

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2022.05.003

长江中下游一次暖区极端致洪暴雨特征及 天气学成因分析

张芳¹,张芳华¹,张恒德^{1,2},杨舒楠¹,包红军^{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)

摘要: 基于多源观测资料和再分析资料,采用天气学诊断分析方法研究了 2019 年 5 月长江中下游地区发生的一次致洪暴雨的特征及主要成因。结果表明:该次极端致洪暴雨过程是在稳定的“西低东高”天气形势下,由持续时间长的短时强降水累积而成,具有明显的中尺度和阶段性特征。直接造成极端暴雨的中尺度对流系统在低空急流前沿不断新生东移,表现出明显的“列车效应”和准静止特点。过程中低空急流和超低空急流异常强盛,为极端暴雨提供了持续有利的水汽和对流不稳定条件,特别是整层高湿、较低的抬升凝结高度和较大暖云层厚度有利于提高降水效率,产生雨强较大的短时强降水;高低空急流耦合是强降水发生发展的重要动力机制,强垂直风切变区与暴雨落区有较好的对应。

关键词: 极端致洪暴雨;低空急流;列车效应;降水效率;长江中下游

中图分类号:P458 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2022)05-0016-09

Characteristics and synoptic causes of the extreme warm-region flood-causing rainfall over the middle-lower reaches of the Yangtze River

ZHANG Fang¹, ZHANG Fanghua¹, ZHANG Hengde^{1,2}, YANG Shunan¹, BAO Hongjun^{1,2}

(1. National Meteorological Center, Beijing 100081, China;
2. CMA-HHU Joint Laboratory for Hydrometeorological Studies, Beijing 100081, China)

Abstract: Based on the multi-source observation and reanalysis data, the characteristics and main causes of the flood-causing rainstorm in May, 2019 in the middle-lower reaches of the Yangtze River were studied by using the synoptic diagnostic analysis method. The results indicated that the extreme rainstorm with the characteristics of mesoscale and stage was formed by the accumulation of continuously short-time heavy precipitation under the stable "low in the west and high in the east" weather background. The mesoscale convective system directly causing the extreme rainstorm was constantly regenerated and moved eastward in the front of the low-level jet with obvious "train effect" and quasi-static features. Continuously favorable water vapor and convective instability were provided by the extremely strong low-level jet and ultra-low-level jet. In particular, the high humidity of the whole layer, low lifting condensation height and large warm cloud thickness were conducive to improving the precipitation efficiency and producing the short-term heavy precipitation with high rain intensity. The high- and low-level jet coupling was an important dynamic mechanism for the occurrence and development of heavy rainfall, and the strong vertical wind shear area has a good correspondence with the heavy rainfall area.

Key words: extreme flood-causing rainfall; low-level jet; train effect; precipitation efficiency; middle-lower reaches of the Yangtze River

暴雨是造成我国夏季城市内涝、农田渍涝等灾害的主要天气类型,尤其是极端暴雨会对人民生命和财产安全造成极大的影响。受全球变暖和人类活动的影响,极端降水事件频发^[1],加剧了城市洪涝事件的发生

基金项目: 中国气象局创新发展专项(CXFZ2021Z009);中国气象局预报员专项(CMAYBY2020-153)
作者简介: 张芳(1985—),女,高级工程师,硕士,主要从事暴雨机理和预报技术研究。E-mail:jshyy1209@126.com
通信作者: 张恒德(1977—),男,研究员级高级工程师,博士,主要从事灾害性天气研究。E-mail:hanghengde1977@163.com
引用本文: 张芳,张芳华,张恒德,等. 长江中下游一次暖区极端致洪暴雨特征及天气学成因分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(5):16-24.
ZHANG Fang,ZHANG Fanghua,ZHANG Hengde,et al. Characteristics and synoptic causes of the extreme warm-region flood-causing rainfall over the middle-lower reaches of the Yangtze River [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2022,50(5):16-24.

频率和强度^[2],而城市洪涝事件是影响城市安全的最主要灾害事件之一^[3]。因此,对极端暴雨机制成因和预报方法的改进,一直是天气预报科研和业务工作的重点和难点。对于暖区极端暴雨,由于其突发性强、时空分布不均、局地雨强大,可预报性更低,而对暖区暴雨的研究多集中在华南地区^[4-5]。湛芸等^[6]从暖区暴雨基本概念、多尺度天气学特征、与低空急流的关系、中尺度对流系统发展特征、可预报性等方面对华南地区暖区暴雨特征进行了总结。

长江中下游地区经常会出现暖区暴雨,主要发生在急流轴附近或急流前沿风速辐合区。陈玥等^[7]将长江中下游地区暖区暴雨按天气形势分为冷锋型、暖切变型和副高(西太平洋副热带高压)边缘型 3 类,并建立了 3 类暴雨的概念模型。张萍萍等^[8]统计发现湖北省西南气流型暖区暴雨主要发生在鄂东南地区,低空急流是最重要的影响系统,低层风速辐合是暴雨的主要动力启动机制,高低空急流耦合进一步加强了该动力机制。赵娴婷等^[9]对湖北省一次极端特大暴雨分析发现,在梅雨锋南侧暖区降水阶段,西南低空急流出现脉动,在地面风场辐合的作用下触发对流。袁恩国等^[10]对一次无明显天气尺度系统强迫的暖区暴雨分析发现,在对流层低层为南风的背景下,边界层中尺度辐合线可激发中尺度对流系统的发生发展。

针对低空急流对暖区暴雨触发和维持的影响机制也有许多研究。孙淑清等^[11]对一次江淮气旋暖区中的暴雨分析发现,低空急流的超低转特性对应暴雨发生,急流中风速脉动的传播对于中尺度低涡及雨团的发生起着触发的作用。何军等^[12]分析发现,强降水产生与低空急流带上风速加大且向下扩展相对应,低空急流使暴雨区获得充沛的热力和水汽供给。张冰等^[13]利用数值模拟方法发现,超低空急流的增强加强了大气的斜压性,促进了低涡的发展,同时有利于形成足够的低层辐合区厚度,促进暖空气的抬升。

