

研究報告

集水區土地利用變遷及降雨量變化 對水資源涵養能力影響之研究

何嘉浚¹⁾ 曾俊偉^{2,3)} 李嘉若³⁾ 林鎮洋³⁾ 莊智瑋^{4,5)}

摘要

臺灣年平均降雨量2500 mm，因受降雨時空分布不均、地勢陡峻、河短急流影響導致水資源蓄留不易。近年更因社會經濟蓬勃發展、平地開發已趨飽和，逐漸朝向山坡地發展，使原有水文循環系統產生巨大改變。因此，瞭解土地利用變遷及降雨型態變化對水資源涵養量影響乃是目前重要課題之一。本研究以臺灣中部水里溪集水區為研究樣區，利用美國環保署開發之BASINS/HSPF水文模式進行量化評估，研究結果如下：(1)分別以2009及2010年資料進行參數率定及驗證，結果顯示相關係數(correlation coefficient, r)分別為0.87及0.72；決定係數(determination coefficients, R^2)分別為0.75及0.52；模式有效性係數(efficiency coefficient, E)分別為0.39及0.11，表示模式具有可靠性。(2)以四個年度土地利用進行模擬，顯示其水資源年涵養率為23.37~23.82%，再與土地利用交叉比對，發現以森林與建物面積對集水區水資源涵養量影響最大；(3)選取較易影響水資源涵養量之三種土地利用型態(森林、農業及建地)進行6種情境模擬，顯示將森林開發為建地對水資源涵養劣化影響最為明顯；(4)經由豐枯水年之年降雨量進行模擬，發現豐水年因降雨豐沛，雨水儲蓄於集水區能力較佳，水資源年涵養率約26%。

關鍵詞：BASINS/HSPF水文模式、水資源涵養、土地利用、情境模擬。

何嘉浚、曾俊偉、李嘉若、林鎮洋、莊智瑋。2019。集水區土地利用變遷及降雨量變化對水資源涵養能力影響之研究。台灣林業科學34(4):217-33。

¹⁾ 國立臺灣科技大學營建工程系，10607臺北市大安區基隆路4段43號 Department of Civil and Construction Engineering, National Taiwan University of Science and Technology, 43 Keelung Rd., Sec.4, Da'an Dist., Taipei City 10607, Taiwan.

²⁾ 林業試驗所集水區經營組，10066臺北市南海路53號 Division of Watershed Management, Taiwan Forestry Research Institute, 53 Nanhai Rd., Taipei 10066, Taiwan.

³⁾ 國立臺北科技大學土木與防災研究所，10608臺北市忠孝東路3段1號 Graduate Institute of Civil and Disaster Prevention Engineering, National Taipei University of Technology, 1 Zhongxiao E. Rd., Sec. 3, Da'an Dist., Taipei 10608, Taiwan.

⁴⁾ 國立屏東科技大學水土保持系，91201屏東縣內埔鄉老埤村學府路1號 Department of Soil and Water Conservation, National Pingtung University of Science and Technology, 1 Shuefu Road, Neipu, Pingtung 91201, Taiwan.

⁵⁾ 通訊作者 Corresponding author, e-mail: chinwei.chuang@gmail.com

2019年6月送審 2019年8月通過 Received June 2019, Accepted August 2019.

Research paper

Effects of Changes in Land Use and Rainfall Patterns on Water Resources Conservation Capability in a Watershed

Chia-Chun Ho,¹⁾ Chun-Wei Tseng,^{2,3)} Chia-Chun Lee,³⁾
Jen-Yang Lin,³⁾ Chih-Wei Chuang^{4,5)}

【 Summary 】

The average annual rainfall in Taiwan is about 2500 mm. Because of the uneven distribution of rainfall in time and space, the steep terrain, short rivers, and rapid flow, water resources cannot easily be stored. In recent years, due to the vigorous development of the social economy, development of lowlands has become saturated, and development has gradually expanded towards slope land; this has brought tremendous changes to the original hydrological cycle system. Therefore, understanding the impacts of changes in land use and rainfall patterns on water resources conservation is an important issue at present. The Shui-Li Creek watershed in central Taiwan was selected for this study. A quantitative assessment of water resources conservation in the study area was conducted using the BASINS/HSPF hydrological model which was developed by the US Environmental Protection Agency. The following research results were documented. (1) The parameters were calibrated and verified by flow data of the years 2009 and 2010, respectively. The results showed that the correlation coefficients (r) were 0.87 and 0.72, the determination coefficients (R^2) were 0.75 and 0.52, and the efficiency coefficients (E) were 0.39 and 0.11, respectively. This indicates that the model was reliable. (2) Simulation results of land use patterns in four periods showed that rates of annual water resource conservation were 23.37 to 23.82%. After a cross comparison of land use, it was found that patterns of forests and buildings had the greatest impacts on water resources conservation in watershed areas. (3) Three patterns of land use (forest, agriculture, and buildings), which can easily affect water resource conservation, were selected for six simulation scenarios. Results showed that land use change from forests to buildings had the most obvious impact on water resource conservation. (4) Comparisons of water resource conservation of the annual rainfall in high-flow and dry years showed that rainfall which was stored in the watershed area in a high-flow year was better due to the abundant rainfall. The rate of annual water resource conservation was about 26%.

Key words: BASINS/HSPF hydrological model, water resource conservation, land use, scenario simulation.

Ho CC, Tseng CW, Lee CC, Lin JY, Chuang CW. 2019. Effects of changes in land use and rainfall patterns on water resources conservation capability in a watershed. *Taiwan J For Sci* 34(4):217-33.

緒言

臺灣年降雨豐沛(約2500 mm)，惟受降雨時空分配不均，地勢陡峻、河短急流等影響，缺水問題時有所聞，近年來更因氣候變遷缺水問題日趨嚴重，依中央氣象局1911~2014年降雨統計資料，無降雨日數呈現逐年遞減，河川洪枯懸殊情形越趨明顯，致使洪旱災害頻傳。因此，瞭解土地利用變遷、型態轉變及降雨量多寡對水資源涵養量影響乃是現階段重要課題。

相關水資源涵養研究顯示，森林可增加地表水入滲土壤，使其貯留其中，於枯水期時，再緩慢流出調節河川流量，發揮水資源涵養功能(Chen 1993b, Tseng and Chen 2018)。而影響集水區水資源涵養因子，包含降雨量及其特性、集水區自然環境特性(地質、土壤、地形與坡度等)與集水區擾動程度(天然擾動如崩塌、人為擾動如開發行為)等(Chen and Chen 1990)；亦有相關研究指出，當森林土地利用型態遭受擾動破壞，其水資源能力降低程度與變更後之土地利用型態有著密切關聯(Xu 1984, Cheng et al. 2007, Jasrotia et al. 2009, Chen and Tseng 2013, Gong et al. 2017)。在不同土地利用型態對水資源涵養能力研究中顯示，林地的水資源涵養能力最佳，其次為農地及草地(Lu et al. 1987, Chen 1993a, b, Tseng and Chen 2018)。Cheng et al. (2002)曾研究分析臺灣上游流域森林與非森林地區水文環境差異，不同土地利用型態的入滲能力為林地>草地>森林皆伐區>高度擾動與夯實地區。另Siriwardena et al. (2006)以SIMHYD降雨-逕流模式對澳大利亞Comet流域的集水區進行土地利用變遷分析，評估森林轉為草地及農地之逕流變化，發現其逕流量相較於森林增加40%。綜上述相關研究可發現，土地利用與水資源涵養有著密不可分之關係。

