



造成贵州黔西“5.4”游船倾覆事件的极端大风观测分析

杜小玲 何东坡 吴安坤 姚聘 廖瑶 曹艳察 周晓敏 孙瑾

Observation of an extreme wind disaster associated with the "5.4" cruise ship capsizing event in Qianxi, Guizhou Province

DU Xiaoling, HE Dongpo, WU Ankun, YAO Dan, LIAO Yao, CAO Yancha, ZHOU Xiaomin, SUN Jin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12406/byzh.2025-173>

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

两个超级单体导致的冀豫交界区极端下击暴流预警分析

Analysis of early warning of extreme downbursts induced by two supercell storms in the border area between Hebei and Henan Provinces

暴雨灾害. 2022, 41(3): 254–265 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.03.002>

雷暴大风极端风速估算方法在2025年贵州“5·04”下击暴流过程中的适用性分析

Applicability of method for estimating the extreme wind speed of thunderstorm gales during the downburst event in Guizhou on May 4, 2025

暴雨灾害. 2025, 44(5): 565–575 <https://doi.org/10.12406/byzh.2025-111>

贵港市“5.20”下击暴流过程超级单体结构演变与环境特征分析

Analysis of supercell structure evolution and environmental characteristics of downburst in Guigang City of Guangxi On May 20, 2020

暴雨灾害. 2022, 41(6): 631–639 <https://doi.org/10.12406/byzh.2021-024>

引发“6.25”天津极端雷暴大风的超级单体与中尺度对流系统分析

Analysis of supercell and meso-scale convective system causing an extreme thunderstorm gale in Tianjin on 25 June 2020

暴雨灾害. 2023, 42(3): 312–323 <https://doi.org/10.12406/byzh.2022-093>

宁波两次下击暴流的环境条件与多普勒雷达特征对比分析

A comparative study on environmental conditions and doppler radar echo characteristics of two downburst events in Ningbo

暴雨灾害. 2025, 44(3): 340–351 <https://doi.org/10.12406/byzh.2023-157>

湖南衡阳“4.04”强下击暴流预警关键点及环境条件分析

Analysis of key warning points and environmental conditions for the '4.04' strong downburst event in Hengyang of Hunan

暴雨灾害. 2024, 43(2): 158–167 <https://doi.org/10.12406/byzh.2023-137>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

杜小玲,何东坡,吴安坤,等.2026.造成贵州黔西“5.4”游船倾覆事件的极端大风观测分析[J].暴雨灾害,45(5):609–620. DU Xiaoling, HE Dongpo, WU Ankun, et al. 2026. Observation of an extreme wind disaster associated with the "5.4" cruise ship capsizing event in Qianxi, Guizhou Province [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 45(5):609–620 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2025-173

造成贵州黔西“5.4”游船倾覆事件的极端大风观测分析

杜小玲¹,何东坡¹,吴安坤²,姚聃³,廖瑶⁴,曹艳察⁵,周晓敏⁵,孙瑾⁵

(1. 贵州省气象台, 贵阳 550002; 2. 贵州省气象数据中心, 贵阳 550002; 3. 中国气象局探测中心, 北京 10081;
4. 贵州省生态农业气象中心, 贵阳 550002; 5. 国家气象中心, 北京 10081)

摘要: 2025年5月4日下午16:30—16:40(北京时,下同),贵州省黔西市新仁乡化屋村化屋码头附近发生客船倾覆事件(以下简称“5.4”船覆事件),造成重大人员伤亡。为揭示事件中极端大风的特征及可能原因,利用区域气象站分钟加密观测数据、视频监控信息、贵阳多普勒雷达、高空地面常规观测以及ERA5再分析等资料,对此次天气开展了强度、持续时间、成因等多视角分析。结果表明:5月4日下午至前半夜贵州出现强对流天气,其中黔西市新仁乡化屋村观测到 $44.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (16:32—16:33)的极端大风。化屋村在16:28—16:45之间出现了两轮大风,极端大风出现在第一轮,以偏西风为主;视频监控捕捉到强风暴在化屋村产生下击暴流的过程,出现了风暴底外涌、风雨交加、河面风浪升高、能见度骤降等现象;雷达回波显示了该强风暴形成超级单体,具有钩状回波等特征,且16:29—16:34该超级单体在化屋村造成下击暴流爆发并增强,导致极端大风;另外还推测当地典型的河谷地形进一步造成大风加速。上述分析结果可以为更好地开展强对流天气临近预警服务提供参考依据,同时对春季至初夏气温异常偏高的环境条件下一旦出现强对流天气作出风雹及降水极端性预报具有指示意义。

关键词: 极端大风; 超级单体; 下击暴流; 视频; 雷达偏振参量

中图法分类号: P445

文献标志码: A

DOI: 10.12406/byzh.2025-173

Observation of an extreme wind disaster associated with the "5.4" cruise ship capsizing event in Qianxi, Guizhou Province

DU Xiaoling¹, HE Dongpo¹, WU Ankun², YAO Dan³, LIAO Yao⁴, CAO Yancha⁵,
ZHOU Xiaomin⁵, SUN Jin⁵

(1. *Guizhou Provincial Meteorological Observatory, Guiyang 550002*; 2. *Guizhou Provincial Meteorological Data Center, Guiyang 550002*; 3. *China Meteorological Administration Detection Center, Beijing 10081*; 4. *Guizhou Province Ecological Agriculture Meteorological Center, Guiyang 550002*; 5. *National Meteorological Center Beijing 10081*)

Abstract: A passenger ship capsized near Huawu Wharf in Huawu Village Qianxi City Guizhou Province on the afternoon of May 4 2025 from 16:30 to 16:40 local time. This study is to reveal the characteristics and possible causes of extreme wind disasters during the accident, using regional station minute data, video surveillance data, Guiyang Doppler radar observations, and other related materials. The results show that: from the afternoon of May 4 to the early evening, Guizhou experienced severe convective weather, with an extreme wind speed of $44.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (16:32—16:33 BT) recorded in Huawu Village, Xinren Township, Qianxi City. There were two rounds of strong winds in Huawu Village from 16:28 to 16:45, with extreme winds occurring in the first round. Video surveillance captured the downburst process of a strong storm in Huawu Village, including phenomena such as storm surges, winds and rain, increased winds and waves on the river surface, and sudden drops in visibility. The radar echo confirmed a supercell with hook shaped echoes, and the supercell caused a downburst outbreak and enhancement in Huawu Village during 16:29—16:34 BT, leading to extreme winds. Additionally, it is speculated that the typical river valley terrain in the area further accelerated the strong winds. This article reveals the characteristics of the strong storms and associated downbursts and extreme winds based on multiple observational data, providing scientific support for better short-term warning. The study also indicates that, we need pay attention to forecasts of extreme winds, hail and precipitation in environments with abnormally high temperatures from spring to early summer.

收稿日期: 2025-09-12; 定稿日期: 2026-02-09

资助项目: 贵州省气象局创新团队项目(黔气科合TD[2024]01号); 贵州省气象局省市联合基金项目(黔气科合SS-KF[2024]14号)

第一作者: 杜小玲, 主要从事灾害性天气诊断及预报技术方法研究, E-mail: 13985141480@163.com

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY-NC-ND 4.0

Key words: Extreme winds; Downburst; Supercell; Video; Radar polarization parameter

引 言

2025 年 5 月 4 日下午 16:30—16:40 (北京时,下同) 贵州省黔西市新仁乡化屋村化屋码头附近发生客船倾覆事件,造成 4 艘游船倾覆、10 人落水遇难(以下简称“5.4”船覆事件)。事后调查结果表明,极端大风是导致“5.4”船覆事件的主要原因。极端大风通常是指远超气候平均值、达到历史罕见量级的瞬时或短时强风事件,是气象灾害中最具破坏性的天气现象之一。此类强风事件具有极强的局地破坏性,致灾风险高,对基础设施、交通运输、公共安全等构成严重威胁,造成的经济损失在气象灾害中占比高,其成因复杂多样,强对流风暴(包括下击暴流)是产生极端大风的重要天气系统之一。下击暴流最早由 Fujita (1976) 提出,是指对流单体强下沉气流引发的地面或地面附近的爆发性辐散出流(王秀明等, 2023)。依据水平尺度,下击暴流分为宏下击暴流(>4 km)和微下击暴流(<4 km)(Fujita, 1977; 王秀明等, 2023)。Wakimoto (2001) 进一步将下击暴流界定为由下沉气流造成的水平尺度在 10 km 以下的强风, Smith 等 (2004)、Markowski 和 Richardson (2010) 沿用了水平尺度 10 km 的界定。Smith 等 (2004) 还细化了强度标准,即地面极大风超过 $26 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 或有灾情记录;或雷达探测到距地 1 km 高度以下 $25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上的径向风;或 10 km 范围内径向速度差超过 $40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。此次事件既观测到极大风,又有明确灾情记录。

