

翟丽萍,梁依玲,周云霞,等.2024.桂林“5.22”极端强降雨过程的观测分析[J].暴雨灾害,43(3):313–321. ZHAI Liping, LIANG Yiling, ZHOU Yunxia, et al. 2024. Observation analysis of "5.22" extreme rainfall event in Guilin [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 43(3):313–321 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023–141

桂林“5.22”极端强降雨过程的观测分析

翟丽萍,梁依玲,周云霞,屈梅芳,黄晴,黄荣

(广西壮族自治区气象台,南宁 530022)

摘要:2023年5月22日凌晨至上午,桂林市北部发生极端强降雨,1 h和3 h雨量均突破当地历史记录,导致严重城市内涝。利用常规观测、地面加密自动站、多普勒天气雷达以及ERA5再分析等资料对此次强降雨过程进行分析。结果表明:(1)过程发生在副热带高压边缘,受低层切变线和地面冷锋南下影响,持续增强的西南急流为极端强降雨提供充足的水汽和能量;(2)强降雨回波由线状对流演变,线状对流与地面冷空气适时相遇,移向和形态发生改变,同时其西侧不断发展的新生单体加入形成“列车效应”,导致极端降雨产生,且降雨回波呈现低质心高效率的特征;(3)弱冷空气适时入侵,增强对流降雨并加强冷池出流,在其前沿的暖湿区域中触发新生对流,有利于强降雨的发展和持续;(4)对流单体在东移过程中通过云桥合并和云体扩大发展两种方式合并形成新的云团,并迅速发展,使降雨增强,对流单体之间的相互作用和合并是强降雨持续和加强的主要机制;(5)国内多家业务模式均低估此次过程雨强,预报降雨中心存在偏差,主要原因是模式预报地面冷空气影响时间出现偏差。

关键词:极端强降雨;冷空气;单体合并;可预报性

中图法分类号: P458.1*21

文献标志码: A

DOI: 10.12406/byzh.2023–141

Observation analysis of "5.22" extreme rainfall event in Guilin

ZHAI Liping, LIANG Yiling, ZHOU Yunxia, QU Meifang, HUANG Qing, HUANG Rong

(Guangxi Zhuang Autonomous Region Meteorological Observatory, Nanning 530022)

Abstract: An extreme heavy rainfall event struck the northern part of the Guilin urban area in the early morning of May 22, 2023, breaking local historical records for both hourly and three-hourly precipitation, resulting in severe urban waterlogging. Analysis was conducted using data from routine observation, ground-based dense automatic stations, Doppler weather radar, and ERA5 reanalysis. The results are as follows. (1) This event occurred on the edge of the subtropical high-pressure system, with the continuous strengthening of the southwest jet stream providing abundant moisture and energy for the extreme rainfall under the influence of the low-level shear line and the southward movement of the surface cold front. (2) The echoes of heavy rainfall evolved into a linear convection, which changed the direction and shape when timely met with the surface cold air. Meanwhile, the continuously developing new individual cells on its western side joined to form a "train effect," leading to extreme rainfall. The echo exhibited characteristics of low core and high efficiency. (3) The timely intrusion of weak cold air intensified convective rainfall and enhanced cold pool outflow, triggering new convection in the warm and moist region ahead of it, which favored the development and persistence of heavy rainfall. (4) During the eastward movement of individual convective cells, they merged through cloud bridges and expanded through cloud development, forming new cloud clusters and rapidly intensifying precipitation. The interaction and merging of convective cells were the main mechanisms for the prolonged and intensified heavy rainfall. (5) Various numerical models underestimated the intensity of this event, with biases in forecasting the rainfall center mainly due to deviations in the timing of forecasting the influence of surface cold air.

Key words: extreme heavy rainfall; cold air; cell merging; predictability

引言

极端强降雨是指某一地区在一定时间内出现的

历史罕见降雨,具有发生概率小、社会影响大等特点(Li and Wang, 2018)。近年来,在全球气候变暖背景下,极端强降雨频发,造成的灾害日益严重,引起了气象

收稿日期: 2023–07–06;定稿日期:2023–12–20

资助项目: 广西自然科学基金项目(2023GXNSFBA026342);广西气象科研计划项目(桂气科2023ZL03,桂气科2022ZL01,桂气科2020QN04)

第一作者: 翟丽萍,主要从事灾害性天气预报及中小尺度机理研究。E-mail: mast2535@163.com

通信作者: 周云霞,主要从事强对流天气预报研究。E-mail: 13878131128@163.com

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

学者的广泛关注。许多学者从极端强降雨的天气学诊断分析(许霖等,2020,2021;Zhang et al.,2022;刘嘉慧敏等,2023)、时空变化特征(Yazid and Humphries,2015;Limsakul and Singhruck,2016;杨涵洧等,2021)和形成机理(Wang et al.,2019;陈博宇等,2023)等方面做了大量的研究工作,为理解极端强降雨的成因和提高其预报水平提供了重要的参考价值。极端强降雨通常发生在有利的大尺度环流背景下,由中小尺度对流系统引发。蒲义良等(2023)分析华南沿海一次罕见极端降雨过程指出,双低空急流共同作用形成的上升运动是其主要的触发机制。贺晓露等(2023)对湖北“8.12”极端强降雨及成因进行分析认为, β 中尺度对流云团的迅速发展和缓慢东移是导致其发生的主要因素。由于极端强降雨的天气形势复杂多变,大气系统存在非线性和不确定性,因此极端强降雨的预报和预警极具挑战。在预报业务中,预报员通常对极端强降雨的雨强预报不足,且数值模式对极端强降雨的预报和模拟能力有限,此外现阶段学术界对于造成极端强降雨的中小尺度发生和发展机理认识仍然不全面。因此,加强极端强降雨研究是亟需开展的工作。

2023年5月22日凌晨至上午,桂林市北部遭遇极端强降雨天气,引起严重的城市内涝,造成市区交通不便、全市学校停课。据统计,广西北部小时雨量 ≥ 150 mm的极端强降雨均发生在5—7月,主要位于高空槽前和低空急流前端,地面没有系统性冷空气影响,属于暖区暴雨。而此次过程却发生在地面冷锋入侵的背景下,主观预报和数值模式的客观预报均严重低估此次过程的雨强,预报的强降雨中心落区存在明显偏差。因此,有必要加强对此类环流形势下极端强降雨的研究。本文从极端强降雨过程的降雨实况、环流背景、环境条件、对流演变特征以及加强维持机制等方面进行天气学诊断分析,以加深对冷空气背景下桂北极端强降雨发展演变机理的认识,并为今后此类致灾性极端强降雨的预报预警提供有益参考。

