

經由現地量測及數值模擬探討埔里地下水區之 水文收支

ESTIMATING THE GROUNDWATER BUDGET IN PULI AREA THROUGH FIELD MEASUREMENT AND MODEL SIMULATION

逢甲大學
水利工程與資源保育學系
碩士

宋 瑞 君
Rui-Jun Song

逢甲大學
水利工程與資源保育學系
教授

許 少 華*
Shao-Hua Marko Hsu

僑光科技大學
財務金融系
副教授

洪 碧 芳
Pi-Fang Hung

摘 要

為了瞭解埔里盆地水文收支與主要補注來源，利用現地試驗搭配 MODFLOW 來評估埔里盆地地下水水文收支。於眉溪、南港溪使用微型壓力計、滲流儀量測河床導水度 5 m/day；於筊白筍田進行雙環試驗量測垂直水力傳導係數 0.0017 m/day；與當地農友合作設置抽水管水錶取得筊白筍田一年抽水量，以旬頻率方式紀錄。

本研究使用線性疊加概念進行模擬，透過 MODFLOW 中最佳化參數模組(PEST)進行穩態模擬，求得區域橫向水力傳導係數值(K_h)、各河床導水度(K)與降雨入滲係數，最後模式驗證進行比儲水率微調與分離出短延時強降雨。由 2009 年至 2014 年模擬結果得知，地下水平均出流量為 35.7 萬 CMD (4.13 CMS)，其中抽水井佔整體出流量約 38 %、湧泉佔約 34 %、單位網格蓄水量(storage)流量約 18 %、河床出滲佔整體出流量約 9 %、邊界出流量約 1 %。地下水總補注量也是 35.7 萬 CMD，其中河床補注佔整體補注約 28 %、降雨補注佔整體補注約 26 %、水田補注約 14 %、單位網格蓄水量(storage)流量補注約 19 %、邊界補注佔整體補注約 12 %。2009 年至 2015 年期間模擬地下水位與觀測值平均誤差約 1 m，此模擬結果較水利規劃試驗所的模擬(2016)更接近現地地下水位觀測值。

探討模擬可能誤差來源，其降雨補注設定乃採用降雨水深之百分比值代入模式中，不合乎水文現象中之入滲物理現象；河川水位與邊界補注設定乃給定已知水頭高，當抽水量增加時河川水位與邊界水頭亦不會減少，故會高估補注量。因此模式需考慮現地條件之河川水可供應量。

關鍵詞：埔里盆地、地下水水文收支、MODFLOW、未拘限含水層、河川補注、湧泉、滲流儀、雙環試驗。

* 通訊作者，逢甲大學水利工程與資源保育學系教授

40724 台中市西屯區文華路 100 號，shhsu@fcu.edu.tw

ESTIMATING THE GROUNDWATER BUDGET IN PULI AREA THROUGH FIELD MEASUREMENT AND MODEL SIMULATION

Rui-Jun Song

Department of Water
Resources Engineering
and Conservation, Feng Chia
University, Taichung, Taiwan

Shao-Hua Marko Hsu

Department of Water
Resources Engineering
and Conservation, Feng Chia
University, Taichung, Taiwan

Pi-Fang Hung

Associate professor,
Department of Finance,
Overseas Chinese University

ABSTRACT

In order to estimate the groundwater budget of PuLi basin, site investigations and experiments were performed to obtain local data for parameters estimation, then MODFLOW groundwater model was employed to simulate each groundwater components.

In the site investigation, seepage meter and mini piezometer were used in the Nangang River and Mei Xi River, to measure river-bed conductivity, which was around about 5 m/day; ring infiltrometer was used at water-bamboo field, to measure its conductivity and around 1.7mm/day. Two large valve meters were used at two water-bamboo fields, to measure pumping discharge of field needed for one year.

Based on simulation from year 2009 to 2014, the averaged groundwater budget of aquifer is around 357,000 CMD (4.13 CMS). The outflow part, pumping from well 38 %; spring overall flow 34 %; storage flow overall 18 %; groundwater exfiltration into the river 9 %; boundary outflow 1 %. Total recharge into groundwater aquifer is the same amount of water (357,000 CMD or 4.13 CMS). Among them, river recharge accounts for about 28 %; rain recharge accounts for about 26 %; water bamboo field recharge accounts for about 14 %; storage flow recharge accounts for 19 %; boundary recharge accounts for about 12 %.

