

张容菁,李秀昌,彭武坚,等. 玉林市“4·19”飑线大风成因及雷达特征分析[J]. 气象研究与应用,2023,44(3):90-94.

ZHANG Rongjing, LI Xiuchang, PENG Wujian, et al. Analysis of the causes and radar characteristics of "4·19" squall line in Yulin [J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2023, 44(3): 90-94.

# 玉林市“4·19”飑线大风成因及雷达特征分析

张容菁, 李秀昌, 彭武坚, 林确略, 陆秋霖

(玉林市气象局, 广西 玉林 537000)

**摘要:** 利用自动气象站加密和常规观测资料、欧洲中期天气预报中心全球气候第五代大气再分析数据(ERA5)以及SA波段双偏振雷达资料,对2023年4月19日玉林暖区飑线过程进行分析。结果表明:(1)本次飑线过程发生在高空短波槽、低空切变线和地面倒槽锋面影响的环流背景下,是一次湿对流型飑线。(2)中层短波槽的动力作用与低层高温高湿环境配合较好,倒槽中的锋面是触发强对流天气的关键系统,飑线成熟阶段,受中高层短波扰动影响,飑线脱离锋面向暖区快速移动发展。(3)此次暖区飑线过程具有飑中系统的典型特征,飑线后部形成一个冷池,冷池密度流形成强的雷暴出流,造成冷池前部玉林多处出现10级以上大风。(4)雷达回波具有弓状回波、速度模糊、后侧入流缺口等雷暴大风特征,双偏振参量显示 $Z_{DR}$ 大值区随高度降低,回波均一性较好( $CC>0.9$ ), $Z_{DR}$ 和 $K_{DP}$ 都可以看到飑线前沿的极大值窄回波带。

**关键词:** 暖区飑线;大风;环境条件;双偏振雷达回波

**中图分类号:** P458.1+23

**文献标识码:** A

**doi:** 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2023.3.16

飑线是多个对流单体侧向排列形成的强烈线状雷暴群,飑线过境常常伴有短时强降水、雷雨大风、冰雹和龙卷等强对流天气,是一种破坏性极强的中尺度天气系统<sup>[1]</sup>。广西地区前汛期西风带飑线一般出现于春季和初夏,3—4月的西风带飑线常常从凌晨开始发展,中午前后趋于减弱<sup>[2-3]</sup>,此类飑线主要分为两种,一种是伴随着冷锋快速南下而出现的飑线,常发生在冷锋附近,通常称为冷锋型飑线<sup>[4-5]</sup>;另一种形成发展机制非常复杂,通常在锋前较远的暖区里发生,称为暖区飑线,仍有待深入研究<sup>[6]</sup>,本次过程属于倒槽锋面触发后脱离锋面向暖湿环境移动的暖区飑线。近年来有许多气象工作者对暖区飑线的形成机理、演变规律进行了深入研究,发现该类飑线大多是在高空槽前、低层西南暖湿气流背景下发生的,低层暖湿平流强迫是其发生发展的原因之一<sup>[7-8]</sup>。通过分析环流背景、潜势条件,可以初步判断强对流天气发生的落区及类型<sup>[9-11]</sup>,若想获得强对流确切发生时间、地点、种类、强度等信息,还需通过高时

空分辨率的新一代天气雷达监测,国内外已有不少学者研究总结了飑线系统的回波结构概念模型<sup>[12-17]</sup>。随着双偏振技术在天气雷达上的应用,许多气象工作者研究强降水过程的双偏振参量特征<sup>[18-23]</sup>。在华南暖区天气背景下发生的飑线,其抬升触发机制有时不明显,容易导致预报员漏报,加上对流系统的复杂性、雷达探测的局限性和定标误差、预报员对风暴结构及生消演变机理的认知不全等原因,在实际工作中对强对流天气的监测和预警能力仍显不足。因此,有必要对暖区飑线过程进行深入研究,总结适用于本地的预报经验。本文分析2023年4月19日玉林暖区飑线过程的双偏振雷达回波特征,并探讨其形成和发展机制,以及暖区飑线大风灾害的形成条件和移动规律,为预防和减轻飑线造成的损失和影响提供更为有效的技术支撑。

## 1 资料与方法

利用玉林市自动气象站加密观测资料、常规观

收稿日期: 2023-05-03

基金项目: 广西气象青年人才培养项目(桂气科 2023QN13)、广西气象科技计划指令性项目(桂气科 2023ZL11)

