

范雯杰,俞小鼎,2015.中国龙卷的时空分布特征.气象,41(7):793-805.

中国龙卷的时空分布特征^{*1}

范雯杰 俞小鼎

中国气象局气象干部培训学院,北京 100081

提 要: 基于《中国气象灾害大典》、《中国气象灾害年鉴》和其他有关资料,根据“增强藤田级别”龙卷级别分类标准,对 1961—2010 年 50 年间中国 EF2 或以上级强龙卷(Significant Tornadoes)和 2004—2013 年 10 年间中国 EF1 或以上级龙卷的时空分布、发生频率和灾害特征进行了统计分析。主要结果如下:(1)1961—2010 年 50 年间共记录到 165 次强龙卷,含 EF2 级 145 次、EF3 级 16 次、EF4 级 4 次,年均 3.3 次;(2)强龙卷主要分布在中国江淮地区、两湖平原、华南地区、东北地区和华北地区东南部等平原地区,具有在某地频发的特征;(3)165 次强龙卷中,1986—1990 年间的发生最为频繁,此后呈逐渐下降趋势;大多发生在春、夏两季,4—8 月的数量占全年的 87%;发生起始时间多集中在 12—20 时;(4)强龙卷发生过程中多伴随有冰雹和/或暴雨等天气现象,其路径长度与强度之间可能存在一定的正相关关系;(5)165 次强龙卷至少造成 1772 人死亡,3.17 万人受伤,总结了记录到的最强 25 次龙卷的灾情特征;(6)2004—2013 年 10 年间共记录到 143 次 EF1 或以上级龙卷,含 EF1 级 121 次、EF2 级 19 次、EF3 级 3 次,其空间分布与 1961—2010 年强龙卷的分布相似;10 年间,2005 年记录到的数量最多,此后呈逐年下降趋势;(7)利用 2004—2013 年《中国气象灾害年鉴》和其他相关资料记录的龙卷资料中 EF1 级龙卷和 EF2 或以上级强龙卷的发生数量之比,以及不完整的 EF0 级龙卷与 EF1 或以上级龙卷的发生数量之比,粗略估计得到 1961—2010 年 50 年间中国年均发生龙卷的次数不低于 85 次,EF1 或以上级龙卷年均发生 21 次,不及美国龙卷发生频率的十分之一。

关键词: 龙卷, 时空分布, 发生频率, 灾情特征, 中国

中图分类号: P468

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2015.07.001

Characteristics of Spatial-Temporal Distribution of Tornadoes in China

FAN Wenjie YU Xiaoding

China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081

Abstract: Based on “the Handbook of China Meteorological Disasters” published in 2008 and other relevant documents for period 1961—2010, spatial-temporal distribution characteristics of significant tornadoes (EF2 or greater) are analyzed according to the “Enhanced Fujita Scale”. And based on “the Annual Report of China Meteorological Disasters” which began to be published from the year 2005, spatial-temporal distribution characteristics of EF1 or greater tornadoes are investigated. The main results show there are total 165 significant tornadoes recorded in China during the 50 year period from 1961 to 2010, including 145 EF2, 16 EF3 and 4 EF4 tornadoes, with average 3.3 significant tornadoes each year. Most of the tornadoes occur in plain area, with higher frequency in Jianghuai Plain, South China, Northeast China Plain and the North China Plain. The highest frequency of tornadoes is during the period 1986—1990. Then, it starts to decline. Most of significant tornadoes occur in spring and summer (from April to August) which account for 87% of the total. The peak frequency of tornado genesis in the diurnal variation is from 12:00

* 国家自然科学基金项目(41175043)、国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2013CB430103)和中国气象局强对流创新专家团队项目共同资助

2015 年 1 月 21 日收稿; 2015 年 4 月 25 日收修定稿

第一作者:范雯杰,主要从事强对流天气临近预报和综合气象观测研究工作. Email: fanwj@cma.gov.cn

通信作者:俞小鼎,主要从事多普勒天气雷达应用和临近预报技术研究. Email: xdyu1962@126.com

to 20:00 local time. The 165 significant tornadoes killed at least 1772 people and wounded more than 31700.

During the 10 year period from 2004—2013, according to “the Annual Report of China Meteorological Disasters” from 2005 to 2014, there are 121 EF1, 19 EF2 and 3 EF3 tornadoes recorded and their spatial distribution is similar to those of the significant tornadoes from 1961 to 2010. Furthermore, at least there are 570 EF0 tornadoes during the same period. With the data, we can infer roughly there is about at least 85 tornadoes and 21 EF1 or greater tornadoes seen in China on average each year, less than the tenth of the tornado occurring frequency in the United States.

Key words: tornadoes, spatial-temporal characteristics, occurring frequency, disaster features, China

引 言

本文主要目的是对 1961 年以来发生在中国的龙卷的时空分布、发生频率和灾情特征给予描述和揭示。龙卷是一种由雷暴云底伸展至地面的漏斗状云产生的强烈旋风,是对流风暴产生的最猛烈的天气现象,其中心最大风速可超过 $140 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (David-Jones et al, 2001)。龙卷生消迅速,常与雷暴、冰雹和暴雨等强对流天气系统相伴出现,可造成重大的人员伤亡和财产损失,是建筑设计、防灾减灾、工农业生产和财产保险等诸项事业中应予重视的灾害性天气现象。

由于观测手段所限,目前仍然极难甚至无法探测到诸如龙卷的实际风速、气压等气象要素值,气象观测站中也很少观测到龙卷(张雪芬等, 2013),对龙卷最大风力的估计多数是灾后灾情调查者的估计值或者车载多普勒雷达近距离观测的估计值。为了界定龙卷强度, Fujita(1971)基于龙卷路径上所造成的破坏大小和风速的对应关系将龙卷分为了 6 个等级,从 F0 级到 F5 级,即“藤田级别”(Fujita Scale, F-Scale)。此后,“藤田级别”龙卷分级法得到了广泛应用(NOAA, 2003),并将 F2 级以上龙卷称为强龙卷。为了更准确地反映龙卷风破坏力与风速之间的对应关系,2007 年,美国天气局对原“藤田级别”中各级龙卷所对应的风速上下限进行了调整,即“增强藤田级别”(Enhanced Fujita Scale, EF-Scale),现已应用于美国的龙卷级别界定业务中。就全球而言,美国是龙卷发生频率最高的国家,1981—2010 年年均可记录到 1122 个龙卷。龙卷分为超级单体龙卷和非超级单体龙卷,前者龙卷产生于中气旋中,后者没有中气旋。大多数 EF2 级及以上的强龙卷

都属于超级单体龙卷,龙卷的临近预警主要基于多普勒天气雷达探测到的中气旋(Moller, 2001; 俞小鼎等, 2006; 吴芳芳等, 2012; 李改琴等, 2014; 周后福等, 2014)。此外,大的低层垂直风切变、低的抬升凝结高度和地面阵风锋的存在也有利于强龙卷的产生(俞小鼎等, 2008; 2012; 王毅等, 2012; 张一平等, 2012; 刁秀广等, 2014; 罗爱文等, 2015; 朱江山等, 2015)。

我国气象工作者对龙卷风的区域特征和灾损情况也开展了一些研究,分析了部分地区的龙卷气候特征、地理分布等,并依据“藤田级别”对龙卷强度进行界定。魏文秀等(1995)利用 1981—1993 年资料统计了中国龙卷的气候和天气特征,指出有两个龙卷风多发带,一是自长江三角洲经苏北平原至黄淮海平原,南北走向,呈下弦月形;另一个是在广东和广西,呈东西走向,其中一个中心在海南省。姚叶青等(2012)发现安徽龙卷多发于 4—9 月的平原丘陵地带。此外,鹿世瑾(1996)、薛德强等(2003)、许遐祯等(2009)和申占营(2012)也分别对福建、山东、江苏和河南龙卷风的分布或气候特征做过分析。随着工程建设的需要和探测手段的改进,在对龙卷风进行补充调查的基础上,开展了二次统计分析、极值推算、风险评估等研究工作(陈正洪等, 2008; 许遐祯等, 2009; 马德栗等, 2011),对龙卷风灾害的分析和统计得到逐步深入。这些研究工作积累了珍贵资料,但利用时间长度较长并一致的资料,分析全国范围内龙卷的时空分布和灾害特征,这方面开展的工作仍鲜有涉及。本文拟对 1961—2010 年近 50 年来全国 EF2 或以上级强龙卷的时空分布和灾情特征进行统计分析,同时对 2004—2013 年间中国 EF1 或以上级龙卷做类似统计分析,包括总体空间分布、年代际变化、年变化、日变化、路径和灾情特征等。

