

災害目標之地下水管理策略

A Groundwater Management Strategy by Disaster Objective

國立屏東技術學院土木工程技術系講師

國立台灣大學農業工程學系副教授

葉 一 隆

蘇 明 道

摘 要

地下水資源之利用是國土資源利用之重要一環，但不合理的開發利用所造成之災害損失往往難以計算。諸如：超抽地下水所引起之地盤下陷，海水入侵等災害，往往難以補救而恢復國土之原貌。若欲加以阻止災害之惡化，則非短時間可完成；因此，建立“用水付費”與“國土保育”之觀念實刻不容緩。

地下水資源開發利用之使用者付費不應單從用水量之多寡來評定，因地下水之抽用將對含水層造成影響，故用水者之付費除應考慮用水量外尚需考慮對含水層之效應。本文探討三種不同標的用水之抽水所造成之地下水位洩降量，並分別以抽水量、地層下陷之責任分擔與併合抽水量及地層下陷之責任分擔為目標之管理方式來探討各標的抽水對含水量影響所應負擔之責任，依此可建立國土資源受破壞時之責任分擔關係，並提供行政單位為地下水資源保育管理之基金建立參考。

關鍵詞：地盤下陷，災害標的，非拘陷含水層。

ABSTRACT

The management of groundwater use is an important aspect of national resources management. The disaster from over-pumping the groundwater, e.g. land subsidence and seawater intrusion, once occur, are very difficult to recover. Therefore, to establish the concept of "user feed" and "national resources conservation" are very important. Once the adverse effects occur from groundwater pumping, the damage needs to be allocated to each user and charge them for the recovery of the environment. Quantity is not the sole factor to be considered in deciding how much the users should be charged for their use of groundwater. Because different groundwater pumping scale imposes different effects on the aquifer, the responsibility for each user should be estimated on how much they pump as well as what the impact this pumping induce. This paper presents approaches to allocate responsibility in a multi-users groundwater pumping scenario, i.e. municipal, agriculture, and aquiculture.

Keywords: Land subsidence, Disaster objective, Unconfined aquifer.

一、前 言

台灣地區年平均降雨量達2300mm，但因社會

發展後對水資源之需求日愈增加，及降雨之時間與空間之分配不均，使得旱季時水源不足；因此，地下水便成爲一補助之水源。另外，有些區域因無完

整之供水系統，而以地下水為主要水源。但無論何種因素抽用地下水，均會造成地下水位之洩降，而超量之抽水或地下水井之安排不當之抽水更會造成地盤下陷、海水入侵及土壤鹽化等災害〔1, 2, 3, 4〕。然而此種災害均非立即反應，需等待相當時間後才會緩慢顯現，而此時再探討防範之道與其應負擔之責任將為時已晚。為期使水文地質災害能建立完整之預警系統，對水文地質資料庫之建立相當重要〔5〕。再依此資料庫所提供之資訊規劃管理策略，俾能建立合理公平之地下水資源使用管理政策。

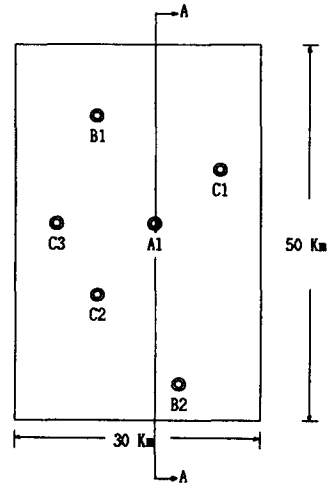
近年來，由於抽用地下水資源之標的不同，而造成各種紛爭〔6〕。其原因除地下水容易取得外，其次為地下水之抽用除了付抽水機之電費外，無需再付任何費用，但因抽水量與抽水所造成之地下水位洩降量並非線性關係，故此種付費方式無法含括抽水所造成地質災害成本，另地質災害發生後亦難以分擔各標之抽水責任。本文係探討一區域有三種不同標之抽水所造成之地盤下陷情形，分別以抽水量、地層下陷之責任分擔與併合抽水量及地層下陷之責任分擔為目標之管理方式來探討各標的抽水對含水層影響所應負擔之責任，以期建立考慮含水層效應之地質災害責任分擔模式。