下击暴流作为强对流风暴中极具破坏力的天气现象之一,其触发的极端大风突发性强、局地性显著和风力破坏性大(俞小鼎等, 2020)。近年来聚焦下击暴流触发极端大风的研究指出,下击暴流在超级单体风暴的情况下发生概率高达 88% (Yu et al., 2012),约 1/3 超过 $33.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的直线型大风由超级单体引发 (Smith et al., 2012)。对流风暴引发的直线型地面强风的直接驱动因子来自风暴内部的垂直运动(孙继松, 2023),孤立风暴产生的下击暴流多由强下沉气流辐散形成,中尺度对流系统(MCSs)产生的直线型对流大风包括下击暴流大风和阵风锋大风, MCSs 可间歇性产生系列下击暴流(下击暴流簇)(王秀明等, 2023)。例如,2015 年 6 月 1 日长江湖北监利段“东方之星”事件中强对流风暴气流具有显著的多尺度性,事发周边区域同时发生了多条相邻的微下击暴流条迹(郑永光等, 2016)。下击暴流常常又是不对称的 (Wilson et al., 1984),在移动型下击暴流中致灾强风出现在雷暴高压前侧的出流与风暴前侧下沉辐散气

流叠加区(Fujita, 1981; 王秀明等, 2023)。下击暴流往往难以被气象测风仪探测到(唐明晖等, 2016; 孙晓磊等, 2023),近年来通过分析风暴结构的雷达特征来判断是否出现下击暴流具有较好的指示意义(周明飞等, 2022; 邓朝平等, 2024),包括反射率因子核下降、中层径向辐合、低仰角径向速度大值区等(顾小丽等, 2025; 杨秀庄等, 2025; 胡媚等, 2026)。

上述研究为“5.4”船覆事件调查奠定了较好的理论基础,此次事件发生后,由贵州省气象局、国家气象中心、中国气象局探测中心共 10 人组成了技术组,从 5 月 6 日至 25 日,开展了实地调查、人员走访、无人机航拍、视频监控筛选、气象资料分析、气象调查报告撰写以及汇报等工作。本文基于上述部分调查工作开展极大风等强对流特征分析,以期揭示并还原风灾天气情况。

1 资料说明

所用资料包含:(1)描绘新仁乡化屋村化屋码头及周边地形地貌环境的图来源于百度地图,分辨率为 200 m。(2)区域气象观测站(简称区域站)分钟级大风、闪电、气温、气压、降水及气压等要素观测数据,来源于贵州省气象数据中心天擎系统,用于分析事发前后不同气象要素变化,图形由天擎绘制。(3)中国气象局气象信息综合处理系统(MICAPS)的高空和地面观测资料,用于分析环流背景和影响系统。(4)贵阳 S 波段雷达数据来源于贵州省气象数据中心天擎系统,用于分析回波强度、结构变化等。贵阳雷达站海拔高度为 1 261 m,化屋村海拔约为 900~1 360 m 之间,雷达低仰角体扫无法观测到化屋村从水面到山顶附近的回波。(5)灾情调查期间从贵阳市交通局等政府相关部门获得部分视频资料,通过筛选找到部分视频还原并分析事件发生前后的天气现象变化;(6)欧洲中期数值预中心第五代全球再分析资料 ERA5,时间分辨率为 1 h、空间分辨率为 $0.25^\circ\times 0.25^\circ$,用于对与环境场相关的要素分析。上述资料时段均为 2025 年 5 月 4 日 14:00—5 日 00:00。

2 天气实况及灾情

5 月 4 日下午至前半夜(4 日 14:00—5 日 00:00),贵州省自西北向东南出现雷暴大风、冰雹及短时强降水等强对流天气。全省 40 站出现 8 级($\geq 17.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)以上极大风,主要出现在毕节市、贵阳市和黔南州,最强为 $44.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (16:32—16:33,黔西市新仁乡化屋村站)(图 1a)。上述地区还伴随明显的闪电,贵州西

北部地区的闪电以云闪和云地闪为主,东南部地区云地闪更为显著(图1b)。另外有40站出现冰雹,冰雹最大直径为60 mm,38站出现短时强降水,最大雨强为 $52.9 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ (图略)。其中,4日16:30—16:40毕

节黔西市新仁乡化屋村化屋码头附近发生游船倾覆事件。此次事件发生在强对流天气背景下,强对流天气强度大,风雹极端性显著,风灾造成了重大人员伤亡。

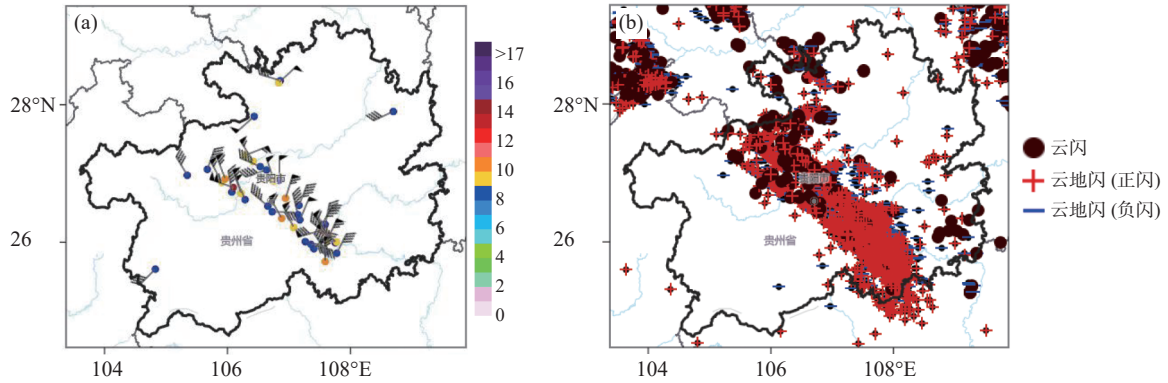


图1 2025年5月4日14:00—5日00:00 8级以上极大风(a,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)及闪电(b)分布

Fig. 1 The (a) extremely strong winds of level 8 or above (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and (b) lightning distribution from 14:00 BT on May 4 to 00:00 BT on May 5 2025

3 影响系统与环境条件

3.1 影响系统

此次强对流天气发生在高空槽东移背景下,由地面暖区辐合线锋生发展造成。5月4日亚洲中高纬环流多短波槽活动,高原东侧低槽活跃。08:00高原槽位于四川盆地至云南北部,贵州处于槽前西南气流控制下(图2a)。低层贵州受偏南气流影响(图略),地面为热低压控制,低压中心位于四川盆地东南部,贵州处于热低压中心偏南一侧,存在一条西北—东南向的辐合线(图2b),此时冷空气在河套一线;

20:00(图略)低槽东移过贵州,到达恩施—怀化—桂林一线,贵州上空转为槽后西北气流。850 hPa贵阳转为东北风,低层切变线移过贵阳,进入贵州南部。地面上,冷空气已经越过秦岭达到太行山至四川北部一带,从湖北经湖南至贵州东北部一线有弱冷空气渗透,原先在贵州的西北—东南向辐合线此时转为弱锋面。夜间,随着冷空气继续南下,冷锋与贵州境内的锋区合并,造成南方大范围强对流天气。可见,这次贵州强对流天气是在高空槽东移影响下由地面辐合线在暖区出现锋生诱发的。

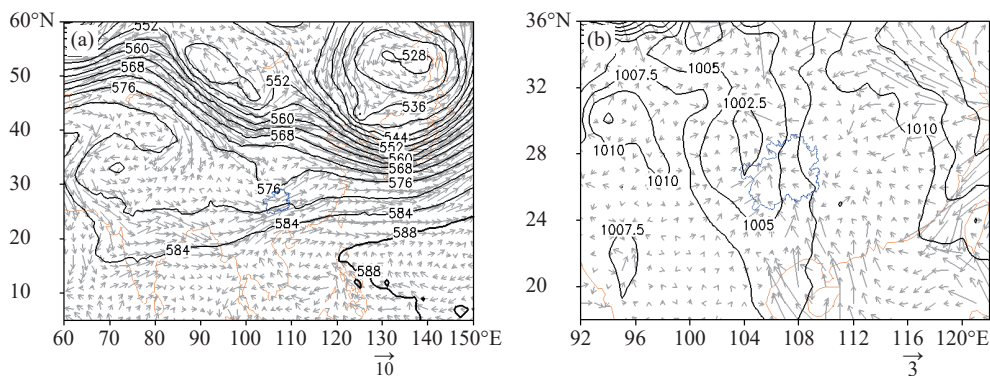


图2 2025年5月4日08:00 500 hPa位势高度(等值线,单位: dagpm)及风场(箭头,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)(a)与海平面气压场(等值线,单位: hPa)及10 m风场(箭头,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)(b)(图中不规则蓝线为贵州省行政边界,下同)

