

地下水流的模擬

國中組地球科學科第一名

台北市立陽明國民中學

作者：林美杏

指導教師：陳英杰

一、研究動機

去年學姐們從事有關地下水的實驗工作，使我對於地下水的問題產生興趣，由於她們的實驗中並未詳細討論地下水在土壤中的流動情形，因此我想自行設計實驗來加以探討。

二、研究目的

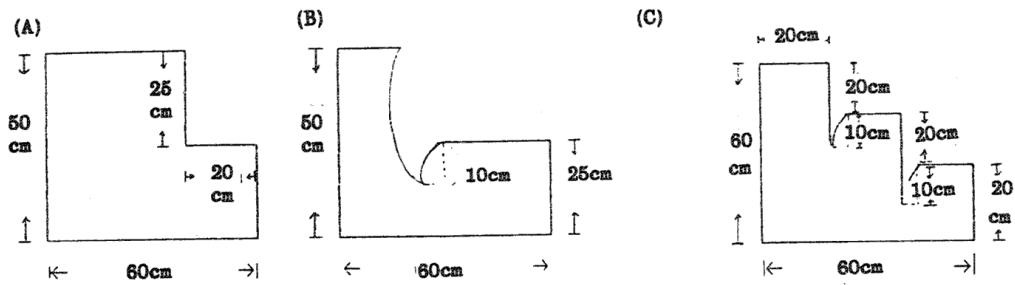
- (一) 自製模型觀察紅墨水在模型中所形成之流線，以探討地下水在土壤中的流動情形。
- (二) 了解模型外形及障礙物對流線的影響。
- (三) 說明入水口與出水口高度差對流線的影響。
- (四) 探討出水速率與流線的關係。
- (五) 模擬抽水對地下水位的影響。
- (六) 模擬驅除地下水的污染。
- (七) 證明紅墨水流線能代表清水的流動。
- (八) 了解地下水流動時水位的變化情形。
- (九) 說明沿海地區受海水污染時淡鹹水界面的變化。
- (十) 明白超抽地下水造成地盤下陷的嚴重情形。

三、研究設備器材

電子秤、電子計時器、碼錶、鋸台、研磨機、鉋光機、鑽床、鑽孔器、尖嘴鉗、鐵架、鐵環、酒精燈、保特瓶、縫衣針、割刀、燒杯、Water Aspirator、漏斗、量筒、注射針筒、吸量管、安全吸球、長尾夾、濾紙、砂紙、絕緣膠帶、矽膠、氯仿、紅墨水、食鹽、壓克力板（厚1~25mm）、壓克力圓管（直徑6~200mm）。

