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

两次相似路径江淮气旋引发的极端强降雨特征及诊断分析

安礼政 刘梅 汤洁 张梦 杨梦兮 宋昊冬

Analysis of the characteristics and diagnosis of extreme heavy precipitation associated with two Jiang-huai cyclones with similar paths

AN Lizheng，LIU Mei，TANG Jie，ZHANG Meng，YANG Mengxi，SONG Haodong

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2024-226

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

桂林“5.22”极端强降雨过程的观测分析

Observation analysis of "5.22" extreme rainfall event in Guilin

暴雨灾害. 2024, 43(3): 313-321 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-141

贺兰山东麓两次局地暴雨过程的湿位涡诊断分析

Diagnostic analysis of moist potential vorticity for two local rainstorm events on the eastern foot of Helan Mountain

暴雨灾害. 2020, 39(2): 148-157 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.02.005

2020年7月4—10日长江流域极端强降雨过程MCS活动特征分析

Analysis of MCS activity characteristics during extreme heavy rainfall in the Yangtze River Basin from July 4 to 10, 2020

暴雨灾害. 2020, 39(6): 593-602 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.06.007

东北移高原低涡引发我国西北两次强降水过程的对比分析

Comparative analysis of two heavy precipitation events in Northwest China induced by northeastward Tibetan Plateau vortices

暴雨灾害. 2023, 42(2): 144-149 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-014

江淮梅雨期持续性暴雨和极端强降水事件的位涡比较分析

Comparative analysis of potential vorticity between persistent rainstorm and extreme intense rainfall events during the Yangtze-Huaihe Meiyu period

暴雨灾害. 2024, 43(2): 121-134 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-202

黄河流域夏季6—8月极端强降水的主要环流型

Characteristics of the synoptic conditions of summer extreme heavy precipitation in the Yellow River Basin

暴雨灾害. 2022, 41(5): 536-543 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-028

关注微信公众号，获得更多资讯信息

安礼政,刘梅,汤洁,等.2025.两次相似路径江淮气旋引发的极端强降雨特征及诊断分析[J].暴雨灾害,44(6):792−803. AN Lizheng, LIU Mei, TANG Jie, et al. 2025. Analysis of the characteristics and diagnosis of extreme heavy precipitation associated with two Jiang-huai cyclones with similar paths [J]. Torrential Rain and Disasters,44(6):792−803 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−226

两次相似路径江淮气旋引发的极端强降雨特征及诊断分析

安礼政[1], 刘梅[2], 汤洁[1], 张梦[1], 杨梦兮[3], 宋昊冬[1]

(1. 江苏省淮安市气象局, 淮安 223001; 2. 江苏省气象台, 南京 210041; 3. 江苏省泰州市气象局, 泰州 225300)

摘　要: 2023 年 8 月 27—28 日和 9 月 19—20 日受两次相似路径江淮气旋影响, 江苏中北部分别出现两次区域性暴雨到大暴雨 (分别简称“8.27”和“9.19”过程)。基于国家和区域地面气象观测站、探空、ERA5 再分析及 FY-4A 的 TBB 资料, 并采用天气诊断分析方法对这两次强降雨过程的降雨特征、天气背景及发生原因进行比较。结果表明: (1) 两次过程均属于区域极端强降雨过程, 其中“8.27”过程强降雨的范围、强度和极值更大。(2) 两次过程前期高空槽均稳定维持, 地面低压倒槽增强形成江淮气旋, 配合低涡切变线和低空急流以及高空分流区有利于产生强降雨。(3) 两次过程气旋中心移至安徽前, 斜压锋生产生的辐合上升运动较弱, 降雨强度较弱; 气旋中心移至安徽后, 斜压锋生地转偏差作用增强, 次级环流发展且高低空急流耦合作用增强, 位于气旋第一、四象限的江苏中北部地区降雨强度显著增强。(4) “8.27”过程高层正涡度平流作用更强, 较强上升运动持续时间较长, 次级环流上升支呈倾斜状, 结合更强的水汽条件, 导致强降雨的范围、强度和极值更大; 而“9.19”过程中低层暖平流作用占主导, 上升运动和对流条件更强, 但是次级环流上升倾斜分量较弱, 最终强降雨范围相对较小。

关键词: 江淮气旋; 极端强降雨; 湿位涡; 地转偏差; 急流

中图法分类号: P458.1+21.1　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2024−226

Analysis of the characteristics and diagnosis of extreme heavy precipitation associated with two Jiang-huai cyclones with similar paths

AN Lizheng[1], LIU Mei[2], TANG Jie[1], ZHANG Meng[1], YANG Mengxi[3], SONG Haodong[1]

(1. *Huaian Meteorological Bureau*, *Huaian* 223001; 2. *Jiangsu Meteorological Observatory*, *Nanjing* 210041; 3. *Taizhou Meteorological Bureau*, *Taizhou* 225300)

Abstract: The central and northern parts of Jiangsu have encountered reginal heavy to extreme heavy precipitation under the influence of two Jiang-huai cyclones with similar paths that occurred on August 27 to 28 and September 19 to 20 (referred to as the “8.27” and “9.19” process) in 2023. The characteristics of heavy precipitation, weather background, and occurrence causes of these two processes have been compared and analyzed in this study based on the ground observation data from national and reginal stations, radiosonde, ERA5 reanalysis data and FY-4A’s TBB product, and by using synoptic diagnostic analysis methods. The results are as follows. (1) Both processes were regional extreme precipitation events with strong extremity, with the “8.27” process being more severe. (2) During the two processes, the upper-level trough was stable in the early stage, while the surface low-pressure inverted trough has evolved in to Jiang-huai cyclone. The low-pressure shear line, the low-level jet stream, and the upper-level diversion zone, all together provided the circulation background conducive to the generation of heavy precipitation. (3) Before the center of cyclones moved to Anhui during the two processes, the convergence and ascending motion produced by the baroclinic frontogenesis was weak, and the rainfall intensity was weak. After the center of cyclone moved to Anhui, the geostrophic deviation effect of the baroclinic frontogenesis was strengthened which led to the development of secondary circulation, and the coupling effect of the low-level and upper-level jet streams was enhanced. The rainfall intensity in the northern and central Jiangsu, which located in the first and fourth quadrants of the cyclone, was significantly increased.(4) In the "8.27" process, the upper-level positive vorticity advection was stronger, the duration of the strong ascending motion was longer and the ascending branch of the secondary circulation was inclined. Combined with stronger water vapor conditions, the range, intensity and

收稿日期: 2024−12−24; **定稿日期**: 2025−03−17

资助项目: 江苏省气象局面上基金项目 (KM202415); 江苏省气象局青年基金项目 (KQ202202)

第一作者: 安礼政, 主要从事灾害性天气机理研究。E-mail: alzde@163.com

通信作者: 刘梅, 主要从事中短期天气预报方法研究。E-mail: lmkerry@163.com

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

extreme value of heavy rainfall were larger. In the "9.19" process, the low-level warm advection was dominant, the ascending motion and convective conditions were stronger, but the weaker tilted component of the secondary circulation limited the spatial extent of heavy rainfall.

Key words: Jiang-huai cyclone; extreme heavy precipitation; wet potential vortex; geostrophic deviation; jet

引　言

江淮气旋是活跃于我国长江中下游地区和淮河流域、生命史 12 h 以上、具有明显冷暖锋结构的天气尺度低值系统。江淮气旋影响期间常能带来暴雨、暴雪和大风天气 (张晓红等, 2016; 张家国等, 2018; 李畅, 2024), 在影响江苏天气的天气系统中其灾害性仅次于台风 (江苏省气象局预报课题组; 1988)。因此, 江淮气旋形成机制、发展和移动特征及其所带来强降雨一直是预报技术研究重点之一。

国内学者针对江淮气旋强降雨的产生机制做了大量的研究工作。江淮地区降水异常及强降雨事件的发生与天气尺度气旋活动显著相关 (王艳玲等, 2015; 卢楚翰等, 2019)。气旋移动左前方低层强辐合中心和正涡度中心耦合, 加剧水汽和能量的辐合, 有利于强降雨的产生和维持 (张晓红等, 2016)。沈阳等 (2019) 研究发现引发极端降水的江淮气旋过程中降水与气旋之间存着类似于“CISK (Conditional instability of the second kind)”的正反馈过程, 降水凝结潜热释放加强了气旋又增强了降水。江淮气旋背景下的强降雨过程还往往伴有显著高低空急流耦合特征, 与低层对流不稳定的触发相结合产生强上升运动 (陈莜秋和王咏青, 2016 等; 燕若彤等, 2023 等)。中小尺度对流活动对于江淮气旋强降雨的形成有着重要作用。对流雨带常出现在江淮气旋暖锋前缘、暖区及冷锋后侧不稳定区域 (李柏等, 2002; 黄美金等, 2022)。气旋暖锋附近不稳定性区域强的锋生及大尺度背景场强迫有利于产生大范围暴雨 (吴涛等, 2023)。此外, 气旋发展过程中高层湿位涡向下扩展易导致位势不稳定能量的触发, 暴雨和强对流易发生于对流不稳定和斜压不稳定结合的区域 (毛程燕等, 2021)。上述研究对于分析和预报江淮气旋产生的强降雨具有重要的指示意义, 但目前针对相似路径的不同江淮气旋导致的强降雨特征差异及成因的研究较少, 有必要针对此展开进一步研究。

