

牛若芸, 周兵, 2020, 2019 年江淮流域梅雨异常特征及成因分析[J]. 气象, 48(1): 1-10.
Niu R Y, Zhou B, 2020. Analysis of abnormal characteristics and causes of Meiyu over the Yangtze-Huai River Basin in 2019[J]. Meteor Mon, 48(1): 1-10(In Chinese).

2019 年江淮流域梅雨异常特征及成因分析*

牛若芸¹ 周兵²

1 国家气象中心, 北京, 100081

2 国家气候中心, 北京, 100081

提 要: 利用梅雨监测、降水量观测以及 NCEP 大气再分析和海表温度等资料, 对 2019 年江淮流域梅雨异常特征及其大尺度环流成因进行了分析研究, 结果表明: 2019 年江淮流域梅雨季入梅日期偏晚、长度偏短, 梅雨量呈南多北少分布且总体偏少, 并且是 1951 年以来梅雨带在长江以南停滞结束时间最晚的一年。三个子区中, 江南区和长江中下游区梅雨期基本同步, 江淮区出现空梅。3 月上旬末至中旬前期冷空气势力的增强, 阻碍和延后了东亚夏季风季节性北进的进程, 导致了东亚季风环流型由冬季向初夏季节转换时间偏晚及江淮流域入梅偏晚。5-6 月印度洋海温偏暖 (ICRW 指数正异常)、南亚 60°~80°E 地区 MTGMUT 逆转 (由负转正) 日期偏晚对 2019 年江淮流域入梅偏晚具有较好的超前指示性能。2019 年梅雨季高层南亚高压东部脊和东亚西风急流偏南, 中层亚欧中纬环流槽偏南、副高西部脊偏南、澳大利亚东侧范围内位势高度偏高, 低层东亚夏季风强度偏弱、槽线位置偏南。在上述多个大尺度环流系统异常特征共同影响下, 江淮流域的长江中下游沿江以南地区处于高层强辐散和低层水汽通量径向强辐合的叠置区中, 非常有利于垂直上升运动发展和强降水的形成, 从而导致了梅雨量南多北少的分布特征。

关键词: 梅雨异常特征 大尺度环流成因 前兆信号

中图分类号: P448, P458 **文献标识码:** A **DOI:** ?

Analysis of Abnormal Characteristics and Causes of Meiyu over the Yangtze-Huai River Basin in 2019

Niu Ruoyun¹ Zhou Bing²

1 National Meteorological Center, Beijing 100081, China

2 National Climate Center, Beijing 100081, China

* 国家重点研发计划 (2018YFC1507703) 资助

2020 年 7 月 14 日收稿; 2021 年 3 月 7 日收修改稿

第一作者: 牛若芸, 主要从事中期延伸期预报技术及灾害性天气形成机制研究. E-mail: niury@cmac.gov.cn

Abstract: Based on the datasets of Meiyu monitoring and observation of precipitation and NCEP atmosphere reanalysis and sea surface temperature, the abnormal characteristics of Meiyu over the Yangtze–Huai River Basin (YHRB) in 2019 and its causes of large-scale circulation are analyzed. The results are as follows: (1) The abnormal characteristics obviously showed that the Meiyu onset date was later than normal compared with a shorter duration, the Meiyu precipitation presented a distribution pattern of the more in the south and the less in the north of the Yangtze River over YHRB which was less than normal in overall in the Meiyu season of 2019. Among the three subareas, the Meiyu period of the subarea of the middle and lower reaches of Yangtze River was almost simultaneous with that of Jiangnan subarea, and the Meiyu of the Jianghuai subarea was not obviously. (2) Due to the periodical enhancement of the cold air between June 8 to 15 it was impeded and delayed that the seasonal northward of East Asia summer monsoon, which lead to the conversion later from winter to early summer of the circulation pattern in East Asian and Meiyu onset date also later over YHRB. It can be regarded as the precursory signals of Meiyu onset date later over YHRB in 2019 that the sea surface temperature in Indian Ocean was warmer than normal in May-June and the reversal date of MTCMUT was later over $60^{\circ} \sim 80^{\circ}$ E of South Asia. (3) Compared with climate mean state, the eastern ridge of South Asian high and East Asia westerly jet were southward at upper-level, the circulation meridionality in the middle-high latitude in Eurasia was stronger and the western ridge of Northwest Pacific subtropical high was southward and the geopotential height east of Australia was higher at middle-level, the intensity was weaker and the northernmost was southward of the East Asia summer monsoon at low-level. Due to the combined influence of the above-mentioned abnormal characteristic , it was under the control of the strong divergence at upper-level and the strong meridional gradient convergence of vapor flux at low-level in the south of the Yangtze River over YHRB. That is greatly conducive to the development of vertical upward movement and the occurrence of heavy rainfall and cause the distribution pattern of the Meiyu precipitation in 2019 with the more in the south and the less in the north of the Yangtze River over YHRB.

Key words: Abnormal characteristics of Meiyu, Causes of large-scale circulation, Precursory signal

引言

梅雨是初夏时节江淮流域特有的连阴雨天气，期间暴雨、大暴雨天气过程频繁出现，降水连绵不断，多雨闷热易生霉，谓之“霉雨”；此时正值江南梅子成熟季节，故又称为“梅雨”。梅雨量的多寡和雨带位置不仅直接影响江淮流域的旱涝及空间分布，还关系到中国夏季的旱涝趋势和分布形态，为此对于梅雨的研究也格外受到气象学者们的关注。已有研究表明，江淮流域梅雨特征及其影响存在明显的年际差异，1998 年和 2016 年梅雨造成了长江流域严重的大洪水（王建捷和陶诗言，2002；叶德超等，2019），2003 年和 2007 年梅雨则引发了淮河流域的洪涝灾害（赵兵科等，2005；金荣花等，2008），1992 年和 2008 年入梅时间显著偏早（何敏，1993；牛若芸和金荣花，2009），2009 年却出现了空梅（孙建华等，2011）。梅雨特征的多样性和复杂性与多尺度大气环流影响系统的共同影响及海-气相互作用密切相关（丁一汇等，2007；梁萍等，2007），且不同年份的主导因子也有所不同。长江中下游地区自 2000-2007 年连续八年梅雨期降水偏少的主导因子是东亚高空急流中准定常波动、西太平洋暖池强对流活动和西北太平洋热带气旋活动（鲍名，2009）。2011 年长江中下游梅雨强度偏强、入梅时间异常偏早则是受南海夏季风偏弱、爆发时间偏早的影响（朱伟军等，2016）。20 世纪 90 年代末中国梅雨雨带呈现北移的趋势是由于江淮梅雨期东亚中纬度地区对流层的明显增暖和平流层的明显冷却引起了东亚副热带大气扩张所致（Si et al., 2009）。东亚副热带高空西风急流、西北太平洋副热带高压（以下简称副高）、阻塞高压等也会对梅雨强度、位置及出现时间产生重要影响（杜银等，2008；牛若芸等，2011；张志刚等，2009；孙晓晴等，2020）。而当北太平洋海温处于 PDO 负位相背景下则易出现入梅偏晚、出梅偏早、梅雨期长度缩短、强度减弱的现象（蒋薇和高辉，2013）。

那么，2019 年江淮流域梅雨又有哪些特征？引发这些特征的大气环流影响因子有哪些？在中期延伸期时间尺度有哪些前兆信号可寻？本文针对以上问题展开了详细地分析和讨论，以期对 2019 年梅雨异常特征及其大尺度环流成因形成较深入的认识，为今后的梅雨预报服务提供更多的参考和依据。

1 资料和方法

1.1 资料

文中使用的逐日降水量观测资料取自国家气象信息中心数据库，该资料经过了严格的质

量控制。逐日全球大气环流再分析资料来源于美国国家环境预报中心，水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ ，使用变量包括位势高度、风、比湿、温度等 (Kanamitsu et al, 2002, Kalnay et al, 1996)。逐日全球线性最优插值海表温度 (OISST-v2) 资料 (Reynolds et al, 2007) 来自于美国国家海洋和大气管理局，网格点分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。江淮流域入（出）梅日期、梅雨季（期）长度等梅雨监测信息为国家气候中心基于 GB/T 33671-2017《梅雨监测指标》（中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准化管理委员会，2017）确定并发布，该标准将江淮流域（ $28^{\circ} \sim 34^{\circ} \text{N}$ 、 $110^{\circ} \sim 123^{\circ} \text{E}$ ）梅雨分为三个子区域进行监测，即江南区（I）、长江中下游区（II）、江淮区（III），三个区中最早开始的入梅（最晚结束的出梅）日期即为江淮流域梅雨季节的入（出）梅日；区域梅雨量为梅雨季（期）内区域平均逐日累计降雨量的总和。

