暴雨灾害
Torrential Rain and Disasters
中国科技核心期刊
中国科技论文统计源期刊

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

郭英莲 肖艳姣 王珏 周志敏 吴翠红 赖安伟 付志康 许建玉

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

GUO Yinglian，XIAO Yanjiao，WANG Jue，ZHOU Zhimin，WU Cuihong，LAI Anwei，FU Zhikang，XU Jianyu

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2025-111

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

2017年7月29日宜昌三峡坝区一次下击暴流过程的中尺度分析

Mesoscale analysis of a downburst process in Yichang three gorges dam area on 29 July 2017

暴雨灾害. 2023, 42(2): 200-210 https://doi.org/10.12406/byzh.2020-202

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

一次下击暴流过程形成机制的模拟分析

Simulation and analysis of the mechanism of a downburst process

暴雨灾害. 2022, 41(1): 42-49 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.01.005

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

2017年夏季天津一次下击暴流事件的成因初探

Preliminary study on the causes of a downburst event in Tianjin in the summer of 2017

暴雨灾害. 2022, 41(5): 556-563 https://doi.org/10.12406/byzh.2021-112

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

关注微信公众号，获得更多资讯信息

郭英莲,肖艳姣,王珏,等.2025.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[J].暴雨灾害,44(5):565−575. GUO Yinglian, XIAO Yanjiao, WANG Jue, et al. 2025. Applicability of method for estimating the extreme wind speed of thunderstorm gales during the downburst event in Guizhou on May 4, 2025 [J]. Torrential Rain and Disasters,44(5):565−575 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2025−111

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

郭英莲, 肖艳姣, 王珏, 周志敏, 吴翠红, 赖安伟, 付志康, 许建玉

(中国气象局武汉暴雨研究所 全国暴雨研究中心/中国气象局流域强降水重点开放实验室/暴雨监测预警湖北省重点实验室, 武汉 430205)

摘　要: 目前国内基于天气雷达的下击暴流识别预警算法尚不能有效估算其强度和风速, 中国气象局武汉暴雨研究所最新研发了一种基于双偏振天气雷达水凝物分类产品估算雷暴大风极端风速的方法 (Method for estimating the extreme wind speed of thunderstorm gales based on dual-polarization weather radar hydrometeors classification products, EESonHC)。本文以 2025 年 5 月 4 日贵州地区出现的下击暴流过程 (以下简称贵州“5·04”下击暴流过程) 为例, 利用探空气象数据、地面自动站观测资料以及贵阳双偏振天气雷达产品, 对 EESonHC 在贵州西南山区超级单体风暴中的应用效果和影响因素进行了分析。结果表明: EESonHC 可以准确估算出贵阳附近超级单体风暴产生地面大风的时间演变特征, 提前 10 min 估算出略高于地面实测风速的极端风速; 能有效识别贵州“5·04”下击暴流过程两个单体风暴中哪个会产生风速 25 m·s^{-1} 以上的下击暴流; 因贵州山区 0.5°仰角雷达资料受地形影响较为严重, 使用 1.5°仰角雷达资料估算的极端风速更准确; EESonHC 中的风暴单体区域内垂直加速度阈值设定与雨滴谱特征有关, 但基于华北、江淮区域个例设定的阈值仍然适用于贵州地区。

关键词: 定量风速估算; 下击暴流; 双偏振天气雷达

中图法分类号: P412.25　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2025−111

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

GUO Yinglian, XIAO Yanjiao, WANG Jue, ZHOU Zhimin, WU Cuihong, LAI Anwei, FU Zhikang, XU Jianyu

(*Heavy Rainfall Research Center of China/China Meteorological Administration Basin Heavy Rainfall Key Laboratory/Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research, Institute of Heavy Rain, China Meteorological Administration, Wuhan* 430205)

Abstract: Currently, downburst identification and warning algorithms based on weather radar in China cannot effectively estimate the intensity and wind speed of downbursts. The Wuhan Institute of Heavy Rain, China Meteorological Administration, has newly developed a method for estimating the extreme wind speed of thunderstorm gales based on dual-polarization weather radar hydrometeor classification products, which is referred to as the Extreme wind speed Estimation method based on Hydrometeor Classification (EESonHC). This study utilized sounding meteorological data, ground automatic weather station observations, and dual-polarization weather radar products to analyze the application effectiveness and influencing factors of the EESonHC for the downburst event that occurred over the southwestern Guizhou mountainous areas on May 4, 2025 (hereinafter referred to as the "5·04" downburst event in Guizhou). For this event, the

收稿日期: 2025−06−16; **定稿日期**: 2025−08−06

资助项目: 湖北省自然科学基金项目 (2022CFD012, 2024AFD211); 中国气象局重点创新团队项目 (CMA2022ZD07); 全国暴雨研究开放基金项目 (BYKJ2024Z05, BYKJ2024Z04); 中国气象局创新发展专项 (CXFZ2025J006, CXFZ2024J015); 国家自然科学基金重点项目 (42230612)

第一作者: 郭英莲, 主要从事中小尺度气象学研究。E-mail: 103232924@qq.com

通信作者: 肖艳姣, 主要从事天气雷达资料应用技术和强对流天气研究。E-mail: yanjiao.xiao@163.com

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

EESonHC accurately captured the temporal evolution of surface winds generated by the supercell storm near Guiyang, estimating extreme wind speeds slightly higher than surface observations with a 10-minute lead time. It effectively identified the storm from the two storm cells that produced downburst wind speeds exceeding 25 $m·s^{-1}$. Due to severe terrain affecting the 0.5° elevation radar data in Guizhou's mountainous areas, extreme wind speeds estimated using 1.5° elevation radar data were more accurate. The vertical acceleration threshold within the storm cell in the EESonHC is related to raindrop size distribution characteristics. Thresholds established based on case studies from North China and the Jianghuai regions remain applicable to Guizhou.

Key words: extreme wind speed estimation; downburst; dual-polarization weather radar

引　言

下击暴流是由对流风暴中的强烈下沉气流所引发的近地面强辐散性出流现象, 其水平尺度通常小于 10 km (Smith et al., 2004)。该现象既可由孤立的对流风暴产生, 亦常见于中尺度对流系统 (MCSs) (Fujita and Wakimoto, 1981; 郑永光等, 2016, 2025)。根据我国现有记录, 由超级单体引发的下击暴流风速最高可达 60 $m·s^{-1}$ (翟丽萍等, 2019)。下击暴流往往会造成建筑物倒塌、电力系统瘫痪等重大社会影响和严重经济损失, 并对航空 (陈阳权等, 2024)、航海 (顾小丽等, 2025) 等安全构成威胁。例如, 2021 年 4 月 30 日, 江苏南通地区的飑线中强下击暴流导致地面最大瞬时风速达到 45.4 $m·s^{-1}$, 强风造成大树倒伏并砸毁房屋 11 处, 11 人因坠物和触电不幸身亡, 20 艘渔船在长江口因风浪倾覆 (王秀明等, 2023); 2021 年 5 月 14 日晚, 浙江绍兴地区遭遇强对流大风天气, 下击暴流导致 500 kV 输电线路倒塔事故 (王振国等, 2021); 1982 年 7 月 9 日, 美国路易安纳州新奥尔良机场受下击暴流影响, 导致载有 137 名乘客和 8 名机组人员的飞机坠毁, 同时造成机场上 8 人死亡和 14 人重伤 (张金平, 2017); 2015 年 6 月 1 日, 湖北监利局地以下击暴流为主的雷暴大风导致“东方之星”客轮翻沉事件, 造成 442 人遇难 (孟智勇等, 2016)。可见, 下击暴流破坏力大, 极易引发重大人员伤亡与经济损失。因此, 针对其开展精准监测、有效预警与机理研究具有重要意义。