A major source of simulation error was the component of rainfall recharge, which was set, in the MODFLOW, using a percentage of total rainfall depth and does not consider the infiltration physics in hydrological phenomena; The setting of river package and boundary package was given a known hydraulic head. Even when the pumping rate increases to a huge amount, hydraulic head will be the same, so the amount of replenishment will be overestimated. Therefore, the simulation needs to consider, in real situations, the available flux supply from the boundaries and river bed recharge.

Keywords: PuLi basin, Groundwater budget, MODFLOW, Unconfined aquifer, River seepage, Spring, Seepage meter, Infiltrimeter.

Song, R.J., Hsu, S.H. Marko* & Hung, P.F (2021). "Estimating the Groundwater Budget in Puli Area Through Field Measurement and Model Simulation." *Journal of Taiwan Agricultural Engineering*, 67(2), 15-23.

[https://doi.org/10.29974/JTAE.202106_67\(2\).0002](https://doi.org/10.29974/JTAE.202106_67(2).0002)

一、前言

年地下水供應量為 43.49 億噸約佔台灣地區總用水量的三分之一，與所有水庫供水量的總和約略相當，妥善使用地下水可以彌補水源需求；若長期過度抽取地下水則會造成不可回復的災害，如地層下陷等等。埔里盆地緊鄰風景區造就當地發展快速，從水利規劃試驗所(2016)報告得知該區域產業、民生水資源來源皆為地下水。因此本研究為了瞭解該區域地下水文收支與主要補注來源以提供後人想進一步利用地下水水資源的參考與估計。

水利規劃試驗所(2016)以民國 98 至 103 年進行分析，綜合評析成果顯示埔里盆地地下水補注量每年 1.58 億立方公尺中，河川補注量 9,270 萬立方公尺占 59%，降雨與灌溉補注 4,885 萬立方公尺占 31%，盆地周緣側向補注量 1,607 萬立方公尺占 10%。而離開埔里盆地之地下水總量中，抽水量 8,301 萬立方公尺占 52%，地下水流出至地面 7,548 萬立方公尺占 48%，地下水平均各旬均有自然流出地面現象，介於每日 13 至 30 萬立方公尺之間。評估得地下水安全出水量約 0.8374 億立方公尺，目前埔里已接近安全出水量。

本研究將現地試驗數據代入 MODFLOW 模式中，以穩態 PEST 求解出河床導水度、降雨補注(recharge)入滲係數、橫向水力傳導係數(K_h)。再以 2013 枯水季、2013 年平均、2013 豐水季之各區域橫向水力傳導係數作幾何平均，最後以 2009 年至 2014 來進行模擬驗證。

二、數值模擬

2.1 MODFLOW 模式理論

MODFLOW 模式係美國中央地質調查所(United State Geological Survey)於 1988 年所發展。本模式係三維有限差分法地下水模式，演算方式皆設定全區為飽和含水層，於時間上可模擬穩定或非穩定狀態；於空間垂直方向可模擬自由含水層或受壓含水層。本研究設 K_{xx} 與 K_{yy} 相同，以下皆以橫向水力傳導係數(K_h)表示。

控制方程式為：

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

式中， K_{xx} 、 K_{yy} 、 K_{zz} 分別為含水層 x、y、z 方向水力

傳導係數[L/T]；h：含水層總水頭[L]；W：為單位體積流量[L/T]，當 $W>0$ 則進入地下水含水層系統， $W<0$ 則由地下水系統流出； S_s ：比蓄水率= S/b [1/L]； S_s ：儲水係數(無因次)；b：含水層厚度[L]。

2.2 最佳化參數估計(PEST)

MODFLOW 內建最佳化參數估計(PEST)求其區域水力傳導係數，最佳化參數估計(Parameter Estimated)縮寫為 PEST，透過其他水文條件輸入，則模式使用線性與非線性方法等方法求解區域最佳合理參數，本研究使用直接求解法。為了區域整體地下水位誤差最小，則運用標準誤差計算。其公式如下：

$$SE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (WF)_i (h_{obs} - h_{sim})_i^2}{n-p}} \quad (2)$$

式中，SE：標準差； $(WF)_i$ 為各區域權重大小； h_{obs} ：量測水位[L]； h_{sim} ：模擬水位[L]；n：觀測水位數量；p：迴歸參數數量。