2019 年 5 月 25 日,湖北东部至安徽南部沿江地区出现一次大范围极端致洪暴雨过程,降水强度大、持续时间长,多站日降水量突破 5 月历史极值,导致长江中下游地区沿江多个城市发生了内涝灾害,多处发生山体滑坡、塌方处等地质灾害。此次降水过程发生时长江中下游地区尚未进入梅雨期,同时并无明显冷空气参与,是一次初夏季节较为少见的较大范围暖区极端暴雨过程。本文对该次致洪暴雨的特征及主要成因进行分析,以期加强对该类暖区暴雨的认识,为提高预报准确率提供参考。

1 资料和方法

本文采用的资料包括:①自动气象站逐时降水量观测资料、国家基本气象站建站以来日降水量资料、间隔 6 min 的雷达组合反射率因子拼图资料等,其中国家基本气象站日降水量资料用来统计极端日降水量站点;②欧洲中期数值预报中心 1 h 间隔、空间分辨率为 0.25°×0.25°的第五代全球再分析资料(the fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate),即 ERA5 资料;③NCEP NCAR 1988—2017 年 6 h 间隔、空间分辨率为 2.5°×2.5°的再分析资料,该资料用于环境场极端性分析。

极端性采用标准化异常进行分析,计算公式^[14]为

$$S = (F - M) / \sigma$$

式中: F 为某一气象场或物理量的值; M 为该变量 30 a 的气候平均,为去除小波动对统计结果的影响,在计算气候平均时,对每一天的变量都进行了 21 d 的滑动平均(前后各 10 d); σ 为变量场气候标准差。标准化异常表征变量场偏离气候态的程度,一般情况下, $|S| \geq 0.5\sigma$ 表示较为异常, $|S| \geq 2.5\sigma$ 表示明显异常。

2 极端致洪暴雨特征分析

2.1 降水概况及洪涝灾情

2019 年 5 月 26 日 8 时自动气象站 24 h 逐时累计降水量显示(图 1),暴雨带沿长江呈东西带状分布,长度达 1 000 km,宽度仅约 200 km,降水量超过 250 mm 的自动气象站站点有 41 个,大部分集中在安徽省安庆市,最大日降水量出现在安庆市怀宁县江镇自动气象站,为 418.5 mm,

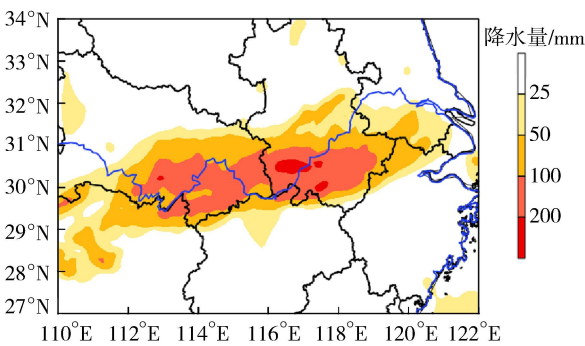


图 1 2019 年 5 月 25 日 8 时至 26 日 8 时 24 h 累计降水量分布

Fig. 1 Cumulative precipitation from 8:00 on May 25 to 8:00 on May 26, 2019

最大小时降水量(安庆市太湖县自动气象站)为25日9—10时的97.9 mm。该次降水过程是一次极端降水过程,共有27个国家基本气象站日降水量超过5月历史同期(建站至2019年5月25日之前),其中安徽太湖站(278.1 mm)、湖北仙桃站(209.3 mm)、湖北金沙站(195.1 mm)等3站日降水量超过历史极值。

受极端强降水的影响,长江中下游沿江地区面雨量普遍超过50 mm,河道水位有一次明显的上涨过程,沿江荆州、武汉等城市发生了内涝灾害,多个中小河流超起排水位,如白莲河水位98.47 m、白洋河水位82.60 m、梅子山水位48.34 m、兰溪长江水位20.02 m,望天湖水位18.83 m超起排0.63 m,新港水位18.20 m超起排0.70 m,策湖水位18.47 m超起排0.97 m;强降水区域发生山体滑坡、塌方处等地质灾害超过30起。

2.2 造成极端暴雨的短时强降水时空特征

短时强降水是指1 h降水量在20 mm或3 h降水量在50 mm以上的降水事件^[15]。该次强降水过程中出现了大范围的短时强降水,其中湖北省东南部、安徽省西南部的部分地区24 h内大于20 mm/h的短时强降水出现频次在4~6次,局地超过6次(图2)。小时降水量大于50 mm的极端短时强降水^[15]在安徽大别山以南的平原地区出现频次达三四次,局地超过4次,与特大暴雨中心相对应。同时,过程最大小时降水量普遍达到30~50 mm,其中湖北省东南部和安徽省西南部的部分地区达50~80 mm,特大暴雨中心局地超过80 mm(图3)。短时强降水频次和最大小时降水量的分布均与过程累计降水量中心较为一致。最大日降水量站安徽太湖自动气象站的逐时降水量显示,大于20 mm/h的短时强降水持续了7 h(25日10—17时),降水量占日降水量的78%。因此,该次极端强降水过程以降水持续时间长的短时强降水为主,中尺度对流特征明显。

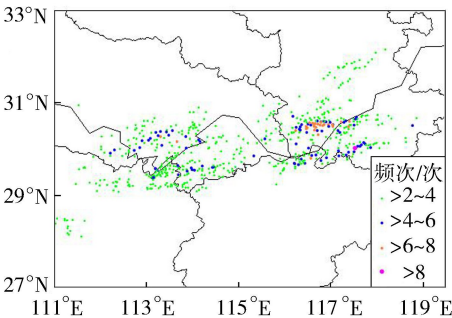


图2 25日8时至26日8时小时降水量大于20 mm出现频次分布

Fig.2 Occurrence frequency of rainfall intensity larger than 20 mm/h from 8:00 on May 25 to 8:00 on May 26

