云贵高原东侧不同强度雷暴大风的环境参数演变

周永水[1]，郭建平[2]，原 野[3]，朱育雷[1]，喻乙丹[1]，任远刘瑞[1]

1 贵州省气象台，贵阳 550002

2 中国气象科学研究院 灾害天气科学与技术全国重点实验室/专项气象保障技术研究中心,北京 100081

3 贵州省气象服务中心，贵阳 550002

摘要：针对高原复杂地形与静锥区环境对雷暴大风雷达识别造成的技术瓶颈，本文融合雷达回波与地面大风观测数据，结合人工校验构建了 2016-2023 年贵州雷暴大风全样本数据集，提出了雷暴大风 T0（17.2～25 m·s-1）、T1（25～33 m·s-1）、T2（≥33 m·s-1）三级分类体系。通过多维度环境参数挖掘，揭示不同等级雷暴大风的气候特征与前兆信号：强冰雹指数（SHIP）、能量螺旋度指数（EHI）、抬升凝结高度（LCL）、对流抑制能量（CIN）及风切变参数与雷暴大风呈现显著相关性。在 T0 风暴发生前 6 h 至触发时刻所有环境参数变化较为平缓，T1 风暴时 SHIP、风灾指数（WNDG）和最不稳定抬升指数（MULI）在风暴前 1～2 h 增至最大值（MULI 达最小值）后缓慢下降（上升），WNDG 的跃增可能预示着 T1 型雷暴大风的发生；SHIP、EHI、最不稳定抬升的对流有效位能（MUCAPE）、WNDG、MULI 等指标在 T2 型风暴前 2～3 h 迅速增至最大值（MULI 达最小值）后缓慢下降（上升），SHIP、EHI、MUCAPE、MULI、WNDG 小时变化速率和前 1 h 出现 5 倍以上跃增后开始下降可能预示着 T2 型雷暴大风即将到来，WNDG 的“跃增（11.3 倍增幅）-骤降（5.87 倍降幅）”波形特征可作为 T2 型强雷暴大风临近预警指征。

关键词：雷暴大风，分级，环境参数，对比

Evolution of Environmental Parameters for Thunderstorm Gales of Different Intensities on the East Side of Yunnan-Guizhou Plateau

ZHOU Yongshui[1] GUO Jianping[2] YUAN Ye[3] ZHU Yulei[1] YU Yidan[1] REN Yuanliurui[1]

1 Guizhou Meteorological Observatory, Guiyang 550002

2 State Key Laboratory of Severe Weather Meteorological Science and Technology /Specialized Meteorological Support Technology Research Center, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

3 Guizhou Meteorological Service Center, Guiyang 550002

Abstract: Addressing the technical bottleneck in radar identification of thunderstorm gales due to the complex terrain and the radar quiet cone of the plateau, this paper integrates radar echo and surface wind observation data and constructs an intelligent identification model for thunderstorm gales. Combined with manual verification, a comprehensive sample dataset of thunderstorm gales in Guizhou from 2016 to 2023 is established. A three-tier

贵州省科技支撑计划(黔科合支撑[2023]一般 236)、国家自然科学基金项目(42465001)和 贵州省气象高层次人才创新团队项目(黔气科合 TD[2024]02 号)共同资助

第一作者：周永水，主要从事灾害性天气预报预警， Email:312404588@qq.com

通讯作者：郭建平，主要从事边界层气象和中小尺度天气研究，E-mail:jpguo@cma.gov.cn

《气象》待刊

classification system for thunderstorm gales is proposed: T0 (17.2–25 m·s^{-1}), T1 (25–33 m·s^{-1}), and T2 (≥33 m·s^{-1}). Through an in-depth mining of multi-dimensional environmental parameters, this paper reveals the climatic characteristics and precursor signals of different grades of thunderstorm gales, including the Significant Hail Parameter (SHIP), Energy Helicity Index (EHI), Lifting Condensation Level (LCL), Convective Inhibition (CIN), and the significant correlations between wind shear parameters and thunderstorm gales. From 6 h before the occurrence of T0 storms to the triggering moment, all environmental parameters change relatively slowly. For T1 storms, SHIP, WNDG and MULI reach their maximums (MULI to minimum) in 2-1 h prior to the storm initiation, and then decrease or rise slowly. The abrupt increase of WNDG can indicate the occurrence of T1-type thunderstorm gales. For T2 storms, indicators such as SHIP, EHI, MUCAPE, WNDG and MULI rapidly climb to their maximum values (MULI bottomed out) in 3-2 h before the storm initiation, followed by a slow decline or rise. When the hourly variation rates of SHIP, EHI, MUCAPE, MULI and WNDG surge more than five times compared with their variations in the previous hour and then begin to drop, these are the signals for the imminent arrival of T2-type thunderstorm gales. The waveform feature of "sharp increase (11.3-fold rise) followed by abrupt drop (5.87-fold fall)" of wind disaster index (WNDG) can be used as a nowcasting warning indicator for extreme T2-type thunderstorm gales.

Key words: thunderstorm gale, classification, environmental parameter, comparison

引言

雷暴大风是指由大气对流活动所导致的近地面风速达 17.2 m·s^{-1}(8 级) 以上的强阵风事件，主要由风暴的强下沉气流造成，有时还有冷池密度流和高空动量下传的作用（王秀明等，2013）。大部分雷暴大风由超级单体、飑线和弓状回波产生（崔新艳等，2025；李彩玲等，2021；盛杰等，2020），对流过程是雷暴大风的核心机制（罗辉等，2026）。此类天气通常维持时间短，破坏力强，常造成设施严重损毁和人员伤亡，给人民生产、生活带来严重影响。如 2015 年 6 月 1 日的“东方之星”沉船导致 400 多人遇难事件和 2016 年 6 月 23 日 98 人死亡、800 多人受伤的江苏盐城特大灾害就分别由下击暴流（郑永光等，2016a）和 EF4 级龙卷造成（郑永光等，2016b；张小玲等，2016）。贵州地区强雷暴大风发生频率相对较低（费海燕等，2016），但仍然时有较为极端的雷暴大风灾害天气影响，如 2021 年 9 月 18 日，贵州六枝特区牂牁镇因下击暴流导致沉船造成 13 人死亡、2 人失踪，瞬时风速达 11～13 级；2025 年 5 月 4 日，贵州毕节市黔西市新仁乡六冲河化屋码头水域因雷暴大风（最大风速 44.7 m·s^{-1}）造成 4 艘客船倾覆，导致 85 人落水，10 人遇难（贵州省应急厅，2026）。贵州地形复杂，海拔落差明显，强迫对流触发机制极不稳定，中尺度模式预报有较多的不确定性从而导致预报预警难度大，因此，研究高原地区雷暴大风的规律和环境参数前置变化特征有较大的社会效益和现实意义。

《气象》待刊

影响雷暴大风发生的要素为水汽、动力抬升和不稳定层结和风切变等条件，这些条件均可通过大气环境参数表征，Johns and Doswell(1992）提出了有利于雷暴内强烈下沉气流的环境条件：对流层中下层（500 hPa 以下）大气环境温度直减率较大，对流层中层（700～400 hPa）有明显干层。在中纬度地区，环境风垂直切变和大气热力不稳定度分别是影响对流风暴组织类型最重要的动力因子和热力因子（Parker and Johnson，2000；Weisman and Rotunno，2000；张建军等，2016）。层结稳定度指数也常被作为强对流天气的预报指标（Showalter，1953；Fuelberg and Biggar，1994；Madhulatha et al，2013；余蓉等，2016）。目前用于强对流天气分析预报的物理量已超过 100 种（刘健文等，2005），其中物理意义最清晰的是对流有效位能（CAPE）和对流抑制能量（CIN）（俞小鼎等，2006，2012），对于雷暴大风来说，下沉对流有效位能（DCAPE）也是较为重要的环境参数（费海燕等，2016；俞小鼎等，2020）。这些参数的计算一般是基于探空数据和 ERA5 资料（王秀等，2020；胡娟等，2015；许霖等，2017），全国探空站约为 120 个（俞小鼎等，2012），观测时间为 08 时、20 时（北京时，下同），时间和空间分辨率低，造成了对流参数与强对流天气之间在时空上的错位（曾明剑等，2015）。为了解决分辨率问题，研究人员利用模式探空的对流参数来分析和诊断强对流天气方面进行了较多的尝试（陈子通等，2006；李佳英等，2006；陈敏等，2011），均取得了较好的效果，但是模式探空往往受初始场和边界条件影响，并且会随着时间的外推误差逐步增大。欧洲中心第五代再分析资料（ERA5）提供了逐小时 0.25° ×0.25° 的基础变量和部分计算后环境参数数据，时空分辨率较高，ERA5 已被证明对对流环境相对更可靠（Algarni et al，2020；Huang et al，2021）。

