

陈卓,高正南,郭晓梅,等.“天鸽”台前飚线环境场及雷达回波特征分析[J]. 中低纬山地气象,2023,47(4): 41 - 47.

“天鸽”台前飚线环境场及雷达回波特征分析

陈 卓¹,高正南¹,郭晓梅²,徐八林³

(1. 云南省普洱市气象局,云南 普洱 665000;2. 云南省气象台,云南 昆明 650034;
3. 云南省大气探测技术保障中心,云南 昆明 650034)

摘 要:利用地面观测资料、ERA5 和多普勒天气雷达资料,对 2017 年 8 月 23 日发生在台风“天鸽”前沿的一次飚线过程进行分析。结果表明:(1)近地面显著升温、低层大气暖湿不稳定及 CAPE 值达 $2000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上,为台前飚线形成提供了前期热力条件;(2)对流单体在地面辐合线附近触发并迅速发展为高度组织化的飚线,其强度、移向与地面风的辐合强弱及位置高度一致;(3)水汽通量中低层辐合、高层辐散的配置保证了短时强降水发生时高效的水汽供应;(4)雷达图上台前飚线发展旺盛阶段中尺度辐合带特征最明显,出现多个 55 dBz 以上强中心及 RIJ 特征;(5)当飚线两侧的风向辐合特征减弱时,其带状结构快速断裂且强度减弱,伴随的强对流天气消失。

关键词:台风“天鸽”;台前飚线;地面辐合线;雷达回波

中图分类号:P458.3 **文献标识码:**A

Characteristics of Circulation Patterns for a Pre - Tropical Cyclone Squall Line of Typhoon Hato and Corresponding Doppler Echoes

CHEN Zhuo¹, GAO Zhengnan¹, GUO Xiaomei², XU Balin³

(1. Pu'er Meteorological Bureau of Yunnan Province, Pu'er 665000, China;

2. Yunnan Meteorological Observatory, Kunming 650034, China;

3. Yunnan Provincial Technical Support Center for Atmospheric Sounding, Kunming 650034, China)

Abstract: Based on the ground observation data, ERA5 reanalysis data and Doppler weather radar data, a Pre - Tropical Cyclone (Pre - TC) squall line of typhoon Hato on August 23, 2017 was studied. The results show that: (1) the significant near - surface warming, warm and humid instability of the lower atmosphere and the CAPE above $2000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ provide the early thermal conditions for the Pre - TC squall line; (2) the convective cells trigger near the surface convergence line and rapidly develop into a highly organized squall line, whose intensity and direction of movement were highly consistent with the convergence strength and location of the surface winds; (3) the configuration of middle and low - level convergence and high - level dispersion of water vapor flux ensures efficient water vapor supply during the occurrence of short - term heavy precipitation; (4) the Doppler radar chart shows that the characteristics of mesoscale convergence zone in the vigorous stage of Pre - TC squall line was the most obvious, with multiple CR centers above 55 dBz and RIJ features; (5) when the convergence characteristics of wind directions on both sides of the squall line was weakened, the band structure broke up rapidly and the intensity diminished, the accompanying strong convective weather disappeared.

Key words: Typhoon "Hato"; Pre - Tropical Cyclone Squall Line; convergence line; radar echo

收稿日期:2022 - 09 - 28

第一作者简介:陈卓(1988—),女,工程师,主要从事中短期及短时临近预报研究,E-mail:757755046@qq.com。

通讯作者简介:郭晓梅(1990—),女,工程师,主要从事中短期预报和气象防灾减灾研究,E-mail:285590861@qq.com。

资助项目:中国气象局创新发展专项(CXFZ2022J021);云南基层台站气象科技创新与能力提升计划重点项目(STIAP202233)。

0 引言

飊线是由对流单体侧向排列而成的中尺度带状对流系统,常导致雷暴、强风,甚至短时暴雨、下击暴流、冰雹等灾害性天气,破坏力巨大,因此加强飊线的研究对预报预警具有重要指导作用和现实意义。国内气象学者对其发生条件、组织方式、生命史演变、雷达回波特征、中尺度结构、数值模拟等^[1-5]已经有了很多研究结果,如丁一汇等^[6]根据飊线发生前后的环流特征及天气系统的差异,将飊线的触发机制分为槽后型、槽前型、高后型以及东风波型 4 种;张云济等^[7]将在热带气旋(tropical cyclone, TC)移动路径的前方数百千米处,因 TC 靠近而触发的飊线称为台前飊线。台前飊线一般发生于西行台风或热带低压前侧的偏东气流里。由于副高边缘大气不稳定且高温高湿,当台风外围的螺旋云带与其相遇时会得到发展,呈线状或带状排列,且在时间上具有连续性^[8]。台前飊线往往在 TC 主体抵达前就造成较大影响,如 2008 年第 9 号强热带风暴“北冕”、2014 年第 9 号台风“威马逊”、2019 年第 19 号台风“杨柳”在登陆前分别在广东、湖南、海南出现明显飊线天气过程,所经之处出现大范围雷雨大风、局地短时强降水等强对流天气,灾情较重。相对于西风带中的飊线,台前飊线致灾强度更强范围更广,持续时间通常更长。目前气象工作者对台前飊线的研究^[9-10]还较少,加之深入云贵高原造成影响的台前飊线更因个例极少,对其发生发展的物理机制研究还不够多,特别是在短期预报中可借鉴的经验有限。

