覃武,刘国忠,赖珍权,等,2020. 华南暖区暴雨预报失误及可预报性探讨[J]. 气象,46(8):1039-1052. Qin W, Liu G Z, Lai Z Q, et al,2020. Study on forecast errors and predictability of a warm-sector rainstorm in South China[J]. Meteor Mon,46(8):1039-1052(in Chinese).

# 华南暖区暴雨预报失误及可预报性探讨\*

覃 武<sup>1</sup> 刘国忠<sup>2</sup> 赖珍权<sup>2</sup> 覃月凤<sup>2</sup> 梁依玲<sup>2</sup>

1 广西壮族自治区气象局,南宁 530022
 2 广西壮族自治区气象台,南宁 530022

**提**要:由于暖区暴雨产生的环境条件复杂和触发机制难以捕捉,数值模式对其预报能力弱,给预报带来困难,经常导致预 报失误,是短期预报中的难点。2016年4月19—20日广西出现了一场暖区暴雨天气过程,预报员及数值模式预报出现较大 失误。利用业务预报中的数值预报产品、地面中尺度自动气象站观测、常规地面及高空观测、新一代天气雷达及 FY-2G 卫星 探测等资料对此次暖区暴雨预报失误进行剖析。结果表明:中低空急流增强及西南暖低压发展,为越南北部至广西中南部提 供了高温、高能的环境条件,地形性辐合及涡旋触发了对流的发生,中尺度辐合线有效组织了对流的发展,雷达回波具 有质心低、降雨效率高等暖云降雨的特征。预报员和数值模式短期时效内对暖区暴雨缺乏预报能力,未能准确把握可触发对 流的机制,是预报失败的原因。预报员通过分析上游地区对流云团、地面中尺度辐合线演变及地形作用等触发条件,可以在 短时临近时效内对暖区暴雨部分做出定性预报,发布预警信息,弥补短期预报的不足。因此,加强对暖区暴雨形成机理的认 识,在预报中做好精细分析,是提高暖区暴雨预报能力的有效途径之一。

关键词:华南地区,暖区暴雨,预报失误,可预报性

**中图分类号:** P458 文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.08.004

# Study on Forecast Errors and Predictability of a Warm-Sector Rainstorm in South China

QIN Wu<sup>1</sup> LIU Guozhong<sup>2</sup> LAI Zhenquan<sup>2</sup> QIN Yuefeng<sup>2</sup> LIANG Yiling<sup>2</sup> 1 Guangxi Meteorological Service, Nanning 530022 2 Guangxi Meteorological Observatory, Nanning 530022

**Abstract**: For warm-sector rainstorms, forecast errors often appear in the short-term forecast due to the complexity of environmental conditions, the difficulty in capturing the trigger mechanisms and the poor prediction ability of the numerical models. From 19 to 20 April 2016, a warm-sector rainstorm event occurred in Guangxi, China, but forecasters and numerical models both failed to forecast the rainfall intensity. Based on numerical forecast products, observation data of automatic weather stations, conventional surface and upper-air observation data, Doppler radar and FY-2G data, the forecast errors of this heavy rainfall event were analyzed. The results show that the development of the low- and mid-level jet and the southwest warm low pressure provided the environment with high temperature, high humidity and high energy in the area between the northern part Vietnam and the central and southern part of Guangxi, the topographic convergence and vortex triggered the convection and the mesoscale convergence lines effectively

\* 国家重点研发计划(2017YFC1502501)、广西壮族自治区气象局重点项目(桂气科 2017Z01)和广西智能网格预报服务创新团队共同资助 2019 年 12 月 29 日收稿; 2020 年 6 月 9 日收修定稿

第一作者:覃武,主要从事预报服务业务及研究.E-mail:gxqinwu@163.com

通讯作者:刘国忠,主要从事天气预报业务及研究.E-mail:baiselgz@sina.com

organized the convection. In addition, radar echoes were characterized by low centroid and high rainfall efficiency. The reasons for the failure are that forecasters and numerical models lacked the forecasting ability of the short-term warm-sector rainstorms, and could not accurately grasp the trigger mechanism of the convection. By analyzing the convective cloud clusters in the upstream zone, the evolution of the surface mesoscale convergence lines and the topographic effects and other trigger conditions, forecasters could have made qualitative nowcasting of warm-sector rainstorms and issued early warnings to make up for the ability shortage of short-term forecasting. Therefore, strengthening the understanding of the mechanism of warm-sector rainstorms and making fine analysis are effective ways to improve the forecast ability. **Key words**: South China, warm-sector rainstorm, forecast error, predictability

# 引 言

暖区暴雨是一类发生在地面锋面暖空气一侧或 没有冷空气影响时的暴雨。对于华南地区暖区暴雨 到底发生在离地面锋面系统多远才算暖区暴雨,认 识上存在一定的差异,但大多认为发生在地面锋面 前端 200~300 km 处(黄士松,1986;陶诗言, 1980)。华南暖区暴雨有时则发生在西南风和东南 风的汇合气流中,甚至无切变的西南气流中,在此种 情况下,冷空气和锋面离华南较远,甚至未来2~3d 没有冷空气影响,华南地区暖区暴雨更多是指这种 情况,暖区暴雨是华南前汛期暴雨最显著的特点之 一(何立富等,2016)。华南暖区暴雨有较大的地域 性差别,降水具有突发性强、时空分布不均、局地小 时雨量大及危害特别严重等特点(陈玥等,2016)。 由于造成暖区暴雨天气系统和环境条件复杂,触发 机制难以捕捉,暴雨开始时间、落区及强度难以确 定,数值模式对其预报能力弱等原因,对其预报较为 困难,因而经常出现预报偏差(谌芸等,2018;盛杰 等,2019;田付友等,2018;Davis and Lee,2012;Wu and Luo, 2016)。据统计, 广西近5年的暖区暴雨定 时、定点、定量短期预报正确率(TS)评分为2.3%, 远低于锋面、低涡及台风等天气系统所致暴雨的评 分,预报暖区暴雨一直是预报中的一个难点。

