

张泽宇,白兰强,蔡康龙,等,2026.2024 年中国龙卷时空分布和典型案例分析[J].气象,52(6):726-741. Zhang Z Y, Bai L Q, Cai K L, et al, 2026. Spatio-temporal distribution and case analysis of the tornado events in China in 2024[J]. Meteor Mon, 52(6):726-741(in Chinese).

2024 年中国龙卷时空分布和典型案例分析*

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

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 上海市七宝第二中学,上海 201101

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。共对 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 日在高空槽影响下的一次强对流过程中山东共生成 13 个龙卷,使其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,春季华南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,在南昌发生的一次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

中图分类号: P445

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2026.050701

Spatio-Temporal Distribution and Case Analysis of the Tornado Events in China in 2024

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

1 Foshan Tornado Research Center, CMA Tornado Key Laboratory, Guangdong-Hongkong-Macao Greater Bay Area Academy of Meteorological Research, Guangdong Foshan 528000

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

3 Shanghai Qibao No. 2 Middle School, Shanghai 201101

4 CMA Training Centre, Beijing 100081

5 National Meteorological Centre, Beijing 100081

6 Hong Kong Observatory, Hong Kong 999077

* 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)、广东省气象局科技项目(GRMC2025M10、GRMC2024M09)和广东省气象局科技创新团队(GRMC202601-ZD08)共同资助

2025 年 3 月 17 日收稿; 2026 年 5 月 7 日收修定稿

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

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

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

引言

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、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(简称EF等级)进行分类(McDonald and Mehta, 2006; Doswell III et al, 2009),该标准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 $89\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。本文同时结合中国国家标准(简称国标)《龙卷风强度等级》(GB/T 40243—2021)对龙卷强度进行定级(国家市场监督管理总局和国家标准化管理委员会, 2021),其强度等级与EF等级存在如下对应关系:弱对应EF0及其以下,中等强度对应EF1,强对应EF2、EF3,超强对应EF4、EF5。

全球有许多国家遭受不同程度的龙卷危害。其中美国由于地理位置、气候条件的影响,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)。需要指出的是,过去由于缺少监测或者记录等,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; 徐芬等, 2021; 郑媛媛等, 2009)。

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(姚聘, 2020)。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。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据支撑。本研究通过多源资料搜集、灾害调查和综合研判分析等方式,重点对 2024 年中国龙卷概况和基本观测特征进行梳理和分析。

1 资料与方法

1.1 资料及其处理

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。逐月 ONI 指数为 Niño 3.4 区域 ($5^{\circ}\text{S} \sim 5^{\circ}\text{N}$, $120^{\circ} \sim 170^{\circ}\text{W}$) 的 3 个月滑动海温距平, 由美国国家海洋和大气管理局发布的 ERSSTv5 海面温度数据计算所得。雷达数据来源于广东省 S 波段业务雷达站。

文中时间均为北京时。

1.2 龙卷信息收集

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, 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, 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一定的经验积累。龙卷个例信息的搜集主要依托自媒体与官方媒体平台。自媒体凭借即时性和广覆盖性, 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、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

交叉对比提升可信度。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) 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, 最终确定灾害路径与强度等级 (图 1)。

2 2024 年中国龙卷活动概况

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系统的搜集和真实性验证, 确保数据的可靠性。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, 采用 2018—2023 年质量可控的中国龙卷观测数据作为龙卷活动分布的参考背景 (图 2c, 2d)。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、山东北部和西部、东北平原和内蒙古东部地区, 以及低纬度的珠江三角洲和海南北部等地 (图 2c)。EF2 级及以上的强龙卷主要发生在中纬度地区 (图 2d)。

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、京津冀、东北地区 and 珠江三角洲 (图 2a), 共有 17 个省份发生了龙卷。空间分布特征与气候平均态总体较一致, 但山东中西部龙卷发生较多。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, 河北 8 个 (图 2a)。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

