

# 集水區總量管理模式中氣象模擬與水文校正之研究

陳鴻烈<sup>(1)</sup> 蔡大偉<sup>(2)</sup>

## 摘要

本研究將以南投縣境濁水溪支流之水里溪集水區為研究對象，運用集水區總量管理模式來進行氣象模擬與水文校正工作，希望藉此協助集水區總量管理工作。由於台灣集水區相關基礎監測資料庫尚未建立，故進行總量模擬時缺少許多模式所需之基本資料，為了研究能順利進行，本研究使用總量管理模式下之 WDMUtil 工具進行氣象資料模擬，模擬項目包括逐時蒸發散量與逐時降雨量。在建立模式所需基本資料庫後，研究中首先針對水文因子進行校正，校正之結果證實調整模式中 AGWRC、LZSN、UZSN 等 3 個變數有助於提升模式模擬之精確度。至於最後模式模擬之總逕流量誤差為 10%，尚在模式標準之內；而 50% 最低流量與季節流量等 2 個指標則誤差過大，需進一步研究探討。

(**關鍵詞**：總量管理模式、氣象模擬、水文校正、水里溪集水區)

## Weather Simulation and Hydrology Calibration in the TMDL Model

*Paris Honglay Chen*

Professor, Department of Soil and Water Conservation,  
National Chung Hsing University, Taichung, Taiwan 402, R.O.C.

*David D-W. Tsai*

Graduate Student, Department of Soil and Water Conservation,  
National Chung Hsing University, Taichung, Taiwan 402, R.O.C.

## ABSTRACT

This study used the TMDL model to complete weather simulation and hydrology calibration in the Shuili-stream watershed of Naotou County, Taiwan. We hoped the results could help the total maximum daily load (TMDL) management in the watershed. Because Taiwan's watershed database was not yet established, TMDL model was hardly used for lack of many basic data. In order to simulate the TMDL successfully, we used the WDMUtil program in TMDL model to simulate weather data including hourly evapotranspiration and rainfall. After building the database, we calibrated the hydrological factors of model first. The results showed that we could calibrate three

---

(1) 國立中興大學水土保持學系教授

(2) 國立中興大學水土保持學系博士班研究生

parameters of AGWRC, LZSN, UZSN in the model to improve the simulation accuracy. Finally, model simulation exhibited 10% errors in the total runoff volumes which were still acceptable according to the model standards. But the errors in 50% lowest flows and seasonal flows were too large, and should be improved further.

**(Key words:** TMDL model, weather simulation, hydrology calibration, Shuili-stream watershed)

## 前言

在進行集水區永續發展規劃時，需同時兼顧點源與非點源污染的管理。由於非點源污染難以掌握污染來源與變化，因此必須藉由總量管理的概念來訂定合理的減量目標，以達到保護環境水質及有效管理經營的目標(林鎮洋，2003；U.S. EPA，2004a)。

本研究是利用美國環保署開發的管理模式總量管理模式來模擬集水區之污染總量(U.S. EPA，2004b)，它整合了點源與非點源之污染。在進行有效模擬前，需先行模擬集水區氣象水文特性，因水文特性在生態結構與功能上扮演十分重要的角色(Sun等，2002)。本研究是依集水區實地狀況來校正模式，期能使模擬結果最符合現場實況。研究地點為南投縣境濁水溪支流的水里溪集水區，並先以氣象水文現象為目標進行模擬與校正。研究主要目的為補齊集水區氣象資料之不足，其後再校正模式來模擬水文流量的變化。

## 理論分析

在估算日蒸發散量的工作中，可使用Hamon(1961)所提出的方法，此方法所需資料包括(1)逐日氣溫、(2)逐月變數係數與(3)該地緯度位置，此外，利用氣溫及緯度資料則可分別估算(4)絕對溼度與(5)日照時數等兩個參數資料。在獲得以上5個參數後，Hamon公式可表示如下(U.S. EPA，2004c)：

$$PET = CTS \times DYL \times VDSAT$$

式中的 PET = 每日蒸發散量 (英吋)；  
CTS = 每月變數係數；DYL = 可能日照時數 (以 12 小時為單位)，依照緯度與時間計算；  
VDSAT = 絕對溼度 (日均溫之飽和蒸氣密度) (g/cm<sup>3</sup>)，其計算方式為

$$VDSAT = \frac{216.7 \times VPSAT}{TAVC + 273.3}$$

上式中 TAVC = 日均溫；VPSAT = 飽和蒸氣壓 (毫巴)，其計算式為

$$VPSAT = 6.108 \times \exp\left(\frac{17.26939 \times TAVC}{TAVC + 237.3}\right)$$

關於每月變數係數 (CTS)，Hamon 建議值為 0.0055，但此數值因地而異，尤其在冬天的月份誤差會較大，故 Hamon (1979, 1982) 提醒研究者仍應依研究地區之特性予以調整。

Hamon 法由於所需資料較少，且推算過程較為簡便，因此，在台灣有許多相關研究皆採納此法，同時證明其應用具有一定程度之準確性(陳信雄等，1997；黃正良，1999)。而在台灣現地的模擬與比較方面，則有施鈞程(2003)在畢祿溪集水區、福山集水區與蓮華池集水區進行的水平衡法、Thorntwaite 法與 Hamon 法之比較，結果發現使用水平衡法有明顯高估的現象，亦即水平衡法的年平均蒸

發散量大約等於以 Thornthwaite 或 Hamon 法所推估的年平均蒸發散量再加上該地區的截留量；至於以 Hamon 與 Thornthwaite 法估算之年蒸發散量及皿蒸發量則大致相同。

## 研究方法

本研究主要目的是針對集水區水文現象進行模擬，並使用總量管理模式與其中的 HSPF 模組進行分析。首先，須將模式所需之基本資料匯入，包括 (1) 集水分區地理資料、(2) 基礎氣象資料、(3) 土地利用相對入滲率。由於此集水區的氣象監測資料不足，故須進行評估分析，來補齊研究所需之數據。本研究利用總量管理模式模式下的分析工具 WDMUtil 來推估氣象資料，包括時蒸發散量與時降雨量。在時蒸發散量方面，需先以逐日最高與最低氣溫資料配合測站緯度來

進行日蒸發散量推估，之後再以日蒸發散量資料為依據，進行時蒸發散量的切割估算。而在時降雨量方面，則是依據各氣象測站日降雨量資料的輸入，來進行模擬切割分析。

完整輸入模式所需基本資料後，即可使用 HSPF 模組來進行水文分析。本研究主要是針對集水區流量進行模擬，根據模式模擬值與實測值之差距則可進行模式校正。為了加強模擬的準確性，校正前應先進行模式資料最佳化的工作，包括 (1) 模擬時間的選擇、(2) 潛勢蒸發散量的模擬、(3) 雨量站的選擇與 (4) 暴雨事件的選擇等，最後再以表現最佳的資料匯入模式中進行模擬與校正。在模式校正的過程中，將以水文校正專家系統 HSPEXP 模式來輔助，從中選擇最適當的校正變數與合理校正值，最後即可獲得最佳模式模擬結果。本研究整個研究流程如圖 1 所示。

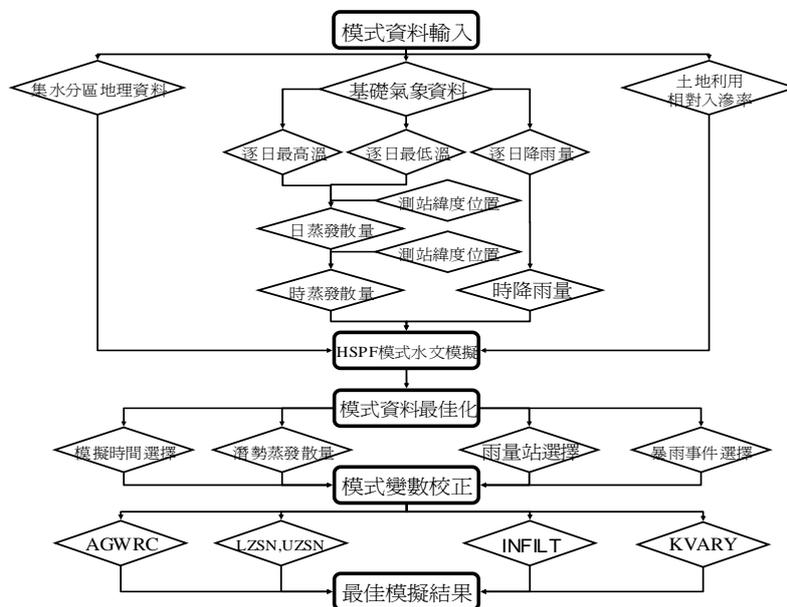


圖 1 研究流程圖

Figure. 1. Flowchart of this study.

