

中華民國第 63 屆中小學科學展覽會
作品說明書

高中組 環境學科

佳作

052609

苧麻微流體檢測陰陽離子及染劑色素濃度

學校名稱：國立臺南女子高級中學

| | |
|---------------------------------|-----------------------------|
| 作者： 高二 宋佩容 高二 李佳怡 | 指導老師： 陳俊佑 陳禹巨 |
|---------------------------------|-----------------------------|

關鍵詞：線微流體、濃度檢測、苧麻

摘要

本實驗使用特殊處理過的苧麻線，開發便捷且可判斷濃度的模組。以簡單、方便的量測方法，利用色素及陰陽離子產物在苧麻線上的層析長度與溶液濃度之關係，有效判斷溶液濃度高低。此模組體積小、藥品用量少、成本低廉，用肉眼即可觀察且攜帶方便。本模組可以用於檢測 0.01g/L ~ 2 g/L 的剛果紅色素溶液、0.04g/L~2g/L 的亞甲藍色素溶液、0.01g/L~1g/L 的鉛離子溶液、0.01g/L ~ 1g/L 的硫氰酸鹽溶液。此簡易且低成本的模組可以降低工廠檢測汙水的成本，進而提高其意願去排出符合環保署標準的汙水。

壹、前言

一、研究動機

傳統上常用火焰式原子吸收光譜法^[1]來測量鉛離子濃度，而色譜法^[2]則可用於測量硫氰酸鹽溶液。儘管光譜法及色譜法具有許多優點，但操作技術要求高、成本高、分析時間長等缺點也不可忽視。因此，開發一種成本低、操作簡單且便於攜帶的替代技術成為本研究的動機。同時，汙水是一個攸關環境的重要議題，利用便宜、簡易的檢測方式可以幫助工廠控制污染物的濃度。出於這方面的考量，本研究參考微流體技術^[3]，運用特殊處理過的苧麻來建立可以量測剛果紅、亞甲藍、鉛離子、硫氰酸鹽四種物質濃度的模組。以簡單、方便的方式，有效判斷溶液的濃度。

本研究希望透過此微流體技術，利用苧麻等便宜材料建立出一組高效率、低成本且攜帶方便的濃度量測模組，並探討其適用範圍及未來可擴展性。

二、研究目的

- (一)、利用特殊處理過的苧麻，開發單次有效判斷溶液濃度的模組。
- (二)、調整苧麻的物理和化學特性，以滿足不同物質的檢測要求。
- (三)、最佳化模組的設計，以提高其量測穩定性和可靠性，同時降低成本和便於攜帶。

三、文獻回顧

(一)、實驗模組：

本研究所使用的實驗裝置為參考自美國化學教育期刊^[3]，但與該文獻的實驗裝置不同。本研究採用苧麻線材，並在兩端加上砝碼以固定張力，同時在陰陽離子實驗中固定烘乾線材之溫度。但該文獻僅進行三次重複實驗，數據過少難以確保其可重複性，且目前利用線微流體的層析長度來測量溶液濃度的模組仍不普及。本研究對每種濃度皆測量了三十組數據，以確保模組的可用性與實驗再現性。

在參考多篇文獻後，多數微流體的研究集中在研究高濃度 0.1 g/L 以上的樣品，其結果呈現出濃度與層析長度為線性關係。為了開拓線微流體的更多應用性，本研究決定將濃度範圍調整至更低濃度。在低濃度實驗數據中，發現結果有偏離線性趨勢的現象。同時，本研究也參考了少數進行 0.05g/L 至 0.1g/L 濃度範圍的研究，發現數據亦呈現偏離線性的趨勢。

(二)、色素的選擇：

剛果紅和亞甲藍是工業中常使用的染劑色素，染劑往往會影響陽光進入水源，進而影響水中生態系。剛果紅是一種無法快速生物降解的物質^[4]；亞甲藍會消耗大量水中溶氧量^[5]，造成環境汙染。剛果紅及亞甲藍染劑皆可能滲入皮膚，影響人體健康。

(三)、陰陽離子的選擇：

1. 鉛離子

鉛離子對環境的汙染可能會損害人體造血系統，引起貧血，以及損害人體神經系統，引起末梢神經炎，從而出現運動和感覺障礙^[6]。因此本組研究人員決定開發一種便宜的檢測濃度模組，讓工廠可以降低量測排放污水濃度的成本，更加願意排放符合環保署標準的污水。

2. 硫氰酸鹽

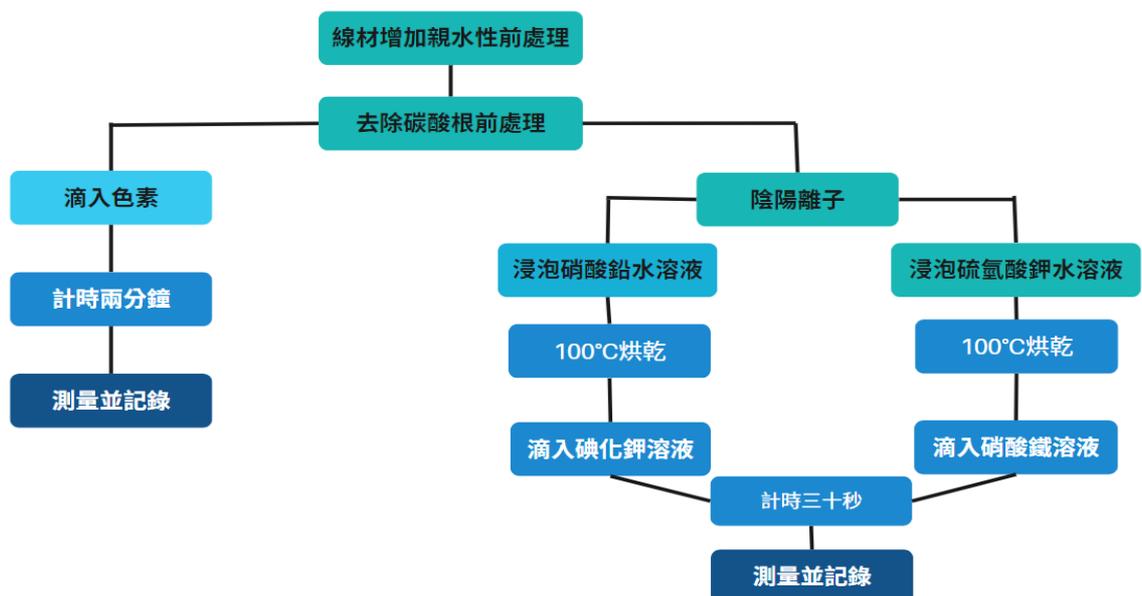
吸菸者吐出之二手菸含有硫氰酸鹽^[2]，長期吸入可能抑制甲狀腺激素、破壞神經系統，對於孕婦、小孩的影響尤為深刻。長期攝入硫氰酸鈉可能導致造成胃腸道損傷、腎炎等身體的危害^[7]。因為許多農業、工業活動會排放含有硫氰酸鹽的汙水，如此將汙染環境，影響人類服用的食品，本實驗操作人員決定開發一種可以簡單測量濃度的模組，快速的量測硫氰酸鹽的濃度。

貳、 研究設備及器材

- 一、試劑：碳酸鈉、亞甲藍、剛果紅、硝酸鉛、碘化鉀、硝酸、硝酸鐵、硫氰酸鉀
- 二、實驗器材：燒杯、容量瓶、移液管、安全吸球、加熱板、鑷子、刮勺、烘箱、碼表、電子秤
- 三、自製模組：珍珠板、定滑輪、砝碼(50 克)、苧麻、微量吸管、尺
- 四、黏度測量實驗所需器材：量筒、鋼珠、碼表

參、 研究過程或方法

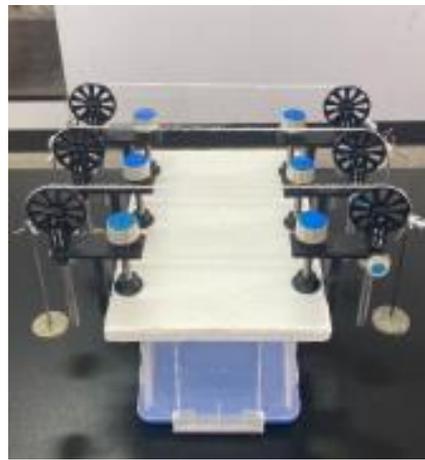
一、研究架構圖



二、研究模組

(一)、微流體模組

依參考文獻中^[3]的實驗裝置進行修改。在模組的兩端綁上 50 克砝碼以固定張力，並在兩側利用定滑輪固定線的位置。使用小箱子墊高模組，以防止砝碼碰到桌面進而導致張力不固定。在觀察和記錄數據時採用統一的方式，於固定時間後用肉眼觀察成色區域，使用直尺測量。圖(一)為模組示意圖。



圖(一) 模組示意圖

(二) 模組線材的選擇

本研究選擇了三種文獻中常使用的線材：棉線、羊毛和聚酯纖維，並增加了一種文獻中未曾提及的線材：苧麻。

棉纖維的機械強度高，潮濕時機械強度可以增加 25%。羥基的存在使棉線具有較高的親水性，回潮率低於 10%^[8]，然而，許多棉線在製作過程中常添加蠟和黏濁劑等疏水物質^[9]。在實驗操作中，即使運用碳酸鈉進行親水性處理後，所購買的棉線仍無法表現出親水性，因此被剔除。

羊毛纖維的蛋白質結構由 20 多種氨基酸組成，這些氨基酸部分地決定了其疏水性。在潮濕的條件下，羊毛的機械強度會降低 10-20%^[8]。因為羊毛纖維表面疏水鱗片的存在，使得水分子擴散困難。在嘗試親水性處理

後仍然表現出疏水性，因此被剔除。

聚酯纖維在吸收溶液後能交錯產生許多微米通道^[8]，透過毛細作用輸送流體，並且聚酯纖維在經過親水性處理後已親水。但由於聚酯纖維大多屬不可生物降解之材料，易導致大量使用後，對環境造成問題，因此被排除在實驗範圍之外。

苧麻大多由纖維素組成(68.6-76.2%)，其結構與棉相似，具有親水、機械強度高的特性^[10]。此外，苧麻是可以生物降解的，而且經過親水處理後也具有親水性。因此，苧麻被選為本實驗的線材。

三、研究原理

(一)微流體

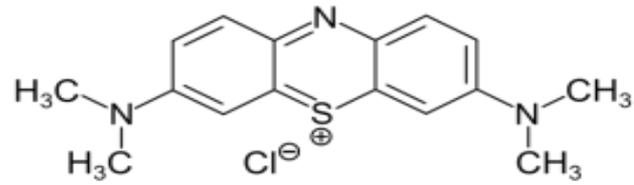
1. 定義：微流體是研究流體通過微流道的科學，也是製造微尺度設備如微流道的技術^[11]。
2. 特性：微流體中的流體與宏觀的流體相比，所需反應體積小、檢測劑量少、成本低^[12]。微流體系統是很有規律的流體系統，其雷諾數(Re)較小，這種性質在微流體裝置中，會導致層流而非湍流，透過毛細作用力驅動流體，而不需要外部幫浦。在層流中，因為黏滯力^[13]的作用水平表面上的層流與彼此是相對靜止的，但與其他層都有相對運動，因此被視為是由相互平行的薄層所組成。

(二)線微流體：線微流體裝置利用線材建造流體通道，以執行各種分析測量。線本身具毛細作用力，且其狹窄毛細管狀通道可作為微流道。線微流體具有低藥品消耗、低成本、操作簡單、模組體積不大、易於生物降解、輸送溶液不需外部幫浦、在潮濕環境機械強度高等優點^[11]。與紙張相比，線能以較低成本取得不同的材料^[14]，如苧麻、棉線、聚酯纖維等。

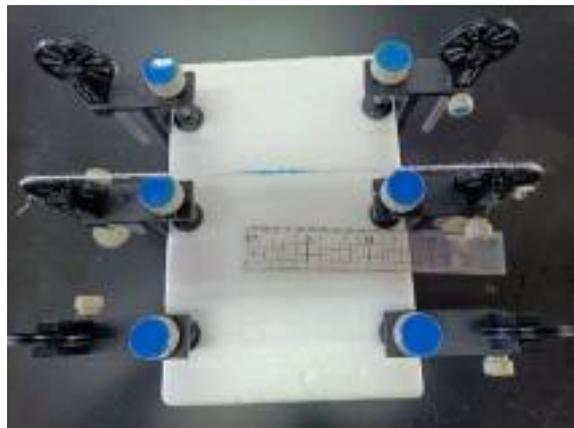
(三)量測模組：利用定滑輪架設線微流體模組，以固定張力。利用微流體的特性測量色素或陰陽離子在苧麻上層析的長度，對應樣品之濃度含量。

1. 色素

(1.) 亞甲藍：常見衣服染料

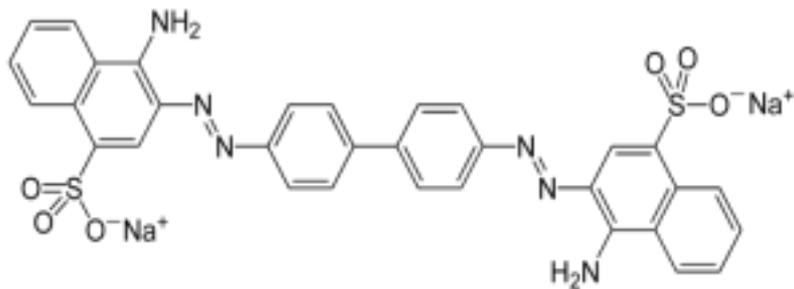


圖(二) 亞甲藍之結構式^[15]

