

夏季西北太平洋副熱帶高壓次季節 異常的大氣低頻演變特徵

黃麗娜^{1,3*} 陳佳東¹ 陳詩琳² 鮑瑞娟^{3,4}

福建省莆田市氣象局¹

福建省莆田市涵江區氣象局²

中國氣象局海峽災害天氣重點開放實驗室³

福建省災害性天氣重點實驗室⁴

(中華民國 114 年 1 月 22 日收稿；中華民國 115 年 6 月 4 日定稿)

摘要

本文應用 NCEP/NCAR 再分析資料以及 Hadley 中心提供的海表溫度資料，運用擾動法、功率譜及超前滯後合成分析等方法，統計 1979-2022 年夏季西北太平洋副熱帶高壓（副高）次季節變化特徵及其異常的前期海溫背景，比較不同 El Niño–Southern Oscillation(ENSO)背景下持續性副高異常個案大氣環流演變特徵的差異，主要結論如下：

（1）夏季副高次季節變化存在 10-30 天和 30-90 天顯著週期振盪，2 個週期的年振盪強度有較高距平同號率和明顯的年代際變化特徵；夏季副高 10-30 天和 30-90 天振盪異常的大部分年份為 ENSO 異常衰減年，包括中太平洋（central Pacific，CP）型 El Niño、東太平洋（eastern Pacific，EP）型 El Niño 和 EP 型 La Niña。（2）3 種 ENSO 異常衰減年夏季持續性副高異常個案均表現為副高活躍期低頻反氣旋面積明顯加大和脊點西伸、副熱帶地區上下層一致的垂直運動週期振盪且副高低頻週期振盪與熱帶低頻對流北傳有關等共同特徵。（3）3 種 ENSO 異常年持續性副高異常個案的差異主要體現在副高活躍期低頻反氣旋脊線位置差異、熱帶對流和中高緯位勢高度等低頻擾動信號及傳播對副高活躍和間歇的作用差異、120-150°E 區域的垂直運動強度、範圍等低頻垂直經圈環流結構差異。（4）關於夏季副高異常的次季節預報，除了關注熱帶對流北傳外，CP 型 El Niño 和 EP 型 El Niño 衰減年熱帶對流緯向傳播、CP 型 El Niño 和 EP 型 La Niña 衰減年中高緯擾動低頻訊號需要關注；CP 型 El Niño 衰減年異常高溫 and 華南至閩贛地區暴雨、EP 型 El Niño 衰減年季風槽活躍、群發颱風以及江淮暴雨、EP 型 La Niña 衰減年華南暴雨等夏季持續性異常天氣過程需要關注。

關鍵字：副熱帶高壓、低頻振盪、ENSO、熱帶對流、持續性過程

*通訊作者：黃麗娜（lenah@163.com）

一、前言

西北太平洋副熱帶高壓（簡稱副高）是東亞季風系統的主要成員，其強度和位置對東亞天氣及氣候異常的重要性已成為共識，其中，副高次季節異常是中國夏季持續性高衝擊天氣關鍵影響因素，近 10 年夏季中國頻繁發生的持續性高衝擊天氣事件均離不開副高季節或次季節變化的影響，如：2016 年 6-7 月長江流域降水異常偏多和 2017 年夏季持續性高溫過程與該年副高次季節變化有密切關係（袁媛等 2017; 鄭志海、王永光 2018）；2019 年華南雨季較常年明顯偏長且出現了多場持續性暴雨，副高階段性偏強及偏西與階段性強降水過程有很好的對應關係（丁婷、高輝 2020）；2020 年夏季降水分型異常，長江流域降水異常偏多，華南高溫及夏秋連旱，副高季節性異常和明顯的準雙週振盪（quasi-biweekly oscillation, QBWO）在其中扮演重要角色（劉芸芸、丁一匯 2020；劉芸芸等 2021）；2021 年 7 月河南持續性極端特大暴雨事件及 8 月份的“倒黃梅”、2022 年 6 月中旬華南極端持續性降水等事件均與副高西伸脊點及脊線位置的季節內振盪有直接關係（孟慶濤、于超 2022; 章大全等 2023; 趙俊虎等 2022）。開展副高次季節變化特徵及成因研究，有

助於捕捉副高異常的前期訊號，掌握持續性極端事件的次季節尺度背景，完善次季節預報的技術手段，提高持續性天氣事件的預報準確率。

過去已有許多研究分析了副高的次季節變化特徵。早在上個世紀 90 年代的研究就已經發現副高具有 QBWO 特徵（張韌、喻世華 1992; 錢貞成、喻世華 1991）；本世紀以來的研究進一步證實了副高的次季節變化特徵，Guan et al. (2018) 之研究發現副高東西變動的次季節特徵及東西變化的動力過程，Qian、Shi (2017) 的統計再次發現副高東西變化的 QBWO 特徵，Mao et al. (2010) 發現副高 20-50 天振盪特徵；觀測事實也證明了副高的次季節變化特徵，次季節變化較季節以上尺度變化更加顯著，是副高變化的最主要特徵之一，副高甚至不會持續某一狀態超過一個月（Yeo et al. 2012）。

關於副高次季節變化的影響因素，吳國雄等 (1999)；劉屹岷等 (1999)；劉屹岷等 (2001) 研究認為，空間非均勻加熱是決定副高位置和強度的關鍵因素，其機制並非是局地哈得萊環流（Hadley Circulation）加強，而是 f 效應和 β 效應使加熱區北側出現附加的負渦度源所致。吳國雄等 (2003)、Liu et al. (2001) 通過數值模擬方法得出，熱帶和副熱帶地區正海表溫度異

常 (Sea Surface Temperature Anomaly, SSTA) 區域的東部會出現副高異常, SSTA 引起的副高異常在次季節至年際尺度上都有影響。研究發現能夠影響副高異常的熱源關鍵區包括: 青藏高原可感熱加熱 (王靜文等 2021; 吳國雄等 1999; 李春暉等 2019; 陳月娟等 2001; 孫國武、陳葆德 1988; 彭玉萍等 2012; 鞏遠發、紀立人 1998; 鞏遠發 2014)、赤道中太平洋 (李熠等 2010; 陳迪等 2013)、大西洋 (Lyu, Yu 2017)、印度洋 (容新堯等 2010; 蘇同華等 2017; Chen et al. 2015; Hong et al. 2014; Qian, Shi 2017; Wu et al. 2025)、孟加拉灣等區域的海溫異常以及東亞季風區的對流凝結加熱 (吳國雄等 2003; Liu et al. 2001)。

El Niño–Southern Oscillation (ENSO) 是影響副高變化最受關注的熱源關鍵區, 統計分析和模式試驗結果表明: 在 El Niño 發展年夏季 8 月副高緯向活動異常, La Niña 發展年夏季 7 月副高經向活動異常 (Xue, Zhao 2017; Xue, Dong, Fan 2018); El Niño 發展年夏季副高次季節活動的主控週期 (dominant period) 為 20-40 天, La Niña 發展年主控週期為 40-70 天 (Li et al. 2020; Liu et al. 2016)。然而, 上述研究成果主要為 ENSO 發展年的副高次季節變化特徵, 目前關於副高次季節異常的前期海

溫背景的研究成果很少, 少量研究認為, 與發展年相比, El Niño 衰減年夏季西太平洋上空對流往西北傳的現象不明顯 (Lee et al. 2022), 副高次季節異常的預報缺乏基礎的統計支撐。

除熱源因素外, 中高緯環流異常、“絲綢之路”波列、太平洋-日本型遙相關 (Pacific-Japan teleconnection pattern, P-J) 波列、北半球夏季大氣季節內振盪 (the Boreal Summer Intraseasonal Oscillation, BSISO)、東亞季風雨帶的回饋作用、南半球系統等也是影響夏季副高次季節變化的因素。其中, 中高緯環流方面, 亞洲北部阻塞高壓通過西風帶基本氣流及長波系統的螺旋結構的變化激發 Rossby 波的經向傳播, 從而影響副高的南北進退 (李峰等 2006); 副高北抬前, 亞洲中高緯地區呈正負波列, 隨後向下游傳播, 當波列的正相位傳播至沿海時, 副高北抬 (Tao, Wei 2006; Xue, Fan 2016); 「絲綢之路」波列的反氣旋相位東傳至副熱帶地區時, 副高加強西伸 (Lu, Oh, Kim 2002; Yang et al. 2014); 南亞高壓東西振盪方面, 副高緯向運動與南亞高壓存在“相向而行背道而馳”的規律 (陶詩言、朱福康 1964; 雷顯輝等 2022)、PJ 波列或熱帶大氣低頻振盪的正相位傳播至西北太平洋地區時, 副高加強西伸 (黃榮輝、嚴邦良 1988; Lee et al. 2013; Nitta,

1987; Waliser, 2006); BSISO 對副高次季節變化的影響主要表現為當源自赤道印度洋的低頻對流傳播至菲律賓至南中國海上空(即第 2-3 相位)時,西北太平洋上空為低頻反氣旋性環流異常,當其傳播至西北太平洋上空(即第 6-7 相位)時,西北太平洋上空為低頻氣旋性環流異常(王熙喬等 2023; Lee et al. 2013)。但 BSISO 傳播較為複雜,一方面,其在 El Niño 發展(衰減)年夏季對流的組織性及北傳現象明顯(不明顯)(Lee et al. 2022);另一方面,其傳播方向有多種分型,包括東北傳播型、向北傳播偶極子型和向東擴展型,BSISO 影響副高次季節變化還受到 BSISO 環流結構、水汽傳輸特點、Rossby 波分量和 Kelvin 波分量的強弱對比等多種因素制約(Chen, Wang 2021)。以上關於副高次季節變化特徵及成因的研究成果表明副高次季節變化存在多尺度特徵,既有準雙週,也有 20-50 天,其影響因素是多方面的且影響過程複雜。上述文獻中關於影響因素的研究方案主要有三種,一是通過理論方程和數值模擬得到副高變化的影響因素,該方案是認識和理解副高次季節變化的理論基礎,但計算步驟複雜,預報時效跨度大,從 10 天至 24 個月,業務適用性不強;第二種是在異常持續性天氣過程的成因研究中發現該天氣事件的某個發展階段伴隨

副高持續異常,間接得到副高異常的影響因素;第三種是在大氣低頻活動如 BSISO 傳播特徵及成因的研究中,發現低頻擾動傳播伴隨副高週期性振盪,該方法被認為是當前副高次季節變化可預報性的主要訊號來源,但 BSISO 傳播的複雜性導致應用該指數預報副高次季節異常仍存在挑戰。直接通過副高低頻指數、對持續性副高異常個案按其發展階段研究副高低頻變化的影響因素的研究方法,目前這方面的文獻比較少。為了瞭解副高次季節變化更全面特徵,便於下一步客觀化業務應用,本文直接從逐日副高強度指數入手,分析副高次季節變化統計特徵,歸納副高次季節異常的前期背景,通過持續性副高異常事件的大氣要素低頻演變特徵,分析副高次季節異常的成因,以期為夏季副高次季節異常的氣候預測及次季節天氣客觀化預報提供參考資訊。

二、資料與方法

本文使用的資料包括:美國國家環境預報中心和美國國家大氣研究中心(National Center for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research, NCEP/NCAR)發佈的大氣環流第二代逐日再分析資料,包括:高度場、風場,空間解析度 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$;美國國家海洋

和大氣管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)經過插值的逐日大氣外逸長波輻射(Outgoing Longwave Radiation, OLR)數據(<https://www.psl.noaa.gov/data/gridded/data.olrcdr.interp.html>), 空間解析度 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$; 月海溫資料選自英國氣象局 Hadley 中心(www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadisst) 的 HadISST1, 空間解析度 $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$ 。以上大氣要素資料年限為 1979-2022 年, 海溫資料年限為 1978-2022 年。

逐日副高指數計算方案: 參照劉芸芸等(2012)的高度值法, 計算逐日 10°N 以北、 $110^{\circ}\text{E} \sim 180^{\circ}$ 範圍內 500 百帕位勢高度場上所有位勢高度不小於 5880 位勢米(gpm)的格點圍成的面積與該點位勢高度減去 5870gpm 差值的乘積的總和。

為了突出副高次季節變化的影響, 本文參照擾動法思路(錢維宏, 2012), 用逐日副高指數與常年(1981-2020 年)平均逐日指數的差值, 即逐日指數距平值做各項統計。

週期分析: 採用功率譜分析副高指數的週期特徵。具體做法: 將每年 5 月 1 日至 10 月 31 日的逐日副高指數與前一年的逐日副高指數相接, 即依 1979 年 5 月 1 日、5 月 2 日...1979 年 10 月 31 日、1980

年 5 月 1 日、5 月 2 日...2022 年 10 月 31 日的時間順序形成夏季副高指數序列, 再進行功率譜分析。對年份不連續的序列, 上述方法同樣適用(紀忠萍等 2012; 陳思等, 2017)。