2023 年 8 月 27—28 日和 9 月19—20 日 (以下分别简称“8.27”过程和“9.19”过程) 受江淮气旋影响, 江苏中北部地区出现两次区域极端强降雨天气过程, 这两次过程气旋路径相似, 造成的强降雨影响范围广、持续时间长、极端性强, 导致多地出现不同程度的城市内涝, 具有较强致灾性, 但是两次强降雨的分布和强度特征又存在差异。为此, 本文利用多源观测资料并采用天气诊断分析方法, 从强降雨的特征、天气背景、气旋特征及强降雨的成因等角度对比分析这两次江淮气旋过程的异同, 以期能为此类过程的理论研究及业务预报提供借鉴与参考。

1 资料与方法

1.1 资料说明

本文使用的资料包括: (1) 国家气象信息中心提供的江苏省、山东省、安徽省国家气象观测站 (以下简称国家站) 和区域气象观测站 (以下简称区域站) 24 h、3 h、1 h 的降水量资料, 用于两次过程降雨特征分析; (2) 国家气象信息中心提供的江苏射阳站 (58150) 探空资料, 用于两次过程探空对比分析; (3) 欧洲中期数值预报中心的空间分辨率为 0.25°×0.25°、时间分辨率为 1 h 的 ECMWF Reanalysis V5 (ERA5) 再分析资料, 用于环流形势、物理量分析与诊断等; (4) 国家卫星气象中心提供的空间分辨率为 4 km、时间分辨率为 1 h 的 FY-4A 云顶亮温 (Black body temperature, TBB)资料, 用于对流云团特征的分析。以上资料时段为 2023 年 8 月 27 日 08 时 (北京时, 下同)—28 日 08 时和 9 月 19 日 08 时—20 日 08 时。

1.2 研究方法

本文对两次天气过程的动力条件、水汽条件和不稳定条件进行诊断对比分析, 针对不稳定条件时诊断分析了湿位涡, 针对动力条件时诊断分析了非线性平衡的作用。

湿位涡 (Moist potential vorticity, MPV) 被广泛应用于气旋和暴雨研究中, 能够综合反映大气动力学、热力学性质和斜压性, 本文参考李静楠等 (2016) 和青逸雨等 (2023) 计算 MPV 的方法对这两次强降雨过程进行诊断。其中湿位涡正压项MPV_1表示惯性稳定度和对流稳定度的作用; 湿位涡斜压项MPV_2表示垂直风切变和假相当位温水平梯度的作用, 可作为暖湿空气的示踪。湿位涡单位为 PVU, 1 PVU = $10^{-6}\ m^2\cdot s^{-1}\cdot K\cdot kg^{-1}$。

非线性平衡诊断项 NBE (nonlinear equilibrium term, 记为 N_{BE}) 可诊断由气旋移动过程中地转偏差引起的散度倾向以分析上升运动的成因。水平方向地转偏差定义为

$$u_a = u - u_g \tag{1}$$

$$v_a = v - v_g \tag{2}$$

其中 u_g、v_g 为地转风，u_a、v_a为地转偏差，继而可以通过散度方程进行天气尺度背景的非地转平衡强迫诊断，分析散度倾向。本文参考 Zhang 等 (2000) 和 Houghton 等 (2009) 计算得到散度方程中非线性平衡诊断项 NBE，即

$$N_{\mathrm{BE}} = 2J(u,v) + f\zeta - \nabla^2\varphi - \beta u \tag{3}$$

式中J为雅各比算子，u 和 v 分别为纬向风和经向风，ζ为相对涡度，φ为位势高度，f为科氏参数，β为科氏参数随纬度的变化。当流场处于地转平衡状态时，N_{BE} 较小；而当流场处于非地转平衡状态时，N_{BE} 有明显非零值，流场散度将出现明显的变化。

2 降雨特征及极端性

2.1 降雨分布及其极端性

2023 年 8 月 27—28 日和 9 月 19—20 日受江淮气旋影响，江苏中北部出现较大范围暴雨到大暴雨，具有较强的极端性，依据江苏省地方标准 (DB32/T 4430-2022)，将某日至少 3 个相邻国家级气象台站发生单站极端强降雨时判定为该日发生区域极端强降雨，其中单站极端强降雨是指某台站日雨量大于该台站 1991—2020 年内逐年 4—10 月日雨量序列的第 95 百分位值，两次过程均属于区域极端强降雨过程。其中，“8.27”过程强降雨的范围、强度和极值更大，江苏共 26 个国家站达到单站极端强降雨的标准，其中淮安区站 24 h 累积降雨量为195.4 mm，为该站 8 月日降水量历史第二位，泗洪站、洪泽站 24 h 累积降雨量分别为 181.1 mm、154.7 mm，均为该站 8 月历史第三位；国家站和区域站总共 21 个站次 1 h 降雨量大于 80 mm，最大达到 118.1 mm (图 1a)。“9.19”过程江苏共 23 个国家站达到单站极端强降雨的标准，其中涟水站、阜宁站 24 h 累积降雨量分别为 183.2 mm、174.3 mm，均突破该站 9 月日降水量历史极值，而射阳站 24 h 累积降雨量为 134.6 mm，为该站 9 月历史第三极值；国家站和区域站总共 9 个站次 1 h 降雨量大于 80 mm，最大达到 95.5 mm (图 1b)。

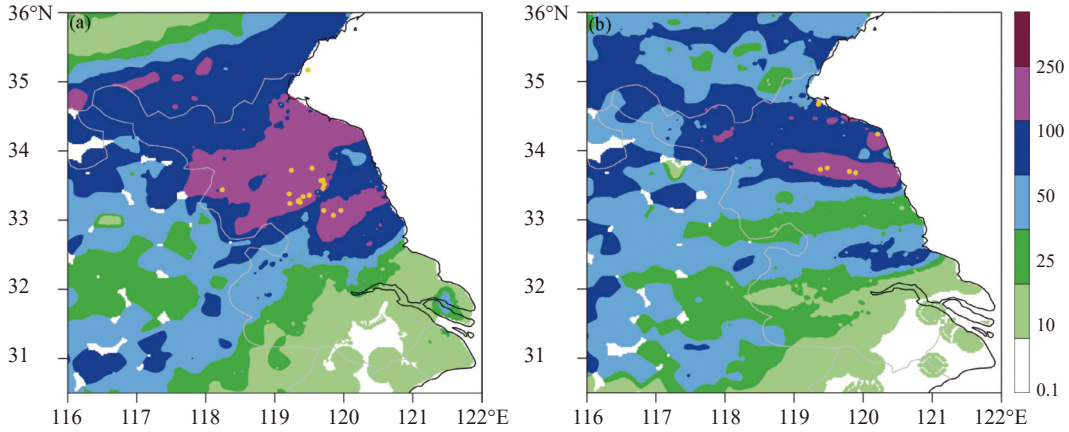


图 1 2023 年 8 月 27 日 08 时—28 日 08 时 (a) 和 9 月 19 日 08 时—20 日 08 时 (b) 24 h 累积降雨量 (单位：mm) 分布 (金色圆点为雨强≥80 mm·h^{-1} 站点)

Fig. 1 Distribution of the 24 h cumulative precipitation (unit: mm) from (a) 08:00 BT 27 to 08:00 BT 28 August and (b) 08:00 BT 18 to 08:00 BT 19 September 2023 (The golden dots represent the stations with rain intensity ≥ 80 mm·h^{-1})

2.2 降雨的演变特征

这两次江淮气旋发展和移动过程中，降雨强度和对流特征均为明显增强的。“8.27”过程中，在气旋移出源地后的降雨过程前期，27 日 11 时强降雨落区主要位于锋面冷区一侧，3 h 累积降雨量普遍小于 50 mm；出现小范围 TBB 小于−52 ℃ 的冷云区，对流云团发展和组织化程度较弱 (图 2a)。27 日 18 时，随着气旋东移增强，强降雨落区逐渐偏向锋面暖区一侧地面辐合线附近，此时气旋中心位于安徽境内，而位于气旋第一、四象限的江苏中北部地区出现 3 h 累积降雨量 50 mm 以上较大范围强降雨区，局部可达 100 mm，降水强度明显增强；该区域被大范围 TBB 小于−52 ℃ 的冷云区所覆盖，云顶伸展高度较高，TBB 最低达到−72 ℃，对流云团发展旺盛，与降雨强度显著增强相对应，呈现为中尺度对流复合体特征 (图 2b)。“9.19”过程前期，19 日 14 时降水同样以冷区一侧的稳定性降雨为主，雨强较弱，TBB 小于−52 ℃ 冷云区范围较小 (图 2c)。19 日 22 时地面气旋中心东移至安徽东部，3 h 累积降雨量 50 mm 以上强降雨区主要位于气旋中心附近，转为暖区降水为主，降雨强度和对流特征明显增强；对流云团长宽比较大，为典型的线状中尺度对流系统 (图 2d)，其长轴方向与

