

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).

江苏龙卷时空分布及风暴形态特征^{*}

徐 芬^{1,2,3} 郑媛媛^{1,2,3} 孙康远^{1,2,3}

1 中国气象局交通气象重点开放实验室,南京 210009

2 江苏省气象科学研究所,南京 210009

3 南京气象科技创新研究院,南京 210009

提 要: 基于江苏气候影响评价文件、重要天气报文、江苏民政部门龙卷灾情记录和其他有关资料,根据“增强藤田级别”龙卷级别分类标准,对 2006—2018 年 13 年间江苏龙卷的时空分布、等级分布、天气背景特征和风暴形态特征进行了统计分析。主要结果如下:2006—2018 年共记录到 27 个龙卷日发生龙卷 41 次,年均 3.2 次,其中 EF2 级强龙卷事件发生最多,占比为 39%,EF4 级龙卷只被记录到一次,为“6·23”阜宁强龙卷。21 世纪以来,江苏尚未记录到 EF5 级极端龙卷事件,而 EF0 和 EF1 级的弱龙卷因灾情小可能被忽略,其统计数量可能被明显低估;龙卷主要分布于东部沿海、中部沿江及淮北西部地区。相较过去江苏中部龙卷高发中心有南移趋势,东部沿海地区高发中心则呈现北抬特征,盐城、徐州、扬州依次为龙卷高发城市,宿迁、连云港、常州、镇江四市近年未有龙卷发生;龙卷主要集中在春、夏两季发生,7—8 月龙卷发生个数约占全年的 90%;发生起始时间为 10—20 时,约 78% 的龙卷集中发生于 15—20 时;约 50% 的龙卷发生于梅汛期期间,27% 为台前龙卷,盐城地区为梅汛期龙卷高发区域,扬州—泰州地区为盛夏副热带高压边缘龙卷高发区域,台前龙卷无明显高发区域;江苏地区超过 50% 的龙卷产生于镶嵌在多单体风暴系统中的超级单体中气旋内,约 30% 的龙卷产生于准线性对流系统,与美国孤立对流单体形态易产生龙卷的结果不同的是,我国华东地区(以江苏省为主)产生龙卷的孤立对流单体相对频率最低,13 年间只有 2 个龙卷产生于孤立对流单体,相对频率为 5%。

关键词: 龙卷,时空分布,风暴形态,江苏

中图分类号: P445,P463

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.05.001

Characteristics of Spatio-Temporal Distribution and Storm Morphologies of Tornadoes in Jiangsu Province

XU Fen^{1,2,3} ZHENG Yuanyuan^{1,2,3} SUN Kangyuan^{1,2,3}

1 Key Laboratory of Transportation Meteorology, CMA, Nanjing 210009

2 Jiangsu Institute of Meteorological Sciences, Nanjing 210009

3 Nanjing Joint Institute for Atmospheric Sciences, Nanjing 210009

Abstract: Based on the climate impact assessment documents, significant weather reports, tornado disaster records from Jiangsu civil affairs department and other relevant data from 2006 to 2018, the spatio-temporal distribution, strength distribution, weather background and storm morphology characteristics of the Jiangsu tornadoes are analyzed according to the “Enhanced Fujita Scale”. The main results show that there were 41 tornadoes recorded in 27 tornadic days during the 13 years (2006—2018) with an average annual tornado

^{*} 国家重点研发计划(2018YFC1506103)、中国铁路总公司重大课题(K2018T007)、江苏省社会发展项目(BE2017776)和江苏省气象局面上项目(KM202007)共同资助

2020 年 5 月 12 日收稿; 2020 年 8 月 4 日收修定稿

第一作者:徐芬,主要从事多普勒天气雷达应用和临近预报技术研究. E-mail:xufen1130@tom.com

通讯作者:郑媛媛,主要从事强对流天气临近预报技术研究. E-mail:zhengyy63@sina.com

of 3.2 times, of which the tornado events at EF2 level occurred the most, accounting for 39%, while the EF4 tornado was only recorded once, referring to the 23 June (6 · 23) Funing severe tornado. Since the 21st Century, there has been no record of extreme tornado events of EF5 level in Jiangsu Province, while the weak tornadoes of EF0 and EF1 are likely to be ignored due to the weak disaster, so their statistical results may be significantly underestimated. Tornadoes mainly occur in the eastern coastal area, the central coastal area and the western area of the north of the Huaihe River. Compared with the past, the high-risk center of tornado in central Jiangsu has a trend of moving southward, while the high-risk center in the eastern coastal area shows a feature of northward movement. Yancheng, Xuzhou and Yangzhou are the high frequency cities of tornado, but no tornado has happened in Suqian, Lianyungang, Changzhou and Zhenjiang in recent years.

Most tornadoes occur in spring and summer, 90% of which are seen in July and August. The onset of tornadoes is from 10:00 BT to 20:00 BT, and 78% of tornado genesis in the diurnal variation are between 15:00 BT and 20:00 BT. About 50% of the tornadoes occur during the Meiyu period, and 27% of them are typhoon tornadoes. Yancheng is the highest incidence area of tornadoes in Meiyu period, and the Yangzhou—Taizhou Region has high incidence of tornadoes in mid-summer. There is no obvious high-risk area of typhoon tornadoes in Jiangsu. More than 50% of tornadoes in Jiangsu are generated in supercell mesocyclone embedded in cluster convective morphology, and about 30% of tornadoes are produced in the quasi-linear convective system convective morphology. Contrast to high frequency of tornadoes produced by the discrete cells in the United States, the possibility of tornadoes generated from discrete cells in East China (mainly in Jiangsu Province) is the lowest, and only two tornadoes (less than 5%) were generated in discrete cells in the past 13 years.

Key words: tornado, spatio-temporal characteristic, storm morphology, Jiangsu Province

引 言

与美国等龙卷高发国家相比,在中国龙卷属低概率天气,发生频率不及美国的十分之一(范雯杰和俞小鼎,2015),但由于我国龙卷高发地区主要集中在东部平原、珠江三角洲等人口密集、经济发达地区(魏文秀和赵亚民,1995;范雯杰和俞小鼎,2015; Yao et al,2015;冯佳玮等,2017),即使是弱龙卷事件也可造成重大的人员伤亡和财产损失,因此我国气象工作者围绕中国龙卷不同区域特征和灾损情况分析工作开展基于不同时序、不同区域的调查研究(薛德强和杨成芳,2003;许遐祯等,2010;冯婧等,2012)。近年随着观测资料的增加、智能手机的拍摄功能及无人机航拍技术的发展为及时捕捉龙卷漏斗云特征,获取灾区实况等提供了丰富手段,特别是1999年以来全国范围内多普勒天气雷达观测网的布设,为获取更为真实的龙卷事件特征提供了大量素材,气象学者们利用天气雷达观测资料开展了