下击暴流突发性强、生命史短、空间尺度小, 通常依赖高分辨率的雷达探测资料来判断其发生, 目前识别下击暴流的常用雷达前兆特征包括: 下降的反射率因子核 (Descending Reflectivity Core, DRC) (Roberts and Wilson, 1989), 代表水凝物的拖曳; 中层径向辐合 (Mid-Altitude Radial Convergence, MARC), 是对下沉气流质量连续性的响应, 也表征中层干冷空气侵入风暴内; 融化层下方具有一定深度的差分反射率 (Z_{DR}) 洞, 代表冰雹在下沉气流中向下移动 (拖曳作用), 与下沉气流速度有关 (Ryzhkov et al., 2013; Amiot et al., 2019); 比差分相位 (K_{DP}) 核 (kuster et al., 2021), 反应融化的冰相水凝物和水凝物相变特征; 中气旋, 即强对流风暴的上升气流和后侧下沉气流紧密相联的小尺度涡旋, 与后侧下沉气流有关 (Fujita and Wakimoto, 1981)。基于这些雷达前兆特征, 一些量化指标被提取并用于下击暴流识别和预警算法研发 (Smith et al., 2004; 罗辉等, 2015; 王兴等, 2019; 肖艳姣等, 2021), 但这些算法通常仅限于判断风暴是否会产生下击暴流, 并未实现对下击暴流强度的定量评估。肖艳姣等 (2021) 研究的下击暴流临近预报方法已在强天气短临预报系统 SWAN3.0 中投入业务运行, 能有效预测下击暴流的发生, 但尚无评估地面极端风速等级的功能, 对预报员发布雷暴大风预警的支持有限。为此, 郭英莲等 (2024) 在已有相关研究成果的基础上, 研发了一种基于双偏振天气雷达估算雷暴大风极端风速的方法 (Method for estimating the extreme wind speed of thunderstorm gales based on dual-polarization weather radar hydrometeors classification products, EESonHC), 并在华北、江淮区域发生的伴有强降水的多单体风暴进行了测试 (Guo et al., 2025), 结果表明该方法对 25 $m·s^{-1}$ 以上的极端雷暴大风有高达 75% 的准确率, 且平均风速偏差约 0.5 $m·s^{-1}$, 但该方法的普适性仍需通过在不同区域和类型的风暴中进一步验证。

2025 年 5 月 4 日 16:40 (北京时, 下同), 贵州省毕节市黔西市新仁乡化屋村乌江源百里画廊景区六广河水域发生一次雷暴大风过程 (以下简称贵州“5·04”下击暴流过程), 瞬时风速达 14 级 (44.7 $m·s^{-1}$), 造成四艘游船倾覆, 84 人落水, 其中 10 人遇难。据新闻报道 (https://new.qq.com/rain/a/20250506A030D200), 这是一次典型的孤立强雷暴极端下击暴流天气过程。尽管历史上存在许多极端风灾事件, 但直接观测到导致灾害的风速却极为罕见, 这一次翻船点西侧不到 2 km 处恰好有化屋村自动气象观测站, 且正位于该下击暴流路线上, 为验证 EESonHC 在贵州西南山区的适用性研究提供了典型个例。因此, 本文利用贵州“5·04”下击暴流过程中贵阳双偏振天气雷达产品、探空气象数据以及地面自动站观测资料,

通过 EESonHC 估算这次下击暴流的地面风速, 检验其在西南地区和单体风暴中的适用性, 以推进利用双偏振雷达水凝物变化定量估算地面极端风速方法的业务化应用。

1 资料和方法

1.1 资料说明

EESonHC 使用中国气象局通过业务系统下发的新一代天气雷达业务软件系统 (Radar Operational Software Engineering, ROSE) 2.0 版本, 生成质控后的雷达产品 (以下简称为 ROSE 产品) 作为初始数据资料, 要求 ROSE 接入的是双偏振雷达基数据。本文使用 EESonHC 计算 2025 年 5 月 4 日 16:00—17:00 贵阳 (Z9851) S 波段双偏振雷达资料, 使用的 ROSE 产品为 0.5°、1.5°、2.4°、3.4°、4.3°、6.0°、9.9°、14.6°和 19.5°等 9 个仰角 (分别对应仰角层号 1—9) 的水平反射率因子 (Z_H, 019 号产品, 单位: dBz)、差分反射率(Z_{DR}, 0158 号产品, 单位: dB)、水凝物分类产品 (HCL, 0164 号产品) 和零度层识别产品 (ML, 166 号产品)。其中 0.5°和 1.5°的 Z_H、Z_{DR}、HCL 用于 EESonHC 估算极端风速, 其他产品用于方法适用性讨论分析。使用 2025 年 5 月 4 日 08:00 和 20:00 贵阳 (57816) 探空站的秒级探空资料以辅助判断零度层高度, 其中 08:00 资料被用于 EESonHC 中环境参量的设置。另外, 使用 2025 年 5 月 4 日 08:00 的 500 hPa 高度场、700 hPa 风场、850 hPa 风场实况和 16:30 的全国雷达组合反射率拼图以及 16:00—17:00 全国地面观测站 17 m·s^{-1} 以上极大风信息, 用于过程特征分析和讨论。以上资料均来自湖北省气象信息与技术保障中心。

1.2 EESonHC 简介

EESonHC 研制的主要思路是利用 ROSE 产品计算格点垂直加速度 (dw/dt), 再通过特定假设估算地面极端风速。在计算水凝物质量 (M) 时, 分别对冰相粒子和液相粒子进行分类处理, 不同研究中所采用的计算公式因研究区域的差异而异 (Guo et al., 2025), EESonHC 使用徐立理 (2017) 在探讨强对流大风特征时所提出的公式 (1)—(7) 进行计算。对于垂直加速度的计算, 综合考虑 Doswell 和 Markowski (2004) 和俞小鼎等 (2006) 所提出的垂直动量方程, 使用公式 (8)—(9) 进行计算。具体步骤如下:

首先, 利用公式 (1) 由 Z_H (单位:dBz) 换算为水平反射率因子 Z_h (单位: mm^6·m^{-3}), 然后由公式 (2)—(3) 利用 Z_{DR} (单位: dB)计算垂直反射率因子 (Z_v, 单位: mm^6·m^{-3}) 和差反射率因子 Z_{DP}(单位: dBz), 再利用公式 (4)—(5) 计算液水和冰水对水平反射率因子的贡献 (Z_h^{rain} 和Z_h^{ice}), 结合 HCL 的水凝物分类结果和表 1 中冰相粒子的密度和质量表达式, 利用公式 (6)—(7) 计算水凝物质量 (M_{water} 和 M_{ice}), 利用单位体积内水凝物质量与干空气质量 (1.293 kg·m^{-3}) 之比计算水凝物混合比 (q_{water} 和 q_{ice})。

$$Z_H = 10\cdot\lg(Z_h) \tag{1}$$

$$Z_{DR} = 10\cdot\lg\left(\frac{Z_h}{Z_v}\right) \tag{2}$$

$$Z_{DP} = 10\cdot\lg(Z_h - Z_v) \tag{3}$$

$$10\cdot\lg\left(Z_h^{rain}\right) = 0.77Z_{DP} + 14.0 \tag{4}$$

$$Z_h^{ice} = Z_h - Z_h^{rain} \tag{5}$$

$$M_{water} = 3.44\times10^{-3}\left(Z_h^{rain}\right)^{4/7} \tag{6}$$

$$M_{ice} = 1000\pi\rho_{ice}N_0^{3/7}\left(\frac{5.28\times10^{-18}Z_h^{ice}}{720}\right)^{4/7} \tag{7}$$

公式 (7) 中, N_0=4×10^6 m^{-4}, ρ_{ice}为冰相粒子密度, 不同水凝物类型对应的粒子密度 (Zhang, 2018) 见表 1。

表 1 HCL 产品的水凝物类型及其密度和质量表达式

Table 1 HCL product's hydrometeors classification, density, and mass calculation

类型	密度/(10^3 kg·m^{-3})	质量表达式
小雨	1.00	公式(6)
大雨	1.00	公式(6)
冰雹	0.92	公式(7)
大雨滴	1.00	公式(6)
干雪	0.10	公式(7)
湿雪	0.50	公式(7)
冰晶	0.92	公式(7)
霰	0.92	公式(7)

然后, 利用 q_{water}、q_{ice} 和公式 (8) 计算相邻雷达体扫时次的温度变化 ($T'_{e,a,r,t}$), 再利用公式 (9) 计算格点垂直加速度 (dw/dt)。

$$T'_{e,a,r,t} = \frac{1}{C}L_{e,a,r,i,t}\left(q_{e,a,r,i,t} - q_{e,a,r,i,t-1}\right) \tag{8}$$

