

中華民國 第 50 屆中小學科學展覽會
作品說明書

國中組 物理科

佳作

030109

潛「移」默化的無形小子-粒子在水中移動擴散
的研究

學校名稱：高雄市立五福國民中學

作者：	指導老師：
國二 盧冠言	許峰銘
國二 郭彥儀	賴淑韻
國二 徐富諒	

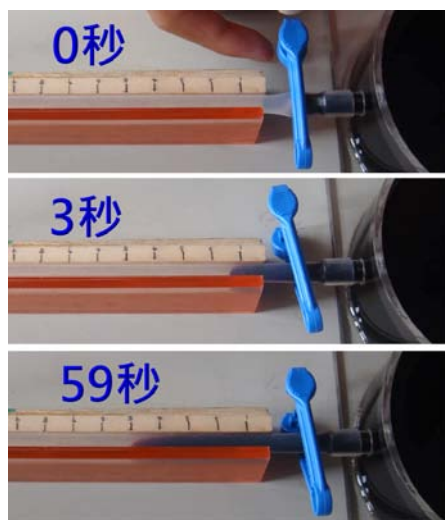
關鍵詞：擴散、速度、過錳酸鉀

摘要：

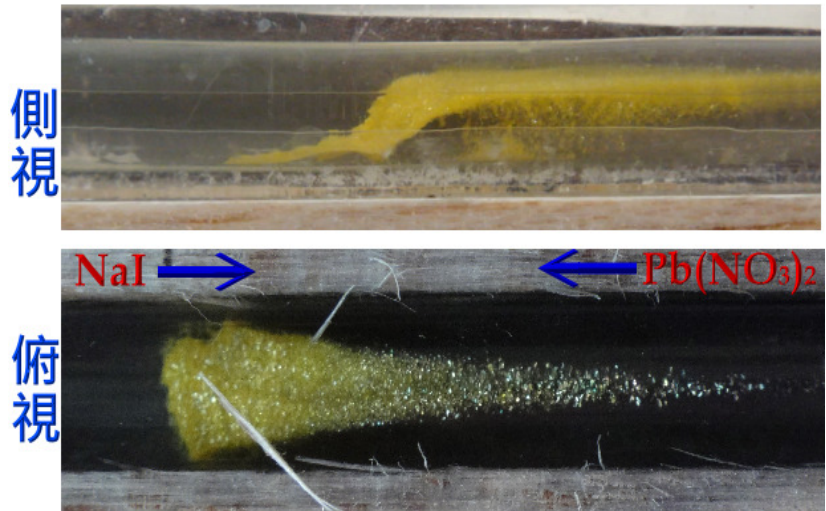
過錳酸鉀在水中魔幻似的擴散，令人看到屬於科學的美麗與神秘。擴散一向被認為是簡單的概念。**濃度、溫度與管徑，是影響它的三大因素**。我們的研究，設計了四種裝置，來探討物質在水中的擴散。分別是**固定式，持續滴入式，單向電錶式與雙向擴散裝置**。以固定式裝置，**單純的觀察過錳酸鉀的紫色跑多快**。以運動學最簡單的「速率」定義，來探討這些變因有什麼關係，結果如下：

$$\text{自行定義的擴散速率} = \frac{\text{趨勢線斜率}}{\text{(過錳酸鉀紫色前端的移動速率)}} \times \text{濃度梯度} \Rightarrow \text{趨勢線斜率} \propto \text{溫度與管徑截面積}$$

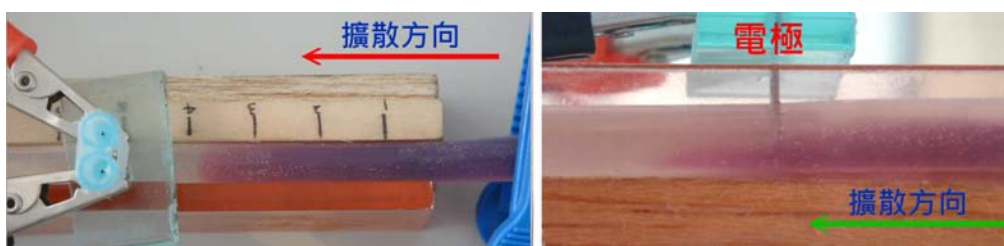
這種設計，可以進一步研究溶質在水中擴散所受到的阻力：**阻止過錳酸鉀擴散的效果，鎂離子比鈣離子強，而且鎂離子濃度愈高愈好**。電錶式擴散裝置，利用導電性造成電錶指針瞬動，把所有的無色離子擴散研究變成可能。雙向擴散，離子相撞產生沉澱，都提供了研究液體擴散的新方向。



固定式過錳酸鉀擴散



雙向擴散看到的美麗碘化鉛晶體沉澱



單向電錶式擴散裝置

壹、研究動機：

國二的課本提到：物質的擴散,是由高濃度到低濃度,最後到達濃度均衡的結果，但喝早餐店的加糖豆漿時，即使放了一段時間後，豆漿還是越喝越甜,最後還有糖剩在杯底。難道糖擴散的這麼慢嗎？實驗時把過錳酸鉀放在杯底，讓它在水中擴散,也發現紫紅色的區域上升的十分緩慢。老師說:這是重力的關係。課本上只是不考慮重力的理論說法。生物讀到細胞膜時，曾說小分子可以擴散進細胞膜內，但最小的金屬離子，因為有帶電，卻必需要靠特殊的蛋白質通道才可進出。難道物質在水中的擴散，有那麼特殊嗎？於是，我們便開始設計實驗，來探討粒子在水中擴散的真相。



一開始的實驗：過錳酸鉀在管徑中的擴散-向右上方的擴散很慢

管徑中加雞蛋膜

貳、研究目的：

- 一、利用糖度計測表面濃度，研究過錳酸鉀、蔗糖、葡萄糖、氯化鈣粉末在水中，從杯底向上擴散的快慢，以作為擴散研究對象選擇的依據。
- 二、設計擴散裝置，探討各種變因對過錳酸鉀擴散移動速率的影響。
 - (一)設計 A—**固定式擴散裝置**：研究 **擴散源容器外型、濃度、溫度、擴散管管徑粗細、擴散源水面高度、擴散源混合其他離子、擴散管中溶液濃度與種類** 對過錳酸鉀紫紅色前端擴散移動速率的影響。
 - (二)設計 B—**持續滴入式擴散裝置**：研究**濃度**對過錳酸鉀擴散移動速率的影響。
比較兩個設計的實驗結果，選擇最適合探討擴散的裝置。
- 三、在前項研究的基礎下，設計 C：**單向電錶式擴散裝置**：研究無色離子在水中的擴散速率。
 - (一)以三用電錶測量純水與 $10^{-4} \text{ M} \sim 1 \text{ M}$ 的食鹽水電阻值，研究離子接近電極時的電阻變化。
 - (二)使用**單向電錶式擴散裝置**，以過錳酸鉀溶液的擴散，來比較眼見紫色前端速率與電錶偏轉時間的差距，驗證設計的可行性。
 - (三)使用**單向電錶式擴散裝置**，研究 **食鹽水濃度、擴散(閘門到電極)距離、溶質種類不同(其他種鹽類)**，對擴散速率的影響。
- 四、應用沉澱反應，**設計 D—雙向擴散裝置**，以下列數種沉澱組合，進行雙向擴散，藉由沉澱發生的位置與時間，驗證**單向電錶式擴散裝置結果--無色離子在水中擴散速率大小比較**。
 - (一) $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ V.S. 鹵化鈉化合物 < NaCl ; NaBr ; NaI >
 - (二) $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ V.S. 鹵化鉀化合物 < KCl ; KBr ; KI >
 - (三) Na_2CO_3 V.S. 鹼土金屬族氯化物 < MgCl_2 ; CaCl_2 ; SrCl_2 ; BaCl_2 >
 - (四) Na_2CO_3 V.S. 鹼土金屬族硝酸鹽類 < $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$; $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$; $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ >
 - (五) 以不同濃度的硝酸鉛與碘化鈉對撞，測量沉澱發生的位置與時間。

參、研究設備與器材：

一、藥品：

(一) 鹵化鉀；鹵化鈉化合物： KCl ； KBr ； KI ； NaCl ； NaBr ； NaI

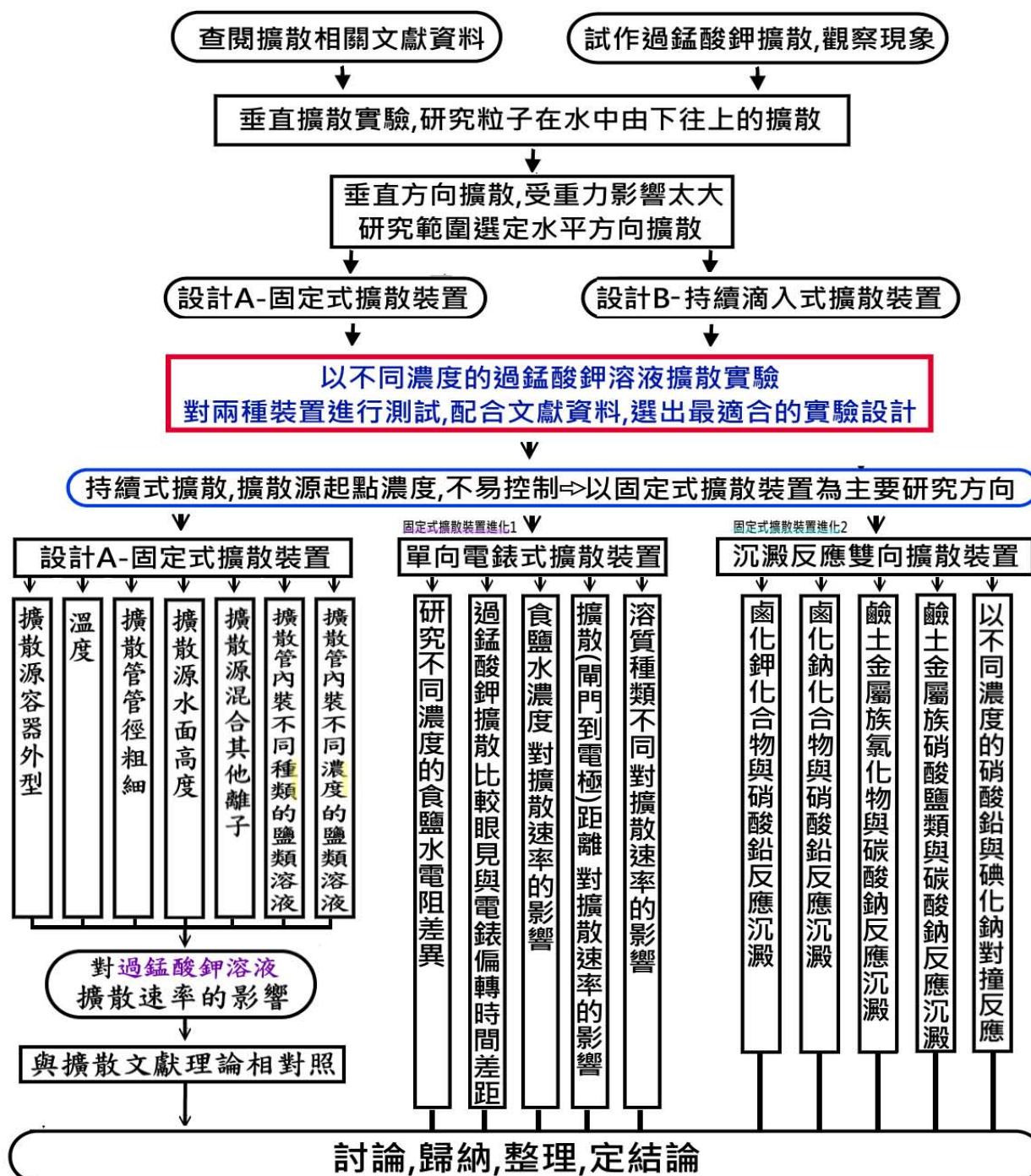
(二) 鹼土金屬族氯化物 $[\text{MgCl}_2$ ； CaCl_2 ； SrCl_2 ； $\text{BaCl}_2]$ ；鹼土族硝酸鹽 $[(\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ ； $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ； $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2]$ ； Na_2CO_3 ； $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ ； KMnO_4

二、器材：

壓克力片(管、槽)	電磁攪拌器	滴定管架	20ml 量筒	20cm 直尺	鐵夾	量瓶	吸量管	0.5、25ml 針筒
矽膠管(內徑 4-8mm)	木材(片)	安全吸球	水平儀	平底試管	鐵架	活栓	藥匙	100ml、5ml 量筒
PVC 管(內徑 4mm)	250ml 燒杯	溫度計	管路夾	三用電錶	碼表	滴管	糖度計	電子天秤(準度 0.01 克)

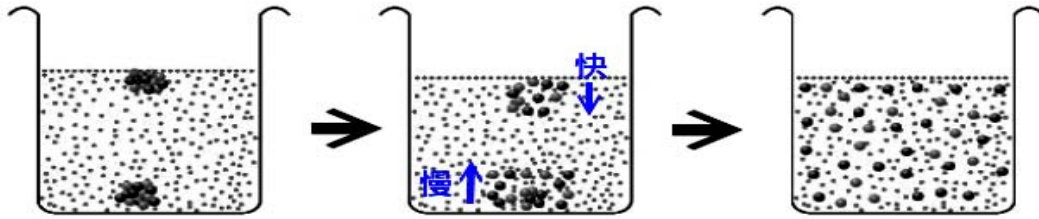
肆、研究過程與方法：

一、研究架構：



二、研究對象與文獻查閱：

(一)國中自然與生活科技課本第三冊第六章²，課本以下圖來說明擴散的原理：



粒子或物質從高濃度所在之處，慢慢地向四周低濃度處分散開來的現象，稱為擴散；當溫度愈高，物質的擴散現象便愈明顯。

我們的懷疑:由上往下的擴散,應該因重力而加快;由下往上的擴散應該因重力而減慢才對

(二)文獻資料：

1. 擴散的種類可分為四種⁸：我們的研究主題在於因濃度差而產生的普通擴散。

擴散現象分類	普通擴散	熱擴散	壓力擴散	強制擴散
原因	濃度差	溫度差	壓力差	外力差

2. 擴散現象的定量解釋---Fick 第一擴散定律^{8,9,10}：

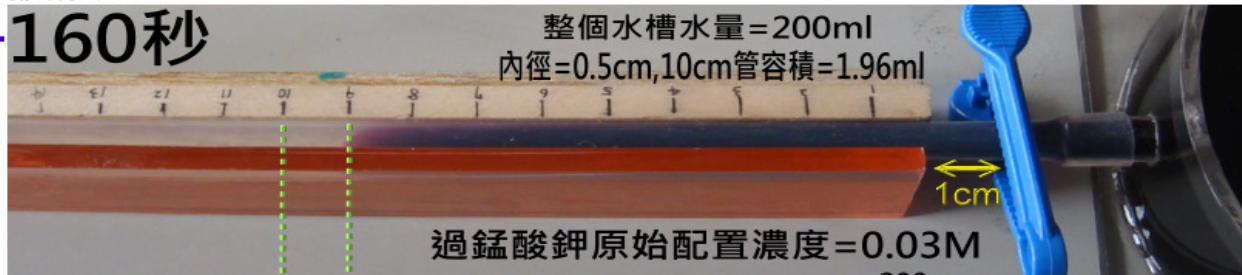
$$\frac{1}{A} \times \frac{\Delta n}{\Delta t} = J \text{ (擴散通量)} = -D \times \frac{\Delta C}{\Delta X}$$

其中: A=擴散通路截面積
 Δn =粒子數
 Δt =時間差
D=擴散係數
 $\frac{\Delta C}{\Delta X}$ =濃度梯度= $\frac{\text{濃度差}}{\text{距離差}}$

3.我們以固定式擴散裝置進行實驗，將所測得的擴散距離與時間的關係，作以下的處理¹：
 參考 Fick 擴散定律的幾個變因進行研究。

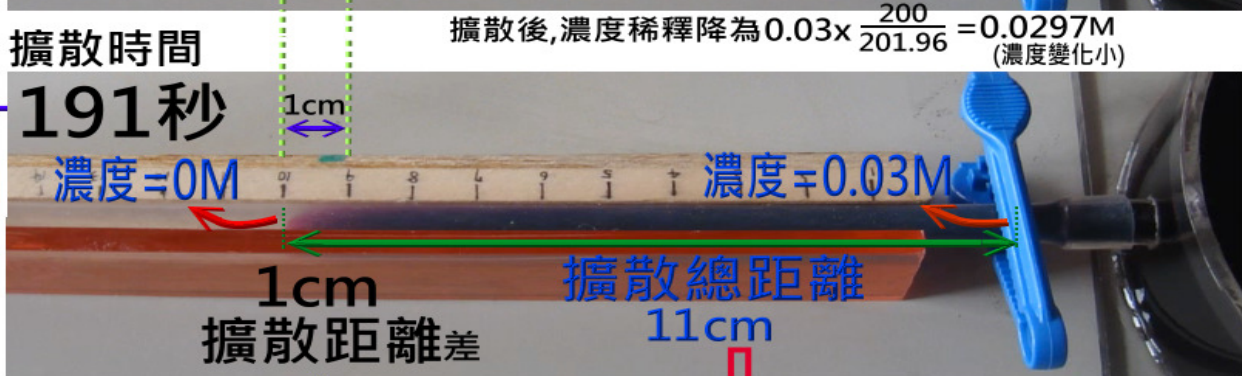
擴散時間

160秒



擴散時間

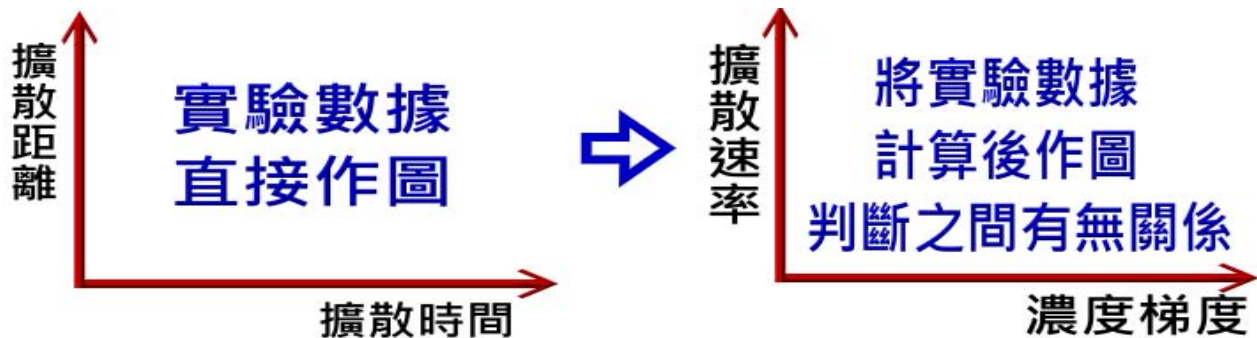
191秒



$$\text{擴散速率} = \frac{\text{擴散距離差}}{\text{擴散時間差}} = \frac{1}{191-160}$$

$$\text{濃度梯度} = \frac{\text{濃度差}}{\text{擴散總距離}} = \frac{0.03-0}{11}$$

⇒ 以濃度梯度(X軸) 對 擴散速率(Y軸)作圖,進一步判斷兩者之間的關係



4. 液體擴散現象的定量解釋---愛因斯坦(1905 年)：推導出計算擴散速度的數學公式
對理想(稀薄濃度)溶液¹²而言：

$$D = \frac{kT}{f} = \frac{RT}{N_A \times f}$$

(擴散係數)

其中: T=溫度 k =波茲曼常數

R=理想氣體常數

f =摩擦係數 N_A =亞佛加厥數

由於物體在液體中的擴散，會受到液體分子摩擦力 F 的阻擾，而

$$F = -f \times V$$

(摩擦力) (摩擦係數) (移動速度)

所以擴散係數越大，粒子在溶液中受到的摩擦力越小，擴散越快。

(三)歷屆科展作品^{4,5,6}：

26 屆台北市科展	47 屆全國科展	49 屆全國科展
誰是飛毛腿-擴散原理應用	散光彈-探討溶液性質對擴散的影響	利用雷射光的偏折測量擴散係數
用膠體為介質進行擴散 洋菜濃度<0.75%：介質濃度愈高，擴散愈快 洋菜濃度>0.75%：介質濃度愈高，擴散愈慢	以光度計測量溶液濃度 研究自上方滴入水中的物質垂直擴散 擴散速率主要受重力影響	硫代硫酸鈉的擴散係數，不隨濃度改變 濃度 10% 以下的蔗糖與尿素，擴散係數為定值