2004年以来的龙卷事件统计分析工作,以期揭示更为客观真实的龙卷区域分布特征。范雯杰和俞小鼎(2015)对2004—2013年间中国EF1级或以上等级龙卷做了时空分布特征分析,并与1961—2010年间的结果进行比对,发现EF1级龙卷在中国最西部过去认为非龙卷发生区域亦有发生;王秀明等(2015)分析了近十年东北地区龙卷环境特征,发现东北地区龙卷风暴主要由干线及其伴随的强边界层辐合触发;黄先香等(2019a;2019b)统计了2005年以来珠江三角洲台风龙卷的活动特征及环境条件,发现台风中心在广东湛江—广西南部或北部湾附近时是珠江三角洲龙卷发生的高风险区;Bai et al(2020)利用2006—2018年间发生的台前龙卷事件系统分析了我国登陆热带气旋环境下的龙卷及超级单体特征。上述利用丰富的观测资料、灾情实况等信息开展的龙卷相关研究工作不仅更加细致揭示了不同区域、不同天气背景下龙卷事件发生的异同,也发现近年我国龙卷发生频次趋势有所下降、但强龙卷发生区域分布有所扩大的客观事实。

2016年6月23日下午,江苏阜宁地区发生了历史罕见的EF4级强龙卷事件,导致99人死亡、800多人受伤,大量基础设施被损毁。该事件的发生给龙卷预警预报科研业务工作提出了前所未有的急迫需求,围绕龙卷,多项科研业务攻关工作给予集中展开,如龙卷灾后调查手段的提升、我国风速等级标准存在问题的探讨(郑永光等,2016)、强龙卷超级单体风暴中尺度结构研究(周海光,2018;黄先香等,2019a;2019b;郑艳等,2017)、强龙卷数值模拟改进(陈锋等,2019)、龙卷可预警性综合分析(张一平等,2019)等,中国气象局也在该地区组织开展龙卷观测试验、龙卷预警业务可行性探索等集中试验性工作。系统梳理近年发生在江苏的龙卷事件分布特征,将对保障工农业生产、生命财产安全等国民经济和社会各项事业的平稳发展具有重大现实意义。本文利用2006—2018年期间发生在江苏的龙卷事件对该地区的龙卷时空分布特征进行统计分析,以期对江苏龙卷环境特征研究、龙卷雷暴单体特征研究、龙卷多发地区观测试验仪器布局及扫描策略制定等科研工作提供数据基础和科学依据。

另外,随着天气雷达观测龙卷个例的不断积累,为利用天气雷达观测数据统计分析产生龙卷的风暴形态提供了可能。美国气象学者围绕龙卷风暴形态开展了较多工作。Trapp and Weisman(2003)对1998—2000年3828个美国本土的龙卷统计分析发现,79%龙卷为块状孤立对流单体结构(single cell),18%为准线状对流系统(QLCS),3%为其他风暴形态。Gallus et al(2008)和Duda and Gallus(2010)的研究指出,美国大平原及密西西比河上游和中游的龙卷有35%是QLCS。Grams et al(2012)在对美国强龙卷进行统计研究时,将产生EF2级以上龙卷的风暴形态分为三类:第一类为相对的单体聚集成圆形或椭圆形的孤立对流单体(discrete cell),第二类为QLCS,第三类为多个单体聚集成团并且难以区分是非连续的还是线状的多单体风暴系统(cluster)。并对美国2000—2008年强龙卷分析发现,约70%以上的强龙卷为孤立对流单体结构。由于产生龙卷的对流系统形态复杂,为能更准确地刻画产生龙卷的对流系统形态,Smith et al(2012)又将三种类型对流形态细分成五种:QLCS、线性混合体(linear hybrid)、超级单体(supercell)、边缘型

(marginal)、无组织型(disorganized)。他们的研究结果发现,与美国南部和大平原地区龙卷多产生于右移超级单体中(right-moving supercell)相比,发生在俄亥俄山谷的龙卷对流组织形式更倾向于QLCS,产生龙卷的风暴形态类型与区域有较大关系。美国风暴预报中心预报人员将上述统计结果投入业务应用时发现,可利用出现块状的孤立对流单体形态去预估美国大平原长生命史的龙卷强度。由此可见对龙卷风暴形态的系统研究可帮助预报人员预估龙卷的强度。我国气象学者对龙卷风暴也初步开展了类似分类,吴芳芳等(2012)对2005—2008年盐城龙卷风暴进行了分类:一类产生于孤立的对流单体中,一类产生于镶嵌在飚线上的对流单体中,还有一类产生于热带气旋前部或江淮暴雨天气型中低顶的对流单体中;张小玲等(2016)参考Grams et al(2012)对流形态分类准则,对2016年6月23日江苏阜宁EF4级强龙卷分析发现该龙卷对流形态为多单体风暴系统形态。但对龙卷风暴形态尚缺乏规范且系统的研究,且江苏龙卷是否多发于多单体风暴系统值得做进一步统计研究,因此本文第3节也利用天气雷达反射率因子图像统计分析了江苏龙卷的风暴形态特征,以期建立龙卷易发风暴形态模型,为龙卷预警预报工作提供参考依据。

1 数据与方法

1.1 资料来源与筛选

用于本文特征统计的龙卷资料来源主要基于江苏省气象局2006—2018年江苏气候影响评价文件、重要天气报文、地方志、江苏民政部门龙卷灾情记录、龙卷灾情调查资料等,并结合各级气象部门门户网站、官方媒体等互联网媒介公布的龙卷现场采访、实录、图片和视频等对龙卷个例进行佐证与补充。在上述龙卷事件搜集整理的基础上,为确保龙卷事件的真实性,本文采用如下准则来确定上述记录的龙卷个例真伪:

(1)有目击者看到伴随强风的漏斗云。该记录可通过视频记录、目击者口头描述,由于漏斗云为形容龙卷风外型特征的专业术语,亦有目击者称为“一条黑龙自上而下到地面……。”也被认定为龙卷的漏

斗云特征;

(2) 比较狭长的路径。该实况的确定主要来自灾后调查记录;

(3) 在报道龙卷出现的位置,在多普勒天气雷达径向速度图上有明显中气旋或龙卷涡旋特征(TVS)与之对应。由于报道时间常存在一定的滞后性,中气旋或龙卷涡旋特征出现的时刻与报道时间可以有提前 30 min 以内的误差;

(4) 除上述三条外,作为龙卷个例已发表于国内外核心期刊文献。

上述四项条件只要满足其中一条,即确定为龙卷个例。通过严格筛选和综合判断,剔除了过去资料中记录为龙卷,但也有可能是阵风锋、下击暴流等中小尺度对流系统造成的大风个例;亦剔除了记录不够清晰完整,疑似龙卷的个例,尽可能使得龙卷事件的特征分布能够得以真实呈现。需要说明的是水龙卷不包括在本文统计范围内。

