

自贡市极端大风过程特征分析

喻琴昆^{1*}, 吕用洋¹, 程乔曦¹, 雷逸萌², 周燕秋^{3#}

¹自贡市气象局, 四川 自贡

²内江市气象局, 四川 内江

³铜梁区气象局, 重庆

收稿日期: 2026年2月15日; 录用日期: 2026年3月13日; 发布日期: 2026年3月23日

摘要

本文对自贡地区2018~2023年发生的15次9级以上对流性大风过程进行分析, 探究其发生时间特征、环境条件、雷达回波及地面要素特征, 结果表明: ① 自贡发生9级以上对流性大风分为混合性大风和雷暴大风两类, 其中混合性大风高发于春末夏初, 雷暴大风高发于盛夏, 且以16时和21时为峰值时段; ② 物理环境方面, 低层和中高层喇叭口状层结是有利层结结构, 且Shr500 hPa与对流有效位能(Convective Available Potential Energy, CAPE)呈一定负相关, Pearson相关系数-0.46; ③ 雷达回波形态以非线性对流系统为主(29%), 且大多回波强度 ≥ 65 dBZ, 短临监测上中层径向辐合(MARC)、低层辐散、低空急流、阵风锋及垂直液态含水量(Vertically Integrated Liquid, VIL)突降为关键监测指标; ④ 过程普遍伴随气温骤降、气压涌升及5分钟雨量 ≥ 7 mm的短时强降水。

关键词

极端大风, 环境条件, 雷达特征, 监测指标

Analysis of Characteristics of Extreme Gale Processes in Zigong

Qinkun Yu^{1*}, Yongyang Lyu¹, Qiaoxi Cheng¹, Yimeng Lei², Yanqiu Zhou^{3#}

¹Zigong Meteorological Bureau, Zigong Sichuan

²Neijiang Meteorological Bureau, Neijiang Sichuan

³Tongliang Meteorological Bureau, Chongqing

Received: February 15, 2026; accepted: March 13, 2026; published: March 23, 2026

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 喻琴昆, 吕用洋, 程乔曦, 雷逸萌, 周燕秋. 自贡市极端大风过程特征分析[J]. 气候变化研究快报, 2026, 15(2): 472-482. DOI: 10.12677/ccrl.2026.152052

Abstract

This paper analyzes 15 convective gale processes of magnitude 9 and above that occurred in Zigong from 2018 to 2023, exploring their temporal characteristics, environmental conditions, radar echo features and surface element characteristics. The results show that: ① The convective gales of magnitude 9 and above in Zigong are divided into two categories, namely mixed gales and thunderstorm gales. Mixed gales occur frequently in late spring and early summer, while thunderstorm gales are prevalent in midsummer, with peak hours at 16:00 and 21:00 local time. ② In terms of physical environment, the trumpet-shaped stratification in the lower and middle-upper troposphere is a favorable stratification structure. Moreover, there is a negative correlation between the vertical wind shear at 500 hPa (Shr500 hPa) and Convective Available Potential Energy (CAPE), with a Pearson correlation coefficient of -0.46 . ③ The radar echo morphology is dominated by nonlinear convective systems (accounting for 29%), and most of the echo intensities are ≥ 65 dBZ. For short-range monitoring, mid-altitude radial convergence (MARC), low-level divergence, low-level jet, gust front and sudden drop in Vertically Integrated Liquid (VIL) are the key monitoring indicators. ④ These processes are generally accompanied by abrupt temperature drop, pressure surge and 5-minute rainfall ≥ 7 mm.

Keywords

Extreme Gale, Environmental Condition, Radar Characteristic, Monitoring Indicator

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在全球气候变化背景下, 极端天气气候事件频发已成为影响社会经济发展和人民生命财产安全的重要威胁, 其中极端大风作为强对流天气的典型表现形式, 因其突发性强、破坏力大, 可对农业生产、基础设施、交通运输等造成严重影响, 一直是气象监测预警的重点关注对象[1]-[3], 深入揭示其发生发展规律对提升防灾减灾能力具有重要科学意义。费海燕、许霖等对雷暴大风的气候特征进行的深入分析, 揭示了中国不同区域雷暴大风的差异化规律[4]-[6]; 王秀明、孙虎林等对通过对飑线过程灾害性大风的研究, 揭示了飑线系统成熟阶段的动力结构与发展演变特征[2] [7] [8]; 郑媛媛等关于东北冷涡对江淮飑线生成影响的研究, 则进一步明确了不同天气系统对雷暴大风触发与维持的作用机制[9]; 此外, 郭弘等、支树林等分别对华南暖区暴雨和江西致灾性飑线的研究, 丰富了不同地域背景下雷暴大风形成机理的认知[10][11]。在短临监测上, 李国翠等利用雷达回波三维拼图资料识别雷暴大风的统计研究, 东高红等关于垂直积分液态水含量在地面大风预报中应用的探索, 为基于观测数据的预警指标构建奠定了基础[12][13]。

自贡市位于四川盆地南部, 特殊的盆地地形使得该区域极端大风近年来极端大风天气呈现多发、频发态势, 极大风速亦呈增强趋势, 给当地防灾减灾工作带来严峻挑战。基于此, 本文利用 2018~2023 年自贡地区地面观测站、高空观测站、探空及雷达等多源气象数据, 筛选出 15 次 9 级以上对流性大风过程, 并探究其时间分布特征、物理环境特征、雷达回波特征及地面要素变化规律, 旨在明确自贡地区极端大风的分类特征及关键影响因子, 为提升该区域极端大风的精细化监测预警水平提供科学依据。

2. 数据与方法

2.1. 数据及来源

本文所用数据均来自大数据云平台“天擎·四川”，包括：① 地面观测资料：国家和区域地面观测站分钟级降水量、气温、气压、风向风速、露点温度等；② 高空观测资料：高空风场、温压场等；③ 探空资料：宜宾站 T-logp 数据；④ 雷达资料：宜宾站 S 波段雷达基本反射率、径向速度、回波顶高、VIL 等。

