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).

2020年6—7月长江中下游极端梅雨天气特征分析*

陈 涛[1,2,3] 张芳华[1,2] 于 超[1,2] 马 杰[1,2]
张夕迪[1,2] 沈晓琳[1,2] 张 芳[1,2] 罗 琪[1,2]

1 国家气象中心，北京 100081
2 中国气象局-河海大学水文气象研究联合实验室，北京 100081
3 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海)，珠海 519082

提 要： 2020年6—7月我国长江中下游地区出现极端梅雨，长江中下游地区累积降水量超过1998年同期，为1961年以来排名第一。梅雨降水过程持续时间长、间隔短、空间重叠度高、夜间增强特征明显，强降水中心空间分布与大别山、皖南山区和鄂西山区地形特征存在显著相关。分析表明6月降水过程移动性特征明显；7月上旬主雨带稳定在长江中下游沿江地区，降水强度更强，极端性更显著。6—7月亚洲中高纬度维持异常稳定的阻塞形势，西太平洋副热带高压脊线西段始终维持在20°N附近，导致梅雨锋长时间在江淮地区活动；整层水汽输送通量达到3倍气候标准差以上，有利于出现异常强的梅雨降水；在低空西南急流、高空西风急流和东风急流共同作用下，长江中下游地区低空辐合、高空辐散形势显著。梅雨暴雨从天气形势可分为准静止锋、气旋锋生两类过程；前者高空环流较为平直，低层切变和降水带稳定少动；气旋锋生梅雨暴雨伴随显著高空波动，伴有江淮或黄淮气旋东移发展，梅雨锋低涡附近往往伴随有长生命史中尺度对流系统发展，并具有更复杂的β中尺度对流雨带结构。预报检验表明第一类梅雨暴雨过程可预报性较高，而第二类梅雨暴雨过程预报不确定性明显，在欧洲中心数值预报中往往出现低涡急流系统和降水潜热之间的非自然正反馈，导致较明显的天气系统和降水预报偏差。

关键词： 梅雨暴雨，大气环流异常，预报检验
中图分类号： P458 **文献标志码：** A **DOI：** 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.11.003

Synoptic Analysis of Extreme Meiyu Precipitation over Yangtze River Basin During June—July 2020

CHEN Tao[1,2,3] ZHANG Fanghua[1,2] YU Chao[1,2] MA Jie[1,2]
ZHANG Xidi[1,2] SHEN Xiaolin[1,2] ZHANG Fang[1,2] LUO Qi[1,2]

1 National Meteorological Centre, Beijing 100081
2 CMA-HHU Joint Laboratory for Hydrometeorological Studies, Beijing 100081
3 Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082

Abstract: Extreme Meiyu struck Yangtze River Basin (YRB) from June to July 2020. The accumulated precipitation in the middle and lower reaches of Yangtze River exceeded that of the same peroid in 1998 and was the most accumulated precipitation since 1961. The Meiyu rainfall events this year were characterized by long-time duration, short intervals and spatial overlapping with nocturnal rainfall peak. Accumulated precipitation centers were obviously correlated with topographical features of Dabie Mountain, Wannan

* 国家重点研发计划(2017YFC150210和2020YFC1510400)共同资助
2020年8月10日收稿； 2020年10月12日收修定稿
第一作者：陈涛，主要从事定量降水预报与中尺度对流系统诊断分析工作. E-mail：chentao@cma.gov.cn

Mountain and mountainous territory in the west of Hubei Province. Analysis reveals that main rainbelt swung significantly over YRB in June with quasi-stationary rainbelt along Yangtze River in July. Staggering of Meiyu front over YRB was correlated with persistence of strong blocking high pressure systems in mid-high latitude zones of Asia and abnormal position of the Western Pacific subtropical high staging at about 20°N during July with significant positive vapor flux anomaly beyond 3σ over YRB. Due to the interaction of low-level southwest jet, upper-level westerly jet and upper-level easterly jet, displacement of low-level convergence with upper-level divergence was conducive to intense precipitation along Meiyu front. Heavy rainfall events on Meiyu front could be identified into two synoptic types. One type was quasi-stationary Meiyu front, and the other type featured mesoscale cyclogenesis on Meiyu frontal zone. The former type was dominated by steady quasi-zonal upper-level flow, and staggered low-level wind shear zones with quasi-stationary rainbelts. The other type of rainstorm events developed with distinct cyclonegenesis along Meiyu front, and was accompanied by long-life mesoscale convective systems organized with complicated meso-β scale convective rainbelt adjoining to low-level vortexes. Forecast verifications indicate that there is high predictivity for the first type of heavy rain events, while the second type of Meiyu events has low predictivity and more uncertainty. Obvious forecast deviations tend to occur due to unrealistic positive feedback between over-intensified low-level vortex, precipitation latent heat releasing and low-level jet enhancing in ECMWF-HR forecast.

Key words: Meiyu rainstorm, atmospheric circulation anomaly, forecast verification

引 言

梅雨汛期是我国最为重要的雨季，持续性梅雨暴雨往往给长江中下游地区造成严重的洪涝灾害。陶诗言(1980)系统总结了我国梅雨的天气形势特征，分析了历史上持续性、极端性梅雨暴雨过程的天气特点。1998年长江中下游地区出现“二度梅”，持续性强降水在南方地区引发了严重洪涝灾害，中国气象局于2000年后组织了两次“973”项目以及南方暴雨野外观测试验，在南方暴雨中尺度观测分析、多尺度天气特征以及数值预报发展上取得丰富研究成果。丁一汇等(2007)总结了东亚梅雨系统的天气和气候特征，比较了中国梅雨与日本梅雨的特征差异，孙建华和赵思雄(2003)分析了1998年极端梅雨暴雨的异常环流特征，张庆云等(2003)研究了导致长江流域暴雨洪涝的夏季风环流和低频振荡特征。

梅雨锋具有副热带锋和斜压冷锋的混合性质，中国大陆地区的梅雨锋温度梯度较弱，湿度梯度明显并具有很强的低层风场水平切变(Chen and Chang,1980;Trier et al,1990)，在地形、日变化等中尺度影响因子下，梅雨暴雨形成机制复杂；Chen et al(2006)研究表明对流潜热释放能够导致梅雨锋显著锋生和涡度增长，进一步导致梅雨锋暴雨发展机制的复杂性。张小玲等(2004)将梅雨锋暴雨概括为中尺度对流性暴雨、梅雨锋东部初生气旋引起的暴雨、梅雨锋西段高空低压槽前的持续性暴雨。近年来针对梅雨锋降水形成机制的研究更为深入，Luo et al(2014)分析了梅雨锋对流系统组织结构对降水的影响，Guan et al(2020)和Chen et al (2017)利用多源资料详细分析了梅雨锋降水的日变化特征，指出夜间急流增强与地形的相互作用过程对于梅雨锋降水维持和增强有重要影响，Fu et al(2017)基于数值模拟试验分析了大别山地形对低涡发展和对流系统的影响。

2020年6—7月长江中下游地区出现持续性极端梅雨降水，受强降水影响长江中下游地区出现历史罕见的洪涝灾害(刘芸芸和丁一汇，2020；张芳华等，2020)。根据国家气候中心监测，自2020年6月9日入梅开始(常年为6月14日)至7月31日出梅，梅雨期长达52 d(常年为29 d)，梅雨雨带基本稳定在西南地区东部至江淮地区，强降水天气过程多、间歇时间短、雨区重叠度高、累积雨量大。本文将初步概括2020年极端梅雨降水特征，分析异常强降水基本成因，针对两类梅雨暴雨过程的天气尺度和中尺度特征进行对比分析，进行初步的业务预报检验和预报偏差分析，提出可进一步深入研究的科学问题。

