大气科学
CHINESE JOURNAL OF ATMOSPHERIC SCIENCES

2016年秋季中国南方降水异常的环流特征及海温影响

蒋子瑶 徐海明 马静

Atmospheric Circulation Characteristics of Heavy Precipitation Events and Impact of Sea Surface Temperature over the Southern China in the Autumn of 2016

JIANG Ziyao XU Haiming MA Jing

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2011.20180

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

中国南方夏季降水的年代际变率主模态特征及机理研究

Characteristics and Corresponding Mechanisms of the Leading Modes of Interdecadal Variability of Summer Rainfall in Southern China

大气科学. 2018, 42(4): 859 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1802.17283

我国南方盛夏气温主模态特征及其与海温异常的联系

Major Modes of Midsummer Air Temperature in Southern China and Their Relationship with Sea Surface Temperature Anomalies

大气科学. 2018, 42(6): 1245 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1801.17186

2016年我国梅雨异常特征及成因分析

Characteristics and Causes Analysis of Abnormal Meiyu in China in 2016

大气科学. 2018, 42(5): 1055 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1708.17170

青藏高原南、北积雪异常与中国东部夏季降水关系的数值试验研究

A Numerical Study on the Relationship between the Spring-Winter Snow Cover Anomalies over the Northern and Southern Tibetan Plateau and Summer Precipitation in East China

大气科学. 2017, 41(2): 345 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1604.16119

东亚夏季环流多齿轮耦合特征及其对中国夏季降水异常的影响分析

Coupling Wheels in the East Asian Summer Monsoon Circulations and Their Impacts on Precipitation Anomalies in China

大气科学. 2019, 43(4): 875 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1808.18164

观测分析非洲南部地区土壤湿度异常对南半球大气环流的显著影响

The Influence of Southern Africa Soil Moisture Anomalies on the Southern Hemisphere Atmospheric Circulation

大气科学. 2019, 43(3): 552 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1806.18116

关注微信公众号，获得更多资讯信息

蒋子瑶, 徐海明, 马静. 2021. 2016 年秋季中国南方降水异常的环流特征及海温影响 [J]. 大气科学, 45(5): 1023−1038. JIANG Ziyao, XU Haiming, MA Jing. 2021. Atmospheric Circulation Characteristics of Heavy Precipitation Events and Impact of Sea Surface Temperature over the Southern China in the Autumn of 2016 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 45(5): 1023−1038. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.20180

2016 年秋季中国南方降水异常的环流特征及海温影响

蒋子瑶 [1,2] 徐海明 [1,2] 马静 [1,2]

1 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心/气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室，南京 210044

2 南京信息工程大学大气科学学院，南京 210044

摘 要 本文利用中国气象台站观测降水、英国 Hadley 中心海温和 NCEP/NCAR 再分析数据集等资料，研究了 2016 年秋季中国南方降水异常偏多的环流特征及其海温影响。结果表明，2016 年秋季东亚副热带西风急流偏强，我国南方地区位于急流入口区的右侧，有利于产生上升运动；同时西太平洋副热带高压强度偏强、面积偏大、位置偏北偏西，对应副高西南侧的东南风将热带太平洋的暖湿气流向我国南方输送，有利于降水偏多。另外，2016 年秋季登陆我国的台风异常偏多，频繁活动的台风给我国南方带来了大量降水，也是导致我国南方降水异常偏多的原因之一。进一步研究表明，2016 年秋季南方降水异常偏多主要与同期赤道西太平洋和东南太平洋海温异常偏高有关，上述海区的海温异常通过激发向下游传播的遥相关波列或通过 Gill 响应对东亚环流产生影响，进而有利于中国南方降水增多。通过 CAM5.3（Community Atmosphere Model Version 5.3）一系列的敏感性试验，验证了上述的结果。

关键词 中国南方地区 秋季降水 环流特征 海温异常 数值模拟

文章编号 1006-9895(2021)05-1023-16 **中图分类号** P466 **文献标识码** A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.20180

Atmospheric Circulation Characteristics of Heavy Precipitation Events and Impact of Sea Surface Temperature over the Southern China in the Autumn of 2016

JIANG Ziyao[1,2], XU Haiming[1,2], and MA Jing[1,2]

1 *Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC-FEMD)/Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education (KLME)/Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change (ILCEC), Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing* 210044

2 *School of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing* 210044

Abstract This paper studies the atmospheric circulation characteristics of the abnormally heavy precipitation events over southern China in the fall of 2016 and the impact of Sea Surface Temperature (SST) based on the precipitation data

收稿日期 2020-07-14；**网络预出版日期** 2020-12-23

作者简介 蒋子瑶，女，1996 年出生，硕士研究生，主要从事海—气相互作用研究。E-mail: 389751842@qq.com

通讯作者 徐海明，E-mail: hxu@nuist.edu.cn

资助项目 国家自然科学基金资助项目 41975106

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 41975106)

from the weather stations in China, UK Hadley Center SST, and NCEP/NCAR reanalysis datasets. Results show that the subtropical westerly jet in East Asia was much stronger in the fall of 2016 and southern China was located to the right of the jet stream entrance, which was conducive to an ascending motion. The western Pacific subtropical high was also much stronger than normal, with a larger area and more northwestward location. The anomalous southeasterly winds on the southwest side of the western Pacific subtropical high transported warm and moist air from the tropical Pacific to southern China, leading to heavy precipitation there. Landing typhoons along the coast of southeast China also contributed to heavy precipitation. Further analysis shows that the heavy rainfall event was mainly related to the abnormally higher SST over the equatorial western and southeastern Pacific simultaneously on interannual time scales. These SST anomalies could affect East Asian atmospheric circulation through exciting downstream-propagating teleconnection wave trains or Gill-type atmospheric responses. The above results are further confirmed by a series of numerical model simulations, using Community Atmosphere Model Version 5.3 (CAM 5.3).

Keywords Southern China, Anomalous fall precipitation in 2016, Characteristics of atmospheric circulation, SST anomalies, Numerical model simulations

1 引言

在全球变暖背景下，旱涝灾害、高温热浪和台风等极端天气气候事件频发（Izrael et al., 2007）。国内外学者针对极端事件已有大量的研究工作（Trenberth and Fasullo, 2012; Coumou and Rahmstorf, 2012; 高荣等, 2018）。强降水引发的城市内涝、洪水、山体滑坡等自然灾害，往往会造成人民生命财产的重大损失，故使其被广泛关注。

以往对我国大范围降水异常的研究主要集中在冬夏两季。前人围绕冬季我国不同地区的降水多寡已开展诸多工作（丁一汇等, 2008; 张福颖等, 2018）。夏季作为降水异常的高发时段，无论是在年代际尺度（黄荣辉等, 1999, 2013）、年际尺度上（吴萍等, 2017; 方浩和乔云亭, 2019），还是个例分析（丁一汇, 2015; 袁媛等, 2017），我国气象工作者对降水异常的成因已经进行了较为深入的研究。然而，对秋季降水异常的研究相对较少，且大都集中在华西秋雨异常（梁萍等, 2019; 陈剀等, 2020）以及近几年来出现的西南秋季干旱（沙天阳等, 2013; 张顾炜等, 2016）。

大范围异常降水的形成主要受大气环流的直接影响。我国东部的降水异常与东亚副热带西风急流（张耀存和况雪源, 2008; 金荣花等, 2012）、稳定维持的中纬度阻塞高压（Chen and Zhai, 2014; 张庆云和郭恒, 2014）和南侵的东北冷涡（何金海等, 2006; 刘慧斌等, 2012）等中高纬度环流系统有关。我国东部大范围降水异常同时也受到低纬度地区大气环流系统的影响，如南亚高压（张庆云等, 2007; 王黎娟等, 2009）、西太平洋副热带高压（张庆云和陶诗言, 2003; 陶诗言和卫捷, 2006）以及东亚夏季风（竺可桢, 1934; 黄士松和汤明敏, 1995; Feng and Hu, 2004）异常也分别通过影响高空辐散条件和低空水汽输送等对降水产生影响。黄荣辉等（2013）指出东亚地区夏季降水与欧亚型、丝绸之路型和东亚—太平洋型等遥相关型的变化有关。此外，大气的低频振荡作为联系不同纬度间相互作用的形式之一，对我国东部降水异常也存在一定影响（翟盘茂等, 2016）。

引起大气环流异常的原因主要涉及到外强迫信号，包括海温异常（李崇银等, 2002）、土壤湿度异常（陈海山和周晶, 2013）、极冰异常（杨修群和黄士松, 1993）等，其中海温异常是影响东亚环流异常的重要因子之一。海温异常的年际尺度信号例如厄尔尼诺—南方涛动（陶诗言和张庆云, 1998; 何金海等, 2014; 张福颖等, 2018）、印度洋偶极子（李崇银和穆明权, 2001; 黄刚等, 2016）等，年代际尺度信号例如太平洋年代际振荡（李崇银等, 2002; 张庆云等, 2007; Yang et al., 2017）、大西洋多年代际振荡（Kucharski et al., 2016; Li et al., 2016; Sun et al., 2017）等，均可引起东亚上空大气环流异常。

通常情况下，秋季大都干燥少雨，但 2016 年秋季我国南方出现了较为异常的气候特征（竺夏英和宋文玲, 2017）：全国平均降水量 164.4 mm，较往年同期偏多 37%，其中南方地区降水异常尤为突出，达 1967 年以来历史同期最高值，多地台站连续降水量突破历史极值，导致了严重的次生灾害，如泥石流、洪涝、山体滑坡等，给我国国民经济建设和农业生产以及人们的财产安全造成了巨大损失。

本文旨在针对 2016 年秋季中国南方强降水现象，通过诊断分析大气环流特征和外强迫信号，并在此基础上利用气候模式开展一系列敏感性试验，探讨造成该降水异常的可能成因。

2　资料与方法

2.1　资料

本文使用的资料主要有：（1）中国气象局国家气象信息中心整编的 1967～2019 年中国国家级地面气象站基本气象要素日值数据集（V3.0）逐日降水观测资料及国家气候中心提供的 160 站月平均降水观测资料；（2）中国气象局热带气旋资料中心（http://www.typhoon.org.cn [2020-03-30]）提供的热带气旋最佳路径数据集（Ying et al., 2014）；（3）1967～2017 年美国气象环境预报中心/美国国家大气研究中心（NCEP/NCAR）逐月再分析资料（Kalnay, 1996），水平分辨率为 2.5°×2.5°；（4）1956～2017 年英国气象局 Hadley 中心月平均海表温度资料（Rayner et al., 2003），水平分辨率为 1°×1°。文中各要素气候态均指 1981～2010 年各要素的平均值，秋季指北半球 9～11 月。

2.2　方法

本文使用了趋势分析、谐波分解、相关分析和合成分析等方法。另外，本文中识别热带气旋降水采用任福民等（2001）和王咏梅等（2006）提出的方法，其主要思路如下：首先从分析降水场的结构入手，通过获取各台站的邻站降水率，选取最大可能的雨带中心，定义雨带的主要特征及边缘，将降水场分离成不同的雨带；然后判定这些雨带及各台站与台风中心的距离是否满足控制阈值，最终得到可能由多条不同雨带以及零星台站组成的台风雨带。具体计算步骤可参考上述两篇文献。