二、研究區域

本文所探討之區域為一長50公里，寬30公里之矩形區域，四週之水力水頭（Hydraulic Head）為定值，其值以粘土層上方為基準點，距基準點20公尺，且其地質條件假設為均質（Homogeneous）且具等向性（Isotropic），其水力傳導係數（Hydraulic conductivity）為30公尺/天，並假設地下水流滿足達西定律（Darcy's Law）及杜普假說（Dupuit Assumptios）。

此區域之三標抽水標的其抽水井位置分別為：標的A於（15Km, 25Km）處，抽水量為5000.0立方公尺/天；標的B於（10Km, 40Km）與（20Km, 10Km）兩處，其抽水量分別為2000.0立方公尺/天與1500.0立方公尺/天；標的C於（25Km, 35Km），（10Km, 15Km）與（5Km, 25Km）三處，其抽水量分別為2000.0立方公尺/天，3000.0

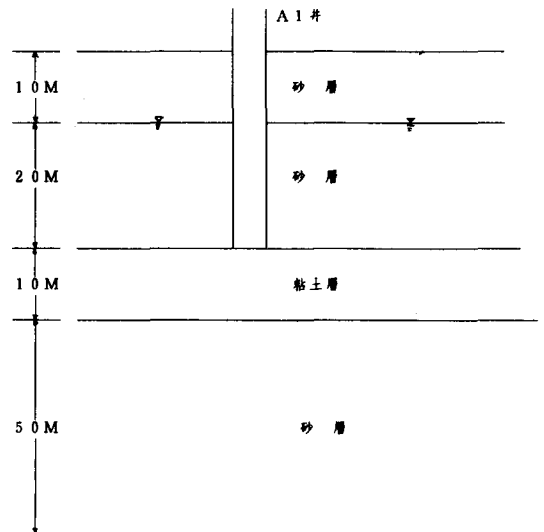
立方公尺/天與2000.0立方公尺/天（如表一與圖一所示），而垂直方向之水文地質條件如圖二與表二所示。



圖一 各抽水標的之抽水井位置圖

表一 各抽水標的之抽水量與抽水井座標

抽水標的	A		B		C		
總抽水量 (M ³ /day)	5000		3500		7000		
抽水井編號	A1	B1	B2	C1	C2	C3	
抽水井位置(x,y)(Km)	15,25	10,40	20,10	25,35	10,15	5,25	
各抽水井抽水量(M ³ /day)	5000	2000	1500	2000	3000	2000	



圖二 A-A剖面圖

表二 砂層與粘土層之物理性質

項 目	砂 層	粘 土 層
孔隙率	30%	40%
地下水位上之體積含水量	10%	
地下水位下之體積含水量	30%	40%
固體顆粒之密度	2.6g/cm ³	2.7g/cm ³
壓縮係數 (Cu)	0.01	0.2

三、地下水流數值模式

在均質且具等向性之非拘限含水層 (Unconfined Aquifer)，源或匯 (Source or Sink) 達穩態 (Steady State) 時，其地下水流控制方程式為 [7]

$$\nabla (K \nabla (h^2)) = -2R \quad (1)$$

其中

K 為水力傳導係數 (Hydraulic conductivity) (L/T)，

H 為水力水頭 (Hydraulic Head) (L)，

R 為源或匯 (Source or Sink) (L/T)。

本為將研究區域分成 31X51 之格網分佈，即 $\Delta X = \Delta Y = 1\text{Km}$ ；而差分方程式之建立係採用中央差分法，在疊代過程中為加速收斂，本文採 SOR 方式來進行疊代，其權重 (Weighting Factor) 採用 $W = 1.7$ 。

令 $V = h^2$ ，則式(1)化為

$$\nabla (K \nabla (V)) = -2R \quad (2)$$

而 $R = Q / (\Delta X * \Delta Y)$ ，其中 Q 為抽水率 (L³ / T)。

將式 (2) 化成差分式為

$$V(i, j) = 0.25 * (V(i+1, j) + V(i-1, j) + V(i, j+1) + V(i, j-1)) + 2R * (\Delta X) * (\Delta Y) / K \quad (3)$$

