣品座後，放上描圖紙，將三個白光發光二極體照向描圖紙的中心。
- (2) 將紅、綠、藍濾波片放在濾波片架上，並固定於支撐架，分別擺在三個白光發光二極體的前方，將白光發光二極體改變為紅、綠、藍三種光。
- (3) 以 Y100 為例，從前面的實驗數據取得 Y100 紅、綠、藍三種顏色的比例，利用電路板的可變電阻，調整三色光的強度至前述比例。
- (4) 將 Y100 色卡取代描圖紙，讓光直接打到色卡上，觀察色卡顏色與光的顏色，並拍照紀錄，

其他顏料色卡可用同樣方式驗證。

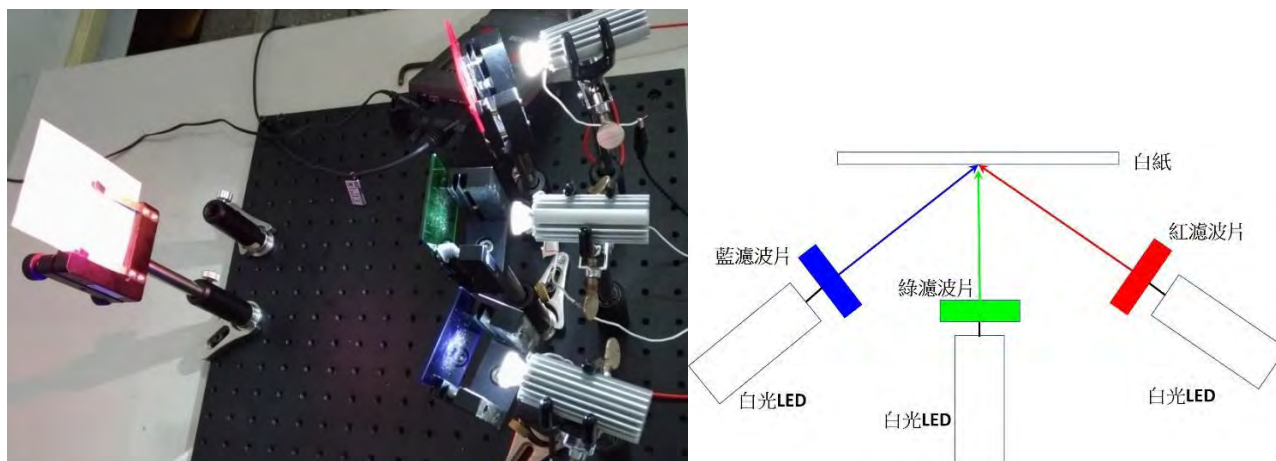


圖 4-6 顏色混合的實驗架設

## 伍、研究結果與討論

### (一)顏色分析

利用紅、綠、藍發光二極體發光範圍重疊成白光投影在牆上，中間加入白紙當成障礙物，產生陰影區域會與白紙至牆壁的距離有關，依序減少白紙與牆壁距離產生的影像變化如下：

| 實驗結果<br>(依序減少白紙與牆壁距離) | 說明   |
|-----------------------|--|
|                       | <p>圖 5-1 當白牆與障礙物距離最遠時，出現在最左邊的色塊因為障礙物阻擋了綠光，所以只剩紅、藍光，因此呈現洋紅色。中間的部分則是因為阻擋了藍光，所以是黃色。最右邊，因為阻擋了紅光，所以只剩下青色。</p> |
|                       | <p>圖 5-2 當白牆與障礙物距離縮減時，白色區域縮減，最後消失，只剩下洋紅、黃、及青色，也就是顏料三原色。</p>  |

|  |  |
|--|--|
|   | <p>圖 5-3 繼續縮減白牆與障礙物距離時，三個原色靠近，甚至重疊，最左邊還是洋紅，左邊靠近中間的地方因為障礙物遮住了綠、藍色的光，因此呈現紅色。正中央一樣是黃色。右邊靠中間因為障礙物遮住了藍、紅色的光，因此是洋紅色，最右邊還是青色。</p> |
|   | <p>圖 5-4 隨著白牆與障礙物距離繼續縮減，三個原色繼續重疊，黃色區域慢慢減少，最後消失，只剩下四種顏色，最左邊仍然是洋紅，左邊偏中是紅色，右邊偏中是綠色，最右仍是青色。</p>                                |
|  | <p>圖 5-5 當從圖 5-4 的位置再繼續縮減白牆與障礙物間的距離，中央開始出現黑色區域，黑色區域隨著白牆與障礙物間的距離縮減而逐漸擴大，由於障礙物將所有顏色的光都遮住了，因此呈現黑色，右邊偏中依然是綠色，最右仍是青色，</p>       |

圖 5-6 中，我們用簡單陰影的概念來解釋成像的顏色變化，咖啡色區塊代表障礙物，虛線對應到圖 5-1 至 5-5 的白牆與障礙物的距離，下方紅、綠、藍區塊分別表示紅、綠、藍色的發光二極體，所拉出的線條之間的區塊代表阻擋掉該顏色的光，上方英文代表該區塊的顏色 (R 代表 red 紅色、G 代表 green 綠色、B 代表 blue 藍色、Y 代表 yellow 黃色、M 代表 magenta 洋紅色、Y 代表 yellow 黃色、C 代表 cyan 青綠色、W 代表 white 白色，K 代表 black 黑色)，以標示”圖 5-1”的虛線為例，最左邊障礙物阻擋了綠光，所以  $【R】 + 【B】 = 【M】$ ，呈現洋紅色，再往右移的區域，剛好閃過綠光和藍光的阻擋的區域，所以維持白色，正中央區域藍光被阻擋到， $【R】 + 【G】 = 【Y】$ ，所以呈現黃色，最後左至右顏色出現的順序為 M-W-Y-W-C，與圖 5-1 相同。依序減少白牆與障礙物的距離，分別可以得到圖 5-2 至 5-5 對應的位置。部分光被阻擋，代表減色的概念，以圖 5-6 中標示對應到”圖 5-3”的虛線為例，左邊及中央分別

為【M】及【Y】，在【M】及【Y】中間重疊的部分相當於【M】\*【Y】=【R】(如基本原理中的說明)，所以得到紅光，這以表示改變白牆與障礙物的距離，可以演示顏料三原色的混合；同理最右邊【C】及中央【Y】中間重疊的部分相當於【C】\*【Y】=【G】，所以得到綠光。標示”圖 5-5”的虛線中央區域對應到【R】\*【G】=【K】，也就是(【M】\*【Y】)\*(【C】\*【Y】)=【K】，這區域表示紅、綠、藍光都被障礙物擋到，所以呈現黑色。

顯然從這套系統中，標示”圖 5-1”虛線可以示範光的三原色的疊加特性，改變白牆與障礙物間的距離可以示範顏料三原色的疊加特性，此外，變換障礙物形狀可進行陰影遊戲，及

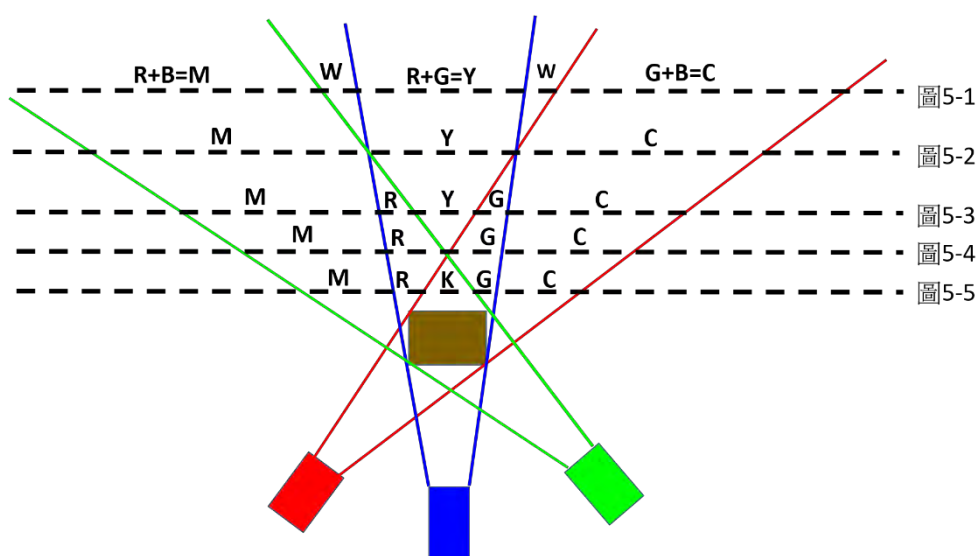


圖 5-6 三色發光二極體經障礙物後，顏色變化分析

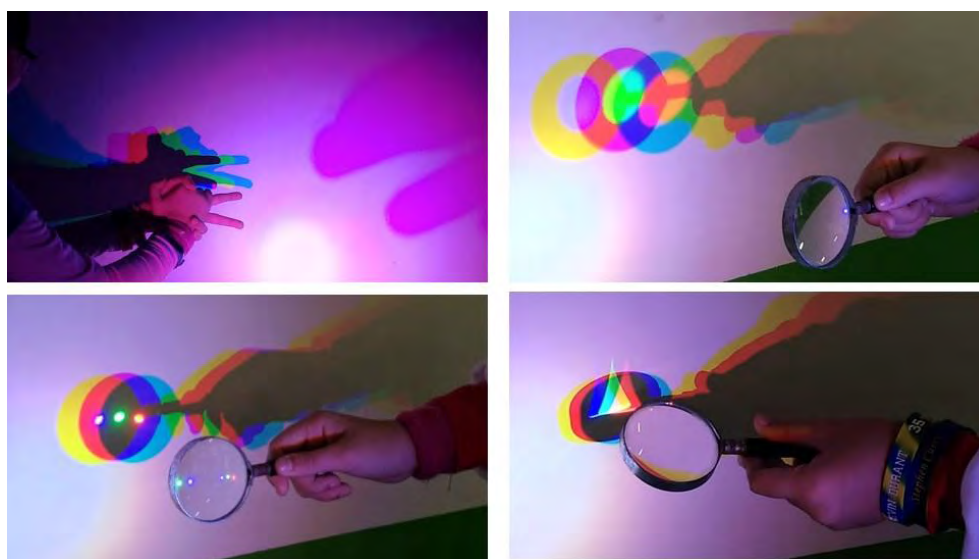


圖 5-7 陰影遊戲及利用放大鏡混出美麗新視界

放大鏡穿透與聚焦變化，可在白牆上混出美麗新視界，如圖 5-7，我們認為這一套系統可做為認識光的三原色、顏料三原色及原色混合的示範教材。再者，這個實驗表示顏料三原色可用光的三原色組成，而任意顏料顏色又可用顏料三原色混合，所以，接續的研究將透過光的三原色來探討顏料顏色的分解與混合。

## (二)顏色分解

顏色分解的研究會因選用功率計及光敏電阻來當偵測器，所以會區分為兩大區塊，但分析技術都是採用前面所提以光的三原色來分解顏料顏色。我們看到顏料的顏色，主要取決於顏料反射光的光譜，從光是由紅、綠、藍三原色所組合而成，因此我們可以量測反射光的紅光反射功率( $P_r$ )、綠光反射功率( $P_g$ )及藍光反射功率( $P_b$ )來量化顏色，量化的運算式為：(三原色其中一種) / ( $P_r + P_g + P_b$ )，用以表示該原色的比重，也就是三原色的比重分別為：

$$\text{紅光比重: } P_r / (P_r + P_g + P_b) \quad (1)$$

$$\text{綠光比重: } P_g / (P_r + P_g + P_b) \quad (2)$$

$$\text{藍光比重: } P_b / (P_r + P_g + P_b) \quad (3)$$

從紅、綠、藍光是光的三”原色”，表示彼此間獨立不相干，所以三個比重類似於三維座標定位的概念來量化顏色。由於三原色比重總和為 1，若紅光比重及綠光比重確定，藍光比重就唯一等於(1-紅光比重-綠光比重)，所計算比重除了將顏色量化外，還有一個好處，就是可以將定位系統簡化成類似二維座標系統。

首先，我們以光功率計作為實驗量測元件，我們用白光打到色卡上，反射光依次經過紅、綠、藍濾波片，再利用功率計分別量取紅、綠、藍光的功率，代入上面公式計算得到三原色的比重，在選擇樣品的顏色上，我們依序以不同混合比例的單一顏色色卡、雙顏色色卡及三顏色色卡進行實驗。為避免名詞混淆，我們先解釋「比重」與「比例」在這份報告的用法，對某一顏料顏色，反射光以紅、綠、藍光的三原色分解計算比重，「比重」這名詞主要用在光學特性討論上，而該顏料顏色可用洋紅、黃、青顏料依特定比例混合得到，「比例」這名詞主要用在顏料三原色的組成含量上。

單一顏色色卡實驗上，圖 5-8 是黃色系列色卡的反射功率及三原色比重實驗結果，一般油墨印刷原色網點色階為 0~100%，色階比例 100%的黃色標示為 Y100，圖 5-8 中橫軸變化表示黃色顏料比例以 10%增加，從黃色顏料反射紅光和綠光，吸收藍光，圖 5-8(a)的反射功率明

顯符合此一特性，隨著黃色比例增加，藍光被吸收的量增加而反射功率減少，紅和綠光反射功率變化不大。因此，圖 5-8(b)中藍光減少使得比重也跟著下降，最後藍光往 0 趨近，一般不等於 0 是因為殘留一些白光反射的量；紅光與綠光反射功率變化不大，但因比重公式分母(總反射功率)變小，所以紅光及綠光比重顯示出增加的現象。圖 5-9 是洋紅色卡的實驗結果，從洋紅色顏料吸收綠光，反射紅及藍光，從圖 5-9(a)中 M100 的反射功率可以發現，藍光的反射功率偏低，由於我們實驗發現一般藍光反射功率都偏低，功率計對藍光反應較不靈敏可能是一個原因，再者，白光發光二極體的反射光譜非均勻是另一個原因，”均勻”的白光表示紅光、綠光及藍光反射功率是 1:1:1，圖 5-9(a)顯示綠光反射功率較強而藍光較弱，圖 5-9(b)顯示，即便紅光反射功率變化不大，因總功率減少，使得紅光比重增加，藍和綠光反射功率下降，真分數分子分母同時減少，造成藍和綠光比值減少。同樣現象也發生在青色改變的實驗結果中。

