

# 近40年夏季热带中太平洋海温对东亚气候影响的不对称性

刘彦博, 明 静

成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都

收稿日期: 2025年6月23日; 录用日期: 2025年8月21日; 发布日期: 2025年8月28日

## 摘 要

基于1980~2020年CRU、NCEP/NCAR再分析资料等数据, 本研究系统分析了夏季热带中太平洋海温异常对于同期东亚气候的调控作用, 重点探讨了该影响的不对称性特征及可能的物理机制。通过经验正交函数分解、合成分析、线性回归与 $T$ 检验等方法, 探讨了热带太平洋海温的主要模态及年际变化趋势, 并利用统计方法和动力诊断进一步分析了其对东亚气候的影响。结果显示: 热带中太平洋海温在近40年时间里持续增暖, 中部型厄尔尼诺事件频发, 海温暖位相对东亚夏季降水与气温的分布影响强于冷位相, 表现为典型的非对称性响应。偏暖年份, 西太副高北抬, 驱动华南沿岸、长江中下游及东北地区降水增多, 中纬度减少, 中高纬度呈现“西伯利亚增暖——鄂霍茨克海降温”偶极型; 偏冷年副高偏弱位置偏南, 响应偏弱, 局地性显著, 机制上表现为对流位置偏西、热力强迫减弱及遥相关波列激发能力减弱。大气环流和辐射场分析结果表明, 海温冷暖位相通过调控热带对流中心位置及沃克环流强度, 引发高层南亚高压位置、中层鄂霍茨克海海低涡活动, 副高位置变动、低层水汽输送路径, 热力强迫差异, 对东亚气候产生了显著的非对称性影响。本文为理解ENSO多样化背景下的区域气候异常机制提供了科学依据, 有利于提升东亚地区的夏季气候预测能力。

## 关键词

热带中太平洋, 海温异常, 东亚气候, 不对称性, 大气环流

# The Asymmetry of the Influence of Sea Surface Temperature in the Tropical Central Pacific on the Climate in East Asia in the Past 40 Summers

Yanbo Liu, Jing Ming

School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan

## Abstract

Based on multi-source data such as CRU and NCEP/NCAR reanalysis data from 1980 to 2020, this paper systematically analyzed the regulatory effect of summer tropical central Pacific Sea surface temperature (SST) anomalies on the climate of East Asia during the same period, with a focus on the asymmetry characteristics of this influence and its possible physical mechanisms. Through methods such as empirical orthogonal function decomposition, composite analysis, linear regression, and *t*-test, the main modes and interannual variation trends of SST over the central tropical Pacific were identified. By using a fixed standard deviation threshold to distinguish significantly warm and cold years, further comparative analysis revealed that the SST in the Nino4 region has been continuously warming over the past 40 years, with frequent occurrences of central El Niño. The warm phase of the SST has a much stronger impact on the distribution of summer precipitation and temperature in East Asia than the cold phase, showing a typical asymmetric response. During warm years, the Western Pacific subtropical high shifts northward, driving increased precipitation along the coast of South China, in the middle and lower reaches of the Yangtze River, and in Northeast China, while precipitation decreases in the mid-latitudes. In the mid-high latitudes, a dipole pattern of warming in Siberia and cooling in the Sea of Okhotsk emerges. During cold years, the subtropical high is weaker and located further south, with a weaker response and more local characteristics. Mechanistically, this is manifested as a westward shift of the convection position, weakened thermal forcing, and reduced ability to excite teleconnection wave trains. Further analysis of the atmospheric circulation and radiation indicated that the warm and cold phases of the SST regulate the position of the tropical convection center and the intensity of the Walker circulation, thereby influencing the position of the upper-level South Asian High, the activity of the mid-level Okhotsk Sea low vortex, the position of the subtropical high, the low-level water vapor transport path, and the thermal forcing difference, exerting significant asymmetric impacts on the climate of East Asia. This study provides a scientific basis for understanding the regional climate anomaly mechanisms under the background of diverse ENSO and is conducive to improving the ability to predict summer climates in East Asia.

## Keywords

Central Tropical Pacific, Sea Surface Temperature Anomalies, East Asian Climate, Asymmetry, General Circulation

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

### 1.1. 研究背景

热带太平洋海温是全球气候年际变化的最强信号,尤其是在全球变暖的背景下,海温格局发生了巨大变化,振幅也在增大,热带中太平洋海温异常在夏季对于东亚气候的影响愈加显著,成为气候变化与区域响应研究的重要方向。热带中太平洋地区,作为厄尔尼诺—南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)事件频发的关键区域,其海温变化不仅调控着热带和副热带的大气环流系统,也对东亚季风、西南季风、降水格局及极端天气事件产生显著影响。传统研究多聚焦于 ENSO 成熟阶段,即冬季的直接气

候影响, 较少关注 ENSO 衰减阶段的夏季滞后影响。越来越多的观测和模拟结果表明, 暖、冷海温异常对于夏季同期东亚气候的调制效应具有显著的不对称性, 在强度、空间分布上呈现出不同的响应特征, 这种非对称性背后的物理机制仍有待深入揭示。

东亚地区地处亚欧大陆东缘, 涵盖中国、日本、韩国、朝鲜半岛、蒙古等国家和地区, 是全球人口最为密集、经济最活跃、气候系统最复杂的区域之一。该地区不仅拥有世界上最重要的农业产区和工业带, 同时也是全球气候变化对人类活动影响最为敏感的区域之一。由于其地理位置独特, 东亚地区受控于多种气候系统交汇, 包括东亚季风、太平洋副热带高压、西风带等, 对于来自热带中太平洋的气候强迫响应尤为敏感。本课题将有助于深化对海气相互作用非线性机制的理解, 通过分析暖、冷海温事件对于东亚气候及季风系统的影响, 可以揭示不同类型热带强迫对中高纬度气候系统的传递路径和反馈机制, 推动区域气候动力学的研究深入。研究表明, 当前的气候模式在模拟不同类型 ENSO 事件对东亚气候的响应方面存在偏差, 尤其是对中部型 ENSO 事件影响的模拟能力较弱[1]。明确热带中太平洋海温异常的非对称性影响, 有助于改进当前气候模式对 ENSO 事件响应的模拟能力, 提升东亚地区夏季降水和气温的预测准确率。系统探讨夏季热带中太平洋海温对东亚气候影响的不对称性, 不仅具有重要的理论价值, 也在提升预测能力、服务灾害防范和支撑区域可持续发展方面具有广泛的现实意义。

## 1.2. 研究现状

ENSO 是热带太平洋地区最显著的年际尺度海气耦合现象, 对全球气候系统具有重要调控作用。早在 Bjerknes [2]的经典理论中便指出, ENSO 事件可通过调控热带对流引发大气环流异常, 从而影响热带及中高纬度的气候。后续研究进一步揭示, ENSO 通过激发遥相关波列, 能够跨越大尺度距离影响全球天气气候分布格局[3]。在 ENSO 发展的成熟阶段, 尤其是冬季, 赤道太平洋的暖(冷)海温异常通过对流加热(抑制)激发大气中低层辐散和高层辐合, 进而形成准正压结构的罗斯贝波列, 构建出太平洋-北美(PNA)型遥相关模式, 显著影响北美等地的降水分布和环流演变。而在次年夏季, ENSO 事件则可激发出东亚-太平洋型(EAP)或太平洋-日本型(PJ)遥相关波列[4], 对东亚地区的副热带高压、西北太平洋反气旋以及东亚夏季风系统产生重要影响。在季节-年际时间尺度上, ENSO 可以通过影响西北太平洋中低层反气旋性环流异常来调制东亚冬季风的变率, 进而影响东亚地区的气温异常[5]-[7]。在 El Niño 年冬季, 西北太平洋上空通常出现异常的反气旋性环流, 减弱东亚冬季风, 使得东亚地区冬季平均气温偏高; 而在拉尼娜(La Niña)年冬季则相反, 异常的气旋性环流往往出现西北太平洋上空, 增强东亚冬季风, 使得东亚地区冬季平均气温降低。而对于北半球夏季期间, 大量实证和模拟研究均表明, ENSO 是调控东亚夏季气候异常的重要外部因子, 其对降水分布、气温变化及极端天气事件频率均有显著影响[8]。在强 ENSO 事件背景下, 东亚夏季风往往表现出显著偏弱, 进而引发华南和长江流域的异常强降水或干旱, 造成一定的农业和经济损失。