另外，由于探空分辨率的问题，目前基于雷暴大风的强对流参数分析一般是选择接近雷暴大风天气时刻的数值作为参考（田付友等，2022），对于雷暴大风天气发生的前后时间段内的描述较少。研究表明，强对流天气发生 2～4 h 以前，热力指数和稳定度指数均有显著的变化（Madhulatha et al，2013；Chan，2009; Chan and Lee，2011），这种变化能更好地帮助预报员分析和判断强对流天气的发生。刘彬等(2022)曾提出了 6 h 变量的描述方法，但是对于 6 h 内的变化细节仍描述较少。针对雷暴大风的分级研究，费海燕等（2016）分析了 25 m·s^{-1} 以上雷暴大风的参数特征，但未对比极端雷暴大风和普通雷暴大风时的对流参数变化。马淑萍等（2019）将极端雷暴大风的风速定义为 30 m·s^{-1}，并开展了极端雷暴大风对流参数研究。本文将利用贵州国家级基准站和区域自动站大风数据和 ERA5 资料，将雷暴大风按照风速分级后分析对比雷暴大风发生前后的环境参数变化，以期发现影响雷暴大风发生的高敏感因子，为高原地区雷暴大风的预报提供参考。

《气象》待刊

1 资料处理及方法介绍

1.1 数据来源

雷暴大风分析首先要聚焦雷暴大风数据的收集整理，传统雷暴大风的收集分析仍然是以国家站为主，由于空间分辨率低，贵州位于云贵高原东侧，山地较多，在贵州（85 个国家站）等山地地区不能较好地代表全省的雷暴大风，且由于地形和雷达静锥区及馈源高度影响（官晓军等，2025），贵州大部分区域通过雷达观测到的大风离地面仍然有一定高度，雷达识别的大风不能完整代表地面大风。经过多年持续建设，贵州省已建有 85 个国家基本站及 825 个区域测风站，贵州地面大风主要分为雷暴大风、热低压大风和偏北大风，仅通过测站观测的风速数值来筛选雷暴大风易造成大风类型的混淆，通过雷暴大风算法质量控制识别，能够极大地增加雷暴大风研究的代表性和样本数量。

本文研究的大风数据来源于贵州省 85 个国家基本站及 [illegible] 个区域测风站，区域测风站中一级站 261 个，二级站 352 个，三级站 212 个。

1.2 雷暴大风客观质量控制方法

根据 85 个国家站的贵州大风和雷暴大风的气候统计，站点年大风日数最多为 19 d，11 月至次年 2 月无雷暴大风发生。考虑到部分区域站数据质量控制和贵州高山等地形因素的影响，对大风数据按以下规则作了初筛：（1）若某站大风年日数超过 60 d（国家站数据放大 3 倍），视为站点数据错误，予以剔除；（2）剔除了雷公山、梵净山等海拔明显高于周围地形且在无雷暴时持续出现大风的高山站数据；（3）若某日全省均无降水发生，则把该日的大风视为热低压大风剔除；（4）在雷暴大风发生频率较少的 11 月至次年 2 月，若某站单日发生大风超过 5 站次，则视为热低压大风或高山大风剔除。

在初筛基础上，本文使用了 2 种客观质量控制方法，一是参考中国气象局第八届全国气象行业天气预报职业技能竞赛智能预报技术方法单项检验方案基础上，将研究样本的雷暴大风定义为当某一站点极大风风速≥17.2 $m \cdot s^{-1}$，在以该大风站点为中心的 20 km 半径内，在出现大风前后 20 min 内出现闪电事件，处理为该站点的一次雷暴大风事件。二是综合考虑雷暴大风附近的雷达回波高度、回波强度、回波出现时间和回波距离、准确率、空报率等因子基础上，利用多元回归方法建立回归算法来识别雷暴大风事件，从图 1 可知，当使用不同强度的雷达回波识别雷暴大风时，选取的雷达回波和雷暴大风站点之间的距离阈值越大，识别命中率越高，当雷达回波距离雷暴大风站点在 10~15 km 时，识别命中率出现明显的跃增，回波强度取 45 dBz，识别距离选 15 km 时算法识别命中率为 92%。通过对热低压大风、

《气象》待刊

非雷暴天气时的高山站大风剔除的基础上，分别采用 2 种方法对 2021—2023 年的地面极大风开展雷暴大风算法识别，并和人工收集整理的同期雷暴大风进行对比。由表 1 可知，3 年内方法 1 识别到雷暴大风 859 站次，方法 2 为 1842 站次，基于雷达和自动站极大风判别雷暴大风在贵州地区命中率明显优于闪电和自动站极大风的识别方法。开展 2023 年 13 次雷暴大风过程验证（表略），基于雷达和自动站识别雷暴大风命中率可达 94%，空报率在 2%左右，这和模型整体识别命中率一致。因此本文选取了雷达回波加地面极大风的客观识别方法整理了 2016-2020 年雷暴大风数据，加上人工整理的 2021-2023 年雷暴大风数据，8 年共获得雷暴大风 3960 站次。

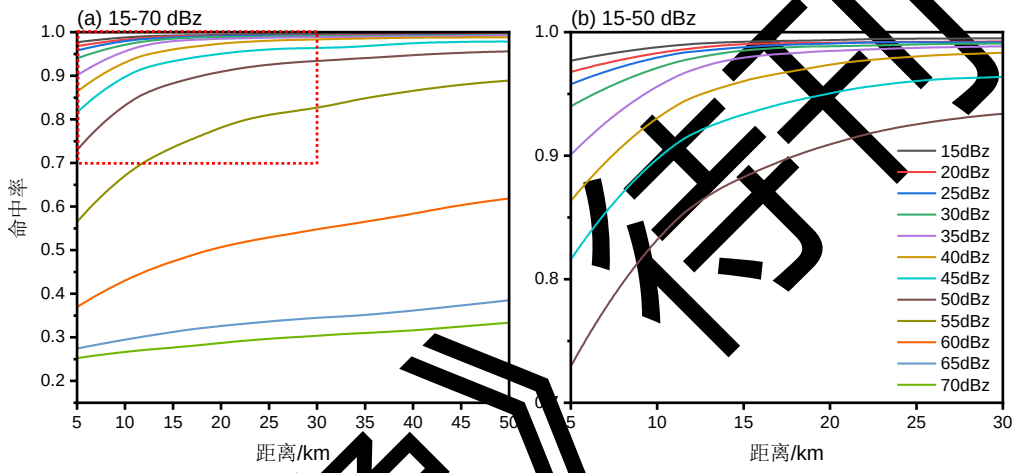


图 1 2021-2023 年回波强度为（a）15～70 dBz 和（b）15～50 dBz 时贵州雷暴大风识别命中率和距离关系

Fig. 1 Relationship between hit rate of thunderstorm gales and distance with radar echo intensifying from (a) 15 to 70 dBz and (b) 15 to 50 dBz from 2021-2023

表 1　2021—2023 年基于闪电和雷达回波（组合反射率）客观识别的雷暴大风数量对比

Table 1 Comparison of the numbers of thunderstorm gales identified by lightning and radar echoes (composite reflectivity) from 2021 to 2023

基于闪电识别的数量/ 站次	基于雷达回波识别的数量/ 站次	人工识别的数量/ 站次
859	1842	1960

1.3 基于 ERA5 数据的环境参数处理

利用 ERA5 再分析资料（逐小时，空间分辨率为 0.25° ×0.25° ），计算雷暴大风发生时刻及前后的环境参数，得到时间分辨率为 1 h，空间分辨率为 0.25° ×0.25° 的环境参数格点数据，根据 Chan（2009）、周永水等（2020）的研究结果，对流参数的最优表征距离为 30 km，由于格点数据分辨率约为 25 km，因此可保证雷暴大风站点数据和环境参数格点数据的适配，并利用最优距离法将格点数据插值到雷暴大风所在站点上。

《气象》待刊

基于雷暴形成的3个必要条件和业务工作经验（章国材，2011），综合考虑水汽、热力、动力和风切变等因素，本文在计算的85个对流参数中初步选取了K指数、从最不稳定层抬升的对流有效位能（MUCAPE）、从混合层抬升的对流有效位能（MLCAPE）、地面抬升的对流抑制能量（SBCIN）、下沉对流有效位能（DCAPE）、危险天气指数（SWEAT）、强致灾指数（SIG_SEVERE）、能量螺旋度指数（EHI）、强冰雹指数（SHIP），以及各层结的温度T、露点温度（T_d）、速度（uv），最不稳定层抬升的凝结高度（MULCL）、地面抬升的凝结高度（SBLCL）等环境参数进行特征分析。