四、模型製作

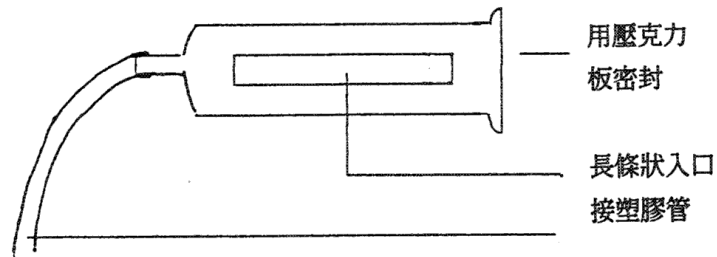
(⇒) 1.1 取乳白與透明的壓克力板(5 mm)各一片，分別裁成下圖之形狀：



1.2 在乳白壓克力板邊緣貼上絕緣膠，其他部份用砂紙磨出深約0.2~0.3mm之條紋（橫式、直式互相交錯且均勻緻密）。

1.3 利用氯仿將兩片白色及透明壓克力板在邊緣處黏貼（除入水口與出水口外均黏緊），使之成爲一壓克力槽。

1.4 將兩個塑膠注射筒製成

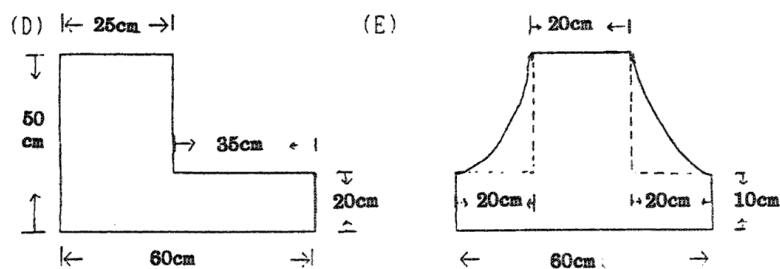


然後分別將其固定於壓克力槽的入水口及出水口的位置，利用燒成紅熱的針在塑膠筒與壓克力槽黏貼處穿孔，使塑膠筒與壓克力槽成通路。

1.5 用保特瓶及塑膠管製成一穩定給水裝置。

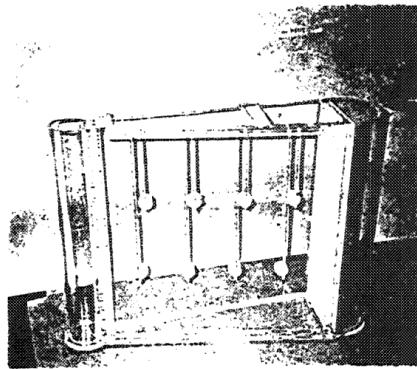
1.6 做一木架支撐壓克力槽，再將給水裝置與之接合。

(⇒) 2.1 取乳白及透明壓克力板(5 mm)各一片，分別裁成下圖之形狀：



2.2 重覆1.2

- 2.3 在乳白壓克力板上部鑽孔，鑽出之小孔位於同一水平線，當作入水孔。
 - 2.4 在透明壓克力板上部較白色壓克力板上的入水孔位置較高處割出一條與入水孔平行的長條狀入水口。
 - 2.5 重覆1.3
 - 2.6 利用壓克力板與壓克力圓管製成給水槽與集水槽，分別黏接於入水口及出水口。
 - 2.7 將細橡皮管一端接水龍頭，另一端用長尾夾夾在給水槽，另取一橡皮管接於給水槽的支管上。
 - 2.8 製作腳架支撐壓克力槽。
 - 2.9 取一小段橡皮管一端灌矽膠使其密封而成塞子。
- (⇒)取厚8mm、10mm及13mm的壓克力板及直徑8mm、30mm、100mm、200mm的壓克力圓管，製成沙箱模型，如下圖所示：



五、研究結果

- (⇒) 1. 目的：觀察紅墨水在模型(A)(B)(C)中流動的情形。
2. 方法：將壓克力槽內注滿水，再倒入紅墨水於給水裝置中，靜置，觀察紅墨水在槽內的流動情形。
3. 結果：（限於篇幅，只好全部省略）
4. 說明：從結果得知紅墨水由入水口進壓克力槽中，起初是整片向下，前進到出水口下方時再上升至出水口，流動範圍大，流線不易觀察，所以僅注入紅墨水來流動的效果不佳，故設計模型(D)、(E)，用清水來帶動紅墨水，進行水流的觀察。

(⇒)

〔實驗一〕測量模型(D)之出水速率

1. 方法：

①橡皮管接水龍頭注水於給水槽，以維持固定水位。

②待水由出水口支管滴出時，每隔5分鐘測定一次滴水之總體積，求出平均出水速率。

2. 結果：

表一

測量次數	1	2	3	4	5
出水總體積 (ml)	15.0	30.0	45.0	59.0	74.0
單位時間出水量 (ml)	15.0	15.0	15.0	14.0	15.0
平均出水速率 (ml/min)	3.0	3.0	3.0	2.8	3.0

表二

測量次數	1	2	3	4	5
出水總體積 (ml)	19.0	39.0	59.0	79.0	99.0
單位時間出水量 (ml)	19.0	20.0	20.0	20.0	20.0
平均出水速率 (ml/min)	3.8	4.0	4.0	4.0	4.0

