

# 2015—2023 年江西雷暴大风特征分析\*

曹倩<sup>1</sup> 郭建平<sup>2</sup> 孙玉萍<sup>2</sup> 雷星宇<sup>3</sup> 薛谌彬<sup>1</sup>

1 江西省气象科学研究所气候变化风险与气象灾害防御江西省重点实验室, 南昌 330096

2 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

3 南昌市气象局, 南昌 330096

**摘要:** 利用江西 2015—2023 年区域自动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次仅略多于夏季, 而江西南部夏季雷暴大风发生的频次多于春季的 2 倍。雷暴大风呈现明显的日变化, 其最高频时段为 14 时—20 时, 江西中北部傍晚至夜间雷暴大风出现频率较江西南部高很多。江西雷暴大风发生前的热动力和水汽特征显著时空差异。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; 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, 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, 此外白天上干下湿结构比夜间显著。因此, 按季节分区域并且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。江西中北部春季若  $Shear_6$  很大且分布于  $30\sim 33\text{ m s}^{-1}$ , 即使  $MUCAPE$  仅介于  $0\sim 500\text{ J kg}^{-1}$  和  $PW$  仅介于  $43\sim 48\text{ mm}$  范围, 则需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  $PW > 60\text{ mm}$ 、 $MUCAPE > 1500\text{ J kg}^{-1}$  时, 即使  $Shear_6$  很小且分布在  $5\sim 8\text{ m s}^{-1}$  范围, 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, 预报雷暴大风时需重点关注  $PW$  的变化。

**关键词:** 江西雷暴大风, 时空分布, 环境参数

中图分类号: P446

文献标识码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.101501

## Analysis on the Characteristics of Thunderstorm High Winds in Jiangxi Province During 2015—2023

CAO Qian<sup>1</sup> GUO Jianping<sup>2</sup> SUN Yuping<sup>2</sup> LEI Xingyu<sup>3</sup> XUE Chenbin<sup>1</sup>

1 Key Laboratory of Climate Change Risk and Meteorological Disaster Prevention of Jiangxi Province, Jiangxi Institute of Meteorological Sciences, Nanchang 330096

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

3 Nanchang Meteorological Bureau, Nanchang 330096

**Abstract:** The spatio-temporal distribution of thunderstorm high winds (THWs) in Jiangxi are comprehensively 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 THWs. The results show that the THWs in Jiangxi

\*国家自然科学基金委气象联合基金 (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 日收修订稿 **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等方向研究. E-mail: jguo@cma.gov.cn

35 occur mainly in Spring and Summer, with significant seasonal variations and differences in the north-central part  
36 and the south. The frequency of THWs occurring in Spring is only slightly higher than in summer in north-central  
37 Jiangxi, but the frequency of THWs in Summer is more than twice that in Spring in the south of Jiangxi. THWs  
38 have obvious diurnal variation with the highest occurrence frequency from 14:00 BT to 20:00 BT. The frequency of  
39 THWs from evening into night in north-central Jiangxi is much higher than in the southern part. The  
40 thermodynamic and water vapor characteristics of THWs are significantly different in spatio-temporal distributions.  
41 In the same season, the dynamic action is generally stronger in north-central Jiangxi than in the southern part, while  
42 the thermal and water vapor effects are stronger in the south than in the north-central part. The thermal and water  
43 vapor effects are stronger in Summer than in Spring, but the dynamic effect in Spring is stronger. The convective  
44 instability energy required for THWs varies by time periods, but all occur under unstable conditions. THWs occur  
45 more frequently under low vertical wind shear in the afternoon and also in the deep night with strong vertical wind  
46 shear conditions. Besides, the upper-level dry and low-level wet structure in the daytime is more pronounced than  
47 at night. Therefore, it is crucial to set ambient parameter thresholds by season, region and time period in order to  
48 provide the more accurate guidance on THWs forecasts and warnings. When Shear<sub>6</sub> is large enough and distributed  
49 in the range of 30-33 m s<sup>-1</sup> in Spring in north-central Jiangxi, it is imperative to be alert to the advent of THWs  
50 even if MUCAPE is only in the range of 0-500 J kg<sup>-1</sup> and PW only in the range of 43-48 mm. To accurately  
51 forecast the occurrence of THWs in summer, it is essential to pay attention to the MUCAPE and PW, and especially  
52 in the south of Jiangxi, THWs tend to occur with higher frequency under weak mid-level vertical wind shear. When  
53 PW > 60 mm and MUCAPE > 1500 J kg<sup>-1</sup>, even though Shear<sub>6</sub> is minimal and confined to a range of 5-8 m s<sup>-1</sup>,  
54 it is necessary to contemplate the potential for THWs. The increase of water vapor is important for the occurrence  
55 of THWs in different regions during different seasons. Therefore, changes in PW should be focused on in the  
56 operation of forecasting THWs.

57 **Key words:** thunderstorm high winds in Jiangxi Province, spatio-temporal distribution, ambient parameter

## 58 引言

59 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 m s<sup>-1</sup> 的强风事件, 主要由对流风暴的  
60 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  
61 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  
62 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  
63 的重要内容之一。

64 早在上世纪 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  
65 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  
66 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  
67 地湿度较低的环境条件中。Johns et al (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  
68 减率较大有利于对流风暴中强下沉气流出现。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

69 直切变大，以及低层高湿的环境中 (Evans et al, 2001; Coniglio et al, 2004)。

70 大量关于中国的雷暴大风时空分布特征的研究表明，我国的雷暴大风具有空间分布特征差异较大的特  
71 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  
72 风季节分布特征较相似，且均多出现于暖季 (柴东红等, 2017; 王冀等, 2020; 刘彬等, 2022; 高帆等,  
73 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,  
74 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  
75 开展大量的统计分析相关研究。王冀等 (2020) 对川藏高原和盆地雷暴大风环境因子进行对比发现，高原  
76 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；而盆地站雷暴大风通常具有  
77 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，  
78 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  
79 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站点的动力和热  
80 力参数，发现热力不稳定条件、动力条件分别在湖南东西部、南北部存在区别。柴东红等 (2017) 研究指  
81 出京津冀地区雷暴大风的形成，5 月和 9 月需要更高的热力条件和动力条件，6—8 月需要更高的不稳定条  
82 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  
83 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  
84 征，因此对于不同区域均需要精细的观测资料进行深入细致的研究才能得到更准确的结果。