濾波: 採用 Lanczos 濾波器對逐日副高指數及大氣環流要素場的每個格點分別做帶通濾波, 得到逐日副高低頻指數序列和逐日大氣要素低頻場(魏鳳英, 1999)。濾波後, 低頻序列值的時間演變呈有正負的正弦或餘弦波形分佈。目前次季節無縫隙預報業務將預報時效按 10-30 天和 30-90 天兩個尺度劃分, 因此, 本文按 10-30 天和 30-90 天兩種週期做帶通濾波, 並以此討論副高次季節變化特徵。

年副高次季節變化(低頻振盪)強度: 定義某年夏季逐日副高低頻指數的標準差為該年副高次季節變化強度; 用累積距平和九點平滑分析副高低頻變化強度的年代際變化特徵, 具體做法如下: 對於樣本長度為 n 的年底頻變化強度序列 y , 其在第 t 年的累積距平表示為:

$$\hat{Y}_n = \sum_{i=1}^t (y_{i-} - \bar{y}) \quad (i = 1, 2, 3, \dots, t) \quad (1)$$

式中, $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$

累積距平是一種常用的、可以由曲線直觀判斷變化趨勢的方法。將 n 個時刻的累積距平全部算出後, 繪出累積距平曲

線。累積距平曲線呈上升趨勢，表示距平值持續為正；呈下降趨勢則表示距平值持續為負。從曲線明顯的上下起伏，可以判斷其長期顯著的演變趨勢及持續性變化，甚至還可以診斷出發生突變的大致時間，從曲線小的波動變化可以考察其短期的距平值變化(魏鳳英，1999)。

次季節變化（低頻振盪）異常年：參考中華人民共和國半年以上氣象要素等級評價標準(GB/T 34412-2017)，將副高年低頻振盪強度距平超過+0.5 倍標準差的年份定義為低頻振盪異常年。

夏季持續性副高異常過程：指 5-9 月副高日低頻指數超過 1 倍標準差且持續 5 天以上的天氣過程。由於持續天數低於 5 天的過程造成的影響較弱，因此本文對不同低頻週期異常年份均採用連續 5 天的篩

選標準；參考趙佳瑩等 (2021)關於異常持續性天氣事件的判定標準，將異常指標定為超過 1 倍標準差。鑒於後文分析副高異常過程的大氣低頻演變特徵時，需要對大氣環流場做超前滯後合成分析，為了保證合成的時間位於 5-9 月，挑選過程時，過程起止時間定為每年的 6 月 1 日至 8 月 31 日。

持續性副高異常過程發展的 5 個階段：先根據上述定義挑選出異常過程，接著對每個過程做階段劃分。經過 Lanczos 濾波後的副高日指數呈正（餘）弦的波形分佈，一個完整週期為 360° ，以 60° 為一個階段劃分，按圖 1 所示將過程劃分為 5 個階段：假設持續性過程中副高指數最大值为 I_{max} ， I_{max} 前的第一個副高指數最小值为 I_{min-1} ， I_{max} 後的第一個副高指數最小值为 I_{min+1} 。

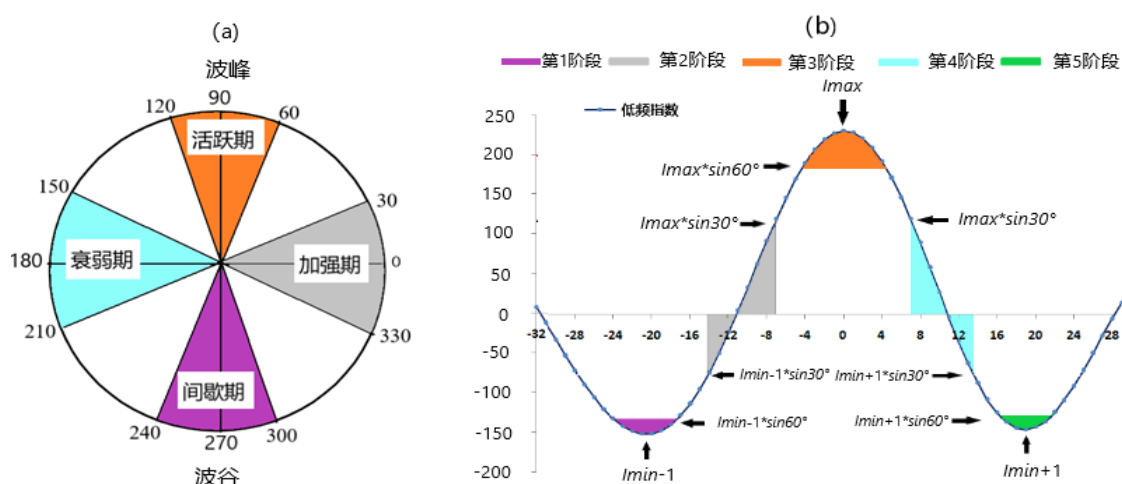


圖 1：持續性副高異常過程 5 個階段劃分標準示意圖（a：副高發展階段對應的圓周方位角；b：5 個階段劃分標準示意圖，橫坐標：時間，0 天表示低頻指數最高值所在日期，負數表示日期超前 0 天的日數，正值表示日期滯後 0 天的日數；縱坐標：低頻指數）。

為 I_{min+1} , 定義副高指數大於 $I_{max} \times \sin 60^\circ$ 的時段為活躍期, 用“第 3 階段”表示(對應圖 1a 中橙色區域, 圖 1b 中 -4 至 4 日); 副高指數小於 $I_{min-1} \times \sin 60^\circ$ 和 $I_{min+1} \times \sin 60^\circ$ 的時段為副高間歇期, 活躍期前的間歇期, 用“第 1 階段”表示(對應圖 1a 中紫色區域, 圖 1b 中 -18 至 -24 日), 活躍期後的間歇期用“第 5 階段”表示(圖 1b 中綠色區域, 16 至 22 日); 副高指數由 $I_{min-1} \times \sin 30^\circ$ 上升至 $I_{max} \times \sin 30^\circ$ 的時段為加強期, 用“第 2 階段”表示(圖 1a 中灰色區域, 圖 1b 中 -7 至 -14 日); 副高指數由 $I_{max} \times \sin 30^\circ$ 下降至 $I_{min+1} \times \sin 30^\circ$ 的時段為衰弱期, 用“第 4 階段”表示(圖 1a 中藍色區域, 圖 1b 中 7 至 13 日)。每個階段之間有 30° 間隙, 間歇時間較短, 篇幅所限, 本文不對這 4 個空檔期做分析。當然, 實際天氣過程的低頻指數時間演變不可能如圖 1b 呈現近乎完美的正餘弦分佈, 但持續性過程按間歇期、加強期、活躍期、衰弱期和再次間歇期等 5 個階段的規律演變是普遍存在的。

ENSO 事件定義標準: 採用 Zhang et al. (2019) 定義的 unified complex ENSO index (UCEI) 定義 ENSO 事件。UCEI 指數相比傳統指數能較好地區分中太平洋型和東太平洋型 ENSO。首先計算出 Niño3 區(150°W , 5°S – 5°N)和 Niño4 區(160°E – 150°W ,

5°S – 5°N)的月平均海表溫度異常, 分別記為 $N3$ 和 $N4$ 。定義 $r = \sqrt{(N3 + N4)^2 + (N3 - N4)^2}$, $N3 + N4 > 0$ 且 $N3 - N4 > 0$ 則為東太平洋 (Eastern Pacific, EP) 型 El Niño, $N3 + N4 > 0$ 且 $N3 - N4 < 0$ 為中太平洋 (Central Pacific, CP) 型 El Niño。 $N3 + N4 < 0$ 且 $N3 - N4 < 0$ 則為 EP 型 La Niña, $N3 + N4 < 0$ 且 $N3 - N4 > 0$ 為 CP 型 La Niña。這裡忽略了混合型的分類。由於 Zhang et al. (2019) 未定義季節尺度 ENSO 事件及強弱標準, 為此, 本文另外參考畢成祥等 (2023) 的標準, 定義 r 值連續三個月大於一個標準差為一次 ENSO 事件, 用 Niño3 指數表徵 EP 型 ENSO 強度, 用 Niño4 指數表徵 CP 型 ENSO 強度, 對同類 ENSO 事件年的 11 月至次年 2 月 Niño 指數分別取平均, Niño 指數超過 (低於) 同類事件年的平均值定義為強年 (弱年)。

三、夏季副熱帶高壓次季節振盪特徵

圖 2 為 5 月 1 日至 9 月 30 日副高強度指數的功率譜分析, 可以看出, 副高強度指數有明顯的季節內週期振盪, 既有 10-30 天顯著週期, 也有 30-90 天顯著週期。

圖 3 為 1979-2022 年副高強度指數 10-30 天和 30-90 天低頻振盪強度距平、低

頻振盪強度累積距平和低頻振盪強度距平 9 年滑動平均曲線。由圖 3 可以看出副高強度低頻變化呈現明顯的年代際特徵。30-90 天振盪累積距平曲線在 1979-1984 年呈上升走向，表明 1980-1983 年持續偏強，1984-2012 年曲線呈下降趨勢，表明該時段持續偏弱；2013 年開始曲線呈上升走向，表明 2013 年後副高持續偏強，偏強趨勢至今未減。30-90 天振盪強度的九年滑動平均曲線與累積距平曲線呈現的年代際特徵與累積距平曲線相近：1983-1988 年曲線呈下降趨勢，1988 年降低至最低點後至 2005 年曲線變化平緩，2006 年起呈明顯上升趨勢；1985 年 9 年滑動平均值由正值轉為負值，此後至 2011 年持續維持負值，2012 年開始轉為正值；9 年滑動平均

曲線的上述特徵進一步表明上世紀 80 年代至本世紀初副高低頻振盪持續偏弱，1984-1985 和 2011-2012 為副高低頻振盪強弱的拐點等年代際變化特徵。10-30 天變化與 30-90 天大致相似，也是在近 10 年開始增強，但開始年份較 30-90 天早，從 2009 年開始。從圖 3a 還可以看出，10-30 天和 30-90 天振盪強度有較高的距平同號率，44 年中共有 35 年距平同號，同號率高達 79.5%。

上述分析可見，副高次季節變化總體上存在 10-30 天和 30-90 天的週期振盪，但不同年份振盪強度差別很大。為了釐清其年際特徵，下面對 10-30 天和 30-90 天振盪異常的年份分別分析其海洋背景，對 30-90 天振盪異常年份的持續性過程分析

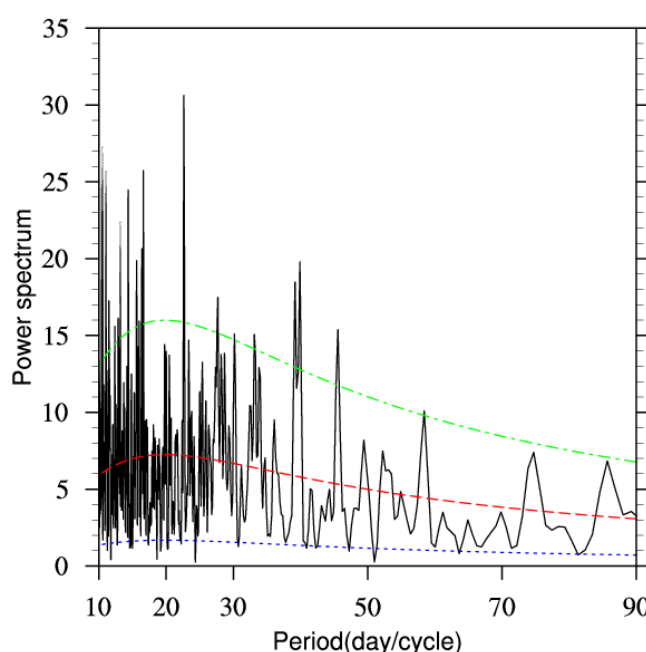


圖 2：1979-2022 年 5 月 1 日至 9 月 30 日副高強度指數功率譜（黑線表示副高指數功率譜密度值、紅色虛線為紅雜訊檢驗譜，綠色和藍色虛線分別表示 0.95 和 0.05 信心區間）。

大氣環流演變特徵。

四、副高次季節異常年海溫背景

根據副高低頻振盪異常年的篩選標準，得到夏季副高 30-90 天振盪異常年 15 年，10-30 天異常年 14 年，兩種異常年中有 11 年同為異常年。依據第二章 ENSO 事件標準統計低頻振盪異常年的前一年冬季（簡稱前冬）ENSO 背景，結果見表 1。由表 1 可見，兩個週期異常年的前冬 ENSO 背景多樣，既有暖事件年，也有冷事件年