2017 年 8 月 23 日,第 13 号台风“天鸽”在西行过程中在云南中部触发飊线,在系统移动过程中普洱市受其影响最大,出现大范围强对流天气。由“天鸽”造成的强对流灾害、暴雨洪涝及暴雨诱发的中小河流洪水、山洪地质灾害共造成普洱市 57 204 人受灾,农作物受灾 1594.02 hm²,共造成直接经济损失 11 526.93 万元。本文对地面气象要素、高空环流形势及物理量场、雷达回波特征进行分析,以期提高对台风外围系统性强对流天气的预报预警能力。

1 天气概况及飊线过境时地面气象要素变化特征

“天鸽”于 2017 年 8 月 23 日 13 时前后在广东台山市登陆,在西行过程中在云南中部触发飊线(图 1)。云南省 125 站次出现短时强降水(小时雨量 ≥ 20 mm),16 站次遭受雷暴大风(风速 > 17 m·

s⁻¹)袭击,嵩明、玉溪、通海、剑川等地出现冰雹。普洱市受成熟的飊线系统影响出现强雷电、短时强降水、大风天气,国家气象观测站监测到最大瞬时风速 20.9 m·s⁻¹(孟连),景东县菠萝村 35 min 降水达 60.3 mm。此次台前飊线天气造成的强对流天气范围广、强度强、造成的灾害重,是云南 2017 年秋季较典型的一次强对流天气过程。

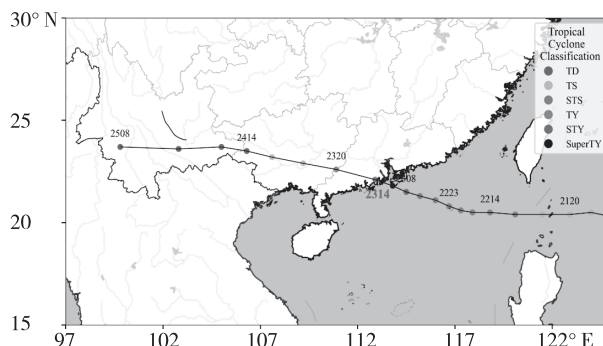


图 1 台风“天鸽”移动路径图

(数据来源于中央气象台台风网)

Fig. 1 Track of Typhoon Hato (<http://typhoon.nmc.cn>)

由于飊线是狭窄的中小尺度系统,当飊线过境时附近的气象要素水平梯度很大。此次飊线于 2017 年 8 月 23 日 11 时在滇东一带形成(图 1 黑色实线所示),随后在向西南方向移动过程中结构高度组织化,于 16 时 30 分左右进入普洱境内并继续发展加强。其中墨江国家气象观测站气象要素在飊线过境前后变化明显(图 2),该站逐 5 min 地面气象要素场变化如下:

(1)气压涌升。当日随着强台风“天鸽”向粤西地区靠近,墨江站气压一直在缓慢下降,16 时 18 分本站气压降到当日最低值 859.6 hPa,之后气压缓慢上升;16 时 35 分开始气压涌升,15 min 内气压从 860.5 hPa 突增至 863.2 hPa($\Delta P = 2.7$ hPa),系统移出后气压缓慢下降。

(2)气温骤降。14 时“天鸽”中心位于广东,其外围云系并未对云南造成直接影响,普洱市当日晴热高温,最高气温 > 30 °C。当飊线天气发生时,墨江站于 16 时 07 分从当日的最高气温 32.3 °C 迅速下降,16 时 54 分下降到当日最低气温 19.5 °C,47 min 内降幅达 12.8 °C。

(3)风速剧增,出现 9 级大风。墨江站 8 月 23 日 16 时 50 分最大 10 min 平均风速为 18.6 m·s⁻¹,16—20 时全市共有 31 个自动站出现 8 级(17 m·s⁻¹)以上偏东大风,墨江县福永自动观测站于 17 时 45 分记录到瞬时 9 级(24.1 m·s⁻¹)狂风。与系统移向一致,本次飊线造成的大风区自东向西传播。

(4)湿度明显增大。当天清晨至白天本站相对湿度缓慢下降,16 时 40 分下降到当日最低值 52%。飚线系统过境时相对湿度 28 min 激增至 94%,之后出现降雨。

