

蒋亚平,农明哲,马智,等. 2022 年广西“6·11”极端暴雨成因及预报偏差分析[J]. 气象研究与应用,2023,44(1):57–63.

Jiang Yaping, Nong Mingzhe, Ma Zhi, et al. Analysis of the causes and forecast deviations of the extreme rainstorm in Guangxi on June 11, 2022[J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2023, 44(1): 57–63.

## 2022 年广西“6·11”极端暴雨成因及预报偏差分析

蒋亚平, 农明哲, 马智, 郭彬, 陆小晓, 黎福仁

(崇左市气象局, 广西 崇左 532200)

**摘要:** 利用常规气象观测和 NECP 再分析资料, 对广西 2022 年 6 月 11 日极端暴雨过程进行分析, 结果表明: (1)本次过程具有暴雨范围广、累积雨量大、极端性强、致灾性高和双雨带的特点; (2)边界层侵入的浅薄冷空气是桂中雨带的重要触发机制, 而桂南雨带则是由超低空急流脉动配合海陆地形的影响共同触发; (3)中尺度对流系统的有组织发展, 以及回波在后向传播移动过程中形成“列车效应”, 同时配合季风爆发带来的充沛水汽供应和低质心暖云高效率降水是造成多地出现极端暴雨的重要原因; (4)在暖区降水的预报中, CMA-GD 和 CMA-MESO 模式往往有较好的表现, 预报员需加强中尺度模式的分析应用, 警惕中尺度模式预报中突发的对流系统, 有利于提高极端暴雨的预报能力。

**关键词:** 极端暴雨; 暖区暴雨; 季风; MCC; “列车效应”

**中图分类号:** P458.1+21.1

**文献标识码:** A

**doi:** 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2023.1.10

### 引言

暴雨是我国常见的灾害性天气之一, 是造成山洪和城市内涝的主要天气类型<sup>[1-3]</sup>。受全球变暖和人类活动等因素的影响, 极端暴雨事件频发, 加剧了因暴雨引发的灾害事件的发生频率和强度, 其造成的影响越发成为各方关注的热点<sup>[4-5]</sup>, 因此极端暴雨形成机制的研究和预报服务方法的改进越来越成为天气预报科研工作的重点和难点, 也取得了很多有用的研究成果<sup>[6-8]</sup>, 如对郑州“7·20”极端暴雨的研究; 苏爱芳等<sup>[9]</sup>认为极端暴雨过程一般发生在稳定的大尺度天气形势下, 充沛的水汽供应和充足的能量是其重要条件; 段汀等<sup>[10]</sup>研究发现低空急流与郑州强降水在时间上有明显同步, 急流在地形作用下产生的辐合抬升在暴雨区形成强烈的垂直上升运动, 对极端暴雨的产生和维持有明显的影

响; 冉令坤等<sup>[11]</sup>认为中尺度云团合并小尺度云团, 发展成结构密实的孤立云团, 稳定少动, 对极端暴雨形成至关重要。

广西位于华南西部, 是暴雨灾害最严重的省份之一, 近年来针对广西的暴雨研究也取得了一些成

果, 蔡悦幸等<sup>[12]</sup>在研究广西持续性暴雨的气候特征时发现大气环流的经向度增加有利于冷空气南下到达广西北部与暖空气交汇, 诱发暴雨产生; 周云霞等<sup>[13]</sup>在研究广西靖西市“5·27”极端暴雨时指出, 低质心暖云降水回波形成的列车效应往往是极端暴雨产生的直接原因; 黄滢等<sup>[14]</sup>在研究广西一次持续性暖区暴雨特征时指出低空急流脉动是暖区暴雨的重要触发机制; 张凌云等<sup>[15]</sup>在研究柳州 2020 年一次“龙舟水”成因时强调地面中尺度辐合线是暴雨触发的重要机制, 迎风坡地形抬升和喇叭口地形收缩对暖区暴雨有重要增幅作用; 林确略等<sup>[16]</sup>在双雨带过程中的回流暖区暴雨个例对比研究中, 发现边界层较大水平螺旋度与回流暖区暴雨有良好对应关系, 对回流暖区暴雨预报有较好指示意义。这些研究成果对于提高广西暴雨天气预报水平具有很好的借鉴和促进作用。

