暴雨灾害
Torrential Rain and Disasters
中国科技核心期刊
中国科技论文统计源期刊

2023年苏州准静止梅雨锋暴雨过程两个强降雨阶段的特征及成因对比

曹舒娅 王啸华 曾晨 汪婷 吴海英 支凤梅

Comparative analysis of characteristics and causes of two heavy rainfall periods in the 2023 quasi-stationary Meiyu Front rainstorm in Suzhou

CAO Shuya，WANG Xiaohua，ZENG Chen，WANG Ting，WU Haiying，ZHI Fengmei

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2024-076

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

苏南一次梅雨锋大暴雨的环境条件及对流系统演变特征

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

暴雨灾害. 2023, 42(5): 532-540 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-128

盛夏一次地面冷锋过境引发局地大暴雨的成因分析

Analysis on the local heavy rainfall caused by cold front in midsummer

暴雨灾害. 2021, 40(4): 393-400 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.04.007

复杂地形影响下鄂东北梅雨锋大暴雨MCS的触发和演变

Initiation and evolution of MCS of Meiyu frontal heavy rain event in the complex terrain of northeast Hubei

暴雨灾害. 2020, 39(6): 611-619 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.06.009

复杂山地下引发特大暴雨的准静止MCS观测分析

Analysis of quasi-stationary MCS causing extreme torrential rain event under complex mountains in Southwest Hubei

暴雨灾害. 2022, 41(3): 241-253 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.03.001

2020年7月4—8日长江中游极端暴雨特征分析

Characteristics analysis of an extreme heavy rain event in the middle reaches of the Yangtse River from July 4 to 8 in 2020

暴雨灾害. 2021, 40(4): 333-341 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.04.001

内蒙古东北部“21.7”罕见极端暴雨特征及成因分析

Analysis of the characteristics and causes of the July 2021 rare extreme rainstorm in northeastern Inner Mongolia

暴雨灾害. 2025, 44(2): 177-185 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-096

关注微信公众号，获得更多资讯信息

曹舒娅,王啸华,曾晨,等.2025. 2023 年苏州准静止梅雨锋暴雨过程两个强降雨阶段的特征及成因对比[J].暴雨灾害,44(6):804−814.
CAO Shuya, WANG Xiaohua, ZENG Chen, et al. 2025. Comparative analysis of characteristics and causes of two heavy rainfall periods in the 2023 quasi-stationary Meiyu Front rainstorm in Suzhou [J]. Torrential Rain and Disasters,44(6):804−814 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−076

2023 年苏州准静止梅雨锋暴雨过程两个强降雨阶段的特征及成因对比

曹舒娅[1], 王啸华[2, 3], 曾晨[4], 汪婷[1], 吴海英[2, 3], 支风梅[4]

(1. 江苏省昆山市气象局, 昆山 215300; 2. 中国气象局龙卷风重点开放实验室, 南京 210041; 3. 江苏省气象台, 南京 210041; 4. 江苏省苏州市气象局, 苏州 215131)

摘　要: 2023 年 6 月 18 日上午和 6 月 19 日傍晚至上半夜梅雨带南北摆动, 出现两个准静止时段, 受其影响, 苏州市出现当年首轮大暴雨过程, 造成主城区积涝严重, 85.8 万人生活受到影响。本文利用常规高空、地面观测, 多普勒天气雷达, 风廓线雷达及 ERA5 再分析等多源资料, 对比分析两个准静止阶段强降雨在环流背景、环境条件、锋生机制、雷达回波演变和形成准静止成因等方面异同点, 并建立苏州市准静止梅雨锋暴雨概念模型。结果表明: (1) 两个阶段均具有强降雨时段集中、降雨效率高、累计降雨量大等特征。强降雨第一阶段为准静止梅雨锋锋面降雨, 空间重叠度高、影响范围广; 第二阶段发生在高空槽后弱冷空气渗透、低空冷式切变线南压过程中, 中尺度对流系统 (MCS) 活跃、局地降雨强度大。(2) 第一阶段东西向带状准静止梅雨锋上出现多个 β 中尺度对流系统, 在高空强西风引导气流作用下向东偏南方向传播形成“列车效应”; 第二阶段梅雨锋云系上多个 MCS 组织成中尺度对流复合体, 在 MCS 移动方向的后侧不断有新的对流云团生成, 形成后向传播, 强雷达回波质心低、梯度大、结构密实; 风廓线雷达上低空急流向下传播及中层风场扰动对极端小时雨强有一定预警作用。(3) 高度组织化的 MCS、地面准静止梅雨锋、低空切变、入流增强引起散度项锋生, 是形成第一阶段“列车效应”准静止雨带的主要原因。西南急流持续输送水汽与能量, 配合切变线上强烈的上升运动及次级环流上升支, 共同触发了地面中尺度低压的生成, 构成有利于对流发展的动力配置, 使得第二阶段 MCS 表现出后向传播的准静止特征。

关键词: 准静止; 梅雨锋; 列车效应; 后向传播; 散度项锋生

中图法分类号: P458.3　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2024−076

Comparative analysis of characteristics and causes of two heavy rainfall periods in the 2023 quasi-stationary Meiyu Front rainstorm in Suzhou

CAO Shuya[1], WANG Xiaohua[2, 3], ZENG Chen[4], WANG Ting[1], WU Haiying[2, 3], ZHI Fengmei[4]

(1. *Kunshan Meteorological Bureau of Jiangsu Province*, *Suzhou* 215300; 2. *Tornadoes Key Open Laboratory of China Meteorological Administration*, *Nanjing* 210019; 3. *Jiangsu Meteorological Observatory*, *Nanjing* 210019; 4. *Suzhou Meteorological Bureau of Jiangsu Province*, *Suzhou* 215131)

Abstract: The Meiyu front oscillated north-south, resulting in two quasi-stationary periods on the morning of June 18, 2023 and in the evening of June 19, 2023. Affected by this, the first stage of heavy rainstorm process occurs in Suzhou, causing severe waterlogging in the main urban area, affecting the lives of 858 000 residents. This paper uses multi-source data such as Jiangsu automatic station data, radar and wind profile data and European Centre for Medium-Range Weather Forecasts ERA5 (ECMWF Reanalysis v5) reanalysis data. Through mesoscale analysis and physical quantity diagnosis methods, it compares and analyzes the similarities and differences between the two quasi-stationary stages in terms of precipitation characteristics, circulation background, environmental conditions, frontogenesis mechanisms, radar echo evolution, and the causes of quasi-stationarity, and establish a conceptual model of Quasi-Stationary Meiyu-Front

收稿日期: 2024−05−02; **定稿日期**: 2024−10−31

资助项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFC3003904, 2021YFC3000905); 苏州市气象局自立课题 (SZKJ202307)

第一作者: 曹舒娅, 主要从事短临预报方法研究。E-mail: caoshuya0929@163.com

通信作者: 王啸华, 主要从事强对流短临预报预警技术研究。 E-mail: njbocai@163.com

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY−NC−ND 4.0

heavy rainstorms in Suzhou. The results are as follows. (1) Both stages of heavy rainfall have the characteristics of concentrated heavy rainfall periods, high rainfall efficiency, and large cumulative rainfall. The first stage of heavy rainfall is quasi-stationary frontal rainfall of the plum rain front, with high spatial overlap and wide impact range. The second stage occurs during the process of weak cold air infiltration behind the upper trough and the southward pressure of the low-altitude cold shear line. Mesoscale convective systems are active and local rainfall intensity is large. (2) In the first stage, multiple β mesoscale convective systems (MCS) propagate eastward and southwards on the east-west belt shaped quasi stationary Meiyu front, forming a train effect under the guidance of strong westerly winds at high altitudes. During the second stage of the Meiyu front cloud system, multiple MCSs organize into a mesoscale convective complex. New convective cells continuously develop on the trailing side of the MCS, resulting in back-building propagation. The intense radar echoes exhibit a low centroid, steep gradient, and compact structure. The strong echo centroid is low, the gradient is large, the structure is dense. The low-level jet stream propagation and mid-level wind field disturbance on the wind profile radar have a certain warning effect on extreme hourly rainfall intensity. (3) The main reasons for the formation of the first stage of the "train effect" quasi-static rain belt are highly organized MCS, ground quasi-static Meiyu front, low altitude shear, and enhanced inflow leading to the generation of divergence fronts. The persistent southwesterly jet continuously transports moisture and energy, which, together with the intense ascending motion over the shear line and the ascending branch of the secondary circulation, jointly triggers the formation of a surface mesoscale low-pressure system. This dynamic configuration establishes an environment conducive to convective development, resulting in MCSs during the second stage exhibiting quasi-stationary characteristics with back-building propagation.