近年来, 关于 ENSO 的研究取得重要突破, 前人通过海表温度异常(SSTA)空间模态分析识别出两种基本类型: 东部型(EP)和中部型(CP)。符淙斌与 Fletcher [9]首次提出东太平洋和中太平洋暖异常中心分异的 El Niño 分类概念, 1990 年代起学界开始关注中太平洋暖中心事件频发态势。随着研究的深入, Larkin 和 Harrison [10]提出“日界线 El Niño”概念, Ashok 等[11]通过分析热带太平洋海温经验正交函数 EOF 分解第二模态, 正式确立“El Niño Modoki”(类厄尔尼诺)的术语体系。后续研究通过多种指标定义方法[12]进一步验证了两类 ENSO 事件的客观存在。值得关注的是, ENSO 形态在 1970 年代后呈现显著年代际变化特征。观测资料显示, 中部型事件发生频率明显增加[13], 混合型事件案例也呈现上升趋势。近来研究重点从传统的 ENSO 成熟阶段秋冬季向夏季延伸。研究表明, 冬季成熟的东部型 El Niño 事件可通过激发印度洋“电容器效应”导致次年夏季西太平洋副高异常偏西, 进而通过调制水汽输送路径使长江

流域降水增加 15%~20%; 而中部型 ENSO 事件由于生命周期较短, 其夏季残留信号更多依赖热带太平洋自身的持续性热力异常。值得注意的是, ENSO 与夏季风系统的相互作用呈现显著非对称性: El Niño 衰减年夏季东亚季风减弱幅度可达 La Niña 年的 2.3 倍, 这种差异与赤道太平洋次表层热含量异常的纬向再分配密切相关[14]。上述结果表明, 热带太平洋海温的变化会导致全球的大气环流异常, 并对东亚地区的气候造成显著的影响。而不同区域的热带太平洋海温的变化对东亚地区的影响是不同的。

现有研究表明, ENSO 冷暖事件常出现正、负位相非对称的现象, 暖事件强度和频率往往强于冷事件[15]-[17]。这是由于非线性温度平流造成的。并且, 热带海温对多地区气候的影响也具有很强的非对称性[18]-[23]。近几十年来, 赤道太平洋的海温异常增暖区域开始逐渐西移至赤道太平洋的中部, 这里海温的背景要高于东太平洋区域, 所以即使是相对于东部型厄尔尼诺更小的暖海温异常, 在这里也会引起较强的对流活动异常。那么, 不同位相的中太平洋海温对东亚地区气候变化的影响是否对称? 本研究以此为切入点, 探讨不同位相的夏季热带太平洋海温变化对同期东亚气候的影响, 并进一步揭示其物理机制。

## 2. 资料和方法

### 2.1. 资料概况

1) 地表气温和降水资料均是来自英国东英吉利大学气候研究中心(CRU)发布的高分辨率格点化月平均实测数据[24], 水平分辨率为  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ , 起始时间为 1901 年 1 月, 本研究选取 CRU TS v4.00 数据集中的月平均降水和气温资料。

2) 来自美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)地球系统研究实验室(Earth System Research Laboratory, ESRL)重建的海温资料(Extended Reconstructed Sea Surface Temperature version 4, ERSST v4b), 该资料的水平分辨率为  $2^\circ \times 2^\circ$ , 起始时间为 1854 年 1 月[25]。

3) 来自美国国家环境预报中心和国家大气研究中心(National Centers for Environment Prediction/National Center for Atmospheric Research, NCEP/NCAR)发布的大气环流和辐射再分析月平均资料[26], 包括: 各层水平风场、垂直速度、位势高度、海平面气压(Sea Level Pressure, SLP)等, 水平分辨率均为  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ , 起始时间为 1948 年 1 月。

4) 本文中所指夏季为 6~8 月。

### 2.2. 方法

#### 2.2.1. 经验正交函数(EOF)分解

对于一个气象要素, 有  $m$  个空间点与  $n$  次观测值, 组成的矩阵中任意元素就表示了某一空间、某一时刻的函数。EOF 的用途则是将这样的时空函数分解成空间函数与时间函数两部分的线性组合。

$X_{ij} = \sum_{h=1}^H T_{ih} \times V_{hj}$  式中,  $X_{ij}$  为要素场,  $i=1,2,\dots,m$  为时间序号,  $j=1,2,\dots,n$  为站点序号;  $T_{ih}$  为时间函数,  $V_{hj}$  为空间函数,  $h=1,2,\dots,H$  为分解场的个数。通常把空间函数  $V_{hj}$  视为典型场, 完全随空间变化, 而不随时间变化; 而把只随事件变化的事件函数  $T_{ih}$  视为典型场的权重系数。

#### 2.2.2. T 检验

(1) 单序列相关性的  $T$  检验

对于气候变量在不同时刻的线性相关和两气候变量的线性相关是否显著, 即相关系数达到多少算存在显著相关关系, 必须进行统计检验。即由相关系数  $r$ , 反算  $t$  值。

$$t = \sqrt{n-2} \frac{r}{\sqrt{1-r^2}} \quad (1)$$

上式服从自由度  $n-2$  的  $t$  分布, 给出信度  $\alpha$ , 查表可以得到临界值  $t_\alpha$ , 当  $t$  的绝对值大于等于  $t_\alpha$  时, 表明两个序列存在显著的相关关系。

## (2) 差值 $T$ 检验

差值  $T$  检验是合成分析置信水平检验, 检验两组样本序列平均值差异的显著性。本文分别对海温冷暖位相下降水、气温、大气环流和辐射等物理量所对应的气象要素场进行了差值显著性检验。

原假设  $H_0: \mu_0 - \mu_1 = 0$  定义一个统计量为:

$$t = \frac{\bar{x} - \bar{y}}{\sqrt{\frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \left( \frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}} \quad (2)$$

式中两序列样本个数分别为  $n_1$  和  $n_2$ ,  $\bar{x}_1$  及  $\bar{x}_2$  为两个序列的平均值,  $S_1^2$ ,  $S_2^2$  分别表示两样本的方差。上式遵从自由度为  $n_1 + n_2 - 2$  的  $t$  分布,  $t \sim t(n_1 + n_2 - 2)$ , 给出信度  $\alpha$ , 查表可以得到临界值  $t_\alpha$ 。计算  $t$  后在原假设  $H_0$  下, 比较  $t$  和  $t_\alpha$ , 当  $t$  的绝对值大于等于  $t_\alpha$  时, 否定原假设  $H_0$ , 说明存在显著性差异; 当  $t$  小于  $t_\alpha$ , 则接受原假设, 即不存在显著性差异。

### 2.2.3. 合成分析

研究气候变化的时候需要分析一些特殊年份的显著性特点, 将特殊年份的气候要素平均值与正常年进行比较从而分析这些年份显著特点的方法就是合成分析。本文中先对热带中太平洋 Niño4 区域海温序列进行标准化处理, 并将海温距平高/低于 1 个标准差的年份定义为海温偏暖/低年份, 然后分别对两种情况下的降水、气温等气象要素与正常年进行比较, 以分析其特点。计算得出的差值场是否显著, 需利用上述  $T$  检验方法进行显著性检验。

### 2.2.4. 视热源

本章中根据 Luo 和 Yanai [27] 以及 Nitta [28] 的工作计算了大气视热源  $Q_1$ , 公式如(3)所示:

$$Q_1 = c_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \bar{v} \cdot \nabla T + \left( \frac{p}{p_0} \right)^\kappa \omega \frac{\partial \theta}{\partial p} \right) \quad (3)$$

以上公式中, 定压比热容  $c_p = 1005 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ ,  $\kappa = R/c_p \approx 0.286$ ,  $\theta$  代表位温, 其他符号均为气象学中习惯性用法。 $Q_1$  公式右端包含了局地变化项、平流项以及垂直输送项三项。本文计算了  $Q_1$  从海平面至 300 hPa 的垂直积分, 用  $\langle Q_1 \rangle$  表示。