臺灣在評估森林水資源涵養量的常見方法有水文收支平衡法(water-budget method)(Yang et al. 1978)、土壤粗孔隙率法(soil coarse porosity)(Chen and Tseng 2013, Tseng and Chen 2018)、基流資料估算法(base-flow-record estimation)(Lu 2017)、退水曲線位移法

(the recession-curve replacement method)(Chou 2016)及水文模式推估法等5種量化推估方式，前4種方法多以迴歸分析推求，屬經驗模式(empirical model)，其優點為操作方便，但缺點為所採用係數無法作為集水區全面性代表(Chou et al. 2000)；水文模式推估法優點為當模式經驗證可行後，便可進行長時間的動態計算及土地利用變遷情境模擬，探討其對水資源涵養量之影響，其與經驗模式最大差異為能隨時間、空間的變動，得到最適切之資訊。

應用水文模式探討土地利用與流量或水資源涵養量變化研究眾多，常見使用模式有HEC-HMS(Liu et al. 2014, Sintayehu 2015)、HSPF(Chou et al. 2000, Chang and Wu 2013)、SWMM(Choi and Ball 2002, Fan 2014)、SWAT(Bingner 1996, Moynihan and Vasconcelos 2014, Lin et al. 2016)等，其中又以HSPF模式於混合型土地利用下模擬流量及懸浮固體(如土砂)結果有較佳表現(Lee et al. 2010, Gebremariam et al. 2014)。

依據本研究樣區特性及研究目的，因HSPF模式具有較佳模擬表現，且美國環保署所開發之BASINS/HSPF模式近年更常被使用於水資源涵養量之研究(Chou et al. 2000, Tong et al. 2012, Ouyang et al. 2013, Baloch et al. 2015)，因此本研究選用該模式探討臺灣中部水里溪集水區土地利用變遷、土地利用型態轉變及降雨量多寡對水資源涵養量之影響，期對後續水資源保育提供參據。

材料與方法

一、研究樣區

考量本研究需觀測資料進行參數率定及驗證，因此選用南投縣水里溪中山橋上游集水區作為本研究樣區，其屬濁水溪之支流；主要行政區涵蓋水里鄉及魚池鄉，集水面積約65.2平方公里(圖1)；樣區上游有行政院農業委員會林業試驗所蓮華池研究中心，其試驗林為臺灣中部地區僅存最完整之天然闊葉林。另研究樣區

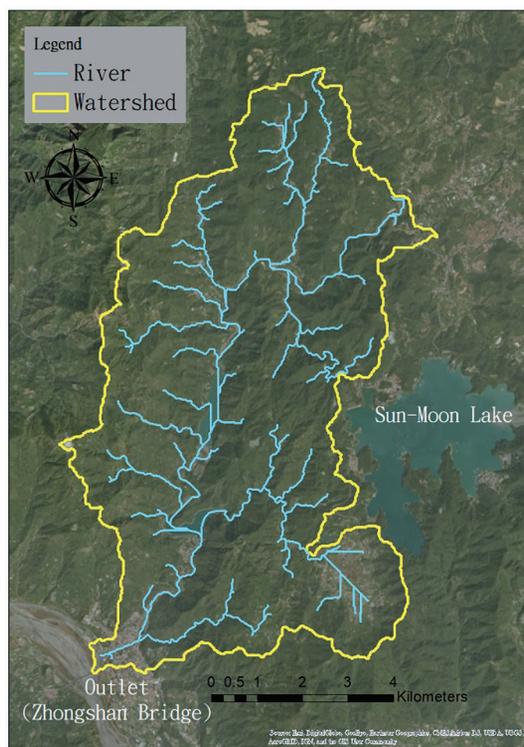


Fig. 1. The site of the study area.

內有亦有明潭、明湖水庫與鉅工、大觀及水里發電廠等分佈其內。

二、研究工具

為瞭解集水區之土地利用型態變遷與水資源涵養能力間關係，經文獻回顧及比較相關水文模式後發現，應用美國環保署開發之 Better Assessment Science Integrating Point and Nonpoint Sources (BASINS) / Hydrological Simulation Program-Fortran (HSPF) 水文模式進行分析及情境模擬推估可得到精確並具有可靠性的結果(Chou et al. 2000)，因此本研究選用該模式進行水資源涵養量探討。

建置水里溪集水區水文模式所需之基本資料類型包含GIS資料及氣象水文資料等二大類(表1及表2)，GIS資料(集水區水系圖、集水區邊界圖、數值高程模型(DEM)及土地利用圖)主要係用於BASINS分析系統軟體進行集水區內地空間資料萃取，氣象水文資料(降雨量、蒸

發散、溫度、風速、露點溫度、日輻射、雲覆蓋、蒸發散潛勢、流量等)則用於建立HSPF模式之集水區氣象水文參數，推估集水區之年蒸發散量及年逕流量，再藉由集水區之實測流量資料進行比對及參數率定，當相關係數大於0.7 (McCuen 2005)、決定係數大於0.5 (Wahyu et al. 2010)及模式有效性係數(E)大於0 (Moriassi et al. 2007)，即表示研究樣區建置之水文模式經驗證可用。

當模式建置完成後，輸入相同的降雨條件並藉由集水區不同年份的土地利用型態來探討對水資源涵養能力之影響；再者，並透過情境模擬探討土地利用型態變更對水資源涵養量之影響，最後探討降雨量多寡(豐水年及枯水年)於水資源涵養能力的影響，經整合上述模擬結果進行結果與討論(詳圖2)。

(一)降雨量萃取

研究樣區內有行政院農業委員會林業試

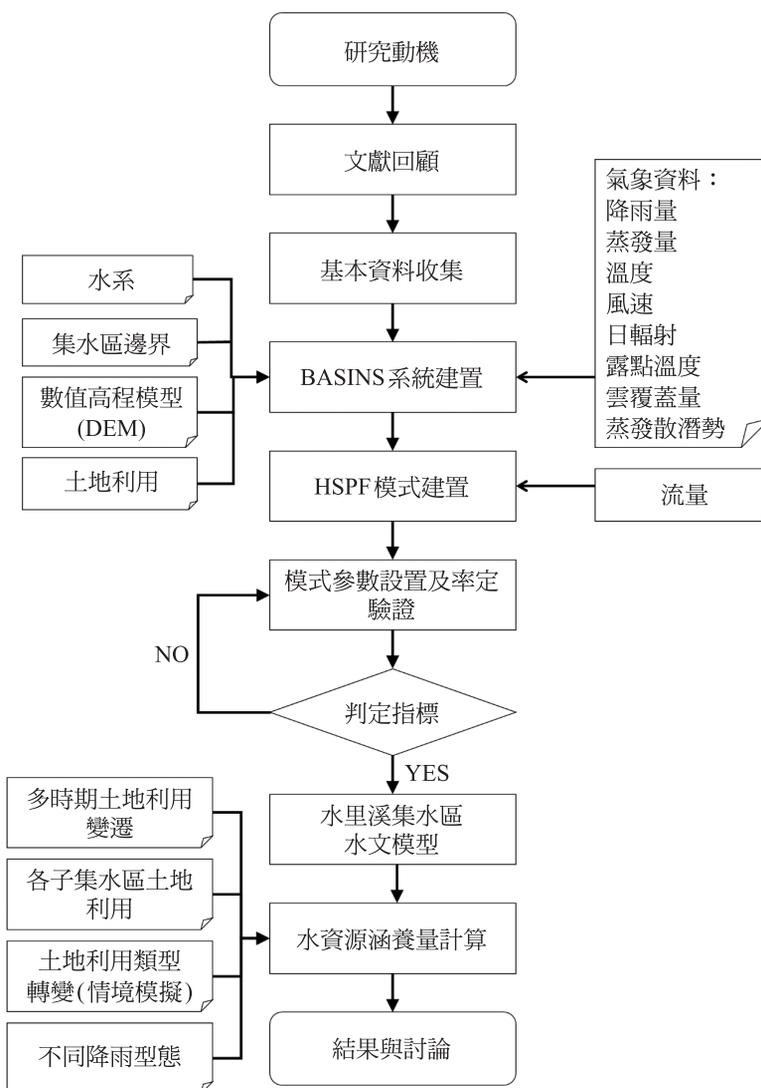


Fig. 2. Flowchart of the study.

