

應用遙測技術與大氣環流模式探討氣候變遷對台東集水區蒸發散之影響

鍾綉雯¹ 吳治達^{2*} 林士淵³ 林俊德⁴ 莊永忠⁵

(收件日期：民國105年2月24日、接受日期：民國105年6月21日)

【摘要】氣候變遷已嚴重衝擊地球上水文循環系統之動態平衡，蒸發散為地表水回歸大氣之最主要機制，故如何評估氣候變遷對於蒸發散之影響，對水資源管理實至為重要。近年來隨著遙感探測技術的進步，結合衛星影像與地表能量平衡公式以可有效推估大尺度蒸發散量之變化。基於此，本研究採用美國太空總署(National aeronautics and space administration, NASA)透過MODIS衛星影像所推估之全球地表蒸發散資料為材料，分析台東集水區蒸發散之時空變異；進一步建立蒸發散與溫度、降雨等氣象變數之迴歸模式後；並結合TaiWAP氣候變遷模擬程式、大氣環流模式(General circulation model, GCM)、以及IPCC第五次評估報告所設定之代表濃度途徑(Representative concentration pathways, RCPs)之情境資料，以推估在氣候變遷影響下，台東集水區未來蒸發散的可能變化趨勢。研究結果指出，台東集水區在2003~2013年間蒸發散於夏季最旺盛，冬季較低，而研究區內之蒸發散亦具有空間分布之特性；此外，氣溫與蒸發散具有顯著正相關($p < 0.01$)，模式之 R^2 為0.75。至於未來氣候變遷之模擬結果顯示，四種未來暖化情境推估所得之蒸發散均較現況為高，其中又以RCP8.5之蒸發散量最大，由此可知，溫室效應與全球暖化確實會影響區域蒸發散量，進而衝擊水文循環，相關成果可供相關部門進行綠資源與水資源管理之參考。

【關鍵詞】蒸發散、氣候變遷、MODIS、遙感探測、大氣環流模式。

¹ 國立嘉義大學森林暨自然資源學系大學四年級生，60004嘉義市鹿寮里學府路300號。

Student, Department of Forestry and Natural Resources, National Chiayi University, No. 300, Syuefu Rd. Chiayi City 60004, Taiwan.

^{2*} 國立嘉義大學森林暨自然資源學系助理教授，60004嘉義市鹿寮里學府路300號，通訊作者。

Assistant Professor, Department of Forestry and Natural Resources, National Chiayi University, No. 300, Syuefu Rd. Chiayi City 60004, Taiwan. Corresponding Author. E-mail: chidawu@mail.ncyu.edu.tw

³ 國立政治大學地政學系副教授，11605臺北市文山區指南路二段64號。

Associate Professor, Department of Land Economics, National Chengchi University, No. 64, Sec. 2, ZhiNan Rd, Wenshan District, Taipei City 11605, Taiwan.

⁴ 逢甲大學環境工程與科學學系助理教授，40724台中市西屯區文華路100號。

Assistant Professor, Department of Environmental Engineering and Science, Feng Chia University, No. 100, Wenhwa Rd. Seatwen, Taichung, Taiwan.

⁵ 逢甲大學都市計畫與空間資訊學系助理教授，40724台中市西屯區文華路100號。

Assistant Professor, Department of Urban Planning and Spatial Information, Feng Chia University, No. 100, Wenhwa Rd. Seatwen, Taichung, Taiwan.

ESTIMATION OF EVAPOTRANSPIRATION CHANGE OF TAITUNG WATERSHED UNDER CLIMATE CHANGES USING REMOTE SENSING AND GCM MODELS

Hsiu-Wen Chung¹ Chih-Da Wu^{2*} Shih-Yuan Lin³ Chun-Te Lin⁴ Yung-Chung Chuang⁵

(Received: February 24, 2016; Accepted: June 21, 2016)

【Abstract】 Evapotranspiration (ET) is one of the processes in hydrological cycle expected to be highly sensitive to climate change. In order to achieve a comprehensive water resources management regime, it is critical to understand the potential impacts of climate change on ET. This study used a MODIS ET product produced by National Aeronautics and Space Administration (NASA), U.S.A. to assess the spatiotemporal variability of ET within Taitung watershed. A stepwise linear regression was then applied to develop the predicted model of ET based on weather parameters, such as air temperature and precipitation. Finally, future weather data generated by the TaiWAP program coupled with a General Circulation Model (GCM) and Representative Concentration Pathways (RCPs) established by IPCC fifth assessment report (AR5) were input into the developed model to estimate future ET under climate change scenarios. Firstly, from the archive data (2003-2013) collected over Taitung watershed, we found that ET reached a peak in summer season, where the spatial pattern of ET was also observed. With the collected ET data, the model was developed successfully with a R^2 value of 0.75, where air temperature showed a significant positive association ($p < 0.01$) with ET. Based on the model, ET values obtained from all tested climate change scenarios were derived; revealing that ET in the near future will be higher than the present observations.

【Key words】 Evapotranspiration (ET), Climate Change, MODIS, Remote Sensing, General Circulation Model.

I、前言

氣候變遷為近年來最重要之全球性環境議題。根據周佳和劉紹臣(2012)指出，在1906~2005年之過去百年中，全球地表溫度大約上升了0.74°C，總降水量則有增加的趨勢，強降水的強度和頻率也有逐漸上升的情形，而且趨於兩極化，即雨季愈濕、乾季愈乾，暖化與極端氣候發生頻率之增加，勢必將會衝擊地球上生態系統之動態平衡。在台灣，盧孟明等(2012)指出，台灣

年平均溫度之長期暖化趨勢十分明顯，在1911年至2009年期間氣溫上升了1.4°C，增溫速率相當於每10年上升0.14°C，而近30年(1980~2009)氣溫的增加速度明顯加快，每10年的上升幅度為0.29°C，幾乎是百年趨勢值的兩倍；至於雨量方面，全島平均年雨量變化不大，但四個季節的降雨日都呈現減少趨勢，其中以夏季的減少幅度最大。由此可知，氣候變遷不僅使得全球暖化日益嚴重、同時亦增強了極端降雨出現的頻率，進而對水資源與水循環造成衝擊。

另一方面，森林係全球最重要之陸域生態系。對人類來說，森林可提供供給、調節、支持及文化等生態系統服務功能，針對氣候變遷之緩解，長期而言，林木為天然之碳匯，其可透過其生理機能將二氧化碳固定於林木體中，進而減緩暖化效應(陳信雄，2006)，短期來講，森林土壤與林木體亦可透過蒸發散(Evapotranspiration, ET)作用釋放水氣，進而補給大氣之水氣含量，達到調節微氣候之功能，然而森林也會因為外在環境變遷衝擊而導致其內部系統改變，兩者息息相關，因此，如何真實且有效的獲取森林蒸發散量之資訊，對於氣候變遷衝擊評估實至為重要(吳治達等，2009; Wu et al., 2010)。