### (一) 集水分區地理資料

以 HSPF 模組進行水文模擬時，必須以集水區相關地文資料為基礎，如此才可精確模擬水流走向、集流時間、水流速度等。在水文流量模擬過程中，主要使用的相關變數包括漫地流長度 (LSUR) 與漫地流坡度 (SLSUR)，這個部分由於缺乏實地監測資料，因此研究中是藉由分析 GIS 圖層來獲得模擬資料。基本原理是透過 GIS 軟體分析模擬河川斷面，再配合曼寧公式推求河川流量。

而在考量經濟因素與研究目的後，必須將整個集水區予以適當的分區，以提高管理

效率。經過集水分區最佳化研究後，本研究所選用的集水分區結果如圖 2，共分為 18 個子集水區 (陳鴻烈、蔡大偉等，2006)。

### (二) 基礎氣象資料

利用總量管理模式來進行水文流量分析時，必須使用氣象資料來配合，才能完整地模擬水循環過程。其基本需求為時蒸發散量與時降雨量資料，氣象檔案則可使用氣象分析工具 WDMUtil 來建立 (U.S. EPA, 2004e)。在氣象資料缺乏的情況下，以 WDMUtil 工具來估算相當好用，本研究即以此推估時蒸發散量與時降雨量資料。

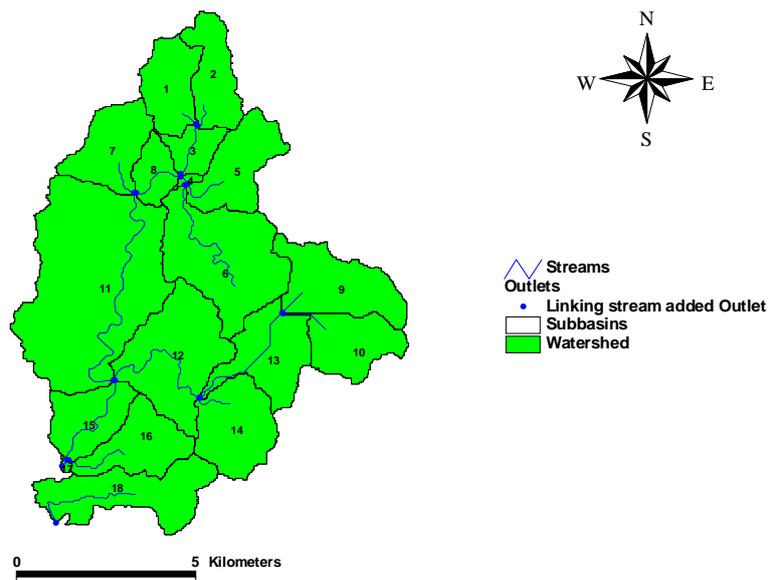


圖 2 集水分區圖

Figure. 2. Division of watershed.

圖片來源：陳鴻烈、蔡大偉，2006。

表 1 WDMUtil 氣象資料代號表  
Table 1. Weather codes in WDMUtil

資料集序號	資料集	資料集代碼	代表參數	資料集序號	資料集	資料集代碼	代表參數
1	PREC	(11,31,51,...191)	每小時降雨量	11	DWND	(21,41,61,...201)	每日平均風速
2	EVAP	(12,32,52,...192)	每小時蒸發量	12	DCLO	(22,42,62,...202)	每日平均雲覆蓋量
3	A TEM	(13,33,53,...193)	每小時溫度	13	DPTP	(23,43,63,...203)	每日平均露點溫度
4	WIND	(14,34,54,...194)	每小時風速	14	DSOL	(24,44,64,...204)	每日平均太陽輻射量
5	SOLR	(15,35,55,...195)	每小時太陽輻射量	15	DEVT	(25,45,65,...205)	每日平均蒸發散量
6	PEVT	(16,36,56,...196)	每小時蒸發散量	16	DEVP	(26,46,66,...206)	每日平均蒸發量
7	DEWP	(17,37,57,...197)	每小時露點溫度	17		(27,47,67,...207)	自訂
8	CLOU	(18,38,58,...198)	每小時雲覆蓋量	18		(28,48,68,...208)	自訂
9	TMAX	(19,39,59,...199)	每日最高溫	19		(29,49,69,...209)	自訂
10	TMIN	(20,40,60,...200)	每日最低溫	20		(30,50,70,...210)	自訂

### 1. 時蒸發散量推估

推估時蒸發散量需要逐日最高與最低溫，及測站緯度等資料。在輸入基本資料後，即可使用模式估算日蒸發散量，然後再以此為依據，進行時蒸發散量的推估。

#### (1) 基本資料輸入

推算日蒸發散量時，所需基本資料為逐日最高與最低溫。本研究乃針對水里溪集水區進行分析研究，因此氣溫是採用日月潭氣象站的資料，輸入時間範圍則是 1998~2003 年（中央氣象局日月潭觀測站，1998-2005）。

本研究所使用的 WDMUtil 氣象分析工具，其資料的讀取是採用時間序列形式，因此必須先將氣溫資料整理為時間數列，並以文字檔形式 (.txt) 匯入。在 WDMUtil 中，每

一種氣象參數都有特定的數列來代表，而每個參數又可分成日或時為單位的時間數列，模式系統即依照不同的數列代碼來判讀輸入的資料為何種氣象參數，其系統代碼所對照的氣象參數資料整理如表 1。由表中可知，本研究所使用的逐日最高溫代號為 TMAX，代碼 19；逐日最低溫為 TMIN，代碼 20。

兩項氣象資料輸入完成後，若以代號 GAGE1 代表日月潭氣象站，則最後模式輸入結果之模式介面如圖 3 所示。

#### (2) 日蒸發散量估算

日蒸發散量必須依據前述之逐日最高最低溫時間數列資料，再加上測站緯度來估算。日月潭氣象站緯度為 23°52'58.78"，每月變數係數則採用建議值 0.0055，在參數均輸入模式

後，藉由 Hamon 公式的計算，即可產生日蒸發散量的時間數列，其代號由表 1 中查出為

DEVT，代碼 25，故最後模式模擬輸出結果如圖 4，其中，蒸發散量單位為英吋。

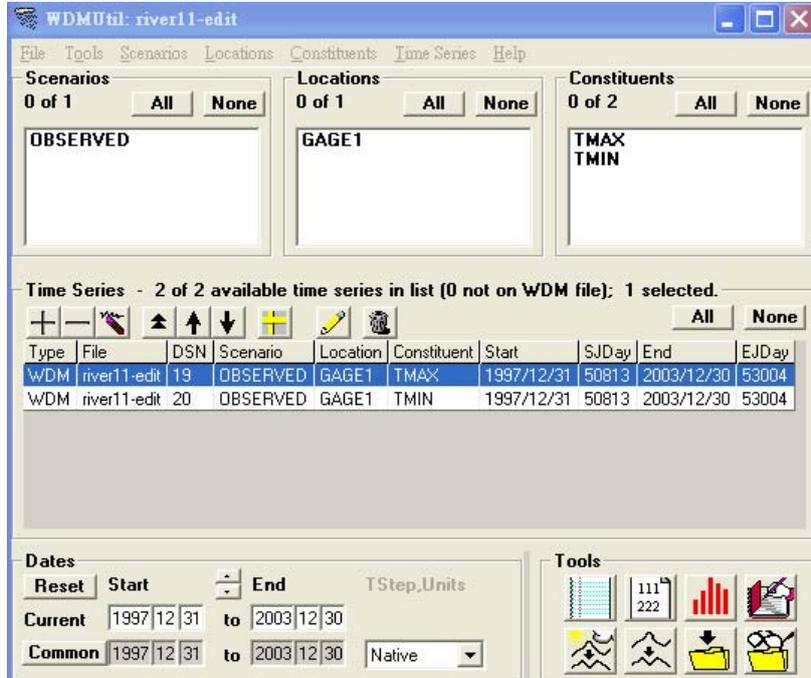


圖 3 逐日最高與最低溫輸入後之模式介面

Figure. 3. Model output display after inputting daily maximum and minimum temperature.

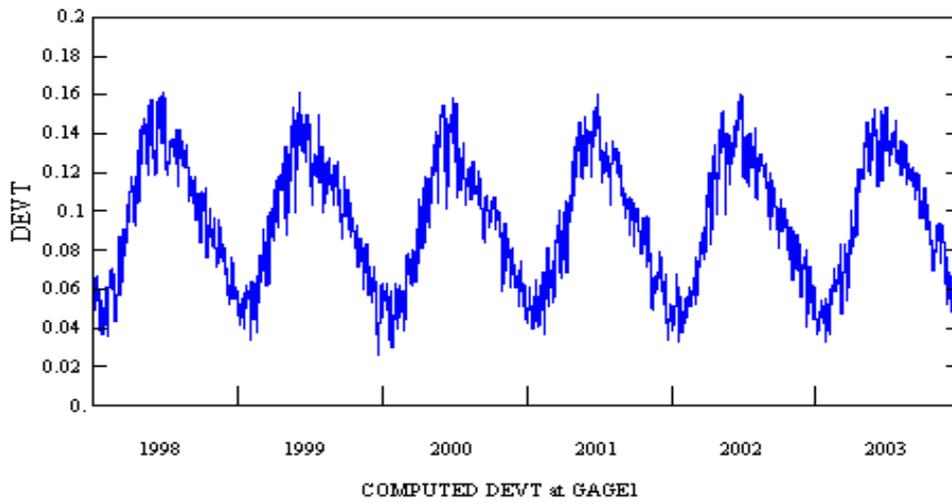


圖 4 日蒸發散量模式計算結果

Figure. 4. Simulation results of daily evapotranspiration.

