中華民國第 64 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國小組　化學科

第三名

080204

藍曬變變變-發展藍曬色彩變化應用於文創作品

學校名稱：　臺北市大安區幸安國民小學

作者：	指導老師：
小六　陳柏縉 小四　陳品彤 小四　吳采蓁	吳欣欣 楊美娟

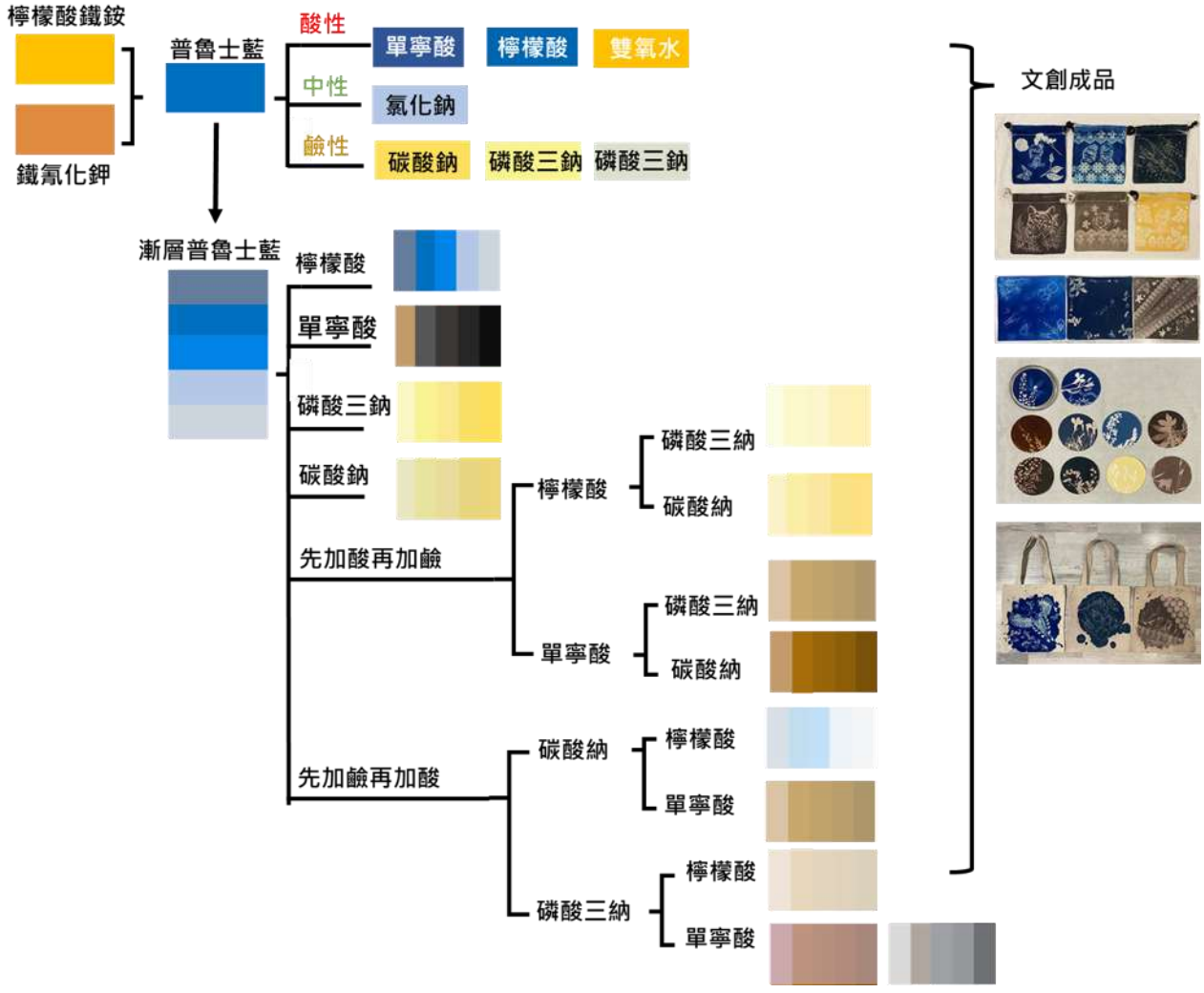
關鍵詞：　普魯士藍、色彩模型、顏色檢測

摘要

以藍曬為主題，利用掃瞄器檢測標準普魯士藍(Pantone 色票 2196U)，並搭配 PS 軟體取得平均值進行色彩分析，成功找到感光液比例 50:50(檸檬酸鐵銨:鐵氰化鉀)、感光 50 秒時，在素描紙上可製作顏色 RGB：R21 / G80 / B133、HSV：H208 / S84 / V52 的標準普魯士藍。

為了增加色彩，我們利用不同的感光時間製作漸層普魯士藍，並進一步將其浸泡於不同酸鹼 pH 值溶液，結果成功發現：**①浸泡於檸檬酸、雙氧水、氯化鈉時，顏色維持藍色，但因浸泡時間、pH 值不同，顏色有明顯的亮度、深淺差異 ②浸泡於碳酸鈉、磷酸三鈉時，顏色為黃棕色系 ③浸泡於單寧酸時，顏色呈現藍黑色系。**

最後，我們將結果應用在不同材質中，成功製作色彩豐富的藍曬作品，讓「古代攝影工藝」有新發現，符合 SDGs11 永續城市之目標！



壹、前言

一、研究動機

在藍曬體驗課程時，看到原本為黃綠色溶液的檸檬酸鐵銨與鐵氰化鉀在混合後，透過紫外線的照射下竟變成藍色的溶液，覺得大開眼界，因此產生了興趣並開啟對藍曬的研究。

收集資料後發現，藍曬是普魯士藍沉澱，且當它浸泡咖啡、茶等溶液時，會產生不同的顏色，這讓我不禁想起三年級自然課「廚房裡的科學」單元所提到的：花和葉子遇到酸鹼也會變色！因此我們決定探討如何才能使藍曬變出更多顏色？希望能讓「古代攝影工藝」有新的發現與樣貌！ 最後，希望創作出豐富多元的藍曬文創成品，讓大家都愛上藍曬。

二、研究目的

(一)利用不同設備檢測並定義標準普魯士藍

(二)探討在不同感光液比例下，棉布與素描紙之標準普魯士藍感光時間

(三)探討普魯士藍在酸鹼中之顏色變化情形

1.分析標準普魯士藍在不同酸鹼中，其顏色之變化

2.利用不同的感光時間製作漸層普魯士藍

3.分析漸層普魯士藍在不同酸鹼中，其顏色之變化

4.分析浸泡酸鹼的順序對於漸層普魯士藍顏色變化之影響

(四)比較不同材質對普魯士藍呈色的影響

1.分析不同材質上的漸層普魯士藍浸泡酸鹼時，其顏色之差異

2.分析浸泡酸鹼的順序對於不同材質上的漸層普魯士藍，其顏色變化之影響

3.製作不同材質之藍曬作品

三、文獻回顧

(一)藍曬（Cyanotype）化學原理

表 1-3-1 藍曬化學原理

1	**檸檬酸銨鐵** $(NH_4)_3[Fe(C_6H_5O_7)_2]$ 中的檸酸根離子為還原劑，在照射紫外光時會進行光化學反應，分解產生丙酮-1,3-二羧酸（acetone-1,3-dicarboxylate）和二氧化碳，並失去電子。Citrate $\xrightarrow{UV}$ acetone-1,3-dicarboxylate + CO_2 + $2e^-$
2	檸檬酸銨鐵中的鐵離子 (Fe^{3+}) 得到電子，還原成為亞鐵離子 (Fe^{2+})。 $2Fe^{3+} + C_6H_8O_7 \xrightarrow{UV} 2\ Fe2+ + C_6H_6O_7 + 2H^+$
3	亞鐵離子 (Fe^{2+}) 與**鐵氰化鉀** $K_3[Fe(CN)_6]$反應生成不溶於水的**普魯士藍** $Fe_4[Fe(CN)_6]_3$。 $4Fe^{2+} + 3K_3[Fe(CN)_6] \rightarrow\rightarrow Fe_4[Fe(CN)_6]_3 + 12K^+$
4	不透光部位，以清水洗去後即成藍底白色的圖樣。

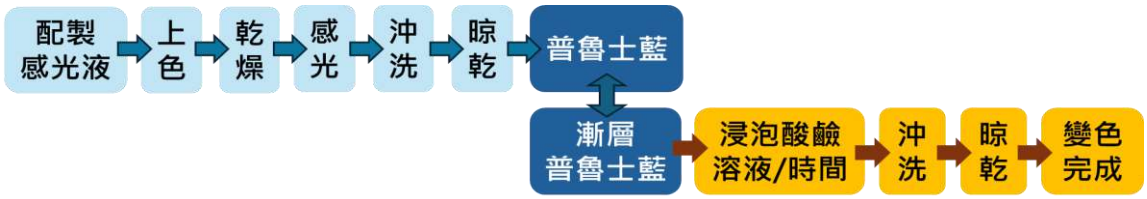
(二)文獻彙整：回顧歷屆科展文獻之產生普魯士藍較佳的方式，彙整如下：

表 1-3-2 文獻彙整

組別	主題	與本研究相關的其他研究結果
高中組	燈下藍～自製燈箱的藍曬研究(第 63 屆)	1.藍曬感光液比例：檸檬酸鐵銨溶液：鐵氰化鉀溶液➔1：1 2.判斷方法：色差儀 3.藍曬作品呈現方式：布料經緯密度大、質量密度大、單股平紋織法和厚度小，有利於藍曬圖品質
	以手機 app 研究各項變因對藍印術反應速率的影響(第 62 屆)	1.判斷方法：手機 APP (科學日誌) 2.藍曬顯色程度會明顯受到紙張種類、紙張吸水率、塗刷工具、塗刷力道、塗刷均勻程度影響，改以溶液顏色判斷
國小組	藍色狂想曲-藍晒變色研究(第 61 屆)	1.感光液比例：檸檬酸鐵銨溶液：鐵氰化鉀溶液➔60：40 2.判斷方法：手機 APP(Color Picker)及目視 3.藍曬作品呈現方式：紙張，日本水彩紙 300 磅最佳 4.調色：硼砂、碳酸鈉、漂白水➔顏色變淺 檸檬酸、雙氧水➔顏色變深 烏龍茶、咖啡、綠茶、紅茶➔褐色 單寧酸➔效果最好，為深褐色
	藍到非晒不可-光雕顯影術，以投影機為例(第 61 屆)	1.感光液比例：檸檬酸鐵銨溶液：鐵氰化鉀溶液➔4：5 2.判斷方法：目視 3.藍曬作品呈現方式：布，胚布最佳
	“藍”住陽光，“晒”出幸福-藍晒關鍵揭迷(第 57 屆)	1.感光液比例：檸檬酸鐵銨溶液：鐵氰化鉀溶液➔35：65 2.判斷方法：目視 3.藍曬作品呈現方式：紙張，素描紙最佳

分析歷屆研究發現有幾項共同點：1.感光液的比例不同　2.顏色檢測與分析方式多以目視方法判斷　3.無實際定義出何為最佳普魯士藍　4.進行普魯士藍變色研究時，使用咖啡、茶葉…等進行變色，容易會因為成分含有多種物質進而影響色彩變化。

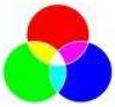
(三)藍曬與變色流程：



(四)色彩模型：了解不同色彩模型的差異。

表 1-3-3 色彩模型說明

CMYK 色彩模型	CMYK 色彩模型使用青色(C)、洋紅色(M)、黃色(Y)和黑色(K)四種元素來定義色彩，這些元素的值介於 0 到 100 之間，代表百分比。
	色料，屬於減法色彩。通用於水彩、印刷。
	此次科展藍曬作品，屬於 CMYK 色料的色彩模型。

RGB 色彩模型 	RGB 色彩模型使用紅 (R)、綠 (G) 和藍 (B) 三種元素來定義特定色彩中紅色、綠色和藍色光源的量。每元素會以 0 到 255 之間的數字表表示。
	色光，屬於加法色彩。應用於顯示器、顏色感測器。
	此次科展顏色感測器、掃描，屬於 RGB 色光的色彩模型。
HSV 色彩模型 	使用色相 (H)、彩度 (S)和亮度(V)三種元素來定義色彩，也稱為 HSV。
	H 色相，描述色彩的色素，以標準色輪上位置的角度表示。 紅色 0°、黃色 60°、綠色 120°、青色 180°、藍色 240°、洋紅色 300°
	S 彩度，色彩鮮明或黯淡程度。介於 0 到 100 間，數值愈高，愈鮮明。
	V 亮度，色彩含的白色量。介於 0 到 100 之間，數值愈高，愈明亮。
	此次科展使用 HSV 色彩模型，進行色彩分析比較。

貳、研究設備及器材

一、顏色檢測器與設備：

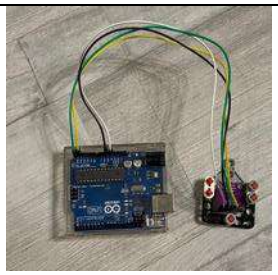
			
Arduino+TCS34725 顏色感應器	LEG OEV3 + HiTechnic 感測器	FUJI XEROX Versant 180Press 掃瞄器	FUJI Color C70 掃瞄器
60cm 正方藍曬箱	LED 紫外線燈 (2000W 光效)	pH 酸鹼檢測筆	行動顯微鏡

圖 2-1 顏色檢測器及設備(圖片由作者拍攝)

二、化學藥品：

檸檬酸鐵銨	鐵氰化鉀	雙氧水	單寧酸	檸檬酸
磷酸三鈉	碳酸鈉	氯化鈉		

三、其他器材：

電腦	護目鏡	攪拌棒	熨斗	電子秤
遮光布	晾乾架	玻璃量筒	遮光透明片	手套
刷子	量匙	固定夾	大小海綿墊	黑色簽字筆
胚布	素描紙	棉布	燒杯	大小玻璃水盆

參、研究過程或方法

一、研究架構

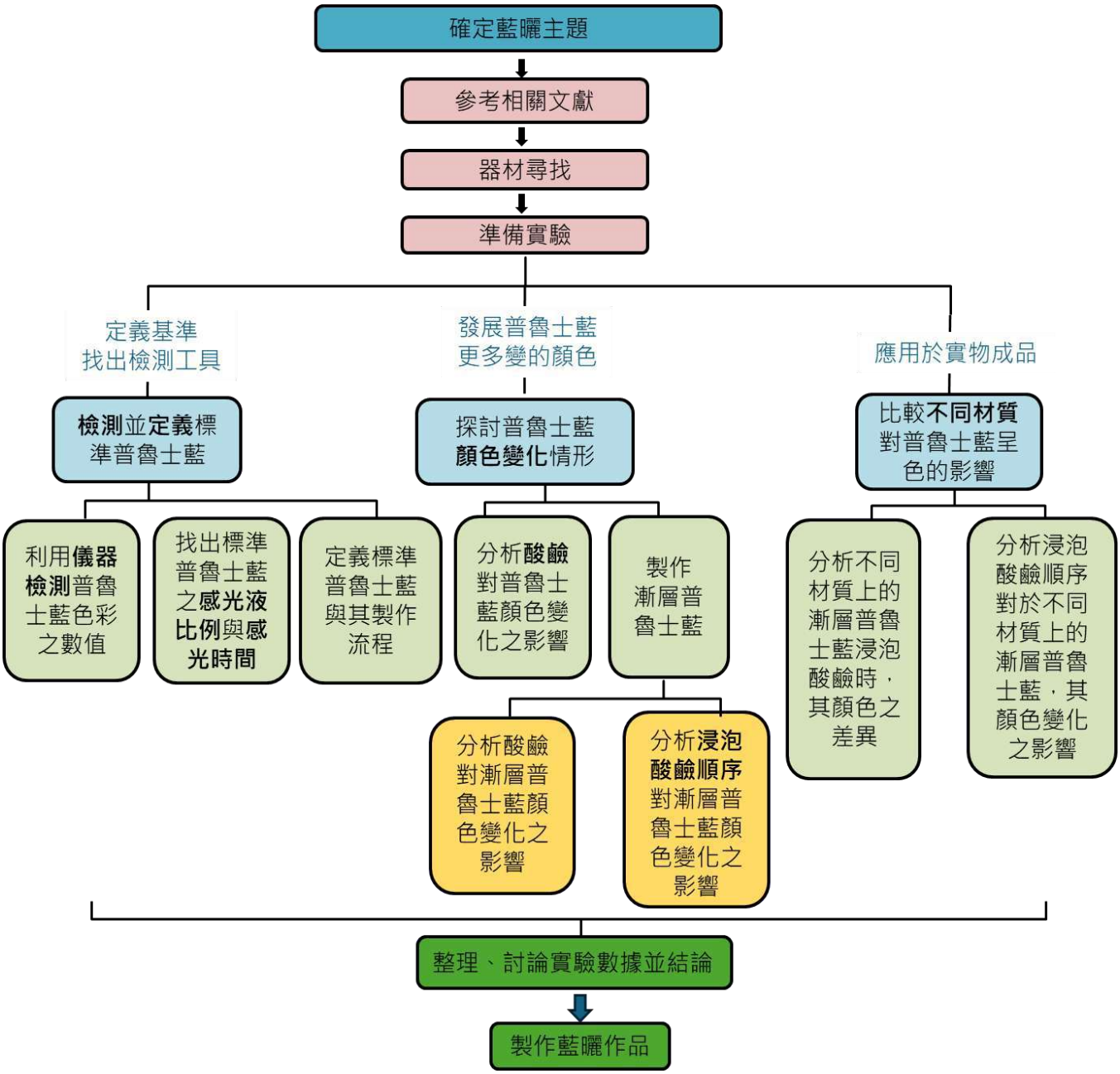


圖 3-1 研究架構圖

二、研究相關化學反應

(一)普魯士藍化學反應式

$$Fe^{3+} + [Fe(CN)_6]^{4-} \rightarrow Fe_4[Fe(CN)_6]^3\,(s)\ \text{普魯士藍}$$

(二)鐵離子與亞鐵離子相關化學反應式

1	Fe^{3+} (aq) 呈現 黃棕色	4	$Fe^{3+} + OH^- \rightarrow Fe(OH)_3$ (aq)
2	Fe^{2+} (aq) 呈現 綠色	5	$Fe^{2+} + CO_3^{2-} \rightarrow FeCO_3$ (aq)
3	Fe^{3+} + 單寧酸 → 錯合物	6	$Fe^{3+} + PO_4^{3-} \rightarrow FePO_4$ (aq)