本文采用的模式为通用地球系统模式（Community Earth System Mode，简称 CESM）1.2.2 版本（Liu et al., 2016），是 2010 年 7 月美国国家大气科学研究中心向外推出的全球耦合气候模式，模式包括五个地球物理模块以及一个耦合器，通过耦合技术，能较准确模拟各圈层之间的相互作用，从而重现过去、模拟现在或者预测未来气候变化。本文运行的通用大气环流模式（Community Atmosphere Model Version 5.3，简称 CAM5.3）是 CESM 中的大气模块，CAM5.3 既可以与海洋、陆面等模式耦合运转，也可以单独使用，模拟大气环流变化。模式水平分辨率为 1.9°×2.5°，全球共有 96（经向）×144（纬向）个格点。垂直方向上为 σ–p 混合坐标系，共有 30 层，最顶层位于 3.643 hPa。

3　2016 年秋季降水和环流异常特征

3.1　降水量异常分布

图 1a 给出了 2016 年秋季全国降水量及降水距平百分比。与常年同期相比，我国大部分地区秋季降水量正常或偏多。全国偏多两成以上的台站约

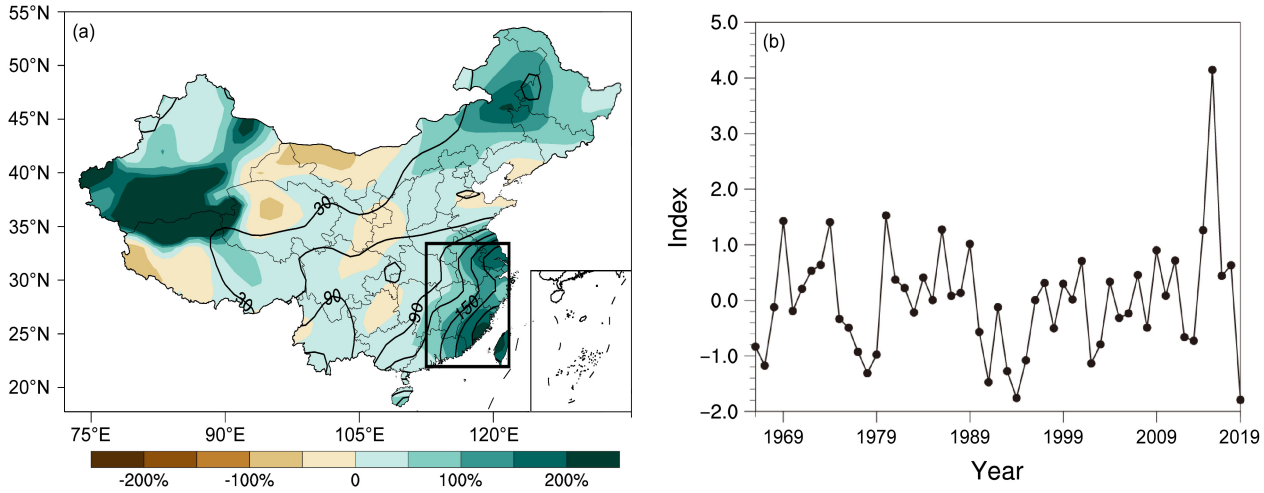

图 1　（a）2016 年秋季全国降水量（等值线，单位：mm）及降水距平百分比（填色）分布（黑色方框表示降水关键区）；（b）1967～2019 年中国南方秋季降水指数

Fig. 1　Distributions of accumulated precipitation (contours, units: mm) and precipitation anomaly percentage (shaded) over China in fall of 2016, black box indicates the key area of precipitation; (b) fall precipitation index in southern China in 1967–2019

占 53%，其中江苏、浙江、上海、福建和安徽降水量均达 1967 年以来历史最高值，尤其是福建省，全省平均降水量达 298.2 mm，几乎为气候平均值的 3 倍。将 2016 年我国南方降水明显偏多的地区（22°N～33°N，113°E～122°E；图 1a 黑色方框）作为降水关键区，并将关键区区域平均的降水标准化时间序列定义为中国南方秋季降水指数（图 1b），可见该地区自 1967 年以来，2016 年秋季降水位列历史同期第一。

3.2 台风降水

2016 年秋季共有 14 个台风在西太平洋生成，相较于往年同期的 11.5 个明显偏多，其中登陆我国的有 4 个，较往年同期的 2.5 个偏多（竺夏英和宋文玲, 2017），频繁活动的台风对我国南方秋季降水产生了重要影响（图 2）。台风“莫兰蒂”于 9 月 15 日登陆福建省厦门市，级别达强台风级，9 月 14～15 日，浙江南部和东部、江西东南部、福建大部、广东东北部以及台湾大部地区有大到暴雨，局地发生大暴雨或特大暴雨。台风“鲇鱼”于 9 月 28 日凌晨登陆福建省泉州市，在其影响下，9 月 27～30 日我国江淮、江南和华南地区陆续出现大到暴雨，局地出现特大暴雨，且上述地区的累计降雨量可达 120～200 mm。台风“莎莉嘉”和“海马”于 10 月中下旬先后登陆我国海南省万宁市和广东省东南部，前者导致 10 月 17 至 19 日江南地区西南部、华南地区大部等地有大到暴雨，广西南部、广东中部和南部、海南等地有大暴雨，局部地区有特大暴雨；而后者主要使得广东出现暴雨到大暴雨，且局地出现特大暴雨。

上述登陆台风产生的降水是造成我国南方降水

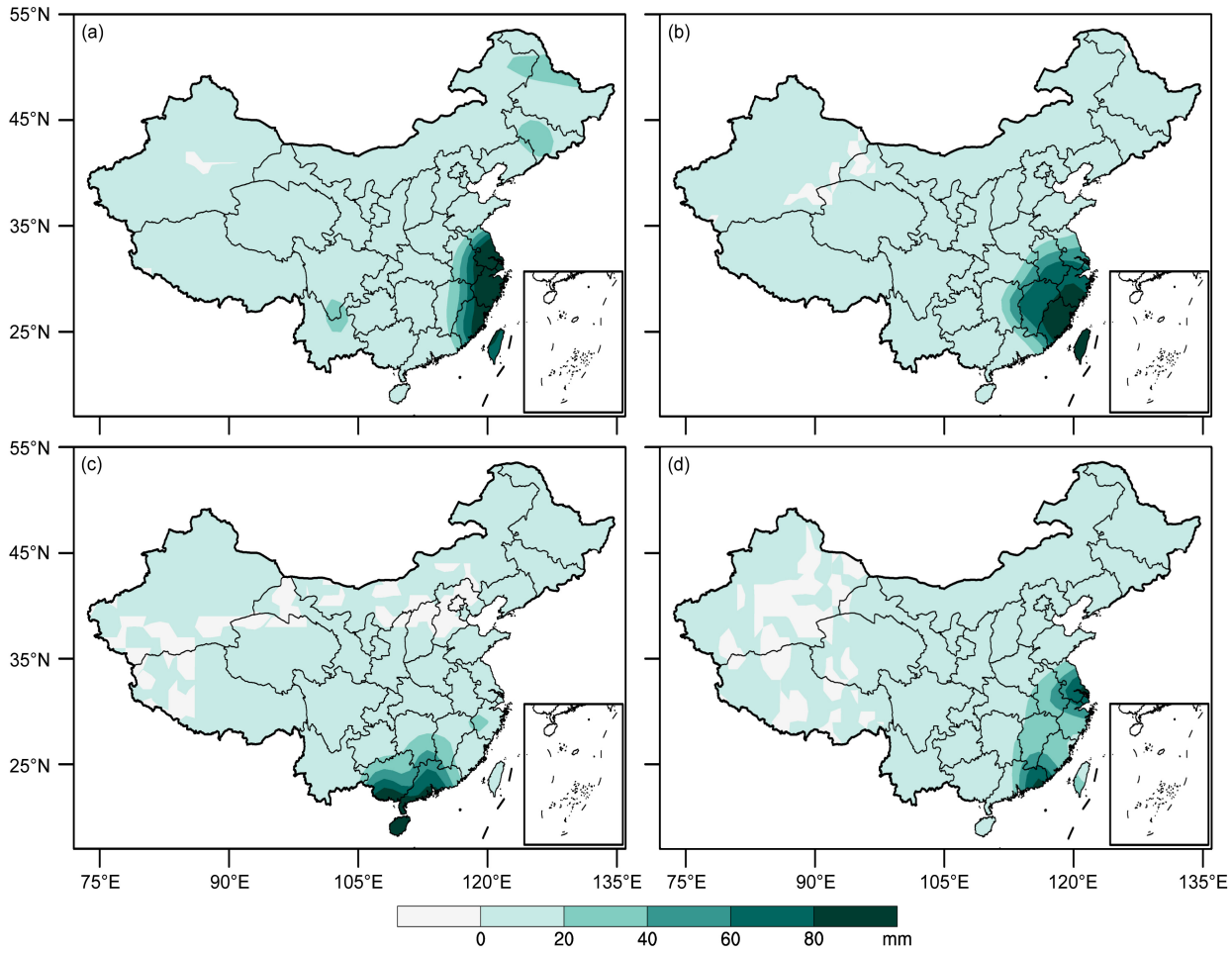

图 2 2016 年秋季台风（a）“莫兰蒂”（9 月 14～15 日）、（b）“鲇鱼”（9 月 27～30 日）、（c）“莎莉嘉”（10 月 17～19 日）和（d）“海马”引起的降水量分布，单位：mm

Fig. 2 Distributions of accumulated precipitation (units: mm) caused by typhoons (a) Meranti (September 14–15), (b) Megi (September 27–30), (c) Sarika (October 17–19), and (d) Haima (October 20–21) in fall of 2016

偏多的原因之一，其大约占了秋季总降水量的 25.3%。除了上述台风引起的降水异常以外，是否还存在其他环流因子导致降水量的异常？这里，我们利用识别热带气旋降水方法（任福民等, 2001; 王咏梅等, 2006）分离出由台风引起的降水量。图 3 给出了去除了台风降水后降水量异常分布。由图 3 可见，尽管去除了台风引起的降水量以后，2016 年秋季南方降水仍较往年明显偏多，且东南沿海大部地区降水量达 120 mm 以上，偏多至少五成，局部地区偏多 1 倍以上（图 3）。因此除了台风引起的降水异常以外，一定还存在其他因子导致 2016 年秋季我国南方降水异常偏多。

3.3　大气环流异常特征

图 4a 给出了 2016 年秋季 500 hPa 位势高度及其距平场、850 hPa 风场和 200 hPa 纬向风场。由图 4 可见，位于鄂霍次克海附近的低值中心强度偏强，有利于其南侧的副热带西风急流增强，该急流的中心风速达 50 m s^{-1}。欧亚中高纬呈现出“西高东低”和“北高南低”的经向型环流，西伯利亚北部处于偏强高压脊控制区，自乌拉尔山经贝加尔湖至白令海为宽广的低槽区，新疆地区位于低槽前部，导致该地区秋季降水异常偏多（梅双丽和牛若芸, 2017）。我国东北地区上空为负高度距平所控制，有利于来自高纬度的冷空气向南入侵，加上南方水汽输送偏强，可能是该地区秋季降水异常偏多的主要原因（竺夏英和宋文玲, 2017）。而黄河以南地区呈正高度距平，不利于冷空气南下。西太平洋副热带高压呈西西南—东东北走向，较常年强度达到最强（图略）、面积明显偏大、脊线偏北、西伸脊点偏西。