### (3) 時蒸發散量估算

經日蒸發散量估算後，可使用 WDMUtil 模式中的切割模組來將日蒸發散量切割成時蒸發散量。與日蒸發散量相同，在輸入測站緯度資料後可使推估更為精確。由表 1 可知時蒸發散量代號為 PEVT，代碼 16，單位為英吋，而計算完成後模式輸出結果如圖 5。

## 2. 時降雨量推估

以 HSPF 模組進行水文流量模擬時，爲了提升模擬的精確度，需要以小時爲單位之氣象資料。若在僅有日降雨量資料的情況下，可利用鄰近雨量站降雨之三角分布統計法來估算該地區之時降雨量，然若附近無任何雨量站可供參考時，則可使用統計方法進行估算。在本研究中，日月潭、大觀、鉅工、水社等 4 個雨量站中僅日月潭有時降雨量的資料，而在流量監測方面，則僅水里測站有資料，爲了比較，故將針對距離水里測站最近的鉅工測站進行切割模擬時降雨量資料。

### (1) 基本資料輸入

時降雨量推估所需基本資料爲該觀測點之日降雨量與鄰近雨量站之時降雨量，資料

的輸入方式與前述逐日最高與最低溫時間數列相同。由表 1 可知並無日降雨量的代號數列，故我們以 (27, 47, 67, .....207) 數列來代表，因採用水里溪集水區內水社、鉅工與大觀電廠 3 個測點的雨量資料，故使用代號 DPRC 與代碼 27、47、67，至於測站地點則分別用 GAGE2、GAGE3 與 GAGE4 來表示。當資料全部輸入完成後，模式輸出介面則如圖 6。

### (2) 時降雨量估算

由於研究主要目的是進行集水區水文流量模擬，因此我們將針對離水里流量測站最近的鉅工雨量站進行分析，將其日降雨量的資料切割爲時降雨量，以符合模式模擬的需求。而主要鄰近雨量站之時降雨量參考點則設爲日月潭氣象站，利用三角分布的統計方法推估，信賴區間定爲 99%，另外，參考表 1 後將推估結果代號定爲 PREC，代碼 31，單位爲英吋，計算完成後得到模式模擬結果如圖 7。由圖中可知，最高時降雨量爲 2001 年 7 月 30 日中午 12~13 點，由桃芝颱風所造成，雨量達 3.45 英吋 (87.63mm)。

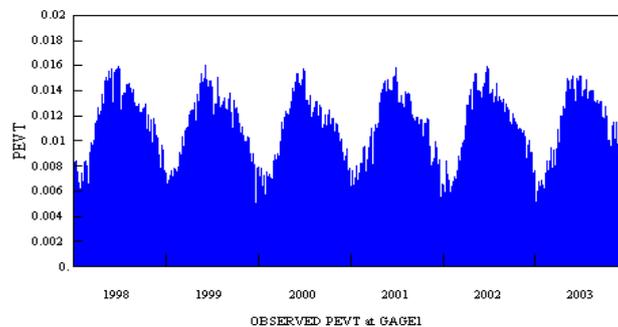


圖 5 時蒸發散量模式計算結果

Figure. 5. Simulation results of hourly evapotranspiration.

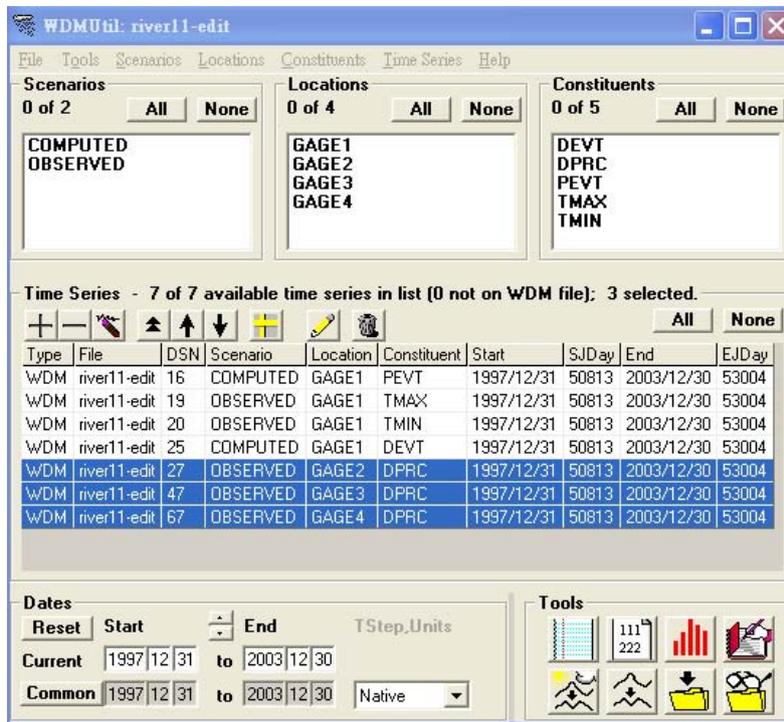


圖 6 日降雨量輸入後模式輸出介面

Figure. 6. Model output display after inputting daily rainfall.

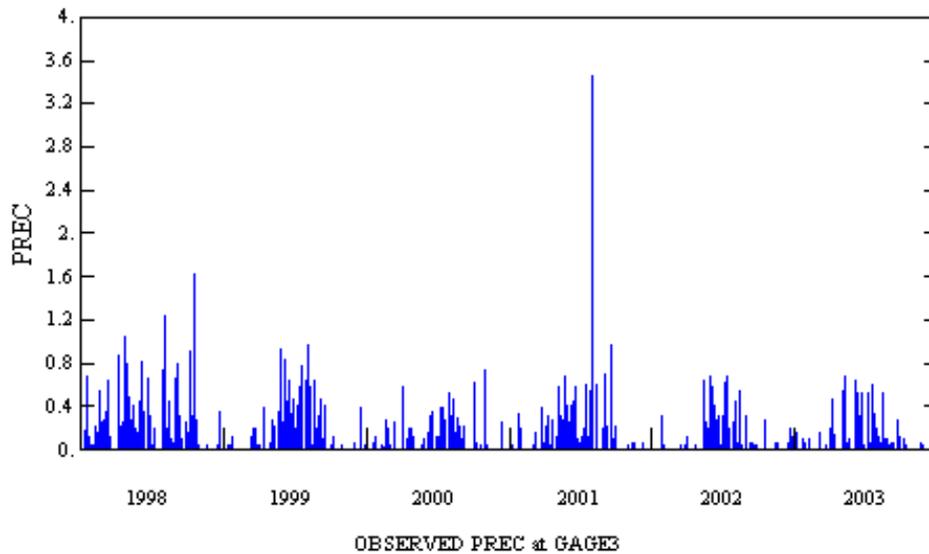


圖 7 鉅工雨量站時降雨量推估結果

Figure. 7. Simulation results of hourly rainfall in Jiuhgong station.

### (三) 土地利用相對入滲率

HSPF 模擬時需依土地利用型態將集水區進行分類，以區別不同土地利用的影響。而在進行水文模擬時，主要將集水區分為透水區 (PERLND)、非透水區 (IMPLND) 與河道 (RCHRES) 三類，分別針對不同土地利用型態計算個別土地利用入滲的比率。因此，必須由研究者依據當地的特性，輸入土地利用相對入滲率，以做為模式計算的基礎。

首先，必須定義分類集水區之土地利用情形，本研究為了符合模式需求，將土地利用予以簡化分類，包括森林 (Forest Land)、農地 (Agricultural Land)、住宅或工業區 (Urban or Built-up Land) 及水域 (Water) 四類，各種土地利用之相對入滲率如表 2 所示。

### 二、HSPF 模式水文模擬

將 HSPF 模式進行水文流量模擬所需資料備齊後，即可將資料完整匯入模式中，模式介面如圖 8。由圖中可清楚看出整體集水區之河系連結，圖中每一個方格代表一個子集水區，方格間的連線即表示子集水區間地理上的連結關係 (U.S. EPA, 2004f)。因研究中採用的流量測站位於第 15 號子集水區，而 15 號子集水區位於最下游處，故模式共納入 15 個子集水區進行分析。接著進入模式模擬階段，因研究重點在於集水區流量模擬，故模擬前需先進行模式輸出調整步驟，包括 (1)

模擬時間點、(2) 流量輸出格式、(3) 模擬區域等，在調整完畢後即得到 (4) 模擬結果。

表 2 不同土地利用型態之相對入滲率  
Table 2. Relative infiltration rate for different landuses.