三、研究方法與設計裝置：

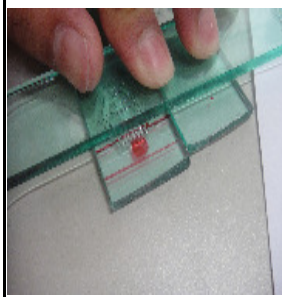
(一)最初設計與改進：

過錳酸鉀自杯底擴散	過錳酸鉀通過活栓擴散
缺點：無法測量顏色深淺與濃度關係	缺點：重力影響、活栓孔徑不一致
固定式擴散裝置的改進	持續滴入式擴散裝置的改進

最後改進產出四組擴散裝置設計(A~D): 固定式，持續滴入式，單向電錶式與雙向擴散裝置。

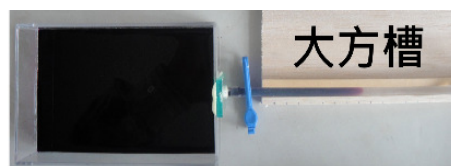
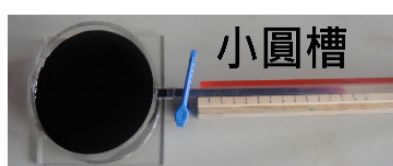
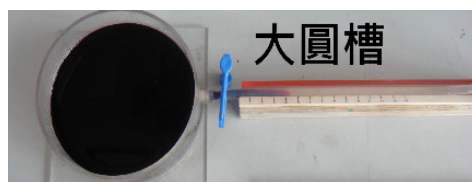
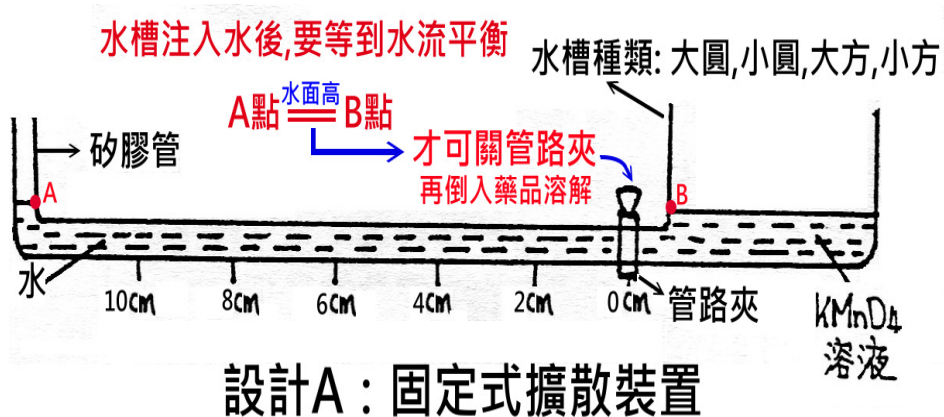
(二)水槽裝置製作記錄：

由於找不到現成的容器作為擴散源與擴散槽，轉向文具行購賣材料(木板，壓克力條，麻將牌尺)，自行鋸(切割)，黏貼成各種擴散裝置。

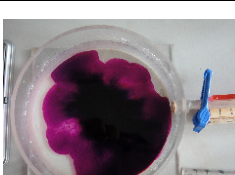
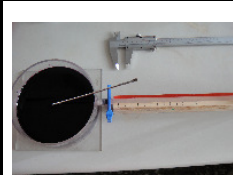
				
鋸壓克力片	磨平	測量洞位置	鑽洞	固定片與水槽接合

(三) 設計 A：固定式擴散裝置(如下圖)

1.原理：利用連通管原理,使水流靜止,而在一端加定量溶質,使其在靜止介質中,進行擴散。

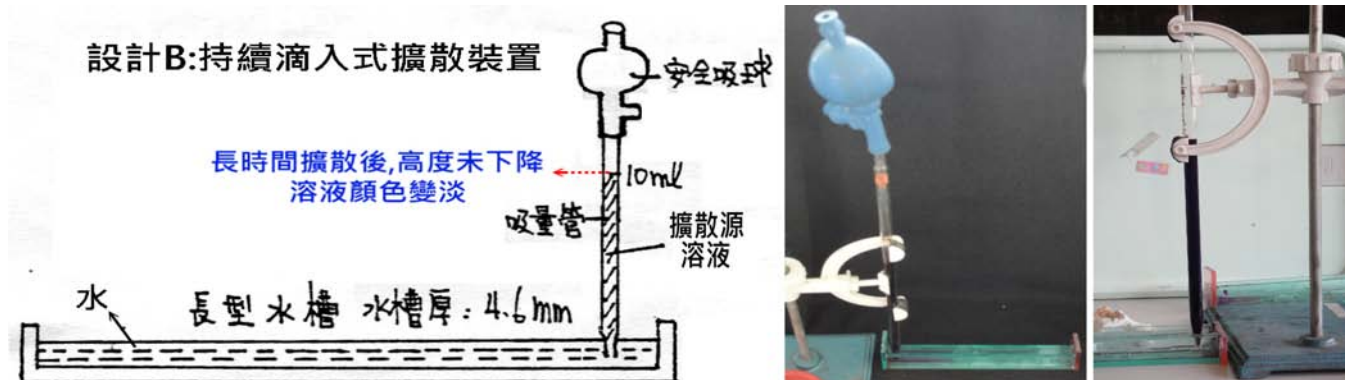


2.實驗步驟：

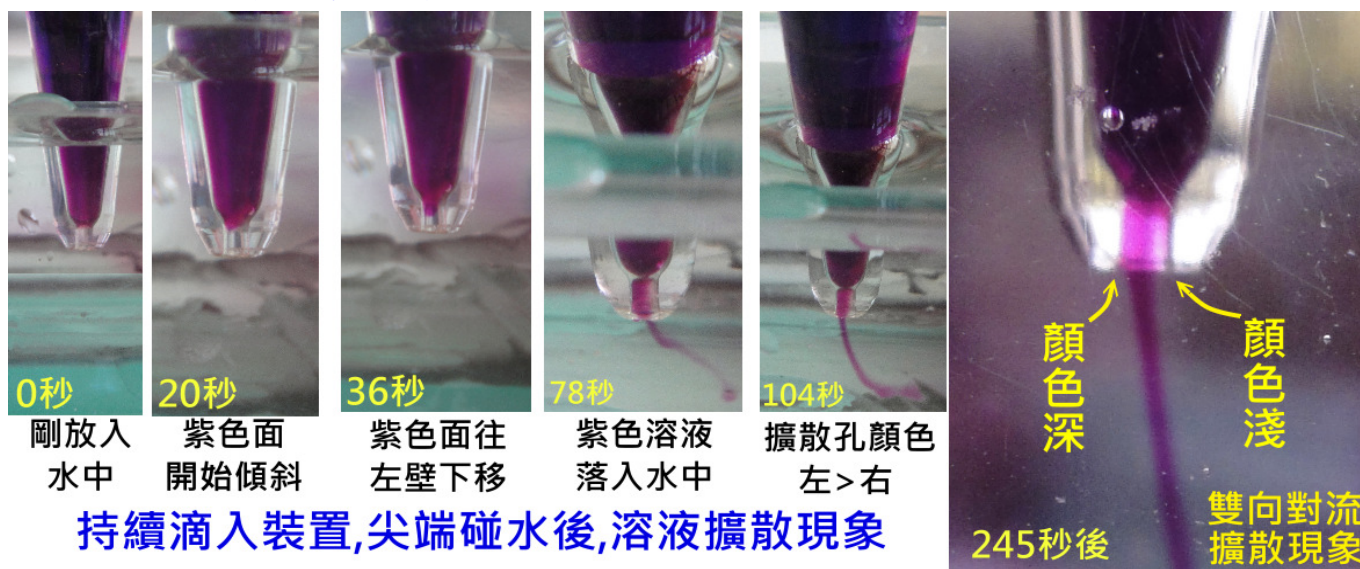
				
秤水重	水倒入擴散槽中	管柱水平測試	等水流平衡等高	關管路夾
				
秤溶質重量	溶質倒入擴散槽中，讓溶質完全溶解		等溶質擴散到閘門，開管路夾，開始擴散，測量到數個固定距離的時間	

(三) 設計 B：**持續滴入式擴散裝置**(如下圖)

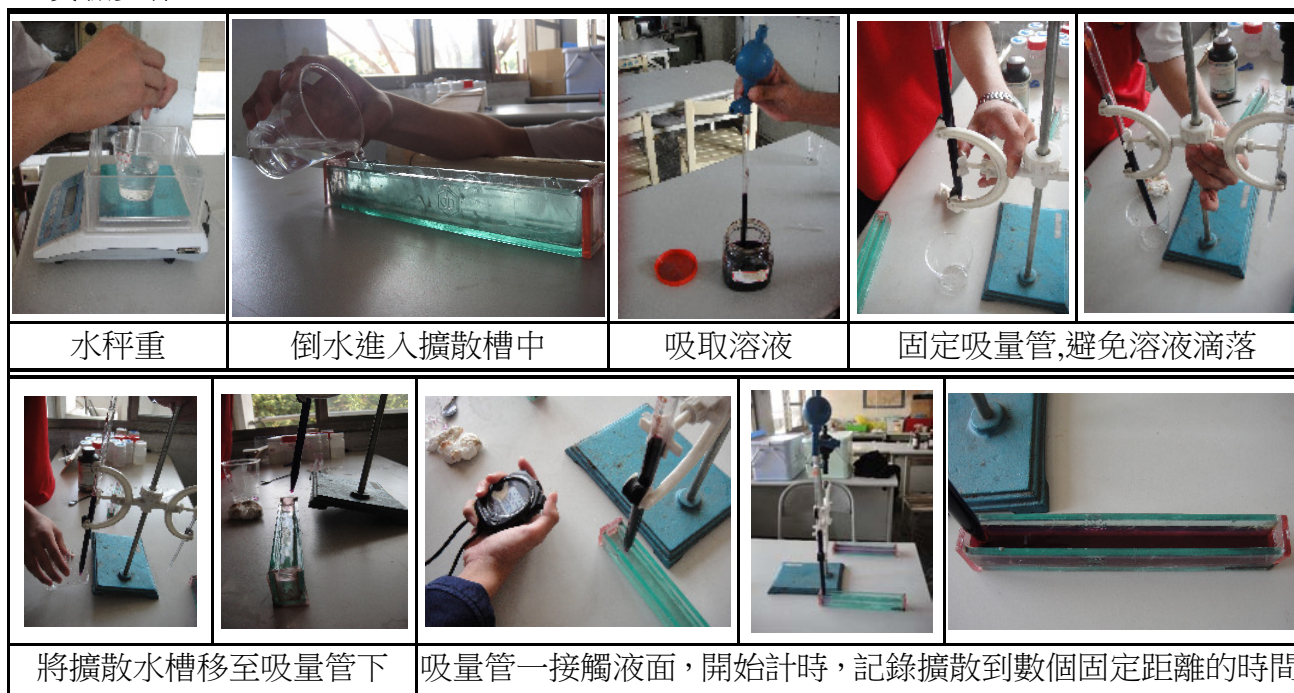
1.原理：實驗發現,吸量管吸起的溶液,尖端碰到水時，管中高濃度溶液會自動擴散到底下水中，同時底下的水也會向上方的管柱擴散。過程中，吸量管液面高度並無下降。利用此種現象做為第二種擴散源，進行研究。



2.持續滴入式擴散裝置的特殊發現：



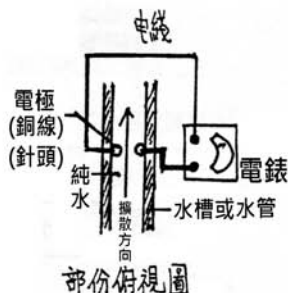
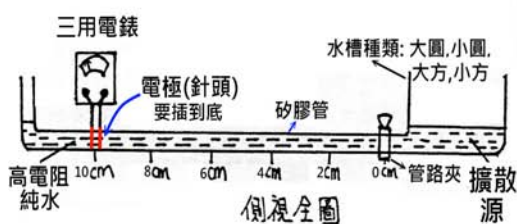
3.實驗步驟：



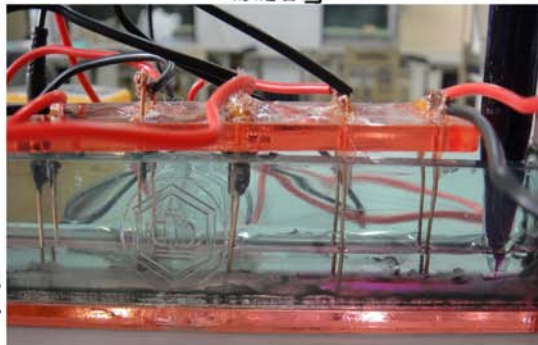
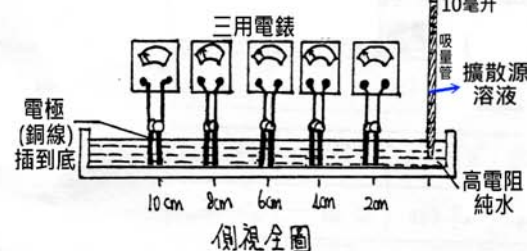
(四) 設計 C：單向電錶式擴散裝置(如下圖)

1.原理：利用純水難導電而電解質溶液導電度高的電阻差異^{1,3}，以電極柵欄偵測粒子的移動，配合三用電錶(電阻功能)及兩種擴散裝置，測量擴散速率。

設計A：固定式擴散裝置+電錶



設計B：持續滴入式擴散裝置+電錶



三用電表轉盤位置

2.實驗設計測試一：以三用電錶測量靜止不動的純水與 10^{-4} ~ 1M 的食鹽水電阻差距有多大

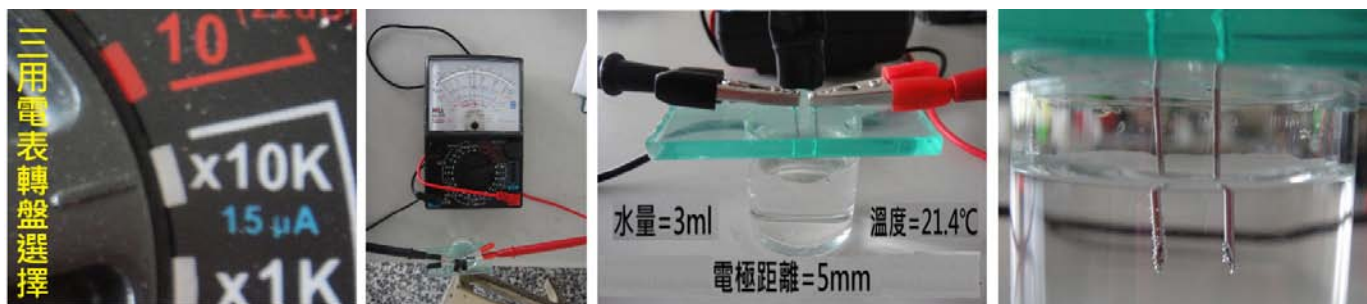
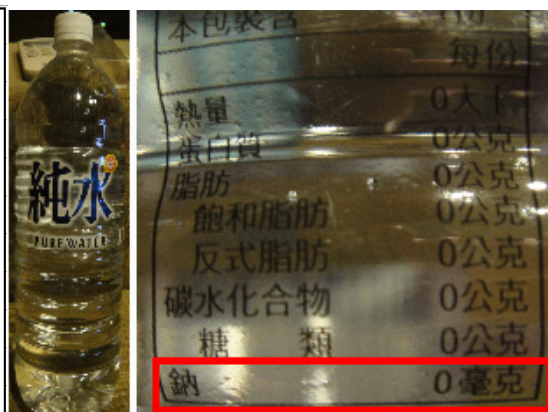
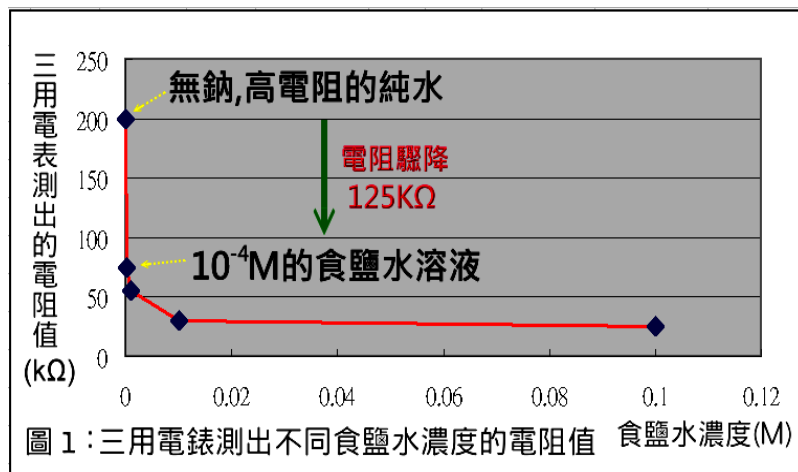


表 1：食鹽水濃度與電阻關係

食鹽水濃度(M)	0	0.0001	0.001	0.01	0.1	1
測量三次平均電阻(k Ω)	200.0	75.0	55.0	30.0	25.0	22.5



電錶式裝置使用無鈉,高電阻的純水

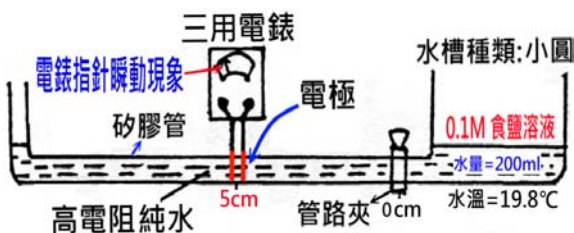
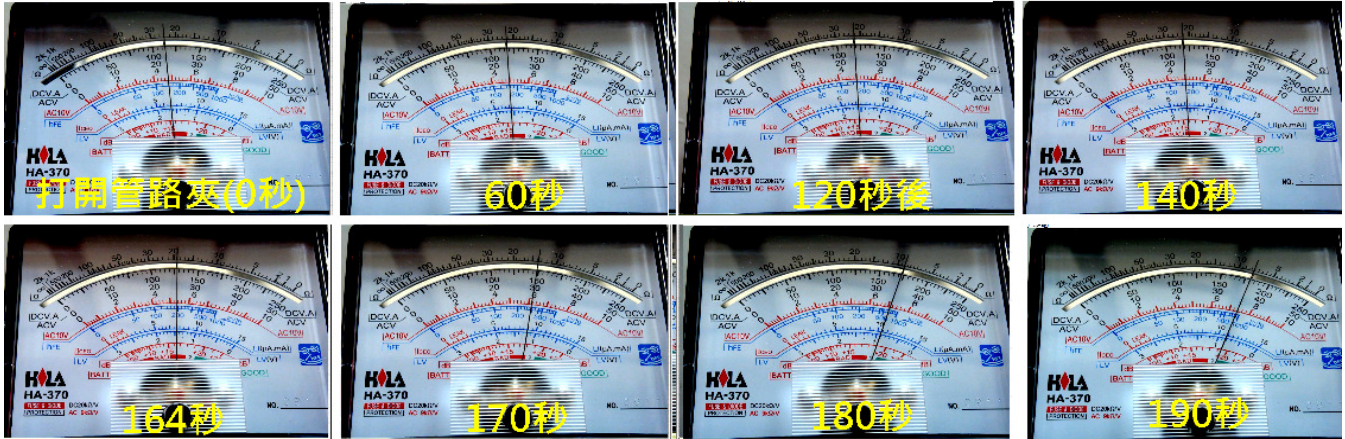
分析：從純水到 0.0001M 的食鹽水，電阻值急降 $125\text{k}\Omega$ ，可利用此特性設計單向電錶式擴散裝置，偵測離子擴散接觸電極的時間，進而得到擴散速率。

3.實驗設計測試二：單向電錶式擴散裝置--電錶電阻值瞬降現象

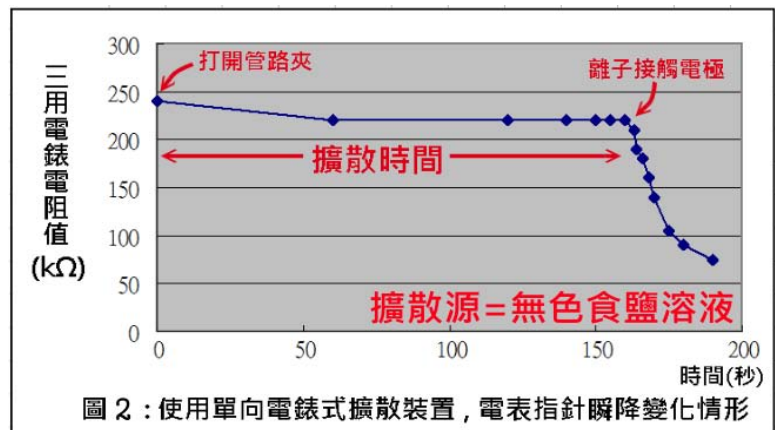
測試條件：0.1M的食鹽溶液,固定式擴散裝置,電極位置距擴散起點=5cm
溫度=19.8℃,電極間距離=3mm

時間(秒)	0	60	120	140	150	155	160	163	164	166	168	170	175	180	190
電阻值(kΩ)	240	220	220	220	220	220	220	210	190	180	160	140	105	90	75

我們的新發現：電錶電阻值瞬降現象



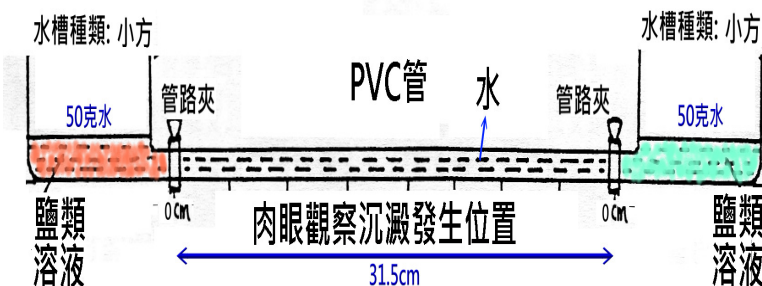
註:持續滴入式搭配電錶的擴散裝置,所得到的實驗結果,擴散梯度對濃度梯度作圖,所得相關係數比固定式差,考量研究時間範圍,暫時捨棄,以固定式發展為主。



