

專 論

應用三維數值模式評估濁水溪中游山區
地下水安全出水量

**Applying a Three-Dimensional Numerical Model to
Evaluate the Safe Yield of Groundwater in the
Mountainous Midstream of Jhoushuei River Basin**

國立成功大學
大地資源研究中心
博士後研究員

王 士 榮

Shih-Jung Wang

國立成功大學
大地資源研究中心
博士後研究員

林 宏 奕

Hung-I Lin

國立成功大學
大地資源研究中心
博士後研究員

李 馨 慈

Shing-Tsz Lee

國立成功大學
資源工程學系
副教授

涂 國 錦

Kuo-Chin Hsu

經濟部
中央地質調查所
科長

黃 智 昭

Chi-Chao Huang

經濟部
中央地質調查所
技士

張 閔 翔

Min-Hsiang Chang

國立成功大學
資源工程學系
教授

李 振 誥*

Cheng-Haw Lee

摘 要

台灣地下水資源在平原區的調查已經相當豐富，然而台灣山地約佔總面積的 2/3，其所涵養之地下水資源勢必相當充沛。本研究基於永續經營的概念，採用地下水模擬系統(groundwater modeling system, GMS)中之 MODFLOW 軟體，進行濁水溪中游地區的三維度數值模式建構，估算該地區的地下水安全出水量。本研究定義研究區之地下水安全出水量，為研究區西側之給定水頭邊界地下水流出量，以評估在不影響研究區地下水資源的情況下，可增加開採的地下水資源量。首先建立研究區之水文地質概念模式，並進行數值模式之建立與率定，之後採用 2000 年至 2009 年間之平均降雨量，進行分年之安全出水量估算，10 年之平均出水量為每年 199 百萬

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

噸，且出水量有隨年遞增之結果；再使用這十年間之月平均最大與最小降雨量，估算最大最小降雨情況下的安全出水量，結果分別為每年 201 與 198 百萬噸。研究結果顯示，本研究區之出水量受降雨變化之影響不顯著，可能為本研究區之降雨大部分為河谷沖積區所貯存與濁水溪排出所致。

關鍵詞：山區，地下水，安全出水量，數值模式。

ABSTRACT

The investigation of groundwater resources in the alluvial plain is abundant in Taiwan. The mountainous region occupied 2/3 of Taiwan area, but the information of groundwater resources in the mountainous region is very lack. In this study, groundwater modeling system (GMS) with MODFLOW code is used to evaluate the groundwater resources in the midstream of Jhoushuei River Basin, Taiwan. A three-dimensional numerical model is used to evaluate the safe yield of groundwater under steady state situation. The safe yield is defined as the outflow from the specified head boundary in the west part of the study area and does not disturb the original groundwater system. The conceptual model is constructed first and then the numerical model is built based on the conceptual model. The numerical model is calibrated by the observed groundwater level. Mean precipitation data from 2000 to 2009 is input in the numerical model to evaluate the safe yield in the study area. The result shows that the mean safe yield is about 199×10^6 ton/year. The safe yield under the maximum and minimum precipitation situation is 201×10^6 and 198×10^6 ton/year, respectively. The influence of the input precipitation is not sensitive. This might be due to the reason that the mountain alluvia and river contain most of the water from precipitation in this area.

Keywords: Mountainous region, Groundwater, Safe yield, Numerical model.

一、前言

台灣地區地狹人稠造成地表水資源的使用日趨不足，地下水之開發與使用勢必為未來之趨勢。台灣地下水資源在平原區的調查已經相當豐富，然而山地面積佔台灣總面積的 2/3，其所涵養之地下水資源必定相當充沛。目前針對台灣山區地下水資源的相關研究相當缺乏，主要以經濟部中央地質調查所(2008a)所進行之山區地下水資源探查的先期計畫為開端，本研究則為山區地下水資源延續計畫之一部分(經濟部中央地質調查所，2010a)。此研究計畫主要在調查全台灣山區地下水資源的涵養量與地下水開發潛能區，以作為未來山區地下水資源開發與使用規劃的參

考。整體計畫共分三期，將分別進行中部、南部與北部地區的山區地下水資源調查，每期各執行四年，以各主要溪流之流域進行分區調查。本研究為第一期第一年之研究子項目，研究區為濁水溪流域中游地區，由研究區之降雨分布與地下水補注情形配合相關因子進行推估結果顯示，濁水溪中游地區含有豐富的地下水資源，主要開發潛能區為陳有蘭溪中游與濁水溪中游西段及清水溪下游區(經濟部中央地質調查所，2010a)。因此，本研究以地下水模擬系統(groundwater modeling system, GMS)中之 MODFLOW 軟體，建立濁水溪流域中游之三維度地下水流模式，來進行濁水溪流域中游地區之地下水資源的安全出水量(safe yield)評估。

地下水出水量是指可從含水層抽用地下水的量。由於地下水文系統處於平衡狀態，當過度抽用地下水時，將對環境造成不利影響，故在評估地下水開發潛能，常以安全出水量來評估。安全出水量可定義為自地下水區域合理和永續抽取，但不致造成不良影響之水量，亦即安全出水量之解釋為地下水區域內可經年抽取之水量，但不因抽水而產生不良之後果。抽水量超過安全出水量時稱為超抽。在使用安全出水量一名詞時須注意其並非一定值，在同一地下水集水區中，在不同時間可能有不同之安全出水量。即使在同一集水區，同一時間內，亦可藉改變抽水井之位置及抽水型態而改變其安全出水量，而地下水之人工補注更可大幅影響安全出水量。