Key words: quasi-static; Mei-Yu Front; train effect; backward propagation; divergence term of frontogenesis function

引　言

梅雨锋暴雨是我国长江中下游地区常见的一种灾害性天气, 其引发的强降雨往往造成严重的洪涝灾害 (曹舒娅等, 2023; 贺程程等, 2024)。苏州地处长江三角洲, 其特殊的地理位置使其既受梅雨锋系统影响, 又受太湖和长江水域调节, 梅雨期暴雨频发且强度大, 对区域经济社会发展和人民生命财产安全构成严重威胁。因此, 深入研究苏州地区梅雨期暴雨的形成机制具有重要的理论和现实意义。

准静止梅雨锋是指移动缓慢或停滞的梅雨锋, 研究表明, 准静止梅雨锋引发的暴雨具有持续时间长、降雨强度大、空间重叠度高等特点 (Liang and Ding, 2017; Li et al., 2021; Yu et al., 2022)。这类暴雨过程通常与中尺度对流系统 (MCS) 的准静止特征密切相关, 其形成机制涉及多个物理过程。首先, 梅雨锋的锋生作用和高低空急流耦合产生的次级环流为 MCS 的发展提供了有利条件 (王晓芳等, 2012)。其次, MCS 的合并加强、停滞和后向传播等特征显著影响降雨效率 (王啸华等, 2021; 周金莲等, 2022)。值得注意的是, “列车效应”在延长强降雨持续时间方面起关键作用: 当多个对流单体沿相同路径依次经过某一地区时, 会产生类似列车车厢连续通过的降雨效应, 显著增加局地降雨总量 (陈豫英等, 2021; 张艳梅等, 2022)。研究表明, MCS 的后向传播机制在准静止梅雨锋暴雨形成中起关键作用, 这主要得益于中尺度次级环流的抬升作用和有利的温压场配置 (蔡雄辉等, 2021)。而最新研究进一步揭示了冷池与暖湿入流的相互作用对新对流单体的触发机制 (宫宇等, 2022; 竹利等, 2024)。

尽管上述研究深化了对准静止梅雨锋暴雨过程的认识, 但现有研究多集中于长江中下游区域的整体性特征, 针对苏州这类典型局地梅雨锋暴雨的系统性研究仍显不足。本文利用常规高空、地面, 多普勒天气雷达, 风廓线雷达及 ERA5 再分析等多源观测资料, 针对 2023 年苏州由准静止梅雨锋导致的两个准静止阶段强降雨, 通过对比分析其在环流背景、环境条件、雷达回波演变、锋生机制及形成准静止成因等方面的异同点, 重点研究“列车效应”在准静止梅雨锋暴雨维持中的作用, 建立了苏州市准静止梅雨锋暴雨概念模型, 以期为苏州地区暴雨预报和防汛减灾决策提供科学依据。

1 资料、方法和天气实况

1.1 资料说明和研究方法

使用的资料来源于中国气象局天擎大数据平台和欧洲数值预报中心, 包括: (1) 2023 年 6 月 17 日 20:00—18 日 12:00 和 6 月 19 日 08:00—20 日 08:00 (北京时, 下同) 江苏国家和区域级气象观测站 (以下分别简称为国家站和区域站) 分钟降雨量、气温和 2 min平均风向、风速资料; (2) 2023 年 6 月 17 日 20:00—18 日 20:00 和 6 月 19 日 08:00—20 日 08:00 宝山站和杭州站探空资料; (3) 2023 年 6 月 18 日 00:00—12:00 和 6 月 19 日 12:00—23:00 常州、南通和青浦 S 波段双偏振多普勒天气雷达资料, 采用 VCP21 模式, 时间间隔 6 min; (4) 2023 年 6 月 18 日 00:00—12:00 张家港风廓线雷达资料, 2023 年 6 月

19 日 12:00—23:00 东山风廓线雷达资料，垂直分辨率 60 m，最大探测高度 3—5 km；(5) 第五代全球大气再分析资料 (ERA5)，其水平分辨率 0.25°×0.25°，时间分辨率 1 h，选取了位势高度、风场、温度、比湿以及小时降水量等要素，垂直方向上共 19 层。

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和环境特征，对比分析该过程两个准静止阶段强降雨发生发展的环流背景异同点；然后，使用国家站、区域站和多普勒天气雷达资料分析准静止 MCS 的演变特征和组织结构；最后，利用 ERA5 再分析资料和风廓线雷达资料探讨准静止梅雨锋暴雨的发展和维持机制等，并基于讨论结果建立概念模型。

为揭示总锋生函数、倾斜项、散度项和形变项对锋生的作用，本文还使用了锋生函数诊断分析方法，即 Miller 锋生计算公式 (Miller, 1948)。

1.2 天气实况

2023 年 6 月 17 日苏州入梅以来，受梅雨带南北摆动影响，分别于 18 日 02:00—12:00 和 19 日 17:00—23:00 出现两段准静止梅雨锋暴雨。两个阶段强降雨均具有强降雨时段集中、降雨效率高、累计降雨量大等特征。但是强降雨持续时间、范围、短时强降雨站数和最大小时雨强等存在明显差异。

第一阶段的降雨主要集中在 18 日 02:00—12:00，强降雨落区高度重叠，大暴雨影响范围广。统计 17 日 20:00—18 日 20:00 累计降雨量，苏州中北部地区普降暴雨到大暴雨，其中张家港国家站最大 24 h 累计降雨量为 140.5 mm；区域站最大 24 h 累计降雨量 189.2 mm，出现在张家港妙桥社区站 (图 1a)。全市共 77 个区域站出现小时降雨量超过 20 mm 的短时强降雨；最大小时降雨量 (39.8 mm) 出现在太仓港区七浦闸 (18 日 05:00—06:00)，其中张家港妙桥社区站 04:00—09:00 连续 5 h 出现小时降雨量超过 20 mm 的短时强降雨 (图 1c)。

第二阶段的强降雨主要集中在 19 日 17:00—23:00，持续时间长，MCS 活跃，局地降雨强度大。19 日 08:00—20 日 08:00，苏州全市普降暴雨，市区、吴中、吴江和昆山局部达大暴雨 (图 1b)，期间局部伴有 8 级雷暴大风。全市共 177 个区域站出现小时降雨量超过 20 mm 的短时强降雨，吴中越溪街道 18:00—19:00 和 19:00—20:00 连续 2 h 出现小时降雨量超过 30 mm 强降雨 (图 1d)，其中 18:00—19:00 出现过程最强小时雨强 75.2 mm·h^{-1}。

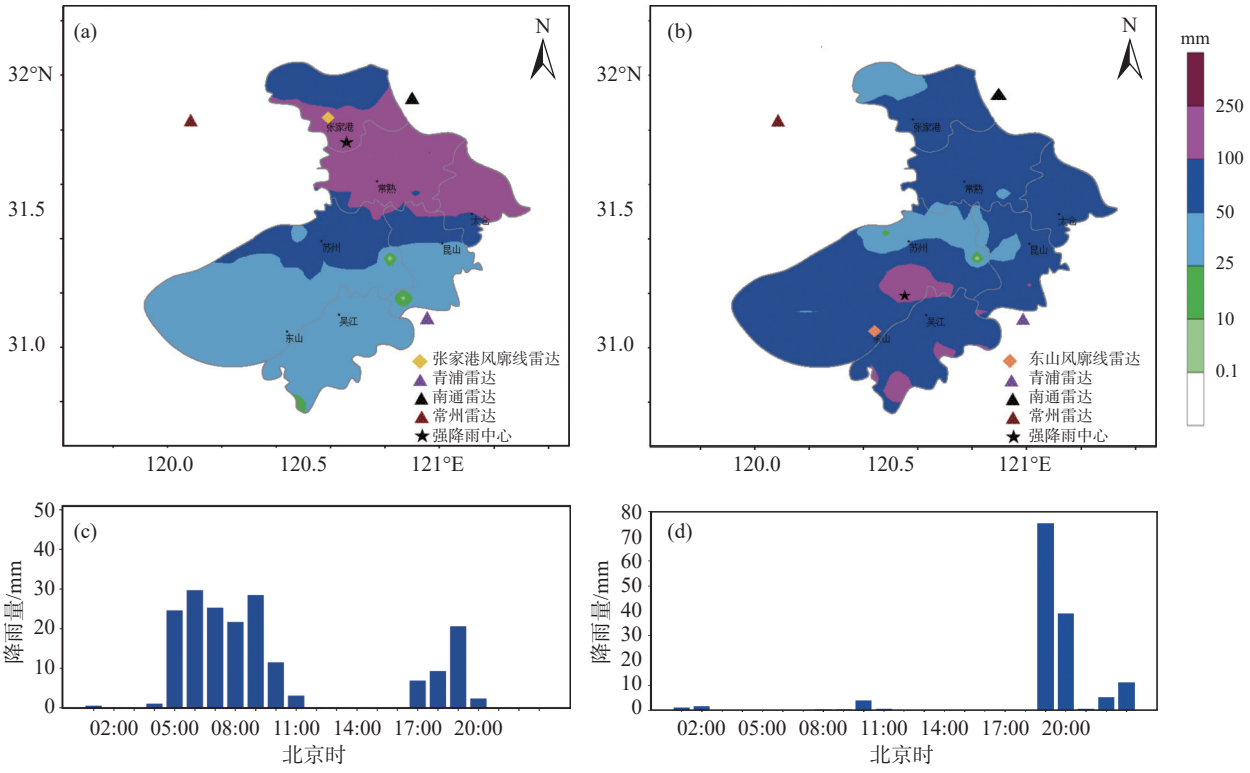


图 1 2023 年 6 月 17 日 20:00—18 日 20:00 (a)、6 月 19 日 08:00—20 日 08:00 (b) 苏州累计降雨量空间分布，18 日 01:00—23:00 张家港妙桥社区 (c) 和 19 日 01:00—23:00 吴中越溪街道 (d) 逐小时降雨量变化