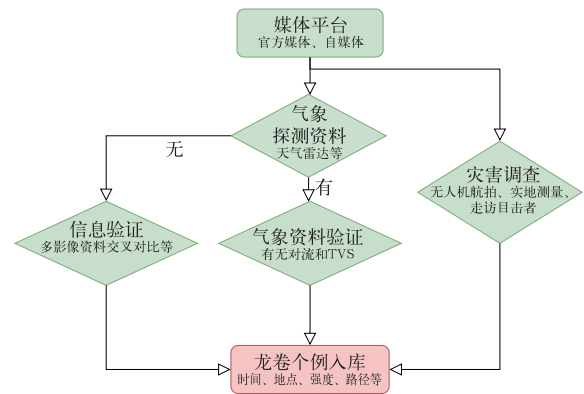


图 1 龙卷信息收集验证流程

Fig. 1 Flowchart of tornado information collection and verification process

¹ 在陆地上发生的龙卷也包含发生后上岸的水龙卷, 水龙卷为完全发生在水面上的龙卷。

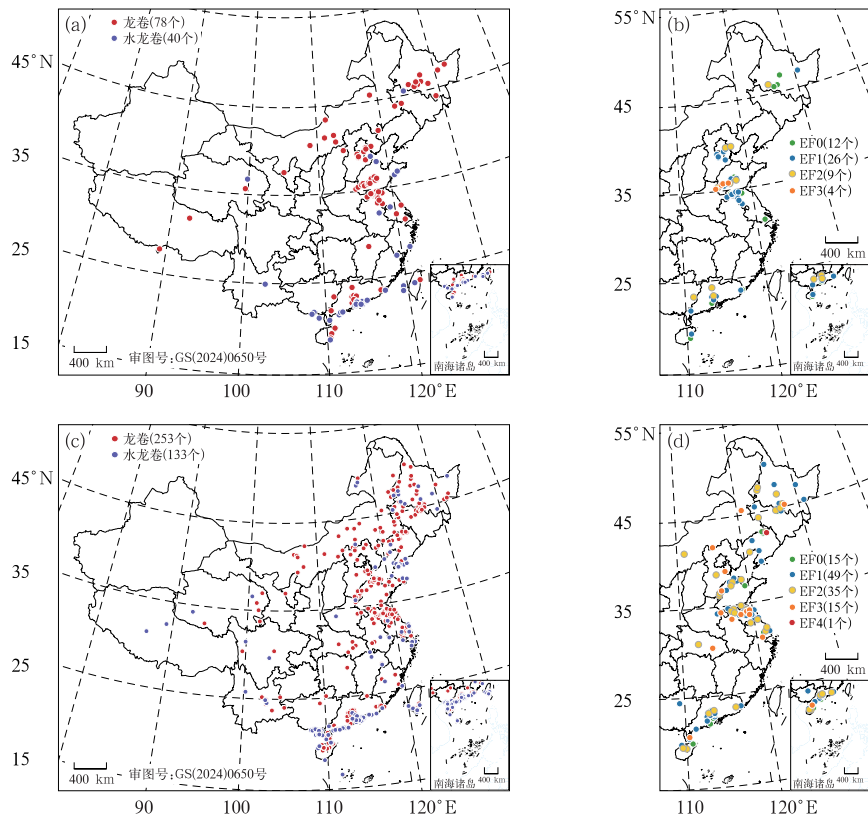


图 2 (a,c)龙卷和水龙卷及(b,d)不同强度龙卷的空间分布
(a,b)2024 年,(c,d)2018—2023 年

Fig.2 Spatial distribution of (a, c) tornadoes and waterspouts, and (b, d) tornadoes with different intensities in (a, b) 2024 and (c, d) 2018—2023

卷均发生在山东。在确定了强度等级的 51 个龙卷中,EF0 级 12 个、EF1 级 26 个、EF2 级 9 个、EF3 级 4 个(图 2b),即弱龙卷 12 个,中等强度龙卷 26 个,强龙卷 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,距摩天大楼和人群密集区近,大量目击者发布水龙卷的视频和照片。

从龙卷数量逐月分布(图 3a)来看,3—10 月均有龙卷发生,最早的龙卷发生在 3 月 30 日,最晚的龙卷发生在 10 月 31 日。其中 83% 发生在 6—9 月,7 月最多,达 25 个。水龙卷主要发生在 8 月,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“贝碧嘉”残余环流影响下黄淮地区发生 11 个龙卷。从日变化(图 3b)来看,92% 的龙卷发生在白天(07:00—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,大多都没有龙卷本体的视频和照片,主要通过灾害调查和雷达数据进行综合分析判断。水龙卷白天多发,06:00 为高峰。

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,越来越多的龙卷影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漏斗结构(Bluestein, 2013; Bluestein et al, 2016),即内侧和外侧都有显著的凝结柱形成一个“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,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,虽然大多数水龙

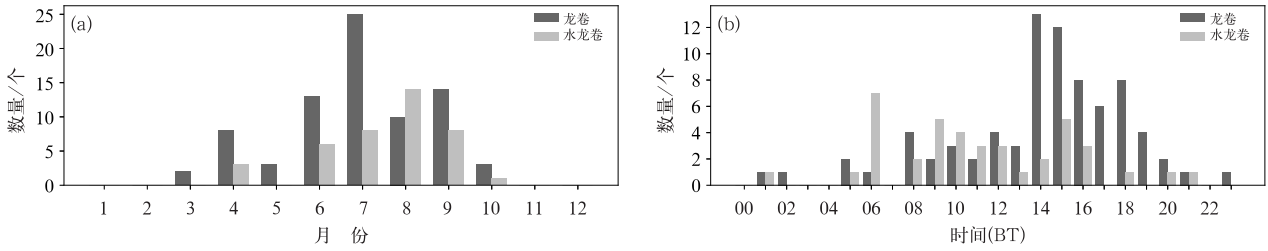


图 3 2024 年龙卷数量的(a)逐月和(b)逐时分布

Fig. 3 Distribution of tornado numbers in different (a) months and (b) hours in 2024

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。

3 典型案例

3.1 龙卷群发事件

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(Cwik et al, 2025; Mercer et al, 2012; Gensini and Brooks, 2018)。中国的龙卷群发事件相对较少,典型事件如 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,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; Bai, 2021)。

本文将龙卷群发事件定义为 48 h 内在 300 km 范围内发生 5 个及以上的龙卷。2024 年,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 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 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、安徽和河南的 11 个龙卷。另外还有一次高空槽

