曹舒娅,邹兰军,王易,等. 2023. 苏南一次梅雨锋大暴雨的环境条件及对流系统演变特征[J].暴雨灾害,42(5):532-540. CAO Shuya, ZOU Lanjun, WANG Yi, et al.2023. Analysis of environmental conditions and characteristics of convective system evolution of a Mei-Yu Front heavy rainstorm in southern Jiangsu [J]. Torrential Rain and Disasters,42(5):532-540 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023-128

苏南一次梅雨锋大暴雨的环境条件及对流系统演变特征

曹舒娅[1],邹兰军[2],王易[3],慕瑞琪[3],周正明[1]
(1. 江苏省苏州市气象局,苏州 215131;2. 上海中心气象台,上海 200030;
3. 江苏省气象台,南京 210000)

摘　要:受梅雨锋及梅雨锋上中尺度低涡影响,2020年7月6日江苏省苏州市出现大暴雨,造成城市内涝等灾害。利用欧洲中期天气预报中心ERA5再分析资料及自动气象站、多普勒天气雷达、风廓线雷达等多种观测资料,分析了此次大暴雨过程的天气背景、环境条件、对流系统演变等特征。结果表明:(1)高空西风槽东移,中低层冷式切变线南压,冷暖空气在苏南上空汇合使低层辐合增强,中低层西南急流加强以及地面梅雨锋维持为此次大暴雨过程提供了有利的天气背景条件。(2) 最强降雨时段回波中心强度超过60 dBz,顶高超过14 km,强反射率因子区对应差分传播相移率达7 °·km^{-1}高值区,强回波垂直伸展高度平均在6 km以下,为典型的低质心暖区降雨。(3) 苏州上空抬升凝结高度低、中等强度的对流有效位能、中低层强垂直风切变和对流不稳定层结,为大暴雨的产生提供了有利的环境条件。不断增强的低空急流向下传播形成超低空急流,急流出口区强烈的辐合抬升和切变线上空次级环流的上升支叠加,为强降水的产生提供了动力抬升和触发条件。水平方向和垂直方向强烈的梅雨锋锋生,使强降水得以维持。

关键词:梅雨锋,列车效应,低空急流,锋生函数
中图法分类号:P458.3　　**文献标志码:** A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2023-128

Analysis of environmental conditions and characteristics of convective system evolution of a Mei-Yu Front heavy rainstorm in southern Jiangsu

CAO Shuya[1], ZOU Lanjun[2], WANG Yi[3], MU Ruiqi[3], ZHOU Zhengming[1]

(1. *Suzhou Meteorological Bureau of Jiangsu Province, Suzhou* 215131; 2. *Shanghai Central Meteorological Observatory, Shanghai* 200030; 3. *Jiangsu Meteorological Observatory, Nanjing* 210019)

Abstract: Affected by the Mei-Yu Front and the mesoscale vortex on the Mei-Yu Front, a heavy rain event occurred in Suzhou on 6 July, 2020, and caused disasters such as urban waterlogging. In this paper, by using ERA5 reanalysis data from the European Center for Medium-Range Weather Forecasts, as well as various observational data from ground meteorological stations, Doppler weather radar, and wind profile radar, we analyze the weather background, environmental characteristics, convective system evolution, and maintenance mechanism of this heavy rain process. The results show that: (1) The upper westerly trough moved eastward, the cold shear line at the middle and lower levels pressed southward, the convergence of cold and warm air over southern Jiangsu enhanced the convergence at the lower level, the strengthening of the southwest jet at the middle and lower levels and the maintenance of the ground quasi stationary front provided favorable weather background conditions for the heavy rainstorm process. (2) During the strongest rainfall period, the intensity of the radar echo center is 60 dBz and the top height exceeds 14 km. The strong reflectivity factor area corresponds to a differential propagation phase shift of 7 °·km^{-1}. The average vertical extension height of the strong echo is below 6 km, making it a typical low center of mass warm area rainfall. (3) The moderate levels of convective availble potential energy, strong vertical wind shear in the middle and lower levels, and convective instability stratification, and the low lifting condensation level over Suzhou provide favorable environmental conditions for the generation of heavy rainstorm. The continuously increasing low-level jet propagates downwards, to forming an superultra low-level jet. The strong convergence and uplift in the jet exitoutflow area, combined with the rising branches of the secondary circulation above the shear line, provide dynamic uplift and triggering

收稿日期: 2023-06-17;**定稿日期:**2023-09-01
资助项目: 江苏省气象局重点科研项目(KZ202108);上海市长三角科技创新共同体领域项目(21002410200)
第一作者: 曹舒娅,主要从事短临预报方向研究。E-mail: caoshuya0929@163.com
通信作者: 邹兰军,主要从事水文气象研究和决策气象服务研究。 E-mail: lanjunzou@126.com

conditions for the generation of heavy precipitation. The strong frontogenesis of the Mei-Yu Front in both horizontal and vertical directions enables the maintenance of heavy precipitation.

Keywords: Mei-Yu Front; train effect; low-level jet; frontogenesis function

引 言

苏州地处长江中下游地区，梅雨是长江中下游地区初夏特有的天气气候现象，梅雨降水主要由对流性降水所贡献(Fu and Liu，2003)，发生发展具有突发性强、局地降雨强度大、随时间变化迅速和致灾性强等特点，其引发的城市内涝、流域洪水等常造成较大的生命财产损失(丁一汇等，2007)。因此研究苏州梅雨期暴雨对于城市防灾减灾十分必要。

国内学者对长江中下游梅雨与江淮切变线的密切关联以及江淮切变线对应的梅雨锋暴雨过程已开展诸多研究(丁一汇，1993；谈哲敏和赵思雄，2013；张人禾和刘屹岷，2013)。梅雨锋的锋生作用与中尺度对流系统的发生、发展密切相关。锋生使湿等熵面倾斜，在锋区前产生显著的正垂直涡度变化，有利于暴雨中尺度对流系统的剧烈发展和维持(王伏村等，2016)。不同类型短时强降水环境大气中水汽含量是决定强降水级别的重要因素，而环境条件差异本身并不显著(田付友等，2017)。2016年7月湖北省一次梅雨锋南侧暖区特大暴雨过程具有很强的极端性，主要是因为具有极端的水汽条件(赵娴婷等，2020)。925—975 hPa边界层急流增强导致水汽在边界层强烈辐合等是暴雨主要成因(陈云辉等，2023)。降水具有低质心暖云降水特征，后向传播、低槽移动缓慢和引导气流弱是导致降水长时间维持的主要原因(蔡雄辉等，2021)。

