

龙卷风研究进展及预警业务现状

黄大鹏^{1,2}, 高歌^{1,2}, 叶殿秀¹, 肖潺¹

1. 中国气象局国家气候中心, 北京 100081

2. 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

摘要 简要回顾龙卷风的研究历史, 综述国内外龙卷风的数据库建设、外场观测试验、发生的环境和气候特征、影响评估等研究进展, 总结全球龙卷风的气候特征及国内外龙卷风预报预警业务的现状, 展望中国龙卷风研究和预警业务发展的未来。

关键词 龙卷风; 数据库建设; 环境特征; 气候特征; 预警

龙卷风是在强烈不稳定天气条件下产生的一种小范围空气涡旋, 其中心附近风速可达 100~200 m/s, 直径一般在几米到数百米之间。龙卷风形成后, 一般维持几分钟到几十分钟, 最长不超过数小时, 通常袭击范围较小, 但破坏力较大。龙卷风具有维持时间短、空间尺度小、移动速度快、发生发展时空随机性强的特点, 使得气象探测设备和系统难以有效准确监测并追踪龙卷风的发生、发展, 准确地预警和预报则更加困难。

本文综述国内外龙卷风的研究进展及预报预警业务的发展现状, 总结全球龙卷风的气候特征, 以为政府、应急管理人员及相关业务的科研人员等提供参考, 同时为提高公众对龙卷风灾害的认知水平、科学防范龙卷风灾害、减轻龙卷风灾害的影响及风险等提供帮助。

1 国内外龙卷风研究概况

1.1 龙卷风研究历史

龙卷风的研究起源于欧洲, 第二次世界大战之前有关龙卷风的研究主要在欧洲各国开展。欧洲在 17 世纪由文艺复兴向近代早期过渡时期就开始了龙卷风的系统研究。意大利的天文学家、数学家 Geminiano Montanari 于 1694 年发表的龙卷风研究成果是欧洲最早详细研究龙卷风的成果之一。克罗地亚的科学家 Roger Joseph Boscovich 于 1749 年出版的龙卷风研究书籍是 19 世纪前最具影响力的欧洲龙卷风研究成果。18 世纪末、19 世纪初, 有关欧洲龙卷风描述和解释的研究论文逐渐增多。1840 年, 法国物理学家 Jean Charles Athanase Peltier 第 1 次对欧洲龙卷风的气候特征进行了研究^[1]。1917 年, 德国气象学家、地球物理学家、极地研究的先驱 Alfred Lothar Wegener 发表了有关欧洲龙卷风气候特征和

龙卷风生成的经典研究^[2]。爱沙尼亚气象学家 Johannes Letzmann 是 20 世纪上半期最杰出的龙卷风研究学者之一, 他分析了龙卷风的气候特征, 并开展了灾害调查和实验室模拟, 揭示了龙卷风的结构特征。1937 年, Letzmann 与德国学者 Harald Koschmieder 合作撰写了龙卷风野外调查工作的详细指南^[3]。第二次世界大战后欧洲各国的龙卷风研究几乎中止, 直到 20 世纪中后期才又逐渐兴起。

美国气象学家 John Park Finley 是美国龙卷风研究的第一人, 从 19 世纪 80 年代开始龙卷风的研究, 并于 1887 年出版了《Tornadoes: What They Are and How to Observe Them》这一龙卷风开创性著作。Finley 的研究首次表明龙卷风是与中纬度气旋紧密联系在一起, 并多发于风暴气旋系统的东南 1/4 象限, 首次指出了龙卷风的西南-东北移动路径, 是与飏线后的高空西北冷气流有关, 首次给出了促成龙卷风形成的一整套地表气象条件, 其龙卷风示意图首次阐述了干空气下沉插入南风吹来的暖湿空气对龙卷风的形成至关重要^[4]这一机理。John Park Finley 所做的关于龙卷风的研究, 是当时最严谨、最全面的气象学研究, 但由于美国陆军通信兵团禁止开展龙卷风研究, 直至 20 世纪 50 年代, 美国才重新开始兴起对龙卷风的研究。

1.2 龙卷风研究现状

目前, 全球有关龙卷风的研究主要在美国开展, 其龙卷风的数据库建设、外场观测试验、发生环境特征研究、气候特征分析、影响评估等方面都走在世界前列。欧洲各国也开展了诸多研究, 建立了较为完备的龙卷风数据库, 对龙卷风气候特征进行了详细研究。中国的龙卷风研究起步较晚^[5], 20 世纪 80 年代, 中国龙卷风研究主要为灾害描述^[6], 到了 20 世纪 90 年代, 龙卷风的研究集中于气候特征分析^[7-8]。进入 21

收稿日期: 2016-11-02; 修回日期: 2017-02-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(41101517)

作者简介: 黄大鹏, 副研究员, 研究方向为气象灾害风险评估与气候变化影响评估、遥感与 GIS 应用等, 电子信箱: dapenghuang@163.com

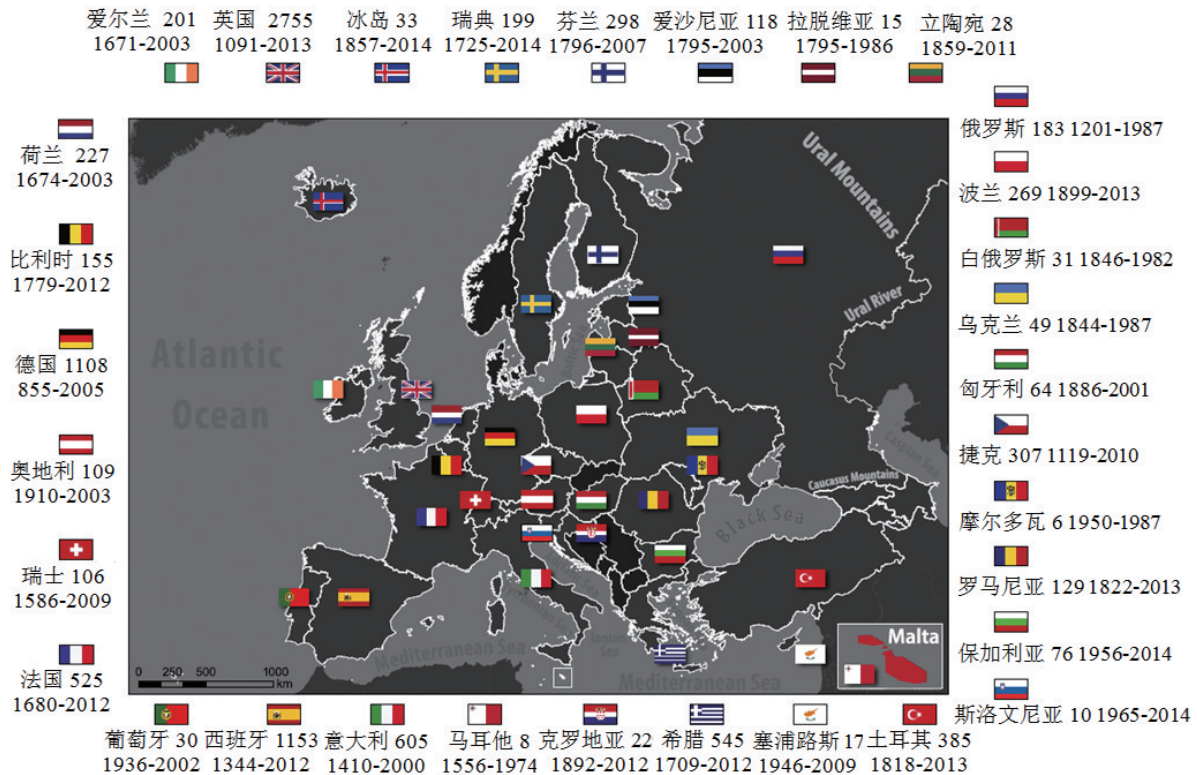
引用格式: 黄大鹏, 高歌, 叶殿秀, 等. 龙卷风研究进展及预警业务现状[J]. 科技导报, 2017, 35(5): 45-53; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.05.005

