

# 第十一屆旺宏科學獎

## 成果報告書

參賽編號：SA11-235

作品名稱：自製重金屬離子檢測儀及檢測流程研究

姓名：周鎂岑

關鍵詞：重金屬離子、顯色劑、檢測試紙

## 壹、研究動機

使用石蕊試紙檢測水溶液的酸鹼性是一個很簡單的實驗，但卻引起我極高的興趣，我很好奇為什麼顏色可以判定酸鹼？請教化學老師瞭解變色的原理之後，常思考如何將試紙變色的方法應用在其他物質的鑑別？重金屬離子是水污染中的劇毒污染物，而大肚溪沿岸有許多的電鍍工廠，排放含重金屬離子的廢水，時有所聞。因此，形成是否可應用試紙的顏色，來鑑別重金屬離子的想法。雖然現行重金屬離子的分析可使用貴重儀器來分析或在實驗室中利用離子沉澱分析，錯離子形成等方法來鑑別。但本研究所研發的試紙檢測法則只須幾滴樣品溶液配合數張檢測試紙，經由試紙上所吸附的試劑與重金屬的變色反應，再經由電腦影像分析，可以檢測出七種重金屬離子的存在與否和含量高低。

## 貳、研究目的

- 一、探討重金屬離子與顯色劑溶液的顯色反應。
- 二、探討重金屬離子與染有顯色劑的乾燥試紙的顯色反應。
- 三、探討顯色劑的最佳濃度條件。
- 四、探討檢測試紙可檢測的重金屬離子最低濃度。
- 五、檢測試紙檢測流程建立。
- 六、特定重金屬離子檢測試紙設計。
- 七、照相時降低光線干擾之改進。
- 八、檢量線之建立。
- 九、真實樣品的重金屬含量檢測。

## 參、研究設備及器材

### 一、器材

- |                       |                                       |
|-----------------------|---------------------------------------|
| (一) 電子天秤 (精確至 0.001g) | (十一) 試管架                              |
| (二) 烘箱                | (十二) 通風櫥                              |
| (三) 濾紙                | (十三) 活性碳口罩                            |
| (四) 吹風機               | (十四) 橡膠手套                             |
| (五) 剪刀                | (十五) 實驗衣                              |
| (六) 量筒                | (十六) 玻璃毛細管 (內徑: 1.1~1.2mm, 厚度: 0.2mm) |
| (七) 量瓶                | (十七) 膠帶                               |
| (八) 燒杯                | (十八) 黑色塑膠瓦楞板                          |
| (九) 滴管                | (十九) 數位相機                             |
| (十) 試管                | (二十) 筆記型電腦                            |

### 二、藥品

- |   |   |
|---|---|
| (一) 硝酸銀 ( $\text{AgNO}_3$ )             | (十一) 硝酸汞 ( $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$ )           |
| (二) 硝酸亞錳 ( $\text{Mn}(\text{NO}_3)_2$ ) | (十二) 硝酸鉀 ( $\text{KNO}_3$ )                       |
| (三) 硝酸鉻 ( $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3$ )  | (十三) 硫化鈉 ( $\text{Na}_2\text{S}$ )                |
| (四) 硝酸銅 ( $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ )  | (十四) 硫氰化鉀 ( $\text{KSCN}$ )                       |
| (五) 硝酸鐵 ( $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ )  | (十五) 黃血鹽 ( $[\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6]$ ) |

- |   |   |
|---|---|
| (六) 硝酸鉛 ( $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ )  | (十六) 赤血鹽 ( $[\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6]$ )                             |
| (七) 硝酸亞鈷 ( $\text{Co}(\text{NO}_3)_2$ ) | (十七) 二苯卡巴脲 (diphenylcarbazide, $(\text{C}_6\text{H}_5\text{NH})_2\text{CO}$ ) |
| (八) 硝酸鎘 ( $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$ )  | (十八) 二甲基乙二醛二肟 (Dimethylglyoxime)  |
| (九) 硝酸鋅 ( $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ )  | (十九) $\alpha$ -亞硝基- $\beta$ -萘酚 ( $\alpha$ -Nitroso- $\beta$ -naphthol)       |
| (十) 硝酸亞鎳 ( $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$ ) | (二十) 鉻酸鉀 ( $\text{K}_2\text{CrO}_4$ )   |

## 肆、研究方法

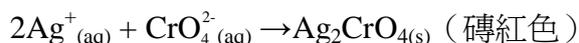
### 一、研究原理

(一) 利用重金屬陽離子與無機陰離子生成有色沉澱反應。

- 意義：不同的兩種電解質溶液混合時，陽離子與陰離子互相吸引形成的化合物，若其在水中溶解度小，則析出沉澱，此稱為離子沉澱反應。
- 如  $\text{AgNO}_3(\text{aq})$  和  $\text{K}_2\text{CrO}_4(\text{aq})$  相混合。



(2) 淨離子方程式：將未參與沉澱反應的離子去除的方程式。



(二) 利用重金屬陽離子與無機陰離子生成有色錯離子反應。

例如  $\text{Fe}^{3+}$  與黃血鹽、硫氰化鉀可生成有色反應，其原理分別為：

- 含三個結晶水的亞鐵氰化鉀晶體  $[\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6 \cdot 3\text{H}_2\text{O}]$  通常叫做黃血鹽。鐵鹽溶液與亞鐵氰化鉀溶液反應可生成亞鐵氰化鐵 ( $\text{Fe}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]_3$ ) 的深藍色沉澱，即俗稱的普魯士藍 (Prussian blue)。



- 鐵離子與硫氰化鉀 ( $\text{KSCN}$ ) 反應可生成血紅色的硫氰化鐵錯離子。



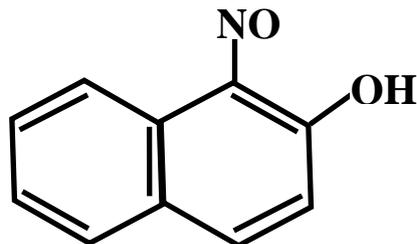
(三) 利用重金屬陽離子與有機沉澱劑生成有色沉澱反應。

許多有機沉澱劑已用於無機物的重量分析上。有機沉澱劑有兩種類型，其中一類型可形成微溶性的非離子錯合物，稱為配位化合物 (coordination compounds)；另一類型所形成之產物的結合鍵是離子性的，即有機沉澱劑與無機物間形成離子化合物。

本研究所使用的  $\alpha$ -亞硝基- $\beta$ -萘酚和二甲基乙二醛二肟即為有機沉澱劑：

- $\alpha$ -亞硝基- $\beta$ -萘酚

$\alpha$ -亞硝基- $\beta$ -萘酚 ( $\alpha$ -Nitroso- $\beta$ -naphthol) 此化合物是最早被發現 (1885 年) 具有選擇性的有機沉澱劑之一，其結構式為：

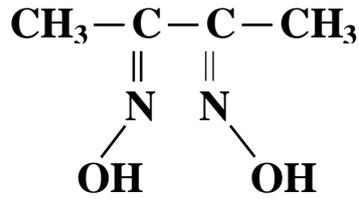


此試劑與鈷 (II) 反應形成中性的鈷 (III) 錯合物。

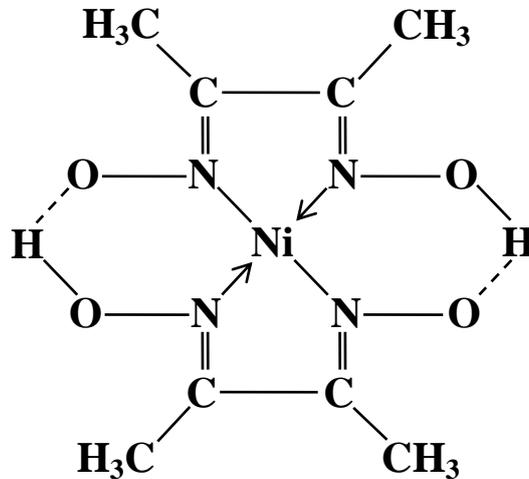
- 二甲基乙二醛二肟

二甲基乙二醛二肟 (Dimethylglyoxime) 有機沉澱劑中具有非常的特異性者，

為二甲基乙二醛二肟，其結構為：

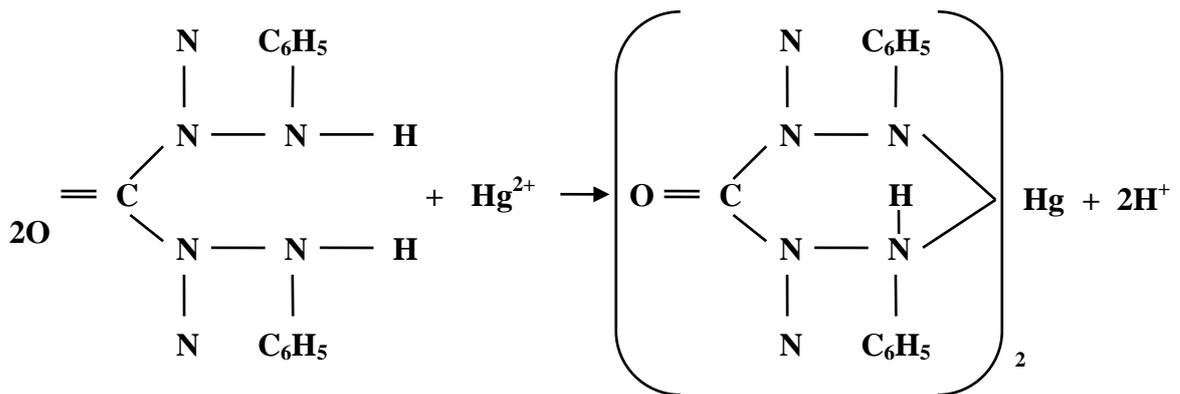


二甲基乙二醛二肟鎳為鮮紅色化合物，其結構為：



(四) 利用重金屬陽離子與有機化合物生成有色錯合物。

汞離子與二苯卡巴脲 [ diphenylcarbazide,  $(\text{C}_6\text{H}_5\text{NHNH})_2\text{CO}$  ] 形成深紫色錯合物。其反應為：



## 二、研究步驟

### (一) 藥品處理及配製

1. 將配製重金屬離子及顯色劑所需的鹽類，分別置於烘箱內，調節烘箱溫度為  $60^\circ\text{C}$ ，乾燥 6 小時。
2. 烘乾後之重金屬鹽類溶於水，配製成 1000 毫升重金屬離子的濃標準液（如下表）並貯放於冰箱中，供稀釋之用。

表一 重金屬離子標準液

離子	$\text{Cr}^{3+}$	$\text{Mn}^{2+}$	$\text{Fe}^{3+}$	$\text{Co}^{2+}$	$\text{Ni}^{2+}$	$\text{Cu}^{2+}$	$\text{Zn}^{2+}$	$\text{Ag}^+$	$\text{Cd}^{2+}$	$\text{Hg}^{2+}$	$\text{Pb}^{2+}$
濃度 (ppm)	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000

3. 配製顯色劑溶液（如下表）。

表二 顯色劑溶液

顯色劑	黃血鹽	硫化鈉	赤血鹽	鉻酸鉀	硫氰化鉀	二甲基乙二醛二脞	$\alpha$ -亞硝基- $\beta$ -萘酚	二苯卡巴脲
濃度 (M)	0.5	1.0	0.5	1.0	1.0	0.05	0.05	0.05

(二) 實驗過程

- 8 種顯色劑溶液分別置於 8 支試管中，再分別滴定一滴重金屬離子溶液，觀察 8 種顯色劑與 11 種重金屬離子溶液反應呈色情形。
- 裁剪濾紙成方塊狀再浸於顯色劑中，取出再將染有顯色劑的試紙先置於烘箱內，調節烘箱溫度  $50^{\circ}\text{C}$ ，烘乾 1 小時，製備成乾燥試紙，分別滴入一滴重金屬離子溶液，觀察變色情形。
- 固定可產生顯色反應的重金屬離子溶液濃度，改變試紙上的顯色劑濃度，記錄顯色效果最佳的顯色劑濃度。
- 固定顯色劑最佳顯色濃度條件，降低重金屬離子濃度，直到顯色無法鑑別為止，記錄重金屬離子，可顯色的最低濃度。
- 依據各離子與各顯色劑的呈色圖，歸納檢測流程圖，並測試檢驗流程圖之可行性，由甲同學配製未知溶液，乙同學檢驗，驗證流程之可行性。
- 依據顯色流程圖，裁剪試紙併貼之後，設計成可攜帶之試紙。
- 重金屬離子溶液滴入操作由滴管改以毛細管替代，改進顯色圖形。
- 照相時降低光線干擾的改進
  - 在量測 RGB 值時發現，由於光線的強弱，會影響 RGB 的值，因而造成實驗誤差，故決定研製一個暗箱，以阻隔外來光線，控制光線的強弱。
  - 實驗原理：利用黑色瓦楞板做出一個長方體，控制相機鏡頭與試紙保持一定距離，並使用相同閃光燈強度，讓光線維持相同強度。
  - 實驗步驟：
    - 量取照相機拍照時與樣品間的最佳距離 15 cm。
    - 裁切黑色瓦楞板，使之能組合成高為 15 cm，長寬適當的長方體。
    - 利用膠帶緊密黏接瓦楞板，並留下一邊開口，以利放入檢測試紙。
    - 在暗箱的上方開一孔，使相機的鏡頭能固定於此。
    - 在暗箱的底部，墊上深藍色的布。
    - 將反應後的檢測試紙放入暗箱拍攝。
    - 量取各張照片的 RGB 值。
    - 將數據製成圖表。



圖一 暗箱側視圖



圖二 暗箱俯視圖

## 9.製作檢量線

### (1)鉻酸鉀試紙檢測 $\text{Ag}^+$ 的檢量線

#### ①配製 $\text{Ag}^+$ 溶液，濃度如下表

檢量溶液(1M)	$\text{Ag}^+$ 濃度
A	1280ppm
B	640ppm
C	320ppm
D	160ppm
E	80ppm
F	40ppm
G	20ppm
H	10ppm

②取溶液 A 滴一滴至各鉻酸鉀試紙，待反應完成，拍照紀錄之。

③再將溶液換成 B~H，重複步驟②。

④再以電腦影像分析軟體 ImageJ 對試紙變色部分作 RGB 值分析，由 RGB 值繪成  $\text{Ag}^+$ 檢量圖。

### (2)黃血鹽試紙檢測 $\text{Fe}^{3+}$ 的檢量線

#### ①配製 $\text{Fe}^{3+}$ 溶液，濃度如下表

檢量溶液(1M)	$\text{Fe}^{3+}$ 濃度
A	1280ppm
B	640ppm
C	320ppm
D	160ppm
E	80ppm
F	40ppm
G	20ppm
H	10ppm

