

# QGIS 系統應用於流域水資源規劃作業

APPLICATION OF QUANTUM GIS SYSTEM FOR WATER RESOURCES PLANNING

國立臺灣海洋大學  
河海工程學系  
特聘教授

**李光敦**  
Kwan Tun Lee

國立臺灣海洋大學  
地理資訊系統研究中心  
助理研究員

**徐郁涵\***  
Yu-Han Hsu

水利署水利規劃試驗所  
水資源規劃課  
課長

**蔡展銘**  
Chan-Ming Tsai

水利署水利規劃試驗所  
水資源規劃課  
副工程司

**杜怡德**  
Yi-Te Tu

## 摘要

臺灣因為人口聚居及工商業快速發展，公共與工業用水與日俱增，水資源面臨供應不足問題，亟需建立一套便捷的水資源設施評估系統，以快速獲得可能堰壩址與水源取用的分析結果。本研究所建立的資訊平臺以數值高程模式為基礎，建置地形指數模式，整合地文與水文運算模組，應用 Quantum GIS 地理資訊系統技術與圖形介面，開發雨量分析、流量分析、水庫特性分析、水源分析、空間分析等模組，藉以建置流域水資源規劃作業系統。使用者可推求集水區河川網路上任一位置點之地文因子，而後計算該位置點的水庫水位-面積-庫容曲線、天然日流量，以及水資源潛能等水資源規劃所需重要資訊。本研究以新北市雙溪水庫預定地為例，進行水庫上游集水區地文與水文分析，評估水資源潛能，以確認水庫興建的合宜性。

**關鍵詞：**水資源規劃作業、QGIS 地理資訊系統、日流量分析、水資源潛能。

\* 通訊作者，國立臺灣海洋大學地理資訊系統研究中心助理研究員  
202 基隆市北寧路 2 號 · yuhanhsu0502@gmail.com

## APPLICATION OF QUANTUM GIS SYSTEM FOR WATER RESOURCES PLANNING

**Kwan Tun Lee**

National Taiwan  
Ocean University  
DEPT. HARBOR &  
RIVER ENGINEERING

**Yu-Han Hsu\***

National Taiwan  
Ocean University, GIS  
Research Center

**Chan-Ming Tsai**

Water Resources  
Planning Institute,  
Water Resources  
Agency, Ministry of  
Economic Affairs

**Yi-Te Tu**

Water Resources  
Planning Institute,  
Water Resources  
Agency, Ministry of  
Economic Affairs

## ABSTRACT

Due to the rapid development and concentrated population in the cities of Taiwan, the domestic and industrial water use is increasing recently, which results in insufficient water supply. It is urgent to establish a convenient water resources assessment system to provide detail analysis for the available water sources at the possible dam site. The information platform developed in this study based on a digital elevation model, which has integrated geomorphologic and hydrological programs with Quantum GIS technology on a graphical interface. The built-in functions include rainfall analysis module, flow analysis module, reservoir characteristics analysis module, water sources analysis module, and spatial analysis module for water resources planning. User can inquire the geological factors at any point on the river network to obtain the information of reservoir H-A-V curve, daily flow series, and potential water supply for water resource planning. In this study, the planned site of Shuangxi Reservoir in New Taipei City was used as an example to conduct geological and hydrological analysis in the upstream catchment of the reservoir. Detail assessments for the water resources potential were performed to confirm the suitability of the reservoir developing project.

**Keywords:** Water resources planning, Quantum GIS, Daily flow analysis, Water resources potential.

## 一、前言

近年臺灣人口聚居及工商業快速發展，公共與工業用水量與日俱增，用水量需求更形迫切。而現有蓄水設施除了抗旱、減災能力不足外，水資源分配亦面臨供需不足問題；現階段尚可由水源調度工作進行水資源分配，但中長期用水仍需及早籌劃增闢新水源，研擬可能堰壩址檢討評估與優選方案，或預先進行跨流域可用水源分析，以免影響都市開發及工商發展。可能堰壩址於可行性規劃階段所需相關資訊，需針對建壩位置進行水源開發潛能評估，或是應用最新用水資訊，針對流域既有引水設施進行供水能力分析與檢討。由於所需之基本資料及分析工作繁多，亟需建立一套便捷的水資源設施評估系統，加速進行大數據資料應用與數位化水文分析工作，以快速獲得可能堰壩開發位置與水源取用的分析結果。有鑑於此，本研究乃參考水資源規劃的分析流程，應用 Quantum GIS 地理資訊系統技術，配合地圖展示進行相關地文特性分析與逕流分析作業。研究中考量規劃堰壩址位置，通常無實測流量紀錄可供參考，故採用地形性水文模式以進行流域水文分析，以確認可能建壩位置之水資源潛能。

隨著資訊科技不斷演進，系統整合的設計與概念已朝向視窗化作業環境整合發展。視窗作業環境的特色即是以滑鼠與表單為主要交談方式，並提供高解析度彩色圖像及多功能處理的功能，使作業系統平臺具有操作簡便、學習容易與管理方便等優點。Steube & Johnston (1990) 曾利用地理資訊系統方式，分析美國水土保持局公式 (SCS) 中之 CN 值，以大量簡化資料處理上的繁瑣。Maidment (1991) 提出地理資訊系統於水文方面之四種應用，分別是推算水文學、推估水文參數、利用地理資訊系統建立水文模式，以及將水文模式建於地理資訊系統中。Feng (2000) 採用開放地理信息系統 (Open GIS) 之觀念，建議提供開放水文模型及其初步框架，並使 GIS 之各項功能可作為單獨之可插入組件。Lee *et al.* (2006) 以地理資訊系統結合數值高程模式，以便捷的方式提供使用者進行集水區任一位置點的地文因子與設計流量。Häner (2010) 利用 QGIS 建置林業規劃系統，為森林管理者與地主間提供一套可相互溝通的平臺。李等 (2016) 採用 QGIS 平臺技術，建立「台灣地區重要河川流域水文與水理設計分析系統平臺」，提供流域管理單位於進行流域整體治理規劃過程，所需之地文與水文重要資訊。Geri *et al.* (2017) 利用 QGIS 建置評估水環境污染影響

之系統平臺，透過篩選分析以評估區域內可能存在環境污染的風險。尤以上說明可知，利用地理資訊系統技術結合水資源分析理論，可對不同的水情資訊和水文計算模組進行資訊系統之整合，以利集水區工程規劃設計與維護管理工作。

地形指數模式 (TOPMODEL) 起源於英國，原是用以模擬上游小集水區之逕流歷程 (Beven and Kirkby, 1979)；該模式利用地形指數  $\ln(a/\tan \beta)$  以描述水流因重力而蓄積與流動的現象；因此藉由少數的地文參數，即可推估土壤飽和程度、地下水深度、以及地表下逕流量空間分布。Quinn and Beven (1993) 利用地形指數模式，分別針對濕季與乾季進行集水區的逕流模擬；並說明集水區氣候由濕季轉為乾季的退水流量歷線，可藉由地形指數模式得到良好的模擬結果。Quinn *et al.* (1995) 探討不同型式之地形指數計算方式對地形指數模式模擬之影響，並用以推算部分集水面積所占之比例。James and Keith (1998) 應用數值高程模式求取地形指數值，探討數值高程資料尺度對地形指數模式中參數的影響。李等 (2011) 應用地形指數模式及馬可夫鏈序率模式，針對永和山水庫及明德水庫上游入流點，進行長期流量預測及可用水量分析。由以上說明可知，地形指數模式為半分布式的逕流演算模式，已被廣泛地應用於歐、美、亞各洲 (Campling *et al.*, 2002; Peter *et al.*, 2003; Lee and Lin, 2006) 進行逕流分析，並得到良好的模擬結果。

由於 TOPMODEL 需仰賴集水區地形特性資料，來推求集水區降雨逕流關係，然而傳統地圖上作業之方式過於耗時，因此採用數值高程模式 (digital elevation model, DEM) 以推求地文因子，乃是最為便捷精準的方式。O'Callaghan and Mark (1984) 首先利用正交網格數值高程資料，發展數值高程模式。Jenson and Domingue (1988) 改進早期窪陷填平步驟，以較有效率的方式處理網格資料中的窪陷。Helmlinger *et al.* (1993) 針對河川網路擷取過程所使用的面積門檻值 (threshold area) 作詳細探討，並利用碎片幾何理論分析河川網路。Vogt *et al.* (2003) 提出利用數值高程模式同時配合地理資訊系統的應用，分析水資源環境參數，包含植被覆蓋、地勢型態與土壤條件，推求更接近實際情形的河川網路。Zhang *et al.* (2008) 針對應用不同格點尺度之數值高程模式，進行地文因子之計算，並分析地文因子改變情況對水文分析的影響。Huang and Lee (2015) 提出一套簡易且快速的窪陷填平方式，以改善窪地辨識與流向判定的處理過程。由以上說明可知，由於傳統地圖上作業之方式過於耗時，因此利用數值高程模式以推求集水區地文