4.實驗步驟：與固定式擴散裝置相同，記錄打開管路夾到電錶指針瞬動的時間差距。

(五) 應用沉澱反應，設計 D：雙向擴散裝置(如下圖)

1.原理：利用兩組固定式擴散裝置，從 PVC 管兩側向中央擴散，藉由兩擴散粒子相遇的沉澱反應³發生位置，測量擴散速率。



2.實驗步驟：與固定式擴散裝置相同，兩側管路夾同時打開，記錄沉澱發生的位置與時間。

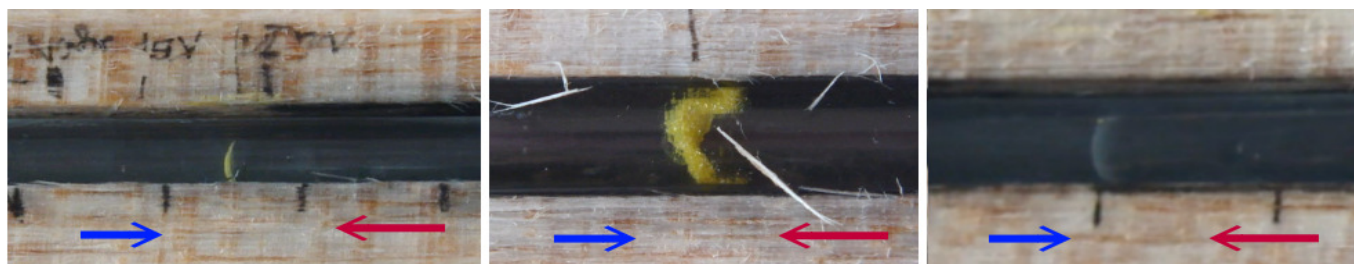
(13 種沉澱反應，每種至少作三次，見現場展示的錄影畫面)

3. 雙向擴散裝置應用到的沉澱反應方程式整理如下：

研究目標	所應用的 化學反應方程式	相撞產生沉澱物質
鹵化鉀化合物	$\text{Pb}(\text{NO}_3)_2 + 2\text{KX} \rightarrow \text{PbX}_2 \downarrow + 2\text{KNO}_3$	氯化鉛(白) 溴化鉛(白)
鹵化鈉化合物	$\text{Pb}(\text{NO}_3)_2 + 2\text{NaX} \rightarrow \text{PbX}_2 \downarrow + 2\text{NaNO}_3$	碘化鉛(黃色)
鹼土金屬族氯化物	$\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{MCl}_2 \rightarrow \text{MCO}_3 \downarrow + 2\text{NaCl}$	碳酸鎂(白) 碳酸鈣(白)
鹼土金屬族硝酸鹽	$\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{M}(\text{NO}_3)_2 \rightarrow \text{MCO}_3 \downarrow + 2\text{NaNO}_3$	碳酸鋇(白) 碳酸鋇(白)

4. 實驗測試：

(1) 由上方觀察沉澱發生：

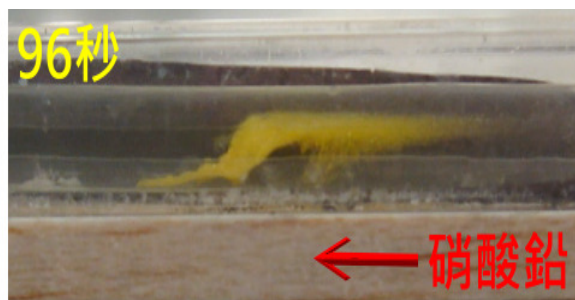
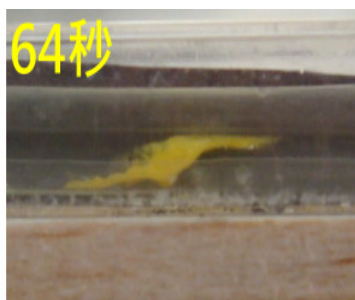
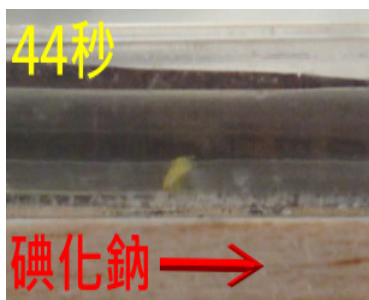
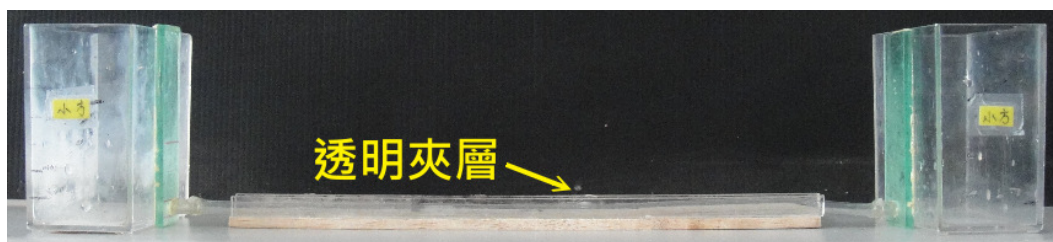


碘化鉀 + 硝酸鉛

碘化鈉 + 硝酸鉛

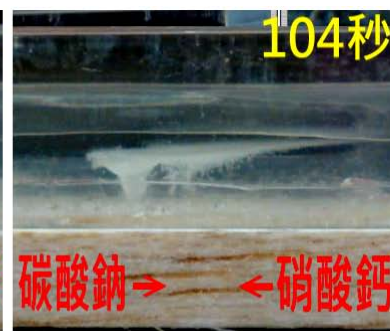
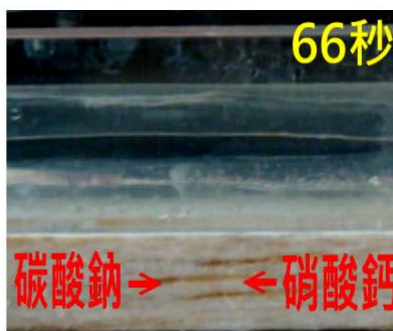
氯化鋇 + 碳酸鈉

(2) 設計透明夾層，從側面觀察沉澱發生：



四、在決定研究擴散這個主題後，老師就告訴我們：在高中，擴散也只有提到氣體擴散，液體的擴散是一種相當複雜的物理變化，會牽涉到對流、密度、壓力等問題，在大量的查閱資料後，有提到溶液擴散的定量資料也很少，而且大都是複雜的微積分、特殊符號等形式。為什麼

一個簡單的過錳酸鉀擴散，會牽扯到那麼多變因？若單純的用每秒鐘跑多遠的觀念(不用擴散通量)來作為擴散速率的定義。在控制良好的條件下，擴散定律會成立嗎？我們用“擴散”來代表過錳酸鉀在靜止水中的自由移動，如果移動滿足擴散定律，那這應該是真的擴散了吧！從簡單的觀察、改進、實驗、再改進、再實驗下手，我們在半年多的時間中，完成了以下的結果。



伍、研究結果：

一、用糖度計測表面濃度，研究過錳酸鉀、蔗糖、葡萄糖、氯化鈣在水中，從杯底向上擴散的快慢，來選擇研究對象。

實驗步驟 (蔗糖、葡萄糖、氯化鈣 在水中溶解度高，糖度計容易測出其濃度變化)

秤空試管重與溶質重

五組不同溶質重的試管

加水 20ml，靜置

每隔數小時，測量溶液表面糖度(濃度)，至少持續 1 日以上

1 日後，蓋瓶塞，上下顛倒搖晃，使溶質完全溶解，再測量溶液表面糖度(濃度)

表 1：三種溶質由杯底向上擴散時，經過不同時間，水面量到的糖度值

氯化鈣重(克)	0	1	3	6	9
水重(克)	20	20	20	20	20
均勻濃度	0%	4.8%	13.0%	23.1%	31.0%
0小時	0.0	3.9	5.0	7.2	10.1
0.33小時糖度	0.0	3.2	6.0	7.8	11.2
0.67小時糖度	0.0	3.6	5.0	8.4	11.0
2小時糖度	0.0	3.0	7.2	9.4	11.5
3小時糖度	0.0	3.0	7.2	9.8	12.3
11小時糖度	0.0	4.0	9.2	12.0	15.6
19小時糖度	0.0	5.0	11.2	13.6	19.8
22小時糖度	0.0	6.0	13.4	14.8	21.2
24小時糖度	0.0	7.0	14.0	16.2	21.8
26小時糖度	0.0	9.6	15.0	17.6	23.0
換算攪拌後糖度	0.0	16.2	38.4	72.0	101.4

葡萄糖重(克)	1	2	3	4	5
水重(克)	20	20	20	20	20
葡萄糖水濃度	4.8%	9.1%	13.0%	16.7%	20.0%
0小時糖度	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
3小時糖度	0.2	0.2	0.2	0.2	0.5
9小時糖度	0.2	0.2	0.2	0.2	0.6
14小時糖度	0.2	0.3	0.2	0.2	0.8
26小時糖度	0.2	0.3	0.2	0.4	0.8
36小時糖度	0.2	0.3	0.2	0.4	0.8
43小時糖度	0.2	0.4	0.3	0.8	1.0
57小時糖度	0.2	0.4	0.4	0.8	1.0
攪拌後糖度	4.0	8.2	12.0	15.0	18.4

蔗糖重(克)	1	2	3	4	5
水重(克)	20	20	20	20	20
蔗糖水濃度	4.8%	9.1%	13.0%	16.7%	20.0%
0小時糖度	0.2	0.2	0.8	0.4	0.2
1小時糖度	0.6	0.8	0.6	0.6	0.6
19小時糖度	0.6	1.2	1.2	0.8	0.8
43小時糖度	0.6	1.2	1.0	0.8	1.0
48小時糖度	0.2	1.2	1.0	0.8	0.8
攪拌後糖度	4.8	9.3	13.1	16.7	19.8

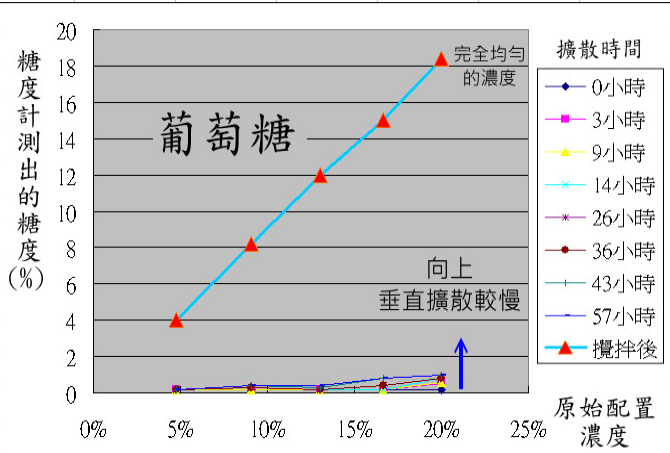


圖 3：試管底部溶質向上溶解擴散，不同時間後，水面濃度變化1

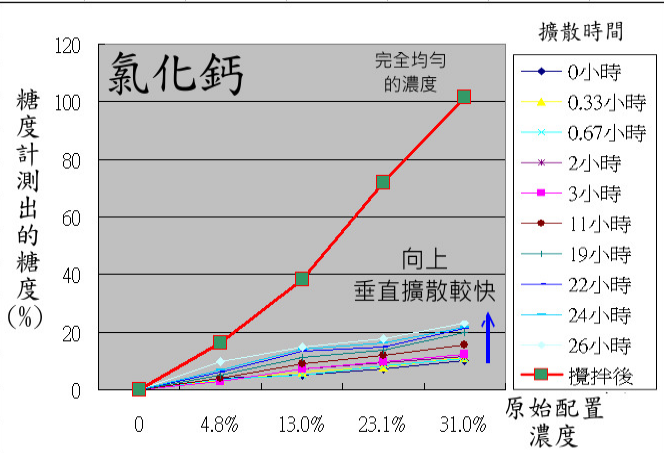
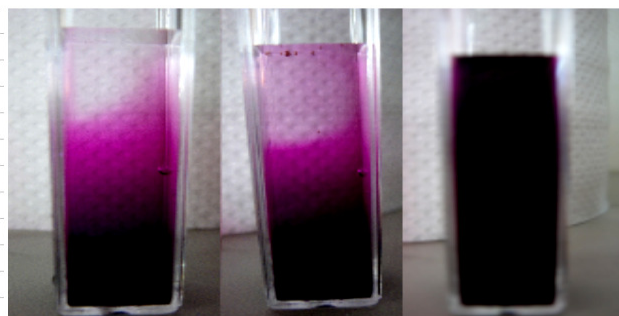
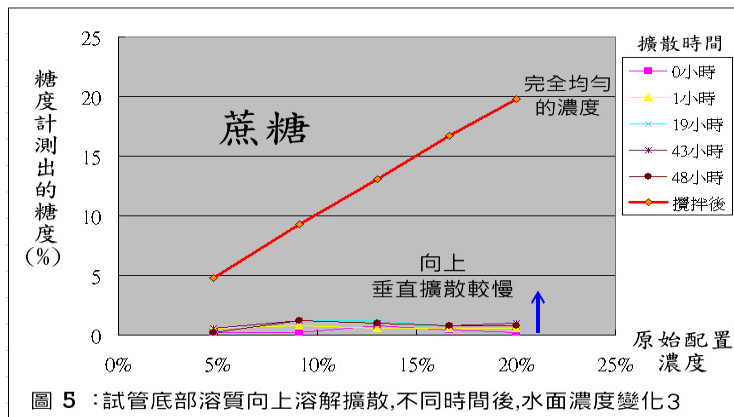


圖 4：試管底部溶質向上溶解擴散，不同時間後，水面濃度變化2



0小時 ➤ 0.25小時 ➤ 17.5小時
過錳酸鉀在一天內就可以擴散均勻

結果分析：因為葡萄糖和蔗糖在水裡垂直向上擴散的速率較氯化鈣慢，所以我們決定以鹽類作為實驗對象，特別是有顏色的過錳酸鉀，更方便讓我們研究與觀察。

二、設計擴散裝置，探討各種變因對過錳酸鉀擴散移動速率的影響。

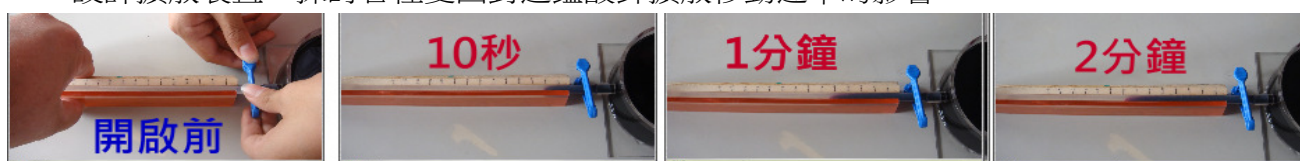


圖 6：固定式擴散裝置,擴散過程記錄(條件:0.05M過錳酸鉀,水量=200ml,26°C,小圓槽)

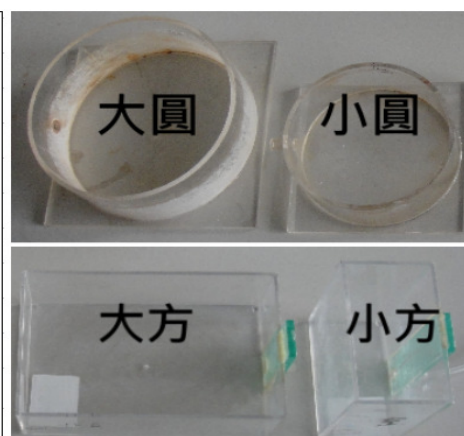
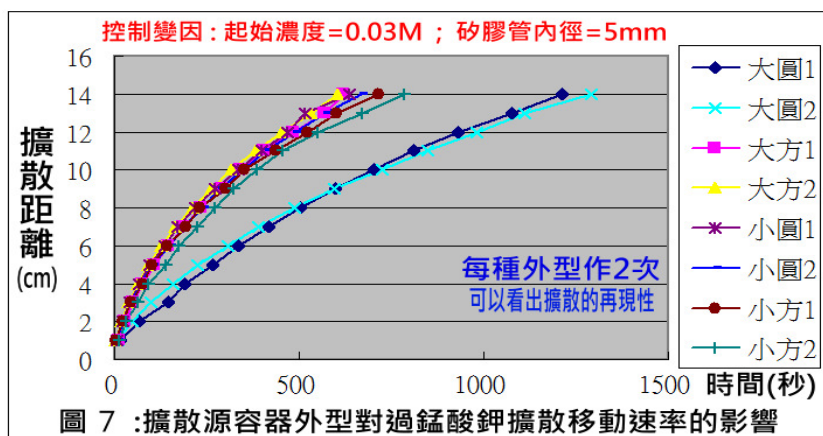
(研究一)以固定式擴散裝置研究擴散源容器外型對過錳酸鉀擴散移動速率的影響

表 3：固定式擴散實驗中,各種水槽尺寸,外形資料

自製	深(cm)	長(cm)	寬(cm)	管距地高(cm)	管內徑(cm)	管外徑(cm)	定作	深(cm)	圓槽內徑(cm)	管距地高(cm)	管內徑(cm)	管外徑(cm)
大方	5.00	15.25	9.60	1.05	0.48	0.7	大圓	4.95	11.54	2.25	0.62	1.00
小方	9.25	8.66	4.70	0.81	0.48	0.7	小圓	3.99	9.31	2.53	0.48	0.80

表 4：擴散源容器外型不同實驗中,過錳酸鉀擴散,距離與時間的關係

外型	溫度(°C)	距離(cm)	擴散時間(秒)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
大圓1	20.1	(左-右)		16.44	66.56	145.55	190.44	266.44	335.45	418.65	503.87	596.89	703.32	811.11	931.47	1074.78	1210.70
大圓2	21.5	(右-左)		10.08	48.13	98.52	158.21	224.55	306.63	387.93	487.61	594.54	723.11	848.76	980.36	1110.88	1290.50
大方1	22.7	(左-右)		12.13	28.00	49.93	74.83	108.52	144.26	186.77	233.47	291.03	342.59	406.51	485.29	568.65	621.54
大方2	21.3	(右-左)		2.67	18.00	37.04	62.18	92.04	126.01	164.71	212.86	263.22	317.07	381.49	452.72	532.37	604.50
小圓1	20.1	(左-右)		6.69	22.41	40.58	67.39	95.68	135.86	171.69	217.49	272.39	336.34	398.62	469.44	515.36	635.58
小圓2	21.5	(右-左)		6.89	23.54	45.54	69.56	101.52	148.75	187.54	235.84	285.88	348.94	412.55	487.33	568.11	666.54
小方1	21.8	(左-右)		4.69	20.61	42.95	74.37	100.10	142.59	192.82	232.45	300.94	352.61	436.35	521.24	600.54	714.21
小方2	20.1	(右-左)		13.23	33.05	61.87	93.26	139.78	174.54	224.55	272.44	321.55	384.77	455.22	552.11	672.45	785.41



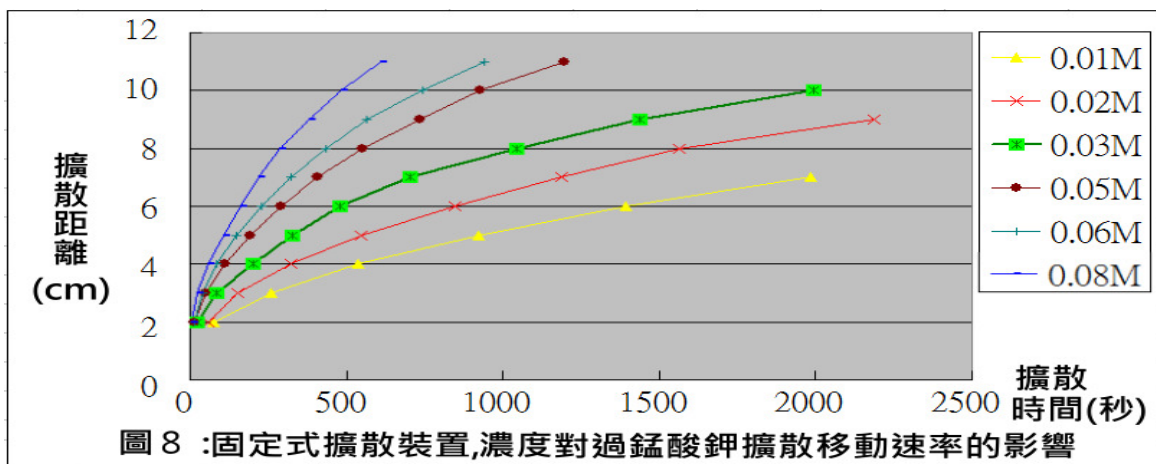
結果分析：小圓、大方、小方三水槽在相同條件下，得到類似的擴散速率，因此除了大圓以外，水槽類型不影響實驗。