3. 說明：多次實驗發現出水速率大致分為表(一)與表(二)兩種結果，可能與壓克力槽內清水流動的情形有關。

[實驗二] 觀察紅墨水在模型(D)中的流動，並測量出水速率。

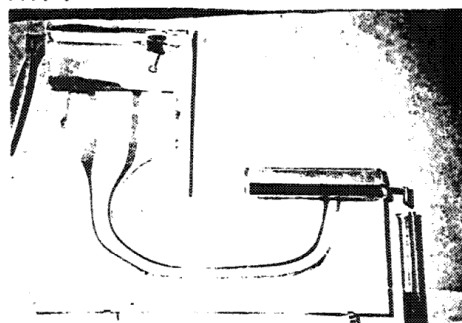
1. 方法：

- ①橡皮管接水龍頭注水於長條形入水口的給水槽，以固定水位。
- ②注紅墨水於另一水槽至適當高度。
- ③觀察並記錄紅墨水流動的情形及出水速率。

2. 結果：

①流線如下圖(一)所示：

圖(一)



②出水速率：(略)

3.說明：

①紅墨水流線由入水孔下方開始形成，逐漸向下延伸，經障礙物附近時會彎曲且變細，約10分鐘後紅墨水達出水口。

②紅墨水到出水口後，有時會有一段細小較淺的流線由出水口往回進行，但不久又消失。

③當紅墨水流線不同時（即清水流動情形改變），出水速率隨之改變。

〔實驗三〕給水槽水位改變對流線及出水速率的影響

1.方法：

①將清水與紅墨水分別注入給水槽於適當高度（給水槽不接水龍頭）。

②觀察其流線並計算出水速率。

2.結果：

①流線形成之過程：(略)

②出水速率：(略)

3.說明：給水槽內的清水體積隨時間增加而減少，水位呈不規則降低，清水與紅墨水單位時間內進入壓克力槽的量不固定，出水速率不穩定，流線形狀亦隨之變化。

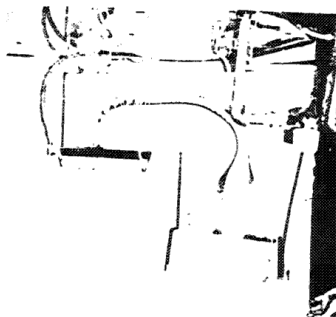
〔實驗四〕模型(D)：抽水對流線的影響

1.方法：

①待實驗裝置內的流線達出水口時，將集水槽的支管接上Water Aspirator抽水。

②觀察並記錄紅墨水流線的變化。

2.結果：流線如圖(二)所示。



圖(二)

