

臺灣中部常綠闊葉林之水與能量收支季節性差異

SEASONAL VARIATIONS OF WATER AND ENERGY BUDGET OF EVERGREEN BROAD-LEAVED FOREST
IN CENTRAL TAIWAN

國立中央大學
水文與海洋科學研究所
碩士生

邱文昱
Wen-Yu Chiou

國立中央大學
水文與海洋科學研究所
教授

李明旭*
Ming-Hsu Li

國立中央大學
水文與海洋科學研究所
博士生

陳觀印
Kuan-Yin Chen

國立中央大學
水文與海洋科學研究所
助理教授

陳沛莞
Pei-Yuan Chen

摘要

森林生態系之水文與能量收支深受大氣條件與地表狀態影響，於乾濕季節下會有不同特徵。本研究使用 2010 ~ 2020 年間蓮華池水文氣象站之微氣象與通量觀測數據，依據月降水量多寡，區分成乾季(10 ~ 3 月)與濕季(4 ~ 9 月)各 6 個月二種類型，在濕季的潛熱通量與淨輻射均較乾季為高，可感熱於乾濕季間差異不大，在水文收支如土壤含水量、蒸發散量與河川流量均呈現濕季高與乾季低的特徵。接著利用標準化降水指數(Standardized Precipitation Index, SPI)，計算三個月累積降水的 SPI 時間序列(即 SPI3)，再將各年的乾濕季依據其 SPI3 中位數，分為偏濕濕季($SPI3 > 1$)、正常濕季($0 < SPI3 < 1$)、正常乾季($-1 < SPI3 < 0$)或偏乾乾季($SPI3 < -1$)等四種類型，偏濕濕季比正常濕季有較大的潛熱通量與較小的可感熱，原因為偏濕濕季之降水日數與降水量較正常濕季為多，使淨輻射較小；而偏乾乾季與正常乾季之潛熱通量卻差異不顯著，但偏乾乾季有較高之淨輻射與可感熱通量，原因為偏乾乾季之降水日數與降水量較正常乾季為少。在水文量部分，偏濕濕季有最高之土壤含水量與河川流量，偏乾乾季則為最低。過去十年間蓮華池並未發生嚴重乾旱，常綠闊葉林於輕度至中度乾旱期間仍能由土壤水分支撐蒸發散作用。長期且持續的水文與能量觀測有助於我們了解森林生態系的季節變動特徵，特別是極端事件的影響，幫助我們對於森林經營管理提出更好的策略。

關鍵詞：標準化降水指數、水與能量收支、常綠闊葉林、季節性變異。

SEASONAL VARIATIONS OF WATER AND ENERGY BUDGET OF EVERGREEN BROAD-LEAVED FOREST IN CENTRAL TAIWAN

Wen-Yu Chiou

Graduate Institute of
Hydrological and
Oceanic Sciences
National Central
University, Taiwan

Ming-Hsu Li*

Graduate Institute of
Hydrological and
Oceanic Sciences
National Central
University, Taiwan

Kuan-Yin Chen

Graduate Institute of
Hydrological and
Oceanic Sciences
National Central
University, Taiwan

Pei-Yuan Chen

Graduate Institute of
Hydrological and
Oceanic Sciences
National Central
University, Taiwan

ABSTRACT

Water and energy budget in forest ecosystem are deeply affected by changes in meteorological conditions and surface characteristics, which lead to distinct behaviors in dry and wet seasons. Meteorological and energy fluxes data observed at the Lianhuachi (LHC) Research Center in central Taiwan during 2010 to 2020 were analyzed in this study. Based on rainfall amount, dry (*i.e.*, Oct.~Mar.) and wet (*i.e.*, Apr.~Sept.) seasons were identified to have 6 months in each season. Latent heat flux (LE) and net radiation (Rn) in wet seasons are larger than those in dry seasons, while differences in sensible heat flux (H) between dry and wet seasons are insignificant. Soil moisture, evapotranspiration, and streamflow of wet seasons are also larger than those in dry seasons. In order to understand effects of different dryness and wetness on energy and water budget, the Standardized Precipitation Index (SPI) was applied to further identify dryer (*i.e.*, SPI3 < -1), dry (*i.e.*, -1 < SPI3 < 0), wet (*i.e.*, 0 < SPI3 < 1), and wetter (*i.e.*, SPI3 > 1) seasons in different years based on the median of SPI3 calculated by 3 months accumulated precipitation in each season. The wetter season has larger LE and smaller H than the wet season due to more rainfall and rainy days which lead to small Rn. Although differences in LE between dryer and dry seasons are insignificant, larger H and Rn are observed in the dryer season than those in dry seasons due to less rainfall and rainy days in dryer seasons. The wetter seasons have the largest soil moisture and streamflow, which are the lowest in the dryer seasons, among 4 types of wet/dry seasons. Since the LHC did not suffer extreme drought with long duration during past 10 years, the evergreen broad-leaved forest is still able to sustain functions of evapotranspiration by uptaking deeper soil moisture under moderate drought condition. Long-term and continuous observation of water and energy contributed to understanding the characteristics of seasonal variation, especially the impacts of extreme wet and dry events to the forest ecosystem, and supporting to propose sound strategies of forest management.

Keywords: Standardized precipitation index, Water and energy budget, Evergreen broad-leaved forest, Seasonal variations.

一、前言

森林生態系在地球水循環中扮演重要的角色，以調節水氣、能量與固碳作用為主。在自然界中，林中植被透過蒸發散作用使水氣返回大氣中，大氣中的水又以降水的形式回到森林中，能量在水發生相變時流動，大氣的二氣化碳則於光合作用中被植被吸收，前述的機制環環相扣且影響了區域及全球的水氣交互作用(Lean and Warrilow, 1998)，間接影響人類及生物的活動。此外，大氣因子如溫度、降水量的變動會反映在水與能量收支上，有研究指出雨量的改變對於季節及年際變化之能量分配有很大的影響(Chen *et al.*, 2019)，而蒸發散量的增加與溫度、降水的增加有關(Spellman *et al.*, 2021)，而在季節變化下，微氣象條件也產生明顯差異，使水文物理量與能量通量的變化呈現季節性特徵(Rodrigues *et al.*, 2013; Kuricheva *et al.*, 2021)，除大氣條件以外，地表狀態如植被的種類、植株密度與土壤乾濕程度(Raz-Yaseef *et al.*, 2012)也影響能量與水氣的分配。

然而，近年因人類活動加劇溫室效應，改變全球氣候系統，使極端事件的頻率與強度增強，IPCC(2013)的報告指出此情況將在未來更加嚴重，也有研究指出未來全球異常乾旱出現的頻率將增高(Wang *et al.*, 2021)，地表水分布的面積將減少(Zarch *et al.*, 2017)，嚴重的旱澇不僅為社會經濟帶來嚴重損失(Wong *et al.*, 2010; Mishra and Singh, 2010)，有研究顯示植物受長期乾旱影響後，對於其水分傳輸與生長能力將產生不可逆的負面影響(Borghetti *et al.*, 1998; Doughty *et al.*, 2015)，此外，水文與能量收支也受氣候變遷的影響(Guo and Shen, 2015)，更加嚴峻的大氣條件對於森林生態系的威脅不可小覷。在溫室效應增強的影響下，未來乾季將變得更乾、濕季則更濕，森林生態系將面臨更極端的氣候條件，水文循環的季節性特徵也將更加顯著，而臺灣身為一個四面環海且四季分明的海島國家，也身受氣候變遷的影響，有研究指出臺灣在全球暖化下短期乾旱發生的頻率與強度將增加(李昱祺等, 2019; 林志彥, 2007)，近 50 年內，無降水日有增多的趨勢，進而加重乾旱的影響(林夢等, 2014)，在「臺灣氣候變遷科學報告 2017-物理現象與機制」報告中也指出，未來臺灣的乾濕差異將更大，出現濕季更濕，乾季更乾的極端化現象，西北太平洋的颱風侵襲個數雖減少但強度更強(臺灣氣候變遷推估與資訊平台建置計畫團隊, 2017)，這些研究都顯示未來氣候極端化的趨勢。為提早因應氣候變遷對臺灣森林系統的衝擊，我們需了解不同大氣條件下森林生

態系的陸氣交互過程與特徵，過去也有許多學者以臺灣森林如天然闊葉林為主要探討對象，研究森林之水文特性(Lu *et al.*, 2007; 葉正霖, 2002; 蔡玉袁, 2000)。