除 OISST-v2 气候平均场受资料起始时间的限制，为 1981-2010 年的平均（值）外，上述其余所有资料的气候平均场（值）均为 1981-2010 年的平均。

1.2 方法

副高脊线、南亚高压脊线采用 Niu and Zhai (2013) 文中定义计算得出。

东亚夏季风指数定义为 $20^{\circ} \sim 35^{\circ} \text{N}$ 、 $105^{\circ} \sim 122.5^{\circ} \text{E}$ 范围内 850 hPa 经向风的平均值 (Niu et al, 2015)，指数值越大表征东亚夏季风强度越强。东亚夏季风北缘位置的确定采用流场和气团热力属性相结合的方法，流场上需为西南气流，热力属性需满足假相当位温 (θ_{se}) 超过指定临界值，已有文献对于 θ_{se} 临界值的选定有两种，分别为 335 K 或 340 K (李栋梁等, 2013)。本文特意对比分析了近 40 年逐年梅雨季及其邻近时段的 θ_{se} 、风矢、经向风和降水量沿 $110^{\circ} \sim 123^{\circ} \text{E}$ 平均的时间-纬度剖面（图略），发现在大多数情况下 θ_{se} 的 335 K 和 340 K 线的南北进退基本保持一致而且间隔很小；但在梅雨季后期及出梅前后，有时会出现两者间距较大的情况，此时 340 K 线与西南气流的南风强梯度带及梅雨带的北缘联系更为紧密。为此，本文以 850hPa 风场为西南风且 $\theta_{se} \geq 340 \text{ K}$ 的北界纬度来确定东亚夏季风的北缘位置。

热带印度洋全区一致海温模态指数 (Indian Ocean Basin-Wide mode, IOBW) 为热带印度洋 ($20^{\circ} \text{S} \sim 20^{\circ} \text{N}$ 、 $40^{\circ} \sim 110^{\circ} \text{E}$) 区域格点平均海表温度距平 (袁媛等, 2017)。

对流层中上层 (500~200 hPa) 经向温度梯度 (Meridional Temperature Gradient of the Middle-Upper Troposphere, MTGMUT) 为 500~200 hPa 之间 25°N 和 22.5°N 的平均温度与 7.5°N 和 5°N 的平均温度之差 (李崇银等, 2004)。南亚 $60^{\circ} \sim 80^{\circ} \text{E}$ 地区 MTGMUT 发生逆转的

日期为南亚 $60^{\circ}\sim 80^{\circ}\text{E}$ 地区 MTGMUT 由负值转为正值的日期, 且该日之后的连续 10 d 里 MTGMUT 保持正值的天数需不少于 7 d。

2 2019 年梅雨异常特征

监测结果显示(表 1), 2019 年江淮流域梅雨季于 6 月 16 日入梅, 7 月 17 日出梅, 梅雨季长度为 31 d, 由于入梅较常年偏晚 8d 且出梅偏早 1 d (李莹等, 2020), 梅雨季长度较常年偏短了 9 d。各子区中, 江南区(I)和长江中下游区(II)梅雨期的出现时间和长度接近, 但由于江南区气候平均的入、出梅时间早于长江中下游区, 所以江南区梅雨期整体偏晚 9 d, 而长江中下游区则基本接近气候平均态, 两区的梅雨期长度均接近气候平均值。江淮区(III)没能达到入梅指标, 出现空梅。

2019 年江淮流域梅雨量为 290.9 mm, 较气候平均值偏少 15.3%, 具有很强的区域差异性(丁婷和高辉, 2020), 明显呈现出南多北少的分布特征。纬度最高的江南区梅雨量有 458.1 mm, 较气候平均值偏多 25.4%; 纬度居中的长江中下游区梅雨量为 280.1 mm, 基本接近气候平均值; 纬度最北的江淮区空梅, 降雨量显著偏少。2019 年江淮流域梅雨季累计降雨量分布图上(图 1)南多北少的分布特征也清晰可见, 以长江为界, 沿江以南地区累计降雨量普遍有 200~400 mm, 部分地区达 500~700 mm, 较常年同期偏多 3~7 成, 局部偏多 1 倍以上, 累计降雨日数可达 15~25 d (图 2); 沿江以北地区累计降雨量多为 80~150 mm, 仅少部分地区可达 180~250 mm, 较常年同期偏少 3~7 成, 累计降雨日数一般不足 15 d。事实上, 直至进入 7 月中旬梅雨带还停滞在长江以南的年份实属少见, 自 20 世纪 50 年代以来也仅有 2019、1970、1992 和 1997 年曾出现过(图 2), 这四年梅雨带仍停滞在长江以南的截止日期依次为当年 7 月的 16 日、14 日、11 日、13 日。在这四年中, 2019 年还是梅雨带在长江以南停滞结束时间最晚的一年。也正是由于梅雨带进入 7 月中旬仍停滞在长江以南, 较常年同期明显偏南, 致使梅雨量呈现出显著的南多北少分布特征。

综上所述, 2019 年江淮流域梅雨季最显著的特征为入梅日期偏晚、长度偏短, 梅雨量呈南多北少分布且总体偏少; 三个子区中, 江南区和长江中下游区梅雨期基本同步、江淮区则出现空梅。其中, 2019 年江淮流域梅雨季长度偏短主要归因于入梅日期偏晚, 梅雨量总体偏少则与梅雨季长度偏短和江淮流域北部梅雨量偏少密切相关。为此, 下文重点针对 2019 年江淮流域梅雨季入梅日期偏晚和梅雨量南多北少的异常特征形成原因进行分析和讨论。

表 1 2019 年江淮流域梅雨监测

Table 1 The monitoring of Meiyu over the Yangtze-Huai River Basin in 2019

区域	入梅日期 (距平/d)	出梅日期 (距平/d)	雨季和雨期长度/d (距平/d)	梅雨量/mm (距平百分率/%)
江淮流域	6 月 16 日 (+8)	7 月 17 日 (-1)	31 (-9)	290.9 (-15.3)
江南 (I 区)	6 月 17 日 (+9)	7 月 17 日 (+9)	30 (0)	458.1 (+25.4)
长江中下游 (II 区)	6 月 16 日 (+2)	7 月 14 日 (+1)	28 (-1)	280.1 (-0.3)
江淮 (III 区)	/	/	/	/

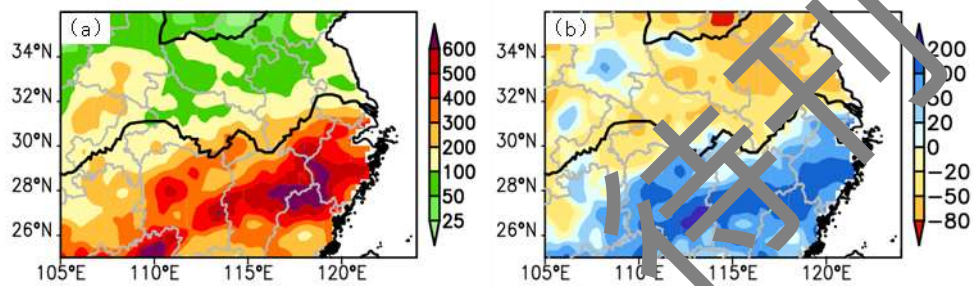


图 1 2019 年江淮流域梅雨季 (a) 累计降雨量 (单位: mm) 及其 (b) 距平百分率 (单位: %)

Fig.1 Accumulated precipitation (a, units: mm) and percentage anomalies (b, units:%) during the Meiyu season in 2019 over the Yangtze-Huai River Basin

