

翟舒楠,黄伊曼,刘国忠,等.一次多类型降雨组成的暴雨成因及预报偏差分析[J].气象研究与应用,2022,43(3):83-87.

Zhai Shunan, Huang Yiman, Liu Guozhong, et al. Analysis on cause and prediction deviation of a rainstorm process composed of multiple types of rainfall[J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2022, 43(3): 83-87.

一次多类型降雨组成的暴雨成因及预报偏差分析

翟舒楠, 黄伊曼*, 刘国忠, 陈 见, 黄 荣

(广西壮族自治区气象台, 南宁 530022)

摘要: 2021年5月12—13日广西出现了一次多类型降雨组成的暴雨过程,成因复杂,预报偏差大,有必要进行诊断分析。利用多源气象资料进行多尺度诊断分析,结果表明:(1)此次过程是在高空槽、低层切变线、偏南急流及地面弱冷空气共同作用下发生的,包含冷锋、静止锋及暖区三种降雨类型。(2)锋面上对流不断生消发展、移动缓慢及列车效应导致桂东北锋面暴雨。锋前中尺度对流系统移速慢、质心低及降水效率高造成桂南暖区暴雨。(3)模式对锋面对流预报偏差是降水偏差的一个重要原因,模式对越南北部带状降水的预报可作为暖区对流初生的一个指标。

关键词: 锋面暴雨;暖区暴雨;多尺度分析;预报偏差

中图分类号: P458.121

文献标识码: A

doi: 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2022.3.15

引言

受高空短波槽、低层切变线、偏南急流及地面弱冷空气共同影响,2021年5月11日20时—13日20时(北京时,下同)桂东、桂南出现了大雨到暴雨、局地大暴雨到特大暴雨的强降雨过程并伴有短时雷暴大风、冰雹等强对流天气,其中桂东北为锋面暴雨,桂南为锋前暖区暴雨。暴雨导致桂林、柳州、河池3市15县(区)出现不同程度洪涝灾害。

数值模式能预报出此次暴雨过程的锋面降雨但强降雨落区和强度出现了偏差,暖区暴雨出现了漏报,以至于预报中没能充分认识到桂南暖区暴雨过程的发生,给服务带来了较大的影响,因此在前人研究成果的基础上^[1-13],有必要深入分析此次过程的成因和预报偏差,揭示其机理,为精准预报、精细服务提供支撑。

1 资料与方法

利用2021年5月10—13日中尺度气象站观测、高空地面常规观测、多普勒天气雷达探测及FY-

4A卫星遥感等观测资料及ECMWF全球模式(以下简称EC)和CMA广东模式(以下简称CMA_GD)5月10日20时和11日20时起报的风场、高度场、雷达组合反射率和12h雨量预报资料,运用天气学原理和方法对此次过程的成因进行多尺度综合分析,利用误差分析方法对两家数值模式预报产品进行检验,分析暴雨落区预报偏差原因。

2 降水实况特征

据统计,5月11日20时—13日20时,全区出现399站暴雨、172站大暴雨、2站特大暴雨,最大降雨量在融安长安气象观测站达283.4mm,最大小时雨量在13日07时资源两水气象观测站达88.8mm。百色、河池、桂林、崇左、南宁等市出现冰雹;11市34县(区)出现8级以上大风。可见,此次强降水过程具有强对流天气范围广、累计雨量大、局地降雨猛的特点。

3 天气形势及环境条件

3.1 天气形势分析

5月10—13日500hPa亚欧中高纬为纬向环

收稿日期:2022-06-24

基金项目:广西气象科研计划项目(桂气科2022M09)、广西极端暴雨形成机理及预报技术研究创新团队项目

作者简介:翟舒楠(1993—),女,工程师,硕士,主要从事中短期和短临天气预报与研究。E-mail:zsn407850425@qq.com

*通讯作者:黄伊曼(1997—),女,主要从事短临天气预报与研究。E-mail:995217383@qq.com

流,西太平洋副热带高压(以下简称“副高”)呈带状稳定维持在南海北部,广西位于副高西北侧。由于副高阻挡南支槽东移,南支槽稳定维持在孟加拉湾附近,宽槽上不断有小槽分裂东移为暴雨的产生提供了有利的动力条件。南支槽和副高的稳定维持,有利于形成西南方向的水汽通道及槽前正涡度区的维持。