和中性年，冷事件年和暖事件年中，既有 CP 型，也有 EP 型，但出現次數較多的為 CP 型 El Niño、EP 型 El Niño 和 EP 型 La Niña 這 3 種分型。由於副高次季節異常出現在 CP 型 La Niña 年和中性年的年數少，因此，下文分析其異常的特徵時，僅分析 CP 型 El Niño、EP 型 El Niño 和 EP 型 La Niña 這 3 個分型（為敘述方便，下文將出現在 CP 型 El Niño 衰減年的夏季副高次季節異常稱為 CP-El Niño 型，EP 型 El Niño 衰減年的稱為 EP-El Niño 型，EP 型 La Niña 衰減年的稱為 EP-La Niña 型）。表 1

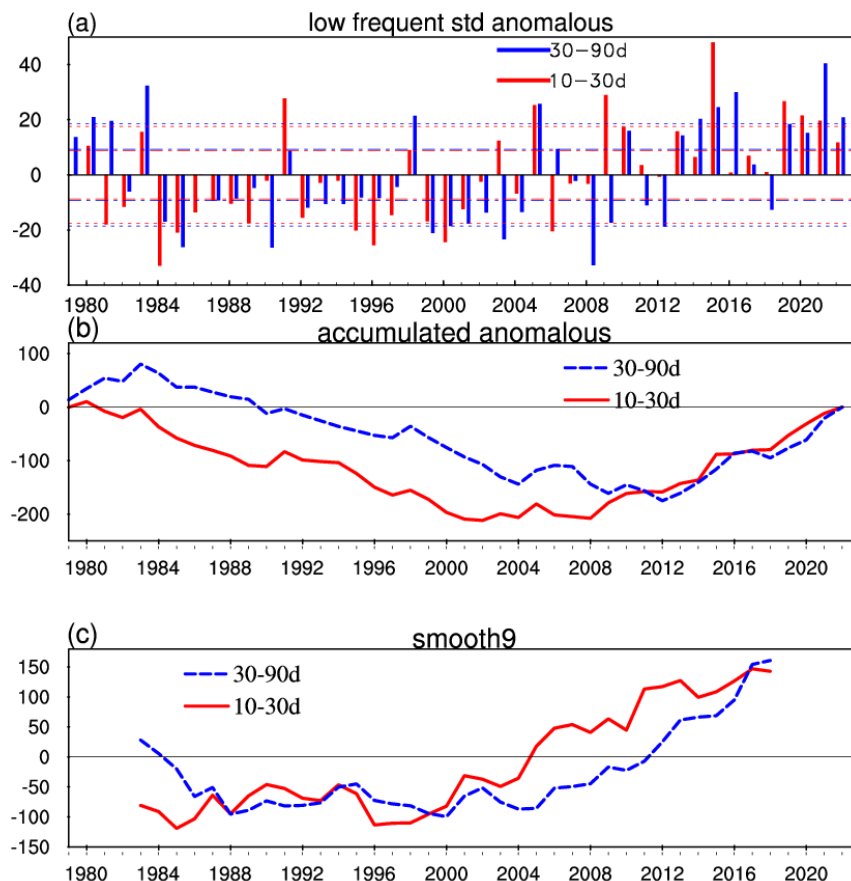


圖 3：1979-2022 年副高低頻振盪強度距平(a，虛線和點劃線分別為低頻振盪強度 1 倍和 0.5 倍標準差，藍線和紅線分別表示 30-90 天和 10-30 天)、年低頻振盪強度累積距平 (b) 和低頻振盪強度 9 年滑動平均 (c)。

表 1：夏季副高次季節變化異常年的前冬 ENSO 背景

週期	El Niño 年		La Niña 年		中性
	CP 型	EP 型	CP 型	EP 型	
10-30 天	1991,2003,2005, 2010,2015,2019, 2020	1980,1983,1998	2009	2013,2021,2022	
30-90 天	2005,2010,2015, 2019,2020	1980,1983,1998, 2016		1981,2006,2013, 2014,2021,2022	1979

中所列的所有 CP-El Niño 型、EP-El Niño 型和 EP-La Niña 型年低頻振盪強度距平及功率譜見圖 4。由圖 4 可見，三種 ENSO 分型之副高均存在顯著的 30-90 天週期，其中 CP-El Niño 型、EP-El Niño 型還存在 10-30 天顯著週期。圖 5 為 30-90 天振盪異常年 SSTA 的空間分佈（10-30 天與 30-90 天異常年份由於重合率高，2 個週期異常的 SSTA 分佈很相似，故省略 10-30 天異常年 SSTA 合成圖）。從圖 5 可以看出：(1) CP-El Niño 型和 EP-El Niño 型前冬在赤道太平洋中部和東部分別存在明顯的正距

平，到了夏季，上述兩個區域海溫異常明顯減弱，其中 CP-El Niño 型轉為弱負距平，EP-El Niño 型合成圖上雖然仍為正距平，但正距平範圍及強度明顯減弱；EP-La Niña 型前冬季至春夏季 3 個季節赤道東太平洋海溫雖然為負距平但未能通過顯著檢驗。(2) CP-El Niño 型和 EP-El Niño 型前冬至春季印度洋海溫為正距平，CP-El Niño 型正距平尤其顯著，其物理過程可以根據全型渦度方程理論加以理解，即印度洋海溫正異常首先通過可感熱加熱使加熱區東部出現南風和對流降水，隨後，由於

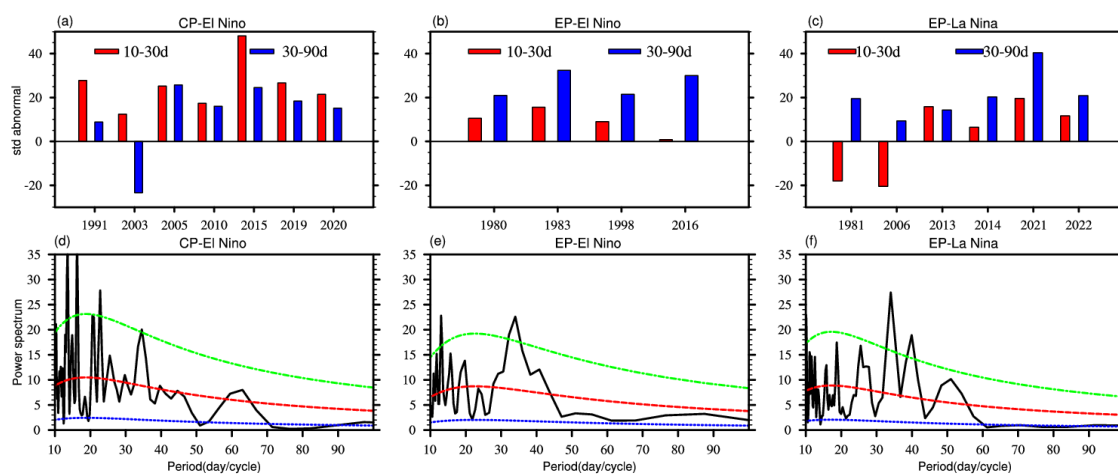


圖 4：夏季副高強度次季節異常年份、次季節振盪強度距平及功率譜 (a 和 d 為 CP-El Niño 型、b 和 e 為 EP-El Niño 型、c 和 f 為 EP-La Niña 型，d-f 曲線含義同圖 2)。

大氣對該對流凝結潛熱加熱的回饋，在對流性降水的東部出現異常反氣旋（吳國雄等，2003）。(3) CP-El Niño 型南大西洋前冬至春季為明顯正距平，但到了夏季，該區域海溫正異常已消失。

為了進一步確認前冬 ENSO 異常與次年副高強度次季節振盪異常的關係，下面對 1978-2021 年冬季強 ENSO 異常年的次年夏季副高季節內振盪強度做特徵統計，ENSO 強弱根據畢成祥等（2023）的標準劃分，共有 9 個 CP 型 El Niño、3 個 EP

型 El Niño 和 5 個 EP 型 La Niña 等強 ENSO 年，這些年份副高低頻振盪強度距平和功率譜見圖 6。

由圖 6 可以看出，強 CP 型 El Niño 和 EP 型 El Niño 衰減年夏季副高 10-30 天和 30-90 天低頻振盪強度總體上為正距平，強 EP 型 La Niña 衰減年大部分為負距平；3 種 ENSO 分型的 30-90 天週期均通過 95% 信度檢驗；從圖 6d 可以看出，CP 型 El Niño 衰減年 10-30 天內的 10-20 天（準雙週）和 20-30 天 2 個週期的譜密度值均

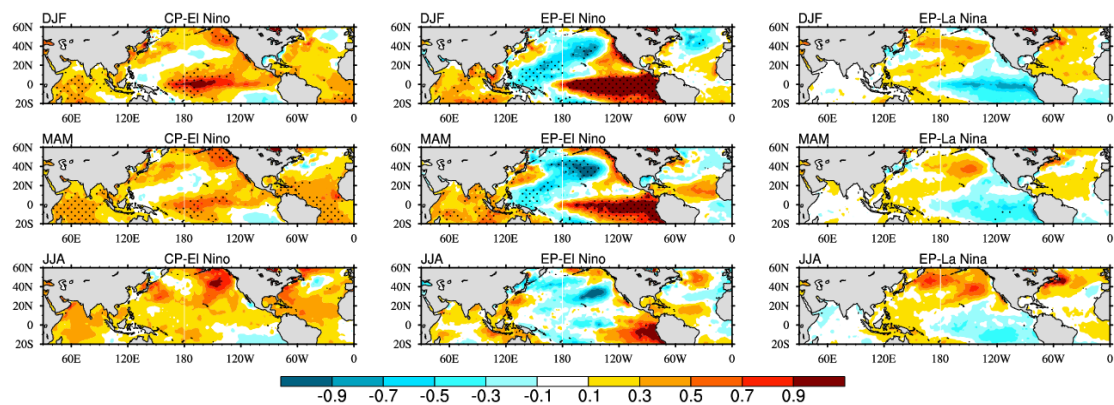


圖 5：三種 ENSO 分型之副高 30-90 天振盪異常的前冬至夏季海溫距平成圖(單位:°C，打點區域為通過 95% 信度檢驗，ENSO 分型標於小圖正上方)。

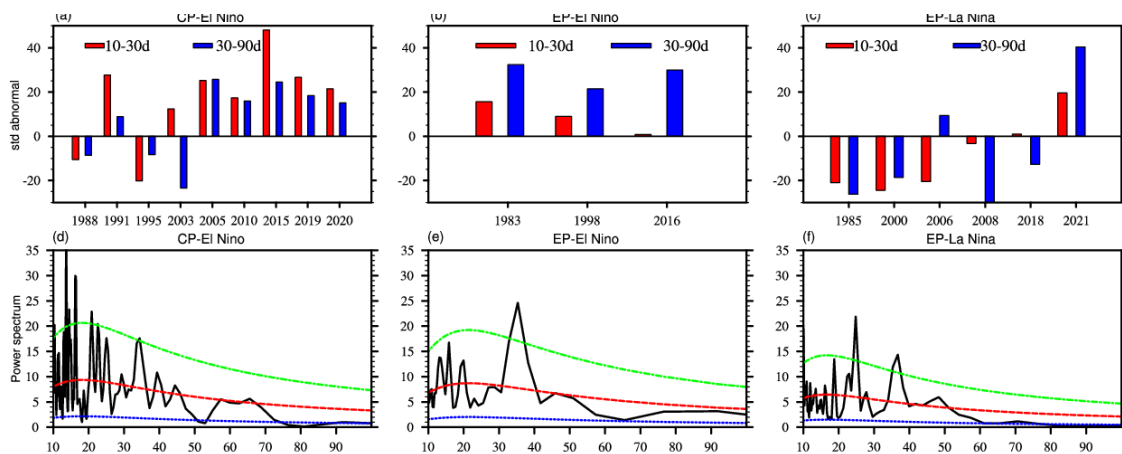


圖 6：強 El Niño 和 La Niña 年衰減年夏季副高強度指數低頻振盪強度距平及功率譜（a-c 為低頻振盪強度距平，d-f 為功率譜，曲線含義同圖 2，ENSO 分型標於小圖正上方）。

超過 95%信度曲線，表明 CP 型 El Niño 衰減年 10-30 天內還存在 2 個顯著週期。

儘管 EP 型 La Niña 衰減年夏季西太平洋副高次季節振盪強度總體偏弱，但表 1 中低頻振盪異常強的年份中仍有 26%出現在 EP 型 La Niña 衰減年，最典型的是 2021 年為強 La Niña 衰減年，但該年 30-90 天振盪強度達 98.69，居 1979-2022 年首位，結合圖 3 年代際特徵推測，表 1 中 EP 型 La Niña 衰減年中的 2013、2014、2021 和 2022 年次季節振盪偏強並非由前冬 EP 型 La Niña 引起的，而是在偏強的年代際背景下疊加其它有利因素造成。

