

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).

广东龙卷时空分布及其母体风暴雷达观测特征^{*}

黄先香^{1,2} 炎利军³ 白兰强^{1,2} 植江玲^{1,2} 张晶晶^{1,2} 李兆明^{1,2}

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, 广东佛山 528000

2 粤港澳大湾区气象研究院, 广州 510610

3 广东省气象局, 广州 510062

提 要: 基于《中国气象灾害大典》广东卷(1959—2000 年)、广东省防灾减灾年鉴(2002—2022 年)和近年来广东龙卷现场灾调记录等历史数据、常规观测、ERA5 高分辨率再分析资料以及广东多普勒天气雷达(2006—2022 年)等资料, 分析 1961—2022 年广东龙卷的时空分布、天气背景和 2006 以来的龙卷对流风暴形态等气候统计特征。结果表明: 近 62 年广东共有 225 个龙卷记录。其中, 在多源观测资料较齐备的 2006 年以来, 龙卷年均发生约 6 个, 近 50% 发生在热带气旋影响天气背景下, 40% 为西风带系统龙卷, 还有约 10% 为热带扰动龙卷, 但龙卷数量逐年波动很大, 最高达 17 个(2008 年), 部分年份仅 1 个或无记录。广东龙卷主要发生在 4—9 月, 4—6 月主要为西风带系统龙卷, 7—9 月主要为热带气旋和热带扰动龙卷; 约 85% 的龙卷发生于 06—20 时, 14—18 时为最高发时段(占比近 40%)。龙卷最频发于珠三角、雷州半岛和潮汕平原一带, 北部山区极少。其中, 佛山、湛江和广州是广东龙卷最高发的 3 个城市。广东产生龙卷的对流形态中, 约 54% 带状对流系统, 为热带气旋和热带扰动龙卷母体风暴, 其风暴结构呈现出低质心的特点; 约 36% 多单体风暴系统, 多数为西风带龙卷母体风暴; 与美国龙卷易产生于孤立单体和准线状对流系统不同, 广东产生龙卷的孤立对流单体和准线性对流系统相对频率很低, 均仅约为 5%, 主要为西风带龙卷母体风暴, 其风暴结构往往呈现出高质心的特点。超过 90% 的龙卷中尺度母体风暴具有低层中气旋, 但仅约 47% 伴随低层龙卷涡旋特征(TVS)。强龙卷通常伴随着旋转速度超过 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的低层中气旋、超过 $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的 TVS 速度差。

关键词: 龙卷, 时空分布, 环流型, 风暴形态, 雷达观测特征, 广东

中图分类号: P445

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.020701

Spatio-Temporal Distribution of Guangdong Tornadoes and Characteristics of Radar Echoes of Parent Storms

HUANG Xianxiang^{1,2} YAN Lijun³ BAI Lanqiang^{1,2} ZHI Jiangling^{1,2}

ZHANG Jingjing^{1,2} LI Zhaoming^{1,2}

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

2 Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area Academy of Meteorological Research, Guangzhou 510610

3 Guangdong Meteorological Service, Guangzhou 510062

Abstract: Based on tornado data from the *China Meteorological Disaster Encyclopedia (Guangdong Volume)* (1959—2000), *Guangdong Disaster Prevention and Mitigation Yearbook* (2002—2022) and record of on-site disaster investigation of tornadoes in recent years, conventional observations and ERA5 high-resolution reanalysis data, as well as the data from Guangdong Doppler weather radar (2006—2022), we

^{*} 国家自然科学基金项目(U2142210)、广东省科技厅社会发展科技协同创新体系建设专项(2019B020208015)、广东省自然科学基金项目(2022A1515011814)和广东省气象局劳模和工匠人才创新工作室专项(GRMC2021LM06)共同资助

2023 年 9 月 28 日收稿; 2024 年 4 月 26 日收修定稿

第一作者: 黄先香, 主要从事龙卷等强对流预警研究. E-mail: fsqxj@163.com

analyze the spatio-temporal distribution and weather background of tornadoes in Guangdong from 1961 to 2022, as well as the morphology of tornado convective storms since 2006. The results are as follows. In the past 62 years, Guangdong has recorded a total of 225 tornadoes. Since 2006 when multiple sources of observation data are relatively complete, about 6 tornadoes have occurred annually. About 50% of tornadoes occurred in the background of tropical cyclone weather, followed by 40% of tornadoes in the westerly weather system, and about 10% of tornadoes were tropical disturbance tornadoes. However, the number of tornadoes fluctuated greatly year by year, up to 17 in 2008. In some years, there was only one tornado or no tornadoes recorded. In general, tornadoes in Guangdong mainly occur from April to September. From April to June, they are mainly westerly tornadoes and from July to September, mainly tropical cyclone tornadoes and tropical disturbance tornadoes. About 85% of tornadoes occur between 06:00–20:00 BT, with the highest occurrence between 14:00–18:00 BT, accounting for about 40%. Tornadoes occur most frequently in the Pearl River Delta, Leizhou Peninsula and Chaoshan Plain. There are few tornadoes in the northern mountainous areas. Foshan, Zhanjiang and Guangzhou are the cities with the highest frequency of tornadoes. About 54% of convective systems generating tornadoes in Guangdong are banded convective systems, which are tropical cyclone tornado parent storms and tropical disturbance tornado parent storms. The storm structures exhibit low centroid characteristics. About 36% are multi-cell storm systems, most of which are westerly tornado parent storms. Different from the tornadoes in the United States that tend to occur in discrete cells and quasi-linear convective systems, the relative frequencies of discrete convection cell and quasi-linear convective systems generating tornadoes in Guangdong are very low, both about 5%. They are the parent storms of the tornadoes in the westerly and their storm structures often show the characteristics of high centroid. More than 90% of tornado mesoscale parent storms have low-level mesocyclones, but only about 47% of the tornado parent storms are accompanied by low-level tornado vortex signature (TVS). Strong tornadoes are typically characterized by low-level mesocyclones with rotational speeds exceeding $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ and TVS velocity differences exceeding $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Key words: tornado, spatio-temporal distribution, circulation pattern, storm morphology, radar echo feature, Guangdong

引 言

龙卷风(以下简称龙卷)是从积雨云底部下伸至地面的快速旋转空气柱,是大气中最剧烈、致灾性最强的一种局地强对流天气。由于龙卷尺度很小、突发性强、发生概率低及成因复杂,对其预报预警难度极大,一直是大气科学领域的前沿问题与难题。广东地处低纬度地区,是我国强对流天气的多发区,同时也是我国龙卷的主要发生地之一,EF1或以上级别龙卷数量在全国仅次于江苏(俞小鼎等,2021; Chen et al,2018)。此外,由于广东人口稠密、经济发达,一旦发生龙卷可造成重大人员伤亡和财产损失。因此开展广东历史龙卷基本活动规律、典型环境背景和雷达观测的母体风暴特征等相关研究,有助于提高对区域龙卷发生风险的定量认识和龙卷母

体风暴的监测预警能力,为防灾减灾提供科学参考依据。

美国是龙卷发生频率最高的国家,平均每年约有1200个龙卷(Bruening et al,2002)。作为龙卷灾害最严重的国家,美国对龙卷的研究最早也最深入。20世纪40年代已开始实施龙卷观测计划,70年代开展了龙卷气候特征研究(Kelly et al,1978; Tecson et al,1982; Ashley,2007; Moore,2017)。美国龙卷频发与其独特的地理地形、气候条件及大气环流特征等密切相关。美国全年都有龙卷,4—6月相对多发,当地14—19时为一天中的高发时段;龙卷典型高发区为美国落基山脉到阿巴拉契亚山脉之间的大平原“龙卷风走廊”和佛罗里达州,以及深秋墨西哥湾沿岸地区的“迪克西走廊”;西风带系统和飓风环流是龙卷发生的两个主要天气背景(Schultz and Cecil,2009;王东海等,2018)。

我国龙卷发生频次不足美国的十分之一(范雯杰和俞小鼎,2015),但近年来强龙卷时有发生,而且主要集中在经济发达、人口密集的东部省份,造成比较严重的人员伤亡和财产损失,如 2022 年“7·20”江苏盐城 EF3 级强龙卷(黄舒婷等,2023)、2021 年“5·14”江苏苏州和湖北武汉 EF3 级强龙卷(植江玲等,2022a)、2020 年“6·12”江苏高邮 EF2 级强龙卷(王磊等,2023)、2019 年“7·3”辽宁开原 EF4 级强龙卷(郑永光等,2020;张涛等,2020)、2018 年“8·13”天津静海 EF3 级强龙卷(张楠等,2020)、2017 年“8·11”内蒙古赤峰 EF3 级强龙卷(郑永光等,2021)、2016 年“6·23”江苏盐城 EF4 级强龙卷(Meng et al,2018;张小玲等,2016)、2015 年“10·4”广东佛山和广州 EF3 级强龙卷(Bai et al,2017)。中国东部和中部部分地区是龙卷主要发生地,包括江淮、黄淮、华南地区、东北平原和华北平原等地势平坦地区,其中江苏和珠三角是龙卷最多发的地区,而强龙卷基本发生在中国中东部(范雯杰和俞小鼎,2015)。