有利的大气环流背景下,11 日夜间,500hPa 南支槽上小波动东移,槽前云系影响桂东北,850hPa 切变线东段由黔桂交界处缓慢南压,地面冷空气渗透南下影响桂东北,强降水开始。12 日白天,切变线在桂东北摆动,使水汽得以不断补充,其南侧偏南气流有所增强,有利于强降雨的持续。

12 日夜间,500hPa 南支槽上再次有小波动东移,影响桂东北云系增强,由于冷空气较弱,850hPa 切变线北抬至黔桂交界处,地面图上暖湿气流与冷空气在桂东北对峙形成静止锋,降水再度加强。13 日 08 时,西南气流加强为急流,桂林站测得风速达 $20\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,有利于热量和水汽源源不断地向暴雨区输送。

值得注意的是,12 日夜间,云南蒙自为西北风,与越南北部的西南风形成气旋性切变,同时西南风与越南北部的喇叭口地形呈约 45° 夹角,地形的抬

升作用有利于对流的触发。13 日凌晨,东移的小波动槽底偏南,与副高西侧偏南气流叠加,气流辐合加强,并在同一区域叠加在 850hPa 西南急流之上,形成线状强回波,导致桂南暖区暴雨发生。

3.2 环境条件

分析每日暴雨中心附近探空站的物理量(表 1),暴雨发生前对流有效位能(CAPE)为 $253.2\sim 2931.8\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$,积聚了较大的不稳定能量,通过对比可以看出,冷锋和暖区的 CPAE 要远大于静止锋;对流抑制有效位能(CIN)为 $32.7\sim 145.4\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$,均较小,冷锋和暖区的 CIN 要小于静止锋,有利于能量聚集和对流发展突破自由对流高度;抬升凝结高度和自由对流高度均比较低,暖云层深厚,有利于暴雨的触发和高效率降水; $0\sim 6\text{km}$ 垂直风切变为 $13.9\sim 26.0\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,较强的垂直风切变有利于倾斜对流的发展和维持。

暴雨发生前,广西地面气温 $28\sim 37^\circ\text{C}$,地面露点温度 $22\sim 27^\circ\text{C}$ 。850hPa 比湿 $15\sim 18\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,有一定的湿层,且冷锋暴雨前的湿层厚度要远小于暖区和静止锋暴雨前,在一定的触发条件作用下很容易产生短时强降水。从地面至低层,大气处于高温高湿、层结不稳定的状态,有利于暴雨的发生和持续。

表 1 暴雨前强降雨中心附近探空站物理量

时间	附近探空站 (站号)	CAPE $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$	CIN $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$	抬升凝结 高度/hPa	自由对流 高度/hPa	$0\sim 6\text{ km}$ 垂直 风切变/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	湿层起止高度 及厚度/hPa
11 日 20 时	桂林(57957)	2931.8	32.7	890.6	860.6	20.3	850~819(31)
12 日 20 时	桂林(57957)	253.2	145.4	921.9	707.9	13.9	986.1~594(392.1)
	南宁(59431)	2836.2	40.9	927.7	803.7	15.9	986~785(201)
13 日 08 时	北海(59644)	1399.2	0	985.6	1005.1	26.0	1006~489(517)

4 中尺度对流系统的触发、演变及特征

此次暴雨过程包含了冷锋、静止锋及暖区三种暴雨类型,由于冷锋和静止锋暴雨具有类似特征且静止锋暴雨相对降雨范围小,因此着重分析 12 日冷锋暴雨及 13 日暖区暴雨前后对流系统的演变和发展特征。

4.1 桂东北冷锋暴雨对流系统演变及发展特征

11 日 20:15 在地形抬升作用下,元宝山附近和贵州东南部各有一中尺度对流云团 A 和对流云团

B 生成,云团 A 生成后迅速发展。21:15 东移的云团组合 A 与桂林东北部的云团 C 合并。由于地面东北风和东南风辐合线作用,山前的弱回波地区不断有新对流云团生成并迅速发展汇入云团 A,雷达图上表现为直线型回波带的上风方不断有组合反射率 $(\text{CR})\leq 45\text{dBZ}$ 的对流单体生成后合并汇入,强降雨区较局地。地面图上,融水一带出现了 $2\sim 4^\circ\text{C}$ 的降温,冷池的形成有利于对流的触发和维持^[12,14,15]。