(三)磷酸三鈉溶液之時效性

$$PO_4^{3-} \xrightarrow{H^+} HPO_4^{2-} \xrightarrow{H^+} H_2PO_4^-$$

磷酸三鈉水溶液時應避免長時間存放於空氣中，建議在配置後盡快使用，以免與空氣中的二氧化碳作用，影響溶液酸鹼性。

三、研究方法

研究一、利用不同儀器檢測並定義標準普魯士藍

(一)內容：

歷屆藍曬研究尚無實際定義出何為最佳普魯士藍，然而我們查到 Pantone 2196U 色票普魯士藍，想藉由不同的顏色檢測方式，找到與色票相同的精準色值，定義標準普魯士藍的數值，並作為後續實驗檢測顏色的基準。

(二)實驗步驟：

使用五種顏色檢測方式，在同一人檢測、同光源的條件下對色卡、Pantone2196U 與藍曬作品進行 RGB 色值檢測。

表 3-3-1-1 顏色檢測流程說明(圖片由作者拍攝)

<table>
<tr><td>1</td><td colspan="2">Arduino & TCS34725 顏色感應器＋程式：Arduino IDE</td></tr>
<tr><td>流程步驟</td><td>1.串接 Arduino 機器與 TCS34725 顏色感應器晶片 。
2.使用 LEGO 零件，固定感應器高度為 0.5cm。
3.下載對應程式：LED Color.ino，對色卡進行檢測。</td><td> </td></tr>
<tr><td>2</td><td colspan="2">LEGO EV3 & HiTechnic 感測器＋程式：EV3 MINDSTORMS Education</td></tr>
<tr><td rowspan="2">流程步驟</td><td>曾學過 EV3 的 Color Sensor 顏色感應器與 HiTechnic 感測器進行顏色下達指令，由於 Color Sensor 顏色感應器無法校色，因此選用 HiTechnic 感測器。</td><td rowspan="2"> </td></tr>
<tr><td>1.組裝並串接 LEGO EV3 主機與 HiTechnic 感測器。
2.使用 LEGO 零件，固定感應器高度為 0.5cm。
3.撰寫感測顏色指令程式，對色卡進行檢測。</td></tr>
</table>

3	**FUJI XEROX Versant 180Press 掃瞄器＋程式：小畫家**	
流程步驟	1.將實驗結果、Pantone2196U 與作品掃描成影像檔。 2.使用小畫家吸管工具，對掃描後的影像檔進 RGB 色值檢測。	
4	**FUJI XEROX Versant 180Press 掃瞄器＋程式：Adobe Photoshop 影像軟體！**	
流程步驟	使用「Adobe Photoshop 影像軟體」滴管工具中的**「平均顏色數值」**功能，取得實驗的顏色平均值。 1.掃描實驗結果、Pantone2196U 與藍曬作品的影像檔案，利用 Adobe Photoshop 軟體中滴管工具，進行檢測 RGB 色值。 2.滴管工具，設定顏色取樣標本尺寸為「101 x 101 平均像素」進行區域內平均像素 RGB 顏色檢測。	
5	**FUJI Color C70 掃瞄器+程式：Adobe Photoshop**	
流程步驟	比較不同掃描機的檢測結果，如設備 4 的流程步驟，換掃描機再進行一次。	

研究二、探討在不同感光液比例下，棉布與素描紙之標準普魯士藍感光時間

(一)內容：找出標準普魯士藍製作方式，根據第 63 屆燈下藍～自製燈箱的藍曬研究與第 57 屆“藍”住陽光，“晒”出幸福-藍晒關鍵揭迷之研究，選擇棉布與素描紙進行實驗。

(二)實驗設計：改變感光液比例與感光時間進行交叉實驗，每組重複實驗三次，取得平均值，得到不同顏色之普魯士藍進行色彩分析。

1.改變感光液比例： A 溶液與 B 溶液分別 (30：70)、(35：65)、(40：60)、(45：55)、(50：50)、(55：45)、(60：40)、(65：35)、(70：30) 共 9 種比例進行實驗。

2.改變感光時間：10 秒為單位進行 10、20、30……170、180 秒共 18 種感光時間。

(三)實驗步驟：以表 3-3-2-1 說明。

表 3-3-2-1 藍曬流程

步驟		做法
1	**前置作業**	(1)清洗棉布上層的保護漿，熨燙平整後，裁切為 7×7cm 尺寸 (2)製作與設計團隊的 LAB 透明圖片，有助於觀察感光狀況
2	**配置感光液**	(1)20%檸檬酸鐵銨溶液(A 溶液)：取 25 克檸檬酸鐵銨與 100 毫升純水混合均勻 (2)9 %鐵氰化鉀溶液(B 溶液)：取 10 克鐵氰化鉀與 100 毫升純水混合均勻
3	**上色**	由同一人用刷具將感光液從左塗到右，來回均勻塗抹一次在實驗材質上
4	**乾燥**	將感光材質吊掛於低光源的廁所，並自然乾燥
5	**感光**	用壓克力板和長尾夾夾住乾燥後的感光材質與 LAB 透明圖片，於 **2000W 光效 60cm 正方體紫外線 LED 燈箱**中曝曬
6	**沖洗**	用清水洗去曝曬後感光材質之殘餘感光液

7	**催化**	將感光材質放入雙氧水(10mL35%雙氧水＋490mL 水)中，加速氧化反應後，並以清水沖洗
8	**晾乾**	將感光材質分別晾乾
9	**紀錄**	測量記錄乾燥後的 **RGB 色值，並轉換成 HSV 值，**進行色彩分析。

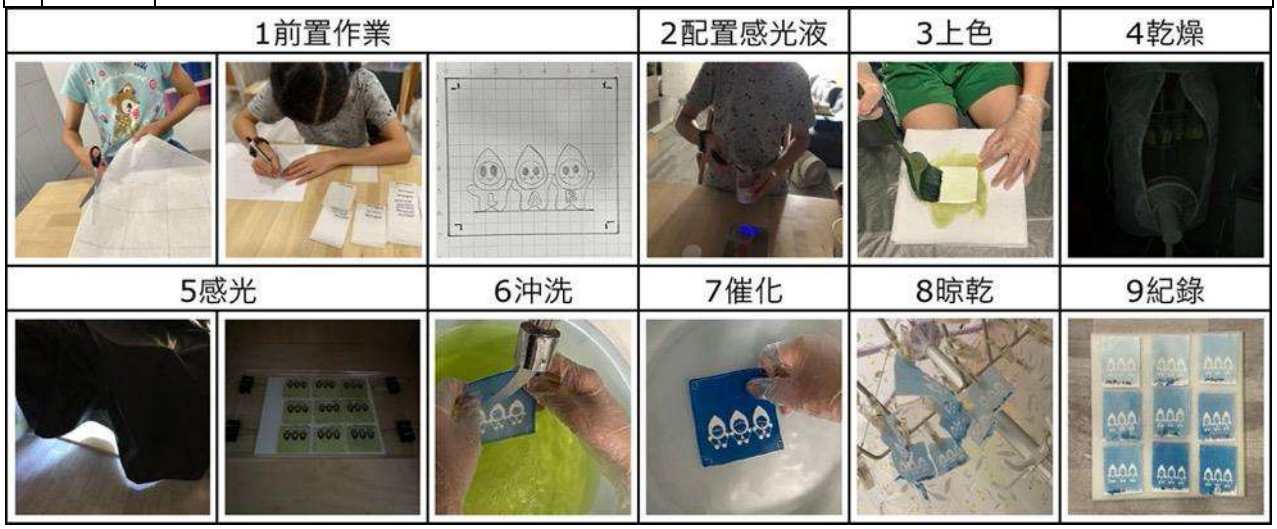


圖 3-3 藍曬實際製作過程照片(圖片由作者拍攝)

研究三、探討普魯士藍在酸鹼中之顏色變化情形

(一)分析標準普魯士藍在不同酸鹼中，其顏色之變化。

1.內容：參考書籍「美國攝影圖片製作工藝專業教程」與網路相關文獻所提到的藍曬變色方法，除了選擇較常被使用的單寧酸和磷酸三鈉之外，亦選擇了幾種五年級水溶液單元學習過的酸鹼進行實驗。

2.實驗設計：將標準普魯士藍分別浸泡不同的酸鹼溶液且改變浸泡的時間進行交叉實驗，每組重複實驗三次，取得平均值，得到不同顏色之普魯士藍進行色彩分析。

(1)控制變因：素描紙上的標準普魯士藍

(2)操縱變因：

①改變浸泡時間：20 秒、40 秒、1 分鐘、5 分鐘、10 分鐘，共 5 種。

②改變酸鹼溶液的 pH 值(配製不同濃度的酸鹼溶液)

表 3-3-3-1 酸鹼溶液 pH 值示意圖

溶液種類 \ pH 值		1~2	3	5~6	7	10	11	12
酸性	檸檬酸 $C_6H_8O_7$							
	雙氧水 H_2O_2							
	單寧酸 $C_{76}H_{52}O_{46}$							
中性	氯化鈉 NaCl							
鹼性	碳酸鈉 Na_2CO_3							
	磷酸三鈉 Na_3PO_4							

3.配製溶液之方法：以表 3-3-3-2 說明

表 3-3-3-2 配置酸鹼溶液流程表

溶液種類		溶液配製方法	pH 值
酸性	檸檬酸 $C_6H_8O_7$	取 300 克檸檬酸與 300 mL 純水混合均勻	0.68
		取 0.24 克檸檬酸與 500 mL 純水混合均勻	3
		取 0.14 克檸檬酸與 2600 mL 純水混合均勻	5.05
	雙氧水 H_2O_2	取 200mL 濃度為 35%雙氧水	1.8
		取 199.23 克濃度 35%雙氧水與 500mL 純水混合均勻	3.02
		取 6.3 克濃度 35%雙氧水與 580mL 純水混合均勻	5.01
	單寧酸 $C_{76}H_{52}O_{46}$	取 100 克單寧酸與 500mL 純水混合均勻	4.82
		取 0.21 克單寧酸與 500mL 純水混合均勻	5
		取 0.11 克單寧酸與 500mL 純水混合均勻	5.89
中性	氯化鈉 NaCl	取 60 克氯化鈉與 500mL 純水混合均勻	5.74
		取 3 克氯化鈉與 500mL 純水混合均勻	6.02
		取 43 克氯化鈉與 500mL 純水混合均勻	7
鹼性	碳酸鈉 Na_2CO_3	取 0.05 克碳酸鈉與 2500mL 純水混合均勻	10.03
		取 0.35 克碳酸鈉與 500mL 純水混合均勻	11
		取 105 克碳酸鈉與 500mL 純水混合均勻	11.76
	磷酸三鈉 Na_3PO_4	取 0.05 克磷酸三鈉與 2000mL 純水混合均勻	10.09
		取 0.4 克磷酸三鈉與 750mL 純水混合均勻	10.98
		取 3 克磷酸三鈉與 500mL 純水混合均勻	11.73
		取 60 克磷酸三鈉與 500mL 純水混合均勻	12.4

(二)利用不同的感光時間製作漸層普魯士藍。

1.內容：想製作色彩繽紛的普魯士藍，根據研究二的實驗結果製作漸層普魯士藍。

2.實驗設計：將感光液(A 溶液 50：B 溶液 50)塗抹至素描紙，分五段感光。

(1)控制變因：素描紙上的標準普魯士藍

(2)操縱變因：改變感光時間：20 秒、40 秒、60 分鐘、120 秒、180 秒，共 5 種。

(三)分析漸層普魯士藍在不同酸鹼中，其顏色之變化。

1.內容：依研究三(一)實驗結果與流程，分別選擇不同 pH 值的酸鹼溶液進行實驗。

2.實驗設計：將漸層普魯士藍分別浸泡不同的酸鹼溶液且改變浸泡的時間進行交叉實驗，每組重複實驗三次，取得平均值，得到不同顏色之普魯士藍進行色彩分析。

(1)控制變因：素描紙上的漸層普魯士藍

(2)操縱變因：

①改變浸泡時間：20 秒、40 秒、1 分鐘、5 分鐘、10 分鐘，共 5 種。

②浸泡酸鹼溶液：檸檬酸(pH=0.68)、單寧酸(pH=4.6)、碳酸鈉(pH=11.58)、磷酸鈉(pH=12.48)，共 4 種。

3.配製溶液之方法：以表 3-3-3-3 說明。

表 3-3-3-3 配置酸鹼溶液流程表

溶液種類		溶液配製方法	pH 值
酸性	檸檬酸 $C_6H_8O_7$	取 500 克檸檬酸與 500 mL 純水混合均勻	0.68
	單寧酸 $C_{76}H_{52}O_{46}$	取 100 克單寧酸與 500 mL 純水混合均勻	4.6
鹼性	碳酸鈉 Na_2CO_3	取 105 克碳酸鈉與 500 mL 純水混合均勻	11.58
	磷酸三鈉 Na_3PO_4	取 60 克磷酸三鈉與 500 mL 純水混合均勻	12.48

(四)分析浸泡酸鹼的順序對於漸層普魯士藍顏色變化之影響。

1.內容：依研究三(三)的實驗結果，選擇最長及最短的浸泡時間並進行漸層普魯士藍先後浸泡酸鹼之實驗。

2.實驗設計：分析漸層普魯士藍在不同浸泡時間、先後浸泡酸與鹼之交叉實驗後，得到不同顏色的漸層普魯士藍，進行色彩分析。

(1)控制變因：素描紙上的漸層普魯士藍

(2)操縱變因：①改變浸泡時間：20 秒、10 分鐘，共 2 種 ②浸泡不同酸鹼溶液： 檸檬酸(pH=0.68)、單寧酸(pH=4.6)、碳酸鈉(pH=11.58)、 磷酸三鈉(pH=12.48)

3.實驗流程：每組溶液進行交叉實驗，共 32 組。

表 3-3-3-4 實驗流程表

項目	溶液組別		每組浸泡規則
先浸泡酸再浸泡鹼	1	檸檬酸(a) + 碳酸鈉(b)	(1)先浸泡 a：20 秒、再浸泡 b：20 秒 (2)先浸泡 a：20 秒、再浸泡 b：10 分鐘 (3)先浸泡 a：10 分鐘、再浸泡 b：20 秒 (4)先浸泡 a：10 分鐘、再浸泡 b：10 分鐘
	2	檸檬酸(a) + 磷酸三鈉(b)	
	3	單寧酸(a) + 碳酸鈉(b)	
	4	單寧酸(a) + 磷酸三鈉(b)	
先浸泡鹼再浸泡酸	5	碳酸鈉(b) + 檸檬酸(a)	(1)先浸泡 b：20 秒、再浸泡 a：20 秒 (2)先浸泡 b：20 秒、再浸泡 a：10 分鐘 (3)先浸泡 b：10 分鐘、再浸泡 a：20 秒 (4)先浸泡 b：10 分鐘、再浸泡 a：10 分鐘
	6	碳酸鈉(b) + 單寧酸(a)	
	7	磷酸三鈉(b) + 檸檬酸(a)	
	8	磷酸三鈉(b) + 單寧酸(a)	

研究四、比較不同材質對漸層普魯士藍呈色的影響

(一)分析不同材質上的漸層普魯士藍浸泡酸鹼時，其顏色之差異。

1.內容：依研究三(三)的實驗結果，選擇不同 pH 值的溶液進行實驗。

2.實驗設計：不同材質的漸層普魯士藍分別浸泡不同 pH 值的酸鹼溶液，每組重複實驗三次取得平均值並進行色彩分析。

(1)控制變因：浸泡 10 分鐘的漸層普魯士藍

(2)操縱變因：①不同材質：素描紙、棉布、6 安胚布、12 安胚布，共 4 種 ②浸泡不同溶液：檸檬酸(pH=0.68)、單寧酸(pH=4.6)、碳酸鈉(pH=11.58)、 磷酸三鈉(pH=12.48)

(二)分析浸泡酸鹼的順序對於不同材質上的漸層普魯士藍，其顏色變化之影響。

1.內容：依研究三的實驗結果，選擇最長浸泡時間並於不同材質的漸層普魯士藍進行先後浸泡酸鹼之實驗。

2.實驗設計：比照研究三(四)、研究四(一)的實驗流程，選擇溶液組別 4-單寧酸 + 磷酸三鈉、組別 6-碳酸鈉+ 單寧酸、組別 8-磷酸三鈉+ 單寧酸，浸泡規則組別 4-先後浸泡酸鹼溶液各 10 分鐘於不同材質的漸層普魯士藍，進行色彩分析。

