

2024 年中国龙卷概况

张泽宇¹ 白兰强¹ 蔡康龙¹ 黄舒婷¹ 黄先香¹ 杨磊² 徐纵横³ 王秀明⁴
张涛⁵ 李彩玲¹ 陈柏纬⁶ 张晶晶¹

¹ 佛山市龙卷风研究中心/中国气象局龙卷风重点开放实验室/粤港澳大湾区气象研究院, 广东 佛山 528000

² 辽宁省气象灾害监测预警中心, 沈阳 110166

³ 上海市闵行区文来实验学校, 上海 201107

⁴ 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081

⁵ 国家气象中心, 北京 100081

⁶ 香港天文台, 香港 999077

提 要: 通过结合多源资料和实地强风灾害调查等信息进行综合研判, 形成了 2024 年中国龙卷个例记录, 并总结了龙卷活动的基本特征。尽管受限于气象设备观测能力以及公众报料具有一定随机性等客观因素影响, 当前龙卷记录数量可能存在一定程度的低估, 但在全年仍共记录到 78 个发生于陆地的龙卷 (以下简称龙卷) 以及 40 个完全发生于水面的龙卷 (以下简称水龙卷), 显示出该年龙卷活动较为活跃。这些龙卷主要分布于东北、京津冀、黄淮及珠三角地区, 多发于 6—9 月 (其中 7 月最为频发), 日变化特征表现为午后时段高发。共有 51 个龙卷通过现场灾情调查等方式开展了强度定级估计, 其中 EF0 级 12 个、EF1 级 26 个、EF2 级 9 个、EF3 级 4 个, 整体以中等及以下强度为主。水龙卷主要分布在华南沿海及渤海湾地区, 多发于 8 月, 日变化上在 06:00 前后出现一个明显峰值。龙卷群发特征显著, 共发生 4 次群发性过程, 群发性龙卷个数占陆地龙卷总数的 44%。其中, 7 月 5 日山东在高空槽影响下的一次强对流过程中共生成 13 个龙卷, 使山东成为当年龙卷发生次数最多的省份。在 2023 年冬季强厄尔尼诺事件背景下, 华南春季的大气对流有效位能明显高于常年同期。在此有利热力环境下, 广东当年约 67% 的龙卷发生在 3 月底至 4 月底, 呈现明显的早春高发集中特征。此外, 在南昌夜间发生的一次社会高影响灾害天气事件表明, 对于夜间龙卷的有效确认仍存在较大挑战。

关键词: 龙卷, 灾害天气, 灾害调查, 雷达

Overview of the Tornado Events in China in 2024

广东省基础与应用基础研究基金气象联合基金 (2024A1515510006)、粤港澳大湾区气象科技协同攻关专项 (GHMA2024Z03) 和广东省气象局科技项目 (GRMC2025M10, GRMC2004M09) 共同资助

第一作者: 张泽宇, 主要从事龙卷风等强对流天气机理研究. E-mail: zhangzy951@foxmail.com

通讯作者: 白兰强, 主要从事强对流灾害性天气的机理和可预报性研究. E-mail: bailanqiang@foxmail.com

27 ZHANG Zeyu¹ BAI Lanqiang¹ CAI Kanglong¹ HUANG Shuting¹ HUANG Xianxiang¹
28 YANG Lei² XU Zongheng³ WANG Xiuming⁴ ZHANG Tao⁵ LI Cailing¹ CHEN Pakwai⁶
29 ZHANG Jingjing¹

30 ¹ Foshan Tornado Research Center, CMA Tornado Key Laboratory, Guangdong, Foshan 528000

31 ² Liaoning Meteorological Disaster Monitoring and Early Warning Center, Shenyang 110166

32 ³ Shanghai Wenlai Experimental School, Shanghai 201107

33 ⁴ CMA Training Center, Beijing 100081

34 ⁵ National Meteorological Centre, Beijing 100081

35 ⁶ Hong Kong Observatory, Hong Kong 999077

36 **Abstract:** Basic characteristics of tornadoes in China in 2024 are presented in this article based on
37 comprehensive analysis of multi-source data and on-site ground damage surveys. Despite the
38 potential underestimation arising from the limitation of observations and the inherently stochastic
39 nature of public reports, a total of 78 tornadoes and 40 waterspouts are identified. The results
40 show that these tornadoes were primarily concentrated in Northeast China, the
41 Beijing-Tianjin-Hebei region, the Huang-Huai area and the Pearl River Delta in 2024. Most
42 tornadoes occurred between June and September, with July seeing tornadoes most frequently and
43 their diurnal peaks in the afternoon. In addition, the intensities of 51 tornadoes are classified based
44 on damage surveys into 12 rated EF0, 26 EF1, 9 EF2, and 4 EF3. In terms of waterspouts, they
45 primarily occurred along the coastal region of South China and in the Bohai Bay, and most of
46 them occurred in August with a pronounced diurnal peak around 06:00 BT. Overall, the tornadoes
47 in 2024 were characterized by a high frequency of mass outbreaks, with four times of mass
48 tornado events accounting for 44% of the annual total tornadoes. Notably, there were 13 tornadoes
49 generated associated with an upper-level trough in Shandong Province on 5 July, making the
50 province experiencing the highest occurrence frequency of tornadoes in 2024. Under the influence
51 of the strong 2023 winter El Niño event, convective available potential energy (CAPE) in South
52 China in spring 2024 was significantly higher than the climatological mean. With such a favorable
53 thermodynamic environment, 67% of tornadoes in Guangdong Province occurred from late March
54 to late April, reflecting an unusually high early-spring concentration. Additionally, a societal
55 high-impact nocturnal severe weather event in Nanchang, Guangxi Province, underscored the
56 persistent difficulties in identifying and confirming nighttime tornadoes.

57 **Key words:** tornado, severe weather, disaster investigation, radar

58

59 引 言

60 龙卷是一种局地尺度的强旋转性极端强对流灾害天气，其母体雷暴常伴随着强风、降水
61 和冰雹等天气现象，通常发生在较高对流有效位能、强垂直风切、低抬升凝结高度的大气条
62 件下。在外观特征上，龙卷常表现为从雷暴云底部延伸至地面的漏斗云，近地面直径从几十

63 米到几百米不等。龙卷具有突发性强、持续时间短等特点，造成灾害影响包括建筑物倒塌、
64 植被连根拔起、车辆掀翻以及基础设施严重受损等。龙卷的强度通常采用增强藤田级数（简
65 称 EF 等级）进行分类（McDonald and Mehta, 2006; Doswell III et al, 2009），该标准
66 依据龙卷造成的建筑物破坏程度估算风速范围，将龙卷由弱至强划分为 EF0~EF5 共 6 个等
67 级，其中 EF0 级的龙卷风速约为 $29\sim 38\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，EF5 级的风速超过 $89\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。本文同时结
68 合中国国家标准《龙卷风强度等级》（GB/T 40243-2021）对龙卷强度进行定级（国家市场监
69 督管理总局和国家标准化管理委员会，2021）。国标的龙卷风强度等级与 EF 等级存在如下
70 对应关系：弱对应 EF0 及其以下，中对应 EF1，强对应 EF2、EF3，超强对应 EF4、EF5。

71 全球有许多国家遭受不同程度的龙卷危害。其中美国由于其地理位置、气候条件的影响，
72 是龙卷数量最多的国家，年均约 1200 个。根据现有统计数据，中国每年记录到的龙卷总体
73 在 100 个以内（范雯杰和俞小鼎，2015；郑永光，2020；郑永光等，2021；Chen et al, 2018），
74 不到美国龙卷数量的十分之一。需要指出的是，过去由于缺少监测或者记录等原因未能完全
75 统计，龙卷数量可能存在一定低估。中国的强龙卷主要分布在东部平原地区或地形平坦的区
76 域，包括江淮、黄淮、华南、东北和华北地区等（范雯杰和俞小鼎，2015；俞小鼎等，2021；
77 徐芬等，2021；郑媛媛等，2009）。

78 当前，对龙卷的实时监测和预报预警仍是世界性难题（李峰等，2020）。近年来，随着
79 以多普勒天气雷达为主的先进探测设备的广泛部署，龙卷客观识别算法的研发，数值模式预
80 报产品的改进，以及公众气象科普意识的提升，我国对龙卷的监测能力显著提高（姚聃，2020）。
81 尽管如此，由于龙卷空间尺度小、生命史短、演变快，其发生发展仍具有较大的不确定性。
82 为进一步提升对中国龙卷活动规律的科学认识，有必要形成逐年完整的龙卷历史个例库。这
83 些龙卷记录将为研究中国龙卷形成机理，客观识别算法的检验评估，构建用于人工智能相关
84 技术的龙卷训练数据集，促进龙卷预报预警技术提升和完善应急响应体系等诸多方面提供数
85 据支撑。鉴于建设中国龙卷历史个例库的迫切需求，本研究通过多源资料搜集、灾害调查和
86 综合研判分析等方式，重点对 2024 年的全国龙卷概况和基本观测特征进行梳理分析。

