

研究報告

應用集水區水文模式SWMM評估德基水庫集水區 之水資源涵養量

曾俊偉^{1,2)} 陳起鳳³⁾ 吳憶茹⁴⁾ 林鎮洋^{4,5)}

摘要

集水區之水資源涵養量計算方法雖有土壤孔隙率、水文平衡收支法、基流資料估值法及消退曲線位移法等計算方法，但多屬於靜態計算單一時期的水資源涵養量，較無法推估全年度或全集水區尺度之水資源涵養量。有鑑於此，本研究利用集水區水文模式SWMM（暴雨逕流管理模式），以集水區尺度動態模擬評估集水區內之年水資源涵養能力，以及土地利用型態變遷所造成的影響。研究區域為大甲溪上游之德基水庫集水區，藉由德基水庫集水區共4年期之土地利用型態變遷分析與相關氣象水文資料建置SWMM水文模式，進而推估集水區土地利用型態變遷對水資源涵養量的影響。研究結果顯示，集水區內之森林土地利用型態比例較多則可增加水資源涵養能力，德基水庫集水區約61%的年降雨量不隨逕流流出，而涵養於集水區中。然而，土壤中的水資源涵養量會受到如降雨量、降雨強度、地質、坡度等各種環境因素所影響，本研究針對降雨量以及土地利用型態探討水資源涵養量的變化，採用2009年及2010年度之降雨量資料進行水資源涵養量分析結果顯示，不同降雨型態對水資源涵養量的影響較土地利用型態變遷的影響大，但於同一種降雨型態下，不同土地利用型態對水資源涵養量也有明顯影響。

關鍵詞：SWMM水文模式、動態模擬、土地利用型態變遷、水資源涵養量。

曾俊偉、陳起鳳、吳憶茹、林鎮洋。2020。應用集水區水文模式SWMM評估德基水庫集水區之水資源涵養量。台灣林業科學35(2):103-21。

¹⁾ 林業試驗所集水區經營組，10066台北市南海路53號 Division of Watershed Management, Taiwan Forestry Research Institute, 53 Nanhai Rd., Taipei 10066, Taiwan.

²⁾ 國立臺北科技大學土木工程系土木與防災博士班，10608台北市忠孝東路三段一號 Department of Civil Engineering, National Taipei University of Technology, 1 Zhongxiao E. Rd., Sec. 3, Taipei 10608 Taiwan.

³⁾ 中國文化大學土地資源學系，臺北市陽明山華南路55號 Department of Land Resources, Chinese Culture University, 55 Hwa-Kang Rd., Yang-Ming-Shan, Taipei 11114, Taiwan.

⁴⁾ 國立臺北科技大學土木工程系，10608台北市忠孝東路三段一號 Department of Civil Engineering, National Taipei University of Technology, 1 Zhongxiao E. Rd., Sec. 3, Taipei 10608, Taiwan.

⁵⁾ 通訊作者 Corresponding author, e-mail: jylin@ntut.edu.tw

2019年9月送審 2020年4月通過 Received September 2019, Accepted April 2020.

Research paper

Application of a Stormwater Management Model (SWMM) to Assess the Water Resource Conservation Capability in the Deji Reservoir Watershed

Chun-Wei Tseng,^{1,2)} Chi-Feng Chen,³⁾ Yi-Ru Wu,⁴⁾ Jen-Yang Lin^{4,5)}

【 Summary 】

Water resource conservation can be calculated with soil porosity, a water balance method, base flow estimation, and a depletion curve method. However, most of these belong to static state calculations in a single period. This study used the Stormwater Management Model (SWMM). The SWMM can dynamically simulate the water resource conservation capability with land-use changes, and determine the impacts of land-use changes in the study area. The research area of the Deji Reservoir was the upstream portion of the Dajia River. Meteorological, hydrological, and land-use data were gathered, and 4 yr of land-use changes were put in the SWMM model to analyze the Deji Reservoir water resource conservation. Furthermore, impacts of land-use changes on water resources conservation changes were also estimated. Results showed that when the proportion of forest land use was higher, the resource conservation capacity was higher. About 61% of the annual rainfall was conserved in the watershed of the Deji Reservoir. Water resource conservation can be more finely calculated in the future, for example, using different kinds of trees. In addition, water resource conservation is affected by various factors, such as rainfall, the rainfall intensity, geology, slope, etc. This study used rainfall data from 2009 and 2010 to analyze water resource conservation. Results showed that the impacts of different rainfall patterns on water resource conservation were greater than those of land-use changes. Under the same rainfall pattern, different land uses also had an obvious influence on the amount of nutrients.

Key words: stormwater management model, dynamic simulation, land-use change, water resource conservation capability.

Tseng CW, Chen CF, Wu YR, Lin JY. 2020. Application of a stormwater management model (SWMM) to assess the water resource conservation capability in the Deji reservoir watershed. *Taiwan J For Sci* 35(2):103-21.

緒言

臺灣地形山多平原少，地形陡峭且河川短急，水資源難以藉由河川的蓄存而達到永續利用，而水庫則因上游崩塌嚴重致使水庫淤砂量大而縮短使用壽命；另外，因臺灣降雨在時間及空間分佈的不平均及受到氣候變遷的影響，造成部份地區水資源過剩而導致洪水災害，抑或是水資

源缺乏而導致旱災。近年來更因全球氣候變化快速，導致生態水文產生負面連鎖反應，包括集水區土地劣化、水資源短缺等問題(Liaw 2012)。一般而言，森林保育與水資源涵養能力息息相關，常言道森林是水的故鄉，水和森林相互依存。依據行政院農業委員會林務局之第三次森林資源調

查報告，在台灣國土360萬公頃的面積中，森林覆蓋率占58%，農業用地約占29%，兩項合計占全島土地總面積的87%。由此可知，森林對於水資源涵養有極高的影響。

由於近年來社會經濟的蓬勃發展，臺灣平地面積比例少，因此山坡地之森林土地的開發日益顯著，破壞森林結構並造成涵養水源的功能持續劣化，諸多研究顯示，一旦林地遭受破壞或變更，土地利用型態改變之後，土壤之水資源涵養能力便會下降，且下降的程度與變更後的土地利用型態有著密切的關聯，在降雨條件日趨極端的前提下，若土壤之水資源涵養能力下降，則可能會造成地表逕流量呈現兩極化發展，逕流量過低則可能導致乾旱的發生，而逕流量過高則會造成山坡地崩塌潛勢的上升，進而引起災害的發生並影響該區域的社會經濟發展能力。

土地利用的開發型態及程度明顯影響集水區之水文循環體系(Chou et al. 2000)，若其開發程度愈高，將造成降水入滲量愈小、洪峰到達時間減短而逕流量增加。不同土地利用型態對其水源涵養能力已經證實確有不同之影響(Chen et al. 1993, Lu and Lu 1995)。為避免過度的利用而造成水資源涵養能力的劣化並引致頻繁的災害，實有必要進一步針對土地利用型態變遷探討分析其水資源涵養能力的變化。

森林對水資源涵養的重要或者不當土地開發對水土資源的破壞，皆是明顯預期的結果。然而對水資源涵養增加或減少的程度，以量化數據評估乃是重要評估方式，對於森林的保育工作以及土地利用規劃都是重要的依據。相較於以往之集水區水資源涵養量的估算方法多只能在小區域採用經驗公式及統計方法，利用水文模式以集水區尺度進行整體評估及計算的相關研究仍然稀少，因此本研究嘗試採用美國環保署開發且已應用成熟之SWMM (Storm Water Management Model)水文模式(或稱暴雨逕流管理模式)免費軟體嘗試進行集水區之動態水文模擬，並分析瞭解水資源涵養量在集水區內不同土地利用型態下與不同降雨型態條件下的變化。目前SWMM水文模式軟體在5.0版本後已加入集水區模組，且該模式具有完整的降雨逕流