土地利用	Pervious (%)	Impervious (%)
森林	100	0
農地	30	70
住宅或工業區	10	90
水域	60	40

資料來源：陳鴻烈、蔡大偉，2005。

#### (一) 模擬時間點

在輸入監測時間範圍內，均可指定模式模擬時段，藉此可依研究目的而調整所需模擬時段。本研究輸入之監測資料為 1998~2003 年，但因水里流量觀測站被桃芝颱風帶來的豪雨所損壞，於 2001 年 7 月 30 日後無法運作，約 2 個月後才修復，故模式模擬時間由 1998 年 1 月 1 日開始，到桃芝颱風侵襲前降雨事件為止，也就是 2001 年 7 月 28 日。

#### (二) 流量輸出時間格式

HSPF 中可依研究目的而調整流量模擬的時間格式，如以季節或年為單位等。因本研究目的在於流量的模擬，所以初始將以年為單位設定流量模擬值的輸出，以統一格式便於觀察年流量的變化。

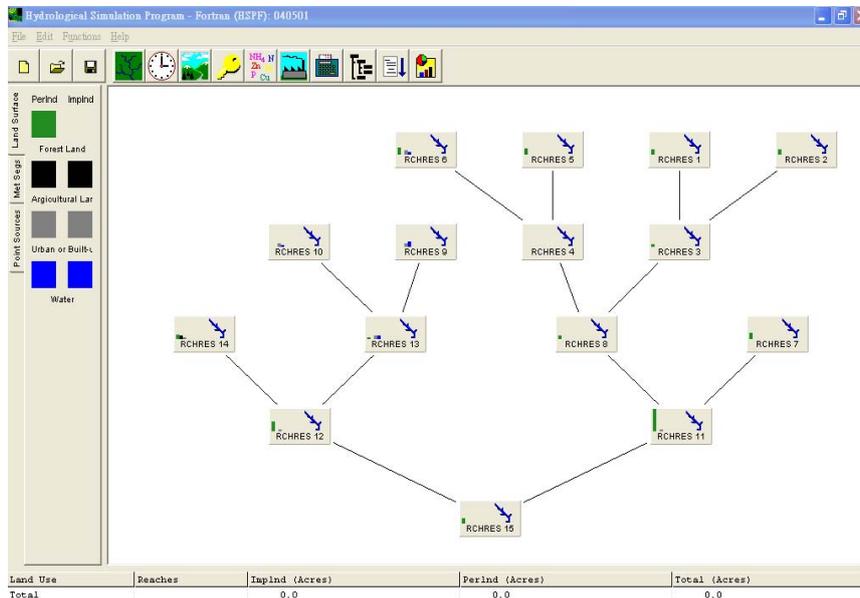


圖 8 HSPF 模式模擬介面

Figure. 8. Output display of HSPF model simulation.

### (三) 模擬區域

模式模擬時需指定所需子集水區的位置來進行，一般為整體集水區之出水口或特定流量監測站位置。由於本研究採用水里流量觀測站之資料，故指定第 15 號子集水區為模擬區域 (圖 2)。

### (四) 模擬結果

經過以上 3 個步驟的調整後，即可進行模式對流量的模擬。以日月潭時降雨量及水里流量監測值 (台灣電力公司明潭發電廠，1998-2003) 為之，圖 9 即可表示此區域的水文歷線圖，其中流量單位為 cfs。由圖中可知，

觀測時間中最大流量發生在 1999 年 7 月 30 日的 6820 cfs (=193 cms)。圖 10 則表現出集水區流量實測值與模式模擬值之差別，由圖中可觀察到模式模擬之流量大體上偏低，尤其是在 2000 年時最為明顯，推論其原因可能是 921 大地震所造成的影響，但實際情形仍需進一步研究。

為了使流量觀測值與模擬值二者間的差別更加顯現，可繪製兩者間差距之相關統計圖來觀察。圖 11 即為監測值減去模擬值的差距圖，由圖中可明顯看出差值以正數居多，代表監測值大部分高於模擬值，尤其是 2000 年的時段，監測值幾乎均高於模擬值。

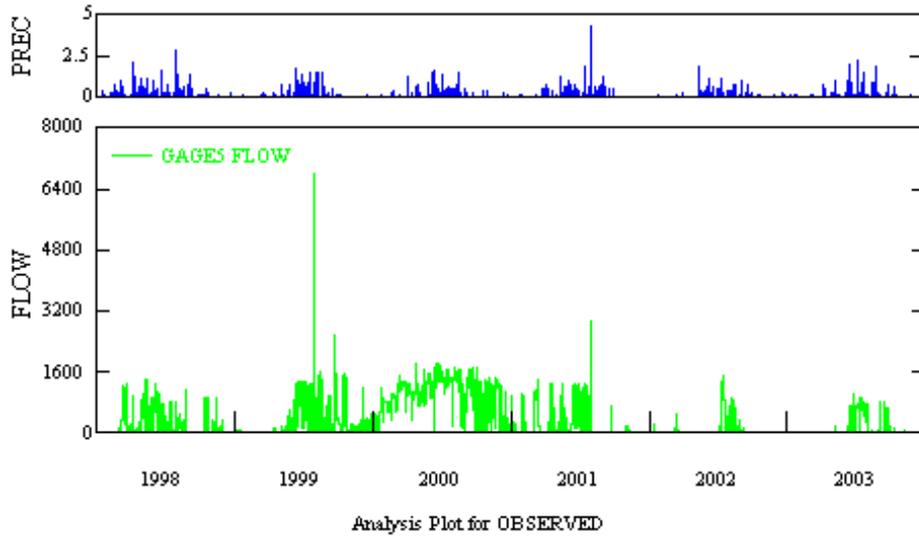


圖 9 水里集水區水文歷線圖

Figure. 9. Hydrograph and hyetograph of Shuili-stream watershed.

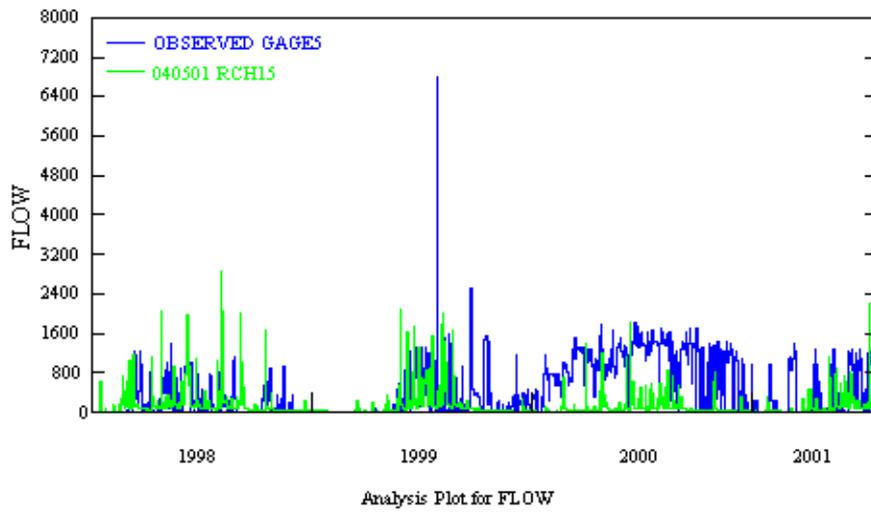


圖 10 流量觀測值與模擬值之比較圖

Figure. 10. Comparisons of flow volumes between observed and simulated data.

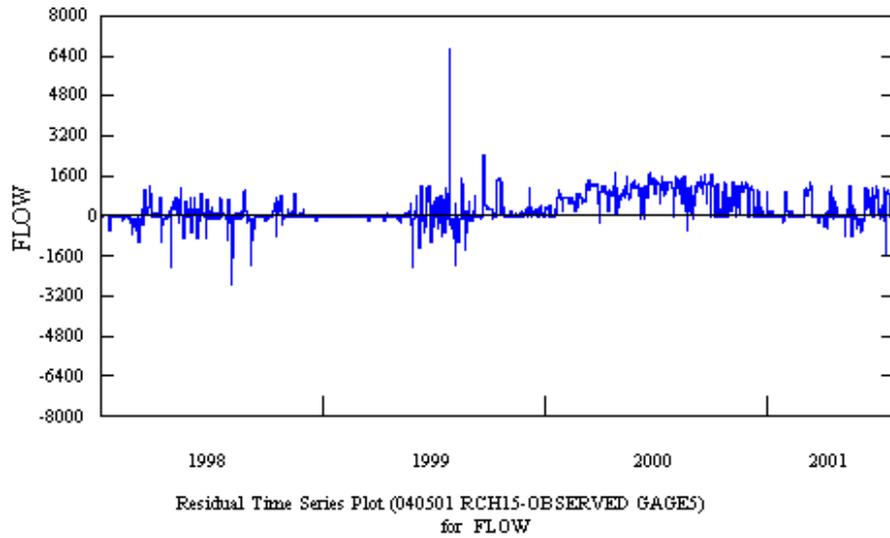


圖 11 流量監測值與模擬值差距圖

Figure. 11. Differences of flow volumes between observed and simulated data.

