河畔取水引致河川渗漏量之研究

Evaluation of Stream Depletion Caused by Pumping

國立成功大學 資源工程研究所 博士生 國立成功大學 資源工程研究所 博士生 國立成功大學 資源工程研究所 碩士生 國立成功大學 資源工程研究所 教授

謝壇煌

皇 陳忠偉

Hsun-Huang Hsieh Jung-Wei Chen

Ching-Lin Sue

蘇清林

Cheng-Haw Lee

変 振 誥*

摘 要

本研究以彰化快官與貓羅溪河畔爲研究範圍,以 MODFLOW 與四種解析解進行 模式建立與驗證。利用率定後之河畔取水模式,分別對水文地質參數與抽水井型式 進行參數敏感性分析,評估各項因子對河川滲漏量之影響。

由水文地質參數敏感性分析成果顯示,河川型式、河川底部透水係數、水平透 水係數和地下水位與河川水位差等四個參數,為影響模式之重要因子。由數值模式 推估含水層出水量增加時,河川滲漏量與地下水位洩降則呈現正相關。由水井型式 分析顯示,井徑增加對河川滲漏量影響並不大,但可降低井內地下水位洩降,抽水 井與河川距離越大則河川滲漏比小幅度降低。

關鍵詞:河畔取水,河川滲漏量,MODFLOW。

ABSTRACT

The area of this research is located an intersection in Kuai-guan and Mao-luo Stream. Building and calibration the model of pumping nearby stream were proceeded by MODFLOW and four analytical solutions. The parameter sensitivity analysis of hydrogeological parameters and pumping well types would evaluate the effects on stream depletion caused from each factor.

The hydrogeological parameters sensitivity analysis showed that the four parameters including the stream type, the hydraulic conductivity of riverbed, the horizontal hydraulic conductivity of an aquifer and the difference between groundwater and stream level were the important factors. The simulation model showed that when discharge of an aquifer

^{*}通訊作者,國立成功大學資源工程研究所教授,701台南市東區大學路1號,Leech@mail.ncku.edu.tw

increased, the stream depletion and the drawdown of groundwater table would be increased. The well type analysis showed that the increased well diameter will not influence the stream depletion, but reduce the drawdown of groundwater table in the well. If the longer distance from the pumping well to the stream, then the stream depletion will be smaller.

Keywords: Pumping nearby stream, Stream depletion, MODFLOW.



由於臺灣地勢陡峭造成河川短促,水源涵養 不易,降雨大都經由地表逕流至海洋。若於河畔 地區開發水源,可對河川逕流產生間接截留,且 含水層具河川補注條件,可降低開發地下水對地 層產生之不良之影響。彰化地區無地表蓄水設 施,民生與工業用水皆仰賴地下水與外來水源供 應,為提高自有水源供應量,本研究提出河畔取 水模式,以快官與貓羅溪河畔爲研究範圍,進行 河畔取水對河川滲漏量之影響進行評估。

一般推估河川滲漏量方式,概分為解析與數 值模式。解析模式由 Theis (1941)與 Glover and Balmer (1954)提出於非拘限含水層中,河川完全 貫穿含水層並以完整并方式取水,應用重疊理論 推求河川滲漏量與取水量之比值。Hantush (1965) 與 Jenkins (1968)假設當河川與含水層系統中存 在低滲透性土層,該土層造成河川與含水層間不 完整水力連結。Grigoryev (1957)與 Bochever (1966)探討當河川為部份貫穿含水層時,進行河 畔取水所引致之河川滲漏量推估。

Wilson (1993)假設當河川完全貫穿含水層, 並與含水層間具有良好水力連結,且含水層具側 向補注,探討河畔取水時,邊界條件對河川滲漏 量之影響並提出解析公式。Hunt (1999)應用 Hantush (1965)之解析公式,探討部分貫穿含水層 之河川與低滲透性河床之情況下,進行河川滲漏 量推估,並提出含水層內各點地下水位洩降量之 解析解。Chen and Yin (2004)以 Hunt (1999)提出 之解析解,針對含水層補注河川型式,在水頭差 已知條件下,分別推估抽水所引致河川滲漏量及 河川基流減少量,由研究成果顯示,河川基流減 少量與河床滲漏量及抽水井至河川距離成正 比,而抽水所引致河川之滲漏量則與河床滲漏量 與抽水井至河川距離成反比。