三、模式建構與參數設定

3.1 概念模式

本研究依據水利規劃試驗所(2016)報告劃分研究區域，以固結地質與非固結地質劃分區域界線，其研究區域地質為中更新世層，土壤組成較為鬆散、容易儲水。其研究區域河川邊界以眉溪攔河堰、南港溪隘口、南港溪攔河堰為界線，因攔河堰地基皆打入岩盤內，則可以認定未有上游河川側流補注。研究區域，如圖 1，東西寬 9 公里、南北長 12 公里，主要為礫石沖積層，厚約 200 公尺不等。取一模式網格其縱向與橫向間距為 50 m ($\Delta x = \Delta y = 50$ m)、上下高度為 1,000 m，共計東西向與南北向總網格數 22,004 個，垂直向網格共計 1 個。

3.2 降雨入滲補注

埔里盆地雨量站僅有北山測站(TWD97 座標：239096, 2653427)數據完整，故以北山測站雨量資料為研究區域降雨深度採用逐旬資料輸入。本研究未將蒸發列入模擬中，考慮區域內水田腹地與水利用地佔總研究區域約 70% 以上，故假設蒸發來源為水田與水利用地。



圖 1 研究區域與邊界設定圖



圖 2 滲流儀儀器圖

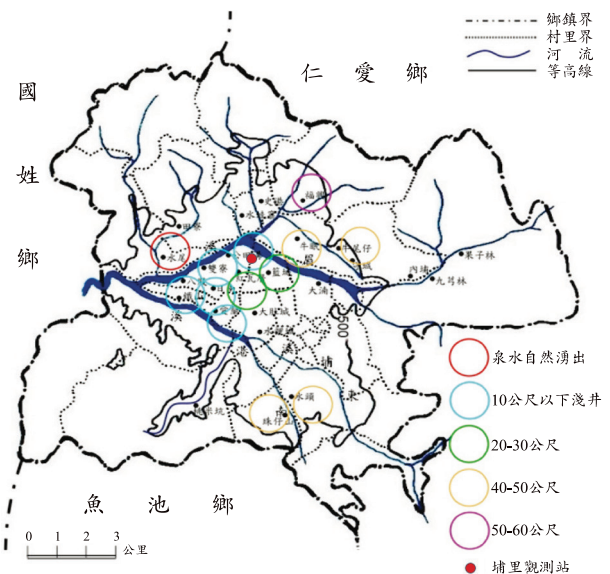


圖 3 埔里盆地區域地下水水位狀況

3.3 水田補注

先將雙環置入預測位置，內外環各別加入水，使內外環水深等高，若水入滲土壤內則導致雙環內水位降低，而馬特力奧瓶因大氣壓力驅使瓶中水補注穩定水量，以維持雙環內固定水深，在時間 t 內所紀錄之補注雙環內之水體積 V ，計算出單位時間內該地點入滲流量 Q ，再以 Philip 公式計算出水垂直向水力傳導係數 K_z 。

其水田垂直水力傳導係數為 0.034 m/day 。

3.4 邊界補注

根據區域地質圖得知，其研究區西北邊界與西南邊界為紅土台地，故本研究參考水利規劃試驗所 (2016) 設定，西北邊界水力傳導係數為 0.18 m/day 、西南邊界水力傳導係數為 0.17 m/day ，其邊界地表水頭高介於 $4 \text{ m} \sim 8.1 \text{ m}$ (圖 1)。

3.5 河床導水度量測

本研究採用直徑 56 cm 、高 25 cm 之鋼環所製之滲流儀(seepage meter)(圖 2)進行量測，將滲流儀埋入欲測量河床位置，將滲流儀置入河床深約 15 公分 ，再將滲流儀上蓋使其密合與外部河水隔絕，接著以軟管

連收集袋並用碼錶計時。若地下水補注河川，因滲流儀內體積固定則增加水體積會流入收集袋內，在時間 t 內所收集之體積 V ，計算出單位時間地下水滲流量 Q 。

水力梯度(Hydraulic gradient, HG)之量測是以微型壓力計(mini-piezometer)進行量測，先以鋼管插入河床下 15 公分 量測位置，量測地下水頭端連接壓克力管，再將鋼管移除並以壓克力管取代，量測河川水頭端置於河床底部，兩管上端以 T 型接頭連接，以手動真空泵將管內減壓至負壓狀態，即可觀測兩端水頭差，其水力梯度 i 即為兩端水頭高差除以河床下 15 公分 。