五、持續性副高異常個案的大氣低頻演變特徵

上述分析了夏季西太平洋副高強度次季節振盪異常與前一年冬季 ENSO 異常的統計關係，那麼，不同 ENSO 背景下副高次季節異常的大氣低頻演變特徵是否有差異？為此，下面根據第 2 章的方法對 10-30 天和 30-90 天異常年份分別挑選夏季持續性副高異常個案，並對個案的 5 個發展階段的 850 百帕風和渦度、200 百帕風和散度及 OLR 等低頻要素場繪製合成圖。挑選結果表明，10-30 天異常年份滿足條件的個案數量少，30-90 天異常年份滿足條件的個案數量較多且持續時間長，考慮到

10-30 天持續性異常個案的持續時間短且樣本少，環流要素合成結果代表性不足，因此，下文僅分析 30-90 天異常年個案的大氣低頻演變特徵。

(一) 低層要素演變特徵

圖 7 為 3 種 ENSO 年持續性副高異常個案的 850 百帕風場、渦度場各階段的大氣低頻演變特徵，可以看出，3 種分型的持續性異常個案在第 3 階段即活躍期低頻反氣旋面積明顯加大及脊點西伸，但 500 百帕位勢高度原始場及大氣低頻場的演變特徵存在明顯差異：

(1) 低頻風場上第 3 階段 850 百帕低頻反氣旋脊線位置存在南北差異：EP-El Niño 型位置最北、EP-La Niña 型最南，CP-El Niño 型介於兩者之間。120°E 位置上低頻反氣旋的脊線位置 EP-El Niño 型在 25-30°N，EP-La Niña 型在 20°N 附近，CP-El Niño 型在 20-25°N，EP-La Niña 型與 EP-El Niño 型相差 5-7 個緯距。

(2) 500 百帕原始高度場 5880gpm 等值線動態變化差異：從第 1 階段到第 3 階段，CP-El Niño 型和 EP-El Niño 型 5880gpm 線西伸不明顯，西伸約 10 個經度，EP-La Niña 型西伸很明顯，西伸約 30 個經度；從第 3 階段至第 5 階段，5880gpm 線的東撤速度存在明顯差異，CP-El Niño 型東撤緩慢，而 EP-El Niño 型與 EP-La

Niña 型則東撤迅速且主要發生在第 4 至第 5 階段；EP-El Niño 型和 EP-La Niña 型間歇期與活躍期 5880gpm 線的面積差異較 CP-El Niño 型顯著。

(3) 中高緯低頻擾動存在差異：CP-El Niño 型中高緯存在低頻振盪訊號及其傳播現象，EP-El Niño 型和 EP-La Niña 型雖然也存在低頻振盪但無傳播現象。

CP-El Niño 型：從圖 7a-e 可以看出，該型 130°E-180°/60-20°N 區域存在西北-東南走向的波列，第 1 階段，該波列的渦度自西北向東南呈“+ - +”分佈，日本以東至鄂霍次克海東南部為低頻反氣旋，20-40°N 國際換日線以西區域為低頻氣旋；第 2 階段，負渦度中心較第 1 階段向東向南移動；第 3 階段，負渦度中心傳播至 20-40°N 國際換日線以西區域，130°E-180°/60-20°N 區域的渦度及低頻風場呈現與第 1 階段的中心位置接近，但相位相反的波列分佈，第 1 階段 20-40°N 國際換日線以西的低頻氣旋此時演變為低頻反氣旋，500 百帕在該位置上出現 5920gpm 等值線，說明該區域的位勢高度明顯升高；到第 5 階段，20-40°N 國際換日線以西區域恢復為第 1 階段時的低頻氣旋狀態。

EP-El Niño 型和 EP-La Niña 型：從圖 7f-j 可以看出 EP-El Niño 型 130°E

-180°/60-40°N 區域也存在風場和渦度場的低頻振盪現象，但其傳播方向自東南向西北，其與副高低頻變化無關；對於 EP-La Niña 型，從圖 7k-o 上分析不出該型明顯的中高緯低頻擾動向南傳播現象。

(4) 熱帶大氣低頻振盪關鍵區及傳播存在差異：CP-El Niño 型關鍵區為 100-140°E 區域，擾動自赤道向北傳播；EP-El Niño 型關鍵區，一個是 120-150°E 區域，擾動自赤道向北傳播，另一個是 15-20°N 區域，擾動自東向西傳播；EP-La Niña 型關鍵區為 100-150°E，擾動自赤道向北傳播。

CP-El Niño 型：100-140°E 區域熱帶的低頻反氣旋、副熱帶的低頻氣旋、0-5°N 的低頻東風和 15-20°N 低頻西風均向北傳播，且間歇期與活躍期呈現反相位（圖 7a、7c、7e）。從第 1 階段至第 3 階段，15-20°N 附近由低頻西風轉為低頻東風，東風西界到達 110°E 以西，其中，第 3 階段 100-140°E/20-40°N 範圍內主要為低頻反氣旋，副高面積最大，西伸脊點最西，同時，5-15°N 區域為低頻正渦度；第 4 階段，低頻反氣旋北傳至 30-40°N 一帶，5-15°N 區域的正渦度北傳，並在 20°N 附近形成閉合氣旋（圖 7d）；第 5 階段低頻氣旋北傳至 20-30°N，熱帶地區恢復為低頻反氣旋控制（圖 7e），形成與第 1 階段

相近、第 3 階段相位相反的渦度和風場分佈特徵。

EP-El Niño 型：第一個關鍵區即 120-150°E/0-50°N 範圍低層渦度呈波列分

佈，第 1、3、5 階段自西南向東北渦度分佈呈“-+”、“+-”、“-+”的演變

特徵。當 850 百帕低頻負渦度維持在 25-30°N 附近時，副高西伸（圖 7h）；當低

30-90d 850uv&vor and 500hgt

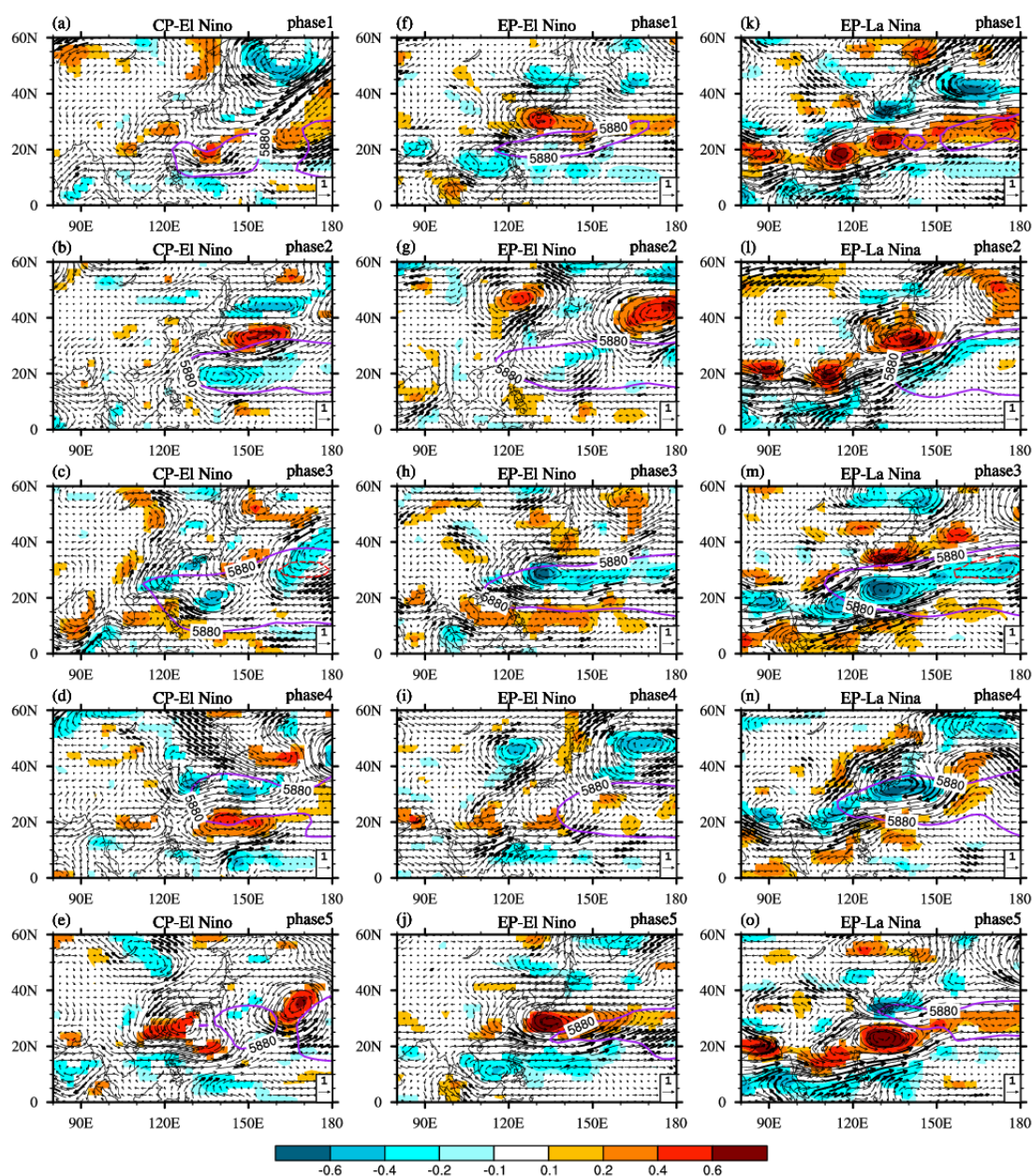


圖 7：三種 ENSO 分型之持續性副高異常個案 5 個階段 850 百帕低頻風、低頻渦度和 500 百帕位勢高度等要素合成圖(箭頭為風場，單位： $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，粗箭頭為通過 95%顯著性檢驗；陰影為渦度，單位： $10^{-6}\cdot\text{s}^{-1}$ ，僅顯示通過 95%信度檢驗部分；等值線為 500 百帕高度，紫色實線為 5880gpm，紅色虛線為 5920 gpm，個案分型標於小圖正上方)。

頻正渦度到達 20°N 附近時，副高開始東撤(圖 7i)；當低頻正渦度到達 25°N 時，副高面積迅速縮小(圖 7j)，開始新一輪週期。第二個關鍵區的傳播特徵將在後文通過 OLR 的演變特徵介紹。

EP-La Niña 型：從 850 百帕風場及渦度場上可以看出 $100\text{--}150^{\circ}\text{E}$ 渦度及風場呈現明顯的緯向帶狀分佈並從低緯向北傳播。從第 1 到第 3 階段，負渦度帶由熱帶北傳至副熱帶(圖 7k、7l、7m)，其中第 3 階段副高面積最大，西伸脊點最西， 120°E 處脊線位置較 CP-El Niño 型和 EP-El Niño 型偏南，負渦度帶的南北兩側均為正渦度帶；第 4 階段，隨著副熱帶(熱帶)地區負渦度(正渦度)北傳，副高減弱東撤(圖 7n)；第 5 階段，低頻氣旋及正渦度北傳至副熱帶地區，副高面積迅速縮小(圖 7o)。

(二) 中高層低頻擾動演變

圖 8 為持續性副高異常個案的 200 百帕散度和 500 百帕位勢高度低頻場。從圖 8 可以看出與低層負(正)渦度相對應的高層輻合(輻散)及 500 百帕正(負)的低頻高度，但並沒有以往研究認為的與副高“相向而行、背道而馳”的南亞高壓低頻活動特徵。此外，還可以從 500 百帕低頻位勢高度演變中看到一些中高緯高度擾動向副熱帶區域傳播現象，具體如下：

CP-El Niño 型：從圖 8a-c 可以看出， $90\text{--}120^{\circ}\text{E}/35\text{--}50^{\circ}\text{N}$ 區域有較弱的位勢高度擾動訊號向東南傳播現象， $130^{\circ}\text{E}\text{--}180^{\circ}/20\text{--}60^{\circ}\text{N}$ 區域有西北-東南走向的高度擾動偶極子振盪。當 $90\text{--}120^{\circ}\text{E}/35\text{--}50^{\circ}\text{N}$ 區域的正高度擾動傳播至 25°N 附近時， $130^{\circ}\text{E}\text{--}180^{\circ}/20\text{--}60^{\circ}\text{N}$ 區域的正高度擾動的南端也到達 25°N 附近，兩處正高度擾動同相位疊加(圖 8c)，副熱帶西北太平洋、江南到華南北部為大範圍低頻高度正值區，表明此時副高處於活躍階段。但從第 3 至第 5 階段， $90\text{--}120^{\circ}\text{E}/35\text{--}50^{\circ}\text{N}$ 區域的高度場並沒有呈現符號相反的分佈特徵。

