

赵俊虎, 陈丽娟, 王东阡. 2016 年我国梅雨异常特征及成因分析 [J]. 大气科学, 42 (5): 1055–1066. Zhao Junhu, Chen Lijuan, Wang Dongqian. 2018. Characteristics and causes analysis of abnormal Meiyu in China in 2016 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42 (5): 1055–1066, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1708.17170.

2016 年我国梅雨异常特征及成因分析

赵俊虎¹ 陈丽娟^{1,2} 王东阡¹

¹ 中国气象局国家气候中心/中国气象局气候研究开放实验室, 北京 100081

² 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, 南京 210044

摘 要 利用国家气候中心梅雨监测资料和 NCEP 再分析资料, 对 2016 年我国梅雨异常特征及其大尺度环流成因进行了分析。结果表明: (1) 2016 年我国梅雨有明显的区域特征, 其中江南区入梅偏早 14 天, 与 1995 年并列成为 1951 年以来入梅最早的年份, 出梅偏晚 11 天, 梅雨期(量)偏长(多), 但梅雨期日平均降水量偏少; 长江区入梅和出梅均偏晚, 梅雨期接近常年, 但梅雨量偏多一倍以上, 梅雨量和梅雨期日平均降水量分别为 1951 年以来历史同期第三和第二高值; 江淮区入梅、出梅及梅雨期接近常年, 但梅雨量偏多。(2) 对流层高、中、低层环流系统冬夏季节性调整和转变显著提前共同作用, 导致了 2016 年江南区入梅显著偏早; 东亚副热带西风急流、西太平洋副热带高压(副高)和东亚夏季风涌在 7 月中旬阶段性地南落导致了江南区和长江区出梅偏晚。(3) 受到前冬超强厄尔尼诺衰减和春、夏季热带印度洋全区一致海温模态偏暖的影响, 梅雨期副高异常偏强, 副高西南侧转向的水汽输送异常偏强, 并在长江区和江淮区与北方弱冷空气辐合, 造成梅雨量异常偏多。

关键词 入(出)梅 梅雨量 厄尔尼诺 热带印度洋全区一致海温模态 异常成因

文章编号 1006-9895(2018)05-1055-12

中图分类号 P462

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1708.17170

Characteristics and Causes Analysis of Abnormal Meiyu in China in 2016

ZHAO Junhu¹, CHEN Lijuan^{1,2}, and WANG Dongqian¹

¹ National Climate Center / Laboratory for Climate Studies, China Meteorological Administration, Beijing 100081

² Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

Abstract Based on the National Climate Center Meiyu monitoring data and NCEP reanalysis dataset, the characteristics of abnormal Meiyu and associated large scale circulation during the Meiyu period of 2016 in China are analyzed. The results are as follows: (1) There were obvious regional characteristics of Meiyu in 2016 in China. The Meiyu onset date over regions to the south of the Yangtze River was 14 days earlier than normal and was the earliest as that in 1995 since 1951. The Meiyu outset date in 2016 was 11 days later than normal with a longer duration and more Meiyu precipitation, whereas daily average precipitation was weaker. The Meiyu onset (outset) date over the Yangtze River valley was later than normal, while the Meiyu duration was close to normal with more than double of normal Meiyu precipitation. The amount of total Meiyu precipitation and average daily precipitation are ranked as the third and the second highest values since 1951, respectively. The Meiyu onset, outset, and duration over the Yangtze–Huaihe valley were close to normal, but

收稿日期 2017-05-21; **网络预出版日期** 2017-08-30

作者简介 赵俊虎, 男, 1985 年出生, 高级工程师, 主要从事短期气候预测研究。E-mail: zhaojh@cma.gov.cn

通讯作者 陈丽娟, E-mail: chenlj@cma.gov.cn

资助项目 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目 2015CB453203, 国家自然科学基金项目 41875093、41505061、41705074、41275073

Funded by National Basic Research Program of China (Grant 2015CB453203), National Natural Science Foundation of China (NSFC) (Grants 41875093, 41505061, 41705074, 41275073)

the amount of total Meiyu precipitation was more than normal. (2) The significantly early Meiyu onset over regions to the south of the Yangtze River was induced by abnormally early transition of East Asian circulation from winter pattern to summer pattern. The southward shift of East Asian subtropical upper-level westerly jet and the western Pacific subtropical high (WPSH) were combined with the southward displacement of the East Asian summer monsoon surge in middle July, leading to late than normal Meiyu onset. (3) The decay of the extremely strong El Niño event in the previous winter and the persistent warming of the Indian Ocean Basin-Wide mode (IOBW) in spring and summer were the main reasons that caused the WPSH to be extremely strong during the Meiyu period in 2016. The abnormally strong moisture flux from the southwest of the WPSH and weak cold air from the north converged over the Yangtze-Huaihe valley, resulting in higher than normal Meiyu precipitation over this region.

Keywords Meiyu onset (outset), Meiyu precipitation, El Niño, Indian Ocean Basin-Wide mode (IOBW), Abnormal causes

1 引言

梅雨指的是每年 6~7 月在中国长江中下游地区出现的以持续多雨为主要特征的气候现象 (Tao and Chen, 1987)。梅雨期是东亚夏季风季节性北推过程中的重要阶段, 这一时期中国东部雨带主要徘徊在江南至淮河之间, 并往往伴随着持续性大暴雨、洪涝灾害的发生, 给国家和人民的生命财产等带来巨大损失。因此, 揭示梅雨的变化规律及其异常成因, 具有重要的科学意义, 对防灾、减灾也具有十分重要的指导意义。

国内外学者很早就开展了梅雨的研究工作, 并发现了很多有价值的结论和规律 (陶诗言等, 1958, 1988; 施能等, 1996; 丁一汇等, 2007; 王遵亲 and 丁一汇, 2008; Gu et al., 2009; 梁萍等, 2010; Sampe and Xie, 2010; 赵俊虎等, 2011)。例如陶诗言等 (1958) 指出梅雨的开始和结束与亚洲上空南支西风急流的北跳过程密切相关。丁一汇等 (2007) 认为, 当 6 月中旬东亚夏季风从华南推进到长江流域, 同时印度夏季风在印度次大陆爆发时, 中国梅雨雨季开始。胡娅敏等 (2008) 讨论了江淮梅雨丰 (弱) 梅年的大气环流异常特征。胡娅敏和丁一汇 (2009) 研究指出西太平洋副热带高压 (副高) 脊位置的北移、东亚夏季风的加强以及冷空气的减弱, 可能是导致 2000~2005 年江淮梅雨带北移的原因。魏凤英和宋巧云 (2005) 探讨了近百年全球海表温度年代际尺度的空间分布结构与长江中下游梅雨异常变化的联系, 发现当北太平洋年代际振荡 (Pacific Decadal Oscillation, PDO) 暖事件趋势处于较强时期时, 长江中下游梅雨为偏多的趋势, 反之亦然。梁萍等 (2007) 进一步总结了我国梅雨的影响因子。此外, 梅雨异常年的成因也引起了学者们的关注。李维京 (1999)、周兵和文继芬 (2007) 研

究了 1998 年夏季大尺度环流系统对长江流域“二度梅”的影响。汪靖等 (2006) 分析了 2005 年江淮流域入梅偏晚的环流成因。牛若芸和金荣花 (2009) 对 2008 年梅雨异常的大尺度环流成因进行了分析, 指出对流层高、中、低层多个尺度环流系统都可对江淮梅雨产生直接或者间接影响。封国林等 (2012) 研究了 2011 年梅雨期长江中下游地区旱涝急转的成因。总之, 每年影响梅雨的主导因素不尽相同, 导致各年入 (出) 梅早晚、梅雨期长短、梅雨量的多寡、梅雨型分布等出现不同的组合, 给梅雨预报带来很大的难度。

2016 年是一次超强 El Niño 事件的衰减年, 本次 El Niño 事件于 2015 年 11 月达到峰值, 2016 年 4 月结束, 是 1951 年以来峰值强度最强、持续时间最长的一次 El Niño 事件 (陈丽娟等, 2016; 邵颢和周兵, 2016; 翟盘茂等, 2016)。2016 年夏季全国气温较常年同期偏高 0.9°C , 是 1961 年以来的最高值; 全国平均降水量较常年偏多 5.6%, 其中长江流域降水异常偏多, 梅雨期间梅雨量较常年偏多一倍以上, 南方共发生 11 次区域性暴雨过程, 暴雨过程平均综合强度为 1980 年以来最强 (曹艳察和张涛, 2016; 权婉晴和何立富, 2016; 袁媛等, 2017), 带来了较大的损失。本文旨在从大尺度环流系统演变及其异常特征入手, 分析 2016 年我国梅雨的异常特征及其原因, 以提高对梅雨的科学认识和预报水平。

2 资料和方法

本文所用资料主要包括: 美国国家环境预报中心和大气研究中心 (NCEP/NCAR) 发布的全球逐日的高度场 (H)、风场 (u 、 v 分量)、比湿 (q) 再分析资料 (Kalnay et al., 1996), 水平空间分辨率为 $2.5^{\circ}\times 2.5^{\circ}$, 垂直方向从 1000~10 hPa 共 17 层等

