

中華民國第四十七屆中小學科學展覽會
作品說明書

國中組 生物及地球科學科

第一名

031724

海水入侵地下水之模擬實驗

學校名稱：台北市立龍門國民中學

作者： 國二 徐鼎昀	指導老師： 陳英杰
---------------	--------------

關鍵詞：密度 地下水 海水

海水入侵地下水之模擬實驗

壹、摘要

本研究利用簡易器材自製實驗裝置，模擬「沿海地區地下水含水層遭海水入侵」的現象，共設計九個實驗來探討海水侵入地下水的相關問題。研究顯示，過度抽取地下水會破壞液壓的平衡狀態，海水將入侵地下水層而造成地下水之污染。而且，海水與淡水之密度差愈小，大量抽取地下水後，淡、鹹水交界面上升愈多，地下水鹽化的程度也愈嚴重。此外，本研究自製之模型及實驗裝置，具有製作簡易、成本低廉、操作安全及結果容易觀察之特點，可應用於國中自然科之教學上。

貳、研究動機

假日時看到電視上播出屏東沿海地區超抽地下水的報導，它的後果有土壤鹽化以及海水倒灌，景像十分恐怖！根據文獻資料，臨海地帶因地下水超抽而導致地下水面降低一公尺，鹹、淡水交界面將升高四十公尺。由於無法親眼目睹，難以置信，於是想要以自然課學過的密度及液體壓力之原理，自行設計實驗來模擬海水入侵地下水的情形。

參、研究目的

- 一、利用液壓平衡原理設計實驗，模擬沿海地區超抽地下水致海水入侵的情形。
- 二、自製模型及實驗裝置，探討海水滲入地下水，造成地下水鹽化的污染情形。

肆、研究設備及器材

壓克力管（直徑 2cm、3cm、6cm 及 9cm）、壓克力圓盤（直徑 6cm）、壓克力方盤（20cm×20cm）、壓克力塊、氯仿、玻璃注射針筒（含針）、乳頭滴管、塑膠滴管、塑膠注射筒、漏斗、橡皮水管、吸量管、安全吸球、量筒、鐵架、滴定管夾、膠帶、皮尺、剪刀、BB 彈、玻璃水族箱（90cm×45cm×60cm）、廣用夾、電鑽、電鋸、銅線、鱷魚夾、三用電表、電源供應器、砂、紅墨水、沙拉油、沙拉脫、食鹽水（3.5%、3%、2%、1%）。

伍、研究過程或方法

一、製作實驗裝置

(一)裝置一：

- 1.將直徑 2cm、長 30cm 的壓克力管(內管)利用氯仿黏接於直徑 6cm、長 30cm 的壓克力管(外管)內壁，且內管頂端較外管頂端高出 1.5cm，如圖 1-1。
- 2.利用膠帶黏貼 30cm 皮尺於外管外壁上，如圖 1-2。
- 3.將直徑 6cm 之壓克力圓盤以氯仿黏於外管底部。



圖 1-1



圖 1-2

(二)裝置二：

- 1.將長 50cm 的皮尺以膠帶黏貼於直徑 2cm、長 50cm 的壓克力管外壁上。
2. 1,000mL 量筒置於鐵架底座上。
- 3.將壓克力管置入量筒中，並以滴定管夾固定壓克力管至適當高度，裝置如圖 2-1 及圖 2-2。



圖 2-1

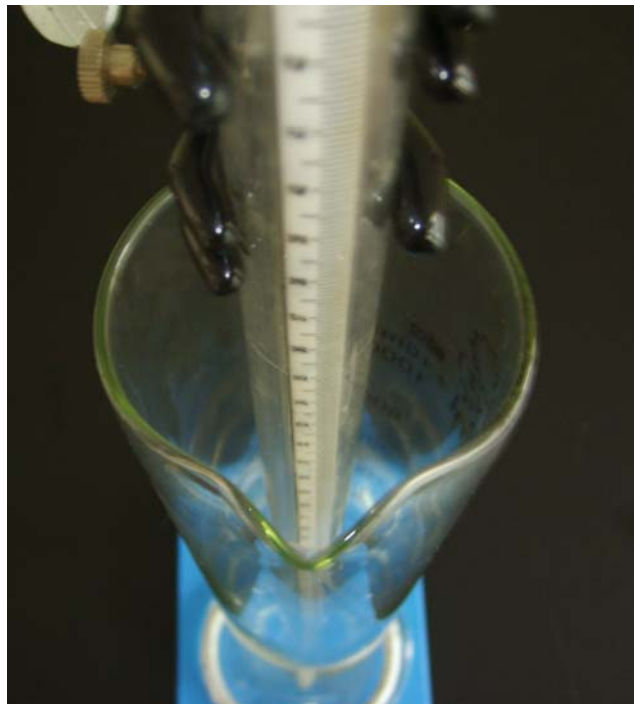


圖 2-2

(三) 裝置三：

將裝置二中貼有皮尺的壓克力管，利用廣用夾固定於長 90cm、寬 45cm、高 60cm 的玻璃水族箱上，並以重錘輔助調整壓克力管至鉛直狀態，如圖 3。



圖 3

(四) 裝置四：

1. 取直徑 3cm、長 60cm 的細壓克力管作為內管，利用電鋸切除 1/3，使之呈優弧狀。
2. 將步驟 1 的細壓克力管（內管）以氯仿黏接於直徑 9cm、長 60cm 的粗壓克力管（外管）內壁，且頂端較外管頂端高出 5cm，如圖 4-1。
3. 將壓克力方盤黏接於外管底部，管外壁再黏貼壓克力小方塊固定，如圖 4-2。
4. 於外管外側距底部 5cm 處，利用電鑽鑽 2 個平行且相距 1cm 的小孔(直徑 2mm)，且由下而上每間隔 10cm，以相同方法鑽孔，內管外側也同時鑽孔，如圖 4-3。
5. 內管外側最上方 5cm 處鑽孔，並接上滴管頭，作為出水口，如圖 4-4。
6. 將塑膠注射筒固定於鐵架及廣用夾上，並以橡皮管連接水源，裝置如圖 4-5。



圖 4-1

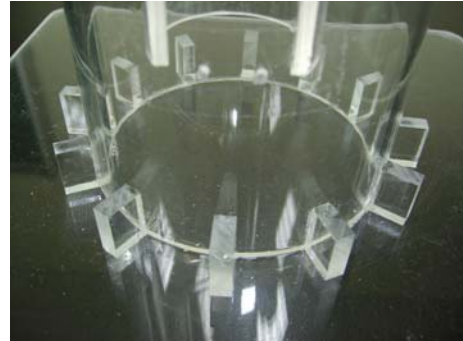


圖 4-2

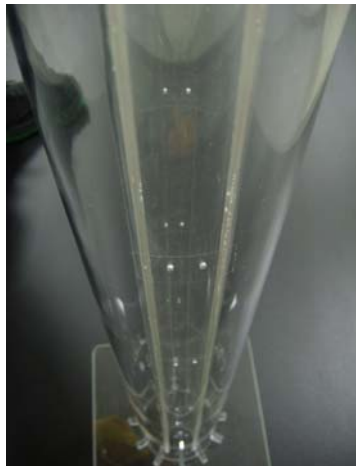


圖 4-3



圖 4-4

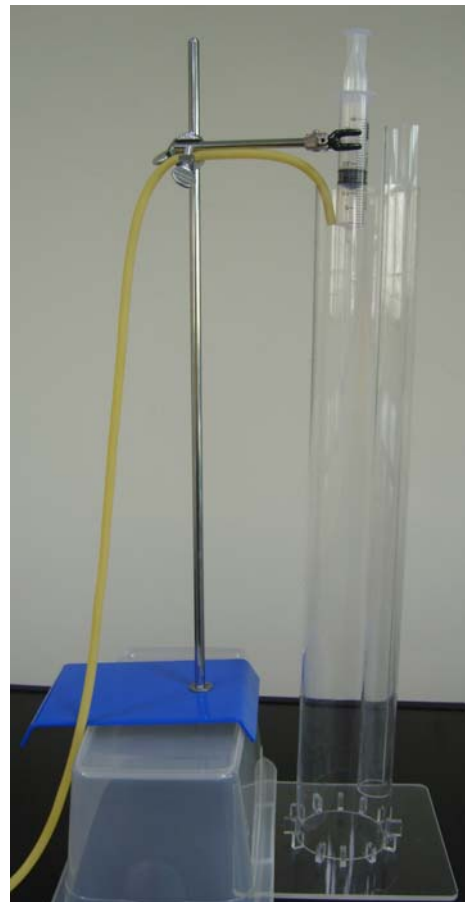


圖 4-5

二、實驗步驟

(一) 實驗一：

- 1.取 10mL 水及 10mL 油，分別測量其質量並計算密度。
- 2.裝置一（圖 1-1）外管盛水（模擬海水）八分滿，內管以滴管注入油（模擬淡水），並調整至液面靜止為止，使油水交界面在內管的底部，達成平衡狀態。
- 3.以吸量管抽取內管的油，每次抽 1mL 後，靜待液面達穩定平衡，測量油面位置、水面位置及油水交界面位置的變化，並計算油水交界面上升高度與油面下降高度之比值。

(二) 實驗二：

- 1.裝置二（圖 2-1）之量筒盛水（模擬海水）七分滿，壓克力管以滴管注入油（模擬淡水），並調整至液面靜止為止，使油水交界面在壓克力管的底部，達成平衡狀態。
- 2.以吸量管抽取壓克力管內的油，每次抽 1mL 後，靜待液面達穩定平衡，測量油面、水面位置及油水交界面位置的變化，並計算油水交界面上升高度與油面下降高度之比值。

(三) 實驗三：

- 1.取 10mL 紅墨水及 10mL 沙拉脫，分別測量其質量並計算密度。
- 2.裝置二（圖 2-1）之量筒盛沙拉脫（模擬海水）七分滿，壓克力管中先置入 BB 彈再以滴管注入紅墨水（模擬淡水），並調整至液面靜止為止，使沙拉脫與紅墨水交界面在壓克力管底部，達成平衡狀態。
- 3.以吸量管抽取壓克力管內的紅墨水，每次抽 1mL 後，靜待液面達穩定平衡，測量並計算兩液體交界面（以 BB 彈作為刻度讀取依據，如圖 5）的上升高度與紅墨水下降的高度之比值。
- 4.以吸量管補注紅墨水至壓克力管中，每次補注 1mL 後，靜待液面達穩定平衡，測量並計算兩液體交界面下降高度與紅墨水面上升高度之比值。