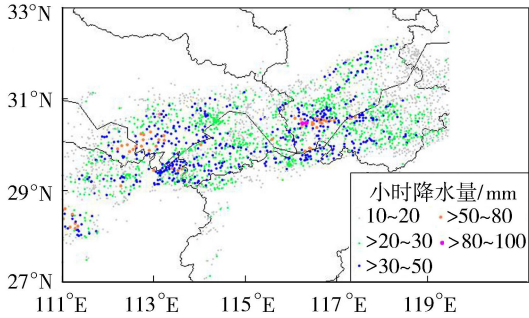


图3 25日8时至26日8时最大小时降水量分布

Fig.3 Distribution of maximum rainfall intensity from 8:00 on May 25 to 8:00 on May 26

2.3 极端暴雨的阶段特征

由于该次强降水过程伴随着两次低空急流发展,因此按照低空急流加强时段可将该次强降水过程分为两个阶段:第一阶段(25日8—20时,图4虚线左侧),暴雨雨带位于湖北省东南部至安徽省南部一带沿长江分布,两个大暴雨中心分别位于湖北省东南部和安徽省西南部大别山以南沿江地区,其中,后者共有20个自动气象站12 h累计降水量超过250 mm,与24 h特大暴雨中心相吻合。安徽省南部地区小时降水量在50 mm

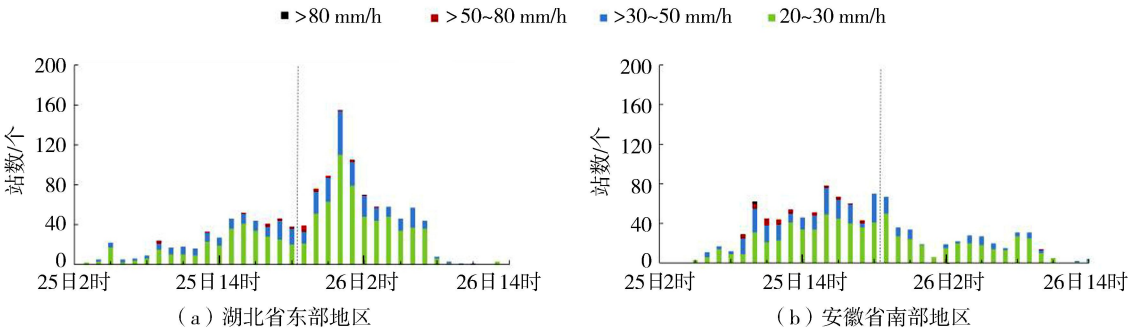


图4 24 h暴雨区内逐小时各降水量级站数分布

Fig.4 Hourly station numbers of short-time heavy rainfall of different magnitude in the 24-hour rainstorm area

以上的自动气象站站数达 37 站,其中两个自动气象站小时降水量超过 80 mm(图 4(b))。

第二阶段(25 日 20—26 日 8 时,图 4 虚线右侧)的暴雨雨带宽度较第一阶段增大,但大暴雨中心南压且变窄,西段(112°E ~ 116°E,29°N ~ 31°N)位于湖北省东南部和湖南省东北部交界处,东段(116°E ~ 119°E, 29°N ~ 31°N)位于安徽省南部山区,西段中心短时强降水站数明显较第一阶段增多(图 4(a)) ,而东段则相反(图 4(b))。

2.4 造成极端暴雨的中尺度对流系统雷达回波演变特征

中尺度对流系统活动是决定降水效率和强度的关键因素,持续的中尺度对流系统触发和发展有利于强降水的发生。从雷达组合反射率因子来看(图 5),降水回波表现为准东西向带状的层积混合型回波,具有明显的“列车效应”和准静止特点,造成雨带维持稳定、降水时间长的状况。

