

张剑明, 廖玉芳, 蒋元华, 2017. 2015 年湖南冬汛成因分析[J]. 气象, 43(10): 1186-1197.

2015 年湖南冬汛成因分析^{*}

张剑明 廖玉芳 蒋元华

湖南省气候中心, 长沙 410118

提 要: 本文基于气象观测资料、再分析资料和国家气候中心提供的百项气候系统指数集, 利用气候事件机理诊断和气候统计等方法, 重点从降水背景、大尺度环流异常及外强迫因子对气候异常影响, 分析 2015 年湖南罕见冬汛及其成因机制, 本文对 2015 年湖南冬汛及其可能成因进行了分析, 结果表明: (1) 2015 年 11 月湖南省平均降水量偏多 1.6 倍, 为 1961 年以来同期第一高位, 其中湘东南部分地区降水量超过 250 mm, 出现气象洪涝。 (2) 在湖南 11 月降水处于偏多的年代际背景下, 大气环流异常是导致湖南发生冬汛的最直接的原因, 2015 年 11 月西太平洋副热带高压偏强、偏西, 引导来自印度洋、太平洋地区水汽向东亚地区输送, 加上西路冷空气影响导致 11 月降水异常偏多。 (3) 在 PDO 暖位相时发生的 El Niño 事件可能是湖南降水异常的重要外强迫条件, 赤道中东太平洋和印度洋海表温度异常偏高, 导致该区域上空出现强的异常上升运动, 而在海洋性大陆区域上空出现了一个异常下沉气流区, 这有利于西太平洋副热带高压的加强、西伸, 在东亚低纬地区上空出现异常下沉气流区, 中纬地区上空出现异常上升气流区, 造成该区域强烈的异常辐合, 导致该地区持续阴雨天气。

关键词: 冬汛, 环流, ENSO, PDO

中图分类号: P461

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.10.003

The Causes for the Winter 2015 Flooding in Hunan Province

ZHANG Jianming LIAO Yufang JIANG Yuanhua

Hunan Climate Centre, Changsha 410118

Abstract: The characteristics and its possible mechanisms of winter flooding in Hunan in 2015 were investigated. The results show that: (1) The monthly mean precipitation in Hunan was 1.6 times more than the annual mean, which was recorded as the most for the corresponding period since 1961. Meanwhile, the precipitation amount was more than 250 mm in parts of southeastern Hunan, where flooding occurred. (2) Because the precipitation amount in November was above the normal precipitation, the atmospheric circulation anomaly was the most direct cause for the winter flooding in Hunan. The unusually positive precipitation anomalies in November was produced from the stronger location of Western Pacific Subtropical High (WPSH) and the larger western extension of its ridge, which easily transported water vapor from India and Pacific to East Asia and met the cold air down to southern China. (3) When the Pacific Decadal Oscillation (PDO) was in positive phase, the El Niño event was important external forcing condition for abnormal precipitation. The sea surface temperature of the central and eastern equatorial Pacific and Indian Ocean were anomalously above average, leading to the enhanced anomalous ascending motion over these oceans, while the anomalous descending motion over the Maritime Continent and its surrounding area occurred. These were favorable for the westward stretch of the WPSH, the anomalous descending motion over the low latitude East Asia, and the anomalous ascending motion over the mid-latitude regions. The

^{*} 湖南省气象局 2016 年重点科研课题(XQKJ16A004)、中国气象局气候变化专项(CCSF201525)和 2015 年湖南山洪地质灾害防治气象保障工程项目共同资助

2016 年 3 月 1 日收稿; 2017 年 6 月 29 日收修定稿

第一作者: 张剑明, 主要从事天气与气候研究. Email: zhangjm1123@sina.com

abnormal Hadley circulation caused strong convergence over the mid-latitude, which led to continuous rain weather in these areas.

Key words: winter flooding, general circulation, ENSO, PDO (Pacific Decadal Oscillation)

引 言

2015 年 11 月我国出现了降水异常偏多的气候特征,全国平均降水量 39.4 mm,较常年同期偏多 1.1 倍,其中华北、黄淮、江淮、江汉、江南、华南及西北大部等地降水量较常年同期偏多 5 成至 2 倍,东北中南部、内蒙古中西部、西北地区中西部和东北部、华北、黄淮大部、浙江北部、江南西南部、广西东部等地偏多 2 倍以上(气候系统诊断预测室,2015),南方部分地区出现了罕见的冬汛(常年发生在立冬之后洪涝称之为冬汛),引发了洪涝和山体崩塌灾害,给社会生产生活造成了很大的影响。

此次罕见冬汛发生在 1951 年以来继 1982/1983 年和 1997/1998 年之后的第三次超强 El Niño 事件(邵颢和周兵,2016;袁媛等,2016)背景下,ENSO 事件作为最强的年际气候信号之一,对我国的气候异常有非常显著的影响(刘永强和丁一汇,1995;施能,1990;吴正贤等,1990;姚辉和李栋梁,1992;李耀辉等,2000;袁媛等,2012;贾小龙等,2008;宗海锋等,2010;王艳姣和闫峰,2014)。研究指出,ENSO 对我国秋季气候异常的影响甚至超过了对夏季的影响(李海燕等,2016),龚道溢和王绍武(1999)发现我国东部冬、秋季降水量与 ENSO 有显著的关系,El Niño 年江南地区降水量偏多,北方地区偏少,夏季的关系不如秋冬季明显;谌芸和施能(2003)指出 El Niño 年我国秋季降水出现南多北少分布型的频率增加近 20%,当我国秋季降水距平出现大尺度南北降水异常时,表示有 ENSO 现象发生。在 20 世纪 70 年代以后,热带印度洋偶极子(IOD)与 ENSO 基本同时发生,因为两支异常沃克环流相互作用,使得赤道海温的变化几乎同时发生,ENSO 影响 IOD 事件的整个生命史,而 IOD 事件可以通过“大气桥”影响 ENSO 事件发展时期的强度(黄刚等,2016;袁媛和李崇银,2008;杨辉等,2006)。热带印度洋海表温度异常也是影响我国秋季降水的重要外强迫因子(刘宣飞和袁慧珍,2006a;2006b;王遵娅等,2013),当 IOD 正位相与 El Niño 伴随出现时,西太平洋副热带高压位置偏南,我国南方地区为

西南气流控制,使得我国西南至江南地区秋季降水偏多。司东等(2015)指出秋季华西地区降水偏多可能与热带印度洋海表温度偏高有关,当印度洋海表温度偏高,有利于西北太平洋地区对流层低层异常反气旋式环流的发展和东南水汽输送的加强,印度洋海表温度的偏高有利于印度洋地区对流的活跃和西南水汽输送的加强(聂羽等,2016)。PDO 为东北太平洋最显著的年代际变化信号,是调节 ENSO 与东亚地区气候遥相关关系的最重要的因子,其对东亚地区气候异常关系具有明显的调制作用。在 PDO 暖位相时期,El Niño 事件发生频率较高、强度较强,La Nina 事件受到抑制,20 世纪最强的两次 El Niño 事件均发生在 PDO 暖位相时期(吕俊梅等,2005;Wang et al, 2008)。在冷暖不同的 PDO 位相下,ENSO 事件引起的干湿变化程度将会发生改变(Kim et al, 2014)。王江曼和李春(2015)指出 PDO 不同位相时期 El Niño 事件是通过西北太平洋异常反气旋(气旋)及源自印缅槽的西南水汽输送的差异影响我国南方降水异常。

