

# 大甲溪流域中上游地區地下水出水量評估

## Evaluating the Exploitative Quantity of Groundwater in the Upstream and Midstream of Dajia River Basin

王士榮<sup>1</sup>、李馨慈<sup>1</sup>、林宏奕<sup>1</sup>、徐國錦<sup>2</sup>、張閔翔<sup>3</sup>、黃智昭<sup>4</sup>、李振誥<sup>2\*</sup>

Shih-Jung Wang, Shing-Tsz Lee, Hung-I Lin, Kuo-Chin Hsu, Min-Hsiang Chang, Chi-Chao Huang, and Cheng-Haw Lee\*

國立成功大學 大地資源研究中心<sup>1</sup> 博士後研究員

<sup>1</sup>Postdoctoral Researcher, Georesources Research Center, National Cheng Kung University

國立成功大學 資源工程學系<sup>2</sup> 教授

<sup>2</sup>Professor, Department of Resources Engineering, National Cheng Kung University

經濟部中央地質調查所<sup>3</sup> 技士<sup>4</sup> 科長

<sup>3</sup>Associate Technical Specialist, <sup>4</sup>Section Chief, Central Geological Survey, Ministry of Economic Affairs

### 摘要

本研究為台灣山區地下水資源調查與評估相關計畫 2011 年之部份成果，整合各研究計畫之調查資料與研究成果，以地下水資源永續經營的觀點，採用 MODFLOW 地下水流模式，進行大甲溪流域中上游地區的三維度地下水流數值模擬，以評估該地區的地下水安全出水量與可開發量。本研究定義研究區之地下水安全出水量，為研究區向外流出之地下水量，以評估在不影響研究區現有地下水系統的情況下，可增加開採的地下水資源量。結果顯示，大甲溪流域之地下水安全出水量約為每年 173.1 百萬噸，在增減 50% 平均降雨量狀況下，安全出水量變化為每年 172.6~174.3 百萬噸，變化情形不顯著。本研究定義地下水可開發量，為允許特定地下水位洩降下，地下水開發潛能區中可抽取之地下水量。地下水可開發量估算結果顯示，在允許 2 公尺地下水位洩降情況下，地下水開發潛能區可開發地下水量約為每年 493 百萬噸，單位面積地下水可開發量為每平方公里每年 7.3 百萬噸。本研究之研究結果可提供研究區未來地下水資源開發與管理之相關參考。

---

\*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

**關鍵詞：**大甲河流域、地下水、數值模式、安全出水量、可開發量。

## **ABSTRACT**

This study is from the results of 2011 projects of groundwater resources investigation in the mountainous region of Taiwan. The investigation and survey results from the projects are collected and combined to develop a three-dimensional numerical model by using a groundwater modeling software, MODFLOW. The sustainable concept of groundwater resources is considered to evaluate the groundwater safe yield and exploitable quantity in the Dajia River Basin. The safe yield in this study is identified as the excess groundwater flows out from the study area and does not affect the original groundwater system. The results show that the safe yield in the mountainous region of Dajia River Basin is about  $173.1 \times 10^6$  ton/year. Then, considering the cases by adding and subtracting by 50% of mean precipitation, the result of groundwater safe yield is  $172.6 \sim 174.3 \times 10^6$  ton/year. The quantity does not show obvious discrepancy. The exploitable quantity of groundwater is identified as the pumping quantity under the specific value of groundwater drawdown in the exploitive potential zone. The result shows that the exploitable quantity of groundwater is about  $493 \times 10^6$  ton/year in the exploitive potential zone under allowing two meters drawdown. The exploitable quantity of groundwater under a unit area is  $7.3 \times 10^6$  ton/year/km. The results obtained in this study can be used in the groundwater resources exploitation and management in the mountainous region of Dajia River Basin.

**Keywords:** Dajia River Basin, Groundwater, Numerical model, Safe yield, Exploitable quantity.

## **一、前言**

台灣山區地下水資源的調查與研究近年來正逐步展開，研究區以地下水較為充沛的中部地區開始進行，於2008年進行了山區地下水資源探查的先期計畫(經濟部中央地質調查所，2008)，針對清水溪下游區域進行地下水資源之調查與研究。而2010年開始，將台灣分為北中南三部分，依序進行中部、南部與北部地區的山區地下水資源調查與研究，每期各執行四年，以各主要溪流之流域分年進行分區調查。第一期四年期計畫包含「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」、「台灣中段山區流域水文地質調查及圖幅繪編」、「台灣中段山區地下水資源調查與評估」與「台灣中段山區地下水資料庫建置與應用系統開發」等四個計畫，分別由四個研究團隊執行，主要目

標為進行山區地下水資源的初步調查、分析與資料庫建置。2010年調查目標為濁水溪流域中游與北港溪地區，2011年進行濁水溪流域上游與大甲溪流域地區，2012年將進行烏溪流域地區，2013年則為東部之立霧溪與花蓮溪流域地區。本研究屬於「台灣中段山區地下水資源調查與評估」計畫2011年之部份成果(經濟部中央地質調查所，2011c)，主要在整合各研究計畫之調查資料與研究成果，建立大甲溪流域的三維度數值模式，以進行大甲溪流域山區的地下水資源與可開發量評估，作為未來該地區地下水資源開發之規劃與管理參考。

本研究承襲王士榮等人(2012)進行濁水溪流域中游地區地下水資源評估的方式，以地下水模擬系統(groundwater modeling system, GMS)內建之 MODFLOW 軟體，採用結合概念模式法(conceptual model)與網格法(grid model)之方式，建立大甲溪流域中上游地區之三維度地下水流數值模式，並以研究區逐年之降雨量與可能之極端降雨情形，進行該地區之地下水安全出水量(safe yield)與可開發量(exploitable quantity)評估。地下水安全出水量一般定義為，研究區中可合理且永續抽取地下水但不致造成不良影響之抽水量，亦即安全出水量可解釋為，研究區內不產生不良後果下可經年抽取之地下水量。依曹以松(1989)的分類，安全出水量的計算方式可分為：(a)水文平衡公式(Equation of Hydraulic Equilibrium)；(b)地下水平衡法(Groundwater Water Inventory)；(c)希爾法(Hill Method)；(d)哈定法；(e)辛普森法與(f)零水位變化法等。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：在不影響研究區原始水文條件情況下，研究區可輸出之地下水量，即研究區在降雨與河川、湖泊補注情況下，流出研究區的地下水總量。本研究之地下水可開發量定義為，於地下水開發潛能區中，採用希爾法在允許一定地下水位洩降下，地下水可抽取之總量。而此地下水位洩降量在本研究中以給定值進行估算，未來在地下水位資料充足時，可採用安全水位之概念進行地下水可開發量評估(經濟部水利署，2011)。

本研究結合經濟部中央地質調查所進行之水文地質鑽探資料(經濟部中央地質調查所，2011a)、地球物理探測資料(經濟部中央地質調查所，2011b)與降雨補注量及開發潛勢推估(經濟部中央地質調查所，2011c)等研究成果，首先建立山區水文地質概念模式，之後由蒐集與匯整之資料，依據水文地質概念模式建立大甲溪流域中上游三維度地下水流數值模式，並以水文地質鑽探中量測之地下水位資料進行模式之率定。由於目前研究區內尚無充足的地下水位觀測資料可用來進行模試驗證，因此僅以穩態地下水位資料進行模式之率定。最後以率定完成之三維度地下水流數值模式，進行大甲溪流域中上游地

區地下水之安全出水量與可開發量評估。

## 二、背景說明

### 2.1 研究區概述

大甲溪流域之高程與水系如圖1所示，上游段地勢高峻，中游段在石岡壩前有一明顯之沖積盆地，整個流域地形呈現東高西低，大甲溪由東向西流入台灣海峽。大甲溪發源於雪山山脈之雪山主峰(海拔3,886公尺)及中央山脈之南湖大山(海拔3,742公尺)，主要支流包含七家溪、合歡溪、南湖溪等三條，流域總面積約1,236平方公里，年逕流量約21億立方公尺，幹流長度約124公里，為台灣第三長河川。其流域面積包括宜蘭縣、南投縣與台中市三個縣市，並涵蓋13個鄉鎮，於清水附近入海。本研究以山區地下水為評估對象，因此數值模式之研究區為大甲溪流域石岡壩以上之中上游地區，如圖1中粗黑線範圍。