2022 年 6 月 11 日广西出现了一次极端暴雨天气, 局地日降雨量达到 314.8mm, 打破了当地降雨历史极值并致使多地出现洪涝灾害。因此, 利用常规气象资料和 NECP 再分析资料对此次暴雨过程的触发机制和极端性成因进行分析, 有利于加深对广西汛期暴

收稿日期: 2022-11-25

基金项目: 广西壮族自治区气象局面上项目(桂气科 2023M29)、崇左市气象局面上项目(崇气科 202101)

作者简介: 蒋亚平(1993—), 男, 工程师, 主要从事中短期天气预报服务。E-mail: lovjiangyp@sina.com

雨的认识,为今后广西暴雨预报累积经验和提供参考。

1 资料与方法

文中采用常规气象观测资料、区域站逐小时观测资料、FY-4 卫星观测资料、北海和柳州多普勒天气雷达资料和 6h 一次的美国国家环境预报中心(NCEP)再分析资料。研究方法主要是常规天气分析、中尺度天气分析和动力诊断分析方法。

2 结果与分析

2.1 降水实况及特征分析

2022 年 6 月 10 日 20 时至 11 日 20 时,广西出现了一次极端暴雨天气,强降水主要分布在桂中和桂南沿海两条雨带。据统计,日雨量超过 50mm 有 357 个乡镇,其中超过 100mm 有 84 个乡镇,超过 250mm 有 3 个乡镇,最强降水出现在来宾市兴宾区大湾镇 314.8mm,打破该站建站以来日雨量历史记录。

从部分乡镇的小时雨量来看(图 1),最强降雨时段主要集中在 10 日 21 时至 11 日 05 时,多个站点多个时次小时雨量超过 50mm,最大小时雨量出现在 11 日 04 时,北海市海城区涠洲镇达到 108.7mm,最大 3h 雨量达到 194mm(合浦县星岛湖镇)。可见,

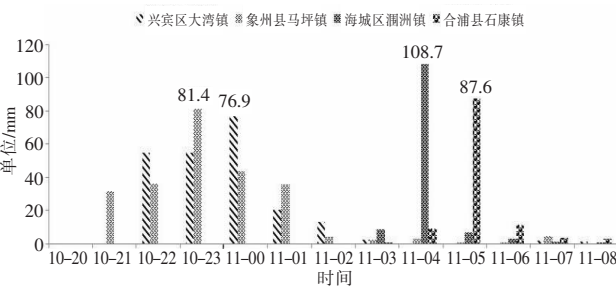


图 1 2022 年 6 月 10 日 20 时至 11 日 08 时  
广西部分乡镇逐小时降水量

此次过程降水强度大、持续时间长,具有极端性和致灾风险高特点。

2.2 大尺度环流背景及环境条件分析

2.2.1 环流背景分析

2022 年 6 月 10 日 20 时,500hPa 贝加尔湖一带有冷涡存在,其南部深槽一直延伸到广西中部;200hPa 南亚高压呈带状稳定维持在华南上空,高空急流南支分流刚好经过广西上空,高空强辐散有利于上升运动的发展;低层 925hPa,季风槽从中南半岛延伸至广西,其向北延伸的切变线在广西中部缓慢南北摆动,北部湾至广西南部存在一条明显的超低空急流,最大风速达到  $18\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,有利于暖湿气流向广西输送;地面上与低层季风槽对应位置,存在一个向西开口的倒槽,整个广西处于暖低压倒槽控制,地面温度从 8 日开始大部维持在  $33^{\circ}\text{C}$  以上,局地最高气温超过  $38^{\circ}\text{C}$ ,持续高温为广西积累了大量能量,在广西与贵州交界有弱锋面存在,弱冷空气的侵入有利于触发较强天气。