因子，乃為現今之趨勢。

本研究首先應用數值高程模式，推估預定壩址上游集水區地文因子，並計算出不同高程條件下，規劃堰壩址的蓄水面積與蓄水體積關係（即 H-A-V 關係曲線）；並利用地形指數模式，配合歷年日雨量紀錄資料，以推估規劃堰壩址日流量歷線，另考量堰壩址上、下游用水需求，藉以推估水庫剩餘水量，進而提供規劃堰壩址水資源潛能的評估參考。本研究分析流程可敘述如下：

1. 蒐集研究集水區數值高程資料、鄰近測站水文紀錄資料，以及規劃堰壩址下游保留水量資訊；
2. 應用數值高程模式計算規劃堰壩址的 H-A-V 關係曲線，與庫區淹沒影響範圍；
3. 應用數值高程模式分析集水區地文因子，同時應用鄰近測站水文紀錄資料，以進行水文模式參數檢定；
4. 應用地形指數模式，配合日雨量紀錄，推估預定壩址上游集水區的天然日流量歷線，再扣除下游保留水量，以推估水庫剩餘水量；
5. 將上述水庫剩餘水量轉換為旬流量，以推估各旬流量超越機率與流量延時曲線，以評估規劃壩址位置的水資源潛能。

## 二、研究方法

水庫規劃評估階段時，常面臨集水區內無流量紀錄資料，可供水文模式的參數檢定，以進行後續水文分析。有鑑於此，本研究採用 Beven and Kirkby (1979) 所提出的地形指數模式，僅藉由集水區的地文特性資料，即可建立水文模式，以進行流域長期逕流特性分析。考量地形指數模式計算時需仰賴大量地文資料，所以可藉由數值高程資料配合數值高程模式，以擷取集水區各項地文因子。因此本研究於進行流域水資規劃所需採用的分析方法，包括利用數值高程模式進行集水區地形與水庫蓄水體積特性分析，以及應用地形指數模式以進行流域日流量分析；而作業系統平臺則採用 Quantum GIS，配合 PostgreSQL 建置系統資料庫。

### 2.1 集水區地形與水庫蓄水體積特性分析

數值高程資料是將地圖上的高程資料轉換為三度空間坐標數值，分別標定其平面位置與高程，以利於計算機之解讀與判釋。其主要計算方式係將指定坐標

點與周圍相鄰坐標點作相對屬性之判斷。首先為流向的決定，可將指定位置點的高程與周圍相鄰位置點高程作一比較，而相對高程差較大的方向，即為指定位置點往下游流動的方向。利用數值高程模式推求河川網路與地文因子的流程，依序分別為：(1) 河川源頭判定，(2) 河川網路節點判定，(3) 集水區河川級序判定，以及 (4) 次集水區劃分；而後可求得集水區中各級序河川數目、河川平均長度與坡度、河川頻率、各級序河川集水面積、漫地流坡度與坡度等地文因子；本研究推求的地文因子如表 1 所示。

傳統地圖作業方式難以有效率針對規劃壩址位置，分析不同壩高所相對應的上游蓄水面積、蓄水容量，以及迴水範圍等資訊。然而，藉由本研究建立的數值高程模式，可以精準且有效率的方式推估水庫水位-面積-蓄水體積關係曲線、迴水長度，以及可能淹沒範圍等資訊。如圖 1 所示，對於某一高度壩堰所相對應上游蓄水面積之計算，可藉由指定堰壩址位置點上游區域內的數值高程資料，判讀區域內低於此特

表 1 流域地文因子

地文參數	定義
$A$	集水區總面積
$\bar{A}_i$	$i$ 級序集水區平均面積
$\bar{H}$	集水區平均高程
$L$	集水區主流長度
$L_{ca}$	集水區出口沿主流至重心距離
$\bar{L}_{c_i}$	$i$ 級序溪流之平均長度
$N_i$	$i$ 級序河川數目
$P_{x_i, x_j}$	$i$ 級序河川銜接 $j$ ( $j > i$ ) 級序河川之轉移機率
$P_{o, A_i}$	$i$ 級序漫地流區域面積相對於全流域面積之比
$\bar{S}_{c_i}$	$i$ 級序河川之平均坡度
$\bar{S}_{o_i}$	$i$ 級序漫地流之平均坡度
$\bar{S}$	集水區平均坡度
$S_s$	集水區主流平均坡度
$\Omega$	集水區河川之最高級序
$\ln\left(\frac{a}{\tan \beta}\right)$	集水區地形指數值

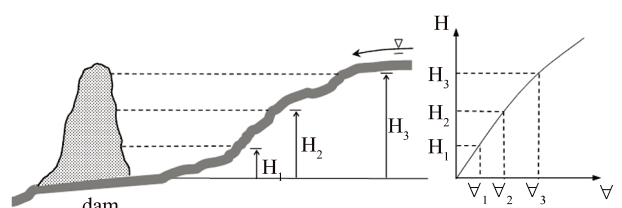


圖 1 水庫選址位置之蓄水高程與蓄水容量推求示意圖



定高度的格點數，而計算出相對應之上游蓄水面積。針對某一高度壩體所相對應的水庫蓄水容量，可表示為

$$\forall(H') = \int_{H_0}^{H'} A(H)dH \dots\dots\dots(1)$$

式中  $H'$  為壩體高程， $\forall(H')$  為壩體高程於  $H'$  之蓄水容量， $A(H)$  為壩體高程於  $H$  的上游蓄水面積，而  $H_0$  為堰壩址位置的地表高程。上式可採用辛普森積分方式 (Simpson integration method)，以數值高程資料的垂直解析度為積分間距，而推求得壩體高程為  $H'$  的水庫蓄水容量。

## 2.2 日流量分析

研究中採用地形指數模式，配合數值高程模式的地文因子計算成果，進行集水區內重要控制點的日流量模擬。Beven and Kirkby (1979) 所提出的地形指數模式 (topographic index model, 簡稱 TOPMODEL) 藉由集水區地形與土壤特性的關係，推求地表與飽和含水層之間的距離。模式中定義當地表與飽和含水層間之距離為 0 時，該位置為地表逕流之起點。如圖 2 (a) 所示，此地表逕流產生之位置僅分布於河川周圍之局部飽和區域，而未飽和區域則無地表逕流漫流的現象。如圖 2(b) 所示，模式中將逕流貯蓄機制劃分為根系層 (root zone)、未飽和含水層 (unsaturated zone) 與飽和含水層 (saturated zone)。當降雨發生時，雨滴首先落於根系層，當根系層貯蓄量大於根系層最大貯蓄容量 ( $S_{RZmax}$ )，則水流將由根系層轉入未飽和含水層。此時若降雨強度甚大，由根系層轉入未飽和含水層的水量，大於未飽和含水層的貯蓄容量 ( $z_j$ )，則水流將湧出地面形成地表逕流。而未飽和含水層的水受重力影響，將以垂直入滲方式進入飽和含水層，在坡面以側向出流方式匯入河川形成地表下逕流。

地形指數模式有三個基本假設：(1) 飽和含水層的動力現象可近似為連續穩定狀態 (successive steady state)；(2) 飽和含水層的水力梯度可近似為局部區域的地表坡度  $\tan \beta$ ；(3) 地表下含水層之側向流通度 (或是水力傳導度) 的空間分布與地下水位深度成指數函數關係，可表示如下 (Beven and Kirkby, 1979)

$$K = K_0 \exp\left(-\frac{z}{m}\right) \dots\dots\dots(2)$$

式中  $K_0$  為地表飽和情況的土壤側向水力傳導度； $z$  為局部區域的地下水位深度，亦即是由地表面至地下水位之距離； $m$  為係數。若集水區的水力傳導度  $K_0$  可

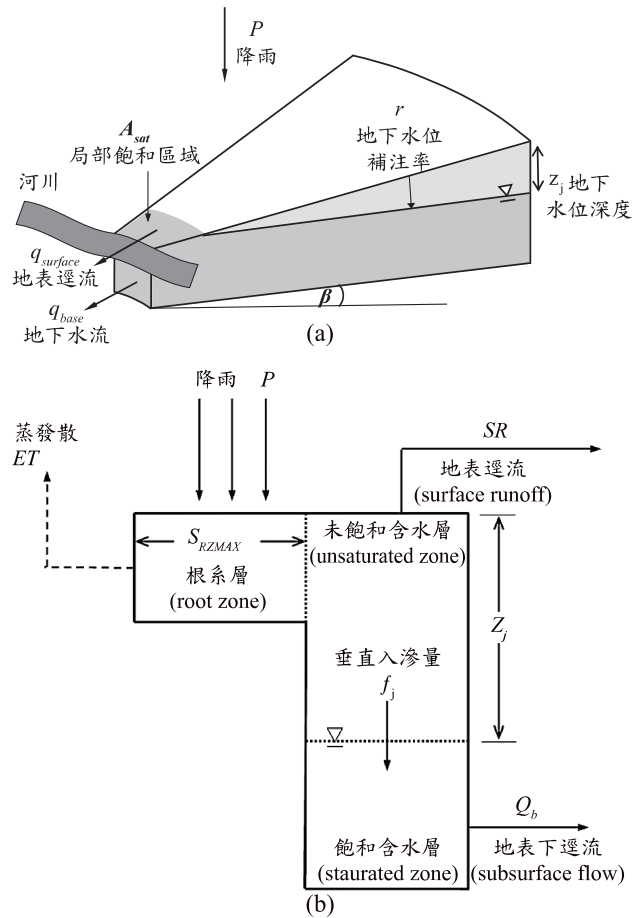


圖 2 地形指數模式架構

視為常數，則任何一位置點的地下水位深度可表示為

$$z_j = \bar{z} + m \left[ \lambda - \ln \left( \frac{a}{\tan \beta} \right)_j \right] \dots\dots\dots(3)$$