(rainfall-runoff)水理模擬機制之優勢，可呈現降雨量在集水區內的分布情況，再利用水文收支平衡法之概念，將降雨量扣除逕流量及蒸發散量，餘值即可視為集水區之水資源涵養量。本研究以德基水庫集水區為研究範圍，利用多期土地利用型態圖資分析其型態變遷，並配合集水區之水文與地文資料，利用水文模式估算集水區之降雨逕流，以探討集水區內土地利用型態變遷對水源涵養能力之影響。

材料與方法

一、研究區域與資料蒐集

(一) 研究區域概況

德基水庫集水區位於大甲溪上游，集水區面積約592平方公里，集水區範圍橫跨臺中市、南投縣及宜蘭縣，滿水位蓄水面積為454公頃，為臺灣蓄水量第四大的水庫。供水標的為農業灌溉、民生用水、防洪及發電，屬於多目標水庫，有效蓄水量共18,300萬立方公尺，為臺中及部分彰化地區的主要用水來源之一，故選擇德基水庫集水區做為研究區域(如Fig. 1)所示，研究流程如Fig. 2所示。

(二) 水文資料整理

研究區域內有梨山、環山、桃山以及合歡啞口共四個氣象觀測站，德基水庫集水區年平均降雨量約2098 mm，年平均溫度為16°C，年平均蒸發量約1024 mm，年平均相對濕度72.6% (Lin 2002)。

因降雨於空間中分布不均，因此本研究採用徐昇式多邊形法(Thiessen polygon method)求出各個雨量站於集水區的面積權重，用於後續各子集水區的平均降雨量，各雨量站於子集水區的權重如Table 1所示，各子集水區的平均降雨量則由此四個雨量站的資料加權後總計得出。

(三) 土地利用型態資料蒐集與分析

本研究蒐集研究區內之各權責單位調查產

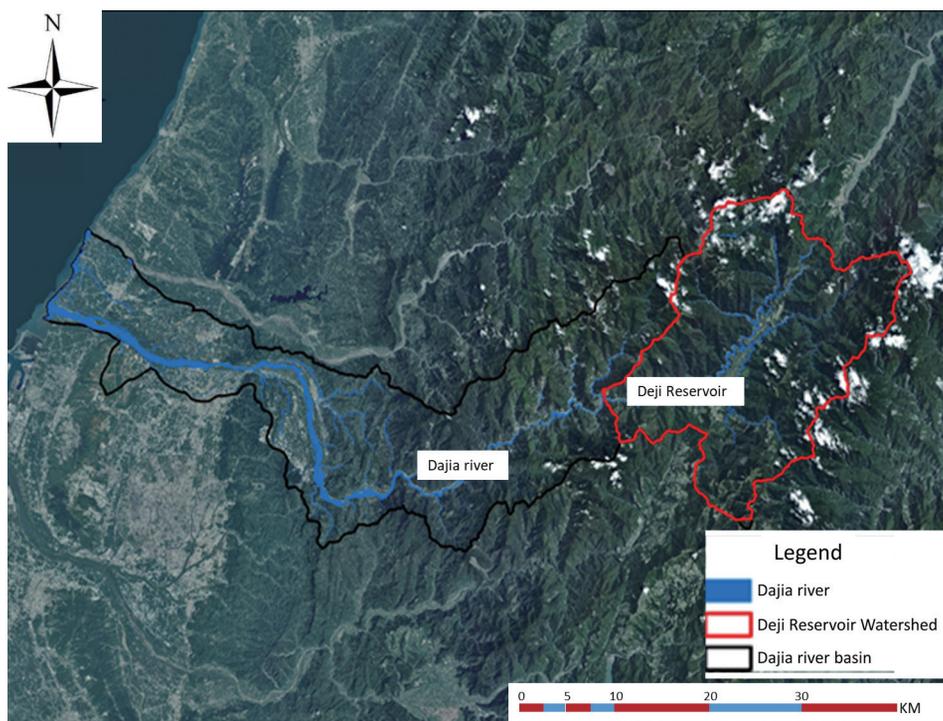


Fig. 1. Location of the Deji Reservoir watershed.

Table 1. Results of control area weights in the Thiessen polygon method for each sub-watershed

Climate station	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
Taoshan	0.156	0.000	0.000	0.624	0.940	0.000	0.239	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Huanshan	0.844	0.864	1.000	0.376	0.060	1.000	0.761	1.000	0.000	0.017	0.538	0.138
Lishan	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.342	0.090	0.462	0.862
Hehuanyakou	0.000	0.136	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.658	0.893	0.000	0.000

製之1999年、2009年、2011年及2015年等4個年度之土地利用型態資料，利用Arcgis軟體綜合套疊圖資分析彙整各單位所缺漏之部分後，另產製集水區之完整土地利用型態分布的圖層如Fig. 3所示。

本研究之土地利用型態分類係採用內政部土地使用分類系統，將土地利用形態區分為「農業使用土地」、「森林使用土地」、「交通使用土地」、「水利使用土地」、「建築使用土地」、「公共設施使用土地」、「遊憩使用土地」、「礦鹽使用土地」及「其他使用土地」等9種使用型態。本研究彙整各年度之土地

利用型態變遷比例情形如Table 2所示，以便瞭解4個年度不同土地利用型態的總比例變化。如農業使用土地增加0.21%，森林使用土地減少了4.33%，交通使用土地增加了0.21%，水利、建築、公共設施、遊憩及礦鹽則各別有微量的增減情形，其中增加最多的為其他使用土地共增加了2.4%。另外，由於不同單位測定後產出的分類會有所不同，故在輸入模式前將各種不同分類依據國土利用代碼的分類表整合。