我国幅员辽阔,地区间龙卷气候特征差异较大。以往研究表明,中国龙卷主要发生在 4—9 月,梅雨、冷涡和热带气旋(TC)是中国龙卷发生的主要天气背景(俞小鼎等,2021;郑永光,2020;Chen et al,2018)。江苏龙卷半数发生于梅汛期,主要分布于东部沿海、中部沿江及淮北西部,多发在春夏两季,7—8 月龙卷发生个数约占全年的 90%,而 78% 的龙卷集中发生于 15—20 时(北京时,下同),超 50% 产生于镶嵌在多单体风暴系统中的超级单体中气旋内(徐芬等,2021);安徽龙卷多发于 4—9 月,主要分布在江淮东部平原丘陵地带,山区极少,梅雨期龙卷占 21%,TC 龙卷占 20%,高发时段为 13—18 时(姚叶青等,2012);东北龙卷主要发生在东北冷涡天气背景下(袁潮等,2023),冷涡南侧次天气尺度短波槽是龙卷发生的直接影响系统(王秀明等,2015);河南东部龙卷发生在高空辐散、中层中纬度槽前和副热带高压边缘西南暖湿气流等有利于暴雨发生天气背景下,低空急流和低涡、切变线及地面低压辐合区是主要影响系统(张一平等,2020);海南龙卷可分为 TC 龙卷(李昭春等,2021)和非 TC 龙卷,其中非 TC 龙卷又可分为海风锋触发的龙卷和干冷空气天气背景下的边界层切变线触发的龙卷(郑艳等,2020)。

上述研究可见,不同区域的龙卷活动特征、龙卷发生天气背景甚至对流组织类型都可能存在明显差

异。由于龙卷的观测资料严重缺乏,目前对广东龙卷的研究仍主要停留在个例分析(李兆慧等,2017;黄先香等,2018;2019a;2019b;2021a;2021b;植江玲等,2022b)。王沛霖(1996)对 1976—1983 年珠江三角洲地区春季(3—5 月)龙卷发生的环境条件进行了总结;冯喆(2016)对 2004—2012 年广东 62 次龙卷的时空分布及天气形势进行了研究;黄先香等(2019c)对珠江三角洲区域的热带气旋龙卷作过统计分析,但这些工作所涉及到的统计区域、资料时段等不够全面,对广东省的龙卷气候特征研究还不够深入。

2013 年以来,佛山市龙卷风研究中心通过对广东历史龙卷个例普查、龙卷现场灾害调查等途径,积累了 60 年以上的龙卷资料,可以比较全面地开展广东龙卷时空分布的研究。这对于揭示广东龙卷活动的基本特征、监测预报预警有很大的科学意义和应用价值。此外,已有研究表明,不同环流背景下的龙卷超级单体风暴形成环境条件存在一定差异,广东地处低纬度,北依南岭、南临大海,既受到来自中纬度西风带系统影响,又受到来自低纬度海洋热带东风天气系统影响,导致龙卷发生的天气背景更为复杂。目前针对广东大量龙卷的时空分布、发生天气背景及龙卷母体风暴形态的分类等工作还亟待开展。

本研究基于 1961—2022 年广东有龙卷灾害发生的最为全面的 225 个陆龙卷记录,结合常规观测资料、再分析数据和雷达资料等,对广东龙卷的时空分布、发生天气背景、产生龙卷的对流形态及龙卷母体风暴雷达关键指标等基本特征统计分析,揭示广东龙卷的基本活动特征,建立不同类型龙卷天气概念模型,有助于提升龙卷发生发展的机理认识和监测预警水平,并为有针对性的防灾减灾工作提供科学依据。

1 资料和方法

1.1 资料及其处理

龙卷资料来源主要包括:《中国气象灾害大典(广东卷)》(1959—2000 年)(温克刚和宋丽莉,2006)、广东省防灾减灾年鉴(2002—2022 年)、广东各市气象部门龙卷灾害档案、广东各地龙卷的现场调查和考察所获取的第一手气象和灾害资料,同时

结合相关媒体报道、公共场所监控的龙卷影像、公众拍摄的图片或视频和历史文献等对龙卷个例进行补充。在上述龙卷数据搜集的基础上,为了确保龙卷事件的真实性,对龙卷资料进一步进行质量控制以去伪存真。一般基于以下三点进行综合判断:

(1)有目击者或监控视频观察到漏斗云或有黑色云柱从天空伸到地面,并伴随有强风卷起的沙尘碎屑。监控视频上,还往往能看到轻质物体的快速辐合式移动,树木被风吹歪的方向在短时间内快速转变等。

(2)灾害调查现场或气象灾害描述用语具有较为明显的大风灾害,且典型灾害指示物出现如下现象:树木倒伏呈辐合状、树木被拧断、家禽或房屋材料碎片等材料被卷上天,灾害路径总体呈狭长状等。

(3)在群众报告或媒体报道龙卷发生的位置附近,在多普勒天气雷达径向速度图上有明显低层中气旋或最低层仰角龙卷涡旋特征(TVS)相对应。

对于已发表在历史文献的龙卷个例也需进一步结合雷达探测资料、地面自动站观测资料及风灾区域的破坏特点做进一步核验后再采纳。例如部分历史文献中把2011年4月17日广东佛山风灾、2012年4月18日广东佛山风灾、2013年3月20日广东东莞风灾等天气事件记录为龙卷灾害,但根据多普勒天气雷达资料和自动气象站资料等分析,这些风灾过程均是由下击暴流等直线型大风造成。

另外,由于龙卷涡旋具有连续性和跳跃性,参照Bai et al(2020)做法,对同一漏斗云在短时间内多次触地的情况记录为同一个龙卷;在同一个风暴中,若一个龙卷在前一个龙卷消亡20分钟后发生,则记为两个龙卷。

通过上述严格筛选,剔除了历史资料中记录为龙卷但实际为下击暴流等直线型大风风灾的个例或尘卷风等天气事件,并剔除了灾情描述不够清晰的个例,共统计了广东龙卷225个,其中造成人员伤亡的强龙卷有38个(表略)。需要说明的是,2000年以前,由于智能手机等通信设备不发达以及对龙卷现场灾调不够完备,加上雷达站点布置较少,可能会影响一些龙卷个例的收集。2001年以后,随着广东多普勒天气雷达的布设及智能手机和数码相机等逐渐普及,龙卷过程记录较为详细完备,特别是2015年以来,随着无人机在龙卷现场灾害调查中的应用,使得灾害调查流程更加规范和完善,再加上更稠密的雷达和自动气象站的布设,确保龙卷特征分布、强

度等级等能够真实呈现。另外,需要说明的是,对于部分龙卷强度信息的评估可能存在一定的偏差,特别是2006年以前的龙卷,主要是基于历史档案中记录的灾情描述对龙卷强度大致评估,2006年以后的龙卷特别是珠三角龙卷多数都开展了详细的现场灾害调查,充分结合了灾害现场的树木、房屋、电线杆等灾害标识物的损毁特征来定级,因此对于龙卷强度等级评估相对更为客观准确。此外,本文统计的仅是陆龙卷个例,无海面活动的龙卷。

龙卷天气背景分析采用的数据为1979—2022年欧洲中期天气预报中心ERA5再分析数据,水平分辨率为 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$,时间分辨率为1 h。对龙卷环流场作分类合成分析时,采用临近时次的环流场资料,但对于同一天出现多个龙卷的情况,该天仅计算一次,以确保其既有代表性,又避免该次天气过程所占合成分析的权重过大。

龙卷风暴形态等特征分析采用2006—2022年广东CINRAD/SA天气雷达产品中的反射率因子、径向速度等资料。雷达数据处理参照了慕瑞琪等(2022)的方法,中气旋和TVS识别分别采用Stumpf et al(1998)的中气旋识别方法和Mitchell et al(1998)的TVS识别方法进行雷达关键特征提取处理。

1.2 龙卷天气型分类

关于广东龙卷分类方面,根据以往研究表明,广东龙卷的发生既可能与西风带系统(高空槽、切变线、低涡、锋面等)影响有关,也可能与热带气旋、热带扰动(东风波、热带辐合带、季风扰动等)等东风系统影响有关(郑永光等,2021)。据此,从天气背景划分,本文将广东龙卷归纳为三大类:第一类是西风带龙卷,指龙卷发生在西风带系统影响天气背景下,根据大气低层华南有无冷空气活动,又细分为锋面型龙卷和暖区型龙卷。锋面型龙卷是指龙卷母体风暴发生发展的环境场与冷空气活动有关联,龙卷发生时,华南有冷空气活动,冷空气和锋面距离龙卷发生地的空间范围一般在300 km以内;而暖区型龙卷,是指当龙卷发生时,华南不受冷空气或冷性高压脊影响,冷空气和锋面距离广东较远(≥ 300 km)。第二类是TC龙卷,指华南或南海中北部海面有TC活动,发生在TC环流或外围环流中的龙卷,一般位于其母体TC中心800 km范围内;若龙卷发生处距