随着天气系统加强缓慢东南移,云团 AC 及云团 B 在东移南压过程中云盖不断向下风方向扩展,

回波中心强度增大至 55dBZ, 云系发展为密实的团状结构。23:00 云团 B 与云团 AC 合并为东西向中尺度对流系统云带, 云团范围继续扩大, 云顶亮温(TBB)最低值持续下降, 雷达回波为直线型回波带中镶嵌强回波区, 降雨为直线型雨带中镶嵌强降雨区。11 日 23 时—12 日 02 时云团中分散的最低云顶亮温 $\leq 200\text{K}$ 区域发展为连片密实的云顶亮温带, 最低云顶亮温为 188~195K, 云带明显增强, 强降水区与 TBB 梯度大值区重合, 01 时桂东北出现最大小时雨量 $85.2\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$, 为当日最大小时雨量。02—05 时云团有所减弱, 最低云顶亮温逐渐升高至 200K 以上, 桂东北最大小时雨量减弱为 $40\sim 60\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$, 在 TBB 低值中心附近有偏北风与偏南风的地面中尺度辐合线, 辐合线走向与锋面几乎垂直。雷达图上最低云顶亮温附近的回波为混合型回波, 45~50dBZ 强回波呈弧形, 与辐合线走向一致, 降雨为宽雨带前侧弧型强降雨带。08 时后, 随着云团逐渐东移出桂东北, 强降水趋于减弱结束。

分析 12 日 00:18 沿锋面的剖面可见, 11 日 20 时桂林站 0°C 高度为 5.1km, 雷达回波强度 30dBZ 伸展高度可达 10km, 45dBZ 以上的强回波从 1.5~7.5km, 最强回波 55dBZ 位于 4.5km 附近, 强回波中心质心位于 4km 左右, 对流发展高度高, 强回波大部位于 0°C 附近, 具有偏冷云回波的特征。冷锋暴雨期间, 强雷达回波区始终保持着东西走向, 并在槽前西南偏西气流引导下缓慢东传, 同时随锋面和切变线南压, 由于锋面移动缓慢, 锋面上不断有对流触发、合并、发展、消亡, 列车效应明显, 降雨时间长, 累积雨量大。

4.2 桂南暖区暴雨对流系统演变及发展特征

12 日 22:15 在越南北部距离凭祥西侧大约 150 km 处有对流云团 A 生成并在原地以团状形态迅速发展壮大。在槽前西南气流引导下, 云团 A 缓慢东北移, 23:30 与云南西南侧的东北—西南向带状云系首次合并加强, 13 日 01:45 对流云团迅速发展成中尺度对流复合体(MCC), 最低云顶亮温下降至 180K。03 时 MCC 强中心移入凭祥, MCC 进入强盛阶段, 最低云顶亮温为 194K, 雷达图上可见南北向块状回波移入桂西, 最强回波增强至 50dBZ, 强降水区与 TBB 低值中心重合, 凭祥最大小时雨量骤升至 $60\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。05:24 北部湾海面上有新的对流单体生成, 其向东北方向移动过程中迅速发展汇入 MCC 形成二次合并加强。08 时桂东南 850hPa 与地面场均存在风向的

辐合, 在此有利的条件下, MCC 东南部再次加强, 最低云顶亮温迅速下降至 192K, 在辐合线附近有最大 $\text{CR}\geq 50\text{dBZ}$ 积云发展组织成的弓形雷达回波, 回波后为大片层状云回波区, 08:30 飑线形成, 09 时桂南出现最大小时雨量 $86.4\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。新生单体不断从强回波上风方生成, 表明中尺度对流系统具有后向传播的特征, 系统移速慢, 列车效应明显。随着边界层急流和低空急流北推, 09:30MCC 开始减弱, 强降水趋于减弱结束。

分析 13 日 08:18 沿飑线的剖面可见, 13 日 08 时南宁站 0°C 高度为 5.4km, 雷达回波强度 30dBZ 平均高度接近 10km, 45dBZ 以上的强回波从 0~6km, 最强回波 50dBZ 大部位于 5km 以下, 强回波中心质心位于 2.5km 附近, 对流发展高度高, 强回波大部位于 0°C 以下, 具有暖云回波的特征。暖区暴雨期间, 中尺度对流系统具有后向传播的特点, 强雷达回波具有弓形特征, 飑线东移速度较慢, 列车效应明显, 小时雨量大。

5 降水预报偏差及成因分析

5.1 强降水过程预报

对 EC 和 CMA-GD 不同起报时间的降水预报检验后发现, EC 预报的降水范围明显偏大, 桂东北暴雨以上量级降水预报明显估计不足, 且白天预报误差较夜间大, 桂南强降水完全漏报。值得一提的是, EC 对 24—72h 时效均在越南北部预报了带状降水, 这可能是模式对暖区对流初生的一个指示。与 EC 相比, CMA-GD 对桂东北降水量级的预报更接近实况, 夜间的降水把握较好, 白天误差较大, 对于锋面降水的预报要优于暖区降水, 13 日白天的降水预报效果最差, 桂南强降水完全漏报。