1 资料来源与方法

1.1 资料来源

强龙卷(Significant Tornadoes,指强度为EF2或以上级别的龙卷)资料收集主要基于《中国气象灾害大典——综合卷》(丁一汇,2008)和各省分卷的统计记录。除了个别省份如江苏等,我国气象部门对发生的龙卷事件尚没有完整、详尽的记录,依据《中国气象灾害大典》(简称《灾害大典》)中的记录给出全国所有级别龙卷的时空分布和发生频率也是不可行的。因此,只好降低要求,通过《灾害大典》分析1961—2000年(该大典记录的灾情截至到2000年)全国记录到的EF2或以上级强龙卷的时空分布特征,这主要是考虑到这些强龙卷所导致的灾情相对严重,被记录下来的可能性会大为增加。因此,即便对于EF2级以上的强龙卷仍有漏记的情况,但相对于EF1和EF0级龙卷,其漏记情况会少得多。此外,根据其他资料(《中国气象灾害年鉴》等),填补2001—2010年间中国的强龙卷资料,构成1961—2010年中国EF2或以上级强龙卷的相对完整资料集。另外,由于1951—1960年《灾害大典》中对龙卷的记录很不完整,因此没有计入统计,但个别极强龙卷的例子仍被选作为1951年以来中国最具影响的龙卷事件给出。

自2005年起,中国气象局开始正式编辑出版《中国气象灾害年鉴》(中国气象局,2005—2013)(简称《灾害年鉴》),记录了2004年后10年间中国的各种气象灾害。上述年鉴中所收集的龙卷记录相较《灾害大典》的记录更为完整,这很大程度上归功于互联网和媒体的发达。根据《灾害年鉴》和源自互联网等的信息,统计分析了2004—2013年中国EF1或以上级龙卷的时空分布特征。之所以没有分析EF0级,是因其强度较弱、灾情较轻,在年鉴中也难免会有大量漏记情况发生。

根据2004—2013年10年间EF2或以上级龙卷数和EF1级龙卷数的比例,假定这一比例相对固定,则可反算出1961—2010年期间发生的EF1级龙卷数和总的EF1或以上级龙卷总数。除了上述《灾害大典》和《灾害年鉴》外,资料来源还包括气候影响评价、台站地面气象观测月报表、地方志和相关文献资料,并结合各级气象网站、门户网站、电视、报

纸等媒体所公布的龙卷现场采访、实录、图片和视频等对龙卷个例进行了补充。

1.2 龙卷定级方法

在龙卷个例收集过程中,通过各类文档所描述

的龙卷起始时间、发生地点、灾情特征、路径长度、路径宽度、破坏半径、最大风速、飞射物(指被风卷起并抛落到距原地一定距离外的人或物体)、现场照片、视频和调查报告等,根据归纳后的“增强藤田级别”(Texas Tech University, 2004)强度分类标准(表1),对龙卷强度进行了判定。

龙卷的移动路径长度有时可达几十千米,可能同时影响多地。为了便于统计,在判定过程中只记录其强度达最强时(通常灾情最重)的发生地,且只定位到县区级。统计时,对多个龙卷同时或连续发生,且其最强一支龙卷级别已达EF2级以上,但无法判定其各个龙卷强度的,为了避免多记,则只合并记为1次强龙卷;在统计路径特征时,也只取其最强一支龙卷的路径信息;无法判定强度的,则取其最长一支龙卷的路径信息。

1.3 偏差说明

本文的统计对象主要为强龙卷,这使低强度龙卷事件得以过滤,提高了资料准确度,但仍存在一些难以避免的偏差,可能造成龙卷统计数量偏少,主要偏差如下:各地龙卷灾害的调查、记录方式不同,标准不一,且缺失“文化大革命”时期的部分省份记录;20世纪80年代后的统计资料虽相对较全,但部分灾情记录的内容仍不完善,不足以判定龙卷强度;龙卷的空间尺度小、生命史短,且其通常伴随其他强天气事件同时发生,易导致漏报或灾情事实不全面,尤其是在夜间或人烟稀少地区;为了提高数据准确性,统计中尽量剔除了由飑线、台风、大冰雹、暴雨等强天气造成灾害的龙卷个例,并对灾情描述不详、龙卷级别高低难辨的个例,在判定其强度时取较低级别;中国尚无完善的龙卷灾情调查标准,建筑物、树木、电杆等各类龙卷灾害指示物的结构特征等也较美国不同,直接参照“增强藤田级别”来判定中国龙卷的强度本身会有一定误差,且在进行灾情调查时,较少区分灾害是否为多龙卷造成,这也在整体上使龙卷的记录数量偏少;另外,即使相关标准统一、可靠,判定龙卷强度本身仍高度依赖于个人主观判断,易造成判断标准的前后不一(Doswell et al, 1988),甚至

表 1 根据“增强藤田级别”中各等级龙卷特征所归纳的破坏现象

Table 1 Table of induction on damage indicators and degrees of damage for “Enhanced Fujita Scale”

等级	风速范围 /m · s ⁻¹	可能伴随的破坏现象描述*
EF0	29~38	轻度破坏。破坏棚舍、板房、厂房的屋顶有所损坏；对电视天线和烟囱造成一些破坏，房屋顶层小部分表面被削去；加油站顶棚装饰带被卷走；刮断树木细枝，刮倒浅根树，可连根拔起软木（多为针叶树）类树木。
EF1	39~49	中等破坏。棚舍倒塌，刮掉质量较差房屋（木质棚屋、活动板房等）的屋顶表面；砖木结构民房的房顶“开洞”，烟囱倒塌；车拖活动房屋被推倒，金属结构房屋的天花板或墙板被吹走；加油站房顶被掀、柱体弯曲；汽车被推离道路；不结实的木质电杆、路灯被摧毁，高压铁塔有所损坏；软木类树木断、折；硬木（多为阔叶树）类树木被连根拔起。
EF2	50~60	相当大的破坏。活动板房、厂房、加油站和砖木机构民房墙倒屋塌、屋顶被吹走；推翻不结实民房，框架结构的房屋屋顶被刮掉，墙体还在；两层房屋的顶层外墙坍塌，摧毁车拖活动房屋；路上的车被吹走或吹翻，集装箱卡车侧翻；轻的物体快速飞到空中；瘦长结构的金属电杆、铁塔、微波塔倒塌，摧毁、折断金属或混凝土电杆；硬木类树木被折断或连根拔起。
EF3	61~73	严重破坏。砖木结构的民房在很低的位置倒塌，一些农村建筑物被完全摧毁；框架结构的屋顶和部分墙体被吹走；钢结构仓库、厂房坚固的框架倒塌；汽车被卷起抛出一定距离，重型车、火车被刮倒；森林里大部分树被拔起或折断，树木枝叶被剥落到只剩主干。
EF4	74~89	摧毁性破坏。良好的砖木结构、框架结构民房被摧毁，有的房屋被齐根铲掉、夷平；钢结构房屋被严重破坏；汽车和火车被抛出一段距离，或滚动相当远的距离；产生大的飞射物，破坏力巨大。
EF5	≥90	异乎寻常、难以置信的破坏。整个框架结构房子连同地基一起被抛出；钢筋混凝土结构建筑被严重损坏；汽车大小的飞射物被快速抛入空中。

* “增强藤田级别”中对 28 类指示物的受灾情况进行了分级，并根据指示物个体差异给出了造成相应灾害所对应风速（3 s 平均风速）的范围，据此进行综合判断。为了便于统计，本表对其主要内容进行了归纳，其中指示物的灾情现象与其一般情况下的估计风速相对应以利分级。

