

# 屏東縣第63屆國中小學科學展覽會 作品說明書

科別：地球科學科

組別：國中組

作品名稱：大地水銀行－探討地下水的流動

關鍵詞：砂箱、流線、達西定律

編號：B5003

# 摘要

屏東平原地下水位在這波旱情中下降，為了解地下水從沖積扇頂到平地的流動原理及可能遇到的環境影響，我們利用自製砂箱和類似地層沉積物的砂礫進行模擬，以食用色素呈現流線並測量相關數據。結果顯示距離中央隔水牆愈遠，流線的時間和路徑長均愈多，流線的速度則愈低。當地下水鹽度增加時，流線的路徑不會改變，距離中央隔水牆較近的流線速度增加，距離中央隔水牆較遠的流線速度減少。當地下水溫度增加時，流線的路徑不會改變，流線的速度會跟著增加。

## 壹、前言

### 一、研究動機

在過去兩年的大旱中，屏東依賴豐沛的地下水度過危機（林倖妃，2021），但從去年2022至今，屏東已近600日沒有下雨，連地下水位也開始下降（劉星均，2023），實在令人憂心，這引起我們對屏東平原地下水從何而來的好奇心，如果地下水全靠降雨滲入地下，理論上屏東市區可以透過下雨補注的地面環境（例如農田）隨著都市開發已經逐漸減少，市區的地下水位應該會逐年下降才是，但從學校內地下水井的監測資料來看確非如此（行政院環境保護署，無日期）。官晉安（2021）的研究中指出，影響屏東平原地下水位的主要因子為平原區之扇頂區域的降雨，以及河川的自然補注，但是靠近山區沖積扇頂的地下水是如何流動到平原區？除了降雨減少，未來是否還有其他的環境變化會影響到地下水的流動呢？我們在網路影片中得到靈感，想利用砂箱模擬的方式了解地下水的流動情形，進一步探討上述的疑問。

### 二、研究目的

- （一）探討砂箱模擬地下水流動的結果
- （二）探討地下水鹽度對地下水流動的影響
- （三）探討地下水水溫對地下水流動的影響

### 三、文獻探討

- （一）屏東平原的地下水文及地質環境

屏東平原的沖積扇頂屬於厚礫石層，構成了上下貫通的巨大地下水層，在多次海進海

退的歷史中，越往海洋方向的地層中留下較細密的粉砂、泥和黏土等不透水層，因此地下水層從源頭區向下游逐漸分成各地下水層次層（陳瑞娥、陸挽中，2015）。從經濟部（2014）的地下水補注地質敏感區劃定計畫書可以發現，屏東市鄰近的地下水層剖面從西邊的沖積扇到市區的海豐含水層多以礫石層為主，地下水層共分為水層一、二、三-1和三-2，由三個阻水層所分隔，地下水層一為未受壓地下水層，以粗至中砂為主，其次為礫石和細砂，泥和黏土層最不發達，僅於地表附近分布較廣，可阻礙地表水之入滲補注；其餘泥層則以凸鏡體零散間夾於地下水層中（圖1、圖2）。由於地下水層二和地下水層一之產水性能良好，二者構成屏東平原地下水開發之主要層次；淺井開發地下水層一，大部分深井則深達地下水層二為止，百公尺內之地下水開發最為普遍。

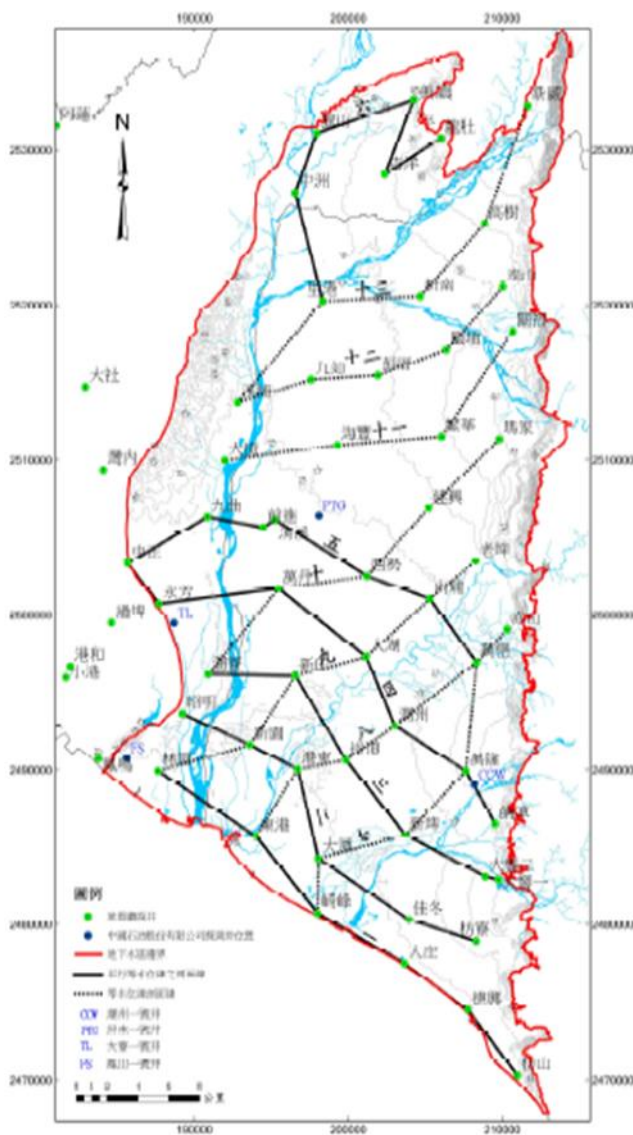


圖1. 屏東平原地下水區範圍及鑽探井位置。來源：經濟部（2014）

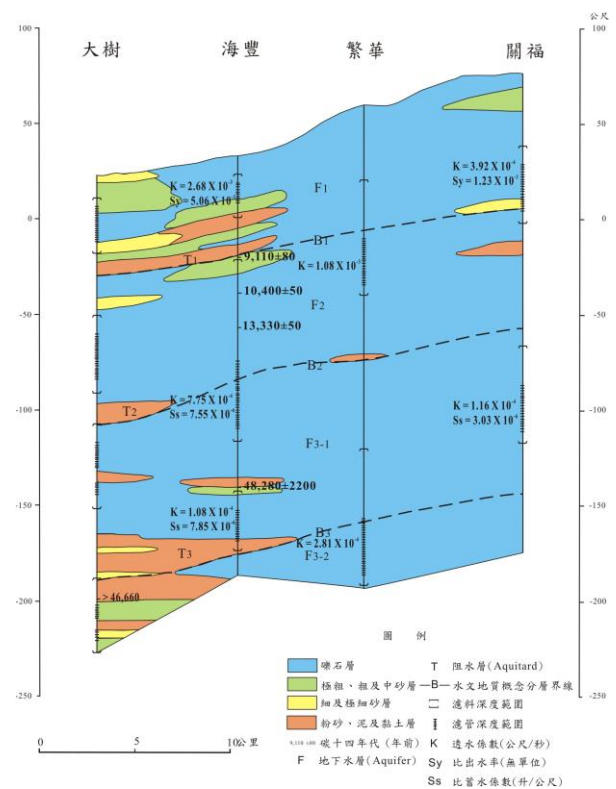


圖2. 大樹-關福水文地質剖面圖。來源：經濟部（2014）。

(二) 達西定律與影響地下水流速的因素

當水受到重力作用而往下滲透，填滿在土壤及岩石中的孔隙時，形成了地下水，由於地下各點的水壓不同，地下水因而不斷地自壓力高處（高水頭）流向低處（低水頭），由於地下水流動極為緩慢，所以一般認為地下水的流動可以使用達西定律(Darcy's Law)