85 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  
86 损失。开展江西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  
87 的研究，主要是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)，  
88 而专门针对江西雷暴大风时空分布及环境参数的研究迄今鲜见。江西东南西三面环山，江西南部 (SJ) 多  
89 为海拔高度较高的山区，江西中北部 (NCJ) 外高内低，多为海拔较低的盆地 (图 2a)。由于江西南北地  
90 形差异较大，不同区域的雷暴大风发生发展的环境条件不全一致，其雷暴大风发生的环境特征还有待研究。  
91 本文利用 2015—2023 年区域自动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  
92 对比江西南部和中北部两个区域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  
93 时间段和不同季节雷暴大风的特征，并尝试归纳环境参数阈值，以期为今后提高江西雷暴大风潜势预报提  
94 供参考。

## 95 1 数据来源与方法介绍

96 本研究利用江西 2015—2023 年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  
97 资料和 ERA5  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$  逐小时再分析资料，开展江西雷暴大风时空分布统计分析研究，并通过选取多个

98 用于表征热力、动力和水汽条件的物理量参数，诊断江西雷暴大风发生前的环境参数。

99 雷暴大风天气常伴有活跃的闪电（Yang and Sun, 2014），研究参照杨波等（2019）和刘彬等（2022）  
100 的方法，首先选取地面某时次地面台站出现极大风速  $\geq 17 \text{ m s}^{-1}$  大风事件，且在大风附近  $0.25^\circ$  范围内测得  
101 大于  $35 \text{ dBz}$  雷达回波，并考虑前后  $1 \text{ h}$  内站点附近半径范围  $0.25^\circ$  内监测到非孤立闪电活动（2次及以上），  
102 则将该站点该时次作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，研究参照 Yang et al（2017）  
103 将样本进行了  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  格点化处理，格点化规则为：以每一格点为圆心统计  $0.25^\circ$  范围内出现雷暴大风  
104 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  
105 格点化处理，即统计每一格点  $0.25^\circ$  范围内的站点数。将每个格点  $0.25^\circ$  范围的雷暴大风的样本总数和站点  
106 总数相除，由此计算出雷暴大风的时空分布。雷暴大风时空分布计算公式如下：

$$107 \quad \text{Num} = \frac{\sum_{r \leq 0.25^\circ} NT}{NS} \quad (1)$$

108 式中： $NS$  为以格点为圆心半径范围  $0.25^\circ$  内气象站点总数， $NT$  为以格点为圆心半径范围  $0.25^\circ$  内各个气  
109 象站点出现的雷暴大风样本数量， $Num$  为计算得到的每个格点雷暴大风的数量。

110 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。  
111 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物理量，空间上选取距离最近格点的物理量  
112 数据，计算相关物理量参数表征雷暴大风发生前的环境参数。

113 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  
114 制，底图无修改。

## 115 2 雷暴大风的时空分布特征

116 江西 2015—2023 年雷暴大风的样本数共 16 374 个，发生在 1238 个站点上。将 9 年的样本数按年分类  
117 统计（图 1）。2022 年发生雷暴大风的样本数最多为 2678 个，占总数的 16.3%，发生在 448 个站点上。2015  
118 年发生的雷暴大风样本数最少为 832 个，仅占总数的 5.1%，发生在 324 个站点上。雷暴大风样本数在其它  
119 7 年中在 1274~2562 之中变化，雷暴大风发生的站点数在 287~734 之间变化。这表明雷暴大风事件的频数和  
120 位置有明显的年变化。

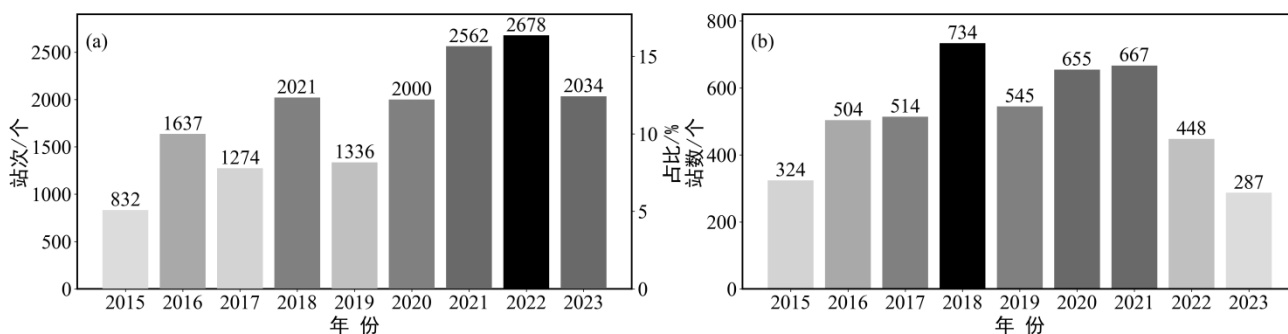
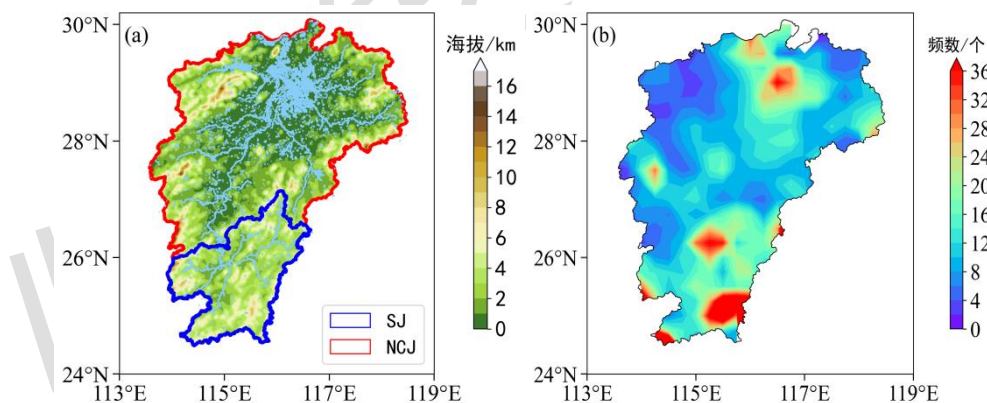


图 1 2015—2023 年期间江西雷暴大风事件 (a) 发生站次及其占比和 (b) 发生的气象站点数年际变化

Fig.1 (a) The stations and percentages of thunderstorm gale events in Jiangxi Province during 2015—2023 and (b) the inter-annual variation of the number of stations with thunderstorm high winds

研究期间, 共 701 个气象台站的雷暴大风年平均次数小于 1 次。只有 74 个站点每年发生了 4 次以上的雷暴大风, 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 2b 展示了江西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, 多发于江西南部山区附近, 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地及河谷附近, 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, 江西省暖季雷暴大风高频区与短时强降水不一致。因此, 雷暴大风和短时强降水发生没有相关性。