在水文研究領域，有許多不同量化環境乾濕程度之分析工具，而標準化指標是相對簡單且直觀的分類方式。不同指標計算所需考慮的水文因子，如潛勢能蒸發散量、降水量或溫度等也不盡相同。標準化降水指數(Standardized Precipitation Index, SPI) (McKee *et al.*, 1993)為透過降水量多寡計算乾濕程度的標準化指標，大多應用在氣象乾旱的研究上，缺點為未考慮溫度，因此在考慮如受氣候變遷影響之潛勢蒸發散變化對乾旱的影響，則 SPI 較不適用(Zarch *et al.*, 2015)。標準化降水蒸發散指數(Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI)(Vicente-Serrano *et al.*, 2010)為同時考慮降水與溫度的乾旱指標，利用溫度估計潛勢蒸發散量，再計算水平衡以評估乾旱程度，過去研究顯示 SPEI 對中長期乾旱比 SPI 敏感(Potop *et al.*, 2012)。帕爾莫乾旱指標(Palmer Drought Severity Index, PDSI) (Palmer, 1965)也是利用降水與溫度資料，但進一步推估特定區域之蒸散量、逕流量和土壤水分以水平衡估算乾旱程度，因為不是標準化指標，因此無法類似 SPI 或 SPEI 可跨時間與空間比較乾旱特性。前述不同類型的乾旱指標，各有其適用性與優缺點，研究者可以依據可取得的資料類型多寡選用合適工具來分析不同的環境乾濕程度。

陸氣間交換之潛熱通量、可感熱通量與二氣化碳通量之估算方法，以渦流協變法(Eddy Covariance Method)(Foken and Wichura, 1996)最為廣泛使用，可以提供較高時間解析之精確觀測數據，相關技術也應用於陸域生態系二氣化碳與甲烷通量計算的相關研究，或是結合衛星遙測應用(Pahari *et al.*, 2018; Dumortier *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2021)。目前世界各地的通量觀測站有全球以及區域的研究網絡，如全球通量網 FLUXNET 或亞洲地區的 AsiaFlux 提供開放通量資料供研究社群用於研究用途。林業試驗所蓮華池試驗集水區也曾進行渦流協變法的通量相關研究，並註冊在 AsiaFlux，過去如袁一夫(2008)、陳奕穎(2012)與陳觀印(2019)等進行探討此技術在蓮華池森林之適用性，也陸續發展出通量資料補遺技術。

隨著氣候變遷可能帶來的影響，不論是在減緩或調適議題，森林生態系統的角色更顯重要，而乾濕季節極端化的影響將無可避免的對森林生態系統服務功能產生衝擊。臺灣位於季風氣候帶，四季分明，中部地區的蓮華池試驗集水區，代表臺灣典型的中海拔天然常綠闊葉林，乾濕季節降水差異顯著，適合進行長

期森林生態系水文與通量觀測研究，本研究使用蓮華池水文與通量測站之長期觀測數據，分析 2010~2020 年間不同乾濕季節下的水與能量收支變化，並探討不同乾濕程度季節下的森林水文與能量變化特性，嘗試釐清森林生態系在不同季節下水與能量收支變化與影響機制，除有助於了解森林生態系在陸氣間交互作用機制外，也有助於我們對森林生態系的經營與管理提出具科學數據的更好策略。

二、研究場址與觀測儀器

2.1 研究場址與降水特性

本研究測站位於南投縣魚池鄉的蓮華池試驗集水

區(圖 1、圖 2 左)，蓮華池設有五座試驗集水區，為農委會林業試驗所蓮華池研究中心所經營管理，本研究測站位於第五號試驗集水區，架設有一高 25 公尺的微氣象觀測塔與地表通量觀測儀器(圖 2 右)，蓮華池五號集水區海拔高度 720~800 公尺之間，植被以常綠闊葉林為主，人為擾動少，平均植被高度為 18~20 公尺，近地表岩層為第三紀始新世之泥質砂岩互層，年均溫約 21 °C，近十年(2010~2020 年)的平均年降水量為 2,000 mm 左右，平均降水日數為 72.5 天(表 1)，降水來源以對流雨、鋒面雨和颱風為主(黃正良，2010)，根據降水集中度的差異性，本研究以月降水量最高的 6 個月份(4~9 月)定義為濕季，其餘月份(10~3 月)定義為乾季，如表 1 所示，濕季降水量合計佔全年 83%，顯示蓮華池地區的乾濕季節相當明顯。

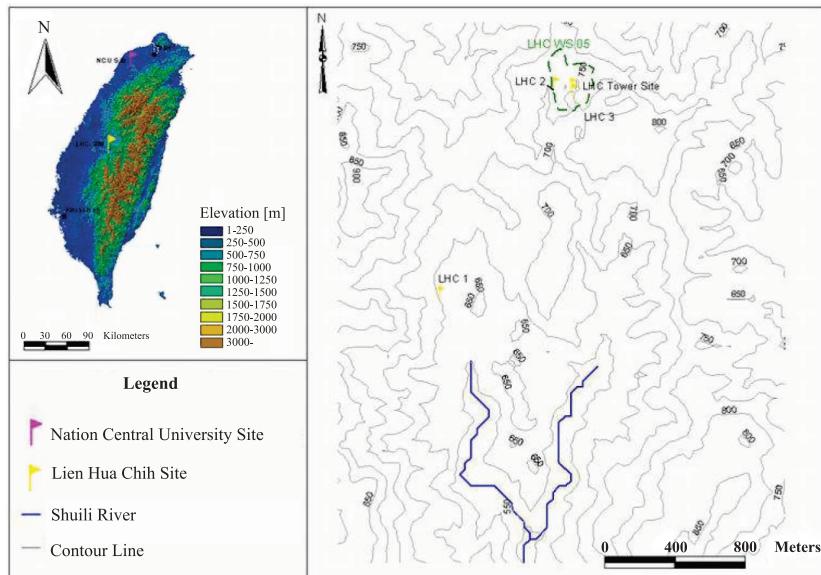


圖 1 蓮華池地理位置圖 (來源：國立中央大學地表水文研究室網頁)

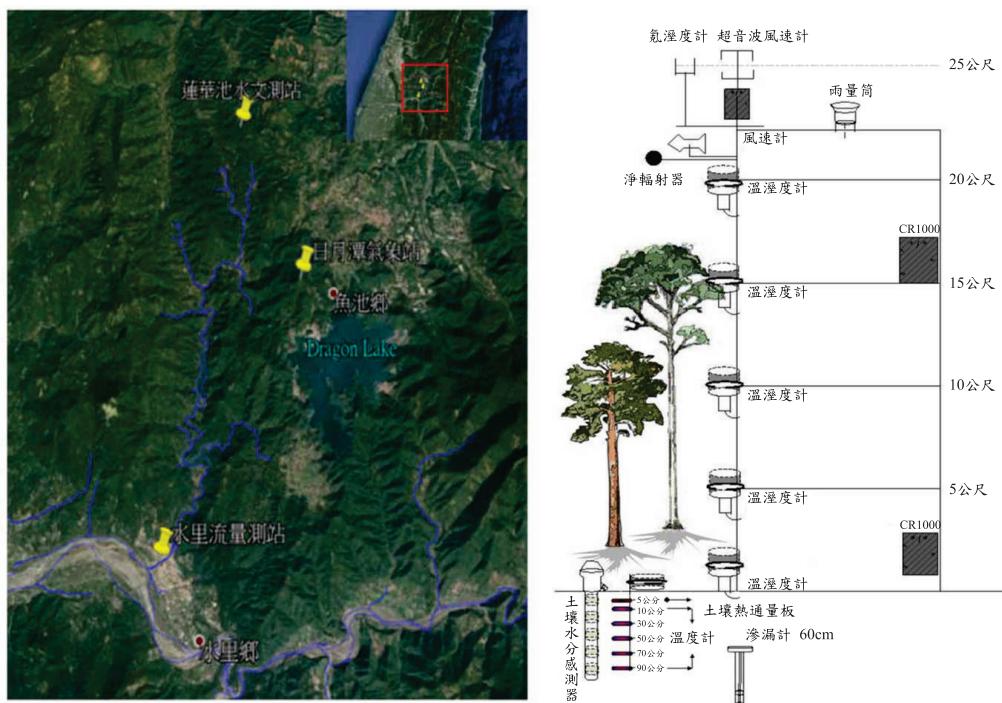
表 1 蓮華池歷史年均降水量與降水日數統計 (2010 至 2020 年)