2.2. 研究方法

本文主要采用统计分析与个例诊断相结合的方法进行分析研究：① 基于 2018~2023 年地面分钟级观测数据，筛选阵风 9 级以上(极大风速 ≥ 20.8 m/s)的对流性大风过程；② 利用探空资料分析大风发生前的能量条件、风切变特征和层结结构；③ 基于雷达数据，统计回波形态、强度、顶高等特征，分析径向速度和 VIL 变化规律；④ 结合地面观测数据，研究大风过程中气温、气压、降水等要素的演变特征。

3. 个例筛选及分类

3.1. 个例筛选结果

利用地面观测站极大风速对自贡 2018 年至 2023 年符合设定条件的极端对流性大风天气过程进行筛选，共筛选了 15 个个例(表 1)，过程最大阵风为 36.9 m/s(12 级)，出现在 2022 年 4 月 11 日，单过程 9 级以上站点数最多为 8 个，出现在 2023 年 8 月 23 日。

Table 1. Statistical analysis of gale cases

表 1. 大风个例统计

时间	9 级以上站数	最大阵风(m/s)	出现时间	风力	类型
20180521	2	23.2	22:31	9 级	混合性大风
20180714	3	21.7	21:04	9 级	雷暴大风
20180722	1	22.9	3:45	9 级	雷暴大风
20180817	3	21.7	20:00	9 级	雷暴大风
20190604	1	21.7	23:25	9 级	混合性大风
20190731	1	24	14:21	9 级	雷暴大风
20200505	2	30.9	22:07	11 级	混合性大风
20210509	1	21.8	21:48	9 级	混合性大风
20220411	4	36.9	21:03	12 级	混合性大风
20220630	1	28.3	20:32	10 级	雷暴大风
20220727	2	24.4	0:16	9 级	雷暴大风
20220805	3	24.3	21:00	9 级	雷暴大风
20220825	3	26.3	16:57	10 级	雷暴大风
20230619	1	22.1	13:26	9 级	混合性大风
20230823	8	32.8	16:08	12 级	混合性大风

3.2. 时间分布特征

从大风发生的时间来看，9 级以上混合性大风 70%集中在春末夏初(4~6 月)，雷暴大风则主要发生在

夏季(6~8月),其中7月发生频率最高(图1(a))。从小时分布特征来看(图1(b)),自贡的对流性大风主要发生在午后13~16时和夜间20~00时,又以傍晚16时和晚上21时频率最高。这主要是春季太阳辐射开始增强,下垫面增温快,大气层结开始变得不稳定,能量累积在午后到傍晚达到顶峰,易触发对流。而当白天未出现强对流天气,到了夜间山风带来的冷空气可能破坏逆温层,释放不稳定能量,触发强对流。