以上研究不仅在理论上揭示了长江中下游梅雨期典型暴雨过程的特征和形成条件，而且对指导长江中下游大范围的、系统性的梅雨期暴雨预报具有积极作用。但是大暴雨通常涉及中低纬度多种系统之间以及不同尺度系统之间的相互作用，大气环流表现为不同的形势，特别是小范围、突发性的极端暴雨形成机理极其复杂，现阶段梅雨期大暴雨预报强度、落区、范围等方面常出现偏差。2020年梅汛期长江中下游出现了大范围的强降雨，多个流域水位逼近或超出历史最高水位，给流域水环境和水生态安全带来巨大威胁。那么，期间典型的强降水过程是在怎样的环流背景下产生，强降水环境场与动力机制有何特点，造成暴雨的中尺度系统如何发展，针对以上问题，选取2020年7月6日发生在苏州的一次大暴雨过程，从天气背景、对流系统演变、环境特征、梅雨锋锋生机制和低空急流的演变等方面进行分析研究，以期加深对太湖流域梅雨期强降水过程发生、发展机理的认识，为梅雨期强降雨预报预警提供依据，为科学应对流域暴雨与洪水可能引发的次生灾害提供决策参考。

1 资料和方法

1.1 资料说明

本文使用的资料包括：(1) 欧洲中期天气预报中心第5代全球大气再分析资料ERA5 (ECMWF Reanalysis v5)，空间分辨率为0.1°×0.1°，时间分辨率为1 h；(2) 2020年7月6日00∶00—12∶00 (北京时，下同)苏州市121个气象站(包括国家气象站、区域气象站，下同)分钟降水量、气温和2 min平均风向风速资料；(3) 2020年7月6日00∶00—12∶00常州市多普勒天气雷达资料；(4) 2020年7月6日00∶00—12∶00太仓市风廓线雷达资料。苏州市气象站站点分布及常州多普勒天气雷达站、太仓风廓线雷达站位置见图1。

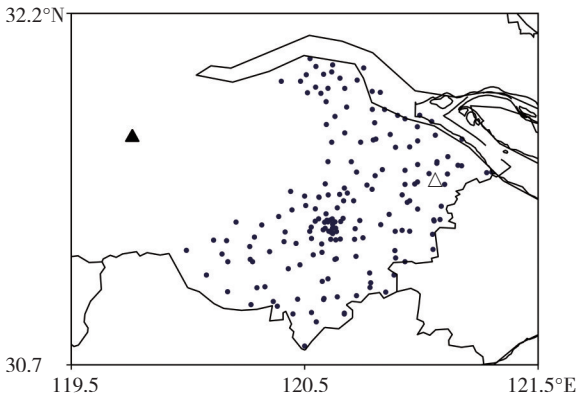

图1 苏州市气象站点(黑色圆点)分布及常州多普勒天气雷达站(实心三角)、太仓风廓线雷达站位置(空心三角)

Fig.1 Distribution of meteorological stations (black dot) in Suzhou City and the location of Changzhou Doppler radar (solid triangle), Taicang wind profile radar (hollow triangle)

1.2 研究方法

首先，利用常规天气图及ERA5再分析资料分析天气尺度环流背景，探讨大暴雨发生发展的大尺度特征；其次，通过分析气象站监测的雨量实况，揭示雨团活动的特点，并通过云图及雷达资料，进一步证实对流系统的演变特征。最后，利用ERA5再分析资料和风廓线雷达资料计算暴雨区附近热力、动力场物理量分布和低空急流演变等，以揭示对流发展演变的环境特征。

2 降水实况

受梅雨锋及梅雨锋上中尺度低涡发展影响，2020年7月5日20∶00—6日20∶00(北京时，下同)，苏州市出现

一次暴雨到大暴雨过程，全市121个气象站有89个出现暴雨到大暴雨，最大日降水量为202.6 mm，出现在相城区黄埭镇(图2a)。7月6日凌晨至上午苏州中南部地区出现短时强降水，全市有102个气象站小时雨量超过20 mm，即出现短时强降水的站数占比达84%，其中16个气象站小时雨量超过50 mm。降水强度短时间内迅速增强，08:00—09:00苏州站最大小时雨量41.3 mm；09:00—10:00太仓浏河站降水量为35.5 mm，昆山姜巷村站最大小时雨量72.5 mm，打破该站2012年建站以来小时雨量记录(2021年58.9 mm) (图2b)。此次过程具有降水效率高、极端性强等特点，造成苏州部分地区严重积水。

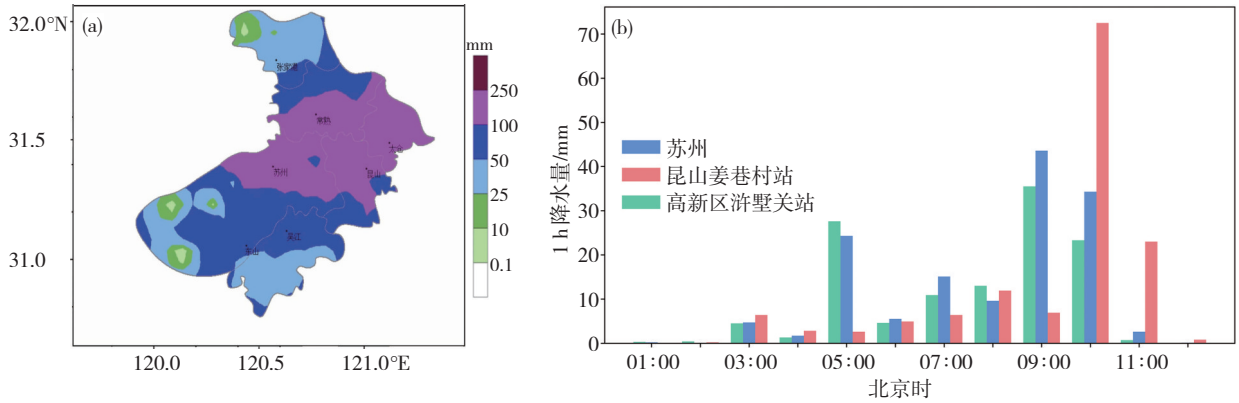

图2 2020年7月5日20:00—6日20:00苏州24 h累积降水量分布(a)以及7月6日01:00—12:00苏州站、昆山姜巷村站、高新区浒墅关站逐小时降水量变化(b)

Fig.2 (a) Distribution of 24-hour accumulated precipitation amount (unit: mm) in Suzhou from 20:00 BT on 5 July to 20:00 BT on 6 July 2020 and (b) the variations of hourly rainfall (unit: mm) at Suzhou, Jiangxiang Village, Xushuguan Town stations from 01:00 BT to 12:00 BT on 6 July 2020

3 天气背景及环境条件

此次大暴雨过程中夜间有超低空急流存在并加强，持续向苏州地区输送暖湿空气和不稳定能量。下面从强降水发生前的环流形势、环境条件、梅雨锋锋生和风廓线雷达来探讨此次大暴雨过程的天气背景和环境条件。

3.1 天气背景

2020年7月5日夜里到6日白天，500—700 hPa中纬度有高空槽东移，西北太平洋副热带高压(以下简称“副高”)呈带状分布，受西风槽东移影响，副高西脊点由105°E东退至115°E，副高脊线略南压至23°N，江苏南部处于副高外围西北侧584 dagpm线附近，有源源不断的西南暖湿气流输送，高空槽后偏北气流与副高外围偏南气流在苏南上空汇合，850 hPa和925 hPa自江淮之间东部至皖南分别有一条东北-西南向的冷式切变线，苏州处于高空槽底和低空切变线南侧、西南急流轴顶端的风速辐合区，存在较强的风向和风速辐合(图3a)。地面图上，冷暖空气在长江中下游交汇，形成一条东北-西南走向的梅雨锋，苏州处于梅雨锋东段北侧(图3b)。6日20时后，副高和低层冷式切变线南落，中低层西南急流减弱，此次强降水过程趋于结束。