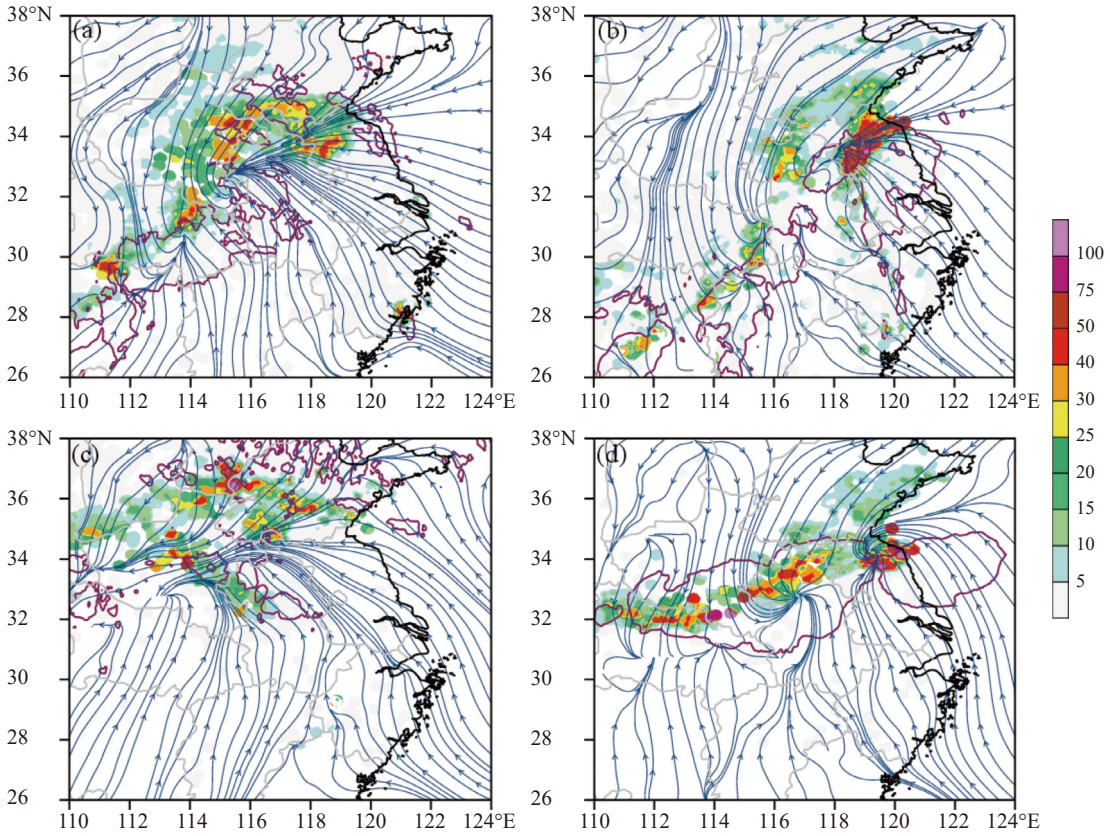


图 2 2023 年 8 月 27 日 11 时 (a)、18 时 (b) 和 9 月 19 日 14 时 (c)、22 时 (d) 地面流场 (流线)、前 3 h 累积降雨量 (填色, 单位: mm) 和 −52 ℃ TBB (紫色等值线) 分布

Fig. 2 Distribution of the surface streamline (streamline), accumulated rainfall in the past 3 hours(shaded, unit: mm) and the TBB of −52℃ (the purple contour line) at (a) 11:00 BT, (b) 18:00 BT on 28 August 2023 and (c) 14:00 BT, (d) 22:00 BT on 19 September 2023

移动方向一致, 出现“列车效应”, 导致江苏中北部地区出现区域性极端强降雨。

上文分析表明, 两次过程中地面气旋中心移至安徽境内前以稳定性降雨为主; 气旋中心东移至安徽境内后江苏中北部转为暖区降雨, 降雨强度和对流性显著增强。气旋中心移至安徽后“8.27”过程中对流云团呈现为中尺度对流复合体特征, 造成的强降雨的范围、强度和极值更大; 而“9.19”过程中对流云团为典型的线状中尺度对流系统特征, 强降雨范围相对较小。为探究两次过程气旋中心移至安徽后降雨强度增强及强降雨特征差异的成因, 下文分别从环流背景、气旋特征及强降雨的成因等方面进行分析。

3 环流背景与气旋路径

3.1 环流背景

两次过程的环流背景均有利于产生强降雨。从 500 hPa 上看, 8 月 27 日 14 时受第 9 号台风“苏拉”影响, 西太平洋副热带高压 (以下简称“副高”) 已经东退至西太平洋上, 我国东部沿海处于高空槽前侧, 槽移动偏慢, 地面低压倒槽受槽前正涡度平流影响增强形成气旋 (图 3a)。9 月 19 日 14 时副高明显偏强, 稳定少动, 588 dagpm 线位于淮河一线, 高空槽偏弱, 移动偏快 (图 3b), 气旋生成偏迟且强度偏弱, 17 时江苏中北部高空转为槽后偏西北气流控制, 有明显干冷空气侵入, 不稳定层结增强。两次过程对流层低层均有明显的低涡切变线东移及低空急流, 大尺度动力强迫较强, “8.27”过程 850 hPa 低涡中心相比于地面气旋中心略偏西, 斜压特征明显, 且存在显著的台风外围向江苏中北部地区的偏南风转东南风水汽输送通道 (图 3c); 而“9.19”过程低涡和地面气旋中心基本重合, 准正压结构更明显, 有利于低层产生更强的辐合上升运动, 水汽输送以低涡东南象限西南风为主 (图 3d)。此外, 200 hPa 南亚高压均为西部型, 江苏中北部处于高压东北侧的分流区 (图略), 高层辐散特征明显。两次过程环流背景存在一定相似性, 但是高空槽强度、移速及低层水汽输送作用的差异导致气旋及强降雨的特征出现差异。

3.2 气旋路径

在高层较为相似的环流背景下, 这两次过程气旋源地、路径也存在相似性, 但是气旋强度及变化特征差异明显。“8.27”过程中气旋强度和气旋中心气压变化幅度更大, 移动偏慢, 气旋在江西中部生成后

于 27 日 14 时强度增强移出源地并在安徽北部再次增强, 27 日 17 时中心气压最低降至 998 hPa, 此后在入海前气旋强度再次减弱 (图 4a)。“9.19”过程地面气旋同样在江西中部生成发展增强, 中心气压逐渐降低, 19 日 17 时移出源地后由于高层引导气流偏强, 气旋移动较快, 中心最低气压维持在 1 004 hPa 左右 (图 4b)。

两次过程高空槽前期均稳定维持, 配合低涡切

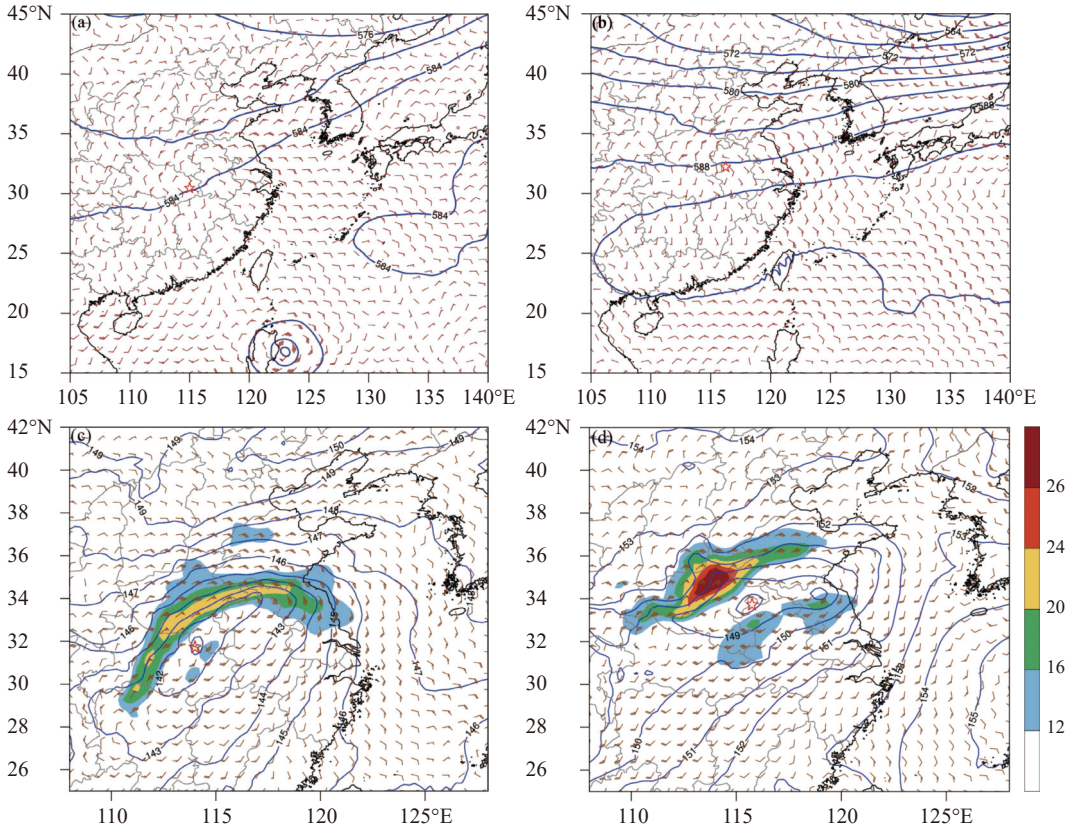


图 3 2023 年 8 月 27 日 14 时 (a, c) 和 9 月 19 日 20 时 (b, d) 500 hPa 位势高度场 (等值线, 单位: dagpm) 与地面 10 m 平均风 (风羽, 单位: $m \cdot s^{-1}$) 分布 (a, b; 红色五角星为地面气旋中心) 以及 850 hPa 位势高度场 (等值线, 单位: dagpm) 与 850 hPa 风场 (风羽, 单位: $m \cdot s^{-1}$, 填色为风速) 分布 (c, d; 红色五角星为低涡中心)

Fig. 3 Distribution of (a, b) geopotential height (contours, unit: dagpm) at 500 hPa and wind field (barbs, unit: $m \cdot s^{-1}$) at 10 m (the red pentagram indicates the center of the cyclone), and (c, d) geopotential height (contours, unit: dagpm) and wind field (barbs, unit: $m \cdot s^{-1}$, the shaded area is speed) at 850 hPa (the red pentagram indicates the center of the low-pressure vortex) at (a, c) 14:00 BT on 27 August 2023 and (b, d) 20:00 BT on 19 September 2023