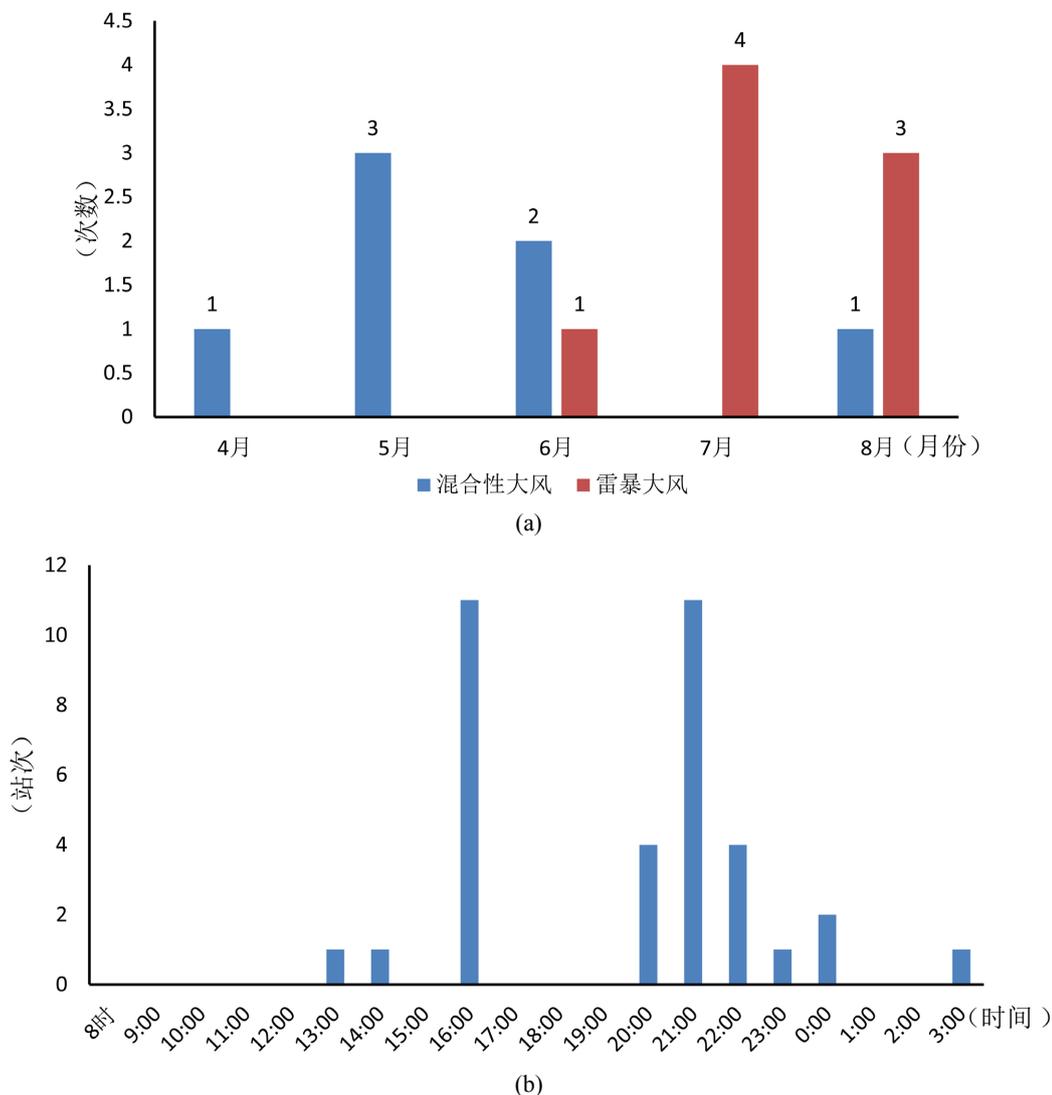


Figure 1. Temporal distribution characteristics of extreme gale events (a: monthly distribution; b: hourly distribution)
图 1. 极端大风时间分布特征(a: 月分布; b: 小时分布)

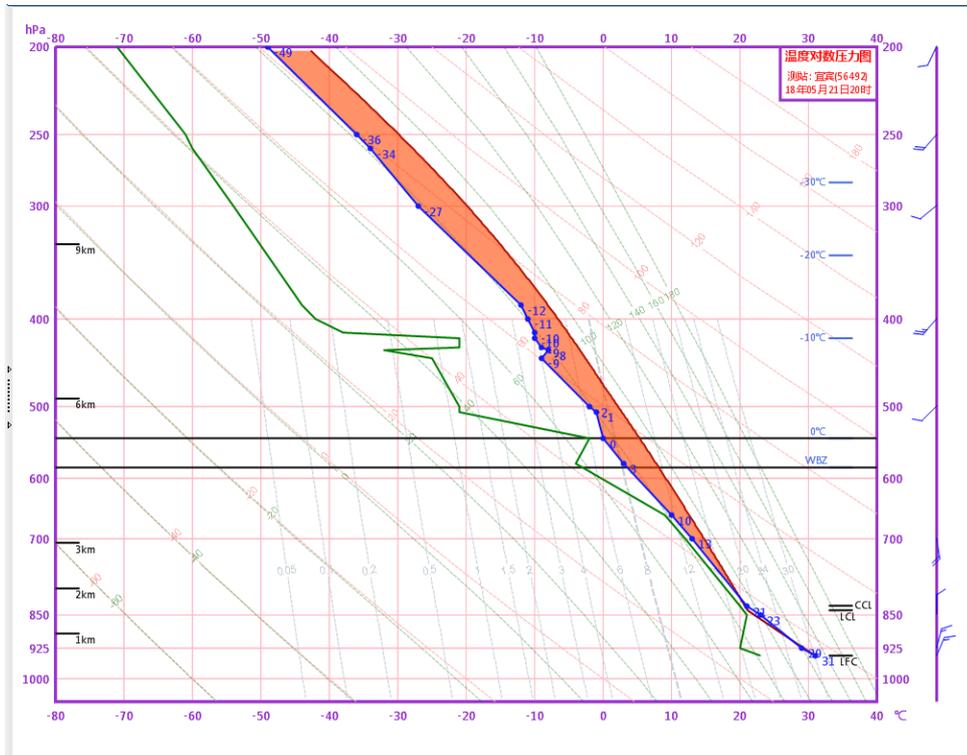
4. 环境特征

利用宜宾站 T-logp 图,从层结结构、对流不稳定、水汽、风切变等角度分析自贡对流性大风过程发生前的环境条件。

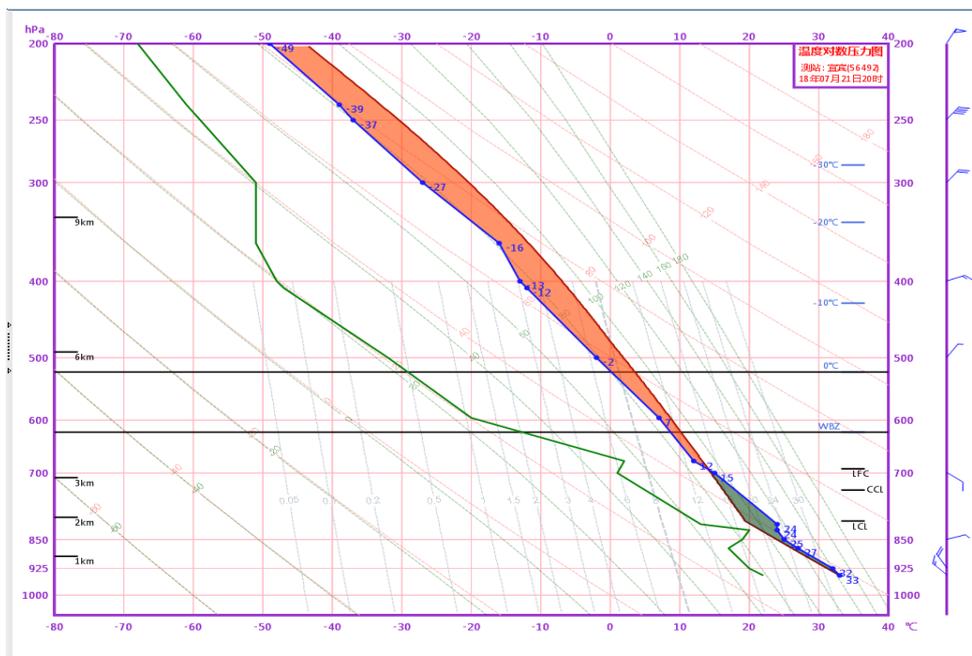
4.1. 层结结构及对流不稳定条件

大气层结的结构更容易体现出极端大风天气过程发生前的潜势特征,文中对大风个例的 T-logP 进行分析,结果发现 85%以上的大风个例发生前都有弱的下喇叭口状层结结构,925 hPa 的温度露点差大于