式中  $z_j$  為  $j$  位置點由地表面至地下水位距離； $\bar{z}$  為集水區地下水位深度平均值； $a$  為流經  $j$  位置點之單位寬度集流面積； $\ln(a/\tan \beta)$  稱地形指數值 (topographic index)，而  $\lambda$  為集水區地形指數平均值。集水區中指定位置點之地形指數值，可利用數值高程模式推求，因此集水區中地下水位深度的空間分布即可求得。當局部區域土壤水份達到飽和，上式之  $z_j$  可能呈現負值，表示該區域將產生漫地流，此漫地流水量匯集至集水區出口處即成為地表逕流總量。如圖 2 (b) 所示，根系層貯蓄水份量  $S_{RZ}$ ，可以水文連續方程式表示為

$$S_{RZ}(t+1) = S_{RZ}(t) + P(t+1) \cdot \Delta t - ET(t) \cdot \Delta t \dots\dots\dots(4)$$

式中  $S_{RZ}$  為根系層貯蓄水份量； $t$  為時間； $P$  為降雨量； $\Delta t$  為演算時距；而  $ET$  為蒸發散量。蒸發散量可表示為 (Quinn and Beven, 1993)

$$ET(t) = PET(t) \cdot \frac{S_{RZ}(t)}{S_{RZ\max}} \dots\dots\dots (5)$$

式中  $PET$  為勢能蒸發散量； $S_{RZ\max}$  為根系層之最大容許貯蓄水量 (maximum allowable storage)；若根系層貯蓄水份為 0，則此時根系層無蒸發散的情況發生。當根系層貯蓄水份達到最大容許貯蓄水量  $S_{RZ\max}$ ，多餘的水量將貯存於未飽和含水層中，並允許未飽和含水層貯蓄水份垂直入滲至飽和含水層中；而各位置的未飽和含水層貯蓄水份量  $S_{UZ}$  可表示為

$$S_{UZ_j}(t+1) = \begin{cases} S_{UZ_j}(t) + (S_{RZ_j}(t) - S_{RZ\max}) - f_j(t) \cdot \Delta t - SR_j(t), & S_{RZ_j}(t) > S_{RZ\max} \\ S_{UZ_j}(t) - f_j(t) \cdot \Delta t - SR_j(t) & , S_{RZ_j}(t) \leq S_{RZ\max} \end{cases} \dots\dots\dots (6)$$

式中  $S_{UZ_j}$  為  $j$  位置的未飽和含水層貯蓄水份量； $f_j$  為  $j$  位置之垂直入滲通量；而  $SR_j$  為  $j$  點位置之地表逕流量。 $j$  位置之垂直入滲通量可利用達西通量 (Darcian flux) 表示為 (Beven, 1986a, 1986b)

$$f_j(t) = \gamma K_0 \exp\left(-\frac{z_j(t)}{m}\right) \dots\dots\dots (7)$$

式中  $\gamma$  為有效垂直水力梯度 (effective vertical hydraulic gradient； $\alpha \cong 1$ )；而地下水的平均補注量為

$$Q_v(t) = \frac{1}{A} \sum_j f_j(t) A_j \dots\dots\dots (8)$$

式中  $Q_v$  為地下水的平均補注量； $A_j$  為垂直入滲通量  $f_j$  的集流面積。

在  $t$  時間，從飽和含水層流至河川，而匯集至集水區出口處之地下水出流量  $Q_b$ ，可利用地下水出流量與集水區平均地下水位深度  $\bar{z}$  之關係表示為

$$Q_b(t) = Q_0 \exp\left(-\frac{\bar{z}(t)}{m}\right) \dots\dots\dots (9)$$

式中  $Q_b$  為地下水出流量； $Q_0$  為土壤表面達到飽和的地下水出流量，亦即平均地下水位深度等於零的情況。而飽和含水層與地表的距離，即集水區地下水位深度之平均值  $\bar{z}$  可依水文連續方程式表示為

$$\bar{z}(t+1) = \bar{z}(t) + Q_b(t) \cdot \Delta t - Q_v(t) \cdot \Delta t \dots\dots\dots (10)$$

由第(9)式之解可得退水歷線對時間的倒數關係為 (Beven *et al.*, 1995)

$$\frac{1}{Q_b} = \frac{1}{Q_0} + \frac{t}{m} \dots\dots\dots (11)$$

綜合上述流程，因此集水區內任一位置點的逕流量，即為匯集至集水區出口點的地表逕流量，加上出口點的地下飽和含水層總出流量。地形指數模式主要是利用地形指數值，來描述集水區內逕流的匯集特

性。上述集水區各位置點之地形指數值，可利用數值高程模式推求；而模式中僅有  $K_0$ 、 $S_{RZ\max}$ ，以及  $m$  共計三個參數。基本上，在大範圍區域內，上述三個模式參數的空間變異甚為有限，因此可直接採用鄰近流量站水文紀錄檢定所得的模式參數值，以進行預定壩址的水文分析。

目前水資源規劃單位於分析堰壩址可取用水量時，主要係以規劃堰壩址之逕流量，扣除該堰壩址應保留水量後的剩餘水量進行計算 (台灣省水利局, 1994)；上述所稱保留水量須考慮下游既有用水單位的權利，並維持下游河段生態放流量 (即生態基流量，通常以  $Q_{95\%}$  進行計算)。以圖 3 為例， $k$  點為欲進行分析的新設壩址，如該位置有流量紀錄，則水壩建置之後，可供取用的剩餘流量可表示如下

$$Q'_k(t) = Q_k(t) - \sum_{j=1}^m \alpha_j \cdot (Q_d(t))_j \dots\dots\dots (12)$$

其中  $Q'_k(t)$  為水庫預定位置可供取用的剩餘水量， $Q_k(t)$  為  $k$  位置點的紀錄流量， $(Q_d)_j$  為下游  $j$  位置點已核發用水量； $\alpha$  為分擔係數，主要用於預定壩址對下游保留水量的比例，為水庫壩址集水面積

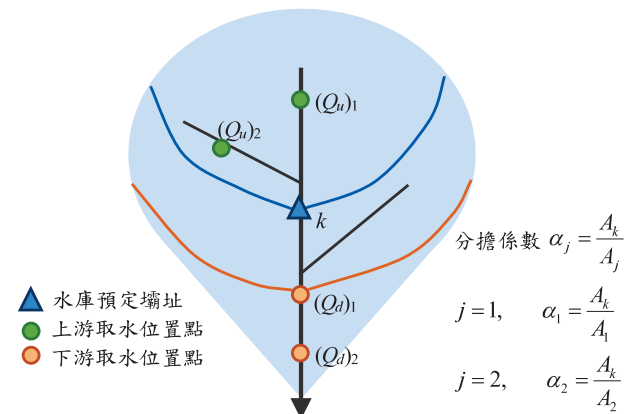


圖 3 規劃壩址剩餘水量分析示意圖

與下游用水位置點集水面積之比值，可表示為

$$\alpha = \frac{A_k}{A_j} \dots\dots\dots(13)$$

式中  $A_k$  為水庫壩址位置之上游集水面積； $A_j$  為下游核發用水位置點 ( $j$ ) 的上游集水面積。

然而，新設水庫位置點往往無流量紀錄可供分析，對於第(12)式中的逕流量  $Q_k$ ，傳統作法上常取用鄰近流量測站紀錄，以控制面積比例方式進行推求。考量集水區為一非線性逕流系統，因此以簡單的控制面積比例方式進行計算，將無法正確掌握逕流的匯集情形。有鑑於此，本研究乃採用地形指數模式以推求  $k$  點之天然流量  $\hat{Q}_k$ ，唯應用地形指數模式推求天然流量，需考慮上游已取用的水量 (如圖 3 中的兩個上游取水位置點)，而予以扣除。因此  $k$  點位置的剩餘流量  $Q'_k$  可計算如下

$$Q'_k(t) = \hat{Q}_k(t) - \sum_{i=1}^n (Q_u(t))_i - \sum_{j=1}^m \alpha \cdot (Q_d(t))_j \dots\dots(14)$$

式中  $Q'_k(t)$  為預定壩址位置可供取用的剩餘水量， $\hat{Q}_k(t)$  為利用地形指數模式計算的天然日流量， $(Q_u(t))_i$  為上游  $i$  位置點取用水量或是已核發水權的取水量； $(Q_d(t))_j$  為下游  $j$  位置點取用水量或是已核發水權的取水量。