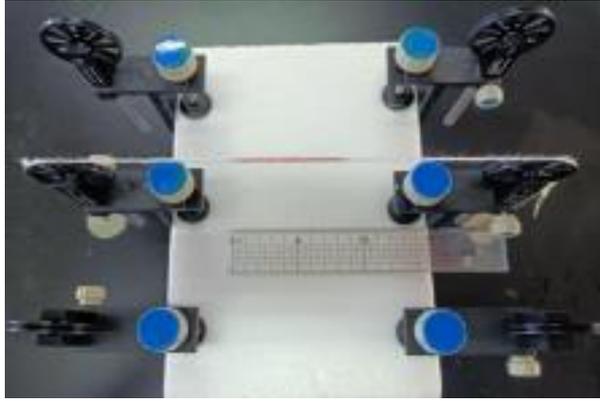


圖(三)：亞甲藍線微流體模組示意圖

(2.) 剛果紅：常見衣服染料



圖(四)：剛果紅之結構式^[16]

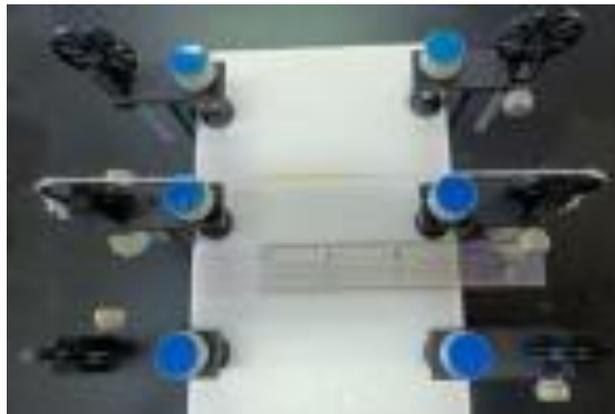
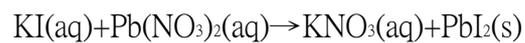


圖(五)：剛果紅線微流體模組示意圖

- (3.) 雖然無亞甲藍及剛果紅之偶極矩數據，但是如果以對水溶解度來評估兩者之極性。因剛果紅對水溶解度大於亞甲藍^{[17][18]}。從實驗中發現在同濃度下，剛果紅移動的距離較亞甲藍遠。

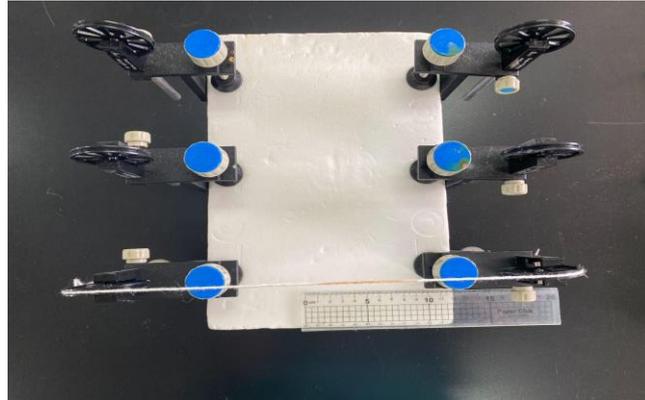
2. 陰陽離子

- (1.) 鉛離子：透過鮮黃色的碘化鉛測量鉛離子的濃度。



圖(六)：鉛離子線微流體模組示意圖

(2.) 硫氰酸鹽：透過黃棕色的硝酸鐵測量硫氰酸鹽的濃度。



圖（七）：硫氰酸鹽線微流體模組示意圖

(四) 親水性處理

線在製作過程中常添加蠟和黏濁劑等疏水物質^[9]，故在製造微流體裝置之前，應通過親水性處理製備線材，使水溶液能滲透到螺紋纖維中並在螺紋上流動^[16]。這些線先浸泡在 0.1 mol/L $\text{Na}_2\text{CO}_3(\text{aq})$ 溶液中，溫度維持在 100°C ，浸泡時間為 1 小時，然後用水清洗，即完成親水性處理。

(五) 硝酸去碳酸根處理

在步驟(四)以 $\text{Na}_2\text{CO}_3(\text{aq})$ 溶液做線材的親水性處理，但在之後的研究中有運用到陰陽離子的沉澱反應，所以如果經清洗後仍殘餘碳酸根，會形成額外的碳酸鹽類沉澱物，進而影響後續研究。因此將親水處理後的線材，浸泡硝酸溶液 20 分鐘後，去除殘留碳酸根，減少後續實驗的誤差。

四、研究設計

- (一)文獻探討
- (二)建立模組
- (三)選擇線材
- (四)調整親水處理
- (五)染劑色素濃度檢測
- (六)陰陽離子濃度檢測

五、研究方法與步驟

(一) 製作模組

1. 將一片 10mm 的珍珠板與一片 7mm 的珍珠板以雙面膠黏。
2. 將 3 組定滑輪固定在兩側，用小箱子墊高。
3. 在繩子左右兩端綁上各 50 克的砝碼。

(二) 線材前處理

1. 將苧麻浸泡於 0.1M 碳酸鈉溶液，維持 100°C 並浸泡 1 小時。
2. 將苧麻浸泡於 1M 硝酸溶液，以超音波震動 20 分鐘。
3. 苧麻透過烘箱以 100°C 烘乾。於室溫冷卻後，即可用於染劑色素量測實驗。
4. 在進行陰陽離子沉澱實驗前，將苧麻浸泡於各實驗濃度的硝酸鉛溶液或硫氰酸鉀溶液中。並於 100°C 下，以烘箱烘乾。



圖(八)



圖(九)



圖(十)

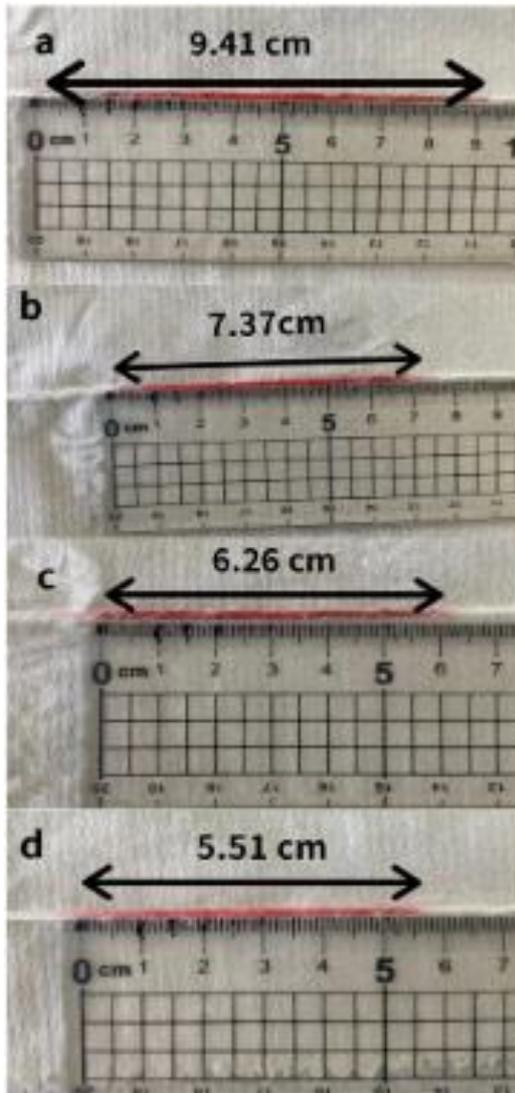
圖(八): 苧麻浸泡於 100°C 碳酸鈉

圖(九): 苧麻浸泡於 1M 硝酸溶液，以超音波震動

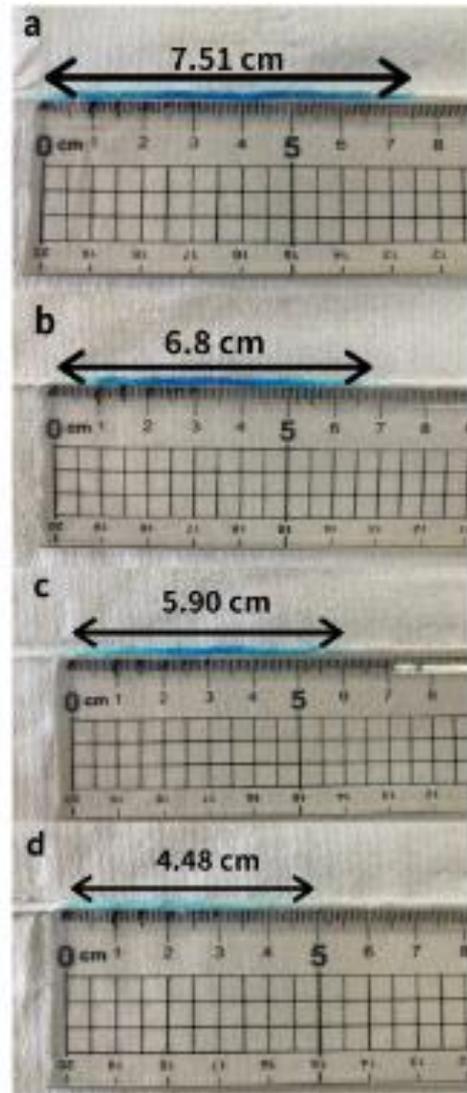
圖(十): 苧麻透過烘箱以 100°C 烘乾

(三) 微流體分離實驗

1. 以微量滴管吸取 50 微升之待測物，以垂直於線材的角度，滴入色素溶液、硝酸鐵或是碘化鉀溶液。
2. 以手機計時，色素計時 2 分鐘，陰陽離子計時 30 秒，拿尺以肉眼量取長度並記錄。
3. 以平均值找出層析長度與溶液濃度的關係及其相關係數與 95% 信賴區間，並用 CV 值確認其離散程度。



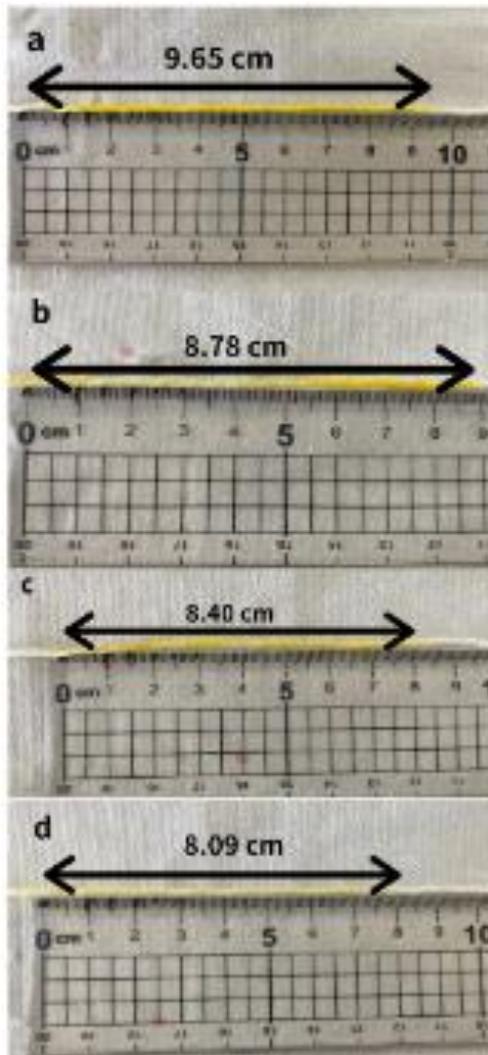
圖(十一)



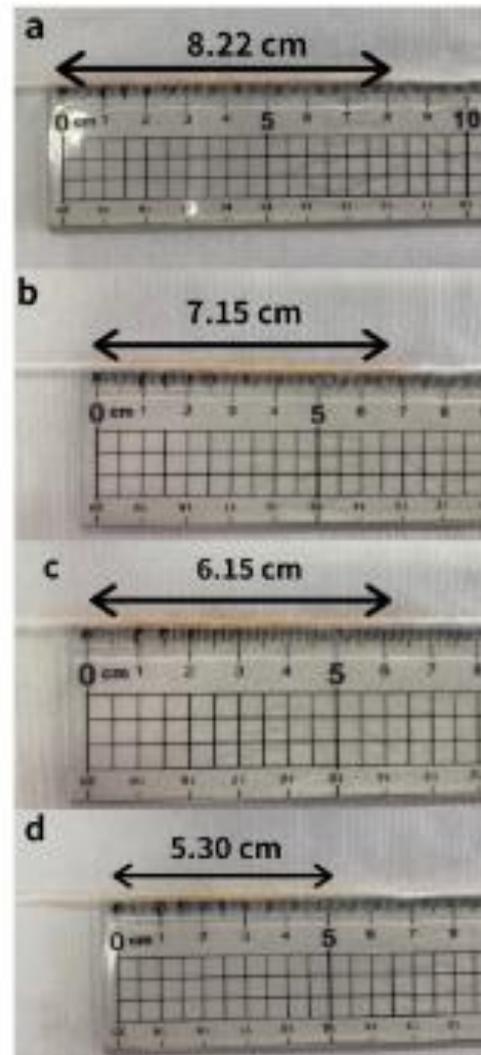
圖(十二)

圖(十一): 剛果紅色素的層析長度。(a)圖濃度為 2g/L (b)圖濃度為 1g/L
(c)圖濃度為 0.5g/L (d)圖濃度為 0.25g/L

圖(十二): 亞甲藍色素的層析長度。(a)圖濃度為 2g/L (b)圖濃度為 1g/L
(c)圖濃度為 0.5g/L (d)圖濃度為 0.25g/L



圖(十三)



圖(十四)