為進一步了解不同土地利用型態的變化，本研究採用轉移矩陣法，將1999年至2015年的土地利用型態變化整理後，得到土地利用型態

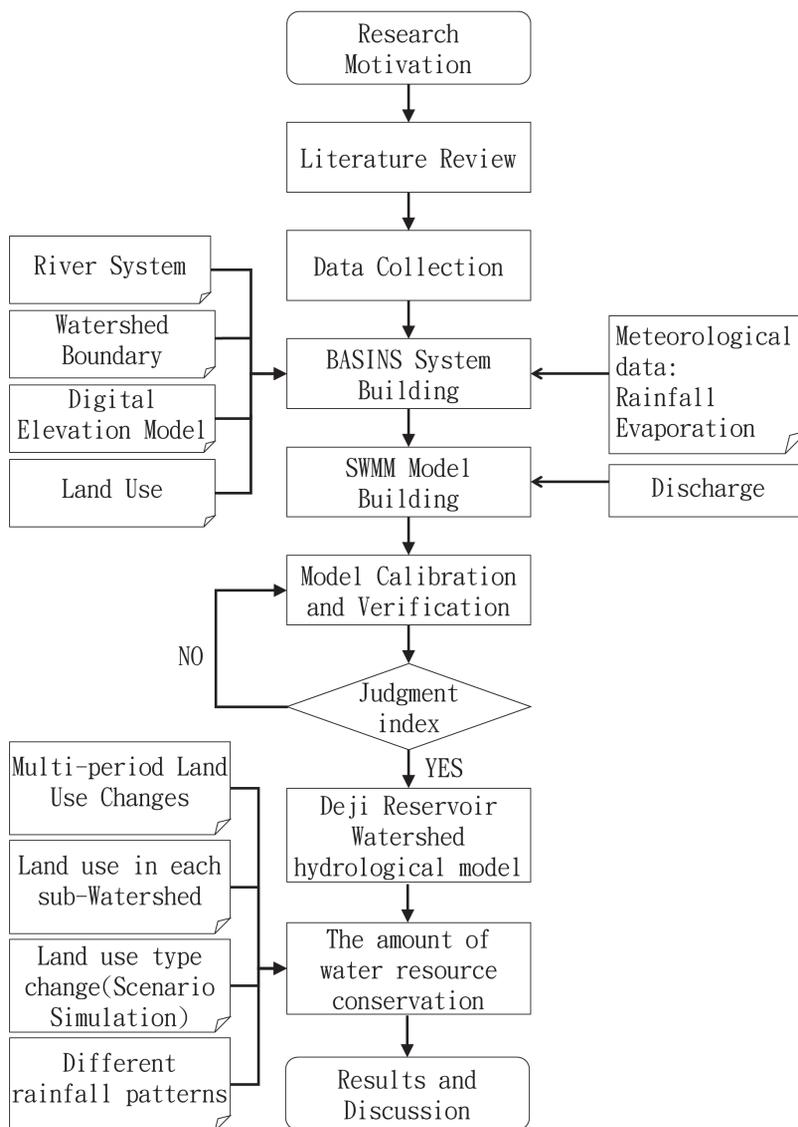


Fig. 2. Flowchart of the study.

之轉移矩陣如Table 3所示。由Table 3可見，土地利用型態變化最大的類別為農業及森林土地。其中農業的部分，1999年農業使用總面積為3,582.53公頃於2015年增加至3,691.66公頃，但1999年至2015年間一直維持農業使用土地的面積為2816.19公頃，1999年為農業使用土地於2015年轉變為森林使用土地的面積共624.95公頃，農業使用土地轉變為交通使用土地共49.67公頃，農業使用土地轉變為水利使用土地為

18.77公頃，農業使用土地轉變為建築使用土地共38.23公頃，農業使用土地轉變為公共設施使用土地共1.72公頃，農業使用土地轉變為遊憩使用土地1.34公頃，農業使用土地轉變為其他使用土地31.66公頃。

在森林使用土地型態的變化上，1999年的森林總面積為47,782.67公頃，然而於2015年時已減少為45,624.26公頃，由1999年至2015年森林轉變為農業土地利用型態則有785.21公頃，

一直為森林土地且未改變的面積有44,225.60公頃，改變為交通使用土地有84.37公頃，改變為水利使用土地有0.17公頃，改變為建築使用有2.81公頃，改變為公共設施使用有0.27公頃，改

變為遊憩使用有0.70公頃，改變為其他使用土地有0.66公頃。

由土地利用型態轉移矩陣可知不同型態的土地利用之間會互相轉變，從1999年原始使用

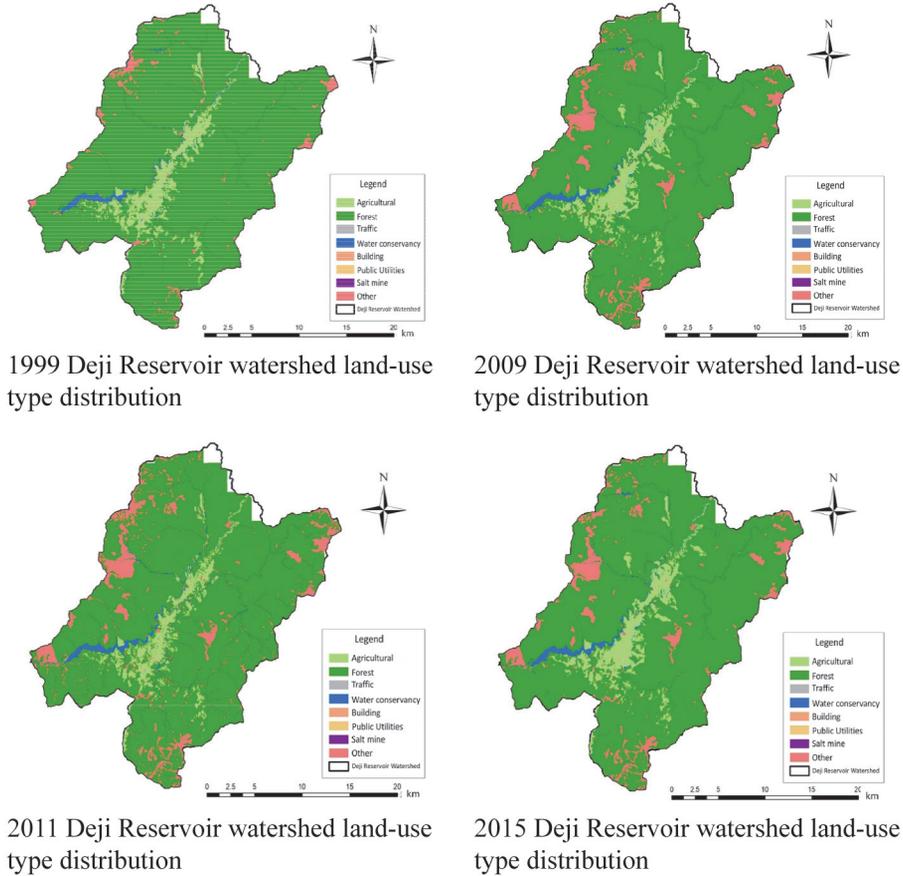


Fig. 3. Land-use map in 1999 merged by this study.

Table 2. Ratios of land use in different years

Land use type	1999	2009	2011	2015
Agricultural	6.65%	6.86%	6.86%	6.86%
Forest	89.06%	84.78%	84.79%	84.73%
Traffic	0.12%	0.33%	0.33%	0.33%
Water conservancy	1.65%	1.76%	1.76%	1.77%
Building	0.11%	0.15%	0.15%	0.15%
Public utilities	0.00%	0.01%	0.01%	0.01%
Recreation	0.00%	0.01%	0.01%	0.01%
Salt mine	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%
Others	2.40%	6.10%	6.10%	6.16%

Table 3. Transfer matrix of land use from 1999 to 2015 (Unit: ha)

Land use type	Agricultural	Forest	Traffic	Water conservancy	Building	Public utilities	Recreation	Salt mine	Others	1999 total
Agricultural	2816.19	624.95	49.67	18.77	38.23	1.72	1.34	-	31.66	3582.53
Forest	785.21	44,225.60	84.37	140.30	8.65	0.37	-	-	2538.17	47,782.67
Traffic	15.67	10.95	34.15	0.17	2.81	0.27	0.70	-	0.66	65.38
Water conservancy	29.65	75.67	0.71	773.58	0.73	-	-	-	4.76	885.11
Building	8.43	9.85	2.43	0.01	26.66	1.92	0.77	-	7.69	57.77
Public utilities	-	-	-	-	0.12	-	-	-	0.12	-
Recreation	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Salt mine	-	1.44	0.32	0.30	1.25	-	-	-	0.15	3.46
Others	36.52	675.81	4.20	19.59	1.34	0.34	1.71	-	731.54	1471.06
2015 total	3691.66	45,624.26	175.86	952.73	79.68	4.75	4.52	-	3314.63	53,848.10

型態轉變成2015年的使用型態，由各類別轉變為不同類別中，面積轉變最大者分別為：農業轉變為森林共624.95公頃，森林轉變為其他共2538.17公頃，交通轉變為農業最多共15.67公頃，水利轉變為森林共75.67公頃，建築轉變為森林共9.85公頃，遊憩轉變為森林共1.44公頃，其他轉變為森林共675.81公頃。