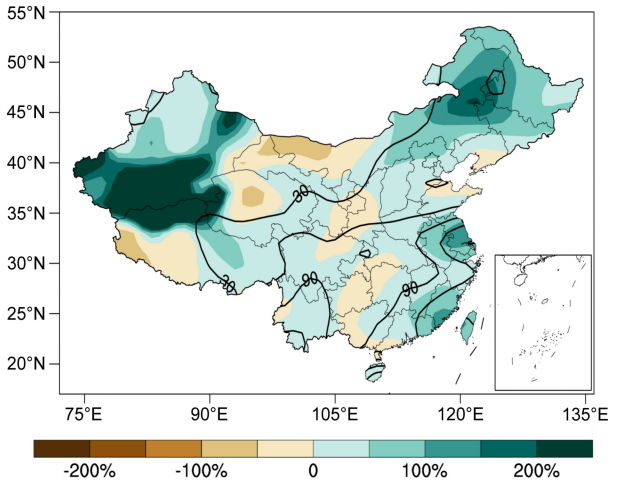

图 3　去除台风影响后的 2016 年秋季全国降水量（等值线，单位：mm）及降水距平百分比（填色）分布

Fig. 3　Distributions of accumulated precipitation (contours, units: mm) and precipitation anomaly percentage (shaded) over China in fall of 2016 with the typhoon-related precipitation removed

从 2016 年秋季 850 hPa 风场距平（图 4b）上可见，赤道印度洋地区为偏南风异常，90°E 附近向北的越赤道气流异常偏强。孟加拉湾上空的异常西风途径中南半岛北部后继续北上，我国南方地区出现南风异常。日本岛东侧存在一异常反气旋性环流中心，其南侧的东风异常气流一直向西延伸至菲律宾附近，并与来自孟加拉湾的西南异常气流在南海南部上空汇合，随后北上到达我国南方地区。

图 4c 为 2016 年秋季海平面至 300 hPa 整层积分水汽通量及水汽通量散度距平场。我国秋季降水异常与两支水汽通道偏明显强有关，其中一支来源于赤道印度洋，其上空向北的水汽输送与孟加拉湾的偏西水汽输送汇合后继续东行，越过中南半岛后经南海北部进入我国，而后继续向北输送水汽至南方地区上空。另一支来自西太平洋副热带高压南侧，其上空异常偏东的水汽输送西行至菲律宾附近转而北上，向我国南部输送水汽。南方地区上空出现异常偏强的水汽辐合，表明暖湿气流水汽输送偏强，为该地区秋季降水提供了十分充足的水汽条件。

形成降水的另一个必要条件是垂直上升运动。从 2016 年秋季沿 113°～122°E 纬向平均的经向垂直环流图（图 4d）上可以看出，10°～30°N 存在大范围一致的上升运动，上升气流到达对流层上部后南北分流，向北的一支在 40°N 附近下沉，向南的一支则流向赤道。垂直速度场距平上表现出我国南方地区从低层到高层均有明显的垂直速度正距平，上升运动强烈，且在 700 hPa 和 500 hPa 附近出现了极大值。东亚副热带西风急流较往年偏强，上述上升运动区刚好位于高空急流入口区的右侧，高层辐散产生的抽吸作用有利于上升运动加强并得以维持，从而有利于降水的发生发展（Whitney, 1977）。

4　环流异常成因分析

造成大范围环流异常的主要影响因子可以分为大气内部变率和外强迫信号，其中，海温异常作为外强迫之一，常常对大范围大气环流异常有重要作用，本文将从这一角度展开讨论。

图 5a 给出了 2016 年秋季海温与多年平均的秋季海温之差。可以看出赤道太平洋呈现出东冷西暖

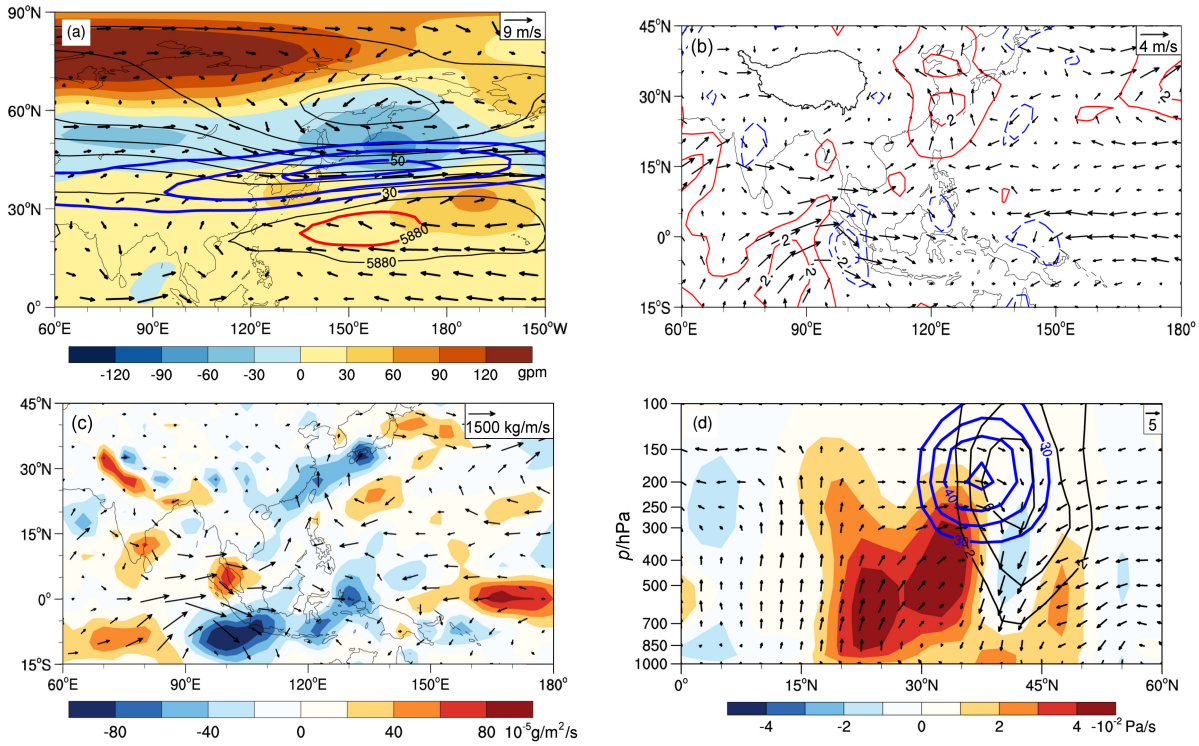

图 4 2016 年秋季大气环流及其异常分布：（a）500 hPa 位势高度场（黑色等值线，单位：gpm）及其距平场（填色，单位：gpm）（粗红线为气候平均的 5880 等值线）、850 hPa 风场（箭头，单位：m s^{-1}）及 200 hPa 纬向风场（蓝色等值线，单位：m s^{-1}）；（b）850 hPa 风场距平（箭头，单位：m s^{-1}）及经向风分量距平（等值线，单位：m s^{-1}）；（c）地面至 300 hPa 整层积分水汽通量距平场（箭头，单位：kg m^{-1} s^{-1}）及水汽通量散度距平场（填色，单位：10^{-5} g m^{-2} s^{-1}）；（d）沿 113°～122°E 纬向平均的经向垂直环流（箭头，两个分量为经向风和垂直速度，单位分别为 m s^{-1} 和-10^{-2} Pa s^{-1}）和纬向风（蓝色等值线，单位：m s^{-1}）及其距平场（黑色等值线，单位：m s^{-1}）、垂直速度距平场（填色，单位：-10^{-2} Pa s^{-1}）

Fig. 4 Atmospheric circulation and its anomalies in fall of 2016: (a) Geopotential height (black contours, units: gpm) and its anomalies (shaded, units: gpm) at 500 hPa (the thick red line denotes the 5880 contours of the climatological mean), winds at 850 hPa (arrows, units: m s^{-1}), and zonal winds at 200 hPa (blue contours, units: m s^{-1}); (b) wind anomalies (arrows, units: m s^{-1}) and meridional wind anomalies (contours, units: m s^{-1}) at 850 hPa; (c) anomalies of moisture flux integrated from the surface up to 300 hPa (arrows, units: kg m^{-1} s^{-1}) and its divergences (shaded, units: 10^{-5} g m^{-2} s^{-1}); (d) meridional vertical circulation averaged from 113°E to 122°E (arrows, meridional wind, and vertical velocity in m s^{-1} and -10^{-2} Pa s^{-1}, respectively), zonal wind (blue contours, units: m/s) and its anomalies (black contours, unit: m s^{-1}), vertical velocity anomalies (shaded, units: -10^{-2} Pa s^{-1})

即东西偶极子型的海温异常分布，北太平洋呈南冷北暖的海温异常，西北太平洋、西南太平洋、东南太平洋、北大西洋及印度洋北部则主要为海温正距平控制。

考虑到由于温室效应导致的全球变暖已是不争的事实（Izrael et al., 2007），因此上述海温异常既包含了海温年际异常，也包含了与全球海温增暖相联系的海温年代际异常。这里我们将 2016 年秋季海温异常分离成两部分，即时间尺度相对较短的年际异常和时间尺度相对较长的年代际异常，海温年际异常用 2016 年秋季海温减去近十年（2006～2015 年）秋季平均海温表征（图 5b），我们也用不同的十年平均，如 2005～2014 年，2008～2017 年平均，得到的结果并无太大差异，而年代际异常则用近十年（2006～2015 年）秋季平均海温减去多年（1956～2005 年）平均的秋季海温表征（图 5c）。由图 5b 可见，太平洋海温的年际异常分布与 2016 年秋季异常基本一致，但前者异常程度较后者弱，此外，印度洋和北大西洋海温的年际异常表现出负距平。由图 5c 可见，年代际海温异常明显的海区主要出现在印度洋、北大西洋和北太平洋中纬度地区，海温均异常偏高。对比上述海温异常的分布可以发现，2016 年秋季太平洋海温异常以年际变化为主，而北大西洋和北印度洋海温异常则与背景场增暖有关。接下来，我们将分别探究海温年际异常和背景场增暖对我国南方秋季降水的可能影响。