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

测资料、ERA5 再分析资料以及玉林市地面气象观测站的 SA 波段双偏振雷达资料,通过天气动力学诊断和中尺度分析方法进行研究。

## 2 过程概况

2023 年 4 月 18 日晚至 19 日早晨,广西出现飊线大风过程。18 日 22 时前后,有初生对流单体生成于贵州兴义至广西百色之间,并随锋面缓慢南压,01:00 左右在桂西北形成多单体风暴;19 日 02—04 时飊线处在发展阶段,影响百色、河池等多地出现雷暴大风、短时强降水和冰雹天气;19 日 05—09 时飊线处在成熟阶段,飊线脱离锋面向暖区快速移动发展,移动速度约为  $70 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,空间尺度达到 300~400 km,最强单体强度达到 65 dBZ 以上,19 日 09:00 飊线基本移出广西。飊线自西北向东南横扫华南地区,广西强对流天气主要出现在夜间到早晨(19 日 01—09 时),玉林强对流天气主要出现在 19 日 05—07 时。玉林大风和降雨出现在锋面过境时,本次飊线过程玉林市普降中到大雨,并伴有短时雷暴大风等强对流天气,累积雨量最大为兴业县卖酒镇周覃村 43.3 mm,有 26 个气象观测站出现 8 级以上大风,5 个气象观测站出现 10 级以上大风,极大风速最大为大容山山顶  $36.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  (高山站),容县气象观测站  $29.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。本次飊线过程具有强度强、影响范围大、生命史长的特点,天气以雷暴大风为主,降雨次之,是一次湿对流型飊线。

## 3 飊线大风过程成因分析

### 3.1 环流背景分析

本次飊线过程发生在高空短波槽、低空切变线和地面倒槽锋面影响的环流背景下。500 hPa 形势叠加 850 hPa 相当位温图显示,2023 年 4 月 18 日 20 时在湖南-贵州-重庆存在一个冷温槽配合的短波槽,广西处于低槽槽前,中层为西南偏西风控制,副高呈带状分布,控制  $20^{\circ}\text{N}$  以南地区。华南低层为相当位温大值区,其中广西大部相当位温达到  $350^{\circ}\text{K}$  以上,桂南甚至达到  $360^{\circ}\text{K}$  以上,中层短波槽前的动力强迫,配合低层高温高湿的不稳定环境,非常利于强对流天气的发生。200 hPa 形势分析发现,19 日 03 时辐散气流明显加强并东移,此后对流系统组织性有明显加强,500 hPa 短波槽逐渐东移加深,19 日 08 时短波槽后部的偏北风已到达桂东南,飊线的移动方向与短波槽移动方向几乎一致,由此可见,中高

层的短波扰动是飊线脱离锋面向暖区移动的关键原因。分析低层环流形势和相对湿度分布可以发现,2023 年 4 月 18 日 20 时 850 hPa 在江西-湖南-贵州北部存在东西向低涡切变线,广西处于切变线南侧的强辐合区中,广西大部低层维持西南风,最大西南风达到  $18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,有利于暖湿平流的输送,玉林地区低层相对湿度达到 90%以上,具备强对流天气发生的动力和水汽条件。低层切变线在冷空气推动下向南移动,到 19 日 08 时,低涡切变线南压到湖南南部-广西中部一带,玉林的强对流天气基本结束。

2023 年 4 月 18 日 20 时 925 hPa 形势叠加 500 hPa 垂直速度显示,湖南、贵州和广西交界处存在边界层辐合线,同时 500 hPa 有上升速度大值区,到 19 日 08 时边界层辐合线南压到桂东-桂中地区,但此时上升速度大值区已经脱离辐合线随着飊线移动到粤西地区。2023 年 4 月 18 日 20 时地面形势显示,暖低压控制西南地区,西南、华南及华中大部地区处于低压倒槽控制区,广西处在“东高西低”的形势控制之下,四川北部有冷高压中心 1010 hPa,在新疆北侧一带存在一个冷高压中心 1035 hPa,在高空槽的引导下冷空气分裂南下,有推动锋面南移的趋势,倒槽锋面在本次过程中为对流单体的新生提供了触发条件,但在飊线成熟阶段,受中高层的短波扰动影响,飊线脱离锋面向暖区快速移动发展,19 日 08 时锋面大致位于广西中部,但飊线主体已移动到广东。