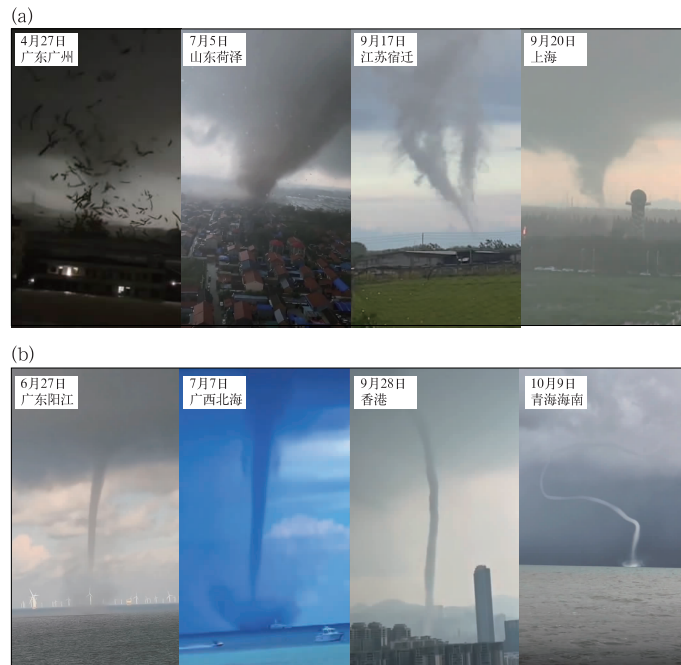


图 4 2024 年部分(a)龙卷和(b)水龙卷影像图集

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

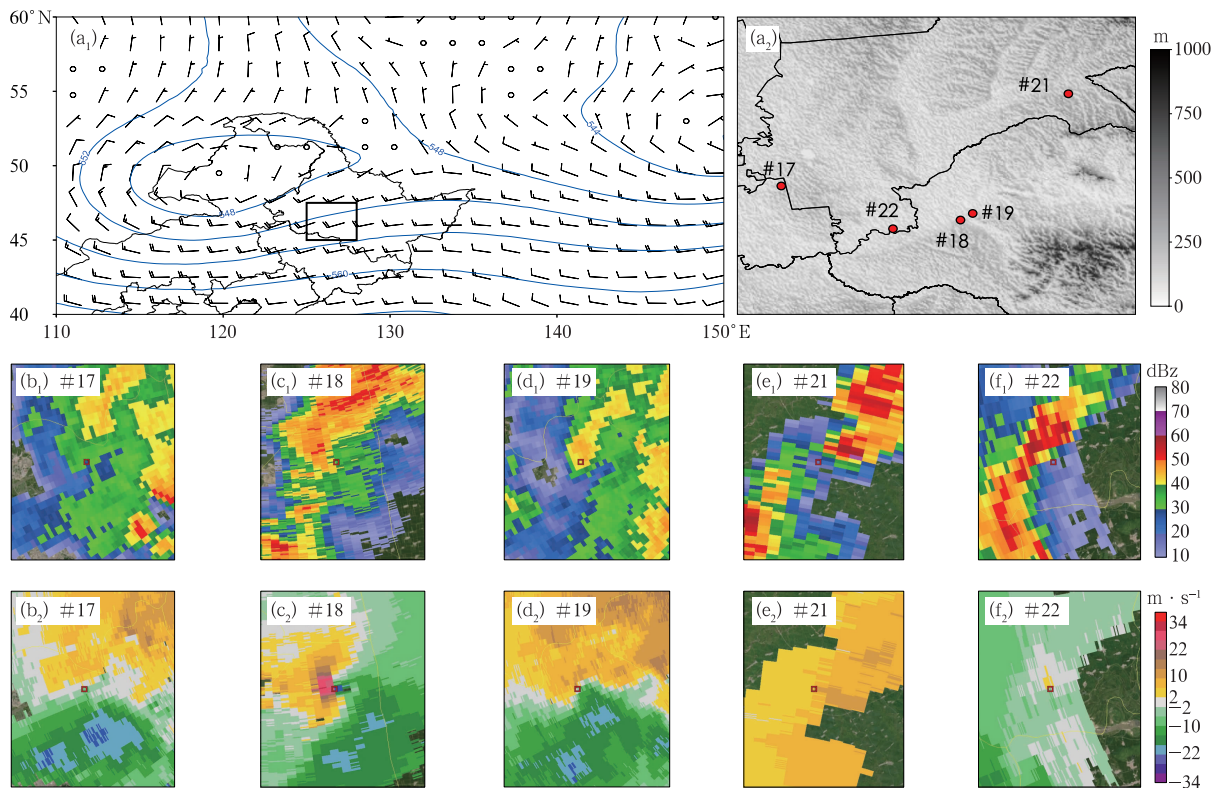
背景下共 5 个水龙卷的群发过程,发生在 8 月 13 日的山东东营(其中一个水龙卷上岸被记录为陆地龙卷)。

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 个龙卷均发生在东北冷涡的东南和西南象限(图 5a),其中 1 个为 EF2 级,4 个为 EF0 级。发生在大庆肇州的 EF2 级龙卷持续 51 min,灾情路径长度达 30 km,最大影响宽度约 1.2 km,过程最强 TVS 达到 $50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 5c₂)。其余 4 个 EF0 级龙卷过程最强 TVS 均在 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右(图 5b₂, 5d₂~5f₂),速度对旋转特征不显著,龙卷持续时间短。

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)。13 个龙卷中 EF3 级 4 个,EF2 级 3 个,EF1 级 5 个,EF0 级 1 个,属于强度高、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 EF3 级龙卷的灾情路径长度均在 10 km 以上,持续时间在 15 min 以上,其中发生在菏泽东明的 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、强度高,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 和 48.0 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

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),也受典型的西风带背景影响。其中发生在保定安新白洋淀的龙卷过程持续了 46 min,



注:图 a₁ 中黑色方框为图 a₂ 范围,空心圆圈代表静风;图 a₂ 中阴影为地形;红色方框标记龙卷位置,“#”后面的数字对应附表 1 中的龙卷序号;下同。

图 5 2024 年 6 月 13—14 日黑龙江龙卷群发事件中(a₁)500 hPa 平均位势高度(等值线,单位:dagpm)和风场(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(b₂~f₂)雷达径向速度
Fig. 5 (a₁) Average 500 hPa geopotential height (contour, unit: dagpm) and wind field (barb) with (a₂) tornado locations (dot), (b₁~f₁) radar reflectivity factor and (b₂~f₂) radar radial velocity at the strongest stage of five tornado processes in the mass tornado event of Heilongjiang Province during 13—14 June 2024