Fig. 2 The (a) 500 hPa geopotential height (contours, unit: dagpm) and wind field (arrows, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), (b) sea level pressure field (contours, unit: hPa) and 10 m wind field (arrow, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) at 08:00 BT on May 4th 2025 (irregular blue line indicates Guizhou Province, same hereinafter)

3.2 环境条件

5月4日正值“5·1”长假期间,1—4日贵州全省平均气温为 21.5°C ,较同期偏高 1.9°C ;平均最高气温为 29.4°C ,较同期偏高 4.3°C (图略)。在气温偏高背景下,4日当天下午14:00,全省对流有效位能(CAPE)

升高(图3a),自南部向西北部出现 $500 \sim 1500 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的大值区,并维持到20:00;850 hPa与500 hPa温差显示(图3b),中西部处于 $26 \sim 34^\circ\text{C}$ 大值区,表明4日下午贵州中西部地区处于热力不稳定区域。大气可降水量(PW)呈西低东高分布(图3c),全省大部为

25~40 mm, 中西部地区水汽总体偏弱;地面温度露点差显示(图 3d), 14:00 贵州西部尤其是西南部地区温度露点差远大于 16 °C, 表明西南部地区水汽明显偏干, 而西北部地区存在温度露点差的密集区(即湿度锋), 且地面辐合线处于湿度锋附近。15:00—16:00 湿度锋变得更加密集, 地面辐合线逐步向南推;总云

量变化显示 (图 3e), 14:00 贵州西北部地区观测到云量, 15:00—16:00 云量范围扩大并增强, 表明西北部地区在 14:00—16:00 之间有对流云团初生并发展增强。另外, 地面至 6 km 的垂直风切变偏强 (图 3f), 西部为 $10\sim 16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 贵州大部达到 $16\sim 24\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 强的垂直风切变可增强雷暴对流活动。

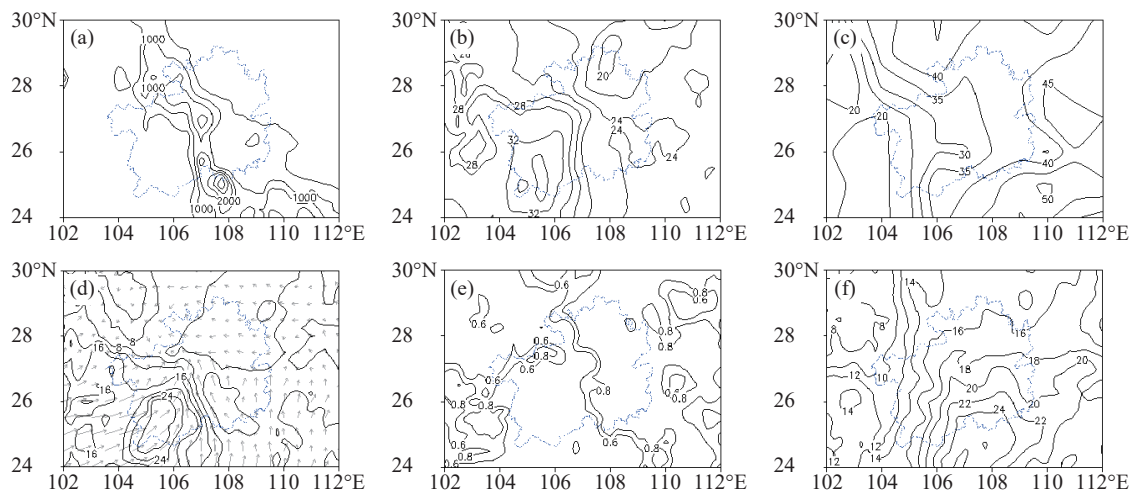


图 3 2025 年 5 月 4 日 14:00 对流有效位能 (a, 单位: $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)、850 hPa 与 500 hPa 温差 (b, 单位: $^{\circ}\text{C}$)、大气可降水量 (c, 单位: mm)、地面温度露点差 (d, 单位: $^{\circ}\text{C}$) 与 10 m 风场 (箭头, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)、总云量 (e, 单位: 成)、地面至 6 000 m 垂直风切变 (f, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) 分布

Fig. 3 The (a) convective effective potential energy (unit: $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$), (b) temperature difference between 850 hPa and 500 hPa (unit: $^{\circ}\text{C}$), (c) precipitation water (unit: mm), (d) surface temperature dew point difference (contour line, unit: $^{\circ}\text{C}$) and 10 m wind field (arrow, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), (e) total cloud cover (unit: oktas), (f) vertical wind shear (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) from surface to 6 000 m at 14:00 BT on 4 May 2025

上述分析显示,在前期气温偏高的背景下,4日下午受高空槽东移影响,贵州西北部的辐合线处于热力不稳定区和湿度锋区,且垂直风切变强盛,利于对流系统在湿度锋区生成并发展增强。

3.3 贵阳探空分析

考虑到事发地距离贵阳探空站约 65 km, 采用贵阳站探空资料对垂直风切变进行分析。5 月 4 日 08:00 贵阳上空存在明显的垂直风切变, 0—6 km 风切变为 $22.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 属于强垂直风切变。同时在 400—500 hPa 之间有明显干层, 且下沉对流有效位能 (DCAPE) 较大, 达到 $502.5 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。当天受地面热低压影响, 14:00 黔西及贵阳气温均升至 27°C 以上, 通过地面气温对探空进行订正, 发现 CAPE 达 $1500 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以上 (图 4)。另有研究表明, 国内超级单体环境 CAPE 值的高频区为 $1500\sim 2500 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$, 0—6 km 风矢量差为 $15\sim 25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 中气旋旋转速度的峰值频率为 $15\sim 25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (Yu et al., 2012)。综合上述因素分析, 4 日贵阳探空具有强的垂直风切变、中层干层及较大的 DCAPE, 午后热力不稳定增强后, 可触发雷暴云团的发生。风暴一旦形成会快速发展, 强垂直风切变

可促使风暴增强为超级单体,并为风暴提供高空动量。中层干空气和较大的 DCAPE 促使下沉气流向

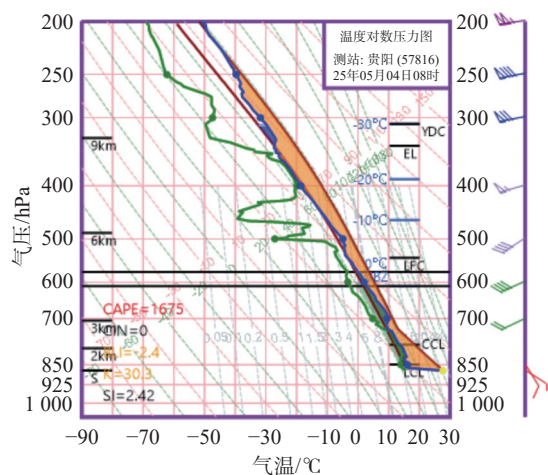


图 4 2025 年 5 月 4 日 08:00 贵阳站探空曲线 (红色区域为 14:00 地面气温订正后的对流有效位能, 绿色区域为下沉对流有效位能)

Fig. 4 Guiyang sounding at 08:00 BT on 4 May 2025 (the red area represents the corrected convective effective potential energy at 14:00 BT, the green area is DCAPE)

下加速的过程中会裹挟高空动量向下冲,导致地面大风爆发。

4 “5.4”船覆事件事发地环境及要素变化

4.1 船覆事发地环境

事发地位于黔西市新仁乡化屋村化屋码头附近,地处黔西市、织金县、清镇市三地交界的河谷地带,属于乌江源百里画廊核心区(图5)。河谷由六冲河、

三岔河及鸭池河组成,百里画廊是20世纪60年代因修建东风水电站造湖形成的,湖区总长62 km。事发地北侧化屋村海拔约900~1360 m,是蜿蜒的坡面及悬崖,南侧和东侧是高出水面约300~400 m左右的垂直石灰岩崖壁。化屋码头位于六冲河北侧,水面海拔高约900 m左右、水域宽500~700 m,最大水深62 m。这里山峦叠嶂、沟谷纵横,六冲河与三岔河在三岔河口汇流后流向北偏东方向,形成乌江上游鸭池河。



图5 “5.4”船覆事件事发地及周边环境(源自百度地图,分辨率为200 m)

Fig. 5 Location of the ship capsizing accident and surrounding environment on 4 May 2025 (sourced from Baidu Maps, with a resolution of 200 m)