注: a 图蓝色线内为江西南部 (SJ), 红色线内为江西中北部 (NCJ), 浅蓝色区域为江西水系。

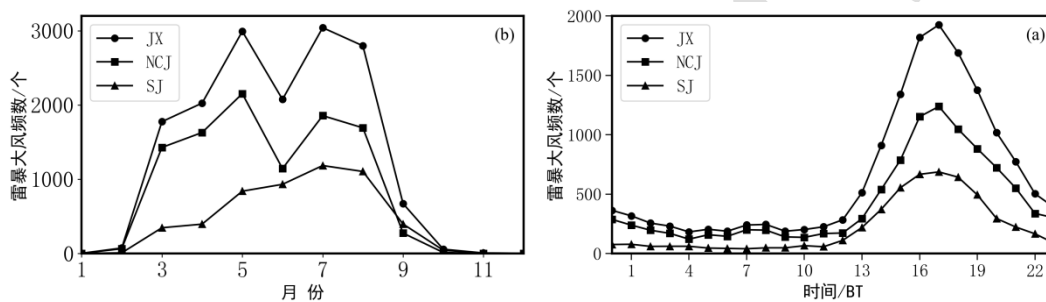
图 2 (a) 江西地形高度图, (b) 2015—2023 年江西省雷暴大风总频数空间分布

Fig.2 (a) Topographic elevation map of Jiangxi Province, and (b) spatial distribution of the total occurrence frequency of thunderstorm high winds in Jiangxi during 2015—2023

对比江西省雷暴大风在不同季节空间分布图 (图略) 来看, 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率较春季有明显的增多。因此江西南

140 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，下文将江西分为南部、  
141 中北部两个区域，分析不同区域内雷暴大风的特征。

142 图 3a 显示 2015—2023 年江西雷暴大风出现频数月分布呈双峰结构，雷暴大风集中出现在春夏季（3—  
143 8 月），峰值出现在 5 月和 7 月。一些其它的相关研究（Yang et al, 2017；韦惠红等，2022）也有类似的结  
144 果。由表 1 可知，在江西 41.9%雷暴大风出现在春天（3—5 月），52.7%出现在夏天（6—8 月），仅有 0.5%  
145 雷暴大风事件发生在冬天，且基本都发生在 2 月。江西中北部雷暴大风的月分布都呈双峰结构，江西中北  
146 部的峰值发生在 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  
147 可以看出，江西中北部雷暴大风春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  
148 春夏季分别占 30%和 61.2%，夏季多于春季的 2 倍。Yang et al（2017）研究结果显示整个江西都是春季  
149 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  
150 自动站观测数据，而 Yang et al（2017）仅使用了江西 93 个国家站的数据；也可能与统计的年限不一致相关，  
151 本研究所用资料为 2015—2023 年的资料，而 Yang et al（2017）使用的是 2010—2014 年的资料。



152  
153 图 3 2015—2023 年江西整个区域（JX）、江西中北部（NCJ）和江西南部（SJ）雷暴大风出现频数的（a）月分布和（b）日  
154 分布

155 Fig.3 (a) Monthly and (b) daily frequency of thunderstorm high winds in the whole region of Jiangxi Province (JX), the  
156 north-central Jiangxi (NCJ) and the southern Jiangxi (SJ) during 2015—2023

157

158 表 1 2015—2023 年江西雷暴大风不同区域各季节占全年的比例

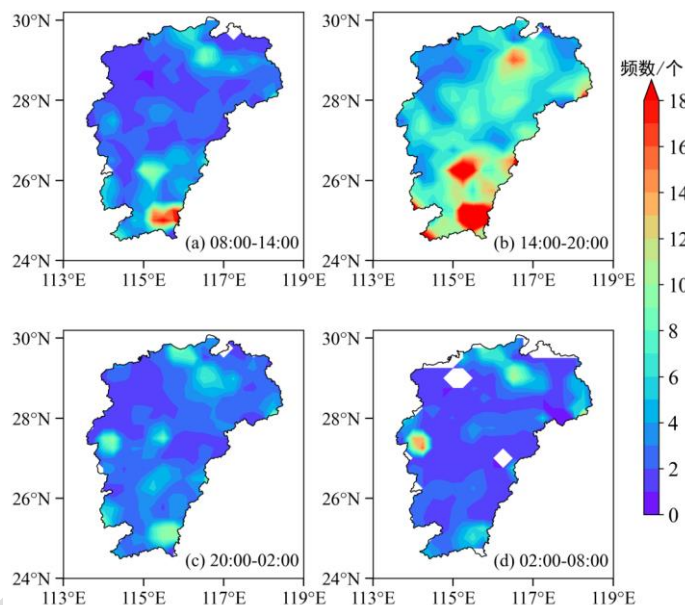
159 Table 1 Proportion of thunderstorm high winds in different regions and seasons to that of the whole year in Jiangxi during 2015—  
160 2023

161

	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%

162 由 2015—2023 年江西雷暴大风出现频数日分布曲线图（图 3b）以及逐 6 h 空间分布图（图 4）可知，  
163 一天之中整个区域发生雷暴大风的高频时间段是 14—20 时（北京时，下同），集中出现于 16—18 时，峰

164 值出现在 17 时，这与许多前人（许霖等，2017；韦惠红等，2022；刘彬等，2022）的研究结果相似。午后  
 165 随着地面温度升高，对流有效位能增大，雷暴大风开始多发。四个时间段的雷暴大风高发区都类似，均为  
 166 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，  
 167 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），在江西  
 168 中北部和江西南部雷暴大风出现在 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  
 169 次高时间段为 08—14 时，而江西中北部发生频数次高时间段为 20 时至次日 02 时。江西中北部发生频数有  
 170 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  
 171 南部高很多，与王冀等（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  
 172 可引起对流不稳定有关（Yin et al, 2009）。



173 图 4 2015—2023 年江西雷暴大风发生频数逐 6 h 空间分布

174 Fig.4 The 6 h spatial distribution of the occurrence frequency of thunderstorm high winds in Jiangxi during 2015—2023

175 表 2 2015—2023 年江西雷暴大风不同区域各时段占全天的比例

176 Table 2 Proportion of thunderstorm high winds in difference time periods in different regions to that of the whole day during 2015  
 177 —2023