而疊代採

$$V(i, j, n) = W * V(i, j, n) + (1-W) * V(i, j, n-1) \quad (4)$$

利用式 (3) 與式 (4) 來模擬各抽水標的單獨抽水與聯合抽水之地下水位洩降情形，各種抽水結果之等地下水位線示於圖三至圖六，而各抽水情形之全區地下水位洩降總體積示於表三。

四、地盤下陷模式

地盤下陷之發生是由於地下水被抽取量超過安全出水量 (Safe Yield) 致使孔隙介質內之孔隙水壓減小，而使孔隙介質顆粒產生壓密 (Consolidation) 而產生地盤下陷。

超抽地下水與地盤下陷關係之理論有多種 [8, 9]，本文主要在利用地下水被抽取後，假設孔隙介質長期處於此時之地下水位，所可能引發之地盤下陷量，為簡化問題之描述，本文採用對數理論 (Logarithmic Theory) 地盤下陷模式 [10]，即

表三 各標的抽水之抽水量與洩降量

抽水標的	抽水量 (M ³ / day)	抽水百分比 (%)	抽水造成全區洩降量總體積 *10 ⁶ (M ³)
A	5000	32.26	247.36
B	3500	22.58	112.16
C	7000	45.16	223.05
A B C	15500	100.00	602.65

$$S_u = Z * [C_c / (e+1)] * \text{Log} [P_a / P_b] = Z * C_u * \text{Log} [P_a / P_b] \quad (5)$$

其中

S_u = 地盤下陷量 [L]

Z = 壓縮前土層厚度 [L]

C_c = 無因次係數

e = 抽水前之土壤孔隙比

P_b = 抽水前之土壤有效應力 [F/L²]

P_a = 抽水後之土壤有效應力 [F/L²]

$C_u = C_c / (e+1)$ = 壓縮係數

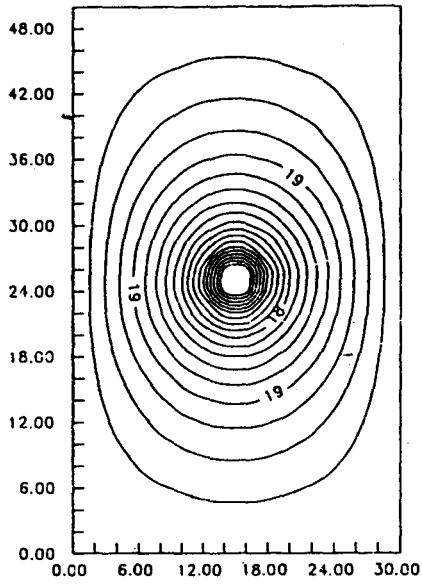
而 $P_i = P_t - P_h$

其中

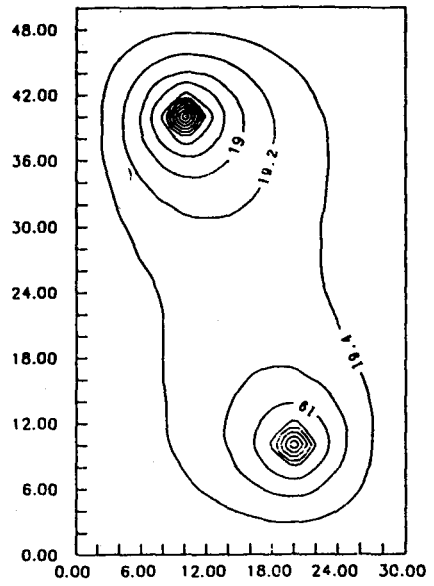
P_t = 總壓力

P_h = 孔隙水壓力 (Pore Water Pressure) [F/L²]