由于华南暖区暴雨的复杂性,其一直是我国大 气科学界的研究热点,许多气象工作者进行了这方 面的研究。在华南暖区暴雨分型概念模型建立方 面:何立富等(2016)依据预报实践经验将其分为边 界层辐合线型、偏南风风速辐合型及强西南急流型 等3种类型,并给出了天气系统配置及触发因子特 征。丁治英等(2011)利用距离低层的θ<sub>se</sub>锋区在 200 ~300 km以上的θ<sub>se</sub>场的垂直分布特征将其分成 3 类,分析了暖区暴雨与高、低空急流和南亚高压关

系。陈翔翔等(2012)通过统计分析将其分为切变线 型、低涡型及偏南风风速切变辐合型等3大类型,分 析得出各型 500 hPa 及以下的环流特征。林良勋等 (2006)将暖区暴雨分为由变性冷高脊后部气流辐合 或暖湿切变引起的暴雨(即回流暴雨)、由强西南季 风爆发引起的暴雨以及由高空槽和副热带急流共同 作用而引起的暴雨等3类,华南地区预报员将此分 类应用于预报实践中,发挥了一定的作用,成为华南 暖区暴雨预报的重要依据之一。在华南暖区暴雨个 例成因分析方面:夏茹娣和赵思雄(2009)、赵金彪等 (2010)分别对影响系统为切变线、低涡的个例进行 分析,韦统健(1994)选取3次典型的持续性华南暖 区暴雨,研究其流场结构特征。近年来,叶朗明和苗 峻峰(2014)、郭弘等(2014)、张晓美等(2009)、周秀 骥等(2003)、郑彬等(2007)还对华南暖区暴雨典型 个例的中尺度对流系统进行了分析。以上研究取得 的成果应用于业务预报中,一定程度上改善了华南 暖区暴雨的预报能力,但实际业务预报中仍然屡屡 出现误报。因此,有必要分析误报的原因,探讨可预 报性,进一步提高华南暖区暴雨预报能力。

2016年4月19—20日广西出现了一场暖区暴雨过程,预报员及数值模式对此过程的短期预报均出现了预报失败。本文利用业务预报中的数值预报产品、地面中尺度自动站观测、常规地面及高空观测、新一代天气雷达及FY-2G卫星探测等资料对此次暴雨过程的形成机理、预报失误原因及可预报性等方面进行探讨,总结预报着眼点,旨在提高暖区暴雨预报能力。

### 1 降雨实况

2016年4月19日20时至20日20时(北京时) 广西出现了一场暖区暴雨天气过程。19日20时至 20日20时(图1a),广西境内有12个国家级观测站

(全区共 89 个站)出现了 24 h 降雨量≥50 mm 的暴 雨天气,达到广西区域性暴雨级(出现暴雨的国家级 观测站数≥10个站定义为广西区域性暴雨),其中 北海市合浦县白沙镇自动雨量站为 24 h 最大雨量 站,降雨量达 250.4 mm,小时雨量达 74.9 mm。 24 h 强降雨主要分布在广西西南部(雨带 A)、东南 部(雨带 B)、中部(雨带 C)及北部(雨带 D)等4个区 域,雨带A、B、C、D雨型大致呈西南一东北向,最大 雨量中心分别在宁明、合浦、金秀、资源。分析最大 降雨中心小时雨量随时间变化可以看出(图 1b),强 降雨时段集中在 20 日凌晨至上午,持续 3~4 h,既 有同时又有先后出现,合浦、资源出现在20日00-03时,宁明、金秀出现在06-09时。从跟踪雷达回 波移动对应自动雨量站小时雨量的中心演变来看 (图 1c),广西境内雨团生成于十万大山、六万大山、 大容山、大桂山、大瑶山、越城岭等山脉附近(图略), 以东北移或原地维持为主,移动方向与山脉走向相 近,维持时间在1~5h,越往南雨团中心越零散,维

持时间越短。强降雨明显具有区域分散、范围小,时 段集中,局地雨量特别大、雨强强及与地形相关等华 南暖区暴雨的特征。

## 2 天气形势及环境条件

#### 2.1 天气形势

暴雨发生前,欧亚大陆中高纬地区中高层大气 500~200 hPa 环流呈稳定的"一脊一槽"型,乌拉尔 山建立,贝加尔湖以西为脊区、以东为槽区,西伯利 亚至我国新疆北部为横槽区,不断有槽分裂南摆东 移,引导冷空气南下(图 2)。由于中高层冷空气的 不断侵入,副热带锋区的增强,导致 200 hPa 在华南 至华东到日本一带出现了强盛的西南风高空急流, 华南地区位于高空急流入口的右后侧,高空为强辐 散区,为暴雨的产生提供了强大的辐散作用。同时,



图 1 2016 年 4 月(a)19 日 20 时至 20 日 20 时 24 h 雨量(A,B,C,D 为雨带),(b)19 日 21 时至 20 日 12 时各雨带最大降雨 中心小时雨量随时间变化,(c)雨团中心演变及分布(点为雨团中心,实线为雨团移动路径)

Fig. 1 (a) Rainfall from 20:00 BT 19 to 20:00 BT 20 (A, B, C, D indicate rain belts); (b) hourly rainfall timing diagram of the maximum rainfall center of each rain belt from 21:00 BT 19 to 12:00 BT 20; (c) evolution and distribution of rainfall center on 20 April 2016 (black solid dots: the centers of the rain clusters, and solid lines: moving paths of the rain clusters)