根據 Darcy 定律滲流試驗，所提出飽和土壤中水之關係如下式所示：

$$Q = -KiA$$

式中地下水滲流量 Q 可由收集水體積 V 除以時間 T ，飽和土壤中水流動速度 V 即為水力傳導係數 K 乘以水力梯度 i 。

根據滲流儀試驗結果，將現地取得水力傳導係數平均約為 5 m/day 代入模式中。

3.6 產業用水

民生用水、旱田用水量、自來水廠用水量參考水利規劃試驗所(2016)，其成果乃本研究團隊承接並於埔里現地廠商問卷調查而得。工業用水採取經濟部統計處提供之各廠商營收級距，代入推估工業用水量公式。水田用水量則是使用水錶以一句方式記錄。

四、模式設定

研究區域觀測井數據不多。本研究參考水利署-地理倉儲判斷觀測井數據趨勢合理性，以埔里測站作為基準，以圖高程內插求出各堆積區域假設地下水位。河川水位站僅有研究區域下游觀音橋測站，假設河川內水深隨地點像上游距離增加 1 公里降低 1 %。本研究使用 MODFLOW 模式，採用線性疊加概念，分別選定 2013 年 2 月枯水季期間、2013 年平均與 2013 年 7 月豐水季之各項數據，並假設枯水季下游湧泉水頭高出地表 0.5 公尺、2013 年年平均下游湧泉水頭高出地表 1 公尺、2013 年 7 月豐水季下游湧泉水頭高出地表 1.5 公尺，先以枯水季穩態 PEST 求解上游河床導水度(K)範圍；其次，再將枯水季穩態 PEST 求解出河床導水度代入 2013 年平均穩態模擬，以 2013 年年平均穩態模擬求出降雨補注(recharge)入滲係數；2013 年豐水季確定模擬降雨入滲係數，再以 2013 枯水季、2013 年平均、2013 豐水季之各區域橫向水力傳導係數作幾何平均，最後以 2009 年至 2014 來進行模擬驗證。

4.1 2013 年 2 月枯水季穩態 PEST

選用 2013 年 2 月平均之各項參數，在下游湧泉假設高於地表 0.5 公尺，西北邊界水頭高為 484.7 m 至 399.4 m、西南邊界水頭高為 386 m 至 421 m。穩態 PEST 模擬結果，其橫向水力傳導係數(K_h)值介於 12.63 ~ 0.06 m/d。

總離開地下水系統為 337763 CMD，佔整體出流

量約 90 %；下游湧泉(Drain)流出量為 26195 CMD，佔整體出流量約 7 %；河川出滲量為 10734 CMD，佔整體出流量約 3 %。補注地下水系統部分，河川與水田補注 291647 CMD，佔整體補注量約 80 %；邊界補注 72311 CMD，佔整體補注量約 20 %。

4.2 2013 年全年平均穩態 PEST

選用 2013 年全年平均之各項參數，在下游湧泉假設高於地表 1 公尺，西北邊界水頭高為 489 m 至 400.2 m、西南邊界水頭高為 388 m 至 423 m，降雨補注為降雨深度之 15 %。穩態 PEST 模擬結果，其橫向水力傳導係數(K_h)值介於 917.07 ~ 0.03 m/d。

總離開地下水系統為 303602 CMD，佔整體出流量約 64 %；下游湧泉(Drain)流出量為 140700 CMD，佔整體出流量約 29 %；河川出滲量為 36146 CMD，佔整體出流量約 8 %。補注地下水系統部分，河川與水田補注 3975545 CMD，佔整體補注量約 83 %；邊界補注 805274 CMD，佔整體補注量約 17 %；降雨補注 1815 CMD，佔整體補注量約 0.4 %。

4.3 2013 年 7 月豐水季平均穩態 PEST

選用 2013 年 7 月豐水季平均之各項參數，在下游湧泉假設高於地表 1.5 公尺，西北邊界水頭高為 486.9 m 至 401.4 m、西南邊界水頭高為 388 m 至 422.1 m，降雨補注深度令為 7 月平均降雨深度 15 %。穩態 PEST 模擬結果，橫向水力傳導係數(K_h)介於 235 至 0.07 m/d。

總離開地下水系統為 303602 CMD，佔整體出流量約 44 %；下游湧泉(Drain)流出量為 362799 CMD，佔整體出流量約 53 %；河川出滲量為 17591 CMD，佔整體出流量約 2 %。補注地下水系統部分，河川與水田補注 541504 CMD，佔整體補注量約 79 %；邊界補注 70307 CMD，佔整體補注量約 14 %；降雨補注 47463 CMD，佔整體補注量約 7 %。