综上所述，高空西风槽东移，中低层冷式切变线南压，冷暖空气在苏南上空汇合使低层辐合增强，中低层西南急流加强以及地面梅雨锋维持是大暴雨产

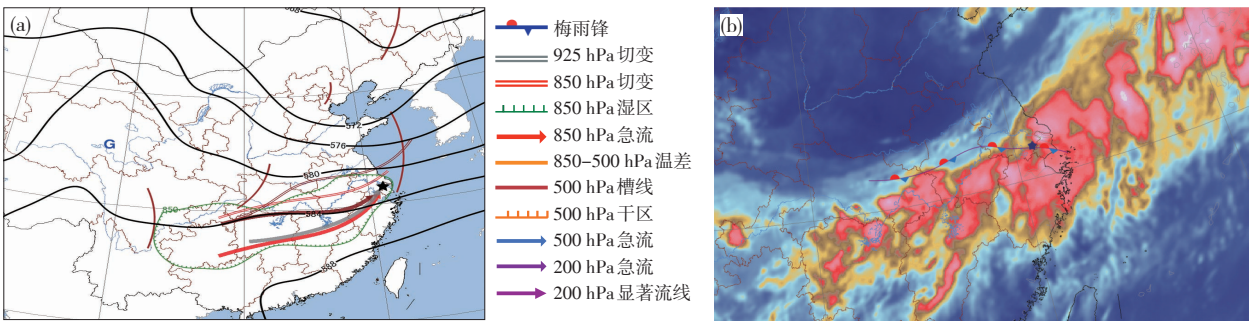

图3 2020年7月5日20:00中尺度综合分析图(a)以及7月6日08:00 FY-4A卫星红外云图和梅雨锋叠加图(b)

Fig.3 (a) Mesoscale composite analysis char at 08:00 BT on 6 July 2020, (b) Overlay chart of FY-4A infrared satellite cloud image and ground stationary Mei-Yu Front at 08:00 BT on 6 July 2020

生的主要天气尺度系统。这些天气尺度系统的有效合理配置及相互作用为此次大暴雨过程提供了极为有利的条件。

3.2 环境条件

3.2.1 热力条件

梅雨期暴雨通常包含对流性强降水，一般发生在高温高湿具有强位势不稳定的区域(陶诗言等，2001)。此次过程副高西北侧东北-西南向的假相当位温(θ_{se})高值带伸展至江苏中南部，θ_{se}中心值超过365 K，强降水发生于θ_{se}锋区附近。垂直分布可见，锋面低层(775 hPa以下)坡度陡直，775 hPa以上至500 hPa锋面随高度倾斜，600 hPa以下θ_{se}随高度减小，反映了中低层大气的对流不稳定 (图4c)。

从7月5日20时上海宝山站探空图可见(图4a)，850—700 hPa高度均出现20 m·s^{-1}的低空急流，其中700 hPa高度附近西南急流最强，最大风速达24 m·s^{-1}。中低层西南急流增强一方面导致湿层明显增湿增厚，温度曲线和露点曲线十分靠近，大气整层近饱和；另一方面加剧了大气层结不稳定，宝山站对流有效位能(CAPE)为939.9 J，K指数35.8 ℃，抬升凝结高度在1 000 hPa附近，0 ℃层高度为5.6 km，云底比湿为20.0 g·kg^{-1}，表明存在含水量大且较为深厚的暖云层。中等强度的CAPE值，可以有效避免低空含水量大的气块快速通过暖云层底部导致降水效率降低；平衡高度为214 hPa，利于对流向较高的高度发展；不断增强的西南急流和边界层强烈的风向、风速辐合使苏州处于暖湿不稳定的大气中，利于产生上升运动；地面附近风力弱，低层0～1 km和中层0～3 km均存在强垂直风切变，利于对流系统的组织化发展。苏州上空抬升凝结高度低、中等强度的CAPE、中低层强垂直风切变和对流不稳定层结，利于强降水的产生(杨康权等，2017)。