依曹以松(1989)的分類，安全出水量的計算方式可分為下列幾種：

(a) 水文平衡公式(Equation of Hydraulic Equilibrium)

水文的循環基本上符合物質不滅定律，水的總質量不變，所變的僅為存在的形式、位置與分配而已。某一個時間輸入一地區的水量與同時期滲入此地區之水層、耗損、地面及地下之輸出量相等。

(b) 地下水平衡法(Groundwater Water Inventory)

僅考慮含水層之輸出量與輸入量的關係。亦即：

$$\text{總輸出量} = \text{總輸入量}$$

(c) 希爾法(Hill Method)

在地下水區內，水井之水位年變化量與年抽水量有密切關係，如此區域內之補注水量相當穩定，則其平均年地下水位變化(自由含水層之水位面或是受壓含水層之水壓面)與年抽水量之關係呈現性關係，在此直線上，水位年平均變化為零所對應的抽水量即為安全出水量。

(d) 哈定法

一個地下水區經過一段時間的抽水，且年抽水量保持相當穩定，同時在此期間補注量與長期平均值相當接近，則可用年平均變化與滯留在此區域之進水量(總輸入量減去總輸出量)相對做圖成一直線，在此直線上，年平均水位變化為零時

之輸入與輸出水量之差值，即為安全出水量。由於此法考慮到補注量，所以限用於自由含水層。

(e) 辛普森法

當含水層以海洋為邊界時，超抽地下水導致地下水位降低，當水位低於海平面時，將產生海水入侵現象。此時地下水坡降斜向海面，小部分地下水耗之於海，以其穩定海水楔(sea water wedge)之位置，而區域的地下水流量小於抽水量，促使地下水位下降而形成一個抽水溝(pumping trough)。在區域抽水井剛發現抽水溝之前的抽水量，即為合適出水量。

(f) 零水位變化法

在某一時間內，若開始的地下水位與終止時的地下水位相等，則不論在此時期內的水位變化過程為何，均可表示在此一時間內總抽出量與總補注量相等，因此如以此時期內的總抽水量除以時間，即為流域之安全出水量。

本研究以水文平衡與地下水平衡概念法，定義安全出水量為研究區輸出之地下水量，亦即輸入研究區之地下水量減去涵養之水量，此量即為研究區可增加開採之地下水量。研究考量經濟部中央地質調查所所進行之研究與調查資料(2008a, 2010a, 2010b, 2010c)，首先建立濁水河流域中游之水文地質概念模式，並由收集之資料將水文地質概念模式依數值模式所需，建立濁水河流域中游之三維度數值模式，之後參考地下水位觀測資料進行模式之率定，而由於研究區目前尚無可用來驗證的資料，因此僅以穩態地下水位資料進行模式之率定，最後則以率定完成之三維度數值模式來進行濁水河流域中游地區之安全出水量推估。

二、研究區概述

本研究之研究區為濁水河流域中游，其地形水系如圖 1 所示，研究區東南西北各邊界線皆為山稜線，東側為中央山脈分支，南側主要為玉山山塊，西側為斗六丘陵與八卦山台地，北側為集集山脈與南投丘陵等。濁水溪主流由東向西穿越研究區北部，本區屬於濁水河流域中游，以河階地形與台地為主，兩主要支流由南向北注入濁水

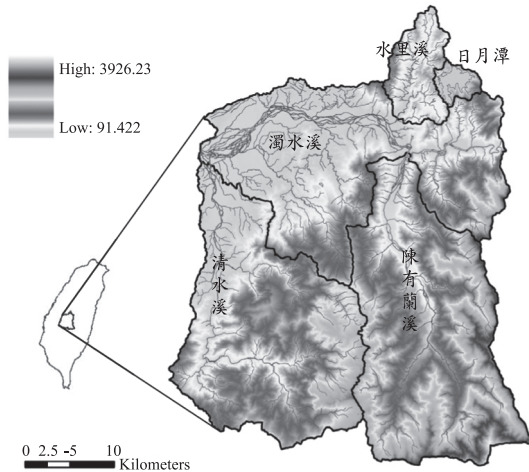


圖 1 三維度數值模式之研究區與各集水區分區圖

溪主流，東側支流為陳有蘭溪，西側支流為清水溪，另一較小之支流由北向南注入濁水溪主流，為水里溪，日月潭則位於本區東北方。因此本研究區可概分為五個集水區，分別為濁水溪集水區、陳有蘭溪集水區、清水溪集水區、水里溪集水區與日月潭水庫集水區(圖 1)。研究區地形大致呈現東高西低、南高北低趨勢，最高點位於研究區東南方，屬於玉山山脈，海拔超過 3400 公尺，最低點位在研究區西北方，為濁水溪穿出斗六丘陵與八卦山脈出口處，海拔約 100 公尺，因此整個研究區之地形變化相當劇烈。

三、數值模式建立

本研究依據三維數值地形、河川水系、集水區範圍與三維地下水位分布及考量地質構造、自然邊界條件與降雨入滲補注量等因素，建立一個模擬真實物理環境之水文地質概念模式；再給定模式內各水文地質單元之水文地質參數，採用等效孔隙介質理論，選用數值軟體 GMS 於各地層劃分網格，設定各地層水文地質參數，建立水文地質數值模式。