EP-El Niño 型：比較圖 8f-8j 和圖 8a-8e 發現，EP-El Niño 型 $90\text{--}120^{\circ}\text{E}/35\text{--}50^{\circ}\text{N}$ 無明顯中高緯高度場擾動向南傳播現象， $130^{\circ}\text{E}\text{--}180^{\circ}/20\text{--}60^{\circ}\text{N}$ 區域也存在高度擾動偶極子振盪，當擾動正(負)相位位於 30°N 附近時，副高處於活躍期(間歇期)。

EP-La Niña 型：儘管從圖 7k-o 看不出明顯的中高緯擾動訊號向南傳播現象，但從圖 8k-8n 可以看出， 20°N 及 45°N 附近均存在低頻高低壓交替出現現象，兩個緯度帶的週期接近且符號相反，其中 45°N 附近的高度振盪與 $40\text{--}60^{\circ}\text{N}/80^{\circ}\text{E}$ 的高度擾動向東南傳播有關，當中緯度向東南傳播的高度擾動與低緯向北傳播的擾動在 45°N 同相位疊加時，在 45°N 形成帶狀低

頻高度場，高壓（低壓）的南側低層為東（西）風振盪。當熱帶和中緯度低頻高度場呈北低南高配置時， $30-40^{\circ}\text{N}$ 低層為低頻西風，有利於副熱帶區域負渦度的維持

及副高活躍，反之，副高處於間歇期。

(三) OLR 和高度低頻擾動時間演變

以上通過副高活動 5 個階段合成分析

得到大氣低頻要素擾動訊號週期振盪特

30-90d 200uv&div and 500hgt

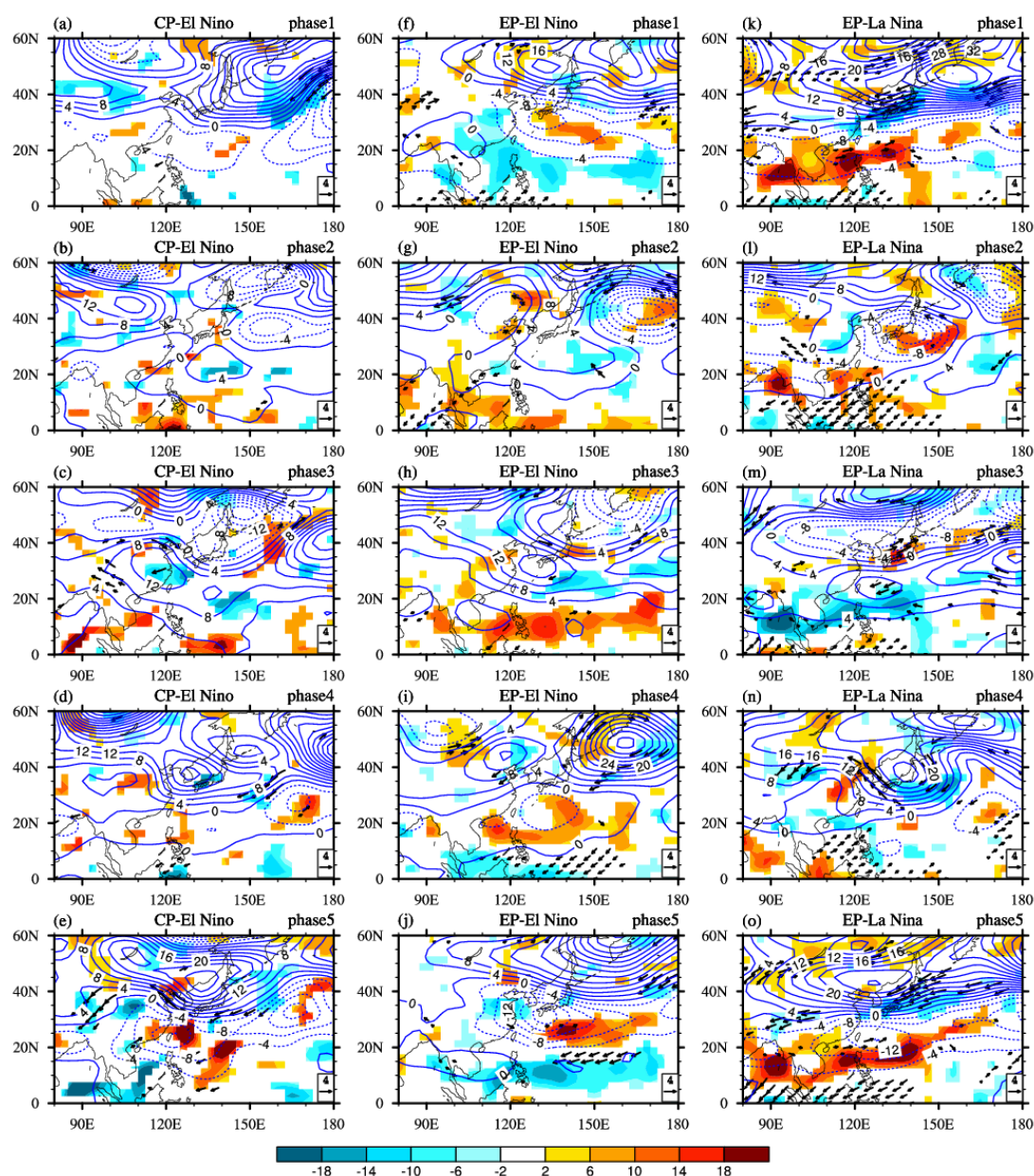


圖 8：三種 ENSO 分型之持續性副高異常個案 5 個階段 200 百帕風場、散度和 500 百帕位勢高度等低頻要素場合成圖（箭頭為風場，單位： $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ；陰影為散度場，單位： $10^{-7}\cdot\text{s}^{-1}$ ；等值線為高度場，虛線小於 0，單位： gpm ；風場和散度場僅顯示通過 95% 信度檢驗部分）。

表 2：三種 ENSO 分型之持續性副高異常個案的大氣低頻關鍵區

分型	熱帶地區渦度場		中高緯地區高度場	
	範圍	傳播特徵	範圍	傳播或振盪特徵
CP-El Niño	100-140°E	自赤道向北	130°E -180°/20-60°N	西北東南向偶極子 振盪
			90-120°E/35-5 0°N	自西北向東南傳播
EP-El Niño	120-150°E	自赤道向北	無	無
	15-20°N	自東向西		
EP-La Niña	100-150°E	自赤道向北	40-60°N/80°E	自西北向東南傳播

徵，並初步分析低頻訊號傳播特徵，上述歸納的 3 種分型關鍵區見表 2。

由於 5 個階段在時間上不連貫，低頻訊號的傳播特徵不夠清晰，下面用上述歸納的關鍵區繪製低頻 OLR 和 500 百帕位勢高度場的時間演變圖，通過時間演變圖對低頻擾動訊號的演變及傳播特徵做更詳細分析。表 2 中 3 種 ENSO 分型熱帶地區渦度均存在自赤道向北傳播現象，對於 CP-El Niño 型，綜合考慮 100-140°E 渦度向北和 90-120°E/35-50°N 高度擾動向南的傳播特點，在繪製 OLR 緯度時間演變圖時，該型經度範圍取上述兩個區域的共同部分即 100-120°E，以便同時考察中緯度及熱帶地區的傳播特徵；對於熱帶渦度的緯向傳播特徵，上述分析僅 EP-El Niño 型在 15-20°N 緯度帶存在傳播現象，考慮到 15-20°N 為副熱帶高壓的南端，該區域對

流演變與副高強度變化及中國東部地區異常天氣關係密切，下文對 3 種分型 15-20°N 範圍的 OLR 經度時間演變一併分析。

(1) OLR 經向傳播特徵

CP-El Niño 型：從圖 9a 可以看出該型中緯度擾動向南傳播現象：-20 天，正 OLR 在 35-40°N，0 天，正 OLR 向南傳播至 25-30°N，與圖 7b 和圖 7c 中 5880 等值線西伸及圖 8c 副熱帶地區低頻高度正值區範圍加大現象相吻合，表明此時對應副高加強西伸，同時，35-40°N 為負 OLR，醞釀下一階段副高的減弱東撤；+5 至+10 天，負 OLR 向南傳播至 25°N 附近，熱帶北傳的負 OLR (BSISO 第 6 相位, J. Y. Lee et al. 2013) 也傳播至該緯度，南北兩支負 OLR 連為一體，副高衰弱並轉為間歇期。從圖 9a 還可以看出熱帶和中緯擾動疊加現象：20-30°N 和 10-15°N 兩個緯度帶低

頻正負相位交替出現，中緯度(40°N 附近)對流向南傳播和赤道對流向北傳播共存現象，其中-20 天到 10 天中緯度對流向南傳播現象更明顯，正 OLR 前方到達 25-30°N 時，對應副高強度最強時段；0 天至+10 天，南北兩支負 OLR 均傳播至 25°N 附近，對應副高迅速減弱東撤。

EP-El Niño 型：從圖 9b 可以看出該型熱帶對流北傳現象：從-20 天至-5 天，低頻正 OLR 從 15°N 北傳並發展，-5 天，正

中心傳播至 25°N 附近；0 天，25°N 處 OLR 維持正相位；-15 至-10 天位於赤道的負 OLR 在 0 天北傳至 10°N 附近，15 天後負值中心傳播至 25°N。可見，熱帶對流正相位傳播至 25°N 引起副高加強西伸，負相位傳播至 25°N 引起副高迅速減弱和東撤。

EP-La Niña 型：從圖 9c 可以看出該型熱帶對流的北傳、±10°N、10-20°N 以及 30°N 三個緯度帶對流低頻週期振盪現象，當熱帶對流正相位自赤道向北傳播至

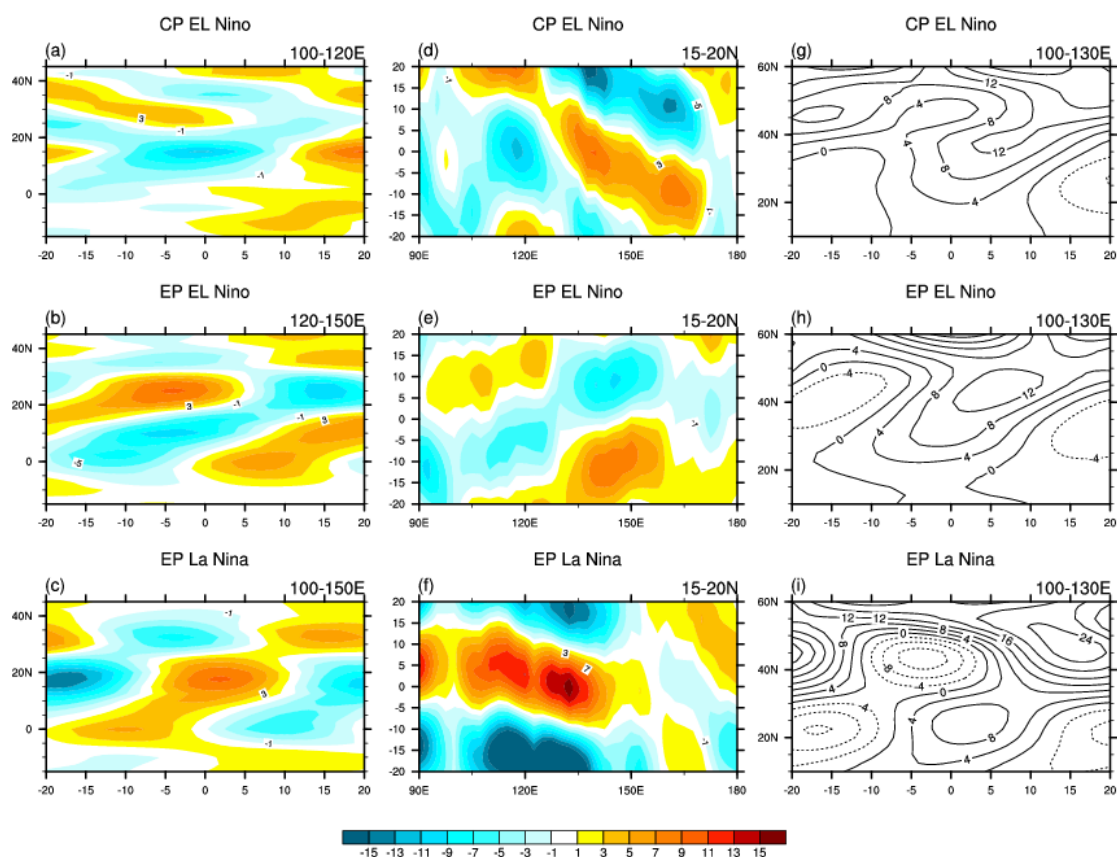


圖 9：三種 ENSO 分型之持續性副高異常個案低頻 OLR (a-f) 和 500 百帕低頻位勢高度場 (g-i) 時間演變 (ENSO 分型標於每個子圖正上方，要素的平均範圍標於子圖右上方；a-c 和 g-i 橫坐標為時間，縱坐標為緯度；d-f 橫坐標為經度，縱坐標為時間，時間單位為天，0 天表示持續性副高異常個案副高低頻強度高峰日，負數表示高峰日以前，正數表示高峰日以後；OLR 單位： $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ，位勢高度單位： gpm)。

