

张容菁, 韦荣, 李秀昌, 等. 台风“三巴”(2316)特大暴雨成因及预报偏差分析[J]. 气象研究与应用, 2023, 44(4): 29–35.

ZHANG Rongjing, WEI Rong, LI Xiuchang, et al. Analysis of causes and forecast deviations of severe rainfall caused by Typhoon "Sanba" (2316)[J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2023, 44(4): 29–35.

台风“三巴”(2316)特大暴雨成因及预报偏差分析

张容菁¹, 韦 荣¹, 李秀昌¹, 黄小燕², 林确略^{1*}

(1. 玉林市气象局, 广西 玉林 537000; 2. 广西壮族自治区气象科学研究所, 南宁 530022)

摘要: 基于常规气象观测资料、欧洲中期天气预报中心全球气候第五代大气再分析数据集(ERA5)、卫星、双偏振雷达观测资料和数值模式预报产品, 对 2316 号秋季台风“三巴”造成广西特大暴雨的成因及预报偏差进行分析。结果表明: (1) 高空辐散场和低空东南急流的卷入使台风“三巴”进入北部湾后强度增强, 广西低层为相当位温大值区。冷空气的加入使得边界层东南急流和偏东气流在台风东北侧和北侧强烈汇合, 造成了在冷垫之上的强辐合抬升运动, 引发极端强降水。(2) 台风“三巴”本体和倒槽旺盛发展的对流云团是造成特大暴雨的直接影响系统, 桂东南到沿海上游地区不断有回波生成发展, 形成明显的“列车效应”, 雷达双偏振参量显示大暴雨落区低层存在明显的差分传播相移率(Z_{DR})和差分反射率因子(K_{DP})高值区。(3) 数值模式对此次极端降雨较弱的预报能力, 预报员对倒槽特大暴雨的对流特征、强度和持续时间认识的不足, 导致预报员对冷空气主体南下速度预报偏快, 对累积雨量的预报偏小。

关键词: 台风“三巴”; 特大暴雨; 成因分析; 预报偏差

中图分类号: P457.6

文献标识码: A

doi: 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2023.4.05

台风暴雨是多尺度天气系统相互作用的产物, 台风路径、强度及结构受环境流场影响较大, 暴雨落区预报十分复杂^[1]。台风暴雨的强度与落区, 除了受大尺度、中尺度天气系统的影响外, 还与台风自身结构、不稳定能量、地形等因素有关^[2-5]。由于环流背景的季节性变化, 秋季台风往往具有强度更强, 移动路径更偏南的特点^[6], 其移动路径、强度变化和带来的风雨影响一直是业务预报中的重点与难点。学者们通过研究秋季台风暴雨个例发现, 偏南气流和东南气流的辐合及低空急流的存在是触发和维持大暴雨的有利条件^[7], 台风倒槽区域、减弱的台风中心附近不稳定的大气层结是出现特大暴雨的主要原因^[8], 而中纬度南下的弱冷空气往往对秋季台风的降雨有明显增幅作用^[9-13]。

广西常位于秋台风的前进方向上, 受秋台风的影响易出现极端暴雨天气^[14], 进而引发的暴雨洪涝灾害严重威胁人民的生命财产安全。目前鲜少有对

从北部湾北上引发广西大范围极端暴雨的秋季台风的研究, 业务人员对此类台风暴雨的极端性预报能力较为薄弱, 有必要对该类过程进行分析总结, 以提高预报准确率。本文利用常规气象观测资料、ERA5 再分析资料、卫星、双偏振雷达观测资料和数值模式预报产品, 运用天气学诊断分析方法, 对 2316 号秋季台风“三巴”造成广西特大暴雨的成因及预报偏差进行分析, 加深对此类台风暴雨的认识, 为今后相似台风暴雨预报提供参考。

1 资料与方法

本文采用的资料包括自动站气象观测资料、ERA5 再分析资料($0.25^\circ \times 0.25^\circ$)、FY-4A 卫星资料、玉林双偏振雷达观测资料和数值模式降水预报产品。主要运用天气学诊断分析方法, 针对动力、热力、水汽条件等方面对 2316 号秋季台风“三巴”造成广西特大暴雨的成因及预报偏差进行分析。