87

88 1 资料与方法

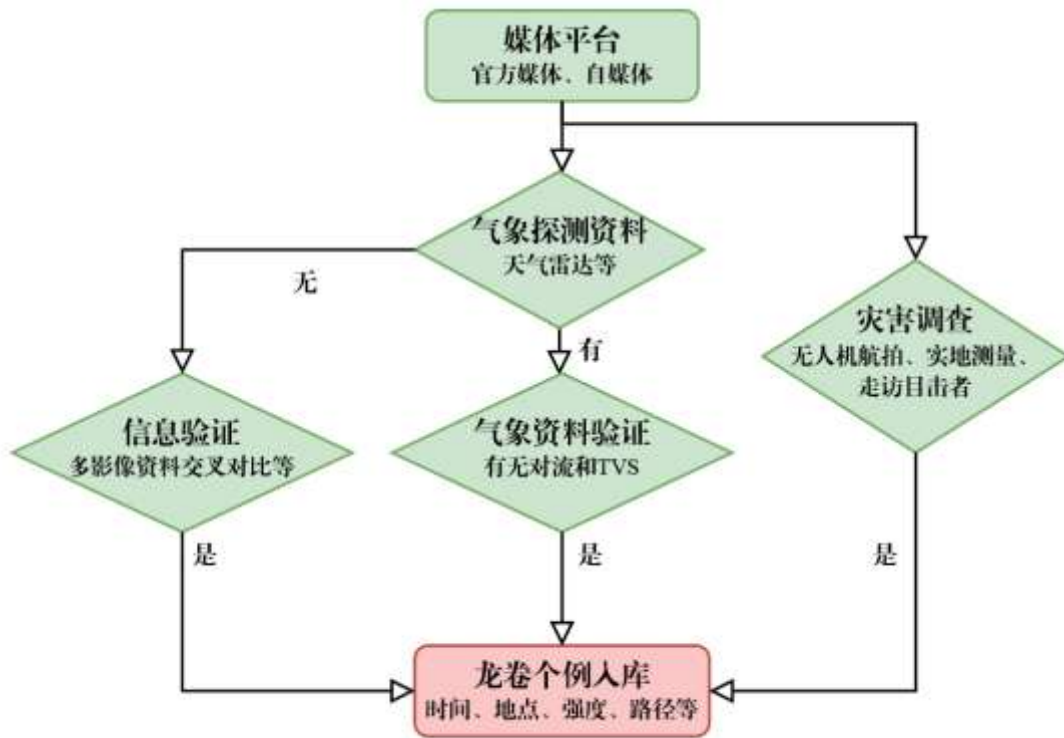
89 1.1 资料及其处理

90 背景场数据及相关物理量来源于1979—2024年的欧洲中期天气预报中心的ERA5再分析
91 数据 (Hersbach et al, 2023), 空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$, 时间分辨率为 1 h。逐
92 月 ONI 指数为 Niño 3.4 区域 (5°N – 5°S , 120°W – 170°W) 的 3 个月滑动海温距平, 由
93 ERSST.v5 海表温度数据计算所得。雷达数据来源于广东省 S 波段业务雷达站。本文提到的
94 时间均为北京时。

95 1.2 龙卷信息收集

96 一直以来, 龙卷事件发生的真实性判断是建立龙卷历史个例库的难题。自 2018 年起,
97 佛山市龙卷风研究中心联合国家气象中心、中国气象局龙卷风重点开放实验室 (以下简称实
98 验室)、龙卷高发区的气象部门、以及气象爱好者等, 持续搜集和整理每年发生的中国龙卷
99 事件, 并形成龙卷年鉴 (张晶晶等, 2024; 黄舒婷等, 2023; 植江玲等, 2022; 蔡康龙等,
100 2021; 李彩玲等, 2020; 黄先香等, 2019a)。经过多年来持续开展龙卷资料搜集、组织参
101 与国内龙卷等致灾雷暴大风的实地灾害调查, 对于龙卷信息真伪鉴别和灾损强度定级已具备
102 一定的经验积累。本研究主要通过媒体平台、气象资料、灾害调查等多方面进行龙卷信息的
103 收集和验证 (图 1)。

104



105

106

图 1 龙卷信息收集验证流程

107

Fig. 1 Flowchart of tornado information collection and verification process

108 龙卷个例信息的搜集主要依托自媒体（如抖音、快手）与官方媒体平台。自媒体凭借即
109 时性和广覆盖性，在雷达盲区及缺乏观测的地区具有显著优势，其视觉资料可有效辅助灾损
110 评估；官方媒体则提供权威信息支撑。在搜集过程中，利用“龙卷爬虫系统”进行全平台自
111 动捕捉，并结合人工定期关键词检索及气象爱好者群体的转发提醒，确保了信息获取的全面
112 性与准确性。针对搜集到的个例，需进一步开展多维核实与验证。通过分析视频发布信息、
113 IP 地址、监控影像及地标建筑，确认发生时刻与精确位置；对于多源影像个例，采取交叉
114 对比提升置信度。随后，利用雷达资料核对反射率与径向速度特征，以低层径向风速差(TVS)
115 作为判定真实性的重要依据。对于重大龙卷事件，则由实验室协同地方气象部门进行实地调
116 查，通过无人机航拍、实地测量及目击者走访，结合多源资料会商研判，最终确定灾害路径
117 与强度等级。

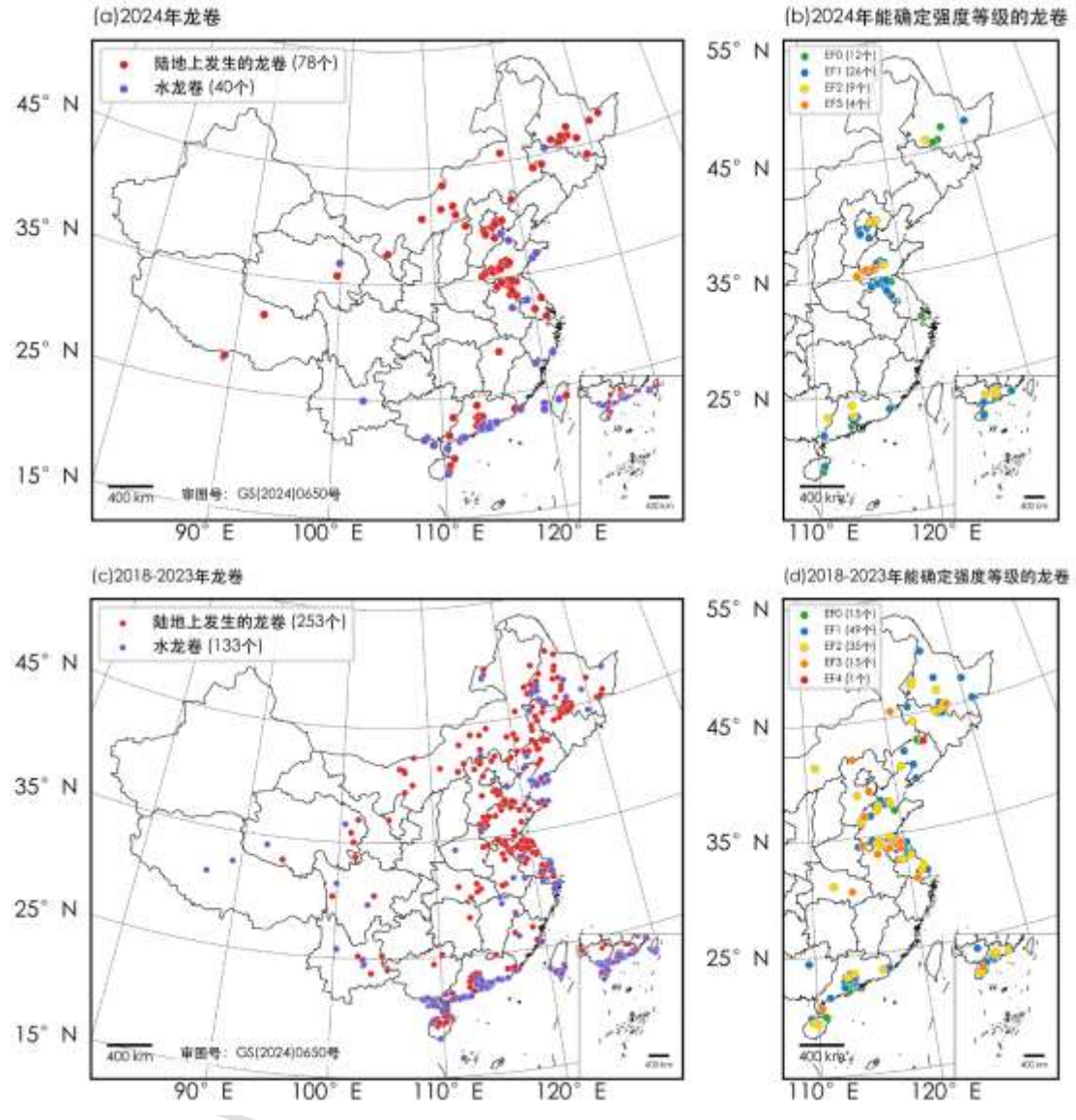
118 2 2024 年中国龙卷活动概况

119 自 2018 年起，佛山市龙卷风研究中心对每年在国内发生的龙卷事件进行了系统地搜集
120 和真实性验证，包括实地灾害调查和结合多普勒天气雷达数据进行交叉验证，确保了数据的
121 可靠性。因此，2018 年以后的龙卷记录在完整性和准确性方面较早期记录有显著提升，采
122 用 2018—2023 年质量可控的中国龙卷观测数据作为气候平均态参考基准（图 2c 和图 2d）。
123 从过去 6 年的中国龙卷总体分布特征来看，龙卷主要发生在中纬度的江苏北部、山东边界区
124 域、东北平原和内蒙古东部区域，以及低纬度的珠江三角洲和海南北部等地（图 2c）。EF2
125 级及以上的强龙卷主要发生在中纬度地区（图 2d）。

126 相比于往年，2024 年共记录了 78 个陆地龙卷¹（以下简称龙卷），主要集中在黄淮地
127 区、京津冀地区、东北地区 and 珠江三角洲地区（图 2a），共有 17 个省级行政区发生了龙卷
128 （图 3a）。空间分布特征与气候平均态总体较一致，但山东的中西部龙卷发生较多（图 2a）。
129 山东的龙卷数量最多，达 16 个，其次是黑龙江 11 个，内蒙古 10 个，广东和江苏各 9 个，
130 河北 8 个。往年强龙卷多发生在江苏和东北地区（图 2d），而 2024 年的 EF3 级强龙卷均发
131 生在山东。在经实地灾情调查等方式确定了强度等级的 51 个龙卷中，EF0 级 12 个、EF1 级
132 26 个、EF2 级 9 个、EF3 级 4 个（图 2b），即国标的弱龙卷 12 个，中等强度龙卷 26 个，强
133 龙卷 13 个。水龙卷共 40 个，主要分布在华南沿海以及渤海湾，在内陆的湖泊、河流、水库
134 等也时有发生。华南沿海共发生 22 个水龙卷，包括香港维多利亚港的一次水龙卷。根据香

¹ 本文所称的陆地龙卷为在陆地上发生的龙卷风，包含发生后上岸的水龙卷，不对应英文中的 Landspout（非中气旋龙卷风）；水龙卷为完全发生在水面上的龙卷风。

135 港天文台统计，此次是自 1959 年起首次在维多利亚港出现水龙卷，水龙卷距离摩天大楼和
 136 人群密集区近，大量目击者发布水龙卷的视频和照片。
 137

