

钱卓蕾, 罗玲, 马洁华, 等. 2020. 2018/2019 年冬季浙江罕见持续阴雨天气的环流异常与海温强迫 [J]. 气候与环境研究, 25(5): 510–520. QIAN Zhuolei, LUO ling, MA Jiehua, et al. 2020. Circulation Anomaly and Sea Surface Temperature Forcing in Rare Continuous Rainy Weather in Zhejiang during the Winter of 2018/2019 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 25 (5): 510–520. doi:[10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19060](https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19060)

## 2018/2019 年冬季浙江罕见持续阴雨天气的环流异常与海温强迫

钱卓蕾<sup>1</sup> 罗玲<sup>2</sup> 马洁华<sup>3, 4, 5</sup> 钱月平<sup>1</sup> 娄小芬<sup>2</sup>

1 绍兴市气象台, 浙江绍兴 312000

2 浙江省气象台, 杭州 310000

3 中国科学院气候变化研究中心, 北京 100029

4 中国科学院大气物理研究所竺可桢—南森国际研究中心, 北京 100029

5 气象灾害预警与评估协同创新中心, 南京 210044

**摘要** 利用 NCEP/NCAR 全球再分析资料、地面观测资料和自动站降水资料, 分析了 2018/2019 年冬季浙江罕见连续阴雨寡照天气过程中冬季风环流和南支槽等环流异常, 并从西风带波动、海温强迫等方面研究了局地环流异常的成因。结果表明: 2018/2019 年冬季连阴雨事件中雨日、日照破历史记录, 雨量较常年同期明显偏多。主要的环流异常为西北太平洋异常反气旋 (WNPAC) 明显偏北, 同时阿留申低压和西伯利亚高压亦偏北, 东亚地区 40°N 以南有强的偏南风异常, 冬季风偏弱; 南支槽较常年偏强, 保证了浙江上空有持续的水汽和扰动输送。对流层中层存在沿欧洲向东亚—西太平洋传播的波动能量, 波能在东亚地区一直向南传播至 20°N 以南, 可能导致 WNPAC 明显北抬和南支槽加强。ENSO 是 WNPAC 的重要强迫源, ENSO 暖位相使得海洋性大陆出现异常对流冷却, 而浙江上空对流加强, ENSO 对南支槽活动强度亦有明显的制约作用。中国近海海温偏高是 WNPAC 和阿留申低压明显偏北的重要影响因素。2018/2019 年冬季局地环流异常可能由 ENSO 和中国近海海温协同强迫所致。

**关键词** 连阴雨 西北太平洋异常反气旋 (WNPAC) 东亚冬季风 南支槽 ENSO

文章编号 1006-9585(2020)05-0510-11

中图分类号 P466

文献标识码 A

doi:[10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19060](https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19060)

## Circulation Anomaly and Sea Surface Temperature Forcing in Rare Continuous Rainy Weather in Zhejiang during the Winter of 2018/2019

QIAN Zhuolei<sup>1</sup>, LUO ling<sup>2</sup>, MA Jiehua<sup>3, 4, 5</sup>, QIAN Yueping<sup>1</sup>, and LOU Xiaofen<sup>2</sup>

1 Shaoxing Meteorological Office, Shaoxing, Zhejiang Province 312000

2 Meteorological Bureau of Zhejiang Province, Hangzhou 310000

3 Climate Change Research Centre, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

4 Nansen-Zhu International Research Center, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

5 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing 210044

**Abstract** Based on the NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric

收稿日期 2019-04-25; 网络预出版日期 2019-12-30

作者简介 钱卓蕾, 女, 1985 年出生, 硕士, 副高级工程师, 主要研究方向为天气预报和气候变化。E-mail: qianzl@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家重点研发计划项目 2017YFC1502304, 国家自然科学基金项目 41730964、41605064

Funded by National Key Research and Development Program of China (Grant 2017YFC1502304), National Natural Science Foundation of China (Grants 41730964 and 41605064)

Research) global reanalysis data, ground observation data, and automatic station precipitation data, this study analyzed circulation anomalies such as winter monsoon circulation and the South Branch trough in rare continuous rain and oligoscale weather in Zhejiang in the winter of 2018/2019. Moreover, the study investigated the causes of local circulation anomalies from aspects such as westerly wind fluctuation and sea temperature forcing. The results showed that in the winter of 2018/2019, the rainy days and sunshine hours surpassed the historical record, and the rainfall was significantly above normal. The main circulation anomalies were the abnormal northerly western North Pacific anomalous anticyclone (WNPAC). Meanwhile, the Aleutian low-pressure and the Siberian high-pressure systems were also northerly. There was a strong southerly wind anomaly south of 40°N in East Asia, and the winter monsoon was weak. The southern branch trough was stronger than the perennial, ensuring that there was a continuous water vapor and disturbance transport over Zhejiang. In the middle layer of the troposphere, a wave energy propagated along Europe to East Asia and the western Pacific. The wave energy spread southward to the south of 20°N in East Asia, which might lead to a significant north lift of the WNPAC and the strengthening of the southern branch trough. The El Niño–Southern Oscillation (ENSO) warm phase caused abnormal convective cooling in the maritime continent, while the convection over Zhejiang strengthened, and ENSO also had a significant effect on the activity intensity of the southern branch trough. The high sea surface temperature in the offshore waters of China was an important factor for the WNPAC and the Aleutian Low to significantly jump north. The abnormal circulation in the northern hemisphere in the winter of 2018/2019 might have been caused by ENSO and China's offshore sea temperature collaborative forcing.

**Keywords** Continuous rain, Western North Pacific anomalous anticyclone (WNPAC), East Asian winter monsoon, South branch trough, ENSO

## 1 引言

我国南方地区冬季降水有明显的年际变化特征, 异常偏多可造成冬汛, 降水异常偏少则可导致干旱, 影响冬季乃至次年春季的农业生产。近些年来, 我国冬季极端降水和降雪事件频发, 引起了科学家的极大关注。2008年初的严重雨雪冰冻事件和2010~2011年长江中下游地区的强降雪天气就造成了严重的灾害。

许多学者对南方冬季降水的环流影响因子做了研究工作, 发现北半球环流异常是影响南方冬季降水异常的关键因子: 2007/2008年冬季中国南方发生罕见的低温、雨雪、冰冻灾害天气与东亚冬季风环流系统的年际变率异常有着密切的关系(陶诗言和卫捷, 2008; 顾雷等, 2008); 在1、2月强(弱)东亚冬季风易造成南方冬季降水偏少(多)(曾剑等, 2010); 欧亚遥相关型(EU)是我国南方冬季降水的主要影响因子(和李维京丑纪范, 1990; 刘毓赞和陈文, 2012)。在低纬度地区, 南支槽为南方降水区提供水汽和扰动, 对南方冬季降水有重要影响(彭艳等, 2010; 钱卓蕾, 2014)。

众多研究也表明, 海表温度对大气环流有强迫作用, 进而导致冬季气候异常: 中国南方冬季降水受ENSO(El Niño–Southern Oscillation)事件影响