(5)强烈降水。飚线天气发生前,墨江站晴热无雨,当飚线过境时,尽管强降雨中心不在本站,但从 16 时 36 分出现骤雨,15 min 内累计降水 21.8 mm,其中 16 时 45—55 分雨势最大,平均分钟降雨量 1.6 mm。飚线过境后雨强快速减弱。

分析受台前飚线影响的自动气象站资料发现,飚线过境时首先发生突变的地面要素是气压,其次是风速剧增形成大风,温度和湿度的突变,最后才出现强降雨。主要原因是飚线初生时首先在系统前方出现小尺度雷暴高压,由于气压梯度的加大造成风速剧增,伴随温度骤降的同时,大气中水汽凝结使湿度迅速增加,最后才造成骤雨。由于飚线系统在移动过程中结构完整清晰,因此上游站气象要素的变化情况可作为下游站强天气预报的重要参考。

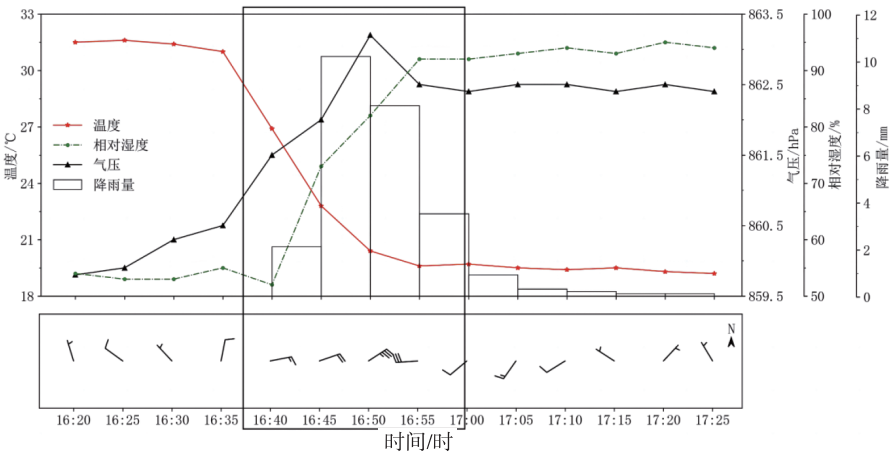


图 2 2017 年 8 月 23 日 16 时 20 时—17 时 25 分墨江站逐 5 min 地面温度(红线)、相对湿度(绿线)、气压(黑线)、累积雨量(柱状)及 2 min 平均水平风向风速的时间演变图

Fig. 2 5-minute evolution of surface temperature (red line), relative humidity (green line), atmospheric pressure (black line), accumulative rainfall (bar) and 2-minute average horizontal wind speed at Mojiang station from 16:20 to 17:25 on August 23, 2017

2 台前飚线发生的环流背景和环境场特征分析

2.1 高空环流背景分析

生成于西太平洋的 2017 年 13 号台风“天鸽”于 8 月 23 日 13 时前后在广东台山市登陆,登陆时中心气压 955 hPa,最大风力 14 级,为强台风级别,登陆后继续以 30 km · h⁻¹ 的速度向西北偏西方向移动。从 500 hPa 位势高度场和风场分布可见(图 3),西太平洋副热带高压(以下简称副高)西伸至

95°附近,在南侧强盛的偏东气流引导下“天鸽”快速向西移动。14 时广西西部至文山存在明显风速辐合区,随着“天鸽”向云南靠近,20 时风速辐合区移至滇西地区。与此同时,700 hPa 风速辐合带自滇中向西推进,20 时辐合带两侧风速差 > 10 m · s⁻¹ (图略)。中低层强烈的风速辐合导致空气质量快速堆积,在垂直方向上强迫气流向上运动,加之副高外围不稳定、高能高湿的大气环境,为台前飚线的形成创造了动力和热力条件。

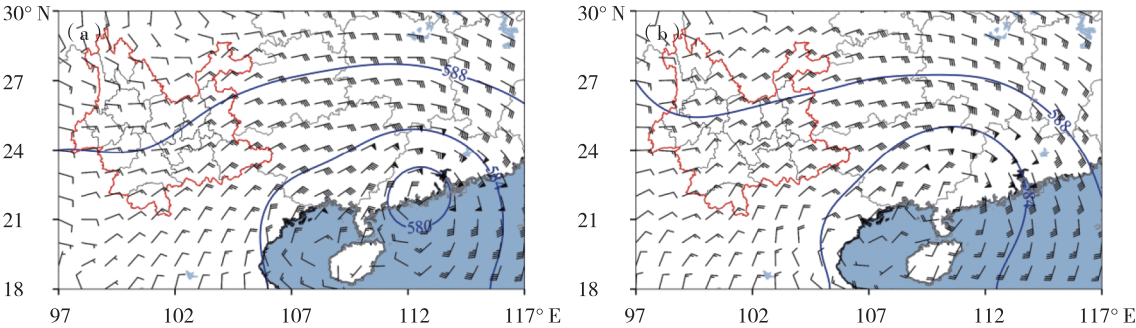


图 3 2017 年 8 月 23 日 14 时(a)、20 时(b)500 hPa 风场、位势高度场

Fig. 3 Wind and geopotential height at 500 hPa at 14:00 (a) and 20:00 (b) on August 23, 2017