4.2 船覆事发地周边要素变化特征

4日下午16—17时,事发地周边的黔西市南部、织金县东北部和清镇市西北部出现6级以上大风(图6a),其中7级和8级大风各1站、9级大风2站、10级大风1站,最大14级($44.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,化屋村站)。上述地区1 h累计降水量最大为44 mm(百里画廊站,图6b),此外还有5站累计降水量达20 mm以上。1 h气温变化显示(图6c),上述地区出现明显降温,事发地附近是降温最大区域,六冲河两岸测站降温幅度达 12°C 以上,最大降温幅度出现在百里画廊站(13.8°C)。同时,百里画廊站出现本站气压高于周边20 hPa以上,形成小的雷暴高压(图6d)。分析显示,16—17时事发地出现的 $44.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的极端大风局地性强,还伴随短时强降水、气温骤降现象,并出现雷暴小高压。

4.3 船覆事发地分钟数据要素变化特征

进一步分析化屋村的气象要素变化,化屋村有两个测风自动气象站,分别是百里画廊站和化屋村站,两地直线距离约1.2 km(图5)。16:00—17:00百里画廊站极大风为 $11.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,化屋村站为 $44.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,两站风速差异很大,为弄清这种差异,作者一行开展

了实地调查。经考察发现,百里画廊站为六要素(含风向风速、气温、气压、降水、湿度)观测站,位于化屋村委会院子东南角落,距离码头约300 m,其北侧是村委会房屋,西侧依次有凉亭及树林,周边环境对风速风向观测影响很大,造成所测风速明显小于实际风速;化屋村站位于六冲河北岸,为四要素(含风向风速、气温、降水)观测站,四周空旷无遮挡。结合沿途农作物和树木倒伏受损情况,认为该站所测风速风向值是可靠的。

为此,分析化屋村站16:00—17:00风速风向的分钟数据可知(图7a),16:27前当地为弱的偏东风,16:27后转为偏西风,16:28风力增加至 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,随后快速增加,16:32出现 $34.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的最大风,风向为 275° 。16:32—16:33出现 $44.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的极大风,风向为西偏北风 289° ,形成第一峰值。16:34—16:37风力降至 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下,16:38—16:41风力呈现强弱交替,风向由西南风转为东南风,16:42风力再次增强为 $17.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,形成第二峰值,16:43风力基本维持,随后风力逐步减弱,16:46风力减弱为 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下。至此,大风天气结束。

船覆事发地气温、降水变化显示,化屋村站(图7b)

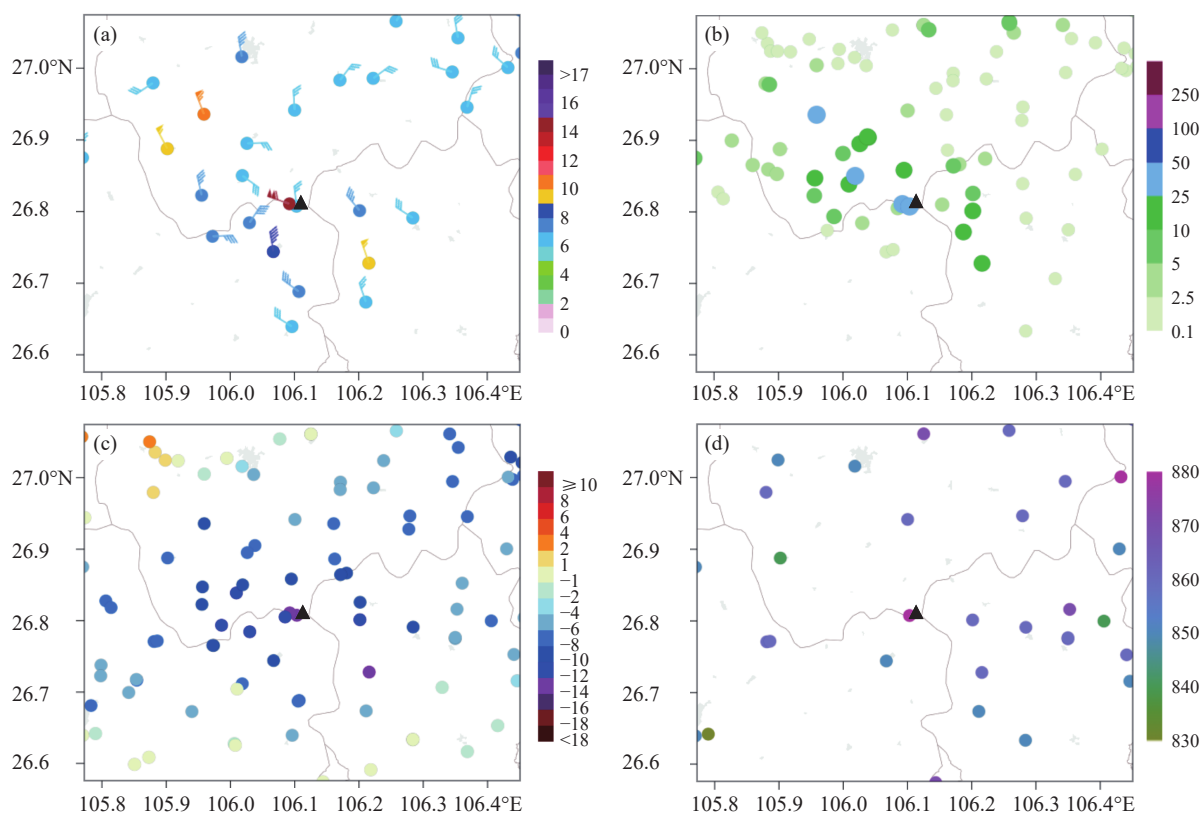


图 6 2025 年 5 月 4 日 16:00—17:00 船覆事发地周边 6 级以上大风 (a, 单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)、1 h 降水量 (b, 单位: mm)、1 h 变温 (c, 单位: $^{\circ}\text{C}$) 及本站气压 (d, 单位: hPa) 分布 (图中“▲”为事发地点)

Fig. 6 The (a) force 6 wind above (unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), (b) precipitation (unit: mm), (c) temperature changes (unit: $^{\circ}\text{C}$), and (d) local air pressure (unit: hPa) in the vicinity of the incident site from 16:00 BT to 17:00 BT on 4 May 2025 (the character "▲" represents the location of the incident)

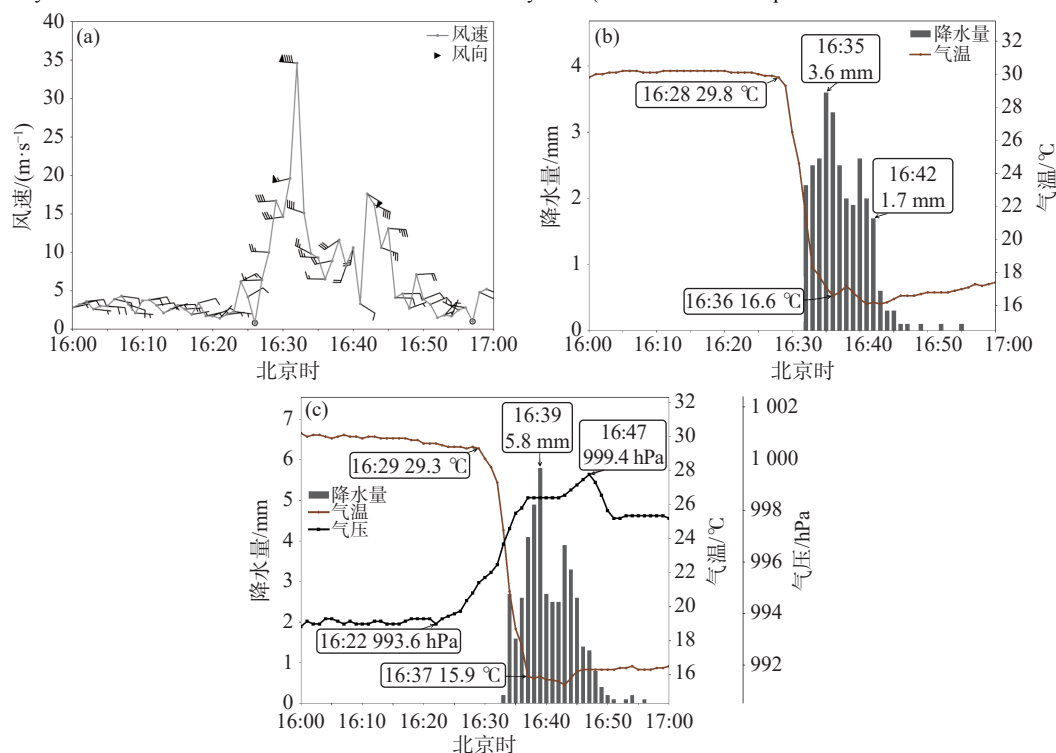


图 7 2025 年 5 月 4 日 16:00—17:00 化屋村站风向风速 (a)、气温和降水 (b) 与百里画廊站逐分钟气温、降水及海平面气压 (c) 逐分钟变化