五、模擬驗證

將以上 2013 年 2 月枯水季、2013 年年平均、2013 年 7 月豐水季之橫向水力傳導係數(K_h)進行幾何平均橫向水力傳導係數與各項水文數據，由於未有邊界水頭之區域(M、N、O、K)模擬結果有地下水位高於地表情形，因此將 M、N、O、K 區域降雨水深再乘於 0.1，降低其地下水位使其模擬與現地差異減少。輸入 2009

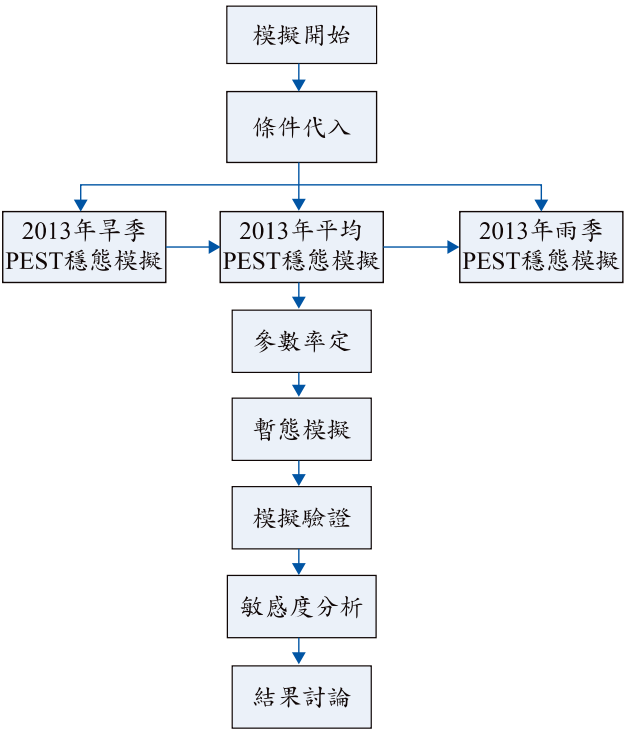


圖 4 模擬流程圖

年至 2014 年水文參數進行模式中驗證，採用 2009 年 1 月 1 日地下水位作為模式驗證起始水深。

總離開地下水系統為 128653 CMD，佔整體出流量約 38 %；下游湧泉(Drain)流出量為 114419 CMD，佔整體出流量約 34 %；單位網格蓄水量流出 60057 CMD，佔整體補注量約 18 %；河川出滲量為 31427 CMD，佔整體出流量約 9 %。

補注地下水系統部分，河川補注 140447 CMD，佔整體補注量約 42 %；單位網格蓄水量流入 66380 CMD，佔整體補注量約 19 %；邊界補注 41715 CMD，佔整體補注量約 12 %；降雨補注 86158 CMD，佔整體補注量約 26 %；地下水總和減少 39 CMD。埔里站模擬與觀測值平均誤差 0.5 m、溪尾站模擬與觀測值平均誤差 1.5 m (表 1)，區域水平衡收支如。