很大(张自银等, 2008), 中国南方典型多雨年与ENSO事件的暖期相联系, 少雨年与ENSO事件的冷期相联系(何溪澄等, 2006); 郭其蕴和王日昇(1990)认为El Niño年与La Niña年东亚大陆气压场的差异主要表现在冷空气南下路径不同, El Niño(La Niña)年冷空气路径偏东(西), 中国南方多(少)雨。西北太平洋异常反气旋(WNPAC)是ENSO影响东亚气候的纽带, 在El Niño成熟年, 冬季—初夏WNPAC的强度和位置的变化均可对东亚地区降水异常分布产生影响(李慧敏等, 2017)。除了ENSO, 北大西洋、黑潮区海温以及东印度洋海温异常对我国南方地区大范围降水异常也起了很重要的作用(刘少锋等, 2008; 宗海峰等, 2008; 彭京备, 2012)。

2018/2019年冬季浙江出现罕见连续阴雨寡照天气, 降水量、降水日数异常偏多, 日照时数异常偏少。持续阴雨导致浙江省大部农田土壤过湿, 冬种进度推迟, 各类农作物长势偏差, 设施作物出现病害。文章对这次持续阴雨寡照天气的特征、环流异常和海温强迫因子进行分析, 探讨连阴雨事件的成因, 为浙江冬季降水预报提供依据。所用的数据资料为NCEP/NCAR全球月平均和逐日再分析资料[水平分辨率为 $2.5^{\circ}$ (纬度) $\times 2.5^{\circ}$ (经度)], 浙江省地面历史气候资料以及NOAA发布的Niño3

区 ( $5^{\circ}\text{S} \sim 5^{\circ}\text{N}$ ,  $150^{\circ}\text{W} \sim 90^{\circ}\text{W}$ ) 海表温度距平指数 (Niño3 SST Anomaly Index), 文中的距平均为相对于 1981~2010 年 30 年气候态的距平。

## 2 2018/2019 年冬季连阴雨事件特征

自 2018 年 12 月 1 日开始的阴雨寡照天气事件持续至 2019 年 3 月 9 日正式结束, 浙江省于 3 月 10 日入春。这次过程降雨日数之多、日照时数之少破 1951 年以来历史纪录。2018 年 12 月 1 日至 2019 年 3 月 9 日, 全省平均降雨日数 63 d, 比常年同期偏多 25 d, 共有 57 个县(市、区)降雨日数破历史同期最多纪录, 从雨日距平来看(图 1a), 全省基本都为明显的正距平, 浙中北大部分地区达 100 d 以上, 极端超过 125 d; 全省平均降雨量 452 mm, 比常年同期偏多 9 成, 仅次于 1998 年 (487 mm), 共有 17 个县(市、区)破历史同期

最多纪录, 其中浙中西地区异常偏多最为明显(图 1b); 全省平均累积日照时数 156.7 h, 比常年同期偏少 218 h, 共有 43 个县(市、区)破历史同期最少纪录, 嘉兴以北地区偏少近 300 h(图 1c)。从浙江省逐日面雨量(平均雨量)分布图可以看到(图 1d), 此次连阴雨事件共分为 2018 年 12 月 1~16 日、12 月 20~27 日、12 月 30 日至 2019 年 1 月 16 日、2 月 3 日至 3 月 9 日 4 个阶段, 最大日雨量达 29 mm, 出现在 2019 年 2 月 21 日。2018 年 12 月 7~9 日、30~31 日、2019 年 2 月 9~10 日、16~17 日还出现了雨雪天气。

## 3 与连阴雨相联系的局地环流异常

### 3.1 东亚冬季风环流

东亚冬季风是北半球冬季最活跃和影响我国冬季气候的主要环流系统, 其年际—年代际变率对

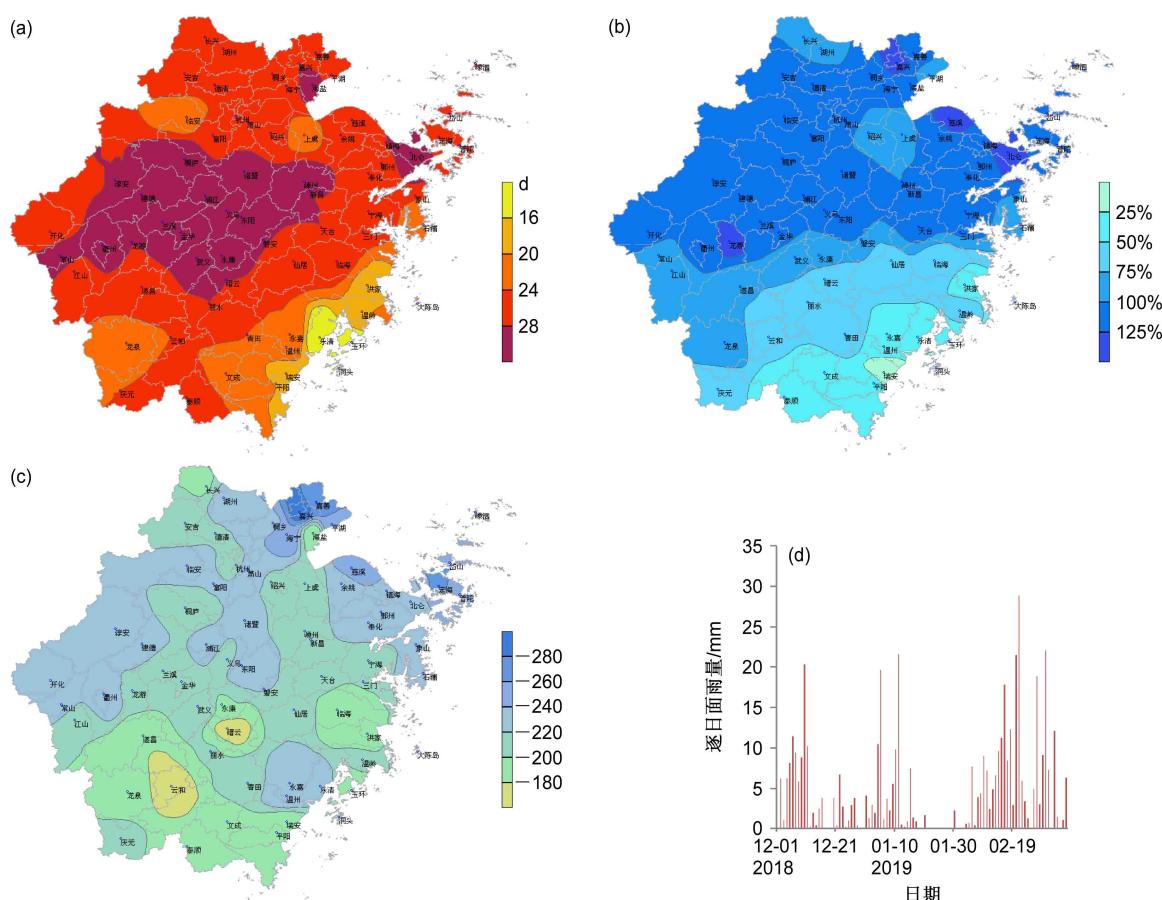


图 1 2018 年 12 月 1 日至 2019 年 3 月 9 日浙江省 (a) 降水日数距平(单位: d)、(b) 降水量距平百分率、(c) 日照时数距平(单位: h)、(d) 逐日面雨量(单位: mm)

Fig. 1 (a) Anomalies of precipitation days (d), (b) precipitation anomaly percentage, (c) sunshine hours anomaly (h), and (d) daily area rainfall (mm) in Zhejiang from 1 December 2018 to 9 March 2019