月份	月雨量(mm)	降水日數(days)	月雨量占年雨量百分比(%)	月降水日數占年降水日數百分比(%)
Jan	61.1	1.7	3%	3%
Feb	45.1	1.5	2%	3%
Mar	73.0	2.5	4%	5%
Apr	152.7	5.4	7%	11%
May	336.9	8.4	16%	16%
Jun	461.3	9.5	22%	19%
Jul	316.6	7.3	15%	14%
Aug	380.4	8.1	18%	16%
Sep	106.9	3.3	5%	6%
Oct	30.4	0.7	1%	1%
Nov	51.5	1.5	3%	3%
Dec	40.7	1.2	2%	2%
總計	2056.5	72.5	100%	100%

備註：降水日選取單日雨量大於 10 mm

表 2 蓮華池水文與微氣象觀測儀器

Measurements	Company/Model	Height	Time resolution
Air Temperature	Campbell/CS215	5, 10, 15, 20 m	
Relative Humidity	Campbell/CS215	5, 10, 15, 20 m	
Soil Moisture	Sentek/ EnviroSCAN	-0.05, -0.1, -0.3, -0.5, -0.7, -0.9 m	
Net Radiometer	Campbell/ NR01	22 m	30 min
Soil Heat Flux	Hukseflux/ HPF01	-0.05 m	
Precipitation	Texas Electronics/ TE525	22 m	



(來源：Google Earth、國立中央大學地表水文研究室網頁)

圖 2 日月潭氣象站、水里流量站與蓮華池測站相對位置圖(左)與蓮華池氣象塔與地表觀測儀器配置圖(右)

2.2 觀測儀器

觀測儀器依系統種類可分高頻與低頻兩大類，高頻儀器為渦流協變系統，包含三維超音速風速計(CSAT3A, Campbell Scientific)、開放式紅外線氣體分析儀(EC150, Campbell Scientific)與資料紀錄器(CR1000, Campbell Scientific)。高頻儀器設置於氣象塔25 m高位置，高於平均植被高度，取樣頻率為10 Hz。低頻儀器用於觀測微氣象變化，包含淨輻射、溫濕度、土壤含水量、土壤熱通量等等，淨輻射計(NR01, Campbell Scientific)與雨量筒設於距地表22 m之位置、四組溫濕度計(CS215, Campbell Scientific)分別安裝於氣象塔5、10、15、20 m處，多點電容式土壤含水量計(Capacitance probe, Sentek)埋於地表下5、10、30、

50、70、90 cm處，觀測數據每30分鐘儲存於資料紀錄器(CR1000, Campbell Scientific)。

2.3 水文微氣象與能量通量資料

本研究分析的水文與微氣象資料，包含雨量、河川流量、土壤含水量、溫濕度與蒸發散量，能量通量包含潛熱、可感熱通量與淨輻射。水文與微氣象數據如雨量、土壤含水量、溫濕度與淨輻射等為測站觀測資料，惟雨量資料於2014年2~8月有缺失，取用蓮華池鄰近之氣象局日月潭氣象站進行雨量相關性分析，分析蓮華池與日月潭氣象站之月雨量具高度相關性(如圖3)， R^2 達0.88，因此，該段期間蓮華池之缺失資料由日月潭氣象站同時間之觀測雨量以圖3內之線性迴歸關係式進行月雨量資料補遺。河川流量數據取

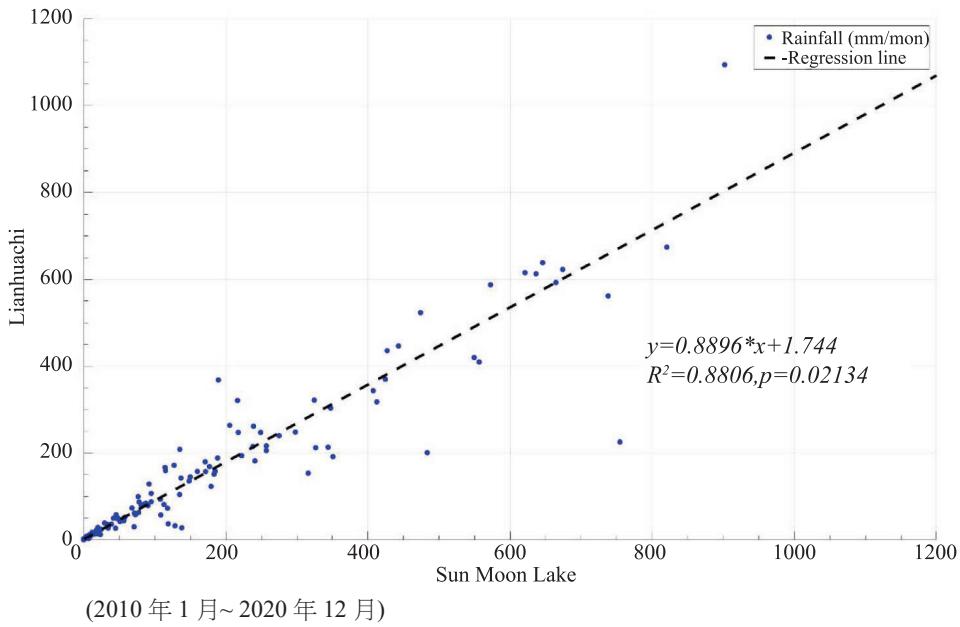


圖 3 蓮華池測站(Lianhuachi)與日月潭氣象站(Sun Moon Lake)月雨量迴歸分析

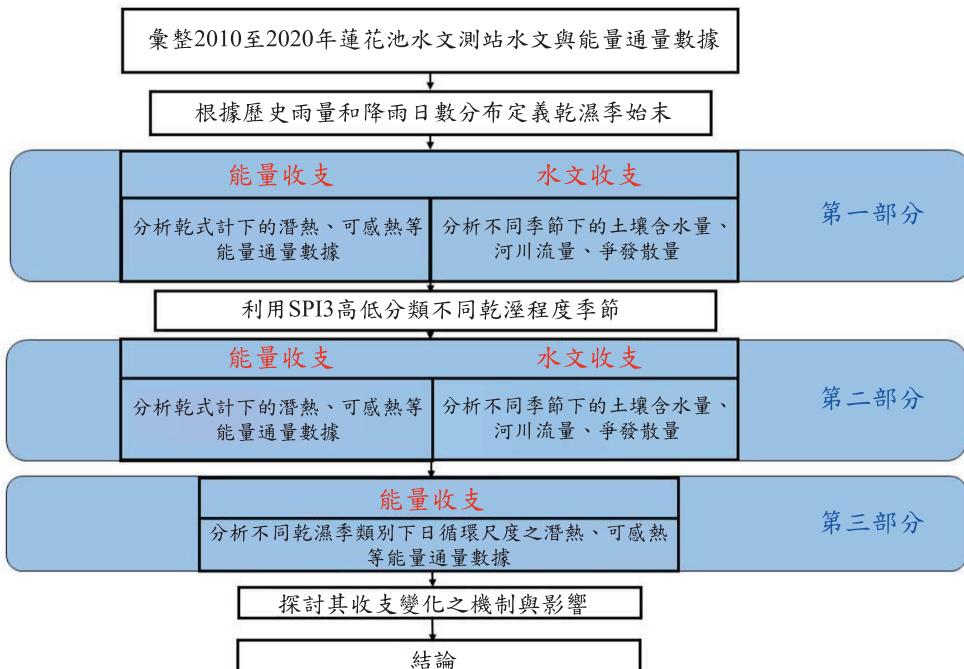


圖 4 研究流程圖

用水利署水里流量測站資料，資料頻率為每日一筆，前述測站空間相對位置如圖 2 左所示。在能量通量部分，包含淨輻射、潛熱通量與可感熱通量取自國立中央大學地表水文研究室，潛熱通量與可感熱通量之缺失資料為經過主成分分析法，再利用多元線性回歸以微氣象資料進行補遺後之完整連續資料(陳觀印，2019)，分析使用之通量資料時間解析度為 30 分鐘。