在利用數值方法進行地下水與河水關聯分 析之研究方面,大多為針對較複雜之現場情況進 行模擬,一般包含部分貫穿含水層之河川類型、 非完整井型式、含水層具異向性或不規則河床類 型等。Butler et al. (2001)利用地下水流數值軟體 MODFLOW,將含水層概分為七層,其模擬結果 與 Glover and Balmer (1954)之解析解擬合良好。 Chen and Chen (2003)利用 MODFLOW 分析含水 層具異向性時,河川水向抽水井運移過程,利用 MODPATH 模組紀錄水分子之移動過程。由研究 成果顯示,當水平透水係數與垂直透水係數之比 值(K_h/K_z)介於10至20,河川滲漏量比高於K_h/K_z 小於10或大於20時,而當K_b/K_c介於20至100之 間時,水分子到達抽水井所需時間,較其他情形 為短。Matteo and Dragoni (2005)利用 MODFLOW 建立水文地質模式,較 Bulter et al. (2001)增加考 慮含水層補注河川之側向補注量,以及井篩頂部 至河床之距離,提出於異向性含水層中取水之經 驗公式。

本研究以彰化快官與貓羅溪河畔為研究範 圍,首先分別以數值模式 MODFLOW 建構 Grigoryev (1957)、Hantush (1965)、Wilson (1993) 與 Hunt (1999)等四種解析模式進行驗證, MODFLOW 與 Grigoryev (1957)之模式驗證以 Butler (2001)模式進行,MODFLOW 與 Hantush (1965)、Wilson (1993)與 Hunt (1999)等模式驗證 則以 Matteo (2005)模式進行。待模式驗證完成 後,本研究利用 MODFLOW 建立研究範圍之河 畔取水模式,並對水文地質參數與抽水井型式進



行敏感性分析,評估河畔取水模式各項因子對河 川滲漏量之影響,研究流程示於圖1。

二、模式介紹與驗證

2.1 數值模式介紹

本研究數值模式採用 PROCESSING MODFLOW5.06,此套軟體是依據美國地質調查 所(U.S.G.S.)之 MODFLOW (McDonald & Harbaugh, 1988)⁽¹³⁾地下水流模擬程式再行研發之軟體。 MODFLOW 之地下水流控制方程式爲假設在固 定密度下,含水層三維地下水流的流動控制方程 式示於式(1)。

其中 K_{xx}、K_{yy}和 K_{zz}為分別為沿著 x,y,z 方向上 的透水係數[LT⁻¹];h:水頭[L];W:水之流入或 流出單位體積流通量[T⁻¹];S_s:比貯水率[L⁻¹];t: 時間[T]。由式(1)結合有限差分法、反向差分法 及迭代運算技巧,可推算得 MODFLOW 模擬地 下水流之基本控制方程式之解。本研究將利用 MODFLOW 地下水流數值軟體,建構研究區域之 河畔取水模式,分析各水文地質因子與抽水井型 式對河川滲漏量之影響。

2.2 解析模式介紹

為驗證數值模式之可靠性,本研究利用地下 水流數值軟體 MODFLOW,分別建構 Grigoryev (1957)、Hantush(1965)、Wilson (1993)與 Hunt (1999)等四種解析模式以進行驗證,驗證模型之 邊界與初始條件設定為分別參考 Butler (2001)與 Matteo (2005)模式,各解析模式之邊界與初始條 件示於圖 2,各解析模式分別介紹如下。

2.2.1 Grigoryev (1957)模式介紹

模式 I 為 Grigoryev (1957)、Bochever (1966) 與 Butler et al. (2001)分別提出探討河川水與地下 水關聯性之解析模式,含水層與抽水井之設定與 Hantush (1965)和 Jenkins (1968)之假設相同,含水 層與河川間亦存在隔水邊界條件,差異性在於河 川僅為部份貫穿含水層,且模擬邊界設定 y 軸為 無限域邊界,x 軸為有限域邊界,在初始無水位 洩降之情況下,推估因抽水所引致之河川滲漏 量,解析公式示於式 2,模式邊界與初始條件示 於圖 2 (A)。

式中 q_s 為河川滲漏量(L³T⁻¹),Q為抽水量(L³T⁻¹), K′為河床透水係數(LT⁻¹),b′為河床厚度(L),w為河川寬度(L),s為抽水後產生之洩降(L)。

2.2.2 Hantush (1965)模式介紹

模式II為 Hantush (1965)與 Jenkins (1968)提 出,假設含水層在透水係數為均質等向,初始無 水位洩降,含水層為水平且邊界為雙無限域之條 件下,河川完全貫穿含水層,河川與含水層間存 在低滲透性土層,以完整井進行抽水,推估因抽 水所引致之河川滲漏量之解析公式示於式(3),模 式邊界與初始條件示於圖 2 (B)。



圖 2 解析模式之邊界與初始條件設定

上式中 $L = \frac{K}{K'}b'$

式中 q_s 為河川滲漏量(L³T⁻¹), Q 為抽水量 (L³T⁻¹), S 為儲水係數, d 為抽水井至河川之距離 (L), T 為導水係數(L²T⁻¹), L 為河床滲漏參數(L), t 為抽水時間(T), K 為透水係數(L T⁻¹), K 為河床 透水係數(L T⁻¹), b 為河床厚度(L)。