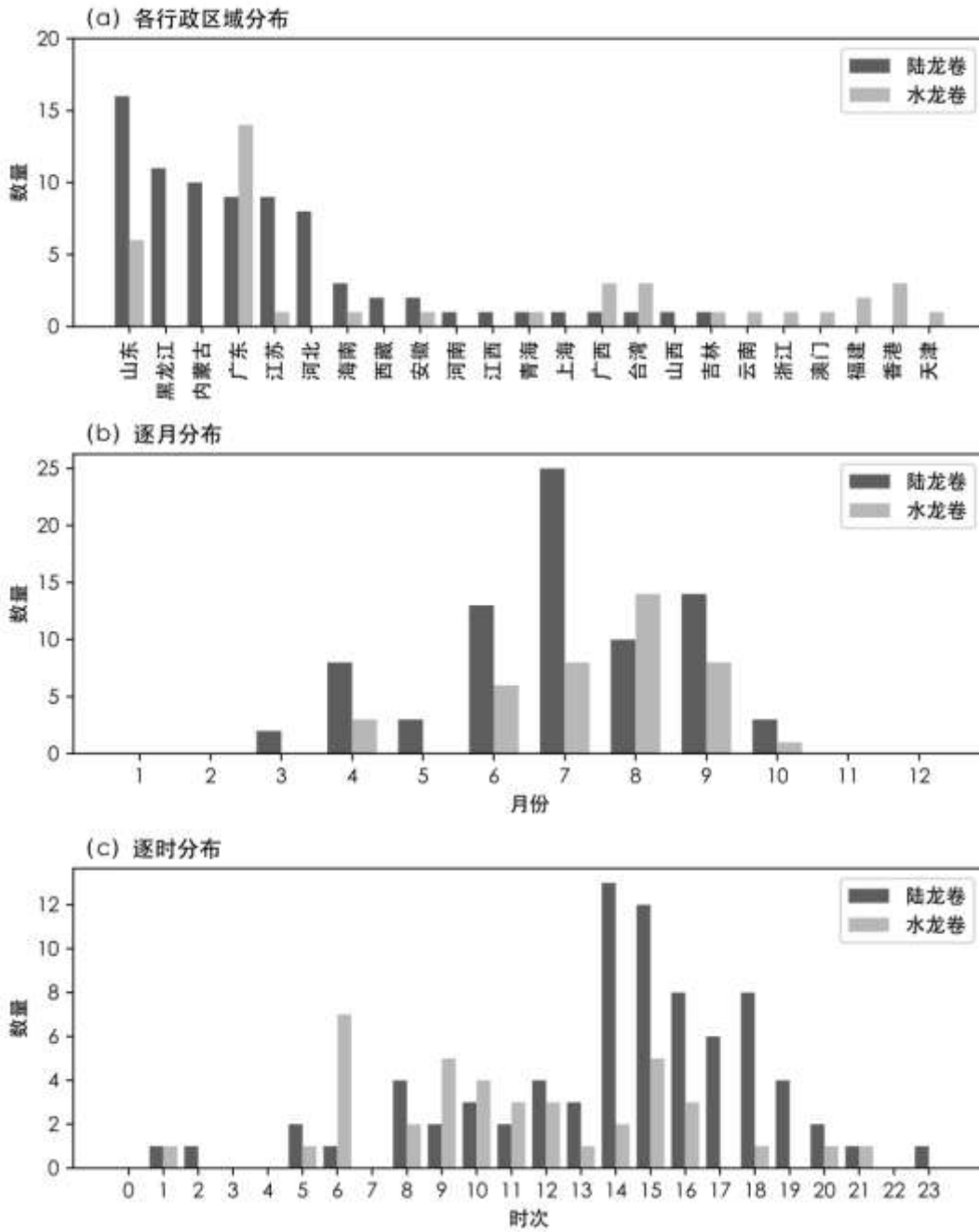


138
 139
 140
 141
 142
 143
 144

图 2 (a, c) 龙卷和 (b, d) 不同强度龙卷的空间分布
 (a, b) 2024 年, (c, d) 2018—2023 年

Fig. 2 Spatial distribution of (a,c) tornadoes and (b,d) tornadoes with different intensity grades during (a, b) 2024 and (c, d) 2018—2023

145 从龙卷逐月分布来看, 3-10 月均有龙卷发生, 最早的龙卷发生在 3 月 30 日, 最晚的龙
146 卷发生在 10 月 31 日。其中 83% 发生在 6—9 月, 7 月份最多, 达 25 个。水龙卷主要发生在
147 8 月份, 达 15 个。受秋季台风影响, 9—10 月仍出现多个龙卷, 例如 9 月 17 日在台风“贝
148 碧嘉”残余环流影响下黄淮地区发生 11 个龙卷。从日变化来看, 92% 的龙卷发生在白天(07:00
149 —19:00), 61% 发生在 14:00—18:00。夜间(21:00—05:00) 发生的龙卷仅有 6 个, 大多
150 都没有龙卷本体的视频和照片, 主要通过灾损调查和雷达数据进行综合分析判断。水龙卷白
151 天多发, 06:00 为高峰。



153

154

图3 2024年龙卷数量变化

155

(a) 省份, (b) 逐月, (c) 逐时

156

Fig. 3 Variation of tornadoe quantity in different (a) provinces, (b) months and (c) hours in 2024

157

158

自媒体平台的即时性和去中心化让更多的龙卷个例被发现和记录到,越来越多的龙卷影

159

像资料被公众上传到网络(图4)。龙卷的形态多样,包括漏斗形、细管形、卷曲形等。龙

160 卷多呈漏斗形，强度较强的龙卷其漏斗形状较宽，例如 7 月 5 日的山东菏泽龙卷。龙卷有时
161 还会出现较明显的多涡形态，例如 9 月 17 日的江苏宿迁龙卷。龙卷出现在多种不同下垫面
162 上，常见的有田地、城市及农村住宅、厂房，还包括沙漠、草原、山地、高原。水龙卷多呈
163 细管形，时有卷曲形出现，例如 10 月 9 日的青海海南水龙卷。水龙卷有时会出现一种双重
164 漏斗结构 (Bluestein, 2013; Bluestein et al, 2016)，即内侧和外侧都有显著的凝结柱
165 形成一个“双壁”结构，除了常见的内侧漏斗，外侧还包裹着一层更宽的漏斗或环状结构，
166 例如 7 月 7 日的广西北海水龙卷。9 月 28 日的香港水龙卷与摩天大楼相距不过百米，虽然
167 大多数水龙卷通常不会对人员或建筑物造成危害，但也曾有水龙卷造成船只损伤的情况出现。
168



169
170
171
172
173

图 4 2024 年部分 (a) 龙卷和 (b) 水龙卷影像图集

Fig. 4 Photo gallery of partial (a) tornadoes and (b) waterspouts in 2024

174 3 典型案例

175 3.1 龙卷群发事件

176 龙卷群发事件是指在一定时间范围、一定空间范围内发生多次龙卷的过程。美国是全球
177 龙卷活动最频繁也是龙卷群发事件最多的地区，发生过上百次龙卷群发事件 (Ćwik et al,
178 2025; Mercer et al, 2012; Gensini and Brooks, 2018)，中国的龙卷群发事件相对少见，

179 例如 2018 年热带气旋“摩羯”背景下的共 11 个龙卷的群发事件 (Bai, 2021), 2021 年江
180 淮气旋背景下的共 13 个龙卷的群发事件 (Wen et al, 2024), 2023 年出现多次龙卷群发
181 事件 (张晶晶等, 2024)。以往研究表明, 龙卷群发事件的成因与多尺度天气气候因素相关,
182 从大尺度天气背景、中尺度环境条件到小尺度的局地地形等因素。有研究指出, 在我国热带
183 气旋和温带气旋背景下通常容易出现龙卷群发事件 (Wen et al, 2024; 张晶晶等, 2024;
184 Bai, 2021)。

185 本文将龙卷群发定义为 48 h 内在 300km 范围内发生 5 个及以上的龙卷事件。2024 年,
186 中国龙卷群发特征明显, 共有 4 次龙卷群发事件: 东北冷涡背景下 6 月 13—14 日黑龙江 5
187 个龙卷, 低层为温带气旋控制; 高空槽背景下 7 月 5 日山东 13 个龙卷; 高空槽背景下 8 月
188 9 日河北 5 个龙卷, 低层也受温带气旋影响; 台风残余环流影响下 9 月 17 日山东、江苏、
189 安徽和河南的 11 个龙卷。另外还有一次高空槽背景下共 5 个水龙卷的水龙卷群发过程, 发
190 生在 8 月 13 日的山东东营 (其中一个水龙卷上岸被记录为陆地龙卷)。

191 东北地区的龙卷多发生在冷涡背景下, 且大多出现在东北冷涡的东南和西南象限 (袁潮
192 等, 2023; 才奎志等, 2022; 王秀明等, 2015)。6 月 13—14 日黑龙江的 5 个龙卷均发生
193 在东北冷涡的东南和西南象限 (图 5a), 其中 1 个为 EF2 强度等级, 4 个为 EF0 级。其中发
194 生在大庆肇州的 EF2 级龙卷, 持续了 51min, 灾情路径长度路径达 30 km, 最大影响宽度约
195 1.2 km, 过程中最强 TVS 达到 $50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 5c)。其余 4 个 EF0 级的龙卷, 过程最强 TVS
196 均在 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右 (图 5b, d-f), 速度对旋转特征不显著, 龙卷持续时间短。

197 7 月 5 日, 山东发生了 13 个龙卷的群发事件, 高层主要受高空槽影响 (图 6a), 即西
198 风带系统影响, 这也是最易发生龙卷的天气系统之一 (黄先香等, 2024; 俞小鼎等, 2021)。
199 13 个龙卷中 EF3 级 4 个, EF2 级 3 个, EF1 级 5 个, EF0 级 1 个 (图 6a), 属于强度强,
200 影响大的龙卷群发事件。2024 年所有的 EF3 级龙卷都是在这群发事件中发生的, 这 4 个
201 EF3 级龙卷的灾情长度路径均在 10 km 以上, 持续时间在 15min 以上, 其中发生在菏泽东明
202 的 EF3 级龙卷穿过了东明县城, 巨大的漏斗云穿城而过, 破坏力强、影响范围大。13 个龙
203 卷中有 4 个龙卷是由同一个超级单体过程在不同时间生成的, 这一超级单体持续时间长、强
204 度强, 产生的 4 个龙卷强度都在 EF2 级及以上, 过程最强 TVS 分别达到 34.5、45.4、49.5
205 和 $48 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