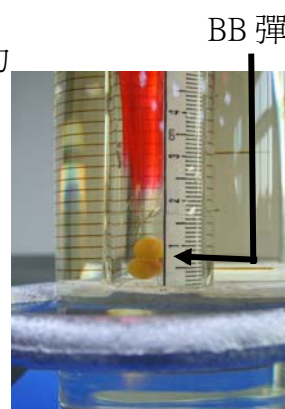


圖 5

(四) 實驗四：

- 1.同實驗二步驟 1。
- 2.以吸量管抽取壓克力管內的油，每次抽 1mL 後，量筒加水 1mL，靜待液面達穩定平衡，測量並計算油水交界面上升高度與油面下降高度之比值。

(五) 實驗五：

- 1.同實驗三步驟 2。
- 2.以吸量管抽取壓克力管內的紅墨水，每次抽 1mL 後，量筒加沙拉脫 1mL，靜待液面達穩定平衡，測量並計算兩液體交界面上升高度與紅墨水下降高度之比值。

(六) 實驗六：

- 1.裝置三（圖 3）之水族箱注入深 34cm 的水，壓克力管以滴管注入油，並調整至液面靜止為止，使油水交界面在壓克力管的底部，達成平衡狀態，如圖 6-1 所示。
- 2.以吸量管抽取壓克力管內的油，每次抽 1mL 後，靜待液面達穩定平衡，如圖 6-2 所示，測量並計算油水交界面上升高度與油面下降高度之比值。



圖 6-1

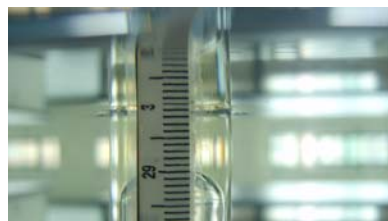


圖 6-2

(七) 實驗七：

1. 先將裝置四所有的孔以膠帶封住，並以鋁板將裝置架於水槽上方，如圖 7-1。
2. 裝置上方以橡皮管連接水龍頭做為水源，先盛水至水面達出水口，接著調整水頭進水量為每分鐘 1 mL，如圖 7-2。
3. 利用塑膠注射筒，吸取濃度為 3.5% 的紅色鹽水 20mL，並以廣用夾將其固定於裝置上方，且注射孔恰好接觸水面。
4. 待紅色鹽水流入水中開始計時，以雷射筆對準紅鹽水底端，每十秒記錄一次紅色鹽水的位置，如圖 7-3。
5. 分別以 3%、2% 及 1% 的紅色鹽水進行上述操作，最後依據實驗結果作圖分析。



圖 7-1

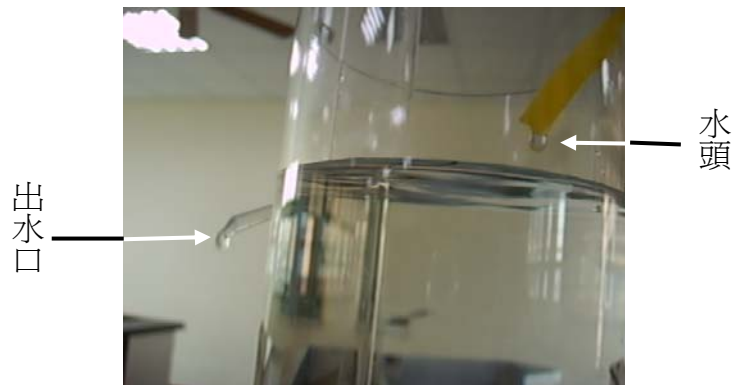


圖 7-2

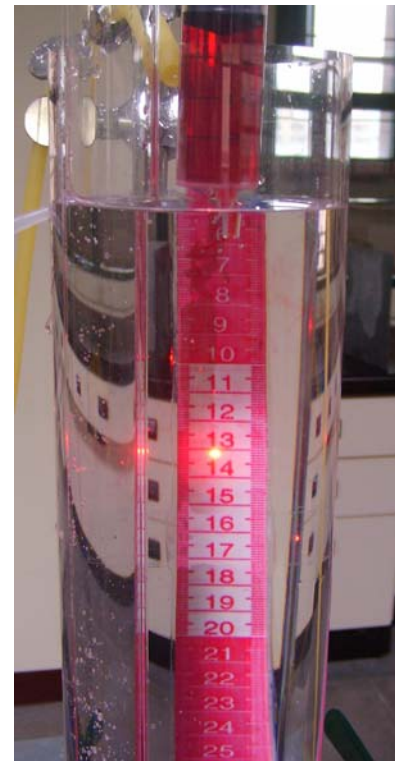


圖 7-3

(八) 實驗八：

1. 取長 8.5cm 之電線 2 條，每條電線其中一端切除絕緣套 6cm，另一端切除 1cm 長的絕緣套，並用砂紙磨光 6cm 及 1cm 之裸露銅線。
2. 將 6cm 的一端插入裝置四中粗壓克力管最底下的孔，並以熱熔膠封孔固定，如圖 8-1。
3. 裝置接上水源，並調整進水量為每分鐘 1 mL。
4. 將盛有 20mL 3.5% 紅色鹽水之塑膠注射筒，以廣用夾固定於裝置上方，且注射孔離水面 1mm。
5. 利用鱷魚夾將 2 條銅線連接電表及電源供應器，如圖 8-2，並將電壓調整至 3 伏特。
6. 拔除注射筒的橡皮活塞，使紅色鹽水自然流出。
7. 觀察紅鹽水的流動情形，並記錄電表的電流值。

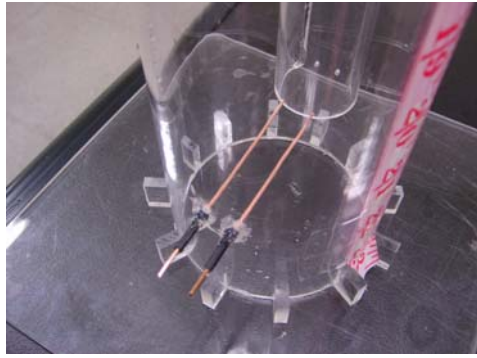


圖 8-1

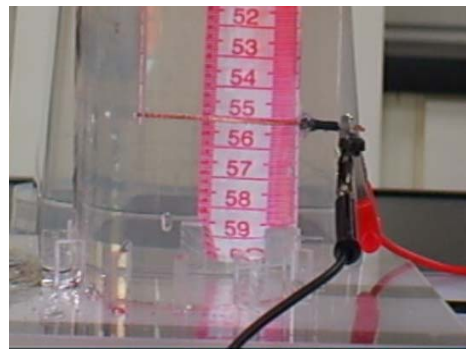


圖 8-2

(九) 實驗九：

1. 取長 8.5cm 之電線 10 條，每條電線其中一端切除絕緣套 6cm，另一端切除 1cm 長的絕緣套，並用砂紙磨光裸露之銅線。
2. 取長 5cm 之電線 10 條，每條電線其中一端切除絕緣套 4cm，另一端切除 0.5cm 長的絕緣套，並用砂紙磨光裸露之銅線。
3. 先將 10 條處理後的 8.5cm 長銅線，插入裝置四中粗壓克力管（外管）外壁的第一~五探測孔，並以熱熔膠封孔固定；再將 10 條處理後的 5cm 短銅線，以相同方法固定於細壓克力管（內管）外壁的第六~十探測孔，如圖 9。
4. 裝置四盛水半滿，然後將砂倒入外管，讓砂慢慢沉降，直至砂面距外管頂端 5cm 處。
5. 裝置接上水源，並調整進水量為每分鐘 1 mL。
6. 利用鱷魚夾將各組銅線分別連接電表及電源供應器，並將電壓調整至 3 伏特。
7. 以廣用夾將盛有 20mL 3.5% 鹽水的塑膠注射筒固定，且注射孔離砂面 1mm。
8. 拔除注射筒的橡皮塞，使鹽水自然流出，每 1 分鐘觀察電表電流一次，並記錄其變化，找出各探測孔測得之最大電流以及出現時間。