### 3.2 强对流天气潜势分析

利用玉林市周边气象探空站等资料计算一些对流参数(表 1),从表 1 可以看到,飊线过程发生前,玉林市附近均表现出“上干下湿”的不稳定层结特征,并具备较强的对流有效位能和下沉有效位能, $K$  指数和  $SI$  指数表明极有可能出现湿对流天气,0~6 km 垂直风切变达到  $18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以上,为强深层垂直风切变, $DCAPE$  值均在  $1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$  以上。4 月 18 日 20 时梧州市气象站探空图显示,强对流天气发生前,桂东南地区  $BLI=-3.9$ , $SI=-3.69^{\circ}\text{C}$ , $K=34.4^{\circ}\text{C}$ ,对流参数均指示利于强天气的发生;湿层高度达到 700 hPa,700~400 hPa 有显著干区, $DCAPE$  值达到  $1012.2 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,0~6 km 垂直风切变达到  $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,利于雷暴大风天气发生。4 月 18 日 20 时实况强对流天气条件分析图显示:桂东南→地区中层处于  $T-T_d>15^{\circ}\text{C}$  的干区,700 hPa 切变线位于华中到江南一带,850 hPa 切变线位于赣湘南部,逐渐南压至广西北部,低层切变线南侧为西南或偏南急流,低层湿度条件较

表 1 南宁、梧州和北海气象探空站 18 日 20 时物理量特征值

探空站	CAPE 值/ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$	$T-T_{\text{d}}(400-700)/^{\circ}\text{C}$	SI 指数/ $^{\circ}\text{C}$	DCAPE/ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$	0~6 km 垂直风切变/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
南宁	1703.8	23	-4.00	1530.9	29.6
梧州	1165.8	22	-3.69	1012.2	25.0
北海	1940.9	23	-2.72	1607.7	18.6

好,与中层形成上干下湿的不稳定层结,且高空干冷平流叠加在低空暖湿平流之上,利于不稳定能量的积聚。桂东南地区  $T_{85}$  达  $24\sim 26^{\circ}\text{C}$ ,CAPE 达  $1165.8\sim 1940.9 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,具备热力和动力不稳定能量。

### 3.3 飊线中尺度特征和冷池分析

此次飊线过程展现了典型的飊中系统特征。下面详细分析飊线成熟时期(4 月 19 日 05 时)中尺度特征。19 日 05 时飊线位于“柳州-贵港-南宁-百色”一带,呈弓形弯曲;飊线后方是一个东北-西南向狭长的雷暴高压,高压中心强度约为  $1007 \text{ hPa}$ ,飊锋位于雷暴高压的前沿等压线密集带里,飊线前方是一个狭长的飊线前低压,低压值约为  $1003 \text{ hPa}$ ;雷暴高压的后方存在一个  $1002 \text{ hPa}$  中低压,表示飊线已发展成熟,尾流低压与雷暴高压形成一对气压偶,飊锋前后有风速辐合。飊线的前端存在暖中心,飊线后方气温递减、有较强的水平温度梯度。此次暖区飊线过程具有飊中系统的典型特征,空间尺度约  $300\sim 400 \text{ km}$ ,空间尺度表现为中  $\alpha$  尺度特征;飊线过境时气温和露点骤降、气压涌升,伴有雷暴大风和短时强降雨等天气。飊线过境前  $2\sim 3 \text{ h}$  内,大部气象站海平面气压均出现了不同程度的下降,如玉林市气象站 18 日 23:00—19 日 04:00 气压下降了  $3\sim 4 \text{ hPa}$ 。可见飊线过境前存在降压的趋势,有利不稳定能量的积累和飊前低压的形成,飊线过境时,气压迅速上升,过境之后  $1\sim 2 \text{ h}$  内气压还会再次下降,本站气压完成“降-升-降”过程的时间尺度约  $9 \text{ h}$ 。

陈圣劼等<sup>[18]</sup>研究显示,极端大风与飊线的发展、风暴下沉气流辐散及飊线前侧冷池密度流密切相关,8 级以上雷暴大风区位于地面辐合线偏冷气流一侧。分析过程的  $3 \text{ h}$  变温叠加雷达组合反射率发现,由于降水的蒸发和降温作用,19 日 04 时在飊线后部桂中-桂西北一带形成一个冷池,冷池中心负变温最强达到  $6.9^{\circ}\text{C}$ ,05 时冷池中心负变温略有加强,最强达到  $7.2^{\circ}\text{C}$ ,飊锋前后温差为  $4\sim 5^{\circ}\text{C}$ ,冷池密度流形成强的雷暴流出,造成冷池前部玉林市多处出现 10 级以上大风。