1　数据与方法

分析数据集(表 1)主要采用 NCEP/GFS Analysis以及 ERA5 高分辨率再分析数据,实况数据采用从国家气象信息中心获取的中国国家级和区域级气象观测站降水数据集、CMORPH-QPE 定量降水估测、全国组网雷达组合反射率以及 ECMWF-HR 等业务数值预报产品。CMORPH-QPE 融合了全国加密自动站、多源卫星反演降水数据,评估结果表明具有较高的准确率(Shen et al,2010)。国家站气候背景采用国家气象信息中心整编的 1981—2010 年气候背景数据集。

表 1　分析和观测数据集特征

Table 1　Characteristics of datasets

数据集名称	水平格距	时间间隔	数据集类型特征
NCEP/GFS Analysis	0.5	6 h	NCEP GFS 再分析
ERA5	0.25°	1 h	EC 高分辨率再分析
中国国家站、区域站降水	站点	1 h	国家站数为 2422 个,区域站数大于 60000 个
全国组合反射率拼图	0.1°	6 min	格点化数据
CMORPH-QPE	5 km	1 h	全国逐时定量降水估测
ECMWF-HR	~ 9 km	3 h	EC 确定性模式降水和形势预报

文中使用标准化距平进行异常分析气象因子分析,定义物理量 x 的气候平均标准差 σ 为:

$$\sigma=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(x_i-\bar{x})^2}{N-1}}$$

式中 $\bar{x}$ 为 1981—2010 年 30 年同期气候平均,则标准化距平 I(无量纲量)为

$$I=\frac{x-\bar{x}}{\sigma}$$

标准化距平表达了观测样本与气候平均状况的偏差程度。通常认为,标准化距平超出 $\pm0.5\sigma$ 为"较为异常",$\pm2.5\sigma$ 以上可用于判定极端天气事件中因子异常特征。

2　梅雨降水过程时空分布特征

2.1　降水时空分布特征

图 1a 为 2020 年 6 月 1 日至 7 月 31 日区域观测站累积降水量,主雨带主要集中在贵州、四川、重庆至长江中下游地区,淮河流域到长江中下游流域降水量普遍超过 500 mm,其中在长江沿江地区附近出现 3 个面积较大的超过 1000 mm 的强降水区,分别位于①湖北东部到安徽西南部大别山区,②江西东北部、安徽南部到浙江西部新安江流域,③湖北西南部到湖南西北部;此外在重庆北部还存在一个面积较小的 1000 mm 以上降水中心。安徽黄山、祁门、岳西,以及湖北鹤峰是国家站累积降水量前 4 名,累积降水量均在 1500 mm 以上。强降水中心空间分布与长江中下游地形特征有密切的关系,图 1b 表明 6—7 月累积降水量大于 1000 mm 的国家站集中分布在湖北东部至安徽西南部的桐柏山—大别山区、安徽南部皖南山区,湖北西南部鹤峰强降水中心也与鄂西山区地形特征相关。

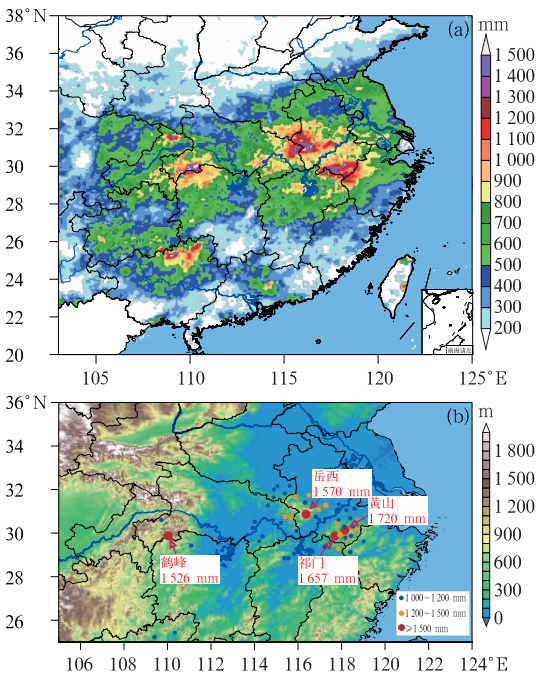


图 1　2020 年 6—7 月(a)区域站累积降水量,以及(b)降水量超过 1000 mm 的国家站点分布和地形海拔高度(填色)

Fig. 1　(a) Accumulated precipitation, and (b) topography elevation (colored) and distribution of the national stations with precipitation beyond 1000 mm during June—July 2020

图 2 为 2020 年 6 月 1 日至 7 月 31 日长江中下游流域国家站总降水量累积分布，长江流域降水量为 550.4 mm，超过 1998 年同期，成为 1961 年以来最多。表 2 为 2020 年 6—7 月长江中下游地区国家站和区域站降水统计，国家站降水量最大值出现在安徽黄山(1720 mm)，区域站降水量极大值出现在安徽大别山以南的太湖站(2161 mm)；单日区域站降水量最大值出现在 7 月 7 日江西鄱阳莲花山站(538 mm)。

2020 年 6 月区域站累积降水量超过 500 mm 的降水中心主要分布在华南中北部和长江中下游沿江地区(图 3a)，高正距平区主要出现在长江以北(图 3b)，其中江汉、江淮和沿淮地区的降水量超出常年平均 1 倍以上，江汉西部、淮北地区部分地区超过 2 倍以上，6 个国家站点降水量距平超出常年 3 倍以上。与 6 月相比，7 月长江中下游沿江地区降水明显增强(图 4a)，500 mm 以上降水区分布与 6 月降水中心基本重叠、面积扩大；从距平场分析 7 月长江中下游沿江地区超出常年同期 2 倍以上的面积显著扩大(图 4b)；湖北东部、江西中北部、安徽南部共 13 个国家站点降水量超过常年同期 3 倍以上，表明 7 月降水具有更强的极端性。

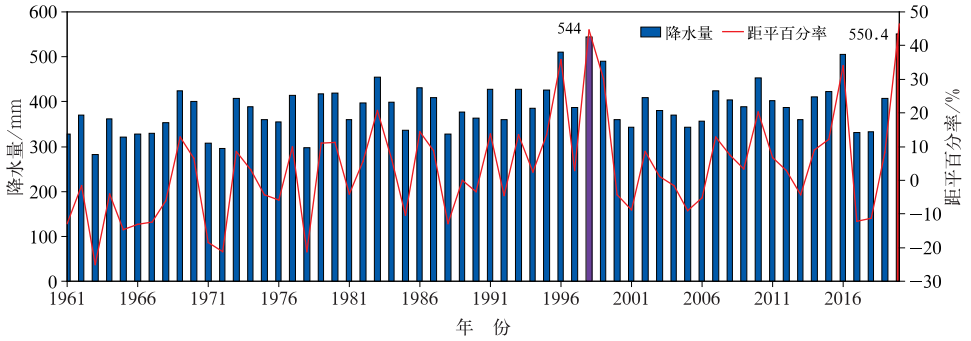


图 2 1961—2020 年 6 月 1 日至 7 月 31 日长江中下游流域国家站平均累积降水量和距平百分率

Fig. 2 The average accumulated precipitation and anomaly percentage over Yangtze River Basin from 1 June to 31 July during 1961－2020

表 2 2020 年 6—7 月长江中下游地区降水量统计(单位：mm)

Table 2 Precipitation statistics in Yangtze River Basin from June to July 2020 (unit: mm)