肆、研究結果

研究一、利用不同設備檢測並定義標準普魯士藍

(一)研究結果：以表 4-1-1、表 4-1-2 說明。

表 4-1-1 設備檢測結果

顏色	黑色			白色			紅色			綠色			藍色			黃色			Pantone 2196U			藍曬作品		
設備1	Arduino+TCS34725顏色感應器+程式：Arduino ID																							
顏色																								
RGB	73	101	85	173	238	214	165	55	52	68	130	58	42	83	135	126	158	62	37	91	128	37	91	128
HSV	146	28	40	158	27	93	2	68	65	112	55	51	214	69	53	80	61	62	204	71	50	204	71	50
設備2	LEGO EV3+HiTechnic感測器+程式：EV3 MINDSTORMS Education EV3 Student Editiont																							
顏色																								
RGB	4	9	10	255	255	255	151	19	4	78	134	59	18	31	111	255	255	69	15	39	105	15	39	105
HSV	190	60	4	0	0	100	6	97	59	105	56	53	232	84	44	60	73	100	224	86	41	224	86	41
設備3	FUJI V180PX掃瞄器＋程式：小畫家																							
顏色																								
RGB	29	31	30	255	255	255	183	32	47	139	190	69	47	74	153	255	255	71	48	78	126	45	70	127
HSV	150	6	12	0	0	100	354	83	72	85	64	75	225	69	60	60	72	100	217	62	49	217	62	49
設備4	FUJI XEROX Versant 180Press掃瞄器＋程式：Adobe Photoshop影像軟體																							
顏色																								
RGB	7	12	13	255	255	255	189	0	33	88	171	56	23	41	116	252	251	68	12	63	113	12	63	113
HSV	194	46	5	0	0	100	350	100	74	103	67	67	228	80	45	59	73	99	209	90	44	209	90	44
設備5	FUJI Color C70掃瞄器＋程式：Adobe Photoshop影像軟體																							
顏色																								
RGB	34	34	34	255	255	255	208	9	42	96	176	58	50	61	138	245	243	49	21	80	133	21	80	133
HSV	178	2	13	0	0	100	350	96	81	101	67	69	232	64	54	59	80	96	208	84	52	208	84	52

表 4-1-2 設備顏色檢測結果與問題

設備 1	**Arduino & TCS34725 顏色感應器＋程式：Arduino IDE**
1. TCS34725 顏色感應器為初階顏色感應器，白色與黑色不準、顏色會「偏色」。 2. Pantone2196U 與藍曬作品，可以檢測出相同 R37/G91/B128 數據。	

設備 2	LEGO EV3 & HiTechnic 感測器＋程式：EV3 MINDSTORMS Education
1.由於 HiTechnic 感測器是利用光檢測 RGB 值，所以檢測環境的光源會影響檢測結果。黑色測出的結果為 R4 / G9 / B10，呈現深灰色，且紅色、藍色、綠色所測出的 RGB 值結果，均比「目視」看到的偏暗。 2. Pantone2196U 與藍曬作品，可以檢測出相同 R15 / G39 / B105 數據。	
設備 3	**FUJI XEROX Versant 180Press 掃瞄器＋程式：小畫家**
1.掃描器都做過較嚴格的顏色校正，因此掃描的顏色相對準確。 2.用「小畫家」滴管工具，吸取的顏色判別範圍為 1Pixel，無法取得區域內的平均數值，操作上顏色無法立即顯示，所以在 Pantone2196U 與藍曬作品中，無法找到一樣顏色數據。	
設備 4	**FUJI XEROX Versant 180Press 掃瞄器＋程式：Adobe Photoshop 影像軟體**
1. Photoshop 影像軟體之滴管工具可以選擇區域範圍內的平均顏色，搭配掃描機使用，顏色顯示相對準確，成功取得顏色的 RGB 平均值。 2. Pantone2196U 與藍曬作品，可以檢測出相同 R12 / G63 / B113，但在藍曬作品中淺色部分無 法顯示，會呈現白色。	
設備 5	**FUJI Color C70 掃瞄器＋程式：Adobe Photoshop 影像軟體**
1.與設備 4 檢測步驟相同，利用 Photoshop 影像軟體成功取得顏色的 RGB 平均值。 2. Pantone2196U 與藍曬作品，可以檢測出相同 R21 / G80 / B133，且顯色範圍較完整，因此以此為後續實驗檢測顏色基準。	

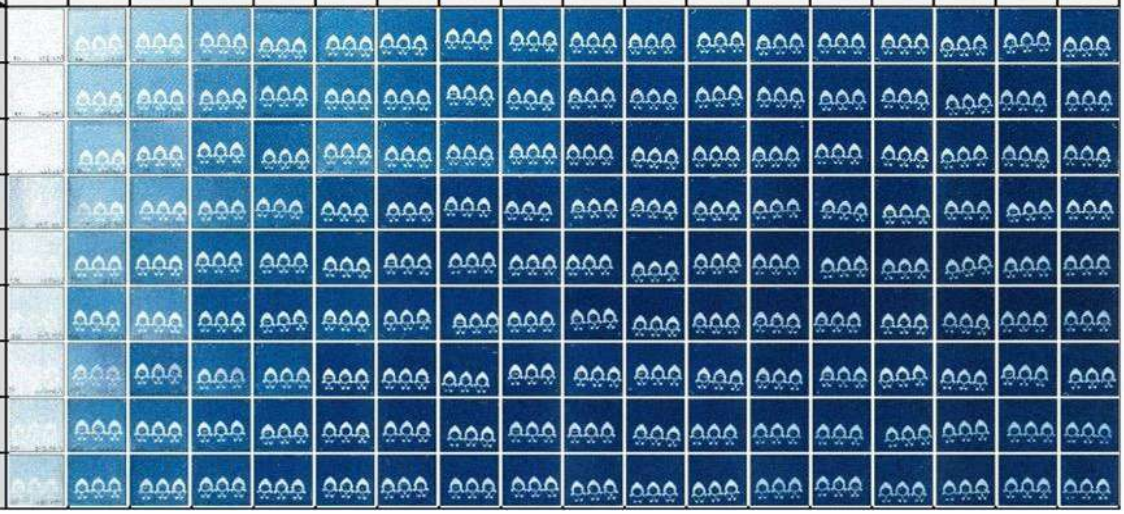
(二)實驗結論：綜合五種檢測方式對色票及普魯士藍的色彩分析結果，以檢測方式 5 進行檢測，顏色效果及顯示範圍最佳，因此後續實驗皆以 FUJI Color C70 掃瞄器搭配程式：Adobe Photoshop 影像軟體，進行顏色檢測，並以普魯士藍數值 RGB：R21 / G80 / B133、HSV：H208 / S84 / V52 作為標準。

研究二、探討在不同感光液比例下，棉布與素描紙之標準普魯士藍感光時間

(一)研究結果

我們發現當感光液「A：檸檬酸鐵銨」比例越高、「感光時間」越長，顏色會越藍。且在感光液比例 50:50，感光時間 50 秒時，素描紙上可以找到與研究一實驗結果-Pantone 色票 2196U 相同的數值(表 4-2-1 紅框標示)。另外，在棉布則找不到相同數值，與素描紙相較之下，棉布的彩度較高、亮度較低。

表 4-2-1 不同感光液比例與感光時間之棉布與素描紙產生的普魯士藍呈現表

秒數 / 溶液A (%)	棉布																	
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
30																		
35																		
40																		
45																		
50																		
55																		
60																		
65																		
70																		

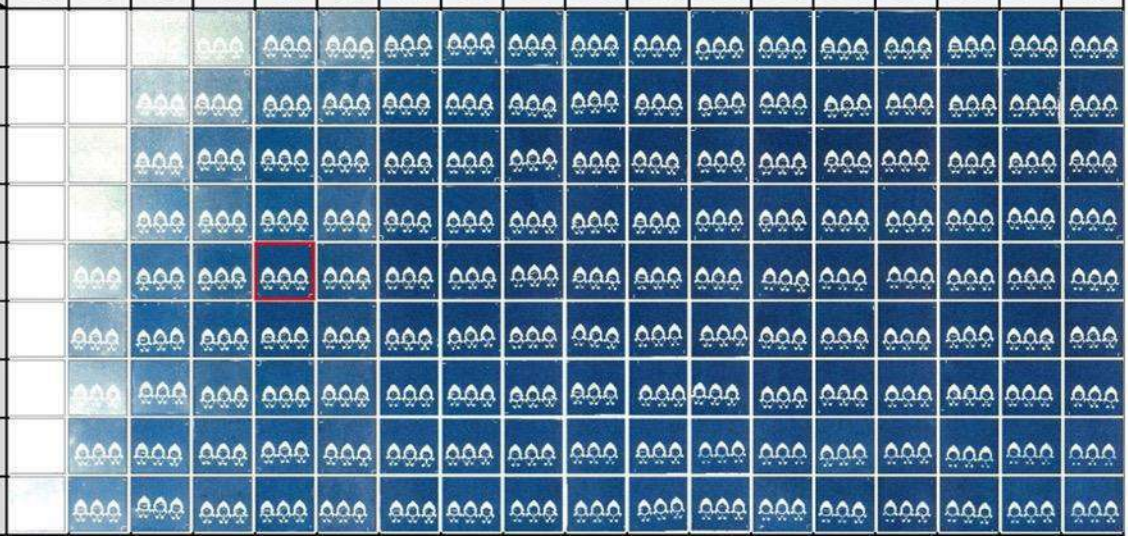
秒數 / 溶液A (%) (s)	素描紙																	
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
30																		
35																		
40																		
45																		
50																		
55																		
60																		
65																		
70																		

表 4-2-2 不同感光液比例與感光時間之素描紙普魯士藍平均 HSV 數值(節錄)

素描紙																		
秒數(s)	10			30			50			70			90			110		
溶液A (%)	H 色相	S 彩度	V 亮度	H 色相	S 彩度	V 亮度	H 色相	S 彩度	V 亮度	H 色相	S 彩度	V 亮度	H 色相	S 彩度	V 亮度	H 色相	S 彩度	V 亮度
30	0	0	100	142	6	92	202	36	71	204	80	55	207	85	51	208	87	48
35	0	0	100	194	27	79	205	72	60	205	85	53	211	81	48	211	83	47
40	0	0	100	203	45	73	207	79	57	209	85	49	212	82	46	211	83	45
45	0	0	100	203	46	71	207	85	54	210	83	48	212	82	46	212	82	46
50	0	0	100	207	70	64	208	85	53	212	82	46	212	81	44	211	81	45
55	0	0	100	206	74	62	208	85	53	211	82	49	212	79	48	212	81	46
60	0	0	100	207	65	66	208	82	56	211	81	50	212	77	50	212	79	48
65	0	0	100	207	70	64	208	81	56	210	81	52	211	79	51	211	79	50
70	123	5	95	207	67	66	208	81	56	210	79	52	211	78	51	211	79	51

(二)實驗結論：

1.利用不同比例的感光液、不同感光的時間，可以做出漸層普魯士藍。

2.感光液比例 50:50(檸檬酸鐵銨:鐵氰化鉀)、感光時間 50 秒時，可製作顏色為 RGB：R21/ G80/ B133、HSV：H208/ S84/ V52 的標準普魯士藍(表 4-2-2 紅框標示)。

表 4-2-3 標準普魯士藍製作方式

標準普魯士藍製作方式 (Pantone色票 2196U)			
	RGB	R21 / G80 / B133	
	HSV	H208 / S84 / V52	
材質	素描紙	感光時間	50 秒
感光液比例	20% 50mL 檸檬酸鐵銨溶液 9 % 50mL 鐵氰化鉀溶液		

研究三、探討普魯士藍在酸鹼中之顏色變化情形

(一)分析標準普魯士藍在不同酸鹼中，其顏色之變化。

1.標準普魯士藍浸泡不同濃度、時間之酸鹼溶液後的呈色結果

表 4-3-1-1 標準普魯士藍在不同酸鹼中顏色變化結果

	檸檬酸			雙氧水			單寧酸			氯化鈉			碳酸鈉			磷酸三鈉		
pH值 浸泡時間	pH 0.68	pH 3	pH 5.05	pH 1.8	pH 3.02	pH 5.01	pH 4.82	pH 5	pH 5.89	pH 5.74	pH 6.02	pH 7	pH 10.02	pH 11	pH 11.76	pH 10.09	pH 11.03	pH 12.40
20秒																		
40秒																		
1分鐘																		
5分鐘																		
10分鐘																		

我們發現當標準普魯士藍浸泡檸檬酸、雙氧水、氯化鈉時，顏色呈現不同深淺藍色；浸泡單寧酸時，隨著 pH 值下降、H^+濃度與浸泡時間增加，加速鐵離子與單寧酸之錯合物沉澱，溶液顏色逐漸轉變為藍黑色；浸泡碳酸鈉和磷酸三鈉時，隨著 pH 值上升、OH^-濃度增加，可以加速碳酸鐵與磷酸鐵沉澱，溶液顏色逐漸轉變為黃色。

2.檢測標準普魯士藍在不同酸鹼中顏色變化之平均 HSV 數值

表 4-3-1-2 標準普魯士藍在不同酸鹼中平均 HSV 數值

pH值	檸檬酸									雙氧水								
	pH0.68			pH3			pH5.05			pH1.8			pH3.02			pH5.01		
浸泡時間	H 色相	S 彩度	V 亮度	H 色相	S 彩度	V 亮度	H 色相	S 彩度	V 亮度	H 色相	S 彩度	V 亮度	H 色相	S 彩度	V 亮度	H 色相	S 彩度	V 亮度
20秒	207	84	61	207	89	56	207	86	56	208	82	57	206	74	59	204	57	60
40秒	208	76	63	208	88	56	208	86	54	208	73	61	207	79	57	205	54	61
1分鐘	208	79	61	207	86	56	207	88	56	208	76	60	207	78	59	206	74	58
5分鐘	208	82	61	206	88	61	207	82	59	210	69	63	208	73	60	207	66	60
10分鐘	209	81	61	206	81	65	207	74	61	210	65	66	210	65	62	208	64	61

pH值	單寧酸									氯化鈉								
	pH4.82			pH5			pH5.89			pH5.74			pH6.02			pH7		
浸泡時間	H 色相	S 彩度	V 亮度	H 色相	S 彩度	V 亮度	H 色相	S 彩度	V 亮度	H 色相	S 彩度	V 亮度	H 色相	S 彩度	V 亮度	H 色相	S 彩度	V 亮度
20秒	204	65	44	204	77	43	207	85	56	206	48	64	207	83	56	207	83	56
40秒	204	58	42	203	74	40	206	87	57	207	49	65	207	81	57	207	80	58
1分鐘	203	54	37	203	62	38	207	88	55	207	52	64	207	78	58	207	80	58
5分鐘	199	39	29	198	45	29	205	79	55	202	36	65	208	60	63	209	63	63
10分鐘	196	32	28	191	34	24	205	60	53	205	47	64	205	48	63	208	55	61

pH值	碳酸鈉									磷酸三鈉								
	pH10.03			pH11			pH11.76			pH10.09			pH11.03			pH12.4		
浸泡時間	H 色相	S 彩度	V 亮度	H 色相	S 彩度	V 亮度	H 色相	S 彩度	V 亮度	H 色相	S 彩度	V 亮度	H 色相	S 彩度	V 亮度	H 色相	S 彩度	V 亮度
20秒	207	78	56	206	72	57	53	25	95	207	84	54	207	72	59	62	22	99
40秒	208	83	54	206	68	57	52	25	96	207	83	55	208	65	60	63	22	99
1分鐘	207	81	56	197	31	62	52	27	97	206	84	56	207	51	64	65	22	99
5分鐘	208	69	59	55	23	95	58	27	99	207	74	59	129	9	75	65	23	100
10分鐘	207	51	63	56	23	98	60	28	99	207	62	61	65	14	90	66	22	100

標準普魯士藍浸泡時間最長、酸鹼濃度最高、中性溶液(表 4-3-1-2 紅框標示)之 HSV 分析：

表 4-3-1-3 標準普魯士藍與浸泡時間最長、酸鹼濃度最高及中性溶液 HSV 數值分析

數值	普魯士藍	檸檬酸	雙氧水	單寧酸	氯化鈉	碳酸鈉	磷酸三鈉
色相H	208	差異小	接近藍色	接近青色	差異小	下降至60度	下降至66度
彩度S	84		降低19%	下降52%	降低29%	下降57%	下降62%
亮度V	52		提高14%	下降24%	提高9%	維持95%以上	提高至100%
顏色							

3.實驗結論：

(1)普魯士藍浸泡酸性溶液(檸檬酸、雙氧水)或中性溶液(氯化鈉)時，顏色維持藍色，但會因浸泡時間、pH 值不同，顏色有深淺之差異。

(2)普魯士藍浸泡酸性溶液單寧酸時，產生錯合物，顏色呈現藍黑色系。

(3)普魯士藍浸泡鹼性溶液(碳酸鈉、磷酸三鈉)時，顏色可變為黃色系，且隨著 pH 值上升，可加快變色速度。

(二)利用不同的感光時間製作漸層普魯士藍。

我們利用感光液比例 50:50(檸檬酸鐵銨：鐵氰化鉀)，在素描紙上以不同的感光時間 20、40、60、120、180 秒，製作如表 4-3-2-1：

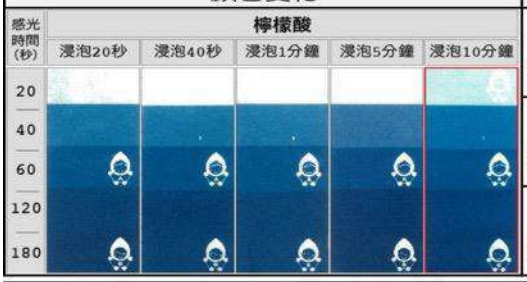
表 4-3-2-1 漸層普魯士藍

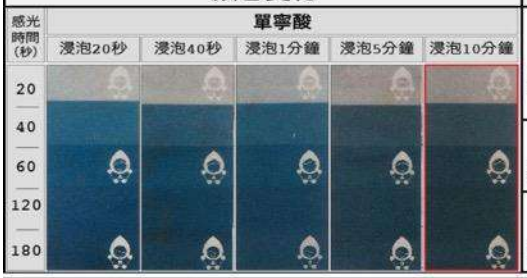
感光時間(秒)	漸層普魯士藍	HSV顏色檢測平均值 H 色相	S 彩度	V 亮度
20		193	21	79
40		207	80	57
60		211	79	50
120		212	80	44
180		212	78	46