Fig. 7 Changes in minute (a) wind direction and speed, (b) temperature and precipitation at Huawu Village Station, and (c) minute temperature, precipitation, and sea level pressure at Bailihualang station from 16:00 BT to 17:00 BT on 4 May 2025

16:28 前气温维持在 30°C 左右, 16:28—16:36 气温从 29.8°C 降至 16.6°C , 8 min 气温骤降 13.2°C 。16:37—16:38 气温小幅反弹后, 16:39—16:41 气温继续缓降, 并在 16:41 及 16:43 降至最低, 达 16.1°C 。从 16:28—16:41 之间的 13 min 内气温从骤降至缓降, 降幅达 13.7°C 。该站 1 h 降水量为 28.6 mm, 16:32—16:47 是降水最集中时段。表明化屋村站先出现大风降温, 3 min 后出现降水, 极端大风出现时刻伴随着气温骤降和强降水; 百里画廊站 (图 7c), 16:29 前气温为 30°C 左右, 16:29—16:37 的 8 min 内气温从 29.3°C 骤降至 15.9°C , 降幅达 13.4°C 。16:38—16:43 气温继续缓降, 到 16:43 达到最低值 15.4°C 。从 16:29—16:43 之间的 14 min 内气温从骤降至缓降, 降幅达 14.6°C 。该站 1 h 降水量为 43.6 mm, 16:37—16:39 连续 3 min 降水量为 $4.1\sim 5.8\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$, 超过翻斗式雨量计 $4\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 的降水强度, 表明该站分钟降水极端性明显。气压上, 从 16:22—16:47, 气压从 993.6 hPa 升至 999.4 hPa, 25 min 内气压上升了 5.8 hPa。

表明百里画廊站先出现气压上升和降温, 随后才出现强降水, 具有气温骤降、气压涌升和分钟降水极端的特征。

由此可见, 化屋村在 16:28—16:45 出现了两轮大风, 第一轮风力明显强于第二轮, 以偏西风为主, 第二轮风向以东南风为主。 $44.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的极大风出现在第一轮, 并成为贵州省有完整观测记录以来的风速极值。此外, 化屋村 8 min 内气温骤降 13°C 以上, 伴有气压涌升、分钟降水极端的特征。

5 船覆事发地岸边视频监控特征

灾情调查过程中收集到了部分视频, 经过筛选后选取了两组摄像头视频, 分别为手巴岩摄像头和航道球机摄像头 (图 5)。

手巴岩摄像头位于迁徙古道望江台附近, 海拔约为 1 263 m, 监控中心朝向约 250° (西偏南方向)。视频显示 (图 8), 15:40—15:49, 摄像头视野右侧 (六冲河峡谷上风方) 方向云层变厚, 隐约可见积雨云风

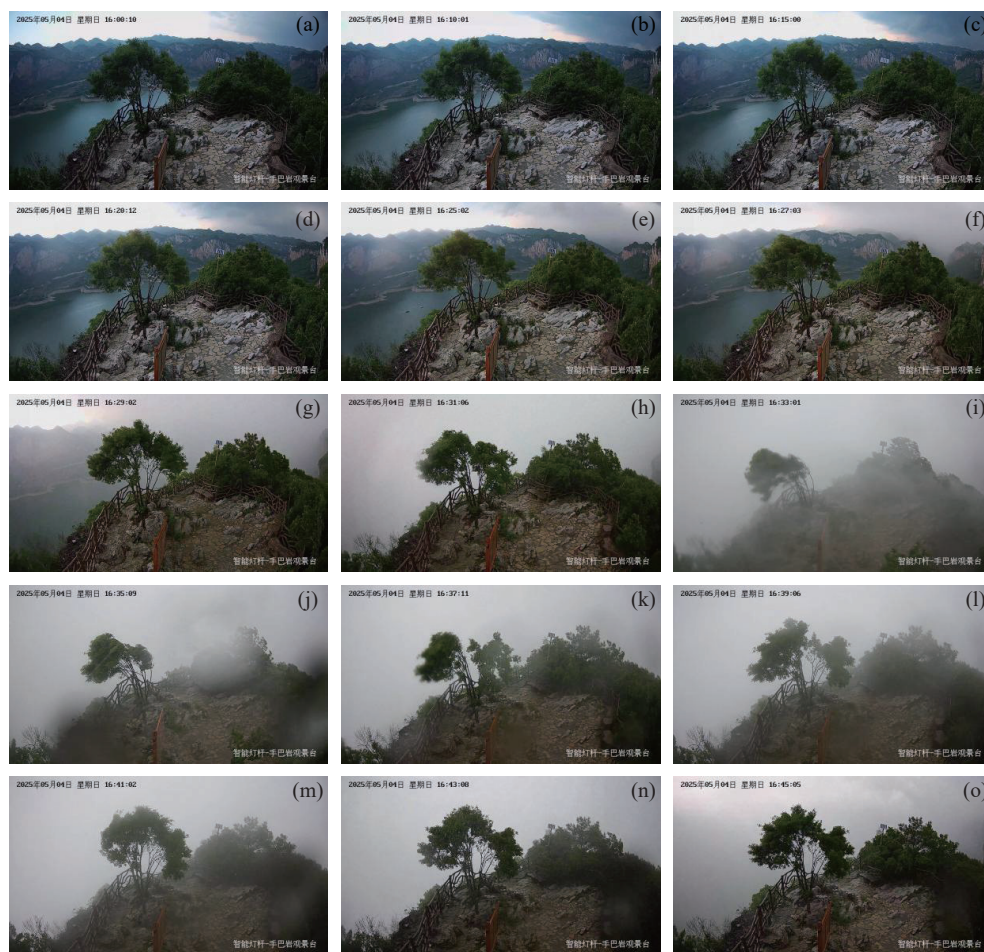


图 8 2025 年 5 月 4 日 16:00 (a)、16:10 (b)、16:15 (c)、16:20 (d)、16:25 (e)、16:27 (f)、16:29 (g)、16:31 (h)、16:33 (i)、16:35 (j)、16:37 (k)、16:39 (l)、16:41 (m)、16:43 (n)、16:45 (o) 手巴岩摄像头视频截图

Fig. 8 Screenshot of Handrock camera at (a) 16:00 BT, (b) 16:10 BT, (c) 16:15 BT, (d) 16:20 BT, (e) 16:25 BT, (f) 16:27 BT, (g) 16:29 BT, (h) 16:31 BT, (i) 16:33 BT, (j) 16:35 BT, (k) 16:37 BT, (l) 16:39 BT, (m) 16:41 BT, (n) 16:43 BT, (o) 16:45 BT on 4 May 2025

暴; 15:50—15:59, 云层变暗, 积雨云风暴逐步清晰, 云体上方出现向外辐散的云砧; 16:00—16:10, 云砧呈气旋式旋转 (图 8a、b); 16:11—16:20, 积雨云风暴底部出现爆发式向前涌出的气流 (图 8c、d), 其速度明显快于云砧旋转的速度, 推测此时风暴触地; 16:21—16:27, 风暴向镜头方向快速靠近 (图 8e、f), 峡谷口附近能见度降低, 视野内树木摇晃判断风向从偏东风转为偏西风; 16:28—16:31, 河面能见度骤降 (图 8g、h), 镜头内树木摇晃振幅明显; 16:32—16:35, 风力增加至最大时段, 树木剧烈摇晃, 根据树木摇晃方向可判断为剧烈的偏西风 (图 8i、j)。同时能见度持续降低, 山上能见度降至数米, 四周则白茫茫一片; 16:36—16:39, 风力有所减弱, 树木转向偏北方向摇晃 (图 8k、l); 16:40—16:45, 树木向北摇晃再度加强 (图 8m—o); 16:46—16:50 风力减弱, 能见度上升, 风暴影响逐步结束。

化屋基航道球摄像头位于化屋码头, 海拔高约 940 m, 监控中心朝向 290° (西偏北方向), 距峡谷口直线距离约 2.5 km (百度地图测距), 视频可观察码头至峡谷方向。视频显示 (图 9), 16:24, 河面风平浪静,