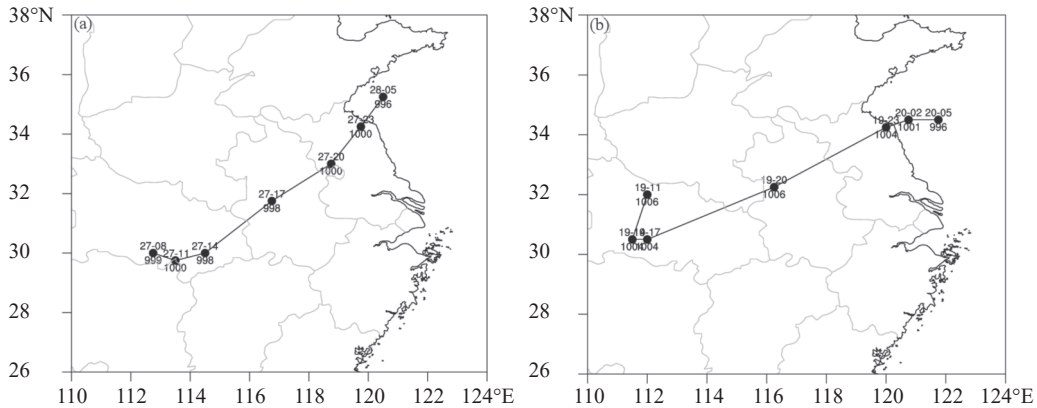


图 4 “8.27”过程 (a) 和“9.19”过程中 (b) 气旋移动路径 (圆点上标注的数字为地面气旋中心位置对应的时间, 如“27-08”表示 27 日 08 时, 以此类推; 圆点下标注的数值为相应时刻海平面气压, 单位: hPa)

Fig. 4 Moving paths of cyclones in (a) “8.27” process and (b) “9.19” process (the numbers marked on the dots represent the time corresponding to the surface center position of the cyclones, "27-08" indicates 18:00 BT on 27, snd so on. The numbers marked under the dots represent sea level pressure, unit: hPa)

变线和低空急流以及高空分流区有利于江苏中北部地区出现强降雨。江淮气旋均在江西中部生成向东北方向移动并在江苏北部入海。“8.27”过程高空槽较强, 移动较慢, 气旋强度更强且移动偏慢, 低层存在显著的台风外围水汽输送作用。“9.19”过程高空槽偏弱, 移动较快, 气旋强度偏弱且移动偏快, 后期 500 hPa 干冷空气侵入, 低层呈现准正压结构, 有利于产生更强的上升运动。

4 极端强降雨环境条件诊断分析

为探究两次强降雨过程差异的成因, 分别从动力、水汽和不稳定条件等角度进行诊断对比分析。

4.1 动力条件

4.1.1 散度与垂直速度诊断

极端强降雨的形成需要持续的较强上升运动, 分别对两次过程的散度与垂直速度进行诊断, 以分析上升运动的差异。8 月 27 日 14 时和 9 月 19 日 20 时江淮气旋中心移至安徽境内, 江苏中北部处于气旋第一、四象限, 此时低层辐合和高层辐散中心分别达到−10×10^{-5} s^{-1} 和 8×10^{-5} s^{-1}, 低层辐合和高层辐散特征明显, 伴有较强的上升运动, 随着气旋东移上述特征进一步增强。“8.27”过程在降雨最强时段上升速度达到−1.2 Pa·s^{-1} (图 5a)。“9.19”过程由于地面气旋与低涡中心重合, 大尺度强迫更强, 低层辐合和高层辐散均更强, 其上升运动相比“8.27”过程更强, 最大达到−2.4 Pa·s^{-1} (图 5b)。因此, 两次过程均有较强的上升运动, “8.27”过程相比“9.19”过程上升运动略弱, 但是低层辐合、高层辐散的配置维持时间更长, 影响范围更广, 导致“8.27”过程强降雨影响范围和强更大。

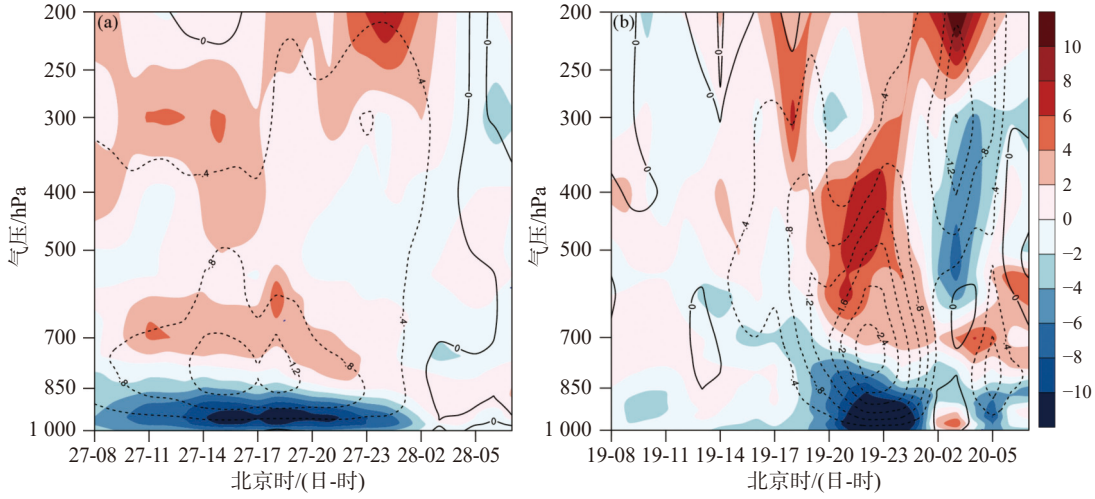


图 5 “8.27”过程 (a) 强降雨区 (118°—120°E, 33°—34.5°N) 和“9.19”过程 (b) 强降雨区 (119°—120.5°E, 33.5°—34.5°N) 区域平均垂直速度 (等值线, 单位: 10^{-1} Pa·s^{-1}) 和散度 (填色, 单位: 10^{-5}s^{-1}) 时间-高度剖面图

Fig. 5 The time-height cross-section of regional mean vertical velocity (the contours, unit: 10^{-1} Pa·s^{-1}) and divergence (shaded, unit: 10^{-5}s^{-1}) of heavy precipitation area (118°—120°E,33°—34.5°N) in (a) “8.27” process and heavy precipitation area (119°—120.5°E,33.5°—34.5°N) in (b) “9.19” process

4.1.2 涡度平流与温度平流特征

高层正涡度平流和低层暖平流是影响江淮气旋生成和发展的关键因素 (熊秋芬等, 2016; 沈阳等, 2019), 进而影响气旋演变过程中上升运动的特征。两次过程气旋源地附近正涡度平流和温度平流的配置差异明显。“8.27”过程高空槽偏强, 27 日 16 时前 500—200 hPa 有较强正涡度平流且随着高度逐渐增强, 有利于地面减压, 气旋移出源地后强度发展, 此后正涡度平流中心向下扩展, 低层正涡度平流增强, 中高层逐渐转为负涡度平流, 气旋减弱 (图 6a)。“9.19”过程高空槽偏弱, 整层涡度平流较弱, 气旋在移出源地后发展不明显 (图 6b)。“8.27”过程中 27 日 14 时前低层有较强暖平流, 气旋处于增强阶段, 随着气旋东移, 暖平流向上拓展, 后期低层转为冷平流, 气旋发展减弱 (图 6c)。“9.19”过程整个生命史中 500 hPa 以下基本为暖平流控制, 低层暖平流对于气旋移动发展起主导作用; 19 日 14 时 500 hPa 附近转为冷平流, 且冷平流逐渐向 700 hPa 扩展, 体现了槽后干冷气流侵入过程 (图 6d), 这种低层暖平流, 中层冷平流的配置关系有利于不稳定层结的增强。综上, “8.27”过程由于较强高空槽稳定维持, 高层正涡度平流较长时间占主导, 有利于高层辐散场长时间维持, 气旋移出源地后强度增强, 中低层始终维持较强上升运动; 而“9.19”过程中低层暖平流占主导, 气旋强度稳定, 后期 500 hPa 转为冷平流导致不稳定层结增强进而产生更强上升运动。