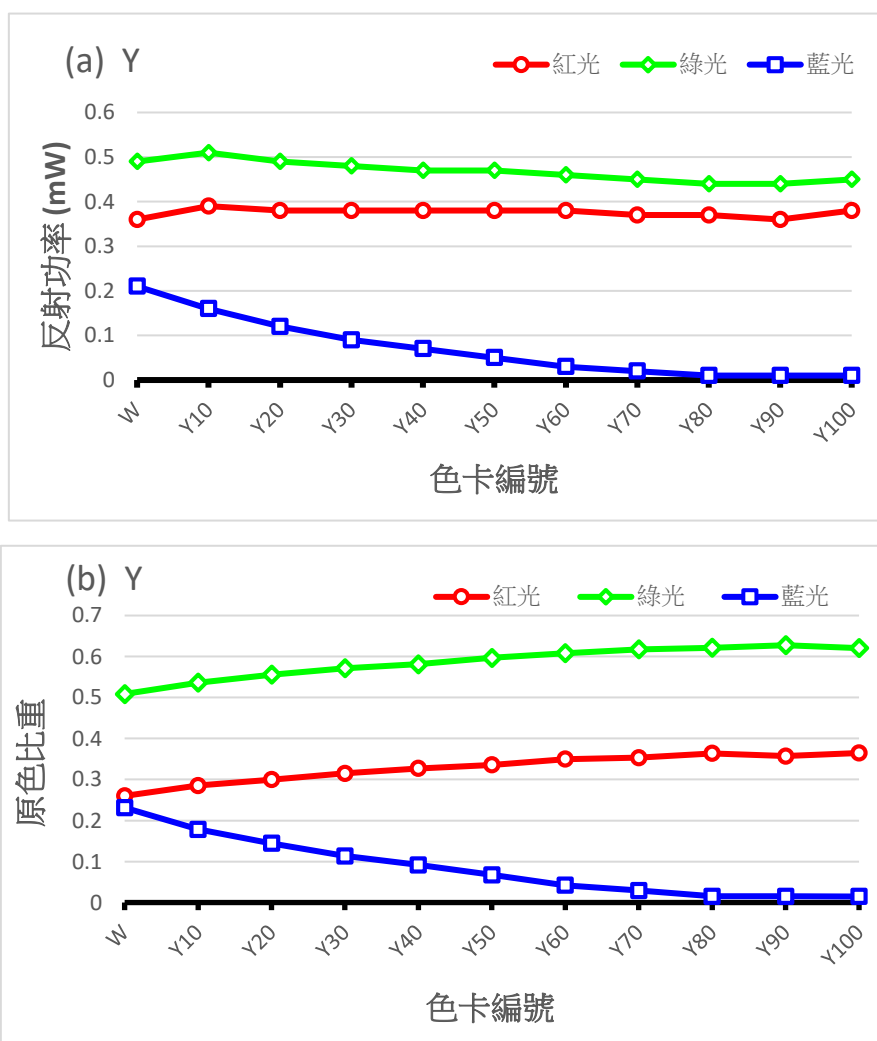


圖 5-8 用功率計測量黃色系列色卡的(a)反射功率及(b)三原色比重

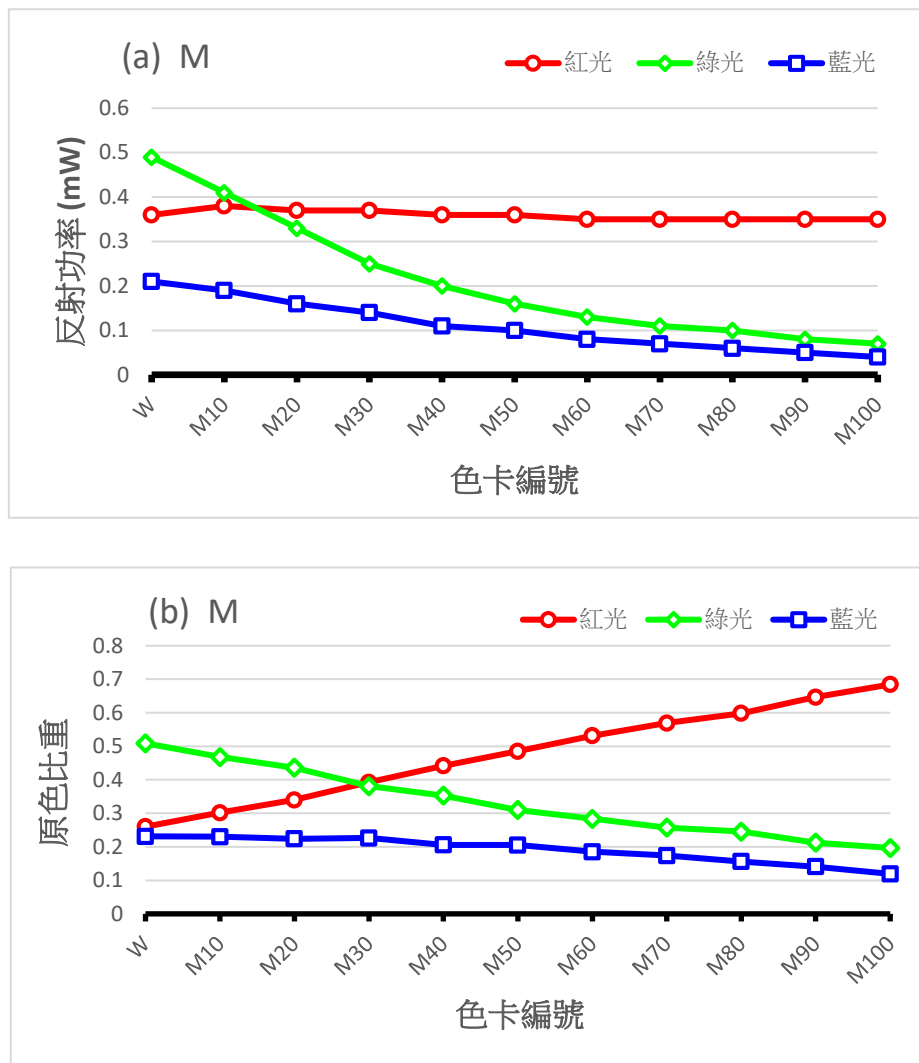


圖 5-9 用功率計測量洋紅色系列色卡的(a)反射功率及(b)三原色比重

在雙色混合實驗中，圖 5-10 是我們針對洋紅色與黃色不同比例混合色卡量出的三原色比重。以洋紅色的比例每減少 10%，黃色的比例同時增加 10% 的方式來量測紅、綠、藍光功率及計算比重作圖，洋紅色顏料吸收綠光，黃色顏料吸收藍光，紅光同時被兩種顏料反射，所以圖 5-10(a) 中紅光反射功率變化不大；隨著洋紅色比例減少綠光被吸收也減少，所以反射功率上升，同時黃色比例增加使得藍光被吸收增加，而藍光功率下降。圖 5-10(b) 中藍及綠光比重趨勢與反射功率相同，而紅光比重隨洋紅色比例減少而下降，在於綠光大量增加，使得總反射功率(比重的分母)增加。

在三顏料混合實驗中，我們使用另一組色卡進行三色同時改變色卡的實驗，結果顯示在圖 5-11 中，圖中分成 4 區分別對應到: (1)C 接近 100，(2)M 接近 100，(3)Y 接近 100 及(4)三色比例都小於或等於 65，基本上從光三原色比重可以大概判定出顏料顏色，像第(2)區的紅光比



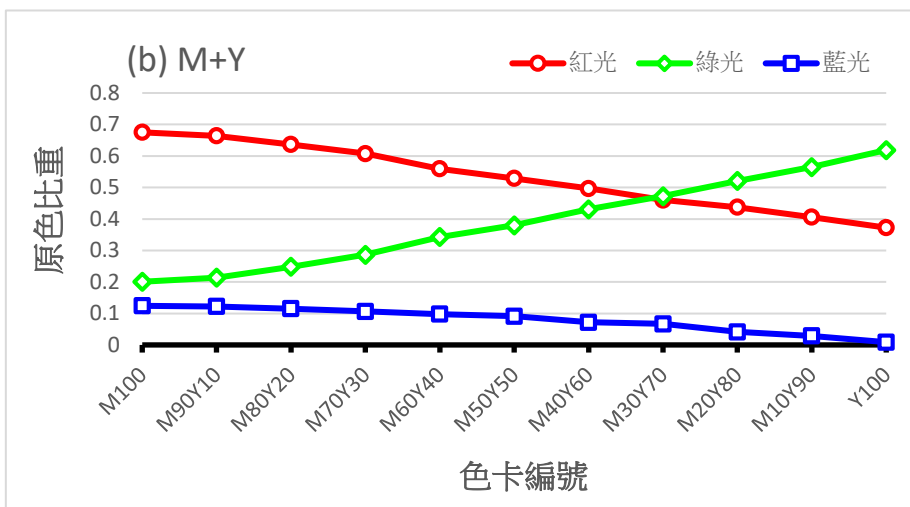
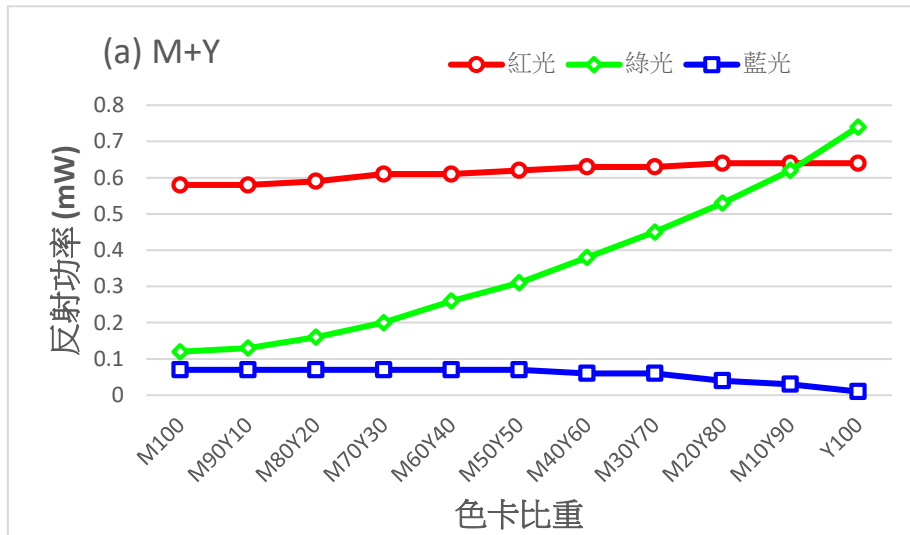


圖 5-10 用功率計測量洋紅色和黃色混合色卡的(a)反射功率及(b)三原色比重

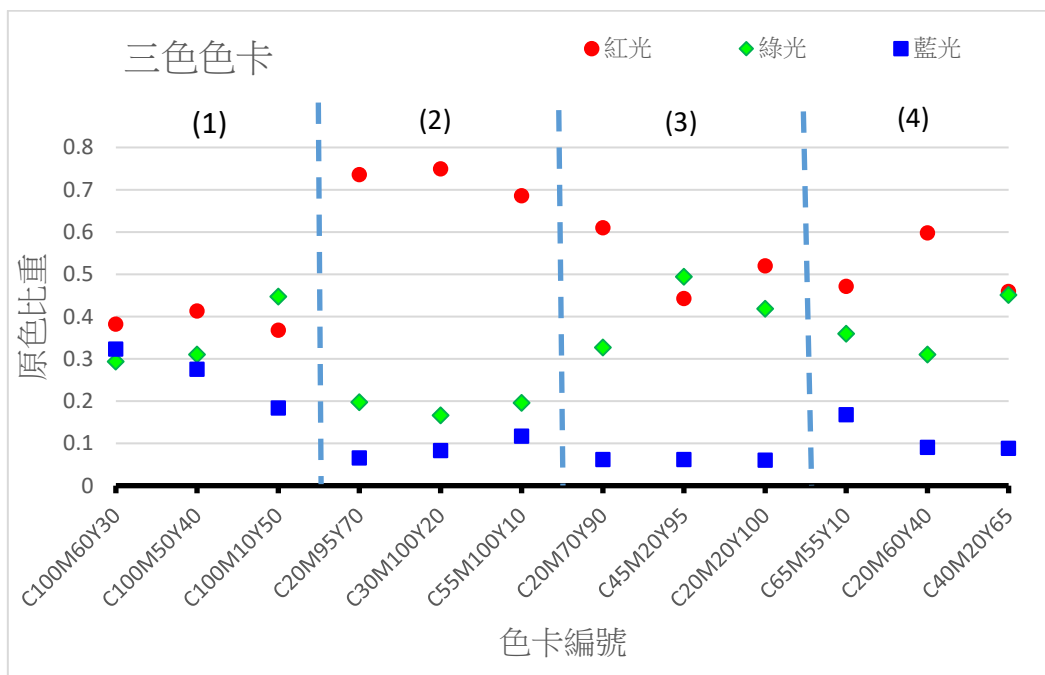


圖 5-11 用功率計測量三色混合色卡的三原色比重

重大，顏色則偏向紅色系，由於我們實驗發現藍光反射功率一向不大，第(1)區中藍光比重相對較大，顏色偏向藍色系，這區中 C100M10Y50 綠光比重高，顏色偏向藍綠色。由於三色混合色卡完整取得不易，無法進行完整控制變因的實驗，但可以從三原色比重判別顏色會接近紅或綠或藍色，此部分實驗會與後面顏色混合模擬相互驗證。

我們最初的構想就是要用便宜簡單的偵測元件，未來可用在顏色比例量測儀器上，接著我們選用數十元的光敏電阻替換光功率計來實驗。光敏電阻的基本特性是打在電阻上的功率值越大，電阻值越小，相反的，打在電阻上的功率值越小，電阻值越大，所以我們需要先知道光敏電阻值與光功率的關係。我們利用同樣的紅光強度打到功率計及光敏電阻，分別去測得它的電阻值以及功率計值，得到的是一條非線性的曲線，如圖 5-12，我們對電阻值取了一個 Log 值去繪圖，發現它是一個線性(如圖 5-13)，Log 這是計算指數大小的函數，我們從文獻中發現功率是電阻值的某一指數次方的關係，所以利用 Log 將這個指數提出，使得兩變量呈現線性關係，計算上則是靠 EXCEL 內建程式幫忙。我們用取完 Log 這些數據點去做線性適配，得出圖 5-13 中的適配方程式。同樣量取綠光與藍光的電阻值與功率對照圖，我們可以得到光敏電阻與功率計的轉換關係如下：

$$\text{紅光: } P_r = -0.8841 \text{Log}(R_r) + 1.1016 \quad (4)$$

$$\text{綠光: } P_g = -1.0219 \text{Log}(G_r) + 1.2624 \quad (5)$$

$$\text{藍光: } P_b = -0.4709 \text{Log}(B_r) + 0.7484 \quad (6)$$

$R_r$ ， $G_r$ ， $B_r$  分表代表紅、綠、藍光量到的電阻值。以紅光為例，我們將量到的電阻值  $R_r$  帶入(4)式，得到換算出功率計值  $P_r$ 。

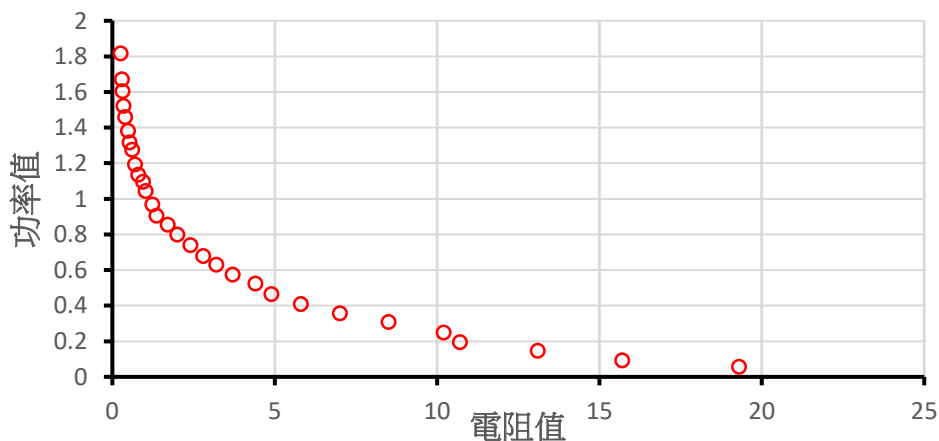


圖 5-12 紅光光敏電阻電阻值與光功率的關係

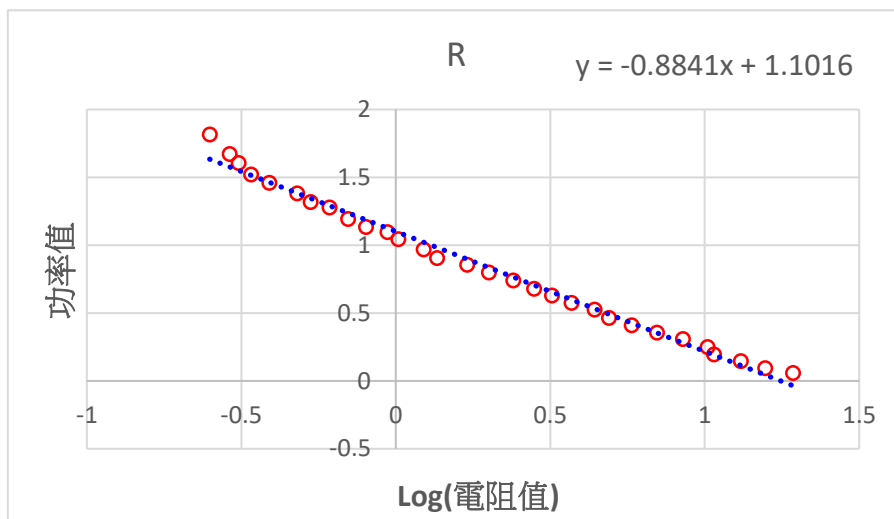


圖 5-13 紅光光敏電阻取對數與光功率對照表

接著實驗的步驟和流程跟前面原色比重的量測相同，唯一不同的是用光敏電阻替代光功率計來測量功率。我們先以光敏電阻測量單一顏色黃色系列色卡的三原色比例圖，如圖 5-14，當黃色比例上升時，紅光跟綠光比重上升，而藍光比重下降，與圖 5-8(b)用功率計量出的趨勢相同。同樣的，圖 5-15 為洋紅色與黃色雙色混合色卡利用光敏電阻量出的原色比重，隨著洋紅色比例減少及黃色比例增加，綠光比重上升，紅光及藍光比重下降，與圖 5-9(b)利用功率計量到的結果趨勢相符合。