2 雷暴大风的气候特征

2.1 空间分布

郑永光等（2015）把33 m·s^{-1}以上的雷暴大风定义为重大（Significant）强雷暴大风天气，美国定义的强雷暴大风为25 m·s^{-1}，本文把雷暴大风样本按照风速强度划分为3种类型（表2），风速为17.2 ～25 m·s^{-1}的T0型，风速为25～33 m·s^{-1}的T1型和风速≥33 m·s^{-1}的T2型雷暴大风。根据节2的选取方法，2016～2023年共筛选出雷暴大风3960站次，其中T0型3623站次，T1型290站次，T2型47站次。从其空间分布来看（图2），T0、T1型雷暴大风在全省均有发生，其中黔东南的东部和黔南南部地势较为平坦地区分布次数较少；T2型大风主要分布在贵州中部和西南部地区，贵州西北部和东南部没有T2型大风发生。贵州西北部地区在T0和T1型雷暴大风发生频率与其余地区无明显差异情况下，本次统计时段内没有T2型雷暴大风发生，可能和贵州西北部地区为乌蒙山，是贵州西部雷暴大风天气的源地（田芊和吴爱平，2020），雷暴大风天气系统在西北部地区初生时强度小于其东移到中东部地区后发展到成熟阶段时的强度，因此未出现T2型雷暴大风。

表2 基于10 m风速的3种不同的雷暴大风分类

Table 2 A three-tier classification system of thunderstorm gales based on 10 m wind speeds

类别	T0	T1	T2
风速/（m·s^{-1}）	17.2～25	25～33	≥33

《气象》待刊

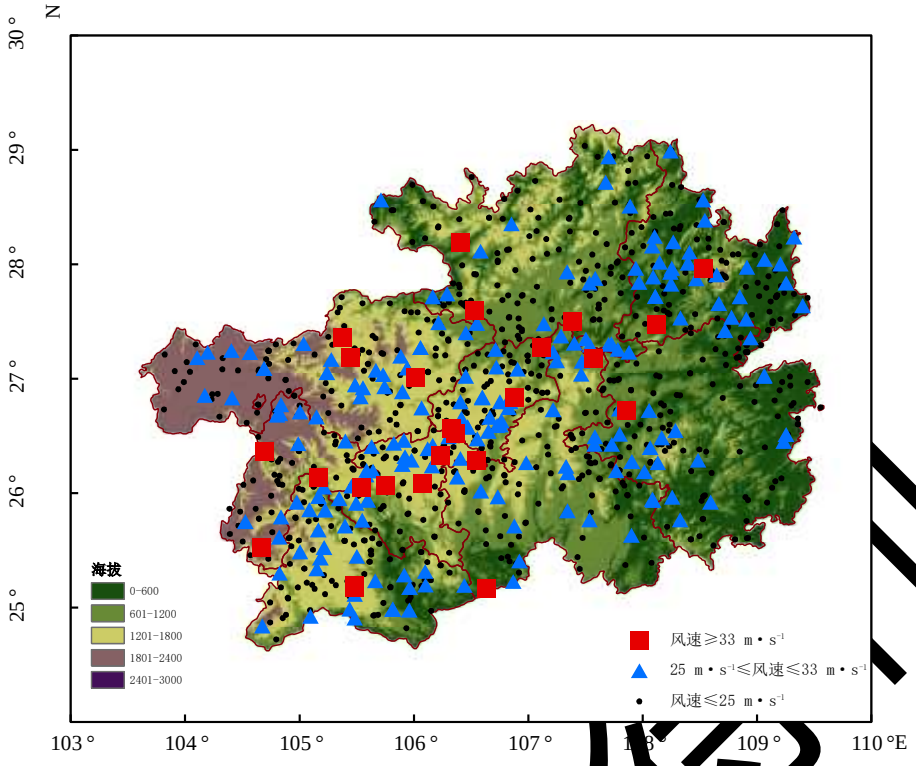


图 2 2016-2023 年贵州雷暴大风空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of thunderstorm gales in Guizhou from 2016 to 2023

2.2 时间分布

利用 3 类雷暴大风每个小时和每个月发生的次数，分别除以各自的样本总数，可得到三种类型雷暴大风相对频率的日变化（图 3a）和年变化（图 3b）特征。对于日变化来说，T0 型除 07 时（北京时，下同）分布频率为 0 外，其余时段均有发生，高发时段为 16-19 时，17 时频率最高；T1 型 05 时、07-12 时分布频率为 0，其余时段均有发生，高发时段为 16-20 时，每个时次频率占比均超过 10%；T2 型只发生在 16 时至次日 01 时，高发时段为 18-22 时，3 个时次频率占比 52.17%。3 种类型的雷暴大风的高发时段表明贵州雷暴大风主要发生在午后到夜间，T2 型的高发初始时段比 T1 和 T0 型滞后约 1～2 h，这可能和 T2 型雷暴大风发生时对不稳定能量的要求更高有关（费海燕等，2016）。由图 3b 可知，贵州地区 T0 和 T1 型雷暴大风主要发生在 3-10 月，共出现两个高峰，第一个高峰出现在 4-5 月，另一个出现在 8 月，3 个月的频率占比 80.79%。T2 型雷暴大风主要发生在 3-6 月，5 月最多，发生频率为 78.26%。

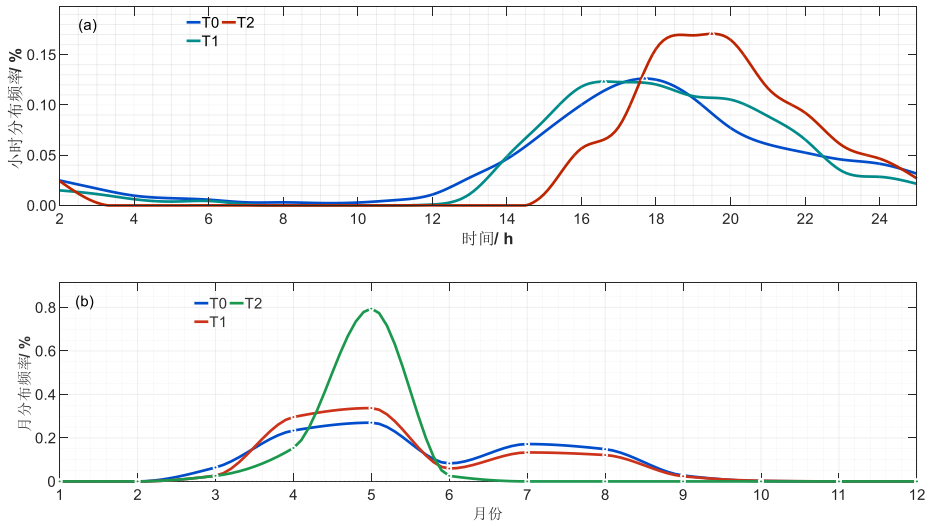


图 3 2016-2023 年贵州雷暴大风（a）日和（b）月分布频率

Fig. 3 (a) Hourly and (b) monthly distribution frequencies of thunderstorm gales in Guizhou from 2016 to 2023

3 大风对流参数特征分析

统计学中，箱线图能以简单的组合图形直观地反映较大容量样本的值分布情况和数据中隐含的结构信息，可通过分析数据的分布形状、排除异常数据点来进行数据之间的比较。本文将环境参数和 T0、T1、T2 型大风对应点分类并绘制箱线图。当环境参数在各类别箱线图的值域交集越少，说明对该类雷暴大风的预报指示性越好。通过计算各参数箱体交叉部分（值域交集）占面积较大箱体的比例，来确定在雷暴大风天气分析中有指示意义的环境参数，比例越大，指示性越差。由表 3 可知，K 指数、DCAPE、MUCAPE、MLCAPE、850 hPa 和 500 hPa 温度差（$T_{850-500}$）、700 hPa 露点温度（Td_{700}）、从最不稳定层抬升的凝结高度（MULCL）、从地面抬升的凝结高度（SBLCL）参数对于 T0—T1 型区分的指示性极弱（≥90%），部分参数（Td700、MULCL、SBLCL）随着风速增大对 T1—T2 型、T0—T2 型的指示性明显变好（≤50%），但 T1—T2 型、T0—T2 型两组之间的区分程度不明显，说明以上参数可主要用于区别 33 m·s^{-1} 以上的雷暴大风，近乎不可区分 17.2～33 m·s^{-1} 的雷暴大风。SBCIN、500 hPa 比湿（q_{500}）、500 hPa 风场（uv_{500}）、0～3 km 风暴相对螺旋度（SRH03）也类似，但对 T0—T1 型的指示性稍好。有效层入流风切变（EBWD）、SIG_SEVERE、SWEAT、强冰雹指数（SHIP）、500 hPa 西风分量（u_{500}）、边界层风切变（SHERB）、0～1 km 风暴相对螺旋度（SRH01）参数对于各类雷暴大风的指示性较好，T0—T1 型的值域交集比例均小于 80%，且风速差越大指示性越强，SHIP 对各类别雷暴大风的指示性最优。

