

刘芸芸,丁一汇,2020. 2020 年超强梅雨特征及其成因分析[J]. 气象,46(11):1393-1404. Liu Y Y, Ding Y H, 2020. Characteristics and possible causes for the extreme Meiyu in 2020[J]. Meteor Mon, 46(11):1393-1404(in Chinese).

2020 年超强梅雨特征及其成因分析^{*}

刘芸芸^{1,2} 丁一汇¹

1 国家气候中心,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

提 要: 2020 年梅雨呈现出入梅早、出梅晚、梅雨期长、雨区范围广、累计雨量大、强降水过程多的特点,是一次典型的超强梅雨。分析发现,梅雨期东亚季风区多个关键大气环流系统的平均位置相对稳定,且表现出显著的准双周振荡特征。梅雨的开始和结束、主雨带的北抬和停滞、强降水过程的发生维持都与准双周振荡有很好的对应关系。梅雨期间西太平洋副热带高压共经历了 6 次北抬和南撤的周期性振荡,同时高、低层季风环流系统则表现出 5 次显著增强的过程,尤其是低空西南急流的不断加强,南风大值中心反复建立和位置的相对稳定,使得源自热带的水汽输送一次次加强,水汽辐合与上升运动反复发展,从而导致梅雨在江淮流域长时间持续,暴雨过程频频发生。另外,梅雨期欧亚中高纬环流表现为“两脊一槽”型,中高纬阻塞高压活动频繁,东亚沿岸低槽活跃,经西北路径和(或)东北路径的冷空气不断南下,与低层一次次加强的西南暖湿水汽在江淮区域频繁交汇,这是造成今年梅雨异常偏强的另一重要因素。通过对历史上梅雨的时空分布、雨涝特征及致灾程度等方面的比较可知,2020 年的超强梅雨的异常程度总体弱于 1954 年,而强于 1998 年和 1991 年。得益于现今气候预测准确率和防灾减灾能力的明显提高,今年由此次超强梅雨而造成的江淮流域洪涝灾害影响及死亡失踪人数等均较之前明显降低。

关键词: 超强梅雨,西太平洋副热带高压,准双周振荡,东亚高空西风急流,低空西南急流,阻塞高压

中图分类号: P466

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.11.001

Characteristics and Possible Causes for the Extreme Meiyu in 2020

LIU Yunyun^{1,2} DING Yihui¹

1 National Climate Centre, Beijing 100081

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

Abstract: The extreme Meiyu in 2020 was featured with earlier onset, later retreat, longer duration of rainy season, wider rainfall range, abundant accumulated rainfall, and more severe rainfall processes than normal. Through the analysis of simultaneous atmospheric circulation systems, we have found that the average locations of the key East Asian monsoon circulation systems were relatively stable, with significant characteristic of quasi-biweekly oscillation (QBWO) in the Meiyu season of 2020. The onset and retreat of Meiyu, the northward shift and stagnation of the rainfall belt, and the occurrence and persistence of severe rainstorm processes had a good relationship with the QBWO. During the Meiyu season, the western Pacific subtropical high experienced six periodic oscillations of northward migration and southward retreat. Meanwhile, the upper- and low-level monsoon circulation systems strengthened for five times corresponding with the QBWO in the Meiyu season. Especially, the strengthening of the southwesterly low-level jet,

^{*} 国家重点研发计划(2018YFC1505806)、第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0208)、中国科学院战略性先导科技专项(XDA20100304)、国家自然科学基金项目(41790471)和中国气象局预报员专项(CMAYBY2020-164)共同资助

2020 年 8 月 8 日收稿; 2020 年 10 月 1 日收修定稿

第一作者: 刘芸芸, 主要从事短期气候预测研究. E-mail: liuyunyun@cma.gov.cn

通讯作者: 丁一汇, 主要从事天气、气候和数值天气预报研究. E-mail: dingyh@cma.gov.cn

add the repeated establishment of the large-value centers of southerly with relatively consistent latitude made the water vapor transport from the tropics strengthened again and again, and the water vapor convergence and upward movement developed repeatedly, leading to the long-term persistence of Meiyu in the Yangtze-Huaihe River Valley (YHRV) and frequent occurrences of rainstorms. On the other hand, two blocking highs maintained in the mid- and high latitudes, which was characterized by the spatial pattern of “two ridges and one trough” over Eurasia, and the low trough along the East Asian coast was also active. The cold air flew continuously southward through the northwestern and/or northeastern paths, frequently merging with the repeatedly strengthened warm moisture from the low latitude over the YHRV. So, this is another important factor causing the extreme Meiyu in 2020. Moreover, by comparing the spatio-temporal distribution of Meiyu and the corresponding flood disaster in 2020 with other super Meiyu years since 1951, we have also found that the Meiyu in 2020 was weaker than that of 1954, but stronger than that of 1998 and 1991. Thanks to the improvement of both the accuracy of climate prediction and the ability of disaster prevention and mitigation, the flood and disaster losses caused by the 2020 extreme Meiyu in the YHRV were significantly less than before.

Key words: extreme Meiyu, Western Pacific subtropical high (WPSH), quasi-biweekly oscillation (QBWO), East Asian upper-level westerly jet stream, low-level southwesterly jet, blocking high

引 言

梅雨是东亚夏季风季节进程中特有的雨季。5月中旬东亚夏季风首先在南海爆发,随后向北推进,季风雨带相继在华南、台湾、江淮流域、日本以及朝鲜半岛建立(Ding, 1992; 2004; Qian and Lee, 2000; 丁一汇等, 2007)。不同的国家对发生在东亚初夏的季节性雨期有不同的叫法。在中国,“梅雨”用来指从6月中旬到7月中旬江淮流域的雨季(Tao and Chen, 1987)。在日本称之为 Baiu (Ninomiya and Murakami, 1987; Saito, 1995), 而韩国称之为 Changma (Oh et al, 1997)。每年汛期, 出入梅时间、梅雨量及梅汛期暴雨过程等都是预报中关注和研究的重点, 由于对流层高、中、低层多个大尺度环流系统对梅雨产生直接或间接影响, 每年影响梅雨的主导因素不尽相同, 从而导致各年入出梅早晚、梅雨期长短、梅雨量多寡、梅雨雨型分布等差异显著。准确预测梅雨开始和结束的时间及梅雨量, 对国家防汛减灾有着非常重要的指导意义。

东亚夏季风的异常活动伴随着东亚季风系统成员的偏南或偏北, 将显著影响江淮流域的入出梅时间及梅雨持续天数, 进而引起江淮流域的干旱或洪涝(丁一汇等, 2007)。陶诗言等(1958)系统地研究了梅雨与亚洲上空大尺度环流在气候上的关系, 指出亚洲高空南支西风急流的两次北跳过程与梅雨期

的开始和结束密切相关。李崇银等(2004)指出, 东亚高空急流在6月的北跳是梅雨开始的前期征兆。丁一汇等(2007)认为, 当6月中旬东亚夏季风突然从华南向北推进到长江流域, 同时印度夏季风开始在印度次大陆爆发时, 中国梅雨雨季开始。作为东亚季风系统成员之一的西太平洋副热带高压(以下简称西太副高)对梅雨有着极其重要的作用, 它的位置和强度变动以及由此而带来的夏季风的强弱变化是长江流域旱涝的最主要原因(Tao and Chen, 1987; 刘芸芸等, 2012; 蒋薇和高辉, 2013; 刘芸芸和陈丽娟, 2019; 丁婷和高辉, 2020)。