蒸發散是指水分從不同土地覆蓋面(例如水面、林地、雪面、建物以及植物體等)，透過蒸發或蒸散作用而回到空中之總量(陳信雄，1990)。傳統上蒸發散之量測主要透過地面氣象站觀測、水平衡收支公式、以及藉由土壤含水量與地面資料建立折算係數等方法(林錦源，2003；Penman, 1948)。就以上方法而言，地面資料之調查與蒐集實為不可或缺的必要工作，然而受限於人力及物力的考量，地面資料通常只能以單點量測之形式進行調查，如此不僅無法顧及蒸發散在空間尺度上的變異性，且所得結果亦難代表大區域之蒸發散特性。近年來由於衛星影像具有大尺度、多光譜、取得容易等特性，已有許多專家學者結合數值影像處理技術和能量平衡模式，利用衛星影像估算地表溫度、土壤含水量、淨輻射量、土壤熱通量、大氣可感熱等參數，進而推估蒸發散量(陳朝圳等，

2006；鐘玉龍等，2005；Allen *et al.*, 2011; Morse *et al.*, 2000; Dewez and Dautrebande, 1993; Huete *et al.*, 2002; Wu *et al.*, 2010)，然而截至目前為止，尚未見有研究針對台灣地區於氣候變遷情境下，大尺度蒸發散量之變化情形進行推估及探討。

基於此，本研究採用美國太空總署透過MODIS(Moderate resolution imaging spectroradiometer)衛星影像所推估之全球地表蒸發散量為材料，以分析台東集水區蒸發散之空間變異；進一步建立蒸發散與溫度、降雨等氣象資料之關係模式後；並結合TaiWAP氣候變遷模擬程式、大氣環流模式(General circulation model, GCM)、以及氣候變遷專門委員會(Intergovernmental panel on climate change, IPCC)第五次評估報告所設定之代表濃度途徑(Representative concentration pathways, RCP)之情境資料，以推估在未來氣候變遷之影響下，台東集水區蒸發散的可能變化趨勢，相關成果可供相關部門進行綠資源與水資源管理之參考。

II、材料與方法

(I) 研究試區

本研究選擇台東縣及其轄內之20個集水區做為研究試區(如圖1)。臺東縣位於台灣東南方，面積3,515 km²，僅次於花蓮縣、南投縣，為台灣第三大縣，東臨太平洋(菲律賓海)，南面和西面與屏東縣、高雄市以中央山脈為界，北面則以布拉桑克山、崙天山、海岸山脈等為界山與花蓮縣相鄰。全縣海岸線長達176 km，是全台灣

海岸線最長的縣，總人口大約22萬3千人，森林覆蓋率高達78%以上(林務局，2011)，為全台森林覆蓋率最高之縣市，基於此，本研究選擇台東縣做為研究試區，並以其內之五級河子集水區為單元，以探討氣候

變遷下台東集水區的蒸發散變化。

(II) 研究材料

本研究所使用之主要研究資料庫有二，第一項為NASA及美國地質調查所(United states geological survey, USGS)提供

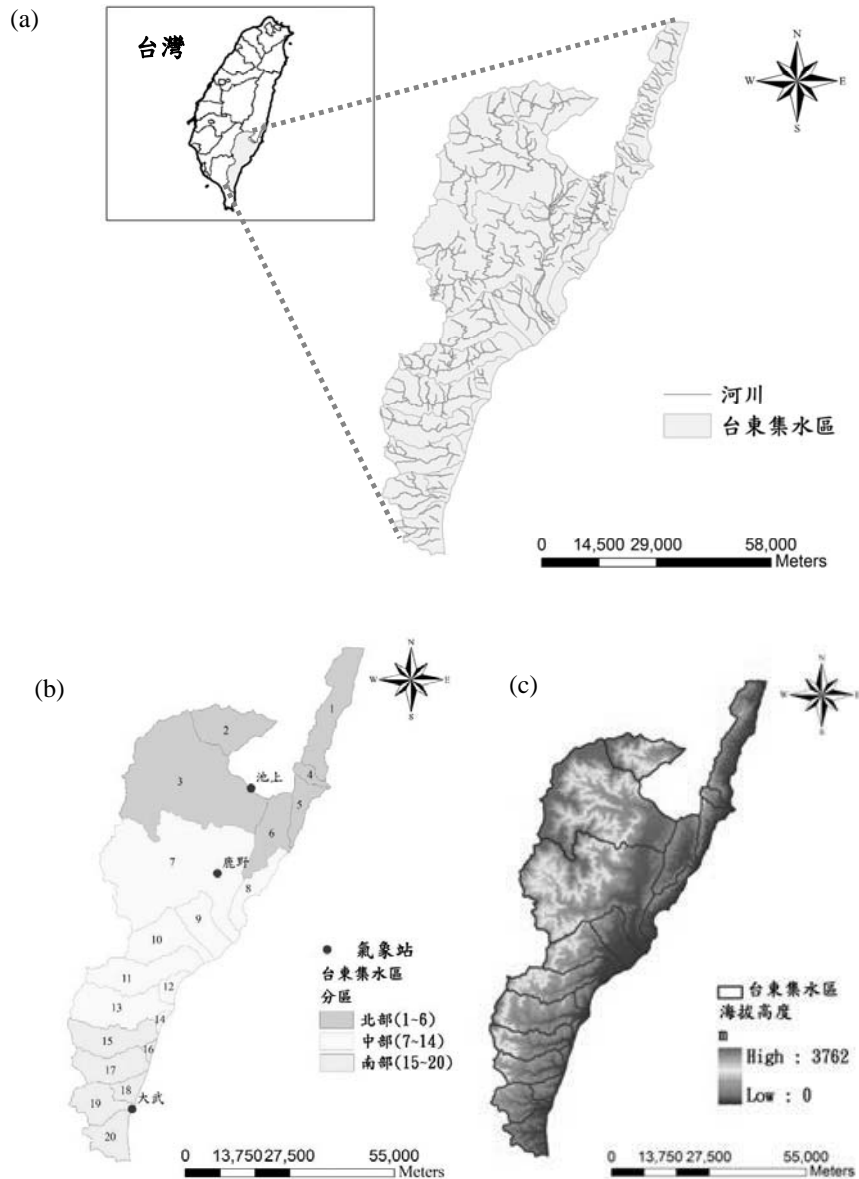


圖1 研究試區圖：(a)台東集水區與河川流域分布圖；(b)集水區分區圖；(c)海拔高度圖

Fig. 1 Illustrations of study area: (a) location of Taitung watershed and stream network, (b) watershed division, and (c) elevation

之全球地表蒸發散監測資料(MOD16 global terrestrial evapotranspiration data set)。NASA目前已釋出2000年至2014年底，應用MODIS影像所估算之單日(每8天一筆)、月及年地表蒸發散影像資料，該資料將