2.2 能量条件分析

飊线作为组织性强的深对流天气系统,其发生发展伴随着大量不稳定能量的积累、触发和释放^[8,11]。23 日 14 时(图 4a)和 20 时(图 4b)飊线附近 CAPE 值均高达 $2000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上,说明飊线形成前大气具备极好的能量条件,保证了飊线系统在

触发后的能量补充,进而维持较长的生命周期。随着“天鸽”中心逐渐移近,飊线前沿的 CAPE 大值带随即向西南方向转移,飊线过境后迅速降低至 $500 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,CAPE 大值区在系统上下游差异较大,说明过程伴随明显的能量释放^[12]。

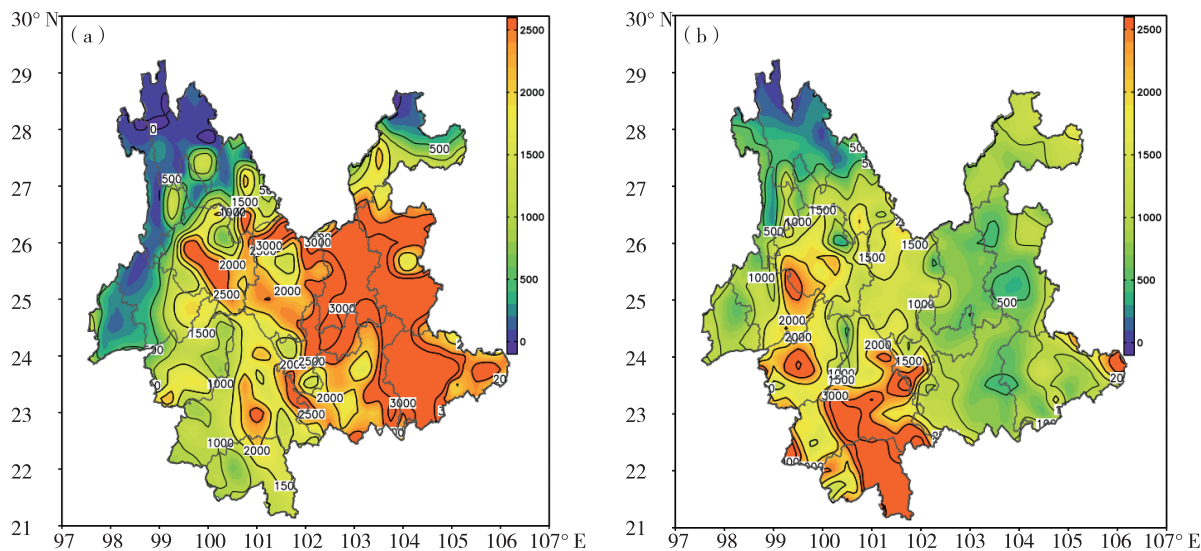


图 4 2017 年 8 月 23 日 14 时(a)、20 时(b)CAPE 值分布(单位: $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Fig. 4 Distribution of CAPE at 14:00 (a)、20:00(b) on August 23, 2017 (unit: $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)

假相当位温 (θ_{se}) 与空气质块的温度和湿度均有关,能较好地反映一个地区大气的热力学性质^[13-14]。从墨江站 θ_{se} 时间—垂直剖面可以看出(图 5a),500 hPa 以下假相当位温随高度减小, $\Delta\theta_{se_{500-850}} < -22^\circ\text{C}$,说明低层大气暖湿特性明显,层结对流不稳定性较大。由于飊线前沿天气晴好,16 时地面最高气温 $> 31^\circ\text{C}$,与系统后部温差最大达 20.3°C (图 5b)。可见飊线系统初生时对流层低层

大气暖湿不稳定,CAPE 值非常高,能量条件充足;飊线形成后在向西南方向移动的过程中,前沿高温高湿的近地层大气被飊线系统前部相对冷的出流剧烈抬升,不稳定能量得到释放和补充,飊线系统的结构和组织性得以长时间维持。从实况来看,台前飊线正是从热力和条件不稳定有利的区域首先发展起来。

