

國立臺灣師範大學理學院生命科學系碩士論文

2000-2020 乾旱對副熱帶島嶼植被影響之探討

Vegetation response to drought in a subtropical island
between 2000-2020



指導教授:林登秋 博士

Advisor: Lin, Teng-Chiu, Ph.D.

中華民國 112 年 8 月

August 2023

致謝

在讀碩班的過程，遇到不少研究上的困難及問題，有老師們以及實驗室夥伴們的協助，我才能順利畢業。首先要感謝的是我的指導老師，林老師最令我敬佩的部分就是，對於指導學生的熱誠始終沒有改變，從最一開始的題目構想，到最後的論文修改，不論是誰，總是保持良好的態度與學生溝通，並且提供良好的建議和不同的想法，刺激我們不斷思考，使我在這兩年期間進步許多。此外在老師身上也了解處事圓滑，待人友善的重要，能使生活、事業更順利。接著要感謝的老師是我的口試委員，同時也是我大學時期的指導老師，張老師不僅帶我踏入遙測、空間分析的領域之中，還提供我重要的圖資以及研究上的建議，使我的研究內容更加完整，透過閱讀老師的文獻，增加我對研究的靈感及邏輯思維，看過老師學生時期的筆記過後，明白基本功的重要性，透過每日的累積及寫下文獻的重點，才是我準時畢業的關鍵。然後也要感謝從南北上的王素芬老師，千里迢迢北上只為一兩個小時的學生口試，不僅在口試時擔任主持，也給予我實質上的評論，從不同的角度切入問題，頓時接受到新的想法，也讓我腦袋空白並思考了一陣子，總之很感謝老師願意擔任我的口試委員，也祝所有老師們研究順利，身體健康。

實驗室的夥伴也給我不少幫助。與我同屆的黃冠博在我剛入學時告訴我選課的技巧和提醒我各重要事情的截止時間，他同時也是被研究耽誤的甜點師傅，準備好吃的下午茶讓大家充電。Jonathan 博士教導我許多關於遙測的知識、程式以及 GIS 的操作，每當我寫程式卡住時，John 總能三兩下輕鬆幫我搞定，因此只要一完成新的步驟或者程式有跑出新的結果，我都會興奮地和 John “對答案”，並且討論如何進行下一步，沒有他的幫助我的研究也沒辦法這麼順利，也祝福他工作順利。蔡譯禎學姊，在我 R 語言零基礎的情況下，從最簡單的程式開始教起，每當我有問題時，總不厭其煩的為我除錯並告訴我關鍵字搜尋的技巧，此外也認真評論我的碩論及課堂報告，告訴我其中的問題，且提出修改的建議，讓我的報告更加順利且完整。陳冠勛學長，感謝他教會我 QGIS 基礎的操作，減少我初期自行摸索的時間，以及與我討論各種天馬行空的研究問題。在程式方面還曾與學姊一起思考解決我的問題，透過這一年多來與他們的討論及學習，如今我對 R 語言也有一定的了解，並且可以獨立完成所有程式的條件需求，這都要感謝他們。陳筱偵學姊，雖然學姊的行為無法用一般邏輯思考，但要感謝他教我論文版面設定、文獻引用的格式還陪我講垃圾話，讓我度過枯燥乏味的寫程式時間，在這過程中也讓我學到許多從未接觸過的知識。其他 C301 的成員們，要感謝你們維持這間研究室良好風氣，友善輕鬆的氣氛讓研究過程不再有壓力，有求必應的優良傳統也希望可以一直傳承下去，也祝環境生態研究室的大家工作、研究都順利。最後少不了要感謝的當然就是我的家人，在各種人生階段一直支持我，並提供良好的環境學習，讓我不愁各種費用，希望家人們可以身體健康，開心的過每一天。

摘要

陸域生態系為地球上重要的碳庫，而嚴重的乾旱會影響碳循環，受到氣候變遷的影響，乾旱發生的頻率以及嚴重程度正逐漸上升。臺灣因全球暖化加上降雨型態的改變，夏季的降水有減少的趨勢，未來中南部地區發生乾旱的機率上升。了解植被對於乾旱的反應，有助於評估在全球氣候變遷的情境下生態系功能的變化。透過遙測技術可以長時間且大規模的分析植被受環境變化的影響，本研究透過美國太空總署的遙測感應器 MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer) 衍生的增強植被指數(EVI; 250 m x 250 m)和常態化差異紅外指數(NDII; 500 m x 500 m)，以及 3 個月雨水累積的標準降水指數(SPI₃)，評估臺 20 年來(2000-2020)乾旱對臺灣植被影響。結果發現，20 年間臺灣共發生兩次極度乾旱，皆對植被生長有明顯負面影響，2002 年極度乾旱造成植生指數減少約 20%，特別是中、南部山區的植被受到的影響最大，經過 4 個月的時間才恢復至歷年平均值；2020 年乾旱使植生指數下降約 10%，並觀察到植物生長對乾旱的延遲反應。本研究也發現不同類群的植被對於乾旱的反應有所不同，乾旱期間草原的植生指數下降幅度最小，而闊葉林及混合林下降幅度較大；農田地雖受負面影響，但恢復速率較快。相關性分析結果顯示，植被的生長情形在不同程度的缺水壓力下不盡相同，且有明顯的空間分布差異及延遲反應。NDII 指數與乾旱指數的相關性較高，顯著網格佔總植被網格數約 54%，並隨時間延遲，相關性逐漸減弱；EVI 指數則是在一個月的延遲下與乾旱指數有較高的相關性。本次研究的結果有助於了解生態系對於乾旱的反應，未來需要結合多方面且長期的研究，才能更深入了解以應對氣候變遷對生態環境的衝擊。

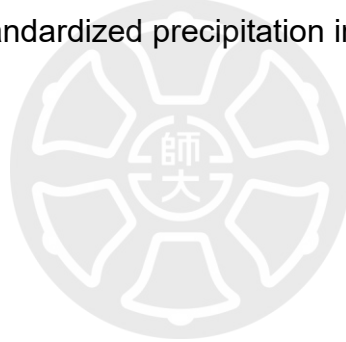
關鍵字：乾旱、常態化差異紅外指數、增強植被指數、標準降水指數

Abstract

Terrestrial ecosystems are important carbon sinks on Earth but severe drought could affect carbon cycling. The frequency and severity of droughts are gradually increasing due to climate change. Taiwan is experiencing a trend of decreasing summer precipitation due to changes in rainfall patterns likely because of global warming, which increases the likelihood of droughts in central and southern Taiwan. Understanding the response of vegetation to droughts can help assess changes in ecosystem function under global climate change scenarios. Remote sensing technology can be used to analyze the impact of environmental changes on vegetation over a long period of time and over very broad spatial extent. In this study, the enhanced vegetation Index (EVI; 250 m x 250 m), normalized difference infrared index (NDII; 500 m x 500 m) derived from MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer) of NASA, and the standard precipitation Index for three-month accumulated rainfall (SPI3) were used to evaluate the impact of drought on Taiwan's vegetation over the past 20 years (2000-2020). The results showed that Taiwan experienced two extreme droughts during the 20-year period, both of which had a significant negative impact on vegetation growth. The extreme drought in 2002 caused a decrease in vegetation index of about 20%, especially in the central and southern mountainous areas, which took about four months to recover to the average value of the previous years. The drought in 2020 caused a decrease in vegetation index of about 10%, and the lag response of plant growth to drought was observed. This study also found that different types of vegetation have different responses to drought. The grassland had the smallest decrease in vegetation index during the drought period, while the broad-leaved forest and mixed forest had larger decreases. Although the cropland was negatively

affected, its recovery rate was faster. The correlation analysis showed that the response of vegetation growth to different degrees of water stress was different and showed significant spatial variation and lag response. Compared to EVI, NDII index had a higher correlation with the drought index, with about 54% of all vegetation pixels experiencing significant decreases, and the correlation gradually weakened over time. The EVI index had a higher correlation with the drought index with a lag of one month. The results of this study help to understand the response of ecosystems to droughts. In the future, multi-faceted and long-term research is needed to gain a deeper understanding of the impact of climate change on the ecological environment.

Keyword: drought, normalized difference infrared index (NDII), enhanced vegetation index (EVI), standardized precipitation index (SPI)



目錄

第一章 緒論.....	1
第一節 全球氣候變遷.....	1
第二節 乾旱對植物與陸域生態的影響.....	1
第三節 遙測技術的應用.....	3
第一項 植生指數(vegetation index, VI).....	4
第二項 常態化差異植生指標(normalized difference vegetation index, NDVI).....	4
第三項 增強植生指數(enhanced vegetation index, EVI).....	4
第四項 常態化差異紅外指數(normalized difference infrared index, NDII).....	5
第四節 乾旱指數(drought index).....	6
第五節 研究動機與目的.....	8
第一項 重大乾旱紀錄.....	9
第二項 乾旱對臺灣植被的影響.....	9
第三項 研究目的.....	10
第二章 材料及方法.....	12
第一節 研究範圍.....	12
第二節 流程圖.....	13
第三節 資料來源及處理.....	14
第一項 土地利用分布圖.....	14
第二項 植生指數(EVI, NDII).....	14
第三項 氣象資料.....	15
第四項 乾旱指數(SPI).....	15
第四節 統計分析.....	16
第三章 結果.....	17
第一節 乾旱頻率及嚴重程度.....	17
第二節 不同缺水壓力對植被的影響.....	18
第三節 植生指數(EVI, NDII)在嚴重缺水期間的時序變化及空間分布.....	23
第四節 乾旱對不同植被類型的影響.....	29
第四章 討論.....	30
第一節 乾旱對植被的影響.....	30
第二節 季節性乾旱.....	30
第三節 延遲反應.....	32
第四節 空間分布.....	32

第五節 不同缺水程度對植被的影響.....	34
第六節 指數差異.....	35
第七節 研究限制及不確定性.....	36
第五章 結論.....	38
參考文獻.....	39



圖目錄

圖一 臺灣 1991-2020 年月均雨量、年均溫度以及年均降雨量。	9
圖二 台灣土地利用分布圖。	13
圖三 研究流程圖。	14
圖四 標準化降水指數 (SPI3) 時間序列。	17
圖五 2000-2020 期間，在曾出現極度缺水的網格其 EVI 與 NDII 指數與 SPI3 的相關性。	19
圖六 2000-2020 期間，在曾出現嚴重缺水的網格其 EVI 與 NDII 指數與 SPI3 的相關性。	20
圖七 2000-2020 期間，在曾出現中度缺水的網格其 EVI 與 NDII 指數與 SPI3 的相關性。	21
圖八 2002 年及 2020 年乾旱期間植生指數的時序變化。	24
圖九 2002 乾旱發生前後一個月乾旱指標。	26
圖十 2020 乾旱發生前後一個月乾旱指標。	28
圖十一 極度缺水不同植被類型 EVI 及 NDII 的影響。	29

表目錄

表 1 EVI、NDII 指數與不同缺水壓力(SPI3)及不同延遲反應下的皮爾森相關性統計結果，以及呈顯著相關網格和總植被網格的百分比。.....	22
---	----



第一章 緒論

第一節 全球氣候變遷

隨著全球氣候的改變，許多研究預測全球未來天氣極端事件發生的頻率以及規模會不斷增加和擴大，包含：洪水(Saurav et al., 2021)、高溫(Mukherjee & Mishra, 2021)、乾旱(Xu et al., 2019)、寒流(Field et al., 2012)及強降雨(Knpp et al., 2008)。這些極端事件對人類的健康與福祉造成的衝擊也越來越大，例如：水資源缺乏(Zampieri et al., 2016)、空氣汙染(Demetillo et al., 2019)、食物來源不足或農作物的損失(Parry et al., 2007)，以及對社會經濟的影響(Bell et al., 2018)。政府間氣候變遷專門委員會(IPCC)指出 21 世紀為乾燥且炎熱的世紀，各地區發生乾旱及高溫事件的頻率皆顯著上升(IPCC, 2012)，原因可能與溫室氣體持續增加，以及大規模的氣候變化有關(Meehl&Tebaldi, 2004)，如：聖嬰現象(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)、太平洋十年振盪(Pacific Decadal Oscillation, PDO)(Zhang & Zhou, 2015)。據估算每年全球因乾旱造成約 60 至 800 億美元的經濟損失(Wilhite, 2000)。乾旱可分為氣象乾旱 (meteorological drought)、農業乾旱 (agricultural drought)、水文乾旱 (hydrological drought)及社會經濟乾旱 (socioeconomic drought)四種類型(Wilhite, 2005)。氣象乾旱係指降雨量低於平均值並持續一段時間(Crausbay et al., 2017)；若降雨量過少，使土壤中水分過低，影響作物生長，造成農業上的損失，則稱為農業乾旱(Xu et al., 2019)；若影響逕流量、河川流量、地下水量、濕地水量等使其低於平均值，則稱為水文乾旱(Van Loon, 2015)；社會經濟乾旱則指水資源系統無法滿足人類生活所需，對經濟產生負面的影響。由此可知乾旱對於生態及社會的影響是複雜且彼此相關的。

第二節 乾旱對植物與陸域生態的影響

在乾旱的初期，植物會藉由降低氣孔導度(stomatal conductance)(即將氣孔關閉)來防止水分喪失，長期下來會導致碳缺乏(carbon starvation)、生產力降低

(Lawson, 2009)以及改變組織中的化學活性(Campos et al., 2014)。乾旱會影響植物營養的有效性及吸收，在養分供給不足的情況下，植物器官的生長、種子的發育會受到限制。造成此生理反應的原因可能是因為溫度變化(Luomala et al., 2005)、土壤水分不足(Pirasteh-Anosheh et al., 2016)或蒸氣壓力差(vapor pressure deficit)增加所致(Grossiord et al., 2020)。木質部在缺水高張力(high tension)的情況下，會造成莖部的栓塞(Reichstein et al., 2013)，降低約 60%水分運輸能力(Adams et al., 2017)，使樹冠層的葉片老化，進而影響樹冠的生長，此反應時間約數天至數周，透過遙測技術可觀測其變化(Zhang et al., 2013)。

乾旱在不同的氣候帶皆有可能發生，嚴重的乾旱會影響陸域生態系的結構和功能(Nepstad et al., 2004 ; Zhao & Running, 2010)，例如：植被生產力下降、生長季縮短、樹木死亡率上升、生物多樣性與生態系服務下降等(Allen et al., 2010 ; Clark et al., 2016 ; Fensham et al., 2019 ; Rivero et al., 2007)。2011/2012 年北美遭遇嚴重的乾旱，重創當地的農業、降低森林的初級生產量 (GPP)及改變碳循環(He et al., 2018 ; Wolf et al., 2016)；2014-2017 年美國的乾旱引發的蟲害，造成加州地區大規模(約 50%研究區域)的樹木死亡，同時增加林火的發生(Fetting et al., 2019)；Cavin et al. (2013) 等人使用年輪分析的結果顯示，乾旱會降低原生樹種的生態優勢，例如：恢復力 (recovery)降低、生長速率減緩，改變原生種與外來種的競爭關係，造成物種組成的改變。乾旱也會影響木質部的水分運輸能力，增加樹木自我調節失衡的風險。Stovall et al. (2019)的長期研究發現，樹高是預測樹木因乾旱死亡率的重要指標，樹高每多 10 m，死亡率上升約 1.07 倍，且大樹(DBH > 30 m)的死亡率是小樹的(DBH < 15 m)2 倍，原因可能是大樹需克服更大的水分運輸挑戰 (hydraulic challenge)(Bennett et al., 2015)；此外，高溫、乾燥的環境容易增加林火的頻率，改變全球的碳循環及生物地球化學，特別是泥炭地(peatlands)所在的地區(Loisel et al., 2021)，如：印尼(Page et al., 2002)、加州(Earles et al., 2014)。

潮濕多雨的地方仍可能發生乾旱(Dietze & Moorcroft, 2011)，據估算亞馬遜河流域 2005 年和 2010 年的乾旱長期而言造成 1.6×10^{15} 克以及 2.2×10^{15} 克的碳因樹木死亡而釋放(Lewis et al., 2011)；乾旱造成的水分的限制，使植物氣孔關閉，光合作用的能力降低，進而使亞馬遜河流域的森林物候發生改變(Santos et al., 2018)；2015 年發生在南美洲熱帶雨林的乾旱，不僅使當地的初級淨生產量(NPP)下降 60%，同時加強土壤的呼吸作用，使大量的溫室氣體釋放至大氣中(O'Connell et al., 2018)；Zhou et al. (2014) 等人在剛果雨林進行長達 10 年的監測，結果指出剛果雨林地區的降雨量有顯著下降的趨勢，伴隨植被的光合作用效率的降低，使耐旱物種更佔優勢，未來可能會改變物種組成及生態結構。自 21 世紀以來，亞洲(Chunlan et al., 2018; Wang et al., 2011)、歐洲(Feyen & Dankers, 2009)、非洲(Baudoin et al., 2017; Hoffman et al., 2009)、及美洲(Asner & Alencar, 2010; Rebello et al., 2020) 皆有重大乾旱事件，顯示嚴重乾旱將已普遍發生在全球各地並可能對生態造成衝擊。

第三節 遙測技術的應用

傳統上對植被受乾旱的影響的研究方法，大多為田野調查(Barbeta et al., 2015; Pasho et al., 2011; Phillips et al., 2009)或野外操作性實驗(Liu et al., 2020; Winkler et al., 2019)，不僅耗費大量的時間及人力資源，研究範圍也有所限制，因為乾旱發生的地區可能無法輕易到達或者為重要的保護區(Nagendra et al., 2013)，造成研究上的困難，然而遙測技術(remote sensing)可以偵測乾旱對樹冠層造成的改變(Cunha et al., 2015)，能快速、大範圍、長期且不經接觸的情況下獲得地表資訊，被應用國家和全球尺度的研究之中(Joiner et al., 2018; Rao et al., 2019; Zhao & Running, 2010)。

Barbosa & Asner (2017)使用遙測技術以及長達百年的雨水資料，針對夏威夷森林進行長期的研究，發現在雨水顯著減少的趨勢下，樹冠層的體積逐漸縮小，光合作用的效率也逐漸降低，影響整個生態結構。乾旱對於氣孔的影響為短暫且

可逆的，然而對樹冠層的損傷需要數年的時間才能恢復(Semeraro et al., 2020； Xu et al., 2019)，因此透過遙測影像長期監測樹冠層的生長情形，是評估森林生態對於環境變化反應的有效方法。

第一項 植生指數(vegetation index, VI)

以遙測影像監測植物生長是利用植物行光合作用時，會吸收紅光(red)能量，並反射近紅外光(near-infrared, NIR)的特性。健康的植物(葉綠素濃度較高)相比生長不佳(葉綠素濃度較低)的植物能吸收更多的紅光(red)能量，故透過計算反射和吸收的能量差，可以推估植被的覆蓋度和生產力(Zhang et al., 2016)，因此衍生許多植生指數(Vegetation Index；VI)。

第二項 常態化差異植生指標(normalized difference vegetation index, NDVI)

常態化差異植生指標為應用最廣的植生指數(VI)之一，其數值介於-1 至 1 之間，對於樹冠層的結構變化及光合作用活性非常敏感(Vincini et al., 2008)，被大量應用於植物研究之中。Song et al. (2019) 在中國西南地區利用 NDVI 對不同季節的乾旱對於植被影響進行評估，結果顯示中國地區春季的乾旱對於植被的生長有負面的影響；Wu et al. (2018) 使用 NDVI 探討北半球溫帶地區的植被受乾旱的生長反應，發現不同的植被類型，對乾旱的反應大約會有 1 至 4 年的延遲，這可能與土壤水的補充以及植被根的結構差異有關；2015 年由聖嬰現象引起的乾旱，造成西非地區土壤水的減少，降低西非地區人工林的綠度 (Xulu et al., 2018)；Dong et al. (2019) 研究美國加州乾旱對植被的影響，發現 2012-2016 的乾旱使 NDVI 顯著下降；Chang 等人 (2011)透過 NDVI 指數研究臺灣的物候，結果顯示溫度增高有助於高海拔的植物生長。然而常態化差異植生指標(NDVI)在樹冠結構密度較高的森林地區時，易有飽和效應 (saturation effect) (Houborg & McCabe, 2018)，且對於背景環境、雲霧干擾非常敏感，使 NDVI 的數值在部分地區不夠準確或不夠靈敏。

