

太平洋經向模態對臺灣熱浪的年代際影響

蔡曉葶^{*1} 王懌琪² 曾琬鈴³ 羅敏輝⁴ 洪志誠⁵ 羅資婷⁶

¹國立臺灣大學氣候變遷與永續發展博士學位學程

²瑞典氣象與水文研究所

³國立臺灣大學海洋中心

⁴國立臺灣大學大氣科學系

⁵臺北市立大學地球環境暨生物資源學系

⁶中央氣象署海象氣候組氣候預報科

(中華民國 114 年 2 月 26 日收稿；中華民國 114 年 6 月 30 日定稿)

摘要

隨著全球氣候變遷加劇，臺灣夏季熱浪事件的頻率與強度逐步升高，將成為人口及社會安全的一大隱憂，因此，我們需要對臺灣熱浪在未來年代際的變化有更多的瞭解，以提前做出中長期的調適措施。太平洋經向模態（Pacific Meridional Mode；PMM）是一個發生在東太平洋，南北向海水溫度增溫的年代際氣候變異，研究顯示，當 PMM 增強時，東亞地區的極端高溫事件不僅更頻繁，強度也更強，而臺灣夏季氣溫亦在年代際尺度上顯著升高。然而，臺灣的 PMM 與熱浪之間的關聯性卻尚未被充分探討。本研究旨在釐清 PMM 與臺灣夏季溫度之間的關係，並探討其中的物理與動力機制，此外，進一步分析 PMM 增強時對臺灣熱浪事件的影響。研究結果顯示，PMM 是影響臺灣夏季溫度在年代際尺度上變化的主要因素，當 PMM 增強時，東太平洋上空的氣流上升並在高層發散，其中部分氣流向西傳播，跨越太平洋，最終於西太平洋約東經 120° 附近下沉，使臺灣處於穩定少雨的天氣狀態，在這種條件下，地表接收的太陽短波輻射增多，導致臺灣夏季氣溫上升，此外，當 PMM 處於正相位時，熱浪發生的頻率與持續時間亦增加。本研究有助於提升我們對臺灣夏季氣溫年代際變化的理解，並提供更多的資訊給各領域的專家制定中長期氣候調適計畫。

關鍵字：太平洋經向模態、年代際夏季溫度變化、熱浪、遙相關

*通訊作者：蔡曉葶（k2175379yy@gmail.com）

一、前言

臺灣位於西北太平洋的副熱帶地區，地理位置介於亞洲大陸與太平洋之間，同時受熱帶與中緯度氣候系統的雙重影響，且位於太平洋暖池帶的北緣(圖 1a)，因而形成獨特且複雜的氣候特徵。夏季是臺灣的主要高溫季節，近年來有溫度上升的趨勢(圖 1b,c)。儘管臺灣四面環海，在一定程度上可緩和炎熱，但在全球暖化持續推進的背景下，極端高溫已從偶發逐漸成為

常態，未來勢必面臨更頻繁的熱浪挑戰。隨著夏季氣溫不斷攀升及極端高溫事件愈發頻繁，臺灣的能源規劃、農業管理與災害調適正面臨嚴峻挑戰(臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台, 2024)。因此提供五至十年時程之氣候資訊的年代際預測，對於制定中長期調適策略越來越重要(Dunstone, 2022; Goddard, 2016; Trenberth et al., 2016)。這類資訊不僅有助於決策者預估未來能源需求，也能協助農業部門規劃適宜的作物種植時間與品種，並為災害

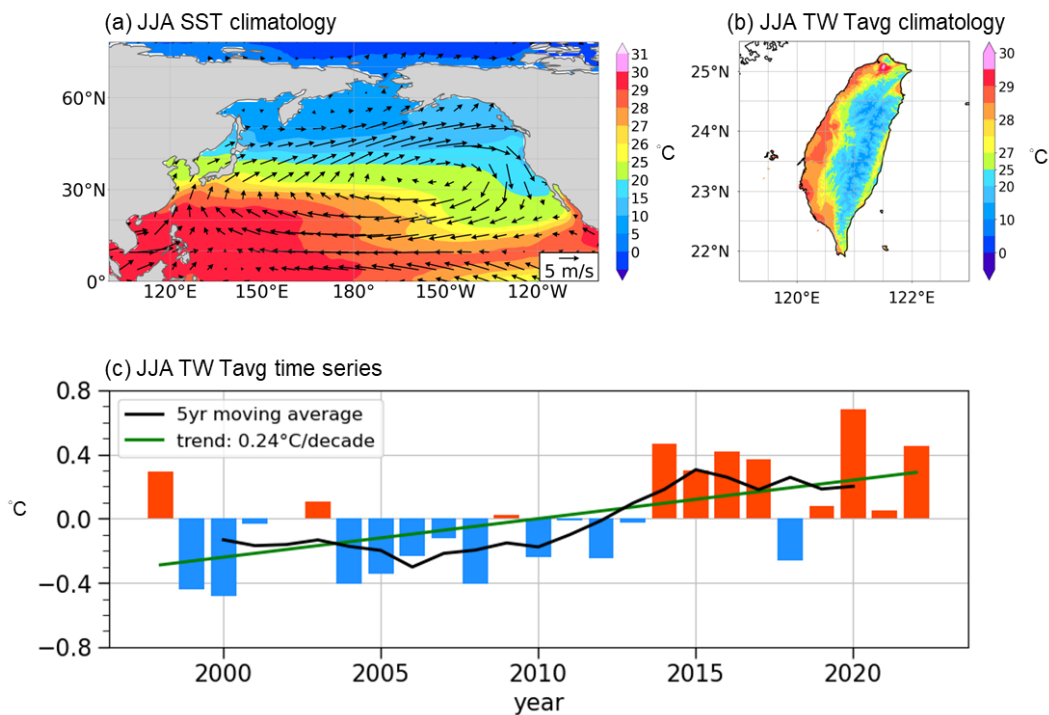


圖 1：(a) 1998 年至 2022 年夏季 (JJA) 太平洋區域海溫 (色階，單位：°C) 與 10 m 風場 (黑色箭頭) 之分布，可見副熱帶高壓下熱帶與副熱帶區域較高的海溫；(b) 同期臺灣平均溫度分布 (單位：°C)，顯示高溫主要集中在北部、西部及低海拔平原；(c) 1998 年至 2022 年臺灣夏季平均氣溫距平 (紅色長柱表示正距平、藍色長柱表示負距平)，並繪有 5 年移動平均 (黑線) 及長期趨勢線 (綠線)，其線性趨勢約為每十年上升 0.24°C，顯示臺灣夏季溫度持續有緩增的傾向。

管理者提供長期應變計畫的科學參考。然而，相較於短期天氣預報和世紀末的氣候推估，年際至年代際尺度的區域氣候預測仍面臨高度挑戰，其主要原因在於此時程易受到初始條件、內部氣候變異及外部輻射驅動等多重因素的交互影響，導致預測結果具有較高的不確定性，再者，因為臺灣的面積不大且地勢複雜險峻，氣候模式所提供的預測資料之解析度，往往不足以應付臺灣在氣候預測上的需求，使得預測臺灣未來數十年間的熱浪變化面臨更多挑戰。

為了改善臺灣在氣候上的熱浪預測需求，以及提升年代際夏季氣候預測的準確度，我們想要瞭解會影響到夏季臺灣氣候的年代際尺度氣候變異模態及其機制。過去研究顯示，臺灣夏秋季氣溫的變化深受大尺度氣候系統的支配。例如，在 6 月至 8 月期間，當副熱帶高壓增強並向西延伸至臺灣時，穩定且乾燥的下沉氣流常常導致高溫並抑制對流發展，同時阻斷西南季風帶來的水氣，使雲量減少、降雨稀少，進而出現連續多日的酷熱天氣（臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台, 2024）；在年際尺度上，聖嬰現象（El Niño – Southern Oscillation；ENSO）與臺灣夏季熱浪的發生密切相關（Wu et al., 2020）；作為夏季亞洲季風一部分的東亞三極降水結構

（Pacific-Japan；PJ）也對臺灣夏季氣溫及極端高溫事件有重要調節作用（Tseng et al., 2023）。另外有研究指出，在年代際尺度（數十年以上）的秋季時，印度洋與熱帶太平洋的冷海溫影響沃克環流，進而在印度洋與熱帶太平洋形成下沉距平中心，在海洋大陸處於上升的距平中心，這些上升與下沉運動所造成的環流，使臺灣出現西北-東南距平風，通過由南方帶上來的暖平流效應（warm advection）使臺灣變暖，這樣的溫度震盪大約 11 年會發生一次，而在臺灣的年代際冷期，上述調節機制則發生相反的變化（Chen et al., 2008）。綜合以上，雖說已有很多對於臺灣溫度與較大尺度環流場的討論，然而，這些研究不是聚焦於數年間的年際尺度，就是針對其他季節的探討，針對年代際尺度臺灣夏季氣溫的主要影響機制，仍缺乏深入探討。