5.2 预报偏差原因分析

5.2.1 桂东北锋面降水预报偏差

EC 预报 12 日南支槽缓慢东移, 槽前西南风偏弱, 中空急流偏弱导致动力辐合偏小, 模式预报的降水偏弱。850hPa 切变线和地面冷锋是 12 日桂东北锋面暴雨对流触发的主要动力系统。EC 预报 12 日切变线北抬, 低层我区受偏南急流影响, 桂北有风速辐合, 对流触发机制以南风急流脉动为主, 与实况差别较大。10m 风场上 EC 预报 12 日 08 时锋面北抬至黔桂交界处, 广西转为偏南风影响。锋面北抬时间偏早, 导致 11 日夜间桂东北降水偏弱, 12 日白天桂东北暴雨漏报。由此可见, EC 对低层对流触发系

统的预报偏差是其降水偏弱的一个重要原因。

CMA-GD 预报对流在贵州触发后南压进入桂北的时间偏晚且未预报出回波进入广西后南压的过程,导致模式预报 11 日夜间桂东北降水落区偏北偏东,12 日白天降水偏弱。对其 500hPa 形势场检验后发现,CMA-GD 预报桂北主要受偏西气流影响且风速偏弱,中层引导气流偏西导致对流以西行为主,南移分量较小,强降水落区偏北。从 850hPa 风场的检验来看,CMA-GD 同样预报 12 日切变线北抬,低层广西偏南气流加强为急流,与实况相差较大。此外,CMA-GD 还预报桂西北有暖式切变线的存在,导致其强降水报在暖式切变线附近。由此可见,与 EC 类似,CMA-GD 对低层对流触发系统的预报偏差是其降水落区有偏差的一个重要原因。

5.2.2 桂东北锋面降水及桂南暖区降水预报偏差

850hPa 偏南急流是 13 日桂东北锋面暴雨及桂南暖区暴雨对流触发的主要动力系统之一。EC 预报急流轴偏西,出口区偏北且风速偏小,急流偏弱导致动力辐合和水汽辐合偏小,预报的降水偏弱。此外 EC 预报桂西 850hPa 比湿偏大,各层比湿大值区也均位于中南半岛北部-桂西一带,导致其较强降水报在比湿大值区附近。对于桂东北的锋面暴雨,地面准静止锋是另一主要影响系统。EC 预报 12 日夜间锋面位置偏北导致桂东北降水偏弱。对于桂南的暖区暴雨,地面辐合线的作用不可忽视。实况上 13 日白天桂南有两条辐合线长时间维持,这有利于对流不断地触发、发展,EC 未预报出辐合线的存在是桂南暖区暴雨漏报的重要原因之一。

对于桂东北的锋面暴雨,CMA-GD 预报回波触发位置偏西,南压位置偏南,导致模式预报 12 日夜间桂东北降水落区偏西偏南。对于桂南的暖区暴雨,模式并未预报出云南南部至越南北部触发后东移进入桂西南的对流回波,导致桂南暖区暴雨漏报。对其 850hPa 风场检验后发现,CMA-GD 预报 12 日夜间急流出口区偏南且南风偏弱,导致模式预报 12 日夜间桂东北降水落区偏南。对于桂南的暖区暴雨,与 EC 类似,CMA-GD 未预报出辐合线的存在,动力辐合条件偏弱,导致桂南暖区暴雨漏报。

6 结论

利用多源气象资料对 2021 年 5 月 12—13 日暴雨过程进行多尺度特征分析,获得主要结论如下:

(1)此次暴雨过程包含冷锋、静止锋及暖区三种

降雨类型。南支槽稳定维持在孟加拉湾附近为暴雨提供了有利的环流背景;850hPa 切变线和地面冷空气是冷锋暴雨触发的主要动力系统;暖湿气流与冷空气对峙形成静止锋触发了静止锋暴雨;引起暖区暴雨的主要系统为偏南急流和地面辐合线。

(2)锋面暴雨为东移南压的带状云系和线状回波,锋面上对流不断触发、合并、发展、消亡,移动缓慢,列车效应明显,影响时间长是暴雨的主要原因。暖区暴雨为东移的团状云系和弓形回波,中尺度对流系统东移缓慢,对流主体具有低质心的暖云强降水特点,小时雨量大是暴雨的主要原因。

