

中華民國第 63 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國中組 地球科學科

團隊合作獎

030507

大地水銀行-探討地下水的流動

學校名稱：屏東縣立中正國民中學

| | |
|---|-----------------------------|
| 作者： 國一 黎鎧慧 國一 郭綺恩 國三 郭亭慧 | 指導老師： 簡秉逸 黃苙嬪 |
|---|-----------------------------|

關鍵詞：砂箱、流線、達西定律

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，環境因子和抗旱井抽水對地下水流動的影響，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增加，流線的速度則減少。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。在模擬抽水的狀況下，流線路徑會改變，較快的流線速度會下降，流線路徑向左偏移、長度增加，較慢的流線速度下降並改往抽水口方向，且有隔水層時會使流線路徑偏移更明顯。

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範圍（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卻非如此（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？

此外，為因應這次大旱，南區水利局也著手開挖抗旱井，卻引起當地居民抗議，認為會影響民生用水和養殖產業（羅欣貞，2023）。在不同深度的地層中取水是否會影響地下水的流動呢？我們在網路影片(Practical Engineering, 2015)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）製作模擬地下水流動的砂箱
- （二）探討砂箱模擬地下水流動距離與流速的關係
- （三）探討地下水鹽度對地下水流動的影響

(四) 探討地下水溫度對地下水流動的影響

(五) 探討抗旱井取水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(F1)為未受壓地下水層，以粗至中砂為主，其次為礫石和細砂；地下水層二(F2)以礫石層最發達，其次為細砂層和中、粗砂層；地下水層三-1(F3-1)以礫石層最發達。

我們這次研究的區域以高屏堰左岸的抗旱井為主，鄰近屏東市區（水利署，2023），以圖1來看屬於隘寮扇以下的平原區域，由圖2可看出屏東市區的地下水來源是從隘寮扇而來，因此我們採用與流線經過區域較接近的大樹-關福地質剖面線（圖3），來觀察高屏堰左岸的抗旱井鄰近區域的水文地質，並作為此次研究模擬的砂土粒徑參考。由圖4可以看出屏東市區附近的地下水層一以礫石層和極粗、粗、中砂層為主，抗旱井（深度120公尺）所在的地下水層三-1，以極粗、粗、中砂層為主。

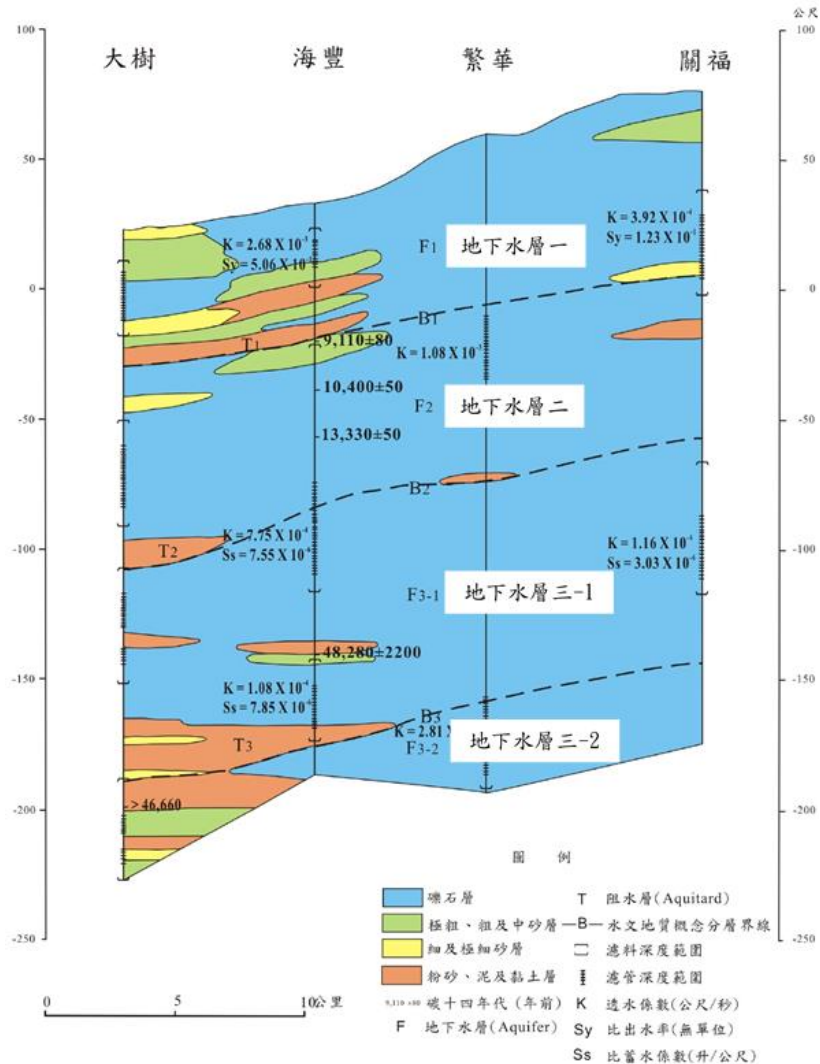


圖4. 大樹-關福水文地質剖面圖。來源：經濟部（2014）。

(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）。因為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為常見的土壤顆粒粒徑和水力傳導係數的整理（王焰新（譯），2013）。

表1. 常見的地層沉積物顆粒直徑與水力傳導係數（改編自王焰新（譯），2013）

| 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 | $2 \times 10^{-5} \sim 2 \times 10^{-2}$ |
| 中沙(medium sand) | 0.25~0.5 | $9 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-2}$ |
| 粗砂(coarse sand) | 0.5~1.0 | $9 \times 10^{-5} \sim 6 \times 10^{-1}$ |
| 礫石(gravel)-含極粗砂和細礫 | 1.0~4.0 | $3 \times 10^{-2} \sim 3.0$ |

（三）模擬地下水流的方法

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，裝入砂後，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，並添加染料和障礙物，觀察地下水流的變化。這是利用兩平板間的層流流動加上染料，將流線具現化（郭家竹、王煜維、郭一鴻，2016），也可以在相關的網路影片中觀察到類似實驗（Morphohydraulics Imaging Laboratory，2018）。

使用砂箱會比壓克力板更能接近水流在砂石間的流動情形，不過受限規模以及地層的複雜程度，所以許多研究常會以模擬軟體輔助（梁杏等人，2022）。由於本研究採用的地質剖面組成較單純，加上模擬軟體需要的技術門檻較高，因此我們決定採用砂箱模擬的方式來進行研究。

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5），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6、7）。

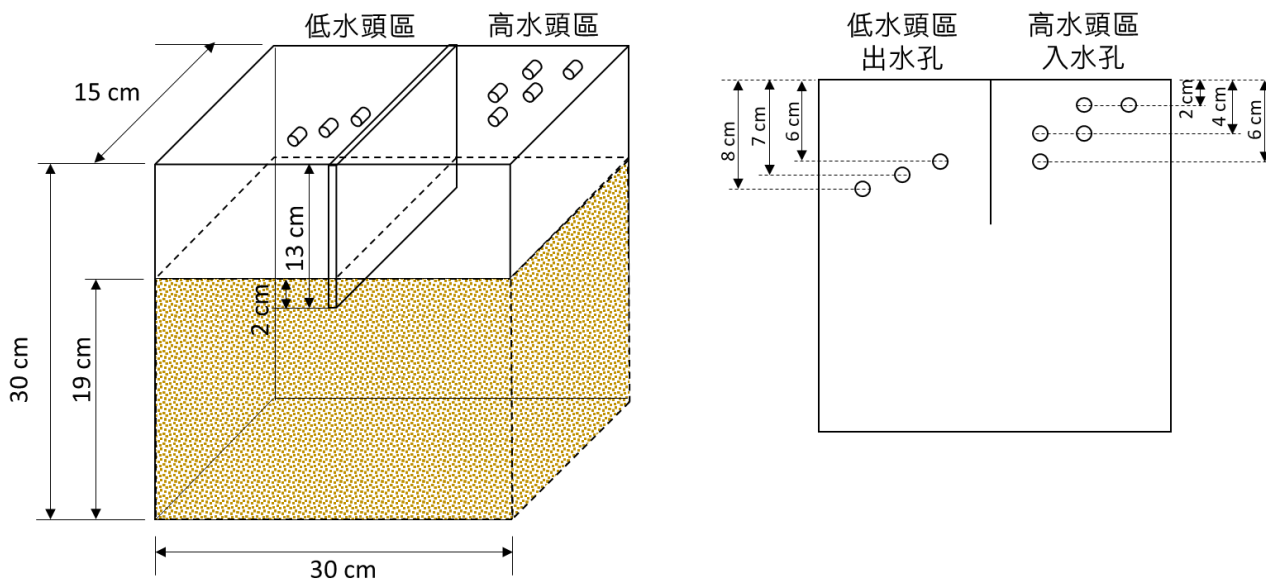


圖5. 砂箱尺寸規格。

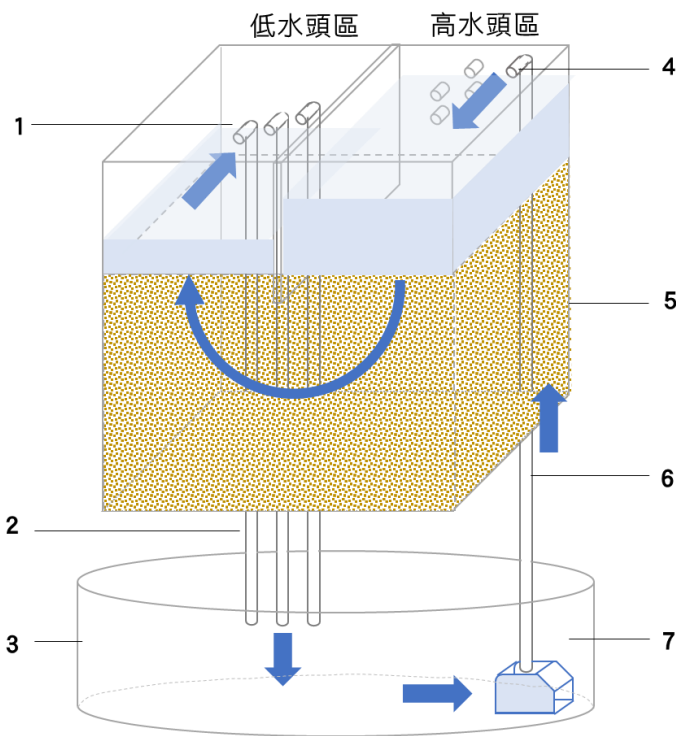


圖6. 實驗循環水路圖（正面）。1：出水孔，2：出水管，3：蓄水桶，4：入水孔，5：砂箱，6：入水管，7：沉水馬達(PH-1200)。



圖7. 實驗裝置（背面）

二、實驗材料和器材：砂（來源：水族用品店）、EverStyle藍色色漿（食品添加物）、食鹽、加熱棒、針筒、幼鳥餵食管。

三、測量紀錄用器具：平板電腦、手機計時app、棉繩、直尺、標準篩（10號、40號、200

號、500號)、四合一測試筆(pH/EC/TDS/temp)。

四、分析用軟體：Damnasht、PowerDirector、ImageJ。

參、研究過程與方法

一、製作模擬地下水流動的砂箱

(一) 測量模擬沉積物的粒徑比例

取水族店購置的砂 100克，以標準篩10號(2mm)、40號(0.42mm)、200號(0.074mm)、500號(0.025mm)過篩測量重量，共重複測量5次。

(二) 測試簡易版砂箱

看過網路影片後，在和其他老師討論過程中，對於水位是否真如影片呈現落差感到懷疑，因此我們在正式訂做壓克力砂箱前，先使用回收的塑膠瓶、塑膠管組成連通裝置進行測試。在裝置內裝入砂並在兩個瓶身分別挖出不同高度的出入水孔，以水管持續注水觀察結果(圖8)。