南亚高压位于印度半岛以南,位置偏西、偏南,强度 偏弱,欧亚大陆低纬地区环流平直,有利于高原槽和 印缅槽东移影响我国中东部地区(图 2a)。500 hPa 中高纬度槽、高原槽及印缅槽形成的阶梯形势在东 移或南压过程中合并后加深,加强中高层冷空气向 南侵入,增强槽前的动力强迫作用(图 2b)。大气环 流形势有利于暴雨的产生。

在有利的的环流背景下,19日 20时,500 hPa

中高纬槽东移至河套南部,高原槽移至四川西部,印 缅槽移至云南中部到中南半岛一带,呈阶梯状 (图 3a);850 hPa 从华南至我国东部地区为强盛的 西南风低空急流,华南北部桂林为 20 m • s<sup>-1</sup>急流 核(图 3b);地面滇黔桂交界为西南暖低压中心,出 海高压位于东海,华南为出海高压后部与西南暖低 压过渡区,为等压线呈南北向暖干与冷湿气流交汇 不稳定区(图3c)。随着500 hPa高原槽与印缅槽东



图 2 2016 年 4 月 19 日 20 时(a)200 hPa, (b)500 hPa 环流特征 (实线:等高线,单位:dagpm;填色:急流区) Fig. 2 Circulations at (a) 200 hPa and (b) 500 hPa at 20:00 BT 19 April 2016

[line: height, unit: dagpm; colored: jet zone (≥30 m·s<sup>-1</sup>)]



图 3 2016 年 4 月(a,b,c)19 日 20 时和(d,e,f)20 日 08 时暴雨前及期间的 (a,d)500 hPa,(b,e)850 hPa 天气图,以及(c,f)地面图 Fig. 3 The weather charts (a, d) 500 hPa, (b, e) 850 hPa, (c, f) surface at (a, b, c) 20:00 BT 19 and (d, e, f) 08:00 BT 20 April 2016

移过程中在云南东部一带合并加深,中高纬度槽东 移至华中地区(图 3d),引导850 hPa切变线南移至 江南到贵州中部一带(图 3e),地面弱冷空气南移至 贵州中南部,广西与贵州交界低压倒槽内有静止锋 生,强降雨区位于锋面南侧 200 km 左右的广西境 内(图 3f)。暴雨发生前及期间,华南西部广西位于 槽前、切变线南侧西南风急流和锋面南侧偏南风气 流中,处于暖区。

#### 2.2 环境条件

分析暴雨发生前中尺度环境场(图 4)发现,由 于影响华南地区的北方冷空气势力弱,受春季大陆 尤其是中南半岛下垫面加热增温作用影响,地面西 南暖低压从中南半岛向北、向东发展,西南暖低压中 心从越南北部移至滇黔桂交界一带。受暖低压影 响,广西地面从西往东增温明显,靠近暖低压中心的 广西西部一带 19 日 14 时气温已达 30℃(图略),广 西中东部地区位于西南暖低压东部暖干和出海高压 后部冷湿气流过渡区,由于暖干和冷湿空气的混合 作用,使得其为气温在 25~27℃的相对高温区,*T*--*T*<sub>4</sub>≪2℃湿舌从北部湾向广西东北延伸呈西南一东 北向。 850 hPa广西中东部为 $\geq$ 12 m·s<sup>-1</sup>的西南风 低空急流区,急流轴从北部湾西岸至广西东北部 (图 4),桂林出现了 20 m·s<sup>-1</sup>急流核,在急流核的 前端风速辐合处,桂林北部形成了一条近东西向的 辐合线,由从中南半岛来的西南风和从南海来的东 南风的汇流作用,在中越交界形成了另一条西北一 东南向的辐合线,两条辐合线处亦是未来对流发展 较为旺盛的区域。850 hPa 强盛的低空急流把低纬 度暖湿空气向广西一带输送,在与急流轴相近的位 置出现了气温 $\geq$ 21℃从北部湾至广西的温度脊,广 西大部假相当位温( $\theta_{se}$ ) $\geq$ 340 K,比湿(q) $\geq$ 13 g·kg<sup>-1</sup>,达到或均超过广西 3—5 月  $\theta_{se}$ 和q的强对流 发生阈值(340 K、10 g·kg<sup>-1</sup>)\*。

500 和 700 hPa 急流轴位于广西北部(图 4),风 速分别≥20、16 m・s<sup>-1</sup>的西南偏西风急流穿越广西 上空,加大了中低层水平风的垂直切变,有利于对流 发生,同时从低层到中层由西南急流向偏西急流顺 转,中层以下为强劲的暖平流输送区。广西及周边 低层高温、高湿、高能的特征十分明显。

随着 500 及 700 hPa 的高空槽东移至云南中东 部(图 4),700 hPa 从云南东北部至滇黔桂交界区有  $T-T_d \ge 10^{\circ}$ 的干舌,500 hPa 从贵州西南到广西西



图 4 2016 年 4 月 19 日 20 时中尺度环境场分析图 Fig. 4 Mesoscale ambient field analysis diagram at 20:00 BT 19 April 2016

<sup>\*</sup> 广西区气象台《广西中尺度天气分析技术规范》,2010。

北部有 12 h 变温≪-3℃的显著变温区,广西西北部 地区中层冷空气已经先于地面冷空气到达该地区上 空,形成前倾槽形势,此时广西中东部低层到中层仍 为高温高湿状态,上游地区的这一形势,有利于中层 冷空气从广西西北面侵入叠加于广西中东部低层暖 湿气流区域之上。广西大部 850 与 500 hPa 温差达 25℃以上,大气处于条件性不稳定状态。