统计量	国家站	区域站
6—7 月降水量最大值	安徽黄山：1720	安徽太湖：2161
6 月降水量最大值	安徽岳西：819	安徽太湖：1071
7 月积降水量最大值	安徽黄山：1130	湖北黄冈：1517
24 h 降水量最大值	江西吉安(7 月 9 日)：375	江西鄱阳莲花山(7 月 7 日)：538

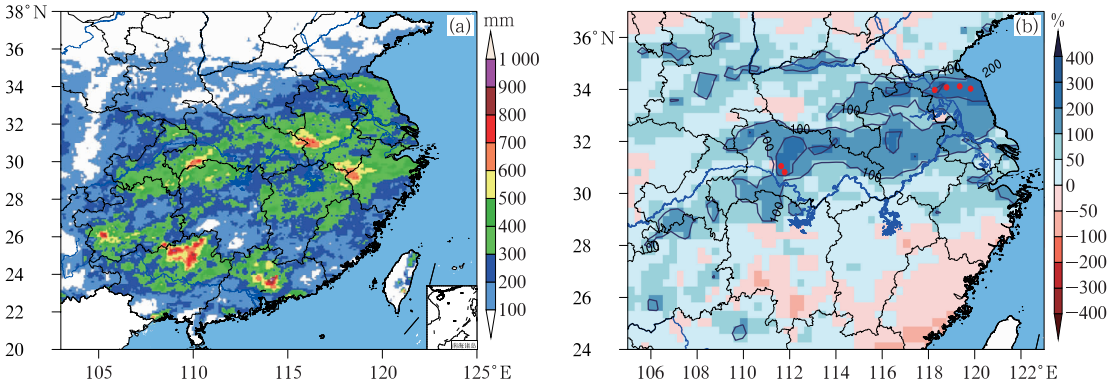


图 3 2020 年 6 月(a)区域站累积降水量和(b)降水距平百分率(填色，红色站点＞300%)

Fig. 3 (a) Monthly accumulated precipitation and (b) anomaly percentage (colored, red dots of stations ＞300%) in June 2020

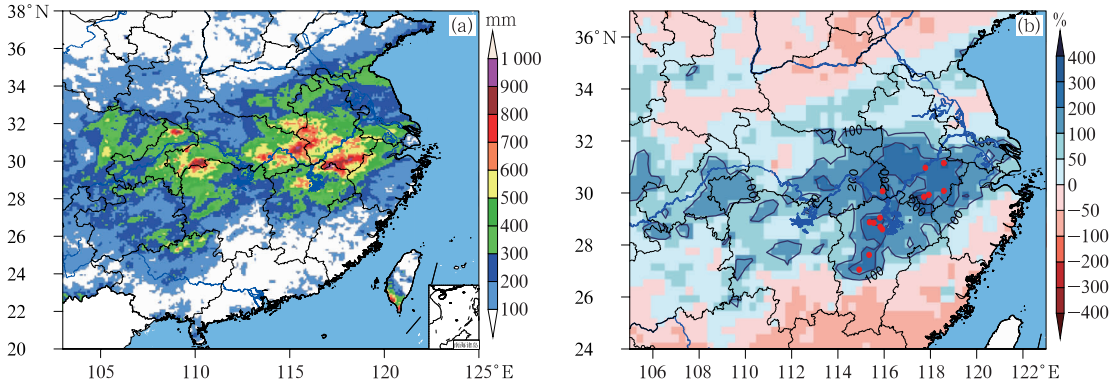


图 4　同图 3,但为 2020 年 7 月

Fig. 4　Same as Fig. 3, but for July 2020

2.2　梅雨降水过程特征

2020 年 6—7 月我国南方地区一共出现 11 轮强降水过程(表 3),除 6 月 2—9 日华南至江南南部地区的强降水过程外,其余 10 次过程均集中出现在江淮地区,降水过程空间重叠度高、持续时间长、间隔时间短。从暴雨站次看,最强的两次过程出现在 7 月 4—9 日和 15—19 日,分别对应了长江中下游和淮河流域的最强降水过程。

图 5 为我国南方地区 6—7 月 CMORPH-QPE 的时间-纬度变化,6 月降水过程多以自北向南移动性过程为主,降水带和 850 hPa 风场切变位置南北振幅较大,降水持续时间相对较短。7 月上旬降水集中在长江中下游沿江地区 30°N 附近,其中 7 月 4—9 日长江中下游地区降水过程持续时间长、强度大,在暴雨站次、区域平均雨量特征上均是 2020 年度最强的梅雨暴雨过程。降水过程发展前都伴随着低空西南风增强和比湿增加,降水区北界与偏南风纬度北界位置基本一致,强降水中心与急流中心的空间位置配合更好。

表 3　2020 年 6—7 月中国南方地区国家站暴雨过程统计表

Table 3　Statistics of severe precipitation events of national stations during June to July 2020

编号	起止日期	暴雨影响区域	发生站次			过程最大降水量
			暴雨	大暴雨	特大暴雨站次	
1	6 月 2—9 日	华南、江南、西南地区东部	449	81	5	广西永福(683 mm)
2	6 月 11—14 日	西南地区东部、江汉江淮	222	27	0	湖北鹤峰(250 mm)
3	6 月 15—17 日	四川盆地、陕西南部、淮河流域	242	41	2	江苏灌南(315 mm)
4	6 月 20—25 日	长江中下游地区、江南	315	56	1	安徽岳西(280 mm)
5	6 月 26—30 日	四川盆地、长江中下游	344	60	1	湖北宜昌(234 mm)
6	7 月 1—2 日	西南地区东部、长江中下游	225	25	0	湖北枝江(186 mm)
7	7 月 4—9 日	四川东部、长江中下游	519	69	3	安徽黄山(572 mm)
8	7 月 10—12 日	西南地区东部、江汉黄淮江淮	214	35	0	江苏赣榆(226 mm)
9	7 月 15—19 日	四川盆地、淮河流域	360	75	3	安徽金寨(496 mm)
10	7 月 21—23 日	四川盆地、黄淮	183	53	0	河南方城(263 mm)
11	7 月 24—27 日	四川盆地、长江中下游	129	17	0	湖北建始(262 mm)

2.3　降水日变化特征

中国暖季降水具有显著的日变化特征,Yu et al (2007)指出超过 6 h 的持续性降水过程中最大小时降水量往往出现在清晨,而持续 1～3 h 的短时降水事件的最大小时降水量往往出现在午后。从 2020 年 6—7 月长江中下游地区 CMORPH-QPE 逐时降水量统计分析(图 6a),降水存在双峰型分布特征,16—18 时左右出现弱的午后降水峰值;20 时入夜以后降水减弱,次日 02 时之后降水又开始增强,降水峰值出现在 06—08 时左右,强度显著强于午后降水。CAPE 逐时变化表现为明显的单峰型分布,17 时前后 CAPE 达到最高值,长江中下游的午后降水峰值与日变化造成的热力不稳定相关。

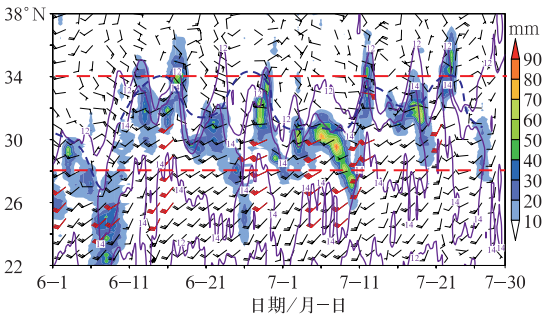


图 5 2020 年 6—7 月 CMORPH-QPE(填色)、850 hPa 风场和比湿(紫线,单位:g·kg^{-1})的 110°～120°E 平均时间-纬度分布

