

# 中国与欧美龙卷统计特征比较分析及研究进展

王东海<sup>1</sup> 李兆慧<sup>2</sup> 高枫亭<sup>3</sup> 柳崇健<sup>4</sup> 朱建军<sup>5</sup> 炎利军<sup>5</sup> 杜钧<sup>6</sup>

(1 广东省气候变化与自然灾害研究重点实验室, 中山大学大气科学学院, 广州 510275; 2 纬哲组咨美国分公司, Norman 73072, 美国; 3 吉林省气象科学研究所/长白山气象与气候变化吉林省重点实验室/中高纬度环流系统与东亚季风研究开放实验室, 长春 130062; 4 中国气象科学研究院, 北京 100081; 5 佛山市气象局/佛山市龙卷风研究中心, 佛山 528000; 6 美国国家海洋和大气管理局国家环境预报中心, College Park 20740, 美国)

**摘要:** 介绍欧洲、美国和中国的龙卷研究进展及其龙卷的时空分布特征, 包括对年变化、月变化及日变化等统计特征进行了回顾和比较分析, 并肯定了我国对龙卷的关注度及龙卷研究水平的逐步提升以及对未来龙卷的发展前景的展望。

**关键词:** 龙卷, 研究进展, 统计特征

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2018.02.001

## A Comparison of Statistical Characteristics and Research Progress of Tornadoes in China to that in Europe and USA

Wang Donghai<sup>1</sup>, Li Zhaohui<sup>2</sup>, Gao Zongting<sup>3</sup>, Liu Chongjian<sup>4</sup>, Zhu Jianjun<sup>5</sup>, Yan Lijun<sup>5</sup>, Du Jun<sup>6</sup>

(1 Guangdong Province Key Laboratory for Climate Change and Natural Disaster Studies, School of Atmospheric Science, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275

2 Weathernews American Incorporation, Norman 73072, USA

3 Institute of Meteorological Sciences of Jilin Province/Jilin Provincial Key Laboratory of Changbai Mountain Meteorology and Climate Change/ Laboratory of Research for Middle-High Latitude Circulation and East Asian Monsoon, Chuangchun 130062

4 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

5 Foshan Meteorological Bureau Foshan, Tornado Research Center, Foshan 528000

6 Environmental Modeling Center, NCEP, NOAA, College Park 20740, USA)

**Abstract:** In this paper, the research progresses of tornado in Europe, the United States and in China are overviewed and compared from a historical perspective. The statistical characteristics of tornado occurrence including its temporal (annual, monthly and diurnal) and geographical distributions are also described for the three regions. In recent years, China's attention to tornadoes and effort in tornado research is gradually increased and tornado research development is discussed.

**Keywords:** tornado, research progress, statistical characteristics

## 0 引言

一般说来, 龙卷往往产生于强对流风暴内部, 而强对流风暴发生在地球的各个地区, 所以龙卷可能发生在地球的每个角落。事实上, 除了南极洲以外, 每个洲都有龙卷发生的记录(南极洲也不能排除龙卷发生的可能性, 只是迄今尚无记录)。就全球而言, 最能为龙卷的产生提供有利环境条件的地域为中纬度地区, 大致为南北半球的 $30^{\circ}\sim 50^{\circ}$ , 通常为极地冷气团与副热带地区的暖气团在边界层相遇, 产生包括龙

卷在内的天气系统, 并产生强对流降水。另外, 由于中纬度气流在各层的方向通常具有差异性, 这就容易形成垂直风切变从而在风暴单体中产生小尺度涡旋系统。有趣的是, 龙卷频发区通常集中在人口较密集的地区, 北半球尤其突出, 其带来的自然灾害也格外令人瞩目; 另一方面, 正是由于强对流风暴带来的充足水分, 加之土地肥沃, 使得龙卷出现越多的地区, 也是农业上的高产地区。因此如何趋利避害, 至关重要, 从而也使得人们对龙卷的关注度与日俱增。

## 1 研究进展概述

### 1.1 欧洲龙卷研究进展

欧洲观测记录和研究龙卷的历史起步比较早, 而且曾有学者进行了回顾。例如, Antonescu等<sup>[1]</sup>曾对

收稿日期: 2017年11月7日; 修回日期: 2018年3月14日  
第一作者: 王东海(1965—), Email: wangdh7@mail.sysu.edu.cn  
资助信息: 国家自然科学基金项目(91437221, 41775097);  
吉林省重点科技攻关项目(20150204025SF)

整个欧洲龙卷进行了总结和概括。他们提到,古希腊是最早开始龙卷的气象观测和研究的国家。龙卷和水龙卷是当时自然哲学家们的一个很感兴趣的研究课题。在中世纪早期,很多学者认为龙卷是由于云内风速的转变而形成的。然而,关于龙卷的系统性研究始于17世纪,法国和意大利等不少学者开始对龙卷个例进行分析。当时最有影响力的人物是Roger Joseph Boscovich,他是原子理论的先驱,同时在航空学和测地学方面也有很多贡献。他对发生于1749年6月11日晚到12日凌晨最初出现在第勒尼安海上然后逐步移动到罗马内地的龙卷进行了为期3 d的灾情调研<sup>[2]</sup>。

18世纪末到19世纪初,在《科学》杂志上发表关于龙卷和水龙卷的文章数量呈现上升趋势。一位法国物理学家,也是热电效应的发明者Jeas Charles Athanase Peltier,1840年曾对龙卷和水龙卷的形成进行了研究,他收集了1456—1839年欧洲西部91个龙卷个例并对此进行气候学统计分析,可谓是欧洲龙卷气候研究的第一人<sup>[3]</sup>。1917年,德国气象学家Wegener<sup>[4]</sup>发表了关于龙卷的形成机理和气候学研究的经典文章《欧洲的龙卷和水龙卷》。他与当时美国的龙卷统计对比后认为,欧洲龙卷强度、发生概率以及破坏强度都不及美国龙卷。Wegener收集了欧洲1456—1913年的258个龙卷,组建欧洲龙卷数据库。其中有120个龙卷发生于1880—1913年,205个龙卷发生于欧洲西部地区。他不仅对龙卷的气候学感兴趣,对龙卷的形成机理也有一定研究,他提出的动力理论是当时唯一能解释龙卷现象的理论。Wegener在爱沙尼亚遇到了气象学家Johannes Letzmann,并激发出他对龙卷研究的强烈兴趣,特别是龙卷的低层风场。1918—1950年,Lsetzmann<sup>[5]</sup>通过收集大量欧洲龙卷的个例对龙卷灾情进行细致的调研、收集龙卷图片等方式对波罗的海区域的龙卷进行研究,并与德国气象学家Koschmieder合作出版了《龙卷现象的调研指南》<sup>[6-7]</sup>。