若將第 (12) 式或 (14) 式分析所得的各旬剩餘流量由大至小排列，則可利用韋伯 (Weibull) 機率公式  $P = m / (N + 1)$ ，計算  $N$  年水文紀錄中排序為  $m$  的剩餘流量所發生的超越機率  $P$ ，而後可將各旬的日流量  $Q_{p\%}$  繪製流量超越機率分布曲線。應用前述分析

方法，即可模擬預定壩址位置各旬的剩餘流量，而得到規劃壩址剩餘流量超越機率資訊，以瞭解該位置之水資源潛能。

### 三、水資源規劃作業系統建置

#### 3.1 系統架構

考量水資源規劃過程所需的基本資料眾多，且分析過程繁複，亟需建立一套便捷的作業系統，結合數據資料處理與水文分析程序。圖 4 為本研究所建立的「流域水資源規劃作業系統」平臺架構，分為「使用者本機端」與「系統伺服器端」二大部分。「使用者本機端」應用軟體包括：(1) 系統應用資料庫，(2) 核心計算模組，以及 (3) QGIS 計算系統等；檔案資料存取位置為已授權使用者的個人電腦主機；而「系統伺服器端」主要工作為系統維護與更新。

此水資源規劃作業系統係以開放原始碼地理資訊系統 (Open source GIS) 為平臺，匯入對應流域之數值高程資料與相關空間數化資料；而後以呼叫網路服務 (Web Services) 方式，介接水利署的「水資源資訊交換平臺」(Water Resource Information Service Platform, WRISP)，藉以擷取水文觀測資料。作業系統內部是以 Fortran 程式語言建立地文與水文分析模組；而針對系統資料儲存，則採用 PostgreSQL 資料庫系統儲存修正暨補遺資料以及模組計算成果。因此使用者於 Quantum GIS (QGIS) 平臺上，可透過視覺化圖形介面操作，連結系統應用資料庫，以進行指定流域的地文



圖 4 作業系統架構圖





圖 5 系統主畫面

與水文分析工作。此外，為維持平臺運行之正確與完整性，乃連結 Windows 平臺的網路伺服器，發布更新作業平臺版本訊息，以及地文與水文分析模組的重大更新項目，提供便捷且高效能之操作環境。

圖 5 為「流域水資源規劃作業系統」的主畫面；平臺功能列上方為 QGIS 基本操作功能，可提供一般 GIS 基本操作與所提供的外掛軟體；而下方為「流域水資源規劃作業系統」主選單，乃直接掛載本研究建置的核心計算模組。

### 3.2 分析模組功能

圖 6 為流域水資源規劃作業系統所包含的分析模組，相關功能可簡述如下：

#### 3.2.1 水資源資料庫

進行水文分析時，需要大量水文觀測資料方可執行，為簡化資料蒐集之繁複工作，本系統乃介接水利署 WRISP 服務取得水文觀測資料，以進行水文分析計算。系統可提供「水文資料檢視」、「水文資料修正/補遺」、「月平均溫度資料檢視與編輯」，以及「用水資訊」等功能。以資料可視化視窗，提供使用者進行各類水資源觀測紀錄資料檢視，且可執行資料編輯工作。

#### 3.2.2 前置設定

一般進行地文與水文分析，主要是針對指定位置點(如流量站、水文站、壩址位置等)，選定特定水文事件後，再進行後續計算分析。而該指定位置點與特定水文事件，常被重複應用於不同分析流程中。本系統將各項分析過程中較常重複輸入之資料(例如：地



圖 6 系統模組主選單功能列表

文因子推求與分析時間設定)，進行前置資料計算與資料儲存。此外，各模式需應用之參考表(如無因次單位歷線)，已匯入本系統資料庫中，系統可自動連接進行分析，或是應用「水文模式參數編修與匯入」功能，提供使用者針對前述各項參數進行新增與編修。

#### 3.2.3 雨量分析

研究中參考一般慣常使用方法與水文分析流程，建置結構化計算功能，使用者可透過視覺化操作設定，直接引用雨量紀錄資料，進行集水區降雨特性分析工作。『雨量分析模組』提供「區域降雨平均」、「雨量頻率分析」、「IDF 曲線分析」、「未降雨日數分析」，以及「可施工日數分析」等功能，可針對集水區降雨特性進行分析。「區域降雨平均」功能中，使用者可自行選取雨量站，配合徐昇多邊形法、等雨量線法，以及算術平均法等，推求特定控制點之區域平均降雨。「雨量頻率分析」功能可推估年最大一日、二日、三日降雨量，並應用常態分布、二參數對數常態分布、三參數對數常態分布、皮爾遜 III 型分布、對數皮爾遜 III 型分布，以及極端值 I 型分布等六種常用機率分布進行頻率分析計算。「IDF 曲線分析」功能可利用時雨量紀錄求得各延時降雨量，並推估 Honer 公式於六種常用機率分布的  $a$ 、 $b$ 、 $c$  參數值。「未降雨日數分析」功能，乃藉由雨量門檻值及豐水期設定，可進行單站或區域之未降雨日數分析，以便提供未來乾旱發生機率之資訊，供決策者進行水資源之分配管理工作。「可施工日數分析」功能，乃依使用者設定分析歷年各月份降雨日數，並統計各月份可施工日數，作為計畫工期推估依據。

#### 3.2.4 流量分析

『流量分析模組』提供「流量頻率分析」、「天然日流量模擬」、「流量超越機率分析」，以及「重



現期洪峰流量推估」等功能。可針對有流量紀錄與無流量紀錄地區，分別進行短延時洪峰流量模擬，與長延時天然日流量模擬。「流量頻率分析」功能針對有流量紀錄地區(流量站)，採用歷年最大瞬時流量紀錄，應用常態分布、二參數對數常態分布、三參數對數常態分布、皮爾遜 III 型分布、對數皮爾遜 III 型分布，以及極端值 I 型分布等六種常用機率分布進行頻率分析計算。「天然日流量模擬」功能，則利用地形指數模式進行長時距之天然日流量模擬，而其計算成果亦可提供予「流量超越機率分析」與『水源分析模組』的「剩餘水量分析」功能進行後續分析。「流量超越機率分析」功能，可針對實測日流量紀錄與天然日流量模擬成果進行旬或月之日流量超越機率分析。「重現期洪峰流量推估」功能，其分析流程包含前置設定、集流時間公式計算(運動波集流時間公式、角屋睦集流時間公式、Rziha 集流時間公式、加州集流時間公式及周文德集流時間公式等五種集流時間公式)、設計雨型(同位序平均法與序率馬可夫法)、有效降雨推估( $\Phi$  指數入滲法與 Horton 入滲法)，以及水文模式(運動波-地貌瞬時單位歷線模式、無因次單位歷線模式及三角形單位歷線模式) 選取，使用者可自行選定分析模式，進而推求特定控制點的重現期洪峰流量。

### 3.2.5 水庫特性分析

『水庫特性分析模組』提供「水庫選址資訊」、「現存壩址查詢與編輯」、「泥砂率定曲線分析」，以及「水庫壽命分析」等功能。「水庫選址資訊」功能提供使用者進行可能壩址選址資訊分析及初步評估工作，並可推估河川網路上任一位置點之水庫水位-面積-庫容曲線(H-A-V curve)，並得知最大高程之淹沒範圍，以及 30 公尺與 50 公尺保護帶之計算結果圖檔。「現存壩址查詢與編輯」功能可讓使用者以滑鼠點選地圖圖徵方式，查詢現存水庫壩壩的概況；「泥砂率定曲線分析」乃利用歷年含砂量資料，推求泥砂率定曲線之迴歸係數，作為後續水庫壽命分析之參考資訊。「水庫壽命分析」則可引用前述『水源分析模組』中「流量超越機率分析」成果，與「泥砂率定曲線分析」成果，針對水庫使用壽命進行初步推估。

### 3.2.6 水源分析

『水源分析模組』提供「取水點分析」、「剩餘水量分析」，以及「水庫供水量分析」等功能。本分析模組可考量上、下游用水資訊、生態基流量、供水量限制、越域引水情況等，藉由本分析模組獲得可能

壩址與各用水資訊之關係，並進而推估剩餘水量及規劃水庫供水情況。「取水點分析」功能可針對河川網路上任一位置點，判斷其與各引水點之相對上、下游關係，並建立其屬性關係資料表後納入本系統應用資料庫中。「剩餘水量分析」功能可針對實測日流量紀錄與天然日流量模擬成果，考量各引水點之用水資訊後，進行旬或月之剩餘流量超越機率分析。「水庫供水量分析」功能，則可引用前述『水庫特性分析模組』中「水庫選址資訊」成果(H-A-V curve)，與「剩餘水量分析」成果，進行水庫供水量分析。