## 3. 研究结果

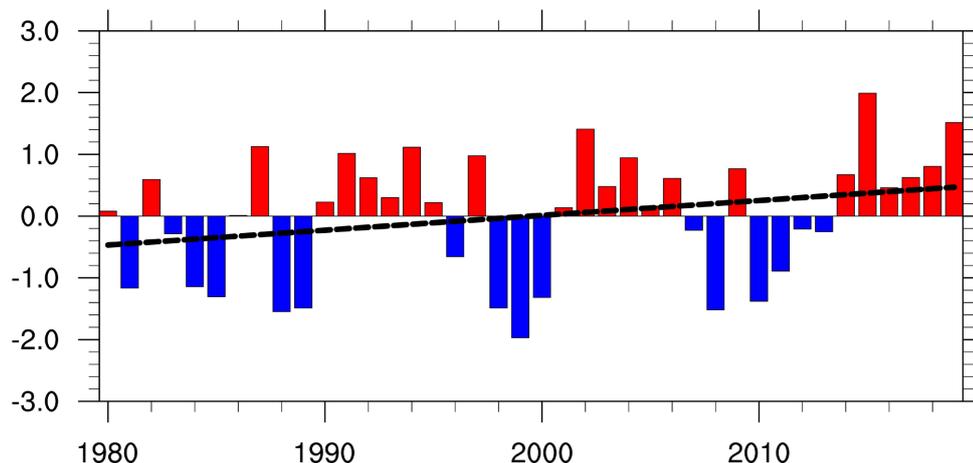
### 3.1. 热带中太平洋近几十年夏季海温变化特征

从标准化的 Niño4 区海温时间序列图(图 1)中可以看到, 热带中太平洋夏季海温有显著的年际振荡特征, 中部型 El Niño 现象和 La Niña 现象交替出现。同时海温时间序列的线性回归结果显示, 近 40 年热带中太平洋海温在持续增暖, 与目前全球气候变暖的趋势相吻合。

**Table 1.** The SST warm years and cold years (beyond and below 1 standard deviation)

**表 1.** 海温偏暖年份与偏冷年份(正负超过 1 个标准差)

	年份
偏暖年	1987 1991 1994 2002 2015 2019
偏冷年	1981 1984 1985 1988 1989 1998 1999 2000 2008 2010



**Figure 1.** The time series of the standardized time series of Niño4 SST (bar charts) and the trend (black dashed line) during the boreal summers (June-August) for the period 1980-2020

**图 1.** 1980~2020 年夏季(6~8 月) Niño4 区平均海温标准化时间序列(柱状图)及其趋势(黑色虚线)

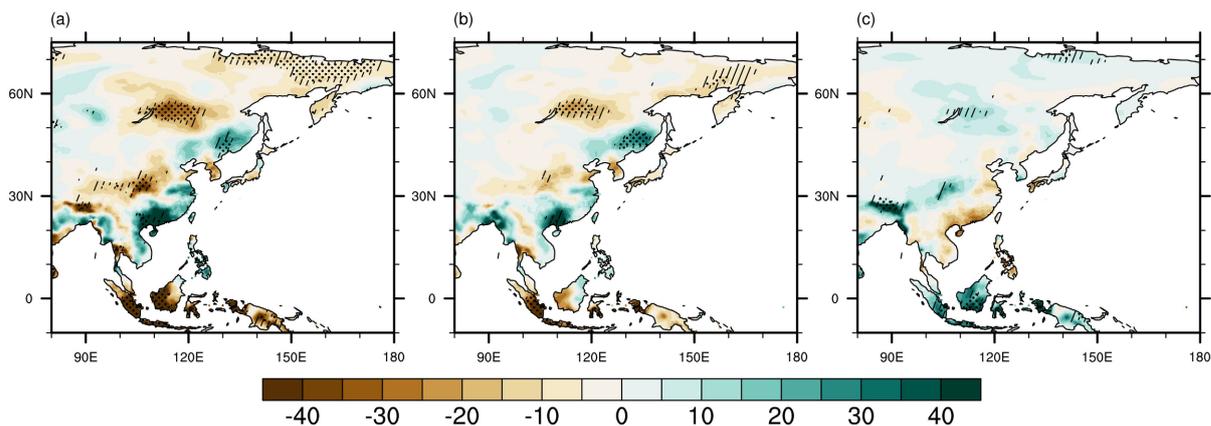
为了进一步研究暖海温和冷海温的不对称性影响特征, 本研究把上述海温高于(低于)超过 1 个标准差的年份定义为热带中太平洋海温偏暖年(偏冷年)(本文中简称偏暖/冷年)。如表 1 所示, 并利用合成分析的方法探讨其与东亚气候的关系。

### 3.2. 热带中太平洋夏季海温异常对气候的影响

图 2(a)为海温偏暖年份与偏冷年份平均降水的差值场。如图所示, 受热带中太平洋海温异常变化的影响, 东亚区域呈现出了多极值中心的格局, 其中贝湖东部、马来群岛、中国东北、四川盆地、华南沿岸以及藏南地区受海温变化影响显著, 而山东半岛、长江中下游、朝鲜半岛和日本列岛等区域也伴有较强的降水响应信号。从回归分析的结果(图略)来看, 热带中太平洋海温对降水异常影响的空间分布与合成结果(图 2(a))基本一致。图 2(b)和图 2(c)则进一步展示了热带中太平洋夏季海温处于正、负异常时, 各个地区的降水异常对海温变化的不同响应。如图 2(b)所示, 海温偏暖时华南沿岸、长江中下游以及东北地区降水量增多: 东北地区表现为一西一东的双极值中心的格局, 东部降水变化较为显著; 华南沿岸一带降水增多信号最为强烈, 局部达到了 40 mm 以上的级别。东亚 30°N~40°N 一带区域大都表现为降水异常减少, 中国中西部、山东半岛、朝鲜半岛及日本列岛降水减少的信号比较显著, 体现了热带海温异常对中纬度气候的远程调控作用, 也可能包含了印度洋和中纬度环流的协同影响。海温偏冷时中国东北地区降水响应较弱。东亚中纬地区降水表现为西多东少的格局, 长江中上游地区降水显著增多, 淮河流域附近降水量有所减少, 朝鲜半岛南部有较强降水增加信号而中部较海温偏暖时降水信号微弱, 日本列岛降水减少的信号变化不大, 只有东京附近地区有较弱的降水增加。赤道中太平洋海温冷暖位相的转变在华南地区表现出较为对称的影响特征。海洋性大陆大部分区域在偏暖年降水显著减少而偏冷年降水显著增多, 呈现出气候的线性对称响应特征。

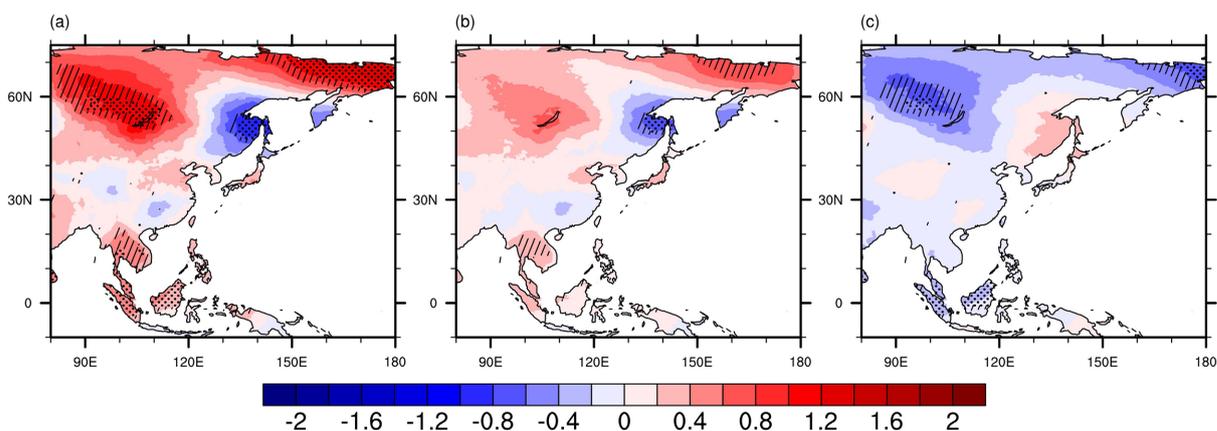
从对气温的影响来看, 如图 3(a)所示, 受热带中太平洋海温异常影响, 亚洲中高纬一带表现为显著的纬向波状型气温异常, 鄂霍茨克海为中心的圆形区域内气温变化信号强度由中心向外逐步递减, 这种气温的异常变化将导致亚洲中高纬天气系统活动的异常。从海温暖、冷年份的对比来看, 海温异常对亚洲中高纬气温的影响有着显著的不对称特征。如图 3(b)和图 3(c)所示, 可以发现西侧偏暖年份气温稍增偏冷年份降低显著, 东侧偏暖年气温降低显著偏冷年稍增的变化趋势。山东半岛和日本列岛在偏暖年表现为气温的升高, 而偏冷年份日本列岛南部为弱的冷信号东北依旧是增暖的信号。中南半岛在偏暖年增