## 4 雷达回波特征分析

分析组合反射率因子回波发现,19 日 05 时左右有弓形回波从玉林市上游快速东移南下,移速达到  $70 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,最强反射率因子强度超过  $65 \text{ dBZ}$ ,对应最大  $K_{\text{DP}} > 7 \text{ deg} \cdot \text{km}^{-1}$ ,最大  $Z_{\text{DR}}$  达到  $3.5 \text{ dB}$ ,飊线后部伴有大片尾随层状云回波,造成多地出现短时强降水天气。飊线前部暖区有多个雷暴单体新生,新生单体并入飊线使飊线强度得以加强,范围扩大。分析 19 日 05:30 玉林市雷达  $1.5^{\circ}$  仰角反射率因子和仰角径向速度回波图可以发现,弓状回波前沿有强的反射率因子梯度,回波顶位于低层强反射率因子梯度之上,径向速度图上有大风核特征,距离雷达  $14 \text{ km}$  处最大风速达  $32 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以上,后侧存在明显入流缺口,对应较强的入流急流,同时次同仰角的反射率因子和径向速度剖面显示,强反射率因子质心很低,大风速区基本接地。分析双偏振参量可发现,05:30  $Z_{\text{DR}}$  大值区随高度降低,向地面靠近,指示下沉气流接地并向外扩散,回波均一性较好( $\text{CC} > 0.9$ )。无论  $Z_{\text{DR}}$  还是  $K_{\text{DP}}$  都可以看到飊线前沿的极大值窄回波带。综合考虑飊线系统中下沉辐散气流的强度、飊锋的移动速度,对实际大风量级的监测与预警有重要参考意义,可以判断本次过程玉林市主要强对流天气为雷暴大风,液态强降水次之,无冰雹。

## 5 结论与讨论

发生在 2023 年 4 月 19 日早晨的玉林市强对流大风是由暖区飊线造成的,该飊线生命史长、影响范围大、主要引发雷暴大风并伴有短时强降雨,其触发、维持原因及双偏振雷达特征如下:

(1) 飊线初始对流在桂西北是由低空切变线和地面倒槽锋面触发形成的,高空短波槽东移加深使飊线获得发展并脱离倒槽锋面向暖区快速移动,影响桂东南地区。桂东南“上干下湿”的不稳定层结、较强的垂直风切变、较高的对流有效位能和下沉有效位能等环境条件,有利雷暴大风等强对流天气发生



发展。

(2)此次暖区飊线具有飊中系统典型特征,飊线后侧冷池出流使对流加强发展,造成玉林市多处出现 10 级以上大风。

(3)飊线的 SA 双偏振雷达观测显示,弓形回波移动快速,有强的窄带反射率因子,对应窄带回波上有大的差分反射率( $Z_{DR}$ )和差分相移率( $K_{DP}$ ),弓状回波前沿有强的反射率因子梯度、对应径向速度有大风核,后侧入流明显,弓形回波后侧伴有大片尾随层状云,融化层以下对应相关系数(CC)几乎在 0.9 以上,表明有明显液态降水(出现冰雹概率下降)。反射率因子及  $Z_{DR}$ 、 $K_{DP}$  质心下降、径向速度大风核高度下降对飊线大风发生有指示意义。

SA 双偏振雷达在强对流监测、相态识别有显著优势,充分利用好偏振参量对提高预警信号发布提前时间有积极意义。

#### 参考文献:

- [1] 章国材,矫梅燕,李延香,等.现代天气预报技术和方法[M].北京:气象出版社,2007:133.
- [2] 方翀,林隐静,曹艳察,等.华南地区西风带飊线和台风飊线环境场特征统计对比分析[J].热带气象学报,2017,33(6):965-974.
- [3] 叶朗明,伍志方,张华龙,等.相同季节和相似区域华南两次飊线过程比较分析[J].暴雨灾害,2016,35(5):445-454.
- [4] 郭弘,林永辉,周森,等.华南暖区暴雨中一次飊线的中尺度分析[J].暴雨灾害,2014,33(2):171-180.
- [5] 陈芳丽,窦新英,李明华,等.一次强对流天气过程中尺度对流系统特征分析[J].广东气象,2012,34(2):10-15.
- [6] 李影虹,苏文,陈芳丽.2016年6月4日华南一次罕见强对流天气过程分析[J].广东气象,2017,39(4):10-14.
- [7] 詹棠,宗森,郑浩阳.2013年5月21日广东沿海一次飊线过程的综合分析[J].广东气象,2015,37(6):19-22.
- [8] 林确略,邓雅倩,陈明璐,等.广西一次槽前型暖区飊线的中尺度分析[J].气象研究与应用,2018,39(1):38-

45,155.