气象学家和具有丰富灾情调查经验的专业人士也常将同一龙卷灾害认定为不同级别。

尽管存在上述偏差，针对龙卷进行的统计分析和相关研究，仍可从总体上揭示中国龙卷活动的一些重要事实，从而加深对对中国龙卷灾害的认识。

2 结果与分析

2.1 空间分布特征

1961—2010 年全国共记录到 EF2 或以上级强龙卷 165 次，年均 3.3 次，包括 145 次 EF2 级、16 次 EF3 级和 4 次 EF4 级龙卷，EF2 级与 EF3 或以上级强龙卷的记录次数之比约为 7 : 1。从整体空间分布看（图 1），165 次强龙卷主要发生在中国江淮流域、华南地区、东北地区和华北地区东南部等人口稠密、地势平坦的地区。西部地区极少发生，仅陕西记录有一次 EF3 级龙卷。

结合地形图可以看出，中国强龙卷的发生与地形关系密切（图 1），易出现在地形平坦地区，江河湖泊、沿海等条件对强龙卷生成也有一定的促进作用，这也与强对流天气的易发区相重叠。高原、山地的地形不利于龙卷产生，较少发生强龙卷。这一结果也与姚叶青等（2012）对安徽龙卷的时空分布研究相符。纪文君等（2005）对雷州半岛强对流天气展开过研究，指出该地区地形南北高、中间低、喇叭口地形

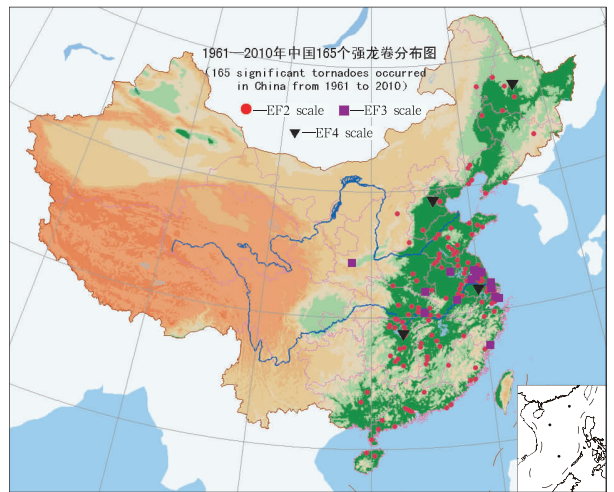


图 1 1961—2010 年 165 次强龙卷分布图（叠加地形）

Fig. 1 Distribution of 165 severe tornadoes in China from 1961 to 2010 on the topographical map

多，易生成强对流天气。这类地形也可能会促进龙卷生成。

图 2 给出了全国记录到强龙卷数量最多的 11 个省份的分布情况，其中江苏次数最多，有 36 次，湖北、湖南、山东和上海则各记录有 15、14、13 和 12 次，上述五省记录的次数之和占强龙卷总数的 54.5%。此外，江苏记录有 8 次 EF3 级、1 次 EF4 级龙卷，也是记录 EF3 或以上级强龙卷次数最多的省份，这说明强龙卷发生频繁的地区其发生更高级

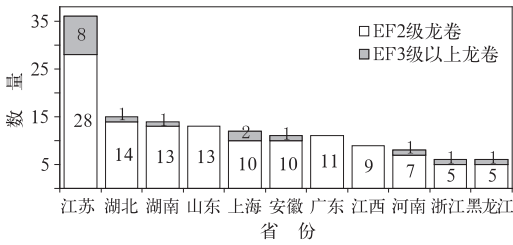


图 2 1961—2010 年记录到强龙卷数量最多的 11 省(市)分布

Fig. 2 Distribution of the top 11 provinces with more tornadoes from 1961 to 2010

别龙卷的可能性也相应偏高。

就地级市辖区而言(表略),50 年间记录到 EF2 或以上级强龙卷的次数以江苏盐城最多,有 11 次(含 3 次 EF3)。江苏南通次之,有 8 次(含 2 次 EF3)。江苏泰州记录到 6 次,上海浦东和湖北黄冈则各有 5 次(各含 1 次 EF3),山东临沂 4 次。有 8 个地市各记录到 3 次,它们是黑龙江齐齐哈尔、山东烟台、安徽滁州、湖北荆州、湖南常德和岳阳(含 1 次 EF4)、江西吉安和宜春,此外,黑龙江绥化等 16 个地市各记录到 2 次强龙卷。

需要指出的是,强龙卷发生过程中,其路径长度可达几十千米,有时可途经数地,但统计中只记录了其强度达最强时(通常灾情最重)的发生地,且只定位到县区级。因此,部分地级市辖区内发生强龙卷的实际数量应更多。

上述结果说明了强龙卷具有在某地频发的特征,其发生与地形、环境等因素有着密切关系。例如:苏北地区强龙卷多发,而该地区地势低洼平坦、土壤分布不均、江河湖泊水网交织,且具有季风气候特征,处于亚热带和暖温带的气候过渡地带,因此易积聚不稳定能量,在合适的动力条件下,极易导致大气对流强烈发展,有助于龙卷生成。与之相比,福建、浙江的部分地区则多山地和丘陵,其龙卷发生次数也较周边其他省份明显偏少。

2.2 时间分布特征

2.2.1 年代际变化特征

为了获得强龙卷的年代际分布变化特征,以每 5 年为界,给出了 165 次 EF2 或以上级强龙卷的发生年代分布(图 3),其每 5 年的记录次数均值为 16.5 次。

1961—1965 年 5 年间仅记录有 10 次强龙卷,次数偏少,这可能与早期气象灾情统计不完整有关。

1966—1985 年间强龙卷的发生频率适中,分布也相对均匀。但在资料收集过程中也发现:受“文化大革命”影响,个别省份对灾害性天气现象的记录工作处于近乎停滞状态,这可能会导致 20 世纪 60、70 年代强龙卷的统计数量偏少。1986—2000 年间强龙卷的记录次数最多,尤其在 1986—1990 年 5 年间共记录到 28 次,达到峰值。其后,自 20 世纪 90 年代起,强龙卷的记录数量则呈逐年下降趋势,在 21 世纪头 10 年内只有 20 次。这种下降趋势可能是受气候变化所伴随的大气环流变化等因素影响,也可能与个别强龙卷多发地区的环境改变密切相关,如城市化的不断发展使原本平坦的下垫面产生变化,从而不利于龙卷的发展。此外,冯婧等(2012)发现自 20 世纪 80 年代后,中国华北平原地区 7—8 月间 0~6 km 深层垂直风切变明显下降,这可能是造成华北地区龙卷数量减少的原因之一。

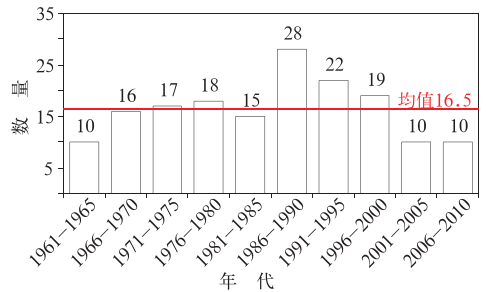


图 3 1961—2010 年强龙卷记录数量变化趋势

Fig. 3 Variation trend of the number of significant tornadoes from 1961 to 2010

2.2.2 年变化特征

图 4 给出了 1961—2010 年间 165 次强龙卷记录的年变化特征,可知 EF2 或以上级强龙卷主要集中在春、夏两季和早秋(3—9 月)发生,其中 4—8 月最为频发,约占全年总数的 87%。就单月看,7 月最多,记录到 47 次,约占全年总数的 28%,4 月次之,有 31 次;1、2 和 10 月很少发生,均各只记录到 1 次;11 和 12 月则未见强龙卷记录。