206 8月9日,河北发生了一次5个EF1级龙卷生成的群发事件(图7),也是在典型的西
207 风带背景影响下。其中发生在保定安新白洋淀的龙卷过程持续了46min,灾情长度路径约31
208 km,其余4个龙卷的持续时间都不超过10min,灾情长度路径都不超过4km。

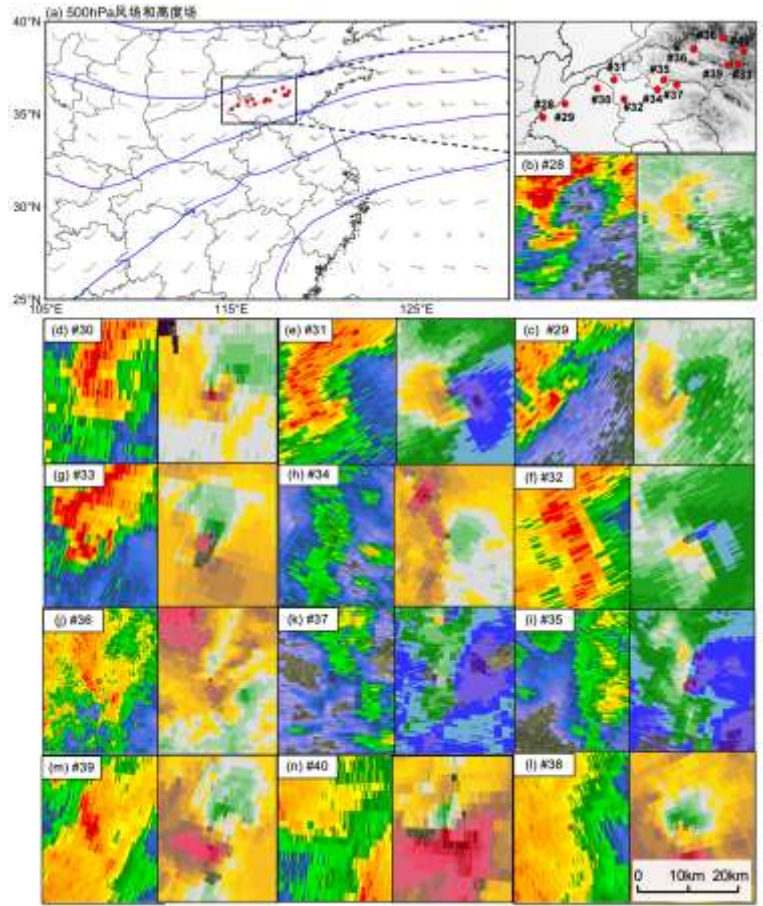
209 热带气旋是龙卷发生的重要天气背景之一,珠三角和江苏省都是热带气旋龙卷多发的地
210 区(慕瑞琪等,2022; Bai, 2021; 白兰强等, 2020; 黄先香等, 2019b)。2024年第13号
211 台风“贝碧嘉”9月16日早晨在上海以强台风级登陆,而后强度缓慢减弱并深入内陆,17
212 日下午已减弱至热带风暴级,中心位于安徽省内,在其残余环流影响下,黄淮地区发生了
213 11个龙卷的群发过程(图8),包括江苏7个龙卷、山东2个、安徽和河南各1个,其中8
214 个为EF1级,3个为EF0级,灾情影响路径大多在10km以内。其中发生在连云港东海的EF0
215 级龙卷出现跳跃,第一段和第二段的影响路径长度分别为2.9km和2.8km,中间间隔4.5km,
216 因间隔时间不超过20min,认为是同一个龙卷过程。

217

218 注:图 a_1 中黑色方框为图 a_2 范围,图 a_2 中阴影为地形;红色方框标记龙卷位置,“#”后面的数字对应表1中的龙卷序号;下
219 同。

220 图5 2024年6月13—14日黑龙江龙卷群发事件中(a_1)500hPa位势高度(等值线,单位:dagpm)和风
221 场(风羽),(a_2)龙卷位置分布(圆点),($b\sim f$)5个龙卷过程最强时次的($b_1\sim f_1$)雷达反射率因子
222 和($b_2\sim f_2$)径向速度

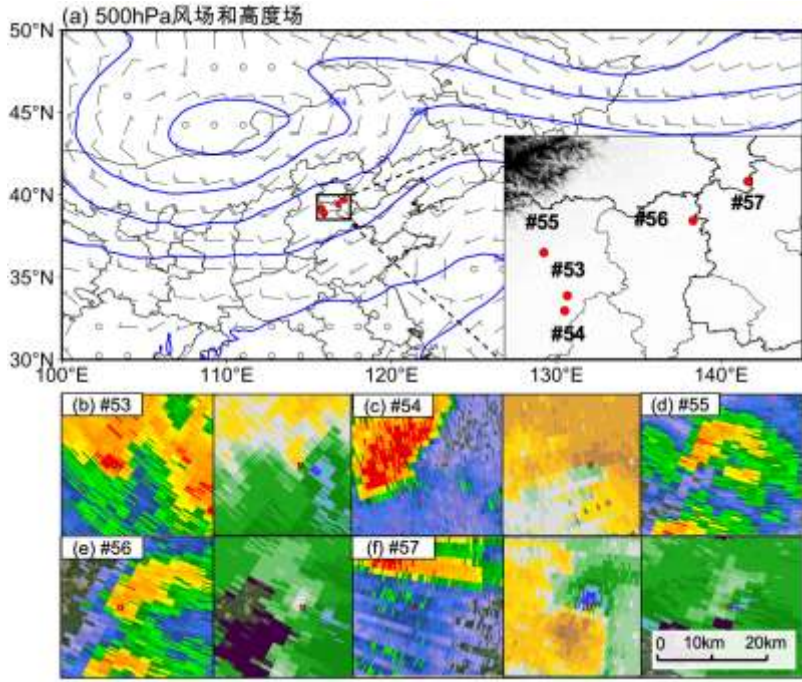
223 Fig.5 (a_1) 500 hPa geopotential height (contour, unit: dagpm) and wind field (barb) with (a_2) tornado locations
224 (dot), ($b_1\sim f_1$) radar reflectivity factor and ($b_2\sim f_2$) radial velocity at the strongest stage of five tornado processes in
225 the tornado outbreak of Heilongjiang Province during 13–14 June 2024



226
 227
 228
 229
 230
 231
 232
 233

图6 2024年7月5日山东龙卷群发事件中 (a₁) 500 hPa 位势高度 (等值线, 单位: dagpm) 和风场 (风羽), (a₂) 龙卷位置分布 (圆点), (b₁~n₁) 13 个龙卷过程最强时次的 (b₁~n₁) 雷达反射率因子和 (b₂~n₂) 径向速度

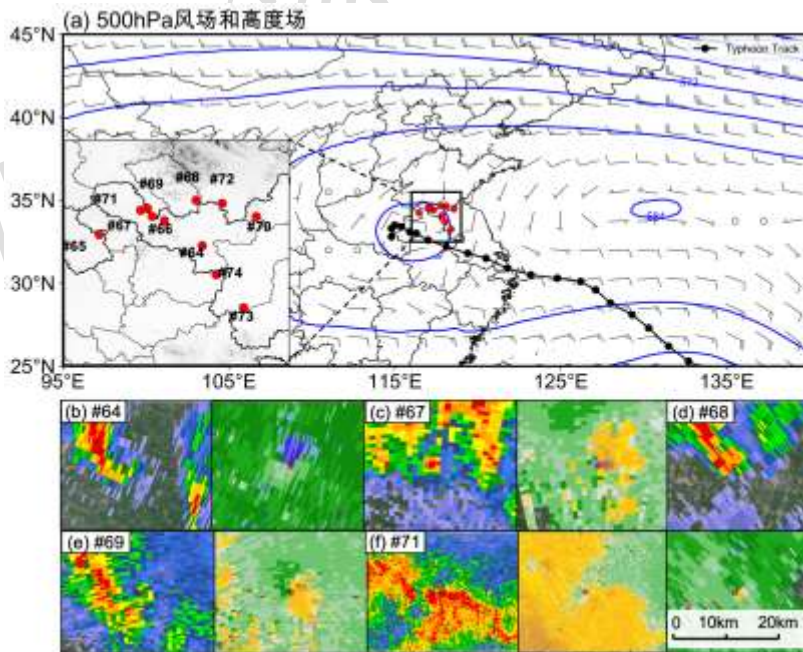
Fig.6 (a₁) 500 hPa geopotential height (contour, unit: dagpm) and wind field (barb) with (a₂) tornado locations (dot), (b₁~n₁) radar reflectivity factor and ((b₂~n₂)) radial velocity at the strongest stage of thirteen tornado processes in the tornado outbreak of Heilongjiang Province on 5 July 2024



234

235 图7 2024年8月9日河北龙卷群发群发事件中 (a₁) 500 hPa 位势高度 (等值线, 单位: dagpm) 和风场
 236 (风羽), (a₂) 龙卷位置分布 (圆点), (b~f) 5个龙卷过程最强时次的 (b₁~f₁) 雷达反射率因子和
 237 (b₂~f₂) 径向速度

238 Fig.7 (a₁) 500 hPa geopotential height (contour, unit: dagpm) and wind field (barb) with (a₂) tornado locations
 239 (dot), (b₁~f₁) radar reflectivity factor and (b₂~f₂) radial velocity at the strongest stage of five tornado processes in
 240 the tornado outbreak of Heilongjiang Province on 9 August 2024