15-20°N 時，正 OLR 的南北兩側均為負 OLR，此時對應副高加強西伸；-5 至+10 天，正 OLR 在 15-20°N 維持時間較久，與上面通過圖 7 分析得到的 EP-La Niña 型年份持續性副高異常個案副高迅速東撤的時間較晚，發生在第 4 到第 5 階段的結論一致；+15 至 20 天，來自赤道的熱帶對流負相位向北傳播至 15-20°N 時，副高迅速減弱東撤。

(2) OLR 緯向傳播特徵

CP-El Niño 型：儘管低層渦度場上該型 15-20°N 低頻渦度緯向傳播不明顯，但從圖 9d 可以看出，CP-El Niño 型該緯度帶低頻 OLR 存在向西傳播現象，當負相位傳播至 110-120°E 時，對應南海一帶為正渦度，正渦度的北側低層為低頻東風(圖 7c)，有助於副高加強西伸。

EP-El Niño 型：從圖 9e 可以看出該型 15-20°N 熱帶低頻對流向東傳播現象。 -20 天至-5 天，對流抑制中心由 120°E 傳播至 150°E，對流中心由 90°E 傳播至 120°E，其中，-5 天，低頻對流呈現東正西負的相位分佈，該配置導致低層低頻東風形成和維持，促進副高加強和活躍；0 天至+15 天，位於 90°E 的對流中心向東傳播至 130°E -150°E，位於 100°E 附近的對流抑制向東傳播至 120°E 附近，形成西正東負的相位分佈，副高衰弱並進入間歇期。

EP-La Niña 型：從圖 9f 上看，該型無明顯熱帶低頻對流緯向傳播特徵。

15-20°N/ 160°E -180°範圍的熱帶對流存在低頻振盪及向西傳播，但該區域範圍小且位置偏東，其對副高低頻振盪的影響非常有限；100°E -140°E 範圍存在 40 天左右的週期振盪，但該振盪緯向傳播特徵不明顯，應為 100°E -150°E 對流北傳的結果(圖 9c)。

(3) 位勢高度緯度-時間演變

從 100-130°E 平均位勢高度的緯度-時間演變(圖 9g-i)可以看出：EP-La Niña 型 20°N 附近及 45°N 附近均存在低頻高低壓交替出現現象，兩個緯度帶的週期接近且相位相反，45°N 的低谷時間較 20°N 的高峰時間早 5 天左右(圖 9i)，45°N 緯度帶低頻低壓可通過其南側的低頻西風促進副熱帶地區低頻負渦度的加強或維持，使副高低頻振盪的週期更明顯；CP-El Niño 型和 EP-El Niño 型中緯度與副熱帶區域不存在高度場的同頻振盪現象(圖 9g-9h)。

綜合以上關於三種 ENSO 分型年份低頻 OLR 及位勢高度場的時間演變分析可以得出：CP-El Niño 型年份持續性副高異常個案 90-120°E/35-50°N 的中緯度低頻振盪及其向東南傳播造成副高的西伸和東撤，熱帶對流北傳造成副高加速東撤減弱；EP-El Niño 型年份持續性副高異常個

案主要受熱帶低頻振盪北傳調節，熱帶低頻對流有弱的東傳現象，使副高低頻週期振盪的振幅更大；EP-La Niña 型年份持續性副高異常個案一方面受熱帶對流向北傳播調節，另一方面，中緯度與副熱帶地區高度擾動的同頻振盪現象，使副高低頻振盪的週期更明顯。

(四) 垂直環流演變特徵

上述從單個層次的低頻擾動分析了三種 ENSO 分型之持續性副高異常個案大氣低頻演變特徵，對持續性異常個案的垂直結構有初步瞭解，即副高活躍期（間歇期）低層為負（正）渦度、高層為輻合（輻散）。下面用副熱帶地區低頻變化特徵最突出的區域即 120-150°E 範圍的平均垂直環流演變（圖 10）對三種 ENSO 分型之持續性副高異常個案的垂直結構及傳播特徵做更深入分析，結合 ENSO 異常年夏季平均經向垂直環流（圖 11）特徵，探討三種 ENSO 分型之持續性副高異常個案的可能特點。

由圖 10 可以看出，三種 ENSO 分型之持續性副高異常個案均存在垂直運動的低頻振盪向北傳播現象及副熱帶區域整層垂直運動的週期振盪現象，副高活躍期與間歇期下沉和上升運動呈現明顯的反相位，但垂直運動的傳播特點、活躍期下沉中心的緯度及垂直經圈環流結構有差別，具體如下：

（1）第 3 階段上升和下沉運動中心緯度差異。CP-El Niño 型下沉中心位於 20°N 附近，上升運動中心在 0-10°N；EP-El Niño 型下沉中心位於 20-30°N，其南北兩側各有一支上升氣流，北支上升運動中心位於 35°N 附近，南支上升運動中心位於 5-15°N；EP-La Niña 型下沉中心與 CP-El Niño 型接近，位於 20°N 附近，但其上升運動中心位於 30-40°N。

（2）垂直運動的強度和範圍差異。不管是間歇期還是活躍期，CP-El Niño 型下沉運動的強度比 EP-El Niño 型和 EP-La Niña 型弱，緯度範圍也比其餘兩個分型的窄；EP-La Niña 型活躍期下沉運動的強度最強，緯度範圍最廣，垂直運動伸展高度最高，其下沉區約 17 個緯距，CP-El Niño 型和 EP-El Niño 型僅 10 個緯距。

（3）垂直運動傳播特徵及環流結構差異。CP-El Niño 型第 3 階段的下沉中心由第 1 階段 0-10°N 和 30°N 附近兩支下沉運動分別向北和向南傳播疊加而成，除第 5 階段，無明顯的閉合垂直環流；EP-El Niño 型第 3 階段的下沉中心由第 1 階段 10-20°N 的下沉運動向北傳播至 25°N 而成，5 個階段均有閉合垂直環流，其中第 2 和第 4 階段閉合環流南北跨度大（0-30°N），第 1、3、5 階段閉合環流南北跨度小，約 20 個緯度；EP-El Niño 型從第

2 至第 4 階段，垂直經圈環流自南半球向北移動，環流中心由 10°S 移至 10°N ，其中，第 3 階段，對流層中下部有跨赤道南風，跨赤道南風加強熱帶對流，加強的熱帶對流通過海氣相互作用獲得額外的北傳機制和低頻振盪源，對流北傳現象將更突

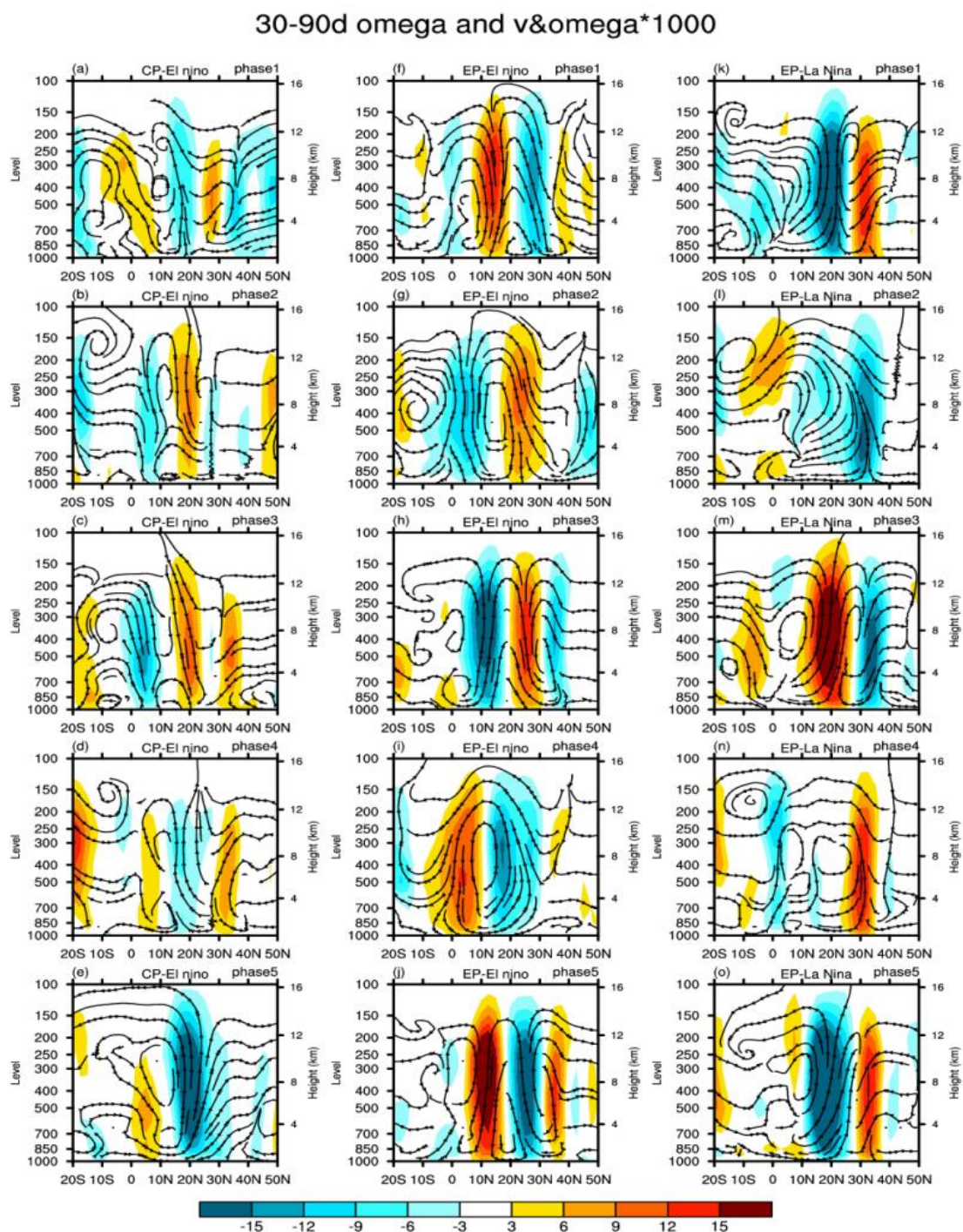


圖 10：三種 ENSO 分型之持續性副高異常個案 5 個階段 $120-150^{\circ}\text{E}$ 低頻經向垂直運動剖面 (ENSO 分型標於圖上方，階段標於子圖右上角，流線為 $v\text{-}\omega$ ，陰影為 ω ，單位： $10^{-3}\times\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$)。

出，週期性的熱帶對流、抑制向北傳播，利於後期副高呈間歇、活躍的週期振盪（Wang et al. 2018）。EP-La Niña 型從第 2 至第 4 階段，下沉運動自赤道向北傳播，也可以看出 20°N 和 35°N 兩個緯度垂直運動反位相週期振盪的突出特徵。

（4）三種 ENSO 分型之持續性副高異常個案的垂直環流除上述差異外，還表現在活躍期下沉運動中心與相應 ENSO 分型年份夏季平均的異常下沉運動中心的相對位置存在差異。比較圖 10 和圖 11 可以看出：CP-El Niño 型持續性副高異常個案第 3 階段的下沉區與該型夏季平均的下沉運動異常區在 20°N 附近存在同位相疊加現象（圖 10c，圖 11a），EP-El Niño 型（圖 10h，圖 11b）和 EP-La Niña 型（圖 10o，圖 11c）年份不存在此現象。CP-El Niño 型不同尺度下沉運動同相位疊加現象可能導致副熱帶高壓強度原始值異常高，進一

步統計發現，CP-El Niño 型個案副高強度指數原始值平均為 511，明顯比 EP-El Niño 型（400）和 EP-La Niña（450）個案高；副高強度逐日指數原始值歷史排位最高的前 20 天中，有 12 天出現在 CP-El Niño 型年份的持續性異常個案中。

六、結論與討論

通過 1979-2022 年夏季副高次季節振盪特徵、次季節異常年份的前期海溫背景的統計分析以及發生在 6-8 月的持續性副高異常事件的大氣環流要素的超前滯後合成分析，得到不同 ENSO 背景下持續性副高異常事件的大氣環流演變特徵的差異，揭示夏季西太平洋副高次季節異常的可能成因，主要結論如下：