3.2.2 动力条件

针对此次大暴雨过程发生发展的动力触发和抬升机制分析如下。2020年7月6日08:00，江苏沿江苏南上空850 hPa有冷式切变线(以下简称冷切)，地面上

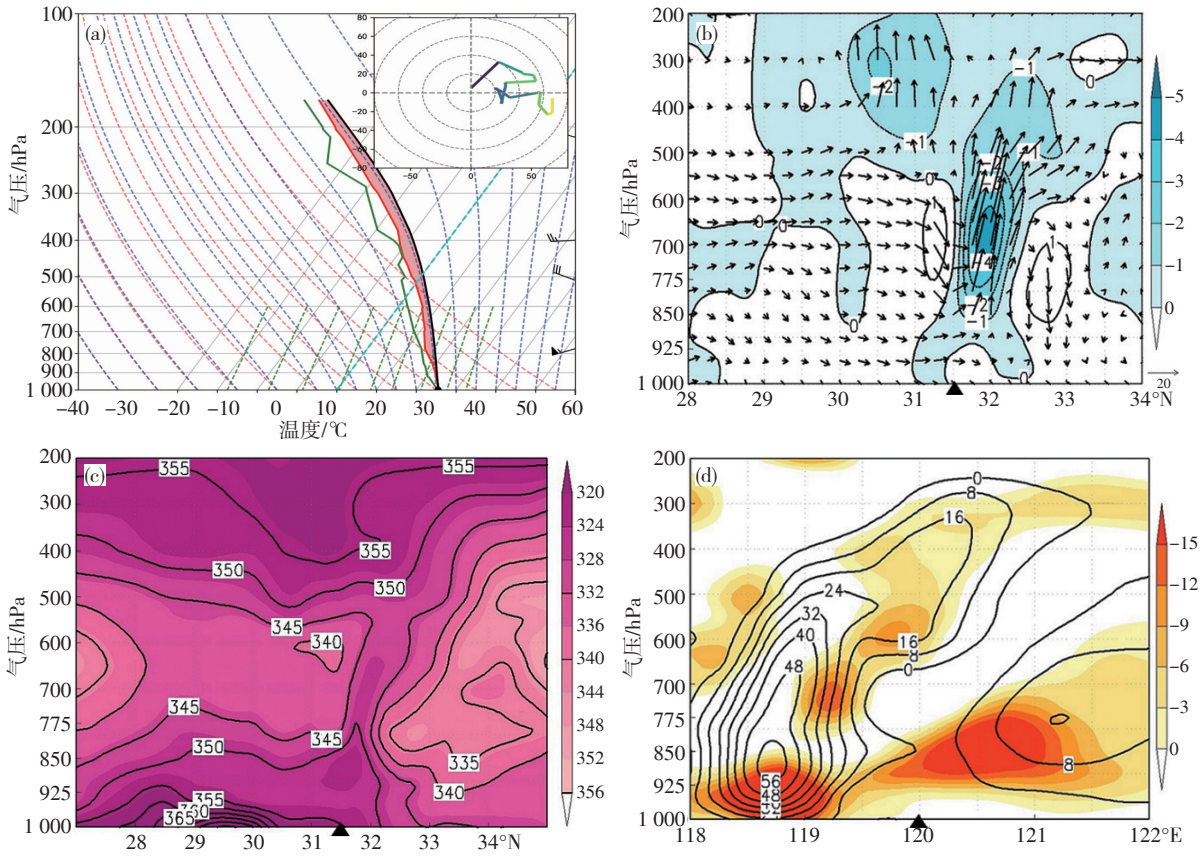

图4 2020年7月6日08:00宝山站探空图(a)；沿120°E经暴雨中心的垂直速度(等值线和填色，单位：Pa·s^{-1})、纬向环流(u, $\omega \times 10$)(矢量箭头，u的单位为m·s^{-1}，ω的单位为Pa·s^{-1})的垂直剖面(b)；沿120°E经暴雨中心的假相当位温(等值线和填色，单位：K)的垂直剖面(c)；沿31°N经暴雨中心的涡度(等值线，单位：10^{-5} s^{-1})、散度(填色，单位：10^{-5} s^{-1})垂直剖面(d)

Fig.4 (a) Sounding map of Baoshan station at 08:00 BT on 6 July 2020, (b) vertical cross sections of vertical velocity (contours and shadings, units: Pa·s^{-1}) and zonal circulation (u, $\omega \times 10$) (arrows, unit of u: m·s^{-1}, unit of ω: Pa·s^{-1}) along 120°E through the rainstorm center, (c) pseudo equivalent potential temperature (contours and shadings, unit: K) along 120°E through the rainstorm center, (d) vorticity(contours, unit: 10^{-5} s^{-1}) and divergence (shadings, unit: 10^{-5} s^{-1}) along 31°N through the rainstorm center at 08:00 BT on 6 July 2020

苏州位于西南气流和东南气流交汇处，近地面对流抑制能量(CIN)为0，云底低且抬升凝结高度(LCL)接近地面，自由对流高度(LFC)也相对较低，十分有利于初始对流的启动。

切变线附近垂直风场特征显示(图4b)，850 hPa冷切北侧上空存在明显的次级环流圈，该环流圈为直接热力环流圈，冷切南侧存在弱的间接热力环流圈，上升运动主要位于两个方向相反的环流圈之间，切变线附近上升运动最强烈。且850—500 hPa上升运动中存在一致的南风分量，表明上升气流主要由偏南风构成，850 hPa以下上升气流相对微弱，切变线上空次级环流的上升支叠加，利于强降水的产生。

切变线西段500 hPa以下均为正的相对涡度(图4d)，相对涡度随高度向东倾斜，利于雨滴和水凝物倾斜上升，并在苏州上空积聚，切变线东段850—600 hPa存在相对涡度中心，随高度倾斜不明显。中低层正涡度区为显著的负散度区，表明风场辐合强烈，切变线西段850 hPa以下辐合更强，切变线东段辐合中心主要位于925—775 hPa，与850 hPa低空急流相对应。

3.2.3 水汽条件

暴雨的形成需要充分的水汽供应，2020年7月6日00:00江苏、安徽以南大部分地区整层大气可降水量(PW)达到140 mm以上，最大值达180 mm。在西南暖湿急流输送下，强烈的水汽辐合作用使得江苏南部大范围地区PW超过140 mm，为大暴雨提供了充分的水气供应，PW大值区持续时间超过6 h，在降水最强时段发生前一个小时即08:00前后，PW较前一时次显著增强，表明PW的增强对极端降水的发生有一定的指示作用(图5c)。

从比湿场可见(图5a–b)，7月6日06:00江苏中南部850 hPa比湿在14 g·kg^{-1}以上，中心值在16 g·kg^{-1}以上，而700 hPa苏南比湿一直维持在10 g·kg^{-1}以上，比湿大值中心06:00位于苏南西部，随着西南急流不断向东传播，09:00整个苏南均处在11 g·kg^{-1}以上的大值区中，超过江苏发生暴雨的比湿标准(源自《江苏省预报员手册》，即850 hPa比湿≥14 g·kg^{-1}，700 hPa比湿≥8 g·kg^{-1})。

此次过程850 hPa和700 hPa均存在源自孟加拉

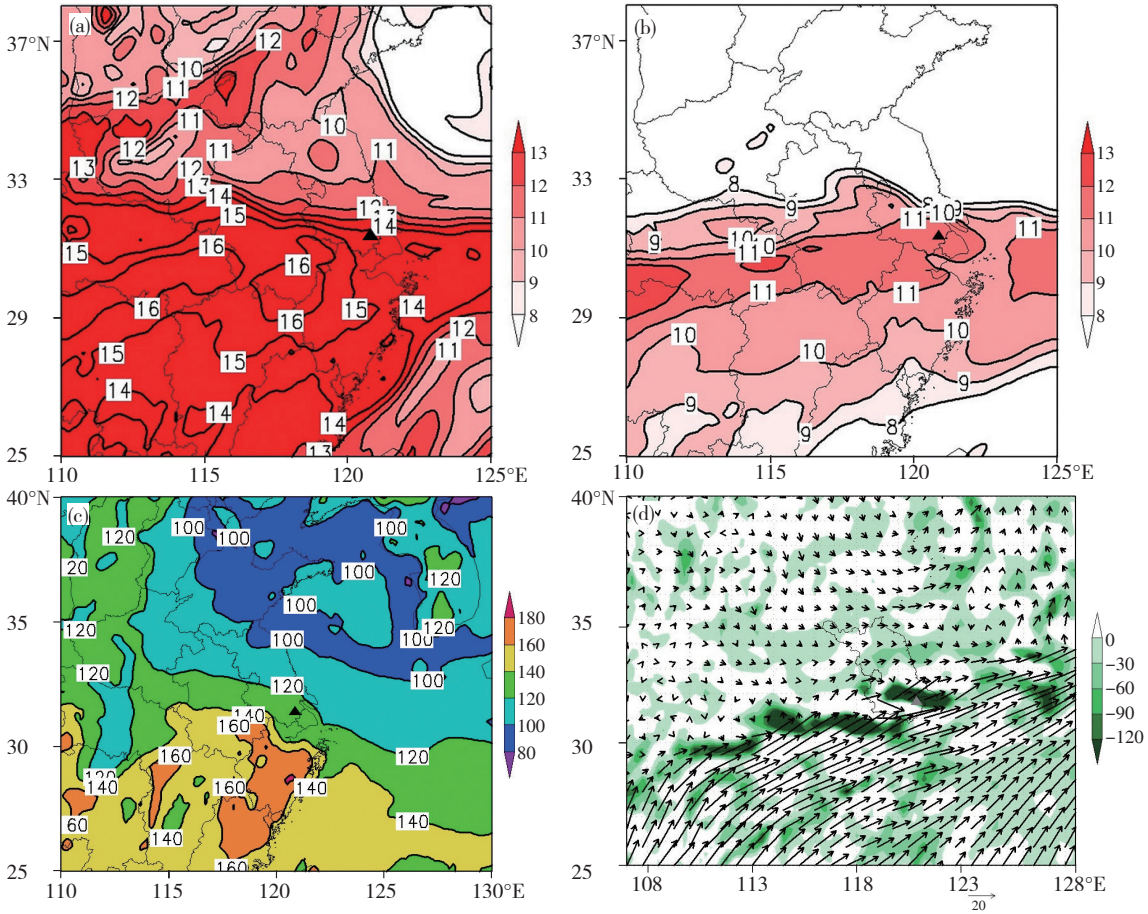

图5 2020年7月6日06:00 850 hPa (a)和09:00 700 hPa (b)比湿(单位:g·kg^{-1})，08:00大气整层可降水量(c, 单位:mm)，08:00 850 hPa水汽通量(箭头，单位: kg·m^{-1}·hPa^{-1}·s^{-1})和水汽通量散度(阴影，单位: 10^{-5} kg^{-1}·hPa^{-1}·m^{-2}·s^{-1})(d)