表 1 模擬值與觀測值誤差總表

	本研究 平均誤差(m)	水規所(2016) 平均誤差(m)
埔里測站	0.5	9.16
溪尾測站	1.5	4.23
平均誤差	1	6.7

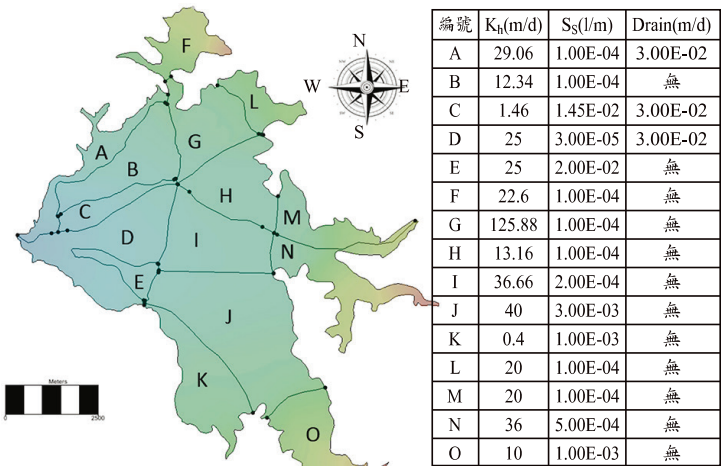


圖 5 模擬範圍水文參數分區

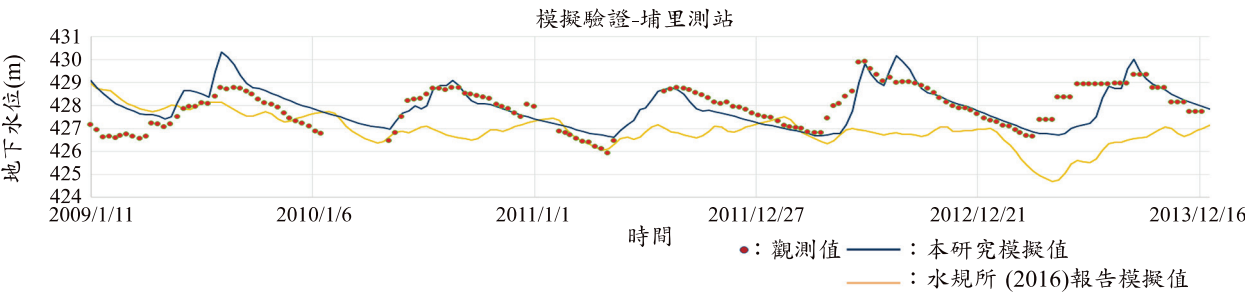


圖 6 模擬結果-埔里測站

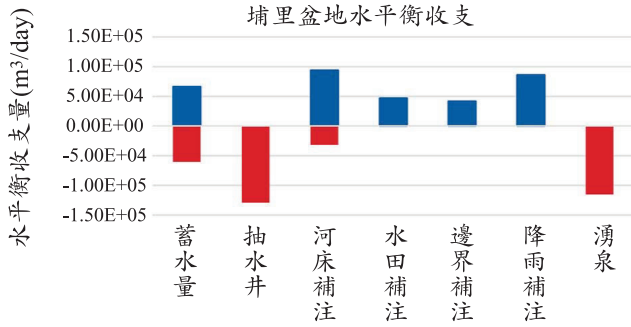


圖 7 研究區域水文收支

六、敏感度分析

原始河床導水度情況埔里地區之地下水總量減少 $1.8 \text{ m}^3/\text{day}$ ；模擬結果在 0.5 倍抽水量之地下水總量增加約為 $0.12 \text{ m}^3/\text{day}$ ；模擬結果在 1.2 倍抽水量之地下水總量減少 $26.8 \text{ m}^3/\text{day}$ 。其模擬結果有違背現實情形，因模式中河川水位乃給定水位高，故抽水量增加而河川補注提高。若為實際情況，則地下水位降低則提高水力梯度，大量河川水滲漏補注地下水，造成河川水位降低。