從上可得知森林型態轉變為其它使用型態的面積最大，推測原因可能為921地震的關係，造成不少崩塌地，而崩塌地係歸類在本研究之其他使用土地型態類別。但是從土地轉移矩陣也看到，其他用地有675公頃轉變為森林，可能是崩塌地治理、植樹造林等措施施行結果。

二、水文模式介紹

本研究利用水文數值模式進行德基水庫集水區多期土地利用型態變遷分析資訊，數值模式採用國內水庫集水區常用的Better Assessment Science Integrating Point and Nonpoint Sources (簡稱BASINS模式)進行資料前處理再以SWMM模式建立水文模型，北區水資源局曾應用BASINS模式於石門水庫集水區之研究(Lin 2015)，臺北翡翠水庫管理局則曾應用SWMM模式於翡翠水庫集水區研究(Lin 2013)，以下針對模式進行初步介紹。

(一) BASINS集水區管理模式

BASINS，是由美國環保署(簡稱USEPA)於1996年結合地理資訊系統(geographic information System, 簡稱GIS)、集水區資料庫及多種水質模擬評估工具所發展的集水區多目標環境分析系統。BASINS模式可應用在不同尺度下進行模擬的工作、水體進行總量管制所需的點源及非點源污染分析，達成集水區水質分析之目標。其最大特點在於採整合式的系統，利用GIS整理地理利用圖層，如數值地形模型圖(DEM)、河系圖、集水區邊界圖及土地利用型態圖層等，並計算模式所需之地文與水文資訊，包含高程、坡度、透水與不透水比例等，利用BASINS作為聯繫整個系統的工具，克服資料常需以不同的系統進行處理，而無整合性且費時之問題，所有模式之所需皆可在此平台完成後匯出至BASINS所支援之水質評估模式中，如HSPF、SWMM、SWAT、WASP及PLOAD等。

(二) SWMM模式介紹

集水區EPA-SWMM模式是一套動態降雨逕流模擬模式，可經由單一水文事件或長期水文連續事件的降雨來模擬集水區內的逕流傳輸現象。模式概念分為兩個區塊，分別為集水區區塊和傳輸路徑區塊，在集水區區塊將排水流域劃分為數個子集水區，分別給予各集水區之特

性如集水區面積、平均坡度、透水及不透水面積比例等等，子集水區在降雨發生後，其地表逕流會發生入滲現象進而產生滲漏現象進入地下水含水層；傳輸區塊則由節點與連線構成，功能為利用渠道、管線、抽水機以及人孔蓋、滯洪池等導水、儲水設施傳輸子集水區之逕流。SWMM模式由多個可視化物件組成，包含子集水區、人孔節點、傳輸路徑、雨量站及最終排放口等。非可視化物件包含污染物、BMPs設施、地下水、氣象資料及土地利用型態等，操作介面如Fig. 4。

1. 地理資訊資料

BASINS可將諸多資料進行整合，如土地利用型態圖層、數值高程地形圖、河系圖及集水區邊界圖等。因此在進行模式建置作業前需先蒐集目標區域多年土地利用型態情形，經系統計算後之集水區資訊整合加入SWMM模式使用。

2. 氣候、水文資料

氣象資料可以為小時為單位，亦可使用日、月為單位之資料，包括降雨、蒸發量、溫度、風速、日輻射、露點溫度等資料，由於逕流與降雨關息息相關，因此以降雨資料最為重

要，因不同的降雨資料會造成不同的逕流量變化。

三、水文模式之率定及驗證統計指標

水文模式經建置後，必須先經過模式率定(calibration)以及驗證(verification)過程，對於模式結果滿意或可接受後，才能應用於後續之模擬分析。此率定及驗證主要配合前人經驗所採用之相關統計指標協助判斷。本研究使用之統計指標為決定係數(R^2)、及平均百分比(MAPE)等，其範圍值與接受值如表Table 4所列。公式說明如下：

(一) 決定係數(R^2)

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

式中，SSR：迴歸平方和，SST：誤差平方和。

(二) 平均百分比(MAPE)

$$MAPE = \frac{\sum_i^n \frac{|X_i - Y_i|}{Y_i}}{n} \times 100\%$$

式中， X_i ：第*i*個模擬值， Y_i ：第*i*個實測值， n ：模擬值與實測值的總樣本數。

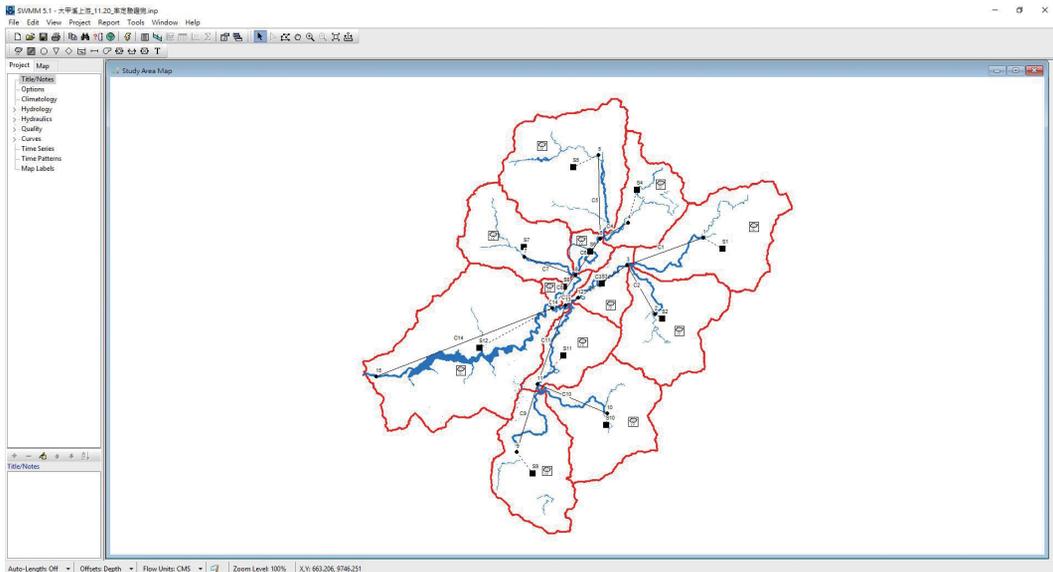


Fig. 4. Operational interface of SWMM.

四、水資源涵養量推估

臺灣在研究森林水資源涵養量推估的方式，常見方式為土壤粗孔隙率蓄水量估算法、水文收支平衡法、基流量資料估算法及退水曲線位移法等，上述方式多為經驗公式及應用統計迴歸分析推求其量體，計算耗時且計算結果多只能小區域具代表性，無法推估應用至集水區尺度。本研究為應用SWMM水文模式模擬計算集水區之逕流量，再以水文收支平衡法推估集水區的整體水資源涵養量，其優點有計算較為簡便及可再加以分析集水區內之不同土地利用型態對造成集水區水資源涵養量之影響趨勢。另外，由於各子集水區的降雨量不同，因此水資源涵養比為水資源涵養量與年降雨量的比值，用以表示不同降雨量的影響。公式說明如下：

(一) 水文平衡、收支法(water budget method)

$$\Delta S = Q_P - Q_{IE} - Q_{ET}$$

式中：

ΔS 水資源涵養量(mm)

Q_P 降雨量(mm)

Q_{IE} 逕流量(mm)

Q_{ET} 蒸發散量(mm)

(二) 水資源涵養比

$$S_{rate} = \frac{\Delta S}{Q_p}$$

式中：

S_{rate} 水資源涵養比(%)

ΔS 水資源涵養量(mm)

Q_p 降雨量(mm)