3.說明：抽水使得流線變得較為混亂，且愈靠近抽水處，影響愈顯著。

〔實驗五〕模型(D)：擬驅除地下水的污染

1.方法：

①待實驗裝置內的流線達出水口時，將紅墨水槽換裝清水。

②將集水槽的支管接上Water Aspirator抽水，並將裝置左方架高。

③觀察並記錄流線的變化。

④重覆上述操作。

2. 結果及說明：（略）

〔實驗六〕測量模型(E)的出水速率

1. 方法：

①橡皮管接水龍頭注水於給水槽，調節水量，並使其維持固定水位。

②待集水槽的出水口滴水後，開始每隔10分鐘測量一次出水量。

③將其中一個集水槽的通氣管口與出水管口封閉，重覆上述操作，並記錄其結果。

2. 結果及說明：（略）

〔實驗七〕模型(E)：流動的觀察

1. 方法：

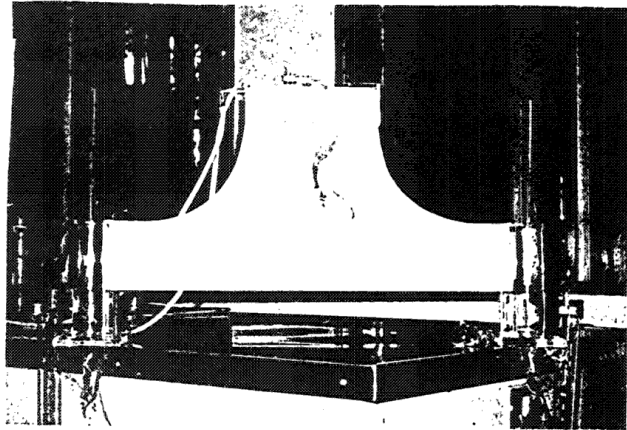
①橡皮管接水龍頭注水於長條形入水口的給水槽，並使其維持固定水位。

②注紅墨水於另一給水槽至適當高度。

③觀察其流線並測定出水量。

2. 結果：

①流線形成之情形，如下圖(三)



②出水量：（略）

〔實驗八〕模型(E)：關閉一邊的出水口對流線及出水量的影響

1. 方法：

①將其中一個集水槽的通氣管及出水管塞住。

②橡皮管接水龍頭注水於長條形入水口的給水槽，並使其維持固定水位。

③注紅墨水於另一給水槽至適當高度。

④觀察並記錄其流線及出水量。

2. 結果及說明：（略）

〔實驗九〕模型(E)：抽水對流線的影響

1. 方法：

- ①將其中一個集水槽的通氣管及出水管塞住。
- ②將另一集水槽的通氣管塞住，出水管接上Water Aspirator抽水。
- ③橡皮管接水龍頭注水於長條形入水口的給水槽，並使其維持固定水位。
- ④注紅墨水於另一給水槽至適當高度。
- ⑤觀察並記錄其流線的變化。

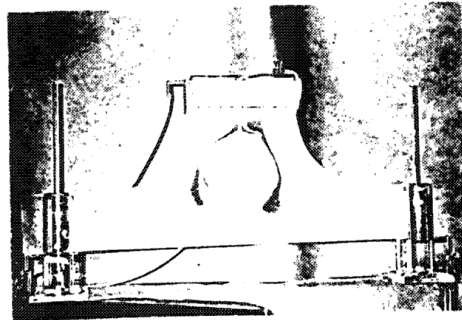
2. 結果及說明：（略）

〔實驗十〕模型(E)：障礙物對流線的影響

1. 方法：

- ①將集水槽的兩出水管口及一個通氣管口封閉，由另一個通氣管口注水，使裝置內產生一個大氣泡，再將所有管口打開。
- ②注水於長條形入水口的給水槽，並使其維持固定水位。
- ③注紅墨水於另一給水槽至適當高度。
- ④觀察並記錄其流線的變化。

2. 結果：如圖(四)



〔實驗十一〕模型(E)：模擬清除地下水的污染

1. 方法：

- ①利用抽水使裝置內流線混亂，並將紅墨水槽換裝清水。
- ②橡皮管接水龍頭注水於給水槽，使其維持固定水位。
- ③將第一個集水槽之出水管口封閉，並由上方通氣口注入清水至滿水位。
- ④將另一給水槽的出水管接上Water Aspirator抽水。
- ⑤觀察並記錄裝置內紅墨水的變化。
- ⑥將實驗(十)所得之流線，重覆上述操作。

2. 結果及說明：（略）

〔實驗十二〕模擬海水滲透

1. 方法：

(1) 模擬海水倒灌：

1. 使模型(E)內充滿清水。
2. 倒染紅的食鹽水(3%)於兩給水槽。
3. 觀察並記錄紅食鹽水流動的情形。

(2) 模擬海水入侵：

1. 使模型(E)內充滿清水。
2. 倒染紅的食鹽水(3%)於兩集水槽至滿。
3. 觀察並記錄紅食鹽水滲入模型的情形。
4. 注清水於兩給水槽。

2. 結果：(略)