世纪, 诸多学者开始对龙卷风的机制进行探讨^[9-11], 利用天气雷达监测龙卷风事件天气过程的研究逐渐增多^[12-16], 龙卷风发生环境分析、气候与灾害特征的研究从区域尺度扩展到全国尺度^[17-20]。

1) 龙卷风数据库建设。

龙卷风研究的重要基础工作是收集整理龙卷风记录, 建立龙卷风数据库。目前, 美国和欧洲大部分国家已经建立了国家(或区域)龙卷风数据库。美国国家气候数据中心(NCDC)和风暴预测中心(SPC)共同维护建立了国家级龙卷风数据库风暴事件数据库, 涵盖了1950年至今的龙卷风数

据, 包括龙卷风开始/结束时间、开始/结束位置、开始/结束经纬度、强度、路径长度、路径宽度、经过的州和县、直接和间接死亡/受伤人数、财产和作物损失、报告来源、过程描述、事件描述等信息^[21]。欧洲强风暴实验室(ESSL)于2006年建立了欧洲强天气数据库(ESWD), 该数据库合并了德国、奥地利、捷克共和国、爱沙尼亚、芬兰、法国和俄罗斯等国的龙卷风数据, ESSL、志愿观测网络(VON)、多国气象部门以及公众通过多语言用户界面的网站向该数据库报告龙卷风记录, 再由ESSL对报告数据进行4级质量控制^[22]。另外, 欧洲的32个国家建立了各自龙卷风数据库^[1], 具体情况见图1。



注: 根据文献[1]修改, 图中数据分别为国家名称、龙卷风记录数量和龙卷风记录的时间范围

图1 欧洲各国龙卷风数据库建设情况

Fig. 1 Tornado databases developed in the European countries (indicated by their flags)

中国气象局国家气候中心于2008年开始建立中国龙卷风灾情普查数据库, 截止目前收集整理了1984以来的中国龙卷风灾情, 包括龙卷风的发生时间、地点、受灾人口、死亡人口、失踪人口、受伤人口、损坏房屋数量、倒塌房屋数量、直接经济损失、农作物受灾面积、农作物成灾面积、农作物绝收面积、农业经济损失等信息。除此之外, 2008年出版发行的《中国气象灾害大典》综合卷和各省分卷, 记录了从中国古代至2000年的龙卷风, 其中1949年之后的记录相对完整。1984—2015年《全国气候影响评价》和2003—2015年《中国气象灾害年鉴》中也有相对完整的龙卷风记录。

2) 龙卷风外场观测试验研究。

美国对龙卷风开展了诸多大型外场科学试验研究。1994—1995年, 美国在中部和南部平原州开始龙卷风起源证实实验(Verification of the Origins of Rotation in Tornadoes Experiment, VORTEX), 由多机构参与调查并研究龙卷风的生成、动态和动力学、风暴环境与龙卷风结构关系等科学问题^[23], VORTEX 成果已被用来改进美国国家气象局的龙卷风预警。2009年5月和2010年5月, 美国在大平原分别开展了VORTEX-2的第1阶段和第2阶段的试验计划, 该计划采用3部风暴尺度雷达、4部中气旋尺度雷达、4部龙卷尺度雷达、1部外场协调车辆、18部龙卷风现场探测器、24部移动气象观测平台(StickNet平台)、无人飞行器系统、激光雨滴谱仪和移

动中尺度站等先进移动探测设备,获取龙卷风发展关键区域更精细的资料,以进一步研究龙卷风的产生机制、结构、近地面风速,以及如何预警等科学问题^[24]。2016年3月1日,VORTEX-SE 试验计划在美国东南部开展,该计划预计持续至2017年春季,考虑美国东南部与美国大平原在气象条件、龙卷风气候特征和社会因素等各方面的差异,调查东南部龙卷风的死亡率高于其它地区的成因,研究东南部的环境因子如何影响龙卷风的形成、强度、结构和路径,如何将预报的不确定性告知给公众并评估公众响应。该计划第1次在强风暴试验中关注了社会因素对于龙卷风死亡率的贡献^[25]。

3) 龙卷风发生环境特征研究。

不同国家(或区域)、不同时间尺度的龙卷风发生环境特征有差异。美国学者研究发现,对流有效位能、低层风切变、抬升凝结高度、中层温度递减率、有利的湿度场配置等环境参数是有利于龙卷风发生的环境因子^[26-29]。Tippett 等^[30-31]发现,可以利用月平均对流降水和风暴相对螺旋度2个大尺度的环境参量建立月龙卷风活动指数,以揭示美国龙卷风空间分布、季节变化和年际变化等的气候学特征,月龙卷风活动指数的建立为龙卷风延伸期预报提供了基本框架。Romero 等^[32]发现,对流有效位能、低层大气水汽含量和环境切变(风暴相对螺旋度)等环境参数与各自月尺度气候特征的比较值,可以作为指示欧洲龙卷风发生可能性的有用指标。Grünwald 等^[33]发现,最大上升气流速度和深层(0~6 km)垂直风切变的组合可以很好地区分欧洲的弱龙卷风(包含未分级的龙卷)与强龙卷风,强龙卷风发生在更大的最大上升气流速度和深层垂直风切变的环境中;美国的情况与欧洲不同,抬升凝结高度和任何一种风切变(深层垂直风切变或低层垂直风切变)的组合可以很好地区分弱龙卷风与强龙卷风,强龙卷风发生在更低的抬升凝结高度和更大的垂直风切变的环境中。Groenemeijer 等^[34]发现,抬升凝结高度不能有效区分荷兰的龙卷风环境和雷暴环境,因而不能将其作为判定龙卷风发展的唯一有利环境因子:荷兰弱龙卷风(F0)发生时,低层(0~1 km)风矢量差的绝对值低于雷暴发生时的平均值;而较强龙卷(F1和F2)发生时,0~1 km层内风矢量差的绝对值远高于雷暴发生时的平均值。