比較圖 5-8(b)及圖 5-14 對黃色系列色卡的量測結果，功率計及光敏電阻量到的三原色比重的數值大小不盡相同，像圖 5-8(b)中 Y100 中紅、綠、藍光比重分別 0.36471, 0.62066 及 0.01463，圖 5-14 光敏電阻量測的值分別為 0.227377, 0.708367 及 0.064256，這個差異來自於光敏電阻和功率計對不同波長的敏感程度不同所造成的，我們發現光敏電阻相較於功率計對綠光是敏感許多，從我們搜尋到光敏電阻的規格，光敏電阻最敏感的波長在 560nm，也就是在綠光附近，所以量到的綠光反射功率會較強，造成綠光比重會較高。然而，延伸而出的另一個問題是：我們已經做了功率值與電阻值對照關係，為何還會有誤差呢？我們認為主要是來自於光譜分布的問題，以圖 5-12 為例，我們是以紅色濾波片來選取白色發光二極體在紅色區域的光譜進行量測，所以量到的是寬頻帶(約 1/3 白光光譜範圍)所有的光功率總和，然而在進行色卡量測時，是對色卡反射光譜紅色區域進行量測，這兩者光譜分布並不會相同，加上光敏電阻對所有波長的反應能力也不會都相同，所以造成差異。雖然光敏電阻及光功率計對不同波長敏感

度不同，但最主要的「趨勢」是非常相像的，後面顏色混合的報告，會以顏料三原色量到的比重去計算混合的比例，例如以 C100 及 Y100 去混合成 C90Y10，我們是以實驗量到 C100 及 Y100 的反射率去計算三原色比重的擬合值，再與實驗 C90Y10 的三原色比重相比較，只要數據都用同一種量測儀器量到的，不會影響混合比例，所以我們認為使用光敏電阻去量測三原色比例是可行的方法。

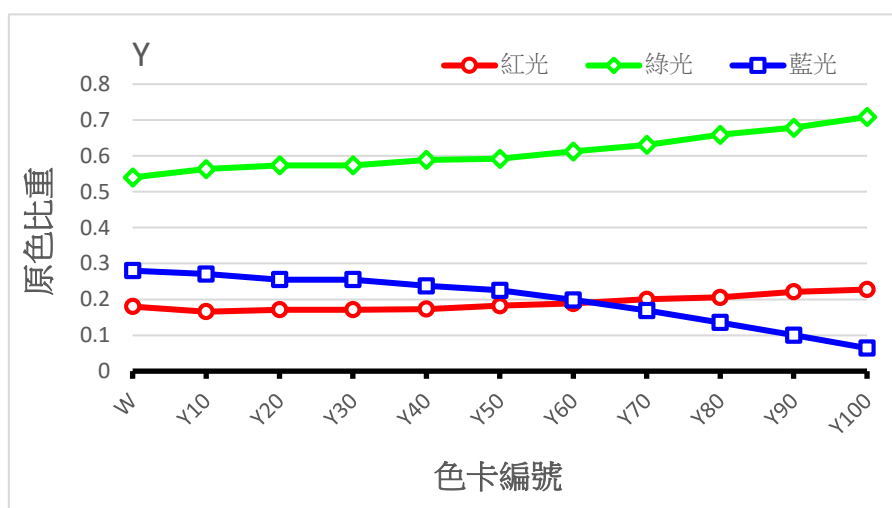


圖 5-14 用光敏電阻測量黃色系列色卡的三原色比重

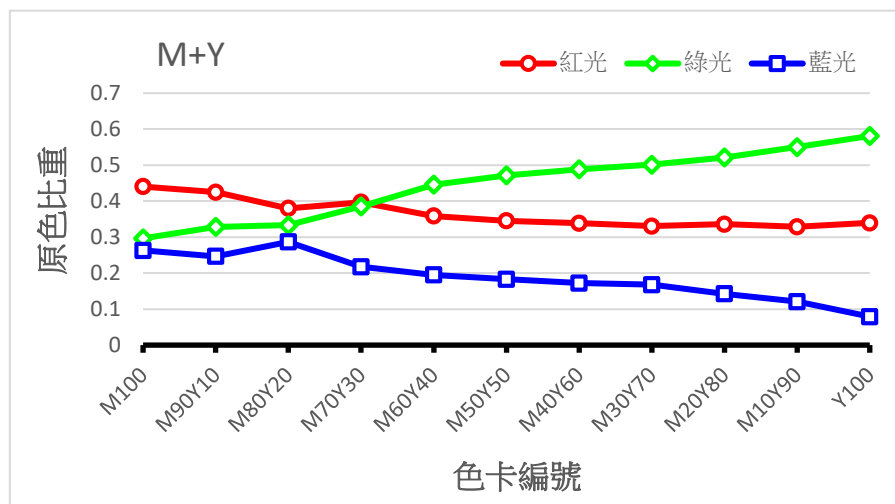


圖 5-15 用光敏電阻測量青色和洋紅色混合色卡的三原色比重

### (三)顏色混合

實驗上我們將色卡顏色進行光三原色分解可得到三原色比重數據，接著將三個白色發光二極體分別經紅、綠、藍色濾波片，按照三原色比重的數據調出強度同時照在色卡上，移動

色卡找出最相近的顏色，圖 5-16 是我們依 Y100 實驗所得到光三原色的比例調整白色發光二極體經紅、綠、藍濾波片的強度，照在色卡上的結果，如果照在白色部分所反射的黃光和色卡反射的顏色連成一片，表示人眼判斷為同一種顏色。圖中右下角的色卡含有青色成分，所以可以明顯看出與黃色亮點的不同，顯示光的三原色比重不僅可進行顏色分解，還可依此比重還原回原來顏色，表示用光三原色比重描述顏料顏色有一定的準確性。

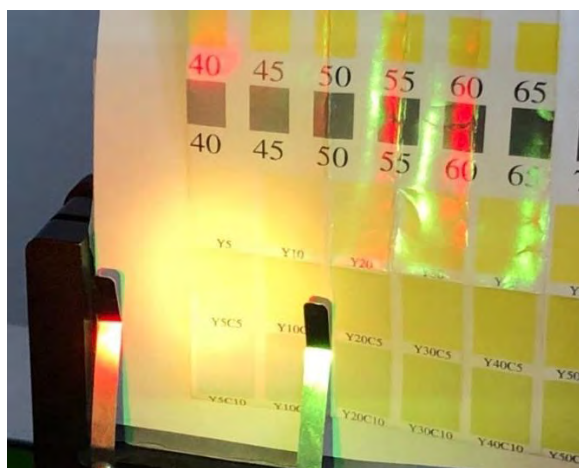


圖 5-16 依 Y100 實驗數據調整紅綠藍強度混成顏色與色卡顏色比較

我們進一步利用模擬計算，對混合顏料顏色進行顏料三原色的組成比例分析。假設洋紅原色 M100 對紅、綠、藍光的反射率分別為  $r_{mr}$ ， $r_{mg}$  及  $r_{mb}$ ，其中第一個下標 m 是指顏料原色 M100，第二個下標 r，g，b 分別指對應到紅、綠、藍光量到的反射率，以 M50 為例，M50 表示印刷網點數為 M100 的 50%，所經 M50 作用兩次應該跟 M100 一樣，從經過兩次的反射率為單次反射率的平方，所以 M50 紅光的反射率為  $(r_{mr})^{0.5}$ ，所以，一般化的公式可以寫成  $(r_{mr})^l$ ， $l$  是混合百分比。假設我們取的紅、綠、藍光的頻帶沒有重疊，也就是彼此沒有相干，對一混合顏料  $M_xY_wC_z$ ，其中  $x$ 、 $w$  及  $z$  分別表示顏料三原色 M100、Y100 及 C100 的混合百分比例，紅光的反射率可以表示為  $(r_{mr})^{x/100}(r_{yr})^{w/100}(r_{cr})^{z/100}$ ，第一個下標 y 及 c 分別是指顏料原色 Y100 及 C100。例如混合顏料 M80Y10C10 表示  $x=80$ 、 $w=10$  及  $z=10$ ，M80Y10C10 紅光的反射率為  $(r_{mr})^{0.8}(r_{yr})^{0.1}(r_{cr})^{0.1}$ 。同理我們可以獲得  $M_xY_wC_z$  綠光與藍光反射率公式分別為  $(r_{mg})^{x/100}(r_{yg})^{w/100}(r_{cg})^{z/100}$  及  $(r_{mb})^{x/100}(r_{yb})^{w/100}(r_{cb})^{z/100}$ 。

在分析混色比例過程中，我們可以先量測顏料三原色 M100、Y100 及 C100 的紅、綠、藍

光反射率(=反射功率/入射功率)，共九個 r 值，同樣對一未知顏色  $M_xY_wC_z$  量測其紅、綠、藍光的反射率，利用三色反射率我們就可以列出三個方程式，就可以解出三個未知數  $x$ 、 $w$  及  $z$ ，也就是得知該顏色要用多少比例的洋紅、黃、青色原色顏料去混合，這也是這份研究最主要的目的。由於三元方程式且未知數位在指數位置，目前我們還沒有能力去解，所以我們修正分析流程，從前面的色卡量測實驗，相當於  $x$ 、 $w$  及  $z$  是已知，配合原色的九個反射率及前面所提混合反射率公式，可以得到模擬計算的紅、綠、藍光反射率，進而得到三原色比重，再將此模擬值與實驗值相比較，同樣可以達到驗證分析方法是否正確。

首先，我們以單色色卡黃色系列為例，圖 5-17 為黃色系列實驗與模擬結果圖，紅圓圈、綠菱形及藍方形分別代表紅光、綠光及藍光比重的實驗數據點(圖 5-8 的實驗結果)，而各顏色線條則是我們模擬出的數據，可以發現兩者數據十分相近。在雙色混合的模擬分析中，圖 5-18 是青色與洋紅色混合的實驗與模擬結果，同樣的我們拿 C100 和 M100 的實驗數據得到反射率，來模擬不同比例混色的原色比重，結果相近。接著進行三色混合的模擬，我們對圖 5-11 三色混合色卡進行模擬算，圖 5-19 為紅光與綠光比重的實驗與模擬結果圖，整體來講結果相符，誤差較大的為 C55M100Y20、C55M100Y10 及 C65M55Y10 三組數據，對應的都是 Y 值較小的數據，一部分原因是我們用來計算的 C100、M100 及 Y100 色卡跟此組色卡是不同組，圖 5-11 實驗使用的色卡並沒有原色色卡，從不同公司顏料不同及塗層厚度不同，反射率可能會有誤差；再者，我們也發現用來計算的 Y100，紅光及綠光反射功率分別為 0.38 及 0.45mW，而藍光反射功率只有 0.01mW，相對偏小，因此在模擬時藍光誤差較大。

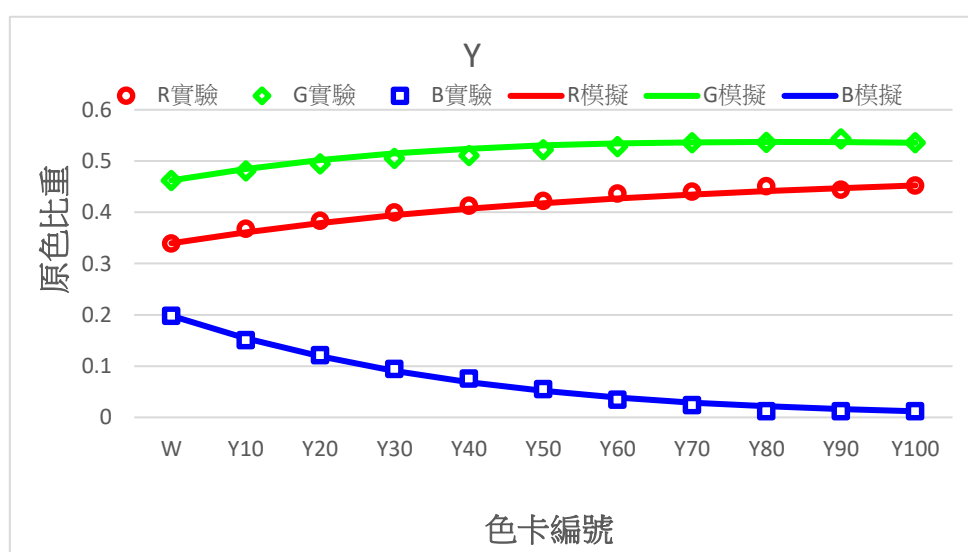


圖 5-17 利用白色及 Y100 為參考，計算單一顏色改變原色比重，並與實驗結果比較

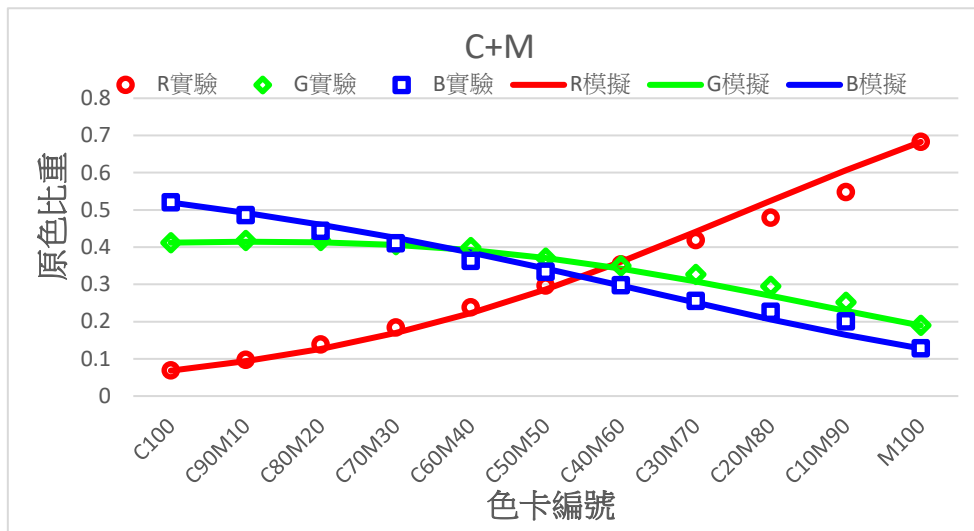


圖 5-18 利用 M100 及 Y100 為參考，計算雙顏色混合原色比重與實驗結果比較

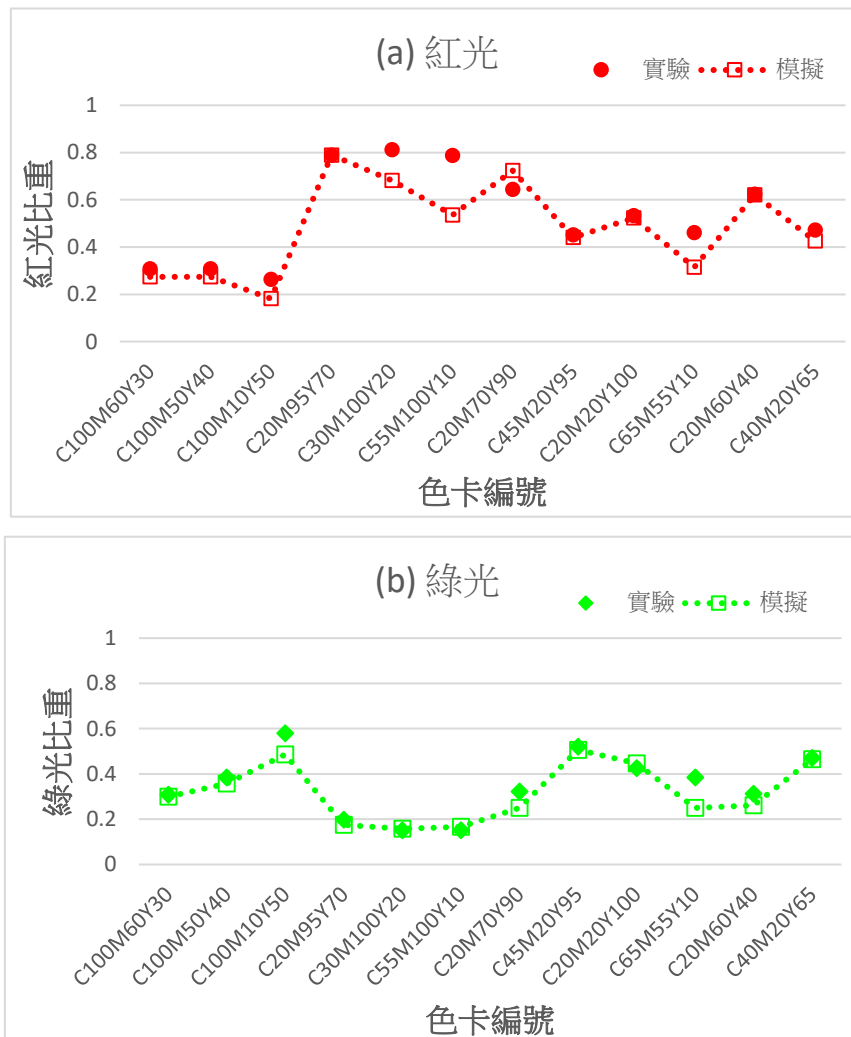


圖 5-19 三色混合色卡實驗與模擬結果比較 (a) 紅光分量 (b) 綠光分量

同樣的，我們也對光敏電阻測量數據進行模擬分析，圖 5-20 為洋紅色及黃色實驗及模擬數據比較，模擬於實驗結果很相近，有些偏離模擬的數據點比較多(像 M80Y20)，其實這可從

