

曹倩, 郭建平, 孙玉萍, 等, 2024. 2015—2023 年江西雷暴大风特征分析[J]. 气象, 50(12):1495-1508. Cao Q, Guo J P, Sun Y P, et al, 2024. Analysis on the characteristics of thunderstorm gale in Jiangxi Province during 2015—2023[J]. Meteor Mon, 50(12):1495-1508(in Chinese).

2015—2023 年江西雷暴大风特征分析*

曹倩^{1,2,4} 郭建平³ 孙玉萍³ 雷星宇⁵ 薛谔彬^{1,2,4}

1 江西省气象科学研究所, 南昌 330096

2 气候变化风险与气象灾害防御江西省重点实验室, 南昌 330096

3 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

4 华东区域相控阵天气雷达应用联合实验室, 上海 200030

5 南昌市气象局, 南昌 330096

提 要: 利用江西 2015—2023 年区域自动气象观测站地面逐小时观测资料、地闪资料以及天气雷达资料, 给出了江西雷暴大风的总体时空分布特征, 结合 ERA5 再分析资料, 分析雷暴大风发生前的大气环境特征。结果表明: 江西雷暴大风集中出现在春夏季, 雷暴大风的季节变化有明显的南北差异, 表现为江西中北部春季雷暴大风发生的频数仅略多于夏季, 而江西南部夏季雷暴大风发生的频数超过春季的 2 倍。雷暴大风呈现明显的日变化, 其发生最密集时段为 14—20 时(北京时间), 江西中北部傍晚至夜间雷暴大风发生频率远高于江西南部。江西雷暴大风发生前的热力、动力和水汽特征存在显著时空差异。在同一季节江西中北部的动力作用总体强于江西南部, 而南部热力和水汽作用要强于中北部; 夏季热力和水汽作用强于春季, 春季动力作用强于夏季; 不同时段雷暴大风发生所需要的对流不稳定能量有差异, 但均在不稳定层结环境中, 午后雷暴大风多发生在较小垂直风切变环境中, 而深夜时段则多发生在强垂直风切变环境中, 此外白天上下干湿结构比夜间显著。因此, 按季节分区域、分时段设定环境参数阈值, 对于雷暴大风预报预警的指导意义更大。江西中北部春季当 0~6 km 垂直风切变(Shear6)分布于 30~33 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 即使最佳对流有效位能(MUCAPE)仅介于 0~500 $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和大气可降水量(PW)介于 43~48 mm, 仍要警惕雷暴大风的发生。夏季预报雷暴大风时需关注 MUCAPE 和 PW, 尤其江西南部雷暴大风更集中发生在很弱的中层垂直风切变环境中, 当 $\text{PW} > 60 \text{ mm}$ 、 $\text{MUCAPE} > 1500 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 即使 Shear6 分布在 5~8 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 仍需考虑雷暴大风的发生。任何区域在不同季节, PW 的增加对雷暴大风的发生都很重要, 需重点关注其变化。

关键词: 江西, 雷暴大风, 时空分布, 环境参数

中图分类号: P446

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.101501

Analysis on the Characteristics of Thunderstorm Gale in Jiangxi Province During 2015—2023

CAO Qian^{1,2,4} GUO Jianping³ SUN Yuping³ LEI Xingyu⁵ XUE Chenbin^{1,2,4}

1 Jiangxi Institute of Meteorological Science, Nanchang 330096

2 Key Laboratory of Climate Change Risk and Meteorological Disaster Prevention of Jiangxi Province, Nanchang 330096

3 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

4 East China Phased Array Weather Radar Application Joint Laboratory, Shanghai 200030

5 Nanchang Meteorological Bureau, Nanchang 330096

Abstract: The spatio-temporal distribution of thunderstorm gales (TGs) in Jiangxi is comprehensively

* 国家自然科学基金委气象联合基金项目(U2142209)、江西省气象局重点项目(JX2022Z07)和江西省气象科学研究所自筹经费科研项目共同资助

2024 年 6 月 14 日收稿; 2024 年 10 月 15 日收修定稿

第一作者: 曹倩, 主要从事强对流天气预警预报研究. E-mail: qcao2014@lzu.edu.cn

通讯作者: 郭建平, 主要从事边界层气象和对流触发机制研究. E-mail: jgguo@cma.gov.cn

analyzed based on hourly observation data of automatic weather stations, cloud-to-ground lightning observations and weather radar data in Jiangxi Province from 2015 to 2023. The ERA5 reanalysis data are further used to investigate the atmospheric environment before the onset of TGs. The results show that the TGs in Jiangxi occur mainly in spring and summer, with significant seasonal variations and differences in the north-central part and the south. The frequency of TGs occurring in spring is only slightly higher than in summer in north-central Jiangxi, but the frequency of TGs in summer is more than twice of that in spring in the south of Jiangxi. TGs have obvious diurnal variation with the highest occurrence frequency from 14:00 BT to 20:00 BT. The frequency of TGs from evening into night in north-central Jiangxi is much higher than in the southern part. The thermodynamic, dynamic and water vapor characteristics of TGs are significantly different in spatio-temporal distributions. In the same season, the dynamic effect is generally stronger in north-central Jiangxi than in the southern part, while the thermodynamic and water vapor effects are stronger in the south than in north-central part. The thermodynamic and water vapor effects are stronger in summer than in spring, but the dynamic effect in spring is stronger. The convective instability energy required for TGs varies by time periods, but all occur under unstable conditions. TGs occur more frequently under low vertical wind shear in the afternoon and also in the deep night with strong vertical wind shear conditions. Besides, the upper-level dry and low-level wet structure in the daytime is more pronounced than at night. Therefore, it is crucial to set ambient parameter thresholds by season, region and time period, in order to provide more accurate guidance on TGs forecast and warning. When 0—6 km vertical wind shear (Shear6) is large enough and distributed in the range of 30—33 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ in spring in north-central Jiangxi, it is imperative to be alert to the advent of TGs even if most unstable convective available potential energy (MUCAPE) is only in the range of 0—500 $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ and precipitable water (PW) only in the range of 43—48 mm. To accurately forecast the occurrence of TGs in summer, it is essential to pay attention to the MUCAPE and PW, and especially in the south of Jiangxi, TGs tend to occur with higher frequency under weak mid-level vertical wind shear. When $\text{PW} > 60$ mm and $\text{MUCAPE} > 1500$ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$, even though Shear6 is minimal and confined to a range of 5—8 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, it is necessary to contemplate the potential for TGs. The increase of water vapor is important for the occurrence of TGs in different regions during different seasons. Therefore, changes in PW should be focused on in the operation of forecasting TGs.

Key words: Jiangxi Province, thunderstorm gale, spatio-temporal distribution, ambient parameter

引 言

雷暴大风是由大气对流引起的地面以及近地面瞬时风速大于 $17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的强风事件, 主要由对流风暴的强下沉气流造成, 有时伴随高空水平动量下传导致地面辐散风增强、冷池出流以及地面暖湿入流受到上升气流的抽吸作用加速导致的大风(王秀明等, 2013; 俞小鼎等, 2020)。雷暴大风具有发生频率高、持续时间短、破坏力强且预报预警难度大等特点, 其产生的环境条件、触发机制一直是强对流灾害性天气研究的重要内容之一。

早在 20 世纪 50 年代 Fujita(1959) 研究认为, 雷暴大风是由于上升气流中凝结的冰晶和水滴在下

降过程中产生拖曳作用以及融化、蒸发吸收潜热使大气冷却作用引起的, 冲上云顶的气流也能够转化为下沉气流。Hookings(1965) 通过研究表明, 强雷暴大风能出现在液态水含量较大、水滴尺度较小以及下沉气流源地湿度较低的环境条件中。Johns and Doswell III(1992) 提出, 对流层中层存在明显干层以及对流层中下层环境温度直减率较大有利于对流风暴强下沉气流出现。美国区域性雷暴大风常发生在极端不稳定和中低层水平风垂直切变大, 以及低层高湿的环境中(Evans and Doswell III, 2001; Coniglio et al, 2004)。

大量关于中国雷暴大风时空分布特征的研究表明, 我国雷暴大风具有空间分布特征差异较大的特点(费海燕等, 2016; 方翀等, 2017; Yang et al, 2017;