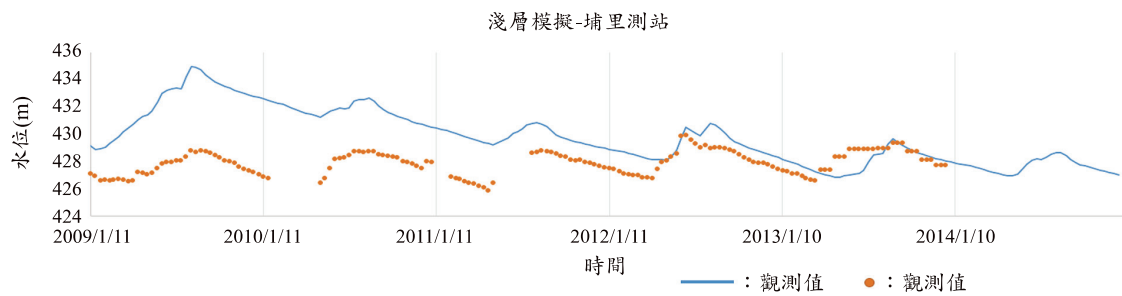


圖 8 淺層模擬-埔里測站

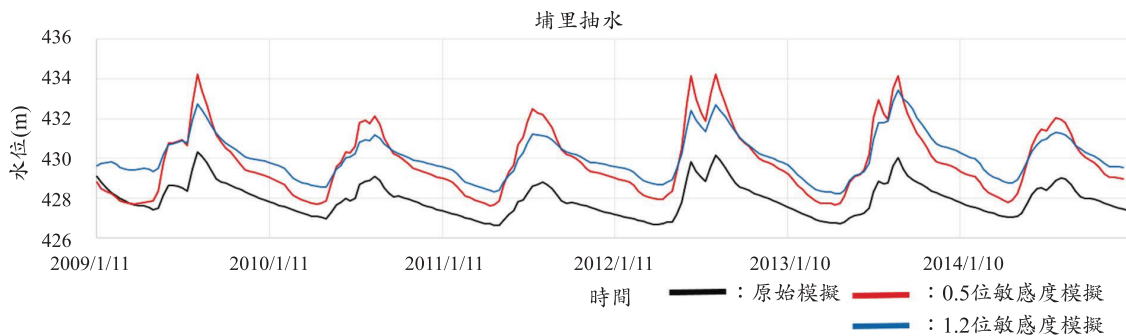


圖 9 埔里抽水量敏感度

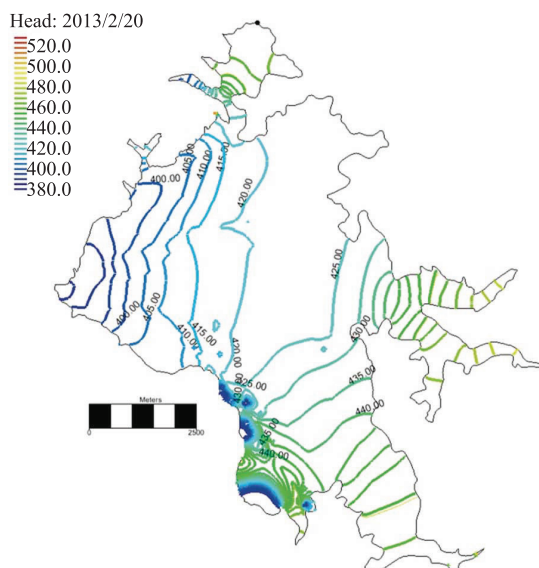


圖 10 2013 年 2 月 20 日枯水季模擬地下水位分佈圖

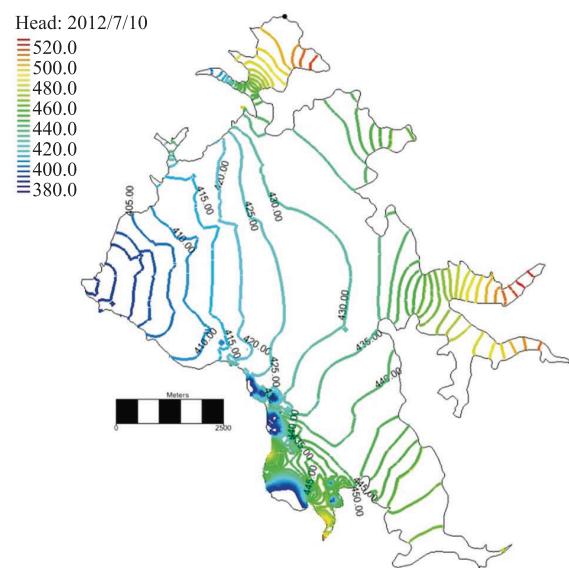


圖 11 2012 年 7 月 10 日豐水季模擬地下水位分佈圖

七、淺層模擬

根據台糖鑿井隊前隊長-李昭順前輩口述，進行埔里盆地頭一層鑽探，雖然整體岩心看起來相似，但是 50 m 以下的導水性實際上小很多，可能因孔隙中固結特性不同。因此有必要測試較薄的含水層厚度條件。

透過觀測值得知地下水水位振幅位於地表下 30 公尺以內。因此本節改用底部高程 342 公尺水平面上之土層作為非拘限含水層的厚度進行淺層模擬。其淺層模擬之橫向水力傳導係數(K_h)約為原始模擬值 2 倍以上，比儲水率(S_s)則差異不大。地下水測站模擬結果得知，地下水位變化皆受到含水層厚度影響。其淺層模擬之地下水位振幅劇烈變化，原因為研究區域含水層厚度減少，則保持其地下水含水層流通率(T)，區域內含水層橫向水力傳導係數與地下水位提高，加速地下水之流動。