温显著而偏冷年气温降低并不显著, 海洋性大陆西部则是在偏暖年增温不明显而在偏冷年降温显著。其余地区气温变化并不显著, 与海温联系很弱。



**Figure 2.** Composite differences in the precipitation (unit:  $\text{mm month}^{-1}$ ) between the (a) SST warm years and cold years, (b) SST warm years and climate average and (c) SST cold years and climate average during 1980-2020 summers. The shaded/dashed areas are significant at the 95%/90% confidence level based on the Student's *t*-test

**图 2.** (a) 1980~2020 年夏季海温偏暖年份与偏冷年份降水差值场; (b)/(c) 分别为海温偏暖/冷年份与 1980~2020 年气候态降水差值场(单位:  $\text{mm month}^{-1}$ )。打点/斜杠阴影部分表示合成结果通过 95%/90% 的置信水平



**Figure 3.** Same as **Figure 2**, but for the surface air temperature anomalies (unit:  $^{\circ}\text{C}$ )

**图 3.** 与图 2 一致, 但为地表气温异常(单位:  $^{\circ}\text{C}$ )

### 3.3. 热带中太平洋海温影响气候的不对称性可能的物理机制

本研究利用向外长波辐射(Outgoing Longwave Radiation, OLR)来代表对应区域的对流活动(图 4(a))。如图 4(b)所示, 相较于海温偏冷年份, 热带太平洋上出现一对偶极子: 热带中太平洋在偏暖年份表现为显著的上升运动, 而热带海洋性大陆上空则为下沉气流。从经向方向看, 热带中太平洋往北至日本海表现为典型的东亚-太平洋(EAP/PJ)型遥相关, 即上升-下沉-上升的波动型分布。在海温偏暖年份(图 4(b)),  $50^{\circ}\text{N}\sim 60^{\circ}\text{N}$  呈现出东西偶极型分布, 贝加尔湖附近为高值区, 鄂霍茨克海海附近为低值区。高值区对应着对流活动较弱, 高云减少、云顶温度较高, 降水随之减少, 气温稍增。低值区对应着对流活动频繁, 有高云顶的存在, 与上文冷涡活动频繁相印证, 降水量显著增加, 温度显著降低。中低纬度 OLR 分布与上文分析相吻合, 广西、长江中下游地区等地为低值区, 山东半岛、中西部地区和藏南地区为高值区。赤道附近的海洋性大陆区域为显著的向外长波辐射高值区, 天空晴朗, 干燥少雨。偏冷年份中(图 4(c)),

高纬度表现出了单极格局, 即贝湖以西为低值中心, 东部没有显著的 OLR 距平。中低纬度藏南区域成为了 OLR 负距平中心, 对应着大规模的地形降水。海洋性大陆对流更加活跃, 成为了显著低值区, 雨量暴增, 气温大幅下降。

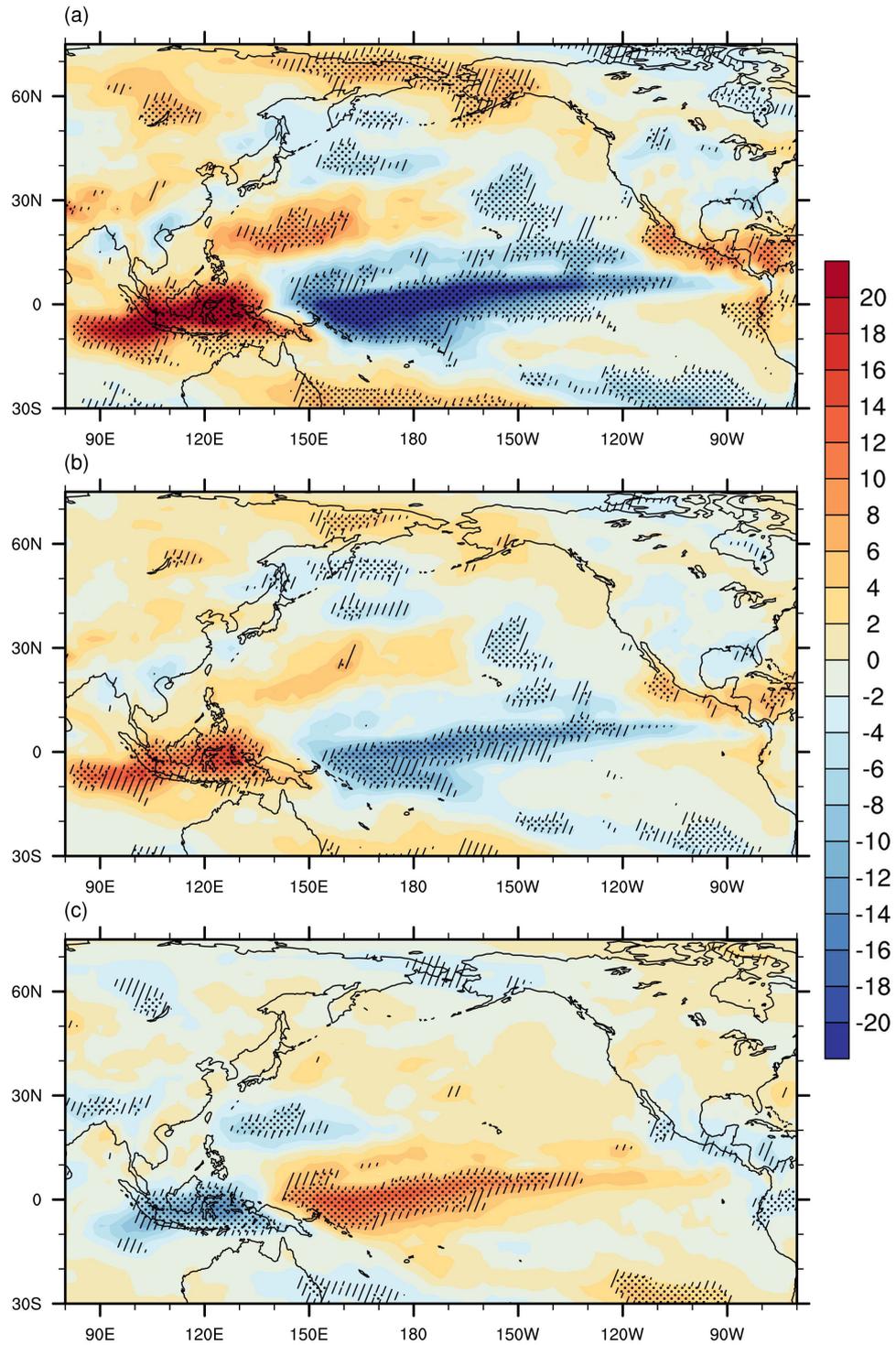
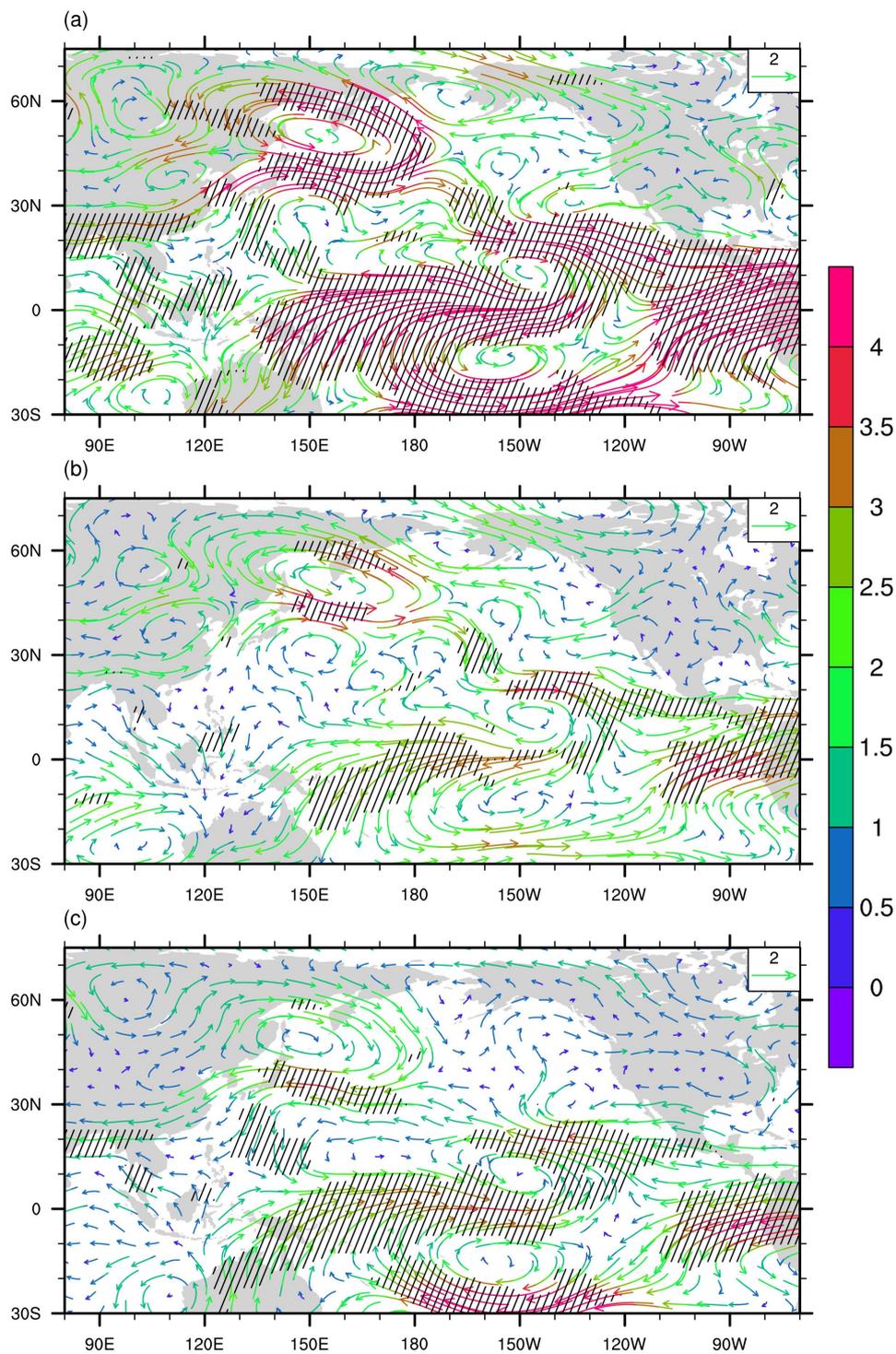