(研究二)以**固定式擴散裝置**研究**濃度**對過錳酸鉀擴散移動速率的影響。

控制 變因	溫度	管中介質	矽膠管內徑	水槽水量	裝置規格
	14.2℃	水	5.0mm	200ml	小圓+設計 A：固定式擴散裝置

表 5：固定式擴散裝置,不同濃度的過錳酸鉀溶液擴散,距離與時間的關係

溫度(℃)	擴散距離 擴散 時間(秒)	2cm	3cm	4cm	5cm	6cm	7cm	8cm	9cm	10cm	11cm
14.2	0.01M	75.84	260.00	538.84	924.57	1394.78	1986.43				
14.2	0.02M	56.50	150.93	323.60	544.88	848.02	1188.26	1561.74	2185.93		
14.3	0.03M	20.30	83.14	202.33	326.45	479.77	705.26	1042.56	1436.40	1994.07	
14.2	0.05M	13.02	47.88	111.28	191.86	292.91	409.30	550.00	735.47	928.60	1197.21
14.5	0.06M	12.40	42.21	83.14	149.65	228.95	321.05	433.60	565.35	743.14	940.12
14.3	0.08M	2.56	23.02	57.56	108.72	161.16	221.28	286.51	379.88	484.77	607.56



進一步計算濃度梯度與擴散速率：

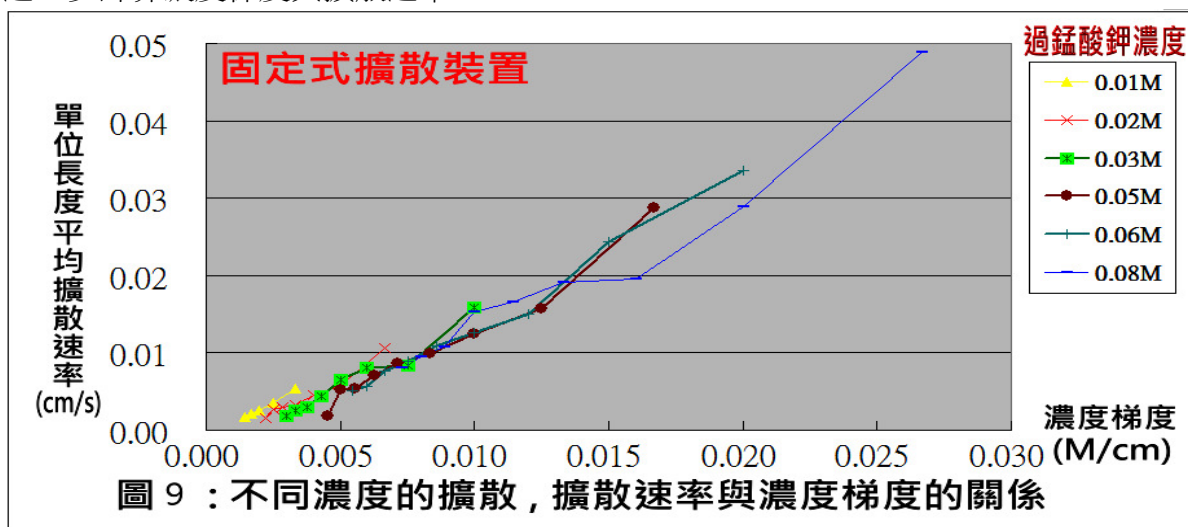
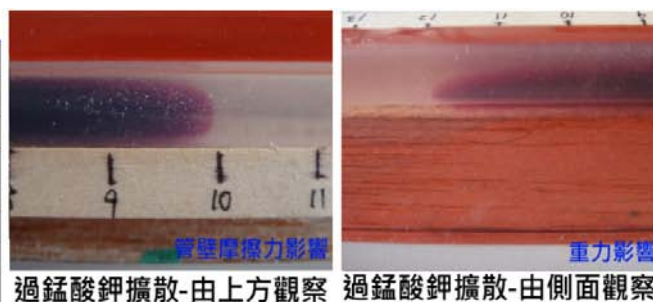


表 6：固定式擴散濃度實驗,擴散速率與濃度梯度作圖,趨勢線整理比較

過錳酸鉀溶液 濃度	濃度梯度 (X 軸) 對 擴散速率 (Y 軸) 作圖		
	趨勢線方程式	斜率	R ² 值(相關係數平方值)
0.01M	$y = 1.9598x - 0.0012$	1.9598	0.9943
0.02M	$y = 1.8676x - 0.0026$	1.8676	0.9616
0.03M	$y = 1.8905x - 0.0038$	1.8905	0.9613
0.05M	$y = 1.9512x - 0.0059$	1.9512	0.9657
0.06M	$y = 1.9616x - 0.0061$	1.9616	0.9879
0.08M	$y = 1.9315x - 0.0065$	1.9315	0.9558



- 分析：1.濃度愈高，過錳酸鉀擴散速率愈快；隨著距離增加，過錳酸鉀擴散有愈來愈慢的趨勢。
2.以濃度梯度對擴散速率作圖後，發現：不同濃度的所有點，趨勢線斜率非常接近。

(研究三)以**固定式擴散裝置**研究**溫度**對過錳酸鉀擴散移動速率的影響。

控制 變因	濃度	管中介質	矽膠管內徑	水槽水量	裝置規格
	0.05M	水	5.0mm	200ml	小圓+設計 A：固定式擴散裝置



表 7：不同溫度的過錳酸鉀溶液擴散,距離與時間的關係

擴散距離 溫度 擴散 時間(秒)	2cm	3cm	4cm	5cm	6cm	7cm	8cm	9cm	10cm	11cm	12cm	13cm	14cm
14.2°C	13.02	47.88	111.28	191.86	292.91	409.30	550.00	735.47	928.60	1197.10			
17.2°C	8.50	23.60	80.41	113.37	155.36	200.50	248.60	305.61	369.65	447.94	526.71	610.22	732.82
21.6°C	10.30	21.15	34.52	51.42	73.52	100.25	125.33	158.98	194.98	235.00	280.21	325.64	380.52
26.0°C	1.22	8.16	20.39	34.04	49.88	70.67	94.80	119.91	149.48	183.19	218.71	254.40	297.24

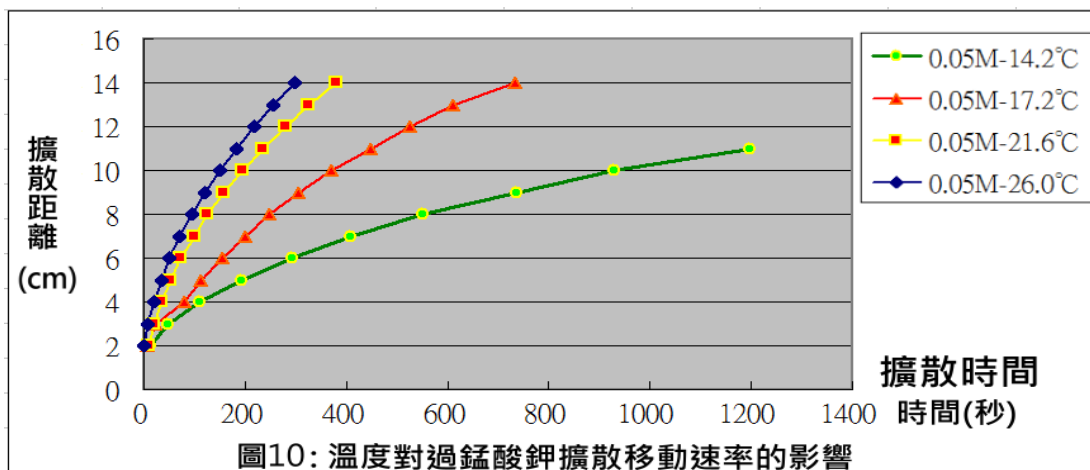


圖10：溫度對過錳酸鉀擴散移動速率的影響

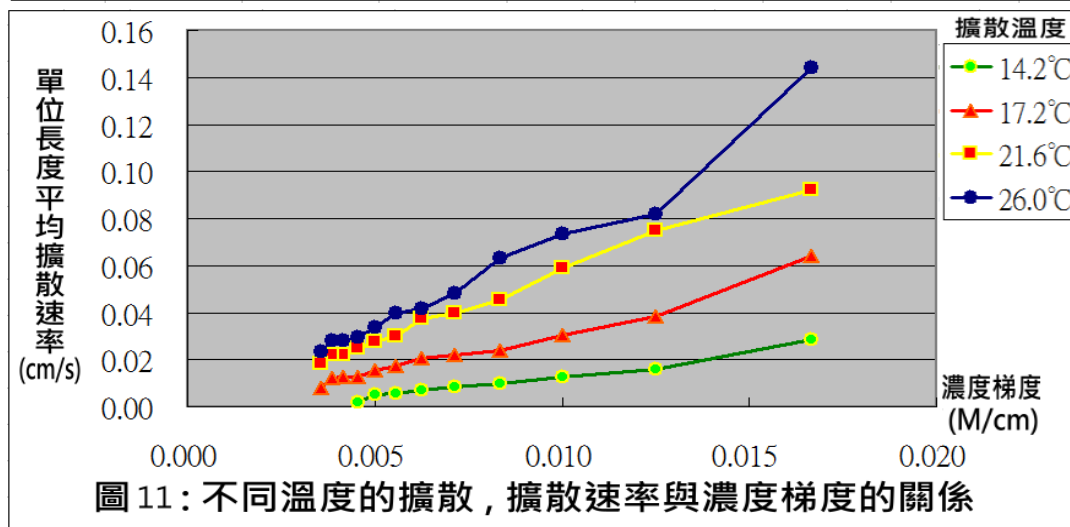


圖 11：不同溫度的擴散，擴散速率與濃度梯度的關係

表 8：固定式擴散溫度實驗,擴散速率對濃度梯度作圖,趨勢線整理比較

不同溫度的 過錳酸鉀溶液 擴散(固定式)	濃度梯度 (X 軸) 對 擴散速率 (Y 軸) 作圖		
	趨勢線方程式	斜率	R ² 值 (相關係數平方)
14.2°C	$y = 1.9512x - 0.0059$	1.9512	0.9657
17.2°C	$y = 3.7995x - 0.0045$	3.7995	0.9687
21.6°C	$y = 5.7799x - 0.0011$	5.7799	0.9928
26.0°C	$y = 8.4570x - 0.0088$	8.4570	0.9671

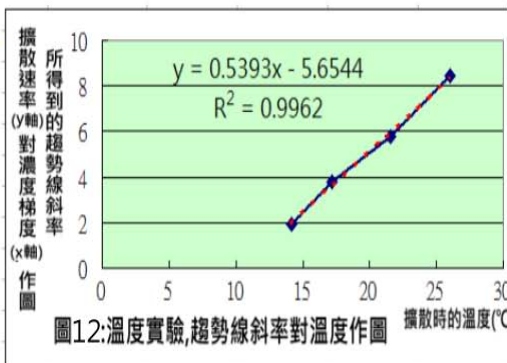


圖12:溫度實驗,趨勢線斜率對溫度作圖

- 分析：1.溫度高擴散變快，但過錳酸鉀擴散的越遠，擴散速率有愈來愈慢的趨勢（圖 10）。
2.濃度梯度對擴散速率作圖：4 種溫度有 4 條斜率不同的直線，溫度愈高，斜率愈大。

(研究四)以**固定式擴散裝置**研究**擴散管管徑粗細**對過錳酸鉀擴散移動速率的影響。

控制	濃度	管中介質	溫度	水槽水量	裝置規格
變因	0.05M	水	17.2℃	200ml	小圓+設計 A: 固定式擴散裝置

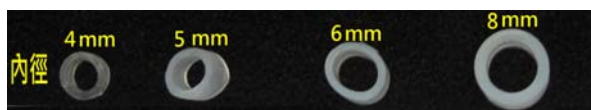


表 9 : 不同管徑的過錳酸鉀溶液擴散, 距離與時間的關係

管徑	擴散距離 管截面積 (秒)	2cm	3cm	4cm	5cm	6cm	7cm	8cm	9cm	10cm	11cm	12cm
4mm	12.6mm ²	6.21	24.58	59.85	109.00	177.40	265.03	384.72	537.54	720.29	932.95	1172.32
5mm	19.6mm ²	5.88	12.76	28.85	48.09	72.67	96.18	132.52	166.71	221.54	298.56	400.51
6mm	28.3mm ²	紊流	5.32	11.59	21.47	33.13	48.00	65.19	84.43	107.52	133.52	163.54
8mm	38.5mm ²	紊流	2.92	4.58	8.50	13.50	21.30	31.30	42.75	54.43	67.90	83.52

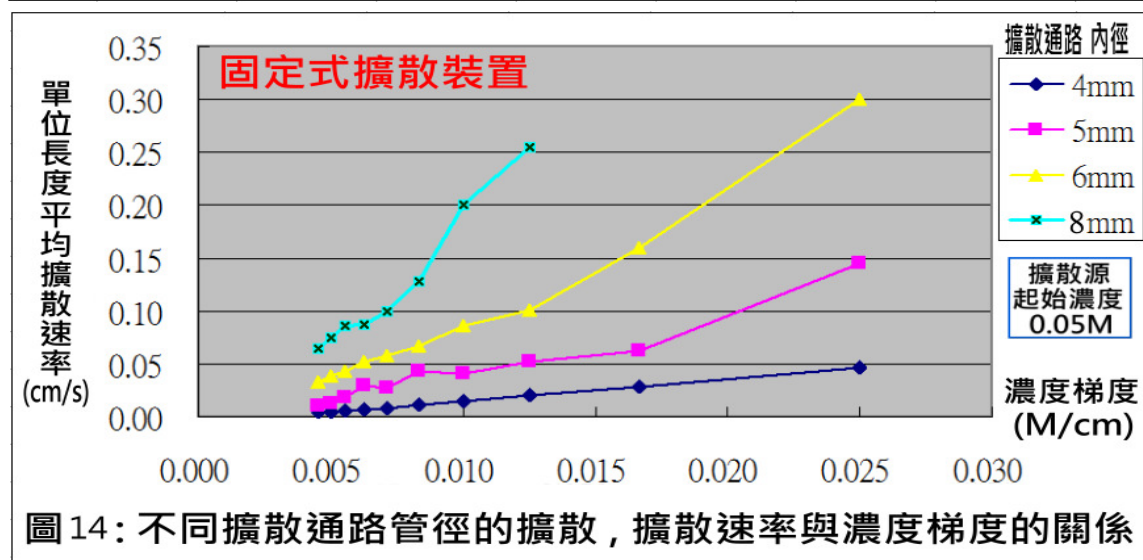
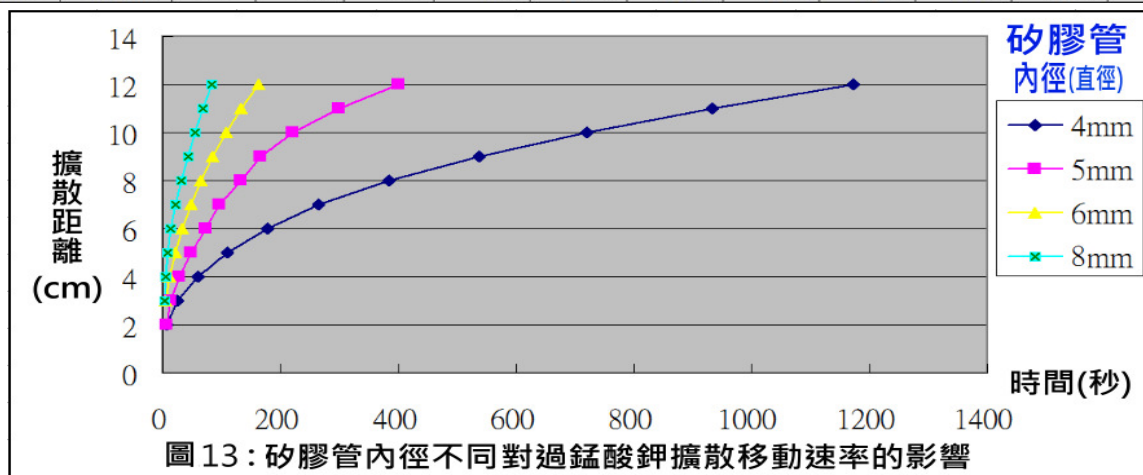
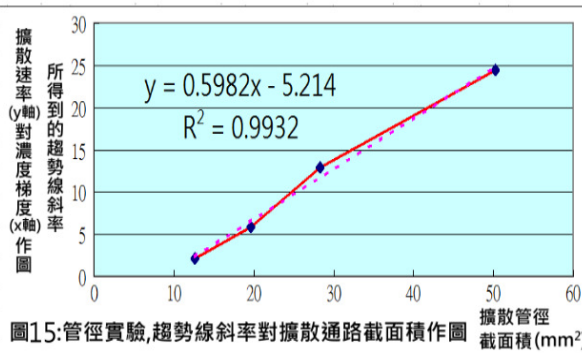


表10 : 固定式擴散管徑實驗, 擴散速率對濃度梯度作圖, 趨勢線整理比較

過錳酸鉀 擴散管徑		濃度梯度 (X 軸) 對 擴散速率 (Y 軸) 作圖		
管徑	通路面積	趨勢線方程式	斜率	R ² 值 (相關係數平方)
4mm	12.6mm ²	$y = 2.1025x - 0.0062$	2.1025	0.9990
5mm	19.6 mm ²	$y = 5.9236x - 0.0158$	5.9236	0.9428
6mm	28.3 mm ²	$y = 12.905x - 0.0354$	12.905	0.9700
8mm	50.2 mm ²	$y = 24.454x - 0.057$	24.454	0.9646



分析: 1. 管內徑愈粗, 過錳酸鉀擴散速率愈快。

2. 以濃度梯度對擴散速率作圖: 四種內徑有四條斜率不同的直線, 內徑越粗, 斜率愈大。

(研究五)以**固定式擴散裝置**研究**擴散源水面高度**對過錳酸鉀擴散移動速率的影響。

控制變因	濃度	管中介質	矽膠管內徑	溫度	裝置規格
	0.05M	水	5mm	18.8℃	小方+設計 A: 固定式擴散裝置

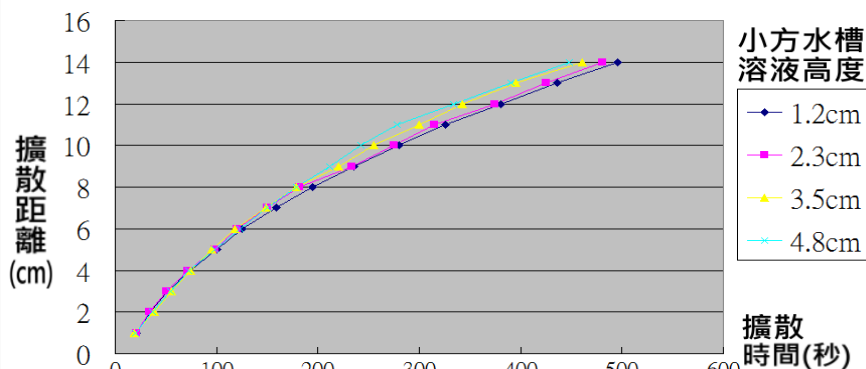
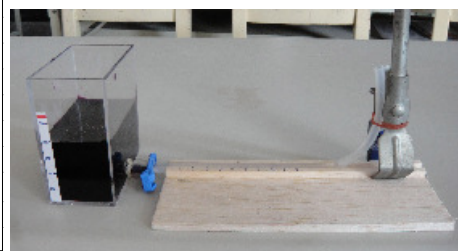
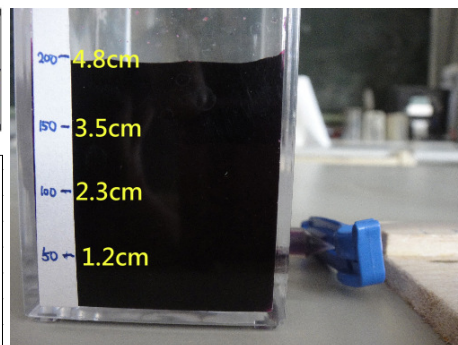


圖 16: 擴散源水槽內溶液高度, 對擴散速率的影響

分析：固定式擴散裝置中，擴散源水面高度的改變，過錳酸鉀擴散速率變化不明顯

(研究六)以**固定式擴散裝置**研究**擴散源混合其他離子**對過錳酸鉀擴散移動速率的影響。

表 11：混合不同濃度的食鹽與過錳酸鉀一起擴散, 擴散距離與時間的關係

擴散溶質種類 \ 擴散距離 擴散時間(秒)		擴散距離													
		1cm	2cm	3cm	4cm	5cm	6cm	7cm	8cm	9cm	10cm	11cm	12cm	13cm	14cm
0.03M 過錳酸鉀		6.69	22.41	40.58	67.39	95.68	135.86	171.69	217.49	272.39	336.34	398.62	469.44	515.36	635.58
0.03M 過錳酸鉀 + 0.1M 食鹽		3.54	10.11	20.93	31.54	44.93	62.04	81.23	103.07	127.47	155.33	180.95	204.02	238.09	283.86
0.03M 過錳酸鉀 + 0.01M 食鹽		1.72	6.25	17.73	33.42	54.78	80.9	112.31	150.52	187.27	235.64	289.59	349.23	425.59	516.85
0.03M 過錳酸鉀 + 0.05M 食鹽		2.11	13.23	22.65	36.2	53.61	72.75	98.18	125.81	149.91	186.19	221.13	259.19	301.63	348.16