在1950年之前,由Wegener和Letzmann领导的欧洲龙卷研究可谓是位于世界前沿。他们的工作内容包括了龙卷的气候学统计、个例研究、灾情调研以及实验室的模拟研究<sup>[8]</sup>。当时美国对龙卷研究的兴趣还不如欧洲浓烈,但是到1950年以后,美国对龙卷的研究热情逐步高涨,而整个欧洲区域的龙卷气候学统计研究却停滞不前。

2000年以后,欧洲学者才又开始点燃龙卷研究的热情,很多国际会议上出现了龙卷等强风暴专题讨论会。2002年,在一次关于强风暴的欧洲会议上,强对流风暴和极端天气领域的一个权威专家Nikolai Dotzek

对与会的28个欧洲国家进行调研,统计欧洲每年龙卷发生的频率<sup>[9]</sup>。在调研以前,Wegener估计欧洲每年龙卷次数至少为100次,这次调研的统计结果显示欧洲龙卷和水龙卷总频率每年在329次左右。在很长一个时期以来,欧洲很多人还没有意识到龙卷带来的巨大威胁,所以很多气象局还没有龙卷预报。Rauhala等<sup>[10]</sup>展示了对欧洲的38个国家进行问卷调查后得知,在33个国家回复中,只有8个国家进行过龙卷预警。欧洲的第一次龙卷预警是1977年由荷兰发出的。2003—2006年,西班牙、德国、罗马尼亚、马尔他、土耳其以及爱沙尼亚都发过龙卷预警。

如今欧洲对龙卷的气候特征的理解来源于历史上对龙卷的报道、龙卷的个例研究以及当地的龙卷气候统计。以前,由于没有对龙卷进行持续的观测、报道和统计,很多人对欧洲龙卷的认识不全面。近几十年,由于公众对龙卷的关注度提高以及国家气象局对龙卷数据库进行更新,越来越多的龙卷得到关注,使得龙卷数据库越来越准确。近期,欧洲强天气数据库(European Severe Weather Database, ESWD)<sup>[11]</sup>已建成,从中可以了解到整个欧洲龙卷的时空分布特征。从公元0—2013年的9529个龙卷报道中,2006—2013年间欧洲平均每年龙卷发生频率为483次,从而可见近年来龙卷发生频率呈明显上升趋势。

## 1.2 美国龙卷研究进展

诚然,以全球范围而论,美国是龙卷最多的国家(其次是加拿大),每年记录到的平均龙卷数量已超过1000个。美国也是世界上受龙卷灾害最严重的国家,因此美国对龙卷的研究十分重视。纵观美国龙卷的研究历程,其研究内容主要包括对龙卷的早期观测、实验室模型及数值模式研究、理论研究、多普勒雷达研究以及本土外场观测仪器的发展。

对龙卷进行有规模的早期观测始于20世纪40年代末期的“雷暴计划”。1953年龙卷的钩状回波第一次在美国伊利诺伊州的雷达图像上被偶然的观察到。50年代末期以后,特别是在60—70年代,对龙卷观测最有代表性的人物是芝加哥大学的Ted Fujita(藤田哲也)<sup>[12-14]</sup>,他结合地面数据、龙卷图片以及龙卷灾害做了中尺度分析,提出了云墙、逗点云系等专有名词并一直沿用至今。他根据龙卷风速大小来描述灾害程度的龙卷等级指标Fujita scale(F-Scale),后期经过多方面的修定于2003年升级为EF-Scale。他还根据飞机航拍的龙卷灾情,发现地面倒伏物呈现圆形的轨迹,从而推断出多涡旋龙卷的存在。1977年Fujita就注意到风暴云中的下击暴流对龙卷的产生有着触发作

用。1961年5月4日, Nail Ward在全国强风暴计划中首次在俄克拉荷马西部成功追捕到龙卷, 由于当时通信较落后, 他只能利用座机电话来咨询预报部门以获取WSR-57雷达的回波演变情况。随后他根据观测经验推断出雷暴云母体的冷却出流对龙卷的产生有重要作用。1964年Keith Browning和Ealph Donaldson在描述1959年6月9日英国一次雹暴的文章中注意到雷达图像上存在回波空洞-穹窿, 这与龙卷或者强上升气流相关<sup>[15]</sup>。

为了了解涡旋系统(如龙卷)对地面的破坏性有多大, 美国成立了涡旋实验室, 主要关注与龙卷相关的破坏性。20世纪90年代中期, John Snow课题组不再使用烟雾示踪或者气味示踪, 而首次采用激光多普勒测速仪对龙卷风速进行无干扰的探测。

除了涡旋实验以外, 数值模拟也取得较大突破。首次在实验室进行涡旋系统的数值模拟研究的是NCAR的Rich Rotunno, 20世纪70年代末至80年代初他进行了不少数值模拟实验。后期, 西弗吉尼亚大学的学者采用大涡模拟, 成功模拟出与真实涡旋极为相似的特征。当时不管是实验室模型还是数值模拟都展示了旋转系数对涡旋系统的重要作用, 并能模拟出涡旋系统是如何消失的。