1 资料说明

使用的资料包括:(1)广西气象信息中心天擎系统提供的2023年5月22日00:00—12:00(北京时,下同)全国常规地面探测资料、经质控后的广西地面加密气象站观测资料,包含雨量、气温、露点、风向、风速和海平面气压等气象要素,用于分析此次极端强降雨过程的天气实况。(2)2023年5月21日20:00桂林站常规高空探空资料,用于分析对流发生前大气层结特征。(3)欧洲中期天气预报中心发布的2023年5月21日20:00—22日12:00第五代全球再分析

(ERA5)格点资料,时空分辨率为 $1\text{ h}\cdot 0.25^\circ\times 0.25^\circ$,包含各层(共30层)位势高度、温度、相对湿度、风场等要素以及1990—2020年500 hPa平均位势高度场,用于分析此次极端强降雨过程的环流形势演变特征及异常度。(4)2023年5月22日00:00—12:00桂林S波段多普勒天气雷达逐6 min体扫资料,采用VCP21体扫模式,包含基本反射率因子、组合反射率因子及径向速度等产品,垂直方向19层,用于分析中小尺度对流系统的演变。(5)2023年5月22日00:00—12:00柳州对流层风廓线雷达逐6 min资料,雷达最大探测高度为6—8 km,1 km以下垂直分辨率为120 m,1 km以上垂直分辨率为240 m,用于分析垂直方向上风场的时间演变特征。

2 降雨实况

2023年5月22日00:00—12:00,广西东北部出现暴雨,局部出现大暴雨到特大暴雨,其中桂林市秀峰区甲山街道琴潭站累积雨量最大,达329.3 mm,其最大1 h雨量(22日05:00—06:00)为160.6 mm、最大3 h雨量(05:00—08:00)为300.1 mm,均打破当地历史记录。从5月22日00:00—12:00累积雨量的空间分布(图1a)可见,强降雨集中,大暴雨落区主要在桂林市区北部,处于越城岭、天平山、架桥岭、海洋山等山脉夹持的盆地中,盆地东北侧的峡谷为湘桂铁路沿线,是东路冷空气进入广西的通道,这种特殊的地形极易引发强降雨天气(《广西天气预报技术和方法》编写组,2012)。

此次过程雨强最强时段发生在22日04:00—07:00,其中最大小时雨量(05:00—06:00)突增至90 mm以上,桂林市秀峰区甲山街道站连续2 h的小时雨量超100 mm。过程主要特点是短时雨强大、局地性强、降雨系统移动缓慢、极端性突出。通过分析桂林市秀峰区甲山街道站05:00—06:00分钟雨量时间演变特征(图1b)可知,分钟雨量也表现出极端性,呈现多波动变化的特征,出现三个降雨峰值,表明受到三个中小尺度对流降雨系统的影响,且三个降雨峰值的分钟雨量均超过4 mm,其中第50、51 min的雨量分别达到6 mm和6.1 mm,说明对流系统的降雨效率极高。

3 环流形势与环境条件

此次极端强降雨发生在副热带高压(以下简称副高)边缘、低空切变线和地面冷锋附近。极端强降雨发生前,5月21日20:00 500 hPa高度场及其标准化异常分布和850 hPa风场(图2a)显示,副高强盛且呈带状分布,位置显著偏北,588 dagpm线位于桂林上空,副高

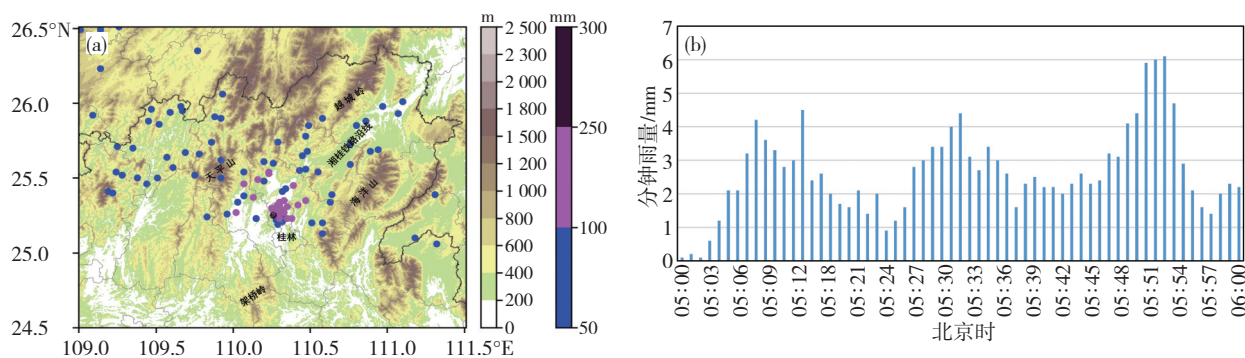


图1 2023年5月22日00:00—12:00累积雨量(彩色圆点)和地形高度(填色)的空间分布(a),桂林秀峰区甲山街道琴潭站05:00—06:00分钟雨量的时间演变(b)

Fig. 1 Spatial distribution of (a) accumulated precipitation (colored dot) and terrain height (shaded) from 00:00 BT to 12:00 BT on May 22, 2023, (b) time evolution of minute precipitation from 05:00 BT to 06:00 BT at Qintan station of Jiashan Street, Xiufeng District in Guilin

偏强,强度标准差 $\geq 1.5\sigma$,有利于形势稳定,且使低层切变线和地面冷锋南下速度减缓;850 hPa低涡切变线缓慢南压至桂林上空,为强降雨产生提供了很好的动力辐合条件。地面图上(图2b),东路弱冷空气沿着湘