Fig.5 The specific humidity(unit: g·kg^{-1}) at (a) 850 hPa at 06:00 BT and (b)700 hPa at 09:00 BT, (c)the total precipitable amount (unit: mm) at 08:00 BT, (d) water vapor flux (the arrow, unit: kg·m^{-1}·hPa^{-1}·s^{-1}) and water vapor flux divergence (shaded, unit: 10^{-5} kg^{-1}·hPa^{-1}·m^{-2}·s^{-1}) at 850 hPa at 08:00 BT on 6 July 2020

湾的水汽输送。7月6日08:00江苏省沿江的苏南东部出现强烈的水汽辐合中心，中心值超过120×10^{-5} $kg^{-1}\cdot hPa^{-1}\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}$，表明此处有明显的水汽聚集，为强降水的发生提供了充分的水汽条件(图5d)。

3.3 梅雨锋锋生

降水强度与锋生函数关系密切(侯俊和管兆勇，2013)，下面重点分析此次过程强降水发生前后梅雨锋的维持和发展演变。由850 hPa锋生函数水平分布可见(图6a)，7月6日08:00东西向水平锋生带集中在江苏沿江至苏南中北部一线，同时中高层冷平流加强促使冷锋锋生，叠加在低层暖平流上，使大气斜压性大大增强，产生强降水，未来1 h强降水区位于地面锋生区北侧，与850 hPa锋生区对应较好。垂直方向上(图6b)，07:00前后700 hPa以上锋生随高度向北倾斜，700 hPa至地面锋生随高度剖面与地面几乎垂直，且925 hPa以下锋生稍弱，08:00地面以上均为强烈的锋生区，中心强度超过4×10^{-9} $K\cdot m^{-1}\cdot s^{-1}$，地面以上锋生随高度一致向北倾斜，表明斜压性增强。此次过程水平方向和垂直方向均有强烈的锋生，为强降水的发生提供了能量条件和触发条件。

锋生函数主要由倾斜项即垂直速度的水平导数产生的锋生作用、散度项即水平辐合辐散产生的锋生作用和形变项即水平变形产生的锋生作用三项组成。从7月6日08:00锋生函数各分解项水平分布可见(图6c–e)，各分解项范围有所重叠，倾斜项和形变项量级相近，而散度项偏小一个量级，表明此次梅雨锋锋生以倾斜项和形变项的贡献为主，而散度项贡献较小。锋生位置看，中层倾斜项对应的锋生位置更偏南，中层形变项对应的锋生位置更偏北偏东，而中层散度项的位置与低层接近。各项叠加的区域和08:00—09:00的1 h强降水对应较好。假相当位温密集带即锋面附近和南侧暖气团内锋生更强烈，而北侧冷气团内锋生不明显。

3.4 低空急流的演变

此次过程强降水阶段中低层伴有深厚的低空急流，下面利用更精细的风廓线雷达资料分析低空急流的演变。从7月6日08:00开始，太仓强降水发生前，整层处于一致的西南气流中，西南暖湿气流输送水汽，1 km以下风速随高度逐渐增大，1.5 km以上风速迅速增大，出现了强劲的低空急流，其中2—4 km风速超过20 $m\cdot s^{-1}$。此后低空急流开始向下传播，08:20在1 km开始出现风速超过20 $m\cdot s^{-1}$的超低空急流，08:48前后900 m附近风速明显增强，达到20 $m\cdot s^{-1}$，并继续向低层传播，在不同高度、不同时段的西南急流形成了多个大小不一的风速辐合区，导致环境风场上下扰动从而形成不稳定层结，对应降水明显增强；09:00低空急流进一步下传，此时地面附近为东南风，700 m以上为西南急流，风向随高度顺转，表明近地面暖平流

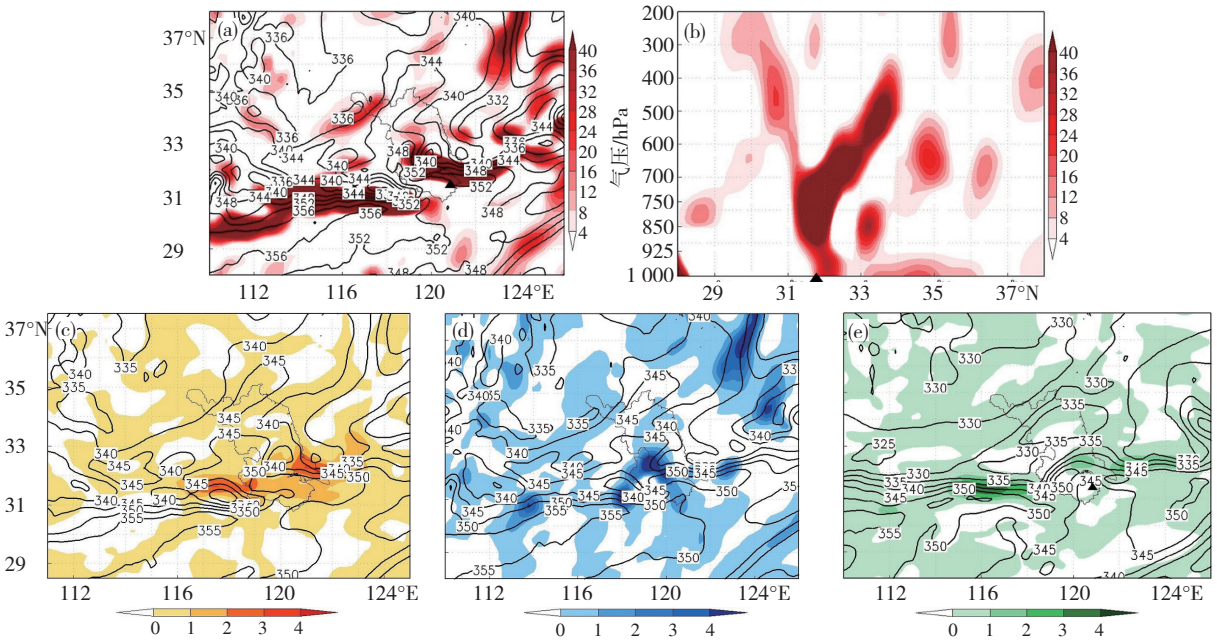

图6 2020年7月6日08:00 850 hPa水平锋生函数(阴影，单位：10^{-9} $K\cdot m^{-1}\cdot s^{-1}$) (a)、沿121°E经暴雨中心的锋生函数垂直剖面(b，阴影，单位：10^{-9} $K\cdot m^{-1}\cdot s^{-1}$)、850 hPa锋生函数倾斜项(c，阴影，单位：10^{-8} $K\cdot m^{-1}\cdot s^{-1}$)、散度项(d，阴影，单位：$10^{-9}$ $K\cdot m^{-1}\cdot s^{-1}$)、形变项(e，阴影，单位：$10^{-8}$ $K\cdot m^{-1}\cdot s^{-1}$)