收稿日期: 2023-11-25

基金项目: 广西气象科研计划项目(桂气科 2023ZL11)、广西气象青年人才培养项目(桂气科 2023QN13)、玉林气象科研项目(玉气科[2021]04 号)

第一作者简介: 张容菁(1996—), 女, 助理工程师, 主要从事短期天气预报及环境气象研究工作。E-mail: zorina_rjzhang@foxmail.com

* 通讯作者: 林确略(1982—), 男, 正高级工程师, 从事短期天气预报和灾害性天气研究。E-mail: l_ql@163.com

2 结果与分析

2.1 台风路径及风雨实况

2023 年第 16 号台风“三巴”(Sanba)于 2023 年 10 月 18 日 14 时在南海中西部海面生成,向北偏西方向移动,于 19 日 09 时前后以热带风暴级在海南省东方市第一次登陆。登陆后继续北行进入北部湾海面,强度缓慢加强并于 20 日 00 时在广西涠洲岛东北方向的北部湾北部海面加强为强热带风暴级($25\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,10 级)。随后强度逐渐减弱,20 日 07 时折向偏南方向移动,于 09:45 前后在广东湛江市遂溪县沿海再次登陆,之后向偏南方向移动并再次进入北部湾海面。19:40 前后以热带低压在海南临高县第三次登陆,23:00 时中央气象台对其停止编号。

受“三巴”影响,广西出现极端强降水和大风天气。主要强降雨时段为 10 月 19 日 08 时至 20 日 08 时,暴雨落区主要位于台风移动路径北侧,包括广西南部沿海地区。此次过程广西全区有 640 个气象站累积雨量 $\geq 50\text{ mm}$,452 个气象站累积雨量 $\geq 100\text{ mm}$,103 个气象站累积雨量 $\geq 250\text{ mm}$ 。过程广西最大 24 h 降雨量出现在北海市银海侨港亚平气象站 780.3 mm,突破广西 24 h 降雨量历史极值;广西东南部的玉林市最大 24 h 降雨量出现在博白县东平镇达 522.1 mm,突破博白县 24 h 降雨量历史极值,最大小时雨量出现在玉林市博白县文地镇姜充气象站 107.8 mm(19 日 22—23 时)。“三巴”造成广西 14 个气象站出现 10 级以上大风。总体而言,台风“三巴”对广西造成的影响以降雨为主,大风次之。本次过程具有降雨时间长、小时雨强较大、累积雨量大、极端性极强的特点。

2.2 台风特大暴雨成因分析

2.2.1 环流背景

10 月南亚高压减弱南移至南海上空,其脊线位于 20°N 附近,台风“三巴”进入北部湾期间,广西上空 200 hPa 为反气旋环流控制,高层辐散抽吸作用对大范围上升运动的发展有促进作用。19 日 08 时 500 hPa 高纬地区呈两槽一脊型,中西伯利亚地区受脊前偏北气流控制;中纬度地区四川—重庆有短波槽快速东移,引导冷空气南下;低纬地区西太平洋副热带高压呈东—西带状分布,控制 28°N 以南大部地区,滇黔桂交界处有短波东移,引导台风向北偏东方向移动。华南低层为相当位温大值区,其中广西大部 850 hPa 相当位温达到 337 K 以上,桂东南至沿海地

区甚至相当位温达到 344 K 以上,相当位温大值中心位于台风本体和台风北侧倒槽影响区域,随着台风继续北上,沿海低层相当位温进一步增加,于 19 日 20 时达到 350 K 以上,低层具备高温高湿的不稳定条件。台风“三巴”位于副热带高压控制区,其东侧洋面上存在闭合高压中心,中心强度达 592 dagpm。受海上高压西侧偏南引导气流和短波槽前西南引导气流影响,台风持续向北偏东方向移动,台风倒槽长时间维持在广西上空,桂东南和沿海地区受到倒槽影响,洋面上的水汽在此强烈辐合抬升,水平散度沿 22°N 垂直剖面图显示(图 1a、1b),19 日 08 时沿海地区中低层为负散度区,300 hPa 转为正散度区控制,低层辐合高层辐散为暴雨的发生提供良好的动力条件,对应中层有上升运动速度大值区,19 日 20 时,沿海地区中低层负散度区范围明显加大,且延伸高度更高,沿海地区中层上升运动速度明显加大。