但峡谷方向山体逐渐模糊 (图 9a); 16:25, 峡谷口可见雨幡外涌, 下船游客加快返程步伐; 16:26, 雨幡涌入河面, 河面扬起风浪 (图 9b); 16:27, 雨幡及风浪到达化屋村站附近; 16:28, 雨幡到达码头, 风浪加大 (图 9c)。从峡谷口至码头的距离及雨幡影响时间, 大致推测风暴的移动速度约为 $0.8\sim 0.9\text{ km}\cdot\text{min}^{-1}$; 16:29, 摄像头摇晃明显, 降水加大, 码头能见度明显下降; 16:30—16:33, 风雨交加, 能见度骤降至 10 m 以下, 最低时接近零 (图 9d、e); 16:34—16:38, 风力有所减弱, 但低能见度和降水维持 (图 9f—h); 16:39—16:41 风雨加大, 风向先转为偏南风再转为偏东风, 且夹降冰雹 (图 9i); 16:42 后风力减弱, 16:42—16:44 见管理人员到河堤眺望河面, 此时能见度仍然较低 (图 9j、k), 推测 100 m 左右; 16:45—16:46 河堤管理人员和部分游客均外出看向河面, 此时风雨明显减弱, 能见度逐步升高, 16:46 摄像头中可以看见河面及河对岸, 推测此时已经可以清楚看见游船情况 (图 9l)。上述分析表明化屋码头的强风雨及低能见度天气影响时间是 16:28—16:45 之间, 这与分钟数据观测结果一致。



图 9 2025 年 5 月 4 日 16:24—16:46 逐 2 min (a—l) 化屋基航道球机摄像头视频截图

Fig. 9 Video screenshot from (a—l) 16:24 BT—16:46 BT every 2 min on 4 May 2025 using the Huawuji Navigation Ball Camera

由视频画面判断, 积雨云风暴于 16:00 前进入手巴岩摄像头视野, 16:00 左右可见积雨云风暴呈气旋式旋转, 16:10 后积雨云风暴可能触底, 16:25 左右风暴前侧雨幡达到峡谷口附近, 16:28—16:45 风暴对化

屋码头影响主要时段, 而 16:30—16:33 是风暴影响化屋码头最强时段, 此时段风浪最强, 能见度骤降至数米, 最低时接近零, 16:45 后风暴对码头和手巴岩附近的影响减弱。

6 强风暴的雷达回波演变特征

5月4日15:00前后(图略)贵州西北部的单体发展为多单体风暴,其中最南侧的风暴(1号风暴)是文中重点分析的对象,正是该风暴造成了此次极端风灾。根据该风暴变化情况,本文聚焦16:13—16:39这个时段,从反射率因子、径向速度以及差分反射率因子(Z_{DR})和比差分相移(K_{DP})等参量分析1号风暴的结构及演变过程。

16:13(图略),风暴在 0.5° — 1.5° 仰角上出现钩状回波,并在 2.4° 仰角反射率因子强度达67.5 dBz。在 0.5° — 2.4° 仰角上径向速度均有旋转特征,但旋转速度低于 $15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。在径向剖面上,反射率因子的低质心增强,并出现三体散射现象,中层径向辐合增加,表明此刻该风暴形成超级单体。

16:18(图略),风暴的钩状回波特征增强,在 2.4° — 3.4° 仰角上反射率因子强度均达67.5 dBz,并在 1.5° 仰角上最大径向速度达 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,表明此时刻风暴处于发展上冲阶段。垂直方向上,风暴呈现前倾结构,前侧上升气流旺盛,超过7 km高度,后侧下沉气流(R_{FD})增强。上升气流区出现了 Z_{DR} 柱和 K_{DP} 柱,均超过5 km高度,还出现 Z_{DR} 槽。

16:23(图略),风暴持续发展, 1.5° — 3.4° 仰角的最大回波强度达68~70 dBz,风暴前侧接近百里画廊。垂直方向上,风暴前倾结构更加显著,反射率因子核增强,45 dBz的反射率因子向上伸展至10 km高度,前侧上升气流到8 km高度, R_{FD} 增强,最大径向速度达 $23.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。上升气流区的 Z_{DR} 柱和 K_{DP} 柱仍维持, Z_{DR} 槽下降接近地面,且变得更加清晰。

16:29(图10),强风暴接近百里画廊,推测 0.5° — 1.5° 两个低仰角的反射率因子中心距离事发地的距离不足5 km(图10a₁—a₄)。低层径向辐合增强, 0.5° 仰角(距离地面2.08 km高度)的中气旋增强,朝向事发地的径向速度最为显著,最大达 $28\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。剖面(图10b₁—b₄)显示,风暴维持悬垂倾斜结构,其前侧顶部出现塌陷迹象,形成风暴顶部“V”形缺口特征。此时 R_{FD} 达到最强,疑似速度模糊。在上升气流区的 Z_{DR} 柱和 K_{DP} 柱均出现下降, Z_{DR} 中心值增强至5 dB以上, Z_{DR} 槽维持, K_{DP} 最大值达 $3\sim 7^{\circ}\cdot\text{km}^{-1}$,这些迹象显示此时下击暴流爆发。

16:34,强风暴中心达到百里画廊, 0.5° — 1.5° 仰角上百里画廊处于钩状回波的“V”型缺口中心。 0.5° 仰角径向速度减弱,但 1.5° 仰角朝向事发地的最大径向速度仍达 $24\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (图10c₁—c₄),且两个仰角的径向速度0线几乎达到事发地,推测此时低层气旋中心

达到事发地。在剖面上(图10d₁—d₄),对流发展仍十分旺盛,风暴顶部塌陷加强,水平方向形成前冲的回波柱。同时上升气流仍十分旺盛, R_{FD} 有所减小。此时上升气流区的 Z_{DR} 中心和 K_{DP} 中心均异常大, $Z_{DR}>5\text{ dB}$, $K_{DP}>7^{\circ}\cdot\text{km}^{-1}$ 。这表明16:29—16:34下击暴流爆发并增强,产生了第一轮风力峰值。极端大风出现在钩状回波“V”型缺口中心附近,与强风暴中心前侧强下沉气流触地和动量下传的叠加影响有关(Orf and Anderson, 1999)。下击暴流中的水凝物粒子又是混合了密集的含有冰核的大雨滴和融化的冰雹粒子,这种固液混合态粒子会产生强大的负浮力,促使下击暴流加速。

16:39(图略),强风暴在百里画廊维持,低层径向速度减弱。此时不同仰角径向速度的0线已经越过百里画廊,百里画廊处于负的径向速度一侧,表明此时当地处于强风暴中心的后侧,随后造成第二轮强风雨天气。在剖面上,风暴顶部塌陷继续,水平方向前冲的回波柱维持,上升气流减弱、高度降低。反映出下击暴流仍维持,但风速有所减弱。

16:45(图略),风暴中心移出百里画廊进入下游的清镇市流长乡,风暴强度仍偏强且维持钩状回波特征, Z_{DR} 柱与 K_{DP} 柱均下降减弱,地面观测到16:50流长乡马场出现 $23.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的极大风速。

以往研究表明,产生强风的超级单体具有明显的中层径向辐合,极端强风多发生在强降水超级单体的 R_{FD} 附近(王秀明等, 2025)。偏振雷达对降水粒子的探测可提高下击暴流的监测能力,雷达偏振参量一定程度上可揭示超级单体微物理结构(Kumjian and Ryzhkov, 2008),融化的冰雹粒子下降伴随的“ Z_{DR} 槽”是下击暴流的特征结构(Kuster et al., 2016; Mahale et al., 2016), Z_{DR} 柱和 K_{DP} 柱通常在上升气流和 R_{FD} 相邻处观测到,并位于有界弱回波区(BWER)边缘。下击暴流产生的强下沉气流是由雨滴蒸发、冰雹融化及冰雹融化后的蒸发等复杂水凝物粒子相变导致的负浮力产生,融化的冰雹是湿下击暴流加上的主要贡献者(Richter et al., 2014; Kuster et al., 2016)。

综上所述,1号风暴形成超级单体后,16:18具备产生下击暴流的条件,16:23随着 Z_{DR} 槽下降且梯度增加,风暴处于下击暴流爆发前夕;16:29—16:34风暴顶塌陷,出现“V”型缺口特征, R_{FD} 达到峰值,低层最大径向速度超过 $25\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,下击暴流爆发并增强。此刻 Z_{DR} 柱和 K_{DP} 柱下降, Z_{DR} 和 K_{DP} 中心值异常大,表明密集的固液混合态粒子加速下沉气流,对下击暴流加速起到了关键作用;16:39下击暴流维持,