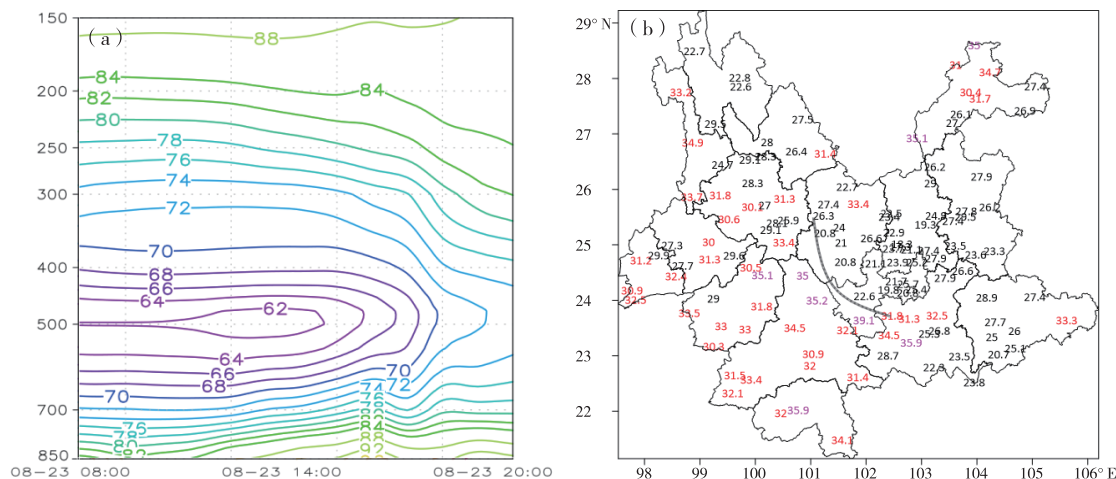


图 5 墨江站 θ_{se} 时间—垂直剖面图(a)、2017 年 8 月 23 日 16 时地面最高气温分布图(b,单位: $^\circ\text{C}$;黑色实线为飊线系统位置)

Fig. 5 The θ_{se} time – vertical profile at Mojiang station(a), distribution of maximum surface temperature at 16:00 on August 23, 2017 (b, unit: $^\circ\text{C}$; black solid line is the location of the squall line system)

2.3 水汽条件分析

强风暴的形成要求低层有比普通雷暴更丰富的水汽含量^[15]。在副高外围的气流引导下,“天鸽”快速西行中在中心北侧形成偏东急流,自南海热带洋面向云南上空的水汽通道随即建立。23日08—20时,墨江站上空至400 hPa出现明显水汽通量辐合(图6c),14时辐合程度达到最强,其中心位于500 hPa附近,达 $-12 \times 10^{-6} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。水汽在中低层辐合、高层辐散,抽吸作用有利

于维持水汽向上输送的强度,进而保证了短时强降雨发生时高效的水汽供应。此外,850 hPa云南滇中以东相对湿度 $>80\%$ (图6a),而500 hPa相对湿度 $<50\%$ (图6b),大气层结上干下湿且水平方向上差值较大,是形成强对流天气的有利形势。结合实况分析,飊线正是从滇中发展起来的,这种水汽场分布特点与大范围强降雨过程的差异,导致飊线过程所伴随的降水历时短但强度大。

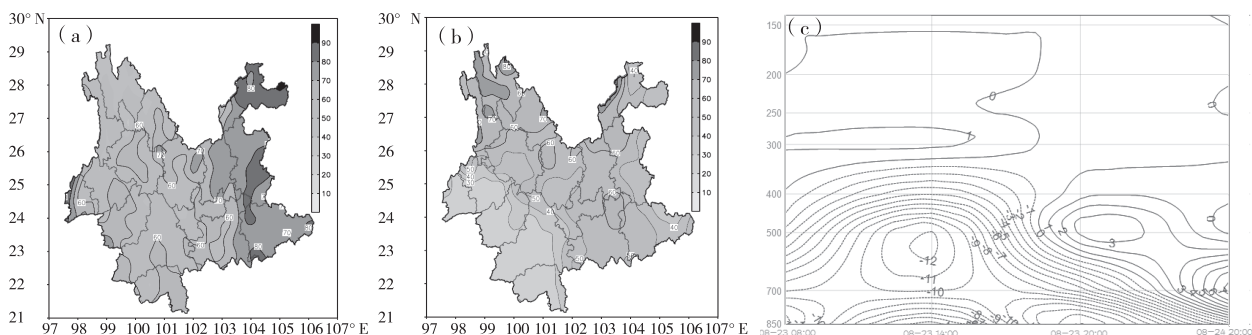


图6 2017年8月23日14时云南省850 hPa(a)、500 hPa(b)相对湿度及墨江站上空水汽通量散度垂直分布(c,单位: $10^{-6} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 6 Vertical distribution of relative humidity in Yunnan Province 850 hPa(a); 500 hPa(b), water vapor flux divergence over Mojiang Station at 14:00 on August 23, 2017 (c, unit: $10^{-6} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

