JOURNAL OF TAIWAN AGRICULTURAL ENGINEERING
VOL. 69, NO. 3, SEPTEMBER 2023
DOI - 10.29974/JTAE.202309_69(3).0003

臺灣多時間尺度降雨集中型態之時空變化分析

SPATIOTEMPORAL VARIABILITY OF PRECIPITATION CONCENTRATION PATTERNS AT MULTI-TIME SCALE IN TAIWAN

國立成功大學
資源工程學系
博士班研究生
黃 嘉 琦
Chia-Chi Huang

國立成功大學
資源工程學系
碩士班研究生
陳 信 宇
Hsin-Yu Chen

國立成功大學
資源工程學系
副教授
葉 信 富*
Hsin-Fu Yeh

摘　要

降雨對於農業經濟活動、供水管理以及維持生態環境至關重要。臺灣位處熱帶與副熱帶季風氣候區而乾濕季分明，加上近年來氣候變遷增加水文不確定性，掌握降雨時空分佈特徵將有助於剖析降雨型態如何改變以及其對區域的影響。近年來，降雨集中狀況已被多數研究視為探討洪水與乾旱等極端降雨事件風險的有效工具，因此本研究藉由以日與月尺度資料為基礎的日降雨集中指數 DPCI (Daily Precipitation Concentration Index) 與月降雨集中指數 MPCI (Monthly Precipitation Concentration Index)，探討臺灣 1960 至 2020 年在氣象、水文季節與水文年尺度的降雨集中狀況與其空間分佈，並透過兩種指數間之相關性瞭解各時間尺度以及兩種指數間是否存在空間關係，並進一步綜整臺灣各分區在不同時間尺度所對應的降雨型態，最後應用趨勢與同質性檢定分析降雨集中程度的長期變化以及潛在的降雨型態轉換。結果顯示各時間尺度之平均 DPCI 皆呈高度降雨集中，平均 MPCI 則皆呈中度集中以上。DPCI 與 MPCI 於不同時間尺度之空間分佈差異可能受到降雨來源的強度、影響範圍以及起訖時間等因素所影響，亦是導致高度顯著正相關性僅出現在春季 DPCI 與春季及平均年 MPCI 間的原因。此外，DPCI 與 MPCI 分別與經緯度的相關性，說明臺灣各區域的降雨型態受到不同因素所影響，且分區結果顯示中部與南部區域在任一時間尺度皆更傾向乾濕極端分明。趨勢檢定結果可以北回歸線為界，北回歸線以南之山區在夏季與濕季乾濕分明程度呈上升趨勢，西南部地區在乾季之降雨型態趨向均勻乾燥；北回歸線以北之東部則在年尺度降雨趨向均勻濕潤。本研究結果說明應用不同降雨集中指數有助於將降雨變率以不同時間尺度剖析、瞭解其空間分佈與降雨來源之關係，並探討降雨型態潛在的轉換行為，可應用於改善水文模擬預測與水資源管理決策所參考。

關鍵詞：降雨集中指數、多時間尺度、時空分佈、降雨型態。

* 通訊作者，國立成功大學資源工程學系副教授
701 台南市大學路 1 號，hfyeh@mail.ncku.edu.tw

SPATIOTEMPORAL VARIABILITY OF PRECIPITATION CONCENTRATION PATTERNS AT MULTI-TIME SCALE IN TAIWAN

Chia-Chi Huang
National Cheng Kung University
Department of Resources Engineering

Hsin-Yu Chen
National Cheng Kung University
Department of Resources Engineering

Hsin-Fu Yeh*
National Cheng Kung University
Department of Resources Engineering

ABSTRACT

Precipitation plays a critical role in agricultural activities, water supply management, and maintaining ecological habitat. Taiwan belongs to a tropical and a subtropical monsoon climatic region with distinct wet and dry seasons. Besides, climate change has increased hydrological uncertainty in recent years, and thus understanding the characteristics of precipitation spatiotemporal distribution would help to explore how precipitation patterns change and their impacts on the local regions. Precipitation concentration has been regarded as an effective tool to explore the risk of extreme events such as floods and droughts by previous studies. Therefore, this study applied Daily Precipitation Concentration Index (DPCI) and Monthly Precipitation Concentration Index (MPCI) to explore the precipitation concentration and its spatial distribution in Taiwan from 1960 to 2020 at the meteorological season, hydrologic season and hydrologic years scales. We analyzed the correlation among each scale and the two indexes to realize the consistency of the spatial distribution. The precipitation patterns corresponding to different time scales in each subregion of Taiwan were also identified. Finally, trend and homogeneity test were used to analyze the long-term changes in precipitation concentration and potential precipitation pattern transformations. The results show that the average DPCIs at each time scale is high precipitation concentration, and the average MPCIs included moderate and high precipitation concentrations. The difference of the spatial distribution between DPCI and MPCI at different time scales may be affected by the precipitation intensity of different sources, the influence range, and the times of events. These may be also the reason that a highly positive correlation only appears among DPCI in spring and MPCI in spring and hydrologic years. In addition, the correlation of DPCI and MPCI with latitude and longitude indicated that the difference in the precipitation patterns in each subregion are contributed by different factors. The central and southern regions are more prone to be a significant difference between wet and dry periods at any time scale. The results of trend tests were bounded by the Tropic of Cancer. The difference between wet and dry periods in the mountainous areas south of the Tropic of Cancer had increasing trends in summer and wet season, and the precipitation pattern in the southwest area tends to be uniform dryness in the dry season. In north of the Tropic of Cancer, precipitation tends to be uniform wetness in the eastern area at hydrologic years scale. These results show that using different precipitation concentration indexes help to analyze rainfall variability at different time scales, to understand the relationship between the spatial distribution and the precipitation sources, and to explore the potential transformation of rainfall patterns. It can be used as a reference for improving hydrological simulation and prediction, and water resource management.

Keywords: Precipitation concentration index, Multi-time scale, Spatiotemporal distribution, Precipitation pattern.

Huang, C.C., Chen, H.Y., & Yeh, H.F.* (2023). "Spatiotemporal Variability of Precipitation Concentration Patterns at Multi-Time Scale in Taiwan." *Journal of Taiwan Agricultural Engineering,* 69(3), 30-44. https://doi.org/10.29974/JTAE.202309_69(3).0003

一、前言

降雨作為水文系統的輸入，不僅扮演著供給地表水與地下水資源的角色，也是分析區域氣候主導特徵必要的水文變量。由於一系列氣象過程 (包含氣旋、季風、大氣長河與局部對流)、地形及與海洋間距離等差異，降雨在時空上普遍分布不均，進而引致極端降雨 (Kunkel *et al.*, 2013)。長期以來，全球氣候暖化的現象預計會生成更為強烈且頻繁的極端降雨事件，許多研究亦透過氣候模型模擬、歷史觀測資料、極端水文指標支持極端降雨強度與頻率持續呈上升趨勢的結論 (Myhre *et al.*, 2019; Kirchmeier-Young & Zhang, 2020; Konapala *et al.*, 2020; Tabari, 2020; Zhang *et al.*, 2021; Bevacqua *et al.*, 2022)。將各類極端事件歸因於氣候變遷的科學信心取決於我們對於氣候變遷如何影響極端事件的理解程度 (National Academies of Sciences & Medicine, 2016)。儘管極端降雨的複雜性使其理解程度仍需改善，但其不僅表現極端溫度事件對於區域水文氣候的影響，也涵蓋部分小空間尺度或複合型事件的水文資訊。極端降雨造成乾旱、洪水、土壤侵蝕和邊坡不穩定等環境災害，加上近年來降雨型態特徵隨著氣候變遷改變，逐漸衝擊生態與人類生存環境 (Coscarelli & Caloiero, 2012; Rahman & Islam, 2019)。因此，評析降雨時空分佈對於水資源有效管理、改善水文預測以及災害預警至關重要 (Kumar, 2013; Bhattacharyya & Sreekesh, 2022)。