Fig. 1 Precipitation spatial distribution of Suzhou (a) from 20:00 BT on June 17 to 20:00 BT on June 18 and (b) from 08:00 BT on June 19 to 08:00 BT on June 20 and hourly precipitation variation of (c) Miaoqiao Community, Zhangjiagang from 01:00 BT to 23:00 BT on June 18 and (d) Yuexi Street, Wuzhong from 01:00 BT to 23:00 BT on June 19, 2023

2 环流背景及环境条件

大暴雨过程中西太平洋副热带高压 (以下简称副高) 北侧准静止梅雨锋维持, 副高外围西南急流持续向苏州输送暖湿空气和能量, 使得强降雨维持较长时间。下面探讨两个准静止阶段在环流背景及环境条件方面的异同点。

2.1 环流背景

两个阶段均发生在南亚高压东伸加强、副高西伸北抬, 高空短波槽沿副高外围东移, 低空有江淮切变线, 地面准静止梅雨锋维持的典型梅雨环流背景下, 但也存在一定差异。

2023 年 6 月 17 日, 200 hPa 南亚高压主体稳定控制我国华南地区, 脊线越过 25°N, 江苏南部位于副热带西风急流和南亚高压东北侧西北急流的分流区中, 为入梅后的首轮强降雨过程提供了有利的高层辐散条件 (图略)。17 日 20:00, 500 hPa 中高纬呈“两脊一槽”环流型, 江苏南部处于宽广的低压槽前, 有显著的正涡度平流, 120°E 副高脊线位于 20°N 附近, 江苏处于副高外围 588 dagpm 和 584 dagpm 线之间, 偏南暖湿气流为强降雨的发生提供暖湿水汽条件; 中低层有暖式切变线东伸, 苏州处于暖式切变线南侧西南急流中。17 日 20:00—18 日 08:00 西南急流显著增强北抬, 700 hPa 和 850 hPa 急流风速分别超过 16 $m\cdot s^{-1}$ 和 12 $m\cdot s^{-1}$。地面上长江下游地区准静止梅雨锋维持, 梅雨锋切变线北部边界层内的偏北急流与南侧暖区边界层内西南气流相遇不断发展生成中尺度涡旋, 苏州沿江一带受低空急流轴顶端与梅雨锋切变线东段的共同影响, 风向和风速均存在显著辐合, 动力抬升条件有利 (图 2a)。

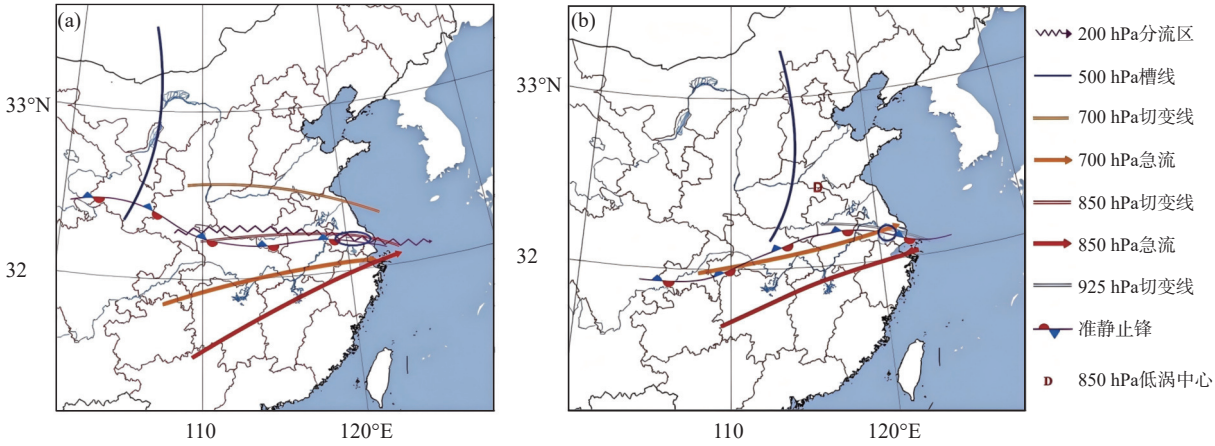


图 2 2023 年 6 月 17 日 20:00 (a) 和 6 月 19 日 08:00 (b) 中尺度综合分析图

Fig. 2 Mesoscale composite analysis at (a) 20:00 BT on June 18 and (b) 08:00 BT on June 19, 2023

19 日 08:00 500 hPa 中高纬维持“两脊一槽”环流形势, 随着高空系统东移, 江苏中南部由槽前转为槽底, 槽后有弱冷空气渗透, 受其影响副高略有南落, 700 hPa 槽线位置在垂直方向上与 500 hPa 略呈前倾结构, 850 hPa 有低涡从江苏江淮之间东移。19 日 08:00—20:00 低涡后部冷式切变线南压扫过苏州造成强降雨, 925 hPa 偏南急流加强和地面低压中心维持为强降雨的发生提供强劲的动力条件 (图 2b)。

综上, 两个准静止阶段的环流背景存在显著的差异: 第一阶段强降雨发生在暖式切变线、强盛西南急流以及高层辐散与正涡度平流共同构成的有利环流背景下, 强降雨落区位于梅雨锋暖区内; 第二阶段强降雨发生在冷式切变线主导、低涡东移及弱冷空气渗透的有利环流背景下, 强降雨落区位于低涡后部冷式切变线南压的区域, 动力抬升条件尤为强劲。

2.2 探空分析

为对比强降雨两个准静止阶段环境条件的差异, 选择临近时刻距离最近的 17 日 20:00 宝山站和 19 日 08:00 杭州站的探空, 并利用 ERA5 资料分析两个阶段强降雨中心附近探空。

17 日 20:00 宝山站上空整层温度与露点温度接近一致, 反映出深厚的饱和湿层特征, 900 hPa 以下为东南风, 950—400 hPa 为一致的偏西到西南风, 850 hPa 以下风向随高度顺转近 120°, 表明低层有强烈的暖平流 (图 3a)。对流有效位能 (CAPE) 和对流抑制 (CIN) 均为 0, 抬升凝结高度 (LCL) 为 985.3 hPa, 18 日凌晨张家港附近 (120.7°E, 31.8°N) 最不稳定气块对流有效位能 (MUCAPE) 为 302 $J\cdot kg^{-1}$, 温度露点差进一步缩小, 表明空气湿度显著增大, 接近饱和状态。*K* 指数由 36.4 ℃ 升至 39 ℃, 大气可降水量 (PW) 达 60 mm, 表明强降雨开始前不稳定能量进一步增大 (图 3c)。

19 日 08:00 杭州站上空仅 750—850 hPa 接近饱和, LCL 至 500 hPa 层结曲线斜率略小于湿绝热线, 表明存在条件不稳定, 1 000—400 hPa 为一致西南