陈晓欣等,2022;田付友等,2022);而雷暴大风季节分布特征较相似,多出现于暖季(柴东红等,2017;王黄等,2020;刘彬等,2022;高帆等,2023)。具体到日变化尺度,多数地区雷暴大风集中出现在午后到傍晚(许霖等,2017;樊李苗和俞小鼎,2020;韦惠红等,2022;刘彬等,2022)。许多学者利用再分析资料,针对不同区域雷暴大风的环境参数开展大量相关研究,王黄等(2020)对川藏高原和盆地雷暴大风的环境因子进行对比发现,高原气象站雷暴大风的中低层环境温度递减率较大,一般呈上湿下干的逆湿垂直结构;而盆地气象站雷暴大风通常具有上干下湿的垂直结构。方翀等(2017)统计分析华北低海拔和高海拔地区雷暴大风的环境物理参数表明,多种常用的热力指标等对雷暴大风预报都有一定的指示性,但需考虑季节因素,且每种参数对于雷暴大风是否发生、范围大小及海拔高度的指示均不尽相同。许霖等(2017)统计分析了湖南典型气象站的动力和热力参数,发现热力不稳定条件、动力条件在湖南东西部、南北部存在区别。柴东红等(2017)研究指出京津冀地区雷暴大风的形成,在 5 月和 9 月需要更高的热力条件和动力条件,在 6—8 月需要更高的不稳定条件和能量条件。刘彬等(2022)统计分析了云南雷暴大风的动力、热力及水汽条件参数,发现春季以动力作用为主,夏季以热力作用为主。这些研究表明雷暴大风气候特征及发生机理有显著的季节性和地域性特征,因此对于不同区域均需要精细的观测资料进行深入研究才能得到更准确的结果。

江西位于长江以南的亚热带季风气候区,每年都有多次雷暴大风天气发生,给人民生命财产带来巨大损失。开展雷暴大风天气的研究,对于江西气象防灾减灾工作具有重要意义。以往对于江西雷暴大风的研究,主要是对单个或者多个雷暴大风过程的分析(陈云辉等,2019;夏文梅等,2021;徐瑾薇等,2023),而专门针对江西雷暴大风时空分布及环境参数的研究鲜见。江西东南西三面环山,南部多为海拔高度较高的山区,中北部外高内低,多为海拔较低的盆地。由于江西南北地形差异较大,不同区域的雷暴大风发生发展的环境条件不完全一致,其发生的环境特征还有待研究。本文利用 2015—2023 年区域自动气象观测站(以下简称气象站)地面逐小时观测资料、地闪资料、雷达资料和 ERA5 再分析资料,统计对比江西南部和中北部雷暴大风的时空分布和雷暴大风发生前的环境参数,揭示不同区域在不同时段和不同季节雷暴大风的特征,并尝试归纳

环境参数阈值,为提高江西雷暴大风潜势预报提供参考。

1 数据来源与方法

本研究所用资料为:江西 2015—2023 年区域自动气象观测站地面逐小时观测资料、闪电定位系统监测的地闪资料、雷达资料和 ERA5 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 逐小时再分析资料。

雷暴大风天气常伴有活跃的闪电(Yang and Sun,2014),参照杨波等(2019)和刘彬等(2022)的方法,选取地面某时次气象站出现极大风速 $\geq 17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的大风事件,且在大风附近 0.25° 半径范围内测得 $> 35 \text{ dBz}$ 雷达回波,且前后 1 h 内站点附近 0.25° 范围内监测到 2 次及以上非孤立闪电活动,则将该站点该时次计为一个雷暴大风样本。统计分析雷暴大风的时空分布特征时,参照 Yang et al (2017) 将样本进行 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 格点化处理,格点化规则为:以每个格点为圆心统计 0.25° 范围内出现雷暴大风的样本数,为减少站点分布不均对统计结果的影响,对出现雷暴大风的所有站点也按照 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 进行格点化处理,即统计每个格点 0.25° 范围内的站点数。将每个格点 0.25° 范围的雷暴大风的样本总数和站点总数相除,由此计算出雷暴大风的时空分布,计算公式如式(1)所示:

$$\text{Num} = \frac{\sum \text{NT}}{\text{NS}} \quad (1)$$

式中:NS、NT 分别为以格点为圆心半径范围 0.25° 内气象站点总数及各个气象站出现的雷暴大风样本数,Num 为计算得到的每个格点雷暴大风数。

物理量参数选取方面,根据对流参数的物理意义,利用 ERA5 再分析资料计算挑选出的物理量参数。在分析物理量特征时,时间上选取雷暴大风发生前最近时次的,空间上选取距离最近格点的,计算得到表征雷暴大风发生前的环境参数。

文中地图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2019)3082 号的标准地图绘制,底图无修改。

2 雷暴大风的时空分布特征

江西 2015—2023 年雷暴大风的样本数共 16374 个,发生在 1238 个气象站。将 9 年的样本按年度分类统计(图 1)。2022 年样本数最多(2678 个),占总

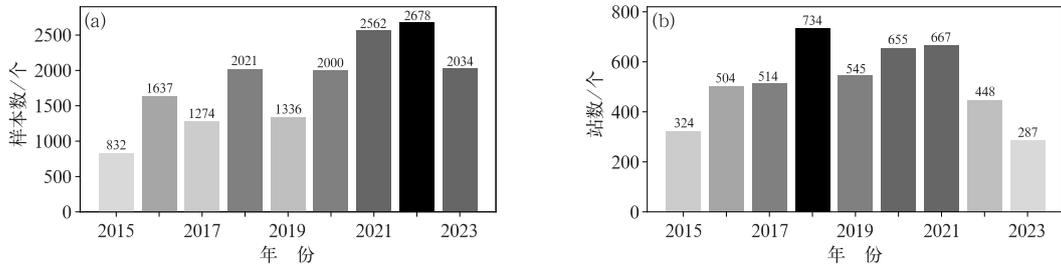


图 1 2015—2023 年江西雷暴大风事件(a)发生样本数和(b)发生的气象站数年际变化

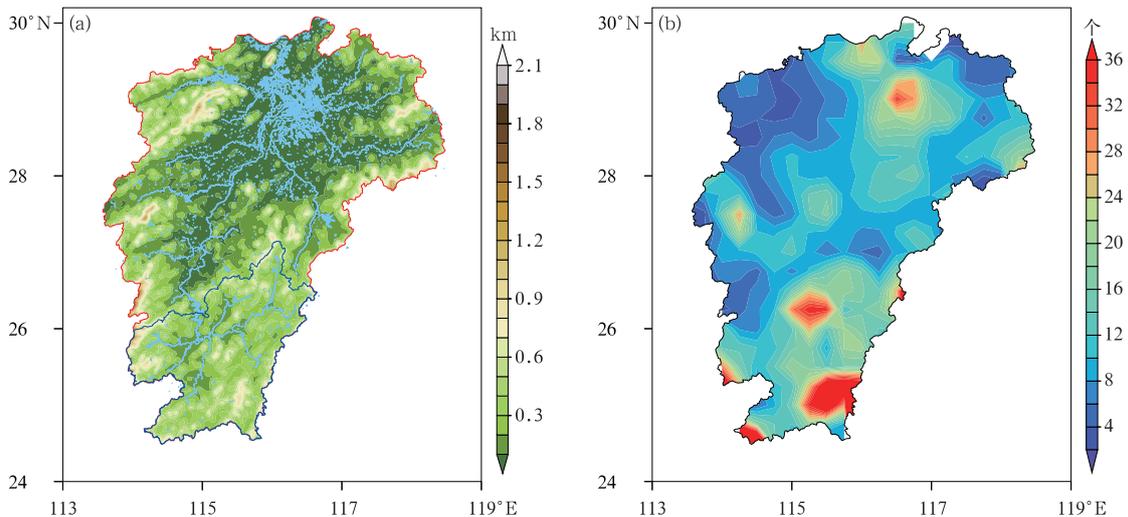
Fig. 1 (a) Sample number of thunderstorm gale events and (b) the interannual variation of the number of meteorological stations with thunderstorm gales in Jiangxi during 2015—2023

数的 16.3%，发生在 448 个气象站。2015 年样本数最少(832 个)，仅占总数的 5.1%，发生在 324 个气象站。雷暴大风样本数在其他 7 年中为 1274~2562 个，发生的气象站数为 287~734 个。这表明雷暴大风事件的频数和位置有明显的年变化。

研究期间，共 701 个气象站的雷暴大风年平均发生次数小于 1 次，只有 74 个站点每年发生了 4 次及以上的雷暴大风，这些站点主要位于江西南部 and 鄱阳湖区域。总体而言，大多数站点每年发生的雷暴大风事件少于 1 次。图 2 为江西海拔高度和雷暴大风频数的空间分布，由图可知，江西雷暴大风空间分布不均匀，多发于南部山区附近，鄱阳湖及其周边的盆地也相对多发，武功山附近也有一个小的高发区，江西北部的幕阜山、九岭山、罗霄山脉和玉山等