表 3 两箱体交叉部分在大箱体中的百分比（单位：%）

Table 3 Percentages of the intersections of two boxes in the larger box (unit: %)

《气象》待刊

	环境参数	T0—T1	T1—T2	T0—T2
热力条件	DCAPE	90.6	67.0	65.4
	MUCAPE	92.7	78.0	82.4
	MLCAPE	97.6	89.2	89.9
	SBCIN	81.8	29.6	26.7
	$t_{850\text{-}500}$	92.6	59.2	62.7
	SIG_SEVERE	76.1	53.4	40.6
	K	88.2	56.7	50.0
	SWEAT	87.0	75.6	66.7
	EHI	94.7	51.3	52.9
	SHIP	75.0	50.0	35.7
水汽条件	q_{500}	88.0	61.4	54.0
	Td_{700}	92.9	43.6	40.5
抬升条件	uv_{500}	87.5	50.0	39.9
	$uv_{850\text{-}500}$	78.2	54.2	33.3
	MULCL	91.8	29.6	35.8
	SBLCL	91.0	41.1	39.9
	HERB	0	66.7	44.4
	SRH	81.6	61.3	50.0
	EBWD	80.0	63.8	48.5

3.1 动力抬升和风切变指数

风切变是强对流天气预报中一个必要条件（朱乾根等，2007），强的垂直风切变有利于对流组织化和斜升气流发展（张翠华等，2005；张琳娜等，2018）。本文的研究个例表明，0～6 km 垂直风切变比 0～1 km 和 0～3 km 垂直风切变对雷暴大风有更好的指示意义，T0、T1、T2 型雷暴大风研究样本中 0～6 km 垂直风切变中值依次为 10.1、13.9、17.9 $m \cdot s^{-1}$（图 4b），对应的 0～3 km 垂直风切变中值为 7.2、7.6、8.5 $m \cdot s^{-1}$（图 4c），0～1 km 为 0.8、0.9、0.75 $m \cdot s^{-1}$（图略），可以看出 3 类雷暴大风中 0～1 km、0～3 km 垂直风切变中值、下四分位值和上四分位值区分度较小，因此 0～6 km 垂直风切变可能是对雷暴大风更有指示意义的参数。有效层入流风切变引入了风暴厚度的概念，考虑了风暴底向上到风暴厚度的

《气象》待刊

50%高度（不得低于 300 hPa）之间的风切变，对雷暴大风也有较好的指示意义，3 类样本对应的 EBWD 中值是 21.1、28.6、40.1 m·s^{-1}（图 4e），上下四分位值分别是 34.2、39.7 和 52.65 m·s^{-1}，10.2、10.9 和 16.9 m·s^{-1}，当 EBWD 数值大于 34 时，发生 25 m·s^{-1}以上雷暴大风的概率较大，当 EBWD 数值大于 39.7 m·s^{-1}则发生 33 m·s^{-1}雷暴大风的概率较大。

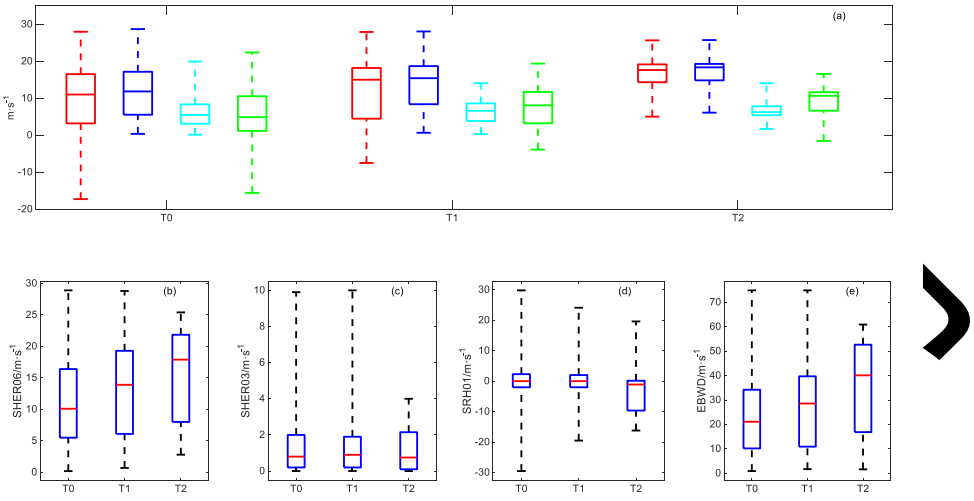


图 4 2016-2023 年 3 类雷暴大风时（a）u_{500}、uv_{500}、uv_{850}、$uv_{500-850}$和（b）0～6 km，（c）0～3 km，（d）0～1 km 风切变及（e）有效入流层风切变箱线图

Fig. 4 Boxplots of (a) u_{500}, uv_{500}, uv_{850} and $uv_{500-850}$, (b, c, d) wind shears of (b) 0-6 km, (c) 0-3 km and (d) 0-1 km, and (e) effective inflow layer wind shear during three types of thunderstorm gales from 2016 to 2023

在对流层中低层，雷暴系统后部的入流把中低层的经向动量倾斜向下输送是形成雷暴大风的原因之一（沈杭锋等，2019），因此雷暴大风的分析中除了分析垂直方向上风速差以外，中低层的风速大小也是要考虑的要素之一。气象预报业务中 500、700 和 850 hPa 的风场是分析的重点要素，由于贵州西部海拔高度超过 850hPa 所在高度，因此在风场的对比中剔除了贵州西部（25.3°～27.7° N，103.6°～105.6° E）的数据，从表 3 可以看出，500 hPa 和 850 hPa 的风速差（$uv_{500-850}$）对雷暴大风有较好的指示意义，T0、T1、T2 雷暴大风时 $uv_{500-850}$ 的下四分位值依次为 1.19、3.25、6.65 m·s^{-1}，中值为 4.90、8.10、10.67 m·s^{-1}，上四分位值为 10.56、11.73、10.65 m·s^{-1}（图 4a）；对应的 500 hPa 风速箱线图分别为 3.32、4.49、14.35 m·s^{-1}，11.02、15.03、17.65 m·s^{-1}，16.53、18.21、19.17 m·s^{-1}。由于 3 类雷暴大风在 850 hPa 高度上风速的中值及下四分位值相差较小（图 4a），由此可以认为在雷暴大风发生过程中，500 hPa 和 850 hPa 的风速差的变化主要是由于 500 hPa 的风速变化造成的，从风场的经纬向分量来看（图 4a），这种变化更多是由于经向风（西风分量）的变化引起。结合箱线图的值域交集来看，当 500 hPa 和 850 hPa 的风速差达到 10.56 m·s^{-1}

以上，500 hPa 风速超过 17.65 m·s^{-1}，发生 33 m·s^{-1}以上雷暴大风的概率较高。

抬升凝结高度(LCL)表示未饱和的湿气块被干绝热过程抬升至水汽饱和所需要的高度。本文研究发现，LCL 对雷暴大风有一定指示意义，从不同高度抬升计算的凝结高度中，MULCL 和 SBLCL 对 3 种雷暴大风有最好的区分度，从箱线图的值域交集占面积较大箱体的比例来看（表 3），3 类雷暴大风中 MULCL 分别为 91.8%、29.6%和 35.8%，SBLCL 为 91.0%、41.1%、39.9%。T0、T1、T2 型雷暴大风时 MULCL 上四分位值依次是 1065.4、1076、592 m，中值是 631.9、604.2、373 m，下四分位值是 328.05、388.23、227.20 m（图 5a）。SBLCL 对应的上四分位值为 1020.9、974.3、591.9 m，中值是 604.6、596.5、373.05 m，下四分位值是 307.6、324.68、227.20 m（图 5a）。从 LCL 在 3 种雷暴大风时的数值分布来看，当 LCL 越低时，发生 T2 型雷暴大风的概率较高，LCL 在 227～600 m 左右 T2 型雷暴大风发生的概率较大，600 m 以上则发生 T0 和 T1 型雷暴大风的概率较大。