3. 說明：

- (1) 紅食鹽水由給水槽如潑墨狀向下流動。
- (2) 紅食鹽水迅速推入模型內，同時沿模型邊緣之細管上升，後來由給水槽補注清水，則鹽水停止入滲，經過六個小時，鹽水、淡水形成清楚的分界面。

〔實驗十三〕 模擬地下水流動時的水位變化

1. 方法：

- (1) 沙箱模型主槽注水約1/5滿。
- (2) 放入礫石至主槽中。
- (3) 注水於給水槽，觀察測壓管的水位變化。
- (4) 停止注水，改由抽水槽抽水，觀察測壓管內的水位變化。
- (5) 將礫石換為白砂、泥土，重覆上述操作。

2. 結果：(略)

3. 說明：模型中放置礫石，注水或抽水時，各測壓管間水位無明顯差異，給水槽及抽水槽水位亦快速平衡，但換置白砂或泥土時則可明顯看到各測壓管間的水位由給水槽往抽水槽方向逐漸降低，即水位順著水流方向減少。另外，抽水水位降低的情形比注水顯著。

〔實驗十四〕 模擬地盤下陷

1. 方法：

- (1) 取長80cm，內徑7mm的玻璃管，底部包上紗布並以橡皮塞固定，垂直立於沙箱模型中。
- (2) 倒13公升的水於模型中，然後將砂樣加入模型中至滿。
- (3) 將0.5kg、1.0kg的重錘貼上刻度，分別置於砂面上，靜置24小時觀察其結

果。

(4)24小時以後，以水流抽氣裝置抽取6公升的水，抽水後一小時、三小時、六小時、十二小時、一天、二天、三天、四天、五天觀察其結果並記錄之。

(5)改變抽水量為3升，重覆上述操作。

2.結果：

3.說明：重錘重量愈大，抽水量愈多，則重錘下陷情形愈顯著。而其沉陷速率隨時間增長而漸趨緩和，最後終告停止。此外，重錘下陷情形遠比模擬的地層嚴重，而重錘愈近抽水處，下陷愈嚴重，且重錘會向抽水處傾斜。

六、討論

(一)本實驗的水流線模型是利用英國人Hele-Shaw所提出的「二片相距極近之平行板中黏滯液體的流動為一種二度空間勢能流」的原理而設計的。使入水口的位置高於出水口，利用高度差所造成的位能變化帶動水的流動。

(二)清水在模型中由高水頭向低水頭流動，但因其透明無色而難以觀察，故使用紅墨水追蹤劑。當清水由入水口進入模型中後，紅墨水則由入水口下方的入水孔進入模型中，同時被清水帶動，因此紅墨水所呈現的流線便是清水流動時的主要軌跡。

(三)使用Water Aspirator抽氣時，由於集水槽內的氣體壓力降低，使得給水槽及集水槽間的壓力差增加，因此加速了水的流動，造成流線的混亂。

(四)模型(E)的流線大部份偏向右邊，原因可能是製作模型時，左邊乳白的壓克力板磨得較細，黏貼後縫隙較窄，水流動時受到較大的摩擦阻力，造成左邊流速緩慢，所以流線趨向右方形成。

(五)本實驗的水流在兩片極近之平行板中進行，相當於水以緩慢的流速通過滲透性均勻之地層所形成的線流。抽水或水流經模型較寬處或大氣泡時，造成流線混亂，可說明水流經抽水井周圍或地層中較大之裂縫與溶解水脈，因流速加快所造成的亂流。

(六)由於紅墨水的密度較水大，且紅墨水的入水口較清水低，若兩給水槽水位均等高時，則紅墨水入水孔所受的壓力較清水入水口所受的壓力大，會使紅墨水流入的量過多，造成流線模糊不清，所以流線的粗細（紅墨水流入的多寡）決定於兩給水槽中清水與紅墨水的水位差。