全球劃分為 35×17 個正弦曲線投影網格(Sinusoidal grid)，並以 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 之規整網格為單元計錄地表蒸發散資訊。NASA表示，該蒸發散資料已經過充分之檢核與驗證，可供學術研究使用(Mu *et al.*, 2011)。

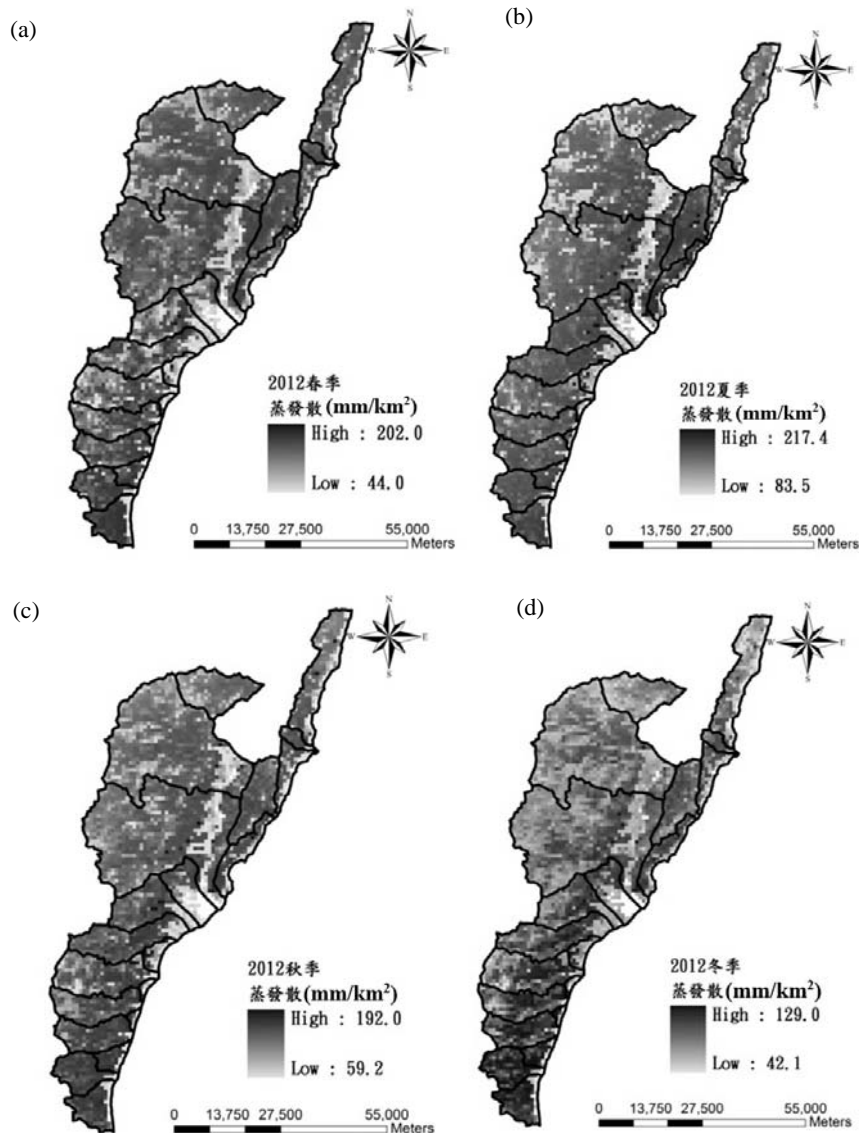


圖2 2012年台東集水區蒸發散四季圖 (a)春季(3-5月)；(b)夏季(6-8月)；(c)秋季(9-11月)；(d)冬季(12-2月)

Fig. 2 Seasonal evapotranspiration of Taitung watershed of 2012: (a) spring (March to May), (b) summer (June to August), (c) autumn (September to November), and (d) winter (December to February)

本研究選用MOD16 2003~2012年之月累積實際蒸發散資料進行分析，圖2為2012年MOD16四季蒸發散資料處理之成果示意圖。

第二項為氣象資料，溫度及降雨等氣象資料擬取自中央氣象局委託國家實驗研究院台灣颱風洪水中心管理之大氣研究資料庫(Data bank for atmospheric research)該資料庫紀錄1985至2015年，全台326處測站之氣象資訊，為一涵蓋台灣全島之龐大氣象觀測網。本研究以該資料為基礎，利用克利金空間內插以獲取全台長期溫度雨量之空間分佈資料，並由其中抽取出台東集水區內各集水區之成果，供後續進行溫度/雨量/蒸發散模式分析之用；此外，為探討氣候變遷對台東集水區蒸發散之影響，故

進一步將整個台東集水區劃分為北、中、南三區(圖1b)，並分別選擇池上(C0S740)、鹿野(C0S710)、大武(467540)三個氣象站之2000年至2014年之氣象資料，以代表台東集水區氣象資料之空間差異性，供後續氣候變遷情境模擬之用。