TC 中心超过 800 km,但仍处于 TC 外围雨带中,则仍将其视为 TC 龙卷(Bai et al,2020)。第三类是热带扰动龙卷,指华南或南海中北部海面有除 TC 以外的热带波状或涡状形式的天气尺度或次天气尺度扰动活动(朱乾根等,2007),发生在热带扰动环流中的龙卷。

1.3 龙卷母体风暴形态分类

Grams et al(2012)将美国强龙卷风暴形态分为三类,分别是孤立对流单体、准线性对流系统、多单体风暴系统,并把美国东南部秋季 TC 强龙卷事件的对流形态归为孤立对流单体类;徐芬等(2021)将江苏龙卷风暴形态分为孤立对流单体、准线性对流系统、多单体风暴系统和其他对流系统共四类,并将占比 27% 的台风天气背景下龙卷风暴形态归为多单体风暴系统或准线性对流系统。由于 2006 年以来,广东多数龙卷是发生在 TC 天气背景下,而广东 TC 龙卷往往产生于偏南北走向的带状回波中(郑媛媛等,2015;黄先香等,2019c),其风暴的组织性和移动性明显不同于 Grams et al(2012)以往研究划

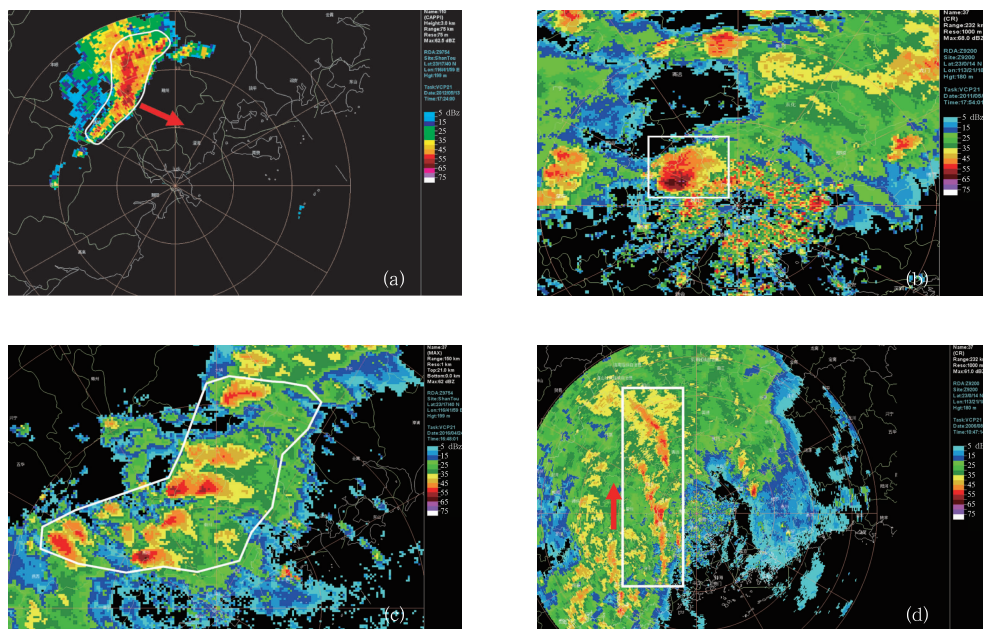
分的三类典型风暴形态,更接近江苏龙卷风暴的其他类对流系统。因此,参照 Grams et al(2012)和徐芬等(2021)的分类方法,并结合广东产生龙卷的对流系统特征,将广东龙卷风暴分为以下四类:

第一类:准线性对流系统,反射率因子连续区域是准线状的,有共同前导边界,最大回波强度达 50 dBz 以上,主轴的长度大于 100 km 并且长轴与短轴的长度之比大于 3,对流系统沿与长轴垂直的方向移动(图 1a 白框);

第二类:孤立单体,反射率因子区域是相对孤立的单体,聚集成圆形或椭圆形,最大回波强度达 50 dBz 以上,尺度小于 50 km(图 1b 白框);

第三类:多单体风暴系统,连续回波区域是多个单体聚集成团并且难以区分是非连续的还是线状的,典型特征是其 40 dBz 以上连续回波区域的面积至少为 2500 km² (50 km×50 km)(图 1c 白框);

第四类:带状对流系统,多个对流单体位于线状对流中,最大回波强度达 50 dBz 以上,与第一类不同的是,不存在共同前导边界,对流系统沿其长轴走向的方向移动(图 1d 白框)。



注:红色箭头为对流系统移动方向。

图 1 2006—2022 年广东龙卷四类母体风暴形态的雷达反射率因子

(a) 准线性对流系统, (b) 孤立单体, (c) 多单体风暴系统, (d) 带状对流系统

Fig. 1 Radar reflectivity of four storm morphologies of Guangdong tornadoes from 2006 to 2022

(a) quasi-linear convective system, (b) isolated convection cell,

(c) multi-cell storm system, (d) banded convective system

2 广东龙卷时空分布特征

从空间分布看(图 2a),广东龙卷主要集中在三个区域:珠三角地区,粤西地区特别是雷州半岛,粤东的揭阳、潮州和汕头交汇区一带。其中,灾害性强龙卷主要发生在珠三角区域,特别是佛山和广州一带。结合地形图可以看出,广东龙卷的发生与地形关系极为密切,龙卷易发生在江河交汇处、入海口、喇叭口地形以及沿海等地势平坦区域,粤北等山区龙卷较少发生。龙卷最为多发的珠三角平原,地处西江、北江、东江和喇叭形珠江口交汇区,河网密集,有利于冷暖气流交汇,易导致强对流天气多发;粤西龙卷较为多发的雷州半岛,地势平坦、三面临海、喇叭口地形多,容易发生强对流天气;而粤东龙卷较为集中的区域处于莲花山南侧的韩江三角洲以及榕江、练江中下游平原所构成的潮汕平原,水系发达,是强对流的多发区。统计时段内,广东各市均有龙卷发生,其中佛山龙卷发生频次最多,达到 41 个,其次是湛江和广州,分别为 36 个和 28 个,龙卷发生频次较高的城市还有江门和阳江,达到 20 个以上,龙卷给上述地区造成的灾害也较为严重(图 2b)。

统计表明,1961—2022 年广东共记录到 225 个龙卷,其中 1991—2020 年 137 个,30 年气候平均值为年均 4.6 个。由图 3a 可见,20 世纪 70 年代之前,龙卷记录很少,这应该与早期观测设备少、通信交通条件落后以及对龙卷认识缺乏等因素有一定关系;70 年代中期以后龙卷记录明显增多,1976—1990 年共记录到 52 个,年均 3.5 个;90 年代龙卷记录明显减少,年均 1.9 个;21 世纪以来,龙卷记录明

显增多,2001—2022 年记录到 130 个,年均 5.9 个。但龙卷数量逐年波动很大,共有 13 个年份在 7 个以上(图 3a),其中最高为 2008 年,达 17 个,其次为 2013 年、2022 年、2005 年,分别为 15、10、10 个。总体来看,有记录的龙卷数量随着时间的推移而增加。但这可能也反映了随着公众对龙卷认知提高和媒体媒介的快速进步,被记录到的龙卷增多。实际上,计算 2001—2022 年的龙卷年频数变化趋势,并没有明显增多或减少的迹象。

从月分布来看,1—11 月广东均可能有龙卷发生,但以 4—9 月最多,约占总数的 88%。其中 4—6 月为峰值,共记录到 123 个,占比约 54%(图 3b),主要与华南前汛期受到高空槽、切变线、西南低空急流等西风带系统影响有关;7—9 月为次峰值,记录到 76 个,占比约 34%,主要与华南后汛期受到 TC 影响有关。另外,广东最晚记录到的龙卷为 11 月 11 日,发生在 2013 年的湛江徐闻县;最早记录到为 1 月 12 日,发生在 1996 年的茂名市,强度为 EF2 级,可见即使是在全国寒冬时节,广东仍有发生强龙卷的可能性,这与该季节低纬地区会出现阶段性相对暖湿环境,同时低层和深层垂直风切变也较大等因素有关(范雯杰和俞小鼎,2015)。

从日变化来看,龙卷主要发生在白天(06—20 时),占比约 85%,其中 14—18 时频次较高,占比约 39%(图 3c),这与该时段经过太阳辐射正处于大气层结最不稳定、强对流天气最易发生的时段有关;20 时至次日 06 时记录较少,这可能与夜间大气层结相对稳定有关,也与夜间视觉受限、一些弱龙卷难以被记录到有关。广东龙卷的这种月变化和日变化分布特征与美国东海岸具有相近纬度、相同气候类型的