- ②取溶液 A 滴一滴至各黃血鹽試紙，待反應完成，拍照紀錄之。
- ③再將溶液換成 B~H，重複步驟②。
- ④再以電腦影像分析軟體 ImageJ 對試紙變色部分作 RGB 值分析，由 RGB 值繪成  $\text{Fe}^{3+}$  檢量圖。

(3)黃血鹽試紙檢測  $\text{Cu}^{2+}$  的檢量線

- ①配製  $\text{Cu}^{2+}$  溶液，濃度如下表

檢量溶液(1M)	$\text{Cu}^{2+}$ 濃度
A	1280ppm
B	640ppm
C	320ppm
D	160ppm
E	80ppm
F	40ppm
G	20ppm
H	10ppm

- ②取溶液 A 滴一滴至各黃血鹽試紙，待反應完成，拍照紀錄之。
- ③再將溶液換成 B~H，重複步驟②。
- ④再以電腦影像分析軟體 ImageJ 對試紙變色部分作 RGB 值分析，由 RGB 值繪成  $\text{Cu}^{2+}$  檢量圖。

(4)二苯卡巴脲試紙檢測  $\text{Hg}^{2+}$  的檢量線

- ①配製  $\text{Hg}^{2+}$  溶液，濃度如下表

檢量溶液(0.05M)	$\text{Hg}^{2+}$ 濃度
A	356ppm
B	128ppm
C	64ppm
D	32ppm
E	16ppm
F	8ppm
G	4ppm
H	2ppm

- ②取溶液 A 滴一滴至各二苯卡巴脲試紙，待反應完成，拍照紀錄之。
- ③再將溶液換成 B~H，重複步驟②。
- ④再以電腦影像分析軟體 ImageJ 對試紙變色部分作 RGB 值分析，由 RGB 值繪成  $\text{Hg}^{2+}$  檢量圖。

(5)  $\alpha$ -亞硝基- $\beta$ -萘酚試紙檢測  $\text{Co}^{2+}$  的檢量線

①配製  $\text{Co}^{2+}$  溶液，濃度如下表

檢量溶液(0.05M)	$\text{Co}^{2+}$ 濃度
A	356ppm
B	128ppm
C	64ppm
D	32ppm
E	16ppm
F	8ppm
G	4ppm
H	2ppm

②取溶液 A 滴一滴至各  $\alpha$ -亞硝基- $\beta$ -萘酚試紙，待反應完成，拍照紀錄之。

③再將溶液換成 B~H，重複步驟②。

④再以電腦影像分析軟體 ImageJ 對試紙變色部分作 RGB 值分析，由 RGB 值繪成  $\text{Co}^{2+}$  檢量圖。

(6) 二甲基乙二醛二肟試紙檢測  $\text{Ni}^{2+}$  的檢量線

①配製  $\text{Ni}^{2+}$  溶液，濃度如下表

檢量溶液(0.05M)	$\text{Ni}^{2+}$ 濃度
A	640ppm
B	320ppm
C	160ppm
D	80ppm
E	40ppm
F	20ppm
G	10ppm
H	5ppm

②取溶液 A 滴一滴至各二甲基乙二醛二肟試紙，待反應完成，拍照紀錄之。

③再將溶液換成 B~H，重複步驟②。

④再以電腦影像分析軟體 ImageJ 對試紙變色部分作 RGB 值分析，由 RGB 值繪成  $\text{Ni}^{2+}$  檢量圖。

(7) 鉻酸鉀試紙檢測  $\text{Mn}^{2+}$  的檢量線

①配製  $\text{Mn}^{2+}$  溶液，濃度如下表

檢量溶液(0.25M)	Mn <sup>2+</sup> 濃度
A	640ppm
B	320ppm
C	160ppm
D	80ppm
E	40ppm
F	20ppm
G	10ppm
H	5ppm

- ②取溶液 A 滴一滴至各鉻酸鉀試紙，待反應完成，拍照紀錄之。
- ③再將溶液換成 B~H，重複步驟②。
- ④再以電腦影像分析軟體 ImageJ 對試紙變色部分作 RGB 值分析，由 RGB 值繪成 Mn<sup>2+</sup>檢量圖。

#### 10. 社區河川採樣檢測。

實驗照片：



圖一 濾紙置入二苯卡巴脲溶液



圖二 重金屬離子溶液



圖三 檢測試紙



圖四 社區河川汙染現況

## 伍、研究結果

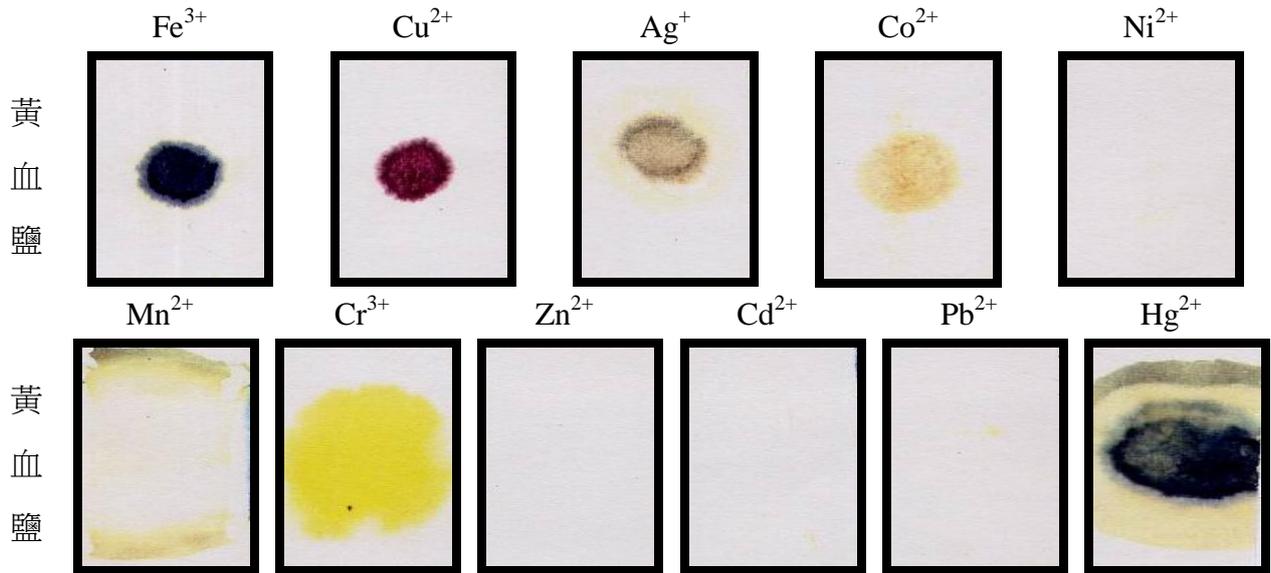
### 一、重金屬離子與顯色劑溶液反應結果

表 1 十一種重金屬離子與八種顯色劑反應結果

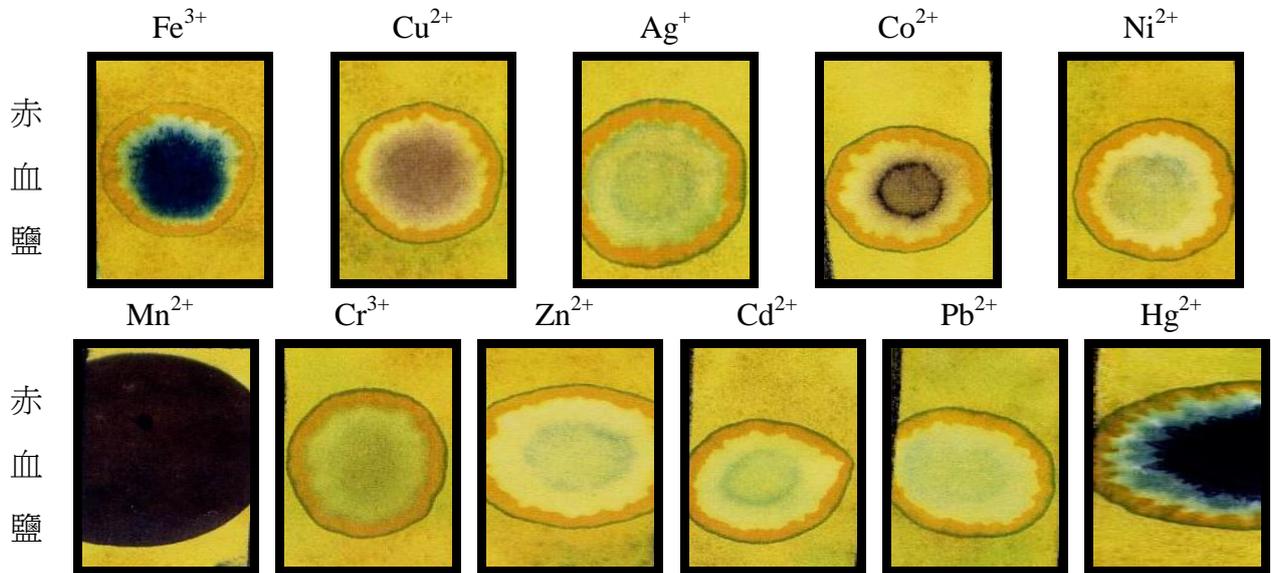
顯色劑 離子 1000 ppm	黃 血 鹽 (0.5M)	赤 血 鹽 (0.5M)	鉻 酸 鉀 (1.0M)	硫 氰 化 鉀 (1.0M)	硫 化 鈉 (1.0M)	二 二 甲 醛 基 二 乙 脞 (0.05M)	二 苯 卡 巴 脲 (0.05M)	$\alpha$     $\beta$ 亞   硝 萘 基 酚 (0.05M)
Cr <sup>3+</sup>	黃 褐	綠	褐	無	粉 藍	淡 綠	紫 紅	棕 黑
Mn <sup>2+</sup>	白	褐	黑 褐	淡 紅	淡 棕	粉 紅	紫 紅	褐
Fe <sup>3+</sup>	藍	藍	橙	血 紅	黑	褐	黃	棕
Co <sup>2+</sup>	土 黃	褐	黑	淡 紅	黑	褐	紫 紅	褐
Ni <sup>2+</sup>	淡 綠	棕	褐	綠	黑	粉 紅	紫	褐
Cu <sup>2+</sup>	褐	棕	褐	綠	黑	棕	褐	褐
Zn <sup>2+</sup>	白	紅 棕	黃	無	白	無	褐	褐
Ag <sup>+</sup>	白	綠	磚紅	無	黑	無	褐	褐
Cd <sup>2+</sup>	白	棕 綠	黃	無	黃	無	紫	褐
Hg <sup>2+</sup>	藍	白	橙	無	灰	無	紫 藍	褐
Pb <sup>2+</sup>	白	棕 綠	黃	無	黑	無	紫	褐