(III) 研究方法

本研究整合MODIS蒸發散影像、氣象資料、TaiWAP氣候變遷模擬程式，以推估台東集水區未來之蒸發散變化趨勢，整體研究流程如圖3所示，各研究步驟詳細說明如下：

1. 比較台東集水區蒸發散之空間差異

本研究蒐集2003~2012年台灣每月之MODIS蒸發散影像，並由其中萃取出台東集水區蒸發散資料，其目的除在了解台

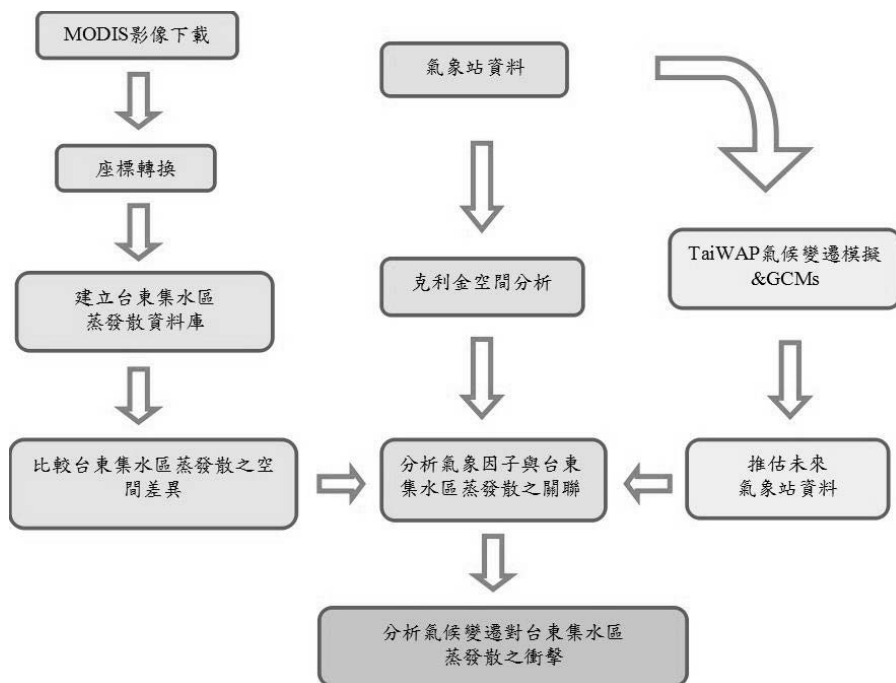


圖3 研究流程圖

Fig. 3 Study framework

東集水區於研究期間蒸發散量之逐年、與春、夏、秋、冬四季之變化趨勢外，進一步比較蒸發散量在各子集水區之空間變異。

2. 分析氣象因子與蒸發散之關聯

本研究利用研究區中各個子集水區之蒸發散量為依變數、藉由克利金空間內插法所獲得之溫度及雨量資訊為解釋變數，透過逐步線性迴歸(Stepwise regression)，以建立氣象因子與集水區蒸發散之關係模式。克利金空間內插法是一種空間內插的地理統計學方法，其原理係基於區域化變數理論(Regionalized variable theory)，假設 z 值的空間變異現象具全面統計同質性(Statistical homogeneity)，即空間中任一點之物理量 z 視為隨機變數 $Z(x)$ ，各隨機變數 $Z(x)$ 構成一隨機變域，而不同位置之隨機變數間存在一空間變異結構，使 $Z(x)$ 除受地區性變異影響外，也受空間變異結構之影響，則 $Z(x)$ 稱為區域化變數(馮豐隆、黃志成，1997)。基於此假設，空間中任兩個位置之隨機變數 $Z(x)$ 與 $Z(x+h)$ 之變異數只與兩點之相對距離(h)有關。在克利金模擬的過程中，假設測站間的距離或方向可反應並且解釋觀測變數的空間變異與相關性，而空間變異可由半變異圖(Semi-variogram)定量之，半變異圖由測站之組合計算樣本半變異值而來，其值係依已知點(測站)與未知點間之相對距離 h 進行分組後，各配對之 Z 值差平方之平均，可由下式求之(高堅泰、馮豐隆，2001)：

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^n (Z(x_i) - Z(x_i + h))^2 \dots (1)$$

式中： $\gamma(h)$ 為距離 h 時之半變異數， $n(h)$ 為試區內所有觀測值距 h 時之配對數。

在模擬的過程中，首先，以溫度雨量之半變異數 $\gamma(h)$ 與相對距離 h 之關係繪製試驗半變異圖(Experimental variogram)，由於該圖為不連續觀測點所繪製，不具空間連續性，故於實際應用時需以未知網格與各已知網格(測站)距離，計算與各已知網格值之變異，藉以計算未知網格值，才能完整地表達其空間變異結構關係。

考量到試區內之氣象測站數目有限，為使所建立之模式能通盤考量整個台東地區之空間變異特性，並完整函蓋研究區內氣象與蒸發散值域之可能變化，故本研究利用MODIS MOD16產品，以獲得研究區歷史蒸發散之面分佈資料；其次結合氣象站與克利金空間內插，以推估氣象資料之空間分佈圖；最後再以集水區為單位，統計各集水區於不同時期之平均蒸發散、平均溫度與平均雨量，並以此資料進行迴歸模式分析。此外，為避免溫度與雨量之共線性(Collinearity)而影響模式推估之可信度，故在建模前，將先利用Pearson相關分析以檢示兩氣象變數間之相關程度。

3. 氣候變遷對集水區蒸發散之衝擊分析

本研究利用TaiWAP氣候變遷模擬程式，進行不同暖化情境下，未來溫度雨量之推估。由於TaiWAP無法支援地理資訊系統圖層，僅能針對氣象測站進行氣候變遷情境模擬結果之輸出，基於此，本研究以池上(C0S740)、鹿野(C0S710)、大武(467540)等三個氣象站之氣象資料代表試區之北部、中部(子集水區7~14)、南部(子集水區15~20)(圖1b)，並以這三個測站之歷史

氣象特性為基礎，進行不同GCMs及氣候變遷情境下未來氣象資料之合成與模擬後，將所得成果輸入前一步驟所建立之蒸發散-氣象關係模式中，以推估氣候變遷衝擊影響下未來台東集水區蒸發散量的變化。TaiWAP係由台灣大學生物環境系統工程學系永續發展研究室所開發，TaiWAP包含了氣候變遷風險評估所需的氣候情境以及氣象合成模式，同時亦提供氣候變遷下水資源風險評估之各項分析功能。為使現況氣候資料與氣候變遷模擬資料能在相同基準下進行比較，本研究以2003~2012年氣候資料之統計特性為基礎，利用TaiWAP之序率合成模式(Weather generation model)(Tung and Haith, 1995)模擬現況及未來之日溫度與日降雨量資料，其中日溫度資料係經由月平均溫度與一階Markov鏈模擬所得，其數學式為：

$$T_i = \mu_{Tm} + \rho(T_{i-1} - \mu_{Tm}) + \nu_i \sigma_T \sqrt{1 - \rho^2} \dots (2)$$

式中： T_i 為第*i*天之溫度， μ_T 為對應月份之月平均溫， ρ 為該月份 T_i 與 T_{i-1} 之一階系列相關係數(First-order serial correlation coefficient)， ν 為0~1間之常態分佈隨機亂數， σ_T 為對應月份溫度之標準偏差。

在日降雨量方面則分為降雨事件模擬與降雨發生時降雨量之模擬兩部份。降雨事件模擬係以歷史資料為演算依據，以 $P(W|W)$ 表示各月中第I-1日降雨時，第I日降雨的機率，以 $P(W|D)$ 表示各月中第I-1日不降雨時，第I日降雨的機率，首先給定每月第一天一個0~1間之亂數RN做為模擬之基準，當此RN值小於或等於該月降雨機率 $P(W)$ 時，表示此日為降雨日。除第一