Figure 4. Same as Figure 2, but for the OLR (unit:  $W \cdot m^{-2}$ )  
图 4. 与图 2 一致, 但为 OLR (单位:  $W \cdot m^{-2}$ )



**Figure 5.** Same as **Figure 2**, but for the horizontal wind at 200 hPa (unit:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )  
**图 5.** 与图 2 一致, 但为 200 hPa 水平风场(单位:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )

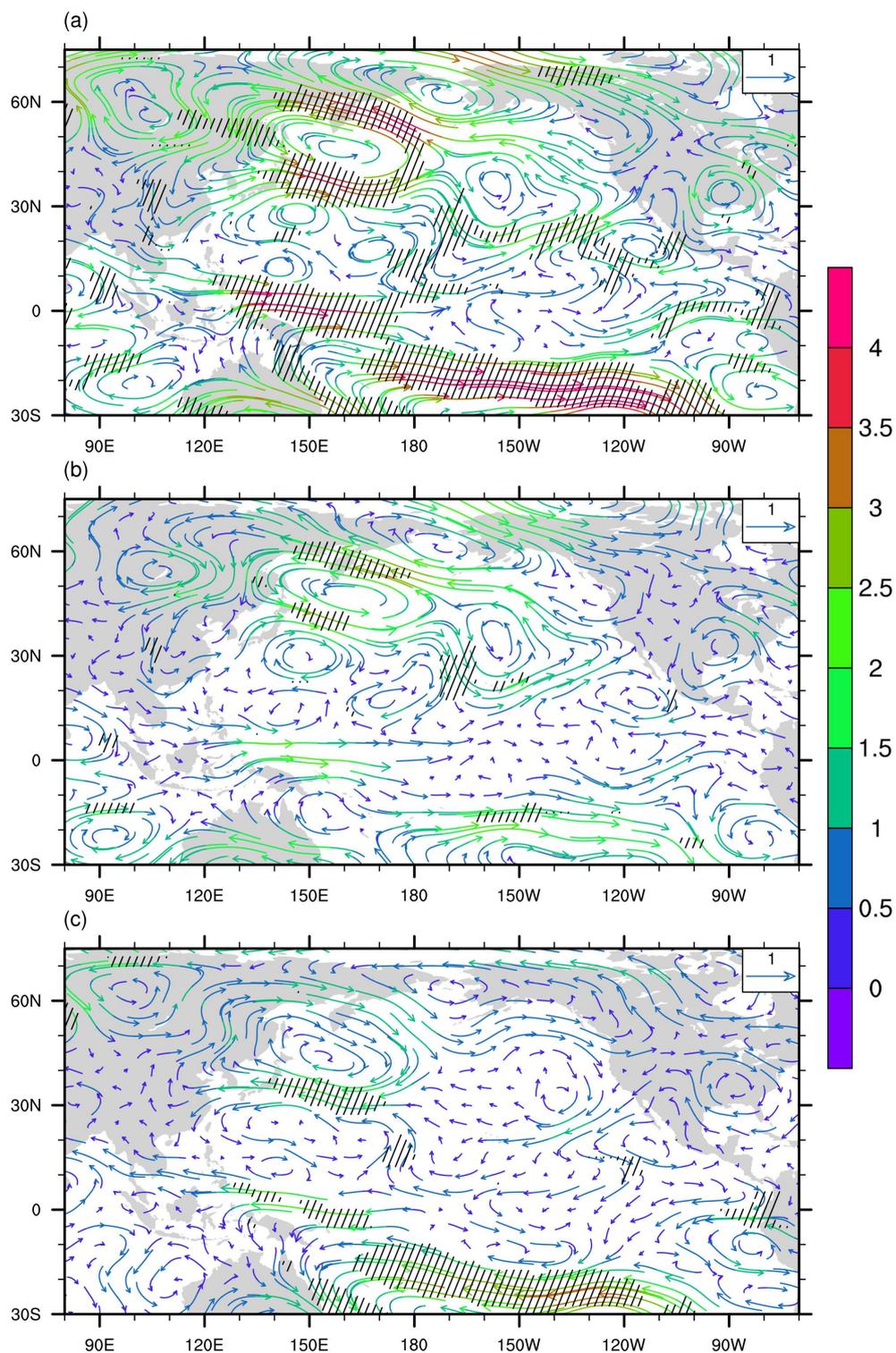
海温偏暖年份与偏冷年份夏季平均的 200 hPa 差值风场如图 5(a)所示, 中低纬以及赤道附近均表现出显著的环流异常, 影响着大尺度环流的稳定性。中高纬鄂霍茨克海上空形成了一个闭合环流中心, 西侧贝加尔湖以东表现为显著的北风异常, 在蒙古高压反气旋的配合下 40°N 附近为东风距平。中低纬孟湾

附近为显著的西风异常。赤道太平洋上空 200 hPa 也表现为显著的异常环流。在海温偏暖年(图 5(b)), 赤道中东太平洋区域高层有异常反气旋, 且对应海域上空有正变高, 气流在高层辐散, 有利于产生上升运动。赤道中东太平洋对流增强, 西太平洋对流减弱, 沃克环流减弱。异常反气旋西侧为显著的东风异常并在赤道西太平洋区域减弱向北辐合下沉运动加强, 使得西太平洋副热带高压增强。鄂霍茨克海高层表现为异常气旋, 低涡活动可能会更加频繁, 中国东北易出现冷涡暴雨, 夏季东北地区和华北地区的持续性降水通常与冷涡系统相关联, 低值系统造成的气旋活动也可能削弱西太平洋副高, 削弱其对东亚中纬度地区的控制; 另一方面, 南亚高压在偏暖年份表现为西部型, 华南及长江中下游地区有利于上升运动, 中西部地区的对流则不易发展, 导致中国南方夏季高温天气减少, 台风路径在副热带高压较强的背景下西进增多, 路径偏东, 对于华南降水格局产生影响。在海温偏冷年份(图 5(c)), 150°W 上空为异常气旋中心, 气流在高层辐合下沉, 西侧为异常西风, 西太平洋对流增强, 沃克环流加强, 赤道附近对流中心西移至热带西太平洋区域, 哈德来环流随之增强, 下沉支副高较强且位置偏西。鄂霍茨克海上空转为同偏暖年份(图 5(b))相反的反气旋式环流。另一方面, 南亚高压表现为东部型, 青藏高原东南部、四川盆地为上升运动区域, 东部大部分地区下沉气流为主, 有利于副高西进加强, 控制当地。东亚大槽在偏冷年份不稳定, 冷空气更易配合高原上东移的低槽影响我国中西部地区, 在四川盆地等区域造成降水。