(三)分析漸層普魯士藍在不同酸鹼中，其顏色之變化。

1.研究結果：

表 4-3-3-1 漸層普魯士藍浸泡不同酸鹼結果 HSV 數值分析

漸層普魯士藍浸泡在 pH=0.68 檸檬酸 之呈色情形			
顏色變化	HSV顏色檢測		說明
	H 色相	174度~208度 變化不大	浸泡檸檬酸10分鐘後的漸層普魯士藍H色相變化不大，呈現藍色，S彩度、V亮度都提高。在感光20秒、相較浸泡時間10分鐘與5分鐘時，其彩度由0%提高至12%，符合白色至天藍色的呈色變化。
	S 彩度	12%~99% 提高	
	V 亮度	95%~45% 提高	

漸層普魯士藍浸泡在 pH=4.6 單寧酸 之呈色情形			
顏色變化	HSV顏色檢測		說明
	H 色相	194度~196度 除感光20秒外 (26度)略為下降	浸泡單寧酸10分鐘的漸層普魯士藍，H色相略往青色靠近，S彩度、V亮度也都下降，顏色呈現藍黑色漸層。在感光20秒、浸泡時間10分鐘時，H色相(26度)接近紅色，S彩度、V亮度也都降低。
	S 彩度	11%~47% 下降	
	V 亮度	54%~26% 下降	

漸層普魯士藍浸泡在 pH=11.58 碳酸鈉 之呈色情形			
顏色變化	HSV顏色檢測		說明
	H 色相	20度~62度 下降至黃色系	浸泡碳酸鈉10分鐘的漸層普魯士藍，H色相改為黃色，S彩度下降，但V亮度提高，顏色呈現黃色漸層。
	S 彩度	0%~41% 下降	
	V 亮度	100%~99% 提高	

漸層普魯士藍浸泡在 pH=12.48 磷酸三鈉 之呈色情形			
顏色變化	HSV顏色檢測		說明
	H 色相	63度~49度 下降至黃色系 除感光20秒外	浸泡磷酸三鈉10分鐘的漸層普魯士藍H色相改為黃色，S彩度下降，但V亮度提高，顏色呈現黃色漸層。
	S 彩度	0%~30% 下降	
	V 亮度	100%~99% 提高	

2.實驗結論：

(1)漸層普魯士藍浸泡檸檬酸產生藍色漸層，H 色相變化不大，S 彩度、V 亮度提高；浸泡單寧酸會產生藍黑色漸層，H 色相略往青色靠近，S 彩度、V 亮度都下降；浸泡碳酸鈉、磷酸三鈉皆產生黃色漸層，H 色相改為黃色，S 彩度下降，V 亮度提高， 碳酸鈉的彩度 S 較磷酸三鈉略高，所以浸泡碳酸鈉後黃色比磷酸三鈉鮮豔。

(2)運用不同感光時間製作漸層普魯士藍，浸泡於酸鹼溶液中能產生更豐富色彩變化。

(3)感光時間越長，形成的普魯士藍越藍且深，當其遇到酸鹼溶液時，顏色的變化越明顯，完全變色之反應時間就越長。

(四)分析浸泡酸鹼的順序對於漸層普魯士藍顏色變化之影響。

根據研究三(三)實驗結果，我們選擇浸泡時間 20 秒與 10 分鐘的變因進行實驗。

1.先浸泡酸再浸泡鹼對於漸層普魯士藍呈色結果

(1)先浸泡檸檬酸(a)再浸泡碳酸鈉(b)

表 4-3-4-1 先浸泡檸檬酸再浸泡碳酸鈉結果與 HSV 數值

(1)先浸泡 檸檬酸 (a) / 再浸泡 碳酸鈉 (b)												
顏色變化				HSV顏色檢測平均值								
先浸泡a 20秒		先浸泡a10分鐘		先浸泡a 20秒				先浸泡a10分鐘				
再浸泡 b 20秒	再浸泡 b 10分鐘	再浸泡 b 20秒	再浸泡 b 10分鐘	再浸泡 b 20秒			再浸泡 b 10分鐘			再浸泡 b 20秒			再浸泡 b 10分鐘		
				H 色相	S 彩度	V 亮度	H 色相	S 彩度	V 亮度	H 色相	S 彩度	V 亮度	H 色相	S 彩度	V 亮度
				0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100
				63	7	100	63	15	100	0	0	100	62	13	100
				54	17	98	58	23	99	69	4	100	50	25	98
				46	27	94	47	35	99	60	10	99	45	36	99
				48	27	89	45	37	89	54	13	98	44	41	99

結果說明：先浸泡檸檬酸(pH=0.68)再浸泡碳酸鈉(pH=11.58)，漸層普魯士藍呈現黃色漸層，當浸泡檸檬酸的時間較久，出現了 H 色相、S 彩度變為 0，呈現白色的部分較多，當浸泡碳酸鈉的時間較久，S 彩度明顯變高，顏色呈現較鮮明的黃色。

(2)先浸泡檸檬酸(a) 再浸泡磷酸三鈉(b)

表 4-3-4-2 先浸泡檸檬酸再浸泡磷酸三鈉結果與 HSV 數值

(2)先浸泡 檸檬酸 (a) / 再浸泡 磷酸三鈉 (b)												
顏色變化				HSV顏色檢測平均值								
先浸泡a 20秒		先浸泡a10分鐘		先浸泡a 20秒				先浸泡a10分鐘				
再浸泡 b 20秒	再浸泡 b 10分鐘	再浸泡 b 20秒	再浸泡 b 10分鐘	再浸泡 b 20秒			再浸泡 b 10分鐘			再浸泡 b 20秒			再浸泡 b 10分鐘		
				H 色相	S 彩度	V 亮度	H 色相	S 彩度	V 亮度	H 色相	S 彩度	V 亮度	H 色相	S 彩度	V 亮度
				0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100
				66	3	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100
				58	9	99	65	7	100	0	0	100	0	0	100
				49	19	96	63	19	100	0	0	100	65	5	100
				48	20	93	61	20	100	0	0	100	63	5	100

結果說明：先浸泡檸檬酸(pH=0.68)再浸泡磷酸三鈉(pH=12.48)，漸層普魯士藍呈現淡黃色漸層，當浸泡檸檬酸的時間較久，出現了 H 色相、S 彩度變為 0 的顏色，呈現白色的部分較多，當浸泡磷酸三鈉的時間較久，V 亮度較高，顏色呈現淺黃色。

(3)先浸泡單寧酸(a) 再浸泡碳酸鈉(b)

表 4-3-4-3 先浸泡單寧酸再浸泡碳酸鈉結果與 HSV 數值

(3)先浸泡 單寧酸 (a) / 再浸泡 碳酸鈉 (b)												
顏色變化				HSV顏色檢測平均值								
先浸泡a 20秒		先浸泡a10分鐘		先浸泡a 20秒				先浸泡a10分鐘				
再浸泡 b 20秒	再浸泡 b 10分鐘	再浸泡 b 20秒	再浸泡 b 10分鐘	再浸泡 b 20秒			再浸泡 b 10分鐘			再浸泡 b 20秒			再浸泡 b 10分鐘		
				H 色相	S 彩度	V 亮度	H 色相	S 彩度	V 亮度	H 色相	S 彩度	V 亮度	H 色相	S 彩度	V 亮度
				26	18	72	25	29	76	26	30	61	23	44	56
				28	27	63	27	39	73	23	32	38	22	48	40
				30	27	62	30	42	74	24	28	34	21	44	37
				30	33	60	30	46	74	26	27	33	22	43	35
				31	30	59	30	47	73	28	23	30	22	41	35

結果說明：

先浸泡單寧酸(pH=4.6)再浸泡碳酸鈉(pH=11.58)，發現漸層普魯士藍呈現咖啡色漸層，當浸泡單寧酸的時間較久，H 色相較接近紅色、V 亮度較低，顏色呈現深咖啡色漸層，當浸泡碳酸鈉的時間較久，S 彩度及 V 亮度較高，顏色呈亮淺咖啡。

(4)先浸泡單寧酸(a) 再浸泡磷酸三鈉(b)

表 4-3-4-4 先浸泡單寧酸再浸泡磷酸三鈉結果與 HSV 數值

(4)先浸泡 單寧酸 (a) / 再浸泡 磷酸三鈉 (b)												
顏色變化				HSV顏色檢測平均值								
先浸泡a 20秒		先浸泡a10分鐘		先浸泡a 20秒				先浸泡a10分鐘				
再浸泡 b 20秒	再浸泡 b 10分鐘	再浸泡 b 20秒	再浸泡 b 10分鐘	再浸泡 b 20秒			再浸泡 b 10分鐘			再浸泡 b 20秒			再浸泡 b 10分鐘		
				H 色相	S 彩度	V 亮度	H 色相	S 彩度	V 亮度	H 色相	S 彩度	V 亮度	H 色相	S 彩度	V 亮度
				25	16	75	31	17	85	26	33	55	25	47	56
				25	22	70	30	28	78	23	35	38	22	46	37
				30	25	67	32	32	78	24	30	33	22	41	33
				31	25	66	32	40	74	25	26	32	23	35	30
				31	27	61	31	41	73	27	25	31	24	34	30

結果說明：

先浸泡單寧酸(pH=4.6)再浸泡磷酸三鈉(pH=12.48)，發現漸層普魯士藍呈現咖啡色漸層(以表 4-3-4-4 紅框標示) ，當浸泡單寧酸的時間較久，H 色相較接近紅色、V 亮度較低，顏色呈現深咖啡色漸層，當浸泡磷酸三鈉的時間較久，S 彩度較高，V 亮度較高，顏色較明亮。

2.先浸泡鹼再浸泡酸對於漸層普魯士藍呈色結果

(1)先浸泡碳酸鈉(b) 再浸泡檸檬酸(a)

表 4-3-4-5 先浸泡碳酸鈉再浸泡檸檬酸結果與 HSV 數值

(1)先浸泡 碳酸鈉 (b) / 再浸泡 檸檬酸 (a)													
顏色變化				HSV顏色檢測平均值									
先浸泡b 20秒		先浸泡b10分鐘		先浸泡b 20秒				先浸泡b 10分鐘					
再浸泡 a 20秒	再浸泡 a 10分鐘	再浸泡 a 20秒	再浸泡 a 10分鐘	再浸泡 a 20秒			再浸泡 a 10分鐘			再浸泡 a 20秒			再浸泡 a 10分鐘		
				H 色相	S 彩度	V 亮度	H 色相	S 彩度	V 亮度	H 色相	S 彩度	V 亮度	H 色相	S 彩度	V 亮度
				0	0	100	0	0	100	0	0	100	183	6	98
				69	2	100	0	0	100	64	8	100	180	2	99
				69	2	100	0	0	100	64	8	100	180	2	99
				68	8	95	186	5	96	50	25	98	165	2	99
				87	9	90	199	17	88	50	26	96	163	1	100

結果說明：

先浸泡碳酸鈉(pH=11.58)再浸泡檸檬酸(pH=0.68)，漸層普魯士藍呈現黃色或藍色漸層。當浸泡碳酸鈉的時間較久，顏色呈現黃色或藍色，當浸泡檸檬酸的時間較久，顏色呈現藍色。

(2)先浸泡碳酸鈉(b) 再浸泡單寧酸(a)

表 4-3-4-6 先浸泡碳酸鈉再浸泡單寧酸結果與 HSV 數值

(2)先浸泡 碳酸鈉 (b) / 再浸泡 單寧酸 (a)													
顏色變化				HSV顏色檢測平均值									
先浸泡b 20秒		先浸泡b10分鐘		先浸泡b 20秒				先浸泡b 10分鐘					
再浸泡 a 20秒	再浸泡 a 10分鐘	再浸泡 a 20秒	再浸泡 a 10分鐘	再浸泡 a 20秒			再浸泡 a 10分鐘			再浸泡 a 20秒			再浸泡 a 10分鐘		
				H 色相	S 彩度	V 亮度	H 色相	S 彩度	V 亮度	H 色相	S 彩度	V 亮度	H 色相	S 彩度	V 亮度
				29	9	72	17	13	66	33	12	88	25	18	73
				35	17	69	22	17	52	34	27	79	27	25	61
				35	21	66	22	16	46	34	31	74	28	27	55
				38	23	60	26	16	40	35	35	70	28	28	49
				48	12	52	28	12	38	33	35	67	28	28	48

結果說明：

先浸泡碳酸鈉(pH=11.58)再浸泡單寧酸(pH=4.6)，發現漸層普魯士藍呈現淺咖啡色漸層(表 4-3-4-6 紅框標示)。當浸泡碳酸鈉的時間較久，H 色相接近紅色，S 彩度及 V 亮度都較高，顏色呈現淺咖啡色；當浸泡單寧酸的時間較久，H 色相接近紅色，S 彩度及 V 亮度都較低，顏色呈現較暗的咖啡色。

(3)先浸泡磷酸三鈉(b) 再浸泡檸檬酸(a)

表 4-3-4-7 先浸泡磷酸三鈉再浸泡檸檬酸結果與 HSV 數值

(3)先浸泡 磷酸三鈉 (b) / 再浸泡 檸檬酸 (a)																	
顏色變化				HSV顏色檢測平均值													
先浸泡b 20秒		先浸泡b10分鐘		先浸泡b 20秒						先浸泡b 10分鐘							
再浸泡 a 20秒	再浸泡 a 10分鐘	再浸泡 a 20秒	再浸泡 a 10分鐘	再浸泡 a 20秒			再浸泡 a 10分鐘			再浸泡 a 20秒			再浸泡 a 10分鐘				
				H 色相	S 彩度	V 亮度	H 色相	S 彩度	V 亮度	H 色相	S 彩度	V 亮度	H 色相	S 彩度	V 亮度		
				0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100		
				0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100		
				0	0	100	57	0	100	0	0	100	0	0	100		
				23	0	100	62	5	100	0	0	100	0	0	100		
				66	4	100	61	5	100	0	0	100	0	0	100		

結果說明：先浸泡磷酸三鈉(pH=12.48)再浸泡檸檬酸(pH=0.68)，發現漸層普魯士藍幾乎變為白色。當浸泡磷酸三鈉的時間較久，顏色呈現白色。當浸泡檸檬酸的時間較久，部分顏色呈現淺藍色。

(4)先浸泡磷酸三鈉(b) 再浸泡單寧酸(a)

表 4-3-4-8 先浸泡磷酸三鈉再浸泡單寧酸結果與 HSV 數值

(4)先浸泡 磷酸三鈉 (b) / 再浸泡 單寧酸 (a)																	
顏色變化				HSV顏色檢測平均值													
先浸泡b 20秒		先浸泡b10分鐘		先浸泡b 20秒						先浸泡b 10分鐘							
再浸泡 a 20秒	再浸泡 a 10分鐘	再浸泡 a 20秒	再浸泡 a 10分鐘	再浸泡 a 20秒			再浸泡 a 10分鐘			再浸泡 a 20秒			再浸泡 a 10分鐘				
				H 色相	S 彩度	V 亮度	H 色相	S 彩度	V 亮度	H 色相	S 彩度	V 亮度	H 色相	S 彩度	V 亮度		
				26	9	74	14	11	58	20	10	66	21	17	55		
				30	14	66	14	12	42	26	17	54	15	17	40		
				33	17	64	17	11	38	25	19	49	17	18	37		
				34	21	61	21	10	35	26	19	44	18	15	31		
				34	21	60	21	10	34	24	16	42	19	13	31		

結果說明：先浸泡磷酸三鈉(pH=12.48)再浸泡單寧酸(pH=4.6)，發現漸層普魯士藍呈現藕紫色漸層(表 4-3-4-8 紅框標示) 當浸泡磷酸三鈉的時間較久，H 色相較接近紅色、S 彩度大部分較高、V 亮度較低，顏色呈現藕紫色漸層；當浸泡單寧酸的時間較久，H 色相較接近紅色，S 彩度、V 亮度皆較低，顏色較暗。

2.實驗結論：

(1)漸層普魯士藍先後浸泡檸檬酸與碳酸鈉、磷酸三鈉，不論先或後，並未產生新的顏色，而且由實驗結果可以發現先浸泡磷酸三鈉再浸泡檸檬酸時，不但圖案模糊且顏色幾乎全部消失，我們猜測的原因為：當漸層普魯士藍浸泡到磷酸三鈉溶液時，

生成了磷酸鐵沉澱和其他化合物，接著浸泡到檸檬酸時，磷酸鐵和其他化合物會與檸檬酸根離子發生反應，生成可溶性無色的配合物，使溶液顏色變淡甚至無色。

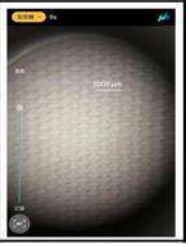
(2)漸層普魯士藍先後浸泡單寧酸與碳酸鈉、磷酸三鈉，由於單寧酸與鐵離子產生錯合物沉澱，使 H 色相偏紅色且 V 亮度下降，可以產生深淺不同的咖啡色與藕紫色，因此我們選擇了單寧酸搭配碳酸鈉、磷酸三鈉作為研究四(二)比較不同材質的實驗組合。