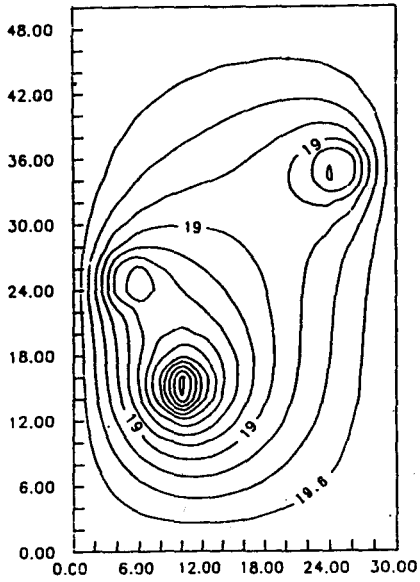
利用本模式所得名單獨抽水標的與聯合抽水標的之等地盤下陷量，分別示於圖七至圖十。而各標的抽水所造成之總地盤下陷體積分別列於表四。



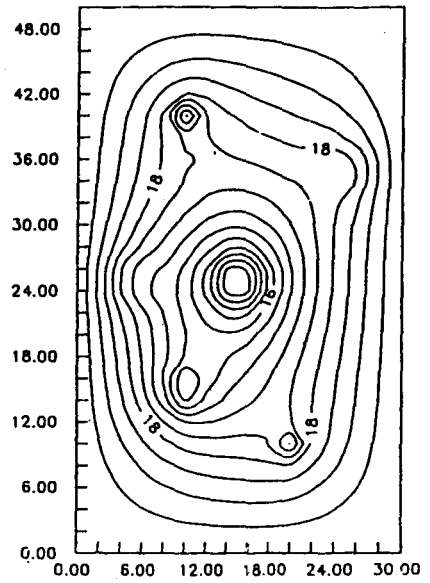
圖三 抽水標的A之等地下水位線



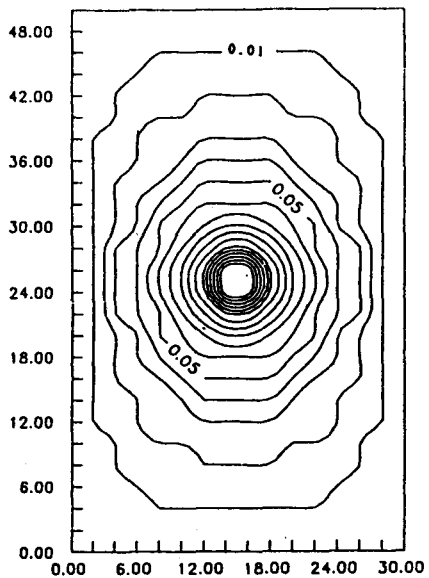
圖四 抽水標的B之等地下水位線



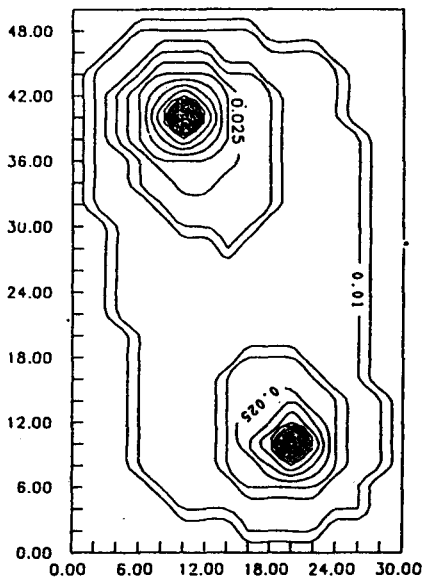
圖五 抽水標的C之等地下水位線



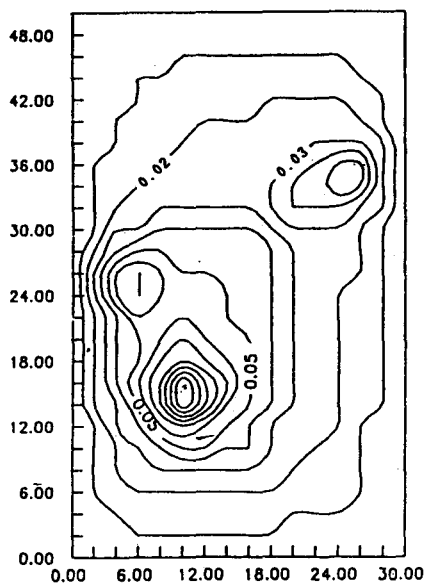
圖六 抽水標的ABC之等地下水位線



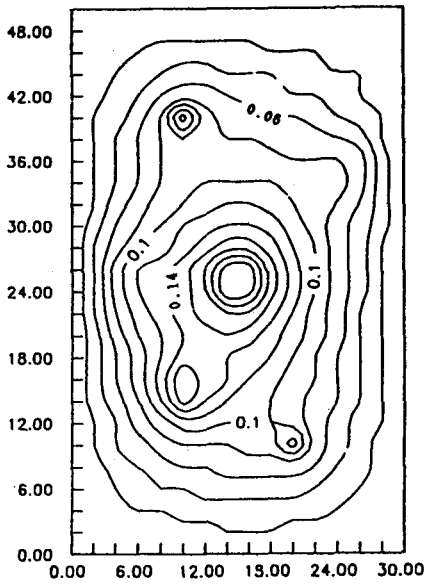
圖七 抽水標的A所產生之等地盤下陷量線



圖八 抽水標的B所產生之等地盤下陷量線



圖九 抽水標的C所產生之等地盤下陷量線



圖十 抽水標的ABC所產生之等地盤下陷量線

表四 各標的抽水所造成之總地盤下陷體積

抽水標的	非拘限含水層之 總地盤下陷體積 *10 ⁶ (M ³)	全部地層之總 地盤下陷體積 *10 ⁶ (M ³)
A	4.5600	37.7399
B	0.7500	16.8801
C	4.3800	34.1701
A B C	12.9201	91.3399

五、地下水管理策略

為提供行政單位建立使用地下水資源用者付費之目標，以對區域性地下水資源得以合理開發及管理，本文提出以抽水所造成之災害預防做為地下水資源管理之策略，在此所討論之災害標準以地盤下陷為主。又地下水流與地盤下陷均非線性關係，故對抽水所造成地質災害之責任分擔並無法以線性處理。