降雨過程可被視為由降雨與無降雨所構成的離散過程，其具有低降雨量日數多而強降雨量日數少的分佈特性，可應用 Gamma 或負指數分佈來描述(Royé & Martin-Vide, 2017; Ye *et al.*, 2018)。極端降雨通常被定義為特定降雨量或百分位數門檻以上之降雨異常事件 (Anagnostopoulou & Tolika, 2012)，事件持續時間相對較短但其降雨量可能在月、季及年降雨佔很大的比例，表示降雨事件為高度時間集中的水文過程 (Cortesi *et al.*, 2012)。瞭解降雨時間結構對於監測大氣物理過程與確定當前氣候狀態至關重要，因此許多量化降雨時間結構的方法被提出 (Monjo & Martin-Vide, 2016; Pendergrass & Knutti, 2018)，其中以降雨集中指數 (Precipitation Concentration Index, PCI)為最常見的指標之一。降雨集中程度能夠表現不同時間尺度下降雨分佈的不規則性以及複合降雨形式所構成的降雨時間結構。Martin-Vide (2004) 基於經濟學中評估貧富差距之吉尼係數 (Gini coefficient) 發展日降雨集中指數 (Daily Precipitation Concentration Index, DPCI)，提供強降雨事件對總降雨量貢獻的資訊。Oliver (1980) 提出月降雨集中指數 (Monthly Precipitation Concentration Index, MPCI) 來評估給定期間內降雨是否集中於特定月分，有助於瞭解季節或年總降雨量的長期變化。DPCI 與 MPCI 已廣泛應用於探討全球各地不同氣候條件之降雨型態及其時空變化，如全球 (Monjo & Martin-Vide, 2016; Sloat *et al.*, 2018; Dong *et al.*, 2021)、美洲 (Sarricolea *et al.*, 2019; Zubieta *et al.*, 2019; Sofia & Nikolopoulos, 2020; Llano & Vargas, 2021)、亞洲 (Vyshkvarkova *et al.*, 2018; Rahman & Islam, 2019; T. Yang *et al.*, 2020; Darand & Pazhoh, 2022; Fu *et al.*, 2023)、歐洲 (Cortesi *et al.*, 2012; Sofia *et al.*, 2017; Bartolini *et al.*, 2018; Tolika, 2019; Mathbout *et al.*, 2020) 以及非洲 (Nsubuga *et al.*, 2014; Benhamrouche *et al.*, 2015; Fenta *et al.*, 2017; Salhi *et al.*, 2022)。

多數研究將不同降雨集中指數分開討論以確定總降雨量是否由少數降雨日所貢獻以及評估降雨之季節性，並執行趨勢檢定來補捉降雨集中程度的變化趨勢 (Coscarelli & Caloiero, 2012; Huang *et al.*, 2016; Zamani *et al.*, 2018)。基於降雨集中程度表徵極端水文事件的共識以及評估氣候變遷下降雨型態響應的有效性，部分研究嘗試結合不同水文特徵來評估降雨異常所引致的潛在災害風險。Deng *et al.* (2018) 的研究表明在低海拔的珠江三角洲 (Pearl River Delta)，高度日降雨與月降雨集中皆有可能加劇長期乾旱的現象，且月降雨集中程度對於短期與中期乾旱的負面影響更為強烈。大陸尺度的研究則指出長期乾旱對於日降雨集中程度相對於月降雨的結果較為敏感 (Guo *et al.*, 2020)。Nunes *et al.* (2016) 說明雖然葡萄牙南部年降雨量與降雨侵蝕力隨降雨集中程度增加而降低，但實際從季節尺度觀察，夏季及秋季的降雨量、集中程度與侵蝕力呈顯著上升趨勢；在巴西東南部流域集中指數預測結果亦顯示 21 世紀期間的降雨侵蝕力將隨著降雨集中程度逐漸增強，指出未來山區淺層土壤潛在的侵蝕風險 (de Mello *et al.*, 2015)。相關研究亦調查降雨集中指數變化與遙相關指數間關聯來闡述大氣震盪(如 Pacific Decadal Oscillation, PDO; El Niño-Southern Oscillation, ENSO 與 North Atlantic Oscillation, NAO) 對於降雨模式的影響 (P. Yang *et al.*, 2020; Xie *et al.*, 2022)。然而，仍僅有少數研究針對不同時間尺度之降雨集中指數間的關係進行探討。

有鑒於此，本研究蒐集 1960 至 2020 年之臺灣降雨網格資料，推估氣象季節、水文季節與水文年之 DPCI 與 MPCI 指數以綜整不同時間尺度之降雨集中狀況，同時探討其空間分佈以及兩指數間之關係來瞭

解降雨集中狀況在不同降雨來源下的差異。最後，本研究藉由趨勢檢定分析兩者之長期變化趨勢以確認降雨型態是否存在潛在的轉換行為，進而評析臺灣多時間尺度降雨集中狀況之時空變化。

二、研究區域

臺灣為位於太平洋西北側的島嶼，面積約為 36,000 km^2。山地與丘陵佔全島面積約 70 %，其餘則平原且主要集中於西部沿海，如圖 1。臺灣氣候以北回歸線為分界，北回歸線以北為副熱帶季風氣候，北回歸線以南則為熱帶季風氣候。臺灣降雨量豐沛且乾濕季分明，年平均降雨量約為 2,500 mm。濕季為每年 5 至 10 月，受西南季風、梅雨 (5 至 6 月) 以及颱風 (7 至 9 月) 影響而降雨量較多；乾季則為每年 11 至隔年 4 月，多數地區因東北季風受中央山脈阻擋而降雨量較少。為瞭解臺灣降雨集中狀況之時空變化，本研究分析 1960 至 2020 年氣象季節 (春季—3 至 5 月、夏季—6 至 8 月、秋季—9 至 11 月與冬季—12 至 2 月)、水文季節 (乾季—11 至隔年 4 月與濕季—5 至 10 月) 以及年尺度之降雨集中指數，日降雨資料採用臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台計畫 TCCIP (Taiwan Climate Change Projection and Information Platform) 建置之 5 km × 5 km 網格降雨資料。

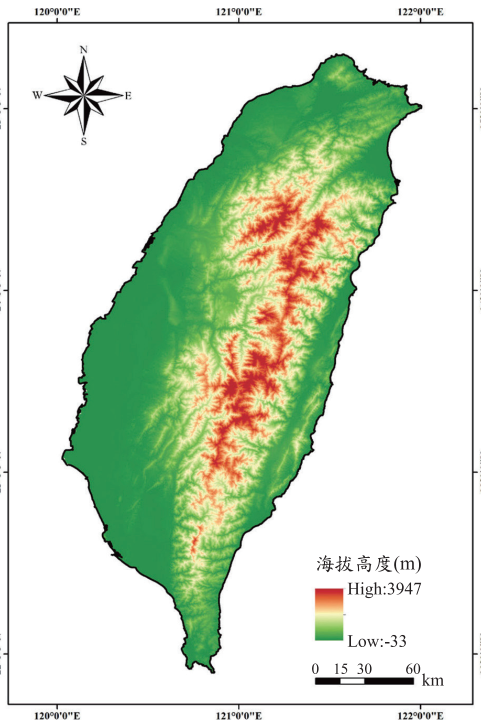

圖 1　臺灣地理位置與地形分佈圖

三、結果與討論

3.1 降雨集中指數 (precipitation concentration index, PCI)

3.1.1 日降雨集中指數 (Daily precipitation concentration index, DPCI)

給定期間內少數的大量降雨可能在總降雨量具有相當高的佔比，其也反映出降雨在時間上不平均分佈的特性。Martin-Vide (2004) 基於不同日降雨量級距對應之降雨日數提出代表日降雨時間結構的 DPCI，其透過將雨日降雨量以 1 mm 為級距分組取得累積降雨日數百分比 X 與累積降雨量百分比 Y，接著使用 Riehl (1949) 與 Olascoaga (1950) 所提出之正指數分佈曲線 (positive exponential distribution curve) 來擬合羅倫茲曲線 (Lorenz Curve)，正指數分佈曲線如式 (1) 所示：

$$Y = aX \cdot exp(bX) \quad (1)$$

其中 a 與 b 為迴歸係數，可透過最小平方法求得。分配均等性可透過推估羅倫茲曲線與完全均等分配線 (perfect equality line) 間之面積 A 來進行評估 (如圖 2 所示)，羅倫茲曲線下之面積則可透過積分式 (1) 取得，並計算面積 A 與完全均等分配線下面積之比值，其值即為 DPCI：

$$DPCI = A/5000 \quad (2)$$

DPCI 範圍介於 0 到 1 之間，DPCI 越接近 0 表示各級距之降雨分配越均等；DPCI 越接近 1 則表示降雨分配越集中於特定級距，即降雨集中程度越高。

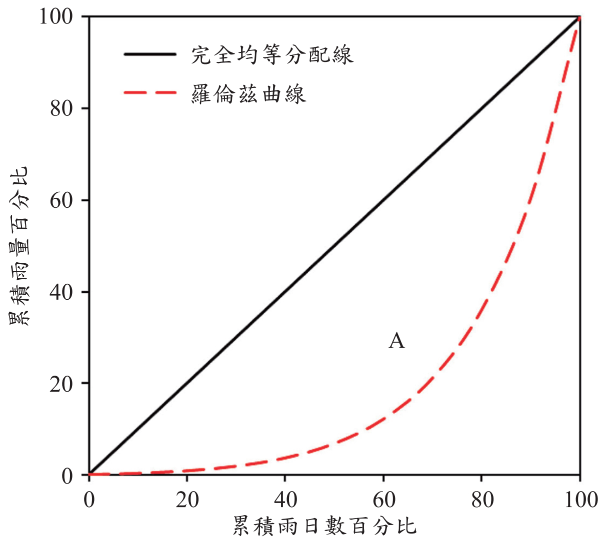

圖 2　降雨集中曲線示意圖

3.1.2 月降雨集中指數 (Monthly precipitation concentration index, MPCI)