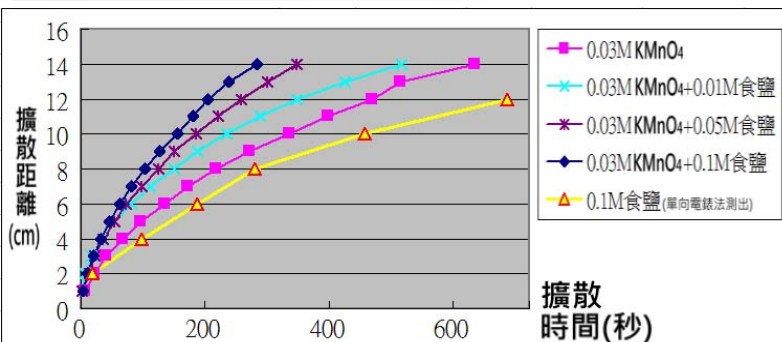


圖 17: 在過錳酸鉀的擴散源中, 加入食鹽, 研究食鹽濃度對擴散速率的影響

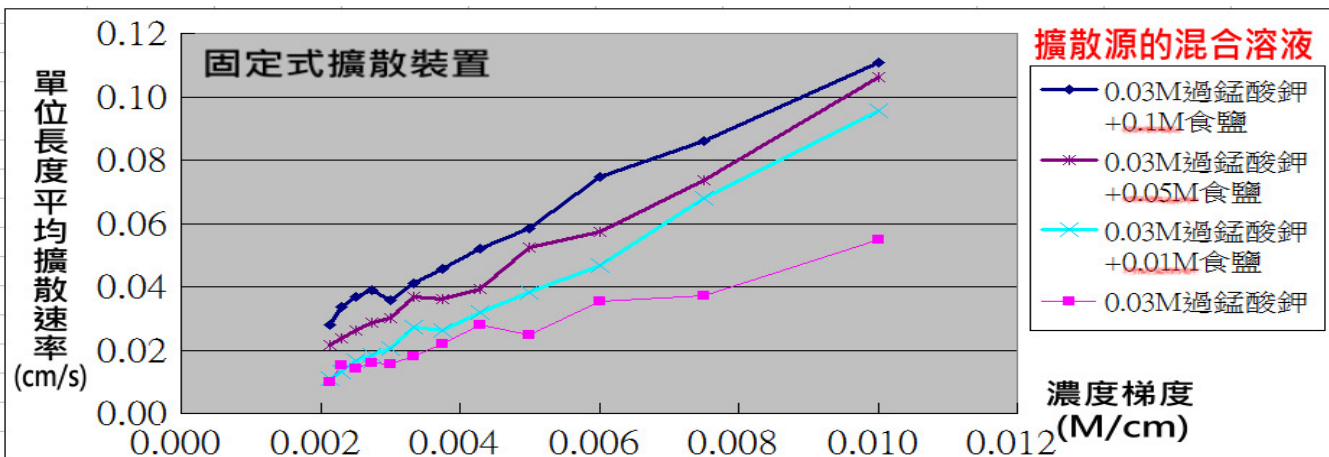
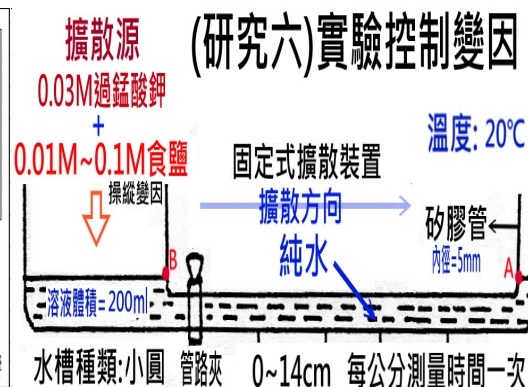
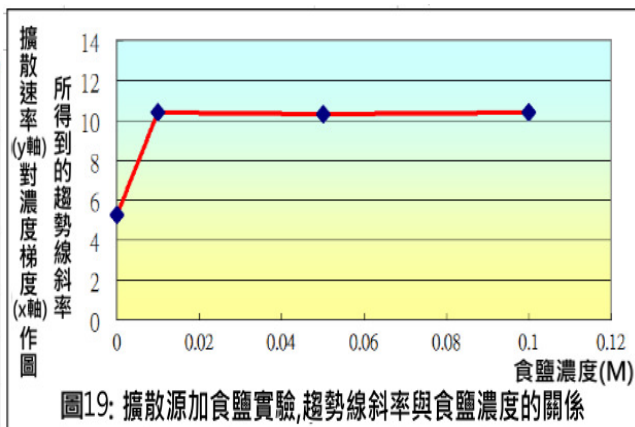


圖 18: 過錳酸鉀溶液混合食鹽擴散, 擴散速率與濃度梯度的關係

表12: 固定式擴散加鹽實驗, 擴散速率對濃度梯度作圖, 趨勢線整理比較

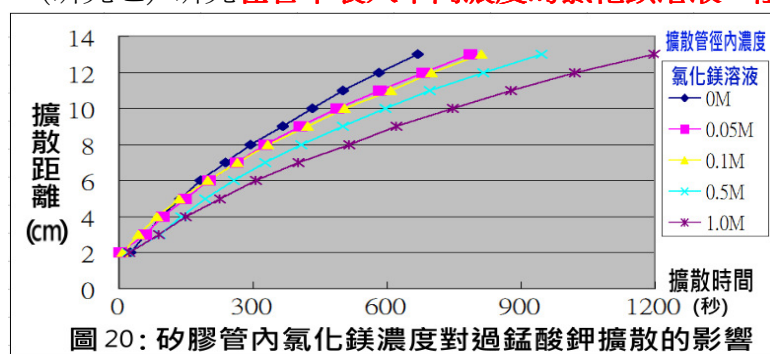
與不同量的食鹽混合後的過錳酸鉀溶液擴散(固定式)	濃度梯度 (X 軸) 對 擴散速率 (Y 軸) 作圖		
	趨勢線方程式	斜率	R ² 值 (相關係數平方)
0.03M 過錳酸鉀	$y = 5.2895x + 0.0011$	5.2895	0.9692
0.03M 過錳酸鉀+0.01M 食鹽	$y = 10.401x - 0.0111$	10.401	0.9914
0.03M 過錳酸鉀+0.05M 食鹽	$y = 10.311x - 0.0008$	10.311	0.9894
0.03M 過錳酸鉀+0.1M 食鹽	$y = 10.387x + 0.0008$	10.387	0.9913



分析：1. 加入食鹽越多，過錳酸鉀擴散速率愈快

2. 以濃度梯度對擴散速率作圖：出現四條直線，加食鹽的三條有相近的斜率。

(研究七) 研究在管中裝入不同濃度的氯化鎂溶液，阻止過錳酸鉀擴散，擴散速率的變化為何？



(研究七) 實驗控制變因

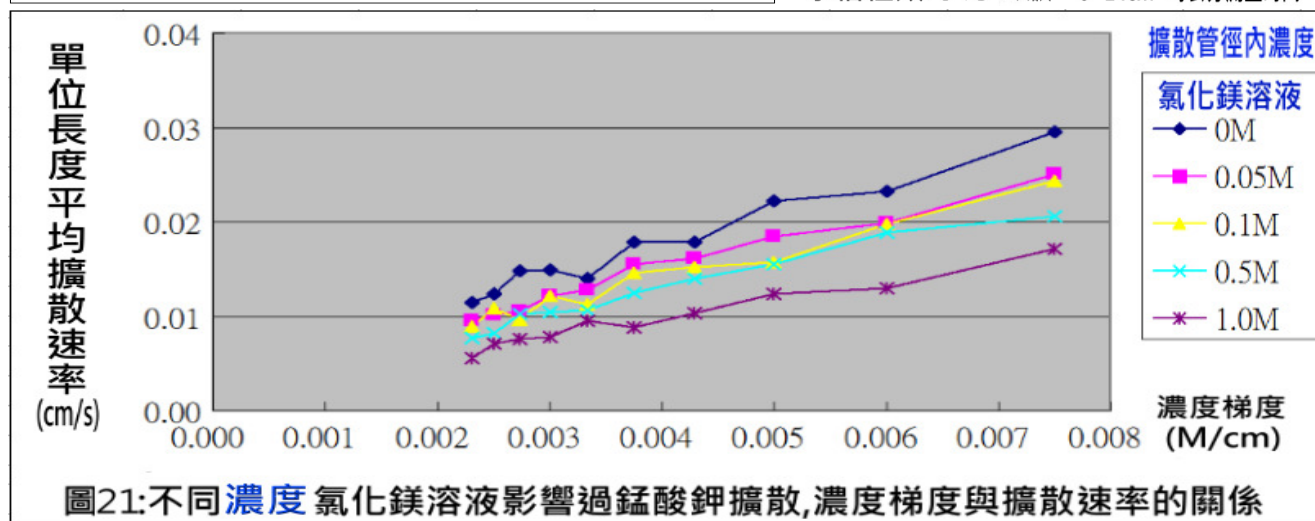
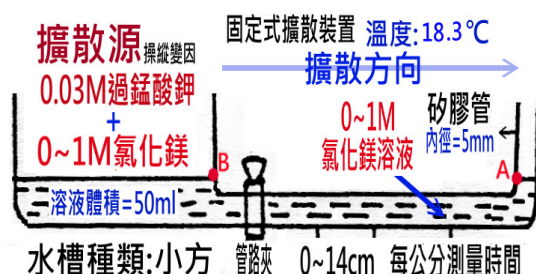
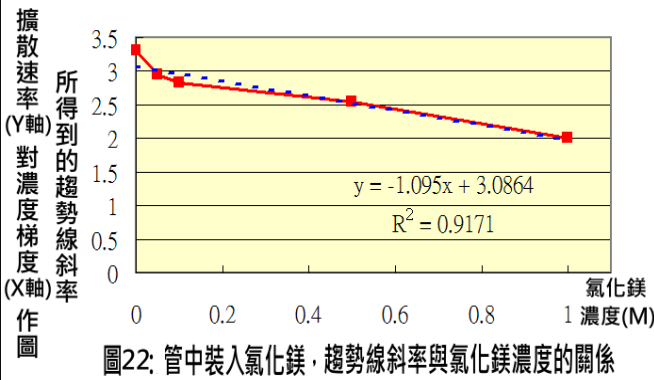


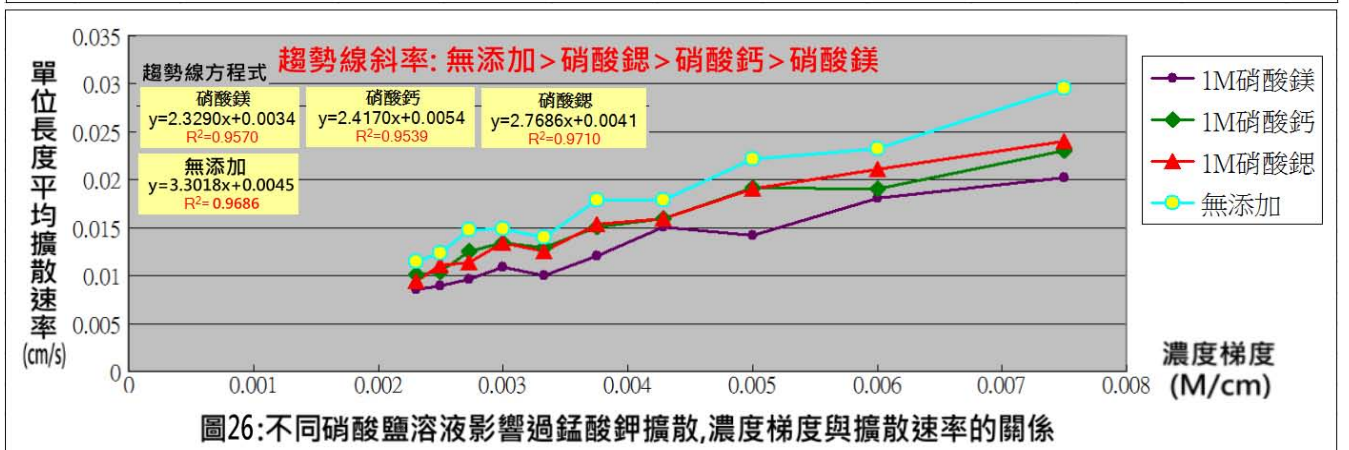
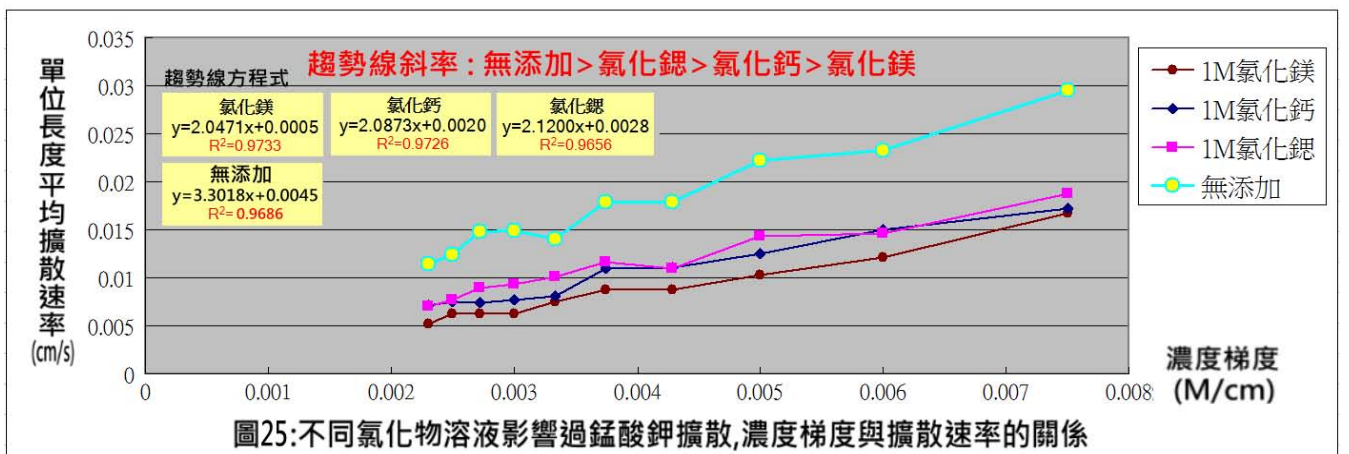
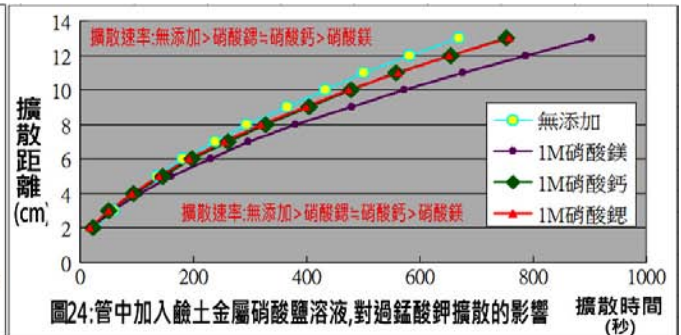
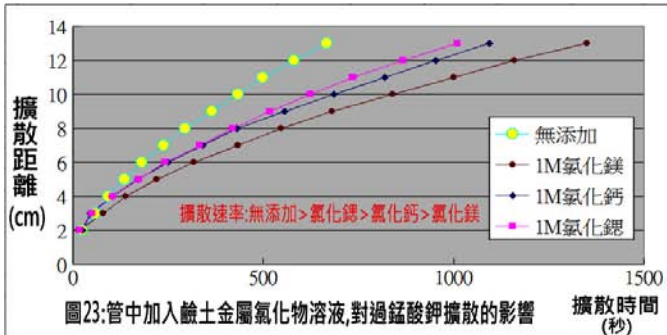
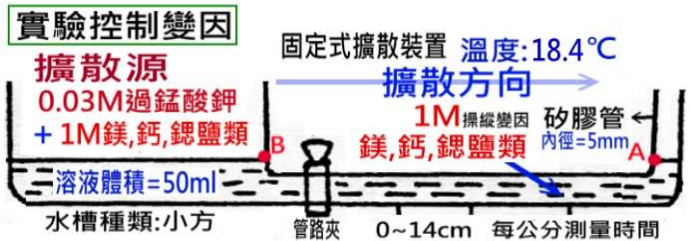
表13: 不同濃度的氯化鎂溶液影響過錳酸鉀擴散, 濃度梯度對擴散速率作圖, 趨勢線整理

氯化鎂溶液濃度	濃度梯度 (X 軸) 對 擴散速率 (Y 軸) 作圖		
	趨勢線方程式	斜率	R ² 值 (相關係數平方)
0M	$y = 3.3018x + 0.0045$	3.3018	0.9686
0.05M	$y = 2.9442x + 0.0032$	2.9442	0.9825
0.10M	$y = 2.8236x + 0.0029$	2.8236	0.9671
0.5M	$y = 2.5500x + 0.0026$	2.5500	0.9747
1.0M	$y = 2.0055x + 0.0018$	2.0055	0.9681



分析：氯化鎂溶液濃度愈高，紫色過錳酸鉀擴散越慢，趨勢線斜率越低。

(研究八)以固定式擴散裝置研究：在管中裝入同濃度的鹼土金屬氯化物與硝酸鹽類溶液，阻止過錳酸鉀擴散，不同種的鹽類會使擴散速率的變化為何？



(研究九)以持續滴入式擴散裝置研究濃度對過錳酸鉀擴散移動速率的影響。

控制變因	吸量管尖距槽底	溫度	擴散水槽寬	擴散水槽水面高	吸量管溶液量	水槽水量	裝置規格
	8mm	17°C	12.7mm	12.8mm	10ml	200 克	設計 B：持續滴入式擴散裝置

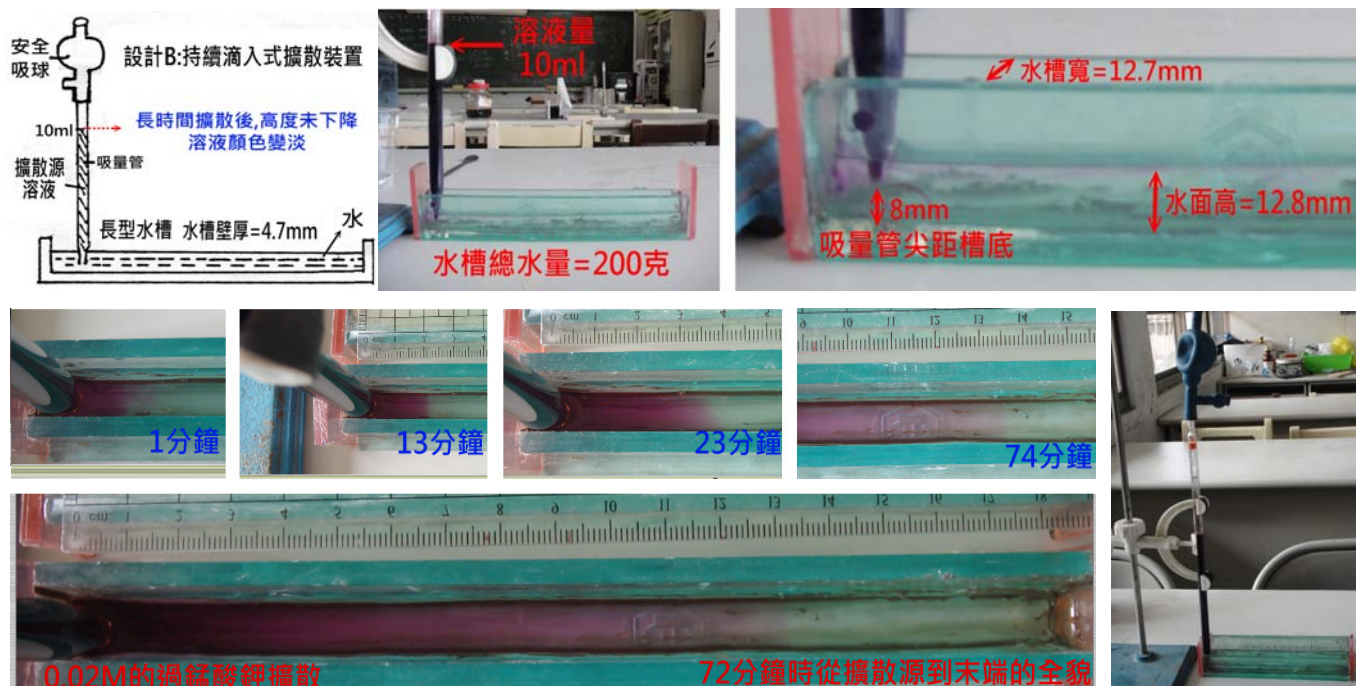


表 14：持續滴入式擴散裝置,不同濃度的過錳酸鉀溶液擴散,距離與時間的關係

擴散距離 濃度 擴散時間 (秒)	0cm	1cm	2cm	3cm	4cm	5cm	6cm	7cm	8cm	9cm	10cm
0.02M	0.00	336.12	680.31	910.46	1145.87	1487.96	1995.74	2456.45	2855.41	3211.74	3565.87
0.08M	0.00	54.46	158.11	312.67	439.95	625.43	770.90	985.47	1194.58	1480.07	1691.00
0.10M	0.00	47.18	130.83	276.30	394.49	538.15	663.61	870.91	1083.66	1236.40	1418.24
0.12M	0.00	41.73	101.74	221.75	338.12	458.14	578.15	769.08	947.28	1107.30	1261.86
0.14M	0.00	25.36	72.64	145.38	225.39	327.21	443.59	550.88	669.07	794.54	943.65