研究四、比較不同材質對漸層普魯士藍呈色的影響

(一)分析不同材質上的漸層普魯士藍浸泡酸鹼時，其顏色之差異。

表 4-4-1-1 不同材質普魯士藍浸泡酸鹼顏色與 HSV 數值

素描紙																
浸泡時間	漸層普魯士藍			檸檬酸10分鐘			單寧酸10分鐘			碳酸鈉10分鐘			磷酸三鈉10分鐘			結構
感光時間(s)	H 色相	S 彩度	V 亮度	H 色相	S 彩度	V 亮度	H 色相	S 彩度	V 亮度	H 色相	S 彩度	V 亮度	H 色相	S 彩度	V 亮度	
20	193	21	79	195	7	95	16	13	56	0	0	100	0	0	100	
40	207	80	57	204	82	62	200	36	31	61	18	100	63	11	100	
60	211	79	50	207	92	52	199	43	28	59	23	99	61	18	100	
120	212	80	44	209	89	43	197	40	26	46	35	99	60	23	99	
180	212	78	46	209	87	40	197	39	27	43	38	99	57	26	99	

棉布																
浸泡時間	漸層普魯士藍			檸檬酸10分鐘			單寧酸10分鐘			碳酸鈉10分鐘			磷酸三鈉10分鐘			結構
感光時間(s)	H 色相	S 彩度	V 亮度	H 色相	S 彩度	V 亮度	H 色相	S 彩度	V 亮度	H 色相	S 彩度	V 亮度	H 色相	S 彩度	V 亮度	
20	199	57	79	198	62	82	192	21	54	65	1	99	65	1	99	
40	202	95	58	203	97	59	194	66	36	55	16	97	57	14	97	
60	206	98	46	207	98	46	199	79	28	48	29	96	49	27	96	
120	211	95	32	213	97	32	202	73	21	42	47	95	42	45	95	
180	211	90	29	213	93	28	203	68	19	40	53	94	41	51	94	

胚布6安																
浸泡時間	漸層普魯士藍			檸檬酸10分鐘			單寧酸10分鐘			碳酸鈉10分鐘			磷酸三鈉10分鐘			結構
感光時間(s)	H 色相	S 彩度	V 亮度	H 色相	S 彩度	V 亮度	H 色相	S 彩度	V 亮度	H 色相	S 彩度	V 亮度	H 色相	S 彩度	V 亮度	
20	192	61	59	194	76	60	190	26	45	40	24	86	40	21	86	
40	198	93	47	202	97	48	196	68	33	40	35	85	41	29	86	
60	203	97	39	204	98	44	197	82	27	39	41	84	40	36	86	
120	208	95	29	210	97	33	200	81	21	37	50	82	39	47	85	
180	209	92	27	211	96	31	201	79	19	37	53	82	38	51	84	

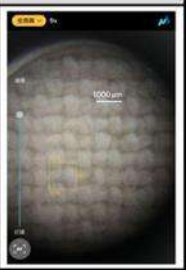
胚布12安																
浸泡時間	漸層普魯士藍			檸檬酸10分鐘			單寧酸10分鐘			碳酸鈉10分鐘			磷酸三鈉10分鐘			結構
感光時間 (s)	H 色相	S 彩度	V 亮度	H 色相	S 彩度	V 亮度	H 色相	S 彩度	V 亮度	H 色相	S 彩度	V 亮度	H 色相	S 彩度	V 亮度	
20	186	19	64	193	44	68	144	4	50	41	16	84	41	13	85	
40	198	80	51	200	90	56	195	32	35	41	27	84	42	23	85	
60	202	91	44	207	97	46	195	52	28	41	34	84	41	29	85	
120	206	95	37	212	98	38	197	68	25	40	40	84	41	35	84	
180	205	95	36	211	97	38	196	67	27	40	40	83	41	36	85	

表 4-4-1-2　不同材質上的普魯士藍浸泡酸鹼溶液之 HSV 分析

數值 / 溶液	H 色相	S 彩度	V 亮度
漸層普魯士藍	1.H 色相的大小排列: H 色相愈大愈靠近藍色 素描紙>棉布>胚布 6 安>胚布 12 安 2.在感光時間 120 秒、180 秒時棉布 H 與素描紙相近	1.素描紙最低 2.棉布、胚布數值接近	素描紙最高
浸泡檸檬酸	各材質感光時間越長越接近藍色	1.素描紙最低 2.胚布 6 安最高	素描紙最高
浸泡單寧酸	1.素描紙感光 20 秒 H 偏紅色 2.胚布 12 安感光 20 秒時偏綠色，在感光時間 40 秒後，H 變化不大	1.胚布 6 安最高 2.棉布第二 3.素描紙較低	1.材質數值接近 2.素描紙略高
浸泡碳酸鈉 **浸泡磷酸三鈉**	1.素描紙感光 20 秒時 H 為 0 度白色 2.棉布在感光 20 秒時偏黃色，隨感光時間提高偏橘黃色 3.胚布 6 安、12 安色相變化不大，偏橘黃色	1.胚布 6 安最高 2.素描紙較低	1.素描紙最高 2.棉布第二

結果說明:

1.比較素描紙、棉布與胚布，發現布類的 S 彩度都較高且 V 亮度都較低，除了因為棉布為單股編織，且由顯微鏡下的結構可以得知，其纖維縫隙較素描紙大，比素描紙吸水，再加上材質較薄，所以感光液可留存較多，另外，布類平織法交接點多，也讓普魯士藍比較容易沉澱，造成布類的顏色會較飽和且比較深。

2.胚布 12 安為多股編織，厚度較高，由顯微鏡下的結構得知，其纖維縫隙較密，以同樣上色方式會讓感光液不容易滲透均勻，吸水性較差，亦會影響呈色效果。

(二)分析浸泡酸鹼的順序對於不同材質上的漸層普魯士藍，其顏色變化之影響。

表 4-4-2-1 不同材質普魯士藍浸泡不同酸鹼順序顏色與 HSV 數值

素描紙										棉布									
浸泡時間	單寧酸10分鐘 磷酸三鈉10分鐘			磷酸三鈉10分鐘 單寧酸10分鐘			碳酸鈉10分鐘 單寧酸10分鐘			浸泡時間	單寧酸10分鐘 磷酸三鈉10分鐘			磷酸三鈉10分鐘 單寧酸10分鐘			碳酸鈉10分鐘 單寧酸10分鐘		
感光時間(s)	H 色相	S 彩度	V 亮度	H 色相	S 彩度	V 亮度	H 色相	S 彩度	V 亮度	感光時間(s)	H 色相	S 彩度	V 亮度	H 色相	S 彩度	V 亮度	H 色相	S 彩度	V 亮度
20	24	43	57	17	15	56	22	25	72	20	23	25	54	16	5	61	30	8	70
40	19	42	34	13	18	41	23	27	59	40	23	29	41	10	6	43	27	10	51
60	20	32	28	14	17	37	24	25	54	60	25	33	37	12	6	34	27	12	42
120	24	22	24	14	15	33	24	23	50	120	28	36	34	30	6	25	33	13	32
180	26	22	24	15	14	31	24	23	48	180	29	36	34	43	5	24	37	12	30

胚布6安										胚布12安									
浸泡時間	單寧酸10分鐘 磷酸三鈉10分鐘			磷酸三鈉10分鐘 單寧酸10分鐘			碳酸鈉10分鐘 單寧酸10分鐘			浸泡時間	單寧酸10分鐘 磷酸三鈉10分鐘			磷酸三鈉10分鐘 單寧酸10分鐘			碳酸鈉10分鐘 單寧酸10分鐘		
感光時間(s)	H 色相	S 彩度	V 亮度	H 色相	S 彩度	V 亮度	H 色相	S 彩度	V 亮度	感光時間(s)	H 色相	S 彩度	V 亮度	H 色相	S 彩度	V 亮度	H 色相	S 彩度	V 亮度
20	25	33	43	19	8	44	30	10	50	20	26	46	46	15	13	50	25	17	59
40	25	34	32	14	6	33	28	12	39	40	25	44	34	11	13	38	23	18	47
60	26	33	29	16	4	26	29	11	32	60	26	42	27	15	13	32	22	19	42
120	29	33	27	133	2	19	41	8	27	120	27	37	25	16	9	28	25	20	34
180	30	32	28	145	3	19	46	7	27	180	27	35	26	14	8	28	26	17	34

結果說明:

1.先浸泡單寧酸再浸泡磷酸三鈉：

(1)素描紙上呈現咖啡色。

(2)與素描紙相比，布類 H 色相較接近黃色，但在不同彩度及亮度交互影響下，布類呈色仍為咖啡色漸層。

2.先浸泡磷酸三鈉再浸泡單寧酸：

(1)素描紙上呈現藕紫色。

(2)布類的 H 色相與素描紙很接近，但 S 彩度都較低，所以呈現灰色。

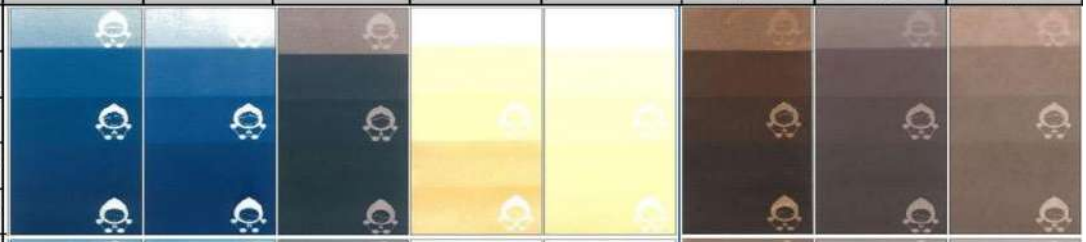
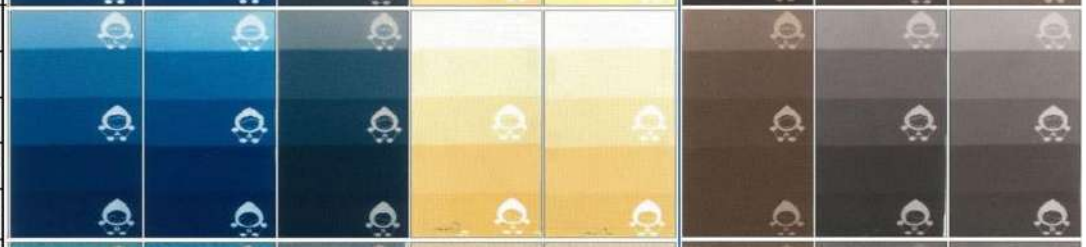
(3)胚布 6 安感光時間 120 秒、180 秒 H 色相較接近綠色，因彩度太低無法辨別。

3.先浸泡碳酸鈉再浸泡單寧酸：

(1)素描紙上呈現淺咖啡色

(2)布類的顏色變化與先浸泡磷酸三鈉再浸泡單寧酸之結果相近，不過 H 色相較接近黃色、亮度較高，所以會呈現較淺的灰色。

表 4-4-2-2 不同材質上普魯士藍先後浸泡酸鹼結果

材質	感光時間(秒)	漸層普魯士藍	檸檬酸10分鐘	單寧酸10分鐘	碳酸鈉10分鐘	磷酸三鈉10分鐘	單寧酸10分鐘 磷酸三鈉10分鐘	磷酸三鈉10分鐘 單寧酸10分鐘	碳酸鈉10分鐘 單寧酸10分鐘
素描紙	20								
	40								
	60								
	120								
	180								
棉布	20								
	40								
	60								
	120								
	180								
胚布6安	20								
	40								
	60								
	120								
	180								
胚布12安	20								
	40								
	60								
	120								
	180								

伍、討論

一、顏色檢測問題

(一)「普魯士藍」是什麼藍？

網路上關於普魯士藍的 RGB 顏色數值約略不同，且每個人對色彩的感受程度不盡相同，因此即使在資料收集時有查詢到普魯士藍的標準色票編號為 Pantone2196U，如何確認藍曬的普魯士藍是否為 Pantone2196U 是個難題。

(二)檢測顏色儀器的限制：

顏色感測器大多利用色光反射原理進行顏色判讀，感測器本身的辨色精準度、周圍環境光、檢測顏色的有效距離、判讀顏色區域...等，都會影響判讀顏色檢測的結果。

(三)轉換色彩模式:

藍曬成品顏色是屬於 CMYK 的色料顏色，而我們在電腦上看到的圖片、顏色感測器則是屬於 RGB 色光的顏色，如何轉換色料與色光的數值並精準的檢測出顏色？

最後我們使用掃描機搭配 Photoshop 軟體，證實藍曬製作出來的普魯士藍與 Pantone2196U 相符合，能避開顏色感測器周圍光影響顏色檢測之問題，並成功精準分析藍曬研究中的豐富顏色變化。未來若有更高階顏色檢測儀器，可更方便判讀色彩。

二、藍曬製作過程問題討論

(一)人為操作影響，造成成色不均勻：

1.上色：不同人刷感光液、刷的力道與反覆次數不一致時，會影響普魯士藍的深淺，所以，我們統一由同一人刷感光液，並盡量控制反覆次數、力道與方向，即便如此，我們在感光前仍需要先篩選並剔除藍曬感光液會塗不均勻的紙張跟布材。或許未來可以設計一台自動藍曬感光液上色機，進行控制變因，希望能上色更均勻並減少藍曬感光液用量。

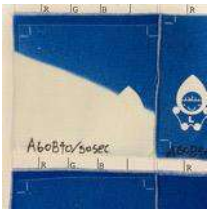


圖 5-1 感光不完全

2.感光：感光過程容易不小心遮到光(圖 5-1)，導致有區域沒有形成普魯士藍，我們解決的方式為自製遮光片藍曬板，降低此情形發生。

(二)普魯士藍的藍曬感光液比例與時間：

在實驗二中，我們找到了藍曬感光液比例為「檸檬酸鐵銨 50：鐵氰化鉀 50」，感光 50 秒時，在素描紙上製作出的普魯士藍與 Pantone2196U 數值相同，但從數據中可以發現，前後感光前的秒數與感光液比例所產生的普魯士藍，其數值也都十分相近，因此不難想像為什麼歷屆藍曬科展研究裡，大家的藍曬感光液比例皆略微不同。

三、藍曬變色問題討論

(一)漸層普魯士藍製作方法

感光液的選擇亦會影響普魯士藍最終呈色結果，本次研究使用檸檬酸鐵銨與鐵氰化鉀作為感光液溶液。

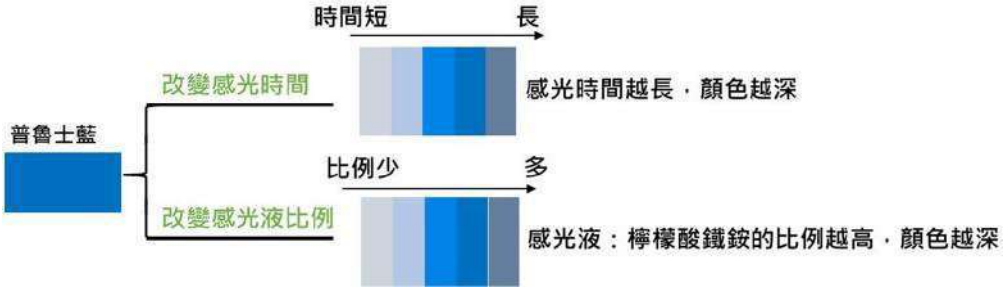


圖 5-3-1 漸層普魯士藍製作方法

(二)普魯士藍在酸鹼中的反應與變色情形

普魯士藍變色的原理主要與普魯士藍中的 Fe^{3+}鐵離子與 Fe^{2+}亞鐵離子有關，當普魯士藍碰到不同酸鹼溶液時，鐵離子與亞鐵離子會和溶液中的酸根、鹼根行競爭以及沉澱反應，當反應完成後，各反應物混合出來的顏色便是我們肉眼所看到的顏色。