(蓝虚线代表风场切变线位置,红虚线之间的 28°～34°N 覆盖长江中下游流域到淮河流域大部地区)

Fig. 5 Time-latitude distribution of CMORPH-QPE (colored), wind and specific humidity (purple line, unit: g·kg^{-1}) at 850 hPa averaged over the Yangtze River Basin Region within 110°－120°E

(Blue dashed line is for horizontal wind shear zone, and zonal range of Yangtze River Basin between 28°N and 34°N is marked with two red dashed lines)

图 6b 表明主降水带上游江南地区(25°～30°N、110°～120°E)850 hPa 上低空急流的夜间活动频率显著增高,急流高频时段出现在 05 时前后。图 6c 为江南地区 850 hPa 扰动风场逐时变化,扰动风场具有显著的惯性振荡特征,22 时至次日 07 时之间为偏南风扰动,05 时出现最大的西南风扰动,风场扰动峰值时间较降水峰值提前 1～2 h 左右,具有一定的预报指示意义。Chen et al(2017)研究表明,中国南方季风气流夜间加速过程对梅雨锋夜间降水的水汽、能量输送和对流发展都有重要作用,但夜间急流加强机制复杂,地形、辐射物理过程以及对流自身反馈作用都影响夜间急流的发展,仍然需要进一步研究。

3 持续性异常强降水的大气环流特征

3.1 大气环流异常特征

2020 年 6 月中高纬度 500 hPa 鄂霍次克海阻塞高压异常强大(图 7a),高度场正距平超过 80 gpm,两个负距平中心分别位于中亚和远东地区,冷空气活动较为频繁。低纬度西太平洋副热带高压(以下简称副高)脊线位于 20°N 附近,副高脊线位置与气候平均接近,但副高西脊点明显较气候平均偏西,有利于副高西侧边缘出现较活跃的北上暖湿气流,长江中下游地区较早出现降水过程,这也是 2020 年梅雨日期开始偏早的原因之一。

7 月天气形势特征发生一定变化(图 7b),75°N 以北极地地区受显著正距平控制,极地冷空气在贝加尔湖以北地区形成定常冷涡,中高纬度地区维持稳定的双阻塞高压形势,大尺度经向环流形势有利于冷空气南下活动。低纬度地区副高东段有显著增强北抬,然而副高西段脊线仍然位于 20°N 附近,较常年偏南 2～3 个纬距,副高北侧的梅雨锋仍然位于长江中下游地区;由于多次江淮、黄淮气旋入海发展,

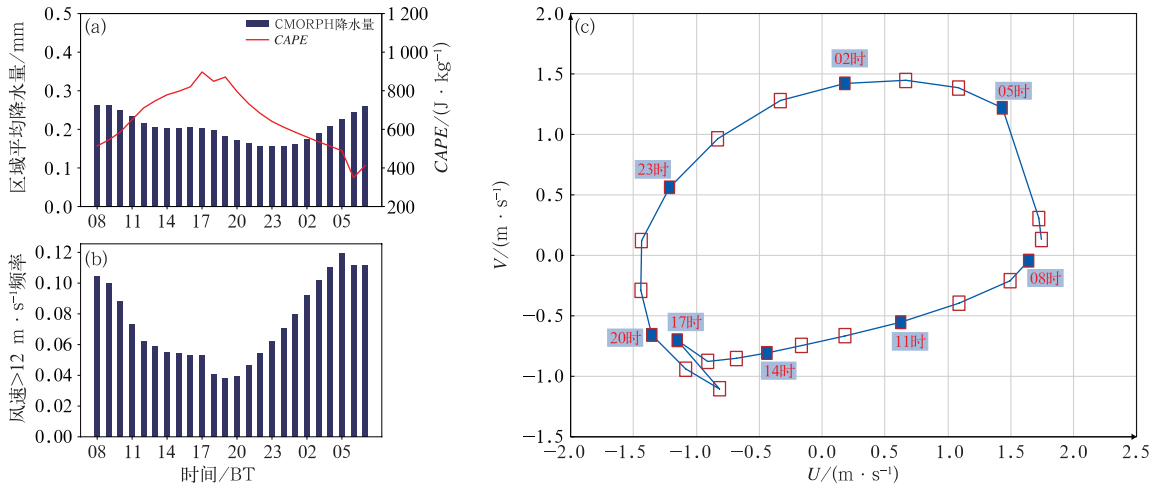


图 6 2020 年 6—7 月(a)长江中下游平均 CMORPH 降水量、CAPE 和(b)江南地区 ERA5 850 hPa 风场风速>12 m·s^{-1}频率的日变化,以及(c)ERA5 850 hPa 风场扰动逐时变化玫瑰图

Fig. 6 Diurnal variation of (a) CMORPH precipitation averaged and CAPE, and (b) frequency of 850 hPa wind speed >12 m·s^{-1} from June to July 2020 over Yangtze River Basin, and (c) wind rose plot for hourly wind perturbations at 850 hPa from ERA5 dataset

导致大陆东部海区上出现明显的负距平区。在高中低纬度天气系统的共同作用下,江淮地区 6—7 月出现异常长时间的梅雨降水以及极端累积降水量。

3.2　水汽输送异常特征

从 2020 年 7 月整层积分水汽通量分析(图 8a),通过来自孟加拉湾—中南半岛和南海的两条水汽通道的汇合输送,从华南到江南形成高水汽通量区,长江中下游地区出现明显的水汽通量辐合,水汽通道特征与 Zhou and Yu(2005)研究结果较为一致。从标准化距平分析,长江中下游地区水汽通量达到 3 σ 以上,有利于形成极端强降水。整层大气可降水含量(PWAT)平均分布(图 8b)表明,长江中下游地区 PWAT 平均值高于 50 mm,在洞庭湖、鄱阳湖地区出现两个 60 mm 以上的 PWAT 高值中心,标准化正距平中心达到 4 σ 以上,环境水汽条件非常有利于强降水产生。

3.3　梅雨锋水平和垂直异常特征

梅雨锋是形成梅雨降水的重要影响天气系统,从 2020 年 7 月平均天气形势场分析(图 9),在华北高压和副高之间形成稳定的东西向江淮低空切变线,江淮地区形成梅雨锋对应的正涡度区和低层辐合区。四川盆地位于青藏高原下游背风坡,盆地内形成定常低涡系统,若有明显的高空槽或者高原槽东移,往往带动低涡系统沿着切变线东移发展,在长江中下游地区形成大范围强降水过程。从 850 hPa 风场看,华南至江南地区盛行低空西南气流,而梅雨锋以北盛行偏东气流,梅雨锋两侧风场南北风标准化距平在 0.5 σ～1 σ,有利于在梅雨锋区造成低层异常辐合和正相对涡度增长。

从长江中下游地区 110°～120°E 纬向平均的垂直剖面上(图 9b),江南到江淮地区的 600 hPa 以下存在显著条件不稳定性,西南低空急流 LLJ 位于对流层低层 850～925 hPa,高西风急流中心位于 35°N、200 hPa 附近,风速中心超过 28 m·s^{-1},低纬度地区东风急流中心高度超过 100 hPa,在高低空急流的相互作用下,30°N 附近能够形成的显著的高层辐散和低层辐合,有利于强梅雨降水的发展(矫梅燕等,2006)。从上升运动标准化距平看,中层上升