$$v = K \frac{h}{l}$$

其中v為流速，K為水力傳導係數(hydraulic conductivity)，h為流路上兩點之水位差，l為流路上兩點之距離。而K值大小因不同土壤質地而異（2020地下水觀測網，無日期）。由上述公式來看，地下水的流動速度會受到水力傳導係數和水力坡降(hydraulic gradient，I，即 h/l)的影響。表1為常見的土壤質地孔隙率和水力傳導係數的整理表（改編自：第八章地下水水文學，無日期）。

表1. 常見的地層沉積物顆粒直徑與水力傳導係數

沉積物物質	顆粒直徑(mm)	水力傳導係數(cm/s)
細沙(fine sand)	0.125~0.25	$2 \times 10^{-1} \sim 2 \times 10^{-5}$
中沙(medium sand)	0.25~0.5	$5 \times 10^{-1} \sim 9 \times 10^{-5}$
粗砂(coarse sand)	0.5~2.0	$6 \times 10^{-1} \sim 9 \times 10^{-5}$
礫石(gravel)	2.0~64.0	$3.0 \sim 3 \times 10^{-2}$

### （三）地下水流速的原理與工具

目前在模擬地下水流的方法中，包括了以下幾種：

1. 電腦軟體模擬：如MODFLOW、GMS等（梁杏等人，2022）
2. 砂箱：利用壓克力製成大小合適的箱體，裝入沙後，利用隔水牆或兩端的高低水位區製造水頭差，並以染料或偵測水壓來確認地下水流動（Vaheddoost等人，2019；梁杏等人，2022）。
3. 壓克力板：林美杏（1993）中使用了兩片壓克力板黏貼，再注水模擬地下水水流。

## 貳、研究設備及器材

一、模擬用砂箱：我們參考Vaheddoost等人(2019)的裝置，以厚度 0.5 cm的壓克力板製作本研究用砂箱（圖3），中央加隔水牆來產生水力梯度，出水孔和入水孔連結透明軟管、沉水馬達(PH-1200)和蓄水桶，以循環水流方式進行模擬實驗，並

