

水平集水管河畔取水對河川滲漏及地下水位 影響之研究

Study of River Seepage and Groundwater Level Change Cased by Horizontal Collecting Well Pumping Near Riverbank

國立成功大學
資源工程學系
博士班

洪智勇

Chih-Yung Hung

嘉南藥理科技大學
溫泉產業研究所
助理教授

陳忠偉

Jung-Wei Chen

國立成功大學
資源工程學系
碩士

梁勝淵

Sheng-Youn Liang

台灣自來水公司
第七區管理處
經理

謝堽煌

Hsun-Huang Hsieh

國立成功大學
資源工程學系
教授

李振誥*

Cheng-Haw Lee

國立屏東科技大學
土木工程系
教授
暨水資源教育及研究中心
主任

丁澈士

Cheh-Shyh Ting

國立屏東科技大學
土木工程系
博士生
暨水資源教育及研究中心
助理研究員

杜永昌

Yung-Chang Tu

摘要

由於台灣近年每逢颱風來襲所夾帶之豪大雨，屢屢造成供水系統之原水濁度飆高，遠超出淨水場可處理能力，因此建立穩定且永續之供水備援系統實刻不容緩。淺層含水層因同時具有降雨、河川與地下水側向補注等來源，以河畔取水形式可於豐水期取得乾淨水源，枯水期可截留部分伏流水，且經由土層之入滲過濾，可降低河川水污染物及細菌濃度，為可行之開發或備援水源方案。

本研究利用 Joshi (1988)解析模式驗證 MODFLOW 應用於模擬水平集水管河畔取水之適用性，由研究結果顯示解析解與數值解驗證結果良好，表示數值模式可模擬具備各種水文條件之現場情況。

*通訊作者，國立成功大學資源工程系教授，70101 台南市東區大學路 1 號，leech@mail.ncku.edu.tw

利用數值模式進行水平集水管形式之敏感性分析，並以濁水溪北岸與竹塘地區為例提出合適設置方案。由研究分析結果顯示，建議方案為沿濁水溪北岸設置 6 口，單井出水量為 7,404 CMD 之 4 m 寬口輻射井，井徑 2 m 之水平集水管由寬口井往外延伸 10 m，地下水位洩降量符合下限水位標準，洩降影響範圍至 600 m 外之住宅區僅約 0.2 至 0.3 m。

關鍵詞：河畔取水，水平集水管，MODFLOW。

ABSTRACT

Taiwan is hit by typhoons along with torrential rains in recent years, the raw water for the water system would usually rise to a level of high turbidity, far beyond the capacity of the water purification station. Therefore, it is of great urgency to establish a steady and sustainable water supply backup system. The shallow aquifer is sourced by rains, rivers, and groundwater side recharge. By pumping near the riverbank, it is able to obtain clean water in wetting season and also intercept part of the groundwater during the drying season. Furthermore, the seepage on the soil stratum as well as the seepage is able to decrease the contamination and bacterial concentration of the water from rivers. Thus, it can be considered as a developable backup water supply program.

To evaluate the applicability of MODFLOW being used for all hydrological variations on the site, the study makes use the Joshi(1988) analytical models to verify its applicability. According to the research results, the analytical solution and the numerical solution have shown good verification results. This indicates that the MODFLOW can simulate the on-site situation under all kinds of hydrological conditions.

The sensitivity analysis for the horizontal collection well form is undertaken for the water supplying program design. The water source development building horizontal collection wells along the north bank of the Zhuoshui River and Zhutang Area. Based on the analysis of the research, the proposal is to build 6 horizontal collection wells, each with a water yield of 7,404 CMD, 4 m well diameter, with horizontal collection wells 2 m in length reaching 10 m from the wells. The simulation results indicate that the groundwater drawdown is in accordance with the lower limit standard. Furthermore, the drawdown affects the residential areas situated 600 m away between the degrees of 0.2 to 0.3 m.

Keywords: Pumping near riverbank, Horizontal collecting well, MODFLOW.

一、前言

台灣目前儲存水資源大都以水庫蓄水方式，但近年來遭遇颱風帶來之豪大雨，常因原水濁度太高造成無法供水情況，同時間埋設於河床與河畔底下之集水廊道，則可取得水質較佳水源。以屏東來義鄉二峰圳為例，2008 年 7 月 17

日卡玫基颱風與 2009 年 8 月 8 日莫拉克颱風來襲，造成林邊溪河川滾滾泥流，但經由集水廊道取出之地下水卻清澈見底，以上兩颱風來襲之河川與二峰圳水流狀況比較示於圖 1。集水廊道相較於水庫或攔河堰，具有無水庫淹沒區、無潰壩風險、水質穩定、用地面積小、興建阻力較小與設置、營運及維護成本低等優點。(中央地調所，



圖 1 (a) 2008 年卡玖基颱風時林邊溪水情況；(b) 2008 年卡玖基颱風時二峰圳取水情況；(c) 2009 年莫拉克颱風時林邊溪水情況；(d) 2009 年莫拉克颱風時二峰圳取水情況

1997；徐年盛，2000)

本研究提出河畔設置水平集水管形式進行水源開發，探討水平集水管設置條件與出水量，對河道滲漏與地下水位之影響，分別利用解析模式與數值模式進行推估與驗證。水平集水管取水模式由 Joshi 於 1988 年提出解析公式，並推估 Abandoned 與 Algyo 試驗場之取水情況。竇宏恩於 1996 年修正 Joshi (1988)之解析公式，推估中國冷平、樹平與任平等地區之油井開採量。蔣廷學(2000)以平面徑向方式推導多分枝水平集水管之解析公式，可有效分析水平集水管之滲流機制。Azuhan Mohamed (2006)提出水平集水管抽水時井壁有近似井壁效應之阻水狀況，模擬設定上不適宜設定為完全中空之材質，可依現地狀況調整水平集水管之透水係數以符合實際情況。

本研究建立單一水平集水管模擬場，比較數值解與解析解之擬合情況以提升數值模式之可靠度，並利用數值模式進行各項水平集水管因子之敏感度分析，提出最佳水平集水管設置方式。現地模擬以濁水溪北岸與竹塘地區為場址，提出竹塘地區合適水平集水管設置與出水方案。