我国冬季气候有着重要意义。当东亚冬季风增强时, 冷空气强盛, 而来自热带的暖湿气流活动偏弱, 故不易在长江中下游冬季形成降水过程; 当东亚冬季风减弱时, 情况相反, 长江中下游冬季降水偏多(钱卓蕾, 2013)。在2018/2019年冬季850 hPa距平风场(图2a)上最显著的特征是东亚—太平洋上的异常反气旋, 即WNPAC(Western North Pacific Anomalous Anticyclone), WNPAC覆盖我国东南部沿海到北太平洋中部的广大地区, 位置较常年明显偏北, 强度偏强。WNPAC制约西太平洋副热带高压强度的强度和位置, 使得西太平洋副热带高压异常偏强偏北, 2018/2019年冬季副高脊线平均位置为17.7°N(常年平均为16°N), 强度指数为8.38(常年平均为3.05)。在北太平洋上, 东部为异常反气旋环流, 而西北部为异常气旋环流, 表明阿留申低压较常年明显偏西偏北, 而中纬度中亚地区为异常气旋性环流控制, 中心位于巴尔喀什湖南部, 北侧的乌拉尔山地区为异常反气旋, 表明西伯利亚高压中心亦偏北。西伯利亚高压和阿留申低压均偏北的特征使得海陆气压大梯度区北移, 东亚地区的偏北风异常出现在40°N以北, 中高纬度东亚冬季风偏强, 而40°N以南地区均为异常偏南风, 冬季风偏弱, 其中我国东部和南部地区偏南风异常最为显著, 达到10 m/s以上, 30°N以南地区有异常西南风, 30°N以北转为异常东南风。相应地, 反映在OLR(Outgoing Longwave Radiation)场上, (25°N~45°N, 80°E~120°E)范围内为OLR异常负距平区, 表明该区域内对流活动较常年明显偏强, 而南海和西太平洋上空OLR为异常正距平,

这与WNPAC异常偏北抑制对流活动有关。

图3给出了850 hPa(118°E~120°E)平均经向风的时间演变, 可以看到大部分时间内北风都位于30°N以北, 30°N以南地区长期为南风所控制, 冬季风与南侧的暖湿气流持续交汇形成连续阴雨寡照天气。几次明显的北风撤退的日期为12月1日、12月20日、12月30日和1月30日, 与连阴雨4个阶段的起始时间是基本一致的。北风南下的日期为12月16日、12月27日、1月15日和3月10日, 与连阴雨4个阶段的终止时间也是基本同步的, 表明连阴雨过程中表现的阶段性特点与东亚冬季风的进退密切相关。

### 3.2 南支槽活动和水汽输送

冬季低层西风在青藏高原西端分裂成南北两支, 绕过高原两侧, 南支气流在高原地形和摩擦作用下, 形成南支槽。南支气流上多小槽脊活动, 这些东移的小槽为江南—华南地区的降水提供水汽和扰动, 是冬半年影响东亚的主要天气系统之一(索渺清和丁一汇, 2009)。用700 hPa经向风纬向偏差的平方来定义扰动活动强度, 计算2018年12月1日至2019年3月9日的平均扰动距平情况(图4), 图4显示35°N以南有两个明显的正距平区, 分别位于孟加拉湾—中南半岛和我国南方地区, 孟加拉湾—中南半岛的正距平扰动中心为(18°N, 95°E), 与南支槽常年所在位置是一致的, 南支槽较常年偏强, 槽前的西南气流亦偏强。我国南方地区的扰动正距平范围较大, 往东一直延伸至浙江地区, 中心位于(25°N, 110°E), 对应南支气流上的扰动活跃区, 表明南支槽前的扰动频繁东传至浙

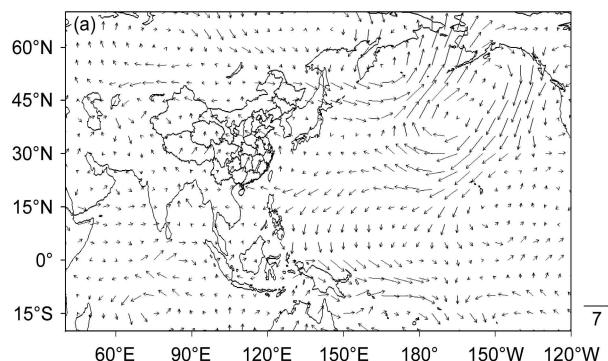
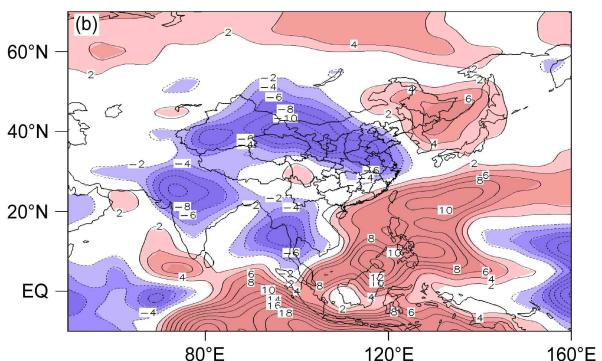


图2 2018年12月1日至2019年3月9日平均(a)850 hPa矢量风(单位:m/s)和(b)OLR距平场(单位:W/m<sup>2</sup>, 填色区代表OLR绝对值≥2 W/m<sup>2</sup>)

Fig. 2 (a) 850-hPa vector wind (m/s) and (b) OLR (Outgoing Longwave Radiation) anomaly field (units: W/m<sup>2</sup>, the color-filled areas represent the absolute value of OLR ≥ 2 W/m<sup>2</sup>) averaged from 1 December 2018 to 9 March 2019



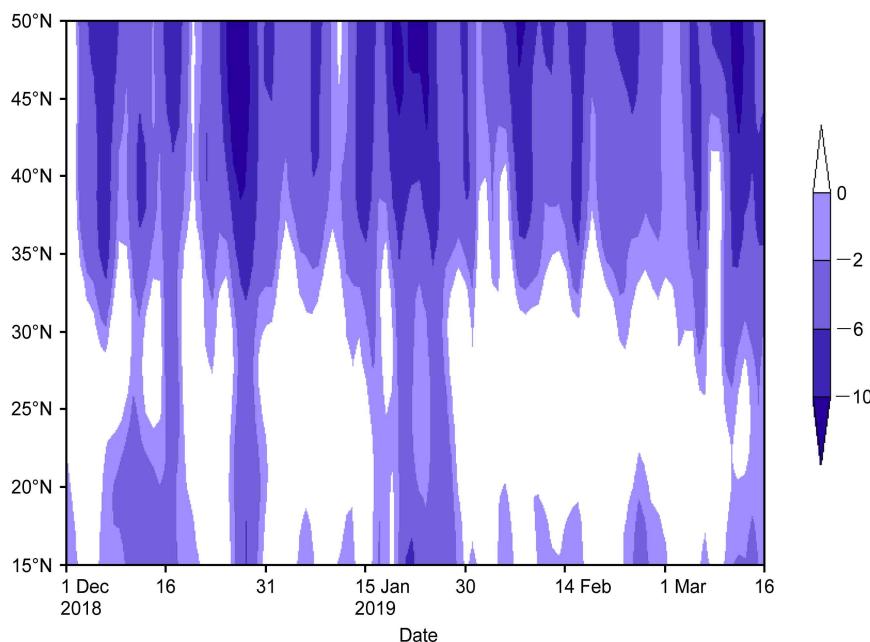


图3 2018年12月1日至2019年3月16日850 hPa 118°E~120°E平均经向风的时间演变(单位:m/s, 填色区代表北风)