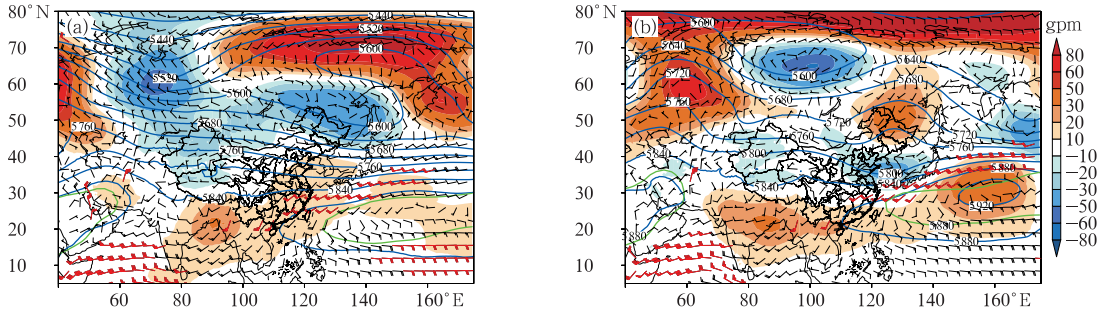


图 7　2020 年(a)6 月和(b)7 月平均 500 hPa 高度场(等值线,单位:gpm)、距平(填色)和 850 hPa 风场
(绿线为气候平均 5 880 gpm)

Fig. 7　Monthly averaged 500 hPa geopotential height (contour, unit: gpm), anomaly (colored) and wind at 850 hPa in June (a) and July (b) 2020
(Green line represents climate mean 5 880 gpm)

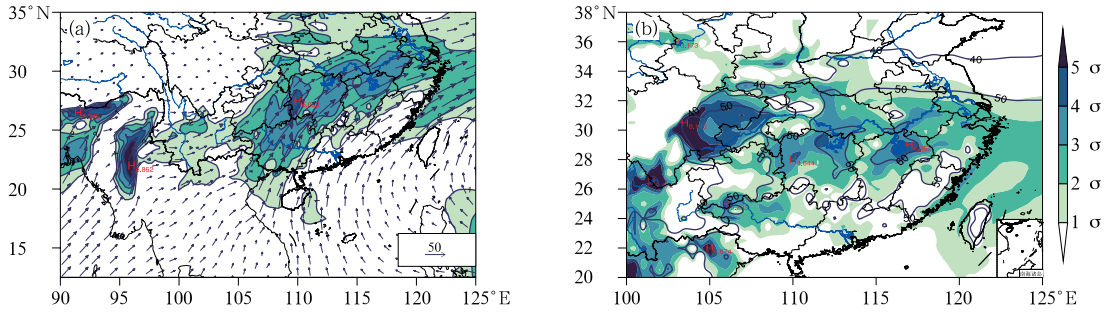


图 8　2020 年 7 月(a)平均大气整层积分水汽通量(单位:kg·m^{-1}·s^{-1})和
标准化距平(填色),(b)PWAT(等值线,单位:mm)和标准化距平(填色)

Fig. 8　(a) Averaged accumulated water vapor flux in the whole layer (unit: kg·m^{-1}·s^{-1}) and standardized anomaly (colored); (b) averaged PWAT (contour, unit: mm) and standardized anomaly (colored) in July 2020

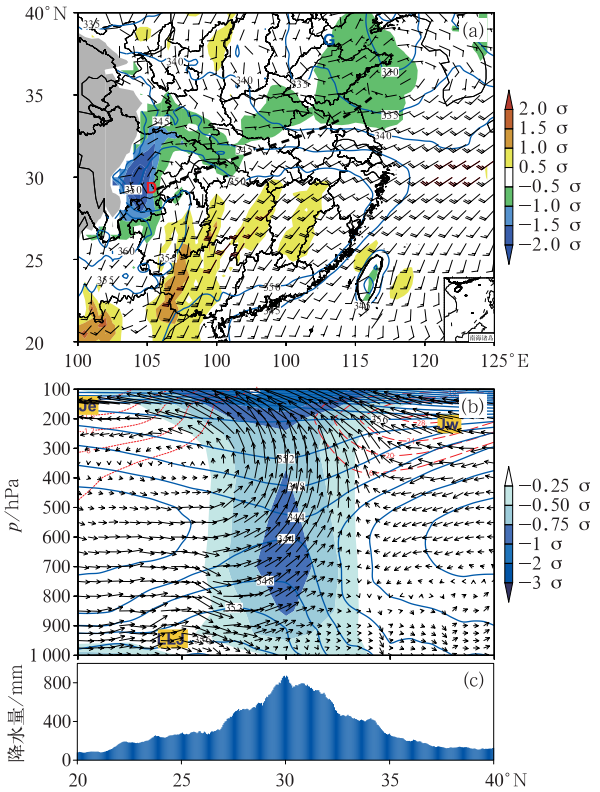


图 9 2020 年 7 月(a)850 hPa 平均风场、相当位温 θ_e(蓝线,单位:K)以及经向风标准化距平(填色)(灰色区域海拔高度大于 2500 m);(b)110°～120°E 平均 θ_{se}(蓝线,单位:K)、垂直速度标准化距平(填色)垂直剖面和 v—w 合成矢量(箭头,w 放大 10 倍)(红虚线为高层纬向风分量,Jw 代表高层西风急流中心,Je 代表高层东风急流,LLJ 代表低空西南急流);(c)110°～120°E 平均纬向 CMORPH 累积降水量

Fig. 9 (a) Monthly averaged wind and θ_e (blue lines, unit: K) at 850 hPa and standerdized anomaly of meridional wind (colored) (grey zone: topography height beyond 2500 m); (b) vertical section of 110°—120°E θ_{se} (blue lines, unit: K), updraft anomaly (colored) and wind vector (arrows, w amplified 10 times) composed by meridional and updraft movement with upper-level zonal wind speed (red dashed lines) (LLJ: low level jet, Jw and Je: west and east upper-level jets); (c) zonal monthly accumulated precipitation from CMORHP-QPE averaged over 110°—120°E in July 2020

运动距平在 0.75 σ～1 σ,对应了梅雨锋区上的异常强上升运动,图 9c 也表明梅雨锋降水峰值中心位于 30°N 附近的长江中下游沿江地区。

4 两次强梅雨暴雨过程的天气尺度系统特征比较

根据梅雨锋天气形势特征,梅雨锋暴雨可分为两类基本暴雨过程(朱乾根等,2007),一类是由准静止梅雨锋、江淮切变线引起的强降水过程,降水带呈现准东西向分布并较为稳定;一类为高空槽配合江淮切变线上低涡移动,江淮或者黄淮气旋发展的降水过程,强降水带具有显著空间变化。根据表 3 统计,6—7 月降水过程共计有 49 个暴雨日,按逐日主要影响天气系统分析,以准静止梅雨锋活动为主的有 29 个暴雨日,占总暴雨日数的 59%;存在明显低涡和气旋活动特征的有 20 个暴雨日,占总暴雨日数的 41%。以 7 月 5 日作为准静止梅雨暴雨过程个例代表,以 7 月 18 日江淮气旋暴雨过程作为代表进行分析。

7 月 5 日 30°N 附近 500 hPa 环流较为平直(图 10a),低层 850 hPa 切变线稳定维持在长江中游沿江地区,暴雨区位于低空切变线附近到西南暖湿急流左前侧位置。降水回波以准东西向带状的层积混合型回波为主(图 10b),强降水回波单体基本向偏东方向移动,降水强度一般为 20～40 mm·h^{-1},局地可超过 50 mm·h^{-1},由于降水带维持稳定、降水时间长,主降水带上 34 个国家站 24 h 累计降水量达到 100 mm 以上。