3.1 水文地質概念模式

水文地質概念模式之目的是為了簡化現地複雜的水文地質情況，透過現場的資料整合，來

合理地架構整個系統。模式的建立，首先須根據研究區之水文地質特性與含水層的空間分布，來建立地下水水文地質架構概念模式，以做為數值模式之基礎。

山區岩層之分層概念主要參考北卡羅萊納的山麓水文地質分層(Daniel and Dahlen, 2002)概念，其將含水層型態大致分為三層，由地表向下分別為：風化層、破碎帶與岩盤。其中主要含水層為風化層，由已經風化的土壤顆粒組成；而破碎帶為次要含水層，地下水主要存在於岩層之節理與裂隙；岩盤則為完整的岩體，缺乏裂隙可涵養地下水，可視為阻水層。然而本研究區水文地質分層資料之相關研究文獻甚少，本研究採用財團法人中興工程顧問社於研究區所進行之水文地質鑽探資料為基礎(經濟部中央地質調查所，2010b)，配合財團法人工業技術研究院於研究區進行之 RIP 地球物理試驗結果(經濟部中央地質調查所，2010c)，以及參考經濟部中央地質調查所(2008a)先期計畫之結果來進行水文地質概念模式之建構。

經濟部中央地質調查所(2010b)在研究區進行 26 個位置的水文地質鑽探工作，欲建立地下水位之監測站與觀測井，鑽井深度分為 100 公尺和 150 公尺兩種。除了確認各井位之地下水位深度外，也採取鑽探岩心做判識建立岩心柱狀圖，並將岩心資料做水文地質分層，概略將研究區之水文地質分為岩屑層、破碎帶和岩盤三層。岩屑層為主要含水層，為土壤與細碎之岩塊；破碎帶之主體為岩石，但其中包含可透水之岩層節理、裂隙與構造，為次要含水層；岩盤則為深處之岩體，可能含有裂隙但已經被不透水材質填充，可視為阻水層。因此，可依據上述之結果，建立研究區之水文地質分層如圖 2 所示。

3.2 三維度 GMS 數值模式

3.2.1 水文地質分層

根據所建立之水文地質概念模式，本研究考量岩性、坡度與構造等因子，將經濟部中央地質調查所(2010b)鑽井分析所得之岩屑層厚度，與考量因子做連結並建立其空間分布圖，輸入 GMS

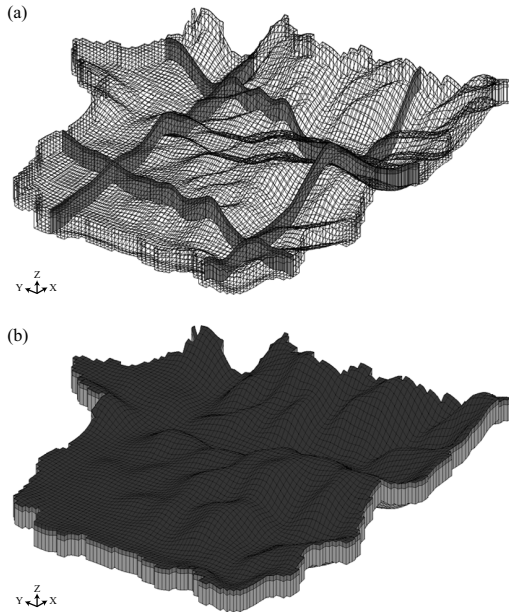


圖 2 濁水河流域中游之水文地質分層(a)剖面圖與 (b)全區圖

網格中建立岩屑層厚度如圖 3 所示。其中岩屑層在濁水溪與清水溪匯流之鄰近區域較厚，主要為該區域有較厚之岩屑層鑽井資料且屬於同一岩性，並位於車籠埔斷層之西側，因此有較厚之含水體；而較高山區之岩屑層則相對很薄，最薄處僅約 1 公尺。本研究並參考經濟部中央地質調查所(2010c)於名竹橋車籠埔斷層線兩側施作地球物理試驗，依據其試驗結果，車籠埔斷層東西兩側之岩盤深度分別約為 10 公尺與 250 公尺，而地利斷層區域之河床下方岩盤深度約 130 公尺。經濟部中央地質調查所(2008a)在清水溪附近進行地球物理試驗結果顯示，該地區含水層約為地表下 15 公尺內。綜合上述之結果，目前對研究區中之岩盤深度仍然無法有效的定位，且經濟部中央地質調查所(2010c)使用之地球物理方法無法分辨出岩屑層與破碎帶的差異，因此破碎帶之深度目前亦無法定位。故本研究依據上述資料為基礎並考量數值模式之穩定性，將岩屑層與破碎帶結合為數值模式之表層，作為研究區之含水層，並設定數值模式中之破碎帶厚度為均勻之 150 公尺，則岩盤深度為岩屑層底向下 150 公尺