降雨集中狀況亦可根據給定期間內之固定區間的降雨量差異來進行量化。Oliver (1980) 提出 MPCI 評估水文年尺度之月降雨集中程度，即一水文年之降雨分配是否集中於特定月份，其亦可作為季節性的判斷基準。本研究將 MPCI 擴展至氣象季節與水文季節尺度，故其可被定義為給定期間內各月降雨量之平方和與和的平方間之比值，並依據分析月份數 n 調整其數值至相同值域：

$$\mathrm{MPCI}=\frac{\sum_{i=1}^{n}P_i^2}{\left(\sum_{i=1}^{n}P_i\right)^2}\cdot 100\cdot\frac{n}{12} \quad \text{......(3)}$$

其中，P_i 為第 i 個月的降雨量 P，本研究分析時間尺度分別為氣象季節 (n = 4)、水文季節 (n = 6) 以及水文年 (n = 12) 尺度。MPCI 值越高則表示降雨分佈越集中於特定月份；MPCI 值越低則表示降雨越均勻分配於各月份。本研究根據過去研究 (de Luis *et al.*, 2011) 將 DPCI 與 MPCI 依範圍分成均勻分佈、中度集中、高度集中與極端集中，如表 1 所示。

表 1　降雨集中程度分類標準

降雨集中程度	DPCI	MPCI
均勻分佈	DPCI < 0.4	MPCI < 10
中度集中	0.4 ≤ DPCI < 0.6	10 ≤ MPCI < 15
高度集中	0.6 ≤ DPCI < 0.8	15 ≤ MPCI < 20
極端集中	0.8 ≤ DPCI < 1	20 ≤ MPCI

3.2 相關性分析、趨勢及同質性檢定

3.2.1 Spearman 相關性分析

為了瞭解基於不同資料時間尺度所推估之 DPCI 與 MPCI 間關係，本研究採用 Spearman 相關性分析兩種降雨集中指數在各時間尺度間以及與經緯度間的關係。Spearman 相關性分析為一種無母數檢定，可用於衡量兩變量間的相依性，且其不受異常值所影響。

3.2.2 Mann-Kendall 趨勢檢定

本研究使用 Mann-Kendall 趨勢檢定來推估 DPCI 與 MPCI 的長期變化趨勢，透過不同定義下之降雨集中程度在各時間尺度的長期變化來瞭解降雨型態是否存在潛在的轉變行為。Mann-Kendall 檢定為 Mann (1945) 及 Kendall (1948) 所提出之無母數統計方法，其透過判定連續資料間之大小關係來檢定時間序列是否存在顯著趨勢。假定一組資料時間序列為 $X = x_1, x_2, \cdots, x_n$，其 Mann-Kendall 檢定統計值 S 為：

$$\mathrm{S}=\sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^{n}\operatorname{sgn}(x_j-x_i),\ \operatorname{sgn}(x_j-x_i)=\begin{cases}+1 & if\,(x_j-x_i)>0\\ 0 & if\,(x_j-x_i)=0\\ -1 & if\,(x_j-x_i)<0\end{cases} \quad \text{......(4)}$$

當 m ≥ 10 時，統計值 S 近似於常態分佈且其變異數 Var (S)為可用於

$$Var(\mathrm{S})=\frac{m(m-1)(2m+5)}{18} \quad \text{......(5)}$$

計算 Z 值可判定時間序列是否具有顯著趨勢：

$$\mathrm{Z}=\begin{cases}\mathrm{S}-1\big/\sqrt{Var(\mathrm{S})}, & if\quad \mathrm{S}>0\\ 0, & if\quad \mathrm{S}=0\\ \mathrm{S}+1\big/\sqrt{Var(\mathrm{S})}, & if\quad \mathrm{S}<0\end{cases} \quad \text{......(6)}$$

本研究選定顯著水準 0.05 來判定趨勢之顯著性。在顯著水準為 0.05 時，Z > 1.96 與 Z < -1.96 分別代表時間序列具有顯著上升與顯著下降趨勢。

3.2.3 Mann–Whitney–Pettitt 檢定

本研究亦使用 Mann–Whitney–Pettit 檢定來偵測降雨集中指數的改變點，並計算改變點前後之平均改變量，探討各時間尺度的變化程度及其空間分佈。Mann–Whitney–Pettit 檢定由 Pettitt (1979) 提出，主要用於偵測連續資料時間序列中的單一顯著改變點，其假設若時間序列 $x_1, x_2, \ldots, x_n$ 中存在一改變點，$x_1, x_2, \ldots, x_t$ 的分佈函數則不同於 $x_{t+1}, x_{t+2}, \ldots x_n$，顯著改變點位置可藉由連續資料大小關係的無母數統計值來決定，當統計值在特定時間 t 達到最大值時，該時間點即為改變點位置：

$$U_{t,n}=\sum_{i=1}^{t}\sum_{k=t+1}^{n}\operatorname{sgn}(x_i-x_k) \quad \text{......(7)}$$

$$K_n=\max\left|U_{t,n}\right| \quad \text{......(8)}$$

在顯著水準為 0.05 的條件下，可經由下式確定改變點的顯著性：

$$p = 2\exp\left(\frac{-6K_n^2}{n^3+n^2}\right) \quad \text{...(9)}$$

四、結論與討論

4.1 各時間尺度之 DPCI 與其空間分佈

日降雨集中指數 DPCI 為累積日降雨量百分比對應於累積降雨日數百分比之分佈狀況，DPCI 越小表示當累積降雨量增加，累積降雨日數以一定比例增加，代表各級距雨量之降雨日數越相似。臺灣各時間尺度 DPCI 之敘述統計如表 2 所示，結果顯示各時間尺度之平均 DPCI 皆呈降雨高度集中的狀況。在氣象季節尺度，平均降雨集中指數在春季、夏季、秋季與冬季分別為 0.652 ± 0.038、0.701 ± 0.026、0.751 ± 0.031 與 0.650 ± 0.036。降雨集中程度由春季至秋季遞增 15.24 %，接著在冬季下降-13.44 %，冬季至春季僅增加 0.25 %，說明夏季與秋季降雨相對較為集中。乾季與濕季平均降雨集中指數分別為 0.663 ± 0.041 與 0.709 ± 0.027。由於濕季之時間段約略涵蓋夏季與秋季，因此結果亦反映於水文季節尺度的指數差異，此表示具有豐沛降雨量的期間同時也衍生不同級距之降雨事件發生比例有高度不均勻的狀況。全年尺度平均 DPCI 為 0.712 ± 0.034，平均值與範圍皆近似於濕季，表示臺灣在一個完整水文年內整體降雨集中程度相對較高。

臺灣 DPCI 在各時間尺度之空間分佈如圖 3 所示。在氣象季節尺度，高度降雨集中狀況在春季主要集中於南部區域；夏季擴展至東部及部分北部區域；秋季遍布整體區域且在東部加劇；冬季則整體指數下降而僅有部分南部區域有高度降雨集中狀況。臺灣主要降雨來源為 5 至 6 月梅雨季及 7 至 9 月颱風季，顯示降雨集中程度伴隨著降雨事件增加而增加，說明這些降雨事件可能在區域內提供間斷或持續但變化相對較大的降雨量。秋季因同時經歷颱風季的結束與乾季

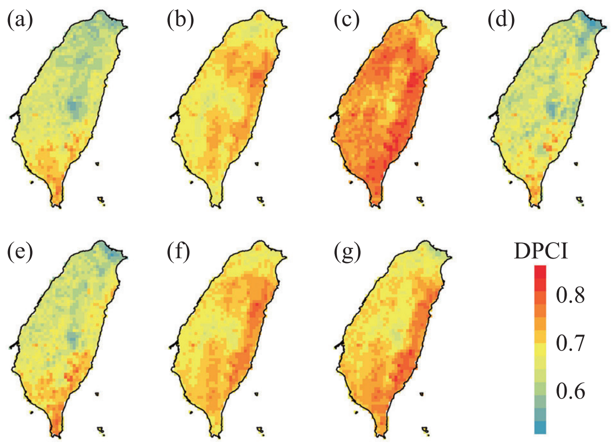

圖 3 DPCI 在各時間尺度之空間分佈圖。(a) 春季、(b) 夏季、(c) 秋季、(d) 冬季、(e) 乾季、(f) 濕季、(g) 全年

的起始導致臺灣整體有高度降雨集中的狀況，春季與冬季之南北部區域差異則可能與兩區域分別位於中央山脈之迎風面及背風面而產生的降雨事件數量差異有關。過去針對臺灣極端降雨的研究亦指出臺灣春季與冬季的累積極端降雨在乾燥地區因降雨事件較少而導致極端降雨事件展總降雨事件的比例較高 (Henny *et al*., 2021)。在水文季節尺度，乾季降雨集中程度主要以南部較高，其與春季及冬季結果相似。濕季則擴展至東部及部分北部區域，與夏季結果相似。此結果說明儘管秋季在整體區域皆為降雨高度集中，但當時間尺度拉長至以水文季節為單位時，多數區域的降雨集中狀況相對較為均勻，且凸顯出豐水期內以東部海岸山脈及中央山脈中部偏南及偏北段為主要高度降雨集中的地區。乾濕季的結果亦反映於全年尺度之 DPCI 空間分佈，降雨集中程度以東部及南部較高，代表東部及南部區域降雨量各級距所對應的降雨日數較不一致，即不同降雨強度事件發生的比例差異較大，且此