同时, 数值模式研究也快速发展起来。20世纪60年代初期, 不包含声波的复杂效应在内的非静力模式被用来模拟龙卷。70年代末期, 第一个无弹性不可压的三维模式被开发出来, 随后又开发出包含声波的三维可压缩模式(Klem and Wilhelmon模式), 并很快被应用到超级单体的研究中。在80年代早期和中期, NCAR的Morris Weisman和Rich Rotunno的研究工作堪称是最具影响力的。他们阐明了垂直切变和CAPE的重要性, 并解释了在风暴发展过程中由动力引起的垂直扰动气压梯度这一推论, 还用单向嵌套的Klem和Wilhelmon模式研究了超级单体低层涡旋的起源。在90年代中期, 向上扰动气压梯度重要性被发现并在三重嵌套的RAMMS模式中得到了验证。随后伊利诺伊大学和俄克拉荷马大学的学者运用超高分辨率模式对龙卷的涡旋进行逼真的模拟, 将分辨率尺度降到了12 m。Lewellen和他的合作者在对龙卷涡旋系统的模拟中还将水平分辨率降到2.5 m, 垂直分辨率降到1.5 m, 但是其模拟范围没有包括风暴母体。

对龙卷大量的理论研究始于20世纪70年代末期, 当时气象学者对涡旋系统进行了线性稳定性分析并解释了涡旋系统形成的物理机制, 指出在上空产生的涡管是如何向地面倾斜发展起来的。当时还存在一股试图解释龙卷风速的热潮。主要是通过静力学平衡来解释涡旋系统的地转平衡关系, 进一步解释龙卷内部的

最大风速特征, 同时也推断出龙卷内部出现下沉气流的原因与流体静力学热核有密切关系。80年代中期, 螺旋度被指出可使风暴更加稳定, 还指出其在涡度形成过程中的重要作用, 同时还深入地讨论了环境矢端弯曲度在对流风暴中的作用, 指出与对流风暴相关的螺旋度的大小取决于风暴的运动, 风暴的运动又取决于平均风速及其传播方向。自从Ted Fujita提出下击暴流在龙卷形成阶段起着重要作用后, 不少学者用理想模型研究了下击暴流的作用, 指出下击暴流在雨水伴随下对龙卷有触发作用, 原因是降水携带动量下传, 从而会使涡度加强。随后还发现超级单体的下沉反射率中心(descending reflectivity cores, DRCs)对龙卷的发生也起重要作用。

使用多普勒雷达来对龙卷进行观测研究始于1957年, 多普勒雷达连续波段(X波段)、脉冲C波段、S波雷达以及相控阵雷达等逐步在观测中用于监测超级单体中气旋风场切变信息。20世纪70年代初期, 龙卷涡旋被成功提取出来。随着双雷达观测网的建立, 80年代初期, 龙卷的热力学变量从双多普勒雷达分析出来的三维的风场综合信息中反演出来。当多普勒雷达数据成为分析龙卷超级单体这种风暴尺度风场的主要资料时, 龙卷的最大风速便直接从雷达数据反演出来, 而不再依赖于早期的图像分析或本土观测。

对强风暴的最早本土仪器观测是在1980年, 波动传播实验室设计了TOTO Tornado Observatory (TOTO), 这个仪器重400磅(约181.44 kg), 里面配有能测量温度、气压、露点温度和风速的仪器, 测量时需要将其放在龙卷将经过的路径上, 由于要准确估计龙卷路径存在很大的难度, 所以当时成功观测到龙卷的个例很少。20世纪80年代末期, 另一种观测龙卷的仪器Turtle被设计出来, 它较轻便且体积小, 容易在大范围内布点, 这增加了龙卷光顾仪器的机会。1988年, Turtle成功观测到俄克拉荷马境内的一次龙卷过程。但是由于Turtle太轻, 容易被龙卷破坏, 所以Tim Samaras就将Turtle与加固的龙卷气压记录器融为一体, 并于2003年6月24日成功记录到South Dakota的一次龙卷降压过程(降低了约100 hPa)<sup>[16]</sup>。另外, 在VORTEX外场试验中, 静止自动观测站Stationary Automated Mesonet (SAM)、便携式自动观测站Portable Automated Mesonet (如PAM-II)以及车载移动气象观测站Mobile Mesonet也逐步用于龙卷的观测, 成功获取到龙卷内部的温、压、湿、风等数据, 使得对龙卷钩状回波及其后侧下沉区地面层的热力和动力结构有了进一步的认识<sup>[17]</sup>。在2004年的风暴季节期间, 数值红外相机被用来拍摄龙卷及其云

强, 试图用它来分析云底的温度梯度。此外, 用无线电探空仪观测龙卷超级单体开始于1984年。光学经纬仪被用来定位气球位置随时间的变化, 以此来计算风速。20世纪80年代中后期, 用无线电探空仪测量的个例都较成功, 其中有的个例直接成功释放在龙卷超级单体的上升气流中。在80年代后期, 美国强风暴实验室(NSSL)开始释放CLASS探空, 这种便携式的探空利用LORAN导航信号来定位气球位置随时间的变化, 近期则改用GPS探空来获取强对流风暴周围及内部的探空数据。

### 1.3 中国龙卷研究进展

中国对龙卷的研究起步较晚, 而且步履艰难。究其客观原因无非是因通信、交通条件落后而缺乏必要的观测资料。因为龙卷是一种小尺度天气系统, 又是小概率事件, 需要靠积累长期的观测资料才能较好的研究。加之通信与交通的落后, 便无法深入实地进行调查, 致其研究长期处于“零打碎敲”的状态, 中国目前对龙卷的研究仍然处于起步阶段。20世纪90年代之前对龙卷研究主要围绕灾情的描述, 包括灾害现场地面倒伏物特征描述、龙卷的时空分布特征以及目击者描述龙卷出现时的风雨特征等方面, 同时还包括龙卷发生时简单的天气学分析以及雷达回波反射率分析<sup>[18-21]</sup>。20世纪90年代后, 随着观测设备的逐步完善, 特别是中国气象局从1998年开始建设的由S波段和C波段多普勒天气雷达构成的中国新一代天气雷达网的逐步完善, 结合车载X波段雷达和C波段雷达的应用, 使得龙卷等强对流风暴研究有一定的提高。另外加上常规气象观测资料、加密地面自动站观测资料、无线电探空仪等资料以及使用高分辨率的数值模式模拟等技术, 使得龙卷的研究得到大量开展, 进而逐步深入的分析龙卷的气候活动规律及时空分布特征, 以及有利于龙卷发生的天气尺度环流背景及中、小尺度对流系统的特征<sup>[22-39]</sup>。近年来, 由于方便快捷的手机等通讯设备的普遍使用, 使得越来越多的龙卷呈现于大众媒体上, 从而让公众对龙卷的关注度逐渐提高, 与龙卷相关的研究也因为个例的增多而增加<sup>[40-52]</sup>。在龙卷研究方面, 无人机的使用让龙卷灾情调研更加深入更加全面, 直观地将龙卷倒伏物特征以及受损等级展现出来, 从而使得龙卷的结构特征更清晰的表现出来。这方面比较突出的是佛山市气象局, 他们于2013年成立了佛山市龙卷风研究中心, 随后布设了4部X波段双偏振雷达, 其时间分辨率不到1 min, 空间分辨率为75 m, 使得佛山区域不仅有广州S波段雷达的覆盖, 还增加了佛山区域低空高时空分辨率双偏振雷