圖 12 是流量觀測值與模擬值之頻率累積百分比，由圖中可看出，兩者僅在高流量 (>1000 cfs) 情況下較為接近，中低流量的分布則相差甚多。觀測值為中流量的次數明顯高於模擬值，至於低流量的次數則以模擬值

較多，故整體而言，產生流量模擬值低於觀測值的結果。本研究將各項難以掌握之可能原因先行排除後，再針對匯入模式之監測資料予以最佳化，並將模式變數做最適當的修正，期能得到最佳之集水區流量模擬值。

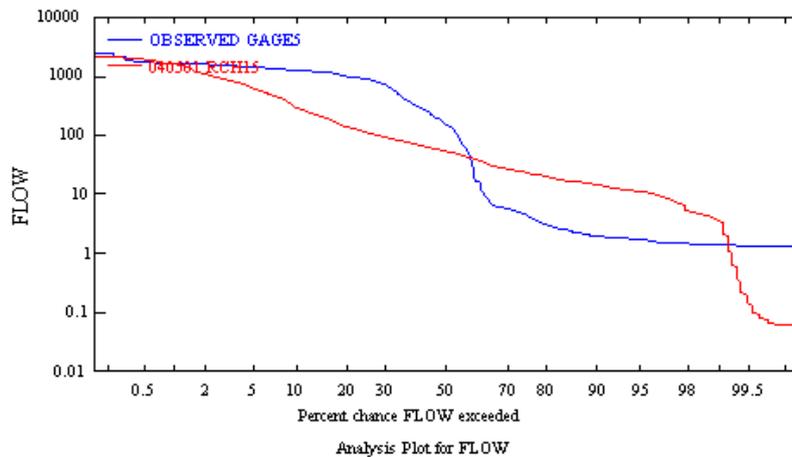


圖 12 流量監測值與模擬值頻率累積百分比圖

Figure. 12. Accumulative frequency percentages of flow volumes between observed and simulation data.

## 二、模式資料最佳化

在進行模式變數校正前，必須針對所使用的資料進行正確性與合適性討論，藉此提升模式模擬的精確度，以達最佳化之目的。研究中共進行 4 項討論，包括 (1) 模擬時間選擇、(2) 蒸發散量修改、(3) 測站選擇及 (4) 暴雨事件選擇。

### (一) 模擬時間選擇

由於模擬時間中曾歷經 921 大地震的發生，而地震對集水區流量的影響難以評估，故本研究在進行水文流量模擬時，應先討論是否要加入地震因子的影響，以避免模式模擬之結果與觀測值間之誤差過大。

研究先將模擬時間分為兩類，即以 921 大地震發生時間做為切割點。大地震發生時間為 1999 年 9 月 21 日，故第 1 組模擬時間為忽略地震的影響，亦即原定模擬時間 — 1998 年 1 月 1 日至 2001 年 7 月 28 日，而以 2002、2003 年的觀測值進行驗證；第 2 組時間則避開地震的影響，亦即僅以地震以前的資料為基礎 — 1998 年 1 月 1 日到 1998 年 12 月 31 日，然後再以 1999 年 1 月 1 日至 1999

年 9 月 20 日的資料進行驗證。

模式模擬結果如表 3，而判別模擬結果之項目則包括總逕流量、低流量退水率、50% 最低流量、10% 最高流量、洪峰流量、季節流量誤差、夏季洪峰流量誤差等 7 項。由表中數據可知，雖然以原定模擬時間來模擬時，僅有總逕流量與 10% 最高流量兩項指標較以地震前資料進行模擬的結果為差，但在進行水文流量模擬時，總逕流量的正確度乃最基本的要求，故研究中最後仍選擇以地震前之資料為基礎進行模擬。由此結果亦可看出，忽略地震的影響時，模式模擬流量明顯偏低，反應出模式無法校正地震後流量突然偏高的情形，這也代表地震的影響相當大，因此，應將地震因子納入考量，作為日後進一步研究的方向。

### (二) 蒸發散量修改

在模擬過程中，蒸發散量的資料是以 Hamon 法進行估算，而此法中每月變數係數值 (c 值) 則採用原作者建議的 0.0055，但實際環境中隨著季節的變換，每個月份應該有不同的係數值，尤其是在冬季時變化最大。

表 3 模擬時間對流量模擬結果之影響

Table 3. Time effect on flow simulation.

模式檢驗項目	Criteria	模擬時間	
		1998.1.1~2001.7.28	1998.1.1~1998.12.31
total volume	10%	-69.1%	-9.1%
low flow recession	0.01	-0.17	-0.24
50% lowest flows	10%	28.5%	1400%
10% highest flows	15%	-48.2%	-0.4%
storm peaks	15%	49.3%	95.6%
seasonal volume error	10%	16.5%	2873.3%
summer storm volume error	15%	3.8%	37.7%

因此，為了更貼近實際情形，本研究將針對蒸發散量進行討論。

一開始先以相關研究中台灣中部不同月份的蒸發散係數為基礎 (表 4)，進行蒸發散量月加權係數校正前後的比較；接著再使用 Wolock1 & McCabe (1999) 之建議值 0.0065 來做比較；最後再選出流量模擬正確程度最高的組別。模擬結果如表 5，可知以  $c = 0.0055$  並進行加權校正後之總逕流量模擬結果最準確，代表進行不同月份的每月變數係數加權校正可使模擬結果更貼近實際情形，以減少模擬誤差的產生。

### (三) 測站選擇

在地理上，若氣象站位置越接近水文測站，則越可表現出水文測站之氣象條件與水文流量間之關聯性與變化。本研究中的氣象資料來源共有日月潭、水社、大觀、鉅工等測點，其中以日月潭氣象站最為齊全，可惜距離模式所使用的水里水文測站較遠，因此可能會出現降雨與流量變化不一致的情形，進而增加誤差產生的機率。

為了降低誤差，研究中採用三角分布統計

法，以 99% 為信賴區間，並以日月潭逐時降雨量資料為參考點，對離水里測站最近之鉅工測站所監測的逐日降雨量進行切割分析，即可得到逐時降雨量資料，然後再以此進行流量模擬分析，最後再與以日月潭為基礎的分析結果進行比較，選出最佳測站根據。

表 4 全台各區之月蒸發散係數  
Table 4. Monthly coefficient of evapotranspiration in Taiwan.

月份	北區	中區	南區	東區
一月	0.86	0.84	0.80	0.95
二月	0.87	0.84	0.79	0.96
三月	0.98	0.88	0.84	0.97
四月	0.92	0.97	0.91	1.00
五月	0.95	1.01	0.95	1.00
六月	0.94	0.98	0.92	1.00
七月	0.90	0.88	0.85	0.98
八月	0.91	0.90	0.87	0.98
九月	0.92	0.93	0.89	0.99
十月	0.95	0.99	0.94	0.99
十一月	0.96	1.02	0.96	1.01
十二月	0.91	0.96	0.89	0.98

資料來源：田維婷，2003。

表 5 蒸發散量修正對流量模擬結果之影響

Table 5. Influence of evapotranspiration calibration on flow simulation.

模式檢驗項目	Criteria	蒸發散量修正		
		c=0.0055, 無加權	c=0.0055, 加權	c=0.0065, 加權
total volume	10%	-9.1%	-7.6%	-11.3%
low flow recession	0.01	-0.24	-0.24	-0.24
50% lowest flows	10%	1400%	1410%	1370%
10% highest flows	15%	-0.4%	1.3%	-2.3%
storm peaks	15%	95.6%	99.3%	92.2%
seasonal volume error	10%	2873.3%	2941.9%	2936%
summer storm volume error	15%	37.7%	38.2%	37.6%

經過模式模擬計算後之結果如表 6，由表中可看出，以鉅工測站為資料時，模擬結果中的總逕流量與 10%最大流量的誤差均較日月潭測站為大，但誤差仍在模式標準之內。至於其他指標，則均以鉅工測站之表現較佳，推

論原因可能是因鉅工測站的地理位置較日月潭測站更靠接近於水里觀測站，故該測站之降雨與流量變化較為一致，而使模式模擬結果之誤差降低。因此，模式改以鉅工測站的資料為依據來進行後續的模擬工作。

表 6 不同雨量站對流量模擬結果之影響

Table 6. Influences of different rainfall stations on simulated results of flow volumes.