3.2 热力条件

对流有效位能（CAPE）是强对流天气分析中较为重要的参考指数，它能够较好地反映对流潜势强度（方翀等，2017；张涛等，2013），下沉对流有效位能（DCAPE）则是雷暴大风分析中较为重要的参考指数，从箱线图分析来看（图 5b），T0、T1、T2 雷暴大风发生时 MUCAPE 上四分位值分别是 4434、4204、4926 J·kg^{-1}，中值是 3218、3315、4030 J·kg^{-1}，下四分位值是 2114、1941、2726 J·kg^{-1}。对应的 MLCAPE 的上四分位值为 3250、3234、3465 J·kg^{-1}，中值是 2255、2233、2823 J·kg^{-1}，下四分位值是 1295、1248、1333 J·kg^{-1}。3 类雷暴大风对应的 DCAPE 上四分位值是 1242、1238、1042 J/kg，中值是 910、893、755 J·kg，下四分位值是 668、602、546 J·kg^{-1}。3 类雷暴大风发生临近时刻 MUCAPE、MLCAPE 和 DCAPE 的上四分位值、中值和下四分位值基本一致，难以从这 3 个参数的数值来辨识雷暴大风级别。而 SBCIN 对应的 3 类雷暴大风时的上四分位值分别为 66、56.7、22.5 J·kg^{-1}，中值是 28.7、25、7.8 J·kg^{-1}，下四分位值是 6.7、8.1、3.4 J·kg^{-1}（图略），结合箱线图值域交集来看，SBCIN 数值对 T0 和 T2、T1 和 T2 型大风有较好的辨识度，对 T0 和 T1 型的辨识度也高于 MUCAPE、MLCAPE 和 DCAPE。

850 hPa 和 500 hPa 的温度差（$T_{850-500}$）也是天气业务中分析的重要指标，从箱线图来看（图 5c），3 类雷暴大风时 $T_{850-500}$的上四分位值依次为 28、27.8、30.2 ℃，中值和下四分位值为 25.4、25.6、26.4 ℃和 23.6、23.8、24.4 ℃，说明当 $T_{850-500}$数值达到 23.6℃以上时发生雷暴大风的概率较大，但是从 $T_{850-500}$的数值不能确定发生的雷暴大风的级别。

《气象》待刊

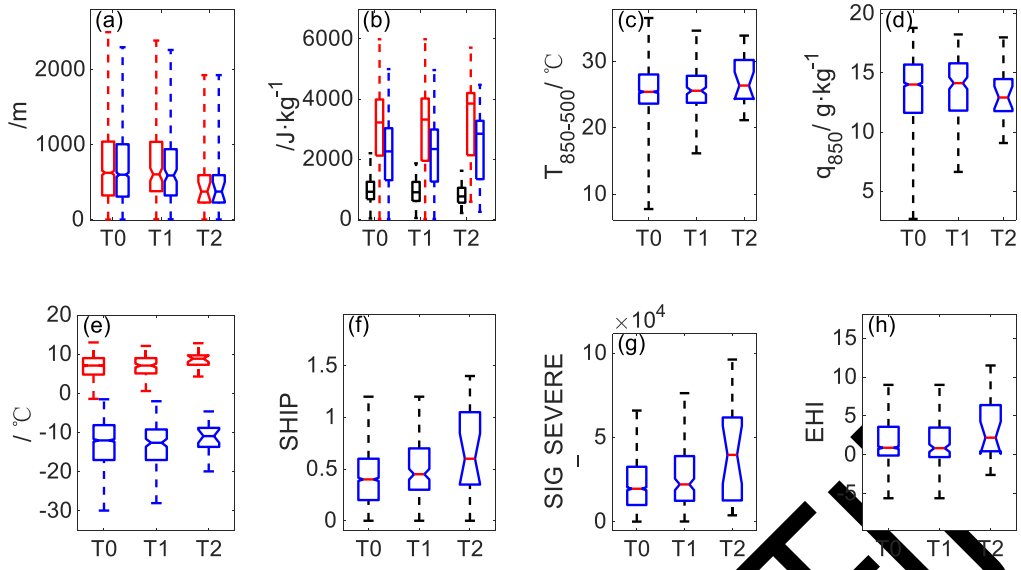


图 5 2016-2023 年 3 类雷暴大风时 (a)MULCL、SBLCL，(b)DCAPE、MUCAPE、MLCAPE，(c)$T_{850-500}$，(d)q_{850}，(e) Td_{700}，Td_{500}，(f)SHIP，(g)SIG_SEVERE，(h)EHI 箱线图

Fig. 4 Boxplots of (a)MULCL、SBLCL，(b) DCAPE、MUCAPE、MLCAPE，(c)$T_{850-500}$，(d)q_{850}，(e) Td_{700}，Td_{500}，(f)SHIP，(g)SIG_SEVERE，(h)EHI during three types of thunderstorm gales from 2016 to 2023

3.3 水汽条件

大气中 90%以上水汽在 500 hPa 以下，因此本文主要分析 500 hPa 以下特殊层的水汽状况，3 类雷暴大风时 500、700 和 850 hPa 的比湿并无明显差别（图略），其中，850 hPa 比湿在 T0、T1、T2 雷暴大风时上四分位值依次为 15.7、15.8、14.5 g·kg^{-1}，中值为 14、14.1、13 g·kg^{-1}，下四分位值为 11.8、11.8、11.7 g·kg^{-1}。露点温度也是表征水汽和水汽饱和度的参数之一，3 类雷暴大风 850 hPa 时露点温度的箱线图较为一致，在 700 hPa 和 500 hPa 箱线图上则有所差别，主要区别出现在 700 hPa 和 500 hPa 的下四分位值，T0、T1、T2 对应的 700 hPa 下四分位值为 4.8、5.1、7.3 ℃，500 hPa 下四分位值分别为-17、-17、-13.5 ℃，T2 型雷暴大风时 500 hPa 和 700 hPa 的露点温度明显高于另外 2 种雷暴大风同层次露点温度，在水汽相同的情况下，这可能表明 T2 型雷暴大风对大气层结中层的热力条件要求更高。对流层中层的干层通过加速水汽的蒸发形成气压差从而影响雷暴大风的强度，是发生雷暴大风的关键因子之一。相对湿度（RH）是表征大气干湿程度的重要物理量，本文通过 RH 从两个方面来查看 3 类雷暴大风干层情况，一是 RH 从 850 hPa 到 400 hPa 高度的 RH 平均值，此平均值在 3 类雷暴大风时的中值均在 65%左右，上下四分位值也较为接近；二是查看 850～400 hPa 高度 RH 小于 50%的大气厚度，三者中值为 4.36、4.42、4.85 km，上四分位值均为 5.9 km 左右，接近 850～400 hPa 大气厚度，将 RH 阈值从 50%调整为 40%、60%、

《气象》待刊

70%和均得到相似结果，结合 RH 均值表现特征，表明在本研究时空尺度下对流层中层的干层不属于雷暴大风分级判定的敏感因子。

3.4 其他参数

强冰雹指数（SHIP，https://www.spc.noaa.gov/exper/mesoanalysis/help/help_sigh.html)专门用于区分能够产生大冰雹和小冰雹的环境，SHIP 是 MUCAPE、最不稳定气块的水汽混合比、700～500 hPa 的温度递减率、0～6 km 风切变和 0℃层的非线性组合共同计算而来（Tang et al，2019）。从箱线图分析来看（图 5f），SHIP 对 3 类雷暴大风之间也有较好的区分度，3 类雷暴大风发生临近时刻 SHIP 中值依次为 0.4、0.45、0.6，下四分位值分别是 0.2、0.3、0.35，上四分位值分别是 0.6、0.7、1.1，这说明当 SHIP 超过 0.6 时发生 33 m·s^{-1}大风的概率较大。

强致灾指数（Significant Severe）和能量螺旋度指数（EHI）对 T2 型雷暴大风也有较好的指示(图 5g)，3 类雷暴大风时强致灾指数上四分位值分别是 [illegible]567、38 903、61 842，中值为 19 523、22 098、39 631，下四分位值分别是 9 86[illegible]、12 276、[illegible] 578，EHI 的上四分位值依次是 3.6、3.5、6.4，中值为 0.9、0.85、2.2，下四分位值分别是-0.1、-0.3、0.45（图 5h），说明当强致灾指数超过 39 000、EHI 大到 3.6 时发生 T2 型雷暴大风的概率大。

4 雷暴大风发生前后对流参数特征

除了雷暴大风发生时的对流参数特征外，雷暴大风发生前后对流参数的变化也能较好地判断是否发生雷暴大风，根据第 3 节的内容，选取在强对流天气时对比度较好的对流参数来查看其在强对流天气发生前后的表现特征。通过雷暴大风发生前后 6 h 的对流参数平均值和标准差来查看其特征变化可知（图 6），T2 型雷暴大风发生前后对流参数特征变化比其余两种更为明显，且标准差更小。不同级别雷暴大风发生前 3～6 h，MUCAPE、EHI、SHIP、WNDG（风灾指数）均呈现出缓慢上升的趋势，MUCAPE 从约 2800 J·kg^{-1}上升到 3200 J·kg^{-1}；T0 和 T1 型对应的 EHI 从 1.3 上升到 1.6，T2 型对应的 EHI 维持在 2.6；T0 和 T1 型对应的 SHIP 从 0.4 上升到 0.5，T2 型对应的 SHIP 从 0.45 上升到 0.55；T0 和 T1 型对应 WNDG 从 0.05 上升到 0.08，T2 型对应的 WNDG 从 0.02 上升到 0.06。雷暴大风发生前 0～3 h，不同级别雷暴大风对应参数变化较大，T0 和 T1 型对应的 MUCAPE 从 3200J·kg^{-1}缓慢上升到 3500 J·kg^{-1}，T2 型对应的 MUCAPE 1 h 内（-3～-2 h）从 3200 J·kg^{-1}剧烈上升到 4050 J·kg^{-1}，-2～0 h 缓慢下降到 3700J·kg^{-1}，T2 型雷暴大风发生后 MUCAPE 呈缓慢递减趋势，T0 和 T1 型雷暴大风发生后递减趋势不明显。雷暴大风前 0～3 h T0 和 T1 型对应的 EHI 上升到 2.0 左右，雷