透過球閥來控制流量（圖3、4、5、6、7）。

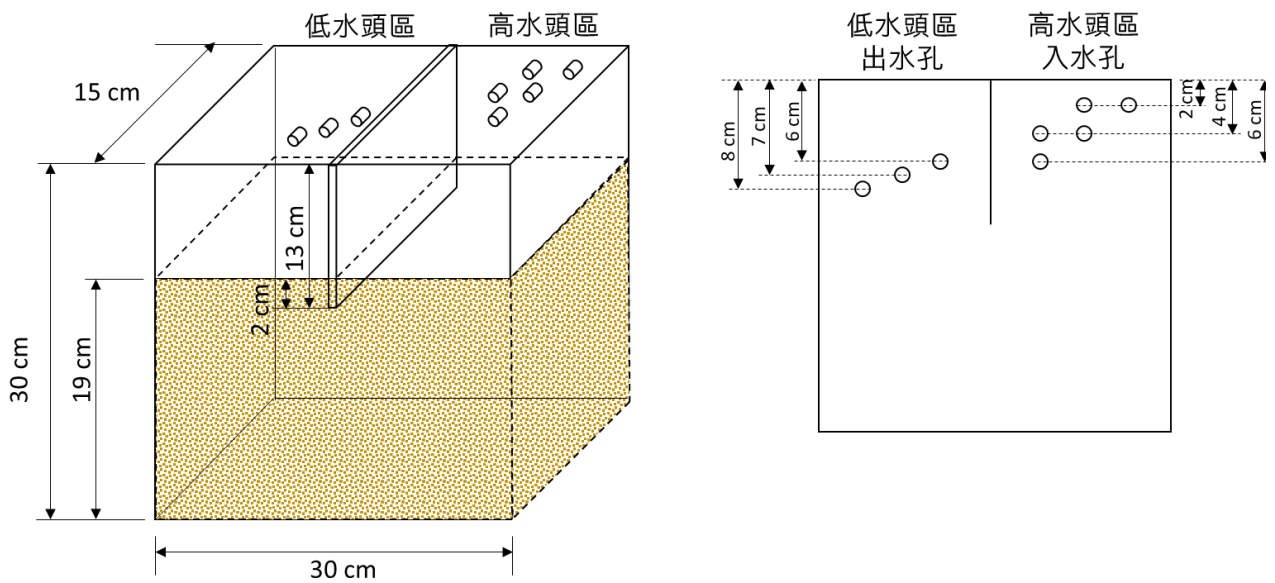


圖3.砂箱尺寸規格。

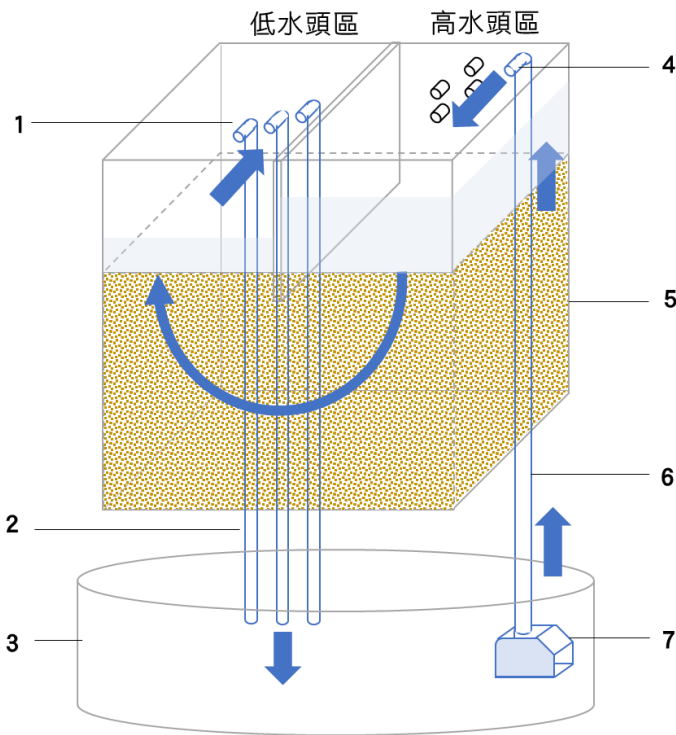


圖4. 實驗循環水路圖（正面）。1：出水孔，2：出水管，3：蓄水桶，4：入水孔，5：砂箱，6：入水管，7：沉水馬達(PH-1200)。



圖5. 實驗裝置（背面）



圖6. 入水孔分散水流裝置



圖7. 入水孔控制流量用球閥

二、實驗材料和器材：粗砂（來源：園藝用品店）、EverStyle藍色色漿（食品添加物）、食鹽、加熱棒。

三、測量紀錄用器具：平板電腦、手機計時app、棉繩、直尺、游標尺。

## 參、研究過程與方法

### 一、探討砂箱模擬地下水流動的結果

#### （一）測量模擬沉積物的直徑

1. 將購自園藝店的粗砂隨機抽取10顆砂粒，並以游標尺測量直徑。
2. 在不同處抽取砂粒10顆，共重複3次，合計測量30顆。

#### （二）觀察地下水流動狀況

1. 將實驗裝置和管路架設好如圖5，加入粗砂並壓實，直到粗砂層的高度達19公分，這時中央隔水牆的底端，會埋在粗砂層表面以下2公分。
2. 在蓄水桶加入25°C自來水共18公升後啟動馬達，試跑水路10分鐘，確認有無漏水。
3. 以中央隔水牆為原點（代號0），在高水頭區距離中央隔水牆3.5 cm、7 cm、11cm處作為染料注入點，代號分別為A、B、C（如圖8）。
4. 架設平板於裝置前方約 20 cm進行拍攝，以針筒吸取藍色色漿 0.5 ml，伸入粗砂層表面層注射，以呈現出地下水流線。
5. 待A、B、C三點的染料移動到低水頭區的砂層表面時，分別定義為a、b、c點，測量中央隔水牆與a、b、c的距離，以手機計時app記錄三條流線Aa、Bb、Cc的染料移動時間，並利用棉繩測量Aa、Bb、Cc的長度（移動路徑長）。
6. 待染料移動結束後，再重新注入染料觀察一次，共進行3次實驗測量。

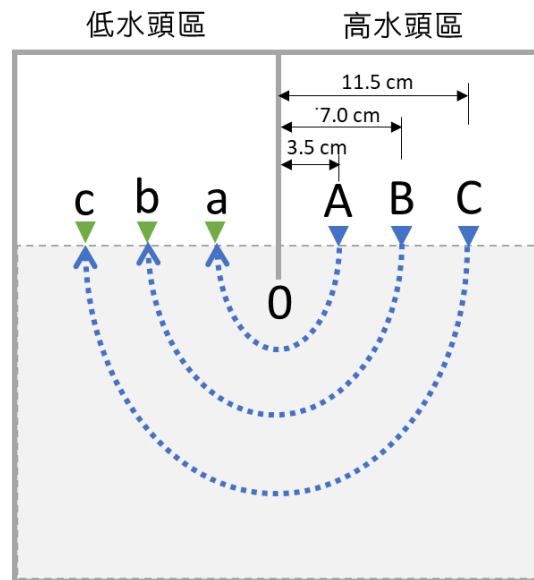


圖8.測量代號示意圖

## 二、探討地下水鹽度對地下水流動的影響

1. 將實驗裝置和管路架設好如圖5，加入粗砂並壓實，直到粗砂層的高度達19公分，這時中央隔水牆的底端，會埋在粗砂層表面以下2公分。
2. 在蓄水桶加入25°C自來水共18公升和食鹽630克，攪拌至食鹽完全溶解後啟動馬達，試跑水路10分鐘，確認有無漏水。
3. 以中央隔水牆為原點（代號0），在高水頭區距離中央隔水牆3.5 cm、7 cm、11cm處作為染料注入點，代號分別為A、B、C（如圖8）。
4. 架設平板於裝置前方約 20 cm進行拍攝，以針筒吸取藍色色漿 0.5 ml，伸入粗砂層表層注射，以呈現出地下水流線。
5. 待A、B、C三點的染料移動到低水頭區的砂層表面時，分別定義為a、b、c點，測量中央隔水牆與a、b、c的距離，以手機計時app記錄三條流線Aa、Bb、Cc的染料移動時間，並利用棉繩測量Aa、Bb、Cc的長度（移動路徑長）。
6. 待染料移動結束後，再重新注入染料，共進行3次實驗測量。

## 三、探討地下水溫度對地下水流動的影響

1. 將實驗裝置和管路架設好如圖5，加入粗砂並壓實，直到粗砂層的高度達19公分，這時中央隔水牆的底端，會埋在粗砂層表面以下2公分。
2. 在蓄水桶加入25°C自來水共18公升，試跑水路10分鐘，確認有無漏水。
3. 以中央隔水牆為原點（代號0），在高水頭區距離中央隔水牆3.5 cm、7 cm、11cm處作

- 為染料注入點，代號分別為A、B、C（如圖8）。
4. 架設平板於裝置前方約 20 cm進行拍攝，以針筒吸取藍色色漿 0.5 ml，伸入粗砂層表層注射，以呈現出地下水流線。
  5. 待A、B、C三點的染料移動到低水頭區的砂層表面時，分別定義為a、b、c點，測量中央隔水牆與a、b、c的距離，以手機計時app記錄三條流線Aa、Bb、Cc的染料移動時間，並利用棉繩測量Aa、Bb、Cc的長度（移動路徑長）。
  6. 待染料移動結束後，再重新注入染料，共進行3次實驗測量。
  7. 在蓄水桶加入冰塊將水降溫至 20°C後，重複上述流程測量3次，過程中以溫度計隨時監控水溫變化。
  8. 在蓄水桶加入熱水將水升溫至 30°C後，重複上述流程測量3次，過程中以溫度計隨時監控水溫變化。

## 肆、研究結果

### 一、探討介質對地下水滲流的影響

#### （一）測量模擬沉積物的直徑

從三次的測量結果來看（表2），我們選用的粗砂直徑介於 0.16 cm~0.21 cm之間，平均直徑為 0.31 cm，對照表1，我們發現屬於偏小的礫石和粗砂之間，也就是類似屏東平原含水層一、二的主要成分，因此可作為我們模擬地下水流動的地層。

表.2 粗砂顆粒直徑測量結果

測量次數	第1次 (n=10)	第2次 (n=10)	第3次 (n=10)
直徑平均(cm)	0.21 ± 0.02	0.20 ± 0.03	0.22 ± 0.02