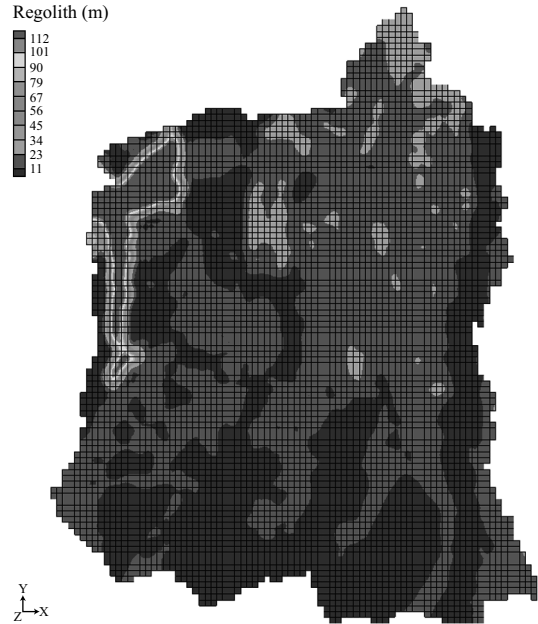


圖 3 數值模式中岩屑層厚度之分布情形

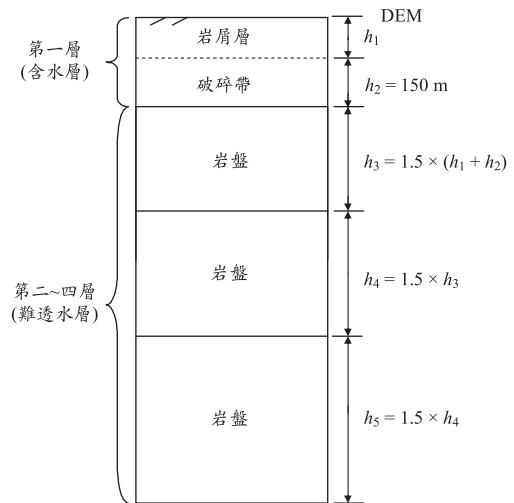


圖 4 數值模式中水文地質分層設定示意圖

處。考量數值運算之穩定性與正確性，設定相鄰網格之大小差異不大於 1.5 倍，因此將表層下之岩盤分為三層，岩盤中每層之參數設定皆相同，且各層厚度為上層厚度的 1.5 倍，以減少數值運算上的誤差。因此數值模式中水文地質分層共有四層，設定示意圖如圖 4 所示。

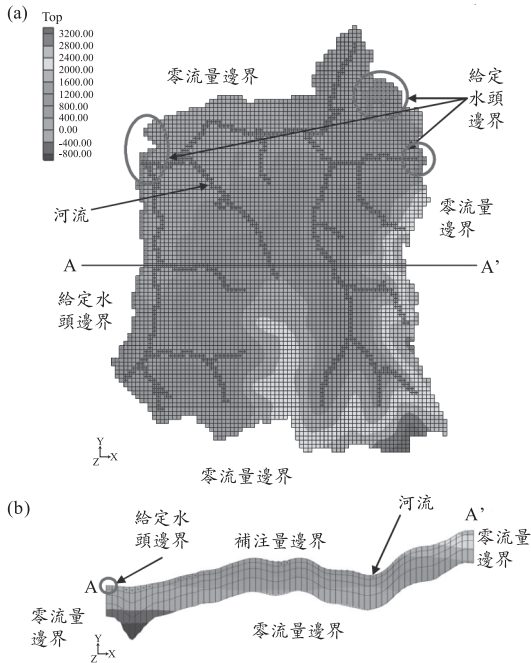


圖 5 三維度數值模式中(a)表層與(b)AA'剖面之邊界條件設定

3.2.2 網格與邊界條件設定

確認研究區之大小、邊界與相關分層後，使用 GMS 軟體之水文地質概念模型(conceptual model)來建構本研究區之三維度數值模式。考慮研究區大小、參數設定與數值模式之運算效率，建立研究區南北向與東西向長度分別為 56000 m 與 43000 m，網格大小設定為 500 m × 500 m，因此南北向共 112 網格，東西向共 86 網格，垂向設定四層，總網格數為 38528。

在數值模式設定上，各山陵線可視為地下水之分水嶺，因此研究區四個側向邊界皆可設定為零流量邊界。然而研究區西側之斗六丘陵，向西對濁水溪沖積扇有側向之地下水補注情形(經濟部中央地質調查所，2010a)，因此本研究將表層之西側邊界設定為給定水頭邊界(specified head)，以評估研究區向西之地下水補注量。而西側之給定水頭邊界，亦將用來估算研究區流出之地下水量，作為本研究安全出水量之評估依據。濁水溪流入與流出本研究區之邊界處，在第一層中亦設定為給定水頭邊界，以模擬研究區地面水

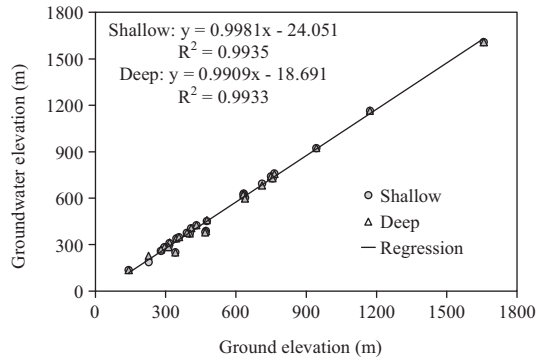


圖 6 地下水位高程與地表高程之相關性

與地下水之流入與流出。上邊界主要分為地表補注與水體補注邊界，地表補注依降雨量與補注率設定補注量(經濟部中央地質調查所，2010a)；水體補注包含河川補注與日月潭補注，河川使用 MODFLOW 中的 river 模組進行設定，日月潭區域則在第一層設定為給定水頭邊界，將日月潭水體納入山區地下水資源之數值模式中。下邊界為不透水的深層岩盤，設定為零流量邊界。數值模式中之邊界條件設定如圖 5 所示。