从越南北部探空站(站号 48820)及广西沿海北 海探空站的探空图看出(图 5),暴雨发生前,中低空 存在较深厚急流,大气湿层从低层至高层增厚,不稳 定能量增加。4月19日20时越南北部及广西中南 部部分探空站物理量参数值(表 1)为,对流有效位能 (CAPE) 值达1000 J • kg<sup>-1</sup> 左右, SI 指数≤-2℃, 其 中广西北海 CAPE 达到 2 359.7 J•kg<sup>-1</sup>, SI 指数为 一2.8℃,暴雨区及其上游地区积聚了大量的不稳定 能量,不稳定能量的累积为中尺度对流产生提供了 有利的条件。对流抑制有效位能(CIN)与对流的触 发有密切的关系,广西中南部 CIN 为较小值(0~10 J•kg<sup>-1</sup>),弱抬升或扰动就可以使空气块抬升至自 由对流高度,易于触发对流,同时一定的 CIN 使在低 层能量得以积聚,增强了对流发生的强度。虽然前 期越南北部 CIN 为较大值(230 J•kg<sup>-1</sup>),对对流发 生有较大的抑制作用,但由于夜间中低层潮湿的偏 南风加强改善了低层层结,使自由对流高度降低、 CIN 值减少,易于对流的突破,并且有利于越南北部 对流的产生。

# 3 中尺度对流系统的触发、演变及特征

中尺度对流系统直接造成的(Doswell III et al,1996; Keene and Schumacher,2013;Peters and Schumacher,2015)。通过以上分析可以看出,此次暖区暴雨发 生具备了较为有利的环境条件,下面探讨此次过程 中尺度对流系统的触发、演变及特征。

#### 3.1 MCS 触发

19日午后,广西地面流场总体为偏南风,偏南风 不断为降雨区增温、增湿,受复杂地形影响,广西境 内中尺度自动站风场十分紊乱,部分地区出现了分 散的阵雨或雷阵雨天气(图略)。随着地面偏南风的 脉动增强,19日23时广西南部地区自动站风向转为 较为一致的偏南风,位于广西东南部的云开大山和 六万大山山前的浦北一合浦一带最大偏南风速增大 为 6 m • s<sup>-1</sup>(位置 A)(图 6a),由于山前地形辐合抬 升作用,在浦北一合浦一带触发γ中尺度较强对流 云团(云团 A)(图 7a),相应最强雷达回波组合反射 率(CR)达 45 dBz(图 8a),自动站观测的最大小时雨 量为 47 mm(图 9a)。19 日 20-23 时广西西北部 (位置 C)和东北部(位置 D、E)紊乱风场在地形作用 下形成局地小涡旋(图 6a),于23 时触发了弱的对流 云团(云团 C、D、E)(图 7a),最强 CR 为30 dBz(图 8a),自动站观测的最大小时雨量为15 mm(图 9a), 同时越南北部地区(位置 B)触发的对流云团不断合 并加强为β中尺度的对流云团(云团 B)(图 7a)(此 处无雷达、中尺度自动站资料)。

此后,广西境内除浦北一合浦一带云团(云团 A)外,其他地方不断有弱对流云团生消。20日02 时前后,广西中北部越城岭(位置F)、天平山(位置G)、



暴雨是在有利环流背景和天气系统配置下,由

图 5 2016 年 4 月 19 日 20 时(a)越南北部站和(b)广西北海站的 T-log p 图 Fig. 5 T-log p diagram at (a) the north of Vietnam, (b) Beihai Station at 20:00 BT 19 April 2016

表 1	2016 年 4 月	19日20	时越南北部及广	西中南部部分	·探空站物理量	量参数值

 
 Table 1
 Physics parameters of soundings of northern Vietnam and central southern Guangyi at 20:00 BT on 19 April 2016

central southern Guangxi at 20:00 B1 on 19 April 2010								
探空站	$CAPE/J \cdot kg^{-1}$	$K/^{\circ}\mathbb{C}$	$SI/\degree C$	$CIN/J \cdot kg^{-1}$				
越南北部	801.2	37	-2.78	230.0				
广西北海	2359.7	35	-2.80	7.1				
广西南宁	1026.8	33	-2.00	0.4				

大明山(位置 H、I)等山前地形性辐合或涡旋(图 6b)触发了多个γ中尺度较强对流云团(云团 F、G、 H、I)(图 7b),越南北部云团东移靠近越南与广西西 南交界处,广西西南部西大明山、十万大山等山前地 形性涡旋(位置 J)(图 6b)触发了γ中尺度较强对流 云团(云团 J)(图 7b),广西西南部至东北部雷达回 波呈现强回波镶嵌的回波带,CR 在 20~40 dBz (图 8b),广西基本形成西南部至东北部的雨带,小 时雨量为 10~30 mm(图 9b)。中尺度地形性辐合 或涡旋触发了对流的发生。

#### 3.2 MCS 演变

由于广西东南部的云开大山和六万大山山前的 浦北一合浦一带 19 日 20 时至 20 日 02 时维持较长 时间偏南风辐合(图 6b),20 日 02 时云团 A 发展达 到最强(图 7b),最强 CR 达 55 dBz(图 8b),最大小时雨量为 74.9 mm(图 9b),小时雨量≥40 mm 的降 水维持了 5 h(19 日 23 时至 20 日 04 时)(图 1c),降 雨叠加带来总雨量达 250.4 mm,05 时后偏南风速 减弱,辐合减弱(图 6c),降雨迅速减小。

来自于南海的一致偏南风向北缓慢推进,04 时前后,在偏南风前沿与紊乱风之间形成中尺度辐合线,中尺度辐合线与地形性涡旋或辐合相互作用使辐合加强(图 6c),使得对流云团得以组织加强,在辐合线南侧形成了从越南北部对流云团至广西东北部基本连续的对流云带(图 7c),广西中北部雷达回波为线状回波,南部为明显的飑线(图 8c),广西西南、中部及北部最大小时雨量分别为 35、32、15 mm (图 9c)。