結果

一、水文數值模型建立

本研究利用上述之氣象、水文及地文資料等資料，針對德基水庫集水區應用BASINS之地理資訊系統平台將其切割為12個子集水區如Fig. 5所示，德基水庫子集水區的河道參數、子集水區特徵、坡度等透過BASINS切割好的範圍，放入GIS計算各子集水區的不透水面積等參數，再將相關參數放入SWMM模式後進行流量率定驗證。SWMM模式相關參數表如Table 5所示，這些於模式相關參數中屬於影響較大的參數，故設定時須特別注意是否符合實際情形。將不同年份各子集水區的土地利用型態面積比整理後成果放於Appendix。

二、水文數值模型率定驗證

流量率定驗證採用的流量站為位於七家灣溪與有勝溪匯流後的七家灣站，率定年份使用2009年(如Fig. 6)，驗證年份使用2010年(如Fig. 7)。

其流量站率定結果之決定係數 $R^2 = 0.87$ ，平均百分比MAPE = 36%，驗證結果之決定係數 $R^2 = 0.67$ ，平均百分比MAPE = 32%，成果整理如Table 6，結果均判定在可接受範圍之內，其中決定係數 R^2 可接受範圍為 > 0.5 ，平均百分比MAPE可接受範圍 $< 50\%$ (合理預測)，由判定指標證明SWMM水文模式在水文模擬方面所模擬之數值與實際值接近，並認定此套參數的可使用性。

流量模擬結果符合率定驗證標準後，再進行不同年度土地利用型態模擬，以評估不同

Table 4. Statistical indicators for model verification

Judgment index	Range	Accepted value	References
Coefficient of determination (R^2)	0~1	> 0.5	Wahyu (2010)
Mean Absolute Percentage Error (MAPE)	-1~1	$< 15\%$ Highly accurate prediction $10\% \sim 20\%$ Good prediction $20\% \sim 50\%$ Reasonable prediction $> 50\%$ Inaccurate predictionj	Lewis (1982)

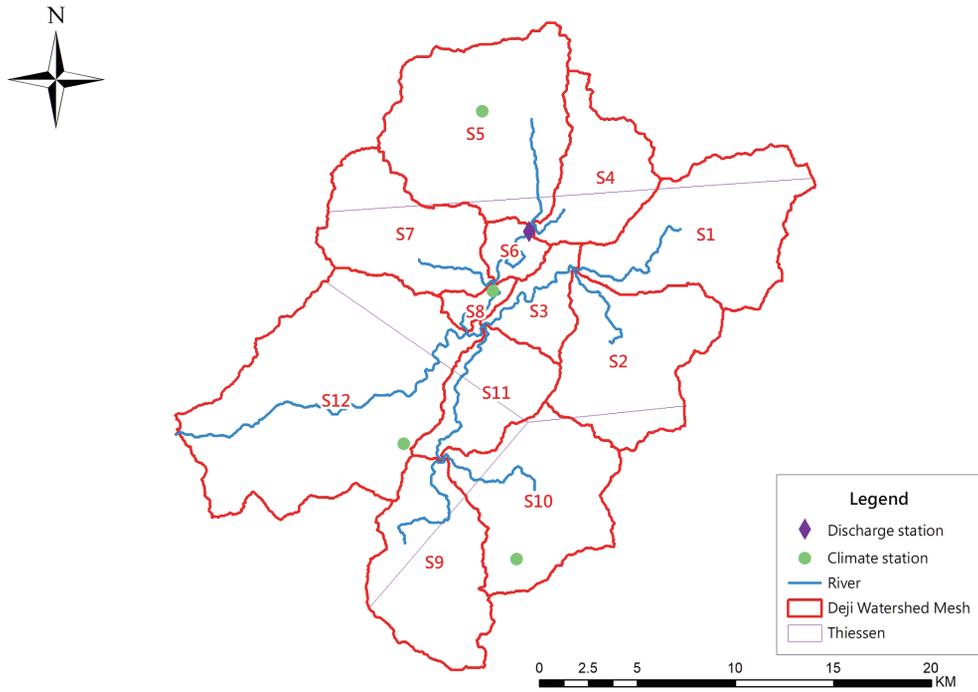


Fig. 5. Distribution of sub-watersheds and monitoring stations.

Table 5. Model parameters used in watershed characteristics

Parameters	Descriptions	Ranges in this study	Unit	
Width	Width of overland flow (depends on the shape of watershed)	2858 ~ 11,676	m	
%slope	Average slope	51 ~ 69	%	
%imperv	Percentage of impervious area	10 ~ 14	%	
N-imperv	Manning N coefficient of impervious area	0.01	Unitless	
N-perv	Manning N coefficient of pervious area	0.51 ~ 0.79	Unitless	
Dstore-imperv	Depth of depression in impervious area	0.05	mm	
Dstore-perv	Depth of depression in pervious area	0.05	mm	
%zero-imperv	Percentage of zero depression area in impervious area	85 ~ 92	%	
Subarea Routing	1. Imperv: Runoff from permeable to impermeable and to the outlet	Outlet	Unitless	
	2. Perv: Runoff from impermeable to permeable and to the outlet			
	3. Outlet: Runoff direct from permeable and impermeable to the outlet			
Percent Routed	Percent of runoff routed between sub-areas	100	%	
Infiltration	Infiltration method: Horton	Decay Constant	4	1/hr
		Drying Time	7	days

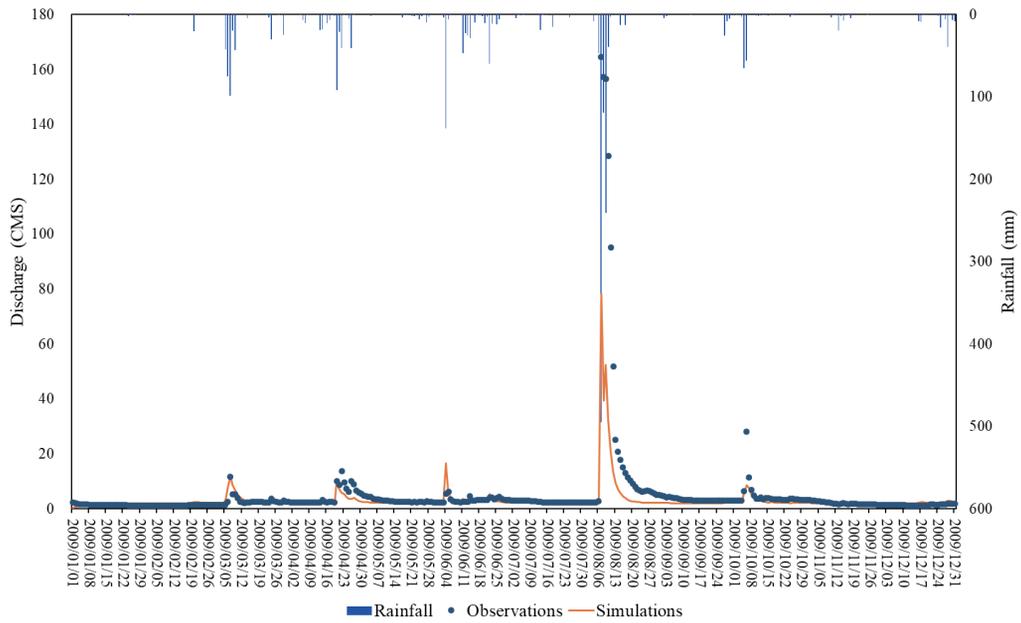


Fig. 6. Model calibration of flow simulations (2009 data).