表 2 臺灣各時間尺度 DPCI 之敘述統計

	春季	夏季	秋季	冬季	乾季	濕季	全年
最小值	0.567	0.633	0.640	0.529	0.548	0.626	0.605
最大值	0.788	0.798	0.847	0.762	0.800	0.800	0.820
中位數	0.647	0.698	0.751	0.650	0.658	0.707	0.709
平均數	0.652	0.701	0.751	0.650	0.663	0.709	0.712
標準差	0.038	0.026	0.031	0.036	0.041	0.027	0.034
峰度	-0.074	0.154	0.292	0.489	0.089	-0.072	-0.017
偏態	0.468	0.298	-0.346	0.019	0.386	0.327	0.152

差異與上述 DPCI 之時空變化過程有關，說明 DPCI 在各時間尺度之分析有助於剖析埋藏於長時間尺度降雨變率中降雨變率對於季節性降雨的響應以及空間分佈隨時間的變化。

4.2 各時間尺度之 MPCI 與其空間分佈

月降雨集中指數 MPCI 為給定時間段內之月降雨量是否均勻分布，指數越高表示降雨集中於特定數個月份，即個別月份相較於整體平均值的差距越大。臺灣各時間尺度 MPCI 之敘述統計如表 3 所示，結果顯示各時間尺度之平均 MPCI 皆在降雨中度集中以上，其中秋季、乾季以及全年尺度為降雨高度集中狀況。由於日降雨變率資訊未涵蓋於月降雨量，因此降雨集中程度較小且與 DPCI 結果相差甚異。在氣象季節尺度，春至冬季平均 MPCI 分別為 12.68 ± 1.83、11.14 ± 0.56、15.50 ± 2.29 與 13.34 ± 1.93。MPCI 由春季至夏季減少 12.13 %，夏季至秋季增加 39.15 %，秋季至冬季下降-13.98 %，冬季至春季則減少-4.92 %，呈餘弦型波動變化。其中以夏季最低而秋季最高，顯示夏季降雨在各月份間平均分佈，秋季月份間之降雨量則差異較大，表現出夏季與秋季間降雨來源的穩定性差異。乾濕季平均降雨集中指數分別為 16.05 ± 3.25 與 13.86 ± 1.04，月尺度降雨分佈相對於日尺度分佈如預期在豐枯水期有較大的差異。全年尺度之平均 MPCI 為 19.59 ± 3.53，高於其他時間尺度之結果，此也代表降雨在水文年內存在明顯的季節性差異。

臺灣 MPCI 在各時間尺度之空間分佈如圖 4 所示。在氣象季節尺度，春季在西南部有高度降雨集中狀況且沿西南至東北遞減；夏季臺灣整體呈中度降雨集中；秋季在西側呈高度降雨集中且中西部有少許極端降雨集中的區域；冬季則以西南部有高度降雨集中的情形。以月尺度降雨量為基礎考量時，春季臺灣受東北季風及梅雨影響，北部位處迎風面而降雨分佈相對穩定，春季末期開始發生梅雨鋒面，即乾季末期後

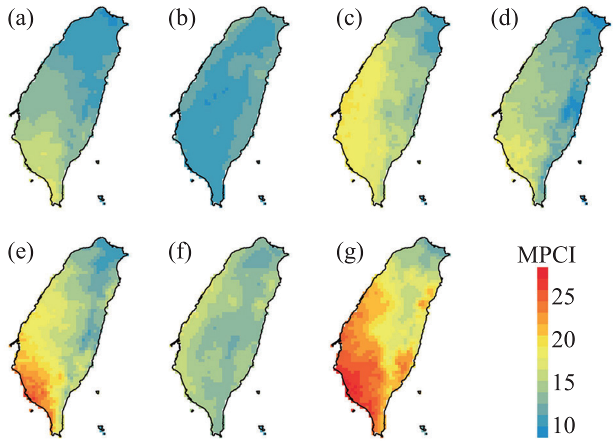

圖 4 MPCI 在各時間尺度之空間分佈圖。(a) 春季、(b) 夏季、(c) 秋季、(d) 冬季、(e) 乾季、(f) 濕季、(g) 全年

出現的第一個雨季，加上南部熱帶季風區域在溫度上升後對流雨增加，使得此區域的降雨集中程度較大。夏季降雨量充沛導致月份間的降雨量差異不大，因此並未像 DPCI 受個別降雨事件差異的影響而有較高的降雨集中程度。降雨均勻分佈的地區主要沿西南至東北方向擴展，且集中於中央及雪山山脈西側，說明夏季降雨集中分佈以西南季風與颱風引進西南氣流所影響，此與 Chiang *et al.* (2009) 提及梅雨期間平均累積降雨之空間分佈主要為西南—東北走向之結果一致。秋季經歷西南季風與颱風季的結束以及東北季風的開始，因此在臺灣西半部出現高度降雨集中的狀況，甚至在中西部有極端降雨集中的情形，過去研究在此區域也同樣偵測到較高的氣象乾旱風險 (Shiau & Hsiao, 2012)，顯示乾旱事件可能為降雨極端集中的主要原因。冬季則僅受東北季風影響，使得降雨均勻分佈區域由東北向西南區域擴展，西部則因中央山脈阻隔東北季風加上季風強度不高，有由東北遞增至西南的情形。乾季 MPCI 空間分佈由西南向東北遞減，與冬季及春季結果相符，且凸顯東北季風主要影響東北部及

表 3 臺灣各時間尺度 MPCI 之敘述統計

	春季	夏季	秋季	冬季	乾季	濕季	全年
最小值	9.85	9.88	10.11	9.30	10.26	10.80	11.26
最大值	18.02	13.31	20.07	18.01	25.52	16.61	26.87
中位數	12.67	11.06	15.32	13.34	15.65	13.74	19.69
平均數	12.68	11.14	15.50	13.34	16.05	13.86	19.59
標準差	1.83	0.56	2.29	1.93	3.25	1.04	3.53
偏態	0.389	0.704	-0.255	0.041	0.470	0.383	-0.066
峰度	-0.865	0.647	-0.794	-0.654	-0.361	-0.356	-0.924

JOURNAL OF TAIWAN AGRICULTURAL ENGINEERING
VOL. 69, NO. 3, SEPTEMBER 2023
DOI - 10.29974/JTAE.202309_69(3).0003

東部山脈地區，西南地區則僅由熱帶氣候控制其降雨分佈。濕季則顯示豐水期間臺灣整體的降雨分佈差異不大，在西部沿岸向內陸遞增的狀況也指出由地形導致的降雨空間分布不均也進而影響降雨在時間上的分佈狀況，山地相對平地降雨分佈較為均勻，可能為山區攔截暖濕空氣而多地形雨所導致。全年尺度的 MPCI 空間分佈則反映地區的季節性強度，南部與部分西部地區季節性較為明顯，東北部則較無季節性特徵，表示除了緯度上氣候區的差異外，季風方向與山脈阻隔也造成在臺灣降雨集中程度上特殊的空間分佈差異。