#### （二）觀察地下水流動狀況

由表3可以看出不同位置的流線差異，與理論上的砂箱實驗結果相同，即離中央隔水牆愈遠的流線，移動速度愈慢。此外，由表 4 來看，染料最後回到砂層表面的a、b、c點與中央隔水牆的距離，三次實驗下來都還算穩定，這代表我們的模擬裝置應該可以用來模擬地下水的流動。



表3. 25°C 純水的流線數據(n=3)

路徑名稱	Aa	Bb	Cc
平均路徑長 (cm)	12.3 ± 0.6	21.7 ± 1.5	39.0 ± 1.7
移動時間 (s)	27.00 ± 1.00	152.67 ± 4.04	340.67 ± 16.07
移動速度 (cm/s)	0.46 ± 0.03	0.14 ± 0.01	0.11 ± 0.01

表4. 25°C 純水的流線終點與隔水牆距離(n=3)

流線終點	a	b	c
與中央隔水牆距離 (cm)	2.3 ± 0.6	5.7 ± 0.6	9.7 ± 0.6

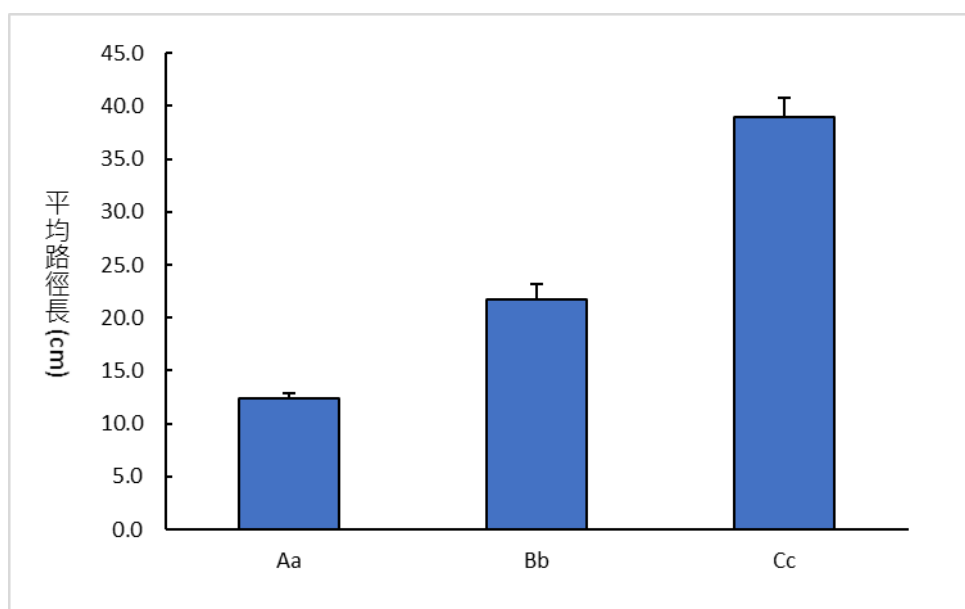


圖9. 25°C 純水的平均路徑長

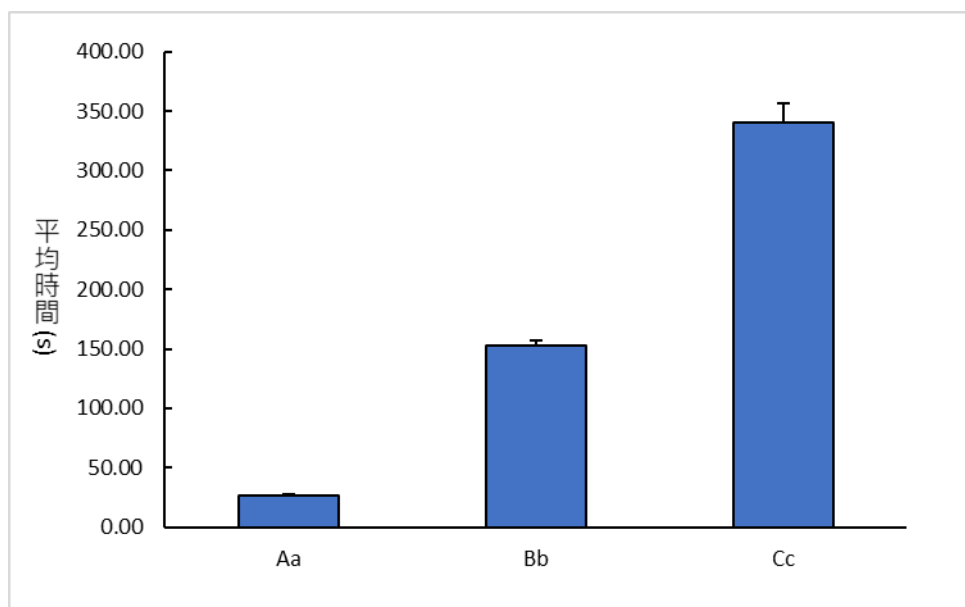


圖10. 25°C 純水的移動時間

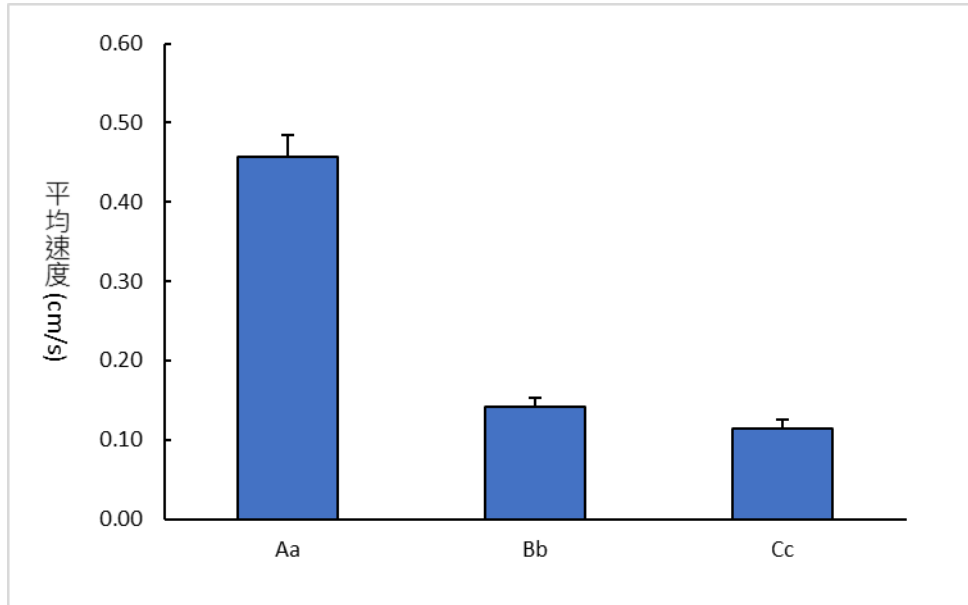


圖11. 25°C 純水的移動速度



圖12. 25°C 純水的Aa流線路徑



圖13. 25°C 純水的Bb流線路徑



圖14. 25°C 純水的Cc流線路徑



圖15. 25°C 純水的流線(後製合併)