江淮流域夏季降水具有明显的季节内振荡和准双周振荡的特征(陆尔和丁一汇, 1996; 毛江玉和吴国雄, 2005; 尹志聪等, 2012), 尤其在梅雨偏多年的准双周振荡较梅雨偏少年显著(夏芸, 2007)。大气准双周振荡(quasi-biweekly oscillation, QBWO)主要是时间尺度为10~20 d的振荡, 它是大气中重要的低频系统之一, 是在研究季风天气及其相联系的季风系统时被发现的(Vincent et al, 1998)。事实上, 东亚夏季风区多种气象变量都具有准双周振荡特征(杨双艳等, 2015), 丁一汇(1993)还指出, 不仅在季风区, 中高纬地区的冷空气活动也具有准双周振荡特征。大气环流的这些周期性振荡信号会对江淮流域梅雨的开始及梅雨期强降水过程的发生造成显著影响(李崇银, 1991)。

2020年夏季江淮流域经历了一次超长梅雨季,

入梅偏早,出梅偏晚,梅雨量异常偏多(陈涛等,2020)。梅汛期经历了多次强降水过程(张芳华等,2020),雨量多,强度大,被媒体戏称为“暴力梅”。6—7月,南方强降雨频繁来袭,长江流域累计降雨量超过1998年同期水平,持续的暴雨给长江中下游地区带来严重的洪涝灾害。是什么原因导致今年梅雨不仅持续时间长,而且雨量异常偏多?这是值得深入研究的一个重要科学问题。为此,本文从观测事实出发,分析总结了2020年超强梅雨的气候异常特征及其可能成因。另外,我们还从梅雨的时空分布、雨涝特征及致灾程度等方面与20世纪以来的几个典型梅雨异常偏多年进行了对比,旨在为今后这类梅雨年的成因诊断和预测提供有用的参考信息。

1 资料和方法

本文所用资料包括:(1)国家气象信息中心提供的全国2400站逐日20时(北京时)降水量观测资料;(2)美国国家环境预报中心的大气再分析资料(NCEP/NCAR),水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ (Kalnay et al, 1996);(3)国家气候中心提供的1951—2020年的梅雨基本监测数据,包括入出梅时间,梅雨期长度和梅雨量。所有变量的气候态(常年)均为1981—2010年的平均,距平场去除的都是气候态的平均。文中提取准双周振荡分量采用的是二阶Butterworth带通滤波器(吴洪宝和吴蕾,2010),该方法分离变量场不同尺度信号的常用方法。

我国梅雨主要分布在江淮流域,按照《梅雨监测指标》国家标准(GB/T 33671—2017;中国气象局,2017),梅雨监测区为西自湖北宜昌,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,其范围为 $28^{\circ} \sim 34^{\circ}\text{N}$ 、 $110^{\circ} \sim 122.5^{\circ}\text{E}$ 。按照气候类型又将监测区域分为江南区、长江中下游区(以下简称长江区)、江淮区,确定区域入(出)梅的主要依据是区域内各监测站的降水条件和关键环流指标的变化,具体可参考《梅雨监测指标》(中国气象局,2017)。

2 2020年梅雨期降水时空特征

表1给出了2020年梅雨各个特征量的基本监测信息。江南区6月1日入梅,7月11日出梅,梅雨期为40 d,较常年偏长10 d,区域平均的梅雨量为615.6 mm,较常年偏多68.5%(图1a)。长江区6月9日入梅,较常年偏早5 d,7月31日出梅,梅雨期长达52 d,较常年(29 d)显著偏长,为1951年以来第七长年。梅雨期平均总雨量为753.9 mm,较常年偏多153.2%,为仅次于1954年的第二多年(图1b)。江淮区6月10日入梅,较常年偏早11 d,8月2日出梅,梅雨期长达53 d,与1974年并列第一长年。梅雨期平均总雨量为659 mm,较常年偏多149.2%,为仅次于1991年的第二多年(图1c)。

图2为2020年梅雨期累计降水量及距平百分率的空间分布。可以看到,梅雨监测区降水量普遍达600 mm以上,其中长江中下游沿江区域超过800 mm,局地甚至超过1400 mm(图2a)。其中湖北、安徽降水量均为历史同期最多,江苏、上海和浙江为历史同期第二;安徽黄山单站累计降水量达1720 mm,祁门站为1667 mm,岳西站为1570 mm。江淮流域区域平均的累计降水量为759.2 mm,仅次于1954年的789.3 mm。降水偏多区域南北范围跨度广,3个梅雨监测区的降雨量均表现为显著

表 1 2020 年梅雨监测信息

Table 1 Observation information of the Meiyu season in 2020

区域	年份	入梅时间	出梅时间	梅雨期/d	梅雨量/mm
江南区	2020	6月1日 (-7 d)	7月11日 (+3 d)	40 (+10 d)	615.6 (68.5%)
	气候平均	6月8日	7月8日	30	365.4
长江区	2020	6月9日 (-5 d)	7月31日 (+18 d)	52 (+23 d)	753.9 (153.2%)
	气候平均	6月14日	7月13日	29	297.7
江淮区	2020	6月10日 (-11 d)	8月2日 (+18 d)	53 (+29 d)	659.0 (149.2%)
	气候平均	6月21日	7月15日	24	264.4

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)。

Note: The values in brackets refer to the anomaly or anomaly percentage, and the positive/negative days mean later/earlier onset and retreat of Meiyu than normal.