随着高空槽东移,引导低层系统东移,在东移过

图 6 2016 年 4 月(a)19 日 23 时,20 日(b)02 时、(c)05 时和(d)08 时地面中尺度自动站风场 (A,B,C,D,E,F,G,H,I,J 为地形辐合区或涡旋,叉划线为中尺度辐合线;填色为地形高度)
Fig. 6 Wind field of surface automatic weather stations (a) 23:00 BT 19, (b) 02:00 BT 20,
(c) 05:00 BT 20, and (d) 08:00 BT 20 April 2016 (A, B, C, D, E, F, G, H, I and J indicate topographic convergence zone or vortex, and cross lines indicate mesoscale convergence lines; colored: topographic height)



图 7 2016 年 4 月(a)19 日 23 时,(b)20 日 02 时,(c)20 日 05 时和(d)20 日 08 时 FY-2G 气象卫星 TBB 演变 (A,B,C,D,E,F,G,H,I,J,K 为云团) Fig. 7 TBB evolution of FY-2G meteorological satellite at (a) 23:00 BT 19 (b) 02:00 BT 20, (c) 05:00 BT 20, and (d) 08:00 BT 20 April 2016

(A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K indicate cloud clusters)



图 8 2016 年 4 月(a)19 日 23 时,(b)20 日 02 时,(c)20 日 05 时和(d)20 日 08 时 多普勒雷达组合反射率拼图

Fig. 8 Doppler Radar composite reflectivity at (a) 23:00 BT 19, (b) 02:00 BT 20, (c) 05:00 BT 20, and (d) 08:00 BT 20 April 2016



图 9 2016 年 4 月(a)19 日 23 时,(b)20 日 02 时,(c)20 日 05 时和(d)20 日 08 时 中尺度自动站小时雨量 Fig. 9 Hourly rainfall from automatic weather stations at

(a) 23:00 BT 19, (b) 02:00 BT 20, (c) 05:00 BT 20, (d) 08:00 BT 20 April 2016

程中地面辐合线由西南一东北向转南北向(图 6d), 在辐合线及大瑶山、大桂山、大容山南侧,云团发展 成近 MCC 形状(云团 K),达到最强,TBB 低值中心 达到 200 K(图 7d),雷达回波上飑线发展成后侧有 大片层状云的弓形回波,最大 CR 值>55 dBz(图 8d),从广西中部到南部为小时雨量达 40~70 mm 的强雨带。此后,低空急流及地面辐合线东移减弱, 降雨减弱。由于中尺度对流系统前向传播,因此最 大中尺度雨团向东或东北移动(图 1c)。暴雨过程 中,地面中尺度辐合线对地形性辐合和涡旋的组织 对中尺度系统的发展和演变起到了重要作用。

#### 3.3 雷达回波特征

选取 20 日 06:43 南宁雷达站回波资料分析暖 区飑线(图 10),最大反射率因子达 55 dBz,飑线后 侧有大片的层状云区(图 10a),在径向速度图上 (图略),飑线后侧有大于 20 m·s<sup>-1</sup>的速度大值区, 表明存在自西向东方向的后侧入流急流。沿雷达径 向 105°方向作垂直剖面(图 10b),50 dBz 强回波伸 展至 6 km,回波质心位于 4 km 处,飑线前沿有弱回 波区,强回波从低到高向入流一侧倾斜。径向速度 垂直剖面图上(图 10c),中低层辐合,高层 9 km 以 上辐散,飑线前沿弱回波区对应有强上升气流,后侧 有 20 m · s<sup>-1</sup>的入流急流,表明后部存在较强的下 沉气流。根据临近此次强降雨开始 19 日 20 时越南 北部到广西中南部的探空站计算的大气 0℃层高度 为4.8~5.0 km,强雷达回波主要在 0℃层以下,回 波中的降水粒子相态以液态水为主,因而降水效率 高。该次过程和田付友等(2018)对华南前汛期极端 暴雨分析获得的雷达回波特征都具有回波质心低、 主要强回波在 0℃层以下等共同特征,但后者的强 雷达回波水平尺度宽、回波密实、质心更低,更具高 效的热带型低质心暖云降雨的特征,这是后者降雨 总量更大、强度更强的主要原因。

# 4 可预报性分析

# 4.1 主观预报及数值模式确定性预报降雨可预报 性分析

各级气象台 19 日 20 时起报的 24 h 累计降雨 量(19 日 20 时至 20 日 20 时)主观预报(图略)结果 显示,中央气象台预报在长江中下游沿江至江南北 部至广西东北部有东北一西南向的暴雨带,广西气 象台及下辖各地市气象台订正预报暴雨区在广西东 北部,是中央气象台预报暴雨区的南端部分,各级气 象台暴雨区预报是基本一致的,但对广西中南部地 区均预报了小雨到无雨天气,暖区暴雨区均出现了 漏报。

EC(图 11a)、T639(图 11b)及 JP(图 11c)等全 球数值模式确定性预报的 19 日 20 时起报 24 h 累 计降雨量也均漏报了广西中南部地区暖区暴雨。 GRAPES\_Meso 中尺度模式(图 11d)确定性预报的 19日20时起报24h累计降雨量在广西中南部有三 个相对独立的暴雨区:一个位于广西西南部(雨区 A),一个位于广西东南部(雨区 B),一个位于广西中 部(雨区 C)。广西北部预报了连片大范围暴雨区。 预报暴雨区24h累计雨量普遍≥100 mm,其中广西 中北部≥250 mm。与实况雨带(图 1a)相对照,雨区 A在广西西南部实况雨带北侧;雨区 B在广西东南部 实况雨带南侧,预报雨区呈南北向,与山脉走向垂直, 实况雨带呈西南一东北向,与山脉走向一致;雨区C



图 10 2016 年 4 月 20 日 06:43(a)南宁雷达组合反射率因子,(b)沿 105°径向方向(图 10a 中 黑线)反射率因子剖面,(c)径向速度剖面