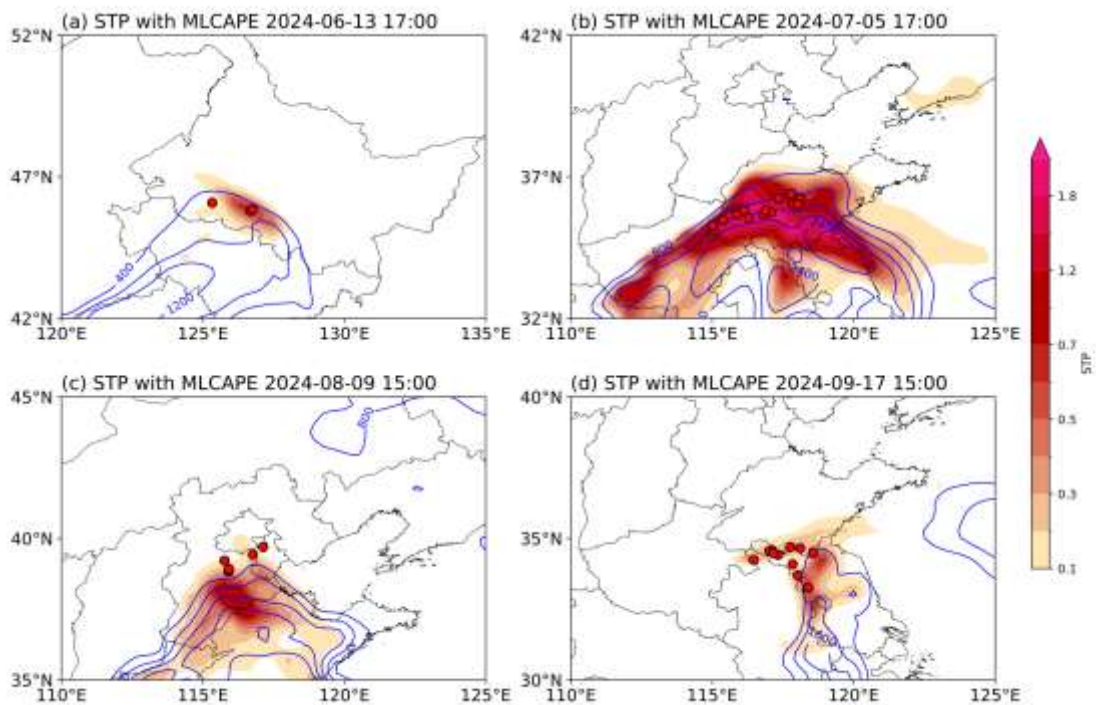


241

242 图8 2024年9月17日黄淮地区龙卷群发事件中 (a₁) 500 hPa 位势高度 (等值线, 单位: dagpm) 和风场
 243 (风羽) 及 (a₂) 龙卷位置, (b~f) 5个龙卷过程最强时次的 (b₁~f₁) 雷达反射率因子和 (b₂~f₂) 径向
 244 速度

245 Fig.8 (a₁) 500 hPa geopotential height (contour, unit: dagpm) and wind field (barb) with (a₂) tornado locations,
 246 (b₁-f₁) radar reflectivity factor and (b₂-f₂) radial velocity at the strongest stage of five tornado processes in the
 247 tornado outbreak of Heilongjiang Province on 17 September 2024

248
 249 通过对上述4次龙卷群发事件的大气对流环境条件进行诊断分析表明,龙卷风集中发生
 250 在强龙卷指数 (STP; Thompson et al, 2003) 的相对大值区附近,如图9中STP大于0.1
 251 的区域。此外,龙卷风多集中发生在对流有效位能梯度大值区而非其绝对数值大值区 (图
 252 9b 蓝色等值线密集区)。以上结果表明龙卷发生与局地有利的热力和动力条件密切相关。
 253 该结果进一步印证了有利的环境背景特征与龙卷群发事件之间存在一定关联性,为未来群发
 254 性龙卷天气的潜势预报提供了参考依据。然而,值得注意的是,即使在有利于龙卷形成的大
 255 气对流环境下,多数情况下仅出现个别龙卷,甚至可能无龙卷发生。因此,虽然大范围的
 256 STP 高值区域在概率上增加了龙卷多发的可能性,但并不必然导致龙卷生成或爆发。龙卷的
 257 实际发生仍受到对流风暴组织结构的演变以及其与复杂下垫面相互作用等多种因素的影响。



258
 259

注: 圆点代表龙卷发生位置。

260 图 9 2024 年 4 次龙卷群发事件的强龙卷指数（填色）和混合层对流有效位能（等值线，单位： $J \cdot kg^{-1}$ ）分
261 布

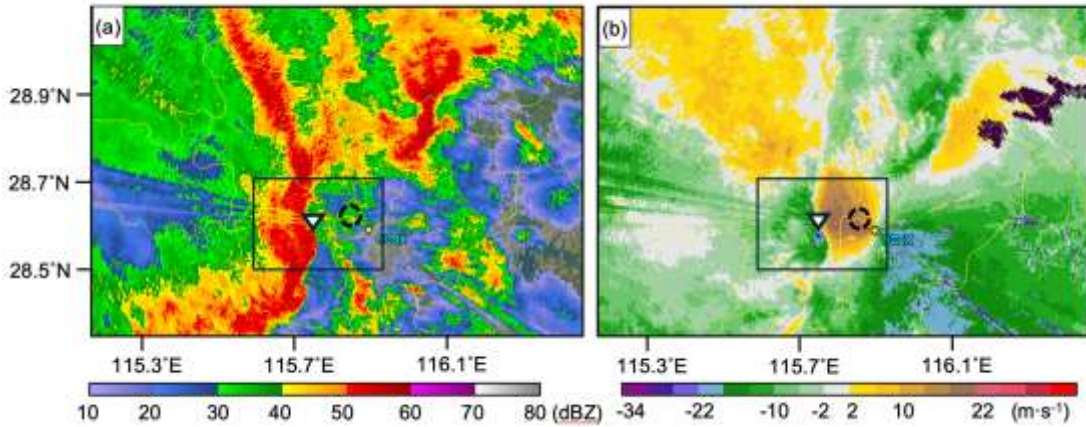
262 (a) 6 月 13 日 17:00, (b) 7 月 5 日 17:00, (c) 8 月 9 日 15:00, (d) 9 月 17 日 15:00

263 Fig.9 Significant tornado parameter (colored) and mixed-layer convective available potential energy (contour,
264 unit: $J \cdot kg^{-1}$) of four tornado outbreak events at (a) 17:00 BT 13 June, (b) 17:00 BT 5 July, (c)
265 15:00 BT 8 August, and (d) 15:00 BT 17 September 2024

266 3. 2 夜间龙卷事件

267 当龙卷发生在夜间时，通常缺乏直接的龙卷影像证据，因此可能出现遗漏或难以判断的
268 情形。另一方面，龙卷夹杂发生在大范围强影响的强对流天气过程中，在最终地面灾害中分
269 辨出龙卷致灾特征也可能存在一定难度。夜间龙卷个例的确定，往往需要结合邻近天气雷达
270 观测和地面灾害特征进行综合研判，下文将以江西南昌的一次夜间龙卷为例。

271 受弓形回波过境影响，江西南昌西湖区 3 月 31 日凌晨遭受雷电、暴雨和地面强风等强
272 对流天气。在此次天气过程中，位于南昌县的一高层住宅发生了室内人员受强风影响被吸出
273 室外的气象灾害事件。通过对比邻近多普勒天气雷达观测，该地点位于弓形回波前沿（图
274 10）。在弓形回波附近通常伴随强烈的下沉气流和冷池出流，其前沿易形成地面强风。以往
275 研究表明，多数龙卷通常与超级单体相关，除了超级单体以外，弓形回波中的中尺度涡旋也
276 会产生龙卷 (Knupp et al, 2014)。在上述气象灾害事件发生时刻之前（约 3 月 31 日 03
277 时），位于其西侧约 12 km 处的雷达观测显示出龙卷信号特征，同时在地面具有对应的窄带
278 状地面灾害（王秀明等，2024）。从 02:44 的雷达观测可见（图 11），在扣除风暴移动速
279 度的风暴相对径向速度场中呈现出明显的旋转性切变特征，并伴随着“卷曲”的反射率形态；
280 在 1.5 度仰角的 TVS（地面高度 400 m 左右）达 $30 m \cdot s^{-1}$ 的强度，表明该地点存在较强的
281 旋转性大风。同时，雷达 1.5 度仰角及以上都有明显的相关系数 (CC) 小值区，具有较好的
282 垂直连续性（图 11c₁~11c₄），CC 小于 0.7 的范围存在于圆形区域，一直向上延伸到 2 km
283 左右，伴随有差分反射率因子 (Z_{DR}) 低值，即 $Z_{DR} < 2$ dB（图 11d₁~11d₄）。这些双偏振特征
284 量表明该旋转性大风所在区域出现了地面灾害，存在被卷入空中的灾害碎片。综合上述雷达
285 气旋性切变、灾害碎片特征，以及地面实际发生了窄带状灾损等特征，将上述气象灾害事件
286 上游区域发生的地面旋转性大风判断为龙卷事件。



288

289 注：方框为关注区，白色倒三角为雷达龙卷涡旋特征位置，黑色圆圈为高层住宅室内人员受强风影响被吸出室外所处位置区域。

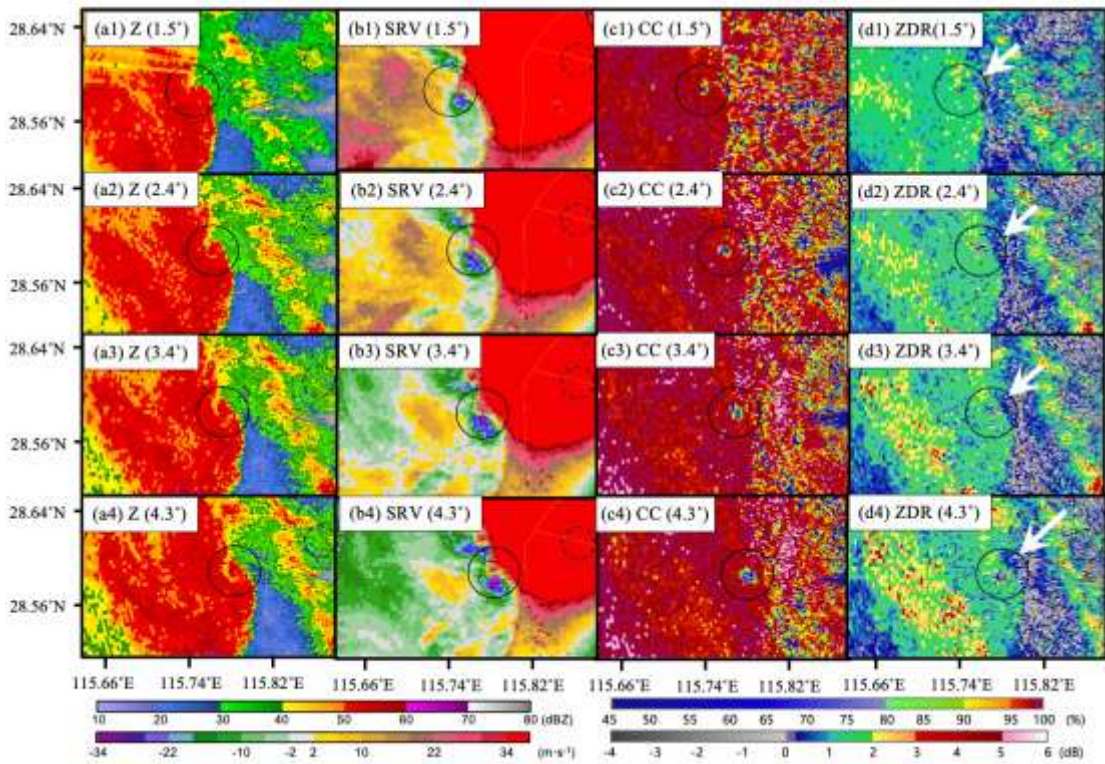
290 图 10 2024 年 3 月 31 日 02:44 南昌雷达 1.5 度仰角 (a) 基本反射率因子和 (b) 风暴相对径向速度