4.3 PCI 相關性分析

為了瞭解各時間尺度間之關聯性與兩種降雨集中指數間是否存在潛在關係，本研究應用 Spearman 相關性分析 DPCI 與 MPCI 間之相關性，結果如圖 5 所示。在顯著水準小於 0.05 的條件下，DPCI 在春季、冬季、乾季以及全年間呈高度正相關性；夏季與濕季呈顯著高度正相關性；秋季、濕季與全年間呈顯著高度正相關；濕季、夏季與秋季有高度相關，其中夏季與秋季僅呈中度正相關。MPCI 在春季、秋季、冬季、乾季以及全年間呈高度正相關性，夏季與濕季則無與其他時間尺度有明顯的相關性。這些結果指出儘管指數隨季節變化與不同時間尺度有高低差異，但皆有相似的空間分佈。在 DPCI 與 MPCI 的相關性中，僅有春季 DPCI 與春季及全年 MPCI 間呈高度正相關，主要原因為同樣由西南向東北遞減的空間分佈所導致。此結果指出春季西南部相對於東北部區域在日尺度與月尺度的降雨變率較大，春季降雨來源為依序為東北季風以及梅雨初期，季風強度較小加上中央山脈阻擋，使得西南部區域 3 至 4 月較為乾燥，並持續到 5 月梅雨季開始。這種明顯由乾燥到濕潤的過程導致 DPCI 與 MPCI 呈現相似的結果，也因此與代表平均水文年之季節性程度的全年 MPCI 有高度正相關性。其餘季節之 DPCI 與 MPCI 則相互較為獨立，即

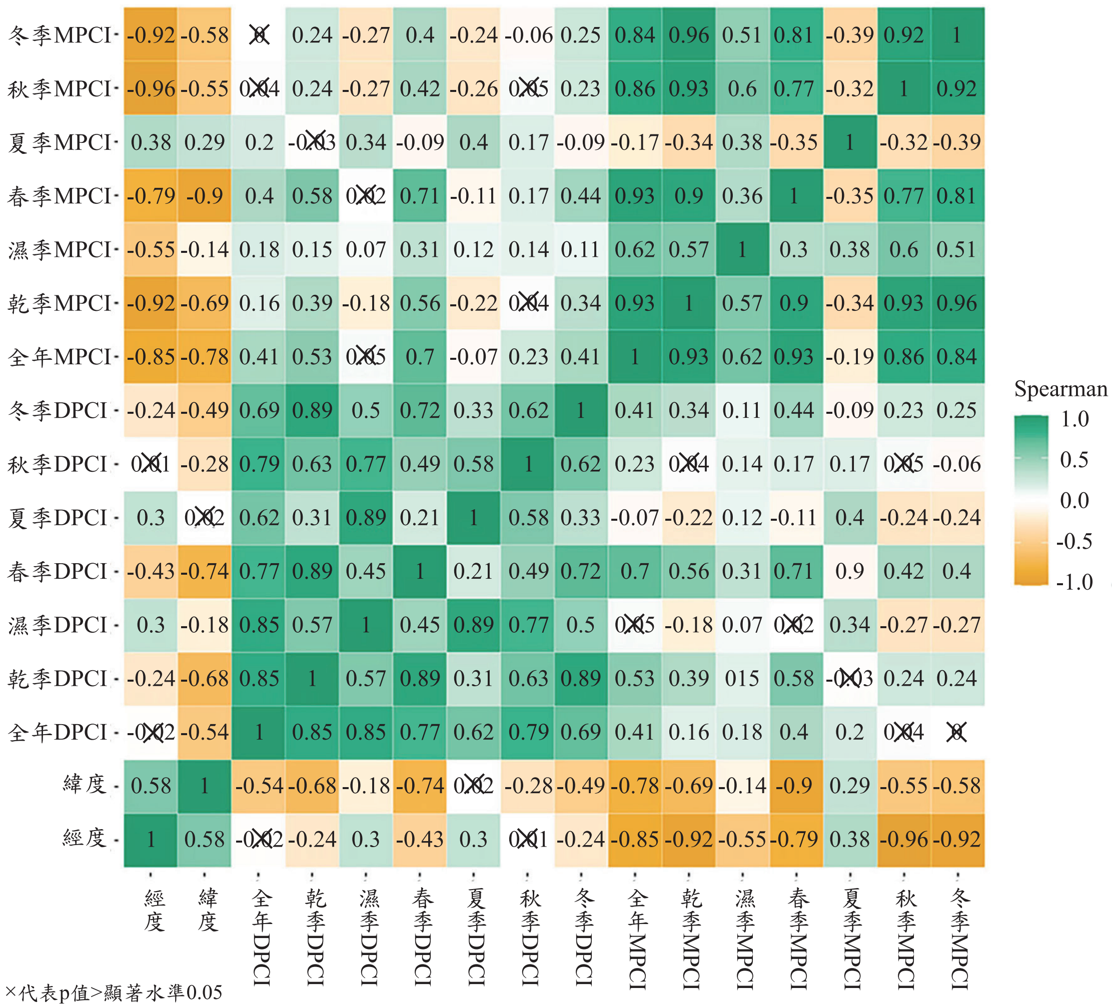

圖 5　DPCI 與 MPCI 相關性分析結果

月尺度降雨變率並未主要受日尺度降雨變率影響，也表示兩種降雨集中指數能夠提供不同的降雨分佈資訊。此外，春季與乾季之 DPCI 與 MPCI 以及全年 MPCI 與緯度呈顯著高度負相關，MPCI 則特別在春季、秋季、冬季、乾季及全年與經度有高度負相關性。此結果顯示季節尺度除了夏季與濕季之外，越接近臺灣東部或北部的地區，其在日與月尺度之降雨變率皆較小，此可能與東北區域在這些季節僅有東北季風作為降雨來源有關。全年尺度結果則說明在各季節皆有降雨來源的情況下，臺灣東北區域的季節性相對較不明顯。經度與緯度說明臺灣不同區域的降雨型態受到許多因素影響 (如季風方向、地形分佈與颱風路徑等)。

不同時間尺度在各區域可能存在不同的降雨型態，因此本研究將臺灣分為北部、中部、南部與東部區域，且依據 DCPI 與 MPCI 間之數值大小關係分成四種臨界降雨型態：(1) I 型(DPCI > 0.8，MPCI > 20) —乾濕極端分明、(2) II 型 (DPCI < 0.2，MPCI > 20) —乾濕逐步分明、(3) III 型 (DPCI < 0.2，MPCI < 10) —均勻濕潤或乾燥以及 (4) IV 型 (DPCI > 0.8，MPCI < 10) —普遍濕潤或乾燥但有極端事件。臺灣各時間尺度之 DPCI 約在中度至極端集中之間 (0.5 < DPCI < 0.8)；MPCI 則在均勻分布至極端集中之間 (8.3 < MPCI < 27)，如圖 6 所示。整體大致趨近於 I 型，部分則趨近於 IV 型降雨型態，說明臺灣明顯乾濕分明並在乾燥或濕潤期間會伴隨著極端事件發生。圖中可見溫帶地中海氣候的義大利 Calabria 地區 (Coscarelli and Caloiero, 2012) 與溫帶半乾旱氣候的中國渭河流域 (Huang *et al*, 2016) 有較為相似的降雨型態。副熱帶氣候的印度 Jharkhand 州 (Zamani *et al*., 2018) 與溫帶半濕潤氣候的中國淮河流域 (Xie *et al*., 2022) 則以 MPCI 的範圍較廣且 DPCI 屬於高度降雨集中，與臺灣降雨集中指數範圍較為相似，但臺灣在兩種指數範圍的變異性仍然相對較大，此與臺灣降雨型態的區域差異有關。

各時間尺度之分區降雨集中指數關係結果 (圖 7) 顯示，北部與東部區域由春季至秋季傾向趨近於 IV 降雨型態，並在冬季回復至近似春季降雨型態，主要變化以日降雨變率所控制；中部與南部區域在季節變化則先趨向 IV 降雨型態再轉向 I 降雨型態，並同樣於冬季回復，但南部區域春季降雨型態的日及月尺度降雨量變率較大。乾季以中部、南部與東部區域較趨近於 I 降雨型態，代表區域在乾季降雨集中於特定月份且期間內有較多的極端事件，可能為強降雨或極端乾旱事件，且所有分區皆在濕季傾向轉變為 IV 降雨型態，即降雨豐沛且伴隨著較多的極端事件，其中以東部區域 DPCI 較高而較為接近。過去研究也表明颱風平均累積降雨較大值多發生在東部地區且極端降雨頻率以東部沿岸較高 (Lee *et al*., 2006; Lu *et al*., 2007)，說明強降雨事件對於 DPCI 的影響。在全年尺度下，各分區皆趨近 I 降雨型態，說明臺灣整體在平均水文年具明顯季節性，其中以中部、南部及東部區域乾濕較為分明，其差別在於南部區域有較高的季節性，而東部區域則可能在其降雨分佈上有較多極端事件。這些結果皆指出中部與南部區域無論在季節或水文年尺度上皆有較為明顯的乾濕差異，東部區域則以日降雨變率為主要差異。