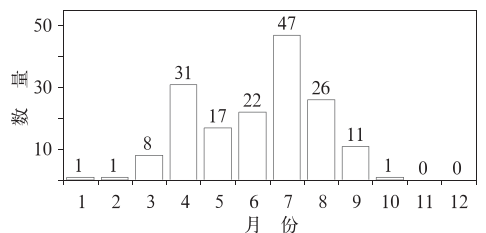


图 4 1961—2010 年强龙卷记录的逐月分布
Fig. 4 Monthly distribution of the significant tornadoes from 1961 to 2010

上述统计结果表明,中国强龙卷的发生有明显的季节性。冬季由于气候相对寒冷、大气稳定和水汽含量少,使得强龙卷生成的条件难以满足。但值得一提的是,一年中最早记录到强龙卷的时间是1月12日,是1996年发生在广东茂名的一次EF2级龙卷。这说明在华南地区,即便冬季(其实,华南部分沿海地区并没有气象意义上的冬季)仍有强龙卷发生的可能性,其与该季节华南地区会出现间歇性相对暖湿环境,同时低层和深层垂直风切变也较大有

关。1987年10月30日发生在湖北仙桃的EF2级龙卷,则是记录到的一年中强龙卷发生时间最晚的。

根据地域不同,165次强龙卷在一年中的发生季节分布亦有不同(表2);广东、江西和湖南等南方地区,强龙卷多集中在4—5月发生,且在1—2月所发生的季节最早的2个强龙卷均位于广东;江苏、安徽、河南和山东等地,强龙卷则多发于7和8月。相对而言,中国南方地区在一年中强龙卷多发的季节要早于其他地区开始。

表 2 1961—2010 年强龙卷记录概况表

Table 2 Frequency of the significant tornadoes from 1961 to 2010

省份	总数	各月份发生数目								人员伤亡	
		3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	其他月	死亡	受伤
江苏	36	1	1	—	8	18	6	2	—	480	13528
湖北	15	—	4	3	3	3	1	—	1	170	2509
湖南	14	—	9	1	2	2	—	—	—	156	2554
山东	13	—	3	—	3	4	3	—	—	133	2248
上海	12	3	—	—	1	3	1	4	—	76	608
安徽	11	—	1	1	—	8	1	—	—	97	2368
广东	11	—	4	3	1	—	1	—	2	136	870
江西	9	—	5	3	1	—	—	—	—	58	2546
河南	8	—	—	1	—	2	5	—	—	46	958
浙江	6	1	—	1	—	1	2	1	—	41	796
黑龙江	6	—	—	2	1	2	—	1	—	28	533
辽宁	6	—	—	—	2	—	1	3	—	68	341
其他省	18	3	4	2	—	4	5	—	—	283	1907
合计	165	8	31	17	22	47	26	11	3	1772	31766

2.2.3 日变化特征

除季节差异外,强龙卷也存在明显的日变化特征。在165次EF2或以上级强龙卷中,有时间记录可查的有121次,图5给出了它们发生起始时间的分布情况。可知,有85次强龙卷的发生起始时间在12—20时之间,占总数121次的70%,该时段也是经过白天太阳辐射后,大气层结不稳定,强对流天气最易发生的时段,易促进龙卷天气系统形成和加强;此外,00—02时也有10次强龙卷生成,表现为一个

小高峰;08—12时,强龙卷的发生次数最少,共仅发生3次;其余各时次,强龙卷的发生次数相对较少,分布也较均匀。

2.3 伴随天气现象

龙卷发生过程中,多伴随有冰雹、暴雨、雷暴大风等强对流天气,从而使灾情进一步加重,造成更多的人员伤亡和财产损失。

在165次EF2或以上级强龙卷中,有91次记录有冰雹和/或暴雨天气相伴发生(图6),而未见上述两类天气记录的其余74次强龙卷中,可能较多的是因其天气现象记录不详所致(个别省份未见天气现象记录)。在伴有冰雹和/或暴雨天气的91次强龙卷中,发生冰雹天气的有58次,其中只见冰雹记录且其最大直径超过2cm的,有18次;只见冰雹记录但其直径小于2cm或记录不详的,有19次;同时伴随有冰雹和暴雨两类天气的,有21次。另外,还有33次强龙卷只记录伴随有暴雨天气产生,未见冰

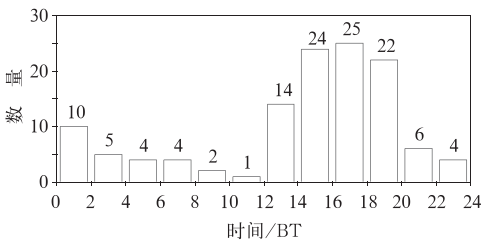


图 5 121 次强龙卷发生时间的日变化分布

Fig. 5 Diurnal variation of genesis time of 121 significant tornadoes

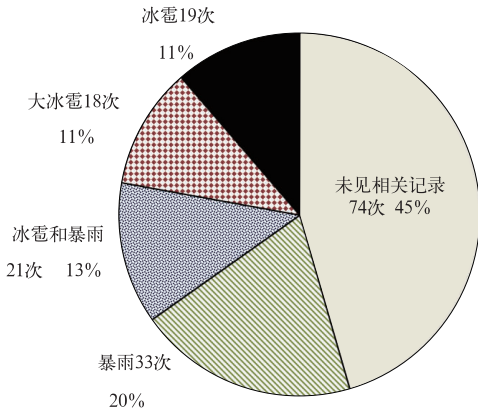


图 6 1961—2010 年强龙卷记录中伴随的部分天气现象分布图

Fig. 6 Distribution of weather phenomena in significant tornadoes from 1961 to 2010

雹记录。

2.4 路径特征

龙卷的水平气压梯度很大,可造成很强的风速,其移动速度由产生它的积雨云的移动速度决定,常为 $40\sim 50\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,最快可达 $90\sim 100\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 。在 165 次 EF2 或以上级强龙卷中,有 33 次记录有较详细的路径信息(表 3),其中含 7 次 EF3 或以上级强龙卷。路径最长的强龙卷是发生在江苏如东的一次 EF3 级龙卷,其路径长约 95 km,宽度均值约 0.2 km,且其发生同时伴随有另一支长度较短的龙卷(未记入路径信息统计);路径最短的强龙卷则是发生在广东连平的一次 EF2 级龙卷,长仅 0.5 km。

从总体来看,7 次 EF3 或以上级强龙卷的平均

表 3 33 次强龙卷的路径信息统计表

Table 3 Table of the size of damage swath of 33 significant tornadoes

发生地点 (县区级)	发生日期 /年.月.日	级别	龙卷路径信息		发生地点 (县区级)	发生日期 /年.月.日	级别	龙卷路径信息	
			长/km	宽/km				长/km	宽/km
湖南湘阴	1983. 4. 27	EF4	50	2	湖北黄冈	1964. 4. 2	EF2	4	0.05
江苏盐城	1966. 3. 3	EF3	30	1.5	湖北监利	1986. 7. 26	EF2	—	5
江苏如东	1983. 7. 1	EF3	95	0.2	湖北钟祥	1996. 5. 28	EF2	60	5.5
江苏建湖	1984. 8. 31	EF3	20	0.34	福建惠安	1973. 7. 3	EF2	25	0.1
上海浦东	1986. 7. 11	EF3	18	0.3	山西忻县	1977. 8. 14	EF2	4.5	—
陕西乾县	1978. 4. 14	EF3	7.5	0.3	广东连平	1975. 2. 4	EF2	0.5	—
河北霸州	1969. 8. 29	EF3	30	0.6	广东潮阳	1988. 5. 1	EF2	5	—
江苏涟水	1969. 4. 8	EF2	3	0.1	河南郾城	1963. 8. 2	EF2	2	0.1
江苏淮阴	1971. 6. 25	EF2	32.5	2	河南潢川	1980. 8. 24	EF2	1.75	1
江苏灌南	1973. 7. 16	EF2	10	0.25	河南汝南	1997. 5. 29	EF2	40	—
江苏海安	1980. 8. 12	EF2	25	0.12	海南定安	1987. 4. 11	EF2	3	0.2
江苏扬州	2007. 7. 3	EF2	15	1	辽宁东沟	1969. 8. 25	EF2	25	—
上海嘉定	1961. 6. 7	EF2	16	2.5	辽宁绥中	1983. 9. 14	EF2	13.5	0.3
上海浦东	1986. 7. 11	EF2	13	0.1	湖南汨罗	1989. 4. 27	EF2	—	0.5
山东海阳	1966. 8. 12	EF2	8	0.1	黑龙江拜泉	1987. 7. 31	EF2	55	1.2
山东莱州	1971. 6. 27	EF2	12.5	0.25	黑龙江拜泉	1990. 5. 29	EF2	80	0.15
山东莱阳	1972. 4. 16	EF2	30	—	EF3 或以上级强龙卷路径均值			35.7	0.74
					EF2 级强龙卷路径均值			20.2	1.03