天外，其餘則依據前一天是否降雨以選擇 $P(W|W)$ 或 $P(W|D)$ 做為降雨與否之門檻值，若亂數RN小於或等於 $P(W|W)$ 或 $P(W|D)$ 時，判定該日為降雨日；至於降雨量之模擬則採用指數分佈(Exponential distribution)進行推估，其方程式如下：

$$P = \mu_p(I) \times [-\ln(1 - RN)] \dots \dots \dots (3)$$

式中： P 為日降雨量(cm)， $\mu_p(I)$ 為對應第I月份雨天之平均降雨量(cm)，RN為0~1間之隨機亂數。

至於在未來氣候變遷資料修正方面，本研究參考科技部氣候變遷調適科技整合計畫(TaiCCAT)之建議，選擇最符合台東氣象特性之CESM1-CAM5及GISS-E2-R等兩種GCMs模式(童慶斌等，2015)，結合IPCC第五次評估報告中所提供的四種代表濃度途徑(含RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0與RCP8.5)於未來最長期之變化趨勢，針對台東集水區之北部、中部、南部，分別進行未來氣象資料之模擬，並將模擬結果代入所建立之”蒸發散-氣象關係模式”中，進而評估不同氣候變遷情境下台東集水區蒸發散之可能變化。其中RCP2.6代表在2100年時每平方公尺的輻射強迫力將增加2.6瓦，同理，RCP4.5、RCP6.0與RCP8.5分別代表每平方公尺的輻射強迫力將增加4.5、6.0與8.5瓦。在這四種情境中，RCP2.6為暖化相對減緩之情境(本情境中輻射強迫力在2100年呈減少趨勢)；RCP4.5與RCP6.0屬於穩定的情境(輻射強迫力的變化在2100年呈較為穩定狀態)；RCP8.5代表溫室氣體高度排放、溫化愈趨嚴重的情境(輻射強迫力在2100年呈持續增加趨勢) (TCCIP

2013)。在實際做法方面，TaiWAP程式以歷史氣象資料之統計特性為基礎，利用序率模式合成未來200年之資料後，再以統計降尺度後，CESM1-CAM5及GISS-E2-R模式所輸出之未來最長期溫度差值(Difference of temperature; ΔT)與雨量比值(Ratio of precipitation; RP)為係數進行資料修正，以推估在氣候變遷影響下，未來之氣象模擬資料。氣象資料之修正公式如下：

$$T'_{t,m} = T_{t,m} + \Delta T_m \quad \forall t \in m \text{ \& } m = 1 \sim 12 \dots\dots(4)$$

$$P'_{t,m} = P_{t,m} \times RP_m \quad \forall t \in m \text{ \& } m = 1 \sim 12 \dots\dots(5)$$

式中： $T'_{t,m}$ 與 $P'_{t,m}$ 為修正後第 m 月第 t 天之溫度與降雨， $T_{t,m}$ 與 $P_{t,m}$ 為歷史紀錄第 m 月第 t 天之溫度與降雨， ΔT_m 與 RP_m 為GCM模式預測鄰近觀測氣象站網格點第 m 月，未來平均氣溫相對於基期所增加的溫度，以及未來平均雨量相對於基期的雨量的比值(倍數)。

IV、結果

(I) 比較台東集水區蒸發散之時空變異

1. 2003~2012年蒸發散之變化趨勢

圖4為台東集水區於2003~2012年間蒸發散之逐月變化趨勢，由圖中可看出，大致來說各年間逐月之變化量趨於穩定的狀態，不論在那一年，大多以夏季(6-8月)之蒸發散最高、冬季(12-2月)最低，其主要原因可能與夏季時森林及植被生長較其他季節旺盛，所釋出之水汽量更多有關；圖5則是以年為單位進行製圖的結果，由圖中可知，2010、2011年蒸發散明顯偏低，2009年平均蒸發散量略高。

2. 不同季節蒸發散之比較

在季平均之比較方面，圖6為研究期間四季蒸發散趨勢圖，由該圖可明顯看出，雖然各年間之數值略有些微差異，但整體來說，仍然是以夏季之蒸發散量最大、冬季之蒸發散量最小；圖7為各子集水區於四季蒸發散之比較，結果顯示，東部(集水區6)與南部(集水區17~20)集水區在四季中之蒸發散明顯較其他地區高，北部地區(集水區1~3)則偏低。

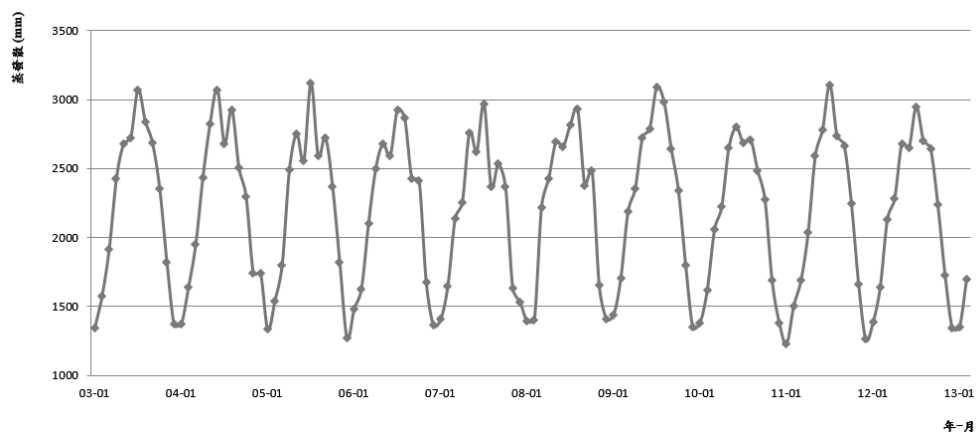


圖4 台東集水區2003~2012年蒸發散變化(以月為單位)

Fig. 4 Monthly averaged evapotranspiration of Taitung watershed from 2003 to 2012

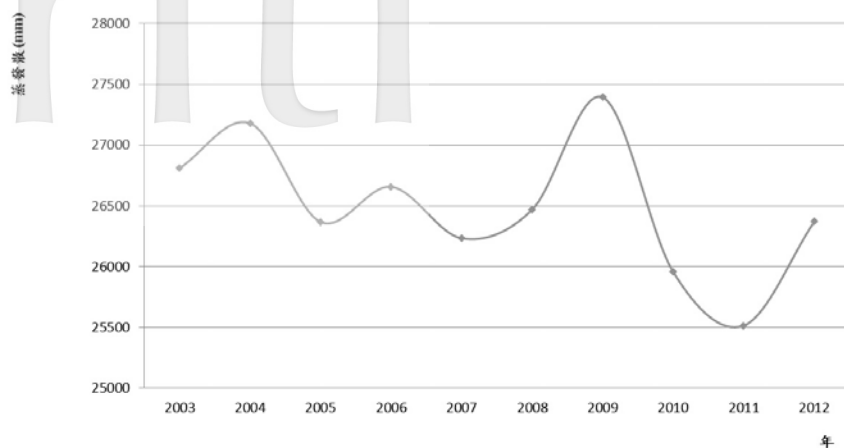


圖5 台東集水區2003~2012年蒸發散變化(以年為單位)