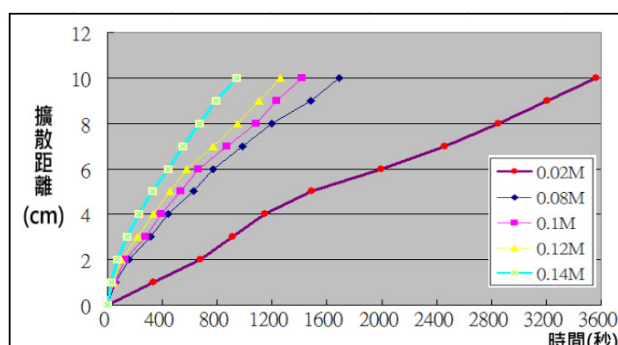


圖28: 持續滴入式擴散裝置,不同濃度,過錳酸鉀擴散距離與時間的關係

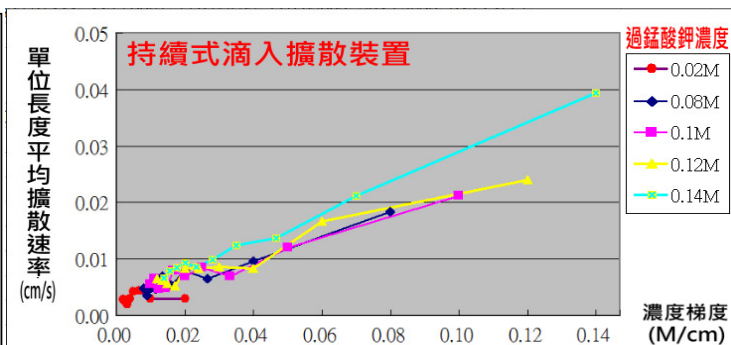


圖29: 使用持續滴入式擴散裝置,不同濃度的擴散,擴散速率與濃度梯度的關係

表15: 持續滴入式擴散裝置,不同濃度的擴散,擴散速率與濃度梯度的趨勢線整理

不同濃度過錳酸鉀 溶液擴散 (持續滴入式)	濃度梯度 (X 軸) 對 擴散速率 (Y 軸) 作圖	趨勢線方程式	斜率	R ² 值 (相關係數平方值)
0.02M		$y = 0.0273x + 0.0028$	0.0273	0.0378
0.08M		$y = 0.1894x + 0.0028$	0.1894	0.9518
0.1M		$y = 0.1729x + 0.0034$	0.1729	0.9435
0.12M		$y = 0.1738x + 0.0037$	0.1738	0.9468
0.14M		$y = 0.2552x + 0.0033$	0.2552	0.9943

- 分析：1.擴散速率很慢，0.02M 濃度擴散 10cm 需要 1 小時時間(固定式需 30 分鐘)。
- 2.擴散距離與時間的關係接近直線，速率隨擴散距離增加，而愈來愈慢的趨勢並不明顯。
- 3.以濃度梯度對擴散速率作圖：並未集中在一條直線上，和固定式不同。

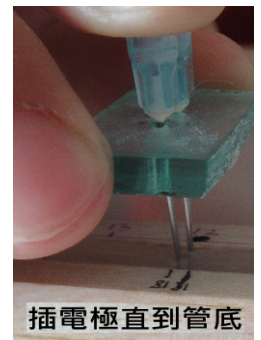
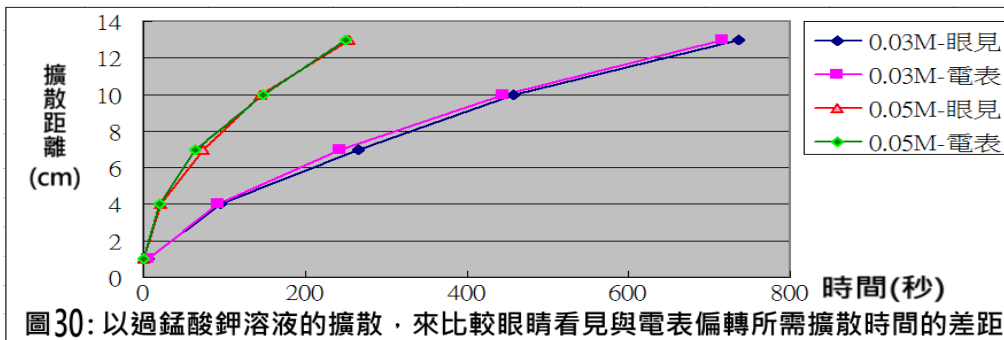
三、在前項研究的基礎下，設計 C：單向電錶式擴散裝置：研究無色離子在水中的擴散速率。

(研究一)使用單向電錶式擴散裝置，以過錳酸鉀溶液的擴散，來比較眼睛看見與電表偏轉時間的差距，驗證設計的可行性。同時按下兩個碼錶，開始計時，一個目測紫色粒子到達管外標定刻度所需時間。另一個負責記錄每個三用電錶開始偏轉時所需時間。

控制	電極正負極間距離	矽膠管內徑	管中介質	水槽水量	裝置規格
變因	3mm	5mm	水	200 克	小圓+設計 A 固定式擴散裝置

表16: 過錳酸鉀溶液擴散，比較眼睛看見與電表偏轉時間的差距

溫度	過錳酸鉀 濃度,條件	擴散起點 到 電錶電極放置點的距離					
		擴 散 時 間 (秒)	1	4	7	10	13
26.6°C	0.03M-眼見		5.32	94.99	265.45	457.09	736.11
26.6°C	0.03M-電表		5.71	92.85	243.52	444.27	716.54
26.0°C	0.05M-眼見		0.00	21.54	74.52	145.32	253.66
26.0°C	0.05M-電表		0.00	20.42	64.12	147.69	249.87



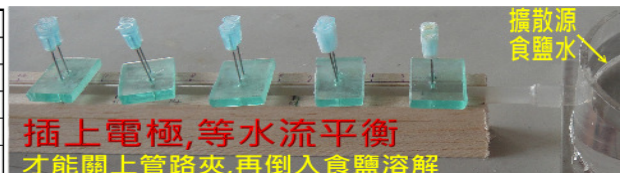
分析：利用三用電錶測得之粒子擴散速率，與目測所得者相當接近

(研究二)以單向電錶式擴散裝置，研究 擴散(開門到電極)距離對擴散速率的影響。我們懷疑：前面的電極會影響到後面的擴散時間，使結果不同。(電錶電流= 15×10^{-6} 安培)

控制	電極正負極距離	矽膠管內徑	管中介質	水槽水量	食鹽濃度	溫度	電表轉盤	裝置規格
變因	3mm	5mm	水	200 克	0.1M	23.4°C	10K	小圓+固定式擴散裝置

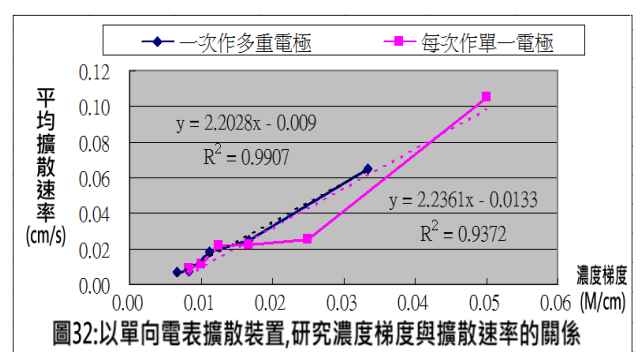
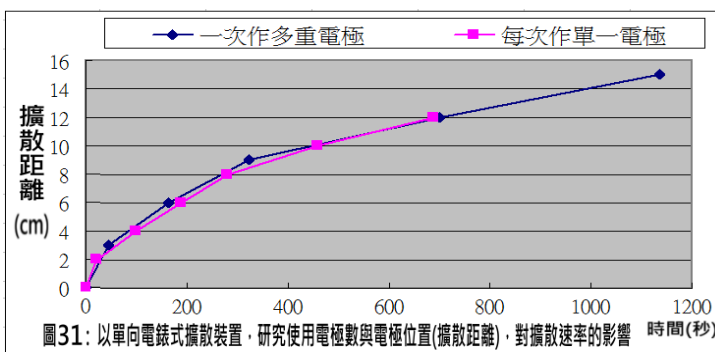
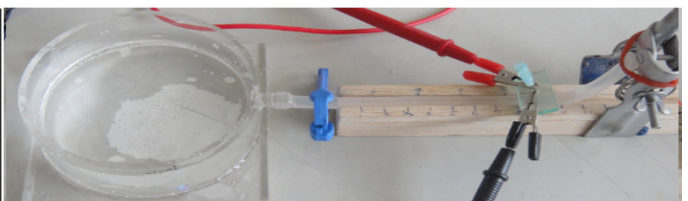
【第一組】一次五組電極，連續插在管子上一重複三次實驗

表17	擴散起點 到 電極位置 的距離(cm)					
實驗次數	0	3	6	9	12	15
第一次	0.00	43.79	163.83	323.04	700.39	1135.68
第二次	0.00	45.87	164.52	330.54	745.84	1194.66
第三次	0.00	48.69	169.66	334.56	768.71	1208.96
平均	0.00	46.12	166.00	329.38	738.31	1179.77



【第二組】每次實驗只用一組電極，在管子上插不同位置，共 18 次實驗

表18	擴散起點 到 電極位置 的距離(cm)						
實驗次數	0	2	4	6	8	10	12
第一次	0.00	19.87	101.54	187.54	280.47	453.00	698.87
第二次	0.00	18.22	98.10	190.64	285.46	464.59	688.11
第三次	0.00	19.05	95.39	185.97	275.96	457.11	678.97
平均	0.00	19.05	98.34	188.05	280.63	458.23	688.65



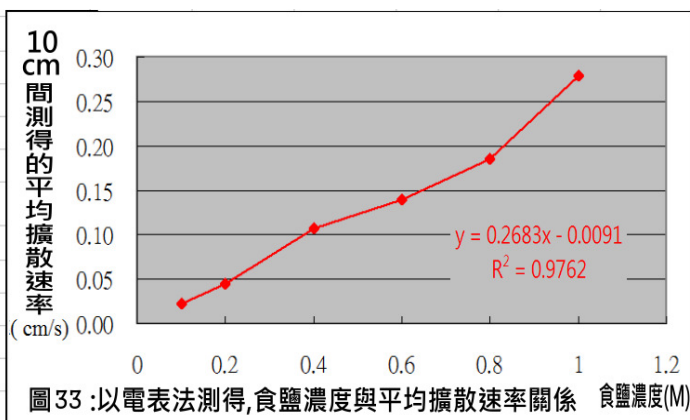
- 分析：1.隨著距離增加，與過錳酸鉀相同，食鹽的擴散也有愈來愈慢的趨勢。
2.每次使用 1 或多個電極偵測，實驗結果類似。因為電流小，電極存在影響擴散不大。

(研究三)探討**食鹽水濃度**對擴散速率的影響。依研究二結果，為求實驗簡便，節省時間，改用一个電極測量擴散速率。

控制變因	電極正負極間距離	矽膠管內徑	擴散物質	水槽水量	電極數
	3mm	5mm	食鹽溶液	200 克	1
	電極距源頭距離	溫度	電表轉盤	裝置規格	
	10cm	19.9℃	10K	小圓+單向電錶式擴散裝置	

表 19 :不同食鹽濃度,以電表法測得的移動速率

起始食鹽濃度(M)	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	1
第一次	453.00	229.22	95.39	69.55	54.82	33.04
第二次	464.59	225.34	91.25	71.71	54.14	38.53
第三次	458.72	220.71	92.66	73.58	53.24	35.95
平均時間(秒)	458.77	225.09	93.10	71.61	54.07	35.84
平均速率(cm/s)	0.0218	0.0444	0.1074	0.1396	0.1850	0.2790



分析：用電錶法偵測擴散速率，食鹽水起始濃度愈高，擴散速率愈快。

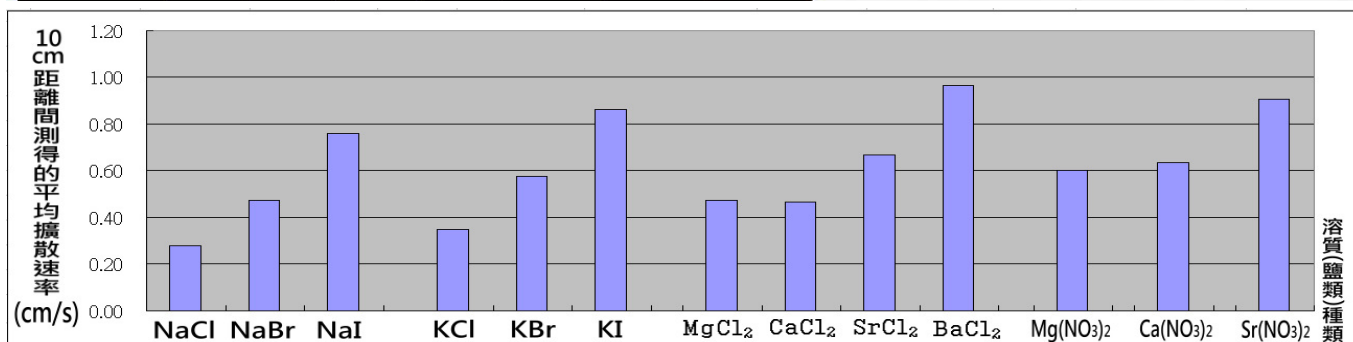
(研究四) 以**單向電錶式擴散裝置**研究**不同種類的硝酸鹽與氯化物**，擴散速率的差異。

控制變因	電極正負極距離	矽膠管內徑	擴散濃度	水槽水量	電極數	電極距源頭距離	溫度	電表轉盤	裝置規格
	3mm	5mm	1 M	50 克	1	10cm	23℃	10K	小方+單向電錶式擴散裝置

表 20 :不同種類溶質,以電表法測得的移動速率

不同鹽類	NaCl	NaBr	NaI	KCl	KBr	KI
第一次 時間 (秒)	37.16	21.38	13.01	27.47	16.92	12.34
第二次 時間 (秒)	36.54	20.89	13.06	29.54	17.29	11.45
第三次 時間 (秒)	33.78	21.22	13.42	28.78	17.83	11.05
平均時間(秒)	35.83	21.16	13.16	28.60	17.35	11.61
平均速率(cm/s)	0.2791	0.4725	0.7597	0.3497	0.5765	0.8611

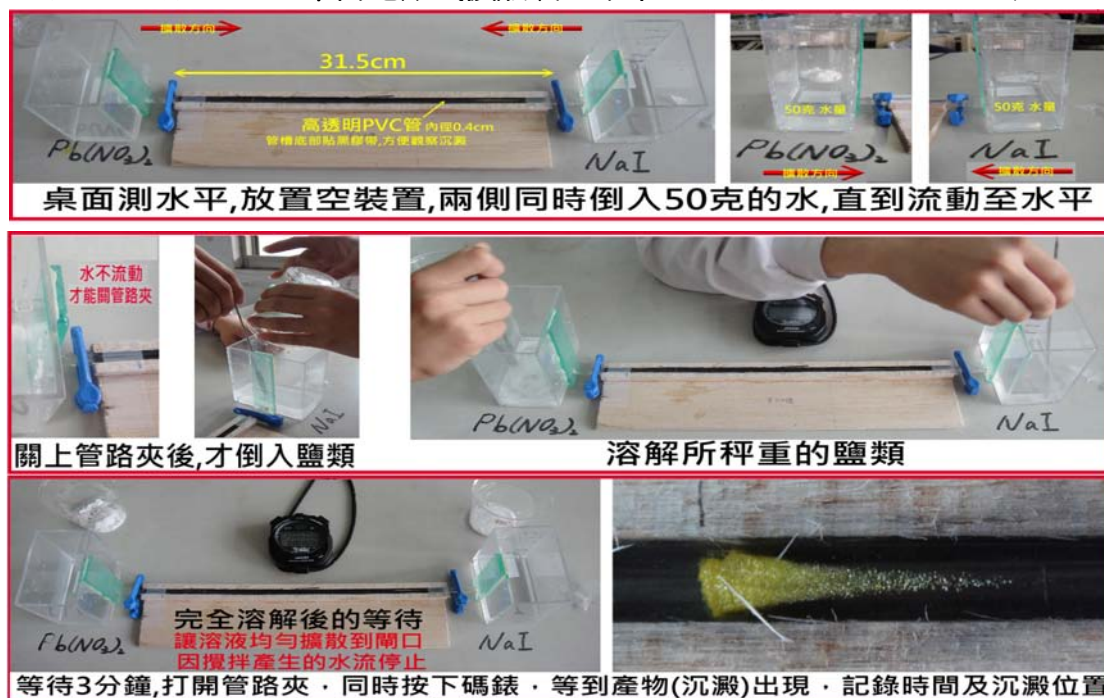
不同鹽類	MgCl ₂	CaCl ₂	SrCl ₂	BaCl ₂	Mg(NO ₃) ₂	Ca(NO ₃) ₂	Sr(NO ₃) ₂
第一次 時間 (秒)	21.32	21.62	13.46	10.52	15.95	14.32	10.54
第二次 時間 (秒)	21.11	21.92	15.62	11.32	19.30	15.51	11.64
第三次 時間 (秒)	21.05	20.88	15.79	9.23	14.63	17.44	10.89
平均時間(秒)	21.16	21.47	14.96	10.36	16.63	15.76	11.02
平均速率(cm/s)	0.4726	0.4657	0.6686	0.9656	0.6014	0.6347	0.9072



- 分析: 1.鹵化鈉化合物的擴散平均速率：**NaI > NaBr > NaCl**
2.鹵化鉀化合物的擴散平均速率：**KI > KBr > KCl**
3.鹼土金屬族氯化物的擴散平均速率：**BaCl₂ > SrCl₂ > MgCl₂ > CaCl₂**
4.鹼土族硝酸鹽類的平均速率：**Sr(NO₃)₂ > Ca(NO₃)₂ > Mg(NO₃)₂**

除了氯化鎂大於氯化鈣以外，同類型鹽類中，同族元素都有原子量大，擴散愈快的趨勢

四、應用沉澱反應，設計 **D-雙向擴散裝置**，以下列數種沉澱組合，進行雙向擴散，藉由沉澱發生的位置與時間，驗證**單向電鍍式擴散裝置結果**--無色離子在水中擴散速率大小比較。



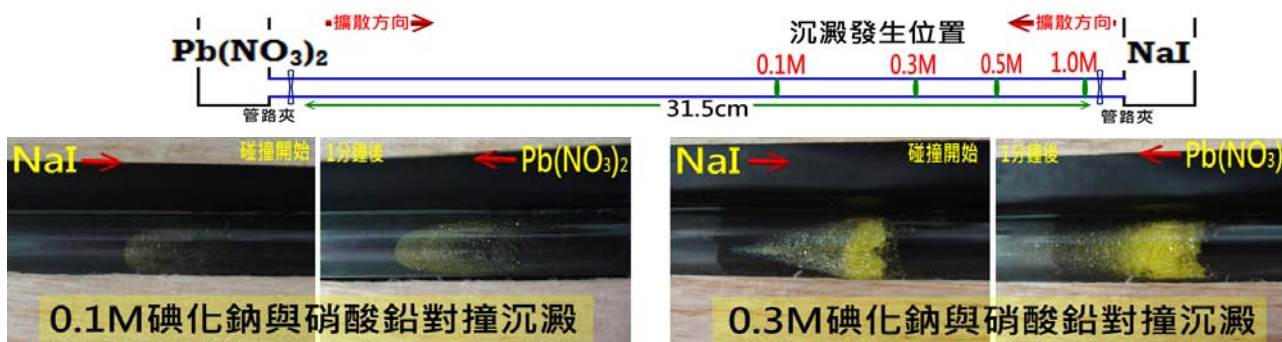
【研究一】以下列四種濃度，進行雙向擴散對撞，研究**鹽類濃度**與發生沉澱位置與時間的關係

控制變因	PVC 管長	兩管柱夾間距離	PVC 管內徑	擴散沉澱反應組合	2 個水槽水量	裝置規格
	34.5cm	31.5 cm	0.4 cm	硝酸鉛 v.s. 碘化鈉	2 × 50 克	小方+雙向擴散裝置

表21：以不同濃度，進行雙向擴散對撞，研究鹽類濃度與發生沉澱位置與時間的關係

使用濃度	實驗次數	溫度(°C)	沉澱距離硝酸鉛(cm)	沉澱距離碘化鈉(cm)	沉澱發生時間(秒)	濃度(M)	溫度(°C)	硝酸鉛平均擴散速率(cm/s)	碘化鈉平均擴散速率(cm/s)
0.1M	1	22.8	19.00	12.50	349.61	0.1	22.8	0.055	0.036
	2	22.8	19.30	12.20	340.11	0.3	22.8	0.316	0.091
	3	22.8	18.90	12.60	356.82	0.5	23.5	0.671	0.096
	平均	22.8	19.07	12.43	348.85	1	22.8	1.362	0.020
0.3M	1	22.8	24.60	6.90	76.66				
	2	22.8	24.40	7.10	75.83				
	3	22.8	24.30	7.20	79.54				
	平均	22.8	24.43	7.07	77.34				
0.5M	1	23.5	27.60	3.90	42.00				
	2	23.5	27.50	4.00	38.78				
	3	23.5	27.60	3.90	42.54				
	平均	23.5	27.57	3.93	41.11				
1.0M	1	22.8	31.00	0.50	23.56				
	2	22.8	31.10	0.40	22.14				
	3	22.8	31.00	0.50	22.68				
	平均	22.8	31.03	0.47	22.79				