中国学者对龙卷风的环境特征也做了大量研究。2012年,冯婧等^[17]发现7—8月6时(UTC)的对流有效位能(E)与深层垂直风切变(S)是影响中国龙卷风的2个重要因子, ES 的高值中心更好的对应于龙卷风事件发生的集中区。2015年,王霁吟等^[19]认为中国龙卷风发生的首要条件是合适的对流有效位能和大的深层风切变,低的抬升凝结高度和大的低层风切变也是重要因素。与美国龙卷风发展有利的环境因子相比,中国不需要较大的中层温度递减率就可以产生龙卷风。王秀明等^[35]对中国东北龙卷风环境特征研究发现,水汽、深层和低层垂直风切变、温度直减率以及干线或冷锋触发机制,是东北龙卷风暴发生与否的关键因子,与夏季江淮流域和华

南的龙卷风相比,东北龙卷风环境温度直减率较大,850~500 hPa 温差为 30~33℃,低层水汽含量及湿层厚度显著偏低,低层和深层风垂直切变均强。江淮地区6个龙卷风超级单体风暴的环境温度直减率较小,850~500 hPa 温差平均为 23.7℃^[39]。珠江三角洲春季龙卷发生的有利环境条件为在对流层深厚气层中,气压低、风速大、层结不稳定、低层高温高湿和中下层位势不稳定,与垂直风速切变无明显的联系^[37]。安徽龙卷发生时的中低层比湿、中低层垂直风切变、风暴相对螺旋度和 0℃层以下的对流有效位能与整层对流有效位能比值均比冰雹、雷雨大风发生时的大^[38]。台风龙卷的对流有效位能相对偏小,平均 200~1000 J/kg,明显小于梅雨期槽前型龙卷的对流有效位能^[41],台风龙卷一般在台风外围发生,主要出现在台风前进方向的东北侧^[40,41]。

4) 龙卷风灾害社会影响评估研究。

龙卷风的社会经济影响评估工作正逐年得到重视。Simmons 和 Sutter 等^[42-43]研究了美国龙卷风的社会经济影响,提出采取小范围疏散和关键基础设施迁移的办法减少龙卷风造成的人员伤亡。2015年,Shen 和 Hwang 建立了龙卷风人员伤亡风险评估模型,研究美国州尺度的人员伤亡风险,发现龙卷风伤亡风险最高的5个州为得克萨斯州、俄克拉荷马州、亚拉巴马州、阿肯色州和密西西比州,伤亡风险最低的5个州为内华达州、华盛顿州、罗德岛州、佛蒙特州、蒙大拿州^[44]。中国学者采用主成分方法对江苏省龙卷风灾害易损性进行分析^[45],选用水域面积、海拔高度、人均国民生产总值、人口密度、龙卷密度和龙卷灾害综合灾度等因子,建立了龙卷风灾害风险评估模型,对江苏省龙卷风灾害风险进行了评估^[46]。龙卷风灾害的社会影响评估是一项新的研究工作,只有深入了解龙卷风的灾害影响机制,如龙卷风预警信息的有效表达与传播、公众的认知水平与响应等社会因素对龙卷风人员伤亡的影响等,社会影响评估研究才能更有效、更深入的进行。

5) 龙卷风气候特征研究。

龙卷风气候特征的研究主要围绕龙卷风的年发生频率、季节和月尺度特征、日尺度特征、强度特征及空间分布特征等开展。目前已经开展该研究的主要国家和地区为北美、欧洲大部分国家及阿根廷、巴西、中国、日本、澳大利亚等国^[1]。龙卷风气候特征的详细研究成果将在本文第2节中介绍。

2 龙卷风的气候特征

全球除南极洲以外的大洲都有龙卷风记录,龙卷风主要发生在中纬度地区,其中美国发生最为频繁,堪称“龙卷王国”,其发生的龙卷风约占全球龙卷风总数的75%;其次为加拿大;欧洲西部和中部、中国、孟加拉国、日本、澳大利亚、新西兰、南非和阿根廷等国家或地区龙卷风发生也较为频繁。本节围绕龙卷风年、季节和月尺度特征、日尺度特征、空间分布特征、强度分布特征、灾情特征等方面,概述全球龙卷风的气候特征。

2.1 年尺度特征

美国龙卷风平均每年有 1000 多个(1991—2010 年间,平均为 1253 个/年)^[47]。其次为加拿大,记录到的龙卷风平均约 70 个/年,估计实际发生的龙卷风平均约 150 个/年^[48]。欧洲平均观测到的龙卷风大约有 330 个/年,其中陆龙卷 170 个,水龙卷 160 个,而实际发生的龙卷风大约有 700 个/年,其中陆龙卷 300 个,水龙卷 390 个^[49]。欧洲龙卷风多发生于英国、德国、法国和西班牙:英国(1981—2010 年间)平均每年大约有(47.2±10.5)个龙卷风,其中陆龙卷(36.5±10.1)个,水龙卷(12.7±2.8)个;法国平均每年有 15~20 个龙卷风^[50]。亚洲的龙卷风主要发生在中国、日本、印度和孟加拉国:中国平均每年发生的龙卷风有 73 个^[20];日本平均每年发生 20.5 个陆龙卷和 4.5 个水龙卷^[51];孟加拉国平均每年发生的龙卷风有 2 个。大洋洲的龙卷风主要发生在澳大利亚和新西兰:澳大利亚平均每年发生的龙卷风有 29 个^[52],新西兰平均每年发生的龙卷风有 17 个^[53]。南美洲的龙卷风多发于阿根廷中部的潘帕斯草原^[54];阿根廷平均每年记录到的龙卷风大概有 10 个^[55];巴西、智利和乌拉圭也有龙卷风的记录,巴西平均每年记录到的龙卷风有 3 个^[56]。

2.2 季节和月尺度特征

美国的龙卷风多发于春季,其次为夏季,冬季最少发生^[57]。欧洲的龙卷风主要发生在夏季,其次为秋季^[58];英国龙卷风主要发生在秋季(9—11月),其次为夏季(6—8月),11月为龙卷风发生最多月^[59];德国 2/3 的龙卷风发生在 6—8 月,其中 7 月龙卷风发生频率达 27%^[60];法国的龙卷风多发于春季和夏季,8 月发生最多^[50];西班牙的龙卷风多发于暖季,明显的趋向于秋季^[61]。澳大利亚的龙卷风多发于初春和夏季,其次为初冬^[62]。中国龙卷风发生的季节变化特征明显,主要集中在春夏两季,尤以 7 月和 8 月最多,两月约占全年总数的 50% 以上^[18,20]。日本 56% 的陆龙卷发生在 7—10 月,其中 9 月最为频繁,3 月最少;水龙卷主要发生在 9—10 月,10 月最多^[51]。