《气象》待刊

暴大风后逐步下降，T2 型对应的 EHI 在雷暴大风前 2 h 达到最大值 3.52，雷暴大风前 1 h 内下降到 3.0 后逐步下降。雷暴大风前 0～3 h T0 型对应的 SHIP 无明显变化，T1 和 T2 型对应的 SHIP 在雷暴大风前 2 h 均达最大值，分别为 0.55 和 0.71，T1 型 SHIP 在雷暴大风前 1 h 开始下降，雷暴大风时为 0.51，T2 型 SHIP 在雷暴大风前 2 h 开始下降，雷暴大风时为 0.64，雷暴大风后 3 类雷暴大风 SHIP 均逐步下降。类似 EHI，雷暴大风前后 T0 型 WNDG 变化较小，T1 型 WNDG 在雷暴大风前 1 h 达最大 0.12，雷暴大风时降到 0.09，T2 型 WNDG 在雷暴大风前 2 h 达最大 0.24，雷暴大风时降到 0.06。

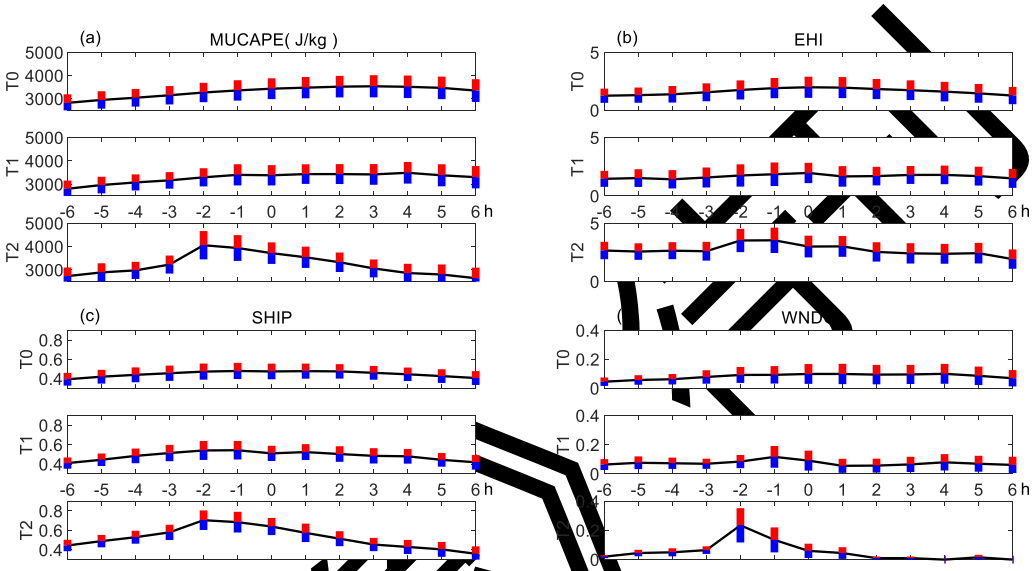


图 6 2016-2023 年 3 类雷暴大风发生前后 6 h（a）MUCAPE，（b）EHI，（c）SHIP，（d）WNDG 平均值及其标准差变化

Fig. 6 Changes of the average values and their standard deviations of (a) MUCAPE, (b) EHI, (c) SHIP, and (d) WNDG before and after 6 h of the occurrence of three types of thunderstorm gales from 2016 to 2023

图 7 选取了 SHEAR03、SHEAR06、MULI 和 SBLCL 4 个参数对比了不同类型雷暴大风发生前后参数变化，SHEAR03 在 3 类雷暴大风发生前后呈总体上升趋势，SHEAR06、SBLCL 呈总体下降趋势，3 类雷暴大风的下降趋势无明显差异，T0 和 T1 型 MULI 在雷暴大风前逐步下降，雷暴大风后缓慢上升，T2 型 MULI 雷暴大风前 2 h 下降到最小值-8.4 后缓慢上升，雷暴大风时为-7.9。对比 T2 型 SHEAR03 和 SHEAR06 的变化，雷暴大风前 0～3 h SHEAR03 是缓慢上升而 SHEAR06 是缓慢下降，表明 3 km 高度左右的风速增强幅度大于 6 km 高度处增幅。

从参数小时变化速率来看，T1 型雷暴大风发生前部分环境参数变化速率有一定的上升，-6～-3 h 到-3～-2 h，SHIP 从 0.03/ h 变为 0.05/ h，变化幅度为 1.67 倍，WNDG 从-6～-2 h 的 0.006/ h 上升至-2～-1 h 的 0.032/ h，变化幅度为 5.33 倍。T2 型雷暴大风时，MUCAPE、

SHIP、EHI、MUCAPE、MULI、WNDG 环境参数变化曲线是-6～-3 h 缓慢上升，-3～-2 h 显著上升，然后是-2～0 h 的下降，3 个阶段具体小时变化速率为 MUCAPE：167～850～-165 J·kg^{-1}，SHIP：0.03～0.16～-0.032，WNDG：0.015～0.17～-0.088，EHI：-0.02～0.92～-0.26，MULI：-0.16～-1.05～0.27，把-6～-3 h 的平均小时变化速率作为对比，以上参数在-3～-2 h 均有 5 倍以上的小时变化幅度，-2～0 h 变化速率中 WNDG 最大达到-6～-3 h 的 5.87 倍，其余参数变化较小。因此当 SHIP、WNDG 的变化曲线和前一个小时出现显著区别时，发生 T1 型以上级别雷暴大风的概率较大，WNDG 的跃增（5 倍以上小时增幅）可能预示着 T1 型雷暴大风的发生；而 SHIP、EHI、MUCAPE、MULI、WNDG 变化速率和前一个小时出现 5 倍以上跃增后开始下降，特别是 WNDG 跃增（11.3 倍）后骤降（5.87 倍降幅）可能预示着 T2 型雷暴大风即将到来。而 T0 型各类对流参数在雷暴大风前无明显变化。

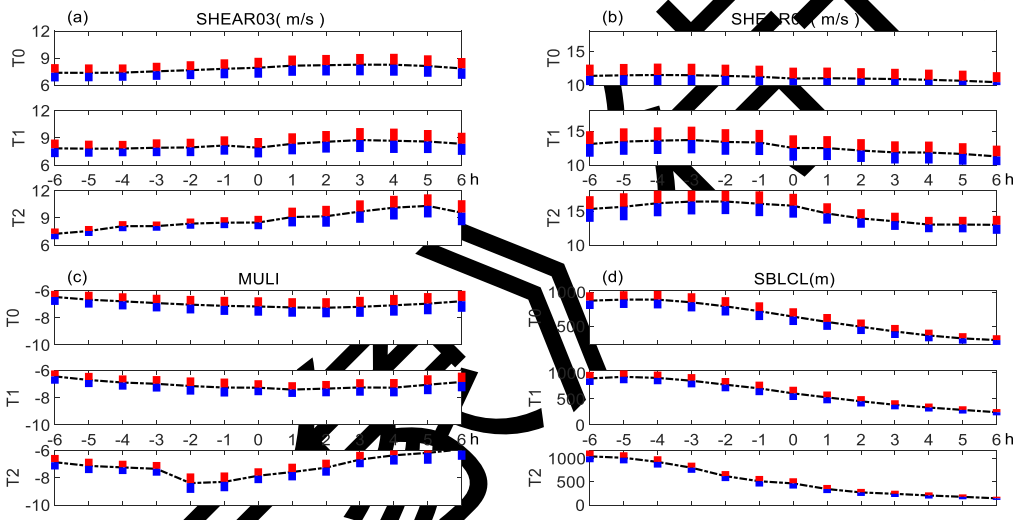


图 7 2016-2023 年 3 类雷暴大风发生前后 6 h

（a）SHEAR03，（b）SHEAR06，（c）MULI，（d）SBLCL 平均值及其标准差变化

Fig. 7 Changes of the average values and their standard deviations of (a) SHEAR03, (b) SHEAR06, (c) MULI, and (d) SBLCL before and after 6 h of the occurrence of three types of thunderstorm gales from 2016 to 2023