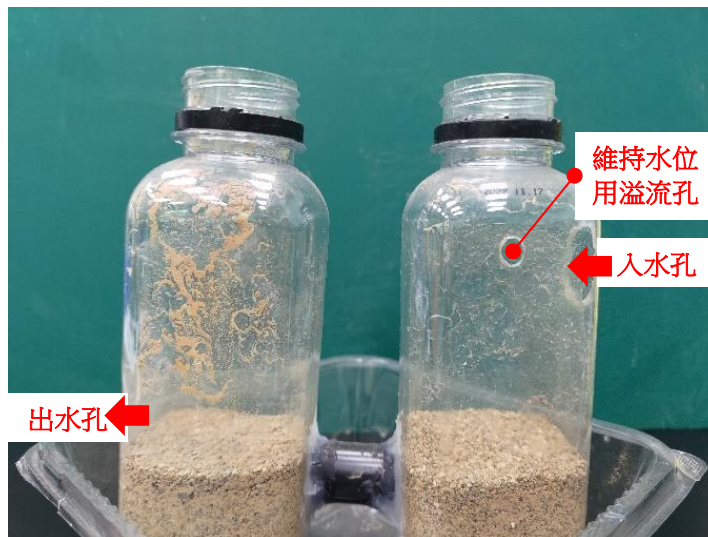


圖8. 測試簡易版砂箱

(三) 試用並改良砂箱

我們參考Vaheddoost等人(2019)的裝置製作相同規格的砂箱，在放入砂後，嘗試滴入染料，觀察操作過程中所產生的狀況，希望找出設備上的問題並加以改良。

(四) 測試染料量

我們在測試砂箱過程中發現染料量會影響流線外觀，因此分別測試 0.1、0.5、1ml 的染料量，希望能找出固定注射的染料量，以適合觀察流線。

(五) 測試染料點

我們以中央隔水牆為基準，於高水頭區每隔 2 cm 注射 0.5 ml 的染料，希望能找出適合的注射點，避免流線的染料互相影響。

(六) 測試染料對水質的影響

因為每項變因會重複實驗三次，如果每次實驗後都要清洗會耗去不少時間，因此我們希望可以重複實驗三次後再清洗。為了解三次累積的染料量是否會造成水質差異，以總水體 18公升，做完一次實驗會使用 1.5 ml 染料量（3條流線）的比例來換算，配置三杯 600 ml 的清水，分別加入 0.05 ml、0.1 ml、0.15 ml 的染料，代表進行一、二、三次實驗時的染料濃度（圖9），並測量水中的 pH、EC 和 TDS 變化。



圖9. 加入不同染料量的清水，由左至右分別為 0.05 ml、0.1 ml、0.15 ml。

二、探討砂箱模擬地下水流動距離與流速的關係

1. 將實驗裝置和管路架設好如圖6，加入粗砂並壓實，直到粗砂層的高度達 19cm，這時中央隔水牆的底端，會埋在粗砂層表面以下 2cm。
2. 在蓄水桶加入 25°C 清水共 18 公升後啟動馬達，調整球閥使高低水頭區水位相差 2cm，試跑水路 10 分鐘，確認有無漏水和水位差是否穩定。
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、11.5cm 處作為染料注入點，代號分別為 A、B、C（如圖10）。
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。
- 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）。
 - 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。
 - 實驗完確實清洗，並測量水質，確保有清洗乾淨。

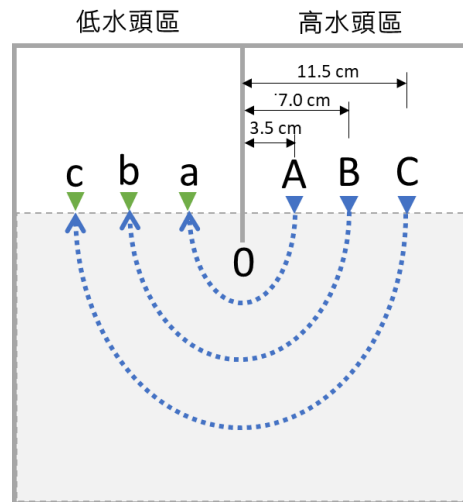


圖10. 測量代號示意圖

三、探討地下水鹽度對地下水流動的影響

- 實驗裝置如研究方法二，改在蓄水桶加入25°C清水共18公升和食鹽630克（模擬海水鹽度35‰），攪拌至食鹽完全溶解後啟動馬達，固定球閥開關位置如研究方法二，試跑水路10分鐘，確認有無漏水和水位差是否穩定。
- 其餘實驗過程、次數和紀錄方式如研究方法二。

四、探討地下水溫度對地下水流動的影響

- 實驗裝置如研究方法二，改在蓄水桶加入冰塊將水降溫至15°C、20°C後，分別重複上述流程測量3次，過程中以溫度計隨時監控水溫變化。
- 實驗裝置如研究方法二，改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。

五、探討抗旱井取水對地下水流動的影響

（一）諮詢南區水利局相關抗旱井訊息

為了更進一步了解目前抗旱井的相關訊息，我們接洽南區水利局，希望能更深入了解

屏東平原選擇抗旱井地點的條件，這樣抽水是否會造成地層下陷，以及為何抗旱井不會與民搶水。

(二) 模擬抽水對地下水流動的影響

1. 測試砂層深處的染色點

(1) 將實驗裝置和管路架設好如圖11，加入粗砂達高度10公分並壓實，置放三隻透明吸管作為染色用通道（與中央隔水牆垂直延伸線的距離分別為3.5 cm、7 cm、10 cm），再繼續加入粗砂到高度達19 cm，這時中央隔水牆的底端，會埋在粗砂層表面以下2cm。

(2) 在高水頭區距離中央隔水牆3.5 cm、7 cm、10 cm處以及砂面垂直向下9cm處作為染料注入點，代號分別為A、B、C和A'、B'、C'（圖12），以針筒和搭配幼鳥餵食管延伸注射器長度，分別注入藍色色漿 0.5 ml，待A、B、C和A'、B'、C'六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和a'、b'、c'，觀察流線Aa、Bb、Cc和A'a'、B'b'、C'c'的狀況（圖13）。

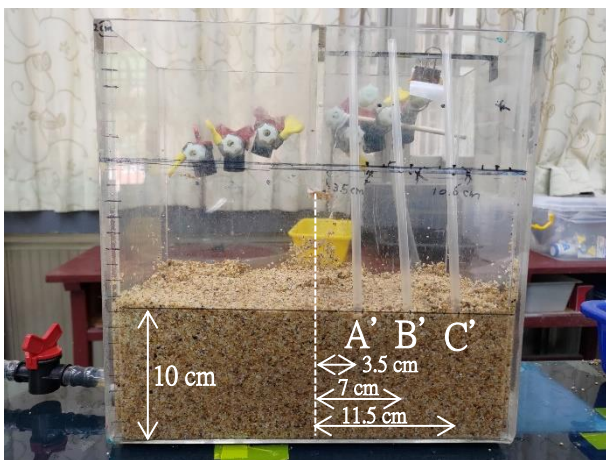


圖11. 裝置製作流程與代號說明一

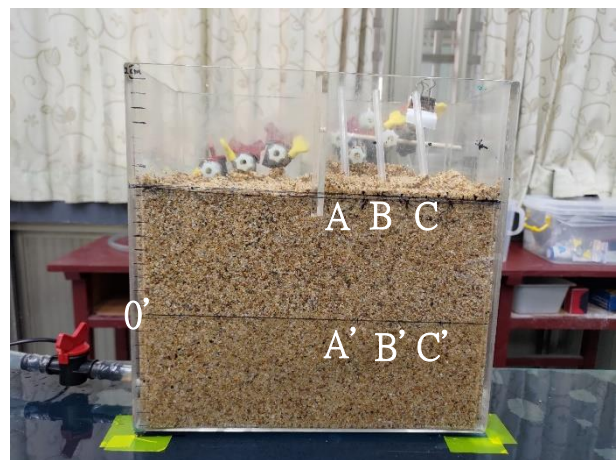


圖12 裝置製作流程與代號說明二

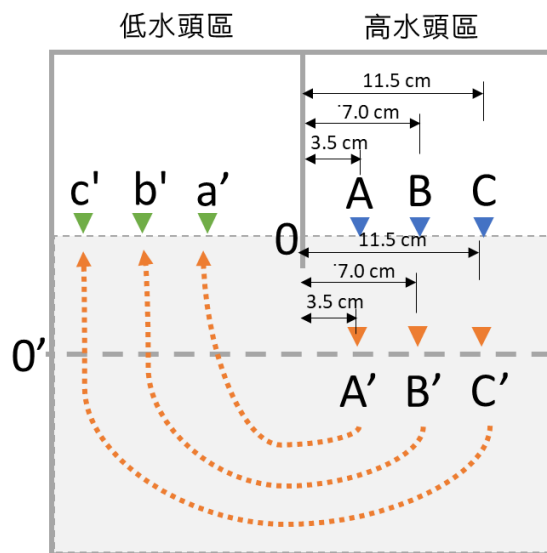


圖13. 測量代號示意圖

2. 測試抽水對流線的影響

- (1) 採用上述裝置和水路裝置，在蓄水桶加入25°C清水共18公升後啟動馬達，固定球閥開關位置，試跑水路10分鐘，確認有無漏水和水位差是否穩定。
- (2) 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處以及砂面垂直向下9cm處作為染料注入點，代號分別為A、B、A'、B'。
- (3) 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。
- (4) 待A、B、A'、B'四點的染料移動到低水頭區的砂層表面時，分別定義為a、b、a'、b'，測量中央隔水牆與a、b、a'、b'的距離，以手機計時app記錄四條流線Aa、Bb、A'a'、B'b'的染料移動時間，並利用棉繩測量Aa、Bb、A'a'、B'b'的長度（移動路徑長）。
- (5) 重複上述流程測量3次後，清洗裝置再進行抽水測試。測試時開啟低水頭區底下的排水孔模擬抽水，並重複上述流程測量 3次模擬抽水的結果。
- (6) 紀錄時若流線呈現往下方排水孔流動，紀錄時以砂面下9 cm的水平線為紀錄基準線，基準線與左方箱壁交會點為基準點0'，流線接觸左方箱壁的位置為測量點（a、b、a'、b'），測量Aa、Bb、A'a'、B'b'的長度（移動路徑長），以及基準點0或0' 與 a、b、a'、b'的距離（如圖13、圖16）。
- (7) 清空砂箱，將砂箱加入粗砂達高度10公分並壓實，置放二隻透明吸管作為染色用通道（與中央隔水牆垂直延伸線的距離分別為3.5 cm、7 cm），鋪上0.5cm的高嶺土模擬隔水層後（圖14），再加入粗砂壓實直到高度達19 cm，這時中央隔水牆的底端，會埋在粗砂層表面以下2cm（圖15）。
- (8) 重複上述測量流程(2)~(6)。

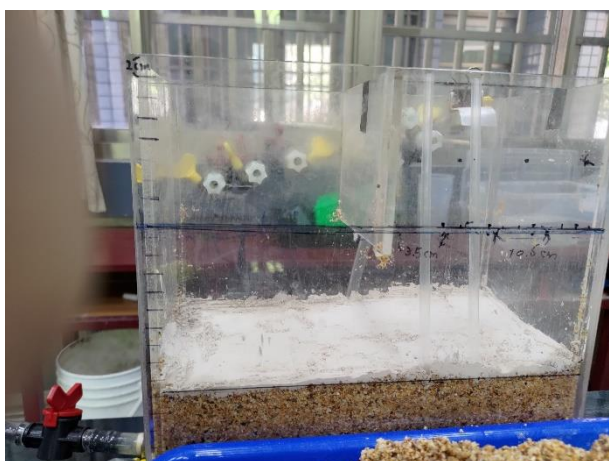


圖14. 鋪上高嶺土作為隔水層

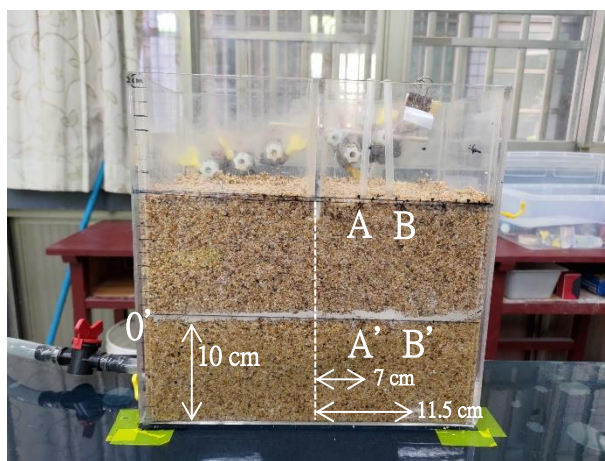


圖15. 隔水層裝置完成圖與代號說明

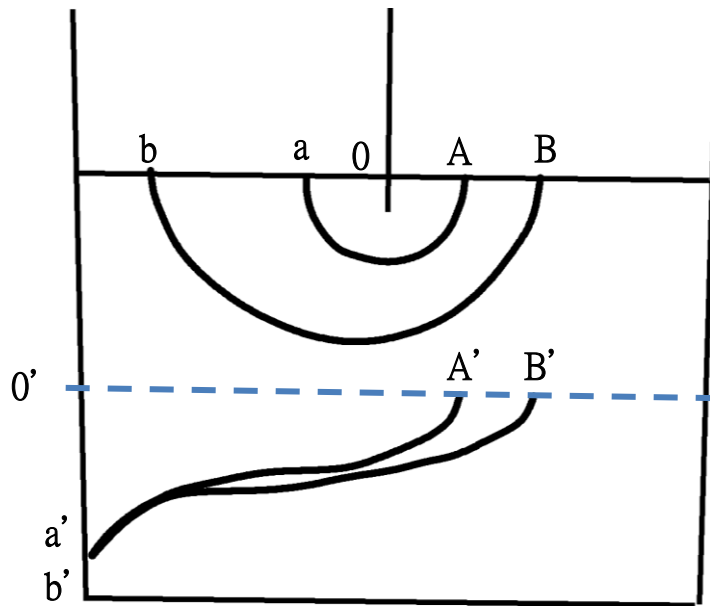


圖16. 測量代號示意圖

肆、研究結果

一、製作模擬地下水流動的砂箱

(一) 測量模擬沉積物的粒徑比例

測量結果如表2。根據王新傳（1980）所述，粗砂類的粒徑為 0.25-2 mm，包括了極粗砂、粗砂、中砂，由於我們的砂約有 94%屬於這個範圍，因此之後均以粗砂稱呼實驗所用砂。