7 月 18 日 30°N 附近有较清楚的高空槽(图 11a),在槽前正涡度平流的作用下,低层切变线上有 2 个低涡系统发展并相继发展为江淮气旋出海,在气旋移动路径上形成大范围强降水。图 11b 表明 7 月 18 日 20 时梅雨锋上形成两个中尺度对流系统(MCS),MCS-P1 和 MCS-P2,其中 MCS-P1 与梅雨锋西段低涡系统相关,整体位于 925 hPa 切变线以北位置,在南侧的对流边界上存在多条基本平行的西南—东北走向 β 中尺度线状对流,在“列车效应”作用下局地降水强度可达 20～40 mm·h^{-1},降水强度时间变化明显。梅雨锋东段的 MCS-P2 位于 925 hPa 切变线南侧;强降水回波稳定维持在大别山南麓地区,降水强度可达 30～60 mm·h^{-1}。从 CMORPH-QPE 降水的经度-时间变化特征看(图 11c),MCS-P1 具有显著的向东移动的特征,生命史超过 12 h;而 MCS-P2 稳定维持,没有显著的移动特征,持续 24 h 的降水过程导致 18 日大别山地区降水量达到 200～300 mm。

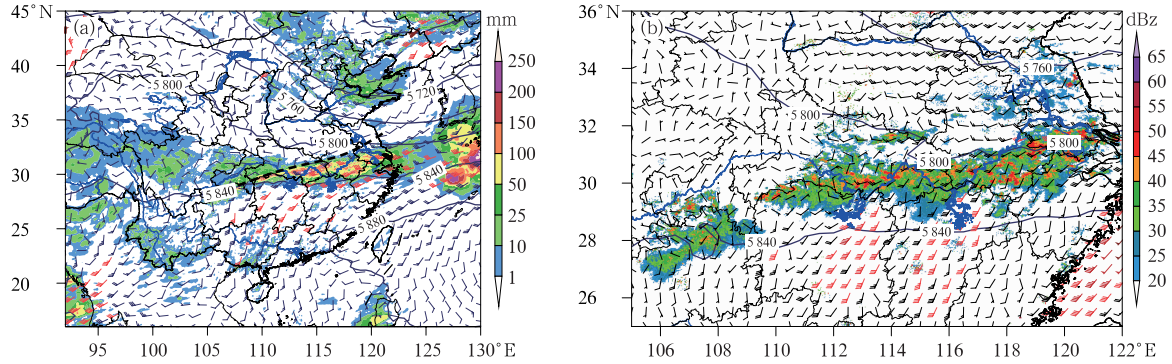


图 10　2020 年 7 月(a)5 日 20 时 500 hPa 高度场(等值线,单位:gpm)、850 hPa 风场以及 5 日 08 时至 6 日 08 时 CMOPRPH-QPE(填色)(a,粗虚线代表江淮切变线),(b)6 日 02 时 500 hPa 高度场(等值线,单位:gpm)、925 hPa 风场以及组合反射率因子(填色)

Fig. 10　(a) Geopotential height at 500 hPa (contour, unit: gpm), wind at 850 hPa at 20:00 BT 5 and CMORPH-QPE (colored) from 08:00 BT 5 to 08:00 BT 6 July (Dashed line is for horizontal shear zone over the Yangtze River Basin); (b) geopotential height at 500 hPa (contour, unit: gpm), wind at 925 hPa and composite reflectivity factor (colored) at 02:00 BT 6 July 2020

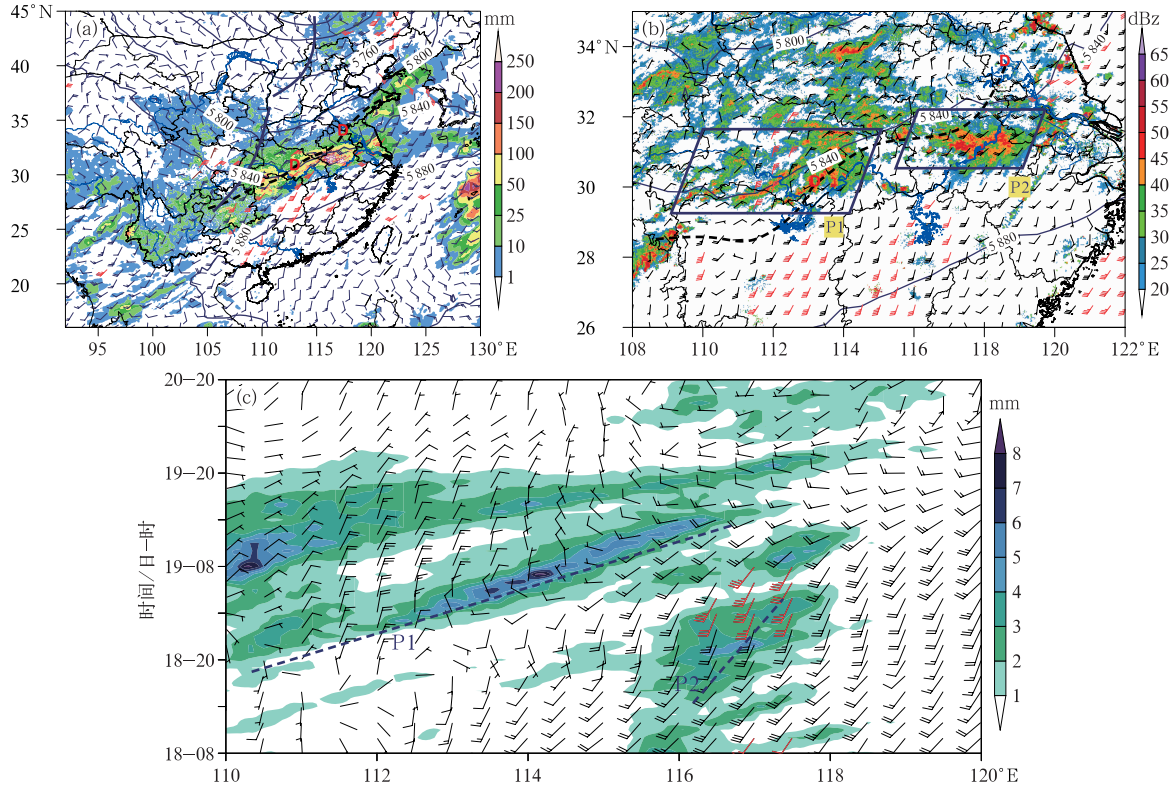


图 11　2020 年 7 月 18 日 20 时(a)500 hPa 高度场(等值线,单位:gpm)、850 hPa 风场以及 18 日 CMOPRPH-QPE(填色)(粗实线代表高空槽线,粗虚线代表低空切变线);(b)组合反射率因子(填色)和 925 hPa 风场(P1 和 P2 方框内为梅雨锋上的中尺度对流系统);(c)CMORPH-QPE 逐时降水量(填色)和 925 hPa 分析风场的经度-时间剖面(蓝虚线分别代表 MCS-P1 和 MCS-P2 对流系统发展时空轨迹)

Fig. 11　(a) Geopotential height at 500 hPa (contour, unit: gpm) and wind at 850 hPa at 20:00 BT and CMORPH-QPE (colored) on 18 July 2020 (Thick solid line is for upper-level trough and thick dashed line for low-level horizontal wind shear zone over Yangtze River Basin); (b) composite reflectivity factor (colored), wind at 925 hPa at 20:00 BT 18 July 2020 (two mesoscale convective systems marked with boxes P1 and P2); (c) time-longitude evolution of hourly accumulated precipitation (colored) from CMORPH-QPE and wind at 925 hPa averaged over Yangtze River Basin (Blue dashed lines show the trajectories of MCS-P1 and MCS-P2)