在夏季年代際尺度方面，近年來，東太平洋熱帶與副熱帶區域的太平洋經向模態（Pacific Meridional Mode, PMM）日益受到關注。PMM 是太平洋地區重要的年代際氣候變異模態，其特徵為風場與海表溫度變異的耦合，範圍大致位於 32°N – 21°S 與 175°E – 95°W（Chiang & Vimont, 2004），PMM 具有年際尺度的正負相位轉化週期，同時也擁有年代際尺度（約 8-16 年）的週期特徵，並且其年代際振盪的特性在 1990

年後變得更加強烈 (Kao et al., 2022)。
PMM 與東亞地區的極端高溫、降水變化及颱風生成數量密切相關 (Hong et al., 2018; Song et al., 2023)，研究亦發現，PMM 與臺灣的溫度呈現顯著的正相關 (Tsai et al., 2025)。基於此，我們推測 PMM 在臺灣長期氣候，特別是年代際的夏季熱浪的變化中，可能扮演重要角色，然而，目前關於 PMM 與臺灣夏季溫度之間的關聯性，相關的研究與討論仍相對有限，因此，本研究結合了 1998 年至 2022 年中央氣象署的臺灣觀測的網格化高解析度資料及全球再分析資料，深入分析 PMM 與臺灣夏季氣溫在年代際尺度上的關聯性、影響的物理過程，並量化其對夏季熱浪的影響。我們希望透過本研究，為未來年代際氣候預測提供更穩固的科學基礎與理論支持，並提升未來數十年間熱浪的預測能力，以協助臺灣面對日益嚴峻的熱浪挑戰。

二、資料

(一) 太平洋經向模態簡介

本研究採用 PMM 指數作為評估 PMM 強弱的工具。該指數由美國國家海洋暨大氣總署 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 提供，並可從其地球系統研究圖書館 (Earth System Research Library) 網站取得

(<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/timeseries/monthly/PMM/>，於 2023 年存取)。

PMM 是透過對熱帶及副熱帶太平洋區域 (32°N – 21°S, 175°E – 95°W) 的海溫與 10 米風場進行最大協方差分析 (Maximum Covariance Analysis; MCA) 所得的第一個耦合模態。為了提取純粹的 PMM 信號，原始海溫與風場在進行最大協方差分析前需經過多項預處理，包括空間平滑、去除季節循環及線性趨勢，並應用三個月滑動平均。此外，我們移除了代表 ENSO 信號的太平洋冷舌指數 (Pacific Cold Tongue Index)，以減少聖嬰現象對 PMM 的干擾。本研究使用 1998 年至 2022 年的 6 月至 8 月 (June-August; JJA) 的月均 PMM 指數，並應用五年的滑動平均進一步削弱聖嬰現象信號對臺灣氣候的影響，近 25 年來 PMM 在太平洋上的海水與風場變異模態如圖 2 所示。

(二) 臺灣網格分析資料 (Taiwan Station-based Analysis)

本研究採用中央氣象署提供的臺灣網格分析資料，包括平均溫度、最高溫度，以及最低溫度。該資料是基於 110 個設站時間長、觀測資料缺漏較少的測站溫度紀錄，經過資料檢核、銜接補遺與時間尺度轉換等處理程序後，透過通用克利金法 (Universal Kriging) 進行插值運算，將原

本分布不均的測站觀測資料轉換為均勻的網格點資料，以提升空間覆蓋率並提供更完整的氣候資訊(中央氣象署, 2023)。此資料的空間解析度為 2.5 公里，本研究使用的資料時間範圍為 1998-2022 的 6 月至 8 月夏季平均，共 25 年。

(三) 全球氣候資料

全球海溫資料取自英國氣象局 Hadley 中心的全球海冰與海表溫度資料集 (Rayner et al., 2003)，解析度為 $1^\circ \times 1^\circ$ 。其他大氣變數則使用歐洲中期天氣預報中心 (ECMWF) 的第五代全球氣候再分析資料 (the fifth generation ECMWF atmospheric reanalysis of the global climate data; ERA5; Hersbach et al., 2020)。ERA5 基於

Integrated Forecast System 模型 41r2 版本，具有原生解析度 T1279L137，並融合衛星、實地觀測及探空資料進行同化。本研究使用的變數包括海平面氣壓 (sea level pressure; SLP)、水平風場 ($u; v$)，解析度為 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。海溫及其他變數的使用年份皆為 1998-2022 年之 6 月、7 月、8 月夏季平均。

三、方法

(一) 相關與迴歸分析

本研究使用 皮爾森相關分析 (Pearson correlation) 與 線性迴歸分析 (linear regression)，以量化 PMM 對東太平洋與臺灣地區地表變數與環流型態的影響。

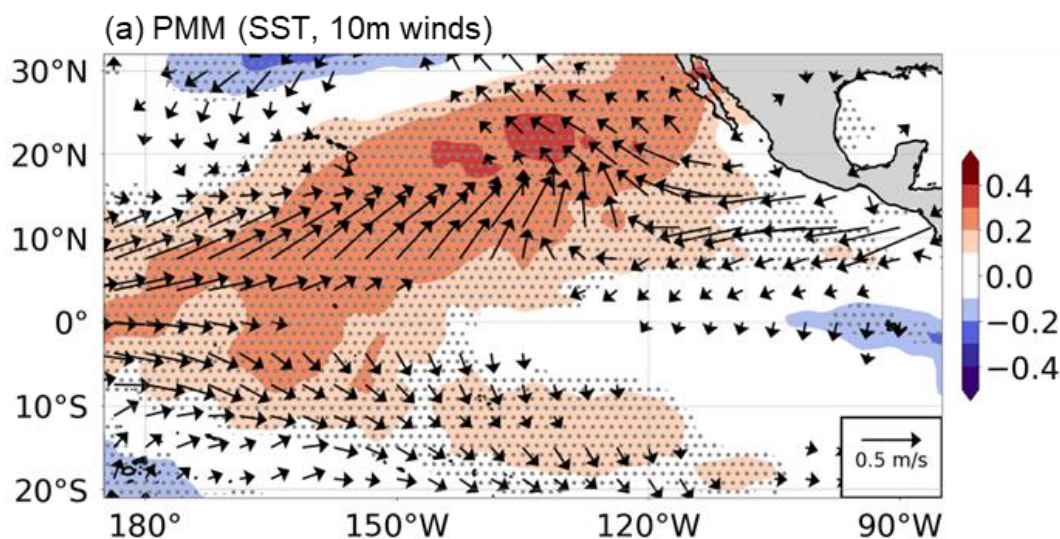


圖 2：代表 1998 - 2022 年期間，海表溫度 (SST) 與 10 公尺風場對標準化 PMM 指數的線性迴歸結果。圖中底色表示海溫對 PMM 指數的反應，箭頭則表示 10 公尺風場的變化趨勢，風速小於 0.1 ms^{-2} 者不顯示於圖中。此圖涵蓋 6 - 8 月平均狀態，空間範圍與 Chiang 和 Vimont (2004) 使用的區域一致。

皮爾森相關分析用於探討兩個連續變數間的線性關聯程度，其數值範圍介於 -1 到 1 之間。絕對值越大表示兩者的共變程度越強。一般而言，正相關表示當 x 增加時， y 傾向於也增加；反之，負相關則表示當 x 增加時， y 傾向於減少。皮爾森相關的公式如下：

$$r(x, y) = \frac{COV(x, y)}{S_x S_y} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1.1)$$

其中， r 表示皮爾森相關係數， x_i 與 y_i 為各自變數的觀測值， $\bar{x}$ 與 $\bar{y}$ 為其平均值。

(Boslaugh, 2012)

線性迴歸分析是一種用於描述自變數與應變數之間線性關係的基本模型，可用來定量描述當自變數改變時，應變數的變化幅度。其通用公式為：

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \varepsilon \quad (1.2)$$

其中， Y 為應變數， $x_1, x_2, \dots$ 為自變數， β_0 為截距項， $\beta_1, \beta_2, \dots$ 為迴歸係數，代表 y 對 x 的依賴程度， ε 則為殘差項。本文中所顯示之迴歸分析圖，代表將某變數之空間網格點分別迴歸到某指數後之迴歸斜率，亦即該網格點的變數變化對 PMM 指數所呈現之敏感程度。

(二) 經驗正交函數 (Empirical Orthogonal Function, EOF)

經驗正交函數是一種常用於氣候學的統計工具，用於提取高維空間資料中的主

要變異模式。該方法的目的是將複雜的大氣或氣候資料分解為一組正交函數，以便識別主導變化的結構及其時間演化特徵。經驗正交函數分析的數學基礎是主成分分析 (Principal Component Analysis, PCA)，透過計算資料的協方差矩陣或相關矩陣，提取資料變異的主要方向。對於大氣資料（如海溫、海平面氣壓等），經驗正交函數分析能有效地將資料分解為以下兩部分：