驗所蓮華池氣象觀測站(海拔高744公尺)及中央氣象局日月潭氣象觀測站(海拔高1018公尺)(圖3)。由蓮華池氣象觀測站資料顯示(1961~1996年),該區域年平均降雨量約為2285毫米,年均溫為20.80℃,年平均蒸發散量為939.10毫米,年平均相對濕度達87.10% (Lu et al. 2008);而從日月潭氣象觀測站資料顯示(1994~2016年),該區域年平均降雨量約為2403毫米,年均溫為19.2℃,年平均蒸發散量為752毫米,年平均相對濕度達82.1%。

因蓮華池氣象觀測站於模式所需氣象資料(如日輻射等)有所缺漏,故除降雨量資料外,餘氣象資料皆採用日月潭氣象觀測站資料;另因降雨量測站在空間分布不均,因此本研究採用徐昇式多邊形法(Thiessen polygons method)求出各觀測站於集水區之控制面積權重,用於後續建置集水區降雨量(表3)。

(二)實測流量修正及採用

在進行模式模擬前,對所蒐集資料進行檢

Table 1. Acquisition data for establishment of the Better Assessment Science Integrating Point and Nonpoint Sources (BASINS) system

| 資料類別 | 資料圖層 | 資料格式 | 資料來源 |
|-------|-----------------------------------|-----------|-----------------------|
| GIS資料 | 集水區水系 | Shapefile | 林務局 |
| | 土地利用 (1990年、1995年、2000年、2005年) | Shapefile | |
| | 集水區邊界圖 | Shapefile | 水利署 (水里自來水水質水量保護區) |
| | 數值高程模型(DEM) | Grid file | 中央研究院 |

Table 2. Acquisition data for establishment of the Hydrological Simulation Program-Fortran (HSPF) model

| 資料類別 | 所需資料 | 軟體單位 | 資料來源 |
|--------|-------------|--------------------|-----------------------------|
| 氣象水文資料 | 降雨量(PREC) | in h ⁻¹ | 中央氣象局(日月潭) 農委會林試所蓮華池研究中心 |
| | 蒸發散(EVAP) | in h ⁻¹ | 中央氣象局(日月潭) |
| | 溫度(ATEM) | □ | |
| | 風速(WIND) | mph | |
| | 露點溫度(DEWP) | □ | |
| | 日輻射(SOLR) | Ly h ⁻¹ | |
| | 雲覆蓋(CLOU) | Tenths | |
| | 蒸發散潛勢(PEVT) | in h ⁻¹ | |
| | 流量 | cfs | 經濟部水利署 |

Table 3. Weights of the control area of weather stations in the watershed

| 觀測站 | 日月潭 | 蓮華池 |
|-----|-----|-----|
| 權重 | 0.8 | 0.2 |

視及判讀後，得知本研究樣區內因有鉅工、大觀及水里發電廠分佈其中(圖4)，依據財團法人農業工程研究中心(2014)於水里溪下游中山橋進行定期流量觀測報告指出，除水里溪本身天然逕流量外，亦受上游發電廠放流量影響；因此為求水里溪實際天然逕流量，利用各發電廠所提供每日發電量經由水電比(鉅工分廠：0.9645CMS/MWH；水里機組：2.8935CMS/MWH)進行轉換求出每日放流量(即發電量乘上各水電比)，再將實測觀測值扣除放流量後，即可推求出集水區之實際流量。

(三)HSPF模式建置及率定

1. 模式建置

建置HSPF模式前須以BASINS軟體平臺完成地文空間資訊萃取及氣象水文參數建置，應用BASIN軟體轉出研究樣區之HSPF模式，再將HSPF模式做率定及驗證，操作介面如圖5所示。

2. 率定及驗證

由於模式模擬均須檢核其參數適切度，本研究選用相關係數(r)、決定係數(R^2)及模式有效性係數(E)作為判定指標，藉由判定指標檢核參數假設是否合宜本研究樣區，當參數檢核通過，即證實研究採用參數假設符合現況，並得一最佳組合參數，便可後續使用於相關模擬及針對不同情境模擬下進行探討。採用判定指標

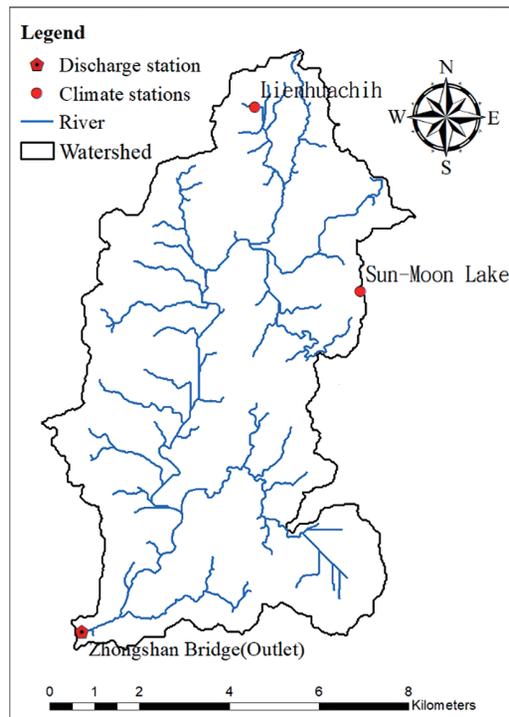


Fig. 3. Spatial distributions of weather stations.

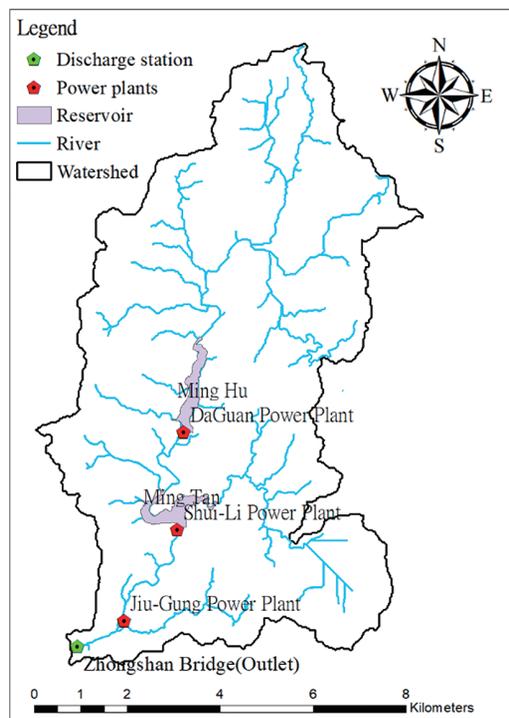


Fig. 4. Spatial distributions of power plants and reservoirs.