压面；亚洲经向环流指数、副高强度指数和脊线指数、Niño3.4 指数及热带印度洋海温全区一致模态（Indian Ocean Basin-Wide, IOBW）指数来自国家气候中心的新百项指数；水汽通量的计算方法参照丁一汇（2005）。为方便表述，这里将梅雨指标达到一倍以上标准差的称为异常。如无特别说明，变量的气候值均为 1981~2010 年的 30 年平均值。

中国气象局预报与网络司于 2014 年发布了梅雨新的监测指标，即《梅雨监测业务规定》^①。中国梅雨（以下简称梅雨）主要分布在江南至江淮流域，即西自湖北宜昌，东至华东沿海，南端以南岭以北的 28°N 为界，北抵淮河沿线 34°N 一带，其经、纬度范围：（28°~34°N，110°~123°E），涉及的行政区域包含上海、江苏、安徽、浙江、江西、湖北、湖南等 6 省 1 市。按照气候类型可将梅雨监测区域分为江南区（I）、长江区（II）、江淮区（III）（图 1）。确定区域入（出）梅与梅雨期的主要依据是区域内各监测站的降水条件，副高脊线、日平均温度、南海夏季风爆发时间等为辅助条件，关于各区域入梅、出梅和梅雨期、梅雨量的其他业务规范请参考《梅雨监测业务规定》，这里不再赘述。

3 2016 年梅雨异常特征

3.1 入（出）梅特征

表 1 给出了 2016 年梅雨的监测概况。其中江南区 5 月 25 日入梅，较常年平均偏早 14 天，与 1995 年并列成为 1951 年以来入梅最早年份；7 月 19 日出梅，较常年偏晚 11 天，为 2000 年以来第 2 异常偏晚年，仅次于 2015 年（偏晚 18 天）；梅雨期 55 天，与 1998 年并列 1951 年以来梅雨期长度的第 3 位，仅次于 2015 年和 1954 年。长江区 6 月 19 日入梅，较常年同期偏晚 5 天；7 月 21 日出梅，较常年偏晚 8 天；梅雨期 32 天，较常年同期偏多 3 天。

江淮区 6 月 20 日入梅，较常年偏早 1 天；7 月 16 日出梅，较常年偏晚 1 天；梅雨期 27 天，较常年同期偏多 2 天。综上所述，江南区入（出）梅显著偏早（晚），梅雨期显著偏长，长江区入（出）梅均偏晚，江淮区接近常年。

3.2 梅雨期降水时空特征

（1）梅雨量和梅雨期日平均降水量。由表 1 可见，2016 年江南区梅雨量为 526.0 mm，较常年平均偏多 44.0%，位列 1951 年以来第 9；梅雨期日平均降水量为 9.6 mm d⁻¹，较常年偏少 2.6 mm d⁻¹，属于强度偏弱年。长江区梅雨量为 584.3 mm，较常年平均偏多 107.9%，位于 1951 年以来的第 3 位，仅次于 1954 年和 1996 年；梅雨期日平均降水量为 18.3 mm d⁻¹，较常年平均偏多 8.6 mm d⁻¹，强度较强，位于 1951 年以来的第 2 位，仅次于 1969 年。江淮区梅雨量为 420.6 mm，较常年偏多 59.1%，梅雨期日平均降水量为 14.9 mm d⁻¹，较常年平均偏多 4.3 mm d⁻¹，强度较强，位于 1951 年以来的第 8 位。

（2）时间演变特征。图 2 是 2016 年 5 月 21 日至 7 月 26 日三个梅雨区平均的逐日降水量演变图。由图可见，三个区域有 3 段相对持续的降水期，分别为 P1：5 月 25 日至 6 月 3 日；P2：6 月 11 日至 7 月 7 日；和 P3：7 月 10~20 日。其中 P2 期降水持续时间长，且降水量较大。长江区 7 月 1~6 日的降水量分别为 60.4、64.3、52.5、45.1、21.8 和 26.3 mm，6 天的总降水量为 270.4 mm，接近长江区整个梅雨期多年平均的降水量（280.4 mm）；江淮区 7 月 1~7 日的降水量分别为 89.9、16.6、19.3、49.5、27.2、8.1 和 19.3 mm，7 天的总降水量为 229.9 mm，接近江淮区整个梅雨期多年平均的降水量（264.4 mm）。而这一时期江南区梅雨量较少。为进一步分析 2016 年三个区域梅雨期内降水量时间演变之间的关系，计算了整个梅雨期（5 月 25 日

表 1 2016 年梅雨监测概况

Table 1 The characteristics of Meiyu in China in 2016

区 域		入梅时间	出梅时间	梅雨期/d	梅雨量/mm	梅雨期日平均降水量/mm d ⁻¹
I 型（江南区）	气候平均	6 月 8 日	7 月 8 日	30	365.4	12.2
	2016 年	5 月 25 日(-14 d)	7 月 19 日(+11 d)	55(+25)	526.0(+44.0%)	9.6(-2.6)
II 型（长江区）	气候平均	6 月 14 日	7 月 13 日	29	281.0	9.7
	2016 年	6 月 19 日(+5 d)	7 月 21 日(+8 d)	32(+3)	584.3(+107.9%)	18.3(+8.6)
III 型（江淮区）	气候平均	6 月 21 日	7 月 15 日	25	264.4	10.6
	2016 年	6 月 20 日(-1 d)	7 月 16 日(+1 d)	27(+2)	420.6(+59.1%)	14.9(+4.3)

注：括号中数值为距平或距平百分率，入梅和出梅正（负）值表示偏晚（早）

① 中国气象局预报与网络司. 2014. 关于印发《梅雨监测业务规定》的通知，气预函（2014）28 号 [R].

至 7 月 20 日) 内三个区域的逐日降水量序列相互间的相关系数。其中江南区和长江区、江淮区的相关系数分别为 0.12 和 -0.14, 呈弱的正、负相关; 而长江区和江淮区的相关系数为 0.54, 呈显著的正

相关。这主要是因为江南区入梅较其他两个区偏早了 20 天以上, 梅雨期降水过程相对独立。

(3) 空间分布特征。2016 年 6 月 19 日至 7 月 20 日, 三个区域基本均处于梅雨期, 是梅雨集中期。由图 2 可见, 该时期降水中心主要位于长江区, 其中湖北东部和南部、湖南北部、江西北部、安徽中部和南部、江苏中部和南部等地降水量在 400 mm 以上(图 3a), 较常年同期偏多 5 成以上(图 3b), 沿江地区偏多 1 倍以上; 湖北东部至安徽南部达到了 600 mm 以上, 其中湖北东南部较常年同期偏多 1.5 倍以上; 其次是江南北部和淮河下游, 降水量有 200~400 mm, 偏多 2~5 成; 淮河上游降水量有 100~200 mm, 偏多 0~2 成。结合表 1 可见: 2016 年长江区梅雨量和梅雨期日平均降水量最多, 而江南区和江淮区相对偏少。

综上所述, 2016 年三个区域梅雨特征有明显差异, 其中江南区入梅时间异常早, 出梅时间异常晚, 梅雨期异常偏长, 梅雨量显著偏多, 但梅雨期日平均降水量偏小。长江区入梅和出梅均偏晚, 梅雨期接近常年, 但梅雨量异常偏多, 梅雨期日平均降水

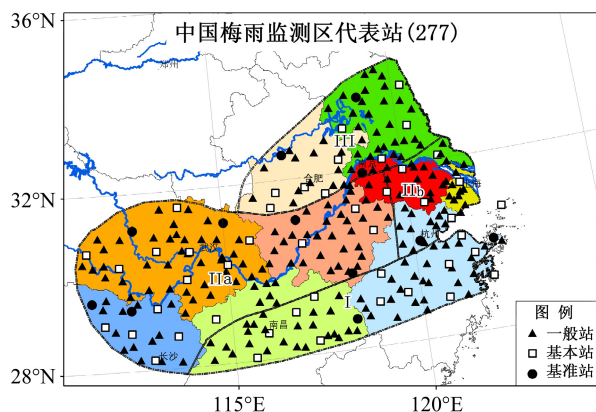


图 1 梅雨监测区域划分及监测站点空间分布示意图(引自《梅雨监测业务规定》)。I 表示江南区, II 表示长江区, III 表示江淮区

Fig. 1 Schematic diagram of the division of the monitoring area and spatial distribution of monitoring stations. I indicates regions to the south of the Yangtze River, II indicates regions of the Yangtze River valley, III indicates the region of Yangtze-Huaihe River basin