（一）夏季副高次季節變化總體上存在 10-30 天和 30-90 天週期振盪，2 種週期的年振盪強度有較高距平同號率，同號率

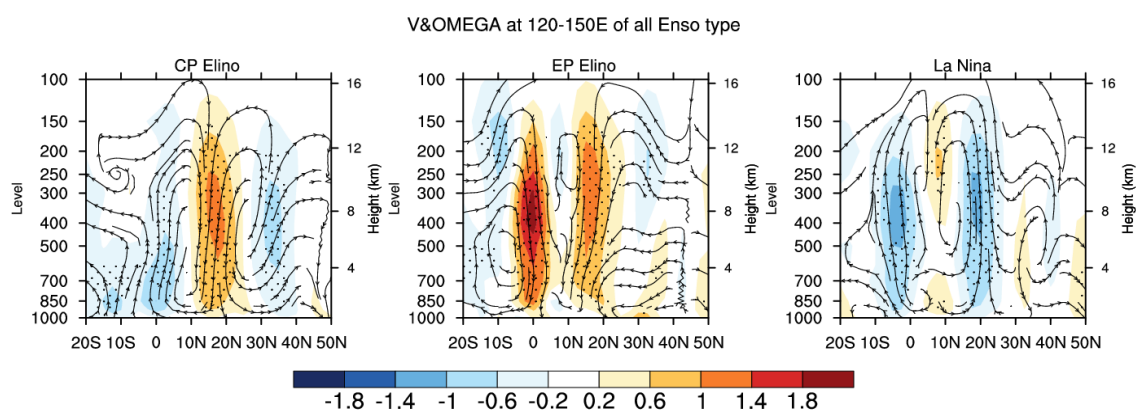


圖 11：ENSO 異常年 120-150°E 夏季平均經向垂直運動距平剖面（ENSO 分型標於圖上方，流線為 v-omega，陰影為 omega，單位： $10^{-3} \times \text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ ，打點區域為通過 95%信度檢驗）。

達 79.5%；副高次季節振盪呈現明顯的年代際特徵，2013 年起至今 2 種週期均呈偏強趨勢。

(二) 夏季副高次季節振盪異常的前一年冬季大部分為 ENSO 異常年，包括 CP 型 El Niño 年、EP 型 El Niño 年和 EP 型 La Niña 年，3 種 ENSO 分型的年數比例 10-30 天異常年為 6:3:3，30-90 天異常年為 5:4:6，除中東太平洋海溫異常外，CP 型 El Niño 異常年的前一年冬季至當年春季印度洋和熱帶南大西洋海溫為明顯正異常。

(三) 3 種 ENSO 分型的夏季持續性副高異常個案大氣環流要素演變的共同點：3 者均在副高活躍期副熱帶區域低頻反氣旋面積明顯加大及脊點西伸；均與熱帶低頻振盪向北傳播有關；垂直環流上，副熱帶區域均存在整層垂直運動的週期振盪現象。

(四) 3 種 ENSO 分型的夏季持續性副高異常個案在活躍期脊線位置、熱帶低頻振盪北傳的作用、中高緯低頻擾動及傳播、垂直經向環流結構等方面有明顯差異：(1) 副高活躍期 120°E 低頻反氣旋的脊線位置差異明顯，EP-El Niño 型最北 (25-30°N)，EP-La Niña 型最南 (20°N 左右)，CP-El Niño 型介於兩者之間。(2) 熱帶低頻振盪北傳對副高次季節變化的影

響，CP-El Niño 型主要表現為熱帶低頻對流負相位北傳造成副高加速東撤減弱，EP-El Niño 型和 EP-La Niña 型表現為熱帶低頻對流正 (負) 相位北傳至關鍵位置時，副高加強西伸 (減弱東撤)；熱帶對流緯向傳播方面，CP-El Niño 型和 EP-El Niño 型 15-20°N 對流分別存在向西和向東傳播現象，該緯度帶對流緯向傳播對副高週期振盪起輔助作用。(3) CP-El Niño 型和 EP-La Niña 型存在中高緯低頻擾動及傳播現象，EP-El Niño 型沒有明顯的中高緯低頻擾動訊號：CP-El Niño 型中高緯低頻擾動及傳播是該型副高加強西伸的主要擾動訊號來源；EP-La Niña 型在 100-130°E 經度範圍，20°N 和 45°N 兩個緯度存在低頻位勢高度反相位同頻振盪現象，該現象對副熱帶高壓活躍起輔助作用。(4) 120-150°E 平均經向垂直環流結構上，副高活躍期下沉運動中心緯度 EP-El Niño 型最北，CP-El Niño 型和 EP-La Niña 型較南；活躍期和間歇期脊線關鍵位置下沉和上升運動的強度和範圍 EP-La Niña 型最強最廣；南半球低頻擾動傳播是 EP-El Niño 型年份垂直經圈環流週期性振盪的重要組成部分；CP-El Niño 型副高活躍期的下沉運動異常區與該型夏季平均的下沉運動異常區同相位疊加，導致該型副熱帶高壓強度原始值明顯高於 EP-El Niño 型和 EP-La Niña 型。

(五) 持續性副高異常事件副高活躍期低頻反氣旋脊線位置及 5880gpm 線西伸脊點差異造成中國東部夏季持續性暴雨過程多發區位置及型態差異，EP-El Niño 型更多發生在江淮流域，雨帶呈東西向；EP-La Niña 型多發生在華南南部，雨帶呈東西向；CP-El Niño 型多發生在華南至閩贛一帶，雨帶東西跨度較小，南北跨度較 EP-El Niño 型和 EP-La Niña 型大。發生在 CP-El Niño 型年份之持續性副高異常過程的副高活躍期強度指數原始值總體上比 EP-El Niño 型和 EP-La Niña 型高，可能導致夏季持續性異常高溫；EP-El Niño 型副高活躍期脊線位置較北且有越赤道氣流，可能導致季風槽活躍和群發颱風；EP-La Niña 型中緯度和副熱帶區域位勢高度場同頻振盪，副高活躍期脊線位置較南，可能伴隨東北冷渦活躍和華南地區持續性暴雨。

後記

本研究在福建省自然科學基金 2022J011074、福建省自然科學基金 2022J01441 支持下完成。

參考文獻

畢成祥、任保華、鄭建秋·2023·ENSO 對次年夏季西北太平洋降水的非對稱

影響·熱帶氣象學報，39 (1)：89–101·<https://doi.org/10.16032/j.issn.1004-4965.2023.01.009>·

陳迪、陳錦年、左濤·2013·西太平洋副熱帶高壓變化與赤道太平洋海溫場的聯繫·海洋學報，35 (6)：21–30·<https://doi.org/10.3969/j.issn.0253-4193.2013.6.003>·

陳思、高建雲、黃麗娜、游立軍·2017·華南前汛期持續性暴雨年代際變化特徵及成因·應用氣象學報，28 (1)：86–97·<https://doi.org/10.11898/10017313.20170108>·

陳月娟、張弘、周任君、武海峰·2001·西太平洋副熱帶高壓的強度和位置與亞洲地表溫度之關係·大氣科學(中國科學院主辦)，25 (4)：516–522·<https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.25.4.516>·

丁婷、高輝·2020·2019 年夏季東亞大氣環流異常及對我國氣候的影響·氣象，46 (1)：129–137·<https://doi.org/10.7519/j.issn.10000526.2020.01.013>·

鞏遠發·2014·青藏高原及東亞大氣熱源低頻振盪與我國東部旱澇的研究[博士論文]·蘭州：蘭州大學·

- 鞏遠發、紀立人·1998·西太平洋副熱帶高壓中期變化的數值試驗·熱帶氣象學報, 14 (2): 106–112·<https://doi.org/10.16032/j.issn.1004-4965.1998.02.014>·
- 黃榮輝、嚴邦良·1988·熱帶基本氣流對冬季北半球中高緯度準定常行星波的影響·氣象學報, 46 (2): 154–163·<https://doi.org/10.11676/qxxb1988.02.18>·
- 紀忠萍、吳秀蘭、劉燕、梁健、項頌翔、謝炯光·2012·西江流域汛期暴雨與 500 hPa 關鍵區準雙週振盪的關係·熱帶氣象學報, (4): 497–505·<https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-4965.2012.04.008>·
- 雷顯輝、宋敏紅、張少波·2022·夏季南亞高壓和西太副高活動特徵指數與中國東部降水分佈的聯繫·高原氣象, 41 (2): 489–501·<https://doi.org/10.7522/j.issn.1000-0534.2021.00099>·
- 李春暉、何超、萬齊林·2019·青藏高原熱力作用對南海及周邊區域夏季氣候的影響研究進展·熱帶氣象學報, 35 (2): 268–280·<https://doi.org/10.16032/j.issn.1004-4965.2019.02.012>·
- 李峰、林建、何立富·2006·西風帶系統的異常活動對 2003 年淮河暴雨的作用機制研究·應用氣象學報, 17 (3): 303–309·<https://doi.org/10.11898/10017313.2006.03.007>·
- 李熠、楊修群、謝倩·2010: 北太平洋副熱帶高壓年際變異與 ENSO 循環之間的選擇性相互作用·地球物理學報, 53 (7), 1543–1553·<https://doi.org/10.3969/j.issn.0001-5733.2010.07.005>·
- 劉屹岷、吳國雄、劉輝、劉平·1999·空間非均勻加熱對副熱帶高壓形成和變異的影響 III. 凝結潛熱加熱與南亞高壓及西太平洋副高·氣象學報, 57 (4): 385–396·<https://doi.org/10.11676/qxxb1999.04.003>·
- 劉屹岷、吳國雄、宇如聰、劉新·2001·熱力適應、過流、頻散和副高水準非均勻加熱與能量頻散·大氣科學, 25 (5): 317–327·<https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.25.5.317>·
- 劉芸芸、丁一匯·2020·2020 年超強梅雨特徵及其成因分析·氣象, 46 (11): 1393–1404·<https://doi.org/10.7519/j.issn.10000526.2020.11.005>·

- 劉芸芸、李維京、艾子兌秀、李清泉·2012·
月尺度西太平洋副熱帶高壓指數的
重建與應用·應用氣象學報, 23
(4): 409–418 · <https://doi.org/10.11898/10017313.20120404> ·
- 劉芸芸、王永光、柯宗建·2021·2020 年
夏季我國氣候異常特徵及成因分
析·氣象, 47 (1): 117–126 ·
<https://doi.org/10.7519/j.issn.10000526.2021.01.012> ·
- 孟慶濤、于超·2022·2022 年 6 月大氣
環流和天氣分析·氣象, 48 (9):
1209–1216 · <https://doi.org/10.7519/j.issn.10000526.2022.09.003> ·
- 彭玉萍、何金海、陳隆勳、張博·2012·
1981–2000 年夏季青藏高原大氣熱
源低頻振盪特徵及其影響·熱帶氣
象學報, 28 (3): 330–338 ·
<https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1509.15164> ·
- 錢維宏·2012·天氣尺度瞬變擾動的物理
分解原理·地球物理學報, 55 (5):
1439–1448 · <https://doi.org/10.6038/j.issn.0001-5733.2012.05.002> ·
- 錢貞成、喻世華·1991·東亞地區凝結加
熱的中期變動與西太平洋副高準雙
週振盪的關係·熱帶氣象, 7 (3):
259–267 · <https://doi.org/10.16032/j.issn.1004-4965.1991.03.011> ·
- 容新堯、張人禾、Li, T., 2010·大西洋海
溫異常在 ENSO 影響印度—東亞
夏季風中的作用·Chin. Sci. Bull.,
55 (14), 1397–1408, <https://doi.org/10.1360/csb2010-55-14-1397>.
- 孫國武、陳葆德·1988·青藏高原上空大
氣低頻波的振盪及其經向傳播·大
氣科學, 12 (3): 250–256 ·
<https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.12.3.250> ·
- 蘇同華、薛峰、陳敏豔、董嘯·2017·季
節內振盪影響西太平洋副熱帶高壓
兩次北跳的機制·大氣科學, 41
(3): 437–460 · <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1609.16125> ·
- 陶詩言、朱福康·1964·夏季亞洲南部 100
毫巴流型的變化及其與西太平洋副
熱帶高壓進退的關係·氣象學報,
34 (4): 387–396 · <https://doi.org/10.11676/qxxb1964.039> ·
- 王靜文、孫即霖、寧方悅·2021·2018 年
盛夏副熱帶高壓極端偏北的原因分
析·海洋氣象學報, 41 (2): 14–23 ·
<https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-640X.2021.02.002> ·