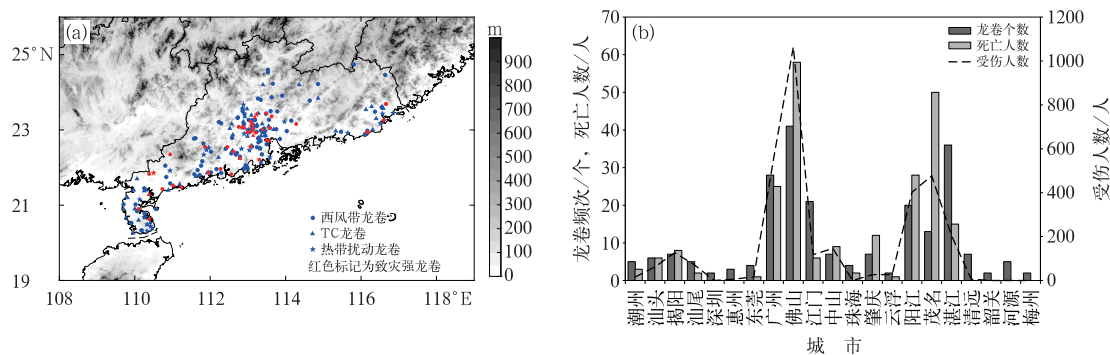
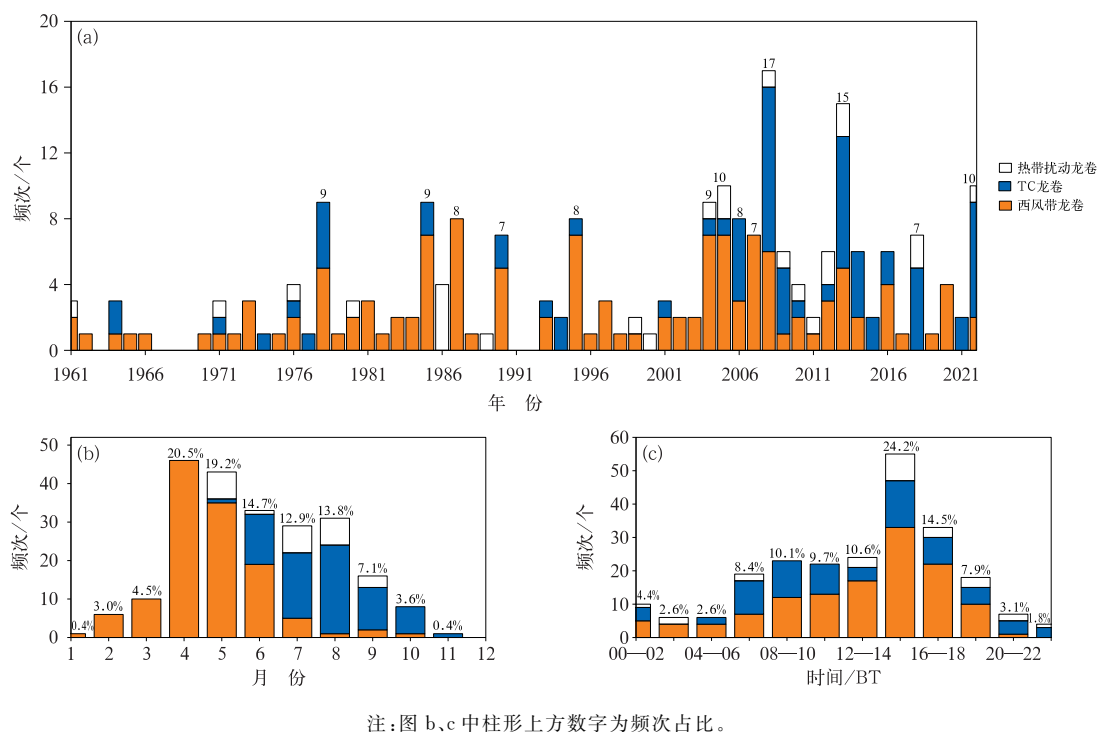


图 2 1961—2022 年广东(a)225 个龙卷空间分布和海拔高度(阴影)及(b)各市龙卷灾害统计

Fig. 2 (a) Spatial distribution of 225 tornadoes and altitude (shaded), (b) tornado disasters in various cities in Guangdong from 1961 to 2022



注:图 b、c 中柱形上方数字为频次占比。

图 3 1961—2022 年不同天气背景下的广东龙卷发生频次的(a)年变化,(b)月变化和(c)日变化统计

Fig. 3 Statistics of tornadoes under different weather backgrounds in the (a) annually, (b) monthly and (c) daily occurrence frequency in Guangdong from 1961 to 2022

佛罗里达州龙卷活动特征相似。佛罗里达州 3—4 月为强龙卷发生的峰值月份,主要受到强的中纬度西风带系统影响,次峰值为 8—9 月,与 TC 活动有关;雨季(5—10 月)龙卷主要发生在 14—18 时(LT),15 时为峰值(Hagemeyer and Schmocker, 1991)。这表明,对于龙卷发生的风险预报和临近预警需要区分重点季节、重要时段进行综合考虑。

3 产生龙卷的天气背景特征

按照西风带系统、TC 和热带扰动三类影响系统统计分析广东龙卷发生的天气背景特征。如图 4 所示,1961—2022 年,西风带系统是广东最易发生龙卷的天气背景,约有 57% 的龙卷事件发生在该类天气背景下,其次约有 32% 发生在 TC 影响的天气背景中,还有少数(占比约 11%)发生在热带扰动天气背景下;但 2006 年以来,发生在 TC 影响中的 TC 龙卷事件明显增加,占比增至约 49%,这可能与 2006 年“派比安”、2022 年“暹芭”等 TC 过程贡献了多个龙卷有关。对比而言,美国佛罗里达州,TC 龙卷占比仅约 14% (Schultz and Cecil, 2009);我国龙

卷最高发的江苏省,其 2006—2018 年约 50% 的龙卷发生在梅汛期,仅约 27% 的龙卷发生于台风天气背景中(徐芬等, 2021)。这也表明 TC 龙卷高发是广东龙卷最为突出的特点,与俞小鼎等(2021)的研究结论“广东是热带气旋外围龙卷发生最多的省”相吻合。

从不同天气背景下龙卷空间分布来看(图 2),三类龙卷在广东龙卷的三个高发区(珠三角、粤西和粤东地区)的发生位置呈现出重叠的特征,表明在不同天气背景下龙卷具有在某地多发、频发特征。但

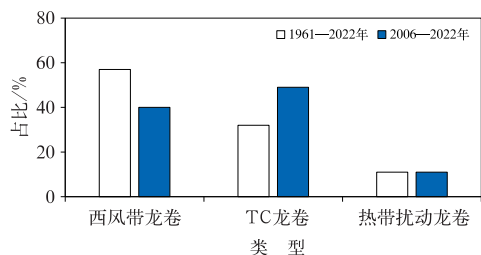


图 4 1961—2022 年不同天气背景下的广东龙卷发生比例

Fig. 4 Proportion of tornadoes under different weather backgrounds in Guangdong from 1961 to 2022

TC 和热带扰动背景龙卷基本发生在距海岸线 150 km 以内的区域,而部分西风带龙卷可以发生在距海岸线更远的粤北地区。这表明下垫面地形对不同天气类型背景下龙卷生成的影响。从时间分布看,1—6 月龙卷多数发生在西风带系统天气背景下,7—11 月主要发生在 TC 和热带扰动天气背景中;另外,西风带系统龙卷与热带扰动龙卷主要发生在 12—20 时,而 TC 龙卷日变化特征不是十分明显,但 14—18 时和 06—12 时是发生频次相对较高的两个时段(图略)。

3.1 西风带龙卷天气背景

对 2000—2022 年广东西风带龙卷发生的天气形势统计表明,锋面型龙卷占比约 65%,暖区型占比约 35%。

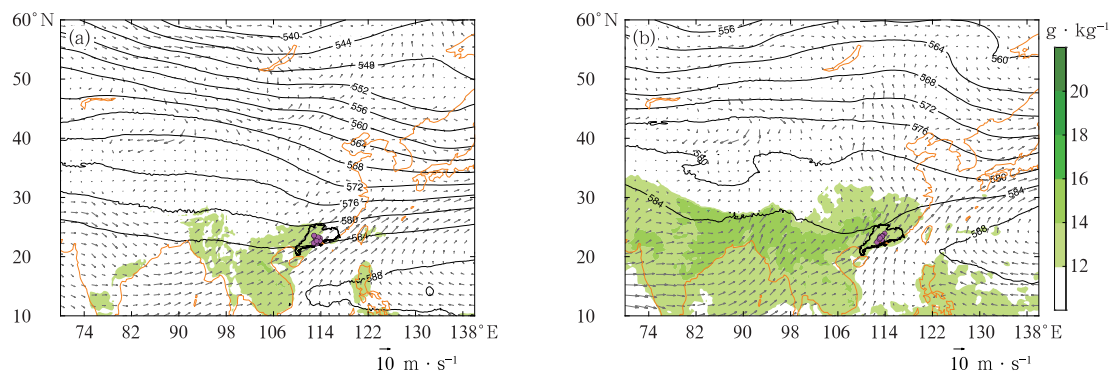
图 5a、5b 分别是有代表性的 13 个锋面型龙卷和 9 个暖区型龙卷的 500 hPa 高度场与 850 hPa 风场合成分析。由图 5a 可见,锋面型龙卷 500 hPa 西太平洋副热带高压(以下简称副高)(参考 588 dagpm 位势高度等值线)偏南,脊线平均位于 15°N 附近,呈东西带状,西脊点位于 106°E 附近,中低纬有明显西风槽东移南压,槽底到达 23°N 以南,槽后有较强的冷空气南下;中低层有低槽或切变线东移南压,低槽前或切变线南侧存在较强的西南急流,850 hPa 风速达 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上;高层通常处于南亚高压东北侧风场辐散区;地面有冷空气南下,通常有锋面位于粤北附近,斜压性明显,龙卷发生地处于锋面南侧的低压槽中并存在明显中尺度辐合线(图略)。在地面或近地层高能高湿区与中层槽后冷平流、高层辐散场垂直叠置时,上冷下暖易形成不稳定的大气层