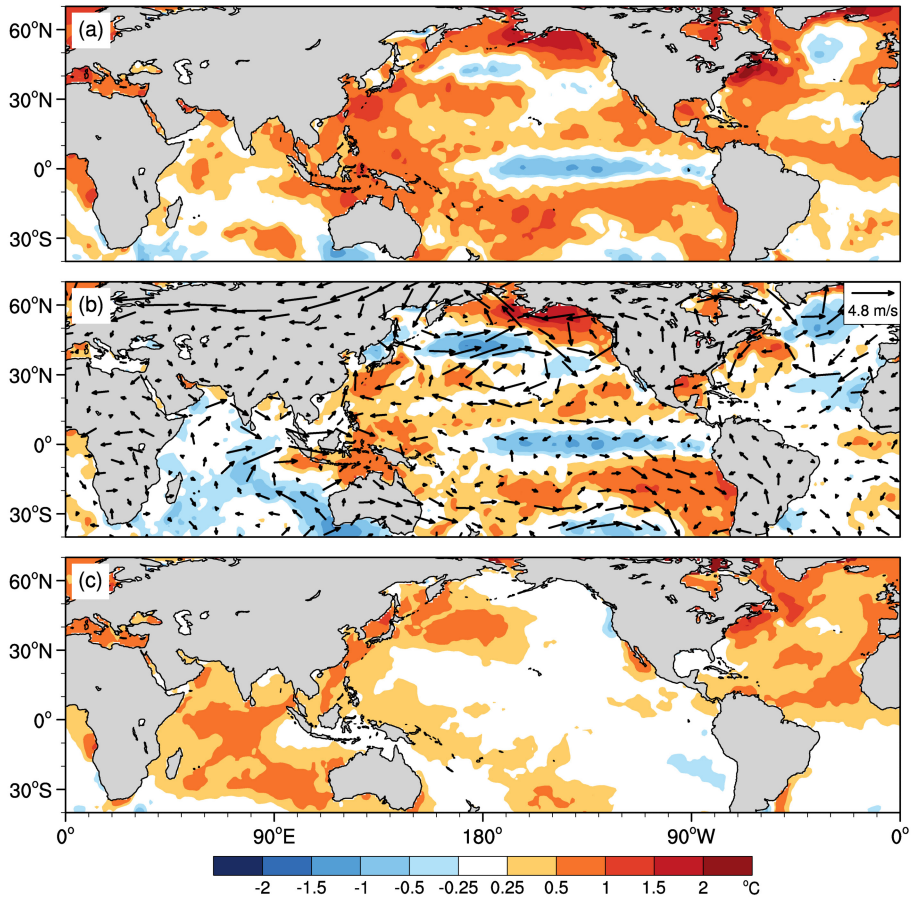

图 5　2016 年秋季海温异常分布：（a）2016 年秋季海温与多年（1956～2005 年）平均的秋季海温之差（单位：°C）；（b）2016 年秋季海温与近十年（2006～2015 年）秋季平均海温之差（填色，单位：°C）和 850 hPa 风场距平（箭头，单位：m s^{-1}）；（c）近十年秋季平均海温与多年平均的秋季海温之差（单位：°C）

Fig. 5　Distributions of SST (Sea Surface Temperature) anomalies in fall of 2016: (a) Differences between SST in 2016 and multiyear-averaged (1956–2005) SST (units: °C); (b) differences (shaded, units: °C) between SST in 2016 and averaged SST in the past ten years (2006–2015) in fall and corresponding wind differences at 850 hPa (arrows, units: m s^{-1}); (c) differences between averaged SST in the past ten years and multiyear-averaged SST in fall (units: °C)

4.1　海温年际异常对我国南方秋季降水的可能影响

一些学者认为 2016 年秋季西太平洋生成台风个数异常偏多与海温异常有关。Zhan et al.（2017）提出 2016 年 9～10 月台风异常偏多可能是西太平洋增暖和中东太平洋类似 La Niña 型的海温分布共同作用的结果，Wang et al.（2019）则认为 2016 年秋季北印度洋海温偏冷、赤道西太平洋海温偏暖以及赤道中东太平洋海温偏冷的三极型海温模态（tri-polar SST pattern），是造成东西风在西太平洋辐合的可能原因（图 5b），进而促使热带气旋的生成和发展。2016 年秋季登陆我国的热带气旋个数异常偏多也可能与 La Niña 型的海温异常分布有关。Liu and Chan（2003）和 Wu et al.（2004）指出秋季 9～11 月 La Niña 型的海温异常分布可导致热带印度洋上的西风异常向东延伸至中国南海地区，南海上空出现正涡度异常，与此同时，西太平洋副热带高压增强西伸，这样的环流形势十分有利于登陆我国的台风偏多。因此，2016 年秋季热带太平洋西暖东冷的偶极子型海温异常分布可能是导致台风异常偏多的主要原因，但该结论仍需要数值模式的验证。

图 6a 为去除台风降水后 2016 年秋季我国降水的年际变化。由图 6 可见，南方地区的降水分布特征与图 3 大致相同，但福建南部的降水大值区范围南扩至广东东部及整个台湾地区，与之匹配的对流层中、低层大气环流距平场（图 6b）也与图 4a 和 b 极其相似，只是我国南方地区上空 850 hPa 南风异常略有增加。因此，年际异常可能是导致 2016 年

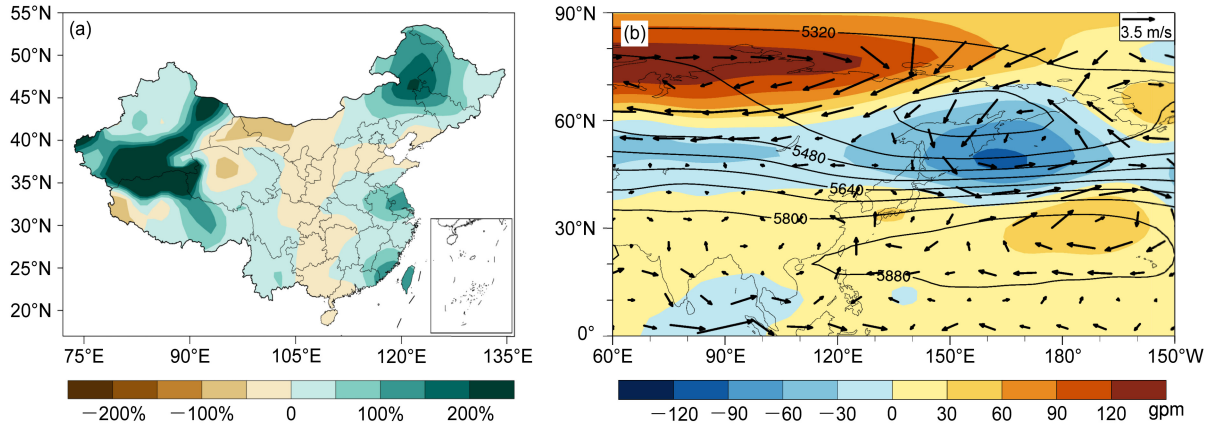

图 6 2016 年秋季相对近十年秋季平均的气象要素差值场分布：（a）降水（台风除外）距平百分比；（b）位势高度距平场（填色，单位：gpm；等值线为 2016 年秋季的 500 hPa 位势高度场）及 850 hPa 风场距平（箭头，单位：m s^{-1}）

Fig. 6 Distributions of differences of fall meteorological variables between 2016 and the past 10-year average: (a) Precipitation (typhoon-related precipitation removed) anomaly percentage; (b) geopotential height anomalies at 500 hPa (shaded, units: gpm; contours denote a 500 hPa geopotential height in fall of 2016.) and wind anomalies at 850 hPa (arrows, units: m s^{-1})

我国秋季降水异常和东亚大气环流异常的主要原因。

图 7 为 1967～2015 年年际时间尺度上中国南方秋季降水指数与全球同期海温的相关系数及 850 hPa 回归风场。由图可见，中国南方秋季降水年际变化与赤道西太平洋西部和西北部的海温呈显著的正相关，说明当赤道西太平洋和西北太平洋海温偏高时，我国南方秋季降水偏多，这与 2016 年秋季两片海区的海温异常分布相一致。此外，两片海区上空的回归风场也与 2016 年秋季相类似，赤道西太平洋存在东西异常风的辐合，风场辐合区与海温暖异常相对应，表明该地区的海气之间明显表现为海洋对大气的强迫作用。另外，西北太平洋上空也存在一异常反气旋式环流，其形成也可能与赤道西太平洋异常增暖有关。已有研究表明，当西太平洋暖池异常偏暖时，其上空的对流活动异常增强，进而造成 Hadley 环流增强，同时其北侧的下沉支增强北移（黄荣辉和孙凤英, 1994），可导致西太平洋副热带高压增强北移（李业进和王黎娟, 2016）。

上述分析表明，2016 年秋季赤道西太平洋和西北太平洋年际时间尺度上的异常增暖可能是造成 2016 年秋季西太平洋副热带高压强度偏强、位置偏西偏北的重要原因，同时也是导致南方降水异常偏多的重要原因。

4.2 海温背景场增暖对我国南方秋季降水的可能影响

与年际异常类似，海温的年代际异常也可能通过影响大气环流从而对我国南方降水产生影响。图 8a 给出了近十年秋季平均相对多年秋季平均的降水距平百分比。由图可见，我国南方大部分地区为降水正异常，偏多五成以内的台站主要分布在江西大部、福建北部、浙江大部以及安徽和湖北南部地区。从相应的 500 hPa 位势高度异常场（图 8b）上可以看出，北半球对流层中层几乎全为位势高度正异常所控制，中纬度地区上空出现了三个位势高度正异常大值中心，分别位于欧洲中部、北太平洋和北美东部，西太平洋副热带高压也有所增强。从 850 hPa 风场距平（图 8b）上可见，库页岛以东的北太平洋上为一异常反气旋式环流中心，其与位势高度正异常相对应。西太平洋副热带高压南侧的异常东风与来自孟加拉湾的异常西风在菲律宾附近上空辐合，进而北上到达我国南方地区。上述大气环流的异常分布特征与 2016 年秋季环流异常场（图 3、图 4a 和 b）存在相似之处，但异常程度相对偏弱。因此，海温背景场的增暖可能对 2016 年秋季我国南方降水异常起次要作用。

此外，热带地区的环流异常（图 8b）表现出了一定的独特性。赤道印度洋和赤道西太平洋上均盛行较为一致的异常东风气流，中东太平洋及热带大西洋则为西风异常，而东南太平洋上空则为一较强的异常气旋式环流。现有的研究发现，在年代际和多年代际尺度上，印度洋海温变化可通过大气桥对太平洋地区产生影响，印度洋海温增暖主要通过调整印度—太平洋地区上空东西向 Walker 环流，从而对太平洋上空的大气环流系统产生影响

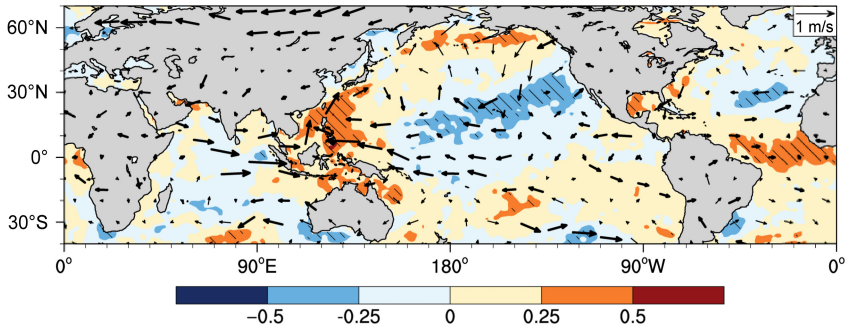

图 7　年际尺度上的中国南方秋季降水指数与全球同期海温的相关（填色，斜线区域表示通过信度为 95% 的显著性检验）及 850 hPa 回归风场（箭头，单位：m s^{-1}，粗箭头表示通过信度为 95% 的显著性检验）