表2. 模擬沉積物的粒徑比例

| 粒徑(mm) | >2 | 0.42~2 | 0.074~0.42 | 0.025~0.074 | <0.025 |
|------------|-----|--------|------------|-------------|--------|
| 平均重量百分比(%) | 4.6 | 93 | 1.1 | 0.1 | 1.2 |

另外，根據AASHTO土壤分類系統，留在2mm篩的稱為礫石，通過2mm留在0.075mm篩的稱為砂土，通過0.075mm篩的稱為黏土和粉土，而我們的砂通過 2mm篩的共有95.4%，屬於A-1-b（礫石、石碎屑和砂土）。

若是採用統一分類系統，50%以上留在200號篩屬於粗顆粒，其中若有50%以上通過4號篩則屬於砂土，而我們的砂子是超過50%通過10號篩，所以屬於砂土。

(二) 測試簡易版砂箱

利用手邊的廢棄材料，做出高入水孔和低出水孔的連通裝置，發現透過適當的水量控制和隔水牆，也可以在短距離內做出高低水頭的砂箱裝置（圖17）。

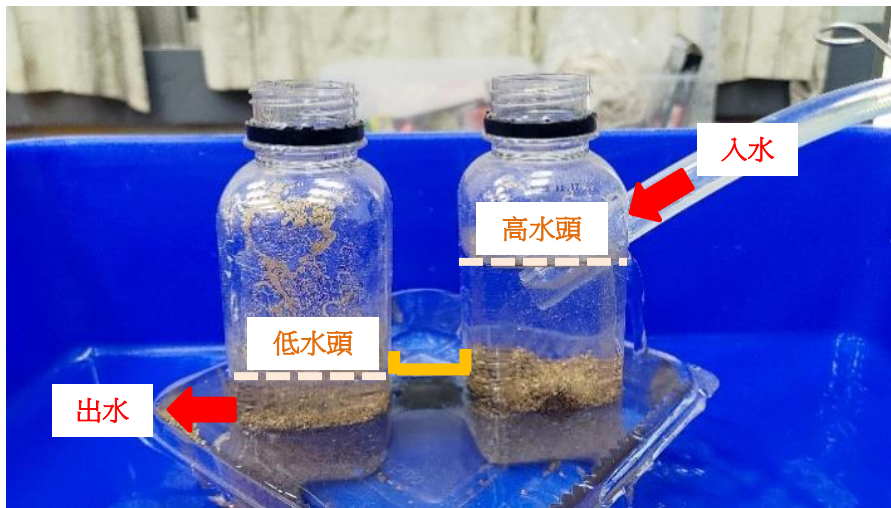


圖17. 試作高低水頭差設備

(三) 試用並改良砂箱

在試用過程中，我們發現設備有幾個問題：需要調節水量才能控制水頭差；入水孔處因為水流量大，容易讓沙面衝擊出凹陷；滴加染料後需要把砂全部挖出重洗，耗時甚久。

因此針對上述問題，我們在各水孔增加球閥，方便控制水量（圖18）。在入水孔處增加分散水流裝置（塑膠片），以減緩衝擊（圖19）。在高水頭區增加開口，可以在增加入水量時做為維持水位的溢流孔，創造較大的水頭差，以方便在不挖出砂的狀況下，加速水流通過砂而帶出染料。另外低水頭區底層加開出水孔，方便排出底層水，以及後續作為抽水實驗之用（圖20、21、22、23）。



圖18. 入水孔控制流量用球閥



圖19. 入水孔分散水流裝置

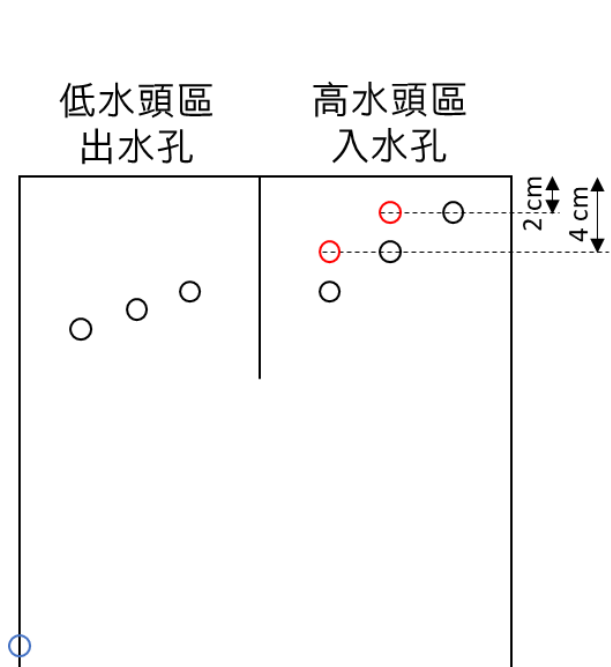


圖20. 改良Vaheddoost等人(2019)的裝置，於高水頭區增加2個開孔（紅色圓圈），低水頭區底部增加1個開孔（藍色圓圈）

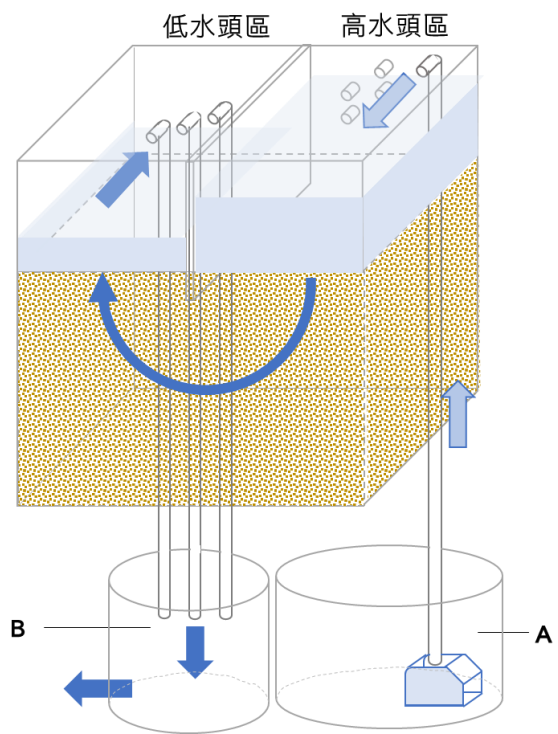


圖21. 清洗用水路（A：清水桶；B：污水桶）

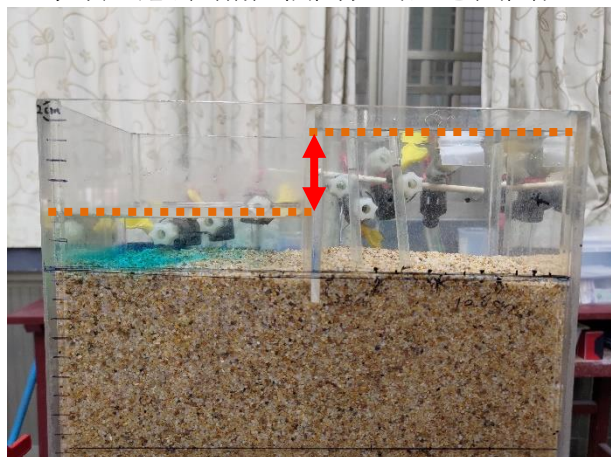


圖22. 增大水流配合排水孔，產生較大的水頭差，增加清洗速度



圖23. 清洗過程

（四）測試染料量

測試結果發現使用0.1ml 於較遠的染色點，當染料抵達低水頭區時，會因染料過少而無法呈現完整的流線（圖24）。使用1 ml於較遠的染色點，當染料抵達低水頭區時，會因染料過多而使流線易散開導致不易判讀（圖26）。使用0.5 ml的染料則較無上述缺點（圖25），因此我們決定後續實驗均採用 0.5 ml 的染料進行染色觀察。



圖24. 0.1 ml染料測試結果



圖25. 0.5 ml染料測試結果

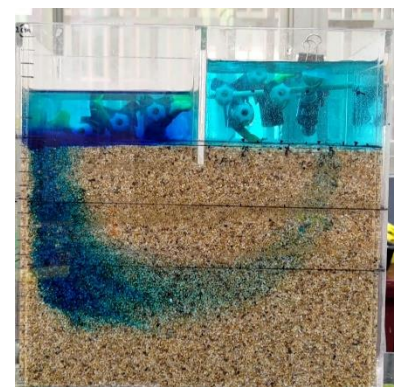


圖26. 1 ml染料測試結果

(五) 測試染料點

當我們以 2cm 為間距，在距離中央隔板 12 cm、10 cm、8 cm、6 cm、4 cm、2 cm 處接連注射 0.5 ml 染料，結果發現因間距過近，導致所有流線混合在一起（圖 27），因此我們決定改成分開注射測試最近的 2cm 和最遠的 12cm，發現 2cm 因為過近且移動速度很快，導致染料累積在低水頭區，使得流線不易判讀（圖 28），而 12 cm 因為移動速度太慢，染料容易散開（圖 29），因此我們經過反覆測試後找出流線不易混在一起也較不易散開的滴加位置：3.5 cm、7 cm、11.5cm，以觀察距離中央隔板近、中、遠的不同流線狀況。



圖27. 間距2cm的染色結果

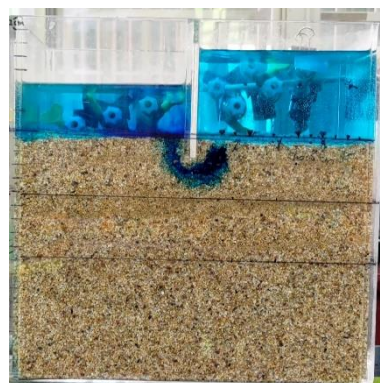


圖28. 2cm的染色結果

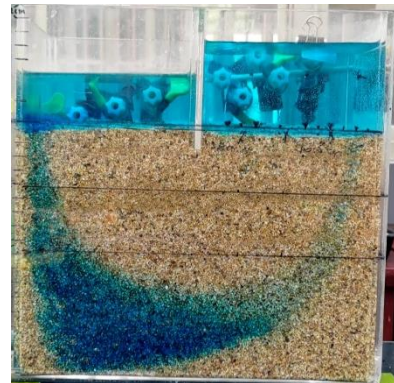


圖29. 12cm的染色結果

(六) 測試染料對水質的影響

由表 3 可以發現，即使重複滴加染料進行三次實驗而不清洗，水質不會產生太大差異，因此我們決定每項變因進行三次實驗後再清洗裝置，以節省實驗時間。

表 3. 不同染料比例對水質的影響（平均 ± 標準差，n=3）

| 染料量 (ml/600ml水) | 0.05 | 0.1 | 0.15 |
|-----------------|-------------|-------------|-------------|
| pH | 7.78 ± 0.02 | 7.72 ± 1.53 | 7.76 ± 0.01 |
| EC (μs/cm) | 515 ± 1.53 | 514 ± 0.58 | 515 ± 0.58 |
| TDS(ppm) | 257 ± 1.00 | 257 ± 0 | 257 ± 0 |

二、探討砂箱模擬地下水流動距離與流速的關係

由表4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，這是因為兩點間即使有相同水頭差，但是因為距離愈遠者，壓力梯度變化愈小導致流速變慢（圖30）。此外，由表5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（圖31）。

表4. 25°C 清水的流線數據（平均±標準差，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5. 25°C 清水的流線終點與隔水牆距離（平均±標準差，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 |