第三項 增強植生指數(enhanced vegetation index, EVI)

Huete et al. (1997)利用藍光波長(450 nm)修正大氣粒子造成的干擾以及土壤背景造成的誤差，發展出增強植生指數(enhanced vegetation index, EVI)，用來評估樹木的葉片數量和葉綠素濃度，並與葉面積指數(leaf area index)具有良好的相關性(Nemani et al., 2003)，成為較適合應用於樹冠結構較複雜的森林地區的植生指數(Huete et al., 2002)，而被應用在多種植被類型的生長變化或空間分布及時間變異的研究之中，Reinermann et al. (2019) 利用 EVI 研究德國 20 年來乾旱對於植被以及農作物的影響，結果發現不同農作物種類的產量受到乾旱的影響程度不相同；Branco et al. (2019) 探討巴西熱帶森林受乾旱影響的空間分布和趨勢變化，結果發現 NDVI 及 EVI 指數皆呈現下降的趨勢，顯示生產力逐漸下降；中國山地的研究，透過 EVI 指數的變化，發現在中海拔地區(500 m 至 2000 m)的生態抗性(resistance)較高，高海拔地區(2000m 以上)則較低(Geng et al., 2019)；另有草原生態系的研究發現，乾旱伴隨的高溫使 EVI 指數顯著下降，且 EVI 指數與初級生產力(gross primary productivity)的相關性較 NDVI 指數高(Wagle et al., 2014)；在全球尺度下，Huang & XIA. (2019)的研究指出，熱帶地區的常綠闊葉林在面對嚴重乾旱時的生態韌性較其他植被類型高，是未來穩定全球生產力及碳匯的重要類型；Seddon et al. (2016) 評估 2000 至 2013 年全球植被受乾旱影響的結果，發現不同生態系的生長限制因子(溫度、雨量、雲層厚度)不同，且 EVI 指數的變化會有一個月的延遲。

第四項 常態化差異紅外指數(normalized difference infrared index, NDII)

藉由近紅外光(NIR)及短波長紅外光(short-wave infrared, SWIR)之間的反射差所衍生的植生指數也應用於乾旱的研究，常見的指數為常態化差異紅外指數(normalized difference infrared index, NDII)，NDII 對於樹冠層水分的變化非常敏感(Wang et al., 2008)，Joiner et al. (2018) 使用 NDII 及其他指數針對全球植被的研究顯示，在可利用水資源有限時，各種遙測指數的變化在時間及空間上的變異是一致的；在匈牙利西南部的研究，由聖嬰現象引發的乾旱，對松樹的生長

及恢復力造成負面影響，NDII 指數顯著下降，且乾旱期間，NDII 指數比 NDVI 指數對樹木的生長變化更敏感(Móricz et al., 2018)；Liu et al. (2021) 透過 NDVI 和 NDII 監測西伯利亞森林對於乾旱的反應，發現原始森林的生態韌性(resilience)較差，且當植被的綠度(NDVI)開始下降時，樹冠層水分含量(NDII)可能仍維持在最大值；乾旱引起的蟲害對森林的損傷可能大於乾旱的影響。Camarero et al. (2022)的研究發現，2016 年乾旱引起的蟲害(Siberian silk moth)，使樹木的葉片大量掉落以及死亡，NDII 指數顯著下降，重創當地針葉林的生產力。

第四節 乾旱指數(drought index)

乾旱的影響往往需要時間的累積，造成的影響可以持續多達數年，而乾旱發生的起始時間及結束時間不易偵測(Tannehill, 1947)，受特定地區的氣候變化、地理特徵、環境因子等的影響，難以從強度、持續時間和範圍等多方面給予一個客觀的定義(Spinoni et al., 2014)，因此自 20 世紀以來衍生許多氣象指數作為評估乾旱的方法(Heim, 2002)。帕默爾乾旱指數(palmer drought severity index, PDSI)，主要偵測水資源的變異，將降雨量以及蒸發散(evapotranspiration, ET)納入計算(Palmer, 1965)，被應用於許多乾旱的研究(Barlow et al., 2016；Okin et al., 2018；Wilhite et al., 2000)。然而此指數僅適用於美國地區，若要跨地區比較，需考量該地區的溫度、緯度及月分對蒸發散(ET)造成的偏差，需使用不同的校正方法重新運算過後才能進行比較，在運算上更為複雜(Dai, 2011)。Wells et al., (2004)的研究比較不同校正方法發現校正過後的帕默爾乾旱指數(sc_PDSI)較適用於歐洲(Markonis et al., 2018)；北美(Van der Schrier et al., 2006)；中國(Yang et al., 2017)等地區。

另有一值得關切的是一地區同一年之中可能會發生各種乾旱，例如：季節間的乾旱、農業乾旱、突發性的乾旱事件，而 PDSI 僅能使用固定的時間尺度(12 個月)進行計算，不易偵測不同類型的乾旱(Vicente-Serrano et al., 2010)，Eltahir

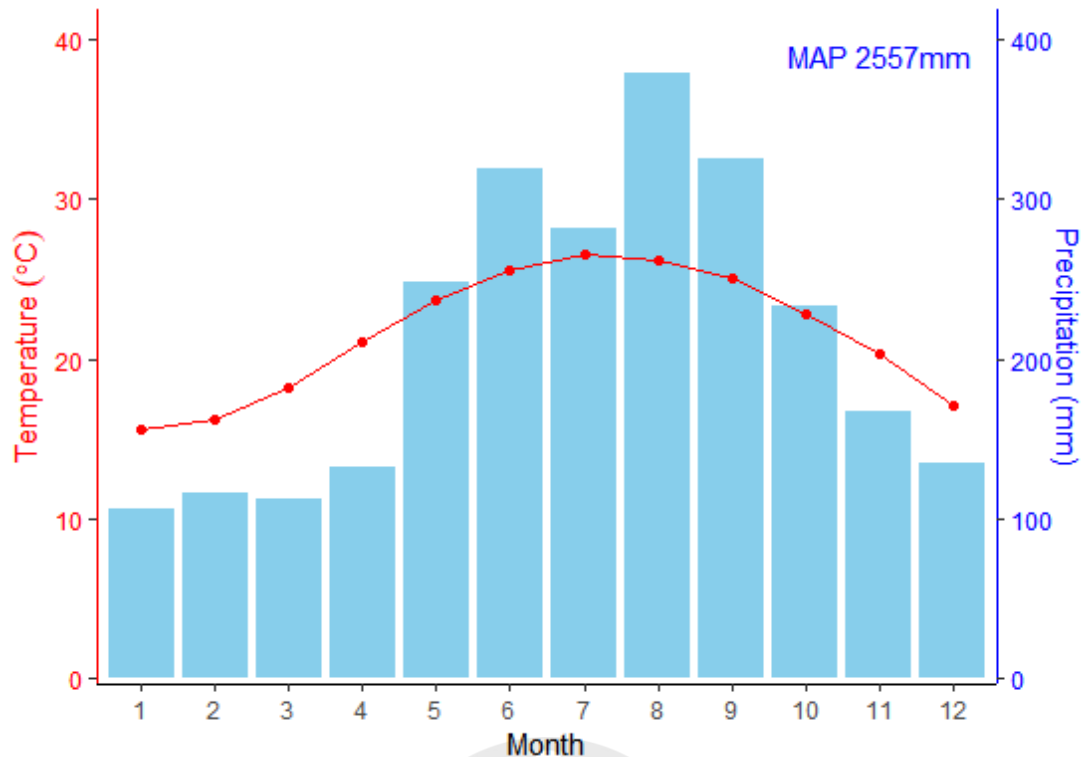
et al., (1999)的研究發現不同的水資源(降雨、地下水、溪流水)對水循環的影響在不同時間尺度上會有顯著變化，無法以帕默爾乾旱指數(PDSI)完整反應其嚴重程度。Mckee 使用標準降水指數(standardized precipitation index；SPI)來量化乾旱的嚴重性(Mckee et al., 1993)，利用降水資料來評估缺水持續的時間、嚴重程度、頻率，此一指數可根據不同時間長度的雨水累積(如：3, 6, 9, 12, 18 個月雨量)，來評估乾旱的嚴重程度，適用於長期監測乾旱發生的持續時間及比較不同地區的乾旱嚴重程度。彈性的時間尺度及僅需降水資料即可進行運算的優勢使它被廣泛應用於水文、極端氣候及不同時間尺度的乾旱研究之中(Jain et al., 2010；Sobral et al., 2019；Sönmez et al., 2005)，也被世界氣象組織(World Meteorological Organization, WMO)認定為適合做為評估乾旱的指標(WMO, 2006)。然而標準降水指數(SPI)因忽略溫度、蒸發散、濕度等因子對乾旱的影響，而受到一些批評。

先前的研究顯示，高溫伴隨的高蒸發散量會加強乾旱的嚴重程度(Kong et al., 2020; Trenberth et al., 2014; Zhu et al., 2021)，加上全球溫度逐漸上升，各地區皆有發生高溫事件的紀錄(He et al., 2018；Rita et al., 2020；Ye et al., 2019)，僅考慮降水量顯得不夠全面，加上不易計算無降水的時期以及降水量極少地區，因此標準化蒸發散量指數(standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI)在 2010 年被提出(Vicente-Serrano et al., 2010)，用蒸發散(Evapotranspiration, ET)以及降水作為參數對乾旱嚴重程度進行評估，在估計蒸發散(ET)方面較帕默爾乾旱指數(PDSI)準確，同時也保留了標準降水指數(SPI)的優點(彈性的時間尺度)，因此標準化蒸發散量指數(SPEI)也被廣泛應用於乾旱或氣候變遷的文獻探討之中(Gao et al., 2017；Hernandez & Uddameri, 2014；Khatri-Chhetri et al., 2021)。但是蒸發散(ET)的估計在不同地區容易有偏差，在熱帶地區容易高估，在亞熱帶地區則相反(Van der Schrier et al., 2011)，Beguería et al., (2014)的研究發現，在計算蒸發散(ET)時，在半乾旱地區的差異較大，在

濕潤地區較小，Yang et al., (2017)的研究指出，標準降水指數(SPI)比標準化蒸發散量指數(SPEI)更適用於濕潤地區，因為溫度對乾旱的貢獻，在標準化蒸發散量指數(SPEI)中被高估。臺灣位於亞熱帶氣候區，自 1960 至今擁有數千個雨水觀測站，擁有長期且完整的雨水資料，造成乾旱的原因主要是因為降水減少所引發(Shiau & Hsiao, 2012)，若使用 SPEI 指數，則會因臺灣夏季旺盛的蒸發散，使乾旱發生的時間集中在夏季(洪致文、施明甫，2017)而造成偏差，因此標準降水指數(SPI)為較適用評估乾旱事件的頻率及嚴重程度的指標(Guenang & Kamga, 2014)。

第五節 研究動機與目的

臺灣的年平均降雨約 2500 毫米(圖一)，中南部地區降雨多集中因西南季風盛行的在夏季，5 月至 10 月的梅雨和颱風為主要降水來源；北部地區因受東北季風帶來降雨的影響，冬季降水充足，反之中南部地區因地形阻隔導致冬季降雨機率較低(11 月至 4 月)，雖然臺灣降雨量為世界平均值的 3 倍，但是自 1960 年以來，臺灣遭受乾旱的次數越來越多(Yu et al., 2006)，Chen et al. (2009)以標準降水指數(SPI)研究臺灣長期乾旱的趨勢變化和變異性，結果指出西部地區受到乾旱的影響較大，且未來會有更多嚴重的乾旱發生；研究指出，未來台灣的降雨量在雨季會增加，乾季則有減少的趨勢，加上全球暖化的影響，造成乾旱發生的機率上升(IPCC, 2021)；長期的觀測資料顯示，臺灣近 30 年的平均氣溫持續上升，少雨年發生的次數增加，預計在 21 世紀末期平均溫度會上升 3.4°C，最大連續無降雨日，在 21 世紀末增加的幅度為 12.4% (IPCC, 2022)。



圖一 臺灣 1991-2020 年月均雨量、年均溫度以及年均降雨量(mean annual precipitation, MAP)。資料來源:交通部中央氣象局 (<https://www.cwb.gov.tw/>)。

第一項 重大乾旱紀錄

受氣候變遷的影響，太平洋高壓向西延伸，可能會導致颱風路徑的改變，使登陸臺灣的機會降低，造成降雨不足而引發乾旱(Yeh & Hsu, 2019)。自 2000 年以來也記錄到多次嚴重的乾旱事件，例如：2002 年的極度乾旱事件，降雨量較平均值低約 30%，水庫嚴重缺水(Huang & Yuan, 2004)。又如由於缺少颱風降雨，造成 2014-2015 年北部地區水資源缺乏(朱等人)、2020-2021 年苗栗、臺中地區，因梅雨減少，加上無任何颱風登陸，造成堪稱 50 年來最嚴重的乾旱事件，造成大規模的經濟損失(劉等人，2021)。

第二項 乾旱對臺灣植被的影響

農業為臺灣重要的產業，根據 110 年農業委員會的統計，農業的生產總值約為 5000 億元，臺灣可利用的農業用地正逐漸減少(Chang et al., 2012)，如何改變耕作方式因應暖化的環境，是目前要面對的重要課題。乾旱對於農作物的影響非常顯著(Zhong et al., 2018)，農作物的生長對於水分的變化非常敏感(Zhang et

al., 2019), 在缺水的情況下會限制作物發育導致產量減少, 特別是需水量大的水稻(Pascual & Wang, 2017); 玉米亦為臺灣重要的糧食之一, Greaves & Wang (2017) 透過不同的灌溉方式對玉米的生長進行評估, 發現玉米的產量以及外型與土壤中的水分有顯著關係。乾旱對臺灣農業的影響並不罕見, 2020-2021 的嚴重缺水使中南部地區遭受嚴重的乾旱, 造成當地的蔬果、茶葉、稻米等農作物受到影響, 造成大約 16.5 億元的損失(劉等人, 2021)。目前已有需多研究就乾旱對農作物的影響進行分析(Wang et al., 2014; Zhong et al., 2018), 結果皆指出乾旱會顯著減少農作物產量, 且不同的作物種類、耕作方式、土壤性質, 受到乾旱的影響不相同。

乾旱對於植被的影響不只有農業, 對於不同類型的植被也有顯著的影響(Vicente-Serrano et al., 2013), 如: 針葉林(Sánchez-Salguero et al., 2015; Thonfeld et al., 2022)、闊葉林(Jha et al., 2019; Zhang et al., 2017)、草原(Lei et al., 2020; Wang et al., 2022), 了解植被對於乾旱的反應, 有助於了解陸域生態系受環境變化的影響(Zhang et al., 2019)以及協助生態系經營管理 (Zhang et al., 2004), 過去的研究較少聚焦於副熱帶濕潤地區, 在臺灣已有一些研究探討水文乾旱, 分析和預測趨勢變化(Chen et al., 2009; Yeh, 2019; Shiau & Hsiao, 2012), 也有一些研究探討溫度和降水變異對植物的影響(Abdulmana et al., 2021; Chang et al., 2014; Tsia et al., 2021), 或著極端氣候改變物候的研究(Chang et al., 2013; Wang & Chang, 2021), 但罕見研究就嚴重乾旱對植被造成的影響進行長期分析研究(Chang et al., 2018)。

第三項 研究目的

評估森林樹冠層的變化需要由多個角度切入, 因為樹冠層的變化主要有三個不同的特徵: (1) 樹冠層的覆蓋度, (2) 樹冠層的葉綠素濃度, (3) 樹冠層的含水量(Xiao et al., 2005), 無法使用單一指標準確地評估複雜的變化, 由於各種植生指數的原理以及採用的光譜波段皆不同, 因此使用多種植生指數綜合討論有利於全

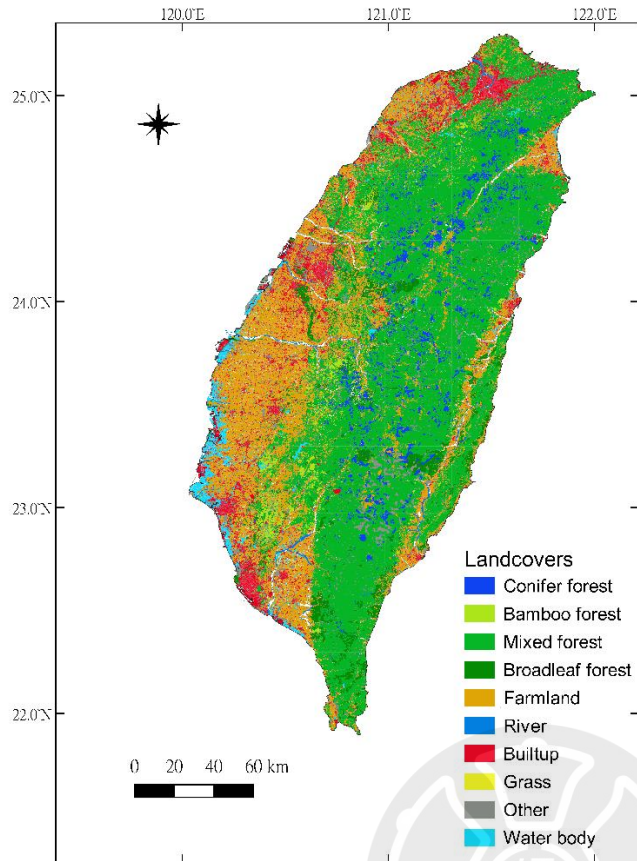
面地了解實際情況。臺灣森林地區占全島約 60%，多樣化的棲地環境加上豐富的雨水條件，有利樹木生長(Chang et al., 2014)，複雜的樹冠層結構加上多雲霧的天氣特徵，讓使用 NDVI 指數來評估樹冠層的變化會有許多限制，使用校正過雲霧干擾及土壤背景誤差的 EVI 指數可以有效減少 NDVI 指數的偏差；NDII 指數則對於樹冠層的水分變化非常敏感(Wang et al., 2008)，適合用於缺水時期的監測，Chang et al.(2017) 使用多種植生指數，評估臺灣乾旱對於植被生長影響的敏感性，結果顯示 NDII6 對植被生長變化最敏感。本研究主要的目的為：(1) 評估臺灣 2000-2020 乾旱發生的頻率及嚴重程度，(2) 透過乾旱指數(SPI)及兩個植生指數(EVI, NDII6)，分析不同程度的缺水壓力對不同植被類型(針葉林、針闊葉混和林、常綠闊葉林、草原、農田)的影響，(3) 了解植生指數(EVI, NDII)在乾旱期間的時空變化。