實驗結果(圖 5-15)推測出來，實驗結果比用功率計量的不平滑，也就是跳動大，在實驗過程中，我們也發現用光敏電阻來測量反射功率時，功率越大電阻值越穩定，功率較小時跳動較大，這是造成誤差的其中原因之一，或許這也是低價量測儀器的限制。整體而言，如果我們著重的是找出某一顏色中洋紅、黃、青原色顏料的混合比例，光敏電阻還是適用的。

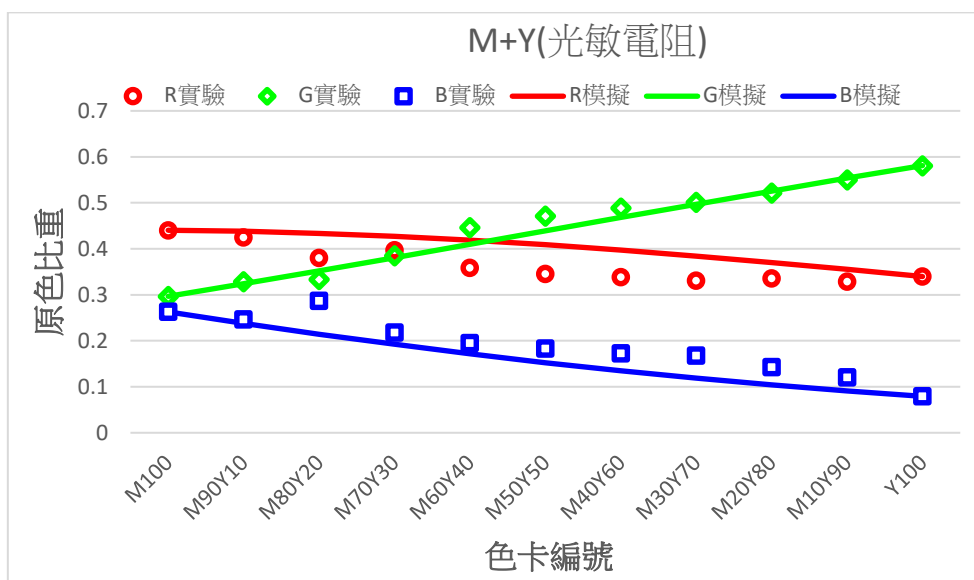


圖 5-20 利用光敏電阻量測洋紅色及黃色混合原色比重結果與模擬結果比較

從我們這些模擬與實驗對照圖中，實驗與模擬符合度高，這表示我們可以用 C100、M100 及 Y100 的測量反射率，來推算混合顏色(如 M90Y10，M80Y20…)的原色比重是合理的。反過來如果經由測量得到某一顏料的光三原色比重，預期可以用洋紅色 M100，黃色 Y100 及青色 C100 的紅、綠、藍光反射率(共九種)，調整顏色混合比例去模擬待測顏料的光三原色比重。因此，使用這個分析技術設計出一個儀器告訴我們顏料三原色混合比例的構想是可行的。

## 陸、討論

從前面的實驗結果告訴我們，透過光的三原色量測，可以幫助我們做顏料顏色的分解，也就是說，我們現在有一種待測顏料顏色，透過前面光三原色量測的技術，我們可以找出洋紅、黃、青色顏料該用多少比例混合，可以混出這個顏色；即便是便宜的光敏電阻也具有這樣的能力，因此，我們提出一個利用便宜的光敏電阻及一些光學元件來做一個低價的顏色混合比例分析儀的構想。圖 6-1 是我們構想的設計圖，也就是將某一顏色樣品放入，直接讀出



洋紅、黃、青色顏料混合比例的儀器，我們將白光發光二極體經透鏡聚焦，在透鏡聚焦的地方放上樣品架，此為待測物品擺放位置，入射光以斜向方式入射(圖中黑線)，直接反射光會從同樣的反射角出射(圖中黑虛線)，在反射處可以加吸收材料吸收不必要的白光，減少量測反射白光造成的誤差，接著在正向法線方向適當距離上放置三個透鏡來收集光，光分別經紅、綠、藍色濾波片，聚焦在光敏電阻上，校對時須調整光敏電阻，使光敏電阻讀到最小的值，光敏電阻利用電路讀出電阻值，電路板還負責電阻及功率的轉換計算及原色比重計算，最後可用液晶顯示螢幕將光三原色強度及顏料三原色混合比例顯示，當然在分析過程中，我們需要先量顏料三原色的九個反射率作為基本資料，來計算混合比例。這樣的顏色混合比例分析儀像對美術初學顏色調色，及對色彩敏感度不佳的人，可提供一個輔助工具；日常生活需要較精準顏色要求，像油漆粉刷，新舊油漆色差就會破壞美感，有一簡單判定儀器或許可減少許多麻煩。

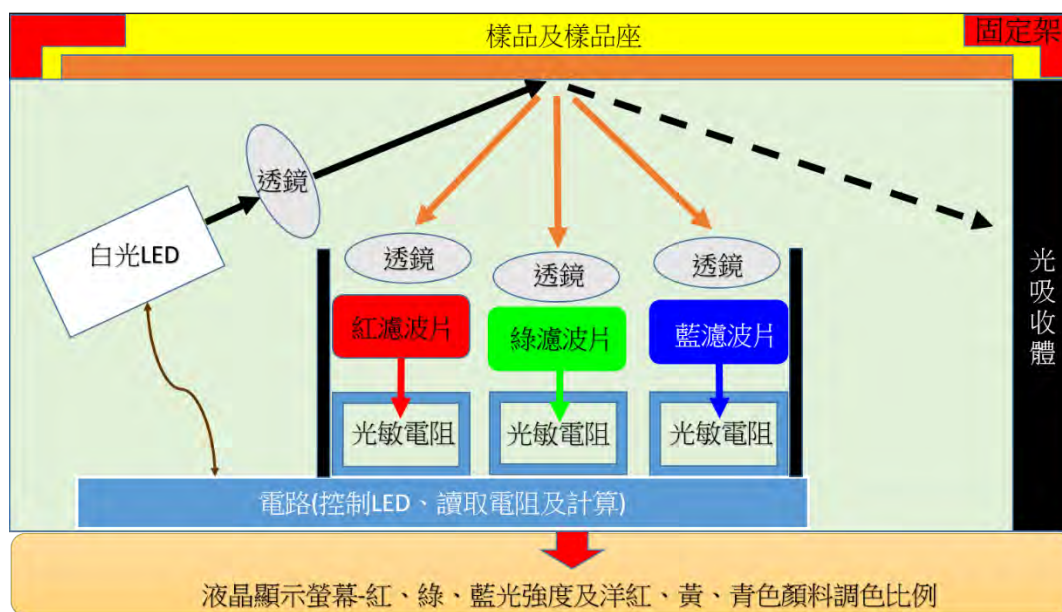


圖 6-1 顏色混合比例分析儀構想設計圖

## 柒、結論

我們在這個研究中主要包括原色分析、顏色分解及顏色合成三部份工作，結論分敘如下：

- (1) 在原色分析實驗方面，當紅、綠、藍三原色的光照在牆上呈現白光，若在中間放上障礙物，各色光被阻擋的區域會跟白牆與障礙物間的距離有關，照射在牆壁上的影像顏

色，就會是白色的光減掉被擋原色光。最遠區域成像展現光的三原色混合，改變白牆與障礙物間的距離可以呈現顏料三原色的疊加特性。因此，利用障礙物的阻擋部分光源，可以演譯光三原色及顏料三原色的相加，可做為顏色介紹的授課示範教材。

- (2) 在顏色分解實驗方面，我們使用以光的三原色來分析顏料顏色的技術，以單一顏料原色、雙色混合及三色混合色卡為樣品，量測各混色色卡的紅、綠、藍光反射功率，再計算得到各顏料顏色的原色比重，我們發現不同的顏料顏色有不同的三原色比重，也就是說三原色比重這三個數值可以用來標示顏色，這個流程相當於把顏色數值化或量化，而且還可以更精細的分別顏色差異。另外，我們發現功率計所測出來的結果，和光敏電阻量出來的結果趨勢相近，所以我們認為便宜的光敏電阻在探討顏料分解與混合上，是可以當作一種測量器的替代物品。
- (3) 顏色混合方面，實驗上將紅、綠、藍光的強度依某一顏色的三原色比重調整，可以還原出原來顏色，表示利用三原色比重來量化顏色可展現顏色主要特性。此外，我們也利用反射率模擬顏色混合，我們以實驗上得到洋紅、黃、青顏料三顏色對紅、綠、藍光的反射率，共九個反射率值，配合反射率運算公式，對給定洋紅、黃、青色混合比例的顏色，就可以計算出該顏色光的三原色反射率及比重，我們模擬出不同混合比例顏色的三原色比重，與實驗相符。我們的方法可以計算任一顏色要用多少比例的洋紅、黃、青色原色顏料去混合，也就是說可用來分析顏料顏色中顏料三原色的組成比例，利用這技術我們提出顏色混合比例分析儀的構想設計圖。

## 捌、參考資料

1. 國中自然第三冊第 4 章「光」，康軒文教事業。
2. 牛頓科學雜誌，”色與光的科學”，2015 年 6 月第 92 號。
3. 大田登 原著，陳鴻興、陳詩涵 翻譯，”色彩工程學”，全華圖書(2007 年)。
4. 賴瓊琪，”色彩計劃與實作”，北星出版社(2017 年)。
5. CREE 公司技術報告，”LED Color Mixing: Basics and Background”，CLD-AP38 REV 1D。

## 附錄

### ◎三顏料混合實驗補充

在三顏料混合實驗中，除了本文中三顏料原色任意混合的實驗結果，我們也分別對其中一顏料比例改變及其中二顏料比例同時改變進行探討，將此實驗資料補充於下，以供參考。

在一顏料顏色比例改變的實驗，圖 A-1 是針對色卡洋紅色、黃色與青色不同比例混合量出的三原色比重，當青色（C50）與洋紅色（M50）的比例維持不變，黃色比例每增加 10% 的方式來量測紅、綠、藍光功率再計算比重進行作圖。由圖 A-1 我們發現，紅光與綠光比重遞增，藍光比重遞減。因為青色的組合為紅光被吸收掉，所以當青色比例遞增時，紅光被吸收的量增加，造成紅光反射功率減少，紅光比重就跟著下降。藍光和綠光的反射功率變化不大，但三色總反射功率減少使得藍光和綠光的比重就跟著遞增。我們用同樣的實驗方式，可以得到洋紅色（M50）和黃色（Y50）維持不變青色比例遞增混色的三原色比重圖（圖 A-2），及青色（C50）和黃色（Y50）維持不變洋紅色遞增混色的三原色比重圖（圖 A-3），發現他們的混色行為和圖 A-1 是類似的。洋紅色和黃色維持不變青色遞增混色的三原色比重圖（圖 A-2）裡，青色為紅光被吸收，所以當青色遞增時，紅光被吸收的量增加，所以紅光反射功率減少，綠光比重就跟著下降。同樣在圖 A-3 中洋紅色增加，也就是綠光被吸收增加，造成綠光比重下降，而紅光與藍光比重上升。這些實驗結果與單一顏料色卡實驗(例如圖 5-8)相似。

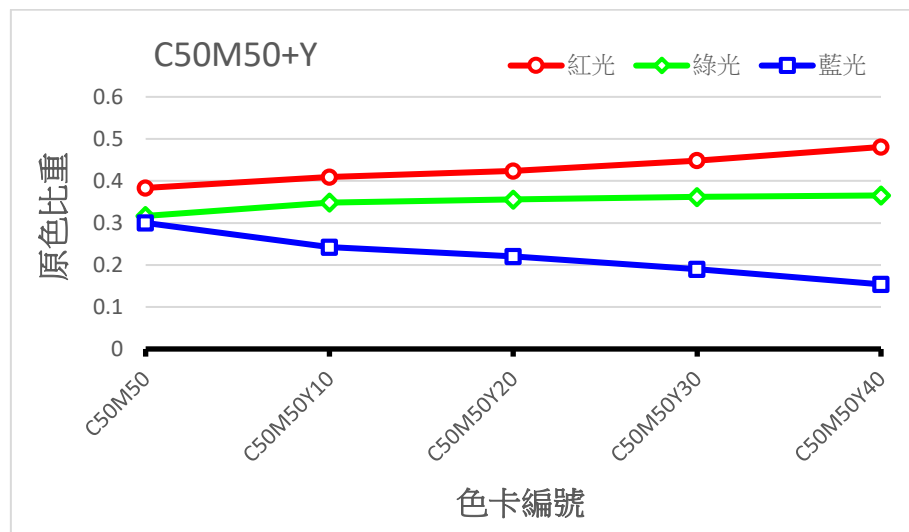


圖 A-1 用功率計測量三色混合色卡黃色比例改變的三原色比重

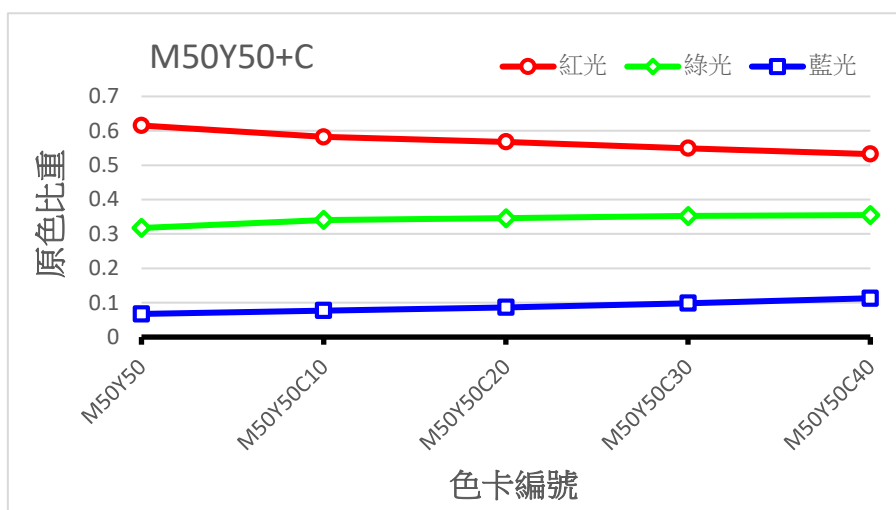


圖 A-2 用功率計測量三色混合色卡青色比例改變的三原色比重

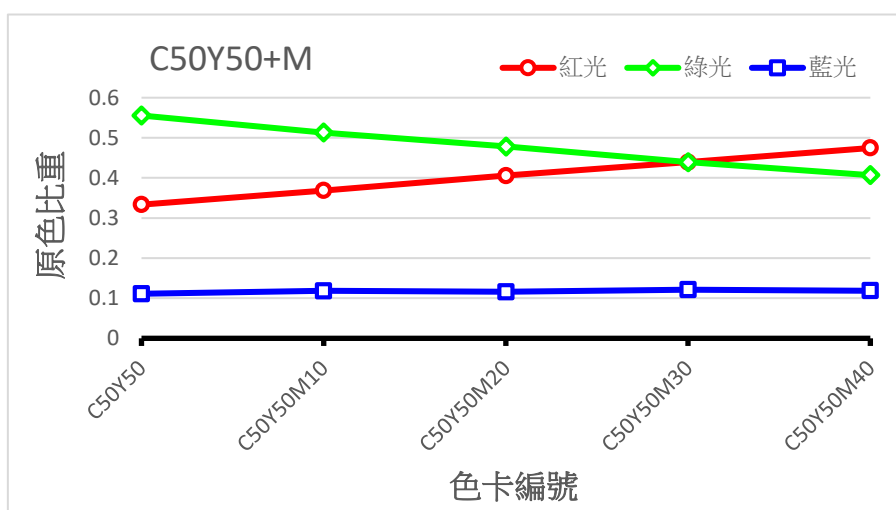


圖 A-3 用功率計測量三色混合色卡洋紅色比例改變的三原色比重

接著固定一顏料顏色另二顏料顏色同時改變，圖 A-4 是針對色卡洋紅色、黃色與青色不同比例混合量出的三原色比重，當洋紅色與黃色的比例每增加 10%，青色（C30）比例維持不變的方式來量測紅綠藍光比重作圖。由圖 A-4 我們發現，隨著洋紅色和黃色的比例增加，紅光比重遞增，綠光及藍光比重遞減。因為洋紅色顏料吸收綠光，黃色顏料吸收藍光，青色顏料吸收紅光，當洋紅色和黃色遞增青色維持 C30 不變時，紅光只會被 C30 吸收，在 C30 固定下造成紅光反射功率幾乎固定，而洋紅色和黃色遞增，綠光及藍光分別被洋紅及黃色顏料吸收而造成反射功率減少，總反射功率也因而下降，紅光比重因分子不變分母變小，造成比重上升，綠光與藍光則因真分數分子分母同時減少，造成比值下降。同理可以得到青色和黃色遞增洋紅色維持不變混色的三原色比重圖（圖 A-5），及青色和洋紅色遞增黃色維持不變混色