山脉附近少发。总体来看，江西南部的雷暴大风高频区明显多于江西中北部。付超等(2019)研究发现江西暖季短时强降水高频区主要分布在山地区及河谷附近，分别为湘赣交界罗霄山脉东侧、武夷山西侧、信江河谷、乐安河谷和昌江河谷，鄱阳湖附近不是短时强降水的多发区。对比发现，江西暖季雷暴大风高频区与短时强降水分布不一致。因此，雷暴大风和短时强降水发生相关性不大。

对比江西雷暴大风在不同季节空间分布(图略)，雷暴大风多发于春夏季，江西中北部雷暴大风发生频数在春夏季差异不显著，而江西南部夏季雷暴大风发生频数较春季有明显增多，可见江西南北区域雷暴大风的季节特征有差异。基于此并综合考虑地形、行政区划和气候带，下文将江西分为南



注:图 a 蓝色线内为江西南部,红色线内为江西中北部,浅蓝色区域为江西水系。

图 2 (a)江西海拔高度图,(b)2015—2023 年江西雷暴大风总频数空间分布
Fig. 2 (a) Altitude map of Jiangxi, and (b) spatial distribution of the total occurrence frequency of thunderstorm gales in Jiangxi during 2015—2023

部、中北部两个区域,分析不同区域内雷暴大风的特征。

由图 3a 可看出 2015—2023 年江西雷暴大风发生频数月分布呈双峰结构,雷暴大风集中出现在春夏季(3—8 月),峰值出现在 5 月和 7 月。相关研究(Yang et al,2017;韦惠红等,2022)也有类似结果。由表 1 可知,江西雷暴大风 41.9%发生在春天(3—5 月),52.7%发生在夏天(6—8 月),仅有 0.5%发生在冬天,且基本发生在 2 月。江西中北部雷暴大风频数的月分布都呈双峰结构,峰值出现在 5 月,7 月次之。江西南部月分布呈现单峰结构,3—7 月逐月递增,8 月开始减少。由表 1 可见,江西中北部雷暴大风在春季和夏季发生的比例分别为 50.8%和 45.7%,春季略多于夏季;然而在江西南部,春季和夏季分别占 30.0%和 61.2%,夏季为春季的 2 倍。Yang et al(2017)研究结果显示,整个江西的雷暴大风发生频数都是春季明显少于夏季。本文研究结果与其不一致,部分原因可能是本研究使用了空间分辨率更高的 2000 多个区域自动气象观测站数据,而 Yang et al(2017)仅使用了江西 93 个国家气象站的数据;也可能与统计年限不一致相关,本研究为 2015—2023 年,而 Yang et al(2017)是 2010—2014 年。

由 2015—2023 年江西雷暴大风发生频数日分

布曲线(图 3b)以及逐 6 h 空间分布(图 4)可知,整个区域发生雷暴大风的高频时段是 14—20 时(北京时间,下同),集中出现于 16—18 时,峰值出现在 17 时,这与许霖等(2017)、韦惠红等(2022)、刘彬等(2022)的研究结果相似。午后随着地面温度升高,对流有效位能(CAPE)增大,雷暴大风开始多发。四个时段 08—14 时、14—20 时、20 时至次日 02 时、02—08 时(下文四个时段均为此顺序)的雷暴大风发生高频区域都类似,均为江西南部、鄱阳湖和武功山附近,其中 08—20 时江西南部大部分区域雷暴大风发生频数高于江西中北部,而在 02—08 时江西中北部的鄱阳湖及武功山附近区域发生频数高于江西南部。具体来看(表 2),江西中北部和江西南部雷暴大风发生在 14—20 时的比例最高,分别为 57.3%和 64.2%。其中江西南部发生频数高时段为 08—14 时,而江西中北部发生频数次高时段为 20 时至次日 02 时。江西中北部发生频数有 28.5%出现在 20 时至次日 08 时,而江西南部仅有 19.0%。江西中北部傍晚至夜间雷暴大风发生频数较江西南部高很多,与王簧等(2020)研究结果一致,均为盆地夜间更活跃。这可能与盆地夜间的云顶辐射冷却可引起对流不稳定有关(Yin et al,2009)。

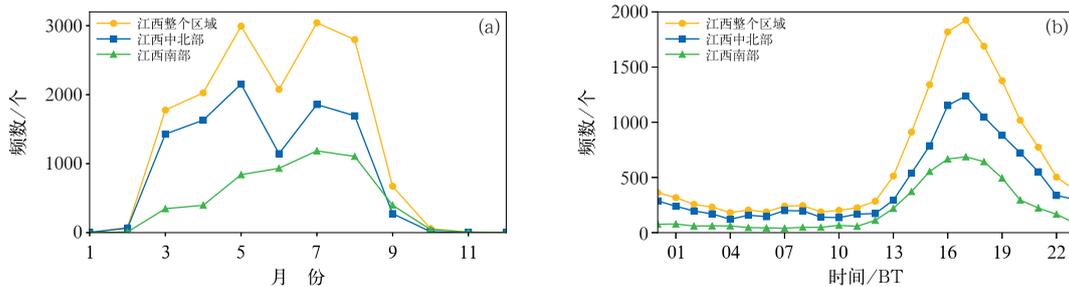


图 3 2015—2023 年江西整个区域、江西中北部和江西南部雷暴大风发生频数的(a)月分布和(b)日分布

Fig. 3 (a) Monthly and (b) daily frequencies of thunderstorm gales in the whole region of Jiangxi, the north-central Jiangxi and the southern Jiangxi during 2015—2023

表 1 2015—2023 年江西雷暴大风发生频数在不同区域不同季节占全年的比例(单位:%)

Table 1 Proportion of thunderstorm gales in different regions and seasons to that of the whole year in Jiangxi during 2015—2023 (unit: %)

区域	春	夏	秋	冬
江西整个区域	41.9	52.7	4.9	0.5
江西中北部	50.8	45.7	2.8	0.7
江西南部	30.0	61.2	8.5	0.3

3 环境参数的统计分析

由于雷暴大风多发生于春夏季,下文重点分析发生在春夏季雷暴大风的基本条件。本节对雷暴大风发生前的大气热力、动力和水汽的部分环境参数进行统计分析,对比不同区域在不同季节和不同时

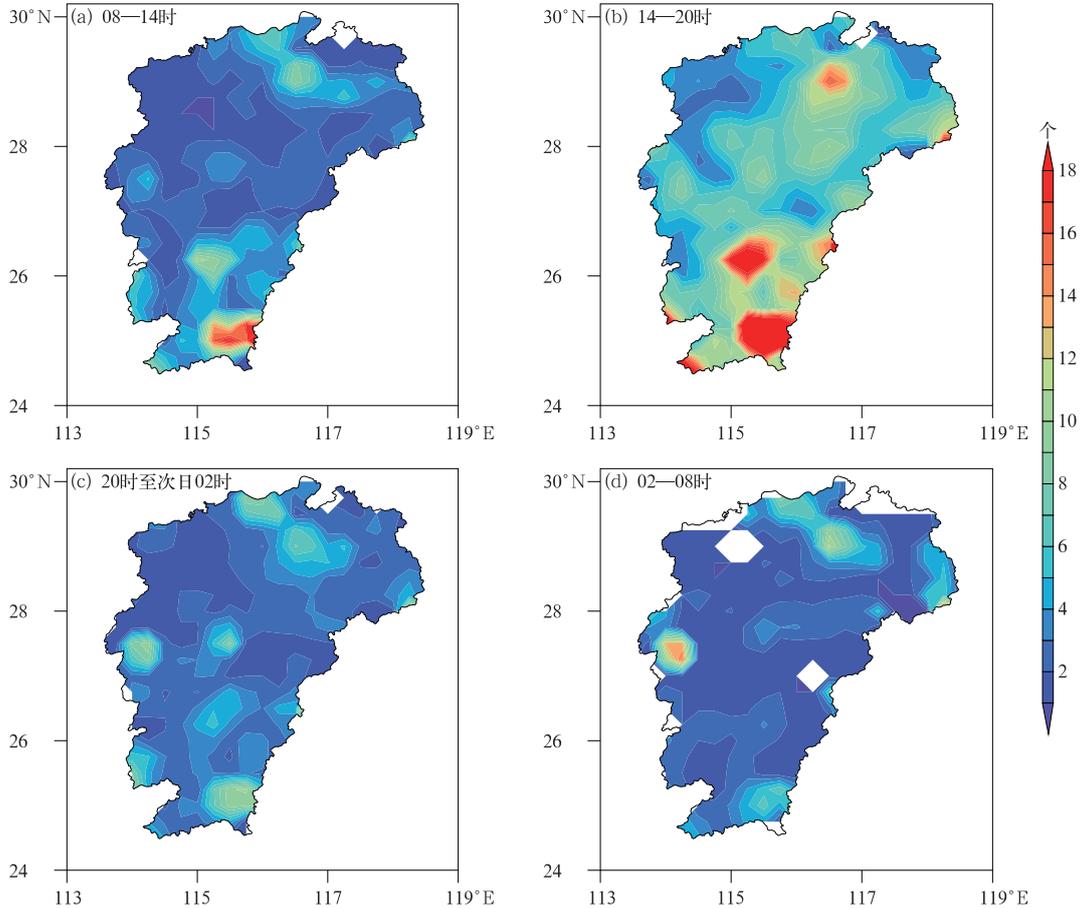


图 4 2015—2023 年江西雷暴大风不同时段发生频数空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of the occurrence frequency of thunderstorm gales in different time periods in Jiangxi during 2015–2023