桂铁路沿线缓慢进入,冷暖空气交汇,利于极端强降雨的发生和发展。

极端强降雨需要充足的水汽,环境大气中水汽含量可能是决定短时强降雨级别的重要因素。利用全

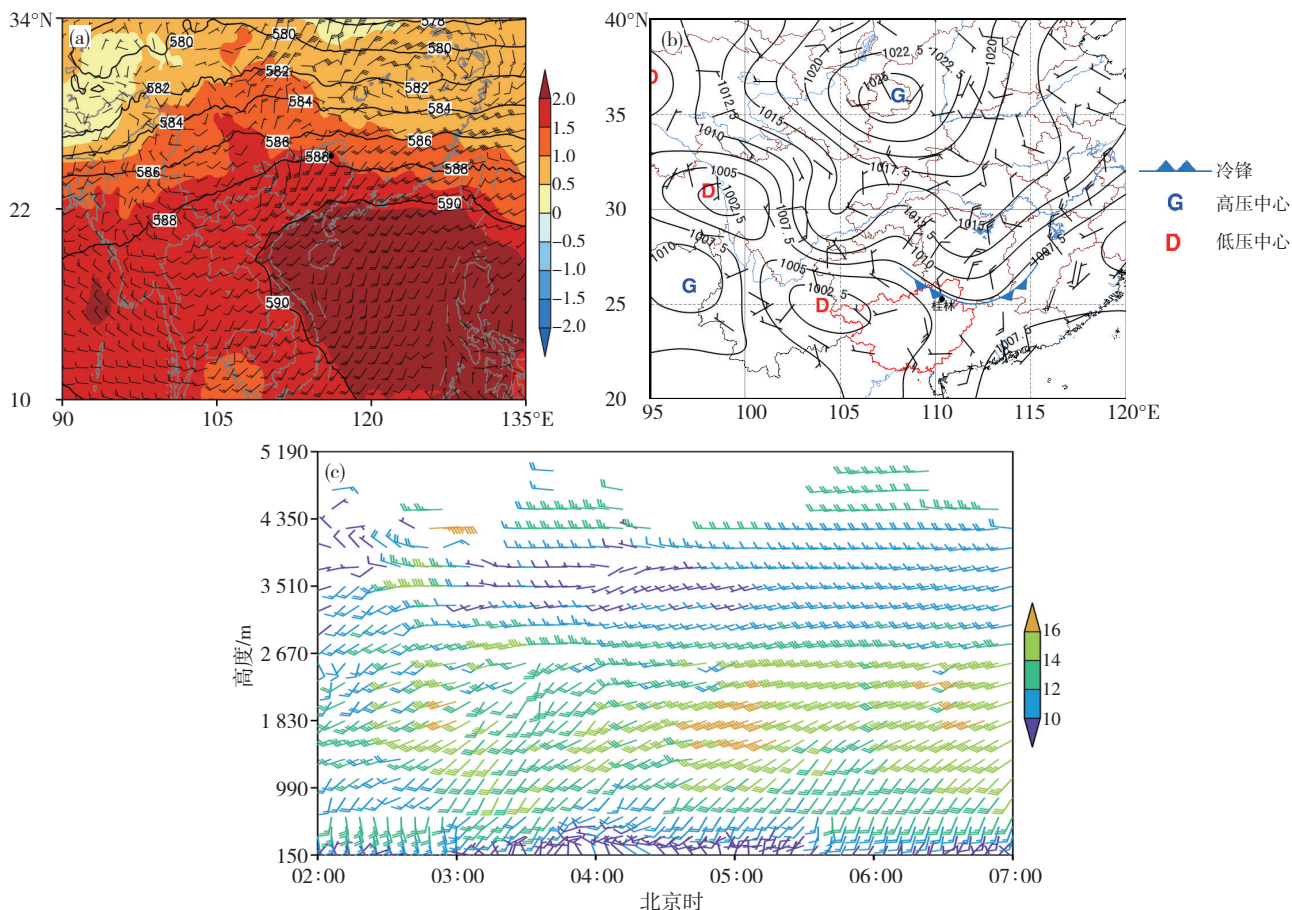


图2 2023年5月21日20:00 500 hPa高度场(等值线,单位: dagpm)、气候标准差倍数(填色,单位: σ)和850 hPa风场(风向杆)(a), 5月22日05:00地面海平面气压(等值线,单位: hPa)和风场(风向杆,黑色圆点为桂林站,下同)(b), 5月22日02:00—07:00柳州风廓线雷达风场(风向杆,彩色代表风速值,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)的时间演变(c)

Fig. 2 (a) The geopotential height (contour, unit: dagpm), climate standard deviation multiples (shaded, unit: σ) at 500 hPa, and wind field (barb) at 850 hPa at 20:00 BT on May 21, (b) the sea-level pressure (contour, unit: hPa) and wind field (barb, black dot indicates Guilin station, hereinafter) at 05:00 BT on May 22, (c) time evolution of wind field (barb, wind speed values were displayed in color, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) of Liuzhou wind profile radar from 02:00 BT to 07:00 BT on May 22, 2023

球定位系统气象学(Global Positioning System/Meteorology, GPS/MET)技术的地基水汽监测表明,5月21日20:00桂林大气可降雨量为46.5 mm,之后逐渐增大(图略)。上游柳州风廓线雷达监测(图2c)显示,22日02:00之后大气低层(1.0—2.5 km)西南风明显增大为急流,05:00 1.5—2.0 km之间西南急流达到最强,为桂林上空源源不断输送水汽,桂林的大气可降雨量增至62.1 mm,有利于极端强降雨发生。

极端降雨与对流密切相关,此次过程最大分钟雨量达6.1 mm,对流剧烈,降雨效率极高。21日20:00桂林探空显示(图3),最佳抬升指数(BLI)达 -3°C ,层结不稳定;对流有效位能(CAPE)达 $239.9\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$,呈均匀狭长分布,有利于对流性降雨的发生和发展,是产生短时强降雨的典型有利环境条件(樊李苗和俞小鼎,2013)。同时, 0°C 层高度为5.7 km,抬升凝结高度(LCL)较高(1.2 km),用05:00桂林地面温度(24.3°C)和露点温度(22.2°C)订正探空(图略)可知,LCL降至0.4 km,暖云层厚度达5.3 km,异常深厚,易形成高降雨效率。