Fig. 3 Time evolution of 118°E–120°E average meridional wind at 850 hPa from 1 December 2018 to 16 March 16 2019 (units: m/s, the filled area represents north wind)

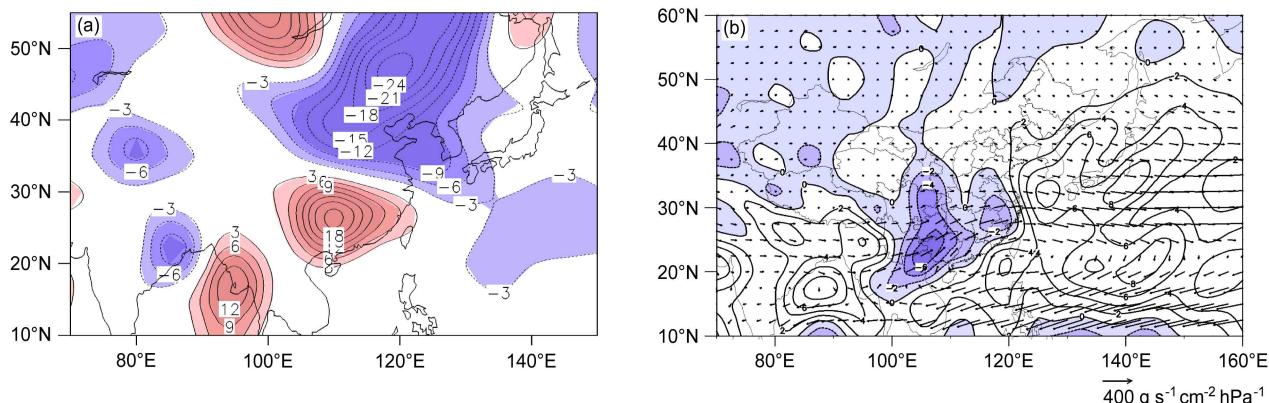


图4 2018年12月1日至2019年3月9日平均(a)700 hPa经向风扰动距平场(单位: $\text{m}^2/\text{s}^2$ , 填色区代表扰动绝对值 $\geq 3 \text{ m}^2/\text{s}^2$ )和(b)整层积分的水汽通量散度场(等值线, 单位: $\text{g s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{hPa}^{-1}$ , 填色区代表辐散区)(矢量代表水汽通量, 单位: $\text{g s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{hPa}^{-1}$ )

Fig. 4 (a) 700-hPa meridional wind disturbance anomaly (units:  $\text{m}^2/\text{s}^2$ , the color-filled area represents the absolute value of the disturbance  $\geq 3$ ) and (b) the water vapor flux divergence field of the whole layer (contours, units:  $\text{g s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{hPa}^{-1}$ , the color-filled area represents the divergence area) averaged from 1 December 2018 to 9 March 2019 (vectors represent vapor flux, units:  $\text{g s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{hPa}^{-1}$ )

江上空, 这是冬季浙江上空的主要扰动和水汽来源。从图4我们还发现, 35°N以北地区是大范围负距平区, 说明北侧的西风带扰动很弱, 强冷空气难以通过扰动南下至我国东南部地区, 这与前文东亚冬季风在该地区上空明显偏弱的分析一致。

南支槽前的西南气流是冬季连阴雨天气的水汽输送来源。从整层积分的水汽通量场可以发现: 槽前的西南气流主要来自印度洋和孟加拉湾北上的西南气流以及副热带高压西侧转向的东南气流, 因而

水汽的初始源地除了印度洋和孟加拉湾外, 还包括南海和西太平洋, 环流场上(图2a)这3个地区上空都有异常反气旋, 异常反气旋加强了水汽源地上空水汽的对外辐散和输送, 在水汽通量散度场(图6b)表现为三者上空都有较强的水汽通量辐散中心。水汽自印度洋和孟加拉湾出发, 向东一直传递至西太平洋, 形成一条水汽通量大值带。主要的水汽通量辐合中心在中南半岛—云南—广西一带, 强度达到 $-6 \text{ g s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{hPa}^{-1}$ , 而在我国东部地区还

有 $-2 \text{ g s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ hPa}^{-1}$  的次大值中心, 南支槽前强烈的水汽辐合是浙江持续连阴雨天气的必要水汽条件。

## 4 局地环流异常的成因分析

### 4.1 西风带波能传播作用

对环流异常的分析可知: 连续阴雨天气的建立和维持, 与西北太平洋异常反气旋、南支槽等大尺度系统的强度和位置异常有重要联系, 表明在连阴雨过程中有大气长波的异常活动。波作用量通量可以用来描写波动能量的传播方向。T-N 波作用通量能更好地反映当前季节内的 Rossby 波传播异常 (施春华等, 2017), 因而我们使用 Takaya and Nakamura (2001) 推导出的三维波作用通量诊断 Rossby 波扰动能量传播特征, 以便研究浙江冬季连续降水过程中波扰的影响。对于非静止 Rossby 波, 三维波作用通量的水平分量由下式给出:

$$W_r = \frac{p}{2000|U|} \begin{bmatrix} U(v'^2 - \psi'v'_x) + V(-u'v' + \psi'u'_x) \\ U(-u'v' + \psi'u'_x) + V(u'^2 + \psi'u'_y) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中,  $\psi'$  为准地转扰流动函数,  $u'$  和  $v'$  为扰动准地转风,  $U$  和  $V$  为基本气流的纬向和经向风速分量,  $U$  为基本流的气流速度,  $p$  为等压面气压, 下标  $x$ 、 $y$  分别表示对经度 (纬向) 和纬度 (经向) 的差分。图 5 给出了 2018/2019 年冬季平均对流层中层 500 hPa 位势高度场、相对于平均场的扰动场和 T-N 水平通量。T-N 波作用通量反映了 2018/2019 年冬季相对于冬季平均气候场具有异常偏强的大气长波扰动, 从 500 hPa 的位势高度扰动来看, 自欧洲到西太平洋上的负—正—负—正的 Rossby 波列结构较清晰。波列结构中的中心分别对应欧洲的异常气旋、乌拉尔山异常反气旋、巴尔喀什湖以南到印度半岛北部的异常气旋以及控制我国东南部地区并一直延伸到太平洋上的异常反气旋 (WNPAC)。波作用量通量显示存在波能的东传, 该异常长波的波能量沿欧洲向东亚—西太平洋异常传播, 在传播过程中波作用量通量沿大气长波具有强的经向分量, 在东亚地区出现强的向南传播, 一直传播至 20°N 以南, 可能导致 WNPAC 明显北抬, 同时也有利于贝加尔湖南部到中南半岛的异常气旋的稳定维持, 南支槽强度较常年偏强。以上分析表明西风带波动能量