其中, C 表示干空气比定压热容, L、q 分别表示相变潜热和混合比, e、a、r、i、t、t−1 分别表示仰角、方位角、斜距库、水凝物分类、当前雷达体扫时次、前一雷达体扫时次。

$$\frac{\mathrm{d}w}{\mathrm{d}t}=\underbrace{-\frac{1}{\rho}\frac{\partial P'}{\partial z}}_{\mathrm{PPA}}\underbrace{+g\frac{T'}{\bar{T}}}_{\mathrm{BTA}}\underbrace{-gq_i}_{\mathrm{GDA}} \tag{9}$$

其中, 第一项为扰动气压项 (PPA), 第二项为浮力项 (BTA), 第三项为重力拖曳项 (GDA)。“′”表示扰动量, “-”表示环境平均量, w 为垂直速度, t 为时间。PPA 使用 $-R\frac{T_1'}{H_1}$ 代替, 其中 1 表示 0.5°仰角层, H 表示 0.5°仰角层的高度, BTA 中的 $\bar{T}$ 使用各仰角垂直高度范围内的探空平均温度代替, 探空温度取自强对流发生前距离雷达站最近的探空站温度廓线。

由于格点垂直加速度 (dw/dt) 的计算仅考虑了水凝物的局地变化, 为增加平流作用的影响, EESonHC 方法需设置一个包含当前时次和前一时次的风暴单体区域 (Guo et al., 2025)。当前时次 dw/dt 负值中心对应当前时次风暴单体移入造成的水凝物高值区, 当前时次 dw/dt 正值中心对应前一时次风暴单体移出造成的水凝物低值区, 同一个风暴单体的正负值中心构成一个加速度对。使用选定风暴单体区域内 (图 5 中实线或虚线框内) 指定阈值范围内的加速度平均值作为该风暴单体的垂直加速度 ($\bar{a}$), 具体如下: 当同一风暴单体区域的平均高度在 800 m 以上, 取|dw/dt|≥0.5 m·s^{-2} 的区域计算风暴单体$\bar{a}$; 当同一风暴单体区域的平均高度在 600~800 m 之间, 取|dw/dt|≥1.5 m·s^{-2} 的区域计算风暴单体$\bar{a}$; 当同一风暴单体区域的平均高度在 600 m 内, 取|dw/dt|≥2 m·s^{-2} 的区域计算风暴单体$\bar{a}$。

取最低仰角风暴单体区域的平均高度为起始下沉高度 (H) (Guo et al., 2025), 初始速度为 0, 根据速度计算公式 (10) 可估算出下击暴流造成的极端地面风速 (V_S)。当最低仰角因波束阻挡出现较大的探测盲区时, 可以用次低仰角数据来计算。

$$V_S=\bar{a}^*\sqrt{2^*H/|\bar{a}|} \tag{10}$$

其中, $\bar{a}$为负值表示向下的加速度, 地面风速为出流风速, $\bar{a}$为正值表示向上的加速度, 不估算地面风速, H 为加速度对所在区域的平均高度。

综上, EESonHC 的计算流程如图 1 所示。

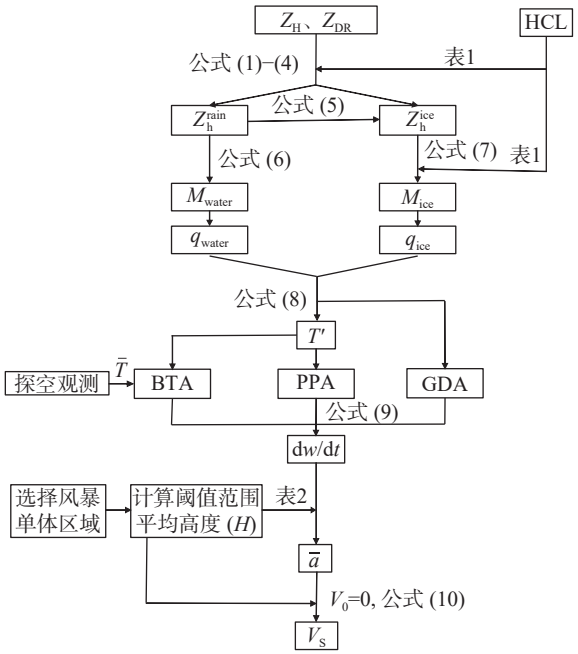


图 1 EESonHC 的计算流程

Fig. 1 Flowchart for EESonHC

2 EESonHC 在贵州“5·04”下击暴流过程中的应用效果

2.1 贵州“5·04”下击暴流过程概况

2025 年 5 月 4 日受高空槽和低空切变线影响, 贵州中北部出现强对流天气, 下击暴流位置与强对流风暴单体相对应 (图 2a), 利用距离其最近的贵阳站 (57816) 探空 5 月 4 日 16:00 地面观测订正 08:00 探空资料后显示, 中低层存在明显的下沉对流有效位能 (DCAPE) 和垂直风切变, 对流有效位能 (CAPE) 达 2 423 J·kg^{-1} (图 2b)。从最接近极端下击暴流大风发生时间 (16:33 出现地面风速 44.7 m·s^{-1}) 的 16:34 贵阳雷达资料 (图 3) 可见, 在产生下击暴流的强风暴单体内, 组合反射率因子≥50 dBz 的区域直径约 15 km, 最大值>65 dBz (图 3a)。强回波中心剖面显示, 回波主体向东南方向 (移动方向) 倾斜, 60 dBz 回波从 2 km 垂直延伸至 8 km, 其后侧对应较小的反射率因子 (图 3c)、极大的 Z_{DR} (图 3e) 和很小的相关系数 (图略), 表明此处为强冰雹后侧的三体散射, 强冰雹下落融化、降水蒸发及其拖曳, 预示强下沉气流的存在 (李典南等, 2024)。水凝物分类产品 (HCL) 显示, 高反射率因子和低 Z_{DR} 重合区对应冰雹 (图 3e); 风暴前侧 3 km 以下高度以大雨和大雨滴为主 (图 3d), 对应较大的反射率因子和 Z_{DR}; 风暴后侧低层以小雨为主, 夹杂大滴和冰雹。径向速度 (V) 显示, 中层径向辐合高度从风暴底向上延伸到近 8 km 高度, 主体出流速度位于 10~20 m·s^{-1}, 最大值达 20 m·s^{-1} 以上 (图 3f)。雷达风暴追踪信息显示, 风暴单体移速为 11 m·s^{-1}, 均远小于地面实况观测的 44.7 m·s^{-1}。下面分析 EESonHC 能否准确估算出V_S。

2.2 EESonHC 应用效果分析

受贵州山地地形影响, 在 0.5°仰角雷达波束阻挡严重, 回波强度显著偏弱 (图 3b), 因此选用 1.5°仰角的数据估算下击暴流风速。表 2 为贵州“5·04”下击

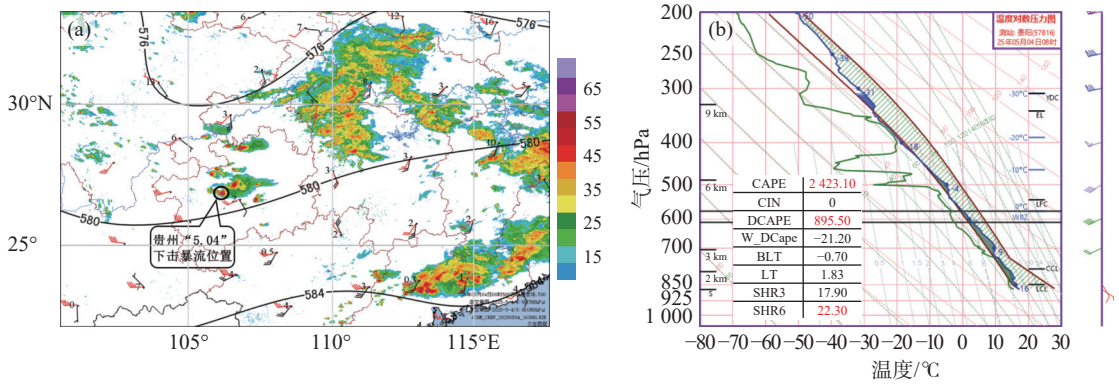


图 2 2025 年 5 月 4 日 08:00 高空形势场 (黑线表示 500 hPa 高度场, 单位: dagpm; 红色风向杆表示 700 hPa 风, 黑色风向杆表示 850 hPa 风, 单位: m·s^{-1}) 和 16:30 雷达组合反射率 (填色, 单位: dBz) 叠加图 (a), 以及 08:00 贵阳站探空图 (b)