Fig. 7　Simultaneous correlation coefficients between the fall precipitation index in southern China and global SST on interannual time scales (shaded; the slashed areas denote the values significant at a confidence level of 95%) and regression coefficients of wind at 850 hPa (arrows; the thick arrows denote the values significant at a confidence level of 95%)

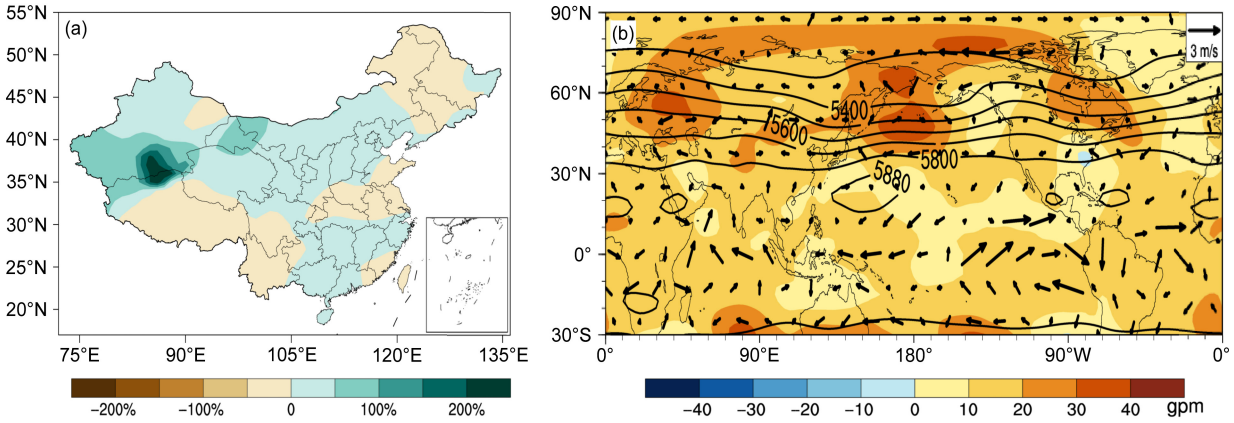

图 8　近十年秋季平均相对多年秋季平均的气象要素差值场分布：（a）降水距平百分比；（b）位势高度距平场（填色，单位：gpm；等值线为近十年秋季平均的 500 hPa 位势高度场）及 850 hPa 风场距平分布（箭头，单位：m s^{-1}）

Fig. 8　Distributions of differences of fall meteorological variables between average in the last ten years and multiyear average: (a) Precipitation anomaly percentage; (b) geopotential height anomalies at 500 hPa (shaded, units: gpm; contours denote a 500 hPa geopotential height in fall of 2016) and wind anomalies at 850 hPa (arrows, units: m s^{-1})

（Johnson and Xie, 2010; Luo et al., 2012）。相对于印度洋，大西洋海温的年代际变化对太平洋地区的影响较为复杂，且其影响主要可通过热带和热带外两种途径。其热带途径为：通过热带大西洋增暖产生的对流响应和大气非绝热加热引起的 Gill 型响应，在热带大西洋出现 Walker 环流的异常上升支，相应地在赤道中东太平洋出现异常的下沉支，并通过风—蒸发—海温反馈机制可导致赤道中东太平洋出现冷海温异常和赤道西太平洋暖海温异常，东西向海温异常反过来又进一步加强太平洋地区的 Walker 环流，并有利于拉尼娜事件的发生（Kucharski et al., 2016; Li et al., 2016）。而热带外途径则为：北大西洋增暖后通过增强局地的对流活动和北太平洋的下沉运动，可导致副热带北太平洋高压异常增强以及西北太平洋异常反气旋的生成（在图 8b 中得到大致的体现），并通过局地海气相互作用致使西北太平洋海温异常升高（Sun et al., 2017）。

然而，上述两片海区的年代际增暖是否对 2016 年秋季南方降水异常产生影响？如有影响，其影响过程和机制如何还有待通过数值模拟来验证。

5　数值模拟

以上分析表明，2016 年秋季热带西太平洋和西北太平洋年际尺度上的异常偏暖可能是导致同期我国南方降水偏多的主要原因，然而，基于观测资料分析则无法确定热带西太平洋和其他海区的海温

异常所起的作用以及它们的相对重要性。此外，印度洋和北大西洋年代际上的异常增暖是否对 2016 年秋季降水也存在影响？接下来，我们将利用 CAM5.3 模式进行模拟研究。

5.1 试验方案

本文共设计了 1 个控制试验和 9 个敏感性试验（表 1），以探究不同海区的海温异常对我国南方秋季降水的可能影响。控制试验以 1981～2010 年秋季平均的气候态海温作为下边界条件，共运行 20 年，然后取后 15 年模式输出结果进行分析。9 个敏感性试验与控制试验相同，不同之处在于每个敏感性试验后 15 年的运行过程中在不同的海区 9～11 月间分别叠加了观测的海温异常分布。

5.2 试验结果分析

在 9 个敏感性试验中，其中 3 个敏感性试验的结果表现为我国南方降水明显增多，它们分别是 TWP、SEP 和 NA 试验，表明 2016 年秋季赤道西太平洋和东南太平洋海温异常偏高以及北大西洋的异常增暖都会对 2016 年我国南方秋季降水异常产生影响。而其他 6 组敏感性试验中的海温异常则对华南秋季降水均无明显影响，因此，这 6 个海区的海温异常并非是影响 2016 年秋季我国南方地区降水偏多的关键区域，其结果这里不再赘述。下面我们主要讨论 TWP、SEP 和 NA 三个数值试验的结果。

5.2.1 TWP 试验

图 9a 给出了 TWP 试验与 CTL 试验中模拟的秋季降水量差值分布。由图可见，赤道西太平洋海温异常偏暖可导致我国华南秋季降水明显增多，华南大部分地区降水偏多达两成以上。

从两个试验模拟的秋季 500 hPa 位势高度差值

表 1 试验方案

Table 1 Schemes of the numerical experiments

数值试验	名称	下边界强迫区域
控制试验	CTL	气候态海温
赤道西太平洋试验	TWP	叠加2016年秋季赤道西太平洋(15°S～15°N, 100°～160°W)的海温异常
赤道中东太平洋试验	TCEP	叠加2016年秋季赤道中东太平洋(7°S～10°N, 180°～80°W)的海温异常
北太平洋试验	NP	叠加2016年秋季北太平洋(40°～60°N, 150°E～120°W)的海温异常
西北太平洋试验	WNP	叠加2016年秋季西北太平洋(20°～40°N, 120°～150°E)的海温异常
东南太平洋试验	SEP	叠加2016年秋季东南太平洋(10°～30°S, 160°～70°W)的海温异常
赤道大西洋试验	TA	叠加2016年秋季赤道大西洋(7°S～7°N, 28°W～10°E)的海温异常
北大西洋试验	NA	叠加近10年秋季平均的北大西洋(0°～66°N, 90°W～0°)海温异常
印度洋试验	IO	叠加近10年秋季平均的印度洋(30°S～20°N, 40°～110°E)海温异常
中纬度北太平洋试验	MNP	叠加近10年秋季平均的北太平洋中纬度地区(23°～60°N, 130°～202°E)的海温异常

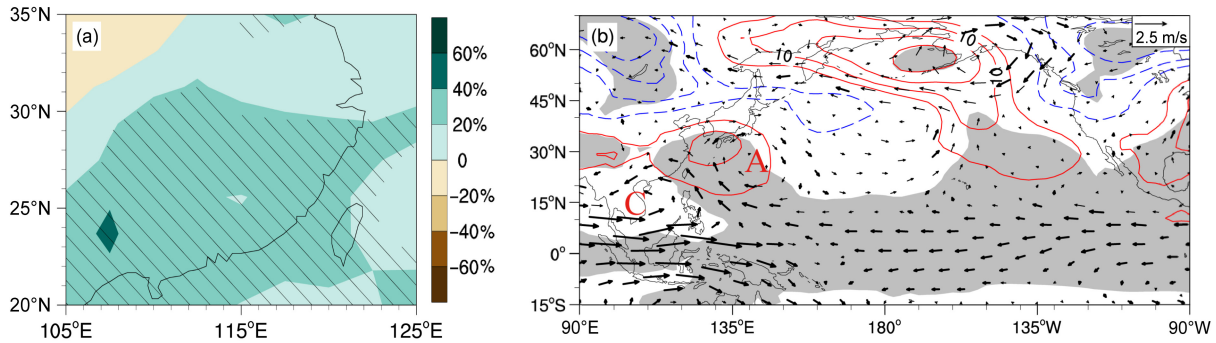

图 9 TWP 试验与 CTL 试验模拟结果的差值场分布：（a）降水距平百分比（斜线区域表示通过信度为 90% 的显著性检验）；（b）500 hPa 位势高度距平场（等值线，单位：gpm，阴影表示通过信度为 90% 的显著性检验）及 850 hPa 风场距平分布（箭头，单位：m s^{-1}，粗箭头表示通过信度为 90% 的显著性检验），“A”和“C”分别表示反气旋和气旋

Fig. 9 Distributions of differences of simulations between TWP (Tropical Warm Pool) and CTL experiments: (a) Precipitation anomaly percentage (slashed areas denote the values significant at a confidence level of 90%); (b) geopotential height anomalies at 500 hPa (contours, units: gpm; shaded areas denote the values significant at a confidence level of 90%) and wind anomalies at 850 hPa (arrows, units: m s^{-1}; the thick arrows denote the values significant at a confidence level of 90%), “A” and “C” represent the cyclone and anticyclone, respectively

场（图 9b）上可见，我国东部地区至西北太平洋上空为一个显著的正位势高度异常，表明赤道西太平洋海温异常增暖可导致西北太平洋副热带高压明显增强、位置偏北偏西。另外，从位势高度差值场上还可以看到，贝加尔湖至日本以东上空为一位势高度负异常区，白令海到北美阿拉斯上空为一位势高度场正异常区，而整个北美上空为位势高度负异常，上述位于东亚沿岸正负相间的位势高度异常场分布类似于夏季东亚—太平洋遥相关型波列（Huang and Li, 1987）。因此，当秋季赤道西太平洋海温异常偏高时，可通过激发类似东亚—太平洋遥相关型波列，从而对西太平洋副热带高压强度和位置产生影响，致使西北太平洋副热带高压明显增强、位置偏北偏西，有利于华南秋季降水异常增多。