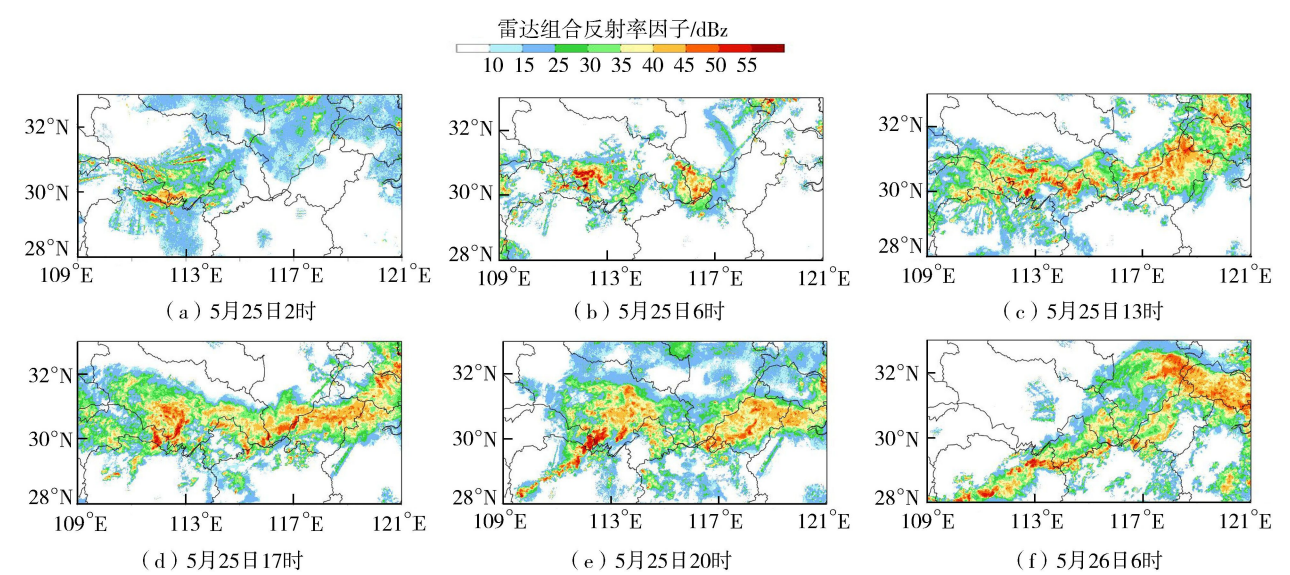


图 5 雷达组合反射率因子
Fig.5 Radar composite reflectivity factor

强降水第一阶段,湖北省西南部和东南部等地在低空急流前沿局地有 γ 中尺度对流单体触发(图 5(a)),沿引导气流东移并逐渐发展加强为组织化程度较高的中尺度对流系统(图 5(b)),其后部不断有新生对流系统向偏东方向移动,并入主回波带中。回波走向与移动方向平行,导致同一地点不断有强回波移入,形成明显的“列车效应”(图 5(a)(b)(c)(d)),与降水中心代表站多个不连续的降水峰值相对应。而在大暴雨带东段,25 日 8—13 时,东西向带状回波在安徽省南部沿江地区稳定维持,中心强度在 45 ~ 50 dBz,呈现准静止状态,造成较大范围的持续性短时强降水。10 时小时降水量大于 40 mm 的自动气象站点数较 8 时之前增加了 28 站,大别山南侧地区出现 97.9 mm/h 的强降水峰值。13 时左右(图 5(c)),从湖北省中东部至江苏省沿长江地区形成一条连续的东西向回波带,回波主体继续缓慢东移。17 时之后(图 5(d)),安徽省南部地区回波逐渐南压,湖南省北部地区至湖北省中部地区逐渐生成一条东北西南向带状回波,与东部的回波连成人字形分布。

强降水第二阶段,湖南省北部低涡东南侧的低空急流再次发展加强,急流前沿又有新的对流回波生成,向东北方向移动并入人字形回波(图 5(e))。随后强回波缓慢东移,中心强度超过 50 dBz,湖北省东南部地区出现东北西南向的中尺度雨带,局地出现 70 mm/h 的短时强降水。安徽省南部地区的大暴雨中心附近回波与第一阶段类似,呈现准静止状态,中心强度为 35 ~ 40 dBz,对应最大小时降水量 20 ~ 40 mm,维持时间较长。26 日 5 时之后(图 5(f)),对流回波逐渐移出暴雨区,降水强度逐渐减弱,强降水过程趋于结束。

3 天气形势及极端性分析

3.1 主要天气形势

5 月 25 日 8 时(图 6(a)),亚洲中高纬地区 500 hPa 为“两脊一槽”的环流形势,高空槽位于贝加尔湖及其以南的蒙古国地区,东侧高压脊位于日本海附近;南支槽位于 100°E 附近,副热带高压 588 dagpm 等高线

呈东西带状分布,控制我国南海。25 日 20 时,南支槽东移至江南西部地区,西太平洋副热带高压与日本海高压脊同位相叠加,强度增强,进一步对南支槽产生阻塞作用,环流形势基本稳定维持,有利于降水持续。由于贝加尔湖高空槽位置偏北,冷空气并未影响至长江中下游地区,该次降雨过程是一次暖区暴雨过程(图 7(b))。

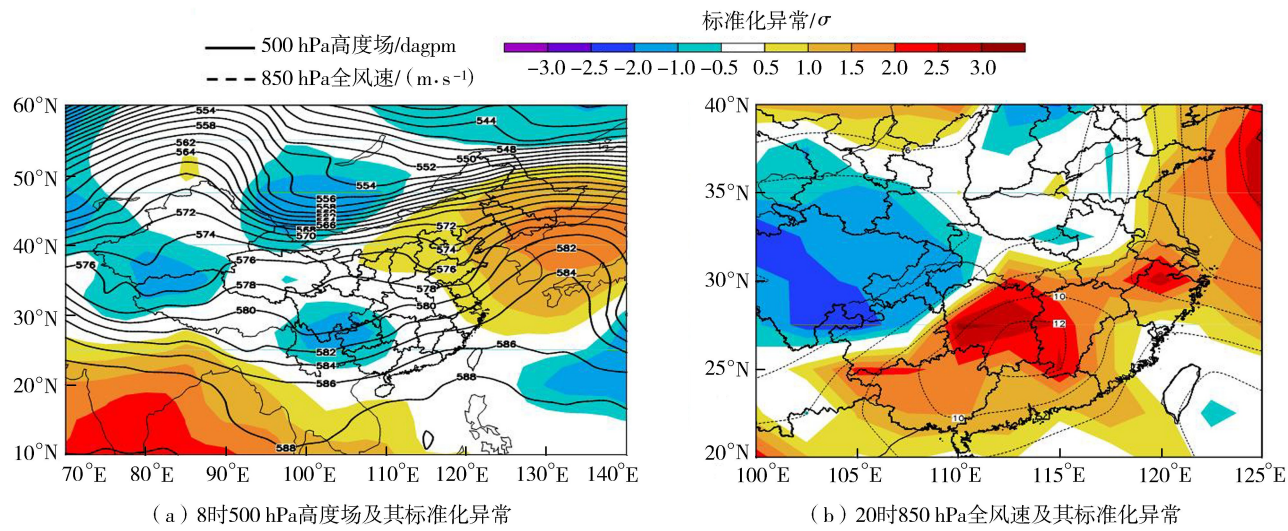


图 6 25 日高度场和全风速及其标准化异常

Fig. 6 Geopotential height, fullwind speed and its standard exception on May 25

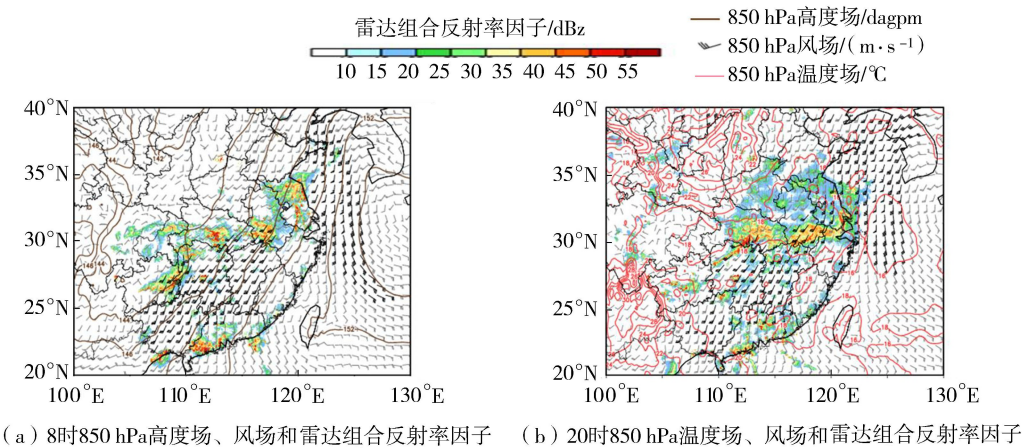


图 7 25 日高度场、风场、温度场和雷达组合反射率因子

Fig. 7 Geopotential height, wind field, temperature field and radar composite reflectivity factor on May 25