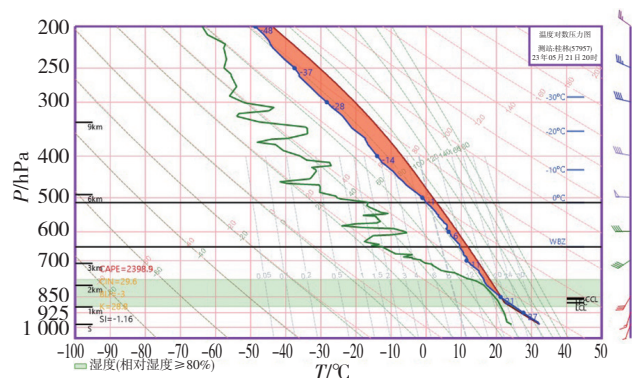


图3 2023年5月21日20:00桂林站T-logp图

Fig. 3 T-logp diagram of Guilin Station at 20:00 BT on May 21, 2023

4 中尺度对流系统特征

4.1 中尺度对流系统的演变特征

从桂林雷达逐小时组合反射率因子演变(图4)可知,22日02:00(图4a),在贵州和湖南南部,地面冷锋触发形成由多单体风暴组成的东西向线状对流,其缓慢南移,结构松散;03:00(图4b),线状对流越过南岭山脉南移至桂林和柳州北部,与前侧新生对流合并,并沿着850 hPa切变线发展,组织性转好,强度加强,最强反射率因子达50 dBz,呈东北—西南走向;04:00(图4c),线状对流下山,进一步组织加强和发展,其前侧反射率因子梯度加大,后侧入流急流加强,逐渐演变成弓形回波形态的飑线,并向东南移动,沿途造成雷暴大风和短时强降雨天气;05:00(图4d),地面冷空气沿湘桂铁路从东北方向移入,致飑线东段回波减弱,西段回波停滞位于桂林市区北部上空(图4d黑色椭圆圈),大于45 dBz的强回波范围变宽,反射率因子梯度趋于均匀,此时地面小时雨强突增,最大达 $95\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$;06:00(图4e),强回波形态发生改变,演变为团块状且呈东南—西北向,同时由于西南急流输送大量的水汽和能量,在天平山脉南侧强迫抬升,促使新单体在强降雨区域西侧不断生成,并在东移过程中加强,后向传播和平流结合导致对流单体反复经过同一区域形成“列车效应”,致使桂林市区北部在05:00—07:00持续受 $\geq 45\text{ dBz}$ 强回波影响,造成桂林秀峰区甲山街道3 h累计雨量达300.1 mm;07:00(图4f),强降雨回波结构逐渐变松散并向南移动,降雨明显减弱。

4.2 中尺度对流系统的结构特征

分析雷达组合反射率因子回波特征(图略)可知,

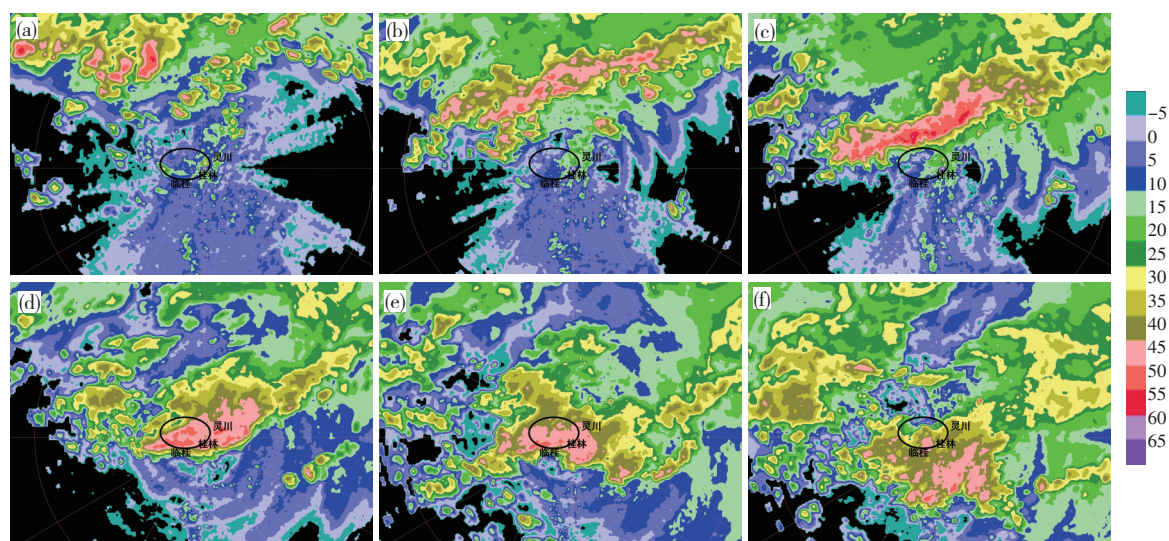


图4 2023年5月22日02:00—07:00(a—f)桂林雷达逐小时组合反射率因子(单位: dBz,黑色椭圆圈为强降雨区域)

Fig. 4 Hourly composite radar reflectivity (unit: dBz) observed by Guilin radar from (a-f) 02:00 BT to 07:00 BT on May 22, 2023

(The black elliptical circle represents areas of heavy rainfall)

先后有3个相对较强的对流单体影响桂林秀峰区甲山街道,与其分钟雨量的三个降雨峰值相对应。对流单体最强回波达55 dBz,速度图(图略)上中高层伴有弱中气旋。桂林秀峰区甲山街道离桂林雷达站仅7 km,受静椎区影响最大探测高度为2.7 km,距柳州雷达130 km,探测高度为2.5—15.3 km,故综合两部雷达探测资料分析产生最强降雨的对流单体,该单体影响时段为5:37—5:55,其中5:48—5:53连续5 min雨量达4 mm以上,最大达6.1 mm。从雷达回波(图5a)可见,反射率因子梯度较小,最强反射率因子为55 dBz,对应剖面(图5b)上,强回波发展高度不高且接地,质心在5 km左右,属于典型的低质心降雨回波,形成高效

率降雨。桂林雷达(图略)2 km以下径向速度辐散,对应强降雨的发生,2.0—2.7 km为辐合。柳州雷达(图5c)9 km以下均表现为径向速度辐合,5 km高度附近辐合最强,与质心高度一致,辐合强度为 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右,表明中层持续的强西南气流为降雨单体提供充足的水汽和动力辐合条件,利于高效降雨的持续;9 km以上呈现为辐散,使得对流上升运动维持和发展。可见强降雨对流单体自下向上表现为低层辐散(0—2 km)、深厚的中层辐合(2—9 km)、高层辐散(9—15 km)的流场结构。这种流场结构(图5c黑色流线所示)使得上升和下沉气流上下错开,利于对流的持续发展和维持。

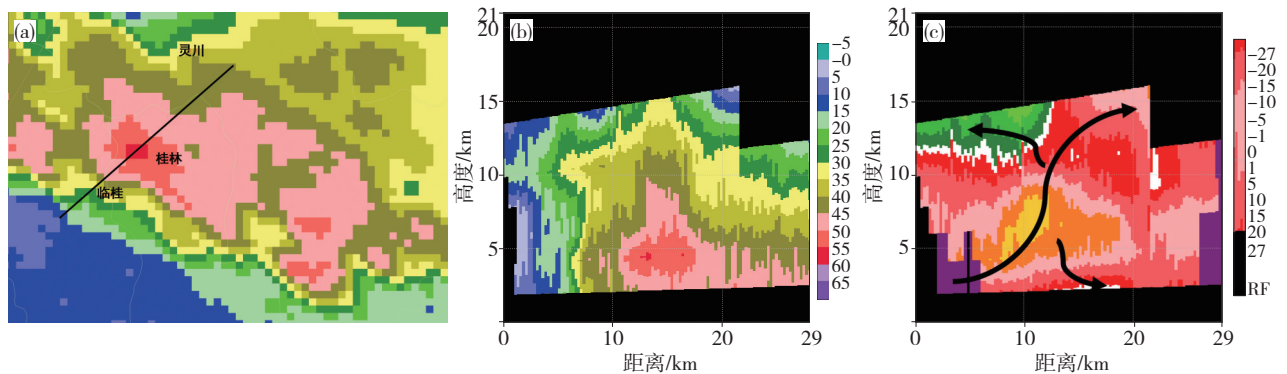


图5 2023年5月22日05:43柳州雷达监测的最强降雨对流单体组合反射率因子(a,单位: dBz)以及沿图5a黑线的反射率因子(b,单位: dBz)和径向速度(c,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,黑色箭头为气流方向)的垂直剖面