的传播对 2018/2019 年冬季中低纬环流异常有重要作用。

### 4.2 海温强迫作用

#### 4.2.1 ENSO 的驱动作用

ENSO 作为海温年际气候变化中的最强信号, 是影响东亚环流系统从而导致东亚气候异常的关键因素。对近 60 年的冬季异常少雨年和异常多雨年的海温场合成分析可知, Niño3 区海温是影响我国南方冬季降水最显著的海温相关因子, 而 Niño3 区海温是表征 ENSO 循环的关键区海温, 冬季为 ENSO 暖位相时, 异常多雨的概率偏大; 反之则异常少雨的概率偏大, 较强的 ENSO 事件和长江中下游冬季降水的对应关系是相当好的 (钱卓蕾, 2013)。2018 年 1~3 月, Niño3 区的海温偏低, ENSO 呈现冷位相, 4 月, Niño3 区海温转为正距平, 8 月起 Niño3 区海温正距平开始显著 (图 6), 11~12 月 Niño3 区海温指数超过 1, 表明 ENSO 暖位相处于强烈发展期。ENSO 暖位相的发展对赤道太平洋上的水平和垂直环流都产生了影响, 冬季 850 hPa 风场上 (图 2a), 赤道西太平洋上出现异常反气旋, 增强该地区上空的辐散, 抑制上升运动, 表现在 OLR 场上为明显的正距平 (图 2b), 而赤道中东太平洋则为异常气旋控制, 增强辐合并促使该地区异常上升气流的发展, OLR 场上为负距平区, 因而垂直方向上表现为东升西降的异常偶极子结构 (图 7a)。在 160°E~90°W 的太平洋中东部, 出现较强的异常上升运动, 而在 110°E~160°E 的赤道西太平洋上有异常下沉气流, Walker 环流减弱。

那么, ENSO 是如何通过赤道上空的环流强迫来影响东亚冬季风环流的呢? 研究表明: Wang et al. (2000) 指出在厄尔尼诺事件期间, 由于赤道西太平洋海温持续偏低以及 Walker 环流减弱导致对流减弱, 负的加热异常激发冷的 Rossby 波在其西北侧形成反气旋性异常环流, 即 WNPAC。我们用 Niño3 区的 SST 距平指数来回归冬季 850 hPa 风场 (图 8a), 从菲律宾到西太平洋上的异常反气旋非常显著, 我国东部地区盛行偏南风, 说明 ENSO 是 WNPAC 的强迫源。WNPAC 的稳定存在对东亚季风环流造成重大影响, WNPAC 西北侧异常南风减弱了东亚冬季风, 还可通过加强向北的暖湿水汽输送使得我国东南部地区降水增加, 因而 WNPAC 可认为是 ENSO 影响东亚冬季风环流的

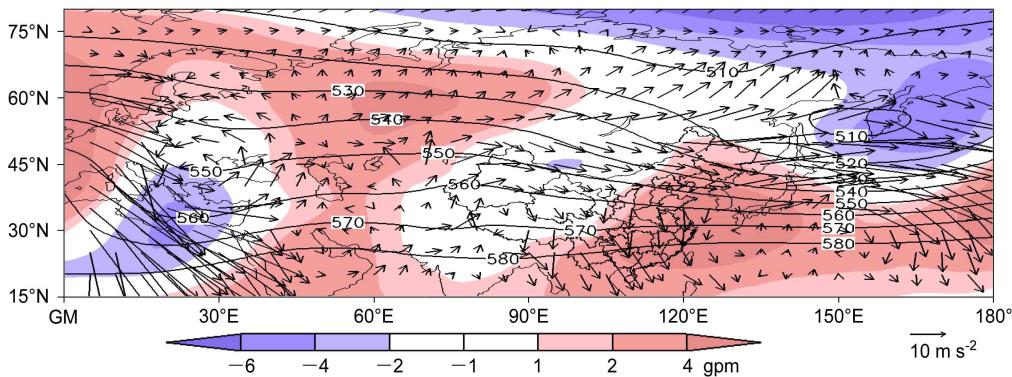


图5 2018年12月1日至2019年3月9日平均的500 hPa位势高度场（等值线，单位：gpm）、位势高度相对于多年平均的扰动场（填色，单位：gpm）、波作用通量（箭矢，单位： $m s^{-2}$ ）

Fig. 5 The mean 500-hPa geopotential height (contours, units: gpm), geopotential height anomaly referring to multiyear average (coloring, units: gpm), and wave activity flux (vectors, units:  $m s^{-2}$ ) from 1 December 2018 to 9 March 2019

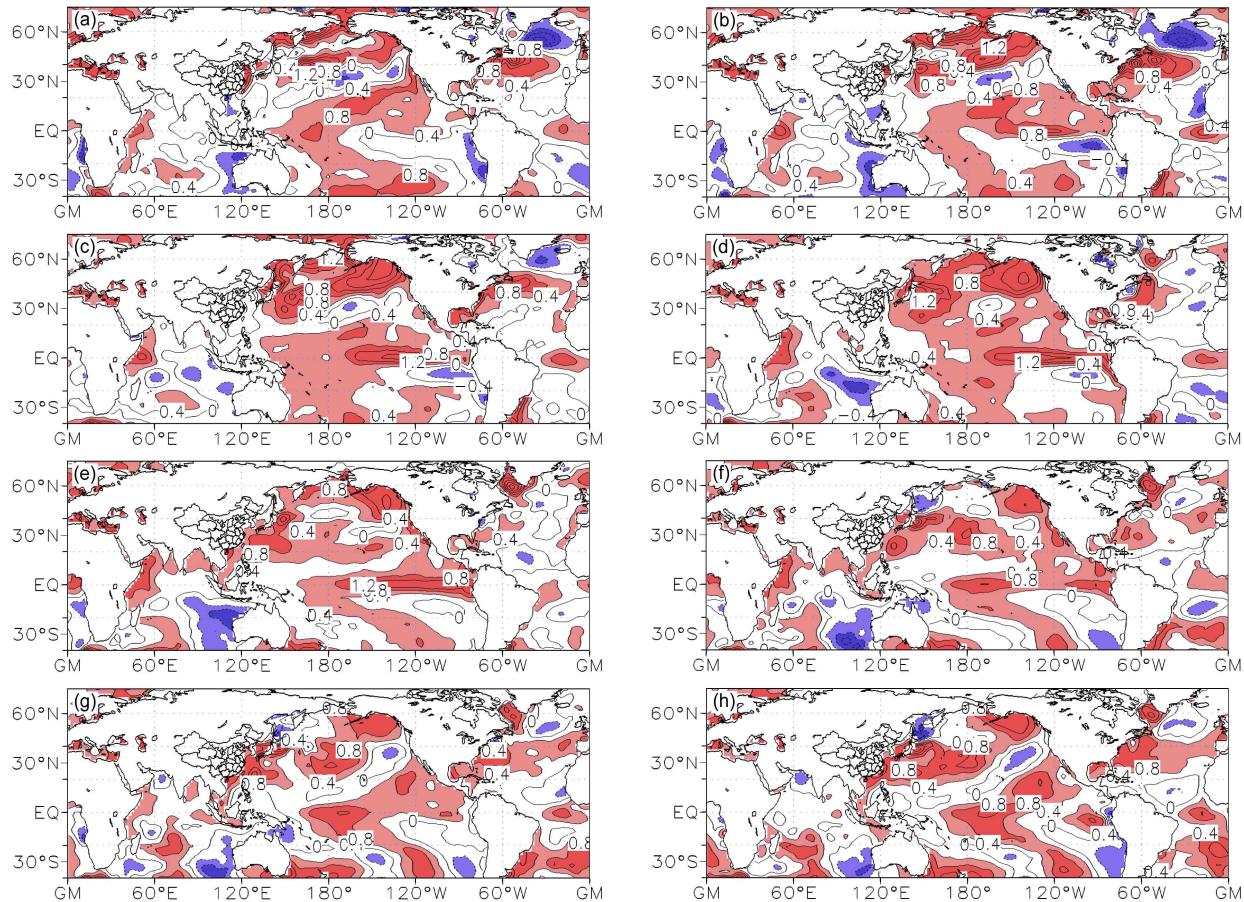


图6 (a) 2018年8月、(b) 2018年9月、(c) 2018年10月、(d) 2018年11月、(e) 2018年12月、(f) 2019年1月、(g) 2019年2月、(h) 2019年3月平均SST距平分布（单位： $^{\circ}C$ ，填色区代表SST距平绝对值 $\geq 0.4^{\circ}C$ ）