6℃，这种低层的干层有利于逆温层或者弱稳定层的形成，使不稳定能量累计，当触发机制出现时，干层顶部的空气被快速抬升，干空气与上层湿空气之间的湿度梯度会加剧抬升过程中的不稳定性；部分个例中高层呈上喇叭口状(如图 2(a)、图 2(b))，500 hPa 温度露点差大于 10℃，这种干层的夹卷作用可使干空气进入雷暴，通过蒸发冷却作用使下沉气流加速，从而造成地面雷暴大风。



(a)



(b)

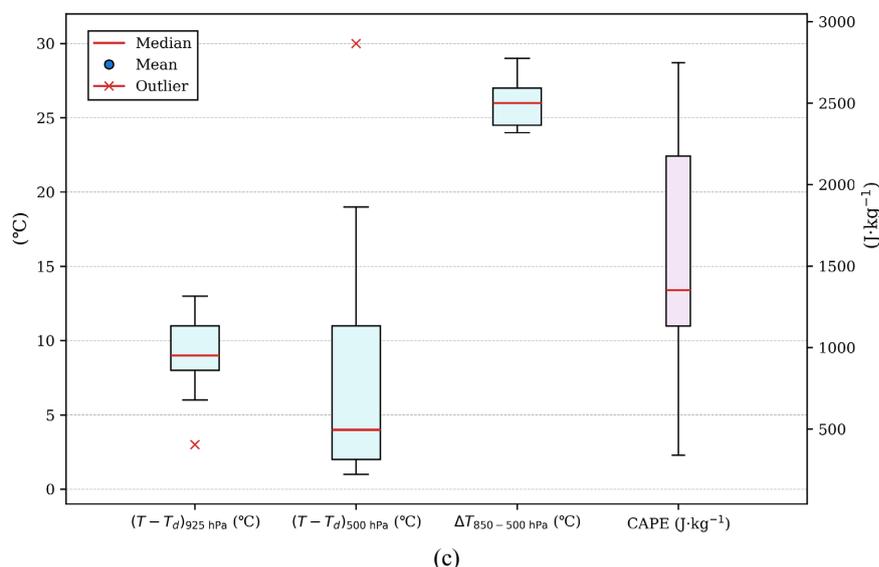


Figure 2. Typical T-logp diagrams of convective gale processes and boxplots of temperature-dew point depression and convective available potential energy in Zigong Area

图 2. 自贡地区对流性大风过程典型 T-logp 图及温度露点差和对流有效位能箱线图

850 hPa 与 500 hPa 的温差(∇T_{85})箱线图显示(图 2(c)), 最小温差值为 24°C , 25%分位数值为 24.5°C , 平均值为 26°C , 表明对流性大风发生前大气层结具有一定不稳定性, 尤其春季的 ∇T_{85} 普遍大于平均值, 夏季 ∇T_{85} 值波动较大, 因此可以 25%分位值 24.5°C 作为指标阈值; 从 CAPE 值箱线图来看, 无论春季还是夏季的对流性大风, CAPE 值离散度较大, 表明单纯以不稳定能量作为对流性大风发生的指标不具有代表意义, 需结合其他物理量特征进行综合分析。

4.2. 垂直风切变特征

垂直风切变是产生极端大风的重要动力条件, 有利于对流风暴组织化, 从而导致下击暴流。文中对近地面到 700 hPa、500 hPa 及 400 hPa 的垂直风切变(分别以 Shr700 hPa、Shr500 hPa、Shr400 hPa 表示)进行了统计分析, 结果显示(图 3(a)) Shr700 hPa、Shr500 hPa、Shr400 hPa 的平均值分别为 11.1、9.4、10.5 m/s, 25%到 75%分位数值分别为 6.9~14.9 m/s、4~15.4、8~14.9 m/s, Shr500 hPa 波动相对较大, Shr700 hPa 和 Shr400 hPa 数据分布相对更为集中, 更适用于作为预报指标参考, 以 25%分位值作为指标阈值, 则分别为 6.9 m/s 和 8 m/s。同时, 文中对大风发生前的 CAPE 与风切变进行相关性分析发现, CAPE 与 Shr500 hPa 二者之间存在一定的相关性(图 3(b)), Pearson 相关系数为 -0.46 , 表明 CAPE 和垂直风切变存在一定的互补作用, 当垂直风切变比较大时, 不需要很高的 CAPE 就能产生极端雷暴大风; 当 CAPE 比较大时, 产生极端雷暴大风的垂直风切变阈值就更小。

4.3. 水汽特征

在对流性大风过程中, 降水的拖曳作用是加强下沉气流速度的重要原因之一, 文中对 15 次大风过程的大气可降水量(PW)、700 hPa 和 850 hPa 比湿进行的统计分析, 结果显示(图 3(c)), 自贡地区所发生的对流性极端大风过程中 PW 的波动较大, 最小值仅有 34 mm, 而最大值可达 65 mm, 25%到 75%分位值为 42~55 mm, 表明不同过程的大气总水气条件差异较大, 850 hPa 和 700 hPa 的比湿 Q 则表现相对稳定, 其箱线图显示这两个不同高度层的 25%~75%分位值分别为 12~16 g/kg、7~10 g/kg, 数据相对较为集中, 可根据此范围作为对流性大风的预报指标。