路径长约 35.7 km,宽约 0.74 km;26 次 EF2 级强龙卷的平均路径长约 20.2 km,较 EF3 或以上级强龙卷短,但其路径平均宽度为 1.0 km,略宽于 EF3 或以上级强龙卷。至少在统计意义上,由上述结果可知龙卷的路径长度与其强度可能存在一定的正相关关系,即强度越高,其路径长度也相应越长。由于龙卷从根本上要遵循角动量守恒原理,其风力主要受制于最大风半径和旋转轴之间的距离,宽度较窄龙卷其强度甚至可比较宽龙卷更强,因此尚无法得出龙卷路径宽度与其强度的对应关系。有研究表明,伴随着龙卷路径长度和宽度的增加,发生更高级别龙卷的可

能性也在增加,但仍有例外的情况(NOAA,2003)。由于本文样本数所限,以及各地对龙卷路径信息的统计方式不同,还不足以得到规律性的结论。

此外,龙卷的路径越长,其破坏范围和造成的损失也随之增大,这一方面使其更易被发现和记录,另一方面也会提供更多的破坏证据以利判断、甚至提升该龙卷的等级。

2.5 灾情特征

龙卷虽生消迅速、影响范围相对较小,但其破坏力强,在极高风速的冲击作用下,可对建筑物产生极

强的瞬时荷载,并在建筑物不同部位或同一部位先后产生极大扭矩。龙卷中心通过时产生的压力骤降,可使密闭或半密闭的建筑物产生炸裂式破坏。此外,龙卷发生过程中,常伴随有冰雹、暴雨、直线型雷暴大风等强对流灾害性天气,更会加重灾情。

强龙卷所造成的破坏尤甚。据不完全统计,165次 EF2 或以上级强龙卷至少造成了 1772 人死亡,平均每年 35 人,另有约 3.17 万人受伤(表 2),倒损房屋数百万,损毁的良田、农作物不计其数(部分损失是由伴随的冰雹、暴雨等灾害性天气造成的)。强龙卷发生次数最多的地区往往也是人员伤亡最严重的地区,江苏、湖北、湖南、山东四省的因灾死亡人数分别为 480、170、156 和 133 人(表 2),上述四省之和占总死亡人数的 53%。

为了更全面地了解强龙卷的灾情特征及其破坏力,统计了 1961—2010 年间(包括 20 世纪 50 年代最强的 3 次龙卷)所记录到的最强 25 次龙卷的相关信息(表 4),可以看出:强龙卷的破坏力极强,足以将一般建筑夷为平地,扭曲或摧毁钢筋混凝土房屋、电杆和铁塔,掀翻或移动重型机械、汽车、飞机,倒断或卷起直径几米的大树,吹翻或卷起船只、汽车,卷起江水、湖水等;龙卷发生过程中,通常会大量产生大量飞射物,常见的有砖瓦、树木、家具和铁板等,EF3 或以上级强龙卷则可卷起汽车、房屋、船舶等抛出一段

距离。此外,飞射物本身既会造成严重破坏,同时也是判断龙卷强度等级的重要依据。

强龙卷造成的生命财产损失十分巨大,致人伤亡的原因较多,其中建筑物倒塌是最大原因,尤其是在人员密集的礼堂、学校、工厂等地,更易造成重大伤亡。张相庭(1998)统计表明,龙卷风所导致面大量广的低层建筑的风损和风毁是造成人员伤亡和财产损失的主要原因。此外,统计表明:人被卷到高空后跌落地面、水体中,或遭受雷击、电击等次生灾害,以及被飞射物击中而致死伤的情况也较多见。

由表 4 可知,人员伤亡情况特别严重的龙卷,其发生的年代也相对较早,单次致死人数超过 80 人的 5 次强龙卷记录均发生于 1978 年之前。这一方面是由于早期建筑的建设标准较低,且土房等抗灾能力差的房屋较多,极易倒损,从而致人伤亡;另一方面也与其时灾害性天气预警能力较弱,人们防灾意识不强和避险方法不正确等有关。

此外,在部分龙卷记录不完整(多龙卷可能被记为单龙卷)的情况下,最强 25 次龙卷中至少有 5 次在发生时,在其同地区或相邻地区,伴随有 1 个以上龙卷同时或前后相伴生成,且其最强龙卷级别均接近或超过 EF3 级(表 4),例如:1989 年 9 月 16 日,江苏全省共记录有 23 次龙卷发生(无法区分各龙卷强度,依据前文 2.2 节所述方法,记录为 2 次 EF3),

表 4 最强 25 次龙卷记录的灾情统计特征

Table 4 Table of disaster situations of the top 25 significant tornadoes

发生地点 (县区级)	发生日期 /年.月.日	级别	人员伤亡		房屋受损/间		典型灾害现象
			亡	伤	倒塌	损坏	
上海浦东	1956.9.24	EF4*	68	842	倒损近千		一座重 10 t,有 5 人作业的储油罐被卷起腾空约 15 m,抛至 120 m 远;一座钢筋混凝土结构房屋被掀倒;一座四层高、结构牢固的教学楼被削去半栋。
河北霸州	1969.8.29	EF4	98	763	1400	—	倒塌房屋中有 1106 间被全部夷平,屋顶被卷跑;1 人接近窗口时被刮出窗外 10 m。该龙卷其后入天津境内,摧毁一座学校大礼堂,摧毁 6 个工厂。
江苏常州	1979.7.21	EF4	2	231	倒损 2914		将一家三间楼房齐地端起,腾空数丈,螺旋飞舞,突然下坠,迸裂破碎,楼址夷为平地,家具什物刮至 200 m 以外。
湖南湘阴	1983.4.27	EF4	伤亡 83		倒损 2.4 万		将围径 3.15 m 的百年古樟树拔起,使地物呈毁灭性破坏,数目竹枝呈麻花状旋扭;一人被卷起 30 m,2 名学生被卷出 300 m 摔死;一座古塔被卷去 8 层,重 200 kg 麻石像纸片一样缓缓坠落;高压电杆被卷离原地 6 m;《中国气象报》将其列为 20 世纪全球十大风灾之一。