1. 空間模式 (mode)：反映資料在空間上的主要變化結構。
2. 時序變化 (即主成分；principle component, PC)：表示每個空間模式隨時間的變化。經驗正交函數分析的數學公式如下：

$$X(t, s) = \sum_{k=1}^M c_k(t) u_k(s) \quad (1.3)$$

其中， $X(t, s)$ 代表需要分解的連續空間-時間場， t 和 s 分別表示時間和空間位置， M 為場中包含的模式數量。 $c_k(t)$ 和 $u_k(s)$ 分別為時間展開函數和對應每個模式的基函數的空間模式 (Hannachi et al., 2007)。

(三) 熱浪定義

本篇論文以網格點之日最高氣溫作為熱浪指標，當該指標連續三天超過氣候 90 百分位熱浪門檻值時，即定義熱浪事件發生，本定義簡稱為 CTX90pt (Calendar day 90th prc of Tmax; Perkins & Alexander, 2013)。其中，每一個網格點熱浪門檻值的

設定方式是：在基準期（1998 – 2022 年）內，取該特定日以及其前後各七天（共計 15 天）日最高氣溫資料，計算其中第 90 百分位數，作為該網格點該日的熱浪門檻。舉例而言，若某天的網格溫度超越門檻值，且連續超過三天以上，就視為發生了熱浪事件。之所以選用 15 天的移動視窗，主要是考量到特定日期的氣候特徵（如高溫狀況）可能在前後幾天內有較高的相似度或延續性。此方法幫助我們從氣候資料中獲取有關熱浪的各種資訊，包括本研究採用 1998-2022 年的最高溫度網格資料，計算三項熱浪指標：(1) 熱浪頻率，意即每年熱浪發生的總天數（the annual number of heatwaves；HWN）、(2) 熱浪長度，每次熱浪的持續天數（heatwave duration；HWD），以及(3) 熱浪強度，每起熱浪的最高溫度（heatwave magnitude；HWM）。

四、研究結果

為探討臺灣溫度在年代際尺度上的變化及其與 PMM 之間的關聯，我們首先比較 1998–2022 年間臺灣夏季平均溫度（圖 3a，橘色長柱）、夏季平均溫度經由經驗正交函數分析所得之第一主成分（principal component 1; PC1；圖 3a，藍色折線）以及 PMM 指數（圖 3a，黑色折線），三項資料皆有經過五年滑動平均以及標準化處理。其中，PC1 與平均溫度的相關係數高達

0.99，且 P 值小於 0.05，說明其能有效代表臺灣的年代際溫度變化。臺灣夏季平均溫度與其 PC1 所對應的時間序列，整體呈現約 5 至 10 年的振盪週期，在 2000–2004 年間由正值轉為負值，2005–2012 年間出現下降振盪，2013–2018 年間轉為上升振盪，2019 年後則再度正負值轉換，表現出相似的振盪特徵。同時，PC1 與 PMM 指數之間的相關係數達 0.55，P 值小於 0.1，有顯著的相關性，雖然前期（約 1998–2004 年）的相關性並不明顯，但 2005–2012 年間雙方同步下降，2013 年後又同時轉為正值並對應平均溫度的上升，顯示二者之間有顯著的正向關聯。為進一步探討 PMM 對臺灣在空間上的溫度影響，圖 3b 呈現臺灣平均溫度與 PMM index 的迴歸分析結果，當 PMM 增強時，全臺普遍出現升溫現象，尤以北部、西部的縣市升溫特別明顯（例如：新北市、臺北市及苗栗縣），最高可以增加攝氏 0.2 ± 0.1 度。圖 3c 則顯示經驗正交函數分析後的第一模態（mode 1），其溫度分布與圖 3b 高度相似，全臺灣皆出現溫度上升，其中以北部、西部等地區有最明顯的增溫（例如：臺北市、新北市、苗栗縣、臺中市，以及南投縣、高雄市、花蓮縣與臺東縣在山區的交界帶）。PMM 與平均溫度的迴歸分析圖與經驗正交函數第一模態的相關性達 0.95，

顯示經驗正交函數第一模態可能捕捉到了 PMM 帶來的增溫影響訊號，且其解釋力達 73.9%，由此可知，PMM 很可能是主導臺灣溫度變化的關鍵因素。值得注意的是，PMM 與臺灣平均溫度的迴歸分析結果顯示，通過統計檢定的地區存在著東西兩側的差異，且主要集中在臺灣西半部，東部則僅有花蓮縣南端與臺東縣沿海地帶達到顯著性，其餘區域雖然也呈現增溫趨勢，但仍存在不確定性。此結果可能代表 PMM

所帶來的增溫效應會受到區域條件不同的影響，使其在不同地區的表現存在差異。

為了瞭解 PMM 影響到臺灣溫度的物理與動力過程，以及臺灣的平均溫度變化和 PMM 的關係，我們對太平洋的環流場進行了一連串的分析，在這組分析中，PMM 指數皆經過標準化以及五年滑動平均處理。圖 4a 為海溫距平值 (SSTa) 對標準化後的五年滑動平均 PMM index 的迴歸分析，當 PMM 增強時，東太平洋出現

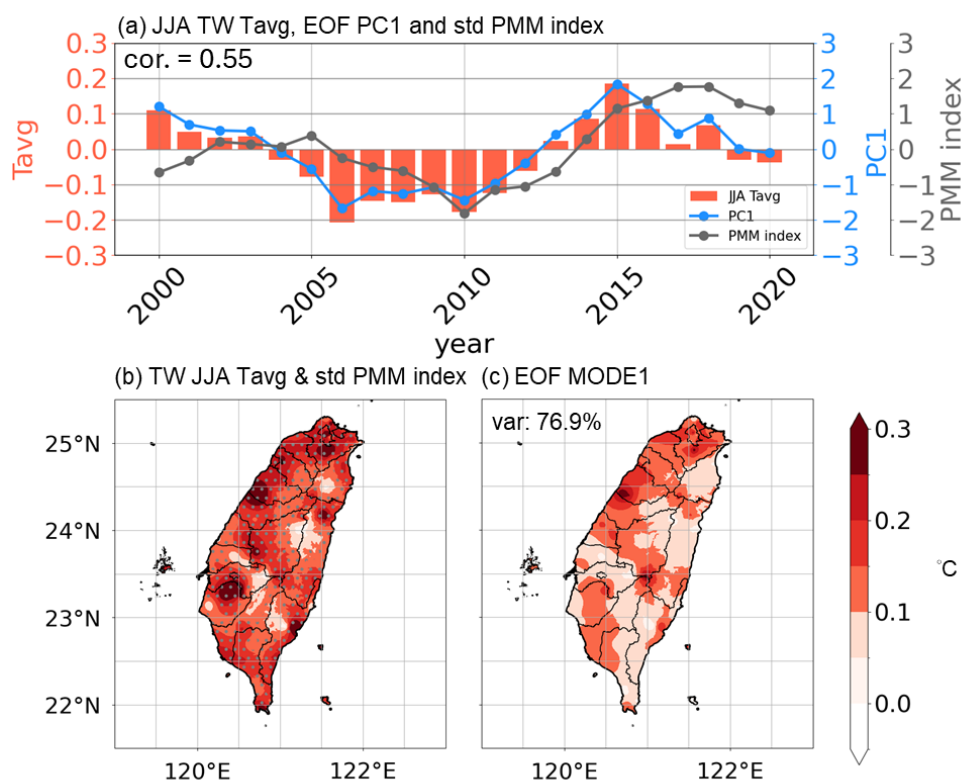


圖 3：(a) 1960-2022 年，臺灣夏季年平均溫度以經驗正交函數分析後之第一主成分（PC1）時間序列（藍線；無單位）、標準化的 PMM 指數（黑線；無單位）與臺灣夏季年平均溫度（Tavg；紅色柱狀圖；單位： $^{\circ}\text{C}$ ）。(b) 臺灣夏季年溫度對標準化 PMM 指數的迴歸圖，圖中的點表示在 0.1 顯著水平下具有顯著性。(c) 臺灣夏季年平均溫度的經驗正交函數第一模態（單位： $^{\circ}\text{C}$ ），其解釋變異量為 73.9%。

一個靴型的海溫距平值，增溫區域在東太平洋（約 120°W 附近）呈現較寬的範圍，往西延伸時逐漸變窄，類似靴頭，較高緯度（ 20°N 以上），溫暖區域往北延伸，形成像靴筒的部分，此為最典型的 PMM 模態，另一方面，在太平洋的西邊，臺灣附近的海域，也同樣的出現了顯著海溫增溫的情形。圖 4b 顯示，當 PMM 增強時，東太平洋（約 $180^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{W}$ ）在 200 hPa 高空速度位（velocity potential；VP）場中出現顯著輻散，並透過向西延伸的輻散氣流，