- 王熙喬、李健穎、李雙林 · 2023 · 北半球夏季 30~60 天季節內振盪年代際變化及其對中國東部降水和氣溫的影響 · 大氣科學 (中國科學院主辦) , 47 (6) : 1665–1679 .
<https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2204.21228> .
- 魏鳳英 · 1999 · 現代氣候統計診斷預測技術 · 北京 : 氣象出版社 .
- 吳國雄、醜紀範、劉屹岷、張慶雲、孫淑清 · 2003 · 副熱帶高壓研究進展及展望 · 大氣科學(中國科學院主辦) , 27 (4) : 503–517 . <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.27.4.503> .
- 吳國雄、劉屹岷、劉平 · 1999 · 空間非均勻加熱對副熱帶高壓帶形成和變異的影響 II. 尺度分析 · 氣象學報 , 57 (4) : 385–396 . <https://doi.org/10.11676/qxxb1999.04.002> .
- 袁媛、高輝、柳豔菊 · 2017 · 2016 年夏季我國東部降水異常特徵及成因簡析 · 氣象 , 43 (1) : 115–121 .
<https://doi.org/10.7519/j.issn.10000526.2017.01.013> .
- 張韜、喻世華 · 1992 · 夏季西太平洋副熱帶高壓準雙週振盪的動力學機制 · 熱帶氣象 , 8 (4) : 306–314 .
<https://doi.org/10.16032/j.issn.1004-4965.1992.04.012> .
- 章大全、袁媛、韓榮青 · 2023 · 2022 年夏季我國氣候異常特徵及成因分析 · 氣象 , 49 (1) : 110–121 .
<https://doi.org/10.7519/j.issn.10000526.2023.01.010> .
- 趙佳瑩、陳莉、班晉、劉艷華、劉澤恩、李晉濱 · 2021 · 黑龍江省冬季異常暖氣候事件判定及其與環流指數的關係 · 災害學 , 36 (2) : 84–88, 103 .
<https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-811X.2021.02.015> .
- 趙俊虎、陳麗娟、章大全 · 2022 · 2021 年夏季我國氣候異常特徵及成因分析 · 氣象 , 48 (1) : 107–121 .
<https://doi.org/10.7519/j.issn.10000526.2022.01.010> .
- 鄭志海、王永光 · 2018 · 2017 年夏季北半球大氣環流特徵及對我國天氣氣候的影響 · 氣象 , 44 (1) : 199–205 .
<https://doi.org/10.7519/j.issn.10000526.2018.01.021> .
- Chang, C. P., Y. S. Zhang, and T. Li. 2000. Interannual and Inter-decadal variations of the East Asian summer monsoon and tropical Pacific SSTs. Part I: Roles of the subtropical ridge.

- J. Climate, 13: 4310 – 4325. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013<4310:IAIVOT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<4310:IAIVOT>2.0.CO;2).
- Chang, C. P., Y. S. Zhang, and T. Li. 2000. Interannual and interdecadal variations of the East Asian summer monsoon and tropical Pacific SSTs. Part II: The meridional structure of the monsoon. J. Climate, 13: 4326–4340. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013<4326:IAIVOT>2.0.CO;3](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<4326:IAIVOT>2.0.CO;3).
- Chen, G., and B. Wang. 2021. Diversity of the boreal summer intraseasonal oscillation. J. Geophys. Res. Atmos., 126(8): e2020JD034137. <https://doi.org/10.1029/2020JD034137>.
- Chen, W., J. Y. Lee, R. Y. Lu, and Coauthors, 2015: Intensified impact of tropical Atlantic SST on the western North Pacific summer climate under a weakened Atlantic thermohaline circulation. Clim. Dyn., 45, 2033–2046, doi:10.1007/s00382-014-2454-4.
- Guan, W. N., X. J. Ren, and W. Shang. 2018. Subseasonal zonal oscillation of the western Pacific subtropical high during early summer. Meteor. Res., 32(5): 768–780. <https://doi.org/10.1007/s13351-018-8061-2>.
- Hong, C.-C., T.-C. Chang, and H.-H. Hsu, 2014: Enhanced relationship between the tropical Atlantic SST and the summertime western North Pacific subtropical high after the early 1980s. J. Geophys. Res.: Atmos., 119(7), 3715–3722, <https://doi.org/10.1002/2013JD021394>.
- Lee, D. Y., J.-Y. Lee, Y.-M. Yang, P.-C. Hsu, and J.-E. Kim. 2022. Dominant Processes for Dependence of Boreal Summer Intraseasonal Oscillation on El Niño Phases. Geophys. Res. Lett., 49: e2022GL098669. <https://doi.org/10.1029/2022GL098669>.
- Lee, J.-Y., B. Wang, M. C. Wheeler, X. H. Fu, D. E. Waliser, and I.-S. Kang. 2013. Real-time multivariate indices for the boreal summer intraseasonal oscillation over the Asian summer monsoon region. Clim. Dyn., 40(1-2): 493 – 509. <https://doi.org/10.1007/s00382-012-1544-4>.
- Li, Y., F. Liu, and P.-C. Hsu. 2020. Modulation of the Intraseasonal Variability of

- Pacific-Japan Pattern by ENSO. *J. Meteor. Res.*, 34: 546 – 558. <https://doi.org/10.1007/s13351-020-9182-y>.
- Liebmann, B., and C. A. Smith. 1996. Description of a complete (interpolated) outgoing longwave radiation dataset. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77: 1275–1277. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077<1275:DOACIO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077<1275:DOACIO>2.0.CO;2).
- Liu, F., T. Li, H. Wang, L. Deng, and Y. W. Zhang. 2016. Modulation of boreal summer intraseasonal oscillation over the western North Pacific by the ENSO. *J. Climate*, 29: 7189–7201. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0831.1>.
- Liu, Y. M., G. X. Wu, H. Liu, H. M. Liu, and P. Liu. 2001. Condensation heating of the Asian summer monsoon and the subtropical anticyclone in the eastern Hemisphere. *Climate Dyn.*, 17(4): 327–338. <https://doi.org/10.1007/s003820000117>.
- Lu, R. Y., J.-H. Oh, and B.-J. Kim. 2002. A teleconnection pattern in upper-level meridional wind over the North African and Eurasian continent in summer. *Tellus A.*, 54(1): 44–55. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v54i1.12122>.
- Lyu, K., and J.-Y. Yu. 2017. Climate impacts of the Atlantic Multidecadal Oscillation simulated in the CMIP5 models: A re-evaluation based on a revised index. *Geophys. Res. Lett.*, 44. <https://doi.org/10.1002/2017GL072681>.
- Mao, J. Y., Z. Sun, and G. X. Wu. 2010. 20–50-day oscillation of summer Yangtze rainfall in response to intraseasonal variations in the subtropical high over the western North Pacific and South China Sea. *Clim. Dyn.*, 34: 747–761. <https://doi.org/10.1007/S00382-009-0628-2>.
- Nitta, T. 1987. Convective activities in the tropical western Pacific and their impact on the Northern Hemisphere summer circulation. *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 65(3): 373–390. https://doi.org/10.2151/jmsj1965.65.3_373.
- Qian, W., and J. Shi. 2017. Tripole precipitation pattern and SST variations linked with extreme zonal activities of the

- western Pacific subtropical high. *Int. J. Climatol.*, 37: 3018–3035. <https://doi.org/10.1002/joc.4897>.
- Tao, S. Y., and J. Wei. 2006. The westward, northward advance of the subtropical high over the West Pacific in summer. *J. Appl. Meteor. Sci.*, 17(5): 513–525. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-7313.2006.05.001>.
- Wang, T. Y., X. Q. Yang, J. B. Fang, X. G. Sun, and X. J. Ren. 2018. Role of Air–Sea Interaction in the 30–60 - Day Boreal Summer Intraseasonal Oscillation over the Western North Pacific. *J. Climate*, 31: 1653 – 1680. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0517.1>.
- Waliser, D. E. 2006. Intraseasonal Variability in The Asian Monsoon. In: Wang B (ed.) *The Asian Monsoon*. Springer Praxis Publishing Ltd., 203–259. https://doi.org/10.1007/3-540-37722-1_6.
- Wu, S., D. Jin, X. Wang, and J.-J. Luo, 2025: Interannual relationship between moist heat waves in South China and tropical Indian Ocean sea surface temperature anomalies and possible mechanisms during boreal summer. *Clim. Dyn.*, 63, 193, <https://doi.org/10.1007/s00382-025-07680-1>.
- Xue, F., and F. X. Fan. 2016. Anomalous Western Pacific Subtropical High during Late Summer in Weak La Niña Years: Contrast between 1981 and 2013. *Adv. Atmos. Sci.*, 33(12): 1351–1360. <https://doi.org/10.1007/s00376-016-5281-1>.
- Xue, F., and J. J. Zhao. 2017. Intraseasonal variation of the East Asian summer monsoon in La Niña years. *Atmos. Ocean. Sci. Lett.*, 10(2): 156–161. <https://doi.org/10.1080/16742834.2016.1254008>.
- Xue, F., X. Dong, and F. X. Fan. 2018. Anomalous western Pacific subtropical high during El Niño developing summer in comparison with decaying summer. *Adv. Atmos. Sci.*, 35(3): 360–367. <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1707.17164>.
- Yang, J., Q. Bao, B. Wang, D.-Y. Gong, H. Z. He, and M.-N. Gao. 2014. Distinct quasi-biweekly features of the subtropical East Asian monsoon during

- early and late summer. *Clim. Dyn.*, 42: 1469–1486. <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1728-6>.
- Yeo, S. R., J. G. Jhun, and W.-M. Kim. 2012. Intraseasonal variability of Western North Pacific subtropical high based on the El Niño influence and its relationship with East Asian summer monsoon. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, 48(1): 43 – 53. <https://doi.org/10.1007/s13143-012-0005-7>.
- Zhang, Z., B. Ren, and J. Zheng. 2019. A unified complex index to characterize two types of ENSO simultaneously. *Sci. Rep.*, 9: 8373. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44617-1>.

Characteristics of Atmospheric Low Frequency Evolution of the Northwest Pacific Subtropical High Subseasonal Anomalies in Summer

Li-Na Huang^{1 3*}, Jia-Dong Chen¹, Shi-Lin Chen², Rui-Juan Bao³⁴

¹ Putian Meteorological Bureau of Fujian

² Chengxiang Meteorological Bureau of Fujian

³ Key Laboratory of Straits Severe Weather of China Meteorological Administration

⁴ Fujian Key Laboratory of Severe Weather, Fuzhou

(manuscript received 22 January 2025; in final form 4 June 2026)

Abstract

Based on NCEP/NCAR reanalysis data and sea surface temperature(SST) data from the Hadley Center, this paper used the perturbation method, the power spectrum method, and the lead-lag composite analysis to analyze the subseasonal oscillation characteristics of the Northwest Pacific Subtropical High(subtropical high) during the summer and the previous SST background from 1979 to 2022. By comparing the differences in the evolution characteristics of atmospheric circulation of persistent subtropical high anomaly events during different El Niño–Southern Oscillation(ENSO) backgrounds, the main conclusions are as follows:(1) The summer subtropical high exhibits significant 10–30-day and 30–90-day periodic oscillations. The annual oscillation intensity of the two cycles has a high anomaly sign consistency rate and distinct interdecadal variability characteristics. Most summer subtropical high years exhibiting 10–30-day and 30–90-day oscillation anomalies coincided with ENSO decay years, including Central Pacific (CP) El Niño, Eastern Pacific (EP) El Niño, and EP La Niña events. (2) Persistent subtropical high anomalies during all three ENSO anomaly decaying years share common characteristics as a marked expansion of low-frequency anticyclonic areas and westward extension of ridge points during the high's active phase, a coupled vertical-motion oscillations in both upper and lower troposphere within the subtropical region, as well as a correlation between the high's low-frequency oscillations and the northward transport of trop-

ical low-frequency convection. (3) Differences among the three ENSO anomaly years' persistent subtropical high anomalies are mainly manifested in the position of the low-frequency anticyclonic ridge during the active period of the subtropical high, the differences in the effects of low-frequency disturbance signals such as tropical convection and mid-to-high latitude potential height and their propagation on the subtropical high activity and intermittence, and the differences in the vertical circulation structure of low-frequency vertical meridional circulation in the 120-150°E region, including the intensity and range of vertical motion. (4) As for the extension period forecast of the summer subtropical high anomaly, in addition to paying attention to the northward transmission of tropical convection, low frequency signals such as zonal propagation of tropical convection in CP El Niño and EP El Niño decaying years, and low frequency disturbance in middle and high latitude of CP El Niño and EP La Niña decaying years should be paid attention to. The continuous abnormal weather process such as the persistent abnormal high temperature and continuous heavy rain from South China to Fujian and Jiangxi in the summer of the CP El Niño decaying year, the active monsoon trough and multiple typhoons in the EP El Niño decaying year, as well as the continuous heavy rain in the Jianghuai region and the continuous heavy rain in South China in the EP La Niña decaying year deserve attention.

Keywords: subtropical high, Low-frequency oscillation, ENSO, tropical convection, continuous process. doi: 10.53106/025400022026065401003

*Corresponding author: Li-Na Huang (E-mail: lenah@163.com)