第二章 材料及方法

第一節 研究範圍

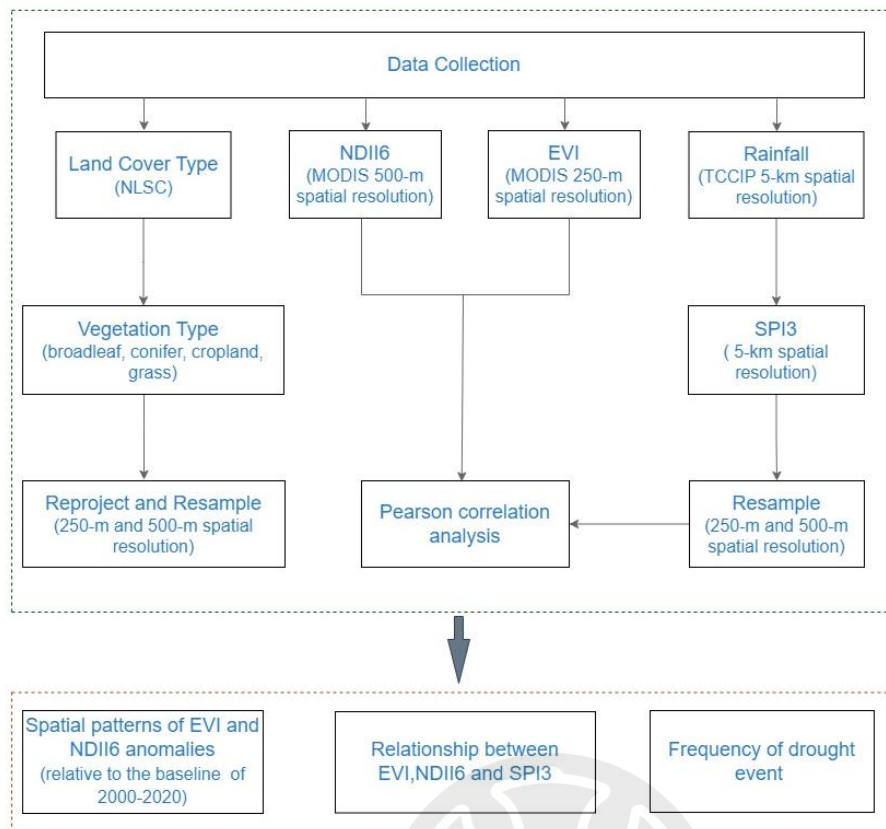
本研究以臺灣本島為研究範圍，臺灣為位於亞洲大陸東南方太平洋西方的島嶼，陸地面積約 36,000km²，北回歸線以北為副熱帶季風氣候區，以南為熱帶季風氣候區，年均溫為 22°C，平均年雨量約為 2500 mm，山坡地及森林的土地面積占全臺灣面積三分之二以上，高海拔地區的植被類型大多為針闊葉混和林及針葉林，中、低海拔地區主要為闊葉林以及農田地，人為活動多集中在低海拔地區(圖一)。在水平距離 75 公里內，垂直距離可從海平面上升至近 4000 公尺，多樣化的地形加上溫帶及熱帶的氣候條件使臺灣擁有豐富的生物資源(Chou & Tang, 2016)。豐水期(5 月至 10 月)依賴颱風及梅雨(plum rain)的降雨，若期間無任何颱風登入，則易引發缺水危機。高低起伏的地形，東西流向的河川及降雨的空間分布不均，使降雨後的雨水快速流入台灣海峽及太平洋之中，故可利用的水資源並不充裕，乾旱常造成經濟和農業的損失。雖然年雨量高於世界平均，近年來受聖嬰現象的影響，降雨的變動及氣溫升高，不僅可能改變森林的物候，也可能增加林火的風險(Huang et al., 2020)。



圖二 台灣土地利用分布圖。資料來源：內政部國土測繪中心 (NLSC ; <https://www.nlsc.gov.tw/>)。

第二節 流程圖

本次研究的流程圖如圖三。首先自各平台獲得圖資及資料，包含：土地利用分布圖、空間解析度各別 250 m 和 500 m 的植生指數(EVI, NDII)，以及 5 公里空間解析度網格化的觀測月平均降雨量。將雨量計算成標準降水指數(SPI)並重新取樣至和植生指數一致的空間解析度，再進行皮爾森相關性統計；接著計算植被的生長情形與基準年期(2000-2020 年)平均值的差異，最後評估乾旱對不同植被類型造成的影響、植生指數與乾旱指數的相關性，以及 20 年來乾旱發生的頻率及強度。



圖三 研究流程圖。

第三節 資料來源及處理

第一項 土地利用分布圖

土地利用分布圖(圖二)資料來自內政國土測繪中心(NLSC；<https://www.nlsc.gov.tw/>)，使用高解析度的遙測影像，將土地利用有系統的分類並隨時間更新。本次研究針對臺灣本島的植被進行評估，自 1991 年來已禁止人工伐林，森林的動態變化受人為的干擾相對小，適合作為研究乾旱對亞熱帶植被影響的場所。土地利用圖重新投影成 WGS84 大地基準，並轉換成網格資料，使用最近鄰法(nearest neighbor method)重新取樣至空間解析度 250 m 及 500 m，與 EVI 指數和 NDII 的解析度一致。

第二項 植生指數(EVI, NDII)

美國太空總署(NASA)的 Terra 衛星及 Aqua 衛星上所搭載的 MODIS(Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer)遙測感測器，擁有自 2000 年(3 月)至今的長期遙測資料，提供 250 m 至 1 km 的空間解析度以及 36

個光譜帶，可應用於監測大氣、災害防治、預測氣候變遷等用途。本次研究使用的增強植生指數(EVI)選用 Terra MODIS，每 16 天記錄一次，空間解析度 250 m x 250 m (MOD13Q1)，時間尺度為 2000 年至 2020 年，將資料匯集成月資料並計算平均值，EVI 的公式如下：

$$EVI = G \times \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + C1 \times \rho_{RED} - C2 \times \rho_{BLUE} + L}$$

其中 ρ_{NIR} 為近紅外光波段(841nm~876 nm); ρ_{RED} 為紅光波段(620nm~670nm); ρ_{BLUE} 為藍光波段(459 nm~479 nm); 常數分別為： $G=2.5$ 、 $C_1=6$ 、 $C_2=7.5$ 、 $L=1$ 。常態化差異紅外指數(NDII6)選用 Terra MODIS，每 8 天記錄一次，空間解析度為 500 m x 500 m (MOD09A1)，時間尺度為 2000 年至 2020 年，資料匯集成月資料並計算平均值，NDII6 的公式如下：

$$NDII6 = \frac{(\rho_{NIR} + \rho_6)}{(\rho_{NIR} - \rho_6)}$$

其中 ρ_{NIR} 為近紅外光波段(841 nm~876 nm)； ρ_6 為 MODIS 第 6 個波段(1628 nm~1652 nm)。所有 MODIS 數據下載及計算皆以 Google Earth Engine (GEE) 進行。

第三項 氣象資料

降雨資料採用 2000 年至 2020 年的 5 公里空間解析度網格化觀測月平均雨量，降雨資料用來計算乾旱指數以及相關性統計。資料來源為臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台(TCCIP；<https://tccip.ncdr.nat.gov.tw/>)，TCCIP 提供多樣化的氣象資料，擁有自 2000 年至 2020 年的長期資料，且經過標準程序的校正及檢閱，具有一定的正確性。

第四項 乾旱指數(SPI)

SPI 值大約範圍在+4 至-4 之間，正號及負號各代表和平均值相比降雨量較多及較少的事件，一般依據 SPI 值小於-1、-1.5、-2 定義乾旱的嚴重程度分別

為：中度乾旱、嚴重乾旱、極度乾旱(Mckee et al., 1993)。本研究將使用標準化降水指數(SPI)，以 3 個月的雨水累積(SPI3)作為監測乾旱的指數，利於監測短期及季節間的乾旱，與 Chen 等人(2009)的方法一致，公式如下：

$$SPI_{li} = \Phi^{-1}(F(r_i))$$

其中 SPI_{li} 為選定時刻(i)SPI 值； Φ^{-1} 為標準常態分布逆函數； $F(.)$ 為雨量累積分布函數； r_i 為選定時間雨量，時間尺度為 2000 年至 2020 年，SPI3 的數據重新取樣至空間解析度 250m 及 500m，與 EVI 指數和 NDII 的解析度一致。乾旱指數的計算使用 R(4.2.0)語言中的 SPEI 套件，並使用 QGIS 繪製成空間分布圖。

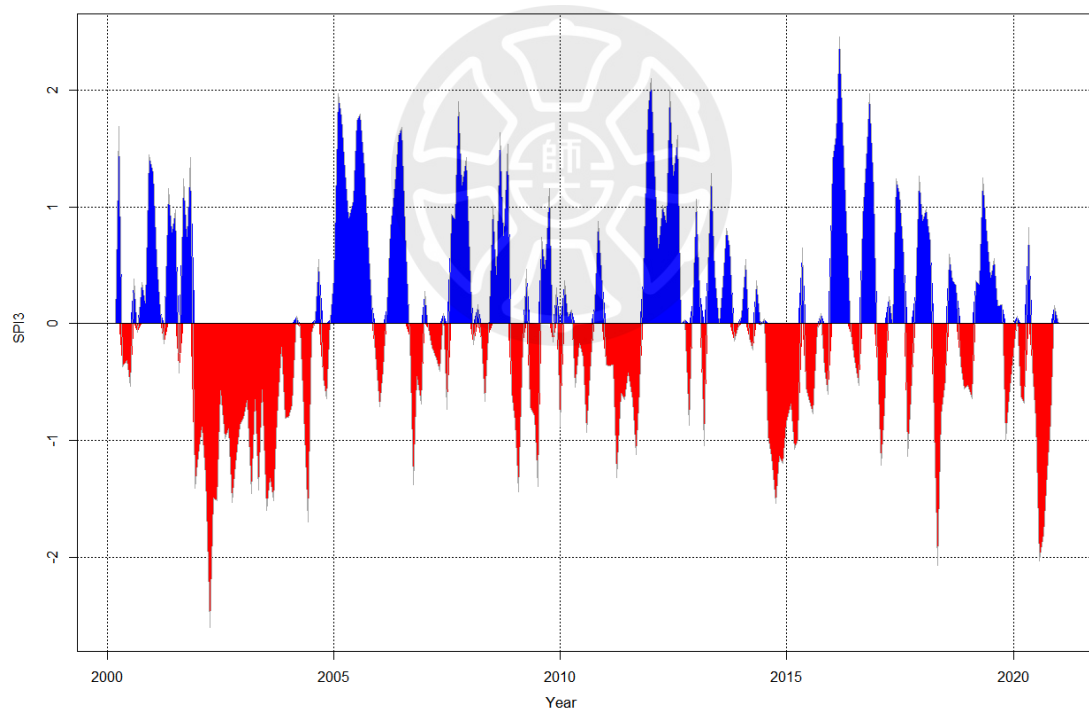
第四節 統計分析

藉由比較植被生長情形(EVI, NDII6)與基準期(2000 年至 2020 年)平均的差異來量化乾旱對於植被的影響，並且繪製成空間分布圖。此外為了評估 20 年來不同植被類型的生長情形與不同程度缺水壓力(SPI3)的相關程度，將植被類型分為五種(針葉林、針闊葉混和林、常綠闊葉林、草原、農田)，缺水壓力依照 20 年間曾發生過乾旱事件的強度分為：極度缺水($SPI3 < -1$)、嚴重缺水($-1 < SPI3 < -0.7$)、中度缺水($-0.7 < SPI3 < -0.5$)的月份，各別與植生指數(VI)在無延遲、延遲 1 個月及延遲 2 個月的情況下，使用皮爾森相關性統計(Pearson Correlation)，對每一個空間解析度 250 m(EVI)及 500 m (NDII6)的網格進行分析。所有統計和分析皆在 R 語言(4.2.0)中進行，並使用 QGIS 繪製成空間分布圖。

第三章 結果

第一節 乾旱頻率及嚴重程度

根據 SPI3 指數臺灣本島 2000 年至 2020 年的乾旱頻率及嚴重程度結果如圖四。整體而言，20 年間發生二次極度乾旱 ($SPI3 < -2$)，而中度乾旱($SPI3 < -1$)事件發生的頻率較高但持續時間短。2000 年至 2002 年間發生一次極度嚴重的乾旱，2002 年 4 月 SPI3 值為 -2.6 ，缺水少雨的情況持續至 2005 年才有改善。2005 年至 2013 年間沒有發生明顯的乾旱事件，2014 年至 2015 發生一次嚴重乾旱 ($SPI3 < -1.5$)，2014 年 10 月 SPI3 值為 -1.7 。2016 年至 2019 年間無明顯乾旱事件，2020 年 8 月又發生一次極度乾旱，SPI3 值為 -2.03 ，到年底缺水情形才稍微緩解。

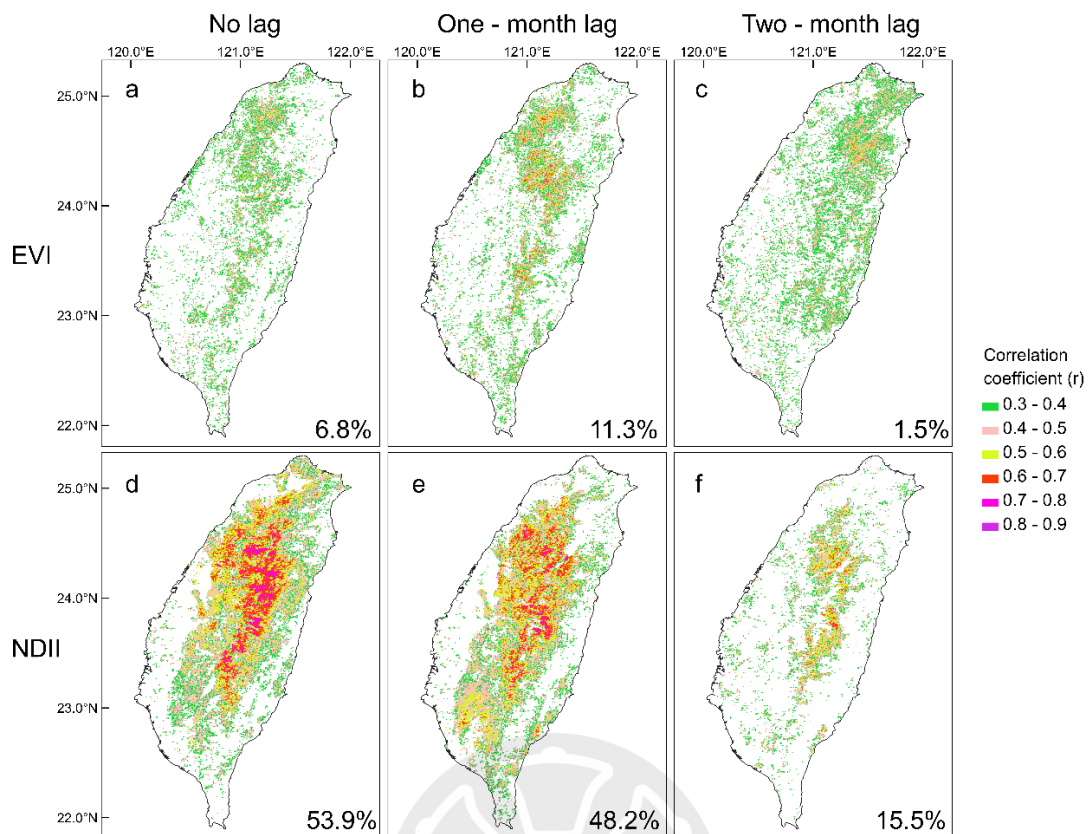


圖四 標準化降水指數 (SPI3) 時間序列。資料來源: TCCIP 網格化雨量資料 (<https://tccip.ncdr.nat.gov.tw/index.aspx>)

第二節 不同缺水壓力對植被的影響

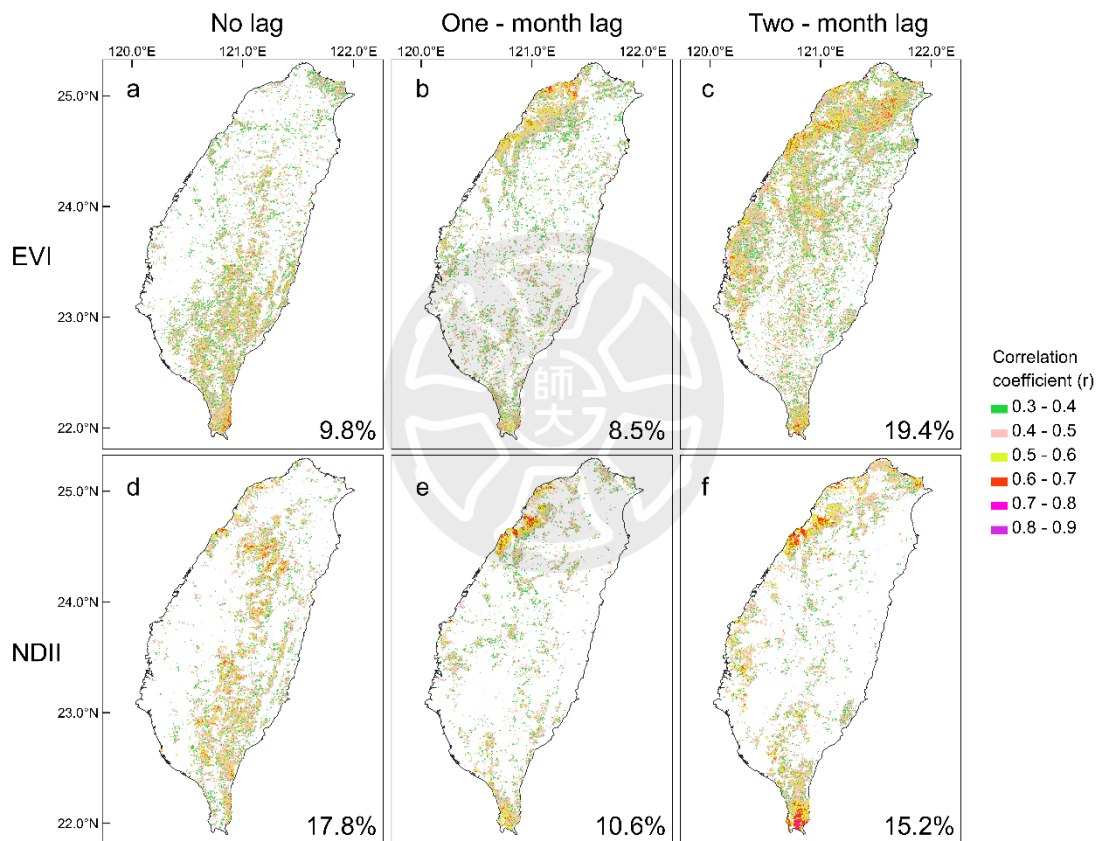
植生指數(EVI, NDII)與不同程度缺水壓力(SPI3)之間相關性結果如圖五、圖六、圖七。二十年間出現過極度缺水的地方(即 $SPI3 < -1$ 的網格)，其當月增強植生指數(EVI)與 SPI3 的相關性結果呈現正相關，即 SPI 越大(越不缺水)EVI 也越大，相關係數大多介於 0.3 到 0.4 之間(圖五 a、b、c)，以一個月的延遲相關性最高，又以中部以北的地區相關係數較高，可達 0.6 至 0.8 之間(圖五, b)，相關性顯著的網格約佔整體植被網格數的 11%(表 1)。反應樹冠層含水量的常態化差異紅外指數(NDII)與 SPI3 情況的相關性結果，在無延遲反應情況，相關性顯著的網格佔總植被網格數約 54%(表 1)，在中部高海拔地區，相關係數最高介於 0.7 至 0.9 之間(圖五 d)，一個月延遲時，相關係數下降至 0.6 至 0.8 (圖五 e)，顯著網格佔總植被網格 48%，兩個月延遲則下降至 0.5 至 0.7，且顯著的網格僅佔 15%(圖五 f)。