在西太平洋（含海洋大陸）約東經 120° 附近形成高空輻合並下沉。由於高空輻散往往對應地面或中低層的上升運動，東太平洋得以發展旺盛對流並生成雲雨；反觀輻合下沉區則帶來大氣穩定度提高與降雨減少。此下沉區主要覆蓋海洋大陸及其周邊，但由於臺灣地處其北緣過渡帶，也同樣受到下沉氣流影響而出現顯著的下沉增溫。同樣地，850 hPa 速度位與 PMM 指數的迴歸分析（圖 4c）顯示，中-東太平洋（約西經 $140^{\circ}\sim 180^{\circ}$ ）存在明顯輻合，對應於

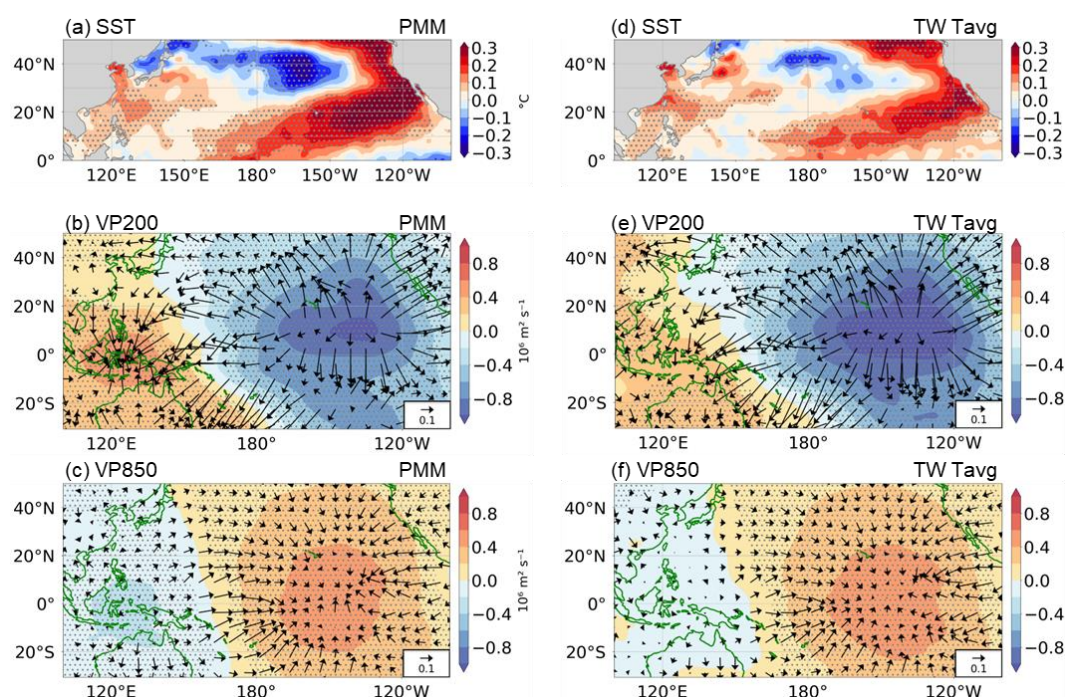


圖 4：(a) 展示海溫（單位： $^{\circ}\text{C}$ ）與標準化臺灣夏季年平均氣溫的迴歸分析圖。(b) 為 200hPa 的速度位勢（velocity potential；VP200）對應臺灣夏季年平均氣溫的迴歸圖。(c) 為 850 hPa 水平風場（uv，黑色箭頭，單位： m/s ）與海平面氣壓，底圖顏色，單位： hPa ）與標準化臺灣夏季年平均氣溫的迴歸分析圖。(d, e, f) 的內容與 (a, b, c) 相同，但改為迴歸至標準化的夏季 PMM 指數的分析圖。圖中以點標示的區域表示 $p\text{-value} < 0.1$ 。為了強調經向變化，在 (b, c, e, f) 圖中，已扣除經向平均值（zonal mean），圖中資料涵蓋年份為 1998 年至 2022 年。

較強的上升運動；而在西太平洋則為較弱的輻散或下沉信號，代表該區（含臺灣）偏向乾燥且穩定，大幅降低雲雨生成的機會。綜合兩張圖可知，PMM 處於正相位時，東太平洋形成暖海溫區並促進對流活躍，高空輻散氣流進一步向西推移，最終在臺灣附近形成下沉支並顯著提升其氣溫。再加上海溫在 PMM 正相位期間於臺灣海域也略有上升，雙重作用下更易造成長期且顯著的乾燥炎熱天氣。

而在圖 4 d-f 中，顯示當臺灣的溫度上升時，太平洋上的環流場出現相似的特徵，可以得知臺灣年代際溫度上升的過程反映的極有可能是受到太平洋經向模態對臺灣的增溫主導。

為進一步量化 PMM 與臺灣夏季整體溫度的關係，本研究繪製了 PMM 指數（經五年滑動平均處理）與臺灣日平均溫

（Tavg）、日最高溫（Tmax）、日最低溫（Tmin）三者的散布圖（圖 5）。分析結果顯示，這三類溫度均與 PMM 呈現顯著正相關，表示當 PMM 增強時，臺灣在夏季的溫度普遍升高。然而，從迴歸係數與相關係數的差異可觀察到以下幾點特徵：首先，日最高溫的迴歸係數最高，說明其對 PMM 變動的敏感度最強，日平均溫次之，而日最低溫最低；這代表 PMM 正相位可能更大的推動白天極端高溫的生成。另一方面，最低溫的相關係數卻最高，顯示夜間溫度與 PMM 之間的關係最為穩定，受其他干擾因素較小；平均溫緊隨其後，最高溫則略低。綜合來看，日最高溫雖然迴歸係數最大，但相關性偏低，可能受到局部對流、雲量變化或日間輻射等短期和區域性因素的影響；日最低溫則因夜間邊界層狀態較穩定，更能反映大尺度氣候環流

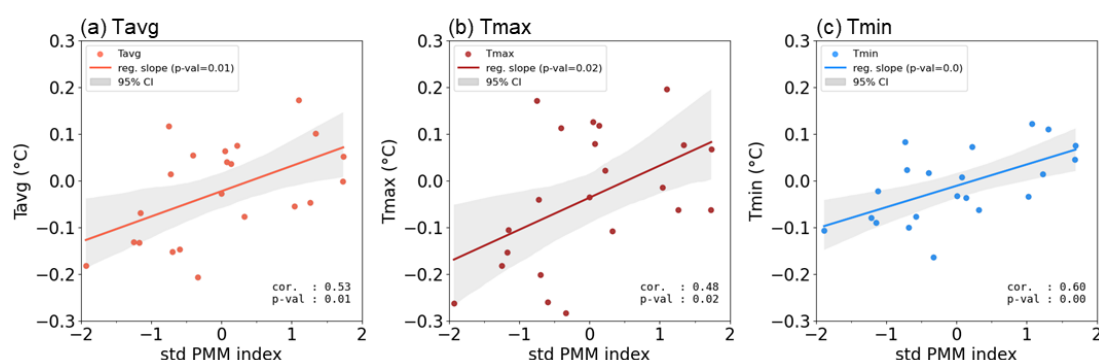


圖 5：臺灣在 1998-2022 年間夏季全島平均之日平均溫度、日最高溫度、日最低溫度與標準化 PMM 指數之散布關係。圓點在 (a) 為全台灣所有網格點，在五年滑動平均處理過後之日平均溫度（圖中標示為 Tavg），(b)、(c) 的資料處理與 (a) 相同，但分別日最高溫度（圖中標示為 Tmax）和日最低溫度（圖中標示為 Tmin），單位：°C。灰色陰影為 95% 信賴區間（Confidence Interval；CI）。資料年份為 1998-2022 年夏季。

場（如 PMM）的作用。由此推論，雖然 PMM 對夜間最低溫的控制相對穩定，但其增強所引發的白天極端熱能量累積，才更可能最終促使極端高溫事件的發生，進一步強化熱浪強度與頻率。

為了更清楚區分 PMM 正相位與負相位對臺灣日最高溫度的影響，本研究將「PMM 指數大於 1」及「PMM 指數小於 1」的年份分開合併，分別計算各年份夏季最高溫度之平均值，並進行合成分析。圖