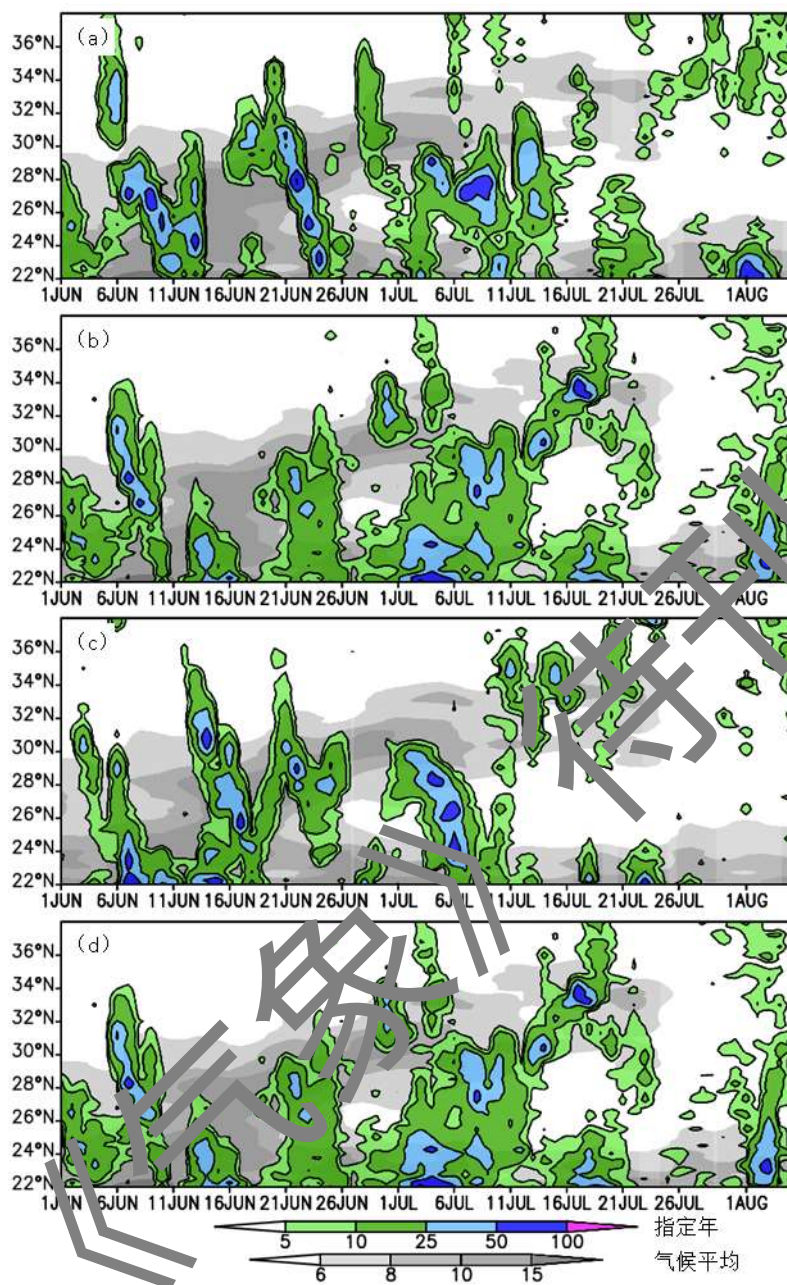


图2 (a) 2019 年、(b) 1970 年、(c) 1992 年、(d) 1997 年沿 $110^{\circ} \sim 123^{\circ} \text{E}$ 平均的逐日累计降雨量时间-纬度剖面 (彩色, 灰色为气候平均值; 单位: mm)

Fig.2 Time-latitude cross sections of daily precipitation averaged over $110^{\circ} \sim 123^{\circ} \text{E}$ in 2019(a), 1970(b), 1992(c), 1997(d) (shaded with color, climatic mean shaded with gray; unit: mm)

3 2019 年梅雨异常特征成因分析

3.1 入梅日期偏晚成因分析

梅雨是东亚夏季风在向北推进过程中在江淮流域停滞的产物, 是在东亚夏季风系统中多

个大尺度环流系统的最佳配合（或锁定）下形成的（张庆云等，2003；Zhang et al, 2002）。副高作为东亚夏季风系统中的重要成员，对强降雨区位置有着重要的调节作用，当副高西伸北跳时暴雨带向北移动，反之，当副高南撤东退时暴雨带向南移动（陶诗言和卫捷，2006）。尤为重要的是，副高第一次季节性北跳对应着东亚大气环流型由冬季向初夏季节的转换，江淮流域随之进入梅雨期；副高第二次季节性北跳对应着东亚大气环流转入盛夏阶段，江淮流域梅雨亦随之结束（张庆云和陶诗言，1999；竺夏英等，2008）。GB/T 33671-2017《梅雨监测指标》明确限定，江淮流域梅雨季内 5d 滑动平均的副高西段脊线南界位置需 $\geq 18^{\circ}\text{N}$ 、北界位置需 $< 27^{\circ}\text{N}$ 。由图 3 可以清楚看到，早在 2019 年 6 月上旬前中期，副高西段脊线就北抬并越过 18°N 。受副高引导，低层西南暖湿气流随之向北涌并伴随着 $\theta_{se} \geq 340\text{ K}$ 线北推入江淮流域纬度带，并与冷空气在此交汇产生强烈的水汽辐合上升运动，接连出现了两次区域性大到暴雨天气过程，江南区连续 4 d（6 月 6–9 日）达到了梅雨日标准，江淮流域很有希望提前进入梅雨季节。然而在此之后，自北方南下的冷空气势力明显增强，其前锋大幅度南压。受其影响，副高迅速南落，西段脊线持续 8 d 位于 18°N 以南， $\theta_{se} \geq 340\text{ K}$ 的西南风带随之向南退出江淮流域，江淮流域转为偏北气流控制为主（如图 3b 箭头所示），不利于降雨形成。可见，6 月上旬末至中旬前期冷空气势力的增强，阻碍和延后了东亚夏季风季节性北进的进程以及东亚大气环流型由冬季向初夏季节的转换，同时也影响了梅雨日的后续积累及梅雨季的提前开始。

直至 6 月 16 日以后，冷空气势力减弱，副高才出现了第一次阶段性的季节性北跳，截止 7 月 16 日以前 5 d 滑动平均的副高西段脊线稳定位于 $18^{\circ} \sim 27^{\circ}\text{N}$ ；同期，以 $\theta_{se} \geq 340\text{ K}$ 的西南风带北界位置表征的东亚夏季风北缘也在江淮流域纬度带内南北摆动，低层季风涌不断向江淮流域输送大量的水汽和能量，与南下冷空气在江淮流域频繁交汇辐合；高层东亚副热带西风急流和南亚高压也出现了阶段性的向北推进，西风急流（ $\geq 30\text{ m s}^{-1}$ ）带南侧和南压高压脊线北侧的辐散区位于江淮流域上空，高层辐散抽吸作用进一步加剧了中低层的辐合上升运动。总之，在多个东亚夏季风系统成员的协同影响下，江淮流域进入多雨时段，强降雨过程频发，于 6 月 16 日达到入梅标准，但入梅日期已较常年偏晚。