表 2 2015—2023 年江西雷暴大风发生频数在不同区域不同时段占全天的比例(单位: %)

Table 2 Proportion of thunderstorm gales in difference periods in different regions to that of the whole day in Jiangxi during 2015–2023 (unit: %)

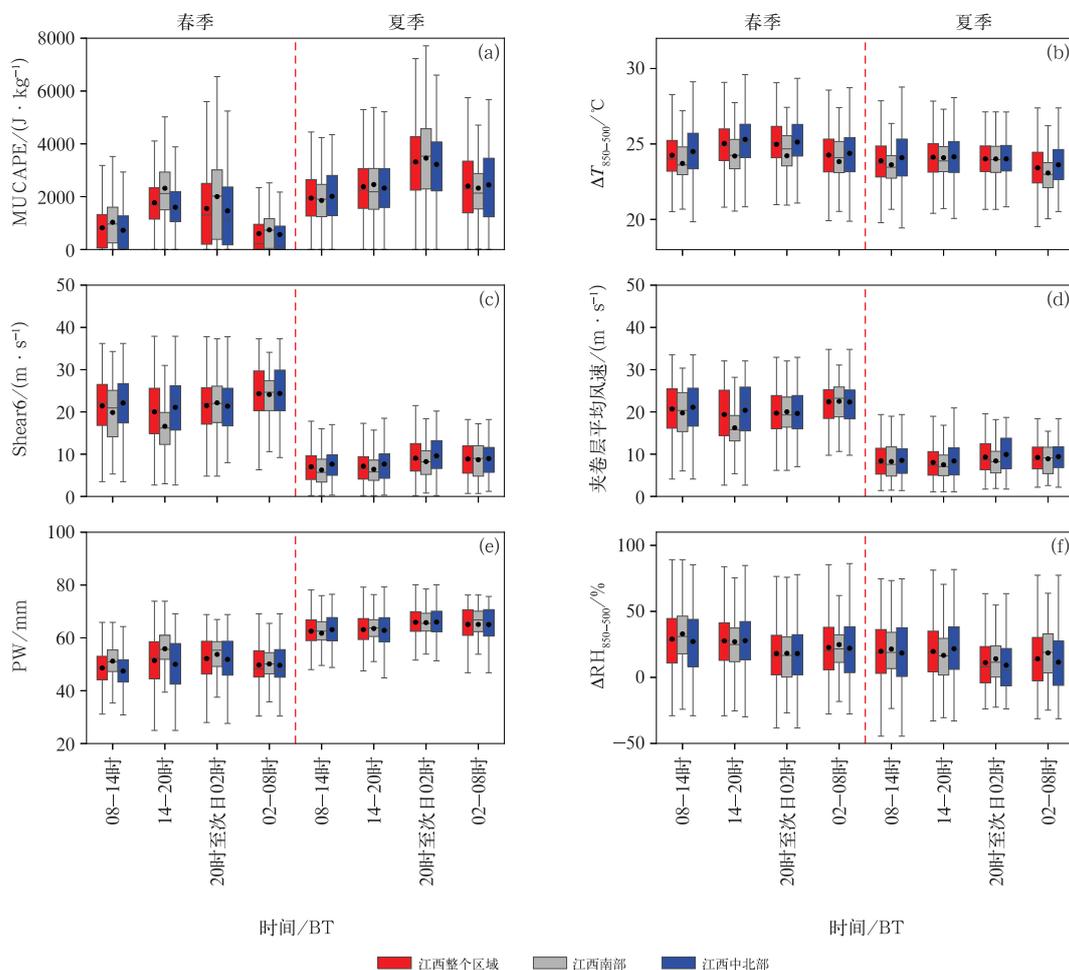
区域	08—14 时	14—20 时	20 时至次日 02 时	02—08 时
江西整个区域	15.1	59.6	17.0	8.4
江西中北部	14.2	57.3	18.8	9.7
江西南部	16.8	64.2	13.3	5.7

段,雷暴大风发生前的大气环境条件的差异。表征热力条件的参数包括最佳对流有效位能(MUCAPE)、850 hPa 与 500 hPa 的温度差($\Delta T_{850-500}$),表征动力条件的参数为 0~6 km 垂直风切变(Shear6)、夹卷层平均风速(700、500、400 hPa 三层的平均风速),表征水汽条件的参数包括大气可降水量(PW)、850 hPa 与 500 hPa 相对湿度差($\Delta RH_{850-500}$)。

3.1 热力参数

MUCAPE 是单位质量气块从最不稳定层到平

衡高度做功所产生的动能,可以表征大气极端不稳定状况,能够有效地区分强对流天气(Ma et al., 2021),也可以减小雷暴大风漏报概率(叶爱芬等, 2006)。如图 5a 所示,任何区域在四个时段,夏季雷暴大风频数的各分位数均明显大于春季,江西南部雷暴大风发生前 MUCAPE 相比江西中北部偏大。其中江西北部在夏季四个时段的 25%分位数分别为 1282.2、1587.2、2220.7、1238.7 $J \cdot kg^{-1}$,春季 75%分位数分别为 1275.7、2192.2、2367.6、885.5 $J \cdot kg^{-1}$;江西南部在夏季四个时段的 25%分位数分别



注:箱体最上端、最下端的短横线分别表示第 95%及 5%分位数,长方形的上下两端分别表示第 75%及 25%分位数,中间的横线表示中位数,下同。

图 5 2015—2023 年江西整个区域、江西中北部和江西南部雷暴大风发生前热力、动力和水汽参数箱线图

(a) MUCAPE, (b) $\Delta T_{850-500}$, (c) Shear6, (d) 夹卷层平均风速, (e) PW, (f) $\Delta RH_{850-500}$

Fig. 5 Box plots of thermodynamic, dynamic and water vapor parameters before thunderstorm gale events in the whole region of Jiangxi, the north-central Jiangxi and the southern Jiangxi during 2015—2023

(a) MUCAPE, (b) $\Delta T_{850-500}$, (c) Shear6, (d) average wind speed in entrainment zone, (e) PW, (f) $\Delta RH_{850-500}$

为 1244. 3、1522. 6、2292. 0、1535. 7 J · kg⁻¹, 春季 75%分位数分别为 1601. 7、2933. 0、3013. 9、1168. 9 J · kg⁻¹。可以看出春季的 75%分位数与夏季的 25%分位数差距不明显,尤其在 02—08 时春季的 75%分位数显著小于夏季的 25%分位数;因此,就 MUCAPE 而言,春季和夏季雷暴大风发生前区分度很大,不同时段差异也很显著。CAPE 对抬升气块的湿度和温度都较敏感,特别是露点温度(王秀明等,2012)。由于夏季地面的温度以及露点温度整体比春季高,这使得夏季雷暴大风发生前的 MUCAPE 比春季明显偏高。春季江西南部与江西

中北部雷暴大风发生前 MUCAPE 的均值差异较大(1942. 8 J · kg⁻¹和 1261. 1 J · kg⁻¹),夏季两个区域的均值相当(2505. 7 J · kg⁻¹和 2409. 4 J · kg⁻¹),由此也可以看出江西南部雷暴大风发生前春夏季热力作用均显著。由于夏季地面的温度、露点温度整体比春季高,这使得夏季雷暴大风发生前的 MUCAPE 比春季明显偏高。但值得注意的是,在夏季 20 时至次日 02 时时段雷暴大风发生前的 MUCAPE 高于其余时段,说明夏季夜间雷暴大风发生需要环境中积聚更加充足的不稳定能量。