Fig. 2 The (a) overlay image of upper-level atmospheric situation at 08:00 BT (black lines indicate 500 hPa height field, unit: dagpm, red wind bars indicate 700 hPa wind, black wind bars indicate 850 hPa wind, unit: m·s^{-1}) and the radar-derived combined reflectivity (colored,unit: dBz) at 16:30 BT, and (b) sounding map from Guiyang station at 08:00 BT on May 4, 2025

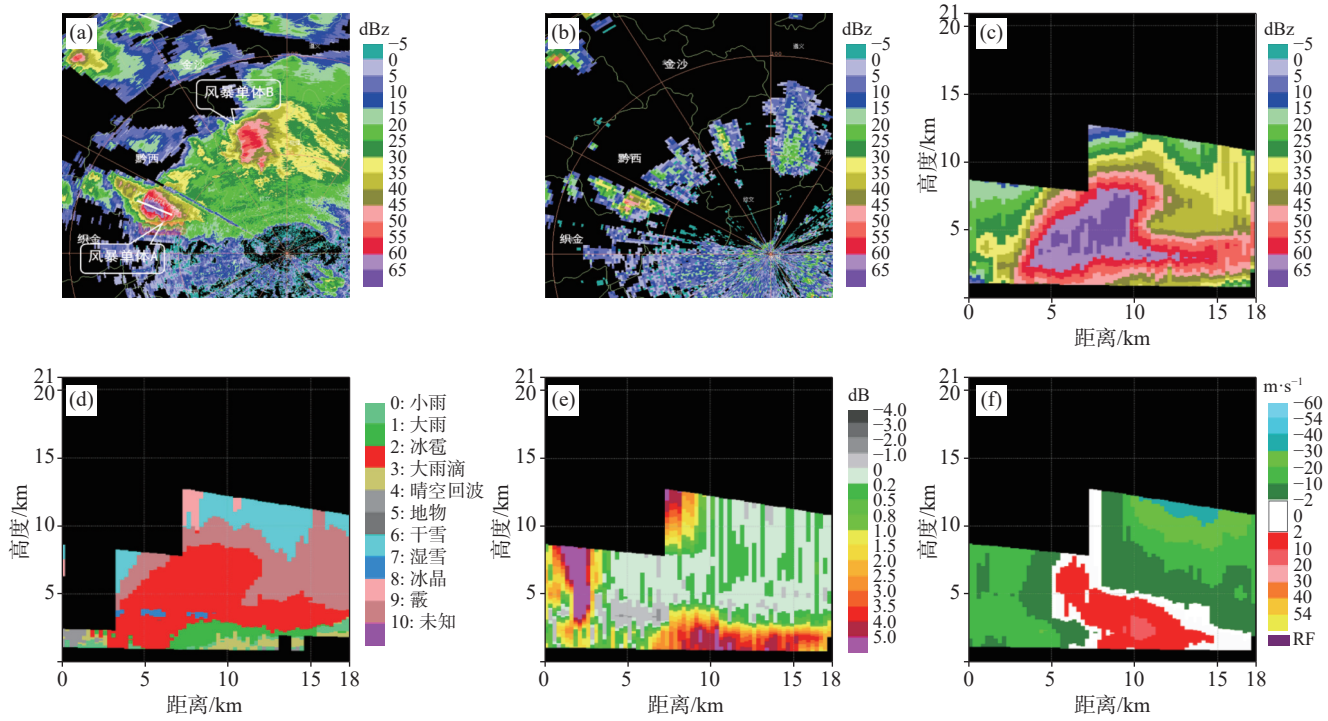


图 3 2025 年 5 月 4 日 16:34 贵阳雷达组合反射率 (a)、0.5°仰角反射率因子 (b) 以及沿图 a 白线的反射率因子 (c)、HCL(d)、Z_{DR} (e) 和 V (f) 的剖面

Fig. 3 The (a) combined reflectivity, (b) reflectivity factor at 0.5°degree elevation and the sections of (c) reflectivity factor, (d) HCL, (e) Z_{DR} and (f) V along the white line in Fig. 3a from Guiyang radar at 16:34 BT on May 4, 2025

暴流过程中风暴 A 和 B (图 3a) 附近的地面实况大风 (≥17 m·s^{-1})。图 4 为基于 EESonHC 和 1.5°仰角 ROSE 产品估算的贵州“5·04”下击暴流过程中地面极大风速和雷达观测时次前后 3 min 内≥17 m·s^{-1} 的实况风速。从图 4 可见, 16:33 出现过程实况极大风速 44.7 m·s^{-1}, 对应利用雷达资料估算的 16:34 下击暴流极大风速为 33.43 m·s^{-1}, 但利用雷达资料估算的 16:23 (实况极大风速发生前 10 min) 下击暴流极大风速为 54.0 m·s^{-1}。16:07 实况极大风速为 26.2 m·s^{-1}, 16:33 再次达 17 m·s^{-1}, 16:33—16:50 实况极大风速再次呈现先减小后增加的特征。利用雷达资料估算的极大风速同样存在类似波动特征, 即在 16:07 出现极大出流风速 36.84 m·s^{-1}, 16:13 减小至 15.49 m·s^{-1}, 16:18 未估算出下击暴流大风 (正值), 到 16:23 开始出现显著的下击暴流极大风速 (54.0 m·s^{-1}), 16:29 减弱, 16:34 增强, 16:39 快速减小, 16:45 再次出现下击暴流风速 43.61 m·s^{-1}, 随后逐渐减弱。从估算风速与实况风速的对应情况来看, 16:23 估算风速 54.0 m·s^{-1}

表 2 贵州“5·04”下击暴流过程 16:00—17:00 两个雷暴单体 (A、B) 对应≥17 m·s^{-1} 大风的地面站点信息及天气实况

Table 2 Information of ground stations and weather conditions for gale winds ≥17 m·s^{-1} corresponding to two thunderstorm cells (A and B) from 16:00 BT to 17:00 BT during the Guizhou "5·04" downburst event

风暴单体	站点信息			站点海拔高度/m	极大风时间	极大风速/(m·s^{-1})	极大风向/°	小时雨量/mm
	站名	经度/°	纬度/°					
A	五里	105.90	26.89	1 409.9	16:04	23.4	332	3.3
	金碧	105.96	26.94	1 100.0	16:07	26.2	339	41.0
	化屋村	106.10	26.81	978.0	16:33	44.7	289	28.6
	龙场	106.07	26.74	1 376.6	16:36	18.8	350	0.1
	流长马场	106.22	26.73	1 230.0	16:50	23.6	341	16.2
B	化觉	106.41	27.19	1 213.0	16:07	23.1	328	26.6
	九庄天鹅	106.53	27.12	1 080.0	16:37	18.6	293	37.4
	青山大林	106.63	27.06	1 324.0	16:53	18.2	251	26.1

对应 16:33 实况风速 44.7 m·s^{-1}, 16:34 估算风速 33.43 m·s^{-1} 对应 16:36 实况风速 18.8 m·s^{-1}, 16:45 估算风速 43.61 m·s^{-1} 对应 16:50 实况风速 23.6 m·s^{-1}, 三个极大风速峰值对应的时间, 估算相对实况分别提前了 10 min、2 min、5 min, 估算风速分别比实况风速偏高 9.34 m·s^{-1}、14.63 m·s^{-1}、20.01 m·s^{-1}。

由于贵州“5·04”下击暴流过程发生时, 其东北侧同样有一雷暴单体 B 存在 (图 3a), 但未观测到超过 25 m·s^{-1} 的极端大风, 其最大实况风速为 23.1 m·s^{-1}, 发生在 16:07。基于雷达资料估算的风速显示, 16:07 估算出 17.98 m·s^{-1} 的下击暴流风速 (图 5a), 16:34 估算出 4.33 m·s^{-1} 的下击暴流风速 (图 5b), 其他时间则均未估算出下击暴流风速。风暴单体 A 区域始终有显著的向下加速度 (负值), 而风暴单体 B 区域仅在 16:07 出现较明显的向下加速度, 其它时次多以弱的向上加速度为主。Guo 等 (2025) 指出, EESonHC 方法主要针对 25 m·s^{-1} 以上的下击暴流出流大风有较好的预报能力, 可见 EESonHC 对发生极端出流大风的风暴单体 A 有识别能力, 即便在对风暴单体 A 的风速存在高估的情形下, 也未将风暴单体 B 错误地估计为极端大风, 但估算的风速偏差高于 Guo 等 (2025) 研究中风速偏差的标准差 4.8 m·s^{-1}, 对 25 m·s^{-1} 以下出流风速的估算偏差超过 14 m·s^{-1}。下面将讨论影响风速估算的可能因素。