模式檢驗項目	Criteria	雨量站選擇	
		日月潭	鉅工
total volume	10%	-7.6%	-9.5%
low flow recession	0.01	-0.24	-0.24
50% lowest flows	10%	1410%	1230%
10% highest flows	15%	1.3%	8.6%
storm peaks	15%	99.3%	78.9%
seasonal volume error	10%	2941.9%	1893%
summer storm volume error	15%	38.2%	2.5%

#### (四) 暴雨事件選擇

HSPF 模式在進行水文流量校正時，需要輸入模擬時間內之暴雨事件。暴雨事件可依下列原則來選取：(1) 模擬初始時間不選擇，待模式達一定穩定度後再開始校正；(2) 暴雨事件的起點為暴雨開始的時間，終點則為流量回復至暴雨前水平之時間；(3) 暴雨事件選擇的時間點不可過於接近；(4) 暴雨事件與流量變化明顯不一致者不選取。但即使以上述幾個原則來選取，仍難以準確定義真正之暴雨事件，因此，本研究先將可能之暴雨事件挑選出來後，再從中選取對模式校正有正面助益的組合。

本研究於 1998 年降雨事件中選取了 5 場暴

雨，分別是 5 月 2、10、31 日，8 月 17 日和 10 月 15 日，共有 31 種組合。將各種組合放入模式模擬後，發現以 5 月 10 和 31 日兩場暴雨資料進行校正時，模擬誤差最小。暴雨事件校正的結果如表 7，由表中可看出，不同的暴雨事件將對洪峰流量與夏季洪峰流量誤差有直接的影響，而經適當選擇後，洪峰流量誤差由 78.9%降至 6%，但夏季洪峰誤差卻由 2.5%升至 12.7%，但仍在可接受範圍內。由此結果可知，正確的暴雨事件選擇，有助於提升模式的模擬結果。本研究僅暫用試誤法來選擇正確的暴雨事件，未來可繼續研究更精準快速的方法，以提升工作效率。

表 7 暴雨事件對流量模擬結果之影響

Table 7. Storm effects on simulation results of flow volumes.

模式檢驗項目	Criteria	暴雨事件選擇	
		選擇前	選擇後
total volume	10%	-9.5%	-9.5%
low flow recession	0.01	-0.24	-0.24
50% lowest flows	10%	1230%	1230%
10% highest flows	15%	8.6%	8.6%
storm peaks	15%	78.9%	6%
seasonal volume error	10%	1893%	1893%
summer storm volume error	15%	2.5%	12.7%

### 三、模式變數校正

經模式資料最佳化後，不但選出資料中最正確的部分來做為模擬基礎，亦對模式模擬的精確度有所助益。以下即以此為基礎，開始進行模式內部變數的校正，依不同變數與模擬時間逐一進行，期能使模式變數最接近實地狀況，達到模式模擬最佳化的目的 (U.S. EPA, 2004g)。此部分將透過 HSPF 水文校正專家系統 (HSPEXP 2.4) 來協助 (U.S. EPA, 2004h)，將模式變數調整至最佳狀態。HSPEXP 介面如圖 13，模式選擇的 1998 年集水區水文歷線圖則如圖 14，圖中雨量資料來

自鉅工測站，單位為英吋；流量資料來自水里觀測站，單位為 cfs。

透過 HSPEXP 的輔助，研究中需依序調整 AGWRC (Groundwater recession rate)、UZSN (Nominal upper zone soil moisture storage)、LZSN (Lower nominal zone soil moisture storage) 等 3 個變數，但卻無法達到 HSPEXP 之建議，雖然如此，我們還是繼續研究可能需要校正的變數，包括 INFILT (Index to mean soil infiltration rate) 和 KVAR (Non-linear groundwater recession rate parameter) 變數，期能降低模式誤差。以下即針對模式校正過程加以說明。

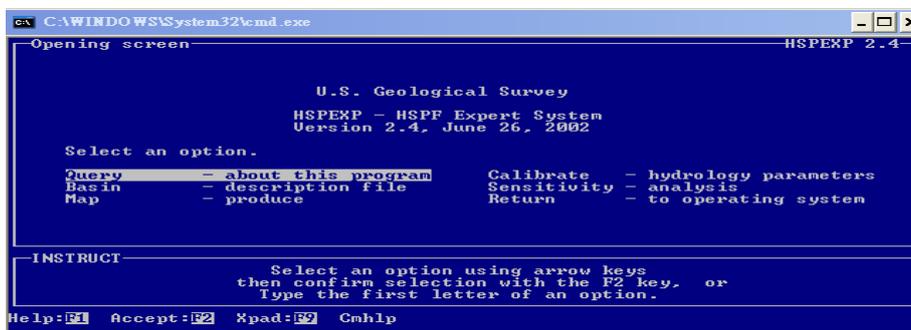


圖 13 HSPEXP 2.4 模式介面

Figure. 13. Output display of HSPEXP model.

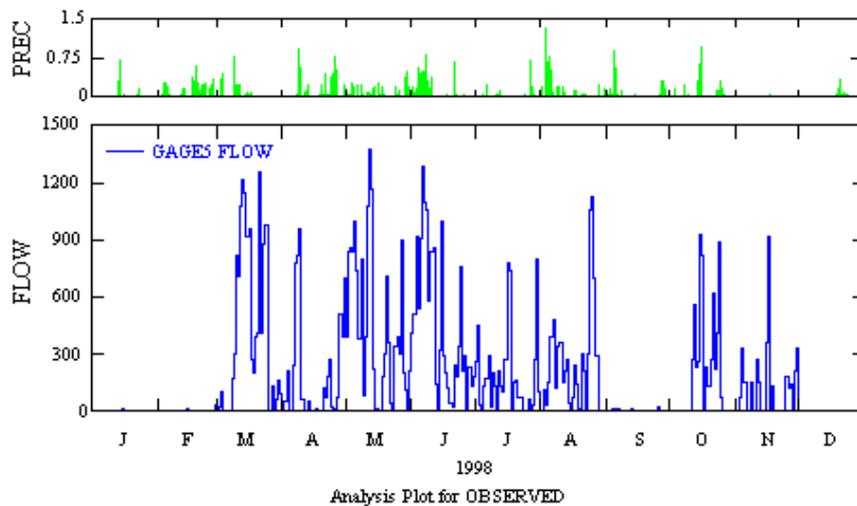


圖 14 1998 年水文歷線圖 (鉅工雨量測站、水里流量測站)

Figure. 14. Hydrograph and hyetograph in 1998 (Jiuhong rainfall station and Shuili flow station).

#### (一) AGWRC

經 HSPEXP 模式鑑定後，我們決定先針對低流量退水率進行校正，並建議校正 AGWRC 變數。理由包括 (1) 模式模擬結果退水率為 -0.24，誤差低於標準 0.01；(2) AGWRC 變數為地下水退水率（其定義是以昨日基流量為基準，計算今日所流失基流量的比率），因模擬結果過低，故建議降低此變數值以提升退水率，但 HSPEXP 模式建議不可低於 0.88。

校正結果如表 8，由模擬結果可得知修改 AGWRC 變數可減少總逕流量、低流量退水率、50%最低流量等檢驗項目的模擬誤差。尤其是 50%最低流量誤差在 AGWRC=0.88 時，由 1,230%降至 557%最多，而校正目標——低流量退水率亦由 -0.24 上升至 -0.14，雖仍未達檢驗標準，但變數值已達建議下限，再降低數值則不符一般自然界的現象。另外，由校正結果中亦可看到 10%最高流量、洪峰流量、季節流量之誤差有升高的趨勢，這是因為退水率提

升後會增加洪峰流量所造成，但除了季節流量誤差外，其他兩個指標尚在合理標準範圍內。

模式模擬結果發現，50%最低流量與季節流量之誤差與檢驗標準相差最大，而季節流量中又以冬季流量誤差最大，推論原因為降雨事件與流量變化不一致所造成。由圖 14 的水文歷線可看出 12~2 月的流量幾乎均非常小，但期間同樣有許多降雨事件發生，故造成模式模擬冬季流量值 5.13 cfs 遠高於監測值 0.261 cfs，亦使這兩個指標的誤差特別大。因此，接下來的校正過程即不再以這兩個指標為重點，但仍希望減小其誤差。

經由 AGWRC 變數校正得知，需減小此變數值才較符合集水區現況，也就是說，應提高此集水區之地下水退水率。推論原因為此集水區中下游已有相當程度的開發，包括農業、觀光業與住宅區等，因此有許多的水利工程設施，導致地下水退水率增加，故模式建議提升地下水退水率是合理的。

## (二) UZSN 和 LZSN

在完成 AGWRC 變數校正後，HSPEXP 模式進一步建議修正 UZSN 參數，即上部土壤

表 8 變數 AGWRC 的校正過程  
Table 8. Calibration process of AGWRC.