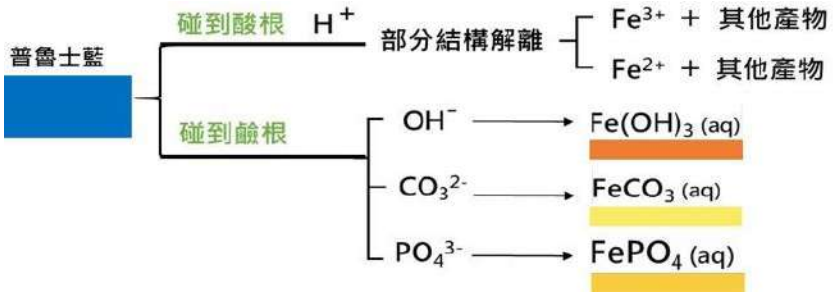


圖 5-3-2 普魯士藍在酸鹼中反應與變色情形

(三)普魯士藍先後浸泡酸鹼的顏色變化情形

普魯士藍在不同濃度的酸鹼溶液中會因為浸泡時間之不同，離子之間的競爭反應而有不同的顏色深淺變化。

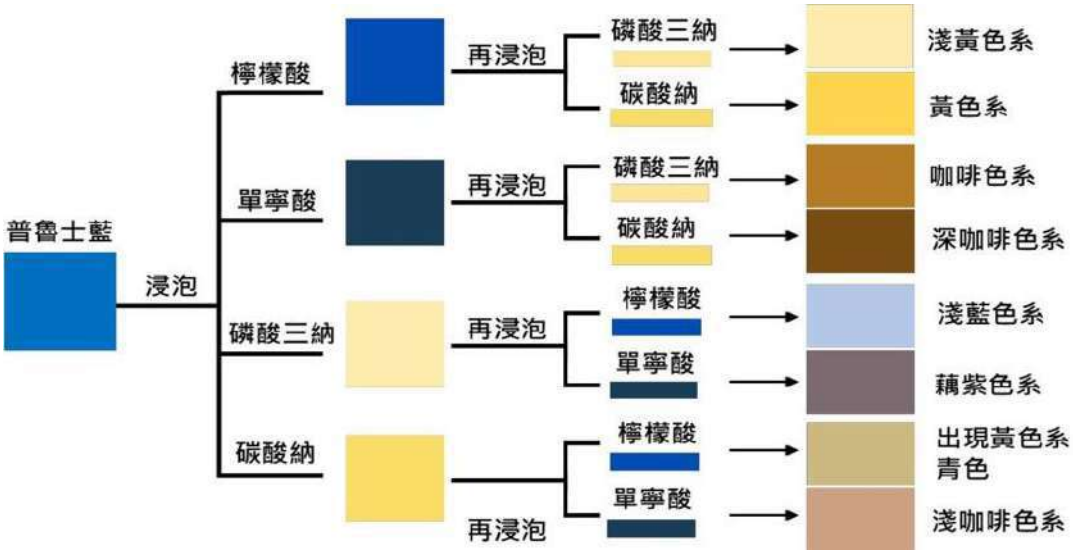


圖 5-3-3 普魯士藍先後浸泡酸鹼顏色變化

(四)觀察單寧酸與磷酸三鈉在實驗裡的其他顏色變化:

1.浸泡單寧酸溶液，會造成白色的部分變成微咖啡色，浸泡越久，顏色越深。浸泡後沖水也不易沖洗乾淨。

2.發現磷酸三鈉溶液會因放置時間越久，造成變色效果越緩慢。

圖 5-2 單寧酸染色

圖 5-3 磷酸三鈉時效性

四、材質不同的問題討論

(一)吸水性：

1.刷感光液的時候，棉布明顯比素描紙來的吸墨，猜測由於棉布的纖素較素描紙稀疏，因此藍曬感光液吸收的較多， 感光後普魯士藍也沉澱的較多，因此普魯士藍漸層色階的「棉布」色系較偏藍、彩度較高。

2.「棉布」吸水性高，「濕」跟「乾」的時候，看起來的顏色變化較大，濕的時候，彩度較鮮豔，但乾了之後，彩度跟明度都會明顯下降。

3.胚布 12 安的厚度較厚，由多股纖維編織而成，經緯線較粗，且纖維縫隙小，較不易吸水，刷塗藍曬感光液的時候，感光液不易滲入纖維中，造成普魯士藍不均勻的現象，如果要更均勻要多刷幾層！

圖 5-4 胚布微黃色

(二)材質的顏色：

「胚布」布料顏色為微黃色(圖 5-4)，進行藍曬的時候顏色有微差異。

五、實作遇到的問題討論

(一)遮光素材:

製作藍曬作品時，我們使用生活周邊的蕾絲、乾燥植物、透明片繪製圖案，發現透明片的厚度也會影響畫面，較厚的透明片會曬出框痕(圖 5-5)，因此我們決定增加感光時間，如此可以消除框痕、解決問題。另外，我們也發現不同植物的厚度也會影響圖像所呈現的細緻度，未來可以針對遮光材質進行進一步的研究！

圖 5-5 遮光片框痕

(二)人造纖維：

成品製作時，有嘗試製作聚酯纖維上衣(圖 5-6)，但感光形成普魯士藍時，我們嘗試了 13 分鐘，結果只呈現淡淡的藍色，沒有成功，因此我們猜測如果要曬出美麗的藍色，至少要 1 小時以上才能成功，原因可能和其材質-聚酯纖維有關，因為聚酯纖維的纖維密度較高，且其有耐磨與耐化學相關溶劑的性質，因此不易上色成功。除了人造纖維以外，後續我們也可以增加其他天然纖維的材質進行實驗，例如：蠶絲、綢緞....等，來作為下次藍曬相關材質研究的素材。

圖 5-6 聚酯纖維

陸、結論

一、成功定義標準普魯士藍

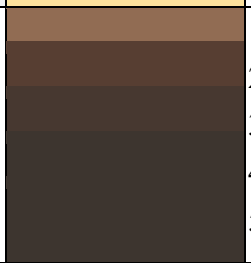
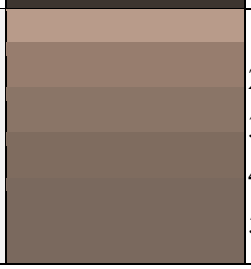
歷屆藍曬科展研究的感光液比例不一致、顏色檢測與分析方式大多使用「目測」觀察，缺少科學依據、無定義何為研究內容裡最佳普魯士藍！所以，我們研究不同的顏色檢測方式，使用科學數據的方式分析藍曬產生的普魯士藍，定義「標準普魯士藍」，作為後續變色研究的基準！成功得到以下結論：

(一)研究不同顏色檢測方式，使用 **FUJI Color C70 掃瞄器掃瞄器＋Adobe Photoshop 影像軟體**，轉換藍曬作品（CMYK 色料）與顏色檢測器（RGB 色光）之間的色彩模式，並**使用 H 色相 / S 彩度 / V 亮度分析顏色數據，是精準的檢測方式**。

(二)證實藍曬產生的**普魯士藍與標準色票 Pantone 2196U 相符合**。定義標準普魯士藍。

(三)使用 2000W 光效 LED 距離高度 60cm 紫外線燈箱，藍曬感光液比例「檸檬酸鐵銨 50：鐵氰化鉀 50」，感光 50 秒時，在素描紙上，能製作出標準普魯士藍。

二、成功研發普魯士藍顏色變化的配方

色彩變化		調製方法
普魯士藍色系		1/藍曬液比例：檸檬酸鐵銨 50:50 鐵氰化鉀。 2/2000W 光效紫外線燈，感光 20/40/60/120/180 秒。 3/完成普魯士藍藍色漸層色系。
天藍色系		1/使用普魯士藍漸層色階，於棉布材質中！ 2/浸泡：取 500 克檸檬酸與 500 mL 純水混合均勻。 3/浸泡時間：10 分鐘。
鐵黑色系		1/使用普魯士藍漸層色階 2/取 100 克單寧酸與 500 mL 純水混合均勻，浸泡 10 分鐘。 3/清水沖洗乾淨，完成！
黃色系		1/使用普魯士藍漸層色階 2/取 105 克碳酸鈉與 500 mL 純水混合均勻，浸泡 10 分鐘。 3/清水沖洗乾淨，完成！
深咖啡色系		1/使用普魯士藍漸層色階 2/先取 100 克單寧酸與 500 mL 純水混合均勻，浸泡 10 分鐘。 3/清水沖洗乾淨。 4/再取 60 克磷酸三鈉與 500 mL 純水混合均勻，浸泡 10 分鐘。 5/清水沖洗乾淨，完成！
淺咖啡色系		1/使用普魯士藍漸層色階 2/先取 105 克碳酸鈉與 500 mL 純水混合均勻，浸泡 10 分鐘。 3/清水沖洗乾淨。 4/再取 100 克單寧酸與 500 mL 純水混合均勻，浸泡 10 分鐘。 5/清水沖洗乾淨，完成！

藕紫色系		1/使用普魯士藍漸層色階，於棉布材質中！ 2/先取 60 克磷酸三鈉與 500 mL 純水混合均勻，浸泡 10 分鐘。 3/清水沖洗乾淨。 4/再取 100 克單寧酸與 500 mL 純水混合均勻，浸泡 10 分鐘。 5/清水沖洗乾淨，完成！
灰色系		1/使用普魯士藍漸層色階，於棉布材質中！ 2/先取 60 克磷酸三鈉與 500 mL 純水混合均勻，浸泡 10 分鐘。 3/清水沖洗乾淨。 4/再取 100 克單寧酸與 500 mL 純水混合均勻，浸泡 10 分鐘。 5/清水沖洗乾淨，完成！

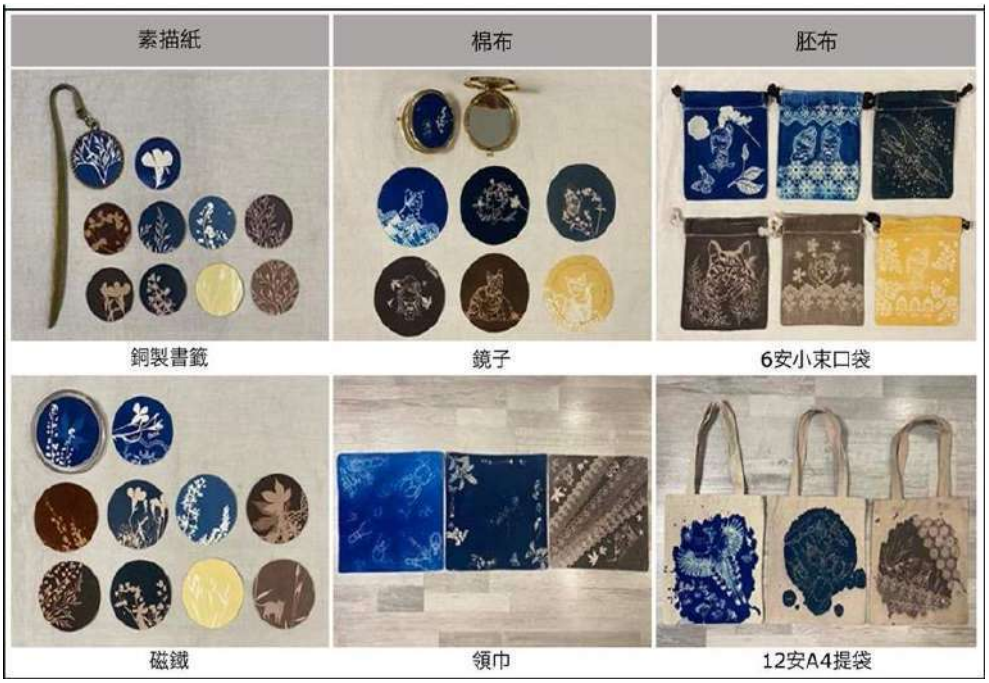
三、普魯士藍在「不同材質」上的呈色差異

相較素描紙，布類材質以編織而成，其纖維的縫隙較大，容易吸收較多的感光液，再加上交接點較多，因此變色後的沉澱反應較容易附著在布面上，因此**普魯士藍在布類材質上可以有更多不同的彩度和亮度，能產生更豐富多變的顏色**。

四、成功製作普魯士藍變色文創作品

圖 5-7 SDGs 11

從一開始定義與檢測普魯士藍，接著用我們所定義的標準普魯士藍發展色彩，由浸泡不同酸鹼溶液開始觀察顏色變化情形，進而延伸製造漸層普魯士藍，發現其中變色的原理及影響變色的因素後，最後**成功調配出色彩豐富的普魯士藍，實際創作出豐富多元的藍曬變色作品**，讓「古代攝影工藝」有新發現，符合 **SDGs11 永續城市：享受進步科技的同時也保有文化的豐富多樣！**



柒、參考文獻資料

一、Pantone 色票全解析. (2021 年 7 月 6 日). 2023 年 8 月 5 日 擷取自 Shutterstock: https://www.shutterstock.com/zh-Hant/blog/pantone-colors-overview

二、日光顯影藍曬圖. (無日期). 2023 年 7 月 2 日 擷取自 K12ea.gov.tw: https://vtedu.k12ea.gov.tw/uploads/1616766769803DAQEow1U.pdf

三、古典工藝-藍晒法(Cyanotype). (2016 年 10 月 17 日). 擷取自 PHOTO PLANET 影像星球: http://photoplanet.cc/blueghost/cyanotype/

四、何綺婷,張皓帆. (2021). 藍色顏料之藍曬奇旅. 化學科普(2021)專刊. 擷取自 https://www.koushare.com/post/postdetail/4386

五、克里斯多佛˙詹姆士. (2016). 美國攝影圖片製作工藝專業教程. 中國: 上海人民美術出版社.

六、梁展銘, 林邑誠, & 林子恩. (2022). 鑑色~藍染動力進行式. 中華民國第 62 屆中小學科學展覽會國中組 生活與應用科學(一)科.

七、彭勻霖, 侯禹彤, 吳芮昕, 彭勻霆, & 楊立丞. (2021). 藍到非晒不可-光雕顯影術，以投影機為例. 中華民國第 61 屆中小學科學展覽會國小組化學科.

八、黃佩愉, 王楷翔, & 張嘉詠. (2023). 燈下藍~自製燈箱的藍曬研究. 中華民國第 63 屆中小學科學展覽會高中組化學科.

九、黃薈恩, 張采甯, 李昕怡, & 張鉦泓. (2017). "藍"住陽光，"晒"出幸福-藍曬關鍵揭迷. 中華民國第 57 屆中小學科學展覽會國小組化學科.

十、蔡昀蓁, 張伶, & 邱天韻. (2022). 以手機 APP 研究各項變因對藍印術反應速率的影響. 中華民國第 62 屆中小學科學展覽會高中組化學科.

十一、蔡涵芸, 李沄蓁, 蔡宇翔, & 鍾茲涵. (2021). 藍色狂想曲-藍晒變色探究. 中華民國第 61 屆中小學科學展覽會國小組化學科.

十二、親子活動（三十六）藍印術. (2016 年 9 月 16 日). 擷取自 跟著鄭大師玩科學: https://reurl.cc/z1OxNa

十三、瞭解色彩模型. (無日期). 擷取自 CorelDRAW Help: https://ppt.cc/fMhPmx

十四、顏色差異. (無日期). 擷取自 維基百科: https://ppt.cc/fDtjWx

【評語】080204

學生在藍曬體驗課程中對檸檬酸鐵銨與鐵氰化鉀在紫外線照射下變藍的現象產生興趣，進而希望通過實驗探索藍曬的色彩變化和應用。研究目的利用不同的設備檢測並定義標準普魯士藍，探討不同感光液比例和感光時間對藍曬色彩的影響，以及普魯士藍在不同酸鹼條件下的色彩變化。實驗設計使用了 Arduino 顏色感應器、LEGO 顏色感應器、掃描器和 Adobe Photoshop 等多種設備進行顏色檢測，並通過改變感光液比例和感光時間進行漸層普魯士藍的製作和分析。實驗結果顯示感光液比例 50:50（檸檬酸鐵銨:鐵氰化鉀）、感光 50 秒時，素描紙上可製作顏色為 RGB：R21/G80/B133、HSV：H208/S84/V52 的標準普魯士藍。此外，不同酸鹼溶液對普魯士藍的顏色變化有顯著影響。例如，浸泡於檸檬酸、雙氧水、氯化鈉時顏色維持藍色，但亮度和深淺有所不同；浸泡於碳酸鈉和磷酸三鈉時顏色變為黃棕色系；浸泡於單寧酸時顏色呈現藍黑色系。這項研究充分展示了學生在科學探究中的創新思維和實驗技能，數據全面且有說服力，為未來在藍曬工藝和色彩變化方面的研究提供了寶貴的參考。

注意事項：

普魯士藍是氰鐵化合物，在鹼性條件下會分解產生有毒可致命的氰離子，本工作所用的鹼性條件已達能夠分解普魯士藍的地步，實驗團隊應注意安全，事前應小心搜尋文獻。如文獻 Shoichi Manabe, etal. Stabilization of Prussian blue using copper sulfate for eliminating radioactive cesium from a high pH solution and seawater, Journal of Hazardous Materials, 2020 (386) 121979. 摘要第二行 “However, PB （Prussian ）crystals quickly decompose in an alkaline solution, generating hazardous cyanide contamination.” 已清楚說明風險。濃酸條件下亦會將普魯士藍分解產生氰酸。

以下是一些建議：

(1) 應該注意此研究的工序繁多，是否在執行當中有依照標準化的流程進行，以避免實驗誤差。實驗結果具系統性，待未來可以進一步分析顏色的物質組成。

(2) 加入酸鹼可調配出更多的色彩變化與應用，並能分析數據、藍晒材質、酸鹼說明原因。

(3) 對於浸泡酸鹼的時間長或短的設定需再作說明，與進一步實驗有更接近精準的調配比例、照光時間、浸泡時間和顏色。

作品簡報

藍曬變變變

L A B

發展藍曬色彩變化應用於文創作品

摘要

以藍曬為主題，利用**掃瞄器**檢測標準普魯士藍(Pantone色票2196U)，搭配PS軟體取得平均值進行色彩分析成功找到**感光液比例50:50(檸檬酸鐵銨：鐵氰化鉀)、感光 50 秒**時，在**素描紙**上可製作顏色 **RGB：R21 / G80 / B133、HSV：H208 / S84 / V52的標準普魯士藍**。

為了增加色彩，我們利用**不同的感光時間**製作**漸層普魯士藍**，並進一步進行色彩分析，成功發現：**①浸泡於檸檬酸、雙氧水、氯化鈉時，顏色維持藍色，但因浸泡濃度、時間不同，顏色有亮度、深淺差異 ②浸泡於碳酸鈉、磷酸鈉時，顏色為黃色系 ③浸泡於單寧酸時，顏色呈現藍黑色系。**

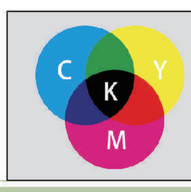
最後，我們將結果應用在**不同材質**中，成功製作色彩豐富的藍曬作品，讓「古典攝影工藝」有新發展，符合SDGs11**永續城市**之目標！