达的覆盖, 从而弥补了S波段雷达因仰角而产生的近地面盲区。另外, 佛山地区的6要素的地面自动站网也非常密集, 其平均距离为4.3 km, 主城区密集地方可达到2 km, 高密度的自动观测设备能更高概率的观测到龙卷及其周围环流的温、压、湿、风等气象要素的演变。2015年10月4日佛山发生EF3级龙卷, 其地面自动站就清楚地记录到了龙卷整个路径上的气旋性环流的演变特征<sup>[44]</sup>。

范雯杰等<sup>[48]</sup>对中国2004—2013年的龙卷进行统计后发现, 广东佛山是出现EF1级或以上的龙卷次数最多的地级市。龙卷发生与地形有密切关系, 除了地形平坦外, 江河湖泊、沿海等地区对强龙卷生成也有一定的促进作用, 特别是喇叭口地形容易生成强对流天气, 也能促发龙卷的生成。佛山市地处东亚大陆的边缘、毗邻南海, 属于亚热带季风性气候。由于受季风、热带气旋以及珠江口附近喇叭口地理地貌影响, 佛山强对流天气多发, 是华南龙卷气象灾害高发区。佛山的龙卷近几年发生频率较高, 最近10年龙卷的发生频率平均为每年2.0次。

魏文秀等<sup>[22]</sup>对中国1980—1993年的龙卷分布进行统计后指出, 中国有两个龙卷多发带, 一个是自长江三角洲经苏北平原至黄淮平原, 另一个是在广东和广西。近期范雯杰等<sup>[48]</sup>对1961—2010年全国记录到的EF2级以上的165次龙卷的发生地进行统计后发现, 江淮流域、华南、东北和华北地区东南部等地形平坦地区为龙卷高发区。可见, 龙卷多发地多集中在水源丰富且较平坦的地区, 从东北平原到江淮地区再到华南地区。

朱红蕊等和姚俊英等<sup>[49-50]</sup>对黑龙江1956—2011年共发生的229次龙卷事件进行统计分析得到, 此地区龙卷强度主要集中在F0和F1级, 比例为龙卷总个数的95.6%, 从未出现过F4级以上龙卷。一年中龙卷主要集中在夏季, 以7月最多, 且多出现在午后至傍晚; 龙卷在空间分布上有明显的地域特征, 山区很少或不发生, 松嫩平原腹地是龙卷高发地带, 其中绥化地区出现的次数最多; 不稳定的天气形势场是龙卷产生的基础, 暖湿气流的输送和冷暖空气的强对流运动为龙卷的产生提供了有利条件。王秀明等<sup>[51]</sup>进一步对近年来东北地区13个龙卷个例进行综合的天气要素分析后发现, 东北龙卷多发生在东北冷涡背景下, 直接影响系统为冷涡后侧伴随干侵入的横槽等次天气尺度扰动, 且常出现在槽区或前倾槽后; 较之夏季江淮流域和华南龙卷, 东北龙卷环境温度直减率较大; 低层水汽含量及湿层厚度相较于江淮及华南龙卷显著偏低。拥有较强的高低空垂直风切变(0~6 km深层风

垂直切变超过 $4 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ,  $0 \sim 1 \text{ km}$  风垂直切变大于 $10 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ) 以及较干的低层环境场, 有明显的低空急流和干线, 风暴抬升触发系统常为干线及其伴随的边界层强辐合。东北龙卷多发生在傍晚前后, 其环境参量08:00—20:00的12 h内变化显著: 500 hPa风速平均增幅达 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 低空风速和水汽亦显著增大。层结不稳定(明显的对流有效位能)是由温度直减率大值区东移和低层湿舌西伸北扩至二者叠置造成。其环境与发生在美国中南部大平原地区有利于强对流环境的形成非常类似, 只是范围要小得多。

江淮地区的龙卷以苏北、皖北为中心, 主要发生在梅雨期间, 并且常伴随强降水及冰雹等。龙卷发生的大尺度环境场受副热带高压外围西风槽前的偏南气流影响, 低空急流盛行, 并有充足的水汽条件,  $0 \sim 6 \text{ km}$  深层风垂直切变超过 $3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ , 对流有效位能通常较高<sup>[23-26, 30-39]</sup>。曾明剑等<sup>[52]</sup>对江淮梅雨期间龙卷的环境条件进行了综合分析, 指出梅雨期大气环流背景为龙卷的发生提供了对流层低层充沛的水汽和有利的不稳定层结与动力条件, 低层气旋性涡度在龙卷发生前强烈发展, 边界层内强的垂直风切变促进了龙卷风暴内气旋性涡度的迅速增强, 而对流层低层辐合的增强有利于初始对流的触发; 龙卷的易发区位于地面中尺度气旋的右侧100 km附近、对流层低层中尺度低涡右下方约200~300 km处和低空急流左后侧之间区域。

华南地区强龙卷超过一半发生在台风外围环流中, 属于浅对流龙卷, 或者微超级单体龙卷, 其对流发展高度相对于超级单体龙卷而言较低。华南前汛期也会在冷暖空气交汇形成的对流系统中出现F2级以下