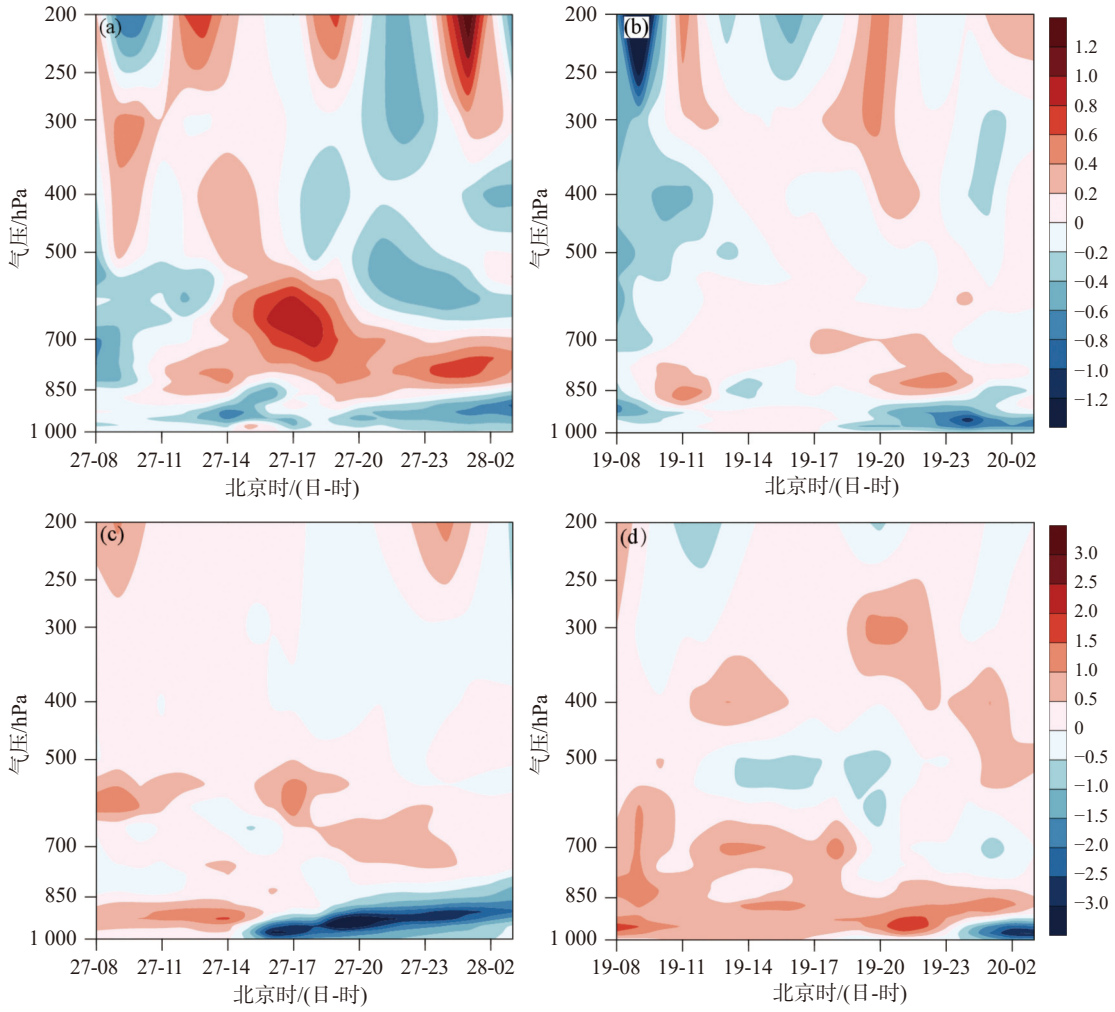


图 6 “8.27”过程 (a, c) 气旋源地附近 (114.5°—115.5°E, 30.5°—31.5°N) 和“9.19”过程 (b, d) 气旋源地附近 (114°—115°E, 30.5°—31.5°N) 区域平均相对涡度平流 (a, b; 单位: 10^{-8} s^{-2})、温度平流 (c, d; 单位: 10^{-4} K·s^{-1}) 时间-高度剖面图

Fig. 6 The time-height cross-section of regional average (a, b) relative vorticity advection (unit: 10^{-8} s^{-2}) and (c, d) temperature advection (unit: 10^{-4} K·s^{-1}) near the source of the cyclones in (a, c) “8.27” process (114.5°—115.5°E, 30.5°—31.5°N) and (b, d) “9.19” process (114°—115°E, 30.5°—31.5°N)

4.1.3 锋生地转偏差与高低空急流耦合作用

气旋在发展演变过程由于斜压锋生作用在高低层会产生明显地转偏差 (何齐强等, 1994)。高低层地转偏差和 N_{BE} 项诊断结果表明, 两次过程降雨强度最大阶段 8 月 27 日 18 时和 9 月 19 日 22 时气旋中心移至安徽境内后, 江苏中北部地区处于气旋第一、四象限, 受地转偏差影响高低层 N_{BE} 项有明显的非零值, 低层有负散度倾向和偏南风异常 (图 7a、b), 高层有正散度倾向和偏北风异常 (图 7c、d), 这种高低层经向风的异常会进一步增强锋生, 上升运动得到增强, 有利于该区域强降雨的出现和维持 (曹舒娅等, 2023; 赵凯等, 2024)。9 月 19 日 22 时低层偏南风异常、高层偏北风异常更大, 低层负散度倾向达到 -8×10^{-8} s^{-2} (图 7b、d), 最终上升运动也更强。

高低空急流耦合作用对于极端强降雨的形成有着重要作用 (刘鸿波等, 2014; 高晓梅等, 2023; 崔梦雪等, 2024), 气旋发展过程中斜压锋生产生的地转偏差有助于次级环流的发展 (Chen et al., 1998; 赵强等, 2024), 在不同阶段会对高低空急流耦合产生不同的影响, 从而影响降雨的强度与分布特征。“8.27”过程中前期 27 日 11 时气旋斜压锋生产生的低层地转偏差辐合与低空急流核重合, 该区域位于高空急流入口区右侧 (图 8a), 所产生次级环流的上升支略向北倾斜, 导致气旋第一、四象限较大范围降雨的出现 (图 2a); 后期 18 时斜压锋生产生的地转偏差辐合进一步增强, 而在 34°N 以南 700 hPa 以下存在显著的偏南风异常, 有利于低空东南风急流和超低空偏南风急流的维持和增强, 结合次级环流上升支的增强 (图 8b), 降雨强度明显增强 (图 2b) , 此时次级环流上升支呈倾斜状, 影响范围更广, 最终强降雨的范围也更大。“9.19”过程中前期 19 日 15 时低空急流强度及斜压锋生产生的低层地转偏差辐合较弱, 次级环流也较弱, 大尺度强迫产生的上升运动集中在 850 hPa 以上 (图 8c), 降雨和对流性较弱 (图 2c); 后期 22 时

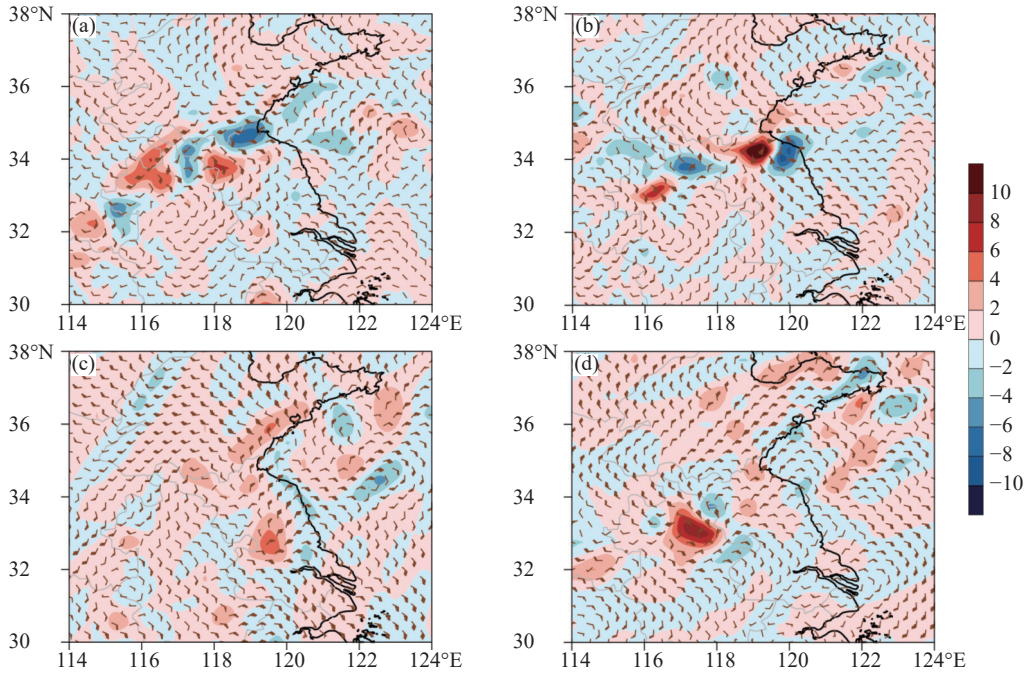


图 7 2023 年 8 月 27 日 18 时 (a, c) 和 9 月 19 日 22 时 (b, d) 850 hPa (a, b) 和 200 hPa (c, d) 地转偏差 (风羽, 单位: $m\cdot s^{-1}$) 和 N_{BE} 非线性平衡项 (填色, 单位: $10^{-8}\,s^{-2}$) 分布

Fig. 7 Distribution of the ageostrophic deviation (barbs, unit: $m\cdot s^{-1}$) and the N_{BE} (shaded, unit: $10^{-8}\,s^{-2}$) at (a, b) 850hPa and (c, d) 200hPa at (a, c) 18:00 BT on 27 August 2023 and (b, d) 22:00 BT on 19 September 2023