2.4 触发机制分析

高能高湿的大气状态下,边界层的中尺度辐合线可以直接触发强对流天气^[16]。23日10时地面风场存在东北风与偏西风的辐合(图7a),辐合线两侧风向较一致且偏东北风速 $>4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,此时辐合线附近已有分散的对流云团生成并发展;12—16时云南东部的主导风向由东北风转为偏东风(图7b),地面辐合线西推至哀牢山沿线(普洱东部),且 100°E 附近的西风也明显增强,辐合区域趋于狭窄,加之两侧风速增强,为飊线系统的形成提供了更有力的动力触发条件^[17]。分散的对流云团快速合并成高度组织性的线状对流系统,随着辐合线的西推而向西移动,在16时前后影响普洱,此时地面风向辐合最明显(图7c),对应飊线结构更清晰,所影响测站出现雷雨大风、短时强降雨、冰雹天气。随着飊线进一步向西移动,20时地面风速减弱(图7d),辐合带主要位于普洱西部且尺度减小,飊线后侧开始出现层状云回波,说明后侧入流组织性减弱,预示着飊线强度减弱。从雷达图上飊线的移动路径(图7e)可知,地面对流单体在地面辐合线附近触发并迅速发展为高度组织化的飊线,其强度、移向与地面风的辐合强弱与位置高度一致。

综上,此次台前飊线是出现在副高边沿,近地

面显著升温、低层大气暖湿不稳定及 $\text{CAPE} > 2000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的背景下,由地面辐合线和700 hPa风速辐合共同触发。

3 多普勒天气雷达回波演变分析

在短临预报中,雷达资料中组合反射率的值能直观体现对流风暴强度。此次飊线系统在雷达图上结构完整清晰,持续时间约6 h,生命史包含多次雷暴单体族的合并和分裂,图8为成熟的飊线系统影响普洱市的主要过程。本节对飊线生命史中各个阶段的回波演变特征进行分析。

初始阶段:10时起滇中一带逐渐有独立对流单体生成并迅速向西南方向扩展(图略),12时左右单体强度 $>50 \text{ dBz}$,在移动过程中逐渐合并排列成线状,移速约为 $43 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,地面天气以雷雨、冰雹为主。

发展成熟阶段:在16时31分普洱毡帽山回波图上(图8a)可识别出清晰的窄带回波且强单体组合反射率明显加强,飊线主体强度维持在 55 dBz 以上,回波结构更加密实且排列有序。回波存在高反射率因子梯度,且对流单体不断合并呈线状排列,21时长度向两端扩展(图8b),说明存在有利于系统发展的环境条件。0.5°仰角径向速度图上出现中尺度

辐合带(黑色实线),后侧入流达 $23.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (RIJ) (图 8c),大大加强了由降水拖曳导致的初始下沉气流,进而增加地面出流的强度,导致地面大风天气