对流层低层,850 hPa 上出现两次较强的西南急流活动:25 日 2 时左右,急流最大风速达 16 m/s,白天略减弱,随着 500 hPa 西北地区弱短波槽南下与南支槽合并加强,进一步发展为低涡系统并东移,在湖南东北部地区和江淮地区分别形成暖式切变线;25 日 20 时两段切变线南侧的西南急流重新发展,最大风速达 20 m/s,降水回波主要位于低空急流最大风速中心前方(图 7)。同时在 925 hPa 也存在超低空急流,最大风速约 18 m/s。低空急流宽度为 9~10 个经度(1 000~1 100 km),东西方向急流核有两支,大致位于湖南省中东部地区和江西省中部地区。

3.2 主要影响系统的极端性

该次强降水过程中对流层中层环流形势稳定,进一步分析其极端性,结果表明,在 500 hPa 高度场(图 6(a))上南支槽及东部洋面上的高压脊分别表现为负距平和正距平,标准化异常值一般在 1σ 左右,系统存在一定的异常性。二者结合,增强了西低东高的环流形势,这种稳定维持、系统强度明显偏强的环流形势有利于南支槽前低空西南急流的长时间维持^[16-17]。相比之下,低空急流强度的异常程度更高。25 日 8 时,暴雨区及其上游地区 850 hPa 全风速标准化异常大于 2σ ,局地超过 3σ ;25 日 20 时,标准化异常大于 2σ 、 3σ 的区域随南支槽东移,范围扩大(图 6(b))。925 hPa 超低空急流的标准化异常也有类似的变化。标准化异常超

过 3σ 意味着小概率严重事件发生的可能性^[18],低层西南风风速具有显著偏强的极端性,为极端暴雨的发生提供了异常有利的水汽和动力条件。

4 低空急流对极端暴雨的影响机制

4.1 水汽输送与辐合

该次强降水过程中暴雨区上游低空急流长时间维持,其前沿风速辐合区稳定在长江中下游地区,将大量水汽源源不断向暴雨区输送,25 日凌晨至上午、25 日夜间至 26 日早晨低空西南急流风速出现两次脉动(图 8(a)),暴雨区上游对应出现两次明显的水汽通量跃增,长江中下游地区持续位于高水汽通量辐合中心(图 8(b))。与风场异常(图 6(b))相对应,25 日 8 时暴雨区上游 850 hPa 水汽通量的标准化异常超过 2σ ,20 时超过 2σ 的范围明显扩大。暴雨区 850 hPa 比湿达 $13 \sim 14 \text{ g/kg}$,925 hPa 达 $14 \sim 16 \text{ g/kg}$,均较常年明显偏强。此外,强降水期间,暴雨区上空整层大气相对湿度均在 70% 以上,整层大气处于高湿状态,有利于产生强降水。

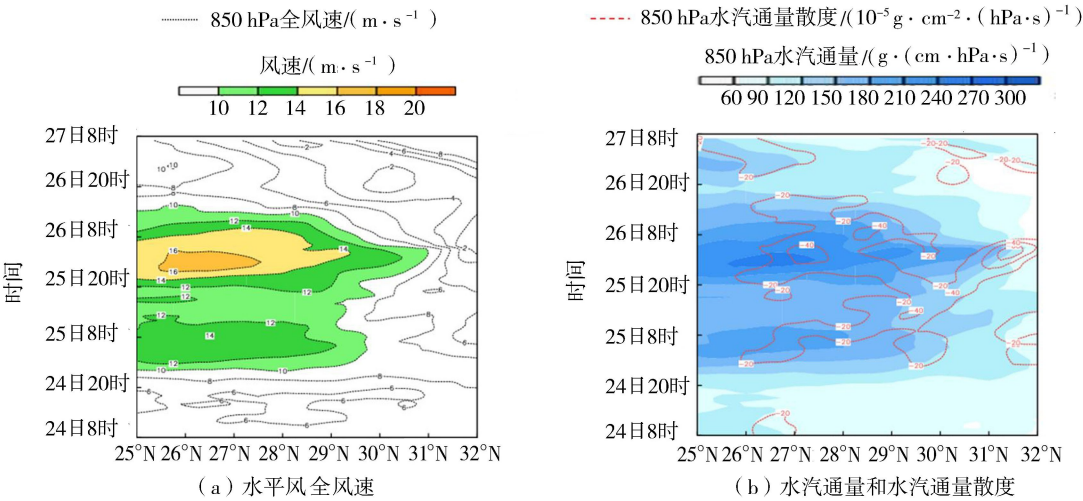


图 8 850 hPa 区域平均(109°E ~ 119°E) 水平风全风速、水汽通量和水汽通量散度辐合的纬向-时间演变

Fig. 8 Zonal-time evolution of regional average (109°E-119°E) of 850 hPa horizontal wind speed, water-vapor flux and water-vapor flux divergence convergence

由于在降水过程中存在两次低空急流风速脉动,在降水的不同阶段水汽辐合程度不同,第一阶段东段大暴雨中心的降水强度更强。从水汽通量散度和水平风速的垂直剖面可以看到,25 日 8 时(图 9(a))大别山以南地区水汽通量散度中心位于 925 hPa 以下、975 ~ 850 hPa 西南急流前沿风速辐合区和地形交汇处,区域平均最大水汽通量散度达 $-100 \times 10^{-5} \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$,强烈的水汽辐合导致温度露点差均在 2°C 以下,空气