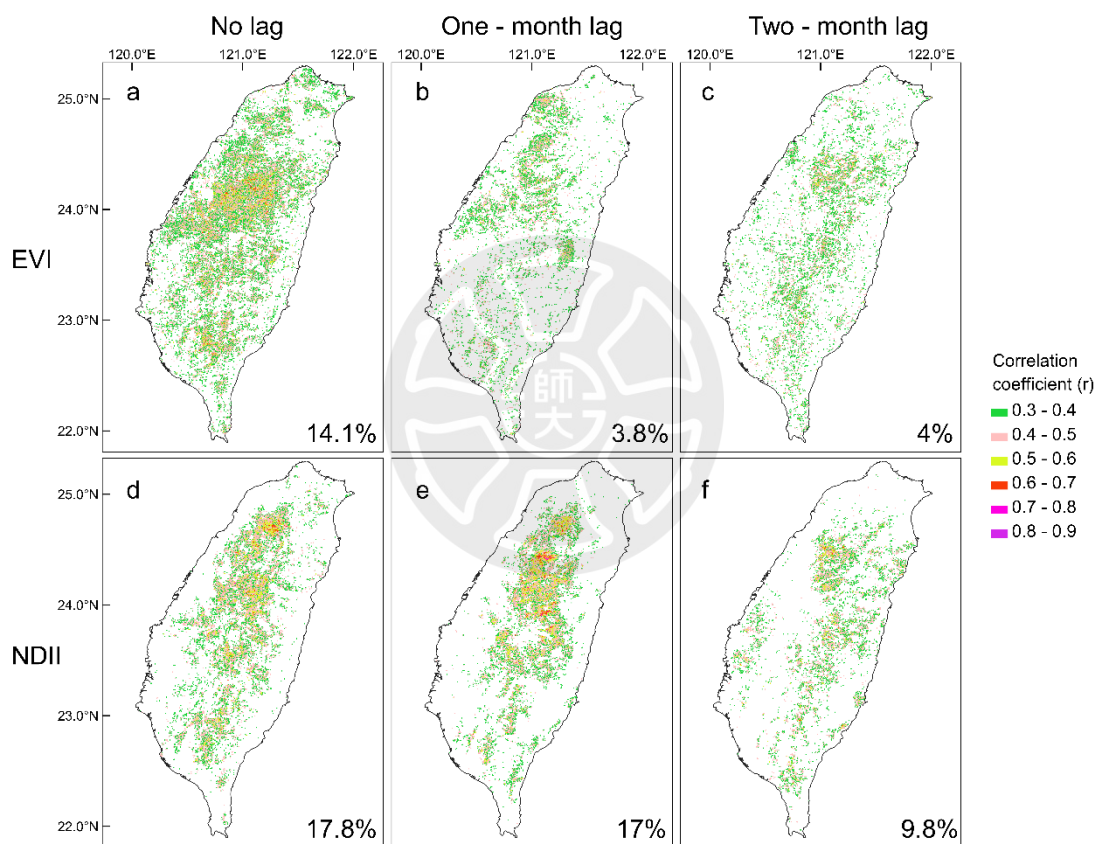
圖五 2000-2020 期間，在曾出現極度缺水($SPI3 < -1$)的網格其 EVI 與 NDII 指數與 SPI3 的相關性(包含無延遲以及 1-2 個月延遲反應)以及顯著網格佔全部植被網格的比例(%), 白色的網格為相關性不顯著($p > 0.05$)的部分。

二十年間出現嚴重缺水的網格($-1 < SPI3 < -0.7$)，其 EVI、NDII 與 SPI 的相關性如圖五。整體而言，相關係數多介於 0.3 至 0.5 之間，為顯著正相關，在無延遲的情況下，相關性顯著的網格佔總植被網格 9.8% (EVI)及 17.2% (NDII)(表 1)，主要多集中在南部地區(圖六 a、d)；一個月延遲，相關性顯著的網格佔 8.5% (EVI)及 10.6% (NDII)，主要集中於北部地區(圖六 b、c)；兩個月延遲情況下，顯著網格各佔總植被網格數的 19.4% (EVI)及 15.2% (NDII)(表 1)，且集中於北部及南部地區，部分地區相關係數介於 0.4 至 0.7 (圖六 c、f)。



圖六 2000-2020 期間，在曾出現嚴重缺水($-1 < SPI3 < -0.7$)的網格其 EVI 與 NDII 指數與 SPI3 的相關性(包含無延遲以及 1-2 個月延遲反應)以及顯著網格佔全部植被網格的比例(%)，白色的網格為相關性不顯著($p > 0.05$)的部分。

二十年間出現中度缺水的網格($-0.7 < SPI3 < -0.5$)，其 EVI、NDII 與 SPI 的相關性如圖七。整體而言，相關係數界於 0.3 至 0.4 之間。無延遲情況，顯著網格各佔總植被網格的 14.1% (EVI)及 17.8% (NDII) (表 1)，且集中於中部以北地區(圖七 a、d)；一個月延遲，顯著網格佔總植被網 3.8% (EVI)及 17.0%(NDII)(表 1)，主要集中於中部以北地區(圖七 b、e)，且部分地區相關係數介於 0.4 至 0.7 之間(圖六 e)；兩個月延遲，顯著網格各別約減少至 4.0% (EVI)及 9.8% (NDII)(圖七 c、f)(表 1)。



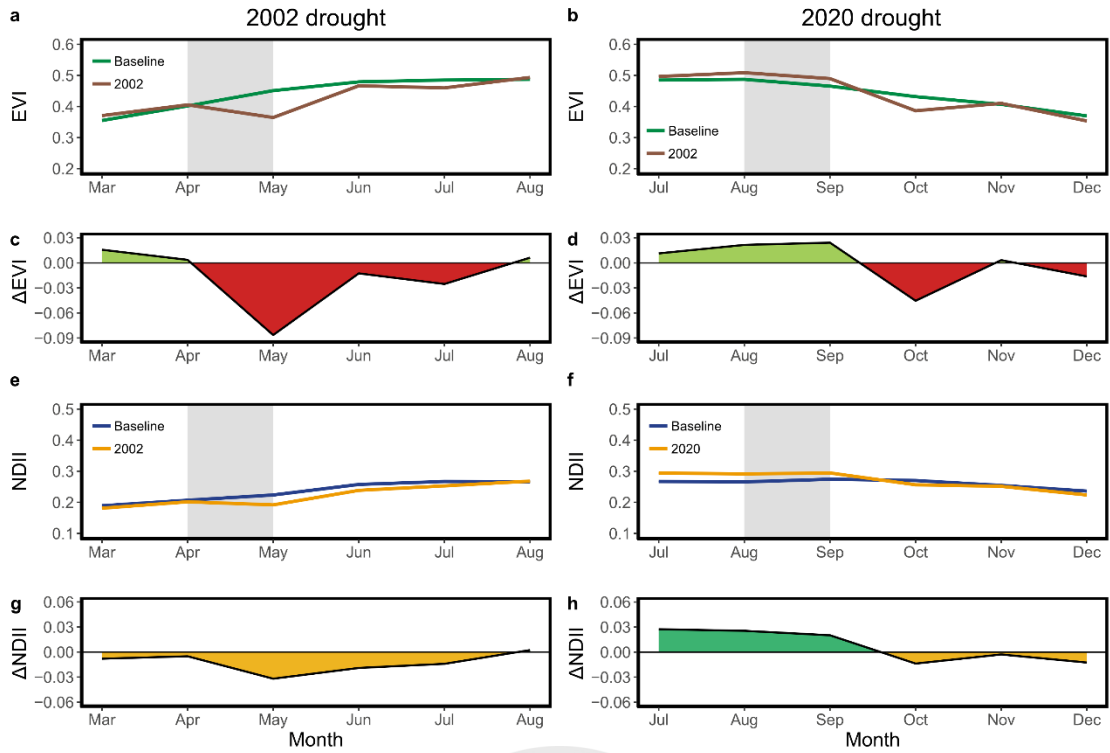
圖七 2000-2020 期間，在曾出現中度缺水($-0.7 < SPI3 < -0.5$)的網格其 EVI 與 NDII 指數與 SPI3 的相關性(包含無延遲以及 1-2 個月延遲反應)以及顯著網格佔全部植被網格的比例(%)，白色的網格為相關性不顯著($p > 0.05$)的部分。

表 1 EVI、NDII 指數與不同缺水壓力(SPI3)及不同延遲反應下的皮爾森相關性統計結果，以及呈顯著相關網格和總植被網格的百分比。

Index	Water stress (SPI3)	Time lag (month)	Significant proportion (%)
EVI	SPI3 < -1	No lag	6.8%
		One month	11.3%
		Two months	11.5%
	-1 < SPI3 < -0.7	No lag	9.8%
		One month	8.5%
		Two months	19.4%
	-0.7 < SPI3 < -0.5	No lag	14.1%
		One month	3.8 %
		Two months	4%
NDII	SPI3 < -1	No lag	53.9%
		One month	48.2%
		Two months	15.5%
	-1 < SPI3 < -0.7	No lag	17.2%
		One month	10.6%
		Two months	15.2%
	-0.7 < SPI3 < -0.5	No lag	17.8%
		One month	17%
		Two months	9.8%

第三節 植生指數(EVI, NDII)在嚴重缺水期間的時序變化及空間分布

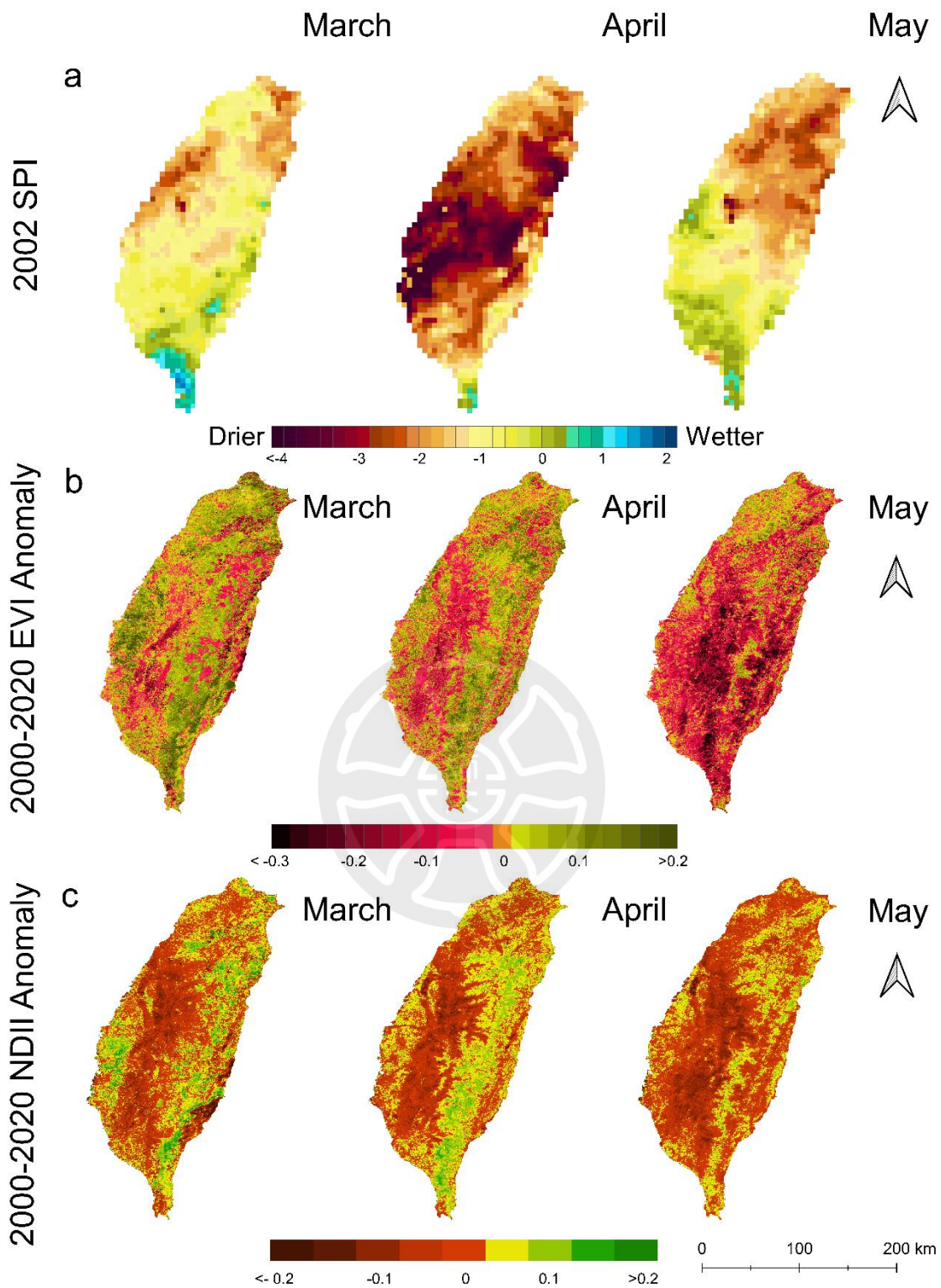
2000 年至 2020 年間發生兩次極度缺水的嚴重乾旱事件($SPI < -2$) (圖四)，一次在 2002 年另一次在 2020 年。2002 年的極度缺水發生在 4 月，EVI 在 5 月下降至 0.36 (圖八 a)，與 2000-2020 當月長期平均值相比，減少 19% (-0.086) (圖八 c)。反應樹冠層含水量的 NDII，5 月下降至 0.19 (圖八 e)，與當月長期平均值相比，減少約 14% (-0.031)。2020 年的乾旱發生在 8 月，EVI 指數在 10 月下降至 0.38 (圖八 b)，與當月長期平均值相比，減少約 10% (-0.045) (圖八 d)，NDII 指數下降至 0.25 (圖八 f)，與當月長期平均值相比，減少約 5% (-0.014)。二次極度缺水對於植被的影響不同，2002 年的極度缺水對植被的影響，需 4 個月的時間才能恢復至當月長期平均值(圖八 a)；2020 的極度缺水，在乾旱發生之初，植生指數並未立即下降，而是延遲兩個月至 10 月才發生變化，並且在 11 月恢復至接近當月長期平均值(圖八 b)。整體而言，極度缺水對植被生長有負面影響，兩种植生指數的時間變化趨勢大致相同，且植物生長對乾早有延遲的反應。



圖八 2002 年及 2020 年乾旱期間植生指數的時序變化：(a, b) EVI 指數在乾旱期間的時序變化；(c, d) EVI 指數相對 2000-2020 長期平均值的變化量(即線下面積)；(e, f) NDII 指數在乾旱期間的時序變化；(g, h) NDII 指數相對長期平均值的變化量。灰色區塊為乾旱發生的月份。

空間上 2002 年 4 月的極度缺水並非均勻分布全臺，西北和東南端相較其他地方緩和，到了 5 月全臺相對緩和，尤其彰化以南已回復至極度缺水之前，但中部尤其山區仍較三月乾旱，且中部山區及北部地區仍然呈現極度缺水的情況(圖九 a)。EVI 及 NDII 指數在 5 月變化最大，指數下降趨勢非常明顯，EVI 除西北部基隆台北桃園一帶以外均明顯下降，尤其以中南部山區以及海岸山脈的 EVI 下降最嚴重(圖九 b, c)。NDII 也有類似的情形，但山區的下降相對緩和。

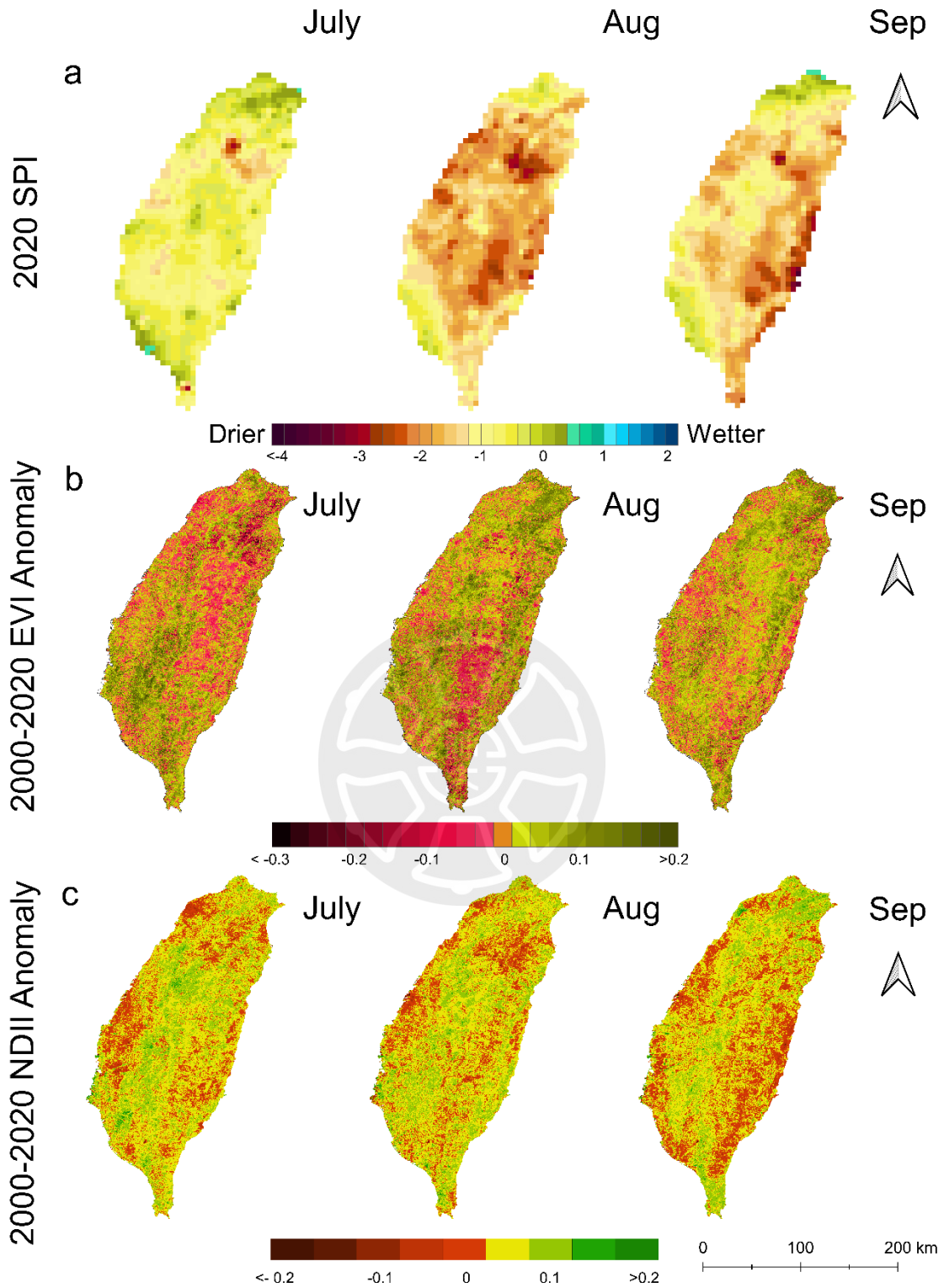




圖九 2002 乾旱發生(4 月)前後一個月年乾旱指標 SPI3 (a)，增強植生指數 EVI (b)和常態化差異紅外指數 NDII (c)的空間變動；顏色越深的網格代表與 2000-2020 長期平均相比變化越大，以及 SPI3 指數較低的地區。

2020年8月少雨的情況造成中部山區及西部地區發生極度缺水，9月乾旱較為緩和，僅東部地區仍有極度缺水(圖十 a)。EVI 指數及 NDII 指數的變化與大致上與乾旱發生的地區一致，乾旱不嚴重的地區植生指數無明顯的變化趨勢，部分區域的植生指數甚至有些微上升。