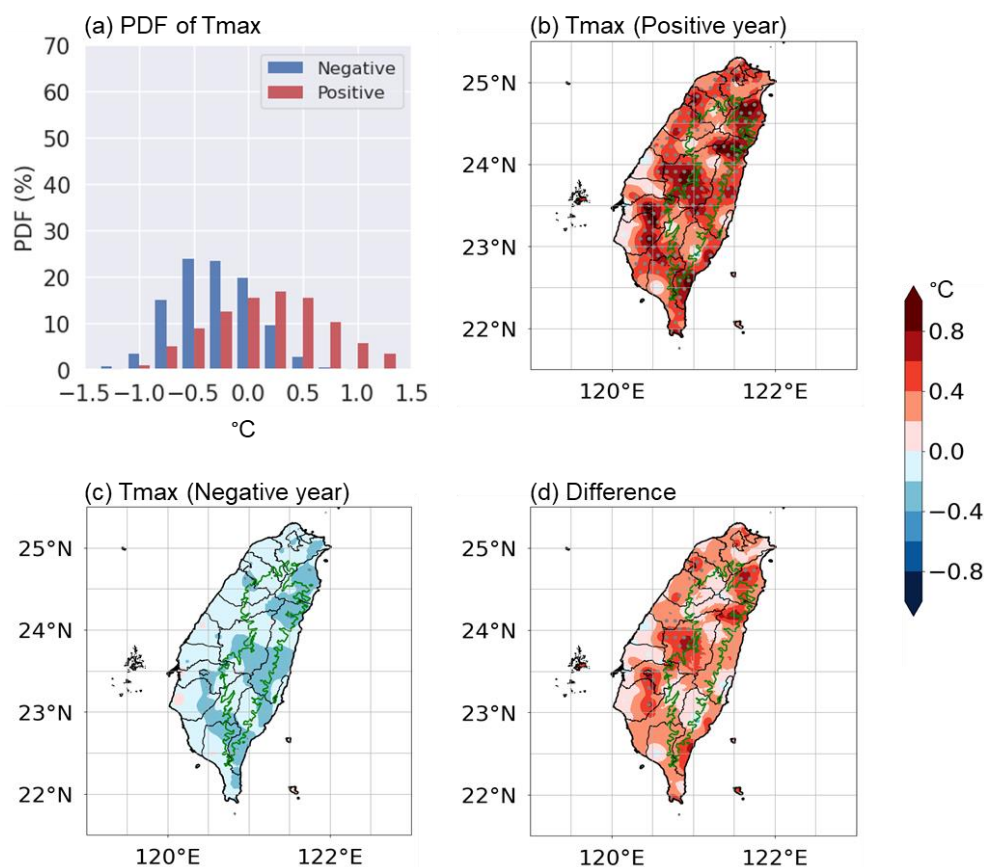


圖 6：代表 PMM 在正相位與負相位時，臺灣夏季平均日最高溫之比較。PMM 正向位年為：2015 年、2016 年、2017 年、2018 年、2019 年、2020 年，共 6 年；PMM 負相位則為 2000 年、2001 年、2002 年、2003 年、2004 年、2005 年、2006 年、2007 年、2008 年、2009 年、2010 年、2011 年、2012 年、2013 年、2014 年、2021 年，共 11 年。(a) 為臺灣日最高溫在 PMM 正負相位之機率分佈圖 (probability distribution function; PDF)。紅色代表 PMM 正相位年，藍色則代表 PMM 負相位年，X 軸代表極端高溫 (Extreme heat temperature; EHT; 單位：°C)，Y 軸則為機率分布 (b) PMM 正相位時，臺灣夏季平均日最高溫之合成分析圖。(c) PMM 負相位時，臺灣夏季平均日最高溫之合成分析圖。(d) 日最高溫合成分析在 PMM 正相位與負相位時之差異 (PMM 正相位減去 PMM 負相位)。綠色實線代表海拔 1000 公尺山區等高線，圖中以灰色圓點標示區域之 $p\text{-value} < 0.1$ 。

6a 之溫度機率分布函數 (probability distribution function ; PDF) 顯示, 當 PMM 處於正相位 (紅色) 時, 整體分布明顯向較高溫方向偏移, 極端高溫值甚至可達 1.5°C , 相較於負相位 (藍色) 的 0.5°C , 高出約 1°C , 突顯 PMM 正相位對高溫的放大效應。圖 6b 顯示當 PMM 為正相位時, 臺灣各地最高溫普遍顯著升高, 特別集中在近山區或部分山區 (例如臺北市、新竹市、南投縣、嘉義縣、臺南市、宜蘭縣、花蓮縣以及臺東縣等), 形成明顯的熱點分布。對照之下, 圖 6c 為 PMM 負相位時的最高溫合成圖, 雖然全臺多數地區顯示降溫趨勢, 降溫中心主要集中在東半部, 但大部分區域並未通過統計檢定, 表示 PMM 負相位下最高溫度的變化較分散且不穩定。最後, 圖 6d 為正相位與負相位之最高溫度差異分布, 結果指出, 除了彰化縣、雲林縣、高雄市、花蓮縣與臺東縣有少數地區呈現冷點外, 全臺各地整體皆顯示正相位明顯增溫, 尤以臺北市、南投縣、雲林縣、嘉義市、宜蘭縣與花蓮縣等臨山縣市最為顯著。整體而言, PMM 正相位下的日最高溫度明顯增加, 顯示 PMM 的增強對臺灣在夏季最高溫的推升效應相當明顯。

除了最高溫之外, 本研究也對熱浪頻率 (HWN; 即每年熱浪發生的總次數) 進

行了 PMM 正、負相位的合成分析。圖 7a 的機率分布顯示, 當 PMM 處於正相位 (紅色長條) 時, 熱浪頻率的分布整體向右偏移, 最高可達約 30 天; 相比之下, 負相位 (藍色長條) 的極端值僅約為 10 天, 突顯 PMM 正相位更易誘發頻繁且持續時間較長的熱浪事件。在日數距平的空間分布上圖 7b, PMM 正相位時, 臺灣大部分地區皆出現熱浪頻率增加的趨勢, 尤以中南部山區 (如南投縣、嘉義縣、高雄市與屏東縣的高海拔區) 更為明顯, 且 P 值小於 0.05, 有顯著的相關性, 顯示此區域對 PMM 增強具有較高的敏感度; 然而, 也有少數地區 (例如彰化縣、嘉義縣、臺南市及高雄市沿海帶) 顯示熱浪頻率減少, 但該訊號並未達到統計顯著, 可信度相對較低。與此相對, PMM 負相位 (圖 7c) 下, 雖然大部分地區的熱浪頻率呈現減少, 但其空間分布未達廣泛顯著; 同時, 西南部沿海區卻在負相位時出現熱浪頻率增加, 與正相位期間該地區減少的現象形成鮮明對比。這種差異可能與區域條件的差異 (例如: 地形造成的迎背風面環流特徵、土地利用型態與氣候條件等) 有關, 導致西南部沿海對 PMM 的反應與其他地區截然不同。圖 7d 則顯示正相位與負相位圖 7c 的差值分布, 可以更直觀地看到兩者在各地熱浪頻率上的差異, 多數區

域在正相位時普遍增幅較大，中南部山區的增溫最為顯著，而西南沿海則呈現與整體趨勢相反的負差異。總結而言，PMM 正相位普遍顯著提升臺灣的熱浪頻率，但在少數區域（如西南部沿海）卻出現相反趨勢，暗示區域條件（包括地形產生的局部環流、海陸風系及土地利用）在 PMM 對區域熱浪的影響上也扮演控制角色，造成熱浪變化的空間差異。

在分析臺灣熱浪長度(HWD; 每次熱浪的持續天數)時，圖 8(a) 顯示 PMM 正相位（紅色長條）相較於負相位（藍色長條）整體分布更偏向較長日數，極端值也可達約 6 天，比負相位多出約 2 天，顯示當 PMM 增強時，單一熱浪事件可能在某些地區維持更長時間。然而，觀察全臺空間分布圖 8b，可發現其增幅重心並非集中在中南部山區，而是偏向東部，尤其花蓮縣與臺東縣的交界處增幅最為明顯，但