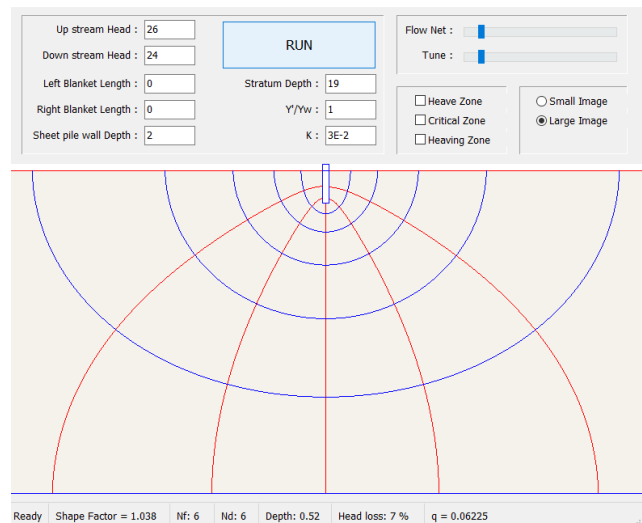


圖16. 軟體模擬的流線

## 二、探討地下水鹽度對地下水流動的影響

由圖20和圖23我們可以看出不同鹽度下各流線的路徑長度和終點位置相近，代表移動

路徑不受鹽度影響，但當鹽度增加時，Aa流線的移動速度增加、Bb和Cc流線的移動速度減少（圖22），導致Aa流線的移動時間減少、Bb和Cc流線的移動時間增加（圖21）。