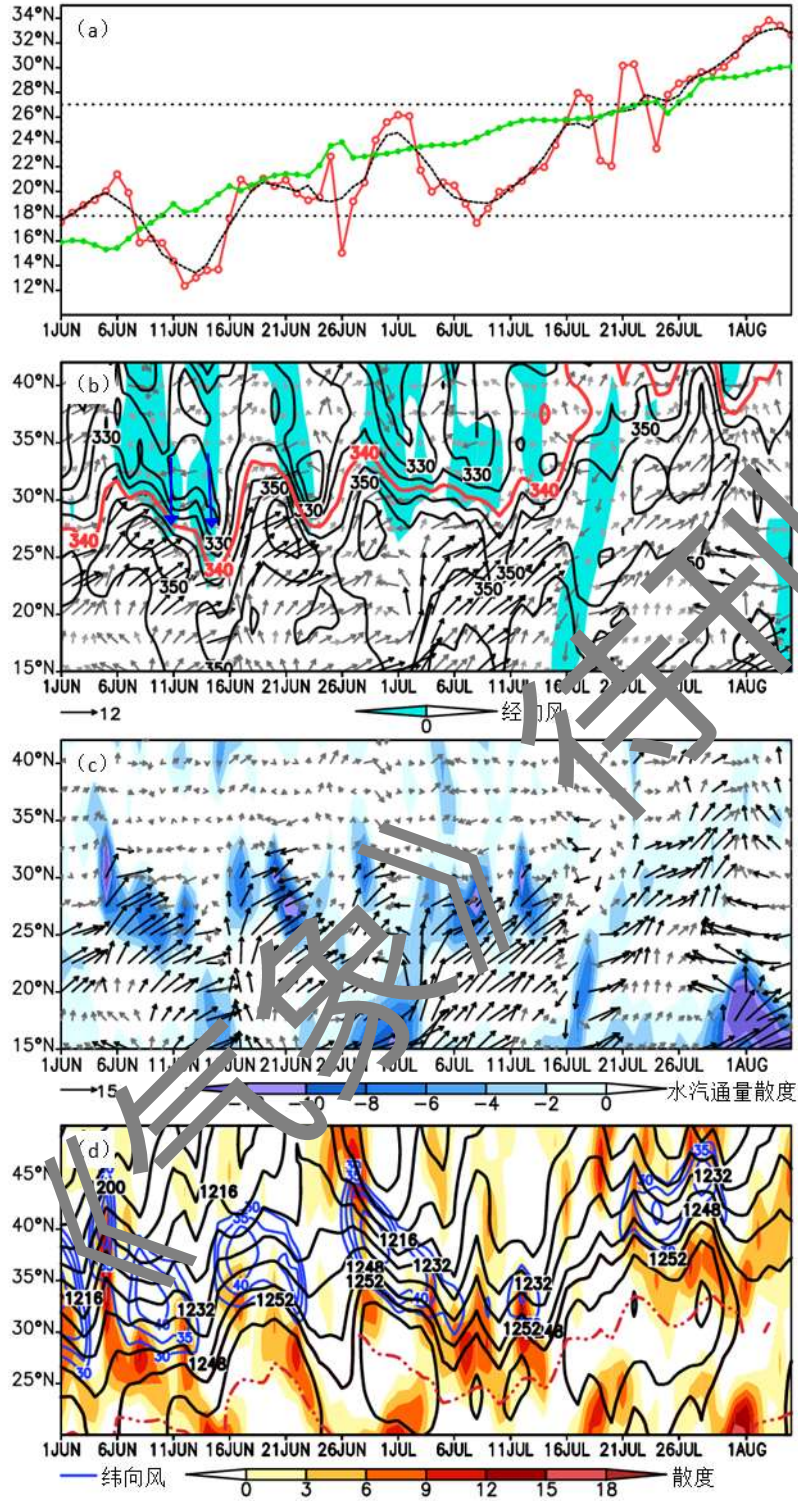


图3 2019年逐日的(a)副高西段脊线位置(红线,黑线为5 d滑动平均值,绿线为气候平均值)以及沿110°~123°E平均的(b)850 hPa风(矢量箭头,单位: m s^{-1})和假相当位温(单位: K)、(c)850 hPa水汽通量(矢量箭头,单位: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$)及其散度(填色,单位: $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)、(d)200 hPa位势高度(黑线,单位: dagpm;红色点划线为南压高压脊线)、纬向风($\geq 30 \text{ m s}^{-1}$,蓝线)和散度(填色,单位: 10^{-6} s^{-1})

时间-纬度剖面

Fig.3 Daily western ridge line position (a) of the Northwest Pacific subtropical high averaged over 110°~130°E (red line, black line is the 5 d running average, green line is climatological mean) and time-latitude cross sections

averaged over $110^{\circ}\sim 123^{\circ}\text{E}$ of daily wind (vector arrow, unit: m s^{-1}) and potential pseudo-equivalent temperature (unit: K) at 850 hPa (b), water vapor flux (vector arrow, unit: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$) and its divergence (shading, unit: $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) at 850 hPa (c), geopotential height (black line, unit: dagpm, red line shows the ridge line of the South Asian high) and zonal wind ($\geq 30 \text{ m s}^{-1}$, blue line) and divergence (shading, unit: 10^{-6} s^{-1}) at 200 hPa (d) in 2019

上文分析了对 2019 年江淮流域入梅偏晚有直接影响的环流特征和成因，下文进一步探究对 2019 年江淮流域入梅偏晚有超前指示意义的间接影响因子和前兆信号。已有研究表明，海温等外强迫因子可对东亚夏季风系统产生显著影响（王永光和郑志海，2018），印度洋海温的持续偏暖是对厄尔尼诺事件的滞后效应，是副高继续偏强、偏西的重要因素（袁媛等，2017）。试问印度洋海温持续偏暖是否对副高纬度位置也会产生影响呢？为此计算了 1982–2019 年 5 月各旬 IOBW 指数与 6–7 月逐旬副高西段脊线位置距平的时滞相关系数（图 4a），发现 6 月各旬的副高西段脊线位置距平与其前 1~3 旬的 IOBW 指数存在较好的滞后负相关，特别是 6 月上旬的副高西段脊线位置距平与 5 月三个旬的 IOBW 指数均高度相关，相关系数达 0.343~0.408，全部通过了 $\alpha=0.05$ 的显著性水平 t 检验。2019 年 5–6 月印度洋海温持续偏暖（图 4b），其中 5 月下旬至 6 月中旬偏暖尤为明显（超过了 0.5°C ），与 6 月副高西段脊线位置大多处于较常年同期偏南（图 2a）的趋势正好反向。已有研究表明，入梅偏晚年，6 月副高西段脊线位置多偏南，副高第一次季节性北跳也偏晚（汪靖等，2008；赵俊虎等，2018）。由上述可见，1982–2019 年印度洋海温持续偏暖（IOBW 指数正异常）对 2019 年江淮流域入梅偏晚有较好的超前指示性能。

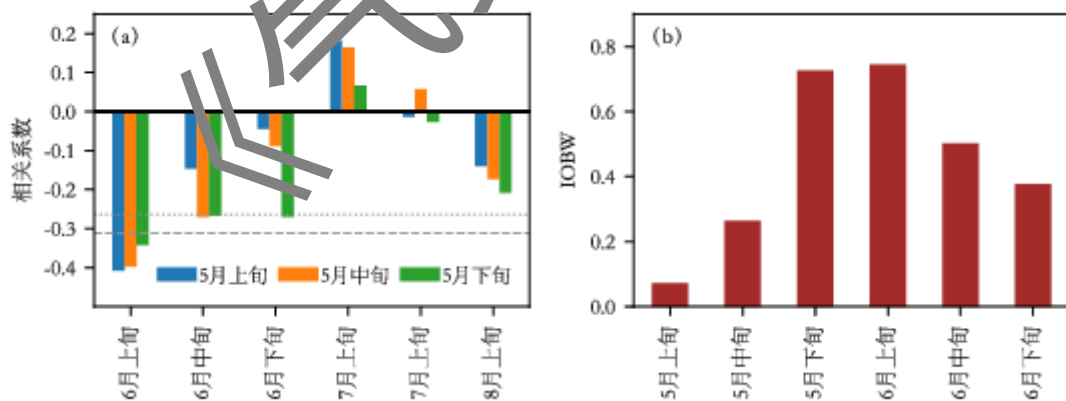


图 4 (a) 1982–2019 年 5 月各旬 IOBW 指数与 6–7 月逐旬副高西段脊线位置距平的时滞相关系数（短划线和点虚线分别指示 $\alpha=0.05$ 和 0.1 的显著性水平）和 (b) 2019 年 5–6 月逐旬平均的 IOBW 指数（单位： $^{\circ}\text{C}$ ）
Fig.4 Time lagged correlation coefficients in ten-day periods between IOBW index in May and the western ridge position anomaly of the Northwest Pacific subtropical high averaged over $110^{\circ}\sim 130^{\circ}\text{E}$ from June to July during 1982 to 2019 (a, dashed line and dotted line show $\alpha=0.05$ and 0.1 significance level) and IOBW index in ten-day periods from May to June in 2019 (b, unit: $^{\circ}\text{C}$)