3.2.3 初始水頭設定

經濟部中央地質調查所(2010b)建立之 26 口地下水水位監測井，其觀測所得之穩態地下水位高程與地表高程之相關性如圖 6 所示，圖中顯示不論深層或淺層地下水位之高程與地表高程皆有良好之線性關係，本研究採用深層之地下水位為建立初始水頭之基礎。深層地下水位與地表高程之迴歸係數 R^2 為 0.9933，線性方程式可寫為：

$$h_{GWL} = 0.9909h_{ELE} - 18.691 \dots\dots\dots (1)$$

其中 h_{GWL} 為地下水位高程， h_{ELE} 為地表高程，單位皆為 m。本研究即依據此方程式設定各網格之初始地下水頭。

3.2.4 水文地質參數設定

本研究所需要輸入三維度數值模式中之水文地質參數資料，包含各岩層之水力傳導係數(hydraulic conductivity)、地表補注量(recharge)與河床傳導度(conductance)三者，分述如下：

(1)水力傳導係數

研究區之水力傳導係數文獻主要為經濟部

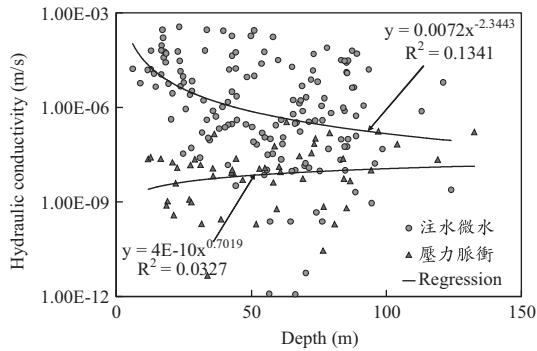


圖 7 地下水水位監測井之水力傳導係數與深度之相關性

中央地質調查所(2008b)委託財團法人中興土木科技發展文教基金會所執行之計畫，其施作水力試驗外，亦收集相關文獻整理出依據濁水溪流域中不同岩性之水力傳導係數範圍，為本研究模式率定時調整參數之參考。經濟部中央地質調查所(2010b)亦在本研究區進行相關水文地質試驗，以求取不同深度之水力傳導係數、儲水係數(storage)與孔隙率(porosity)等參數。其中水力傳導係數與深度之關係如圖 7 所示，圖中顯示水力傳導係數對深度之相關性不明顯，但使用注水與微水試驗方法之水力傳導係數結果略有隨深度減少之趨勢，其關係式可寫為：

$$K = 0.0072 \times depth^{-2.3443} \dots\dots\dots (2)$$

其中 *depth* 表示深度，單位為 m，*K* 為水力傳導係數，單位為 m/s。

本研究即依據經濟部中央地質調查所(2010b)不同深度之水力傳導係數資料與其分布，計算各地下水水位監測井位之水平(K_h)與垂向(K_v)水力傳導係數值如表 1 所示，其中水平水力傳導係數約為垂向水力傳導係數的 10 倍。將此資料做為三維度數值模式中表層之水平與垂向水力傳導係數之初始設定。而第二至四層之岩盤部分，設定水平與垂向水力傳導係數值皆為 10^{-7} m/d，以模擬其相對較低之滲透性。

(2)補注量

數值模式中補注量的設定，為依據經濟部中

表 1 地下水水位監測井計算所得之水平與垂向水力傳導係數值

孔號	站名	K_h (m/d)	K_v (m/d)
BH(W)-01	清水	1.89E-03	8.74E-04
BH(W)-02	車埕	5.35E-05	1.36E-07
BH(W)-03	中和	2.13E-03	5.03E-04
BH-04	秀峰	2.24E-01	1.56E-04
BH-05	玉峰	1.15E+00	3.30E-03
BH(W)-06	內湖	8.54E-02	3.60E-03
BH-07	坪仔頂	5.71E-02	2.24E-05
BH-08	永興	2.46E-01	2.95E-03
BH(W)-09	興隆	6.17E-02	7.57E-04
BH-10	地利 1	1.20E+01	8.86E-02
BH(W)-11	地利	8.34E-01	1.57E-02
BH-12	地利 2	1.26E+00	2.66E-02
BH-13	地利 3	2.59E-01	2.45E-02
BH(W)-14	坪頂	4.56E-01	9.08E-02
BH(W)-15	山峰	3.74E-03	9.07E-04
BH(W)-16	瑞龍	5.08E-01	2.85E-02
BH(W)-17	桶頭	7.53E-05	2.66E-05
BH-18	樟湖	3.72E+00	5.76E-02
BH(W)-19	內茅埔	3.76E-02	3.03E-02
BH-20	杉林溪	5.77E+00	1.43E-05
BH(W)-21	羅娜	2.52E+00	9.29E-01
BH-22	新鄉	5.33E-01	8.79E-02
BH(W)-23	和社	7.92E-01	6.28E-01
BH-24	草嶺	1.24E-01	1.18E-03
BH(W)-25	仁和	3.38E+00	1.80E-01
BH-26	東埔	1.98E-03	9.82E-04

央地質調查所(2010a)估算之補注量結果，並參考研究區之平均降雨量約為 0.007 m/d 來做數值模式的初始設定值與率定依據，補注量在 GMS 數值網格中之分布如圖 8 所示，其中補注量主要受到岩性、坡度、水系、地表覆蓋以及線形構造等五大因子之影響。模式中補注量之調整亦參考李振誥等人(2002)與陳尉平(2006)所評估台灣地區之飽和入滲率結果。