1.2 龙卷定级的制定

本文对龙卷事件的定级方法依据范雯杰和俞小鼎(2015)做法,根据归纳后的“增强藤田级别”强度分类标准,统一对龙卷强度进行判定。当有官方认定的龙卷定级结果,如“6·23”阜宁龙卷已被确定为 EF4 级,则不再进行定级;若已有龙卷等级结果,但不是采用“增强藤田级别”强度分类标准,则重新认定等级;对灾情描述不详、龙卷级别高低难辨的个例,在判定等级时取较低级别。由于 EF 等级是完全基于灾害程度确定的风速等级方法,因此龙卷强度等级的确定高度依赖个人主观判断,易造成判断标准的前后不一,同一龙卷灾害被认定为不同级别也常发生。如本文搜集的部分龙卷事件灾后调查结果中灾情描述“电线杆倒伏”,有专家认为该结果符合 EF2 级破坏现象描述“瘦长结构的金属电杆倒塌”,应定为 EF2 级,也有专家认为中国农村电线杆基建较浅,风力大时易折断倒伏,应定为 EF1 级。为尽量减少龙卷事件定级的主观因素,本文按照范雯杰和俞小鼎(2015)制定的各等级龙卷特征所归纳的破坏现象去对照龙卷灾情所描述的现象,当有一种描述灾情符合某一破坏现象时,则被定为该破坏现象所属的龙卷等级,例如上文导致“电线杆倒伏”的龙卷等级被定为 EF2 级,并不主观考虑每一地区

电线杆土建情况。

EF2 级及以上等级龙卷为强龙卷,EF2 级以下等级龙卷为弱龙卷。

1.3 基于天气雷达的风暴形态分类准则

本文统一采用 CINRAD/SA 天气雷达产品中组合反射率图像作为龙卷风暴形态分类的基础图像。一般采用距离龙卷事件发生区域最近的雷达站组合反射率图像进行分析,当该雷达站组合反射率图像特征受到较大数据污染时(如严重的超折射影响),则采用多仰角基本反射率图像进行综合判断分析。

为了能更好分析江苏龙卷风暴形态特征与其他强对流系统风暴形态特征异同,本文还分析了同时期江苏强冰雹事件(落地冰雹直径 ≥ 2 cm 的冰雹事件)。

本文以 Grams et al(2012)风暴形态分类方法为基础,结合江苏产生龙卷的对流系统形态特征,将风暴形态分为以下四类,分析区域的雷达反射率因子阈值 ≥ 35 dBz:

第一类:为相对孤立的单体聚集成圆形或椭圆形的孤立对流单体(discrete cell),最大回波强度达 50 dBz 以上,对流形态如图 1a 白框内所示的孤立对流单体;

第二类:为主轴长度超过 100 km 并且至少是短轴 3 倍且有共同前导边界移动的准线性对流系统(QLCS),包含飚线和弓状回波系统,形态如图 1b 白框内的对流系统;

第三类:为多个单体聚集成团并且难以区分是非连续的还是线状的多单体风暴系统(cluster),其 40 dBz 以上回波区域范围至少为 2500 km²;如图 1c 白框内对流系统所示;

第四类:为不属于上述三类风暴形态中的任一类型,本文归为其他类(other),该类型主要包括以下两种对流形态:一是单个或多个对流单体位于线状对流中,与第二类不同的是,不存在共同前导边界,且与线状对流(准)平行移动,多为台前龙卷发生的对流系统;二是大片反射率因子超过 35 dBz 对流系统中出现唯一一块反射率因子大于 50 dBz 的单体(如图 1d)。

风暴形态分类示意如图 1 所示。

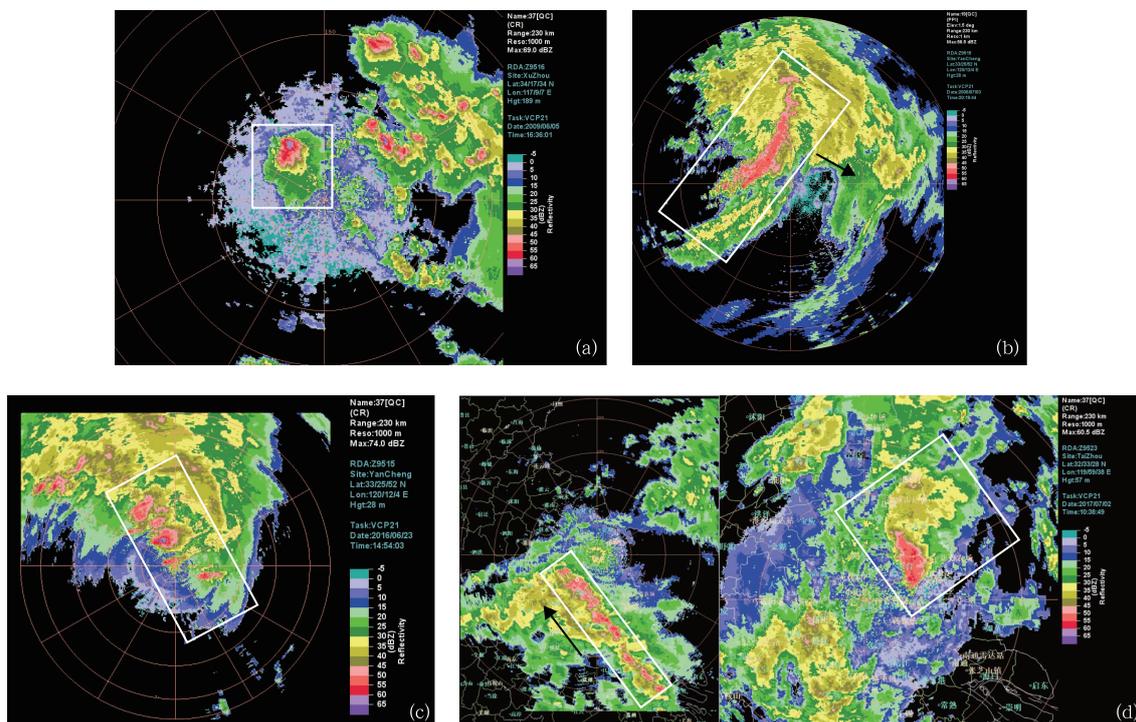


图 1 2006—2018 年江苏龙卷风暴形态分类

(a)第一类孤立对流单体,(b)第二类准线性对流系统,(c)第三类多单体风暴系统,(d)第四类其他对流
(图 1b 和 1d 中黑色箭头为对流系统移动方向)

Fig. 1 Categories of tornado storm morphologies in Jiangsu from 2006 to 2018

(a) discrete cell, (b) QLCS, (c) cluster, (d) other

(Black arrows in Figs. 1b, 1d show the moving direction of convective system)