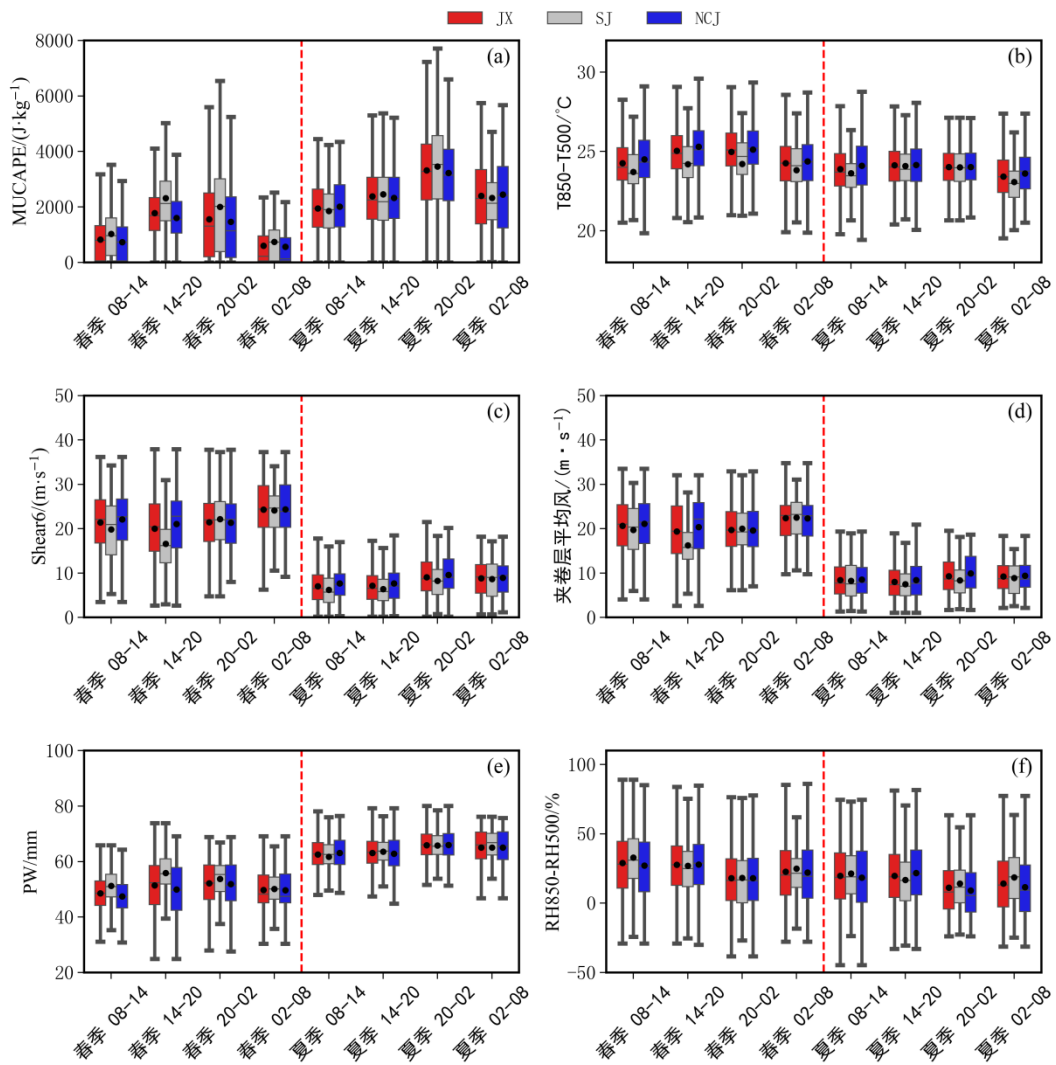
	08—14 时	14—20 时	20 时至次日 02 时	02—08 时
江西整个区域	15.1%	59.6%	17.0%	8.4%
江西中北部	14.2%	57.3%	18.8%	9.7%
江西南部	16.8%	64.2%	13.3%	5.7%

### 180 3 环境参数的统计分析

181 由于雷暴大风多发于春夏季，下文重点分析发生在春夏季的雷暴大风。雷暴大风发生的基本条件包括



182 热力不稳定、动力和水汽条件。本节对江西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  
 183 了统计分析，对比不同区域在不同季节和不同时间段雷暴大风发生前的大气环境条件的差异。本节选取的  
 184 表征热力条件的参数参数包括最佳对流有效位能（MUCAPE，单位： $\text{J kg}^{-1}$ ）、850 hPa 与 500 hPa 的温差  
 185 （T850-T500，单位： $^{\circ}\text{C}$ ），表征动力条件的参数为 0~6 km 垂直风切变（Shear6，单位： $\text{m s}^{-1}$ ）、夹卷层  
 186 的平均风（700 hPa、500 hPa、400 hPa 的 3 层平均风，单位： $\text{m s}^{-1}$ ），表征水汽条件的参数包括大气可降  
 187 水量（PW，单位： $\text{mm}$ ）、850 hPa 与 500 hPa 相对湿度差（RH850-RH500，单位： $\%$ ）。



188  
 189 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动力、水汽参数箱线图

190 (a) MUCAPE、(b) T850-T500、(c) Shear6、(d) 夹卷层平均风速、(e) PW、(f) RH850-RH500

191 Fig.5 Boxplots of thermodynamic and water vapor parameters before thunderstorm gale events in

192 JX, NCJ and SJ during 2015—2023

193 (a) MUCAPE, (b) T850-T500, (c) Shear6, (d) average wind speed in entrainment zone, (e) PW, (f) RH850-RH500