模式檢驗項目	Criteria	AGWRC		
		0.98	0.93	0.88
total volume	10%	-9.5%	-8.2%	-8.1%
low flow recession	0.01	-0.24	-0.19	-0.14
50% lowest flows	10%	1230%	806%	577%
10% highest flows	15%	8.6%	10.3%	11.2%
storm peaks	15%	6%	8.1%	9%
seasonal volume error	10%	1893%	1946%	2117%
summer storm volume error	15%	12.7%	12.3%	12.7%

含水層厚度 (英吋)，理由是此參數與季節流量誤差相關，尤其是冬季流量誤差 (高達 2,090%)。冬季時，逕流量大部分與上部土壤含水層厚度最為相關，且 UZSN 之改變對夏季流量影響較小，因夏季流量主要為降雨事件所造成，因此增加 UZSN 之厚度即可提升土壤保水能力，藉此降低模式模擬流量，使模擬結果能更接近觀測值。然而，調整 UZSN 值時要同時注意 LZSN 值的變化，因 LZSN 為下部土壤含水層厚度，在一般情況下，UZSN 最大厚度為 LZSN 之 0.14 倍 (U.S. EPA, 2004h)，故在調整 UZSN 時必須同時調整 LZSN，以避免不合理的現象發生。

本研究將 UZSN 和 LZSN 之校正過程整理為表 9，由計算結果得知，增加 UZSN 可降低

10%最高流量、洪峰流量與季節流量之誤差。因我們的主要目標在降低季節流量中之冬季模擬誤差，表 9 顯示，當 UZSN=1.1284 英吋時，季節誤差由 2,117%降至 1,907.5%，其中的冬季誤差亦由 2,090%降至 1,880%。然而，若繼續增加 UZSN 時，總逕流量誤差會超過標準值 10%，故 UZSN 最佳數值即定為 1.1284 英吋。有關調升 UZSN 會造成總逕流量誤差增加的原因，是因土壤含水層越厚，表示土壤保水能力越佳，因此較不易造成地表逕流，也使總逕流量下降，誤差隨之增加。模式模擬結果顯示，原始模擬值對此集水區土壤保水力有低估的情形，造成冬季流量模擬偏高。但此集水區現地大部分土壤種類為崩積土與黃壤 (林俐玲等，2005)，保水能力亦不高，故含水層厚度增加有限。

表 9 變數 UZSN 和 LZSN 的校正過程  
Table 9. Calibration process of UZSN and LZSN.

模式檢驗項目	Criteria	UZSN						
		校正前	0.91	1.001	1.092	1.1284	1.1375	1.183
total volume	10%	-8.1%	-7.3%	-8.5%	-9.6%	-10%	-10.1%	-10.7%
low flow recession	0.01	-0.14	-0.14	-0.13	-0.13	-0.13	-0.13	-0.14
50% lowest flows	10%	577%	574%	574%	575%	577%	577%	579%
10% highest flows	15%	11.2%	13.1%	11.1%	9.2%	8.4%	8.2%	7.3%
storm peaks	15%	9%	10.2%	8.7%	7.5%	6.9%	6.6%	6%
seasonal volume Error	10%	2117%	2196.4%	2066.8%	1947.3%	1907.5%	1897.5%	1847.7%
summer storm volume error	15%	12.7%	12.8%	12.8%	12.7%	12.7%	12.7%	12.5%

### (三) INFILT

透過 HSPEXP 模式的協助，模擬結果已達一定程度之校正，模擬精確度亦被提升許多，但仍建議繼續提升模式的 UZSN 值，以減少低流量的產生，降低冬季流量誤差。然而，此集水區的狀況已無法再增加 UZSN 值，因總逕流量模擬值偏低，若再繼續增加 UZSN 值，會造成總逕流量過低的現象。

因此，為了使模式模擬結果之正確度可以再提升，本研究將依據 U.S. EPA (2004i) 所建議的水文校正流程繼續尋找可以進行校正之模式變數。首先將針對 INFILT 進行討論，INFILT 為土壤入滲率 (in/hr)，當降低 INFILT 值時，可以使土壤層上部保存較多的水分，藉此增加上部土壤含水層的厚度。當然，也可能增加漫地流的機會，但在未飽和狀態下來增加土壤的儲水量，將可降低地表逕流的產生。因此，本研究將對 INFILT 值進行校正，探討其對模式之影響程度，並探討其對模式

準確度是否有正面的助益。

INFILT 值之校正過程如表 10，由表中數據可看出，降低 INFILT 值對於 50% 最低流量的誤差有顯著降低的效果。當 INFILT=0.113 時，誤差由 577% 降至 489%，共減低 88%；然而，這個變數值的調整卻讓其他指標誤差全部增加，尤其是季節流量指標更是多了約 40% 的誤差，因此，我們最後決定不採納此變數值之變更，仍維持校正前之原始值。

由此校正過程可發現，雖然降低土壤入滲率可使冬季流量降低，但也增加了夏季時的逕流量，以致於大部分指標誤差均增加，故並不適合作為校正變數。所以，本研究最後仍決定不針對此變數進行校正工作。

### (四) KVARY

KVARY 為非線性地下水退水率參數，亦即地下水消退變化率，單位為 1/inches，通常是最後一個需要考慮調整的模式變數。

表 10 變數 INFILT 的校正過程  
Table 10. Calibration process of INFILT.

模式檢驗項目	Criteria	INFILT					
		0.16 (校正前)	0.1	0.105	0.107	0.11	0.113
total volume	10%	-10%	-9.3%	-9.3%	-9.4%	-9.4%	-9.5%
low flow recession	0.01	-0.13	-0.14	-0.14	-0.14	-0.14	-0.14
50% lowest flows	10%	577%	460%	470%	475%	482%	489%
10% highest flows	15%	8.4%	17%	16.2%	15.9%	15.4%	15%
storm peaks	15%	6.9%	13.5%	12.9%	12.9%	12.3%	12%
seasonal volume error	10%	1907.5%	1967.1%	1967.2%	1957.2%	1947.2%	1947.2%
summer storm volume error	15%	12.7%	13%	13%	13%	12.9%	13%

在一般情形下，KVARY 不需調整，因為

當 AGWRC 值不太低時，可假設地下水退水

率沒有太大的變化，而偏向於線性狀態。然而，若地下水退水率隨季節變化而有相當大的差異，也就是乾濕季明顯不同時，或是在當地地形有陡坡的狀況下，即需調整 KVAR Y 值以校正模式模擬值，並藉此修正洪峰之峰型。

經先前模式校正後，由於 50% 最低流量與季節流量兩個檢驗項目的誤差仍偏高，故將針對 KVAR Y 變數做最後的校正，以觀察此集水區地下水退水率是否存有特殊情形。

KVAR Y 變數一般均假設為 0，因此校正過程即以 0 為出發點，逐漸增加數值來觀察模式模擬的結果 (表 11)。由表 11 可知，校正過程中逐漸增加 KVAR Y 的數值至 1.65 停止，因此時的 10% 最高流量誤差已等於模式

檢驗標準 15%。由校正結果可看出 KVAR Y 變數對 50% 最小流量有最大的校正效果，能將誤差由 577% 降至 73.1%，一共降低了約 504%，主要是因地下水退水率增加會使低流量消退率增加，減少低流量發生的機率，故低流量部分會產生大量下降的現象。然而，對於高流量 (也就是夏季流量的部分) 而言，卻是引發上升的現象，尤其是季節流量誤差更因此進一步擴大到 304.4%，故此變數校正的結果仍不宜被採用。另外，最佳化的 KVAR Y 數值為 1.65，雖低於一般自然環境下的最大值 3 (U.S. EPA, 2004h)，但此指標主要目的在於校正季節性誤差，而校正結果卻使季節流量誤差上升，所以最後決定不宜對 KVAR Y 變數進行校正來改變其數值。

表 11 變數 KVAR Y 的校正過程  
Table 11. Calibration process of KVAR Y.