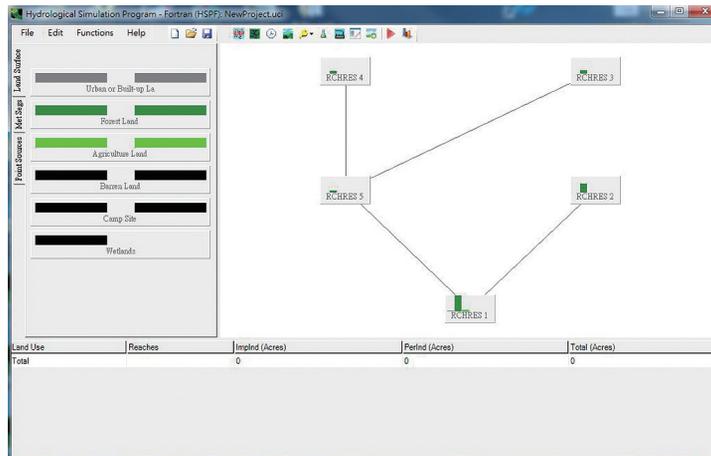


Fig. 5. User interface of Hydrological Simulation Program-Fortran (HSPF) model software.

公式如下：

(1) 相關係數(r)

為兩變項與其各自平均數差值的乘積總和除以與其各自均方根之乘積總和所得的值，用來驗證兩變項間直線關係強度。其值介於-1~1之間，McCuen (2005)指出，當 $r > 0.7$ 為可接受範圍。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}}$$

式中： X_i ：第 i 個模擬值

Y_i ：第 i 個實測值

\bar{X} ：平均模擬值

\bar{Y} ：平均實測值

n ：模擬值與實測值總樣本數

(2) 決定係數(R^2)

當自變數與因變數之間的關係可用迴歸式表示時，其迴歸公式的適合度(goodness of fit)可用決定係數來描述，因此決定係數值常用來表示迴歸分析中的變數解釋能力。在直線迴歸式下，恰為相關係數 r 的平方值，若用於模式的模擬值與實測值關係比較，則可假設模擬值與實測值呈直線關係，當此線性迴歸的決定係數越接近1時，表示模擬值與實測值越相近，模擬結果越好。其值介於0~1之間，Wahyu et al. (2010)指出，當 $R^2 > 0.5$ 為可接受範圍。

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST}$$

式中： SSR ：迴歸平方和

SSE ：殘差平方和

SST ：總平方和

(3) 模式有效性係數(E)

此數值的範圍在負無限大到1之間($-\infty \sim 1$)，當此值越趨近於1，表示模擬值越接近實測值，通常當 E 值介於0~1可視為理想的率定與驗證結果。當此值為0時，表示模式可準確模擬出平均值(模擬平均值等於觀測平均值)，當此值小於0時，表示利用觀測平均值當作預測值會比模式要好。總而言之，當此值趨近於1，表示模式準確性越高。Moriassi et al. (2007)指出，當 $E \geq 0$ 為可接受範圍。

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}$$

式中： X_i ：第 i 個模擬值

Y_i ：第 i 個實測值

\bar{X} ：平均模擬值

\bar{Y} ：平均實測值

n ：模擬值與實測值總樣本數

(四) 水資源涵養量推估

經由前人研究得知，目前探討水資源涵養量多採取以經驗公式，再以迴歸分析推求土地涵養能力，如水文收支平衡法、土壤含水率法、基流資料估計法及退水曲線位移法。本研究採用HSPF模擬所得之逕流量，再藉由水文

收支平衡法計算出水資源涵養量，為摒除面積之控制影響，進一步將水資源涵養量除以集水區面積，推求出單位面積之水資源涵養量，以利探討不同土地利用型態對水資源涵養量之影響；另水資源年涵養率則為該年水資源涵養量與年降雨量之比值，以因不同降雨量所造成影響。公式如下：

1. 水文收支平衡法

$$P = ET + R + S$$

式中：P：年總降雨體積：年降雨量乘上集水區面積之乘積(m³)

ET：年蒸發散量(m³)

R：年逕流量(m³)

S：水資源涵養量(m³)

2. 單位面積之水資源涵養量

$$Su = \frac{S}{A}$$

式中：Su：單位面積之水資源涵養量(mm)

S：水資源涵養量(m³)

A：集水區面積(m²)

3. 水資源年涵養率

$$Sr = \frac{S}{P} \times 100$$

式中：Sr：水資源年涵養率(%)

P：年降雨量乘上集水區面積之乘積(m³)

S：水資源涵養量(m³)

(五) 情境模擬

為瞭解土地利用型態變遷對水資源涵養量衝擊變化，在無法以過去趨勢準確的預測未來政策的執行效果時，利用情境模擬，將可協助評估政策施行或是面臨重大變遷時所造成的影響情況(Hsu 2009)。本研究將已完成率定及驗證之模式，以2009年土地利用進行土地利用型態轉變之情境模擬分析，進一步探討土地利用型態轉變與水資源涵養量之敏感度關係。研究中挑選較易影響水資源涵養量之三種土地利用型態(森林、農業及建地)，以兩兩轉換方式進行整體集水區及單一子集水區水文情境模擬，土地

利用轉換情境模擬計有森林→農業、農業→森林、建物→森林、森林→建物、農業→建物及建物→農業等6種。最後將模式模擬所得之前後單位面積之水資源涵養量(mm)差值與前單位面積之水資源涵養量(mm)相除，即可求得單位面積之水資源涵養量變化率。單位面積之水資源涵養量變化率公式如下：

$$CR = \frac{Su2 - Su1}{Su1} \times 100$$

式中：CR：單位面積之水資源涵養量變化率(%)

Su1：原單位面積之水資源涵養量(mm)

Su2：轉換後單位面積之水資源涵養量(mm)

當CR為正值，表示水資源涵養能力變好，反之，即水資源涵養能力變差。

結果

一、水里溪水文模式建置

(一) 參數判定指標

藉由BASINS萃取之地文空間資訊、土地利用圖、氣象水文資訊及水利署水里溪流量站觀測資料於HSPF模式進行水文模擬，其中水文參數率定係採用2009年，驗證時間係採2010年。

2009年率定相關係數(r)為0.87，決定係數(R^2)為0.75，模式有效性係數(E)為0.39，均屬可接受範圍；再以2010年資料進行驗證，相關係數(r)為0.72，決定係數(R^2)為0.52，模式有效性係數(E)為0.11，亦於可接受範圍(圖6、圖7及表4)，顯示BASINS/HSPF模式所建置之模型於本研究樣區具有其可靠性，並可進行後續模擬探討。

另從圖6及圖7中發現，部分時間模擬與實測流量有低估情形，因本研究採用鄰近與集水區內之雨量觀測站(蓮華池及日月潭站)，主要分布於集水區之中上游段，研判部分時間低估主因可能為集水區降雨時間及空間分布不均特性所引起；且河川逕流過程中，下游端常有民生用水排放，由於量少而無法完全排除，恐亦會造成干擾雜訊所致。

