

农孟松,翟丽萍,屈梅芳,等. 2014. 广西一次飑线大风天气的成因和预警分析. 气象, 40(12):1491-1499.

广西一次飑线大风天气的成因和预警分析^{*}

农孟松 翟丽萍 屈梅芳 赖珍权 梁维亮 祁丽燕

广西区气象台, 南宁 530022

提 要: 本文利用常规探测资料、多普勒天气雷达资料、自动站观测资料等对 2013 年 3 月 27—28 日发生在广西的一次飑线大风天气过程进行跟踪及监测预警, 对其大尺度环流背景、雷达回波特征以及灾害性大风形成原因进行了较为详细的分析与研究。结果表明: 此次飑线过程是由高空冷槽与地面高压后部形势所引起的; 假相当位温、 $T\text{-}\log p$ 图分析表明广西上空具有较好的热力、动力条件; 地面辐合线触发初始对流活动; 发展成熟的飑线地面气压场上存在雷暴高压、飑前低压和飑后低压等中尺度特征; 飑线大风等灾害性天气出现在地面高压前侧气压梯度大值区和飑线的断裂处; 雷达图像上中层径向辐合、反射率因子核心和中层风速大值区逐渐降低以及垂直风廓线图中低层风的转变等特征信息对地面大风天气临近预警有较好的指示意义; 降水粒子的拖曳作用和飑线的快速移动都对地面大风的产生及增幅有一定的作用。

关键词: 飑线大风, 雷暴高压, 中层径向辐合, 预警

中图分类号: P458 **文献标志码:** A **doi:** 10. 7519/j. issn. 1000-0526. 2014. 12. 007

Study on Initialization Mechanism and Alert of Gale in Squall Line Storm Event

NONG Mengsong ZHAI Liping QU Meifang LAI Zhenquan LIANG Weiliang QI Liyan

Guangxi Meteorological Observatory, Nanning 530022

Abstract: A squall line storm that stroke Guangxi severely in 27—28 March 2013 was traced and alerted based on various observation data collected by conventional meteorological radar, and automatic meteorological stations, etc. This paper particularly analyzes the large scale circulation weather background, the characteristics of radar echo and formation mechanism of gale. The results show that this squall line is caused by the cold trough of high altitude and high pressure of ground. The good thermal and dynamic conditions over Guangxi are demonstrated on graphs of equivalent potential temperature and $T\text{-}\log p$. Initial convection is triggered by the ground convergence line. Surface pressure field of matured squall line has the mesoscale features including thunderstorm high, depression before and after the squall. Disastrous weathers such as gale of squall usually appear in the area of big values of barometric gradient and the split part of squall line before ground high pressure. On the other hand, the information of radar, including midaltitude radial convergence (MARC), reflectivity core and middle-level greatest speed gradually decrease and the transition of the low-level wind show vertical wind profile chart, which could be well in indicating ground wind. Drag effect of precipitation particles and the fast moving squall line have certain effect on generation and growth of ground gale.

Key words: squall line gale, thunderstorm high, midaltitude radial convergence (MARC), alert

^{*} 广西自然科学基金项目(2012GXNSFAA053191、2014GXNSFAA118295)和中国气象局项目(CMAYBY2014-049)共同资助
2014 年 3 月 4 日收稿; 2014 年 4 月 24 日收修定稿
第一作者: 农孟松, 从事灾害性天气预报和研究工作. Email: nmsong1997@163. com

引言

飊线又称为不稳定线或气压涌升线,是气压和风的连续线,由多个雷暴单体或雷暴群所组成的狭窄的强对流天气带。飊线过境时,常会出现风向突变、风速猛增、气温陡降、气压骤升等剧烈的天气变化,可以出现雷暴、暴雨、大风、冰雹、龙卷等强对流天气(章国材,2011)。飊线对人民群众的生命财产安全造成危害,成为预报工作的重点之一,但因其发展迅速,生命时间短,局地性、突发性强又是预报工作的难点。近年来研究和应用表明(洪毅等,2007;曲晓波等,2010;段鹤等,2014;袁子鹏等,2011;王国荣等,2010),根据大尺度天气背景,充分利用多普勒雷达资料、卫星云图、高时空密度自动地面观测网、与邻近省市台站之间的联防,加强对中小尺度天气系统的生成和发展进行跟踪监测,从而使得在临近时段内对强对流天气做出较为准确的预报成为可能。王莉萍等(2006)对河北省衡水市的一次飊线过程进行了非常规资料特征分析,发现红外卫星云图、闪电定位资料以及雷达回波三种非常规资料在系统影响时间、强度变化、移动方向等方面具有很好的对应性。段鹤等(2012)对滇南飊线的发生环境及其多普勒雷达回波特征进行了统计分析,根据灾害类型和飊线中的单体结构将飊线分为5种类型,对飊线的短时临近预报有很好的指导作用。随着观测手段的多样化,中小尺度系统研究日益成为学者们关注的重点,尤其是飊线的形成机制及其产生强天气的成因(陈涛等,2013),姚建群等(2005)利用常规观测资料、多普勒天气雷达、自动站等资料对2004年7月12日影响上海的一次较长生命史的强飊线过程进行了综合分析,发现了其成因及维持和加强机制;杨晓霞等(2007)应用湿位涡守恒理论研究了飊线的发展机制;牛淑贞等(2012)利用雷达资料和自动站加密观测资料对商丘的一次强飊线形成机制进行了分析,并提出强雷暴高压、高压前侧的强气压梯度以及飊线的快速移动是产生大风的直接原因。

2013年3月27—28日,广西北部及东部地区出现了一次飊线大风天气过程,同时伴随短时强降水、局部伴有冰雹,具有突发性强、影响大、灾害损失严重等特点。实况表明,此次过程中广西有一个测站出现了冰雹,12个乡镇出现 $17\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上大风,