2.2.2 探空环境分析

从 10 日 08 时南宁和北海两个探空站点资料来看(表 1),两个站点对流有效位能(CAPE)用午后温度订正后均在  $1400\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$  以上,说明不稳定能量非常充足;两个站点 K 指数均在  $39^{\circ}\text{C}$  以上,SI 指数均在  $0^{\circ}\text{C}$  以下,说明大气层结不稳定;850hPa 比湿均在  $15\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  以上,且湿层均较为深厚,有利于暴雨的发生; $0^{\circ}\text{C}$  层高度较高均为 5.1km,暖云层厚度更是在 4.7km 以上,且抬升凝结高度(LCL)均在 1km 以下,说明大气容易被抬升形成对流; $0\sim 6\text{km}$  垂直风矢量差均在  $6\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  以下,中低层较小的垂直风切变有利于暴雨的形成,配合深厚的暖云层高效率降水,极易造成极端性暴雨。

表 1 2022 年 6 月 10 日 08 时部分探空站环境参数

站点	CAPE $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$	K $^{\circ}\text{C}$	SI $^{\circ}\text{C}$	850hPa 比湿 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	$H_{\text{wet}}$ /km	$0^{\circ}\text{C}$ 层高度 /km	抬升凝结高 度/km	0~6km 风矢 量差/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
南宁(59431)	1436	42.3	-4.4	16	9.5	5.1	0.98	6
北海(59644)	3440	39.8	-1.73	15	5.7	5.1	0.98	4.3

2.3 触发机制分析

2.3.1 边界层侵入浅薄冷空气触发桂中雨带

从边界层风场来看(图 2),10 日 08 时,边界层有较弱的偏北风与偏南风对峙于桂林-河池中部一带,形成一条明显的边界层辐合线,在其缓慢南移的

过程中,附近不断有对流触发生成,但随着偏南气流的加强,特别是 14—20 时在北部湾形成了边界层西南急流,水汽输送的加强使得对流迅速发展,22 时后桂中多地出现极端暴雨;从假相当位温( $\theta_{\text{se}}$ )场来看,从 10 日 08 时至 11 日 02 时,等  $\theta_{\text{se}}$  线密集区主

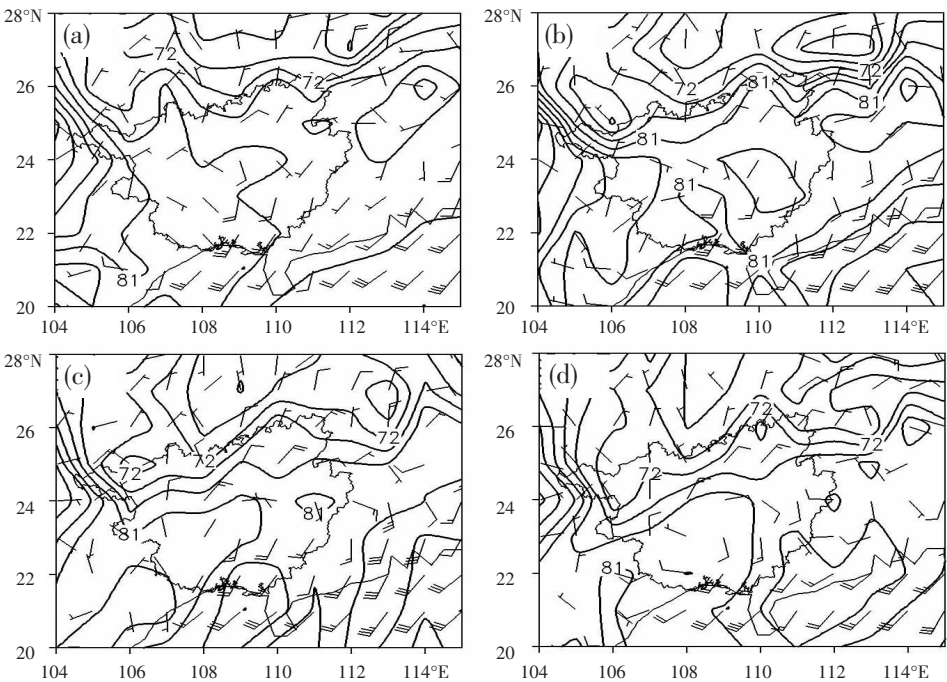


图 2 925hPa 风场和  $\theta_{se}$  场 (黑色实线为等  $\theta_{se}$  线, 单位:  $^{\circ}\text{C}$ )  
(a)10 日 08 时; (b)10 日 14 时; (c)10 日 20 时; (d)11 日 02 时