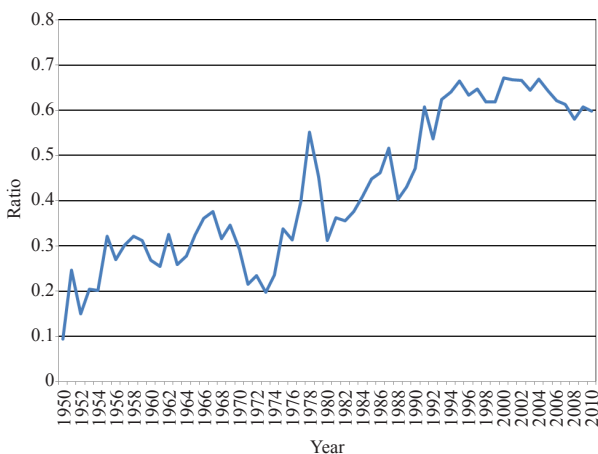


图1 1950—2010年 ( E ) F0级龙卷占总龙卷的比例<sup>①</sup>  
Fig. 1 Ratio of (E) F0 tornado reports to total reports for 1950-2010

的小龙卷, 有时也有非中气旋龙卷发生。台风外围龙卷通常都发生在台风环流的东北象限, 其发生的环境条件通常都伴随着充沛的水汽和较强的低空急流, 中低层伴有明显的辐合区和正涡度区。另外, 抬升凝结高度低, K指数以及强天气威胁指数大, 中低层的垂直风切变较明显, 对流有效位能要求不高, 这些都是台风龙卷伴有的特点<sup>[27-30, 32, 40, 43-44]</sup>。顺便提下, 在美国的飓风龙卷研究中有类似的特点, 他们强调热带气旋低层强的垂直风切变是产生龙卷的重要因素<sup>[53-54]</sup>。

## 2 龙卷的若干观测研究结果及其统计特征分析

### 2.1 美国龙卷

#### 2.1.1 一般特征

早在1887年, 美国学者John Park Finley出版的*Tornadoes*一书对龙卷气候特征进行了统计研究, 促进了龙卷的研究。但是由于早期的美国中部大平原人口稀少, 很多较弱的龙卷由于无人发现而没有被记录到。如今, 随着人口的增长, 对龙卷关注度的提高以及雷达的大范围覆盖使得龙卷的统计误差越来越小。逐步完善的龙卷观测使得越来越多的弱龙卷被捕捉到, 弱龙卷占总龙卷的比例也呈现增高趋势(图1)。尽管如此, 也有一些小龙卷会因为无人发现而没有被记录到。所以, 在分析历史统计的弱龙卷时, 要注意到这方面给弱龙卷数量带来的影响。另一方面, 通过观察EF3级及以上的强龙卷的统计特征, 其实并没有太明显的增加的趋势(图2)。通常美国大部分龙卷强度都较弱, 有77%左右的龙卷强度在EF0~EF1, 而95%左右的龙卷强度都在EF3级以下,

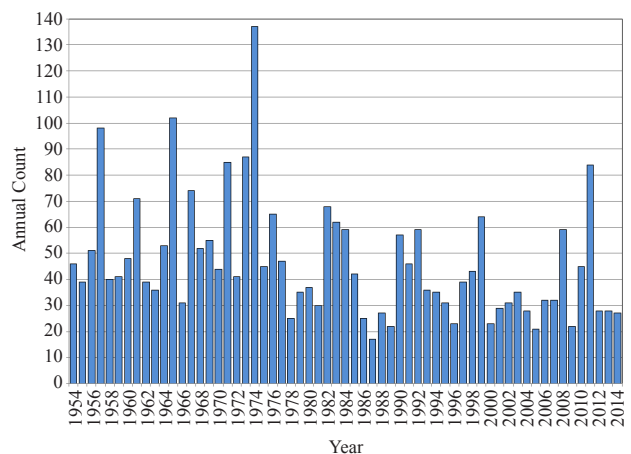


图2 1954—2014年EF3及以上强龙卷数量统计特征<sup>②</sup>  
Fig. 2 Annual count of strong to violent tornadoes (F3+) for 1954-2014 in USA

① <http://www.ncdc.noaa.gov/oa/climate/severeweather/tornadoes.html>.

② <https://www1.ncdc.noaa.gov/pub/data/cmb/images/tornado/clim/EF3-EF5.png>.

EF5级超强龙卷比例只有0.1%，相当于，若美国每年有1000个龙卷发生，其中只有20个龙卷达到EF3，而大约只有1个龙卷强度级别达到EF5。

### 2.1.2 美国龙卷的出现时间及地域特征

由于大部分龙卷与雷暴的强度有关，而雷暴的能量来自于太阳加热水汽凝结的潜热释放，因此，多数龙卷出现在下午和晚上（图3）。再者，由于大气向外辐射，凌晨温度最低，所以龙卷的出现概率最低。但是，龙卷会发生一天之中的任何时间。

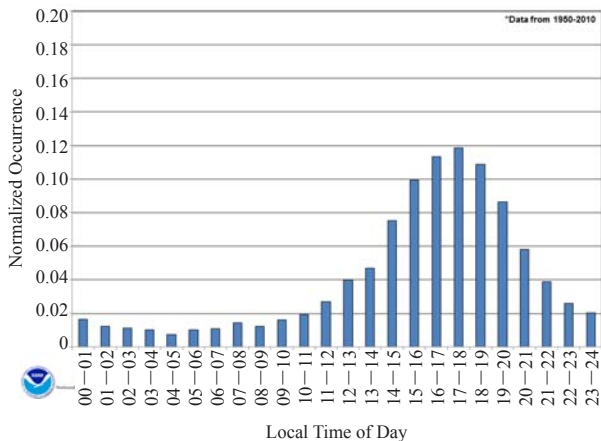


图3 1950—2010年美国龙卷出现的日变化统计特征<sup>①</sup>  
Fig. 3 Daily changes of tornado occurrence for 1950–2010 in USA

另外，美国龙卷也会在全年中的任何一天出现，所以很难定义真正意义上的“龙卷季节”。当太阳加热和强的锋面系统到来时，往往引发龙卷产生。从地域上而言，龙卷频率的高低与暖季经常出现的冷暖气流相遇有密切关系。在春季初期，龙卷出现在美国东南部与中南部地区。2—4月，墨西哥湾区附近的几个州，如密西西比州和路易斯安纳州较易出现龙卷。晚春时，龙卷向北部延伸，堪萨斯州，内布拉斯加州和田纳西州易出现龙卷。夏季，美国全国各地都有龙卷出现的可能，但“龙卷走廊”地区尤其活跃。夏末，强龙卷易发生在美国中西部以及俄亥俄州。随着秋季到来，龙卷易发区又移回到南部地区。相对而言，冬季是龙卷发生最少的季节，但不排除致命龙卷的出现（图4和图5）。