二、解析與數值模式介紹

2.1 數值模式介紹

本研究將利用 MODFLOW 地下水流數值軟體，建構虛擬流場之數值模型，以解析模式驗證其適用性，並應用數值模式探討各項因子對水平集水管進水量之影響。

本研究採用 PROCESSING MODFLOW 5.3.0，此套軟體是依據美國地質調查所(U.S.G.S.)之 MODFLOW (McDonald & Harbaugh, 1988)地

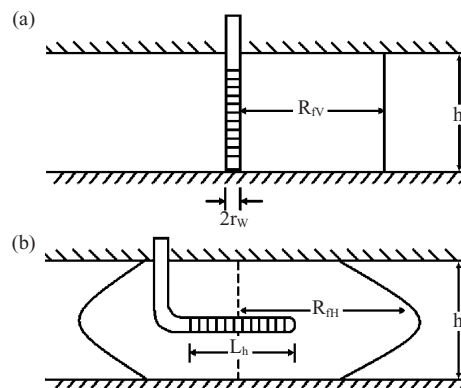


圖 2 Joshi (1988)解析模型示意圖

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為假設在固定密度下，含水層三維地下水流的流動控制方程式之偏微分式如式(1)。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad \text{.....(1)}$$

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。

2.2 解析模式

Joshi (1988)提出水平集水管之解析解與公式分別示於圖 2 與式(2)。由圖 2 中顯示，水平集

水管內水流是由垂直(圖 2a)與水平(圖 2b)兩個平面流動組成。在推導過程中將流動分為兩部分，水平集水管水平面集水方式為橢圓球體集水，垂直面則呈圓柱體，水平集水管之平面橢圓半長軸為 l ，橢圓焦點為水準井端點，分別計算兩個平面之滲流阻力，採用歐姆(Ohm)定律和達西(Darcy)定律的相似原理求得出流量公式，並使用平均有效滲透率來修正非均質地層，使得水平集水管出流量公式更為合理。

以下流動方程式為流體於一水平地層中流入水平集水管之流動情況：

$$q_1 = \frac{\frac{2\pi k_0 \Delta p}{\mu B_0}}{\ln \left[\frac{l + \sqrt{l^2 - \left(\frac{L_h}{2}\right)^2}}{\frac{L_h}{2}} \right]} \dots\dots\dots(2)$$

式中 k_0 為滲透率[L²]， Δp 為初始地下水位與抽水後之井內水位壓力差[pa]， μ_0 為黏度[Pa · s]， B_0 為抽取前後體積比[-]， L_h 為水平集水管長度[L]。若考慮地層厚度，可將上式改寫為：

$$q_1^* = q_1 H \dots\dots\dots(3)$$

考慮流體於水平方向所遭受之阻抗，則

$$R_{H1} = \left(\frac{\Delta p}{q_1^*} \right) = \frac{\mu B_0}{2\pi k_0 H} \ln \left[\frac{l + \sqrt{l^2 - \left(\frac{L_h}{2}\right)^2}}{\frac{L_h}{2}} \right] \dots\dots\dots(4)$$

除上述之水平方向水流方程式、 R_{H1} 與地層厚度之假設外，亦須加入垂直方向之水流方程式以及垂直方向水流之阻抗，單位水平管長度之垂直方向水流量為

$$q_2 = \frac{\frac{2\pi k_0 \Delta p}{\mu B_0}}{\ln \left(\frac{H}{2r_w} \right)} \dots\dots\dots(5)$$

考慮管長 L_h 之流量

$$q_2^* = q_2 L \dots\dots\dots(6)$$

垂直方向水流之阻抗

$$R_{H2} = \left(\frac{\Delta p}{q_2^*} \right) = \left(\frac{\mu B_0}{2\pi k_0 L} \right) \ln \left(\frac{H}{2r_w} \right) \dots\dots\dots(7)$$

同時考慮水平與垂直水流阻抗之出水量

$$R_{H1} + R_{H2} = \Delta p \left(\frac{1}{q_1^*} + \frac{1}{q_2^*} \right) = \frac{\Delta p}{q_H} \dots\dots\dots(8)$$

結合上述條件可得水平集水管流動方程式 (9)

$$Q = \frac{2\pi K_0 H}{\mu_0 B_0} \left[\frac{\Delta P}{\ln \left[\frac{l + \sqrt{l^2 - \left(\frac{L_h}{2}\right)^2}}{\frac{L_h}{2}} + \frac{H}{L_h} \ln \frac{H}{2r_w} \right]} \right] \dots\dots\dots(9)$$

呂勁(1993)以旋轉橢圓球體修正 Joshi (1988) 以平面橢圓方式所推導之水平集水管產量公式，建議原式(9)中之 l 值修正為：

$$l = \sqrt{\left(\frac{L_h}{2}\right)^2 + \left(\frac{H}{2}\right)^2} = \frac{1}{2} \sqrt{L_h^2 + H^2} \dots\dots\dots(10)$$

因本研究應用於出水量之推估，水之黏度(μ_0)設為 0.001 (Pa · s)，假設水體為不可壓縮，其體積比(B_0)為 1，進行水平集水管出流量之估算。

三、水平集水管設置參數驗證與敏感度分析

3.1 水平集水管參數驗證

本研究為驗證水平集水管解析與數值模式之適用性，建立一均質之虛擬水文地質場，分別利用數值模式 MODFLOW 與 Joshi (1988)解析解推估水平集水管進水量，以增加數值模式應用於現場複雜條件之可靠度，虛擬地下水流場示於圖 3。圖 3(a)中顯示模式範圍之長寬均為 3,020 m，網格長寬為 10 m，在抽水井(pw)附近之網格加密為 1 m，模式範圍之長寬均為 320 個網格，總計