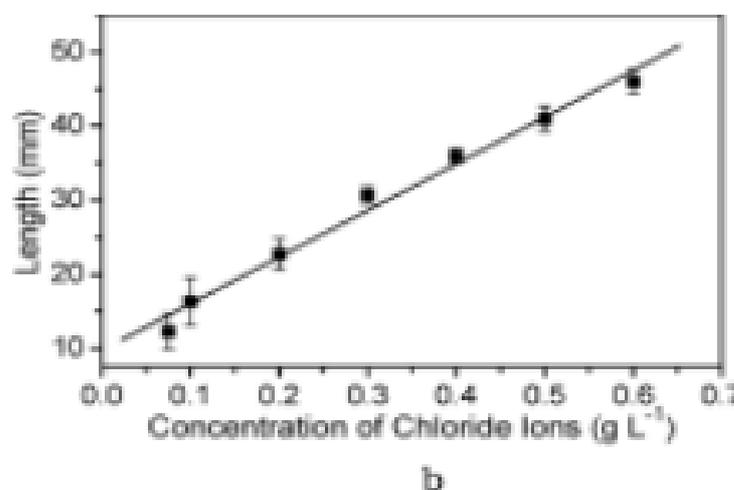
圖(十三): 鉛離子溶液的層析長度。(a)圖濃度為 1g/L (b)圖濃度 0.5g/L
(c)圖濃度為 0.25g/L (d)圖濃度為 0.1g/L

圖(十四): 硫氰酸鹽溶液的層析長度。(a)圖濃度為 1g/L (b)圖濃 0.5g/L
(c)圖濃度為 0.25g/L (d)圖濃度為 0.1g/L

肆、 研究結果

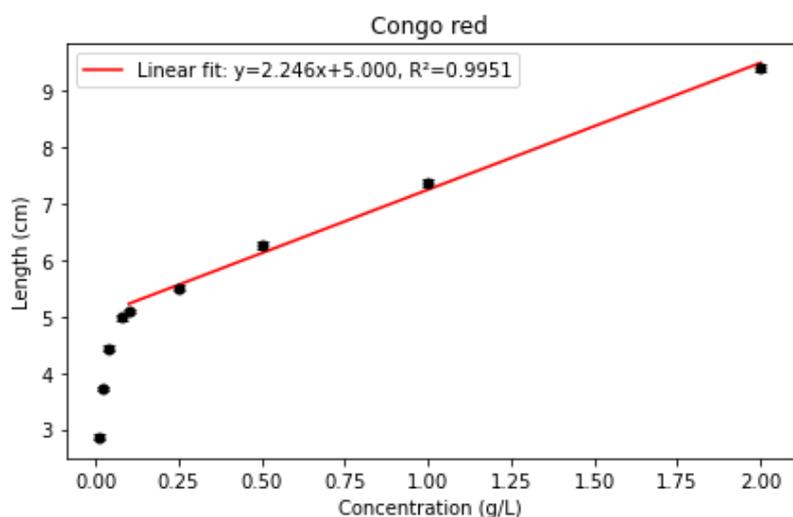
以現今的研究主流，目前大部分測量溶液濃度的實驗，多是利用比色法，然而比色法測量一般都依賴電子設備。不同廠牌的儀器將可能造成飽和度、色調等的差異，因此降低其可靠度^[14]。此外，一般的線微流體實驗皆從 0.1g/L，由低往高濃度進行實驗，且實驗結果大多為線性關係。

從文獻數據的散佈圖中發現，少數進行濃度量測之微流體實驗，當實驗範圍於濃度 0.1g/L 至 0.05g/L 之間時，其數據有偏離線性趨勢線的趨勢，如圖(十五)。此一現象引起我們的興趣。因此，本研究決定往更低的濃度進行實驗。在剛果紅色素及鉛離子的實驗中，其結果顯示：在低於 0.1 g/L 的剛果紅色素及鉛離子溶液，於微流體上層析之長度，逐漸偏離 0.1g/L 以上濃度之線性趨勢線。



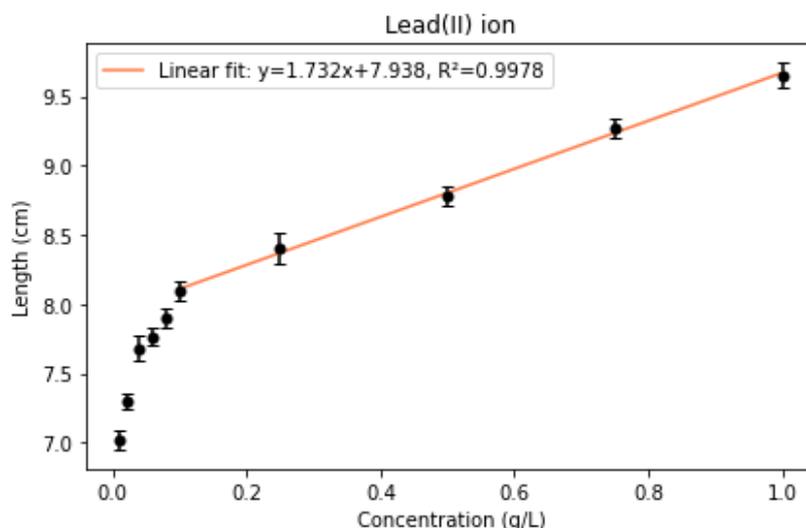
圖(十五)

圖(十五)源於文獻^[3]，其中可以清楚看到一個低於 0.1g/L 的數據點有偏離趨勢線的趨勢。



圖(十六)

圖(十六)為剛果紅色素的實驗結果，其線性趨勢線從 0.1g/L 的濃度往高濃度，達本實驗所操作的最高濃度 2g/L。其中，圖表所使用之數據，為經過 30 次實驗後的平均值。其誤差線範圍為 30 個數據的 95%信賴區間，判定係數(R^2)為 0.9951。其中，剛果紅的誤差線(error bar)不明顯之原因在於剛果紅實驗中，微流體上的顯色長度跨度大，而 95%之信賴區間僅約為 0.06 公分，而其低濃度明顯偏離高濃度線性趨勢線的趨勢，與文章^[3]之趨勢相似。

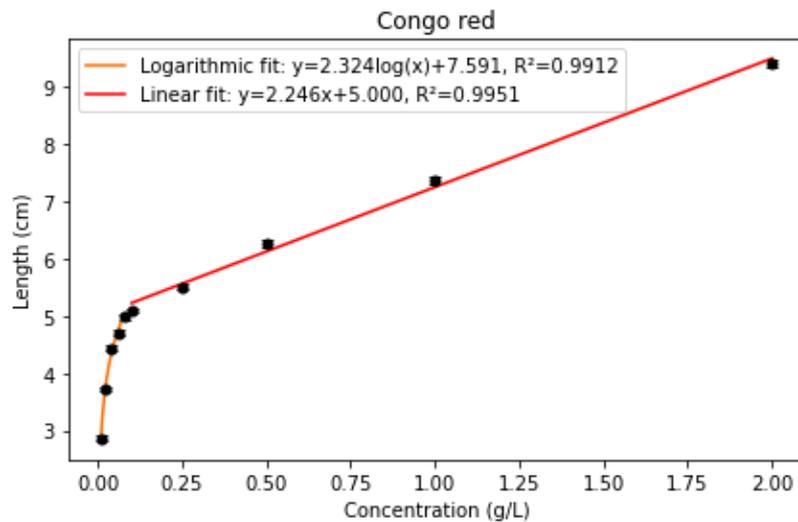


圖(十七)

圖(十七)為鉛離子的實驗結果。其線性趨勢線也是從 0.1g/L 的濃度往高濃度，達本實驗所操作的最高濃度 1g/L。其中，圖表所使用之數據，為經過 30 次實驗後的平

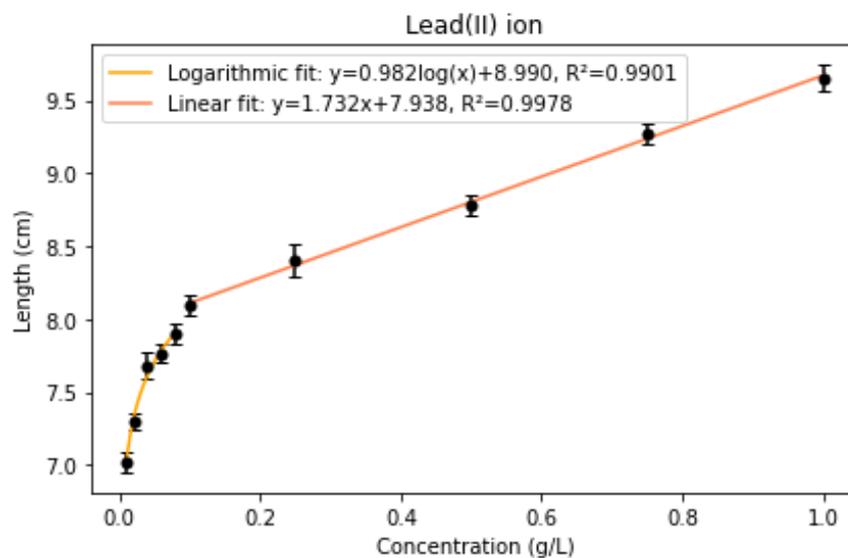
均值。其誤差線範圍為 30 個數據的 95%信賴區間，而其判定係數(R^2)為 0.9978。同樣，其低濃度明顯偏離高濃度線性趨勢線的趨勢，與文章^[3]之趨勢相似。

觀察剛果紅及鉛離子的低濃度數據，經數據分析發現，兩者低濃度的最佳趨勢線為對數趨勢線，且其判定係數(R^2)皆高達 0.99，如圖(十八)、圖(十九)



圖(十八)

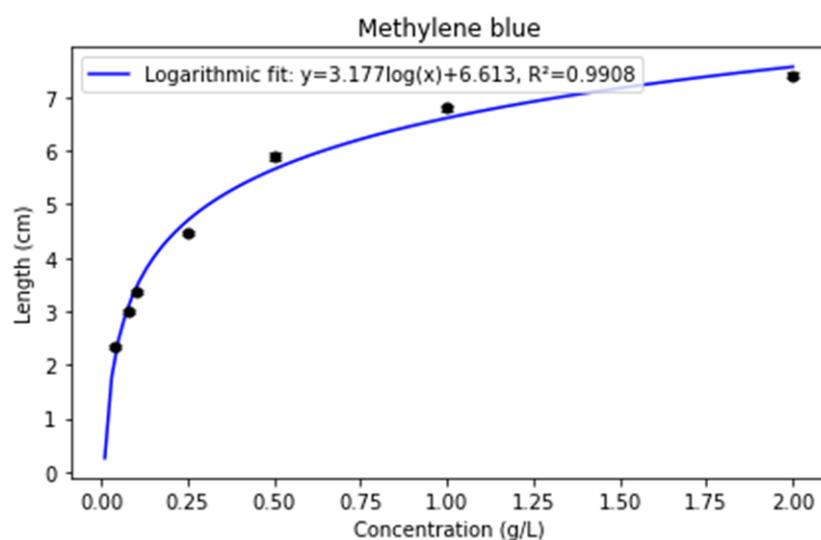
圖(十八)為剛果紅色素的實驗結果，其對數趨勢線為從 0.08g/L 的濃度往低濃度進行實驗。本實驗所操作的最低濃度為 0.01g/L，其中，圖表之數據為經過 30 次實驗之平均值，其誤差線範圍為 30 個數據的 95%信賴區間，而其判定係數(R^2)為 0.9912。誤差線不易發現，其原因依然為在剛果紅的實驗中，微流體上的顯色長度跨度大，而 95%之信賴區間僅約為 0.05 公分。



圖(十九)

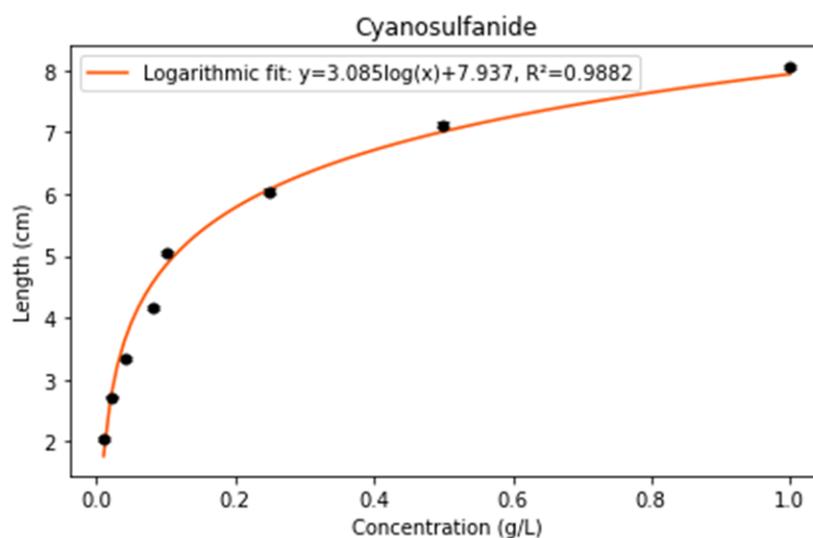
圖(十九)為鉛離子的實驗結果，其對數趨勢線為從 0.08g/L 濃度往低濃度進行實驗，到達本實驗所操作的最低濃度為 0.01g/L，其中，圖表之數據為經過 30 次實驗之平均值，其誤差線範圍為 30 個數據的 95%信賴區間，而其判定係數(R^2)為 0.9901。

測量亞甲藍色素、硫氰酸鹽濃度與微流體上的層析長度之關係，與剛果紅及鉛離子實驗不同之處在於，其實驗結果的散佈點，整體具對數趨勢。



圖(二十)

圖(二十)為亞甲藍的實驗結果，實驗檢測限度為 0.04g/L，自 0.04g/L 到 2g/L，其散佈點趨勢為對數趨勢線。其中，圖表之數據為經過 30 次實驗之平均值，其誤差線範圍為 30 個數據的 95%信賴區間，判定係數(R^2)為 0.9908。亞甲藍的實驗結果圖表中看不出誤差線，因為在亞甲藍的實驗中，微流體上的層析長度跨度大。



圖(二十一)

圖(二十一)為硫氰酸鹽的實驗結果，實驗濃度自 0.01g/L 到 2g/L，其整體散佈點的最佳趨勢線為對數趨勢線。其中，圖表之數據為經過 30 次實驗之平均值，其誤差線範圍為 30 個數據的 95%信賴區間，判定係數(R^2)為 0.9882。其中，硫氰酸鹽的實驗結果圖表中誤差線不明顯的原因為，實驗中微流體上的層析長度跨度大，而 95%之信賴區間僅約為 0.04 公分。