的三原色比重圖（圖 A-6），發現他們的混色行為和圖 A-4 是類似的。但在青色和洋紅色遞增黃色維持不變混色的三原色比重圖（圖 A-6），我們發現紅光比重的趨勢本應下降才對，但卻呈現先上升後下降的趨勢，原因紅、綠、藍光的反射功率都是下降，但減少的變化量由多到少依序為綠、紅、藍，所以在比重圖上，綠光比重下降，藍光比重上升，紅光比重變化不大。此外，這些實驗數據我們也以反射率混合的方式進行模擬，以青色和洋紅色遞增黃色維持不變混色的實驗為例（圖 A-6），圖 A-7 為模擬結果，與實驗比較，結果符合預期。

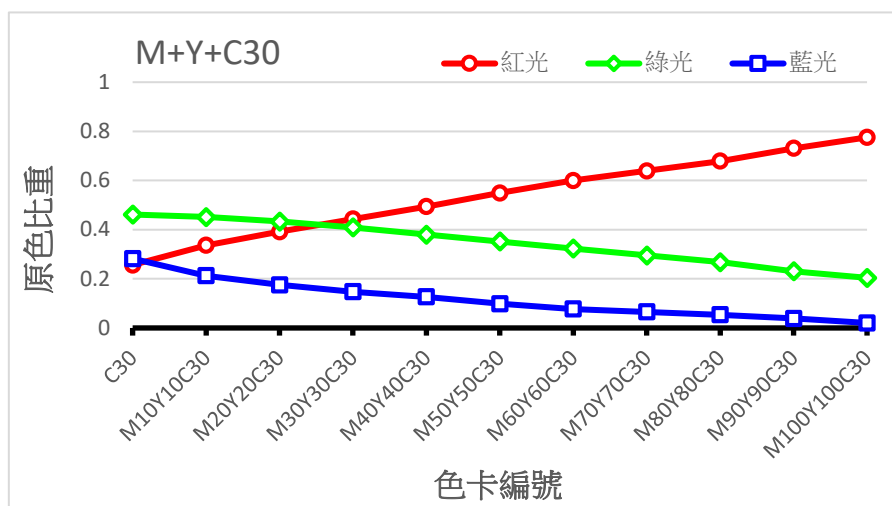


圖 A-4 用功率計測量三色混合色卡，洋紅色及黃色比例同時改變的三原色比重

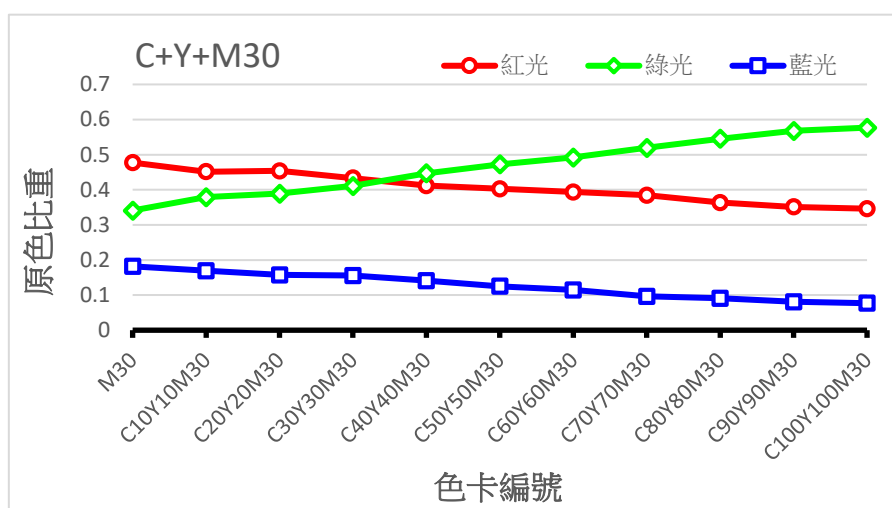


圖 A-5 用功率計測量三色混合色卡，青色及黃色比例同時改變的三原色比重

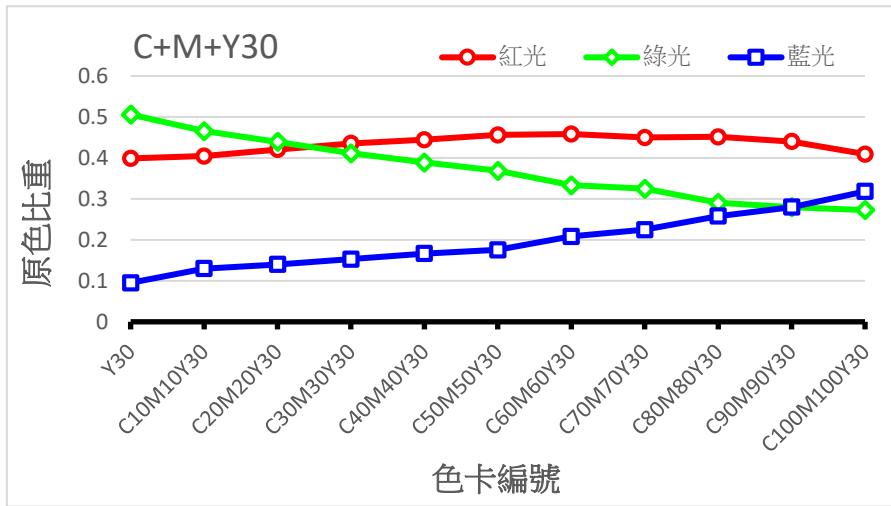


圖 A-6 用功率計測量三色混合色卡，青色及洋紅色比例同時改變的三原色比重

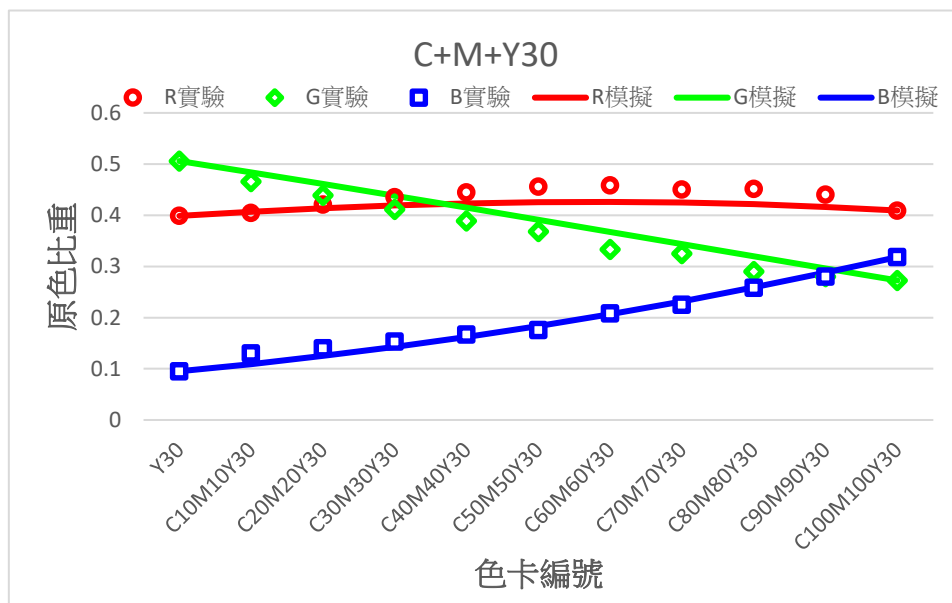


圖 A-7 三色混合實驗與模擬三原色比重的比較

## 【評語】 030103

研究主題適切符合國中階段學習內容，由課程教材出發進行深入探究值得鼓勵。利用色卡反色亮度比色，想法有創意，工作包含光的三原色及其混合色變化與頻率相關的關係，與顏料三原色的對應比例做定性與定量的呈現，自行定義了一套色彩系統，若能多查資料和現行業界系統比較，將更完整。

口頭報告自信而流暢，研究紀錄依日期連續而完整。

# 摘要

本研究主要透過光的三原色(紅色、綠色、藍色)來分析顏料顏色。首先將紅、綠及藍三色發光二極體的光經過障礙物，觀察到光的三原色及顏料三原色(洋紅色、青色、黃色)的混合現象與兩種原色間的關聯，藉此建立以光的三原色來分析顏料顏色的技術，並做為原色混合的示範教學。其次，以混色色卡為樣品，量測紅、綠、藍光之反射功率，並利用光的三原色比重將顏料顏色用數值表示，也就是量化顏色，並可分辨顏色差異。最後，從顏料三原色量到的紅、綠、藍光之反射率，可模擬出不同比例顏色混合下的紅、綠、藍原色比重，與實驗相符，以此方法可以獲得某一特定顏料顏色的洋紅色、青色、黃色原色組成比例。基於此研究，我們提出顏色混合比例分析儀的構想，並驗證便宜的光敏電阻可做為此構想的量測工具。

## 壹、研究動機

1. 美術課在調顏料顏色時，有個問題也是常困擾我們：如何將一個特定的顏色用顏料三原色來組成？(如圖1)
2. 自然課學到光的三原色是紅色(red, R)、綠色(green, G)、藍色(blue, B)，在美術課學過顏料的三原色是洋紅色(magenta, M)、黃色(yellow, Y)、青色(cyan, C)有何關聯？

## 貳、研究目的

1. 探討光的三原色與顏料三原色的關聯性。
2. 利用光的三原色來分解顏料的顏色，以光三原色的比重將顏色定量化。
3. 以功率計與光敏電阻探討偵測器對顏色組成的分析能力。
4. 利用反射率分析顏色混合結果，並與實驗相對應。
5. 提出顏色混合比例分析儀器示意圖。

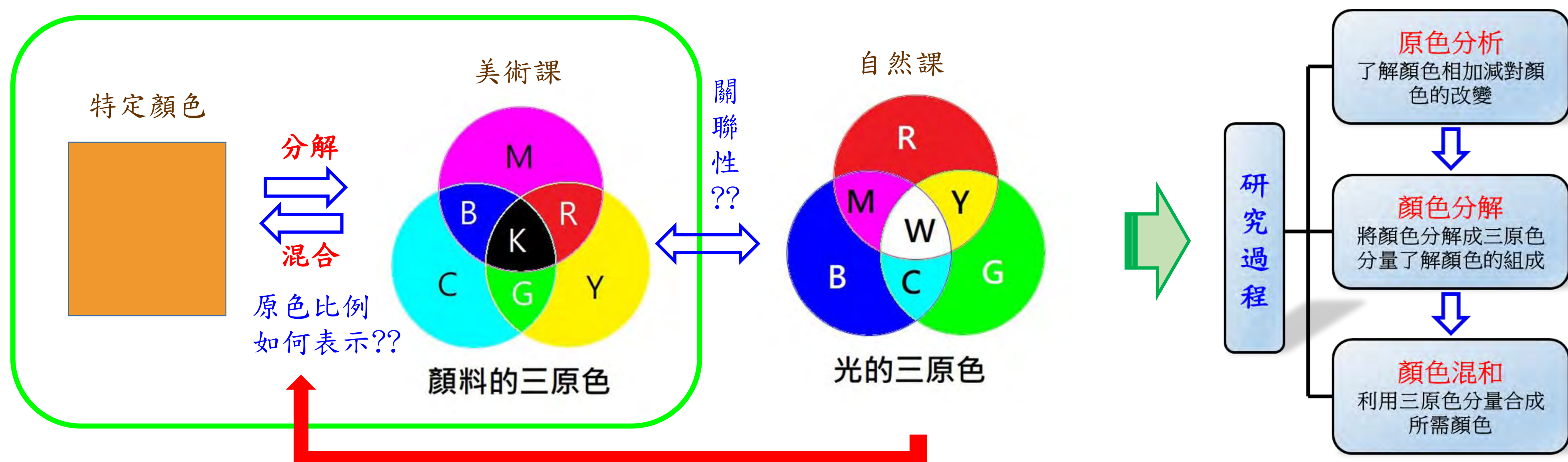


圖1 研究動機與研究過程

## 參、研究設備與器材

- 光源元件:**發光二極體(LED)、散熱片、塑膠透鏡、LED控制電路板、電源供應器。(組裝如圖2)
- 架設元件:**LED夾具、樣品架、透鏡、濾波片、底板、支撐座、壓條。
- 量測元件:**功率計、光敏電阻與麵包板、三用電表。
- 安全元件:**護目鏡。
- 數據處理:**電腦與EXCEL軟體

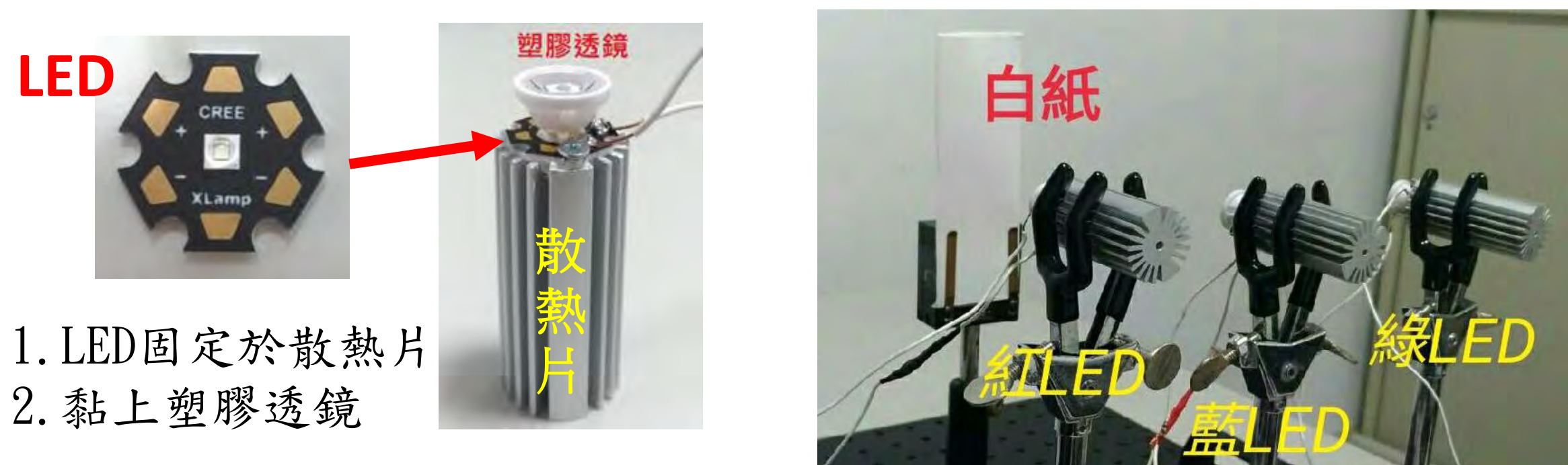


圖2 LED光源組裝與原色分析實驗架設

## 肆、原色分析

**研究方法:**將紅、綠、藍色的發光二極體朝白牆照射，使三種顏色照射範圍重疊，在三種顏色光共同重疊的位置放入障礙物(白紙)，改變障礙物與白牆的距離，觀察影像的顏色變化。(如圖2所示)

### 三原色運算公式

$$\begin{aligned}
 [R] * [R] &= [R] & [R] * [G] &= [G] * [B] = [B] * [R] = [K] \\
 [M] * [Y] &= ([B] + [R]) * ([R] + [G]) = [B] * [R] + [B] * [G] + [R] * [R] + [R] * [G] = [R]
 \end{aligned}$$