结,在中低层低槽或切变线和冷锋等天气尺度系统的斜压强迫抬升及中尺度系统触发下,不稳定能量强烈爆发,导致强对流风暴的发生。而中低空较强的西南急流使得垂直风切变较大,产生水平涡度,当水平涡度沿着强对流风暴入流进入到上升气流中后被扭曲为垂直涡度,利于有组织性风暴体的形成,从而产生龙卷。龙卷发生在切变线和锋面南侧、高空辐散区及中低空西南急流交汇处。

由图 5b 可见,暖区型龙卷 500 hPa 副高偏东,西脊点位于 120°E 附近,整体呈方头状,低纬度环流较为平直,广西附近有短波槽东移,中低层华南无冷空气和切变线南下,广东受一致的西南季风气流影响,存在强西南急流和明显的风速辐合,850 hPa 风速在 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,垂直风切变较大。高层处于高空急流入口区右侧的辐散区,地面无冷空气影响,无锋面靠近,处于脊后槽前并存在明显中尺度辐合线(图略),有利于近地面层增暖增湿,不稳定能量聚集。在近地层高温高湿区与中层槽前、高层辐散场垂直叠置时,不稳定度加大,有利于水平涡度转化为垂直涡度,在地面辐合线等中尺度系统触发下,导致龙卷母体强对流风暴的发生。龙卷发生在中低空西南急流交汇处、风速辐合区及高空辐散叠置区。

3.2 TC 龙卷天气背景

统计 2000—2022 年广东 TC 龙卷发生的天气形势,以中低层 925~500 hPa 任一层或多层的急流活动特征来区分,可以相应地归纳为两大类:偏南(包括东南、西南)急流型和偏北(东北)急流型,分别占比约 70% 和 30%。



注:黑色等值线为 500 hPa 位势高度(单位: dagpm),风矢为 850 hPa 风场,填色为 850 hPa 比湿,圆点为龙卷大致发生地,黑色实线所示范围为广东省。

图 5 2000—2022 年广东西风带龙卷(a)锋面型和(b)暖区型合成环流
Fig. 5 Synthesis circulation of (a) frontal type and (b) warm zone type of westerly tornadoes in Guangdong from 2000 to 2022

图 6a、6b 分别是有代表性的 9 个偏南急流型和 6 个偏北急流型龙卷的 500 hPa 高度场与 850 hPa 风场的合成分析。由图 6a 可见,偏南急流型龙卷 500 hPa 副高呈方头状,西脊点位于 115°E 附近,脊线位于 25°N 附近,TC 中心平均位于广西南部—北部湾一带,龙卷发生在 TC 中心的偏东象限与副高之间,中低空存在强偏南(东南急流或西南偏南)急流,850 hPa 风速达 $17\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,近地层至 500 hPa 的深层垂直风切变和低空垂直风切变均很大;高层对应分流区或明显风场辐散区,地面龙卷发生前存在中尺度辐合线(图略)。

由图 6b 可见,偏北急流型龙卷 500 hPa 副高偏东、偏弱,588 dagpm 等值线位于 140°E 以东,TC 中心平均位于南海中北部海面,龙卷发生在 TC 中心的偏西象限,低层至中层为一致的偏北气流,存在较强的偏北风急流(风速 $14\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右),垂直风切变特别是低空的垂直风切变较大;同样高空对应明显辐散区、地面存在中尺度辐合线(图略)。在台风这种深厚的天气尺度系统提供的上升运动和大的垂直风切变环境下,有利于产生强的水平涡度和垂直涡度,在地面中尺度系统的触发下,导致龙卷母体强对流风暴的形成,龙卷发生在中低空偏南(偏北)急流交汇处、地面辐合线附近及高空辐散叠置区。

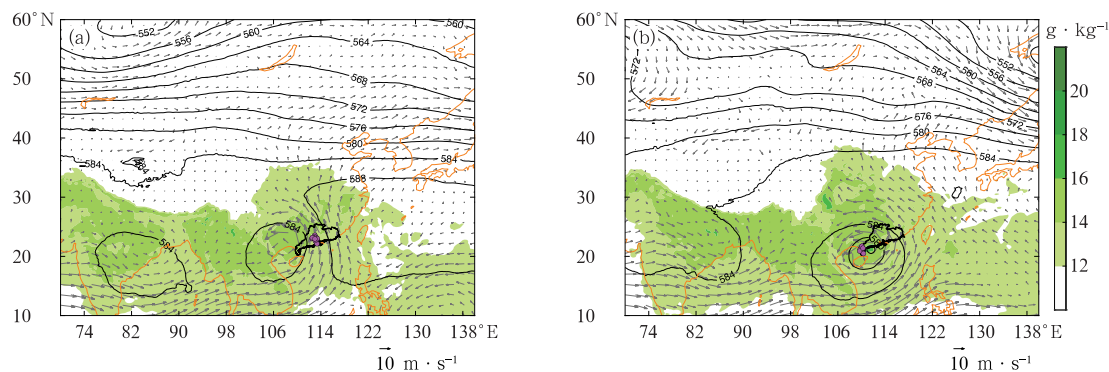
3.3 热带扰动龙卷天气背景

2000—2022 年广东热带扰动龙卷的天气形势可以分为三类:低压扰动型、辐合带型和东风波型,分别占比 50%、31% 和 19%。

图 7a~7c 分别是有代表性的 5 个低压扰动型、3 个辐合带型和 3 个东风波型龙卷的 500 hPa 高度场与 850 hPa 风场的合成分析。由图 7a 可见,低压扰动型龙卷 500 hPa 副高呈方头状,西脊点位于 110°E 附近,脊线位于 26°N 附近,低压扰动中心平均位于北部湾到越南北部一带,龙卷发生在低压扰动右侧与副高之间;低层存在较强的西南偏南急流,垂直风切变较大;高层广东处于明显风场辐散区;龙卷发生前广东中西部地面存在明显中尺度辐合线(图略)。该类天气型龙卷的天气形势配置与偏南急流型 TC 龙卷相似,但低空急流的强度普遍偏弱,风速在 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,龙卷发生在中低空偏南急流交汇处、地面辐合线附近及高空辐散叠置区。

由图 7b 可见,辐合带型龙卷 500 hPa 副高偏东偏弱,588 dagpm 等值线西脊点位于 126°E 附近,脊线位于 27°N 附近,广东处于副高西侧的 584 dagpm 等值线内;低层南海中北部海面有辐合带北抬,存在西南偏南急流,低空的垂直风切变较大;地面存在明显的中尺度辐合线。在辐合带等天气尺度系统形成的上升运动和地面中尺度系统的触发下,以及较大的低空垂直风切变环境下,导致龙卷母体风暴的形成。龙卷发生在西南偏南急流交汇处及地面辐合线附近。

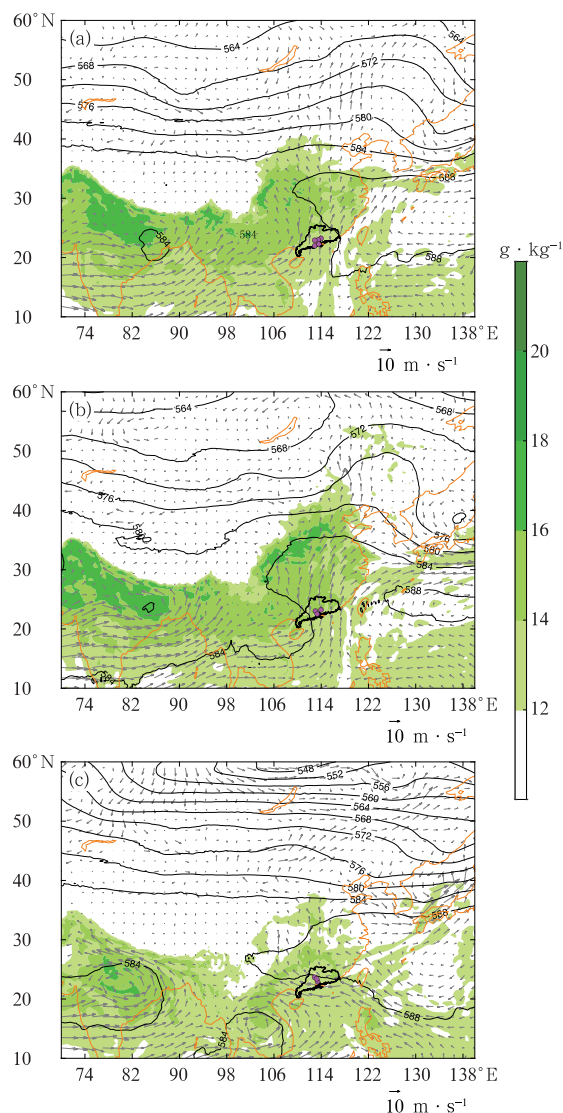
由图 7c 可见,东风波型龙卷 500 hPa 副高呈带状控制江南及华南北部,西脊点位于 100°E 附近,脊线位于 28°N 附近,广东大部处于副高南侧,有东风波自广东东部沿海一带西移至广东中西部地区;低层有热带辐合带或季风槽自南海中部海面北抬,存