的出现^[18]。21 时起中尺度辐合线特征减弱(图 8d)。该时段内主要出现雷雨大风、短时强降水和局地冰雹。

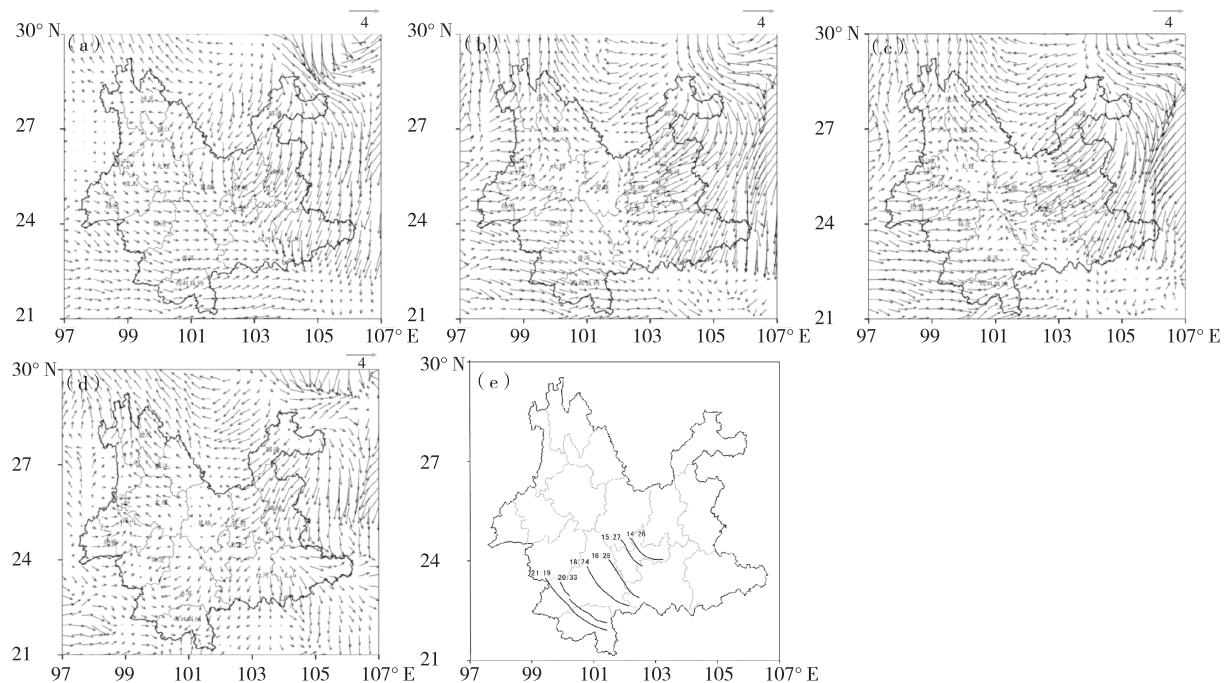


图 7 2017 年 8 月 23 日 10 时(a)、14 时(b)、16 时(c)、20 时(d)地面风场,台前飑线移动示意图(e)

Fig. 7 Distribution of wind on surface at 10:00(a)、14:00(b)、16:00(c) and the movement of the pre - Tropical Cyclone squall line (e) on August 23, 2017

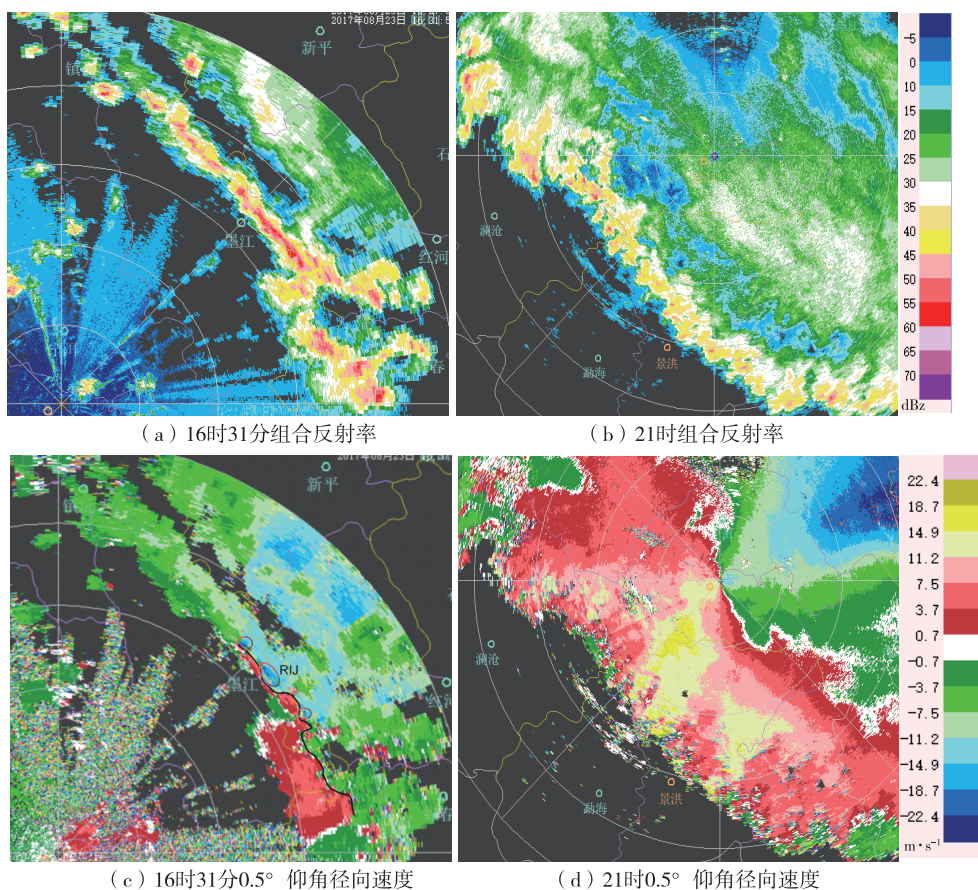


图 8 2017 年 8 月 23 日普洱雷达组合反射率和径向速度

Fig. 8 Combined reflectance and radial velocity of Pu'er radar on August 23, 2017

减弱阶段:成熟的飊线维持至 21 时 22 分后逐渐减弱(图略),带状结构断裂,独立对流单体强度减弱为 <30 dBz 的层状云回波,对应的速度图上辐合特征消失,后侧最大入流风速降至 $12.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。天气转为降水为主,实测地面极大风速有所减弱。

4 结论

(1) 台前飊线过境时地面气象要素变化明显。受影响的测站首先是出现雷暴高压,随后风速剧增、温度骤降、湿度迅速加大,最后才出现骤雨。飊线系统在移动过程中结构完整清晰,因此上游气象要素的剧烈变化情况,可为下游台站强天气预报提供参考。