Fig. 6 Distributions of SST anomalies (units:  $^{\circ}C$ , the color-filled area represents the SST anomaly absolute value  $\geq 0.4^{\circ}C$ ): (a) August 2018; (b) September 2018; (c) October 2018; (d) November 2018; (e) December 2018; (f) January 2019; (g) February 2019; (h) March 2019

“大气桥”。

此外，ENSO 暖位相造成海洋性大陆（ $10^{\circ}S \sim 20^{\circ}N$ ,  $90^{\circ}E \sim 150^{\circ}E$ ）和热带西太平洋地区上空的异常对流冷却，而钱卓蕾（2014）的研究表明海洋

性大陆对流活动强，南方冬季降水弱，海洋性大陆对流活动弱，南方冬季降水强。分析  $115^{\circ}E \sim 125^{\circ}E$  的垂直运动（图 7b），可知在  $5^{\circ}S \sim 15^{\circ}N$ ，对流层高层和中低层都有异常下沉运动，而在

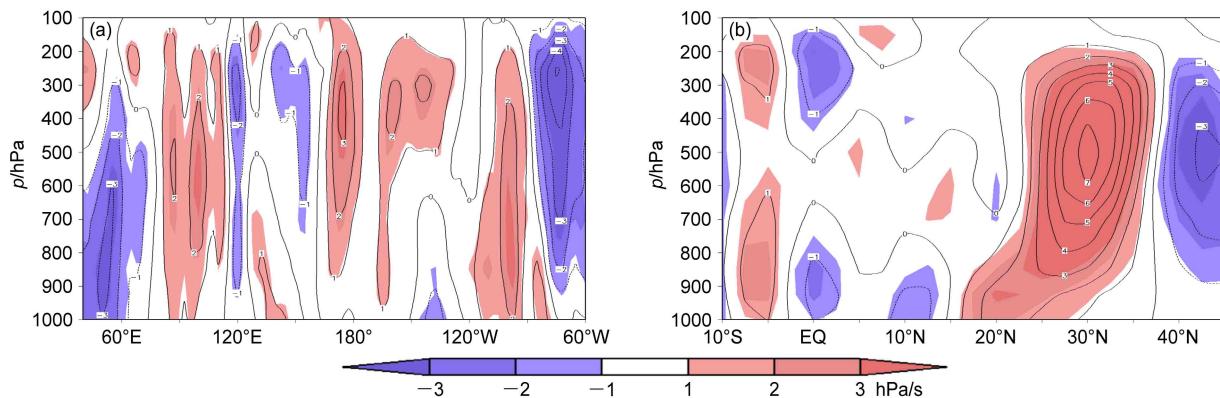


图 7 2018 年 12 月 1 日至 2019 年 3 月 9 日平均 (a)  $0^{\circ}$ ~ $10^{\circ}$ N 平均垂直速度距平的经度—高度剖面和 (b)  $115^{\circ}$ E~ $125^{\circ}$ E 平均垂直速度距平的纬度—高度剖面 (单位: hPa/s, 填色区代表垂直速度绝对值  $\geq 1$  hPa/s)

Fig. 7 (a) Longitude–height profile of  $0^{\circ}$ ~ $10^{\circ}$ N average vertical velocity anomaly and (b) latitude–height profile of  $115^{\circ}$ E~ $125^{\circ}$ E average vertical velocity anomaly averaged from 1 December 2018 to 9 March 2019 (units: hPa/s, the color-filled area represents the absolute value of vertical speed  $\geq 1$  hPa/s)

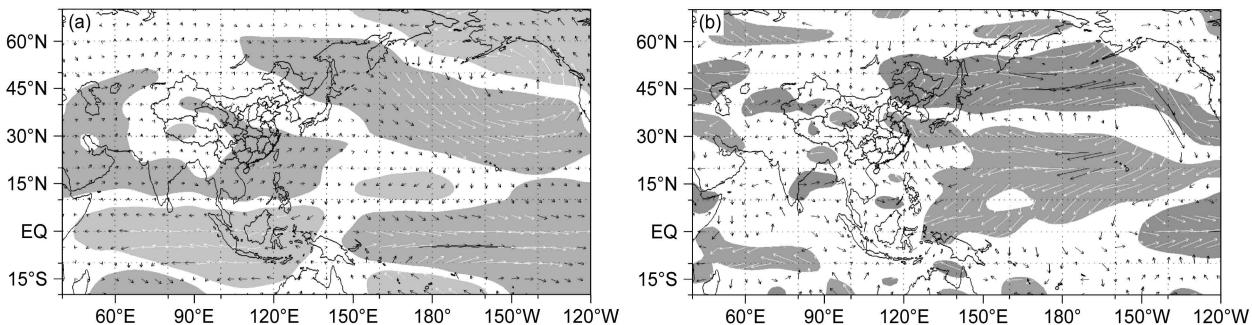


图 8 2018 年 12 月 1 日至 2019 年 3 月 9 日 (a) Niño3 区和 (b) 中国近海 SST 距平指数回归的 850 hPa 风场 (单位: m/s) (阴影代表通过 95% 显著性检验的区域)

Fig. 8 Regression map of 500-hPa geopotential height field (m/s) by (a) Niño3 area and (b) China offshore SST anomaly index from 1 December 2018 to 9 March 2019 (the shadow area represents the area that exceeds the confidence level of 95%)

$15^{\circ}$ N~ $35^{\circ}$ N, 均是较强的异常上升运动, 两者与高空的异常偏北气流和低空的异常偏南气流 (图 2a) 构成了闭合经向环流, 表明海洋性大陆上空的对流活动通过局地经向环流影响浙江上空的对流, 而强烈的上升运动是造成 2018/2019 年冬季持续阴雨天气的动力条件, 因而 ENSO 也通过海洋性大陆与浙江冬季降水联系起来。

#### 4.2.2 ENSO 与南支槽

从 Niño3 SST 距平指数与 700 hPa 扰动的相关系数图上 (图 9) 可以发现, 正距平区从中南半岛途经我国南方地区向东一直延伸到西北太平洋上, 3 个相关系数超过 0.3 的正相关中心分别位于中南半岛北部、广东和日本南部沿海, 其中广东地区的相关系数最大, 中心数值 0.5, 而中南半岛和我国南方地区是南支波动的频繁活动区, 表明 ENSO 对南支槽的活动强度也有明显的强迫作用。随着