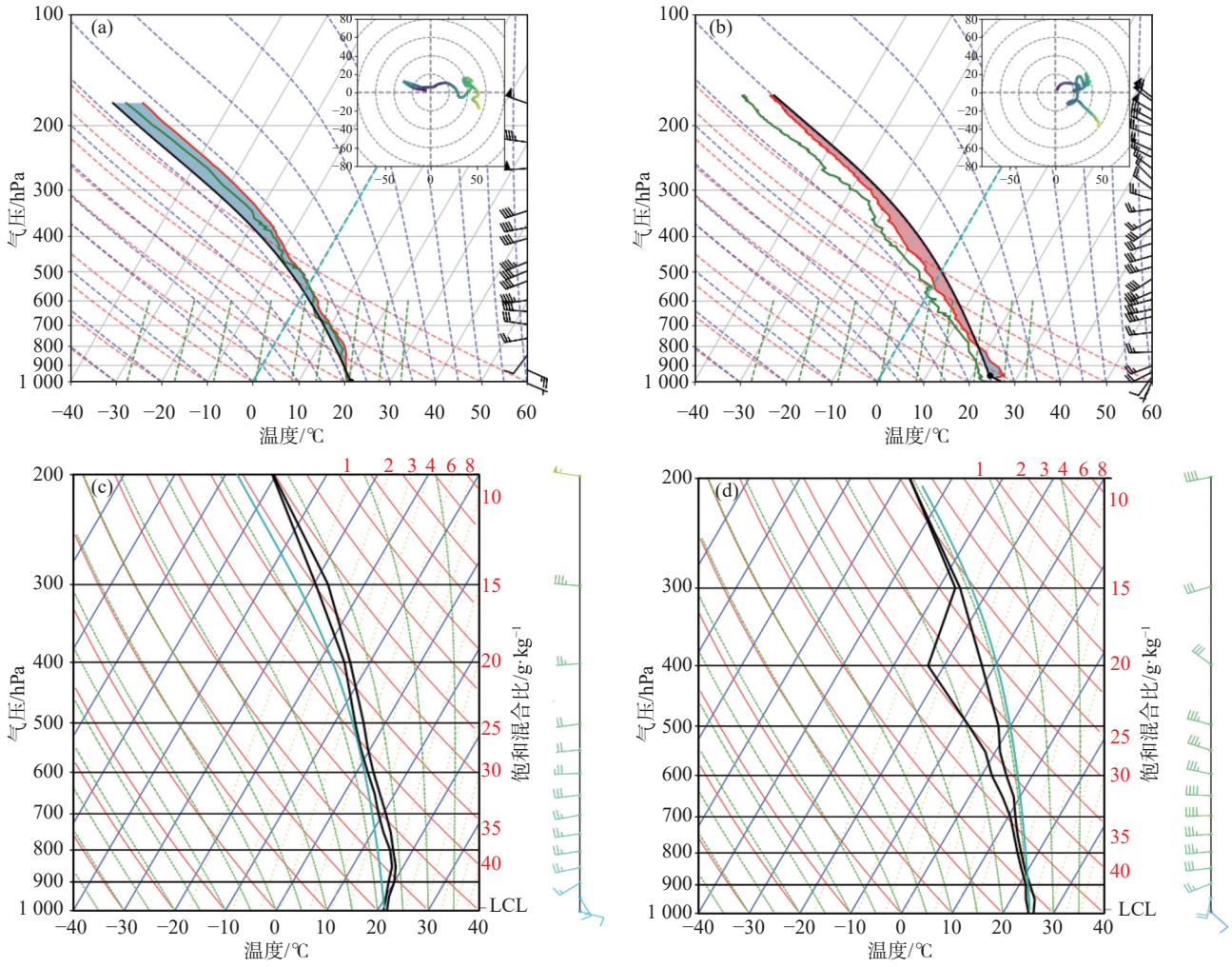


图 3 2023 年 6 月 17 日 20:00 宝山站 (a) 和 6 月 19 日 08:00 杭州站 (b) 探空图 (红实线为温度曲线; 绿实线为露点曲线; 黑实线为状态曲线); 6 月 18 日 04:00 张家港 (c) 和 6 月 19 日 16:00 吴中 (d) 探空图 (黑实线为温度曲线和露点曲线; 绿实线为状态曲线; 绿虚线为饱和混合比线)

Fig. 3 Sounding maps of (a) BaoShan station at 20:00 BT on June 18 and (b) Hangzhou station at 08:00 BT on June 19 (Red solid line represents temperature curve. Green solid line represents dew point curve. Black solid line represents state curve), (c) Zhangjiagang at 04:00 BT on June 18 and (d) Wuzhong at 16:00 BT on June 19, 2023 (Black solid line represents temperature curve and dew point curve. Green solid line represents state curve. Green dashed line represents saturation mixing ratio line)

风, 600 hPa 以下风向随高度顺转, 600—500 hPa 风向随高速逆转, 表明中高空存在冷平流 (图 3b)。杭州站上空 CAPE 达 290.7 J·kg^{-1}, CIN 达 67.6 J·kg^{-1}, K 指数为 39.5 ℃, 沙氏指数 (SI) 为-0.9, 19 日 16:00 吴中附近 (120.6°E, 31.3°N) 600—400 hPa 转为西北风, 探空曲线可见明显的中层干侵入, 700 hPa 以下湿度转好, “上干下湿”的不稳定层结进一步增强。物理量指数方面, CAPE 迅速增大至 1 147 J·kg^{-1}, PW 达 63 mm, 表明午后随着地面气温上升, 大气中积聚了大量不稳定能量, LCL 降至地面附近, CIN 降至 11 J·kg^{-1}, 表明极易触发强对流天气 (图 3d)。对比可见第二阶段强降雨的各项不稳定指数均优于第一阶段, 更有利于产生对流性降雨。

综上, 此次过程第一阶段的强降雨是梅雨锋锋生作用及其强迫抬升所主导的典型锋面降雨, 降雨落区主要发生在低层强烈发展的暖平流中, 整层湿度条件更好。第二阶段发生在高空槽后弱冷空气渗透、低空冷式切变线南压过程中, 伴有更强的对流性。

2.3 环境条件

边界层环境场的热力、动力结构对产生准静止大暴雨 MCS 的形成与维持具有关键作用 (Sun and Zhang, 2005)。研究表明, 边界层内的温度梯度、湿度分布和风场辐合特征直接影响 MCS 的初生位置和组织化过程, 而边界层与自由大气的能量交换则决定了 MCS 的维持时间和发展强度 (张小玲等, 2014)。基于上述认识, 对两个准静止阶段环境场的热力、动力结构特征及其对 MCS 影响的异同点分析如下。

2023 年 6 月 18 日 03:00 苏州强降雨发生前, 850 hPa 以下为假相当位温 (θ_{se}) 密集带, 775 hPa 以下锋面随高度向北倾斜, 850—500 hPa θ_{se} 随高度降低 ($\partial\theta_{se}/\partial p>0$), 表明低层存在对流不稳定层结, 对流不稳定高度随时间缓慢降低 (图 4c), 沿江一带处于梅雨锋锋面切变线东段上升运动区内。由垂直风场 (图 4a) 可见, 强降雨中心上空整层为上升运动, 西南暖湿气流梅雨锋锋面爬升, 由于锋面维持时间长, 造成沿江多站暴雨。19 日 15:00, 大暴雨发生前吴中附近 850 hPa 以下为等 θ_{se} 密集带, 对流不稳定能量不断积累, 地面至 500 hPa 为 θ_{se} 随高度降低的对流不稳定层结。19 日 18:00 前后 600—500 hPa θ_{se} 线出现上凸 (图 4d), 表明 18:00—19:00 短时强降水释放大量凝结潜热。由垂直风场 (图 4b) 可见, 850 hPa 冷式切变线上空存在强烈的上升运动, 冷切南侧出现明显的间接热力环流。850—300 hPa 存在上升速度超过 0.8 Pa·s^{-1} 的上升运动中心, 切变线上空强烈的上升运动与次级环流的上升支叠加利于强降水的产生。