其中来宾金秀县罗香乡最大瞬时风速达 $25.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,20个乡镇的降雨量大于 50 mm ,其中最大为梧州岭景镇岭景村 71.3 mm 。为加深对飊线的发生、发展和演变过程的认识,进一步提高短时临近预报水平,本文利用常规探测资料、多普勒天气雷达资料、自动站观测资料等对飊线的大尺度环流背景和雷达回波特征进行天气学分析,并对该天气过程中灾害性大风形成原因作较详细的分析,以期提高对广西飊线天气的认识,为今后此类强对流天气的监测及预警提供参考。

1 飊线发生的环境条件分析

1.1 大尺度环流背景

产生此次强对流天气的高空影响系统主要是高空冷槽。3月27日08时(图略),500和700 hPa在川东至滇东地区有一个冷槽,广西处于槽前西南气流控制中;850 hPa上有切变位于广西中部,广西东南部大部分地区的850与500 hPa温差大于 26°C ,上冷下暖,温度直减率很大,同时,850 hPa湿舌从沿海延伸至东南部,低层暖湿。20时(图1),500 hPa偏西南气流有所加强,川东至滇东地区冷槽发展加深并缓慢东移,槽后冷平流明显,广西处于槽前24 h负变温区域中,中层有冷平流侵入,形成了上干冷、下暖湿的不稳定层结。850 hPa上由于偏南气流加强,切变线北抬至贵州南部,低层暖湿气流加强,大气层结不稳定性进一步加大。另外,分析各层风场发现,低层850 hPa及其以下为明显的偏南风,700 hPa以上各层均为西南偏西风,高空急流轴位于广西中北部,高低层急流相交,风速随高度明显增加,500和925 hPa风速差达 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上,风垂直切变强,有利于深厚对流的发展。

27日08时(图略),地面图上广西处于高压南部偏南气流控制下,20时,高压中心从江西东移至福建,广西区内为南北向的等压线,等压线较为密集。同时,西南低压开始发展并缓慢东移,广西西北部位于高低压之间,并有西南风与东南风的辐合。

1.2 热力条件和不稳定层结

假相当位温 θ_{sc} 能够反映大气中的温湿状况,是反映稳定性和湿度条件的综合指标,可用来分析大气中的能量分布及垂直稳定度特征(盛裴轩等,

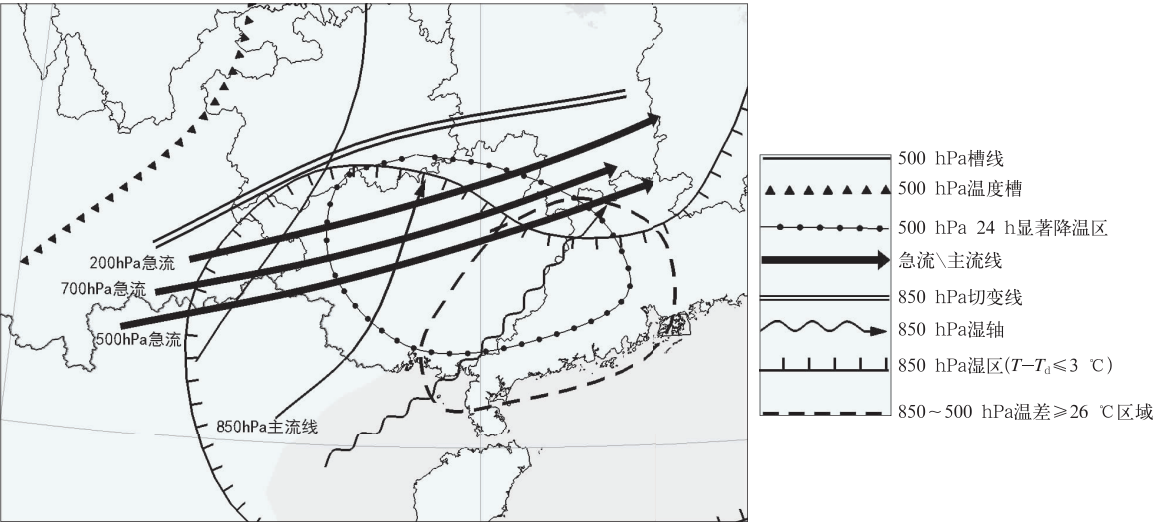


图 1 2013 年 3 月 27 日 20 时主要影响系统配置中分析图

Fig. 1 Mesoscale analysis of fields at 20:00 BT 27 March 2013

2002)。27 日 08—20 时,850 hPa 在广西西南部到云南有一条从南向北伸的高能舌区(图略),中心值在 64~74℃,高能舌区域盛行西南风,说明有暖湿气流输送,有利于高能舌继续向东北方向加强延伸。 θ_{se} 高能舌的南北轴线随高度向东向北倾斜, θ_{se} 随高度减小。500 hPa 以上有一条为从西北方向伸向广西的 θ_{se} 低值舌,舌区为西北气流,低值舌加强南伸。高层西北风输送的干冷平流与低层西南风输送的暖湿平流在广西西北部上空叠加,广西西北部的 850 和 500 hPa 的 θ_{se} 之差达到 19.8℃,大气层结不稳定性加剧。飊线产生在 θ_{se} 的高空低值舌与低层高值舌相叠加、大气强烈对流不稳定区域。