194 **3.1 热力参数**

195 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，它可以表征大气极端不稳定状



196 况。MUCAPE 能够有效的区分强对流天气 (Ma et al, 2021), 也可以减小雷暴大风漏报几率 (叶爱芬等,  
197 2006)。如图 5a 所示, 任何区域在 4 个时段 08—14 时、14—20 时、20 时至次日 02 时、02—08 时 (下文  
198 4 个时段均为此顺序), 夏季的各分位值均明显大于春季, 江西南部雷暴大风发生前 MUCAPE 相比江西中  
199 北部偏大。其中江西北部在夏季 4 个时段的 25%分位值分别为  $1282.2 \text{ J kg}^{-1}$ 、 $1587.2 \text{ J kg}^{-1}$ 、 $2220.7 \text{ J kg}^{-1}$ 、  
200  $1238.7 \text{ J kg}^{-1}$ , 春季 75%分位值分别为  $1275.7 \text{ J kg}^{-1}$ 、 $2192.2 \text{ J kg}^{-1}$ 、 $2367.6 \text{ J kg}^{-1}$ 、 $885.5 \text{ J kg}^{-1}$ , 江西南  
201 部在夏季 4 个时段的 25%分位值分别为  $1244.3 \text{ J kg}^{-1}$ 、 $1522.6 \text{ J kg}^{-1}$ 、 $2292.0 \text{ J kg}^{-1}$ 、 $1535.7 \text{ J kg}^{-1}$ , 春季  
202 75%分位值分别为  $1601.7 \text{ J kg}^{-1}$ 、 $2933.0 \text{ J kg}^{-1}$ 、 $3013.9 \text{ J kg}^{-1}$ 、 $1168.9 \text{ J kg}^{-1}$ 。可以看出春季的 75 分位数  
203 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  
204 MUCAPE 而言, 春季和夏季雷暴大风发生前区分度很大, 不同时间段的差异也很显著。CAPE 对抬升气块的  
205 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  
206 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  
207 前 MUCAPE 的均值差异较大分别为  $1942.8 \text{ J kg}^{-1}$  和  $1261.1 \text{ J kg}^{-1}$ , 夏季两个区域的均值相当分别为  $2505.7$   
208  $\text{ J kg}^{-1}$  和  $2409.4 \text{ J kg}^{-1}$ , 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  
209 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,  
210 在夏季 20 时至次日 02 时雷暴大风发生前的 MUCAPE 高于其它时段, 说明夏季夜间雷暴大风发生需要环境  
211 中积聚更加充足的不稳定能量。

212 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, 它是  
213 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)。T850-T500 值越大, 表明下  
214 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, 同一区域在不同时间段及不同季节的中  
215 低层温度递减率差有差异, 但是差异不显著。江西南部的 T850-T500 各分位值小于江西北部, 25 百分位和  
216 75 百分位覆盖范围在  $22.1^{\circ}\text{C}$ ~ $26.3^{\circ}\text{C}$  之间, 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  
217 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。

### 218 3.2 动力参数

219 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  
220 等, 2020)。柯元惠等 (2022) 研究结果显示: 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  
221 垂直风切变明显。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  
222 显, 因此在江西应该关注中层垂直风切变。从图 5c 可以看到, 在任何时间段、不同季节江西南部的 Shear6  
223 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  
224 是江西南部地面海拔高度比江西中北部高 (费海燕等, 2016; 王冀等, 2020)。不同区域在任何时间段,  
225 夏季箱线图的 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

226 季江西南部和江西中北部的 Shear6 中位数分别为  $18.8 \text{ m s}^{-1}$  和  $22.8 \text{ m s}^{-1}$ ，25 百分位数分别为  $14.6 \text{ m s}^{-1}$   
227 和  $17.2 \text{ m s}^{-1}$ ；夏季中位数分别仅为  $6.2 \text{ m s}^{-1}$  和  $7.5 \text{ m s}^{-1}$ ，25 百分位数分别为  $3.9 \text{ m s}^{-1}$  和  $4.6 \text{ m s}^{-1}$ 。按  
228 照切变值  $\geq 15 \text{ m s}^{-1}$  且  $< 20 \text{ m s}^{-1}$  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  
229 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  
230 60%以上雷暴大风都发生于  $\geq 20 \text{ m s}^{-1}$  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，  
231 产生雷暴大风只需要弱动力作用。在 4 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  
232 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，深夜时段雷暴大风发生  
233 则需要相对较强垂直风切变。

234 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，  
235 可以利用夹卷层的平均风表征动量下传的潜势大小，夹卷层的平均风越大，雷暴大风的强度也越强（Cohen  
236 et al, 2007；马淑萍等，2019）。夹卷层的平均风的变化趋势（图 5d）与 Shear6 类似。夏季对流层中层冷  
237 空气弱，因此夏季雷暴大风发生前夹卷层平均风相比于春季小，进而不易形成较大垂直风切变。

### 238 3.3 水汽参数

239 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，  
240 因此本文选取可反映大气干湿程度的 PW 以及 RH850-RH500 来表征水汽参数。从图 5e 可以得知，春季四  
241 个时段的 25 百分位和 75 百分位覆盖范围分别为  $43.3\sim 55.4 \text{ mm}$ 、 $42.5\sim 61.0 \text{ mm}$ 、 $45.9\sim 58.7 \text{ mm}$ 、 $45.1\sim 55.6 \text{ mm}$ ，  
242 夏季四个时段的 25 百分位和 75 百分位覆盖范围分别为  $58.9\sim 67.7 \text{ mm}$ 、 $58.5\sim 67.7 \text{ mm}$ 、 $62.4\sim 70.1 \text{ mm}$ 、  
243  $60.7\sim 70.7 \text{ mm}$ 。由此可以看出在 4 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  
244 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，  
245 夏季的整层大气可降水量明显大于春季，这种水汽参数分布可能与大尺度环流有关，夏季江西常位于副热  
246 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。

247 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），  
248 RH850-RH500 在某种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  
249 时段及不同季节箱图重叠区域较大，说明雷暴大风发生前的 RH850-RH500 的时空差异较小；且在任何时段、  
250 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的发生前基本具有上干下湿的垂直结构。08—  
251 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  
252 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。

### 253 3.4 雷暴大风的环境参数阈值

254 通过上述分析可知，江西雷暴大风发生前，MUCAPE、T850-T500、Shear6、夹卷层平均风、PW 和  
255 RH850-RH500 在不同区域、不同季节和不同时段均有一定差异，因此若使用同一的环境参数阈值来制作江

256 西省的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  
 257 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 百分位值作为预报的阈值相  
 258 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  
 259 大风环境参数的具体预报阈值。

260 由表格可以更清楚的看出对于以下 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  
 261 MUCAPE 和 PW 的阈值明显比春季大，春季 Shear6、夹卷层的平均风以及 RH850-RH500 的阈值明显比夏  
 262 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  
 263 阈值高达  $1502.2 \text{ J kg}^{-1}$ ，而在江西中北部 08—14 时阈值为  $26.6 \text{ J kg}^{-1}$ 。因此对于各个环境参数在分季节的  
 264 基础上，分区域以及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。

265 表 3 江西春季雷暴大风的分区域、分时段环境参数阈值

266 Table 3 Thresholds of ambient parameters for thunderstorm high winds in different periods and different regions of Jiangxi in

267

Spring							
区域	时段	MUCAPE/ $\text{J kg}^{-1}$	T850-T500/ $^{\circ}\text{C}$	Shear6/ $\text{m s}^{-1}$	夹卷层的平均风 $/\text{m s}^{-1}$	PW/mm	RH850-RH500 /%
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

268 表 4 江西夏季雷暴大风的分区域、分时段环境参数阈值

269 Table 4 Thresholds of ambient parameters for thunderstorm high winds in different time periods and different regions of Jiangxi in