在对流层中层(图 6(a)), 海温暖、冷年份对大气环流的影响也不对称。在偏暖年份(图 6(b)), 鄂霍茨克海异常气旋相较 200 hPa 位置偏东偏南, 西侧有蒙古高压异常反气旋活动, 东亚大槽加深, 预示着夏季东北冷涡活动频繁。其西南侧的偏北风与暖湿气流交汇, 极易引发华北、东北的强对流天气, 使得东北地区降水增多, 气温显著降低。在低纬地区, 热带海洋性大陆上空对流中心东移至中太平洋, 在该区域出现了明显的西风异常, 上空的上升运动转为下沉运动, 抑制了对流发展且印尼附近海温异常偏冷, 水汽蒸发也随之减少, 热带辐合带(ITCZ)活动北移, 导致该地区降水量的骤减; 而偏冷年份(图 6(c)), 东亚大槽异常不明显, 鄂霍茨克海附近及乌拉尔山脉附近高脊加强, 西伯利亚地区低槽加深趋势明显, 形成两脊夹一槽的形势, 贝加尔湖以西位于脊前冷空气聚集影响此处, 气温显著降低; 应贝湖以东区域正好位于槽前有持续的上升运动降水较偏暖年份增加显著。东北及外东北地区受高脊的影响, 异常反气旋的控制, 对流较弱且不易发展, 降水量较常年变化不显著, 气温小幅增暖。副高活动在偏冷年份较弱, 位置偏南偏西, 西南气流与北方冷空气在中国西南地区交汇, 降水量增加。中国东部沿海及华南地区则因副高控制, 天气晴好。对流中心西移, 南亚高压位置偏北偏西, 西风系统能更深入高原南侧, 与来自孟加拉湾的季风水汽在藏南-横断山区交汇, 上升运动显著, 地形抬升作用与水汽叠加触发降水, 较常年增加明显。海洋性大陆水汽蒸发较强, 南海夏季风较常年增强, 降水增多。

在对流层低层(图 7(a)), 鄂霍茨克海东南侧异常气旋环流显著, 孟加拉湾及南侧海域上跨赤道气流差异很大, 赤道太平洋区域表现为西风距平。海温偏暖年(图 7(b)), 日本南部由于中太平洋对流加强, 在日本南部形成下沉支, 副热带高压控制降水减少。沃克环流东移, 导致印尼-南海一带下沉运动增强, 降水减少, 总云量减少, 冷却加强, 同时东南信风的增强在赤道附近海域产生了更强的离岸风, 促使表层暖水被吹离海岸, 底层冷水上涌补充, 形成上升流冷却效应, 导致孟湾附近海域温度下降。北侧西部型的南亚高压会抑制季风北进, 孟湾沿岸产生降水而藏南区域水汽输送不足降水变化不大, 而中南半岛天气晴好, 辐射升温作用强盛, 海陆热力差异增大, 跨赤道气流在 10°N 左右转为西南风吹向中南半岛, 造成部分地形雨。携带大量水汽的暖湿西南气流在广西、粤西及雷州半岛等地造成大规模降水。在偏冷年(图 7(c)), 日本东部海域为反气旋式环流异常, 受赤道西太平洋海温偏暖, 沃克环流增强, 东部型南亚高压东侧的下沉气流的影响, 副热带高压影响范围较大并且西进, 控制日本南部及中国东南沿海地区, 低层太平洋的水汽输送在东南沿海区域很弱, 没有水汽累积和上升运动配合, 华南、淮海流域降水量减少。中太平洋海温下降, 海洋性大陆周围海温有所回升, 孟加拉湾的西南季风强度因此减弱, 而东部型的南

亚高压导致西南季风在其边缘北上于藏南地区产生大规模地形雨。赤道太平洋附近风场距平则是中太平洋对流增强, 沃克环流东移和皮耶克尼斯反馈综合作用的结果。



**Figure 6.** Same as **Figure 2**, but for the horizontal wind at 500 hPa (unit:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )

**图 6.** 与图 2 一致, 但为 500 hPa 水平风场(单位:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )

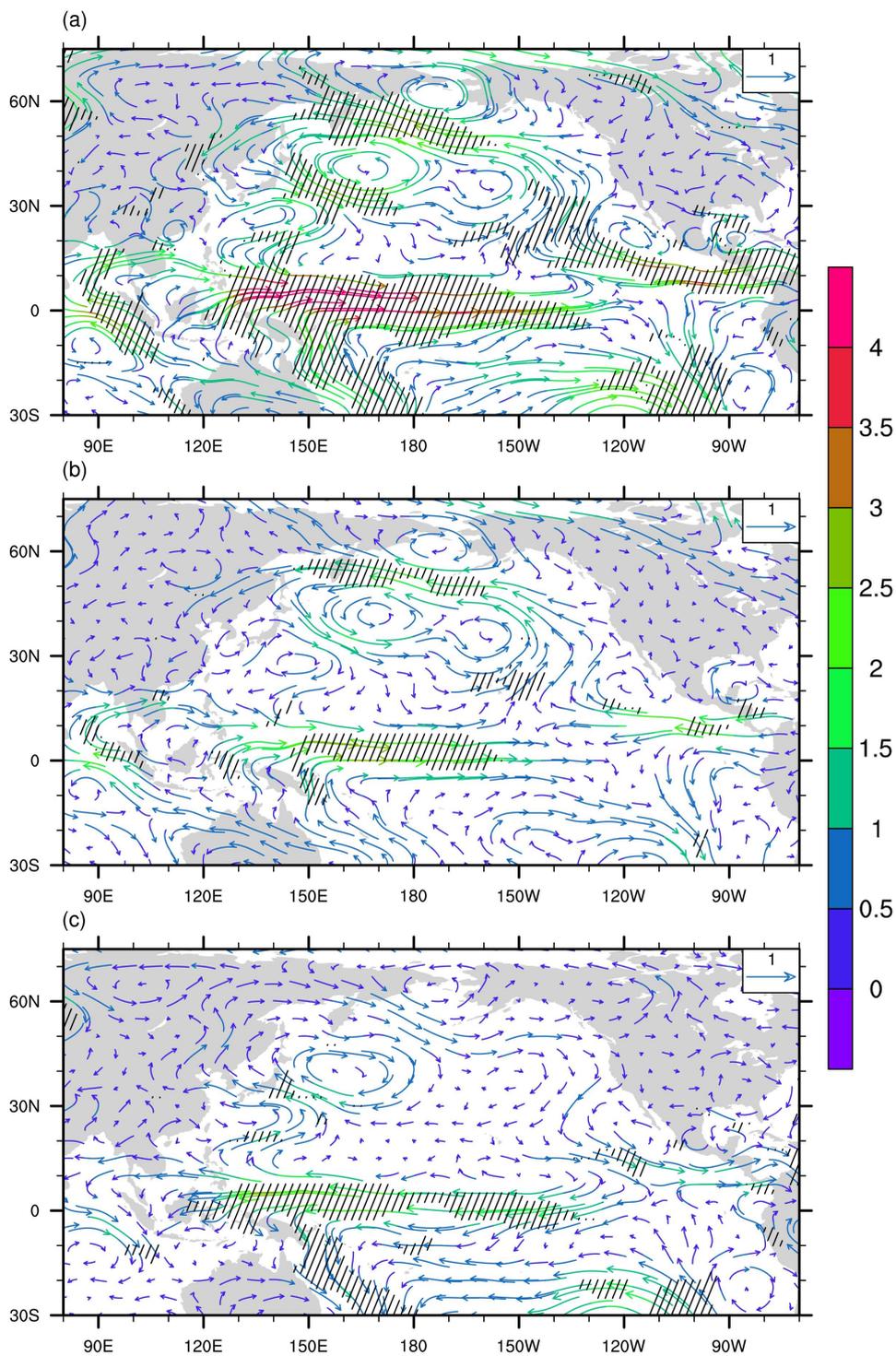
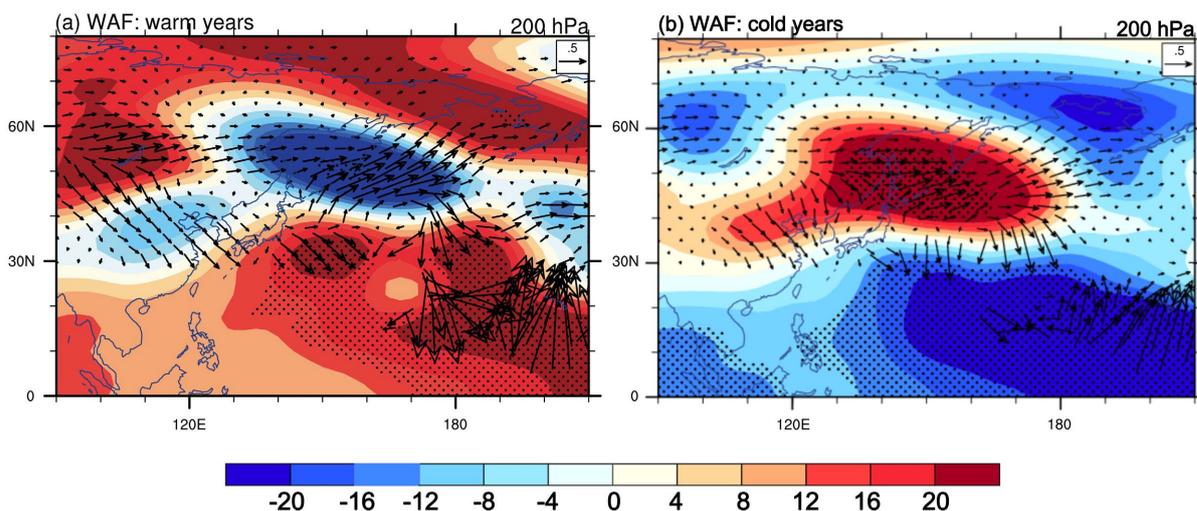