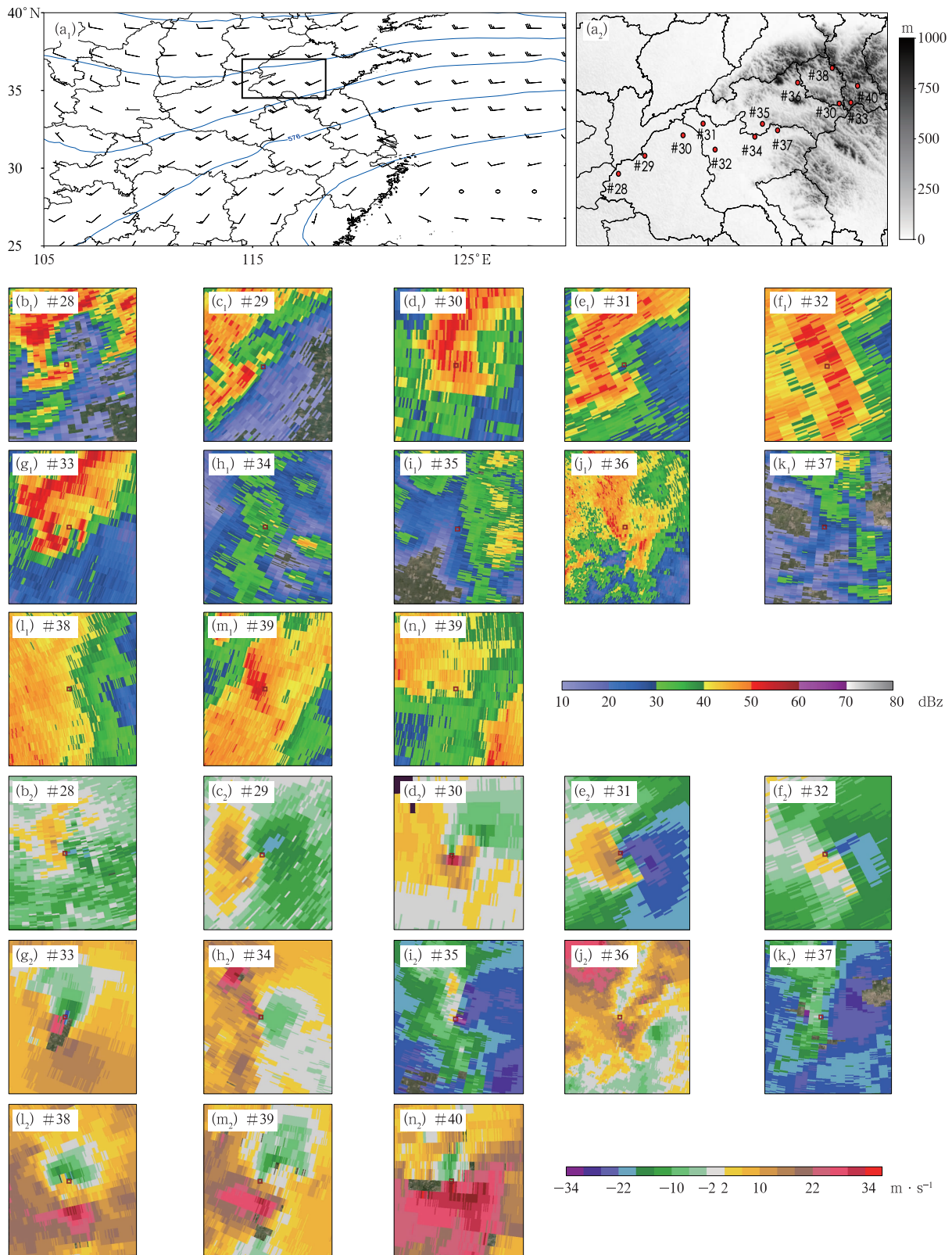


图 6 2024 年 7 月 5 日山东龙卷群发事件中 (a₁) 500 hPa 平均位势高度 (等值线, 单位: dagpm) 和 风场 (风羽), (a₂) 龙卷位置分布 (圆点), (b₁~n₁) 13 个龙卷过程最强时次的 (b₁~n₁) 雷达反射率因子和 (b₂~n₂) 雷达径向速度
 Fig. 6 (a₁) Average 500 hPa geopotential height (contour, unit: dagpm) and wind field (barb) with (a₂) tornado locations (dot), (b₁~n₁) radar reflectivity factor and (b₂~n₂) radar radial velocity at the strongest stage of thirteen tornado processes in the mass tornado event of Shandong Province on 5 July 2024

灾情路径长度约 31 km,其余 4 个龙卷的持续时间都不超过 10 min,灾情路径长度都不超过 4 km。

热带气旋是龙卷发生的重要天气背景之一,珠三角和江苏都是热带气旋龙卷多发的地区(黄先香等,2019b;慕瑞琪等,2022;Bai,2021;白兰强等,2020;Bai et al,2020)。2024 年第 13 号台风“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 日下午已减弱至热带风暴级,中心位于安徽,在其残余环流影响下,黄淮地区发生了 11 个龙卷的群发过程(图 8,仅展示有雷达数据或强度较强的龙卷),包括江苏 7 个龙卷、山东 2 个、安徽和河南各 1 个,其中 8 个为 EF1 级,3 个为 EF0 级,灾情路径长度大多在 10 km 以内。其中发生在连云港东海的 EF0 级龙卷出现跳跃,第一段和第二段的灾情路径长度分别为 2.9 km 和 2.8 km,中间间隔 4.5 km,因间隔时间不超过 20 min,被认为是同一个龙卷过程。

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 的区域。此外,龙卷多集中发生在对流有效位能(CAPE)梯度大值区而非其绝对数值大值区(图 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,为未来群发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 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。

3.2 夜间龙卷事件

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情形,而且,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辨出龙卷致灾特征也可

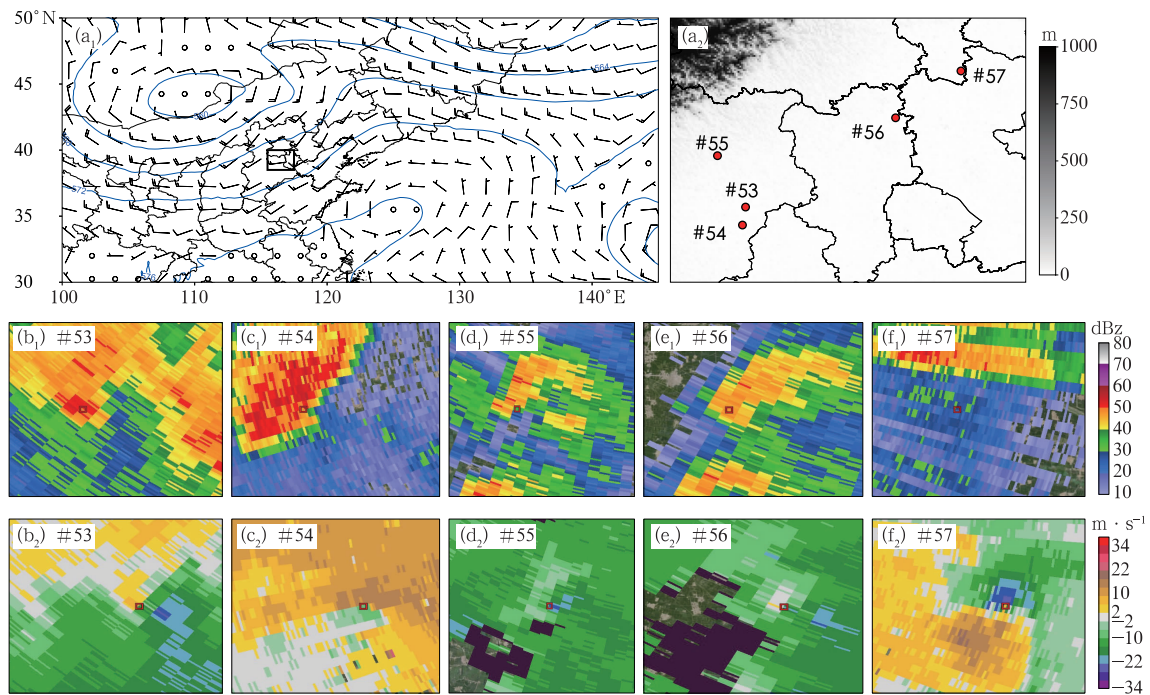


图 7 2024 年 8 月 9 日河北龙卷群发事件中(a₁)500 hPa 平均位势高度(等值线,单位: dagpm)和环场(风羽),(a₂)龙卷位置分布(圆点),(b~f)5 个龙卷过程最强时次的(b₁~f₁)雷达反射率因子和(b₂~f₂)雷达径向速度