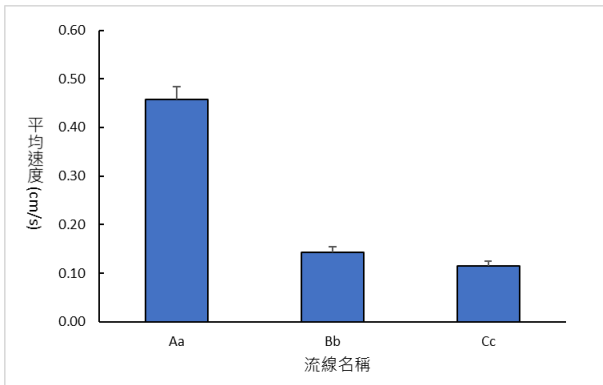


圖30.不同流線的移動速度比較

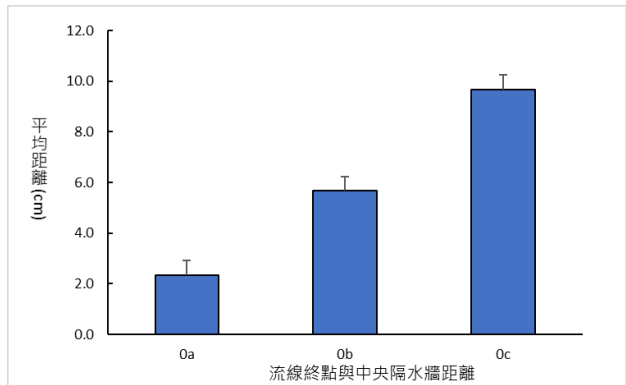


圖31.不同流線的終點與中央隔水牆距離比較



圖32. 25°C 清水的Aa流線路徑



圖33. 25°C 清水的Bb流線路徑



圖34. 25°C 清水的Cc流線路徑

三、探討地下水鹽度對地下水流動的影響

由表6和圖35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流線的移動時間減少、Bb和Cc流線的移動時間增加（表7），導致Aa流線的移動速度增加、Bb和Cc流線的移動速度減少（圖36）。

表6. 不同鹽度的流線平均路徑長 (cm) (平均 ± 標準差, n=3)

| 流線名稱 | Aa | Bb | Cc |
|------|--------------|--------------|--------------|
| 0 ‰ | 12.33 ± 0.58 | 21.67 ± 1.53 | 39.00 ± 1.73 |
| 35 ‰ | 12.67 ± 0.59 | 22.33 ± 1.53 | 38.00 ± 2.00 |

表7. 不同鹽度的流線移動時間 (秒) (平均 ± 標準差, n=3)

| 流線名稱 | Aa | Bb | Cc |
|------|--------------|----------------|----------------|
| 0 ‰ | 27.00 ± 1.00 | 152.67 ± 4.04 | 340.67 ± 16.07 |
| 35 ‰ | 23.05 ± 5.70 | 208.59 ± 53.32 | 429.03 ± 23.59 |

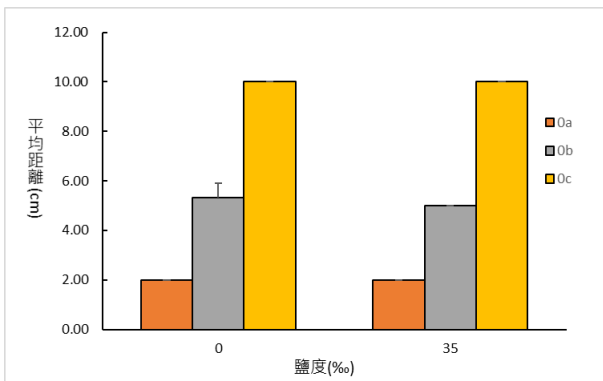


圖35. 不同鹽度的流線終點與中央隔水牆距離比較

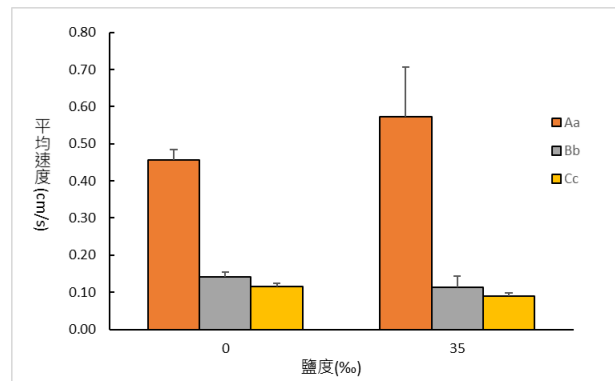


圖36. 不同鹽度的流線移動速度比較



圖37. 35‰鹽水的Aa流線路徑



圖38. 35‰鹽水的Bb流線路徑

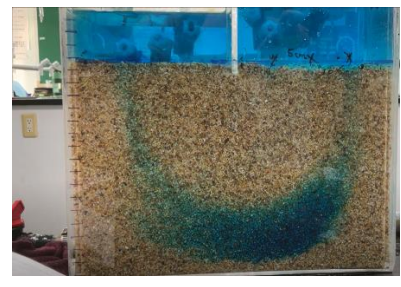


圖39. 35‰鹽水的Cc流線路徑

四、探討地下水溫度對地下水流動的影響

由表8 和圖40 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，但當溫度增加時，Aa、Bb和Cc流線的移動時間均有減少（表 9），導致Aa、Bb和Cc流線的移動速度均有增加（圖41）。

表8. 不同溫度的流線平均路徑長 (cm) (平均 ± 標準差, n=3)

| 流線名稱 | Aa | Bb | Cc |
|------|------------|------------|------------|
| 15°C | 11.0 ± 0.0 | 22.0 ± 0.0 | 32.7 ± 0.0 |
| 20°C | 11.7 ± 0.6 | 22.7 ± 2.1 | 40.3 ± 0.6 |
| 25°C | 12.3 ± 0.6 | 21.7 ± 1.5 | 39.0 ± 1.7 |
| 30°C | 10.7 ± 1.2 | 21.3 ± 1.2 | 37.3 ± 3.2 |

表9. 不同溫度的流線移動時間 (秒) (平均 ± 標準差, n=3)

| 流線名稱 | Aa | Bb | Cc |
|------|--------------|----------------|----------------|
| 15°C | 35.06 ± 1.21 | 165.33 ± 18.58 | 549.95 ± 30.11 |
| 20°C | 32.33 ± 2.52 | 219.00 ± 2.00 | 401.00 ± 13.45 |
| 25°C | 27.00 ± 1.00 | 152.67 ± 4.04 | 340.67 ± 16.07 |
| 30°C | 14.00 ± 2.65 | 129.33 ± 42.48 | 260.33 ± 64.66 |

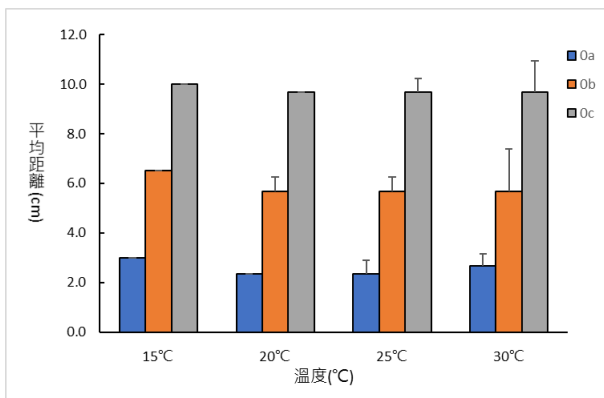


圖40. 不同溫度的流線終點與中央隔水牆距離比較

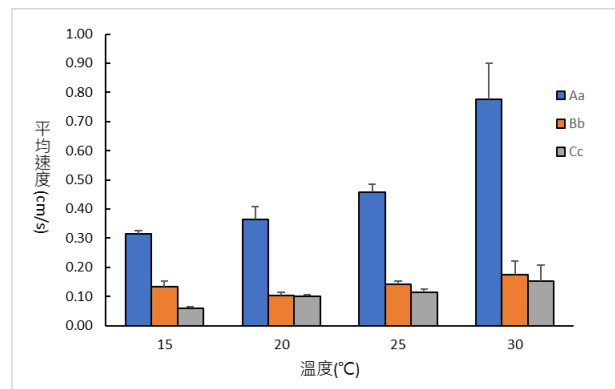


圖41. 不同溫度的流線移動速度比較

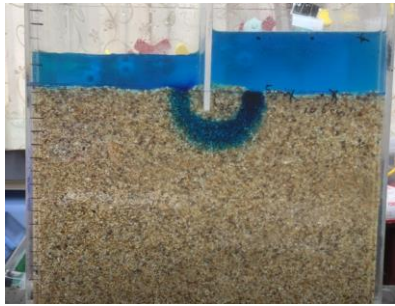


圖42. 15°C 清水的Aa流線路徑



圖43. 15°C 清水的Bb流線路徑

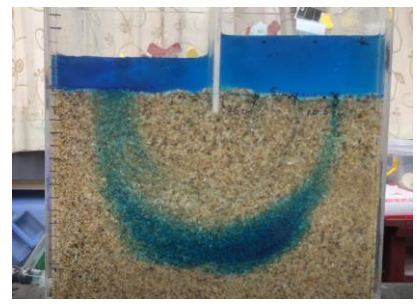


圖44. 15°C 清水的Cc流線路徑

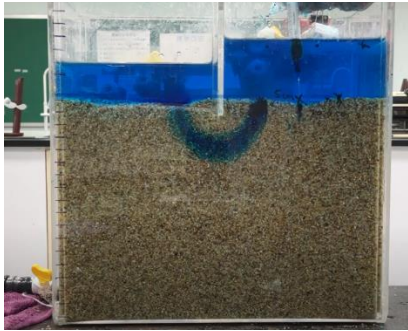


圖45. 20°C 清水的Aa流線路徑

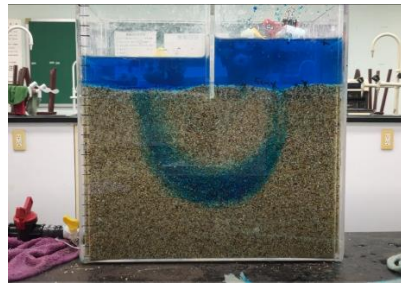


圖46. 20°C 清水的Bb流線路徑

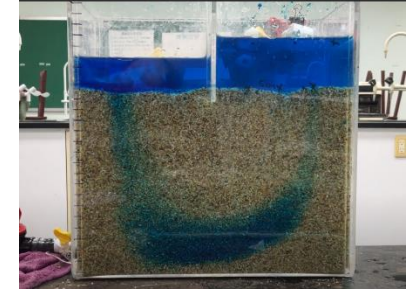


圖47. 20°C 清水的Cc流線路徑



圖48. 30°C 清水的Aa流線路徑



圖49. 30°C 清水的Bb流線路徑



圖50. 30°C 清水的Cc流線路徑

五、探討抗旱井取水對地下水流動的影響

(一) 諮詢南區水利局相關抗旱井訊息

透過南區水利局相關人員的說明，我們了解佳冬一帶多為黏土，黏土含片狀礦物，上下帶負電荷，左右兩端帶正電荷，當抽走黏土片狀顆粒間的孔隙水時，顆粒間會因正負電荷而吸附在一起，顆粒間的孔隙會減少，導致體積縮小，進一步造成地層下陷，而且顆粒之間不易再分開，不易透過補注地下水而恢復體積，但抗旱井所在的位置為靠近扇頂扇央處的里港和高屏堰左側，地層多為孔隙較大的礫石、砂，儲水量多，是作為抗旱井選址的條件，而且抽走顆粒孔隙間的水時，顆粒間不會有像黏土有電荷吸附的問題，所以可以保持孔隙，不會造成地層下陷。

抗旱井為深度120公尺的深水井，抽水位置大約在地下水層三-1，而一般民眾的自用井深度多為7~10公尺，屬於地下水層一，透過控制每日的抗旱井抽水量以及來自四面八方的

地下水流動補注，短時間內抗旱井的抽水並不會造成與一般民眾的自用井搶水問題。

(二) 模擬抽水對地下水流動的影響

1. 測試砂層深處的染色點

利用ImageJ疊圖之後（圖51），發現Cc會和A'a'、B'b'的流線重疊，且C'c'在流經砂箱底部時會變形無法維持流線形狀，因此我們決定後續實驗採用A、B、A'、B'四個染色點即可。

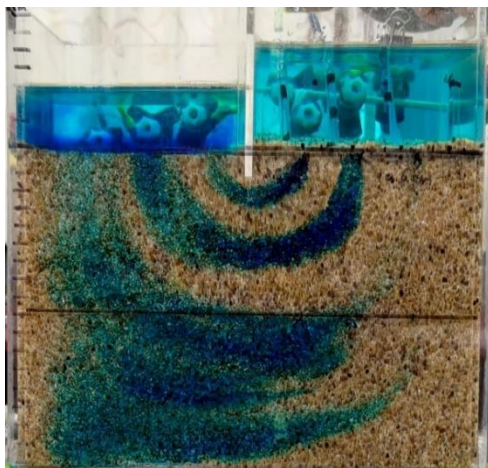


圖51. 砂層深處的染色點測試結果（疊圖）

2. 測試抽水對流線的影響

不論有無隔水層，當抽水時Aa和Bb的流線速度會下降（圖52、圖53）。由圖72～圖75和表10、表12來看，流線形狀向左偏移、長度增加，應該是抽水產生的力量，造成流線偏移，移動速度下降。