Fig. 5 (a) Composite radar reflectivity (unit: dBz) of the strongest precipitation convective cell observed by Liuzhou radar, vertical cross sections of (b) reflectivity (unit: dBz) and (c) radial velocity (the black arrow was the airflow, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) along the black solid line in Fig.5a at 05:43 BT on May 22, 2023

综上,造成强降雨的回波由线状对流演变而成,强回波在桂林市区北部上空形态和移向发生改变并停滞,后向传播和平流结合导致对流单体反复经过同一区域形成“列车效应”,造成极端强降雨;产生极端强降雨的对流单体为低质心高效率降雨回波,流场结构自下向上表现为低层辐散、深厚的中层辐合、高层辐散,利于对流长时间持续发展和维持。

5 强降雨加强和维持机制

5.1 地面冷空气作用

地面冷锋在此次极端强降雨过程中发挥关键作用,冷空气适时加入增强了对流性降雨。22日04:00(图6a),对流回波随低层切变线移至灵川北部上空,同时地面北风沿湘桂铁路沿线到达灵川东北部,此时雨强

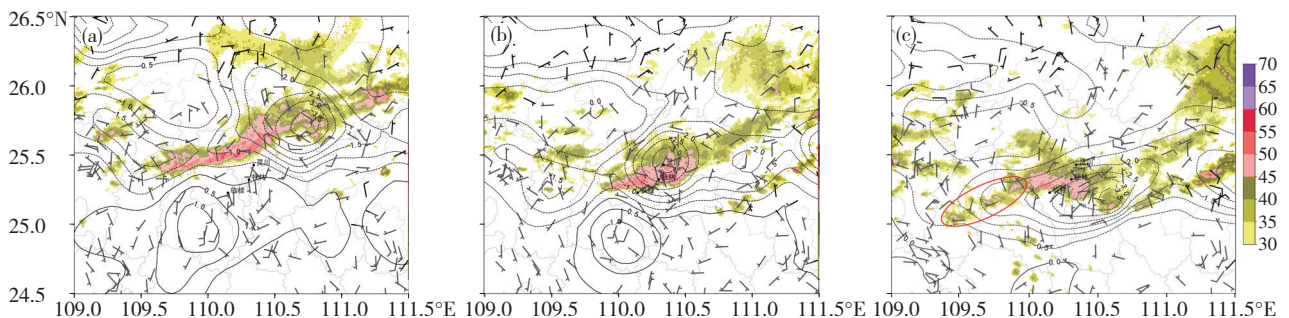


图6 2023年5月22日04:00(a)、05:00(b)、06:00(c)地面风场(风向杆,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)、1 h变温场(等值线,单位: $^{\circ}\text{C}$)和雷达组合反射率因子(阴影,单位: dBz)(图6c红色圆圈表示新生对流触发区域)

Fig. 6 Surface wind field (barb, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), 1-h variable temperature (contour, unit: $^{\circ}\text{C}$), and composite radar reflectivity (shaded, unit: dBz) at (a) 04:00 BT, (b) 05:00 BT and (c) 06:00 BT on May 22, 2023 (The red circle in Fig.6c represents the triggering area of new convection)

突增,最大小时雨强从 $54.7 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ (03:00—04:00)跃升至 $94.9 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ (04:00—05:00),表明冷暖空气交汇加强地面辐合扰动,利于对流性降雨增强;05:00 (图6b),对流回波移至桂林北部上空,地面冷锋也继续南移至桂林,冷空气适时加入增强了对流单体,加剧了对流性降雨,05:00—06:00出现过程最大小时雨强($90.0 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$)。

此外,地面弱冷空气南下与对流性降雨造成的冷池相互叠加,加强冷池出流,在其前沿暖湿区域中触发新生对流。04:00开始,对流性降雨加强,形成冷池(图6a),对流冷池叠加在侵入到湘桂铁路沿线沟谷地段的冷锋上,形成沿沟谷自东北向西南移动的强冷池中心,冷池进入相对开阔的桂林小盆地平原后,其移动速度减慢,冷池前沿暖湿区域中不断有新生对流触

发(图6c红色圆圈中),并沿西南引导气流东北移造成对流系统在桂林市区北部长时间维持。

5.2 对流风暴单体相互作用和合并

对流云合并会引起云体增强、降雨增加,合并受低空辐合、云的水平气压梯度力、云发展强度和单体之间距离等因素影响(翟菁等,2012)。分析雷达回波特征可知,造成极端强降雨的对流风暴存在单体流场相互作用并发生合并。05:42 (图7a),组合反射率因子显示在桂林市区北部上空存在一个反射率因子较强、面积较大的主降雨回波,其西侧沿着天平山山前有多个对流单体发展。沿 270° (图7a中黑色实线)做反射率因子和径向速度剖面(图7d)可知,自西向东有5个对流单体发生发展。单体1产生向后的辐散气流与单