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

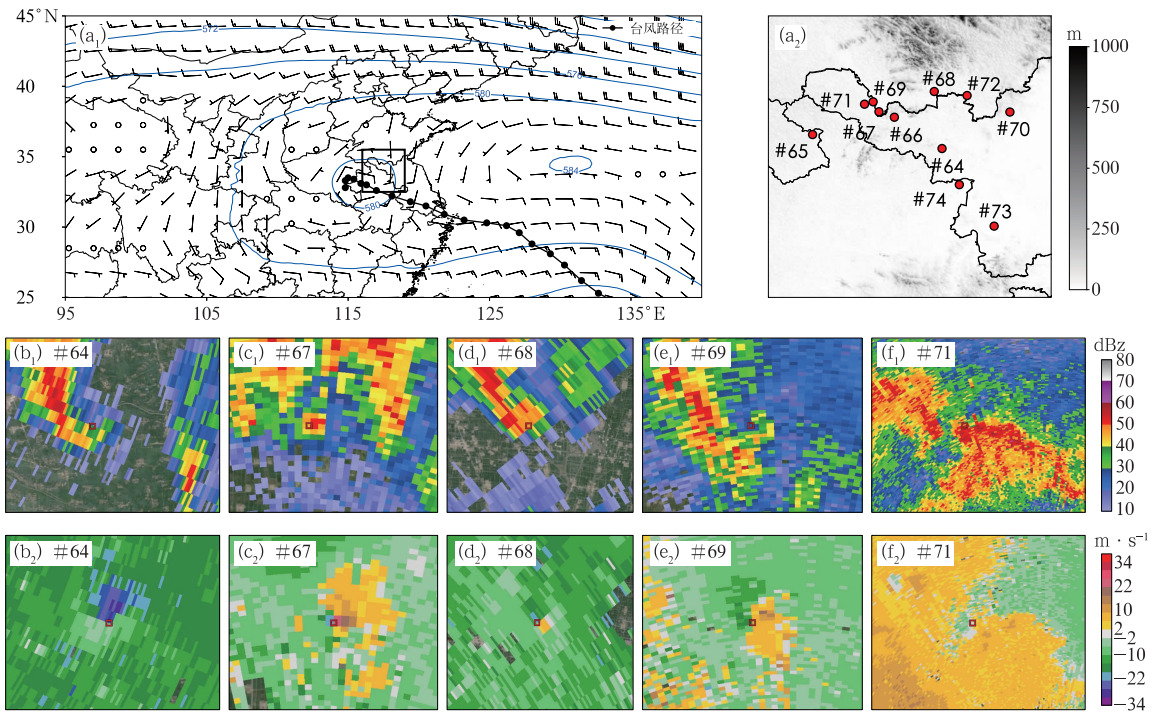
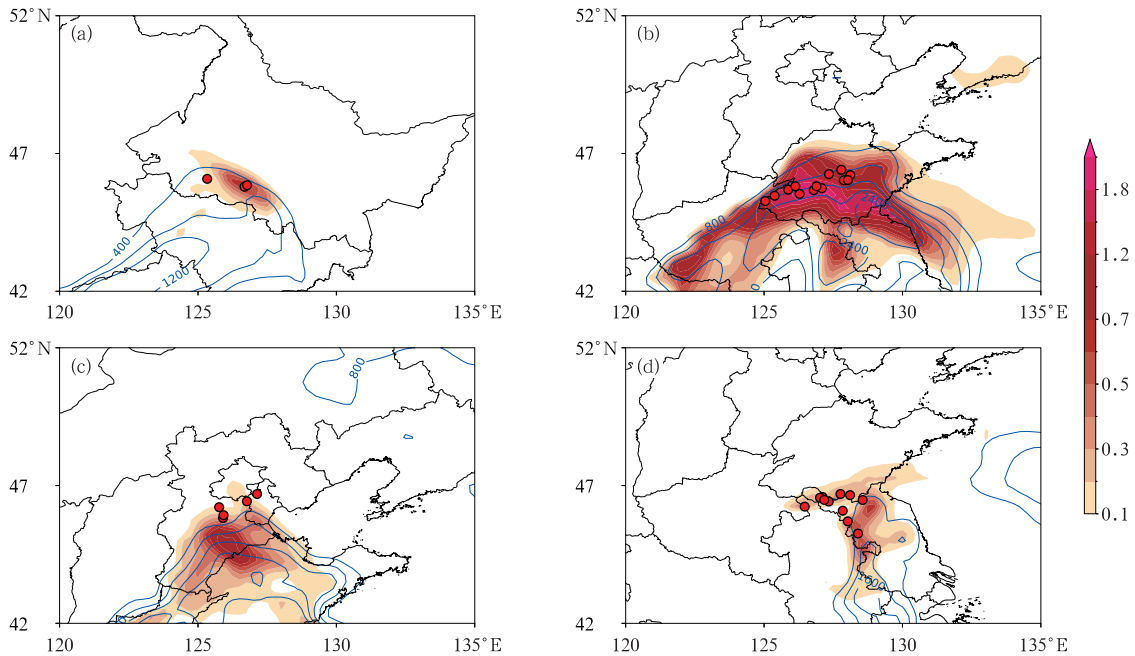


图 8 2024 年 9 月 17 日黄淮地区龙卷群发事件中 (a₁) 500 hPa 平均位势高度 (等值线, 单位: dagpm) 和 风场 (风羽), (a₂) 龙卷位置分布 (圆点), (b₁~f₁) 5 个龙卷过程最强时次的 (b₁~f₁) 雷达反射率因子和 (b₂~f₂) 雷达径向速度
 Fig. 8 (a₁) Average 500 hPa geopotential height (contour, unit: dagpm) and wind field (barb) with (a₂) tornado locations (dot), (b₁~f₁) radar reflectivity factor and (b₂~f₂) radar radial velocity at the strongest stage of five tornado processes in the mass tornado event of Huang-Huai Region on 17 September 2024



注: 圆点代表龙卷发生位置。

图 9 2024 年 4 次龙卷群发事件的强龙卷指数 (填色) 和混合层 CAPE (等值线, 单位: $J \cdot kg^{-1}$) 分布
 (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
 Fig. 9 Strong tornado indices (colored) and mixed-layer CAPE (contour, unit: $J \cdot kg^{-1}$) of four times of mass tornado events at (a) 17:00 BT 13 June, (b) 17:00 BT 5 July, (c) 15:00 BT 9 August, and (d) 15:00 BT 17 September 2024