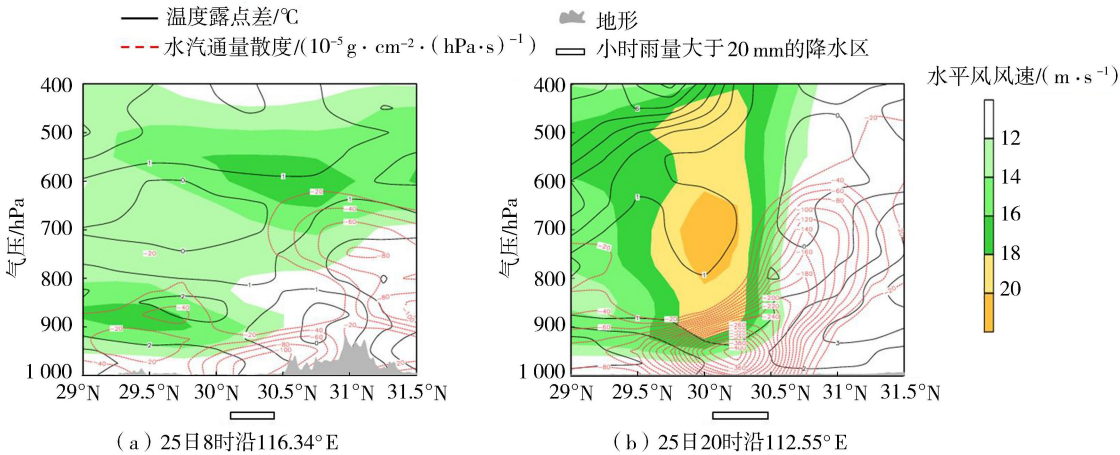


图 9 水平风风速、水汽通量散度辐合和温度露点差的经向-高度剖面

Fig. 9 Meridian-height profile of horizontal wind speed, water vapor flux divergence convergence and temperature difference from dew point

维持饱和状态。低空急流中心位于 850 hPa 以下,即超低空急流直接导致该地区抬升凝结高度(LCL)和自由对流高度(LFC)均在 1 000 hPa 左右,即使较弱抬升条件也能触发不稳定能量释放;同时,0℃层高度在 5 km 左右,暖云层(LCL 到 0℃层高度)厚度大,有利于提高降水效率^[15],产生雨强较大的短时强降水。第二阶段西段中心的降水强度更强,对应 25 日 20 时(图 9(b)),南支槽东移过程中槽前低层有低涡生成,位于低涡东南部的湖北地区中南部及其上游地区低空急流再次加强,垂直方向上急流轴位于 850 ~ 600 hPa 附近,最大风速超过 20 m/s,相应急流前方水汽通量辐合高度增高,水汽通量辐合中心位于 925 ~ 850 hPa,中心值约 $-400\times10^{-5}\text{ g}/(\text{cm}^2\cdot\text{hPa}\cdot\text{s})$,低层水汽辐合较该地区第一阶段明显加强。

4.2 对流不稳定能量的累积和重建

低空急流的发展不仅为暴雨区输送了大量水汽,同时也有利于不稳定能量的累积和重建,形成有利于中尺度对流系统发生发展的不稳定层结。 K 指数可以很好地反应大气的的不稳定状况,其值愈大表示大气层结愈不稳定,通常当 K 指数大于 35℃,层结就相当不稳定。此次强降水过程中强降水区大部分 K 指数可以达到 38℃ 以上,但由于低空急流出现两次较强脉动, K 指数也出现两次较明显的变化,与强降水阶段对应较好。25 日 8 时, K 指数 38℃ 线最北界位于河南省南部地区,东界大致位于安徽省西南部至江西东北部一带。25 日 17 时 38℃ 线较 25 日 8 时明显南压、西收,但 25 日 20 时再一次北推、东伸,表明大气的的不稳定度再一次加强。

该次强降水过程中,低空急流及其前沿地区假相当位温稳定维持在 345K 以上,为中尺度对流系统的发生发展提供了较强的不稳定能量,位势不稳定层结的形成与低空急流的发展在时间上有很好的对应关系。从图 10 可以看出,25 日凌晨开始,随着低空急流的加强,850 hPa 出现 350K 的高假相当位温中心,比湿由 12 g/kg 上升到 14 g/kg,其上至 500 hPa 为位势不稳定层结;由于降水对能量的消耗,25 日 18 时左右对流不稳定层结减弱,比湿也有所减小,但是随着 25 日 20 时之后低空急流的再次加强,850 ~ 600 hPa 位势不稳定层结重建,且较前一阶段的不稳定层结高度更高,造成第二阶段的对流性强降水也较第一阶段更强。从仙桃站 850 hPa 温度和露点演变来看,24 日 20 时开始,由于低空急流的暖湿输送,露点温度呈现明显上升趋势,至降水开始前(25 日 2 时)上升了 5℃ 左右,而温度较降水开始前大约升高 2℃ 左右,与夜间低空急流加强造成的暖平流有关。因此,位势不稳定层结的建立主要来源于低空急流的贡献。

4.3 高低空急流耦合加强动力抬升

25 日 8 时,200 hPa 高空急流轴位于 34°N 左右,即黄淮南部至江淮西部一带,急流中心风速达 40 m/s,暴雨区位于其入口区右侧的强辐散区。从第一阶段最大降水中心纬度-高度剖面图(图 11(a))可以看到,安徽省西南部地区强降水区附近高层 200 hPa 散度中心值达 $10\times10^{-5}/\text{s}$,辐合层主要位于边界层,975 hPa 上低空急流前沿风速辐合中心值达 $-10\times10^{-5}/\text{s}$,强降水区整层为上升运动,垂直运动中心位于 600 ~ 500 hPa 附近,最大垂直速度超过 -1.6 Pa/s ;湖北省东南部地区强降水区高层辐散中心位于 250 hPa 左右,低层 925 ~ 600 hPa 为辐合层,辐合中心值约 $-5\times10^{-5}/\text{s}$,最大垂直速度较安徽省西南部地区略弱,约 -1.2 Pa/s 。