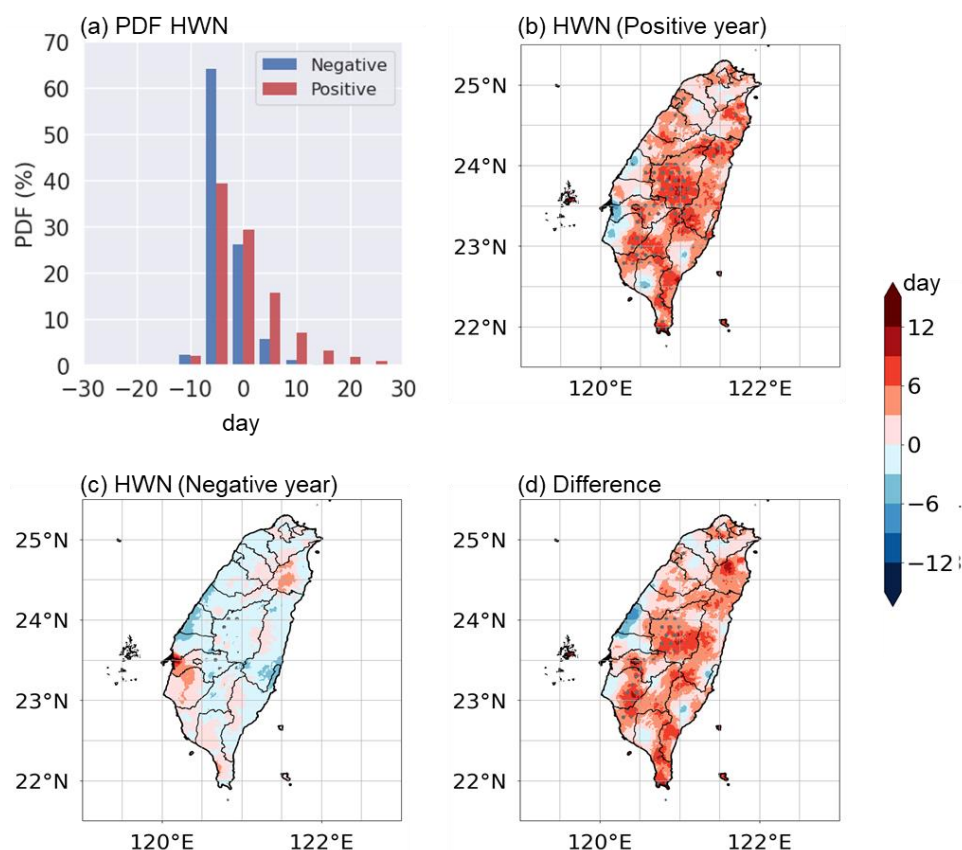


圖 7：代表 PMM 在正相位與負相位時，臺灣夏季每年熱浪頻率之比較。(a) 為每年熱浪日數之機率分佈圖 (probability distribution function; PDF)。(b) PMM 正相位時，每年熱浪頻率之合成分析。(c) PMM 負相位時，每年熱浪頻率之合成分析。(d) 每年熱浪頻率合成分析在 PMM 正相位與負相位時之差異 (PMM 正相位減去 PMM 負相位)。圖中以灰色圓點標示區域之 $p\text{-value} < 0.1$ 。

全臺只有零星地區通過統計檢定，說明此趨勢在空間上並不普遍且具有較高不確定性。相對地，PMM 處於負相位時（圖 8c），多數地區熱浪長度略微下降；但值得注意的是，在新竹縣、苗栗縣與宜蘭縣交界的山區，以及花蓮縣、嘉義縣、臺南縣等地，卻出現增長訊號，且同樣只有少數區域達到統計顯著。當比較正相位與負相位的差異（圖 8d），可以更明顯看出東部區域（特別是花蓮與臺東交界處）對 PMM

正相位增幅較為敏感；然而，與前述對最高溫與年熱浪頻率的合成分析相比，PMM 在熱浪長度上的增幅並沒有同樣強烈且廣泛的表現。總結而言，雖然 PMM 正相位明顯增加了熱浪事件的發生頻率與最高溫度，但熱浪長度則呈現出更高的空間變異，部分區域（特別是東部山區）才有較顯著增長跡象。在綜合考量前幾個合成結果後，推測 PMM 正相位可促使夏季熱浪在臺灣更頻繁發生，但其對個別地區熱浪長度

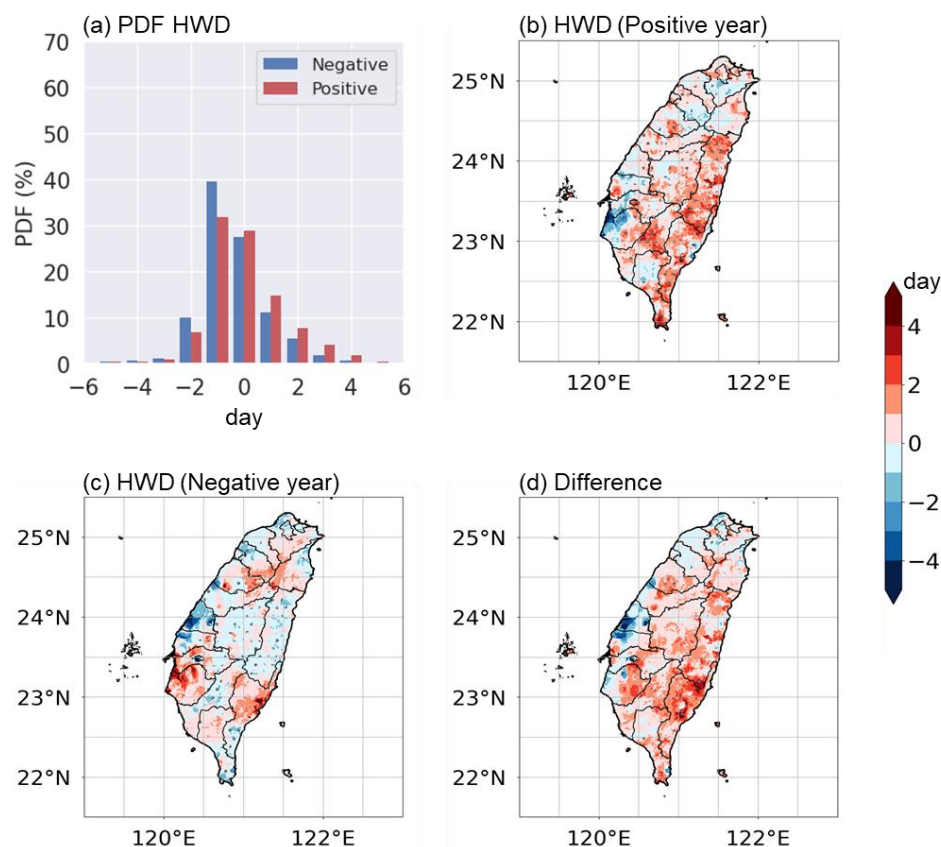


圖 8：代表 PMM 在正相位與負相位時，臺灣夏季每次熱浪持續天數之比較。(a) 為每次熱浪持續天數之機率分佈圖 (probability distribution function; PDF)。(b) PMM 正相位時，每次熱浪持續天數之合成分析。(c) PMM 負相位時，每次熱浪持續天數之合成分析。(d) 每次熱浪持續天數合成分析在 PMM 正相位與負相位時之差異 (PMM 正相位減去 PMM 負相位)。

影響並非穩定一致，可能還需考慮更多區域因素的綜合作用，才可完整瞭解各地熱浪持續時間的變異。

我們進一步分析了熱浪強度(HWM; 每起熱浪的強度)，即超過熱浪門檻值的最高氣溫，並進行合成分析。在圖 9a 中，我們觀察到，代表正相位的紅色長條與代表負相位的藍色長條之間的分布差異，並未如先前分析般呈現出「正相位較強」的明顯趨勢。相反地，PMM 正相位年熱浪強度的分布更趨向於中間區間 ($0\sim0.5^{\circ}\text{C}$)，甚

至低於 PMM 中立年。此外，在極端值方面，PMM 正相位年的熱浪強度最多僅增加約 1°C ，並未超過負相位年。從 PMM 正相位年的熱浪強度空間分布(圖 9b)來看，熱浪強度增加的區域相對有限，主要集中在臺灣中南部山區，如南投縣、嘉義縣、高雄市等地，此外，宜蘭縣與臺東縣部分地區也有些微增強。然而，其他地區的熱浪強度則呈現下降趨勢，其中新竹市最為明顯。另一方面，在 PMM 負相位年(圖 9c)，全臺超過一半的區域熱浪強度下降，