国家气候中心监测表明,2014 年 9 月开始赤道中、东太平洋海表温度进入 El Niño 状态,2015 年 1 月达到事件标准,至 2015 年 11 月,累计海表温度距平为 19.0℃,已达到超强 El Niño 事件标准。本文分析了 2015 年冬汛及其可能成因,旨在探讨影响湖南月尺度降水变化的关键因子,为异常气候事件预测提供参考依据。

1 资料和方法

本文所用资料包括湖南省 97 个气象站点逐日降水资料,且所采用的资料均进行了严格的质量控制。再分析资料为 1981—2015 年 NCEP/NCAR 提供的月平均位势高度场、风场、比湿、地面气压资料,网格点分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$;美国 NOAA 提供的 1981—2015 年全球海表温度数据,网格点分辨率是 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$;美国 NOAA 系列极轨卫星高分辨率辐射仪的 1981—2015 年逐日向外长波辐射(OLR)资料,网格点分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。水汽整层积分由地表到 300 hPa,水汽收支采用“箱体”模型(苗秋菊等,

2005;叶敏和封国林,2015)。此外,还有国家气候中心整编的百项气候系统指数集,包括逐月大气环流指数和海表温度指数等。文中使用的各要素气候平均值为 1981—2010 年平均值。

2 11 月降水特征及影响分析

2.1 11 月全国降水的特征

2015 年 11 月,全国平均降水量 39.4 mm,较常年同期(18.8 mm)偏多 1.1 倍,为 1961 年以来历史新高,其中华北、黄淮、江淮、江汉、江南、华南及西北大部等地降水量较常年同期偏多 5 成至 2 倍,东北中南部、内蒙古中西部、西北地区中西部和东北部、

华北、黄淮大部、浙江北部、江南西南部、广西东部等地偏多 2 倍以上,南方部分地区出现罕见冬汛,多条河流发生超警戒洪水。

月内,全国共有 45 站发生极端连续降水日数事件,主要发生在新疆北部、华北、黄淮西部等地,全国共有 189 站日降水量超过历史同期月极大值,主要分布在内蒙古南部、华北、黄淮、江汉、江南和华南北部等地,其中广西灵川(148.9 mm)和湖南桂东(127.1 mm)等 14 站日降水量超过历史同期季极大值(图 1)。

2.2 11 月湖南降水的特征及影响

2015 年 11 月湖南省平均降水量为 182.5 mm,较常年(1981—2010 年平均,下同)偏多 1.6 倍,降水的空间分布(图 2a)表明,湘中偏北及湘北降水量

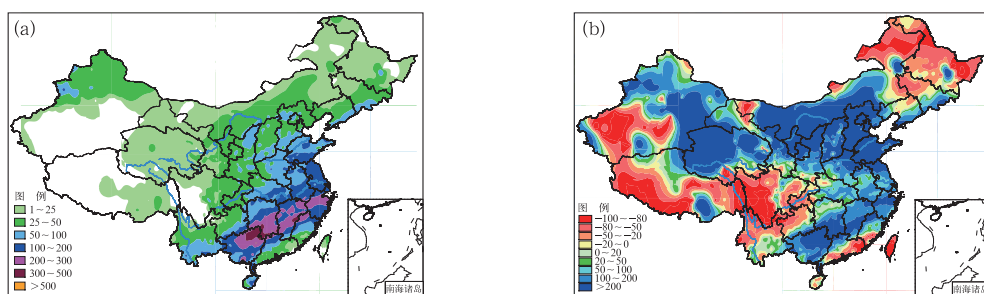


图 1 中国 2015 年 11 月降水量(a,单位:mm)和降水距平百分率(b,单位:%)的空间分布

Fig. 1 Distribution of precipitation amount (a, unit: mm) and precipitation anomaly percentage (b, unit: %) over China in November 2015

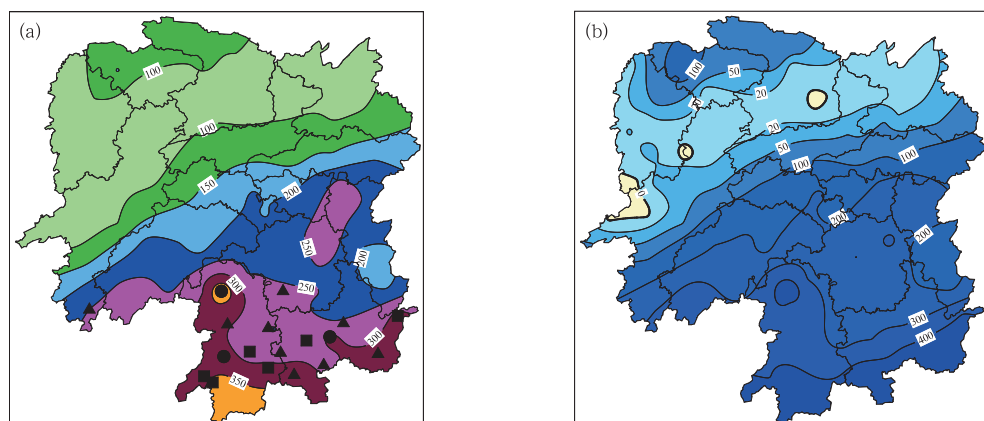


图 2 湖南 2015 年 11 月降水量(a,单位:mm)及降水距平百分率(b,单位:%)的空间分布

(●表示达到过程 1 d 最大降水量极端标准,▲表示达到过程降水量极端标准,
■表示既达到了过程 1 d 最大降水量极端标准又达到了过程降水量极端标准)

Fig. 2 Distribution of precipitation amount (a, unit: mm) and precipitation anomaly percentage (b, unit: %) in Hunan in November 2015

(● represents the extreme standard of 1 d maximum precipitation amount, ▲ represents the extreme standard of the precipitation amount in the process, ■ represents the precipitation amount that has reached the extreme standards of the two)

在 60~150 mm, 湘中偏南及以南地区降水量在 150 mm 以上, 其中湘东南部分地区降水量超过 250 mm。降水距平百分率的空间分布(图 2b)表明, 全省除个别县(市)降水量偏少外(泸溪、汉寿、芷江), 其他地区均偏多, 其中湘中以南地区偏多 1 倍以上, 湘东南部分地区偏多 3 倍以上, 冷水滩、临武、汝城、江华、宜章等 35 县(市)降水量破当地有连续气象记录以来同期历史极值。

11 月逐日各级降水站次的时间变化(图 3)表明, 11 月除 2、6、13、26 和 30 日雨日数没有达到 25 站次外, 其他时段均超过 25 站次, 月内共出现 4 次暴雨过程, 分别发生在 7—8 日、11—12 日、17—18 日、20—21 日, 共出现 50 站次暴雨、8 站次大暴雨, 位居历史同期第二高位。常宁、桂东、双牌、江永、宜章、临武、郴州等 18 县(市)达到极端降水事件标准, 7—18 日共 14 县市出现连阴雨天气(连续 7 d 以上日降水量 ≥ 0.1 mm, 过程日平均日照时数 ≤ 0.1 h), 其中常宁、新田达到中度连阴雨标准(连阴雨天气 10~12 d 以上)。11 月全省平均降水日数为 19.3 d(图 4a), 较常年同期偏多 9.8 d, 湘北部分地区及湘中以南大部地区降水日数达 20 d 以上。湘中以南 23 县(市)出现气象洪涝(10 d 累积降水量 ≥ 200 mm), 其中冷水滩、临武、江华 3 县(市)达到重度洪涝(10 d 累积降水量 ≥ 300 mm)(图 4b), 湘江中上游发生自 1961 年以来最大冬汛, 湘江多个站点超警戒水位。