Fig. 5 Yearly averaged evapotranspiration of Taitung watershed from 2003 to 2012

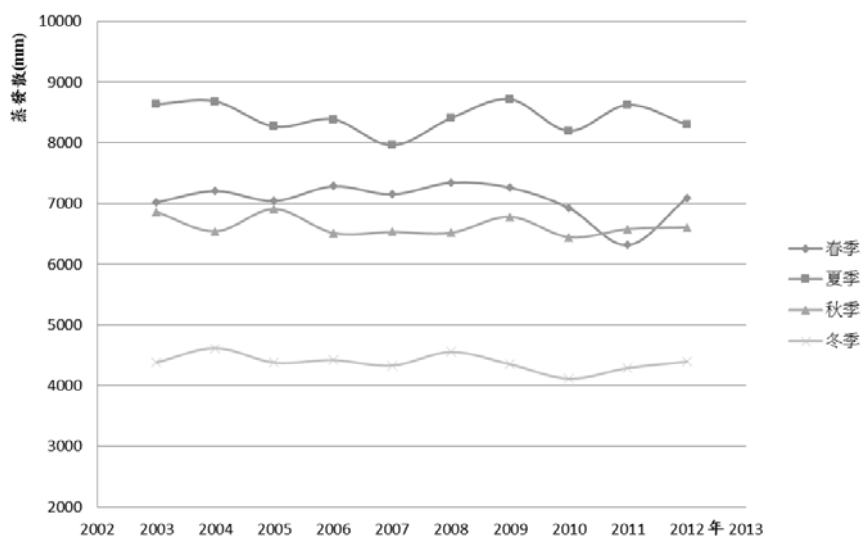


圖6 2003~2012年四季蒸發散趨勢比較

Fig. 6 Seasonal trend of evapotranspiration from 2003 to 2012

表1 蒸發散與溫度及雨量之相關分析

Table 1 Correlation analysis among evapotranspiration, temperature, and precipitation

變數名稱	蒸發散	溫度	雨量
蒸發散	1		
溫度	0.87**	1	
雨量	0.45**	0.53**	1

** p < 0.01

(II) 氣象因子與蒸發散之關聯

表1為蒸發散與溫度及雨量之相關分析成果，表中可看出其溫度與雨量之相關係數為0.53($p < 0.05$)，故兩項氣象變數均導入逐步迴歸分析，然由於雨量在模式中並不顯著($p = 0.58$)，因此模式排除雨量因子、僅納入溫度變數($p < 0.01$)，(表2)；模式之 R^2 為0.75，整體來說模式之解釋力佳，最終之迴歸模式如下式：

$$ET = -39.21 + 6.95T \dots\dots\dots(6)$$

式中：ET為台東集水區之蒸發散(mm/km²)，T為溫度(°C)。

(III) 氣候變遷對集水區蒸發散之衝擊分析

本研究以研究區內池上、鹿野、大武氣象站於2003~2012年之歷史資料為基礎，利用TaiWAP程式模擬不同RCP情境下之未來氣象資料，並代入所建模式(式6)。在不同GCM模擬結果之比較方面，GISS-E2-R與CESM1-CAM5所模擬出的台東集水區未來蒸發散曲線圖趨於一致，結果如圖8、9。由圖中可看出，RCP8.5推估所得之蒸發散在各情境與各區位恆為最高；在北、中、南三地區之比較顯示，中部與北部之未來蒸發散模擬結果趨勢頗為一致，以七月為分界，在七月之前，現況蒸發散較RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0略高，然較RCP8.5為低；在七月之後，則各情境推估之值均較歷史現況為高，並且RCP8.5推估之蒸發散量仍為最大。至於在南部的部分，四種RCP情境下推估之蒸發均顯高於現況蒸發散。最後，觀察圖8、9可知，台東集水區未來四季平均蒸發仍以夏季最旺盛、冬季較低。

V、討論

影響蒸發散量之因子甚多，以一般廣被使用之Penman-Monteith公式而言，其考慮之因子包含飽和蒸氣壓、濕度、淨輻射量、土壤熱通量、蒸發潛熱、平均氣溫等，於資料取得之要求頗高。本研究之目的旨在評估氣候變遷影響下，未來蒸發散之可能變化。針對一般使用者而言，情境模式所提供之未來氣象參數僅溫度差值與雨量比值兩項，其他如輻射量、飽和蒸氣壓等，並無法透過大氣環流模式獲得未來資料，此點亦為本研究進行之主要限制之一。然本研究所建立之蒸發散-溫度迴歸模式之 R^2 值為0.75，在解釋蒸發散之趨勢變化時，應尚可接受。基於此，本研究結合歷史資料所建立之蒸發散-溫度迴歸模式，以及未來溫度模擬資料，以推估在氣候變遷情境下，地表蒸發散之可能變化趨勢。

本研究利用遙測之蒸發散資料與歷史氣象資料，以建立兩者之迴歸模式。考量到模式應用上之便利性，本研究係結合所有研究區中所有集水區之資料，建立單一之全區蒸發散-氣象迴歸模式，供後續分析使用。事實上不同地區之蒸發散可能具有空間變異性，而不同季節其特性亦可能有所差異，故建議未來在進行相關研究時，如資料許可，可針對不同區位之集水區、以及不同季節分別建立模式。

各子集水區於四季蒸發散之比較結果顯示(圖7)，東部與南部集水區在四季之蒸發散均較其他地區高，北部地區則偏低，本研究推測，這可能是由於不同集水區上植生覆蓋程度並不相同所造成。為驗