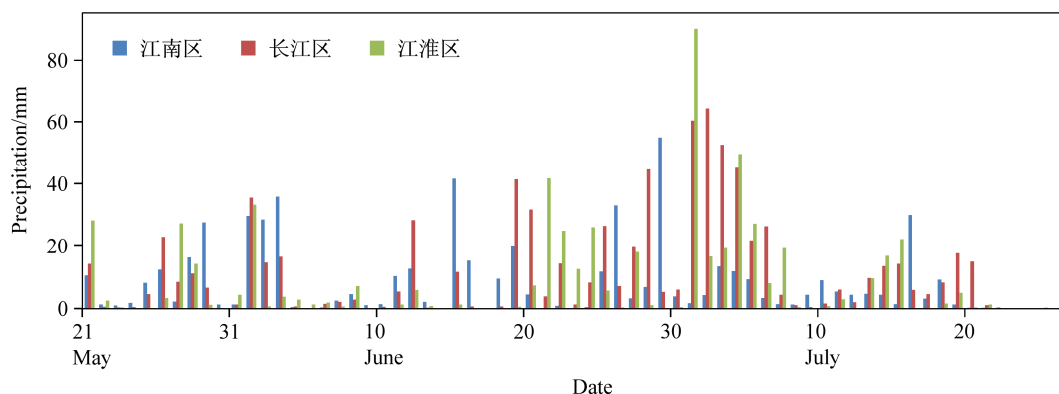


图 2 2016 年 5 月 21 日至 7 月 26 日梅雨区平均降水量逐日演变。横坐标为日期, 纵坐标为降水量(单位: mm)

Fig. 2 Regional average precipitation from 21 May to 26 July 2016. The horizontal axis indicates time, and the vertical ordinate shows precipitation (units: mm)

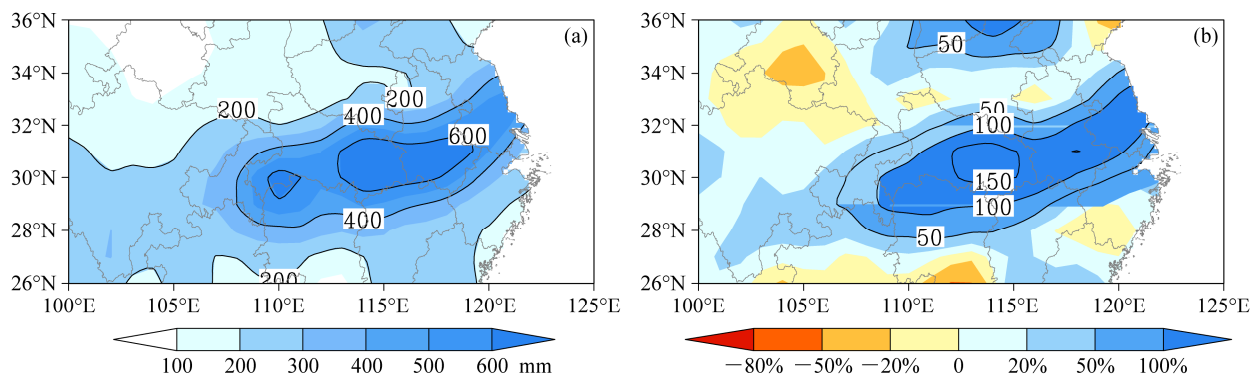


图 3 2016 年 6 月 19 日~7 月 20 日梅雨期 (a) 总降水量(单位: mm) 和 (b) 总降水量距平百分率

Fig. 3 (a) Accumulated rainfall amount (units: mm) and (b) percentage anomalies during the Meiyu period (from 19 June to 20 July) of 2016

量异常偏多; 江淮区入梅、出梅及梅雨期接近常年, 但梅雨量偏多, 梅雨期日平均降水量偏多。

4 2016 年梅雨异常大尺度环流成因

4.1 江南入梅偏早成因

梅雨是东亚夏季风系统和欧亚中高纬度环流系统相互作用的结果, 入梅则体现了东亚大气环流系统完成了从冬季风环流系统向夏季风环流系统的调整。2016 年江南入梅显著偏早, 也是这种冬、夏季环流系统季节性调整和转变提前的结果, 是对流层高、中、低层环流相互配置、共同作用造成的。

东亚大气环流的季节转换、中国大部分地区雨季的开始和结束都与东亚副热带西风急流位置的南北移动及强度变化有着密切的关系(况雪源和张耀存, 2006; 杨莲梅和张庆云, 2007)。陶诗言等(1958)指出, 东亚梅雨的开始和结束与亚洲上空南支西风急流的两次北跳过程密切相关。急流轴位置的变化和副高的变化具有很好的一致性, 高层西风急流的北抬有利于中层副高的北跳。

由于 2016 年与 1995 年并列成为 1951 年以来江南区入梅最早年份, 因此选取 10 个偏早年(1953、1961、1971、1972、1973、1990、1995、2000、2006 和 2015 年)进行合成, 分析 2016 年与历史偏早年环流的异同。10 个偏早年中, 1995 年入梅最早为 5 月 25 日, 1953、1961 和 1996 年入梅最迟为 5 月 30 日; 10 年平均入梅为 5 月 28 日。图 4 给出了江南区 10 个入梅偏早年和 2016 年的东亚($110^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$ 平均)上空 200 hPa 西风急流随时间变化的剖面图。从图 4a 可以清楚地看到, 江南区入梅偏早年, 5 月下旬东亚上空的西风急流加强, 急流轴位置北跳至 35°N 以北, 此时江南区梅雨开始。此后西风急流稳定维持, 直至 6 月中下旬发生第二次北跳。和偏早年合成类似, 2016 年 5 月 25 日左右, 东亚上空的西风急流风速较常年明显增强, 中心风速在 45 m s^{-1} 以上, 强度较偏早年合成的更强, 急流轴位置第一次北跳较早, 急流轴在 38°N 以北(图 4b), 较常年同期偏北 5 个纬度, 较偏早年更加偏北。这表明 2016 年对流层高层的中高纬度大气环流系统调整和北跳异常偏早, 为中层副高的北跳、低层亚洲夏季风向北推进和江南区入梅提供了有利的条件。

研究表明, 副高阶段性地北跳与我国东部地区的雨季及多雨带位置直接相关。气候态下, 从初夏

到盛夏副高有两次明显的季节性北跳, 第一次北跳东亚夏季风推进到长江流域, 长江中下游地区入梅, 第二次北跳东亚夏季风推进到华北, 梅雨结束, 华北雨季开始(张庆云和陶诗言, 1999; 陶诗言和卫捷, 2006; 赵俊虎等, 2012; Ye et al., 2014; 封国林等, 2015)。《梅雨监测业务规定》中也指出了梅雨期副高脊线活动范围, 江南区南界 $\geq 18^{\circ}\text{N}$, 北界 $< 25^{\circ}\text{N}$ 。即脊线 $\geq 18^{\circ}\text{N}$ 时有利于江南区入梅, 而脊线在 $18^{\circ}\sim 25^{\circ}\text{N}$ 这个范围内, 有利于江南区梅雨的维持。图 5 给出了江南区 10 个入梅偏早年和 2016 年 500 hPa 高度场沿副高西段($110^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$)平均的时间—纬度剖面图。由图 5a 可见, 多平均的副高脊线在 6 月 8 日(7 月 8 日)越过 18°N (25°N), 江南区平均的入(出)梅时间也正好是 6 月 8 日(7 月 8 日)。入梅偏早年, 5 月下旬起副高区域为显著的正高度距平, 一直持续到 6 月下旬, 副高脊线明显偏北, 并维持在 18°N 以北(图 5a), 导致江南区入梅偏早。与江南区入梅偏早年合成相比, 2016 年副高强度更强, 5 月 25 日副高脊线迅速北跳, 基本维持在 18°N 以北, 维持一周多时间, 此时环流条件有利于江南区入梅, 直至 6 月 7 日后副高才发生一次明显的南落, 6 月 19 日副高北跳至 22°N (图 5b), 此时长江区和江淮区陆续入梅, 副高的这一次较长时间的南落导致了长江区入梅偏晚。

东亚夏季风的北推, 是梅雨区降水水汽来源的动力, 入梅的早晚与东亚夏季风的季节进程密切相关。图 6 给出了江南区 10 个入梅偏早年和 2016 年沿 $110^{\circ}\sim 122.5^{\circ}\text{E}$ 平均的 850 hPa 经向风时间—纬度剖面图。从入梅偏早年的合成可见, 5 月下旬起, 中国东部的经向风已经加强, 大于 4 m s^{-1} 的经向风已经北进至江南区, 且逐步向北推进, 江南区及其以北为显著的正距平(图 6a), 表明东亚夏季风向北推进偏早, 强度较常年偏强, 导致江南区入梅偏早。与江南区入梅偏早年合成相比, 2016 年东亚夏季风于 5 月 25 日迅速加强, 并北推至 26°N 以北(图 6b), 给江南区带来了充沛的水汽, 梅雨开始。6 月 4~10 日, 夏季风阶段性减弱, 与此同时, 梅雨区降水显著减弱(图 3)。6 月 11 之后夏季风再一次增强, 6 月 19 日北推至 30°N 以北, 长江区和江淮区入梅。