Fig.6 (a) Horizontal frontogenesis function at 850 hPa and (b) vertical cross section of frontogenesis function along 120°E through the center of rainstorm at 08:00 BT on 6 July 2020 (shaded, unit: 10^{-9} $K\cdot m^{-1}\cdot s^{-1}$), (c) frontogenesis function tilt term (shaded, unit: 10^{-8} $K\cdot m^{-1}\cdot s^{-1}$) (d) divergence term (shaded, unit: 10^{-9} $K\cdot m^{-1}\cdot s^{-1}$) (e) deformation term (shaded, unit: 10^{-8} $K\cdot m^{-1}\cdot s^{-1}$) at 850 hPa at 08:00 BT on 6 July 2020

增强，1—2 km风速超过30 m·s^{-1}，0—1 km风向风速垂直切变均发展到最强，09∶12—09∶18低层暖平流维持，900 m高度开始出现风场扰动，720—900 m风随高度逆转，表明有冷空气入侵。到09∶36，900 m高度以下偏南风逆转为西北风，对应此时太仓面小时降水迅速增大到 38.8 mm的峰值，强降水主要位于边界层急流出口区左前侧，随后09∶54整层转为西北风，降水迅速减弱(图7)。

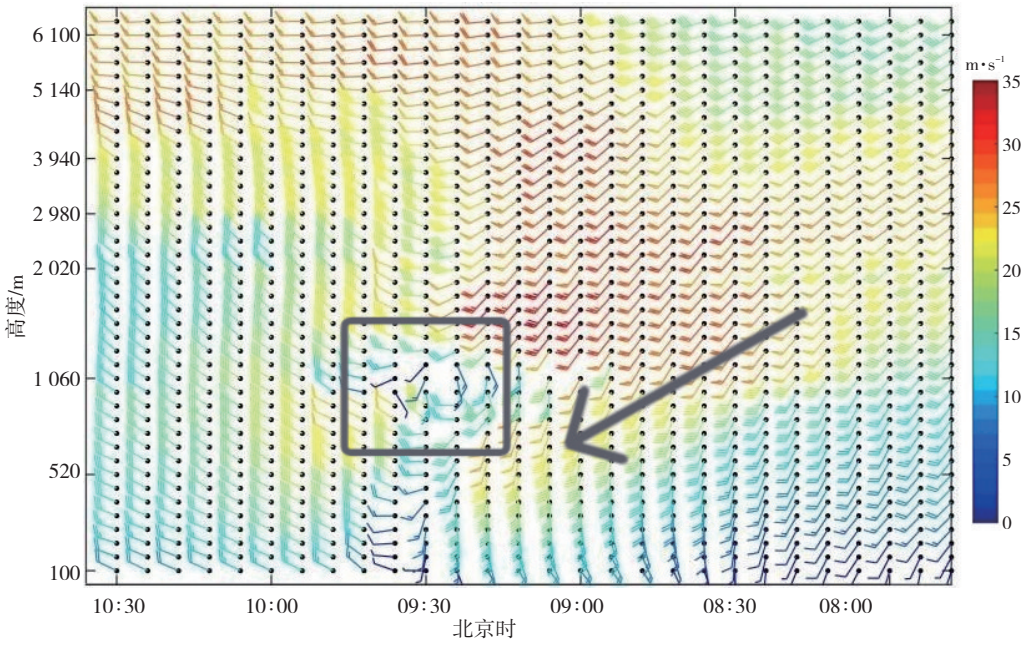

图7 2020年7月6日08:00—10:36太仓雷达站风廓线图(箭头表示低空急流传播方向，矩形框表示风场扰动区)

Fig.7 The horizontal wind field for wind profiler radar of Taicang from 08∶00 BT to 10∶36 BT on 6 July 2020 (Arrow represents the propagation direction of the low-level jet streams, and rectangular box represents the wind field disturbances)

4 对流系统的演变特征

此次强降水过程对流系统演变主要分为三个阶段，即对流初生阶段(02∶00—05∶00)、对流发展阶段(05∶00—08∶00)和对流传播阶段(08∶00—10∶00)。6日02∶00前后苏州相城附近有降水回波生成，该降水回波02∶00—03∶00准静止地维持在相城附近，造成持续降水，但降水强度不大，小时降水量在10 mm以下，以层云降水为主。03∶00起该回波附近不断激发新对流单体，对流单体向下游移动过程中出现后向传播，形成层积混合块状回波；05∶00—08∶00回波继续发展，在苏州上游逐渐发展成涡旋状对流云团(图8a)。

08∶24—08∶30涡旋状对流云团中强回波中心范围不断增大，中心强度超过55 dBz，对流云团后部无锡附近层云回波逐渐组织成带状。08∶42涡旋状对流云团继续加强东移，中心强度超过60 dBz，顶高超过14 km，0.5°仰角径向速度图上开始出现明显的正负速度对，旋转速度达15.8 m·s^{-1} (图 8d)，宽广的涡旋状回波表明强降水包裹着中气旋，也就是存在强降水超级单体风暴，苏州站5 min内出现17.1 mm的短时极端强降水；无锡附近的带状回波上有对流单体激发，同时带状回波结构逐渐密实。08∶48—08∶54回波顶高超过15 km(图 8e)，强回波中心强度维持在60 dBz以上(图 8b-c)，由垂直剖面可见，超过40 dBz的对流回波高度均在6 km以下，强回波质心低于苏州当天0 ℃层高度，表明以暖雨为主(图 8g)。强反射率因子区与K_{DP}达7 °·km^{-1}的高值区(图 8f) 对应，K_{DP}高值区主要由大量降水粒子组成，液态水含量达35～40 kg·m^{-2}，表明降雨强度大。垂直剖面上K_{DP}柱所在位置与短时强降水发生区域对应，结合涡旋状回波特征，降水粒子在上升气流作用下不断上下翻滚且迅速增长，利于增强“暖雨”过程(图 8h)，08∶00—09∶00苏州站出现最大小时降雨。09∶00回波整体呈反“L”状的弓形，其中南北向回波带自昆山阳澄湖地区向偏东方向移动，中心强度超过55 dBz，对应苏州东部太仓附近开始出现短时强降水。东西向回波带东移过程尾部不断有对流单体新生。09∶06尾部新生单体合并后，强度迅速增强，正负速度对消失。09∶12东西向带状回波开始出现列车效应，并不断向东传播，强度始终维持，导致09∶00—10∶00苏州再次出现超过30 mm·h^{-1}的短时强降水。09∶30—09∶36带状回波断裂，弓形回波分裂成南北两块，仍以东移为主。09∶42—09∶54苏州境内回波组织结构开始松散，并转向东南方向移动到上海境内，苏州降水强度迅速减弱(图略)。