本研究之大甲溪模式區東南西北各邊界線皆為山稜線，東側為中央山脈，南側為中央山脈西斜與大肚台地，北側為雪山山地與后里台地，西側為新社河階與大甲溪中下游之隘口。整個大甲溪流域之山嶺與台地面積約佔流域面積90%左右。由上游至中游可將大甲溪模式區概分為四個集水區(如圖2)，分別為德基水庫集水區、谷關水庫集水區、天輪調整池集水區與大甲溪集水區。

### 2.2 水文地質鑽探

經濟部中央地質調查所進行「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(2/4)」計畫，於大甲溪流域山區進行水文地質鑽探(經濟部中央地質調查所，2011a)，2011年於大甲溪流域共進行15個水文地質鑽井，其分布如圖3所示。其中在中段地區與東側山區，因天候交通因素無法進行水文地質鑽井，故鑽探點位分布不平均。經濟部中央地質調查所於水文地質鑽探完成後，進行地下水位量測，並於各井位施做現地水力試驗以求取水力傳導係數(hydraulic conductivity)、孔隙率(porosity)與儲水係數(storativity)等參數，並選取6個井位建立地下水位觀測井(如圖3中標W之井位)，以進行山區地下水位之長期觀測。其中大甲溪流域水力傳導係數與深度之關係如圖4所示，圖中顯示水力傳導係數約介於 $10^{-4}$ ~ $10^{-9}$  m/s之間，且隨著深度有減小的趨勢，但相關性不明顯，其關係式可寫為：

$$K = 8 \times 10^{-6} \times depth^{-0.8047} \quad (1)$$

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

### 三、數值模式建立

本研究考量三維數值地形、河川水系、地質條件、集水區範圍、自然邊界條件與降雨入滲補注量等因素，並結合地下水位資料與水文地質鑽探資料，首先建立山區水文地質概念模式；之後依據水文地質概念模式，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，設定各地層與網格之水文地質參數，建立地下水流數值模式。以下說明本研究地下水流數值模式之建立過程與相關設定。

#### 3.1 山區水文地質概念模式

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，透過相關資料的蒐集與整合，來合理地架構一個簡化的水文系統。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，來建立水文地質架構概念模式，以描述整個研究區之水文概況，之後再以此概念模式為基礎，進行數值模式之設定與建構。

山區岩層之分層概念主要為參考北卡羅萊納的山麓水文地質分層概念(Daniel and Dahlen, 2002)，大致可將含水層型態分為三層，由地表向下分別為：風化層、破碎帶與岩盤。經濟部中央地質調查所(2010a)在濁水溪中游進行了 29 口水文地質鑽探，將山區水文地質概分為岩屑層(regolith)與岩盤(bed rock)，其中之岩盤若以 Daniel and Dahlen(2002)之分類概念，則包含了破碎帶，因其在深度 80~90 公尺處仍然存在許多裂隙並可進行封塞水力試驗。經濟部中央地質調查所(2011a)則在濁水溪上游與大甲溪流域共進行 20 個井位之水文地質鑽井，各井深度皆為 100 公尺，並同樣將研究區之水文地質概分為岩屑層與岩盤，其中之岩盤在 Daniel and Dahlen(2002)之分類同樣包含破碎帶，在所鑽 100 公尺內之岩心皆含有一定裂隙，並可進行封塞水力試驗，因此皆可視為含水層。本研究因此將岩屑層作為山區水文地質概念模式之第一分層，並定義破碎岩盤為岩

屑層與完整岩盤間之區域，其中含有許多連通性的裂隙可貯存與運移地下水，為水文地質概念模式之第二分層，而完整岩盤則為第三分層，故山區地下水主要涵養在第一與第二分層中。

本研究以河川流域為模式之研究區範圍，故地下水的補注主要來自降雨入滲、河川與水庫湖泊等地表補注，其中地下水的蒸發散情形於降雨補注部分進行整體之評估，河川與地下水的交互作用則採用 river 模組進行模擬，而水庫湖泊的補注則採用給定水頭方式進行模擬。因此，本研究進行之山區水文地質概念模式如圖 5 所示，其中較薄之岩屑層隨著地形起伏而變，大致隨著高程之增加而變薄。

### 3.2 三維度數值模式

#### (1) 水文地質分層

經濟部中央地質調查所進行「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」計畫，於2010年在濁水溪中游進行26口水文地質鑽井(經濟部中央地質調查所，2010a)，並於2011年在濁水溪上游與大甲河流域進行20口水文地質鑽井，其結果顯示，在鑽井深度100~150公尺內，岩心皆有許多明顯裂隙，並可在深度大於80~90公尺處施作封塞水力試驗，因此在此鑽井深度內皆未達到完整岩盤之深度。而岩屑層之分布受到地表高程、坡度與岩性之影響，厚度由60公分到超過150公尺不等。本研究考量高程、岩性與坡度等因子，將大甲河流域研究區鑽井分析所得之岩屑層厚度，與考量之因子做統計分析以建立岩屑層之空間分布圖(如圖6所示)。

經濟部中央地質調查所(2008)在濁水河流域中游之清水溪附近進行地球物理試驗結果顯示，該地區透水層約在地表下15公尺內。經濟部中央地質調查所(2010b)於名竹橋車籠埔斷層線與地利村地利斷層線兩側施作RIP地球物理試驗，依據其試驗結果，車籠埔斷層東西兩側之完整岩盤深度分別約為10公尺與250公尺，而地利斷層區域之河床下方完整岩盤深度約130公尺，且在地下水氣採樣分析中發現，鑽井100公尺內之岩盤裂隙發達，皆能順利採得地下水樣，故完整岩盤頂部的最小深度為100公尺。經濟部中央地質調查所(2011b)在大甲溪研究區之大茅埔斷層線上施作RIP地電阻探測，北側測線結果顯示岩屑層厚度約10公尺，較高電阻地層約在地表下30公尺內，為地下水可能富存區；南側測線結果顯示，岩屑層厚度約40公尺，較高電阻地層約在地表下100公尺內。而在濁水溪研究區之名竹大橋旁補充兩段RIP測線，結果顯示地下水層厚度約地表下10-150公

尺，此深度即相當於完整岩盤深度。

綜合上述之研究結果，受到目前水文地質鑽井深度之限制與地球物理測線佈線位置之限制，現階段對整個研究區第三層之完整岩盤深度仍然無法直接有效的定位，且目前使用之地球物理方法無法分辨出岩屑層與破碎岩盤的差異，因此第二分層之破碎岩盤深度目前亦無法定位。故本研究依據上述資料，將研究區之岩屑層與破碎岩盤結合為數值模式之表層，並設定數值模式中，完整岩盤頂部之深度為岩屑層再向下100公尺，即假設破碎岩盤厚度為均勻之100公尺，以貼近目前水文地質鑽井之結果。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，因此將數值模式中表層下之完整岩盤劃分成三個網格，完整岩盤中各網格之參數設定皆相同，且其中各層厚度為上層厚度的1.5倍，以減少數值運算上的誤差。數值模式中各分層之高程設定示意圖如圖7所示。

## (2) 網格與邊界條件設定

確認研究區大小、研究範圍與相關分層後，使用GMS軟體之水文地質概念模型並配合網格模型來建構三維度數值模式。考慮研究區之大小、參數設定與數值模式之運算效率，建立大甲溪流域網格之南北向與東西向長度分別為37000公尺與71000公尺，網格大小設定為500公尺×500公尺，因此南北向共74網格，東西向共142網格，垂向設定四層，因此總網格數為42032。初始網格建立完成後，將大甲溪流域之DEM高程資料輸入網格中，以建立數值模式之表層高程，配合上述之分層設定，即可將研究區進行數值網格分層，並將研究區外不需要進行數值模擬運算之網格刪除，可獲得大甲溪流域模式區之有效網格數為18025，其三維度數值網格高程如圖8所示。其中因數值模式採用500公尺×500公尺之網格精度描繪地表高程，使地表起伏變化比實際地表起伏變化平緩許多。