在剛果紅、亞甲藍、鉛離子及硫氰酸鹽的線微流體實驗中，皆具有合理 CV 值 (5%以下)、較高的判定係數(R^2)。因此，本實驗藉由簡易模組以肉眼觀測，無須定量環境之溫度、濕度，便可製作出具有量測可靠的檢測模組。

從上述數據發現剛果紅色素及鉛離子的最佳趨勢線與亞甲藍及硫氰酸鹽的最佳趨勢線不同，為了找尋其相異之原因，實驗研究人員決定從微流體的特性著手分析。微流體的最大特色為層流，而影響層流最主要的因素為黏滯力，查閱了相關文獻^[19]，決定以黏性作為解釋數據的突破口。實驗操作人員製作了剛果紅色素及亞甲藍色素的黏度實驗，實驗操作及實驗結果如下。



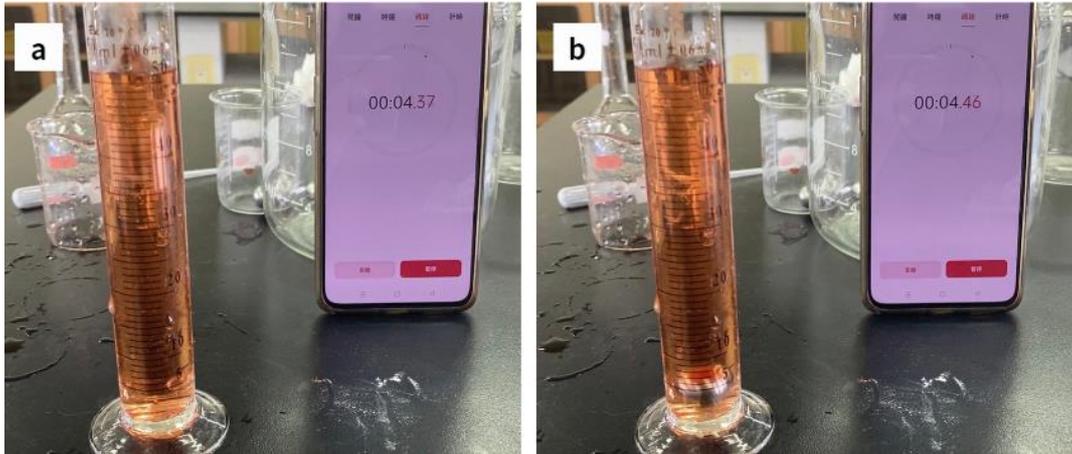
圖(二十二)

圖(二十二)為黏度實驗之示意圖，實驗研究人員紀錄鋼球自 50 毫升量筒之溶液表面至量筒底部的時間。利用公式(1)計算的溶液之黏度，所需器材為一個 50 毫升的量筒、1 個小鋼球、計時器、50 毫升之待測溶液。

$$\mu = \left(\frac{2}{9}\right) * \frac{r^2 * g(\rho_s - \rho_f)}{V_s} \text{-----(1)}$$

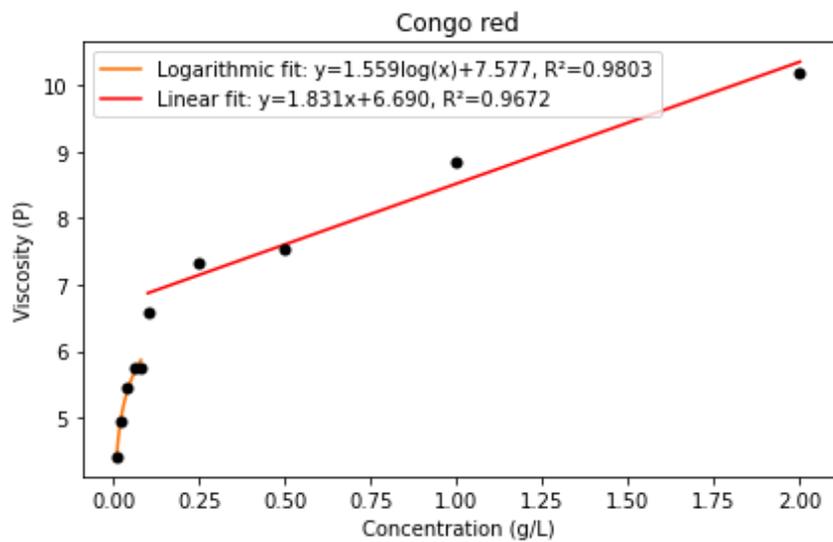
μ 為黏度，單位(P)； r 為鋼球半徑，單位(cm)； g 為重力常數=981(cm/s)； V_s 為鋼球之終端速度。因量筒高度僅 11.6 公分，以平均速度近似之，故為量筒

總高度/鋼球用時，單位為(cm/s)； ρ_s 為鋼球之密度，單位(g/cm^3)； ρ_f 為鋼球之密度，單位(g/cm^3)



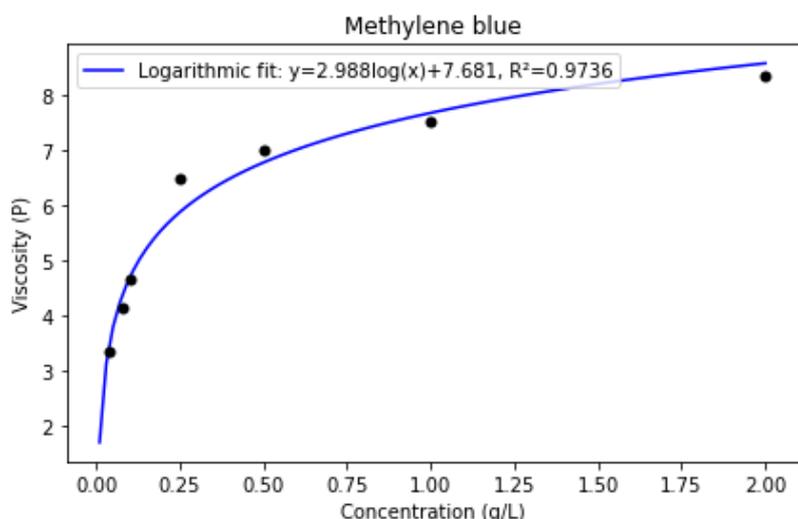
圖(二十三)

圖(二十三)為實驗過程之示意圖。圖(a)為鋼球進入水面的瞬間；圖(b)為鋼球到達底部的瞬間。以此圖為例，鋼球用時為 0.09 秒。



圖(二十四)

圖(二十四)為剛果紅黏度的測量結果，每個數據點為 3 次重複實驗的平均值，其結果與剛果紅層析實驗之最佳趨勢線具有相同的趨勢。



圖(二十五)

圖(二十五)為亞甲藍黏度的測量結果，每個數據點為 3 次重複實驗的平均值，其結果與亞甲藍層析實驗之最佳趨勢線具有相同的趨勢。

綜合剛果紅及亞甲藍黏度實驗的結果，黏度與層析長度有相似的结果趨勢圖，由此可知，以黏度解釋層析長度的趨勢是可行的。

伍、 討論

一、數據分析

大部分利用層析長度測量溶液濃度的線微流體研究文獻中，往往沒有提供完整的實驗數據及數據散佈圖和趨勢線。為了將線微流體應用於汗水檢測，本研究的操作人員將剛果紅、亞甲藍、鉛離子和硫氰酸鹽的實驗濃度降低，以測試苧麻線微流體的偵測極限。研究結果中，亞甲藍的最低肉眼檢測限度為 0.04g/L。

同時，將剛果紅及鉛離子的實驗數據與少數具有數據散佈圖的文獻之趨勢線進行對照，發現低於 0.1g/L 的層析長度與溶液濃度之間的關係，與 0.1g/L 以上之線性趨勢線逐漸偏離。剛果紅及鉛離子 0.01g/L 至 0.08g/L 的長度與濃度之間的關係更趨近於對數趨勢線，判定係數(R^2)高達 0.99。同時，為了解釋不同物種之間的數據趨勢相異，研究人員製作溶液黏性實驗，結果顯示溶液黏性與數據的趨勢相近。因此，溶液黏性可以作為預先判斷線微流體實際量測的結果。

二、本研究與參考文獻中以層析長度測量濃度線微流體實驗相異之處

(一)、線材不綁結

在利用層析長度測量溶液濃度的線微流體文獻中，其裝置由中間有結的平行線材構成，因此其分析物將先堆積在結中，接著以毛細作用力向線的兩端流動。然而，此操作無法定量其綁成結的線材長度，且結內體積無法定量，結中完全吸收其分析物的時間也不一致。相反，本實驗中的線材不綁結，分析物直接滴入線材，層析出的分析物長度成為本實驗之數據。

(二)、線微流體模組中定量張力、烘乾溫度

在利用層析長度測量溶液濃度的線微流體實驗中，其操作簡單且肉眼可觀察的特性^[3]，使得實驗較難定量化。L. Cai et al.^[3]未提供定量張力的方法，然而，張力可能會影響線材的截面積，進而影響測量長度。因此，本組在線材的兩端綁上 50 克的砝碼以定量張力。此外，L. Cai et al.^[3]在離子沉澱的實驗僅以定量時間風乾固定向。風乾時其溫度無法控制，固定向風乾後濕度不一，可能導致模組狀況不一致。本研究將線材浸泡於待測溶液後，以烘箱定溫 100°C 烘乾，可提高模組的穩定性。

三、利用層析長度測量溶液濃度的線微流體之突破

文獻回顧上，僅有一篇以層析長度測量溶液濃度的線微流體實驗^[3]，有呈現數據散佈圖，其實驗所得到的最低濃度介於 0.05g/L-0.1g/L 之間。其最低濃度明顯的偏離趨勢線。本組所有實驗的最低濃度皆低於 0.05g/L，這是對於利用肉眼觀測和操作簡單的模組的突破。此外，本研究發現，在 0.01g/L-0.08g/L 之間，剛果紅色素和鉛離子的最佳趨勢線不是直線，而是對數線。然而，當濃度超過 0.01g/L 時，其關係為線性。而亞甲藍色素及硫氰酸鹽在 0.04g/L-2g/L 及 0.01g/L-1g/L 之間的最佳趨勢線則是對數線。

文獻回顧上，利用層析長度觀測實際溶液濃度的實驗皆未說明數據呈現線性關係的物理原理。然而，本研究以線微流體之層流特性，尋找影響層析長度與溶液濃度的因素。不同濃度溶液之黏度數據與線微流體層析數據趨勢相近。因此，在分析線微流體數據時，可以用黏度數據作為交錯分析。

在本研究中，自製模組因其肉眼觀察的限制無法應用於環保署之鉛離子放排之標準^[20]。然而，此簡易模組可應用於工廠內之自我污水檢測。以此便宜、簡單的模組初步確認污水濃度，使工廠便於添加適量試劑移除污染源，降低工廠反覆送測的成本。如此，工廠有較大的意願排放符合環保署限制濃度之污水。

陸、 結論

根據本實驗的結果，我們發現剛果紅、鉛離子、亞甲藍和硫氰酸鹽在自製的模組中微流體層析長度與濃度具有高度相關趨勢關係。在剛果紅色素實驗中，0.1g/L-2g/L 的剛果紅濃度與層析長度為線性關係，而在 0.01g/L-0.08g/L 濃度範圍內，則為對數關係；在鉛離子實驗中，0.1g/L-1g/L 的鉛離子濃度與層析長度呈現線性關係，而在 0.01g/L-0.08g/L 濃度範圍內，則為對數關係。在亞甲藍色素實驗中，0.04g/L-2g/L 濃度與長度之關係整體為對數關係；硫氰酸鹽實驗中，0.01g/L-1g/L 濃度與長度之關係為對數關係。所有這些關係都具有高於 0.98 的判定係數(R^2)和合理的變異係數(CV 值)，顯示利用層析長度測定溶液濃度是一種可行的方法。從線微流體的層流特性，發現黏度可以解釋線微流體之層析長度與實際濃度的趨勢。因此，對於分析數據趨勢的判斷多了一個標準。

本研究通過自製的模組配合線微流體，製作了一種低成本的方法，可以用層析長度觀測實際溶液濃度。這種方法可以為缺乏優質水質檢測設備的國家提供幫助，同時也可以降低工廠使用過量移除污染物試劑的成本，提高工廠的意願去排出符合環保署標準之污水。

柒、 參考文獻資料

1. 行政院環境保護署(2014年9月12日)。水中銀、鎳、鉻、銅、鐵、錳、鎳、鉛及鋅 檢測方法—火焰式原子吸收光譜。
2. S. Wirojsaengthong, D. Aryuwananon, W. Aeungmaitrepirom, B. Pulpoka. A colorimetric paper-based optode sensor for highly sensitive and selective determination of thiocyanate in urine sample using cobalt porphyrin derivative. *Volume 231, 15 August 2021, 122371*.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0039914021002927>
3. L. Cai, Z. Ouyang, X. Huang, C. Xu, Comprehensive Training of Undergraduates Majoring in Chemical Education by Designing and Implementing a Simple Thread-Based Microfluidic Experiment. *J. Chem. Educ., 2020, 97, 1566–1571*.
<https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.9b01201>
4. Chikang Wang, Kuan-Yun Liao. Decolorization and Mineralization of Congo Red Dyeing Wastewater by UV/O₃ Process. *Journal of Health Management Vol. 14, No. 2, December 2016 pp. 11 - 22* <https://libap.nhu.edu.tw:8081/Ejournal/AD01140202.pdf>
5. Jian-Zhong Guo, Bing Li, Li Liu, Kangle Lv. Removal of methylene blue from aqueous solutions by chemically modified bamboo. *Chemosphere Volume 111, September 2014, Pages 225-231*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S004565351400486X>
6. 巫鴻章、施錫璋、陳欣佑、張瓊尹、林畢修平(2009年12月)水環境中重金屬銅鉛污染生物快速檢測技術暨產品開發。工業污染防治，112，41-68。
<https://reurl.cc/qLmoEN>
7. 列管關注化學物質及其運作管理事項修正草案總說明(2020年10月30日)
8. D. Agustini, F. R. Caetano, R. F. Quero, J. A. Fracassi da Silva, M. F. Bergamini, L. H. Marcolino-Junior, D. P. de Jesus, Microfluidic devices based on textile threads for analytical applications: state of the art and prospects. *Anal. Methods, 2021,13, 4830-4857*.
<https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2021/ay/d1ay01337h>