本文主要對不同標的抽水時所造成之地盤下陷量來探討其應負擔責任，而不論該地盤下陷是否已發生。若該地下水流域地盤下陷已發生，則本管理策略可提供責任分擔之模式，若地質災害未發生，則可提供用水付費之收費架構。假設該區域之抽水係有組織及計畫之抽用，而該區域為避免地質災害之發生，需建立監測系統，其所需費用為M，或該區域已發生地質災害，而為處理該地質災害所需費用為M，則各抽水標的應負擔之責任分配方式如下：

方法一：以抽水量分配責任

$$\text{各抽水標的之付擔責任} = M * \frac{\text{各標的之抽水量}}{\text{總抽水量}} \quad (6)$$

方法二：以地盤下陷量來分配責任

$$\text{各抽水標的之付擔責任} = M * \frac{\text{各標的單獨抽水所產生之總地盤下陷體積}}{\text{各標的聯合抽水所產生之總地盤下陷體積之總合}} \quad (7)$$

方法三：以抽水量及地盤下陷量來分配責任

各抽水標的之付擔責任 = M * [各標的單獨抽水所產生之總地盤下陷體積 + ($\frac{\text{單一標的抽水量}}{\text{總抽水量}}$) * (各標的聯合抽水所產生之總地盤下陷體積 - 各標的單獨抽水所產生之總地盤下陷體積)] / (各標的聯合抽水所產生之總地盤下陷體積) (8)

各標的抽水之責任分配結果如表五。

各標的抽水之責任分配結果如表五。

表五 各標的抽水之責任分擔百分比

方法別	標的A	標的B	標的C
一	32.26%	22.58%	45.16%
二	42.50%	19.01%	38.48%
三	42.22%	19.11%	38.67%

茲以一區域之地下水資源開發為例，為避免地下水超抽而需建立監測井網，其所需之費用為30,000,000元，該區域之用水標的有三種，各標的之用水量及水井之配置如圖一及圖二，含水層之物理性質如表二，則依上述之責任分擔方式，各標的所需負擔之費用分別為：