注:黑色等值线为 500 hPa 位势高度(单位:dagpm),风矢为 850 hPa 风场,填色为 850 hPa 比湿,圆点为龙卷大致发生地,黑色实线所示范围为广东省。

图 6 2000—2022 年广东 TC 龙卷(a)偏南急流型和(b)偏北急流型合成环流

Fig. 6 Synthesis circulation of (a) southerly jet and (b) northerly jet of TC tornadoes in Guangdong from 2000 to 2022



注:黑色等值线为 500 hPa 位势高度(单位: dagpm), 风矢为 850 hPa 风场,填色为 850 hPa 比湿,圆点为龙卷大致发生地,黑色实线所示范围为广东省。

图 7 2000—2022 年广东热带扰动龙卷
(a)低压扰动型,(b)辐合带型和
(c)东风波型合成环流

Fig. 7 Synthesis circulation of (a) low-pressure disturbance, (b) convergence zone and (c) easterly wave of tropical disturbance tornadoes in Guangdong from 2000 to 2022

在东南急流,低空的垂直风切变较大,并且东风波与低层辐合带或季风槽接近或叠加;地面存在明显的中尺度风向风速辐合线(图略)。在东风波和季风槽等天气尺度系统形成的上升运动叠加和地面中尺度系统的触发下及较大的低空垂直风切变环境下,有利于龙卷母体风暴的形成。龙卷发生在东风波动和低层东南急流交汇处及地面辐合线附近。

综上所述,低层较强的暖湿气流、中低空急流(大的垂直风切变)、高层辐散和地面中尺度辐合线是广东三种天气背景龙卷发生的关键影响因子,差异主要在于不同天气背景下中低空急流(垂直风切变)的强度不同,其中 TC 龙卷和西风带龙卷的环境中低空急流(垂直风切变)普遍较强,特别是 TC 龙卷最强,而扰动类龙卷最弱,这也是广东 TC 龙卷强度普遍更强、扰动类龙卷强度普遍更弱的主要原因。

4 广东龙卷雷达关键特征

4.1 龙卷母体风暴的形态特征

对 2006—2022 年广东 98 个龙卷的对流系统形态进行统计,结果如图 8a 所示。可以看到,发生龙卷的带状对流系统形态相对频率远高于其他三类,占比为 54%;其次为多单体风暴系统,占比为 36%;孤立超级单体形态和准线性对流系统的相对频率很低,均仅约为 5%,17 年间均仅有 5 个龙卷产生于孤立对流单体和准线性对流系统。这与美国龙卷更易产生于孤立超级单体形态(Trapp et al.,2005)的研究结果不同,也与江苏龙卷超过 50%产生于镶嵌在多单体风暴簇系统(如梅雨对流雨带)中的超级单体中气旋内(徐芬等,2021)有差异,但相同的是广东和江苏产生龙卷的孤立对流单体占比均很低,均约为 5%。分析广东产生龙卷的四类对流系统形态对应的三种天气形势下龙卷母体风暴发现,第一类准线性对流系统和第二类孤立对流单体为前汛期的西风带龙卷母体风暴,其结构常呈现高质心特点,50 dBz 以上的强回波伸展高度可达 8~10 km(黄先香等,2019c;2021a;2021b);第三类多单体风暴系统的构成较为复杂,多数为西风带龙卷母体风暴,还有小部分 TC 龙卷和热带扰动龙卷母体风暴;第四类带状对流系统风暴形态为 TC 龙卷和热带扰动龙卷母体风暴,主要为低质心结构,50 dBz 以上的强回波垂直伸展高度通常在 5 km 以下(黄先香等,2019a;2019b;2019c)。

结合广东龙卷发生的天气背景特征,分析广东龙卷带状对流系统形态相对频率远高于其他三类的原因:2006—2022 年,广东约 60%的龙卷是发生在 TC 和热带扰动天气背景下(图 4),而 TC 外围螺旋云系影响下的降水常呈带状,其上镶嵌多个微型超级单体,热带扰动影响下的部分降水也呈现类似结构。因此从对流系统形态分型角度看,广东发生龙

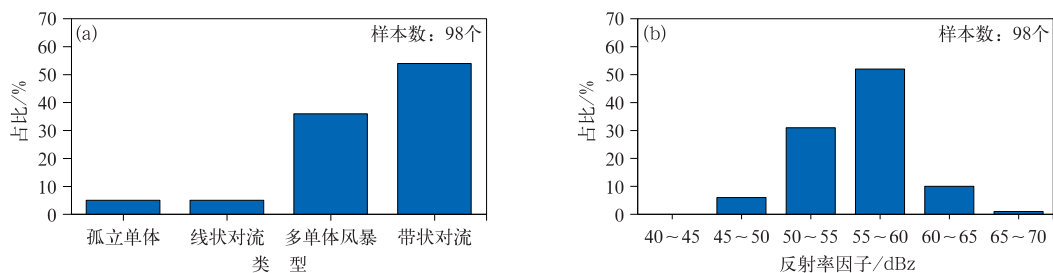


图 8 2006—2022 年广东龙卷风暴不同(a)形态和(b)最大回波强度的发生占比
Fig. 8 Proportion of different (a) patterns and (b) maximum echo intensities of tornado storms in Guangdong from 2006 to 2022

卷的带状对流系统相对频率远高于其他三类形态。另外,对龙卷母体风暴的强度统计表明,广东龙卷发生时龙卷母体风暴最低仰角(0.5°)最大回波强度均在 45 dBz 以上,主要分布在 50~60 dBz,占比约 83%,最大回波强度超过 60 dBz 的龙卷母体风暴占比约 11%,最大回波强度低于 50 dBz 的风暴发生占比约为 6%(图 8b)。

4.2 龙卷母体风暴中气旋和 TVS 特征

2006—2022 年,98 个龙卷中由于部分龙卷缺乏

雷达径向速度或龙卷发生地距雷达超过 80 km,对龙卷风暴中气旋和 TVS 进行统计时选取的有效样本数为 58 个,其中 53 个龙卷母体风暴有低层中气旋,占比约 91%,有 5 个为非中气旋龙卷(占比约 9%),但仅约 47%(27 个)龙卷母体风暴伴随低层 TVS,在出现 TVS 时,50%没有提前量。从最低仰角(0.5° 仰角)中气旋和 TVS 的特征量来看,龙卷发生时刻的低层中气旋旋转速度主要在 $10\sim 20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,占比约 81%,部分龙卷可达 $20\sim 30\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (图 9a),中气旋尺度普遍较小,超过 70%的直径在