众所周知,亚洲夏季风爆发与青藏高原迅速增温变暖并加热大气关系密切。季风爆发前后对流层中上层(500~200 hPa)大气平均经向温度梯度(MTGMUT)逆转为正值是加热场变化的主要标志(毛江玉等,2002)。南亚 $60^{\circ}\sim 80^{\circ}\text{E}$ 地区 MTGMUT 逆转的气候平均日期为 5 月 26 日,较江淮流域气候平均入梅日期(6 月 8 日)超前 13 d。2019 年,南亚 $60^{\circ}\sim 80^{\circ}\text{E}$ 地区 MTGMUT 逆转的日期为 6 月 7 日(图 5a),较当年江淮流域入梅日期 6 月 16 日超前 9 d,且两者均较常年偏晚(分别偏晚 12 d 和 8 d)。为进一步验证南亚 $60^{\circ}\sim 80^{\circ}\text{E}$ 地区 MTGMUT 逆转日期与江淮流域入梅日期之间的关系,计算了 1951-2019 年南亚 $60^{\circ}\sim 80^{\circ}\text{E}$ 地区 MTGMUT 逆转日期与江淮流域入梅日期的差值,结果表明这 69 年中绝大部分年份的 MTGMUT 逆转日期都发生在江淮流域入梅日期之前(差值为负值)(图 5b),并且南亚 $60^{\circ}\sim 80^{\circ}\text{E}$ 地区 MTGMUT 逆转日期距平与江淮流域入梅日期距平之间高度正相关(图 5c),相关系数达 0.879,远超 $\alpha=0.05$ 的显著性水平,这表明南亚 $60^{\circ}\sim 80^{\circ}\text{E}$ 地区 MTGMUT 逆转日期偏早(晚)的年份,入梅日期易出现偏早(晚)。由上分析可见,南亚 $60^{\circ}\sim 80^{\circ}\text{E}$ 地区 MTGMUT 逆转的日期偏晚也可作为 2019 年江淮流域入梅偏晚的前兆信号。

3.2 梅雨量南多北少成因分析

既然梅雨的形成是对流层高、中、低层多个大尺度环流系统共同作用的结果,梅雨量的空间分布形态自然与大尺度环流系统活动特征有着密切联系。

在高层,2019 年梅雨季南亚高压东部脊线($110^{\circ}\sim 125^{\circ}\text{E}$)位于 25°N 附近,江淮流域所处经度带的东亚西风急流轴线位于 36°N ,两者所处纬度位置分别较常年同期(图 6a 和图 7a、7b)偏南 1.5° 和 2° ,致使南亚高压东部脊线北侧和西风急流入口区右后方的强辐散区位于长江中下游沿江以南地区。因此,梅雨季高层环流系统位置和辐散抽吸条件更有利于强降雨出现在长江中下游沿江以南,形成梅雨量南多北少分布特征。

在中层,2019 年梅雨季亚欧中高纬环流呈“两槽一脊”型(图 6b),距平场上也呈“-+”分布。高压脊位于贝加尔湖附近,其东侧为低压槽区,且位于较高纬度的鄂霍次克海低压槽与中国东部沿海低压槽形成了同位相叠加之势,高压脊和低压槽的强度均较常年同期偏强,中高纬环流经向度相应偏大。此种中高纬环流特征一方面有利于引导高纬冷空气南下进入江淮流域且势力偏强,另一方面还一定程度地抑制了副高的季节性北跳,2019 年梅雨季副高西部脊线($110^{\circ}\sim 130^{\circ}\text{E}$)平均位于 21°N 附近,较常年同期偏南 $1^{\circ}\sim 2^{\circ}$ 。此外,副高的偏南还与南半球环流异常有关。表 3 给出了 1951-2019 年 6-7 月澳大利亚东侧范围内位势

高度与同期的副高特征指数以及江淮流域累计降水量的标准化序列相关系数。表中清楚显示，
澳大利亚东侧范围

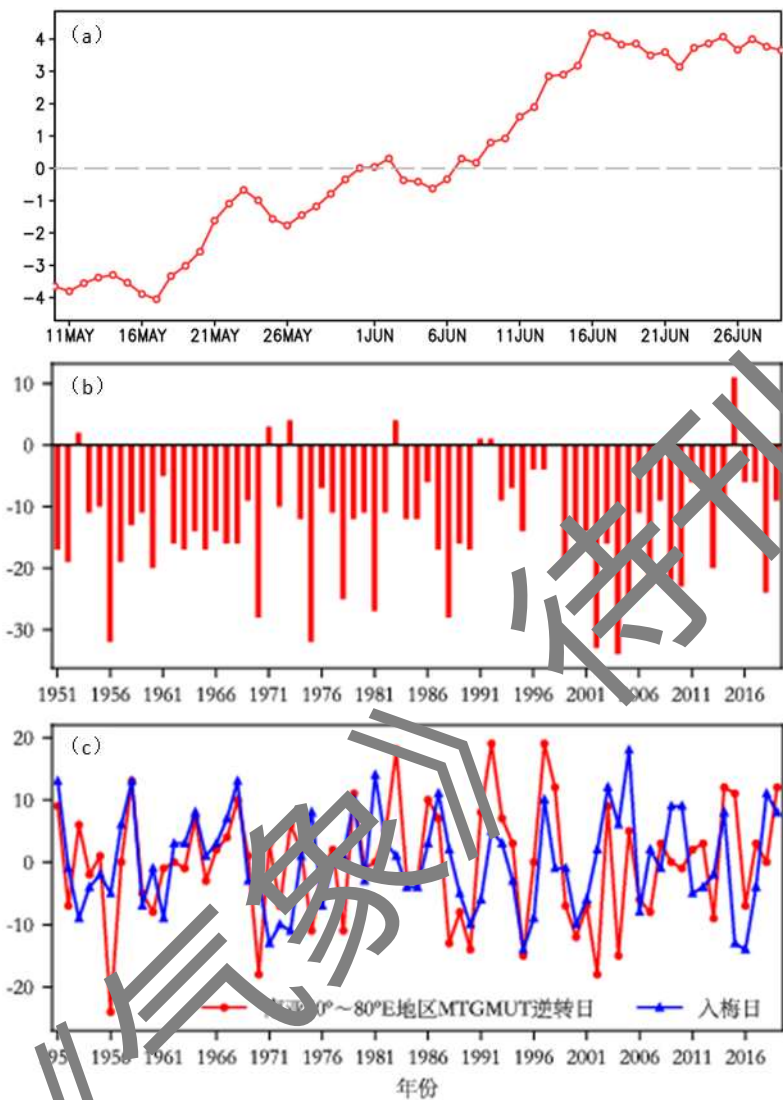


图5 (a) 2019 年逐日的南亚 60°~80°E 地区 MTGMUT (单位: °C) 及 (b, c) 1951-2019 年南亚 60°~80°E 地区 MTGMUT 逆转日期与江淮流域入梅日期的 (b) 差值 (单位: d) 和 (c) 距平 (单位: d)

Fig.5 Daily MTGMUT over 60 °~80 °E of South Asia in 2019 (a, unit: °C) and deviation between the day of MTGMUT reverse and the day of Meiyu onset over the Yangtze–Huai River Basin in 1951-2019 (b, unit: d) and their anomaly (c, unit: d)

内位势高度与副高西段脊线和西伸脊点呈显著的负相关(分别通过了 $\alpha=0.1$ 和 $\alpha=0.05$ 的显著性水平 t 检验), 表明澳大利亚东侧范围内位势高度偏高, 有利于副高西部脊偏南、偏西。研究表明澳大利亚东侧范围内位势高度偏高的这种异常扰动可通过 Rossby 波传播到北半球副热带地区, 形成南北半球高度场的遥相关, 从而使我国南海至菲律宾北部副热带地区位势

高度增加，以及副高西部脊偏南、偏西（刘舸等，2008；周波涛，2011）。副高偏南势必不利于梅雨带位置偏北，表 3 中澳大利亚东侧范围内位势高度与江淮流域的长江以南地区降水量也呈显著的正相关，相关系数高达 0.371，远远超过了 $\alpha=0.05$ 的显著性水平，这表明澳大利亚东侧范围位势高度偏高更有利于江淮流域的长江以南地区降水量偏多，而与江淮流域的长江以北地区降水量相关并不明显。以上分析与 2019 年梅雨季澳大利亚东侧（ $35^{\circ}\sim 25^{\circ}$ S、 $160^{\circ}\sim 170^{\circ}$ E）范围内位势高度总体明显偏高（图 8a），副高偏南偏西，江淮流域长江以南地区降水量显著偏多的特点吻合良好。综上所述，亚欧中高纬环流经向度偏大、副高西部脊偏南、澳大利亚东侧范围内位势高度偏高也是导致 2019 年梅雨量在长江以南明显偏多的重要因素。