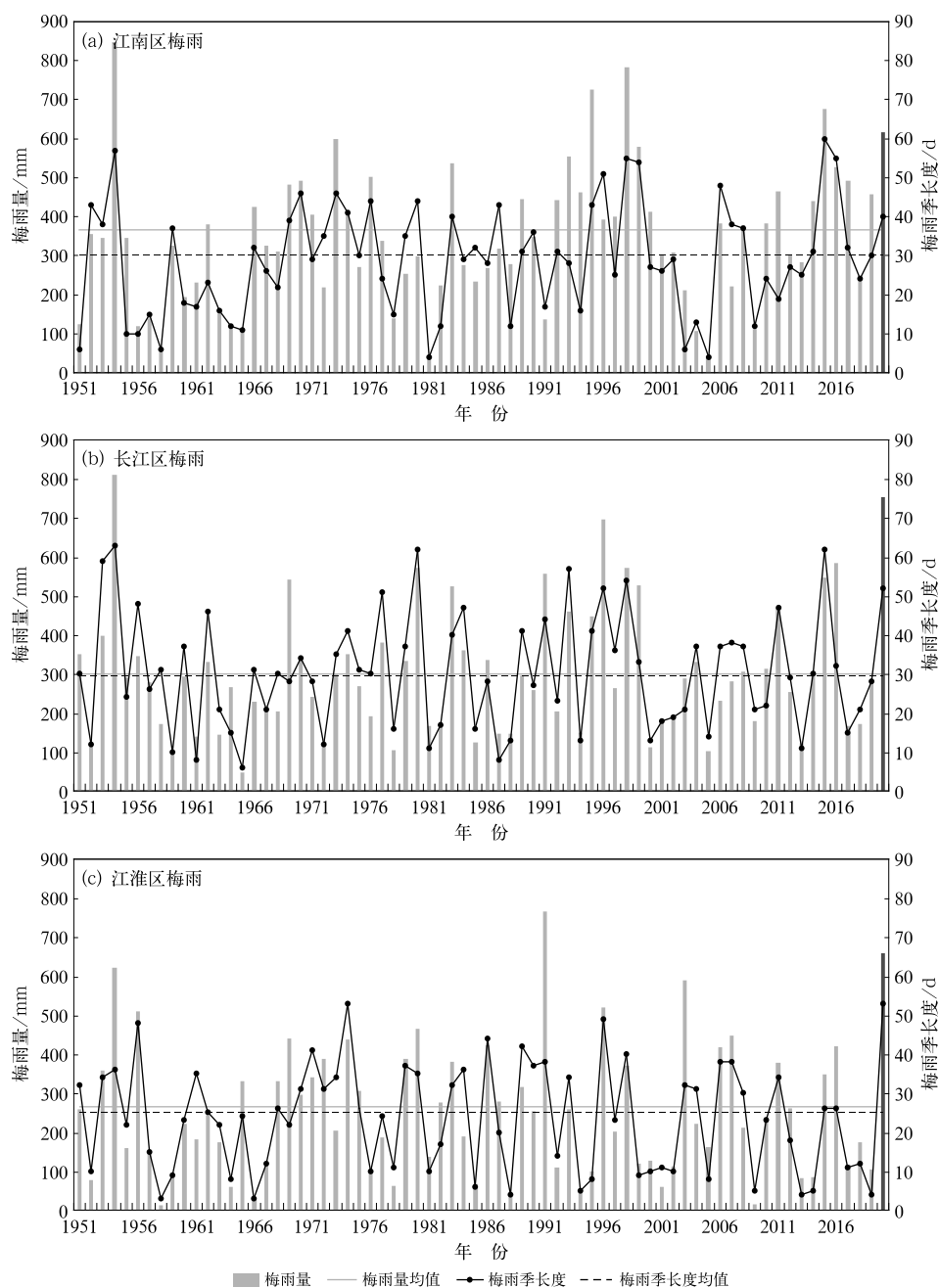


图 1 1951—2020 年(a)江南区,(b)长江区,(c)江淮区梅雨量和梅雨季长度的时间序列(深色柱状代表 2020 年)

Fig. 1 The accumulated rainfall and duration of the Meiyu season from 1951 to 2020

(a) Jiangnan Region, (b) the middle and lower reaches of Yangtze River Valley, (c) Huaihe River Valley
(Dark column denotes the year of 2020)

偏多, 包含江南中北部至江淮的大部分地区(图 2b)。从降水的时间-纬度剖面图(图 3)可以看到, 6 月上旬多雨带位置偏南, 强降水中心主要位于江南至华南北部, 6 月 9 日开始梅雨带快速北抬, 10—16 日北推至江淮到黄淮南部一带, 分别对应长江和江淮梅雨的开始。随后主雨带回落到长江中下

游区域, 并且长时间地稳定维持, 期间多雨带有小幅的南北摆动, 造成多雨带南北跨度范围宽。7 月 10 日前后雨带再次北抬, 江南梅雨结束。7 月下旬江淮流域降水强度明显减弱, 梅雨趋于结束。3 个梅雨监测区都多次出现较强的降水大值中心, 其中安徽合肥连续降水日数达 21 d, 江西安义连续降水日

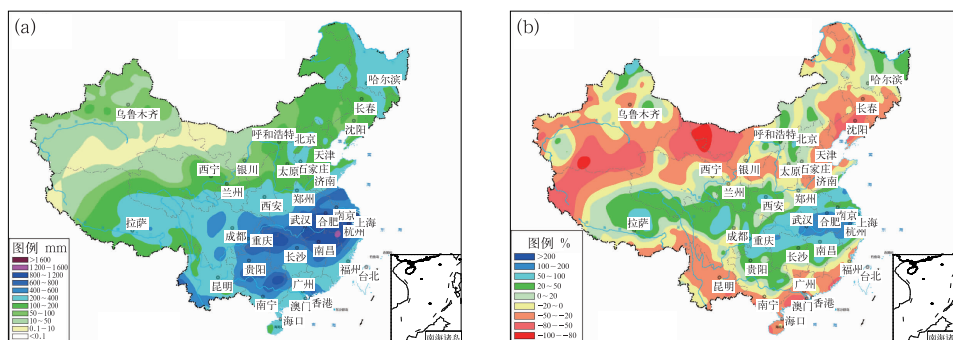


图 2 2020 年 6 月 1 日至 8 月 2 日梅雨期(a)累计降水量和(b)降水距平百分率的空间分布

Fig. 2 Distributions of (a) the accumulated rainfall and (b) corresponding rainfall anomaly percentage rate in the Meiyu season of 2020 from 1 June to 2 August 2020

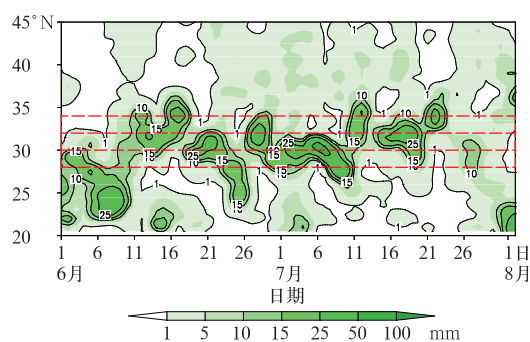


图 3 2020 年梅雨期沿 $110^{\circ}\sim 122.5^{\circ}\text{E}$ 平均的逐日降水量的时间-纬度剖面
[红色虚线代表梅雨监测区,从南至北分别代表江南区($28^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$),长江中下游区($30^{\circ}\sim 32^{\circ}\text{N}$)和江淮区($32^{\circ}\sim 34^{\circ}\text{N}$)]

Fig. 3 Time-latitude cross-section of daily rainfall along $110^{\circ}\sim 122.5^{\circ}\text{E}$ in the Meiyu season of 2020
[Red dashed lines indicate the three Meiyu subregions, including the Jiangnan Region ($28^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$), the middle and lower reaches of Yangtze River Valley ($30^{\circ}\sim 32^{\circ}\text{N}$), and the Huaihe River Valley ($32^{\circ}\sim 34^{\circ}\text{N}$)]

数达 25 d,均突破历史纪录(图略)。

总体来说,2020 年梅雨入梅偏早,出梅偏晚,梅雨期持续时间长,雨区范围广,梅雨量大,其中长江区和江淮区的累计降水量均排名第二,分别次于 1954 年和 1991 年,已超过 1998 年,因此可以说 2020 年的梅雨是一次典型的超强梅雨。那么,是怎样的大气环流系统配置和变化导致 2020 年出现如此超强的梅雨?下面将从大尺度环流的演变特征入手,着重分析东亚夏季风环流系统的准双周振荡与我国东部持续性强降水过程的关系,探讨造成今年梅雨如此异常的可能原因。

3 2020 年梅雨期降水异常成因分析

3.1 西太平洋副热带高压

我国东部夏季降水雨带分布与西太副高的南北位置有很好的对应关系(刘芸芸等,2012;Liu et al, 2019)。副高在 6 月中旬和 7 月中旬前后的两次显著北跳是梅雨开始和结束的标志(陶诗言和卫捷, 2006)。当副高脊线位于 $18^{\circ}\sim 26^{\circ}\text{N}$ 范围内,非常有利于江淮梅雨的发生和维持(牛若芸和金荣花, 2009;梁萍等,2010;胡景高等,2013)。2020 年梅雨期间西太副高表现出显著的准双周振荡的特征,共经历了 6 次北抬和南落的阶段性变化过程(图 4),而我国东部的主雨带位置和强降水过程均与副高脊线的准双周振荡表现出很好的对应关系。西太副高第一次北抬发生在 5 月 30 日前后,6 月 1 日副高脊线越过 18°N ,促使江南区入梅显著偏早。经过短暂的南落和停留后,西太副高于 6 月 8 日前后再次迅速北抬至 20°N 以北,促使长江区和江淮区分别于 6 月 9 日和 10 日入梅。副高的这两次阶段性北抬过程均较常年明显偏早,且准双周振荡的振幅明显偏强,这是直接导致今年入梅异常偏早的主要原因之一。