大甲溪研究區之邊界條件設定中，東南西北四邊邊界皆為相對高點之稜線，可設定為零流量邊界，然而，為了評估西側麓山帶之地下水向沖積平原區的補注情形，將西側邊界設定為給定水頭邊界，其他邊界則視模式率定之結果進行適當調整。上邊界主要分為地表補注與水體補注邊界，地表補注依據研究區降雨量與補注率設定補注量；水體補注包含河川補注與谷關水庫和德基水庫補注，雖然研究區內尚有其他水體，但考量水體規模與數值網格大小，僅將此兩水庫納入數值模式中。河川使用MODFLOW中的river模組進行設定，谷關水庫和德基水庫則在第一層設定為給定水頭邊界，將地表較大水體

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。因此大甲溪流域模式區之邊界條件設定如圖9所示。

### (3) 初始水頭設定

經濟部中央地質調查所(2011a)於大甲溪流域進行15口水文地質鑽井，並進行井頂高程與地下水位量測，因此可獲得大甲溪流域地表高程與地下水位之相關性，如圖10所示。圖中顯示大甲溪流域之地下水位高程與地表高程有良好之線性關係，其迴歸係數 $R^2$ 為0.9979，線性方程式可寫為：

$$h_{GWL} = 1.0048h_{ELE} - 20.428 \quad (2)$$

其中 $h_{GWL}$ 為地下水位高程， $h_{ELE}$ 為地表高程，單位皆為公尺。然而，若依照此線性方程式進行初始水位設定，會有地下水位面隨地表高程增加而接近地表的趨勢，與實際上地下水位面應隨著地表高程之增加而下降的趨勢不同。因此本研究分析地表高程與地下水位深度之相關性，並刪除地下水位深度過深之觀測值，獲得較為合理之地下水位與地表高程趨勢，結果可以線性方程式寫為：

$$h_{GWD} = 0.0022h_{ELE} + 4.6426 \quad (3)$$

其中 $h_{GWD}$ 為地下水位深度， $h_{ELE}$ 為地表高程，單位皆為公尺。本研究即依據式(3)進行各網格之初始地下水位設定。然而，初始地下水位距地表距離相對於垂向尺度小許多，因此地下水位面之變化與地表高程之變化相當。

### (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，包含各分層之水力傳導係數(hydraulic conductivity)、地表補注量(recharge)與河床傳導度(conductance)三者，相關設定說明如下：

## 1. 水力傳導係數

本研究依據經濟部中央地質調查所(2011a)在研究區進行不同深度水力試驗獲得之水力傳導係數資料與分布，計算各井位之水平( $K_h$ )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，為模式中垂向水力傳導係數的設定依據。並依據研究區之岩性分類，將大甲溪研究區分為礫岩、砂頁岩互層以砂岩為主與砂岩及板岩三種岩性，依試驗結果與岩性分類給定數值模式第一層各分區之水平水力傳導係數初始值，依序為10、5與1 m/d，其空間分布如圖11所示，而垂向水力傳導係數則設定為水平水力傳導係數之1/10。完整岩盤中之三層數值網格，設定水平與垂向水力傳導係數值皆為 $10^{-5}$  m/d，以模擬其相對較低之滲透性。之後於模式率定中再進行水力傳導係數之調整，以符合地下水位觀測資料。

## 2. 補注量

數值模式中的補注量參數，主要為依據經濟部中央地質調查所(2011c)估算之補注量結果來進行設定，並於模式率定中進行補注量之調整，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。大甲溪流域年平均降雨量為2421公厘，由補注率估算之結果，大甲溪模式區之補注率約為21.4%，因此平均補注量為0.0014 m/d。大甲溪流域之初始補注量設定如圖12所示，其中補注量較高處位於中段南岸之合歡山地區附近，約為0.0032 m/d。補注量較高之主要原因為該地區降雨量較大之故。

## 3. 河床傳導度

數值模式中，河流的模擬採用MODFLOW程式中之river模組，其假設河流為矩形斷面，並需設定河流之河面高程(head stage)、河床高程(bottom elevation)與河床傳導度(conductance,  $C$ )。河面高程依河流所在位置之DEM高程設定，河床高程目前因為尚無相關資料，故依照河流所在高程位置作假設之河床高程設定，給定範圍在河面下50公分至5公尺不等，並依據數值模式之率定結果進行調整。河床的傳導度 $C$  [ $L^2T^{-1}$ ]定義為：

$$C = K \times l \times w / t \quad (4)$$

其中  $K$  [ $LT^{-1}$ ] 為河床沉積物之水力傳導係數， $l$  [L] 為河流流經長度， $w$  [L] 為河床沉積物寬度， $t$  [L] 為河床沉積物厚度。

GMS軟體中之河床傳導度，因所使用之點、線或面而有不同給定方式。在本研究中

使用曲線(arc)來模擬河流路徑，因此數值模式中河床傳導度之值為單位長度之河床傳導度 $C_{arc}$  [ $LT^{-1}$ ]，寫為：

$$C_{arc} = K \times l \times w / t / l = K \times w / t \quad (5)$$

本研究大甲溪流域模式區之河床沉積物，目前無相關河流傳導度資料可提供數值模式使用，因此參考Rushton(2007)之研究結果來作設定。Rushton(2007)使用不同方法推估河流係數(river 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：

$$RC = C_{arc} = c \times K_h \quad (6)$$

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，並配合數值模式第一層之水平水力傳導係數來設定河床之傳導度，即河床在各分區之傳導度等於該區之水平水力傳導係數。之後在數值模式之率定過程再進行河床傳導度的調整。

## 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、地表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，以確定數值模式之代表性。由於研究區目前尚無足夠資料可用來進行模式的驗證，因此現階段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地下水安全出水量推估與可開發量評估，以了解大甲溪流域中上游地區可開採的地下水量。

### 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(2011a)水文地質鑽井之觀測水位資料，進行大甲溪流域的穩態地下水流數值模式率定，各地下水位觀測井之率定結果如表2所示。其中大甲溪流域之廣福站位於石岡壩下游，在本研究數值模式區之外不進行率定，而其他井位之率定結果佳。由各井位率定結果可知，本研究所建立之數值模式有其代表性，而地下水位分布原則上隨地表高程之起伏而變化。

為了評估研究區西側麓山帶向西之側向補注量，本研究將數值模式之西側設定為給

定水頭邊界，並以水平衡觀點分析麓山帶邊界向西流出之地下水量，而其中僅計算給定水頭網格向西流出量之結果。數值模式之水平衡計算結果顯示，本研究估算在大甲溪流域中游往西側麓山帶邊界流出之地下水量，約為每年144百萬噸。

#### 4.2 地下水安全出水量推估

使用本研究率定完成之大甲溪模式區三維度數值模式，將研究區內各雨量站之年平均降雨量紀錄輸入模式中，進行逐年的地下水安全出水量推估，並進一步取平均降雨量增減50%代入模式中，以求取在相對乾旱與潮濕狀況下流域之地下水安全出水量變化。本研究以水文平衡與地下水平衡概念法，定義地下水安全出水量為研究區給定水頭邊界向研究區外輸出之地下水量，此量即為研究區可增加開採之地下水量。

首先由各雨量站在1999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地下水安全出水量之推估。其中補注量使用大甲溪流域之降雨補注率21.4%作為輸入值。以本研究定義之地下水安全出水量，進行各年之地下水安全出水量估算，其安全出水量與降雨量之變化情形如圖13所示，其中各年之地下水安全出水量差異不大，大甲溪流域之平均出水量約為每年173.1百萬噸，且因為本研究區之年平均降雨量逐年遞增，因此地下水安全出水量亦有逐年遞增之趨勢。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與增減50%降雨量進行研究區穩態狀況下之地下水安全出水量估算，對研究區各年實際地下水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量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分析。

本研究另外考量未來氣候變遷可能引起大甲溪流域地區之水文變化，採用年平均降雨量加減 50% 為最大降雨量與最小降雨量，分別估算此兩種相對極端降雨與平均狀況下，大甲溪流域中上游模式區之地下水安全出水量，模式推估結果如表 3 所示。在此條件下，本研究推估之地下水安全出水量結果顯示，在最高、平均與最低降雨量情況下，地下水安全出水量之變化不顯著，推估之安全出水量結果約為每年 172.6~174.3 百萬噸。