强降水第二阶段,200 hPa 急流东移北抬,急流轴位于 35°N 以北,高空辐散作用略减弱,但由于对流层低层低空急流再次加强,湖北省东南部地区强降水区低层辐合较第一阶段明显加强,地面至 850 hPa 的辐合层中最大散度达 $-20\times10^{-5}/\text{s}$,925 ~ 700 hPa 为强上升运动中心,最大垂直速度超过 -2 Pa/s 。同时,由于南支槽移近和低层低涡的生成,在这一阶段垂直方向上由前一阶段中层正涡度、高层负涡度的配置逐渐转为整层正涡度,有利于维持上升运动的加强;安徽省南部地区强降水中心 200 hPa 散度中心值约 $5\times10^{-5}/\text{s}$,700 hPa 辐合中心散度值约 $-5\times10^{-5}/\text{s}$,垂直运动也较第一阶段略减弱(图 11(b))。因此,高低空急流长时间维持耦合与南支槽前正涡度柱的动力结构,加强了垂直上升运动,为极端暴雨的发生提供了有利的动力条件。

在有利的大尺度天气形势下,中尺度对流系统是产生暴雨的直接影响系统,风向风速的垂直切变对暖区

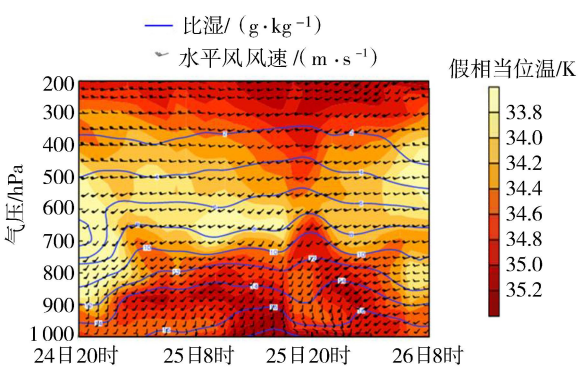


图 10 湖北仙桃附近假相当位温、水平风和比湿的时间-高度剖面

Fig. 10 Time-height profiles of pseudo-equivalent potential temperature, horizontal wind and specific humidity near Xiantao, Hubei Province

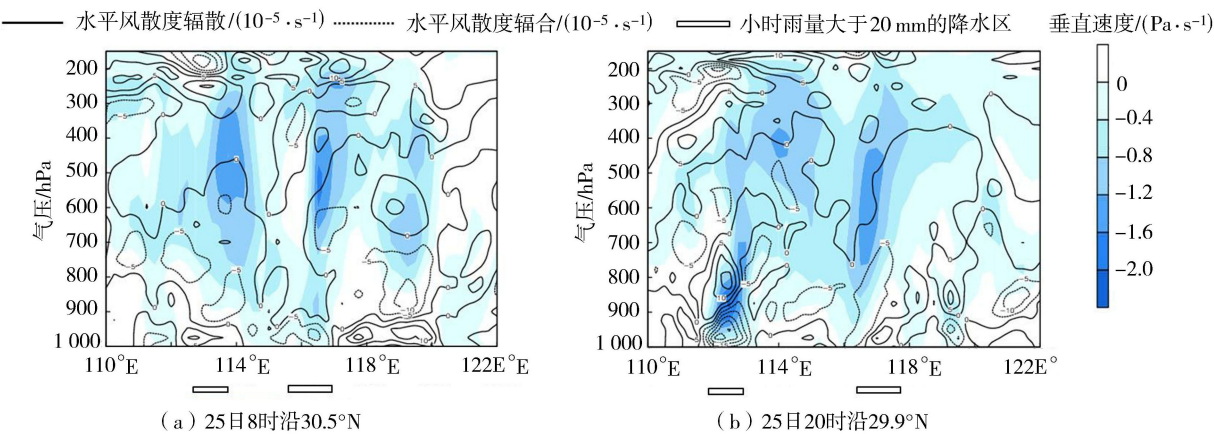


图 11 垂直速度和散度的纬向-高度剖面

Fig. 11 Zone-height profile of vertical velocity and its divergence

对流过程的形成和发展有重要的影响。此次大暴雨过程中边界层为偏南风,水平风速 2~4 m/s,对流层中低层为强盛的西南风,风随高度顺转增强,有暖平流,有利于上升运动的发展。强降水前和强降水过程中,暴雨区与 500~1 000 hPa 强垂直风切变中心的发生发展区有较好的对应。25 日 8 时,安徽省西南部地区垂直风切变中心值达到 20 m/s 以上,25 日 20 时垂直风切变中心南压,与暴雨雨带位置南压一致。

5 结 论

- a. 此次大暴雨过程降水范围广、强度大、持续时间长,造成多处城市内涝和地质灾害。强致洪暴雨主要由持续时间长的短时强降水累积造成,具有明显的中尺度和阶段性特征。
- b. 极端暴雨主要由活跃的中尺度对流系统造成,低空急流前沿对流不断新生东移并组织化加强。降水回波以准东西向带状的层积混合型回波为主,表现出明显的“列车效应”和准静止特点,造成持续时间长的强降水。
- c. 异常偏强的南支槽和高压脊稳定维持有利于持续性降水的产生;低层异常偏强的两次西南急流活动为极端暴雨提供了有利的水汽和对流不稳定能量重建条件,并造成整层高湿、较低的抬升凝结高度和较大暖云层厚度,有利于提高降水效率。
- d. 低层低空急流和超低空急流的持续发展,及其伴随的风速辐合也导致长时间较强降水的发生,为极端暴雨提供了持续有利的动力条件。此外,高低空耦合也是该次强降水过程重要的动力机制,500~1 000 hPa 强垂直风切变区与强降水落区对应较好。

参考文献:

[1] 王辉,吴文俊,王广,等. 昆明市极端降水事件演变特征及城市效应[J]. 水资源保护,2021,37(4):61-68. (WANG Hui,WU Wenjun,WANG Guang,et al. Evolution characteristics of extreme precipitation events and its urban effect in Kunming City[J]. Water Resources Protection,2021,37(4):61-68. (in Chinese))

[2] 徐宗学,任梅芳,陈浩. 我国沿海城市洪潮组合风险分析[J]. 水资源保护,2021,37(2):10-14. (XU Zongxue,REN Meifang,CHEN Hao. Analysis on urban flooding risk caused by flood tide combination in coastal cities[J]. Water Resources Protection,2021,37(2):10-14. (in Chinese))