6 月 24 日副高开始第三次北抬,并于 6 月 25 日至 7 月 10 日期间稳定维持在 $20^{\circ}\sim 23^{\circ}\text{N}$,准双周振荡的振幅相对偏弱,为长江中下游沿江出现持续性强降水过程提供了非常有利的环流条件。7 月中旬,副高再次出现两次波动,对应江淮流域主雨带也发生南北跨度较大的摆动,强降水过程频繁,影响范围增大。直到 7 月 28—31 日,副高第六次明显北抬

至 26°N 以北,由于副高的准双周振幅再次加强,夏季主雨带移出江淮流域,持续近两个月的江淮流域梅雨趋于结束。

由上可见,西太副高南北位置的异常变化是导致 2020 年出现超强梅雨的一个关键环流因子。今年梅雨期间西太副高共经历了 6 次北抬和南撤的阶段性变化,表现出明显的准双周振荡特征,其周期性变化与梅雨的开始和结束、主雨带的北抬和停滞、强降水过程的发生维持都有很好的对应关系。

3.2 低层西南急流和水汽输送

来源于低纬度地区暖湿气流的向北输送是梅雨发生和维持的重要水汽条件(刘芸芸等,2006;He et al,2007)。2020 年梅雨期间南方低空西南急流活跃,与副高脊线的准双周振荡对应的,共出现了 5 次明显加强北伸的过程。随着西南急流的一次次加强,经向风大值中心北侧的南风经向强梯度带也相应一次次向北推进,而降水落区基本位于经向强梯度带中(图 5)。每一次南风大值中心的形成,并在其北侧建立经向风强梯度带,都为梅雨期间的暴雨过程提供了有利的低层动力条件,且降水强度与经向风梯度的强弱对应。另外,低空西南急流也是强水汽输送带,它不仅将自来阿拉伯海、孟加拉湾和南海的暖湿气流输送到我国南方,为梅雨的形成

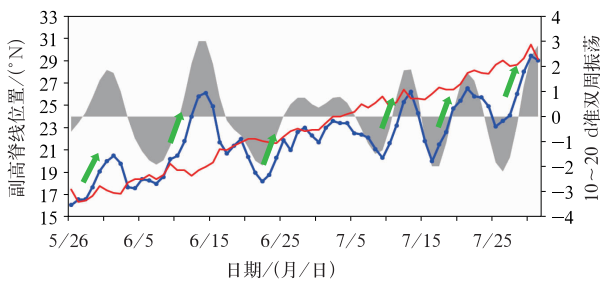


图 4 2020 年梅雨期 $110^{\circ}\sim 130^{\circ}\text{E}$ 副高脊线位置的逐日演变
(红线为气候平均值,绿色箭头代表副高的北抬过程,灰色阴影代表经 $10\sim 20\text{ d}$ 滤波后的准双周振荡分量)

Fig. 4 Daily variation of the ridgeline of the Western Pacific subtropical high along $110^{\circ}\sim 130^{\circ}\text{E}$ in the Meiyu season of 2020
(Red line denotes the climatic mean, and the green bold arrows represent the northward uplift of the subtropical high, grey shading is the quasi-biweekly oscillation component which is bass-filtered by $10\sim 20\text{ days}$)

提供必要的水汽条件和不稳定能量,而且西南急流北侧的南风经向强梯度带还促成了源自低纬地区的水汽在此区域的强烈辐合(图 5),上升运动发展,促使西南季风气流的不稳定能量释放,为梅雨的形成提供了必须的动力条件。西南急流的周期性不断加强、南风大值中心的反复建立和位置的相对稳定,使得低层水汽输送一次次加强、辐合上升运动反复发展,从而导致梅雨不仅在江淮流域长时间持续,并且期间暴雨过程也频频发生。

3.3 高空西风急流和南亚高压

南亚高压是梅雨天气系统的重要组成部分,入梅前南亚高压的突然大幅度北跳是入梅的一个前期信号(张庆云和陶诗言,1999),其北侧的高空西风急流的南北位置和强度变化与梅雨的关系显著。2020 年梅雨期东亚副热带高空急流和南亚高压与中低层环流系统变化较为一致,也经历了 5 次的加强北抬随后又减弱南撤的过程,但摆动幅度不大,位置相对稳定(图 6)。 $110^{\circ}\sim 122.5^{\circ}\text{E}$ 平均的高空西风急流轴和南亚高压脊线在 5 月下旬末和 6 月上旬末的两

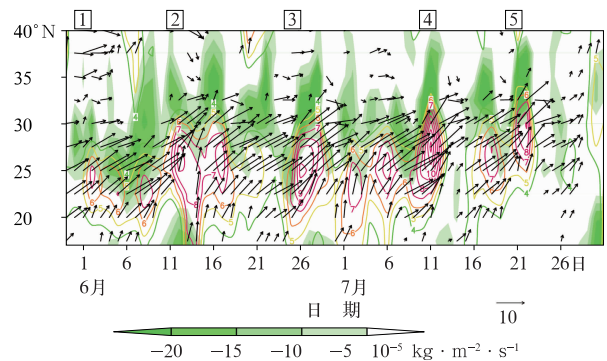


图 5 2020 年梅雨期 $110^{\circ}\sim 122.5^{\circ}\text{E}$ 平均的 850 hPa 经向风(等值线, $>1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)和矢量风(箭头,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)及整层水汽通量散度(填色)的时间-纬度剖面
(图片上方的数字表示 5 次低层南风大值中心的建立加强过程)
Fig. 5 Time-latitude cross-section of the 850 hPa meridional wind (contours, $>1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) and southwesterly wind (vectors, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) along $110^{\circ}\sim 122.5^{\circ}\text{E}$, and divergence of the vertically integrated water vapor transport from surface to 300 hPa (colored) in the Meiyu season of 2020
(The numbers at the top of figure indicate five establishment and strengthening processes of the low-level southerly centers)

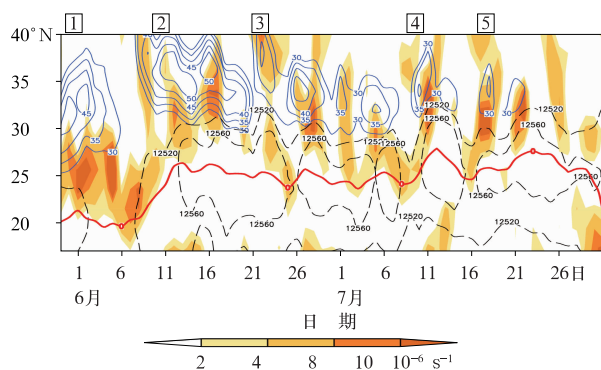


图 6 2020 年梅雨期 $110^{\circ}\sim 122.5^{\circ}\text{E}$ 平均的 200 hPa 位势高度场(黑色虚线,单位:gpm), 纬向风(蓝色细实线,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)和水平散度(填色)的时间-纬度剖面图(红色粗实线代表南亚高压脊线,图片上方的数字表示 5 次东亚高空西风急流的加强过程)

Fig. 6 Time-latitude cross-section of the geopotential height (black dashed lines, unit: gpm), zonal wind (thin blue solid lines, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), and horizontal divergence (colored) along $110^{\circ}\sim 122.5^{\circ}\text{E}$ at 200 hPa in the Meiyu season of 2020 (Red solid line is the ridgeline of South Asian high, the numbers at the top of figure indicate five strengthening processes of the East Asian upper-level westerly jet)