102,400 個計算網格。

本研究以流網概念訂定研究區域邊界條件，以東西側分別假設為上下游地下水位，設為定水頭邊界，地下水流線方向設定為零流量邊界。含水層分層概念與地下水位設定為參考竹塘地區淺層含水層厚度約 30 m，地下水位高程約為 26.3 m。含水層為單一自由含水層，含水層底部高程設為 0 m，含水層頂高程為 30 m，地下水位為高程 26.3 m 處，水平管埋設於高程 20 m 位置，虛擬含水層剖面示於圖 3(b)。水平集水管管徑假設為 1 m，長度為 10 m，各項水文地質參數設定示於表 1。水平集水管內部水力傳導係數(k_w)設定值為參考為 Azuhan (2006)建議，設定 k_w 為含水層導係數 k_h 之 5 至 25 倍，依相異抽水量評估數值解與解析解之相對誤差。

表 1 水平集水管敏感性分析參數表

水文地質參數	參數值	單位
含水層水力透水係數(k_h)	43.2	m/day
有效孔隙率(n_e)	0.25	-
含水層厚度(h)	30	m
初始地下水位高程(L_w)	26.3	m
抽水井出水量(q_w)	500~1,000	CMD
水平集水管水力透水係數(k_w)	216~864	m/day
水平集水管有效孔隙率(n_w)	0.99	-

將表 1 之各項水文地質參數代入 Joshi (1988) 及呂勁(1993)修正之解析公式，並利用 MODFLOW 軟體建構模式初始與邊界條件設定，利用水平衡分析推求其水平集水管出水量，以式(11)之平均相對誤差百分比(MRE)顯示驗證成果，平均相對誤差值越小代表驗證模型和解析模式擬合良好，模擬結果示於表 2。由表中解析解與數值解比較結果顯示，MRE 值約為 0.1%至 3.8%之間，顯示數值與解析解驗證良好。當 $k_w/k_h = 20$ 時之平均相對誤差百分比為最小，因此本研究於後續數值模式應用時，將採用 $k_w/k_h = 20$ 設定 k_w 值。

表 2 水平集水管出水量與 k_w/k_h 比值之相對誤差百分比

k_w/k_h 比值 出水量 (CMD)	5	10	15	20	25
500	3.50	3.20	3.00	2.90	1.40
600	3.70	3.80	3.80	3.70	3.70
700	3.30	3.50	3.60	2.50	3.50
800	1.60	2.80	2.80	2.80	2.80
900	1.40	1.60	1.70	0.90	1.70
1000	-0.10	0.10	0.20	0.20	0.20
平均相對誤差百分比(%) (mean relative error, MRE)	2.22	2.49	2.51	2.17	2.23

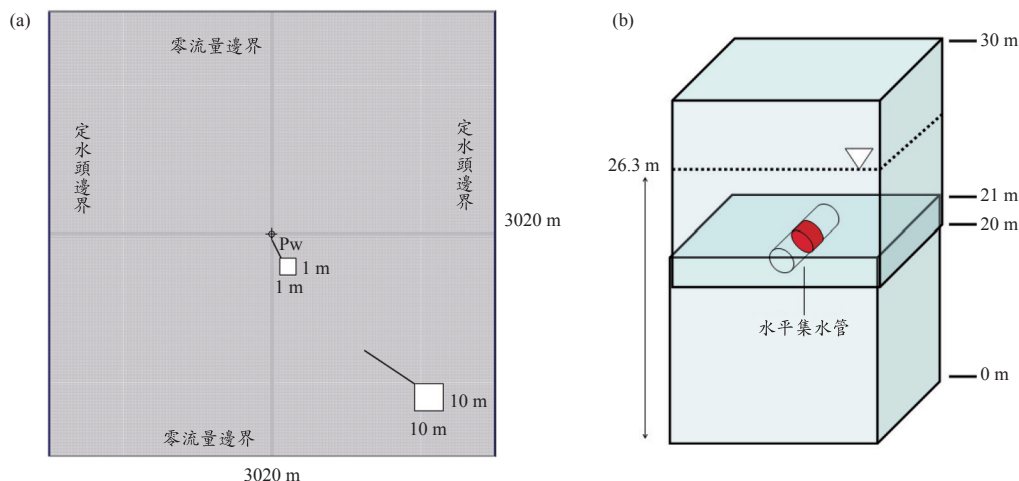


圖 3 (a)數值模式邊界條件與網格劃分示意圖：(b)含水層剖面與水平集水管設置示意圖

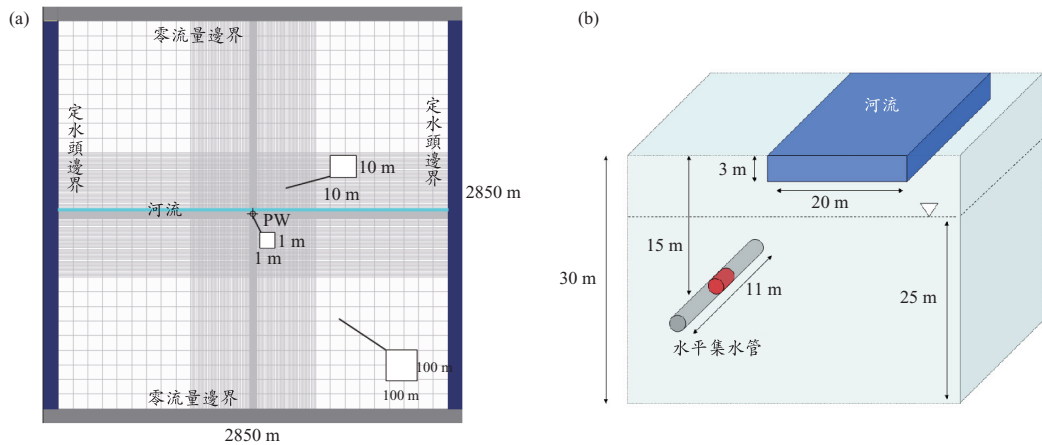


圖 4 (a)模式網格與邊界條件示意圖；(b)含水層剖面與水平集水管設置示意圖

表 3 水平集水管敏感性分析之水文地質參數表

參數名稱	參數值	單位
水力傳導係數	43.2	m/day
有效孔隙率	0.25	-
含水層厚度	30	m
初始地下水位高程	25	m
河流寬度	20	m
河流深度	3	m
水平集水管設置深度	15	m
水平集水管出水量	1,000	m ³ /day
水平集水管水力傳導係數	864	m/day
水平集水管有效孔隙率	0.99	-
水平集水管距河川距離	10	m
水平集水管管徑	1	m
水平集水管長度	11	m

$$MRE = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{E_i - P_i}{P_i}}{n} \dots\dots\dots(11)$$