二、重金屬離子與染有顯色劑的乾燥試紙的顯色結果

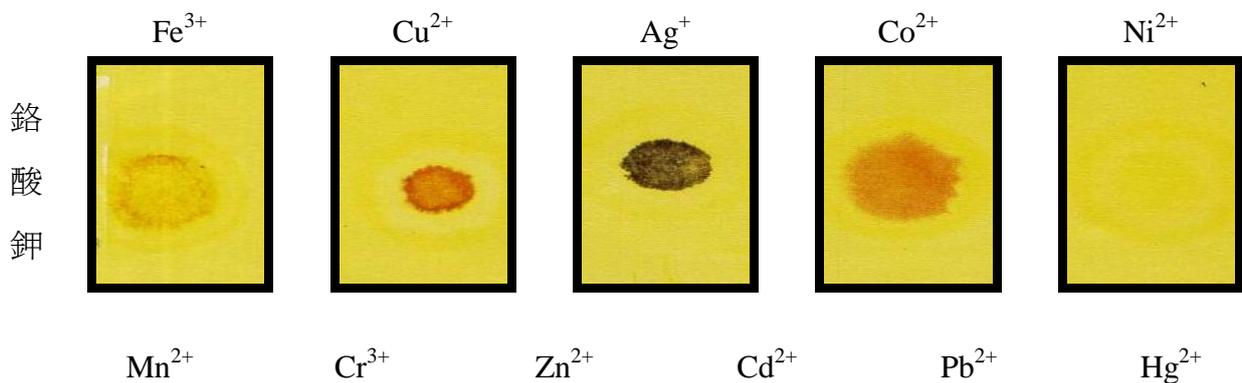
(一) 0.5 M 黃血鹽與十一種重金屬離子(1000 ppm)的反應結果



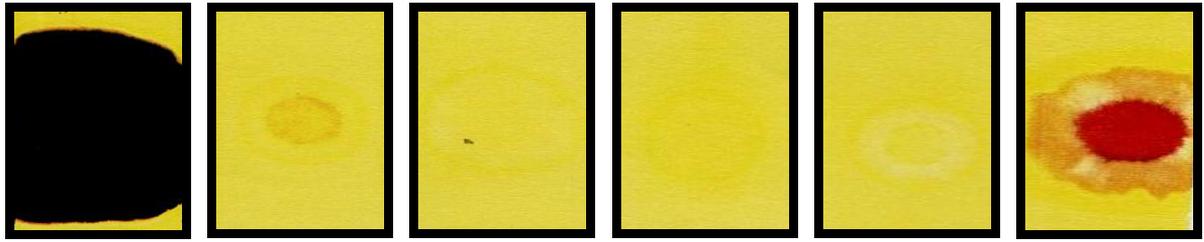
(二) 0.5 M 赤血鹽與十一種重金屬離子(1000 ppm)的反應結果



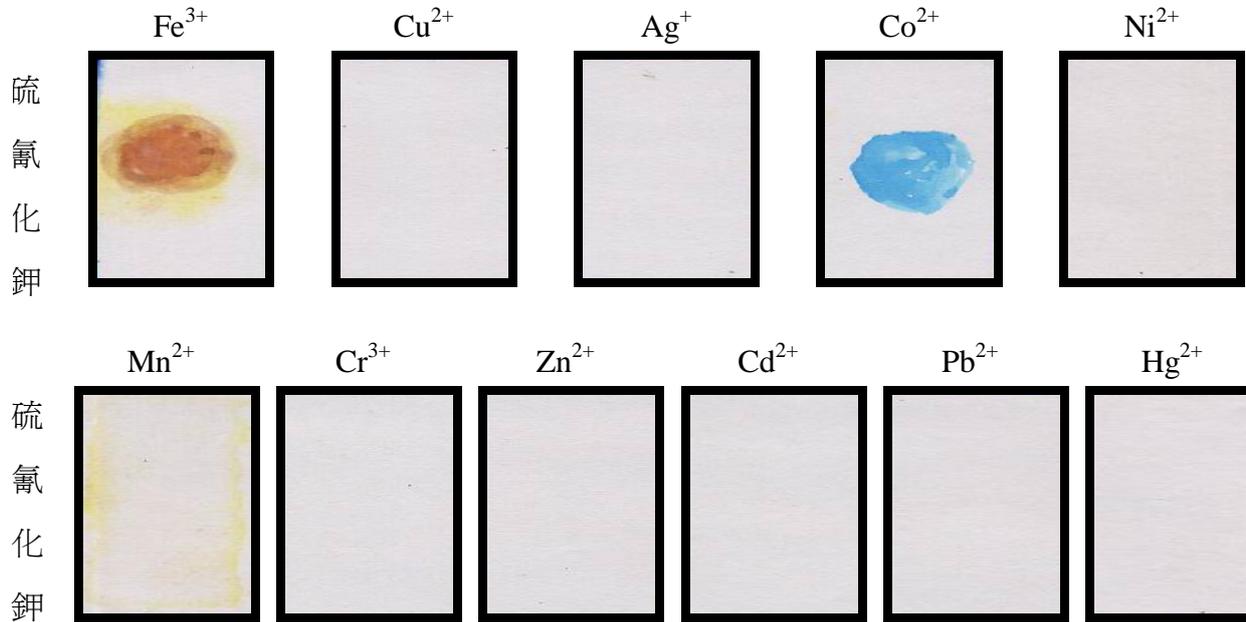
(三) 1.0 M 鉻酸鉀與十一種重金屬離子(1000 ppm)的反應結果



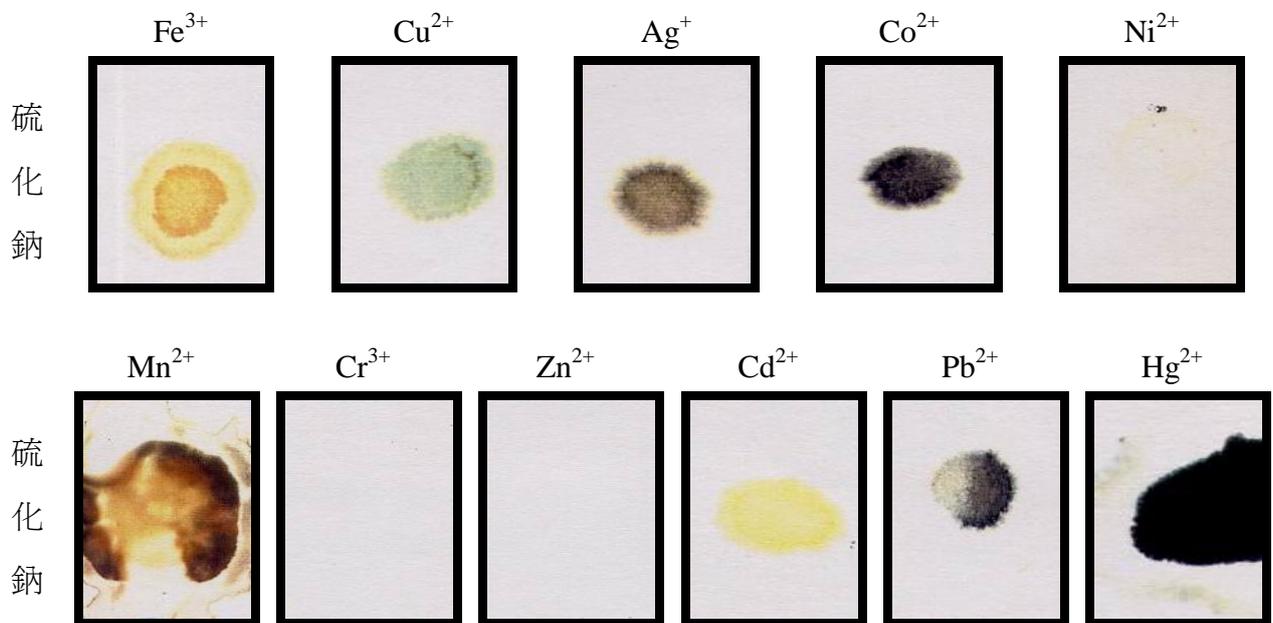
鉻  
酸  
鉀



(四) 1.0 M 硫氰化鉀與十一種重金屬離子(1000 ppm)的反應結果



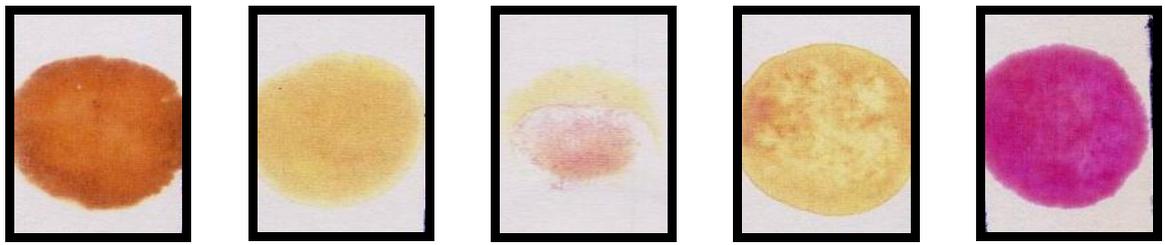
(五) 1.0 M 硫化鈉與十一種重金屬離子(1000 ppm)的反應結果



(六) 0.05 M 二甲基乙二醛二肟與十一種重金屬離子(1000 ppm)的反應結果

Fe<sup>3+</sup>      Cu<sup>2+</sup>      Ag<sup>+</sup>      Co<sup>2+</sup>      Ni<sup>2+</sup>

二甲基乙二醛二脒



Mn<sup>2+</sup>

Cr<sup>3+</sup>

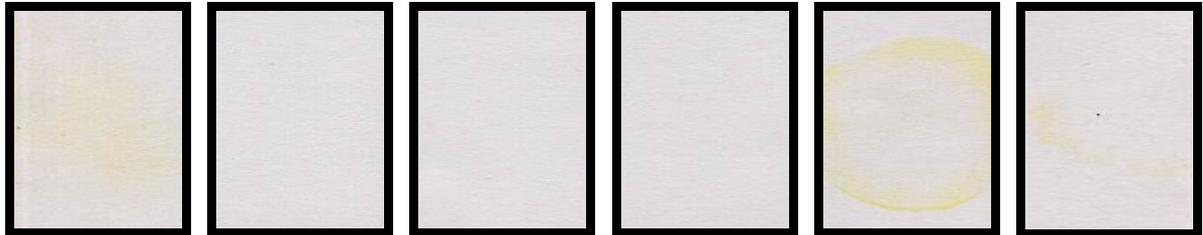
Zn<sup>2+</sup>

Cd<sup>2+</sup>

Pb<sup>2+</sup>

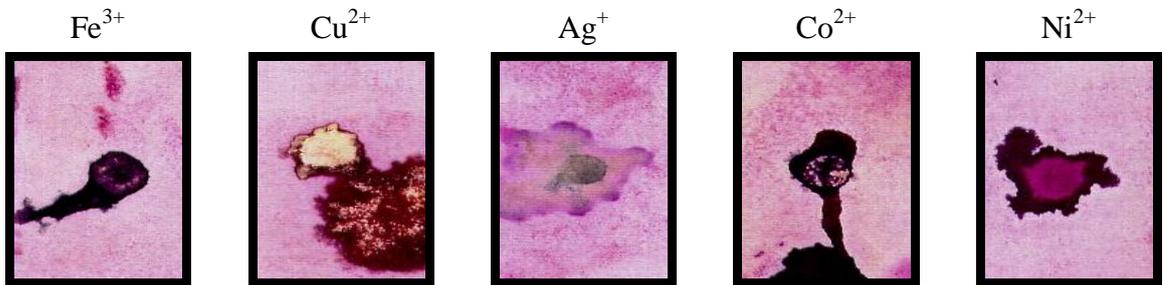
Hg<sup>2+</sup>

二甲基乙二醛二脒

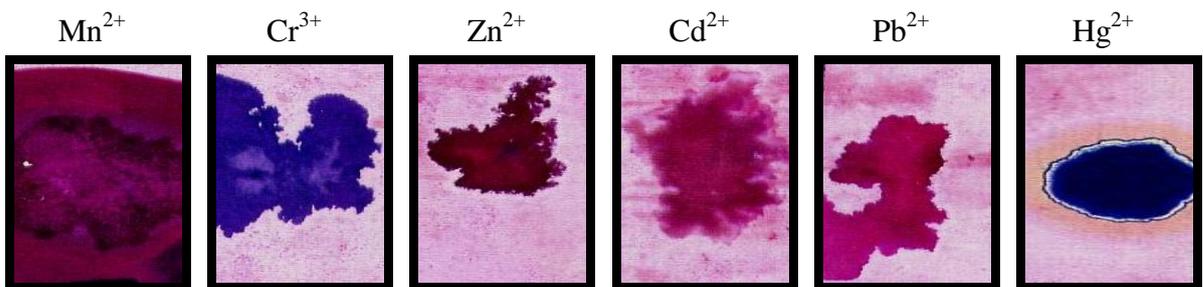


(七) 0.05 M 二苯卡巴脒與十一種重金屬離子(1000 ppm)的反應結果

二苯卡巴脒

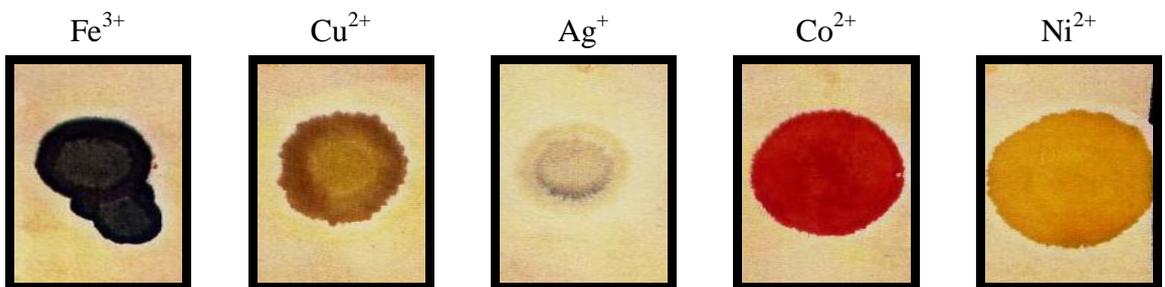


二苯卡巴脒



(八) 0.05 M α-亞硝基-β-萘酚與十一種重金屬離子(1000 ppm)的反應結果

α-亞硝基-β-萘酚



Mn<sup>2+</sup>

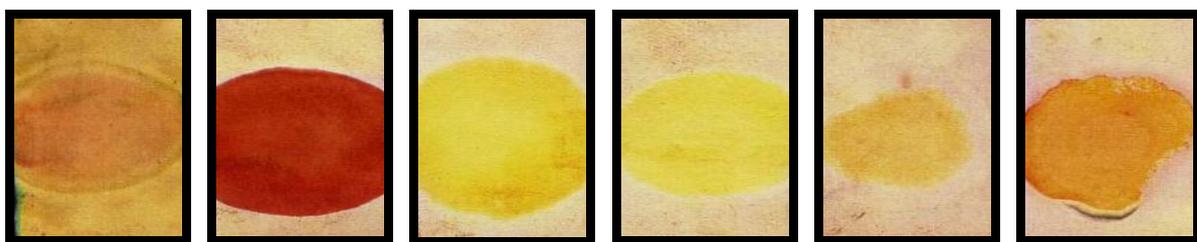
Cr<sup>3+</sup>

Zn<sup>2+</sup>

Cd<sup>2+</sup>

Pb<sup>2+</sup>

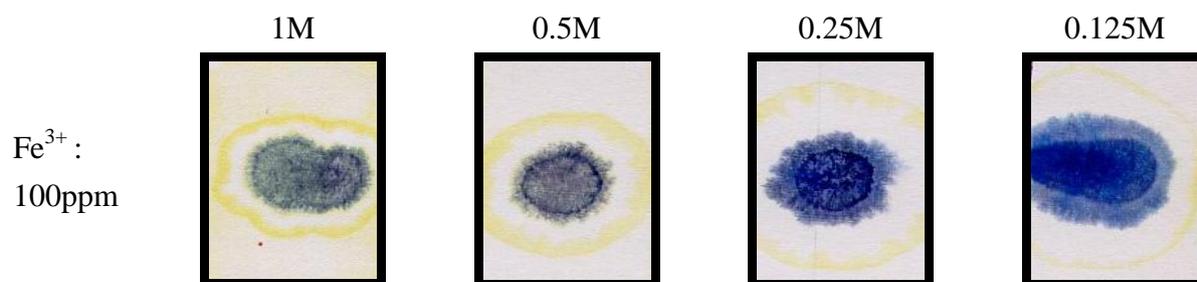
Hg<sup>2+</sup>



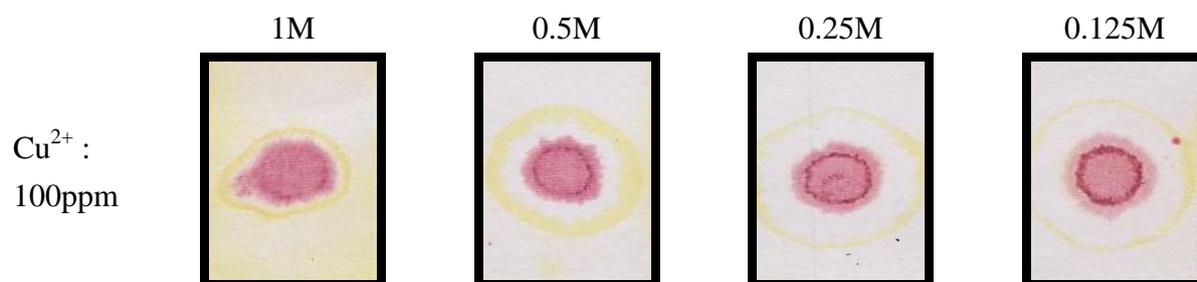
三、固定重金屬離子濃度（100ppm），改變顯色劑濃度，顯色結果

（一）不同濃度的黃血鹽和  $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$  的顯色結果

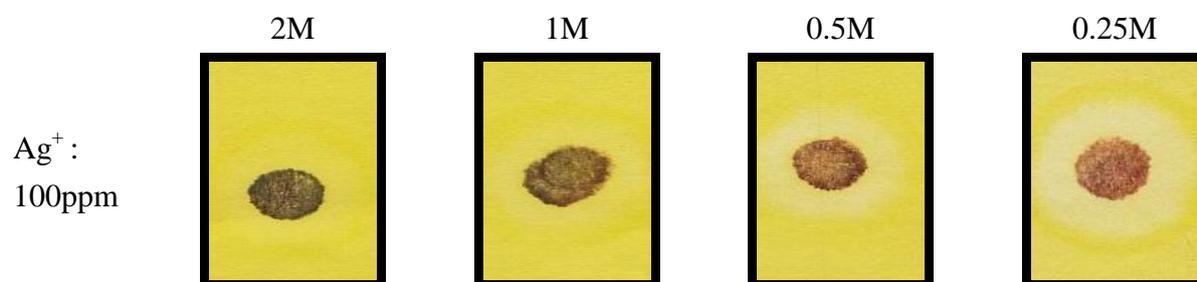
1. 100ppm  $\text{Fe}^{3+}$  與不同濃度黃血鹽的顯色結果