对流层中低层较大的温度递减率有利于降水下

落时的蒸发冷却作用以及下沉气流负浮力的获得,这是有利于雷暴大风生成的热力环境条件之一(许霖等,2017;韦惠红等,2022)。 $\Delta T_{850-500}$ 值越大,表明下沉气块与环境温度差越大,越有利于下沉气流增强。由图 5b 可知,同一区域在不同时段及不同季节的中低层温度递减率差有差异,但是差异不显著。江西南部的 $\Delta T_{850-500}$ 各分位数小于江西中北部,25%分位数和 75%分位数覆盖范围为 22.1~26.3℃,具有明显的条件不稳定层结,说明不同区域、不同季节和不同时段雷暴大风发生前大气层结不稳定性差异不大,均在不稳定层结环境中。

3.2 动力参数

在一定的水汽和热力条件下,垂直风切变越大,风暴的组织度越高,生命史更长且强度更强(俞小鼎等,2020)。柯元惠等(2022)研究显示:海南地区大多数雷暴大风低层 0~3 km 垂直风切变比中层 Shear6 明显。而本研究统计结果与之不一致(图略),在江西中层 Shear6 比低层 0~3 km 垂直风切变明显,因此在江西应该更关注中层垂直风切变。从图 5c 可以看到,在任何时段、不同季节江西南部的 Shear6 都低于江西中北部,这说明江西南部雷暴大风发生前环境垂直风切变相比江西中北部偏小,部分原因可能是江西南部地面海拔高度比江西中北部高(费海燕等,2016;王簧等,2020)。不同区域在任何时段,夏季的 75%分位数显著小于春季的 25%分位数,夏季雷暴大风发生前的 Shear6 明显低于春季。其中春季江西南部和江西中北部的 Shear6 中位数分别为 $18.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $22.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,25%分位数分别为 $14.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $17.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;夏季中位数分别仅为 $6.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $7.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,25%分位数分别为 $3.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $4.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。按照 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \leq$ 切变值 $< 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 为中等以上垂直风切变的标准(樊李苗和俞小鼎,2013),夏季雷暴大风主要发生在弱垂直风切变中,而春季雷暴大风多发于中等及强垂直风切变中,尤其是江西中北部春季有 60%以上雷暴大风都发生于 $\geq 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 强垂直风切变环境中。这是因为夏季环境温度高,不稳定能量强,产生雷暴大风只需要弱动力作用。在四个时段雷暴大风发生前的垂直风切变呈先减小后增大的趋势,其中 14—20 时的 Shear6 为四个时段最小,午后雷暴大风多发于较小垂直风切变环境中,深夜雷暴大风发生则需要相对较强的垂直风切变。

雷暴大风伴随中层干冷空气的夹卷过程,当夹卷层风速较大时,动量下传对地面大风的贡献也较大,可以利用夹卷层平均风速表征动量下传的潜势,夹卷层平均风速越大,雷暴大风的强度也越强(Cohen et al,2007;马淑萍等,2019)。夹卷层平均风速的变化趋势(图 5d)与 Shear6 类似。夏季对流层中层冷空气弱,因此雷暴大风发生前夹卷层平均风速相比于春季小,进而不易形成较大垂直风切变。

3.3 水汽参数

水汽含量及其垂直分布对风暴强度和结构特征有重要的影响,且大气中水汽主要集中在对流层低层,因此本文选取可反映大气干湿程度的 PW 和 $\Delta \text{RH}_{850-500}$ 来表征水汽参数。从图 5e 可知,春季四个时段的 25%分位数和 75%分位数覆盖范围分别为 43.3~55.4、42.5~61.0、45.9~58.7、45.1~55.6 mm,夏季四个时段的 25%分位数和 75%分位数覆盖范围分别为 58.9~67.7、58.5~67.7、62.4~70.1、60.7~70.7 mm。由此可以看出在四个时段雷暴大风发生前的 PW 有差异,但是差异不显著,此外 08—20 时发生雷暴大风前的 PW 小于 08 时之前和 20 时以后;大多数时段夏季的 25%分位数高于春季的 75%分位数,夏季 PW 明显大于春季,可能与大尺度环流有关,夏季江西常位于副热带高压外围,受到大气低层西南季风和东南季风的影响,水汽更加充沛。

低层水汽充沛和中高层湿度较小的配置有利于发生雷暴大风(许霖等,2017;柯元惠等,2022), $\Delta \text{RH}_{850-500}$ 在一定程度上能反映大气是否存在上干下湿的垂直结构。从图 5f 可以看到,不同区域在不同时段及不同季节箱线图重叠区域较大,说明雷暴大风发生前的 $\Delta \text{RH}_{850-500}$ 的时空差异较小;在任何时段、不同季节及不同区域中位数均为正值,说明大多数雷暴大风发生前基本具有上干下湿的垂直结构。08—20 时较 08 时之前和 20 时以后的上干下湿特征明显,说明白天上干下湿结构比夜间明显。春季雷暴大风发生前上干下湿特征较夏季明显,这与刘彬等(2022)研究结果一致。

3.4 雷暴大风的环境参数阈值

通过上述分析可知,江西雷暴大风发生前, MUCAPE、 $\Delta T_{850-500}$ 、Shear6、夹卷层平均风速、PW 和 $\Delta \text{RH}_{850-500}$ 在不同区域、不同季节和不同时段均

有一定差异,因此若使用统一环境参数阈值来制作江西雷暴大风的潜势预报会带来较多的空报和漏报。若以箱线图的最小值作为预报的阈值,将会造成较高的虚警率,因此对于不同区域在不同季节、不同时段发生的雷暴大风,用 25%分位数作为预报的阈值相对合理(高晓梅等,2018;刘彬等,2022)。表 3 和表 4 分别给出了春季和夏季不同区域在不同时段雷暴大风环境参数的具体预报阈值。

由表 3 和表 4 可以更清楚地看出对于以下 6 个环境参数,分季节考虑环境参数阈值是很有必要的,

夏季 MUCAPE 和 PW 的阈值明显比春季大,春季 Shear6、夹卷层平均风速以及 $\Delta RH_{850-500}$ 的阈值明显比夏季大;对于 6 个环境参数在不同区域以及时段阈值也有差异,比如春季在江西南部 14—20 时 MUCAPE 的阈值高达 $1502.2 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,而在江西中北部 08—14 时阈值为 $26.6 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。因此对于各个环境参数在分季节的基础上,分区域以及时段设定环境参数阈值对于雷暴大风预报预警的指导意义更大。

表 3 江西春季雷暴大风发生的分区域、分时段环境参数阈值

Table 3 Thresholds of ambient parameters for thunderstorm gales in different periods and different regions of Jiangxi in spring

区域	时段	MUCAPE/ ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)	$\Delta T_{850-500}$ / °C	Shear6/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	夹卷层平均 风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	PW/mm	$\Delta RH_{850-500}$ / %
江西中北部	08—14 时	26.6	23.4	17.4	16.6	43.3	8.2
	14—20 时	1053.9	24.1	15.7	15.5	42.5	13.4
	20 时至次日 02 时	177.2	24.2	16.7	16.0	45.9	2.0
	02—08 时	0	23.2	20.3	18.4	45.1	3.6
江西南部	08—14 时	248.8	23.0	14.1	15.3	47.3	17.8
	14—20 时	1502.2	23.4	12.3	13.1	51.9	11.9
	20 时至次日 02 时	384.5	23.5	17.5	16.4	49.2	0.2
	02—08 时	39.5	23.1	20.3	18.8	46.4	11.4