续表 4

发生地点 (县区级)	发生日期 /年.月.日	级别	人员伤亡		房屋受损/间		典型灾害现象
			亡	伤	倒塌	损坏	
黑龙江海伦	1987.7.31	EF4	12	185	—	—	当天黑龙江全省共有 14 个县、市受到飊线和龙卷袭击,其中,齐齐哈尔北部出现 6 条龙卷,海伦先后遭 4 股强龙卷袭击。海伦某村房屋全部倒塌;一台 3.5 t 重的脱谷机被风卷起落到 1 km 外,摔碎。
上海浦东	1986.7.11	EF3-4	31	168	倒损 4800		台风倒槽内发生 4 股龙卷,该龙卷为最强的一个,历时 20 min。将沿途 6 根直径 40 cm 的钢筋混凝土电杆折断;重达 11 t 的楼面被掀起腾空约 20 m,扭曲摔至 40 m;毁坏结构良好的钢筋混凝土建筑。
江苏盐城	1966.3.3	EF3-4	87	—	81000	40.2 万	某电厂钢筋混凝土厂房卷去一角,成为废墟;钢筋电杆折断;数吨重变压器被卷离原地 150 m;损坏船只 56 只,失踪 32 只。
上海徐汇	1962.9.6	EF3	23	176	倒损 2800		龙华机场 3 架飞机被毁,4 架损坏严重;20 cm 直径钢筋混凝土圆柱折断;黄浦江一艘木船被吹至岸上。
湖北黄冈	1977.4.16	EF3	104	390	768	3728	某高中礼堂被风吹倒,当场死亡 48 人,抢救无效死亡 38 人;打坏机械 14 台。
陕西乾县	1978.4.14	EF3	84	334	倒损 945		持续 15 分钟。小学、商店等房屋呈一片废墟;水泥电杆拦腰折断;拖拉机向前推动 10 余米。
江苏如东	1983.7.1	EF3	31	1757	30000	31000	分南北两支双龙卷,持续时间 3~5 min;合抱大树被连根拔起;将河中水泥船刮进稻田,固定的脱粒机抛掷百米外;水泥电杆折为数段;家具物件打烂无数甚至卷的荡然无存。
江苏建湖	1984.8.31	EF3	17	1416	4788	2916	一部 200 kg 的脱粒机被抛到几十米远的河里;某村南北 2 km 的 256 户住房全部倒塌,成为一片废墟。
江苏兴化	1989.7.14	EF3	17	453	5000	13000	一辆行驶中的卡车被卷入河中;在 250 m 宽、2.5 km 长的范围内房屋全部被夷为平地,大树被连根拔起。
江苏大丰	1989.9.16	EF3	—	—	2000	—	所经之处大批建筑物顷刻夷为平地,通讯中断,交通受阻,损失惨重。
江苏南通	1989.9.16	EF3	36	1370	13364	11466	当天江苏全省共有 23 次龙卷发生。南通 6 县先后出现 4 次龙卷,且有多龙卷同时发生、跳跃前进的特点。桥被掀翻,高压线杆被刮倒、断,有两栋楼房被完全刮倒。
江苏高邮	2000.7.13	EF3	34	2000	12500	15600	来势凶猛,影响了 40 多个乡镇。一排排大树拦腰折断,钢筋混凝土桥梁被摧毁;数吨重的输变电铁塔被掀翻,正在路上行驶的中巴车被掀到河中;吹翻农船;受灾现场一片废墟。
安徽无为	2003.7.8	EF3	16	166	—	—	30 多户人家,只有一家还算完好,其余一片狼藉,墙体在很低的位置倒塌;拖拉机被掀到 20 m 外。
安徽灵璧	2005.7.30	EF3	15	46	1617	12380	多人被风卷起;某镇工业小区厂房的东西两边房屋全部倒塌;大树被连根拔起,成材树木折断 8 万;房屋被摧毁,工厂被夷为平地。
江苏高邮	2007.7.3	EF3	7	88	3000	2700	发生于同日安徽天长龙卷后约半小时。成排的大树被连根拔起,路边的电杆被齐腰斩断;重达几吨的卡车被刮进河中;成片的房屋倒塌,有些则成为废墟,几乎看不到有人居住过的痕迹。

续表 4

发生地点 (县区级)	发生日期 /年.月.日	级别	人员伤亡		房屋受损/间		典型灾害现象
			亡	伤	倒塌	损坏	
浙江苍南	2007.8.18	EF3	9	62	156	—	钢筋混凝土房屋倒塌;电线杆被拦腰折断;寺庙内一株 139 年树龄的古樟树被连根拔起;一艘船被刮到屋顶;载重 5 t 的大货车被掀翻挪移。
河南宁陵	1957.7.10	EF2*	58	200	—	—	历时不足 10 min。3 个村的房屋全部倒塌;树木全部刮倒,没有一定方向;石碾刮到坑里,水车从井里拔出,刮到 100 m 外。
湖北汉川	1958.4.22	EF2*	133	1 万	4718	13424	持续 40 min。一个孩子被卷入空中落到 1.5 km 之外摔死。
辽宁东沟	1969.8.25	EF2	49	—	>570	—	掀翻石磨,把合抱粗的梨树连根拔起仍到远处;某小学 23 间房全部盖揭塌塌,一学生被卷到空中 300 m,越过山岗。
河南潢川	1980.8.24	EF2	40	—	3750	>2 万	历时 75 min。墙倒屋塌,刮毁房顶;直径 40 cm 大树折断后旋入空中;《灾害大典》中估计其中心旋转速度 $100 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上。
安徽天长	2007.7.3	EF2-3	7	98	593	538	一辆小货车被刮倒侧翻;直径几十厘米的大树拦腰折断;有两个村楼房大都被掀顶,部分房子已成废墟。

* 含 20 世纪 50 年代发生的强龙卷 3 次。

仅南通便产生 4 次龙卷,并具有同时发生、跳跃前进的特点;1987 年 7 月 31 日,黑龙江多地发生多个龙卷,其中齐齐哈尔北部出现 6 次龙卷,海伦也遭 4 股强龙卷袭击,其中至少包含 1 次 EF3 级龙卷;2007 年 7 月 3 日,在安徽、江苏两省交界处产生一次 EF3 级龙卷,并于同日在该地区有多个龙卷发生。

上述结果表明:龙卷发生过程中,有时会有群发性的特点;首次龙卷发生后,若利于龙卷生成的天气条件仍然存在,则产生后续龙卷的可能性相对较大;相对单个龙卷,群发性龙卷中产生 EF2(甚至 EF3)或以上级强龙卷的可能性更高。

2.6 2004—2013 年间龙卷的时空分布特征

正如在引言中所提及的,由于 1961—2003 年间缺少对龙卷事件较为系统的记录,因此只统计了 1961—2010 年 50 年间 EF2 或以上级强龙卷的情况。自 2005 年起,中国气象局开始出版《灾害年鉴》,系统地记录了前一年中发生的包括龙卷在内的各类气象灾害。根据 2005—2014 年的《灾害年鉴》和其他有关资料,对 2004—2013 年 10 年间全国 EF1 或以上级龙卷进行了统计分析,结果表明:10 年间共记录到 EF1 或以上级龙卷 143 次,其中含 EF1 级 121 次、EF2 级 19 次、EF3 级 3 次,年均 14.3 次;EF1 级与 EF2 级以上龙卷的记录次数之比约为 6 : 1;EF2 级与 EF3 级以上龙卷的记录次数之比也

近似为 6 : 1,略低于 1961—2010 年间的结果(7 : 1)。

从整体空间分布来看,记录到的 2004—2013 年 EF1 或以上级龙卷(图 7)与 1961—2010 年 EF2 或以上级强龙卷(图 1)的分布极为相似,即主要在我国江淮流域、华南地区、东北地区和华北地区东南部多发。有所不同的是,EF1 级龙卷在中国最西部亦

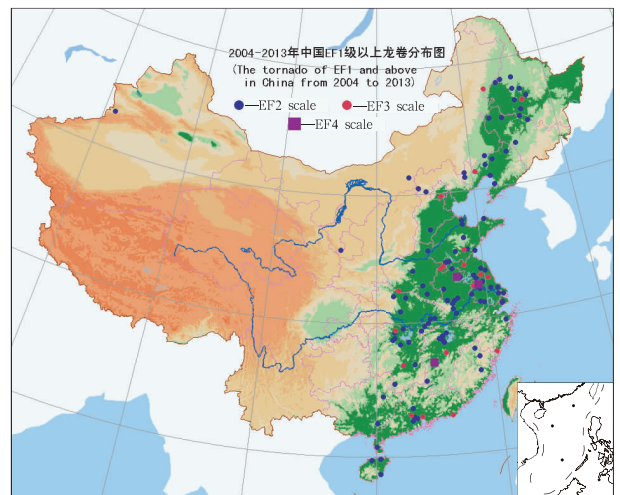


图 7 2004—2013 年 143 次 EF1 级以上龙卷分布图(叠加地形)
Fig. 7 Distribution of tornadoes of EF1 and above in China from 2004 to 2013 on the topographical map

有发生,于 2013 年在新疆伊犁昭苏(高位山间盆地)发生过一次。这说明强度较弱的 EF1 或以下级龙卷由于其生成条件相对易于满足,因此发生概率较高,在非龙卷易发区也有可能发生。