(七)模型中紅墨水所形成的流線，時間愈久就愈明顯且形狀愈穩定，而這軌跡可能就是水流動時的主流。

(八)實驗(三)中，清水給水槽不定水位時，由於清水消耗得比紅墨水快，使清水與紅

墨水間的水位差減少，甚至清水面低於紅墨水面，致使紅墨水流線範圍變大而模糊。

- (f) 不定水位時，同一實驗中每次所測得之出水量十分不穩定，可能是因為水頭高度改變而影響水流速率所致。
- (g) 在實驗中可發現紅墨水於細管（模型邊緣的凹槽）中流動較快，可見水流在較寬的孔隙中流速較大。因此，沒有妥善處理的廢井裡面淤積較大顆粒的砂石時，污染物即容易經由廢井迅速滲入地層，污染含水層。
- (h) 模擬清除地下水污染的實驗中（實驗五、實驗十一）必須將給水槽中紅墨水改為清水，並在出水口處抽水以加速水的流動（清水注入好比一股推力而抽水為拉力），方可將紅墨水引出裝置。實驗(十一)中除了給水槽注入清水外，若由左方之集水槽抽水，則右方集水槽中原本注滿的清水也逐漸降至與左方集水槽之液面同高，顯示此處清水亦隨抽水作用被帶動，所以不斷增加此處清水，可加快紅墨水清除。若是有障礙物存在，則紅墨水因為水流沿障礙物流動，於是沿障礙物邊緣逐漸消失。但不論何種方法，要將紅墨水全部清除，至少都需要2個小時以上，可見欲清除地下水污染不但非常耗力並且費時。
- (i) 裝置中的角落如果有一部份紅墨水未完全清除，給水槽處又倒紅墨水從頭開始進行實驗，則角落的紅墨水在一段長時間後仍可被清除，但在模型邊緣沒有新的紅墨水流線形成，可說明邊緣仍有清水流動，但流動的力量並無法帶動紅墨水形成流線。
- (j) 模型(D)中，圍阻體附近的流線較細，可能是因為圍阻體存在而摩擦阻力增大水流速率減緩所致。
- (k) 模擬沿海地區海水倒灌的實驗，可說明由於海水密度大於淡水因此容易下滲至土壤中，使地下水鹽份劇增，土地鹽化。
- (l) 模擬海水入侵的實驗中，兩集水槽中的紅食鹽水因壓力差而流入模型而其與淡水間的密度梯度則造成擴散。當由給水槽補注淡水時，因給水槽淡水壓力大於集水槽中食鹽水壓力故食鹽水不再流入模型，且因其密度較大而逐漸下沉，最後與淡水達成平衡形成一近似凸透鏡狀的界面。
- (m) 實驗(十二)模擬海水入侵的部份，集水槽中紅食鹽水可經由模型邊緣的細管迅速上升至模型上方通氣處。由此可知，在鹽湖附近的土地或沿海地區，當鹽水滲到附近地層時，會沿土壤中孔隙較大處很快上升至地面，加以強烈日光蒸發水份而使土壤鹽化。
- (n) 在自然情況下地下水由高水位處往低水位處流，但受壓時會發生逆流的情形。例如由模型(D)之集水槽注水，由於水龍頭注水所產生的壓力相當大而使水及氣