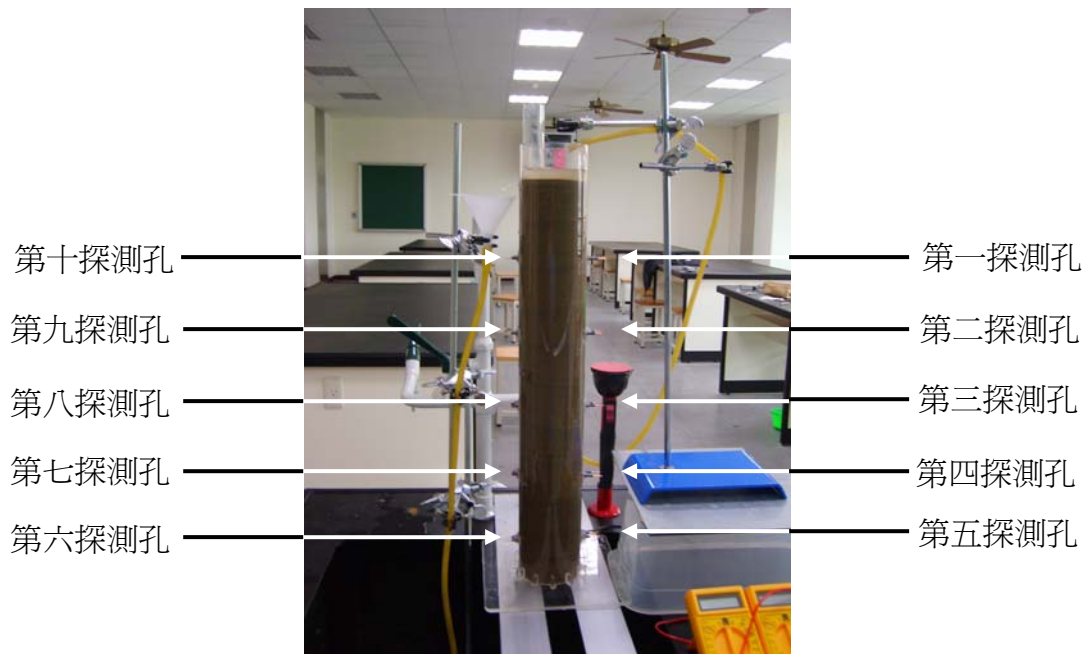


圖 9

陸、研究結果

一、實驗一：（一）水的密度為 0.998 g/cm^3 ，油的密度為 0.914 g/cm^3 。

（二）油水交界面上升高度 B 與油面下降高度 A 之比值 (B/A) 平均為 5.54。

表 1：實驗一結果

抽油體積 (mL)	油面位置 (cm)	水面位置 (cm)	油水交界面位置 (cm)	油面下降高度 A (cm)	油水交界面上升高度 B (cm)	B/A
0.0	30.00	27.50	0.00	0.00	0.00	
1.0	29.90	27.50	0.70	0.10	0.70	7.00
2.0	29.85	27.40	1.20	0.15	1.20	8.00
3.0	29.80	27.40	1.50	0.20	1.50	7.50
4.0	29.75	27.30	1.80	0.25	1.80	7.20
5.0	29.65	27.30	2.10	0.35	2.10	6.00
6.0	29.50	27.30	2.50	0.50	2.50	5.00
7.0	29.45	27.25	2.90	0.55	2.90	5.27
8.0	29.40	27.20	3.30	0.60	3.30	5.50
9.0	29.30	27.20	3.70	0.70	3.70	5.29
10.0	29.25	27.15	4.10	0.75	4.10	5.47
11.0	29.15	27.10	4.50	0.85	4.50	5.29
12.0	29.10	27.05	4.90	0.90	4.90	5.44
13.0	29.00	27.00	5.30	1.00	5.30	5.30
14.0	28.90	26.95	5.70	1.10	5.70	5.18
15.0	28.85	26.90	6.10	1.15	6.10	5.30
16.0	28.80	26.85	6.50	1.20	6.50	5.42
17.0	28.75	26.80	6.80	1.25	6.80	5.44
18.0	28.70	26.80	7.30	1.30	7.30	5.62
19.0	28.60	26.75	7.70	1.40	7.70	5.50
20.0	28.55	26.70	8.10	1.45	8.10	5.59

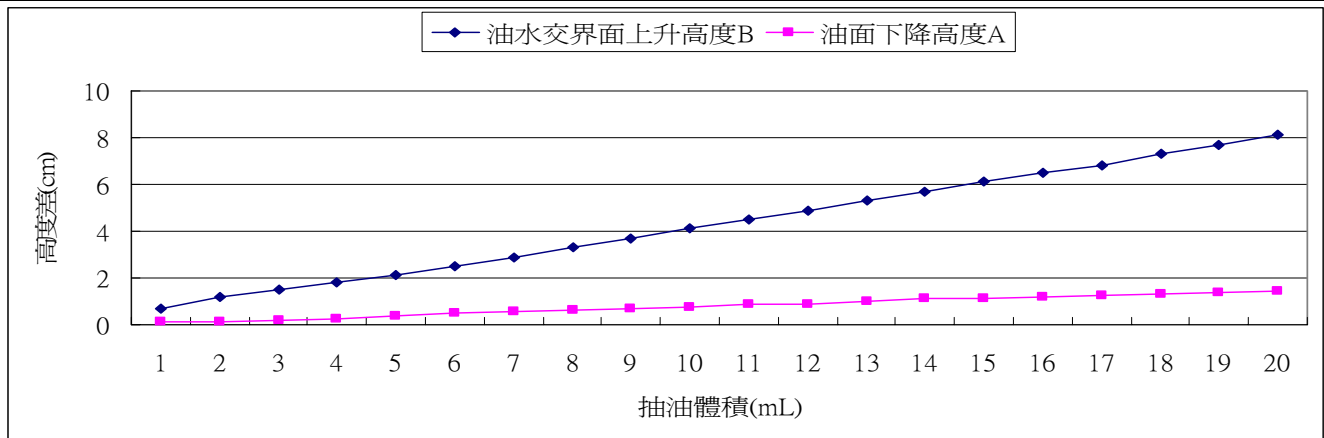


圖 10：實驗一中抽油體積與界面高度差之關係

二、實驗二：油水交界面上升高度B與油面下降高度A之比值（B/A）平均為5.37。

表 2：實驗二結果

抽油體積 (mL)	油面位置 (cm)	水面位置 (cm)	油水交界面位置 (cm)	油面下降高度 A (cm)	油水交界面上升高度 B (cm)	B/A
0.0	31.90	29.20	0.00	0.00	0.00	
1.0	31.80	29.20	0.40	0.10	0.40	4.00
2.0	31.75	29.20	0.90	0.15	0.90	6.00
3.0	31.65	29.15	1.30	0.25	1.30	5.20
4.0	31.60	29.10	1.70	0.30	1.70	5.67
5.0	31.50	29.10	2.10	0.40	2.10	5.25
6.0	31.45	29.10	2.50	0.45	2.50	5.56
7.0	31.40	29.05	2.80	0.50	2.80	5.60
8.0	31.35	29.00	3.20	0.55	3.20	5.82
9.0	31.25	29.00	3.60	0.65	3.60	5.54
10.0	31.20	28.95	4.00	0.70	4.00	5.71
11.0	31.15	28.90	4.40	0.75	4.40	5.87
12.0	31.10	28.90	4.80	0.80	4.80	6.00
13.0	31.00	28.85	5.20	0.90	5.20	5.78
14.0	30.95	28.85	5.60	0.95	5.60	5.89
15.0	30.90	28.80	5.90	1.00	5.90	5.90
16.0	30.80	28.80	6.30	1.10	6.30	5.73
17.0	30.75	28.75	6.70	1.15	6.70	5.83
18.0	30.70	28.70	7.10	1.20	7.10	5.92
19.0	30.60	28.70	7.50	1.30	7.50	5.77
20.0	30.55	28.70	7.90	1.35	7.90	5.85

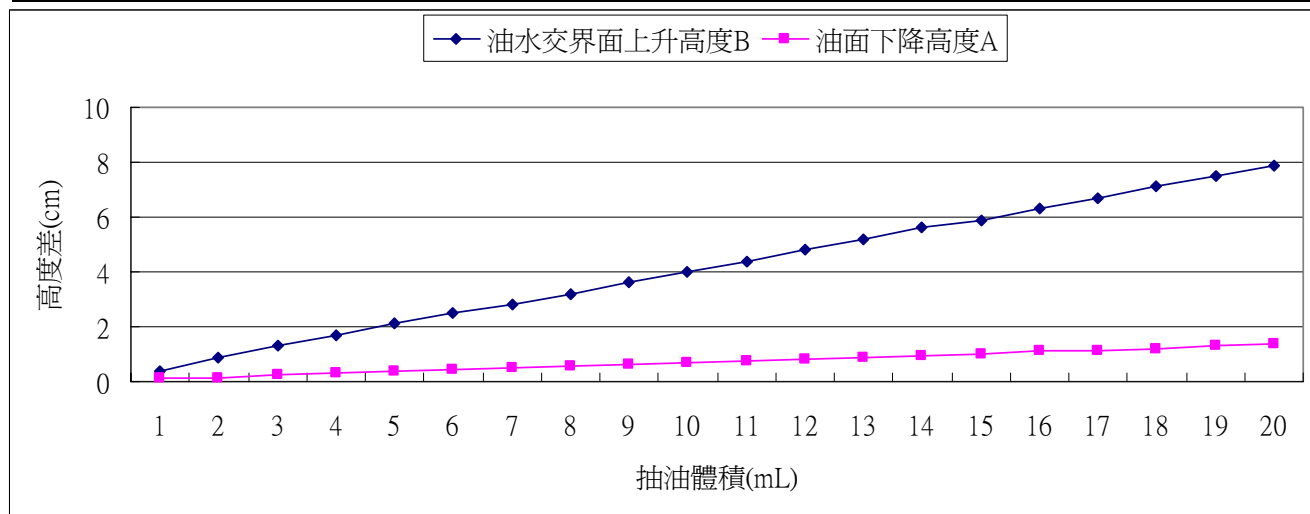


圖 11：實驗二中抽油體積與界面高度差之關係

三、實驗三：

(一) 紅墨水的密度 0.999 g/cm^3 ，沙拉脫的密度 1.048 g/cm^3 。

(二) 抽取部份，沙拉脫與水之交界面上升高度B與水面下降高度A之比值(B/A)平均為8.6。

(三) 補注部份，沙拉脫與水之交界面下降高度B與水面上升高度A之比值(B/A)平均為8.6。

表3-1：實驗三抽紅墨水部份之結果

抽水體積 (mL)	水面位置 (cm)	沙拉脫液面位置 (cm)	交界面位置 (cm)	水面下降高度 A (cm)	交界面上升高度 B (cm)	B/A
0.0	29.30	28.20	1.00	0.00	0.00	
1.0	29.20	28.20	1.70	0.10	0.70	7.0
2.0	29.15	28.20	2.10	0.15	1.10	7.3
3.0	29.10	28.10	2.60	0.20	1.60	8.0
4.0	29.05	28.10	3.00	0.25	2.00	8.0
5.0	29.00	28.10	3.50	0.30	2.50	8.3
6.0	28.95	28.00	4.00	0.35	3.00	8.6
7.0	28.90	28.00	4.50	0.40	3.50	8.8
8.0	28.85	27.90	5.00	0.45	4.00	8.9
9.0	28.80	27.90	5.50	0.50	4.50	9.0
10.0	28.75	27.90	5.90	0.55	4.90	8.9
11.0	28.70	27.80	6.30	0.60	5.30	8.8
12.0	28.65	27.80	6.70	0.65	5.70	8.8
13.0	28.60	27.80	7.20	0.70	6.20	8.9
14.0	28.50	27.70	7.60	0.80	6.60	8.3
15.0	28.45	27.70	8.10	0.85	7.10	8.4
16.0	28.40	27.70	8.50	0.90	7.50	8.3
17.0	28.30	27.60	9.00	1.00	8.00	8.0
18.0	28.30	27.60	9.40	1.00	8.40	8.4
19.0	28.30	27.60	9.90	1.00	8.90	8.9
20.0	28.20	27.50	10.40	1.10	9.40	8.6
21.0	28.20	27.50	10.80	1.10	9.80	8.9
22.0	28.10	27.50	11.20	1.20	10.20	8.5
23.0	28.10	27.40	11.60	1.20	10.60	8.8
24.0	28.00	27.40	12.10	1.30	11.10	8.5
25.0	28.00	27.40	12.60	1.30	11.60	8.9
26.0	27.90	27.30	13.00	1.40	12.00	8.6
27.0	27.90	27.30	13.40	1.40	12.40	8.9
28.0	27.80	27.30	13.90	1.50	12.90	8.6
29.0	27.80	27.30	14.40	1.50	13.40	8.9
30.0	27.70	27.20	14.80	1.60	13.80	8.6
31.0	27.70	27.20	15.30	1.60	14.30	8.9
32.0	27.70	27.20	15.80	1.60	14.80	9.3