三、研究方法

3.1 研究流程

為分析森林環境的季節水文與能量收支差異，研究流程如圖 4 所示，包含三大部分：第一部分，先根

據歷史降水多寡先區分成乾季與濕季各 6 個月，再分析乾濕季的水文與能量差異；第二部分，利用三個月標準化降水指數(SPI3)將歷年的乾濕季進一步區分成偏乾乾季(dryer)、正常乾季(dry)與偏濕濕季(wetter)、正常濕季(wet)等四大類型，比較不同乾濕程度條件下的水文與能量收支；第三部分為延續第二部分之分類，比較日循環尺度的地表通量變化及水文量差異，藉由前述三部分的分析釐清乾濕季節變動下森林生態系的水文與能量變化特徵。以下分別說明標準化降水指數評估法(SPI)、渦流協變法(Eddy Covariance Method)及包溫比 (Bowen Ratio)估算方式。

3.2 標準化降水指數(Standardized Precipitation Indexes, SPI)與乾濕季分類

標準化降水指數為 McKee *et al.* (1993)所提出可應用於評估氣象型乾旱之指標，可藉由分析不同時間尺度(如 1、3、6、9、12 或 24 個月)之累積降水變化，評估一定時間內的枯旱程度，由於 SPI 為標準化之指標，SPI 值為負(正)時代表降水偏少(多)的情況，因此所計算 SPI 數值也可代表環境的乾濕狀態，如表 3 所示，當 SPI 大於 2 時極端多雨，而小於-2 時為極端乾旱。以台灣地區的降水特性，通常至少連續 3 個月的偏少降水才比較會有旱象的發生，因此本研究先將月雨量資料計算成連續 3 個月(前兩個月與當月)累積雨量之時間序列，再逐月計算 SPI 值，即為逐月之 SPI3 時間序列。

參考郭志豪等(2010)之研究，由於 SPI 的計算，降水量資料統計特性需滿足常態分佈或對數常態分布，而蓮華池測站之 3 個月累積降水資料分布，經統計檢定後較符合 Gamma 分布，因此需透過累積機率分布轉換為常態分佈以推估對應之 SPI3 數值。如圖 5(a)中藍點為蓮華池測站之 3 個月累積降水資料之累積機率分布，圖中實線為 Gamma 分布之累積機率曲線，而

表 3 SPI 指數分級 (McKee *et al.*, 1993)

SPI	等級
> 2	極端多雨
1.5 ~ 2	中度多雨
1 ~ 1.5	輕度多雨
-1 ~ 1	正常
-1.5 ~ -1	輕度乾旱
-2 ~ -1.5	中度乾旱
< -2	極端乾旱

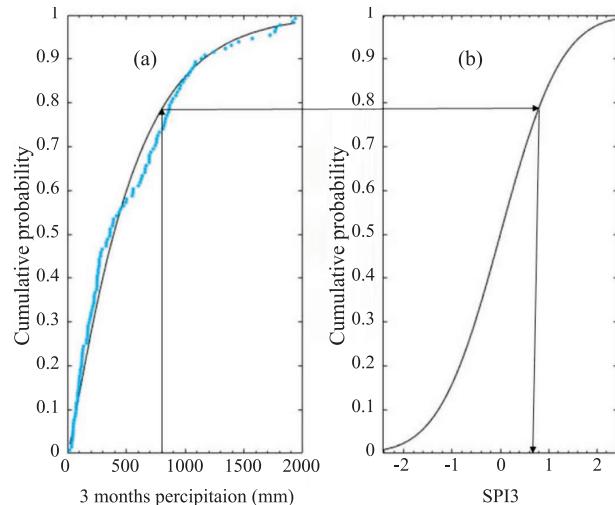


圖 5 SPI3 計算流程示意圖。圖(a)中藍點為 3 個月累積降水之累積機率，實線為 Gamma 分布；圖(b)為標準常態分佈之累積機率，橫軸即為 SPI3 數值

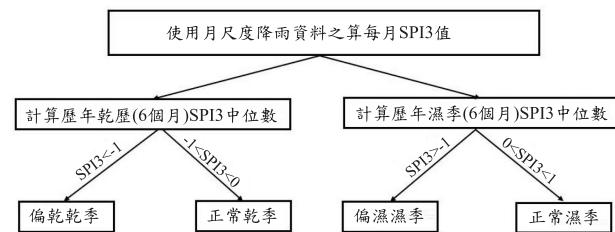


圖 6 四類型乾濕季分類流程圖

圖 5(b)為標準化常態分佈之累積機率曲線，對任一筆雨量資料(如圖 5(a)之 800 mm)之累積機率(約為 0.78)，以此相同累積機率可以轉換成圖 5(b)之 SPI3 值(約為 0.65)，透過此轉換 SPI3 具有標準常態化之特性。如前所述，3 個月累積降水為逐月之時間序列，計算之 SPI3 也是月尺度時間序列。

在 2.1 節已經依據月雨量將各年資料，區分成濕季(4~9 月)與乾季(10~隔年 3 月)，而計算 SPI3 的目的是為了進一步區分不同乾濕程度之乾季與濕季，本研究採用之分類方式為以各年乾季與濕季之 SPI3 中位數與正負 1 倍標準偏差為比較基準，分類流程如圖 6 所示，分成偏乾乾季($SPI3 < -1$)、正常乾季($-1 < SPI3 < 0$)、正常濕季($0 < SPI3 < 1$)、偏濕濕季($SPI3 > 1$)，對應表 3 的分類，本研選取之偏乾乾季為至少發生輕度乾旱，而偏濕濕季為至少發生輕度多雨。透過這樣的分類，以乾季為例，就可以將各年的乾季區分成偏乾乾季與正常乾季二種類型，進一步比較其水與能量收差的差異，同理各年濕季則可區分成偏濕濕季與正常濕季二類。

3.3 涡流協變法(Eddy Covariance Method)與通量計算

渦流協變法可用於計算陸氣間之動量、可感熱、潛熱與氣體(如二氧化碳)通量傳輸，在紊流發展完整的條件下通常會有較高之準確性，觀測需使用高頻之三軸超音波風速儀與紅外線氣體分析儀以解析風速、溫度、水氣與二氧化碳之瞬時變化，資料解析度通常為 10 ~ 20 Hz，在符合泰勒假設(Taylor, 1938)的前提下，利用雷諾分解(Reynolds, 1895)將觀測之瞬時變化物理量，拆解成平均量與擾動量，在特定平均時距下(一般為 30 分鐘)，計算垂直風速擾動量與特定物理量擾動量的乘積之平均值，即可推算該物理量之地表通量值(F)。舉例來說，例如水氣密度為 ϕ (kg/m³)，依雷諾分解可拆解成平均量($\bar{\phi}$)及擾動量(ϕ')，水氣之垂直傳輸通量 F 可以式(2)計算，即為單位面積單位時間之水氣垂直通量(kg/m²/s)，根據雷諾分解將式(1)代入式(2)，垂直風速也拆解成平均量與擾動量得到式(3)：

$$\phi = \bar{\phi} + \phi' \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$F = \overline{\phi w} \quad \dots \dots \dots (2)$$

$$F = (\bar{\phi} + \phi')(\bar{w} + w') \quad \dots \dots \dots (3)$$

其中，w 為垂直風速(m/s)， \bar{w} 為平均垂直風速(m/s)， w' 為垂直風速擾動量(m/s)。在雷諾分解中，擾動量之平均值為 0，可將式(3)改寫為式(4)：

$$F = \bar{\phi}\bar{w} + \overline{\phi'w'} \quad \dots \dots \dots (4)$$

而由於近地表之平均垂直風速需為 0(即 $\bar{w} = 0$)，式(4)簡化成式(5)：

$$F = \overline{\phi'w'} \quad \dots \dots \dots (5)$$

而由於擾動量為原始物理量減去平均量，因此式(5)也等同於在計算 ϕ 與 w 的共變異量(covariance)，因此稱為 Eddy Covariance。而潛熱與可感熱通量使用渦流協變法計算，表示成能量通量如式(6)與(7)所示：

$$LE = \lambda_w \rho_a \overline{w'q'} \quad \dots \dots \dots (6)$$

$$H = \rho_a c_p \overline{w'T'} \quad \dots \dots \dots (7)$$

其中，LE 為潛熱通量(W/m²)；H 為可感熱通量(W/m²)； λ_w 為蒸發潛熱(J/kg)； ρ_a 為空氣密度(kg/m³)； w' 為垂直風速擾動量(m/s)； q' 為比濕； T' 為空氣位