27 日 22 时左右,对流起源于云南蒙自以东一带,之后向东移动进入广西。从 27 日 20 时云南蒙

自 $T\text{-log}p$ 图(图 2a)可以看出,蒙自上空 CAPE 值很大,达到 $1249.6\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$,低层有浅薄的弱的逆温及较小的对流抑制有效位能,为对流的发生提供很好的能量环境;整层大气湿度较大,500 hPa 上有明显干层,有干冷空气入侵;0~3 km 风切变为 $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,0~6 km 风切变为 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,中低层有强的垂直风切变,有利于倾斜对流的发展与维持;850 与 500 hPa 温差达到 32℃,K 指数为 41℃,SI 指数为 -6.84,表明气层不稳定条件较好,这些参数表明蒙自上空具有很好的对流发生发展的环境。

广西梧州 27 日 20 时的 $T\text{-log}p$ 图(图 2b)也可以看出,梧州上空的逆温层较 08 时(图略)有所减弱,梧州站 700~500 hPa 出现明显的干区,湿度垂直分布为上干下湿,表明中层有干冷平流侵入。K

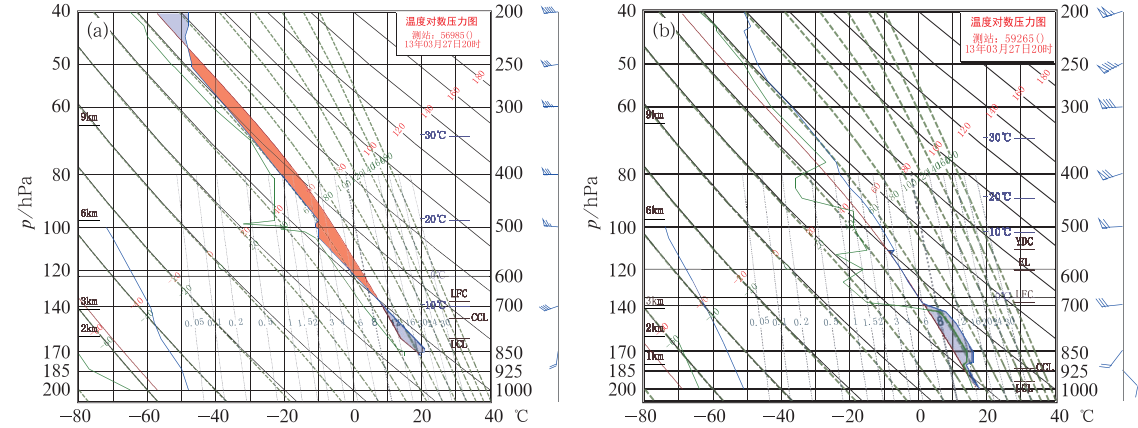


图 2 2013 年 3 月 27 日 20 时云南蒙自(a)和广西梧州(b) $T\text{-log}p$ 图

Fig. 2 $T\text{-log}p$ diagram of Mengzi in Yunnan (a) and Wuzhou in Guangxi (b) at 20:00 BT 27 March 2013

指数为 32°C , SI 指数为 -3.56 , 850 与 500 hPa 温差增大至 27°C , 都表明气层趋向于不稳定。 $0\sim 3$ km 风切变为 $7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $0\sim 6$ km 风切变为 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 中低层有强的垂直风切变, 低层暖平流, 高层冷平流叠加, 都有利于强对流的发生发展。上干下湿的大气层结、较强的垂直风切变、垂直温度差大于 25°C 及较大的 K 指数、较小的 SI 指数对强对流的发生发展有较好的指示意义。

1.3 近地面层的触发条件

以上分析可见, 从云南东部到广西上空大气储备了较高的能量和层结条件, 具有较好的大气层结不稳定度, 这是产生强对流天气的内因, 而强对流的触发则需要一个外力作为触发条件。从地面资料场可见, 27 日 20 时(图 3)云南东部存在一条西南风和东南风的辐合线, 随着西南暖低压向东发展, 辐合线缓慢东移, 2 h 后(即 22 时左右)在云南东部到广西西部的辐合线附近不断触发对流, 有对流云团开始生成并东移。表明地面辐合线作为一个动力触发条件, 在低层辐合产生上升运动触发对流不稳定能量的释放, 产生强对流。

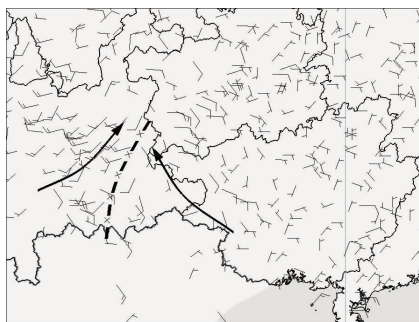


图3 2013年3月27日20时地面风场及辐合线

Fig. 3 The diagram of the surface wind and convergence line at 20:00 BT 27 March 2013

2 飚线的多普勒雷达特征及可预警性分析

2.1 飚线系统的雷达回波演变特征

27 日 22 时开始, 不断有强对流单体在滇桂交界处发展, 在偏西气流引导下向东移动。从 Swan 雷达组合反射率拼图中 ≥ 45 dBz 回波轮廓变化, 可以看出此次飚线系统的演变(图 4)。28 日 02:00, 在