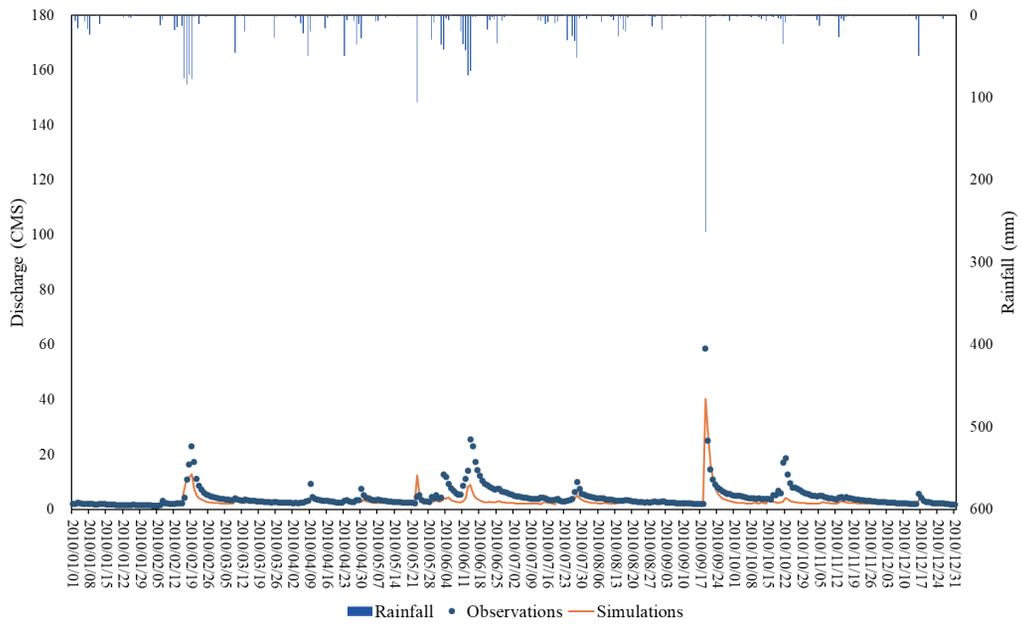


Fig. 7. Model verification of flow simulations (2010 data).

Table 6. Results of SWMM simulations

Judgment index	Calibration	Verification
Coefficient of determination (R^2)	0.87	0.67
Mean Absolute Percentage Error (MAPE)	36%	32%

年份水資源涵養量。水資源涵養量為年總降雨量扣除年總逕流量及年總蒸發散量後之值，進行探討不同土地利用型態對水資源涵養量的影響。降雨量年份採用2009年及2010年，以此兩年降雨情形評估1999年、2009年、2011年及2015年的土地利用型態下之水資源涵養量，計算結果顯示德基水庫集水區2009年平均降雨量為2266 mm，2010年平均降雨量為2262 mm。

討論

由Fig. 6及Fig. 7同時可得知此兩個年度降雨情形，成果將分三部份分析，各別為水資源涵養量總量變化、森林用地對水資源涵養量影響及同一個子集水區土地利用型態改變對水資源涵養量的影響。另外由Fig. 6及Fig. 7中可以看出於高流量的情形下實際流量較模擬值大的情形，可能誤差來於本次模擬時並未考慮地下水的影響，僅探討降雨後地表逕流及入滲等影響，因此導致模擬值與實測值的落差。

一、各子集水區之水資源涵養量變化分析

將各子集水區的降雨量及不同年份的水資源涵養量列出，結果如Table 7及Table 8所示。整體而言，水資源涵養量於2009年之後並無明顯變化，然而由各子集水區來看，在森林使用土地面積比例下降較多的S7 (92%降低至78%)

及S11 (76%降低至65%)區域，在2009年降雨情形下S7的水資源涵養量由1191.78 mm降低至1157.14 mm，2010年降雨情形下S7的水資源涵養量由1520.53 mm降低至1475.68 mm。S11的水資源涵養量在2009年降雨情形下由1242.37 mm降低至1216.28 mm，在2010年降雨情形下由1655.35 mm降低至1620.35 mm。

相對於其他子集水區森林使用土地面積比例增加，S8的森林比例則是屬於下降的情況(60%降至55%)，故在2009年降雨情形下，水資源涵養量由1198.43 mm減少至1195.99 mm，在2010年降雨情形下，水資源涵養量由1506.66 mm減少至1503.59 mm。

將水資源涵養量除以降雨量可得到水資源涵養量比如Table 9所示，分析結果顯示2009年的水資源涵養量比例較低約52%，2010年的水資源涵養量比例較高約69%，兩年平均涵養量約61%，此兩年的降雨量差異不大(2010年降雨量僅較2009年少4 mm)，然檢視此兩年之降雨情形可得知，2010年的降雨強度較小，其水資源涵養量較高。

二、森林使用土地型態對水資源涵養量之影響

將德基水庫不同年份各子集水區的森林面積比例整理後如Table 10所示，子集水區S1、S2、S5及S10其森林面積佔比高於90%以上，S6及S8則屬於森林面積佔比低的子集水區，S6森林用地面積比例約55%，S8森林用地面積比例約61%。

Table 7. Water resource conservation under different land use scenario and 2009 rainfall data (Unit: mm)

Year	S1	S2	S3	S4	S5	S6
2009 Rainfall	2385.04	2482.37	2522.50	1971.96	1693.11	2522.50
1999 Conservation	1,196.69	1,276.96	1,228.55	1,089.82	943.02	1,208.20
2009 Conservation	1,183.82	1,275.80	1,221.63	1,083.13	943.07	1,202.90
2011 Conservation	1,183.83	1,275.82	1,221.64	1,083.13	942.92	1,202.91
2015 Conservation	1,183.69	1,275.82	1,221.64	1,082.78	942.11	1,202.91
Year	S7	S8	S9	S10	S11	S12
2009 Rainfall	2311.45	2522.50	2287.34	2247.55	2468.04	2420.81
1999 Conservation	1,191.78	1,198.43	1,316.58	1,329.97	1,242.37	1,268.19
2009 Conservation	1,157.12	1,195.99	1,287.92	1,315.81	1,216.27	1,248.97
2011 Conservation	1,157.14	1,195.99	1,288.09	1,315.79	1,216.28	1,249.11
2015 Conservation	1,157.14	1,195.99	1,288.09	1,315.79	1,216.28	1,249.25

比較森林使用土地型態在高面積佔比與低面積佔比的子集水區(如S6、S8)水資源涵養量，如Table 11及Table 12所示，在2009年降雨情況下高森林土地面積佔比的子集水

區水資源涵養量比介於50%至59%之間，低面積佔比的子集水區如S6及S8，水資源涵養量比則介於47%至48%之間。在2010年降雨情況下，森林使用土地型態在高面積佔比的

Table 8. Water resource conservation under different land use scenario and 2010 rainfall data (Unit: mm)

Year	S1	S2	S3	S4	S5	S6
2010 Rainfall	2233.75	2379.99	2338.50	1918.96	1706.47	2338.50
1999 Conservation	1,549.75	1,614.06	1,543.46	1,453.95	1,350.35	1,518.46
2009 Conservation	1,533.67	1,612.57	1,534.90	1,445.17	1,350.40	1,511.77
2011 Conservation	1,533.69	1,612.59	1,534.91	1,445.19	1,350.21	1,511.79
2015 Conservation	1,533.51	1,612.59	1,534.91	1,444.71	1,348.99	1,511.79
Year	S7	S8	S9	S10	S11	S12
2010 Rainfall	2177.67	2338.50	2553.76	2615.37	2357.19	2373.40
1999 Conservation	1,520.53	1,506.66	1,773.17	1,769.77	1,655.35	1,751.38
2009 Conservation	1,475.65	1,503.58	1,739.34	1,750.85	1,620.35	1,726.18
2011 Conservation	1,475.68	1,503.59	1,739.56	1,750.82	1,620.35	1,726.37
2015 Conservation	1,475.68	1,503.59	1,739.56	1,750.82	1,620.35	1,726.57