壹、研究動機

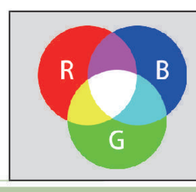
在**藍曬體驗課程**時，看到兩個溶液混合後，透過紫外線的照射下竟變成藍色的溶液，覺得很神奇！這也不禁讓我想起自然課「廚房裡的科學：花和葉子遇到酸鹼會變色」！收集資料發現，**①浸泡咖啡、茶等溶液時會產生不同顏色，**②以往實驗多以**目視**方法辨別，且**感光液比例皆不同**，普魯士藍沒有**標準配置方法**。因此我們決定以**Pantone色票2196U**為基準，搭配**三種色彩模式**數據量化分析以普魯士藍為基礎出發，尋找更多成色因素，並能應用於生活中。

$$4Fe^{3+} + 3[Fe(CN)_6]^{4-} \longrightarrow Fe_4[Fe(CN)_6]_3\,(S)$$

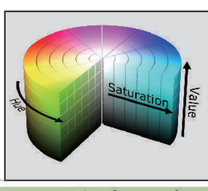
亞鐵離子與鐵氰化鉀反應生成普魯士藍化學反應式



CMYK 色彩模型 | 適合 藍曬成品



RGB 色彩模型 | 適合 感測器



HSV 色彩模型 | 適合 顏色分析

(圖片取自維基百科)

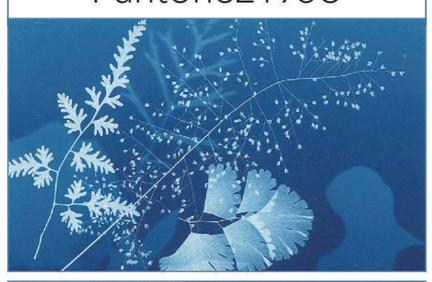
貳、研究目的與流程

定義顏色

研究目的一

利用**不同檢測設備**定義標準普魯士藍

- 實驗1：不同檢測**儀器** / 不同檢測**軟體**
- 搭配 藍曬作品 Pantone2196U

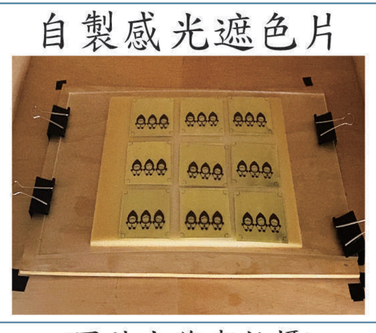


(圖片由作者拍攝)

研究目的二

研究標準普魯士藍的**製作方法**

- 實驗2：不同**感光液比例** / 不同**感光時間**
- **材質**：棉布 / 素描紙
- 自製感光遮色片



(圖片由作者拍攝)

變色研究

研究目的三

分析普魯士藍在**酸鹼**中之顏色變化情形

- **標準**普魯士藍
  - 實驗3：浸泡 **不同酸鹼** 顏色變化
    - 不同時間浸泡 / 不同酸鹼濃度
      - 酸：檸檬酸、雙氧水、單寧酸
      - 中：氯化鈉
      - 鹼：碳酸鈉、磷酸鈉
- 不同感光時間製作 **漸層**普魯士藍
  - 實驗4：浸泡 **不同酸鹼** 顏色變化
    - 不同時間浸泡 / 固定酸鹼濃度
      - 酸：檸檬酸、單寧酸
      - 鹼：碳酸鈉、磷酸鈉
  - 實驗5：改變酸鹼 **浸泡順序** 顏色變化
    - 浸泡10分鐘 / 固定濃度
      - 檸檬酸→碳酸鈉
      - 檸檬酸→磷酸鈉
      - 單寧酸→碳酸鈉
      - 單寧酸→磷酸鈉
      - 磷酸鈉→檸檬酸
      - 磷酸鈉→單寧酸
      - 碳酸鈉→檸檬酸
      - 碳酸鈉→單寧酸

材質研究

研究目的四

比較**不同材質**成色的影響

- 不同感光時間製作 **漸層**普魯士藍
- **不同材質**
  - **素描紙 / 棉布**
  - **胚布6安 / 胚布12安**
  - 實驗6：浸泡 **不同酸鹼** 顏色變化
    - 酸：檸檬酸、單寧酸
    - 鹼：碳酸鈉、磷酸鈉
  - 實驗7：改變酸鹼 **浸泡順序** 顏色變化
    - 單寧酸→磷酸鈉
    - 磷酸鈉→單寧酸
    - 碳酸鈉→單寧酸

製作藍曬變色作品

普魯士藍製作流程 / 變色流程

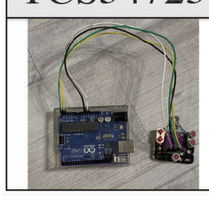
★ 調製感光液比例（A 檸檬酸鐵銨 / B 鐵氰化鉀） → ★ 材質上色 → 乾燥 → ★ 紫外線感光 → 沖洗 → 催化 → 晾乾 → ★ 普魯士藍 → 顏色檢測

普魯士藍 → ★ 浸泡 酸鹼 / 時間 → 沖洗 → 晾乾 → ★ 變色完成 → 顏色檢測 → ★再浸泡 酸鹼 / 時間 → 沖洗 → 晾乾 → ★ 再變色完成 → 顏色檢測

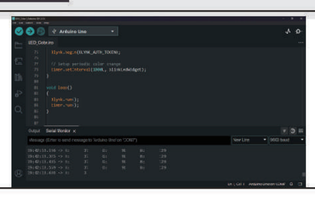
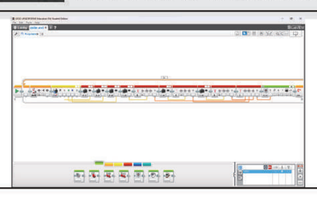
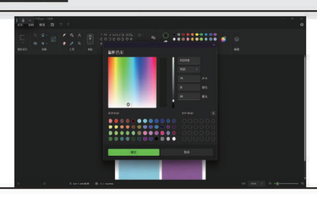
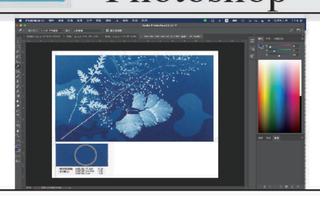
參、研究結果

實驗1、利用不同檢測設備，定義標準普魯士藍。

顏色檢測器

Arduino TCS34725	LEGO EV3 HiTechnic	FUJI 180Press	FUJI Color C70
			

顏色檢測軟體

Arduino IDE	EV3 MINDSTORMS	小畫家	Adobe Photoshop
			

黑	白	紅	綠	藍	黃	Pantone 2196U	藍曬作品
R0 G0 B0	R255 G255 B255	R255 G0 B0	R0 G255 B0	R255 G0 B0	R255 G255 B0	R21 G80 B133	R21 G80 B133
R34 G34 B34	R255 G255 B255	R208 G9 B42	R96 G176 B58	R50 G61 B138	R245 G243 B49		

FUJI Color C70 掃描器 ＋ Adobe Photoshop

掃描器都做過嚴格色彩校正，掃描顏色相對準確。Photoshop 可以取得 101x101pixel 區域**平均顏色**。

實驗結果

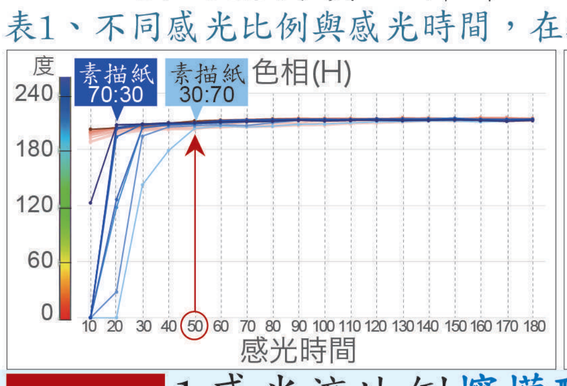
1.使用設備檢測，證實 **Pantone色票2196U 與藍曬的普魯士藍相符合！**
2.專業 **FUJI Color C70 掃描器**，搭配 **Adobe Photoshop 影像軟體**，是**較精準的顏色檢測方式。**
3.檢測結果普魯士藍RGB數值： **R21 / G80 / B133 ，作為後續實驗的顏色基準。**

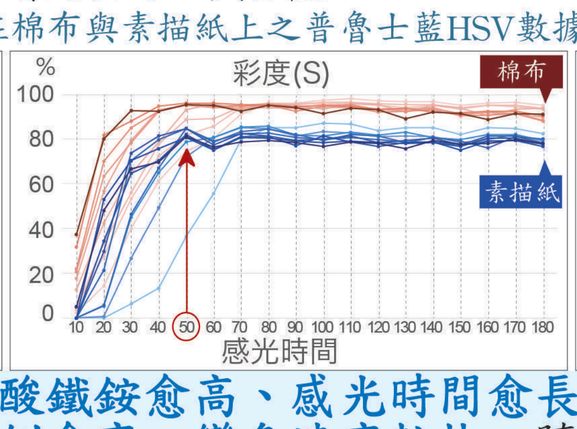
實驗2、研究標準普魯士藍的製作方法。

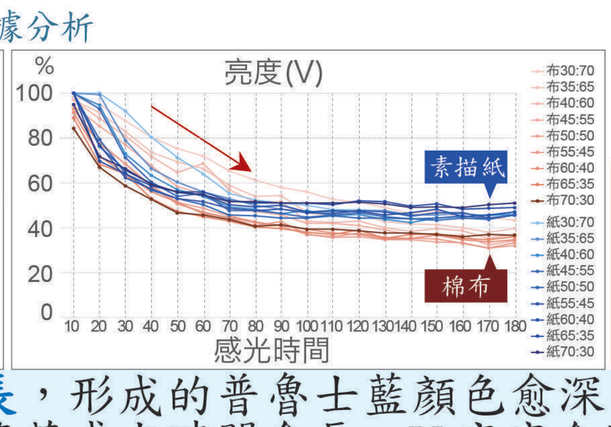
操縱變因

1.改變感光液比例：A 檸檬酸鐵銨溶液 與 B 鐵氰化鉀溶液比例分別為 30：70、35：65、40：60、45：55、50：50、55：45、60：40、65：35、70：30，9 種比例。
2.改變感光時間：10 秒為單位進行10、20、30、30、40、50、60、……170、180秒，共18種感光時間。
3.改變材質：棉布、素描紙，共2種。

表1、不同感光比例與感光時間，在棉布與素描紙上之普魯士藍HSV數據分析







★ 標準普魯士藍製作方式

感光液比例	檸檬酸鐵銨溶液 20% 50mL 鐵氰化鉀溶液 9% 50mL
	感光時間：50秒
	材質：素描紙
	RGB：21 / 80 / 133
	HSV：208 / 84 / 52

實驗結果

1.感光液比例**檸檬酸鐵銨愈高、感光時間愈長**，形成的普魯士藍顏色愈深，均能製作出**漸層普魯士藍**。
2.**檸檬酸鐵銨的比例愈高，變色速度較快，**隨著感光時間愈長，V 亮度會逐漸降低；H 色相及 S 彩度，則在**感光時間 50 秒後差異不大**。
3.**棉布**相較素描紙的 S 彩度較高、V 亮度較低。

實驗3、分析普魯士藍在不同酸鹼中，顏色變化情形。

數值	檸檬酸	雙氧水	單寧酸	氯化鈉	碳酸鈉	磷酸鈉
色相H	至209°	至210°	至196°	208°	至60°	至66°
彩度S	↓ 3%	↓19%	↓52%	↓29%	↓56%	↓ 62%
亮度V	↑ 9%	↑14%	↓24%	↑ 9%	↑47%	↑48%

pH	1~5	1~5	5~6	6~7	10~12	10~12
莫耳濃度(M) 低→高						
	藍色		藍黑色		黃色	黃色

操縱變因

1.改變酸鹼溶液的濃度： 6種溶液，各3種濃度，共18種。
2.改變浸泡時間：20秒、40秒、1分鐘、5分鐘、10分鐘，共5種。

標準普魯士藍 H208 / S84 / V52

表2、浸泡時間對不同溶液中的普魯士藍顏色變化之HSV數據分析

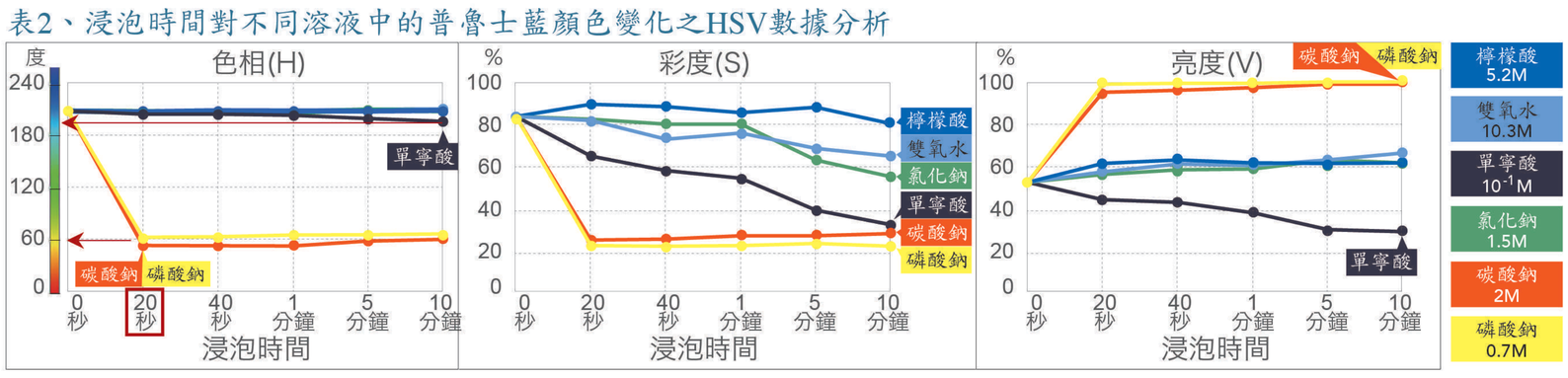
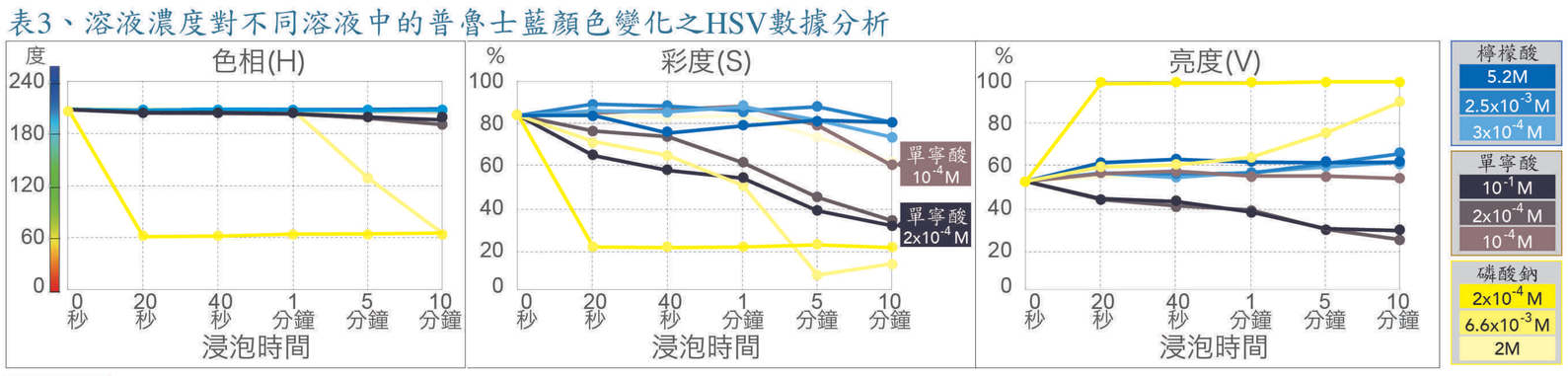


表3、溶液濃度對不同溶液中的普魯士藍顏色變化之HSV數據分析



實驗結果

	浸泡溶液	色系方向	浸泡時間增加			濃度增加
1	酸性溶液 中性溶液	藍色	H色相 —	S彩度↓	V亮度↑	S彩度變淺且不均勻。
2	單寧酸溶液	藍黑色	H色相→196°	S彩度↓	V亮度↓	變色速度愈快，顏色愈黑。
3	鹼性溶液	黃色	H色相→ 60°	S彩度↓	V亮度↑	變色速度愈快，顏色愈黃。

實驗4、分析漸層普魯士藍在不同酸鹼中，顏色變化情形。

操縱變因

1.感光時間：
20、40、60、120、180秒，共5種。
2.浸泡酸鹼溶液：
檸檬酸、單寧酸、碳酸鈉、磷酸鈉，共4種。
3.浸泡時間：
20秒、40秒、1分鐘、5分鐘、10分鐘，共5種。

漸層普魯士藍

浸泡時間	檸檬酸 5.2M					單寧酸 10^{-1}M				
感光時間(秒)	20秒	40秒	1分鐘	5分鐘	10分鐘	20秒	40秒	1分鐘	5分鐘	10分鐘
20										
40										
60			差異小		藍色					藍黑色
120										
180										

浸泡時間	碳酸鈉 2M					磷酸鈉 0.7M				
感光時間(秒)	20秒	40秒	1分鐘	5分鐘	10分鐘	20秒	40秒	1分鐘	5分鐘	10分鐘
20										
40										
60					黃色					淺黃色
120										
180										