Niño3 区 SST 的升高, 南支槽强度加强, 我国南方地区的扰动活跃并有充分的水汽向东部地区输送, 有利于出现持续阴雨天气。东亚和西太平洋上的显著相关区还包括东亚  $30^{\circ}$ N 以北地区和海洋性大陆—西太平洋上的负相关中心, 从南到北构成“+、-、+”的波列结构, 说明赤道上空的异常扰动确实可以通过遥相关作用影响东亚上空的扰动。 $30^{\circ}$ N 以北地区的负相关区也表明当 ENSO 为正位相时, 北支西风带的扰动少, 南下的冷空气强度弱。

#### 4.2.3 中国近海海温对局地环流的制约作用

Niño3 区 SST 回归风场上的 WNPAC 位置较 2018/2019 年冬季明显偏南, 说明存在其他强迫因子导致 2018/2019 年冬季 WNPAC 出现异常北跳。从冬季 12 月至 2 月逐月的海温距平来看, 除了 ENSO, 进入冬季以后, 中国近海海温出现异常偏

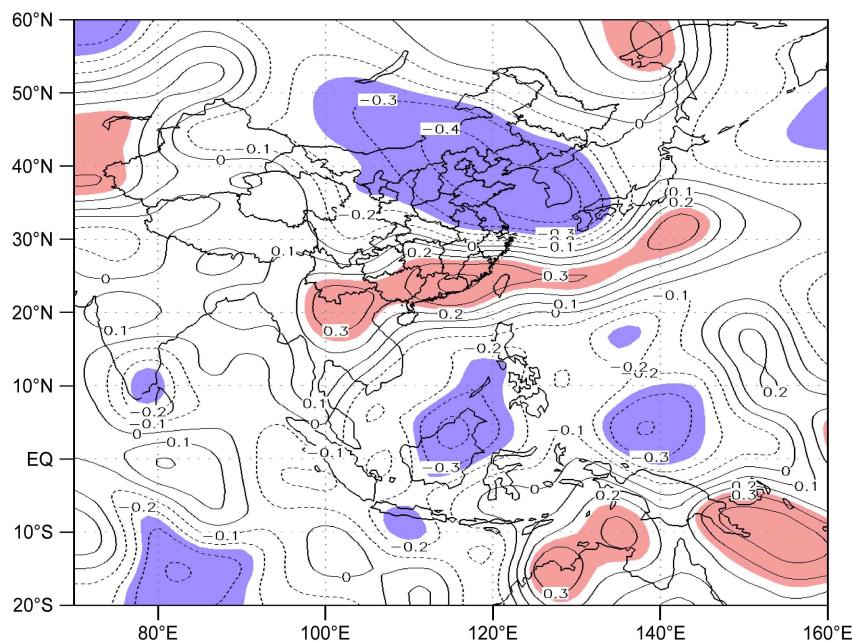


图9 1979/1980~2018/2019年冬季 Niño3 区 SST 距平指数与 700 hPa 扰动的相关系数（填色区代表通过 95% 显著性检验的区域）

Fig. 9 Correlation coefficient between SST anomaly index and 700-hPa disturbance in Niño3 area during the winter of 1979/1980–2018/2019 (the filled area represents the area that exceeds the confidence level of 95%)

高的现象，可能对东亚和西太平洋上的环流造成一定的影响。我们将中国近海海温指数定义为( $20^{\circ}\text{N} \sim 40^{\circ}\text{N}$ 、 $120^{\circ}\text{E} \sim 140^{\circ}\text{E}$ )的平均 SST 距平，用它来回归冬季风场(图 8b)，可以发现东亚—西北太平洋上出现异常反气旋，与 2018/2019 年冬季平均风场上的异常反气旋位置是基本一致的，我国东部有强的偏南风异常，且异常偏南风一直北推至 $45^{\circ}\text{N}$ ，偏南风的范围较 2018/2019 年偏东。因而中国近海海温对于 WNPAC 的北跳有明显的强迫作用，中国近海海温偏高，WNPAC 明显偏北，西太平洋副热带高压偏北偏强，其北侧的偏南风异常更加显著。除了异常偏北的 WNPAC 外，回归场上还显示出北太平洋中部的异常反气旋和其西北侧的异常气旋，与 2018/2019 年冬季北太平洋上的异常环流形势也是类似的，说明中国近海海温对阿留申低压的强度和位置也有制约作用，中国近海海温偏高，阿留申低压中心偏西偏北，强东亚冬季风的范围亦偏北。

结合对 ENSO 的分析可知，ENSO 是 WNPAC 的重要强迫源，也可影响南支槽的活动强度，但其强迫作用并不能导致 WNPAC 明显偏北，而当中国近海海温出现异常偏高时，可能造成同期 WNPAC 北跳并控制我国东南部沿海，造成东南部地区上空出现强的偏南风异常，因而 2018/2019 年

冬季局地环流异常可能是在 ENSO 和中国近海海温的协同强迫作用下发生的。

## 5 结论

本文总结了 2018/2019 年冬季持续阴雨寡照天气的主要特征，并通过对环流形势和海温场的分析，重点研究了本次连续阴雨寡照天气的环流异常与海温强迫因子，得出以下结论：

(1) 2018/2019 年冬季连续阴雨寡照天气的主要特征为：雨日为历史同期最多，日照为历史同期最少，雨量较常年同期明显偏多。连阴雨事件共分为 2018 年 12 月 1~16 日、12 月 20~27 日、12 月 30 日至 1 月 16 日、2 月 3 日至 3 月 9 日 4 个阶段。

(2) 东亚和太平洋最显著的环流异常为北太平洋西部和中部的异常反气旋，WNPAC 偏强偏北使得西太平洋副热带高压脊线亦偏北，强度偏强，其北侧有持续强的偏南风异常，且一直北推至 $40^{\circ}\text{N}$ 。中亚和太平洋中高纬的异常气旋和反气旋表明西伯利亚高压和阿留申低压中心较常年偏北，我国东南部地区上空的东亚冬季风减弱。2018/2019 年冬季南支槽较常年偏强，南支槽前不断有波动东传，为连阴雨天气提供持续的水汽和扰动。连阴雨水汽来源包括印度洋、孟加拉湾、南海和西

太平洋, 浙江上空是水汽通量辐合的大值区。

(3) 从长波能量传播来看, 对流层中层存在沿欧洲向东亚-西太平洋传播的波动能量, 造成东亚地区的环流异常。波能在东亚地区一直向南传播至 20°N 以南, 可能导致 WNPAC 明显北抬, 也有利于南支槽强度的增强, 对浙江出现持续连阴雨天气有重要影响意义。

(4) ENSO 暖位相减弱了 Walker 环流, 西太平洋地区有负的加热异常, 在其西北侧激发出反气旋性异常环流, 即 WNPAC, 使得西太平洋副热带高压明显偏北偏强, 东亚地区有较强的偏南风异常, 有利于水汽和能量输送。ENSO 会导致海洋性大陆对流活动减弱, 而海洋性大陆的对流通过局地经向环流与浙江上空的对流联系起来。ENSO 对南支槽的活动强度也有明显的强迫作用, 随着 Niño3 区海温的升高, 南支槽强度加强, 浙江地区的扰动活跃, 容易出现持续阴雨天气。

中国近海海温对西北太平洋异常反气旋和阿留申低压的位置和强度也有重要制约作用, 中国近海海温偏高, WNPAC 明显偏北, 而阿留申低压中心也北跳。ENSO 和中国近海海温的协同强迫可能是导致 2018/2019 年冬季局地环流异常的重要原因。