2.2.3 Wilson (1993)模式介紹

模式 III 為 Wilson (1993)假設河川係為完全 貫穿含水層,抽水井為完整井形式,與模式 I、II 之差異性為含水層與河川間無低滲透性土層,含 水層具側向補注,探討河畔取水模式邊界條件對 河川滲漏量之影響,並提出解析公式推估河川滲 漏量,其解析公式示於式 4,模式邊界與初始條 件示於圖 2 (C)。

$$\frac{qs}{Q} = \frac{2}{\pi} \left(\frac{-(\beta - 1)^{0.5}}{\beta} + \tan^{-1}(\beta - 1)^{0.5} \right) \dots \dots (4)$$

上式中 $\beta = \frac{Q}{\pi q_u d}$

式中 q_s 為河川滲漏量(L³T⁻¹), Q 為抽水量 (L³T⁻¹), β 為抽水率, q_u 為含水層側向補注量 (L³T⁻¹), d 為抽水井至河川之距離(L)。

2.2.4 Hunt (1999)模式介紹

模式 IV 為 Hunt (1999)應用 Hantush (1965) 與 Jenkins (1968)之解析公式提出,與其他模式之 差異性在於其考慮河川為部分貫穿含水層,以河 川寬度、河川底部低滲透土層厚度與透水係數, 以河床抗阻係數描述河床性質,其解析公式示於 式5,模式邊界與初始條件示於圖2(D)。

上式中 $\lambda = \frac{w}{h'}K'$

式中 qs 為河川滲漏量(L³T⁻¹),Q 為抽水量 (L³T⁻¹),S 為儲水係數,d 為抽水井至河川之距離 (L),T 為導水係數(L²T⁻¹), λ 為河床抗阻係數 (LT⁻¹),t 為抽水時間(T),w 為河川寬度(L),K'為河床透水係數(LT⁻¹),b'為河床厚度(L)。

2.3 解析與數值模式驗證

模式 I 爲參考 Butler (2001)模式設定示於

參數項目	參數值	單位	參數項目	參數值	單位
透水係數	50	md ⁻¹	河川寬度	10	m
河床透水係數	4	md ⁻¹	河川深度	30	m
儲水係數	0.3	1	河川水位	28	m
初始地下水位	28	m	含水层侧向補注	0.0005	md ⁻¹
含水层厚度	30	m	抽水時間	30	day
河床底部厚度	1	m	抽水量	1,000	CMD

表1 解析與數值模式水文地質參數表



圖 3(a)。數值模式之南北邊界假設為定水頭邊 界,東西邊界假設為零流量邊界,模擬範圍為 1,010m×2,000m,單一網格大小為 10m×10m,模 式網格總共為 20,200 個,邊界與網格設定示於 圖 3(b)。四組解析公式之各項水文地質參數示於 表 1。

模式 II、III 與 IV 則參考 Matteo (2005)模式 設定示於圖 4(a)。假設模式之東西側邊界與河川 出入口端假設為定水頭邊界,南北邊界假設為零 流量邊界,模擬範圍為 2,010m×2,000m,單一網 格大小為 10m×10m,假設抽水井為為完整井,距 離河川 10 公尺處,數值模式模式範圍與邊界設 定示於圖 4(b)。

將表1中各項水文地質參數代入四組解析公式,再利用 MODFLOW 建構各解析模式之初始 與邊界條件設定,由數值模式之水平衡分析推求 河川滲漏量(q_s)。本研究以相對誤差顯示驗證成 果,相對誤差值越小,表示解析與數值模式驗證

表 2 解析與數值模式驗證結果

模		MODFLOW 推估		解析公式推估		相對
式編號	作者	q _s (CMD)	q₅⁄Q (%)	q _s (CMD)	q _s /Q (%)	誤差 (%)
Ι	Grigoryev (1957)	37.4	3.74	37.38	3.738	0.05
Π	Hantush (1965)	210.6	21.06	210.1	21.01	0.24
III	Wilson (1993)	352.7	35.27	353.1	35.31	0.11
IV	Hunt (1999)	30	3.0	30.2	3.02	0.66



圖 4 Matteo (2005)解析與數值模式示意圖

良好,驗證結果示於表 2。由表 2 中顯示數值與 解析模式相對誤差為 0.05%至 0.66%,顯示地下 水流數值軟體 MODFLOW 可正確模擬河畔取水 之解析模式。