表4、浸泡磷酸鈉不同時間對漸層普魯士藍顏色變色之HSV數據分析

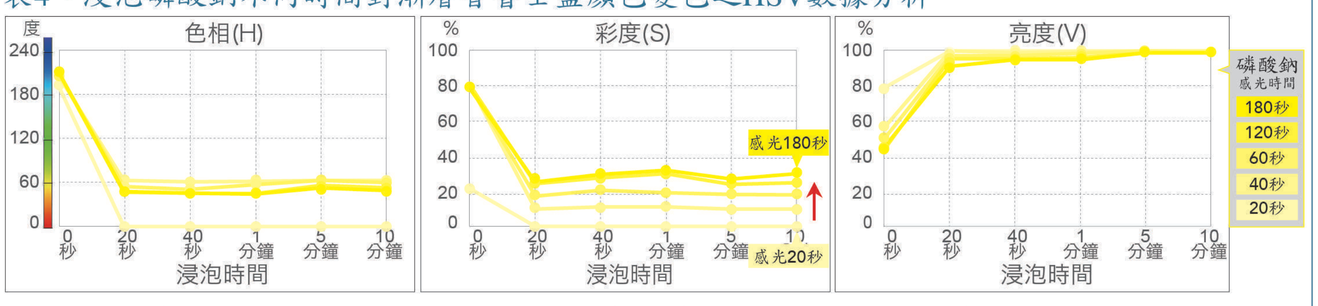
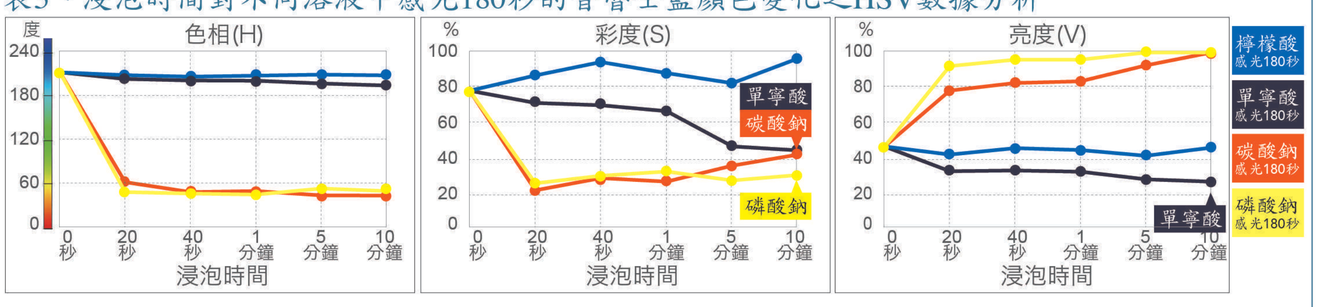


表5、浸泡時間對不同溶液中感光180秒的普魯士藍顏色變化之HSV數據分析



實驗結果

	浸泡溶液	色系方向	感光時間增加		浸泡時間增加
1	檸檬酸	藍色系	S彩度↑	V亮度↓	顏色差異小
2	單寧酸	藍黑色系	S彩度↑	V亮度↓	彩度越低，顏色愈黑。
3	碳酸鈉	黃色系	S彩度↑	V亮度—	S彩度，碳酸鈉41% 比磷酸鈉30%略高。
	磷酸鈉	淺黃色系	S彩度↑	V亮度—	

實驗5、分析浸泡酸鹼順序，對於顏色變化之影響。

操縱變因

1.交換先後順序浸泡酸鹼溶液：檸檬酸、單寧酸、碳酸鈉、磷酸鈉，共 32 種。
2.浸泡時間：20秒、10分鐘，共2種。

浸泡順序 先酸 後鹼	單寧酸 20秒	單寧酸 10分鐘	單寧酸 20秒	單寧酸 10分鐘
	碳酸鈉 20秒 / 10分鐘	碳酸鈉 20秒 / 10分鐘	磷酸鈉 20秒 / 10分鐘	磷酸鈉 20秒 / 10分鐘
感光時間(秒) 20				
40				
60		深咖啡		深咖啡
120				
180				

浸泡順序 先鹼 後酸	碳酸鈉 20秒	碳酸鈉 10分鐘	磷酸鈉 20秒	磷酸鈉 10分鐘
	單寧酸 20秒 / 10分鐘	單寧酸 20秒 / 10分鐘	單寧酸 20秒 / 10分鐘	單寧酸 20秒 / 10分鐘
感光時間(秒) 20				
40				
60		淺咖啡		藕紫色
120				
180				

實驗結果

	浸泡溶液	浸泡顏色反應
1	檸檬酸	顏色被分解！
	單寧酸	S彩度↓呈現深色系。

	浸泡溶液先後順序	色系方向
2	單寧酸→碳酸鈉	深咖啡色
	單寧酸→磷酸鈉	
3	碳酸鈉→單寧酸	淺咖啡色
4	磷酸鈉→單寧酸	藕紫色
5	浸泡時間愈長，變色效果愈好	

實驗6、研究不同材質上，漸層普魯士藍浸泡酸鹼時，顏色之差異。

操縱變因

1.不同材質：素描紙、棉布、6 安胚布、12 安胚布，共 4 種。
2.浸泡酸鹼溶液：檸檬酸、單寧酸、碳酸鈉、磷酸鈉，共 4 種，各 10 分鐘。

觀察：1.布類厚度比較，胚布 12 安(多股編織) > 胚布 6 安 > 棉布
2.素描紙的纖維縫隙緊密，棉布及胚布的纖維縫隙較大。

材質	顯微鏡照片 (圖片由作者拍攝)	漸層普魯士藍	檸檬酸	單寧酸	碳酸鈉	磷酸鈉
素描紙	1000 μm	普魯士藍色	藍色	藍黑色	黃色	淺黃色
棉布	1000 μm		天藍色			

材質	顯微鏡照片 (圖片由作者拍攝)	漸層普魯士藍	檸檬酸	單寧酸	碳酸鈉	磷酸鈉
胚布6安	1000 μm				微黃色	
胚布12安	1000 μm				顏色較淺	

實驗結果

1.相較於素描紙，**棉布** S 彩度較高、V 亮度較低，**成色最均勻、漸層最明顯**，浸泡**檸檬酸**時，呈現**天藍色系**。
2.**胚布**本身**微黃色**影響成色，**胚布 12 安**較 6 安**吸水性差**且不易吸墨，感光液不容易滲透，導致**顏色較淺且不均勻**。

實驗7、不同材質浸泡酸鹼的順序顏色差異

操縱變因

1.4種不同材質。
2.先後浸泡酸鹼溶液各 10 分鐘：
①單寧酸→磷酸鈉
②碳酸鈉→單寧酸
③磷酸鈉→單寧酸，共 3 組。

材質	先酸 後鹼	單寧酸 → 磷酸鈉	先鹼 後酸	磷酸鈉 / 碳酸鈉 → 單寧酸	先酸 後鹼	單寧酸 → 磷酸鈉	先鹼 後酸	磷酸鈉 / 碳酸鈉 → 單寧酸
素描紙		深咖啡		藕紫色 / 淺咖啡				
棉布				灰色				
胚布6安								灰色
胚布12安								灰色

實驗結果

先浸泡**磷酸鈉**，**後**浸泡**單寧酸**，
因為浸泡過單寧酸的關係，顏色較深，
在**布類材質**上，S 彩度更低，呈現**灰色系**。

肆、討論

一、顏色檢測問題

(一)檢測顏色儀器的限制

顏色感測器大多利用**色光反射原理**進行顏色判讀，使用**FUJI Color C70** 掃描機可降低環境光的干擾。

(二)「普魯士藍」是什麼藍？

	材質	感光液比例	感光時間
以Pantone色票2196U為標準	素描紙 (可找到相同數值)	50：50	50秒
	棉布 (取最接近數值)	35：65	80秒

二、分析普魯士藍的顏色變化情形

(一)降低人為操作誤差

感光液上色的力道與反覆次數均會影響普魯士藍的深淺，因此每項數據我們皆製作10次以上，並**剔除明顯誤差成品**。

剔除誤差成品

(二)藍曬感光液比例與時間

1.感光液比例**檸檬酸鐵銨愈高**，反應時間愈快，顏色愈深。

2.在素描紙上，發現**感光時間 50 秒後**，即使感光液比例不同，**達完全反應時，色相變化差距不大**，這也許是歷屆藍曬科展研究裡，感光液比例略微不同的原因。

三、藍曬變色問題

(一)漸層普魯士藍製程與變色情形

普魯士藍

1.改變**感光時間**

時間短 ⟶ 長

漸層普魯士藍

時間愈長，顏色愈深
感光時間 50 秒後，
H 色相差異不大

2.改變**感光液比例**

比例少 ⟶ 多

漸層普魯士藍

感光液：檸檬酸鐵銨
比例愈高，顏色鬱鬱深

(二)普魯士藍浸泡酸鹼的反應與變色情形

浸泡	檸檬酸	再浸泡	磷酸鈉 → 淺黃色系
			碳酸鈉 → 黃色系
	單寧酸	再浸泡	磷酸鈉 → 咖啡色系
			碳酸鈉 → 深咖啡色系
浸泡	磷酸鈉	再浸泡	檸檬酸 → 淺藍色系
			單寧酸 → 藕紫色系
	碳酸鈉	再浸泡	檸檬酸 → 黃色/青色
			單寧酸 → 淺咖啡色系

$Fe_4[Fe(CN)_6]_3$

普魯士藍中的鐵離子
於不同酸鹼中之反應

鐵離子 / 酸鹼溶液	鐵離子 (Fe^{3+})	亞鐵離子 (Fe^{2+})
檸檬酸	錯合物	錯合物
單寧酸	錯合物	錯合物
碳酸鈉 (CO_3^{2-})	碳酸鐵	碳酸亞鐵
磷酸鈉 (PO_4^{3-})	磷酸鐵	磷酸亞鐵
氫氧根 (OH^-)	氫氧化鐵	氫氧化亞鐵

1.**感光時間越長**，形成普魯士藍愈多遇到酸鹼溶液時，顏色愈變化明顯**完全變色之反應時間就越長**。

2.**感光 20 秒**的普魯士藍，除了浸泡單寧酸外，其餘皆呈現無色，可能**時間太短，普魯士藍的形成較少**。

普魯士藍顏色為藍色，其變色原理：**鐵離子**碰到**鐵氰化鉀**，經照光等複雜反應後形成藍色沉澱物，因此變色的關鍵為：**普魯士藍中的鐵離子與誰結合**。

1.**酸性**溶液中，推測浸泡時間愈久、濃度愈高，鐵離子被分解出來，溶液顏色會逐漸變淡。

2.**鹼性**溶液中，**鐵離子**會和**陰離子**（OH^-、CO_3^{2-}、PO_4^{3-}等）形成**化合物**，其中**氫氧化鐵** $Fe(OH)_3$ **為黃色**，所以顏色**由藍轉變為黃色**。

四、材質吸水性的問題

(一) **棉布吸水性較素描紙佳**。由實驗結果推論：素描紙為紙漿製成，纖維交錯且縫隙密，棉布為單股編織、纖維縫隙較大且薄，感光液吸收較多，彩度較高、成色明顯。

(二) **布類**平織法交接點多，**普魯士藍較容易附著沉澱**，造成顏色會較飽和且較深。

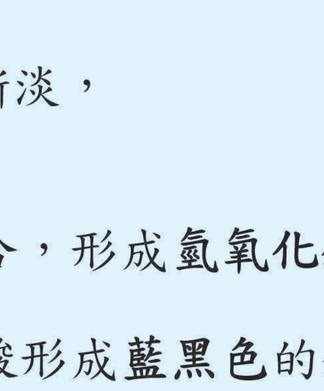
五、實作遇到的問題

(一)遮光素材

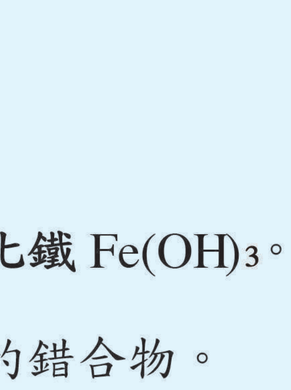
遮光素材的厚度會影響圖像的細緻度**調整感光時間**能避免透明片框痕。

(二)人造纖維

在聚酯纖維上不顯色，推測和其材質**纖維密度高、耐化學溶劑**性質有關。



透明片框痕



聚酯纖維

伍、結論

一、成功定義普魯士藍：

(一)使用 **FUJI Color C70 掃瞄器搭配Adobe Photoshop 影像軟體**，是較為精準的**顏色檢測方式。**

(二)證實**普魯士藍與 Pantone 2196U 相符合**，可作為藍曬實驗的顏色參考依據。

(三)使用 200 W 紫外線 LED 燈箱，距離高度 60 cm，在素描紙上，

藍曬感光液比例「檸檬酸鐵銨 50：鐵氰化鉀 50」感光 50 秒時，能製作出**標準普魯士藍。**

二、成功分析普魯士藍的顏色變化情形：

(一)浸泡**檸檬酸、雙氧水、氯化鈉**…等酸性或中性溶液，當普魯士藍之**藍色**漸淡，推測普魯士藍在酸性溶液中逐漸分解。

(二)浸泡**碳酸鈉、磷酸鈉**…等鹼性溶液，當普魯士藍逐漸變為**黃色**，推測濃度愈高、顏色愈深，且普魯士藍中的**鐵離子**逐漸與**氫氧根離子**結合，形成**氫氧化鐵** $Fe(OH)_3$。

(三)浸泡**單寧酸**時，當溶液逐漸變為**咖啡深色**，推測除了單寧酸本身溶液的顏色影響外，普魯士藍中的**鐵離子**會與單寧酸形成**藍黑色**的錯合物。

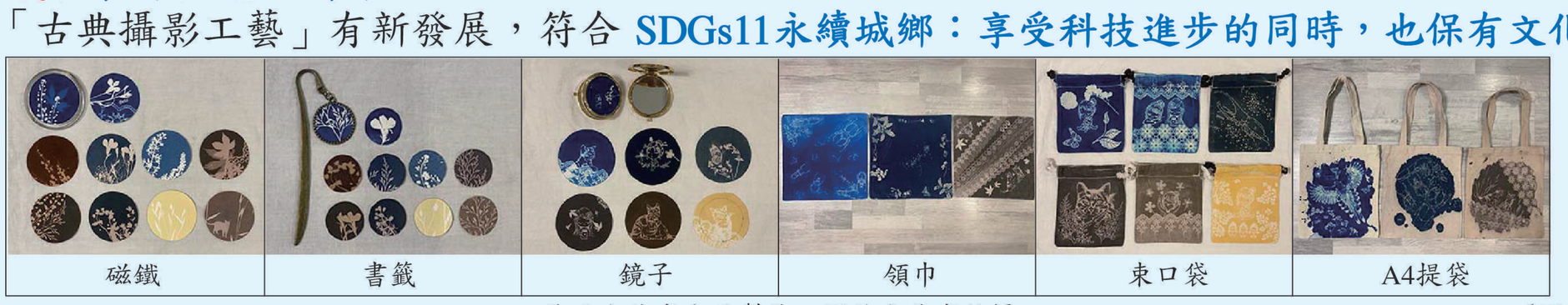
(四)影響成色效果比較：**單寧酸 ＞ 碳酸鈉 ＞ 磷酸鈉 ＞ 酸性溶液**

三、成功由漸層普魯士藍為基礎，研發豐富色系的配方：

感光時間(秒)	天藍色系	藍黑色系	黃色系	深咖啡色系	淺咖啡色系	藕紫色系	灰色系
材質	①材質:棉布	①材質:素描紙/布類	①材質:素描紙/布類	①材質:素描紙/布類	①材質:素描紙/布類	①材質:素描紙	①材質:棉布
每種溶液浸泡10(分)	②浸泡500克**檸檬酸**與500mL純水	②浸泡100克**單寧酸**與500mL純水	②浸泡105克**碳酸鈉**與500mL純水	②浸泡100克**單寧酸**與 500mL 純水 ③浸泡60克**磷酸鈉**與500mL純水	②浸泡105克**碳酸鈉**與500mL純水 ③浸泡100克**單寧酸**與500mL純水	②浸泡60克**磷酸鈉**與500mL純水 ③浸泡100克**單寧酸**與500mL純水	②浸泡60克**磷酸鈉**與500mL純水 ③浸泡100克**單寧酸**與500mL純水

四、成功製作藍曬文創作品：

「古典攝影工藝」有新發展，符合 **SDGs11永續城鄉：享受科技進步的同時，也保有文化的豐富多樣！**



磁鐵 | 書籤 | 鏡子 | 領巾 | 束口袋 | A4提袋

SDGs11

(作品由作者自己製作，圖片由作者拍攝)

（圖片取自globalgoals.tw網站）

陸、參考文獻

一、黃佩愉、王楷翔 & 張嘉詠。(2023)，燈下藍~自製燈箱的藍曬研究。中華民國第63屆中小學科學展覽會高中組化學科。

二、蔡涵芸、李沄蓁、蔡宇翔 & 鍾茲涵。(2021)，藍色狂想曲-藍晒變色探究。中華民國第61屆中小學科學展覽會國小組化學科。

三、林育任、謝君鈺。(2019)，以自組儀器探討單寧酸與鐵及鉛離子之作用，並開發為檢測方法之研究。2019年臺灣國際科學展覽會優勝作品專輯

四、施建輝。(2016)，藍印術的另類實驗與探討檸檬酸根的反應。台灣化學教育電子期刊。