不論有無隔水層，當抽水時A'a'和B'b'的流線會改變方向（圖72～圖75），而且速度下降（圖52、圖53）。

不論有無抽水，有隔水層的四條流線終點與中央隔水牆（或參考點0'）的距離，均比無隔水層的四條流線大（圖52、圖54、圖72～75），另外，有隔水層的狀況之下A'a'和B'b'流線之間的距離，會比無隔水層時來得更接近。這顯示在有隔水層的狀況下會使流線偏移，應該是由隔水層產生類似無流動的邊界效應，改變區域的流動狀況。

表10. 無抽水的流線平均路徑長 (cm) (平均 ± 標準差, n=3)

| 流線名稱 | Aa | Bb | A'a' | B'b' |
|------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 無隔水層 | 9.93 ± 0.60 | 20.75 ± 1.07 | 21.94 ± 0.42 | 29.21 ± 0.50 |
| 有隔水層 | 12.52 ± 0.08 | 22.54 ± 1.37 | 24.81 ± 0.37 | 29.12 ± 0.79 |

表11. 無抽水的流線移動時間 (秒) (平均 ± 標準差, n=3)

| 流線名稱 | Aa | Bb | A'a' | B'b' |
|------|--------------|--------------|----------------|----------------|
| 無隔水層 | 13.84 ± 0.34 | 88.23 ± 4.39 | 172.57 ± 15.01 | 276.12 ± 27.15 |
| 有隔水層 | 17.13 ± 1.97 | 63.84 ± 6.53 | 199.21 ± 16.66 | 231.41 ± 26.98 |

表12. 有抽水的流線平均路徑長 (cm) (平均 ± 標準差, n=3)

| 流線名稱 | Aa | Bb | A'a' | B'b' |
|------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 無隔水層 | 11.75 ± 0.26 | 26.96 ± 1.38 | 19.78 ± 1.10 | 24.30 ± 0.55 |
| 有隔水層 | 13.21 ± 0.29 | 27.77 ± 1.20 | 20.99 ± 0.82 | 24.35 ± 1.42 |

表13. 有抽水的流線移動時間 (秒) (平均 ± 標準差, n=3)

| 流線名稱 | Aa | Bb | A'a' | B'b' |
|------|--------------|----------------|----------------|----------------|
| 無隔水層 | 19.39 ± 2.86 | 165.47 ± 41.36 | 179.05 ± 21.24 | 206.57 ± 11.68 |
| 有隔水層 | 28.84 ± 0.58 | 152.82 ± 9.36 | 255.07 ± 21.63 | 280.08 ± 21.43 |

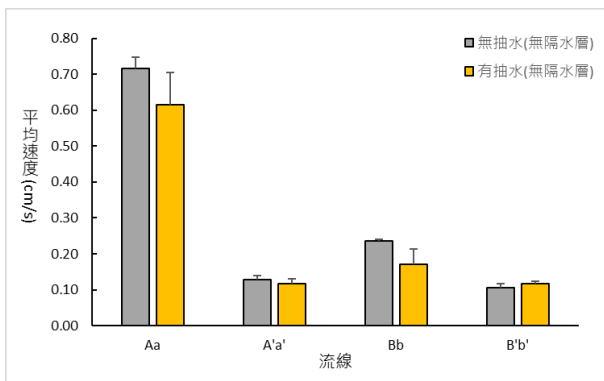


圖52. 抽水時的流線移動速度變化 (無隔水層)

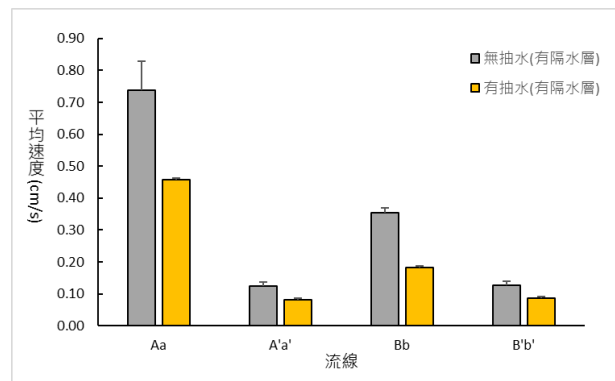


圖53. 抽水時的流線移動速度變化 (有隔水層)

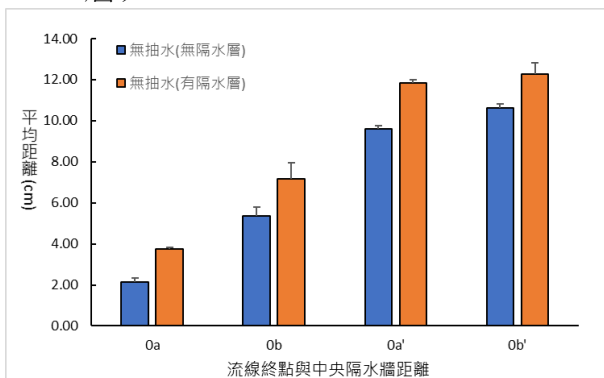


圖54. 無抽水的流線終點與中央隔水牆距離比較

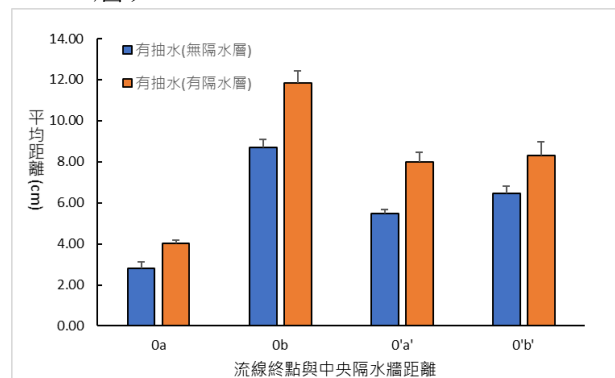


圖55. 有抽水的流線終點與中央隔水牆距離比較



圖56. 無隔水層的Aa
流線路徑（無抽水）



圖57.無隔水層的Bb
流線路徑（無抽水）



圖58.無隔水層的A'a'
流線路徑（無抽水）



圖59.無隔水層的B'b'
流線路徑（無抽水）



圖60. 無隔水層的Aa
流線路徑（有抽水）



圖61.無隔水層的Bb
流線路徑（有抽水）



圖62.無隔水層的A'a'
流線路徑（有抽水）



圖63.無隔水層的B'b'
流線路徑（有抽水）



圖64. 有隔水層的Aa
流線路徑（無抽水）



圖65. 有隔水層的Bb
流線路徑（無抽水）



圖66. 有隔水層的A'a'
流線路徑（無抽水）

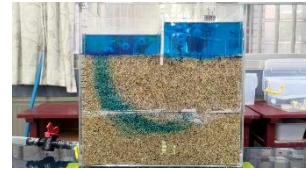


圖67. 有隔水層的B'b'
流線路徑（無抽水）



圖68. 有隔水層的Aa
流線路徑（有抽水）

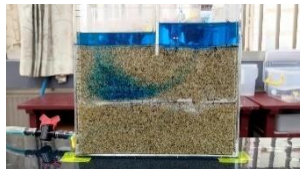


圖69. 有隔水層的Bb
流線路徑（有抽水）

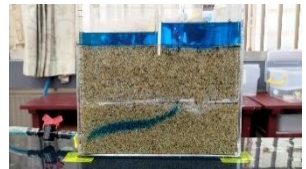


圖70. 有隔水層的A'a'
流線路徑（有抽水）

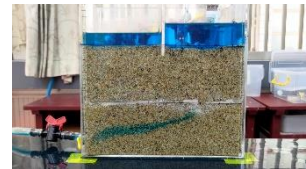


圖71. 有隔水層的B'b'
流線路徑（有抽水）



圖72. 無隔水層的流程（無抽水，疊圖）

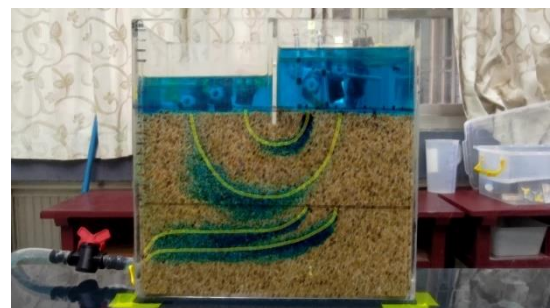


圖73. 無隔水層的流程（有抽水，疊圖）



圖74. 有隔水層的流程（無抽水，疊圖）



圖75. 有隔水層的流程（有抽水，疊圖）

伍、討論

一、製作模擬地下水流動的砂箱

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 $K = \frac{Q}{IA}$ ，但由於地下水須繞過阻礙時，截面積會產生變化，無法直接套用Q的公式，要改用流線網計算：

$$Q = q \times N_f = Kh(N_f/N_d)$$

(N_f ：兩流線間的帶狀區域(流管)數量

N_d ：流管被等位線切割的數目)

砂箱的入水流量為 20 ml/s，h水頭差為2 cm， N_f 、 N_d 均為4，換算出來的K值為 10 cm/s，參考圖78的K值換算表屬於礫石，與原先用標準篩測出的粗砂並不一致，推測是因為真正的地層有較大壓力擠壓，砂粒與砂粒之間的孔隙應該更小，但我們實驗只有透過徒手壓實，即便是粗砂，孔隙的部分仍較真正的粗砂孔隙大，反而比較接近粒徑較大的礫石間的孔隙，如此一來我們的模擬實驗更接近圖4中主要的礫石層。

此外，將我們換算的K值代入流線網簡易繪製軟體Damasht(Boboc, 2021)，換算出來的流量也接近我們的測量值（圖80），代表實驗的操作結果還算是準確。

| | -2 | -1 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|-----|----|-----|---------|---|---|----|---------------|---|---|-----|-------|---|-----|------|
| 滲透性 | | 能透過 | | | | | 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 | | | | | | | |
| 岩石 | | | | | | 泥煤 | 黏土 | | | | 未風化黏土 | | | |
| | | | | | | 油岩 | 砂岩 | | | 石灰岩 | | | 角礫岩 | 花崗岩 |

圖78. 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、探討砂箱模擬地下水流動距離與流速的關係

由於我們在注射ABC三點的染料時為了方便測量，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79），比對在相同條件下，以流線網簡易繪製軟體Damasht(Boboc, 2021)所跑出的流網圖（圖80），發現路徑的形狀有些微差異。我們推測可能是染料在某些較大孔隙的路徑上，因其他的力量（如紊流）或是砂粒間的交互作用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。



圖79. 25°C 清水的流線(後製合併)

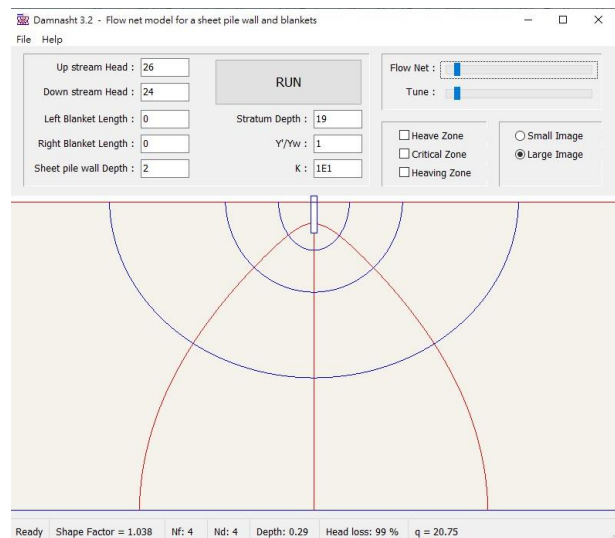


圖80. 軟體模擬的流線

三、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，稱為鹽篩效應。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，海水入侵若與地下水混合，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含鈉的污染物在地下水流動的現象，都能有更進一步認識。

四、探討地下水溫度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，但梁昇和黃天福（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。

我們利用流線網的公式換算出各溫度下的K值（表14），並嘗試做出趨勢線（圖81）以了解溫度和K值的關係，得到 $y = 0.0446x^2 - 1.647x + 23.565$ ， R^2 值為= 0.9983。