(2) 副高南侧和西行强台风外围的偏东风在滇中一带辐合,中低层强烈的风速辐合导致空气质量快速堆积,在垂直方向上强迫气流向上运动,加之副高外围不稳定、高能高湿的大气环境,为台前飊线的形成创造了大尺度动力和热力条件。

(3) 台前飊线附近 CAPE 值高达 $2000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上,前沿地面最高气温 $>31^\circ\text{C}$,说明飊线形成前大气具备极好的能量条件,保证了飊线系统在触发后的能量补充,进而维持较长的生命周期。飊线过境后 CAPE 值迅速降低至 $500 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,说明过程伴随明显的能量释放。

(4) 台前飊线初生时 $\Delta\theta_{se_{500-850}} < -22^\circ\text{C}$,说明低层大气暖湿不稳定;飊线形成后在向西南方向移动的过程中,前沿高温高湿的近地层大气被飊线系统前部相对冷的出流剧烈抬升,不稳定能量得到释放和补充,飊线系统的结构和组织性得以长时间维持,台前飊线正是从热力和条件不稳定有利的区域首先发展起来的。

(5) 水汽通量中低层辐合,高层辐散的配置有利于在动力抽吸作用下维持水汽向上输送的强度,进而保证短时强降水发生时高效的水汽供应。

(6) 对流单体在地面辐合线附近触发并迅速发展成高度组织化的飊线,其强度与移向与地面风的辐合强弱与位置高度一致。

(7) 雷达图上飊线生命史包含多次雷暴单体族

的合并和分裂,发展旺盛阶段中尺度辐合带特征最明显,出现多个 55 dBz 以上强中心及 RIJ 特征;当飊线两侧的风向辐合特征减弱时,其带状结构快速断裂且强度减弱,伴随着强对流天气消失。

参考文献

- [1] 漆梁波,陈永林. 一次长江三角洲飊线的综合分析[J]. 应用气象学报,2004,15(2):162-173.
- [2] 段鹤,严华生,王晓君. 滇南飊线的发生环境及其多普勒雷达回波特征[J]. 热带气象学报,2012(1):68-76.
- [3] 吴海英,裴海瑛,沈树勤,等. 飊线传播与发展及其引发地面强风过程个例分析[J]. 气象科技,2007,35(5):676-680.
- [4] 蒋玉凤,吴满春,陈美伶. FY-4A 卫星及雷达产品在飊线过程中的应用分析[J]. 气象水文海洋仪器,2022,39(4):51-54.
- [5] 马尚芹,马中元,谢维,等. 2020-05-05 江西飊线过程特征分析[J]. 气象水文海洋仪器,2021,38(4):8-9.
- [6] 丁一汇,李鸿洲,章名立,等. 我国飊线发生条件的研究[J]. 大气科学,1982,6(1):18-27.
- [7] 张云济. 2007—2009 年我国登陆台风台前飊线的统计特征[D]. 北京:北京大学,2010:22-28.
- [8] 杨玉莲,陈思毅,梁俊聪. 广西 0823 台前飊线诊断分析[J]. 安徽农业科学,2012,40(17):9401-9404.
- [9] 唐明晖,姚秀萍,王强,等. 不同强度台风相伴随的内陆台前飊线对比分析[J]. 气象,2017,43(8):912-923.
- [10] 陈永林,王智,曹晓岗,等. 0509 号台风“麦莎”登陆螺旋云带的增幅及其台前飊线的特征研究[J]. 气象学报,2009,67(5):828-839.
- [11] 郑媛媛,张备,王啸华,等. 台风龙卷的环境背景和雷达回波结构分析[J]. 气象,2015,41(8):24-34.
- [12] 杨春艳,陈杨,孟庆怡,等. 黔西南一次中 β 尺度强对流天气分析[J]. 中低纬山地气象,2021,45(6):1-8.
- [13] 王秀明,俞小鼎,周小刚. 雷暴潜势预报中几个基本问题的讨论[J]. 气象,2014,40(4):389-398.
- [14] 鲁亚斌,郭荣芬,张腾飞,等. 一次滇中暴雨中尺度对流系统特征分析[J]. 气象科学,2002,25(4):376-384.
- [15] 郑倩,许爱华,应冬梅,等. 江西夏季雷电天气热力条件及不稳定指数对比分析[J]. 气象与减灾研究,2009,32(2):28-29.
- [16] 邱双. 雅安一次极端强降水的超级单体风暴特征及成因分析[J]. 中低纬山地气象,2022,46(2):55-62.
- [17] 王子晨,王红军,彭冲,等. 江南一次强对流天气的成因及环境场特征分析[J]. 中低纬山地气象,2022,46(6):41-47.
- [18] 俞小鼎. 雷暴与强对流临近预报[M]. 北京:气象出版社,2020.