要位于黔桂交界附近,说明存在锋面影响,而整个广西中部及其以南的地区处于锋前,且最大  $\theta_{se}$  值超过  $80^{\circ}\text{C}$ ,说明能量非常充足;由此可见桂中雨带由边界层侵入的浅薄冷空气与偏南气流形成的辐合线触

发,高能量与强水汽输送有利于极端暴雨出现。  
2.3.2 超低空急流脉动和海陆地形触发桂南雨带  
从水汽通量场来看(图 3),孟加拉湾到南海北部一带均处于水汽通量的大值区,说明这一带的水

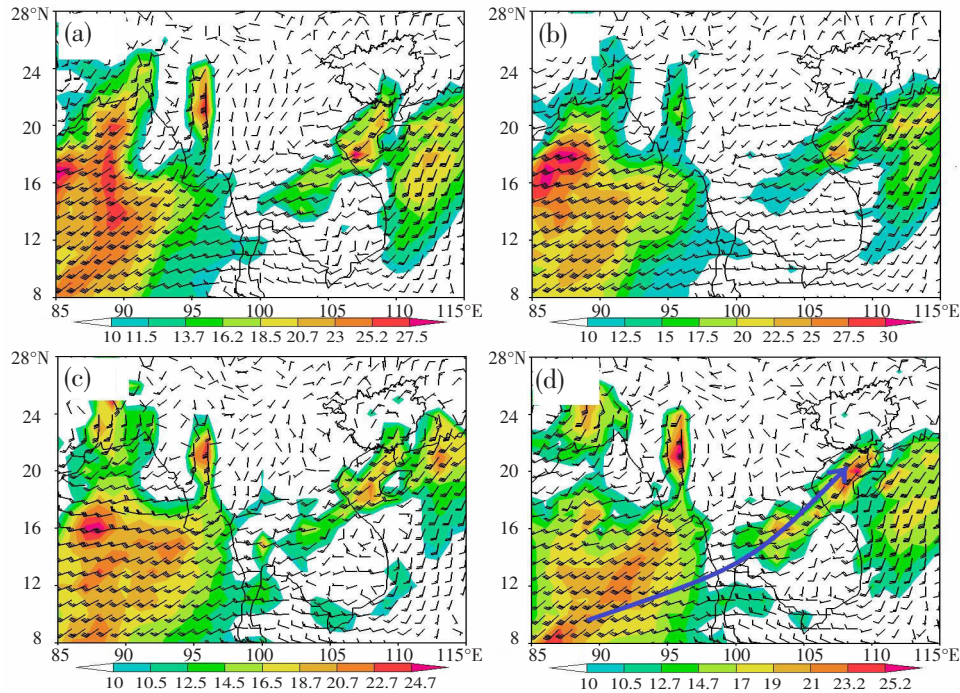


图 3 925hPa 风场和水汽通量场  
(填色部分为水汽通量场,颜色越深代表值越大,单位:  $\times 10^{-3}\text{g} \cdot (\text{s} \cdot \text{hPa} \cdot \text{cm})^{-1}$ ,蓝色箭头表示水汽输送方向)  
(a)10 日 08 时; (b)10 日 14 时; (c)10 日 20 时; (d)11 日 02 时



汽输送很强,同时对应 925hPa 风场显示这一带存在超低空西南急流,且急流具有明显的日变化特征,风速在白天有所减弱,到晚上后又迅速增强,超低空急流脉动容易触发暖区强对流天气;另一方面,在气流从海面运动到陆地上时,受海陆地形和下垫面摩擦力增大影响,风速迅速减弱,在桂南沿海形成明显的速度辐合区,有利于暖区低层上升运动的发展和触发不稳定能量的释放,从而激发对流天气,因此,超低空急流脉动和海陆地形差异是桂南雨带的重要触发机制。