33.0	27.60	27.10	16.20	1.70	15.20	8.9
34.0	27.60	27.10	16.60	1.70	15.60	9.2
35.0	27.50	27.10	17.10	1.80	16.10	8.9
36.0	27.40	27.00	17.50	1.90	16.50	8.7
37.0	27.40	27.00	18.00	1.90	17.00	9.0
38.0	27.40	27.00	18.40	1.90	17.40	9.2
39.0	27.30	26.90	18.90	2.00	17.90	9.0
40.0	27.30	26.90	19.40	2.00	18.40	9.2
41.0	27.25	26.90	19.80	2.05	18.80	9.2
42.0	27.20	26.80	20.30	2.10	19.30	9.2
43.0	27.10	26.80	20.70	2.20	19.70	9.0
44.0	27.10	26.80	21.20	2.20	20.20	9.2
45.0	27.10	26.70	21.60	2.20	20.60	9.4
46.0	27.00	26.70	22.00	2.30	21.00	9.1
47.0	26.90	26.70	22.60	2.40	21.60	9.0
48.0	26.90	26.60	23.00	2.40	22.00	9.2
49.0	26.80	26.60	23.40	2.40	22.40	9.3
50.0	26.70	26.60	23.80	2.60	22.80	8.8
51.0	26.70	26.50	24.30	2.60	23.30	9.0
52.0	26.60	26.50	24.70	2.70	23.70	8.8

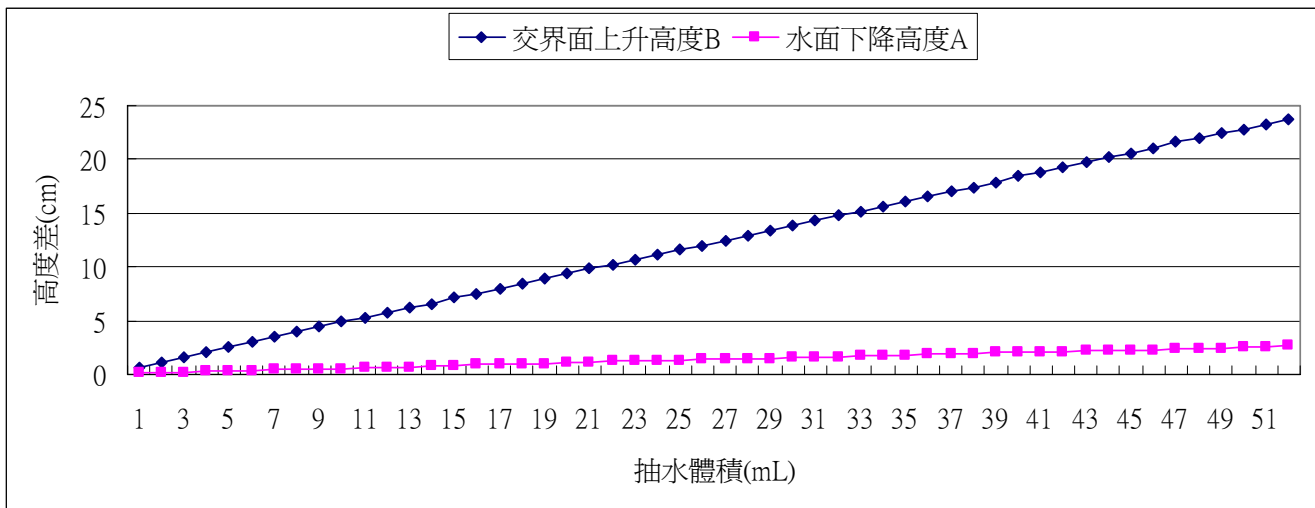


圖 12-1：實驗三中抽水體積與界面高度差之關係

表3-2：實驗三補注紅墨水部份之結果

補注水體積 (mL)	水面位置 (cm)	沙拉脫液面位置 (cm)	交界面位置 (cm)	水面上升高度 A (cm)	交界面下降高度 B (cm)	B/A
1.0	26.6	26.5	26.0	0.0	0.0	0.0
2.0	26.6	26.5	25.5	0.0	0.5	0.0
3.0	26.7	26.6	25.2	0.1	0.8	8.0
4.0	26.8	26.6	24.7	0.2	1.3	6.5
5.0	26.9	26.6	24.2	0.3	1.8	6.0
6.0	26.9	26.6	23.7	0.3	2.3	7.7
7.0	26.9	26.7	23.3	0.3	2.7	9.0
8.0	27.0	26.7	22.7	0.4	3.3	8.3
9.0	27.0	26.7	22.2	0.4	3.8	9.5
10.0	27.1	26.8	21.8	0.5	4.2	8.4
11.0	27.1	26.8	21.3	0.5	4.7	9.4
12.0	27.1	26.8	20.8	0.5	5.2	10.4
13.0	27.2	26.9	20.3	0.6	5.7	9.5
14.0	27.2	26.9	19.8	0.6	6.2	10.3
15.0	27.3	26.9	19.4	0.7	6.6	9.4
16.0	27.3	27.0	18.9	0.7	7.1	10.1
17.0	27.4	27.0	18.3	0.8	7.7	9.6
18.0	27.5	27.0	17.8	0.9	8.2	9.1
19.0	27.5	27.1	17.4	0.9	8.6	9.6
20.0	27.6	27.1	17.2	1.0	8.8	8.8
21.0	27.6	27.1	16.6	1.0	9.4	9.4
22.0	27.7	27.2	16.2	1.1	9.8	8.9
23.0	27.7	27.2	15.5	1.1	10.5	9.6
24.0	27.8	27.2	15.1	1.2	10.9	9.1
25.0	27.8	27.2	14.6	1.2	11.4	9.5
26.0	27.9	27.3	14.1	1.3	11.9	9.2
27.0	27.9	27.3	13.7	1.3	12.3	9.5
28.0	28.0	27.3	13.2	1.4	12.8	9.1
29.0	28.0	27.4	12.7	1.4	13.3	9.5
30.0	28.1	27.4	12.2	1.5	13.8	9.2
31.0	28.1	27.4	11.8	1.5	14.2	9.5
32.0	28.2	27.5	11.3	1.6	14.7	9.2
33.0	28.2	27.5	10.8	1.6	15.2	9.5
34.0	28.3	27.5	10.3	1.7	15.7	9.2
35.0	28.3	27.6	10.0	1.7	16.0	9.4
36.0	28.4	27.6	9.5	1.8	16.5	9.2
37.0	28.5	27.6	9.0	1.9	17.0	9.0

38.0	28.5	27.7	8.5	1.9	17.5	9.2
39.0	28.6	27.7	8.0	2.0	18.0	9.0
40.0	28.6	27.7	7.6	2.0	18.4	9.2
41.0	28.7	27.7	7.1	2.1	18.9	9.0
42.0	28.7	27.8	6.6	2.1	19.4	9.2
43.0	28.7	27.8	6.1	2.1	19.9	9.5
44.0	28.8	27.9	5.6	2.2	20.4	9.3
45.0	28.8	27.9	5.2	2.2	20.8	9.5
46.0	28.9	28.0	4.8	2.3	21.2	9.2
47.0	29.0	28.0	4.2	2.4	21.8	9.1
48.0	29.0	28.0	3.8	2.4	22.2	9.3
49.0	29.1	28.0	3.3	2.5	22.7	9.1
50.0	29.1	28.1	2.9	2.5	23.1	9.2
51.0	29.2	28.1	2.3	2.6	23.7	9.1
52.0	29.2	28.1	1.9	2.6	24.1	9.3
53.0	29.3	28.1	1.5	2.7	24.5	9.1
54.0	29.3	28.2	1.0	2.7	25.0	9.3