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。

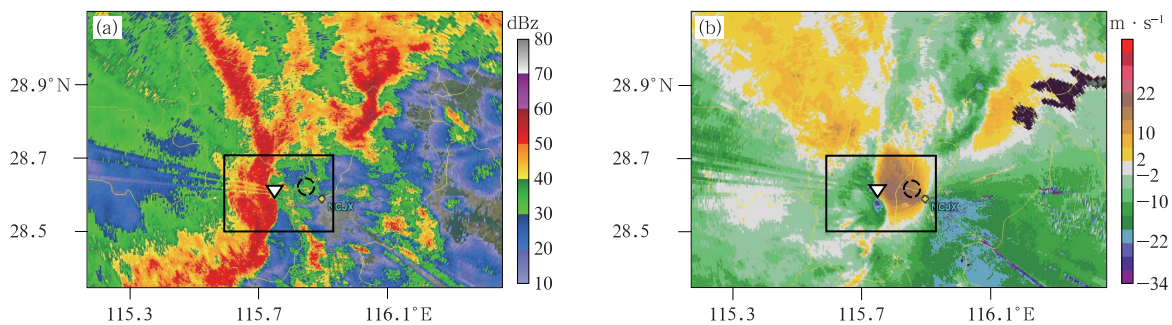
受弓形回波过境影响,江西南昌西湖区 3 月 31 日凌晨遭受雷电、暴雨和地面强风等强对流天气。在此次天气过程中,位于南昌县的一栋高层住宅发生了室内人员受强风影响被吸出室外的气象灾害事件。通过对比邻近多普勒天气雷达观测,该地点位于弓形回波前沿(图 10)。在弓形回波附近通常伴随强烈的下沉气流和冷池出流,其前沿易形成地面强风。以往研究表明,多数龙卷通常与超级单体相关,除了超级单体以外,弓形回波中的中尺度涡旋也会产生龙卷(Knupp et al, 2014)。在上述气象灾害事件发生时刻之前(约 3 月 31 日 03:00),位于其西侧约 12 km 处的雷达观测显示出龙卷信号特征,同时在地面具有对应的窄带状灾害(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;在 1.5° 仰角的 TVS(距地面 400 m 左右)达 $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,表明该地点存在较强的旋转性大风。同时,雷达 1.5° 仰角及以上都有明显的相关系数(CC)小值区,具有较好的垂直连续性(图 11c), $\text{CC} < 0.7$ 的范围存在于圆形区域,一直向上延伸到 2 km 左右,伴随有差分反射率因子(Z_{DR})低值,即 $Z_{\text{DR}} < 2 \text{ dB}$ (图 11d)。这些双偏振特征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。综合上述雷达气旋性切变、灾害碎片特征,以及地面实际发

生了窄带状灾害损失等特征,将上述气象灾害事件上游区域发生的地面旋转性大风判断为龙卷事件。

3.3 广东春季龙卷多发

2024 年,广东共发生了 9 个龙卷,6 个发生在 3 月 30 日至 4 月 27 日(附表 1)。相较于往年,2024 年春季广东龙卷数量偏多,其中 5 个龙卷为超级单体龙卷。超级单体龙卷通常发生在垂直风切变和 CAPE 较强的环境背景下(杨祖祥等, 2024;慕瑞琪等, 2022;Tochimoto and Niino, 2016)。通常,广东 4 月的垂直风切变较大,但热力条件相对有限(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 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)可以对东亚气候产生重要影响(张人禾等, 2017; Zhang et al, 2017),且 ENSO 与龙卷活动有一定联系,主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)。

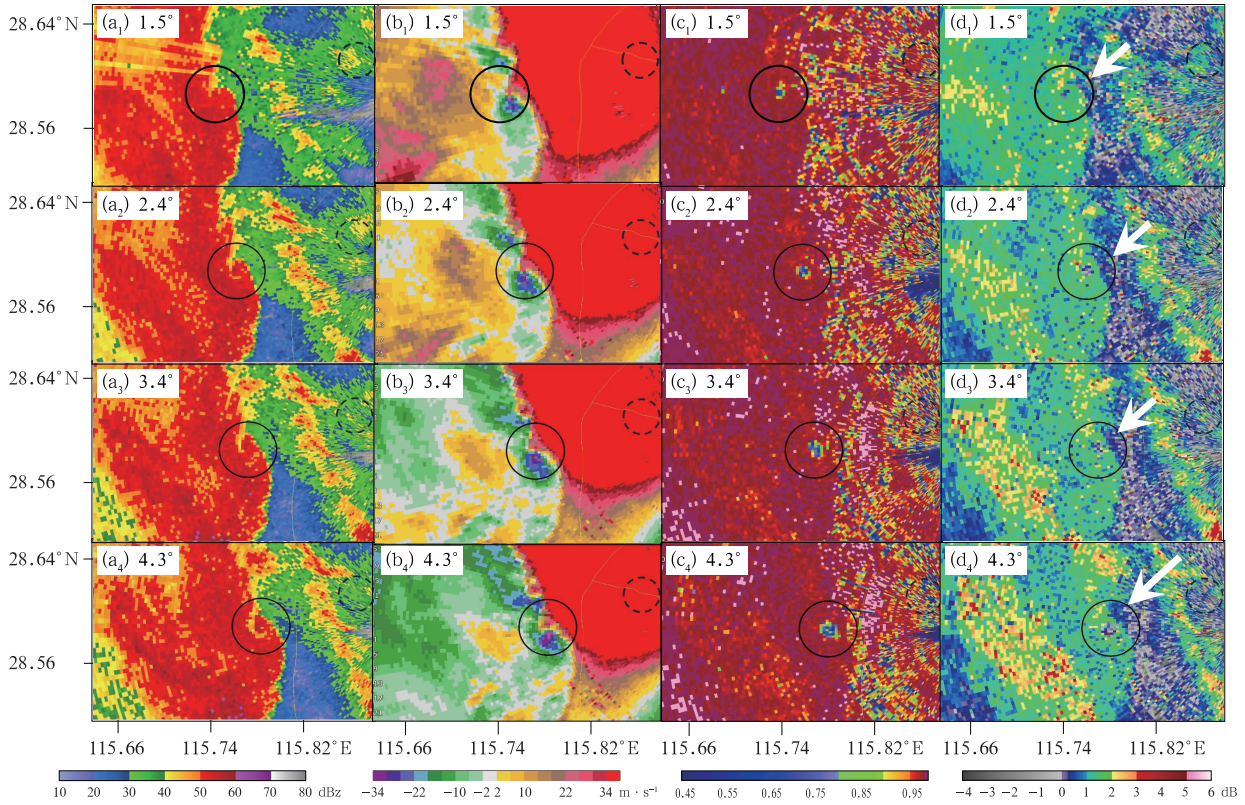
中东太平洋的海温距平在 2023 年冬季达到了 2°C ,表明此次厄尔尼诺事件强度较强。强厄尔尼诺在西北太平洋激发了显著的异常反气旋环流,并持续影响至 2024 年春季。这种冬季形成的反气旋环流,通过遥相关机制影响了春季华南地区的环境背景。一方面,该反气旋异常增强了华南地区低层的