### 3 暴雨极端性成因分析

#### 3.1 中尺度系统的有组织发展

从云图来看,10 日 22 时(图 4a),在来宾附近开始有中  $\gamma$  尺度对流系统生成并迅速发展(云团 A、

B);11 日 00 时(图 4c),所有云团合并发展成中  $\beta$  尺度对流系统(云团 C),云顶亮温(TBB)中心值降至  $-84^{\circ}\text{C}$ ,与此同时地面多地出现极端性强降水,来宾市马坪镇 1h 雨量达到 81.4mm;11 日 01 时(图 4d),云团 C 迅速发展成中  $\alpha$  中尺度对流云团,强降水区域迅速增大;从 10 日 22 时至 11 日 03 时对流云团发展迅速且始终维持在来宾及其附近一带稳定少动,导致多地出现持续性强降水,是桂中出现极端性降水的一个重要原因。

11 日 04 时(图 4e),在北部湾沿海靠近越南一侧有对流云团迅速发展成中  $\beta$  尺度对流云团,不断向东北方向传播移动,同时合并残余的低涡云系和从桂中减弱南移的云团,至 04 时(图 4g),云团已经发展成中尺度对流复合体(MCC),其  $\text{TBB} \leq -32^{\circ}\text{C}$  和  $\leq -52^{\circ}\text{C}$  的冷云区面积均已超过 MCC 标准,其中