19 日 08 时,台风“三巴”环流中心位于北部湾海面,850 hPa 西南季风不活跃,台风南侧对流云系发展不旺盛,但台风东侧和东北侧有东南急流为台风输送暖湿平流,使其强度缓慢增强。研究表明,台风暴雨的发生需要不仅要有充足的水汽条件,持续不断的水汽输送条件尤为重要^[8,15]。比湿剖面图显示(图 1c、图 1d),桂南地区边界层比湿大于 $15\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,925 hPa 至 500 hPa 比湿均大于 $8\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,大气湿度条件良好。850 hPa 水汽通量场上,19 日 08 时存在一个从南海指向桂东南地区的水汽通道,水汽通量大值区随台风东侧的东南风急流不断北上加强,于 19 日夜间中心值达到 $35\text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 。在东南风急流的作用下,源源不断的水汽持续向广西区域输送,并在台风倒槽的作用下使桂南地区出现一水汽通量散度大值区,最大水汽通量散度达到 $-9.5\times 10^{-7}\text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$,水汽在此强烈辐合抬升,造成特大暴雨的发生。

2.2.2 冷空气的影响

地面天气图显示,19 日 08 时冷空气前沿到达贵州—湖南—江西中部一带,此时“三巴”位于海南岛西部北部湾海面上,广西区域气压梯度较小;随着冷空气南压,广西区域气压梯度逐渐加大。19 日 20 时海平面气压叠加 3 h 变温图显示,冷空气主体已到达贵州、湖南和广西交界一带,但弱冷空气的渗入导致处在台风北部的广西和广东境内风场转变为弱北风,且存在大范围弱的 3 h 负变温。分析同时次北海探空图发现,北海探空站在 925~1 000 hPa 之间出现