圖17. 35%鹽水的Aa流線路徑



圖18. 35%鹽水的Bb流線路徑



圖19. 35%鹽水的Cc流線路徑

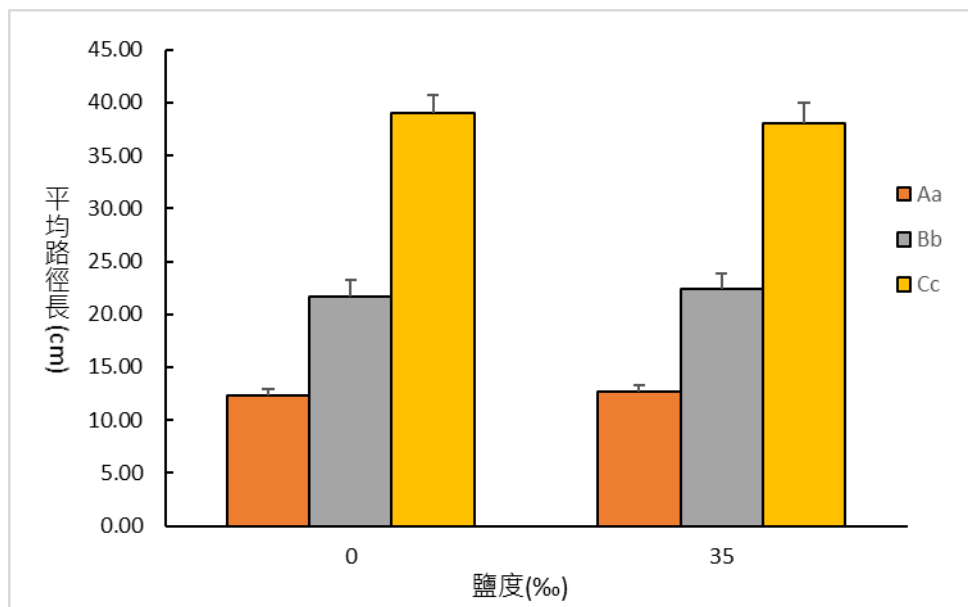


圖20. 不同鹽度的流線路徑長比較

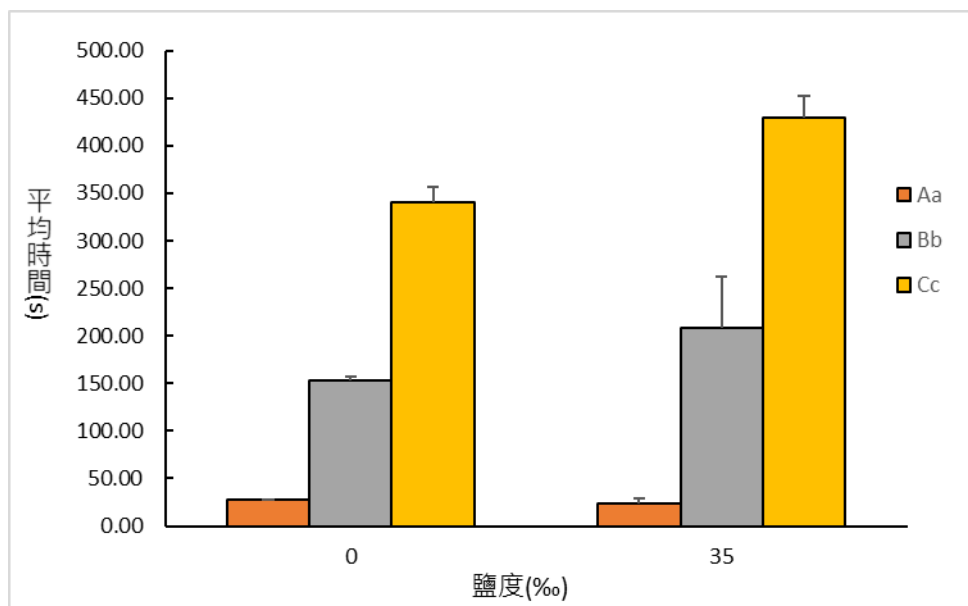


圖21. 不同鹽度的流線移動時間比較

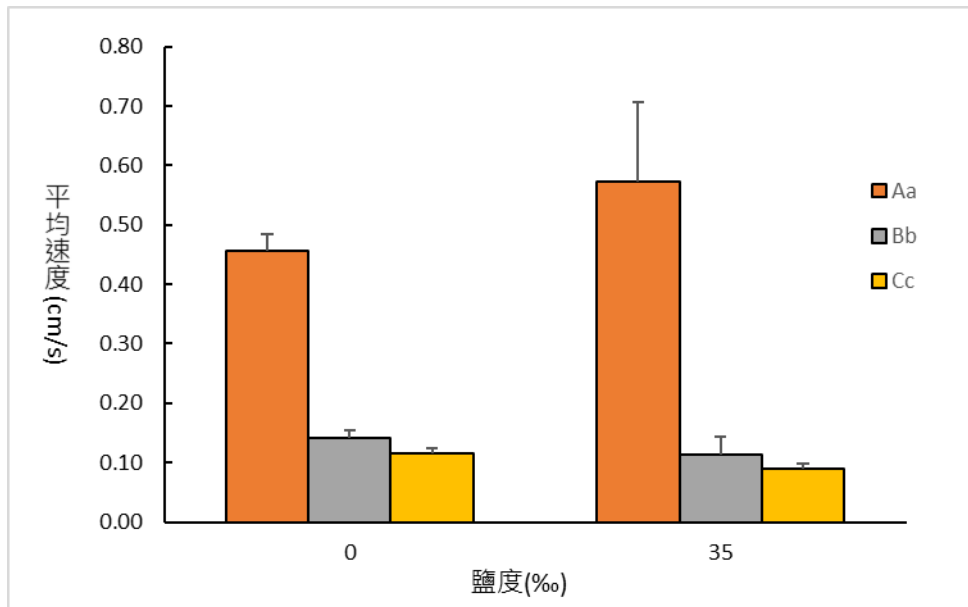


圖22. 不同鹽度的流線移動速度比較

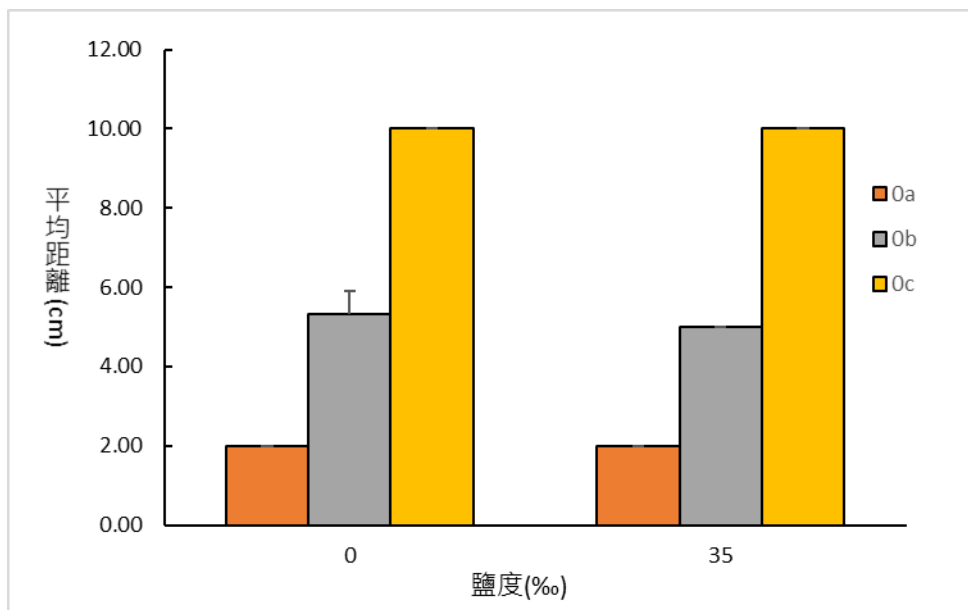


圖23. 不同鹽度的流線終點與中央隔水牆距離比較

### 三、探討地下水溫度對地下水流動的影響

由圖30 和圖33 我們可以看出不同溫度下各流線的路徑長度和終點位置相近，代表移動路徑不受溫度影響，但當鹽度增加時，Aa、Bb和Cc流線的移動速度均有增加（圖32），導致Aa、Bb和Cc流線的移動時間均有減少（圖31）。