(3)对于锋面降水,EC 能预报出雨带的位置和走向但量级偏小,CMA-GD 对降水量级的预报要较 EC 准确,但范围偏大。因此,遇到相似形势时可在全球模式预报的基础上,参考中尺度模式调整量级。模式对低层对流触发系统的预报偏差是降水落区和量级有偏差的一个重要原因。

(4)对于暖区暴雨,不论是全球模式还是中尺度模式可预报性都较差,若遇到相似形势且 EC 预报越南北部有带状降水时,需警惕越南北部至云南部一带是否有对流生成、发展并东移影响广西。

参考文献:

- [1] 刘国忠,周云霞,覃月凤,等.2020 年广西暴雨灾害天气综述与分析[J].气象研究与应用,2021,42(1):101-106.
- [2] 黄土松.华南前汛期暴雨[M].广州:广东科技出版社,1986:212-244.
- [3] 吴乃庚,温之平,邓文剑,等.华南前汛期暖区暴雨研究新进展[J].气象科学,2020,40(5):605-616.
- [4] 覃武,刘国忠,赖珍权,等.华南暖区暴雨预报误差及可预报性探讨[J].气象,2020,46(8):1039-1052.
- [5] 刘国忠,赖珍权,钟祥平,等.“15·7”广西超长持续性暴雨过程多尺度特征分析[J].热带气象学报,2017,33(3):357-367.
- [6] 张萍萍,孙军,董良鹏,等.2016 年湖北省一次暖区极端降水过程预报偏差分析[J].气象与环境学报,2018,34(5):1-8.
- [7] 符娇兰,陈双,沈晓琳,等.两次华北冷涡降水成因及预报偏差对比分析[J].气象,2019,45(5):606-620.
- [8] 王盛繁.2017 年 7 月初广西极端暴雨过程诊断分析[J].气象研究与应用,2019,40(3):18-21.
- [9] 周云霞,翟丽萍,何珊珊.2019 年“5·27”广西靖西市极端暴雨成因及可预报性分析[J].气象研究与应用,2020,41(2):68-74.
- [10] 林开平,陈伟斌,刘国忠,等.广西暴雨业务预报技术回

- 顾与展望[J]. 气象研究与应用, 2020, 41(4): 13–19.
- [11] 刘瑞鑫, 孙建华, 傅慎明. 不同类型华南暖区暴雨过程的环流特征[J]. 气候与环境研究, 2021, 26(4): 359–373.
- [12] 中国气象局. 全国高影响天气监测预报服务技术复盘(2021年)[M]. 北京: 气象出版社, 2021: 27–104.
- [13] 李华实, 马智, 黄秋丰, 等. 广西天等县“5·28”极端特大暴雨中尺度成因初探[J]. 气象研究与应用, 2022, 43(1): 101–106.
- [14] 徐姝, 东高红, 熊明明. 冷池对引发新乡“7·9”特大暴雨的中尺度对流系统的影响分析[J]. 气象, 2019, 45(10): 1426–1438.
- [15] 刘艳杰, 王清川, 许敏, 等. 2019年5月北京一次强降水超级单体特征及成因分析[J]. 气象与环境学报, 2021, 37(4): 9–17.

Analysis on cause and prediction deviation of a rainstorm process composed of multiple types of rainfall

Zhai Shunan, Huang Yiman*, Liu Guozhong, Chen Jian, Huang Rong
(Guangxi Meteorological Observatory, Nanning 530022, China)

Abstract: A rainstorm process consisting of multiple types of rainfall occurred in Guangxi from 12 to 13 May, 2021. Owing to the complexity and large forecast deviations of this rainstorm, it is necessary to carry out multi-scale diagnostic analysis based on multi-source data. The results show that: (1) The process occurred under the combined effect of high-altitude trough, low-level shear line, southerly jet, and weak cold air on the ground. The rainstorm includes three types of rainstorm: cold front rainstorm, stationary front rainstorm and warm-area rainstorm. (2) The continuous growth, disappearance, development, slow movement and train effect of convection on the front are the main causes of the frontal rainstorm in the northeast of Guangxi. The slow-moving mesoscale convective system, low center of convection and high precipitation efficiency are the main causes of the warm-area rainstorm in southern Guangxi. (3) The forecast deviation of the frontal convection in the numerical model is an important reason for the precipitation deviation, and the banded precipitation in northern Vietnam is an indication of the convective initiation in the warm areas.

Key words: frontal rainstorm; warm sector rainstorm; multi-scale analysis; forecast deviation