Fig. 10 (a) Radar composite reflectivity factor, (b) radial reflectivity factor profile along 105° (black line in Fig. 10a), (c) radial velocity profile of Nanning Radar at 06:43 BT 20 April 2016



(A、B、C 为雨区)

Fig. 11 Accumulated rainfall in 24 h forecasted by numerical models, with the initial field at 20:00 BT 19 April 2016(a) EC, (b) T639, (c) JP, (d) GRAPES\_Meso(A, B and C indicate rain areas)

在实况雨带东侧;广西东北部相对孤立的暖区暴雨 区没有体现。中尺度模式强降雨预报的落区、量级 和范围与实况存在较大误差。由于 GRAPES\_Meso 在日常业务预报中对华南区域的强降雨预报存 在空报率高及落区预报错位、量级预报不正确等问 题,预报员往往要结合 EC、T639、JP、GRAPES 等 全球模式的预报进行综合分析,只有综合分析获得 有可能出现强降雨的情况下,对 GRAPES\_Meso 预 报结论分析后作为订正使用。而本次过程的全球模 式对暖区暴雨预报的是小量级的降雨或无雨,与中 尺度模式 GRAPES\_Meso 的预报结论相差巨大,预 报员综合分析后对 GRAPES\_Meso 的预报结论没 有加以采信。

可见,主观预报及数值模式确定性预报对本次 暖区暴过程短期预报是缺乏预报能力的。但值得注 意的是,中尺度数值模式预报在降雨尺度上与实况 接近,在业务预报中应加以仔细分析,筛选出可用的 信息。

#### 4.2 触发机制可预报性分析

在高温、高湿、高能有利环境条件下,暴雨的发 生与触发机制有着十分重要的关系。下面选取日常 通用业务模式 EC 全球数值模式、GRAPES\_Meso 中尺度模式地面风场及未来3h的累计降雨量资料 分析暖区暴雨触发机制。

EC模式 19日 20时起报 20日 02时广西地面 风场为一致的偏南风,东北部越城岭附近为偏南风 中弱的风速辐合区(位置 A)(图 12a),相应在广西 东北部辐合处(位置 A)预报未来3h(20日 02—05 时)局地降雨量≥20 mm的降雨中心,其他地区降雨



图 12 2016 年 4 月 19 日 20 时模式预报 20 日 02 时的地面风场(a,b)(填色为地形高度)、未来 3 h 降雨量(c,d)及实况(e) (a,c)EC,(b,d)GRAPES\_Meso Fig. 12 Model-forecasted surface wind field (a, b) (colored: topographic height) at 02:00 BT 20

with initial time at 20:00 BT 19 April 2016, rainfall in next 3 h (c, d) and observed rainfall (e) (a, c) EC, (b, d) GRAPES\_Meso

量值小于 3 mm(图 12c)。GRAPES\_Meso 中尺度模 式 19 日 20 时起报 20 日 02 时广西境内地面风场以 偏南风为主,在广西东南部(位置A)预报风速 ≥8 m  $\cdot$  s<sup>-1</sup>的偏南风及辐合,在广西西南部(位置 B) 为西南风与南风的暖式切变线,在广西东北部(位置 C)为南风的风速辐合(图 12b),相应在广西东南部 (位置A)、越南北部(位置B)及广西东北部(位置C) 预报了未来 3 h(20 日 02-05 时)降雨量≥50 mm 的强降雨中心,其中广西东北部和越南北部降雨 ≥70 mm (图 12d),与实况降雨(图 12e)对照,中尺 度模式预报了三个强降雨中心,实况强降雨为从广 西西南一东北的雨带和广西东南部孤立的强降雨 区,降雨落区及雨区走向错误,预报雨区范围和降雨 量值明显偏大。与地面实况风场(图 6b)比,EC 和 GRAPES\_Meso 两模式预报在广西境内以偏南风 为主,有尺度较大的风速辐合和气旋性弯曲,实况为 广西南部地面风场为偏南风,其他地区为地形引起 的局地涡旋或辐合组成的紊乱风场,后期出现中尺 度系统性切变线对局地涡旋或辐合的组织,预报与 实况出现较大偏差。

暖区暴雨是在高温、高湿、高能环境条件下发 生,具有聚集的能量大、抬升凝结高度低及对流抑制 能量小等特点,中小尺度弱扰动就能触发出强烈的 暖区暴雨天气。广西复杂的山地、丘陵地形极易形 成局地的小涡旋、切变线及辐合区等中小尺度扰动, 触发暖区暴雨天气。目前数值模式对地面中小尺度 的弱扰动描述尚存较大的误差,从而造成对触发机 制预报偏差,模式在短期时效内对暖区暴雨触发机 制的预报缺乏预报能力(宫字等,2018;吴亚丽等, 2018)。

#### 4.3 短时临近预报能力分析

从短时临近预报的过程来看,19 日 22 时雷达 回波监测到广西东南部、西北部及东北部等区域同 时有分散对流回波生成,预报员通过分析认为广西 东南部的中尺度自动站偏南风在云开大山和六万大 山山前短时间内仍可维持(图略),初步判断出广西 东南部的对流将维持,由于广西复杂的地形引起的 其他地区地面风场十分紊乱,预报员对已生成回波 的发展趋势及未来新的对流在何处触发始终无法把 握。此时,预报员只对已生成对流回波及下游附近 区域发布未来 2 h 内有小时雨量≥20 mm 的强降雨 临近预报,对预警的发布缺乏有力的依据。 19日23时中尺度自动站监测到广西东南部最 大小时雨量≥40 mm(图9a),预报员分析出广西东 南部的中尺度自动站偏南风在云开大山和六万大山 山前增强(图6a),卫星对流云团(图7a)和雷达回波 (图8a)有继续发展的趋势,对该区域发布了暴雨橙 色预警信号。此时,虽然越南北部没有自动站和雷 达回波资料,但FY-2G卫星云图监测到越南北部正 有较活跃对流云团发展合并东移(图7a),根据环境 场分析和预报员的经验可以判断该区域云团未来可 能影响广西西南部地区,提前发布了该地区未来6 h 内有小时雨量≥20 mm 的强降雨预报。