表2 迴歸分析結果

Table 2 Results of regression analysis

變數名稱	係數 (95%信賴區間)	模式 R^2	調過後的 R^2
常數項	-39.21		
溫度	6.95(6.79, 7.11)**	0.75	0.75

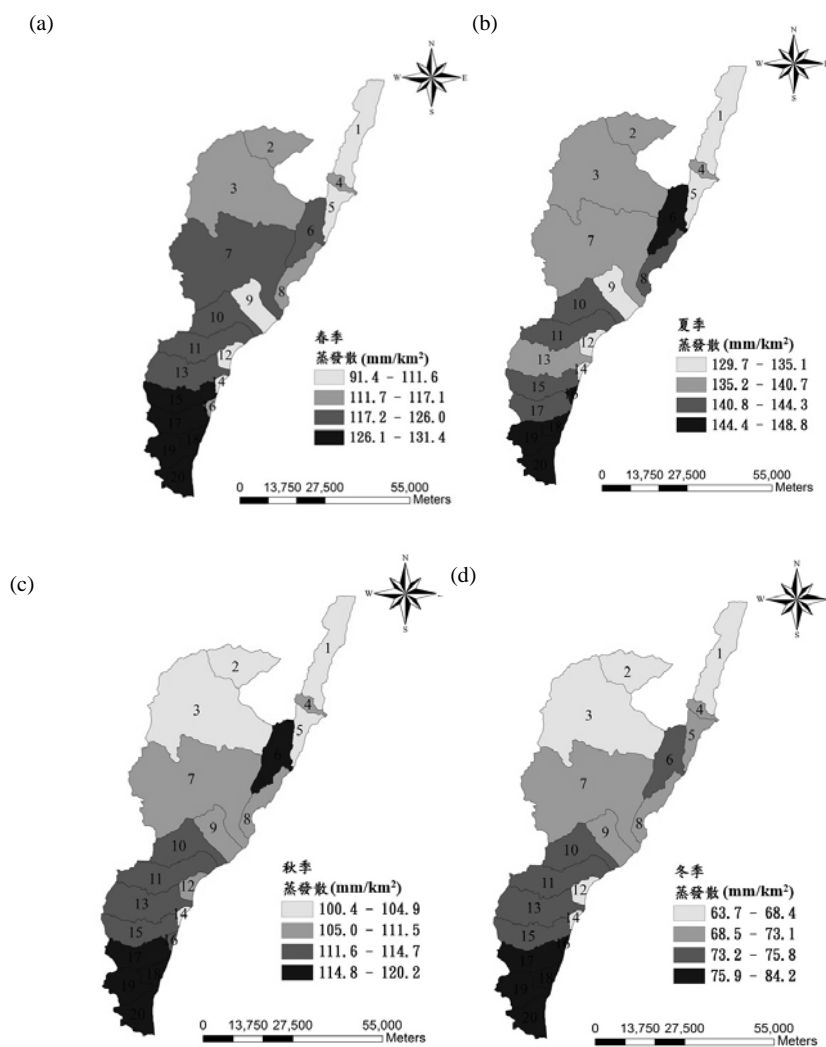
** $p < 0.01$ 

圖7 研究期間四季平均蒸發散之四分位圖：

(a)春季(3-5月)；(b)夏季(6-8月)；(c)秋季(9-11月)；(d)冬季(12-2月)

Fig. 7 Quartile maps of seasonal average evapotranspiration during the study period: (a) spring (March to May), (b) summer (June to August), (c) autumn (September to November), and (d) winter (December to February)

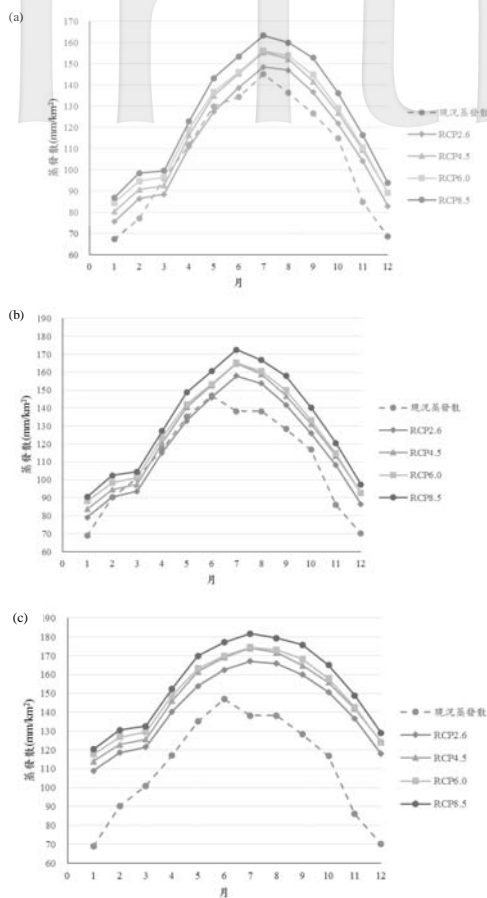


圖8 台東集水區(a)北部、(b)中部及(c)南部地區CESM1-CAM5模式推估之未來蒸發散趨勢圖

Fig. 8 Predicted evapotranspiration of Taitung watershed based on CESM1-CAM5 climate change model: (a) northern, (b) middle, and (c) southern districts

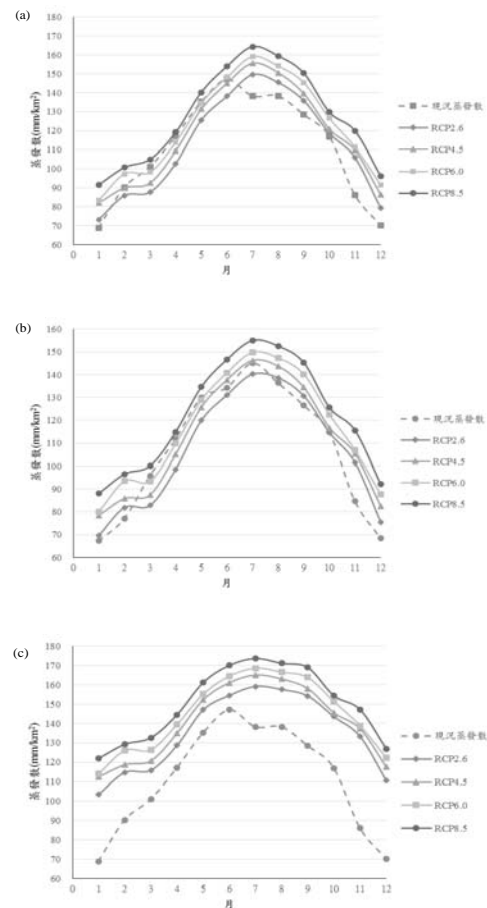


圖9 台東集水區(a)北部、(b)中部及(c)南部地區GISS-E2-R模式推估之未來蒸發散趨勢圖

Fig. 9 Predicted evapotranspiration of Taitung watershed based on GISS-E2-R climate change model: (a) northern, (b) middle, and (c) southern districts

證此推論，本研究利用NASA經由MODIS衛星所產製之全球植生指數（Normalized difference vegetation index；NDVI）資料，以比較研究區內各子集水區植生發分之差異，圖10為研究期間夏季平均蒸發散與平均NDVI之比較圖，由圖10可看出，蒸發散較高的集水區(如集水區4、6、18、20)其

NDVI值也較高，而蒸發散低的集水區(集水區9、12、13)，NDVI值則較低，整體來說兩者趨勢尚算符合，由於植物在進行光合作用、蒸散作用所釋出之水汽量，在區域蒸發散總量中佔據了極高之比例，因此形成植生密度高之地區，其蒸發散量亦較高的現象。

在台東集水區不同區域未來蒸發散趨勢之比較部分（圖8與圖9），可發現中部與北部之未來蒸發散變化趨勢較為一致，RCP4.5、RCP6.0與RCP8.5三項情境下各月份之未來蒸發散均較歷史現況為高，然RCP2.6之結果卻顯示，在1至6月時，現況蒸發散反高於RCP2.6情境之推估結果；反觀南部集水區，其所模擬出四種代RCPs之結果均指示，不管在何種暖化情境下，未來之蒸發散均大於現況蒸發散。造成此空間差異性之原因，可能是由於GCM用來模擬南部氣候變遷的網格點，與用於中部模擬之點位不同所導致，此結果亦展現出氣候變遷之區域差異性。