百色附近的强回波演变发展成带状形式, 回波呈东北—西南向, 其南段回波较强; 03:00, 南段回波减弱, 北段回波向北伸展。03:48, 回波继续东移发展, 移动速度开始加快, 达到 $100\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 左右; 随着弱冷空气从西北部不断入侵, 后侧的入流开始明显, 有向前突出的凸型弱回波区, 带状回波逐渐演变成典型的弓形回波, 北段呈气旋性弯曲, 南段是伸展很长的尾部, 长宽比例大于 $5:1$ 。04:24, 北段回波强度继续加强, 弓形回波后侧入流弱回波区更明显, 中段和南段回波出现断裂, 整体回波东移速度 $110\sim 120\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, 此时从形态上看弓形回波已演变成为一条飚线; 飚线南部不断有小单体生成并入发展, 飚线长度增长, 全长约 300 km , 长宽比例加大, 跟随的层状云范围不断扩大, 飚线处于发展阶段; 飚线北段有近似于南北向且强度 ≥ 55 dBz 的强回波带, 前侧回波强度梯度密集区拉长, 其东移过程中, 分别造成了 04:33 忻城县大唐镇和 04:37 柳江县土博镇 $17\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上的偏西大风。04:54, 飚线主体回波接近柳州, 回波强度最强, 最大达到 65 dBz 以上, 此时从地面自动站的气压场上(图 8b)可以看到飚线后部出现明显的雷暴高压, 飚线发展达到旺盛阶段, 05:07 飚线经过柳州站时造成柳州 $17\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上偏西大风; 之后飚线仍以 $100\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 左右的速度向东偏南方向移动, 05:30, 飚线北段回波强度仍在 55 dBz 以上, 东移过程中, 分别造成武宣县百崖镇和金秀县圣堂山、罗香乡和六巷乡 $17\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上的偏西大风。06:24, 北段回波已经减弱, 回波梯度也减弱。07:06, 带状回波移到距离梧州西北部约 50 km 处, 同时在梧州的西南部有对流发展并向东北方向移向梧州, 带状回波与块状回波合并, 带状回波再次发展南移, 07:27 造成梧州了 $20.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的偏北大风。这条飚线在广西境内生命史长达 7 h , 具有强度大, 生命史长的特点, 给沿途所经大部地区带来雷雨大风的天气。下面主要选取柳州雷达站的雷达资料进行分析及其雷雨大风的可预警性。

2.2 飚线大风的可预警性分析

通过与上游台站的联防, 根据雷达资料判断雷达回波特征和影响系统性质, 判断可能产生的天气及影响程度。基于柳州雷达资料分析, 飚线于 03 时前后进入柳州雷达的观测范围, 并自西向东移向来宾市和柳州市, 飚线中强回波单体强度超过 50 dBz, 回波顶高度达到 12 km 以上, 回波移速达到

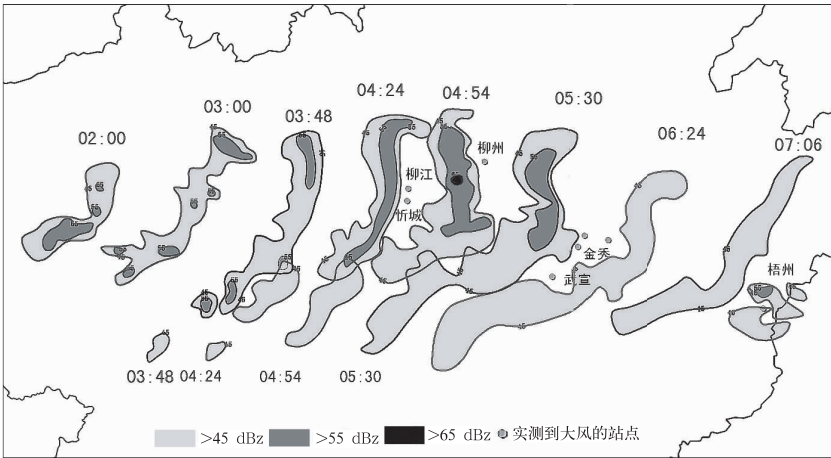


图 4 2013 年 3 月 28 日飊线雷达回波演变图

Fig. 4 The radar echo evolution of squall line on 28 March 2013

110~120 km·h⁻¹。根据回波的形态特征、移动方向及移速,可提前判断该飊线的影响时间和区域。

2.2.1 单站雷达回波特征和预警

28 日 04:27,柳州雷达站的 1.5°反射率因子图可以看出(图 5a),柳州西面约 50 km 处有一条南北向的弓形回波,其北段反射率因子为 50 dBZ 以上的强回波带,弓形回波中镶嵌有单体风暴,其前沿高反射率因子梯度区位于雷达站 240°~300°方位,后侧

存在弱回波通道,表明存在强的下沉后侧入流急流。回波带整体自西向东移动,总长约为 120 km,宽 10~15 km,其弓形非常明显,后部有大片层状云降水云系。速度图上(图 5b),与弓形回波的前沿相对应为明显的风速辐合区,后面存在大片负速度≥20 m·s⁻¹大值区,反映了此飊线有很强的后侧入流。回波的移动速度达到 110~120 km·h⁻¹。结合以上的雷达回波特征:弓形回波、高反射率因子梯度区、