(3)河床傳導度

研究區中之河床沉積物目前無相關河流傳導度資料可直接提供數值模式使用，因此參考 Rushton (2007)之研究結果來作相關設定。Rushton (2007)使用不同方法推估河流係數(river

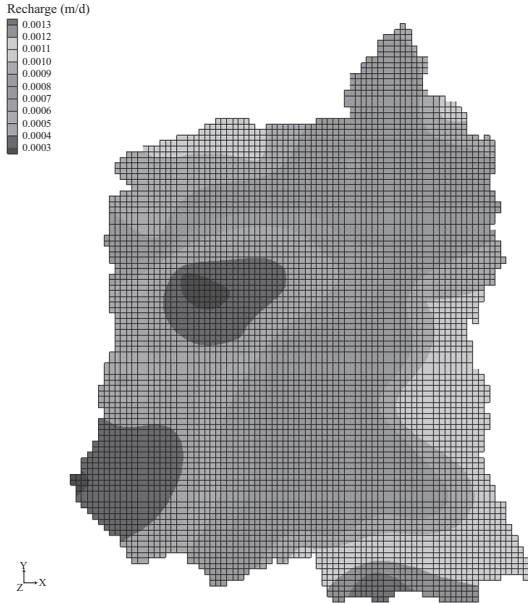


圖 8 三維度數值模式中補注量之初始設定值分布

coefficient, RC), 即本文中所指單位長度下之河床傳導度 C_{arc} 。此係數 RC 與含水層之水平水力傳導係數有關, 可寫為:

$$RC = C_{arc} = c \times K_h \dots\dots\dots(3)$$

Rushton (2007)之推估結果顯示, c 值介於 0.62~2.7 之間, 本研究取 c 值為 1.0, 並配合第一層水平水力傳導係數來作河床傳導度之初始設定, 即河床在各分區之傳導度等於該區之水平水力傳導係數。之後若有需要再進行河床傳導度的調整來做模式之率定。

四、結果與討論

三維度 GMS 數值模式建構完成後, 首先須進行模式之率定。透過調整水力傳導係數、補注量與河床傳導度等參數, 來配合地下水位監測資料進行模式之率定, 以確保數值模型之正確性。由於研究區目前尚無可用來驗證的資料, 因此本研究目前僅以穩態地下水位資料進行模式之率定, 完後模式率定後再進行研究區的安全出水量推估, 以了解濁水溪流域中游可增加開採的地下水量。

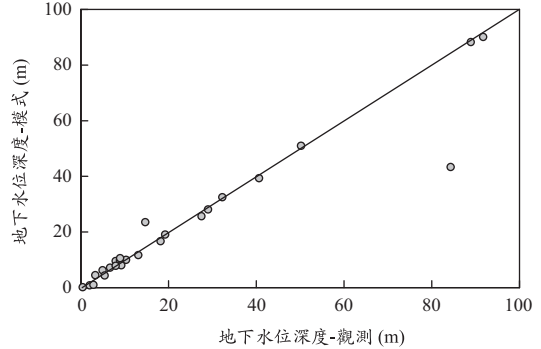


圖 9 地下水位監測井觀測水位深度與模擬水位深度之比較

4.1 數值模式率定與分析

本研究採用經濟部中央地質調查所(2010b)所進行之 26 口地下水位監測井所觀測到之地下水位高程, 來進行三維度 GMS 數值模式之率定。因為研究區範圍大且高程落差極大, 而經濟部中央地質調查所(2010b)所施作之鑽井僅有 26 口且大部分在靠近河床附近, 加上觀測時間尚短無法取得有效之地下水位資料, 因此使用現有之 26 口觀測井資料無法進行模式之驗證, 且其地下水位高程之分布受到地表高程起伏劇烈之影響, 亦無法展現研究區實際之地下水位分布, 故模式率定之結果, 無法由地下水位高程之分布圖進行觀測水位與模擬水位之比較與展示, 僅由各地下水位監測井位之觀測水位與模擬水位做比較。

模式率定結果如表 2 所示, 其中除了地利 2 井位之外, 其餘地下水位觀測結果與數值模式率定結果相近。差異之主要原因為地利地區之地下水位監測井位共有 4 口, 其位置相距近但地下水位變化大, 因此在數值模式率定中無法完全滿足各觀測點之結果, 僅以最適當擬合作為最終結果。圖 9 為地下水位監測井觀測水位深度與模擬水位深度之比較, 由圖中可知兩者相關性良好, 表示本研究所建構之三維度 GMS 數值模式有相當之代表性。

以濁水溪流域中游地區整體模式來看, 本研究區之地下水流狀況與地表高程起伏一致, 主要

表 2 三維度 GMS 數值模式率定結果

站名	坐標(TWD97)		網格高程	觀測地下水位深度(m)	模式地下水位深度(m)
	X	Y			
清水	227452	2633670	263.00	2.00	0.80
車埕	235899	2638199	591.93	4.93	6.24
中和	216236	2628285	138.65	6.65	7.17
秀峰	224813	2630461	405.30	3.30	4.49
玉峰	232947	2633303	356.30	10.30	9.99
內湖	228027	2623101	1397.94	7.94	9.58
坪仔頂	228467	2629148	422.42	5.42	4.36
永興	233530	2630320	717.88	2.88	0.99
興隆	235323	2629066	484.26	32.26	32.51
地利 1	243859	2632076	489.92	8.92	9.90
地利	244160	2632234	529.68	14.68	23.52
地利 2	245441	2631966	576.30	84.30	43.35
地利 3	245689	2632168	630.90	88.90	88.29
坪頂	213387	2628072	198.72	91.72	90.12
*山峰	210890	2614141	—	28.08	—
瑞龍	218254	2617880	474.10	13.10	11.70
桶頭	214927	2615944	308.42	0.42	0.12
樟湖	213172	2611252	621.22	9.22	8.03
內茅埔	234834	2620622	617.16	18.16	16.69
杉林溪	228339	2615102	1721.20	50.20	51.00
羅娜	237956	2617179	755.63	40.63	39.35
新鄉	235359	2613437	1236.20	19.20	19.08
和社	238638	2610221	928.93	8.93	10.60
草嶺	218025	2611566	995.50	27.50	25.67
仁和	221887	2605847	812.00	29.00	28.11
東埔	242553	2606525	899.93	7.93	7.83