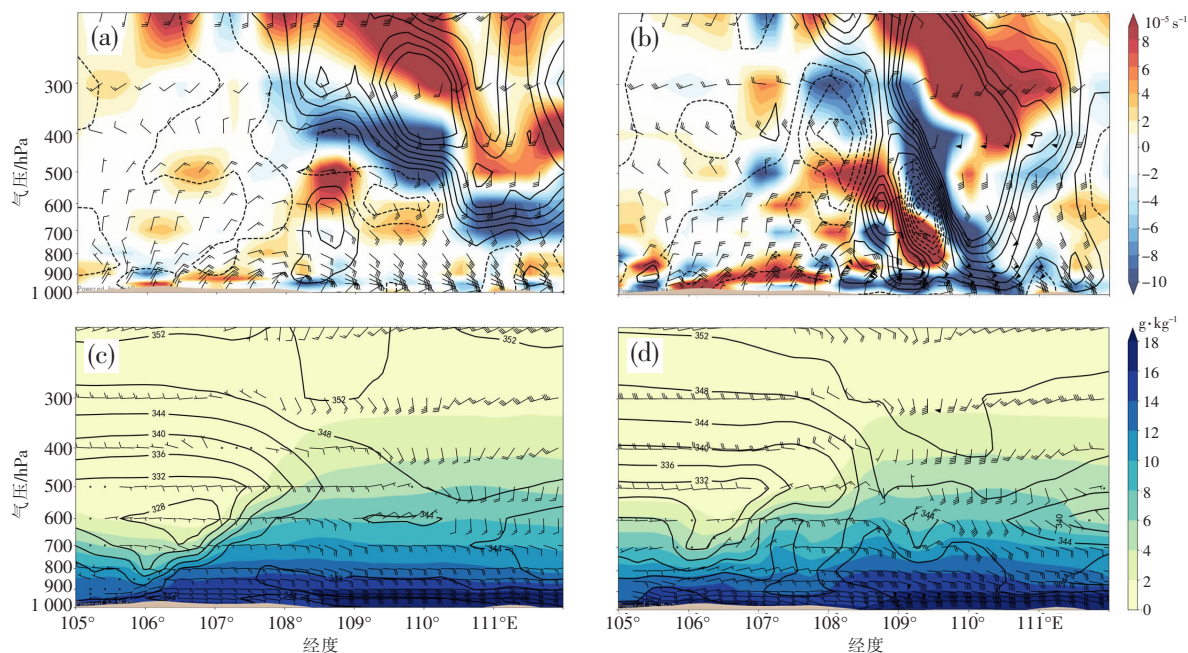


图 1 19 日 08 时(a)、19 日 20 时(b)垂直速度(等值线,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)和水平散度(阴影,单位: 10^{-5}s^{-1})沿 22°N 的垂直剖面图;19 日 08 时(c)、19 日 20 时(d)相当位温(等值线,单位: K)和比湿(阴影,单位: $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)沿 22°N 的垂直剖面图

锋面逆温,证实了地面锋面已到达北海;冷空气的加入,使 925 hPa(图 2)东南急流和偏东气流在台风东北侧和北侧强烈辐合(强辐合区的散度 $<-25\times 10^{-5}\text{s}^{-1}$),造成在冷垫之上的强辐合抬升运动,引发极端强降水。20 日 05 时 1020 hPa 线南压至桂北,此时台风中心位于沿海,冷空气主体从台风北侧逼近,阻挡“三巴”继续北上并使其 07 时转向南移,随后广西地区雨势明显减弱。本次过程 19 日晚上入侵的弱冷空气,是造成“三巴”台风暴雨增幅的关键因素,也是造成台风转向南移的主要原因,而冷空气主体南下速度比预计偏慢,导致预报员低估台风的影响时长,未

能准确预报出本次台风暴雨的极端性。

2.2.3 云图演变

卫星云图的演变能较好地体现台风的发展情况、强度变化特征以及水汽输送情况^[16-17]。红外云图显示,台风“三巴”倒槽特大暴雨的对流特征明显,其影响区域雨强大且降水持续时间长。19 日 08 时台风“三巴”环流云系结构主要分为两个部分(图 3a),对流云团主要分布在台风主体北侧和东侧的东南气流中,此时沿海地区已受台风北侧螺旋云带和东侧对流云团影响而产生降水,因西南季风强度较弱,台风西侧南侧水汽输送较弱,导致云系较少。19 日 14 时(图 3b),随着东南急流的北上加强,台风主体北侧和东侧的对流云团趋于合并加强,并持续影响沿海和桂东南地区;19 日 20 时,随着台风强度逐渐北上增强为强热带风暴,台风主体云系结构更为清晰完整,云顶亮温进一步降低至 210 K 以下,云系发展达到最旺盛阶段(图 3c),最强对流团分布在台风北侧倒槽区域,特别是倒槽东侧的偏南风急流区域,对流云团长时间停留在沿海和桂东南上空,是造成特大暴雨的主要原因。20 日 08 时(图 3d),受冷空气主体影响台风强度有所减弱,云团逐渐变得松散且对流云团逐渐东移,对广西影响减弱。

2.2.4 台风降水雷达回波特征

台风过程强降雨落区通常位于台风云墙回波和

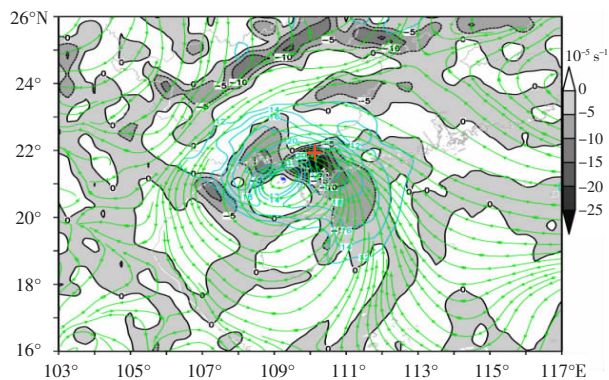


图 2 19 日 22 时流场、散度场(阴影和黑色等值线,单位: 10^{-5}s^{-1} ,显示 $\leq 0\text{s}^{-1}$)和风速大小(蓝色等值线,显示 $\geq 12\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$),+为此后最大小时雨量(博白县文地 107.8mm)出现的位置