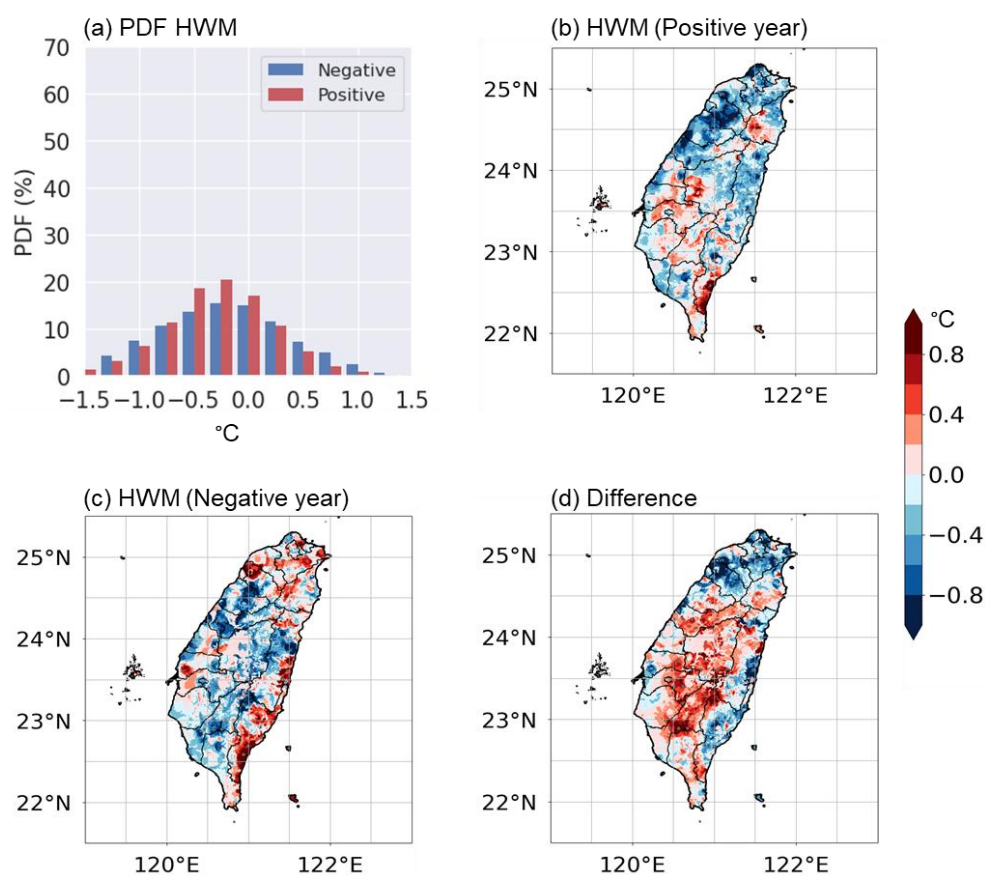


圖 9：代表 PMM 在正相位與負相位時，臺灣夏季 HWM 之比較。(a) 為每次 HWM 之機率分佈圖 (probability distribution function; PDF)。(b) PMM 正相位時，每次熱浪強度之合成分析。(c) PMM 負相位時，每次 HWM 之合成分析。(d) 每次 HWM 合成分析在 PMM 正相位與負相位時之差異 (PMM 正相位減去 PMM 負相位)。

但部分區域卻出現熱浪溫度增強的現象，主要分布於北部地區及東部沿海。無論是 PMM 正相位還是負相位，幾乎全臺的熱浪強度變化均未通過統計檢定，顯示 PMM 不同相位下熱浪強度的變化不穩定。在正負相位的差異分布圖（圖 9d）中，PMM 正相位時熱浪強度較高的區域主要集中於中南部山區，包括臺中市、南投縣、雲林縣、嘉義縣、臺南市及高雄市等地；相對地，北部及部分東部沿海地區則呈現熱浪溫度下降的趨勢。綜合以上分析結果，PMM 對臺灣熱浪強度的影響並不顯著，且在不同相位下的變化不穩定，顯示其影響可能較為區域化，或受其他因素調控。

從前述的合成分析結果可見，PMM 對臺灣夏季熱浪的不同特徵影響程度不一。其中，熱浪的年發生天數對 PMM 的響應最為敏感，在 PMM 正相位時，幾乎全臺

各地的熱浪天數皆顯著增加。其次是熱浪的持續時間，雖然 PMM 正相位期間大部分區域的熱浪持續時間呈增長趨勢，但相較於發生天數，變化幅度較小。至於熱浪強度，PMM 的影響較為隨機，未呈現明顯趨勢。為了更全面量化 PMM 對臺灣熱浪的影響，我們進一步進行迴歸與散布圖分析（圖 10）。從迴歸斜率來看，熱浪年發生天數與 PMM 之間的迴歸係數最高，迴歸線的斜率最大。相關性方面，熱浪年發生天數與 PMM 指數的相關性最高，達 0.41，且 P 值小於 0.1，通過統計檢定。熱浪持續時間與 PMM 的相關性次之，整體相關性僅 0.14，且 P 值大於 0.1，未達統計顯著水準。最後，熱浪強度與 PMM 的迴歸係數最低，相關性僅 0.05，未通過統計檢定。這些結果與先前的合成分析相互印證，顯示 PMM 正相位時會營造有利於熱浪發生

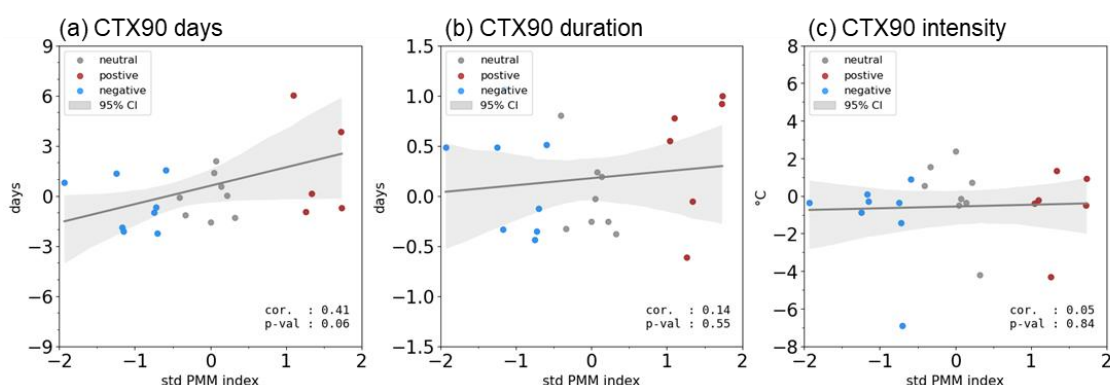


圖 10：臺灣夏季熱浪每年總天數、每次持續時間、每次平均強度與標準化 PMM 指數之間的散布關係。灰色圓點為 PMM 中立年、紅色圓點為 PMM 正向為年、藍色圓點代表 PMM 負相位年，圓點在 (a) 為熱浪每年總天數、(b) 為每次持數時間、(c) 為每次平均強度，單位： $^{\circ}\text{C}$ 。灰色陰影為 95%信賴區間（Confidence Interval；CI）。

的環境，使熱浪天數顯著增加，並可能導致單次熱浪的持續時間略微延長。然而，PMM 所引發的熱浪並不一定比其他年份的熱浪更強，顯示其對熱浪強度的影響較不明顯。

五、總結與討論

本研究結合 1998 – 2022 年臺灣中央氣象署網格化觀測資料，以及 NOAA 發布之 PMM 指標，探討 PMM 對臺灣夏季溫度與熱浪的年代際尺度影響。結果顯示，PMM 增強時，全臺平均溫度普遍上升，尤以北部與西部地區最為明顯；經驗正交函數分析亦指出，第一模態的溫度分布與 PMM 引起的升溫型態高度吻合，驗證了 PMM 作為大型氣候變異源，可在年代際尺度上主導臺灣的氣溫變化。利用 ERA5 再分析資料的環流剖析進一步顯示，PMM 正相位時，東太平洋形成「靴型」海溫增溫模式 (PMMa 模態)，帶動東太平洋上空輻散氣流向西延伸，並在西太平洋地區(包括臺灣附近)形成輻合下沉，致使大氣穩定度上升，不易成雲致雨，令地表更容易接收來自太陽的短波輻射，並促進全臺的溫度增高。

針對熱浪的分析顯示，PMM 正相位時，臺灣年熱浪頻率 (HWN) 顯著增加，熱浪長度 (HWD) 略有延長，但熱浪強度 (HWM) 與 PMM 之間的相關性相對較

低。此結果代表 PMM 主要提升熱浪頻率與熱浪長度，而不一定直接提高極端高溫的強度。

然而，本文仍存在幾項研究限制：首先是資料時程及穩定性：第一，目前僅使用 1998–2022 年間共 25 年的觀測網格資料，而 PMM 屬於數十年尺度的變異，本研究時段僅包含一次正相位與兩次負相位，樣本量偏低可能影響統計穩定性，亦導致部分分析結果未能在全臺範圍內通過統計檢定。未來若能延長研究時序，或利用其他長期氣象資料，將能更全面客觀地評估 PMM 與臺灣熱浪之間的關係並提高統計檢定可信度。第二，本研究主要聚焦於日間最高溫度，並未針對日夜溫度分開進行討論，然而，在 PMM 和最低溫度的關係分析中 (圖 5)，我們了解到 PMM 事實上和最低溫度也存在著穩定的正相關，尤其夜間最低溫度的提升同樣對人體健康與生態系統具重大影響，包括住院率、死亡風險、植被生長及碳循環等均有潛在衝擊，加之全球暖化具有日夜不對稱的特性 (像是夜間升溫常快於白天)，後續研究可納入夜間熱浪指標，並考量日夜溫度皆有可能致使更廣泛的災害風險與生態衝擊。第三，PMM 增強所引發的增溫效應呈現明顯的區域差異。分析結果顯示，在 PMM 正相位期間，中南部高山地區的熱浪頻率顯著