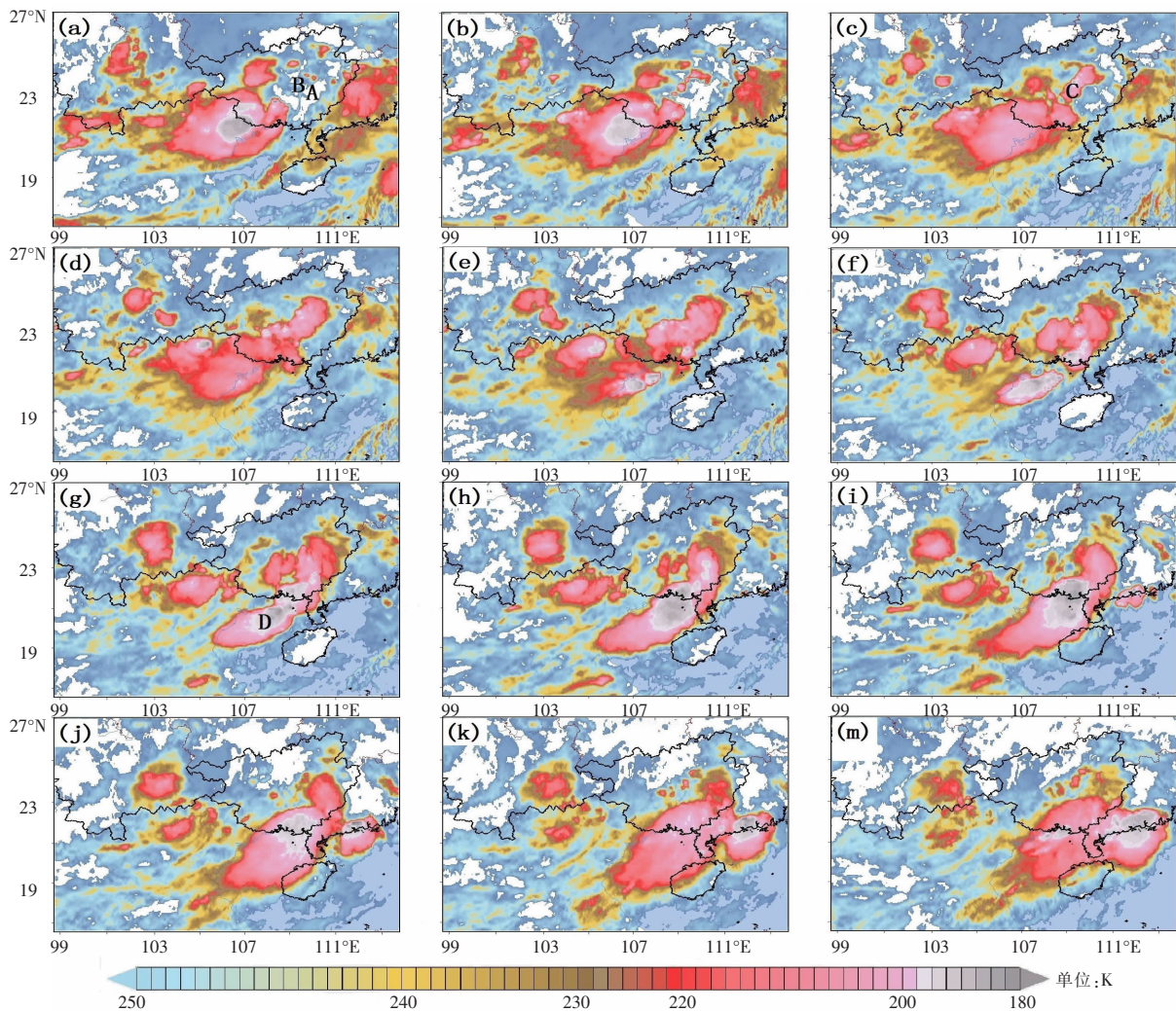


图 4 卫星云图

(a)10 日 22:00;(b)10 日 23:00;(c)11 日 00:00;(d)11 日 01:00;(e)11 日 02:00;(f)11 日 03:00;  
(g)11 日 04:00;(h)11 日 05:00;(i)11 日 06:00;(j)11 日 07:00;(k)11 日 08:00;(m)11 日 09:00

心最低 TBB 值达到  $-90^{\circ}\text{C}$ , 地面 1h 降水也达到 108.7mm, 之后 MCC 持续存在近 7h, 且位置稳定少动, 据统计, 04—06 时 3h, 桂南共计有 14 个站次 1h 雨量超过 50mm, 且强降水落区主要位于 MCC 中心附近。

以上分析表明, 此次极端暴雨主要由中尺度对流系统造成, 中  $\beta$  尺度对流系统和 MCC 分别是桂中和桂南极端降水的直接影响系统, 且云团的位置稳定而少动, 加上充沛的水汽供和极低的云顶亮温值, 是此次极端强降水的直接原因。

### 3.2 降水回波在移动过程中形成“列车效应”

选取柳州和北海两部雷达数据分别对两条雨带雷达回波进行分析, 10 日 22 时左右, 在辐合线附近不断有对流回波生成和发展, 并在西南气流的引导下向东北方向移动, 至 23 时, 对流云团在柳州南部至南宁东部发展成一条带状对流系统, 从其剖面来看, 主体回波均在 5km 以下, 质心更是只有 2~3km, 带状对流回波在广西中部持续维持至 11 日 01 时左右才开始减弱消散; 11 日 03 时 59 分, 桂南回波开始发展, 在钦州北部存在一条明显的速度辐合区, 而在北部湾海面上靠近雷达附近存在大风速区, 最大风速达到  $27\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 越南至北部湾沿海开始有大量的对流回波生成和发展, 质心均较低, 与桂中回波类似, 维持时间均较长, 且由季风爆发导致的西南急流脉动产生的回波在西南气流引导下持续不断向北海方向运动, 并与桂南北部的回波合并发展长时间影响桂南。

由此可见此次极端暴雨对流回波属于明显低质心热带型降水回波, 回波带具有明显的后向传播特性, 并在移动过程中形成“列车效应”, 是造成此次极端暴雨出现的主要原因。

## 4 预报偏差分析

### 4.1 各级气象台站主观预报检验

从各级气象台站 10 日 08 时起报的对 10 日 20 时—11 日 08 时的 12h 主观预报来看, 各家台站对于广西大暴雨及以上量级降水均存在明显漏报现象, 中央气象台预报暴雨范围明显偏小且位置偏北; 省级气象台暴雨预报范围较中央台预报大, 但预报位置偏北主要位于河池、柳州和桂林北部; 来宾和北海两个市级气象台站对于本地降水量级也明显偏小, 最大只报到大雨量级。可见, 各级气象台站降水预报均存在位置偏北和量级偏小。