9. A. Prabhu, H. Singhal, M.S. Giri Nandagopal, R. Kulal, P.P. Yegneswaran, N. K. Mani. Knitting Thread Devices: Detecting *Candida albicans* Using Napkins and Tampons. *ACS Omega*, 2021, 6(19), 12667-12675. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsomega.1c00806>
10. Zhao-Tie Liu, Yani Yang, Lili Zhang, Ping Sun, Zhong-Wen Liu, Jian Lu, Heping Xiong, Yuande Peng, Shouwei Tang, Study on the performance of ramie fiber modified with ethylenediamine. *Carbohydrate Polymers*, 2008, 71,(1), 18-25
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S014486170700255X>
11. Microfluidics: A general overview of microfluidics Definition of microfluidics. *ELEV FLOW*. <https://www.elveflow.com/microfluidic-reviews/general-microfluidics/a-general-overview-of-microfluidics/>
12. X. Weng, Y. Kang, Q. Guo, B. Peng, H. Jiang. Recent advances in thread-based microfluidics for diagnostic applications. *Biosensors and Bioelectronics Volume*, 2019, 132(1), 171-185. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956566319301903>
13. 黃一玄。黏度（或稱黏滯性）。科學 Online。
<https://highscope.ch.ntu.edu.tw/wordpress/?p=59367>
14. A. Nilghaz, D. R. Ballerini, X.-Y. Fang, W. Shen. Semiquantitative analysis on microfluidic thread-based analytical devices by ruler. *Sensors and Actuators*, 2014, 191(B), 586 – 594.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925400513012094>
15. 維基百科—亞甲藍
16. 維基百科—剛果紅
17. Methylene blue. Sciencemadness Wiki.
https://www.sciencemadness.org/smwiki/index.php/Methylene_blue
18. Congo Red. *TOCRIS*. https://www.tocris.com/products/congo-red_5167
19. Michael A. Soltys. *Measuring Viscosity*. TeachEngineering.
https://www.teachengineering.org/activities/view/cub_surg_lesson03_activity1?fbclid=IwAR1rG30ojPguYfhKFt-p7UWFYDWX1JYV1_8SxtQto-J6cUyvNm7TygVMZUI
20. 行政院環境保護署環署水字第 1030005842 號令修正發布第二條條文(2014 年 1 月 22 日)

捌、附錄

一、附錄 1. 剛果紅色素不同濃度之層析長度數據

| 序號 | 濃度 ppm 長度cm | 資料區 | | | 公式區 | | | 自動繪圖 | | | | |
|-------------------------------|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|
| | | 10 | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | |
| 1 | | 3.05 | 3.80 | 4.15 | 4.75 | 5.00 | 5.05 | 5.35 | 6.45 | 7.30 | 9.40 | |
| 2 | | 2.80 | 3.55 | 4.50 | 4.60 | 4.80 | 5.10 | 5.60 | 6.20 | 7.45 | 9.55 | |
| 3 | | 2.70 | 3.80 | 4.30 | 4.70 | 4.95 | 5.20 | 5.70 | 6.30 | 7.10 | 9.50 | |
| 4 | | 2.90 | 3.70 | 4.50 | 4.90 | 5.20 | 5.30 | 5.40 | 6.30 | 7.20 | 9.25 | |
| 5 | | 2.80 | 3.80 | 4.55 | 4.55 | 5.00 | 5.00 | 5.45 | 6.00 | 7.15 | 8.90 | |
| 6 | | 2.80 | 3.60 | 4.50 | 4.70 | 4.95 | 5.05 | 5.30 | 6.15 | 7.60 | 9.30 | |
| 7 | | 2.75 | 3.60 | 4.30 | 4.65 | 5.30 | 5.15 | 5.50 | 6.00 | 7.35 | 9.30 | |
| 8 | | 2.80 | 3.50 | 4.60 | 4.80 | 5.20 | 5.30 | 5.50 | 6.20 | 7.20 | 9.30 | |
| 9 | | 2.80 | 3.95 | 4.20 | 4.80 | 5.05 | 5.20 | 5.60 | 6.50 | 7.20 | 9.65 | |
| 10 | | 3.00 | 3.70 | 4.50 | 4.50 | 5.25 | 5.00 | 5.65 | 6.45 | 7.60 | 9.60 | |
| 11 | | 2.70 | 3.75 | 4.55 | 4.80 | 4.80 | 4.90 | 5.20 | 6.30 | 7.25 | 9.35 | |
| 12 | | 2.80 | 3.70 | 4.50 | 4.70 | 5.00 | 4.90 | 5.70 | 6.15 | 7.10 | 9.30 | |
| 13 | | 3.00 | 3.55 | 4.35 | 4.75 | 4.95 | 5.00 | 5.30 | 6.00 | 7.05 | 9.70 | |
| 14 | | 2.85 | 3.80 | 4.50 | 4.80 | 5.00 | 5.00 | 5.45 | 6.30 | 7.40 | 9.75 | |
| 15 | | 3.00 | 3.50 | 4.50 | 4.60 | 5.00 | 5.15 | 5.50 | 6.30 | 7.65 | 9.20 | |
| 16 | | 2.80 | 3.70 | 4.60 | 4.80 | 4.90 | 4.90 | 5.80 | 6.40 | 7.70 | 9.30 | |
| 17 | | 2.80 | 3.80 | 4.55 | 4.65 | 4.95 | 5.25 | 5.45 | 6.50 | 7.30 | 9.50 | |
| 18 | | 2.80 | 3.65 | 4.25 | 4.80 | 5.00 | 5.20 | 5.60 | 6.25 | 7.65 | 9.35 | |
| 19 | | 3.00 | 3.80 | 4.30 | 4.70 | 5.00 | 5.00 | 5.20 | 6.30 | 7.70 | 9.50 | |
| 20 | | 2.90 | 3.90 | 4.60 | 4.75 | 5.00 | 5.00 | 5.45 | 6.60 | 7.15 | 9.50 | |
| 21 | | 2.75 | 3.85 | 4.50 | 4.60 | 5.05 | 4.95 | 5.50 | 6.00 | 7.40 | 9.25 | |
| 22 | | 2.80 | 3.70 | 4.50 | 4.80 | 5.25 | 5.20 | 5.50 | 6.55 | 7.60 | 9.30 | |
| 23 | | 3.00 | 3.70 | 4.45 | 4.80 | 4.80 | 5.20 | 5.65 | 6.60 | 7.60 | 9.50 | |
| 24 | | 2.80 | 3.95 | 4.30 | 4.70 | 4.75 | 5.25 | 5.50 | 6.35 | 7.00 | 9.40 | |
| 25 | | 3.00 | 3.70 | 4.50 | 4.80 | 5.00 | 5.20 | 5.50 | 6.40 | 7.25 | 9.65 | |
| 26 | | 2.95 | 3.70 | 4.60 | 4.60 | 4.90 | 5.00 | 5.50 | 6.00 | 7.20 | 9.40 | |
| 27 | | 2.80 | 3.90 | 4.65 | 4.70 | 4.75 | 5.10 | 5.50 | 6.05 | 7.45 | 9.25 | |
| 28 | | 3.10 | 3.60 | 4.40 | 4.45 | 4.90 | 5.15 | 5.60 | 6.20 | 7.60 | 9.80 | |
| 29 | | 2.75 | 3.70 | 4.25 | 4.80 | 4.85 | 5.10 | 5.70 | 6.00 | 7.30 | 9.40 | |
| 30 | | 3.00 | 3.65 | 4.30 | 4.70 | 5.05 | 5.10 | 5.65 | 6.00 | 7.50 | 9.25 | |
| 濃度(ppm) | | 10 | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | |
| 個數(n) | | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | |
| 平均值 | | 2.87 | 3.72 | 4.44 | 4.71 | 4.99 | 5.10 | 5.51 | 6.26 | 7.37 | 9.41 | |
| 標準差 | | 0.11 | 0.12 | 0.14 | 0.10 | 0.14 | 0.12 | 0.15 | 0.20 | 0.21 | 0.19 | |
| 變異係數 | | 3.95% | 3.30% | 3.07% | 2.22% | 2.90% | 2.33% | 2.65% | 3.13% | 2.89% | 2.02% | |
| 95%信賴區間, 1.96*標準差/ \sqrt{n} | | 0.04 | 0.04 | 0.05 | 0.04 | 0.05 | 0.04 | 0.05 | 0.07 | 0.08 | 0.07 | |
| 95%信賴區間, 1.96*標準差/ | | 0.04 | 0.04 | 0.05 | 0.04 | 0.05 | 0.04 | 0.05 | 0.07 | 0.08 | 0.07 | |
| 平均值+1.96*標準差/ \sqrt{n} | | 2.91 | 3.76 | 4.49 | 4.75 | 5.04 | 5.14 | 5.56 | 6.33 | 7.44 | 9.48 | |
| 平均值-1.96*標準差/ \sqrt{n} | | 2.83 | 3.68 | 4.39 | 4.67 | 4.93 | 5.05 | 5.46 | 6.19 | 7.29 | 9.35 | |
| Max-平均 | | 0.23 | 0.23 | 0.21 | 0.19 | 0.31 | 0.20 | 0.29 | 0.34 | 0.33 | 0.39 | |
| 平均-Min | | 0.17 | 0.22 | 0.29 | 0.26 | 0.24 | 0.20 | 0.31 | 0.26 | 0.37 | 0.51 | |

二、附錄 2. 亞甲藍色素不同濃度之層析長度數據

| 序號 | 濃度 ppm 長度cm | 資料區 | 公式區 | 自動繪圖 | | | | |
|------------------------------|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 40 | 80 | 100 | 250 | 500 | 1000 | 2000 |
| 1 | | 2.20 | 3.20 | 3.25 | 4.75 | 5.65 | 6.70 | 7.15 |
| 2 | | 2.50 | 3.00 | 3.40 | 4.50 | 5.70 | 6.65 | 7.65 |
| 3 | | 2.30 | 2.70 | 3.50 | 4.35 | 5.60 | 7.15 | 7.45 |
| 4 | | 2.35 | 3.00 | 3.40 | 4.40 | 6.05 | 6.80 | 7.40 |
| 5 | | 2.30 | 3.00 | 3.15 | 4.50 | 5.85 | 6.70 | 7.45 |
| 6 | | 2.45 | 3.00 | 3.40 | 4.45 | 5.70 | 6.85 | 7.20 |
| 7 | | 2.30 | 3.15 | 3.45 | 4.50 | 5.90 | 6.60 | 7.40 |
| 8 | | 2.35 | 2.90 | 3.55 | 4.50 | 6.00 | 6.70 | 7.30 |
| 9 | | 2.25 | 3.00 | 3.40 | 4.30 | 5.75 | 7.00 | 7.25 |
| 10 | | 2.40 | 2.95 | 3.35 | 4.60 | 5.95 | 6.60 | 7.20 |
| 11 | | 2.30 | 3.00 | 3.40 | 4.50 | 6.05 | 6.55 | 7.40 |
| 12 | | 2.40 | 2.90 | 3.40 | 4.65 | 6.10 | 6.80 | 7.65 |
| 13 | | 2.25 | 2.90 | 3.35 | 4.40 | 5.95 | 6.80 | 7.40 |
| 14 | | 2.30 | 2.95 | 3.60 | 4.35 | 5.90 | 6.60 | 7.55 |
| 15 | | 2.15 | 3.10 | 3.40 | 4.50 | 6.15 | 7.05 | 7.25 |
| 16 | | 2.20 | 2.90 | 3.40 | 4.60 | 5.85 | 6.75 | 7.50 |
| 17 | | 2.30 | 2.85 | 3.55 | 4.60 | 6.00 | 6.90 | 7.35 |
| 18 | | 2.45 | 3.00 | 3.30 | 4.60 | 5.80 | 6.80 | 7.40 |
| 19 | | 2.30 | 3.10 | 3.40 | 4.50 | 5.95 | 6.90 | 7.00 |
| 20 | | 2.55 | 3.00 | 3.30 | 4.25 | 5.80 | 6.80 | 7.50 |
| 21 | | 2.30 | 2.90 | 3.35 | 4.50 | 6.20 | 6.80 | 7.45 |
| 22 | | 2.10 | 3.00 | 3.40 | 4.40 | 5.85 | 7.00 | 7.50 |
| 23 | | 2.30 | 3.15 | 3.30 | 4.50 | 5.80 | 6.80 | 7.40 |
| 24 | | 2.30 | 3.00 | 3.45 | 4.40 | 5.90 | 6.70 | 7.30 |
| 25 | | 2.35 | 3.10 | 3.50 | 4.45 | 6.30 | 7.00 | 7.40 |
| 26 | | 2.55 | 2.75 | 3.30 | 4.60 | 5.75 | 6.60 | 7.45 |
| 27 | | 2.40 | 3.00 | 3.30 | 4.50 | 5.90 | 6.95 | 7.70 |
| 28 | | 2.15 | 3.00 | 3.30 | 4.55 | 5.85 | 6.80 | 7.50 |
| 29 | | 2.45 | 3.10 | 3.15 | 4.50 | 5.65 | 6.70 | 7.25 |
| 30 | | 2.30 | 3.00 | 3.40 | 4.30 | 6.00 | 6.95 | 7.50 |
| 濃度(ppm) | | 40 | 80 | 100 | 250 | 500 | 1000 | 2000 |
| 個數(n) | | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 |
| 平均值 | | 2.33 | 2.99 | 3.38 | 4.48 | 5.90 | 6.80 | 7.40 |
| 標準差 | | 0.11 | 0.11 | 0.10 | 0.11 | 0.17 | 0.15 | 0.15 |
| 變異係數 | | 4.78% | 3.68% | 3.07% | 2.49% | 2.84% | 2.24% | 2.08% |
| 95%信賴區間，1.96*標準差/ \sqrt{n} | | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.06 | 0.05 | 0.06 |
| 95%信賴區間，1.96*標準差/ | | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.06 | 0.05 | 0.06 |
| 平均值+1.96*標準差/ \sqrt{n} | | 2.37 | 3.03 | 3.42 | 4.52 | 5.96 | 6.85 | 7.45 |
| 平均值-1.96*標準差/ \sqrt{n} | | 2.29 | 2.95 | 3.34 | 4.44 | 5.84 | 6.75 | 7.34 |
| Max-平均 | | 0.22 | 0.21 | 0.22 | 0.27 | 0.40 | 0.35 | 0.30 |
| 平均-Min | | 0.23 | 0.29 | 0.23 | 0.23 | 0.30 | 0.25 | 0.40 |