[3] 黄国如,罗海婉,卢鑫祥,等. 城市洪涝灾害风险分析与区划方法综述[J]. 水资源保护,2020,36(6):1-6. (HUANG Guoru,LUO Haiwan,LU Xinxiang,et al. Study on risk analysis and zoning method of urban flood disaster[J]. Water Resources Protection,2020,36(6):1-6. (in Chinese))

[4] 苗春生,杨艺亚,王坚红,等. 两类华南沿海暖区暴雨特征及热力发展机制对比研究[J]. 热带气象学报,2017,33(1):53-63. (MIAO Chunsheng,YANG Yiya,WANG Jianhong,et al. Comparative study of characteristics and teermodynamical development mechanism on two types of warmsector heavy rainfall in south China coast[J]. Journal of Tropical Meteorology,2017,33(1):53-63. (in Chinese))

[5] 陈涛,孙军,谌芸,等. 广州“5·7”局地突发特大暴雨过程的数值可预报性分析[J]. 气象,2019,45(9):1199-1212.

- (CHEN Tao, SUN Jun, CHEN Yun, et al. Study on the numerical predictivity of localized severe mesoscale rainstorm in Guangzhou on 7 May 2017[J]. Meteorological Monthly, 2019, 45(9):1199-1212. (in Chinese))
- [6] 湛芸,陈涛,汪玲瑶,等. 中国暖区暴雨的研究进展[J]. 暴雨灾害, 2019, 38(5):483-493. (CHEN Yun, CHEN Tao, WANG Lingyao, et al. A review of the warm-sector rainstorms in China[J]. Torrential Rain and Disasters, 2019, 38(5):483-493. (in Chinese))
- [7] 陈玥,湛芸,陈涛,等. 长江中下游地区暖区暴雨特征分析[J]. 气象, 2016, 42(6):724-731. (CHEN Yue, CHEN Yun, CHEN Tao, et al. Characteristics analysis of warm sector rainstorms over the middle-lower reaches of the Yangtze River[J]. Meteorological Monthly, 2016, 42(6):724-731. (in Chinese))
- [8] 张萍萍,董良鹏,钟敏,等. 湖北省西南气流型暖区暴雨相关特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2019, 13(6):13-19. (ZHANG Pingping, DONG Liangpeng, ZHONG Min, et al. Characteristics analyses on the southwest airflow warm-sector rainstorm in Hubei Province[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2019, 13(6):13-19. (in Chinese))
- [9] 赵娴婷,王晓芳,王珏,等. 2016年7月18—20日湖北省特大暴雨过程的中尺度特征分析[J]. 气象, 2020, 46(4):490-502. (ZHAO Xianting, WANG Xiaofang, WANG Jue, et al. Analysis of mesoscale characteristics of torrential rainfall in Hubei Province during 18-20 July 2016[J]. Meteorological Monthly, 2020, 46(4):490-502. (in Chinese))
- [10] 袁恩国,王景尧. 暖区区域性大暴雨中尺度系统发生发展的研究[J]. 气象科学, 1991(1):21-32. (YUAN Enguo, WANG Jingyao. A study on the occurrence and development of extremely heavy rain mesoscale system in warm region[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 1991(1):21-32. (in Chinese))
- [11] 孙淑清,翟国庆. 低空急流的不稳定性及其对暴雨的触发作用[J]. 大气科学, 1980, 4(4):327-337. (SUN Shuqing, ZHAI Guoqing. On the instability of the low level jet and its trigger function for the occurrence of heavy rain-storms[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 1980, 4(4):327-337. (in Chinese))
- [12] 何军,刘德,李晶,等. 低空急流在重庆2010年“6·7”低能暴雨中的作用[J]. 暴雨灾害, 2012, 31(1):52-58. (HE Jun, LIU De, LI Jing, et al. Function of low-level jet in a heavy rainfall event in Chongqing on 7 June 2010[J]. Torrential Rain and Disasters, 2012, 31(1):52-58. (in Chinese))
- [13] 张冰,郑媛媛,沈菲菲,等. 2017年苏南一次特大暴雨高分辨率模拟及特征分析[J]. 气象科学, 2021, 41(3):386-397. (ZHANG Bing, ZHENG Yuanyuan, SHEN Feifei, et al. Characteristics and simulation of a torrential rainstorm over southern Jiangsu in 2017 revealed by a high-resolution numerical model[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2021, 41(3):386-397. (in Chinese))
- [14] 杨舒楠,路屹雄,张芳华,等. 热带风暴艾云尼持续性强降水成因分析[J]. 气象, 2021, 47(1):106-116. (YANG Shunan, LU Yixiong, ZHANG Fanghua, et al. Analysis on causes of persistent heavy rainfall brought by tropical storm Ewiniar[J]. Meteorological Monthly, 2021, 47(1):106-116. (in Chinese))
- [15] 俞小鼎. 短时强降水临近预报的思路与方法[J]. 暴雨灾害, 2013, 32(3):202-209. (YU Xiaoding. Nowcasting and method of flash heavy rain[J]. Torrential Rain and Disasters, 2013, 32(3):202-209 (in Chinese))
- [16] 葛朝霞,曹丽青. 2003年夏季江淮特大暴雨成因分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2005, 33(1):11-13. (GE Zhaoxia, CAO Liqing. Causes of heavy rains in the Yangtze River-Huaihe River region in the summer of 2003[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2005, 33(1):11-13. (in Chinese))
- [17] 陈鸣,吴永祥,王高旭,等. 不同天气系统下海河流域汛期暴雨落区及时程分布规律[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2011, 39(3):237-241. (CHEN Ming, WU Yongxiang, WANG Gaoxu, et al. Distribution of rainstorm centers and processes under different weather systems in Haihe River Basin[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2011, 39(3):237-241. (in Chinese))
- [18] HART R, GRUMM R. Using normalized climatological anomalies to rank synoptic scale events objectively[J]. Monthly Weather Review, 2001, 129:2426-2442.

(收稿日期:2021-10-09 编辑:胡新宇)