#### 4.3 地下水可開發量評估

本研究採用經濟部中央地質調查所(2011c)所建立之大甲溪流域地下水資源開發潛

能區之結果，其採用GOD指標(Foster, 1987)進行大甲溪流域開發潛能區評估，此潛能區可作為地下水資源利用之重點區域，而本研究完成之流域觀點地下水安全出水量評估結果，可作為整體開發之限制條件。因此本研究縮小評估地下水開發區域，依據開發潛能高區劃定可開發區進行地下水可用水量之評估。根據經濟部中央地質調查所(2011c)之研究成果，劃定大甲溪流域靠近石岡壩上游區為地下水開發高潛能區，如圖14所示，劃定面積為67.25 km<sup>2</sup>，其中黑點部份為潛能區內設定之抽水井位，井位選擇主要參考水文地質鑽井位置與評估河流或河畔網格之抽水狀況而定。

本研究定義地下水可開發量，為允許特定地下水位洩降下，該潛能區可抽取之地下水量。採用希爾法來計算劃定之地下水可開發潛能區內，網格在不同抽水速率下之地下水位變化，以推估潛能區中之地下水可開發量。採用允許地下水位下降1~3公尺情況下，進行地下水可開發量之估算，評估結果如表4所示。在允許地下水位下降2公尺狀態下，大甲溪流域之地下水開發潛能區，可開發地下水量約為每年493百萬噸，單位面積地下水可開發量則約為每平方公里每年7.3百萬噸。此單位面積地下水可開發量，可用來比較不同地下水開發潛能區之地下水可開發量，以了解不同地區地下水可開發潛能之差異，評估地下水最適當開發區域。

## 五、結論

本研究結合經濟部中央地質調查所，山區地下水資源評估研究團隊各計畫所建立之水文地質資料與相關研究成果，建立並完成大甲溪流域模式區之三維度地下水流數值模式。由數值模式水平衡分析結果顯示，大甲溪流域西側麓山帶地下水向西之側向補注量約為每年 144 百萬噸，而大甲溪流域之地下水安全出水量約為每年 173.1 百萬噸，在增減 50% 平均降雨量狀況下，大甲溪流域之地下水安全出水量變化為每年 172.6~174.3 百萬噸，變化情形不顯著。地下水開發潛能區之地下水可開發量估算結果顯示，在允許 2 公尺地下水位洩降情況下，大甲溪流域地下水開發潛能區可開發地下水量為約每年 493 百萬噸，單位面積地下水可開發量為每平方公里每年 7.3 百萬噸。研究成果可提供研究區未來地下水資源開發與管理之相關參考。

本研究以目前所能獲得之水文地質相關資料，進行大甲溪流域山區地下水流數值模式之建立，受到水文地質鑽井位置分布與水文地質參數資料缺乏之限制，與研究區面積

廣大且地勢起伏劇烈之影響，資料之取得因地形天候限制之影響而使資料量不足，且亦不足以涵蓋所有地形或地質單元，因此在數值模式的建立上仍然有改善的空間，諸如岩屑層與破碎岩盤的界定、河川資料的量測、補注量的推估、水文地質參數的推估與地下水位觀測資料等，皆需要不同高程階段與更緻密的資料點位，才能描繪出完整的山區水文地質概念模式，進而建立更完整的數值模式。後續若有相同研究區之水文地質調查工作與研究成果，可將本研究之數值模式進行資料與相關設定之更新，以獲得更貼近實際狀況之數值模式，並應用到相關評估工作中。

## 誌謝

本研究感謝經濟部中央地質調查所、財團法人中興工程顧問社、財團法人工業技術研究院提供相關研究資料與成果，並承蒙經濟部中央地質調查所(計畫編號 CGS 100-5226904000-04-02)與經濟部水利署(計畫編號 MOEAWRA 1000076)補助始得以完成，特此誌謝。

## 參考文獻

1. 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.
2. Foster, S.S., 1987. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. In: Duijvenbooden W van, Waegeningh HG van (eds) TNO Committee on Hydrological Research, The Hague Vulnerability of soil and groundwater to pollutants, *Proceedings and Information*, 38, 69-86.
3. Rushton, K.R., 2006. Representation in regional models of saturated river-aquifer interaction for gaining/losing rivers. *Journal of Hydrology*, 334, 262-281.
4. 王士榮、林宏奕、李馨慈、徐國錦、黃智昭、張閔翔、李振誥，2012，「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」，農業工程學報，第 58 期，第 1 卷。
5. 曹以松，1989，「地下水」，中國土木水利工程學會出版，共 196 頁。
6. 經濟部中央地質調查所，2008，「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。
7. 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。
  8. 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。
  9. 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。
  10. 經濟部中央地質調查所，2011a，「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(2/4)」，財團法人成大研究發展基金會執行。
  11. 經濟部中央地質調查所，2011b，「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(2/4)」，財團法人中興工程顧問社執行。
  12. 經濟部中央地質調查所，2011c，「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(2/4)」，財團法人工業技術研究院執行。
  13. 經濟部水利署，2011，「國立雲林科技大學水土資源及防災科技研究中心 100 年度工作推動計畫-補助計畫-台灣地區伏流水開發對地下水環境影響之調查評估-大甲溪、大安溪、烏溪及濁水溪」，國立雲林科技大學水土資源及防災科技研究中心執行。

表1 各觀測井計算所得之水平與垂向水力傳導係數值

井號	井名	$K_h$ (m/d)	$K_v$ (m/d)	井號	井名	$K_h$ (m/d)	$K_v$ (m/d)
CH-01	廣福	9.93E-01	1.75E-02	CH-09	天輪	2.19E-01	2.35E-02
CHW-02	石角	4.92E-02	4.00E-03	CHW-10	八仙山	2.08E-01	1.73E-02
CHW-03	中坑	2.74E-02	2.65E-02	CHW-11	裡冷	1.48E-02	1.87E-03
CH-04	福民	2.23E-02	1.17E-03	CH-12	谷關	3.78E+00	1.48E-01
CH-05	福興	3.40E-01	2.59E-03	CHW-13	武陵	1.12E-01	6.51E-04
CH-06	出雲山	8.89E-02	1.94E-02	CH-14	平等	6.24E-02	7.76E-03
CHW-07	和平	1.62E-02	4.24E-04	CHW-15	環山	7.63E-01	5.86E-02
CHW-08	博愛	1.51E-01	4.25E-02				

表2 各觀測井位數值模式率定結果

站名	觀測水位 高程 (m)	模式水位 高程 (m)	站名	觀測水位 高程 (m)	模式水位 高程 (m)
廣福	248.1	-	天輪	682.5	682.9
石角	366.2	364.9	八仙山	875.4	876.1
中坑	474.4	473.2	裡冷	981.4	979.7
福民	520.1	517.4	谷關	760.8	762.8
福興	667.5	665.5	武陵	1832.3	1834.0
出雲山	965.3	965.1	平等	1660.6	1662.0
和平	531.8	532.5	環山	1475.0	1475.9
博愛	684.8	684.6			

\* 廣福站在模式區之外

表3 相對極端降雨情況下地下水安全出水量推估結果

狀態	補注量 (m/d)	安全出水量 (10 <sup>6</sup> ton/year)
最大降雨	0.00213	174.3
平均降雨	0.00142	173.1
最小降雨	0.00071	172.6