### 2.1.3 美国中南部及东南部龙卷的季节气候特征

在美国，有两个龙卷高发区，一个是佛罗里达州，另一个是美国中南部的“龙卷走廊”。

佛罗里达半岛的龙卷发生总数最多，但是F3级

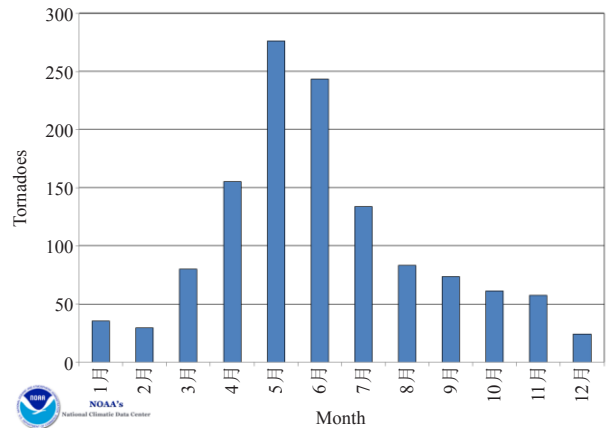


图4 1991—2010年美国龙卷各月出现的平均个数<sup>②</sup>  
Fig. 4 Monthly average number of tornadoes for 1991–2010 in USA

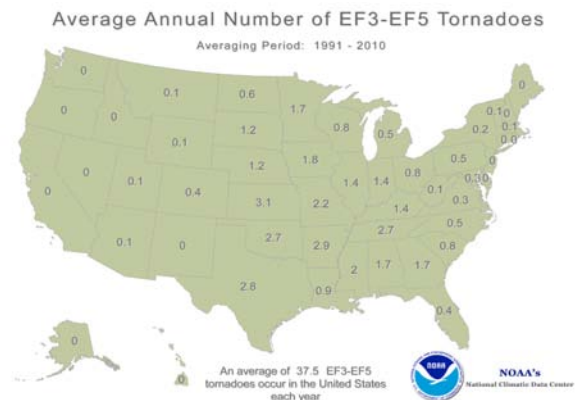


图5 1991—2010年美国各州年平均强龙卷（EF3—EF5）发生个数分布图<sup>③</sup>  
Fig. 5 Distribution of average annual number of EF3–EF5 tornadoes in States of USA for 1991–2010

以上的强龙卷的数量最少。东南内陆F3级以上的强龙卷数量最多，其次是墨西哥湾沿岸，它的龙卷总数量也是第二。季节分布上，春季墨西哥湾沿岸和东南内陆地区龙卷数量最多，其次是11月和12月，这主要是由于墨西哥湾的暖湿气流以及上空的急流存在。墨西哥湾沿岸强龙卷高发期除了春季外，12月也较强。亚特兰大地区出现龙卷高发期的时间稍迟，从春季到初夏，11月和12月的第二高峰不如前二者明显，包括佛罗里达地区也是。但是佛罗里达地区的龙卷数量夏季最多，其中6月数量最多，其次是5月、7月和8月，强龙卷在冷季数量很少，出现龙卷时空风较强。墨西哥湾区和东南内陆龙卷出现次数多是因为有适合生命史较长的超级单体风暴的环境条件，如：环境场有强

① [https://www1.ncdc.noaa.gov/pub/data/cmb/images/tornado/clim/US\\_nationa\\_timeofday.png](https://www1.ncdc.noaa.gov/pub/data/cmb/images/tornado/clim/US_nationa_timeofday.png)

② [https://www1.ncdc.noaa.gov/pub/data/cmb/images/tornado/clim/tornadoes\\_bymonth.png](https://www1.ncdc.noaa.gov/pub/data/cmb/images/tornado/clim/tornadoes_bymonth.png)

③ <https://www1.ncdc.noaa.gov/pub/data/cmb/images/tornado/clim/totavg-ef3-ef5-torn1991-2010.gif>

的垂直风切变<sup>[55]</sup>，或者风暴相对螺旋度较高。佛罗里达夏季龙卷发生的优势与强的中尺度强迫有关，与海风环流相关的中尺度强迫通常又与边界层系统如雷暴出流相互作用。这类龙卷起源于非超级单体风暴，因此强度较弱，生命史较短<sup>[56]</sup>。但是这种龙卷触发机制是否与科罗拉多州东部的非超级单体龙卷触发机制类似还有待商榷<sup>[57]</sup>。佛罗里达的龙卷大多数是由白天高频率的雷暴引发的，另外，每年都有一些热带风暴和台风影响佛罗里达半岛，其雨带中的对流风暴在向海岸移动的过程中经常产生龙卷，但其强度相对于那些非热带雷暴系统引发的龙卷而言要弱很多。

“龙卷走廊 (Tornado Alley)” (图6a) 是一个昵称，指美国中南部平原持续出现的一个龙卷高发区。在这地区的龙卷主要出现在晚春，少部分出现在初秋。美国强龙卷(EF3及以上)出现的几率相对于EF3

以下的龙卷要小很多，尽管如此，从1921—1995年的龙卷统计研究得出，约25%的强龙卷都发生在龙卷走廊地区。龙卷走廊的具体边界根据不同的标准(概率、密度以及单位面积上的发生次数等)有所不同，但主要区域位于美国中部大平原一带，如得克萨斯州、俄克拉荷马州、堪萨斯州以及内布拉斯加州。这一带拥有适合超级单体雷暴发生的气象条件，如高空盛行偏西急流，低层的东南面有来自墨西哥湾区的暖湿气流，西南面有来自新墨西哥州的干暖气流，北面有翻越落基山脉南下的干冷气团，不同性质的气团在此相遇，强的对流不稳定触发出锋面、飚线等系统，由此引发EF2级或以上的强龙卷。值得一提的是，墨西哥湾沿岸地区通常在深秋，主要是10—12月，出现龙卷的概率较高，因此获得一个昵称为“迪克西走廊 (Dixie Alley)” (图6b)。