2. 100ppm  $\text{Cu}^{2+}$  與不同濃度黃血鹽的顯色結果

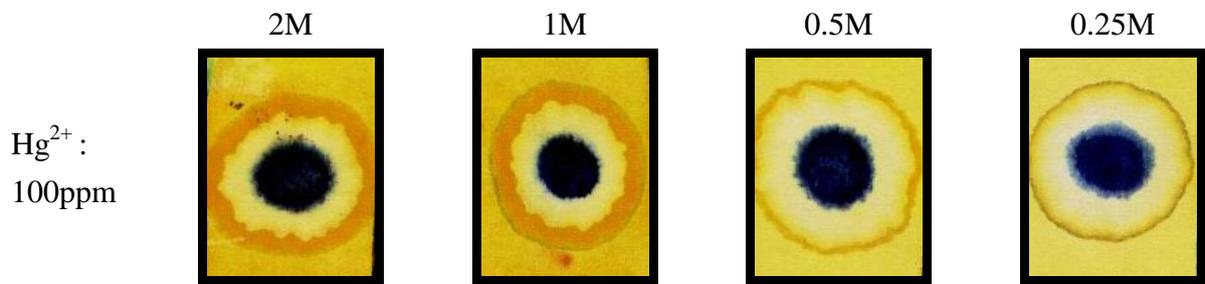


（二）不同濃度的鉻酸鉀和 100ppm  $\text{Ag}^+$  的顯色結果

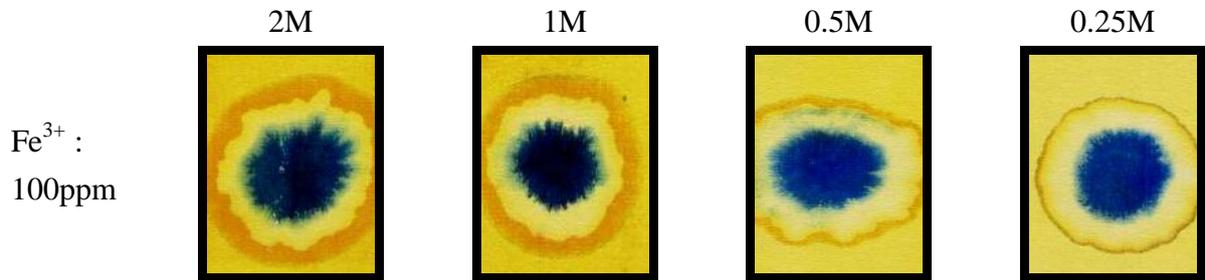


（三）不同濃度的赤血鹽和  $\text{Hg}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{3+}$  的顯色結果

1. 100ppm  $\text{Hg}^{2+}$  與不同濃度赤血鹽的顯色結果

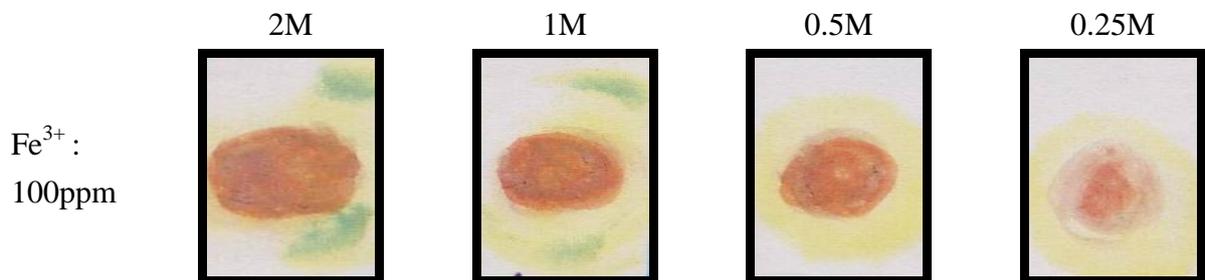


2. 100ppm Fe<sup>3+</sup>與不同濃度赤血鹽的顯色結果

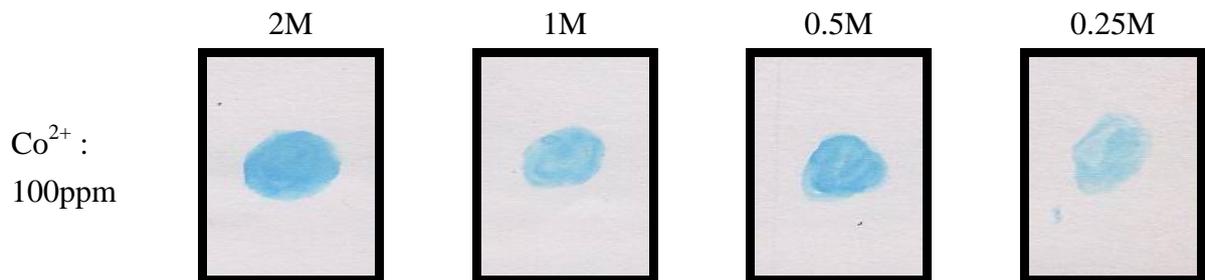


(四) 不同濃度的硫氰化鉀和 Fe<sup>3+</sup>、Co<sup>2+</sup>的顯色結果

1. 100ppm Fe<sup>3+</sup>與不同濃度硫氰化鉀的顯色結果

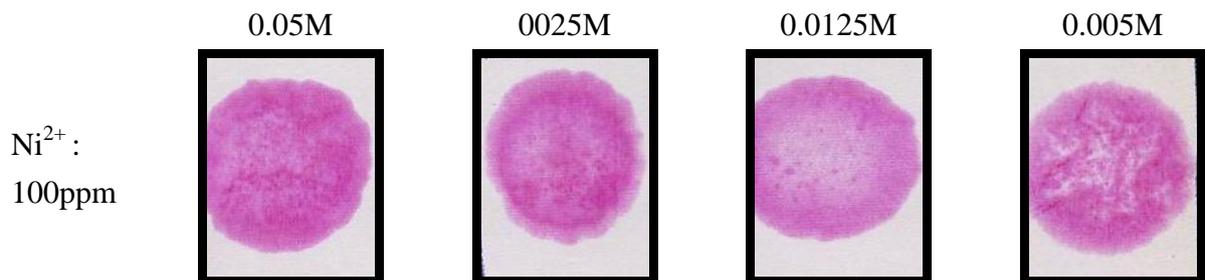


2. 100ppm Co<sup>2+</sup>與不同濃度硫氰化鉀的顯色結果

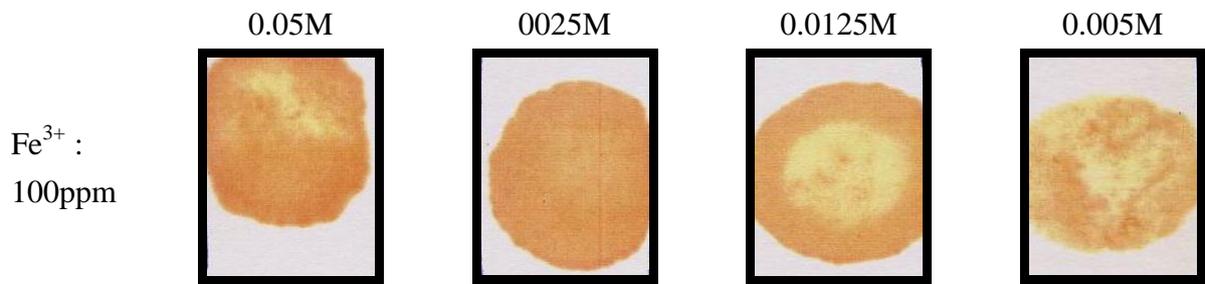


(五) 不同濃度的二甲基乙二醛二肟和 Ni<sup>2+</sup>、Fe<sup>3+</sup>的顯色結果

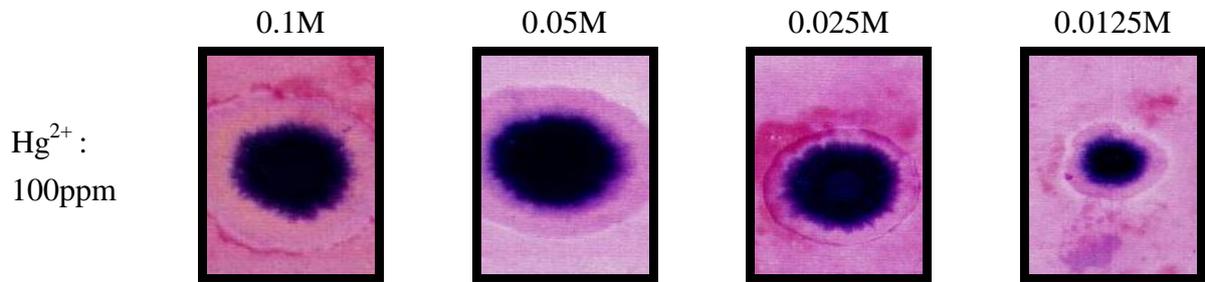
1. 100ppm Ni<sup>2+</sup>與不同濃度二甲基乙二醛二肟的顯色結果



2. 100ppm Fe<sup>3+</sup>與不同濃度二甲基乙二醛二肟的顯色結果

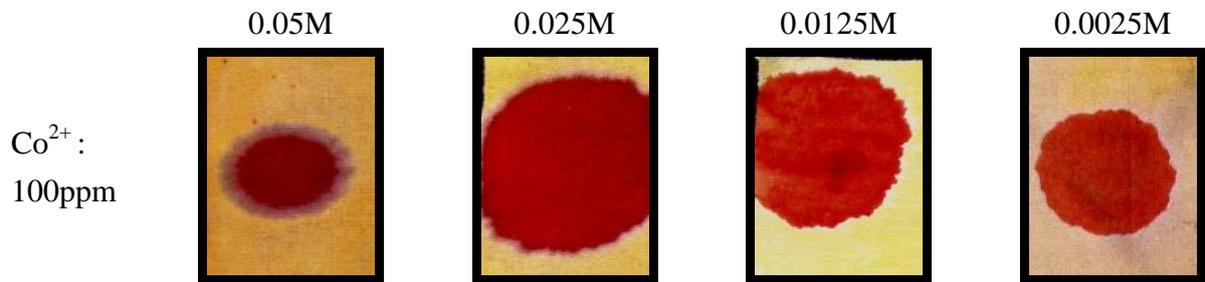


(六) 不同濃度的二苯卡巴脲和 100ppm  $\text{Hg}^{2+}$  的顯色結果

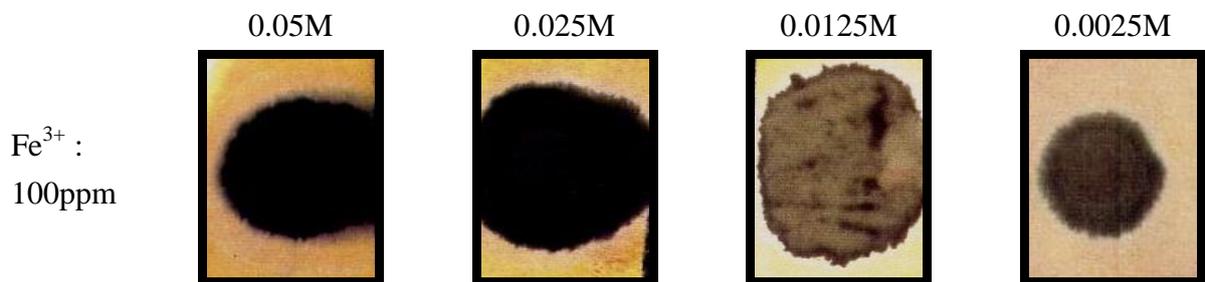


(七) 不同濃度的  $\alpha$ -亞硝基- $\beta$ -萘酚和  $\text{Co}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{3+}$  的顯色結果