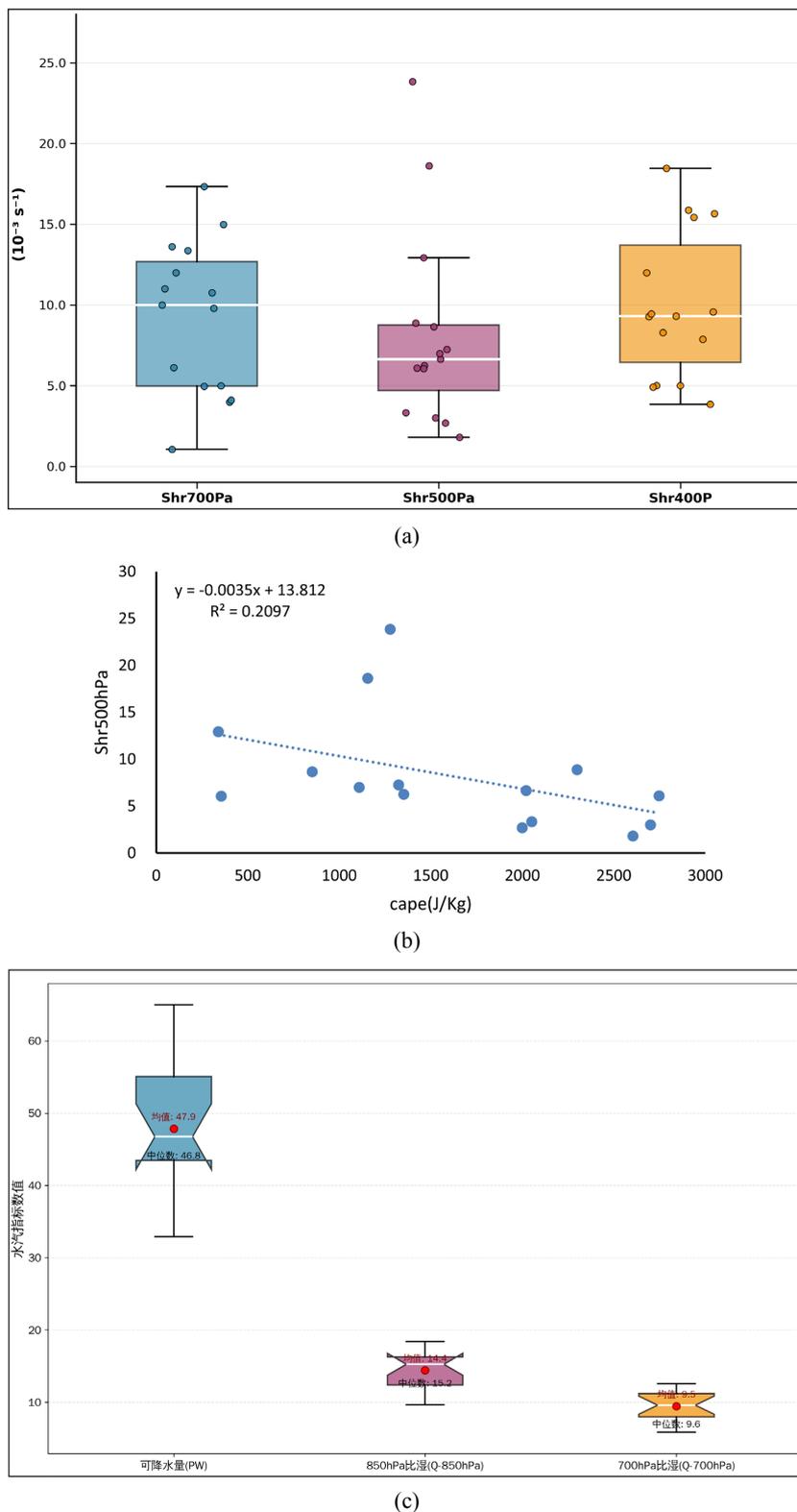


Figure 3. Wind shear characteristics of thunderstorm gale processes in Zigong during 2008~2023 (a: wind shear characteristics from surface to different heights; b: correlation between CAPE and Shr500 hPa; c: humidity boxplot)

图 3. 208~2023 年自贡雷暴大风过程的风切变特征(a: 近地面到不同高度风切变特征; b: CAPE 与 Shr500 hPa 相关性; c: 湿度箱线图)

5. 雷达特征

5.1. 回波形态特征

通过对 15 个极端大风个例的雷达回波形态分析显示(图 4)，产生极端大风的回波形态主要有簇状多单体、孤立对流单体、非线性对流系统、线性对流系统、弓形回波或飢线，其中占比最多的是非线性对流系统，占比 29%。从回波强度来看，绝大多数产生极端大风的回波强度均在 65 dBZ 以上，回波梯度在 35~50 dBZ/5km，且回波梯度与风速大小非线性关系。从回波顶高来看，大多数个例(52.4%)回波顶高可达 16~18 km，部分个例(38.1%)回波顶高达(13~16 km)，而回波顶高在 13 km 和 10 km 以下的个例较少，均不到 10%。

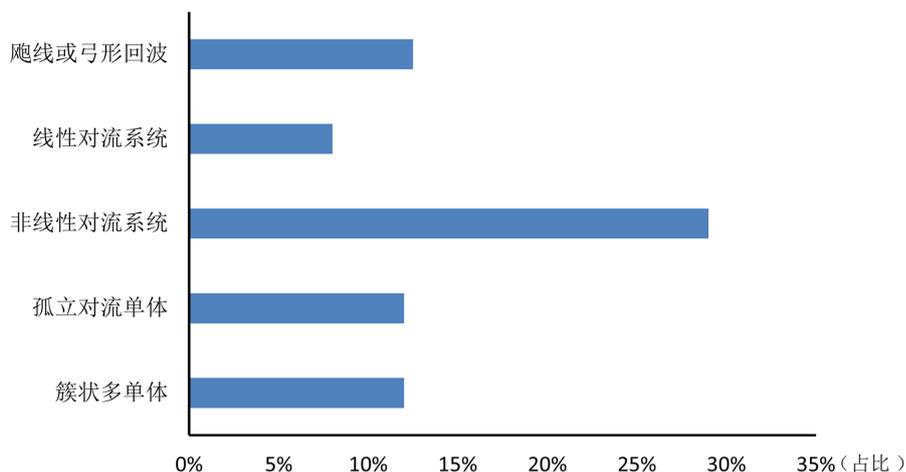


Figure 4. Classification of radar echo types of thunderstorm gale processes in Zigong during 2008~2023
图 4. 2008~2023 年自贡雷暴大风过程雷达回波类型分类