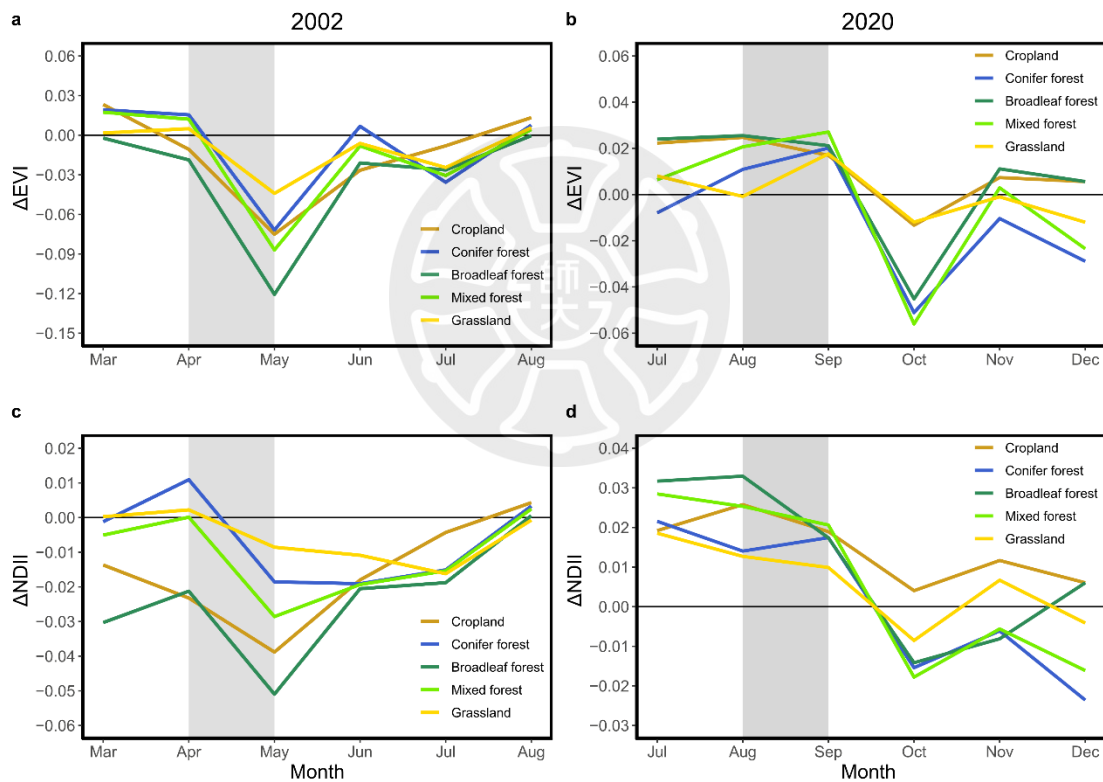




圖十 2020 乾旱發生(8 月)前後一個月年乾旱指標 SPI3 (a)，增強植生指數 EVI (b)和常態化差異紅外指數 NDII (c)的空間變動；顏色越深的網格代表與 2000-2020 長期平均相比變化越大，以及 SPI3 指數較低的地區。

第四節 乾旱對不同植被類型的影響

不同植被類型受極度缺水的影響不同，2002 年的極度缺水對所有植被皆造成負面的影響，由植生指數的變化量結果顯示(圖十一 a, c)，EVI 及 NDII 指數的變化量在 5 月時以闊葉林下降的幅度最大，草原下降的幅度最小；農田地恢復的速率較快且變化趨勢平緩，其餘植被類型的恢復速率以及變化趨勢大致上相同。2020 年 8 月極度缺水同樣造成 EVI 及 NDII 下降，10 月的降幅最大，混合林的下陷最多，農田地及草原受到的影響較小(圖十一 b, d)。針葉林、混合林和草原的 EVI 變化量有先上升後下降的趨勢(圖十一 b)，各種植被在 11 月時均回復至近於平均值。



圖十一 極度缺水不同植被類型 EVI 及 NDII 的影響：農田、針葉林、闊葉林、混合林及草原。 Δ EVI, Δ NDII 為乾旱與 2002-2020 相同月份平均值的差值。

第四章 討論

第一節 乾旱對植被的影響

本研究使用 SPI 指數評估乾旱的發生頻率、持續時間以及強度，並透過兩種植生指數(EVI, NDII6)分析乾旱對各種植被類群的生長影響和空間分布。結果顯示，乾旱確實會使植生指數下降，即對植被產生負面的影響(圖八)，此結果與許多研究一致 (Wu et al., 2022 ; Xie et al., 2022 ; Zhang et al., 2012)，代表副熱帶地區的生態韌性可能會受到乾旱的挑戰。

植生指數的下降代表樹冠層的活性降低，雖未必代表樹木的死亡，但光合作用的效率減弱，會使樹木固碳能力受影響，進而影響碳循環(Sippel et al., 2018)。Wolf et al. (2016) 等人的研究顯示，生長季期間，因溫度上升提高植物光合效率，使固碳能力增加，可彌補其他季節因乾旱減少的碳吸收。然而嚴重的乾旱會影響植被的生理造成生長季縮短，因而減少生長季的碳吸收(Sippel et al., 2018)。

由降雨減少引發的乾旱是影響碳循環變化的重要因素(Reichstein et al., 2007)，儘管樹木從缺水至死亡之間的機制非常複雜，但若超過水力失衡(hydraulics failure)閾值，就可能造成樹木大規模的死亡(Choat et al., 2018 ; Felton et al., 2021)，尤其高大的樹木死亡風險更高(Bennett et al., 2015)，即使是亞馬遜雨林亦無法倖免(Asner & Alencar, 2010)。Zhou et al. (2013) 在季風闊葉林的長期研究指出，乾燥缺水的氣候使當地的森林結構逐漸由高大樹木轉變為矮小的物種組成；臺灣高海拔地區的長期研究也發現，年均溫度持續上升的情況下，物種組成有逐漸轉變為耐旱植物的趨勢(Kuo et al., 2022)，此森林結構及物種組成的改變可能會對生態系結構和生態系服務造成深遠的影響(Bonan, 2008)，值得進一步深入研究。

第二節 季節性乾旱

2002 年的極度乾旱發生在春季，植生指數在五月下降至最低(圖八 c, g)，在八月恢復至平均值，但若無乾旱當年八月的植生指數應該會更高。此結果一方面

顯示春季乾旱對植被造成顯著的負面影響，另一方面植生指數在三個月回復則反應植被有很強的韌性。降雨的時機對於植被的生長十分重要，若土壤水分不足則會威脅植物的健康(Sperry & Love, 2015)，有研究指出春季乾旱對於植物的影響大於其他季節性乾旱，因為春季是生長季的開端，為種子發育、果實成長以及花朵成熟的關鍵時期(Ji & Peters, 2003； Misson et al., 2011)，故在此季節發生乾旱對植物的生長及繁殖均可能有重大影響。Wang & Chang. (2021) 使用遙測及氣象資料分析亞熱帶地區的物候，發現植被的生長與季節性降雨呈現正相關，尤其春季降雨的改變會影響整年的物候，而夏季降雨變化對生產力影響不大；長期同位素分析的研究指出，植物利用土壤中的水分有季節性差異，在春季及夏季時，植物主要利用深層土壤(10 至 35 公分)的水 (Barbeta et al., 2015)，若春季乾旱造成土壤含水量偏低，容易影響夏季的植被生長(Ermitão et al., 2021)。

春旱過後四個月即八月，整體植生指數上升期當月長期平均(圖八 a, e)，各植被類群的恢復趨勢大致上一致(圖十一 a, c)，其恢復的機制可能是由於在水分充足，氣孔開啟的情況下，光合作用效率的提升促進葉片生長(Kannenberget al., 2019)，樹木將部分能量優先轉移至地上部加速葉片生長，以維持競爭優勢(Doughty et al., 2015)。許多研究顯示，乾旱對樹木造成的影響需要漫長的時間才能完全修復，因為恢復的過程涉及多種因素，例如：樹齡、植被種類、乾旱持續時間、根部組織損傷程度(Au et al., 2022； Choat et al., 2018； Luo et al., 2022； Xu et al., 2019)。研究亦指出，即使樹冠層恢復，仍不代表地下部組織或木質部完全恢復(Kannenberget al., 2020)，因為長期的缺水壓力，可能會對組織造成不可逆的損傷(Gazol et al., 2017)，故本研究所發現的植生指數恢復是否代表乾旱的影響完全解除，尚需進一步研究，尤其是對地下部的研究加以檢驗。Anderegg et al. (2013)等人的研究發現，乾旱降低白楊樹的水分運輸能力，即使在水分補充後仍無法恢復，因而增加樹木的死亡風險；一次嚴重的乾旱可能會改

變後續數年的生態系變化，恢復不完全的樹木，將降低整個森林的生態韌性，對於未來的環境變化更難以克服(Huang et al., 2018)。

第三節 延遲反應

2020 年的嚴重缺水發生在八月，然而植生指數在十月才發生明顯改變(圖八 b, f)，此植物對於乾旱的延遲反應，在許多研究中有類似的發現(Chang et al., 2014; Seddon et al., 2016; Zhong et al., 2021)，造成此現象的原因可能是因為，樹木深層的樹根可以吸收深層土壤中水以維持生長(Deng et al., 2020; Deng et al., 2021; Song et al., 2019)。一項在中南美洲地區的研究發現，若乾早前有充足的降雨，土壤跟樹根中的水分，可以維持生長並減少葉片掉落的情形(Zou et al., 2020)。在生理層面，木質部的管胞(Tracheid)，透過可塑的細胞壁，在雨水充足的時期可以儲存更多的水分，以應對後續的乾旱事件(Moran et al., 2017)。此外，會造成土壤中微生物的組成及活性改變(Canarini et al., 2021; Kaisermann et al., 2017)，以及有蟲害爆發風險(Camarero et al., 2022)，但卻未必會對植物造成立即性的影響。但是長期而言，樹木的死亡以及營養吸收的限制對於生態系的生產力、碳循環及生態系服務皆有影響(Phillips et al., 2009; Reichstein et al., 2013)。

第四節 空間分布

臺灣降雨的空間分布非常不均，受季風及地形的影響，乾旱多集中在中、南部地區(圖九、十)，2002 年春旱造成植生指數在五月時大規模顯著下降，代表植被的生長受到限制，特別是山區植被所受影響較平地大(圖九 b, c)。可能的原因為臺灣山區森林禁止人為砍伐，大部分樹齡較大且生長密度不均，造成乾旱時樹木之間的水分競爭較低海拔地區較稀疏的森林劇烈(D'Amato et al., 2013)，有研究指出透過定期的疏伐以及適當保護措施，可以減緩乾旱帶來的影響(Luo et al., 2016)，但臺灣的天然林受到法律保護，不易進行任何處理措施，因此疏伐只能

在人工林進行。此外，本研究也觀察到發生乾旱地區的闊葉林植生指數下降情形較混和林嚴重，目前並無資訊可以解釋此一差異。

高海拔地區植生指數在乾旱期間的變化量多於中、低海拔地區，下降量大於-0.3的網格多集中在山區(圖九 b, c)，原因可能是在資源嚴苛的環境生長，對於氣候變化非常敏感(Ernakovich et al., 2014 ; Ganjurjav et al., 2020 ; Smith et al., 2012)，些微的環境變化就會受到嚴重的生態衝擊。降雨減少以及高山地區強烈的蒸發散作用，會快速降低土壤中的水分(Joiner et al., 2018 ; Kuo et al., 2022)，造成樹木可利用的水資源減少。地理因子也是造成空間分布的差異的原因之一，王等(2012)在蓮華池森林動態樣區(23°54' N, 120°54' E)的研究發現，少雨的2002年，植生指數減損了4.55%，主要集中在迎風坡及海拔高度700公尺至800公尺的部分；Wu et al. (2011)等人的研究顯示，臺灣南部的高位珊瑚礁自然保留區(21°58' N, 120°48' E)，因當地保水性差的喀斯特地形(karst topography)，加上位於少雨的季風背風側，使植被的可利用的水資源受限。

2002年的乾旱造成西、南部地區和部份東部地區植生指數大幅下降，對應的植被類型為農業用地，通常因為農作物短淺的根，對於水分變化非常敏感(Jiang et al., 2020 ; Zhang et al., 2019)。此外受政策改變或者作物休耕(Wardlow et al., 2007)的因素，也會使農業用地的植生指數與往年相比差異較大。值得注意的是2002年部份地區的降雨量(SPI3)在五月恢復至平均，然而植生指數卻沒有上升，特別是南部地區(圖九)，原因可能與植物的抗旱策略有關，部份樹木會停止生長或掉落葉片，減少在缺水時期的能量消耗，提高乾旱期間的生存活率(Bunting et al., 2017 ; Volaire, 2018)，儘管樹木未死亡，仍然會造成葉面積、生物量下降(Kuo et al., 2022)。因此雖然降雨恢復至正常值，反應植物生長狀況的植生指數並無法同時回復。

一些地區在乾旱期間觀察到植生指數未下降，反而呈現上升的趨勢(圖十 b, c)，可能的原因是這些地區土壤中黏土(Clay)的比例較高，保水能力較好，可以

減緩乾旱期間的水分散失，Okin et al. (2018) 等人在加州的研究發現，比起長在粗砂粒的植物，生長在細砂粒(fine-fraction sand)及黏土比例較高的植物，對於乾旱的敏感程度較低，再加上乾旱期間少雲強日照情況，利於光合作用的進行，因此植生指數些微上升(Liu et al., 2018)。或者是樹冠層的葉片已經乾枯死亡並掉落，故植生指數反應的是更下層未受影響的地被植物的植冠反射光譜(Anderson et al., 2010)。

第五節 不同缺水程度對植被的影響

在不同程度的缺水壓力下，植被的生長反應有所不同(表 1)，顯示乾旱對於植被的影響程度，與乾旱的強度有密切關係(Hoover & Rogers, 2016；Lei et al., 2020)。在極度缺水($SPI3 < -1$)的情況下，缺水程度和植生指數的相關性顯著者佔比最高(表 1)，且集中在高海拔地區(圖五)，代表降雨量為此時的生長限制因子，在降雨量減少時，植被的生長受到顯著的負面影響。全球性的研究結果顯示，植物的可用水量(water availability)成為 20 世紀不少氣候區的植物生長限制因子，除低海拔地區之外，高海拔森林也逐漸受到生存危機(Babst et al., 2019；Pompa-García et al., 2021)，因為溫度對高海拔植被的生長限制隨暖化逐漸減弱，而乾旱造成的可用水資源減少對植物生長的影響正不斷擴大(Galván et al., 2015)。過去研究發現，乾旱期間植物的水勢能，隨海拔高度上升而下降，代表高海拔植物對於水分變化非常敏感，水勢能下降的情況可能會增加木質部栓塞的風險(Mayr et al., 2002)。Sánchez-Salguero et al. (2015) 等人在高山地區的研究發現，乾旱造成的缺水壓力影響針葉樹的滲透勢能(osmotic potential)，使獲取土壤中養分的能力受限(Sánchez-Salguero et al., 2015)，影響樹木生長。相對於高海拔地區中低海拔地區受乾旱影響較不明顯，特別是西半部及沿海地區，原因可能是沿海地區多農地，而農地是受到最多人為活動的干擾的土地利用類型之一(Chang et al., 2014；Piao et al., 2003)，因為透過不同的管理策略、耕作方式或肥料選擇，皆會影響農作物的生長(Chen et al., 2017；Graciano et al., 2005；He et al.,

2020)。因此其植生指數的變化與人為干擾影響可能更甚於乾旱的影響。至於看不到有顯著乾旱影響的地區，可能是因為物種差異及三個月的雨水累積並非為最佳相關性的時間(Gouveia et al., 2017)，中亞地區的研究發現，木本植物對於 12 至 24 個月的時間尺度的乾旱最敏感，因為它們比灌木和草原更耐旱(Deng et al., 2020)；Zhao et al. (2018) 等人的研究顯示，中國北方的草原與 3 個月時間尺度的乾旱指數相關性最高，而闊葉林在 12 個月的時間尺度的乾旱最敏感，此差異可能與植被的生存策略與生理不同有關。

在嚴重缺水($-1 < SPI3 < -0.7$)及中度缺水($-0.7 < SPI3 < -0.5$)的壓力下，兩種缺水程度和植生指數的相關性分析結果，顯著的網格多集中在中低海拔地區(圖六、七)，代表中低海拔的植被對嚴重、中程度的缺水壓力敏感，因為降雨量為生長限制因子(Chen et al., 2011)。部分地區的分析結果在兩個月的時間延遲下呈現高度相關(圖七)，原因可能是植被的生長反應不僅受到當月環境變化，幾個月前的降雨累積變化也會影響其生長情形(累積效應)(Peng et al., 2019)。各地區植物的累積效應時間不同，取決於當地的氣候類型及物種差異，從數個月至半年以上皆有可能(Ding et al., 2020；Peng et al., 2019)，這反應不同物種之間的抗旱策略及用水模式的差異。通常淺根系的物種，如：農田、草原，抗旱能力較深根系的物種的抗旱能力弱，因為乾旱期間的表層土壤水分快速散失，而土壤深層仍保持部分的水分供深根系物種使用(Zhan et al., 2022)，因此物種差異可能是造成不同時間延遲下相關性不同的原因。

第六節 指數差異

兩種植生指數(EVI、NDII6)在乾旱期間的時序及空間分布的變化趨勢大致上相同，但相關性分析結果顯示，常態化差異紅外指數(NDII6)與 SPI3 的相關性高於增強植生指數(EVI)(表 1)，代表 NDII6 指數更適用於評估亞熱帶地區植被在乾旱間的生長反應，與 Chang et al. (2018) 等人的結果一致。近紅外光(NIR)波段的植生指數，如：NDVI、EVI，在亞熱帶地區對於降雨

的變化(SPI)較不敏感的原因可能是，近紅外光波段多代表葉片的內部組織，而短波紅外光(SWIR)的波段對於樹冠層的含水量較敏感(Ceccato et al., 2001 ; Liu et al., 2014)，且當植物受到逆境時(乾旱)的光譜反射率變化，短波紅外光較近紅外光波段大(Stimson et al., 2005)，這應該是造成兩者相關性分析結果不同的主要原因。此外由於臺灣森林灌木層至樹冠層的物種多樣且森林構複雜，可能會干擾缺水期間光合色素(0.4 μm - 0.7 μm)的光譜接收(Chang et al., 2018)。本研究結果顯示在偵測乾旱對植被的影響 NDII 會是更敏感的指標。

第七節 研究限制及不確定性

本次研究使用標準降水指數做為分析植被在乾旱期間的反應的主要指標，其中存在一些不確定性。首先，引發乾旱的成因不只受雨量減少而至，也包含溫度變化、連續不降水日等因子，因此使用不同的乾旱因子及定義方式，對於結果有所不同(Hung & Shih, 2017)。接著，降雨雖為重要的水分來源，但是生態系中的地下水、土壤水、逕流水等水資源皆可被植物利用(Zhao et al., 2021 ; Zhou et al., 2014)，加上乾旱的延遲反應及累積作用的影響(Zhao et al., 2020)，植物的生長與乾旱的相關性可能為非線性(Felton et al., 2021)，所以欲了解乾旱期間植物的生長反應，需使用更全面的分析方法。其次雖然不少研究皆使用植生指數評估乾旱對植被的生長反應(Branco et al., 2019 ; Liu et al., 2021 ; Wu et al., 2018)，但是造成植生指數變化的原因很多，例如：物種組成改變(Dong et al., 2019)、生態釋放(Cavin et al., 2013)、新葉生長(Brando et al., 2010)、天災(Thonfeld et al., 2022)、人為干擾(Ichii et al., 2002)，需透過田野調查才比較能提供機制性的了解。此外，降水的變化對於生態系的影響，需經過一定的生態過程才會反應(Sala et al., 2012)，因為氣候(乾旱)對植被的影響需考量地形(Gharun et al., 2020 ; Hawthorne & Miniati, 2018 ; Mitchell et al., 2012 ; Sturm et al., 2018)、土壤性質(Okin et al., 2018)、光照時數(Zhang et al., 2017)、地下部物種組成(Barnard

et al., 2013)演替過程(Liu et al., 2020)等，然而這些因子不易用使用遙測技術進行評估，未來的研究可以結合地上部及地下部的現地觀測深入研究。