1. 100ppm  $\text{Co}^{2+}$  與不同濃度  $\alpha$ -亞硝基- $\beta$ -萘酚的顯色結果

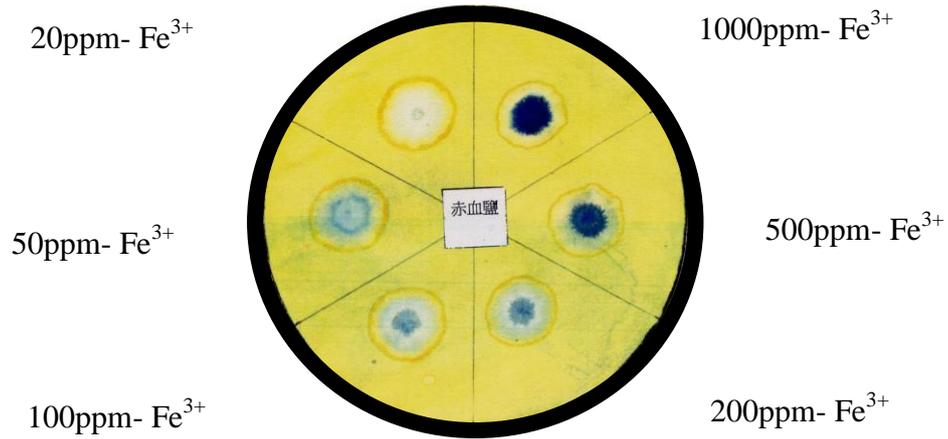


2. 100ppm  $\text{Fe}^{3+}$  與不同濃度  $\alpha$ -亞硝基- $\beta$ -萘酚的顯色結果

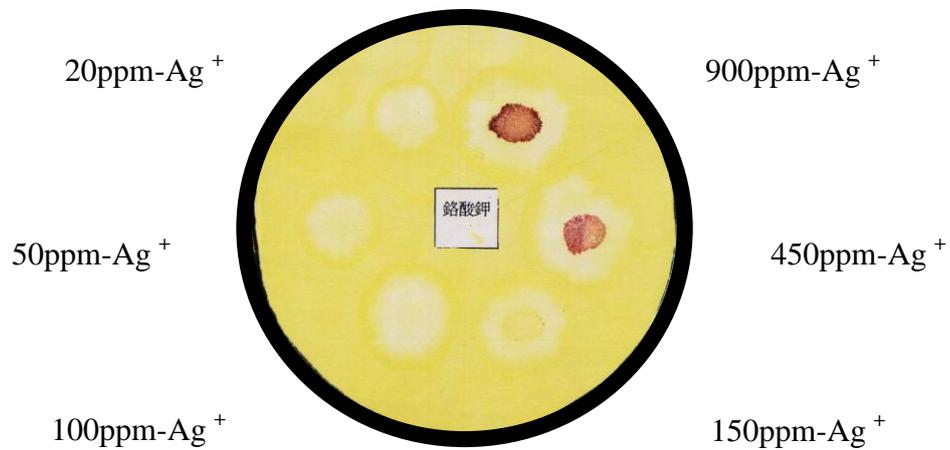


四、重金屬離子可鑑別顯色的最低濃度

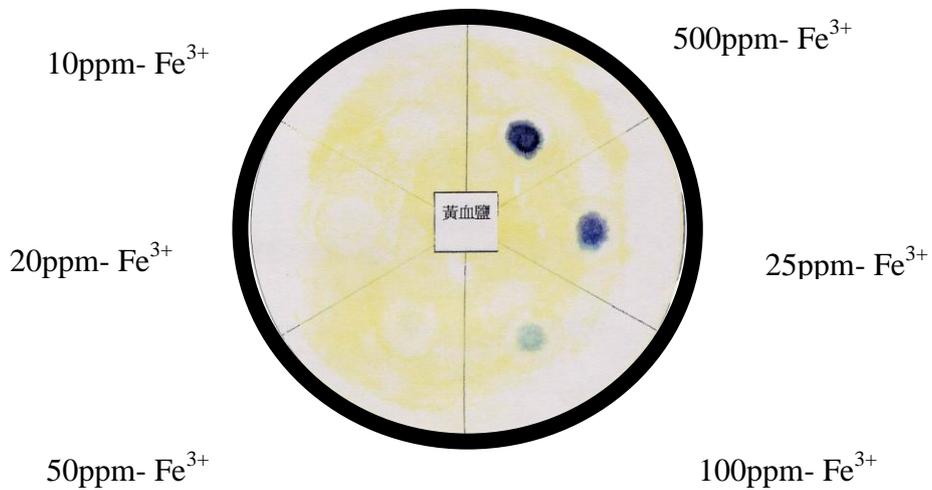
(一) 0.25 M 赤血鹽試紙



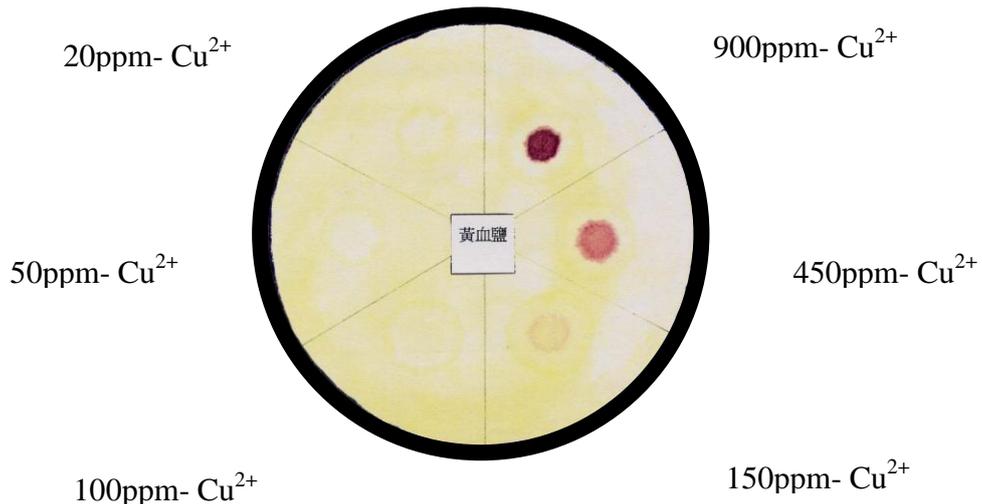
(二) 0.25 M 鉻酸鉀試紙



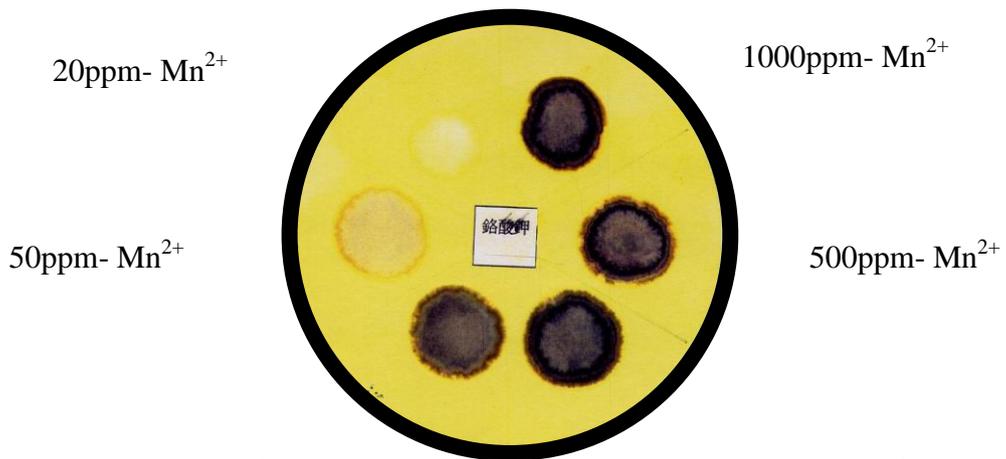
(三) 1 M 黃血鹽試紙



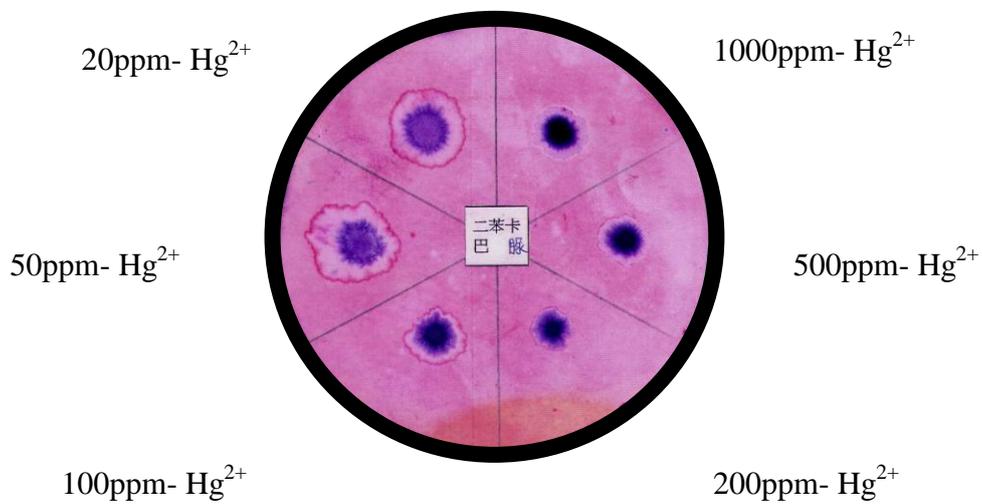
(四) 1 M 黃血鹽試紙



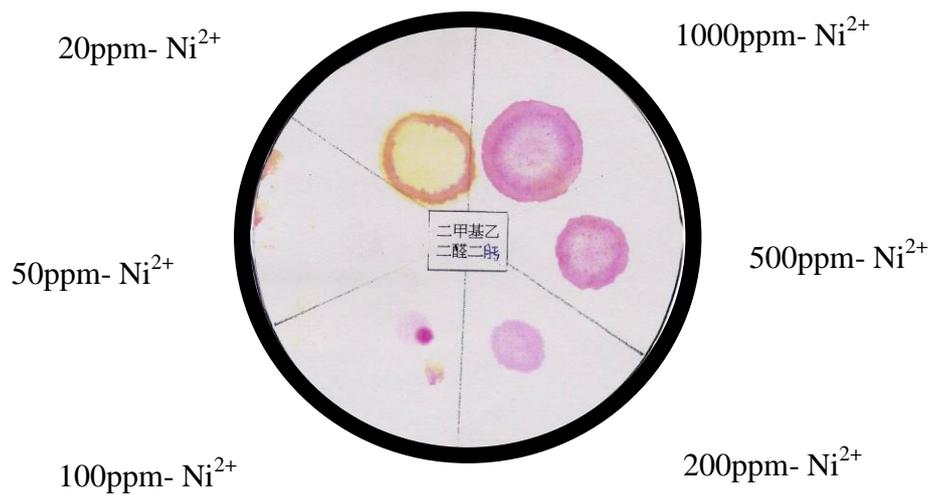
(五) 0.25 M 鉻酸鉀試紙



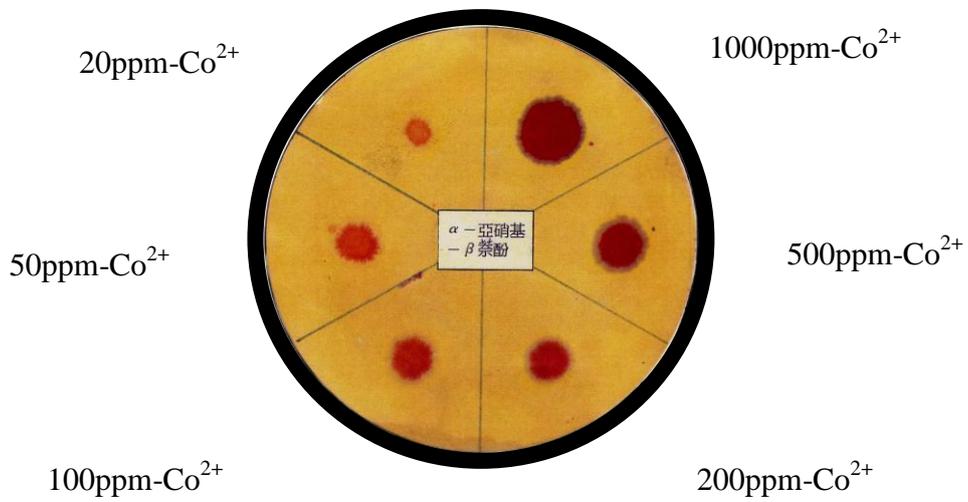
(六) 0.05 M 二苯卡巴脲試紙



(七) 0.05 M 二甲基乙二醛二脲試紙



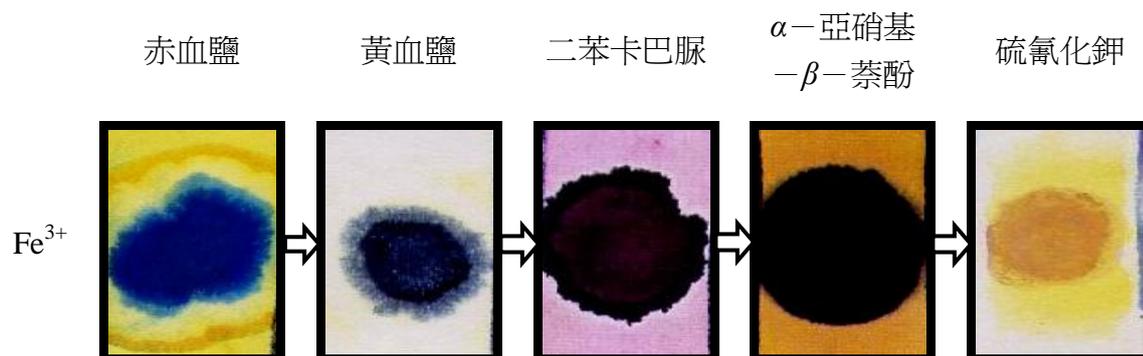
(八) 0.05 M  $\alpha$ -亞硝基- $\beta$ -萘酚試紙