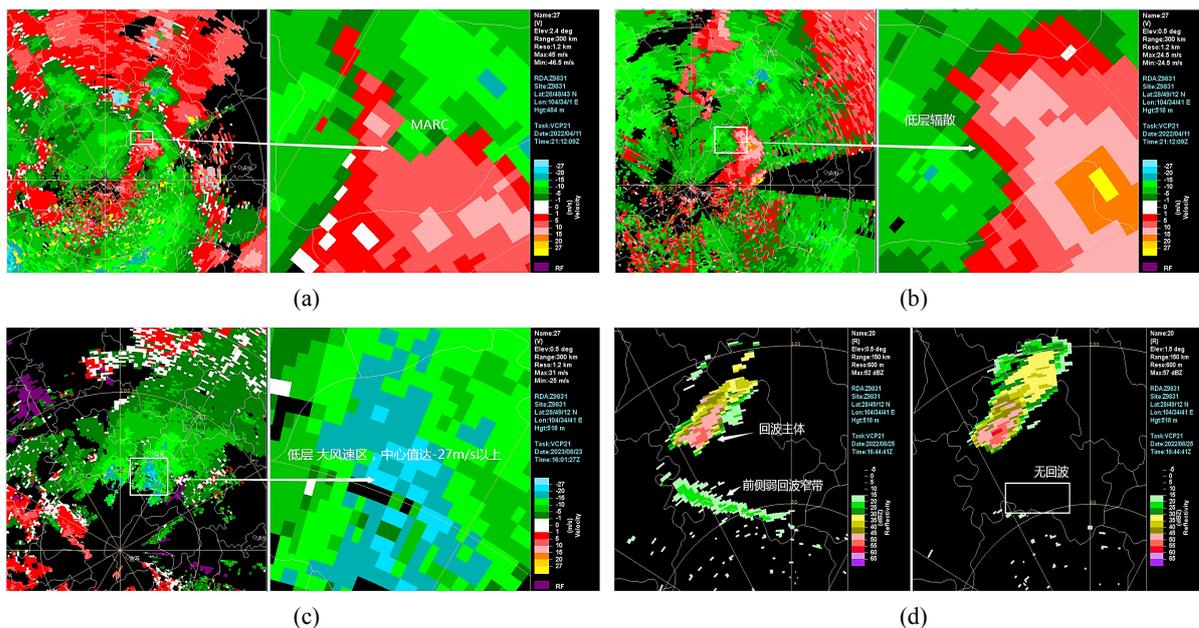


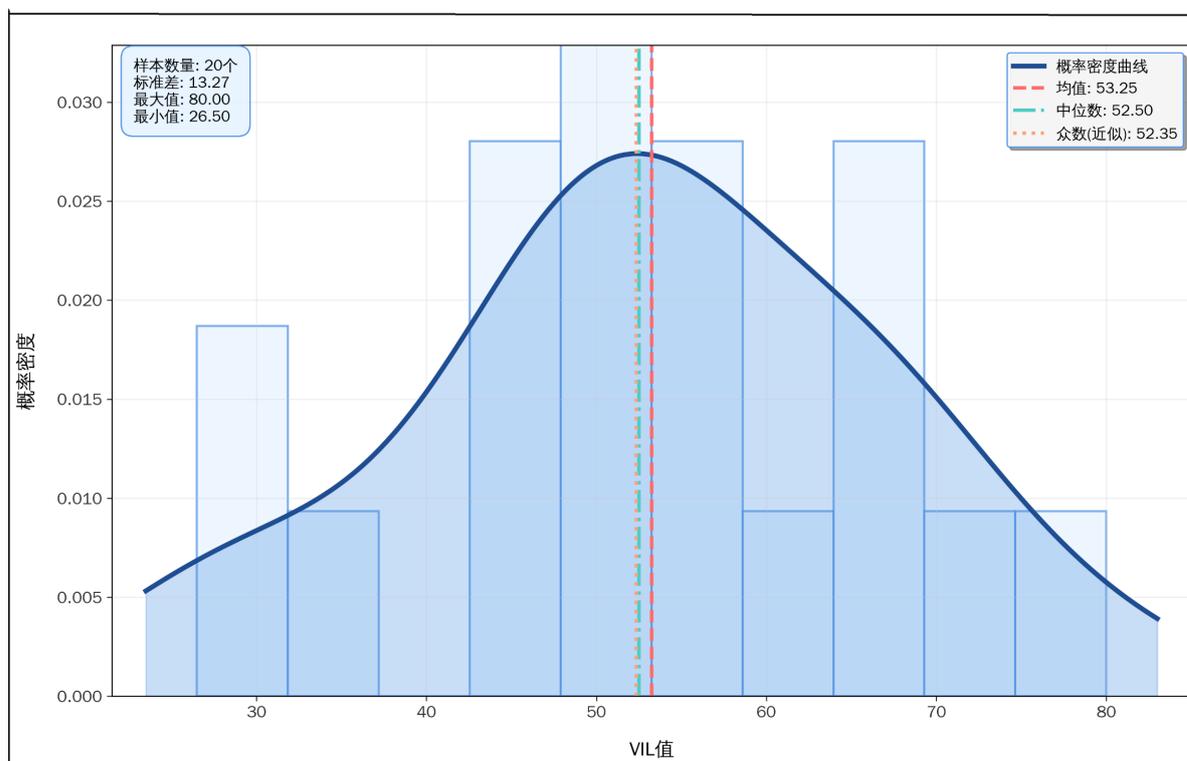
Figure 5. Common radar monitoring characteristic indicators of convective gale processes (a: MARC; b: low-level divergence; c: low-level jet; d: gust front)
图 5. 对流性大风过程常见雷达监测特征指标(a: MARC; b: 低层辐散; c: 低空急流; d: 阵风锋)