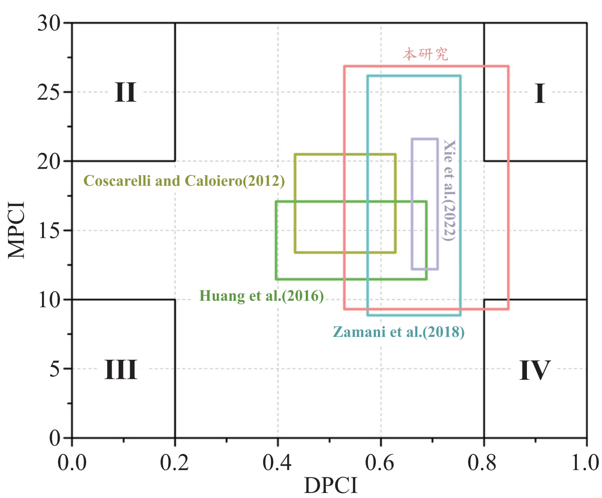

圖 6　降雨集中指數範圍比較圖

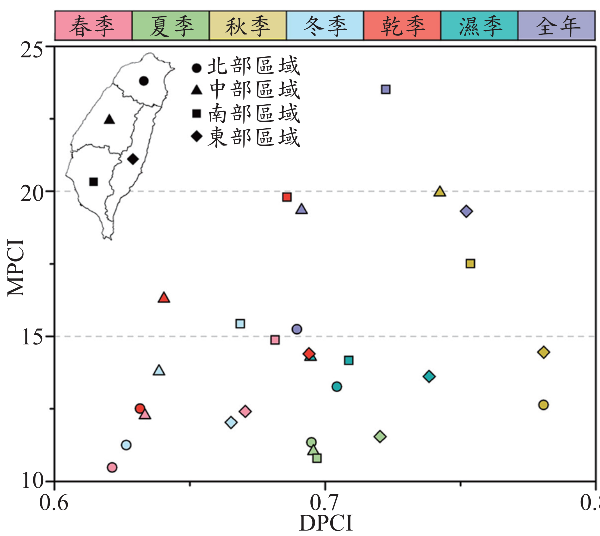

圖 7　各時間尺度之分區降雨集中指數關係圖

JOURNAL OF TAIWAN AGRICULTURAL ENGINEERING
VOL. 69, NO. 3, SEPTEMBER 2023
DOI - 10.29974/JTAE.202309_69(3).0003

4.4 降雨集中指數趨勢與改變量

本研究使用 Mann–Kendall 檢定分析 1960 至 2020 年各時間尺度 DPCI 和 MPCI 是否存在顯著變化趨勢 (圖 8 及 9)，並經由 Mann–Whitney–Pettit 檢定偵測改變點以推估其變化程度 (圖 10 及 11)。顯著趨勢與變化比例的空間分布如預期有一致的狀況。DPCI 在氣象季節、水文季節及全年尺度的顯著上升趨勢皆主要出現在北回歸線以南及部分北部沿岸地區，表示這些區域在各季節雖有更多的降雨事件趨近於平均，但極端事件也相對增加。顯著下降趨勢則主要出現在春季、冬季、乾季以及年尺度，除了年尺度分佈偏東側外，大部分位於北回歸線以北且中央偏東北之地區，表明這些區域在乾燥時期的降雨事件在各級距的數量越來越相似，即極端事件相對較少。DPCI 無論在上升或下降趨勢的區域在變化比例上多為 0 到 20 %左右，除了臺灣最南端的區域外，無明顯觀察到特定變化程度較高的狀況。MPCI 除年尺度有零星分佈外，僅於夏季與濕季在北回歸線以南有顯著上升趨勢，且變化比例多為 11 到 20 %。夏季上升趨勢集中於山區，濕季則分佈於西南沿岸至中部山區，說明這些區域在夏季和濕季中月份間的降雨量差距逐漸增加。過去研究表明 1960 至 2015 年間臺灣中南部山區在梅雨季及颱風季的月平均極端降雨量變化皆為上升，其中以颱風帶來的極端降雨量變化較大 (Henny *et al.*, 2021)。顯著下降趨勢則主要出現在秋季、乾季以及

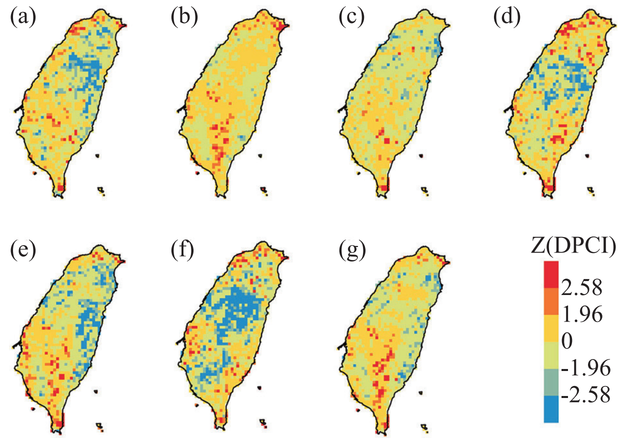

圖 8　臺灣各時間尺度 DPCI 之 Z 分數空間分佈。(a) 春季、(b) 夏季、(c) 秋季、(d) 冬季、(e) 乾季、(f) 濕季、(g) 全年。

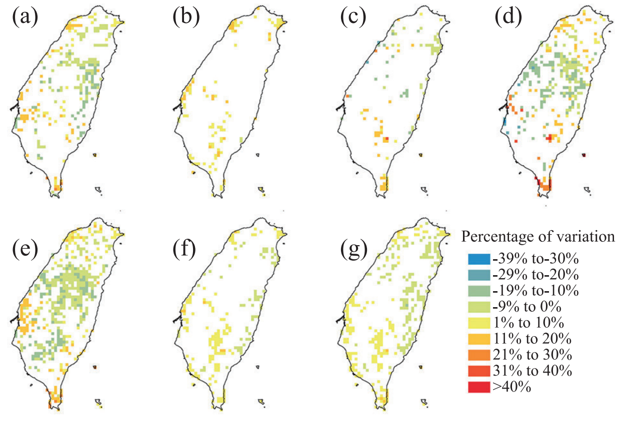

圖 10　臺灣各時間尺度 DPCI 顯著變化比例之空間分佈。(a) 春季、(b) 夏季、(c) 秋季、(d) 冬季、(e) 乾季、(f) 濕季與 (g) 全年。

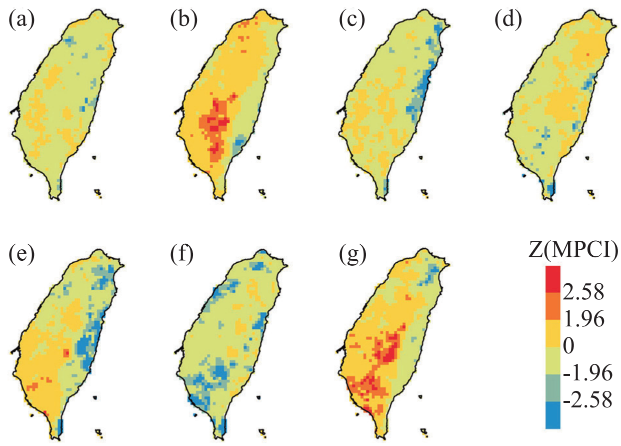

圖 9　臺灣各時間尺度 MPCI 之 Z 分數空間分佈。(a) 春季、(b) 夏季、(c) 秋季、(d) 冬季、(e) 乾季、(f) 濕季、(g) 全年。

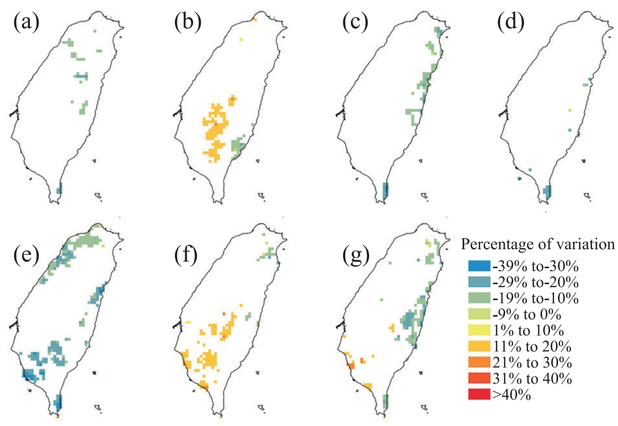

圖 11　臺灣各時間尺度 MPCI 顯著變化比例之空間分佈。(a) 春季、(b) 夏季、(c) 秋季、(d) 冬季、(e) 乾季、(f) 濕季與 (g) 全年。

全年尺度，且變化比例皆為 10 %以上。秋季與全年尺度下降趨勢大部分分佈於北回歸線以北之東部區域，月份間降雨量差距逐漸減少的情形表明可能有極端事件減少的現象。Liang *et al.* (2017) 研究指出近幾十年颱風路徑北移導致其帶來的降雨在西部與北部區域顯著增加，但在東部區域則有不顯著上升或下降的趨勢。此可能為導致東部區域秋季與全年尺度月降雨分佈逐漸趨向均勻的主要原因。乾季除部分西北部沿海外，下降趨勢主要分佈於西北沿岸地區以及西南沿岸至中南部山區，尤其在西南地區的變化程度多有 20 %以上，表示此區域在乾季的月份間降雨量差異逐漸減少，乾燥情形可能更為普遍。