5 长江中下游暴雨预报偏差分析

5.1 TS/Bias 评分检验

图 12 为 2020 年 6 月 1 日至 7 月 31 日国家气象中心定量降水预报和业务数值预报评分，预报检验针对国家气象站。总体看大雨以上主观预报 TS 评分 NMC_QPF 有一定优势，其中暴雨 TS 评分为 0.24，较 EC 降水数值预报高出 26.3%。数值模式中 NCEP-GFS 降水预报 TS 评分较低，主要与其较低的模式分辨率相关。

从 Bias 预报检验上看（图 12b）NMC_QPF 大雨和暴雨 Bias 评分较 EC 数值预报略偏高，表明预报员趋向于强降水预报。两个业务中尺度区域模式 GRAPES-3 km 和 WARMS-9 km 尽管具有较高的暴雨 TS 评分，但 Bias 均超过 2.0，大量级降水空报较为严重。根据各家数值预报的 TS 和 Bias 评分来看，EC 降水数值预报总体较为均衡可靠。

5.2 梅雨暴雨降水典型预报偏差分析

在短中期定量降水预报中，第一类梅雨暴雨过程中主雨带对持续而稳定，主客观预报都具有较高的预报能力，如在 7 月 4—6 日长江中下游地区出现持续稳定的雨带，过程降水的 24 h 暴雨 TS 评分达到 0.3 以上。

第二类梅雨暴雨过程伴随着低涡和气旋系统发展，主雨带具有显著时空变化，短中期数值天气预报具有较高不确定性。如在 7 月 7—8 日降水过程中（图 13），随着华东地区高空槽东移和冷空气南下，降水带出现明显的南落，然而在 ECMWF-HR 提前 2～3 d 的预报中，江汉—江淮地区低涡移动偏慢、偏强，伴随有虚假的模式降水—潜热反馈效应，导致低涡中心附近的降水预报明显偏北、偏强。在 7 月 17—19 日、23—24 日的降水过程中 EC 数值预报偏差也具有类似特征，0～72 h 预报时效的低涡切变系统具有显著的“预报跳跃”（forecast jumpiness）现象（Zsoter et al，2009），预报偏差与低涡-急流天气

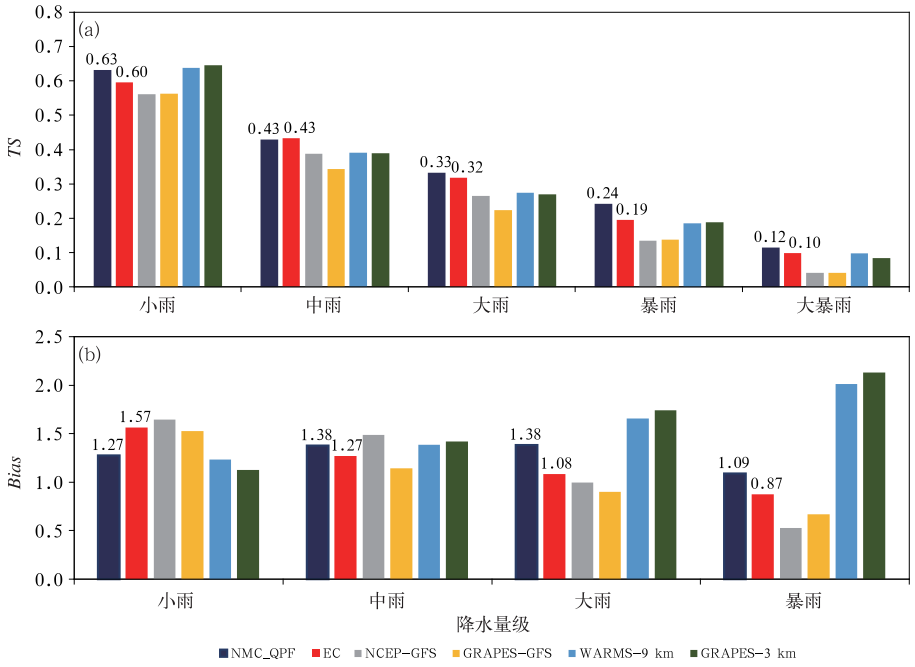


图 12 2020 年 6 月 1 日至 7 月 31 日国家站 24 h 降水主观预报 NMC_QPF 和业务数值预报的(a)TS 和(b)Bias 评分

Fig. 12 Threat Score (a) and Bias (b) of precipitation forecast from NMC_QPF and operational NWP from 1 June to 31 July 2020

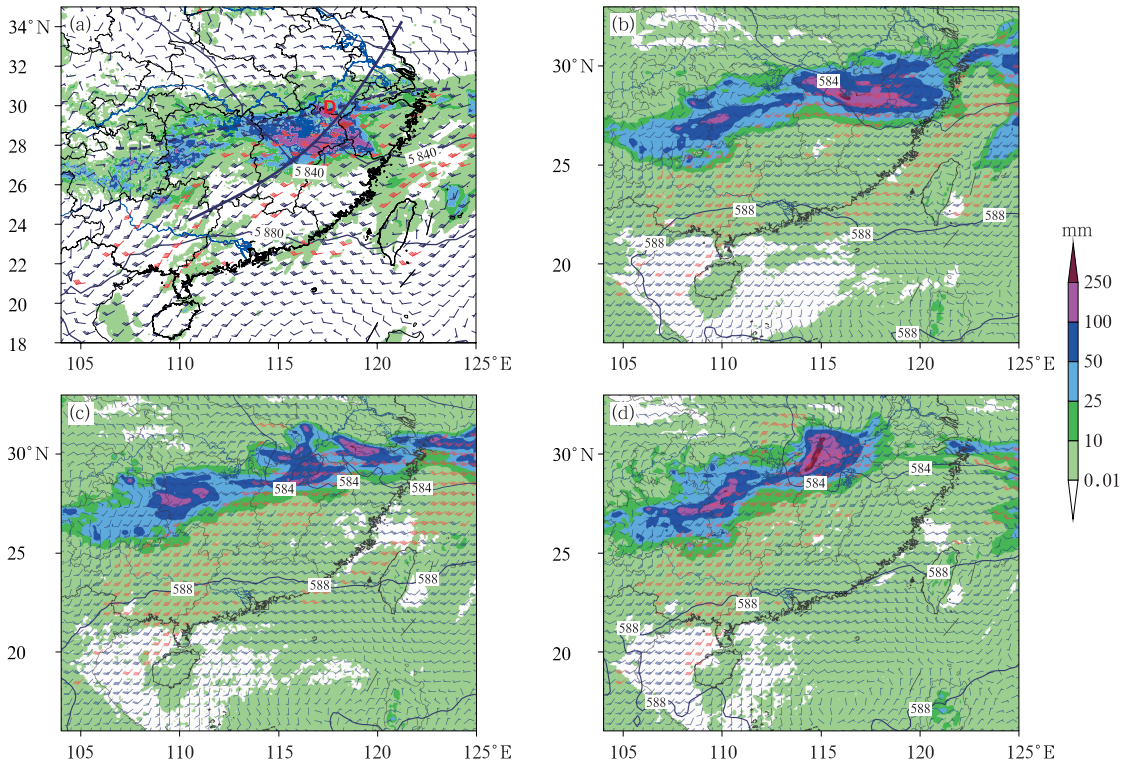


图 13　2020 年 7 月(a)8 日 20 时 500 hPa 高度场(等值线,单位:gpm)、850 hPa 风场以及 8 日 08 时至 9 日 08 时 CMOPRPH-QPE(填色)(粗实线代表高空槽,粗虚线代表低空切变线);(b,c,d)ECMWF-HR 模式分别于(b)7 日 20 时,(c)6 日 20 时,(d)5 日 20 时起报的 8 日 20 时 850 hPa 风场、500 hPa 高度场(等值线,单位:dagpm)和 8 日 08 时至 9 日 08 时累积降水量(填色)