表 4 江西夏季雷暴大风发生的分区域、分时段环境参数阈值

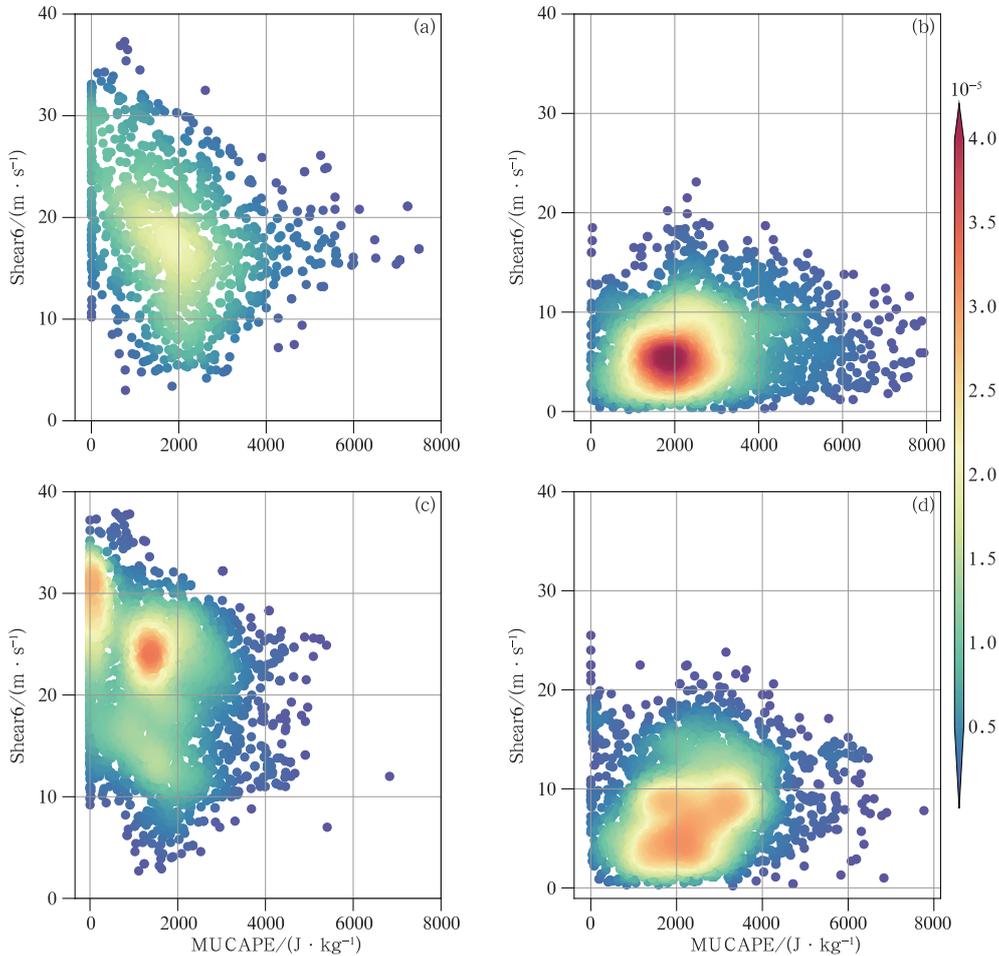
Table 4 Thresholds of ambient parameters for thunderstorm gales in different periods and different regions of Jiangxi in summer

区域	时段	MUCAPE/ ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)	$\Delta T_{850-500}$ / °C	Shear6/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	夹卷层平均 风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	PW/mm	$\Delta RH_{850-500}$ / %
江西中北部	08—14 时	1282.2	22.9	5.0	5.5	59.0	0.7
	14—20 时	1587.2	23.1	4.3	5.1	58.5	6.1
	20 时至次日 02 时	2220.7	23.2	6.6	6.6	62.4	-6.4
	02—08 时	1238.7	22.6	5.7	6.8	60.7	-6.0
江西南部	08—14 时	1244.3	22.7	3.4	4.8	59.2	6.7
	14—20 时	1522.6	23.2	3.8	4.9	60.5	1.8
	20 时至次日 02 时	2292.0	23.1	5.2	5.6	62.6	0.2
	02—08 时	1535.7	22.1	4.8	5.4	62.4	3.4

3.5 环境参数的联合分布特征

单一环境参数预测雷暴大风的技能往往是有限的,分析环境参数的联合分布特征可以更好地分析雷暴大风发生前的环境条件(Ma et al, 2021; 刘彬等, 2022)。本节通过综合分析 MUCAPE 和 Shear6 (图 6)、MUCAPE 和 PW (图 7) 散点密度二维分布并结合 MUCAPE、Shear6 和 PW 三维散点密度分布(图略)来分析雷暴大风发生前环境热力、动力和水汽相互作用特征。

江西南部春季雷暴大风发生前 MUCAPE、Shear6 和 PW 组合中心位于 MUCAPE ($1800 \sim 2200 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$)、Shear6 ($16 \sim 18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 和 PW ($52 \sim 58 \text{ mm}$); 而江西中北部春季有两个组合中心, 最高密度中心位于 MUCAPE ($0 \sim 500 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$)、Shear6 ($30 \sim 33 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 和 PW ($43 \sim 48 \text{ mm}$), 次高密度中心位于 MUCAPE ($1000 \sim 2000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$)、Shear6 ($23 \sim 27 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 和 PW ($38 \sim 43 \text{ mm}$)。表明江西中北部春季即使热力作用很弱、水汽也不是特别充沛, 动力作用很强也容易发生雷暴大风; 春季



注:圆点颜色为样本密度。

图 6 2015—2023 年(a,b)江西南部和(c,d)江西中北部
雷暴大风发生前 MUCAPE 和 Shear6 散点分布
(a,c)春季,(b,d)夏季

Fig. 6 Scatter plots of MUCAPE and Shear6 for thunderstorm gales before the occurrence in (a, b) the southern Jiangxi, (c, d) the north-central Jiangxi in (a, c) spring and (b, d) summer during 2015—2023

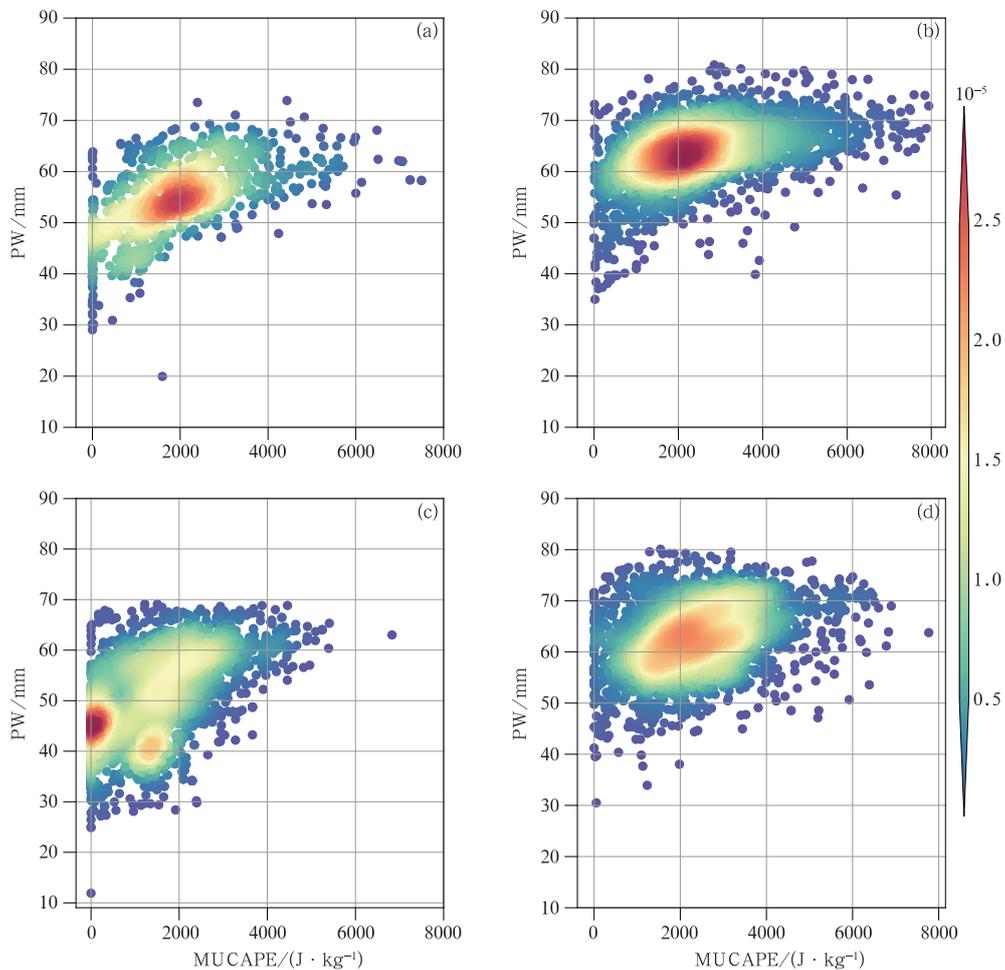
江西中北部雷暴大风发生前比江西南部伴随更强的 Shear6 及较小的 MUCAPE 及 PW。因此在预报时,江西中北部春季若出现了强 Shear6 的情况,即使 MUCAPE 和 PW 很小,仍需要警惕雷暴大风的发生。

夏季江西南部雷暴大风发生前 MUCAPE、Shear6 和 PW 组合中心位于 MUCAPE ($1500 \sim 2500 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$)、Shear6 ($5 \sim 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 和 PW ($60 \sim 65 \text{ mm}$);江西中北部夏季组合中心散点密度高值区对应的 Shear6 大致在 $3 \sim 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,最大密度值对应的 Shear6 大致为 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,MUCAPE 约为 $1000 \sim 2500 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 及 PW 约为 $56 \sim 65 \text{ mm}$;江西

南部的散点密度明显较江西中北部集中。表明夏季江西雷暴大风发生前动力作用偏弱,而水汽和热力作用强,因此在夏季预报雷暴大风时需关注 MUCAPE 和 PW;尤其是江西南部,其雷暴大风更加集中发生在很弱的中层垂直风切变环境中,因此当水汽充沛、热力作用较强时就需考虑雷暴大风的发生。