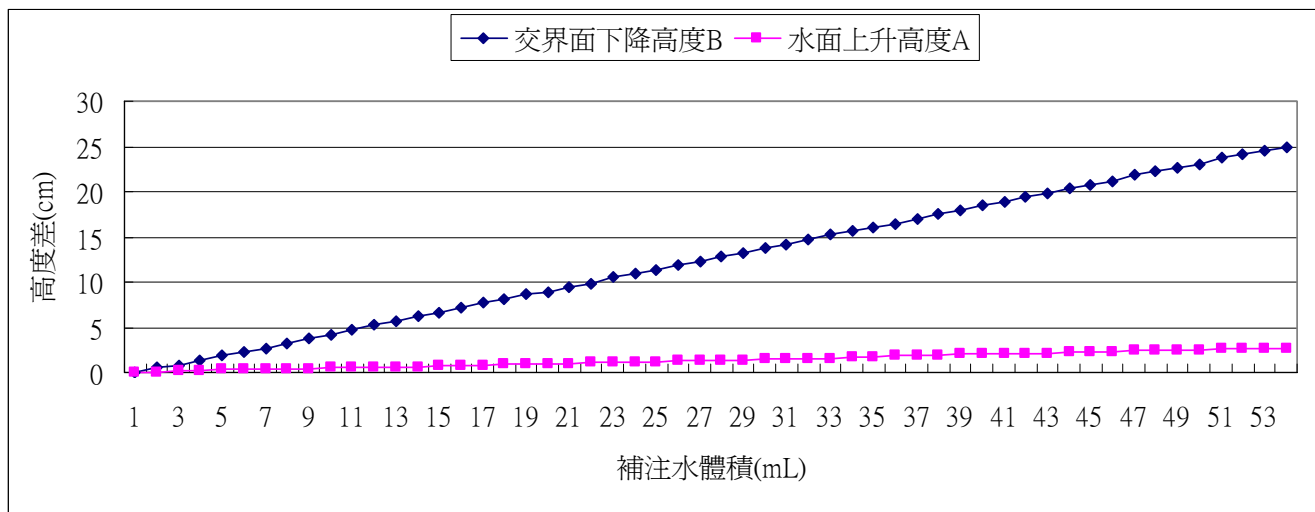


圖 12-2：實驗三中補注水體積與界面高度差之關係

四、實驗四：油水交界面上升高度B與油面下降高度A之比值（B/A）平均為11.3。

表4：實驗四結果

抽油體積 (mL)	油面位置 (cm)	水面位置 (cm)	交界面位置 (cm)	油面下降高度 A (cm)	交界面上升高度 B (cm)	B/A
0.0	32.10	29.40	0.00	0.00	0.00	
1.0	32.00	29.40	0.40	0.10	0.40	4.0
2.0	32.00	29.40	0.90	0.10	0.90	9.0
3.0	31.90	29.40	1.30	0.20	1.30	6.5
4.0	31.90	29.40	1.90	0.20	1.90	9.5
5.0	31.80	29.40	2.30	0.30	2.30	7.7
6.0	31.80	29.40	2.70	0.30	2.70	9.0
7.0	31.80	29.40	3.10	0.30	3.10	10.3
8.0	31.70	29.40	3.50	0.40	3.50	8.8
9.0	31.70	29.40	3.90	0.40	3.90	9.8
10.0	31.70	29.40	4.40	0.40	4.40	11.0
11.0	31.60	29.40	4.90	0.50	4.90	9.8
12.0	31.60	29.40	5.40	0.50	5.40	10.8
13.0	31.60	29.40	5.80	0.50	5.80	11.6
14.0	31.50	29.40	6.20	0.60	6.20	10.3
15.0	31.50	29.40	6.60	0.60	6.60	11.0
16.0	31.50	29.40	7.10	0.60	7.10	11.8
17.0	31.40	29.40	7.60	0.70	7.60	10.9
18.0	31.40	29.40	8.00	0.70	8.00	11.4
19.0	31.40	29.40	8.40	0.70	8.40	12.0
20.0	31.30	29.40	8.80	0.80	8.80	11.0
21.0	31.30	29.40	9.30	0.80	9.30	11.6
22.0	31.30	29.40	9.70	0.80	9.70	12.1
23.0	31.20	29.40	10.20	0.90	10.20	11.3
24.0	31.20	29.40	10.60	0.90	10.60	11.8
25.0	31.20	29.40	11.00	0.90	11.00	12.2
26.0	31.10	29.40	11.40	1.00	11.40	11.4
27.0	31.10	29.40	11.80	1.00	11.80	11.8
28.0	31.10	29.50	12.30	1.00	12.30	12.3
29.0	31.00	29.50	12.80	1.10	12.80	11.6
30.0	31.00	29.50	13.20	1.10	13.20	12.0
31.0	31.00	29.50	13.60	1.10	13.60	12.4
32.0	30.90	29.50	14.00	1.20	14.00	11.7
33.0	30.90	29.50	14.40	1.20	14.40	12.0
34.0	30.90	29.50	14.80	1.20	14.80	12.3
35.0	30.80	29.50	15.30	1.30	15.30	11.8

36.0	30.80	29.50	15.70	1.30	15.70	12.1
37.0	30.80	29.50	16.10	1.30	16.10	12.4
38.0	30.70	29.50	16.50	1.40	16.50	11.8
39.0	30.70	29.50	17.00	1.40	17.00	12.1
40.0	30.70	29.50	17.40	1.40	17.40	12.4
41.0	30.60	29.50	17.80	1.50	17.80	11.9
42.0	30.60	29.50	18.30	1.50	18.30	12.2
43.0	30.60	29.50	18.70	1.50	18.70	12.5
44.0	30.50	29.50	19.10	1.60	19.10	11.9
45.0	30.50	29.50	19.50	1.60	19.50	12.2
46.0	30.50	29.50	20.00	1.60	20.00	12.5
47.0	30.40	29.50	20.40	1.70	20.40	12.0
48.0	30.40	29.60	20.80	1.70	20.80	12.2
49.0	30.40	29.60	21.20	1.70	21.20	12.5
50.0	30.30	29.60	21.60	1.80	21.60	12.0
51.0	30.30	29.60	22.00	1.80	22.00	12.2
52.0	30.30	29.60	22.40	1.80	22.40	12.4
53.0	30.20	29.60	22.80	1.90	22.80	12.0
54.0	30.20	29.60	23.20	1.90	23.20	12.2
55.0	30.20	29.60	23.60	1.90	23.60	12.4
56.0	30.10	29.60	24.00	2.00	24.00	12.0
57.0	30.10	29.60	24.40	2.00	24.40	12.2
58.0	30.10	29.60	24.80	2.00	24.80	12.4
59.0	30.00	29.60	25.30	2.10	25.30	12.1
60.0	30.00	29.60	25.70	2.10	25.70	12.2
61.0	30.00	29.60	26.10	2.10	26.10	12.4
62.0	30.00	29.60	26.50	2.10	26.50	12.6
63.0	30.00	29.60	26.90	2.10	26.90	12.8
64.0	30.00	29.70	27.30	2.10	27.30	13.0
65.0	29.90	29.70	27.70	2.20	27.70	12.6
66.0	29.90	29.70	28.10	2.20	28.10	12.8
67.0	29.90	29.70	28.50	2.20	28.50	13.0
68.0	29.90	29.70	28.90	2.20	28.90	13.1
69.0	29.80	29.70	29.30	2.30	29.30	12.7

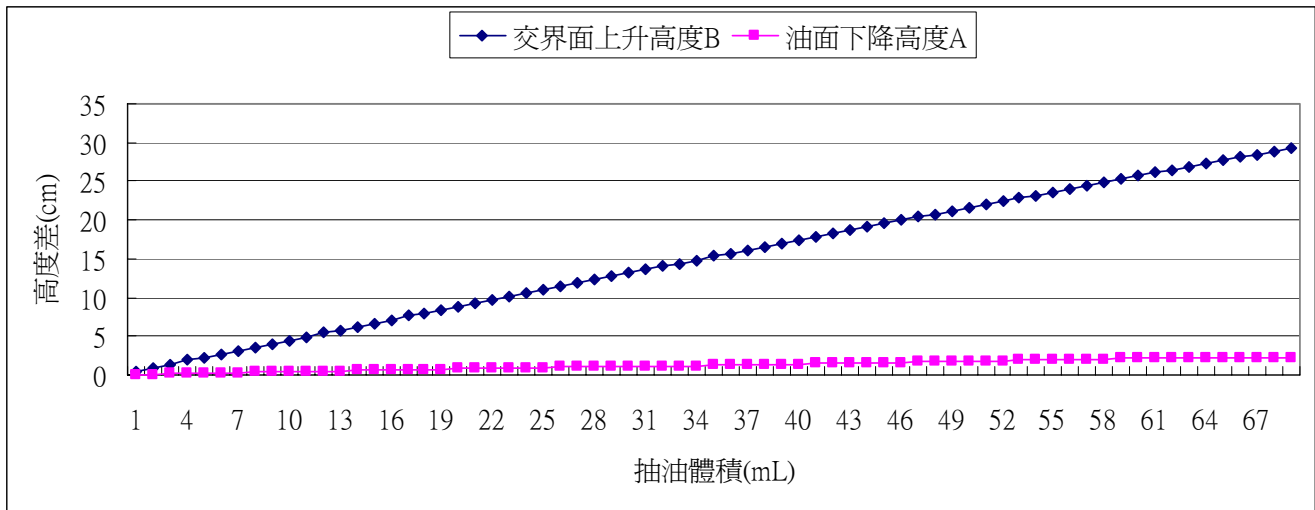


圖 13：實驗四中抽油體積與界面高度差之關係

五、實驗五：沙拉脫與紅墨水之交界面上升高度B與水面下降高度A之比值（B/A）平均為18.9。

表5：實驗五結果

抽水體積 (mL)	水面位置 (cm)	沙拉脫液面位置 (cm)	交界面位置 (cm)	水面下降高度 A (cm)	交界面上升高度 B (cm)	B/A
0.0	29.80	28.70	0.50	0.00	0.00	
1.0	29.75	28.70	1.70	0.05	1.20	24.0
2.0	29.70	28.70	2.20	0.10	1.70	17.0
3.0	29.70	28.70	3.10	0.10	2.60	26.0
4.0	29.60	28.70	4.10	0.20	3.60	18.0
5.0	29.60	28.70	4.70	0.20	4.20	21.0
6.0	29.50	28.70	5.40	0.30	4.90	16.3
7.0	29.50	28.70	5.80	0.30	5.30	17.7
8.0	29.50	28.70	6.20	0.30	5.70	19.0
9.0	29.40	28.70	6.90	0.40	6.40	16.0
10.0	29.40	29.70	7.30	0.40	6.80	17.0
11.0	29.40	29.70	7.80	0.40	7.30	18.3
12.0	29.40	29.70	8.30	0.40	7.80	19.5
13.0	29.30	29.70	8.80	0.50	8.30	16.6
14.0	29.30	29.70	9.40	0.50	8.90	17.8
15.0	29.30	29.70	10.00	0.50	9.50	19.0