2.3 日尺度特征

美国的龙卷风多发于下午和傍晚,主要集中于 14~20 时^[57]。英国龙卷风多发于 11~18 时(UTC)^[59]。西班牙的龙卷风多发于 12~18 时(UTC)^[61]。中国的龙卷风以午后到傍晚为高峰时段^[6,18]。日本的龙卷风多发于日本标准时的 9~17 时,其中 10~11 时和 15~16 时是 2 个高峰^[51]。

2.4 空间分布特征

美国的佛罗里达州和中南部平原是龙卷风的高发区,中南部平原称为“龙卷走廊”,其范围一般指从德克萨斯州中部向北到爱荷华州北部,以及从堪萨斯州中部和内布拉斯加东部到俄亥俄西部的区域。英国的龙卷主要发生于英格兰的东部和南部以及海峡群岛周边。德国的龙卷风多发于沿海和丘陵地区^[60]。法国的龙卷风多发于西北部、南部和东部^[50]。西班牙的龙卷风多发于地中海区域和加的斯湾附近省

份^[61]。中国龙卷风一般多发生在中东部地形相对平坦的平原地区,平原多于山区;从区域尺度来看,长江三角洲、苏北、鲁西南、豫东等平原、湖沼区以及雷州半岛等地都是龙卷风的易发区^[7];从省级行政单元尺度来看,江苏省、安徽省、广东省、河南省、湖北省是龙卷风多发的省份,黑龙江省、河北省、浙江省、江西省和湖南省等省份龙卷风的发生频次较高^[20]。1961—1993 年间日本的陆龙卷和水龙卷主要发生在沿海地区,而关东地区大量龙卷风远离沿海区域^[51]。大洋洲的龙卷风主要发生在澳大利亚和新西兰。澳大利亚的龙卷风主要发生于东南部和西南部^[62]。南美洲的龙卷风多发于阿根廷中部的潘帕斯草原^[54]。巴西龙卷多发于南部和东南部^[56]。

2.5 强度分布特征

根据 Brooks 等^[63]的研究,龙卷风强度分布有上限和下限模式:美国东中部、阿根廷和加拿大 $F(n+1)$ 级龙卷风与 $F(n)$ 级龙卷风的个数比例为 36%,这种分布类型主要由超级单体雷暴产生的龙卷风主导;佛罗里达州、科罗拉多山前地区和英国 $F(n+1)$ 等级龙卷风与 $F(n)$ 等级龙卷风的个数比例为 10% 或更小,这种分布类型主要由非超级单体雷暴产生的龙卷风主导。 $F(n+1)$ 等级龙卷风与 $F(n)$ 等级龙卷风的个数比例上限为 36%,下限为 10% 或更小,这 2 种分布模式可用于检验各国龙卷风记录质量的可靠性。

2.6 灾情特征

美国龙卷风导致的人员死亡多数发生在阿肯色州低地地区、田纳西州以及美国东南部密西西比河下游流域;美国大平原地区的人员死亡少,而最南部诸州的人员死亡多;中老年人相对于年轻人面临更高的死亡风险^[64]。从 1984—2013 年,中国龙卷风导致的死亡人数、倒塌房屋数量及直接经济损失均呈逐年下降的趋势。空间分布上,中国龙卷风发生次数和直接经济损失均表现出西部地区少、东部地区多的特征,江苏、安徽、湖北、湖南、江西和广东为中国龙卷风灾害发生频次高、死亡人数多且经济损失较重的省份,其中江苏省和安徽省最为严重^[20]。

3 龙卷风预报预警

3.1 欧洲国家相继开展龙卷风预报预警

欧洲目前开展龙卷风预警的国家有德国、荷兰、塞浦路斯、马耳他、爱沙尼亚、罗马尼亚、土耳其。荷兰于 1967 年发布了欧洲第 1 个龙卷风预警,塞浦路斯于 1977 年发布了欧洲第 2 个龙卷风预警,爱沙尼亚、马耳他、罗马尼亚、德国和土耳其等国在 2003—2006 年间发布了各自国家的第 1 个龙卷风预警。各国龙卷风预警的标准、方法不尽相同:西班牙的龙卷风预警包括在强雷暴预警之中;荷兰的龙卷风预警仅针对于水龙卷;德国、荷兰、塞浦路斯的龙卷风预警是基于地面已经观测到的龙卷风;马耳他的龙卷风预警基于预报;爱沙尼亚、罗马尼亚和土耳其等国的龙卷风预警基于多普勒雷达数据^[65]。

3.2 美国龙卷风预报预警水平高

美国是世界上龙卷风预报预警水平最高的国家。美国国家气象局(NOAA's NWS)的风暴预测中心(Storm Prediction Center, SPC)负责美国1~8天的强对流天气预报(Convective Outlook), 预报强对流天气发生的概率; 1~3天的预报对强对流天气给出风险等级; 2~8天的预报不区分强对流天气的类型; 1天的预报分别给出龙卷风、破坏性大风和冰雹发生的概率; 当天气形势有利于多个龙卷或单个强龙卷爆发时, 风暴预测中心发布平均时效为2小时的龙卷风观察(Tornado Watch)。当通过多普勒雷达观测到龙卷风初级胚胎, 或观察员直接观测发现龙卷后, 当地的气象部门将立即发布龙卷风预警(Tornado Warning)。

美国龙卷风在平均预警时效、空报率和命中率方面的变化趋势为: 平均预警时效由2011年的14.6 min降至2015年的8 min; 预警空报率由2008年的75%降至2015年的70%; 由于龙卷风预警发布和验证方式从2008年的县尺度变为风暴本身, 预警命中率也由2008年的72%降至2013—2015年的60%^[67]。龙卷风的有效预警可以显著减少人员伤亡: 6~10 min的预警时效能减少41%的人员死亡; 11~15 min的预警时效减少人员伤亡的比例最大, 可以达到47%; 当预警时效大于15 min后, 预警对于人员死亡和伤害的有效性反而会降低^[68]。