## 参考文献 ( References )

- 顾雷, 魏科, 黄荣辉. 2008. 2008 年 1 月我国严重低温雨雪冰冻灾害与东亚季风系统异常的关系 [J]. 气候与环境研究, 13(4): 406–418.
- Gu Lei, Wei Ke, Huang Ronghui. 2008. Severe disaster of blizzard, freezing rain and low temperature in January 2008 in China and its association with the anomalies of East Asian Monsoon system [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 13(4): 406–418.
- 郭其蕴, 王日昇. 1990. 东亚冬季风活动与厄尔尼诺的关系 [J]. 地理学报, 45(1): 68–77. Guo Qiyun, Wang Risheng. 1990. The relationship between the winter monsoon activity over East Asia and the El Niño events [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 45(1): 68–77. doi:10.11821/xb199001007
- 何溪澄, 丁一汇, 何金海, 等. 2006. 中国南方地区冬季风降水异常的分析 [J]. 气象学报, 64(5): 594–604. He Xicheng, Ding Yihui, He Jinhai, et al. 2006. An analysis on anomalous precipitation in southern China during winter monsoons [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 64(5): 594–604. doi:10.3321/j.issn.0577-6619.2006.05.006
- 李维京, 丑纪范. 1990. 北半球月平均环流与长江中下游降水的关系 [J]. 气象科学, 10(2): 139–146. Li Weijing, Chou Jifan. 1990. Relation between monthly mean circulation in the Northern Hemisphere and the summer precipitation in the middle and lower reaches of Changjiang River [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 10(2): 139–146.
- 李慧敏, 徐海明, 李智玉. 2017. 厄尔尼诺年西北太平洋异常反气旋的年际变化特征及其影响 [J]. 气象学报, 75(4): 581–595. Li Huimin, Xu Haiming, Li Zhiyu. 2017. Inter-annual variation of the western North Pacific anomalous anticyclone during El Niño years and its impact [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 75(4): 581–595. doi:10.11676/qxxb2017.042
- 刘少锋, 陈红, 林朝晖. 2008. 海温异常对 2008 年 1 月中国气候异常影响的数值模拟 [J]. 气候与环境研究, 13(4): 500–509. Liu Shaofeng, Chen Hong, Lin Zhaozhi. 2008. Numerical simulation of the impact of sea surface temperature anomalies on the climate anomalies over China in January 2008 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 13(4): 500–509. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2008.04.14
- 刘毓赟, 陈文. 2012. 北半球冬季欧亚遥相关型的变化特征及其对我国气候的影响 [J]. 大气科学, 36(2): 423–432. Liu Yuyun, Chen Wen. 2012. Variability of the Eurasian teleconnection pattern in the Northern Hemisphere winter and its influences on the climate in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36(2): 423–432. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11066
- 彭京备. 2012. 东印度洋海温对中国南方冬季降水的影响 [J]. 气候与环境研究, 17(3): 327–338. Peng Jingbei. 2012. Influence of the sea surface temperature in the eastern Indian Ocean on the wintertime rainfall in the southern part of China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17(3): 327–338. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.10139
- 彭艳, 王钊, 刘安麟, 等. 2010. 2008 年 1 月中国南部低温雨雪冰冻天气特征及其与东亚大气环流异常探讨 [J]. 大气科学学报, 33(5): 634–640. Peng Yan, Wang Zhao, Liu Anlin, et al. 2010. Characteristics of the freezing rain/heavy snow process in South China and the anomalies of atmospheric circulation over East Asia in January 2008 [J]. Trans. Atmos. Sci. (in Chinese), 33(5): 634–640. doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2010.05.016
- 钱卓蕾. 2013. 长江中下游冬季降水特征和影响因素分析 [J]. 高原气象, 32(6): 1795–1802. Qian Zhuolei. 2013. Analyses of winter rainfall variability and influencing factors in the middle-lower reaches of Yangtze River [J]. Plateau Meteorology, 32(6): 1795–1802. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2012.00166
- 钱卓蕾. 2014. 秋季南极涛动异常对冬季中国南方降水的影响 [J]. 大气科学, 38(1): 190–200. Qian Zhuolei. 2014. The impact of autumn Antarctic oscillation (AAO) on winter precipitation in southern China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38(1): 190–200. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13122
- 施春华, 金鑫, 刘仁强. 2017. 大气动力学中三种 Rossby 波作用通量的特征差异和适用性比较 [J]. 大气科学学报, 40(6): 850–855. Shi Chunhua, Jin Xing, Liu Renqiang. 2017. The differences in characteristics and applicability among three types of Rossby wave activity flux in atmospheric dynamics [J]. Trans. Atmos. Sci. (in Chinese), 40(6): 850–855. doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20161023012
- 索渺清, 丁一汇. 2009. 冬半年副热带西风南支槽结构和演变特征研究 [J]. 大气科学, 33(3): 425–442. Suo Miaoqing, Ding Yihui.

2009. The structures and evolutions of the wintertime southern branch trough in the subtropical westerlies [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 33(3): 425–442. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.03.03
- Takaya K, Nakamura H. 2001. A formulation of a phase-independent wave–activity flux for stationary and migratory quasi-geostrophic eddies on a zonally varying basic flow [J]. *J. Atmos. Sci.*, 58(6): 608–627. doi:10.1175/1520-0469(2001)058<0608:AFOAPI>2.0.CO;2
- 陶诗言, 卫捷. 2008. 2008年1月我国南方严重冰雪灾害过程分析 [J]. *气候与环境研究*, 13(4): 337–350. Tao Shiyan, Wei Jie. 2008. Severe snow and freezing-rain in January 2008 in the southern China [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 13(4): 337–350. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2008.04.01
- Wang B, Wu R G, Fu X H. 2000. Pacific–East Asian teleconnection: How does ENSO affect East Asian climate [J]. *J. Climate*, 13(9): 1517–1536. doi:10.1175/1520-0442(2000)013<1517:PEATHD>2.0.CO;2
- 曾剑, 张强, 王同美. 2010. 东亚冬季风与中国南方冬季降水的关系分析 [J]. *高原气象*, 29(4): 975–981. Zeng Jian, Zhang Qiang, Wang Tongmei. 2010. Analysis on relationship of East–Asian winter monsoon intensity and winter precipitation in southern China [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 29(4): 975–981.
- 张自银, 龚道溢, 郭栋, 等. 2008. 我国南方冬季异常低温和异常降水事件分析 [J]. *地理学报*, 63(9): 899–912. Zhang Ziyin, Gong Daoyi, Guo Dong, et al. 2008. Anomalous winter temperature and precipitation events in southern China [J]. *Acta Geographica Sinica (in Chinese)*, 63(9): 899–912. doi:10.3321/j.issn:0375-5444.2008.09.001
- 宗海锋, 张庆云, 布和朝鲁, 等. 2008. 黑潮和北大西洋海温异常在2008年1月我国南方雪灾中的可能作用的数值模拟 [J]. *气候与环境研究*, 13(4): 491–499. Zong Haifeng, Zhang Qingyun, Bueh ChoLaw, et al. 2008. Numerical simulation of possible impacts of Kuroshio and North Atlantic sea surface temperature anomalies on the South China snow disaster in January 2008 [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 13(4): 491–499. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2008.04.13