(二)水文模式推估水資源涵養量

完成2009~2010年水里溪集水區水文模式率定驗證後，證實水文參數假設符合現況，

可利用其模擬結果推估水資源涵養量。依據BASINS/HSPF模擬結果(表5)，年蒸發散量為3,988,976立方公尺，年逕流量為84,787,803立

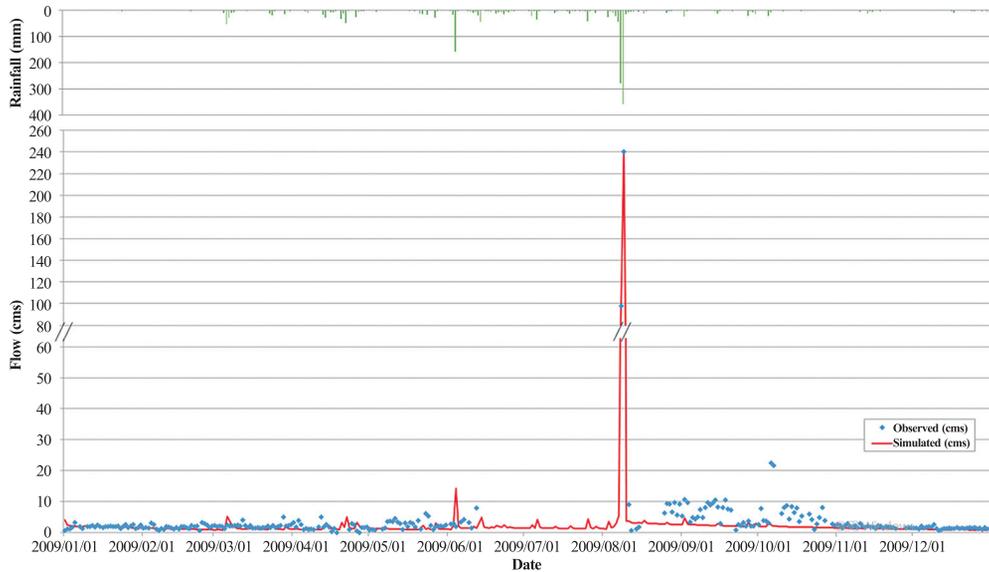


Fig. 6. Results of calibration flow in 2009.

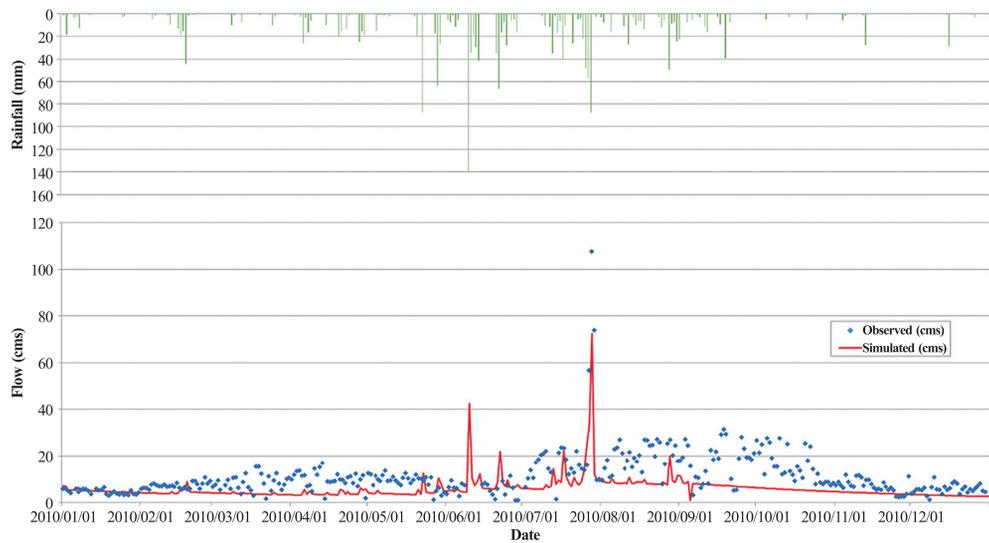


Fig. 7. Results of verification flow in 2010.

Table 4. Results of determinative indicators for model calibration and verification

| 項目 | 採用時間 | 相關係數(r) | 決定係數(R^2) | 模式有效性係數(E) |
|----|------|-------------|---------------|------------|
| 率定 | 2009 | 0.87 | 0.75 | 0.39 |
| 驗證 | 2010 | 0.72 | 0.52 | 0.11 |

Table 5. Results of estimation for water resource conservation in 2009

| 項目 | 模擬推估結果 |
|--------------------------|------------|
| *年總降雨量(mm) | 1833.6 |
| *集水區面積(m ²) | 63,300,000 |
| *年總蒸發散量(m ³) | 3,988,976 |
| *年總逕流量(m ³) | 84,787,803 |
| 水資源涵養量(m ³) | 27,305,874 |
| 單位面積之水資源涵養量(mm) | 431.3 |
| 水資源年涵養率(%) | 23.5 |

註：*表示為HSPF模式模擬結果

方公尺，再經由水文收支平衡法推估，水資源涵養量為27,305,874立方公尺，為摒除面積之控制影響，推估出單位面積之水資源涵養量為431.3 mm及水資源年涵養率為23.5%。

二、土地利用變遷對水資源涵養量研析

(一)各年度不同土地利用面積變遷分析結果

為瞭解土地利用變遷對水資源涵養量所造成之影響，茲將所蒐集之1990、1995、2000及2009年土地利用型態分以農業、森林、建

地、水利、草地及裸露地六大類(表6)，代入建置完成之水里溪水文模式進行模擬分析；另考量因年降雨量不同所造成影響，分析時統一採用2009年降雨量進行模擬，結果顯示，各年度土地利用型態單位面積水資源涵養量(mm)分為436.79、429.86、428.53及431.32，水資源年涵養率(%)分為23.82、23.44、23.37及23.52(表7)。

(二)各子集水區水資源涵養能力分析結果

由表7可知，水資源涵養能力差異最大年度為1990年(單位面積水資源涵養量436.79 mm)及2000年(每單位面積水資源涵養量428.53 mm)，為進一步瞭解各子集水區土地利用型態對水資源涵養量之關係，將本研究集水區利用BASINS劃分為5個子集水區(圖8)，並代入HSPF模式獨立計算各子集水區土地利用型態對水資源涵養量之變化(表8)，其中以4號子集水區水資源變化最大，另各子集水區土地利用統計如表9所示。

三、情境模擬與敏感度分析結果

將各子集水區及整體集水區分別進行土地

Table 6. Area statistics of land use patterns for each period

| 土地利用 型態 | 1990年 | | 1995年 | | 2000年 | | 2009年 | |
|------------|------------|-----------|------------|-----------|------------|-----------|------------|-----------|
| | 面積 (公頃) | 面積 (%) | 面積 (公頃) | 面積 (%) | 面積 (公頃) | 面積 (%) | 面積 (公頃) | 面積 (%) |
| 農業 | 1394.54 | 22.01 | 1598.15 | 25.23 | 1571.8 | 24.81 | 1564.44 | 24.7 |
| 森林 | 4274.27 | 67.47 | 4152.67 | 65.55 | 4128.66 | 65.17 | 4173.77 | 65.89 |
| 建地 | 302.11 | 4.77 | 283.09 | 4.47 | 286.54 | 4.52 | 287.44 | 4.54 |
| 水利 | 193.21 | 3.05 | 192.03 | 3.03 | 191.93 | 3.03 | 191.44 | 3.02 |
| 草生地 | 147.32 | 2.33 | 95.95 | 1.51 | 92.1 | 1.45 | 92.37 | 1.46 |
| 裸露地 | 23.37 | 0.37 | 12.93 | 0.21 | 63.79 | 1.02 | 25.36 | 0.39 |
| 總計 | 6334.82 | 100 | 6334.82 | 100 | 6334.82 | 100 | 6334.82 | 100 |