2 江苏龙卷时空分布特征

2006—2018 年江苏省共记录到 27 个龙卷日发生龙卷 41 次,年均 3.2 次,远低于利用 1956—2005 年江苏龙卷数据统计的结果年均 21.4 次(许遐祯等,2010)。一方面说明由于过去对龙卷事件客观认定存在一定难度,其真实性很难佐证,导致统计结果有所偏差;另一方面也应看到近年尤其进入 21 世纪后,江苏龙卷发生概率有逐步下降的趋势。统计龙卷日发生龙卷频次发现,27 个龙卷日中有 19 个龙卷日每日只发生一次龙卷,占总体约 70%;有 3 个龙卷日发生了 3 次·d⁻¹ 以上龙卷事件,其中 2006 年 7 月 3 日江苏全省自西北向东南共产生 6 个龙卷,属最多龙卷事件日。总体来看江苏属于龙卷日低发龙卷频次地区。

2.1 龙卷等级分布特征

根据 1.2 节龙卷定级方法统计江苏龙卷等级特

征,结果如图 2 所示,2006—2018 年江苏产生 EF2 级强龙卷事件最多,为 39%,其次为 EF1 级龙卷事件,EF4 级龙卷只被记录到一次,为“6·23”阜宁强龙卷(郑永光等,2016;张小玲等,2016)。21 世纪以来,江苏尚未记录到 EF5 级极端龙卷事件。弱龙卷(EF0~EF1)与强龙卷(EF2~EF4)事件次数之比约为 1.05:1,几乎相等。该统计结果不是很合理,其原因可能是一些 EF0 级甚至 EF1 级弱龙卷因为较弱而没有被观察到,尤其是一些发生在夜间的弱龙卷,可能发生在空旷的田野里,因为没有灾情而被忽略;同时这类弱龙卷中非超级单体龙卷占大多数,距离雷达一定距离以外时,径向速度图上也看不到任何明显特征。另外也可能因江苏工农业发达,农田、植被大范围覆盖地区也有较高的人口密度和建筑,电杆、路灯、高压铁塔、以及各种结构的民房厂房等标志性建筑分布密集,导致龙卷过境时破坏现象明显,表现出更强的致灾性,因此 EF2 级或以上等级龙卷被漏掉或没有观测到的可能性较小。再深入分析江苏强龙卷等级分布特征:强龙卷 EF2 级与 EF3 级

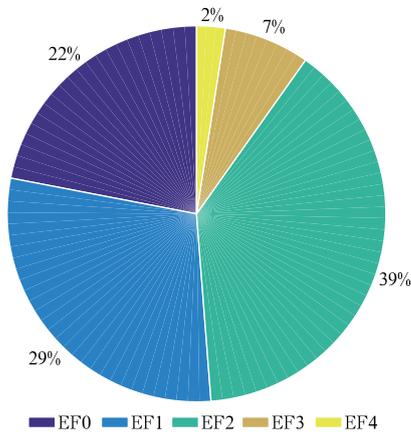


图 2 2006—2018 年江苏龙卷等级分布
Fig. 2 Pie chart of tornadic strength
in Jiangsu from 2006 to 2018

或以上等级强龙卷的事件次数之比约为 4 : 1, 该比值低于 1961—2010 年的全国强龙卷相应等级之比 (7 : 1) (范雯杰和俞小鼎, 2015), 进一步说明江苏龙卷的致灾性更强。

2.2 龙卷空间分布特征

从近年江苏龙卷事件空间分布看 (图 3), 整体呈现中东部、西北部多, 西部、西南部少的分布特征。该结果与许遐祯等 (2010) 分析结果对比发现, 江苏龙卷多发地带从明显东南—西北带状分布, 变为中东部“T”型分布结构。龙卷高发中心除淮北西北部地区高发中心不变外, 江淮地区的龙卷高发中心明显南移: 由淮安、扬州北部南移至扬州—泰州地区中部。东部沿海地区的高发中心从盐城南部移至盐城西北部。从图 3 江苏 13 个地级市龙卷分布清晰可见, 位于沿海东部的盐城是江苏龙卷发生次数最高的城市, 13 年共发生 12 次龙卷, 几乎年均 1 次; 其次为淮北地区的徐州和沿江中部的扬州。发生次数最少的为西部的宿迁、东北部的连云港和沿江以南的常州、镇江, 近年未有龙卷记录。将上述龙卷分布结果与同时期江苏强冰雹事件的分布结果对比可见 (图 3 蓝点所示), 两者呈现出完全不一样的分布特征, 强冰雹事件东部沿海少, 中西部内陆多, 较为均匀的自北向南分布于江苏内陆区域。尚无龙卷发生的连云港、宿迁、镇江、常州 4 个市近年均出现了强冰雹事件, 这可能因为在江苏造成强冰雹天气的对流系统多发生在华北冷空气南下的大尺度天气背景下, 而华北冷空气常常为西北—东南走向南下, 初生于山东、安徽两省的对流系统边向东南移动边发展,

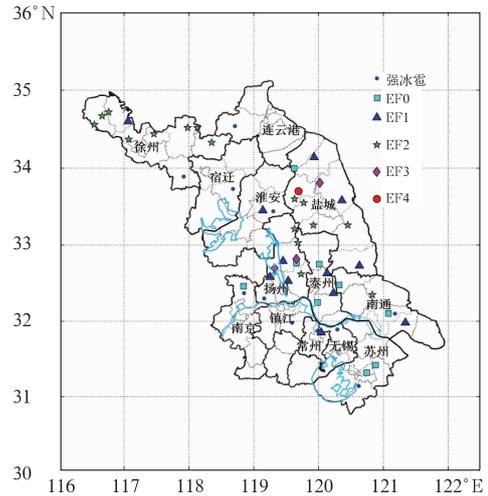


图 3 2006—2018 年江苏龙卷空间分布
(EF0~EF4 为分等级龙卷事件, 蓝点为强冰雹事件, 浅蓝色线条为江苏境内主要水域)

Fig. 3 Spatial distribution of tornadoes
in Jiangsu from 2006 to 2018
(EF0—EF4: tornado events; blue dots:
significant hail events; light blue line:
the main water area in Jiangsu)

南下过程中进入江苏西北内陆地区致灾, 造成了江苏强冰雹区域东部沿海少, 中西部内陆多的分布特点, 这与于波等 (2013) 的研究结果相吻合。

结合龙卷等级信息再来分析不同强度的龙卷空间分布特征 (图 3): 江苏强龙卷高发地区分别位于江苏东部沿海、淮北西北部以及苏中地区。盐城、徐州、扬州、南通 4 个龙卷高发城市近年均出现了 EF2 级及以上的强龙卷事件, 其中徐州市强龙卷事件发生次数最多, 将近 90% 的龙卷均为强龙卷事件。苏州、泰州、南京、无锡四市尽管近年亦有龙卷发生, 但破坏力有限, 均为弱龙卷事件。说明江苏强龙卷的发生与地形关系密切, 易出现在地势平坦、湖泊交错的平原地区。