表 4 開發潛能區在允許不同地下水位洩降下之可開發水量

水位洩降 (m)	可開發量 (10 <sup>6</sup> ton/year)
1	246
2	493
3	986

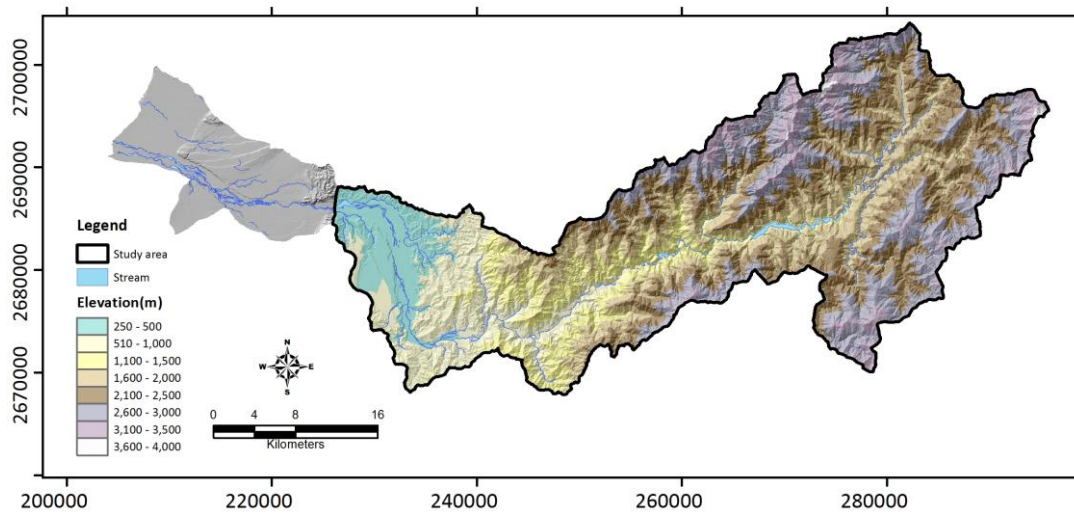


圖1 大甲河流域之地形與水系圖

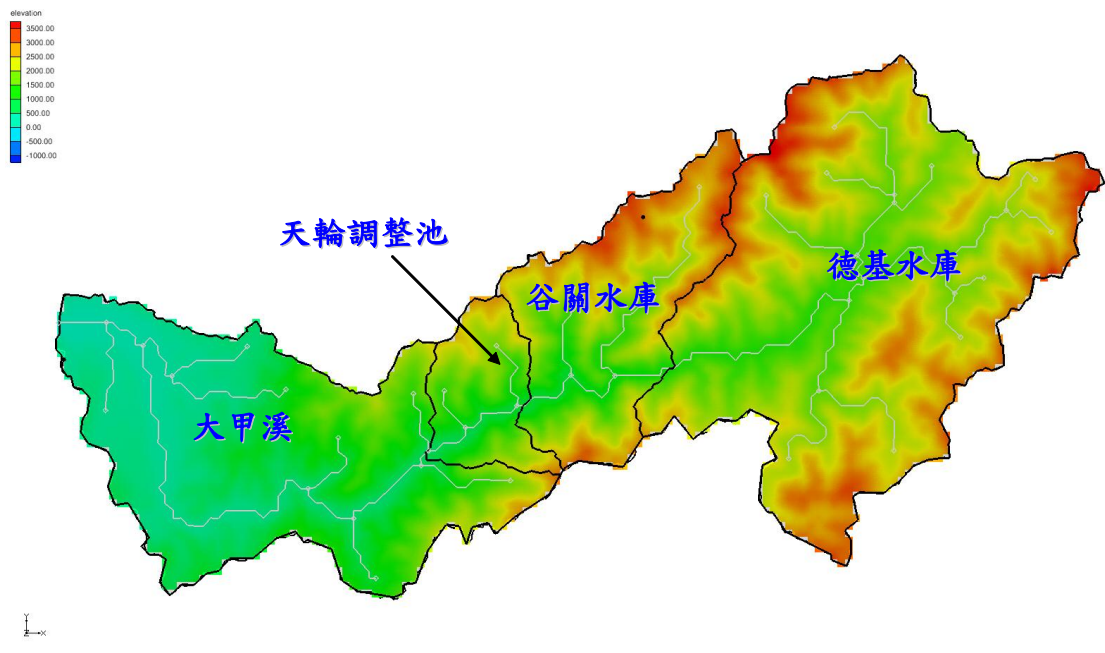


圖 2 大甲溪模式區之集水區分區圖

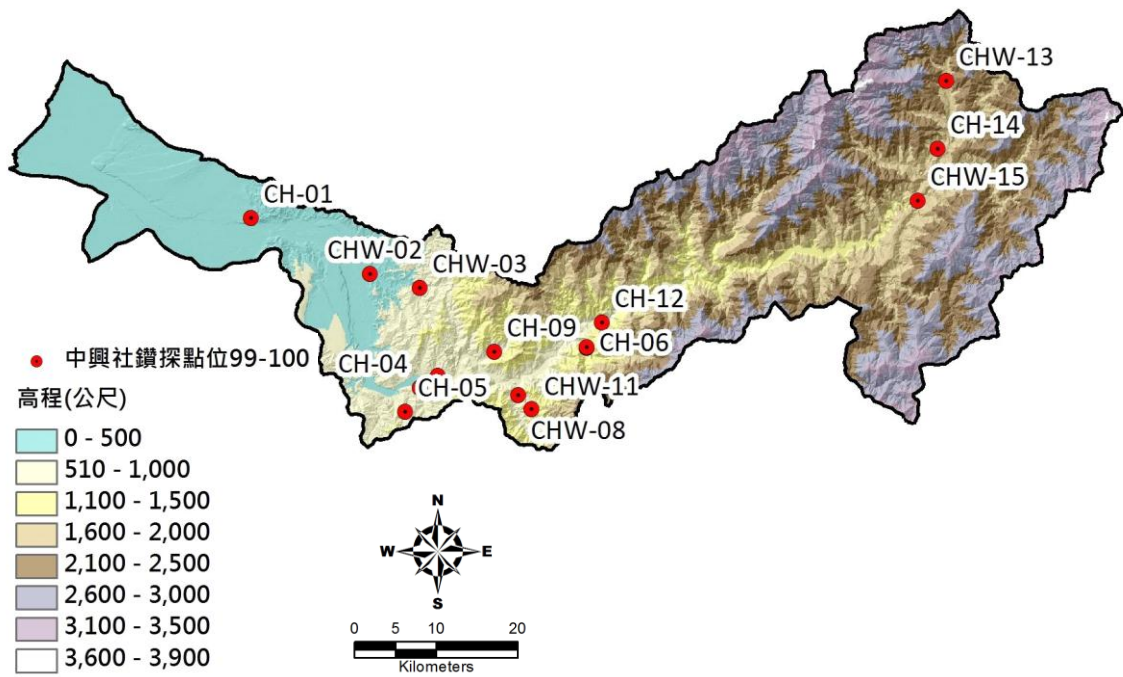