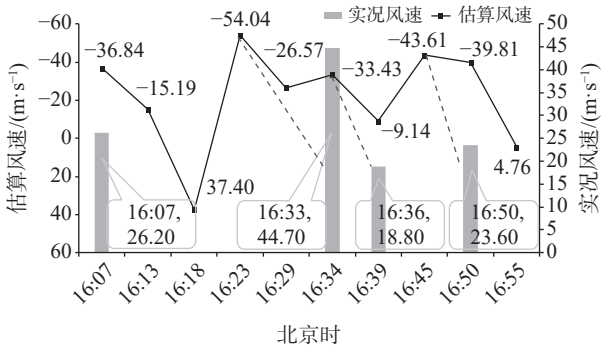


图 4 贵州“5·04”下击暴流过程 16:07—16:55 基于 EESonHC 和 1.5°仰角 ROSE 产品的地面极大估算风速与实况风速 (柱状数值框中前面数字为时间, 后面数字为风速; 估算风速的负值表示估算的地面出流风速, 正值表示未估算出下击暴流; 虚线表示估算风速与实况风速峰值的对应)

Fig. 4 Maximum estimated and observed surface wind speeds from 16:07 BT to 16:55 BT during the Guizhou "5·04" downburst event based on the EESonHC (In the bar value boxes, the first number represents the time and the second represents the wind speed, negative values of estimated wind speeds indicate the estimated surface outflow wind speeds, while positive values indicate no downburst was estimated, gray dashed lines indicate the correspondence between the peaks of estimated and observed wind speeds)

3 造成贵州“5·04”下击暴流过程地面风速估算偏差的影响因素

3.1 地形和探测仰角的影响

Guo 等 (2025) 研究 2022 年 6 月 26 山东临沂雷暴大风和 2024 年 3 月 30 日江西南昌飑线大风时指出, 当 0.5°仰角资料存在遮挡时, 可以使用 1.5°仰角资料代替计算, 且计算结果的差异不大。从图 3b、图 6a 可见, 贵州“5·04”下击暴流过程中, 贵阳雷达 0.5°仰角回波强度显著弱于 1.5°仰角, 1.5°仰角波束轴线高度显示, 其最强回波出现在地形海拔约 1 300 m 的区域, 高于雷达天线馈线所在高度 1 261 m, 这是造成 0.5°仰角波束阻挡并导致反射率因子偏弱的主要原因。计算 0.5°~6.0° 6 个仰角的 H、$\bar{a}$和V_S显示, 所用资料仰角越高, V_S越高 (表 3), 与 Guo 等 (2025) 研究中个例检验存在一定差别。Guo 等 (2025) 研究的

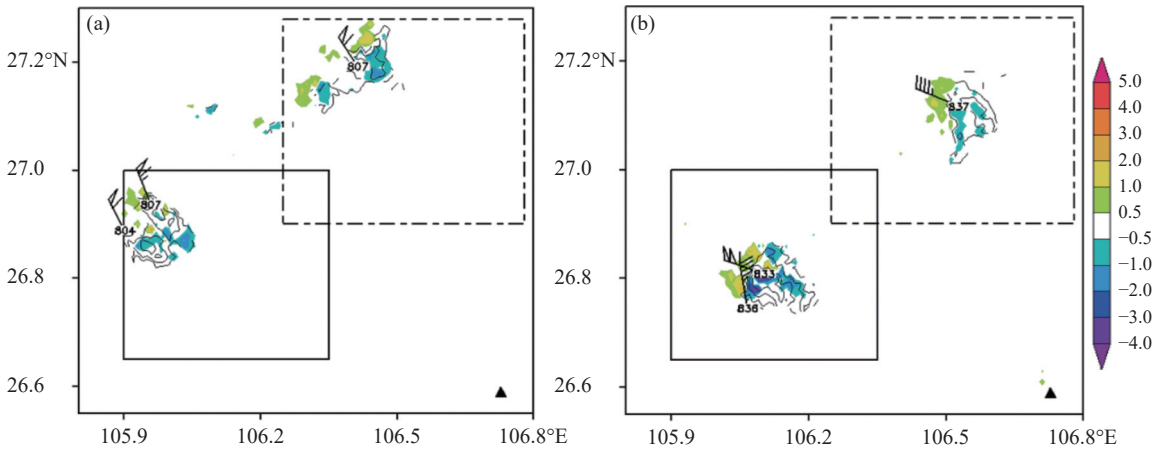


图 5 基于 EESonHC 估算的贵州“5·04”下击暴流过程 16:07 (a) 和 16:34 (b) 格点加速度 (填色, 单位: m·s^{-2}) 和雷达当前时次前后 3 min 内>17 m·s^{-1} 的实况大风 (黑色风向杆, 单位: m·s^{-1}; 黑实线框为风暴单体 A 区域, 黑虚线框为风暴单体 B 区域, 等值线为>45 dBz 的回波, ▲为雷达站位置)

Fig. 5 Grid point accelerations (colored, unit: m·s^{-2}) estimated based on EESonHC at (a) 16:07 BT and (b) 16:34 BT during the Guizhou "5·04" downburst event along with the actual strong winds (>17 m·s^{-1}) within 3 minutes before and after the current radar time (black wind bar, unit: m·s^{-1}, black solid box indicates the storm cell A area, black dashed box indicates the the storm cell B area, contour lines represent echoes >45 dBz, and ▲ indicates the location of the radar station)

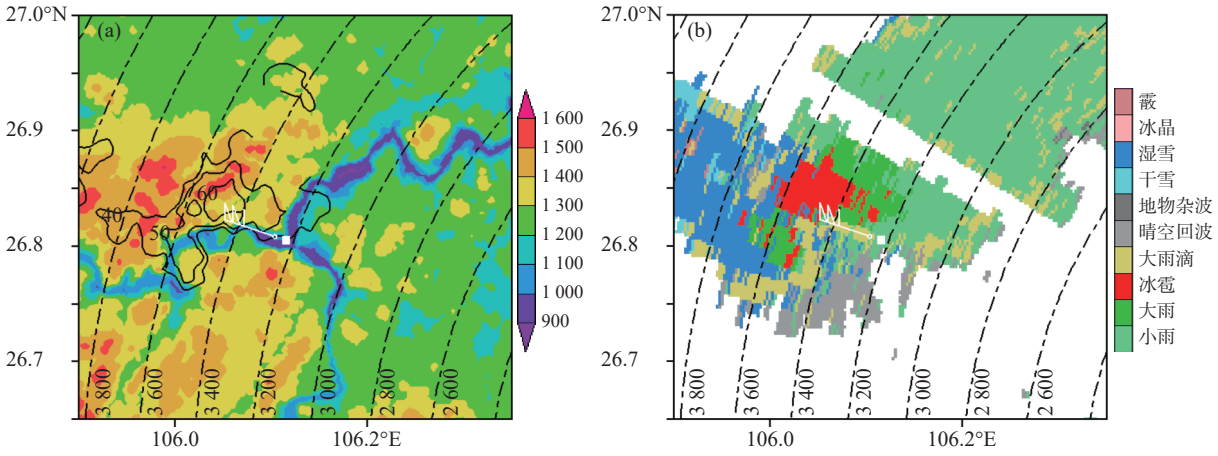


图 6 贵州“5·04”下击暴流过程强回波附近地形海拔高度 (填色, 单位: m) 和 16:23 的 1.5°仰角反射率因子 (≥40 dBz, 等值线) (a), 以及 ROSE-HCL (b) (虚线为探测波束轴线等高度圈, 白色风向杆为观测的极端大风位置, 白色方块为翻船点位置)

Fig. 6 Terrain elevation near the strong echo (a, filled color, unit: m) and reflectivity factor at 1.5°elevation angle (≥40 dBz), and (b) ROSE-HCL at 16:23 BT during the Guizhou "5·04" downburst event (Dashed lines are constant height contours of the detection beam axis, white wind barbs indicate locations of observed extreme gales, white squares indicate locations of capsized boats)