表14.不同溫度下的K值換算

| 溫度(°C) | 水頭差 h(cm) | 流量Q (ml/s) | K值(cm/s) |
|--------|-----------|------------|----------|
| 15 | 1.9 | 17 | 8.9 |
| 20 | 2.3 | 20 | 8.6 |
| 25 | 2.0 | 20 | 10.1 |
| 30 | 1.4 | 20 | 14.3 |

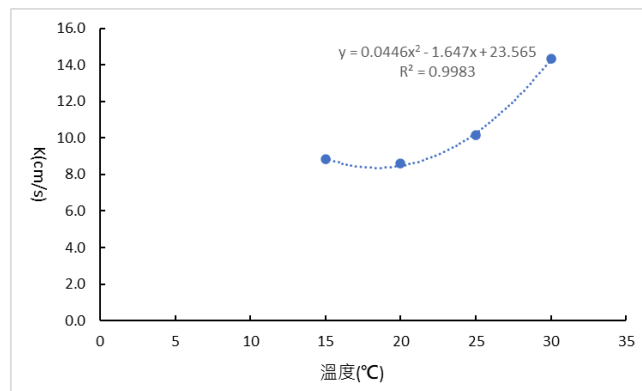


圖81. 溫度與K值關係圖

我們設計這個實驗是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。但是地下水的溫度有可能上升到30°C嗎？一般來說，每下降100公尺地溫會升高3°C，如果地溫等於地下水水溫，地下5-10公尺的地下水約略為15°C~17°C，實驗設定的30°C換算下來已達地下466公尺。在郭曉惠（2021）測量的結果顯示（圖82），屏東平原的地下水觀測井在不同深度的確有不同溫度，但不同於公式換算結果，顯示雖然地溫梯度會影響地下水溫度，導致深度增加溫度也增加，但仍有其他因子會影響地下水溫。可是地下水溫真的會影響地下水流速嗎？

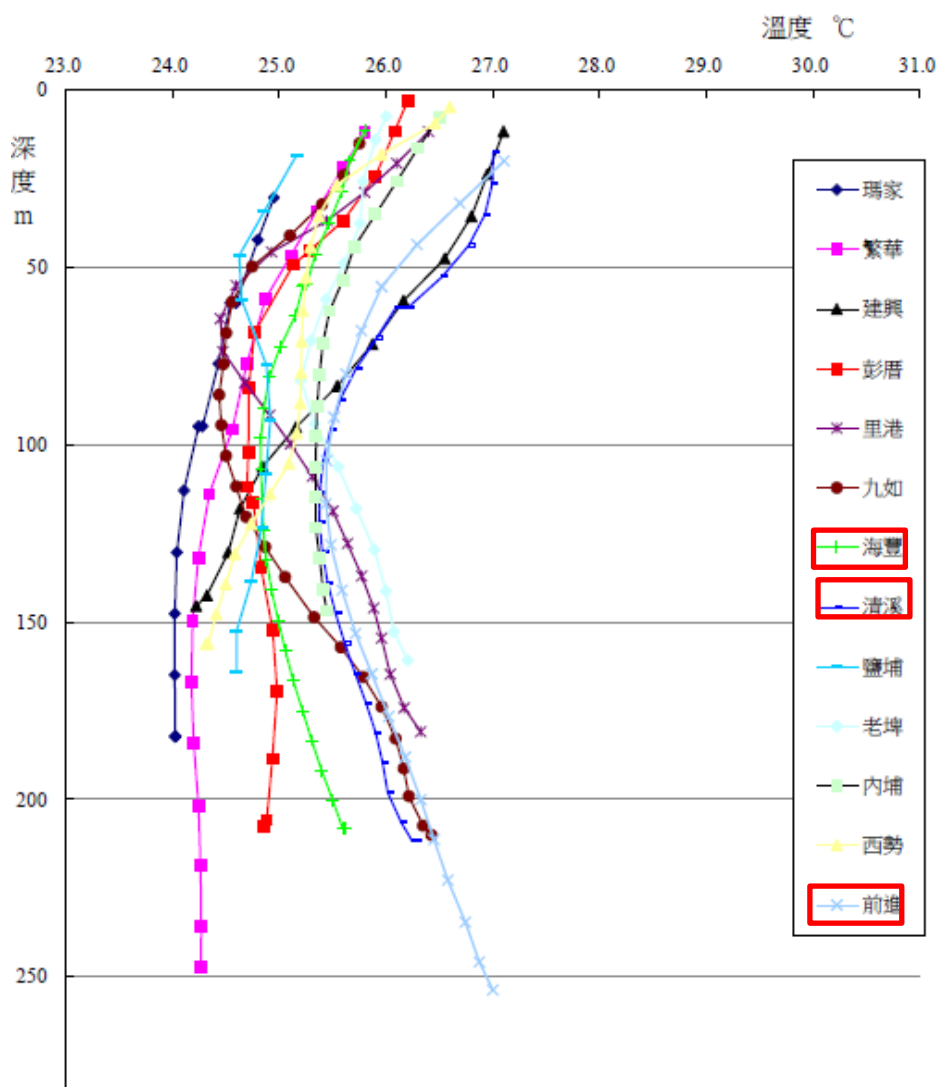


圖83. 屏東平原觀測井的垂直溫度剖面圖。來源：郭曉惠（2021）。

2023年5月過後開始降雨，可以從地下水歷線圖中看到部分觀測井的水位有逐漸上升的現象（經濟部水利署，2023），其中清溪(3)（深度202.7公尺）比清溪(1)（深度24公尺）、清溪(2)（深度95.4公尺）的地下水位上升更快。相同現象也在海豐(3)（深度206.45公尺）、前進(1)（深度242.1公尺）上發現。推測原因除了此類觀測井到達地下水層三-1，一般民眾用井較不可能取水之外，也有可能是此深度的水溫較高，地下水流動速度較快、補注速度較快所致。



圖83. 屏東平原觀測井的地下水水位歷線圖（2022/6/13至2023/6/13）

五、探討抗旱井取水對地下水流動的影響

由於本實驗只能看到二維的流線在砂中的移動方式，研究結果顯示抽水會影響地層中的流線，其中較靠近抽水口、速度較慢的流線會改變方向，但是多了隔水層後，流線的速度、形狀均有改變，真實的地下水層是立體空間，水流的方向不一，加上地層中複雜的地質組成，是否能推論深層的抗旱井抽水會影響上層的民生用井，其實有待商榷。另外，我們在和南區水利局諮詢過程中，他們也有建議要用垂直抽井水的方式，考量重力的影響，可以更接近真實狀況。

因此，我們未來可以利用較大型的砂箱，改變出入水的方式和水頭位置，搭配高嶺土等不同粒徑的物質，更接近真實的地層狀況，並以垂直抽井水的方式，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和抽深井水的影響。

陸、結論

- 一、製作模擬地下水流動的砂箱時，除了考量染料量和注射點會影響流線的清楚程度之外，模擬的沉積物質粒徑和壓密程度，會影響水力傳導係數，此外，考量清洗的方便，可以透過水路的設計讓砂箱可以保持原狀清洗。
- 二、利用砂箱模擬地下水流動時，距離中央隔水牆愈遠，流線的時間愈多、長度愈長，流線的速度則愈低。
- 三、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。

四、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。

五、在模擬抽水的狀況下，流線路徑會改變，較快的流線速度會下降，流線路徑向左偏移、長度增加，較慢的流線速度下降並改往抽水口方向，且有隔水層時會使流線路徑偏移更明顯。

柒、參考資料及其他

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).

Boboc, Madalina (2021) Damnasht 3.2 for Windows。 <https://www.softpedia.com/get/Science-CAD/Sheet-pile-flow-net-model.shtml>

Morphohydraulics Imaging Laboratory(2018)。 **實驗02 層流流線觀察實驗**。 <https://www.youtube.com/watch?v=qrkwg3nT6uw>

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>

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。

王焰新（譯）（2013）。 **物理與化學水文地質學(第二版)** (Domenico, P. A. & Schwartz, F. W.)。 北京：高等教育出版社。

王新傳（1980）。 **土壤質地之辨識**。 作物需肥診斷技術-農業試驗所特刊第13號， p.105-108。

江崇榮等人（2002）。 **台灣地區地下水觀測網第一期計畫-屏東平原水文地質調查研究總報告**。 經濟部中央地質調查所。 取自 <https://twgeoref.moeacgs.gov.tw/GipOpenWeb/wSite//ct?xItem=99827&mp=106&ctNode=341>

- 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。
- 郭家竹、王煜維、郭一鴻（2016）。逢甲大學學生報告-流線具象化觀察試驗。 <https://dspace.fcu.edu.tw/bitstream/2377/31672/1/D0338069105101.pdf>
- 郭曉惠（2021）。屏東平原之地溫分布與溫泉蘊藏評估。嘉南藥理大學觀光事業管理系碩士論文，未出版。 <https://hdl.handle.net/11296/vj77nh>
- 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>
- 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>
- 經濟部水利署（2023）。水文資訊網整合服務系統。取自：<https://gweb.wra.gov.tw/Hydroinfo/GroundWaterQuery/>
- 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>
- 羅欣貞（2023年3月30日）。水情緊張！南水局荖濃溪畔鑿井 屏東里港鄉親抗議。自由時報。 <https://news.ltn.com.tw/news/life/breakingnews/4256159>

【評語】 030507

題材新穎、特別

模型尺度的大小需再多考量。在詮釋上可區分出擴散與流動的差別

($D-T$ 成正比為擴散， $D-T^{(1/2)}$ 成正比為流動)

可以延伸到地下水的補助，下游的地層下陷等議題。

溫度梯度、鹽度梯度、水力梯度與黏度梯度的應該要更有深入的研究。

作品海報



大地水銀行

“ 探討地下水的流動 ”

壹、前言

一、研究動機

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（林倖妃，2021；劉星均，2023），這引起我們對屏東平原地下水從何而來的好奇心。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？

為因應這次大旱，南區水利局也著手開挖抗旱井，卻引起當地居民抗議，認為會影響民生用水和養殖產業（羅欣貞，2023）。在不同深度的地層中取水是否會影響地下水的流動呢？我們在網路影片(Practical Engineering, 2015)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) 製作模擬地下水流動的砂箱
- (二) 探討砂箱模擬地下水流動距離與流速的關係
- (三) 探討地下水鹽度對地下水流動的影響
- (四) 探討地下水溫度對地下水流動的影響
- (五) 探討抗旱井取水對地下水流動的影響

三、文獻探討

- (一) 屏東市區附近的地下水層一以礫石層和極粗、粗、中砂層為主，抗旱井（深度120公尺）所在的地下水層三-1，以極粗、粗、中砂層為主（經濟部，2014）。
- (二) 一般認為地下水的流動可以使用達西定律(Darcy's Law)分析： $v = K \frac{h}{l}$ （2020地下水觀測網，無日期）
- (三) 模擬地下水流的方式包括電腦軟體模擬、使用砂箱或壓克力板模擬（梁杏等人，2022；Vaheddoost等人，2019；林美杏，1993）。

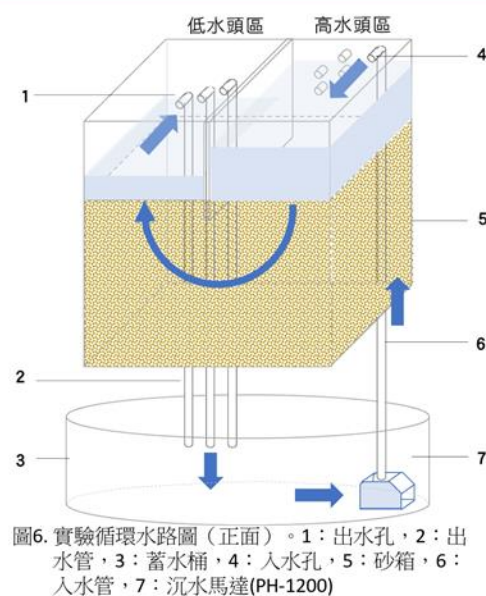
貳、研究設備及器材

一、模擬用砂箱：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，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。

二、實驗材料和器材：砂、EverStyle藍色色漿、食鹽、加熱棒、針筒、幼鳥飼食管、高嶺土。

三、測量紀錄用器具：平板電腦、手機計時app、棉繩、直尺、標準篩（10號、40號、200號、500號）、四合一測試筆(pH/EC/TDS/temp)