291 Fig.10 (a) Basic reflectivity factor and (b) storm-relative radial velocity at 1.5° elevation of Nanchang Radar at

292 02:44 BT 31 March 2024

293

294



295

296 注：黑色实线圆圈为疑似龙卷位置范围，黑色虚线圆圈为高层住宅室内人员受强风影响被吸出室外的区域，图 d 中的白色箭头

297 指示 Z_{dr} 小值区。

298 图 11 站 2024 年 3 月 31 日 02:44 南昌雷达不同仰角的 (a) 反射率因子, (b) 风暴相对速度, (c) CC,
299 (d) Z_{DR}

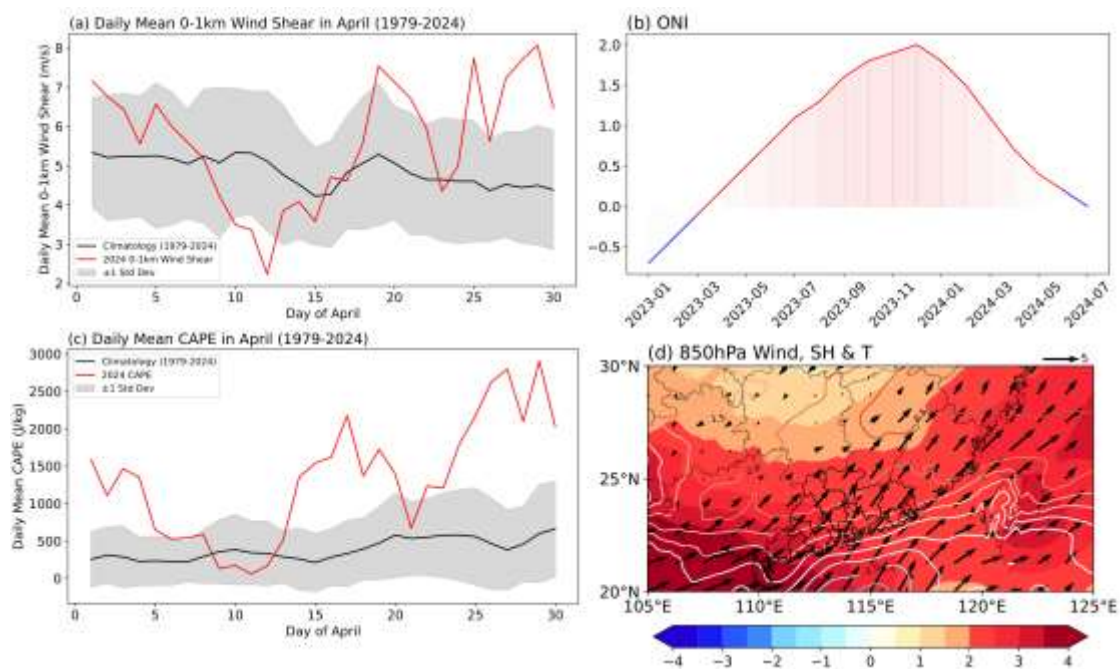
300 Fig.11 (a) Reflectivity factor, (b) storm-relative velocity, (c) CC, and (d) Z_{DR} at different elevation
301 angles of Nanchang Radar at 02:44 BT 31 March 2024

302

303 3.3 广东春季龙卷多发

304 2024 年, 广东共发生了 9 个龙卷, 其中 6 个发生在 3 月 30 日至 4 月 27 日 (附表 1)。
305 发现相较于往年, 2024 年春季龙卷数量偏多, 其中 5 个龙卷为超级单体龙卷。超级单体龙
306 卷通常发生在垂直风切变和对流有效位能 (CAPE) 较强的环境背景下 (杨祖祥等, 2024; 慕
307 瑞琪等, 2022; Tochimoto and Niino, 2016)。通常, 广东 4 月的垂直风切变较大, 但热
308 力条件相对有限 (图 12a, 12c), 一定程度制约了超级单体龙卷发生的概率。本文借助 ERA5
309 再分析资料对 2024 年 4 月的热力和动力条件诊断发现, 该月的动力条件与往年类似, 但热
310 力条件明显增强, 即 CAPE 较往年明显增大 (图 12c)。进一步研究发现, 2023 年冬季发生
311 了一次较强的厄尔尼诺事件 (图 12b)。以往的研究表明, 厄尔尼诺-南方涛动 (ENSO) 可
312 以对东亚天气气候产生重要影响 (张人禾等, 2017), 且 ENSO 与龙卷活动有一定联系, 主
313 要通过影响大尺度环流和环境背景从而影响龙卷活动 (Allen et al, 2015; Lee et al, 2016)。

314 中东太平洋的海温距平在 2023 年冬季达到了 2°C , 表明此次厄尔尼诺事件强度较强。
315 强厄尔尼诺在西北太平洋激发了显著的异常反气旋环流, 并持续影响至 2024 年春季。这种
316 冬季形成的反气旋环流, 通过遥相关机制影响了春季华南地区的环境背景。一方面, 该反气
317 旋异常增强了华南地区低层的西南风, 强化了水汽输送, 导致广东地区湿度显著上升 (图
318 14d); 另一方面, 在全球变暖背景下, 2024 年 4 月成为有记录以来全球最暖的 4 月, 广东
319 地区对流层温度也表现出明显的暖异常 (图 12d)。在热力和动力条件均较为有利的背景下,
320 为超级单体风暴和龙卷风的形成提供了有利环境。这表明, 2024 年春季广东龙卷高发现象
321 可能与 ENSO 事件密切相关。然而需要强调的是, 当前分析基于单一年份的气候异常进行归
322 因, 结论尚存在不确定性。未来有必要进一步研究其他厄尔尼诺次年是否也会出现类似的环
323 境背景与龙卷多发的情况。



324
 325 图 12 (a, b) 2024 年 4 月 (21°~24°N、112°~115°E) 区域平均的 (a) 0~1km 风切变和 (c) CAPE 逐
 326 日变化, (b) 2023 年 1 月至 2024 年 7 月 ONI 指数逐月变化, (d) 2024 年 4 月平均 850 hPa 风场 (风矢)、
 327 绝对湿度 (等值线, 单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和温度 (填色, 单位: K) 相对 1991—2020 年气候平均的异常
 328 Fig.12 Daily variations of (a) 0–1 km wind shear and (c) CAPE averaged over the region of (21°–24° N, 112°–
 329 115° E) in April 2024, (b) monthly variation of the ONI index from January 2023 to July 2024, (d) anomalies of
 330 the averaged 850 hPa wind field (vector), absolute humidity (contour, unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), and temperature (shaded, unit:
 331 K) in April 2024 relative to the 1991–2020 climatology

333 5 结论和讨论

334 通过多类型媒体平台和实地灾情调查等手段,并结合雷达等气象观测数据,综合研判龙
 335 卷的真实性及时间、地点、强度、路径等信息,2024 年共记录 78 个龙卷(特指在陆地上发
 336 生的龙卷),40 个水龙卷。2024 年龙卷多发生在 6—9 月,主要集中分布在东北、京津冀、
 337 黄淮和珠三角地区;水龙卷 8 月最多,主要分布在华南沿海及渤海湾。首个龙卷发生在 3
 338 月 30 日,最后一个龙卷发生在 10 月 31 日(较往年偏晚,与秋季台风有关)。需要指出
 339 的是,受观测能力等客观条件限制,本文的龙卷记录无法涵盖实际发生的所有龙卷过程,可
 340 能存在一定的遗漏。通过灾害调查进行强度估计的龙卷共 51 个,包括 13 个 EF2 级或以上级
 341 强度。最强的龙卷为 EF3 级,共 4 个,均发生在山东。

342 2024 年龙卷的群发性特征显著, 4 次群发过程的龙卷数占到全年陆地龙卷总数的 44%。
343 在东北冷涡背景下, 黑龙江在 6 月 13—14 日记录到 5 个龙卷; 高空槽背景下, 山东在 7 月
344 5 日记录到 13 个龙卷, 河北在 8 月 9 日记录到 5 个龙卷; 热带气旋残余环流背景下, 9 月
345 17 日在山东、江苏、安徽和河南共记录到 11 个龙卷。分析表明, 龙卷群发事件均在有利的
346 热力条件下发生。2023 年冬季发生了一次强厄尔尼诺事件, 其影响持续到次年春季, 华
347 南地区的热力条件相比往年明显加强, 在这种大尺度环境背景下广东春季龙卷异常高发, 3
348 月底至 4 月底发生了 6 个龙卷, 占广东全年数量的 67%。

349 当前, 尽管自媒体、官方媒体及气象观测数据的大大提升了龙卷个例记录的完整性, 但
350 由于龙卷的生命史短, 空间尺度小, 在无直接影像证据的情况下仍存在一些难以判断的个例,
351 及时专业的灾情调查和详尽的观测资料分析仍然是重要且有效的途径。例如江西南昌的一次
352 夜间致灾性天气事件, 反映了夜间龙卷在判定和确认上的较高难度。其次, 同一超级单体在
353 不同时间生成多个龙卷的现象, 反映出超级单体和龙卷的复杂动力机制, 仍需要更深入的研究。
354 2024 年发生了多次龙卷群发事件, 存在影响范围广、灾害性强等特点, 其可能成因与
355 机制仍待未来进一步深入分析与研究。此外, 气候变化可能通过影响大尺度环流、水汽输送
356 及热力条件, 调控区域性强对流天气的发生发展, 未来仍需进一步研究。这些问题不仅关乎
357 龙卷的机理探究和科学认识, 也对预报预警、防灾减灾等工作提出了新的挑战。