本研究存在一些研究限制。一、增強植生指數(EVI)雖然修正大氣粒子及土壤、地形背景造成的干擾(Huete et al., 1997)，但並未考量地形因子造成的偏差(Matsushita et al., 2007)，加上由地形造成的陰影在圖層中很難檢測及區別(Chang et al., 2012)，但是考量樹冠層結構複雜且多雲霧的森林特徵，若使用NDVI仍會有偏差，因此使用增強植生指數(EVI)做為評估植被生長情形的指標。二、臺灣土地利用多樣且複雜(圖二)，受限於MODIS植生指數的空間解析度及網格資料的形式，部分介於交界處或過於破碎的土地利用類型，會因為資料特性而被捨去，如：竹子雖為臺灣中低海拔重要的經濟物種，同時也是森林碳匯的一部分(Yen & Wang, 2013)，但由於分布範圍不夠廣泛且破碎，不易透過遙測資料監測，造成分析上的困難，加上缺少乾旱期間實地調查的相關研究資料，因此本次研究未探討竹林。三、MODIS感測器僅擁有2000年至今的遙測資料，無法獲得2000年之前植被的光學資訊，因此無檢測過去的乾旱造成的遺留效應以及記憶效應(memory effect)是否改變植被的生長或生理機制(Jacques et al., 2021)。四、降雨資料的準確性與相關性分析的結果有關，使用更精確及高解析度的資料，可以反應植被對於缺水壓力的真實情況，雖然使用空間內插法轉換空間解析度會增加資料的不確定性，但是由於目前TCCIP僅提供5公里網格化降雨資料，無法獲得高解析度的網格資料，然而這可能也是造成部分地區相關性結果不顯著的原因。

第五章 結論

受全球氣候變遷的影響，世界各地區發生乾旱的規模及頻率逐漸上升(Xu et al., 2019)，在颱風數量減少的趨勢下(Lee et al., 2019)，副熱帶地區的陸域生態系面臨巨大的缺水壓力，本研究透過植生指數及乾旱指數的相關性分析及應用，評估 2000-2020 年間臺灣植被對於乾旱的反應。結果顯示，2000 年至 2020 年間發生兩次極度乾旱，2002 年的春季乾旱及 2020 年夏季的極度乾旱皆對植被造成負面的影響，整體 EVI 指數在五月減少約 20%，NDII 指數減少約 14%，且經過約 4 個月的時間才恢復至平均，同時也觀察到延遲反應。植生指數與乾旱指數的相關性統計顯示，在不同程度的缺水壓力下，植被對於受到的影響不同，透過 NDII 指數顯示，在極度缺水的情況下，全臺約一半的植被會受到顯著的影響，特別是高海拔地區，並且呈現明顯的空間分布差異。臺灣降雨的空間分布非常不均，乾旱多集中在中南部地區。雖然各植被類型受到的影響程度不同(闊葉林變化最大，草原變化最小)，但是恢復趨勢大致上一致。本次研究的結果有助於了解生態系的反應，未來發生乾旱及複合式極端事件的機率持續上升(Li et al., 2018)，環境變化與生態系、樹木死亡、碳循環之間的關係非常複雜(Anderegg et al., 2015；McDowell et al., 2018；Zhou et al., 2014)，需要結合多方面且長期的研究，才能深入了解以應對氣候變遷對生態環境的衝擊。

參考文獻

- 王素芬、林婉婷、張仲德、林登秋 (2012)。蓮華池試驗林梅雨降雨型態變遷與植生變動之分析。地理學報 66： 67-86。
- 朱容練、朱吟晨、林士堯、劉俊志、陳永明(2015)。國家災害防救科技中心災害防救電子報，124： 2-13。
- 洪致文、施明甫(2017)。台灣氣象乾旱指數的建立與嚴重乾旱事件分析。大氣科學 45(2): 145-165.
- 劉玫婷、李欣輯、徐永衡、陳永明(2021)。國家災害防救科技中心災害防救電子報，194： 3-13。
- Abdulmana, S., Lim, A., Wongsai, S., & Wongsai, N. (2021). Land surface temperature and vegetation cover changes and their relationships in Taiwan from 2000 to 2020. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 24, 100636.
- Adams, H. D., Zeppel, M. J., Anderegg, W. R., Hartmann, H., Landhäusser, S. M., Tissue, D. T., Huxman, T. E., Hudson, P. J., Franz, T. E., & Allen, C. D. (2017). A multi-species synthesis of physiological mechanisms in drought-induced tree mortality. *Nature Ecology and Evolution*, 1(9), 1285-1291.
- Allen, C. D., Macalady, A. K., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., Vennetier, M., Kitzberger, T., Rigling, A., Breshears, D. D., Hogg, E. H. (Ted),

- Gonzalez, P., Fensham, R., Zhang, Z., Castro, J., Demidova, N., Lim, J.-H., Allard, G., Running, S. W., Semerci, A., & Cobb, N. (2010). A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, 259(4), 660–684.
- Anderegg, W. R., Hicke, J. A., Fisher, R. A., Allen, C. D., Aukema, J., Bentz, B., Hood, S., Lichstein, J. W., Macalady, A. K., & McDowell, N. (2015). Tree mortality from drought, insects, and their interactions in a changing climate. *New Phytologist*, 208(3), 674-683.
- Anderegg, W. R., Plavcová, L., Anderegg, L. D., Hacke, U. G., Berry, J. A., & Field, C. B. (2013). Drought's legacy: multiyear hydraulic deterioration underlies widespread aspen forest die-off and portends increased future risk. *Global Change Biology*, 19(4), 1188-1196.
- Anderson, L. O., Malhi, Y., Aragão, L. E., Ladle, R., Arai, E., Barbier, N., & Phillips, O. (2010). Remote sensing detection of droughts in Amazonian forest canopies. *New Phytologist*, 187(3), 733-750.
- Asner, G. P., & Alencar, A. (2010). Drought impacts on the Amazon forest: The remote sensing perspective. *New Phytologist*, 187(3), 569-578.
- Au, T. F., Maxwell, J. T., Robeson, S. M., Li, J., Siani, S. M., Novick, K. A., Dannenberg, M. P., Phillips, R. P., Li, T., & Chen, Z. (2022). Younger trees in

the upper canopy are more sensitive but also more resilient to drought. *Nature Climate Change*, 12, 1168-1174.

Babst, F., Bouriaud, O., Poulter, B., Trouet, V., Girardin, M. P., & Frank, D. C. (2019). Twentieth century redistribution in climatic drivers of global tree growth. *Science Advances*, 5(1), eaat4313.

Banerjee, O., Bark, R., Connor, J., & Crossman, N. D. (2013). An ecosystem services approach to estimating economic losses associated with drought. *Ecological Economics*, 91, 19-27.

Barbeta, A., Mejía-Chang, M., Ogaya, R., Voltas, J., Dawson, T. E., & Peñuelas, J. (2015). The combined effects of a long-term experimental drought and an extreme drought on the use of plant-water sources in a Mediterranean forest. *Global Change Biology*, 21(3), 1213-1225.

Barbosa, J. M., & Asner, G. P. (2017). Effects of long-term rainfall decline on the structure and functioning of Hawaiian forests. *Environmental Research Letters*, 12(9), 094002.

Barlow, M., Zaitchik, B., Paz, S., Black, E., Evans, J., & Hoell, A. (2016). A review of drought in the Middle East and southwest Asia. *Journal of Climate*, 29(23), 8547-8574.

- Barnard, R. L., Osborne, C. A., & Firestone, M. K. (2013). Responses of soil bacterial and fungal communities to extreme desiccation and rewetting. *The ISME Journal*, 7(11), 2229-2241.
- Baudoin, M. A., Vogel, C., Nortje, K., & Naik, M. (2017). Living with drought in South Africa: Lessons learnt from the recent El Niño drought period. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 23, 128–137.
- Beguiría, S., Vicente-Serrano, S. M., Reig, F., & Latorre, B. (2014). Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. *International Journal of Climatology*, 34(10), 3001-3023.
- Bell, J. E., Brown, C. L., Conlon, K., Herring, S., Kunkel, K. E., Lawrimore, J., Luber, G., Schreck, C., Smith, A., & Uejio, C. (2018). Changes in extreme events and the potential impacts on human health. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 68(4), 265-287.
- Bennett, A. C., McDowell, N. G., Allen, C. D., & Anderson-Teixeira, K. J. (2015). Larger trees suffer most during drought in forests worldwide. *Nature Plants*, 1(10), 1-5.

- Bunting, E. L., Munson, S. M., & Villarreal, M. L. (2017). Climate legacy and lag effects on dryland plant communities in the southwestern US. *Ecological Indicators*, 74, 216-229.
- Bonan, G. B. (2008). Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science*, 320(5882), 1444-1449.
- Brando, P. M., Goetz, S. J., Baccini, A., Nepstad, D. C., Beck, P. S., & Christman, M. C. (2010). Seasonal and interannual variability of climate and vegetation indices across the Amazon. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(33), 14685-14690.
- Buras, A., Schunk, C., Zeitrüg, C., Herrmann, C., Kaiser, L., Lemme, H., Straub, C., Taeger, S., Gößwein, S., & Klemmt, H. J. (2018). Are Scots pine forest edges particularly prone to drought-induced mortality? *Environmental Research Letters*, 13(2), 025001.
- Cavin, L., Mountford, E. P., Peterken, G. F., & Jump, A. S. (2013). Extreme drought alters competitive dominance within and between tree species in a mixed forest stand. *Functional Ecology*, 27(6), 1424-1435.
- Camarero, J. J., Shestakova, T. A., & Pizarro, M. (2022). Threshold responses of canopy cover and tree growth to drought and Siberian silk Moth outbreak in southern Taiga *Picea obovata* Forests. *Forests*, 13(5), 768.

Campos, H., Trejo, C., Peña-Valdivia, C. B., García-Nava, R., Conde-Martínez, F.

V., & Cruz-Ortega, M. R. (2014). Stomatal and non-stomatal limitations of bell pepper (*Capsicum annuum* L.) plants under water stress and re-watering: Delayed restoration of photosynthesis during recovery. *Environmental and Experimental Botany*, 98, 56-64.

Canarini, A., Schmidt, H., Fuchslueger, L., Martin, V., Herbold, C. W., Zezula, D.,

Gündler, P., Hasibeder, R., Jecmenica, M., & Bahn, M. (2021). Ecological memory of recurrent drought modifies soil processes via changes in soil microbial community. *Nature Communications*, 12(1), 5308.

Ceccato, P., Flasse, S., Tarantola, S., Jacquemoud, S., & Grégoire, J. M. (2001).

Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain. *Remote Sensing of Environment*, 77(1), 22-33.

Clark, J. S., Iverson, L., Woodall, C. W., Allen, C. D., Bell, D. M., Bragg, D. C.,

D'Amato, A. W., Davis, F. W., Hersh, M. H., & Ibanez, I. (2016). The impacts of increasing drought on forest dynamics, structure, and biodiversity in the United States. *Global Change Biology*, 22(7), 2329-2352.

Crausbay, S. D., Ramirez, A. R., Carter, S. L., Cross, M. S., Hall, K. R., Bathke, D.

J., Betancourt, J. L., Colt, S., Cravens, A. E., & Dalton, M. S. (2017). Defining

ecological drought for the twenty-first century. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(12), 2543-2550.

Chang, C. C., Chen, C. C., & McCarl, B. (2012). Evaluating the economic impacts of crop yield change and sea level rise induced by climate change on Taiwan's agricultural sector. *Agricultural Economics*, 43(2), 205-214.

Chang, C. T., Lin, T. C., Wang, S. F., & Vadeboncoeur, M. A. (2011). Assessing growing season beginning and end dates and their relation to climate in Taiwan using satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 32(18), 5035–5058.

Chang, C. T., Wang, H. C., & Huang, C. (2013). Impacts of vegetation onset time on the net primary productivity in a mountainous island in Pacific Asia. *Environmental Research Letters*, 8(4), 045030.

Chang, C., Wang, H., & Huang, C. (2014). Retrieving multi-scale climatic variations from high dimensional time-series MODIS green vegetation cover in a tropical/subtropical mountainous island. *Journal of Mountain Science*, 11, 407–420.

Chang, C. T., Wang, H. C., & Huang, C. (2018). Assessment of MODIS-derived indices (2001–2013) to drought across Taiwan's forests. *International Journal of Biometeorology*, 62, 809–822.

- Chang, C. T., Wang, S. F., Vadeboncoeur, M. A., & Lin, T. C. (2014). Relating vegetation dynamics to temperature and precipitation at monthly and annual timescales in Taiwan using MODIS vegetation indices. *International Journal of Remote Sensing*, 35(2), 598–620.
- Choat, B., Brodribb, T. J., Brodersen, C. R., Duursma, R. A., López, R., & Medlyn, B. E. (2018). Triggers of tree mortality under drought. *Nature*, 558(7711), 531-539.
- Chou, C. H., & Tang, H. Y. (2016). Conservation of biodiversity in Taiwan. *Journal of Plant Science*, 10, 1-5.
- Chen, S. T., Kuo, C. C., & Yu, P. S. (2009). Historical trends and variability of meteorological droughts in Taiwan. *Hydrological Sciences Journal*, 54(3), 430–441.
- Chen, X., Mo, X., Hu, S., & Liu, S. (2017). Contributions of climate change and human activities to ET and GPP trends over North China Plain from 2000 to 2014. *Journal of Geographical Sciences*, 27, 661-680.
- Cunha, A. P. M., Alvalá, R. C., Nobre, C. A., & Carvalho, M. A. (2015). Monitoring vegetative drought dynamics in the Brazilian semiarid region. *Agricultural and Forest Meteorology*, 214-215, 494-505.

- Dai, A. (2011). Characteristics and trends in various forms of the palmer drought severity Index during 1900–2008. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D12).
- D'Amato, A. W., Bradford, J. B., Fraver, S., & Palik, B. J. (2013). Effects of thinning on drought vulnerability and climate response in north temperate forest ecosystems. *Ecological Applications*, 23(8), 1735-1742.
- Demetillo, M. A. G., Anderson, J. F., Geddes, J. A., Yang, X., Najacht, E. Y., Herrera, S. A., Kabasares, K. M., Kotsakis, A. E., Lerdau, M. T., & Pusede, S. E. (2019). Observing severe drought influences on ozone air pollution in California. *Environmental Science and Technology*, 53(9), 4695-4706.
- Deng, H., Yin, Y., & Han, X. (2020). Vulnerability of vegetation activities to drought in Central Asia. *Environmental Research Letters*, 15(8), 084005.
- Deng, Y., Wang, X., Wang, K., Ciais, P., Tang, S., Jin, L., Li, L., & Piao, S. (2021). Responses of vegetation greenness and carbon cycle to extreme droughts in China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 298–299, 108307.
- Dietze, M. C., & Moorcroft, P. R. (2011). Tree mortality in the eastern and central United States: patterns and drivers. *Global Change Biology*, 17(11), 3312-3326.

- Ding, Y., Li, Z., & Peng, S. (2020). Global analysis of time-lag and-accumulation effects of climate on vegetation growth. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 92, 102179.
- Dong, C., MacDonald, G. M., Willis, K., Gillespie, T. W., Okin, G. S., & Williams, A. P. (2019). Vegetation responses to 2012–2016 drought in Northern and Southern California. *Geophysical Research Letters*, 46(7), 3810-3821.
- Doughty, C. E., Metcalfe, D., Girardin, C., Amézquita, F. F., Cabrera, D. G., Huasco, W. H., Silva-Espejo, J., Araujo-Murakami, A., Da Costa, M., & Rocha, W. (2015). Drought impact on forest carbon dynamics and fluxes in Amazonia. *Nature*, 519(7541), 78-82.
- Earles, J. M., North, M. P., & Hurteau, M. D. (2014). Wildfire and drought dynamics destabilize carbon stores of fire-suppressed forests. *Ecological Applications*, 24(4), 732-740.
- Eltahir, E. A., & Yeh, P. J. F. (1999). On the asymmetric response of aquifer water level to floods and droughts in Illinois. *Water Resources Research*, 35(4), 1199-1217.
- Ermitão, T., Gouveia, C. M., Bastos, A., & Russo, A. C. (2021). Vegetation productivity losses linked to mediterranean hot and dry events. *Remote Sensing*, 13(19), 4010.

Ernakovich, J. G., Hopping, K. A., Berdanier, A. B., Simpson, R. T., Kachergis, E.

J., Steltzer, H., & Wallenstein, M. D. (2014). Predicted responses of arctic and alpine ecosystems to altered seasonality under climate change. *Global Change Biology*, 20(10), 3256-3269.

Felton, A. J., Knapp, A. K., & Smith, M. D. (2021). Precipitation–productivity relationships and the duration of precipitation anomalies: an underappreciated dimension of climate change. *Global Change Biology*, 27(6), 1127-1140.

Fettig, C. J., Mortenson, L. A., Bulaon, B. M., & Foulk, P. B. (2019). Tree mortality following drought in the central and southern Sierra Nevada, California, US. *Forest Ecology and Management*, 432, 164-178.

Feyen, L., & Dankers, R. (2009). Impact of global warming on streamflow drought in Europe. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D17).

Branco, E. R. F., Dos Santos, A. R., Pezzopane, J. E. M., Dos Santos, A. B., Alexandre, R. S., Bernardes, V. P., da Silva, R. G., de Souza, K. B., & Moura, M. M. (2019). Space-time analysis of vegetation trends and drought occurrence in domain area of tropical forest. *Journal of Environmental Management*, 246, 384-396.

Galván, J. D., Büntgen, U., Ginzler, C., Grudd, H., Gutiérrez, E., Labuhn, I., & Camarero, J. J. (2015). Drought-induced weakening of growth–temperature

associations in high-elevation Iberian pines. *Global and Planetary Change*, 124, 95-106.

Ganjurjav, H., Gornish, E. S., Hu, G., Schwartz, M. W., Wan, Y., Li, Y., & Gao, Q. (2020). Warming and precipitation addition interact to affect plant spring phenology in alpine meadows on the central Qinghai-Tibetan Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 287, 107943.

Gao, X., Zhao, Q., Zhao, X., Wu, P., Pan, W., Gao, X., & Sun, M. (2017). Temporal and spatial evolution of the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) in the Loess Plateau under climate change from 2001 to 2050. *Science of the Total Environment*, 595, 191-200.

Gazol, A., Camarero, J. J., Anderegg, W. R. L., & Vicente-Serrano, S. M. (2017). Impacts of droughts on the growth resilience of Northern Hemisphere forests. *Global Ecology and Biogeography*, 26(2), 166-176.

Geng, S., Shi, P., Song, M., Zong, N., Zu, J., & Zhu, W. (2019). Diversity of vegetation composition enhances ecosystem stability along elevational gradients in the Taihang Mountains, China. *Ecological Indicators*, 104, 594-603.

Gharun, M., Hörtnagl, L., Paul-Limoges, E., Ghiasi, S., Feigenwinter, I., Burri, S., Marquardt, K., Etzold, S., Zweifel, R., & Eugster, W. (2020). Physiological

response of Swiss ecosystems to 2018 drought across plant types and elevation. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 375(1810), 20190521.

Gouveia, C. M., Trigo, R. M., Beguería, S., & Vicente-Serrano, S. M. (2017).

Drought impacts on vegetation activity in the Mediterranean region: An assessment using remote sensing data and multi-scale drought indicators. *Global and Planetary Change*, 151, 15-27.

Graciano, C., Guiamét, J. J., & Goya, J. F. (2005). Impact of nitrogen and

phosphorus fertilization on drought responses in *Eucalyptus grandis* seedlings. *Forest Ecology and Management*, 212(1-3), 40-49.

Grossiord, C., Buckley, T. N., Cernusak, L. A., Novick, K. A., Poulter, B., Siegwolf,

R. T., Sperry, J. S., & McDowell, N. G. (2020). Plant responses to rising vapor pressure deficit. *New Phytologist*, 226(6), 1550-1566.