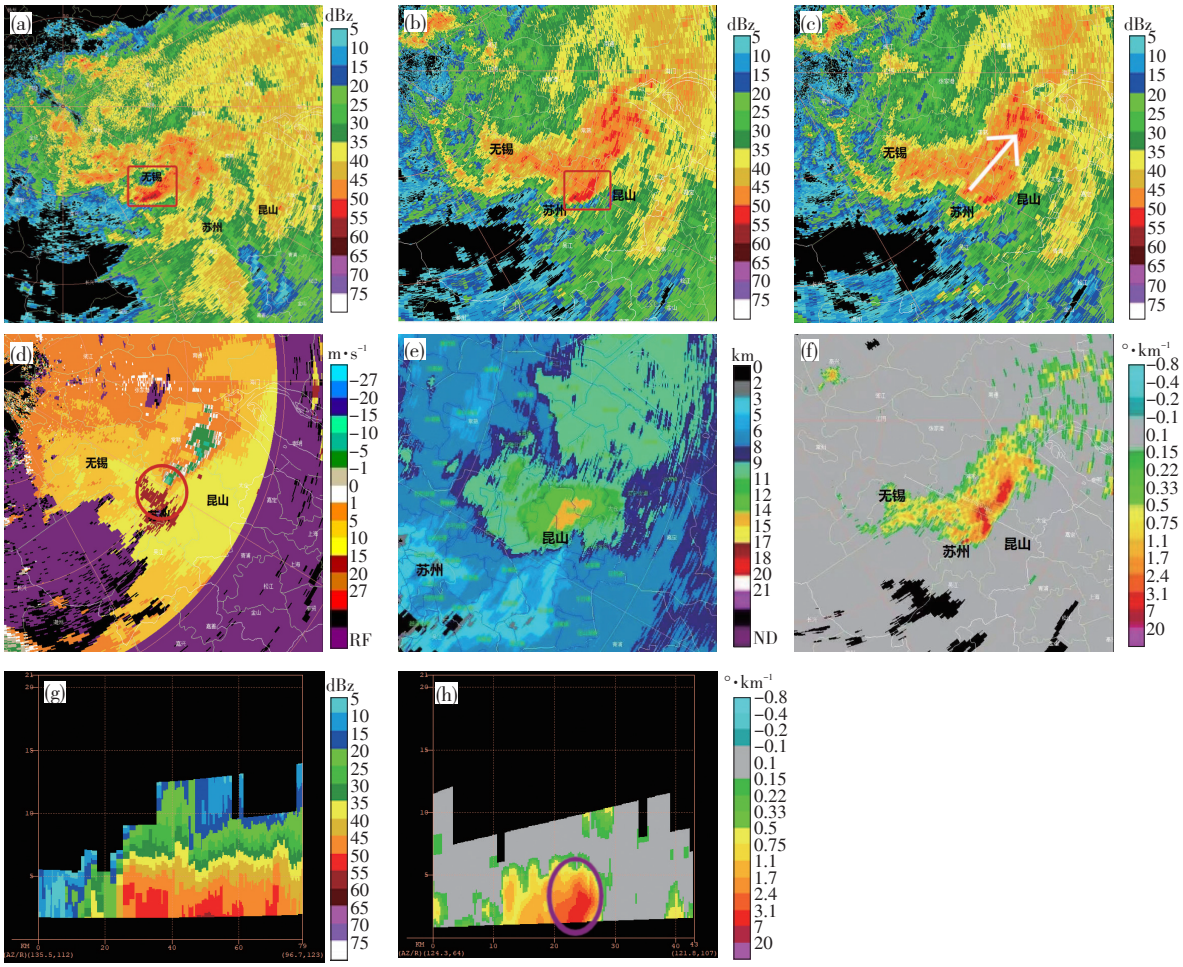

图8 2020年7月6日08∶00 (a), 08∶48 (b), 08∶54 (c)常州雷达0.5°仰角基本反射率因子(红色矩形框表示涡旋状对流，白色箭头表示列车效应); 08∶42 0.5°仰角径向速度(d, 红色椭圆框表示正负速度对); 08∶54回波顶高(e); 08∶54 0.5°仰角 K_{dp} (f); 08∶48反射率因子剖面(g); 08∶24 K_{dp} 剖面(h, 紫色椭圆框表示 K_{dp} 柱)

Fig.8 0.5° Base reflectivity of (a) 08∶00 BT, (b) 08∶48 BT, (c) 08∶54 BT (The red rectangular box represents vortex-like convection. The white arrow indicates the train effect), (d) 0.5° elevation radial velocity at 08: 42 BT (The red elliptical box represents plus and minus velocity pairs), (e) Echo top height at 08∶54 BT, (f) 0.5° elevation K_{dp} at 08∶54 BT, (g) reflectivity echo profile at 08∶48 BT, (h) K_{dp} profile at 08∶24 BT (The purple elliptical box represents K_{dp} columns)

5 结论

本文利用ERA5再分析资料及地面自动气象站、多普勒天气雷达和风廓线雷达等多种观测资料，分析了2020年7月6日发生在苏州的一次暴雨到大暴雨过程，探讨了强降水、环境条件及对流系统演变。得出以下结论：

(1) 此次大暴雨过程具有突发性强、降水效率高等特点。高空西风槽东移，中低层冷式切变线南压，冷暖空气在苏南上空汇合使低层辐合增强，中低层西南急流加强以及地面梅雨锋维持为此次大暴雨过程提供了有利的天气背景条件。大暴雨区主要位于低空切变线南侧、西南急流轴顶端和地面梅雨锋东段北侧。

(2) 强降雨主要发生在对流发展阶段(05∶00—08∶00)和对流传播阶段(08∶00—10∶00)，由强降水超级单体风暴东移造成。最强降雨时段回波中心强度超过60 dBz，顶高超过14 km，强反射率因子区对应 K_{DP} 达7 °·km^{-1}的高值区，液态水含量达38 kg·m^{-2}，降水粒子在上升气流影响下不断翻滚迅速增长。强回波垂直伸展高度平均在6 km以下，为典型的低质心暖区降雨。

(3) 苏州上空抬升凝结高度低、中等强度的CAPE、中低层强垂直风切变和对流不稳定层结，为大暴雨的产生提供有利的环境条件。不断增强的低空急流向下传播形成超低空急流，急流出口区强烈的辐合抬升和切变线上空次级环流的上升支叠加，为强降水的产生提供动力抬升和触发条件。水平方向和垂直方向强烈的梅雨锋锋生，使强降水得以维持，锋生以倾斜项和形变项贡献为主。强降水发生前江苏南部PW和比湿均为高值区，PW显著增强后一个小时苏州出现最强降水。

参考文献(References)：

蔡雄辉，邱学兴，郭婷，等.2021.安徽北部一次局地特大暴雨过程的中尺度特征分析[J].沙漠与绿洲气象，2021，15(4): 83-91. Cai X H, Qiu X X,