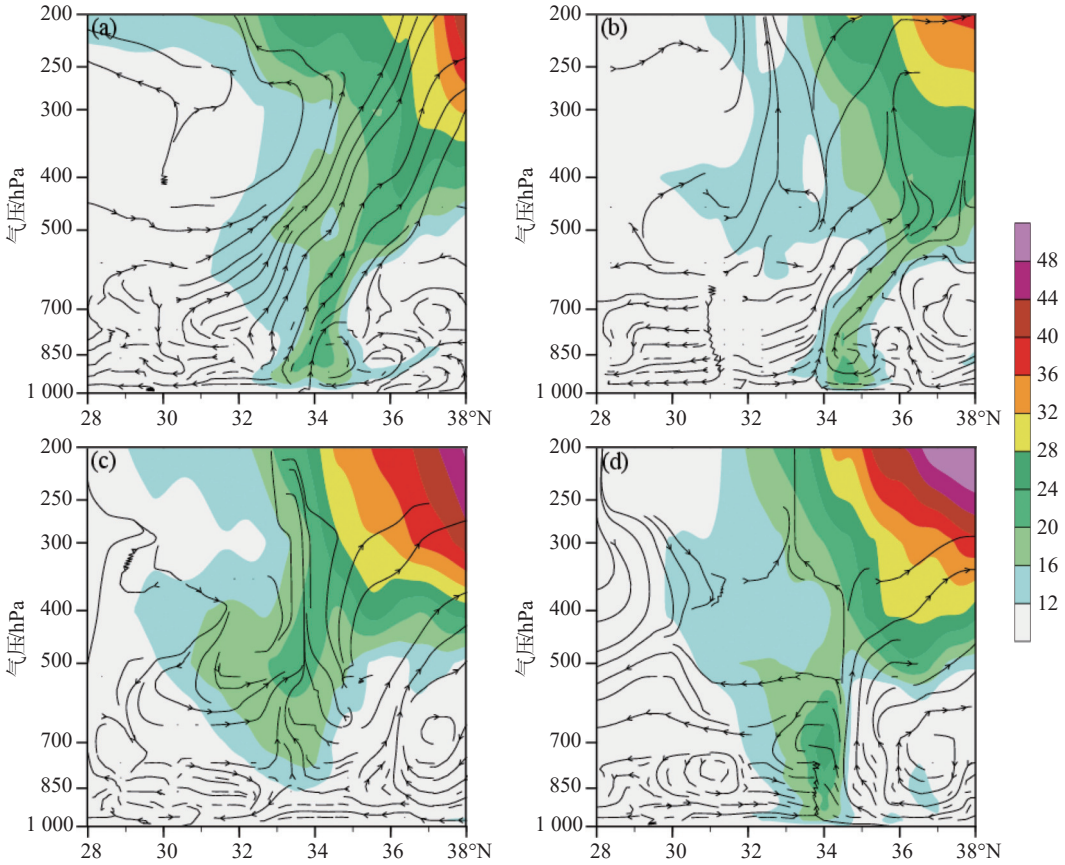


图 8 2023 年 8 月 27 日 11 时沿 118°E (a)、18 时沿 119°E (b)、9 月 19 日 15 时沿 118°E (c) 和 22 时沿 120°E (d) 非地转风合成风场 (v_a, $\omega\times10$) (流线, v_a的单位为 $m\cdot s^{-1}$, ω的单位为 $Pa\cdot s^{-1}$) 和水平风速 (填色, 单位: $m\cdot s^{-1}$) 经向垂直剖面图

Fig. 8 Meridional vertical cross sections of ageostrophic circulation (v_a, $\omega\times10$) (streamlines, unit of v_a: $m\cdot s^{-1}$, ω: $Pa\cdot s^{-1}$) and horizonal wind speed (shaded, unit: $m\cdot s^{-1}$) (a) along 118°E at 11:00 BT, (b) along 119°E at 18:00 BT on 27 August and (c) along 118°E at 15:00 BT, (d) along 120°E at 22:00 BT on 19 September 2023

尽管气旋强度减弱，但是气旋中心南侧近低层地转偏差辐合明显增强，江苏中北部处于显著的次级环流上升支所控制，其倾斜分量较弱，上升运动较集中，34°N 以南 850 hPa 以下存在较强的偏南风异常，使得低空急流和超低空急流增强或出现 (图 8d)，高低空急流耦合作用增强，导致沿气旋中心的地面辐合线附近降雨强度显著增强 (图 2d)。

4.2 水汽条件

充足的水汽输送和辐合作用是产生极端强降雨的必要条件。925 hPa 水汽通量和水汽通量散度诊断表明，两次过程中低涡东侧均存在较强向东、向南的水汽输送，江苏中北部水汽通量辐合特征显著，水汽辐合区呈东西向带状分布，低层比湿均达到 16 g·kg^{-1} (图 9)。“8.27”过程由于海上台风外围水汽输送作用，江苏中北部地区水汽输送和辐合作用更强且维持时间超过 12 h，最强水汽通量辐合中心超过 −1.8×10^{-4} g·cm^{-2}·s^{-1}·hPa^{-1} (图 9a)；而“9.19”过程较强水汽输送和辐合作用持续约 10 h，最强水汽通量辐合中心为−1.4×10^{-4} g·cm^{-2}·s^{-1}·hPa^{-1} (图 9b)。综上，更强且持续的水汽输送和辐合作用导致“8.27”过程强降雨区低层比湿持续偏大，最终强降雨范围和强度更大。

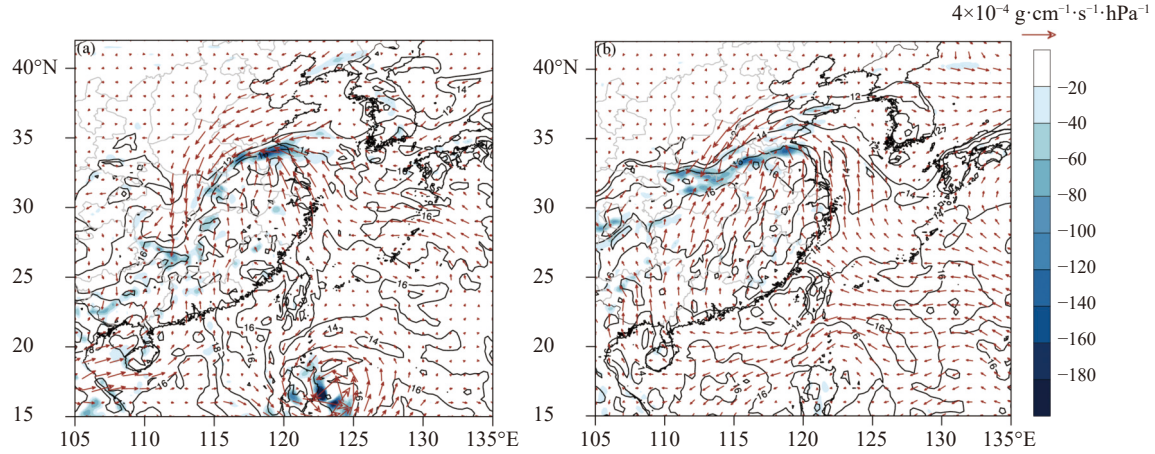


图 9 2023 年 8 月 27 日 18 时 (a)、9 月 19 日 20 时 (b) 水汽通量 (矢量，单位：10^{-4} g·cm^{-1}·s^{-1}·hPa^{-1})、比湿 (等值线，单位：g·kg^{-1}) 和水汽通量散度 (填色，单位：10^{-6} g·cm^{-2}·s^{-1}·hPa^{-1}) 分布

Fig. 9 Distritution of vapor flux (vectors, unit: 10^{-4} g·cm^{-1}·s^{-1}·hPa^{-1}), specific humidity (contours, unit: g·kg^{-1}) and vapor flux divergence (shaded, unit: 10^{-6} g·cm^{-2}·s^{-1}·hPa^{-1}) at (a) 18:00 BT on 27 August 2023 and (b) 20:00 BT on 19 September 2023

4.3 不稳定条件分析

4.3.1 探空分析

基于 14 时地面 2m 温度和露点温度对 2023 年 8 月 27 日 08 时和 9 月 19 日 08 时射阳站探空资料进行探空订正以对比两次过程环境条件的差异 (图 10)。两次过程对流抑制能量 CIN 较小、0~6 km 垂直风切变较大，有利于对流触发和增强维持。但是水汽和不稳定层结存在差异。“8.27”过程中由于超低空偏东风急流水汽输送作用 (图 10a)，整层较湿，暖云层厚度为 4.5 km，抬升凝结高度 LCL 和自由对流高度 LFC 均较低，为有利于产生高效率降雨的环境条件 (黄燕玲等，2024)；而“9.19”过程暖云层厚度为 4.3 km (图 10b)。“9.19”过程不稳定层结和能量条件更强，对流有效位能 CAPE 达到4 294.1 J·kg^{-1}；而“8.27”过程对流有效位能 CAPE 为 202 J·kg^{-1} 且呈狭长带状分布。综上，两次过程水汽和不稳定层结存在差异，“8.27”过程相比

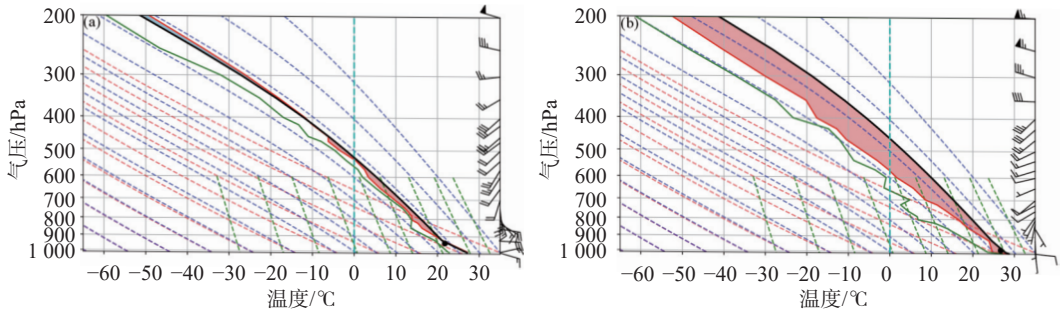


图 10 2023 年 8 月 27 日 08 时 (a) 和 9 月 19 日 08 时 (b) 射阳站订正后探空图

Fig. 10 Corrected sounding charts at Sheyang station at (a) 14:00 BT 27 August and (b) 14:00 BT 19 September 2023