以北回歸線作為分界，DPCI 與 MPCI 趨勢的空間分佈顯示，北回歸線以南之山區在夏季與濕季的降雨逐漸趨向 I 降雨型態，代表乾濕分明的程度增加，由於這兩個季節的降雨來源皆為梅雨及颱風，因此降雨型態的轉變可能源自於梅雨與颱風之降雨量變化差異，前述之過去研究也表明兩者的極端降雨量雖具有長期上升趨勢，但以颱風降雨量變化較大。此表示降雨來源特徵的變化導致月降雨量的差距逐漸增加，更指出降雨季節的極端事件逐漸增加。此外，西南部地區之乾季降雨趨向 III 降雨型態，代表此區域可能在乾季面臨乾燥情形更加普遍的問題。北回歸線以北則主要在臺灣東部的年尺度降雨有趨向 III 降雨型態的現象，代表降雨在水文年內無論在日尺度或月尺度皆更加均勻，區域穩定處於潮濕或乾燥的狀況。本研究結果顯示不同降雨集中指數可運於剖析多時間尺度之降雨時間結構，有助於探討降雨來源特徵的潛在變化，並進一步分析降雨型態及其變化趨勢。

五、結論

本研究使用日尺度之 DPCI 與月尺度之 MPCI，探討臺灣 1960 至 2020 年於不同時間尺度的指數差異與其空間分佈，並基於兩者間關係歸納臺灣各分區在不同時間尺度所對應的降雨型態，最後透過趨勢與同質性檢定分析降雨集中程度的長期變化以及降雨型態的轉換。結果顯示各時間尺度之平均 DPCI 皆呈高度降雨集中的狀況，降雨集中程度由春季至秋季遞增並在冬季減少。平均 MPCI 則在各時間尺度皆為中度以上之降雨，呈餘弦型波動變化。降雨集中指數空間分佈說明日雨量與月雨量在各時間尺度會由於降雨來源的不同以及降雨季節的始末形成降雨集中差異，有助於剖析埋藏於長時間尺度降雨變率中降雨變率對於季節性降雨的響應以及空間分佈隨時間的變化。此外，降雨集中指數與經緯度的相關性說明臺灣降雨型態存在區域性差異。臺灣中部與南部區域相較於北部與東部區域無論在季節或水文年尺度上皆趨向有明顯乾濕差異的 I 降雨型態。趨勢與同質性檢定結果顯示北迴歸線以南之山區在夏季與濕季的降雨逐漸趨向 I 降雨型態；西南部地區則在乾季的降雨趨向均勻乾燥或濕潤的 III 降雨型態。此暗指降雨來源特徵的潛在變化。北迴歸線以北之臺灣東部則可能因颱風路徑北移而在年尺度降雨有趨向 III 降雨型態的現象。本研究結果顯示不同降雨集中指數可運於剖析多時間尺度之降雨時間結構，有助於探討降雨來源特徵的潛在變化，並進一步分析降雨型態及其變化趨勢，其可應用於極端水文氣象及水資源風險評估所參考。

參考文獻

1. Anagnostopoulou, C. and K. Tolika, “Extreme Precipitation in Europe: Statistical Threshold Selection Based on Climatological Criteria,” *Theoretical and Applied Climatology*, 107(3), 479-489, 2012.
2. Bartolini, G., D. Grifoni, R. Magno, T. Torrigiani, and B. Gozzini, “Changes in Temporal Distribution of Precipitation in a Mediterranean Area (Tuscany, Italy) 1955-2013,” *International Journal of Climatology*, 38(3), 1366-1374, 2018.
3. Benhamrouche, A., D. Boucherf, R. Hamadache, L. Bendahmane, J. Martin-Vide, and J. Teixeira Nery, “Spatial Distribution of the Daily Precipitation Concentration index in Algeria,” *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 15(3), 617-625, 2015.
4. Bevacqua, E., G. Zappa, F. Lehner, and J. Zscheischler, “Precipitation Trends Determine Future Occurrences of Compound Hot–dry Events,” *Nature Climate Change*, 12(4), 350-355, 2022.
5. Bhattacharyya, S. and S. Sreekesh, “Assessments of Multiple Gridded-rainfall Datasets for Characterizing the Precipitation Concentration Index and Its Trends in India,” *International Journal of Climatology*, 42(5), 3147-3172, 2022.
6. Chiang, K.-W., W.-C. Peng, Y.-H. Yeh, and K.-H. Chen, “Study of Alternative GPS Network Meteorological Sensors in Taiwan: Case Studies of the Plum Rains and Typhoon Sinlaku,” *Sensors*, 9(6), 5001-5021, 2009.
7. Cortesi, N., J. C. Gonzalez-Hidalgo, M. Brunetti, and J.

Martin-Vide, "Daily Precipitation Concentration Across Europe 1971-2010," *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12(9), 2799-2810, 2012.

8. Coscarelli, R. and T. Caloiero, "Analysis of Daily and Monthly Rainfall Concentration in Southern Italy (Calabria region)," *Journal of Hydrology*, 416-417, 145-156, 2012.
9. Darand, M. and F. Pazhoh, "Spatiotemporal Changes in Precipitation Concentration Over Iran During 1962-2019," *Climatic Change*, 173(3), 25, 2022.
10. de Luis, M., J. C. González-Hidalgo, M. Brunetti, and L. A. Longares, "Precipitation Concentration Changes in Spain 1946-2005," *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(5), 1259-1265, 2011.
11. de Mello, C. R., L. F. Ávila, M. R. Viola, N. Curi, and L. D. Norton, "Assessing the Climate Change Impacts on the Rainfall Erosivity Throughout the Twenty-first Century in the Grande River Basin (GRB) Headwaters, Southeastern Brazil," *Environmental Earth Sciences*, 73(12), 8683-8698, 2015.
12. Deng, S., T. Chen, N. Yang, L. Qu, M. Li, and D. Chen, "Spatial and Temporal Distribution of Rainfall and Drought Characteristics Across the Pearl River Basin," *Science of The Total Environment*, 619-620, 28-41, 2018.
13. Dong, Q., W. Wang, K. E. Kunkel, Q. Shao, W. Xing, and J. Wei, "Heterogeneous Response of Global Precipitation Concentration to Global Warming," *International Journal of Climatology*, 41(S1), E2347-E2359, 2021.
14. Fenta, A. A., H. Yasuda, K. Shimizu, N. Haregeweyn, T. Kawai, D. Sultan, K. Ebabu, and A. S. Belay, "Spatial Distribution and Temporal Trends of Rainfall and Erosivity in the Eastern Africa region," *Hydrological Processes*, 31(25), 4555-4567, 2017.
15. Fu, S., H. Zhang, Q. Zhong, Q. Chen, A. Liu, J. Yang, and J. Pang, "Spatiotemporal Variations of Precipitation Concentration Influenced by Large-scale Climatic Factors and Potential Links to Flood-drought Events Across China 1958-2019," *Atmospheric Research*, 282, 106507, 2023.
16. Guo, E., Y. Wang, B. Jirigala, and E. Jin, "Spatiotemporal Variations of Precipitation Concentration and Their Potential Links to Drought in Mainland China," *Journal of Cleaner Production*, 267, 122004, 2020.
17. Henny, L., C. D. Thorncroft, H.-H. Hsu, and L. F. Bosart, "Extreme Rainfall in Taiwan: Seasonal Statistics and Trends," *Journal of Climate*, 34(12), 4711-4731, 2021.
18. Huang, S., Q. Huang, Y. Chen, L. Xing, and G. Leng, "Spatial–temporal Variation of Precipitation Concentration and Structure in the Wei River Basin, China," *Theoretical and Applied Climatology*, 125(1), 67-77, 2016.
19. Kendall, M. G., *Rank correlation methods*. Griffin, London, England, 1948.
20. Kirchmeier-Young, M. C. and X. Zhang, "Human Influence has Intensified Extreme Precipitation in North America," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(24), 13308-13313, 2020.
21. Konapala, G., A. K. Mishra, Y. Wada, and M. E. Mann, "Climate Change Will Affect Global Water Availability Through Compounding Changes in Seasonal Precipitation and Evaporation," *Nature Communications*, 11(1), 3044, 2020.
22. Kumar, P., "Seasonal Rain Changes," *Nature Climate Change*, 3(9), 783-784, 2013.
23. Kunkel, K. E., T. R. Karl, H. Brooks, J. Kossin, J. H. Lawrimore, D. Arndt, L. Bosart, D. Changnon, S. L. Cutter, N. Doesken, K. Emanuel, P. Y. Groisman, R. W. Katz, T. Knutson, J. O'Brien, C. J. Paciorek, T. C. Peterson, K. Redmond, D. Robinson, J. Trapp, R. Vose, S. Weaver, M. Wehner, K. Wolter, and D. Wuebbles, "Monitoring and Understanding Trends in Extreme Storms: State of Knowledge," *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94(4), 499-514, 2013.
24. Lee, C.-S., L.-R. Huang, H.-S. Shen, and S.-T. Wang, "A Climatology Model for Forecasting Typhoon Rainfall in Taiwan," *Natural Hazards*, 37(1), 87-105, 2006.
25. Liang, A., L. Oey, S. Huang, and S. Chou, "Long-term Trends of Typhoon-induced Rainfall Over Taiwan: In Situ Evidence of Poleward Shift of Typhoons in Western North Pacific in Recent Decades," *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(5), 2750-2765, 2017.
26. Llano, M. P. and W. Vargas, "Spatial and Temporal Variability of Daily Precipitation Concentration in Southeastern South America," *International Journal of Climatology*, 41(S1), E1152-E1163, 2021.
27. Lu, M. M., C. J. Chen, and Y. C. Lin, "Long-term Variations of the Occurrence Frequency of Extreme Rainfall Events During the Period of 1951-2005," *Atmospheric Sciences*, 35(2), 87-102, 2007.