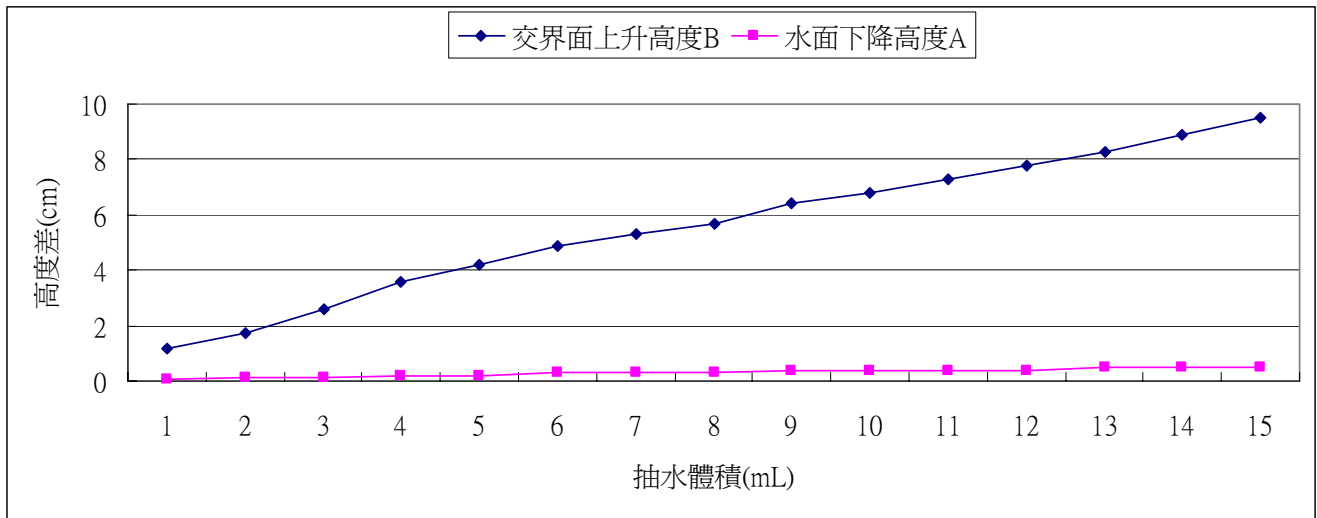


圖14：實驗五中抽水體積與界面高度差之關係

六、實驗六：油水交界面上升高度B與油面下降高度A之比值（B/A）平均為10.5

表6：實驗六結果

抽油體積 (mL)	油面位置 (cm)	水面位置 (cm)	交界面位置 (cm)	油面下降高度 A (cm)	交界面上升高度 B (cm)	B/A
0.0	32.60	29.95	0.00	0.00	0.00	0.0
1.0	32.50	29.95	0.40	0.10	0.40	4.0
2.0	32.45	29.95	1.00	0.15	1.00	6.7
3.0	32.40	29.95	1.40	0.20	1.40	7.0
4.0	32.40	29.95	1.80	0.20	1.80	9.0
5.0	32.35	29.95	2.20	0.25	2.20	8.8
6.0	32.30	29.95	2.70	0.30	2.70	9.0
7.0	32.30	29.95	3.10	0.30	3.10	10.3
8.0	32.25	29.95	3.50	0.35	3.50	10.0
9.0	32.20	29.95	4.00	0.40	4.00	10.0
10.0	32.20	29.95	4.40	0.40	4.40	11.0
11.0	32.15	29.95	4.80	0.45	4.80	10.7
12.0	32.10	29.95	5.20	0.50	5.20	10.4
13.0	32.10	29.95	5.70	0.50	5.70	11.4
14.0	32.00	29.95	6.10	0.60	6.10	10.2
15.0	32.00	29.95	6.60	0.60	6.60	11.0
16.0	31.95	29.95	7.10	0.60	7.10	11.8
17.0	31.90	29.95	7.50	0.70	7.50	10.7
18.0	31.85	29.95	7.90	0.75	7.90	10.5
19.0	31.80	29.95	8.30	0.80	8.30	10.4
20.0	31.75	29.95	8.70	0.85	8.70	10.2
21.0	31.75	29.95	9.20	0.85	9.20	10.8
22.0	31.70	29.95	9.60	0.90	9.60	10.7
23.0	31.70	29.95	10.10	0.90	10.10	11.2
24.0	31.65	29.95	10.50	0.95	10.50	11.1
25.0	31.60	29.95	10.90	1.00	10.90	10.9
26.0	31.55	29.95	11.40	1.05	11.40	10.9
27.0	31.55	29.95	11.80	1.05	11.80	11.2
28.0	31.50	29.95	12.30	1.10	12.30	11.2
29.0	31.45	29.95	12.70	1.15	12.70	11.0
30.0	31.40	29.95	13.10	1.20	13.10	10.9
31.0	31.35	29.95	13.50	1.25	13.50	10.8
32.0	31.30	29.95	13.90	1.30	13.90	10.7
33.0	31.30	29.95	14.30	1.30	14.30	11.0
34.0	31.25	29.95	14.80	1.35	14.80	11.0
35.0	31.20	29.95	15.20	1.40	15.20	10.9

36.0	31.15	29.95	15.60	1.45	15.60	10.8
37.0	31.15	29.95	16.10	1.45	16.10	11.1
38.0	31.00	29.95	16.50	1.60	16.50	10.3
39.0	31.05	29.95	17.00	1.55	17.00	11.0
40.0	31.05	29.95	17.40	1.55	17.40	11.2
41.0	31.00	29.95	17.80	1.60	17.80	11.1
42.0	31.00	29.95	18.20	1.60	18.20	11.4
43.0	30.95	29.95	18.60	1.65	18.60	11.3
44.0	30.90	29.95	19.00	1.70	19.00	11.2
45.0	30.85	29.95	19.50	1.75	19.50	11.1
46.0	30.80	29.95	19.90	1.80	19.90	11.1
47.0	30.80	29.95	20.30	1.80	20.30	11.3
48.0	30.75	29.95	20.70	1.85	20.70	11.2
49.0	30.75	29.95	21.20	1.85	21.20	11.5
50.0	30.70	29.95	21.60	1.90	21.60	11.4
51.0	30.65	29.95	22.10	1.95	22.10	11.3
52.0	30.60	29.95	22.50	2.00	22.50	11.3
53.0	30.55	29.95	23.00	2.05	23.00	11.2
54.0	30.55	29.95	23.40	2.05	23.40	11.4
55.0	30.50	29.95	23.80	2.10	23.80	11.3
56.0	30.45	29.95	24.20	2.15	24.20	11.3
57.0	30.45	29.95	24.60	2.15	24.60	11.4
58.0	30.40	29.95	25.00	2.20	25.00	11.4
59.0	30.35	29.95	25.40	2.25	25.40	11.3
60.0	30.30	29.95	25.80	2.30	25.80	11.2
61.0	30.30	29.95	26.20	2.30	26.20	11.4
62.0	30.25	29.95	26.60	2.35	26.60	11.3
63.0	30.20	29.95	27.00	2.40	27.00	11.3
64.0	30.20	29.95	27.40	2.40	27.40	11.4
65.0	30.15	29.95	27.80	2.45	27.80	11.4
66.0	30.10	29.95	28.20	2.50	28.20	11.3
67.0	30.05	29.95	28.60	2.55	28.60	11.2
68.0	30.05	29.95	29.00	2.55	29.00	11.4

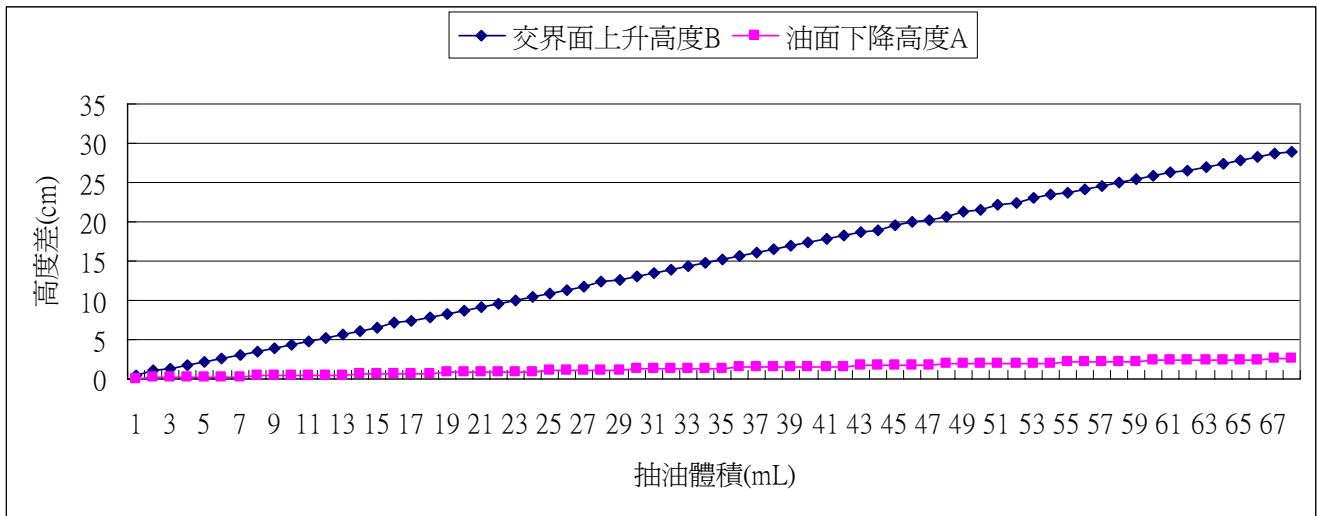


圖15：實驗六中抽油體積與界面高度差之關係

七、實驗七：濃度越高的鹽水，在裝置四中向下流動至底部所需時間越短，如表7及圖16所示。
表7：實驗七結果

時間 (s)	紅墨水位置 (cm)	3.5%鹽水位置 (cm)	3%鹽水位置 (cm)	2%鹽水位置 (cm)	1%鹽水位置 (cm)
10	5.5	19.0	14.5	12.0	10.0
20	6.0	25.0	20.0	19.0	13.0
30	7.0	30.0	27.5	25.0	16.5
40	7.0	32.0	30.0	28.5	19.5
50	8.0	35.0	33.5	31.0	22.5
60	10.0	38.0	35.0	33.0	26.5
70	12.0	39.5	38.5	35.0	30.0
80	12.0	42.0	41.0	37.0	33.0
90	12.0	44.0	43.0	39.0	35.5
100	12.0	46.5	45.0	42.0	37.5
110	12.0	49.0	47.0	43.0	40.0
120	12.0	50.0	48.5	44.0	41.5
130	13.0	51.0	50.0	46.0	43.0
140	13.5	52.5	51.0	47.0	44.0
150	14.0	54.0	52.0	48.0	45.5
160	14.0	55.0	53.5	50.0	47.0
170	14.0	56.5	54.5	51.0	48.5
180	14.0	57.5	55.5	52.0	49.0
190	14.0	58.0	56.5	53.5	50.5
200	14.0	59.0	57.0	54.5	51.5
210	14.5		57.5	55.0	52.0
220	14.5		58.0	56.0	53.0
230	14.5		58.5	56.5	53.5
240	14.5		59.0	57.5	54.0
250	14.5			58.0	54.5
260	14.5			58.5	55.0
270	14.5			59.0	55.5
280	14.5				56.0
290	15.0				56.5
300	15.0				57.0
310	15.0				57.3
320	15.0				57.5
330	15.0				57.8
340	15.0				58.0
350	15.0				59.0