圖3 大甲河流域水文地質鑽井井位分布

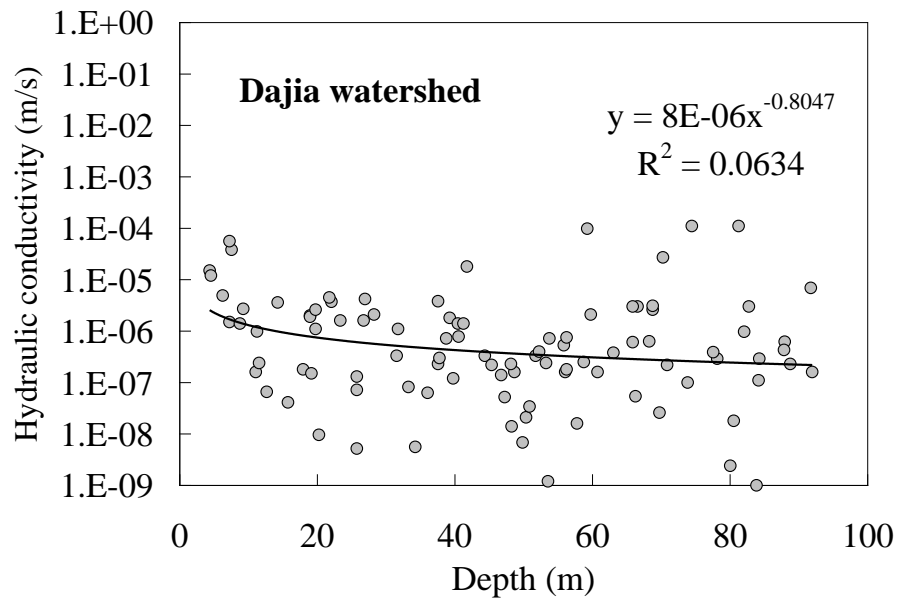


圖4 大甲溪流域水力傳導係數與深度之相關性

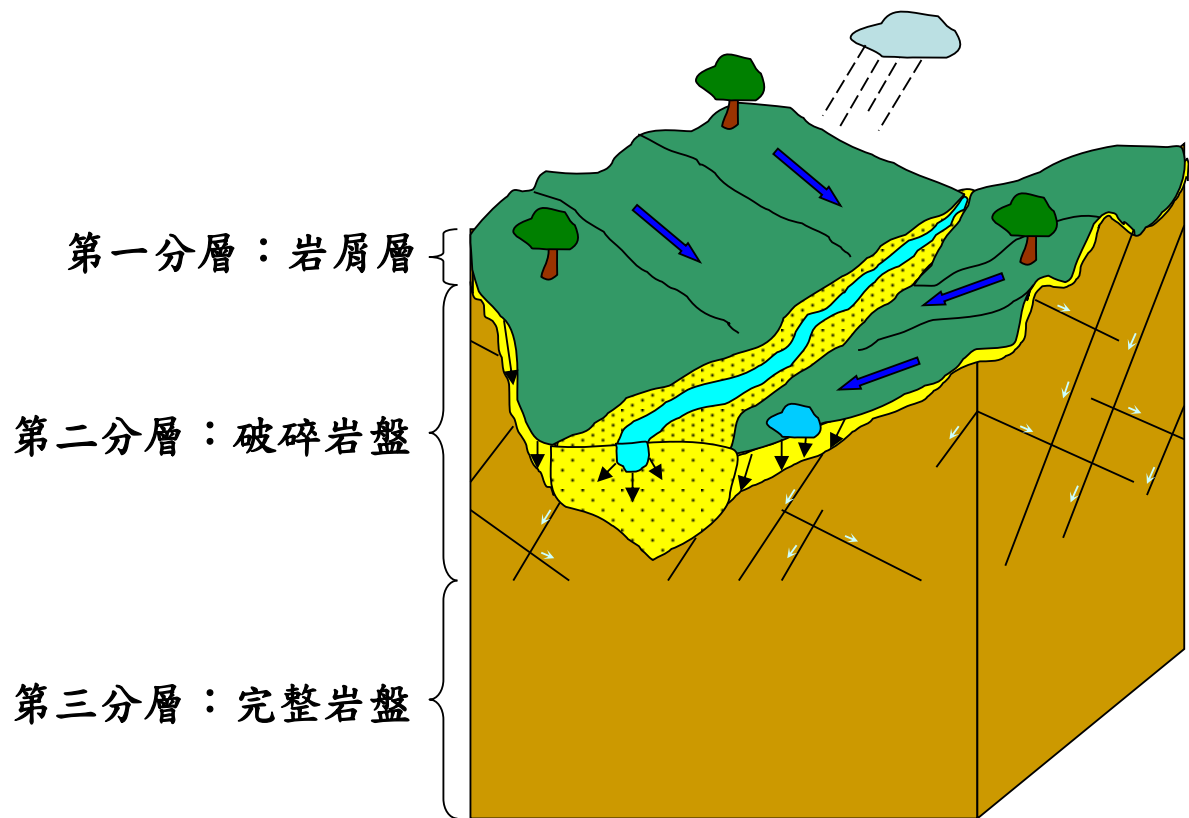


圖5 山區水文地質概念模式

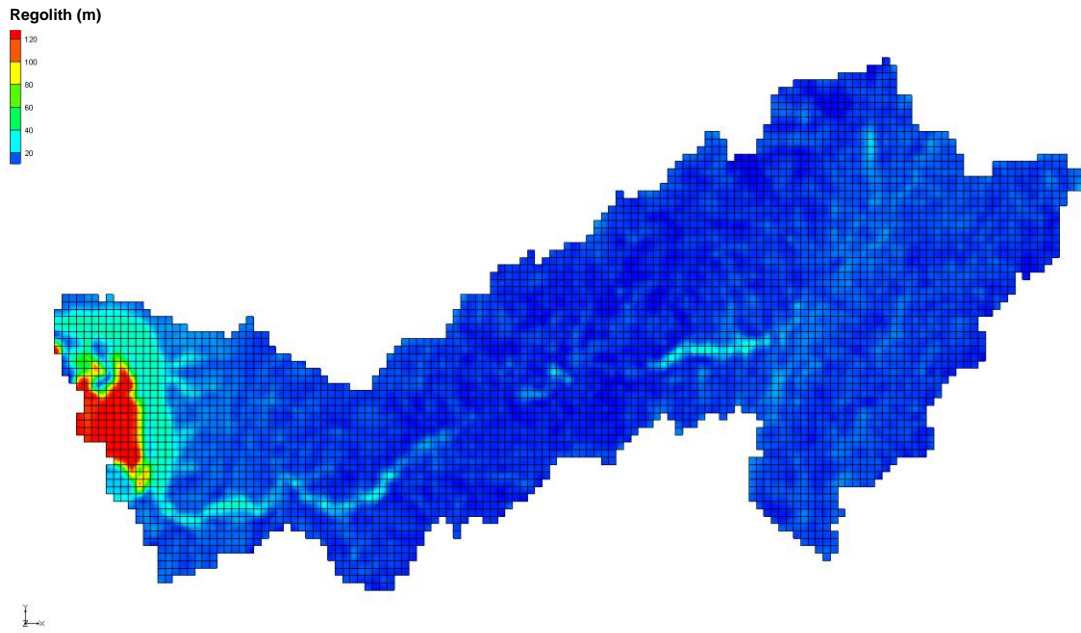


圖6 大甲溪模式區岩屑層厚度分布圖

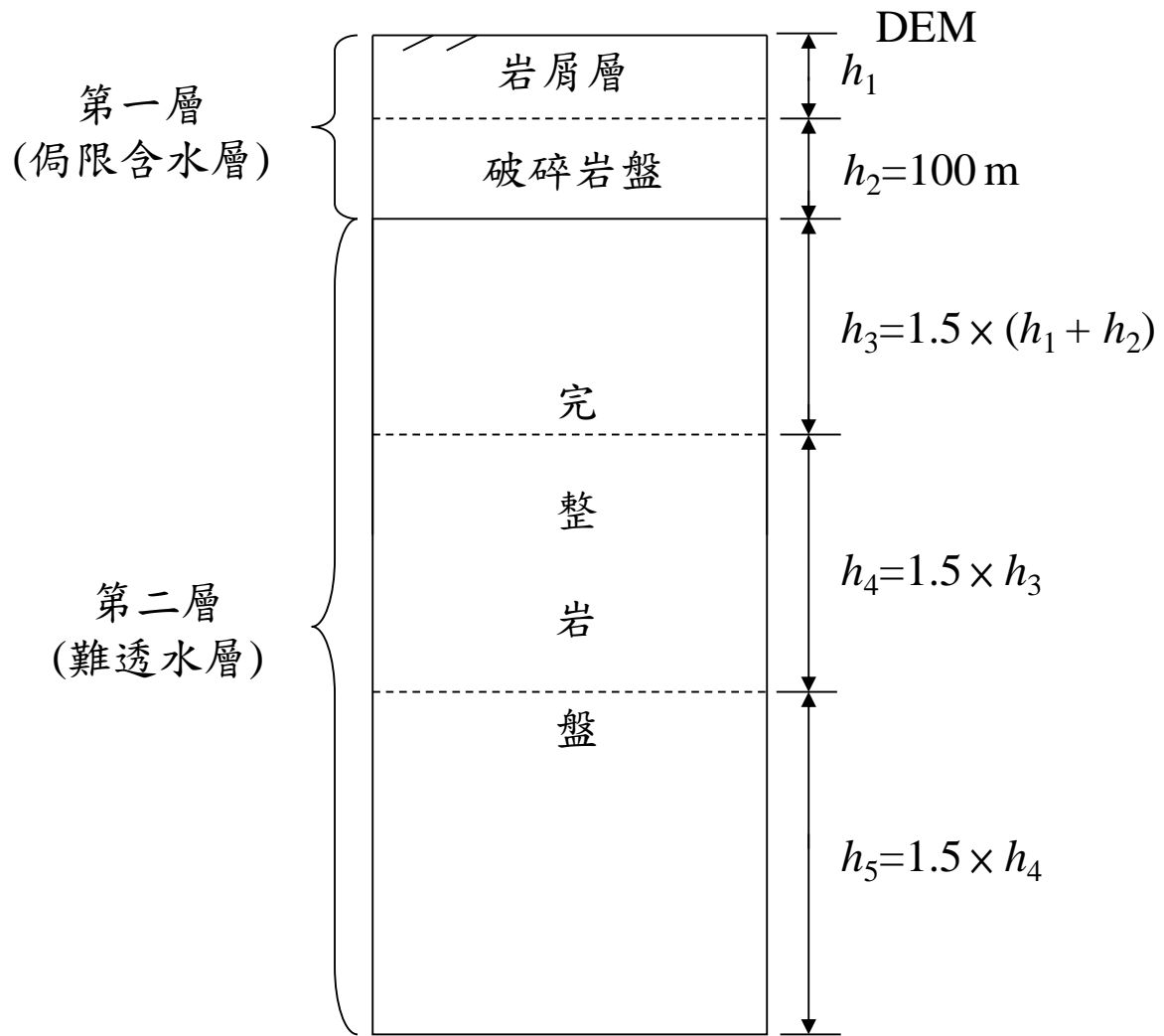