3.2 水平集水管設置因子分析

為進行最佳水平集水管設計，本研究將探討相異水平集水管之埋設深度、出水量、與河川距離、長度與管徑等因子之敏感性分析。本模式增加河川水文條件，並引用上節成果，將水平集水管水力傳導係數假設為含水層水力傳導係數之 20 倍。網格與邊界條件設定示於圖 4(a)，含水層剖面與水平集水管設置示於圖 4(b)，模式所需之各項水文地質參數示於表 3。

首先以水平集水管埋設深度進行敏感性分析，埋設位置由距離地表下 8 m 逐漸增加至 23 m 情形示於圖 5(a)。水平集水管埋設深度(deep)對洩降比(drawdown ratio)之模擬結果示於圖 6(a)，由圖中顯示洩降比隨著埋設深度之增加而由 256%降低至 64%，且埋設深度超過 20m 時，洩降比有趨緩之現象。埋設深度對於滲漏增加比(increased leakage ratio)之模擬結果示於圖 6(b)，由圖中顯示滲漏增加比隨深度增加而上升，但幅度不大。

埋設深度對於管進井抽比(q_{in}/Q)之模擬結果示於圖 6(c)，管進井抽比為水平管之集水量與總抽水量之比值，可藉由管進井抽比顯示水平管之集水能力。由圖中顯示埋設深度埋設深度越深，水平管集水量隨之減少，但僅降低 1%，顯示埋設深度對水平管集水能力影響較低。

埋設深度對於滲漏抽取比(leakage/Q)之影響結果示於圖 6(d)。滲漏抽取比為河川滲漏增加量與抽水量之比值，滲漏抽取比可顯示抽取到河水與地下水之比例關係。由圖中顯示埋設深度增加可提高河水所佔抽水量之比例，其值由 77.5%提高至 105.0%，但深度持續增加則滲漏抽取比上升幅度趨緩。本研究案例約在埋設深度 18 m 位置，其滲漏抽取比有明顯趨緩現象，顯示提升滲漏抽取比可增加水平集水管埋設深度，但應視現場實際狀況設定埋設深度，而並非愈深愈好。

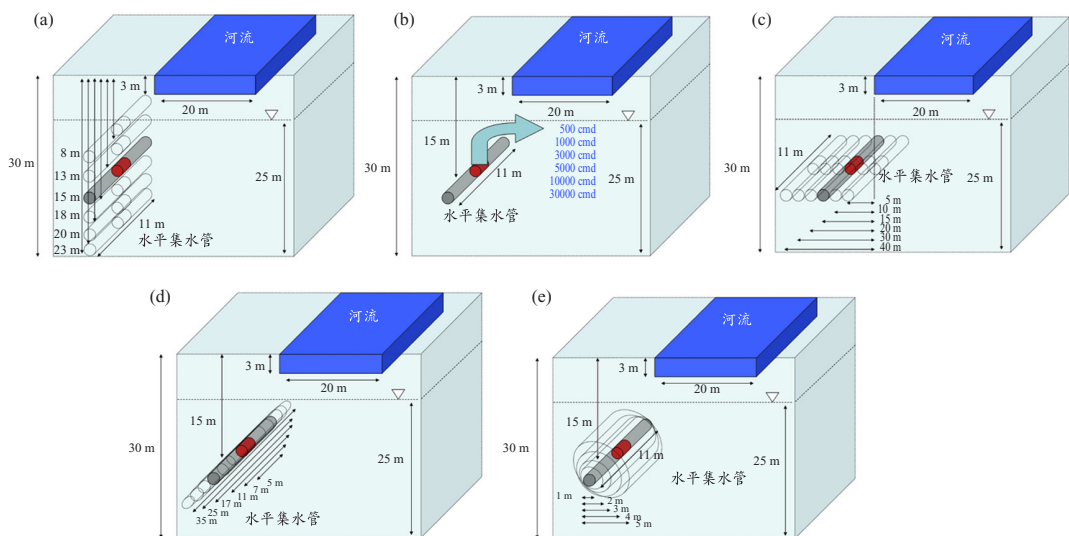


圖 5 (a)水平集水管相異埋設深度示意圖；(b)水平集水管相異抽水量示意圖；(c)水平集水管埋設距河川相異距離示意圖；(d)水平集水管相異長度示意；(e)水平集水管相異管徑示意圖

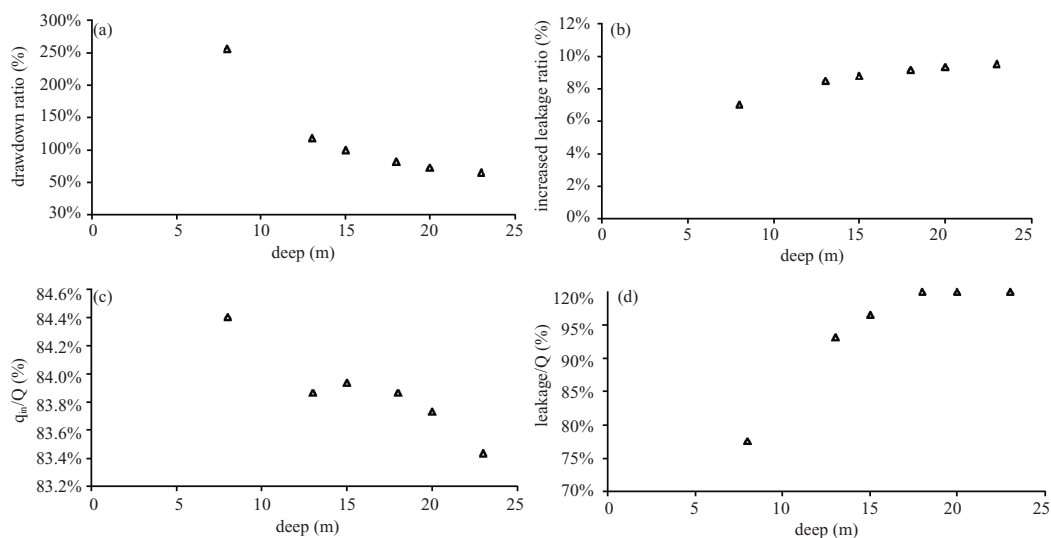


圖 6 (a)水平集水管設置深度(deep)與洩降比(drawdown ratio)之關係圖；(b)水平集水管設置深度(deep)與滲漏增加比(increased leakage ratio)之關係圖；(c)水平集水管設置深度(deep)與管進井抽比(q_{in}/Q)之關係圖；(d)水平集水管設置深度與滲漏抽取比(leakage/Q)之關係圖