Guenang, G. M., & Kamga, F. M. (2014). Computation of the standardized

precipitation index (SPI) and its use to assess drought occurrences in Cameroon over recent decades. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 53(10), 2310-2324.

He, W., Ju, W., Schwalm, C. R., Sippel, S., Wu, X., He, Q., Song, L., Zhang, C., Li,

J., Sitch, S., Viovy, N., Friedlingstein, P., & Jain, A. K. (2018). Large-scale

droughts responsible for dramatic reductions of terrestrial net carbon uptake over north America in 2011 and 2012. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 123(7), 2053–2071.

He, Y., Chen, F., Jia, H., Wang, L., & Bondur, V. G. (2020). Different drought legacies of rain-fed and irrigated croplands in a typical Russian agricultural region. *Remote Sensing*, 12(11), 1700.

Heim Jr, R. R. (2002). A review of twentieth-century drought indices used in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83(8), 1149-1166.

Hernandez, E. A., & Uddameri, V. (2014). Standardized precipitation evaporation index (SPEI)-based drought assessment in semi-arid south Texas. *Environmental Earth Sciences*, 71, 2491-2501.

Hoffman, M. T., Carrick, P. J., Gillson, L., & West, A. G. (2009). Drought, climate change and vegetation response in the succulent karoo, South Africa: Research article. *South African Journal of Science*, 105(1), 54–60.

Hoover, D. L., & Rogers, B. M. (2016). Not all droughts are created equal: the impacts of interannual drought pattern and magnitude on grassland carbon cycling. *Global Change Biology*, 22(5), 1809-1820.

- Houborg, R., & McCabe, M. F. (2018). A hybrid training approach for leaf area index estimation via Cubist and random forests machine-learning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 135, 173–188.
- Hsu, H. H., & Chen, C.-T. (2002). Observed and projected climate change in Taiwan. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 79, 87–104.
- Hung, C. W., & Shih, M. F. (2017). Construction of the Taiwan meteorological drought index and the analysis of severe drought cases. *Atmosphere. Sci*, 45, 145-165.
- Huang, K., & Xia, J. (2019). High ecosystem stability of evergreen broadleaf forests under severe droughts. *Global Change Biology*, 25(10), 3494-3503.
- Huang, M., Wang, X., Keenan, T. F., & Piao, S. (2018). Drought timing influences the legacy of tree growth recovery. *Global Change Biology*, 24(8), 3546-3559.
- Huang, W. C., & Yuan, L. C. (2004). A drought early warning system on real-time multireservoir operations. *Water Resources Research*, 40(6), W06401.
- Huang, Z., Ma, C., Chyi, S. J., Tang, L., & Zhao, L. (2020). Paleofire, vegetation, and climate reconstructions of the middle to late Holocene from lacustrine sediments of the Toushe Basin, Taiwan. *Geophysical Research Letters*, 47(20), e2020GL090401.

Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., & Ferreira, L. G. (2002).

Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83(1-2), 195-213.

Huete, A. R., Liu, H. Q., Batchily, K. V., & Van Leeuwen, W. J. D. A. (1997). A

comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 59(3), 440-451.

Ichii, K., Kawabata, A., & Yamaguchi, Y. (2002). Global correlation analysis for

NDVI and climatic variables and NDVI trends: 1982-1990. *International Journal of Remote Sensing*, 23(18), 3873-3878.

IPCC 2012 *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change* ed C B Field et al. (Cambridge: Cambridge University Press)

IPCC: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J. B. R., Maycock, T. K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R., and Zhou, B.]. Cambridge University Press

IPCC, 2022: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and*

Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C.

Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S.

Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge

University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York,

NY, USA, 3056 pp.

Isbell, F., Craven, D., Connolly, J., Loreau, M., Schmid, B., Beierkuhnlein, C., ... &

Eisenhauer, N. (2015). Biodiversity increases the resistance of ecosystem productivity to climate extremes. *Nature*, 526(7574), 574-577.

Jacques, C., Salon, C., Barnard, R. L., Vernoud, V., & Prudent, M. (2021). Drought stress memory at the plant cycle level: A review. *Plants*, 10(9), 1873.

Jain, S. K., Keshri, R., Goswami, A., & Sarkar, A. (2010). Application of meteorological and vegetation indices for evaluation of drought impact: A case study for Rajasthan, India. *Natural Hazards*, 54, 643–656.

Jha, S., Das, J., Sharma, A., Hazra, B., & Goyal, M. K. (2019). Probabilistic evaluation of vegetation drought likelihood and its implications to resilience across India. *Global and Planetary Change*, 176, 23-35.

- Jiang, W., Wang, L., Feng, L., Zhang, M., & Yao, R. (2020). Drought characteristics and its impact on changes in surface vegetation from 1981 to 2015 in the Yangtze River Basin, China. *International Journal of Climatology*, 40(7), 3380-3397.
- Ji, L., & Peters, A. J. (2003). Assessing vegetation response to drought in the northern Great Plains using vegetation and drought indices. *Remote Sensing of Environment*, 87(1), 85-98.
- Joiner, J., Yoshida, Y., Anderson, M., Holmes, T., Hain, C., Reichle, R., ... & Zeng, F. W. (2018). Global relationships among traditional reflectance vegetation indices (NDVI and NDII), evapotranspiration (ET), and soil moisture variability on weekly timescales. *Remote Sensing of Environment*, 219, 339-352.
- Kaisermann, A., de Vries, F. T., Griffiths, R. I., & Bardgett, R. D. (2017). Legacy effects of drought on plant–soil feedbacks and plant–plant interactions. *New Phytologist*, 215(4), 1413-1424.
- Kannenbergh, S. A., Novick, K. A., & Phillips, R. P. (2019). Anisohydric behavior linked to persistent hydraulic damage and delayed drought recovery across seven North American tree species. *New Phytologist*, 222(4), 1862-1872.

- Kannenbergh, S. A., Schwalm, C. R., & Anderegg, W. R. (2020). Ghosts of the past: how drought legacy effects shape forest functioning and carbon cycling. *Ecology Letters*, 23(5), 891-901.
- Khatri-Chhetri, P., Hendryx, S. M., Hartfield, K. A., Crimmins, M. A., Leeuwen, W. J. V., & Kane, V. R. (2021). Assessing vegetation response to multi-scalar drought across the Mojave, Sonoran, Chihuahuan deserts and Apache Highlands in the Southwest United States. *Remote Sensing*, 13(6), 1103.
- Kong, Q., Guerreiro, S. B., Blenkinsop, S., Li, X. F., & Fowler, H. J. (2020). Increases in summertime concurrent drought and heatwave in Eastern China. *Weather and Climate Extremes*, 28, 100242.
- Kuo, C. C., Liu, Y. C., Su, Y., Liu, H. Y., & Lin, C. T. (2022). Responses of alpine summit vegetation under climate change in the transition zone between subtropical and tropical humid environment. *Scientific Reports*, 12(1), 13352.
- Lawson, T. (2009). Guard cell photosynthesis and stomatal function. *New Phytologist*, 181(1), 13-34.
- Lee, Y. C., Wang, C. C., Weng, S. P., Chen, C. T., & Cheng, C. T. (2019). Future projections of meteorological drought characteristics in Taiwan. *Atmosphere Sciences*, 47, 66-91.

- Lei, T., Feng, J., Lv, J., Wang, J., Song, H., Song, W., & Gao, X. (2020). Net Primary Productivity Loss under different drought levels in different grassland ecosystems. *Journal of Environmental Management*, 274, 111144.
- Lewis, S. L., Brando, P. M., Phillips, O. L., Van Der Heijden, G. M., & Nepstad, D. (2011). The 2010 amazon drought. *Science*, 331(6017), 554-554.
- Li, C., Leal Filho, W., Yin, J., Hu, R., Wang, J., Yang, C., Yin, S., Bao, Y., & Ayal, D. Y. (2018). Assessing vegetation response to multi-time-scale drought across inner Mongolia plateau. *Journal of Cleaner Production*, 179(1), 210–216.
- Liu, D., Zhang, C., Ogaya, R., Estiarte, M., & Peñuelas, J. (2020). Effects of decadal experimental drought and climate extremes on vegetation growth in Mediterranean forests and shrublands. *Journal of Vegetation Science*, 31(5), 768-779.
- Liu, L. Y., Huang, W. J., PU, R. L., & Wang, J. H. (2014). Detection of internal leaf structure deterioration using a new spectral ratio index in the near-infrared shoulder region. *Journal of Integrative Agriculture*, 13(4), 760-769.
- Liu, F., Liu, H., Xu, C., Shi, L., Zhu, X., Qi, Y., & He, W. (2021). Old-growth forests show low canopy resilience to droughts at the southern edge of the taiga. *Global Change Biology*, 27(11), 2392–2402.

- Liu, W. T. H., Massambani, O., & Nobre, C. A. (1994). Satellite recorded vegetation response to drought in Brazil. *International Journal of Climatology*, 14(3), 343–354.
- Liu, Y., & Lei, H. (2015). Responses of natural vegetation dynamics to climate drivers in China from 1982 to 2011. *Remote Sensing*, 7(8), 10243-10268.
- Liu, Y. Y., van Dijk, A. I., Miralles, D. G., McCabe, M. F., Evans, J. P., de Jeu, R. A. M., Gentile, P., Huete, A., Parinussa, R. M., Wang, L., Guan, K., Berry, J., & Restrepo-Coupe, N. (2018). Enhanced canopy growth precedes senescence in 2005 and 2010 Amazonian droughts. *Remote Sensing of Environment*, 211, 26-37.
- Loisel, J., Gallego-Sala, A. V., Amesbury, M., Magnan, G., Anshari, G., Beilman, D., Benavides, J., Blewett, J., Camill, P., & Charman, D. (2021). Expert assessment of future vulnerability of the global peatland carbon sink. *Nature Climate Change*, 11(1), 70-77.
- Luo, H., Zhou, T., Wu, H., Zhao, X., Wang, Q., Gao, S., & Li, Z. (2016). Contrasting responses of planted and natural forests to drought intensity in Yunnan, China. *Remote Sensing*, 8(8), 635.

- Luo, H., Zhou, T., Yu, P., Yi, C., Liu, X., Zhang, Y., Zhou, P., Zhang, J., & Xu, Y. (2022). The forest recovery path after drought dependence on forest type and stock volume. *Environmental Research Letters*, 17(5), 055006.
- Luomala, E. M., Laitinen, K., Sutinen, S., Kellomäki, S., & Vapaavuori, E. (2005). Stomatal density, anatomy and nutrient concentrations of Scots pine needles are affected by elevated CO₂ and temperature. *Plant, Cell & Environment*, 28(6), 733-749.
- Manzano, A., Clemente, M. A., Morata, A., Luna, M. Y., Beguería, S., Vicente-Serrano, S. M., & Martín, M. L. (2019). Analysis of the atmospheric circulation pattern effects over SPEI drought index in Spain. *Atmospheric Research*, 230, 104630.
- Markonis, Y., Hanel, M., Máca, P., Kyselý, J., & Cook, E. R. (2018). Persistent multi-scale fluctuations shift European hydroclimate to its millennial boundaries. *Nature Communications*, 9(1), 1767.
- Matsushita, B., Yang, W., Chen, J., Onda, Y., & Qiu, G. (2007). Sensitivity of the enhanced vegetation index (EVI) and normalized difference vegetation index (NDVI) to topographic effects: a case study in high-density cypress forest. *Sensors*, 7(11), 2636-2651.

- Mayr, S., Wolfschwenger, M., & Bauer, H. (2002). Winter-drought induced embolism in Norway spruce (*Picea abies*) at the Alpine timberline. *Physiologia Plantarum*, 115(1), 74-80.
- McDowell, N., Allen, C. D., Anderson-Teixeira, K., Brando, P., Brien, R., Chambers, J., Christoffersen, B., Davies, S., Doughty, C., & Duque, A. (2018). Drivers and mechanisms of tree mortality in moist tropical forests. *New Phytologist*, 219(3), 851-869.
- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, 17(22), 179-183.
- Meehl, G. A., & Tebaldi, C. (2004). More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century. *Science*, 305(5686), 994–997.
- Misson, L., Degueldre, D., Collin, C., Rodriguez, R., Rocheteau, A., OURCIVAL, J. M., & Rambal, S. (2011). Phenological responses to extreme droughts in a Mediterranean forest. *Global Change Biology*, 17(2), 1036-1048.
- Mitchell, P. J., Benyon, R. G., & Lane, P. N. (2012). Responses of evapotranspiration at different topographic positions and catchment water balance following a pronounced drought in a mixed species eucalypt forest, Australia. *Journal of Hydrology*, 440-441, 62-74.

Moran, E., Lauder, J., Musser, C., Stathos, A., & Shu, M. (2017). The genetics of drought tolerance in conifers. *New Phytologist*, 216(4), 1034-1048.

Móricz, N., Garamszegi, B., Rasztoivits, E., Bidló, A., Horváth, A., Jagicza, A., Illés, G., Vekerdy, Z., Somogyi, Z., & Gálos, B. (2018). Recent drought-induced vitality decline of black pine (*Pinus nigra* Arn.) in south-west Hungary—Is this drought-resistant species under threat by climate change? *Forests*, 9(7), 414.

Mukherjee, S., & Mishra, A. K. (2021). Increase in compound drought and heatwaves in a warming world. *Geophysical Research Letters*, 48(1), e2020GL090617.

Nagendra, H., Lucas, R., Honrado, J. P., Jongman, R. H., Tarantino, C., Adamo, M., & Mairota, P. (2013). Remote sensing for conservation monitoring: Assessing protected areas, habitat extent, habitat condition, species diversity, and threats. *Ecological Indicators*, 33, 45-59.

Nemani, R. R., Keeling, C. D., Hashimoto, H., Jolly, W. M., Piper, S. C., Tucker, C. J., Myneni, R. B., & Running, S. W. (2003). Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999. *Science*, 300(5625), 1560-1563.

Nepstad, D., Lefebvre, P., Lopes da Silva, U., Tomasella, J., Schlesinger, P., Solórzano, L., Moutinho, P., Ray, D., & Guerreira Benito, J. (2004). Amazon

drought and its implications for forest flammability and tree growth: A basin-wide analysis. *Global Change Biology*, 10(5), 704–717.

O’Connell, C. S., Ruan, L., & Silver, W. L. (2018). Drought drives rapid shifts in tropical rainforest soil biogeochemistry and greenhouse gas emissions. *Nature Communications*, 9(1), 1-9.

Okin, G. S., Dong, C., Willis, K. S., Gillespie, T. W., & MacDonald, G. M. (2018). The impact of drought on native southern California vegetation: Remote sensing analysis using MODIS-derived time series. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 123(6), 1927-1939.

Page, S. E., Siegert, F., Rieley, J. O., Boehm, H. D. V., Jaya, A., & Limin, S. (2002). The amount of carbon released from peat and forest fires in Indonesia during 1997. *Nature*, 420(6911), 61-65.

Paiva Alcoforado Rebello, V., Getirana, A., Rotunno Filho, O. C., & Lakshmi, V. (2020). Spatiotemporal vegetation response to extreme droughts in eastern Brazil. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 18, 100294.

Palmer, W. C. (1965). Meteorological drought (Vol. 30). US Department of Commerce, Weather Bureau. *Washington DC, USA*.

Rao, K., Anderegg, W. R., Sala, A., Martínez-Vilalta, J., & Konings, A. G. (2019).

Satellite-based vegetation optical depth as an indicator of drought-driven tree mortality. *Remote Sensing of Environment*, 227, 125-136.

Parry, et al. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*.

Contribution of Working Group 2 to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Cambridge Univ Press, Cambridge, UK, and New York, 2007).

Pascual, V. J., & Wang, Y. M. (2017). Utilizing rainfall and alternate wetting and

drying irrigation for high water productivity in irrigated lowland paddy rice in southern Taiwan. *Plant Production Science*, 20(1), 24-35.

Pasho, E., Camarero, J. J., de Luis, M., & Vicente-Serrano, S. M. (2011). Impacts

of drought at different time scales on forest growth across a wide climatic gradient in north-eastern Spain. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(12), 1800-1811.

Peng, J., Wu, C., Zhang, X., Wang, X., & Gonsamo, A. (2019). Satellite detection

of cumulative and lagged effects of drought on autumn leaf senescence over the Northern Hemisphere. *Global Change Biology*, 25(6), 2174-2188.

Phillips, O. L., Aragão, L. E., Lewis, S. L., Fisher, J. B., Lloyd, J., López-González, G., Malhi, Y., Monteagudo, A., Peacock, J., & Quesada, C. A. (2009). Drought sensitivity of the Amazon rainforest. *Science*, 323(5919), 1344-1347.

Piao, S., Mohammat, A., Fang, J., Cai, Q., & Feng, J. (2006). NDVI-based increase in growth of temperate grasslands and its responses to climate changes in China. *Global Environmental Change*, 16(4), 340-348.

Pirasteh-Anosheh, H., Saed-Moucheshi, A., Pakniyat, H., & Pessarakli, M. (2016). Stomatal responses to drought stress. *Water Stress and Crop Plants: A Sustainable Approach*, 1, 24-40.

Piao, S., Fang, J., Zhou, L., Guo, Q., Henderson, M., Ji, W., Li, Y., & Tao, S. (2003). Interannual variations of monthly and seasonal normalized difference vegetation index (NDVI) in China from 1982 to 1999. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D14).

Pompa-García, M., González-Cásares, M., Gazol, A., & Camarero, J. J. (2021). Run to the hills: Forest growth responsiveness to drought increased at higher elevation during the late 20th century. *Science of The Total Environment*, 772, 145286.

Pretzsch, H., Schütze, G., & Uhl, E. (2013). Resistance of European tree species to drought stress in mixed versus pure forests: evidence of stress release by inter-specific facilitation. *Plant Biology*, 15(3), 483-495.

Reichstein, M., Bahn, M., Ciais, P., Frank, D., Mahecha, M. D., Seneviratne, S. I., Zscheischler, J., Beer, C., Buchmann, N., & Frank, D. C. (2013). Climate extremes and the carbon cycle. *Nature*, 500(7462), 287-295.

Reichstein, M., Ciais, P., Papale, D., Valentini, R., RUNNING, S., Viovy, N., Cramer, W., Granier, A., Ogée, J., & Allard, V. (2007). Reduction of ecosystem productivity and respiration during the European summer 2003 climate anomaly: a joint flux tower, remote sensing and modelling analysis. *Global Change Biology*, 13(3), 634-651.

Richter, R., Ballasus, H., Engelmann, R. A., Zielhofer, C., Sanaei, A., & Wirth, C. (2022). Tree species matter for forest microclimate regulation during the drought year 2018: disentangling environmental drivers and biotic drivers. *Scientific Reports*, 12(1), 17559.

Rita, A., Camarero, J. J., Nolè, A., Borghetti, M., Brunetti, M., Pergola, N., Serio, C., Vicente-Serrano, S. M., Tramutoli, V., & Ripullone, F. (2020). The impact of drought spells on forests depends on site conditions: The case of 2017

summer heat wave in southern Europe. *Global Change Biology*, 26(2), 851-863.

Rivero, R. M., Kojima, M., Gepstein, A., Sakakibara, H., Mittler, R., Gepstein, S., & Blumwald, E. (2007). Delayed leaf senescence induces extreme drought tolerance in a flowering plant. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(49), 19631–19636.

Sala, O. E., Gherardi, L. A., Reichmann, L., Jobbagy, E., & Peters, D. (2012). Legacies of precipitation fluctuations on primary production: theory and data synthesis. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 367(1606), 3135-3144.