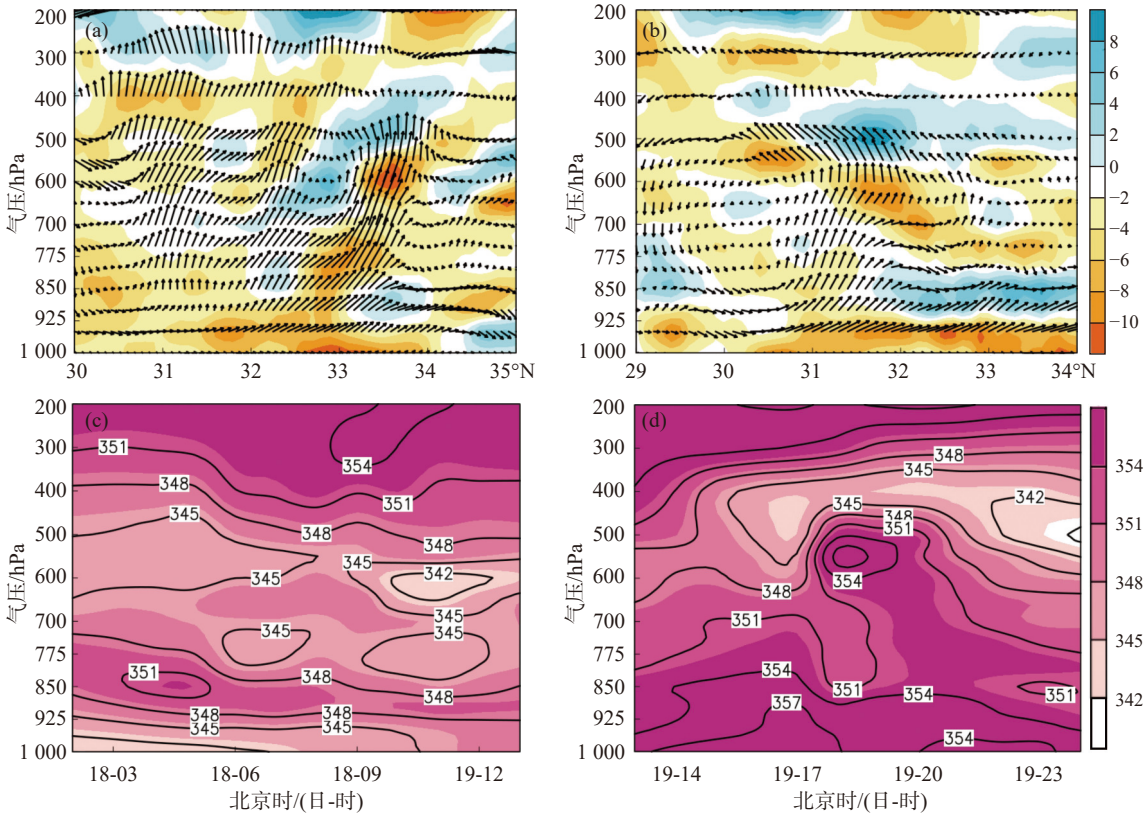


图 4 2023 年 6 月 18 日 09:00 (a) 和 19 日 18:00 (b) 沿 120.5 °E 的散度 (填色, 单位: 10^{-5} s^{-1})、垂直环流 (箭头, 单位: m·s^{-1}) 的经向垂直剖面, 18 日 03:00—12:00 (c) 和 19 日 14:00—23:00 (d) 沿 (120.5°E, 31.5°N) 经暴雨中心的 θ_{se} (填色, 单位: K) 时间-高度剖面

Fig. 4 Meridional cross section of divergence (color-filled, unit: 10^{-5} s^{-1}) and meridional circulation (arrow, unit: Pa·s^{-1}) along 120.5°E at (a) 09:00 BT on June 18 and (b) 18:00 BT on June 19, 2023, time-height cross section of θ_{se} (color-filled, unit: K) through rainstorm center along (120.5°E, 31.5°N) at (c) 03:00 BT to 12:00 BT on June 18 and (d) 14:00 BT to 23:00 BT on June 19, 2023

综上, 第一阶段由于梅雨锋锋面维持时间长, 暖湿气流沿锋面源源不断爬升, 造成沿江多站暴雨; 第二阶段凝结潜热释放加剧不稳定层结, 冷切上空强烈的上升运动与次级环流的上升支叠加产生强降水。

3 准静止 MCS 演变和组织形式

Schumacher 等 (2005) 指出, 能够产生极端强降水的 MCS 主要有两种典型组织方式: 一是具有“列车效应”的对流系统先后过境, 二是具有“后向传播”特征的对流系统准静止维持。下面对比分析本次过程两次强降雨阶段的准静止 MCS 形态和特征。

第一阶段梅雨锋云型呈带状分布, 6 月 18 日凌晨在东西向的梅雨锋上有多个 β 中尺度对流系统, 在高空强西风引导气流作用下向东偏南方向传播形成“列车效应”。第二阶段 19 日下午梅雨锋云系上多个 MCS 在江苏南部组织成中尺度对流复合体, 19:00 发展最旺盛, 覆盖范围达最大, 呈直径接近 190 km 的近圆形, 在 MCS 移动方向的后侧不断有新的对流云团生成, 形成准静止后向传播 (图略)。下面结合雷达回波和风廓线进一步探讨两个阶段准静止的雷达回波演变和组织特征。

18 日 02:48, 长江上游无锡中部和常州中部有对

流单体生成，东移过程中逐渐排列组织成层积混合东西向带状结构，雷达回波中心强度约为 45 dBz，顶高超过 9 km。带状回波东移过程中缓慢北抬，05:06 准静止地维持在张家港、常熟北部沿江至太仓北部一线，探空可见承载层平均风为西南风 (图 3a)，新生对流单体不断沿回波带移动方向传播，其中向南分量抵消了平流中的偏北分量，造成苏州北部沿江持续降雨。随后雷达回波带缓慢南压，降雨集中时段 4 000—5 000 m 西南急流明显增强。分析图 5a 可知，06:34 宽广的强对流回波带西段自镇江-常州北

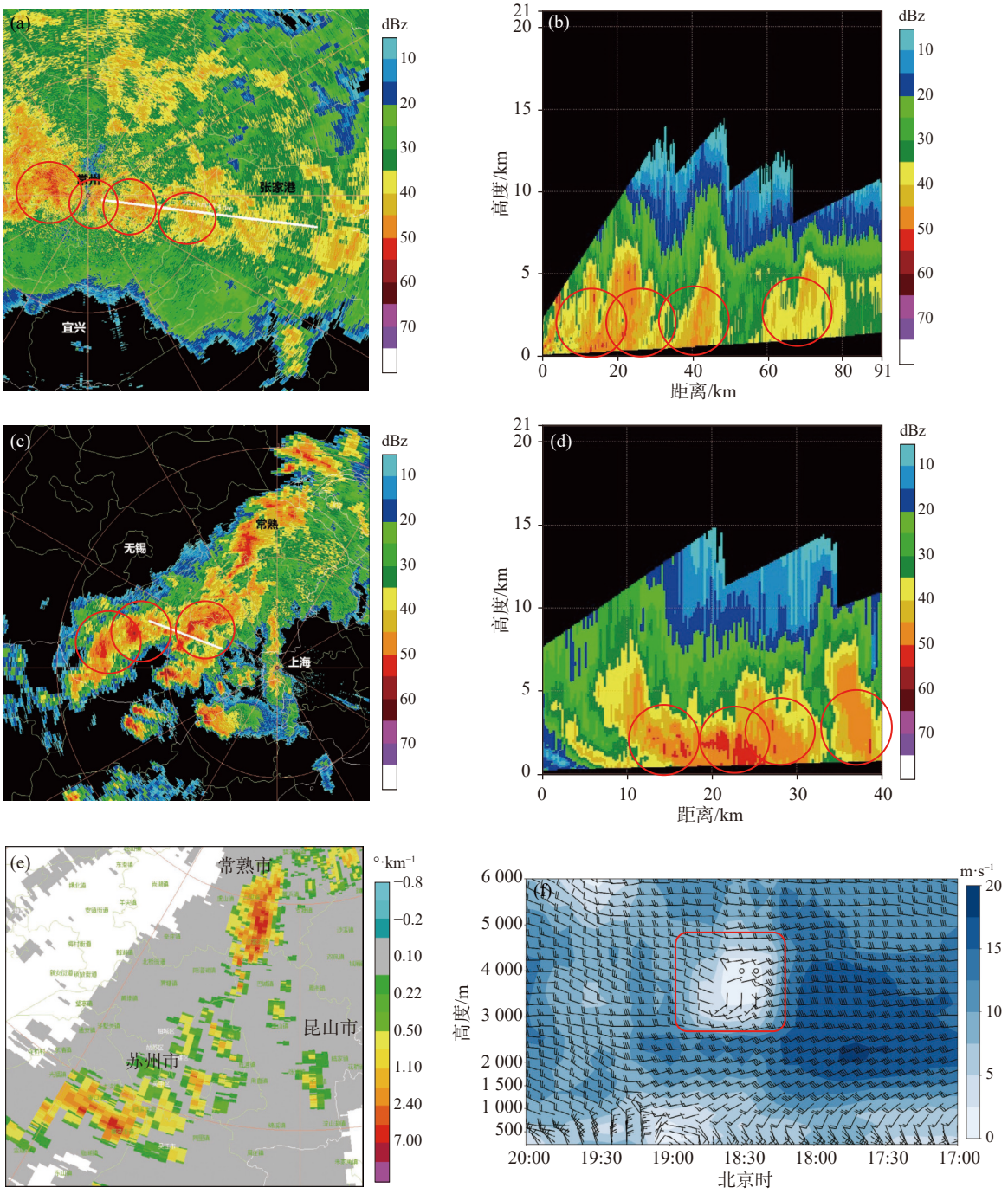


图 5 2023 年 6 月 18 日 06:34 常州雷达 0.5°仰角基本反射率因子 (RF) (a) 和沿图 a 中白线的 RF 剖面 (b)，19 日 18:24 青浦雷达 0.5°仰角 RF(c) 和沿图 c 中白线的 RF 剖面 (d)，南通雷达 19 日 18:34 K_{DP} (e)，19 日 17:06—19:06 东山站风廓线雷达水平风场时间-高度剖面 (f) (图 a—d 中圆圈指示发生“列车效应”的区域，图 f 中方框指示发生风场扰动的区域)