4.2 出梅偏晚成因

2016 年江南区、长江区和江淮区分别在 7 月 19、21 和 16 日出梅, 分别偏晚 11 天、8 天和 1 天。

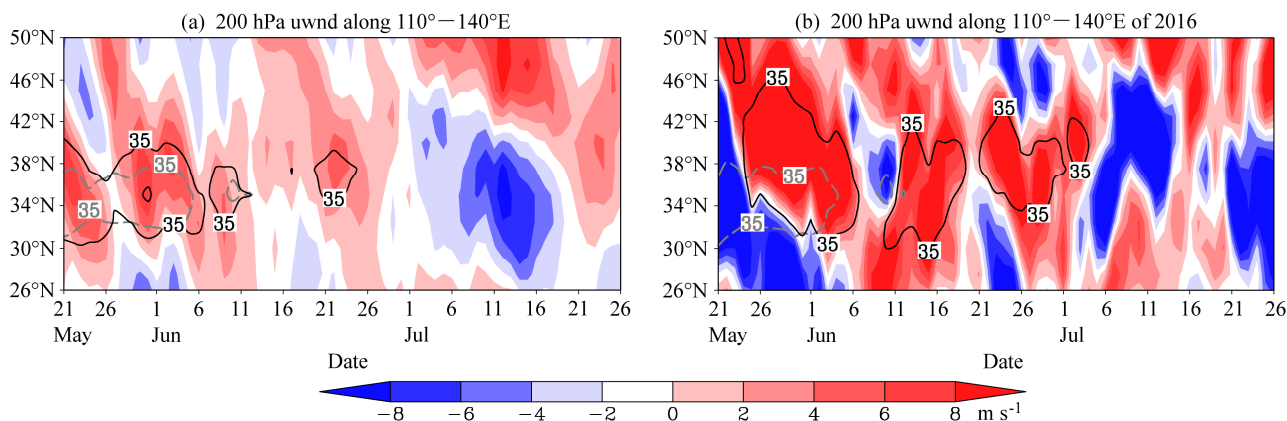


图4 (a) 江南区入梅偏早年和 (b) 2016 年东亚 110°~140°E 平均的 200 hPa 纬向风时间-纬度剖面图 (单位: m s^{-1})。灰色虚线表示气候平均的 35 m s^{-1} 等值线, 黑线表示异常年平均的 35 m s^{-1} 等值线

Fig. 4 Time-latitude cross sections of zonal wind (units: m s^{-1}) at 200 hPa averaged over 110°–140°E in (a) early Meiyu onset years over regions to the South of the Yangtze River and (b) 2016. The gray dotted line represents the climatological mean of 35 m s^{-1} contour, and the black line represents the average of 35 m s^{-1} contour in anomalous years

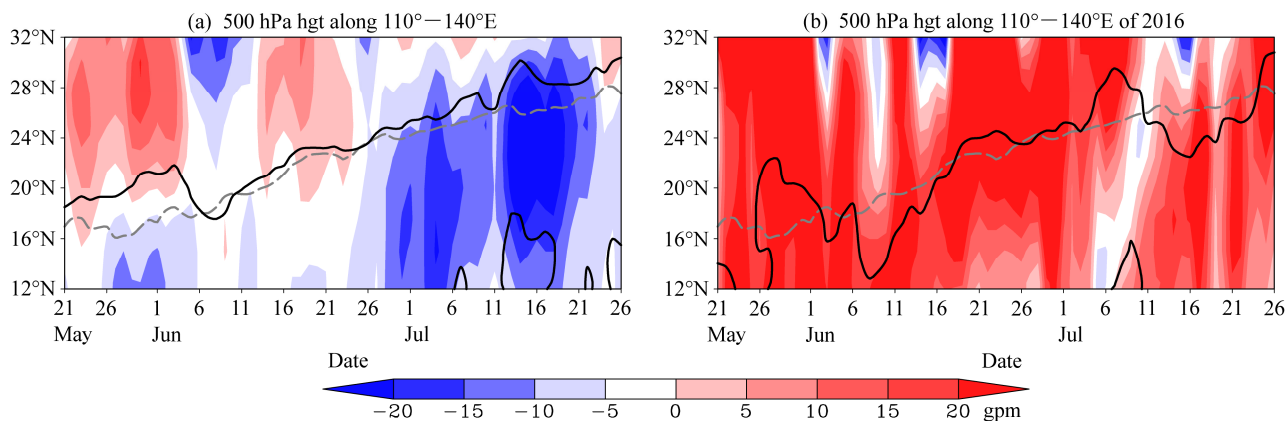


图5 (a) 江南区入梅偏早年和 (b) 2016 年沿 110°~140°E 平均的 500 hPa 位势高度场时间-纬度剖面图 (单位: gpm)。灰色虚线表示气候平均的副高脊线, 黑线表示异常年平均的副高脊线

Fig. 5 Time-latitude cross sections of geopotential height at 500 hPa (units: gpm) averaged over 110°–140°E in (a) early Meiyu onset years in regions to the South of the Yangtze River and (b) 2016. The gray dotted line represents the climatological mean subtropical high ridge line, and the black line represents the mean subtropical high ridge line in anomalous years

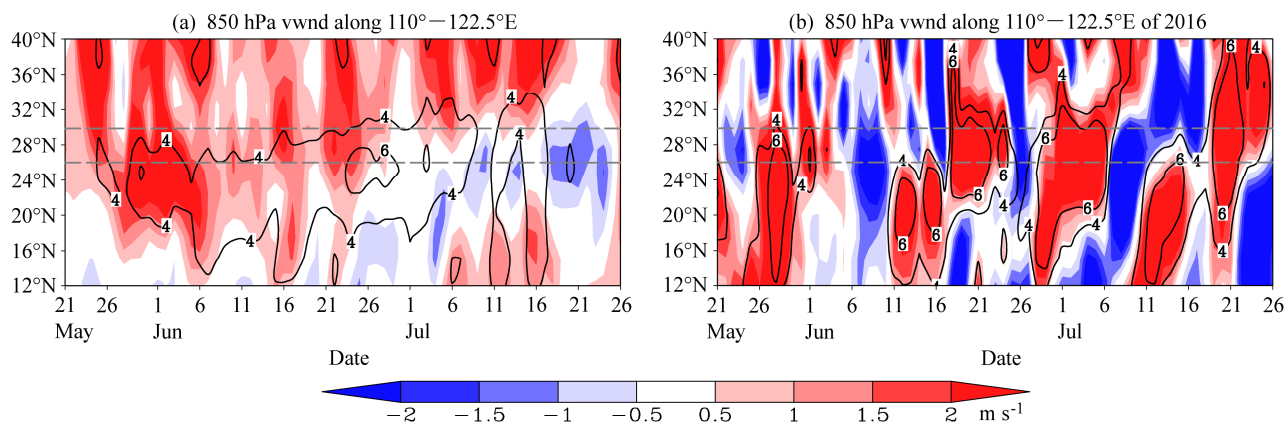


图6 (a) 江南区入梅偏早年和 (b) 2016 年沿 110°~122.5°E 平均的 850 hPa 经向风时间-纬度剖面图 (单位: m s^{-1})。等值线表示经向风, 阴影区表示经向风距平

Fig. 6 Time-latitude cross sections of meridional wind at 850 hPa (units: m s^{-1}) averaged over 110°–122.5°E in (a) early Meiyu onset years in regions to the South of the Yangtze River and (b) 2016. Shaded areas represent meridional wind anomalies, and contours represent the meridional winds

因此,选取江南区和长江区出梅均偏晚 8 天以上的年份(1954、1970、1974、1979、1980、1996、1998、2006、2007 和 2015 年)进行合成,分析 2016 年与历史上出梅偏晚年环流的异同。10 个偏晚年中,1998 年江南区出梅最晚为 8 月 2 日,2006 年和 2007 年出梅最早为 7 月 18 日,江南区和长江区 10 年平均出梅分别为 7 月 23 日和 7 月 26 日。

从出梅偏晚年高层东亚上空西风急流的时间—纬度剖面图(图 7a)可见,7 月 1~23 日期间,26°~40°N 为正距平,中心位于 30°~34°N,40°~50°N 为负距平,表明西风急流轴偏南,强度偏强,有利于江南区和长江区出梅偏晚;7 月 24 日之后,正距平向北发展,急流轴北抬;中层副高和底层夏季风也有类似的北进过程,7 月 1~23 日期间,副高脊线偏南(图 7b),东亚夏季风维持在长江流域及其以南(图 7c),7 月 24 日之后,副高和东亚夏季风逐步北上,江南区和长江区相继出梅。

2016 年 5 月 25 日至 7 月 4 日期间,西风急流主体位置稳定维持在 34°~40°N,有利于梅雨的维持;7 月 8~20 日,急流位置有一次明显的减弱南退过程,急流轴位于 34°N 以南(图 4b),副高在此期间也有一次南落过程,脊线维持在 22°~24°N 之间(图 5b),夏季风北涌也维持在 32°N 以南(图 6b),水汽输送难以北上,有利于江南区和长江区出梅偏晚,7 月 21 日西风急流主体位置迅速北跳至 40°N 以北,副高也发生明显的北跳,夏季风北涌也维持在 32°N 以北,梅雨结束。