### 3.2.7 空間分析

『空間分析模組』提供「水庫空間環境分析」與「崩塌地空間分析」功能。

「水庫空間環境分析」功能以數值高程模式為基礎，應用地理資訊系統技術，針對規劃壩址，自動推估水庫蓄水高程可能之淹沒範圍，並針對已授權空間資料(例如：土地利用、村里界圖等)，統計各空間屬性資料受淹沒影響之面積分布與比例關係。「崩塌地空間分析」功能可提供上游集水區可能產生淺層崩塌之空間分布資訊，以供庫區影響範圍評估與水土保持施作之參考。

### 3.2.8 分析成果輸出

本系統平臺可連結各分析模組地文與水文分析演算成果，以圖、表方式展示演算成果，並提供 WORD 及 EXCEL 報表輸出功能。

前述說明為本系統主要分析模組，考量使用者欲熟悉系統各項操作功能，本作業平臺同時提供線上「系統操作說明」功能，使用者可下載系統操作手冊，手冊中提供系統詳細操作資訊；且使用者可透過「檢查更新」功能得知是否有更新版本可供下載。若對於系統平臺有任何問題，則可以「聯繫我們」來協助操作。

## 四、應用案例分析

本研究以雙溪集水區為應用案例，採用水資源規劃作業系統的分析模組，配合集水區數值高程資料與水文紀錄資料，以進行地文與水文分析，評估雙溪水庫預定壩址之水資源潛能。

### 4.1 雙溪集水區地文特性分析

雙溪集水區位於臺灣北部的獨立水系，發源於新

表 2 雙溪集水區控制點地文因子

控制點	集水區面積 $A$ ( $\text{km}^2$ )	河川長度 $L$ ( $\text{km}$ )	河川坡度 $S$ ( $\text{m/m}$ )	集水區平均坡度 $S_0$ ( $\text{m/m}$ )	地形指數平均值 $\ln(a/\tan\beta)$
雙溪水庫預定壩址	8.91	4.886	0.04615	0.27855	6.331
雙溪(III)流量站	116.74	21.170	0.01158	0.24328	6.553
雙溪(II)流量站	117.09	21.872	0.01126	0.24273	6.563
雙溪流域出口	141.90	26.146	0.00953	0.23136	6.643

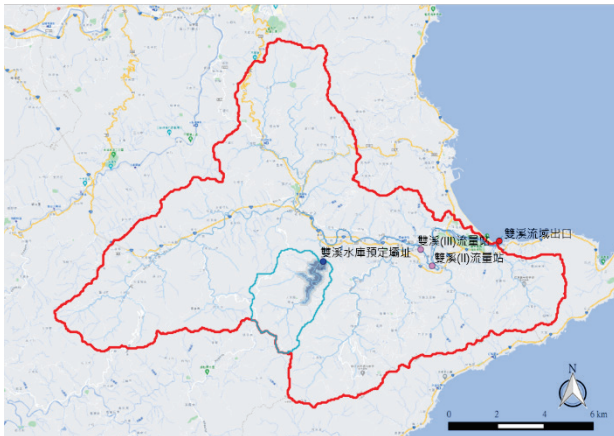


圖 7 雙溪集水區與雙溪水庫位置圖

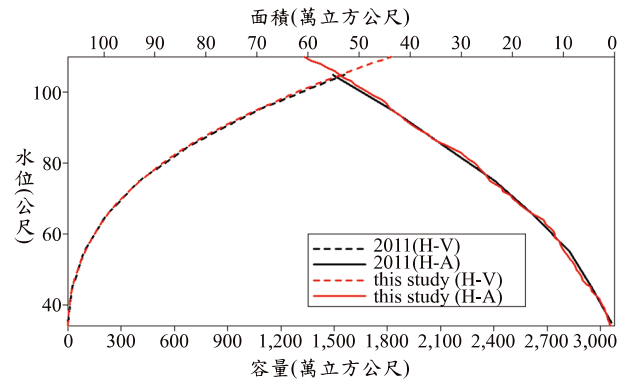


圖 8 雙溪水庫壩址 H-A-V 曲線

北市雙溪區長源村之中坑一帶，流經新北市貢寮區及雙溪區，最後注入於太平洋，主要支流有牡丹溪、丁子蘭溪、枋腳溪、遠望坑溪等 (如圖 7)。雙溪水庫預定壩址位於雙溪支流丁子蘭溪上游，於 1991~1997 年間，已辦理初步規劃、可行性規劃，以及完成環境影響說明書，惟當時決策暫緩推動雙溪水庫的建設計畫，因此環境影響評估作業只完成第一階段，第二階段並未完成；直到近年因基隆地區有水源不足情況，乃重新啟動雙溪水庫興建計畫 (水利規劃試驗所，2011)。

本研究採用規劃作業系統「前置設定→地文因子推求」功能，以數值高程模式推估雙溪集水區內各分析控制點的地文特性。雙溪流域總面積為  $141.9 \text{ km}^2$ ，雙溪 (II) 與雙溪 (III) 流量站控制面積分別為  $117.09 \text{ km}^2$  與  $116.74 \text{ km}^2$ ；而雙溪水庫預定壩址的上游集水區面積僅為  $8.91 \text{ km}^2$ ；其它詳細地文因子如表 2 所示。

#### 4.2 雙溪水庫水位-蓄水面積-蓄水容積曲線推估

應用本作業系統「水庫特性分析→水庫選址資訊」功能，可針對雙溪水庫壩址位置，推求水庫水位-蓄水面積-蓄水容積曲線。如圖 8 所示，當使用者給定水庫最大高程 (110 m) 與正常滿水位高程值 (105 m)，

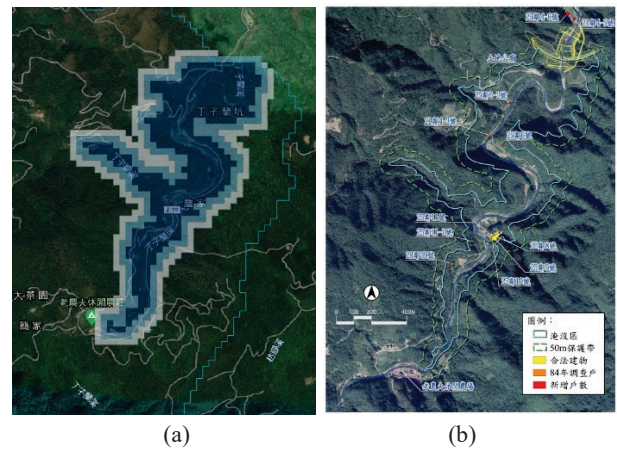


圖 9 雙溪水庫壩址上游可能淹沒範圍：(a) 本研究分析成果；(b) 2011 年規劃報告分析成果

再配合數值高程模式分析，即可進行不同高程情況下，水庫蓄水面積與蓄水容積計算。為確認本研究計算模組的正確性，圖 8 亦同時呈現 2011 年雙溪水庫可行性規劃檢討報告分析成果；圖中黑色線為 2011 年規劃檢討報告分析成果，而紅色線為本研究分析成果，兩者相當接近，其中蓄水面積與蓄水容積的差異侷限在  $\pm 3\%$  之內，可顯現本研究所開發的作業分析平臺，具有相當高的準確性 (如表 3)。圖 9(a) 顯示當假設水庫壩頂高程 110 m 情況下，上游集水區受迴水影響的可能淹沒範圍，以及考慮淹沒範圍外 30 m 與 50 m 之保護帶範圍。圖 9(b) 則顯示 2011 年規劃檢討報告中

表 3 雙溪水庫壩址 H-A-V 曲線數值表

(1) 水位高程 (m)	(2) 本研究蓄水面積 (10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup> )	(3) 2011 年規劃檢討報告 蓄水面積 (10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup> )	(4) (2) & (3) 差異量 (%)	(5) 本研究蓄水 容量 (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> )	(6) 2011 年規劃檢討 報告蓄水容量 (10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> )	(7) (5) & (6) 差異量 (%)
85	32.80	33.45	-1.94%	682.24	688.11	-0.85%
90	38.72	-	-	859.20	-	-
95	43.68	43.50	0.41%	1062.72	1069.91	-0.67%
100	48.32	-	-	1288.16	-	-
105	53.76	55.11	-2.45%	1540.64	1559.77	-1.23%
110	60.80	-	-	1822.40	-	-
115	69.12	68.05	1.57%	2143.23	2173.07	-1.37%
120	77.92	-	-	2508.82	-	-
125	85.28	86.74	-1.68%	2911.55	2948.75	-1.26%

表 4 雙溪集水區地形指數模式參數檢定值

模式參數	雙溪 (II) 流量站	雙溪 (III) 流量站	推估方式
地表飽和土壤之水力傳導度 $K_0$ (m/s)	0.003	0.003	檢定
9 月至翌年 3 月之模式參數 $m$	0.03	0.03	檢定
4 月至 8 月之模式參數 $m$	0.02	0.02	檢定
9 月至翌年 3 月根系層之最大容許貯蓄量 $S_{RZ\max}$ (m)	0.10	0.10	檢定
4 月至 8 月根系層之最大容許貯蓄量 $S_{RZ\max}$ (m)	0.10	0.10	檢定