Fig. 5 The (a) basic reflectivity factor (RF) and (b) RF profile along the white line in Fig. 5a of Changzhou radar at 0.5° elevation angle at 06:34 BT on June 18, (c) RF and (d) RF profile along the white line in Fig. 5c of Qingpu radar at 0.5° elevation angle at 18:24 BT on June 19, (e) K_{DP} of Nantong radar at 18:34 BT on June 19, (f) horizontal wind time altitude profile of Dongshan wind profile radar station from 17:06 BT to 19:06 BT on June 19, 2023 (The circles denote the regions where the “training effect” occurred in Fig. 5a-5d, and the box marks the area of wind field perturbation in Fig. 5f)

部-无锡北部不断激发新对流单体, 在高空偏西—西南风的引导下, 持续向下游传播, 呈现“列车效应”的准静止状态。由图 5b 的垂直剖面可见, 超过 40 dBz 的回波高度位于 5 km 以下, 且超过 40 dBz 的回波持续影响张家港, 造成妙桥社区 04:00—09:00 连续 5 h 出现 20 mm·h^{-1} 以上的短时强降水。10:00 后高空西南风减弱, 第一阶段降雨渐止。

19 日 13:34, 沿江西部层状云雷达回波发展成线状, 强度迅速增强, 风廓线可见 (图 5f), 中低层伴有深厚的低空急流, 线状对流东移过程中向南延伸, 形成宽广的块状结构, 其后上游不断激发线状对流并入超过 40 dBz 的块状回波东移。17:04 块状回波南压过程中结构逐渐密实, 中心位于无锡中部, 回波强度超过 55 dBz。17:30 低空急流开始向下传播, 1 500 m 高度风速迅速增强至 14 m·s^{-1}, 其后 1 000 m 出现风速超过 10 m·s^{-1} 的超低空急流, 18:06—18:46, 中层 3 000—4 000 m 出现风场扰动, 风随高度逆转, 表明有冷空气入侵, 加剧了大气不稳定, 在超低空急流的建立和冷空气入侵后触发对流不稳定能量的释放两者共同作用下, 降雨迅速增强。同时雷达图 (图 5c) 上对流风暴传播方向与环境风平流运动接近抵消, 对流单体在平行于雷达回波带的移动后向不断新生, 表现为后向传播, 双偏振雷达图 (图 5e) 上吴中境内 55 dBz 以上的强反射率因子区对应 3.1~7 °·km^{-1} 的 K_{DP} 高值区, 表明此时液态水含量很大, 并造成吴中过程最大小时雨量 (75.2 mm)。沿图 5c 中白线所作的垂直剖面上可见顶高超过 13 km, 超过 40 dBz 的雷达回波高度在 7 km 以下, 55 dBz 以上强雷达回波高度低于 5 km, 强雷达回波质心低、梯度大、结构密实 (图 5d)。19 日后半夜冷空气进一步南压, 925 hPa 转为偏北风, 地面辐合系统南压至浙北, 过程结束。此次过程风廓线雷达上低空急流向下传播及中层风场扰动对极端小时雨强有一定预警作用。

4 准静止 MCS 维持的物理机制

4.1 第一阶段梅雨锋锋生

前文提到强降雨第一阶段为梅雨锋锋面降雨, 研究表明, 锋生函数能够有效表征锋面附近大气的斜压性和辐合强度, 对锋面降雨的强度和范围具有重要指示意义 (Luo et al., 2014)。为探究第一阶段强降雨的维持与演变机制, 本节采用锋生函数进行诊断分析。

18 日 06:00, 地面有一条东西向的 θ_{se} 密集带, 地面锋区在 31°—31.5°N (图 6b), 850 hPa 锋区在 32°—33°N (图 6c), 降雨雷达回波主要位于地面与 850 hPa

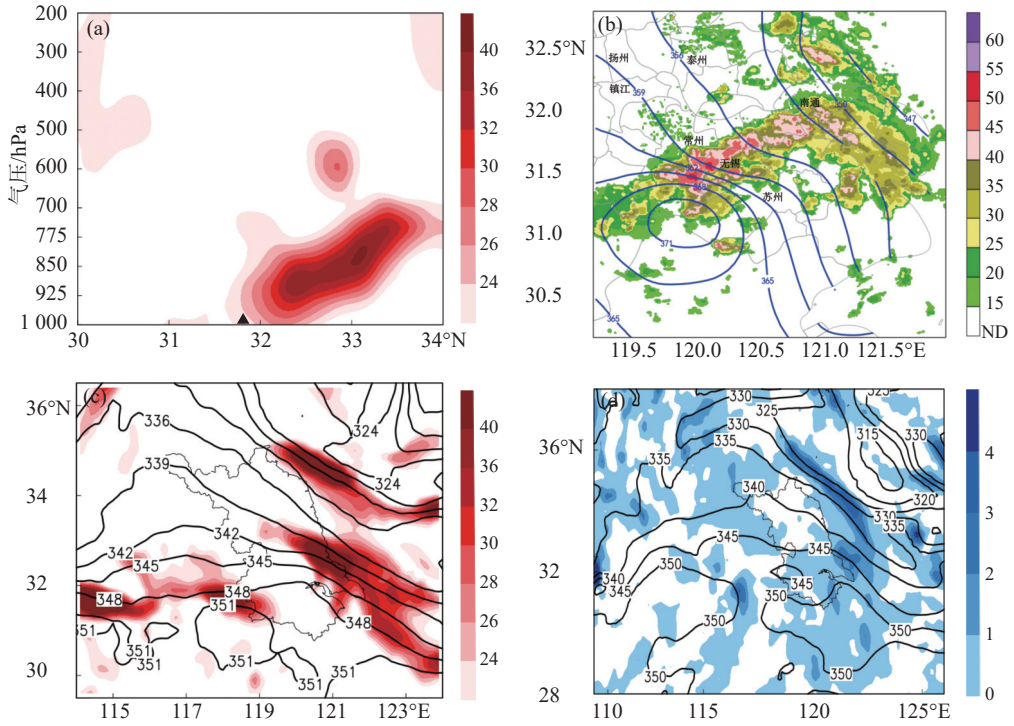


图 6 2023 年 6 月 18 日 06:00 沿 120.5°E 经暴雨中心的锋生函数 (单位: 10^{-9} K·m^{-1}·s^{-1}) 垂直剖面 (a), 09:00 地面 θ_{se} (等值线, 单位: K) 和常州雷达组合反射率因子 (填色, 单位: dBz) 叠加图 (b) , 18 日 09:00 850 hPa 锋生函数 (填色, 单位: 10^{-9}K·m^{-1}·s^{-1}) 和 θ_{se} (等值线, 单位: K) (c) 以及锋生函数散度项 (填色, 单位: 10^{-9}K·m^{-1}·s^{-1}) 和 θ_{se} (等值线, 单位: K) (d) 分布

Fig. 6 The (a) vertical cross sections of frontogenesis function (unit: 10^{-9} K·m^{-1}·s^{-1}) along 120.5°E through the rainstorm center at 06:00 BT, (b) the θ_{se} (contours, unit: K) and combined reflectivity factor (color-filled, unit: dBz) of Changzhou radar on the surface at 09:00 BT on June 18, (c) frontogenesis function (color-filled, unit: 10^{-9} K·m^{-1}·s^{-1}) and θ_{se} (contours, unit: K), (d) divergence term (color-filled, unit: 10^{-9} K·m^{-1}·s^{-1}) and θ_{se} (contours, unit: K) at 09:00 BT on June 18, 2023

锋区之间。风场辐合区随高度向冷区倾斜，上升气流沿 33°N 附近锋区爬升。700 hPa 以下锋区存在辐合中心，600—400 hPa 为辐散，低层辐合高层辐散耦合作用下形成直接环流的倾斜上升支 (图 4a)。从 850 hPa 锋生函数水平分布 (图 6c) 可见，锋生主要集中在沿江一线。沿暴雨中心经与锋区垂直方向做垂直剖面 (图 6a)，发现 700 hPa 以下存在强烈的锋生，锋生区随高度向北倾斜，锋生作用使得锋面维持并加强。进一步分析锋生函数各项的贡献 (图 6d) 表明，18 日早晨强降雨持续阶段，散度项锋生作用更显著，倾斜项和变形项锋生作用相对较小，表明大暴雨过程中由于西南气流入流和梅雨锋切变加强，沿江一带风向、风速辐合增强，梅雨锋锋生，暖湿气流不断在锋面上空辐合抬升产生持续性强降雨。