美国的龙卷风预报和预警水平高, 主要归功于以下几个方面: 1) 一系列大型外场观测试验计划的开展, 深入的研究了龙卷风生成、动力学、结构及社会因素影响等重大科学问题。2) 新一代多普勒雷达网络的建立与升级改造及龙卷风自动化识别算法的研发。天气雷达是预警预报员识别龙卷风发展潜在区域的主要工具。2012年, 美国在全国范围部署了160部WSR-88D天气雷达(S波段), 组成了“下一代”天气雷达(Next Generation Weather Radar, NEXRAD)网络^[69]。2013年完成了所有WSR-88D的双线偏振雷达技术的改造, 探测能力明显提高, 下一代雷达技术——相控阵天气雷达也得到了发展。美国于2010年和2012年分别组织开展了相控阵天气雷达对龙卷预警时间的创新感知试验(2010 PARISE), 试验表明, 采用快速更新的相控阵天气雷达数据可以提高龙卷风的预警时间^[70]。另外, 自动龙卷风探测算法的研发也取得了重大突破^[71]。3) 数量庞大的观察员参与。美国气象局在20世纪70年代开展志愿者项目——SKYWARN计划, 到目前为止约有35万~40万名训练有素的强对流天气观察员参与其中, 主要职责是识别和描述局地的强风暴, 并向当地气象局、应急管理者和新闻媒体提供及时准确的强对流天气报告, 为气象部门及时准确的发布龙卷风预警、强雷暴预警和山洪预警提供了很大帮助^[72]。4) 卫星观测技术的应用。利用NASA的Aqua和GOES系列卫星可以获取风暴图像, 即将发射的GOES-R卫星携带的地球静止闪电成像仪(GLM)可以探测闪电, 探测结果是预报龙卷风和雷暴的指标

之一; 携带的高级基线成像仪(ABI)能够探测超冷深对流, 该指标意味着强对流天气即将来临。5) 部分军用雷达的集成应用。利用联邦航空局的TDWR雷达网络, 改善了龙卷风的探测水平。6) 专业追风者和业余爱好者的参与。除了预警时效外, 预警信息的及时发布也非常重要。美国在提高预警理论技术水平的同时, 迅速发展了对预警信息的快速、有效发布^[73]。例如, 在气象台的预报室内启动用户警报器播送龙卷风警报, 通过预报室直接播预报和警报, 利用电视台和广播电台直播龙卷风警报等。目前, 美国龙卷风的预警是基于探测发布的预警^[69], 未来的发展目标是建立基于预报模式输出的龙卷风预警^[74], 这种预警理论上能够将龙卷风的预警时效提前到龙卷风的起源。

3.3 中国龙卷风监测预警试验业务正在起步

中国从1998年开始着手建设新一代天气雷达监测网, 到2016年末, 参与组网运行的天气雷达为190部, 在建26部, 数量上与美国基本持平^[75]。中国的双线偏振雷达技术逐步从科研外场试验应用发展为业务应用, 部分省市气象局建设了业务用双线偏振雷达, 但在双线偏振雷达技术向全国推广应用之前, 其技术标准的制定、探测能力的综合验证、雷达应用培训等工作亟待开展。相控阵天气雷达正在研究, 距离业务应用尚有很大距离^[70]。2009年3月, 中国气象局国家气象中心成立了强天气预报中心, 专门负责强对流天气预报, 发布的分类强对流天气预报产品包括未来12 h短时强降水预报(3次/天)、雷暴大风和冰雹预报; 发布的强对流天气预警产品包括全国短时强降水预警、雷暴大风或冰雹预警。这是国内首个组建的专门强对流天气的预报队伍, 同时带动了国内部分省市组建专门的强对流天气预报部门^[76]。2013年8月, 佛山市气象局成立了龙卷风研究中心, 这是国内第1个专门研究龙卷风的机构。2015年6月, 佛山市气象局与中国科学院云降水物理与强风暴重点实验室联合成立了“强风暴与龙卷风联合实验室”, 重点开展强风暴和龙卷风等重大科学项目外场试验等工作。2016年10月, 中国气象局启动为期3年的龙卷风监测预警试验业务, 探索龙卷风监测预报预警业务建设所需要的基础支撑条件、业务技术体系和预警服务体系。根据试验方案, 到2019年, 中国将初步建立龙卷风等致灾性强对流天气的短时临近预警技术体系, 建立利用社会资源的龙卷风、冰雹、大风等强对流天气的观测和资料汇交制度、龙卷风灾情调查制度; 建立龙卷业务标准化规范和业务流程^[77]。

中国的龙卷风监测预警能力与美国相比尚有较大差距, 龙卷风的研究亟待加强, 未来可以考虑在以下方面发展。

1) 加强天气雷达技术的发展与应用, 综合运用卫星观测技术。天气雷达是龙卷风监测预警的最强有力的手段, 中国应在充分利用新一代天气雷达功能的同时, 发展双线偏振雷达和相控阵天气雷达技术, 并将其逐步应用到中国新一代天气雷达监测网络中, 加强利用天气雷达监测龙卷风的科学研究与技术积累。2016年底发射成功的中国风云四号静止卫

星搭载先进的闪电成像仪,可以实现对中国闪电活动全天候连续观测,闪电产品的应用对于雷暴和龙卷风等的预警和预报也具有重要作用。

2) 在不同的地理环境和气候区,选取龙卷风多发地开展龙卷风监测预警和预报的科学试验研究。中国幅员辽阔,不同区域的气候特征、地形特征及下垫面环境等有很大的差异,同样是龙卷风的多发区,有利于龙卷风形成的环境条件不同,有必要选取有代表性的区域开展龙卷风监测预警预报的科学试验研究,建立适合各自区域的龙卷风潜势预报和预警指标。在技术条件成熟的区域,可以考虑开展大型的野外观测试验。

3) 充分利用社会资源,建立广泛的龙卷风信息报告制度。加强国内气象部门已有的气象信息员队伍的建设,培养气象信息员识别龙卷风风暴的能力,建立发现龙卷风及时报告的渠道;同时鼓励社会大众的广泛参与,利用普及的手机、网络等媒体及时报告龙卷风信息。

4) 建立龙卷风研究的科研机构 and 人员队伍。目前国内专门从事龙卷风研究的人员还很少,加强与美国气象局风暴预测中心及相关研究人员的技术交流势在必行。

5) 加强龙卷风历史资料数据的整理工作,应建立完整规范、质量可靠的长时间序列龙卷风数据库。龙卷风数据库建立是龙卷风气候特征研究的重要的基础性工作。目前,中国气象局国家气候中心建立了龙卷风灾情普查数据库,该数据库中的龙卷风数据相对来说较为完整规范。但不同时期龙卷风收集数据的方式不同,龙卷风记录的缺失程度不同,数据质量参差不齐,其可靠性仍需要进一步检验。