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区域。

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

Fig. 10 (a) Basic reflectivity factor and (b) storm relative radial velocity at 1.5° elevation of Nanchang Radar at 02:44 BT 31 March 2024



注:黑色实线圆圈为疑似龙卷范围,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 中的白色箭头指示 Z_{DR} 小值区。

图 11 2024 年 3 月 31 日 02:44 南昌雷达不同仰角的(a)基本反射率因子,(b)风暴相对径向速度,(c)CC,(d) Z_{DR}
Fig. 11 (a) Basic reflectivity factor, (b) storm-relative radial velocity, (c) CC, and (d) Z_{DR} at different elevation angles of Nanchang Radar at 02:44 BT 31 March 2024

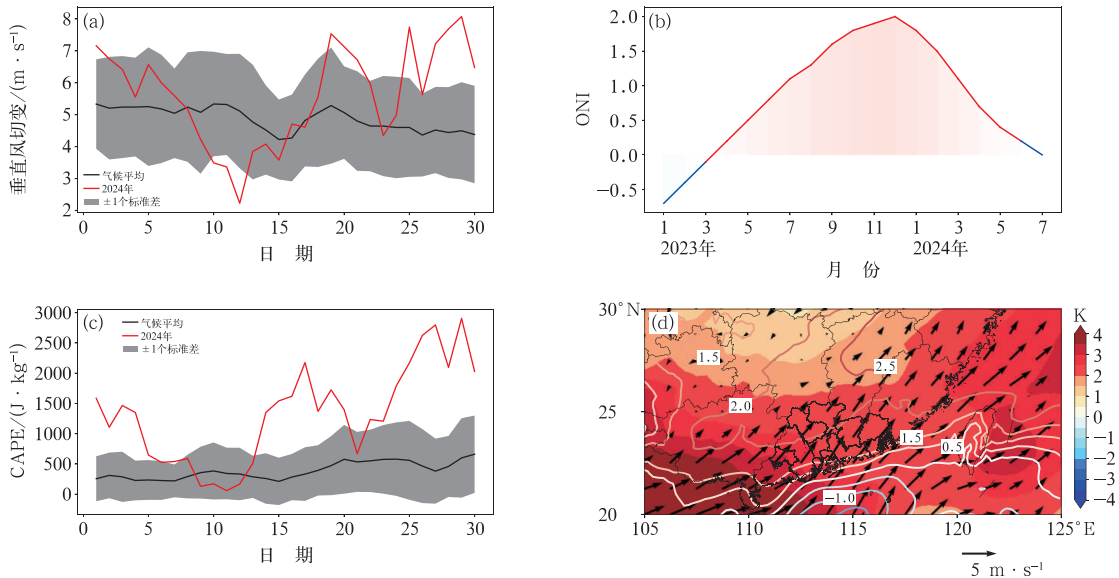


图 12 (a,c)2024 年 4 月(21°~24°N,112°~115°E)区域平均的(a)0~1 km 垂直风切变和(c)CAPE 的逐日变化,(b)2023 年 1 月至 2024 年 7 月 ONI 指数逐月变化,(d)2024 年 4 月平均 850 hPa 风场(风矢)、比湿(等值线,单位: $g \cdot kg^{-1}$)和温度(填色)相对于 1991—2020 年气候平均的异常
Fig. 12 Daily variations of (a) 0~1 km vertical wind shear and (c) CAPE averaged over the region (21°~24°N, 112°~115°E) in April 2024, (b) monthly variation of the ONI index from January 2023 to July 2024, and (d) anomalies of the averaged 850 hPa wind field (vector), specific humidity (contour, unit: $g \cdot kg^{-1}$), and temperature (colored) in April 2024 relative to the 1991—2020 climatological average

西南风,强化了水汽输送,导致广东地区湿度显著上升;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,广东地区对流层温度也表现出明显的正异常(图12d)。在热力和动力条件均较为有利的背景下,为超级单体风暴和龙卷的形成提供了较好环境。这表明,2024年春季广东龙卷高发现象可能与ENSO事件密切相关。然而需要强调的是,当前分析仅基于单一年份的气候异常进行归因,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境背景与龙卷多发的情况。

4 结论和讨论

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(特指在陆地上发生的龙卷),40个水龙卷。2024年龙卷多发生在6—9月,主要集中在东北、京津冀、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级或以上级别强度。最强的龙卷为EF3级,共4个,均发生在山东。

2024年龙卷的群发性特征显著,4次群发过程的龙卷数占全年陆地龙卷总数的44%。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热力、动力条件下发生。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月底至4月底发生了6个龙卷,占广东全年数量的67%。

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,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。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。

致谢: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、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帮助。

参考文献

- 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 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, 50(5): 619-634 (in Chinese).
- 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 L, et al, 2021. Characteristics of tornado activity in China in 2020[J]. Adv Meteor Sci Technol, 11(1): 40-45, 53 (in Chinese).
- 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 X W, et al, 2022. Climatic characteristics and environmental conditions of tornadoes in Liaoning under the background of cold vortex[J]. Acta Meteor Sin, 80(1): 82-92 (in Chinese).
- 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 spatial-temporal distribution of tornadoes in China[J]. Meteor Mon, 41(7): 793-805 (in Chinese).
- 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会,2021.龙卷风强度等级:GB/T 40243—2021[S].北京:中国标准出版社. State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration, 2021. Tornado intensity scale: GB/T 40243—2021[S]. Beijing: Standards Press of China (in Chinese).