### 4.2 数值模式预报偏差分析

对各家数值模式 9 日 20 时起报的 10 日 20 时—11 日 20 时的 24h 预报产品进行对比分析, 大尺度模式中欧洲中期天气预报中心数值预报模式 (ECMWF) 和中国气象局全球中期数值预报模式 (CMA-GFS) 均预报有一条雨带, 但雨带位置偏北, 主要位于河池—柳州—桂林中北部, 且量级明显偏小, 对于桂南雨带均没有反应; 中尺度模式中, 预报效果最好的是中国气象局广东区域数值预报模式 (CMA-GD) 和中国气象局中尺度天气数值预报模式 (CMA-MESO), 两家模式预报对降水极端性均有一定的体现, 预报最大 24h 累积雨量为 230mm 左右, 其中 CMA-GD 对于桂中和桂南两条雨带均有一定的反应, 但位置有所偏西, CMA-MESO 对于桂南雨带预报较好, 但范围偏大, 对于桂中雨带预报降水强度偏弱、范围偏小。

分析模式预报偏差的可能原因, ECMWF 和 CMA-GFS 均较为准确的预报了 500hPa 深槽和低层切变线, 但位置比实况稍稍偏北, 对于 925hPa 偏南风预报偏弱, 对于夜间西南急流迅速增强的特征没有体现, 预报 CAPE 值大部偏小, 特别是广西中部, 预报的水汽辐合大值区主要位于桂北, 因此其强降水落区位置偏北, 且量级明显偏小; CMA-GD 模式预报的低层北部湾西南急流强度与实况较为接近, 其组合反射率因子和实况对比显示, 模式很好的预报出了桂中和桂南沿海两条对流回波的触发生成, 位置稍有偏西且强度较实况偏弱, 且维持的时间较长。

由此可见, 大尺度模式对于系统性降水有较好的把握, 但对于暖区降水预报能力存在不足, 且往往存在预报量级偏小、极端性降水没有反应的问题; 中尺度模式对于暖区降水和极端性暴雨有一定的体现, 但大部存在大暴雨及以上量级降水预报范围偏大的问题, 因此加强各种模式预报的本地化分析, 综合应用大尺度和中尺度模式预报产品, 对于中尺度模式预报的一些极端性降水需要警惕, 有利于提高暴雨特别是极端暴雨的预报能力。

## 5 结论

此次暴雨过程具有明显的双雨带特点, 通过对此次极端暴雨分析, 得到以下结论:

(1) 此次过程具有暴雨范围广, 累积雨量大, 极端性强和致灾性高的特点。



(2)高空深槽和低层切变线是此次过程的重要动力抬升条件,地面暖低压倒槽的发展为广西提供了充足的不稳定能量,且倒槽附近的辐合线有利于地面中小尺度的生成和发展,从而触发强天气。

(3)此次过程广西中部和南部能量充足,抬升凝结高度低,有利于对流的触发,中低层垂直风切变较小且0℃层高度高,有利于暖区高效率降水的形成和极端暴雨天气的出现。

(4)边界层侵入的浅薄冷空气与偏南气流形成的边界层辐合线是触发桂中雨带重要机制,超低空急流脉动配合海陆地形的影响则是桂南雨带的触发机制。

(5)中尺度对流系统的有组织发展,以及回波在后向传播移动过程中形成“列车效应”,同时配合季风爆发带来的充沛水汽供应和低质心暖云高效率降水,是造成多地出现极端暴雨的重要原因。

(6)在暖区降水的预报中,CMA-GD 和 CMA-MESO 模式往往有较好的表现,预报员需加强中尺度模式的分析应用,警惕中尺度模式预报中突发的对流系统,有利于提高极端暴雨的预报能力。