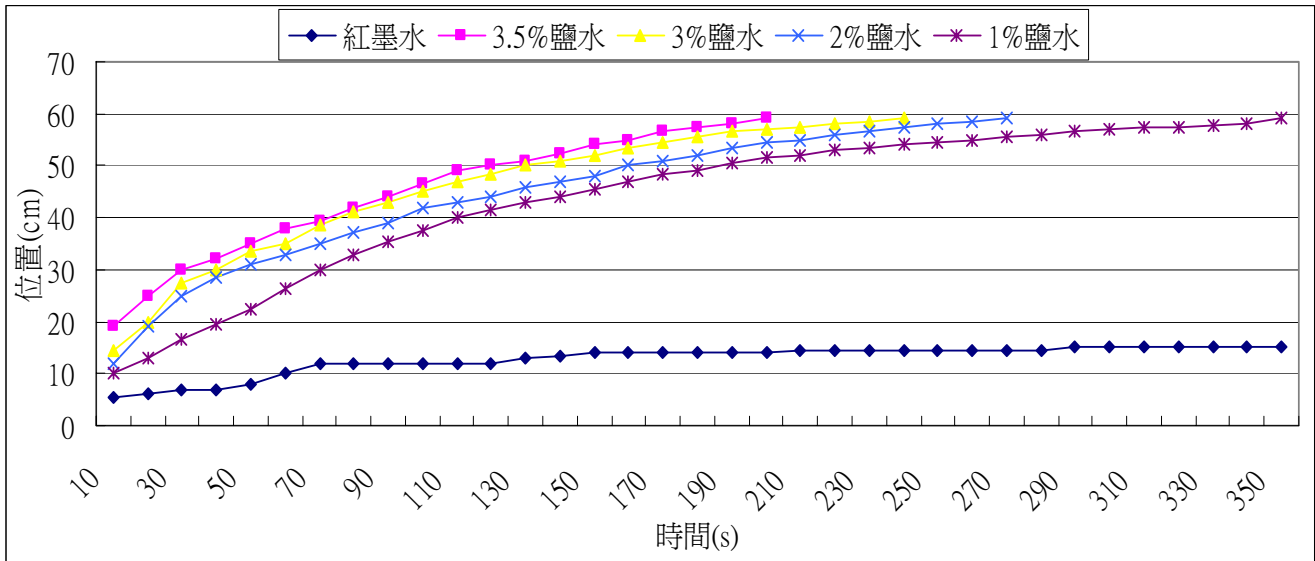


圖16：不同濃度的鹽水流動時間與位置之關係

八、實驗八：

加入紅墨水前，電表之電流為1.31mA，加入紅墨水後38秒，電流遽增為9.42mA，如圖17。

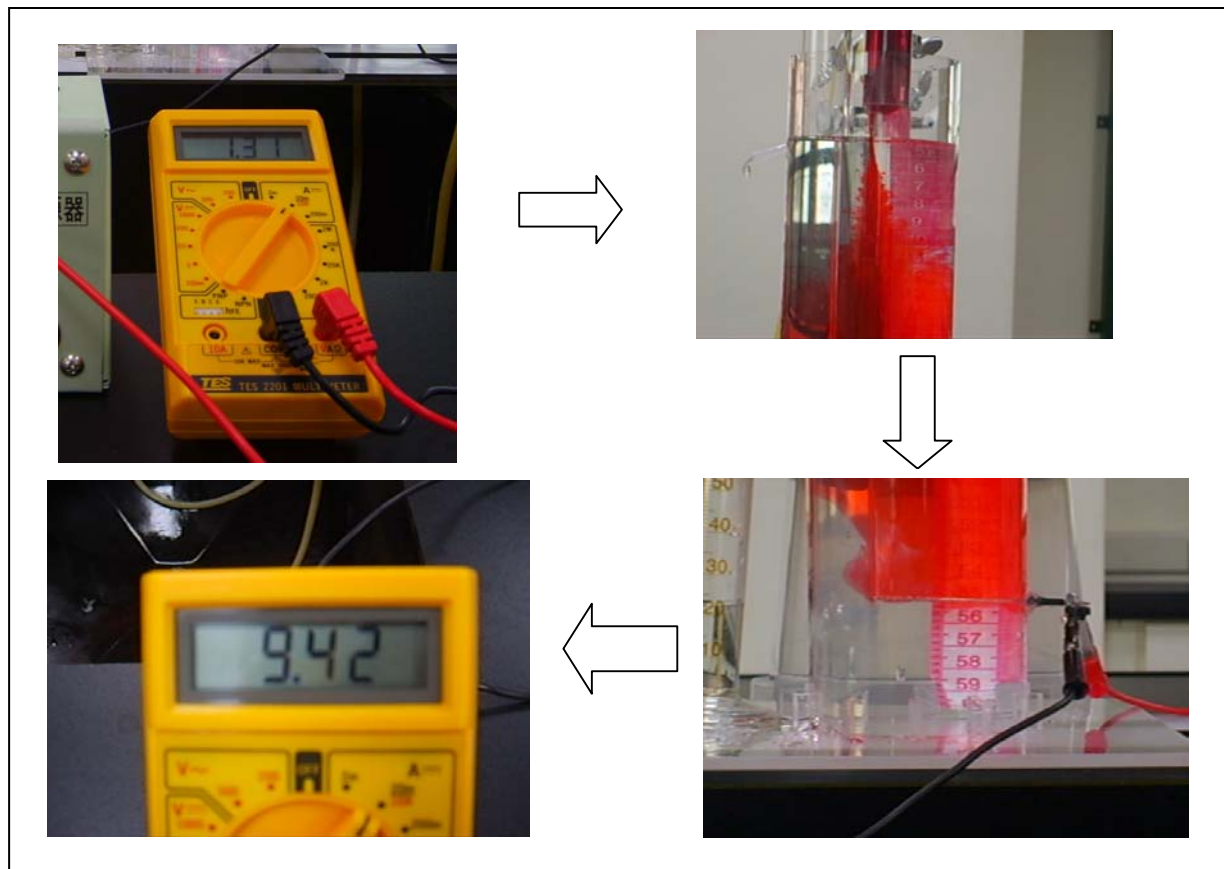


圖17

九、實驗九：

- (一) 表8-1及圖18顯示，外管含砂層中第一至第五探測孔測得之最大電流值差異顯著，且依序遞減；內管不含砂層第六至第十探測孔測得之最大電流值則差異較小。
- (二) 將起點至第四探測孔分為四組，比較各組達最大電流之間隔時間，如表8-2及圖19所示，並無規律性。

表8-1：各探測孔測得之最大電流

探測孔	一	二	三	四	五	六	七	八	九	十
最大電流(mA)	7.06	5.54	4.57	1.97	0.76	1.20	1.18	1.10	1.00	0.99

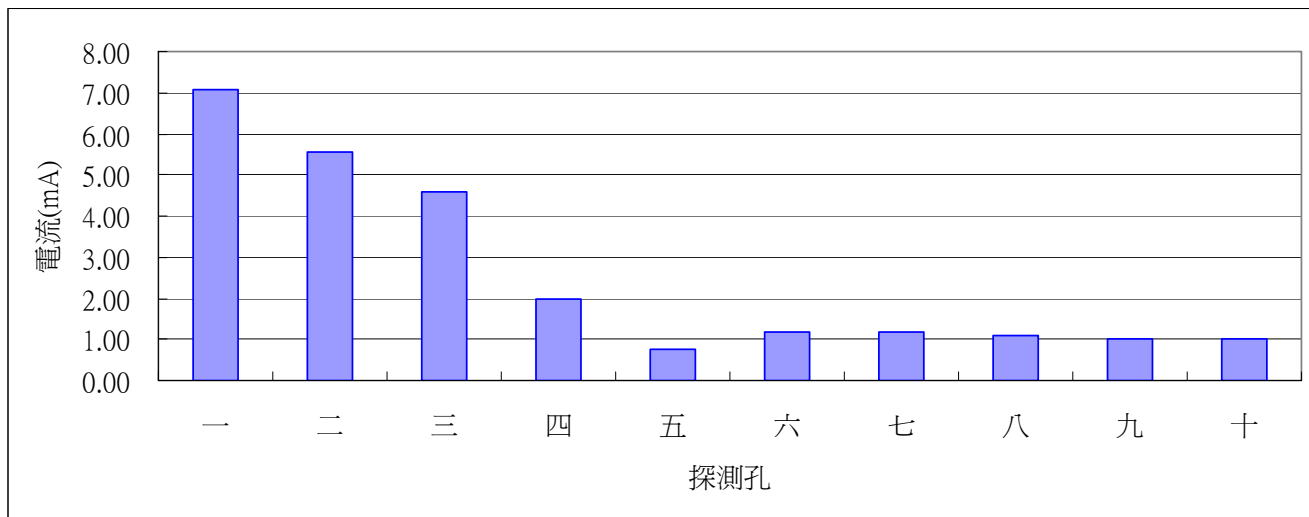


圖18：各探測孔測得之最大電流比較

表8-2：起點至第四探測孔測得最大電流之間隔時間

組別	一 (起點~第一探測孔)	二 (第一~第二探測孔)	三 (第二~第三探測孔)	四 (第三~第四探測孔)
間隔時間(min)	179	148	147	29

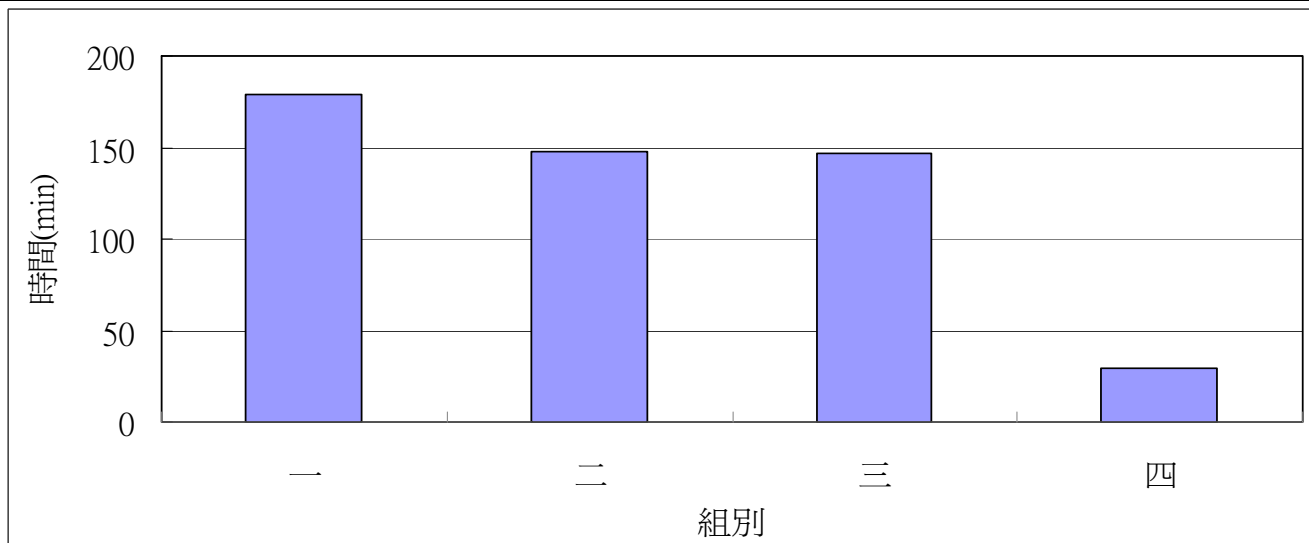


圖19：各組測得電流最大值之間隔時間比較

柒、討論

- 一、在海島或臨海地帶，地下水和海水相連通，因此有淡、鹹水之分。淡水比重較小，鹹水比重較大，但由於陸地上的地下水位高於海平面，因此鹹水與淡水之間維持一個平衡的界面，如下圖20。