模式檢驗項目	Criteria	KVAR Y							
		0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	1.6	1.65
total volume	10%	-10%	-10%	-10%	-10%	-9.9%	-9.9%	-9.8%	-9.8%
low flow recession	0.01	-0.13	-0.11	-0.1	-0.08	-0.07	-0.06	0.05	0.05
50% lowest flows	10%	577%	448%	363%	304%	262%	228%	76.5%	73.1%
10% highest flows	15%	8.4%	9.4%	10.2%	10.9%	11.4%	11.8%	14.9%	15%
storm peaks	15%	6.9%	8.1%	9%	9.9%	10.5%	11.1%	14.1%	14.1%
seasonal volume error	10%	1907.5%	1957.9%	1998%	2028%	2068.1%	2098.1%	2247.9%	2247.9%
summer storm volume error	15%	12.7%	13.4%	13.9%	14.4%	14.5%	14.5%	14%	14%

經一系列模式變數校正後，發現以 AGWRC、LZSN 和 UZSN 校正後之模擬結果較佳。為了與校正前之模擬結果比較，我們將校正前後的結果重新整理如表 12 來進行精確度的比較。由表中可看出，水文校正僅對低流量消退率與 50% 低流量部分有所助益，

尤其是 50% 低流量誤差降低了 653%。然而，校正結果對其他檢驗項目則助益不大，甚至讓誤差有上升的現象發生。經許多其他可能變數 (INFILT、KVAR Y 等) 校正後，發現模擬結果並無法有效的被改善，故最後仍選擇經 AGWRC、LZSN 和 UZSN 等 3 個變數校正

後之模擬結果為最佳模擬值。

經模式校正後，接著需以校正結果為基

礎來進行驗證工作。由於本研究模擬是以 921 大地震為切割點，故驗證資料將以地震發生前最後一個水文事件為終點，而將驗證時間

表 12 模式水文因子校正前後之比較

Table 12. Comparisons of hydrologic model parameters before and after calibration.

模式檢驗項目	Criteria	水文因子校正	
		校正前	校正後
total volume	10%	-9.5%	-10%
low flow recession	0.01	-0.24	-0.13
50% lowest flows	10%	1230%	577%
10% highest flows	15%	8.6%	8.4%
storm peaks	15%	6%	6.9%
seasonal volume error	10%	1893%	1907.5%
summer storm volume error	15%	12.7%	12.7%

定為 1999 年 1 月 1 日到 1999 年 9 月 19 日。在此期間，模式模擬結果與實際監測值之比較如圖 15，由圖中可知模擬結果甚佳，僅在 6、7 月份誤差較大，尤其是 7 月 30 日所發生的洪峰事件，監測值有異常高流量發生，高達 6400 cfs (193 cms)，遠大於模式模擬值的

1040 cfs (31 cms)，因此，模式亦在此時發生最大誤差。此外，模式驗證結果亦可以表 13 來表示，表中數據顯示大部分的誤差未達模式標準，表示模式對於水文流量之模擬仍有進步空間，未來可繼續加以探討來克服可能造成誤差的因子。

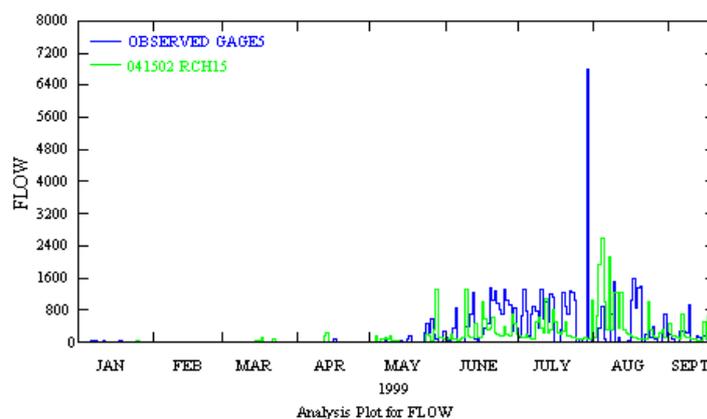


圖 15 模式驗證結果

Figure. 15. Results of model validated.

表 13 模式驗證結果誤差  
Table 13. Errors of model validation.

模式檢驗項目	Criteria	水文模擬驗證
Total volume	10%	-27.9%
Low flow recession	0.01	-0.2
50% lowest flows	10%	17.7%
10% highest flows	15%	-28.2%
storm peaks	15%	3.2%
seasonal volume error	10%	51.5%
summer storm volume error	15%	2.1%

### 結論與建議

完整的集水區總量管理模擬，需要大量的基礎資料庫來支持。在無法取得所有需求資料的情況下，總量管理模式將可針對特定資料進行最佳模擬。本研究即針對逐時降雨量與蒸發散量進行模擬，藉此達到取得模式所需基本資料庫的需求，並以此為基礎，進一步達成集水區總量管理之模擬。

模式在最後水文校正的最佳結果中，共校正了 AGWRC、LZSN 和 UZSN 等 3 個變數，發現水文流量模擬結果大多符合模式標準，僅有 50% 最低流量與季節流量有明顯的誤差，推論原因可能有以下 6 點：

- (1) 本研究所採用的水里流量觀測站位於大觀電廠與明潭水庫下游，電廠與水庫對於流量的調節功能，可能會影響自然流量觀測值之正確性。
- (2) 此模式為美國所發展，未必非常符合台灣的情況。
- (3) 資料不足 — 台灣仍有相當多的基礎監測資料庫尚未建立，建議應合理規劃並加強監測。

(4) 雖然已使用模式進行最佳模擬，但因基礎監測資料不足，仍難以避免誤差產生。

(5) 研究中所採用之雨量與流量測站並非同一處，致使降雨事件與流量變化可能發生不一致的情形。

(6) 水里流量觀測站於冬季之觀測值明顯偏低，故與模式模擬值差距甚大。

總量管理模式經過水文因子校正後，仍需進一步針對集水區泥沙量、水質等因子進行校正，才可使模式模擬污染物總量結果更接近實際情形，因此日後可繼續進行相關變數之校正工作，再依模擬總量結果來研擬集水區管理策略計畫。

### 謝誌

本研究承蒙國科會編號 NSC 93-2621-Z-005-011 計畫之贊助，特此致謝。

### 參考文獻

1. 中央氣象局日月潭觀測站 (1998-2005),「逐日最高最低溫觀測報告書」。
2. 田維婷 (2003),「氣候變遷對台灣地區地表水文量之影響」,國立中央大學碩士論文。
3. 台灣電力公司明潭發電廠 (1998-2003),「明潭發電廠運轉期間環境監測計畫」。
4. 林鎮洋 (2003),「集水區水質總量管理模式與控制技術之研究」,期末報告,國

- 科會委託研究計畫。
5. 林俐玲、林文英 (2005), 「坡地農業使用區之劃定, 保育對策及管理準則」, 期末報告, 國科會委託研究計畫。
  6. 陳鴻烈、蔡大偉 (2005), 「以水質保護為導向分區落實合理土地利用之保育措施及管理準則探討」, 期末報告, 國科會委託研究計畫。
  7. 陳鴻烈、蔡大偉 (2006), 「最佳集水分區模擬之研究」, 水土保持學報。
  8. 陳信雄、廖學誠、黃正良、詹進發 (1997), 「應用 Hamon 公式推估福山試驗林蒸發散之研究」, 台大實驗林研究報告, 11 (4): 21-30。
  9. 黃正良 (1999), 「應用 Hamon 公式推估福山試驗林蒸發散之研究」, 林業試驗所年報。
  10. 施鈞程 (2003), 「台灣森林集水區之蒸發散量推估」, 國立中興大學博士論文。
  11. Hamon, W. R. (1961), "Estimating Potential Evapotranspiration", *Journal of the Hydraulics Division*, 87 (HY3), pp.107-120.
  12. Hamon, W. R. (1982), "Estimating Potential Evapotranspiration", *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 108 (IR3), pp.212- 222.
  13. Hamon, W. R. and W. R. Walk, (1979), "Evapotranspiration Under Depleting Soil Moisture", *Journal of the Irrigation and Drainage, Division, ASCE* 105 (IR4), pp. 392-402.
  14. Sun, G., S. G. McNulty, D. M. Amatya, R. W. Skaggs, L. W. Swift Jr., J. P. Shepard and H. Riekerk (2002), "A Comparison of the Watershed Hydrology of Coastal Forested Wetland and the Mountainous Uplands in the Southern US", *Journal of Hydrology*, Vol.263, pp.92-104.
  15. U.S. EPA (2004a), "BASINS Lectures".
  16. U.S. EPA (2004b), "BASINS Case Study".
  17. U.S. EPA (2004c), "BASINS User Manual".
  18. U.S. EPA (2004d), "HSPF User Manual".
  19. U.S. EPA (2004e), "WDMUtil Version 2.0 Users Manual".
  20. U.S. EPA (2004f), "WinHSPF 2.0 User Manual".
  21. U.S. EPA (2004g), "BASINS Appendix".
  22. U.S. EPA (2004h), "BASINS Technical Notes".
  23. U.S. EPA (2004i), "BASINS Exercises".
  24. Wolock, D. M. and G. J. McCabe (1999), "Explaining Spatial Variability in Mean Annual Runoff in the Conterminous United States", *Climate Research*, Vol.11, pp.149- 159.
- 
- 96 年 12 月 19 日 收稿  
96 年 12 月 22 日 修改  
96 年 04 月 26 日 接受