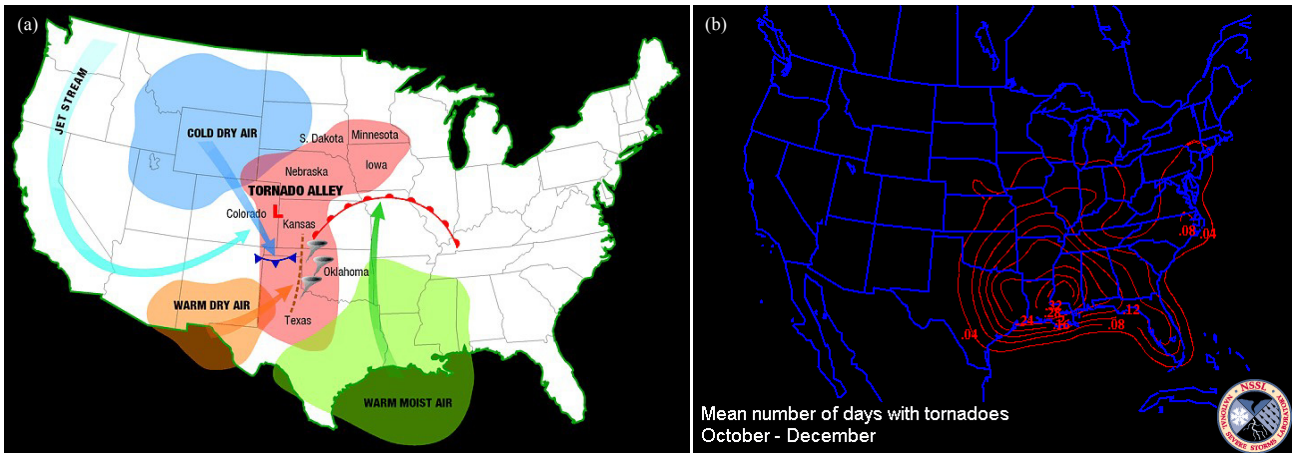


图6 龙卷走廊示意图 (a)<sup>①</sup> 和迪克西走廊 (b)<sup>②</sup> (等值线为10—12月龙卷发生的平均日数)

Fig. 6 The location of Tornado Alley and Dixie Alley (contours denotes mean number of days with tornadoes for October to December)

## 2.2 欧洲龙卷

### 2.2.1 欧洲龙卷的统计特征

Antonescu等<sup>[1]</sup>根据1800—2014年间通过对欧洲龙卷数据库的统计以及经过同行评审后发表的文章中的龙卷进行的统计，得到了整个欧洲范围内30个国家的龙卷的时空分布的统计特征。

欧洲大部分地区(79%)对龙卷强度统计采用F-scale，有21%地区采用T-scale，T-scale是英国一个自愿者组织TORRO (Tornado and Storm Research Organization) 发展起来的<sup>[58]</sup>，他们认为欧洲的龙卷相较于美国龙卷偏弱，所以T-scale有着比F-scale更详细

的级别划分。为了便于统计，将T-scale以 $F=0.5T$ 的关系转化为应用更广泛的F-scale。欧洲有74.7%的龙卷强度属于弱龙卷(F0~F1)，24.5%属于F2~F3，只有0.8%属于极强龙卷(F4~F5)。但是由于F0龙卷的生命史短、路径短，所以容易忽略而导致其统计数量偏少。欧洲东部和西部的龙卷大多属于超级单体龙卷，欧洲南部和北部的龙卷还包括非超级单体龙卷。

### 2.2.2 欧洲龙卷的年变化特征

在19世纪前期，在16个欧洲国家中统计到的龙卷个数是403，主要出现国家是英国、法国和德国，位于偏北的瑞典也有过龙卷的报道。19世纪后期，欧

① National Severe Storms Laboratory and National Weather Center.

② <https://www.ncdc.noaa.gov/sites/default/files/DixieAlleyOct-Dec.gif>.

洲有21个国家报道过龙卷,其总数为900个,主要出现国家是英国、德国、法国和西班牙。20世纪前期,有25个国家报道过龙卷,其总数为1456个,其中50%出现在英国、德国和西班牙。此期间的两次世界大战(1914—1918年,1939—1945年)对龙卷数量的统计有很大影响,在战争期间只有很少的龙卷报道。战后的20世纪后期,龙卷数量快速上升,30个欧洲国家报道过的龙卷总数是3177,其中56%来自于英国、德国和意大利等发达国家。当时,像捷克、罗马尼亚等东欧国家还处于社会主义时期(1948—1989年),龙卷一词被官方禁止使用于气象报道和大众媒体报道中,他们那时认为龙卷仅仅局限于美国中部平原,对于超出45°N的区域由于科氏效应太弱而不会出现龙卷,因此即使当时真的有龙卷出现,也被记录成大风或是当成错误记录<sup>[59]</sup>。2000年以后,由于欧洲强天气数据库ESWD的建立、大众对龙卷的意识提高以及手机等通讯技术的发展,使得龙卷报道的数量在15年内就已经上升到3627个(表1)。由此可推测出,早期存在很多未报道的龙卷,使得统计的龙卷数量远远低于现在<sup>[60]</sup>。由于各个时期龙卷数量呈现出较大的差异,使得整个欧洲龙卷的年平均数量只有72个。这相对于每年有超过1000个龙卷的美国而言相差甚远。

表1 欧洲各时期龙卷统计个数  
Table 1 Annual distribution of tornadoes in Europe

统计年份	1800—1850	1850—1899	1900—1950	1950—1999	2000—2014
龙卷个数	403	900	1456	3177	3627
平均每年龙卷个数	8	18	29	63	242