此后的一段时间广西境内的地面风场依然紊乱 (图 6b),有局地对流云团不断生消,但始终无法有 效组织(图 7b、图 8b)。由于触发和维持机制难以捕 捉,预报员只能对已生成对流回波附近区域发布未 来 2h强降雨临近预报。随着偏南气流向北推进, 中尺度辐合线的形成(图 6c),对流得以有效组织形 成云带(图 7c),雷达回波形成有强飑线镶嵌的线状 回波(图 8c),明显雨带逐渐显现(图 9c),根据环境 场的演变和外推,此后对下游地区的广西中东部地 区发布了强对流天气的短时临近预报及预警等服务 信息。

该次过程中,根据卫星云图、雷达及自动站等资料加上预报员的综合分析,能对局地暖区暴雨作出 定性短时临近预报,发布预警信息,临近预报有一定 的预报能力,但由于广西地形复杂因此对对流在何 处被触发及未来如何发展始终难以把握,这不仅制 约了强降雨预报预警发布的提前量,而且出现了较 多的空报或漏报现象,定点定量的预报准确率 TS 评分只有 26%,远低于广西锋面和台风强降雨的短 时临近预报准确率。目前在客观预报能力欠缺情况 下,预报员对暖区暴雨发生机制的正确认识和预报 经验在短时临近预报中应用仍有现实意义。

# 5 结论与讨论

本文利用业务预报中的数值预报产品、地面中 尺度自动站观测、常规地面及高空观测、新一代天气 雷达及 FY-2G 卫星探测等资料,对 2016 年 4 月 19—20 日影响广西的暖区暴雨天气过程预报失误 进行剖析,得到以下主要结论:

(1)这次暴雨具有区域分散、范围小,时段集中,局地雨量特别大、雨强强及与地形相关等华南暖

区暴雨特征。环流形势为中高纬一槽一脊型,华南 位于高空急流的右后侧,强烈辐散区。高空天气系 统为高原槽和印缅槽合并移入上游云南中东部地区 后缓慢东移,华南低空气流增强为急流。中低空深 厚急流及西南暖低压发展,为越南北部至广西中南 部提供了高温、高湿、高能的环境条件,地形性辐合 及涡旋触发了对流的发生,中尺度辐合线有效组织 了对流的发展,雷达回波具有质心低、降雨效率高等 暖云降雨的特征。

(2) 主观预报及数值模式确定性预报对本次暖 区暴雨过程 24 h 短期时效预报缺乏预报能力。在 高温、高湿、高能环境中,主观预报及数值模式于短 期时效内不能准确把握触发机制是预报失误的原 因。

(3) 通过分析广西上游越南地区对流云团、地 面中尺度辐合线演变及地形作用等触发条件,可以 在短时临近预报时效内对暖区暴雨一定程度上做出 主观定性预报,发布预报预警信息,弥补数值模式短 期预报的不足。目前在客观预报能力依然存在很大 不足的情况下,预报员对暖区暴雨发生机制的正确 认识和预报经验以及加强对数值预报结果的理解在 短时临近预报中仍有现实意义。

#### 参考文献

- 陈翔翔,丁治英,刘彩虹,等,2012.2000—2009 年 5、6 月华南暖区暴 雨形成系统统计分析[J]. 热带气象学报,28(5):707-718. Chen X X,Ding Z Y,Liu C H, et al, 2012. Statistic analysis on the formation system of warm-sector heavy rainfall in May and June from 2000—2009[J]. J Trop Meteor, 28(5):707-718(in Chinese).
- 陈玥,谌芸,陈涛,等,2016.长江中下游地区暖区暴雨特征分析[J]. 气象,42(6):724-731. Chen Y, Chen Y, Chen T, et al, 2016. Characteristics analysis of warm sector rainstorms over the middle lower reaches of the Yangtze River[J]. Meteor Mon,42(6): 724-731(in Chinese).
- 谌芸,吕伟绮,于超,等,2018.北方一次暖区大暴雨降水预报失败案 例剖析[J]. 气象,44(1):15-25. Chen Y,Lyu W Q,Yu C,et al, 2018. Analysis of a forecast failure case of warm sector torrential rainfall in North China[J]. Meteor Mon,44(1):15-25(in Chinese).
- 丁治英,刘彩虹,沈新勇,2011.2005—2008 年 5、6 月华南暖区暴雨 与高、低空急流和南亚高压关系的统计分析[J]. 热带气象学报, 27(3):307-316. Ding Z Y, Liu C H, Shen X Y, 2011. Statistical analysis of the relationship among warm sector heavy rainfall, upper and lower tropospheric jet stream and South Asia high in May and June from 2005 to 2008[J]. J Trop Meteor, 27(3): 307-316

(in Chinese).