Table 7. Statistical results of water resource conservation of different land use patterns for each period

| 年度 | 年總逕流量(m ³) | 水資源涵養量(m ³) | 每單位面積水資源涵養量(mm) | 水資源年涵養率(%) |
|------|------------------------|-------------------------|-----------------|------------|
| 1990 | 84,441,580.26 | 27,652,096.67 | 436.79 | 23.82 |
| 1995 | 84,880,465.91 | 27,213,211.02 | 429.86 | 23.44 |
| 2000 | 84,964,427.43 | 27,129,249.50 | 428.53 | 23.37 |
| 2009 | 84,787,803.20 | 27,305,873.74 | 431.32 | 23.52 |

利用型態轉變並代入前已建置完成之HSPF模式進行6種情境模擬；各子集水區中單位面積之水資源涵養量變化率以建地→森林、建地→農業及

農業→森林為正值，餘均為負值(表10及圖9)；整體集水區中單位面積之水資源涵養量變化率分布與各子集水區趨勢相同(表11)。

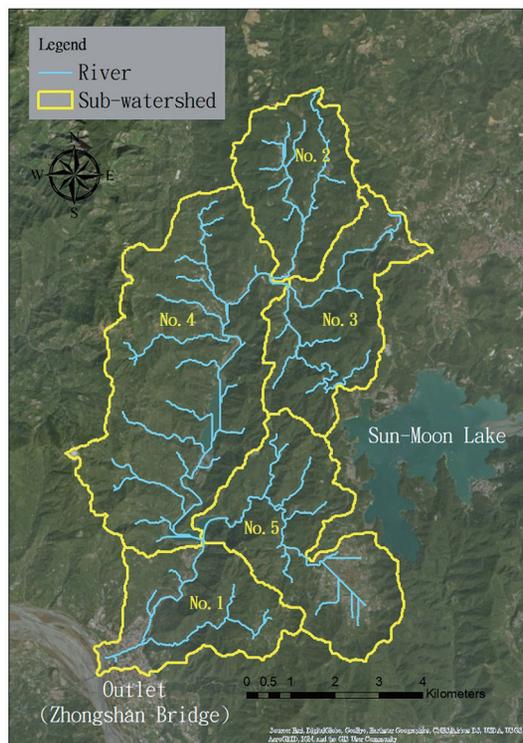


Fig. 8. Spatial distributions of sub-watersheds.

Table 8. Water resource conservation for each sub-watershed in 1990 and 2000

| 項目 | 子集水區編號 | No. 1 | No. 2 | No. 3 | No. 4 | No. 5 |
|------------------|------------|-------|-------|-------|--------|-------|
| 水資源年涵養率(%) | 1990年 | 18.64 | 26.72 | 27.15 | 23.62 | 22.94 |
| | 2000年 | 18.53 | 26.35 | 26.86 | 22.79 | 22.78 |
| 單位面積水資源涵養量變化(mm) | 1990~2000年 | -1.90 | -6.74 | -5.18 | -15.18 | -2.86 |

Table 9. Statistics derived from land use pattern changes for each sub-watershed in 1990 and 2000

| 子集水區 編號 | 面積 (公頃) | 土地利用型態 | | | | | |
|------------|------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| | | 農業 | 森林 | 建地 | 水利 | 草生地 | 裸露地 |
| 3 | 1,065.370 | -0.023 | -1.404 | 0.155 | 0.004 | 0.472 | 0.797 |
| 2 | 869.193 | 1.176 | -1.177 | 0.243 | -0.053 | -0.514 | 0.325 |
| 4 | 2,455.640 | 4.698 | -3.093 | -0.058 | -0.008 | -2.283 | 0.744 |
| 5 | 1,048.153 | 3.057 | -2.366 | -0.935 | -0.015 | -0.378 | 0.638 |
| 1 | 896.464 | 2.025 | -2.077 | -0.773 | -0.065 | 0.440 | 0.450 |

註：單位%

Table 10. Water resource conservation changes for each sub-watershed

| 子集水區 | Su1 (mm) | 建物 -> 森林 | | 建地 -> 農業 | | 農業 -> 森林 | | 森林 -> 建地 | | 農業 -> 建地 | | 森林 -> 農業 | |
|------|-------------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|
| | | Su2 (mm) | CR (%) |
| 1 | 343.7 | 344.93 | 0.36 | 344.5 | 0.23 | 344.17 | 0.14 | 342.41 | -0.38 | 342.88 | -0.24 | 343.21 | -0.14 |
| 2 | 483.26 | 484.51 | 0.26 | 484.05 | 0.16 | 483.74 | 0.10 | 482.03 | -0.25 | 482.49 | -0.16 | 482.8 | -0.10 |
| 3 | 492.94 | 493.97 | 0.21 | 493.57 | 0.13 | 493.31 | 0.08 | 491.94 | -0.20 | 492.31 | -0.13 | 492.57 | -0.08 |
| 4 | 422.24 | 422.68 | 0.10 | 422.52 | 0.07 | 422.4 | 0.04 | 421.79 | -0.11 | 421.96 | -0.07 | 422.09 | -0.04 |
| 5 | 422.08 | 422.89 | 0.19 | 422.57 | 0.12 | 422.37 | 0.07 | 421.28 | -0.19 | 421.57 | -0.12 | 421.78 | -0.07 |

註：Su1為原單位面積之水資源涵養量，Su2為轉換後單位面積之水資源涵養量，CR為單位面積之水資源涵養量變化率

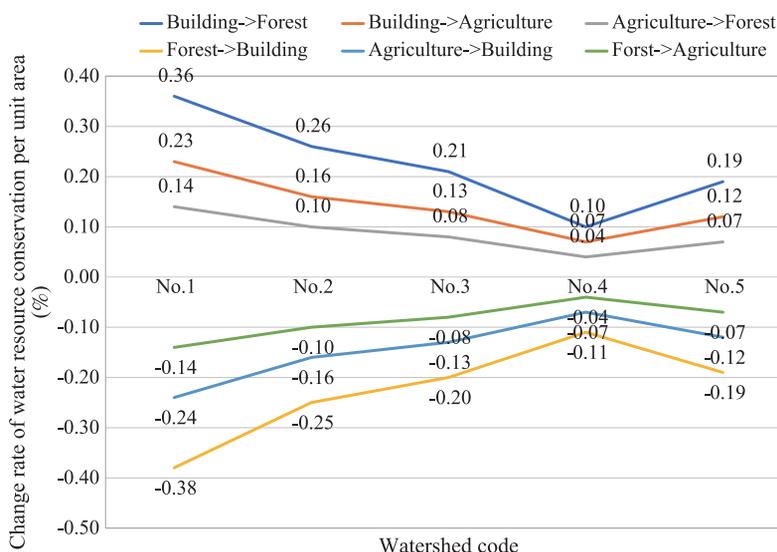


Fig. 9. Changes in water resource conservation derived from changes in land use patterns.