从两个试验 850 hPa 风场的差值场（图 9b）上清楚可见，赤道西太平洋海温异常增暖在对流层低层产生了类似于 Gill 型的响应（Gill, 1980），即赤道印度洋、海洋性大陆以及热带西太平洋上空出现西风异常，而在热带中东太平洋上空出现东风异常，东西风异常在赤道西太平洋附近辐合。同时，在中南半岛至南海上空出现了一个异常气旋性环流，该异常气旋性常环流并向东南方向扩展至菲律宾以东及赤道地区，而台湾以东及日本以南的西北太平洋上为一异常反气旋性环流，与观测结果相一致。上述南海至菲律宾以东地区的异常气旋性环流同样有利于类似夏季南海至赤道西太平洋地区季风槽的形成。前人研究也表明，当赤道西太平洋异常偏暖时，西北太平洋季风槽位置偏北偏西，西北太平洋上空台风生成位置和移动路径偏北偏西，从而导致影响我国的台风个数偏多（Chen and Huang, 2008）。这也可以从控制试验和 TWP 试验中模拟的热带涡旋的个数加以验证（图 10）。这里，我们参考 Chelton et al.（2011）和黄挺等（2020）的方法，把 850 hPa 上同时满足以下条件的大气扰动定义为热带涡旋：（1）扰动中心位于 20°S～20°N；（2）流场上有明显的气旋式环流；（3）相对涡度小于 0；（4）涡旋直径小于等于 700 km。经统计，CTL 试验中秋季西太平洋和西北太平洋上空出现了 24 个热带涡旋，而 TWP 试验中的热带涡旋明显增加，总数达到了 35 个，且其强度和持续时间均有明显增加、移动路径偏北偏西。以上结果也从一定程度上解释了 2016 年秋季台风为何异常偏多。

综上所述，赤道西太平洋海温异常偏高时，一方面通过激发一个类似夏季东亚—太平洋型遥相关的波列影响西太平洋副热带高压强度和位置，导致西太平洋副热带高压明显增强、位置明显偏北偏西，另一方面，通过在对流层低层产生类似 Gill 型的大气响应，在南海至菲律宾以东地区产生异常气旋性环流（类似于夏季南海—西太平洋季风槽），有利于台风的发生发展，从而对我国华南秋季降水产生影响。

5.2.2　SEP 试验

图 11a 为 SEP 试验与 CTL 试验中模拟的秋季降水量差值分布。由图可见，东南太平洋出现异常暖海温时，我国南方地区秋季降水偏多，且西部和西南部分别出现了偏多两成以上的降水。

从两个试验 500 hPa 高度场及 850 hPa 风场的差值场（图 11b）上可见，东南太平洋上空为显著的气旋性环流异常和负位势高度异常，同时，在东南太平洋经南美、南大西洋、南印度洋至澳洲西部

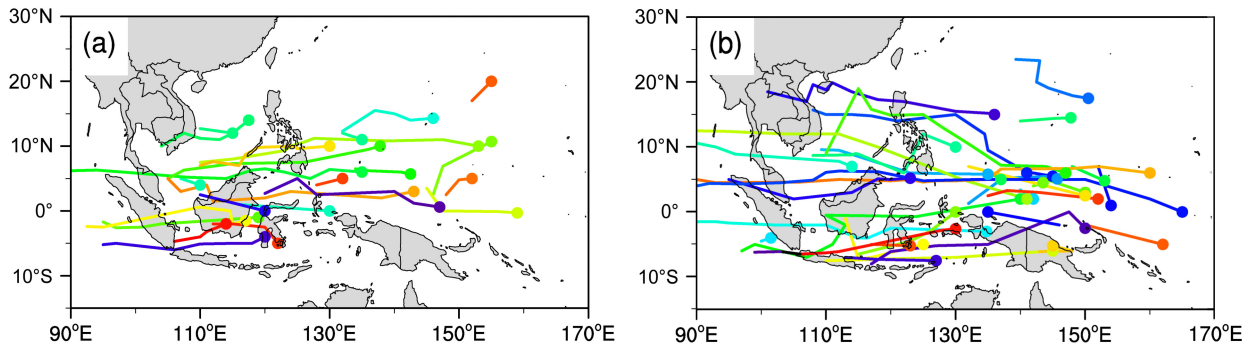

图 10　（a）CTL 试验和（b）TWP 试验模拟的秋季西太平洋和西北太平洋上空逐个涡旋生成位置（圆点）及移动路径（折线）

Fig. 10　Vortex generation positions (dots) and moving tracks (broken lines) over the western and northwestern Pacific in fall by (a) CTL and (b) TWP experiment

的中高纬地区呈现出一支正负相间的位势高度异常波列。该异常波列非常类似于南半球中高纬地区太平洋南美振荡（Pacific South American oscillation，简称 PSA）（Mo and Ghil, 1987; Szeredi and Karoly, 1987a, 1987b）。当该异常波列传播到澳大利亚及以北上空时为一明显的气旋性异常环流，并在热带西印度洋、南海和热带西太平洋上空形成一致的西风异常，同时在南海北部至菲律宾以东的西北太平洋形成异常的气旋式环流（类似于南海—西北太平洋季风槽），从而对我国南方降水产生影响。

5.2.3 NA 试验

图 12a 给出了 NA 试验与 CTL 试验中模拟的秋季降水量差值分布。由图可见，北大西洋的异常增暖也可导致我国南方降水异常偏多，在 30°N 附近偏多达四成以上。

从两个试验模拟的秋季 500 hPa 位势高度差值场（图 12b）上可见，在西北大西洋至欧亚地中海上空明显构成了一个负—正—负—正位势高度中心相间的异常波列。从 200 hPa 准定常波活动通量异常（图略）上可更直观地看到该波列的传播特征，即源自加拿大东海岸经北大西洋向西南欧方向传播，并在欧亚大陆中纬地区继续向下游一直传播到阿拉伯半岛、阿拉伯半岛及印度半岛上空。而从两个试验模拟的 850 hPa 差值风场（图 12b）上则可以清楚看出，热带大西洋及以西地区上空激发出了明显的西风异常，而在热带印度洋上空出现了一致的东风异常。上述东西风异常分布非常类似于低纬热带大气对热带北大西洋异常增暖在其东西两侧分别所产生的 Kelvin 波和 Rossby 波响应（Gill, 1980）。相应地，在热带西太平洋上空也出现了显著的东风异常，这也与 Ham et al.（2013）的研究结果相一致，他们也发现热带印度洋上空对流层大气对热带北大西洋的非绝热加热可产生 Kelvin 波型的正厚度异常的响应，并且当该异常信号在东传的过程中可在热带西太平洋形成明显的东风异常。以上热带洋面上空的风场异常分布与海温年代际变化对应的低层风场异常特征（图 8b）较为相似。尤其值得注意的是，在副热带西北太平洋上空相应出现了异常的反气旋式环流，该异常反气旋环流的形成也与 Kelvin 波东传至热带西太平洋地区上空有关

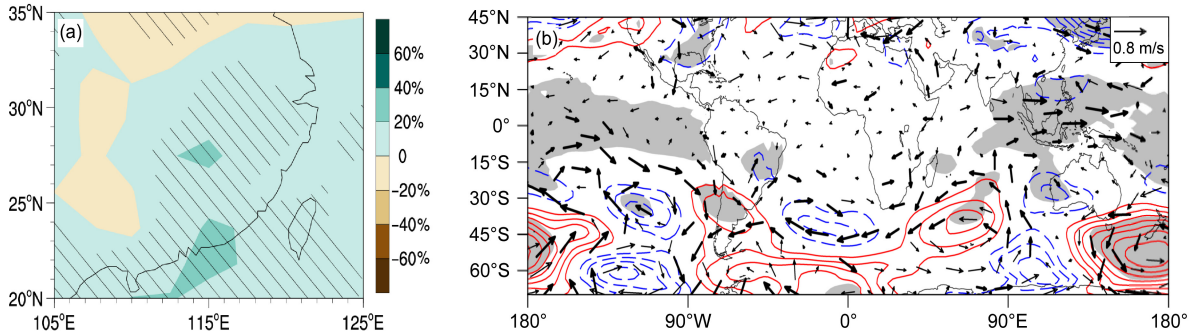

图 11 同图 9，但为 SEP 试验与 CTL 试验的差值场

Fig. 11 Same as Fig. 9, but for the differences between SEP and CTL experiments

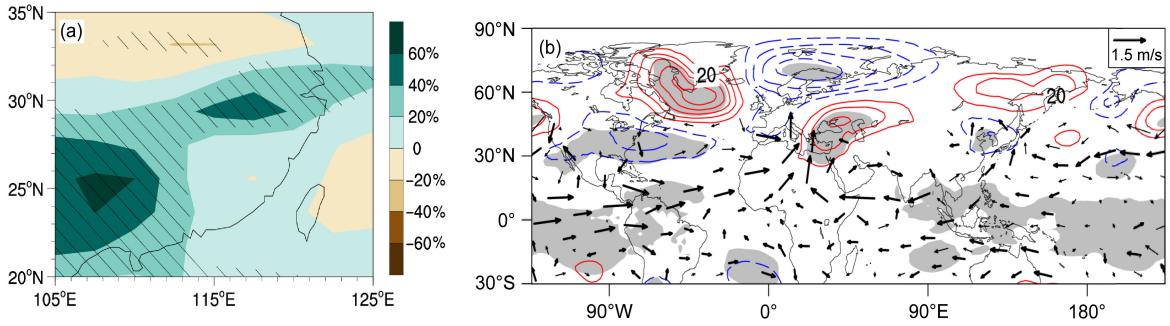

图 12 同图 9，但为 NA 试验与 CTL 试验的差值场

Fig. 12 Same as Fig. 9, but for the differences between NA and CTL experiments

（容新尧等, 2010; Ham et al., 2013）。

综合所述，秋季北大西洋的异常增暖，可能主要通过在热带地区激发向东传播的 Kelvin 波，从而对西北太平洋副热带环流产生影响，进而影响到我国南方秋季降水。

6　结论和讨论

2016 年秋季中国南方降水异常偏多，是近 50 年来秋季降水最多的年份。本文利用中国气象台站降水观测资料、Hadley 海温和 NCEP/NCAR 再分析数据集等资料，分析了造成 2016 年秋季中国南方降水异常偏多的环流特征及其海温影响，得到了以下主要结论：

（1）2016 年秋季东亚副热带高空西风急流异常偏强，中国南方地区刚好位于急流入口区的右侧，为异常降水提供了有利的上升运动条件；同时，西太平洋副热带高压较往年强度异常偏强、面积明显偏大、位置偏北偏西，其西南侧的偏南风与来自孟加拉湾的异常西南气流在南海上空汇合后北上到达中国南方地区，为中国南方异常降水提供了充足的水汽条件。

（2）2016 年秋季中国南方降水异常偏多的原因之一是同期西北太平洋台风生成数和登陆我国台风数都较往年异常偏多，而西北太平洋台风生成与登陆台风的异常偏多可能主要与热带西太平洋的海温异常偏高有关。