2.3 龙卷时间分布特征

2.3.1 年代际变化特征

从龙卷发生年份看 (图 4), 2006—2018 年江苏年均龙卷日数为 2.1 d, 年均龙卷事件为 3.2 个。其中 2010 年发生龙卷日数及龙卷个数最少, 仅为 1 d, 产生了一个龙卷事件; 2008 年和 2011 年龙卷日数最多, 为 4 d, 其中 2008 年 4 d 中共产生 7 个龙卷, 为统计段内产生龙卷最多的年份。从产生龙卷个数趋势看, 增长或下降趋势并不显著, 但总体远低于 20 世纪江苏龙卷的发生日数。

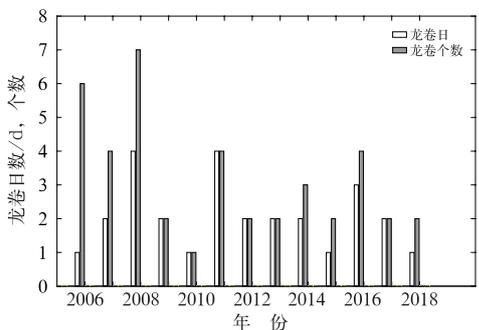


图 4 2006—2018 年江苏各年份龙卷日数和龙卷个数统计

Fig. 4 Histogram of the numbers of tornadic days and tornado events in Jiangsu from 2006 to 2018

2.3.2 年变化特征

图 5a 给出了 2006—2018 年江苏龙卷日数和龙卷个数的年变化特征:江苏龙卷主要集中在春、夏两季发生,其中 7 月和 8 月最为频发,龙卷日数和龙卷个数分别约占全年总数的 89%和 90%。就单月看,7 月最多,在该月有 15 个龙卷日产生了 25 个龙卷,也说明 7 月为多龙卷事件日发生月。8 月次之,共有 9 个龙卷日产生了 12 个龙卷。13 年间只有一个龙卷发生于秋季,为 2007 年 10 月 7 日台风罗莎的外围云系在江苏苏州地区产生了龙卷。其他月份则未见龙卷记录。

再结合龙卷等级信息,分析同时期江苏强龙卷和弱龙卷的年变化特征(图 5b):江苏强龙卷均发生于春、夏两季,就单月看,7 月最多,6 月次之,这与范雯杰和俞小鼎(2015)统计的 1961—2010 年江苏强龙卷日逐月变化的统计特征一致。需要注意的是,8 月尽管发生的龙卷日和龙卷个数较多,但以弱龙卷

事件居多。与范雯杰和俞小鼎(2015)统计结果有所区别的是,近 10 年,江苏地区只在 6 月、7 月和 8 月出现强龙卷记录;而过去近 60 年间,江苏在 3 月、4 月和 9 月也发生过强龙卷事件。

上述统计结果表明,江苏龙卷的发生有明显季节性。通过叠加对流有效位能(CAPE)和 0~1 km 垂直风切变(shr_{0-1})的江苏气候均值分析可见(图 5b),龙卷高发月与 CAPE、0~1 km 垂直风切变的峰值相吻合,7—8 月不稳定大气层结以及近地面较大的垂直风切变均是有利于龙卷产生的大气环境。冬季及初春,由于大气层结相对稳定且水汽含量较少,使得触发龙卷的热动力条件难以满足。尽管秋季江苏天气也处于稳定少雨阶段,但可能受台风活动影响,台风外围云系仍会在江苏地区触发龙卷。

2.3.3 日变化特征

江苏龙卷除有明显季节特征外,也存在明显日变化特征,图 6 给出了 2006—2018 年江苏龙卷事件发生时间的分布特征:约 78%的龙卷发生于 15—20 时,该期间也是江苏盛夏午后最易发生强对流天气的阶段,受白天热辐射影响,近地面温度不断增高,促使午后大气层结趋于不稳定,为强对流天气的发生提供了合适的热力条件。除此以外约有 15%的龙卷发生于 10—14 时,05—06 时、22 时也有极少龙卷发生,其他时刻则无龙卷发生。再分析龙卷强度的日变化特征:具有明显的单峰结构,约 88%的强龙卷发生于 14—20 时,并且主要集中在 15—16 时,这与全国强龙卷日变化分布特征较为相似(范雯杰和俞小鼎,2015);弱龙卷事件发生时刻主要集中在 10—20 时,峰值出现在 17 时。

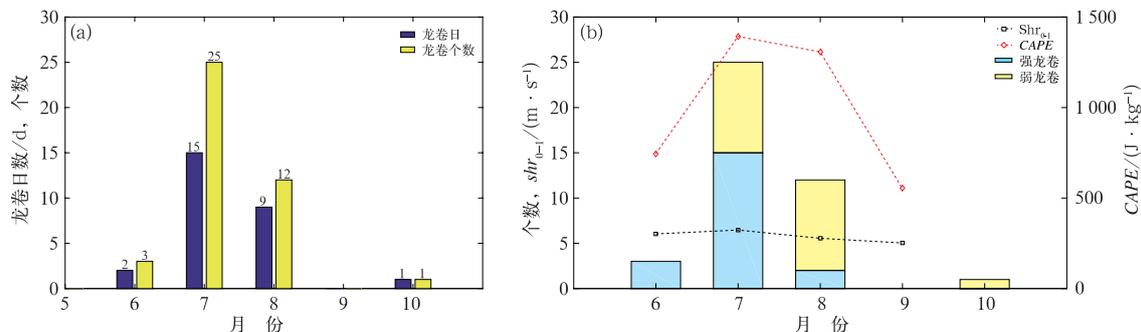


图 5 2006—2018 年江苏(a)龙卷日数和龙卷个数和(b)不同强度的龙卷个数、叠加江苏 CAPE 和 0~1 km 垂直风切变气候平均值 shr_{0-1} 逐月分布

Fig. 5 Monthly distribution of (a) the number of tornadic days and the number of tornadic events, (b) tornadoes with different strengths, overlaid by the climate values of CAPE and shr_{0-1} in Jiangsu from 2006 to 2018

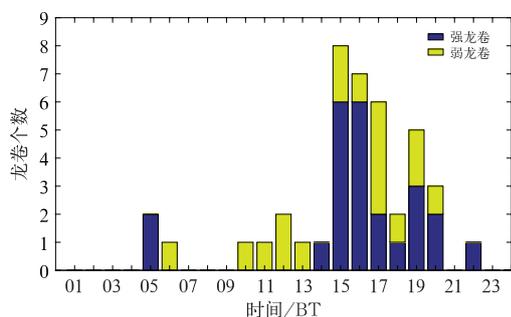


图 6 2006—2018 年江苏龙卷事件日变化分布
Fig. 6 Diurnal variation of tornadoes in Jiangsu from 2006 to 2018