270

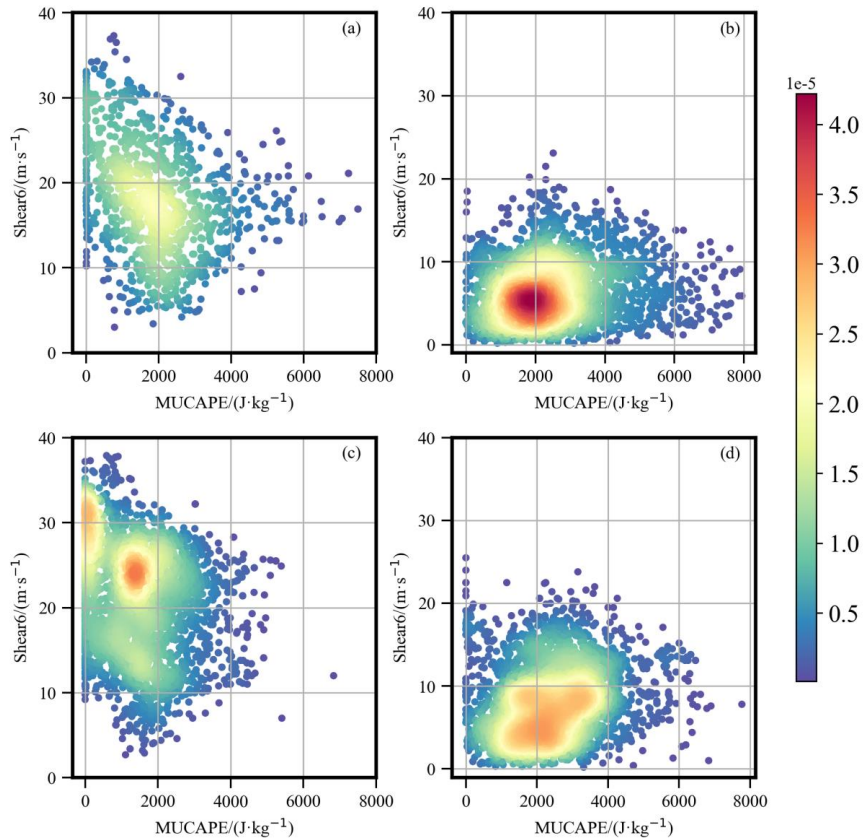
271

Summer							
区域	时段	MUCAPE/ $\text{J kg}^{-1}$	T850-T500/ $^{\circ}\text{C}$	Shear6/ $\text{m s}^{-1}$	夹卷层的平均风 $/\text{m s}^{-1}$	PW/mm	RH850-RH500 /%
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

273

## 274 3.5 环境参数的联合分布特征

275 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的分析雷暴  
 276 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)、  
 277 MUCAPE 和 PW (图 7) 散点密度二维分布图并结合 MUCAPE、Shear6 和 PW 三维散点密度分布图 (图略)  
 278 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。



279

280

注：圆点颜色为样本密度。

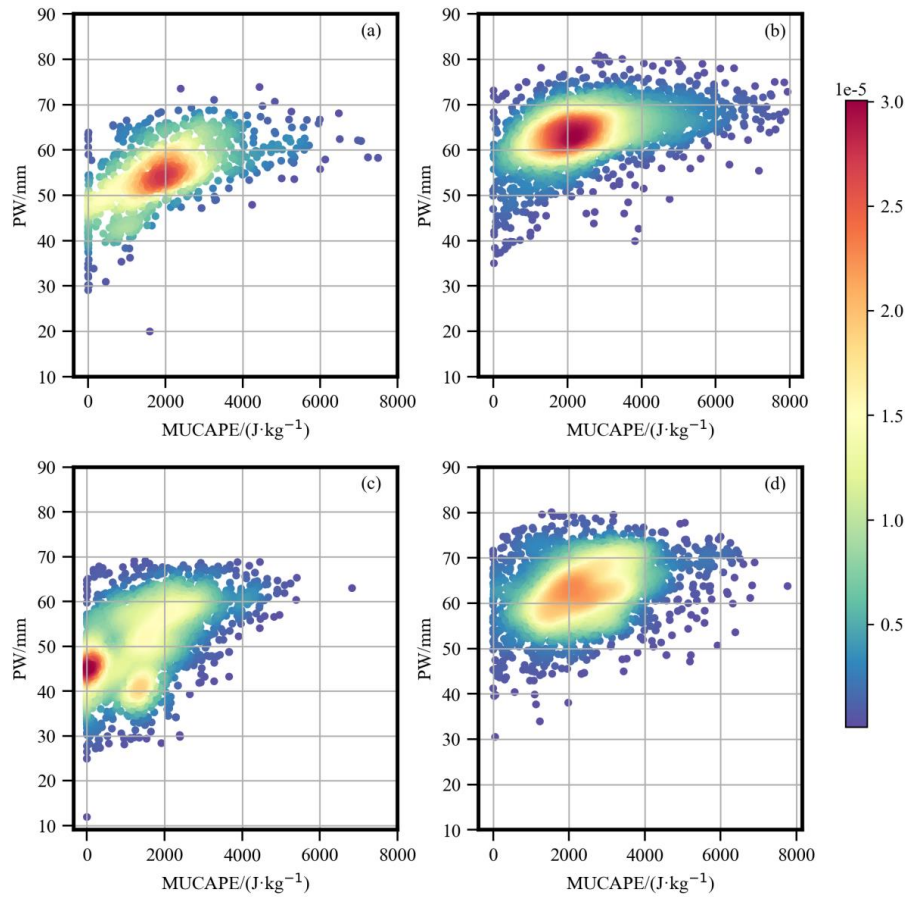
281 图 6 2015—2023 年 (a, b) 江西南部 (a) 春季、(b) 夏季和 (c, d) 江西中北部 (c) 春季、(d) 夏季雷暴大风发生前  
 282 MUCAPE 和 Shear6 散点分布图

283

Fig.6 Scatter plots of MUCAPE and Shear6 for thunderstorm high winds before the occurrence in (a,b) SJ in (a) Spring and (b)

284

Summer, and (c, d) NCJ in (c) Spring and (d) Summer during 2015—2023



285 图 7 2015—2023 年 (a, b) 江西南部 (a) 春季、(b) 夏季和 (c, d) 江西中北部 (c) 春季、(d) 夏季雷暴大风发生  
286 前 MUCAPE 和 PW 散点图  
287

288 Fig.7 Scatter plots of MUCAPE and PW for thunderstorm high winds before the occurrence in (a,b) SJ in (a) Spring and (b)  
289 Summer, and (c, d) NCJ in (c) Spring and (d) Summer during 2015—2023