(1)標的A：

$$(I) MA1 = 30,000,000 * (5,000/15,500) = 9,677,419.4元$$

$$(II) MA2 = 30,000,000 * [37.7399 * 10^6 / (37.7399 + 16.8801 + 34.1701) * 10^6] = 12,751,387.9元$$

$$(III) MA3 = 30,000,000 * [37.7399 + (5,000/15,500) * (91.3399 - (37.7399 + 16.8801 + 34.1701))] * 10^6 / 91.3399 * 10^6 = 12,665,576.4元$$

(2)標的B：

$$(I) MB1 = 30,000,000 * (3,500/15,500) = 6,774,193.5元$$

$$(II) MB2 = 30,000,000 * [16.8801 * 10^6 / (37.7399 + 16.8801 + 34.1701) * 10^6] = 5,703,372.3元$$

$$(III) MB3 = 30,000,000 * [16.8801 + (3,500/15,500) * (91.3399 - (37.7399 + 16.8801 + 34.1701))] * 10^6 / 91.3399 * 10^6 = 5,733,264.9元$$

③標的C：

$$(I) MC1 = 30,000,000 * (7,000/15,500) \\ = 13,548,387.1元$$

$$(II) MC2 = 30,000,000 * [34.1701 * 10^6 / \\ (37.7399 + 16.8801 + 34.1701) * 10^6] \\ = 11,545,239.8元$$

$$(III) MC3 = 30,000,000 * [34.1701 + (7,000 / \\ 15,500) * (91.3399 - (37.7399 + \\ 16.8801 + 34.1701))] * 10^6 / 91.3399 * \\ 10^6 = 11,601,158.7元$$

六、結 論

由本研究得知，依抽水量之多寡來分擔超抽地下水所造成之地質災害責任，則標的A之負擔責任比標的C為大，但對地下水之管理不應祇考慮抽水量之多寡，而需考量分散抽水者所額外支付之設備成本及供水之設施成本，故對地下水超抽所引發之地質災害責任分擔除應考量抽水量外，尚需考慮抽水對含水層所造成之效應，如：標的C之抽水量比標的A為大，但因標的C係分散抽水，故其分擔成本比標的A為小。因此建議，同一標的固定抽水量之抽水，為減少某點之大量地下水位洩降，應考慮將抽水井分散設置。

七、參考文獻

1. 楊基生，1977，台北盆地地盤下陷調查與分析，
土木水利，Vol.4，No.3，p.92-104.

2. 台灣省水利局規劃總隊，1987，雲林地區地盤下陷檢測報告，63pp.
3. 簡錦樹等，1989，海水養殖對地下水及土壤鹽化之研究，行政院環境保護署研究報告，民國78年4月。
4. Polan, Joseph T., 1984, Guidebook to studies of land subsidence due to ground water withdrawal, Prepared for the International Hydrological Programme, working Group 8.4, 305pp.
5. 葉一隆，1991，地下水資訊系統之資料庫規劃研究，技術學刊，第六卷，第四期，p.305-308.
6. 丁澈士，蘇明道，蔡光榮，葉一隆，1990，新園地區自來水設施損害鑑定評估--地下水位變化評估，台灣省自來水股份有限公司，pp.150。
7. Bear, Jacob, 1979, Hydraulics of Groundwater, McGraw-Hill, Inc, 567pp.
8. 施清吉，1976，地盤下陷與超額地下水抽取量間之關係分析，中國土木水利工程學會會刊，Vol.3, No. 2, p.1-16.
9. 劉德壽，1978，台北盆地地層下陷特性與預估以及抑止下陷措施之探討，台灣水利，第二十六卷，第三期，p.32-46.
10. Bouwer, Herman, 1978, Groundwater Hydrology, McGraw-Hill, Inc., p.313-p.338.

收稿日期：民國82年4月13日

修正日期：民國82年9月29日

接受日期：民國82年10月9日

專營土木、水利、建築等工程

柏盛營造有限公司

負責人：陳良盛

地址：桃園市福山街176巷11號

電話：(03)3267777-8