综上，高度组织化的 MCS、地面准静止梅雨锋维持、低空切变、入流增强引起散度项锋生，是形成第一阶段“列车效应”准静止梅雨锋暴雨的主要原因。

4.2 第二阶段梅雨锋次级环流

19 日 17:00—20:00 锋区缓慢南压至 31 °N，大于 45 dBz 的雷达回波主要位于锋区附近，锋区北侧有层状云降水雷达回波 (图 7a)。吴中区南部至浙北存在 1 h 变温低于 1.5 ℃ 的冷中心 (图 7c)，对应降水蒸发冷却产生的中尺度冷池，地面存在强的负散度中心 (图 7b)。地面风场可见中尺度辐合中心 (图 7d)，冷池出流形成中尺度温度梯度进而导致的地面辐合对对流的触发起到了关键作用。吴中区 600 hPa 以下锋区上空为低层辐合高层辐散，锋区南侧地面冷池上空为弱的中低层辐散和中高层辐合，形成次级环流 (图 4b)。锋前西南急流入流加强和高空锋后偏北气流加大增加了层结不稳定。同时增强次级环

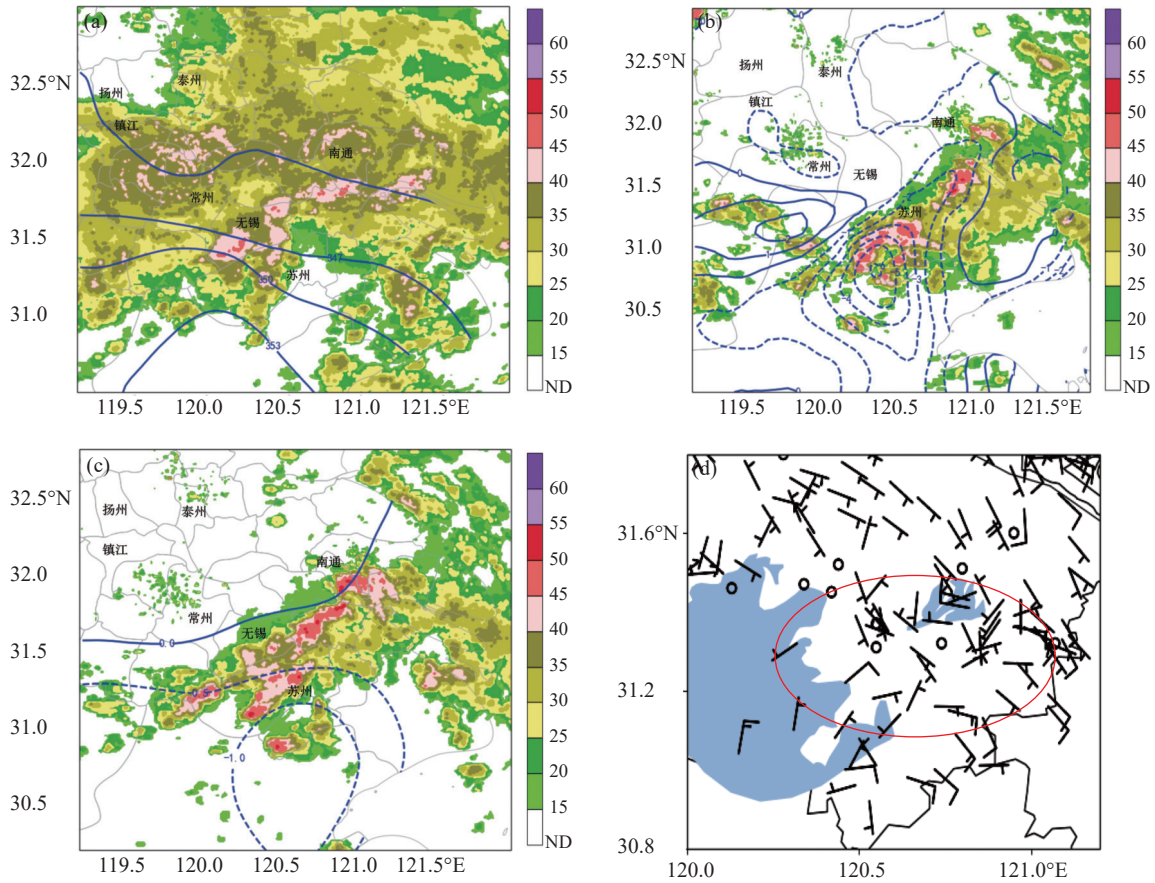


图 7 2023 年 6 月 19 日 17:00 江苏东南部地面 θ_{se} (等值线，单位：K) 和南通雷达组合反射率因子 (填色，单位：dBz) (a)，19:00 地面散度 (实等值线表示正散度；虚等值线表示负散度，单位：10^{-5} s^{-1}) 和南通雷达组合反射率因子 (填色，单位：dBz) (b)，18:00 地面 1 h 变温 (实等值线表示正变温；虚等值线表示负变温，单位：℃) 和南通雷达组合反射率因子 (填色，单位：dBz) (c)，19:00 苏州地面风场 (d，风向杆，单位：$m·s^{-1}$，椭圆代表地面风场辐合区)

Fig. 7 (a) Surface θ_{se} (contours, unit: K) over southeastern Jiangsu and Nantong radar composite reflectivity (color-filled, unit: dBz) at 17:00 BT on June 19, (b) surface divergence (solid contour lines: positive change, dashed contour lines: negative change, unit: °C) and Nantong radar composite reflectivity (color-filled, unit: dBz) at 19:00 BT on June 19, (c) 1-hour surface temperature change (solid contour line: positive change, dashed contour lines: negative change, unit: °C) and Nantong radar composite reflectivity (color-filled, unit: dBz) at 18:00 BT on June 19, (d) surface wind field (wind barbs, unit: $m·s^{-1}$) in Suzhou at 19:00 BT on June 19, 2023 (The ellipse indicating the surface wind convergence zone in Fig. 7d)

流, 上升支加强上升运动使对流发展, 下沉支气流出流和地面冷池外流加强边界层辐合不断触发新对流。次级环流的维持和发展导致吴中越溪街道 18:00—19:00 和 19:00—20:00 连续 2 h 出现小时降雨量超过 30 mm 的短时强降水和 75.2 mm·h^{-1} 的小时极端降雨。

综上, 次级环流抬升、西南急流维持和地面中尺度辐合中心的有利配置, 使得第二阶段 MCS 表现出后向传播的准静止特征。

基于上述两个阶段强降雨的准静止特征, 本文分别构建了第一、第二阶段准静止梅雨锋暴雨的概念模型: (1) 槽前锋生型 (图 8a)。准静止梅雨锋锋面降雨, 降雨落区主要在低层暖平流中, 锋生作用使得暖湿气流不断在梅雨锋锋面上空辐合抬升, 多个 β 中尺度对流系统在高空强西风引导气流作用下沿锋面传播形成“列车效应”。(2) 槽后冷池型 (图 8b)。高空槽后弱冷空气渗透、低空冷式切变线, 地面冷池出流不断触发对流形成强降雨。梅雨锋云系上在 MCS 移动方向的后侧不断有新的对流云团生成, 形成准静止后向传播。

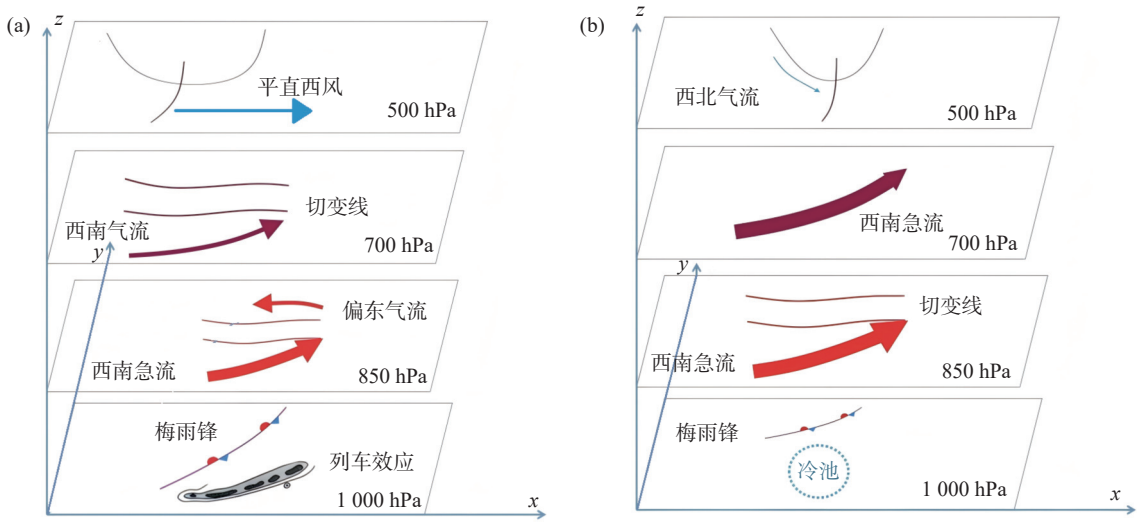


图 8 苏州市槽前锋生型 (a) 和槽后冷池型 (b) 准静止梅雨锋暴雨概念模型

Fig. 8 (a) Pre-trough frontal genesis type and (b) post-trough cold pool type conceptive synoptic models of the quasi-stationary heavy rainstorm in Suzhou