溫擾動量(K)； c_p 為空氣定壓比熱(J/kg/K)。

蓮華池觀測之高頻通量資料，使用 JapanFlux 之通量計算軟體 Flux Calculator 計算。通量觀測資料會因紊流發展不完整、大氣條件不佳、儀器問題及雜訊等造成的異常值，需先通過原始數據品質 QC/QA (quality check and quality assurance)，以確保資料滿足渦流協變法假設(Foken et al., 2004)，以蓮華池測站通量資料而言，透過坐標軸轉換、異常值剔除、紊流風速檢核、穩態測試等 QC/QA 過程，大約會有 60 % 的通量資料被剔除而造成通量資料的缺失，本研究蓮華池通量資料在缺失資料補遺為採用陳觀印(2019)所發展結合主成分分析法與多變數迴歸分析之補遺技術進行通量補遺。

3.4 包溫比 (Bowen Ratio)

包溫比(Bowen Ratio)為可感熱通量與潛熱通量之比值，如式(8)所示，可用以評估環境的乾濕程度及反應地表能量的分配。

$$Bowen Ratio = \frac{H}{LE} \quad \dots \dots \dots (8)$$

當包溫比大於 1 時，代表環境相對乾燥，較少水分可供蒸發散，因此，能量大多轉以可感熱的形式消散；包溫比小於 1 時，代表環境相較潮濕，能量分配至潛熱的比例也較可感熱多，透過包溫比的高低與變化，可以比較乾濕程度的變化，而從能量分配的角度，可以了解森林環境在不同季節影響下，於季、月、日等不同時間尺度的潛熱與可感熱通量變化。

四、結果與討論

4.1 乾季與濕季之水文和能量收支比較

首先分析乾季與濕季之水文與通量差異及逐月變化，圖 7 為歷年平均各月之水文收支比較(左側為濕季月份，右側為乾季月份)，直條圖為雨量、點實線為各物理量，蓮華池地區乾濕季降水差異極大，特別是在 5、6 月梅雨季及 7、8 月颱風季與夏季午後旺盛對流雨期間，反應在水文收支上，濕季的土壤水分、河川流量與蒸發散量皆明顯高於乾季，且與降水量有較高相關性。而乾季期間由於降水量與降水日皆較少，土壤水分、河川流量、蒸發散量之變動也相對較平緩。

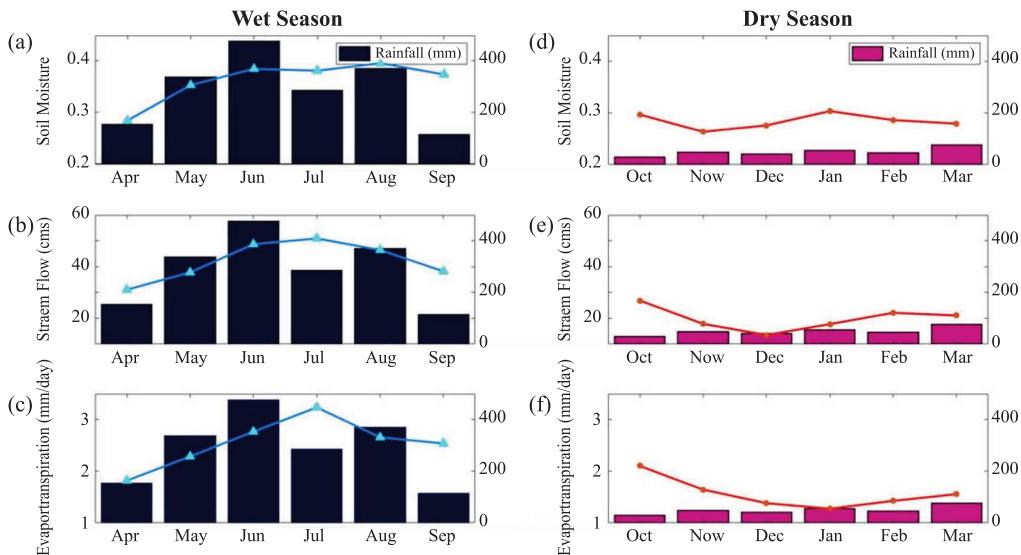


圖 7 歷年乾濕季各月之日平均(a)(d)土壤含水量、(b)(e)河川流量、(c)(f)蒸發散與月總降水量變化 (直條圖為雨量、點實線為各物理量)

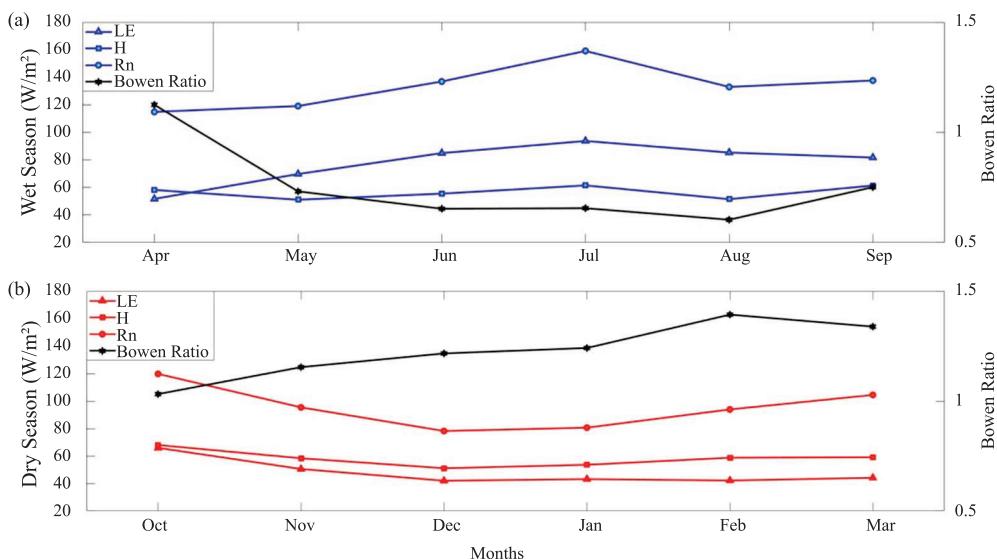


圖 8 歷年(a)濕季、(b)乾季各月之日平均潛熱(LE)、可感熱(H)、淨輻射通量(Rn)與包溫比(Bowen Ratio)變化

圖 8 為歷年平均各月之能量收支(濕季為圖 8(a)、乾季為圖 8(b))，圖中實線為各月日平均之潛熱通量(LE)、可感熱通量(H)、淨輻射通量(Rn)與包溫比(Bowen Ratio)。濕季期間 LE 比 H 大，乾季則相反，從包溫比來看，濕季之包溫比小於 1，而乾季則為大於 1。除前段所討論的濕季降水比乾季為大之外，濕季也有較高淨輻射，說明在濕季期間，因為能量與水氣皆充足的條件下，森林之潛熱通量大於可感熱通量。濕季的 LE 明顯大於乾季的 LE，而乾季期間雖然淨輻射較低，森林仍扮演重要能量消散功能，提供部分潛熱，結果為乾濕季的 H 差異不大，但乾季土壤含水量變得較低以支撐蒸發散(圖 7)。

4.2 不同程度乾濕季水文與能量收支分析與討論

依據 3.2 節的方法計算各月之 SPI3，繪製各年乾季與濕季的 SPI3 分布，如圖 9 所示，盒狀圖中間實線為中位數，矩形範圍為四分位距，可以發現在部分年份中，不論是乾季或濕季其 SPI3 分布變異頗大，例如 2011、2012、2014、2017 年的濕季，2012~2013、2015~2016、2016~2017、2018~2019、2019~20202 的乾季，但共同特徵為濕季之 SPI3 大多為正值，而乾季大多為負值，且若以各年乾濕季之 SPI3 中位數，分類

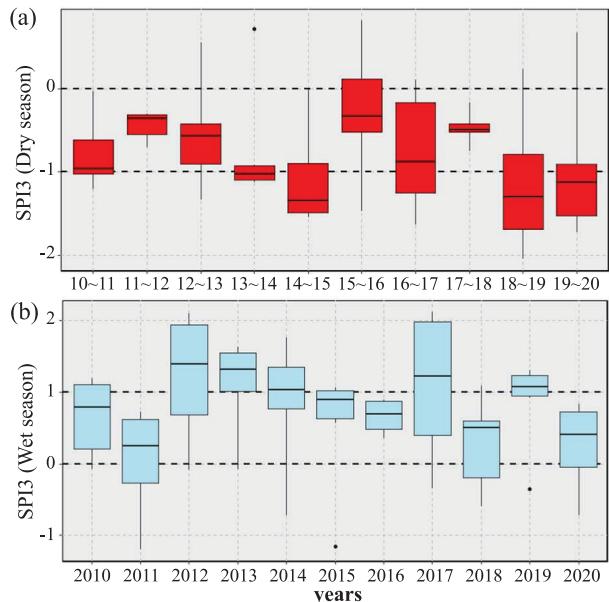


圖 9 歷年(a)乾季與(b)濕季 SPI3 盒狀圖(盒狀圖中間實線為中位數，矩形範圍為四分位距，圖(a)橫軸座標 10 ~ 11 為 2010 ~ 2011 之縮寫)