5 结论

本文基于闪电、雷达回波和区域站大风数据，对贵州地区雷暴大风的客观识别方法、气候特征及相关对流参数演变进行了系统研究，主要结论如下：

（1）基于 2016-2023 年雷暴大风数据集，将雷暴大风划分为 T0、T1、T2 3 种类型并分析时空分布：空间上，T0、T1 型全省均有分布，T2 型集中于贵州中部和西南部；月分布上，T0、T1 型高发于 4-5 月、8 月，T2 型集中于 3-6 月（5 月频次最高）；日变化上，

T0 型高发时段为 16-19 时（17 时最高），T1 型为 16-20 时，T2 型为 18-22 时（仅 16 时至次日 01 时发生），其高发初始时段较前两者滞后约 1～2 h，这可能与不稳定能量需求更高相关。

（2）对流参数分析显示：动力参数中，有效入流层风切变、0～6 km 垂直风切变对雷暴大风指示性好，主要由经向风（西风分量）变化引起，抬升凝结高度在 227～600 m 时 T2 型雷暴大风发生概率大。热力参数中，CAPE、DCAPE、MUCAPE、MLCAPE 不能有效区分 3 类雷暴大风，SBCIN 有一定区分能力，$T_{850-500}$ ≥23.6℃时雷暴大风发生概率大。综合参数中，SHIP、EHI、SIG_SEVERE 指示性好，SHIP＞0.6 时易发生 T1 型以上雷暴大风，强致灾指数＞39 000、EHI≥3.6 时 T2 型雷暴大风发生概率显著上升。

（3）从雷暴大风发生前对流参数变化来看，在 T0 型风暴发生前 6 h 至触发时刻所有环境参数变化较为平缓，T1 型风暴时 SHIP、WNDG 和 MULI 在风暴前 6～2 h 变化较为平缓，风暴前 1～2 h 迅速增至最大值（MULI 达最小值）后缓慢下降（上升），WNDG 的跃增（5 倍增幅）可能预示着 T1 型雷暴大风的发生；SHIP、EHI、MUCAPE、WNDG、MULI 等指标在 T2 型风暴前 2～3 h 迅速增至最大值（MULI 达最小值）后缓慢下降（上升），SHIP、EHI、MUCAPE、MULI、WNDG h 变化速率和前一个小时出现 3 倍以上跃增后开始下降可能预示着 T2 型雷暴大风即将到来，风灾指数（WNDG）相邻一时刻的“跃增（11.3 倍增幅）-骤降（5.87 倍降幅）”波形特征可作为 T2 型极端雷暴大风的临灾预警指征。

参考文献

陈敏, 范水勇, 郑祚芳, 等, 2011. 基于 BJ-RUC 系统的临近探空及其对强对流发生潜势预报的指示性能初探[J]. 气象学报, 69(1): 181-194. Chen M, Fan S Y, Zheng Z F, et al, 2011. The performance of the proximity sounding based on the BJ-RUC system and its preliminary implementation in the convective potential forecast[J]. Acta Meteor Sin, 69(1): 181-194 (in Chinese).

陈子通, 牛淑贞, 苏翼宏, 2006. 模式探空的评估分析及其在强对流天气预报中的应用研究[J]. 大气科学, 30(2): 235-247. Chen Z T, Yan J Z, Su Y C, 2006. Research on assessment of model-generated sounding and application in forecasting strong convective weather[J]. Chin J Atmos Sci, 30(2): 235-247 (in Chinese).

崔新艳, 陈明轩, 秦睿, 等, 2025. 雷暴大风形成机理和临近预报的研究进展[J]. 气象, 51(7): 773-788. Cui X Y, Chen M X, Qin R, et al, 2025. Research advances in the formation mechanisms and nowcasting of thunderstorm gales[J]. Meteor Mon, 51(7): 773-788 (in Chinese).

方翀, 王西贵, 盛杰, 等, 2017. 华北地区雷暴大风的时空分布及物理量统计特征分析[J]. 高原气象, 36(5): 1368-1385.Fang C, Wang X G, Sheng J, et al, 2017, Temporal and Spatial Distribution of North China Thunder-gust Winds and the Statistical Analysis of Physical Characteristics[J]. Plateau Meteorology, 36(5): 1368-1385.

费海燕, 王秀明, 周小刚, 等, 2016. 中国强雷暴大风的气候特征和环境参数分析[J]. 气象, 42(12): 1513-1521. Fei H Y, Wang X M, Zhou X G, et al, 2016. Climatic characteristics and environmental parameters of severe thunderstorm gales in China[J]. Meteor Mon, 42(12): 1513-1521 (in Chinese).

官晓军, 戚友存, 江颖, 等, 2025. 基于雷达观测的福建转折性降雪垂直特征分析[J]. 大气科学, 49(3): 711-726. Guan X J, Qi Y C, Jiang Y, et al, 2025. Analysis of vertical characteristics of a transitional snow event in Fujian based on weather radars[J]. Chin J Atmos Sci, 49(3): 711-726 (in Chinese).

《气象》待刊

贵州省应急厅, 2026. 贵州毕节“5·4”客船倾覆事件调查报告[R/OL]. http://yjgl.guizhou.gov.cn/yjzhxxwmh/zs/dcbg_5851285/202602/t20260204_89372051.html. Department of Emergency Management of Guizhou Province, 2026. Investigation Report on the "5 • 4" Passenger Ship Capsizing Incident in Bijie, Guizhou [R/OL]. http://yjgl.guizhou.gov.cn/yjzhxxwmh/zs/dcbg_5851285/202602/t20260204_89372051.html

胡娟, 李华宏, 李湘, 等, 2015. 云南对流性大风天气的潜势预报及雷达回波特征[J]. 气象科技, 43(6): 1074-1084. Hu J, Li H H, Li X, et al, 2015. Radar echo characteristics and potential prediction of convective gale in Yunnan Province[J]. Meteor Sci Technol, 43(6): 1074-1084 (in Chinese).

李彩玲, 蔡康龙, 黄先香, 等, 2021. 桂林一次强下击暴流成因分析[J]. 气象, 47(2): 242-252. Li C L, Cai K L, Huang X X, et al, 2021. Cause analysis of a severe downburst in Guilin[J]. Meteor Mon, 47(2): 242-252 (in Chinese).

李佳英, 俞小鼎, 王迎春, 2006. 用探空资料检验中尺度数值模式对强对流天气的诊断分析能力[J]. 气象, 32(7): 13-17. Li J Y, Yu X D, Wang Y C, 2006. Evaluation of convective parameters derived from mesoscale numerical model by sounding data[J]. Meteor Mon, 32(7): 13-17 (in Chinese).

刘彬, 邹灵宇, 李晓鹏, 等, 2022. 云南雷暴大风天气的环境条件特征分析[J]. 气象, 48(11): 1402-1417. Liu B, Zou L Y, Li X P, et al, 2022. Analysis on environmental characteristics of thunderstorm gales in Yunnan[J]. Meteor Mon, 48(11): 1402-1417 (in Chinese).

刘健文, 郭虎, 李耀东, 等, 2005. 天气分析预报物理量计算基础[M]. 北京: 气象出版社. Liu J W, Guo H, Li Y D, et al, 2005. Calculations of the Weather Analysis and Forecasting Parameters[M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese).

罗辉, 杨康权, 向筱铭, 等, 2026. 基于机器学习的四川盆地雷暴大风格点预警[J]. 气象, 52(3): 325-336. Luo H, Yang K Q, Xiang X M, et al, 2026. Machine learning-based grid-point warning of thunderstorm gale in Sichuan Basin[J]. Meteor Mon, 52(3): 325-336.

马淑萍, 王秀明, 俞小鼎, 2019. 极端雷暴大风的环境参量特征[J]. 应用气象学报, 30(3): 292-301. Ma S P, Wang X M, Yu X D, 2019. Environmental parameter characteristics of severe wind with extreme thunderstorms[J]. J Appl Meteor Sci, 30(3): 292-301 (in Chinese).

沈杭锋, 方桃妮, 蓝俊倩, 等, 2019. 一次强飑线过程的极端大风成因中尺度分析[J]. 气象学报, 77(5): 806-822. Shen H F, Fang T N, Lan J Q, et al, 2019. Mesoscale analysis of the extremely damaging gale in a severe squall line[J]. Acta Meteor Sin, 77(5): 806-822 (in Chinese).

盛杰, 郑永光, 沈新勇, 2020. 华北两类产生极端天气的线状对流系统分布特征与环境条件[J]. 气象学报, 78(6): 877-898. Sheng J, Zheng Y G, Shen X Y, 2020. Climatology and environmental conditions of two types of quasi-linear convective systems with extremely intense weather in North China[J]. Acta Meteor Sin, 78(6): 877-898 (in Chinese).