6) 加强龙卷风灾害气候特征分析及经济社会影响评估工作,减轻龙卷风导致的财产损失,更重要的是减轻龙卷风引起的人员伤亡。

4 结论

龙卷风的研究起源于欧洲,发展于美国。美国是全球龙卷风发生最为频繁的国家,在龙卷风数据库建设、外场观测试验、发生环境特征研究、气候特征分析、影响评估等方面均取得了巨大的成绩。欧洲大部分国家建立了较为完备的龙卷风数据库,对龙卷风气候特征进行了详细的研究。阿根廷、巴西、日本、澳大利亚等国也开展了龙卷风气候特征研究。中国的龙卷风研究起步较晚,在20世纪90年代逐渐增多,在龙卷风数据库建设、龙卷风气候特征分析和龙卷风发生环境特征研究等方面开展了大量研究工作,但龙卷风的监测预警试验业务才刚刚起步,未来需要在天气雷达技术发展应用、龙卷风监测预报预警科学试验研究、动员社会资源广泛参与、科研队伍建设、数据库建设、气候特征分析及影响评估等方面进一步加强。

参考文献 (References)

[1] Antonescu B, Schultz D M, Lomas F, et al. Tornadoes in Europe:

Synthesis of the observational datasets[J]. Monthly Weather Review, 2016, 144(7), 2445-2480.

[2] Wegener A. Wind- und Wasserhosen in Europa (Tornadoes and Waterspouts in Europe)[M]. Braunschweig: Friedrich Vieweg & Sohn, 1917.

[3] Peterson R E. Johannes Letzmann: A pioneer in the study of tornadoes [J]. Weather and Forecasting, 1992, 7(1): 166-184.

[4] Cox J D. Storm watchers: The turbulent history of weather prediction from Franklin's kite to El Niño. Hoboken: John Wiley and Sons, 2002.

[5] 包澄澗, 赵刚然. 上海地区龙卷风的初步分析[J]. 南京大学学报: 自然科学版, 1964, 8(1): 166-182.

Pao Chenglan, Zhao Gangran. A preliminary analysis on the tornadoes occurring at Shanghai district[J]. Journal of Nanjing University: Natural Sciences, 1964, 8(1): 166-182.

[6] 郑峰, 谢海华. 我国近30年龙卷风研究进展[J]. 气象科技, 2010, 38(3): 295-299.

Zheng Feng, Xie Haihua. Progress in tornado researches in China in recent 30 years[J]. Meteorological Science and Technology, 2010, 38(3): 295-299.

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

Wei Wenxiu, Zhao Yamin. The characteristics of tornadoes in China [J]. Meteorological Monthly, 1995, 21(5): 36-40.

[8] 鹿世瑾. 福建龙卷风的活动特点[J]. 气象, 1996, 22(7): 36-39.

Lu Shijin. Some active features of tornado in Fujian province[J]. Meteorological Monthly, 1996, 22(7): 36-39.

[9] 纪文君, 刘正奇, 郭湘平. 龙卷风生成机制的探讨[J]. 海洋预报, 2003, 20(1): 14-19.

Ji Wenjun, Liu Zhengqi, Guo Xiangping. The mechanism of tornado formation[J]. Marine Forecasts, 2003, 20(1): 14-19.

[10] 伍培云, 陆建隆. 盆池涡旋转方向和龙卷风的形成[J]. 河北师范大学学报: 自然科学版, 2004, 28(2): 143-146.

Wu Peiyun, Lu Jianlong. Study of the rotary eddy direction in pool and formation of cyclone[J]. Journal of Hebei Normal University: Natural Science Edition, 2004, 28(2): 143-146.

[11] 刘式达, 刘式适, 梁福明. 大气涡旋的螺旋结构[J]. 大气科学, 2006, 30(5): 850-853.

Liu Shida, Liu Shishi, Liang Fuming. The spiral structure for atmospheric vortex[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2006, 30(5): 850-853.

[12] 何彩芬, 姚秀萍, 胡春蕾, 等. 一次台风前部龙卷的多普勒天气雷达分析[J]. 应用气象学报, 2006, 17(3): 370-375.

He Caifen, Yao Xiuping, Hu Chunlei, et al. Analyses on a tornado event in front of a typhoon[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2006, 17(3): 370-375.

[13] 俞小鼎, 郑媛媛, 张爱民, 等. 安徽一次强烈龙卷的多普勒天气雷达分析[J]. 高原气象, 2006, 25(5): 914-924.

Yu Xiaoding, Zheng Yuanyuan, Zhang Aimin, et al. The detection of a severe tornado event in Anhui with China new generation weather radar[J]. Plateau Meteorology, 2006, 25(5): 914-924.

[14] 周后福, 郭品文, 张建军, 等. 一次苏皖龙卷的多普勒雷达分析及其成因探讨[J]. 科技导报, 2009, 27(7): 80-84.

Zhou Houfu, Guo Pinwen, Zhang Jianjun, et al. Doppler radar analysis and a discussion on a tornado occurring in border of Jiangsu and Anhui provinces[J]. Science & Technology Review, 2009, 27(7): 80-84.