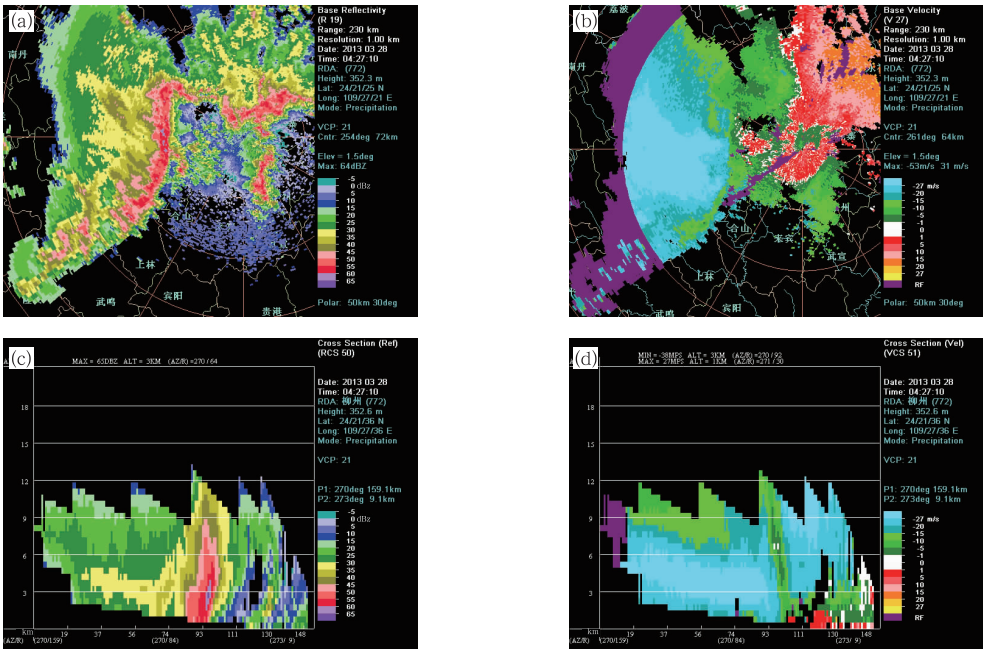


图 5 2013 年 3 月 28 日 04:27,1.5°仰角柳州雷达的(a)反射率因子和(b)径向速度;沿径向 270°的垂直剖面的(c)反射率因子和(d)径向速度

Fig. 5 Radar images of Liuzhou, 1.5°, at 04:27 BT 28 March 2013

(a) reflectivity factor, (b) radial velocity; and images of vertical section along 270° (c) reflectivity factor, (d) radial velocity

后侧弱回波通道、回波 $\geq 100\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 的移动速度和负速度 $\geq 20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 大值区向雷达靠近。04:28, 广西气象台发布了忻城、柳江和柳州的大风预警信号,与实况观测对比,这次大风预警信号发布的提前量有 5~28 min。

同一时刻,通过弓形回波中心沿着雷达径向 270°方向作其垂直剖面,其反射率因子垂直剖面(图 5c)展示弓形回波前沿强大的对流单体,高度可达 12 km,它有向东倾斜结构,强回波质心已经下降到 3 km 以下,55 dBz 强回波接近地面,回波底部前侧梯度很大,最强回波顶位于低层反射率因子高梯度区之上,其向后伸展部分为反射率因子较弱的层状云;径向速度图上可见(图 5d),弓形回波前沿有中低层辐合,高层辐散,从雷达站向外存在由前向后强的上升气流和后侧速度 $\geq 20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 入流急流,过渡区为狭窄的中层径向辐合(MARC),特征显著, Schmocker 等(1996)研究表明飸线后部存在很强的下沉气流,利用 MARC 可以提前 10~30 min 预报地面大风。因此,径向速度图上的风速大值区、后侧入流及中层径向辐合给我们提供了很好的指示意义,此时预报员要警惕大风即将产生。

2.2.2 风暴单体垂直结构时间演变特征

图 6 为沿着雷达径向 270°方向作雷达反射率因子和径向速度随时间变化的垂直剖面图,从反射率因子图上可以看出(图 6a~6d),在弓形回波的前沿有一个强大的风暴单体,04:51,风暴单体 50 dBz 以

上的强回波发展很高,最大反射率因子达到 60 dBz 以上,其所在高度在 5 km 左右;6 min 后,风暴单体有所发展,反射率因子强度加大,最大反射率因子达到 65 dBz 以上,但可以看出,其所在高度明显下降到 2 km 左右;05:03,风暴单体超过 50 dBz 的强回波已经完全接地,最大反射率因子所在高度已经下降到 1 km 以下,完全可以判断大风即将达到地面。反射率因子核心快速下降可能是由于此时降水粒子正在下落。实况观测资料表明,05:07 柳州站出现 $21\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的地面大风;05:09,由于风暴单体已经移出测站,强反射率因子的强度和范围都减小。

对应于径向速度的垂直剖面图上(图 6e~6h), 04:51,低层有辐合,而后侧中层则为径向速度 $\geq 27\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的风速大值区,反映出存在后侧入流急流;随着时间推移,中层风速大值区高度快速下降,这是空气动量下传造成的;05:03,风速大值区即将接地,低层辐合消失,说明高空动量已经下传,地面即将出现大风。从以上风暴的演变可以看出,最大反射率因子所在高度快速下降、强回波中心值减弱,对应径向速度图上大风速区的快速接地,是一次大风接地过程,能很好地预示地面大风的出现。因此,大动量的偏西气流从相对较低的高度短时间内下冲到地面,造成地面的灾害性大风就成为必然。在临近时段,若预警人员在 04:51 径向速度图上识别出大风速区,04:57 径向速度图上的大风速区及反射率因子图上的反射率因子核心下降,并对风暴的移