圖7 三維度數值模式中各分層之高程設定示意圖

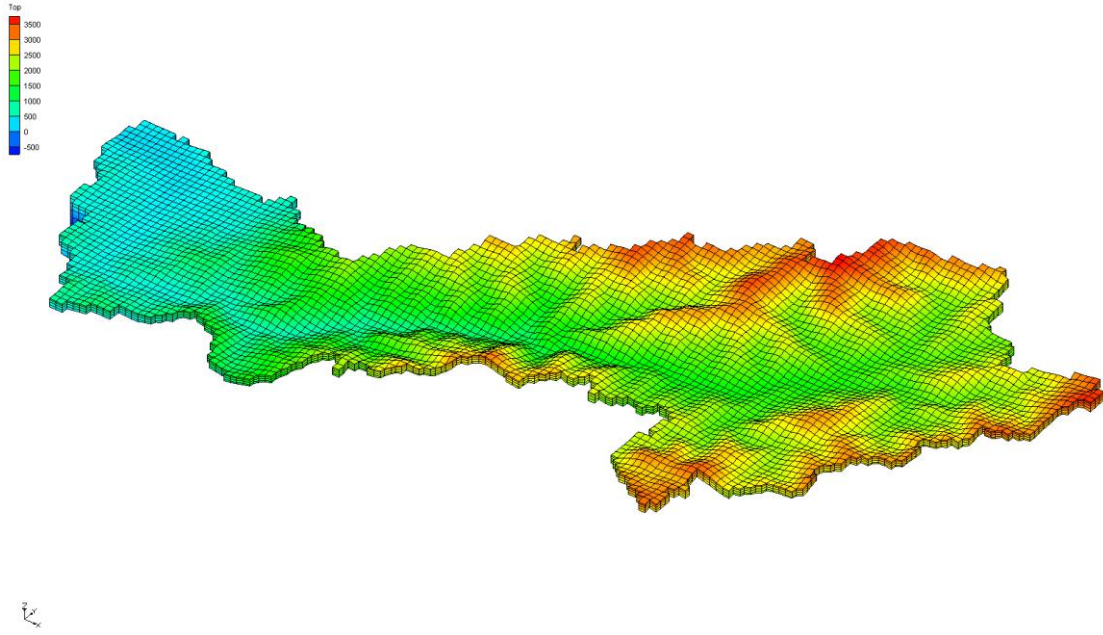


圖8 大甲溪模式區三維度數值網格高程

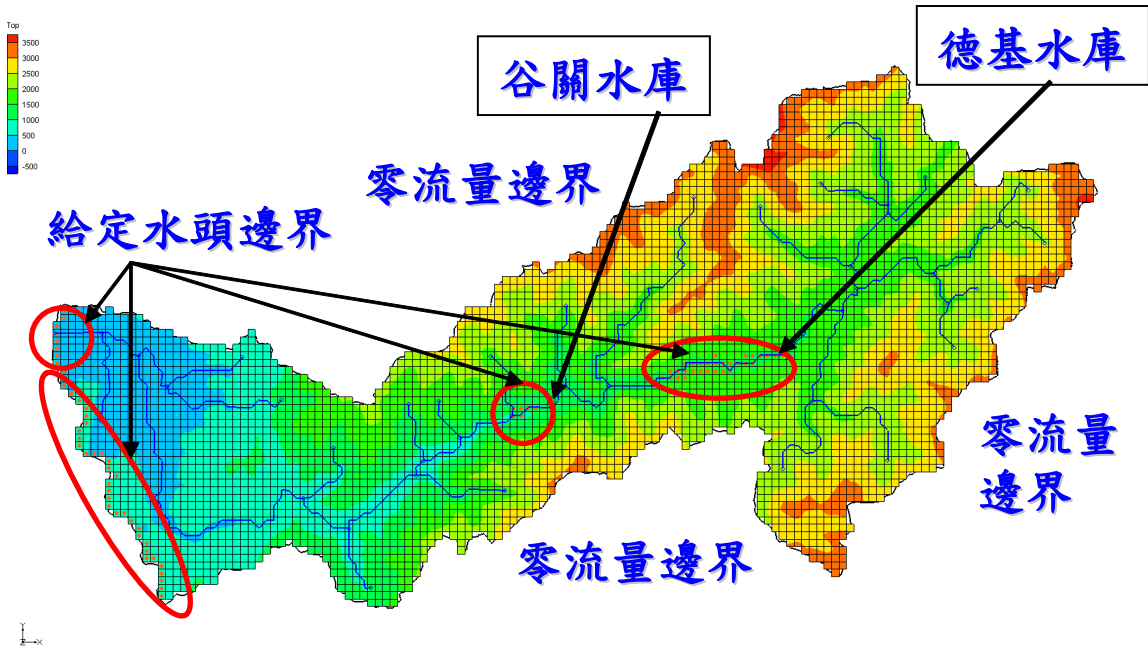


圖9 大甲溪模式區三維度數值模式邊界條件設定

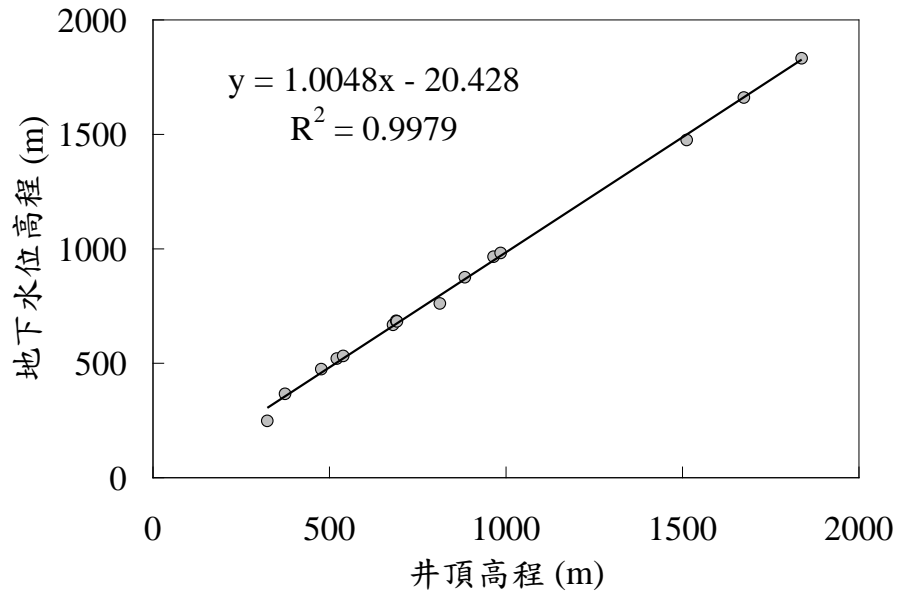


圖10 大甲河流域地下水位高程與地表高程之相關性 (資料來源：經濟部中央地質調查所，2011a)