据湖南省民政厅初步统计, 此次冬汛造成湘东南 4 市 33 个县(市、区)63.9 万人受灾, 4 人失踪, 1.9 万人紧急转移安置, 1.3 万人需紧急生活救助;

700 余间房屋倒塌, 近 3000 间不同程度损坏; 祁阳、道县、冷水滩、江永 4 个县城进水; 农作物受灾面积 40.6×10^3 hm², 其中绝收 6.2×10^3 hm²; 直接经济损失 8.94 亿元。

3 降水的月内变化及主要物理影响因子

2015 年 11 月沿 109°~120°E 平均逐日降水变化(图 5)可以发现, 月内主要发生 5 次强降水过程, 分别为 1 日、6—9 日、11—14 日、16—18 日和 20—22 日(表 1), 其中我国南方地区发生强降水的时段主要为 11 月上旬中至下旬初。

冷空气是持续降水形成的重要动力和热力因素, 其既能促使产生强降水所必需的低层辐合, 也能增强对流不稳定度(姚秀萍和于玉斌, 2005), 本文采用西风环流指数来分析 11 月内冷空气活动情况, 而

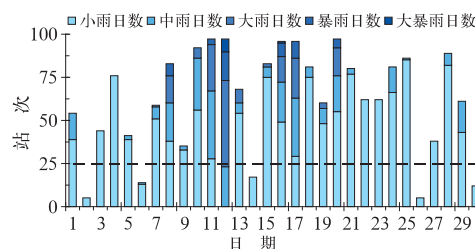


图 3 2015 年 11 月逐日各级降水站次的时间变化

Fig. 3 Temporal variation of different levels of precipitation occurrence time in November 2015

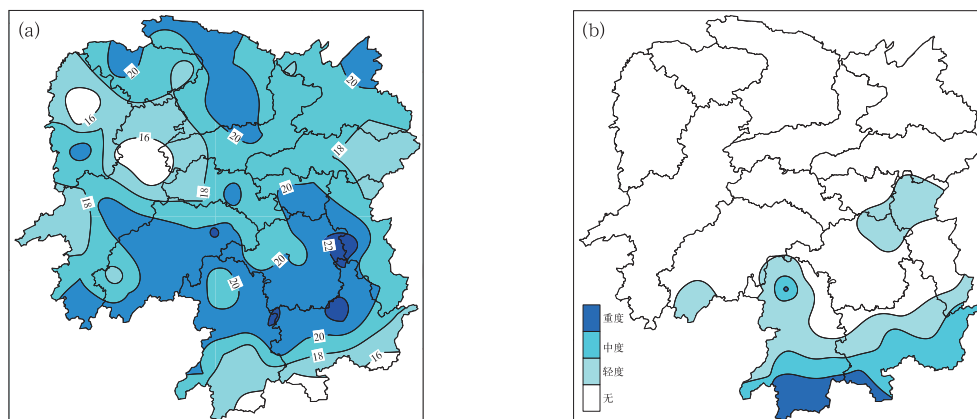


图 4 2015 年 11 月雨日数(a, 单位: d)和洪涝等级(b)的空间分布图

Fig. 4 Distribution of rainday (a, unit: d) and meteorological flood grades (b) in Hunan in November 2015

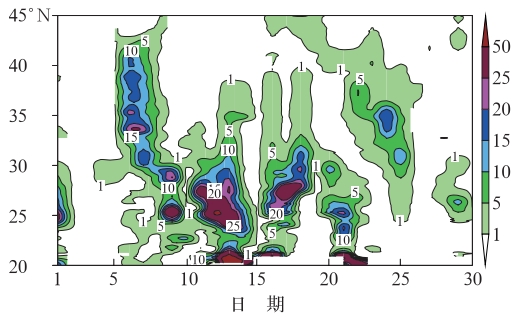


图 5 2015 年 11 月沿 109°~120°E 平均逐日降水(单位: mm)时间-纬度剖面图

Fig. 5 Latitude-time cross-section of daily precipitation (unit: mm) over 109°–120°E in November 2015

表 1 2015 年 11 月主要降水过程

Table 1 Main rainfall processes in November 2015

发生时段	降水区域	强度
11 月 1 日	华南北部、江南南部	大到暴雨
11 月 6—9 日	华北、江淮、江汉、江南、华南	暴雨到大暴雨
11 月 11—14 日	江淮、江南、华南	暴雨到大暴雨
11 月 16—18 日	江淮、江南、华南	暴雨到大暴雨
11 月 20—22 日	西南东部、江南、华南	暴雨到大暴雨

印缅槽的强度决定了水汽条件和热力抬升条件,西太平洋副热带高压(以下简称副高)则影响辐合区域的位置(图 6)。不难发现在我国中东部地区主要降水时段(5—22 日),西风环流指数为低指数,表明该时段中高纬西风偏弱,对应为经向环流,冷空气容易大举南下影响我国中东部;印缅槽高度差指数值较常年以偏小为主,表明该时段内印缅槽强度偏强,为我国中东部地区降水提供了充沛的水汽;西太平洋

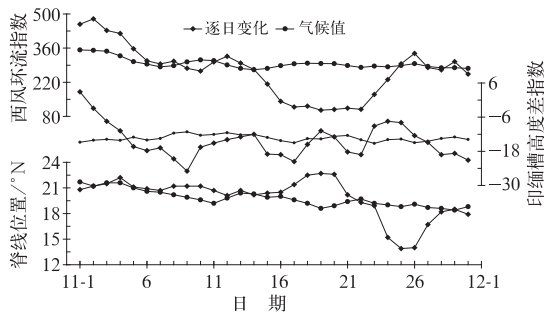


图 6 2015 年 11 月亚洲区西风环流指数、印缅高度差指数、西太平洋副高脊线位置指数逐日演变

Fig. 6 Daily variations of Asia westerly circulation index, India-Burma trough height difference index and western Pacific subtropical high ridge position index in November 2015

副高脊线位置以正常略偏北为主,位于 20°~22°N,导致该时段水汽输送较常年偏北,在华南西部至江南辐合。

湿位涡是用来表征暖湿气流活动特征的物理量。从 850 hPa 等压面上沿 107.5°~120°E 平均逐日 MPV2 时间-纬度剖面图(图 7)可以发现,11 月 24°N 以北区域 850 hPa 等压面上 MPV2 全为负值,表明我国中东部 11 月降水较常年偏多;MPV2 的密集带与强降水的时段和区域均非常吻合,MPV 负值中心为对流最不稳定区域,对应几次强降水过程的降水中心,其中 1 日、6—9 日、11—14 日、16—18 日、20—22 日 MPV 负值中心分别位于 25°N、35°N 和 30°N、27°N、29°N、40°N,与 5 次强降水的中心非常吻合。

南方低空西南风 $\geq 8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 面积指数和西南风速最大值的逐日变化(图 8a)表明,11 月上中旬西南风比较活跃,南风将来自南海、印度洋的暖湿气流输送到我国华南西部至江南地区,为持续较强降水的形成提供了水汽条件和不稳定能量。西南急流的持续偏强,致使该区域整层水汽输送持续偏强、辐合上升运动不断发展从而形成持续性强降水,而 5 次强降水的中心区域与水汽通量散度负的大值中心对应非常好(图 8b)。