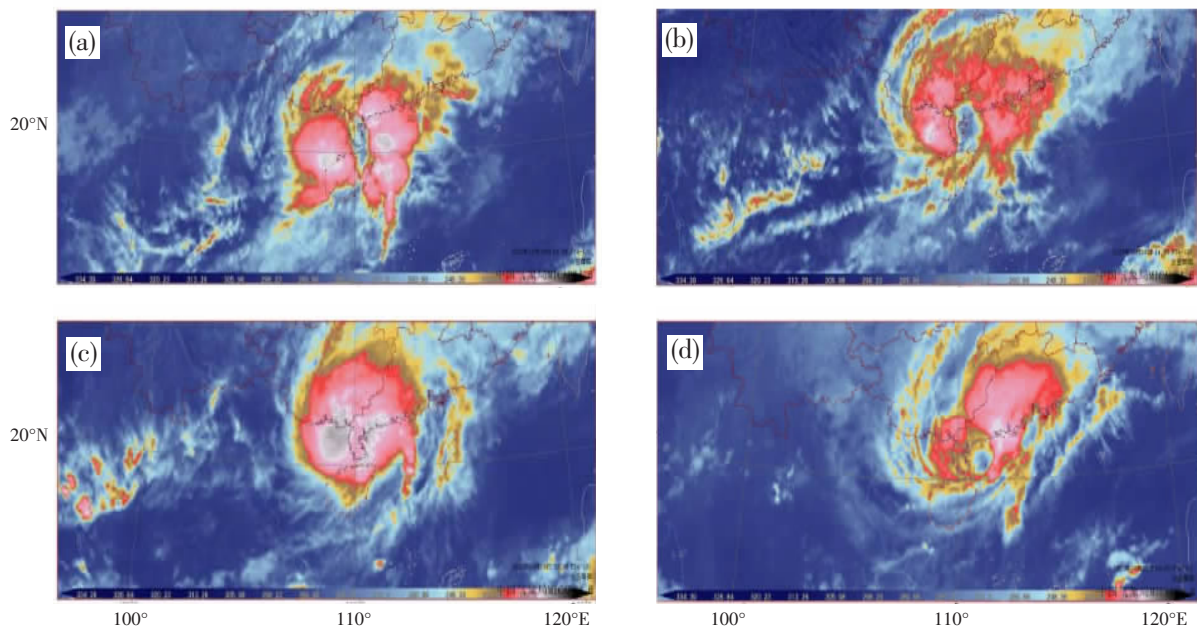


图3 “三巴”FY-4A 卫星云图演变特征(单位:K)

(a)19 日 08 时;(b)19 日 14 时;(c)19 日 20 时;(d)20 日 08 时

螺旋云带影响区域^[18],通过分析华南雷达回波组合反射率发现,本次过程降水回波范围广、强度较强、持续时间长,大部回波强度在 30 dBZ 以上,最强回波达到 50 dBZ 以上,云墙密蔽云区镶嵌有对流单体,回波顶高大多在 6~9 km,少数能达到 15 km。18 日 20 时至 19 日 08 时,“三巴”台风眼区不清晰,回波主要位于台风中心北侧倒槽区域,其东侧受东南急流影响形成回波强度大于 50 dBZ 的螺旋雨带,台风南侧回波则很弱。19 日 20 时回波范围明显扩大并逐渐向西北移动,台风中心东侧形成两条螺旋雨带,玉林雷达强降雨报警产品提示桂东南地区将有 1h 55 mm 的强降雨天气发生,能较好地指示降雨的

增强。广东廉江市、湛江市等地一直源源不断有回波生成发展,并向西北方向移动,形成明显的“列车效应”,长时间影响桂东南和沿海一带,造成极端暴雨的发生。

玉林雷达反射率因子剖面图显示(图 4a),强降雨回波质心在 5 km 以下,呈现出明显的暖云降水特征。玉林雷达双偏振参量显示,19 日 18 时开始桂东南地区上空大部地区 Z_{DR} 值从 0~0.5 dB 逐渐增大到 0.8~1.5 dB,其中博白、浦北地区出现了大于 3 dB 的高值区,说明雨滴尺寸有明显增大。差分反射率因子 Z_{DR} 剖面图显示(图 4b),在博白附近有一强度为 2.5 dB 的 Z_{DR} 柱高度达到 5 km 附近,象征着有较强