358

359 致谢

360 感谢国家气象中心、中国气象局气象探测中心雷达应用室、山东省气象局、辽宁省气象局、黑龙江省
361 气象局、江苏省气象局、安徽省气象局、河南省气象局、广东省气象台、潮州市气象局、清远市气象局、
362 佛山市气象局和国内诸多气象爱好者等对龙卷个例收集提供的支持和帮助。

363

364 参考文献

- 365 白兰强, 孟智勇, Sueki K, 等, 2020. 中国热带气旋龙卷的气候统计特征(2006~2018)[J]. 中国科学: 地球科学, 50(5): 619-634. Bai
366 L Q, Meng Z Y, Sueki K, et al, 2020. Climatology of tropical cyclone tornadoes in China from 2006 to 2018[J]. Sci China Earth Sci,
367 63(1): 37-51.
- 368 蔡康龙, 黄先香, 李彩玲, 等, 2021. 2020 年中国龙卷过程及灾情特征[J]. 气象科技进展, 11(1): 40-45, 53. Cai K L, Huang X X, Li C
369 L, et al, 2021. Characteristics of tornado activity in China in 2020[J]. Adv Meteor Sci Technol, 11(1): 40-45, 53 (in Chinese).
- 370 才奎志, 姚秀萍, 孙晓巍, 等, 2022. 冷涡背景下辽宁龙卷气候特征和环境条件[J]. 气象学报, 80(1): 82-92. Cai K Z, Yao X P, Sun
371 X W, et al, 2022. Climatic characteristics and environmental conditions of tornadoes in Liaoning under the background of cold
372 vortex[J]. Acta Meteor Sin, 80(1): 82-92 (in Chinese).
- 373 范雯杰, 俞小鼎, 2015. 中国龙卷的时空分布特征[J]. 气象, 41(7): 793-805. Fan W J, Yu X D, 2015. Characteristics of
374 spatial-temporal distribution of tornadoes in China[J]. Meteor Mon, 41(7): 793-805 (in Chinese).

375 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会, 2021. GB/T 40243-2021 龙卷风强度等级[S]. 北京: 中国标准出版社. State
376 Administration for Market Regulation, National Standardization Administration, 2021. GB/T 40243-2021 Tornado intensity scale[S].
377 Beijing: Standards Press of China (in Chinese).

378 黄舒婷, 李兆明, 白兰强, 等, 2023. 2022 年中国龙卷活动及灾情特征[J]. 气象科技进展, 13(1): 23-32. Huang S T, Li Z M, Bai L Q,
379 et al, 2023. Characteristics of tornado activity and related disasters in China in 2022[J]. Adv Meteor Sci Technol, 13(1): 23-32 (in
380 Chinese).

381 黄先香, 炎利军, 蔡康龙, 等, 2019a. 2018 年中国龙卷活动特征[J]. 气象科技进展, 9(1): 50-55. Huang X X, Yan L J, Cai K L, et al,
382 2019a. Characteristics of tornado activity in China in 2018[J]. Adv Meteor Sci Technol, 9(1): 50-55 (in Chinese).

383 黄先香, 俞小鼎, 炎利军, 等, 2019b. 珠江三角洲台风龙卷的活动特征及环境条件分析[J]. 气象, 45(6): 777-790. Huang X X, Yu X
384 D, Yan L J, et al, 2019b. Analysis of typhoon-tornado activity characteristics and environmental condition in the Pearl River Delta[J].
385 Meteor Mon, 45(6): 777-790 (in Chinese).

386 黄先香, 炎利军, 白兰强, 等, 2024. 广东龙卷时空分布及其母体风暴雷达观测特征[J]. 气象, 50(7): 804-817. Huang X X, Yan L J,
387 Bai L Q, et al, 2024. Spatio-temporal distribution of Guangdong tornadoes and characteristics of radar echoes of parent storms[J].
388 Meteor Mon, 50(7): 804-817 (in Chinese).

389 李彩玲, 黄先香, 蔡康龙, 等, 2020. 2019 年中国龙卷等对流大风过程及灾情特征[J]. 气象科技进展, 10(1): 7-14. Li C L, Huang X
390 X, Cai K L, et al, 2020. Characteristics of tornado activity in China in 2019[J]. Adv Meteor Sci Technol, 10(1): 7-14 (in Chinese).

391 李峰, 李柏, 唐晓文, 等, 2020. 近 20 年美国龙卷探测研究进展——对我国龙卷风研究的启示[J]. 气象, 46(2): 245-256. Li F, Li B,
392 Tang X W, et al, 2020. Advances in tornado detection in the United States in recent 20 years—inspiration to the study of tornadoes
393 in China[J]. Meteor Mon, 46(2): 245-256 (in Chinese).

394 慕瑞琪, 徐芬, 孙康远, 等, 2022. 江苏台风龙卷环境条件与雷达关键特征分析[J]. 气象, 48(2): 190-202. Mu R Q, Xu F, Sun K Y, et
395 al, 2022. Analysis of environmental conditions and radar key features of typhoon-tornadoes in Jiangsu[J]. Meteor Mon, 48(2):
396 190-202 (in Chinese).

397 王秀明, 俞小鼎, 周小刚, 2015. 中国东北龙卷研究: 环境特征分析[J]. 气象学报, 73(3): 425-441. Wang X M, Yu X D, Zhou X G,
398 2015. Study of Northeast China tornadoes: the environmental characteristics[J]. Acta Meteor Sin, 73(3): 425-441 (in Chinese).

399 王秀明, 刘屹靖, 李淑璠, 等, 2024. 江西 3.31 极端大风天气成因分析[R]. 3 月对流性大风冰雹过程成因分析和短临预警技术交流
400 会暨 2024 年天气预报中试基地第 3 期联合会商. 国家气象中心. Wang X M, Liu Y J, Li S F, et al, 2024. Analysis of the causes
401 of the extreme wind event in Jiangxi on March 31[R]. Seminar on the causes of convective strong wind and hail events in March and
402 short-term warning technologies & the 3rd joint consultation of the 2024 weather forecast trial base. National Meteorological Center
403 (in Chinese). 徐芬, 郑媛媛, 孙康远, 2021. 江苏龙卷时空分布及风暴形态特征[J]. 气象, 47(5): 517-528. Xu F, Zheng Y Y, Sun
404 K Y, 2021. Characteristics of spatio-temporal distribution and storm morphologies of tornadoes in Jiangsu Province[J]. Meteor Mon,
405 47(5): 517-528 (in Chinese).

406 杨祖祥, 李萌萌, 王磊, 等, 2024. 2023 年 9 月 19 日阜宁致灾强龙卷多源观测分析[J]. 气象, 50(12): 1467-1479. Yang Z X, Li M M,
407 Wang L, et al, 2024. Analysis of multi-source observation of the disastrous tornado in Funing County on 19 September 2023[J].
408 Meteor Mon, 50(12): 1467-1479 (in Chinese).

409 姚眺, 2020. 龙卷预报预警体系建设——气象现代化的前沿挑战[J]. 气象科技进展, 10(6): 19-22. Yao D, 2020. Construction of
410 tornado forecast and early warning system: the frontier challenge of meteorological modernization[J]. Adv Meteor Sci Technol,
411 10(6): 19-22 (in Chinese).

412 俞小鼎, 赵娟, 范雯杰, 2021. 中国龙卷的时空分布与关键环境参数特征[J]. 热带气象学报, 37(5-6): 681-692. Yu X D, Zhao J, Fan
413 W J, 2021. Tornadoes in China: spatiotemporal distribution and environmental characteristics[J]. J Trop Meteor, 37(5-6): 681-692
414 (in Chinese).

415 袁潮, 杨文艳, 李得勤, 等, 2023. 1971—2020 年辽宁龙卷的气候特征及环境条件分析[J]. 气象, 49(11): 1285-1298. Yuan C, Yang
416 W Y, Li D Q, et al, 2023. Climatology and environmental features of tornadoes in Liaoning Province during 1971-2020[J]. Meteor
417 Mon, 49(11): 1285-1298 (in Chinese).