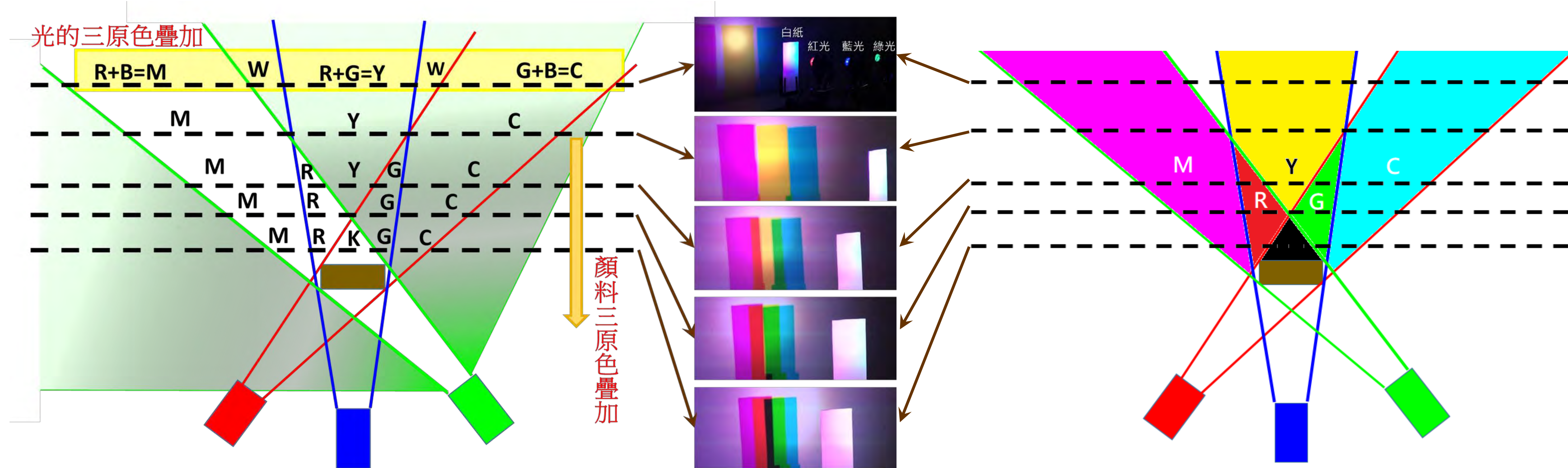


圖3 原色分析實驗結果與解析示意圖

### 結果與討論:

1. 圖3中，當牆壁與障礙物距離最遠時，障礙物的陰影依序呈現洋紅色、黃色及青色，展現光三原色的疊加的特性。
2. 逐漸縮減牆壁與白紙距離，觀測到具顏料三原色的陰影逐漸重疊，展現顏料三原色的疊加特性。
3. 圖4利用影子遊戲或透鏡，更得到豐富色彩的影像。
4. 我們認為此架構可做為認識光的三原色與顏料三原色混合疊加的教學示範與實驗教具。

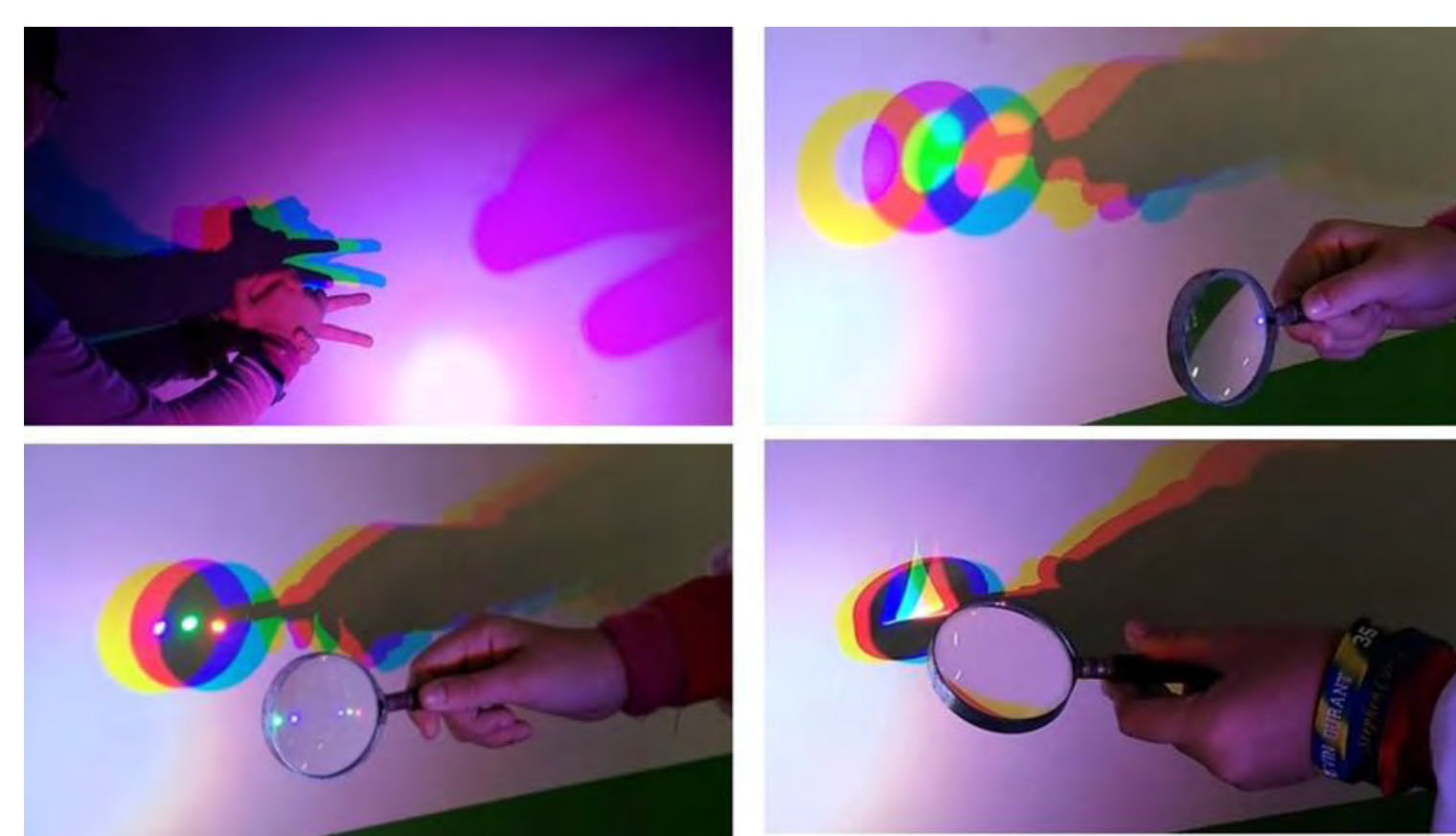


圖4 原色分析應用實驗

## 伍、顏色分解

### 第一部分:利用功率計量測

**研究方法:**將白色發光二極體經透鏡聚光打在色卡上，在正向收集反射光，分別經紅、綠、藍濾波片，用功率計量取紅、綠、藍光的反射功率，分別為 $P_r$ 、 $P_g$ 、 $P_b$ ，如圖5，進一步計算三原色比重。

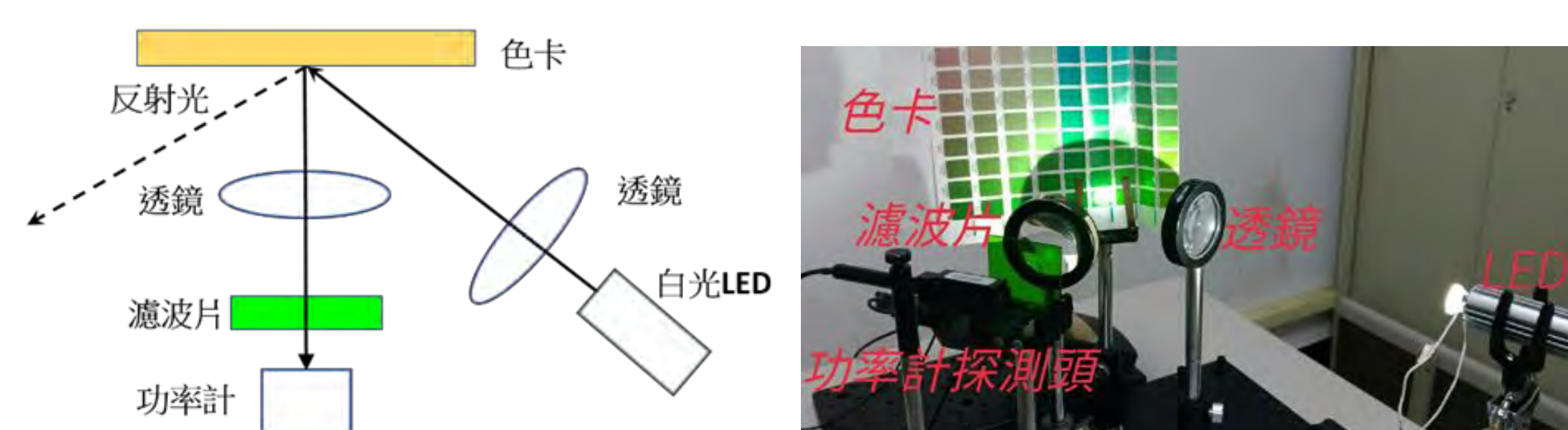
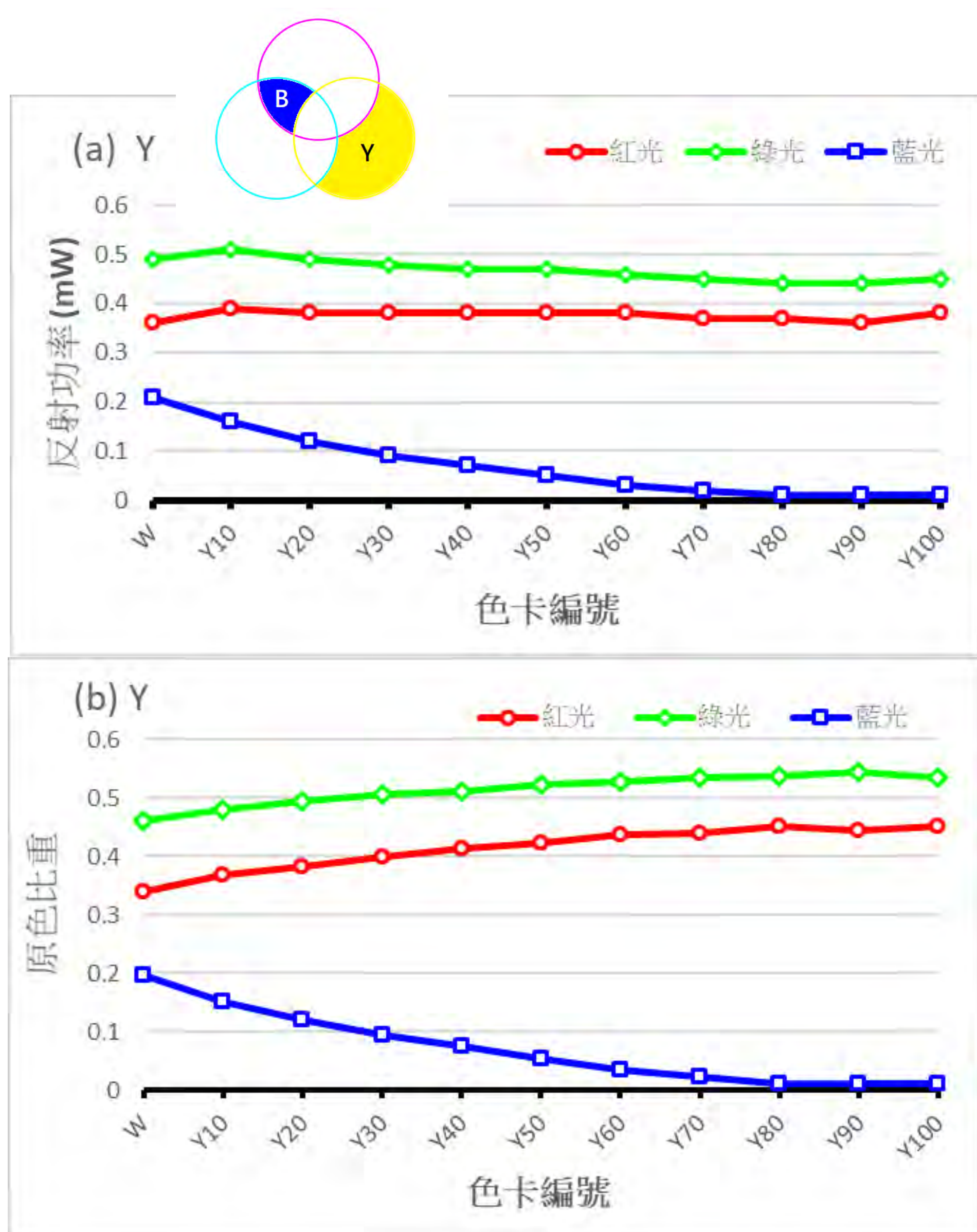


圖5 顏色分解實驗示意圖與架設





**光的三原色  
比重公式**

紅光比重:  $\frac{P_r}{P_r+P_g+P_b}$

綠光比重:  $\frac{P_g}{P_r+P_g+P_b}$

藍光比重:  $\frac{P_b}{P_r+P_g+P_b}$

1. 將顏色量化
2. 三原色光譜不重疊，類似正交
3. 比重總和為1，所以只要知道紅光及綠光比重，藍光比重就被固定
4. 以二維座標系標示顏色

圖6用功率計測量黃色系列色卡的(a)反射功率及(b)三原色比重

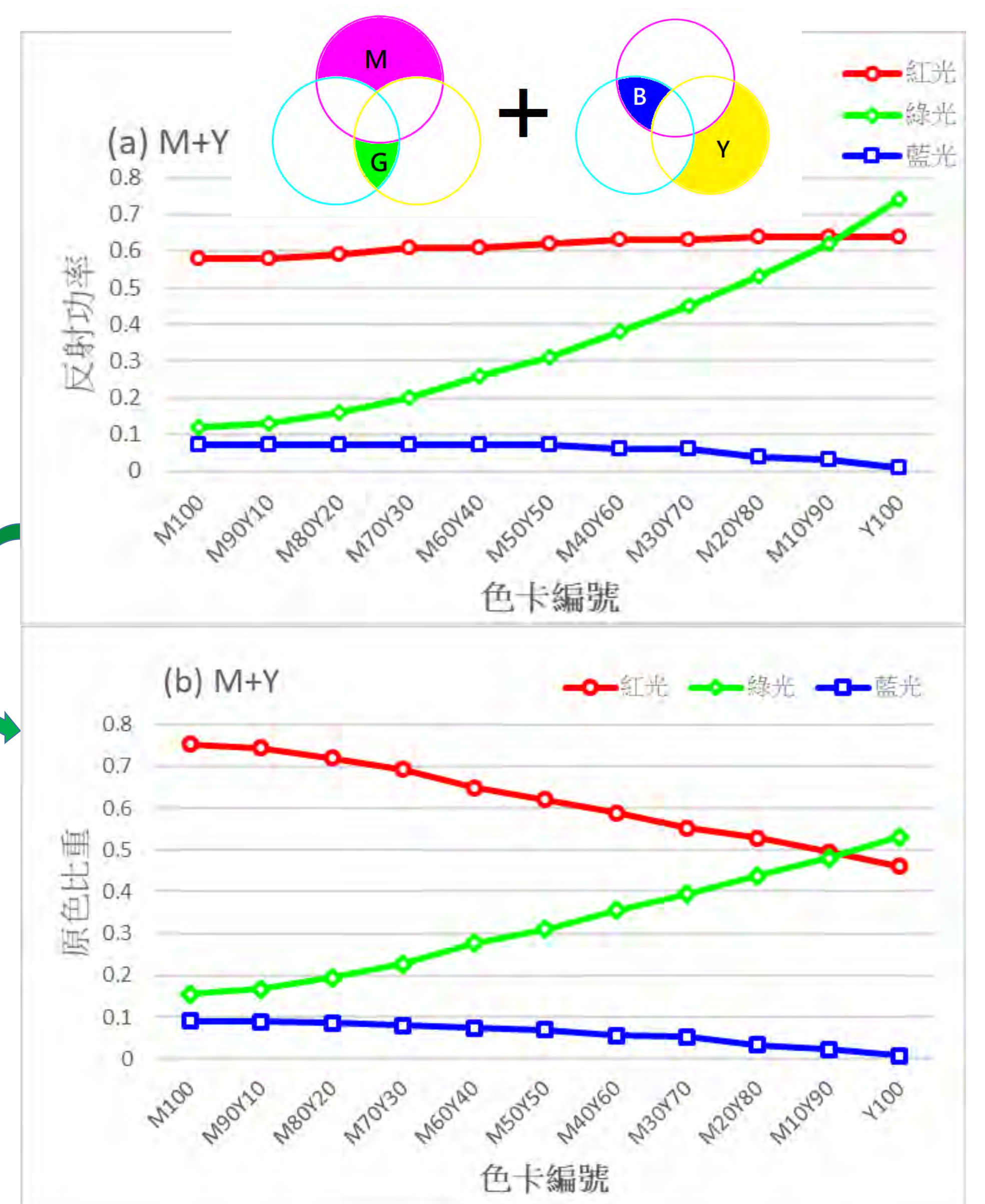


圖7功率計測量洋紅色和黃色混合色卡的(a)反射功率及(b)三原色比重

**單顏料原色色卡實驗**(以圖6增加黃色顏料比例為例)

1. 黃色顏料反射紅光跟綠光，吸收藍光，隨著黃色比例增加，藍光被吸收增加，藍光比重也跟著下降。(圖6(a))
2. 同時藍光反射功率會減少，從比重公式分母(總功率)變小，所以紅光及綠光比重便會接近增加。(圖6(b))