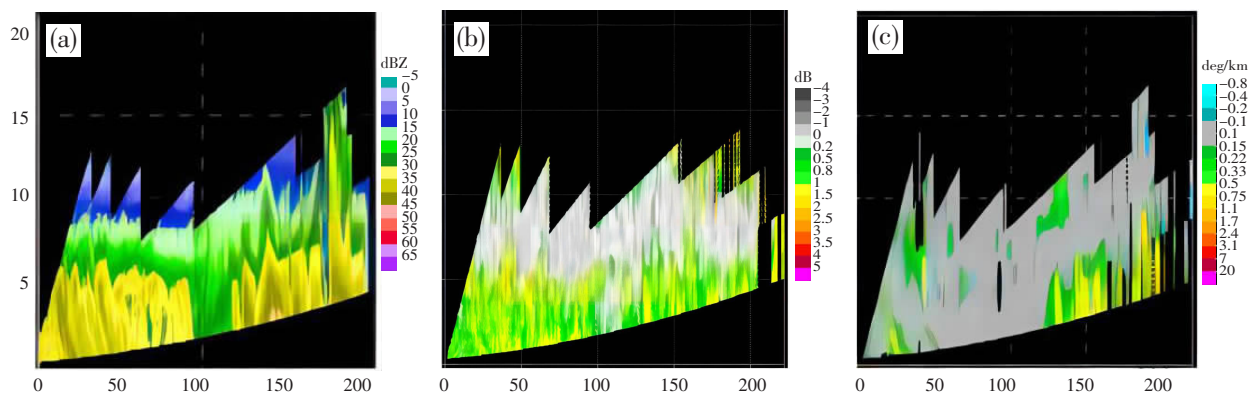


图4 19 日 20 时玉林雷达 0.5°仰角回波剖面

(a) R ; (b) Z_{DR} ; (c) K_{DP}

的上升气流存在,此时台风“三巴”东侧的东南气流往桂东南地区源源不断地输送水汽,为雨强的增大和持续时间提供有利的条件。 K_{DP} 主要由液态降水粒子贡献,因此能较好地体现降水的强度信息^[19],分析同时刻的比微差相移 K_{DP} 回波发现,19日18时开始有 K_{DP} 高值区从雷州半岛旋转北上,移向桂东南和桂南沿海地区,在 0.5° 仰角, K_{DP} 值达到 $7^\circ\cdot\text{km}^{-1}$,在 2.4° 仰角其值达到 $3.1^\circ\cdot\text{km}^{-1}$,可见低仰角看到的高值区更为明显,且雨滴粒子的密度大且多,粒子的液态含水量非常大。剖面图(图4c)也较好地体现该时刻廉江市附近存在 K_{DP} 柱,其高度达到了7 km附近。

3 预报偏差分析

3.1 台风路径及强度预报偏差

18日20时起报的欧洲中期天气预报中心(EC)细网格预报产品显示,冷空气主体将于20日02时左右开始影响台风环流,且中央气象台19日08时的台风路径预报显示,台风“三巴”将于20日08时达到最北(20.8°N),随后转向西南方向移动。但在海上高压西侧的偏南风和高空短波槽的引导作用下,预报路径与实况出现较明显偏差,实际上台风“三巴”于20日07时到达路径最北点(21.4°N , 109.7°E),该位置比预报的位置偏北偏东。19日白天到20日凌晨台风中心持续向北偏东方向移动,使台风外围环流整体北移,沿海和桂东南地区提前受到台风环流影响而产生强降雨。加上实况冷空气主体南下的速度较预报偏慢,“三巴”主体长时间在海上,摩擦作用较小移速较快($23\sim 25\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),且易得到比较有利的能量补充,预报员对台风倒槽影响广西的持续时间有所低估,导致了对本次过程累积雨量的预报偏小。