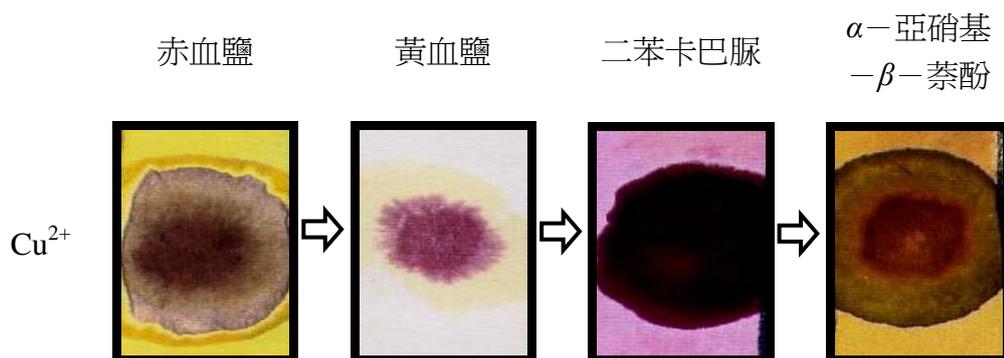
## 五、檢測流程

含單一重金屬離子溶液系統

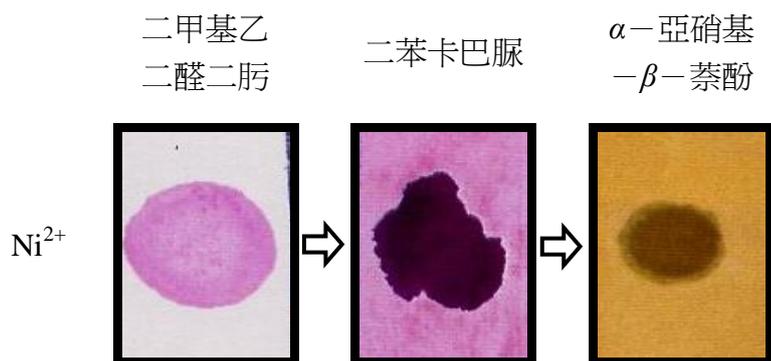
### (一) $\text{Fe}^{3+}$ 的檢測流程



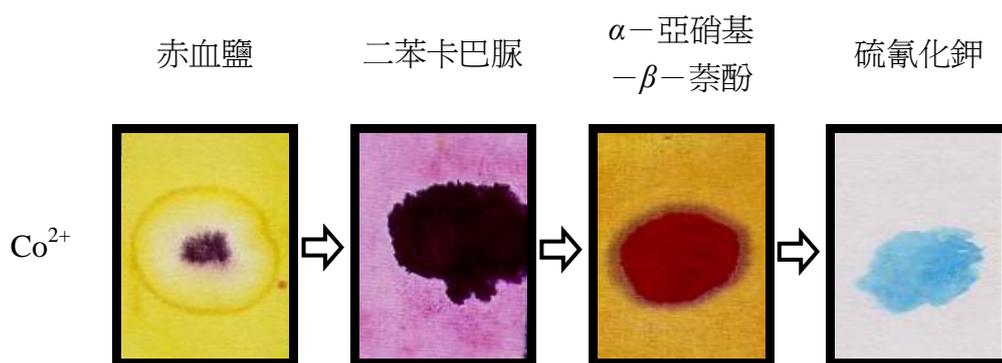
### (二) $\text{Cu}^{2+}$ 的檢測流程



### (三) $\text{Ni}^{2+}$ 的檢測流程

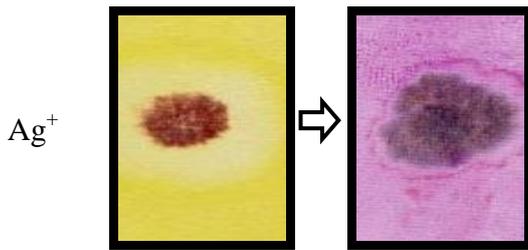


### (四) $\text{Co}^{2+}$ 的檢測流程



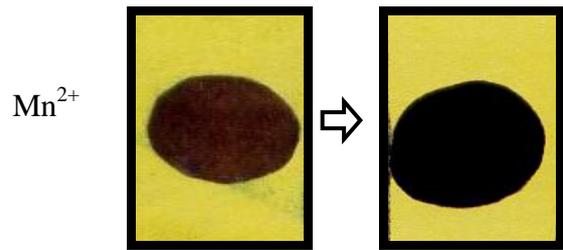
(五)  $\text{Ag}^+$ 的檢測流程

鉻酸鉀      二苯卡巴脲



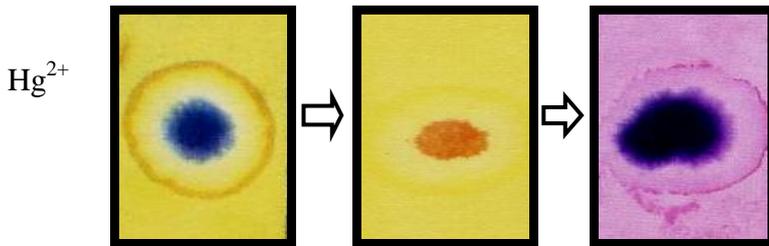
(六)  $\text{Mn}^{2+}$ 的檢測流程

赤血鹽      鉻酸鉀



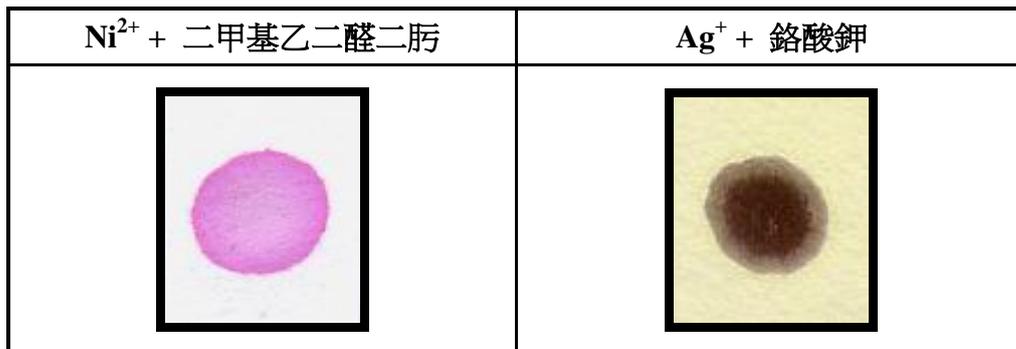
(七)  $\text{Hg}^{2+}$ 的檢測流程

赤血鹽      鉻酸鉀      二苯卡巴脲



六、顯色圖改進

重金屬離子溶液以滴管滴入檢測試紙時，因滴入量太多，有些擴散較為嚴重，造成顯色圖不易判讀，因此改以毛細管改良，滴入時重金屬離子溶液較為集中，呈現圖形也較為清晰。顯色圖改進如下圖。

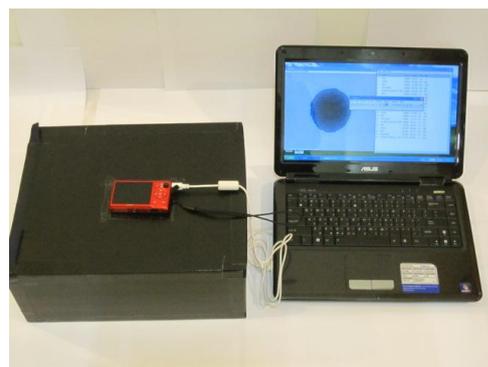


圖一 顯色圖改進情況

七、暗箱裝置(如下圖)



圖一 暗箱側視圖

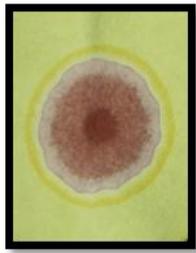
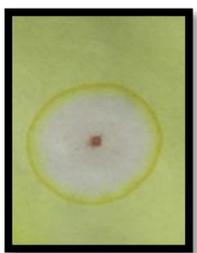


圖二 重金屬檢測儀裝置圖

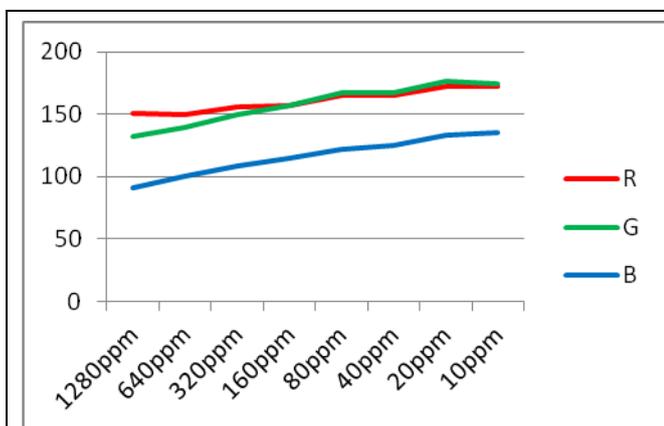
## 八、檢量線的製作

### (一) 鉻酸鉀試紙檢測 $\text{Ag}^+$ 的檢量線

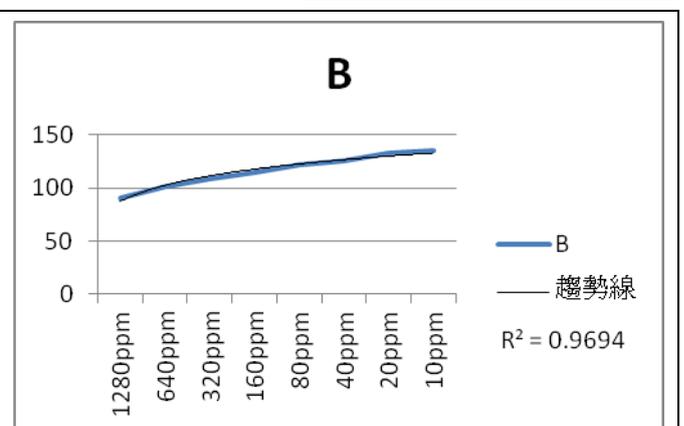
鉻酸鉀(0.25M)試紙與各濃度的  $\text{Ag}^+$  反應圖

		
Ag <sup>+</sup> 濃度 1280ppm	Ag <sup>+</sup> 濃度 640ppm	Ag <sup>+</sup> 濃度 320ppm
		
Ag <sup>+</sup> 濃度 160ppm	Ag <sup>+</sup> 濃度 80ppm	Ag <sup>+</sup> 濃度 40ppm
		
Ag <sup>+</sup> 濃度 20ppm	Ag <sup>+</sup> 濃度 10ppm	

縱軸：RGB 值相對強度  
橫軸：重金屬離子濃度



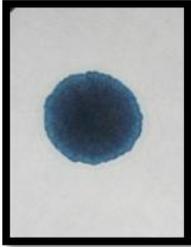
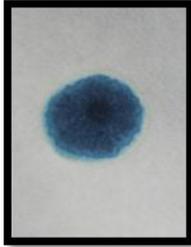
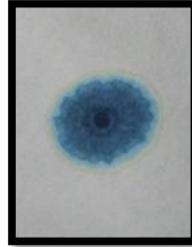
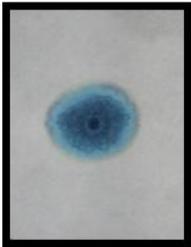
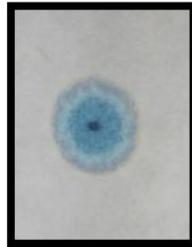
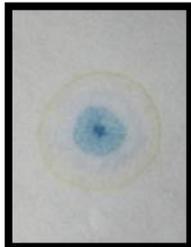
鉻酸鉀試紙檢測  $\text{Ag}^+$  的檢量線 (RGB 值)

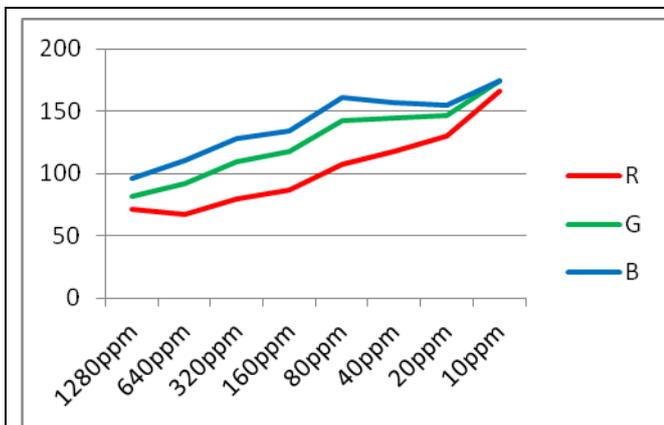


鉻酸鉀試紙檢測  $\text{Ag}^+$  的檢量線 (B 值)

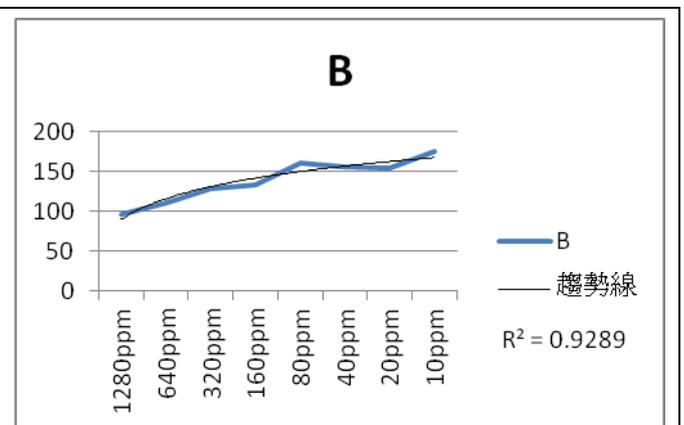
(二) 黃血鹽試紙檢測  $\text{Fe}^{3+}$  的檢量線

黃血鹽(1M)試紙與各濃度的  $\text{Fe}^{3+}$  反應圖

		
$\text{Fe}^{3+}$ 濃度 1280ppm	$\text{Fe}^{3+}$ 濃度 640ppm	$\text{Fe}^{3+}$ 濃度 320ppm
		
$\text{Fe}^{3+}$ 濃度 160ppm	$\text{Fe}^{3+}$ 濃度 80ppm	$\text{Fe}^{3+}$ 濃度 40ppm
		
$\text{Fe}^{3+}$ 濃度 20ppm	$\text{Fe}^{3+}$ 濃度 10ppm	



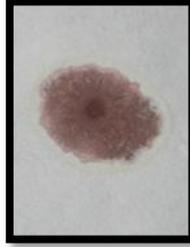
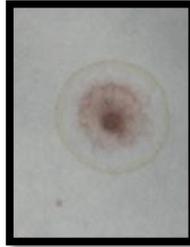
黃血鹽試紙檢測  $\text{Fe}^{3+}$  的檢量線(RGB 值)

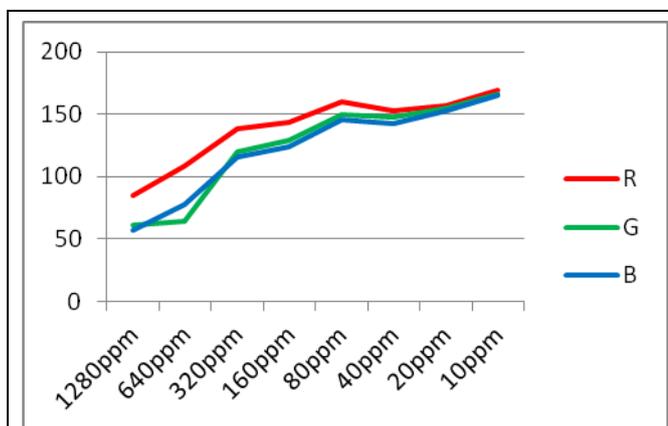


黃血鹽試紙檢測  $\text{Fe}^{3+}$  的檢量線(B 值)

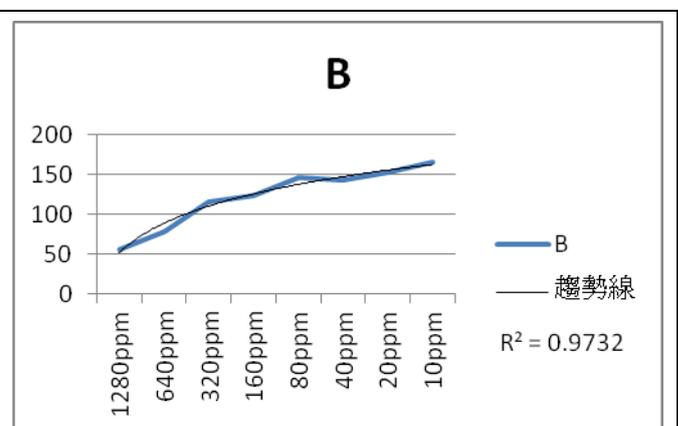
(三) 黃血鹽檢測  $\text{Cu}^{2+}$  的檢量線

黃血鹽(1M)試紙與各濃度的  $\text{Cu}^{2+}$  反應圖

		
$\text{Cu}^{2+}$ 濃度 1280ppm	$\text{Cu}^{2+}$ 濃度 640ppm	$\text{Cu}^{2+}$ 濃度 320ppm
		
$\text{Cu}^{2+}$ 濃度 160ppm	$\text{Cu}^{2+}$ 濃度 80ppm	$\text{Cu}^{2+}$ 濃度 40ppm
		
$\text{Cu}^{2+}$ 濃度 20ppm	$\text{Cu}^{2+}$ 濃度 10ppm	



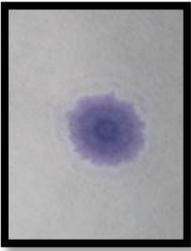
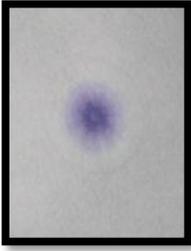
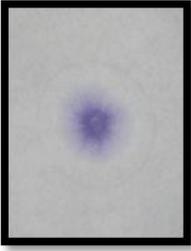
黃血鹽檢測  $\text{Cu}^{2+}$  的檢量線 (RGB 值)