#### 参考文献:

- [1] 刘瑞鑫,孙建华,陈鲍发.华南暖区暴雨事件的筛选与分类研究[J].大气科学,2019,43(1):119-130.
- [2] 李泽椿.我国的气象灾害及科学防灾减灾[J].中国应急管理,2007(7):22-27.
- [3] 蒋运志,陈宙国,范方福.城市内涝的原因与预防[J].气象研究与应用,2012,33(S2):80-81.
- [4] 王辉,吴文俊,王广,等.昆明市极端降水事件演变特征

及城市效应[J].水资源保护,2021,37(4):61-68.

- [5] 刘远,李莹,王国复,等.河南省“21·7”极端暴雨灾害多区域间接经济损失评估[J].灾害学,2022,37(4):45-51.
- [6] 胡素琴,希热娜依·铁里瓦尔地,李娜,等.南疆西部干旱区两次极端暴雨过程对比分析[J].大气科学,2022,46(5):1177-1197.
- [7] 黄治勇,王婧羽,周文.2020年7月4-8日长江中游极端暴雨特征分析[J].暴雨灾害,2021,40(4):333-341.
- [8] 周璇,孙继松,张琳娜,等.华北地区持续性极端暴雨过程的分类特征[J].气象学报,2020,78(5):761-777.
- [9] 苏爱芳,席乐,吕晓娜,等.豫北“21·7”极端暴雨过程特征及成因分析[J].气象,2022,48(5):556-570.
- [10] 段汀,陈权亮,廖雨静.“21.7”郑州极端暴雨的形成过程及致灾机理分析[J].气象科学,2022,42(2):152-161.
- [11] 冉令坤,李舒文,周玉淑,等.2021年河南“7.20”极端暴雨动、热力和水汽特征观测分析[J].大气科学,2021,45(6):1366-1383.
- [12] 蔡悦幸,何慧,陆虹,等.2020年6月广西持续性暴雨的天气气候特征[J].气象研究与应用,2021,42(1):113-117.
- [13] 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.
- [14] 黄滢,黄春华,刘金裕.广西一次持续性暖区暴雨特征及成因分析[J].气象研究与应用,2022,43(3):50-55.
- [15] 张凌云,刘蕾.柳州2020年一次“龙舟水”成因及预报偏差分析[J].气象研究与应用,2022,43(3):67-71.
- [16] 林确略,赵华生,林宝亭.双雨带过程中的回流暖区暴雨个例对比研究[J].热带气象学报,2020,36(6):721-733.

## Analysis of the causes and forecast deviations of the extreme rainstorm in Guangxi on June 11, 2022

Jiang Yaping, Nong Mingzhe, Ma Zhi, Guo Bin, Lu Xiaoxiao, Li Furen  
(Chongzuo Meteorological Bureau, Guangxi Chongzuo 532200, China)

**Abstract:** Using conventional meteorological observation and NECP reanalysis data, an extreme rainstorm process in Guangxi is analyzed in this paper. The results show that: (1) This process is characterized by a wide rainstorm range, largely accumulated rainfall, strong extremes, high disaster-causing and double rainbands; (2) The shallow cold air intruding from the boundary layer is an important trigger mechanism for the rainbands in central Guangxi, while the rainbands in southern Guangxi are triggered by the ultra-low-level jet pulsations with the influence of land-sea topography; (3) The organized development of mesoscale convective systems and the formation of "train effect" during the backward propagation of echoes, together with the abundant water vapor supply brought by the monsoon outbreak and the high efficiency of precipitation from low-mass warm clouds, are important causes of extreme rainstorms in many places; (4) The CMA-GD and CMA-MESO models tend to have better performance in the forecast of precipitation in warm areas. Forecasters need to strengthen the analysis and application of mesoscale models and be alert to the sudden rise of convective systems in mesoscale model forecasting, which is conducive to improving the forecasting ability of extreme rainstorms.

**Key words:** extreme rainstorm; warm-sector rainstorm; monsoon; MCC; train effect