（3）去除了登陆台风造成的降水量后，南方降水仍异常较往年偏多五成以上，而降水的异常偏多主要与年际尺度上热带西太平洋和东南太平洋海温的异常偏高有关。通过一系列的数值试验表明，热带西太平洋海温异常偏高时，一方面通过激发一个类似夏季东亚—太平洋型遥相关的波列，导致西太平洋副热带高压明显增强、位置明显偏北偏西，另一方面，通过在对流层低层产生类似 Gill 型的大气响应，在南海至菲律宾以东地区产生异常气旋性环流（类似于夏季南海—西太平洋季风槽），从而对我国南方秋季降水产生影响。而东南太平洋海温异常偏高时，通过激发一个类似跨越东南太平洋—南印度洋—澳大利亚的遥相关波列，引起热带西印度洋、南海和热带西太平洋上空大气环流异常，从而对我国南方秋季降水带来影响。

本文主要针对造成 2016 年秋季我国南方降水异常的环流特征及海温异常进行了分析。事实上，导致我国南方秋季降水异常的成因可能还有很多，如欧亚地表热力异常（黄菱芳等, 2015）、多种大气涛动（刘晓云等, 2016; 徐金霞等, 2017）等，这些因子是否对 2016 年秋季降水存在影响有待进一步分析。

参考文献（References）

Chelton D B, Schlax M G, Samelson R M. 2011. Global observations of nonlinear mesoscale eddies [J]. Progress in Oceanography, 91(2): 167−216. doi:10.1016/j.pocean.2011.01.002

Chen G H, Huang R H. 2008. Influence of monsoon over the warm pool on interannual variation on tropical cyclone activity over the western North Pacific [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 25(2): 319−328. doi:10.1007/s00376-008-0319-7

陈海山, 周晶. 2013. 土壤湿度年际变化对中国区域极端气候事件模拟的影响研究 II. 敏感性试验分析 [J]. 大气科学, 37(1): 1−13. Chen H S, Zhou J. 2013. Impact of interannual soil moisture anomaly on simulation of extreme climate events in China. Part II: Sensitivity experiment analysis [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37(1): 1−13. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11048

Chen Y, Zhai P M. 2014. Two types of typical circulation pattern for persistent extreme precipitation in central–eastern China [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 140(682): 1467−1478. doi:10.1002/qj.2231

陈凯, 钟霖浩, 华丽娟, 等. 2020. 华西秋雨趋势变化的年代际转折及其成因分析 [J]. 气候与环境研究, 25(1): 90−102.　Chen K, Zhong L H, Hua L J, et al. 2020. Analysis on the interdecadal transition and its causes of the autumn precipitation trend in West China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 25(1): 90−102. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.18116

Coumou D, Rahmstorf S. 2012. A decade of weather extremes [J]. Nature Climate Change, 2(7): 491−496. doi:10.1038/nclimate1452

丁一汇. 2015. 论河南“75.8”特大暴雨的研究: 回顾与评述 [J]. 气象学报, 73(3): 411−424.　Ding Yihui. 2015. On the study of the unprecedented heavy rainfall in Henan Province during 4-8 August 1975: Review and assessment [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 73(3): 411−424. doi:10.11676/qxxb2015.067

丁一汇, 王遵娅, 宋亚芳, 等. 2008. 中国南方 2008 年 1 月罕见低温雨雪冰冻灾害发生的原因及其与气候变暖的关系 [J]. 气象学报, 66(5): 808−825.　Ding Y H, Wang Z Y, Song Y F, et al. 2008. Causes of the unprecedented freezing disaster in January 2008 and its possible association with the global warming [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 66(5): 808−825. doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2008.05.014

方浩, 乔云亭. 2019. 中国东部夏季极端降水时空分布及环流背景 [J]. 热带气象学报, 35(4): 517−527.　Fang H, Qiao Y T. 2019. Temporal and spatial distribution of summer extreme precipitation and circulation background over eastern China [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 35(4): 517−527. doi:10.16032/j.issn.1004-4965.2019.047

Feng S, Hu Q. 2004. Variations in the teleconnection of ENSO and

summer rainfall in northern China: A role of the Indian summer monsoon [J]. J. Climate, 17(24): 4871−4881. doi:10.1175/JCLI-3245.1

高荣, 宋连春, 钟海玲. 2018. 2016 年汛期中国降水极端特征及与 1998 年对比 [J]. 气象, 44(5): 699−703. Gao R, Song L C, Zhong H L. 2018. Characteristics of extreme precipitation in China during the 2016 flood season and comparison with the 1998 situation [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 44(5): 699−703. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2018.05.011

Gill A E. 1980. Some simple solutions for heat-induced tropical circulation [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 106(449): 447−462. doi:10.1002/qj.49710644905

Ham Y G, Kug J S, Park J Y, et al. 2013. Sea surface temperature in the north tropical Atlantic as a trigger for El Niño/southern Oscillation events [J]. Nature Geoscience, 6(2): 112−116. doi:10.1038/ngeo1686

何金海, 吴志伟, 江志红, 等. 2006. 东北冷涡的“气候效应”及其对梅雨的影响 [J]. 科学通报, 51(23): 2803−2809.

何金海, 刘伯奇, 吴国雄. 2014. 春末夏初南亚高压的形成过程及其与 ENSO 事件的联系 [J]. 大气科学, 38(4): 670−684. He J H, Liu B Q, Wu G X. 2014. Formation of South Asia high from late spring to early summer and its association with ENSO events [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38(4): 670−684. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1401.13221

Huang R H, Li W J. 1987. Influence of the heat source anomaly over the tropical western Pacific on the subtropical high over East Asia [C]//Proceedings of International Conference on the General Circulation of East Asia. Chengdu, China, 40–51.

黄荣辉, 孙凤英. 1994. 热带西太平洋暖池的热状态及其上空的对流活动对东亚夏季气候异常的影响 [J]. 大气科学, 18(2): 140−151. Huang R H, Sun F Y. 1994. Impacts of the thermal state and the convective activities in the tropical western Pacific warm pool on the summer climate anomalies in East Asia [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 18(2): 140−151. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1994.02.02

黄士松, 汤明敏. 1995. 我国南方初夏汛期和东亚夏季风环流 [J]. 热带气象学报, 11(3): 203−213. Huang S S, Tang M M. 1995. The early summer flood periods of southern China and the summer monsoon circulation of East Asia [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 11(3): 203−213.

黄荣辉, 徐予红, 周连童. 1999. 我国夏季降水的年代际变化及华北干旱化趋势 [J]. 高原气象, 18(4): 465−476. Huang R H, Xu Y H, Zhou L T. 1999. The interdecadal variation of summer precipitations in China and the drought trend in North China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 18(4): 465−476. doi:10.3321/j.issn:1000-0534.1999.04.001

黄荣辉, 刘永, 冯涛. 2013. 20 世纪 90 年代末中国东部夏季降水和环流的年代际变化特征及其内动力成因 [J]. 科学通报, 58(12): 1339−1349. Huang R H, Liu Y, Feng T. 2013. Interdecadal change of summer precipitation over eastern China around the late-1990s and associated circulation anomalies, internal dynamical causes [J]. Chinese Science Bulletin, 58(12): 1339−1349. doi:10.1007/s11434-012-5545-9

黄菱芳, 陈海山, 郑旭程, 等. 2015. 欧亚大陆夏季地表热力异常与同期中国东部夏季降水的可能联系 [J]. 气候与环境研究, 20(6): 620−634. Huang L F, Chen H S, Zheng X C, et al. 2015. Summer land surface thermal anomalies over Eurasia and their relationship with summer rainfall in East China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 20(6): 620−634. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.15110

黄刚, 胡开明, 屈侠, 等. 2016. 热带印度洋海温海盆一致模的变化规律及其对东亚夏季气候影响的回顾 [J]. 大气科学, 40(1): 121−130. Huang G, Hu K M, Qu X, et al. 2016. A review about Indian Ocean basin mode and its impacts on East Asian summer climate [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40(1): 121−130. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1505.15143

黄挺, 周锋, 田娣, 等. 2020. 孟加拉湾及其毗邻海域中尺度涡旋活动的冬、夏季差异 [J]. 海洋学研究, 38(3): 21−30. Huang T, Zhou F, Tian D, et al. 2020. Seasonal variations of mesoscale eddy in the Bay of Bengal and its adjacent regions [J]. Journal of Marine Sciences (in Chinese), 38(3): 21−30. doi:10.3969/j.issn.1001-909X.2020.03.003

Izrael Y A, Semenov S M, Anisimov O A, et al. 2007. The fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change: Working group II contribution [J]. Russian Meteorology and Hydrology, 32(9): 551−556. doi:10.3103/S1068373907090014

金荣花, 李维京, 张博, 等. 2012. 东亚副热带西风急流活动与长江中下游梅雨异常关系的研究 [J]. 大气科学, 36(4): 722−732. Jin R H, Li W J, Zhang B, et al. 2012. A study of the relationship between East Asia subtropical westerly jet and abnormal Meiyu in the middle-lower reaches of the Yangtze River [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36(4): 722−732. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11076

Johnson N C, Xie S P. 2010. Changes in the sea surface temperature threshold for tropical convection [J]. Nature Geoscience, 3(12): 842−845. doi:10.1038/ngeo1008

Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77(3): 437−472. doi:10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2

Kucharski F, Ikram F, Molteni F, et al. 2016. Atlantic forcing of Pacific decadal variability [J]. Climate Dyn., 46(7-8): 2337−2351. doi:10.1007/s00382-015-2705-z

李崇银, 穆明权. 2001. 赤道印度洋海温偶极子型振荡及其气候影响 [J]. 大气科学, 25(4): 433−443. Li C Y, Mu M Q. 2001. The dipole in the equatorial Indian Ocean and its impacts on climate [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 25(4): 433−443. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2001.04.01

李业进, 王黎娟. 2016. 西太平洋暖池热状态变异及其邻近地区对流活动特征 [J]. 大气科学学报, 39(2): 156−165. Li Y J, Wang L J. 2016. Variability of the thermal state of the western Pacific warm pool and the characteristics of its adjacent convective activities [J]. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39(2): 156−165. doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20140915043

李崇银, 朱锦红, 孙照渤. 2002. 年代际气候变化研究 [J]. 气候与环境研究, 7(2): 209−219. Li C Y, Zhu J H, Sun Z B. 2002. The study

interdecadel climate variation [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 7(2): 209−219. doi:10.3969/j.issn.1006-9585.2002.02.008

Li X C, Xie S P, Gille S T, et al. 2016. Atlantic-induced pan-tropical climate change over the past three decades [J]. Nature Climate Change, 6(3): 275−279. doi:10.1038/nclimate2840

梁萍, 周兵, 马悦, 等. 2019. 2017 年秋季华西秋雨的多时间尺度变化特征及成因分析 [J]. 气象, 45(8): 1104−1112. Liang P, Zhou B, Ma Y, et al. 2019. Characteristics of variability on multiple timescales and cause analysis of autumn rainfall in West China During 2017 [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 45(8): 1104−1112. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2019.08.007

Liu K S, Chan J C L. 2003. Climatological characteristics and seasonal forecasting of tropical cyclones making landfall along the South China coast [J]. Mon. Wea. Rev., 131(8): 1650−1662. doi:10.1175//2554.1

刘慧斌, 温敏, 何金海, 等. 2012. 东北冷涡活动的季节内振荡特征及其影响 [J]. 大气科学, 36(5): 959−973. Liu H B, Wen M, He J H, et al. 2012. Characteristics of the Northeast cold vortex at intraseasonal timescale and its impact [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36(5): 959−973. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11167