“9.19”过程对流能量偏弱, 但是环境条件更有利于强降雨的出现。

4.3.2 湿位涡分析

为进一步分析两次强降雨过程不稳定条件的差异, 图 11 给出了强降雨区湿位涡 (MPV_1 和 MPV_2) 和假相当位温 (θ_{se}) 的时间-高度剖面图。强降雨发生前湿位涡分布特征较好地反映了水汽输送、对流不稳定层结等特征的差异。“8.27”过程中前期由于低空急流和超低空急流的作用, 925 hPa 以上 θ_{se} 逐渐增大, 导致对流层低层 MPV_1 迅速减少 (图 11a), 而低层 MPV_2 有较强负值区 (图 11c), 斜压性逐渐增强, 存在明显暖湿空气的聚集, 有利于后期气旋强度的维持和强降雨的出现。“9.19”过程中强降雨发生前低层暖湿气流较弱, θ_{se} 变化较小, 对流层中高层由于转为高空槽后西北气流控制, θ_{se} 迅速降低, 因此低层 MPV_1 始终小于 0 (图 11b), 中高层存在弱的正的 MPV_1 沿等 θ_{se} 线向下扩展, 反映槽后干冷空气的侵入过程, 有利于强降雨发生前中低层对流不稳定性的增强; 低层有弱的 MPV_2 负值区 (图 11d), 暖湿空气聚集较弱。两次过程中最强降雨时段均为低层湿位涡发生明显变化即对流不稳定与低层斜压性相结合时期; 湿位涡诊断表明“8.27”过程低层斜压性和暖湿空气聚集更强, 因此强降雨强度更强。

以上分析表明, 两次气旋中心移至安徽后, 斜压锋生产生的地转偏差导致江苏中北部低层辐合和高层辐散增强, 次级环流发展, 并且低层偏南风异常有利于后期低空急流和超低空急流增强或出现, 次级环流上升支与高低空急流相配合结合充足的水汽条件导致该地区区域性极端强降雨的出现。“8.27”过程由于较强上升运动影响范围更大、持续时间更长且水汽输送和辐合作用更强导致强降雨的范围、强度和极值更大。

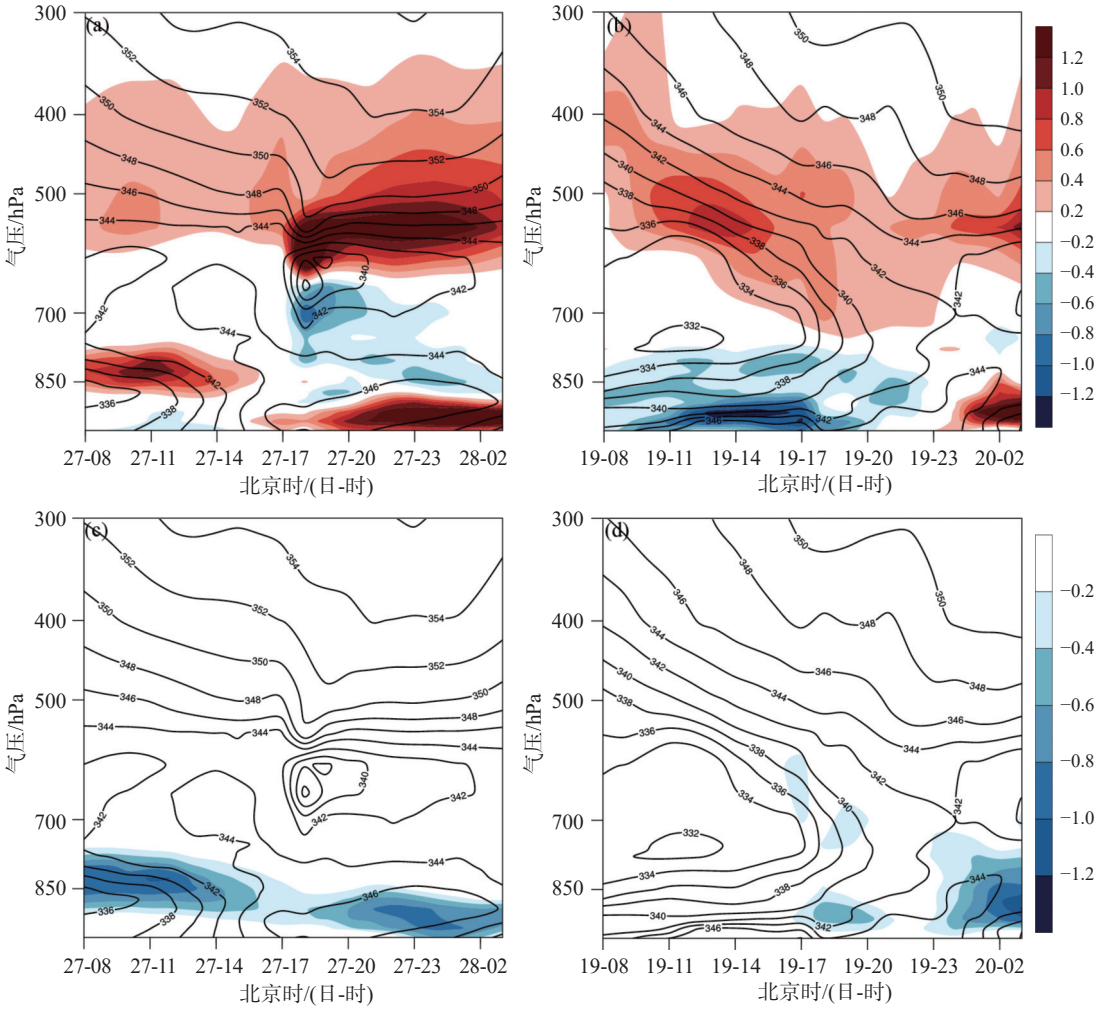


图 11 “8.27”过程 (a, c) 强降雨区 (118°—120°E, 33°—34.5°N) 和“9.19”过程 (b, d) 强降雨区 (119°—120.5°E, 33.5°—34.5°N) 区域平均 MPV_1 (a, b; 填色, 单位: PVU) 和 MPV_2 (c, d; 填色, 单位: PVU) 及 θ_{se} (等值线, 单位:K) 时间高度剖面图

Fig. 11 Time-height cross-section of regional mean (a, b) MPV_1 (shaded, unit: PVU), (c, d) MPV_2 (shaded, unit: PVU) and θ_{se} (contour, unit: K) of heavy precipitation area (118°-120°E,33°-34.5°N) in (a, c) “8.27” process and heavy precipitation area (119°-120.5°E, 33.5°-34.5°N) in (b, d) “9.19” process

5 结论

本文基于国家站和区域站地面观测、探空、ERA5再分析及 FY-4A 的 TBB 资料，采用天气诊断分析方法对 2023 年 8 月 27—28 日和 9 月 19—20 日两次相似路径江淮气旋过程的强降雨及气旋特征、环流背景、强降雨的成因进行对比分析。得到以下结论：

(1) “8.27”过程和“9.19”过程中江苏中北部地区出现大范围暴雨至大暴雨，均属于区域极端强降雨。两次过程前期以冷区稳定性降雨为主，后期气旋中心移至安徽后转为暖区降雨，降雨强度和对流性显著增强。“8.27”过程中对流云团呈现为中尺度对流复合体特征，造成的强降雨的范围、强度和极值更大；而“9.19”过程中对流云团为典型的线状中尺度对流系统特征，造成的强降雨范围相对较小

(2) 两次过程环流背景存在相似性，高空槽前期均稳定维持，地面低压倒槽增强形成江淮气旋，配合低涡切变线和低空急流以及高空分流区有利于产生极端强降雨。在此背景下，两次过程气旋的源地、路径相似，但是“8.27”过程气旋强度更强，气旋在源地移出后强度增强且移动较慢；而“9.19”过程气旋移出源地后移动较快，强度基本稳定。

(3) 气旋中心移至安徽境内前，斜压锋生产生的辐合上升运动较弱，降雨强度较弱；气旋中心移至安徽境内后，随着斜压锋生地转偏差作用增强，低层辐合和高层辐散增强，次级环流发展，导致沿气旋中心的地面辐合线附近的江苏中北部地区降雨强度显著增强。其中，“8.27”过程高层正涡度平流作用长时间占主导有利于较强上升运动的维持，与斜压锋生相伴的次级环流上升支呈倾斜状，影响范围更广，强降雨的落区更大；而“9.19”过程低层暖平流作用占主导，上升运动更强，但是次级环流上升倾斜分量较弱，上升运动较集中，强降雨落区相对较小。

(4) “8.27”过程中水汽输送和辐合作用更强，探空分析表明环境条件更有利于强降雨的出现。湿位涡的分布特征较好地反映了两次过程对流不稳定层结等的差异，最强降雨时段均为低层湿位涡发生明显变化即对流不稳定与低层斜压性相结合时期，其中“8.27”过程低层斜压性和暖湿空气聚集更强，因此强降雨强度更强。

参考文献 (References)：

崔梦雪,张晗昀,陈德花,等.2024. 2023 年 4 月 18 日厦门暖区特大暴雨中尺度特征及低空急流的作用[J].暴雨灾害,43(5):521−531. Cui M X, Zhang H J, Chen D H, et al. 2024. Mesoscale characteristics and role of low-level jets in a warm-sector severe torrential rain event in Xiamen on 18 April 2023 [J]. Torrential Rain and Disasters,43(5):521−531 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−107

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, Zhou 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