28. Mann, H. B., "Nonparametric Tests Against Trend," *Econometrica*, 13(3), 245-259, 1945.
29. Martin-Vide, J., "Spatial Distribution of a Daily Precipitation Concentration Index in Peninsular Spain," *International Journal of Climatology*, 24(8), 959-971, 2004.
30. Mathbout, S., J. A. Lopez-Bustins, D. Royé, J. Martin-Vide, and A. Benhamrouche, "Spatiotemporal Variability of Daily Precipitation Concentration and Its Relationship to Teleconnection Patterns Over the Mediterranean During 1975-2015," *International Journal of Climatology*, 40(3), 1435-1455, 2020.
31. Monjo, R. and J. Martin-Vide, "Daily Precipitation Concentration Around the World According to Several Indices," *International Journal of Climatology*, 36(11), 3828-3838, 2016.
32. Myhre, G., K. Alterskjær, C. W. Stjern, Ø. Hodnebrog, L. Marelle, B. H. Samset, J. Sillmann, N. Schaller, E. Fischer, M. Schulz, and A. Stohl, "Frequency of Extreme Precipitation Increases Extensively with Event Rareness Under Global Warming," *Scientific Reports*, 9(1), 16063, 2019.
33. National Academies of Sciences, E. and Medicine, *Attribution of Extreme Weather Events in the Context of Climate Change*. The National Academies Press, Washington, DC, 2016.
34. Nsubuga, F. N. W., J. M. Olwoch, C. J. d. Rautenbach, and O. J. Botai, "Analysis of Mid-twentieth Century Rainfall Trends and Variability Over Southwestern Uganda," *Theoretical and Applied Climatology*, 115(1), 53-71, 2014.
35. Nunes, A. N., L. Lourenço, A. Vieira, and A. Bento-Gonçalves, "Precipitation and Erosivity in Southern Portugal: Seasonal Variability and Trends (1950-2008)," *Land Degradation & Development*, 27(2), 211-222, 2016.
36. Olascoaga, M. J., "Some Aspects of Argentine Rainfall," *Tellus*, 2(4), 312-318, 1950.
37. Oliver, J. E., "MONTHLY PRECIPITATION DISTRIBUTION: A COMPARATIVE INDEX," *The Professional Geographer*, 32(3), 300-309, 1980.
38. Pendergrass, A. G. and R. Knutti, "The Uneven Nature of Daily Precipitation and Its Change," *Geophysical Research Letters*, 45(21), 11,980-911,988, 2018.
39. Pettitt, A. N., "A Non-Parametric Approach to the Change-Point Problem," *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*, 28(2), 126-135, 1979.
40. Rahman, M. S. and A. R. M. T. Islam, "Are Precipitation Concentration and Intensity Changing in Bangladesh Overtimes? Analysis of the Possible Causes of Changes in Precipitation Systems," *Science of The Total Environment*, 690, 370-387, 2019.
41. Riehl, H., "Some Aspects of Hawaiian Rainfall," *Bulletin of the American Meteorological Society*, 30(5), 176-187, 1949.
42. Royé, D. and J. Martin-Vide, "Concentration of Daily Precipitation in the Contiguous United States," *Atmospheric Research*, 196, 237-247, 2017.
43. Salhi, A., S. Benabdelouahab, and J. Martin-Vide, "Statistical Analysis of Long-term Precipitation in the Maghreb Reveals Significant Changes in Timing and Intensity," *Theoretical and Applied Climatology*, 150(3), 1369-1384, 2022.
44. Sarricolea, P., Ó. Meseguer-Ruiz, R. Serrano-Notivoli, M. V. Soto, and J. Martin-Vide, "Trends of Daily Precipitation Concentration in Central-Southern Chile," *Atmospheric Research*, 215, 85-98, 2019.
45. Shiau, J.-T. and Y.-Y. Hsiao, "Water-deficit-based Drought Risk Assessments in Taiwan," *Natural Hazards*, 64(1), 237-257, 2012.
46. Sloat, L. L., J. S. Gerber, L. H. Samberg, W. K. Smith, M. Herrero, L. G. Ferreira, C. M. Godde, and P. C. West, "Increasing Importance of Precipitation Variability on Global Livestock Grazing Lands," *Nature Climate Change*, 8(3), 214-218, 2018.
47. Sofia, G. and E. I. Nikolopoulos, "Floods and Rivers: A Circular Causality Perspective," *Scientific Reports*, 10(1), 5175, 2020.
48. Sofia, G., G. Roder, G. Dalla Fontana, and P. Tarolli, "Flood Dynamics in Urbanised Landscapes: 100 Years of Climate and Humans' Interaction," *Scientific Reports*, 7(1), 40527, 2017.
49. Tabari, H., "Climate Change Impact on Flood and Extreme Precipitation Increases with Water Availability," *Scientific Reports*, 10(1), 13768, 2020.
50. Tolika, K., "On the Analysis of the Temporal Precipitation Distribution Over Greece Using the Precipitation Concentration Index (PCI): Annual, Seasonal, Monthly Analysis and Association with the

Atmospheric Circulation," *Theoretical and Applied Climatology*, 137(3), 2303-2319, 2019.

51. Vyshkvarkova, E., E. Voskresenskaya, and J. Martin-Vide, "Spatial Distribution of the Daily Precipitation Concentration Index in Southern Russia," *Atmospheric Research*, 203, 36-43, 2018.
52. Xie, Y., S. Liu, H. Fang, M. Ding, and D. Liu, "A study on the Precipitation Concentration in a Chinese Region and Its Relationship with Teleconnections Indices," *Journal of Hydrology*, 128203, 2022.
53. Yang, P., Y. Zhang, J. Xia, and S. Sun, "Investigation of Precipitation Concentration and Trends and Their Potential Drivers in the Major River Basins of Central Asia," *Atmospheric Research*, 245, 105128, 2020.
54. Yang, T., Q. Li, X. Chen, P. De Maeyer, X. Yan, Y. Liu, T. Zhao, and L. Li, "Spatiotemporal Variability of the Precipitation Concentration and Diversity in Central Asia," *Atmospheric Research*, 241, 104954, 2020.
55. Ye, L., L. S. Hanson, P. Ding, D. Wang, and R. M. Vogel, "The Probability Distribution of Daily Precipitation at the point and Catchment Scales in the United States," *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(12), 6519-6531, 2018.
56. Zamani, R., R. Mirabbasi, M. Nazeri, S. G. Meshram, and F. Ahmadi, "Spatio-temporal Analysis of Daily, Seasonal and Annual Precipitation Concentration in Jharkhand State, India," *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 32(4), 1085-1097, 2018.
57. Zhang, W., K. Furtado, P. Wu, T. Zhou, R. Chadwick, C. Marzin, J. Rostron, and D. Sexton, "Increasing Precipitation Variability on Daily-to-multiyear Time Scales in a Warmer World," *Science Advances*, 7(31), eabf8021, 2021.
58. Zubieta, R., M. Saavedra, J. C. Espinoza, J. Ronchail, J. Sulca, G. Drapeau, and J. Martin-Vide, "Assessing Precipitation Concentration in the Amazon Basin from Different Satellite-based Data Sets," *International Journal of Climatology*, 39(7), 3171-3187, 2019.

收稿日期：民國 112 年 05 月 02 日
修改日期：民國 112 年 05 月 19 日
接受日期：民國 112 年 06 月 06 日