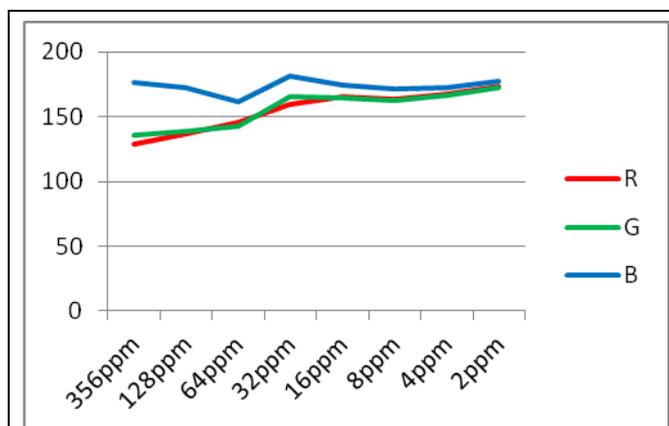


黃血鹽檢測  $\text{Cu}^{2+}$  的檢量線 (B 值)

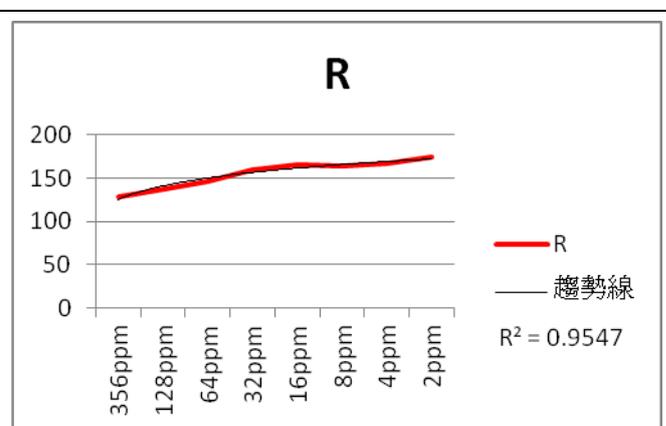
(四) 二苯卡巴脲檢測  $Hg^{2+}$  的檢量線

二苯卡巴脲(0.05M)試紙與各濃度的  $Hg^{2+}$  反應圖

		
Hg <sup>2+</sup> 濃度 356ppm	Hg <sup>2+</sup> 濃度 128ppm	Hg <sup>2+</sup> 濃度 64ppm
		
Hg <sup>2+</sup> 濃度 32ppm	Hg <sup>2+</sup> 濃度 16ppm	Hg <sup>2+</sup> 濃度 8ppm
		
Hg <sup>2+</sup> 濃度 4ppm	Hg <sup>2+</sup> 濃度 2ppm	



二苯卡巴脲檢測  $Hg^{2+}$  的檢量線(RGB 值)

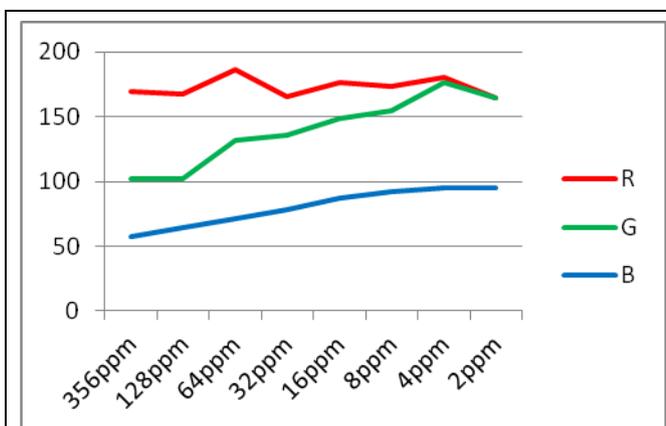


二苯卡巴脲檢測  $Hg^{2+}$  的檢量線(R 值)

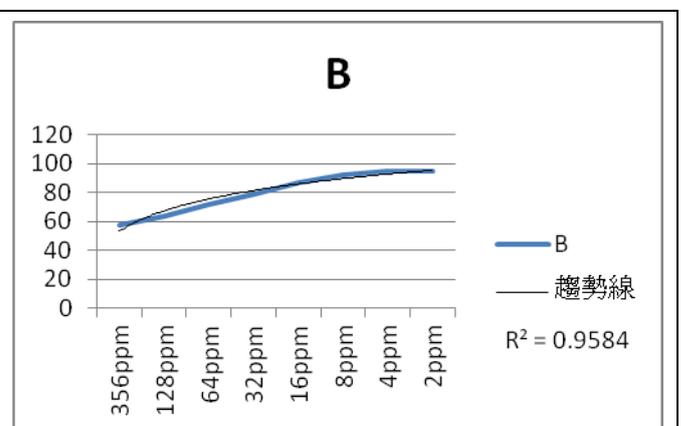
(五)  $\alpha$ -亞硝基- $\beta$ -萘酚檢測  $\text{Co}^{2+}$  的檢量線

$\alpha$ -亞硝基- $\beta$ -萘酚(0.05M)試紙與各濃度的  $\text{Co}^{2+}$  反應圖

		
$\text{Co}^{2+}$ 濃度 356ppm	$\text{Co}^{2+}$ 濃度 128ppm	$\text{Co}^{2+}$ 濃度 64ppm
		
$\text{Co}^{2+}$ 濃度 32ppm	$\text{Co}^{2+}$ 濃度 16ppm	$\text{Co}^{2+}$ 濃度 8ppm
		
$\text{Co}^{2+}$ 濃度 4ppm	$\text{Co}^{2+}$ 濃度 2ppm	



$\alpha$ -亞硝基- $\beta$ -萘酚檢測  $\text{Co}^{2+}$  的檢量線(RGB 值)

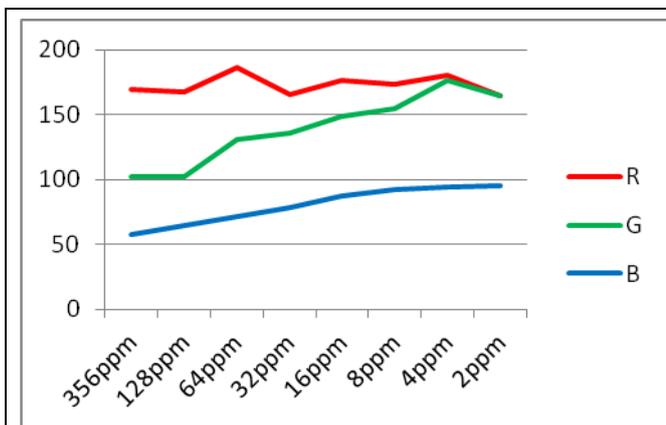


$\alpha$ -亞硝基- $\beta$ -萘酚檢測  $\text{Co}^{2+}$  的檢量線(B 值)

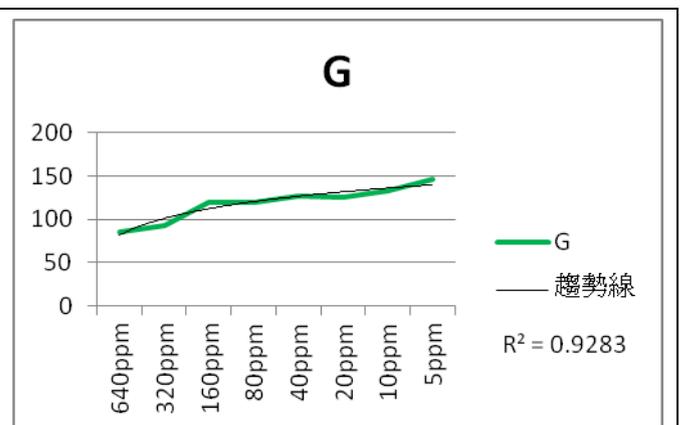
(六) 二甲基乙二醛二肟檢測 Ni<sup>2+</sup>的檢量線

二甲基乙二醛二肟(0.05M)試紙與各濃度的 Ni<sup>2+</sup>反應圖

		
Ni <sup>2+</sup> 濃度 640ppm	Ni <sup>2+</sup> 濃度 320ppm	Ni <sup>2+</sup> 濃度 160ppm
		
Ni <sup>2+</sup> 濃度 80ppm	Ni <sup>2+</sup> 濃度 40ppm	Ni <sup>2+</sup> 濃度 20ppm
		
Ni <sup>2+</sup> 濃度 10ppm	Ni <sup>2+</sup> 濃度 5ppm	



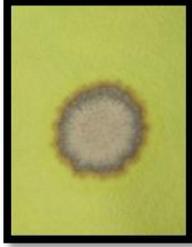
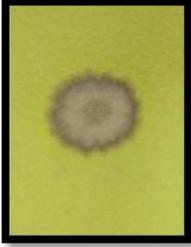
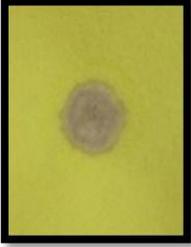
二甲基乙二醛二肟檢測 Ni<sup>2+</sup>的檢量線(RGB 值)

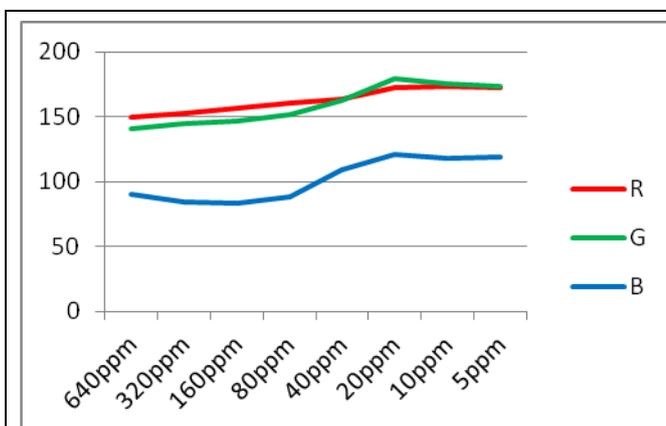


二甲基乙二醛二肟檢測 Ni<sup>2+</sup>的檢量線(G 值)

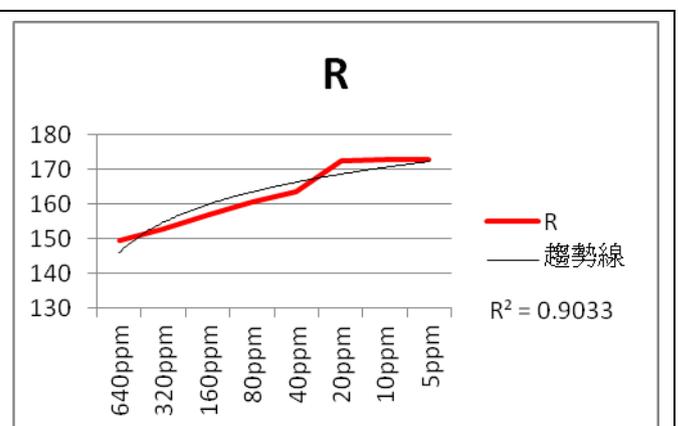
(七) 鉻酸鉀試紙檢測  $Mn^{2+}$  的檢量線

鉻酸鉀(0.25M)試紙與各濃度的  $Mn^{2+}$  反應圖

		
濃度 $Mn^{2+}$ 640ppm	濃度 $Mn^{2+}$ 320ppm	濃度 $Mn^{2+}$ 160ppm
		
濃度 $Mn^{2+}$ 80ppm	濃度 $Mn^{2+}$ 40ppm	濃度 $Mn^{2+}$ 20ppm
		
濃度 $Mn^{2+}$ 10ppm	濃度 $Mn^{2+}$ 5ppm	



鉻酸鉀試紙檢測  $Mn^{2+}$  的檢量線(RGB 值)



鉻酸鉀試紙檢測  $Mn^{2+}$  的檢量線(R 值)

## 附錄

### 九、社區廢水分析

#### (一) 採樣

地點	採樣圖	河川現況	分析結果
A		附近電鍍工廠林立，水質汙濁，水中無魚類，浮游生物及藻類	Fe <sup>3+</sup> ：252ppm Cu <sup>2+</sup> ：106ppm Ag <sup>+</sup> ：75ppm
B		水質較清澈，水面有水草、浮萍、荷花等植物，水中有浮游生物	無法測得
C		臨近電鍍工廠，河面遍佈垃圾、廢棄物，汙染嚴重	Fe <sup>3+</sup> ：246ppm Cu <sup>2+</sup> ：72ppm Ni <sup>2+</sup> ：144ppm
D		河水供農田灌溉，水中有藻類生長	無法測得

## 陸、討論

- 一、實驗 1 中，8 種顯色劑溶液與 11 種重金屬離子溶液的試管顯色反應結果顯示，黃血鹽與 Fe<sup>3+</sup>，Cu<sup>2+</sup>，Co<sup>2+</sup>，Cr<sup>3+</sup>，Ni<sup>2+</sup>，Hg<sup>2+</sup> 會有顯色反應而與其他離子則呈白色反應。赤血鹽則與 Fe<sup>3+</sup>，Cu<sup>2+</sup>，Co<sup>2+</sup>，Mn<sup>2+</sup>，Hg<sup>2+</sup> 有較明顯變色反應，與 Pb<sup>2+</sup> 產生白色反應，其他則較不易觀察出。鉻酸鉀溶液與 Fe<sup>3+</sup>，Cu<sup>2+</sup>，Co<sup>2+</sup>，Ag<sup>+</sup>，Mn<sup>2+</sup> 有變色反應，其他不易觀察出。硫氰化鉀與 Fe<sup>3+</sup>，Ag<sup>+</sup>，Co<sup>2+</sup> 輕微變色，但其他則無明顯變色。硫化鈉與 Cu<sup>2+</sup> 呈黃色反應，與 Zn<sup>2+</sup> 產生白色反應，與其他離子則多呈黑色或灰色反應。二甲基乙二醛二肼與 Ni<sup>2+</sup> 產生鮮艷粉紅色反應，與 Fe<sup>3+</sup>，Cu<sup>2+</sup>，Co<sup>2+</sup> 等有輕微變色，但不易觀察，其他則不變色。二苯卡巴脲與 Hg<sup>2+</sup> 產生鮮艷的藍紫色反應，與 Ag<sup>+</sup> 生成灰色反應，與 Fe<sup>3+</sup>，Cu<sup>2+</sup> 生成紅褐色反應，與其他離子則生成紫紅反應。 $\alpha$ -亞硝基- $\beta$ -萘酚則與 Fe<sup>3+</sup>，Co<sup>2+</sup>，Cr<sup>3+</sup>，Mn<sup>2+</sup>，Cu<sup>2+</sup> 有褐色反應，與其他離子則不易觀察變色情形。
- 二、實驗 2 中，染有顯色劑的試紙烘乾之後再滴入各種離子，反應結果顯示，黃血鹽與 Fe<sup>3+</sup>