4 冬汛的成因分析

4.1 降水背景分析

2015 年 11 月湖南省平均降水量为 182.5 mm

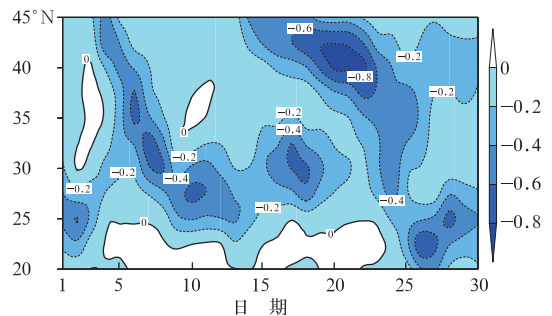


图 7 2015 年 11 月 850 hPa 沿 107.5°~120°E 平均逐日 MPV2(单位: PVU)

时间-纬度剖面图

Fig. 7 Latitude-time cross-section of 850 hPa daily MPV2 (unit: PVU) along the 107.5°–120°E in November 2015

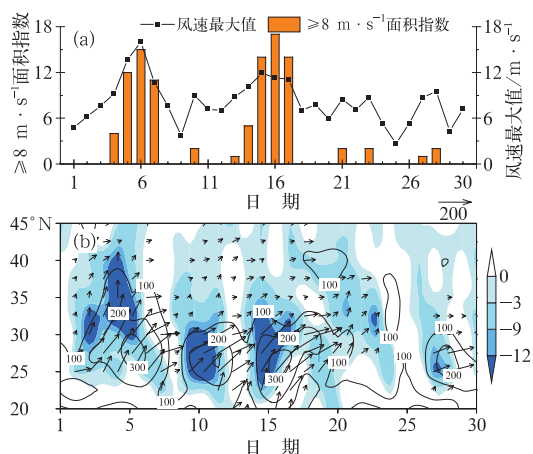


图 8 2015 年 11 月南方 850 hPa $\geq 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

面积指数及西南风风速最大值逐日演变(a)

及地表到 300 hPa 整层水汽通量(矢量

和等值线,单位: $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$) 和水汽

通量散度(阴影,单位: $10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$)

时间-纬度剖面图(b)

Fig. 8 Daily variations of southwest wind vector above $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ area index over southern China and the maximum of southwest wind at

850 hPa (a), vertically integrated water vapor

transport flux from surface to 300 hPa (vectors

and contours, unit: $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$) averaged over

107.5°E – 120°E and its divergence (shaded area,

unit: $10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$) in November 2015

(图 9a),为 1961 年以来最大值,2012 年以来已连续 4 年降水明显偏多,11 月降水的变化趋势可以分为两个时段,1988 年以前降水呈减小趋势,之后降水呈明显增加趋势(通过 0.05 显著性水平检验),倾向率为 $24.2 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。湖南 11 月降水的周期分析(图 9b)发现存在 3 个特征时间尺度,分别为 2~4 a,6~10 a 和 21~25 a 左右的准周期,2012 年以后各时间尺度降水均处于偏多时期,Morlet 小波功率谱分析(图 9c)发现 2~4 a 振荡周期非常显著。以上分析表明,湖南 11 月降水正处于偏多的年代际背景。

4.2 大气环流异常

大气环流异常是导致湖南降水异常偏多的最直接的原因。2015 年 11 月 500 hPa 高度场上及距平场(图 10)可以看出,极涡呈单极型分布,略偏西半球,中心位于 85°N 、 87.5°W 附近,强度较常年明显偏强;欧亚中高纬呈现两槽一脊分布,亚洲地区位势

高度呈“西低东高”分布型,里海以东至贝加尔湖以西为负距平控制,平直锋区上多短波活动,西路冷空气活动较频繁。

西太平洋副高西脊点位于 88°E 附近,为 1951 年以来同期最西,西太平洋副高强度、面积为 1951 年以来同期最强、最大。印缅槽前和西太平洋副高外围西南水汽与北方南下冷空气共同作用于我国南方地区,造成月内该区域出现了持续性阴雨天气,华南西部至江南地区降水量较常年偏多 1 倍以上。

11 月 850 hPa 风场距平(图 11)表明,南海地区形成一异常反气旋式环流,该反气旋性环流引导其南侧的水汽与西侧来自印度洋地区的其西南水汽汇合后输送到我国南方地区,广西东部至湖南南部有

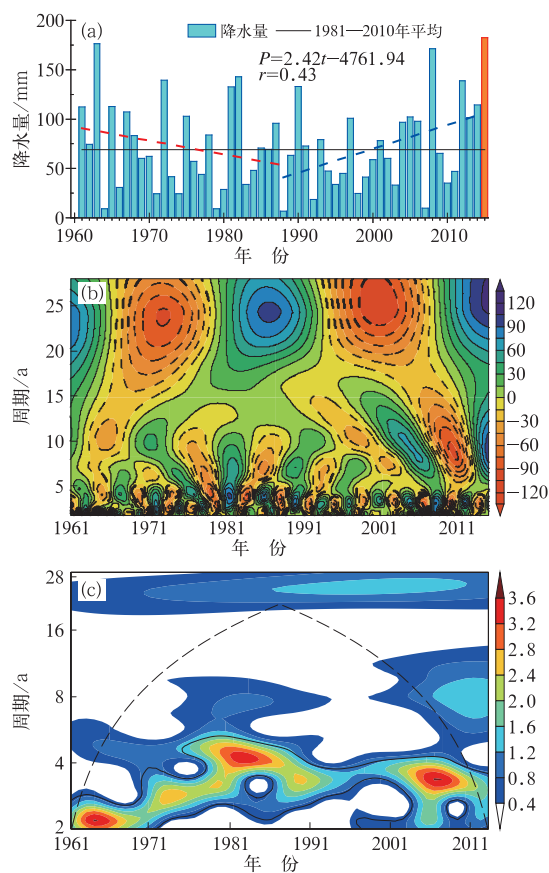


图 9 1961—2015 年湖南 11 月降水量的逐年变化趋势(a)、Morlet 小波(b)及 Morlet 小波功率谱(c)分析

(图 9a 中 P 表示降水量, r 表示相关系数)

Fig. 9 Temporal variations (a), Morlet wavelet (b) and Morlet power spectrum analysis (c) of precipitation in Hunan Province in November during 1961–2015

(P indicates the precipitation, r indicates the correlation coefficient in Fig. 9a)

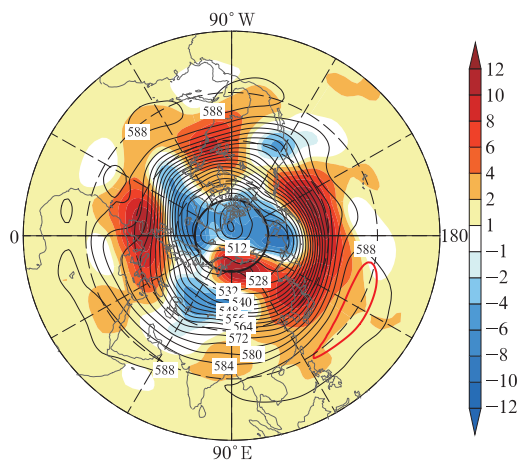


图 10 2015 年 11 月 500 hPa 高度场(等值线)及距平场(彩色阴影区)分布(单位: dagpm)(红色实线为气候平均 588 线)