*山峰站位在本研究區之外

原因在於研究區中高程變化大，地表起伏控制了主要之地下水流速與流向，且地下水位之深度變化相對於地表高程而言極小，故本研究所建構之山區三維度地下水流數值模式之結果，與圖 2 中之地表高程相似。在濁水溪靠近研究區出口附近河床較平緩之地區，因模式中採用單一曲線方式模擬河流，與實際上濁水溪在平緩區有許多分流狀況不同，因此在平緩區地勢較低處，部分水位值貼近地表，與該處實際上有河流分支流經結果相似。

本研究定義之地下水安全出水量為西側之給定水頭邊界向西之流出量，此邊界包含斗六丘陵與濁水溪河谷，而經濟部中央地質調查所

(2010a)進行了斗六丘陵向西之側向補注量推估，因此本研究將斗六丘陵之邊界做水平平衡分析，並與之比較。由數值模式之結果，斗六丘陵之邊界往西側之地下水流出力為每年 124 百萬噸，而地表補注量為每年 9 百萬噸，因此該邊界之東側地下水流入量為每年 115 百萬噸。此結果比經濟部中央地質調查所(2010a)評估，斗六丘陵地下水向西之側向補注量約每年 40 百萬噸之結果大，主要原因可能在於經濟部中央地質調查所(2010a)分析之區域在相對淺層，且其範圍在斗六丘陵西側部分，而本章數值模式分析之西側邊界考量之深度較深，且模式結果為考慮斗六丘陵之稜線邊界，因此造成兩者之差異。

表 3 研究區各年安全出水量之評估結果

年度	降雨量(m/d)	安全出水量(10 ⁶ t/year)
2000	0.00586	198.70
2001	0.00536	198.52
2002	0.00773	199.41
2003	0.00509	198.43
2004	0.00417	198.24
2005	0.00689	199.09
2006	0.00896	199.90
2007	0.00816	199.58
2008	0.00856	199.74
2009	0.00971	200.19

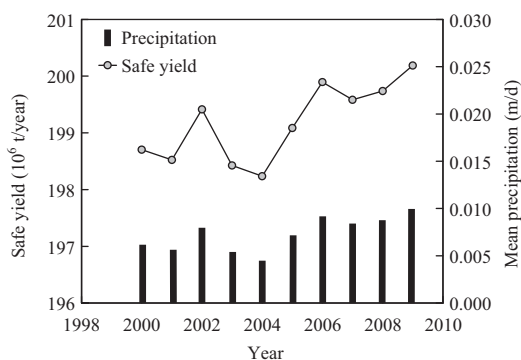


圖 10 研究區各年安全出水量推估結果與年平均雨量變化

4.2 安全出水量推估

使用本研究率定完成之研究區三維度數值模式，將研究區內各雨量站之年平均降雨量紀錄，取最低降雨量、最高降雨量以及平均降雨量代入模式中，以求取在不同氣候變化下濁水溪流流域中游之安全出水量變化。本研究以水文平衡與地下水平衡概念法，定義安全出水量為研究區西側輸出之地下水量，亦即輸入研究區之地下水量減去涵養之水量，此量即為研究區可增加之地下水開採量。

首先由各雨量站在 2000 至 2009 年間之平均降雨量，以年為單位計算各年之平均補注量，輸入數值模式中進行每年安全出水量之推估。其中補注量使用經濟部中央地質調查所(2010a)所估算之降雨量的 16%作為輸入值。以本研究定義之安全出水量評估結果，各年之安全出水量如表 3

表 4 研究區年平均降雨量之最大、最小與平均狀況下安全出水量評估結果

	降雨量(m/d)	補注量(m/d)	安全出水量(10 ⁶ t/year)
最大	0.01290	0.00206	201.39
平均	0.00705	0.00113	199.15
最小	0.00247	0.00039	197.62

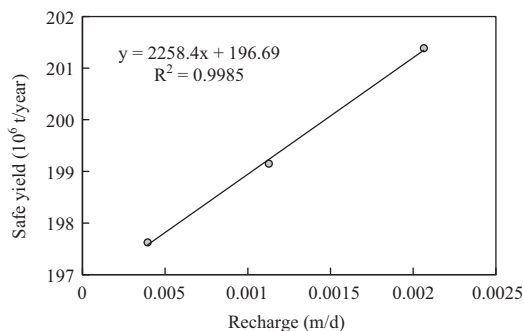


圖 11 不同補注量情況下之安全出水量

與圖 10 所示，其中各年之安全出水量差異不大，平均出水量約為每年 199 百萬噸，且因為本研究區之平均降雨量有隨年遞增之趨勢，因此安全出水量之推估結果亦有隨年遞增之現象。然而，實際上各年之降雨可能包含不同時間的乾旱或暴雨極端降雨事件，而本研究目前僅取用年平均降雨量進行研究區穩態狀況下之安全出水量估算，對研究區各年實際安全出水量推估可能有高估或低估之結果。且極端降雨事件對地下水補注之影響亦並未在本研究中進行評估，有待日後收集更多的資料來作進一步的研究與探討。