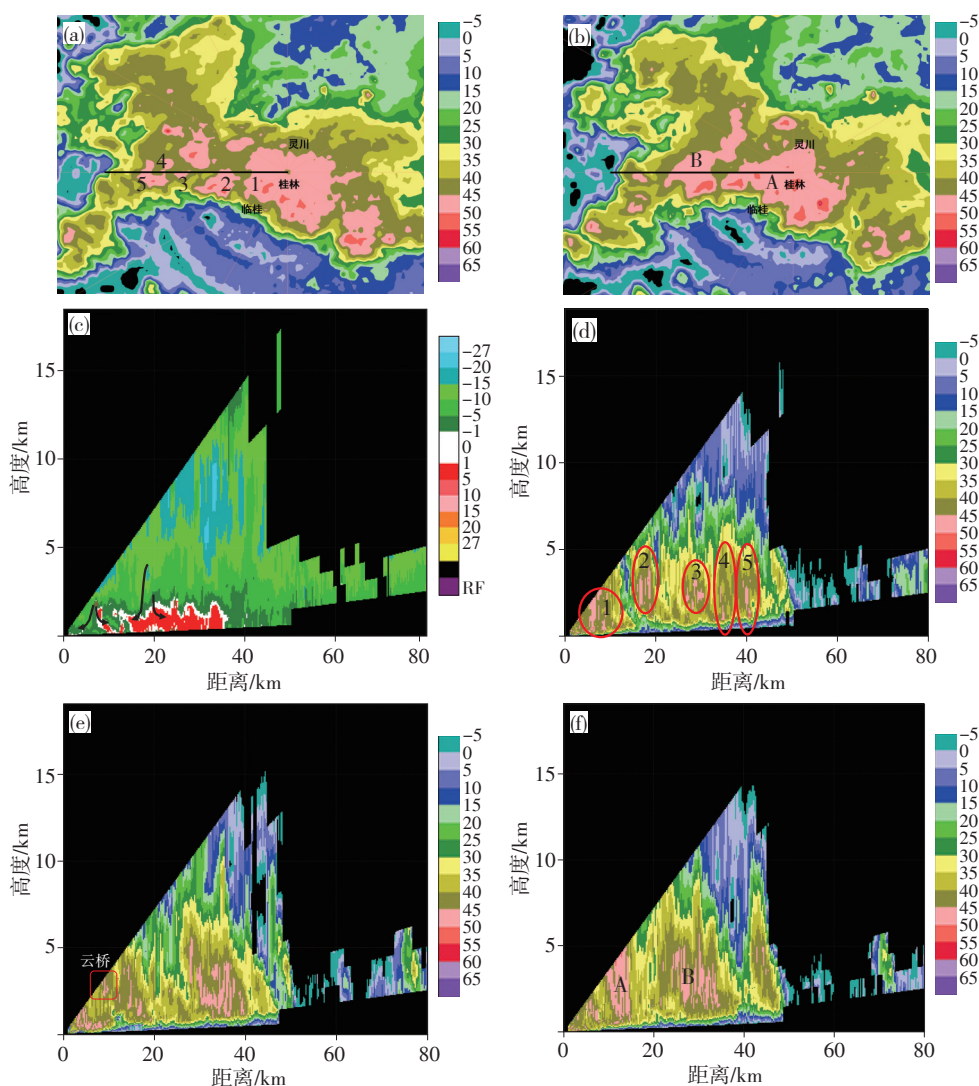


图7 2023年5月22日05:42 (a)、05:54 (b)桂林雷达组合反射率因子(单位: dBz)、沿 270° (图7a黑色实线)05:42 (c)

径向速度(单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)和05:42 (d)、05:48 (e)、05:54 (f)反射率因子(单位: dBz)的垂直剖面图

(图a、d中数字1—5表示单体;图b、f中A、B表示云团)

Fig. 7 Composite radar reflectivity (unit: dBz) at (a) 05:42 BT and (b) 05:54 BT, vertical cross sections of radial velocity (unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) at (c) 05:42 BT and reflectivity (unit: dBz) at (d) 05:42 BT, (e) 05:48 BT, (f) 05:54 BT along 270° (solid black line in Fig.7a or Fig.7b) observed by Guilin Radar on May 22, 2023 (The numbers 1—5 in Fig.7a and Fig.7d represent monomers, A and B in Fig.7b and Fig.7f represent cloud clusters)

单体2产生向前的辐散气流(图7c黑色流线),在两个单体之间形成辐合上升,促进云桥形成和发展,05:48单体1和单体2之间中低层形成云桥(图7e),单体间通过云桥实现合并,05:54组合反射率因子为45 dBz的回波已连在一起(图7b),两个单体通过云桥方式合并形成云团A,合并后对流单体得到发展(图7f),云顶高度明显增加,反射率因子强度也有所增强,合并过程使得云体得到增强。单体3、4、5也在同时发生另一种合并,05:42组合反射率因子平面图(图7a)显示,有几个较弱的小单体靠近在一起且均有所增强,单体之间45 dBz以上的回波开始合并,05:54合并为云团B,且出现50 dBz以上的强回波中心(图7b),单体3、4、5在原地扩大发展最终合并形成云团B(图7f),强度增强,云体扩大导致云体间相互连接并最终实现流体动力场合并,这与付丹红和郭学良(2007)研究发现的“积云存在以云桥方式合并和云体扩大发展合并两种合并方式”相一致。对流合并过程可以引起回波增强、云顶抬高,云水和冰相物质含量增加、地面降雨增加现象(黄勇等,2012;翟菁等,2012)。

综上,西南急流在太平山脉南侧强迫抬升触发新生对流,在东移过程中通过云桥方式合并和云体扩大发展合并两种方式合成新云团并快速发展增强,使得

对流运动加强,从而产生极端强降雨,对流单体之间相互作用和合并是降雨维持和加强的主要机制。

6 极端强降雨过程可预报性

对于此次极端强降雨过程,主、客观预报12 h雨量偏小,落区偏北,漏报了桂林市北部的大暴雨和特大暴雨。结合实况,对中国气象局全球同化预报系统(Global Forecast System of China Meteorological Administration, CMA_GFS)、欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)等大尺度数值模式,以及中国气象局中尺度天气数值预报系统(Mesoscale Weather Numerical Forecasting System of China Meteorological Administration, CMA_MESO)、中国气象局上海数值预报模式系统(Shanghai Numerical Forecasting System of China Meteorological Administration, CMA_SH9)、中国气象局广东数值预报模式系统(GuangDong Numerical Forecasting System of China Meteorological Administration, CMA_GD)等中尺度数值模式进行偏差检验分析。5月21日08:00起报的12 h雨量(5月21日20:00—22日08:00),ECMWF模式(图8b)在柳州和桂林北部预报出