四、分析用軟體：Damnast、PowerDirector、ImageJ。



參、研究過程與方法

一、製作模擬地下水流動的砂箱

測量模擬沉積物的粒徑比例

以標準篩10號、40號、200號、500號過篩測量

測試簡易版砂箱



試用並改良砂箱

測試染料量

測試 0.1、0.5、1ml 的染料

測試染料點

每隔2cm注射0.5 ml的染料

測試染料對水質的影響

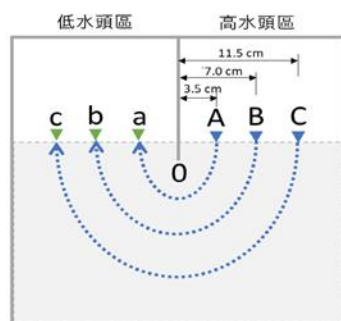
三杯 600 ml的清水，分別加0.05、0.1、0.15 ml的染料，測量pH、EC和TDS

二、探討砂箱模擬地下水流動距離與流速的關係

加粗砂壓實達高度19 cm，中央隔水牆底端埋入粗砂層2 cm
蓄水桶加入25°C自來水18公升，啟動馬達調整球閥使高低水頭區水位相差2cm，試跑10分鐘，確認水位差是否穩定

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(A)、7 cm(B)、11.5cm(C)處作為染料注入點，以針筒吸取藍色色漿 0.5 ml，伸入粗砂層表層注射，並架設平板進行拍攝

染料移動結束後，再重新注入染料，共實驗3次



三、探討地下水鹽度對地下水流動的影響

改變鹽度至35%，觀察流線變化。

四、探討地下水溫度對地下水流動的影響

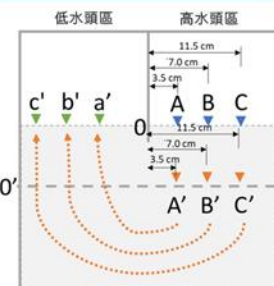
改變水溫至 15°C、20°C、30°C，觀察流線變化。

五、探討抗旱井取水對地下水流動的影響

諮詢南區水利局相關抗旱井訊息

模擬抽水對地下水流動的影響

● 測試砂層深處的染色點：以針筒和搭配幼鳥飼食管延伸注射器長度，注入藍色色漿，觀察流線狀況



● 測試抽水對流線的影響：

- 注入藍色色漿，觀察Aa、Bb、A'a'、B'b' 四條流線
- 開啟低水頭區底下的排水孔**模擬抽水**，觀察四條流線
- 鋪上0.5cm的高嶺土模擬**隔水層**後，觀察無抽水和有抽水時的四條流線

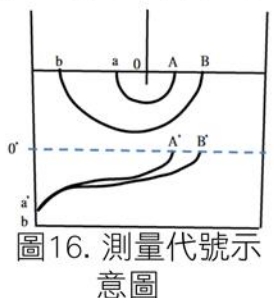


圖14. 鋪上高嶺土作為隔水層

圖16. 測量代號示意圖

肆、研究結果

一、製作模擬地下水流動的砂箱

(一) 測量模擬沉積物的粒徑比例

測量結果如表2。根據王新傳（1980）所述，粗砂類的粒徑為 0.25-2 mm，包括了極粗砂、粗砂、中砂，由於我們的砂約有 94%屬於這個範圍，因此之後均以粗砂稱呼實驗所用砂。

表2. 模擬沉積物的粒徑比例

| 粒徑 (mm) | >2 | 0.42~2 | 0.074~0.42 | 0.025~0.074 | <0.025 |
|------------|-----|--------|------------|-------------|--------|
| 平均重量百分比(%) | 4.6 | 93 | 1.1 | 0.1 | 1.2 |

(二) 測試簡易版砂箱

透過適當的水量控制和隔水牆，也可以在短距離內做出高低水頭的砂箱裝置

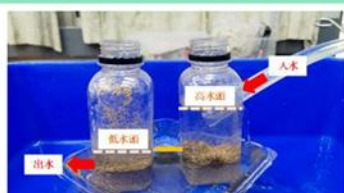


圖17. 試作高低水頭差設備

(三) 試用並改良砂箱

調節水量才能控制水頭差

水孔增加球閥



入水量大，易讓流沙面衝擊出凹陷

增加分散水流裝置



需要將沙全部挖出，才能清洗

高水頭區增加開口，做為維持水位的溢流孔，低水頭區底層加開出水孔

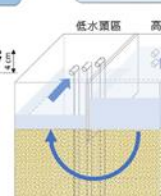
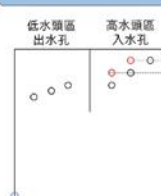


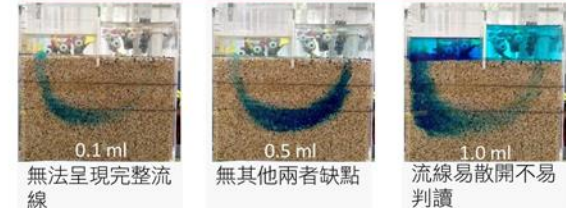
圖20. 改良Vaheddoost等人(2019)的裝置，於高水頭區增加2個開口(紅色圓圈)，低水頭區底部增加1個開口(藍色圓圈)

圖21. 清洗水路

圖22. 增大水流配合排水孔，產生較大的水頭差，增加清洗速度

圖23. 清洗過程

(四) 測試染料量



(五) 測試染料點



(六) 測試染料對水質的影響

重複滴加染料進行三次實驗而不清洗，水質不會產生太大差異

表3. 不同染料比例對水質的影響(平均 ± 標準差, n=3)

| 染料量 (ml/600ml水) | 0.05 | 0.1 | 0.15 |
|-----------------|-------------|-------------|-------------|
| pH | 7.78 ± 0.02 | 7.72 ± 1.53 | 7.76 ± 0.01 |
| EC(μs/cm) | 515 ± 1.53 | 514 ± 0.58 | 515 ± 0.58 |
| TDS(ppm) | 257 ± 1.00 | 257 ± 0 | 257 ± 0 |

二、探討砂箱模擬地下水流動距離與流速的關係

離中央隔水牆愈遠的流線，移動速度愈慢，這是因為兩點間即使有相同水頭差，但是因為距離愈遠者，壓力梯度變化愈小導致流速變慢（圖30）。此外，由圖31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。

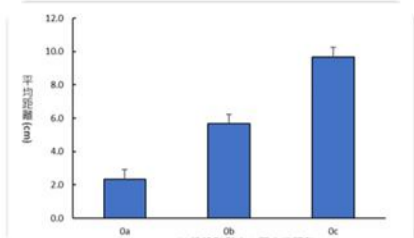


圖30. 不同流線的移動速度比較

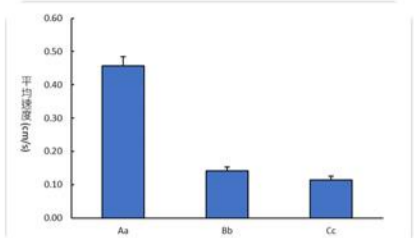


圖31. 不同流線的終點與中央隔水牆距離比較



圖32. 25°C 純水的Aa流線路徑



圖33. 25°C 純水的Bb流線路徑

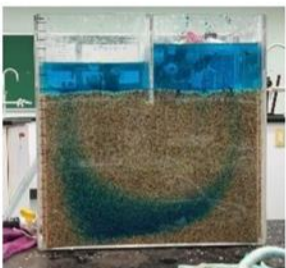


圖34. 25°C 純水的Cc流線路徑

三、探討地下水鹽度對地下水流動的影響

由表6和圖35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流線的移動時間減少、Bb和Cc流線的移動時間增加，導致Aa流線的移動速度增加、Bb和Cc流線的移動速度減少（圖36）。

表6. 不同鹽度的流線平均路徑長 (cm) (平均 ± 標準差, n=3)

| 流線名稱 | Aa | Bb | Cc |
|------|--------------|--------------|--------------|
| 0% | 12.33 ± 0.58 | 21.67 ± 1.53 | 39.00 ± 1.73 |
| 35% | 12.67 ± 0.59 | 22.33 ± 1.53 | 38.00 ± 2.00 |

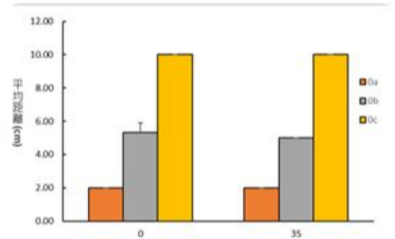


圖35. 不同鹽度的流線終點與中央隔水牆距離比較

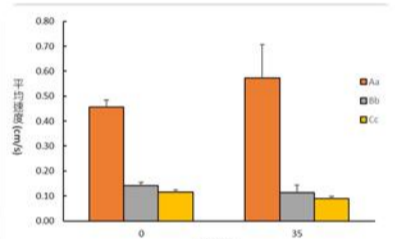


圖36. 不同鹽度的流線移動速度比較

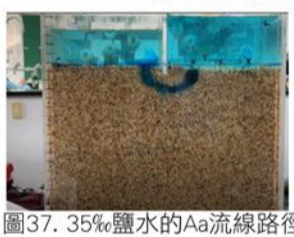


圖37. 35%鹽水的Aa流線路徑

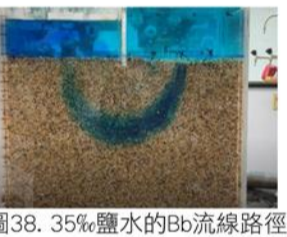


圖38. 35%鹽水的Bb流線路徑

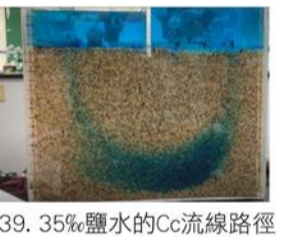


圖39. 35%鹽水的Cc流線路徑

四、探討地下水溫度對地下水流動的影響

由表8和圖40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，但當溫度增加時，Aa、Bb和Cc流線的移動時間均有減少，導致Aa、Bb和Cc流線的移動速度均有增加（圖41）。

表8. 不同溫度的流線平均路徑長 (cm) (平均 ± 標準差, n=3)

| 流線名稱 | Aa | Bb | Cc |
|------|------------|------------|------------|
| 15°C | 11.0 ± 0.0 | 22.0 ± 0.0 | 32.7 ± 0.0 |
| 20°C | 11.7 ± 0.6 | 22.7 ± 2.1 | 40.3 ± 0.6 |
| 25°C | 12.3 ± 0.6 | 21.7 ± 1.5 | 39.0 ± 1.7 |
| 30°C | 10.7 ± 1.2 | 21.3 ± 1.2 | 37.3 ± 3.2 |

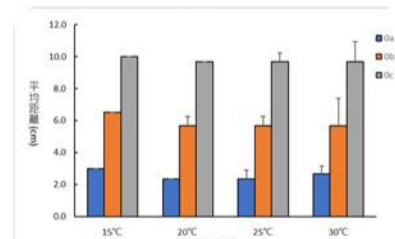


圖40. 不同溫度的流線終點與中央隔水牆距離比較

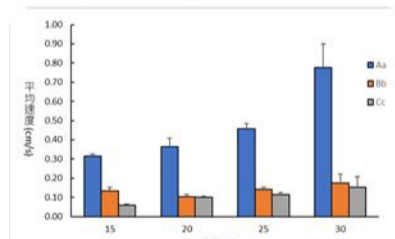


圖41. 不同溫度的流線移動速度比較



圖42. 15°C 清水的Aa流線路徑



圖43. 15°C 清水的Bb流線路徑



圖44. 15°C 清水的Cc流線路徑



圖45. 20°C 清水的Aa流線路徑

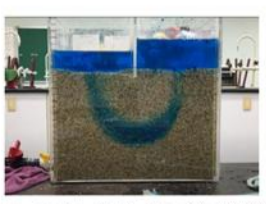


圖46. 20°C 清水的Bb流線路徑

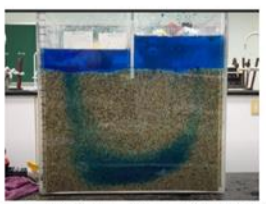


圖47. 20°C 清水的Cc流線路徑

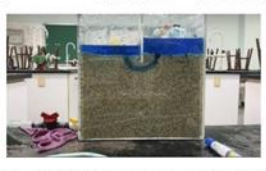


圖48. 30°C 清水的Aa流線路徑



圖49. 30°C 清水的Bb流線路徑

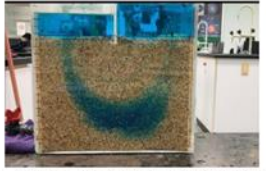


圖50. 30°C 清水的Cc流線路徑

五、探討抗旱井取水對地下水流動的影響

(一) 諮詢南區水利局相關抗旱井訊息

- 透過南區水利局相關人員的說明，我們了解佳冬一帶多為黏土，黏土含片狀礦物，上下帶負電荷，左右兩端帶正電荷，當抽走黏土片狀顆粒間的孔隙水時，顆粒間會因正負電荷而吸附在一起，顆粒間的孔隙會減少，導致體積縮小，進一步造成地層下陷，而且顆粒之間不易再分開，不易透過補注地下水而恢復體積，但抗旱井所在的位置為靠近扇頂扇央處的里港和高屏堰左側，地層多為孔隙較大的礫石、砂，儲水量多，是作為抗旱井選址的條件，而且抽走顆粒孔隙間的水時，顆粒間不會有像黏土有電荷吸附的問題，所以可以保持孔隙，不會造成地層下陷。
- 抗旱井為深度120公尺的深水井，抽水位置大約在地下水層三-1，而一般民眾的自用井深度多為7~10公尺，屬於地下水層一，透過控制每日的抗旱井抽水量以及來自四面八方的地下水流動補注，短時間內抗旱井的抽水並不會造成與一般民眾的自用井搶水問題。