雷达均位于较低海拔的平原区, 1.5°仰角探测的回波高度均在 2 km 以下, 远低于 0 ℃ 层高度, 而贵阳雷达天线馈线高度达 1 261 m, 1.5°仰角雷达波束轴线在强回波区的海拔高度约3 400~3 600 m, 已接近 0 ℃ 层高度。ROSE 的 ML 产品中识别出 16:23 强回波区附近的 0 ℃ 层顶高和底高分别为 4.8 km、3.6 km, 说明 16:23 的 1.5°仰角扫描波束中可能包含 0 ℃ 层区域, 而 0 ℃ 层及以上区域冰相粒子多, 造成地面极端风速的高估。另外, 贵州“5·04”下击暴流过程中极端大风发生在河谷之中, 从图 6a 可知, 实况大风发生位置比雷达天线馈线高度低约 300 m, 而公式 (10) 中所用的 H 并不包含雷达下方的海拔高度, 增加此高度后必将加剧极端风速的高估。

EESonHC 使用低仰角资料是为了减小冰相粒子带来的高估影响。从 16:23 的 1.5°仰角 HCL (图 6b) 分布可知, 其主要以冰雹 (HA)、湿雪 (WS)、大雨 (HR)、小雨 (LR) 为主。将原 HCL 产品中识别为 HA 的区域更换为大雨滴 (BD), 重新估算的 V_S 为 35.27 m·s^{-1}; 将原 HCL 产品中识别为 WS 的区域更换为 BD, 重新估算的 V_S 为 23.60 m·s^{-1}。可见, 冰相粒子更改为液相粒子, 估算的 V_S 明显下降, WS 更改为 BD 较 HA 更改为 BD 对该过程的风速影响更显著。

虽然冰相粒子和液相粒子的误识别对极端风速的估算有明显影响，但如果 0 ℃ 层高度识别准确，那么就很难判断是否高估了 HA 或 WS 区。4 日 08:00 (图 2b) 和 20:00 (图略) 贵阳探空站的干球 0 ℃ 层高度分别为 4 684 m、4 792 m，湿球 0 ℃ 层高度分别为 4 212 m、4 651 m。ROSE 的 ML 产品中识别的 16:23 强回波区附近的 0 ℃ 层顶高和底高分别为 4.8 km、3.6 km，其顶高与探空观测的干球 0 ℃ 层高度基本一致，其底高比探空观测的湿球 0 ℃ 层高度偏低，但同时 ROSE 的 ML 产品识别的强回波北侧晴空区的 0 ℃ 层顶高和底高分别为 4.8 km、4.2 km，与 08:00 探空湿球 0 ℃ 层高度一致，比 20:00 探空湿球 0 ℃ 层高度偏低。由于强对流大风发生时间距离 20:00 更近，不排除 ROSE 识别 0 ℃ 层底高的高度偏低、估算 WS 区偏多的情况，这可能与雷达部分波束阻挡、噪声偏差等因素导致的雷达资料质量下降有关。

另外，V_S 与 H 和 $\bar{a}$ 有关。表 3 给出基于公式 (10) 计算的不同 H 和 $\bar{a}$ 对应的 V_S，可见表 2 中 H=2 000 m、a=0.5 时的估算风速为 44.7 m·s^{-1}，与贵州“5·04”下击暴流过程中 1.5°仰角的观测高度 (表 4) 和最大实况风速 (表 2) 均基本一致，而 H=800 m、a=0.5 时的估算风速为 28.3 m·s^{-1}，与 0.5°仰角的观测高度接近 (表 4)，但估算风速明显偏小。因此，在贵州地区使用 EESonHC，使用 1.5°仰角的估算结果更可靠，而计算 $\bar{a}$ 的阈值设定也适用于贵州地区。虽然 EESonHC 估算的 16:23 极大风速 54.04 m·s^{-1} 较实况偏高，但观

表 3 基于本文公式 (10) 计算的不同风暴单体高度 (H) 和垂直加速度 ($\bar{a}$) 下对应的估算风速 (V_S，单位：m·s^{-1}，阴影区域为风速 35~45 m·s^{-1})

Table 3 Estimated surface wind speed (V_S) corresponding to different storm cell heights (H) and vertical downward accelerations ($\bar{a}$) based on Formula (10) in the study (The shaded area indicates wind speeds of 35-45 m·s^{-1})

H/m	$\bar{a}$/(m·s^{-2})																			
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0
100	4.5	6.3	7.7	8.9	10.0	11.0	11.8	12.6	13.4	14.1	14.8	15.5	16.1	16.7	17.3	17.9	18.4	19.0	19.5	20.0
200	6.3	8.9	11.0	12.6	14.1	15.5	16.7	17.9	19.0	20.0	21.0	21.9	22.8	23.7	24.5	25.3	26.1	26.8	27.6	28.3
300	7.7	11.0	13.4	15.5	17.3	19.0	20.5	21.9	23.2	24.5	25.7	26.8	27.9	29.0	30.0	31.0	31.9	32.9	33.8	34.6
400	8.9	12.6	15.5	17.9	20.0	21.9	23.7	25.3	26.8	28.3	29.7	31.0	32.2	33.5	34.6	35.8	36.9	37.9	39.0	40.0
500	10.0	14.1	17.3	20.0	22.4	24.5	26.5	28.3	30.0	31.6	33.2	34.6	36.1	37.4	38.7	40.0	41.2	42.4	43.6	44.7
600	11.0	15.5	19.0	21.9	24.5	26.8	29.0	31.0	32.9	34.6	36.3	37.9	39.5	41.0	42.4	43.8	45.2	46.5	47.7	49.0
700	11.8	16.7	20.5	23.7	26.5	29.0	31.3	33.5	35.5	37.4	39.2	41.0	42.7	44.3	45.8	47.3	48.8	50.2	51.6	52.9
800	12.6	17.9	21.9	25.3	28.3	31.0	33.5	35.8	37.9	40.0	42.0	43.8	45.6	47.3	49.0	50.6	52.2	53.7	55.1	56.6
900	13.4	19.0	23.2	26.8	30.0	32.9	35.5	37.9	40.2	42.4	44.5	46.5	48.4	50.2	52.0	53.7	55.3	56.9	58.5	60.0
1 000	14.1	20.0	24.5	28.3	31.6	34.6	37.4	40.0	42.4	44.7	46.9	49.0	51.0	52.9	54.8	56.6	58.3	60.0	61.6	63.3
1 100	14.8	21.0	25.7	29.7	33.2	36.3	39.2	42.0	44.5	46.9	49.2	51.4	53.5	55.5	57.4	59.3	61.2	62.9	64.7	66.33
1 200	15.5	21.9	26.8	31.0	34.6	37.9	41.0	43.8	46.5	49.0	51.4	53.7	55.9	58.0	60.0	62.0	63.9	65.7	67.5	69.3
1 300	16.1	22.8	27.9	32.2	36.1	39.5	42.7	45.6	48.4	51.0	53.5	55.9	58.1	60.3	62.4	64.5	66.5	68.4	70.3	72.1
1 400	16.7	23.7	29.0	33.5	37.4	41.0	44.3	47.3	50.2	52.9	55.5	58.0	60.3	62.6	64.8	66.9	69.0	71.0	72.9	74.8
1 500	17.3	24.5	30.0	34.6	38.7	42.4	45.8	49.0	52.0	54.8	57.4	60.0	62.4	64.8	67.1	69.3	71.4	73.5	75.5	77.5
1 600	17.9	25.3	31.0	35.8	40.0	43.8	47.3	50.6	53.7	56.6	59.3	62.0	64.5	66.9	69.3	71.6	73.8	75.9	78.0	80.0
1 700	18.4	26.1	31.9	36.9	41.2	45.2	48.8	52.2	55.3	58.3	61.2	63.9	66.5	69.0	71.4	73.8	76.0	78.2	80.4	82.5
1 800	19.0	26.8	32.9	37.9	42.4	46.5	50.2	53.7	56.9	60.0	62.9	65.7	68.4	71.0	73.5	75.9	78.2	80.5	82.7	84.9
1 900	19.5	27.6	33.8	39.0	43.6	47.7	51.6	55.1	58.5	61.6	64.7	67.5	70.3	72.9	75.5	78.0	80.4	82.7	85.0	87.2
2 000	20.0	28.3	34.6	40.0	44.7	49.0	52.9	56.6	60.0	63.2	66.3	69.3	72.1	74.8	77.5	80.0	82.5	84.9	87.2	89.4
2 100	20.5	29.0	35.5	41.0	45.8	50.2	54.2	58.0	61.5	64.8	68.0	71.0	73.9	76.7	79.4	82.0	84.5	86.9	89.3	91.7
2 200	21.0	29.7	36.3	42.0	46.9	51.4	55.5	59.3	62.9	66.3	69.6	72.7	75.6	78.5	81.2	83.9	86.5	89.0	91.4	93.8
2 300	21.4	30.3	37.1	42.9	48.0	52.5	56.7	60.7	64.3	67.8	71.1	74.3	77.3	80.2	83.1	85.8	88.4	91.0	93.5	95.9
2 400	21.9	31.0	37.9	43.8	49.0	53.7	58.0	62.0	65.7	69.3	72.7	75.9	79.0	82.0	84.9	87.6	90.3	93.0	95.5	98.0
2 500	22.4	31.6	38.7	44.7	50.0	54.8	59.2	63.2	67.1	70.7	74.2	77.5	80.6	83.7	86.6	89.4	92.2	94.9	97.5	100.0
2 600	22.8	32.2	39.5	45.6	51.0	55.9	60.3	64.5	68.4	72.1	75.6	79.0	82.2	85.3	88.3	91.2	94.0	96.7	99.4	102.0
2 700	23.2	32.9	40.2	46.5	52.0	56.9	61.5	65.7	69.7	73.5	77.1	80.5	83.8	86.9	90.0	93.0	95.8	98.6	101.3	103.9
2 800	23.7	33.5	41.0	47.3	52.9	58.0	62.6	66.9	71.0	74.8	78.5	82.0	85.3	88.5	91.7	94.7	97.6	100.4	103.2	105.8
2 900	24.1	34.1	41.7	48.2	53.9	59.0	63.7	68.1	72.2	76.2	79.9	83.4	86.8	90.1	93.3	96.3	99.3	102.2	105.0	107.7
3 000	24.5	34.6	42.4	49.0	54.8	60.0	64.8	69.3	73.5	77.5	81.2	84.9	88.3	91.7	94.9	98.0	101.0	103.9	106.8	109.5