表 3 1951-2019 年 6-7 月澳大利亚东侧范围内位势高度与同期副高特征指数以及江淮流域累计降水量的标准化序列相关系数

Table 3 Correlation coefficients of standardized series between the geopotential height over east of Australia and the characteristic indexes of the Northwest Pacific subtropical high and cumulative precipitation over the Yangtze-Huai River Basin from June to July during 1951 to 2019

副高		降水量	
西段脊线 ($110^{\circ}\sim 130^{\circ}$ E)	西伸脊点	江淮流域的长江以南地区 ($28^{\circ}\sim 30.5^{\circ}$ N, $110^{\circ}\sim 123^{\circ}$ E)	江淮流域的长江以北地区 ($30.5^{\circ}\sim 34^{\circ}$ N, $110^{\circ}\sim 123^{\circ}$ E)
-0.202*	-0.443 [§]	0.371	0.013

注：\$（*）分别表示通过了 $\alpha=0.05$ （0.01）的显著性水平检验

Note: \$（*）represents passing the

在低层，东亚夏季风由热带强西风气流和副高南侧偏东气流转向西南气流汇合而成。2019 年梅雨季，来自南半球的索马里和孟加拉湾越赤道气流较常年同期偏强，两股越赤道气流转向为偏西气流后途经印度洋-孟加拉湾-中南半岛进入我国南海和内陆，成为江淮流域主要的水汽输送通道，而源自副高南侧的偏东气流水汽输送相对偏弱（图 6c、6d）。东亚夏季风降水的形成主要归因于东亚夏季风在经向上的辐合，梅雨期强降雨带与低空急流轴左侧的南风经向辐合所形成的水汽通量径向强梯度带基本吻合（牛若芸等，2011）。2019 年梅雨季，东亚夏季风强度总体偏弱（图 8b）、前沿位置偏南，700 hPa 南、北气流的交界地带位于 31° N 附近，较常年同期偏南 $2^{\circ}\sim 3^{\circ}$ （图略）。与之相应，低层水汽通量径向强梯度带也较常年同期偏南，致使长江中下游沿江以南地区处于低层水汽通量径向强梯度带中，非常有利于长江中下游沿江以南地区的水汽辐合上升运动发展和强降雨的形成；而长江中下游沿江以北地区水汽输送及辐合抬升条件均较差，不利于强降雨的形成（图 7c、7d）。为此，东亚

夏季风强度偏弱、前沿位置偏南及伴随的低层水汽通量径向强辐合带偏南是 2019 年梅雨量呈南多北少分布的又一重要因素。

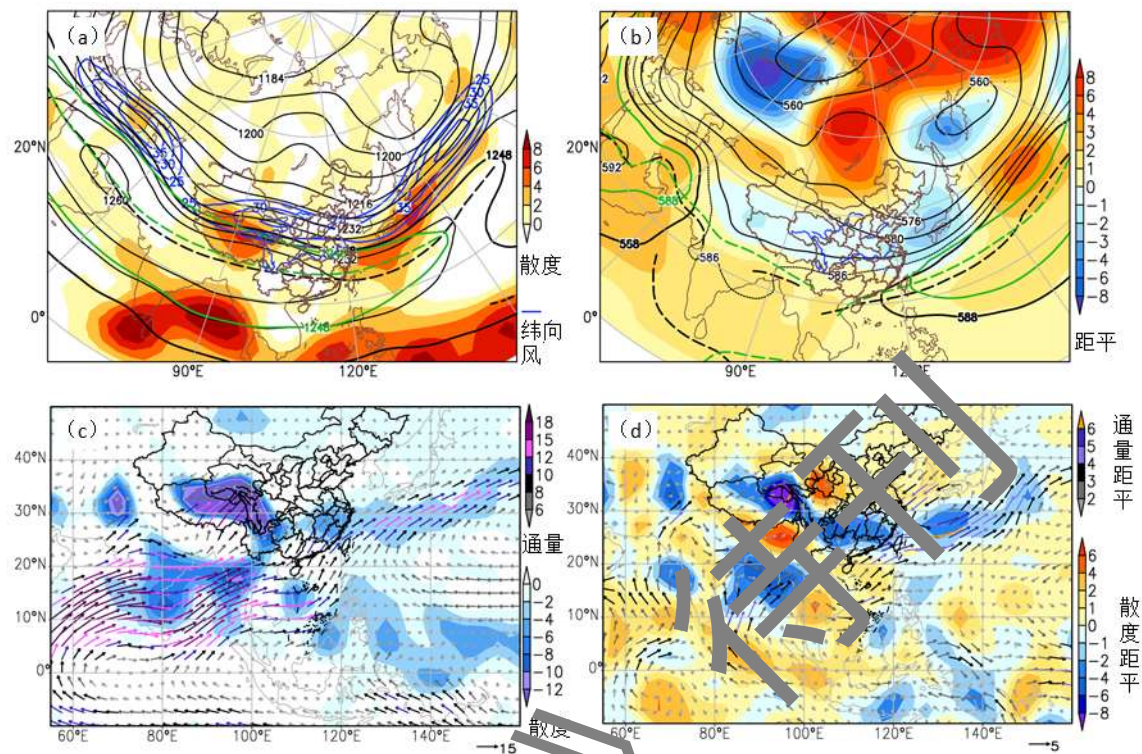


图 6 2019 年江淮流域梅雨季平均的 (a) 200 hPa 位势高度 (黑实线, 单位: dagpm, 黑色长虚线为南亚高压脊线)、纬向风 ($\geq 25 \text{ m s}^{-1}$, 蓝线) 和散度 (填色, 单位: 10^{-6} s^{-1})、(b) 500 hPa 位势高度 (黑实线, 单位: dagpm, 黑色长虚线为副高脊线) 及其距平 (填色)、(c) 850 hPa 水汽通量 (矢量箭头, 单位: $\text{kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$) 及其散度 (填色, 单位: $\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)、(d) 850 hPa 水汽通量距平 (矢量箭头, 单位: $\text{kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$) 及其散度距平 (填色, 单位: $\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)

(绿色线指示同期气候平均的副高和南亚高压及其脊线)

Fig.6 During the Meiyu season in 2019 over the Yangtze-Huai River Basin Averaged geopotential height (black solid line, unit: dagpm, black long-dashed line shows the ridge line of the South Asian high) and zonal wind ($\geq 25 \text{ m s}^{-1}$, blue line) and divergence (shading, unit: 10^{-6} s^{-1}) at 200 hPa(a), geopotential height (black solid line, unit: dagpm, black long-dashed line shows the ridge line of the Northwest Pacific subtropical high) and its anomalies at 500 hPa (shading) (b), water vapor flux (vector arrow, unit: $\text{kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$) and its divergence (shading, unit: $\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) at 850 hPa(c), anomalies of water vapor flux (vector arrow, unit: $\text{kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$) and its divergence (shading, unit: $\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) at 850 hPa (d)

(Green lines show the climatological contemporaneous mean of the Northwest Pacific subtropical high and South Asian high and their ridge lines)