[15] 张峭莹, 吴迎旭, 张礼宝. 利用卫星、雷达资料分析龙卷发生的环境

- 条件[J]. 气象, 2013, 39(6): 728-737.
- Zhang Xiying, Wu Yingxu, Zhang Libao. Analysis of tornado ambient condition based on the YF-2 satellite and radar data[J]. Meteorological Monthly, 2013, 39(6): 728-737.
- [16] 朱江山, 刘娟, 边智. 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[J]. 气象, 2015, 41(2): 182-191.
- Zhu Jiangshan, Liu Juan, Bian Zhi. Analysis of cell merge and vortex signature during generation of tornado in Anhui based on Doppler radar observation[J]. Meteorological Monthly, 2015, 41(2): 182-191.
- [17] 冯婧, 周伟灿, 徐影. 1980—2009年我国龙卷事件变化[J]. 气候变化研究进展, 2012, 8(3): 183-189.
- Feng Qian, Zhou Weican, Xu Ying. Change characters of tornados in China in 1980-2009[J]. Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis, 2012, 8(3): 183-189.
- [18] 范雯杰, 俞小鼎. 中国龙卷的时空分布特征[J]. 气象, 2015, 41(7): 793-805.
- Fan Wenjie, Yu Xiaoding. Characteristics of spatial-temporal distribution of tornadoes in China[J]. Meteorological Monthly, 2015, 41(7): 793-805.
- [19] 王霖吟, 陈宝君, 宋金杰, 等. 基于再分析资料的我国龙卷发生环境和通用龙卷指标[J]. 气候与环境研究, 2015, 20(4): 411-420.
- Wang Jiyin, Chen Baojun, Song Jinjie, et al. Atmospheric conditions of tornado genesis and universal tornadic index based on reanalysis data[J]. Climatic and Environmental Research, 2015, 20(4): 411-420.
- [20] 黄大鹏, 赵珊珊, 高歌, 等. 近30a中国龙卷风灾害特征研究[J]. 暴雨灾害, 2016, 35(2): 97-101.
- Huang Dapeng, Zhao Shanshan, Gao Ge, et al. Disaster characteristics of tornadoes over China during the past 30 years [J]. Torrential Rain And Disasters, 2016, 35(2): 97-101.
- [21] NCEI. Storm events database[EB/OL]. [2016-09-01]. <http://www.ncdc.noaa.gov/stormevents/>.
- [22] Groenemeijer P, Kühne T. A climatology of tornadoes in Europe: Results from the European severe weather database[J]. Monthly Weather Review, 2014, 142(12): 4775-4790.
- [23] NCAR. Verification of the origins of rotation in tornadoes experiment 1 (VORTEX1) [EB/OL]. 2016-09-01. https://www.eol.ucar.edu/field_projects/vortex-95.
- [24] Wurman J, Dowell D, Richardson Y, et al. The second verification of the origins of rotation in tornadoes experiment: VORTEX2[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2012, 93(8): 1147-1170.
- [25] NSSL. VORTEXT Southeast[EB/OL]. [2016-09-01]. <http://www.nssl.noaa.gov/projects/vortexse/>.
- [26] Johns R H, Davies J M, Leftwich P W. An examination of the relationship of 0-2 km AGL "Positive" wind shear to potential buoyant energy in strong and violent tornado situation [C]// 16th Conference on Severe Local Storms. Alber, American Meteor Society, 1990, 593-598.
- [27] Mac Gorman D R, Burgess D W. Positive cloud-to-ground lightning in tornadic storms and hailstorms[J]. Monthly Weather Review, 1994, 122(8): 1671-1679.
- [28] Brooks H E, Lee J W, Craven J P. The spatial distribution of severe thunderstorm and tornado environments from global reanalysis data[J]. Atmospheric Research, 2003, 67-68(3): 73-94.
- [29] Craven J P, Brooks H E. Baseline climatology of sounding derived parameters associated with deep, moist convection[J]. National Weather Digest, 2004, 28(1): 13-24.
- [30] Tippett M K, Sobel A H, Camargo S J. Association of US tornado occurrence with monthly environmental parameters[J]. Geophysical Research Letters, 2012, 39(2): L0821.
- [31] Tippett M K, Sobel A H, Camargo S J, et al. An empirical relation between US tornado activity and monthly environmental parameters[J]. Journal of Climate, 2014, 27(8): 2983-2999.
- [32] Romero R, Gayà M, Doswell III C A. European climatology of severe convective storm environmental parameters: A test for significant tornado events[J]. Atmospheric Research, 2007, 83(2): 389-404.
- [33] Grünwald S, Brooks H E. Relationship between sounding derived parameters and the strength of tornadoes in Europe and the USA from reanalysis data[J]. Atmospheric Research, 2011, 100(4): 479-488.
- [34] Groenemeijer P H, van Delden A. Sounding-derived parameters associated with large hail and tornadoes in the Netherlands[J]. Atmospheric Research, 2007, 83(2): 473-487.
- [35] 王秀明, 俞小鼎, 周小刚. 中国东北龙卷研究: 环境特征分析[J]. 气象学报, 2015, 73(3): 425-441.
- Wang Xiuming, Yu Xiaoding, Zhou Xiaogang. Study of northeast China tornadoes: The environmental characteristics[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2015, 73(3): 425-441.
- [36] 赵亚民. 华北龙卷风群发生环境条件的分析[J]. 气象, 1990, 16(5): 36-38.
- Zhao Yamin. Analysis of the environmental conditions of tornadoes in North China[J]. Meteorological Monthly, 1990, 16(5): 36-38.
- [37] 王沛霖. 珠江三角洲春季龙卷发生的环境条件[J]. 热带气象学报, 1996, 12(1): 60-64.
- Wang Peilin. On the environmental condition for genesis of tornadoes in Zhujiang river delta in spring[J]. Journal of Tropical Meteorology, 1996, 12(1): 60-64.
- [38] 姚叶青, 郝莹, 张义军, 等. 安徽龙卷发生的环境条件和临近预警[J]. 高原气象, 2012, 31(6): 1721-1730.
- Yao Yeqing, Hao Ying, Zhang Yijun, et al. Synoptic situation and pre-warming of Anhui tornado[J]. Plateau Meteorology, 2012, 31(6): 1721-1730.
- [39] 周后福, 刁秀广, 夏文梅, 等. 江淮地区龙卷超级单体风暴及其环境参数分析[J]. 气象学报, 2014, 72(2): 306-317.
- Zhou Houfu, Diao Xiuguang, Xia Wenmei, et al. Analysis of tornado supercell storm and its environmental parameters in the Yangtze-Huaihe region[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2014, 72(2): 306-317.
- [40] 沈树勤. 台风前部龙卷风的一般特征及其萌发条件的初步分析[J]. 气象, 1990, 16(1): 11-16.
- Shen Shuqin. Analysis of general characteristics and genesis conditions of tornado in front of typhoon[J]. Meteorological Monthly, 1990, 16(1): 11-16.
- [41] 郑媛媛, 张备, 王啸华, 等. 台风龙卷的环境背景和雷达回波结构分析[J]. 气象, 2015, 41(8): 942-952.
- Zheng Yanyan, Zhang Bei, Wang Xiaohua, et al. Analysis of typhoon-tornado weather background and radar echo structure[J]. Meteorological Monthly, 1990, 16(1): 11-16.
- [42] Simmons, K M, Sutter D. Economic and societal impacts of tornadoes [M]. Chicago: American Meteorological Society, 2011.
- [43] Simmons, K M, Sutter D. The 2011 tornadoes and the future of tornado research[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2012, 93(7): 959-961.
- [44] Shen G Q, Hwang S N. A spatial risk analysis of tornado-induced human injuries and fatalities in the USA[J]. Natural Hazards, 2015,