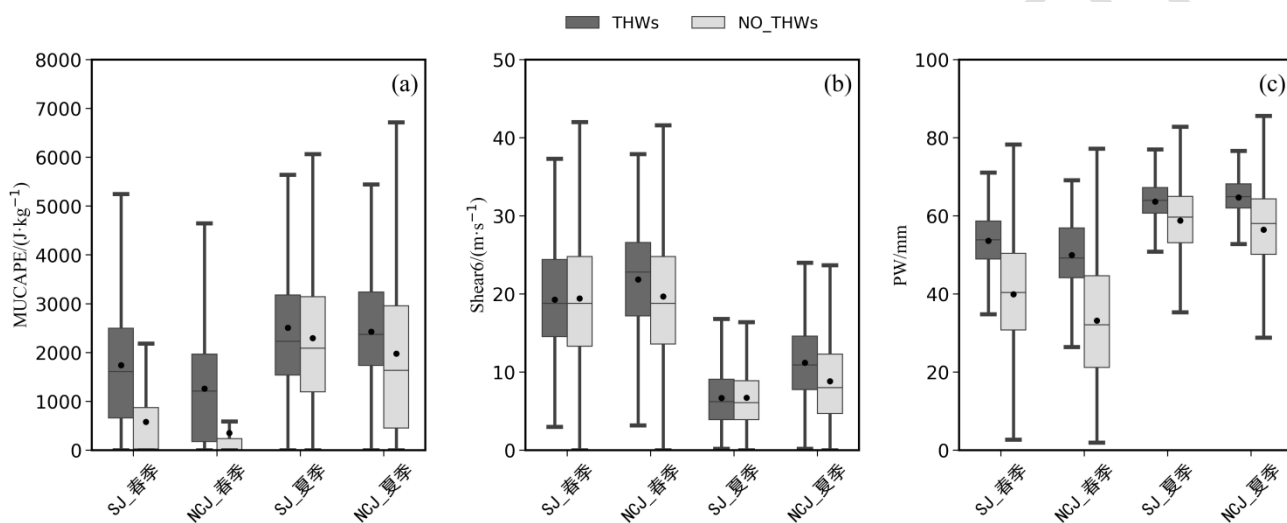
290 江西南部春季雷暴大风发生前 MUCAPE、Shear6 和 PW 组合中心位于 MUCAPE 1800~2200 J kg<sup>-1</sup>、  
291 Shear6 16~18 m s<sup>-1</sup>和 PW 52~58 mm; 而江西中北部春季有两个组合中心, 最高密度中心位于 MUCAPE  
292 0~500 J kg<sup>-1</sup>、Shear6 30~33 m s<sup>-1</sup>和 PW 43~48 mm, 次高密度中心位于 MUCAPE 1000~2000 J kg<sup>-1</sup>、Shear6  
293 23~27 m s<sup>-1</sup>和 PW 38~43 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  
294 很强也容易发生雷暴大风; 春季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  
295 MUCAPE 及 PW。因此在预报时江西中北部春季若出现了强 Shear6, 即使 MUCAPE 和 PW 很小, 则需要警  
296 惕雷暴大风的发生。

297 江西南部夏季雷暴大风发生前 MUCAPE、Shear6 和 PW 组合中心位于 MUCAPE 1500~2500 J kg<sup>-1</sup>、  
298 Shear6 5~8 m s<sup>-1</sup>和 PW 60~65 mm; 江西中北部夏季组合中心高值区对应的 Shear6 大致在 3~10 m s<sup>-1</sup>之间,  
299 最大密度值对应的 Shear6 大致为 5 m s<sup>-1</sup>, MUCAPE 约为 1000~2500 J kg<sup>-1</sup> 以及 PW 约为 56~65 mm; 江  
300 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

301 用强，因此夏季预报雷暴大风时需关注 MUCAPE 和 PW，尤其在雷暴大风更加集中发生在很弱的中层垂直  
302 风切变环境中的江西南部，当水汽充沛、热力作用较强时就需考虑雷暴大风的发生。

#### 303 4 雷暴大风特征差异原因的初步探讨

304 综合上述研究可知，江西省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  
305 异。为了初步探讨造成差异的原因，对比分析江西省在不同区域和不同季节雷暴大风发生前和无雷暴大风  
306 的环境参数，图 8 即为江西南部 and 江西中北部在春季和夏季有以及无雷暴大风的 MUCAPE、Shear6 和 PW  
307 箱线图。



308 图 8 江西中北部和江西南部春季和夏季雷暴大风 (THWs) 发生前和无雷暴大风 (NO\_THWs) 时的热动力、  
309 水汽条件箱线图 (a) MUCAPE、(b) Shear6、(c) PW

310 Fig.8 Boxplots of thermodynamic and water vapor conditions before the onset of thunderstorm high winds (THWs) and without  
311 thunderstorm high winds (NO\_THWs) in summer and spring in NCJ and SJ

312 (a) MUCAPE, (b) Shear6, (c) PW

313 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 仅仅有部分重叠，且在江  
314 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  
315 更多；在夏季，有和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  
316 夏季发生雷暴大风仅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，有和无雷  
317 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  
318 和无雷暴大风 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，  
319 预报雷暴大风时需重点关注 PW 的变化。  
320

321 综合对比可以发现，有和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  
322 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

323 西南部夏季雷暴大风发生频率较春季明显增大。在夏季对比有与无雷暴大风热力和动力作用差异都不显著，  
324 此时 PW 的指示性最好，江西南部夏季常常更靠近副高外围，热力作用强，水汽输送也很显著，这也是江  
325 西南部夏季雷暴大风发生频率高的原因之一。有与无雷暴大风，在春夏季江西中北部的动力作用都强于江  
326 西南部，热力和水汽作用是江西南部强于江西中北部；有与无雷暴大风时，夏季热力和水汽作用强于春季，  
327 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省雷  
328 暴大风特征呈高度异质性的主要原因。

## 329 5 结论与讨论

330 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  
331 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间段  
332 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：

333 (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  
334 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江西中北部。江西雷暴大风集中出现在春夏  
335 季，江西中北部春季发生雷暴大风的频次仅略多于夏季，江西南部夏季发生雷暴大风的频次多于春季的 2  
336 倍，表明雷暴大风季节变化有明显的南北差异。雷暴大风呈现明显的日变化，其最高频时段为 14—20 时  
337 时，其峰值出现在 17 时，江西中北部傍晚至夜间雷暴大风出现频率较江西南部高很多。