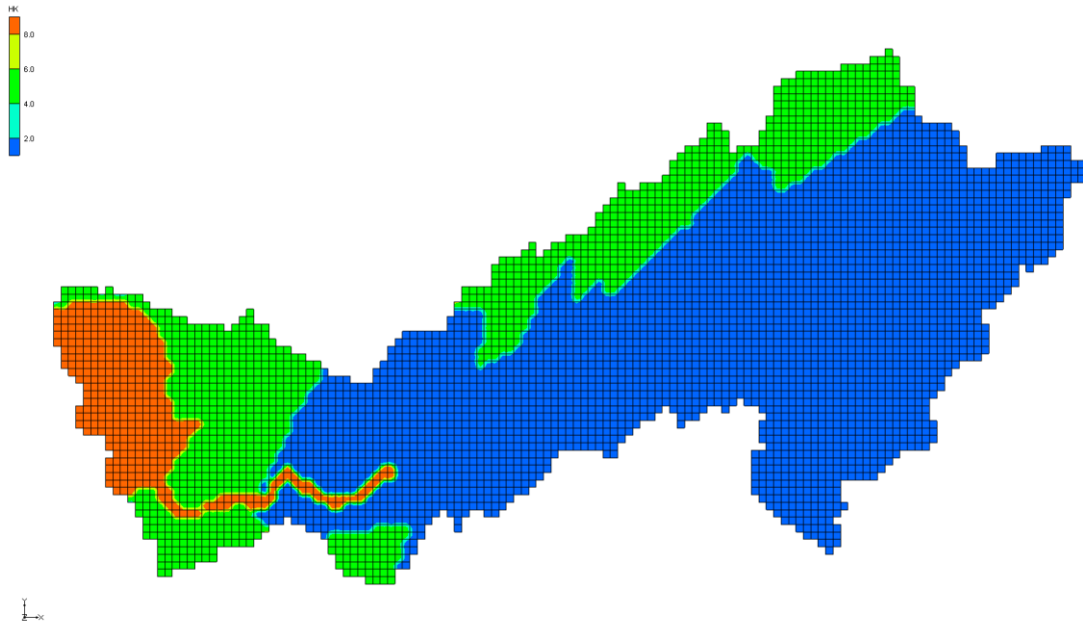


圖11 大甲溪模式區第一層初始水平水力傳導係數設定

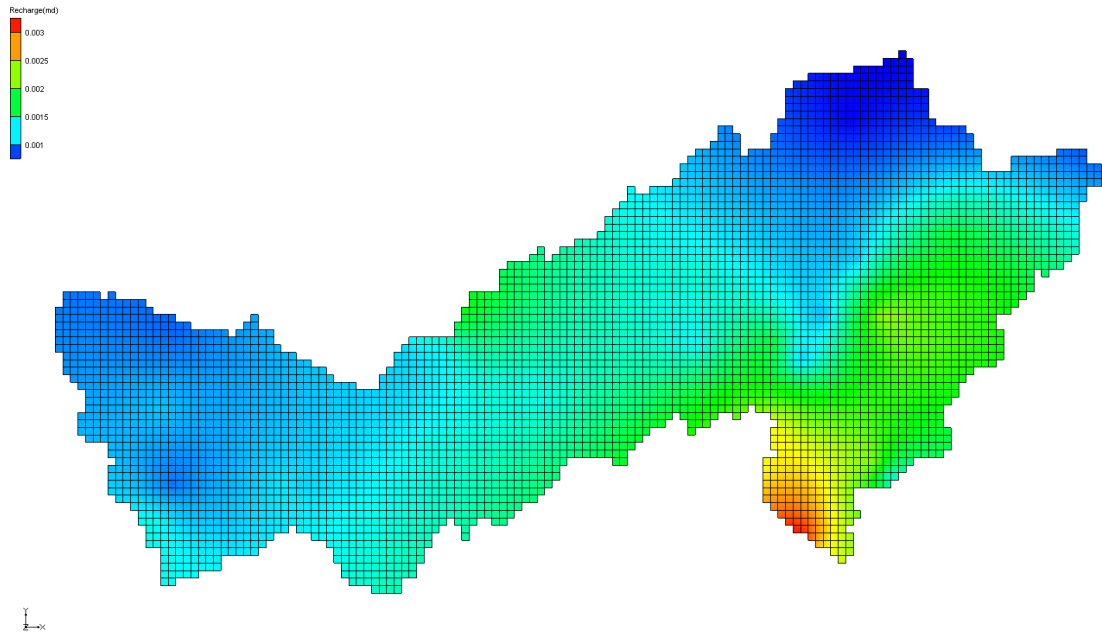


圖12 大甲溪模式區地表補注量初始設定

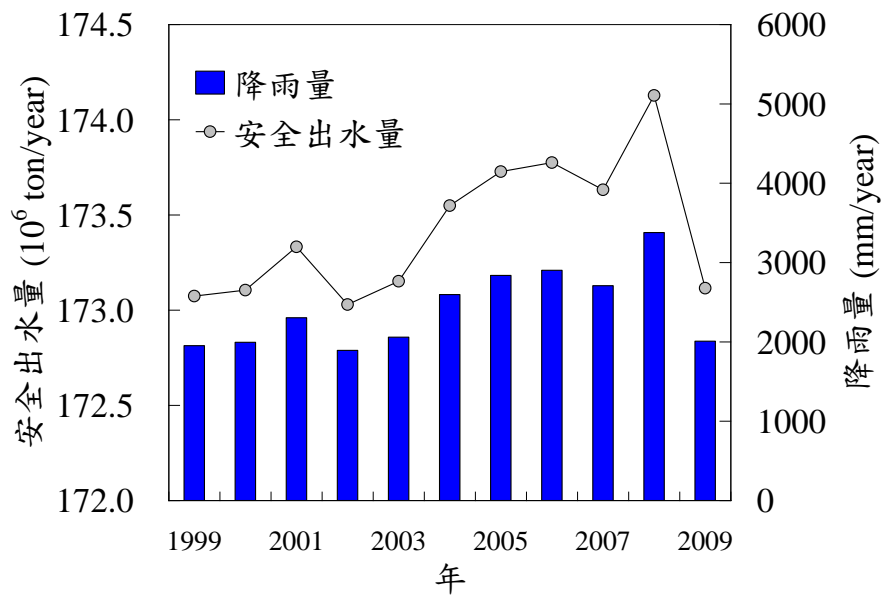


圖13 大甲溪中上游地區各年地下水安全出水量與雨量變化

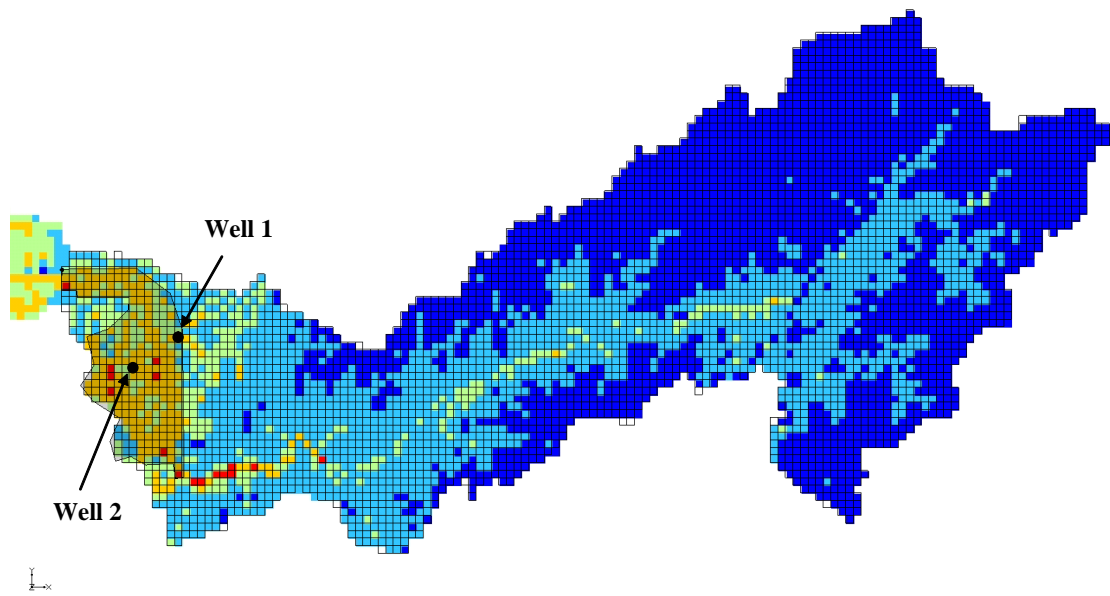


圖 14 大甲河流域地下水資源開發潛能區與抽水井位分布