2.4 产生龙卷的天气背景特征

曾明剑等(2016)、郑媛媛等(2015)研究工作表明江苏龙卷多发生于梅雨季节,以及台风活动频繁的时间段,因此本文根据易发龙卷的天气背景特征,按照梅汛期前期(梅前)、梅汛期、梅汛期后(梅后)、台风影响阶段(台前)四种天气背景进行分布特征研究。结果由图 7 可见,2006—2018 年,梅汛期是江苏最易发生龙卷的天气背景,约有 50% 的龙卷事件发生于此期间,其次约有 27% 的龙卷发生于台风影响下的天气背景中,这两种天气背景下的龙卷发生比例均高于过去类似研究结果,一方面是因为统计样本的不一致所导致,另一方面也说明近年来江苏龙卷发生时间段更趋于集中,近 8 成龙卷事件发生于梅汛期期间和台风天气背景下。

再从不同天气背景下龙卷的空间分布来看,梅汛期期间产生的龙卷多分布于江苏东部沿海地区、淮北西北部区域以及沿江中部地区(图 8),其中盐城地区为梅雨期龙卷的高发区域(图 8 红色边框所示区域)。梅汛期过后江苏进入盛夏,沿江及东南部地区常处于副热带高压边缘,而龙卷则多产生于副热带高压边缘对流系统中,在该期间,扬州—泰州地区为龙卷高发区域。台风外围云系在江苏地区是否产生龙卷,除与该地区下垫面及环境条件有关外,主要与台风自身活动路径和强度有直接关系(另行文叙述),因此从图 8 的台前龙卷空间分布特征可见,江苏无明显台前龙卷高发地区。

3 江苏龙卷风暴形态特征

3.1 江苏龙卷风暴形态分型特征

根据 1.3 节制定的龙卷风暴形态准则,本节对

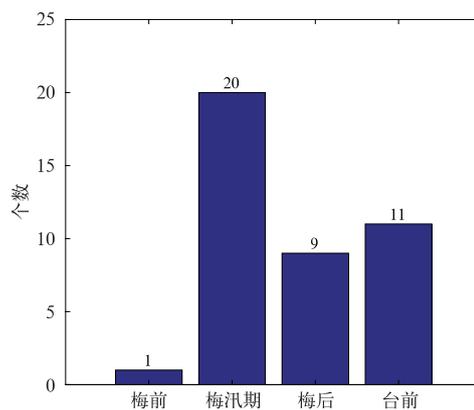


图 7 2006—2018 年江苏产生龙卷的天气背景特征

Fig. 7 Background of tornado weather in Jiangsu from 2006 to 2018

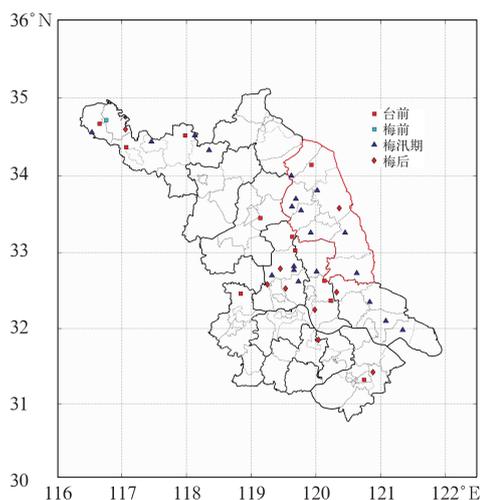


图 8 2006—2018 年不同天气背景下的江苏龙卷空间分布特征

Fig. 8 Spatial distribution of tornado at different weather conditions in Jiangsu from 2006 to 2018

上述龙卷事件集风暴形态进行了分类统计。由于产生龙卷的对流系统随时间不断发展变化,如有些产生龙卷的对流系统初始为孤立对流单体,逐渐发展与周边多个对流单体靠近,在产生龙卷时形态属于多单体风暴系统,本文把龙卷发生时刻龙卷雷暴单体所属的对流系统形态作为该龙卷事件的风暴形态纳入统计。如 2009 年 8 月 27 日江苏昆山地区发生了一次 EF0 弱龙卷事件,产生该龙卷的雷暴单体内对流形态在 15:42 时为孤立对流单体(图 9a),随着时间推移,该单体逐渐与其周边发展增大的对流单

体靠近,回波形态趋于多单体风暴系统,16 时左右在昆山巴城地区产生龙卷,该时刻风暴单体呈现为多单体风暴系统(图 9b)。

江苏龙卷风暴形态统计结果如图 10a 所示,发生龙卷的多单体风暴系统形态相对频率远高于其他三类,占比超过 50%,准线性对流系统形态占比其次,约为 30%,产生龙卷的孤立对流单体形态相对频率最低,不到 10%。针对龙卷等级 \geq EF2 级的强龙卷事件进行类似统计,结果如图 10b 所示,与所有龙卷事件的结果一致,多单体风暴系统产生强龙卷的相对频率最高,孤立对流单体产生强龙卷的相对频率最低。

为探讨龙卷强度是否与龙卷事件所属的风暴形态有一定关系,本文按照龙卷等级,分别统计了不同龙卷等级的风暴形态分布特征(图 11):无论何种龙卷等级,多单体风暴系统形态相对频率均最高,产生 EF0 级龙卷的对流形态中,多单体风暴系统形态占

了近 7 成的绝对比重。从 EF1 级开始,随着龙卷等级的增加,多单体风暴系统形态相对频率也随之增加,说明多单体风暴系统相比其他风暴形态,不仅易产生龙卷,更易产生强龙卷。其次为准线性对流系统形态下易产生龙卷。相较美国孤立对流单体形态易产生强龙卷的统计结果(Grams et al,2012),我国华东地区(以江苏省为主)产生龙卷的孤立对流单体占比最低,能产生强龙卷的孤立对流单体占比也最低。

结合 2.4 节江苏地区产生龙卷的天气背景特征,分析江苏龙卷多单体风暴系统形态相对频率远高于其他三类的原因:江苏龙卷分别约有 50%和 27%发生在梅汛期和台风天气背景下。江淮梅雨期间,梅雨锋雨带多呈现为具有多个(强)风暴单体或超级单体镶嵌于其中的对流结构系统,而该期间产生的龙卷均由镶嵌于梅雨雨带中的对流单体发展引发;台风外围云系影响下的降水结构也常呈现类

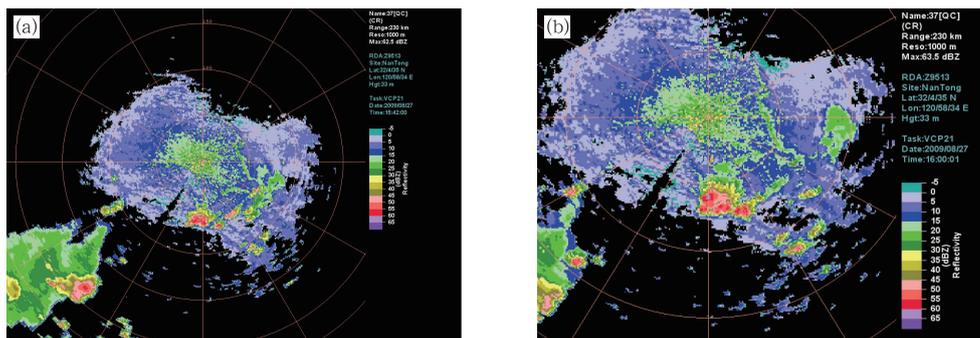


图 9 2009 年 8 月 27 日(a)15:42 孤立对流单体,(b)16:00 多单体风暴系统
Fig. 9 (a) Discrete cell at 15:42 BT and (b) cluster at 16:00 BT 27 August 2009