八、結論

- (1) 比較現地數據與模擬結果，參考水利規劃試驗所(2016)報告抽水試驗，八股地區橫向水力傳導係數(K_h)為 $2.77 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ 、比儲水率(S_s)為每 $1.42 \times 10^{-6} \text{ l/m}$ ，對照模擬區域為 D 區域，模擬結果橫向水力傳導係數(K_h)為 $4.8 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 、比儲水率(S_s)為每公尺 $3 \times 10^{-5} \text{ l/m}$ 差異皆為 10 倍，推測其誤差來源為 D 區域未設立觀測井。史港里區域橫向水力傳導係數(K_h)為 $1.05 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ 、比儲水率(S_s)為 $3.08 \times 10^{-4} \text{ l/m}$ ，對照模擬區域為 G 區域，模擬結果橫向水力傳導係數(K_h)為 $7.2 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ 、比儲水率(S_s)為 $1 \times 10^{-4} \text{ l/m}$ ，差異不大，其模擬結果相當接近現地情況。
- (2) 經過 2009 年至 2015 年之模擬演算，流出地下水系統量為 35 萬 CMD (4.13 CMS)，其中湧泉佔整體出流量 34 %、抽水井佔整體出流量 38 %、單位網格蓄水量(storage)流量佔整體出流量 18 %、河床出滲佔整體出流量 9 %、邊界出流佔整體出流量 1 %。地下水補注量為 35 萬 CMD，河床補注佔整體補注約 28 %、水田補注約 14 %、單位網格蓄水量(storage)流量補注佔整體補注約 20 %、降雨補注佔整體補注約 26 %、邊界補注佔整體補注約 12 %。離開與補注地下水系統相差 40 CMD 對於整體地下水總量影響不大。
- (3) 比較 2013 年 2 月 20 日枯水季模擬地下水位與 2012 年 7 月 10 日豐水季模擬地下水位，其地下水位等

高線 400 m 位於研究區域西半部，在豐水季與枯水季時期水平方向相差有 150 公尺；研究區域東半部需在豐水季時期才有地下水頭 520 m 出現。由此現象可知，整體研究區域地下水位易受到季節影響，其中研究區域東半部較西半部敏感，推測其原因或許乃研究區域西半部湧泉現象為下游河床地下水出水口狹小以及邊界水頭補注，造成地下水回流產生；而東半部地下水位變動差異大，地下水位幾乎位於地表下 20 m，若作為人工湖補注埔里盆地地下水，會有良好成效。

- (4) 探討模擬誤差來源：MODFLOW 估算進入自由含水層之降雨補注量乃採用降雨水深之百分比值，不合乎水文現象中之入滲物理現象-當降雨集中時入滲之比例降低；邊界補注設定與河川水位乃給定已知水頭高，模式中即使抽水量大量增加，邊界水頭與河川水位亦不會減少，如此可能會高估邊界補注量與河川補注量。因此本模式之設計架構不適用來評估可再抽用多少的地下水量與安全出水量。

謝誌

感謝中興顧問楊銘賢博士分享資料，陶方策副總的指導與討論，張侑瑛學長指導現地儀器，蘇荷婷小姐協助模式模擬。

參考文獻

1. 中國文化大學大氣科學系大氣水文研究資料庫 <https://dbar.pccu.edu.tw/pages/About.aspx>。
2. 水利地理資訊服務平台 <https://gic.wra.gov.tw/gis/>。
3. 水井手冊，臺灣糖業公司出版，中華民國六十五年六月修增再版。
4. 林伯聰(2002)「抽水量的時空分布對花蓮鳳林地區地下水之影響」，農業工程學報，48 卷 4 期，P91~101。
5. 陳炳誠(2003)「埔里與魚池盆地之沉積與新構造研究」，碩士論文，國立台灣大學地質科學研究所。
6. 鄭芳玉(2006)「埔里鎮茭白筍產業的產銷研究」，碩士論文，高雄師範大學。
7. 水利規劃試驗所(2016)「埔里盆地地下水資源調查開發評估」，中興工程顧問公司承接。
8. Dragoni, W (2013) "Modeling the effects of pumping wells in spring management; The case of Scirca spring (central Apennines, Italy)", *Journal of Hydrology*, 493, 115-123.

9. Darcy, H.P.G. (1856) Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon, Dalmont, Paris.
10. Fitts, Charles R. (August 2012) "Groundwater Science", Academic Press.
11. Martinez, Christopher J. (2009) "Seepage Meters for Measuring Groundwater-Surface Water Exchange", UF IFAS, AE465.
12. Martinez, Christopher J. (2009) "Mini-piezometers for Measuring Groundwater to Surface Water Exchange" UF IFAS, AE454.
13. Philip, J.R. (1957) "The theory of infiltration: 1.The infiltration equation and its solution", soil sci.83(5), 345-357.
14. Rosenberry, Donald O. and La Baugh, James W. (2007) "Field Techniques for Estimating Water Fluxes Between Surface Water and Ground Water", Denver Publishing Service Center, Denver, Colorado, USA.

收稿日期：民國 107 年 10 月 15 日

修正日期：民國 109 年 03 月 17 日

接受日期：民國 109 年 04 月 02 日