表 4 各年乾季與濕季之 SPI3 中位數

乾季年分	SPI3 中位數	濕季年分	SPI3 中位數
2010~2011	-0.96	2010	0.78
2011~2012	-0.35	2011	0.25
2012~2013	-0.56	2012	1.39
2013~2014	-1.02	2013	1.31
2014~2015	-1.34	2014	1.02
2015~2016	-0.33	2015	0.90
2016~2017	-0.88	2016	0.69
2017~2018	-0.49	2017	1.22
2018~2019	-1.30	2018	0.50
2019~2020	-1.12	2019	1.07
		2020	0.41

註：乾季為 10~ 隔年 3 月；濕季為 4~9 月，紅色、藍色分別為偏乾旱季、偏濕濕季類別，2014 年資料缺失較多，雖有補遺但暫不列入分析討論。

出偏乾旱季($SPI3 < -1$)與偏濕濕季($SPI3 > 1$)，結果如表 4 所示，其中 2010 ~ 2011 乾季之 SPI3 中位數為-0.96，歸類為偏乾旱季，因此出現偏乾旱季的年份有 2010 ~ 2011、2013 ~ 2014、2018 ~ 2019、2019 ~ 2020；出現偏濕濕季的年份為 2012、2013、2017、2019。

在能量收支部分，表 5 中列有潛熱、可感熱與淨輻射之最大、最小、中位數與標準差之詳細數值。從整體趨勢，在潛熱通量為：偏濕濕季 > 正常濕季 > 偏乾旱季 ≈ 正常乾季；可感熱通量則為：正常濕季 > 偏乾旱季 > 偏濕濕季 > 正常乾季；淨輻射為：正常

濕季 > 偏濕濕季 > 偏乾旱季 > 正常乾季。若從四種乾濕季節類型來看，偏濕濕季有最大之潛熱、正常濕季有最大之可感熱與淨輻射、正常乾季之淨輻射、潛熱、可感熱皆最小。造成這些季節性水文與能量收支差異的原因討論如下：

- (1) 潛熱通量：偏濕濕季 > 正常濕季(圖 10(a))，主要因為偏濕濕季有較大之降水(圖 10(d))；也反應在土壤含水量(圖 10(e))也是偏濕濕季 > 正常濕季；但淨輻射(圖 10(c))為正常濕季 > 偏濕濕季，因為偏濕濕季有較多降水日。
- (2) 潛熱通量：正常乾季與偏乾旱季差異不顯著(圖 10(a))，顯示陸氣間之潛熱傳輸在乾季期間變成地表狀態逐漸扮演關鍵，因為偏乾旱季期間之降水較少(圖 10(d))，蒸發散所需水分將受限於地表乾濕狀態，所分析年份資料，在偏乾旱季之土壤含水量也最小(圖 10(e))。
- (3) 可感熱通量：正常濕季 > 偏濕濕季(圖 10(b))，由於潛熱和可感熱為消散地表能量的主要通量，主要原因因為正常濕季有較大之淨輻射(圖 10(c))，雖有充足水分提供蒸發散，但多餘之能量仍需透過可感熱通量消散。
- (4) 可感熱通量：偏乾旱季 > 正常乾季(圖 10(b))，主要原因因為淨輻射在偏乾旱季 > 正常乾季(圖 10(c))，而潛熱在偏乾旱季與正常乾季之差異已經不顯著(圖 10(a))，多餘之能量仍需透過可感熱通量消散。
- (5) 淨輻射：正常濕季 > 偏濕濕季(圖 10(c))，主要原因因為偏濕濕季有較大降水(圖 10(d))與較多降水日(圖 10(h))，同樣趨勢也反應在土壤含水量(圖 10(e))、河川流量(圖 10(f))、蒸發散量(圖 10(g))，降水多寡在濕季期間影響著水文與能量之變動趨勢。
- (6) 淨輻射：偏乾旱季 > 正常乾季(圖 10(c))，但差異不顯著，由於偏乾旱季之降水更低(圖 10(d))與降水日更少(圖 10(h))，而使淨輻射稍微大一些。

綜合而言，濕季的能量通量受大氣條件影響較深，乾季類別下的能量以可感熱形式為主且同時受地表狀態影響所控制，而偏乾旱季與正常乾季雖有降水上的不同，蓮華池森林在分析資料年份並未因雨量減少而受顯著影響，反應在潛熱通量差異不顯著；此外，乾燥環境下的土壤含水量和蒸發散量具補償作用，當可用水稍嫌不足時，森林根系植物可提取土壤水分作為蒸發散水分來源，因此，偏乾旱季的土壤含水量較正常乾季為低，但蒸發散量卻極為相似(圖 10(e)、(g))。淨輻射與可感熱通量於四種季節分類具不同特徵，受降水時雲遮蔽效應，且北半球因不同季節的太陽入射

表 5 偏乾(dryer)、正常乾季(dry)與正常濕季(wet)、偏濕(wetter)季節下之日均水文與能量收支統計表

種類	潛熱通量 W/m ²	可感熱通量 W/m ²	淨輻射 W/m ²	土壤含水量 --	河川流量 cm ³ /s	蒸發散量 mm/day	月降水量 mm/month	降水日數 day
偏濕濕季 (wetter)	最大值	100.7	95.1	169.8	0.52	142.6	3.56	1116.7
	最小值	65.0	17.9	33.1	0.27	6.7	2.30	37.2
	中位數	84.0	58.6	112.3	0.41	36.8	2.97	312.9
	標準差	10.1	19.4	29.7	0.07	32.7	0.36	314.5
正常濕季 (wet)	最大值	110.3	99.5	215.1	0.52	86.9	3.91	622.8
	最小值	42.2	12.3	17.3	0.25	0.5	1.49	12.6
	中位數	77.4	65.3	145.9	0.37	26.8	2.74	197.6
	標準差	16.6	23.3	46.2	0.08	13.6	0.59	162.8
正常乾季 (dry)	最大值	76.8	79.3	171.9	0.45	63.9	2.72	240.1
	最小值	30.4	14.8	10.3	0.21	0.8	1.07	0.4
	中位數	42.9	45.3	79.6	0.30	24.4	1.51	37.7
	標準差	9.6	17.8	35.7	0.06	14.4	0.34	53.7
偏乾乾季 (dryer)	最大值	72.8	98.7	207.7	0.35	27.0	2.57	157.5
	最小值	33.2	20.0	13.1	0.17	0.1	1.17	2.3
	中位數	44.0	64.2	82.4	0.24	11.7	1.55	13.8
	標準差	10.9	20.6	37.9	0.04	6.1	0.39	43.6