Fig. 10 The 500 hPa geopotential height and anomalies in November 2015

(unit: dagpm. Black lines denote 500 hPa geopotential height, red lines denote 588 dagpm of climatology, and shaded area denotes 500 hPa anomalies)

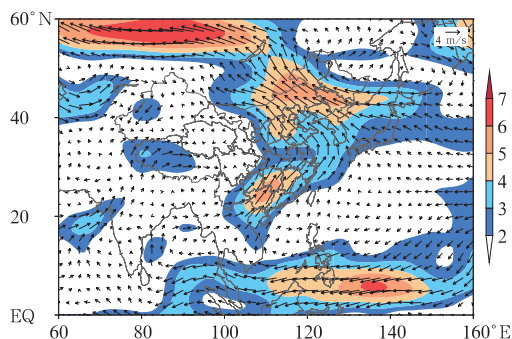


图 11 2015 年 11 月 850 hPa 风场距平(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

(色斑为全风速 $\geq 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的区域)

Fig. 11 The 850 hPa wind anomaly in November 2015 (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

(Shaded area denotes area of wind speed $\geq 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

一异常西南风距平中心,表明该区域是本次冬汛过程期间西南暖湿气流输送的最强中心。由 11 月整层水汽输送和水汽输送距平(图 12)表明,由于印缅槽位置偏东,加强了印度洋地区水汽向东亚地区输送,与南海地区异常反气旋式环流南侧来自太平洋地区的水汽汇合,向我国南方地区输送水汽,为我国华南西部至江南地区降水提供了水汽条件。整层水汽输送距平及水汽通量散度异常场图上可以看出,低纬地区的西南水汽明显偏强,水汽分别经西南、正

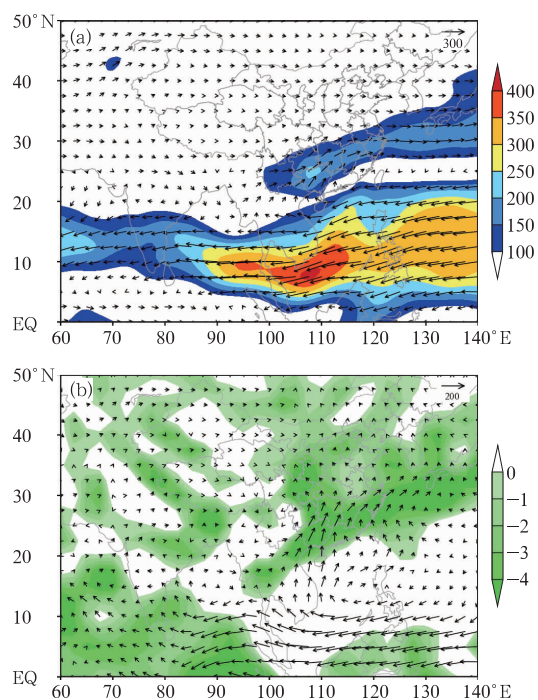


图 12 2015 年 11 月地表到 300 hPa 整层水汽通量(色斑,单位: $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)、水汽通量矢量(a)及水汽通量距平、水汽通量散度异常场(b,色斑,单位: $10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$)

Fig. 12 Moisture flux transport (shaded areas, unit: $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$) and moisture flux transport vector (a), and moisture flux transport anomalies and moisture flux transport divergence anomalies (b, shaded areas, unit: $10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$) vertically integrated from surface to 300 hPa height in November 2015

南输送路径将水汽输送东亚地区,在华南西部至日本南部形成一条水汽辐合带,导致上述区域降水偏多,而湖南南部处于水汽辐合带的辐合中心,导致湘南从 11 月 7 日开始出现了 4 次持续性的强降水过程。

为了客观定量分析 2015 年 11 月湖南整个区域水汽收支的情况,用“箱体”模型描述湖南水汽收支的特征,定义($25^{\circ} \sim 30^{\circ} \text{N}$ 、 $107.5^{\circ} \sim 115^{\circ} \text{E}$)区域为湖南整层水汽收支“箱体”模型计算范围。对湖南 1961—2015 年 11 月降水与同期水汽净输入量做相关分析发现,两者相关系数达 0.574(通过 0.001 的显著性水平检验)。2015 年 11 月湖南各边界的水汽收支图(图 13)可知,水汽的净输入量为 $15.3 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$,较多年平均偏多 $13.9 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$,其中南界输入量大于北界水汽输出量,东界水汽输

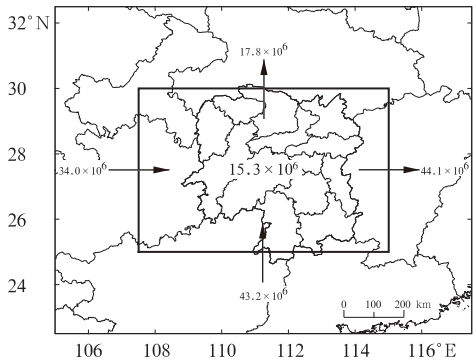


图 13 2015 年 11 月湖南各个边界的水汽收支情况(单位: $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 13 Moisture budget in each boundary in Hunan in November 2015 (unit: $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)

出量大于西界水汽输入量,这与图 12 的结果比较一致。西边界和南边界水汽输入量距平分别为 4.1×10^6 和 $38.6 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$,东边界和北边界水汽输出量距平分别为 13.5×10^6 和 $15.3 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$,即南界水汽输入量距平较北界水汽输出量距平更多,西界水汽输入量距平较东界水汽输出量距平更少。统计发现,湖南南部(27.5°N 以南)11 月降水与同区域($25^\circ \sim 27.5^\circ\text{N}$ 、 $110^\circ \sim 115^\circ\text{E}$)整层水汽净输入量的相关性更好,二者的相关系数达 0.612(通过 0.001 的显著性水平检验),该区域的水汽净输入量为 $18.0 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$,较多年平均偏多 $14.0 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

4.3 外强迫因子的可能影响

ENSO 作为最强的年际气候信号之一,对我国的气候异常有非常显著的影响。对 1961—2015 年 13 个 El Niño 发展年 11 月西太平洋副高特征量指数及湖南降水量(表 2)比较分析发现,西太平洋副高强度偏强的年份有 6 a,概率为 46.2%;脊线位置正常或偏南的年份有 10 a,概率为 76.9%;西伸脊点位置偏西的有 8 a,概率为 61.5%;11 月降水量偏多的有 10 a,概率为 76.9%。表 2 可以看出 20 世纪 80 年代以后西太平洋副高强度偏强、脊线偏南、西伸脊点偏西年份的概率明显增大。

PDO 为东北太平洋最显著的年代际变化信号,ENSO 与降水关系受到 PDO 的影响和调控。统计 1961—2015 年 13 个 El Niño 年,其中 PDO 暖位相发生 El Niño 的年份有 1982、1987、1991、1994 和 1997 年,2015 年 PDO 为正值数(此处将 2015 年放到 PDO 暖位相统计);PDO 冷位相发生 El Niño 事件的年份有 1963、1965、1968、1972、2002、2006 和 2009 年。分别对不同 PDO 位相 El Niño 年我国南方地区 11 月降水异常进行合成分析(图 14)发现,PDO 暖位相时 El Niño 年份我国华南西部至江南地区降水异常通过了 0.05 的显著性水平检验,华南北部至江南南部降水异常偏多达 60 mm 以上,其中广西东北部、湖南西南部部分地区降水异常偏多的中心区域,表明该时期降水明显增多;而在 PDO 冷