此外,2016 年华南前汛期于 3 月 21 日开始,较常年平均的 4 月 2 日明显偏早;江南入梅偏早,三个区域出梅偏晚;华北雨季于 7 月 19 日开始,较常年平均的 7 月 18 日略偏晚。由此可见,2016 年中国东部春、夏季气候季节进程具有前期偏早、后期偏晚的特点。受到海洋外强迫和大气环流季节内振荡的共同作用,东亚大气环流从冬季向夏季转换较常年偏早,体现在对流层高层西风急流北跳偏早、中层副高第一次北跳偏早、低层夏季风加强和北推偏早等多个方面;而 7 月中旬副高和夏季风的阶段性南落,导致了夏季气候季节进程后期偏晚。

4.3 梅雨量异常偏多成因

2016 年梅雨集中期间(6 月 19 日至 7 月 20 日),欧亚中高纬度 500 hPa 环流呈“两槽两脊”型(图 8a),乌拉尔山地区为一个低压槽,阻塞活动明显偏弱,贝加尔湖西北部为较强的高压脊,东北部则

为低压槽,鄂霍次克海则为较强的高压脊控制。副高较常年异常偏强,中心位置达到 5910 gpm,偏高 20 gpm 以上,西伸脊点达到 110°E,较常年平均偏西 10 个经度以上,脊线略偏南。菲律宾附近对流层低层为异常反气旋环流控制,长江中下游地区为西风距平,表明梅雨锋偏强;东北地区也为异常反气旋控制,引导冷空气南下到江淮流域(图 8b)。由副高西南侧转向的水汽输送明显偏强,与东路弱冷空气配合,造成长江中下游地区水汽通量异常辐合(图略),造成梅雨期降水异常偏多。

此外,需要说明的是 1951 年以来梅雨量最多的 1954、1996 和 1998 年,梅雨期间欧亚中高纬度为典型的“两脊一槽”型环流,乌拉尔山和鄂霍次克海为较强的高压脊,贝加尔湖为低压槽(图略),中高纬度冷空气活动较强。而 2016 年梅雨期中高纬度冷空气势力相对较弱,6~7 月东亚经向环流指数的监测结果(图 9a)也表明这一点,这是一个不同之处。监测结果也表明 2016 年 6~7 月副高较气候平均明显偏强,其强度为历史第二,仅次于 2010 年同期(图 9b);梅雨集中期间(6 月 19 日至 7 月 20 日)经过长江中下游地区南边界的水汽通量强度明显偏强(图 9c),整个长江中下游地区(27.5°~32.5°N,110°~120°E)水汽净收支为历史第一(图 9d)。由此可见,充沛的水汽条件是 2016 年长江区梅雨量异常偏多的主要成因之一,而这样强盛的水汽主要来自异常偏强的副高西南侧的转向气流。

2014 年秋季赤道中、东太平洋暖海温开始迅速发展,但由于受到南太平洋中纬度海温异常偏低的影响,2014 年 El Niño 事件并没有形成(Min et al., 2015),但赤道中、东太平洋暖海温仍然维持。图 10 给出了 2015 年 1 月至 2016 年 8 月 Niño3.4 指数和 IOBW 指数的演变。Niño3.4 于 2015 年 4 月大于 0.5°C,并持续 6 个月以上大于 0.5°C,形成了一次 El Niño 事件,于 2015 年 11 月达到 2.5°C,达到峰值,此后逐步衰减,于 2016 年 5 月低于 0.5°C,El Niño 事件结束。这是 1951 年以来峰值强度最强、持续时间最长的一次 El Niño 事件(陈丽娟等, 2016;邵颢和周兵, 2016;翟盘茂等, 2016)。2016 年夏季处于超强 El Niño 事件的衰减年,受 El Niño 事件影响,副高在 2015 年秋、冬季持续偏强,并在 2015/2016 年冬季达到历史最强,IOBW 也表现出持续偏暖的特征(图 10),并在 2015/2016 年冬季和 2016 年春季均达到 1951 年以来最暖(袁媛等,

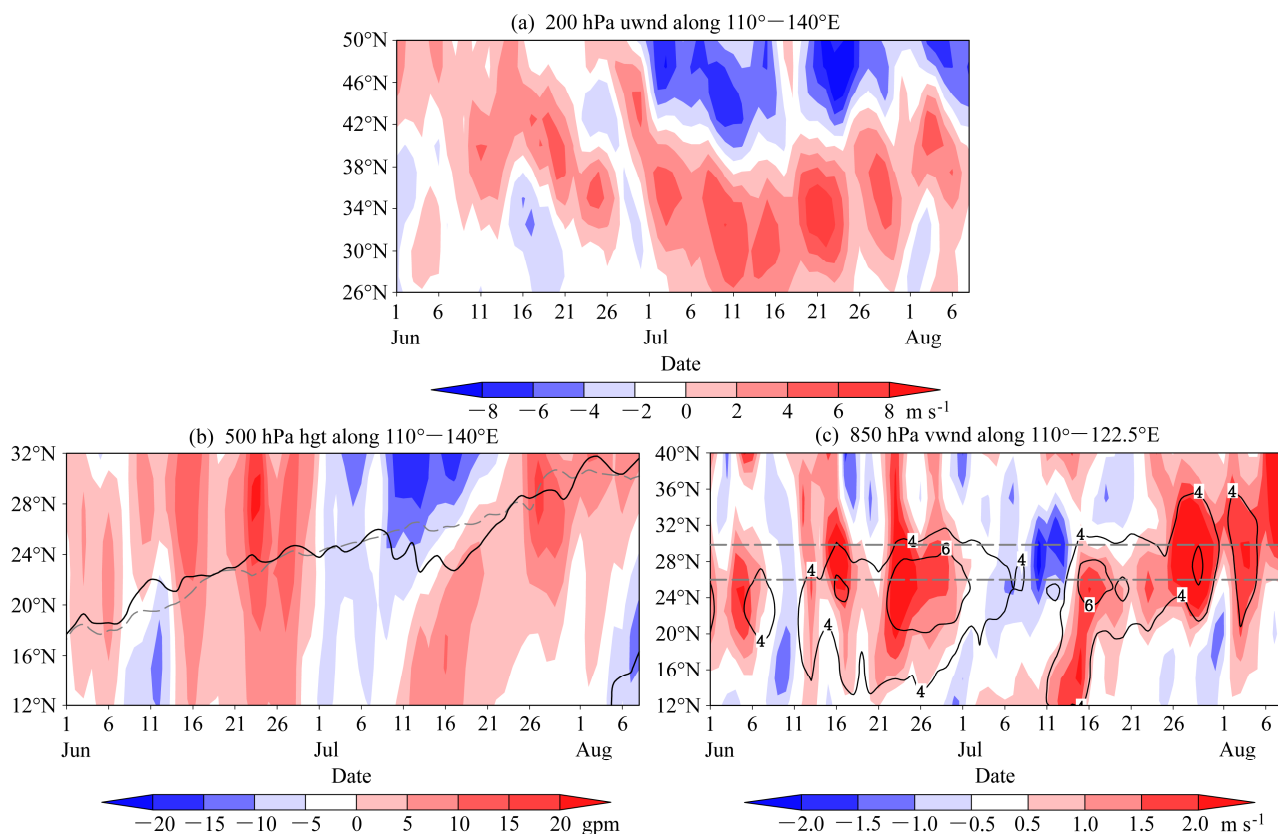


图7 江南区和长江区出梅偏晚年 (a) 沿 $110^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$ 平均的 200 hPa 纬向风距平时间—纬度剖面 (单位: m s^{-1}), (b) 沿 $110^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$ 平均的 500 hPa 位势高度距平时间—纬度剖面 (单位: gpm), (c) 沿 $110^{\circ}\sim 122.5^{\circ}\text{E}$ 平均的 850 hPa 经向风距平时间—纬度剖面 (单位: m s^{-1})。 (b) 中灰色虚线表示气候平均的副高脊线, 黑色实线表示异常年平均的副高脊线。 (c) 中阴影区表示经向风距平, 黑色实线表示经向风大小

Fig. 7 Time-latitude cross sections of (a) zonal wind (units: m s^{-1}) at 200 hPa averaged over $110^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$, (b) geopotential height anomalies at 500 hPa (units: gpm) averaged over $110^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$, and (c) meridional wind at 850 hPa (units: m s^{-1}) averaged over $110^{\circ}\sim 122.5^{\circ}\text{E}$ in late Meiyu onset years in regions to the South of the Yangtze River and the Yangtze River valley. The gray dotted line in (b) represents the climatological mean subtropical high ridge line, and the black line represents the mean subtropical high ridge line in anomalous years. Shaded areas in (c) represent meridional wind anomalies, and the black lines represent the meridional winds