**雙顏料原色混合色卡實驗**(圖7為洋紅色M100與黃色Y100混合為例)

1. 洋紅色吸收綠光，當洋紅色比例遞減且黃色比例遞增時，綠光被洋紅色吸收減少，所以綠光比重也跟著增加
2. 黃色吸收藍光，藍光被黃光吸收增加，所以藍光的比重也跟著減少。
3. M100及Y100紅光比重不同，造成紅光比重遞減。

**三顏料原色混合色卡實驗**(圖8)

1. 分成4區分別對應到: (1)C接近100, (2)M接近100, (3)Y接近100及(4)三色比例都小於或等於65。
2. 基本上從光三原色比例可以大概判定出顏料顏色，像第(1)區中藍光比重較大顏色偏向藍色系，第(2)區的紅光比重大，顏色則偏向紅色系，

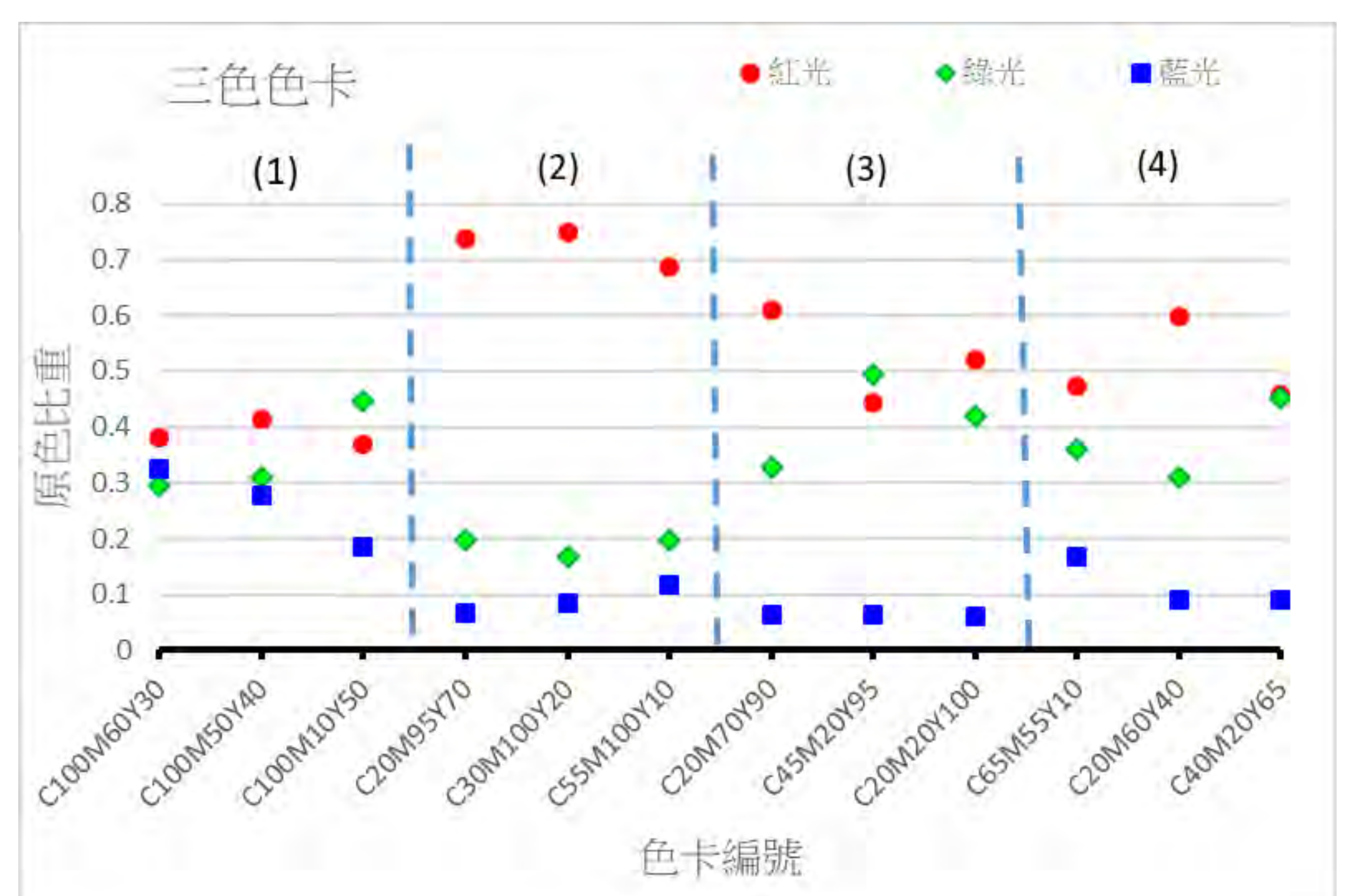


圖8 三顏料顏色色卡實驗結果:洋紅色、黃色、青色同時改變

**第二部分:利用光敏電阻量測**

**研究方法:**

1. 先取得光敏電阻值與光功率的關係，紅光如圖9(a)。
2. 得到光敏電阻與功率計的轉換關係如下:  
紅光:  $P_r = -0.8841 \log(R_r) + 1.1016$   
綠光:  $P_g = -1.0219 \log(R_g) + 1.2624$   
藍光:  $P_b = -0.4709 \log(R_b) + 0.7484$
3. 將偵測器換成光敏電阻進行實驗，如圖10。

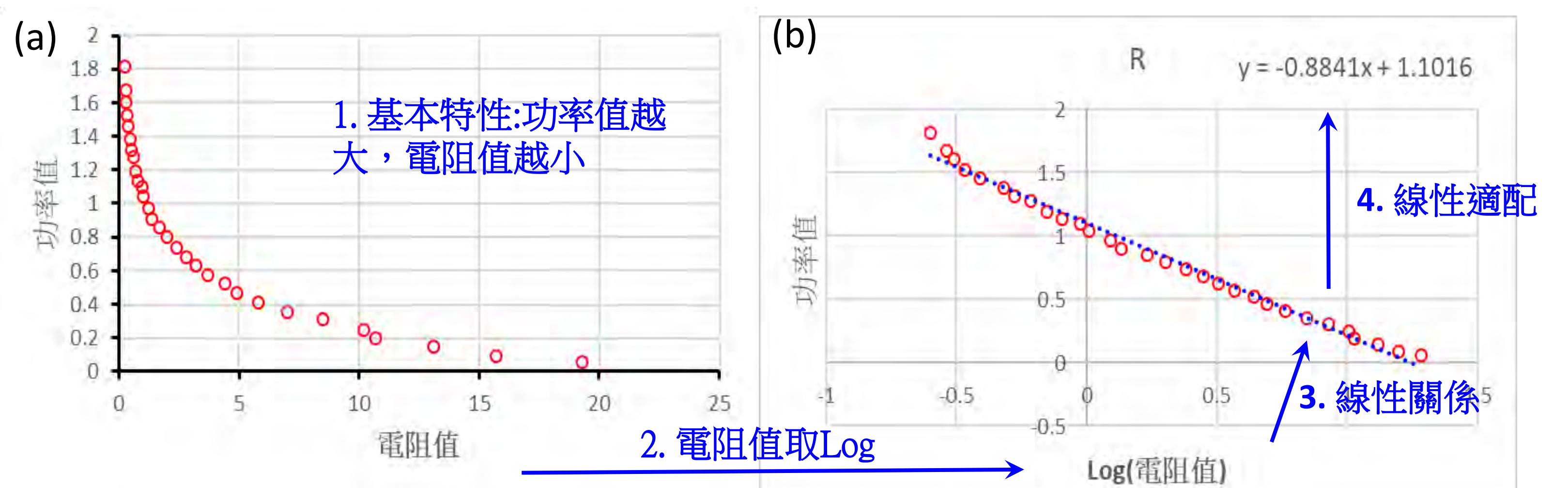


圖9 紅光:(a)功率計與光敏電阻對照圖 (b)將電阻值取對數後的對照圖



圖10 利用光敏電阻值量測的實驗架構

**結果與討論:**

1. 單一顏色黃色系列色卡的三原色比例圖，如圖11(a)，當黃色比例上升時，紅光跟綠光比重上升，而藍光比重下降，與用功率計量出的趨勢相同。
2. 雙顏料顏色(圖11(b))及三顏料顏色(圖11(c))的量測解果，趨勢與功率計量測相近。
3. 光敏電阻及光功率計量測的原色比重不同，主要來自於對不同波長敏感度不同，但最主要的「趨勢」是非常相像的，後面的報告對顏色混合實驗結果，會以顏料三原色量到的原色比重去計算混合的比例，只要數據都用同一種量測儀器量到的，不會影響混合比例的分析，所以我們認為使用光敏電阻去分析顏料的混合比例是可行的方法。

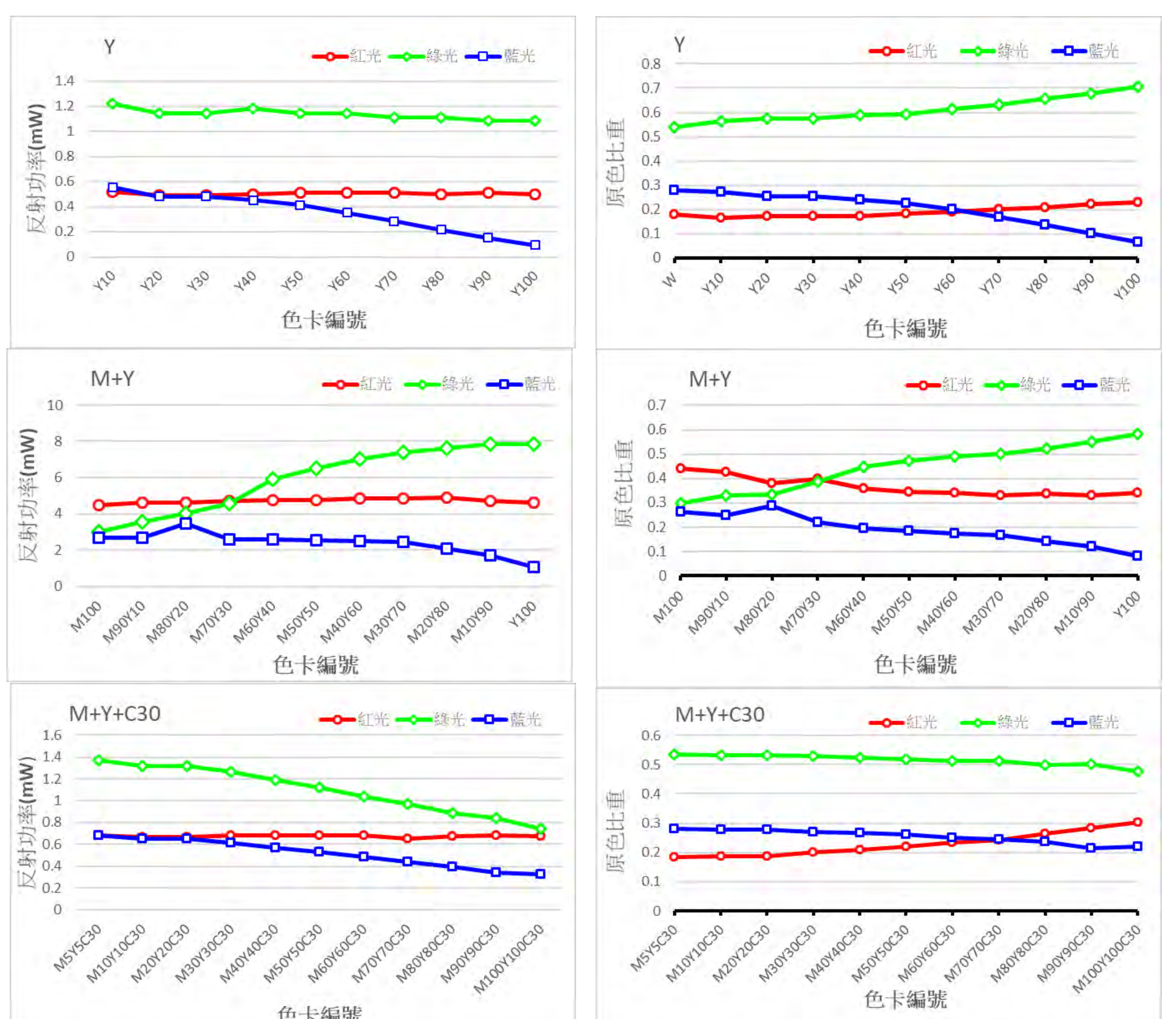


圖11 利用光敏電阻值量測，(a)單顏料原色色卡，黃色比例改變，(b)雙顏料原色混合色卡，洋紅色及黃色混合 (c) 三色顏料原色混合色卡，青色固定C30，洋紅色及黃色改變