次加强北抬过程,对应着江南梅雨和长江、江淮区梅雨的先后开始。随后西风急流轴和南亚高压脊线分别稳定在 $37^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$ 和 $26^{\circ}\sim 28^{\circ}\text{N}$,在相对稳定的高空西风急流和南亚高压的共同影响下,高空西风急流南侧至南亚高压脊线北侧之间的区域内持续出现明显的高空辐散,有利于中低层垂直上升运动的发展,为梅雨期间持续性强降水的形成提供了必要的动力条件。梅雨期的多雨带则处于高空西风急流带南侧和南亚高压脊线北侧之间的强高空辐散区中,而高空西风急流的一次次加强则对应着强降水过程的发生。可见,高空西风急流的周期性建立和南亚高压脊线位置相对稳定也是梅雨长时间在长江流域持续的重要环流特征之一。此外,与西太副高脊线和降水主雨带的逐日演变(图 3 和图 4)对比还可以看出,高层南亚高压的北抬及其北侧高空西风急流的建立似乎要比副高的北跳和每次强降水过程的发生要早 1~3 d,说明东亚夏季风环流的转变是从高层到低层逐步发生变化的,高层的大气环流异常变化对梅雨的开始可能具有超前指示意义。

3.4 中高纬阻塞高压和冷空气活动

阻塞高压(以下简称阻高)是造成中高纬大气环流异常的一个主要环流系统,它的长时期维持会带来持续的天气气候异常(Tibaldi and Molteni, 1990)。江淮梅雨正是东亚夏季风系统与欧亚中高纬环流系统相互作用的产物(牛若芸和金荣花, 2009)。2020 年梅雨期间,欧亚中高纬阻高活动频繁,主要以鄂霍次克海阻高(东阻)和乌拉尔山阻高(西阻)的形式表现,两者或此消彼长,或双阻鼎立(图 7)。其中鄂霍次克海阻高更为稳定和强盛,且鄂霍次克海阻高的活跃期对应副高稳定和江淮流域持续强降水阶段;而乌拉尔山阻高的中心位置偏西。

这种中高纬出现双阻的环流特征在梅雨期平均的 500 hPa 位势高度场上也表现明显(图 8a)。欧亚中高纬环流表现为“两脊一槽”型,乌拉尔山以西和鄂霍次克海为较强的高压脊,且向极区伸展,巴尔喀什湖附近为低压槽,经向度较大,有利于来自于中高纬地区的冷空气自西北向东南影响我国。冷空气活

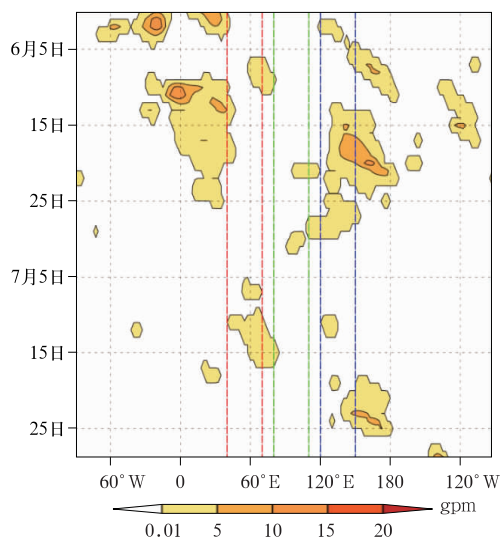


图 7 2020 年梅雨期北半球中高纬度阻塞高压强度的时间-经度剖面

(红色虚线代表乌拉尔山区域,绿色虚线代表贝加尔湖区域,蓝色虚线代表鄂霍次克海区域)

Fig. 7 Time-longitude cross-section of blocking strength in mid-high latitude at 500 hPa in the Northern Hemisphere in the Meiyu season of 2020

(Red dashed lines denote the Urals Region, green dashed lines denote the Lake Baikal Region, and blue dashed lines denote the Sea of Okhotsk Region)

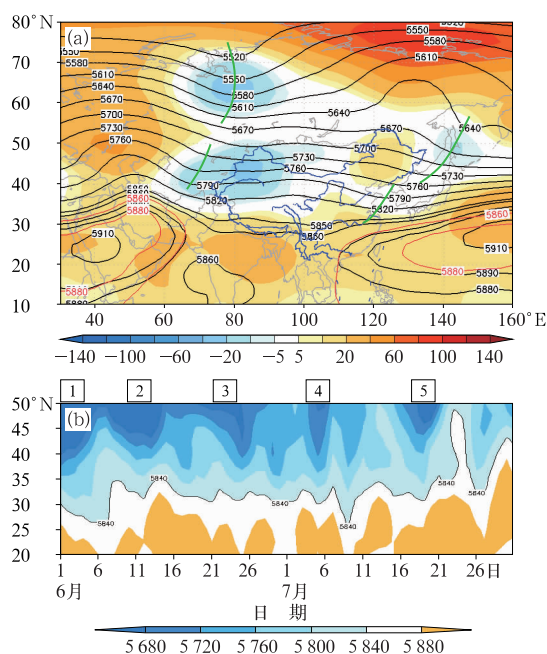


图8 2020年梅雨期(a)平均500 hPa位势高度场的空间分布和(b)110°~122.5°E

平均的500 hPa位势高度的逐日演变(单位:gpm)

(图8a中,等值线为平均场,填色为距平场;红色线代表气候平均的5880和5860 gpm等值线;绿粗线代表低槽。图8b中,5840 gpm等值线表征我国东部冷空气活动所到达的纬度位置,图片上方的数字代表中国东部5次主要冷空气南下过程)

Fig. 8 Distribution of (a) the averaged geopotential height (contours) and corresponding anomalies

(colored), (b) variation of 500 hPa geopotential height along 110°–122.5°E in the Meiyou season of 2020 (unit: gpm) (In Fig. 8a, red lines are the climate mean 5880 and 5860 gpm isolines, and green bold lines represent the low troughs; in Fig. 8b, the isoline of 5840 gpm represents the latitudinal location of the cold air activities in eastern China, and the numbers at the top of figure indicate five cold air activities over the eastern China)

动是持续性强降水形成的重要因素之一,它能够促成产生强降水所必须的低层辐合抬升(姚秀萍和于玉斌,2005)。另外,东亚沿海附近为平均低槽区,且槽区位势高度为负距平,表明东亚沿岸低槽活跃,冷空气势力也较强。图8b是梅雨期我国东部500 hPa位势高度场的逐日演变,它可以表示北方冷空气的活动(张庆云等,2003)。可以看到,梅雨期内冷空气多次南下侵入到30°N附近地区(图中阴影区),当

冷空气南下正好与低层一次次加强的西南暖湿水汽对应(图5),并在此交汇,则造成长江中下游地区的持续性强降水过程(图3)。总的来说,由于来自西北路径(极地过程)和(或)东北路径(超极地过程)的冷空气不断南下,冷暖空气在江淮区域频繁交汇,导致梅雨强度异常偏强。

4 与历史年份的对比分析

历史上共有3年在江淮流域出现了严重的洪涝灾害,分别为1954、1991和1998年,从1951—2020年逐年的梅雨期累计降水量的历史序列(图1)也可以看出这3年的极端性特征。表2给出了1954、1991、1998年3个梅雨监测区各特征量的基本信息。这3年与2020年的梅雨均存在以下特点:入梅早,出梅晚,雨季持续时间长,降水范围广,且强度大。