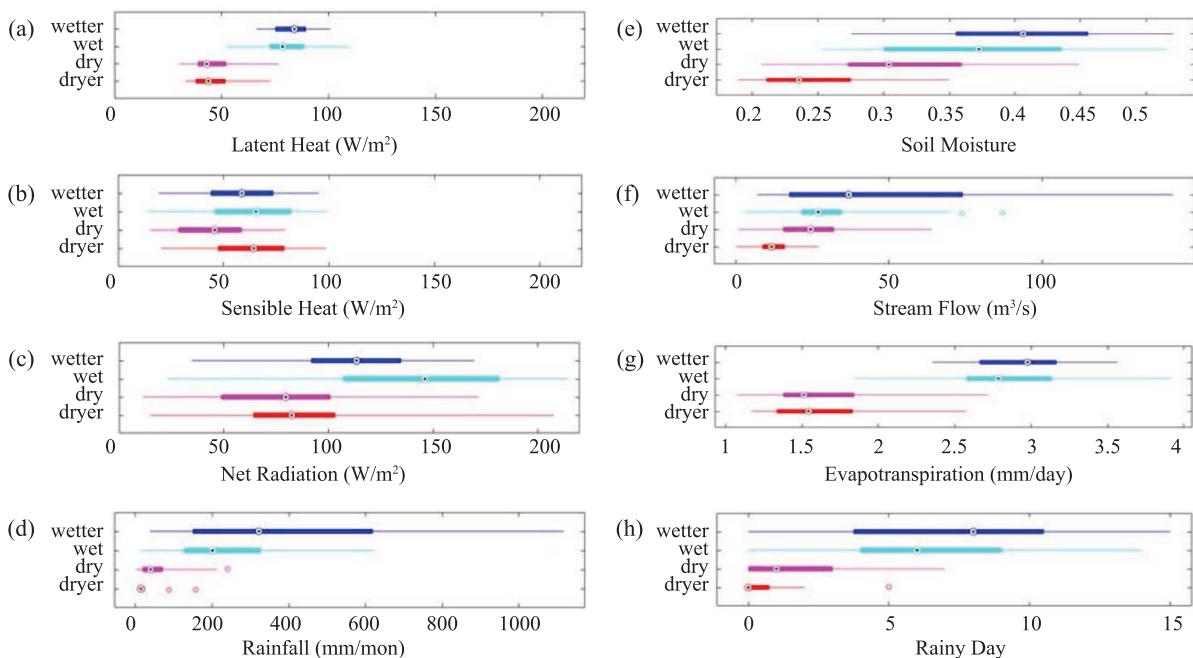


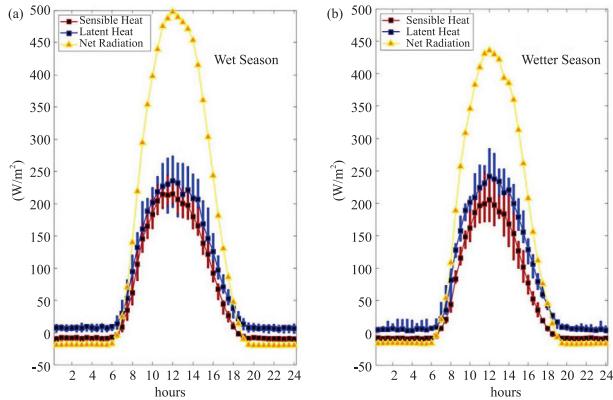
圖 10 偏濕濕季(wetter)、正常濕季(wet)、正常乾季(dry)與偏乾乾季(dryer)之、(a)日均潛熱、(b)日均可感熱、(c)日均淨輻射、(d)月降水量、(e)日均土壤含水量、(f)日均河川流量、(g)日均蒸發散量與(h)月降水日數之盒狀圖(實心棒範圍為四分位距範圍，黑點為中位數、空心點為異常值)

角度差異使淨輻射值產生乾濕季節差異，進而反應在可感熱通量的季節性差異上。

4.3 不同季節下日循環能量分析與討論

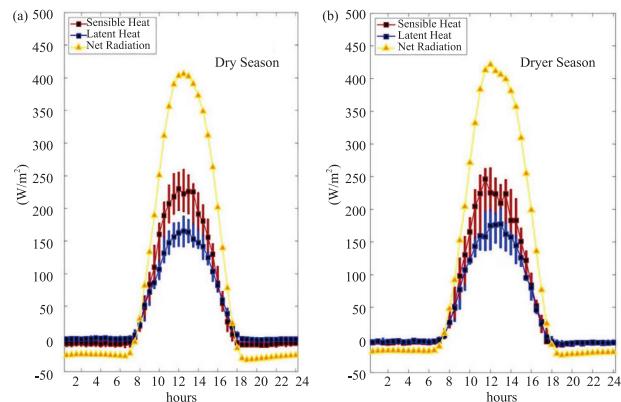
正常濕季與偏濕濕季的日循環潛熱、可感熱通量

與淨輻射如圖 11 所示，整體而言，潛熱通量大於可感熱通量，與濕季期間多雨的環境有關。潛熱通量與可感熱通量的變化，在 10 ~ 14 時之間最顯著，也是淨輻射最強的時段，且偏濕濕季在潛熱通量與可感熱通量的差值比正常濕季還要大，但淨輻射卻是正常濕季遠大偏濕濕季，說明偏濕濕季有充沛的降水提供蒸發散



(黑點為中位數、實心棒範圍為四分位距，資料解析度為半小時)

圖 11 (a)正常濕季與(b)偏濕濕季之日循環潛熱、可感熱通量與淨輻射值



(黑點為中位數、實心棒範圍為四分位距，資料解析度為半小時)

圖 12 (a)正常乾季與(b)偏乾乾季之日循環潛熱、可感熱通量與平均淨輻射值

所需，且淨輻射因為降水日較多而較小(如圖 10)，也就是在足夠淨輻射能量條件下，偏濕濕季因環境較濕潤，而有更高的潛熱通量，地表狀態在偏濕濕季扮演重要角色。

正常乾季與偏乾乾季的日循環潛熱、可感熱通量與淨輻射如圖 12 所示，整體而言，可感熱通量大於潛熱通量，與乾季期間少雨的環境有關。潛熱通量與可感熱通量的變化，也是在 10~14 時之間最顯著，為淨輻射最強的時段。偏乾乾季的淨輻射略大於正常乾季的淨輻射，為偏乾乾季降水日更少的原因，而由於二類乾季間之潛熱差異不大，偏乾乾季的可感熱也就略大於正常乾季的可感熱。相對而言，能量收支在正常乾季與偏乾乾季的差異並未如正常濕季與偏濕濕季顯著，且由於降水皆偏少，在淨輻射差異不大的條件下，正常乾季與偏乾乾季的地表環境抑制了能量收支的變

異。以蓮華池樣區而言，在所分析資料期間，常綠闊葉林之根系可在乾燥的環境下從土壤中獲取水分，惟偏乾乾季的土壤水分最低。

五、結論

本研究分析臺灣中部蓮華池試驗集水區常綠闊葉混生林 2010~2020 年之水文微氣象與通量觀測數據，探討水與能量收支在不同乾濕季節之變異特徵。依據降水多寡，區分為 4~9 月的濕季及 10~ 隔年 3 月的乾季，濕季降水占全年降水達 83%，蓮華池地區乾濕季降水差異顯著。分析結果顯示濕季的淨輻射、潛熱皆較乾季大，可感熱通量則無明顯差異，因臺灣濕季正處北半球夏季，太陽輻射較大使淨輻射較高，充沛的降水使潛熱較高，使濕季的包溫比小於乾季。水文收支也受降水影響顯著，濕季的土壤含水量、河川流量與蒸發散量皆高於乾季。

進一步利用 SPI3 將歷年之濕季與乾季分類成偏濕濕季、正常濕季、正常乾季與偏乾乾季四種等級，分析結果顯示在濕季二個類別的能量收之差異，受降水多寡影響顯著，偏濕濕季因為有較多的降水，相對於正常濕季有較低的淨輻射、較高的潛熱與較低的可感熱；而乾季二個類別的能量收支差異，因為降雨偏少，便未如濕季類別顯著，但反映出在偏乾乾季更少的降水對能量收支的影響。

而在日循環尺度的能量收支比較，基本上反映原先四種乾濕類別的特徵，能量通量在每日的 10~14 期間因為有較高的淨輻射，紊流也發展較完整，而有顯著的潛熱與可感熱通量變化，且濕季二個類別的日循環通量變化皆較乾季二個類別顯著。陸氣交互作用的季節性特徵受淨輻射與降水影響顯著，濕季的能量收支受大氣條件控制，乾季則以地表狀態為主，水文收支的季節性變化受雨量多寡影響顯著。在所分析的資料期間，蓮華池並未發生持續且嚴重的乾旱，常綠闊葉林於輕度至中度乾旱期間仍足以由土壤水分支撐蒸發散作用，且未出現明顯的蒸發散抑制作用，這可以從偏乾乾季與正常乾季的潛熱並未有顯著差異得到佐證。然而，本研究的分析仍有許多可持續分析的議題，例如在日循環尺度下，其他大氣條件如風速、相對溼度、溫度如何影響水與能量收支變化，而在極端降水事件前後，水與能量收支的差異會是怎樣的變化，透過長期且持續的水文與能量觀測有助於我們了解森林生態系的季節變動特徵，提出更好的科學數據協助在森林經營與管理有更好的永續發展策略。