模式 I 與 IV 為河川部分貫穿含水層形式,推 估其河川滲漏量(q_s)分別為 37.4 CMD 與 30 CMD, 河川滲漏比(q_s/Q)分別為 3.7%與 3.0%。模式 II



圖 5 烏溪水系與研究位置圖(資料來源:經濟部水利署,2006)

為河川完全貫穿含水層形式,河川與含水層間存 在低滲透水性土層,推估其q_s為210.6 CMD,q_s/Q 為21.06%。模式 III 為河川完全貫穿含水層形 式,河川與含水層間並無低滲透性土層,由 MODFLOW 推估抽水所引致河川滲漏量(q_s)為 352.7 CMD,其與抽水量(Q)之比值(q_s/Q)為 35.27%。

由模式 I、II 與 IV 推估成果顯示,在河川假 設是否完全貫穿含水層條件下,部分貫穿含水層 相較於完全貫穿含水層,其 q_s/Q 降低約 17.32% 與 18.06%。由模式 II 與模式 III 推估成果顯示, 在河川完全貫穿含水層假設條件下,河川與含水 層間存在低滲透性土層相較於無低滲透性土 層,其 q_s/Q 值減少約 14.21%,故河川貫穿含水 層之形式與河川底部土層之滲透性為影響河川 滲漏量之重要因子。

三、研究區域概述

彰化地區之民生與工業用水,大都以抽用地 下水為主,目前尙須仰賴豐原與林內淨水場補助 供水,自有水源較爲缺乏。彰化爲濁水溪沖積 扇北側,爲一良好之地下水儲水層,由於地下 水開發速率高於地下水補注,目前濁水溪沖積扇 之扇央與扇尾地區,其地下水位逐年下降,造成 沿海地區產生地層下陷與海水入侵等問題。 因此,本研究提出以河畔取水模式進行水源開發,河畔取水可透過河床過濾功能,減緩地面水 濁度過高現象。河畔取水同時具備河川與含水層 補注條件,可降低開發地下水對地層產生不良之 影響。

3.1 研究區域概述

本研究地區選定為彰化快官與貓羅溪河畔 為研究區域,貓羅溪為烏溪支流,烏溪位於台灣 西海岸中部,發源於中央山脈合歡山西麓,東以 中央山脈為界,北鄰大甲溪流域,西臨台灣海 峽,南鄰濁水溪流域,集水區地勢自東北向西南 傾斜,幹流全長約 119.13 公里,流域面積為 2,025.6 平方公里。圖 5 為烏溪水系,研究區域位 於快官附近。

根據中央地質調查所之地質資料庫資料,繪 製芬園至快官地質剖面圖示於圖 6。圖中顯示除 A、B兩點主要由礫石構成,其餘多為黏土與細 砂組合之分佈,其中C點為快官地區,除地表淺 層有少許礫石外,其下方大都由砂所組成。

3.2 氣象水文條件

快官地區屬亞熱帶氣候,雨量豐沛但時空分



圖 6 芬園-快官地區地質剖面圖(資料來源:經濟 部中央地調所,2006)



圖 7 2004 年豐枯季地下水位圖(資料來源:經濟 部水利署,2006)

配不均。就降雨分布時間而言,每年五月至十月 多颱風暴雨,為研究地區豐水期。11月至翌年 4月期間,受季風影響為枯水期。平均月降雨量 以8至10月為高,1至2月為低,年平均降雨量 約1000至2000mm。

地下水位分佈受到地形之影響,地下水位明 顯由東向西降低,由水利署之烏溪流域內 28 口 地下水位觀測井,繪製 2004 年豐枯季之地下水 位等値圖如圖 7。由圖中資料顯示,豐枯季平均 水位差約為1至4m不等。

氣溫冷熱適中,年平均溫度 22.5℃,每年最 低溫發生在 1、2 月,月平均溫度約 15.6℃。最 高溫發生在 7、8 月,月平均溫度約 28.7℃,年 平均蒸發散量約為 900 至 1200mm。快官地區 5 月至 9 月為河川流量豐水期,流量佔全年的 70%,以6月份最多,1、2月則為枯水期。



圖 8 車籠埔斷層與地形等高線 200m 擬合情況

四、數值模式建構與參數敏感性分析

由於快官地區並無明顯之天然邊界,本研究 首先建構烏溪流域地下水流數值模式,再由地下 水流線與等勢能線劃定快官地區數值模式,以快 官地區數值模式進行參數敏感性分析,最後分析 河畔取水之水文地質參數與出水井型式因子對 河川滲漏量之影響。

4.1 數值模式建構

應用 MODFLOW 建構烏溪流域之水文地質 概念模式,須由自然環境條件給定假設條件,本 模式各項水文地質參數設定說明如下:

- (1) 水文分層:由經濟部中央地質調查所之地 質探勘資料庫與經濟部水利署觀測站網 (2006)鑽探井資料顯示,鑽探深度 60m 以 上主要爲砂礫石層組成,爲非拘限含水層 形式,鑽探深度 60m 至 100m 於數値模式 中設爲侷限含水層。地表高程之資料來源 爲農林航測所(1989)測得之 DTM 數值地 形。
- (2) 邊界設定:烏溪流域涵蓋區域包含台中 縣、市,南投縣及彰化縣,流域面積約佔 此四縣市總面積之 27.5%,由於集水區東 側之山區水文地質資料缺乏,本研究利用 地形等高線與地質斷層資料進行交叉比 對,搜尋結果顯示車籠埔斷層與地形等高 線 200m 處重合性高,擬合情況示於圖 8。 陳忠偉(2002)於評估屛東平原東側邊界



圖 9 數值模式範圍與邊界條件設定示意圖

時,假設斷層處具有側向流量補注含水 層,故本研究亦將車籠埔斷層視為側向補 注邊界,以等高線 200m 處假設為本研究 東部邊界,設定為特定流量邊界。

研究範圍南側為集集大山,假設其地 表山脊線位置亦為地下水分水嶺,山脊線 並無地下水交換量,將南部邊界設為零流 量邊界。北側邊界亦以七星山稜線假設為 零流量邊界。西部邊界為八卦山與大肚台 地,假設為零流量邊界。在出海口龍井鄉 處,假設為定水頭邊界,地下水位為平均 海水面高程。格網劃分為南北向 53 列, 東西向 35 行,並採用 1,000×1,000m 之等 間距網格,模式邊界與初始條件設定示於 圖 9。

由於快官地區並無明顯之天然邊界, 經烏溪流域數值模式建構完成後,快官地 區數值範圍由烏溪模式之地下水流線與等 勢能線劃定,本研究以地下水流上游水位 變化最少之等勢能線為東側邊界,下游水 位變化最少之等勢能線為西側邊界,根據 地下水等水位線資料顯示,本研究採用地



圖 10 快官河畔取水數值模型之邊界設定

下水等水位線 38m 位置為東側邊界,地下 水等水位線 32m 位置為西側邊界。以抽水 井為基準點,南北向約 1,800m 處之地下水 流線設為南北側邊界,可劃設快官地區模 式範圍。

因此於邊界設定上,東側為地下水位 38m處,西側為地下水位32m處,均設為 定水頭邊界。南側與北側為流線,假設水 分子循流線方向運移,設為零流量邊界。 模式範圍東西向約為3,960m,南北向約為 3,640m,網格大小為40m×40m,模式之邊 界條件示於圖10。

- (3)水文地質參數:由中央地質調查所之工程 地質資料與水利署之水文地質資料庫 (2006)之鑽探資料,以克利金(kriging)法推 求模式之水文地質參數分佈。
- (4)初始水位值:根據經濟部水利署之水文水 資源資料管理供應系統中,蒐集烏溪流域 地下水位觀測站之地下水位紀錄。本研究 選用 2002 年 12 月之觀測地下水位作為模 式之初始水位值,以克利金推求流域之初 始地下水位分佈。
- (5) 補注:本研究採用 Lee et al. (2006) 以河川 基流資料估計法,推估台灣地下水補注 量,擷取本研究區域範圍內補注量為本模 式初始補注量,模式之初始補注量等值圖 示於圖 11。



圖 11 烏溪流域地下水補注量等值圖

4.2 數值模式率定

本研究模擬時間段為 2003 年 1 月至 2004 年 12 月,以 1 個月為模擬時間段,總共模擬 24 個 時間段,以前 18 個時間段水位資料進行模式率 定,由率定後模式自行預測後 6 個時間段,第 24 時間段模式預測驗證結果示於圖 12。圖中顯 示模式經率定後,數值與觀測地下水位誤差均控 制在 0.5m 以內,顯示建構模式符合現場水文地 質條件。

五、水文地質參數與抽水井型式對河川 滲漏量之影響分析

5.1 水文地質參數敏感性分析

為瞭解當抽水事件發生時河川與含水層系統間之關連性,利用快官河畔取水數值模型,進 行各項水文地質參數之敏感性分析。參數敏感性 分析為僅變動單一參數值,觀察該參數對河川滲 漏量之影響。本研究分別變動水平透水係數、垂 直透水係數、比儲水率、比儲水係數、河床底部 透水係數、地下水位與河川水位之水位差等6項 參數,水文參數調整情形示於表3。



圖 12 數值模式驗證

5.1.1 水平透水係數(K_h)