產生深藍色反應，與  $\text{Cu}^{2+}$  產生紅棕色反應，與  $\text{Cr}^{3+}$  產生黃色反應，其他則效果不明顯，赤血鹽則與  $\text{Fe}^{3+}$  產生藍綠色反應，與  $\text{Mn}^{2+}$  產生褐色反應，與  $\text{Cu}^{2+}$ ， $\text{Co}^{2+}$  產生較淡褐色反應，其他則效果不明顯，鉻酸鉀與  $\text{Fe}^{3+}$ ， $\text{Cu}^{2+}$ ， $\text{Co}^{2+}$  有紅褐色反應，與  $\text{Ag}^+$  有咖啡色反應。硫化鈉與  $\text{Fe}^{3+}$ ， $\text{Cu}^{2+}$ ， $\text{Ag}^+$ ， $\text{Co}^{2+}$ ， $\text{Mn}^{2+}$ ， $\text{Hg}^{2+}$ ， $\text{Pb}^{2+}$  有灰色呈色反應，與  $\text{Cu}^{2+}$  有黃色反應。硫氰化鉀與  $\text{Ag}^+$  有灰色反應，與  $\text{Co}^{2+}$  出現藍色反應，與  $\text{Pb}^{2+}$ ， $\text{Hg}^{2+}$  有灰褐色反應，與  $\text{Ni}^{2+}$  有鮮粉紅反應，較為特殊，定性鑑別  $\text{Ni}^{2+}$  相當簡易。二苯卡巴脲與  $\text{Fe}^{3+}$ ， $\text{Cu}^{2+}$  產生紅褐色反應，與  $\text{Ag}^+$  產生灰色反應，與  $\text{Cr}^{3+}$  淡藍色反應，與  $\text{Hg}^{2+}$  明顯鮮藍紫色反應，較為特殊。 $\alpha$ -亞硝基- $\beta$ -萘酚與  $\text{Fe}^{3+}$ ， $\text{Cu}^{2+}$ ， $\text{Co}^{2+}$ ， $\text{Mn}^{2+}$ ， $\text{Cr}^{3+}$  都有呈色反應。

三、由實驗 3 之實驗圖決定各顯色劑之最佳顯色條件如下：黃血鹽 1M，鉻酸鉀 0.25M，赤血鹽 0.25M，二甲基乙二醛二脲 0.05M，硫氰化鉀 2M，二苯卡巴脲 0.05M， $\alpha$ -亞硝基- $\beta$ -萘酚 0.05M。

四、由實驗 2 之實驗圖，選擇呈色較清晰之組合，降低金屬離子濃度，至顯色不可辨別為止，由顯色圖得知，赤血鹽試紙可鑑別 100ppm 的  $\text{Fe}^{3+}$ ，黃血鹽試紙可鑑別 150ppm 的  $\text{Fe}^{3+}$ ，鉻酸鉀試紙可鑑別 150ppm 的  $\text{Ag}^+$ ，黃鹽試紙可鑑別 150ppm 的  $\text{Cu}^{2+}$ ，鉻酸鉀試紙可鑑別 200ppm  $\text{Mn}^{2+}$ ，二甲基乙二醛二脲可鑑別 50ppm 的  $\text{Ni}^{2+}$ ，二苯卡巴脲試紙可鑑別 200ppm 的  $\text{Hg}^{2+}$ ， $\alpha$ -亞硝基- $\beta$ -萘酚可鑑別 20ppm 的  $\text{Co}^{2+}$ 。但對其他離子則因呈色不清晰而有較難辨別之困難，其中  $\text{Zn}^{2+}$  與各種試紙均無明顯呈色，因此無法以試紙分析， $\text{Pb}^{2+}$  與各種試紙亦無明顯呈色而無法判斷， $\text{Cd}^{2+}$  滴入硫化鈉試紙中，若不烘乾則無顏色變化，但如果馬上烘乾則有黃色結果，是因產生黃色硫化鎘所致，但黃色反應不是很靈敏，判斷不易，亦難鑑別， $\text{Cr}^{3+}$  與黃血鹽試紙反應亦需馬上烘乾才得以有黃色反應，其他有相似情形者，如  $\text{Co}^{2+}$  與硫氰化鉀試紙反應亦需馬上烘乾才会有水藍色反應結果。而  $\text{Pb}^{2+}$  與鉻酸鉀試紙會產生黃色鉻酸鉛，但試紙底色為黃色，故無法判別，其他顯色劑與  $\text{Pb}^{2+}$  並無明顯呈色，故  $\text{Pb}^{2+}$  的檢驗有困難，曾嘗試在鉻酸鉀黃色試紙先染上紅色色素，但結果仍不可判別，對  $\text{Pb}^{2+}$  無法檢測。

五、8 種顏色劑試紙的顯色結果均已建立，其中硫化鈉試紙與  $\text{Co}^{2+}$  會有水藍色反應結果，但硫化鈉試紙若不是新製的試紙則再現性很差。因此硫化鈉試紙在實用上有困難，需新製之試紙才有效。

六、如果溶液系統只含單一離子或未見干擾離子存在，則可以檢測出  $\text{Fe}^{3+}$ ， $\text{Cu}^{2+}$ ， $\text{Ni}^{2+}$ ， $\text{Co}^{2+}$ ， $\text{Ag}^+$ ， $\text{Mn}^{2+}$ ， $\text{Hg}^{2+}$  等七種重金屬離子，其檢驗流程分別為：

$\text{Fe}^{3+}$ ：赤血鹽試紙→黃血鹽試紙→二苯卡巴脲試紙→ $\alpha$ -亞硝基- $\beta$ -萘酚試紙→硫氰化鉀試紙。

$\text{Cu}^{2+}$ ：赤血鹽試紙→黃血鹽試紙→二苯卡巴脲試紙→ $\alpha$ -亞硝基- $\beta$ -萘酚試紙。

$\text{Ni}^{2+}$ ：二甲基乙二醛二脲試紙→二苯卡巴脲試紙→ $\alpha$ -亞硝基- $\beta$ -萘酚試紙。

$\text{Co}^{2+}$ ：赤血鹽試紙→二苯卡巴脲試紙→ $\alpha$ -亞硝基- $\beta$ -萘酚試紙→硫氰化鉀試紙。

$\text{Ag}^+$ ：鉻酸鉀試紙→二苯卡巴脲試紙。

$\text{Mn}^{2+}$ ：赤血鹽試紙→鉻酸鉀試紙。

$\text{Hg}^{2+}$ ：赤血鹽試紙→鉻酸鉀試紙→二苯卡巴脲試紙。

七、如果水溶液為極複雜離子系統，如 11 種重金屬離子均存在情況下，則產生嚴重干擾，但其中二甲基乙二醛二脲試紙對  $\text{Ni}^{2+}$  顯色具專一性，在判斷  $\text{Ni}^{2+}$  離子並無困難，即使如此複雜之離子系統仍可判別。而硫氰化鉀試紙對  $\text{Fe}^{3+}$  亦具專一性，故為檢測複雜混合液中

$\text{Fe}^{3+}$ 的優良試紙。二苯卡巴脲試紙則對  $\text{Hg}^{2+}$ 較具特殊顏色，在判別複雜系統中  $\text{Hg}^{2+}$ 亦可鑑別。混合液之檢測流程可為：

$\text{Fe}^{3+}$ ：赤血鹽試紙→硫氰化鉀試紙→黃血鹽試紙→ $\alpha$ -亞硝基- $\beta$ -萘酚試紙。

$\text{Ni}^{2+}$ ：二甲基乙二醛二脲試紙。

$\text{Hg}^{2+}$ ：鉻酸鉀試紙→赤血鹽試紙→二苯卡巴脲試紙。

$\text{Cr}^{3+}$ ：黃血鹽試紙。

八、綜合以上實驗結論，設計成可攜帶式試紙計有  $\text{Fe}^{3+}$ ， $\text{Cu}^{2+}$ ， $\text{Ni}^{2+}$ ， $\text{Ag}^+$ ， $\text{Mn}^{2+}$ ， $\text{Hg}^{2+}$ ， $\text{Co}^{2+}$ ， $\text{Cr}^{3+}$ 等檢測試紙，其組合如下：

$\text{Fe}^{3+}$ 試紙：由赤血鹽、硫氰化鉀、黃血鹽、 $\alpha$ -亞硝基- $\beta$ -萘酚等試紙組合而成。

$\text{Cu}^{2+}$ 試紙：由赤血鹽、黃血鹽、二苯卡巴脲、 $\alpha$ -亞硝基- $\beta$ -萘酚等試紙組合而成。

$\text{Ni}^{2+}$ 試紙：二甲基乙二醛二脲試紙構成。

$\text{Ag}^+$ 試紙：由鉻酸鉀、二苯卡巴脲試紙組合而成。

$\text{Mn}^{2+}$ 試紙：由赤血鹽試紙、鉻酸鉀試紙組合而成。

$\text{Hg}^{2+}$ 試紙：由鉻酸鉀、赤血鹽、二苯卡巴脲試紙組合而成。

$\text{Co}^{2+}$ 試紙：由硫氰化鉀試紙構成。

$\text{Cr}^{3+}$ 試紙：由黃血鹽試紙構成。

九、暗箱底部最初為光面，閃光燈曝光時產生嚴重反光，造成照片無法呈像，底部墊上深藍色布之後，則能大幅改善反光的情形，照片呈像因而變的清晰。

十、以 ImageJ 軟體分析各種試紙與重金屬離子顯色的檢量圖，得到 R（紅），G（綠），B（藍）三種顏色的檢量圖，採用其中線性較佳者作為定量之用。

檢測組合	檢量線選擇
鉻酸鉀試紙+ $\text{Ag}^+$	B 值(藍)
黃血鹽試紙+ $\text{Fe}^{3+}$	B 值(藍)
黃血鹽試紙+ $\text{Cu}^{2+}$	B 值(藍)
二苯卡巴脲試紙+ $\text{Hg}^{2+}$	R 值(紅)
$\alpha$ -亞硝基- $\beta$ -萘酚試紙+ $\text{Co}^{2+}$	B 值(藍)
二甲基乙二醛二脲試紙+ $\text{Ni}^{2+}$	G 值(綠)
鉻酸鉀試紙+ $\text{Mn}^{2+}$	R 值(紅)

## 柒、結論

一、單一離子系統或較單純的水溶液系統，在定性 100ppm  $\text{Fe}^{3+}$ ，100ppm  $\text{Cu}^{2+}$ ，100ppm  $\text{Ni}^{2+}$ ，20ppm  $\text{Co}^{2+}$ ，100ppm  $\text{Ag}^+$ ，100ppm  $\text{Mn}^{2+}$ ，20ppm  $\text{Hg}^{2+}$ 七種離子具高正確性。

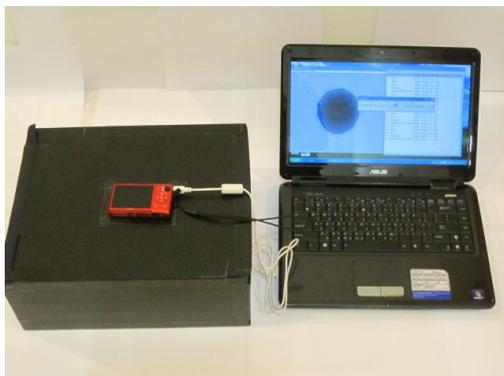
二、非常複雜之水溶液（如含 11 種重金屬離子）系統，可定性出  $\text{Fe}^{3+}$ ， $\text{Ni}^{2+}$ ， $\text{Hg}^{2+}$ ，亦具高正確性。亦可判斷出  $\text{Cr}^{3+}$ ，但需仔細觀察。

三、製作成  $\text{Fe}^{3+}$ ， $\text{Cu}^{2+}$ ， $\text{Ni}^{2+}$ ， $\text{Ag}^+$ ， $\text{Mn}^{2+}$ ， $\text{Hg}^{2+}$ ， $\text{Co}^{2+}$ ， $\text{Cr}^{3+}$ 攜帶式檢測試紙，具實用性，在檢驗時具簡單、快速、可攜帶、可在實驗室外操作之特性，可應用於定性分析。

四、自製檢測儀可應用在廢水的分析，或實驗室中需要檢驗某些重金屬離子時之用。

五、實驗所依原理為重金屬離子與顯色劑產生有色沉澱反應，或形成有色錯離子來判別。實驗原理與在實驗中進行情況相同，嘗試開發為檢測試紙之後，適用於某些重金屬離子的分析。

- 六、重金屬溶液檢測時以毛細管替代滴管或滴瓶，因毛細管口徑較小，溶液滴在檢測試紙較為集中，減少擴散現象，圖形清晰度明顯提昇。
- 七、真實樣品測試結果顯示社區中部份河川已遭受重金屬污染，這與社區中林立的電鍍工廠具地緣關係，自製重金屬檢測儀可作為社區污染現狀的檢測之用。
- 八、本研究自製重金屬檢測儀(如下圖)具有便宜、簡易、快速定量的優點。



圖一 自製重金屬檢測儀

## 捌、展望

- 一、本研究對於單一離子系統， $\text{Fe}^{3+}$ ， $\text{Cu}^{2+}$ ， $\text{Ni}^{2+}$ ， $\text{Co}^{2+}$ ， $\text{Ag}^+$ ， $\text{Mn}^{2+}$ ， $\text{Hg}^{2+}$ 等的鑑別具實用性。至於含兩種或兩種以上的重金屬離子溶液，尚待更進一步的研究，可針對不同重金屬組合的水溶液進行實驗流程探討歸納，提供具體的分析流程。
- 二、對於多種重金屬離子的混合溶液，以檢測試紙直接鑑別，若無法克服不同離子間的顯色干擾，可嘗試先以管柱分離法，將重金屬離子分離，再進行檢測。
- 三、檢測試紙開發完成之後，可多採集工廠廢水，進行真實樣品分析，除確立檢測試紙的實用性，並全面調查家鄉河川污染現況，為家鄉環境保護貢獻一份心力。

## 玖、參考資料

- 一、彭耀寰、孟憲宏、洪家隆。化學實驗。台北市：大中國圖書公司（民 84）。
- 二、賀孝雍、陶雨台。分析化學基本原理。台北市：曉園出版社（民 71）。
- 三、陳昭雄分析化學。台北市：文京出版社（民 83）。
- 四、國立臺灣師範大學化學系。普通化學實驗。台北市：東華書局（民 79）。
- 五、張哲政。化學上。台北縣：龍騰出版社（民 99）。
- 六、黃長司。基礎化學。台北縣：康熹文化出版社（民 99）。
- 七、陳秋炳。基礎化學。台南市：翰林出版社（民 99）。