表 2 1961—2015 年 El Niño 事件发展年 11 月西太平洋副热带高压特征量指数距平及湖南降水距平百分率

Table 2 Anomalies of western Pacific subtropical high indices and precipitation anomaly percentage in Hunan in the El Niño developing years during 1961—2015

年份	海温强度	PDO	西太平洋副热带高压特征量指数			降水距平百分率/%
			强度距平	脊线位置距平/ $^\circ\text{N}$	西伸脊点距平/ $^\circ\text{E}$	
1963	极弱	冷位相	/	-2.6	/	155.8
1965	中等	冷位相	-27.4	0	-0.3	63.6
1968	弱	冷位相	-85.6	-2.5	41.3	20.8
1972	中等	冷位相	10.1	0.7	1.4	102.3
1982	极强	暖位相	-30.3	1.2	5	107.1
1987	强	暖位相	122.1	-0.2	-24.6	38.9
1991	中等	暖位相	-13.6	2.8	17.3	5.6
1994	弱	暖位相	-61.9	-1	-12.4	-31.4
1997	极强	暖位相	55.8	-2.3	-24.7	46.3
2002	弱	冷位相	139	-1.7	-22.4	-12.7
2006	弱	冷位相	14.4	-2.1	-4.6	41.7
2009	中等	冷位相	-0.5	-0.8	-16	-5.4
2015	极强	正指数	210.2	-0.5	-34.5	164.7

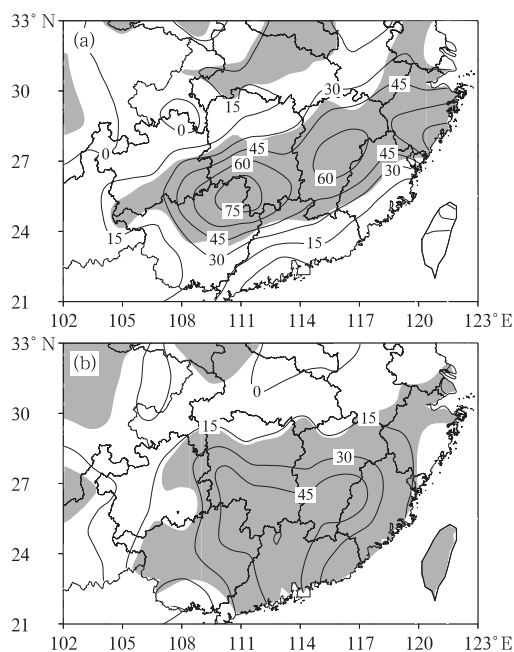


图 14 PDO 正(a),负(b)位相时期 El Niño 事件中国南方地区 11 月降水距平合成图(单位:mm)
(灰色阴影表示通过显著性水平检验的区域)

Fig. 14 Composite maps of South China rainfall anomalies (unit: mm) in the El Niño cases under positive (a) and negative (b) phases of PDO in November
(Gray area has passed significance level test)

位相时 El Niño 年份我国南方地区降水虽然有所增加,但异常程度明显较 PDO 暖位相时 El Niño 年份降水偏少,且异常中心位于华南。

导致这种空间分布形态,可能是在 PDO 暖位相时的 El Niño 时期,整个热带西太平洋均为异常高压控制,且异常高压带延伸至印度洋与中南半岛一带,异常反气旋西北侧存在异常的西南水汽输送,将印缅槽前西南水汽及南海地区的转向水汽输送到我国南方地区;而 PDO 冷位相时的 El Niño 时期西太平洋地区的高压异常呈现东北—西南向的带状分布,水汽输送向南偏移,主要影响我国南海及华南地区。

监测表明(图 15),2014 年 9 月开始赤道中东太平洋海表温度距平指数连续 6 个月达到或超过 0.5°C ,表明 2014 年 9 月开始进入 El Niño 状态,2015 年 1 月达到事件标准,2015 年春季开始不断增强,2015 年 11 月发展至顶峰(峰值强度为 2.9°C),并达到超强 El Niño 事件标准,累积海表温度距平为 19.0°C 。2015 年 8—10 月全球海表温度距平分布(图 16a)可以发现,出了海洋性大陆的部分地区

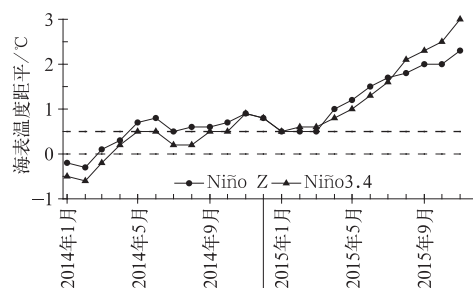


图 15 2014 年 1 月以来 Niño Z 区和 Niño3.4 区海表温度距平的逐月变化

Fig. 15 The monthly variations of indices for Niño Z and Niño 3.4 regional SSTA since January 2014

海表温度偏低以外,其他的热带印度洋、太平洋地区为异常暖水控制,形成“+—+”的印度洋-太平洋海温联合模态,赤道东太平洋海表温度偏高的程度要明显强于赤道西太平洋,其中日界线以东的赤道太平洋海表温度较常年同期偏高 2°C 以上,异常暖水中心值超过 3.5°C 。

采用 1961—2015 年湖南 11 月降水量分别与全球 8—10 月海表温度求相关(图 16b)可以发现,8 月显著正相关区主要位于日界线以东的赤道太平洋地区;9 月显著正相关区也位于日界线以东的赤道太平洋地区,但范围有所扩大,另外阿拉伯海地区也有一明显正相关区;10 月两块显著正相关区明显扩大。通过分析湖南 11 月降水量与各区域海表温度相关性(表 3)发现,湖南 11 月降水与 8—10 月 Niño3 区、Niño3.4 区、Niño C 区、Niño Z 区海表温度距平指数的相关性通过 0.001 显著性水平检验,与 Niño1+2 区、Niño4 区海表温度距平指数和 IOD 指数相关性通过 0.05 以上显著性水平检验。以上分析表明,当前期赤道中东太平洋及北印度洋海表温度为正异常时,湖南 11 月降水量偏多。这可能是由于受 El Niño 影响,赤道太平洋中东部的上升气流强盛,加强了赤道西太平洋的下沉气流,导致西太平洋副高偏强、偏西、偏南,我国南海地区为反气旋环流异常,来自印度洋地区水汽与西太平洋副高南侧的水汽输送偏强,有利于我国南方地区降水量偏多。

射出长波辐射(OLR)是地气系统辐射收支中的重要分量,OLR 的值越小,表明云顶温度低,对流发展越强;反之,云顶温度高,对流发展弱。一般在 OLR 值小的地区,对流发展较高,上升运动强,低层辐合、高层辐散;OLR 值大的地区为下沉运动,高层