三、附錄 3. 鉛離子不同濃度之層析長度數據

| 序號 | 濃度 ppm 長度cm | 資料區 | | | | 公式區 | | | | 自動繪圖 | |
|-------------------------------|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 10 | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 | 250 | 500 | 750 | 1000 |
| 1 | | 6.95 | 7.20 | 7.80 | 7.75 | 7.90 | 8.00 | 8.00 | 8.75 | 9.20 | 9.75 |
| 2 | | 7.15 | 7.20 | 8.05 | 7.55 | 7.95 | 8.00 | 8.25 | 8.90 | 9.45 | 9.80 |
| 3 | | 6.90 | 7.55 | 7.80 | 7.90 | 8.10 | 8.10 | 8.60 | 8.50 | 9.00 | 9.75 |
| 4 | | 7.25 | 7.20 | 7.75 | 7.50 | 8.00 | 8.15 | 8.80 | 8.45 | 9.40 | 9.75 |
| 5 | | 7.00 | 7.20 | 7.90 | 7.70 | 8.00 | 7.85 | 8.45 | 8.85 | 9.55 | 9.50 |
| 6 | | 7.05 | 7.15 | 7.90 | 7.85 | 7.65 | 8.20 | 8.65 | 9.00 | 9.20 | 10.05 |
| 7 | | 7.00 | 7.20 | 7.45 | 7.90 | 8.00 | 7.80 | 8.65 | 8.60 | 9.05 | 9.80 |
| 8 | | 7.15 | 7.20 | 8.00 | 8.00 | 7.80 | 7.95 | 8.70 | 8.55 | 9.00 | 9.30 |
| 9 | | 7.20 | 7.20 | 7.90 | 7.90 | 8.00 | 8.00 | 7.95 | 8.85 | 9.30 | 9.70 |
| 10 | | 6.90 | 7.05 | 7.55 | 7.65 | 8.10 | 8.40 | 8.00 | 8.80 | 9.20 | 9.70 |
| 11 | | 7.00 | 7.00 | 7.30 | 7.80 | 8.05 | 8.09 | 8.45 | 9.00 | 9.35 | 9.40 |
| 12 | | 7.35 | 7.00 | 7.80 | 7.95 | 8.00 | 7.85 | 8.45 | 8.60 | 9.00 | 9.75 |
| 13 | | 7.00 | 7.50 | 7.50 | 7.80 | 8.25 | 8.30 | 8.40 | 9.05 | 9.25 | 9.40 |
| 14 | | 7.45 | 7.00 | 7.40 | 7.45 | 8.20 | 7.80 | 8.00 | 8.80 | 9.55 | 10.10 |
| 15 | | 6.65 | 7.35 | 7.30 | 8.10 | 7.50 | 8.00 | 8.65 | 9.00 | 9.50 | 9.80 |
| 16 | | 7.15 | 7.20 | 7.50 | 7.60 | 8.10 | 8.35 | 8.60 | 8.95 | 9.25 | 9.90 |
| 17 | | 6.80 | 7.50 | 7.50 | 7.75 | 7.75 | 7.80 | 7.90 | 9.00 | 9.35 | 9.40 |
| 18 | | 7.05 | 7.50 | 7.75 | 7.80 | 7.90 | 8.40 | 8.30 | 8.60 | 9.20 | 9.45 |
| 19 | | 7.00 | 7.40 | 7.50 | 7.50 | 7.80 | 7.95 | 8.75 | 8.50 | 9.55 | 8.90 |
| 20 | | 6.80 | 7.20 | 8.00 | 7.80 | 7.50 | 8.10 | 8.80 | 8.80 | 9.05 | 9.85 |
| 21 | | 6.85 | 7.40 | 8.00 | 7.65 | 8.00 | 8.40 | 8.55 | 8.60 | 9.45 | 9.90 |
| 22 | | 7.00 | 7.40 | 8.05 | 7.85 | 8.25 | 8.00 | 8.30 | 8.60 | 9.20 | 9.30 |
| 23 | | 6.95 | 7.40 | 7.50 | 7.55 | 7.80 | 8.15 | 8.50 | 8.80 | 9.60 | 9.65 |
| 24 | | 7.00 | 7.55 | 7.30 | 7.80 | 7.80 | 8.00 | 8.80 | 9.10 | 9.00 | 9.30 |
| 25 | | 6.65 | 7.50 | 7.75 | 7.90 | 7.75 | 8.10 | 7.95 | 8.55 | 9.30 | 9.75 |
| 26 | | 7.20 | 7.50 | 7.70 | 7.85 | 7.60 | 8.20 | 8.50 | 8.80 | 9.15 | 9.70 |
| 27 | | 6.70 | 7.40 | 7.40 | 7.80 | 7.80 | 8.00 | 8.00 | 8.95 | 9.25 | 9.75 |
| 28 | | 7.30 | 7.50 | 7.45 | 7.75 | 7.55 | 8.00 | 8.50 | 8.90 | 9.25 | 9.45 |
| 29 | | 7.10 | 7.50 | 7.80 | 8.00 | 8.00 | 8.45 | 8.00 | 8.80 | 9.00 | 9.85 |
| 30 | | 7.15 | 7.15 | 7.65 | 7.55 | 8.00 | 8.30 | 8.45 | 8.65 | 9.55 | 9.65 |
| 濃度(ppm) | | 10 | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 | 250 | 500 | 750 | 1000 |
| 個數(n) | | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 |
| 平均值 | | 7.02 | 7.30 | 7.68 | 7.77 | 7.90 | 8.09 | 8.40 | 8.78 | 9.27 | 9.65 |
| 標準差 | | 0.20 | 0.18 | 0.24 | 0.17 | 0.21 | 0.19 | 0.29 | 0.19 | 0.19 | 0.26 |
| 變異係數 | | 2.78% | 2.44% | 3.13% | 2.13% | 2.63% | 2.38% | 3.51% | 2.14% | 2.08% | 2.67% |
| 95%信賴區間, 1.96*標準差/ \sqrt{n} | | 0.07 | 0.06 | 0.09 | 0.06 | 0.07 | 0.07 | 0.11 | 0.07 | 0.07 | 0.09 |
| 95%信賴區間, 1.96*標準差/ | | 0.07 | 0.06 | 0.09 | 0.06 | 0.07 | 0.07 | 0.11 | 0.07 | 0.07 | 0.09 |
| 平均值+1.96*標準差/ \sqrt{n} | | 7.09 | 7.37 | 7.76 | 7.82 | 7.98 | 8.16 | 8.50 | 8.84 | 9.34 | 9.74 |
| 平均值-1.96*標準差/ \sqrt{n} | | 6.95 | 7.24 | 7.59 | 7.71 | 7.83 | 8.02 | 8.29 | 8.71 | 9.20 | 9.55 |
| Max-平均 | | 0.43 | 0.25 | 0.38 | 0.33 | 0.35 | 0.36 | 0.40 | 0.32 | 0.33 | 0.45 |
| 平均-Min | | 0.37 | 0.30 | 0.38 | 0.32 | 0.40 | 0.29 | 0.50 | 0.33 | 0.27 | 0.75 |

四、附錄 4. 硫氰酸鹽不同濃度之層析長度數據

| 序號 | 濃度 ppm 長度cm | 資料區 | 公式區 | 自動繪圖 | | | | | |
|------------------------------|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 10 | 20 | 40 | 80 | 100 | 250 | 500 | 1000 |
| 1 | | 1.95 | 2.85 | 3.30 | 4.30 | 5.00 | 6.20 | 7.15 | 8.05 |
| 2 | | 2.20 | 2.70 | 3.40 | 4.25 | 5.10 | 6.00 | 7.10 | 8.20 |
| 3 | | 1.95 | 2.70 | 3.35 | 4.20 | 5.00 | 6.15 | 7.10 | 8.10 |
| 4 | | 2.10 | 2.90 | 3.40 | 4.10 | 5.00 | 6.10 | 7.20 | 8.00 |
| 5 | | 2.00 | 2.70 | 3.45 | 4.25 | 5.15 | 5.80 | 7.00 | 7.85 |
| 6 | | 2.00 | 2.75 | 3.40 | 4.20 | 5.05 | 6.20 | 6.90 | 8.10 |
| 7 | | 1.90 | 2.80 | 3.25 | 4.20 | 4.95 | 6.00 | 7.05 | 8.10 |
| 8 | | 2.05 | 2.75 | 3.30 | 4.25 | 5.00 | 6.15 | 7.10 | 8.05 |
| 9 | | 2.00 | 2.65 | 3.35 | 4.20 | 5.10 | 6.20 | 7.10 | 8.10 |
| 10 | | 2.00 | 2.70 | 3.45 | 4.15 | 4.95 | 6.10 | 7.30 | 7.95 |
| 11 | | 2.00 | 2.70 | 3.40 | 4.30 | 4.95 | 6.20 | 7.25 | 8.05 |
| 12 | | 2.10 | 2.75 | 3.35 | 4.10 | 4.90 | 6.15 | 7.30 | 8.10 |
| 13 | | 2.15 | 2.70 | 3.30 | 4.20 | 5.10 | 6.20 | 7.40 | 8.00 |
| 14 | | 2.00 | 2.70 | 3.25 | 4.10 | 4.95 | 6.00 | 7.10 | 7.95 |
| 15 | | 2.25 | 2.70 | 3.20 | 4.20 | 5.15 | 5.95 | 7.45 | 8.00 |
| 16 | | 2.10 | 2.80 | 3.25 | 4.25 | 4.95 | 5.90 | 7.00 | 7.90 |
| 17 | | 2.10 | 2.70 | 3.25 | 4.25 | 5.10 | 5.95 | 7.00 | 8.00 |
| 18 | | 2.30 | 2.70 | 3.35 | 4.20 | 5.05 | 5.80 | 7.00 | 8.05 |
| 19 | | 2.05 | 2.75 | 3.40 | 4.05 | 5.20 | 5.90 | 7.20 | 8.00 |
| 20 | | 2.00 | 2.85 | 3.45 | 4.30 | 5.10 | 6.10 | 7.10 | 8.05 |
| 21 | | 2.20 | 2.70 | 3.40 | 4.00 | 5.00 | 6.10 | 7.05 | 8.00 |
| 22 | | 1.95 | 2.65 | 3.35 | 4.10 | 5.05 | 5.90 | 6.90 | 8.00 |
| 23 | | 2.10 | 2.70 | 3.20 | 4.15 | 5.15 | 5.80 | 6.95 | 8.25 |
| 24 | | 2.00 | 2.70 | 3.25 | 4.00 | 5.05 | 6.10 | 7.00 | 8.00 |
| 25 | | 2.10 | 2.60 | 3.35 | 4.15 | 4.90 | 6.15 | 7.10 | 8.00 |
| 26 | | 2.00 | 2.70 | 3.25 | 4.25 | 5.15 | 6.00 | 7.10 | 7.95 |
| 27 | | 1.90 | 2.70 | 3.25 | 4.00 | 5.00 | 6.00 | 7.15 | 8.00 |
| 28 | | 2.00 | 2.75 | 3.35 | 4.25 | 4.95 | 5.85 | 7.15 | 8.00 |
| 29 | | 2.10 | 2.65 | 3.40 | 4.15 | 5.25 | 6.00 | 6.90 | 8.25 |
| 30 | | 2.15 | 2.70 | 3.35 | 4.10 | 5.10 | 6.10 | 7.15 | 8.20 |
| 濃度(ppm) | | 10 | 20 | 40 | 80 | 100 | 250 | 500 | 1000 |
| 個數(n) | | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 |
| 平均值 | | 2.06 | 2.72 | 3.33 | 4.17 | 5.05 | 6.04 | 7.11 | 8.04 |
| 標準差 | | 0.10 | 0.06 | 0.07 | 0.09 | 0.09 | 0.13 | 0.14 | 0.09 |
| 變異係數 | | 4.81% | 2.35% | 2.24% | 2.13% | 1.79% | 2.16% | 1.92% | 1.17% |
| 95%信賴區間，1.96*標準差/ \sqrt{n} | | 0.04 | 0.02 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.05 | 0.05 | 0.03 |
| 95%信賴區間，1.96*標準差/ | | 0.04 | 0.02 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.05 | 0.05 | 0.03 |
| 平均值+1.96*標準差/ \sqrt{n} | | 2.09 | 2.75 | 3.36 | 4.21 | 5.08 | 6.08 | 7.16 | 8.08 |
| 平均值-1.96*標準差/ \sqrt{n} | | 2.02 | 2.70 | 3.31 | 4.14 | 5.01 | 5.99 | 7.06 | 8.01 |
| Max-平均 | | 0.24 | 0.18 | 0.12 | 0.13 | 0.21 | 0.17 | 0.34 | 0.21 |
| 平均-Min | | 0.16 | 0.12 | 0.13 | 0.17 | 0.15 | 0.24 | 0.21 | 0.19 |