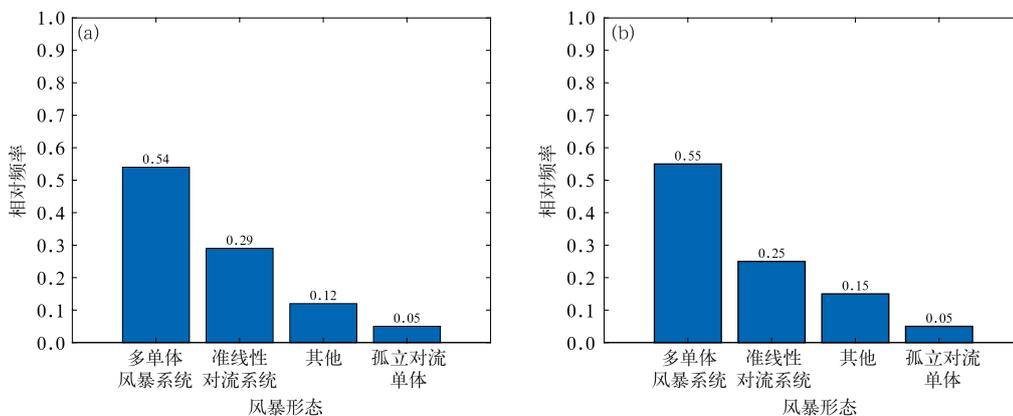


图 10 2008—2016 年江苏(a)龙卷风暴形态,和(b)强龙卷风暴形态相对频率
Fig. 10 Relative frequency of (a) tornadic storm morphologies and (b) severe tornadic storm morphologies in Jiangsu from 2008 to 2016

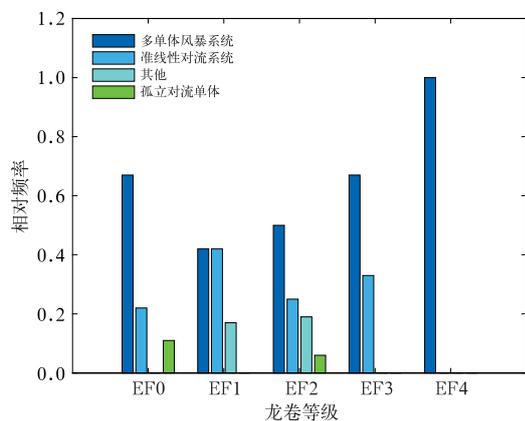


图 11 2008—2016 年江苏龙卷等级与风暴形态的关系
Fig. 11 Relationship between tornado strength and storm morphologies in Jiangsu from 2008 to 2016

似结构,即多风暴单体镶嵌于雨带中,从风暴形态分型角度即为多单体风暴系统或准线性对流系统。因此从风暴形态分型角度看发生龙卷的多单体风暴系统相对频率远高于其他三类形态。

3.2 江苏强冰雹风暴形态特征

为更全面地探讨江苏地区产生极端天气(龙卷、强冰雹)的降水系统风暴形态特征,本文也统计了同时期发生在江苏的强冰雹事件所对应的风暴形态分布特征(图 12):与龙卷风暴形态分布特征一致的是,强冰雹事件仍以多单体风暴系统为主,占比更高达到了 2/3;不同的是,孤立对流单体产生的强冰雹事件位居第二,准线性对流系统产生的强冰雹事件

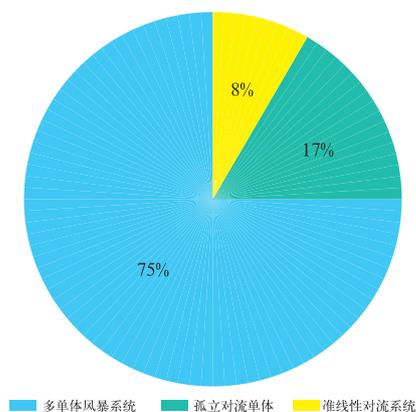


图 12 2008—2016 年江苏强冰雹风暴形态分布特征

Fig. 12 Pie chart of storm morphologies of severe hail events in Jiangsu from 2008 to 2016

最少,且没有第四类风暴形态。综合可见在江苏地区,嵌有多(强)风暴单体的对流性降水系统,配合一定的热动力条件,更易产生包括龙卷、强冰雹等极端强对流天气。

4 结论

本文统计了 2006—2018 年 13 年间江苏龙卷的时空分布、龙卷等级分布、龙卷天气背景和龙卷风暴形态分型特征。主要结论如下:

(1)2006—2018 年间,江苏共记录到 27 个龙卷日发生龙卷 41 次,年均 3.2 次,远低于 1956—2005 年间江苏龙卷发生频率;从龙卷等级分布看,近 13 年,江苏 EF2 级强龙卷事件发生最多,占比 39%,其次为 EF1 级龙卷事件,EF4 级龙卷只被记录到 1 次,为“6·23”阜宁强龙卷。21 世纪以来,江苏尚未记录到 EF5 级极端龙卷事件;需要强调的是,EF0 和 EF1 等级的弱龙卷因灾情小可能被忽略,其统计数量可能被明显低估。

(2)从龙卷空间分布看,江苏呈现中东部、西北部多,西部、西南部少的分布特征。江淮地区的龙卷高发中心由淮安和扬州北部南移至扬州—泰州地区中部,东部沿海地区高发中心从盐城南部北抬至盐城西北部。盐城是江苏龙卷发生次数最高的城市,其次为徐州和扬州。位于江苏西部的宿迁、东北部的连云港和沿江以南的常州、镇江四个地级市未有龙卷记录。

(3)从龙卷发生时间分布看,江苏龙卷主要集中在春、夏两季发生,其中 7 月和 8 月最为频发;EF2 级及以上强龙卷均发生于春、夏两季,7 月最多,6 月次之;江苏龙卷除有明显季节特征外,也存在明显日变化特征:10—20 时均有产生龙卷的可能,其中约 78% 的龙卷发生于 15—20 时;龙卷强度的日变化具有明显的单峰结构,约 88% 的强龙卷发生于 14—20 时,并且主要集中在 15—16 时。