本研究另外考量未來氣候變遷可能引起濁水溪流流域中游地區之水文變化，以年為單位採用各雨量站之月平均雨量，取其中之最大降雨量、最小降雨量與平均降雨量來估算該狀況下之安全出水量，同樣使用補注量為降雨量的 16%作為輸入值。模式推估結果如表 4 與圖 11 所示。在此條件下，本研究推估之安全出水量結果顯示，在最高、平均與最低降雨量情況下，安全出水量之變化不顯著，與各年安全出水量之平均值相近，介於每年 198~201 百萬噸之間，可能為研究區之降雨大部分為河谷沖積區所貯存與濁水溪

排出所致。

五、結 論

本研究結合山區地下水資源相關研究計畫所提供之資料與相關研究成果，整合建立濁水溪中游之三維度地下水流數值模式，並以永續經營的概念，估算濁水溪中游地區之地下水安全出水量，以了解研究區中可增加開採的地下水量，而不影響原始之地下水含量。本研究定義研究區之地下水安全出水量，為研究區西側之給定水頭邊界地下水流出力。

首先建立研究區水文地質概念模式，將研究區概分為岩屑層、破碎帶與岩盤三層。數值模式中，考量數值運算上之穩定性，將岩屑層與破碎帶合併為第一層之主要含水層，而岩盤部分在數值模式中則分為三層，給定相同參數，因此數值模式中共分為四層。數值模式建立後，以 26 口井位之地下水位資料進行模式之率定，完成後採用 2000 年至 2009 年間之平均降雨量，進行分年之安全出水量估算，10 年之平均出水量為每年 199 百萬噸。之後再使用這十年間之月平均最大與最小降雨量，估算此情況下的安全出水量，結果分別為每年 201 與 198 百萬噸。研究結果顯示，本研究區之出水量受降雨變化之影響不顯著，可能為研究區之降雨大部分為河谷沖積區所貯存與濁水溪排出所致。

本研究建構了濁水溪流域中游地區初步的數值模式，然而，目前所建構之數值模式中，因為整個研究區面積廣大且地勢起伏劇烈，再加上現階段相關研究計畫所建立之資料仍然不足，因此在數值模式的建立上尚有可以改善的空間。未來可持續增加相關資料的建置與整理，以建立更完善的數值模式。而本研究定義之安全出水量，為以單獨研究區為出發點之考量，若以整體永續用水的概念來看，本研究定義之地下水安全出水量，可能為濁水溪流域下游之地下水補注源。因此，在地下水開發的規劃與管理中，須考量整個流域上中下游之整體安全出水量，方能達到完善的地下水資源開發與管理策略。

誌 謝

本研究感謝財團法人中興工程顧問社與財團法人工業技術研究院提供相關之研究資料，並感謝蘇中鈺小姐協助本研究數值模式之建立。本研究承蒙經濟部水利署(計畫編號 MOEAWRA 0990363)與經濟部中央地質調查所(計畫編號 99-5226904000-06-02)補助始得以完成，特此誌謝。

參考文獻

1. 李振誥、陳尉平、李如晃，2002，「應用基流資料估計法推估台灣地下水補注量」，台灣水利，第 50 卷，第 1 期，第 69-80 頁。
2. 曹以松，1989，「地下水」，中國土木水利工程學會出版，共 196 頁。
3. 陳尉平，2006，「應用河川流量歷線推估台灣地下水補注量」，國立成功大學資源工程研究所博士論文。
4. 經濟部中央地質調查所，2008a，「台灣山區地下水資源調查研究先期計畫，山區水文地質及地下水資源調查研究(1/2)」，財團法人成大研究發展基金會執行。
5. 經濟部中央地質調查所，2008b，「易淹水地區上游集水區地質調查與資料庫建置－濁水河流域調查成果報告」，財團法人中興土木科技發展文教基金會執行。
6. 經濟部中央地質調查所，2010a，「台灣山區地下水資源調查研究整體計畫－第一期台灣中段山區地下水資源調查與評估(1/4)」，財團法人成大研究發展基金會執行。
7. 經濟部中央地質調查所，2010b，「台灣山區地下水資源調查研究整體計畫－第一期台灣中段山區地下岩層水力特性調查與地下水位觀測井建置(1/4)」，財團法人中興工程顧問社執行。
8. 經濟部中央地質調查所，2010c，「台灣山區地下水資源調查研究整體計畫－第一期台灣中段山區流域水文地質調查及圖幅繪編(1/4)」，財團法人工業技術研究院執行。

9. Daniel, C.C. III and P.R. Dahlen, 2002. Preliminary hydrogeologic assessment and study plan for a regional Ground-Water resource investigation of the blue ridge and piedmont provinces of North Carolina, U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 02-4105.
10. Rushton, K.R., "Representation in regional models of saturated river-aquifer interaction for gaining/losing rivers." *Journal of Hydrology*, 334, 262-281, 2006.

收稿日期：民國 100 年 7 月 8 日

修正日期：民國 100 年 8 月 15 日

接受日期：民國 100 年 8 月 19 日