- [9] 吴福浪,赵成华,陶俞锋.浙江“3·4”暖区飊线环境场和雷达回波特征分析[J].浙江气象,2021,42(4):8-12.
- [10] 许可,杜小玲,周文钰,等.贵州一次暖区飊线大风与大冰雹的雷达结构特征分析[J].中低纬山地气象,2021,45(3):65-72.
- [11] 吴亚丽.典型华南暖区暴雨过程(5·7暴雨)的天气学分析及预报研究[D].广州:中山大学,2020.
- [12] 聂云,周继先,李习瑾,等.贵州一次暖区飊线过程的环境条件和结构特征[J].干旱气象,2020,38(5):782-793.
- [13] 张华龙,肖柳斯,伍志方,等.两次华南飊线卫星亮温特征与强对流天气分析[J].广东气象,2020,42(2):7-11,16.
- [14] 俞小鼎,姚秀萍,熊廷南,等.多普勒天气雷达原理与业务应用[M].北京:气象出版社,2006.
- [15] 屈梅芳,俞小鼎,农孟松,等.一次弱垂直风切变环境下飊线发展维持的成因分析[J].暴雨灾害,2021,40(5):466-473.
- [16] BROWNING K A. Airflow and Precipitation Trajectories Within Severe Local Storms Which Travel to the Right of the Winds[J]. American Meteorological Society, 1964.
- [17] 丁治英,夏擎,高松,等.一次飊线过程中雷达回波的组织结构变化及成因分析[J].热带气象学报,2017,33(3):323-333.
- [18] 陈圣劼,刘梅,杨梦兮,等.江苏“4·30”强风雹成因及双偏振雷达特征分析[J].气象科学,2022,42(5):638-649.
- [19] 许可,杜小玲,周文钰,等.贵州一次暖区飊线大风与大冰雹的雷达结构特征分析[J].中低纬山地气象,2021,45(3):65-72.
- [20] 吴福浪,赵成华,陶俞锋.浙江“3·4”暖区飊线环境场和雷达回波特征分析[J].浙江气象,2021,42(4):8-12.
- [21] 郭飞燕,刁秀广,马艳,等.山东一次飊线双偏振结构与地面降水滴谱特征分析[J].气象学报,2023,81(2):328-339.
- [22] 陈星登,郭泽勇,张弘豪,等.不同强度云系的双偏振雷达特征[J].气象研究与应用,2021,42(2):19-23.
- [23] 杜赛,刘显通,孙皓霆,等.华南一次典型雷暴过程双偏振雷达参量与闪电活动关系研究[J].热带气象学报,2021,37(3):427-438.

## Analysis of the causes of gale and radar characteristics of “4·19”squall line in Yulin

ZHANG Rongjing, LI Xiuchang, PENG Wujian, LIN Quelue, LU Qiulin  
(Yulin Meteorological Bureau, Guangxi Yulin 537000, China)

**Abstract:** Based on data from automatic weather stations, conventional observations, ERA5 reanalysis data, and dual-polarization radar data, the squall line event in the Yulin warm sector that occurred on April 19, 2023 was analyzed. The results show that: (1)The squall line event occurred under the influence of the upper-level shortwave trough, low-level shear line, and surface inverted trough front, indicating it is a moist convective squall line. (2)The dynamic effect of the mid-level shortwave trough, in conjunction with the warm and moist environment in the lower levels, played a significant role. The front within the inverted trough was the key system triggering severe convective weather. During the mature stage of the squall line, influenced by the mid-to upper-level shortwave disturbance, the squall line detached from the front and rapidly developed towards the warm sector. (3)This warm sector squall line event exhibited typical characteristics of a squall system. A cold pool formed behind the squall line, and the density currents associated with the cold pool generated strong thunderstorm outflows. As a result, Yulin experienced gale above magnitude 10 on the Beaufort scale in multiple locations ahead of the cold pool. (4)The radar echoes exhibited characteristics of severe thunderstorm gale, such as bow echoes, velocity aliasing, and rear inflow notches. The dual-polarization parameters showed a decrease in the  $Z_{DR}$  (differential reflectivity) maximum values with height, indicating a narrowing echo band with good echo uniformity ( $CC>0.9$ ). Both  $Z_{DR}$  and  $K_{DP}$  (specific differential phase) showed the presence of a narrow band of maximum values along the leading edge of the squall line.

**Key words:** warm sector squall line; strong winds; environmental conditions; dual-polarization radar echoes