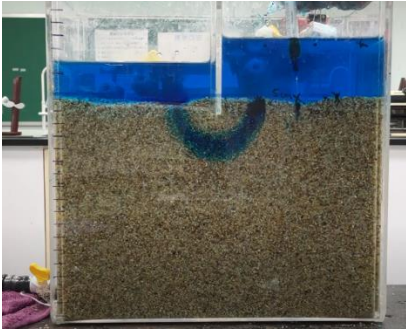


圖24. 20°C 純水的Aa流線路徑

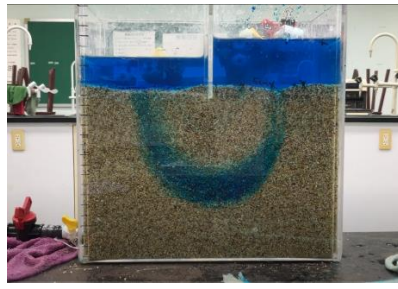


圖25. 20°C 純水的Bb流線路徑

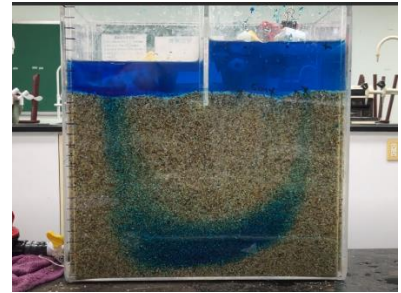


圖26. 20°C 純水的Cc流線路徑



圖27. 30°C 純水的Aa流線路徑



圖28. 30°C 純水的Bb流線路徑



圖29. 30°C 純水的Cc流線路徑

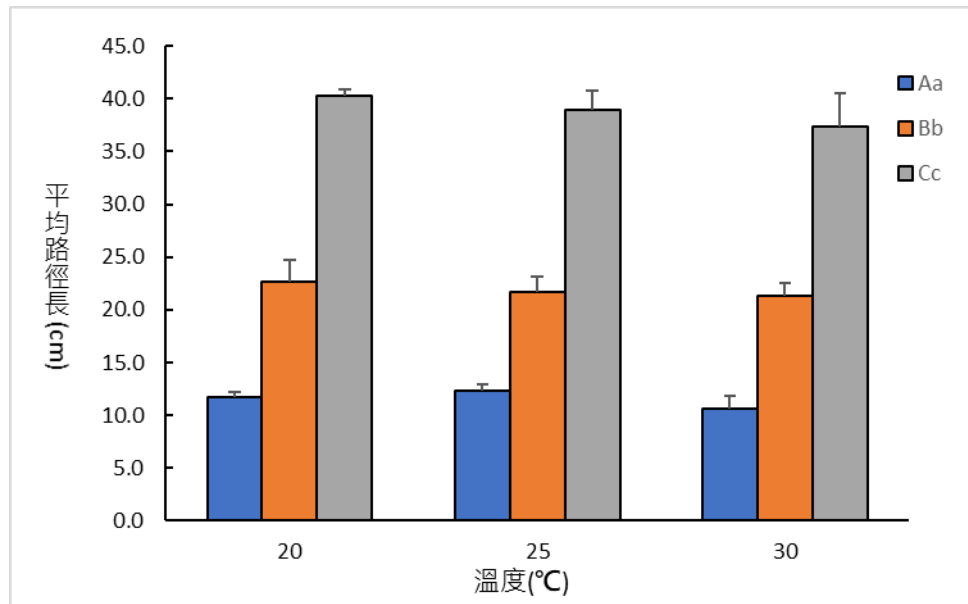


圖30. 不同溫度的流線路徑長比較

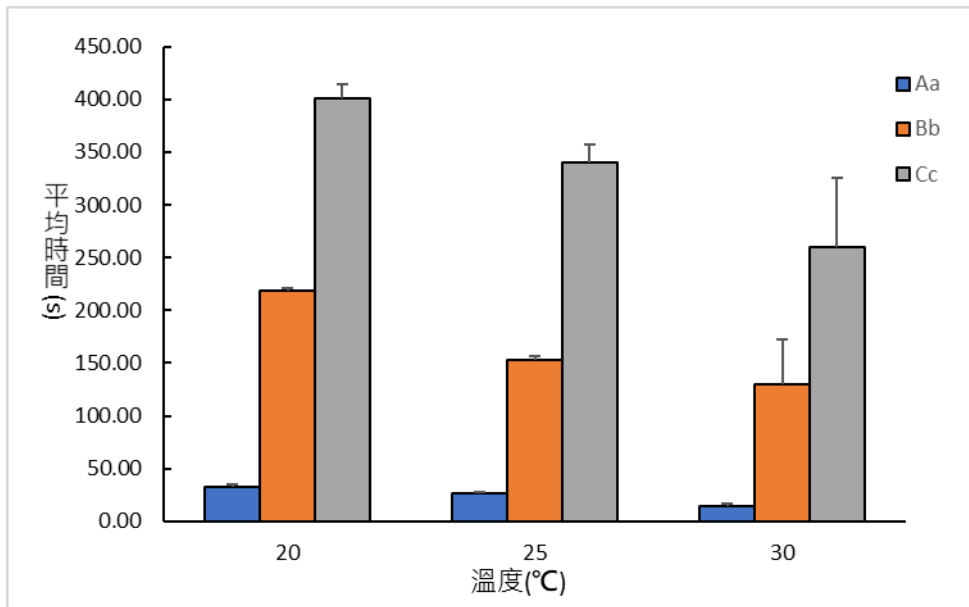


圖31. 不同溫度的流線移動時間比較

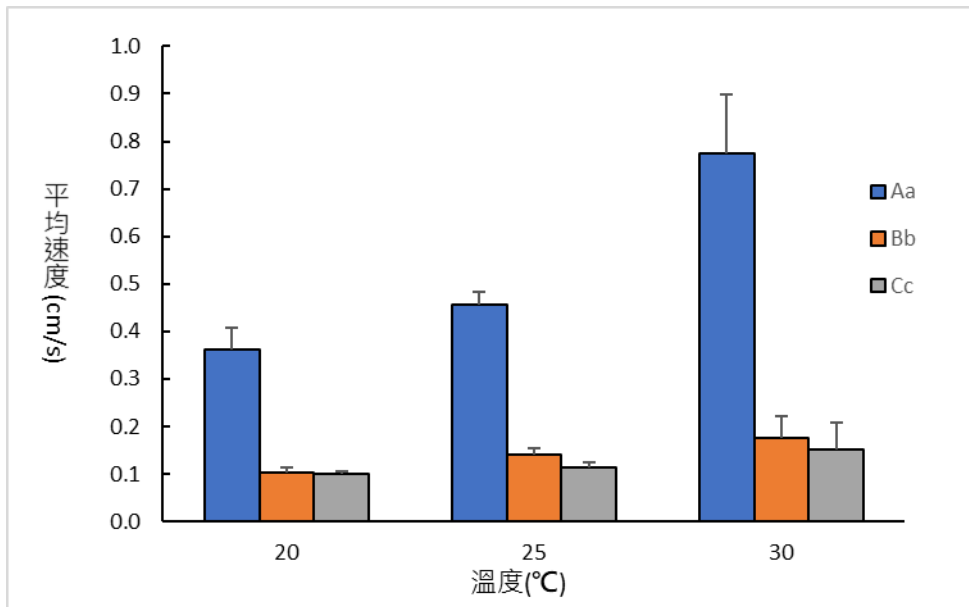


圖32. 不同溫度的流線移動速度比較

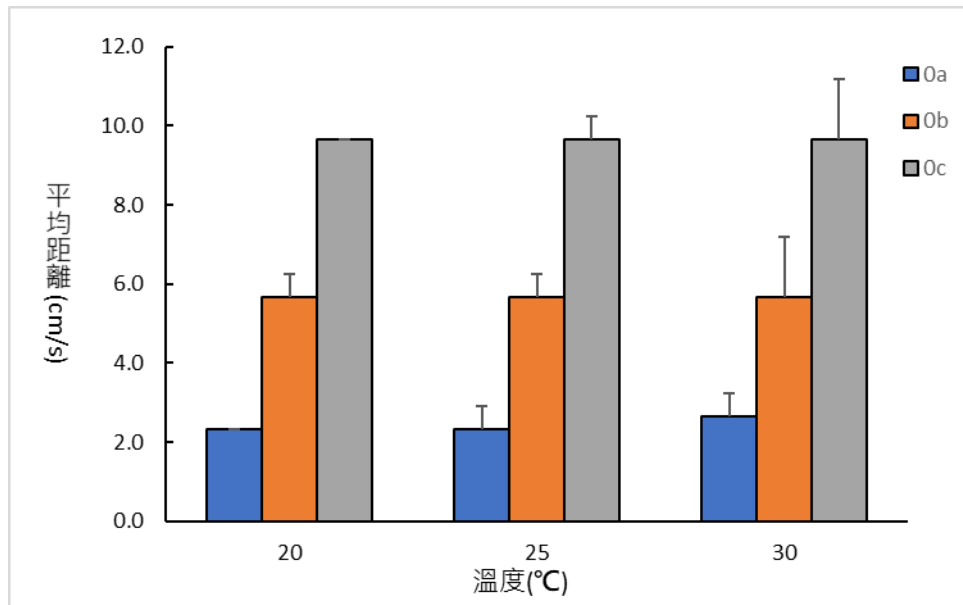


圖33. 不同溫度的流線終點與中央隔水牆距離比較

## 伍、討論

### 一、探討砂箱模擬地下水流動的結果

在開始實驗的過程中遇過許多瓶頸：染色點太近顏色會互相干擾、粗砂沒有壓實染料容易散開、入水孔水流太強容易沖壞砂石層、入水流量不易控制等等問題，在反覆測試十幾次、一步步解決問題後，才確定好對照組的裝置。

根據達西定律可知流量為： $Q = AV = AK \frac{h}{l} = KIA$ ，因此可以推算出  $K = \frac{Q}{IA}$ 。已知我們裝置的流量為  $20 \text{ cm}^3/\text{s}$ ，有效斷面積為  $266 \text{ cm}^2$ ，水力坡降  $I = \frac{h}{l} = \frac{2}{28}$ ，換算K值為1.05，相當於圖34 中介於礫石和砂之間，也和我們透過測量直徑，推論我們使用的材料屬於偏小的礫石和粗砂之間的結果一致。