50 m 保護帶的範圍分布圖。藉由此分析成果，再應用空間屬性圖層進行套疊，即可獲得建壩之後，上游集水區受影響的道路、建物，以及鄰近生態棲息區域，提供建壩後對環境衝擊影響資訊，以數位化分析方式快速進行壩址評估作業。

### 4.3 水文模式參數檢定與驗證

地形指數模式乃是一個基於集水區物理特性，所建立的降雨逕流模式；因此即使指定位置點沒有水文紀錄資料，亦可藉由鄰近流量站的水文紀錄，配合研究集水區的地文特性，分析該區域的降雨逕流關係。地形指數模式中需給定參數分別為：地表飽和土壤之水力傳導度  $K_0$ 、根系層之最大容許貯蓄量  $S_{RZ\max}$ ，以及參數  $m$ ；這些參數可藉由鄰近流量站紀錄資料，以參數檢定方式決定其值。有鑑於臺灣地區乾濕季節明顯，為能正確模擬不同季節水文特性，乃依據雙溪集水區的降雨特性，針對每年 4 月至 8 月，以及 9 月至翌年 3 月兩個階段進行模式參數檢定，藉此描述地形指數模式於不同時期的逕流特性。針對雙溪集水區中的兩個流量站（雙溪 (II) & 雙溪 (III)）的上游集水區，研究中蒐集火燒寮、瑞芳 (II)、太平、福隆、

雙溪及鹽寮等 6 個雨量站的日雨量資料，應用徐昇多邊形法進行區域平均降雨計算，再配合日流量紀錄，進行模式參數檢定。依據所蒐集水文紀錄資料進行評估，以 1996 年為參數檢定代表年份(分析結果如圖 10 所示)，而以 1997 年為參數驗證年份(分析結果如圖 11 所示)。由圖 10 與圖 11 可知，地形指數模式於 1996 年與 1997 年的日流量紀錄，均有甚佳的模擬結果，此模擬結果與原始紀錄的相關係數約為 0.73 ~ 0.84。表 4 為雙溪流域地形指數模式參數檢定結果；由該表可知，由於雙溪 (II) 流量站及雙溪 (III) 流量站位置相近，因此參數檢定結果亦相近。此外，由檢定結果可知，模式參數並無乾季與濕季的差異，顯示雙溪集水區全年逕流特性相對穩定。藉由前述分析過程與參數檢定結果，可作為後續雙溪水庫集水區日流量模擬之應用。

### 4.4 雙溪水庫流量超越機率分析

利用前述數值高程模式分析，可得知雙溪水庫預定壩址的集水區地文因子，而後採用本系統「流量分析→天然日流量模擬」功能，配合火燒寮、瑞芳 (II)、太平、福隆、雙溪，以及鹽寮等雨量站的降雨



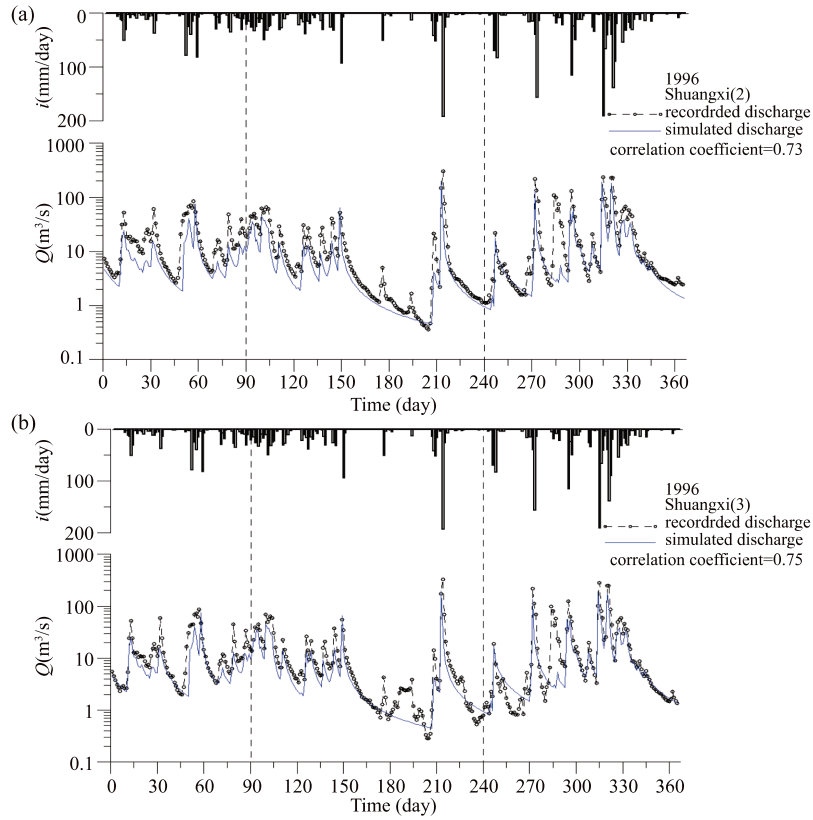


圖 10 雙溪流域天然日流量模擬- 參數檢定年份 (1996 年) : (a) 雙溪 (II) 流量站 ; (b) 雙溪 (III) 流量站

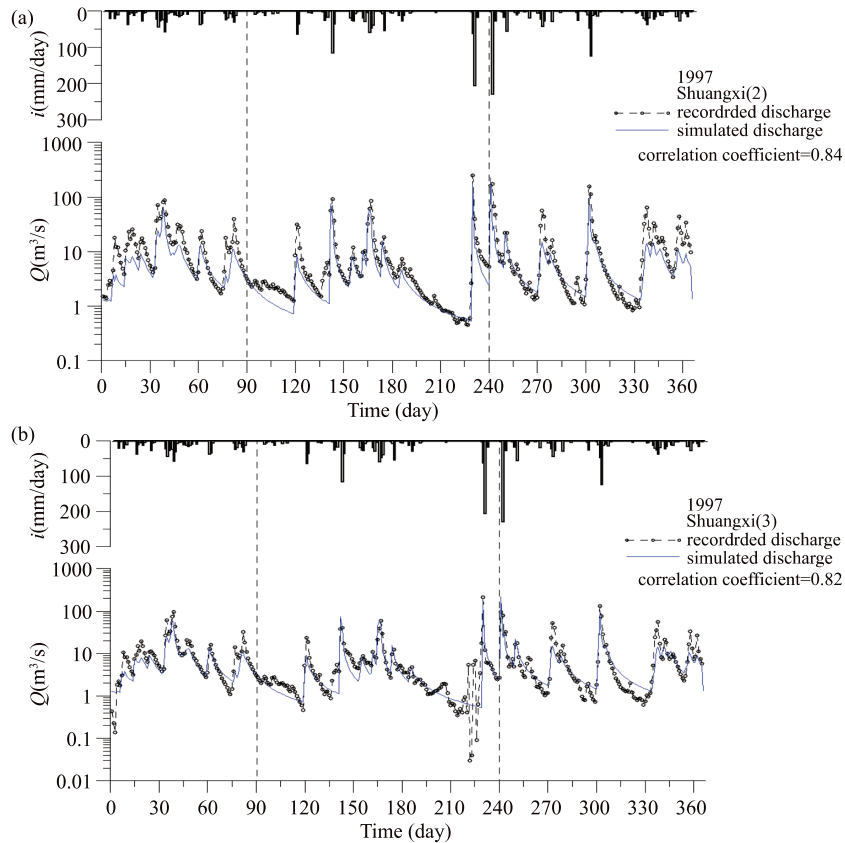


圖 11 雙溪流域天然日流量模擬- 參數驗證年份 (1997 年) : (a) 雙溪 (II) 流量站 ; (b) 雙溪 (III) 流量站



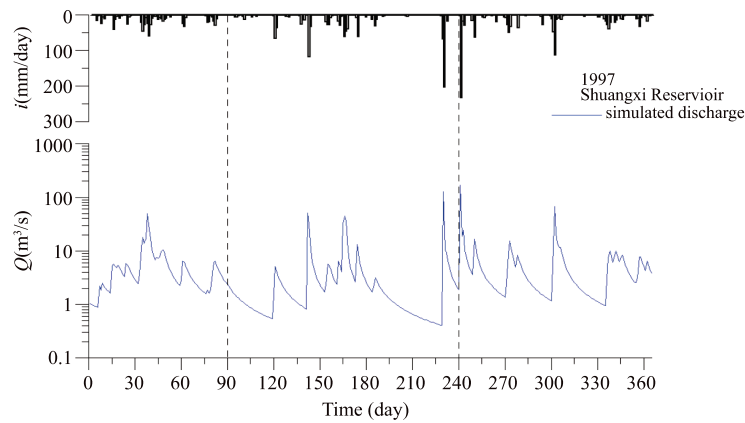


圖 12 雙溪水庫集水區天然日流量模擬結果 (1997 年)