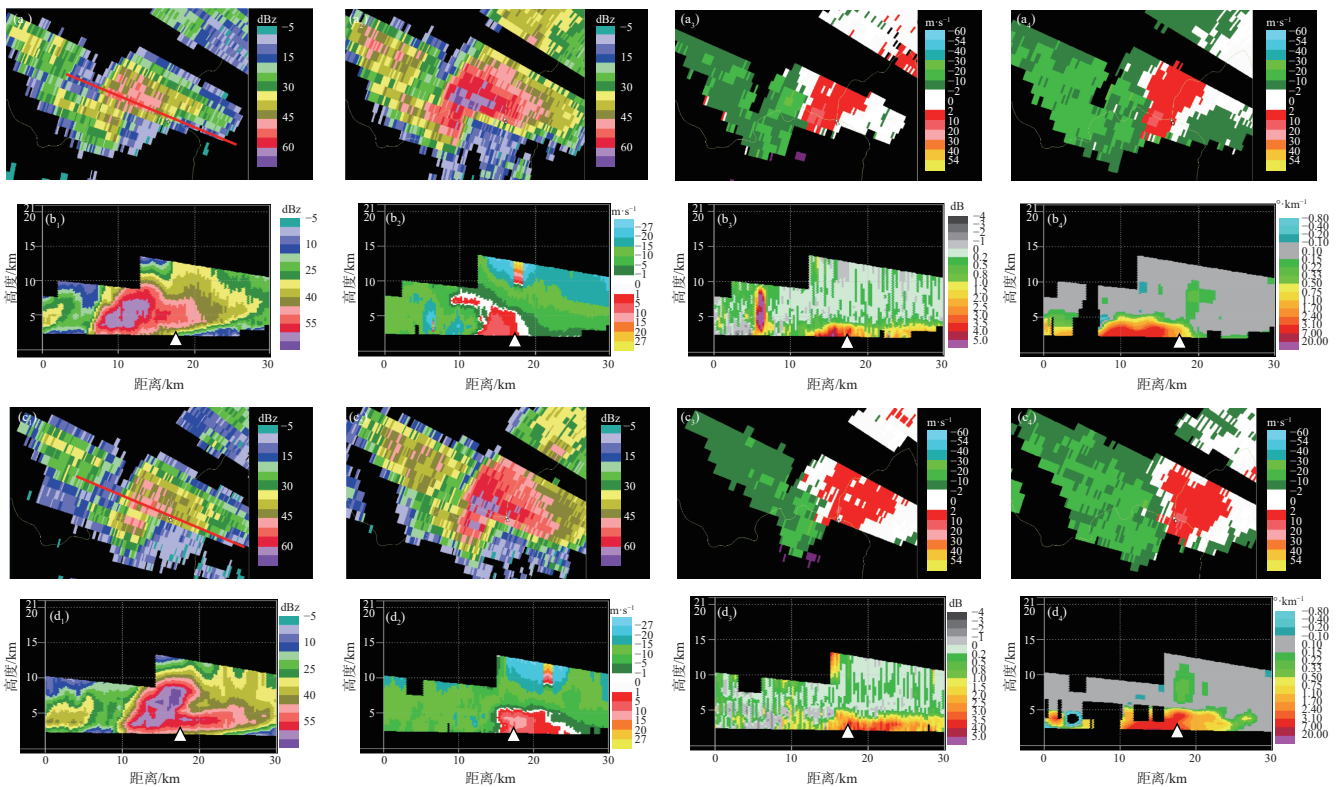


图 10 2025 年 5 月 4 日 16:29 (a₁—a₄, b₁—b₄) 和 16:34 (c₁—c₄, d₁—d₄) 贵阳雷达 0.5° (a₁, a₃, c₁, c₃) 和 1.5° (a₂, a₄, c₂, c₄) 仰角的反射率因子 (a₁, a₂, c₁, c₂) 和径向速度 (a₃, a₄, c₃, c₄) 沿 0.5° 仰角 (图中红色直线) 的剖面 (b₁—b₄, d₁—d₄) 的反射率因子 (b₁, d₁)、径向速度 (b₂, d₂)、Z_{DR} (b₃, d₃) 及 K_{DP} (b₄, d₄) 的径向分布 (“△”表示事发地位置)

Fig. 10 The (a₁, a₂, c₁, c₂) radar reflectivity factor and (a₃, a₄, c₃, c₄) radial velocity quadruple plots on (a₁, a₃, c₁, c₃) 0.5° and (a₂, a₄, c₂, c₄) 1.5° elevation angles, and the (b₁, d₁) reflectivity factor, (b₂, d₂) radial velocity, (b₃, d₃) Z_{DR}, (b₄, d₄) K_{DP} along the red line in the 0.5° elevation plot of Guiyang radar at (a₁—a₄, b₁—b₄) 16:29 BT and (c₁—c₄, d₁—d₄) 16:34 BT on May 4, 2025 (the event location is marked by “△”)

风速减弱。1 号风暴所产生的风速前强后弱的特征, 符合移动型下击暴流的非对称结构 (Fujita, 1981; 王秀明等, 2023)。

7 地形对风暴的可能影响

由上述回波强度及移动变化分析可知, 黔西市金碧镇 (风速 $26.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 风向 339°) (下同)、五里乡 ($23.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 332°)、新仁乡化屋村 ($44.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 289°)、清镇市流长马场乡 ($23.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 341°) 及织金县龙场乡 ($18.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 350°) 出现的 8 级以上大风, 均是受 1 号强风暴影响而产生的 (图略)。从这 5 个站的风向和风速发现, 化屋村在风向和风速上与另外 4 个站的风向风速有明显的差异。从风向来看, 化屋村的风向 289° , 为西偏北方向, 其余 4 站的风向为 $332^\circ\sim 350^\circ$, 为北偏西方向, 与这 4 站的风向差达 $43^\circ\sim 61^\circ$; 从风速来看, 化屋村的风速超过 $40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 而其余 4 站均不足 $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 与这 4 站的风速差达 $18.5\sim 25.9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。上述 4 个气象站均在陆面, 而化屋村则在水边。为什么会造成如此大的差异呢? 除了风暴强度自身的变化外, 地形是否对这种差异产生

了影响?

为揭示这些差异的原因, 调查组还通过实地探查和无人机航拍绘制了风暴产生的灾害点 (图 11), 将这些灾害点连线起来可以推测, 风暴路径是自西北向东南方向移动的。在这个背景下, 结合地形分析风速风向变化。从风速来看, 风暴下山进入河面后由于摩擦力减小, 低层风速可能加速。另一方面风暴经六冲河狭管进入较宽阔的水面后, 狭管口的“井喷”现象也会造成风速加速; 从风向来看, 由于

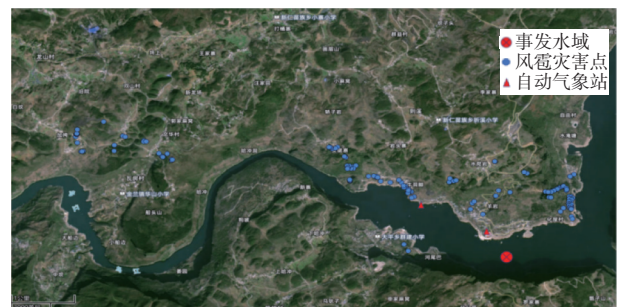


图 11 2025 年 5 月 4 日化屋村周边区域气象站及风雹灾害点分布 (源于无人机航拍和实地调查)

Fig. 11 The distribution of disasters in Huawu Village and surrounding areas (based on drone aerial photography and field investigations)

1号风暴尺度较小,进入六冲河后风暴会沿着六冲河的轴线调整,形成与河面几乎平行的走向。换言之,六冲河河面摩擦力减小以及气流经过狭管口产生的“井喷”现象可能造成了大风加速,而河流走向可能使风向平行于河道。

8 结论与讨论

2025年5月4日下午16:30—16:40黔西市化屋村化屋码头附近发生游船倾覆事件后,技术组历时20d开展了实地调查、无人机航拍、视频监控筛选、气象资料等一系列工作。本文在调研的基础上重新梳理区域站数据、视频监控资料、贵阳雷达观测等资料,对极端大风特征及可能原因进行了分析,得到以下主要结论:

(1) 黔西“5.4”游船倾覆事件发生在强对流天气背景下,风雹极端性显著,风灾造成重大人员伤亡。前期气温偏高,4日贵阳探空具有强的垂直风切变、中层干层及较大的DCAPE,午后热力不稳定增强后,受高空槽东移影响,贵州西北部的辐合线处于热力不稳定区和湿度锋区,可触发雷暴云团生成并发展增强。

(2) 化屋村在4日16:28—16:45出现了两轮大风,第一轮风力明显强于第二轮,以偏西风为主,第二轮风向以东南风为主。 $44.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的极大风出现在第一轮,是贵州省有完整观测记录以来的风速极值。同时化屋村8min内气温骤降 $13\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,并出现气压涌升、分钟降水极端的特征。

(3) 视频监控显示积雨云风暴出现气旋式旋转,并可见风暴前侧底部气流外涌。4日16:25左右风暴前侧雨幡达到六冲河峡谷口附近,16:28—16:45是风暴影响化屋码头附近主要时段,而16:30—16:33是风暴影响化屋码头最强时段,此时段风浪最强,能见度骤降至数米。