Table 9. Summary of water resource conservation rate in different years and different rainfall data

Year	2009	2010	Average conservation ratio
	Rainfall conservation ratio (Average 2,266 mm)	Rainfall conservation ratio (Average 2,262 mm)	
1999	52.3%	69.9%	61.1%
2009	51.7%	69.1%	60.4%
2011	51.7%	69.1%	60.4%
2015	51.7%	69.1%	60.4%

Table 10. Proportion of forest land use in each sub-watershed

Sub-watershed	1999 ratio	2009 ratio	2011 ratio	2015 ratio
S1	95%	91%	91%	91%
S2	99%	98%	98%	98%
S3	75%	71%	71%	71%
S4	92%	88%	88%	88%
S5	93%	93%	93%	92%
S6	61%	55%	55%	55%
S7	92%	78%	78%	78%
S8	63%	61%	61%	61%
S9	90%	84%	84%	84%
S10	95%	93%	93%	93%
S11	76%	65%	65%	65%
S12	82%	78%	78%	78%

Table 11. Water resource conservation ratio in each sub-watersheds with 2009 year rainfall (Unit:%)

Year	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
1999	50.18	51.44	48.70	55.27	55.70	47.90	51.56	47.51	57.56	59.17	50.34	52.39
2009	49.64	51.39	48.43	54.93	55.70	47.69	50.06	47.41	56.31	58.54	49.28	51.59
2011	49.64	51.40	48.43	54.93	55.69	47.69	50.06	47.41	56.31	58.54	49.28	51.60
2015	49.63	51.40	48.43	54.91	55.64	47.69	50.06	47.41	56.31	58.54	49.28	51.60

Table 12. Water resource conservation ratio in each sub-watersheds with 2010 year rainfall (Unit:%)

Year	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
1999	69.38	67.82	66.00	75.77	79.13	64.93	69.82	64.43	69.43	67.67	70.23	73.79
2009	68.66	67.76	65.64	75.31	79.13	64.65	67.76	64.30	68.11	66.94	68.74	72.73
2011	68.66	67.76	65.64	75.31	79.12	64.65	67.76	64.30	68.12	66.94	68.74	72.74
2015	68.65	67.76	65.64	75.29	79.05	64.65	67.76	64.30	68.12	66.94	68.74	72.75

子集水區水資源涵養量比介於68%至79%之間，低面積佔比的子集水區水資源涵養量比介於64%至65%之間。

由上述結果可得知，在降雨量差異不大且降雨強度不強的情形下，森林使用土地面積佔比高的子集水區，其水資源涵養量會較森林使用土地面積佔比低的子集水區高。

三、子集水區之土地利用型態改變對水資源涵養量之影響

由於不同土地利用型態變化情形複雜，欲比較相同子集水區其土地利用型態變化情形對水資源涵養量之影響，則需針對不同情形加以探討。

由於此集水區森林使用土地面積佔比多呈現減少的情況，故選擇森林使用土地面積減少最多的子集水區S7進行個別分析及討論。S7的森林使用土地面積比例由92%降低至78%，如Fig. 8所示，可以得知在此子集水區內，當森林使用土地面積減少時水資源涵養量則相對減少，此情況在其他的子集水區亦呈現相同趨勢。

而在此區農地有增加及減少的情形發生，針對農地面積的土地涵養量變化如Fig. 9及Fig. 10所示。農地增加最多的子集水區為S6，由33%增加至39%，水資源涵養量由1208 mm下降至1203 mm，而農地面積減少最多的子集水區為S9，由5%下降至4%，然而水資源涵養量仍

由1317 mm下降至1288 mm，觀察此子集水區的土地利用型態變化，雖然農業使用土地面積減少，但森林使用土地面積也同樣減少，故水資源涵養量呈現下降趨勢。

結論

一、德基水庫集水區森林使用土地以1999年最多，在往後之年份呈現逐漸下降，而以其他使用土地面積上升最多。德基水庫集水區平均約61%的年降雨量涵養於集水區，其餘則為逕流流出。水資源涵養量與當年降雨總量與型態有關，降雨強度對水資源涵養量的影響較降雨量之多寡明顯。整體而言，在森林使用土地比例較多之子集水區，其水資源涵養量較比例少之子集水區高，但此結果仍會受土壤條件(不同土壤質地、集水區坡度或地形等)所影響。

二、同一子集水區土地利用型態改變，森林使用土地之面積比例增加，其水資源涵養量亦呈現增加趨勢；農業使用土地之面積比例增加，水資源涵養量則呈現減少趨勢，但不同子集水區因部分地理條件不同，故各個森林使用土地對於水資源涵養量的先天條件與可涵養量體自然

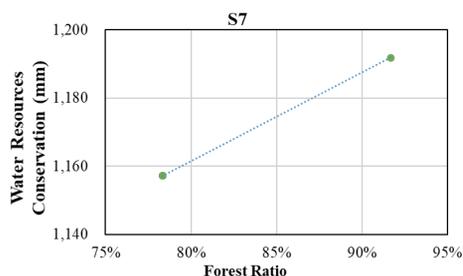


Fig. 8. Relationship between forest area and water resource conservation in sub-watershed S7.

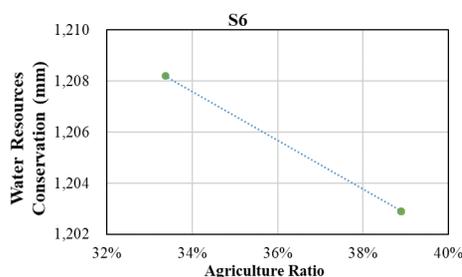


Fig. 9. Relationship between agricultural area and water resource conservation in sub-watershed S6.

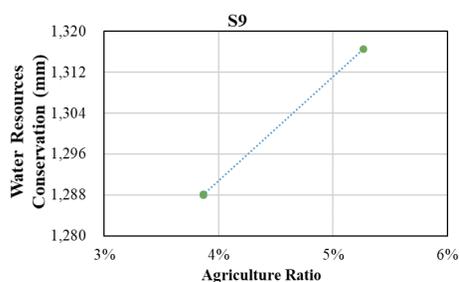


Fig. 10. Relationship between agricultural area and water resource conservation in sub-watershed S9.

有所差異，例如德基水庫之S7子集水區中，森林減少1%，水資源涵養量減少2.6 mm，但在S6子集水區中，森林減少1%，水資源涵養量僅減少0.8 mm。

三、本研究嘗試應用美國環保署開發之免費集水區水文模式探討大空間尺度的集水區降雨逕流量及水資源涵養量，但此模式對於森林水文循環過程中所產生局部

的精細現象敏感度較低，例如不同樹種之影響、樹冠截流作用或林地內地表粗糙度等參數，建議未來應用時可增加調查森林水文現象之實際參數值加入模式模擬，以改善此模式對於森林之水資源涵養評估的準確度。

謝誌

本研究承行政院農業委員會107農科-17.1.2-森-G1科技計畫經費補助，謹此致謝。

引用文獻

- Chen HH, Xie YN, Wang YS. 1993.** Pollution assessment by herbicide TOK disappear and move impact in groundwater. *Taiwan J Agric Chem Sci* 31(1):18-27. [in Chinese].
- 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 Sens* 5(3):57-74. [in Chinese with English summary].
- Lewis EB. 1982.** Control of body segment differentiation in *Drosophila* by the bithorax gene complex. *Prog Clin Biol Res Pt A*:269-88. DOI:10.1007/978-1-4020-6345-9_12.
- Liaw SC. 2012.** Summary of 3rd International Conference on Forest and Water in Changing Environment. *For Res News*19(6):59-62. [in Chinese].
- Lin JY. 2013.** Reservoir protective strip planning and pollution source survey in the Feitsui Reservoir. [Research Project] Taipei, Taiwan: Taipei Feitsui Reservoir Administration, Taipei City Government. 182 p. [in Chinese].
- Lin JY. 2015.** Eutrophication reservoir water quality improve project. [Research Project] Taipei, Taiwan: Environmental Protection Administration, Executive Yuan, R.O.C. 338 p. [in Chinese].