表 5 雙溪水庫下游需保留水量分析

旬次	保留水量 (m <sup>3</sup> /s)	生態基流量 (m <sup>3</sup> /s)	需保留水量 (m <sup>3</sup> /s)
1	0.0380	0.1159	0.1159
2	0.0380	0.1062	0.1062
3	0.0380	0.1413	0.1413
4	0.0380	0.1026	0.1026
5	0.0380	0.0849	0.0849
6	0.0380	0.0700	0.0700
7	0.0380	0.0585	0.0585
8	0.0380	0.0918	0.0918
9	0.0380	0.0786	0.0786
10	0.0380	0.0633	0.0633
11	0.0380	0.0505	0.0505
12	0.0380	0.0424	0.0424
13	0.0380	0.0351	0.0380
14	0.0380	0.0300	0.0380
15	0.0380	0.0259	0.0380
16	0.0380	0.0229	0.0380
17	0.0380	0.0686	0.0686
18	0.0380	0.0637	0.0637
19	0.0380	0.0494	0.0494
20	0.0380	0.0498	0.0498
21	0.0380	0.0417	0.0417
22	0.0380	0.0377	0.0380
23	0.0380	0.0326	0.0380
24	0.0380	0.0299	0.0380
25	0.0380	0.0488	0.0488
26	0.0380	0.0589	0.0589
27	0.0380	0.1122	0.1122
28	0.0380	0.1184	0.1184
29	0.0380	0.1236	0.1236
30	0.0380	0.1086	0.1086
31	0.0380	0.1526	0.1526
32	0.0380	0.1438	0.1438
33	0.0380	0.1405	0.1405
34	0.0380	0.1585	0.1585
35	0.0380	0.1673	0.1673
36	0.0380	0.1613	0.1613

紀錄(1994年~2020年),應用徐昇多邊形法進行區域平均降雨計算,並採用表4的模式參數檢定結果,即可代入作業系統,模擬雙溪水庫上游集水區1994年~2020年的日流量歷線。圖12為雙溪水庫集水區於1997年的日流量模擬結果,該圖顯示1997年的最大日流量約為 $17\text{ m}^3/\text{s}$ ;該圖以對數軸方式表示,乃是因為於無降雨期間的低流量時期,容易分辨流量值的大小。圖12的模擬結果乃是將降雨紀錄直接輸入地形指數模式,所產生的天然日流量序列。如果水庫預定位置的上游已有取水設施,則需將此天然日流量序列扣除取水設施的取水量,才是水庫壩址預定位置所能取得的水量。由於雙溪水庫預定位置的上游無任何取水設施,因此圖12的模擬結果無須再做任何修正。

當水壩興建之後,壩體將會攔蓄水流,阻斷天然流量於河川網路的輸送,因而影響下游既有用水人的權益,以及河川生物棲息所需的生態基流量。雙溪水庫預定位置的上游無任何取水設施,因此建壩後的水資源分配,僅需考慮下游已核發水權的保留水量與生態基流量。如表5所列,雙溪水庫下游水權保留水量合計為 $0.038\text{ m}^3/\text{s}$ ;而生態基流量則採用各旬日流量的模擬結果,以超越機率為95%的旬流量進行估算。研究中乃是採用下游水權保留水量與生態基流量兩者中的較大值,以進行後續水庫可用水量分析計算。

如圖3以及第(12)式與第(14)式所示,新設水庫的可用水量分析(或稱為剩餘水量分析),需考慮上游以核發水權的取水量,以及下游水權保留水量與生態基流量,而後進行流量超越機率分析。本研究乃應用系統平臺的「水源分析→剩餘流量超越機率分析」功能,推估雙溪水庫於1994年至2020年期間,扣除下游保留水量後的剩餘水量,而後建立不同超越機率之流量 $Q_{p\%}$ 與日流量延時曲線。本系統可提供(1)全年度資料分析,(2)乾季資料分析,以及(3)濕季資料分析等不同期間的流量延時曲線分析成果。圖13分別顯示全年度流量延時曲線、乾季流量延時曲線(3月~8月),以及濕季流量延時曲線(9月~翌年2月);由圖中可知,在50%超越機率情況下,濕季的流量可達 $0.42\text{ m}^3/\text{s}$ ,全年度流量為 $0.22\text{ m}^3/\text{s}$ ,而乾季的流量僅為 $0.11\text{ m}^3/\text{s}$ 。如圖14所示,藉由上述剩餘流量的超越機率分析結果,可得到在指定超越機率情況下各旬剩餘流量歷線。由圖中可得知,乾季的流量尖峰出現在6月中旬(第17旬)。而濕季的最大流量尖峰出現在9月下旬(第27旬),此應為颱風降雨所帶來的水量;而11月上旬(第31旬)與12月中旬(第35旬)的流量尖峰,則應該是冬季臺灣北部東北季風所帶來的雨量所致。此水庫可用流量的超越機率訊息,將可提供規畫壩址水資源潛能評估的重要參考依據。