【評語】 052609

本實驗使用特殊處理過的苧麻線，開發便捷且可判斷濃度的模組。利用色素及陰陽離子產物在苧麻線上的層析長度與溶液濃度之關係，有效判斷溶液濃度高低。研究結果顯示可以用於檢測 0.01g/L ~ 2 g/L 的剛果紅色素溶液、0.04g/L~2g/L 的亞甲藍色素溶液、0.01g/L~1g/L 的鉛離子溶液、0.01g/L ~ 1g/L 的硫氰酸鹽溶液。整體研究概念可行，實驗設計考慮佳並有豐富的實驗成果，部分結果說明建議可再加強以及討論應再多考量理論依據與結果的比較說明，建議未來實際應用應考慮廢汗水中其他物質對此分析方法的干擾本作品在線性可利用之範圍，所對應的濃度均偏高，但在低濃度檢測時已無法呈現線性關係，且方法本身僅能針對單一污染物檢測，對水體中出現多種污染物時，是無法分辨的。

本研究應用特殊處理過的苧麻線，開發便捷且可判斷濃度的模組，發現本模組可以用於檢測 0.01g/L ~ 2 g/L 的剛果紅色素溶液、0.04g/L~2g/L 的亞甲藍色素溶液、0.01g/L~1g/L 的鉛離子溶液、0.01g/L ~ 1g/L 的硫氰酸鹽溶液，未來可應用於工廠檢測廢水的成本之研發基礎，具有環保科技性。

建議提供目前台灣那些類型之工廠廢水，其污染物之濃度？並討論說明本研究的：0.01g/L ~ 2 g/L 的剛果紅色素溶液、0.04g/L~2g/L 的亞甲藍色素溶液、0.01g/L~1g/L 的鉛離子溶液、0.01g/L ~ 1g/L 的硫氰酸鹽溶液，是否具有實際之可行性。

本研究將污染物濃度範圍調整至 0.01 g/L 更低濃度，發現在低濃度實驗數據中，結果有偏離線性趨勢的現象。建議討論此偏離線性趨勢的可能原因？

作品海報

苧麻微流體檢測陰陽離子及染劑色素濃度

摘要

本實驗使用特殊處理過後的苧麻，開發便捷且可判斷濃度的模組。以簡單、方便的量測方法，利用色素跟陰陽離子在苧麻線上的層析長度與溶液濃度之關係，有效判斷溶液濃度高低。此模組體積小、藥品用量少、成本低廉，可以用肉眼觀察且攜帶方便。本模組可以用於檢測 0.01g/L~2 g/L的剛果紅色素溶液、0.04g/L~2g/L的亞甲藍色素溶液、0.01g/L~1g/L的鉛離子溶液、0.01g/L~1g/L的硫氰酸鹽溶液。此簡易且低成本的模組可以降低工廠檢測污水的成本，進而提升其意願排出符合環保署標準的污水。

壹、研究動機

傳統上常用火焰式原子吸收光譜法^[1]來測量鉛離子濃度，而硫氰酸鹽溶液則使用色譜法^[2]測量。儘管光譜法及色譜法具有許多優點，但操作技術要求高、成本高、分析時間長等缺點也不可忽視。因此，開發一種成本低、操作簡單且便於攜帶的替代技術成為本研究的動機。同時，污水是一個攸關環境的重要議題，利用便宜、簡易的檢測方式可以幫助工廠控制污染物的濃度。出於這方面的考量，本研究參考微流體技術^[3]，運用特殊處理過的苧麻來建立可以量測剛果紅、亞甲藍、鉛離子、硫氰酸鹽四種物質濃度的模組。以簡單、方便的方式，有效判斷溶液的濃度。

貳、研究目的

1. 利用特殊處理過後的苧麻，開發單次有效判斷溶液濃度的模組。
2. 調整苧麻的物理和化學特性，以滿足不同物質的檢測要求。
3. 最佳化模組的設計，以提高其量測穩定性和可靠性，同時降低成本和便於攜帶。

參、研究設備與器材

- 1、試劑：碳酸鈉、亞甲藍、剛果紅、硝酸鉛、碘化鉀、硝酸、硝酸鐵、硫氰酸鉀
- 2、實驗器材：燒杯、容量瓶、移液管、安全吸球、加熱板、鑷子、刮勺、烘箱、碼表、電子秤
- 3、自製模組：珍珠板、定滑輪、砝碼(50克)、苧麻、微量吸管、尺
- 4、黏度測量實驗所需器材：量筒、鋼珠、碼表

肆、研究方法

一、文獻探討

依參考文獻中^[3]的實驗裝置進行修改。該文獻僅進行3次重複實驗，然而由於利用層析長度測量溶液濃度的模組仍不普及，本實驗對每個濃度進行30次重複實驗，以確保模組可用性與實驗再現性。在模組的兩側利用定滑輪固定線的位置，並在線兩端綁上 50 克砝碼以固定張力。使用小箱子墊高模組，以防止砝碼碰到桌面進而導致張力不固定。Fig.1 為模組示意圖。

二、建立模組

1. 參考文獻^[3]的實驗裝置，將一片10mm的珍珠板與一片7mm的珍珠板以雙面膠沾黏。
2. 將3組定滑輪固定在兩側以固定線的位置，用小箱子墊高以防止砝碼碰到桌面而導致張力不固定。
3. 在繩子左右兩端綁上各50克的砝碼以固定張力。
4. 在觀察和記錄數據時採用統一的方式，並於固定時間後用肉眼觀察層析長度，使用尺測量，Fig.1 為模組示意圖。

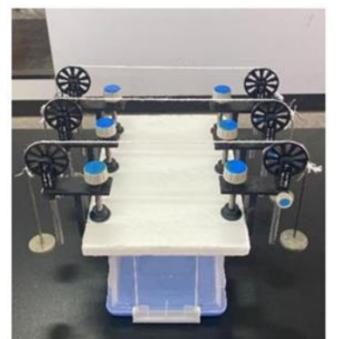


Fig.1 模組示意圖

三、選擇線材

本研究選擇了三種文獻中常使用的線材：棉線、羊毛和聚酯纖維，並增加了一種文獻中未曾提及的線材：苧麻。

1. 棉：許多棉線在製作過程中常添加蠟和黏濁劑等疏水物質^[4]。在實驗操作中，使用碳酸鈉進行親水性處理，所購買的棉線仍無法表現親水性，因此被剔除。
2. 羊毛：羊毛纖維表面疏水鱗片的存在^[5]，使得水分子擴散困難。在嘗試其親水性處理後仍然表現疏水性，因此被剔除。
3. 聚酯纖維：聚酯纖維在經過親水性處理後已親水。但由於聚酯纖維大多屬不可生物降解之材料，導致大量使用後對環境造成污染，因此被排除在實驗範圍之外。
4. 苧麻：結構與棉相似，具有親水特性^[6]。此外苧麻是可以生物降解的，而且經過親水處理後也具有親水性。因此苧麻被選為本實驗的線材。

四、調整親水處理

線在製作過程中常添加蠟和黏濁劑等疏水物質，所以在製造微流體裝置之前，應通過親水性處理製備線材，使水溶液能滲透到螺紋纖維中並在螺紋上流動^[4]。

1. 將苧麻浸泡於0.1M碳酸鈉溶液，維持100°C並浸泡1小時。
2. 將苧麻浸泡於1M硝酸溶液，以超音波震動20分鐘。
3. 苧麻透過烘箱以100 °C烘乾。於室溫冷卻後，即可用於染劑色素量測實驗。
4. 在進行陰陽離子沉澱實驗前，將苧麻浸泡於各實驗濃度的硝酸鉛溶液或硫氰酸鉀溶液中。並於100 °C下，以烘箱烘乾。

五、微流體分離實驗

1. 以微量滴管吸取50微升之待測物，以垂直於線材的角度，滴入色素溶液、碘化鉀或硝酸鐵溶液。
2. 以手機計時，分別於滴入30秒後(生成 $PbI_{2(s)}$ 、 $FeSCN^{2+}_{(aq)}$)及2分鐘後(色素)，使用尺以肉眼量取長度並記錄。
3. 以平均值找出濃度與長度的關係及其判定係數與95%信賴區間，並用CV值確認其離散程度。