針對水平抽水量進行敏感性分析，抽水量由 500 CMD 增加至 30,000 CMD 情形示於圖 5(b)。變動抽水量對洩降比之模擬結果示於圖 7(a)，圖中顯示洩降比隨著抽水量之增加而由 16.2% 大幅提高至 823.1%，且呈線性正相關之趨勢。對於滲漏增加比之模擬結果示於圖 7(b)，圖中顯示滲漏

增加比因抽水量增加，其值由 1.5% 大幅上升至 87.5%，且呈現線性正相關趨勢，因此抽水量為影響河川滲漏量之重要因子。變動抽水量對於管進井抽比之結果示於圖 7(c)，由圖中顯示管進井抽比僅自 83.9% 略微上升至 85.1%，且無固定趨勢，上升幅度亦不明顯，代表變動抽水量未對水

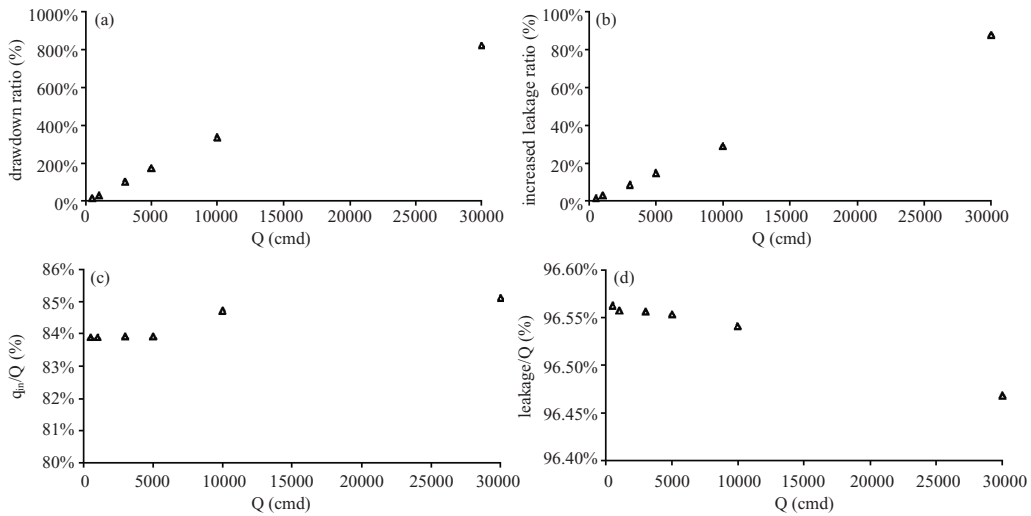


圖 7 (a)水平集水管抽水量(Q)與洩降比(drawdown ratio)之關係圖；(b)水平集水管抽水量(Q)與滲漏增加比(increased leakage ratio)之關係圖；(c)水平集水管抽水量(Q)與管進井抽比(q_{in}/Q)之關係圖；(d)水平集水管抽水量(Q)與滲漏抽取比(leakage/Q)之關係圖

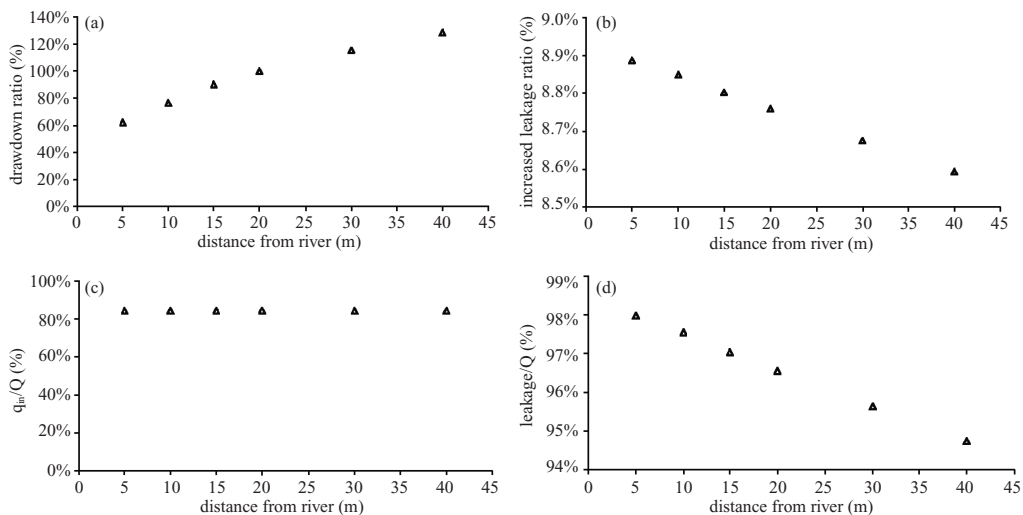


圖 8 (a)水平集水管距河遠近(distance from river)與洩降比(drawdown ratio)之關係圖；(b)水平集水管距河遠近(distance from river)與滲漏增加比(increased leakage ratio)之關係圖；(c)水平集水管距河遠近(distance from river)與管進井抽比(q_{in}/Q)之關係圖；(d)水平集水管距河遠近(distance from river)與滲漏抽取比(leakage/Q)之關係圖

平集水管之集水能力影響不大。變動抽水量對於滲漏抽取比之模擬結果示於圖 7(d)，圖中顯示滲漏抽取比僅有小幅減少，抽水量對於滲漏抽取比之影響不大。

若將水平集水管埋設位置與河川距離由 5 m 增

加至 40 m 情形示於圖 5(c)，模擬結果示於圖 8(a)。圖中顯示水平集水管設置距離河川愈遠，洩降比由 62.2%增加至 128.3%。水平集水管與河川距離對於滲漏增加比之模擬結果示於圖 8(b)，圖中顯示滲漏增加比隨著距離增加而有下降趨勢，但降