泡由模型上方給水槽通氣處冒出。

- (六) 沙箱模型之主槽中放置白砂時，水流動緩慢，各測壓管所得之水位不同；而放置礫石時，水面卻快速平衡，顯示土壤粒徑較小，透水性較差，其原因可能是因為粒子愈小，水與粒子接觸的總表面積愈大，粒子表面對水分子的總吸引力較大，所以對水流之阻力大，因此水不易滲透。而水流線模型之兩夾板間縫隙如果愈窄時，對水流的摩擦阻力增大而使水流緩慢可用於模擬顆粒較細的土壤所構成之含水層內水流的情形。
- (七) 沙箱模型以白砂做水流水位實驗時，起初由於給水槽的水位較高，因此能流至主槽，但因水流路徑的增長而水與白砂摩擦所損耗的能量增加，致使離水頭愈遠的測壓管水位愈低。
- (八) 如果由沙箱模型之抽水槽抽水，可使其與給水槽間的水力梯度力加大而加速水的流動。
- (九) 實驗(十四)中，大量抽水時，測壓管的水位迅速下降，以致主槽中的土壤因脫水而造成壓密沉陷的現象，即為地盤下陷。
- (十) 由主槽中抽水時，抽水處壓力驟減，其他部份的水流過來補充時摩擦損失能量因此水位往抽水處降低，於是形成所謂的洩降錐。
- (十一) 水流線模型封閉部份相當於地層中的不透水層，而模型上方沒有封閉受大氣壓力作用，因此整個模型可模擬飽和層中的水流。
- (十二) 由於地下水流緩慢，所以地下水之污染從種因至結果往往需甚長的時間，因此發生污染之初期容易為人所忽略，及至發現問題時常已十分嚴重，補救極為困難。由文獻得知地下水污染主要原因有：1.地下水超抽2.工礦業廢水污染3.農業化學品污染4.都市廢物污染。
- (十三) 本實驗之水流線模型，最初得自Hele-Shaw黏滯液體模型的靈感，從黏貼夾層的方式至以砂紙磨出凹槽，並不斷改良入水方式以期有更清楚的流線，歷經半年，嘗試許多失敗後，終於製作出目前兩個效果較佳之模型。

七、結論

- (一) 水流線模型的實驗中，水流由上方之入水口流至下方之出水口。如果流線形狀沒有變化，則出水量穩定；流線形狀明顯改變，則出水量不穩定；而抽水對流線的影響最為顯著。
- (二) 水流會繞過圍阻體或沿障礙物邊緣形成。孔隙較小處水流較緩慢，而在細管（模型邊緣的凹槽）中則水流速率較大。
- (三) 水流線模型可說明的地下水流現象主要的有：1.飽和層中的水由高水頭向低水頭流

動。2.地下水流動時受地層組織之影響改變流向及流速。3.地下水會繞不透水性物質流動。4.地下水緩慢流過滲透性均勻之地層時形成穩定的線流。5.抽水井附近地下水流為亂流。6.地下水流受污染後，污染物不易排除。

- (四) 清洗實驗裝置內的紅墨水，必須先將紅墨水槽換裝清水，以抽水的方式加速裝置內的紅墨水流向出水口。此實驗顯示驅除地下水的污染時，先要阻止污染物繼續入侵含水層（去除紅墨水源），然後圍堵污染水體（模型四周相當於不透水層）。由高水頭補注大量清水，從低水頭抽水改變地下存在之污染群的流動方向並將其抽出。如此不斷清洗此含水層，長久下來，方可恢復此含水層原來的性能。
- (五) 模型(E) 模擬海水入侵之實驗可得到食鹽水與淡水間凸透鏡狀界面，說明在海島或半島下方含水層與附近海水達靜力平衡時，淡水體形成一凸透鏡狀形態。
- (六) 沙箱模型模擬地下水流動時的水位變化，可說明離水頭愈遠，則水位愈低，以及抽水井附近形成洩降錐的情形。
- (七) 由模擬地盤下陷實驗得知，下壓重量愈大，抽水量愈多，則地盤下陷情形愈顯著。
- (八) 本實驗是利用簡單的器材與基本的物理觀念，製作模型來模擬地下水的各種流線與地下水流動時水位的變化情形，並可說明水壩的構築原理、地下水人工補助、地盤下降、海水入侵及毛細作用等，也可應用於地下水污染的改善研究。

八、參考資料

- (一) 石再添(1981)：河流與地下水，幼獅文化事業公司，第83～87頁。
- (二) 李伯當等(1992)：北港地區地下水鹽化之研究，鑛冶，第三十六卷，第四期，第103頁。
- (三) 曹以松(1989)：地下水，中國土木水利工程學會，第17～18頁，第177～180頁。

評語

實驗器具頗為精細，實驗過程顯而易見，可惜未能作更為接近自然事實的模擬。