Lin WT. 2002. Automated watershed delineation for spatial information extraction and slopeland sediment yield evaluation [dissertation]. Taichung, Taiwan: Department of Soil and Water Conservation, National Chung-Hsing Univ. 174 p. [in Chinese with English summary].

Lu HS, Lu SY. 1995. Application of an antecedent precipitation index model in estimating

stormflow hydrographs for the Lien-hua-chi Experimental Watershed no. 3 in central Taiwan. Bull Taiwan For Res Inst 10(4):493-500. [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 Devel Coop 16(2):81-100.

Appendix Proportion of land use area in each sub-watersheds (1/3)

Name	Land use type	1999 Ratio	2009 Ratio	2011 Ratio	2015 Ratio
S1	Agricultural	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
S1	Forest	95.19%	91.06%	91.06%	91.02%
S1	Traffic	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
S1	Water conservancy	0.66%	0.57%	0.57%	0.57%
S1	Building	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
S1	Public utilities	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
S1	Recreation	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
S1	Salt mine	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
S1	Others	4.14%	8.37%	8.37%	8.41%
S2	Agricultural	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
S2	Forest	98.80%	98.47%	98.47%	98.47%
S2	Traffic	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
S2	Water conservancy	0.43%	0.39%	0.39%	0.39%
S2	Building	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
S2	Public utilities	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
S2	Recreation	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
S2	Salt mine	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
S2	Others	0.77%	1.13%	1.13%	1.13%
S3	Agricultural	22.97%	26.12%	26.12%	26.12%
S3	Forest	75.03%	71.13%	71.13%	71.13%
S3	Traffic	0.03%	0.18%	0.18%	0.18%
S3	Water conservancy	1.56%	1.73%	1.73%	1.73%
S3	Building	0.00%	0.19%	0.19%	0.19%
S3	Public utilities	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
S3	Recreation	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
S3	Salt mine	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
S3	Others	0.42%	0.65%	0.65%	0.65%
S4	Agricultural	5.32%	8.36%	8.37%	8.36%
S4	Forest	91.88%	88.48%	88.48%	88.32%
S4	Traffic	0.18%	0.45%	0.45%	0.45%
S4	Water conservancy	2.14%	1.66%	1.66%	1.67%
S4	Building	0.08%	0.12%	0.12%	0.12%
S4	Public utilities	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
S4	Recreation	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
S4	Salt mine	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
S4	Others	0.40%	0.92%	0.92%	1.07%

Appendix Proportion of land use area in each sub-watersheds (2/3)

Name	Land use type	1999 Ratio	2009 Ratio	2011 Ratio	2015 Ratio
S5	Agricultural	1.82%	1.43%	1.39%	1.37%
S5	Forest	92.75%	92.62%	92.64%	92.31%
S5	Traffic	0.09%	0.01%	0.01%	0.01%
S5	Water conservancy	0.77%	0.89%	0.89%	0.90%
S5	Building	0.03%	0.00%	0.00%	0.00%
S5	Public utilities	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
S5	Recreation	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
S5	Salt mine	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
S5	Others	4.55%	5.05%	5.06%	5.40%
S6	Agricultural	33.37%	38.90%	38.90%	38.90%
S6	Forest	61.49%	54.67%	54.67%	54.67%
S6	Traffic	0.57%	0.70%	0.70%	0.70%
S6	Water conservancy	2.76%	4.53%	4.53%	4.53%
S6	Building	0.16%	0.58%	0.58%	0.58%
S6	Public utilities	0.00%	0.01%	0.01%	0.01%
S6	Recreation	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
S6	Salt mine	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
S6	Others	1.65%	0.62%	0.62%	0.62%
S7	Agricultural	0.35%	1.79%	1.79%	1.79%
S7	Forest	91.68%	78.35%	78.35%	78.34%
S7	Traffic	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
S7	Water conservancy	0.80%	0.89%	0.89%	0.89%
S7	Building	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
S7	Public utilities	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
S7	Recreation	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
S7	Salt mine	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
S7	Others	7.17%	18.98%	18.98%	18.99%
S8	Agricultural	30.46%	32.38%	32.38%	32.38%
S8	Forest	62.93%	61.45%	61.45%	61.45%
S8	Traffic	0.79%	0.88%	0.88%	0.88%
S8	Water conservancy	3.28%	3.42%	3.42%	3.42%
S8	Building	1.29%	1.38%	1.38%	1.38%
S8	Public utilities	0.00%	0.19%	0.19%	0.19%
S8	Recreation	0.00%	0.02%	0.02%	0.02%
S8	Salt mine	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
S8	Others	1.24%	0.27%	0.27%	0.27%

Appendix Proportion of land use area in each sub-watersheds (3/3)

Name	Land use type	1999 Ratio	2009 Ratio	2011 Ratio	2015 Ratio
S9	Agricultural	5.27%	3.87%	3.87%	3.87%
S9	Forest	90.11%	84.27%	84.27%	84.27%
S9	Traffic	0.19%	0.67%	0.67%	0.67%
S9	Water conservancy	0.84%	0.54%	0.54%	0.54%
S9	Building	0.28%	0.09%	0.09%	0.09%
S9	Public utilities	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
S9	Recreation	0.00%	0.03%	0.03%	0.03%
S9	Salt mine	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
S9	Others	3.31%	10.54%	10.54%	10.55%
S10	Agricultural	3.74%	2.76%	2.76%	2.76%
S10	Forest	94.58%	92.95%	92.95%	92.95%
S10	Traffic	0.01%	0.78%	0.78%	0.78%
S10	Water conservancy	0.96%	0.91%	0.91%	0.91%
S10	Building	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%
S10	Public utilities	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
S10	Recreation	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
S10	Salt mine	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
S10	Others	0.70%	2.60%	2.60%	2.60%
S11	Agricultural	21.78%	26.29%	26.29%	26.29%
S11	Forest	76.25%	64.60%	64.60%	64.60%
S11	Traffic	0.17%	0.30%	0.30%	0.30%
S11	Water conservancy	1.45%	1.68%	1.68%	1.68%
S11	Building	0.05%	0.21%	0.21%	0.20%
S11	Public utilities	0.00%	0.02%	0.02%	0.02%
S11	Recreation	0.00%	0.01%	0.01%	0.01%
S11	Salt mine	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
S11	Others	0.30%	6.90%	6.90%	6.90%
S12	Agricultural	11.89%	10.98%	10.98%	10.98%
S12	Forest	82.37%	77.74%	77.76%	77.74%
S12	Traffic	0.26%	0.53%	0.50%	0.50%
S12	Water conservancy	4.02%	4.56%	4.56%	4.58%
S12	Building	0.26%	0.43%	0.44%	0.44%
S12	Public utilities	0.00%	0.03%	0.03%	0.03%
S12	Recreation	0.00%	0.02%	0.02%	0.02%
S12	Salt mine	0.03%	0.00%	0.00%	0.00%
S12	Others	1.17%	5.70%	5.71%	5.70%