Figure 7. Same as Figure 2, but for the horizontal wind at 850 hPa (unit:  $m \cdot s^{-1}$ )  
图 7. 与图 2 一致, 但为 850 hPa 水平风场(单位:  $m \cdot s^{-1}$ )

我们进一步分析了热带中太平洋海温在异常暖、冷年份相应的波作用通量和加热场。如图 8(a)所示, 在夏季热带中太平洋海温偏暖年份, 高度异常从中国南海至东亚中纬地区在经向方向上呈现出一个显著的三极子 PJ 波型, 热带西太平洋以及中国南海地区的负高度异常意味着当地气旋性活动的增强, 西太副

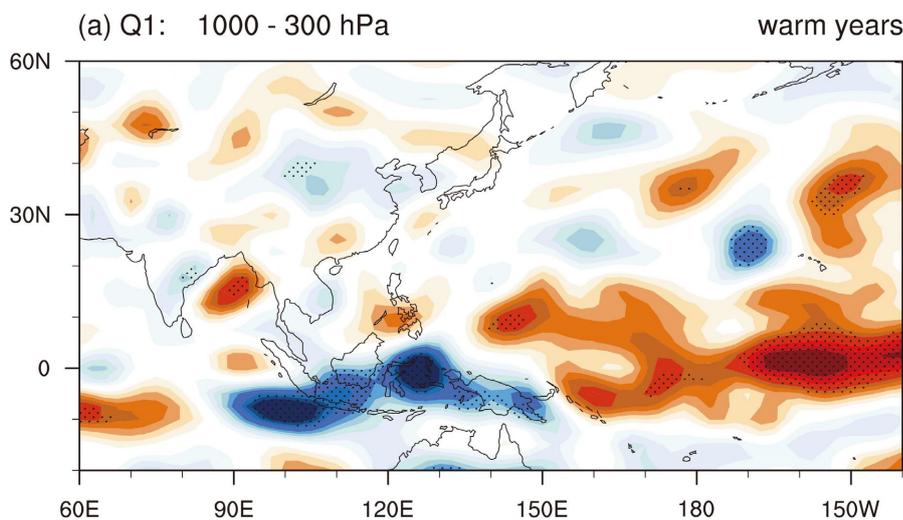
高较气候态偏弱, 对流活动异常活跃; 而长江中下游地区至日本南部的正高度异常则意味着该区域为异常反气旋性环流, 相应的对流活动受到抑制。另外, 在热带中太平洋加热作用下, PJ 波列与欧亚大陆的纬向波列在东亚北部地区汇合再向东传播, 热带地区的海温异常由此影响到中高纬地区的大气环流。而在海温偏冷年份(图 8(b)), 高度异常与图 8(a)几乎相反, 但异常振幅和波作用通量均有所减弱。



**Figure 8.** Composite differences in the geopotential height (shading, unit: gpm) and WAF (vectors, unit:  $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ ) between the (a) SST warm years, (b) cold years and climate average during 1980-2020 summers. The spotted areas are significant at the 95% confidence level based on the Student's  $t$ -test

**图 8.** (a) 1980~2020 年夏季海温偏暖年份, 和(b) 偏冷年份分别与 1980~2020 年气候态 200 hPa 高度差值场(颜色阴影, 单位: gpm)与波作用通量(矢量, 单位:  $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ )。打点部分表示高度合成结果通过 95%的置信水平

大气环流的异常通常与大气的热力强迫异常有着密切的关系, 因此接下来, 我们探究了该时间段上整层大气的加热异常。如图 9(a)所示, 在暖海温年, 大气视热源 $\langle Q_1 \rangle$ 在热带太平洋中部延伸至中国南海区域表现为强烈的正异常, 而在江淮流域和海洋性大陆核心区域 $\langle Q_1 \rangle$ 表现为显著的负异常。图 9(a)的分布表明, 热带中太平洋至中国南海地区作为异常热源, 其对流活动以及带来的降水较气候态偏强; 而长江流域以及海洋性大陆地区作为视热汇, 降水较气候态偏少。这一结论与之前的分析相符。而在冷海温年(图 9(b)), 大气视热源 $\langle Q_1 \rangle$ 的异常分布与暖海温年几乎相反, 但异常强度较暖海温年有所减弱。



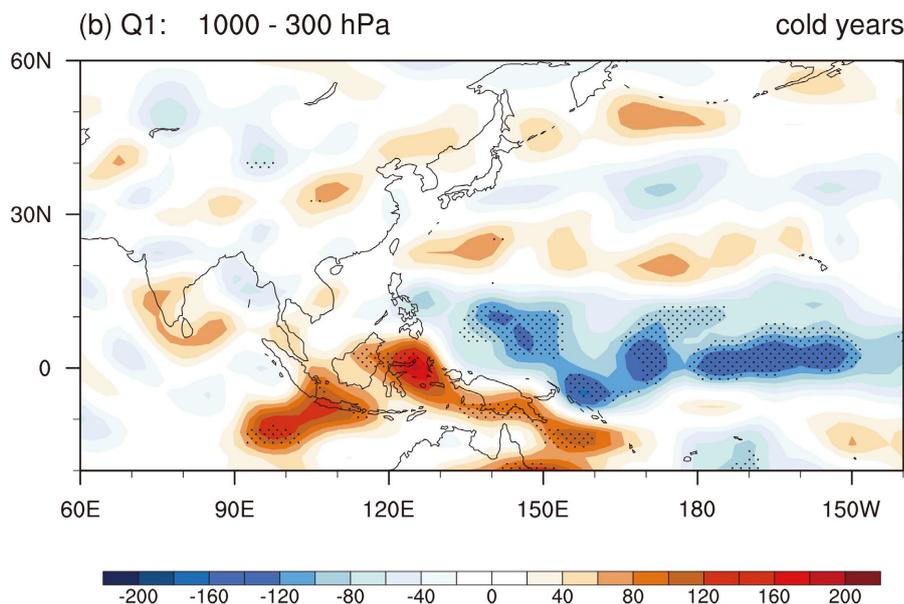


Figure 9. Same as Figure 8, but for the apparent heat source  $\langle Q_1 \rangle$  (unit:  $W \cdot m^{-2}$ )

图9. 与图8一致, 但为整层大气视热源 $\langle Q_1 \rangle$  (单位:  $W \cdot m^{-2}$ )