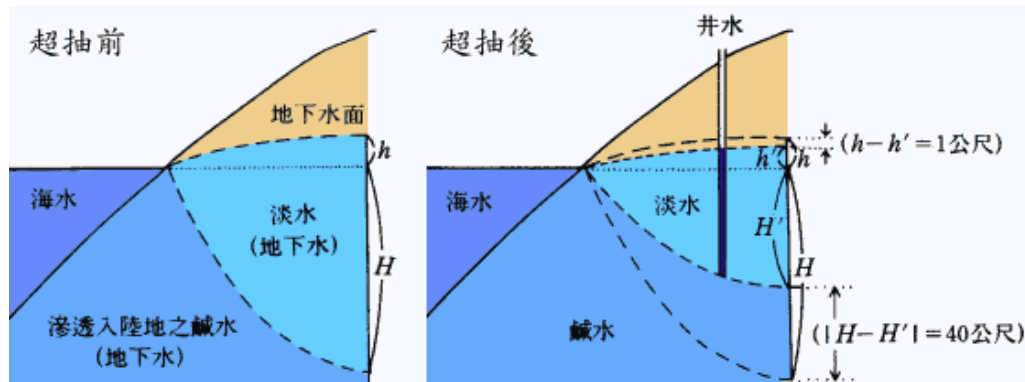


圖20

圖21

海水的密度約為淡水的41/40，在圖20中，地下 H 深處的淡、鹹水交界面，壓力達平衡狀態時， $H \times 41/40 = (h + H) \times 1$ ；經整理後可得 $H = 40h$ 。也就是地下水面每高過海平面1公尺，就能維持海平面以下40公尺深的淡水區域。假設如圖21，淡水被抽後地下水面高度由原來的 h 降為 h' ；地下淡、鹹水交界因而自 H 深處提高至 H' 處，則淡水高度降為 $h' + H'$ ，鹹水高度 H' ，地下 H 深處的淡、鹹水交界面達新平衡，即 $H' \times 41/40 = (H' + h') \times 1$ ；經化簡整理後可得 $H' = 40h'$ 。由於 $h/H = 1/40$ 及 $h'/H' = 1/40$ ，因此 $(h - h')/(H - H') = 1/40$ 。此即代表當淡水（地下水）面下降1公尺，下方的鹹水面將上升40公尺。本研究中，實驗一至實驗六的主要內容即是在探討並驗證上述之理論，而實驗結果中的B/A值相當於鹹水面上升高度與淡水面下降高度之比值。

- 二、實驗一及實驗二是以油來模擬地下水；水模擬海水。雖然實驗裝置不同，但油水交界面上升高度（B）與油面下降高度（A）之比值（B/A）無明顯差異，可說明內管位置及液柱高低不影響B/A值。
- 三、實驗一、實驗二及實驗三抽取內管液體後會造成外管液面稍微降低，造成實驗結果與理論值差距甚大。然而自然界並不會因為人為超抽地下水而造成海水面的改變，於是實驗四及實驗五改良為隨時補充外管的液體以維持液面不變。結果顯示，實驗四的B/A值為11.3，理論值為10.9；實驗五的B/A值為18.9，理論值為20.4，兩實驗之結果與理論值接近。因此，採用「抽取內管液體後回補等量外管液體」之作法正確可行。此外，實驗六改以水族箱取代量筒來進行實驗，不需要加水便能維持水面不變，實驗結果的B/A值為10.5，也十分接近理論值10.9，顯示增加外管之容積，可減少實驗操作手續，縮短實驗操作之時間，並獲得良好的實驗結果。
- 四、實驗三之內管抽油後再重新注油回補，目的是模擬地下水補注，雖然B/A的數值幾乎相同，說明地下水補注似乎可行。然而，地下含水層及土壤一旦受到鹽化污染，要以地下水補注方式去恢復原狀或是清洗鹽化之土壤，不但曠日費時且工程浩大。根據文獻資料，以臺灣目前現況而言，地下水補注的可行性低。
- 五、實驗三及實驗五是以紅墨水模擬地下水；沙拉脫模擬海水，因考量到紅墨水與沙拉脫接觸的界面有兩液體混合現象，不容易清楚觀察，因此利用密度比水大但比沙拉脫小的BB彈，作為讀取數據的基準點。

- 六、實驗四中水與油的密度差為 0.084 g/cm^3 ，兩液體交界面上升高度與油面下降高度之比值(B/A)為11.3；實驗五中沙拉脫與紅墨水的密度差為 0.049 g/cm^3 ，兩液體交界面上升高度與水面下降高度之比值(B/A)為18.9。由此可知內管與外管的液體密度差越小，B/A的數值越大。
- 七、由於地下水流動緩慢，使得地下水在大量抽取之下很容易被超抽，如果長期超抽地下水，地下水壓降得太低，這些地下水壓所減少的支撐力將轉移至地層的組成顆粒，造成顆粒間的孔隙被壓密，因而導致地層下陷。一旦颱風過境時，沿海地層下陷區海水倒灌，將會造成鹹水向下入侵地下水的嚴重後果。本研究中，實驗七至實驗九即是在模擬類似海水倒灌後之情景，探討海水入侵所造成地下水鹽化的污染情形，以及海水在地下含水層中向下滲透的速率。
- 八、實驗七之結果顯示濃度愈大的鹽水，在水中向下流動的速率愈大，因此可推論濃度愈大的鹽水，在地下含水層中向下滲透的速率也愈大。因此，海水入侵的地區離海較近的地點，由於地下含水層中鹽水的濃度較大，將導致地下水鹽化的速率較大。換言之，距海遠近與地下水鹽化時間有相當之關連性。
- 九、實驗八及實驗九的試驗原理，是利用鹽水滲透到有電極的區域時，該區水層中離子數目激增，電阻瞬間減少而造成電流的急劇上升，因此測得最大電流出現之瞬間，代表鹽水滲透到達該探測孔之區域範圍。
- 十、實驗九每次試驗所需時間長達數個小時，顯示鹽水在砂層中向下滲透是非常緩慢的。由於實驗裝置中外管各探測孔之距離固定，因此由實驗數據可說明，鹽水在地下含水層中向下滲透的速率不定且無規律性，並非由上而下遞減或遞增，而且經由多次試驗之結果情況皆相同。另一方面，根據實驗結果亦可推論鹽水在地下含水層中，向下流動擴散的情形複雜，難以簡單描述並預測其流速。
- 十一、實驗九中，由於鹽水在淡水層中流動極緩慢，所以外管設置了五個探測孔，依順序由上而下分別測量電流值的變化，以判斷鹽水向下流動至何處。至於第五及第六探測孔之所以測不到明顯的電流變化，其原因可能是大多數鹽水未接觸到電極所致。此外，在模擬地層中，越接近模型底部，由探測孔所測得之電流也越小，表示鹽水向下流動後濃度逐漸被稀釋。
- 十二、裝置四的設計靈感來自於參考文獻中之傳統沙箱模型，外管注水、內管出水之設計是為了模擬地下水之實際流動情形。本實驗模型之體積較傳統沙箱模型小，重量輕攜帶方便，本模型亦可演示地下水人工補注、地下水之抽水及人工地下擋水牆，可於自然課程中進行實驗教學之用。
- 十三、依據參考文獻，以往討論海水入侵問題的方法主要有兩種，一種是假設海水與淡水為兩種彼此互不相溶的液體，所以海水與淡水將形成一明顯交界面。另一種方法是將問題視為鹽分於密度變化之地下水流中傳輸，對海水入侵問題進行分析。本研究中，實驗一至實驗六屬於前者；實驗七至實驗九屬於後者。
- 十四、過去臺灣雲林縣沿海地區與屏東平原長期大量超抽地下水，不但造成地下水位下降，也導致該地區地層下陷，危及居民生命與財產之安全。尤其在沿海附近地區更發生海水入侵至地下含水層之現象，造成該地區的土壤鹽化，影響農地利用，並且地下水源受到海水嚴重污染，再也無法恢復使用，值得警惕！
- 十五、國內學者對於海水入侵防治方法進行研究，認為防止海水入侵可採行的措施有：（一）控制地下水抽取量；（二）利用蓄水池入滲補注地下水；（三）利用補注井建立補注水丘；（四）利用抽水井建立水力坡降梯度；（五）結合注水與抽水；（六）建立人工地下擋水牆。其研究方法多為選擇一種或多種地下水流模式對上述各種海水入侵防治方法進行模擬，並對其模擬結果進行評估。

捌、結論

- 一、海島或濱海地區的地下含水層與海水聯繫，如果對地下水的開採利用不合理，將會使淡水的水頭地區大幅下降，導致海水向內陸的淡水含水層推進，造成海水滲入地下水層而污染地下水源。
- 二、本研究發現海水與淡水之密度差愈小，大量抽取地下水後，淡、鹹水交界面上升愈多，造成地下水鹽化的程度將愈嚴重。
- 三、地下水資源是臺灣地區灌溉用水與民生飲用水的重要來源之一，一旦遭到海水入侵污染，便無法再作有效利用，將會使原本就已經存在的水源不足問題更形惡化，嚴重影響國人之生活品質，同時也不利國家經濟的發展，全體國民都應該重視此一問題。
- 四、本實驗之自製裝置具有簡易、製作成本低廉、操作安全及實驗結果容易觀察之特點，可應用於國中自然科之教學上。

玖、參考資料及其他

- 一、林美杏（民 82）。**地下水流的模擬**。中華民國第三十三屆中小學科學展覽會國中組優勝作品專輯。民 95 年 12 月 25 日，取自：<http://www.ntsec.gov.tw/activity/race-1/33/pdf/33m/121.pdf>
- 二、曹以松（民 92）。**地下水**（2 版）。臺北市：科技圖書。
- 三、賴宜萍、陳柏昀、張君如、黃玉婷（民 91）。**井水不犯海水？地層下陷與海水倒灌的問題探究**。中華民國第四十二屆中小學科學展覽會國中組參展作品專輯。民 96 年 1 月 28 日，取自：<http://www.ntsec.gov.tw/activity/race-1/42/pdf/d/5/030508.pdf>
- 四、經濟部水利署地層下陷防治服務團網站。<http://www.lsprc.ncku.edu.tw/>
- 五、臺北市立第一女高地球科學學習網站。<http://earth.fg.tp.edu.tw/>
- 六、歷屆科展優勝作品專輯網站。<http://www.ntsec.gov.tw/activity/race-1.asp>

【評 語】

031724 海水入侵地下水之模擬實驗

1.本件作品進行模擬海水入侵地下水的實驗，作者自行設計、發展和進行許多實驗，並收集和分析許多數據，結果與討論完整，實驗精神可佳。

2.建議作者未來針對第二部分實驗進行更深入的分析與討論，或對第一部份實驗增加試驗樣品。