圖35:以雙向擴散裝置,測得不同濃度鹽類,濃度與擴散速率的關係



分析：硝酸鉛擴散速率與濃度有高度正相關，碘化鈉應該是受到管口紊流的影響，而看不出擴散速率與濃度的關係。

【研究二】以下列沉澱組合，進行擴散對撞，研究鹽類種類與發生沉澱位置與時間的關係

控制變因	PVC 管長	兩管柱夾間距離	PVC 管內徑	擴散濃度	2 個水槽水量	裝置規格
	34.5cm	31.5 cm	0.4 cm	0.5 M	2 × 50 克	小方+雙向擴散裝置

操縱變因：(一) $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ V.S. 鹵化鉀化合物 < KCl ; KBr ; KI >
 (二) $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ V.S. 鹵化鈉化合物 < NaCl ; NaBr ; NaI >
 (三) Na_2CO_3 V.S. 鹼土金屬族氯化物 < MgCl_2 ; CaCl_2 ; SrCl_2 ; BaCl_2 >
 (四) Na_2CO_3 V.S. 鹼土金屬族硝酸鹽類 < $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$; $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$; $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ >
 註：硝酸鉍 $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$: 0.5M，超過溶解度，無法完全溶解

表 22：以下列數種沉澱組合，進行雙向擴散，沉澱發生位置與時間整理一覽表

使用濃度	溫度 (°C)	反應物--鹽類 (含有會生成沉澱的正離子)	反應物--鹽類 (含有會生成沉澱的負離子)	實驗次數	距正離子管柱夾距離 (cm)	距負離子管柱夾距離 (cm)	沉澱發生時間(秒)
0.5M	22.8	$\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$	NaCl	1	31.20	0.30	100.32
	22.8			2	31.20	0.30	101.54
	22.8			3	31.20	0.30	99.85
0.5M	22.8	$\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$	NaBr	1	28.60	2.90	44.38
	22.8			2	28.70	2.80	43.56
	22.8			3	28.70	2.80	44.57
0.5M	23.5	$\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$	NaI	1	27.60	3.90	42.00
	23.5			2	27.50	4.00	38.78
	23.5			3	27.60	3.90	42.54
0.5M	23.7	$\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$	KCl	1	29.50	2.00	81.11
	23.7			2	29.40	2.10	86.73
	23.7			3	29.40	2.10	89.45
0.5M	23.7	$\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$	KBr	1	27.20	4.30	63.67
	23.7			2	27.30	4.20	69.90
	23.7			3	27.10	4.40	65.47
0.5M	23.6	$\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$	KI	1	26.50	5.00	48.79
	23.6			2	26.40	5.10	44.56
	23.6			3	26.60	4.90	49.65
0.5M	25.6	MgCl_2	Na_2CO_3	1	20.70	10.80	111.54
	25.6			2	20.90	10.60	111.60
0.5M	26.7	CaCl_2	Na_2CO_3	1	18.60	12.90	124.44
	26.7			2	18.60	12.90	127.96
0.5M	26.5	SrCl_2	Na_2CO_3	1	21.30	10.20	93.35
	26.4			2	21.00	10.50	95.64
0.5M	25.4	BaCl_2	Na_2CO_3	1	23.30	8.20	81.66
	25.4			2	23.40	8.10	81.17
0.5M	24.5	$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$	Na_2CO_3	1	21.00	10.50	99.86
	24.5			2	21.20	10.30	98.14
0.5M	23.9	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	Na_2CO_3	1	22.70	8.80	85.41
	23.9			2	23.10	8.40	80.22
0.5M	24.7	$\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$	Na_2CO_3	1	24.30	7.20	70.36
	24.7			2	24.40	7.10	70.45

表 23：各種沉澱組合，雙向擴散沉澱發生位置、時間、擴散速率平均值整理一覽表

使用濃度	平均溫度(°C)	正離子來自	負離子來自	反應發生平均時間(秒)	正離子擴散距離平均(cm)	正離子擴散平均速度 (cm/s)	負離子擴散距離平均(cm)	負離子擴散平均速度 (cm/s)
0.5M	22.8	$\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$	NaCl	100.57	31.20	0.310	0.30	0.003
0.5M	22.8	$\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$	NaBr	44.17	28.67	0.649	2.83	0.064
0.5M	23.5	$\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$	NaI	41.11	27.57	0.671	3.93	0.096
0.5M	23.7	$\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$	KCl	85.76	29.43	0.343	2.07	0.024
0.5M	23.7	$\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$	KBr	66.35	27.20	0.410	4.30	0.065
0.5M	23.6	$\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$	KI	47.67	26.50	0.556	5.00	0.105
0.5M	25.6	MgCl_2	Na_2CO_3	111.57	20.80	0.186	10.70	0.096
0.5M	26.7	CaCl_2	Na_2CO_3	126.20	18.60	0.147	12.90	0.102
0.5M	26.5	SrCl_2	Na_2CO_3	94.50	21.15	0.224	10.35	0.110
0.5 M	25.4	BaCl_2	Na_2CO_3	81.42	23.35	0.287	8.15	0.100
0.5M	24.5	$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$	Na_2CO_3	99.00	21.10	0.213	10.40	0.105
0.5M	23.9	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	Na_2CO_3	82.82	22.90	0.277	8.60	0.104
0.5M	24.7	$\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$	Na_2CO_3	70.41	24.35	0.346	7.15	0.102

分析:除了氯化鎂與氯化鈣以外，同族元素形成的同類型化合物，有分子量愈大，擴散愈快的趨勢。

圖36: 雙向擴散裝置・各種沉澱組合, 沉澱發生的位置示意圖

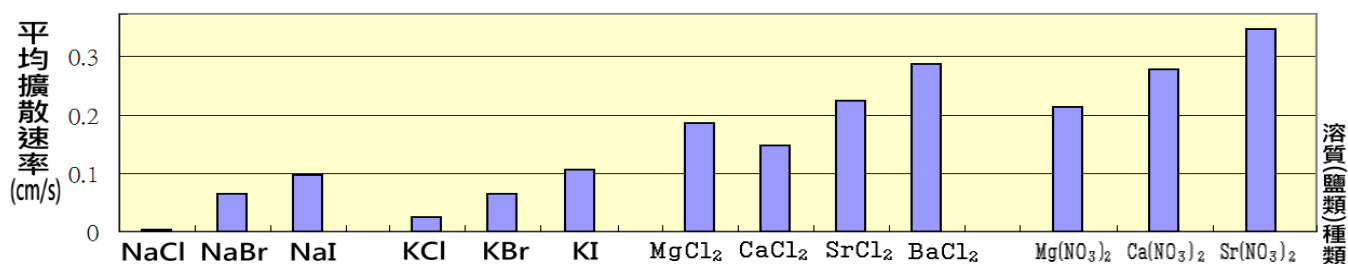
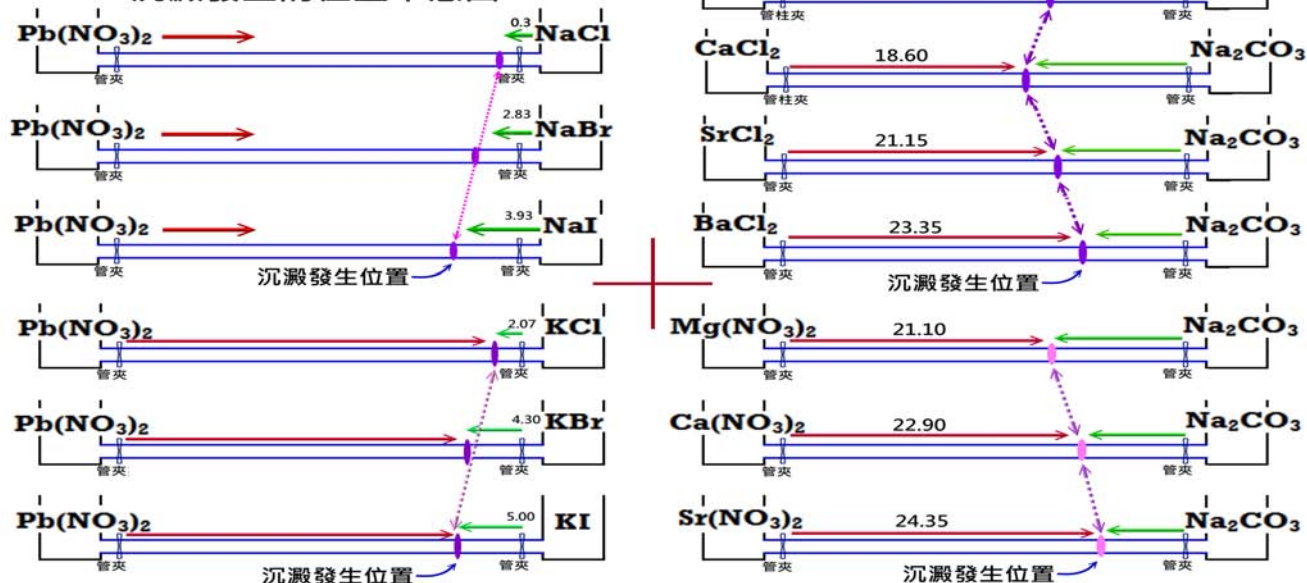


圖37: 雙向擴散裝置,藉由沉澱發生的位置與時間,測得鹽類在碰撞前的擴散速率

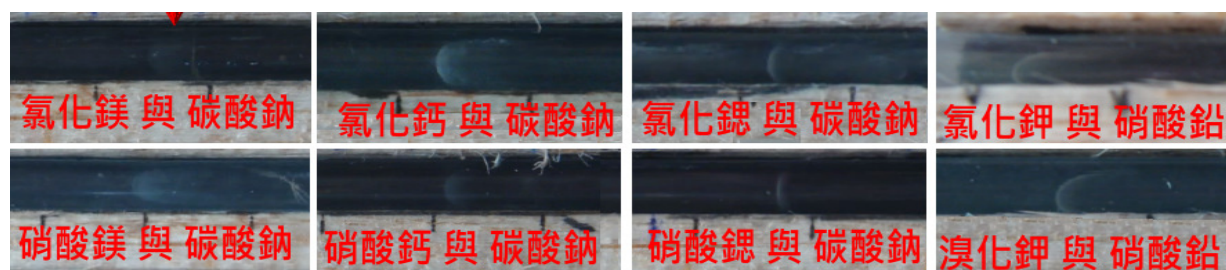


圖38:雙向擴散實驗,溶液擴散相撞反應生成沉澱的實際影像 (溶解度大的沉澱不明顯,如碳酸鎂)

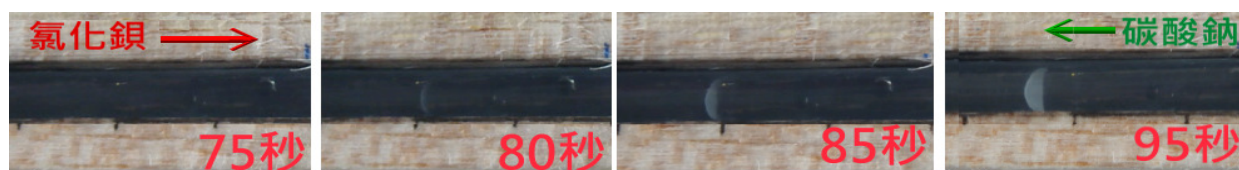


圖39:氯化銀與碳酸鈉碰撞(80秒時),白色沉澱變化

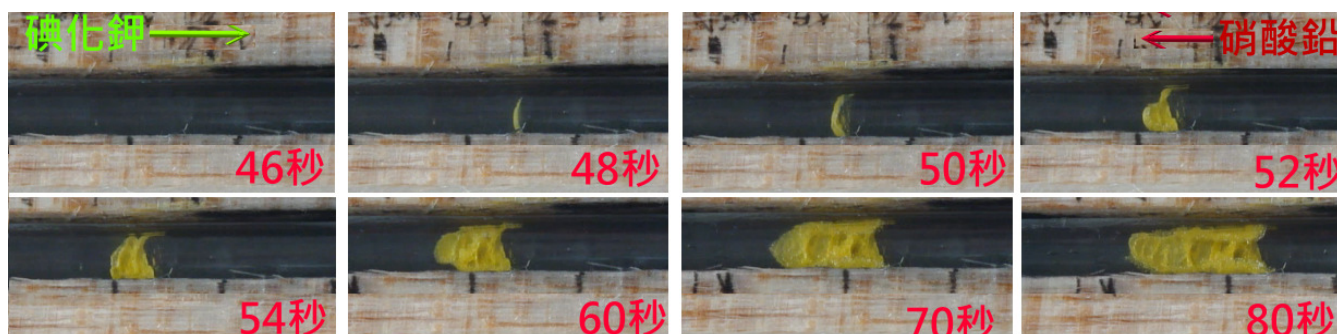


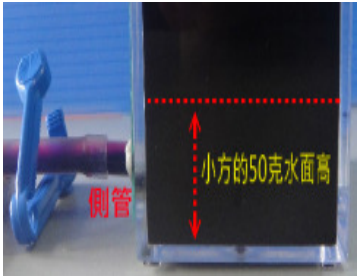
圖40:碘化鉀與硝酸鉛碰撞(48秒),黃色沉澱的變化情形

陸、討論：

一、用糖度計測表面濃度，研究從杯底向上擴散的快慢中發現(如表 24)：氯化鈣擴散至水面的速率較快。過錳酸鉀也在一天內，整杯紫色擴散均勻。這說明離子性物質具有較大的擴散速率(文獻中，離子物質的擴散係數也較大⁸)，時間短，易觀察，適合更進一步的研究。

表 24：氯化鈣、葡萄糖、蔗糖24小時後，由瓶底擴散到水面，表面糖度升高比較

溶質種類	氯化鈣	葡萄糖	蔗糖
分子量	111.2	180	342
$\frac{24\text{hr表面糖度}-0\text{hr表面糖度}}{\text{攪拌後糖度}} \times 100\%$ 五組實驗平均值	16.65%	1.06%	5.25%
每 100 克水的溶解度(20℃) ⁶	79.5 克	87.67 克	199.4 克

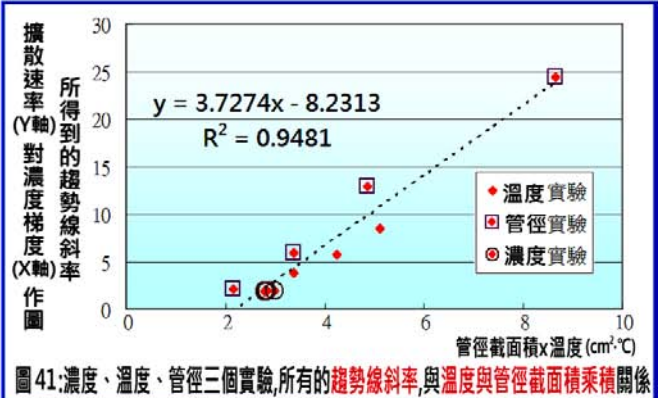


二、同條件下，小圓、大方、小方三種水槽有相近的擴散速率，但小方水槽只需 50ml 溶液量，溶質的量使用少，可減少廢液。因此實驗大多以小方水槽為主。擴散源水面高度，會對擴散源頭造成壓力，是否使得擴散會受壓力影響。為澄清此疑點，水面高度實驗證明：水槽液面高度對擴散速率影響很小。

三、以**固定式擴散**--濃度、溫度、管徑三個實驗，我們整理結果並作以下的比較：

操縱變因	控制變因	實驗結果	我們自行定義--紫色前端的擴散速率 對 濃度梯度 作圖
固定式擴散 - 濃度實驗	溫度；管徑	濃度越高，擴散速率越快	有高度的正相關；不同濃度，趨勢線斜率相近
固定式擴散 - 溫度實驗	濃度；管徑	溫度越高，擴散速率越快	有高度的正相關；溫度愈高，趨勢線斜率愈大
固定式擴散 - 管徑實驗	濃度；溫度	管徑越粗，擴散速率越快	有高度的正相關；管徑截面積愈大，趨勢線斜率愈大

(一)把三個實驗所有的**趨勢線斜率**，對**(溫度 × 管徑截面積作圖)**可得圖41。顯示了這些變因之間，有高度關係。這結果與文獻中理論推導出來的公式十分類似。過錳酸鉀紫色的移動擴散速率，意義上應該與**每秒中通過的粒子數**相當。我們實驗，證明了複雜數學形式推導出來的結果。甚至可以進一步的推廣到其他離子的擴散，找出它們在水中的摩擦係數的大小關係。



我們的實驗：
自行定義的擴散速率 = $\frac{\text{趨勢線斜率}}{\text{濃度梯度}}$ $\Rightarrow$ 趨勢線斜率 $\propto \frac{\text{溫度} \times \text{管徑截面積}}{\text{摩擦係數}}$

Fick 擴散定律：
每秒鐘通過的粒子數 = $D \times A \times \text{濃度梯度}$ $\Rightarrow D = \frac{k \times \text{溫度}}{\text{摩擦係數}}$

愛因斯坦-溶液擴散公式：
 $D = \frac{k \times \text{溫度}}{\text{摩擦係數}}$

(二)文獻中發現：硫代硫酸鈉的擴散係數不隨濃度而變⁴。濃度 0.05M~1M 食鹽的擴散係數⁸，只稍微的由 1.26×10^{-5} 下降到 $1.24 \times 10^{-5} (\text{cm}^2/\text{s})$ 。這些證據支持了我們的實驗結果。

四、實際運用在加入各種鹽類，對過錳酸鉀(紫色)擴散造成的影響如下：

實驗別	不同濃度的氯化鈉 伴隨同濃度過錳酸鉀擴散		過錳酸鉀在不同濃度的 氯化鎂溶液中擴散		過錳酸鉀在同濃度的鹼土金屬 氯化物與硝酸鹽溶液中擴散	
使用藥品	擴散源 (小方水槽)	擴散介質 (矽膠管中)	擴散源 (小方水槽)	擴散介質 (矽膠管中)	擴散源 (小方水槽)	擴散介質 (矽膠管中)
	氯化鈉 過錳酸鉀	水	過錳酸鉀 氯化鎂	氯化鎂	過錳酸鉀 鹼土金屬鹽類	鹼土金屬鹽類
實驗結果 溫度 管徑相同	加食鹽，擴散加快 趨勢線斜率上升 1.96 倍 過錳酸鉀在水中擴散會受 食鹽影響，摩擦係數變小		氯化鎂溶液濃度愈高 紫色過錳酸鉀擴散越慢 趨勢線斜率越低 摩擦係數愈大		過錳酸鉀在鹽類溶液中的 擴散速率與趨勢線斜率都是： 鋇鹽 > 鈣鹽 > 鎂鹽 鎂鹽溶液造成的摩擦係數最大	

五、持續滴入式擴散裝置結果顯示，紫色前端跑的愈遠，因濃度梯度減少所造成的擴散速率漸慢，較固定式擴散不明顯，明顯與 Fick 定律不符。更進一步比較兩裝置優缺點（如表 25）。

表 25：固定式擴散裝置 和 持續滴入式擴散裝置 的優缺點比較

	固定式擴散裝置	持續滴入式擴散裝置
優點	1.擴散穩定，擴散過程管徑一致 2.擴散實驗時間較短，結果符合擴散定律 3.封閉管內擴散，較不受外界影響	1.每次使用廢液較少(<50ml) 2.操作較簡單。
缺點	1.每次使用廢液較多(>50ml) 2.操作較複雜，每次都要秤量藥品。	1.起始濃度有較大變化，無法計算濃度梯度。 2.擴散滴入時，要數十秒紫色液滴才會滴出，不是真正的水平擴散時間(第七頁)。 3.吸量管尖端小，造成擴散阻礙，擴散實驗時間較長。
共同缺點	無色或顏色淡的低濃度溶液，眼睛不易觀察。需搭配電錶，才可進行無色溶液擴散實驗，測量擴散速率	

因此，決定使用固定式擴散裝置進行後續實驗，設計能偵測無色粒子擴散速率的新方法。

六、我們利用純水與鹽類溶液電阻的差異，設計了**單向電錶式擴散裝置**。

(一)電錶指針瞬降現象與偵測濃度極限關係，說明如圖 42。

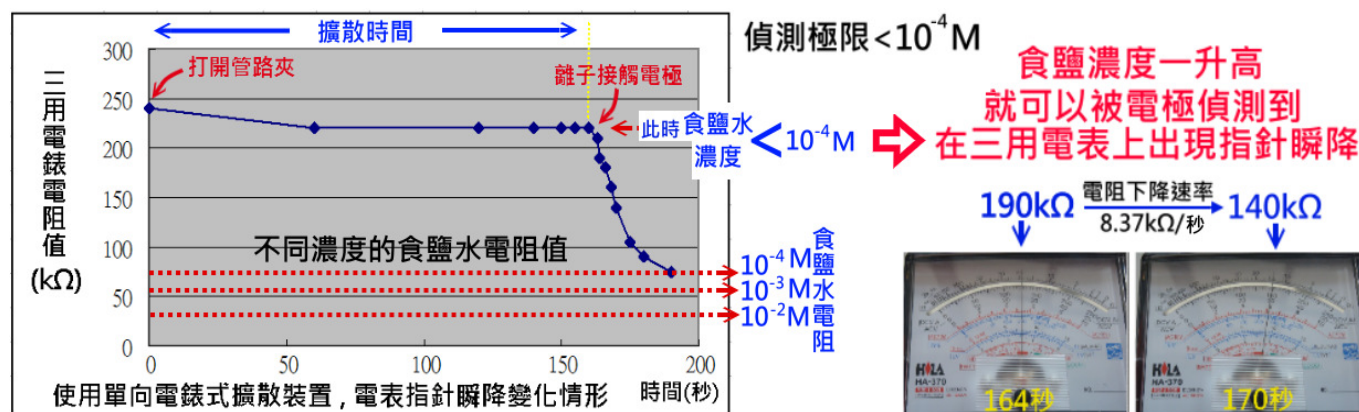


圖42:單向電表擴散裝置測試, 濃度偵測極限與使用設定說明

(二)測試**電錶式擴散裝置**有效性的實驗，結果如下：

設計驗證單向電錶擴散裝置實驗	實驗結果-單向電錶擴散裝置，可有效偵測離子擴散
過錳酸鉀溶液擴散 比較眼睛看見與電表偏轉時間的差距	兩種濃度(0.03M, 0.05M)測試的結果，眼睛看見與電表偏轉 擴散距離對時間作圖，兩者幾乎重合
不同食鹽溶液濃度，十公分距離 (管路夾至電極)，平均擴散速率測量	食鹽溶液濃度愈高，擴散速率愈快 濃度梯度與擴散速率有高度正相關($R^2=0.9762$)