418 张晶晶, 黄先香, 蔡康龙, 等, 2024. 2023 年中国龙卷活动及灾情特征[J]. 气象科技进展, 14(1): 15-24. Zhang J J, Huang X X, Cai K
419 L, et al, 2024. Tornado activities and disaster characteristics in China in 2023[J]. Adv Meteor Sci Technol, 14(1): 15-24 (in Chinese).
420 张人禾, 闵庆焯, 苏京志, 2017. 厄尔尼诺对东亚大气环流和中国降水年际变异的影响: 西北太平洋异常反气旋的作用[J]. 中国科
421 学: 地球科学, 47(5): 544-553. Zhang R H, Min Q Y, Su J Z, 2017. Impact of El Niño on atmospheric circulations over east Asia
422 and rainfall in China: role of the anomalous western North Pacific anticyclone[J]. Sci China Earth Sci, 60(6): 1124-1132.
423 郑永光, 2020. 中国龙卷气候特征和环境条件研究进展综述[J]. 气象科技进展, 10(6): 69-75. Zheng Y G, 2020. Review of
424 climatology and favorable environmental conditions of tornado in China[J]. Adv Meteor Sci Technol, 10(6): 69-75 (in Chinese).
425 郑永光, 刘非凡, 张恒进, 2021. 中国龙卷研究进展[J]. 气象, 47(11): 1319-1335. Zheng Y G, Liu F F, Zhang H J, 2021. Advances in
426 tornado research in China[J]. Meteor Mon, 47(11): 1319-1335 (in Chinese).
427 郑媛媛, 朱红芳, 方翔, 等, 2009. 强龙卷超级单体风暴特征分析与预警研究[J]. 高原气象, 28(3): 617-625. Zheng Y Y, Zhu H F,
428 Fang X, et al, 2009. Characteristic analysis and early-warning of tornado supercell storm[J]. Plateau Meteor, 28(3): 617-625 (in
429 Chinese).
430 植江玲, 黄先香, 白兰强, 等, 2022. 2021 年中国龙卷活动及灾情特征[J]. 气象科技进展, 12(1): 26-36. Zhi J L, Huang X X, Bai L Q,
431 et al, 2022. Characteristics of tornado activity and disaster of China in 2021[J]. Adv Meteor Sci Technol, 12(1): 26-36 (in Chinese).
432 Allen, J, Tippett, M, Sobel, 2015. Influence of the El Niño/Southern Oscillation on tornado and hail frequency in the United States[J].
433 Nature Geosci, (8): 278-283.
434 Bai L Q, 2021. Environmental analysis on the first documented tornado outbreak in China[J]. Atmos Sci Lett, 22(10), e1057.
435 Bluestein H B, 2013. Severe Convective Storms and Tornadoes: Observations and Dynamics[M]. Berlin: Springer: 456.
436 Bluestein H B, French M M, Snyder J C, et al, 2016. Doppler radar observations of anticyclonic tornadoes in cyclonically rotating,
437 right-moving supercells[J]. Mon Wea Rev, 144(4): 1591-1616.
438 Chen J Y, Cai X H, Wang H Y, et al, 2018. Tornado climatology of China[J]. Int J Climatol, 38(5): 2478-2489.
439 Ćwik P, Furtado J C, McPherson R A, et al, 2025. Major May tornado outbreaks in the United States: novel multiscale atmospheric
440 patterns identified using maximum covariance analysis[J]. Atmos Res, 315: 107872.
441 Doswell III C A, Brooks H E, Dotzek N, 2009. On the implementation of the enhanced Fujita scale in the USA[J]. Atmos Res, 93(1-3):
442 554-563.
443 Gensini V A, Brooks H E, 2018. Spatial trends in United States tornado frequency[J]. npj Clim Atmos Sci, 1(1): 38.
444 Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al, 2023. ERA5 hourly data on pressure levels from 1940 to present[R]. Copernicus Climate Change
445 Service (C3S) Climate Data Store (CDS).
446 Knupp K R, Murphy T A, Coleman T A, et al, 2014. Meteorological overview of the devastating 27 April 2011 tornado outbreak[J]. Bull
447 Amer Meteor Soc, 95(7): 1041-1062.
448 Lee S K, Wittenberg A, Enfield D, et al, 2016. US regional tornado outbreaks and their links to spring ENSO phases and North Atlantic
449 SST variability[J]. Environ Res Lett, 11: 044008. McDonald J R, Mehta K C, 2006. A recommendation for an enhanced Fujita scale
450 (EF-scale)[R]. Lubbock: Texas Tech University, Wind Science and Engineering Research Center: 111.
451 Mercer A E, Shafer C M, Doswell III C A, et al, 2012. Synoptic composites of tornadic and nontornadic outbreaks[J]. Mon Wea Rev,
452 140(8): 2590-2608
453 Thompson R L, Edwards R, Hart J A, et al, 2003. Close proximity soundings within supercell environments obtained from the rapid
454 update cycle[J]. Wea Forecasting, 18(6): 1243-1261.
455 Tochimoto E, Niino H, 2016. Structural and environmental characteristics of extratropical cyclones that cause tornado outbreaks in the
456 warm sector: a composite study[J]. Mon Wea Rev, 144(3): 945-969.
457 Wen J Y, Meng Z Y, Bai L Q, et al, 2024. A comparison between the only two documented tornado outbreak events in China: tropical
458 cyclone versus extratropical cyclone environments[J]. Wea Forecasting, 39(4): 613-638.

459 附录

Appendix table 1 Tornado information in 2024

序号	日期	时间	地点	EF 强度 (国标)	主要环流特征
1	3月30日	21:00左右	广东清远	EF2 (强)	高空槽
2	3月31日	02:44左右	江西南昌	/	高空槽
3	4月12日	14:30左右	内蒙古通辽	/	高空槽
4	4月12日	14:30左右	内蒙古通辽	/	高空槽
5	4月20日	08:15—8:44	广西梧州	EF2 (强)	高空槽
6	4月21日	08:48	广东江门	EF0 (弱)	高空槽
7	4月26日	05:22左右	广东佛山	EF1 (中等强度)	高空槽
8	4月27日	14:49—15:04	广东广州	EF2 (强)	高空槽
9	4月27日	15:30—15:32	广东广州	EF1 (中等强度)	高空槽
10	4月30日	11:15左右	广东潮州	EF0 (弱)	高空槽
11	5月5日	16:00左右	内蒙古巴彦淖尔	/	高空槽
12	5月14日	11:58—12:01	黑龙江佳木斯	EF1 (中等强度)	高空槽
13	5月28日	13:00左右	黑龙江绥化	/	东北冷涡
14	6月6日	15:42	内蒙古乌兰察布	/	高空槽
15	6月10日	14:00左右	内蒙古乌兰察布	/	高空槽
16	6月11日	18:00左右	吉林松原	/	东北冷涡
17	6月13日	14:38—15:28	黑龙江大庆	EF2 (强)	东北冷涡
18	6月13日	17:46	黑龙江哈尔滨	EF0 (弱)	东北冷涡
19	6月13日	17:55—17:56	黑龙江哈尔滨	EF0 (弱)	东北冷涡
20	6月13日	18:30	河北沧州	EF1 (中等强度)	东北冷涡
21	6月14日	16:38	黑龙江绥化	EF0 (弱)	东北冷涡
22	6月14日	18:16—18:21	黑龙江绥化	EF0 (弱)	东北冷涡
23	6月17日	09:00左右	黑龙江鹤岗	/	东北冷涡
24	6月21日	19:00左右	内蒙古赤峰	/	东北冷涡
25	6月24日	08:47—09:01	广东茂名	EF1 (中等强度)	副高控制
26	6月26日	12:00左右	黑龙江哈尔滨	/	东北冷涡
27	7月4日	05:52—05:53	安徽宿州	/	高空槽
28	7月5日	14:20—14:35	山东菏泽	EF3 (强)	高空槽
29	7月5日	15:10—15:20	山东菏泽	EF2 (强)	高空槽
30	7月5日	16:05—16:25	山东菏泽	EF3 (强)	高空槽
31	7月5日	16:35—16:55	山东济宁	EF3 (强)	高空槽
32	7月5日	17:45左右	山东济宁	EF1 (中等强度)	高空槽
33	7月5日	17:50—18:00	山东淄博	EF2 (强)	高空槽
34	7月5日	18:30左右	山东济宁	EF1 (中等强度)	高空槽
35	7月5日	18:40—19:00	山东泰安	EF3 (强)	高空槽
36	7月5日	18:50左右	山东泰安	EF1 (中等强度)	高空槽
37	7月5日	19:00左右	山东济宁	EF2 (强)	高空槽
38	7月5日	19:42左右	山东济南	EF0 (弱)	高空槽
39	7月5日	20:15左右	山东济南	EF1 (中等强度)	高空槽
40	7月5日	20:40左右	山东淄博	EF1 (中等强度)	高空槽

41	7月17日	12:31	西藏日喀则	/	副高控制
42	7月20日	14:00左右	内蒙古阿拉善	/	东北冷涡
43	7月20日	17:00左右	西藏那曲	/	副高控制
44	7月21日	14:22左右	黑龙江牡丹江	/	东北冷涡
45	7月25日	10:19	内蒙古锡林郭勒	/	东北冷涡
46	7月26日	18:37—18:42	广东潮州	EF1(中等强度)	热带气旋“格美”
47	7月27日	14:00左右	内蒙古乌拉盖	/	东北冷涡
48	7月28日	08:24左右	广东广州	EF1(中等强度)	高空槽
49	7月28日	13:47左右	山西大同	/	高空槽
50	7月30日	16:33左右	河北廊坊	EF2(强)	高空槽
51	7月30日	14:48—15:12	河北唐山	EF2(强)	高空槽
52	8月4日	19:00左右	黑龙江哈尔滨	/	高空槽
53	8月9日	12:10—12:13	河北保定	EF1(中等强度)	高空槽
54	8月9日	14:23—14:24	河北廊坊	EF1(中等强度)	高空槽
55	8月9日	15:41—16:27	河北保定	EF1(中等强度)	高空槽
56	8月9日	15:54—16:01	河北保定	EF1(中等强度)	高空槽
57	8月9日	23:58—00:05	河北廊坊	EF1(中等强度)	高空槽
58	8月13日	06:00左右	山东东营	/	高空槽
59	8月18日	15:53左右	内蒙古包头	/	高空槽
60	8月23日	15:24左右	海南文昌	/	副高控制
61	8月29日	18:00左右	青海海南	/	副高控制
62	9月11日	10:30左右	江苏无锡	/	副高控制
63	9月16日	09:00左右	江苏盐城	/	热带气旋“贝碧嘉”
64	9月17日	12:26—12:38	江苏徐州	EF1(中等强度)	热带气旋“贝碧嘉”
65	9月17日	13:41—13:50	河南商丘	EF1(中等强度)	热带气旋“贝碧嘉”
66	9月17日	14:07—14:12	江苏徐州	EF1(中等强度)	热带气旋“贝碧嘉”
67	9月17日	14:33—14:41	江苏徐州	EF1(中等强度)	热带气旋“贝碧嘉”
68	9月17日	15:30—15:33	山东枣庄	EF1(中等强度)	热带气旋“贝碧嘉”
69	9月17日	15:31—15:33	江苏徐州	EF0(弱)	热带气旋“贝碧嘉”
70	9月17日	15:47—16:10	江苏连云港	EF0(弱)	热带气旋“贝碧嘉”
71	9月17日	16:02—16:09	江苏徐州	EF0(弱)	热带气旋“贝碧嘉”
72	9月17日	16:30—16:46	山东临沂	EF1(中等强度)	热带气旋“贝碧嘉”
73	9月17日	16:58—17:09	江苏宿迁	EF1(中等强度)	热带气旋“贝碧嘉”
74	9月17日	17:07—17:16	安徽宿州	EF1(中等强度)	热带气旋“贝碧嘉”
75	9月20日	15:45左右	上海青浦	EF0(弱)	热带气旋“普拉桑”
76	10月28日	01:36左右	海南琼海	EF1(中等强度)	热带气旋“潭美”
77	10月28日	15:40—15:50	海南万宁	EF0(弱)	热带气旋“潭美”
78	10月31日	10:00左右	台湾台东	/	热带气旋“康妮”

462 注：强度等级中“/”表示未定级。