Sánchez-Salguero, R., Camarero, J. J., Hevia, A., Madrigal-González, J., Linares, J. C., Ballesteros-Canovas, J. A., Sánchez-Miranda, A., Alfaro-Sánchez, R., Sangüesa-Barreda, G., & Galván, J. D. (2015). What drives growth of Scots pine in continental Mediterranean climates: drought, low temperatures or both? *Agricultural and Forest Meteorology*, 206(15), 151-162.

Sánchez-Salguero, R., Ortíz, C., Covelo, F., Ochoa, V., García-Ruiz, R., Seco, J. I., Carreira, J. A., Merino, J. Á., & Linares, J. C. (2015). Regulation of water use in the southernmost European fir (*Abies pinsapo* Boiss.): Drought avoidance matters. *Forests*, 6(6), 2241-2260.

Santos, V. A. H. F. dos, Ferreira, M. J., Rodrigues, J. V. F. C., Garcia, M. N., Ceron, J. V. B., Nelson, B. W., & Saleska, S. R. (2018). Causes of reduced leaf-level photosynthesis during strong El Niño drought in a Central Amazon forest. *Global Change Biology*, 24(9), 4266–4279.

Seddon, A. W., Macias-Fauria, M., Long, P. R., Benz, D., & Willis, K. J. (2016). Sensitivity of global terrestrial ecosystems to climate variability. *Nature*, 531(7593), 229-232.

Semeraro, T., Luvisi, A., Lillo, A. O., Aretano, R., Buccolieri, R., & Marwan, N. (2020). Recurrence analysis of vegetation indices for highlighting the ecosystem response to drought events: An application to the Amazon forest. *Remote Sensing*, 12(6), 907.

Senf, C., Buras, A., Zang, C. S., Rammig, A., & Seidl, R. (2020). Excess forest mortality is consistently linked to drought across Europe. *Nature Communications*, 11(1), 6200.

Sheffield, J., Wood, E. F., Chaney, N., Guan, K., Sadri, S., Yuan, X., Olang, L., Amani, A., Ali, A., Demuth, S., & Ogallo, L. (2014). A drought monitoring and forecasting system for sub-Saharan African water resources and food security. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 95(6), 861–882.

Shiau, J. T., & Hsiao, Y. Y. (2012). Water-deficit-based drought risk assessments in Taiwan. *Natural Hazards*, 64, 237-257.

Shrestha, R., Di, L., Eugene, G. Y., Kang, L., SHAO, Y. Z., & BAI, Y. Q. (2017). Regression model to estimate flood impact on corn yield using MODIS NDVI and USDA cropland data layer. *Journal of Integrative Agriculture*, 16(2), 398-407.

Sippel, S., Reichstein, M., Ma, X., Mahecha, M. D., Lange, H., Flach, M., & Frank, D. (2018). Drought, heat, and the carbon cycle: a review. *Current Climate Change Reports*, 4, 266-286.

Smith, J. G., Sconiers, W., Spasojevic, M. J., Ashton, I. W., & Suding, K. N. (2012). Phenological changes in alpine plants in response to increased snowpack, temperature, and nitrogen. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 44(1), 135-142.

Smith, M. N., Stark, S. C., Taylor, T. C., Ferreira, M. L., de Oliveira, E., Restrepo-Coupe, N., Chen, S., Woodcock, T., Dos Santos, D. B., & Alves, L. F. (2019). Seasonal and drought-related changes in leaf area profiles depend on height and light environment in an Amazon forest. *New Phytologist*, 222(3), 1284-1297.

Sobral, B. S., Oliveira-Júnior, J. F. de, de Gois, G., Pereira-Júnior, E. R., Terassi,

P. M. de B., Muniz-Júnior, J. G. R., Lyra, G. B., & Zeri, M. (2019). Drought characterization for the state of Rio de Janeiro based on the annual SPI index: Trends, statistical tests and its relation with ENSO. *Atmospheric Research*, 220, 141–154.

Song, L., Li, Y., Ren, Y., Wu, X., Guo, B., Tang, X., Shi, W., Ma, M., Han, X., &

Zhao, L. (2019). Divergent vegetation responses to extreme spring and summer droughts in Southwestern China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 279, 107703.

Sönmez, F. K., Koemuescue, A. U., Erkan, A., & Turgu, E (2005). An analysis of spatial and temporal dimension of drought vulnerability in Turkey using the standardized precipitation index. *Natural Hazards*, 35, 243–264.

Sperry, J. S., & Love, D. M. (2015). What plant hydraulics can tell us about responses to climate-change droughts. *New Phytologist*, 207(1), 14-27.

Spinoni, J., Naumann, G., Carrao, H., Barbosa, P., & Vogt, J. (2014). World drought frequency, duration, and severity for 1951–2010. *International Journal of Climatology*, 34(8), 2792-2804.

Stimson, H. C., Breshears, D. D., Ustin, S. L., & Kefauver, S. C. (2005). Spectral sensing of foliar water conditions in two co-occurring conifer species: *Pinus*

edulis and Juniperus monosperma. *Remote Sensing of Environment*, 96(1), 108-118.

Stocker, T. (Ed.). (2014). *Climate change 2013: the physical science basis: Working Group I contribution to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge university press.

Stovall, A. E., Shugart, H., & Yang, X. (2019). Tree height explains mortality risk during an intense drought. *Nature Communications*, 10(1), 1-6.

Sturm, J., Santos, M. J., Schmid, B., & Damm, A. (2022). Satellite data reveal differential responses of Swiss forests to unprecedented 2018 drought. *Global Change Biology*, 28(9), 2956-2978.

Tannehill, I. R. (1947). *Drought, its causes and effects* (Vol. 64, No. 1, p. 83). LWW.

Thonfeld, F., Gessner, U., Holzwarth, S., Kriese, J., Da Ponte, E., Huth, J., & Kuenzer, C. (2022). A First Assessment of Canopy Cover Loss in Germany's Forests after the 2018–2020 Drought Years. *Remote Sensing*, 14(3), 562.

Trenberth, K. E., Dai, A., Van Der Schrier, G., Jones, P. D., Barichivich, J., Briffa, K. R., & Sheffield, J. (2014). Global warming and changes in drought. *Nature Climate Change*, 4(1), 17-22.

- Trenberth, K. E., Moore, B., Karl, T. R., & Nobre, C. (2006). Monitoring and prediction of the earth's climate: A future perspective. *Journal of Climate*, *19*(20), 5001–5008.
- Tsai, H. P., Wang, G. G., & Zhuang, Z. H. (2021). Vertical Differences in the Long-Term Trends and Breakpoints of NDVI and Climate Factors in Taiwan. *Remote Sensing*, *13*(22), 4707.
- Van der Schrier, G., Briffa, K. R., Osborn, T. J., & Cook, E. R. (2006). Summer moisture availability across North America. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *111*(D11).
- Van der Schrier, G., Jones, P. D., & Briffa, K. R. (2011). The sensitivity of the PDSI to the Thornthwaite and Penman-Monteith parameterizations for potential evapotranspiration. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *116*(D3).
- Van Loon, A. F. (2015). Hydrological drought explained. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, *2*(4), 359-392.
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., López-Moreno, J. I., Angulo, M., & El Kenawy, A. (2010). A new global 0.5 gridded dataset (1901–2006) of a multiscale drought index: comparison with current drought index datasets based on the Palmer Drought Severity Index. *Journal of Hydrometeorology*, *11*(4), 1033-1043.

Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscale drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 23(7), 1696-1718.

Vicente-Serrano, S. M., Gouveia, C., Camarero, J. J., Beguería, S., Trigo, R., López-Moreno, J. I., Azorín-Molina, C., Pasho, E., Lorenzo-Lacruz, J., & Revuelto, J. (2013). Response of vegetation to drought time-scales across global land biomes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(1), 52-57.

Vincini, M., Frazzi, E. R. M. E. S., & D'Alessio, P. A. O. L. O. (2008). A broad-band leaf chlorophyll vegetation index at the canopy scale. *Precision Agriculture*, 9, 303-319.

Voltaire, F. (2018). A unified framework of plant adaptive strategies to drought: crossing scales and disciplines. *Global Change Biology*, 24(7), 2929-2938.

Wagle, P., Xiao, X., Torn, M. S., Cook, D. R., Matamala, R., Fischer, M. L., Jin, C., Dong, J., & Biradar, C. (2014). Sensitivity of vegetation indices and gross primary production of tallgrass prairie to severe drought. *Remote Sensing of Environment*, 152, 1-14.

- Wang, H. C., & Chang, C. T. (2021). The dynamic of vegetation growth with regular climate and climatic fluctuations in a subtropical mountainous island, Taiwan. *Remote Sensing*, 13(16), 3298.
- Wang, J., Rich, P. M., & Price, K. P. (2003). Temporal responses of NDVI to precipitation and temperature in the central Great Plains, USA. *International Journal of Remote Sensing*, 24(11), 2345-2364.
- Wang, L., Qu, J. J., Hao, X., & Zhu, Q. (2008). Sensitivity studies of the moisture effects on MODIS SWIR reflectance and vegetation water indices. *International Journal of Remote Sensing*, 29(24), 7065-7075.
- Wang, Q., Wu, J., Lei, T., He, B., Wu, Z., Liu, M., Mo, X., Geng, G., Li, X., & Zhou, H. (2014). Temporal-spatial characteristics of severe drought events and their impact on agriculture on a global scale. *Quaternary International*, 349, 10-21.
- Wang, W., Zhu, Y., Xu, R., & Liu, J. (2015). Drought severity change in China during 1961–2012 indicated by SPI and SPEI. *Natural Hazards*, 75, 2437–2451.
- Wang, X., Pan, S., Pan, N., & Pan, P. (2022). Grassland productivity response to droughts in northern China monitored by satellite-based solar-induced chlorophyll fluorescence. *Science of The Total Environment*, 830, 154550.

- Wardlow, B. D., Egbert, S. L., & Kastens, J. H. (2007). Analysis of time-series MODIS 250 m vegetation index data for crop classification in the US Central Great Plains. *Remote sensing of environment*, 108(3), 290-310.
- Hawthorne, S., & Miniati, C. F. (2018). Topography may mitigate drought effects on vegetation along a hillslope gradient. *Ecohydrology*, 11(1), e1825.
- Wells, N., Goddard, S., & Hayes, M. J. (2004). A self-calibrating Palmer drought severity index. *Journal of Climate*, 17(12), 2335-2351.
- WMO. 2006. Drought monitoring and early warning: Concepts, progress and future challenges. WMO-No. 1006, World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.
- Wilhite, D. A., 2000: Drought as a natural hazard: Concepts and definitions. *Droughts: A Global Assessment*, D. A. Wilhite, Ed., Routledge, 3–18.
- Wilhite, D. A., Hayes, M. J., & Svoboda, M. D. (2000). Drought monitoring and assessment: status and trends in the United States. *Drought and Drought Mitigation in Europe*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 149-160.
- Wilhite, D. A. (2005). *Drought and water crises: science, technology, and management issues*. Crc Press.

Winkler, D. E., Belnap, J., Hoover, D., Reed, S. C., & Duniway, M. C. (2019).

Shrub persistence and increased grass mortality in response to drought in dryland systems. *Global Change Biology*, 25(9), 3121-3135.

Wolf, S., Keenan, T. F., Fisher, J. B., Baldocchi, D. D., Desai, A. R., Richardson, A. D., Scott, R. L., Law, B. E., Litvak, M. E., Brunsell, N. A., Peters, W., & van der Laan-Luijkx, I. T. (2016). Warm spring reduced carbon cycle impact of the 2012 US summer drought. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(21), 5880–5885.

Wu, S. H., Hseu, Z. Y., Shih, Y. T., Sun, I. F., Wang, H. H., & Sen, Y. C. (2011).

Kenting karst Forest dynamics plot: tree species characteristics and distribution patterns. *Taiwan Forestry Research Institute, Taipei*, 1306.

Wu, X., Liu, H., Li, X., Ciais, P., Babst, F., Guo, W., Zhang, C., Magliulo, V.,

Pavelka, M., & Liu, S. (2018). Differentiating drought legacy effects on vegetation growth over the temperate Northern Hemisphere. *Global Change Biology*, 24(1), 504-516.

Wu, X., Zhang, R., Bento, V. A., Leng, S., Qi, J., Zeng, J., & Wang, Q. (2022). The

effect of drought on vegetation gross primary productivity under different vegetation types across China from 2001 to 2020. *Remote Sensing*, 14(18), 4658.

Xiao, X., Zhang, Q., Hollinger, D., Aber, J., & Moore III, B. (2005). Modeling gross primary production of an evergreen needleleaf forest using MODIS and climate data. *Ecological Applications*, 15(3), 954-969.

Xie, M., Zhu, Y., Liu, S., Deng, D., Zhu, L., Zhao, M., & Wang, Z. (2022). Simulating the impacts of drought and warming in summer and autumn on the productivity of subtropical coniferous forests. *Forests*, 13(12), 2147.

Xu, C., McDowell, N. G., Fisher, R. A., Wei, L., Sevanto, S., Christoffersen, B. O., Weng, E., & Middleton, R. S. (2019). Increasing impacts of extreme droughts on vegetation productivity under climate change. *Nature Climate Change*, 9(12), 948-953.

Xu, P., Fang, W., Zhou, T., Zhao, X., Luo, H., Hendrey, G., & Yi, C. (2019). Spatial upscaling of tree-ring-based forest response to drought with satellite data. *Remote Sensing*, 11(20), 2344.

Xu, Y., Zhang, X., Wang, X., Hao, Z., Singh, V. P., & Hao, F. (2019). Propagation from meteorological drought to hydrological drought under the impact of human activities: A case study in northern China. *Journal of Hydrology*, 579, 124147.

- Xulu, S., Peerbhay, K., Gebreslasie, M., & Ismail, R. (2018). Drought influence on forest plantations in Zululand, South Africa, using MODIS time series and climate data. *Forests*, 9(9), 528.
- Yang, Q., Li, M., Zheng, Z., & Ma, Z. (2017). Regional applicability of seven meteorological drought indices in China. *Science China Earth Sciences*, 60, 745-760.
- Yang, Y., Anderson, M. C., Gao, F., Wood, J. D., Gu, L., & Hain, C. (2021). Studying drought-induced forest mortality using high spatiotemporal resolution evapotranspiration data from thermal satellite imaging. *Remote Sensing of Environment*, 265, 112640.
- Yeh, H. F. (2019). Using integrated meteorological and hydrological indices to assess drought characteristics in southern Taiwan. *Hydrology Research*, 50(3), 901-914.
- Yeh, H.-F., & Hsu, H.-L. (2019). Stochastic model for drought forecasting in the southern Taiwan basin. *Water*, 11(10), 2041.
- Ye, L., Shi, K., Xin, Z., Wang, C., & Zhang, C. (2019). Compound droughts and heat waves in China. *Sustainability*, 11(12), 3270.
- Yen, T. M., & Wang, C. T. (2013). Assessing carbon storage and carbon sequestration for natural forests, man-made forests, and bamboo forests in

Taiwan. *International Journal of Sustainable Development & World*

Ecology, 20(5), 455-460.

Yu, P.-S., Yang, T.-C., & Kuo, C.-C. (2006). Evaluating long-Term trends in annual and seasonal precipitation in Taiwan. *Water Resources Management*, 20(6), 1007–1023.

Zalloni, E., Battipaglia, G., Cherubini, P., Saurer, M., & De Micco, V. (2019). Wood growth in pure and mixed *Quercus ilex* L. forests: drought influence depends on site conditions. *Frontiers in Plant Science*, 10, 397.

Zampieri, M., Russo, S., di Sabatino, S., Michetti, M., Scoccimarro, E., & Gualdi, S. (2016). Global assessment of heat wave magnitudes from 1901 to 2010 and implications for the river discharge of the Alps. *Science of the Total Environment*, 571, 1330-1339.

Zhan, C., Liang, C., Zhao, L., Jiang, S., Niu, K., & Zhang, Y. (2022). Drought-related cumulative and time-lag effects on vegetation dynamics across the Yellow River Basin, China. *Ecological Indicators*, 143, 109409.

Zhang, L., Qiao, N., Huang, C., & Wang, S. (2019). Monitoring drought effects on vegetation productivity using satellite solar-induced chlorophyll fluorescence. *Remote Sensing*, 11(4), 378.

- Zhang, L., Xiao, J., Li, J., Wang, K., Lei, L., & Guo, H. (2012). The 2010 spring drought reduced primary productivity in southwestern China. *Environmental Research Letters*, 7(4), 045706.
- Zhang, L., & Zhou, T. (2015). Drought over East Asia: A Review. *Journal of Climate*, 28(8), 3375–3399.
- Zhang, Q., Kong, D., Singh, V. P., & Shi, P. (2017). Response of vegetation to different time-scales drought across China: Spatiotemporal patterns, causes and implications. *Global and Planetary Change*, 152, 1-11.
- Zhang, Y., Peng, C., Li, W., Fang, X., Zhang, T., Zhu, Q., Chen, H., & Zhao, P. (2013). Monitoring and estimating drought-induced impacts on forest structure, growth, function, and ecosystem services using remote-sensing data: recent progress and future challenges. *Environmental Reviews*, 21(2), 103-115.
- Zhang, Y., Xiao, X., Zhou, S., Ciais, P., McCarthy, H., & Luo, Y. (2016). Canopy and physiological controls of GPP during drought and heat wave. *Geophysical Research Letters*, 43(7), 3325-3333.
- Zhang, X., Friedl, M. A., Schaaf, C. B., & Strahler, A. H. (2004). Climate controls on vegetation phenological patterns in northern mid- and high latitudes inferred from MODIS data. *Global Change Biology*, 10(7), 1133–1145.

- Zhao, A., Yu, Q., Feng, L., Zhang, A., & Pei, T. (2020). Evaluating the cumulative and time-lag effects of drought on grassland vegetation: A case study in the Chinese Loess Plateau. *Journal of Environmental Management*, 261, 110214.
- Zhao, A., Zhang, A., Cao, S., Liu, X., Liu, J., & Cheng, D. (2018). Responses of vegetation productivity to multi-scale drought in Loess Plateau, China. *Catena*, 163, 165-171.
- Zhao, J., Feng, H., Xu, T., Xiao, J., Guerrieri, R., Liu, S., Wu, X., He, X., & He, X. (2021). Physiological and environmental control on ecosystem water use efficiency in response to drought across the northern hemisphere. *Science of the Total Environment*, 758, 143599.
- Zhao, M., & Running, S. W. (2010). Drought-Induced Reduction in Global Terrestrial Net Primary Production from 2000 Through 2009. *Science*, 329(5994), 940–943.
- Zhong, S., Sun, Z., & Di, L. (2021). Characteristics of vegetation response to drought in the CONUS based on long-term remote sensing and meteorological data. *Ecological Indicators*, 127, 107767.
- Zhong, S., Wang, C., Yang, Y., & Huang, Q. (2011). Risk assessment of drought in Yun-Gui-Guang of China jointly using the Standardized Precipitation Index

and vulnerability curves. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 9(1), 892–918.

Zhou, G., Peng, C., Li, Y., Liu, S., Zhang, Q., Tang, X., Liu, J., Yan, J., Zhang, D., & Chu, G. (2013). A climate change-induced threat to the ecological resilience of a subtropical monsoon evergreen broad-leaved forest in Southern China. *Global Change Biology*, 19(4), 1197-1210.

Zhou, L., Tian, Y., Myneni, R. B., Ciais, P., Saatchi, S., Liu, Y. Y., Piao, S., Chen, H., Vermote, E. F., & Song, C. (2014). Widespread decline of Congo rainforest greenness in the past decade. *Nature*, 509(7498), 86-90.

Zhu, X., Zhang, S., Liu, T., & Liu, Y. (2021). Impacts of heat and drought on gross primary productivity in China. *Remote Sensing*, 13(3), 378.

Zou, L., Cao, S., Zhao, A., & Sanchez-Azofeifa, A. (2020). Assessing the temporal response of tropical dry forests to meteorological drought. *Remote Sensing*, 12(14), 2341.