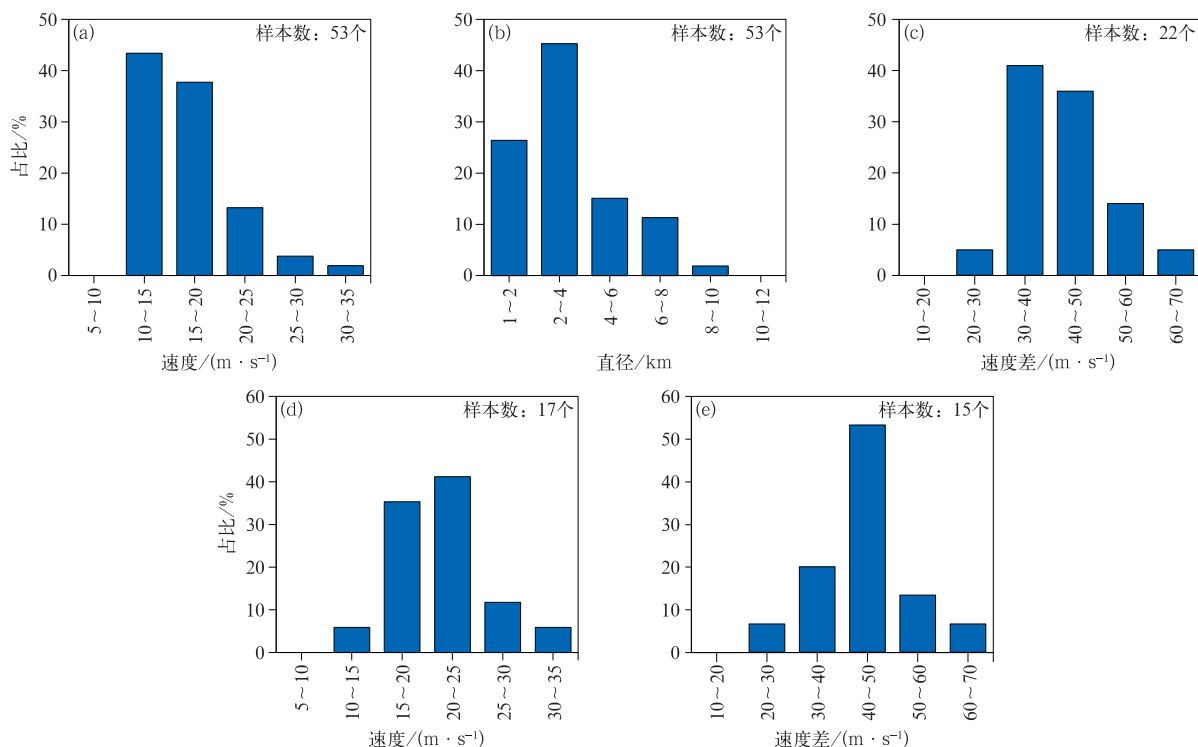


图 9 2006—2022 年广东龙卷单体中气旋和 TVS 关键特征的发生占比
(a) 龙卷单体中气旋最低仰角旋转速度, (b) 龙卷单体中气旋最低仰角直径, (c) 龙卷单体 TVS 最低仰角速度差, (d) 强龙卷单体中气旋最低仰角旋转速度, (e) 强龙卷单体 TVS 最低仰角速度差
Fig. 9 Proportion of key features of mesocyclone and TVS in Guangdong tornado cells from 2006 to 2022
(a) lowest elevation angle rotation speed of the mesocyclone in tornado cells, (b) diameter of the lowest elevation angle of the mesocyclone in tornado cells, (c) lowest elevation angle velocity difference of TVS in tornado cells, (d) lowest elevation angle rotation speed of the mesocyclone in severe tornado cells, (e) lowest elevation angle velocity difference of TVS in severe tornado cells

1~4 km(图 9b),TVS 最低仰角速度差主要在 30~50 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,占比约 77%(图 9c)。强龙卷的低层中气旋旋转速度基本在 15 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,其中约 76%集中在 15~25 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 9d),TVS 最低仰角速度差基本在 30 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,其中约 53%集中在 40~50 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 9e)。与龙卷强度等级对应看,当最低仰角中气旋旋转速度超过 20 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、TVS 速度差超过 40 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,均为 EF2 级以上强龙卷。上述分析表明,广东龙卷总体尺度较小、强度较弱,监测预警难度更大。

5 结论与讨论

本文统计分析了 1961—2022 年广东龙卷的时空分布、发生的天气背景,以及 2006—2022 年龙卷母体风暴形态及中气旋和 TVS 等气候特征。主要结论如下:

(1)1961—2022 年,广东记录到 225 个龙卷,其中 1991—2020 年记录到 137 个,30 年气候平均约为年均 4.6 个,21 世纪以来,龙卷年均 5.9 个,特别是 2004—2013 年达到峰值,年均 8.4 个,明显多于气候平均值;但龙卷数量逐年波动很大,不少年份龙卷数量达 7 个以上,其中 2008 年高达 17 个,而部分年份仅有 1 个或无记录;龙卷主要发生在 4—9 月,约占总数的 88%;约 85%的龙卷发生于 06—20 时,最高发时段为 14—18 时(占比近 40%);珠三角、雷州半岛和潮汕平原是龙卷最为高发的区域,佛山是广东龙卷最高发的城市,其次是湛江和广州。

(2)广东龙卷分为西风带龙卷、TC 龙卷和热带扰动龙卷三类,分别占比约 57%、32%和 11%,其中在多源观测资料较齐备的 2006 年以来,TC 龙卷发生频次明显增加,占比增至近 50%,远高于与广东具有相近纬度及相同气候类型、地处美国东海岸的佛罗里达州的 TC 龙卷比例(约 14%),也远高于中国龙卷最多发的江苏省的 TC 龙卷比例(约 27%),表明 TC 龙卷高发是广东龙卷最为突出的特点,也是广东龙卷监测预报需要关注的重点。

(3)从天气形势划分,西风带龙卷主要分为锋面型和暖区型,分别占比约 65%和 35%,两者低空都伴有强西南偏南急流;TC 龙卷主要分为偏南急流型和偏北急流型,分别占比约 70%和 30%;热带扰动龙卷可分为低压扰动型、辐合带型和东风波型,分别占比约 50%、31%和 19%。低层较好的暖湿气

流、中低空急流(大的垂直风切变)、高层辐散和地面中尺度辐合线是广东三种天气背景龙卷发生的关键影响因子,但台风龙卷和西风带龙卷的环境中低空急流(垂直风切变)普遍更强,而扰动类龙卷的环境中低空急流(垂直风切变)较弱,这也是广东扰动类龙卷强度往往更弱的主要原因。

(4)将广东产生龙卷的对流系统按照其形态分为准线性对流系统、孤立对流单体、多单体风暴系统和带状对流系统四类。其中,带状对流系统形态相对频率最高,占比约为 54%,为 TC 龙卷母体风暴和热带扰动龙卷母体风暴,其风暴结构往往呈现出低质心的特点,50 dBz 以上的强回波垂直伸展高度通常在 5 km 以下;其次为多单体风暴系统,约为 36%,多数为西风带龙卷母体风暴;相比于美国佛罗里达州孤立对流单体形态和准线性对流系统更易产生龙卷的统计结果,广东产生龙卷的孤立对流单体和准线性对流系统相对频率均很低,均约 5%,为前汛期的西风带龙卷母体风暴,其风暴结构往往呈现高质心特点,50 dBz 以上的强回波伸展高度可达 8~10 km。广东龙卷发生时龙卷母体风暴最低仰角(0.5°)最大回波强度均在 45 dBz 以上,主要分布在 50~60 dBz,占比约 83%。

(5)广东龙卷母体风暴超过 90%有低层中气旋,多数中气旋尺度比较小,主要在 1~4 km,但仅约 47%伴随低层 TVS,其中 50%单体的 TVS 出现于龙卷发生后。龙卷(强龙卷)发生时刻的低层中气旋旋转速度主要在 10~20 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ (15~25 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$),TVS 最低仰角速度差主要在 30~40 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ (40~50 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)。当最低仰角中气旋旋转速度超过 20 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、TVS 速度差超过 40 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,更易产生强龙卷。

本文仅对广东龙卷的时空分布、环流形势和母体风暴形态等基本特征进行了统计分析,结论还比较初步。对于广东龙卷发生的热力、动力和水汽等环境条件及对于不同类型龙卷的潜势预报关键技术指标将另作分析。

参考文献

- 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).
- 冯喆,2016. 广东龙卷特征及其预警方法初探[D]. 南京:南京信息工程大学. Feng Z, 2016. Features of tornado in Guangdong Province