338 (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  
339 力作用总体强于江西南部，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  
340 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  
341 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，  
342 而深夜时段则多发生在强垂直风切变环境中。春季全省雷暴大风均多发于中等及强垂直风切变中。夏季全  
343 省雷暴大风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  
344 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，江西中北部的上干下湿特征比江西南部  
345 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。

346 (3) 采用 MUCAPE、T850-T500、Shear6、夹卷层平均风、PW 和 RH850-RH500 环境参数，按区域、  
347 季节、时间段归纳各预报量的阈值。结果发现夏季 MUCAPE 和 PW 的阈值明显比春季大，春季 Shear6、夹  
348 卷层的平均风以及 RH850-RH500 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  
349 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  
350 意义更大。

351 (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 30~33



352  $\text{m s}^{-1}$ ，即使 MUCAPE 仅介于  $0\sim 500 \text{ J kg}^{-1}$  和 PW 仅介于  $43\sim 48 \text{ mm}$  范围，则需要警惕雷暴大风的发生。夏  
353 季预报雷暴大风时需关注 MUCAPE 和 PW，尤其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  
354 江西南部，当  $\text{PW} > 60\text{mm}$ 、 $\text{MUCAPE} > 1500 \text{ J kg}^{-1}$  时，即使 Shear6 很小且分布在  $5\sim 8 \text{ m s}^{-1}$  范围，需考虑  
355 雷暴大风的发生。

356 (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  
357 高度异质性的主要原因。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  
358 重点关注 PW 的变化。

359 本文从统计学角度按区域、时间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  
360 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  
361 需要继续开展以下工作：

362 (1) 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  
363 多源探测资料深入探讨形成这种差异的机理；(2) 江西中北部鄱阳湖盆地附近是雷暴大风的多发区，后续  
364 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；(3) 对雷暴大风南北差异大的形  
365 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  
366 致的研究江西雷暴大风的环境影响因子以及发生和发展机制。

#### 367 参考文献：

- 368 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  
369 statistical analysis of thunderstorm high winds over Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Torr Rain Dis, 36(3): 193-199 (in Chinese).
- 370 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  
371 X, Yu X D, Wang X M, 2022. Investigation of Derechos in China: spatiotemporal distribution, environmental characteristics, and morphology of Derechos  
372 producing convective systems[J]. Acta Meteor Sin, 80(1): 67-81 (in Chinese).
- 373 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,  
374 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).
- 375 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  
376 environmental parameters in short-term severe convective weather in China[J]. Plateau Meteor, 32(1): 156-165 (in Chinese).
- 377 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  
378 conditions of afternoon thunderstorm in Hangzhou[J]. Meteor Mon, 46(12): 1621-1632 (in Chinese).
- 379 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,  
380 2017. Temporal and spatial distribution of North China thunder-gust winds and the statistical analysis of physical characteristics[J]. Plateau Meteor, 36(5):  
381 1368-1385 (in Chinese).
- 382 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.  
383 Climatic characteristics and environmental parameters of severe thunderstorm high winds in China[J]. Meteor Mon, 42(12): 1513-1521 (in Chinese).
- 384 付超, 湛芸, 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  
385 of flash heavy rain in Jiangxi warm season from 2010 to 2016[J]. Meteor Mon, 45(9): 1238-1247 (in Chinese).
- 386 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  
387 radar characteristics of wide-range damaging thunderstorm high winds in Shandong Province[J]. Meteor Mon, 49(7): 790-804 (in Chinese).

388 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.  
389 Characteristics of environmental parameters for classified severe convective weather in central area of Shandong Province[J]. Acta Meteor Sin, 76(2):  
390 196-212 (in Chinese).

391 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.  
392 Analysis of synoptic situation and environmental parameters of thunderstorm high winds in Hainan[J]. Torr Rain Dis, 41(1): 86-93 (in Chinese).

393 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  
394 environmental characteristics of thunderstorm high winds in Yunnan[J]. Meteor Mon, 48(11): 1402-1417 (in Chinese).

395 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  
396 parameter characteristics of severe wind with extreme thunderstorm[J]. J Appl Meteor Sci, 30(3): 292-301 (in Chinese).

397 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,  
398 Cao Y C, et al, 2022. Baseline climatology of environmental parameters for three severe convective weather phenomena over middle-low areas of China[J].  
399 Plateau Meteor, 41(6): 1446-1459 (in Chinese).

400 王黄, 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.  
401 Comparison of characteristics and environmental factors of thunderstorm high winds over the Sichuan-Tibet Region[J]. J Appl Meteor Sci, 31(4): 435-446  
402 (in Chinese).

403 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  
404 applicability of NCEP reanalysis data to severe convection environment analysis[J]. J Appl Meteor Sci, 23(2): 139-146 (in Chinese).

405 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.  
406 Comparative study of environmental characteristics of a windstorm and their impacts on storm structures[J]. Acta Meteor Sin, 71(5): 839-852 (in Chinese).

407 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,  
408 2022. Spatial-temporal distribution and environmental parameter characteristics for different types of thunderstorm high winds in Hubei Province[J]. Torr  
409 Rain Dis, 41(1): 66-75 (in Chinese).

410 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  
411 radar echo characteristics of thunderstorm and gale in Yushan[J]. J Meteor Sci, 43(2): 167-176 (in Chinese).

412 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  
413 temporal-spatial distribution and variation characteristics of thunderstorm high winds in Hunan[J]. Plateau Meteor, 36(4): 993-1000 (in Chinese).

414 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,  
415 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).

416 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  
417 climatological characteristics of thunderstorms in the south and southeast of China in spring[J]. J Trop Meteor, 35(4): 470-479 (in Chinese).

418 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  
419 study of application of CAPE in severe convective weather prediction[J]. J Trop Meteor, 22(5): 484-490 (in Chinese).

420 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  
421 thunderstorms and severe convection[M]. Beijing: China Meteorological Press: 292-294 (in Chinese).

422 Cohen A E, Coniglio M C, Corfidi S F, et al, 2007. Discrimination of mesoscale convective system environments using sounding observations[J]. Wea  
423 Forecasting, 22(5): 1045-1062.

424 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.

425 Hookings G A, 1965. Precipitation-maintained downdrafts [J]. J Appl Meteor, 4(2): 190-195.

426 Evans J S, Doswell III C A, 2001. Examination of Derecho environments using proximity soundings[J]. Wea Forecasting, 16(3): 329-342.

427 Fujita T, 1959. Precipitation and cold air production in mesoscale thunderstorm systems[J]. J Meteor, 16(4): 454-466.

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

429 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:  
430 105519.

431 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

---

432

Sci Lett, 7(6): 571-576.

433

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.

434

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.

气象学报