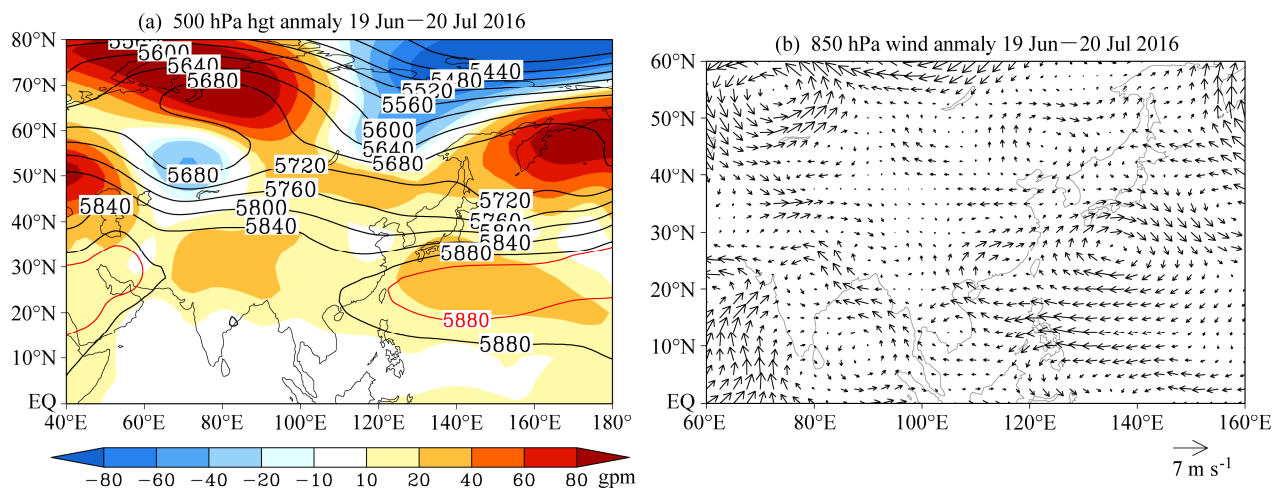


图8 2016 年梅雨期间平均大气环流距平: (a) 500 hPa 位势高度场 (等值线, 单位: gpm) 及其距平 (阴影区), 红色等值线表示气候平均的 5860 和 5880 gpm 等值线; (b) 850 hPa 距平风场 (单位: m s^{-1})

Fig. 8 Averaged atmospheric circulation anomalies during Meiyu period of 2016: (a) 500 hPa geopotential height (contours, units: gpm) and its anomalies (shading), red contours stand for the climatological 5860 and 5880 gpm contours; (b) 850 hPa wind anomalies (units: m s^{-1})

2016)。

El Niño 事件一般在秋、冬季达到峰值, 春季衰减, 到了夏季发生位相转换, 而 IOBW 常在冬季开始发展, 第二年春季达到最强。El Niño 发展年的秋、冬季, 东亚副热带地区会通过 Rossby 波遥相关作用在菲律宾附近激发异常反气旋环流, 它是 El Niño 影响东亚天气、气候的重要因素。但在 El Niño 衰减年的夏季, 由于赤道中东太平洋异常暖水已经减弱, 此时菲律宾附近异常反气旋环流和副高偏强的

维持主要是 IOBW 持续正位相滞后响应的结果。众多研究也表明, IOBW 是对 El Niño 事件的滞后响应, 它在维持 El Niño 对东亚天气、气候的影响中起到重要的“接力”作用 (Yang et al, 2007; Xie et al, 2009; 陈丽娟等, 2013; 黄刚等, 2016; 袁媛等, 2017)。由图 10 可见, 2016 年 6 月 Niño3.4 指数已经转为负值, 并在 7~8 月负指数持续扩大, 赤道中、东太平洋已经转为冷海温; 而 IOBW 在春、夏季一直维持较强的正位相。

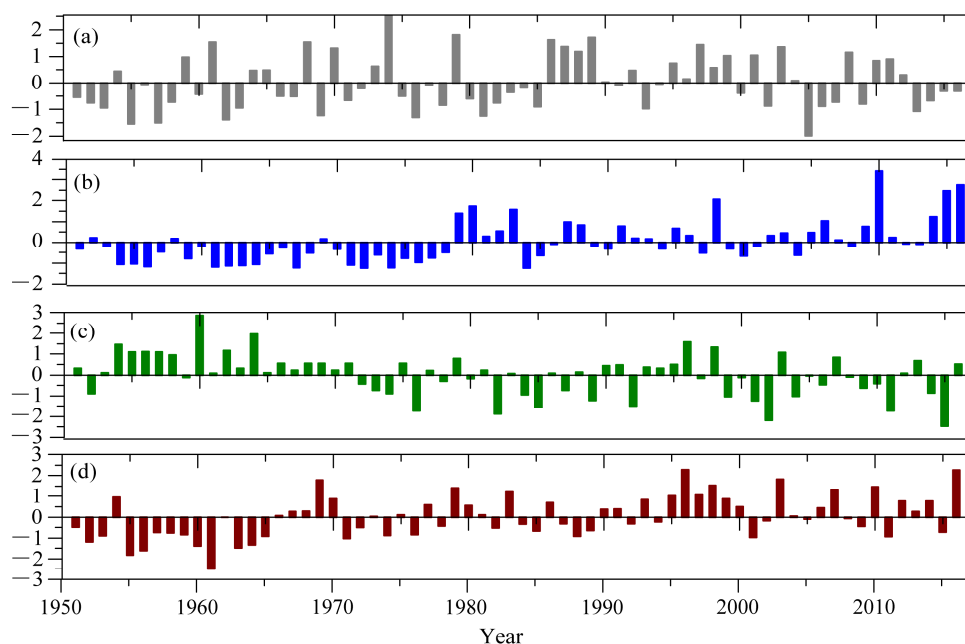


图 9 1951~2016 年环流和水汽输送指数标准化时间序列: (a) 6~7 月东亚经向环流指数; (b) 6~7 月西太平洋副热带高压强度指数; (c) 6 月 19 日至 7 月 20 日经过长江中下游地区南边界的水汽通量; (d) 6 月 19 日至 7 月 20 日长江中下游地区水汽净收支

Fig. 9 Time series of atmospheric circulation and moisture transport index anomalies from 1951 to 2016: (a) Asian meridional circulation index in June–July; (b) intensity index of the western Pacific subtropical high (WPSH) in June–July; (c) moisture budget along the southern boundary of the middle and lower reaches of the Yangtze River (MLYR) from 19 June to 20 July; (d) moisture budget over the MLYRB from 19 June to 20 July

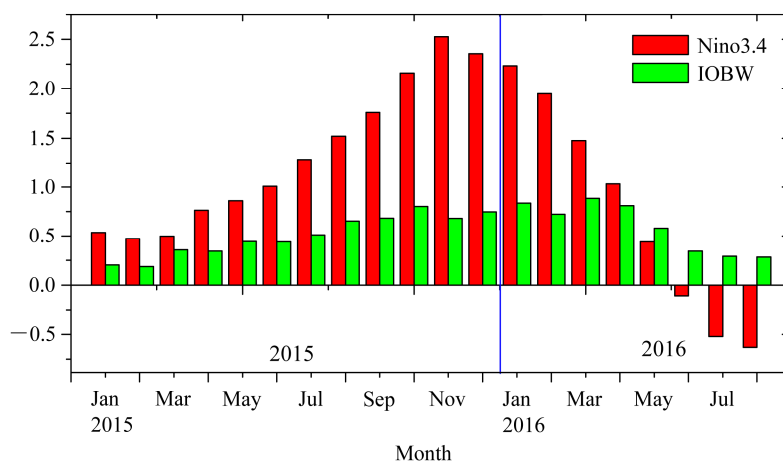


图 10 2015 年 1 月至 2016 年 8 月 Niño3.4 指数和 IOBW 指数

Fig. 10 Time series of Niño3.4 index and the Indian Ocean Basin-Wide mode (IOBW) index from January 2015 to August 2016

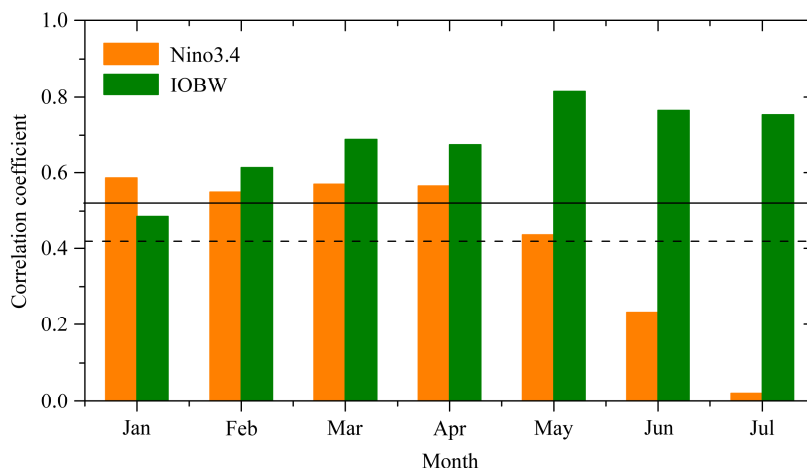


图 11 1981~2015 年 1~7 月逐月 Niño3.4 指数和 IOBW 指数与 6~7 月平均的副高强度指数的相关系数 (实线和虚线分别表示置信水平达到 99.9% 和 99%)