Guo T. et al. 2021. Mesoscale characteristics of a local extremely heavy rainstorm process in northern AnHui [J]. Desert and Oasis Meteorology, 15(4):83–91 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002–0799.2021.04.011

陈超,胡志群,胡胜,等.2018.广州S波段双偏振雷达数据质量初步分析[J].热带气象学报,34(1):59–67. Chen C, Hu Z Q, Hu S, et al. 2018. Preliminary analysis of data quality of Guangzhou s–band polarimetric weather radar [J]. Journal of Tropical Meteorology,34(1):59–67 (in Chinese). doi:10.16032/j.issn.1004–4965.2018.01.006

陈云辉,单九生,李婕,等.2023.南昌“6.29”短历时暴雨过程的成因及其中尺度特征[J].暴雨灾害,42(2):124–133. Chen Y H, Shan J S, Li J, et al. 2023. Causes and meso–scale characteristics of the short–duration rainstrom in Nanchang on 29 June 2022 [J]. Torrential Rain and Disasters,42(2):124–133 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022–145

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:257. Ding Y H. 1993. Research for the Jiang–Huai torrential rain in 1991 [M]. Beijing: China Meteorological Press:257

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]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,31(6):1082–1101 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006–9895.2007.06

侯俊,管兆勇.2013.华东地区6–7月锋生的气候学特征及环流结构[J].气象学报,71(1):1–22.Hou J, Guan Z Y. 2013. Climatic features of frontogenesis in East China and their related circulation patterns during the early summer. Acta Meteorologica Sinica,71(1):1–22 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2013.001

刘明丽,王谦谦.2006.江淮梅雨期极端降水的气候特征[J].南京气象学院学报,29(5):676–681. Liu M L, Wang Q Q. 2006. Climatic characteristics of CHANG jiang HUAI he River valley extreme precipitation in Mei–yu period [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology,29(5):676–681 (in Chinese). doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.2006.05.014

马音,陈文,王林.2011.中国夏季淮河和江南梅雨期降水异常年际变化的气候背景及其比较[J].气象学报,69(2):334–343. MA Y, CHEN W, WANG L. 2011.A comparative study of the interannual variation of summer rainfall anomalies between the Huaihe Mei–yu season and the Jiangnan Mei–yu season and their climate background [J]. Acta Meteorologica Sinica,69(2):334–343 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2011.028

濮梅娟,刘聪,杨金彪,等.2017.江苏省天气预报技术手册[M].气象出版社:74–89. PU M J, LIU C, YANG J B, et al. 2017. Jiangsu Weather Forecast Technical Manual[M]. China Meteorological Press:74–89

陶诗言,倪允琪,赵思雄,等.2001. 1998年夏季中国暴雨的形成机理与预报研究[M].北京:气象出版社:47–61. Tao S Y, Ni Y Q, Zhao S X, et al. 2001. Study on the Formation Mechanism and Forecast of rainstorm in Summer of 1998 in China [M]. Beijing: Meteorology Press: 47–61

田付友,郑永光,张涛,等.2017.我国中东部不同级别短时强降水天气的环境物理量分布特征[J].暴雨灾害,36(6):518–526. Tian F Y, Zheng Y G, Zhang T, et al. 2017. Characteristics of environmental parameters for multi–intensity short–duration heavy rainfalls over East China [J]. Torrential Rain and Disasters,36(6):518–526 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–9045.2017.06.004

王伏村,许东蓓,姚延锋,等. 2016. 一次陇东大暴雨的锋生过程及倾斜涡度发展 [J]. 高原气象,35(2):419–431. Wang F C, Xu D B, Yao Y F, et al. 2016. Frontogenesis process and slantwise vorticity development of a rainstorm process in the eastern Gansu [J]. Plateau Meteorology,35(2):419–431 (in Chinese). doi:10.7522/j. issn.1000–0534.2014.00127

杨康权,卢萍,张琳. 2017.高原低涡影响下的一次暖区强降水特征分析[J]. 热带气象学报,33(3): 415–425.Yang K Q, Lu P, Zhang L. 2017. Analyses of heavy rainstorm in warm sector under the influence of the low–pressure system of qinghai–xizang plateau [J] Journal of Tropical Meteorology,33(3):415–425 (in Chinese). doi:10.16032/j.issn.1004–4965.2017.03.012

杨忠林,赵坤,徐坤,等.2017.江淮梅雨期极端对流微物理特征的双偏振雷达观测研究[J].气象学报,77(1):58–72. Yang Z L, Zhao K. Xu K, et al. 2017. Microphysical characteristics of extreme convective precipitation over Yangtze–Huaihe River basin during Meiyu season using polarimetric radar data [J]. Acta Meteorologica Sinica.77(1):58–72 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb.2018.040

张人禾,刘屹岷.2013.中国南方夏季强降水的大尺度过程[M].北京:气象出版社:312. Zhang R H, Liu Y M. 2013. The large–scale process of summer rain in southern China [M]. Beijing: China Meteorological Press:312

张小玲,林建,张涛,等.2015. 2013年暖季试验概述.气象,41(5):521–532. Zhang X L, LIN J, ZHANG T, et al. 2015. Overview of the warm–season experiment in 2013 [J]. Meteorological Monthly,41(5):521–532 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000–0526.2015.05001

赵娴婷,王晓芳,王珏,等.2020. 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,46(4):490–502. Zhao X T, Wang X F, Wang J, et al. 2020. Analysis of mesoscale characteristics of torrential rainfall in Hubei Province during 18–20 July 2016 [J]. Meteorological Monthly,46(4):490–502 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.000–0526.12020.04.004

朱格利,林万涛,曹艳华.2014.用WRF模式中不同云微物理参数化方案对华南一次暴雨过程的数值模拟和性能分析.大气科学,38(3):513–523. Zhu G L, Lin W T, Cao Y H. 2014. Numerical simulation of a rainstorm event over south China by using various cloud microphysics parameterization schemes in WRF model and its performance analysis [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese),38(3):513–523. doi:10.3878/j.issn.1006–9895.2013.13202

Chen B, Yang J, Pu J. 2013. Statistical characteristics of raindrop size distribution in the Meiyu season observed in eastern China [J]. Journal of the Meteorological Society of Japan,91:215–227

Fu Y, Liu G. 2003. Precipitation characteristics in mid–latitude east Asia as observed by TRMM PR and TMI [J]. Journal of the Meteorological Society of Japan,81:1353–1369

Luo Y, Wang H, Zhang R, et al. 2013. Comparison of rainfall characteristics and convective properties of monsoon precipitation systems over south China and the Yangtze and Huai River basin [J]. Journal of Climate,26:110–132

Oue M, Uyeda H, Shusse Y. 2010. Two types of precipitation particle distribution in convective cells accompanying a Baiu frontal rainband around Okinawa Island, Japan [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres,115:355–365

Xu, W, Zipser E J. 2015. Convective intensity, vertical precipitation structures, and microphysics of two contrasting convective regimes during the 2008 TiMREX [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 120:4000–4016

（责任编辑　何明琼）