1954年夏季发生了20世纪以来最为严重的一次长江流域洪涝灾害。这一年梅雨于5月31日首先从长江区开始,8月2日出梅,梅雨期长度为1951年来历史最长。这期间长江流域连日降雨,且多次出现暴雨和特大暴雨,江南区和长江区平均累计降水量分别达到847.5和811.5 mm,均为1951年以来第一(图1a和1b);江淮区梅雨量为621.2 mm,仅次于1991年和2020年,排名第三(图1c)。从空间分布上看,长江中下游至江淮地区形成一个南北纬度跨度很宽的多雨带,多雨中心位于长江中游,大部地区降水量超过800 mm,较常年同期偏多1倍以上(图9a)。梅雨期长江、淮河等多个流域水位同时上涨,相继出现最高洪水记录,酿成了近百年来罕见的特大洪涝。

相比与1954年,1991年总体的梅雨期长度和梅雨量相对较弱,其影响范围偏北,主要集中在江淮地区。6月2日首先于长江区入梅,7月16日出梅,梅雨期长度为44 d,其中江淮区平均累计降水量达到766.4 mm,历史排名第一(图1c)。从空间分布看,多雨带南北纬度跨度较小,多雨中心偏向于淮河与长江下游地区;其中长江中下游沿江和江淮地区降水量普遍在600~800 mm,部分地区超过800 mm,较常年同期偏多1倍以上,下游部分地区甚至超过2倍(图9b)。江淮一带部分地区降雨强度超过1954年,

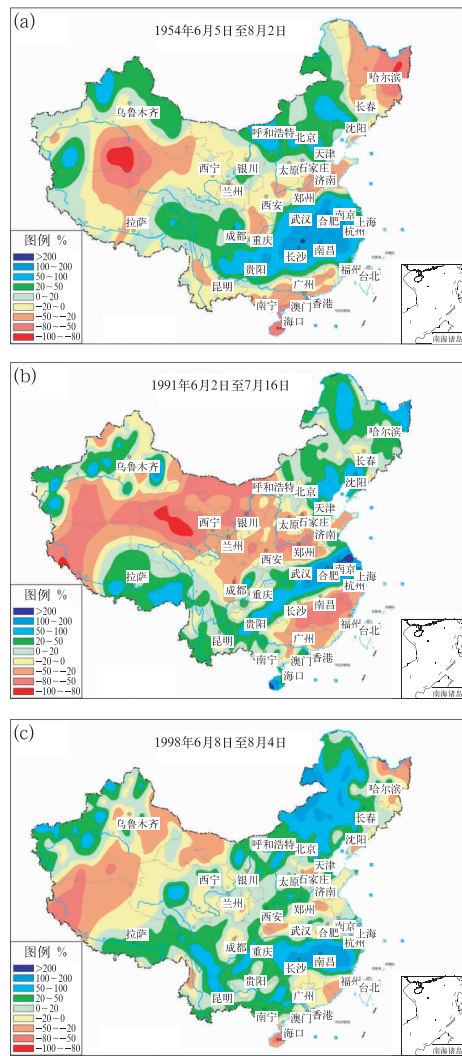


图 9 1954 年(a), 1991 年(b)和 1998 年(c) 梅雨期降水距平百分率的空间分布
Fig. 9 Distribution of the rainfall anomaly percentage rate in the Meiyu season
(a) 1954, (b) 1991, (c) 1998

导致江淮地区遭受特大洪涝灾害,长江下游滁河出现了有记录以来的最大洪水,太湖水位猛涨,7 月 12 日太湖水位达到 4.83 m,超过历史水位 0.18 m;江苏、安徽受灾最为严重(鞠笑生,1993)。丁一汇(1993)统计了 1991 年太湖地区梅雨期 1 d、3 d、30 d 和 60 d 不同时段的最大累计降水量,均较 1954 年同期明显偏多,里下河地区 6—7 月的累计降水量也明显超过 1954 年。

1998 年夏季长江流域再次出现了仅次于 1954 年的全流域特大洪涝。6 月 8 日首先于江南区入梅,8 月 4 日出梅,雨季持续时间超过 50 d,其中江南区平均降水量达到 783.8 mm,历史排名第二,仅次于 1954 年(图 1a);长江区平均降水量为 572.4 mm,历史排名第五(图 1b)。从空间分布看,多雨带较 1954 和 1991 年偏南,多雨中心位于江南中北部,降水量普遍超过 800 mm,较常年同期偏多 1 倍(图 9c)。1998 年梅雨最显著的特征是出现了“二度梅”(黄荣辉等,1998),6 月 11 日至 7 月 4 日为第一段梅雨降水集中期,持续性强降水过程使得长江中下游地区,特别是鄱阳湖、洞庭湖(两湖)流域出现了严重洪涝。随后在 7 月上旬至中旬前期长江流域降水偏少,中下游地区出现了近 10 天超过 35℃ 的盛夏高温天气。7 月 16 日至 8 月 3 日再次出现第二段强降雨天气,即“二度梅”。此阶段降水主要发生在长江中上游地区,且暴雨过程强,致使从 7 月下旬起长江中、上游河水猛涨,使中游地区再度发生严重洪涝。

综合来看,1954 年梅雨的影响范围和程度最大,持续时间最长,造成近百年来罕见的特大洪涝。1998 年梅雨造成了长江全流域的大洪水,但影响区域主要在长江中游和两湖流域,“二度梅”进一步增

表 2 1954、1991 和 1998 年的梅雨基本信息

Table 2 Basic information of the Meiyu season in 1954, 1991 and 1998

年份	区域	入梅时间	出梅时间	梅雨期/d	梅雨量/mm
1954	江南区	6 月 5 日	8 月 1 日	57	847.5
	长江区	5 月 31 日	8 月 2 日	63	811.5
	江淮区	6 月 24 日	7 月 30 日	36	621.2
1991	江南区	6 月 5 日	6 月 22 日	17	137.5
	长江区	6 月 2 日	7 月 16 日	44	555.9
	江淮区	6 月 8 日	7 月 16 日	38	766.4
1998	江南区	6 月 8 日	8 月 2 日	55	783.8
	长江区	6 月 11 日	8 月 4 日	54	572.4
	江淮区	6 月 25 日	8 月 4 日	40	370.5

强了长江中游洪涝灾害;1991 年总体偏弱,降水主要集中在江淮下游区域,江淮部分地区降雨强度甚至超过 1954 年,江苏、安徽受灾严重。相比于前三次梅雨期的暴雨洪涝,2020 年梅雨影响范围大,强降雨范围主要集中在长江中下游沿江一带,其累计雨量和梅雨期长度均超过 1998 年,是仅次于 1954 年的典型超强梅雨。持续的强降水过程导致江淮流域再次出现严重的洪涝灾害,长江流域分别于 7 月 2 日和 17 日两次达到洪水编号标准;7 月 14 日淮河王家坝水位涨至 27.5 m,与警戒水位持平,达到洪水编号标准;7 月 6 日鄱阳湖星子水文站超警戒水位 0.62 m,达到洪水编号标准。但据应急管理部统计,截至 7 月底此次南方洪涝灾害造成的灾害损失较前 3 年明显偏轻,受灾人次、因灾死亡失踪人数、倒塌房屋数量和直接经济损失较近 5 年同期均值相比均偏低 25% 以上。这一方面得益于气象部门对极端天气气候事件的预报准确率的明显提高,另一方面则是现今防灾减灾能力也大大加强,三峡工程的建设对长江中下游地区起到巨大的防洪作用。

5 结论与讨论

梅雨是初夏中国东部雨季进程中最重要的一个雨期,梅雨异常将给我国长江中下游地区带来严重的旱涝灾害。2020 年出现了一次典型的超强梅雨,持续的强降水过程导致江淮流域出现严重的洪涝灾害。本文利用国家气候中心提供的梅雨监测资料和同期大气环流再分析资料,对 2020 年的超强梅雨特征及大尺度关键环流系统的异常成因进行了分析,并从雨涝特征、致灾程度等方面与 20 世纪以来的几个典型梅雨异常偏多年进行了初步比较。具体结论如下:

(1)2020 年梅雨呈现出入梅早、出梅晚、梅雨期长、雨区范围广、累计雨量大、强降水过程多的特点,其中长江区和江淮区的累计降水量均排名第二,分别次于 1954 年和 1991 年,已超过 1998 年,是一次典型的超强梅雨。

(2)梅雨期东亚季风区多个关键大气环流系统均平均位置相对稳定,且表现出显著的准双周振荡的特征,梅雨的开始和结束、主雨带的北抬和停滞、强降水过程的发生维持都与准双周振荡有很好的对应关系。梅雨期间西太副高共经历了 6 次北抬和南撤的阶段性变化过程,前两次周期振荡的振幅偏强,

导致主雨带迅速北跳至江淮流域,梅雨开始偏早,而中间 3 次振幅相对较小,主雨带位置相对稳定,且持续时间长;最后一次强周期振荡则对应了江淮梅雨的结束。与之对应,高、低层环流系统则表现出 5 次明显加强的过程,随着低层西南急流的不断加强,南风大值中心反复建立和位置的相对稳定,使得源自热带的水汽输送一次次加强、辐合上升运动反复发展,从而导致梅雨不仅在江淮流域长时间持续,并且暴雨过程频频发生。此外,梅雨期欧亚中高纬环流表现为“两脊一槽”型,阻高活动频繁,东亚沿岸低槽活跃,冷空气势力较强。经西北路径和(或)东北路径的冷空气不断南下,在江淮区域与来自低纬的暖湿气流频繁交汇,这也是导致梅雨强度异常偏强的重要因素。

(3)通过对梅雨的时空分布、雨涝特征及致灾程度等方面的比较,2020 年的超强梅雨的异常程度总体弱于 1954 年,而强于 1991 年和 1998 年。由于现今气候预测准确率和防灾减灾能力的提高,今年由于江淮流域洪涝而导致的灾害损失明显降低。

需要指出的是,在梅雨量异常偏多的 1954、1991 和 1998 年,一些关键大气环流系统的变化特征与今年存在一定的相似性。如欧亚中高纬度环流也都呈现典型的“两脊一槽”型,中高纬度冷空气活动较强(丁一汇,1993);东亚高空西风急流位置较为稳定,第二次北抬不明显(王作台等,1992),副高南北位置摆动也较小(毛江玉和吴国雄,2005)。更重要的是,这些年梅雨期中总是伴随着较为明显的大气准双周振荡特征(陆尔和丁一汇,1996;毛江玉和吴国雄,2005)。因此结合今年梅雨的成因分析,总结了超强梅雨形成的大气环流条件(图 10)。此次超强梅雨的主要环流因子有 4 个,包括中高纬的阻塞高压、副热带地区的西太副高、低空急流及其带来

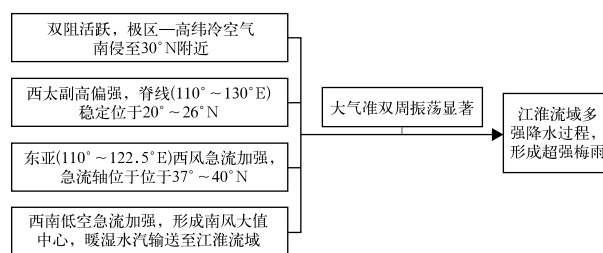


图 10 超强梅雨形成的大气环流条件框图

Fig. 10 Schematic diagram of atmospheric circulation conditions for the formation of extreme Meiyu

的暖湿水汽、高层的东亚西风急流。西太副高和东亚西风急流位置分别稳定在 $20^{\circ}\sim 26^{\circ}\text{N}$ 和 $37^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$ 范围,同时中高纬冷空气南侵正好对应低纬低空急流的加强,这是江淮流域发生强降水过程的主要环流条件;此时如果大气环流系统表现出显著的准双周振荡特征,促使强降水过程反复发生和维持,则非常有利于江淮流域形成超强梅雨。因此,大气准双周振荡作为次季节尺度中的一种主要变率或模态值得重点关注,如何准确把握和预报出次季节尺度变化特征是今后天气—气候预报中的一个挑战。

致 谢:本工作部分研究结果受邀在杨修群和宋连春教授组织的 2020 年梅汛期降水异常成因研讨会上报告,特此致谢!

参考文献

- 陈涛,张芳华,于超,等,2020. 2020 年 6—7 月长江中下游极端梅雨天气特征分析[J]. 气象,46(11):1415-1426. Chen T, Zhang F H, Yu C, et al, 2020. Synoptic analysis of extreme Meiyu precipitation over Yangtze River Basin during June—July 2020[J]. Meteor Mon, 46(11):1415-1426(in Chinese).
- 丁婷,高辉,2020. 2019 年夏季东亚大气环流异常及对我国气候的影响[J]. 气象,46(1):129-137. Ding T, Gao H, 2020. Atmospheric circulation in East Asia in summer 2019 and its influence on climate of China[J]. Meteor Mon, 46(1):129-137(in Chinese).
- 丁一汇,1993. 1991 年江淮流域持续性特大暴雨研究[M]. 北京:气象出版社:255. Ding Y H, 1993. Study on the Persistent Heavy Rainfall in the Yangtze-Huaihe River Basin in 1991[M]. Beijing: China Meteorological Press:255(in Chinese).
- 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 Y H, Liu J J, Sun Y, et al, 2007. A study of the synoptic-climatology of the Meiyu system in East Asia[J]. Chin J Atmos Sci, 31(6):1082-1101(in Chinese).
- 胡景高,周兵,徐海明,2013. 近 30 年江淮地区梅雨期降水的空间多型态特征[J]. 应用气象学报,24(5):554-564. Hu J G, Zhou B, Xu H M, 2013. Characteristics of multi-patterns of precipitation over the Yangtze-Huaihe Basins during Meiyu season in recent 30 years[J]. J Appl Meteor Sci, 24(5):554-564(in Chinese).
- 黄荣辉,徐子红,王鹏飞,等,1998. 1998 年夏长江流域特大洪涝特征及其成因探讨[J]. 气候与环境研究,3(4):300-313. Huang R H, Xu Y H, Wang P F, et al, 1998. The features of the catastrophic flood over the Changjiang River Basin during the summer of 1998 and cause exploration[J]. Clim Environ Res, 3(4):300-313(in Chinese).
- 蒋薇,高辉,2013. 21 世纪长江中下游梅雨的新特征及成因分析[J]. 气象,39(9):1139-1144. Jiang W, Gao H, 2013. New features of Meiyu over middle-lower reaches of Yangtze River in the 21st Century and the possible causes[J]. Meteor Mon, 39(9):1139-1144(in Chinese).
- 鞠笑生,1993. 1954 年、1991 年长江流域洪涝对比[J]. 灾害学,8(2):68-73. Ju X S, 1993. Comparison of flood and waterlogging in the Yangtze River reaches between 1954 and 1991[J]. J Catastrophol, 8(2):68-73(in Chinese).
- 李崇银,1991. 大气低频振荡[M]. 北京:气象出版社. Li C Y, 1991. The Atmospheric Low-Frequency Oscillation[M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 李崇银,王作台,林士哲,等,2004. 东亚夏季风活动与东亚高空西风急流位置北跳关系的研究[J]. 大气科学,28(5):641-658. Li C Y, Wang Z T, Lin S Z, et al, 2004. The relationship between East Asian summer monsoon activity and northward jump of the upper westerly jet location[J]. Chin J Atmos Sci, 28(5):641-658(in Chinese).
- 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 P, Ding Y H, He J H, et al, 2010. A study of determination index of regional Meiyu over the Yangtze-Huaihe Basin[J]. Chin J Atmos Sci, 34(2):418-428(in Chinese).
- 刘芸芸,陈丽娟,2019. 2019 年春季我国主要气候异常特征及可能成因分析[J]. 气象,45(10):1483-1493. Liu Y Y, Chen L J, 2019. Features and possible causes for the spring climate anomalies in 2019[J]. Meteor Mon, 45(10):1483-1493(in Chinese).
- 刘芸芸,何金海,梁建茵,等,2006. 亚澳季风区水汽输送季节转换特征[J]. 热带气象学报,22(2):138-146. Liu Y Y, He J H, Liang J Y, et al, 2006. Features of moisture transport in seasonal transition over Asian-Australian monsoon regions[J]. J Trop Meteor, 22(2):138-146(in Chinese).
- 刘芸芸,李维京,艾祝秀,等,2012. 月尺度西太平洋副热带高压指数的重建与应用[J]. 应用气象学报,23(4):414-423. Liu Y Y, Li W J, Ai W X, et al, 2012. Reconstruction and application of the monthly western Pacific subtropical high indices[J]. J Appl Meteor Sci, 23(4):414-423(in Chinese).
- 陆尔,丁一汇,1996. 1991 年江淮特大暴雨与东亚大气低频振荡[J]. 气象学报,54(6):730-736. Lu E, Ding Y H, 1996. Low frequency oscillation in East Asia during the 1991 excessively heavy rain over Changjiang-Huaihe River Basin[J]. Acta Meteor Sin, 54(6):730-736(in Chinese).
- 毛江玉,吴国雄,2005. 1991 年江淮梅雨与副热带高压的低频振荡[J]. 气象学报,63(5):762-770. Mao J Y, Wu G X, 2005. Intraseasonal variability in the Yangtze-Huaihe River rainfall and subtropical high during the 1991 Meiyu period[J]. Acta Meteor Sin, 63(5):762-770(in Chinese).
- 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(12):1326-1334. Niu R Y, Jin R H, 2009. Causes analysis of large scale circulation of abnormal characteristics in Meiyu period of 2008[J]. Plateau Meteor, 28(12):1326-1334. (in Chinese).
- 陶诗言,赵煜佳,陈小敏,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 S Y, Zhao Y J, Chen X M, 1958. The relationship between May-Yü in Far East and the behaviour of circulation over Asia[J]. Acta Meteor