(4)2006—2018 年约有 50% 的江苏龙卷发生于梅汛期期间,其次 27% 为台前龙卷。梅汛期期间产生的龙卷多分布于江苏东部沿海地区、淮北西北部区域以及沿江中部地区,其中盐城地区为梅雨期龙卷的高发区域;梅汛期后盛夏期间,江苏沿江扬州—泰州地区为龙卷高发区域;台前龙卷无明显高发区域。

(5)把产生龙卷的对流系统按照其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

他类型四类。统计表明江苏地区超过50%的龙卷产生于镶嵌在多单体风暴系统中的超级单体中气旋内,其次为准线性对流系统,约为30%;相较美国孤立对流单体形态易产生龙卷的统计结果,我国华东地区(以江苏省为主)产生龙卷的孤立对流单体相对频率最低(5%),13年间只有2个龙卷产生于孤立对流单体。多单体风暴系统形态相比其他风暴形态,不仅易产生龙卷,更易产生强龙卷。

最后需要说明的是2019年江苏无龙卷事件发生,应正确认识到尽管江苏属于龙卷高发地区,但也只相对中国其他区域而言。龙卷仍属于极低概率强对流天气事件,与美国年均超1000个的发生频率相比,统计分析工作仍缺乏足够样本,对其预警预报技术研发工作的有效开展仍是极大挑战。

参考文献

- 陈锋,董美莹,冀春晓,等,2019. 雷达资料同化对2016年6月23日阜宁龙卷模拟的改进[J]. 气象学报,77(3):405-426. Chen F, Dong M Y, Ji C X, et al, 2019. Improving the simulation of the tornado occurring in Funing on 23 June 2016 by using radar data assimilation[J]. Acta Meteor Sin, 77(3):405-426(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).
- 冯佳玮,闵锦忠,庄潇然,2017. 中国龙卷时空分布及其环境物理量特征[J]. 热带气象学报,33(4):530-539. Feng J W, Min J Z, Zhuang X R, 2017. The spatial and temporal distribution of Chinese tornadoes and their characteristics analysis of environmental physical variations[J]. J Trop Meteor, 33(4):530-539(in Chinese).
- 冯婧,周伟灿,徐影,2012. 1980—2009年我国龙卷事件变化[J]. 气候变化研究进展,8(3):183-189. Feng J, Zhou W C, Xu Y, 2012. Change characters of tornadoes in China in 1980—2009[J]. Adv Climate Change Res, 8(3):183-189(in Chinese).
- 黄先香,俞小鼎,炎利军,等,2019a. 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, 2019a. 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,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).
- 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).
- 魏文秀,赵亚民,1995. 中国龙卷风的若干特征[J]. 气象,21(5):36-40. Wei W X, Zhao Y M, 1995. The characteristics of tornadoes in China[J]. Meteor Mon, 21(5):36-40(in Chinese).
- 吴芳芳,俞小鼎,张志刚,等,2012. 对流风暴内中气旋特征与强烈天气[J]. 气象,38(11):1330-1338. Wu F F, Yu X D, Zhang Z G, et al, 2012. The characteristics of the mesocyclone and severe weather associated with convective storms[J]. Meteor Mon, 38(11):1330-1338(in Chinese).
- 许遐祯,潘文卓,缪启龙,2010. 江苏省龙卷灾害易损性分析[J]. 气象科学,30(2):208-213. Xu X Z, Pan W Z, Miao Q L, 2010. Vulnerability analysis of tornado disaster in Jiangsu[J]. Sci Meteor Sin, 30(2):208-213(in Chinese).
- 薛德强,杨成芳,2003. 山东省龙卷风发生的气候特征[J]. 山东气象,23(4):9-11. Xue D Q, Yang C F, 2003. Features of tornadoes distribution in Shandong Province[J]. J Shandong Meteor, 23(4):9-11(in Chinese).
- 于波,鲍文中,王东勇,2013. 安徽天气预报业务基础与实务[M]. 北京:气象出版社:115-116. Yu B, Bao W Z, Wang D Y, 2013. Operational Basis and Practice of Weather Forecast in Anhui Province[M]. Beijing: China Meteorological Press: 115-116(in Chinese).
- 曾明剑,吴海英,王晓峰,等,2016. 梅雨期龙卷环境条件与典型龙卷对流风暴结构特征分析[J]. 气象,42(3):280-293. Zeng M J, Wu H Y, Wang X F, et al, 2016. Analysis on environmental conditions and structural features of typical convective tornado storm in Meiyu period[J]. Meteor Mon, 42(3):280-293(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,牛淑贞,郑世林,等,2019. “07·06”周口龙卷现场调查和可预警性综合分析[J]. 气象,45(8):1135-1148. Zhang Y P, Niu S Z, Zheng S L, et al, 2019. Investigation and warning practicability analysis of the 6 July 2017 tornado in Zhoukou City[J]. Meteor Mon, 45(8):1135-1148(in Chinese).
- 郑艳,俞小鼎,任福民,等,2017. 海南一次超级单体引发的强烈龙卷过程观测分析[J]. 气象,43(6):675-685. Zheng Y, Yu X D, Ren F M, et al, 2017. Analysis on a severe tornado process in Hainan triggered by supercell[J]. Meteor Mon, 43(6):675-685(in Chinese).
- 郑永光,朱文剑,姚聃,等,2016. 风速等级标准与2016年6月23日阜宁龙卷强度估计[J]. 气象,42(11):1289-1303. Zheng Y G, Zhu W J, Yao D, et al, 2016. Wind speed scales and rating of the intensity of the 23 June 2016 tornado in Funing County, Jiangsu Province[J]. Meteor Mon, 42(11):1289-1303(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).
- 周海光, 2018. “6·23”江苏阜宁 EF4 级龙卷超级单体风暴中尺度结构研究[J]. *地球物理学报*, 61(9): 3617-3639. Zhou H G, 2018. Observations of 23 June 2016 EF4 tornado supercell thunderstorm mesoscale structure in Funing County, Jiangsu Province [J]. *Chin J Geophys*, 61(9): 3617-3639 (in Chinese).
- 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.
- Duda J D, Gallus W A Jr, 2010. Spring and summer midwestern severe weather reports in supercells compared to other morphologies[J]. *Wea Forecasting*, 25(1): 190-206.
- Gallus W A Jr, Snook N A, Johnson E V, 2008. Spring and summer severe weather reports over the Midwest as a function of convective mode: a preliminary study[J]. *Wea Forecasting*, 23(1): 101-113.
- 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.
- Smith B T, Thompson R L, Grams J S, et al, 2012. Convective modes for significant severe thunderstorms in the contiguous United States, part I: storm classification and climatology[J]. *Wea Forecasting*, 27(5): 1114-1135.
- Trapp R J, Weisman M L, 2003. Low-level mesovortices within squall lines and bow echoes. part II: their genesis and implications[J]. *Mon Wea Rev*, 131(11): 2804-2823.
- Yao Y Q, Yu X D, Zhang Y J, et al, 2015. Climate analysis of tornadoes in China[J]. *J Meteor Res*, 29(3): 359-369.