(三) 我們進一步懷疑：一次插多個電極，電極會不會把離子吸住，影響後面的擴散時間。
實驗結果，比較一次一個電極與一次五個電極，兩種做法實驗結果如下：

表 26 :單向電錶式擴散裝置兩種實驗方法比較

	一組電極，每次插不同位置，五次實驗	五組電極，一次插 5 個位置，實驗一次做完
裝置		
結果	擴散速率對濃度梯度作圖趨勢線斜率	擴散速率對濃度梯度作圖趨勢線斜率
	三次實驗平均 = 2.2361	三次實驗平均 = 2.2028
	$R^2 = 0.94$	$R^2 = 0.99$
斜率結果相近，一次五個電極的實驗，未如預期有延誤擴散的現象		

七、雙向擴散裝置，利用離子相向擴散對撞來偵測擴散速率，由側面觀察：在對撞的過程中，產生因密度大小不同的斜向沉澱界面，說明如圖 43。當兩邊的濃度都變小，碘化鉛沉澱也會較稀疏，沉澱發生位置，距離碘化鈉起始端越來越遠，時間也會變長。

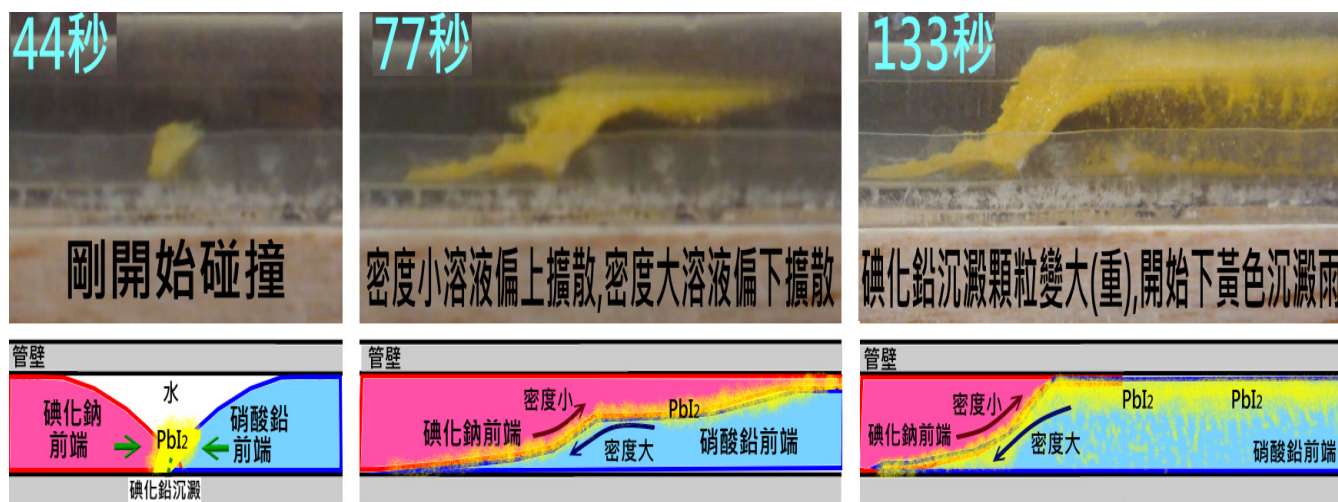


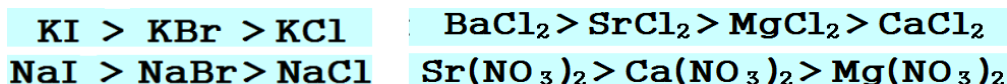
圖 43 :雙向擴散裝置，離子擴散對撞，側面觀察對撞時，產生斜向沉澱界面的解釋

八、離子的性質提供了電錶與沉澱兩種偵測擴散速率的方法，比較如表 27。

表 27：單向電錶式擴散裝置 與 雙向擴散裝置 實驗原理與操作特性 的比較

	特性	優點	缺點
單向電錶式擴散裝置	電錶測得的是 所有離子共同擴散速率 溶液中離子應保持電中性，不可能分開太遠	1.無色離子擴散速率均可測得 2.一次可測得數點的擴散速率 3.偵測極限達到 10^{-4} M 濃度以下	1.需使用蒸餾水（純水）作為介質 2.電極可能會影響擴散，電流須盡量低 3.接電線，裝置，操作較繁複
雙向擴散裝置	測得的擴散速率，來自離子相遇沉澱 沉澱發生瞬間，視為單一離子擴散速率 但溶解度愈大的產物，沉澱顯現愈慢（稀薄）	1.偵測過程，不影響離子擴散 2.操作簡單，不需用到蒸餾水	1.只能適用於有沉澱反應的離子 2.離子相遇須累積到一定濃度，沉澱才出現 3.一次只測得一點的平均擴散速率

(一) 以鈉鹽、鉀鹽、鹼土金屬族氯化物與硝酸鹽為研究對象，這兩種方法都呈現出相同的擴散速率大小順序關係：



除了氯化鎂與氯化鈣以外，同族元素形成的同類型化合物，有分子量愈大，擴散愈快的趨勢。

(二) 電解質溶液必須為電中性，但因為離子熱運動不足以抵消正、負離子間庫侖力，所以在每一個中心離子的周圍，就會分布著一層帶異性電的離子。這層電荷稱為**離子氛(氬)**^{9,10,13,14}。離子的擴散，就是在這種狀況下進行，不同離子的組合，不同的水合程度，就會造成擴散時，有不同的摩擦係數，導致擴散速率不同。

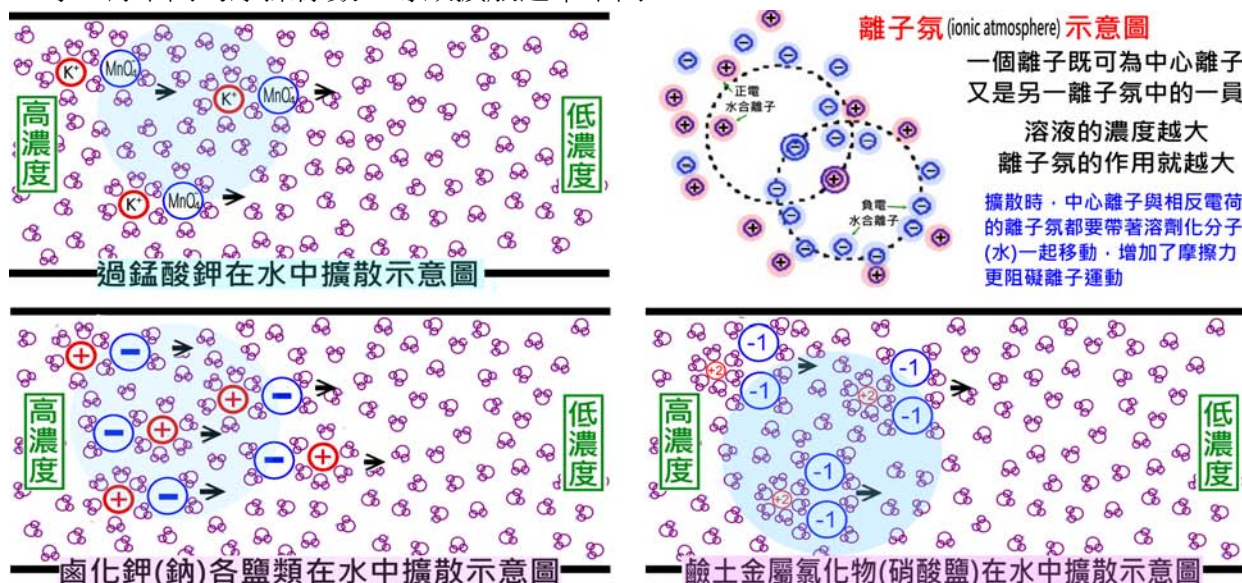


圖44：水合離子以離子氛的形式向前擴散示意圖

九、離子擴散綜合討論：

(一) 在擴散過程中：紫色過錳酸鉀前端容易擴散成圓舌狀，而且向前傾斜，我們認為：這應是受到管壁附著力和重力的影響，粒子在水中的擴散，並不如氣體擴散那麼自由。

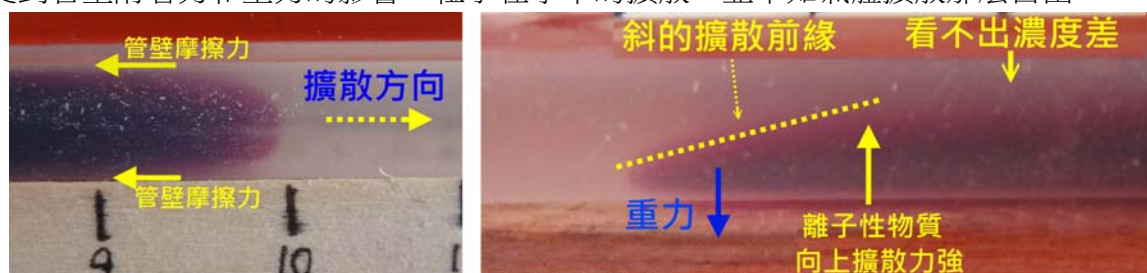


圖45:過錳酸鉀溶液擴散前端現象說明圖

(二) 無論單向電錶式或雙向擴散裝置的實驗結果均顯示：離子在水中的擴散速率，有分子量小，擴散速率快的趨勢（氯化鎂例外），由**格銳目擴散定律**⁶得知：氣體擴散速率和分子量平方根成反比，離子在水中的擴散，這個定律不能用。因離子在水中擴散與水分子距離很近，受水分子的影響很大，不像氣體中分子相互距離很遠，可省略相互間的作用力。

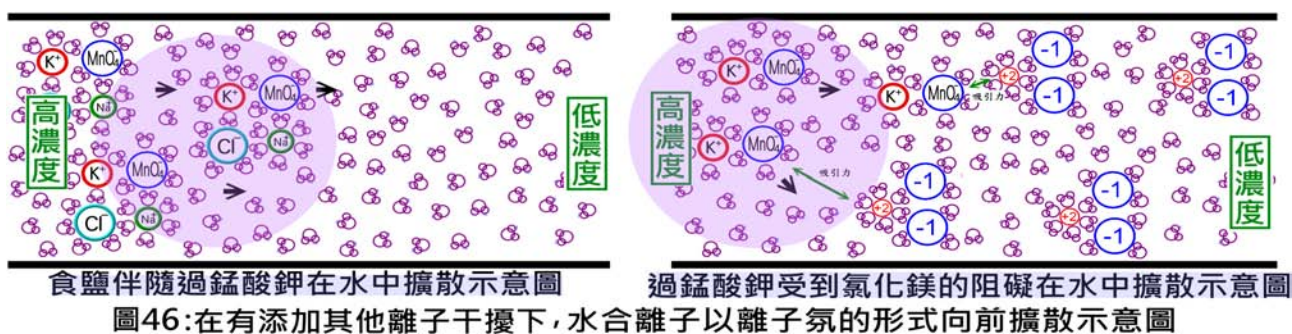
(三) 高中化學參考書¹¹提到：離子化合物溶於水，會放出水合能（見表 28），這種能量代表離子和水分子形成水合離子的強弱程度。水合作用愈強者，離子周圍結合的水分子愈多，其水合離子也愈大，在水中移動所遇的阻力相對增加，因此擴散速率會變慢。帶相同電荷的離子，電荷密度與半徑平方成反比，離子半徑⁷愈大，水合愈弱，擴散速率愈快。在文獻¹⁵中，25℃時，各離子的擴散係數，也與我們的研究結果有類似的大小順序關係。

表28：離子文獻資料	鹵素離子			鹼土金屬離子				鹼金屬離子	
離子種類	Cl ⁻	Br ⁻	I ⁻	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Sr ²⁺	Ba ²⁺	Na ⁺	K ⁺
放出水合能(KJ/mole)	372	339	301	1982	1653	1482	1364	436	351
電荷	-1	-1	-1	+2	+2	+2	+2	+1	+1
離子半徑(pm)	181	195	216	65	99	113	135	95	133

(四) 電解質的擴散速率與四周離子環境有關：氯化鎂擴散比氯化鈣快；加食鹽會使過錳酸鉀擴散變快。這應該都是離子水合後，形成特殊的離子氛，減少摩擦係數的結果(見表 29)。

表29: 電解質的擴散速率與四周離子環境有關的三個實驗結果比較

形成特殊水合離子與離子氛的擴散		摩擦係數
實驗結果	擴散速率：氯化鎂 > 氯化鈣 (其他同族氯化物與硝酸鹽，分子量愈大擴散愈快)	單獨擴散： 氯化鎂 < 氯化鈣
	食鹽與過錳酸鉀的共同擴散：加入食鹽，加速了過錳酸鉀的擴散 (文獻中擴散係數 ¹⁵ 與單獨擴散實驗時的擴散速率<圖17>：食鹽 < 過錳酸鉀)	(食鹽+過錳酸鉀) < 過錳酸鉀 (4個離子) (2個離子)
	過錳酸鉀受到鹼土金屬族氯化物與硝酸鹽類的阻擾，而擴散變慢	擴散通路上的鹽類 增加摩擦係數



柒、結論：

- 物質在垂直方向的擴散，受重力影響很大。電解質的擴散也比非電解質具有較大的擴散速率。
- 我們設計了四種擴散裝置，分別是**固定式擴散裝置**，**持續滴入式擴散裝置**，**單向電錶式擴散裝置與雙向擴散裝置**，從各個角度來研究電解質的擴散。

(一) 濃度對過錳酸鉀溶液擴散速率的影響：

- 起始濃度愈高，過錳酸鉀擴散速率愈快。隨著擴散距離的增加，濃度梯度漸小，造成擴散速率愈來愈慢。
- 以**擴散速率對濃度梯度**作圖，發現：不同濃度的擴散，固定式裝置均有高度正相關，趨勢線斜率幾乎相同。持續滴入式裝置，相關性差，趨勢線斜率差異大。故以固定式擴散裝置，作為本研究主要的探討方向。

(二) 高溫，管徑粗，過錳酸鉀溶液擴散速率快，以**擴散速率對濃度梯度**作圖可知：溫度愈高，管徑愈粗，趨勢線斜率也愈大。趨勢線斜率與溫度、趨勢線斜率與管徑擴散通路截面積，都有高度正相關直線關係。

- 將濃度、溫度、管徑三個實驗，全部的**擴散速率對濃度梯度**作圖趨勢線斜率對擴散通路截面積與溫度乘積作圖，相關係數平方達到 0.9481。
- 實驗結果，與文獻十分類似，過錳酸鉀**紫色移動擴散速率**，意義上應該與**每秒中通過的粒子數**相當。我們的簡單實驗，證明了複雜數學形式推導出來的結果。

$$\text{自行定義的擴散速率} = \frac{\text{趨勢線斜率}}{\text{濃度梯度}} \Rightarrow \text{趨勢線斜率} \propto (\text{溫度} \times \text{管徑截面積})$$

(過錳酸鉀紫色前端的移動速率)

- 食鹽伴隨過錳酸鉀擴散，速率加快。氯化鎂濃度愈高、分子量愈大的鹼土金屬鹽類，**降低過錳酸鉀擴散速率效果愈強**。表示過錳酸鉀會受其他離子影響，改變擴散速率。

三、嘗試設計以三用電錶來測量無色粒子擴散速率：

- (一) 以過錳酸鉀溶液驗證設計：電錶測得的擴散速率與目測相當接近。
- (二) 單向電錶式擴散裝置，電錶指針瞬動時，**對食鹽水的濃度偵測極限至少可達到 10^{-4}M** 。
- (三) 用電錶測量無色粒子擴散，所得鹽類擴散快慢順序，和雙向擴散沉澱法結果完全相同。

四、以數種沉澱組合進行雙向擴散，以沉澱發生位置與時間，找出鹽類在水中的擴散速率。

- (一) **除了氯化鎂大於氯化鈣以外，同類型鹽類中，同族元素都有原子量大，擴散愈快的趨勢。**
- (二) 從側面觀察雙向離子擴散碰撞沉澱，發現在斜向的沉澱界面上，有類似氣象學中鋒面形成降雨的機制，可讓地球科學裡的抽象觀念變成可實際操作的實驗。

五、電解質在水中的擴散，受到水分子影響很大。水合作用愈強，離子結合的水分子多，其水合離子也愈大，在水中移動所遇的阻力相對增加，因此擴散速率會變慢。

六、我們的研究，持續了快兩個學期，在其中我們發現：擴散實驗與熱對物質的影響、電解質、電阻與沉澱反應有關，提供了一次整合應用知識的機會。

捌、參考資料：

- 1.郭重吉(2009)。國中自然與生活科技課本第五冊。台南市：南一書局。
- 2.陳炳亨等(2009)。國中自然與生活科技課本第三冊。台南市：翰林書局。
- 3.李良聘等(2009)。國中自然與生活科技課本第四冊。台北縣：康軒文教事業。
- 4.劉惟中、陳奕豪、陳瑋智、陳柏瑞(2009)。利用雷射光的偏折測量擴散係數。台灣網路科教館，民 99 年 6 月 11 日，取自：
<http://science.ntsec.edu.tw/files/13-1004-15708.php?Lang=zh-tw>
- 5.謝宥庭、呂宛霖、王羿文、周宜貞(2007)。散光彈--探討溶液性質對擴散行為的影響。台灣網路科教館，民 99 年 6 月 11 日，取自：
<http://science.ntsec.edu.tw/ezfiles/4/1004/attach/58/96065.pdf>
- 6.戴桓青(1993)。誰是飛毛腿-擴散原理應用。第 26 屆台北市科展特優作品專輯，197-208 頁，台北市政府教育局。
- 7.謝從卿(譯) (1991)。無機化學。台北市：安和出版社，362-363；86-89。
- 8.葉和明(2004)。輸送現象與單元操作(三)--質量輸送。台北市：三民書局，9-17。
- 9.吳泉忠 (1990)。物理化學(上冊)。台北市：復文書局。285-286；471-476。
- 10.Noggle(著)，謝從卿(譯) (1996)。物理化學(3rd ed)(上冊)。台北市：安和出版社，477；531-561。
- 11.薛勝雄 (1998)。新細說化學。台北市：建宏出版社，11-7；12-6；12-14。
- 12.龐寧寧 (2006)。漫談布朗運動。物理雙月刊(廿八卷一期)。中華民國物理學會，2-11。
- 13.德拜－休克爾離子互吸理論 (2007)。哈爾濱：晨怡熱管技術公司。民 99 年 6 月 11 日，取自：
http://nx8.net/news/61/2007-2-26_20333576166.html
- 14.楊寶旺、楊美惠 (1993)。化學大辭典，台北市：高立出版社，422。
- 15.Lide D.CDC handbook of chemistry and physics. 85th ed.Cleveland, Ohio, United States of America : Chemical Rubber Company;2004.
- 16.劉用成(1996)。食品化學。北京市：中國輕工業出版社。

玖、未來展望與感謝：

我們沒有想到，一個擴散的主題能夠延伸出這麼多方面的探討，這是一件很巨大的作品。我們好像並沒有做完實驗，因為一直在發現新的問題。希望到目前為止的研究，能夠給這個主題一個好的研究方向，而能在未來繼續探討下去。

從 98 年 9 月到 99 年 6 月，我們持續不斷的查資料、接管子、黏器材、秤藥品、作實驗。整個寒假投入了兩個星期。還有兩個學期以來，不知道多少天的午休時間。感謝老師一直陪著我們、又幫忙跑腿買材料，作報告時又教我們美工排版(雖然他常說：這個數據沒再現性，重作)。感謝資優班的課程，教會我們如何處理數據，作獨立研究。這一切都為我們打下了良好的基礎。感謝許多老師在看完報告後，給我們的意見。學會用科學定量的角度去看這個世界。這些都將會是我們國中生活中最美好的回憶。

【評語】 030109

- 1.實驗內容很豐富，但可惜太雜!
- 2.實驗設計有創意!值得鼓勵!能利用量溶液的電阻變化，間接觀察無色離子的擴散現象，是個不錯的想法!