- 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, et al, 2023. Characteristics of tornado activity and related disasters in China in 2022[J]. Adv Meteor Sci Technol, 13(1): 23-32 (in Chinese).
- 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, 2019a. Characteristics of tornado activity in China in 2018[J]. Adv Meteor Sci Technol, 9(1): 50-55 (in Chinese).
- 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 D, Yan L J, et al, 2019b. Analysis of typhoon-tornado activity characteristics and environmental condition in the Pearl River Delta[J]. Meteor Mon, 45(6): 777-790 (in Chinese).
- 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, Bai L Q, et al, 2024. Spatio-temporal distribution of Guangdong tornadoes and characteristics of radar echoes of parent storms[J]. Meteor Mon, 50(7): 804-817 (in Chinese).
- 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 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).
- 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, Tang X W, et al, 2020. Advances in tornado detection in the United States in recent 20 years—inspiration to the study of tornadoes in China[J]. Meteor Mon, 46(2): 245-256 (in Chinese).
- 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 al, 2022. Analysis of environmental conditions and radar key features of typhoon-tornadoes in Jiangsu[J]. Meteor Mon, 48(2): 190-202 (in Chinese).
- 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].北京:国家气象中心. Wang X M, Liu Y J, Li S F, et al, 2024. Analysis of the causes of the extreme wind event in Jiangxi on March 31[R]. Beijing: National Meteorological Centre (in Chinese).
- 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, 2015. Study of Northeast China tornadoes: the environmental characteristics[J]. Acta Meteor Sin, 73(3): 425-441 (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 K Y, 2021. Characteristics of spatio-temporal distribution and storm morphologies of tornadoes in Jiangsu Province[J]. Meteor Mon, 47(5): 517-528 (in Chinese).
- 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, Wang L, et al, 2024. Analysis of multi-source observation of the disastrous tornado in Funing County on 19 September 2023[J]. Meteor Mon, 50(12): 1467-1479 (in Chinese).
- 姚鹏,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 tornado forecast and early warning system: the frontier challenge of meteorological modernization[J]. Adv Meteor Sci Technol, 10(6): 19-22 (in Chinese).
- 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 W J, 2021. Tornadoes in China: spatiotemporal distribution and environmental characteristics[J]. J Trop Meteor, 37(5/6): 681-692 (in Chinese).
- 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 W Y, Li D Q, et al, 2023. Climatology and environmental features of tornadoes in Liaoning Province during 1971—2020[J]. Meteor Mon, 49(11): 1285-1298 (in Chinese).
- 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 L, et al, 2024. Tornado activities and disaster characteristics in China in 2023[J]. Adv Meteor Sci Technol, 14(1): 15-24 (in Chinese).
- 张人禾,闵庆烨,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 and rainfall in China: role of the anomalous western North Pacific anticyclone[J]. Sci China Earth Sci, 47(5): 544-553 (in Chinese).
- 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 climatology and favorable environmental conditions of tornado in China[J]. Adv Meteor Sci Technol, 10(6): 69-75 (in Chinese).
- 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 tornado research in China[J]. Meteor Mon, 47(11): 1319-1335 (in Chinese).
- 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, Fang X, et al, 2009. Characteristic analysis and early-warning of tornado supercell storm[J]. Plateau Meteor, 28(3): 617-625 (in Chinese).
- 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, et al, 2022. Characteristics of tornado activity and disaster of China in 2021[J]. Adv Meteor Sci Technol, 12(1): 26-36 (in

Chinese).

Allen J T, Tippett M K, Sobel A H, 2015. Influence of the El Niño/Southern Oscillation on tornado and hail frequency in the United States[J]. *Nature Geosci.* (8):278-283.

Bai L Q, 2021. Environmental analysis on the first documented tornado outbreak in China[J]. *Atmos Sci Lett*,22(10):e1057.

Bai 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*,63(1):37-51.

Bluestein H B, 2013. *Severe Convective Storms and Tornadoes: Observations and Dynamics*[M]. Berlin:Springer:456.

Bluestein H B, French M M, Snyder J C, et al, 2016. Doppler radar observations of anticyclonic tornadoes in cyclonically rotating, right-moving supercells[J]. *Mon Wea Rev*,144(4):1591-1616.

Chen J Y, Cai X H, Wang H Y, et al, 2018. Tornado climatology of China[J]. *Int J Climatol*,38(5):2478-2489.

Ćwik P, Furtado J C, McPherson R A, et al, 2025. Major May tornado outbreaks in the United States: novel multiscale atmospheric patterns identified using maximum covariance analysis[J]. *Atmos Res*,315:107872.

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(1/2/3):554-563.

Gensini V A, Brooks H E, 2018. Spatial trends in United States tornado frequency[J]. *npj Clim Atmos Sci*,1(1):38.

Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al, 2023. ERA5 hourly data on pressure levels from 1940 to present[R]. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS).

Knupp K R, Murphy T A, Coleman T A, et al, 2014. Meteorological overview of the devastating 27 April 2011 tornado outbreak[J]. *Bull Amer Meteor Soc*,95(7):1041-1062.

Lee S K, Wittenberg A, Enfield D, et al, 2016. US regional tornado outbreaks and their links to spring ENSO phases and North Atlantic SST variability[J]. *Environ Res Lett*,11:044008.

McDonald J R, Mehta K C, 2006. A recommendation for an enhanced Fujita scale (EF-scale)[R]. Lubbock: Texas Tech University, Wind Science and Engineering Research Center:111.

Mercer A E, Shafer C M, Doswell III C A, et al, 2012. Synoptic composites of tornadic and nontornadic outbreaks[J]. *Mon Wea Rev*,140(8):2590-2608.

Thompson R L, Edwards R, Hart J A, et al, 2003. Close proximity soundings within supercell environments obtained from the rapid update cycle[J]. *Wea Forecasting*,18(6):1243-1261.

Tochimoto E, Niino H, 2016. Structural and environmental characteristics of extratropical cyclones that cause tornado outbreaks in the warm sector: a composite study[J]. *Mon Wea Rev*,144(3):945-969.

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 cyclone versus extratropical cyclone environments [J]. *Wea Forecasting*,39(4):613-638.

Zhang R H, Min Q Y, Su J Z, 2017. Impact of El Niño on atmospheric circulations over east Asia and rainfall in China: role of the anomalous western North Pacific anticyclone [J]. *Sci China Earth Sci*,60(6):1124-1132.

(本文责编:张芳)

附录

附表 1 2024 年龙卷信息

Appendix table 1 Tornado information in 2024

序号	日期	时间(BT)	地点	EF 等级(国标)	主要影响系统
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—08:44	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

续附表 1

序号	日期	时间(BT)	地点	EF 等级(国标)	主要影响系统
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)	副热带高压
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	/	副热带高压
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	/	副热带高压
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	/	副热带高压
61	8月29日	18:00左右	青海海南	/	副热带高压
62	9月11日	10:30左右	江苏无锡	/	副热带高压
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”

续附表 1

序号	日期	时间(BT)	地点	EF 等级(国标)	主要影响系统
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”

注:强度等级中“/”表示未定级。