3.2 台风降雨预报偏差

分析各家数值预报18日20时起报的19日08时至20日08时广西累积降雨量分布发现,本次台风过程大尺度模式均报出了沿海到桂东南的暴雨落区,但对降雨的极端性把握不足,均漏报了特大暴雨落区;其中,中国气象局全球天气模式(GFS)表现更好,欧洲中期天气预报中心高时空分辨率气象数值预报模式(EC_HR)预报的桂中到桂东北地区的暴雨带空报。本次台风特大暴雨过程中尺度模式——中国气象局上海数值预报模式(CMA-SH9)表现最好,不仅能准确预报出沿海到桂东南的暴雨落区,还能准确把握降雨量级,但对桂中到桂东北的暴雨量

级预报偏大。通过总结历史个例发现,CMA-SH9对于暴雨过程的量级把握较好,但对于暴雨落区的预报能力还有待加强。台风模式表现欠佳,对暴雨落区的预报偏西,且未能准确把握降雨量级,对桂东南地区的降雨量级预报明显偏低。19日08时上级台站指导预报能较好地预报暴雨落区,但对暴雨量级把握偏小,本级预报员对台风路径转折的判断时间有误,对倒槽特大暴雨的对流特征、强度和持续时间认识不够,导致对本次台风暴雨的极端性预估不足。可见,台风过程降雨预报不能过度依赖台风模式产品,大尺度模式对暴雨落区位置也有一定的指示意义,但对降雨量级预报偏低,需结合中尺度模式对降雨量级进行订正。

4 结论

基于多源气象数据资料,对2316号秋季台风“三巴”造成广西特大暴雨的成因及预报偏差进行分析,得到以下结论:

(1)高空辐散场和低空东南急流的卷入使台风“三巴”进入北部湾后强度增强,广西大部处于相当位温大值区,其中沿海到桂东南地区相当位温随着台风北上而逐渐增加。冷空气的加入,使925 hPa东南急流和偏东气流在台风东北侧和北侧强烈辐合,造成了在冷垫之上的强辐合抬升运动,引发极端强降水。

(2)对流云团主要分布在台风主体北侧和东侧的东南气流中,桂东南到沿海上游地区不断有回波生成发展,形成明显的“列车效应”,造成极端暴雨的产生,雷达双偏振参量显示桂东南地区存在明显的 Z_{DR} 和 K_{DP} 高值区,低仰角看到的高值区更为明显,暖云降水特征明显。

(3)本次台风特大暴雨过程中尺度模式(CMA-SH9)表现最好,但预报员较多取信EC细网格的形势预报,因此对冷空气主体南下速度的预报偏快,从而误判台风的移动路径,对台风倒槽影响广西的持续时间和北侧的辐合强度有所低估,并且对台风北侧降水的对流特征、强度和持续时间认识不足,导致本次过程累积雨量的低估。

参考文献:

- [1] 吴秀兰,李霞,卢山.“浪卡”不对称结构和异常暴雨落区分析[J].气象研究与应用,2011,32(3):5-7.
- [2] 韩慎友,陈伟斌,陈见.超强台风“天鸽”(1713)近海急刷