5.2. 径向速度特征

径向速度分析结果显示,中层径向辐合(MARC)、低层辐散以及低层显著大风速区是出现极端大风的主要特征,中层径向辐合(MARC)强度范围普遍在 15~45 m/s,从监测到 MARC 到出现 9 级以上大风的时间提前量为 11~60 分钟,低层辐散(0.5°仰角)从监测到出现大风的时间提前量为 1~56 分钟,低层大风速区监测到大风出现的时间提前量为 10~60 分钟,但这也与监测区域移动性回波与本地大风观测站点的距离有关;三类主要特征可单独出现,也可组合出现,当低空急流与 MARC 或低层辐散和 MARC 组合出现时对大风的预警效果更优。图 5 是对流性大风过程常见的雷达监测特征指标,如 2022 年 4 月 11 日晚上自贡的一次极端对流性大风过程,速度图(图 5(a)、图 5(b))显示,在 2.4°仰角有明显的 MARC,且对应位置 0.5°仰角配合有明显的低层辐散,此次过程造成了该区域最大 12 级阵风(富顺李桥 36.9 m/s);2023 年 8 月 23 日下午,雷达速度(图 5(c))显示低层 0.5°仰角有明显低空急流,中心速度值达-27 m/s,而对应实况出现了最大 12 级阵风(沿滩联络 32.8 m/s);2022 年 8 月 25 日晚上,0.5°仰角雷达回波显示荣县西北侧有强回波,且回波前侧有一弱回波窄带,抬升仰角到 1.5°后回波窄带消失,表明此弱回波窄带为回波主体前侧近地面的阵风锋,此次过程造成了最大 10 级阵风(荣县新桥 26.3 m/s)。

5.3. 垂直液态含水特征

垂直液态含水量(VIL)统计分析显示(图 6(a)),发生极端对流性大风过程的雷达 VIL 均值、中位数与众数三者数值接近,差值均小于 1.0,表明这些大风过程中的雷达 VIL 值分布具有较好的对称性,VIL 值整体呈现近似正态分布的形态;最强 VIL 主要集中在 40 kg·m⁻²以上,概率密度始终维持在 0.02 以上,可作为短临监测指标之一,其中 50~60 kg·m⁻²区间的概率密度最高(超过 0.04),对应直方图的最高柱体,说明发生极端对流性大风过程的 VIL 值在该区间出现频率最高。



(a)

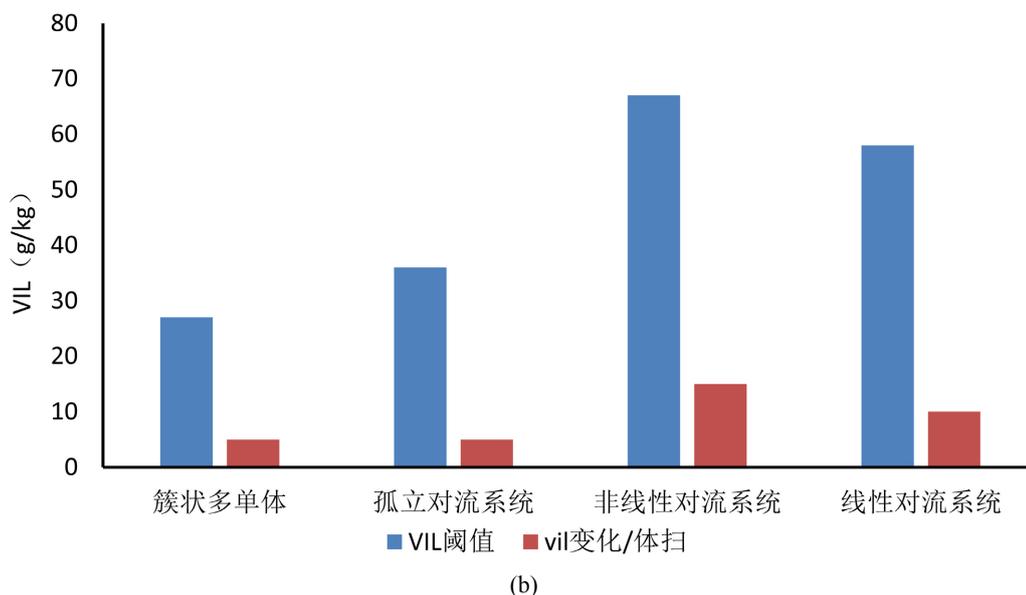


Figure 6. Probability density distribution of VIL in extreme gale processes (a), and VIL thresholds and variation characteristics of different echo types (b)

图 6. 极端大风过程 VIL 概率密度分布(a)、不同回波类型 VIL 阈值及变化特征(b)

另外,通过对不同回波类型的 VIL 进行统计分析发现(图 6(b)),孤立对流系统发生对流性大风的 VIL 阈值为 $27 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,簇状多单体回波的 VIL 阈值为 $36 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,非线性对流系统阈值为 $67 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,线性对流系统为 $58 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,且 95%以上的个例伴有 VIL 的突然下降,据统计,以 VIL 快速下降作为出现大风的指标判定标准,需满足以下条件:当 VIL 强度低于 $40 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 时,在 1 个体扫时间内 VIL 下降值 $\geq 5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 以上,当 VIL 大于 $40 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 时,1 个体扫下降值 $\geq 10 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$,当 VIL 大于 $60 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 时,下降值 $\geq 15 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

6. 地面特征

通过对极端大风天气过程的地面气象要素变化特征进行分析发现(表 2),绝大多数极端大风天气过程都伴随有显著的气温骤降和气压涌升现象,从 5 分钟地面气象要素变化来看,平均 5 分钟变压值 0.8 hPa ,变温为 -2.6°C ,对应逐小时平均变压为 2.1 hPa ,小时变温为 -8.7°C 。温度露点差显示,大多数大风过程的温度露点差都大于 4°C ,平均值为 11.1°C ,表明近地面存在一定的干区,该干区多由地面大风带来的干空气平流及湍流混合作用所致,且偏干的大气层结利于高空动量向下传递,可进一步增强近地面大风的强度;对应 5 分钟降水显示,除 2023 年 6 和 7 月的两个个例之外,大部分个例都伴有分钟级的短时强降水,5 分钟雨量达到 7 毫米以上,这代表短时强降水的拖曳作用也是造成大风的重要原因之一。