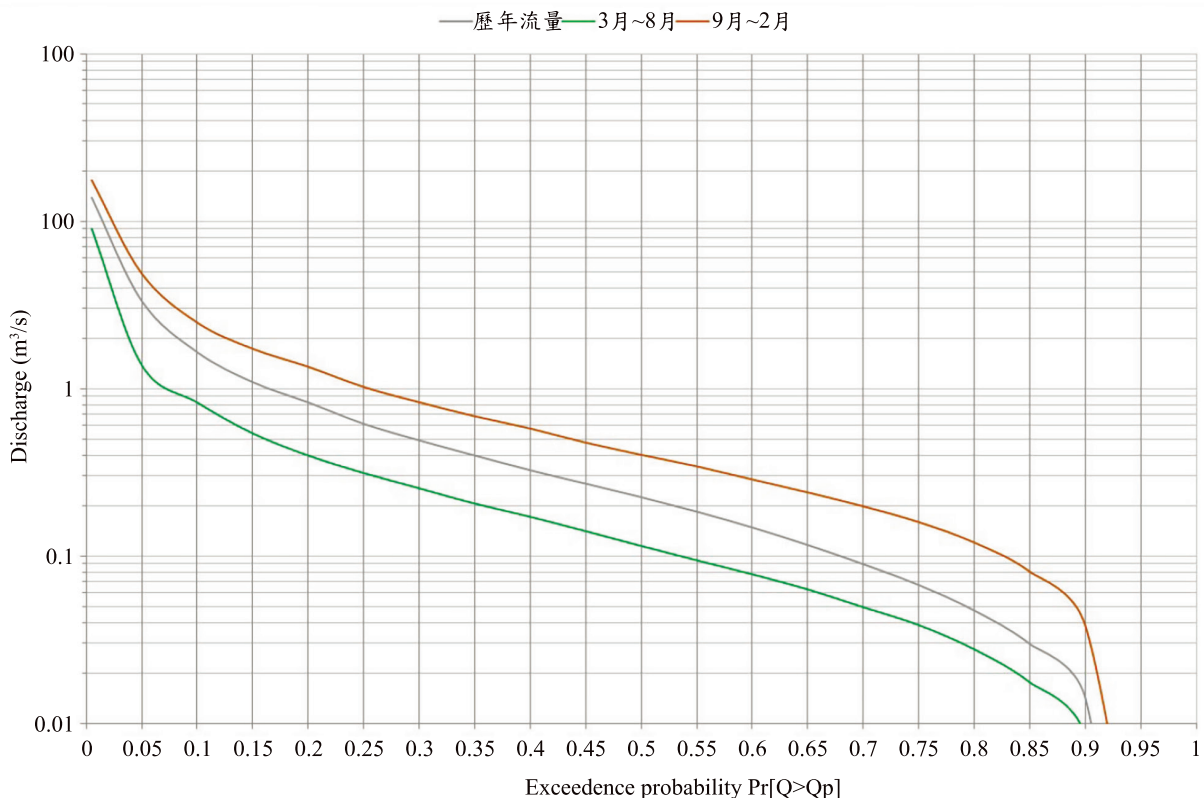


圖 13 雙溪水庫剩餘水量的流量-延時關係分析

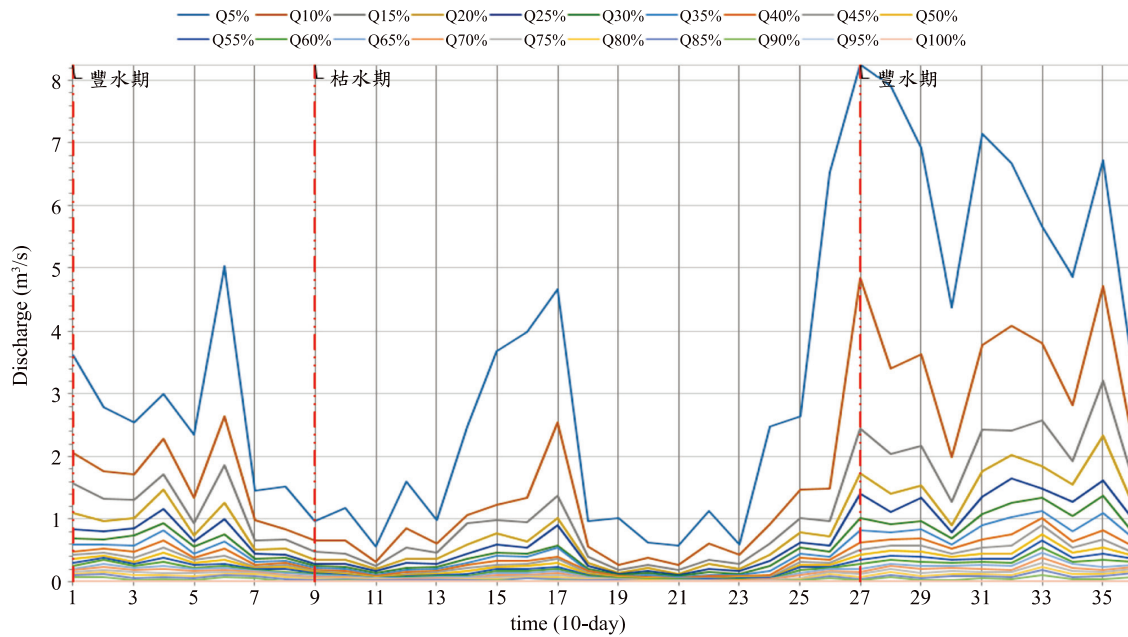


圖 14 雙溪水庫各旬剩餘水量超越機率分析

## 五、結論

本研究結合集水區地文與水文分析理論，建構地理資訊系統作業平臺，以提供新設水庫所需的重要資訊。本系統採用 PostgreSQL 以建置應用資料庫系統，核心計算模組乃是採用 Fortran 程式語言撰寫，而作業平臺則採用 Quantum GIS 以提供基本圖層操作與分析結果展示。當使用者匯入對應集水區的數值高程資料，以及相關雨量與流量紀錄，即可透過平臺介面操作，進行地文、雨量分析、流量分析、水庫特性分析、水源分析，以及空間分析作業。

本文展示採用「前置設定→地文因子推求」模組，推估雙溪流域各控制點的地文因子，而後應用「流量分析→天然日流量模擬」模組，藉由地形指數模式進行日流量模擬與參數檢定工作。研究中收集 1994 年至 2020 年期間集水區內 6 個雨量站與 2 個流量站的水文紀錄資料，以檢定地形指數模式參數。模式模擬結果顯示，模擬結果與原始紀錄之相關係數約為 0.73~0.84，此顯示地形指數模式可適切模擬雙溪集水區的降雨逕流關係。當確認上游已存在的取水量與下游需保留水量之後，即可應用「水源分析→剩餘流量超越機率分析」功能，以推求壩址預定位的可用水量(剩餘水量)。

本文以雙溪水庫預定壩址為例，在考慮上、下游已核發水權取水量以及生態基流量情況下，可得知壩址預定地的可用水量的日流量延時曲線，以及不同超

越機率情況下的旬流量分布。分析結果顯示，在 50% 超越機率情況下，濕季的流量可達 0.42 m<sup>3</sup>/s，全年度流量為 0.22 m<sup>3</sup>/s，而乾季的流量僅為 0.11 m<sup>3</sup>/s。本研究所建立之「流域水資源規劃作業系統」，可提供使用者以便捷的方式獲取集水區河川網路上任一位置點的地文因子與水庫水位-面積-庫容曲線，以及天然日流量、水資源潛能等水庫規劃所需重要資訊，以利研擬新設壩址的開發規模，提出完整的參考評估資訊。

## 參考文獻

1. Beven, K. J. and Kirkby, M. J. (1979). "A physically based variable contributing area model of basin hydrology," *Hydrol. Sci. Bull.*, 24(1), 43-69.
2. Campling, P., Gobin, A., Beven, K. J., Feyen, J. (2002). *Rainfall-runoff modeling of a humid tropical catchment: the TOPMODEL approach. Hydrological Processes* 16:231-253.
3. Feng, C.C. (2000). "Open hydrologic model for facilitating GIS and hydrologic model interoperability," 4th International Conference on Integrating GIS and Environment Modeling (GIS/EM4): Problems, Prospects and Research Needs. Banff, Alberta, Canada, September 2-8.
4. Geri, F., Cainelli, O., Salogni, G., Zatelli, P. and Ciolli, M. (2017). "Screening of environmental impact of pollution

- with the qgis plugin envifate,” *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 42, 79-83.
5. Häner, R. (2010). <http://www.guaraci.ch/fr/projets/projets-foresterie/77-analyse-du-projet-pilote-pour-la-surveillance-de-la-biodiversite-en-forets>.
  6. Helmlinger, K. R., Kumar, P., and Efi Foufoula-Georgiou. (1993). “On the use of digital model data for hortonian and fractal analyses of channel networks,” *Water Resour. Res.*, 29(8), 2599-2613.
  7. Huang, P.-C., Lee, K. T. (2015). “A simple depression-filling method for raster and irregular elevation datasets.” *Journal of Earth System Science*, 124(8), 1653-1665.
  8. James, B. and Keith R. (1998). “Interactions between model predictions, parameters and DTM scales for TOPMODEL,” *Computers & Geosciences*, 24(4), 299-314.
  9. Jenson, S. K., and Domingue, J. O. (1988). “Extracting Topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis,” *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54(11), 1593-1600.
  10. Lee, K. T., Chung, Y.-R., Lau, C.-C., Meng, C.-C., and Chiang, S. (2006). “A windows-based inquiry system for design discharge based on geomorphic runoff modeling,” *Computers & Geosciences*, 32(2), 203-211.
  11. Lee, K. T., Lin, Y.-T. (2006). “Flow analysis of dammed-up-lake watersheds: a case study,” *Journal of the American Water Resources Association*, 42(6), 1615-1628.
  12. Madiment, D.R. (1991). “GIS and hydrologic modeling,” Proc. 1st symposium / Workshop on GIS and Environmental Modeling Boulder, Colorado.
  13. O’Callaghan, J., and Mark, D. M. (1984). “The extraction of drainage networks from digital elevation data,” *Comput. Vision Graphics Image Process.*, 28, 323-344.
  14. Peter, N. E., Freer, J., Beven, K. J. (2003). “Modelling hydrologic responses in a small forested catchment (Panola Mountain, Georgia, USA): a comparison of the original and a new dynamic TOPMODEL,” *Hydrological Processes* 17:345-362.
  15. Quinn, P. F. and Beven, K. J. (1993). “Spatial and temporal predictions of soil moisture dynamics, runoff, variable source areas and evapotranspiration for Plynlimon, mid-Wales,” *Hydrol. Process.*, 7, 425-448.
  16. Quinn, P. F., Beven, K. J. and Lamb, R. (1995). “The  $\ln(a/\tan B)$  index: how to calculate it and how to use it within the TOPMODEL framework,” *Hydrol. Process.*, 9, 161-182.
  17. Steube, M.M., and Johnston, D.M. (1990). “Runoff volume estimation using GIS techniques,” *Water Resour. Bull.*, 26(4), 611-620.
  18. Vogt, J. V., Colombo, R., and Bertolo, F. (2003). “Deriving drainage networks and catchment boundaries: a new methodology combining digital elevation data and environmental characteristics,” *Geomorphology*, 53(3-4), 281-298.
  19. Zhang, X.-N., Xia, D.-Z., Jing, L.-Y., and Bakir, M. (2008). “Study of hydrological simulation on the basis of digitized basin,” *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, 13(5), 317-320.
  20. 台灣省水利局規劃總隊，「雲林地區水庫水源開發調查及可行性規劃二、水源及用水專題報告 2.水源及水庫供水能力分析」，台灣省水利局規劃總隊，(1994)。
  21. 李光敦、俞維昇、林怡廷、洪夢秋、徐郁涵、顏妍帆、劉育鑫、何瑞益：「永如山與明德水庫長期流量預測模式之研究與建置」，國立臺灣海洋大學河海工程研究所研究報告，經濟部水利署中區水資源局委託，(2011)。
  22. 李光敦、范佳銘、洪夢秋、黃雅琪、徐郁涵、游馨竹、林和中、曾國峰、陳乃光、曾韋諶、曾韋餘、詹翊平、廖聿勳、陳煥元：「台灣地區重要河川流域水文與水理設計分析系統平臺擴充與維護(2/2)」，國立臺灣海洋大學河海工程研究所研究報告，經濟部水利署水利規劃試驗所委託，(2016)。
  23. 經濟部水利署水利規劃試驗所 (2011)，「台灣地區北部區域雙溪水庫可行性規劃檢討」。
  24. 經濟部水利署水利規劃試驗所 (2015)，「規劃作業平臺建置-集水區水源應用結合空間環域分析研究(1/3)」。
  25. 經濟部水利署水利規劃試驗所 (2016)，「規劃作業平臺建置-集水區水源應用結合空間環域分析研究(2/3)」。
  26. 經濟部水利署水利規劃試驗所 (2017)，「規劃作業平臺建置-集水區水源應用結合空間環域分析研究(3/3)」。

收稿日期：民國 110 年 08 月 02 日  
修改日期：民國 110 年 08 月 16 日  
接受日期：民國 110 年 12 月 08 日