#### 4. 结论

东亚地区人口密度高, 是重要的多产业基地, 对气候有很强的依赖性。因此对于该地区气候变异机制的研究有着重要的科学与社会意义。大量的研究表明东亚地区气候变化受热带中太平洋海温异常的影响非常大, 前人也通过数值模式进行了模拟验证了热带中太平洋海温异常在 80 年代后对东亚气候影响的增强[29]。本文的研究立足于热带中太平洋海温和东亚气候之间的关系, 利用 1980~2020 年多源观测和再分析资料, 系统探讨了夏季热带中太平洋海温异常对东亚气候的影响及其不对称性。主要结论如下:

(1) 热带中太平洋海温在 1980~2020 年表现出了持续增暖和空间结构上的显著变化, 对同期气候影响有着不对称性。

(2) 东亚夏季气温和降水对正、负海温异常响应具有明显的不对称性, 偏暖年东亚气候异常更强烈、更系统, 而冷年多表现为局地响应或方向相反且幅度较小。

(3) 大气环流、热带对流以及热力过程均表明海温偏暖年份对东亚夏季气候的调控能力更强, 体现出非线性的大气响应机制。

(4) 海温偏暖年引发东亚—太平洋型波列(EAP/PJ)、副热带高压加强、季风北跳; 海温偏冷年遥相关响应不稳定, 且副高偏弱, 风场的大范围调控效果不佳。遥相关型式与背景态差异使得冷暖海温事件的气候调控效果不对称, 是东亚气候不对称响应的关键机制之一。

#### 注 释

本文图片由 NCL 制图。

#### 参考文献

- [1] Ham, Y. and Kug, J. (2011) How Well Do Current Climate Models Simulate Two Types of El Nino? *Climate Dynamics*, **39**, 383-398. <https://doi.org/10.1007/s00382-011-1157-3>
- [2] Bjerknes, J. (1969) Atmospheric Teleconnections from the Equatorial Pacific. *Monthly Weather Review*, **97**, 163-172. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1969\)097<0163:atftpe>2.3.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1969)097<0163:atftpe>2.3.co;2)

- [3] 尹泽疆, 魏维, 杨崧. 北大西洋涛动和英国-鄂霍次克海走廊型遥相关对 2022 年盛夏长江中下游极端高温的影响[J]. 大气科学学报, 2023, 46(3): 345-353.
- [4] Nitta, T. and Yamada, S. (1989) Recent Warming of Tropical Sea Surface Temperature and Its Relationship to the Northern Hemisphere Circulation. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, **67**, 375-383. [https://doi.org/10.2151/jmsj1965.67.3\\_375](https://doi.org/10.2151/jmsj1965.67.3_375)
- [5] 李崇银. El Niño 事件与中国东部气温异常[J]. 热带气象, 1989, 5(3): 210-219.
- [6] Chongyin, L. (1990) Interaction between Anomalous Winter Monsoon in East Asia and El Niño Events. *Advances in Atmospheric Sciences*, **7**, 36-46. <https://doi.org/10.1007/bf02919166>
- [7] Wen, C., Graf, H. and Ronghui, H. (2000) The Interannual Variability of East Asian Winter Monsoon and Its Relation to the Summer Monsoon. *Advances in Atmospheric Sciences*, **17**, 48-60. <https://doi.org/10.1007/s00376-000-0042-5>
- [8] 祁淼. 中国东部夏季极端降水统计特征及其与大尺度气候变化的关系[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2016.
- [9] 符淙斌, Fletcher. “埃尔尼诺”(El Niño)时期赤道增暖的两种类型[J]. 科学通报, 1985(8):596-599.
- [10] Larkin, N.K. and Harrison, D.E. (2005) Global Seasonal Temperature and Precipitation Anomalies during El Niño Autumn and Winter. *Geophysical Research Letters*, **32**, L16705. <https://doi.org/10.1029/2005gl022860>
- [11] Ashok, K., Behera, S.K., Rao, S.A., Weng, H. and Yamagata, T. (2007) El Niño Modoki and Its Possible Teleconnection. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **112**, C11007. <https://doi.org/10.1029/2006jc003798>
- [12] 秦坚肇. 两类厄尔尼诺对次年夏季中国东部降水的可能影响[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国气象科学研究院, 2014.
- [13] McPhaden, M.J. (2012) A 21st Century Shift in the Relationship between ENSO SST and Warm Water Volume Anomalies. *Geophysical Research Letters*, **39**, L09706. <https://doi.org/10.1029/2012gl051826>
- [14] Kong, W. and Chiang, J.C.H. (2020) Southward Shift of Westerlies Intensifies the East Asian Early Summer Rainband Following El Niño. *Geophysical Research Letters*, **47**, e2020GL088631. <https://doi.org/10.1029/2020gl088631>
- [15] Kao, H. and Yu, J. (2009) Contrasting Eastern-Pacific and Central-Pacific Types of Enso. *Journal of Climate*, **22**, 615-632. <https://doi.org/10.1175/2008jcli2309.1>
- [16] An, S. and Jin, F. (2004) Nonlinearity and Asymmetry of Enso. *Journal of Climate*, **17**, 2399-2412. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017<2399:naoe>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<2399:naoe>2.0.co;2)
- [17] Jin, F., An, S., Timmermann, A. and Zhao, J. (2003) Strong El Niño Events and Nonlinear Dynamical Heating. *Geophysical Research Letters*, **30**, Article No. 1120. <https://doi.org/10.1029/2002gl016356>
- [18] Li, C., Wang, C. and Zhao, T. (2017) Influence of Two Types of ENSO Events on Tropical Cyclones in the Western North Pacific during the Subsequent Year: Asymmetric Response. *Climate Dynamics*, **51**, 2637-2655. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-4033-y>
- [19] Karori, M.A., Li, J. and Jin, F. (2013) The Asymmetric Influence of the Two Types of El Niño and La Niña on Summer Rainfall over Southeast China. *Journal of Climate*, **26**, 4567-4582. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-12-00324.1>
- [20] Feng, J. and Li, J. (2011) Influence of El Niño Modoki on Spring Rainfall over South China. *Journal of Geophysical Research*, **116**, D13102. <https://doi.org/10.1029/2010jd015160>
- [21] Cai, W., van Rensch, P., Cowan, T. and Sullivan, A. (2010) Asymmetry in ENSO Teleconnection with Regional Rainfall, Its Multidecadal Variability, and Impact. *Journal of Climate*, **23**, 4944-4955. <https://doi.org/10.1175/2010jcli3501.1>
- [22] Chou, C. and Lo, M. (2007) Asymmetric Responses of Tropical Precipitation during Enso. *Journal of Climate*, **20**, 3411-3433. <https://doi.org/10.1175/jcli4197.1>
- [23] Kang, I. and Kug, J. (2002) El Niño and La Niña Sea Surface Temperature Anomalies: Asymmetry Characteristics Associated with Their Wind Stress Anomalies. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **107**, ACL 1-1-ACL 1-10. <https://doi.org/10.1029/2001jd000393>
- [24] Harris, I., Jones, P.D., Osborn, T.J. and Lister, D.H. (2013) Updated High-Resolution Grids of Monthly Climatic Observations—The Cru Ts3.10 Dataset. *International Journal of Climatology*, **34**, 623-642. <https://doi.org/10.1002/joc.3711>
- [25] Huang, B., Banzon, V.F., Freeman, E., Lawrimore, J., Liu, W., Peterson, T.C., et al. (2015) Extended Reconstructed Sea Surface Temperature Version 4 (ERSST.v4). Part I: Upgrades and Intercomparisons. *Journal of Climate*, **28**, 911-930. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-14-00006.1>
- [26] Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., et al. (1996) The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **77**, 437-472.
- [27] Luo, H. and Yanai, M. (1984) The Large-Scale Circulation and Heat Sources over the Tibetan Plateau and Surrounding

- Areas during the Early Summer of 1979. Part II: Heat and Moisture Budgets. *Monthly Weather Review*, **112**, 966-989. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1984\)112<0966:tlscah>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1984)112<0966:tlscah>2.0.co;2)
- [28] Nitta, T. (1972) Energy Budget of Wave Disturbances over the Marshall Islands during the Years of 1956 and 1958. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, **50**, 71-84. [https://doi.org/10.2151/jmsj1965.50.2\\_71](https://doi.org/10.2151/jmsj1965.50.2_71)
- [29] Ming, J. and Sun, J. (2021) Enhanced Relationship between Central Tropical Pacific Sea Surface Temperature and Eurasian Surface Air Temperature during Boreal Summers. *Journal of Climate*, **34**, 5939-5953. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-19-0028.1>