表 4 贵州“5·04”下击暴流过程中不同仰角、不同时间的风暴区域平均高度 (H, 单位: m)、垂直加速度 ($\bar{a}$, 单位: m·s^{-2}) 和估算风速 (V_S, 单位: m·s^{-1})

Table 4 Average height of the storm area (H, unit: m), average vertical acceleration ($\bar{a}$, unit: m·s^{-2}), and estimated wind speed (V_S, unit: m·s^{-1}) at different elevation angles and different times during the Guizhou "5·04" downburst event

时间	0.5°			1.5°			2.4°			3.3°			4.3°			6.0°		
	H	$\bar{a}$	V_S	H	$\bar{a}$	V_S	H	$\bar{a}$	V_S	H	$\bar{a}$	V_S	H	$\bar{a}$	V_S	H	$\bar{a}$	V_S
8:23	1 006	0.12	16	2 265	−0.64	−54	3 426	−0.42	−54	4 456	−0.56	−70						
8:29	911	−0.46	−29	2 113	−0.17	27	3 167	−0.23	−38	4 396	0.02	13	5 313	−0.79	−92			
8:34	880	0.14	16	2 041	−0.27	−33	2 938	−0.82	−69	4 079	−0.48	−63	5 098	−0.75	−88	6 841	−0.71	−98

测地点距离翻船点约 2 km, 相对最强下击暴流中心位置的风速可能已经减小, 因此, 并不能确定 EESonHC 一定高估了极端风速。

3.2 水凝物质量的影响

Guo 等 (2025) 研究指出, EESonHC 使用的水凝物质量计算公式, 是目前能查到的 6 种公式中估算风速偏差最小的方法, 但徐立理 (2017) 的 Z_h^{rain} 和 Z_{DP} 关系是基于江淮地区夏季雨滴谱观测数据拟合得出, 与西南地区贵州一带的 Z_h^{rain} 和 Z_{DP} 关系可能存在不同。

王福增等 (2020) 和 Li 等 (2022) 研究指出, 相对于江淮地区, 贵阳对流云中的粒子直径更大。粒子直径大, 通常 Z_{DR} 和 Z_{DP} 均偏高, 根据公式 (4)—(7) 可推导出 M_{water} 偏高、M_{ice} 偏低。Guo 等 (2025) 中研究指出, 当 Z_{DR} 偏高、Z_H 也偏高时, M_{water} 和 M_{ice} 的差值并不显著, 这种情况下 Z_h^{rain} 和 Z_{DP} 关系对风速估算的影响并不显著。为验证该判断, 需要修改公式 (4) 的斜率和截距, 以使强 Z_H 对应高 Z_{DP}。首先, 拟合贵州“5·04”下击暴流过程中 1.5°仰角 Z_h^{rain} 和 Z_{DP} 的线性回归方程, 假设 Z_H 对应的均为液相粒子, 得到公式 (11)。对比公式 (4) 和公式 (11) (图 7) 可知, 公式 (11) 的斜率比公式 (4) 高, 即贵州“5·04”下击暴流强 Z_{DP} 对应的 Z_H 更高, 但将公式 (11) 带入 EESonHC 计算后, 发现估算的 V_S 仅比原始方法提高 0.11 m·s^{-1} (54.15 m·s^{-1})。同时, 在公式 (4) 的基础上只改变斜率或者只改变截距, 计算结果变化均不显著。可见, Z_h^{rain} 和 Z_{DP} 的关系并不是影响 V_S 高估的重要原因。

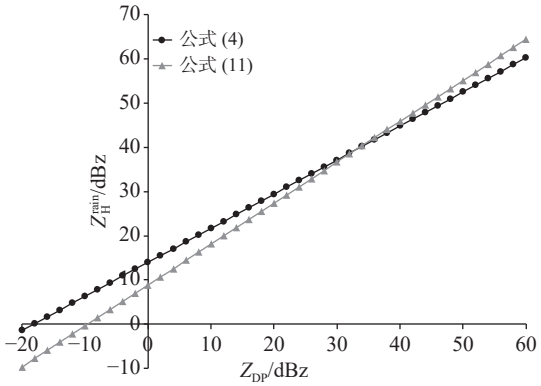


图 7 贵州“5·04”下击暴流过程中基于 1.5°仰角在最大估算风速时间 16:23 雷达资料拟合的公式 (11) 与原公式 (4) 的对比

Fig. 7 Comparison of the fitted equation (11) with the original equation (4) based on radar data at 1.5° elevation angle at 16:23 BT for the time of maximum estimated wind speedduring the Guizhou "5·04" downburst

$$Z_H^{rain}=0.92Z_{DP}+8.86 \tag{11}$$

4 结论与讨论

本文针对贵州“5·04”下击暴流过程, 利用贵阳双偏振天气雷达产品、探空气象数据以及地面自动站观测资料, 对双偏振天气雷达估算雷暴大风极端风速 (EESonHC) 方法在贵州西南山区超级单体风暴中的适用性进行了评估。得出以下主要结论:

(1) EESonHC 可以提前 10 min 估算出54.04 m·s^{-1} 的下击暴流风速, 估算风速比实况风速高 9.3 m·s^{-1}, 且 EESonHC 的估算风速演变特征与实况风速的三次波峰和两次波谷的演变特征一致。

(2) 针对贵州“5·04”下击暴流过程中产生和未产生 25m·s^{-1} 以上下击暴流的两个风暴单体的估算结果显示, EESonHC 可以较好地识别风暴单体中是否存在风速 25 m·s^{-1} 以上的下击暴流。

(3) 贵州山区 0.5°仰角雷达回波受地形阻挡而偏弱, 其资料不适合用于地面极端风速估算。1.5°仰角雷达资料受雷达站高度影响, 会将 0 ℃ 层及以上过多冰相粒子纳入计算, 导致地面极端风速高估, 但大风灾害点位置低于雷达站高度会造成风速的低估, 从而平衡之前的高估, 使估算风速接近实况。

(4) 受地形影响, 贵州地区与江淮区域的雨滴谱特征存在一定差别, 但对 EESonHC 估算地面风速的影响并不显著。

EESonHC 中, 风暴单体区域内垂直加速度阈值虽然是基于华北、黄淮区域设定, 但在贵州“5·04”下击暴流过程中仍然适用。可见, EESonHC方法不仅适用于华北、江淮等平原区域, 也适用于贵州西南山区; 不仅适用于线性和非线性多单体风暴, 也适用于超级单体风暴。