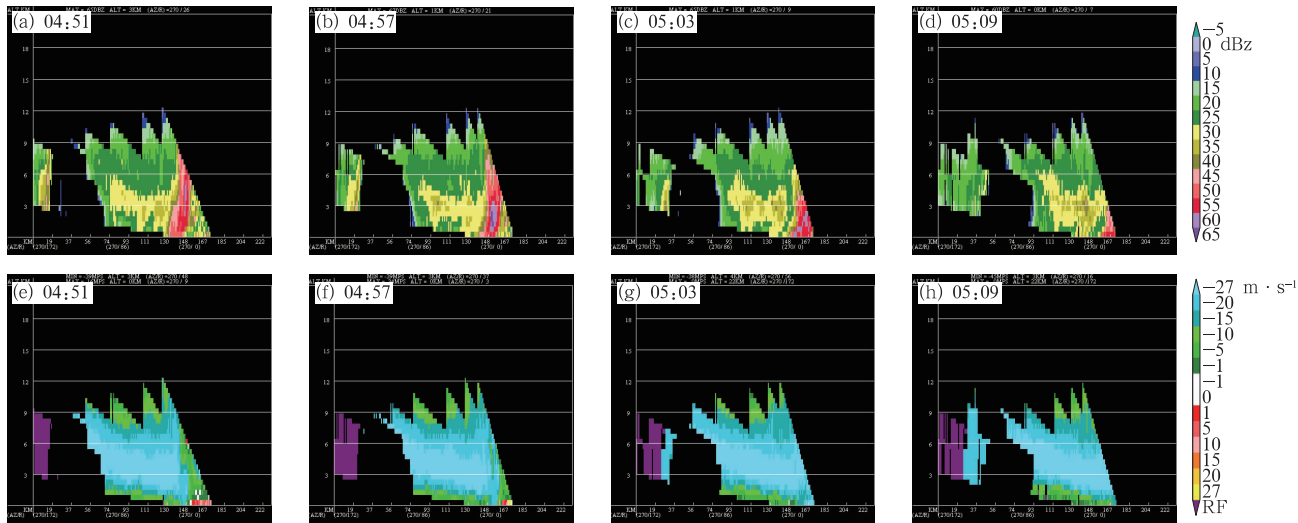


图 6 2013 年 3 月 28 日柳州雷达沿径向 270°的垂直剖面图
(a~d)反射率因子,(e~h)径向速度

Fig. 6 Radar images of vertical section along 270°, Liuzhou, 28 March 2013
(a~d) reflectivity factor, (e~h) radial velocity

动方向作出判断,即可立即准确地判断大风的出现时间及影响地点。根据以上单体的演变,即可提前提前 14 min 发布大风预警。

2.2.3 雷达反演风廓线信息

雷达反演风廓线图可以完整地监测到此次飊线过境的情况并对飊线过境有很好的预示作用。图 7 为柳州雷达的垂直风廓线图,可以看出,04:45 前柳州站上空整层都是西南风,04:51 开始低层自下向上逐渐转为偏北风,而高层仍为西到西南风,值得注意的是,04:33—04:45 近地面层(900 m 高度以下)出现 ND 数据(无效数据),可能是由于近地面层风速过大而被误判为无效数据(俞小鼎等,2006),随后,ND 数据层快速降低,从另一方面反映了大风下

传过程。飊线于 05:07 左右过境,过境后中高层转为偏西风,低层转为偏西北风,可以清楚表现出飊线过境前后风场的转变。垂直风廓线中低层风的转变也给大风的预警提供很好的参考信息。

综上所述,本次飊线系统的雷达回波为典型的弓形回波,其前沿具有反射率因子高梯度区,后侧存在弱回波通道,速度图上对应风速辐合区及后侧入流急流;垂直剖面上存在明显的中层径向辐合,可以有效地提前预警地面大风;同时,反射率因子核心及其后侧中层径向速度大值区中心高度随时间快速逐渐下降的现象,可以用来提前预警地面大风;另外,雷达的垂直风廓线图中,低层风的转变信息也能够对大风做出提前预警。

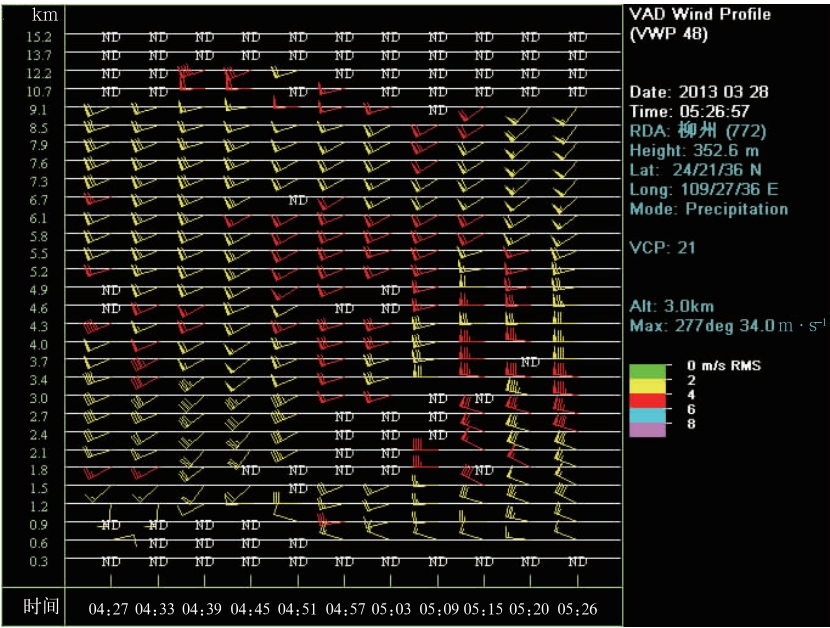


图 7 柳州雷达 2013 年 3 月 28 日垂直风廓线图

Fig. 7 Vertical wind profiler image of Liuzhou on 28 March 2013

3 雷暴高压

在整个飊线的发展与移动过程中,根据地面自动站资料可以明显地看到地面气压场与风场的中尺度演变特征。图 8 为利用 matlab 对经过质量控制的广西 2400 多个地面自动站资料进行四点样条插值,所得的地面气压场和风场,图中三角形和圆点位置分别为东兰站和柳州站。28 日 03:00(图 8a),飊线头部刚刚移过东兰站,其后部出现了 2 个 β 中尺度的冷性雷暴高压,最大中心气压值为 1012.6 hPa,为强风暴中下沉的冷空气在近地面堆积而成,