## 陸、顏色混合

### 第一部分：顏色混合實驗

**研究方法：**將紅、綠、藍色的發光二極體光源功率依黃色Y100的紅、綠、藍光比重調整，朝色卡照射並重疊，移動色卡比對混合光色卡顏色。架設如圖12(a)。

#### 結果與討論：

圖12(b)顯示黃色色卡有很好的重疊，跟最下一排含有C10的色卡明顯不同，實驗結果表示利用三原色比重可以將顏色還原及分辨顏色差異。

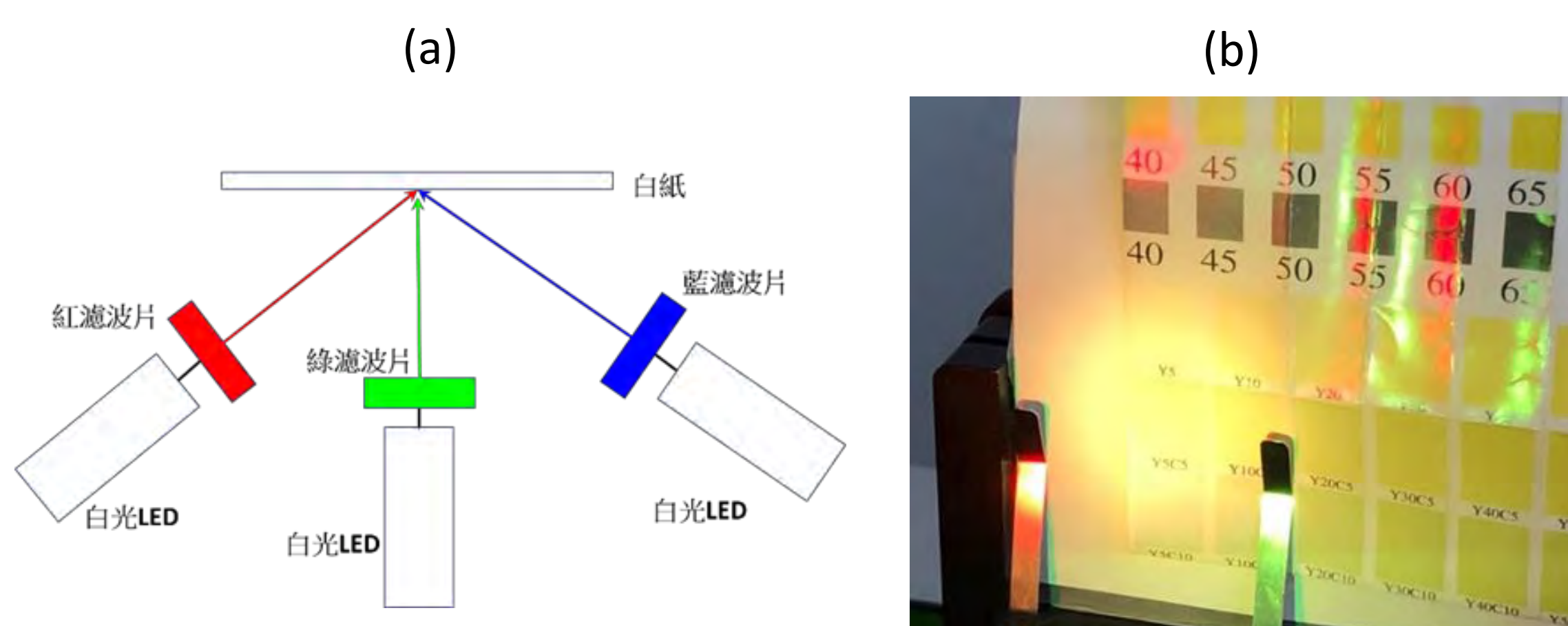


圖12 顏色混合(a)實驗架設與(b)黃光實驗結果

### 第二部分：顏色混合模擬計算

**計算原理：**(圖13以洋紅色及黃色混合為例)

- 對一混合顏料MxYwCz，其中x、w及z分別表示顏料三原色M100、Y100及C100的混合百分比。
- 紅光反射率： $(r_{mr})^x / 100 (r_{yr})^w / 100 (r_{cr})^z / 100$   
 綠光反射率： $(r_{mg})^x / 100 (r_{yg})^w / 100 (r_{cg})^z / 100$   
 藍光反射率： $(r_{mb})^x / 100 (r_{yb})^w / 100 (r_{cb})^z / 100$   
 第一個下標m, y, c是指顏料原色M100、Y100及C100，第二個下標r, g, b分別指對應到紅、綠、藍光
- 利用EXCEL的函數POWER(底數, 指數)進行反射率計算，圖13中的紅線、綠線及藍線分別為模擬計算的比重。
- 從實驗M100及Y100紅光的反射率，可模擬混合顏色的紅光反射率。同理可模擬出混合顏色綠光及藍光反射功率。再計算三原色比重，如圖13中的實線。

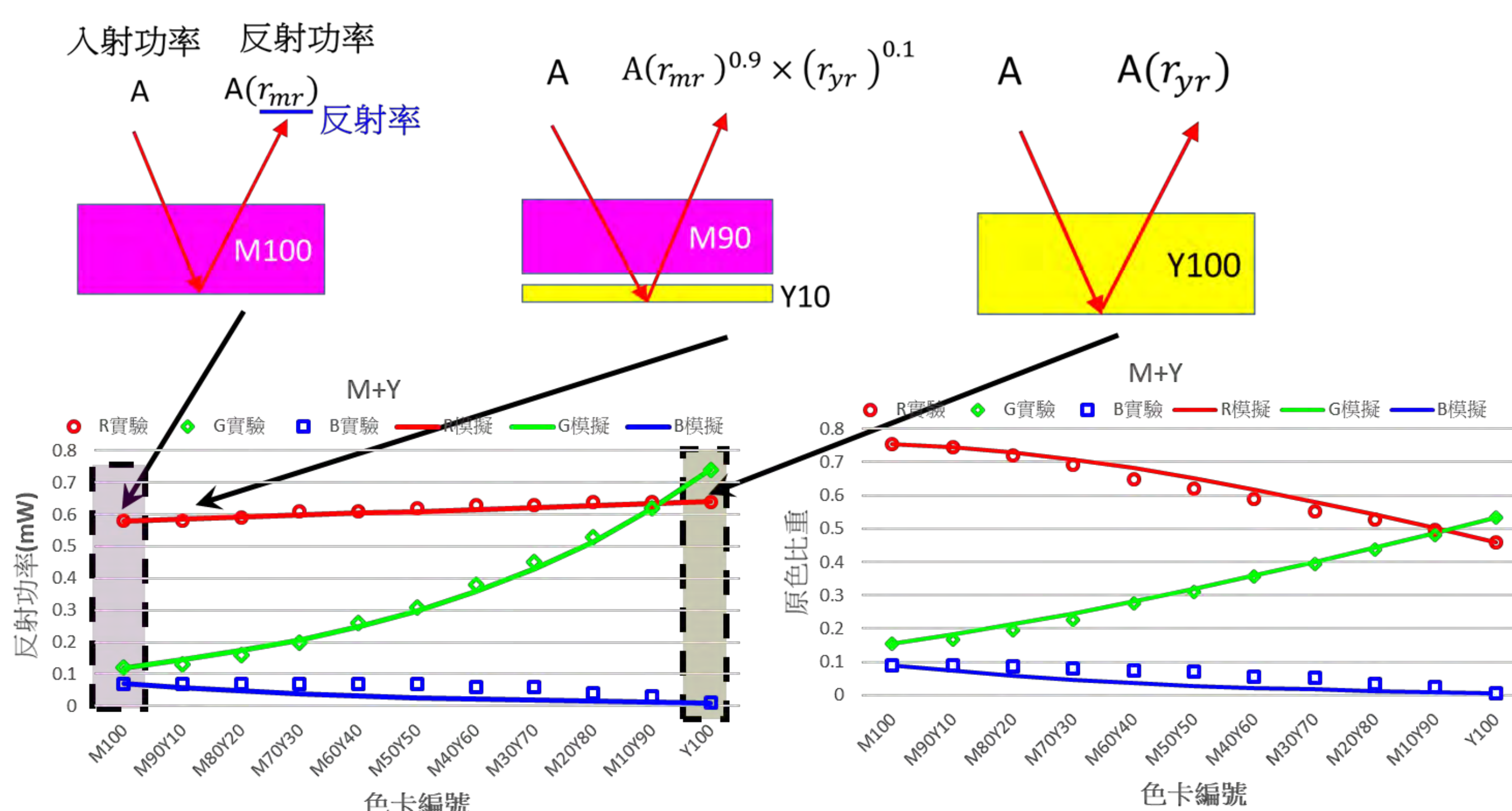


圖13 功率計量測雙顏色原色混合的模擬與實驗結果比較

#### 結果與討論：

- 單色(圖14(a))及雙色混合(圖13)中模擬與實驗都相符合，表示我們利用比重來量化顏色的方法是可行的。
- 圖15為圖8中三色任意比例混合的模擬於實驗比較，兩者相符。
- 圖14(b)為光敏電阻量測的適配結果，仍可模擬出混合顏色的三原色比重，表示光敏電阻應用到顏色混合比例量測是可行的。
- 對一未知顏色，實驗量得的三色光反射率，配合三色光反射率的公式(計算原理2)，可得到三個三元方程式，解出該色的洋紅、黃及青色的比例(式中的x, w, z)，即決定該顏色須用多少顏料三原色的洋紅、黃、青色的比例混合。



圖14 模擬與實驗比較圖 (a)功率計量測單顏色原色，黃色改變 (b) 光敏電阻量測雙色混合，洋紅色與黃色改變。

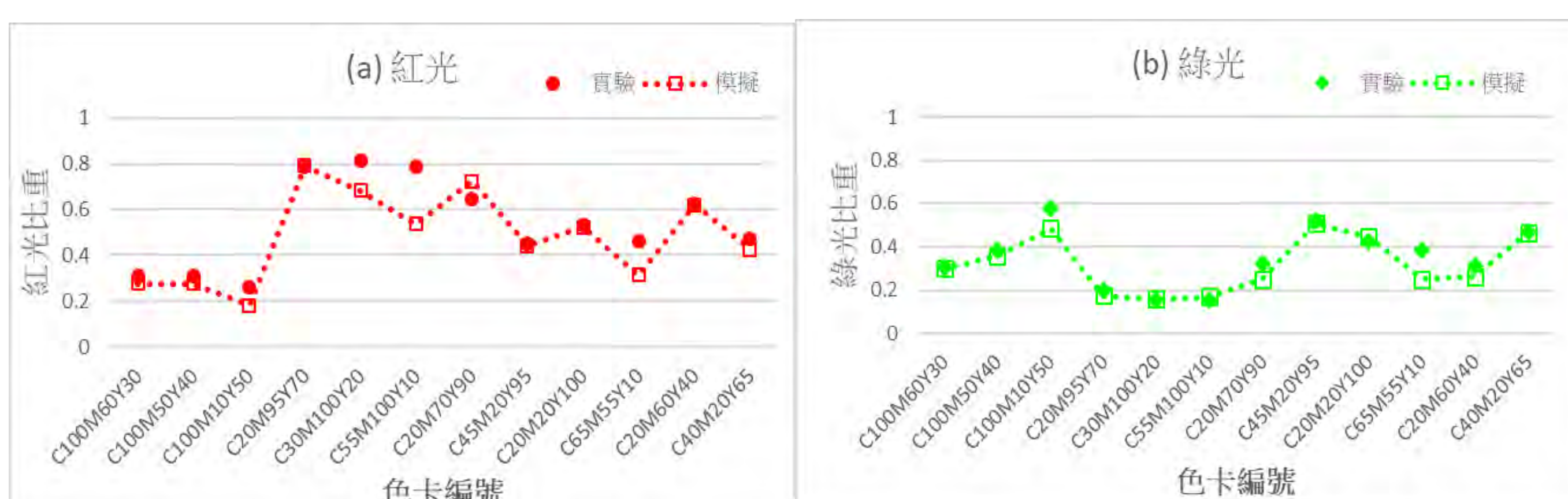


圖15 模擬與實驗比較圖：三色任意比例混合的(a)紅光比重 (b)綠光比重

## 柒、討論

### 顏色混合比例分析儀(圖16)

- 便宜的光敏電阻為偵測器。
- 白光發光二極體經透鏡聚焦打到待測物品，正向法線方向分三道光再經紅、綠、藍色濾波片，聚焦在光敏電阻上。
- 利用電路讀出電阻值，電路板還負責電阻及功率的轉換計算及原色比重計算。
- 最後可用液晶顯示螢幕將待測顏色光三原色強度，及顏料三原色洋紅、黃、青色的混合比例顯示。

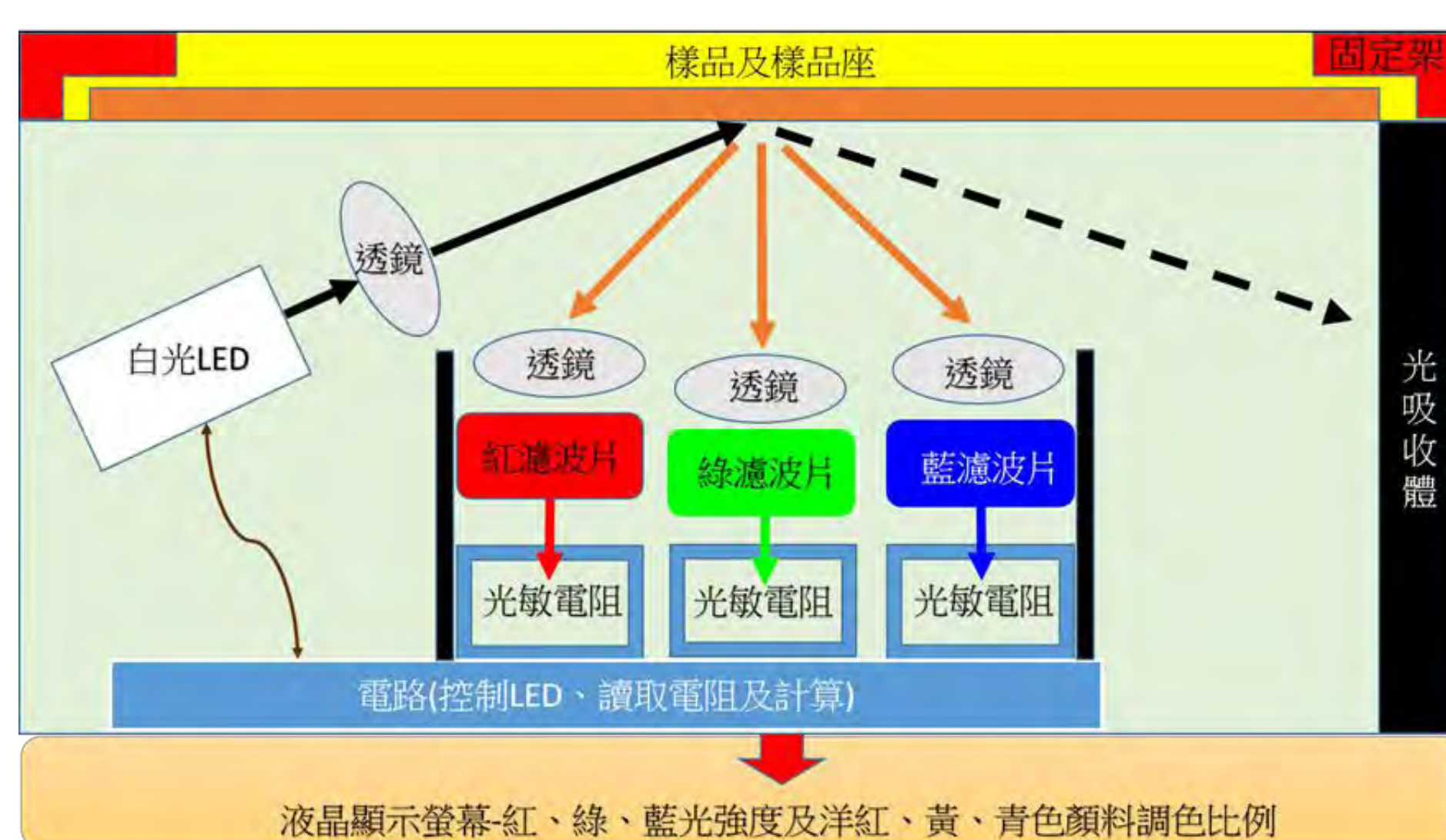


圖16 顏色混合比例分析儀設計圖。

## 捌、結論

- 在原色分析實驗方面，我們知道光的三原色疊加是加色概念，而顏料三原色疊加是減色概念，利用障礙物的阻擋部分光源，可以演譯光三原色及顏料三原色的相加，可做為原色混合的授課示範教材。
- 在顏色分解實驗方面，我們使用以光的三原色來分析顏料顏色的技術，我們發現不同的顏料顏色有不同的三原色比重，也就是說三原色比重這三個數值可以用來標示顏色，這個流程相當於把顏色數值化或量化，而且還可以更精細的分別顏色差異。另外，我們發現功率計所測出來的結果，和光敏電阻量出來的結果趨勢相近，所以我們認為便宜的光敏電阻是可以當作一種測量器的替代物品。
- 我們利用顏料三原色量到的紅、綠、藍光反射率，配合反射率公式，模擬出不同混合比例的顏色，與實驗相符。這也表示我們的方法可以用來分析顏料顏色中顏料三原色的組成比例，利用這技術我們提出顏料顏色混合比例分析器構想設計圖。

## 參考資料

- 國中自然第三冊第4章「光」，康軒文教事業
- 牛頓科學雜誌，「色與光的科學」，2015年6月第92號。
- 大田登 原著，陳鴻興、陳詩涵 翻譯，「色彩工程學」，全華圖書(2007年)。
- 賴瓊琪，「色彩計劃與實作」，北星出版社(2017年)。
- CREE公司技術報告，「LED Color Mixing: Basics and Background」，CLD-AP38 REV 1D。