全球暖化導致了未來蒸發散的上升，

水循環的改變造成了極端氣候的產生，乾季越乾、溼季越濕，未來乾旱和豪大雨將會越來越多，越來越嚴重，故水資源的管理顯得更為重要，如何預防與處理後續問題，公共設施的排洪及儲水措施等，都是很重要的議題，森林的經營更扮演著很重要的角色，森林具有調節氣候等功能，如何妥善經營森林並結合政策應用於社會大眾是未來可執行的目標。

VI、結論

研究結果指出，台東集水區在2003~2012年間蒸發散於夏季最旺盛，冬季較低，不同集水區的比較發現，東部與南

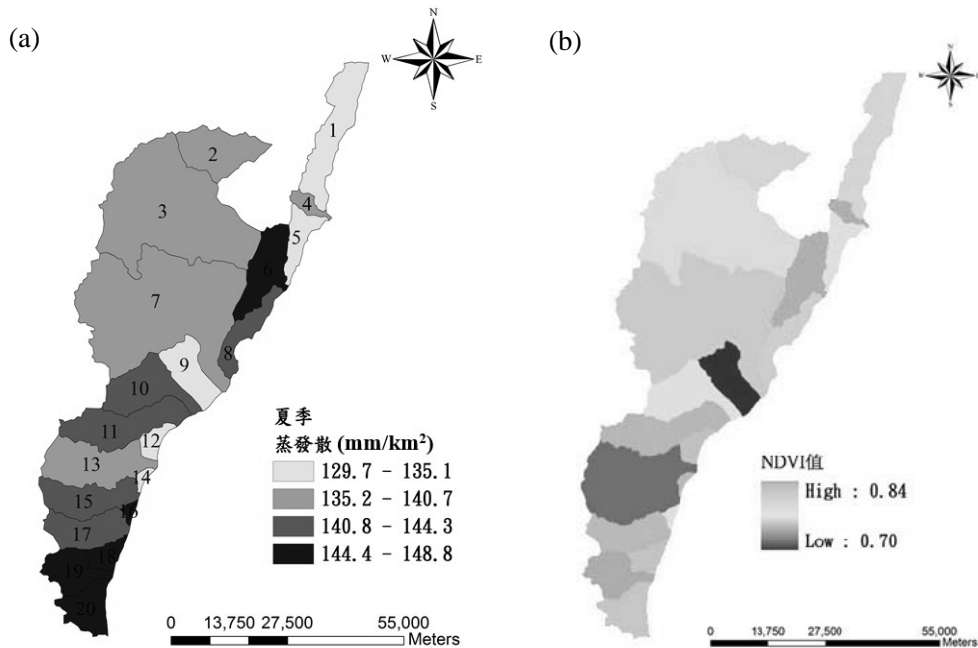


圖10 台東集水區夏季蒸發散與NDVI比對圖：(a)研究期間夏季平均蒸發散之四分位圖；(b)研究期間夏季平均NDVI圖

Fig. 10 Quartile maps of Taitung watershed in summer: (a) evapotranspiration and (b) NDVI

部子集水區在四季中之蒸發散很明顯都較其他地區高，北部地區則偏低；此外，氣溫與蒸發散具有顯著之統計關係；至於在未來氣候變遷之模擬結果則顯示，四種未來暖化情境推估所得之蒸發散均較現況為高，其中又以RCP8.5之蒸發散量最大，由此可知，溫室效應與全球暖化確實會影響區域蒸發散量，進而衝擊水文循環，此成果可供相關部門進行水資源管理之參考。

VII、參考文獻

- 行政院農業委員會林務局(2011)全島各縣市森林地面積及森林覆蓋率。
- 周佳、劉紹臣(2012)全球氣候變遷觀測。大氣科學 40(3): 185-213。
- 林錦源(2003)應用土壤含水量觀測推估蒸發散量之研究。國立成功大學水利及海洋工程學研究所碩士論文。
- 吳治達、鄭祈全、羅漢強、陳永寬(2009)整合遙測技術，大氣環流模式與Markov模式推估未來集水區流量之研究—以淡水河集水區為例。航測及遙測學刊 14(1): 35-48。
- 高堅泰、馮豐隆(2001)森林生育地因子之空間推估與生育地分類，中華林學季刊 34(2): 167-184。
- 陳信雄(1990)森林水文學。千華出版公司。169-170。
- 陳信雄(2006)森林在防止地球溫暖化功能上之研究。中華水土保持學報 37(1): 1-7。
- 陳朝圳、吳守從、江彥鋒(2006)應用MODIS衛星影像推估台灣地區之蒸發散量。台灣林業科學 21(2): 249-261。
- 馮豐隆、黃志成(1997)空間模式應用於林分結構母數推估之研究，中興大學實驗林研究彙刊 19(2): 57-75。
- 童慶斌、劉子明、林嘉佑、曹榮軒、李明旭(2015)氣候變遷水資源風險評估與調適決策之探討。中國土木水利工程學會會刊 42(4): 40-45。
- 盧孟明、卓盈旻、李思瑩、李清滕、林昀靜(2012)台灣氣候變化：1911~2009年資料分析。大氣科學 40(3): 297-321。
- 鍾玉龍、陳朝圳、奚珍妮、劉士銘(2005)MODIS影像波段萃取應用於乾旱監測之研究。台灣林業科學 20(3): 239-47。
- Allen, R. G., L. S. Pereira, T. A. Howell and M. E. Jensen (2011) Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy, Agricultural Water Management, Volume 98, Issue 6, April 2011 Pages 899-920; II. Recommended documentation, Pages 921-929
- Dewez, A. and S Dautrebande (1993) Use of ERS-1 SAR data to study surface states. 2:569-571. In: Esa, Proceedings of the first ERS-1 Symposium on Space at the Service of Our Environment. 4-6 November 1992. Cannes, France.
- Huete, A., K. Didan, T. Miura, E. P. Rodriguez, X. Gao and L. G. Ferreira (2002) Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. Remote Sensing of Environment 83: 195-213.
- Morse, A., T. Tasumi, G. A. Richard and J. K. William (2000) Application of the SEBAL

- methodology for estimating consumptive use of water and stream flow depletion in the bear river basin of Idaho through remote sensing. The Raytheon System's Company Earth Observation System Data and Information System Project.
- Mu, Q., M. Zhao, and S.W. Running (2011) Improvements to a MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration Algorithm. *Remote Sensing of Environment* 115(8): 1781-1800.
- Penman, H. L (1948) Natural evaporation from open water, Bare Soil and Grass. *P Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 193: 120-145.
- Tung, C. P. and D. A. Haith (1995) Global warming effects on New York streamflows. *Journal of Water Resources Planning and Management* 121(2): 216-25.
- Wu, C. D., C. C. Cheng, H. C. Lo and Y. K. Chen (2010) Effect of environmental changes on future hydrology of the northern Taiwan using remote sensing. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 15(3): 243-262.