分別調整水平透水係數(md⁻¹)值分別為 8.64、86.4、864,模式模擬結果示於圖 13(a)。由 模擬結果顯示,當水平透水係數為 8.64 (md⁻¹) 時,河川滲漏量(q_s)與抽水量(Q)之比值皆維持在 10%下,當水平透水係數為 86.4 (md⁻¹)時,比值 於抽水時間約 150 天時達到穩定,且其河川滲漏 量與抽水量之比值(q_s/Q)約達 40%。當水平透水 係數為 864(md⁻¹)時,河川滲漏量與抽水量之比值 由模擬時間為 30 天之 51%增加至模擬時間為 360 天之 80%,總計河川滲漏量增加 29%,故水平透 水係數為影響數值模式之重要因子。

5.1.2 垂直透水係數(Ky)

分別調整垂直透水係數(md⁻¹)數值為 2、20 與 200,模擬結果示於圖 13(b)。研究成果顯示, 三組模擬結果具有相同趨勢,於同一時間段內, 垂直透水係數數值為 2 與 20 時,所得到之河川 滲漏量與抽水量之比值差僅為 1%。垂直透水係 數數值為 20 與 200 時,所推估之河川滲漏比相 約差 4%,可知垂直透水係數雖與河川滲漏量成

水平透水係數	垂直透水係數	比儲水率	比儲水係數	河床底部透水係數	地下水位與河川水位差
(md^{-1})	(md ⁻¹)	(-)	(m ⁻¹)	(md^{-1})	(m)
8.64					
86.4	20	0.25	0.001	11.54	-0.5
864					
	2				
86.4	20	0.25	0.001	11.54	-0.5
	200				
		0.25			
86.4	20	0.025	0.0001	11.54	-0.5
		0.4			
			0.00001		
86.4	20	0.25	0.0001	11.54	-0.5
			0.001		
				1.154	
86.4	20	0.25	0.001	11.54	-0.5
				115.4	
					-1
86.4	20	0.25	0.001	11.54	-0.5
					0

表3 參數敏感性分析設定

正比,但其影響則遠小於水平透水係數所造成之 影響。

5.1.3 比儲水率(S_v)

對於非拘限含水層而言,地下水位下降將引 起重力排水與彈性釋水。非拘限含水層之地下水 位下降引起之重力排水,用比儲水率(S₂)表示重 力排水能力。在飽和含水層則引起彈性釋水,以 比儲水係數(S₂)表示彈性釋水能力。由於本研究為 探討非拘限含水層與河川系統間之關連性,故比 儲水率與比儲水係數皆需探討其影響效應。

由 Morris and Johnson (1976)研究顯示,比儲 水率之範圍最大值為 0.4,故調整比儲水率數值 為 0.025、0.25、0.4,模擬結果示於圖 13(c)。由 研究成果顯示,於短時間段內對於河川滲漏量具 有影響性,但當時間段約達 240 天後,模擬結果 趨於一致。整體而言,比儲水率對於抽水引致河 川滲漏量並無太大之影響,研判在抽水初期,因 非拘限水面下降引起重力排水,地下水位下降引 致河川滲漏量之增加,而抽水後期則因地下水位 達穩定狀態,河川滲漏量亦趨於穩定。

5.1.4 比儲水係數(S_s)

分別調整比儲水係數(m⁻¹)數值為 0.00001、

0.0001 與 0.001,模擬結果示於圖 13(d)。由研究 成果顯示,三組參數於抽水初期差異性較大, 150 天後則趨於一致,因此比儲水係數對於抽水 引致河川滲漏量並無太大之影響。

5.1.5 河床底部透水係數

分別調整河床透水係數(md⁻¹)數值為 1.154、 11.54 與 115.4,模擬結果示於圖 13(e),研究成果 顯示,當河床透水係數為 1.154(md⁻¹)時,抽水行 為無法引致河川之滲漏量,當河床透水係數為 11.54 (md⁻¹)時,河川滲漏比(q_s/Q)於時間約 150 天時達到穩定之 40%。當河床透水係數為 115.4 (md⁻¹)時,河川滲漏比於時間約 90 天時達到穩定 之 90%。即河床透水係數越低,河川內之水分子 通過河床進入含水層之速率大幅降低,故河床透 水係數為影響河川滲漏量之重要因子。

5.1.6 地下水與河川水位差

本研究探討地下水位低於河川水位為 0m、 0.5m 與 1m 之情況,模擬結果示於圖 13(f)。由研 究成果顯示,當地下水與河川水無水位差時,河 川滲漏量與抽水量之比值為 11%,而當地下水位 低於河川水位 0.5m 與 1m 時,抽水引致河川滲漏 比(q,Q)分別為 40%與 42%,明顯高於無水位差