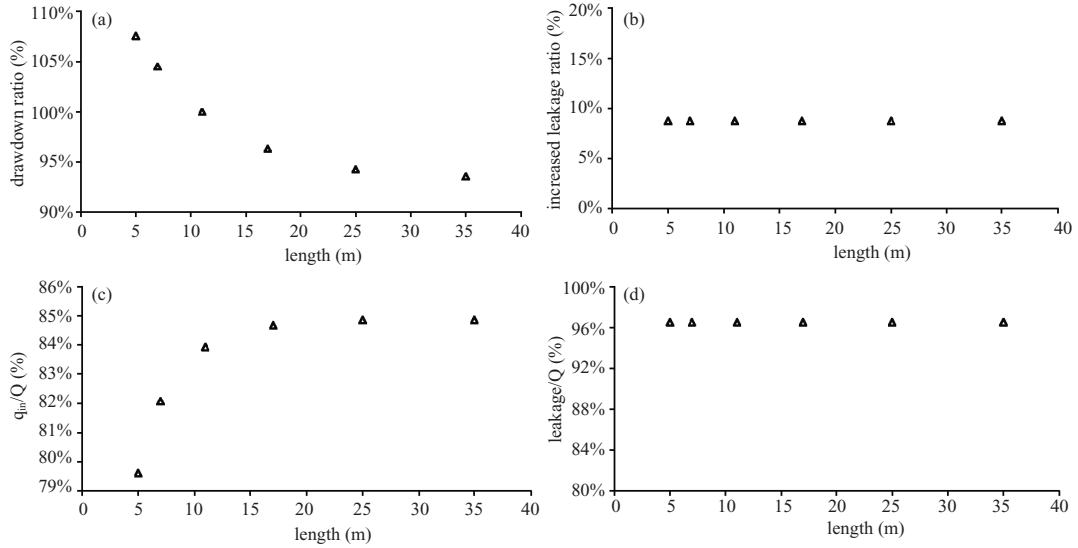


圖 9 (a)水平集水管長度(length)與洩降比(drawdown ratio)之關係圖；(b)水平集水管長度(length)與滲漏增加比(increased ratio)之關係圖；(c)水平集水管長度(length)與管進井抽比(q_{in}/Q)之關係圖；(d)水平集水管長度(length)與滲漏抽取比(leakage/ Q)之關係圖

幅不大。對於管進井抽比影響之模擬結果示於圖 8(c)，圖中顯示影響不大。對於滲漏抽取比之影響模擬結果示於圖 8(d)，圖中顯示水平集水管設置與河川距離對於滲漏抽取比之影響不大。

若改變水平集水管設置長度，假設水平集水管長度由 5m 增加至 35m 情況示於圖 5(d)。水平集水管長度不同對於洩降比之影響結果示於圖 9(a)，由圖中顯示洩降比隨著水平集水管長度之增加而由 107.57% 降低至 93.55%，且於水平集水管長度約為 25m 時，洩降比有明顯趨緩現象，故水平集水管設置長度並非愈長愈好，應視實際需求調整水平設置長度。對於滲漏增加比影響之模擬結果示於圖 9(b)，圖中顯示滲漏增加比並無明顯變化。對於管進井抽比之影響結果示於圖 9(c)，圖中顯示隨著水平集水管長度增加，管進井抽比由 79.6% 提高至 84.87%。但當水平集水管長度持續增加，則管進井抽比之增加呈現逐漸趨緩現象。以本案例為例，當水平集水管長度增加到 25m 時，管進井抽比有明顯平穩狀況。對於滲漏抽取比之影響結果示於圖 9(d)，由圖中顯示滲漏抽取比影響並不明顯。

若改變水平集水管管徑由 1 m 逐漸增加至 5

m 情形示於圖 5(e)。對於洩降比之影響結果示於圖 10(a)，由圖中顯示洩降比隨著管徑之增加而由 100% 降低 91.45%，並且有逐漸趨緩之現象。對於滲漏增加比之影響結果示於圖 10(b)，圖中顯示滲漏增加比因管徑增加而小幅度降低。對於管進井抽比之影響結果示於圖 10(c)，圖中顯示隨著水平集水管管徑之增加，管進井抽比由 83.93% 提高至 92.13%，但管徑愈大則有上升趨緩現象，顯示增大水平集水管管徑能提高水平集水管集水能力。對於滲漏抽取比之影響結果示於圖 10(d)，圖中顯示河川滲漏量與抽水量比值由 96.6% 降至 91.0%，呈現線性下降關係，可能為擴大管徑導致抽取地下水範圍擴大，故滲漏抽取比有下降趨勢。

為設計適合河畔取水之之最佳水平集水管設置形式，由敏感性分析顯示，水平集水管適合位置為地下水位以下 15 m 位置，抽水量與地下水位洩降呈正相關，故合適抽水量需在水位洩降標準以上訂定，與河川之距離則接近河川可減少水位洩降，相對於其他指標則影響較小，故與河川距離可視現場條件而定。水平集水管長度則建議由抽水井往外延伸約 10 m，管徑則建議約