Table 2. Variation characteristics of surface meteorological elements during extreme gale weather processes

表 2. 极端大风天气过程地面气象要素变化特征

	5 min 变压(hPa)	1 h 变压(hPa)	5 min 变温($^\circ\text{C}$)	1 h 变温($^\circ\text{C}$)	Tmax ($^\circ\text{C}$)	T-Td ($^\circ\text{C}$)	5 min 降水(mm)
平均值	0.8	2.1	-2.6	-8.7	31.7	11.1	8.7
中位数	0.7	2.3	-2.90	-8.0	30.6	9.8	7.4
下四分位数	0.6	1.2	-3.20	-11.2	29.3	8.4	5.1
上四分位数	0.9	2.7	-1.90	-6.7	32.4	15.9	11.2

7. 结论和讨论

(1) 自贡市 9 级以上极端对流性大风主要分为混合性大风和雷暴大风两类, 混合性大风高发于春季, 雷暴大风高发于夏季, 均以 16 时和 21 时为峰值时段。

(2) 物理环境方面, 中层干层与喇叭口状层结是极端大风发生的有利条件; 垂直风切变与 CAPE 呈负相关, 二者具有一定的互补作用, 可作为大风潜势预报的参考条件。

(3) 雷达监测特征上, 回波形态主要以非线性对流系统为主, 且回波强度 ≥ 65 dBZ, 回波顶高多为 16~18 km; MARC、低层辐散、低层大风速区及 VIL 突降是重要预警指标, 组合出现更有利于大风的出现。

(4) 地面气象要素突变显著, 气温骤降、气压涌升及 5 分钟雨量 ≥ 7 mm 的短时强降水是极端大风过程的典型伴随特征, 可作为地面监测的重要信号。

本文基于 2018~2023 年 15 次极端大风过程数据, 初步明确了自贡地区极端大风的关键特征和核心监测指标, 为该地区极端大风的短临监测与预报提供了参考, 仍存在明显不足, 即个例数量相对有限, 15 次极端大风过程仅能反映特定时段、特定气候背景下的大风特征, 样本的代表性和覆盖面不足, 可能导致部分结论的普适性受限。例如, 垂直风切变与 CAPE 的负相关关系、雷达参数阈值及地面要素突变特征等, 均基于现有小样本统计得出, 在面对罕见成因的极端大风过程时, 这些结论可能存在偏差; 同时, 小样本下的统计结果易受个别特殊个例影响, 导致部分特征指标的稳定性不足, 难以作为标准化的监测预报依据。未来可优先针对小样本局限性开展优化, 通过延长观测时段、整合周边区域同类观测数据等方式扩大样本量, 提升数据代表性, 同时结合数值模拟方法, 模拟不同类型大风的形成过程, 验证现有统计结论的可靠性, 在此基础上, 分类对比混合性大风与雷暴大风的环境条件和演变特征, 明确两类大风的差异化指标, 提升预报精准度和时效性, 为自贡地区极端大风灾害的防范应对提供更科学、可靠的技术支撑。

基金项目

重庆市自然科学基金面上项目(CSTB2025NSCQ-GPX1086), 自贡市气象局低空飞行气象服务研究创新团队(2024-03)。

参考文献

- [1] 胡宜昌, 董文杰, 何勇. 21 世纪初极端天气气候事件研究进展[J]. 地球科学进展, 2007, 22(10): 1067-1075.
- [2] 王秀明, 俞小鼎, 周小刚, 等. “6.3”区域致灾雷暴大风形成及维持原因分析[J]. 高原气象, 2012, 31(2): 504-514.
- [3] 梁建宇, 孙建华. 2009 年 6 月一次飊线过程灾害性大风的形成机制[J]. 大气科学, 2012, 36(2): 316-336.
- [4] 费海燕, 王秀明, 周小刚, 等. 中国强雷暴大风的气候特征和环境参数分析[J]. 气象, 2016, 42(12): 1513-1521.
- [5] 许霖, 姚蓉, 王晓雷, 等. 湖南省雷暴大风的时空分布和变化特征[J]. 高原气象, 2017, 36(4): 993-1000.
- [6] 张雪晨, 朱珠, 刘高平. 安徽省近 40 年雷暴大风气候变化特征分析[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(12): 1621-1626.
- [7] 孙虎林, 罗亚丽, 张人禾, 等. 2009 年 6 月 3-4 日黄淮地区强飊线成熟阶段特征分析[J]. 大气科学, 2011, 35(1): 105-120.
- [8] 于庚康, 吴海英, 曾明剑, 等. 江苏地区两次强飊线天气过程的特征分析[J]. 大气科学学报, 2013, 36(1): 47-59.
- [9] 郑媛媛, 张雪晨, 朱红芳, 等. 东北冷涡对江淮飊线生成的影响研究[J]. 高原气象, 2014, 33(1): 261-269.
- [10] 郭弘, 林永辉, 周淼, 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.
- [11] 支树林, 许爱华, 张娟娟, 等. 一次影响江西的致灾性飊线天气成因分析[J]. 暴雨灾害, 2015, 34(4): 352-359.
- [12] 李国翠, 刘黎平, 连志鸾, 等. 利用雷达回波三维拼图资料识别雷暴大风统计研究[J]. 气象学报, 2014, 72(1): 168-181.
- [13] 东高红, 吴涛. 垂直积分液态水含量在地面大风预报中的应用[J]. 气象科技, 2007, 35(6): 877-881.