4 雷暴大风特征差异原因的初步探讨

综合上述研究可知,江西雷暴大风的时空分布以及发生前的环境条件均有明显的季节差异和南北差异。为了初步探讨造成差异的原因,对比分析江



注:圆点颜色为样本密度。

图 7 2015—2023 年(a,b)江西南部 and (c,d)江西中北部雷暴大风发生前 MUCAPE 和 PW 散点分布 (a,c)春季,(b,d)夏季

Fig. 7 Scatter plots of MUCAPE and PW for thunderstorm gales before the occurrence in (a,b) the southern Jiangxi, (c, d) the north-central Jiangxi in (a, c) spring and (b, d) summer during 2015—2023

西在不同区域和不同季节雷暴大风发生前和无雷暴大风的环境参数,图 8 为江西南部 and 江西中北部在春季和夏季有、无雷暴大风的 MUCAPE、Shear6 和 PW 箱线图。

在春季,雷暴大风发生前和无雷暴大风在江西南部 and 江西中北部的 MUCAPE 仅有部分重叠,且在江西中北部重叠区域更小,说明春季发生雷暴大风需要环境中积聚不稳定能量,江西中北部需要增大的能量更多;在夏季,有、无雷暴大风在江西南部差异很小,在江西南部能量的增加幅度较江西中北部小,说明夏季发生雷暴大风仅需要环境中不稳定能量略增大,特别是江西南部(图 8a)。从图 8b 来

看,有、无雷暴大风 Shear6 差异不显著,但是江西中北部差异大于江西南部。图 8c 显示,在不同区域以及不同季节,有、无雷暴大风 PW 的差异都很显著,这表明任何区域在不同季节,PW 的增加对雷暴大风的发生都很重要,预报时需重点关注 PW 的变化。

综合对比可以发现,有、无雷暴大风在春季无论是动力作用、热力作用还是水汽作用的差异都较夏季显著,且江西南部夏季差异最小,表明夏季雷暴大风较春季容易发生,江西南部夏季最容易发生,因此江西南部夏季雷暴大风发生频率较春季明显增大。在夏季,有、无雷暴大风热力和动力作用差异都不显

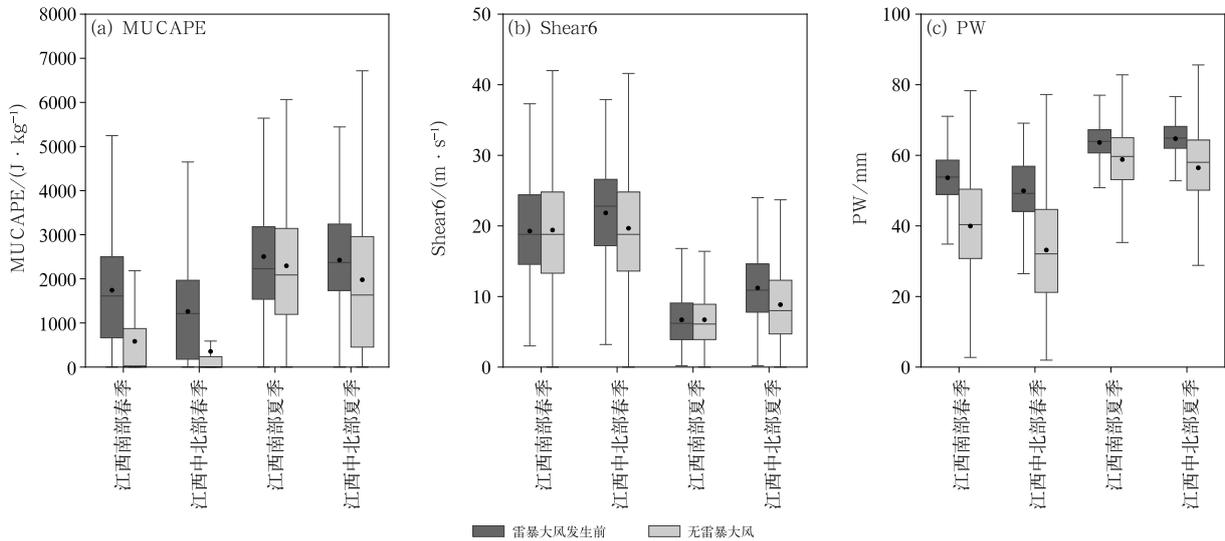


图 8 江西中北部和江西南部春季和夏季雷暴大风发生前和无雷暴大风时的
(a)MUCAPE, (B)Shear6, (c)PW 箱线图

Fig. 8 Box plots of (a) MUCAPE, (B) Shear6, (c) PW before the onset of thunderstorm gales (dark grey) and without thunderstorm gales (light grey) in summer and spring in the north-central Jiangxi and the southern Jiangxi

著,此时 PW 的指示性最好,江西南部夏季常常更靠近副热带高压外围,热力作用强,水汽输送也很显著,这也是江西南部夏季雷暴大风发生频率高的原因之一。有、无雷暴大风,在春夏季江西中北部的动力作用都强于江西南部,热力和水汽作用是江西南部强于江西中北部;有、无雷暴大风时,夏季热力和水汽作用强于春季,春季动力作用强于夏季,江西中北部这种特征更明显。这说明,环境条件的季节差异和南北差异是江西雷暴大风特征呈高度异质性的主要原因。

5 结论与讨论

本研究利用 2015—2023 区域自动站地面逐小时观测资料、闪电定位系统监测的地闪资料、雷达资料和 ERA5 再分析资料统计江西雷暴大风的时空分布和发生前的环境参数特征。对比分析不同区域在不同时段以及不同季节雷暴大风发生前的热力、动力及水汽作用的异同。得出以下结论:

(1)江西雷暴大风事件发生的频率和位置有明显的年变化,大多数站点每年发生雷暴大风事件少于 1 次。雷暴大风空间分布不均匀,江西南部的雷暴大风明显多于中北部。江西雷暴大风集中出现在春夏季,中北部春季发生雷暴大风的频数仅略多于

夏季,南部夏季发生雷暴大风的频数较春季多 2 倍,表明雷暴大风的季节变化有明显的南北差异。雷暴大风呈现明显的日变化,最高频时段为 14—20 时,峰值出现在 17 时,江西中北部傍晚至夜间雷暴大风出现频数较江西南部高很多。

(2)江西雷暴大风发生前的动力、热力和水汽参数特征有显著时空差异。在同一季节,江西中北部的动力作用总体强于南部,而热力和水汽作用南部要强于中北部。夏季热力和水汽作用强于春季,春季动力作用强于夏季,江西中北部这种特征更明显。不同区域在不同时段、不同季节雷暴大风发生所需要的对流不稳定能量有差异,但均在一定不稳定层结环境中;其中,午后雷暴大风多发生在较小垂直风切变环境中,而深夜时段则多发生在强垂直风切变环境中。春季江西雷暴大风均多发于中等及强垂直风切变中。夏季发生前垂直风切变明显比春季小,尤其在江西南部,雷暴大风多发生在很弱的中层垂直风切变条件下。大多数雷暴大风的发生前基本具有上干下湿的垂直结构,中北部的上干下湿特征比江西南部明显,白天上干下湿结构比夜间显著,春季上干下湿特征较夏季明显。

(3)采用 MUCAPE、 $\Delta T_{850-500}$ 、Shear6、夹卷层平均风速、PW 和 $\Delta RH_{850-500}$ 环境参数,按区域、季节、时段归纳各预报量的阈值。结果发现夏季 MU-

CAPE 和 PW 的阈值明显比春季大,春季 Shear6、夹卷层平均风速以及 $\Delta RH_{850-500}$ 的阈值明显比夏季大。6 个环境参数在不同区域以及不同时段阈值也有差异。因此,按季节分区域以及分时段细致归纳雷暴大风的环境参数阈值,对江西雷暴大风预报预警的指导意义更大。

(4) MUCAPE、Shear6 和 PW 散点密度图揭示,在预报时江西中北部春季若 Shear6 很大且分布于 $30\sim 33\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,即使 MUCAPE 仅介于 $0\sim 500\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、PW 仅介于 $43\sim 48\text{ mm}$ 范围,仍需要警惕雷暴大风的发生。在夏季预报雷暴大风时需关注 MUCAPE 和 PW,尤其是在雷暴大风更集中发生在很弱的中层垂直风切变环境中的江西南部,当 $PW>60\text{ mm}$ 、 $MUCAPE>1500\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,即使 Shear6 很小且分布在 $5\sim 8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,也需考虑雷暴大风的发生。