Fig. 13　(a) Geopotential height at 500 hPa (contour, unit: gpm), wind at 850 hPa at 20:00 BT 8 and CMORPH-QPE (colored) from 08:00 BT 8 to 08:00 BT 9 July 2020 (Thick solid line is for upper-level trough and thick dashed line for low-level wind shear), and (b, c, d) accumulated precipitation forecast (colored) during 08:00 BT 8 to 08:00 BT 9 July, with wind at 850 hPa and geopotential height at 500 hPa (coutour, unit: dagpm) valid at 20:00 BT 8 July from ECMWF-HR forecast initiateal at (b) 20:00 BT 7, (c) 20:00 BT 6, (d) 20:00 BT 5 July 2020

系统的预报调整有直接关系,其中关于数值模式初始条件、模式物理过程对预报偏差的影响仍然需要进一步研究。

6　结论与讨论

本文利用多源观测和分析资料,总结了 2020 年 6—7 月我国长江中下游地区极端梅雨过程基本特征,初步分析了梅雨天气系统特征和极端降水基本成因。

(1)2020 年 6—7 月长江中下游地区降水过程多、间隔短,空间重叠度高,长江中下游大部地区降水量较常年偏多 1～2 倍,安徽大别山区和皖南山区、江西北部等地局部地区偏多 3 倍以上,强降水中心分布与大别山、皖南山区和鄂西山区地形特征存在显著相关。6 月多以移动性降水过程为主,7 月上旬梅雨雨带稳定在长江中下游沿江地区,降水强度强、持续时间长,降水极端性更高。梅雨降水夜雨特征明显,07 时前后降水强度最高,夜间降水增强与低空急流夜间增强过程相关。

(2)6—7 月大气环流异常特征显著,亚洲中高纬度维持稳定阻塞形势,中纬度地区多冷空气活动,进入 7 月后副高脊线西段始终维持在 20°N 左右,没有按照气候规律明显北跳,导致副高北侧的梅雨锋系统稳定维持在长江中下游地区;在来自孟加拉湾和南海地区水汽输送作用下,长江中下游地区整层水汽通量达到 3σ 以上,有利于出现极端降水过程。在低空西南急流、高空西风急流和东风急流三支气

流作用下，江淮地区形成有利于梅雨异常强降水的低空辐合、高空辐散天气形势配置。

(3)天气尺度上梅雨锋暴雨可分为准静止锋暴雨、气旋锋生暴雨两种类型，分别占暴雨日数的59%和41%；前者以稳定江淮切变线和准东西向雨带为主；气旋锋生暴雨伴随梅雨锋上的江淮或黄淮气旋发展，往往有与梅雨锋低涡伴随的长生命史中尺度对流系统，并具有更复杂的β中尺度对流雨带组织结构。预报检验表明第一类降水过程可预报性较高，而第二类梅雨暴雨过程具有较明显不确定性。初步分析表明在EC数值预报中往往出现低涡急流系统和降水潜热之间的非自然正反馈，导致明显的降水预报偏差。

2020年6—7月长江中下游地区极端梅雨天气气候成因复杂，在持续性梅雨强降水的中长期成因和可预报性、极端暴雨发生发展的中小尺度物理机制、地形和日变化特征对梅雨暴雨过程的影响等方面仍有众多问题需要深入研究。

参考文献

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).

矫梅燕，毕宝贵，鲍媛媛，等，2006. 2003年7月3—4日淮河流域大暴雨结构和维持机制分析[J]. 大气科学，30(3)：475-490. Jiao M Y，Bi B G，Bao Y Y，et al，2006. Thermal and dynamical structure of heavy rainstorm in the Huaihe River Basin during 3－4 July 2003[J]. Chin J Atmos Sci，30(3)：475-490(in Chinese).

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).

孙建华，赵思雄，2003. 1998年夏季长江流域梅雨期环流演变的特殊性探讨[J]. 气候与环境研究，8(3)：291-306. Sun J H，Zhao S X，2003. A study of special circulation during Meiyu season of the Yangtze River Basin in 1998[J]. Clim Environ Res，8(3)：291-306(in Chinese).

陶诗言，1980. 中国之暴雨[M]. 北京：科学出版社：120-125. Tao S Y，1980. China Heavy Rainfall[M]. Beijing：Science Press：120-125(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，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).

张小玲，陶诗言，张顺利，2004. 梅雨锋上的三类暴雨[J]. 大气科学，28(2)：187-205. Zhang X L，Tao S Y，Zhang S L，2004. Three types of heavy rainstorms associated with the Meiyu front[J]. Chin J Atmos Sci，28(2)：187-205(in Chinese).

朱乾根，林锦瑞，寿绍文，等，2007. 天气学原理和方法：第4版[M]. 北京：气象出版社：356-358. Zhu Q G，Lin J R，Shou S W，et al，2007. Principle of Synoptic Meteorology[M]. 4th ed. Beijing：China Meteorological Press：356-358(in Chinese).

Chen G T J，Wang C C，Lin L F，2006. A diagnostic study of a retreating Mei-Yu front and the accompanying low-level jet formation and intensification[J]. Mon Wea Rev，134(3)：874-896.

Chen G X，Sha W M，Iwasaki T，et al，2017. Diurnal cycle of a heavy rainfall corridor over East Asia[J]. Mon Wea Rev，145(8)：3365-3389.

Chen T G，Chang C，1980. The structure and vorticity budget of an early summer monsoon trough (Mei-Yu) over southeastern China and Japan[J]. Mon Wea Rev，108(7)：942-953.

Fu S M，Sun J H，Luo Y L，et al，2017. Formation of long-lived summertime mesoscale vortices over central East China：semi-idealized simulations based on a 14-year vortex statistic[J]. J Atmos Sci，74(12)：3955-3979.

Guan P Y，Chen G X，Zeng W X，et al，2020. Corridors of Mei-Yu-season rainfall over eastern China[J]. J Climate，33(7)：2603-2626.

Luo Y L，Gong Y，Zhang D L，2014. Initiation and organizational modes of an extreme-rain-producing mesoscale convective system along a Mei-Yu front in East China[J]. Mon Wea Rev，142(1)：203-221.

Shen Y，Xiong A Y，Wang Y，et al，2010. Performance of high-resolution satellite precipitation products over China[J]. J Geophys Res，115(D2)：D02114.

Trier S B，Parsons D B，Matejka T J，1990. Observations of a subtropical cold front in a region of complex terrain[J]. Mon Wea Rev，118(12)：2449-2470.

Yu R C，Xu Y P，Zhou T J，et al，2007. Relation between rainfall duration and diurnal variation in the warm season precipitation over central eastern China[J]. Geophys Res Lett，34(13)：L13703.

Zhou T J，Yu R C，2005. Atmospheric water vapor transport associated with typical anomalous summer rainfall patterns in China[J]. J Geophys Res，110(D8)：D08104.

Zsoter E，Buizza R，Richardson D，2009. "Jumpiness" of the ECMWF and Met Office EPS control and ensemble-mean forecasts[J]. Mon Wea Rev，137(11)：3823-3836.