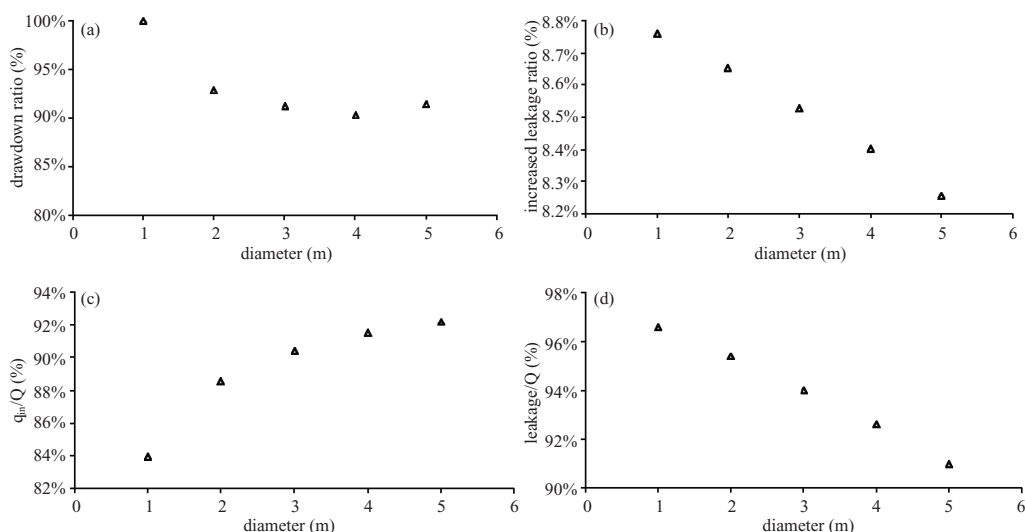


圖 10 (a)水平集水管管徑(diameter)與洩降比(drawdown ratio)之關係圖：(b)水平集水管管徑(diameter)與滲漏增加比(increased leakage ratio)之關係圖：(c)水平集水管管徑(diameter)與管進井抽比(q_{in}/Q)之關係圖：(d)水平集水管管徑(diameter)與滲漏抽取比(leakage/ Q)之關係圖

2 m，可降低約 8%的水位洩降與便於維護工作之操作。

四、濁水溪北岸與竹塘地區 河畔取水數值分析

本研究之試驗場址位於濁水溪自強大橋下游約 260 m 之濁水溪北岸地區，由於試驗場址範圍較小，短距離內無天然水力邊界，因此本研究利用地下水流線與等勢能線劃定竹塘地區數值模式，再利用 MODFLOW 之套疊水流模式，建構濁水溪北岸與竹塘地區之小區域數值模式，數值模式邊界條件示於圖 11。圖中顯示數值模式距離邊界約 1,500 m，可避免邊界條件影響模式推估成果。東部邊界條件以地下水位 12.5 m 處設為定水頭邊界，西部邊界條件以地下水位 8.5 m 處設為定水頭邊界，南北側邊界則以地下水流網概念設為零流量邊界。

由自強大橋之河川水位與研究區域之地下水位資料比對後顯示，河川水位與地下水位相近，故本研究於河川設定上，假設其河川水位與地下水位相同，河川水位距河川底部約 1 m。河川底部透水係數為依據溫志超(2008)進行現場雙環試驗推估，河川水位高程與河川底部高程則

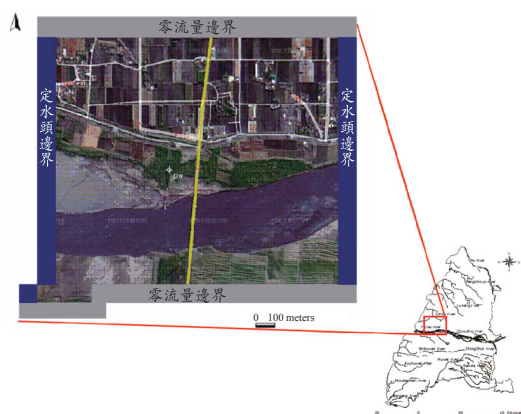


圖 11 濁水溪北岸與竹塘地區數值模式邊界條件圖

取自自強大橋流量站資料，彙整濁水溪北岸竹塘地區之水文地質參數示於表 4。

為檢驗與校正模式參數，本研究採用溫志超(2008)現場抽水試驗資料進行驗證，觀測井分佈示於圖 12。模式需依據試驗抽水量進行模擬值與觀測井之水位洩降擬合，觀測值與模擬值示於表 5，顯示模擬與觀測地下水位最大偏差為 6.51%。

欲合理開發地下水需設定合適之地下水位標準，本研究之地下水位限制為依據劉振宇(2007)建議，訂定觀測水位以下一倍標準偏差為下限水

表 4 竹塘地區數值模式之水文地質參數表

水文地質參數	參數值
力傳導係數(m/day)	47.55
有效孔隙率(-)	0.25
含水層厚度(m)	30
河流深度(m)	1
水平集水管設置高程(m)	0
水平集水管水力傳導係數(m/day)	951
水平集水管有效孔隙率(-)	0.99
水平集水管管徑(m)	2
水平集水管長度(m)	25

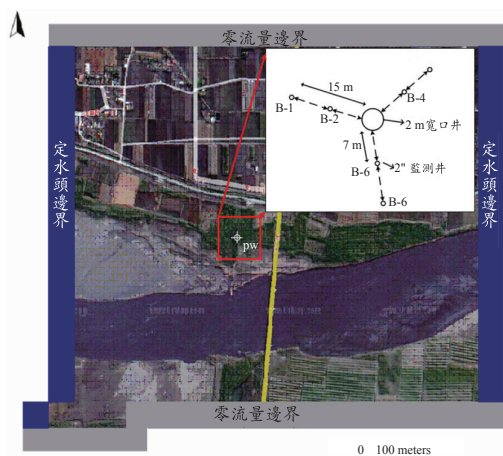


圖 12 竹塘地區抽水試驗觀測井示意圖

位，觀測水位以下二倍標準偏差為嚴重下限水位。本研究以竹塘(1)觀測井地下水位，由 1994 至 2006 年之平均地下水位推估標準偏差值，推估竹塘地區地下水位平均值約為 15.43 m，平均標準偏差為 1.13 m，因此可推估本研究地區之平均下限水位為 14.30 m，平均嚴重下限水位為 13.17 m。

本研究利用率定完成之數值模式，變動水平集水管出水量可推估地下水位洩降情形，出水量與地下水位洩降關係示於圖 13。由圖中顯示若以下限水位為標準，推估可出水量為 7,404 CMD，若以嚴重下限水位為標準，推估可出水量約為 14,104 CMD。

因應南彰化地區目前生活與工業用水仍有 40,000 CMD 由林內淨水場供應，本研究分別提出下限出水以及嚴重下限出水方案取代林內淨

表 5 竹塘地區地下水位洩降模擬值與觀測值偏差 (單位：m)