圖 13 (a)水平透水係數之參數敏感性分析:(b)垂直透水係數之參數敏感性分析:(c)比儲水率之參數敏感 性分析:(d)比儲水係數之參數敏感性分析:(e)河床底部透水數之參數敏感性分析:(f)地下水與河 川水位差之參數敏感性分析

抽水井型式	抽水時間	出水量	水井井徑	抽水井至河川之距離
影響因子	(day)	(CMD)	(m)	(m)
Ι	30~360	5,000	4	10
II	360	0~60,000	4	10
III	360	5,000	1~8	10
IV	360	5,000	4	10~100

表 4 抽水井型式影響因子之參數設定

之情況,因此地下水位與河川水位間之水位差亦 為影響河川滲漏量之重要因子。

由以上6項水文地質參數敏感性分析結果顯示,水平透水係數、河床底部透水係數、地水與 河水間之水位差等 3 項參數為影響模式重要因 子,垂直透水係數、比儲水率與比儲水係數等 3 項參數則對模式則較無明顯影響。

5.2 抽水井型式對河川滲漏量之影響

本研究針對抽水井抽水時間、出水量、水井 井徑及抽水井至河川之距離等四項因子爲變動 參數,探討在相異抽水井型式下,對河川滲漏量 之影響。調整因子設定示於表4。

5.2.1 抽水時間對河川滲漏比之影響

設定抽水時間為變動因子,以 30 天為一模擬時間段,總模擬時間為 360 天,出水量設為 5,000cmd 之條件下,模擬結果示於圖 14(a)結果 顯示本研究模式於抽水時間為 240 天後,河川滲 漏比(q_s/Q)為穩定狀態,其値約為 42.76%。

5.2.2 出水量對河川滲漏比之影響

探討出水量、水位洩降與河川滲漏量三者 關係,假設井直徑為4m,抽水時間360天,抽 水井距離河川10m處抽水,調整出水量(CMD) 分別為5,000至60,000,模擬結果示於圖14(b)。 由模擬結果顯示,出水量為5,000(CMD)時,河 川滲漏量為2,139(CMD),河川滲漏比(q_s/Q)約為 42%,地下水位洩降為0.64m。當出水量增加至 60,000(CMD)時,河川滲漏量為25,450(CMD), 河川滲漏比(q_s/Q)無明顯增加,而地下水位洩降增 加至8.9m,顯示河川滲漏量與地下水位洩降皆隨 出水量增加而呈正相關。

5.2.3 抽水井徑對河川滲漏比之影響

由於一般寬口井直徑為4至8m,因此井徑

設定為 1 至 8m,模擬相異井徑對地下水位洩降 及河川滲漏量之影響,模擬結果示於圖 14(c)。

由研究成果顯示,當井徑由 1m 增加至 8m 時,河川滲漏比由 42.78%小幅度增加至 42.82%, 故井徑對河川滲漏量並無太大影響,但地下水位 洩降由 1.08m 明顯降至 0.52m,故可藉由井徑設 計控制地下水位洩降,降低河畔取水對含水層之 影響。

5.2.3 抽水井至河川距離對河川滲漏比之影響

變動水井至河川距離為 10m 至 100m,模擬 結果示於圖 14(d)。由模擬結果顯示,當抽水井與 河川間之距離增加則河川滲漏比(q_s/Q)降低,故抽 水井與河川距離越小,河川滲漏量越大。

六、成果與討論

本研究主要探討河畔取水對河川滲漏量之 影響,首先利用 MODFLOW 地下水流軟體分別 針對 Grigoryev (1957)、Hantush (1965)、Wilson (1993)與 Hunt (1999)等四種解析模式,以驗證數 值模式之可靠性。接著建構快官地區地下水流數 值模式,利用水文地質參數與抽水型式等因子, 探討河畔取水對河川滲漏量之影響,研究成果如 下:

- 由 MODFLOW 針對四種解析模式進行模擬,模式驗證結果可正確進行河畔取水模擬。由河川部分貫穿含水層模式推估河川滲漏比(qs/Q)約為 3.74%,河川完全貫穿含水層模式則增加至 35.31%,顯示河川是否貫穿含水層,為影響河川滲漏量之重要影響因子。
- 河川條件為貫穿含水層型式,推估其河川滲漏比(q,Q)約為35.31%,若河川與含水層中存在一低滲透性土層,則河川滲漏比



圖 14 (a)抽水時間(pumping time)對河川滲漏比(q_s/Q)曲線圖:(b)出水量(Q)對河川滲漏量(q_s)與水位洩降 (drawdown)曲線圖:(c)井徑(diameter)對河川滲漏比(q_s/Q)與水位洩降(drawdown)曲線圖:(d)水井至 河川之距離(distance)對河川滲漏比(q_s/Q)曲線圖