(4) 分析贵阳雷达回波显示风暴于4日16:13发展为超级单体。16:29—16:34风暴顶塌陷,形成水平前冲的回波柱, R_{FD} 达到峰值,低层最大径向速度超过 $25\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,下击暴流爆发并增强。极端大风与 R_{DF} 出现峰值和动量下传的叠加影响有关。 Z_{DR} 和 K_{DP} 中心值异常大,表明密集的固液混合态粒子加速下沉气流,对下击暴流加速起到了关键作用。

(5) 六冲河下游河面开阔,摩擦力减小以及气流经过狭管口产生的“井喷”现象可能造成了大风加速,而河流走向可能使风向平行于河道。

本文主要基于上述基本观测数据分析了造成贵

州黔西“5.4”游船倾覆事件极端大风的基本特征,在利用贵阳雷达分析风暴的结构特征时发现由于海拔高度的原因,无法看见风暴及地时河面至山顶这个高度上的回波特征。另外,地形对风暴强度的影响究竟有多大,目前还未知,这有待于后续从数值模拟方面进一步开展研究。

参考文献 (References):

- 邓朝平,唐明晖,苏涛,等.2024.湖南衡阳“4.04”强下击暴流预警关键点及环境条件分析[J].*暴雨灾害*,43(2):158–167. Deng C P, Tang M H, Su T, et al. 2024. Analysis of key warning points and environmental conditions for the “4.04” strong downburst event in Hengyang of Hunan [J]. *Torrential Rain and Disasters*,43(2):158–167 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023–137
- 顾小丽,肖王星,涂小萍,等.2025.宁波两次下击暴流的环境条件与多普勒雷达特征对比分析[J].*暴雨灾害*,44(3):340–351. Gu X L, Xiao W X, Tu X P, et al. 2025. A comparative study on environmental conditions and doppler radar echo characteristics of two downburst events in Ningbo [J]. *Torrential Rain and Disasters*,44(3):340–351 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023–157
- 胡媚,唐明晖,王起唤,等.2026.基于S波段双偏振雷达和X波段相控阵雷达的强风暴观测分析[J].*沙漠与绿洲气象*,20(1):24–32. Hu M, Tang M H, Wang Q H, et al. 2026. Analysis of a strong storm by S-band dual polarization radar and X-band phased array radar [J]. *Desert and Oasis Meteorology*,20(1):24–32 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.2097–6801.2408.06004
- 孙继松.2023.与直线型对流大风相关的强风暴形态结构和热动力学过程[J].*气象*,49(1):1–11. Sun J S. 2023. The pattern structure and thermodynamic and dynamic processes of severe storms associated with linear convective gales [J]. *Meteorological Monthly*,49(1):1–11 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000–0526.2022.111802
- 孙晓磊,王科,左涛,等.2023.引发“6.25”天津极端雷暴大风的超级单体与中尺度对流系统分析[J].*暴雨灾害*,42(3):312–323. Sun X L, Wang K, Zuo T, et al. 2023. Analysis of supercell and meso-scale convective system causing an extreme thunderstorm gale in Tianjin on 25 June 2020 [J]. *Torrential Rain and Disasters*,42(3):312–323 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022–093
- 唐明晖,姚秀萍,杨湘婧,等.2016.基于多普勒天气雷达资料的“6.1”监利极端大风成因分析[J].*暴雨灾害*,35(5):393–402. Tang M H, Yao X P, Yang X J, et al. 2016. Cause analysis of an extreme gale event occurred in Jianli on 1 June 2015 based on Doppler weather radar data [J]. *Torrential Rain and Disasters*,35(5):393–402 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–9045.2016.05.001
- 王秀明,俞小鼎,费海燕,等.2023.下击暴流形成机理及监测预警研究进展[J].*气象*,49(2):129–145. Wang X M, Yu X D, Fei H Y, et al. 2023. A review of downburst genesis mechanism and warning [J]. *Meteorological Monthly*,49(2):129–145 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000–0526.2022.100301
- 王秀明,汤欢,俞小鼎,等.2025.超级单体风暴研究进展[J].*气象学报*,83(3):813–832. Wang X M, Tang H, Yu X D, et al. 2025. Advances in supercell storm research [J]. *Acta Meteorologica Sinica*,83(3):813–832 (in Chinese). doi:10.11676/qxb2025.20240156

- 杨秀庄,邓世有,李力,等.2025.多单体强风暴影响下的一次极端强对流天气中尺度特征及触发机制[J].*高原山地气象研究*,45(4):28–37.
- Yang X Z, Deng S Y, Li L, et al. 2025. Mesoscale characteristics and triggering mechanism of an extreme severe convection under the influence of multi-cell strong storms [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research*,45(4):28–37 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674–2184.2025.04.003
- 俞小鼎,王秀明,李万莉,等.2020.雷暴与强对流临近预报[M].北京:气象出版社. Yu X D, Wang X M, Li W L, et al. 2020. Thunderstorm and Severe Convection Nowcasting [M]. Beijing, China Meteorological Press (in Chinese)
- 郑永光,田付友,孟智勇,等.2016.“东方之星”客轮翻沉事件周边区域风灾现场调查与多尺度特征分析[J].*气象*,42(1):1–13. Zheng Y G, Tian F Y, Meng Z Y, et al. 2016. Survey and multi-scale characteristics of wind damage caused by convective storms in the surrounding area of the capsizing accident of cruise ship “Dongfangzhixing” [J]. *Meteorological Monthly*,42(1):1–13 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000–0526.2016.01.001
- 周明飞,杜小玲,罗敬,等.2022.贵州“5.15”极端风雹天气过程的环境场和雷达回波特征[J].*暴雨灾害*,41(2):158–166. Zhou M F, Du X L, Luo J, et al. 2022. Analysis of environmental field and radar echo characteristics for an extreme wind and hail event occurred in Guizhou on 15 May 2021 [J]. *Torrential Rain and Disasters*,41(2):158–166 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–9045.2022.02.006
- Fujita T T. 1976. Spearhead Echo and Downbursts Near the Approach End of a John F. Kennedy Airport Runway, New York City [M]. Chicago: University of Chicago: 1–51.
- Fujita T T. 1977. Byers H R. Spearhead echo and downbursts in the crash of all an air liner [J]. *Monthly Weather Review*,105(2):129–146
- Fujita T T. 1981. Tornadoes and downburst in the context of generalized planetary scales [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*,38(8):1511–1534
- Kumjian M R, Ryzhkov A V. 2008. Polarimetric signatures in supercell thunderstorms [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47(7):1940–1961 doi:10.1175/2007JAMC1874.1
- Kuster C M, Heinselman P L, Schuur T J. 2016. Rapid-update radar observations of downbursts occurring within an intense multicell thunderstorm on 14 June 2011 [J]. *Weather and Forecasting*,31(3):827–851. doi:10.1175/WAF-D-15-0081.1
- Mahale V N, Zhang G F, Xue M. 2016. Characterization of the 14 June 2011 Norman, Oklahoma, downburst through dual-polarization radar observations and hydrometeor classification [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*,55(12):2635–2655. doi:10.1175/JAMC-D-16-0062.1
- Markowski P, Richardson Y. 2010. Mesoscale meteorology in midlatitudes [M]. Chichester: Wiley Blackwell: 407
- Orf L G, Anderson J R. 1999. A numerical study of traveling microbursts [J]. *Monthly Weather Review*,127(6):1244–1258. doi:10.1175/1520-0493(1999)127<1244:ansotm>2.0.co;2
- Richter H, Peter J, Collis S. 2014. Analysis of a destructive wind storm on 16 November 2008 in Brisbane Australia [J]. *Monthly Weather Review*, 142(9):3038–3060. doi:10.1175/MWR-D-13-00405.1
- Smith T M, Elmore K L, Dulin S A. 2004. A damaging downburst prediction and detection algorithm for the WSR-88D [J]. *Weather and Forecasting*,19(2):240–250. doi:10.1175/1520-0434(2004)019<0240:ADDPAD>2.0.CO;2
- Smith B T, Thompson R L, Grams J S, et al. 2012. Convective modes for significant severe thunderstorms in the contiguous United States. Part I: Storm classification and climatology [J]. *Weather and Forecasting*,27(5):1114–1135 doi:10.1175/WAF-D-11-00115.1
- Wakimoto R M. 2001. Convectively driven high wind events [M]. Doswell III C A. Severe Convection Storms. Boston: American Meteorological Society: 255–298
- Wilson J W, Roberts R D, Kessinger C, et al. 1984. Microburst wind structure and evaluation of Doppler radar for airport wind shear detection [J]. *Journal of Climate Applied Meteorology*,23(6):898–915. doi:10.1175/1520-0450(1984)023<0898>2.0.CO;2
- Yu X D, Wang X M, Zhao J, et al. 2012. Investigation of supercells in China: Environmental and storm characteristics [C]. Proceedings of the 26th Conference on Severe Local Storms. Nashville: American Meteorological Society

(责任编辑 杨 浩)