上升，高於其他區域。儘管 PMM 主要透過大尺度環流調變影響整個臺灣，其實際氣候反應卻具區域性差異，反映出各地區的地形特徵、土地利用型態與氣候條件對 PMM 影響力的調節作用。最後，則是在氣候模式應用及預測策略上，臺灣地形複雜且面積狹小，現行全球或區域氣候模式的氣候預報資訊經常受限於解析度的不足，無法直接提供臺灣區域應用可使用的資料。因此，若能在動力或統計模式中納入 PMM 與臺灣熱浪之間的經驗關係，藉由氣候模式模擬的 PMM 大尺度海溫距平模態資訊，有望改善台灣近期氣候預報如年代際預報的準確度，為中長期防災規劃、能源調度及農業管理提供更具體的科學依據。

整體而言，PMM 在年代際的尺度上，對台灣的夏季溫度有相當大的影響力，未來若能針對模式預測應用進行更深入探討，不僅能更加完善對臺灣極端高溫在未來變化的理解，也能增進年代際預測及防災調適的效益，協助臺灣社會在面對全球暖化及極端氣候威脅時，更具前瞻性地規劃應對策略。

致謝

感謝許晃雄教授及兩位審閱委員對本研究提供的寶貴建議與回饋，以及交通部中央氣象署海象氣候組資料管理科提供臺

灣網格分析資料。本論文是在科技部/國科會專題計畫（113-2111-M-002-016-、113-2111-M-001-009-）支持下進行。本論文部份內容取自第一作者在臺灣大學氣候變遷與永續發展學位學程的碩士論文。

六、參考文獻

- Chen, J.-M., Lu, F.-C., & Shih, C.-F. (2008). Decadal Oscillation of Fall Temperature in Taiwan. *TAO*, **19**(5). [https://doi.org/10.3319/TAO.2008.19.5.497\(A\)](https://doi.org/10.3319/TAO.2008.19.5.497(A))
- Chiang, J. C., & Vimont, D. J. (2004). Analogous Pacific and Atlantic meridional modes of tropical atmosphere-ocean variability. *J. Clim.*, **17**(21), 4143-4158. <https://doi.org/10.1175/JCLI4953.1>
- Dunstone, N., Lockwood, Julia, Solaraju-Murali, Balakrishnan, Reinhardt, Katja, Tsartsali, Eirini E, Athanasiadis, Panos J, Bellucci, Alessio, Brookshaw, Anca, Caron, Louis-Philippe, Doblas-Reyes, Francisco J. (2022). Towards useful decadal climate services. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **103**(7), E1705-E1719. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-21-0190.1>

- Goddard, L. (2016). From science to service. *Science*, **353**(6306), 1366-1367. <https://doi.org/10.1126/science.aag3087>
- Hannachi, A., Jolliffe, I. T., & Stephenson, D. B. (2007). Empirical orthogonal functions and related techniques in atmospheric science: A review. *Int. J. Climatol.*, **27**(9), 1119-1152. <https://doi.org/10.1002/joc.1499>
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., & Schepers, D. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Hong, C.-C., Lee, M.-Y., Hsu, H.-H., & Tseng, W.-L. (2018). Distinct influences of the ENSO-like and PMM-like SST anomalies on the mean TC genesis location in the western North Pacific: The 2015 summer as an extreme example. *J. Clim.*, **31**(8), 3049-3059. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0504.1>
- Kao, P.-k., Hong, C.-C., Huang, A.-Y., & Chang, C.-C. (2022). Intensification of Interannual Cross-Basin SST Interaction between the North Atlantic Tripole and Pacific Meridional Mode since the 1990s. *J. Clim.*, **35**(18), 5967-5979. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-21-0594.1>
- Rayner, N. A., Parker, D. E., Horton, E., Folland, C. K., Alexander, L. V., Rowell, D., Kent, E. C., & Kaplan, A. (2003). Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century. *J. Geophys. Res.*, **108**(D14). <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2002JD002670>
- Song, J., Klotzbach, P. J., Wang, Y. F., & Duan, Y. (2023). Asymmetric influence of the Pacific meridional mode on tropical cyclone formation over the western North Pacific. *Int. J. Climatol.*, **43**(14), 6578-6589. <https://doi.org/10.1002/joc.8220>

- Trenberth, K. E., Marquis, M., & Zebiak, S. (2016). The vital need for a climate information system. *Nat. Clim. Change*, **6**(12), 1057-1059. <https://doi.org/10.1038/nclimate3170>
- Tsai, C.-T., Wang, Y.-C., Tseng, W.-L., & Chiang, L.-C. (2025). Pacific Meridional Mode Implicated as a Prime Driver of Decadal Summer Temperature Variation over Taiwan. *J. Clim.*, **38**(8), 1881-1894. <https://doi.org/https://doi.org/10.1175/JCLI-D-23-0734.1>
- Tseng, W.-L., Lin, S.-Y., Wang, Y.-C., Lo, S.-H., Lo, M.-H., Lee, S.-Y. L., Tsai, C.-T., & Hsu, H.-H. (2023). Impact of Pacific–Japan pattern on temperature and heatwave events in summer over Taiwan. *Int. J. Climatol.*, 1-15. <https://doi.org/10.1002/joc.8252>
- Wu, Y.-c., Chu, J.-L., & Yu, Y.-C. (2020). Climatology and the Interannual Variability of the High-Temperature Extremes in Taiwan. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **125**(3), e2019JD030992. <https://doi.org/10.1029/2019JD030992>
- 中央氣象署. (2023). 中央氣象署產品說明文件氣候觀測溫度網格資料. https://www.cwa.gov.tw/Data/data_catalog/2-3-7.pdf
- 許晃雄，王，王柳臻，吳威德，李欣輯，李思瑩，李時雨，林子平，林靜君，侯清賢，涂柏安，施意敏，洪若雅，洪景山，紀佳法，張雅惠，陳正達，陳永明，陳保中，陳昭安，陳家琦，曾品涵，童裕翔，黃文亭，楊曜旭，劉曉薇，歐姿辰，蔡至恒，盧韻存，駱世豪，謝章生，闕帝旺，羅資婷. (2024). 臺灣氣候變遷分析系列報告(暖化趨勢下的臺灣極端高溫與衝擊), Issue.

Decadal Link Between the Pacific Meridional Mode and Taiwan's Summer Heatwaves

Chieh-Ting Tsai¹ Yi-Chi Wang² Wan-Ling Tseng³

Min-Hui Lo⁴ Chi-Cherng Hong⁵ Tzu-Ting Lo⁶

¹ International Degree Program in Climate Change and Sustainable Development,
National Taiwan University, Taipei, Taiwan

² Swedish Meteorological and Hydrological Institute Ocean, Sweden

³ Ocean Center, National Taiwan University, Taipei, Taiwan

⁴ Department of Atmospheric Sciences, National Taiwan University, Taipei, Taiwan

⁵ Department of Earth and Life Sciences, University of Taipei, Taipei, Taiwan

⁶ Marine Meteorology and Climate Division, Central Weather Administration, Taipei,
Taiwan

(manuscript received 26 February 2025; in final form 30 June 2025)

Abstract

With the intensification of global climate change, the frequency and intensity of summer heatwaves in Taiwan have been increasing, posing significant risks to public health and social stability. Understanding the decadal variability of heatwaves is essential for developing long-term adaptation strategies. The Pacific Meridional Mode (PMM) is a decadal-scale climate variability characterized by north-south SST anomalies in the eastern Pacific. Studies indicate that an intensified PMM is associated with more frequent and severe extreme heat events in parts of Asia, along with a significant rise in Taiwan's summer temperatures on a decadal scale. However, the relationship between PMM and heatwaves in Taiwan remains largely unexplored.

This study investigates the connection between PMM and Taiwan's summer temperatures, analyzing the underlying physical and dynamical mechanisms. The results reveal that PMM plays a crucial role in decadal variations of Taiwan's summer climate. When PMM strengthens, ascending air over the eastern Pacific induces upper-level divergence, triggering westward-propagating circulation anomalies that descend near 120°E in the western Pacific. This leads to stable, dry conditions over Taiwan, increasing solar shortwave radiation and surface warming.

Furthermore, during the positive phase of PMM, heatwave frequency and duration also increase. These findings enhance our understanding of decadal-scale summer temperature variability in Taiwan and provide critical insights for policymakers and climate adaptation planning.

Keywords: Pacific Meridional Mode, decadal summer temperatures variation, heatwaves, teleconnection. doi: 10.53106/025400022025095302001

*Corresponding author: Chieh-Ting Tsai (E-mail: k2175379yy@gmail.com)