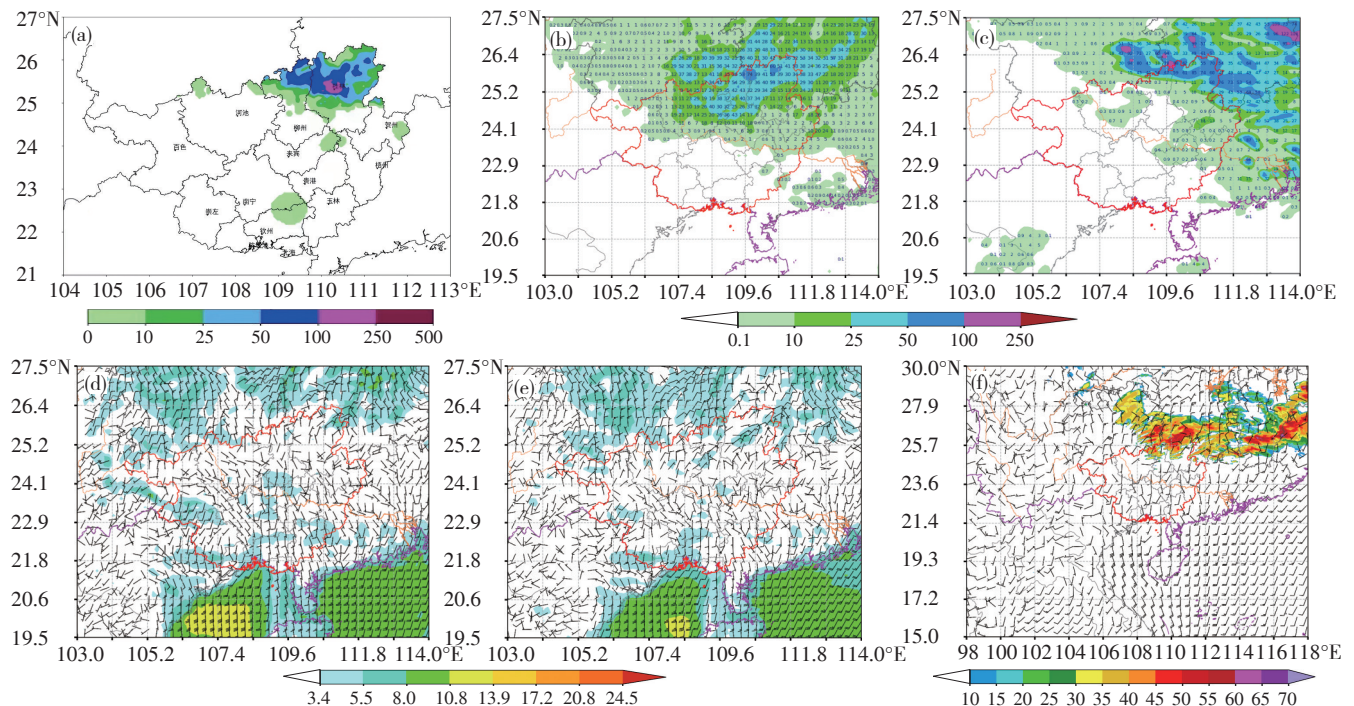


图8 2023年5月21日20:00—22日08:00实况雨量(单位: mm)的空间分布(a), ECMWF (b)、CMA_SH9 (c)模式5月21日08:00起报的12 h雨量(单位: mm)的空间分布, ECMWF模式5月22日02:00 (d)、05:00 (e)起报的12 h 10 m风场(风向杆,阴影为风速,

单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), CMA_MESO模式5月22日02:00起报的12 h反射率因子(阴影,单位: dBz)和10 m风场(风向杆,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) (f)

Fig. 8 Spatial distribution of (a) actual precipitation (shaded, unit: mm) from 20:00 BT May 21 to 20:00 BT on May 22, 2023, and 12 h precipitation forecast (shaded, unit: mm) by (b) ECMWF, (c) CMA_SH9 at 08:00 BT May 21, 2023, and 10-meter wind field forecast (barb, shaded for wind speed, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) by ECMWF at (d) 02:00 BT, (e) 05:00 BT on May 22, and (f) reflectivity (shaded, unit: dBz) and 10-meter wind field forecast (barb, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) by CMA_MESO at 02:00 BT on May 22, 2023

小范围暴雨,在桂林市区北部仅预报大雨,主要是由于预报地面冷空气22日02:00已抵达桂林市区(图8f),05:00快速南移至柳州南部至贺州北部(图8g),冷空气抵达时间较实况(图8a)偏早、移速快,导致预报的累积雨量不大;CMA_GFS模式在桂林市区北部仅预报中雨,也远低于降雨实况(图8c)。值得关注的是,中尺度数值模式预报此次过程局地有大暴雨,但CMA_MESO模式预报强降雨落区(图8d)明显偏北,桂林市区北部仅预报小到中雨,其预报22日02:00冷空气已移过桂林市区,同时10 m风场北风风速较大,达 $8\sim 10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,强反射率因子前沿跟随冷空气快速南下迅速减弱(图8i);CMA_SH9模式预报(图8e)出柳州北局部地大暴雨,但较实况位置偏西偏北,范围也偏小。

因此,确定性大尺度模式对此次极端强降雨过程缺乏预报能力,中尺度模式虽对局地大暴雨有一定体现,但是落区偏差明显,强度较实况偏弱,主要原因是模式预报地面冷空气影响时间出现偏差导致。冷空气影响对降雨的强度和落区起关键作用,5月份冷空气到达广西时已很弱,且该地区地形复杂,确定性预报模式往往对弱冷空气的预报偏差较大,导致对流系统发展和演变的预报出现严重偏差,预报员在使用时很难精准地把握降雨的强度和落区。因此,在短期时效内,预报员在熟悉各家模式性能的基础上,建立分区域极端强降雨概念模型,把握天气系统配置、关键气象要素以及对流系统的发展和演变等细节至关重要。

7 结论与讨论

基于常规观测、地面加密自动站、多普勒天气雷达以及ERA5再分析等资料,对2023年5月22日桂林市区北部发生的极端强降雨过程的环流背景、环境条件、对流演变特征及其加强维持机制进行了分析,得到如下主要结论:

(1) 此次过程发生在四周环山的谷地中,具有短时雨强大、局地性强、降雨系统移动缓慢、极端性和灾害性突出的特点,表现为明显的中尺度特征。

(2) 此次极端降雨发生在副高、低层切变线和地面冷锋南下影响的环流背景下。持续增强的西南急流为桂林输送充足的水汽和能量,桂林上空水汽充沛、不稳定能量大、暖层深厚,为极端降雨的发生和发展提供了良好的水汽和能量条件。

(3) 造成强降雨的回波由线状对流演变而成,线状对流在桂林市区北部上空与地面冷空气适时相遇,移向和形态发生改变并停滞,同时其西侧新生单体发展形成后向传播和平流结合导致对流单体反复经过同一区域形成“列车效应”,造成极端强降雨;产生极端