陈筱秋,王咏青.2016.基于 NCEP 资料的一次东移引发暴雨的江淮气旋结构特征分析[J].暴雨灾害,35(1):53−60. Chen X Q, Wang Y Q. 2016. Structure and mechanism analysis of a Jiang-huai cyclone with an eastern path and heavy rain based on NCEP data [J]. Torrential Rain and Disasters,35(1):53−60 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2016.01.008

DB32/T 4430-2022 极端强降雨事件判定[S]. 北京:中国标准出版社. (DB32/T 4430-2022) Judgment of extreme heavy rainfall events [S]. Beijing: China Standards Publishing House

高晓梅,任广治,王向前,等.2023. 2018 年山东一次极端暴雨的环境场特征分析[J].沙漠与绿洲气象,17(5):56−63. Gao X M, Ren G Z, Wang X Q, et al. 2023. Environmental characteristics of historical extreme rainstorm in Shandong province caused by typhoon Rumbia [J]. Desert and Oasis Meteorology,17(5):56−63 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2023.02.004

黄美金,俞小鼎,林文,等.2022.福建沿海冷锋前暖区和季风槽大暴雨环境背景与对流系统特征[J].气象,48(5):605−617. Huang M J, Yu X D, Lin W, et al. 2022. Environmental background and convective system characteristics of the prefrontal and the monsoon trough torrential rains in Fujian coastal area [J]. Meteorological Monthly,48(5):605−617 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2022.012801

何齐强,吕梅,张铭.1994.冷锋边界层锋生和锋生环流的诊断研究[J].大气科学,18(4):485−491. He Q Q, Lu M, Zhang M. 1994. Diagnosis research of frontogenesis of a cold front and secondary circulation in the boundary layer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,18(4):485−491 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.1994.04.13

黄燕玲,王亚兰,袁月.2024.鲁南一次暖区大暴雨触发与维持机制分析[J].沙漠与绿洲气象,18(4):43−50. Huang Y L, Wang Y L, Yuan Y. 2024. The trigger and maintenance mechanism of a warm-sector heavy rainfall in southern Shandong [J]. Desert and Oasis Meteorology,18(4):43−50 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2024.04.007

江苏省气象局预报课题组.1998.江苏重要天气分析和预报 (上册) [M]. 北京: 气象出版社:1-20. Forecasting subject group of Jiangsu meteorological office. 1998. Important Weather Analysis and Forecast of Jiangsu Province (volume I) [M]. Beijing: China Meteorological Press:1-20 (in Chinese)

李柏,俞卫平,卢云,等.2002.江淮气旋发生发展中尺度系统特征数值模拟研究[J].气象科学,22(1):72−80. Li B, Yu W P, Lu Y, et al. 2002. The numerical simulating study of the mesoscale characteristics on development of Jianghuai cyclones [J]. Journal of the Meteorological Sciences,22(1):72−80 (in Chinese). doi:10.3969/2012jms.00160502

李畅.2024.淮河流域暴雨及其主模态的多时间尺度变化及原因分析[D]. 南京信息工程大学. Li C. 2024. Multi time scale changes and cause analysis of torrential rain and its main models in the Huaihe River

Basin [D]. Nanjing University of Information Science & Technology (in Chinese). doi:10.27248/d.cnki.gnjqc.2024.000137

卢楚翰,周洁雯,胡叶,等.2019.春季影响江淮地区的天气尺度气旋活动与同期降水的联系[J].大气科学,43(2):311−324. Lu C H, Zhou J W, Hu Y, et al. 2019. Simultaneous relationship between precipitation and activities of springtime synoptic scale affecting cyclone over the Yangtzi-Huaihe River Valleys [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,43(2):311−324 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.1804.17294

刘鸿波,何明洋,王斌,等.2014.低空急流的研究进展与展望[J].气象学报,72(2):191−206. Liu H B, He M Y, Wang B, et al. 2014. Advances in low-level jet research and prospects [J]. Acta Meteorologica Sinica,72(2):191−206 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2014.022

李静楠,潘晓滨,臧增亮,等.2016.一次华北暴雨过程的湿位涡诊断分析[J].暴雨灾害,35(2):158−165. Li J N, Pan X B, Zang Z L, et al. 2016. Diagnostic analysis of moist potential vorticity for a rainstorm in North China [J]. Torrential Rain and Disasters,35(2):158−165 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2016.02.008

毛程燕,荆思佳,潘欣,等.2021.浙江一次江淮气旋后部强对流暴雨过程诊断研究[J].热带气象学报,37(4):530−540. Mao C Y, Jing S J, Pan X, et al. 2021. Diagnostic research of severe convective rainstorm event at the back of a Jiang-Huai cyclone in Zhejiang province [J]. Journal of Tropical Meteorology,37(4):530−540 (in Chinese). doi:10.16032/j.issn.1004−4965.2021.051

青逸雨,黄雨婧,孙芳,等.2023.东北移高原低涡引发我国西北两次强降水过程的对比分析[J].暴雨灾害,42(2):144−149. Qing Y Y, Huang Y J, Sun F, et al. 2023. Comparative analysis of two heavy precipitation events in Northwest China induced by northeastward Tibetan Plateau vortices [J]. Torrential Rain and Disasters,42(2):144−149 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022−014

沈阳,孙燕,蔡凝昊,等. 2019. 一次引发极端降水事件的江淮气旋发生发展分析[J].气象,45(2):166-179. Shen Y, Sun Y, Cai N H, et al, 2019. Analysis on the generation and evolution of a Jianghuai cyclone responsible for extreme precipitation event [J]. Meteorological Monthly, 45(2):166-179 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2019.02.003

王艳玲,管兆勇,金大超,等.2015. 1980—2012 年春末夏初江淮气旋活动的气候特征及其年际、年代际变化[J].大气科学学报,38(3):354−361. Wang Y L, Guan Z Y, Jin D C, et al. 2015. Climatic characteristics and interannual (interdecadal) variations of cyclones over Changjiang-Huaihe River basin during late spring and early summer from 1980 to 2012 [J]. Transaction of Atmospheric Sciences,38(3):354−361 (in Chinese). doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20130413010

吴涛,许冠宇,李双君,等.2023.一次春季江淮气旋混合型对流天气特征及成因分析[J].气象,49(1):27−38. Wu T, Xu G Y, Li S J, et al. 2023. Characteristics and causes of a mixed-type convective weather during the formation and development of a Jianghuai cyclone in spring [J]. Meteorological Monthly,49(1):27−38 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2022.111801

熊秋芬,张昕,陶祖钰.2016.一次温带气旋涡度场演变特征及气旋发生发展机制分析[J].气象,42(3):294−304. Xiong Q F, Zhang X, Tao Z Y. 2016. An analysis of vorticity evolution and physics mechanism on an extratropical cyclone [J]. Meteorological Monthly,42(3):294−304. doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2016.03.004

燕若彤,许东蓓,孙继松,等.2023.一次高原涡东移引发江淮强降水的动热力机制分析[J]. 高原气象,42(3):701-710. Yan R T, Xu D B, Sun J S, et al. 2023. Analysis of dynamic and thermal mechanism of heavy precipitation over the Yangtze-Huaihe river basin caused by a Qinghai-Xizang Plateau vortex moving eastward [J]. Plateau Meteorology. 42(3):701-710 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2022.00090

张家国,王孝慈,王珏,等.2018.长江中游地区极端降水主要天气系统类型分析[J].暴雨灾害,37(1):14−23. Zhang J G, Wang X C, Wang Y, et al. 2018. Weather system types of extreme precipitation in the middle reaches of the Yangtze River [J]. Torrential Rain and Disasters, 37(1):14−23 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2018.01.003

赵凯,张银意,陈小宇,等.2024.一次暴雨过程的锋生特征及风场演变分析[J].气象科学,44(5):881−889. Zhao K, Zhang Y Y, Chen X Y, et al. 2024. Analysis of frontogenesis characteristics and the winds field evolution of a rainstorm process [J]. Journal of the Meteorological Sciences,44(5):881−889 (in Chinese). doi:10.12306/2023jms.0048

赵强,彭力,赵世发,等.2024.不同天气尺度强迫下陕西暴雨的成因对比[J].高原山地气象研究,44(2):58−67. Zhao Q, Peng L, Zhao S F, et al. 2024. Comparative analysis of the causes of rainstorm in Shaanxi under different synoptic scale forcing [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,44(2):58−67 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674−2184.2024.02.007

张晓红,罗静,陈兴,等.2016.一次春季江淮气旋形成发展特征及暴雨诊断分析[J].气象,42(6):716−723. Zhang X H, Luo J, Chen X, et al. 2016. Formation and development mechanism of one cyclone over Changjiang Huaihe River Basin and diagnostic analysis of rainstorm [J]. Meteorological Monthly,42(6):716−723 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2016.06.007

Chen C, Tao W K, Lin P L, et al. 1998. The intensification of the low-level jet during the development of mesoscale convective systems on a Mei-Yu front [J]. Monthly Weather Review,126(2):495−506. doi:10.1175/1520−0493(1998)1262.0.CO;2

Houghton D D, Campbell W H, Reynolds N D. 2009. Isolation of the gravity-inertial motion component in a nonlinear atmospheric model [J]. Monthly Weather Review,109(10):4417−4431. doi:10.1175/1520−0493(1981)1092.0.CO;2

Zhang F, Koch S E, Davis C A, et al. 2000. A survey of unbalanced flow diagnostics and their application [J]. Advances in Atmospheric Sciences,17(2):165−183. doi:10.1007/s00376−000−0001−1

(责任编辑　张　文)