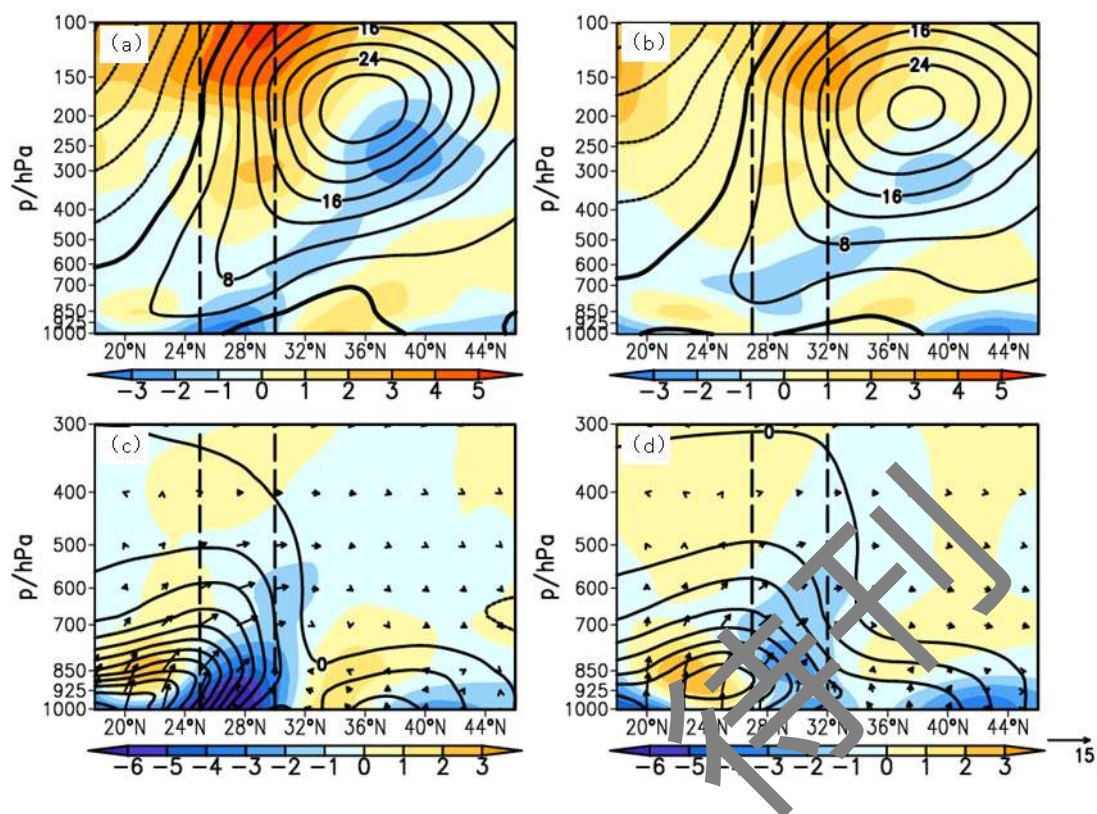


图7 2019 年江淮流域梅雨季 (a, c) 沿 $110^{\circ}\sim 123^{\circ}\text{E}$ 平均的不同物理量纬度-高度剖面及 (b, d) 同期气候平均值

(a, b) 纬向风 (单位: m s^{-1}) 和散度 (填色, 单位: 10^{-6} s^{-1}), (c, d) 水汽通量 (矢量箭头, 黑线为径向分量, 单位: $\text{kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$) 及其散度 (填色, 单位: $\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
(虚线指东亚夏季风影响下的强降雨带位置)

Fig.7 The latitude-altitude cross sections of various physical quantities averaged over $110^{\circ}\sim 123^{\circ}\text{E}$ during the Meiyu season in 2019 over the Yangtze-Huai River Basin (a, c) and their climatological contemporaneous mean (b, d)

(a, b) zonal wind (unit: m s^{-1}) and divergence (shading, unit: 10^{-6} s^{-1}), (c, d) water vapor flux (vector arrow, black lines show the meridional component, unit: $\text{kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$) and its divergence (shading, unit: $\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) (Dashed lines show the area of heavy rain belt under the influence of the East Asia summer monsoon)

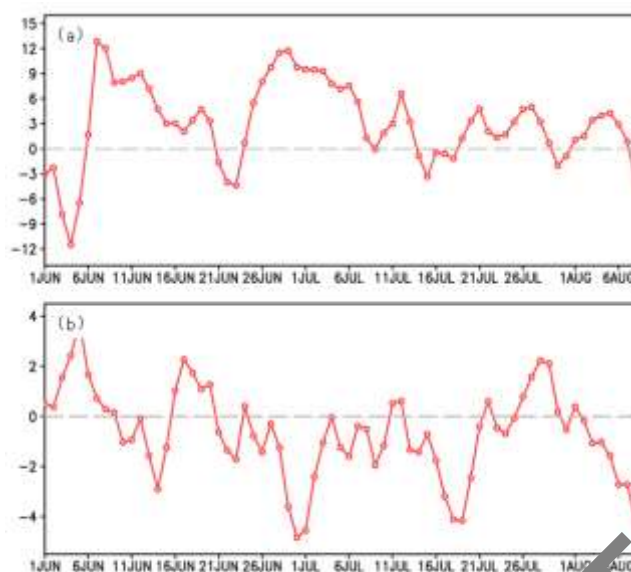


图8 2019年逐日的(a)澳大利亚东侧范围内500 hPa平均位势高度距平(单位: dagpm)和(b)东亚副热带夏季风指数距平(单位: m s^{-1})

Fig.8 Daily anomaly of geopotential height at 500 hPa over east of Australia (a, unit: dagpm) and East Asian summer monsoon index in 2019 (b, unit: m s^{-1})

4 结论

本文利用梅雨监测、降水量观测以及 NCEP 大气再分析和海表温度等资料,对 2019 年江淮流域梅雨异常特征及其大尺度环流成因进行了分析研究,所得主要结论如下:

(1) 2019 年江淮流域梅雨季入梅日期偏晚、长度偏短,梅雨量呈南多北少分布且总体偏少,并且是 1951 年以来梅雨带在长江以南停滞结束时间最晚的一年。三个子区中,江南区和长江中下游区梅雨期基本同步,江淮区出现空梅。

(2) 6 月上旬末至中旬前期冷空气势力的增强,阻碍和延后了东亚夏季风季节性北进的进程,导致了东亚大气环流型由冬季向初夏季转换时间偏晚及江淮流域入梅偏晚。5-6 月印度洋海温偏暖 (IOBW 指数正异常)、南亚 $60^{\circ} \sim 80^{\circ} \text{E}$ 地区 MTGMUT 逆转 (由负转正) 日期偏晚对 2019 年江淮流域入梅偏晚具有较好的超前指示性能。

(3) 2019 年梅雨季高层南亚高压东部脊和东亚西风急流偏南,中层亚欧中高纬环流经向度偏大、副高西部脊偏南、澳大利亚东侧范围内位势高度偏高,低层东亚夏季风强度偏弱、前沿位置偏南。在上述多个大尺度环流系统异常特征共同影响下,江淮流域的长江中下游沿江以南地区处于高层强辐散和低层水汽通量径向强辐合的叠置区中,非常有利于垂直上升运

动发展和强降雨的形成,从而导致了梅雨量南多北少的分布特征。

参考文献

- 鲍名, 2009. 从中期天气过程看近几年长江中下游梅雨偏少的原因[J]. 大气科学, 33(4): 708-718. Bao M, 2009. Causes of deficit Meiyu over the middle and lower reaches of the Yangtze River in the last several years viewed from medium range weather process[J]. Chin J Atmos Sci, 33(4): 708-718 (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, 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).
- 杜银, 张耀存, 谢志清, 2008. 高空西风急流东西向形态变化对梅雨期降水空间分布的影响[J]. 气象学报, 66(4): 566-576. Du Y, Zhang Y C, Xie Z Q, 2008. Impacts of longitude location changes of East Asian westerly jet core on the precipitation distribution during Meiyu period in middle-lower reaches of Yangtze River valley[J]. Acta Meteor Sin, 66(4): 566-576 (in Chinese).
- 何敏, 1993. 1991 年江淮梅雨期间的热带环流异常[J]. 气象, 19(6): 3-7. He M, 1993. Tropical circulation characteristics associated with the severe rainfall in the Jianghuai Area during the summer of 1991[J]. Meteor Mon, 19(6): 3-7 (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).
- 金荣花, 陈涛, 鲍媛媛, 等, 2008. 2007 年梅雨期异常降水的大尺度环流成因分析[J]. 气象, 34(4): 79-85. Jin R H, Chen T, Bao Y Y, et al, 2008. Causes analysis of abnormal rainfall and its large-scale circulation during 2007 Meiyu season[J]. Meteor Mon, 34(4): 79-85 (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).
- 李栋梁, 邵鹏程, 王慧, 等, 2013. 中国东亚副热带夏季风北边缘带研究进展[J]. 高原气象, 32(1): 305-314. Li D L, Shao P C, Wang H, et al, 2013. Advances in research of the north boundary belt of East Asia subtropical summer monsoon in China[J]. Plateau Meteor, 32(1): 305-314 (in Chinese).
- 李莹, 曾红玲, 王国复, 等, 2020. 2019 年中国气候主要特征及主要天气气候事件[J]. 气象, 46(4): 547-555. Li Y, Zeng H L, Wang G F, et al, 2020. Climatic characteristics and major meteorological events over China in 2019[J]. Meteor Mon, 46(4): 547-555 (in Chinese).
- 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 P, Tang X, Ke X X, et al, 2007. Review of study on influencing factors of China Meiyu[J]. Sci Meteor Sin, 27(4): 464-471 (in Chinese).
- 刘舸, 张庆云, 孙淑清, 2008. 澳大利亚东侧环流及海温异常与长江中下游夏季旱涝的关系[J]. 大气科学, 32(2): 231-241. Liu G, Zhang Q Y, Sun S Q, 2008. The relationship between circulation and SST anomaly east of Australia and the summer rainfall in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. Chin J Atmos Sci, 32(2): 231-241 (in Chinese).
- 毛江玉, 吴国雄, 刘屹岷, 2002. 季节转换期间副热带高压带形态变异及其机制的研究 II: 亚洲季风区季节转换指数[J]. 气象学报, 60(4): 409-420. Mao J Y, Wu G X, Liu Y M, 2002. Study on modal variation of subtropical high and its mechanism