强降雨的对流单体为低质心高效率降雨回波,流场结构自下向上表现为低层辐散、深厚的中层辐合、高层辐散,利于对流长时间持续发展和维持。

(4) 地面弱冷空气适时入侵增强对流性降雨,并加强冷池出流,在对流回波前沿暖湿区域中触发新生对流,利于对流性强降雨的加强和维持;冷池出流强迫抬升触发新生对流,在东移过程中通过云桥合并和云体扩大发展合并两种方式合并成新云团并快速发展增强,使得对流运动加强,有利于水汽转化从而产生极端强降雨,对流单体之间相互作用和合并是降雨维持和加强的主要机制。

(5) 确定性大尺度数值模式对此次极端降雨过程缺乏预报能力,中尺度模式虽对局地大暴雨有一定体现,但是落区偏差明显,主要原因是模式预报地面冷空气影响时间出现偏差。

需要指出的是,本文仅根据实况资料从观测和天气学角度对极端强降雨的演变、对流单体结构和降雨维持发展机制进行初步分析,其中仍有许多科学问题亟需深入探讨。如锋面和暖区两种不同环流形势下广西北部极端降雨过程的水汽来源、动力机制和能量条件有何差异?冷空气进入的时间和强弱对强降雨发生的地点和强度有多大的影响?桂林地形复杂、地理位置特殊,地形对此次极端降雨过程的影响机制是什么?这些科学问题有待进一步研究。

参考文献(References):

- 陈博宇,谌芸,孙继松,等.2023.诱发四川冕宁“6.26”山洪灾害的突发性暴雨特征及其形成机制[J].大气科学,47(1):1-19. Chen B Y, Chen Y, Sun J S, et al. 2023. Characteristics and formation mechanism of the sudden rainstorm inducing the “6.26” mountain torrent disaster in Mianning, Sichuan Province [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 47(1):1-19 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2201.21186
- 樊李苗,俞小鼎.2013.中国短时强对流天气的若干环境参数特征分析[J].高原气象,32(1):156-165. Fan L M, Yu X D. 2013. Characteristic analyses on environmental parameters in short-term severe convective weather in China [J]. Plateau Meteorology, 32(1):156-165 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2012.00016
- 付丹红,郭学良.2007.积云并合在强对流系统形成中的作用[J].大气科学,31(4):635-644. Fu D H, Guo X L. 2007. The role of cumulus merger in a severe mesoscale convective system [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 31(4):635-644 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2007.04.08
- 《广西天气预报技术和方法》编写组.2012.广西天气预报技术和方法[M].北京:气象出版社:3,42,272. Writing Group of “Guangxi Weather Forecast Technology and Methods”. 2012. Guangxi weather forecast technology and methods [M]. Beijing: Meteorological Press:3,42,272 (in Chinese)
- 贺晓露,郝元甲,祁海霞,等.2023.湖北“8.12”极端降水特征及成因初探[J].

- 暴雨灾害,42(1):13–23. He X L, Hao Y J, Qi H X, et al. 2023. Analysis of characteristics and causes of “8.12” extreme precipitation in Hu-bei Province [J]. *Torrential Rain and Disasters*,42(1):13–23 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022–109
- 黄勇,覃丹宇,邱学兴.2012.暴雨过程中对流云合并现象的观测与分析[J].*大气科学*,36(6):1135–1149. Huang Y, Qin D Y, Qiu X X. 2012. Study of convective cloud merger in heavy rain using multi-observation data [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 36(6):1135–1149. doi:10.3878/j.issn.1006–9895.2012.11191
- 刘嘉慧敏,潘留杰,郭大梅,等.2023.商洛金丝峡“6.26”极端短时强降水成因分析[J].*暴雨灾害*,42(6):659–669. Liu J H M, Pan L J, Guo D M, et al. 2023. Comprehensive analysis of the extreme short-time heavy rain event on 26 June 2022 in Jinsi Gorge, Shangluo [J]. *Torrential Rain and Disasters*,42(6):659–669 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022–256
- 蒲义良,卢栩诗,胡胜,等.2023.华南沿海一次暖区特大暴雨的对流特征和发展机制分析[J].*气象*,49(2):201–212. PU Y L, Lu X S, Hu S, et al. 2023. Convective characteristics and development mechanisms of an extreme warm-sector rainfall in the coastal area of South China [J]. *Meteorological Monthly*,49(2):201–212 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000–0526.2022.090601
- 许霖,姚蓉,陈红专,等.2020.2017年湖南一次极端降雨过程特征及成因分析[J].*沙漠与绿洲气象*,14(1):31–39. Xu L, Yao R, Chen H Z, et al. 2020. Characteristics and causation of an extreme rainfall in 2017 in Hunan Province [J]. *Desert and Oasis Meteorology*,14(1):31–39 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002–0799.2020.01.004
- 杨涵洧,龚志强,王晓娟,等.2021.中国东部夏季极端降水年代际变化特征及成因分析[J].*大气科学*,45(3):683–696. Yang H W, Gong Z Q, Wang X J, et al. 2021. Analysis of the characteristics and causes of interdecadal changes in the summer extreme precipitation over Eastern China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*,45(3):683–696. doi:10.3878/j.issn.1006–9895.2007.19247
- 翟菁,胡雯,冯妍,等.2012.不同发展阶段对流云合并过程的数值模拟[J].*大气科学*,36(4):697–712. Zhai J, Hu W, Feng Y, et al. 2012. Numerical simulations of convective cloud merging processes at different development stages [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*,36(4):697–712 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006–9895.2012.11096
- Li J, Wang B. 2018. Predictability of summer extreme precipitation days over eastern China [J]. *Climate Dynamics*,51(11):4543–4554. doi:10.1007/s00382–017–3848–x
- Limsakul A, Singhruck P. 2016. Long-term trends and variability of total and extreme precipitation in Thailand [J]. *Atmospheric Research*,169:301–317. doi:10.1016/j.atmosres.2015.10.015
- Wang Y B, Chen Y D, Min J Z. 2019. Impact of assimilating china precipitation analysis data merging with remote sensing products using the 4Dvar method on the prediction of heavy rainfall [J]. *Remote Sensing*,11(8):973–973. doi:10.3390/rs11080973
- Yazid M, Humphries U. 2015. Regional observed trends in daily rainfall indices of extremes over the Indochina Peninsula from 1960 to 2007 [J]. *Climate*,3(1):168–192. doi:10.3390/cli3010168
- Zhang Q, Luo Y, Tang Y, et al. 2022. Cause-effect relationship between meso- γ -scale rotation and extreme short-term precipitation: observational analyses at minute and sub-kilometer scales [J]. *Journal of Meteorological Research*,36(4):539–552. doi:10.1007/s13351–022–2028–z
- (责任编辑 唐永兰)