致謝

本研究在科技部專題計畫(MOST 108-2116-M-008-003、MOST 109-2116-M-008-030)經費支持下，並承蒙農委會林業試驗所蓮華池研究中心多年來提供試驗場地與行政協助，謹致謝忱。感謝農工學報審查委員提供許多寶貴建議。

參考文獻

- 76
1. Borghetti, M., Cinnirella, S., Magnani, F. & Sacacino, A., "Impact of long-term drought on xylem embolism and growth in *Pinus halepensis* Mill," *Trees*, 12, 187-195, 1998.
 2. Chen, J.Y., Shao, C.L., Jiang, S.C., Qu, L.P., Zhao, F.Y., Dong, G., "Effects of change in precipitation on energy and water balance in a Eurasian meadow steppe," *Ecological Processes*, 8, 17, 2019.
 3. Doughty, C.E., Metcalfe, D. B., Girardin, C. A. J., Farfán Amézquita, F., Galiano Cabrera, D., Huaraca Huasco, W., Silva-Espejo, J. E., Araujo-Murakami, A., da Costa, M. C., Rocha, W., Feldpausch, T. R., Mendoza, A. L. M., da Costa, A. C. L., Meir, P., Phillips, O. L. Malhi, Y., "Drought impact on forest carbon dynamics and fluxes in Amazonia," *Nature*, 519, 78-82, 2015.
 4. Dumortier P., de la Motte, L.G., Andriamandroso, A.L.H., Aubinet, M., Beckers, Y., Bindelle, J., Lebeau, F., DeCook, N., Heinesch, B., "Beef cattle methane emission estimation using the eddy covariance technique in combination with geolocation," *Agricultural and Forest Meteorology*, 297, 108249, 2021.
 5. Foken, T., Gockede, M., Mauder, M., Mahrt, L., Amiro, B., Munger, W., "Post-field data quality control," pp. 181-208 in *Handbook of micrometeorology: a guide for surface flux measurement and analysis*, edited by Lee, X., Massman, W., Law, B., Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, Netherlands, 2004
 6. Foken, T. and Wichura, B., "Tools for quality assessment of surface-base flux measurement," *Agricultural and Forest Meteorology*, 78, 83-105, 1996.
 7. Guo, Y. and Shen, T. J., "Quantifying water and energy budgets and the impacts of climatic and human factors in the Haihe River Basin, China: 2. Trends and implications to water resources," *Journal of Hydrology*, 527, 251-261, 2015.
 8. IPCC, Climate Change: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp., 2013.
 9. Kuricheva, O.A., Avilov, V.K., Dinh, D.B., Sandlersky, R.B., Kuznetsov, A.N., Kurbatova, J.A., "Seasonality of energy and water fluxes in a tropical moist forest in Vietnam," *Agricultural and Forest Meteorology*, 156, 298-299, 2021.
 10. Lean, J. and Warrilow, D. A., "Simulation of the regional climatic impact of Amazonian deforestation," *Nature*, 342, 411-413, 1989.
 11. Lu, S.Y., Liu, C.P., Hwang, L.S., Wang, C.H., "Hydrological Characteristics of a Makino Bamboo Woodland in Central Taiwan," *Taiwan Journal of Forest Science*, 2, 1, 81-93, 2007.
 12. McKee, T.B., Doesken, N.J. and Kleist, J., "The relationship of drought frequency and duration to time scales," The 8th Conference on Applied Climatology, January 17-22, Anaheim, California, 179-184, 1993.
 13. Mishra, A. K. and Singh, V.P., "A review of drought concepts". *Journal of Hydrology*, 391, 1-2, 202-216, 2010.
 14. Spellman, P., Pritt, A.B.C. Pritt., Salazar, N., "Tracking changing water budgets across the Bahamian archipelago," *Journal of Hydrology*, 598, 2021.
 15. Palmer, W.C., "Meteorological drought," Research Paper No. 45, Weather Bureau, U.S. Dept. of Commerce, Washington, DC., 1965.
 16. Pahari, R., Leclerc, M.Y., Zhang, G.S., Nahrawi, H., Raymer, P., "Carbon dynamics of a warm season turfgrass using the eddy-covariance technique," *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 251, 11-25, 2018.
 17. Potop, V., Možný, M., Soukup, J., "Drought evolution at various time scales in the lowland regions and their impact on vegetable crops in the Czech Republic," *Agricultural and Forest Meteorology*, 156, 121133, 2012.
 18. Raz-Yaseef, N., Yakir, D., Schiller, G., Cohen, S., "Dynamic of evapotranspiration partitioning in a semi-arid forest as affected by temporal rainfall patterns," *Agricultural and Forest Meteorology*, 157, 77-85, 2012.

19. Reynolds, O., "On the dynamical theory of Incompressible viscous fluids and the determination of the criterion," *Philosophical Transactions of Royal Society of London*, 186:123-164, 1895.
20. Rodrigues, T.R., de Paulo, S.R., Novais, J.W.Z., Curado, L.F.A., Nogueira, J.S., de Oliveira, R.G., Lobo, F.A., Vourlitis, G.L., "Temporal patterns of energy balance for a Brazilian tropical savanna under contrasting seasonal conditions," *International Journal of Atmospheric Sciences*, 326010, 2013.
21. Taylor, G. I., "The Spectrum of Turbulence. Proceedings of the Royal Society of Landon," Series A, *Matheatical and physical Sciences* 164:479-490, 1938.
22. Vicente-Serrano, S.M., Begueria, S., and Lopez-Moreno, J. I., "A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index," *Journal of Climate*, 23, 1696-1718, 2010.
23. Wang, T., Tu, X.J., Singh, V.P., Chen, X.H., Lin, K., "Global data assessment and analysis of drought characteristics based on CMIP6," *Journal of Hydrology*, 596, 2021.
24. Wong, G., Lambert, M.F., Leonard, M., Metcalfe, A.V., "Drought analysis using trivariate copulas conditional on climatic states," *Journal of Hydrologic Engineering*, 15, 2, 129-141, 2010.
25. Zarch, A., M.A., Sivakumar, B., Malekinezhad, H., Sharma, A., "Future aridity under conditions of global climate change," *Journal of Hydrology*, 554, 451-469, 2017.
26. Zarch, A., M.A., Sivakumar, B., Sharma, A., "Droughts in a warming climate: a global assessment of Standardized precipitation index (SPI) and Reconnaissance drought index (RDI)," *Journal of Hydrology*, 526, 183-195, 2015.
27. Zhang, C., Brodylo, D., Sirianni, M.J., Li, T.T., Comas, X., Douglas, T.A., Starr, G., "Mapping CO₂ fluxes of cypress swamp and marshes in the Greater Everglades using eddy covariance measurements and Landsat data," *Remote Sensing of Environment*. 262, 112523, 2021.
28. 李昱祺、王嘉琪、翁叔平、陳正達、鄭兆尊，「臺灣氣象乾旱特性未來趨勢推估」，大氣科學，第 47 期第 1 號，2019。
29. 林志彥，臺灣乾旱特性變動與頻率分析之研究，國立成功大學水利及海洋工程學系，碩士論文，2007。
30. 林棽、劉紹臣、林沛練，2014，臺灣地區乾旱問題之分析，國立中央大學大氣科學系大氣物理研究所。
31. 袁一夫，應用通量變異法與渦流協變法推估地表通量，國立中央大學水文與海洋科學研究所碩士論文，2008。
32. 陳奕穎，發展遙測資料反演可感熱與潛熱通量之研究，國立中央大學水文與海洋科學研究所碩士論文，2004。
33. 陳觀印，發展渦流協變法之潛熱與二氫化碳通量補遺技術，國立中央大學水文與海洋科學研究所碩士論文，2019。
34. 黃正良，蓮華池天然闊葉林及杉木人工林試驗集水區水文與水質特性之探討，國立臺灣大學森林環境暨資源學研究所學位博士論文，2010。
35. 葉正霖，臺灣中部溪流源頭森林集水區水文現象及特性之研究，國立中興大學水土保持學系碩士論文，2003。
36. 蔡玉袁，臺灣中部森林集水區水文反應之研究，國立中興大學水土保持學系碩士論文，2000。
37. 郭志豪、楊道昌、郭振民、陳憲宗、游保彬，「應用ENSO 指標建立乾旱機率預報模式—以臺灣地區為例」，農業工程學報，第 58 卷第 1 期，2012。
38. 臺灣氣候變遷推估與資訊平台建置計畫團隊，臺灣氣候變遷科學報告 2017-物理現象與機制，國家災害防救科技中心編印，2017。