降為 21.06%,顯示本模式之低滲透性土層 影響河川滲漏比約 14.25%。

- 由快官河畔取水模式進行水文地質參數敏 感性分析成果顯示,水平透水係數、河床透 水係數和地下水位與河川水位差等三項參 數,為影響模式重要因子。垂直透水係數、 比儲水率與比儲水係數等三項參數,對於模 式則無明顯影響。
- 由出水時間與出水量對河川滲漏比之影響 成果顯示,當抽水時間為240天後之河川滲 漏比(q,/Q)約為42.76%並達穩定狀態。當出 水量增加時,河川滲漏量與地下水位洩降則 呈現正相關。
- 5. 由抽水井徑對河川滲漏比研究成果顯示,井 徑增加對河川滲漏量影響並不大,但可降低 井內地下水位洩降,因此可藉由調整水井井 徑控制地下水位洩降。由抽水井與河川距離 影響評估,當抽水井與河川距離越大,河川 滲漏比則小幅度降低。

參考文獻

- 1. Theis, C. V., "The effect of a well on the flow of a nearby stream", *American Geophysical Union Transactions*, Vol. 22, No. 3, pp. 734-738, 1941.
- 2. Glover, R. E., and C. G. Balmer, "River depletion from pumping a well near a river", *American*

Geophysical Union Transactions, Vol. 35, No. 3, pp. 468-470, 1954.

- Hantush, M. S., "Wells near streams with semipervious beds," *Journal Geophysical Research*, Vol. 70, No. 12, pp. 2829-2838, 1965.
- Jenkins, C. T., "Techniques for computing rate and volume of stream depoetion by well", *Ground Water*, Vol. 6, No. 2, pp. 37-46, 1968.
- Grigoryev, V. M., "The effect of streambed siltation on well-field yield in alluvial aquifers", *Water Supply and Sanitation*, Vol. 6, pp. 110-118, (in Russian), 1957.
- Bochever, F. M., "Evaluation of well-field yield in alluvial aquifers: The impact of a partially penetrating stream", In *Proceedings of VODGEO* (Hydrogeolog) No. 13, pp. 84-115, 1966.
- Wilson, J. L., "Induced infiltration in aquifer with ambient flow", *Water Resources Research*, Vol. 29, No. 10, pp. 3503-3512, 1993.
- Hunt, B., "Unsteady stream depletion from ground water pumping", *Ground Water*, Vol. 37, No. 1, pp. 98-102, 1999.
- Chen, X. H., and Y. Yin, "Semianalytical solution for stream depletion in partially penetrating streams", *Ground Water*, Vol. 42, No. 1, pp. 92-96, 2004.
- Butler, J. J., V. A. Zlotnik, and M. S. Tsou, "Drawdown and stream depletion produced by pumping in the vicinity of a partially penetrating stream", *Ground Water*, Vol. 39, No. 5, pp. 651-659, 2001.
- Xunhong Chen and Xi Chen, "Effect of aquifer anisotropic on the migration of Infiltrated stream water to a pumping well", *Journal of Hydrology Engineering*, Vol. 8, No. 5, pp. 287-293, 2003.

- Matteo, L. D. and W. Dragoni, "Empirical Relationships for estimating Stream depletion by a well pumping near a gaining stream", *Ground Water*, Vol. 43, No. 2, pp. 242-249, 2005.
- McDonald, M. G., and A. W. Harbaugh, "A Modular Three Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model", U.S. Geological Survey, Virginia, 1988.
- 14. 經濟部水利署第三河川局網站, http://www.wra03.gov.tw/area_d.htm, 2006。
- 15. 中央地質調查所全球資訊網站, http://www.moeacgs.gov.tw/main.jsp, 2006。
- 經濟部水利署水文水資源管理供應系統網站。<u>http://gweb.wra.gov.tw/wrweb</u>, 2006。
- 17. 農林航空測量所,國家數值地形模型(Digital Terrain Model), 1989。
- 18. 陳忠偉、潘文健、李振誥,濁水溪沖積扇與 屛東平原地下水合適出水量之研究,台灣水 利,第50卷,第3期,pp.70-82,2002。
- Lee C. H., Chen W. P., and Lee R. H., "Estimation of Groundwater Recharge Using Water Balance Coupled with Base-Flow-Record Estimation and Stable-Base-Flow Analysis." *Environmental Geology*, Vol. 51, No. 1. pp. 73-82, 2006.
- Morris, J. B., and R. T. Johnson, "Abstract data types in the Model programming language", *ACM SIGPLAN Notices*, Vol. 11, Issue. SI, pp. 36-46, 1976.

收稿日期:民國 96 年 8 月 8 日 修正日期:民國 96 年 8 月 27 日 接受日期:民國 96 年 8 月 28 日