参考文献 (References):

陈阳权,朱雯娜,尹才虎,等.2024.一次东南大风天气下近地面风场结构及航空影响分析[J].沙漠与绿洲气象,18(4):8−14. Chen Y Q, Zhu W N, Yin C H, et al. 2024. Analysis of near-surface layer wind field structure and aviation influence in a southeast gale [J]. Desert and Oasis Meteorology,18(4):8−14 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2024.04.002

翟丽萍,农孟松,梁维亮,等.2019.造成临桂极端大风的超级风暴单体观测分析[J].暴雨灾害,38(4):346−353. Zhai L P, Nong M S, Liang W L, et al. 2019. Observational analysis of a supercell causing extreme winds in Lingui [J]. Torrential Rain and Disasters,38(4):346−353 (in Chinese). doi:10.1175/1520−0493(2019)38<346:AOFTFO>2.0.CO;2

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

郭英莲,肖艳姣,王珏,等.2024.基于双偏振天气雷达估测雷暴大风极端风速的方法和装置: 202411227177.5 [P]. 2024-11-01. Guo Y L, Xiao Y J, Wang J, et al. 2024. Method and device for estimating extreme wind speeds in thunderstorm gales using dual-polarization weather radar (Patent No. 202411227177.5) [P]. 2024-11-01 (in Chinese)

李典南,向淑君,袁三明,等.2024.贵州中北部一次冰雹和雷暴大风过程综合诊断[J].高原山地气象研究,44(2):103−111. Li D N, Xiang S J, Yuan S M, et al. 2024. Comprehensive diagnosis of a hail and thunderstorm gale process occurring in north-central part of Guizhou province [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research,44(2):103−111 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1674−2184.2024.02.013

罗辉,张杰,朱克云,等.2015.下击暴流的雷达预警量化指标研究[J].气象学报,73(5):853−867. Luo H, Zhang J, Zhu K Y, et al. 2015. Study of the radar quantitative index for downburst forecasting [J]. Acta Meteorologica Sinica,73(5):853−867 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2015.058

孟智勇,姚聃,白兰强,等.2016.基于实地灾害调研和雷达观测对 “东方之星” 倾覆地点附近强风的估计[J].科学通报,61(7):797−798. Meng Z Y, Yao D, Bai L Q, et al. 2016. Estimation of strong winds near the capsizing location of the "Eastern Star" based on field disaster surveys and radar observations [J]. Chinese Science Bulletin,61(7):797−798 (in Chinese). doi:10.1007/s11434−016−1005−2

王福增,王秋淞,何山,等.2020.贵州正安夏季雨滴谱特征分析[J].成都信息工程大学学报,35(6):689−696. Wang F Z, Wang Q S, He S, et al. 2020. Analysis of summer raindrop size distribution characteristics in Zheng'an, Guizhou [J]. Journal of Chengdu University of Information Technology,35(6):689−696 (in Chinese). doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2020.06.016

王兴,闵锦忠,张露萱,等.2019.雷达数据外推与特征识别的下击暴流预报方法[J].气象科学,39(3):377−385. Wang X, Min J Z, Zhang L X, et al. 2019. Method for downburst warning based on radar data extrapolation and feature recognition [J]. Journal of Meteorological Sciences,39(3):377−385 (in Chinese). doi:10.3969/2018jms.0058

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. Research progress on the formation mechanism and monitoring early warning of downbursts [J]. Meteorological Monthly,49(2):129−145 (in Chinese). doi:10.1175/1520−0493(2023)49<129:ARODGA>2.0.CO;2

王振国,刘黎,周啸宇,等.2021.一起下击暴流导致 500 kV 输电线路倒塔事故原因分析[J].浙江电力,40(11):16−22. Wang Z G, Liu L, Zhou X Y, et al. 2021. Analysis of the causes of a 500 kV transmission line tower collapse accident caused by a downburst [J]. Zhejiang Electric Power,40(11):16−22 (in Chinese). doi:10.19585/j.zjdl.202111003

肖艳姣,王珏,王志斌,等.2021.基于 S 波段新一代天气雷达观测的下击暴流临近预报方法[J].气象,47(8):919−931. Xiao Y J, Wang J, Wang Z B, et al. 2021. A nowcasting method for downbursts based on S-band new-generation weather radar observations [J]. Meteorology,47(8):919−931 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2021.08.002

徐立理.2017.梅雨锋面对流的动力和微物理特征雷达观测研究 [D]. 南京:南京大学. Xu L L. 2017. Radar observations of dynamic and microphysical characteristics of mei-yu front convection [D]. Nanjing: Nanjing University (in Chinese)

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 [M]. 北京:气象出版社. Yu X D, Yao X P, Xiong T N, et al. 2006. Principles and operational applications of doppler weather radar [M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese)

Zhang G F. 2018. 双偏振雷达气象学[M].北京:气象出版社. Zhang G F. 2018. Dual-polarization radar meteorology [M]. Beijing:China Meteorological Press (in Chinese)

张金平.2017.“机场瘟神”—下击暴流[J].百科探秘 (航空航天),(Z2):37−41 Zhang J P. 2017. “Airport Plague” -Downburst [J]. Encyclopedia Exploration (Aerospace),(Z2):37−41 (in Chinese)

郑永光, 何迪, 李典南, 等.2025. 2025 年 4 月 11—13 日我国大范围极端大风天气过程特征和成因[J].暴雨灾害,44(4):421−430. Zheng Y G, He D, Li D N, et al. 2025. Characteristics and formation mechanisms of the widespread extreme gale weather process in China during April 11-13, 2025 [J]. Torrential Rain and Disasters,44(4):421−430 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2025−085

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. Field investigation and multiscale analysis of wind disasters around the sinking of the "Eastern Star" passenger ship [J]. Meteorological Monthly,42(1):1−13 (in Chinese).

doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2016.01.001

Amiot C G, Carey L D, Roeder W P, et al. 2019. C-band dual-polarization radar signatures of wet downbursts around Cape Canaveral, Florida [J]. WeatherForecasting,34(1):103−131.doi:10.1175/WAF−D−18−0081.1

Doswell C A, Markowski P M. 2004. Is buoyancy a relative quantity? [J]. Monthly Weather Review,132(4):853−863. doi:10.1175/1520−0493(2004)132<0853:IBARQ>2.0.CO;2

Fujita T T, Wakimoto R M. 1981. Five scales of airflow associated with a series of downbursts on 16 July 1980 [J]. Monthly Weather Review, 109(7):1438−1456. doi:10.1175/1520−0493(1981)109<1438:FSOAAW>2.0.CO;2

Guo Y L, Xiao Y J, Wang J, et al. 2025. Extreme wind speed estimation in thunderstorm gales utilizing dual-polarization weather radar hydrometeor classification products [J]. Atmospheric Research,324:108202. doi:10.1016/j.atmosres.2025.108202

Kuster C M, Bowers B R, Carlin J T, et al. 2021. Using KDP cores as a downburst precursor signature [J]. Weather Forecasting,36(4):1183−1198. doi:10.1175/WAF−D−21−0005.1

Li X, Chen S, Li Z, et al. 2022. Statistical characteristics of warm season raindrop size distribution in the Beibu Gulf, South China [J]. Remote Sensing,14(19):4752. doi:10.3390/rs14194752

Roberts R D, Wilson J W. 1989. A proposed microburst nowcasting procedure using single-Doppler radar [J]. Journal of Applied Meteorology, 28(3):285−303. doi:10.1175/1520−0450(1989)028<0285:APMNPU>2.0.CO;2

Ryzhkov A V, Kumjian M R, Ganson S M, et al. 2013. Polarimetric radar characteristics of melting hail. Part I: Theoretical simulations using spectral microphysical modeling [J]. Journal of Applied Meteorology andClimatology,52(12):2849−2870. doi:10.1175/JAMC−D−13−073.1

Smith T M, Elmore K L, Dulin S A. 2004. A damaging downburst prediction and detection algorithm for the WSR-88D [J]. Weather Forecasting,19(2):240−250. doi:10.1175/1520−0434(2004)019<0240:ADDPAD>2.0.CO;2

(责任编辑　唐永兰)