- 加强特征及诊断分析[J].气象研究与应用,2020,41(1):70-74.
- [3] 周渭,蒋平凡,黎馨.2015 台风“彩虹”强降雨过程分析[J].气象研究与应用,2016,37(2):16-19.
- [4] 黄滢,潘一铭,蒋静.秋季台风“海燕”的特点及成因分析[J].气象研究与应用,2019,40(3):13-17.
- [5] 朱红芳,王东勇,娄珊珊,等.地形对台风“海葵”降水增幅影响的研究[J].暴雨灾害,2015,34(2):160-167.
- [6] 高拴柱.为什么 9 月台风仍活跃 秋台风威力会更大吗?[N].人民政协报,2019-09-12(6).
- [7] 李慧芹,李江南,于艳,等.一次海南秋季台风暴雨的特征和成因分析[J].热带气象学报,2018,34(1):133-144.
- [8] 范爱芬,彭霞云,娄小芬,等.秋季台风倒槽特大暴雨的对流特征和预报难点分析[J].暴雨灾害,2022,41(3):298-307.
- [9] 黄增俊,黄归兰,丘良,等.冷空气侵入超强台风“海燕”造成广西强降雨增幅成因分析[J].气象研究与应用,2015,36(1):31-37.
- [10] 吴海英,陈海山,曾明剑,等.冷空气对台风“海葵”(1211)倒槽特大暴雨作用分析[J].热带气象学报,2014,30(5):871-880.
- [11] 黄莉,白龙,李紫甜.适当冷空气对秋季台风暴雨增幅作用研究[J].灾害学,2018,33(2):38-44.
- [12] 杜惠良,黄新晴,冯晓伟,等.弱冷空气与台风残留低压相互作用对一次大暴雨过程的影响[J].气象,2011,37(7):847-856.
- [13] 高安宁,张瑞波.2011 年秋季强台风“纳沙”导致广西灾害成因分析[J].灾害学,2013,28(1):54-58.
- [14] 赵飞,包文雯,张雪波,等.台风“浪卡”(2016)暴雨成因及数值预报模式偏差分析[J].气象研究与用,2021,42(3):83-87.
- [15] 柳龙生,许映龙.台风“暹芭”(2203)残涡陆上维持并引发大范围降水过程的成因[J/OL].高原气象:1-13.[2024-01-07].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1061.P.20231107.1112.010.html>.
- [16] 刘远方.台风“海鸥”影响南宁机场强降水过程分析[J].气象研究与应用,2016,37(1):56-60.
- [17] 李晓俞,陈生,梁振清,等.台风“山竹”期间 GPM 卫星降水产品的误差评估[J].气象研究与应用,2020,41(3):8-15.
- [18] 赖珍权,翟丽萍,古文保.1415 号台风“海鸥”的卫星云图及雷达资料分析[J].气象研究与应用,2017,38(2):10-13,115-116.
- [19] 黄丹青.河南“21·7”特大暴雨的大气结构与双偏振雷达回波分析[D].南京信息工程大学,2022.

Analysis of causes and forecast deviations of severe rainfall caused by Typhoon "Sanba" (2316)

ZHANG Rongjing¹, WEI Rong¹, LI Xiuchang¹, HUANG Xiaoyan², LIN Quelue^{1*}

(1.Yulin Meteorological Bureau, Guangxi Yulin 537000, China;

2.Guangxi Institute of Meteorological Sciences, Nanning 530022, China)

Abstract: Using conventional meteorological observation data, ERA5 reanalysis data, satellite data, dual-polarization radar observation data and numerical model products, the causes and forecast deviations of the extreme rainfall caused by Typhoon "Sanba" (No. 2316) in the autumn in the Guangxi region were analyzed. The results showed that: (1) The combined effect of high-level divergence fields and low-level southeasterly jet streams strengthened Typhoon "Sanba" after it entered the Beibu Gulf. The lower layers of Guangxi are a significant region of high equivalent potential temperature. The inclusion of cold air made the boundary layer southeasterly jet and the easterly airflow converge strongly in the northeastern and northern sides of the typhoon, resulting in a strong convergence and uplift movement on top of the cold cushion, which caused extreme heavy precipitation in southeastern Guangxi. (2) The vigorous development of the main body of Typhoon "Sanba" and the inverted trough led to the formation of convective cloud clusters, directly influencing the occurrence of severe rainfall. Echoes continuously generated and developed in the upstream areas from southeastern Guangxi to the coastal regions, creating a distinct "train effect." Dual-polarization radar parameters displayed significant Z_{DR} (differential reflectivity) and K_{DP} (specific differential phase) high-value areas in the lower layer of the heavy rainfall region. (3) Insufficient understanding of the convective characteristics, intensity, and duration of the severe rainfall associated with the inverted trough, and the weak predictive capability of numerical models for extreme precipitation resulted in an overestimation of the southward speed of the cold air mass and an underestimation of the duration of the inverted trough's impact and a minor underestimation of cumulative rainfall forecasts by forecasters.

Key words: Typhoon "Sanba"; extreme rainfall; causal analysis; forecast deviations