- 77: 1223-1242.
- [45] 许遐祯, 潘文卓, 缪启龙. 江苏省龙卷风灾害易损性分析[J]. 气象科学, 2010, 30(2): 208-213.
Xu Xiaozhen, Pan Wenzhuo, Liao Qilong. Vulnerability analysis of tornado disaster in Jiangsu[J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2010, 30(2): 208-213.
- [46] 许遐祯, 潘文卓, 缪启龙. 江苏省龙卷风灾害风险评估模型研究[J]. 大气科学学报, 2009, 32(6): 792-797.
Xu Xiaozhen, Pan Wenzhuo, Liao Qilong. Disaster risk assessment of tornado in Jiangsu Province[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2009, 32(6): 792-797.
- [47] NCEI. US tornado climatology[EB/OL]. [2016-09-01]. <https://www.ncdc.noaa.gov/climate-information/extreme-events/us-tornado-climatology>.
- [48] Cheng V Y S, Arhonditsis G B, Sills D M L, et al. Probability of tornado occurrence across Canada[J]. Journal of Climate, 2013, 26(23): 9415-9428.
- [49] Dotzek N. An updated estimate of tornado occurrence in Europe[J]. Atmospheric Research, 2003, 67(3): 153-161.
- [50] Paul F. A developing inventory of tornadoes in France[J]. Atmospheric Research, 2001, 56(1): 269-280.
- [51] Niino H, Fujitani T, Watanabe N. A statistical study of tornadoes and waterspouts in Japan from 1961 to 1993[J]. Journal of Climate, 1997, 10(7): 1730-1752.
- [52] Geerts B, Noke-Raico M. Tornadoes in Australia: Do we really know [J] Bulletin of the Australian Meteorological and Oceanographic Society, 1995, 8: 46-51.
- [53] Goliger A M, Milford R V. A review of worldwide occurrence of tornadoes[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998, 74(2): 111-121.
- [54] Rasmussen K L, Zuluaga M D, Houze Jr R A. Severe convection and lightning in subtropical South America[J]. Geophysical Research Letters, 2014, 41(20): 7359-7366.
- [55] De Schwarzkopf M L A, Rosso L C, Sorichetti P. Riesgo de tornados y corrientes descendentes en la Argentina[C]. Presented at the Workshop of the Task Force on High Intensity Windson Transmission Lines, Buenos Aires, Argentina, 1993.
- [56] Silva Dias M A F. An increase in the number of tornado Reports in Brazil[J]. Weather, Climate, and Society, 2011, 3(3): 209-217.
- [57] NCEI. Historical Records and Trends[EB/OL]. 2016-09-01. <https://www.ncdc.noaa.gov/climate-information/extreme-events/us-tornado-climatology/trends>.
- [58] Reynolds D J. European tornado climatology 1960-1989[J]. Journal of Meteorology, 1999, 24(244): 376-403.
- [59] Kirk P J. An updated tornado climatology for the UK: 1981-2010[J]. Weather, 2014, 69(7): 171-175.
- [60] Graf M. Synoptical and mesoscale weather situations associated with tornadoes in Europe[D]. Zurich: Institute of Geography, University of Zurich, 2008.
- [61] Gayà M. Tornadoes and severe storms in Spain[J]. Atmospheric Research, 2011, 100(4): 334-343.
- [62] Allen J T, Allen E R. A review of severe thunderstorms in Australia [J]. Atmospheric Research, 2016, 178-179: 347-366.
- [63] Brooks H, Doswell III C A. Some aspects of the international climatology of tornadoes by damage classification[J]. Atmospheric Research, 2001, 56(1): 191-201.
- [64] Ashley W S. Spatial and temporal analysis of tornado fatalities in the United States: 1880-2005[J]. Weather and Forecasting, 2007, 22(6): 1214-1228.
- [65] Rauhala J, Schultz D M. Severe thunderstorm and tornado warnings in Europe[J]. Atmospheric Research, 2009, 93(1): 369-380.
- [66] Inoue H Y, Kusunoki K, Kato W, et al. Finescale doppler radar observation of a tornado and low-level mesocyclones within a winter storm in the Japan Sea coastal region[J]. Monthly Weather Review, 2011, 139(2): 351-369.
- [67] NOAA. Tornado warnings (nation)[EB/OL]. [2016-10-02]. https://verification.nws.noaa.gov/services/gpra/NWS_GPRA_Metrics.pdf.
- [68] Simmons K M, Sutter D. Tornado warnings, lead times, and tornado casualties: An empirical investigation[J]. Weather and Forecasting, 2008, 23(2): 246-258.
- [69] Brotzge J, Donner W. The tornado warning process: A review of current research, challenges, and opportunities[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2013, 94(11):1715-1733.
- [70] 刘黎平, 胡志群, 吴翀. 双线偏振雷达和相控阵天气雷达技术的发展和應用[J]. 气象科技进展, 2016, 6(3): 28-33.
Liu Liping, Hu Zhiqun, Wu Chong. Development and application of dual linear polarization radar and phased-array radar[J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2016, 6(3): 28-33.
- [71] Mitchell E, Vasiloff S, Stumpf G, et al. The national severe storms laboratory tornado detection algorithm[J]. Weather and Forecasting, 1998, 13(2): 352-366.
- [72] National Weather Service. Skywarn. [EB/OL]. [2016-09-01]. <http://www.nws.noaa.gov/skywarn/>.
- [73] Coleman T A, Knupp K R, Spann J, et al. The history (and future) of tornado warning dissemination in the United States[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2011, 92(5): 567-582.
- [74] Stensrud, D J, Xue Ming, Wicker L J, et al. Convective-scale warn on forecast system: A vision for 2020[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2009, 90(10): 1487-1499.
- [75] 中国气象报社. 中国气象局将开展新一代天气雷达质量专项治理工作,于新文强调既要严谨求实也要改革创新[EB/OL]. [2016-08-12]. http://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011qxqxw/2011qxqyw/201608/t20160812_319190.html.
China Meteorological News. China Meteorological Bureau will launch a new generation of weather radar quality management, Yu Xinwen emphasizing the need to rigorous and realistic to reform and innovation [EB/OL]. [2016-08-12]. http://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011qxqxw/2011qxqyw/201608/t20160812_319190.html.
- [76] 郑永光, 张小玲, 周庆亮, 等. 强对流天气短时临近预报业务技术进展与挑战[J]. 气象, 2010, 36(7): 33-42.
Zheng Yongguang, Zhang Xiaoling, Zhou Qingliang, et al. Review on sever convective weather short-term forecasting and nowcasting[J]. Meteorological Monthly, 2010, 36(7): 33-42.
- [77] 中国气象报社. 中国气象局启动试验业务提升龙卷风预警能力 [EB/OL]. [2015-10-19]. http://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011qxqxw/2011qxqyw/201610/t20161019_336959.html.
China Meteorological News. China Meteorological Administration to start the test business to enhance tornado warning capabilities [EB/OL]. [2015-10-19]. http://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011qxqxw/2011qxqyw/201610/t20161019_336959.html.

Progress in tornado research and present situation of tornado warning operational system

HUANG Dapeng^{1,2}, GAO Ge^{1,2}, YE Dianxiu¹, XIAO Chan¹

1. National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

2. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China

Abstract This paper presents a brief history of tornado research and reviews the current progress in database development, experiment projects, environment factor identification, climatology analysis, and impact assessment in the field of tornado research and development. And then it summarizes the global tornado climatic characteristics. Finally, it examines the present situation of tornado forecast and warning system and suggests the future directions for the Chinese research and development of tornado warning operational system.

Keywords tornado; database development; environment factors; climatology; tornado warning

(编辑 韩丹岫)