觀測井	觀測值	模擬值	偏差百分比
B-1	0.134	0.125	-6.51%
B-2	0.196	0.189	-3.76%
B-3	0.134	0.127	-5.48%
B-4	0.196	0.190	-3.06%
B-5	0.134	0.138	3.41%
B-6	0.196	0.205	4.59%

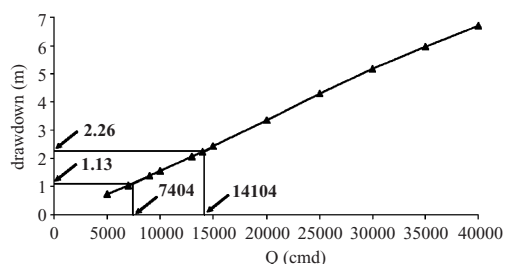


圖 13 抽水量(Q)與水位洩降(drawdown)關係圖

水場水源。若以下限出水量為設計標準時，需設置 6 口出水量均為 7,404 CMD 之水平集水管，寬口井井徑為 4 m，水平集水管為 2 m，水平集水管埋設深度為地下水位面下 15 m 位置，管長 20 m，井間距離約為 200 m，地下水位洩降情況示於圖 14。嚴重下限出水方案為設置 3 口同樣出水量 14,104 CMD 之水平集水管，管間距離約為 300 m，地下水位洩降情況示於圖 15。

因抽水所引致之河川滲漏量約為 39,300 CMD，河川滲漏率(q/Q)約為 88.5%，顯示水平集水管可大幅提升河川滲漏率。圖中顯示沿岸有零星住宅，距離較多住宅區與研究區域距離約 600 m，河畔取水方案影響住宅區之地下水位下降僅約 0.2 至 0.3 m。

五、結論與建議

本研究為探討水平集水管於河畔取水對河川滲漏量與地下水位洩降之影響，藉由模擬各種水平集水管設置與取水方式，針對濁水溪北岸與竹塘地區之區域地下水流數值模型，提出合適河畔取水方案，並探討各方案對地下水位洩降量與影響範圍之關連性。

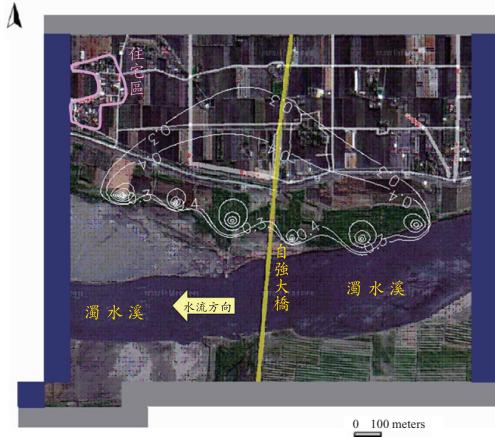


圖 14 下限出水方案地下水位洩降圖(單位：m)

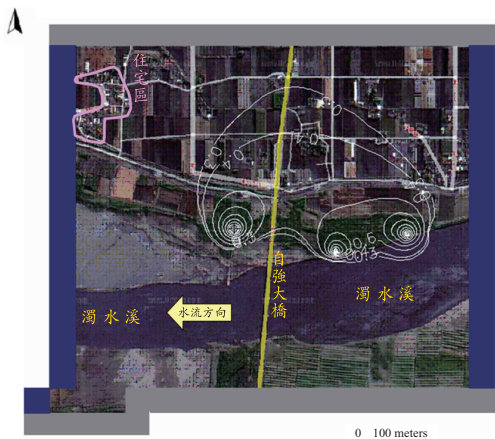


圖 15 嚴重下限出水方案地下水位洩降圖(單位：m)

由敏感性分析顯示，水平集水管適合位置為地下水位以下 15 m 位置，抽水量與地下水位洩降呈正相關，故合適抽水量需在水位洩降標準以上訂定，與河川之距離則接近河川可減少水位洩降，與河川距離則需視現場條件而定。水平集水管長度建議由抽水井往外延伸約 10 m，管徑則建議約 2 m，可降低約 8% 的水位洩降。

由竹塘地區之地下水觀測井資料推估，下限水位最大洩降為 1.13 m，嚴重下限水位最大洩降為 2.26 m，本研究推估單一水平集水管可取水量分別為 7,404 CMD 與 14,104 CMD。因出水方案所引致之河川滲漏量約為 39,300 CMD，河川滲漏率(q/Q)約為 88.5%，顯示水平集水管出水方式

可大幅提升河川滲漏率，減少對地下水之影響。

六、參考文獻

1. 中央地質調查所，1997，以集水廊道開發水資源之可行性研究。
2. 呂勁，1993，水平集水管穩態產油量解析公式及討論 石油探勘與開發，第 20 卷，第 135-140 頁。
3. 徐年盛，2000，地下集水廊道出水量估算數值模式之建立，經濟部水資源局委託計畫，國立台灣大學土木工程學系。
4. 劉振宇，2007，金門地下水資源調查分析 (2/2)，經濟部水利署委託計畫，國立台灣大學生物環境系統工程學系。
5. 溫志超，2008，竹塘淨水場(新設)水源開發試驗及分析，台灣自來水公司第十一區管理處委託計畫，國立雲林科技大學水土資源與防災科技研究中心。
6. 蔣廷學，2000，多分之穩態水平集水管產能研究，特種油氣藏，第 7 卷，第 3 期，第 14-17 頁。
7. 竇宏恩，1996，預測水準井產能的一種新方法，石油鑽採工藝，第 18 卷，第 1 期，第 76-81 頁。
8. Azuhan, M. and Ken, R., 2006, Horizontal wells in shallow aquifers: Field experiment and numerical model, Journal of Hydrology, vol. 329, Issues 1-2, 98-109.
9. Joshi, S. D., 1988, Augmentation of well productivity using slant and horizontal wells, Journal of Petroleum Technology, vol. 40, no. 6, 729-739.
10. McDonald, M. G., and A. W. Harbaugh, 1988, A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model, U.S. Geological Survey, Virginia.

收稿日期：民國 98 年 11 月 19 日

修正日期：民國 99 年 1 月 6 日

接受日期：民國 99 年 1 月 14 日