- during seasonal transition part II: seasonal transition index over Asian monsoon region[J]. *Acta Meteor Sin*, 60(4): 409-420 (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(6): 1326-1334. Niu R Y, Jin R H, 2009. Causes analysis of large scale circulation of abnormal characteristic in Meiyu period of 2008[J]. *Plateau Meteor*, 28(6): 1326-1334 (in Chinese).
- 牛若芸, 苏爱芳, 马杰, 等, 2011. 典型南涝(旱)北旱(涝)梅雨大气环流特征差异及动力诊断分析[J]. *大气科学*, 35(1): 95-104. Niu R Y, Su A F, Ma J, et al, 2011. The difference of the atmospheric circulation features and dynamical diagnosis about the typical Meiyu patterns of southern flood (drought) and northern drought (flood)[J]. *Chin J Atmos Sci*, 35(1): 95-104 (in Chinese).
- 孙建华, 卫捷, 赵思雄, 等, 2011. 2009 年夏季异常天气及其环流分析[J]. *气候与环境研究*, 16(2): 209-220. Sun J H, Wei J, Zhao S X, et al, 2011. The abnormal weather and its circulation in summer of 2009[J]. *Climatic Environ Res*, 16(2): 209-220 (in Chinese).
- 孙晓晴, 金荣花, 肖天贵, 等, 2020. 江淮梅雨季亚洲阻塞高压活动统计特征[J]. *气象学报*, 78(4): 580-592. Sun X Q, Jin R H, Xiao T G, et al, 2020. Statistical characteristics of Asian blocking activity during the Yangtze-Huaihe Meiyu season[J]. *Acta Meteor Sin*, 78(4): 580-592 (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).
- 王建捷, 陶诗言, 2002. 1998 梅雨锋的结构特征及形成与维持[J]. *应用气象学报*, 13(5): 526-534. Wang J J, Tao S Y, 2002. Structure and formation of Mei-yu front in 1998[J]. *J Appl Meteor Sci*, 13(5): 526-534 (in Chinese).
- 汪靖, 何金海, 刘宣飞, 等, 2008. 江淮入梅异常的强信号及其对入梅的影响[J]. *气象*, 34(6): 35-40. Wang J, He J H, Liu X F, et al, 2008. Previous stronger signal of anomalous Meiyu onset over Yangtze-Huaihe River Valley and its analysis[J]. *Meteor Mon*, 34(6): 35-40.
- 王永光, 郑志海, 2018. 2017 年汛期气候预测偏差量的综合分析[J]. *气象*, 44(4): 565-571. Wang Y G, Zheng Z H, 2018. Precursory signal analysis of summer rainfall prediction in China in 2017[J]. *Meteor Mon*, 44(4): 565-571 (in Chinese).
- 叶德超, 管兆勇, 孙思远, 等, 2016. 2016 年梅雨期间长江中下游强降水与对流层上层斜压波包的关系[J]. *气象学报*, 77(1): 73-83. Ye D C, Guan Z Y, Sun S Y, et al, 2016. The relationship between heavy precipitation in the middle and lower reaches of Yangtze River and baroclinic wave packets in the upper troposphere during the Meiyu period of 2016[J]. *Acta Meteor Sin*, 77(1): 73-83 (in Chinese).
- 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 Meteor Sin*, 75(1): 19-38 (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).
- 张志刚, 金荣花, 牛若芸, 等, 2009. 干冷空气活动对 2008 年梅雨降水的作用[J]. *气象*, 35(4): 25-33. Zhang Z G, Jin R H, Niu R Y, et al, 2009. Activity of dry cold air and its impacts on Meiyu during 2008 Meiyu period[J]. *Meteor Mon*, 35(4): 25-33 (in Chinese).
- 赵兵科, 姚秀萍, 吴国雄, 2005. 2003 年夏季淮河流域梅雨期西太平洋副高结构和活动特征及动力机制分析[J]. *大气科学*, 29(5): 771-779. Zhao B K, Yao X P, Wu G X, 2005. The structure and activity characteristics of the Western Pacific

- subtropical anticyclone and its dynamical mechanism during the Meiyu period over the Huaihe River Basin in 2003[J]. *Chin J Atmos Sci*, 29(5): 771-779 (in Chinese).
- 赵俊虎, 陈丽娟, 熊开国, 2018. 基于新监测指标的江南入梅早晚的气候特征及影响系统分析[J]. *气象学报*, 76(5): 680-698.
- Zhao J H, Chen L J, Xiong K G, 2018. Climate characteristics and influential systems of Meiyu to the south of the Yangtze River based on the new monitoring rules[J]. *Acta Meteor Sin*, 76(5): 680-698.
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会, 2017. GB/T 33671-2017 梅雨监测指标[S]. 北京: 中国标准出版社: 15. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration, 2017. GB/T 33671-2017 Meiyu monitoring indices[S]. Beijing: Standards Press of China: 15 (in Chinese).
- 周波涛, 2011. 冬季澳大利亚东侧海温与长江流域夏季降水的联系及可能物理机制[J]. *科学通报*, 56(16): 1301-1307. Zhou B T, 2011. Linkage between winter sea surface temperature east of Australia and summer precipitation in the Yangtze River valley and a possible physical mechanism[J]. *Chin Sci Bull*, 56(17): 1821-1827.
- 朱伟军, 潘佳, 周兵, 等, 2016. 2011 年南海夏季风爆发过程及其与长江中下游梅雨的联系[J]. *大气科学学报*, 39(1): 37-45.
- Zhu W J, Pan J, Zhou B, et al, 2016. Onset process of South China Sea summer monsoon in 2011 and its relationship with Meiyu over the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. *Trans Atmos Sci*, 39(1): 37-45 (in Chinese).
- 竺夏英, 何金海, 吴志伟, 2008. 长江中下游入梅指数及早晚梅年的海气背景特征[J]. *大气科学*, 32(1): 113-122. Zhu X Y, He J H, Wu Z W, 2008. Regional Meiyu onset index over the middle and lower reaches of the Yangtze River and the associated ocean-atmospheric features for the early/late Meiyu onset years[J]. *Chin J Atmos Sci*, 32(1): 113-122 (in Chinese).
- 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.
- Kanamitsu M, Ebisuzaki W, Woollen J, et al, 2002. NCEP-DOE AMIP-II reanalysis (R-2) [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 83(11): 1631-1644.
- Niu R Y, Zhai P M, 2013. Synoptic verification of medium-extended range forecasts of the Northwest Pacific subtropical high and South Asian high based on multi-sensor TIGGE data[J]. *Acta Meteor Sin*, 27(5): 725-741.
- Niu R Y, Zhai P M, Zhou B Q, 2015. Evaluation of forecast performance of Asian summer monsoon low-level winds using the TIGGE dataset[J]. *Weather Forecasting*, 30(2): 455-470.
- Reynolds R W, Smith T M, Liu C, et al, 2007. Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature[J]. *J Climate*, 20(22): 4473-4496.
- Si D, Ding Y H, Liu Y J, 2009. Decadal northward shift of the Meiyu belt and the possible cause[J]. *Chin Sci Bull*, 54(24): 4742-4748.
- Zhang S L, Tao S Y, Zhang Q Y, et al, 2002. Large and meso- α scale characteristics of intense rainfall in the mid—and lower reaches of the Yangtze River[J]. *Chin Sci Bull*, 47(9): 779-786.