Liu X, Ma P L, Wang H, et al. 2016. Description and evaluation of a new four-mode version of the Modal Aerosol Module (MAM4) within version 5.3 of the Community Atmosphere Model [J]. Geoscientific Model Development, 9(2): 505−522. doi:10.5194/gmd-9-505-2016

刘晓云, 王劲松, 杨金虎, 等. 2016. APO 异常对我国西北地区东部秋季干湿变化影响 [J]. 应用气象学报, 27(4): 454−462. Liu X Y, Wang J S, Yang J H, et al. 2016. The relationship between the autumn drought in the eastern part of Northwest China and the summer Asian–Pacific oscillation [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 27(4): 454−462. doi:10.11898/1001-7313.20160408

Luo J J, Sasaki W, Masumoto Y. 2012. Indian Ocean warming modulates Pacific climate change [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 109(46): 18701−18706. doi:10.1073/pnas.1210239109

梅双丽, 牛若芸. 2017. 2016 年 11 月大气环流和天气分析 [J]. 气象, 43(2): 249−256. Mei S L, Niu R Y. 2017. Analysis of the November 2016 atmospheric circulation and weather [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 43(2): 249−256. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2017.02.013

Mo K C, Ghil M. 1987. Statistics and dynamics of persistent anomalies [J]. J. Atmos. Sci., 44(5): 877−902. doi:10.1175/1520-0469(1987)044<0877:SADOPA>2.0.CO;2

Rayner N A, Parker D E, Horton E B, et al. 2003. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century [J]. J Geophys Res, 108(D14): 4407. doi:10.1029/2002JD002670

任福民, Gleason B, Easterling D. 2001. 一种识别热带气旋降水的数值方法 [J]. 热带气象学报, 17(3): 308−313. Ren F M, Gleason B, Easterling D. 2001. A numerical technique for partitioning cyclone tropical precipitation [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 17(3): 308−313. doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2001.03.015

容新尧, 张人禾, Li T. 2010. 大西洋海温异常在 ENSO 影响印度—东亚夏季风中的作用 [J]. 科学通报, 55(22): 2458−2468. Rong X Y, Zhang R H, Li T. 2010. Impacts of Atlantic sea surface temperature anomalies on Indo— East Asian summer monsoon–ENSO relationship [J]. Chinese Science Bulletin, 55(22): 2458−2468. doi:10.1007/s11434-010-3098-3

沙天阳, 徐海明, 邹松佐. 2013. 中国西南地区东部秋季干旱的环流特征及其成因分析 [J]. 大气科学学报, 36(5): 593−603. Sha T Y, Xu H M, Zou S Z. 2013. Atmospheric circulation characteristics and cause analysis for autumn drought in the eastern region of Southwest China [J]. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36(5): 593−603. doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2013.05.010

Sun C, Kucharski F, Li J P, et al. 2017. Western tropical Pacific multidecadal variability forced by the Atlantic multidecadal oscillation [J]. Nature Communications, 8: 15998. doi:10.1038/ncomms15998

Szeredi I, Karoly D. 1987a. The vertical structure of monthly fluctuations of the southern Hemisphere troposphere [J]. Aust. Meteor. Mag., 35(1): 19−30.

Szeredi I, Karoly D. 1987b. The horizontal structure of monthly fluctuations of the southern Hemisphere troposphere from station data [J]. Aust. Meteor. Mag., 35(3): 119−129.

陶诗言, 张庆云. 1998. 亚洲冬夏季风对 ENSO 事件的响应 [J]. 大气科学, 22(4): 399−407. Tao S Y, Zhang Q Y. 1998. Response of the Asian winter and summer monsoon to ENSO events [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 22(4): 399−407. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1998.04.02

陶诗言, 卫捷. 2006. 再论夏季西太平洋副热带高压的西伸北跳 [J]. 应用气象学报, 17(5): 513−525. Tao S Y, Wei J. 2006. The westward, northward advance of the subtropical high over the West Pacific in summer [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 17(5): 513−525. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2006.05.001

Trenberth K E, Fasullo J T. 2012. Climate extremes and climate change: The Russian heat wave and other climate extremes of 2010 [J]. J. Geophys. Res., 117(D17): D17103. doi:10.1029/2012JD018020

王咏梅, 任福民, 王小玲, 等. 2006. 中国台风降水分离客观方法的改进研究 [J]. 气象, 32(3): 6−10. Wang Y M, Ren F M, Wang X L, et al. 2006. The study on the objective technique for partitioning tropical cyclone precipitation in China [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 32(3): 6−10. doi:10.3969/j.issn.1000-0526.2006.03.002

王黎娟, 管兆勇, 何金海, 等. 2009. “05.6”华南强降水期间副热带高压活动与加热场的关系 [J]. 气象学报, 67(4): 666−673. Wang L J, Guan Z Y, He J H, et al. 2009. Relationship between activity of western Pacific subtropical high and diabatic heating during heavy rain in South China in June 2005 [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 67(4): 666−673. doi:10.11676/qxxb2009.066

Wang C, Wu L G, Zhao H K, et al. 2019. Is there a quiescent typhoon season over the western North Pacific following a strong El Niño event? [J]. International Journal of Climatology, 39(1): 61−73.

doi:10.1002/joc.5782

Whitney L F Jr. 1977. Relationship of the subtropical Jet Stream to severe local storms [J]. Mon. Wea. Rev., 105(4): 398−412. doi:10.1175/1520-0493(1977)105<0398:ROTSJS>2.0.CO;2

Wu M C, Chang W L, Leung W M. 2004. Impacts of El Niño-southern Oscillation events on tropical cyclone landfalling activity in the western North Pacific [J]. J. Climate, 17(6): 1419−1428. doi:10.1175/1520-0442(2004)017<1419:IOENOE>2.0.CO;2

吴萍, 丁一汇, 柳艳菊. 2017. 厄尔尼诺事件对中国夏季水汽输送和降水分布影响的新研究 [J]. 气象学报, 75(3): 371−383. Wu P, Ding Y H, Liu Y J. 2017. A new study of El Niño impacts on summertime water vapor transport and rainfall in China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 75(3): 371−383. doi:10.11676/qxxb2017.033

徐金霞, 闫彩霞, 钟燕川, 等. 2017. 北半球秋季欧亚遥相关与华西秋雨的关系 [J]. 气象科技, 45(3): 492−498. Xu J X, Yan C X, Zhong Y C, et al. 2017. Relationships between Eurasian teleconnection pattern in northern Hemisphere autumn and autumn rainfall in West China [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 45(3): 492−498. doi:10.19517/j.1671-6345.20160491

杨修群, 黄士松. 1993. 外强迫引起的夏季大气环流异常及其机制探讨 [J]. 大气科学, 17(6): 697−702. Yang X Q, Huang S S. 1993. On the mechanism of summertime atmospheric anomalies induced by external forcing [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 17(6): 697−702. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1993.06.08

Yang Q, Ma Z G, Xu B L. 2017. Modulation of monthly precipitation patterns over East China by the Pacific decadal oscillation [J]. Climatic Change, 144(3): 405−417. doi:10.1007/s10584-016-1662-9

Ying M, Zhang W, Yu H, et al. 2014. An overview of the China meteorological administration tropical cyclone database [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 31(2): 287−301. doi:10.1175/JTECH-D-12-00119.1

袁媛, 高辉, 李维京, 等. 2017. 2016 年和 1998 年汛期降水特征及物理机制对比分析 [J]. 气象学报, 75(1): 19−38. Yuan Y, Gao H, Li W J, et al. 2017. Analysis and comparison of summer precipitation features and physical mechanisms between 2016 and 1998 [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 75(1): 19−38. doi:10.11676/qxxb2017.019

翟盘茂, 李蕾, 周佰铨, 等. 2016. 江淮流域持续性极端降水及预报方法研究进展 [J]. 应用气象学报, 27(5): 631−640. Zhai P M, Li L, Zhou B Q, et al. 2016. Progress on mechanism and prediction methods for persistent extreme precipitation in the Yangtze–Huai River valley [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 27(5): 631−640. doi:10.11898/1001-7313.20160511

Zhan R F, Wang Y Q, Liu Q Y. 2017. Salient differences in tropical cyclone activity over the western North Pacific between 1998 and 2016 [J]. J. Climate, 30(24): 9979−9997. doi:10.1175/JCLI-D-17-0263.1

张庆云, 陶诗言. 2003. 夏季西太平洋副热带高压异常时的东亚大气环流特征 [J]. 大气科学, 27(3): 369−380. Zhang Q Y, Tao S Y. 2003. The anomalous subtropical anticyclone in western Pacific and their association with circulation over East Asia during summer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27(3): 369−380. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2003.03.07

张耀存, 况雪源. 2008. 东亚副热带西风急流位置变化与亚洲夏季风爆发的关系 [J]. 暴雨灾害, 27(2): 97−103. Zhang Y C, Kuang X Y. 2008. The relationship between the location change of the East Asian subtropical westerly jet and Asian summer monsoon onset [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 27(2): 97−103. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2008.02.001

张庆云, 郭恒. 2014. 夏季长江淮河流域异常降水事件环流差异及机理研究 [J]. 大气科学, 38(4): 656−669. Zhang Q Y, Guo H. 2014. Circulation differences in anomalous rainfall over the Yangtze River and Huaihe River valleys in summer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38(4): 656−669. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1402.13240

张庆云, 吕俊梅, 杨莲梅, 等. 2007. 夏季中国降水型的年代际变化与大气内部动力过程及外强迫因子关系 [J]. 大气科学, 31(6): 1290−1300. Zhang Q Y, Lü J M, Yang L M, et al. 2007. The interdecadal variation of precipitation pattern over China during summer and its relationship with the atmospheric internal dynamic processes and extra-forcing factors [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31(6): 1290−1300. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2007.06.23

张顾炜, 曾刚, 倪东鸿, 等. 2016. 西南地区秋季干旱的年代际转折及其可能原因分析 [J]. 大气科学, 40(2): 311−323. Zhang G W, Zeng G, Ni D H, et al. 2016. Decadal shift of autumn drought in Southwest China and its possible causes [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40(2): 311−323. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1503.14294

张福颖, 潘爱军, 范伶俐. 2018. 中国南方冬雨与 El Niño 事件相关关系的年代际差异及其成因 [J]. 海洋气象学报, 38(4): 38−44. Zhang F Y, Pan A J, Fan L L. 2018. Interdecadal differences in correlations between the winter precipitation over the southern China and El Niño events and their causes [J]. Journal of Marine Meteorology, 38(4): 38−44. doi:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2018.04.005

竺可桢. 1934. 东南季风与中国之雨量 [J]. 地理学报, 1(1): 1−27. Chu C. 1934. The enigma of southeast monsoon in China [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 1(1): 1−27. doi:10.11821/xb193401001

竺夏英, 宋文玲. 2017. 2016 年秋季中国气候特征及其可能成因 [J]. 气象, 43(4): 495−500. Zhu X Y, Song W L. 2017. Features of climatic anomalies in China during the fall of 2016 and the possible causes [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 43(4): 495−500. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2017.04.012