- Sin, 29(2):119-134(in Chinese).
- 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]. J Appl Meteor Sci, 17(5):513-525(in Chinese).
- 王作台, 黄志铭, 胡志文, 1992. 干湿梅雨季东亚环流特性之研究[J]. 大气科学(台), 20:267-294. Wang Z T, Huang Z M, Hu Z W, 1992. A study on characteristics of East Asian circulation in wet and dry Meiyu season[J]. Atmos. Sci (Taiwan), 20:267-294(in Chinese).
- 吴洪宝, 吴蕾, 2010. 气候变率诊断和预测方法: 第2版[M]. 北京: 气象出版社: 232-237. Wu H B, Wu L, 2010. Methods for Diagnosing and Forecasting Climate Variability[M]. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press: 232-237(in Chinese).
- 夏芸, 2007. 夏季江淮流域强降水过程与低频振荡的联系[D]. 南京: 南京信息工程大学. Xia Y, 2007. Role of the low frequency oscillations in the heavy rainfall processes in the Yangtze-Huaihe River Valley during boreal summer[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology(in Chinese).
- 杨双艳, 武炳义, 胡景高, 等, 2015. 大气准双周振荡的研究进展[J]. 大气科学学报, 38(6):855-864. Yang S Y, Wu B Y, Hu J G, et al, 2015. Research progress of quasi-biweekly oscillation of atmosphere[J]. Trans Atmos Sci, 38(6):855-864(in Chinese).
- 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. Yao X P, Yu Y B, 2005. Activity of dry cold air and its impacts on Meiyu rain during 2003 Meiyu period[J]. Chin J Atmos Sci, 29(6):973-985(in Chinese).
- 尹志聪, 王亚非, 袁东敏, 等, 2012. 江淮梅雨期降水南北反位相分布与大气准双周振荡[J]. 热带气象学报, 28(4):517-526. Yin Z C, Wang Y F, Yuan D M, et al, 2012. The north-south anti-phase distribution of rainfall in Meiyu periods and its relationship with QBWO in atmosphere[J]. J Trop Meteor, 28(4):517-526(in Chinese).
- 张芳华, 陈涛, 张芳, 等, 2020. 2020年6—7月长江中下游地区梅汛期强降水的极端性特征[J]. 气象, 46(11):1405-1414. Zhang F H, Chen T, Zhang F, et al, 2020. Extreme features of severe precipitation in Meiyu period over the middle and lower reaches of Yangtze River Basin in June—July 2020[J]. Meteor Mon, 46(11):1405-1414(in Chinese).
- 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 Q Y, Tao S Y, 1999. The study of the sudden northward jump of the subtropical high over the western Pacific[J]. Acta Meteor Sin, 57(5):539-548(in Chinese).
- 张庆云, 陶诗言, 张顺利, 2003. 夏季长江流域暴雨洪涝灾害的天气气候条件[J]. 大气科学, 27(6):1018-1030. Zhang Q Y, Tao S Y, Zhang S L, 2003. The persistent heavy rainfall over the Yangtze River Valley and its associations with the circulations over East Asian during summer[J]. Chin J Atmos Sci, 27(6):1018-1030(in Chinese).
- 中国气象局, 2017. GB/T 33671—2017 梅雨监测指标[S]. 北京: 中国标准出版社. China Meteorological Administration, 2017. GB/T 33671—2017 Meiyu monitoring indices[S]. Beijing: Standards Press of China(in Chinese).
- Ding Y H, 1992. Summer monsoon rainfalls in China[J]. J Meteor Soc Jpn, 70(1B):373-396.
- Ding Y H, 2004. Seasonal march of the east-asian summer monsoon [M]//Chang C P. East Asian Monsoon. Hackensack: World Scientific:564.
- He J H, Sun C H, Liu Y Y, et al, 2007. Seasonal transition features of large-scale moisture transport in the Asian-Australian monsoon region[J]. Adv Atmos Sci, 24(1):1-14.
- 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.
- Liu Y Y, Liang P, Sun Y, 2019. The Asian Summer Monsoon: Characteristics, Variability, Teleconnections and Projection [M]. Cambridge, MA: Elsevier: 237.
- Ninomiya K, Murakami T, 1987. The early summer rainy season (Baiu) over Japan[M]//Chang C P, Krishnamurti T N. Monsoon Meteorology. New York: Oxford University Press: 93-121.
- Oh T H, Kwon W T, Ryoo S B, 1997. Review of the researches on Changma and future observational study (Kormex)[J]. Adv Atmos Sci, 14(2):207-222.
- Qian W H, Lee D K, 2000. Seasonal march of Asian summer monsoon[J]. Int J Climatol, 20(11):1371-1386.
- Saito N, 1995. Quasi-stationary waves in mid-latitudes and Baiu in Japan[J]. J Meteor Soc Jpn, 63:983-995.
- 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. London: Oxford University Press: 60-92.
- Tibaldi S, Molteni F, 1990. On the operational predictability of blocking[J]. Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography, 42(3):343-365.
- Vincent D G, Fink A, Schrage J M, et al, 1998. High- and low-frequency intraseasonal variance of OLR on annual and ENSO timescales[J]. J Climate, 11(5):968-986.