全国范围内,2004—2013 的 10 年间,江苏记录到 EF1 或以上级龙卷的次数最多,共 23 次(含 3 次 EF2、1 次 EF3);安徽次之,有 17 次(含 2 次 EF2、1 次 EF3),其后的广东记录到 14 次,湖南、黑龙江和湖北则各有 11 次(图 8)。与 1961—2010 年 50 年间 165 次强龙卷的省份分布(图 2)相比,有所不同的是:近 10 年来 EF1 或以上级龙卷在安徽、辽宁、黑龙江等地的记录频次较高,且安徽、广东记录到的 EF2 或以上级强龙卷的数量也相对增多。

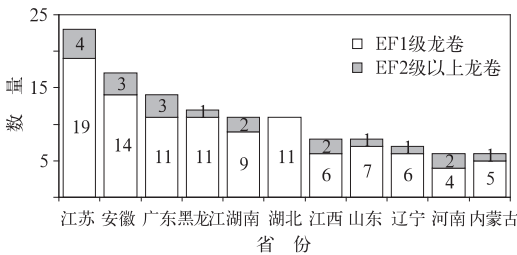


图 8 2004—2013 年记录 EF1 级以上龙卷数量最多的 11 省(区)分布

Fig. 8 Distribution of the top 11 provinces with EF1 tornadoes or above from 2004 to 2013

就地级市辖区而言(表略),10 年间记录到 EF1 或以上级龙卷的次数中,以广东佛山最多,有 6 次(含 1 次 EF2)。各记录到 5 次的有湖南常德(含 1 次 EF2)、黑龙江绥化(含 1 次 EF2)、江苏南通和江苏盐城(含 2 次 EF2)。记录到 4 次的有江苏徐州(含 1 次 EF2)和扬州(含 1 次 EF3)。安徽合肥、六安、宿州(含 1 次 EF2、1 次 EF3)及江西南昌、湖北黄冈、黑龙江哈尔滨六地市则各有 3 次。此外,另有广东揭阳等 15 个地市各记录到 2 次。上述结果也说明:受地形、环境等因素影响,EF1 级以上龙卷仍具有在某地频发的特征。

从发生年份看(图 9),2004—2013 年 10 年间除 2009、2011 年外,每年均有 EF2 或以上级强龙卷的发生记录。其中,2005 年的次数最多,共记录到 27 次(含 5 次 EF2、1 次 EF3)。其后,EF1 或以上级龙卷的记录频次有逐年下降的趋势,这与 20 世纪 90 年代后强龙卷的记录频次变化情况(图 3)有所类似。

从灾害致死人数看,10 年间所记录的 EF1 或以上级龙卷共造成 198 人死亡,年均约 20 人,较 1961—

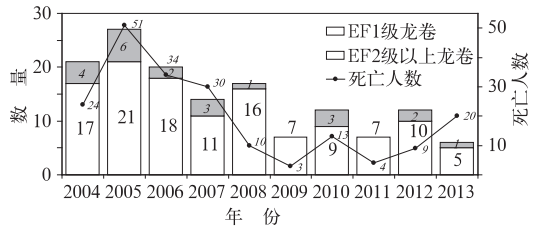


图 9 2004—2013 年各年份 EF1 级以上龙卷的记录数量和死亡人数统计图

Fig. 9 Distribution of annual number of EF1 tornadoes or above and fatalities from 2004 to 2013

2010 年间年均死亡人数 35 人减少近一半。由图 9 可知,2005 年 EF1 或以上级龙卷导致 51 人死亡,此后则呈逐渐下降趋势,这也与龙卷记录频次、强度的变化情况相一致,说明龙卷灾害致死人数与其发生数量、强度密切相关。值得注意的是,据不完全统计,2013 年龙卷的记录数量最少,却造成 20 人死亡。在分析灾情后发现,仅广东东莞一地就有 9 人死亡,而东莞龙卷的路径穿过当地家私工业集中地区,该地外来务工人员众多,且厂房多为铁皮搭建、抗风能力差的简易房,龙卷造成大量简易房屋倒塌,从而致人伤亡。同年,湖南永州市道县龙卷致 3 人死亡,也是由于活动板房倒塌所致。近年来,随着工业化发展和城市建设加快,务工人员逐渐增多,且多居住在抗风性能差的简易房屋内,这导致灾害致死人数反而有所上升。

此外,为了估计 1961—2010 年 50 年间全国龙卷的发生总数,参照《灾害年鉴》和互联网等信息途径对 2004—2013 年间的 EF0 级龙卷的记录数量进行了初步统计。10 年间,共记录到 EF0 级龙卷约 457 次(这应该是一个显著低估的数字,有相当多的 EF0 级龙卷由于灾情小或发生在无人区而没有被记录),其与 EF1 或以上级龙卷的记录数量(143 次)之比约为 3 : 1,按照该数据可知 2004—2013 年间全国共记录有各级别龙卷约 600 次,年均 60 次。由于 EF0 级龙卷的强度弱,统计过程中更易缺报、漏报,且《灾害年鉴》中所记载的多为较强龙卷,因此 EF0 级龙卷和全国年均各级别龙卷的实际发生数量应明显多于此数字。

2.7 对 1961—2010 年间龙卷发生总数的粗略估计

根据 2004—2013 年《灾害年鉴》所作的龙卷数量估计,其间 EF1 级龙卷和 EF2 或以上级强龙卷的

记录数量之比约为 6 : 1, 假定这个比例适合于 1961—2010 年发生的龙卷, 其间 EF2 或以上级强龙卷记录的数量为 165 次, 则该 50 年间 EF1 级龙卷的数量应约为: $6 \times 165 = 990$ 次, 由此可知 1961—2010 年间中国 EF1 或以上级龙卷的总数约为 1055 次, 年均 21 次, 这应当看作是一个大致估计值, 并且是下限。而根据 2004—2013 年《灾害年鉴》上记录的 EF0 级龙卷与 EF1 或以上级龙卷的比例约为 3 : 1, 假定这一比例仍适用于 1961—2010 年间, 则可推断出 50 年间 EF0 级龙卷的数量约为 3165 次, 而所有级别龙卷的总数应约为 4220 次。若将上述数量近似视为龙卷发生的实际数量, 则可推断出 1961—2010 年间年均约发生 85 次各级别龙卷。如前所述, EF0 级龙卷的发生数量是被大大低估的, 因此平均每年 85 次龙卷只能作为估计值的下限。但即便有明显低估, 中国每年发生的龙卷数量仍远低于美国, 不及后者的十分之一。

需要说明的是, 由于长期以来, 中国没有对龙卷的发生做系统、完整的记录, 因此只能根据《灾害大典》对 1961—2000 年间所发生的 EF2 或以上级强龙卷进行统计, 这主要是考虑到强龙卷被报告和被记录下来的可能性较大。为了保持一致性, 对于 1961—2010 年 50 年间龙卷时空分布特征等的分析只针对 EF2 或以上级强龙卷展开。而自 2005 年起《灾害年鉴》的编辑出版, 使得对 2004—2013 年 10 年间发生的 EF1 或以上级龙卷的统计会相对准确一些, 并可对 EF0 级龙卷发生数量的下限进行粗略估计, 进而对 1961—2000 年间发生的所有级别龙卷数量的下限和 EF1 或以上级龙卷数量(包括总数和年平均值)做出粗略估计。因此, 文中关于龙卷发生频率的估计还是很粗糙的, 但其时空分布特征, 包括空间分布、年代际变化、年变化和日变化特征等则是相对精确的。

3 结 论

根据《灾害大典》和其他资料统计了 1961—2010 年 50 年间中国 EF2 或以上级强龙卷的时空分布、发生频率、年代际变化、年变化、日变化、路径和灾情特征; 根据 2005 年后中国气象局编辑出版的《灾害年鉴》和互联网等途径信息统计了 2004—2013 年 10 年间中国 EF1 或以上级龙卷的时空分布、发生频率和年际变化特征。主要结论如下:

(1) 1961—2010 年间, 全国共记录到 EF2 或以上级强龙卷 165 次, 含 EF2 级 145 次、EF3 级 16 次、EF4 级 4 次, 年均记录到强龙卷 3.3 次。强龙卷的发生频率与地形因素关系密切, 主要发生在中国江淮地区、两湖平原、华南地区、东北地区和华北地区东南部等地形相对平坦的平原地区。就省份分布而言, 江苏省记录到强龙卷 36 次, 数量最多, 其次是湖北、湖南。同时, 强龙卷具有在某地频发的特征, 江苏盐城、南通和泰州分别记录有 11、8 和 6 次, 另有 27 个地级市有 2 次以上强龙卷记录, 这些地区发生更高级别强龙卷的可能性也相应偏高。

(2) 从 165 次强龙卷的发生年代看, 1986—2000 年间发生最为频繁, 尤其是 1986—1990 年为最高峰, 此后其数量有逐年下降的趋势, 至 20 世纪初的头 10 年内共只有 20 次强龙卷记录。从年变化来看, 强龙卷主要发生于春、夏两季, 4—8 月的记录数量约占全年的 87%, 其中 7 月最多, 约占全年的 28%。强龙卷的发生季节与地域有关, 南方地区通常多发于 4—5 月, 江苏、安徽、河南和山东等地则多发于 7—8 月。一天中, 强龙卷在任何时段均有可能发生, 且在午后和傍晚的发生频次最高, 发生起始时间在 12—20 时的有 85 次, 占有时间记录的 121 次强龙卷的 70%。

(3) 165 次强龙卷中明确伴随冰雹和/或暴雨的有 91 次, 其中 58 次伴随有冰雹天气。同时, 强龙卷路径的长度与其强度可能存在一定的正相关关系。有路径信息记录的 7 次 EF3 或以上级强龙卷的平均路径长度约 35.7 km, 27 次 EF2 级龙卷的平均路径长度约 20.2 km。

(4) 强龙卷可造成巨大破坏和灾情损失。50 年间, 165 次强龙卷至少造成 1772 人死亡, 3.17 万人受伤。总结了全国记录到的最强 25 次龙卷的灾情特征, 发现: 强龙卷的破坏力极强, 足以摧毁钢筋混凝土房屋, 产生大型飞射物, 若发生在人员密集区域, 则易造成重大的人员伤亡; 强龙卷有时具有群发性特点, 且在群发龙卷中产生 EF2(甚至 EF3)或以上级强龙卷的可能性相对更高, 江苏全省曾在一天内记录到 23 次龙卷。

(5) 2004—2013 年 10 年间全国共记录到 143 次 EF1 或以上级龙卷事件, 含 EF1 级 121 次、EF2 级 19 次、EF3 级 3 次, EF1 与 EF2 或以上级强龙卷的发生比例约为 6 : 1。分析后发现: 其空间分布与 1951—2010 年 50 年间强龙卷的分布极为相似, 但

在最西部的新疆也发生有1次EF1级龙卷;江苏发生EF1或以上级龙卷23次,次数最多,其次是安徽和广东;从年份分布看,2005年记录到27次,次数最多,此后则呈逐年下降趋势,这与20世纪90年代后强龙卷的发生频率下降对应着不同的气候周期;EF1或以上级龙卷仍具有在某地频发的特点,其中最多的广东佛山发生过6次。

(6)对2004—2013年10年间全国各级龙卷数量进行的不完整统计表明:2004—2013年,全国年均记录各级龙卷至少60次(实际数量应更多),其中EF1级与EF2或以上级强龙卷的发生比例约为6:1,EF0级与EF1或以上级龙卷的数目之比约为3:1。假定上述比例仍适用于1961—2010年间的龙卷,则可大致估计出1961—2010年50年间年均发生EF1或以上级龙卷约21次,发生所有级别龙卷数量的下限值约为85次。

有几个问题值得进一步探讨:(1)自20世纪90年代后EF2或以上级强龙卷和21世纪2005年以后EF1或以上级龙卷的发生数量都出现较明显减少,这与全球和区域不同时空尺度的气候变率之间存在何种关系?(2)为何江苏省龙卷发生频率最高,而江苏省又以盐城市所辖地区龙卷发生频率最高?(3)中、美两国均处于从副热带到中纬度的地区,强对流天气发生频繁,为何中国年均发生的龙卷数大约只有美国的十分之一?为何中国龙卷发生率自20世纪90年代以后逐渐下降,而美国却没有这样的趋势?以上问题超出了本文的范围,但非常值得进一步探讨。

参考文献

陈正洪,刘来林.2008.核电站周边地区龙卷风时间分布与灾害特征.暴雨灾害,27(1):78-82.

刁秀广,万明波,高留喜,等.2014.非超级单体龙卷风暴多普勒天气雷达产品特征及预警.气象,40(6):668-677.

丁一汇.2008.中国灾害大典综合卷.北京:气象出版社.

冯婧,周伟灿,徐影.2012.1980—2009年我国龙卷事件变化.气候变化研究进展,8(3):183-189.

纪文君,张羽.2005.雷州半岛强对流天气及触发机制分析.海洋预报,22(3):1-4.

李改琴,许庆娥,吴丽敏,等.2014.一次龙卷风天气的特征分析.气象,40(5):628-636.

鹿世瑾.1996.福建龙卷风的活动特点.气象,22(7):36-39.

罗爱文,朱科锋,方茸,等.2015.江淮地区弓状回波的分布和环境特征分析.气象,41(5):588-597.

马德栗,陈正洪,靳宁,等.2011.湖北浠水核电站周边地区龙卷风特征.气象科技,39(4):520-524.

申占营.2012.河南省1949—2011年龙卷风灾害的时空分布特点.农业灾害研究,2(5):29-32.

王毅,郑媛媛,张晓美,等.2012.夏季安徽槽前形势下龙卷和非龙卷型强对流天气的环境条件对比研究.气象,38(12):1473-1481.

魏文秀,赵亚民.1995.中国龙卷风的若干特征.气象,21(5):36-40.

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.气象,38(11):1330-1338.

许遐祯,潘文卓,缪启龙.2009.江苏省龙卷风灾害风险评估模型研究.大气科学学报,32(6):792-797.

薛德强,杨成芳.2003.山东省龙卷风发生的气候特征.山东气象,23(4):9-11.

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.高原气象,31(6):1721-1730.

俞小鼎,姚秀萍,熊廷南,等.2006.多普勒天气雷达原理与业务应用.北京:气象出版社,314.

俞小鼎,郑媛媛,廖玉芳,等.2008.一次伴随强烈龙卷的强降水超级单体风暴研究.大气科学,32(3):508-522.

俞小鼎,周小刚,王秀明.2012.雷暴与强对流临近天气预报技术进展.气象学报,70(3):311-337.

张相庭.1998.工程抗风设计计算手册.北京:中国建筑工业出版社.

张雪芬,杜波,汤志亚,等.2013.基于观测资料的我国天气现象时空分布分析.气象,39(11):1452-1460.

张一平,俞小鼎,吴蓁,等.2012.区域暴雨过程中两次龙卷风事件分析.气象学报,70(5):61-973.

中国气象局.中国气象灾害年鉴(2005—2013).北京:气象出版社.

周后福,刁秀广,夏文梅,等.2014.江淮地区龙卷超级单体风暴及其环境参数分析.气象学报,2(2):306-317.

朱江山,刘娟,边智,等.2015.一次龙卷生成中风暴单体合并和涡旋特征的雷达观测研究.气象,41(2):182-191.

David-Jones R, Trapp R J, Bluestein H B. 2001. Tornadoes and tornadic storms // Doswell C A. Meteor Monogr 50. Meteor Soc, Boston, 50:167-221.

Doswell C A, Burgess D W. 1988. On some issues of United States tornado climatology. Mon Wea Rev, 116:495-501.

Fujita T T. 1971. Proposed characterization of tornadoes and hurricanes by area and intensity. SMRP 91, Department of Geophysical Sciences, The University of Chicago.

Moller A R. 2001. Severe local storm forecasting // Doswell C A. Meteor Monogr. Amer Meteor Soc, 50:433-480.

NOAA. 2003. A Guide to F-Scale Damage Assessment.

Texas Tech University. 2004. A recommendation for an Enhanced Fujita Scale (EF-Scale).