- 宫宇,代刊,徐珺,等,2018. GRAPES-GFS 模式暴雨预报天气学检验 特征[J]. 气象,44(9):1148-1159. Gong Y, Dai K, Xu J, et al, 2018. Synoptic verification characteristics of operational GRAPES-GFS model heavy rain event forecast[J]. Meteor Mon,44(9): 1148-1159(in Chinese).
- 郭弘,林永辉,周淼,等,2014.华南暖区暴雨中一次飑线的中尺度分析[J].暴雨灾害,33(2):171-180.Guo H,Lin Y H,Zhou M, et al,2014. Mesoscale analysis on a squall line in the warm-sector heavy rainfall over southern China[J]. Torr Rain Dis,33 (2):171-180(in Chinese).
- 何立富,陈涛,孔期,2016. 华南暖区暴雨研究进展[J]. 应用气象学 报,27(5):559-569. He L F,Chen T,Kong Q,2016. A review of studies on prefrontal torrential rain in South China[J]. J Appl Meteor Sci,27(5):559-569(in Chinese).
- 黄士松,1986. 华南前汛期暴雨[M]. 广州:广东科技出版社:94-95. Huang S S,1986. Rainstorm During Prerainy Season in South China[M]. Guangzhou:Guangdong Science & Technology Press: 94-95(in Chinese).
- 林良勋,冯业荣,黄忠,等,2006. 广东省天气预报技术手册[M]. 北 京:气象出版社:119. Lin L X, Feng Y R, Huang Z, et al,2006. Technical Guidance on Weather Forecating in Guangdong Province [M]. Beijing; China Meteorological Press:119(in Chinese).
- 盛杰,郑永光,沈新勇,等,2019.2018 年一次罕见早春飑线大风过程 演变和机理分析[J]. 气象,45(2):141-154. Sheng J,Zheng Y G,Shen X Y, et al, 2019. Evolution and mechanism of a rare squall line in early Spring of 2018[J]. Meteor Mon,45(2):141-154(in Chinese).
- 陶诗言,1980.中国之暴雨[M].北京:科学出版社.Tao S Y,1980. Heavy Rain in China[M].Beijing:Science Press(in Chinese).
- 田付友,郑永光,张小玲,等,2018.2017 年 5 月 7 日广州极端强降水 对流系统结构、触发和维持机制[J]. 气象,44(4):469-484. Tian F Y, Zheng Y G, Zhang X L, et al, 2018. Structure, triggering and maintenance mechanism of convective systems during the Guangzhou extreme rainfall on 7 May 2017[J]. Meteor Mon,44 (4):469-484(in Chinese).
- 韦统健,1994. 华南前汛期暖区暴雨流场结构的特征[J]. 热带气象学 报,10(1):37-46. Wei T J,1994. The typical structure of the flow field in warm-section heavy rain occurring in southern China[J]. J Trop Meteor,10(1):37-46(in Chinese).
- 吴亚丽,蒙伟光,陈德辉,等,2018. 一次华南暖区暴雨过程可预报性 的初值影响研究[J]. 气象学报,76(3):323-342. Wu Y L, Meng W G, Chen D H, et al, 2018. A study of the impact of initial conditions on the predictability of a warm-sector torrential rain over South China[J]. Acta Meteor Sin,76(3):323-342(in Chinese).
- 夏茹娣,赵思雄,2009.2005 年 6 月广东锋前暖区暴雨 β 中尺度系统 特征的诊断与模拟研究[J].大气科学,33(3):468-488. Xia R D,Zhao S X,2009. Diagnosis and modeling of meso-β-scale systems of heavy rainfall in warm sector ahead of front in South China (middle part of Guangdong Province) in June 2005[J].

Chin J Atmos Sci, 33(3): 468-488(in Chinese).

- 叶朗明,苗峻峰,2014. 华南一次典型回流暖区暴雨过程的中尺度分析[J]. 暴雨灾害,33(4):342-350. Ye L M, Miao J F,2014. Mesoscale analysis of a typical heavy rain event caused by returning flow in the warm sector in southern China[J]. Torr Rain Dis,33 (4):342-350(in Chinese).
- 张晓美,蒙伟光,张艳霞,等,2009. 华南暖区暴雨中尺度对流系统的 分析[J]. 热带气象学报,25(5):551-560. Zhang X M, Meng W G,Zhang Y X, et al,2009. Analysis of mesoscale convective systems associated with a warm sector heavy rainfall event over South China[J]. J Trop Meteor,25(5):551-560(in Chinese).
- 赵金彪,罗建英,高安宁,等,2010.2008 年 6 月广西锋前暖区暴雨过 程分析[J]. 热带地理,30(2):145-150. Zhao J B,Luo J Y,Gao A N,et al,2010. Analysis on a heavy rain process in a warm sector in Guangxi in June 2008[J]. Trop Geogr, 30(2):145-150(in Chinese).
- 郑彬,林爱兰,袁金南,等,2007. 广东 0506 大暴雨的成因探讨[J]. 热 带气象学报,23(2):135-140. Zheng B,Lin A L,Yuan J N,et al, 2007. Study on the cause of June 2005 torrential rain in Guangdong[J]. J Trop Meteor,23(2):135-140(in Chinese).

- 周秀骥,薛纪善,陶祖钰,等,2003.98 华南暴雨科学试验研究[M]. 北京:气象出版社.Zhou X J,Xue J S,Tao Z Y,et al,2003.Scientific Experiment on Rainstorm in South China in 1998[M]. Beijing:China Meteorological Press(in Chinese).
- Davis C A, Lee W C, 2012. Mesoscale analysis of heavy rainfall episodes from SoWMEX/TiMREX[J]. J Atmos Sci, 69(2): 521-537.
- Doswell Ⅲ C A, Brooks H E, Maddox R A, 1996. Flash flood forecasting:an ingredients-based methodology[J]. Wea Forecasting, 11(4):560-581.
- Keene K M, Schumacher R S, 2013. The bow and arrow mesoscale convective structure[J]. Mon Wea Rev, 141(5):1648-1672.
- Peters J M, Schumacher R S, 2015. Mechanisms for organization and echo training in a flash-flood-producing mesoscale convective system[J]. Mon Wea Rev, 143(4):1058-1085.
- Wu M W, Luo Y L, 2016. Mesoscale observational analysis of lifting mechanism of a warm-sector convective system producing the maximal daily precipitation in China mainland during pre-summer rainy season of 2015[J]. J Meteor Res, 30(5):719-736.