雷暴高压与地面辐散中心相对应,而在飊线的前部则产生 1 个中尺度低压—飊前低压(前导低压),这与前方高层的补偿下沉气流引起的绝热增温有关(寿绍文等,2003);两个雷暴高压之间的后部也有 1 个明显的中尺度低压,与尾流效应有关(寿绍文等,2003),此时飊线达到成熟阶段。此后,飊线随着前导低压继续东移南压发展,其后部雷暴高压及前导低压并逐渐增强。05:00(图 8b),飊线抵达柳州站,从图中可以看出,飊线后部出现一个 β 中尺度雷暴高压,中心气压达到 1014.0 hPa,同时也出现前导低压及尾流低压,对应多普勒雷达资料可以看到此时飊线与高低压之间的梯度密集带相对应,飊线北

段的强回波与最大梯度位置相一致,柳州站正处于最大梯度密集处,此时飑线发展达到强盛。从风场上可以看出,飑线上有两处明显的大风区,其中一处出现在飑线南部、雷暴高压带中间的相对气压低值区,与雷达回波上的回波断裂处位置相一致,这说明飑线的断裂处往往是大风等强天气容易发生的地方(俞小鼎等,2006);另一处则出现在气压梯度最大区域,其大风的风速更大,所造成的灾害更严重,这与05:07 柳州站观测到 $21\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的地面大风实况相吻合;同时,自雷暴高压向外的流出气流与飑线前部

的东南气流汇合形成一条弧形的辐合线,与飑线的强回波区域相一致。

由上述中尺度特征可知,飑线的发展与地面辐合线的活动密切相关,地面辐合线是对流活动初期的激发者。而发展成熟的飑线地面气压场上出现明显的雷暴高压、飑前低压和飑后低压等中尺度特征;飑线大风等灾害性天气则容易出现在飑线的断裂处和气压梯度大值区;雷暴高压向外的流出气流与飑线前部的东南气流所形成的辐合线与飑线的强回波区相一致。

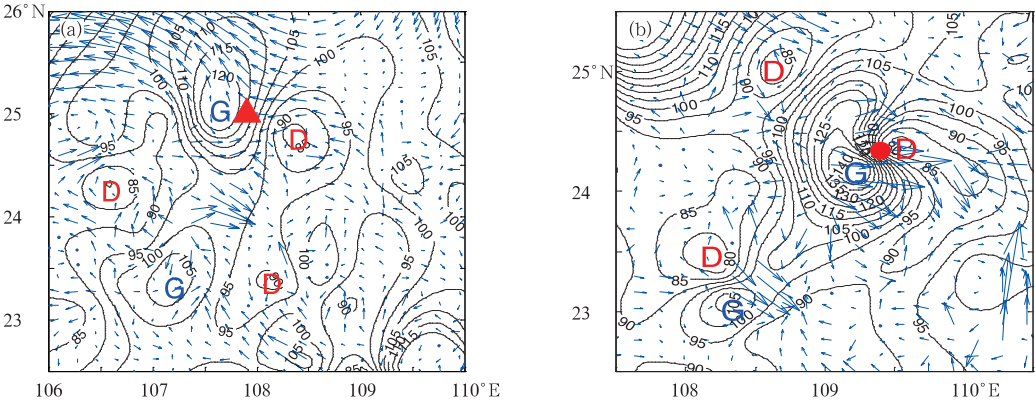


图 8 2013 年 3 月 28 日(a)03:00 和(b)05:00 地面自动站气压场(单位: dagpm)和风场
Fig. 8 The surface barometric pressure (unit: dagpm) and wind of automatic meteorological stations at 03:00 BT (a) and 05:00 BT (b) 28 March 2013

4 大风的产生机制

与深对流相联系的雷暴大风,一般是由水滴和冰粒下降过程中的拖曳作用产生。Doswell(1987)认为,降水负荷和由蒸发冷却带来的负浮力是引发和维持下曳气流的因子。降水负荷引起液态水的拖曳效应。蒸发冷却的负浮力是当降水通过不饱和空

气层时产生,中低层的低湿度有利于降水蒸发从而形成负浮力。

此次过程中梧州和柳州站都出现了大风,从观测站逐半小时雨量与极大风速时序图上看(图 9),雨量与极大风速有极好的对应关系,呈正相关:柳州站在 28 日 05:30 的半小时雨量有明显的突增,由 3 mm 突增到 14.4 mm,对应于极大风速也出现突增,在降雨量最大的半小时中记录到 $12.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

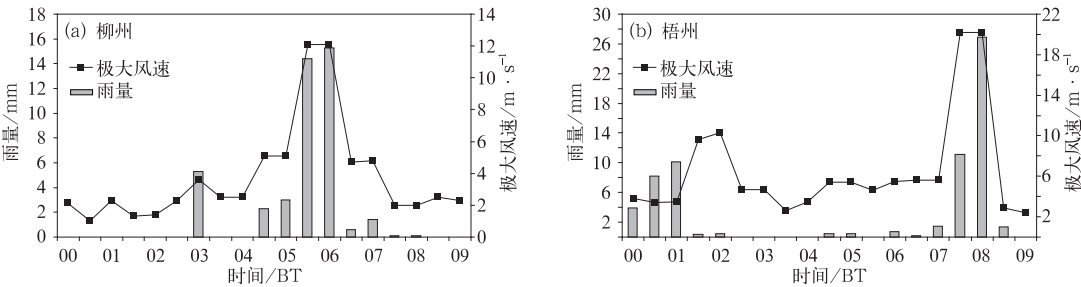


图 9 2013 年 3 月 28 日 00—09 时柳州站(a)和梧州站(b)的雨量和极大风速时序图
Fig. 9 The sequence chart of rainfall amount and extreme wind speed during 00:00—09:00 BT 28 March 2013
(a) Liuzhou, (b) Wuzhou

的极大风速,说明了极大风速出现在雨强最大的时间段内,可见降水的拖曳效应对大风的产生有着一定的作用;同样在梧州站,极大风速也出现在雨强最大的时段内(28 日 07:00—08:00)。而梧州站的 28 日 20 时的探空也显示中低层有一个干区,满足不饱和和空气层的条件。Johns 等(1992)指出,卷入的空气大部分来自对流层中层(地面以上 3~7 km),高空强气流的水平动量下传能增强外流。