六、實驗流程

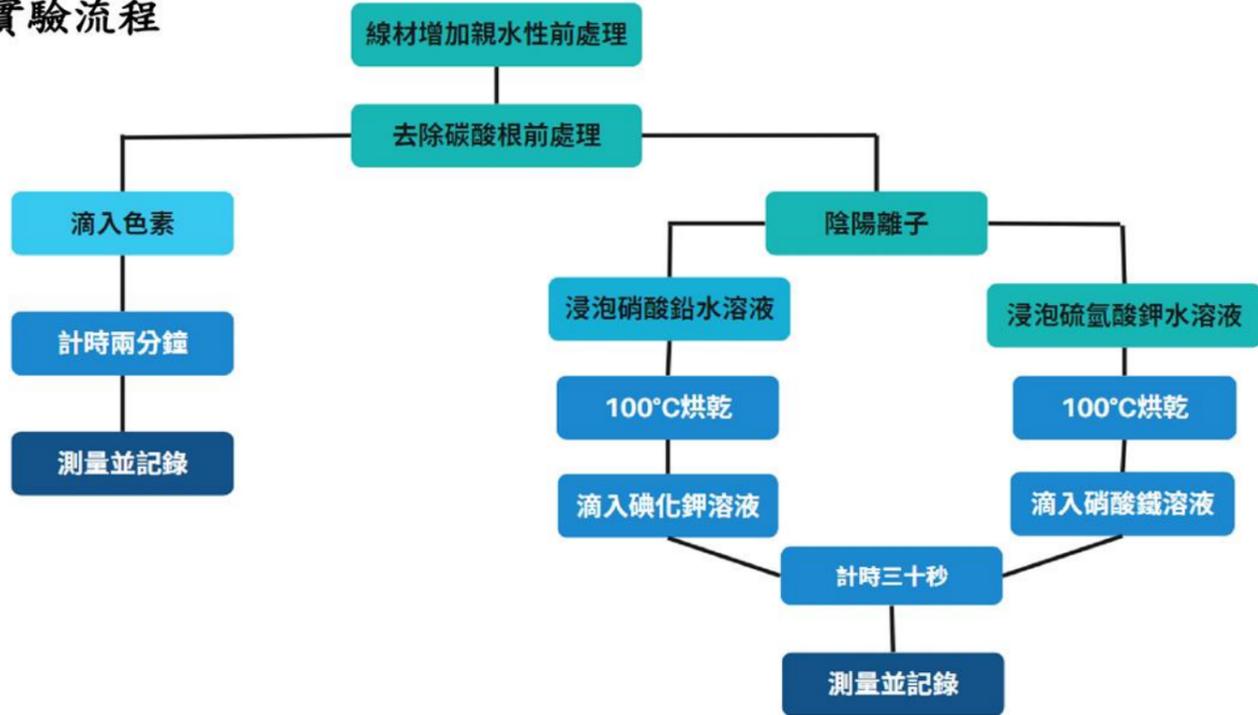


Fig.2 使用模組檢測剛果紅色素



Fig.3 使用模組檢測亞甲藍色素



Fig.4 使用模組檢測鉛離子濃度



Fig.5 使用模組檢測硫氰酸鹽濃度

伍、研究成果

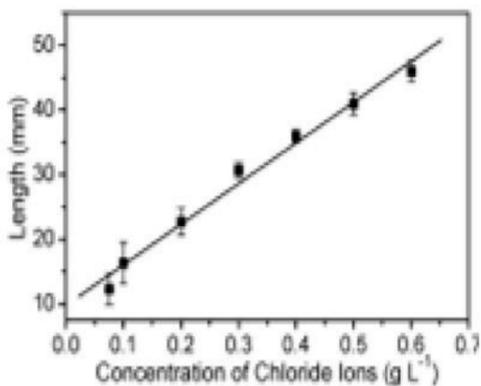


Fig.6 源於Chemical Education文章，其中可以看到一個低於0.1g/L的數據點有偏離趨勢線的趨勢。

一、高濃度剛果紅色素

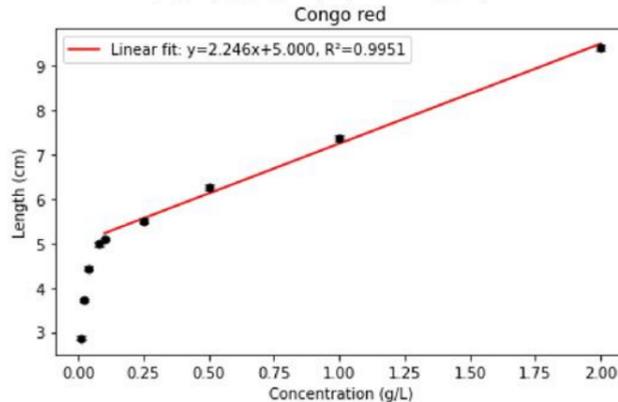


Fig.7 高濃度的剛果紅色素於線微流體上之層析長度

二、高濃度鉛離子

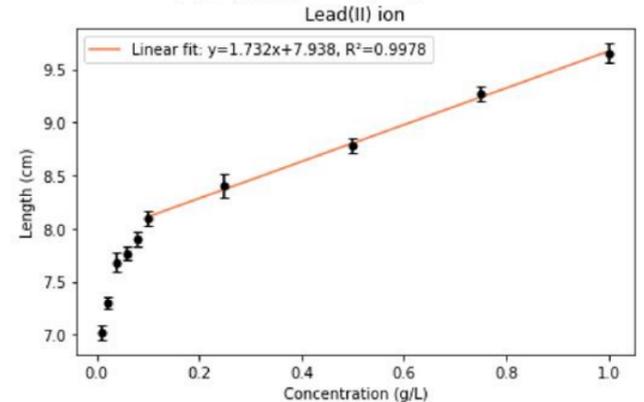


Fig.8 高濃度的鉛離子於線微流體上之層析長度

三、0.01 g/L到2 g/L剛果紅色素

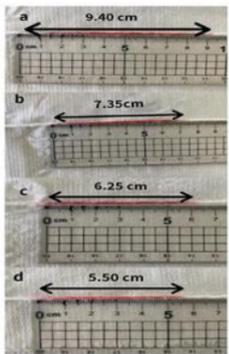


Fig.9 數據量測 (a)圖濃度:2g/L (b)圖濃度:1g/L (c)圖濃度:0.5g/L (d)圖濃度:0.25g/L

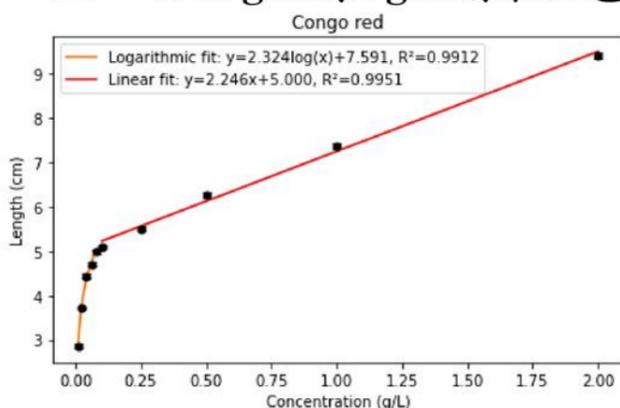


Fig.10 不同濃度的剛果紅色素於線微流體上之層析長度

四、0.01 g/L到1 g/L鉛離子

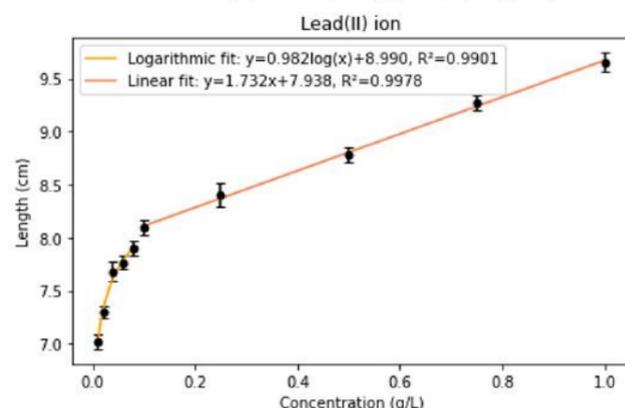


Fig.11 不同濃度的鉛離子於線微流體上之層析長度

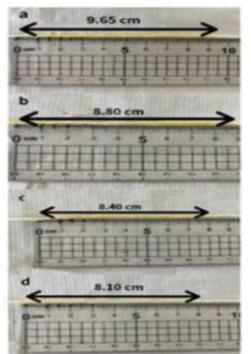


Fig.12 數據量測 (a)圖濃度:1g/L (b)圖濃度:0.5g/L (c)圖濃度:0.25g/L (d)圖濃度:0.1g/L

五、0.04 g/L到2 g/L亞甲藍色素

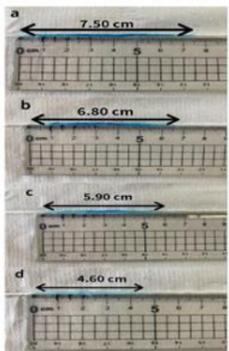


Fig.13 數據量測 (a)圖濃度:2g/L (b)圖濃度:1g/L (c)圖濃度:0.5g/L (d)圖濃度:0.25g/L

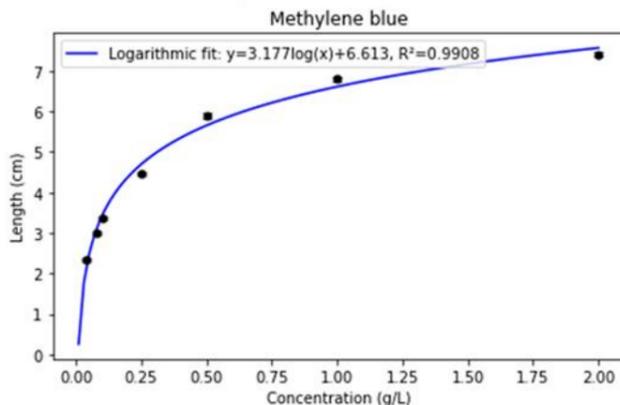


Fig.14 不同濃度的亞甲藍色素於線微流體上之層析長度

六、0.01 g/L到1 g/L硫氰酸鹽

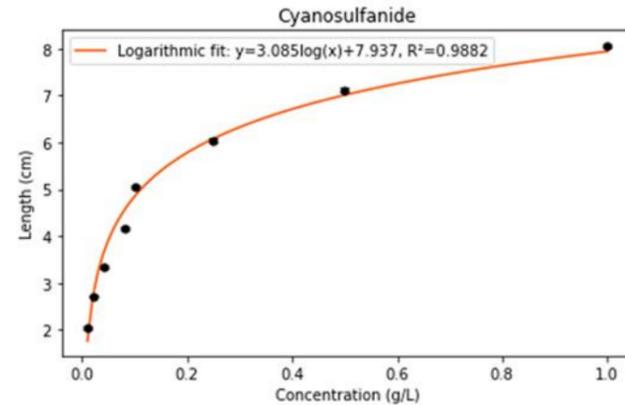


Fig.15 不同濃度的硫氰酸鹽於線微流體上之層析長度

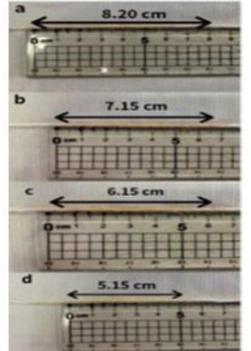


Fig.16 數據量測 (a)圖濃度:1g/L (b)圖濃度:0.5g/L (c)圖濃度:0.25g/L (d)圖濃度:0.1g/L

黏度實驗

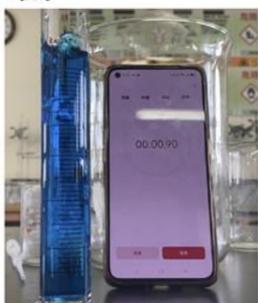


Fig.17 黏度實驗示意圖

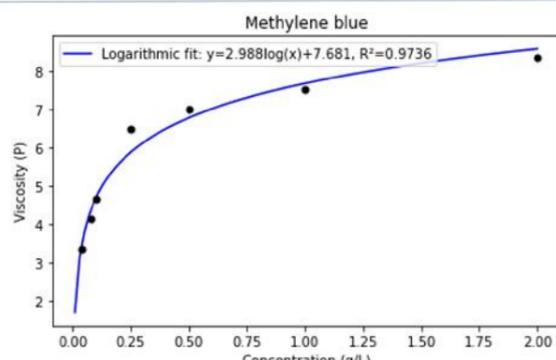


Fig.18 不同濃度亞甲藍色素的黏度

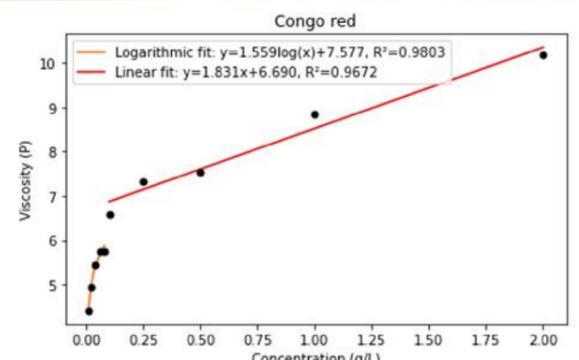


Fig.19 不同濃度剛果紅色素的黏度

陸、討論

一、數據分析

利用層析長度測量溶液濃度的線微流體研究文獻中，往往沒有提供完整的實驗數據及散佈圖和趨勢線。為了將線微流體應用於污水檢測，本研究操作人員將剛果紅、亞甲藍、鉛離子和硫氰酸鹽的實驗濃度降低，以測試苧麻線微流體的偵測極限。

同時，將剛果紅及鉛離子的實驗數據與少數具有數據散佈圖的文獻之趨勢線進行對照，發現0.01g/L至0.08g/L的層析長度與濃度之間的關係，與0.1g/L以上之線性趨勢線逐漸偏離，更趨近於對數趨勢線，判定係數(R^2)高達0.99。

二、本組於他組以長度測濃度線微流體實驗相異之處

1. 線材不綁結

在利用層析長度測量溶液濃度的線微流體文獻中，其裝置由中間有結的平行線材構成，因此其分析物將先堆積在結中，接著以毛細作用力向線的兩端流動。然而，此操作無法定量其綁成結的線材長度，且結內體積無法定量，完全吸收結中分析物的時間也不一致。因此本實驗中的線材不綁結，分析物直接滴入線材，層析出的分析物長度為本實驗之數據。

2. 線微流體模組中定量張力、烘乾溫度

在利用層析長度測量溶液濃度的線微流體實驗中，其操作簡單且肉眼可觀察的特性^[3]，使得實驗較難量化。L.Cai et al.^[3]未提供定量張力的方法，然而，張力可能會影響線材的截面積，進而影響測量長度。因此，本實驗在線材的兩端綁上50克的砝碼以定量張力。此外，L.Cai et al.^[3]在離子沉澱的實驗僅以定量時間風乾固定向。風乾時其溫度無法控制，固定向風乾後濕度不一，可能導致模組狀況不一致。本研究將線材浸泡於待測溶液後，以烘箱定溫100°C烘乾，可提高模組的穩定性。

三、以長度測濃度的線微流體之突破

文獻回顧上，僅有一篇線微流體實驗以層析長度測量溶液濃度且有呈現數據散佈圖^[3]，其實驗所得到的最低濃度為0.075g/L。其數據點偏離其整體線性趨勢線。本組所有實驗的最低濃度皆低於0.075g/L，這是對於利用肉眼觀測和操作簡單的模組之突破。此外本研究發現，在0.01g/L-0.08g/L之間，剛果紅色素和鉛離子的最佳趨勢線不是直線，而是對數線。然而，當濃度超過0.1g/L時，其關係為線性。而亞甲藍色素及硫氰酸鹽在0.04g/L-2g/L及0.01g/L-1g/L之間的最佳趨勢線是對數線。

本研究以線微流體之層流特性，尋找影響層析長度的因素。不同濃度溶液之黏度數據與線微流體層析數據趨勢相近。因此由黏度可以佐證本實驗數據分析之合理性。

在本研究中，自製模組因其肉眼觀察的限制無法應用於環保署之鉛離子放排標準^[7]。然而，此簡易模組可應用於工廠內之自我污水檢測。以此便宜、簡單的模組初步確認污水濃度，使工廠便於添加適量試劑移除污染源，降低工廠反覆送測的成本。如此，工廠有較大的意願排放符合環保署限制濃度之污水。

柒、結論

根據本實驗的結果，發現剛果紅、鉛離子、亞甲藍和硫氰酸鹽在自製的模組中微流體層析長度與濃度具有高度相關趨勢關係。在剛果紅色素實驗中，0.1g/L-2g/L的剛果紅濃度與層析長度為線性關係，而在0.01g/L-0.08g/L濃度範圍內，則為對數關係；在鉛離子實驗中，0.1g/L-1g/L的鉛離子濃度與層析長度呈現線性關係，在0.01g/L-0.08g/L濃度範圍內，為對數關係。在亞甲藍色素實驗中，0.04g/L-2g/L濃度與長度之關係整體為對數關係；硫氰酸鹽實驗中，0.01g/L-1g/L濃度與長度之關係為對數關係。所有這些趨勢線都具有高於0.98的判定係數(R^2)和合理的變異係數(CV值)，顯示利用層析長度測定溶液濃度是一種可行的方法。從線微流體的層流特性，發現黏度可以佐證線微流體之層析長度與實際濃度的趨勢關係。因此，在分析數據時，可以用黏度數據作為交錯分析。

本研究通過自製的模組配合線微流體，製作了一種低成本的方法，可以用層析長度觀測實際溶液濃度。這種方法可以為缺乏優質水質檢測設備的國家提供幫助，同時也可以降低工廠使用過量移除污染物試劑的成本，提高工廠的意願去排出符合環保署標準之污水。

捌、參考文獻

1. 行政院環境保護署(2014年9月12日)。水中銀、鎘、鉻、銅、鐵、錳、鎳、鉛及鋅檢測方法—火焰式原子吸收光譜。
2. S. Wirojsaengthong, D. Aryuwananon, W. Aeungmaitrepirom, B. Pulpoka. A colorimetric paper-based optode sensor for highly sensitive and selective determination of thiocyanate in urine sample using cobalt porphyrin derivative. Volume 231, 15 August 2021, 122371. <https://reurl.cc/94Dx6v>
3. L. Cai, Z. Ouyang, X. Huang, C. Xu, Comprehensive Training of Undergraduates Majoring in Chemical Education by Designing and Implementing a Simple Thread-Based Microfluidic Experiment. J. Chem. Educ., 2020, 97, 1566–1571. <https://reurl.cc/51KVDy>
4. A. Prabhu, H. Singhal, M.S. Giri Nandagopal, R. Kulal, P.P. Yegneswaran, N. K. Mani. Knitting Thread Devices: Detecting Candida albicans Using Napkins and Tampons. ACS Omega, 2021, 6(19), 12667-12675. <https://reurl.cc/VLY7z6>
5. D. Agustini, F. R. Caetano, R. F. Quero, J. A. Fracassi da Silva, M. F. Bergamini, L. H. Marcolino-Junior, D. P. de Jesus, Microfluidic devices based on textile threads for analytical applications: state of the art and prospects. Anal. Methods, 2021, 13, 4830-4857. <https://reurl.cc/GAnQ5d>
6. Zhao-Tie Liu, Yani Yang, Lili Zhang, Ping Sun, Zhong-Wen Liu, Jian Lu, Heping Xiong, Yuande Peng, Shouwei Tang, Study on the performance of ramie fiber modified with ethylenediamine. Carbohydrate Polymers, 2008, 71,(1), 18-25 <https://reurl.cc/o78pVI>
7. 行政院環境保護署環署水字第1030005842號令修正發布第二條條文(2014年1月22日)