- and the preliminary study of tornado early-warning methods[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology(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,2018. 1415号“海鸥”台风龙卷天气过程分析[J]. 灾害学,33(4):114-121. Huang X X, Yan L J, Cai K L, et al, 2018. Analysis of the tornado weather process of No. 1415 Kalmaegi Typhoon[J]. J Catastrophol, 33(4):114-121 (in Chinese).
- 黄先香,炎利军,王硕甫,等,2019a. 1822号“山竹”台风龙卷过程观测与预警分析[J]. 热带气象学报,35(4):458-469. Huang X X, Yan L J, Wang S F, et al, 2019a. An analysis on the observations and warnings of tornado induced by Typhoon Mangkhut[J]. J Trop Meteor, 35(4):458-469(in Chinese).
- 黄先香,俞小鼎,炎利军,等,2019b. 1804号台风“艾云尼”龙卷分析[J]. 气象学报,77(4):645-661. Huang X X, Yu X D, Yan L J, et al, 2019b. An analysis on tornadoes in Typhoon Ewiniar[J]. Acta Meteor Sin, 77(4):645-661(in Chinese).
- 黄先香,俞小鼎,炎利军,等,2019c. 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, 2019c. 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,顾伯辉,等,2021a. 广东一次超级单体强龙卷的形成环境和观测特征分析[J]. 热带气象学报,37(5/6):721-732. Huang X X, Yan L J, Gu B H, et al, 2021a. Analysis of formation environment and characteristics of a supercell strong tornado in Guangdong Province[J]. J Trop Meteor, 37(5/6):721-732(in Chinese).
- 黄先香,俞小鼎,炎利军,等,2021b. 2019年4月13日广东徐闻强龙卷天气分析[J]. 气象,47(2):216-229. Huang X X, Yu X D, Yan L J, et al, 2021b. Analysis of the 13 April 2019 strong tornado in Xuwen County, Guangdong Province[J]. Meteor Mon, 47(2):216-229(in Chinese).
- 李昭春,朱君鉴,张持岸,等,2021. 海南屯昌儋州台风雨带龙卷双偏振雷达探测分析[J]. 气象,47(9):1086-1098. Li Z C, Zhu J J, Zhang C A, et al, 2021. Analysis of dual polarization radar detection of tornado typhoon rainband in Danzhou and Tunchang in Hainan Province[J]. Meteor Mon, 47(9):1086-1098 (in Chinese).
- 李兆慧,王东海,麦雪湖,等,2017. 2015年10月4日佛山龙卷过程的观测分析[J]. 气象学报,75(2):288-313. Li Z H, Wang D H, Mai X H, et al, 2017. Observations of the tornado occurred at Foshan on 4 October 2015[J]. Acta Meteor Sin, 75(2):288-313 (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).
- 王东海,李兆慧,高枫亭,等,2018. 中国与欧美龙卷统计特征比较分析及研究进展[J]. 气象科技进展,8(2):8-23. Wang D H, Li Z H, Gao Z T, et al, 2018. A comparison of statistical characteristics and research progress of tornadoes in China to that in Europe and USA[J]. Adv Meteor Sci Technol, 8(2):8-23 (in Chinese).
- 王磊,王啸华,李杨,等,2023. 2020年江苏高邮EF2级龙卷多尺度特征分析和预警思考[J]. 气象,49(3):291-303. Wang L, Wang X H, Li Y, et al, 2023. Multi-scale characteristic analysis and warning thoughts of EF2 tornado in Gaoyou County, Jiangsu Province in 2020[J]. Meteor Mon, 49(3):291-303(in Chinese).
- 王沛霖,1996. 珠江三角洲春季龙卷发生的环境条件[J]. 热带气象学报,12(1):60-64. Wang P L, 1996. On the environmental conditions for genesis of tornadoes in Zhujiang River Delta in spring[J]. J Trop Meteor, 12(1):60-64(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).
- 温克刚,宋丽莉,2006. 中国气象灾害大典(广东卷)[M]. 北京:气象出版社. Wen K G, Song L L, 2006. China Meteorological Disaster Yearbook (Guangdong) [M]. Beijing: China Meteorological Press(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).
- 姚叶青,郝莹,张义军,等,2012. 安徽龙卷发生的环境条件和临近预警[J]. 高原气象,31(6):1721-1730. Yao Y Q, Hao Y, Zhang Y J, et al, 2012. Synoptic situation and pre-warning of Anhui tornado[J]. Plateau Meteor, 31(6):1721-1730(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).
- 张楠,杨晓君,林晓萌,等,2020. 线状对流中EF3级强龙卷的多尺度机理研究[J]. 气象,46(7):873-884. Zhang N, Yang X J, Lin X M, et al, 2020. Multi-scale mechanisms of EF3 tornado in linear convection[J]. Meteor Mon, 46(7):873-884(in Chinese).
- 张涛,关良,郑永光,等,2020. 2019年7月3日辽宁开原龙卷灾害现

- 场调查及其所揭示的龙卷演变过程[J]. 气象, 46(5): 603-617.
- Zhang T, Guan L, Zheng Y G, et al, 2020. Damage survey of the 3 July 2019 Kaiyuan tornado in Liaoning Province and its evolution revealed by disaster[J]. Meteor Mon, 46(5): 603-617 (in Chinese).
- 张小玲, 杨波, 朱文剑, 等, 2016. 2016年6月23日江苏阜宁EF4级龙卷天气分析[J]. 气象, 42(11): 1304-1314. Zhang X L, Yang B, Zhu W J, et al, 2016. Analysis of the EF4 tornado in Funing County, Jiangsu Province on 23 June 2016[J]. Meteor Mon, 42(11): 1304-1314 (in Chinese).
- 张一平, 梁俊平, 牛淑贞, 等, 2020. 豫东龙卷的环境条件和雷达监测预警分析[J]. 高原气象, 39(5): 1089-1101. Zhang Y P, Liang J P, Niu S Z, et al, 2020. Analysis of environmental conditions and radar monitoring warning of tornado in eastern Henan[J]. Plateau Meteor, 39(5): 1089-1101 (in Chinese).
- 郑艳, 林正扬, 蒋贤玲, 2020. 海南龙卷统计特征[J]. 气象科技进展, 10(6): 76-79, 89. Zheng Y, Lin Z Y, Jiang X L, 2020. Statistical characteristics of tornado in Hainan Province[J]. Adv Meteor Sci Technol, 10(6): 76-79, 89 (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, 蓝渝, 曹艳察, 等, 2020. 2019年7月3日辽宁开原EF4级强龙卷形成条件、演变特征和机理[J]. 气象, 46(5): 589-602. Zheng Y G, Lan Y, Cao Y C, et al, 2020. Environmental conditions, evolution and mechanisms of the EF4 tornado in Kaiyuan of Liaoning Province on 3 July 2019[J]. Meteor Mon, 46(5): 589-602 (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, 张备, 王啸华, 等, 2015. 台风龙卷的环境背景和雷达回波结构分析[J]. 气象, 41(8): 942-952. Zheng Y Y, Zhang B, Wang X H, et al, 2015. Analysis of typhoon-tornado weather background and radar echo structure[J]. Meteor Mon, 41(8): 942-952 (in Chinese).
- 植江玲, 黄先香, 白兰强, 等, 2022a. 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, 2022a. Characteristics of tornado activity and disaster of China in 2021[J]. Adv Meteor Sci Technol, 12(1): 26-36 (in Chinese).
- 植江玲, 黄先香, 顾伯辉, 等, 2022b. 广东两次超级单体导致不同类型强风天气对比分析[J]. 气象, 48(7): 813-825. Zhi J L, Huang X X, Gu B H, et al, 2022b. A comparative study on two different types of gale events caused by supercell in Guangdong[J]. Meteor Mon, 48(7): 813-825 (in Chinese).
- 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等, 2007. 天气学原理和方法: 第4版[M]. 北京: 气象出版社: 496. Zhu Q G, Lin J R, Shou S W, et al, 2007. Synoptic Principles and Methods. 4th ed [M]. Beijing: China Meteorological Press: 496 (in Chinese).
- Ashley W S, 2007. Spatial and temporal analysis of tornado fatalities in the United States: 1880—2005[J]. Wea Forecasting, 22(6): 1214-1228.
- Bai L Q, Meng Z Y, Huang L, et al, 2017. An integrated damage, visual, and radar analysis of the 2015 Foshan, Guangdong, EF3 tornado in China produced by the landfalling Typhoon Mujigae (2015)[J]. Bull Amer Meteor Soc, 98(12): 2619-2640.
- 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.
- Bruening S L, Kay M P, Brooks H E, 2002. A new perspective on the climatology of tornadoes in the United States[C] // Preprints, 16th Conf. on Probability and Statistics in the Atmospheric Sciences, Orlando: Amer Meteor Soc: J96-J103.
- Chen J Y, Cai X H, Wang H Y, et al, 2018. Tornado climatology of China[J]. Int J Climatol, 38(5): 2478-2489.
- Grams J S, Thompson R L, Snively D V, et al, 2012. A climatology and comparison of parameters for significant tornado events in the United States[J]. Wea Forecasting, 27(1): 106-123.
- Hagemeyer B C, Schmocker G K, 1991. Characteristics of East-Central Florida tornado environments[J]. Wea Forecasting, 6(4): 499-514.
- Kelly D L, Schaefer J T, McNulty R P, et al, 1978. An augmented tornado climatology[J]. Mon Wea Rev, 106(8): 1172-1183.
- Meng Z Y, Bai L Q, Zhang M R, et al, 2018. The deadliest tornado (EF4) in the past 40 years in China[J]. Wea Forecasting, 33(3): 693-713.
- Mitchell E D, Vasiloff S V, Stumpf G J, et al, 1998. The national severe storms laboratory tornado detection algorithm[J]. Wea Forecasting, 13(2): 352-366.
- Moore T W, 2017. On the temporal and spatial characteristics of tornado days in the United States[J]. Atmos Res, 184: 56-65.
- Schultz L A, Cecil D J, 2009. Tropical cyclone tornadoes, 1950—2007[J]. Mon Wea Rev, 137(10): 3471-3484.
- Stumpf G J, Witt A, Mitchell E D, et al, 1998. The national severe storms laboratory mesocyclone detection algorithm for the WSR-88D[J]. Wea Forecasting, 13(2): 304-326.
- Tecson J J, Fujita T T, Abbey Jr R F, 1982. Climatological mapping of U. S. tornadoes during 1916—1980[C] // Preprints, 12th Conf. on Severe Local Storms, Boston: Amer Meteor Soc: 38-41.
- Trapp R J, Tessendorf S A, Godfrey E S, et al, 2005. Tornadoes from squall lines and bow echoes. Part I: climatological distribution[J]. Wea Forecasting, 20(1): 23-34.

(本文责编: 张芳)