Fig. 11 Correlation coefficients of intensity index of WPSH averaged in June–July with monthly (from January to July) Niño3.4 index and IOBW index during 1981–2015, respectively (the solid line and dotted line indicate values at the 99.9% and 99% confidence levels, respectively)

从 1~7 月各月 Niño3.4 指数和 IOBW 指数与 6~7 月平均的副高强度指数的相关系数变化 (图 11) 可以清楚地看出, 1~4 月逐月 Niño3.4 指数与 6~7 月平均的副高强度指数呈显著的正相关, 置信水平达到 99.9%, 6 月的相关系数小于 0.01 信度的临界值, 7 月的相关系数接近 0, 表明赤道中东太平洋海温对副高强度的影响是逐步减弱的。2~7 月 IOBW 指数与 6~7 月平均的副高强度指数呈显著的正相关, 置信水平平均达到 99.9%, 其中 5~7 月的相关系数分别高达 0.82、0.77 和 0.75, 表明印度洋海温对于副高强度的影响是显著且持续加强的。这也进一步证明了, 2016 年夏季梅雨期副高的异常偏强在很大程度上是 IOBW 暖海温持续造成的。

此外, 除 2016 年外, 1983 年和 1998 年夏季也处于超强 El Niño 事件的衰减年, 这两年春季印度洋也异常偏暖, IOBW 指数分别位列 1951 年以来的第 11 位和第 2 位; 6~7 月副高强度也异常偏强, 分别位列第 6 位和第 4 位; 导致这两年长江区梅雨期异常偏长, 梅雨量异常偏多。

5 结论和讨论

梅雨是中国东部雨季进程中最重要的一個过程, 梅雨的异常会给我国长江中下游地区带来严重的旱涝灾害。本文利用国家气候中心 2014 年发布的新的梅雨监测资料和 NCEP 再分析资料, 对 2016 年我国梅雨异常特征及其大尺度环流成因进行了分析。具体结论如下:

(1) 2016 年我国梅雨有明显的区域特征, 其中江南区入梅异常偏早, 出梅异常偏晚, 梅雨期异常偏长; 梅雨量偏多, 但由于梅雨期偏长, 导致梅雨期日平均降水量偏小; 长江区入梅和出梅均偏晚, 梅雨期接近常年, 但梅雨量偏多一倍多, 梅雨期日平均降水量异常偏多; 江淮区入梅、出梅及梅雨期接近常年, 但梅雨量偏多。2016 年梅雨期降水时空分布不均匀, 长江区梅雨最强, 江南区和江淮区相对偏弱一些, 属于长江区型梅雨; 7 月 1~7 日长江区和江淮区梅雨量持续偏多, 累积雨量接近常年梅雨期平均的总梅雨量。

(2) 对流层高、中、低层环流系统冬夏季季节性调整和转变显著提前的共同作用, 导致了 2016 年江南区入梅显著偏早, 即 5 月 25 日, 对流层高层的西风急流加强北跳、中层西太平洋副热带高压也加强北跳过 18°N。同时, 低层东亚夏季风开始明显加强和北推, 北推至 26°N 以北, 给江南地区带来了充沛的水汽; 西风急流、副高和东亚夏季风涌在 7 月中旬阶段性地南落导致了江南区和长江区出梅偏晚。

(3) 受到前冬超强 El Niño 衰减和春、夏季 IOBW 暖海温持续偏暖的共同影响, 梅雨期副高异常偏强, 副高西南侧转向的水汽输送异常偏强; 欧亚中高纬度呈“两槽两脊”型, 鄂霍次克海为较强的高压脊控制, 冷空气路径偏东, 北方弱冷空气与南方充沛的水汽输送于长江区和江淮区辐合, 造成梅雨量异常偏多。

综上所述,入梅早晚与东亚大气环流系统由冬季向夏季转换的早晚和快慢密切相关,在入梅的中期预报中,需要密切关注东亚副热带西风急流和副高第一次北跳,及越赤道气流爆发和东亚夏季风推进的早晚,并从历史资料和模式预报中提取影响以上环流系统的外强迫信号。梅雨量的多寡则主要与中高纬度环流和低纬副热带环流系统是否能达到较好的配置及稳定维持有关,来自中高纬度的冷空气强度和路径、来自副热带系统携带的水汽输送的强弱,直接影响到梅雨量的多寡和强度,而副热带环流系统的异常则主要受到前期至同期赤道中、东太平洋和印度洋等关键区域海温外强迫异常的调控。本文从大尺度环流系统异常演变、及前期至同期海温外强迫作用的角度入手,分析了 2016 年我国梅雨的异常特征及其原因,以提高对梅雨的科学认识和预报水平。

参考文献 (References)

- 曹艳察, 张涛. 2016. 2016 年 6 月大气环流和天气分析 [J]. 气象, 42 (9): 1154–1160. Cao Yancha, Zhang Tao. 2016. Analysis of the June 2016 atmospheric circulation and weather [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 42 (9): 1154–1160, doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2016.09.013.
- 陈丽娟, 袁媛, 杨明珠, 等. 2013. 海温异常对东亚夏季风影响机理的研究进展 [J]. 应用气象学报, 24 (5): 521–532. Chen Lijuan, Yuan Yuan, Yang Mingzhu, et al. 2013. A review of physical mechanisms of the global SSTA impact on EASM [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 24 (5): 521–532, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2013.05.002.
- 陈丽娟, 顾薇, 丁婷, 等. 2016. 2015 年汛期气候预测先兆信号的综合分析 [J]. 气象, 42 (4): 496–506. Chen Lijuan, Gu Wei, Ding Ting, et al. 2016. Overview of the precursory signals of seasonal climate prediction in summer 2015 [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 42 (4): 496–506, doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2016.04.014.
- 翟盘茂, 余荣, 郭艳君, 等. 2016. 2015/2016 年强厄尔尼诺过程及其对全球和中国气候的主要影响 [J]. 气象学报, 74 (3): 309–321. Zhai Panmao, Yu Rong, Guo Yanjun, et al. 2016. The strong El Niño in 2015/2016 and its dominant impacts on global and China's climate [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 74 (3): 309–321, doi:10.11676/qxxb2016.049.
- 丁一汇. 2005. 高等天气学 [M]. 2 版. 北京: 气象出版社, 585pp. Ding Yihui. 2005. Advanced Synoptic Meteorology (in Chinese) [M]. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press, 585pp.
- 丁一汇, 柳俊杰, 孙颖, 等. 2007. 东亚梅雨系统的天气—气候学研究 [J]. 大气科学, 31 (6): 1082–1101. Ding Yihui, Liu Junjie, Sun Ying, et al. 2007. A study of the synoptic-climatology of the Meiyu system in East Asia [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (6): 1082–1101, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2007.06.05.
- 封国林, 杨涵涌, 张世轩, 等. 2012. 2011 年春末夏初长江中下游地区旱涝急转成因初探 [J]. 大气科学, 36 (5): 1009–1026. Feng Guolin, Yang Hanwei, Zhang Shixuan, et al. 2012. A preliminary research on the reason of a sharp turn from drought to flood in the middle and lower reaches of the Yangtze River in late spring and early summer of 2011 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (5): 1009–1026, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11220.
- 封国林, 赵俊虎, 杨杰, 等. 2015. 中国汛期降水动力—统计预测研究 [M]. 北京: 科学出版社, 1–330. Feng Guolin, Zhao Junhu, Yang Jie, et al. 2015. The Study on Dynamical and Statistical Prediction on Summer Precipitation over China (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 1–330.
- Gu W, Li C Y, Wang X, et al. 2009. Linkage between Mei-yu precipitation and North Atlantic SST on the decadal timescale [J]. Adv. Atmos. Sci., 26 (1): 101–108, doi:10.1007/s00376-009-0101-5.
- 胡娅敏, 丁一汇. 2009. 2000 年以来江淮梅雨带北移的可能成因分析 [J]. 气象, 35 (12): 37–43. Hu Yamin, Ding Yihui. 2009. Possible reasons for northward shift of Meiyu belt in Yangtze Huaihe River region during 2000–2005 [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 35 (12): 37–43, doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2009.12.005.
- 胡娅敏, 丁一汇, 廖菲. 2008. 江淮地区梅雨的新定义及其气候特征 [J]. 大气科学, 32 (1): 101–112. Hu Yamin, Ding Yihui, Liao Fei. 2008. A study of updated definition and climatological characters of Meiyu season in the Yangtze–Huaihe region [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (1): 101–112, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.01.09.
- 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 Gang, Hu Kaiming, Qu Xia, 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.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77 (3): 437–471, doi:10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2.
- 况雪源, 张耀存. 2006. 东亚副热带西风急流位置异常对长江中下游夏季降水的影响 [J]. 高原气象, 25 (3): 382–389. Kuang Xueyuan, Zhang Yaocun. 2006. Impact of the position abnormalities of East Asian subtropical westerly jet on summer precipitation in middle–lower reaches of Yangtze River [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 25 (3): 382–389, doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2006.03.004.
- 李维京. 1999. 1998 年大气环流异常及其对中国气候异常的影响 [J]. 气象, 25 (4): 20–25. Li Weijing. 1999. General atmospheric circulation anomaly in 1998 and their impact on climate anomaly in China [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 25 (4): 20–25, doi:10.3969/j.issn.1000-0526.1999.04.004.
- 梁萍, 汤绪, 柯晓新, 等. 2007. 中国梅雨影响因子的研究综述 [J]. 气象科学, 27 (4): 464–471. Liang Ping, Tang Xu, Ke Xiaoxin, et al. 2007. Review of study on influencing factors of China Meiyu [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 27 (4): 464–471, doi:10.3969/j.issn.1009-0827.2007.04.018.
- 梁萍, 丁一汇, 何金海, 等. 2010. 江淮区域梅雨的划分指标研究 [J]. 大气科学, 34 (2): 418–428. Liang Ping, Ding Yihui, He Jinhai, et al. 2010. A study of determination index of regional Meiyu over the Yangtze–Huaihe basin [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (2): 418–428, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.02.15.
- Min Q Y, Su J Z, Zhang R H, et al. 2015. What hindered the El Niño pattern