(二) 模擬抽水對地下水流動的影響

1. 測試砂層深處的染色點

利用ImageJ疊圖之後（圖51），發現Cc會和A'a、B'b的流線重疊，且C'c'在流經砂箱底部時會變形無法維持流線形狀，因此我們決定後續實驗採用A、B、A'、B'四個染色點即可。

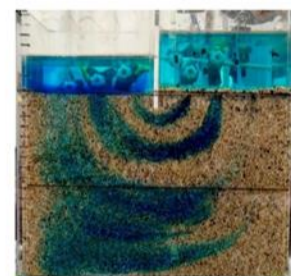


圖51. 砂層深處的染色點測試結果 (疊圖)

2. 測試抽水對流線的影響

不論有無隔水層，當抽水時Aa和Bb的流線速度會下降（圖52、圖53）。由圖72~圖75和表10、表12來看，流線形狀向左偏移、長度增加，應該是抽水產生的力量，造成流線偏移，移動速度下降。不論有無隔水層，當抽水時A'a'和B'b'的流線會改變方向（圖72~圖75），而且速度下降（圖52、圖53）。

不論有無抽水，有隔水層的四條流線終點與中央隔水牆（或參考點0'）的距離，均比無隔水層的四條流線大（圖52、圖54、圖72~75），另外，有隔水層的狀況之下A'a'和B'b'流線之間的距離，會比無隔水層時來得更接近。這顯示在有隔水層的狀況下會使流線偏移，應該是由隔水層產生類似無流動的邊界效應，改變區域的流動狀況。

表10. 無抽水的流線平均路徑長 (cm) (平均 ± 標準差, n=3)

| 流線名稱 | Aa | Bb | A'a' | B'b' |
|------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 無隔水層 | 9.93 ± 0.60 | 20.75 ± 1.07 | 21.94 ± 0.42 | 29.21 ± 0.50 |
| 有隔水層 | 12.52 ± 0.08 | 22.54 ± 1.37 | 24.81 ± 0.37 | 29.12 ± 0.79 |

表12. 有抽水的流線平均路徑長 (cm) (平均 ± 標準差, n=3)

| 流線名稱 | Aa | Bb | A'a' | B'b' |
|------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 無隔水層 | 11.75 ± 0.26 | 26.96 ± 1.38 | 19.78 ± 1.10 | 24.30 ± 0.55 |
| 有隔水層 | 13.21 ± 0.29 | 27.77 ± 1.20 | 20.99 ± 0.82 | 24.35 ± 1.42 |

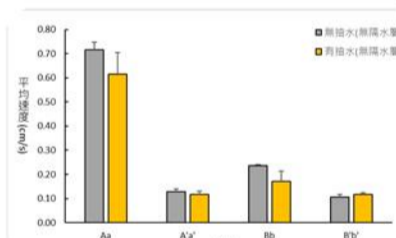


圖52. 抽水時的流線移動速度變化 (無隔水層)

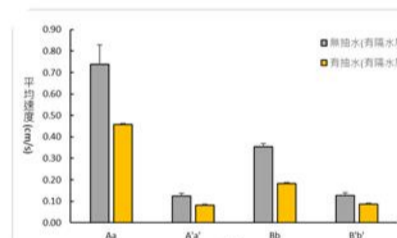


圖53. 抽水時的流線移動速度變化 (有隔水層)

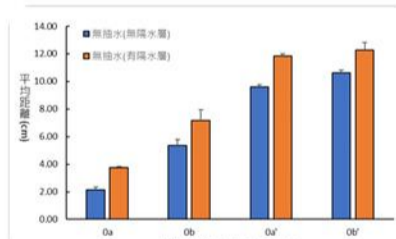


圖54. 無抽水的流線終點與中央隔水牆距離比較

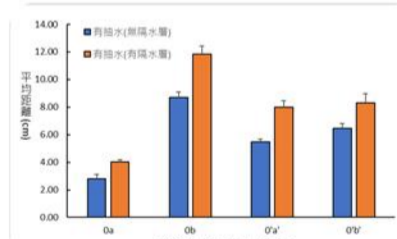


圖55. 有抽水的流線終點與中央隔水牆距離比較

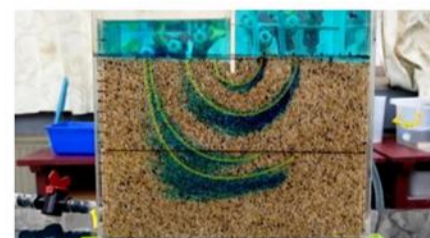


圖72. 無隔水層的流線 (無抽水, 疊圖)



圖73. 無隔水層的流線 (有抽水, 疊圖)



圖74. 有隔水層的流線 (無抽水, 疊圖)



圖75. 有隔水層的流線 (有抽水, 疊圖)

伍、討論

一、製作模擬地下水流動的砂箱

根據達西定律可知流量為： $Q=AV=AK(h/l)=KIA$ ，因此可以推算出 $K=Q/IA$ ，但由於地下水須繞過阻礙時，截面積會產生變化，無法直接套用Q的公式，要改用流線網計算：

$$Q = q \times Nf = Kh(Nf/Nd)$$

(Nf：兩流線間的帶狀區域(流管)數量

Nd：流管被等位線切割的數目)

砂箱的入水流量為20 ml/s，h水頭差為2 cm，Nf、Nd均為4，換算出來的K值為10 cm/s，參考圖78的K值換算表屬於礫石，與原先用標準篩測出的粗砂並不一致，推測是因為真正的地層有較大壓力擠壓，砂粒與砂粒之間的孔隙應該更小，但我們實驗只有透過徒手壓實，即便是粗砂，孔隙的部分仍較真正的粗砂孔隙大，反而比較接近粒徑較大的礫石間的孔隙，如此一來我們的模擬實驗更接近圖4中主要的礫石層。換算的K值代入流線網簡易繪製軟體Damasht(Boboc, 2021)，換算出來的流量也接近我們的測量值(圖80)，代表實驗的操作結果還算是準確。

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

圖78. 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、探討砂箱模擬地下水流動距離與流速的關係

在注射ABC三點的染料時為了方便測量，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79)，比對在相同條件下，以流線網簡易繪製軟體Damasht(Boboc, 2021)所跑出的流網圖(圖80)，發現路徑的形狀有些微差異。推測可能是染料在某些較大孔隙的路徑上，因其他的力量(如紊流)或是砂粒間的交互作用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。



圖79. 25°C 清水的流線(後製合併)

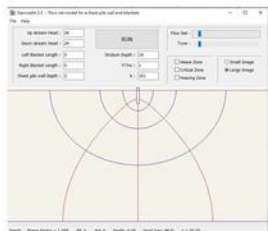


圖80. 軟體模擬的流線

三、探討地下水鹽度對地下水流動的影響

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，稱為鹽篩效應。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狀況。

我們設計這個實驗是想要探討當地下水位降低，海水入侵若與地下水混合，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含鈉的汙染物在地下水流動的現象，都能有更進一步認識。

陸、結論

- 一、製作模擬地下水流動的砂箱時，除了考量染料量和注射點會影響流線的清楚程度之外，模擬的沉積物質粒徑和壓密程度，會影響水力傳導係數，此外，考量清洗的方便，可以透過水路的设计讓砂箱可以保持原狀清洗。
- 二、利用砂箱模擬地下水流動時，距離中央隔水牆愈遠，流線的時間愈多、長度愈長，流線的速度則愈低。
- 三、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。

四、探討地下水溫度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，但梁昇和黃天福(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。

我們利用流線網的公式換算出各溫度下的K值(表14)，並嘗試做出趨勢線(圖81)以了解溫度和K值的關係，得到 $y = 0.0446x^2 - 1.647x + 23.565$ ，R²值為= 0.9983。

表14. 不同溫度下的K值換算

| 溫度(°C) | 水頭差 h(cm) | 流量Q (ml/s) | K值(cm/s) |
|--------|-----------|------------|----------|
| 15 | 1.9 | 17 | 8.9 |
| 20 | 2.3 | 20 | 8.6 |
| 25 | 2.0 | 20 | 10.1 |
| 30 | 1.4 | 20 | 14.3 |

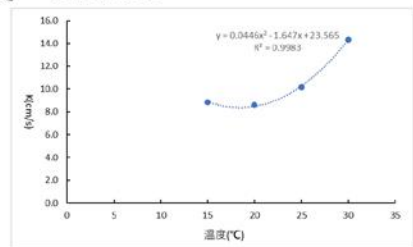


圖81. 溫度與K值關係圖

我們設計這個實驗是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。但是地下水的溫度有可能上升到30°C嗎？一般來說，每下降100公尺地溫會升高3°C，如果地溫等於地下水水溫，地下5-10公尺的地下水約略為15°C~17°C，實驗設定的30°C換算下來已達地下466公尺。在郭曉惠(2021)測量的結果顯示(圖82)，屏東平原的地下水觀測井在不同深度的確有不同溫度，但不同於公式換算結果，顯示雖然地溫梯度會影響地下水溫度，導致深度增加溫度也增加，但仍有其他因子會影響地下水溫。可是地下水溫真的會影響地下水流速嗎？

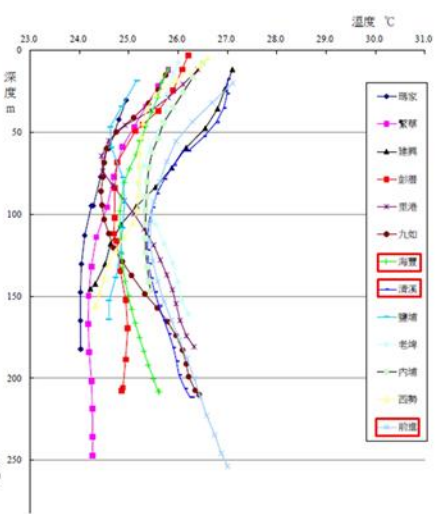


圖82. 屏東平原觀測井的垂直溫度剖面圖。來源：郭曉惠(2021)。

2023年5月過後開始降雨，可以從地下水歷線圖中看到部分觀測井的水位有逐漸上升的現象(經濟部水利署, 2023)，其中清溪(3)(深度202.7公尺)比清溪(1)(深度24公尺)、清溪(2)(深度95.4公尺)的地下水位上升更快。相同現象也在海豐(3)(深度206.45公尺)、前進(1)(深度242.1公尺)上發現。推測原因除了此類觀測井到達地下水層三-1，一般民眾用井較不可能取水之外，也有可能是此深度的水溫較高，地下水流動速度較快、補注速度較快所致。



圖83. 屏東平原觀測井的地下水位歷線圖(2022/6/13至2023/6/13)

五、探討抗旱井取水對地下水流動的影響

由於本實驗只能看到二維的流線在砂中的移動方式，研究結果顯示抽水會影響地層中的流線，其中較靠近抽水口、速度較慢的流線會改變方向，但是多了隔水層後，流線的速度、形狀均有改變，真實的地下水層是立體空間，水流的方向不一，加上地層中複雜的地質組成，是否能推論深層的抗旱井抽水會影響上層的民生用井，其實有待商榷。另外，我們在和南區水利局諮詢過程中，他們也有建議要用垂直抽井水的方式，考量重力的影響，可以更接近真實狀況。

因此，我們未來可以利用較大型的砂箱，改變出入水的方式和水頭位置，搭配高嶺土等不同粒徑的物質，更接近真實的地層狀況，並以垂直抽井水的方式，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和抽深井水的影響。

柒、參考資料及其他

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).

王焰新(譯)(2013)。物理與化學水地質學(第二版)(Domenico, P.A. & Schwartz, F.W.)。北京：高等教育出版社。

王新傳(1980)。土壤質地之辨識。作物需肥診斷技術-農業試驗所特刊第13號。p.105-108。

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>

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。

梁杏, 張人權, 羅明明, 孫蓉琳, 靳孟貴, 周宏, & 蔣立群(2022)。地下水系統研究中的方法論探討: 以 CUG-武漢地下水系統研究為例。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。

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>