由於我們在注射ABC三點的染劑時為了方便測量，採取不同時間注射，所以透過影像軟體(PowerDirector 15)的截圖，以及ImageJ的疊圖後呈現出三條流線（圖15），比對在相同條件下，以流線網簡易繪製軟體Damnast所跑出的流網圖（圖16），發現路徑的形狀有些微差異。我們推測可能是染劑在某些較大孔隙的路徑上，因其他的力量（如紊流）產生向旁移動的現象，不過因為重複實驗的結果顯示流線終點和路徑長均不變，加上換算K值的結果與實際相符，我們決定照原來方式繼續實驗，至於是否真有其他力量影響，可以在後續的研究中再探討。

$-\log_{10} K(\text{cm/sec})$	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
滲透性	能通透			半通透				無法通透						
含水層	佳				差				無					
土壤	礫石	淨砂、砂及礫石			極細砂、淤泥、黃土及亞黏土									
				泥煤		黏土		未風化黏土						
岩石				油岩		砂岩		石灰岩		角礫岩 花崗岩				

圖34. K值換算表，查得值為-1，代表K值為10cm/s，若值為5，代表K值為0.00001cm/s。來源：2020地下水觀測網（無日期）。

## 二、探討地下水鹽度對地下水流動的影響

實驗結果顯示不同鹽度下的路徑長和流線終點相近，鹽度增高時Aa的速度增加，Bb和Cc的速度減少，也就是Aa時間減少，Bb和Cc時間增加，從達西定律來看，鹽度應該不會影響流速，後來我們找了資料才知道K值不只與地層的沉積顆粒大小有關，也會受溫度、水中離子、擠壓空氣的影響（梁昇、黃天福，1984）。水中陽離子對K值影響甚大，當Na增加時K值會隨之降低，在黏土中孔隙很小，會導致較大的陽離子被滯留在孔隙中，稱為鹽節效應。但我們的實驗並非使用黏土，所以我們推測使用的粗砂中，顆粒顏色不同，代表可能由不同礦物所組成，而這些礦物可能也會和水中的Na產生交互作用，進而影響流速，這方面需要能進一步分析礦物成分或是使用單一種類礦物去實驗才能加以驗證。

至於為何三條流線只有Aa的速度增加，Bb和Cc反而減少，我們推測因為Aa路徑短，所以礦物成分影響較小，也因為可供分析的數據較少，我們認為之後可以加大實驗裝置，並增加多條流線染色點，或是偵測箱內多點的壓力，來進一步確認箱內的真實裝況。

我們設計這個實驗是想要探討當地下水位降低，海水入侵改變地下水鹽度時，是否會影響地下水流動，從結果看起來應該會有影響，且推測會和地層的礦物成分，以及海水濃度有關，如果未來能進一步使用不同溶質和濃度進行實驗，相信對於海水入侵或是污染物在地下水流動的現象都能有更進一步認識。

## 三、探討地下水水溫對地下水流動的影響

實驗結果顯示不同溫度下的路徑長和流線終點相近，溫度增高時Aa、Bb、Cc的速度增加，也就是Aa、Bb、Cc時間減少。從達西定律來看，溫度應該不會影響流速，但梁昇、黃天福（1984）指出K值會受溫度的影響，當溫度愈高，水的黏滯性愈低，水分因而較容易



通過含水層的孔隙。

我們設計這個實驗室想要探討當氣候變遷，山區氣溫也升高時，是否會影響地下水的溫度，連帶影響地下水的流動，從結果來看，溫度的確會影響地下水的流動。除了這些因素之外，官晉安（2021）也提到人為抽取也會造成地下水位變化，我們未來可以利用較大型的砂箱模擬沖積扇頂到平原過程中人為抽取的影響，並加入水壓測量裝置和電腦軟體模擬來相互驗證，可以更深入了解地下水的流動。

## 陸、結論

- 一、利用砂箱模擬地下水流動時，距離中央隔水牆愈遠，流線的時間和路徑長均愈多，流線的速度則愈低。
- 二、當地下水鹽度增加時，流線的路徑不會改變，距離中央隔水牆較近的流線速度增加，距離中央隔水牆較遠的流線速度減少。
- 三、當地下水溫度增加時，流線的路徑不會改變，流線的速度會跟著增加。

## 柒、參考資料及其他

2020地下水觀測網（無日期）。**地下水之流動**。2023年3月1日，取自 <http://pc183.hy.ntu.edu.tw/gwater/qw-learning01.php>

Vaheddoost, B., Kaymaz, M. A., Ozteber, M. S., & Cakir, M. S. (2019, December). **Experimental and Theoretical Evaluation of the Flow-Net in Non-Homogenous Soil**. In CONGRESS PROCEEDINGS SERIES (p. 73).

行政院環境保護署（無日期）。**全國環境水質監測網**。2023年3月1日，取自 <https://wq.epa.gov.tw/EWQP/zh/ConService/Download/HistoryData.aspx>

官晉安（2021）。**屏東平原地下水位變動主因之探討**。國立成功大學資源工程學系碩士論文，台南市。取自 <https://hdl.handle.net/11296/w8dses>

林美杏(1993)。**地下水流的模擬**。第33屆全國中小學科展作品。

林倖妃（2021）。**56年大旱中，屏東水情竟能亮綠燈！祕密藏在一座看不見的湖**。天下雜誌。  
<https://www.cw.com.tw/article/5114690>

梁杏, 張人權, 羅明明, 孫蓉琳, 靳孟貴, 周宏, & 蔣立群（2022）。**地下水流系統研究中的方法論探討: 以 CUG-武漢地下水流系統研究為例**。地質科技通報，41(1)，30-42。

- 梁昇、黃天福（1984）。**地下水運動的基礎-達西定律與水力傳導度**。水土保持學報，16-17(1)，p.37-54。
- 陳瑞娥、陸挽中（2015）。**屏東平原地下水補注地質敏感區**。經濟部中央地質調查所彙刊，第二十八號，第93－130頁。
- 陳聖傑（2012）。**地下水水位之主成分分析-以濁水溪沖積扇為例**。國立成功大學資源工程學系碩博士班碩士論文，台南市。取自<https://hdl.handle.net/11296/z5yt5h>
- 無作者（無日期）。**第八章 地下水水文學**。2023年3月1日，取自<http://homepage.ntu.edu.tw/~bach/Groundwater2.pdf>
- 經濟部（2014）。**地下水補注地質敏感區劃定計畫書**。取自<https://www.moeacgs.gov.tw/ReadFile/?p=Article&n=46dfcf9d21174ea1a1d220e65a33f3d6.pdf>
- 劉星均（2023年3月1日）。**近600天沒下雨 屏東水情拉緊報地下水位下降**。聯合新聞網。http://udn.com/news/story/7327/7001606