Table 11. Sensitivity analysis of water resources conservation derived from changes in land use patterns

| 土地利用型態轉變 | Su1 (mm) | Su2 (mm) | CR (%) |
|----------|----------|----------|--------|
| 森林->農業 | 431.37 | 431.02 | -0.08 |
| 農業->森林 | 431.37 | 431.73 | 0.08 |
| 建物->森林 | 431.37 | 432.33 | 0.22 |
| 森林->建物 | 431.37 | 430.42 | -0.22 |
| 農業->建物 | 431.37 | 430.77 | -0.14 |
| 建物->農業 | 431.37 | 431.97 | 0.14 |

註：Su1為原單位面積之水資源涵養量，Su2為轉換後單位面積之水資源涵養量，CR為單位面積之水資源涵養量變化率

四、降雨量多寡之影響

近年因氣候變遷致生降雨集中、降雨強度增強等極端氣候，對坡地集水區造成嚴重衝

擊。為瞭解豐、枯水期對集水區水資源涵養量影響，本研究蒐集研究試區內日月潭雨量觀測站年降雨資料(圖10)，篩選出2008年為豐水年

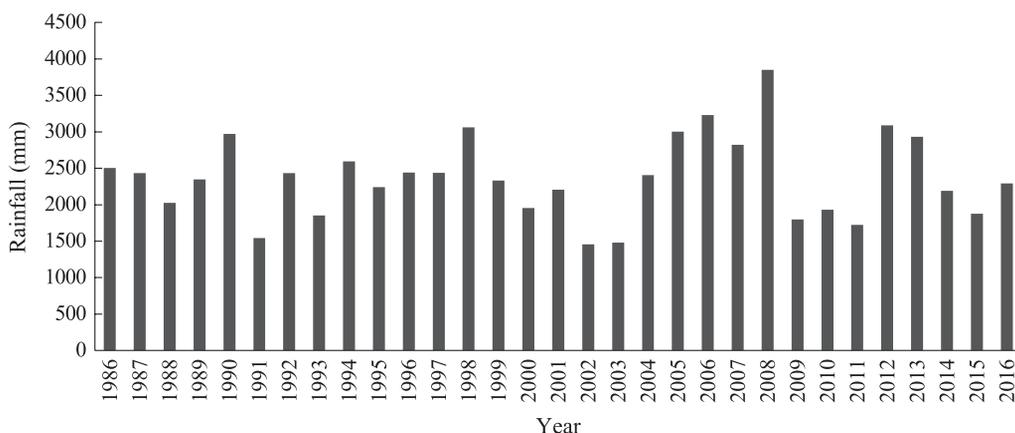


Fig. 10. Statistics of precipitation at the Sun-Moon Lake station (1986~2016).

(年降雨量3851.3 mm)、2002年為枯水年(年降雨量1455.8 mm)作為分析比較代表年度。

再以本研究降雨量萃取方法進行集水區年降雨量估算，得知2008年集水區豐水年年降雨量為3932.9 mm，枯水年年降雨量為1446.6 mm；將所得年降雨量代入模式，分別以1990及2000年土地利用型態進行模擬並推估單位面積水資源涵養量及水資源年涵養率，1990及2000年土地利用型態於豐水年之單位面積水資源涵養量為1055.25及1031.32 mm，水資源年涵養率為26.83及26.22%；枯水年之單位面積水資源涵養量為300.53及294.25 mm，水資源年涵養率為20.77及20.34% (表12)。

討論

將本研究所建置具有可靠性之水里溪水文模式進行各年度土地利用變遷、各子集水區水資源涵養能力、敏感度分析、及降雨型態影響進行討論：

一、各年度不同土地利用面積變遷

藉由模擬1990至2009年(四期)土地利用單位面積水資源涵養量及水資源年涵養率，各年度單位面積水資源涵養量分為436.79、429.86、428.53及431.32 mm，水資源年涵養率分為23.82、23.44、23.37及23.52%，再與各期土地利用面積百分比交叉比對，森林面積變化百分比為67.47、65.55、65.17及65.89%，其趨勢與森林增減一致。再者，森林的土地利用型態具有較多的土壤粗孔隙率，可以促進水分的入滲，良好的森林集水區經營並具有安定土砂、澄清水質、涵養水源及調節水量的功能，故研判水資源涵養量多寡與森林面積增減變化有關。

二、各子集水區水資源涵養能力

再將水資源涵養能力差異最大年度之1990及2000年進行模擬，五個子集水區中4號子集水區水資源年涵養率及單位面積水資源涵養量變化均為最大，分別為-0.83% (1990與2000年水

Table 12. Results of water resource conservation derived from precipitation in high-flow and dry years

| 雨型 | 豐水年 | | 枯水年 | |
|----------------|---------|---------|--------|--------|
| 年降雨量(mm) | 3932.9 | | 1446.6 | |
| 土地利用年度 | 1990 | 2000 | 1990 | 2000 |
| 單位面積水資源涵養量(mm) | 1055.25 | 1031.32 | 300.53 | 294.25 |
| 水資源涵養率(%) | 26.83 | 26.22 | 20.77 | 20.34 |

資源年涵養率差值)及-15.18 mm，再從各子集水區土地利用型態變化統計，發現4號子集水區為森林面積銳減之最大區域，顯示森林為涵養水資源能力最佳之土地利用型態。若以相同邏輯研析，各子集水區森林面積減少為依序分為4、5、1、3及2號集水區，理論上單位面積水資源涵養量變化亦為相同趨勢，但結果卻為2及3號集水區較5及1號減少較多，經比對土地利用型態，發現主要因為2及3號集水區係唯一建物增加之子集水區。一般而言，建物的增加表示土壤的不透水性增加，亦表示水分入滲量相對於森林是減少的，可知建物亦為主要影響集水區水源涵養量關鍵之一。故本研究顯示主要影響研究區域之集水區水資源涵養量的土地利用型態為森林及建物。

三、情境模擬與敏感度分析

將較易影響水資源涵養量之三種土地利用型態(森林、農業及建地)進行各子集水區6種情境模擬，單位面積之水資源涵養量及變化率增加係以建物→森林為最佳，其次為建物→農業，最差為農業→森林；倘在單位面積之水資源涵養量及變化率損失，則以森林→建地為最多，森林→農業為最少。綜上，經由比較結果，顯示森林、農業及建地間關係，以森林與建地間轉換對水資源涵養量影響較為明顯。

四、降雨型態影響

分以豐水年(2008年)、枯水年(2002年)年降雨量進行1990及2000年水資源涵養量模擬，發現單位面積水資源涵養量與水資源年涵養率均顯示在降雨豐沛下，雨水儲蓄於集水區內能力較佳。

結論

本研究整合地文空間資訊、水文資料及BASINS/HSPF模式進行水里溪水文模型建置，結果顯示相關係數(r)、決定係數(R^2)及模式有效性係數(E)均符合接受範圍，顯示該模型於本研究樣區具有其可靠性。

藉由BASINS/HSPF所建置之模型進行各集水區內水資源年涵養率及單位面積之水資源涵養量變化研析，4號子集水區水資源年涵養率及單位面積之水資源涵養量變化均較明顯，原因係其森林面積銳減所致，另建物面積增減亦為影響水資源涵養量變化關鍵之一。

經挑選較易影響水資源涵養量之三種土地利用型態(森林、農業及建地)進行6種情境模擬，結果顯示森林、農業及建地間關係，以森林與建地之土地利用型態間的轉換對水資源涵養量影響最為明顯。

經由本研究已完成參數率定及驗證模式，推估1990及2000年之土地利用於豐、枯水年單位面積水資源涵養量及水資源年涵養率，顯示，豐水年因降雨豐沛，雨水儲蓄於集水區能力較佳。

本研究區域內有多座水庫及發電廠，其放流量皆會影響天然逕流量，造成模式參數率定之不確定性，且HSPF較適用於天然逕流之河川，故建議後續以HSPF分析水資源涵養量之研究時，可選取人為影響較少之河川為宜。

本研究僅針對森林、農業及建物三種類型轉變對水資源涵養量變化之探討，惟農業型態類別眾多，且南投地區多以檳榔作為經濟作物，種植面積逐年上升，建議後續可針對不同農業類別，如果園、檳榔等不同作物，探討其對水資源涵養量之影響，可做為日後水資源保育參考之用。

謝誌

本研究承行政院農業委員會106農科-17.1.2-科-a1(2)科技計畫經費補助，謹此致謝。

引用文獻

Agricultural Engineering Research Center. 2014. Stream flow measurement of hydrostations in Central Water Resources Bureau in 2014. [Research Project] Taoyuan, Taiwan: Central Region Water Resources Office, Water

Resources Agency, Ministry of Economic Affairs. 335 p. [in Chinese with English summary].