(5) 对比有、无雷暴大风发生的环境条件可知,环境条件的季节差异和南北差异是江西雷暴大风特征呈高度异质性的重要原因。任何区域在不同季节,PW 的增加对雷暴大风的发生都很重要,预报雷暴大风时需重点关注 PW 的变化。

本文从统计学角度按区域、时段和季节归纳雷暴大风发生前的环境参量,给出了环境参数阈值,并初步探讨了产生这些特征的原因,得出了一些有意义的结论,但是对这些特征的形成机制分析不足,今后需要继续开展以下工作:高海拔的江西南部雷暴大风频发,但是江西中北部外围山区雷暴大风少发,后续需结合雷达、卫星等多源探测资料深入探讨形成这种差异的机理;江西中北部鄱阳湖盆地附近是雷暴大风的多发区,后续需要借助数值模拟和敏感性试验细致分析鄱阳湖对雷暴大风形成的影响;对雷暴大风南北差异大的形成机制未做细致深入的研究,后期需充分考虑区域地形、大尺度环境以及边界层触发机制的差异,深入细致地研究江西雷暴大风的环境影响因子以及发生和发展机制。

参考文献

柴东红,杨晓亮,吴紫煜,等,2017. 京津冀地区雷暴大风天气的统计分析[J]. 暴雨灾害,36(3):193-199. Chai D H, Yang X L, Wu Z Y, et al, 2017. The statistical analysis of thunderstorm gales over Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Torr Rain Dis, 36(3): 193-199(in Chinese).

陈晓欣,俞小鼎,王秀明,2022. 中国大范围雷暴大风事件(Derechos)研究:时空分布、环境背景和对流系统形态特征[J]. 气象学报,

80(1):67-81. Chen X X, Yu X D, Wang X M, 2022. Investigation of Derechos in China: spatiotemporal distribution, environmental characteristics, and morphology of Derechos producing convective systems[J]. Acta Meteor Sin, 80(1):67-81(in Chinese).

陈云辉,许爱华,许彬,等,2019. 江西一次极端雷暴大风过程的中尺度特征与成因分析[J]. 暴雨灾害,38(2):126-134. Chen Y H, Xu A H, Xu B, et al, 2019. Analysis on mesoscale characteristics and causes of an extreme thunderstorm gale event in Jiangxi[J]. Torr Rain Dis, 38(2):126-134(in Chinese).

樊李苗,俞小鼎,2013. 中国短时强对流天气的若干环境参数特征分析[J]. 高原气象,32(1):156-165. Fan L M, Yu X D, 2013. Characteristic analyses on environmental parameters in short-term severe convective weather in China[J]. Plateau Meteor, 32(1): 156-165(in Chinese).

樊李苗,俞小鼎,2020. 杭州地区夏季午后雷暴大风环境条件分析[J]. 气象,46(12):1621-1632. Fan L M, Yu X D, 2020. Analysis on the environment conditions of afternoon thunderstorm in Hangzhou[J]. Meteor Mon, 46(12):1621-1632(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 Meteor, 36(5):1368-1385(in Chinese).

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).

付超,谌芸,朱克云,等,2019. 2010—2016 年江西省暖季短时强降水特征分析[J]. 气象,45(9):1238-1247. Fu C, Chen Y, Zhu K Y, et al, 2019. Characteristics of flash heavy rain in Jiangxi warm season from 2010 to 2016[J]. Meteor Mon, 45(9):1238-1247(in Chinese).

高帆,俞小鼎,王秀明,2023. 山东较大范围致灾雷暴大风的多普勒天气雷达特征[J]. 气象,49(7):790-804. Gao F, Yu X D, Wang X M, 2023. Doppler radar characteristics of wide-range damaging thunderstorm gales in Shandong Province[J]. Meteor Mon, 49(7):790-804(in Chinese).

高晓梅,俞小鼎,王令军,等,2018. 鲁中地区分类强对流天气环境参量特征分析[J]. 气象学报,76(2):196-212. Gao X M, Yu X D, Wang L J, et al, 2018. Characteristics of environmental parameters for classified severe convective weather in central area of Shandong Province[J]. Acta Meteor Sin, 76(2):196-212(in Chinese).

柯元惠,马明明,郑艳,等,2022. 海南岛雷暴大风天气形势和环境参数特征分析[J]. 暴雨灾害,41(1):86-93. Ke Y H, Ma M M, Zheng Y, et al, 2022. Analysis of synoptic situation and environmental parameters of thunderstorm gales in Hainan[J]. Torr Rain Dis, 41(1):86-93(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).
- 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 thunderstorm[J]. J Appl Meteor Sci, 30(3):292-301(in Chinese).
- 田付友,张小玲,曹艳察,等,2022.中国中低海拔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).
- 王簧,李英,宋丽莉,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,俞小鼎,朱禾,2012. NCEP再分析资料在强对流环境分析中的应用[J].应用气象学报,23(2):139-146. Wang X M, Yu X D, Zhu H, 2012. The applicability of NCEP reanalysis data to severe convection environment analysis[J]. J Appl Meteor Sci, 23(2):139-146(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).
- 韦惠红,许冠宇,刘希文,等,2022.湖北省不同类型雷暴大风的时空分布及环境参数特征[J].暴雨灾害,41(1):66-75. Wei H H, Xu G Y, Liu X W, et al, 2022. Spatial-temporal distribution and environmental parameter characteristics for different types of thunderstorm gales in Hubei Province[J]. Torr Rain Dis, 41(1):66-75(in Chinese).
- 夏文梅,马中元,慕瑞琪,等,2021.江西副高边缘雷暴大风雷达拼图回波特征分析[J].大气科学学报,44(5):717-726. Xia W M, Ma Z Y, Mu R Q, et al, 2021. Analysis of characteristics of mesoscale thunderstorm gale echo on the edge of subtropical high [J]. Trans Atmos Sci, 44(5):717-726(in Chinese).
- 徐瑾薇,马中元,郑媛媛,等,2023.玉山雷暴大风雷达回波特征分析[J].气象科学,43(2):167-176. Xu J W, Ma Z Y, Zheng Y Y, et al, 2023. Analysis of radar echo characteristics of thunderstorm and gale in Yushan[J]. J Meteor Sci, 43(2):167-176 (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).
- 杨波,王园香,蔡雪薇,2019.我国华南江南春季雷暴气候特征分析[J].热带气象学报,35(4):470-479. Yang B, Wang Y X, Cai X W, 2019. Analysis on the climatological characteristics of thunderstorms in the south and southeast of China in spring[J]. J Trop Meteor, 35(4):470-479(in Chinese).
- 叶爱芬,伍志方,肖伟军,等,2006.对流有效位能在强对流预报中的应用研究[J].热带气象学报,22(5):484-490. Ye A F, Wu Z F, Xiao W J, et al, 2006. A study of application of CAPE in severe convective weather prediction[J]. J Trop Meteor, 22(5):484-490(in Chinese).
- 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:292-294. Yu X D, Wang X M, Li W L, et al, 2020. Nowcast of Thunderstorms and Severe Convection[M]. Beijing:China Meteorological Press:292-294(in Chinese).
- Cohen A E, Coniglio M C, Corfidi S F, et al, 2007. Discrimination of mesoscale convective system environments using sounding observations[J]. Wea Forecasting, 22(5):1045-1062.
- Coniglio M C, Stensrud D J, Richman M B, 2004. An observational study of derecho-producing convective systems[J]. Wea Forecasting, 19(2):320-337.
- Evans J S, Doswell III C A, 2001. Examination of Derecho environments using proximity soundings[J]. Wea Forecasting, 16(3):329-342.
- Fujita T, 1959. Precipitation and cold air production in mesoscale thunderstorm systems[J]. J Meteor, 16(4):454-466.
- Hookings G A, 1965. Precipitation-maintained downdrafts [J]. J Appl Meteor, 4(2):190-195.
- Johns R H, Doswell III C A, 1992. Severe local storms forecasting [J]. Wea Forecasting, 7(4):588-612.
- Ma R Y, Sun J H, Yang X L, 2021. An eight-year climatology of the warm-season severe thunderstorm environments over North China[J]. Atmos Res, 254:105519.
- Yang X L, Sun J H, 2014. The characteristics of cloud-to-ground lightning activity with severe thunderstorm wind in South and North China[J]. Atmos Oceanic Sci Lett, 7(6):571-576.
- Yang X L, Sun J H, Zheng Y G, 2017. A 5-yr climatology of severe convective wind events over China[J]. Wea Forecasting, 32(4):1289-1299.
- Yin S Q, Chen D L, Xie Y, 2009. Diurnal variations of precipitation during the warm season over China[J]. Int J Climatol, 29(8):1154-1170.

(本文责编:王婷波)