根据伍志方等(2004)统计分析发现,雷达回波移速与雷雨大风出现几率呈正相关,当回波移速达到 $60\sim 69\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,雷雨大风出现几率急剧上升,超过 55%,速度超过 $60\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 的回波十分有利于产生灾害性大风。此次飊线过程中回波移速超过 $100\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 以上,因此,如此快的回波移速将有利于地面大风的产生,并对大风风速有增速作用。

可见,降水粒子的拖曳作用及飊线的快速移动都对地面大风的产生及增幅都有一定的作用。

5 结论与讨论

(1) 飊线产生在 θ_{sc} 的高层低值舌与低层高值舌相叠加、大气强烈对流不稳定区域; $T\text{-}\log p$ 图分析表明产生雷雨大风的环境条件为上干下湿的大气层结,较强的垂直风切变、垂直温度差大于 25°C 及较大的 K 指数、较小的沙氏指数。

(2) 地面辐合线触发初期的对流活动;发展成成熟的飊线地面气压场上存在雷暴高压、飊前低压和飊后低压等中尺度特征;飊线大风等灾害性天气容易出现在飊线的断裂处和气压梯度大值区处;雷暴高压向外的流出气流与飊线前部的东南气流辐合,与飊线的强回波区相一致。

(3) 雷达分析表明此次飊线过程的弓形回波特征明显,速度图上的风速大值区、后侧入流、中层径向辐合以及垂直风廓线图中低层风的转变信息等对大风的预警有明显的预示作用;反射率因子核心和中层风速大值区快速降低的现象,让预报员可以至少提前 5~28 min 发布大风预警。降水粒子的拖曳作用和飊线的快速移动都对地面大风的产生及增幅有一定的作用。

通过分析 3 月 27 日 20 时的 $T\text{-}\log p$ 图发现,广西 6 个探空站均存在逆温层,逆温层顶高度自东向西在 906~795 hPa,即 2 km 以下,逆温层厚度约在 200~300 m,强度为 $2\sim 3^{\circ}\text{C}$,属较弱的逆温层结。27 日晚有多个单体从云南移入广西,回波底高度有大于 2 km,也有小于 2 km,它们在百色东部发展并

演变为弓形回波;同时刻 VWP 显示 4~5 km 高度的风向有西南风—偏西风—西北风的转变,说明有高空槽过境,大尺度高空槽前动力强迫足于抵消低空逆温层对对流的抑制能力,使单体在东移过程中得到发展。由于观测资料有限,华南地区低空的逆温强度在什么情况下抑制对流发展,以及与有无高空槽过境的关系,仍有待于做进一步的研究。

参考文献

- 陈涛,代刊,张芳华. 2013. 一次华北飊线天气过程中环境条件与对流发展机制研究. 气象,39(8):945-954.
- 段鹤,严华生,马学文,等. 2014. 滇南冰雹的预警方法研究. 气象,40(2):174-185.
- 段鹤,严华生,王晓君. 2012. 滇南飊线的发生环境及其多普勒雷达回波特征. 热带气象学报,28(1):68-76.
- 洪毅,李玉柱,陈智源,等. 2007. 2006 年 6 月 10 日浙江飊线 FY-2C 卫星云图特征. 气象,33(9):47-51.
- 牛淑贞,张一平,席世平,等. 2012. 基于加密探测资料解析 2009 年 6 月 3 日商丘强飊线形成机制. 暴雨灾害,31(3):255-263.
- 曲晓波,王建捷,杨晓霞,等. 2010. 2009 年 6 月淮河中下游三次飊线过程的对比分析. 气象,36(7):151-159.
- 盛裴轩,毛节泰,李建国,等. 2002. 大气物理. 北京:北京大学出版社,137-144.
- 寿绍文,励申申,姚秀萍. 2003. 中尺度气象学. 北京:气象出版社,83-90.
- 王国荣,卞素芬,王令,等. 2010. 用地面加密自动观测资料对北京地区一次飊线过程的分析. 气象,36(6):59-65.
- 王莉萍,崔晓东,常英,等. 2006. 一次飊线天气的非常规气象资料特征分析. 气象,32(10):88-94.
- 伍志方,叶爱芬,胡胜,等. 2004. 中小尺度天气系统的多普勒统计特征. 热带气象学报,20(4):391-400.
- 姚建群,戴建华,姚祖庆. 2005. 一次强飊线的成因及维持和加强机制分析. 应用气象学报,16(6):746-753.
- 杨晓霞,李春虎,杨成芳,等. 2007. 山东省 2006 年 4 月 28 日飊线天气过程分析. 气象,33(1):88-94.
- 袁子鹏,王瀛,崔胜权,等. 2011. 一次中纬度飊线的阵风锋发展特征分析. 气象,37(7):814-820.
- 俞小鼎,姚秀萍,熊廷南,等. 2006. 多普勒天气雷达原理与业务应用. 北京:气象出版社,123,216-218.
- 章国材. 2011. 强对流天气分析与预报. 北京:气象出版社,170.
- Doswell C D. 1987. The distinction between large-scale and mesoscale contribution to severe convection: A case study example. Wea Forecasting,2:3-16.
- Johns R H, Doswell C A. 1992. Severe local forecasting. Wea Forecasting,5:588-612.
- Schmocker G K, et al. 1996. Forecasting the initial onset of damaging downburst winds associated with a mesoscale convective system (MCS) using the midaltitude radial convergence (MARC) signature. 15th Conference on Weather Analysis and Forecasting, Norfolk, VA, Amer Meteor Soc,306-311.