5 结论和讨论

本文针对 2023 年苏州梅雨期首轮大暴雨过程 (6 月 18—20 日) 的环流背景、环境条件和雷达回波演变特征, 对比分析了其两个集中降雨阶段, 即 6 月 18 日上午 (第一阶段) 和 19 日傍晚至上半夜 (第二阶段) 的异同点, 并深入探讨了其准静止成因, 分别建立了其准静止梅雨锋暴雨概念模型。得到以下主要结论:

(1) 两个阶段强降雨均具有强降雨时段集中、降雨效率高、累计降雨量大等特征。第一阶段强降雨空间重叠度高、大暴雨影响范围广, 为准静止梅雨锋锋面降雨; 第二阶段强降雨持续时间长、MCS 活跃、局地降雨强度大, 为槽后弱冷空气渗透、冷切南压过程中的强对流降雨, 对流不稳定能量更大, 降水凝结潜热释放进一步增强不稳定性。

(2) 第一阶段东西向带状准静止梅雨锋上多个 β 中尺度对流系统, 在高空强西风引导气流作用下向东偏南方向传播形成“列车效应”。第二阶段梅雨锋云系上多个 MCS 组织成中尺度对流复合体, 在 MCS 移动方向的后侧不断有新的对流云团生成, 形成准静止后向传播, 强雷达回波质心低、梯度大、结构密实; 55 dBz 以上的强雷达回波区对应 3.1—7.0 °·km^{-1} 的 K_{DP} 高值区, 风廓线雷达上低空急流向下传播及中层风场扰动对极端小时雨强有一定预警作用。

(3) 高度组织化的 MCS、地面准静止梅雨锋维持、低空切变、入流增强引起散度项锋生,是形成第一阶段“列车效应”准静止雨带的主要原因。西南急流持续输送水汽与能量, 配合切变线上强烈的上升运动及次级环流上升支, 共同触发了地面中尺度低压的生成, 构成有利于对流发展的动力配置。

本文通过对苏州地区这次梅雨期准静止大暴雨两个阶段进行对比分析, 揭示了不同阶段动力和热力机制差异, 建立准静止梅雨锋暴雨概念模型, 可为区域暴雨预报提供参考依据。然而, 本文仍存在一些局限性, 比如仅选取了 2023 年梅雨期首场大暴雨过程, 限个例分析, 且未作微物理过程观测分析。下一步, 将收集更多个例样本, 并利用双偏振雷达和雨滴谱仪等新型观测资料, 深入研究强降雨期间的微

物理机制，不断验证和完善苏州准静止梅雨锋暴雨概念模型，并将研究成果应用于业务预报系统，以提高梅雨期强降雨的预报预警能力。

参考文献 (References)：

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 S Y, Zou L J, Wang Y, 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

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,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

陈豫英,苏洋,杨银,等.2021.贺兰山东麓极端暴雨的中尺度特征[J].高原气象,40(1):47−60. Chen Y Y, Su Y, Yang Y, et al. 2021. The mesoscale characteristics of extreme rainstorm in the eastern region of Helan Mountain [J]. Plateau Meteorology,40(1):47−60 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2020.00012

宫宇,张楠,孙赫敏,等.2022.一次华南准静止线状对流系统触发维持机制研究[J].暴雨灾害,41(1):33−41. Gong Y, Zhang N, Sun H M, et al. 2022. A study on triggering and maintenance mechanism of a linear quasi-stationary convection system in South China [J]. Torrential Rain and Disasters,41(1):33−41 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2022.01.004

贺程程,秦鹏程,刘诗慧,等.2024.近 62 a 湖北省旱涝特征分析[J].暴雨灾害,43(1):93−100. He C C, Qin P C, Liu S H, et al. 2024. Analysis of drought and flood characteristics in Hubei Province in recent 62 years [J]. Torrential Rain and Disasters,43(1):93−100 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022−201

王晓芳,崔春光.2012.长江中下游地区梅雨期线状中尺度对流系统分析Ⅰ: 组织类型特征[J].气象学报,70(5):909−923. Wang X F, Cui C G. 2012. Analysis of the linear mesoscale convective systems during the Meiyu period in the middle and lower reaches of the Yangtze River. Part: organization mode features [J]. Acta Meteorologica Sinica,70(5):909−923 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2012.077

王啸华,郑媛媛,张盛曦,等.2021.一次准静止中尺度对流系统维持机制研究[J].气象,47(11):1369−1379. Wang X H, Zheng Y Y, Zhang S X, et al. 2021. Study on the maintenance mechanism of a quasi-stationary mesoscale convective system [J]. Meteorological Monthly,47(11):1369−1379 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2021.11.006

张小玲,余蓉,杜牧云,等.2014.梅雨锋上短时强降水系统的发展模态[J].大气科学,38(4):770−781. Zhang X L, Yu R, Du M Y. 2014. Evolution pattern of short-time intense precipitation-producing systems associated with Meiyu front [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,38(4):770−781 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.1401.13249

张艳梅, 顾欣, 陈杨, 等.2022. “6.23”梅雨锋西段贵州南部大暴雨诊断分析[J].高原山地气象研究,42(3):58−66. Zhang Y M, Gu X, Chen Y, et al. 2022. Analysis of "6.23" sustained heavy rain event occurred in western Meiyu Front in Southern Guizhou [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,42(3):58−66 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674−2184.2022.03.007

周金莲,张家国,吴涛,等.2022.长江中游梅雨锋极端暴雨过程中的边界层中尺度系统主要特征[J].气象,48(8):1007−1019. Zhou J L, Zhang J G, Wu T, et al. 2022. Characteristics of the mesoscale weather system producing extreme rainstorm in boundary layer during the Meiyu Front over the middle reaches of Yangtze River [J]. Meteorological Monthly,48(8):1007−1019 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2022.052801

竹利,康岚,陈永仁,等.2024.青藏高原东坡两次暴雨的 MCS 演变及机理对比分析[J].暴雨灾害,43(5):509−520. Zhu L, Kang L, Chen Y R, et al. 2024. MCS evolution and mechanism comparison in the two rainstorm events on the eastern slope of the Qinghai Tibet Plateau [J]. Torrential Rain and Disasters,43(5):509−520 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−225

Li X, Zhang K, Gu P R, et al. 2021. Changes in precipitation extremes in the Yangtze River basin during 1960-2019 and the association with global warming, ENSO and local effects [J]. Science of the Total Environment,760:144244. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.144244

Liang P, Ding Y H. 2017. The long-term variation of extreme heavy precipitation and its link to urbanization effects in Shanghai during 1916-2014 [J]. Advances in Atmospheric Sciences,34(3):321−334. doi:10.1007/s00376−016−6120−0

Luo Y, Gong Y, Zhang D L. 2014. Initiation and organizational modes of an extreme-rain-producing mesoscale convective system along a Meiyu front in east China [J]. Monthly Weather Review,142(1):203−221. doi:10.1175/MWR−D−13−00111.1

Miller J E. 1948. On the concept of frontogenesis [J]. Journal of the Atmospheric Sciences,5(4):169−171. doi:10.1175/1520−0469(1948)005<0169:OTCOF>2.0.CO;2

Schumacher R S, Johnson R H. 2005. Organization and environmental properties of extreme-rain-producing mesoscale convective systems [J]. Monthly Weather Review,133(4):961−976. doi:10.1038/s43017−020−0057−7

Sun J H, Zhang X L, Qi L L, et al. 2005. An analysis of a meso-β system in a mei-yu front using the intensive observation data during CHeRES 2002 [J]. Advances In Atmospheric Sciences,22,278–289. doi:10.1007/BF02918517

Yu X J, Gu X H, Kong D D, et al. 2022. Asymmetrical shift toward less light and more heavy precipitation in an urban agglomeration of east China: Intensification by urbanization [J]. Geophysical Research Letters,49(4):2021GL097046. doi:10.1029/2021GL097046

(责任编辑　唐国瑛)