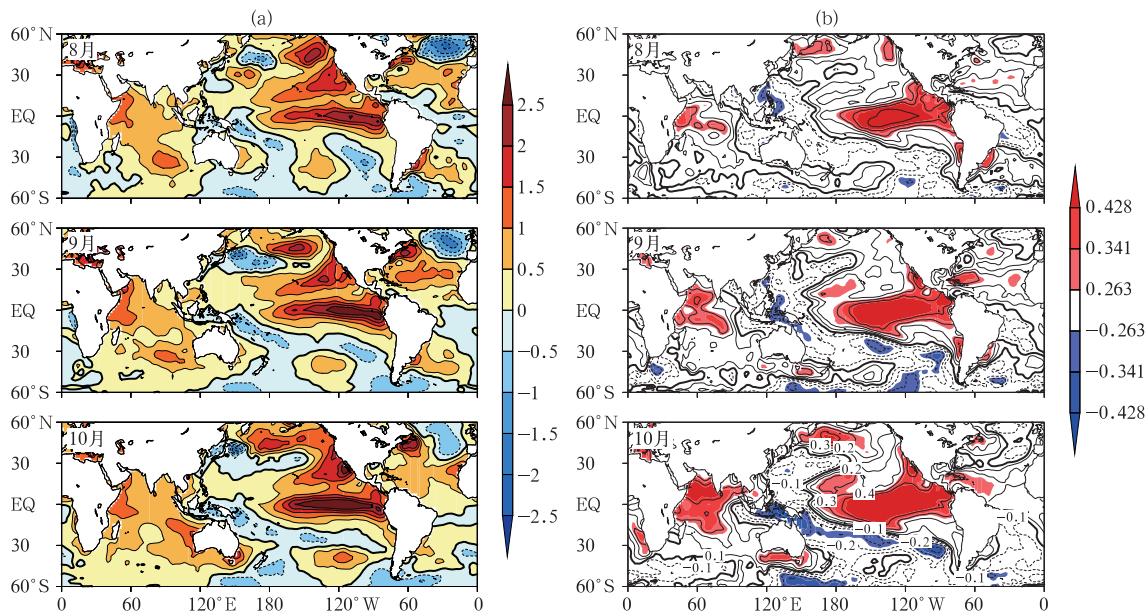


图 16 (a)2015 年 8—10 月海表温度距平(单位:℃)及(b)1961—2015 年湖南 11 月降水量
分别与 8—10 月海表温度的相关分布
(色斑为通过显著性检验区域)

Fig. 16 The sea surface temperature anomaly from August to October 2015 (a), and
distribution of correlation between the precipitation averaged over Hunan in November
and early global sea surface temperature in 1961–2015 (b)
(Shaded area has passed significance level test)

表 3 1961—2015 年湖南 11 月降水量与前期各海表温度指数相关系数表
Table 3 The correlation coefficients between the Hunan precipitation in November
and early indices for regional SSTA over the equatorial ocean

	Niño1+2	Niño3	Niño4	Niño3.4	Niño C	Niño Z	IOD
8 月	0.358 *	0.508 ***	0.358 *	0.508 ***	0.448 ***	0.479 ***	0.312 *
9 月	0.356 *	0.497 ***	0.399 **	0.515 ***	0.458 ***	0.477 ***	0.365 *
10 月	0.336 *	0.525 ***	0.446 ***	0.541 ***	0.482 ***	0.498 ***	0.416 **

注:*** 表示通过 0.001 显著性检验,** 表示通过 0.01 显著性检验,* 表示通过 0.05 显著性检验。
Note: ***, **, * have passed the significance test at 0.001, 0.01 and 0.05 levels, respectively.

辐合,低层辐散。低纬海洋上空对流活动异常(图 17)表明,11 月赤道中东太平洋和印度洋上空的对流活动明显较常年偏强,其中赤道中东太平洋对流活动偏强程度明显超过印度洋上空对流活动;而海洋性大陆地区上空对流活动明显较常年偏弱。我国华南西部至日本南部对流活动较常年明显偏强,使得我国华南西部至江南地区 11 月降水明显偏多。

对流活动明显偏强有利于上升运动的发展,图 18a 表明,2015 年 11 月赤道中东太平洋和印度洋地区上空为强的异常上升运动,而在西太平洋地区上空出现了一个异常下沉气流区,整个赤道印度洋—太平洋上空形成两支异常的反沃克环流圈,这也清楚地反映出典型的 El Niño 事件发展达到强盛期

时低纬热带大气的响应特征,这有利于西北太平洋地区对流层低层反气旋的发展。另外,印度洋暖海

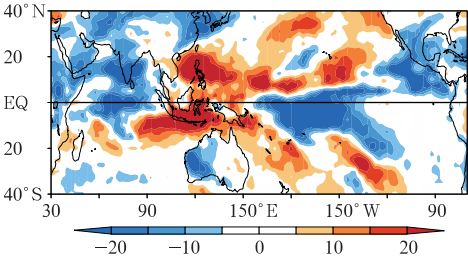


图 17 2015 年 11 月向外长波辐射距平
(单位:W · m⁻²)分布情况
Fig. 17 Distribution of OLR anomaly
(unit: W · m⁻²) in November 2015

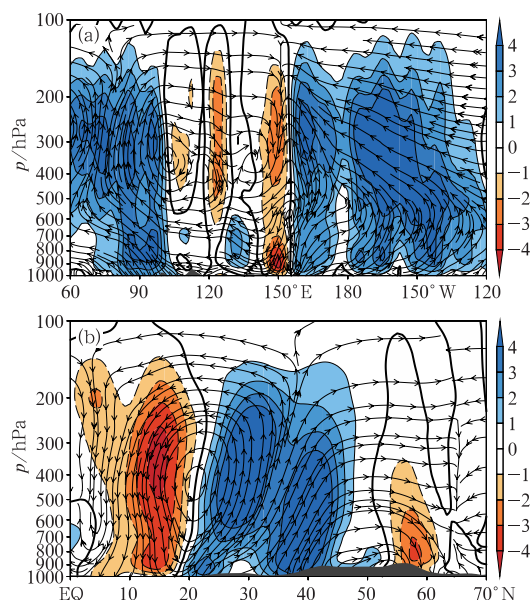


图 18 2015 年 11 月赤道地区(5°S~5°N)平均纬向环流异常(a)及 110°~125°E 平均经向环流异常(b)
(彩色阴影区表示垂直速度异常, 单位: 0.01 Pa·s⁻¹, 灰色区域为地形)

Fig. 18 Mean zonal circulation anomalies along the equator (5°S–5°N) (a), and mean meridional circulation anomalies over 110°–125°E (b) in November 2015
(Color shaded area represents the vertical speed anomaly, unit: 0.01 Pa·s⁻¹, gray area is for terrain)

温的发展能够激发开尔文波东传(Xie et al, 2009), 有利于西太平洋地区对流层低层反气旋式环流的发展加强, 该反气旋环流有利于西太平洋副高的加强、西伸(司东等, 2008; Yuan et al, 2012)。El Niño 事件的发生不仅引起热带大气环流的明显异常, 而且也通过大气的遥响应而引起中高纬大气环流的明显异常, 2015 年 11 月 110°~125°E 平均经向环流异常(图 18b)表明, 中低纬地区存在一反哈得来环流异常, 0°~20°N 区域上空出现了一个异常下沉气流区, 20°~45°N 区域上空出现一个异常上升气流区, 其中 20°~28°N 有一倾斜的异常上升气流中心, 在异常反哈得来环流的作用下, 副高异常增强, 西太平洋副高外围辐散流向我国中东部地区, 造成该区域强烈的异常辐合, 导致该地区持续阴雨天气。

5 结 论

本文采用湖南 97 个气象站点逐日降水资料, 结

合再分析资料、百项气候系统指数集等, 分析了 2015 年湖南罕见冬汛及其可能成因, 主要得出以下结论:

(1) 2015 年 11 月湖南省平均降水量偏多 1.6 倍, 为 1961 年以来同期第一高位, 其中湘东南部分地区降水量超过 250 mm, 35 县(市)降水量破当地有连续气象记录以来同期历史极值, 月内共出现 5 次暴雨过程, 分别发生在 1 日、7—8 日、11—12 日、17—18 日、20—21 日。湘中以南 23 县(市)出现气象洪涝, 18 县(市)达到极端降水事件标准, 湘江中上游出现自 1961 年以来最大冬汛。

(2) 造成 2015 年湖南冬汛的成因有湖南 11 月降水处于偏多的年代际背景之中。而大气环流异常是导致湖南发生冬汛的最直接的原因。2015 年 11 月对流层中层欧亚中高纬呈现两槽一脊分布, 西太平洋副高偏强、偏西; 对流层低层在南海地区形成一异常反气旋式环流, 加强了来自印度洋、太平洋地区水汽向东亚地区输送, 为我国华南西部至江南地区降水提供了充沛的水汽, 加上西路冷空气配合导致 11 月降水异常偏多, 其中 11 月湖南水汽的净输入量为 $15.3 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$, 较多年平均偏多 $13.9 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 。月内主要降水时段对应经向环流阶段性偏强, 引导冷空气南下影响我国中东部, 印缅槽偏强为我国中东部地区降水提供了充沛的水汽, 西太平洋副高脊线位置以正常略偏北为主, 导致水汽在华南西部至江南辐合。

(3) 在 PDO 暖位相时发生的 El Niño 事件可能是湖南降水异常的重要外强迫条件。湖南 11 月降水与 8—10 月 Niño 各区域海表温度距平指数及 IOD 指数均通过显著性水平检验。赤道中东太平洋和印度洋海表温度异常偏高, 导致该区域上空为强的异常上升运动, 而在海洋性大陆区域上空出现了一个异常下沉气流区, 有利于西北太平洋地区对流层低层反气旋的发展, 使得西太平洋副高的加强、西伸。El Niño 事件通过大气的遥响应而引起中高纬大气环流的明显异常, 南海上空出现了一个异常下沉气流区, 我国中东部上空出现一个异常上升气流区, 造成该区域强烈的异常辐合, 导致该地区持续阴雨天气。

参考文献

湛芸, 施能, 2003. 厄尔尼诺/南方涛动与我国秋季气候异常[J]. 热带气象学报, 19(2): 137–146.

- 龚道溢,王绍武,1999. 近百年 ENSO 对全球陆地及中国降水的影响[J]. 科学通报,44(3):315-320.
- 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.
- 贾小龙,张培群,陈丽娟,等,2008. 2007 年我国秋季降水异常的成因分析[J]. 气象,34(4):86-94.
- 李海燕,张文君,何金海,2016. ENSO 及其组合模态对中国东部各季节降水的影响[J]. 气象学报,74(3):322-334.
- 李耀辉,李栋梁,赵庆云,等,2000. ENSO 对中国西北地区秋季异常降水的影响[J]. 气候与环境研究,5(2):205-213.
- 刘宣飞,袁慧珍,2006a. 印度洋偶极子与中国秋季降水的关系[J]. 南京气象学院学报,29(5):644-649.
- 刘宣飞,袁慧珍,2006b. ENSO 对印度洋偶极子与中国秋季降水关系的影响[J]. 南京气象学院学报,29(6):762-768.
- 刘永强,丁一汇,1995. ENSO 事件对我国季节降水和温度的影响[J]. 大气科学,19(2):200-208.
- 吕俊梅,琚建华,张庆云,等,2005. 太平洋年代际振荡冷、暖背景下 ENSO 循环的特征[J]. 气候与环境研究,10(2):238-249.
- 苗秋菊,徐祥德,张胜军,2005. 长江流域水汽收支与高原水汽输送分量“转换”特征[J]. 气象学报,63(1):93-99.
- 聂羽,孙冷,李清泉,等,2016. 2015 年秋季我国气候异常及暖湿成因分析[J]. 气象,42(4):507-513.
- 气候系统诊断预测室,2015. 气候系统监测公报[EB/OL]. <http://cmdp.ncc-cma.net/Monitoring/Bulletin/201511/historybulletin.htm>.
- 邵懿,周兵,2016. 2015/2016 年超强厄尔尼诺事件气候监测及诊断分析[J]. 气象,42(5):540-547.
- 施能,1990. 厄尔尼诺/南方涛动与我国秋季大尺度降水预报[J]. 南京气象学院学报,13(2):174-183.
- 司东,邵懿,孙冷,等,2015. 2014 年秋季我国华西地区降水异常的成因分析[J]. 气象,41(4):508-513.
- 司东,温敏,徐海明,等,2008. 2005 年 6 月华南暴雨期间西太平洋副高西伸过程分析[J]. 热带气象学报,24(2):169-175.
- 王江曼,李春,2015. 太平洋年代际涛动对 ENSO 与华南冬季降水关系的可能影响[J]. 中国海洋大学学报,45(8):1-9.
- 王艳姣,闫峰,2014. 2011 年 11 月我国降水异常特征及成因分析[J]. 自然灾害学报,23(1):100-107.
- 王遵娅,任福民,王东阡,等,2013. 2012 年海洋和大气环流异常及其对中国气候的影响[J]. 气象,39(4):508-515.
- 吴正贤,李崇银,陈彪,等,1990. 1982—1983 年冬季厄尔尼诺期间大气环流异常的诊断分析[J]. 热带气象,6(3):253-264.
- 杨辉,贾小龙,李崇银,2006. 热带太平洋-印度洋海温异常综合模及其影响[J]. 科学通报,51(17):2085-2090.
- 姚辉,李栋梁,1992. 厄尔尼诺事件与中国降水及历史旱涝[J]. 应用气象学报,3(2):228-234.
- 姚秀萍,于玉斌,2005. 2003 年梅雨期干冷空气的活动及其对梅雨降水的作用[J]. 大气科学,29(6):973-985.
- 叶敏,封国林,2015. 长江中下游地区夏季降水的水汽路径的客观定量研究[J]. 大气科学,39(4):777-788.
- 袁媛,高辉,贾小龙,等,2016. 2014—2016 年超强厄尔尼诺事件的气候影响[J]. 气象,42(5):532-539.
- 袁媛,李崇银,2008. 热带印度洋偶极子与 ENSO 事件关系的年代际变化[J]. 科学通报,53(12):1429-1436.
- 袁媛,杨辉,李崇银,2012. 不同分布型厄尔尼诺事件及对中国次年夏季降水的可能影响[J]. 气象学报,70(3):467-478.
- 宗海峰,陈烈庭,张庆云,2010. ENSO 与中国夏季降水年际变化关系的不稳定性特征[J]. 大气科学,34(1):184-192.
- Kim J W, Yeh S W, Chang E C, 2014. Combined effect of El Niño-Southern Oscillation and Pacific Decadal Oscillation on the East Asian winter monsoon[J]. Climate Dyn, 42(3/4): 957-971.
- Wang L, Chen W, Huang R H, 2008. Interdecadal modulation of PDO on the impact of ENSO on the East Asian winter monsoon[J]. Geophys Res Lett, 35(20): L20702.
- Xie S P, Hu K M, Hafner J, et al, 2009. Indian Ocean capacitor effect on Indo-western Pacific climate during the summer following El Niño[J]. J Climate, 22(3): 730-747.
- Yuan Y, Yang S, Zhang Z Q, 2012. Different evolutions of the Philippine Sea anticyclone between the Eastern and Central Pacific El Niño: possible effects of indian ocean SST[J]. J Climate, 25(22): 7867-7883.