Baloch MA, Ames DP, Tanik A. 2015. Hydrologic impacts of climate and land-use change on Namnam Stream in Koycegiz Watershed, Turkey. *Int J Environ Sci Technol* 12(5):1481-94.

Bingner R. 1996. Runoff simulated from Goodwin Creek watershed using SWAT. *Trans ASAE* 39(1):85-90.

Chang CL, Wu TY. 2013. Applying the HSPF model to evaluate the effects of seasonal variability of rainfall on water flow simulation. *J Taiwan Agric Engin* 59(2):82-91. [in Chinese with English summary].

Chen HH. 1993a. Study on the water resource conservation in different landuse area. *Q J Chin For* 26(3):41-61. [in Chinese with English summary].

Chen HH, Chen MC. 1990. Investigation and research on forest status and water conservation function in catchment area. [Research Project] Taipei, Taiwan: School of Forestry and Resource Conservation, National Taiwan Univ. 44 p. [in Chinese].

Chen MC, Tseng CW. 2013. Feasibility study of agroforestry and the effects on water resource conservation. *J Exp For Natl Taiwan Univ.* 27(3):171-88. [in Chinese with English summary].

Chen MJ. 1993b. Study on the pore size distribution of different forest soil in Lien-Hua-Chi area. *Q J Chin For* 26(2):63-77. [in Chinese with English summary].

Cheng JD, Chang YL, Lee CC. 2007. Low flows and droughts in Taiwan as related to environmental factors and land uses. *J Soil Water Conserv* 39(4):401-17. [in Chinese with English summary].

Cheng JD, Lin LL, Lu HS. 2002. Influences of forests on water flows from headwater watersheds in Taiwan. *For Ecol Manage*

165(11):11-28.

Choi KS, Ball JE. 2002. Parameter estimation for urban runoff modeling. *Urban Water* 4(1):31-41.

Chou TW. 2016. Creating an estimating model on water conservation through rainfall on watersheds in Taiwan with the recession-curve replacement method [dissertation]. Taipei, Taiwan: School of Forestry and Resource Conservation, National Taiwan Univ. 117 p. [in Chinese with English summary].

Chou TY, Yang LS, Chen MH. 2000. The application of remote sensing and hydrological model on water conservation capacity estimation for reservoir watershed area. *J Photogram Remote Sensing* 5(3):57-74. [in Chinese with English summary].

Fan CH. 2014. Modelling heavy metal pollution of road runoff [dissertation]. Taipei, Taiwan: Graduate Institute of Civil and Disaster Prevention Engineering, National Taipei Univ. of Technology. 66 p. [in Chinese with English summary].

Gebremariam SY, Martin JF, DeMarchi C, Bosch NS, Confesor R, Ludsins SA. 2014. A comprehensive approach to evaluating watershed models for predicting river flow regimes critical to downstream ecosystem services. *Environ Model Softw* 61:121-34.

Gong SH, Xiao Y, Zheng H, Xiao Y, Ouyang ZY. 2017. Spatial patterns of ecosystem water conservation in China and its impact factors analysis. *Acta Ecol Sin* 37(7):2455-62. [in Chinese with English summary].

Hsu TJ. 2009. A study of scenarios of urban development based on smart growth policies—a case study of Chia Yi City [dissertation]. Tainan, Taiwan: Department of Urban Planning, National Cheng Kung Univ. 148 p. [in Chinese with English summary].

Jasrotia AS, Majhi A, Singh S. 2009. Water balance approach for rainwater harvesting using remote sensing and GIS techniques, *Jam-*

mu Himalaya, India. *Water Resour Manage* 23(14):3035-55.

Lee SJ, Yoon CG, Jung KW, Hwang HS. 2010. Comparative evaluation of runoff and water quality using HSPF and SWMM. *Water Sci Technol* 62(6):1401-9.

Lin TP, Lien WY, Lin YP, Chiang LC. 2016. Impacts of land use and climate changes scenarios on streamflow. *Taiwan Water Conserv* 64(3):52-65. [in Chinese with English summary].

Liu WC, Chang CE, Young CC. 2014. Forecasting runoff discharge at different lead-times using hybrid HEC-HMS and adaptive network-based fuzzy inference system models. *Taiwan Water Conserv* 62(4):43-54. [in Chinese with English summary].

Lu HS, Lin JP, Lu SY. 1987. A study on runoff and soil erosion under different land use of watershed. *J Chin Soil Water Conserv* 18(2):112-21. [in Chinese with English summary].

Lu SY. 2017. Estimation of the ability of a forest watershed to conserve and regulate water by a baseflow approach. *Taiwan J For Sci* 32(2):111-9.

Lu SY, Hwang LS, Huang HH. 2008. Compilation of meteorological records for the Lien-huachih Station 1997-2007. 183rd Forestry series of books. Taipei, Taiwan: Taiwan Forestry Research Institute. 166 p. [in Chinese].

McCuen RH. 2005. Accuracy assessment of peak discharge models. *J Hydrol Engin* 10:16-22.

Moriassi DN, Arnold JG, Van Liew MW, Bingner RL, Harmel RD, Veith TL. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Trans ASABE* 50(3):885-900.

Moynihan K, Vasconcelos J. 2014. SWMM modeling of a rural watershed in the lower

coastal plains of the United States. *J Water Manage Model*. DOI: 10.14796/JWMM.C372.

Ouyang Y, Leininger TD, Moran M. 2013. Impacts of reforestation upon sediment load and water outflow in the Lower Yazoo River watershed, Mississippi. *Ecol Engin* 61:394-406.

Sintayehu LG. 2015. Application of the HEC-HMS model for runoff simulation of Upper Blue Nile River basin. *Hydrol Current Res* 6:199. doi:10.4172/2157-7587.1000199.

Siriwardena L, Finlayson BL, McMahon TA. 2006. The impact of land use change on catchment hydrology in large catchments: the Comet River, Central Queensland, Australia. *J Hydrol* 326(1-4):199-214.

Tong STY, Sun Y, Ranatunga T, He J, Yang YJ. 2012. Predicting plausible impacts of sets of climate and land use change scenarios on water resources. *Appl Geogr* 32(2):477-89.

Tseng CW, Chen MC. 2018. Study on the soil porosity characteristics and water resource conservation capacity of various land use in the Lienhuachih Experimental Forest. *J Exp For Natl Taiwan Univ* 32(1):23-36. [in Chinese with English summary].

Wahyu A, Kuntoro AA, Takao Yamashita. 2010. Annual and seasonal discharge responses to forest/land cover changes and climate variations in Kapuas River basin, Indonesia. *J Int Develop Coop* 16(2):81-100.

Xu HM. 1984. A quantitative investigation on water storage in forest soils [dissertation]. Taichung, Taiwan: Department of Soil & Water Conservation, National Chung Hsing Univ. [in Chinese with English summary].

Yang BY, Lu HS, Chi SC. 1978. A preliminary study on the water balance in Lien-huachih experiment watersheds. Taipei, Taiwan: Taiwan Forestry Research Institute Bulletin No. 316. 12p. [in Chinese with English summary].