田付友, 张小玲, 曹艳察, 等, 2022. 中国中东部地区三类强对流天气环境条件的基本气候特征[J]. 高原气象, 41(6): 1446-1459. Tian F Y, Zhang X L, Cao Y C, et al, 2022. Baseline climatology of environmental parameters for three severe convective weather phenomena over middle-low areas of China[J]. Plateau Meteor, 41(6): 1446-1459 (in Chinese).

田英, 吴爱萍, 2009. 贵州境内冰雹发生源地初探[J]. 贵州气象, 33(S1): 51-53. Tian Y, Wu A P, 2009. Preliminary study on hail-forming source in Guizhou province[J]. Guizhou Meteor, 33(S1): 51-53 (in Chinese).

王黉, 李英, 宋连春, 等, 2020. 川藏地区雷暴大风活动特征和环境因子对比[J]. 应用气象学报, 31(4): 435-446. Wang H, Li Y, Song L L, et al, 2020. Comparison of characteristics and environmental factors of thunderstorm gales over the Sichuan-Tibet Region[J]. J Appl Meteor Sci, 31(4): 435-446 (in Chinese).

王秀明, 周小刚, 俞小鼎, 2013. 雷暴大风环境特征及其对风暴结构影响的对比研究[J]. 气象学报, 71(5): 839-852. Wang X M, Zhou X G, Yu X D, 2013. Comparative study of environmental characteristics of a windstorm and their impacts on storm structures[J]. Acta Meteor Sin, 71(5): 839-852 (in Chinese).

许霖, 姚蓉, 王晓雷, 等, 2017. 湖南省雷暴大风的时空分布和变化特征[J]. 高原气象, 36(4): 993-1000. Xu L, Yao R, Wang X L, et al, 2017. Study of temporal-spatial distribution and variation characteristics of thunderstorm gales in Hunan[J]. Plateau Meteor, 36(4): 993-1000 (in Chinese).

余蓉, 杜牧云, 杜九三, 等, 2016. 基于多对流参数的武汉地区雷电活动预报方法研究[J]. 气象科技, 44(2): 269-274. Yu R, Du M Y, Du J S,, et al, 2016. Methods of lightning forecast in Wuhan based on convective indexes[J]. Meteor Sci Technol, 44(2): 269-274 (in Chinese).

《气象》待刊

俞小鼎，姚秀萍，熊庭南，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 Applications of Doppler Weather Radar[M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese).

俞小鼎，周小刚，王秀明. 2012. 雷暴与强对流临近天气预报技术进展[J].. 气象学报, 70(3): 311-337. Yu X D, Zhou X G, Wang X M. 2012. The advances in the nowcasting techniques on thunderstorms and severe convection. Acta Meteorologica Sinica, 70(3): 311-337.

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. Thunder-storm and Severe Convection Nowcasting[M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese).曾明剑，张备，吴海英，等, 2015. 基于接近度概念的强对流天气预报方法研究[J]. 高原气象, 34(5): 1357-1368. Zeng M J, Zhang B, Wu H Y, et al, 2015. Study on severe convective weather forecast method based on approach concept[J]. Plateau Meteor, 34(5): 1357-1368 (in Chinese).

张翠华，言穆弘，董万胜，等, 2005. 青藏高原雷暴天气层结特征分析[J]. 高原气象, 24(5): 741-747. Zhang C H, Yan M H, Dong W S, et al, 2005. Analyses on atmospheric stratification characteristics of thunderstorms over Qinghai-Xizang Plateau[J]. Plateau Meteor, 24(5): 741-747 (in Chinese).

章国材，2011. 强对流天气分析与预报[M]. 北京：气象出版社. Zhang G C, 2011. Strong convective weather analysis and forecasting [M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese).

张建军，王咏青，钟玮, 2016. 飑线组织化过程对环境垂直风切变和水汽的响应[J]. 大气科学, 40(4): 689-702. Zhang J J, Wang Y Q, Zhong W, 2016. Impact of vertical wind shear and moisture on the organization of squall lines[J]. Chin J Atmos Sci, 40(4): 689-702 (in Chinese).

张琳娜，冉令坤，李娜，等, 2018. 雷暴大风过程中对流层中低层动量通量和动能通量输送特征研究[J]. 大气科学, 42(1): 178-191. Zhang L N, Ran L K, Li N, et al, 2018. Analysis of momentum flux and kinetic energy flux transport in the middle and lower troposphere during a thunderstorm event[J]. Chin J Atmos Sci, 42(1): 178-191 (in Chinese).

张涛，蓝渝，毛冬艳，等, 2013. 国家级中尺度天气分析业务技术进展I: 对流天气环境分析业务技术规范的改进与产品集成系统支撑技术[J]. 气象, 39(7): 894-900. Zhang T, Lan Y, Mao D Y, et al, 2013. Advances of mesoscale convective weather analysis in NMCI: Convective weather environment analysis and supporting technique[J]. Meteor Mon, 39(7): 894-900 (in Chinese).

张小玲，杨波，朱文剑，等, 2016. 2016年6月23日江苏阜宁EF4级龙卷天气分析[J]. 气象, 42(11): 1304-1314. Zhang X L, Yang B, Zhu W J, et al, 2016. Analysis of the EF4 Tornado in Funing County, Jiangsu Province on 23 June 2016[J]. Meteor Mon, 42(11): 1304-1314 (in Chinese).

郑永光，田付友，孟智勇，等, 2016a. 台风“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, 2016a. 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]. Meteor Mon, 42(1): 1-13 (in Chinese).

郑永光，朱文剑，刘鸣彬，等, 2016b. 风速等级划分准则与2016年6月23日阜宁龙卷强度估计[J]. 气象, 42(11): 1289-1303. Zheng Y G, Zhu W J, Liu M B, et al, 2016b. Wind speed scales and rating of the intensity of the 23 June 2016 Tornado in Funing County, Jiangsu province[J]. Meteor Mon, 42(11): 1289-1303 (in Chinese).

郑永光，周康辉，盛杰，等，2015. 强对流天气监测预报预警技术进展. 应用气象学报, 26(6): 641-657.Zheng Y G, Zhou K H, Sheng J, et al, 2015. Advances in techniques of monitoring, forecasting and warning of severe convective weather. J Appl Meteor Sci, 26(6): 641-657 (in Chinese).

周永水，原野，万雪丽, 2020. 复杂山地环境下雷暴天气中的地基微波辐射计影响距离分析[J]. 热带气象学报, 36(2): 199-207. Zhou Y S, Yuan Y, Wan X L, 2020. Analysis of effective detection distance of ground-based microwave radiometer in thunderstorm weather in complex mountainous terrains[J]. J Trop Meteor, 36(2): 199-207 (in Chinese).

朱乾根，林锦瑞，寿绍文，等, 2007. 天气学原理和方法:第三版[M]. 北京：气象出版社: 434-435.Zhu Q G,Lin J R,Shou S W,et al,2007.Principles and Methods of Synoptic[M].3th ed.Beijing:China Meteorological Press:329-331(in Chinese).

Alghamdi A S, 2020. Evaluation of four reanalysis datasets against radiosonde over southwest Asia[J]. Atmosphere, 11(4): 402.

Chan P W, 2009. Performance and application of a multi-wavelength, ground-based microwave radiometer in intense convective weather[J]. Meteorol Z, 18(3): 253-265.

《气象》待刊

Chan P W, Lee Y F, 2011. Application of a ground-based, multi-channel microwave radiometer to the alerting of low-level windshear at an airport[J]. Meteorol Z, 20(4): 423-429.

Fuelberg H E, Biggar D G, 1994. The preconvective environment of summer thunderstorms over the florida panhandle[J]. Wea Forecasting, 9(3): 316-326.

Huang J, Yin J F, Wang M Z, et al, 2021. Evaluation of five reanalysis products with radiosonde observations over the Central Taklimakan Desert during summer[J]. Earth Space Sci, 8(5): e2021EA001707.

Johns R H, Doswell C A III, 1992. Severe local storms forecasting[J]. Wea Forecasting, 7(4): 588-612.

Madhulatha A, Rajeevan M, Ratnam M V, et al, 2013. Nowcasting severe convective activity over southeast India using ground-based microwave radiometer observations[J]. J Geophys Res: Atmos, 118(1): 1-13.

Parker M D, Johnson R H, 2000. Organizational modes of midlatitude mesoscale convective systems[J]. Mon Wea Rev, 128(10): 3413-3436.

Showalter A K, 1953. A stability index for thunderstorm forecasting[J]. Bull Amer Meteor Soc, 34(6): 250-252.

Tang B H, Gensini V A, Homeyer C R, 2019. Trends in United States large hail environments and observations[J]. NPJ Clim Atmos Sci, 2(1): 45.

Weisman M L, Rotunno R, 2000. The use of vertical wind shear versus helicity in interpreting supercell dynamics[J]. J Atmos Sci, 57(9): 1452-1472.

《气象》待刊