- in 2014 [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 42 (16): 6762–6770, doi:10.1002/2015GL064899.
- 牛若芸, 金荣花. 2009. 2008 年梅雨异常大尺度环流成因分析 [J]. *高原气象*, 28 (6): 1326–1334. Niu Ruoyun, Jin Ronghua. 2009. Causes analysis of large scale circulation of abnormal characteristic in Meiyu period of 2008 [J]. *Plateau Meteor. (in Chinese)*, 28 (6): 1326–1334.
- 权婉晴, 何立富. 2016. 2016 年 7 月大气环流和天气分析 [J]. *气象*, 42 (10): 1283–1288. Quan Wanqing, He Lifu. 2016. Analysis of the July 2016 atmospheric circulation and weather [J]. *Meteor. Mon. (in Chinese)*, 42 (10): 1283–1288, doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2016.10.014.
- Sampe T, Xie S P. 2010. Large-scale dynamics of the Meiyu-Baiu rainband: Environmental forcing by the westerly jet [J]. *J. Climate*, 23 (1): 113–134, doi:10.1175/2009JCLI13128.1.
- 邵颢, 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. Shao Xie, Zhou Bing. 2016. Monitoring and diagnosis of the 2015/2016 super El Niño event [J]. *Meteor. Mon. (in Chinese)*, 42 (5): 540–547, doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2016.05.003.
- 施能, 朱乾根, 吴彬贵. 1996. 近 40 年东亚夏季风及我国夏季大尺度天气气候异常 [J]. *大气科学*, 20 (5): 575–583. Shi Neng, Zhu Qian'gen, Wu Bingui. 1996. The East Asian summer monsoon in relation to summer large scale weather–climate anomaly in China for last 40 years [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese)*, 20 (5): 575–583, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1996.05.08.
- 陶诗言, 赵煜佳, 陈晓敏. 1958. 东亚的梅雨期与亚洲上空大气环流季节变化的关系 [J]. *气象学报*, 29 (2): 119–134. Tao Shiyan, Zhao Yujia, Chen Xiaomin. 1958. The relationship between May-Yü in Far East and the behaviour of circulation over Asia [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 29 (2): 110–134, doi:10.11676/qxb1958.014.
- 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 Shiyan, Wei Jie. 2006. The westward, northward advance of the subtropical high over the West Pacific in summer [J]. *J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese)*, 17 (5): 513–525, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2006.05.001.
- 陶诗言, 朱文妹, 赵卫. 1988. 论梅雨的年际变异 [J]. *大气科学*, 12 (S): 13–21. Tao Shiyan, Zhu Wenmei, Zhao Wei. 1988. Interannual variability of Meiyu rainfalls [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese)*, 12 (S): 13–21, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1988.t1.02.
- Tao S Y, Chen L X. 1987. A review of recent research on the East Asian summer monsoon in China [M]//Chang C P, Krishnamurti T N. *Monsoon Meteorology*. New York: Oxford University Press, 60–92.
- 汪靖, 刘宣飞, 韩桂荣, 等. 2006. 2005 年江淮流域入梅偏晚的成因分析 [J]. *气象*, 32 (12): 76–81. Wang Jing, Liu Xuanfei, Han Guirong, et al. 2006. Causality analysis of late Meiyu over the Changjiang and Huaihe River basins in 2005 [J]. *Meteor. Mon. (in Chinese)*, 32 (12): 76–81, doi:10.3969/j.issn.1000-0526.2006.12.013.
- 王遵娅, 丁一汇. 2008. 中国雨季的气候学特征 [J]. *大气科学*, 32 (1): 1–13. Wang Zunya, Ding Yihui. 2008. Climatic characteristics of rainy seasons in China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (1): 1–13, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.01.01.
- 魏凤英, 宋巧云. 2005. 全球海表温度年代际尺度的空间分布及其对长江中下游梅雨的影响 [J]. *气象学报*, 63 (4): 477–484. Wei Fengying, Song Qiaoyun. 2005. Spatial distribution of the global sea surface temperature with interdecadal scale and their potential influence on Meiyu in middle and lower reaches of Yangtze River [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 63 (4): 477–484, doi:10.11676/qxb2005.047.
- 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, doi:10.1175/2008JCLI2544.1.
- Yang J L, Liu Q Y, Xie S P, et al. 2007. Impact of the Indian Ocean SST basin mode on the Asian summer monsoon [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34 (2): L02708, doi:10.1029/2006GL028571.
- 杨莲梅, 张庆云. 2007. 夏季东亚西风急流 Rossby 波扰动异常与中国降水 [J]. *大气科学*, 31 (4): 586–595. Yang Lianmei, Zhang Qingyun. 2007. Anomalous perturbation kinetic energy of Rossby wave along East Asian westerly jet and its association with summer rainfall in China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 31 (4): 586–595, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2007.04.04.
- Ye T S, Zhi R, Zhao J H, et al. 2014. The two annual northward jumps of the West Pacific subtropical high and their relationship with summer rainfall in eastern China under global warming [J]. *Chin. Phys. B*, 23 (6): 069203, doi:10.1088/1674-1056/23/6/069203.
- 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. Yuan Yuan, Gao Hui, Jia Xiaolong, et al. 2016. Influences of the 2014–2016 super El Niño event on climate [J]. *Meteor. Mon. (in Chinese)*, 42 (5): 532–539, doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2016.05.002.
- 袁媛, 高辉, 柳艳菊. 2017. 2016 年夏季我国东部降水异常特征及成因简析 [J]. *气象*, 43 (1): 115–121. Yuan Yuan, Gao Hui, Liu Yanju. 2017. Analysis of the characteristics and causes of precipitation anomalies over eastern China in the summer of 2016 [J]. *Meteor. Mon. (in Chinese)*, 43 (1): 115–121, doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2017.01.013.
- 张庆云, 陶诗言. 1999. 夏季西太平洋副热带高压北跳及异常的研究 [J]. *气象学报*, 57 (5): 539–548. Zhang Qingyun, Tao Shiyan. 1999. The study of the sudden northward jump of the subtropical high over the western Pacific [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 57 (5): 539–548, doi:10.11676/qxb1999.052.
- 赵俊虎, 封国林, 王启光, 等. 2011. 2010 年我国夏季降水异常气候成因分析及预测 [J]. *大气科学*, 35 (6): 1069–1078. Zhao Junhu, Feng Guolin, Wang Qiguang, et al. 2011. Cause and prediction of summer rainfall anomaly distribution in China in 2010 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 35 (6): 1069–1078, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.06.07.
- 赵俊虎, 封国林, 杨杰, 等. 2012. 夏季西太平洋副热带高压的不同类型与中国汛期大尺度旱涝的分布 [J]. *气象学报*, 70 (5): 1021–1031. Zhao Junhu, Feng Guolin, Yang Jie, et al. 2012. Analysis of the distribution of large-scale drought/flood of summer in China under different types of western Pacific subtropical high [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 70 (5): 1021–1031, doi:10.11676/qxb2012.085.
- 周兵, 文继芬. 2007. 1998 年夏季我国东部降水与大气环流异常及其低频特征 [J]. *应用气象学报*, 18 (2): 129–136. Zhou Bing, Wen Jifen. 2007. Abnormality of summertime precipitation of eastern China and general circulation with LFO in 1998 [J]. *J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese)*, 18(2): 129–136, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2007.02.001.