### 2.2.3 欧洲龙卷的月变化特征

对龙卷的月变化而言,欧洲龙卷全年都有发生,大部分地区龙卷高发期在6—8月,11月至次年3月龙卷出现概率最小。东欧龙卷高发期是晚春到夏末,如罗马尼亚和匈牙利龙卷高发期位于5—9月,而最多出现在5月;西欧、中欧和北欧的龙卷高发期是盛夏。西欧龙卷的出现与当地季节性陆面不稳定和雷暴有密切关系,使得龙卷高发期位于在6月和8月<sup>[61-62]</sup>;北欧的芬兰,龙卷高发期是7月和8月,瑞典高发期位于8月<sup>[63]</sup>。而英国和爱尔兰则整年都有龙卷发生,其高峰期位于5—10月<sup>[64]</sup>。南欧龙卷高发期晚于其他地区,出现在8—11月,如意大利的龙卷高峰期8月,地中海西部的西班牙高发期则是秋冬季<sup>[65]</sup>(8—11月)。南欧由于阿尔卑斯山脉的阻挡而形成截断低压,大量暖湿水汽被输送到山区,从而发展为龙卷生成的有利条件<sup>[66]</sup>。

### 2.2.4 欧洲龙卷的日变化特征

欧洲大部分龙卷发生在中午和下午,西欧和南欧龙卷高峰期主要集中在11—17 UTC,北欧和东欧主要集中在13—15 UTC。而基于欧洲强天气数据库(ESWD)库<sup>[11]</sup>的统计,龙卷高发期位于下午近晚上这段时间,而由于夜间户外活动较少,大部分人都已睡觉休息,从而没有觉察到龙卷的出现,使得龙卷低发期位于21至次日07 UTC。学者Dessens等<sup>[67]</sup>认为龙卷的出现高峰与下午的太阳加热有关,他们观测到位于西欧的法国龙卷在11月到次年3月多出现在中午时段,4—10月多出现在下午,其中F2级以上的龙卷多出现在16—17 UTC。从他们收集统计的龙卷数据库中也包括了20个夜间龙卷,他们认为这应该与强天气系统或锋面系统引发的雷暴密切相关。东欧地区如捷克共和国、波兰、罗马尼亚等白天龙卷出现高峰是在15 UTC<sup>[68-69]</sup>。同样,北欧如芬兰的龙卷出现于15:00—16:59 UTC,他们认为这与太阳引起的热力效应有关,其中强龙卷出现的时间偏晚。英国从春季到秋季(3—11月)龙卷日变化的高峰都出现在下午,但是冬季日间和夜间龙卷出现概率相当,这与冬季白天时长变短以及太阳加热效应减弱有关。

## 2.3 中国龙卷

### 2.3.1 中国龙卷的统计特征

范雯杰等<sup>[48]</sup>等根据《中国气象灾害大典》《中国气象灾害年鉴》等资料,对1961—2010年以及2004—2013年间的中国龙卷进行了统计,很好地展示了此期间龙卷的时空分布、发生频率和灾害特征。统计结果显示,1961—2010年共记录到165次强龙卷(此处指藤田级别EF2及以上强度的龙卷),EF2级龙卷有145次,EF3级16次,EF4级4次。这50年的强龙卷平均发生次数为3.3次。2004—2013年这10年间共记录到143次EF1及以上的龙卷,其中EF1级龙卷共121次,EF2级19次,EF3级3次。对两个时段的龙卷发生频率进行比较后,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,这不及美国龙卷发生频率的十分之一。

1961—2010年,强龙卷高峰期位于1986—1990年,5年EF2龙卷次数达到28次。随后龙卷数量呈下降趋势。而对于龙卷的月变化而言,中国龙卷高发期从春夏季持续到初秋,即4—8月,7月最多,10月到次年2月最少(图7a)。但是不同地域有不同特征,如广东、江西和湖南等南方,强龙卷集中在4—5月发生,而江苏、安徽、河南和山东等地多发生于7—8月。

而龙卷的日变化高峰出现在中午到傍晚，即本地时间的12:00—20:00（图7b），此时正处于太阳辐射加热后，大气不稳定而导致强对流天气的易发期。

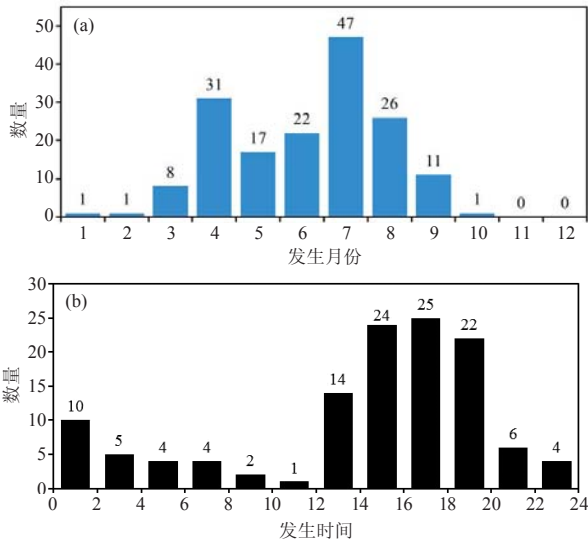


图7 1961—2010中国EF2或以上级龙卷发生数月变化 (a) 和日变化 (b) [48]

Fig. 7 Monthly average of tornado number (a), and hourly average of tornado number(b) in China for 1961–2010 [48]

从整体空间分布看，中国龙卷高发区位于长江中下游的江苏、安徽、湖南等省，江苏省最多，11年间有30次龙卷记录，平均一年2.7次。安徽有12次龙卷发生。EF2级以上的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。但是EF0~EF1级龙卷由于其生成条件相对容易满足而导致其发生概率较高，西部地区也有可能发生。

### 2.3.2 触发龙卷的影响系统及天气形势

触发龙卷的天气条件通常包括包含以下几类：对流不稳定、低层水汽辐合、局地的抬升机制（锋面，地形等）、高低层急流、垂直风切变强和潜在的中层冷空气等。而在中国龙卷高发的东北平原地区、江淮流域以及华南地区，有利于龙卷触发的天气形势又各具特色。

对于东北平原，有利的天气形势包括：

1) 东北冷涡或蒙古冷涡：当东北冷涡出现时，东北平原白天出现雷暴的几率较大。冷涡的南部伴随着明显的低槽，当其槽前南支急流位于东北平原上空，低层又配有中尺度系统时，强雷暴及龙卷的发生几率较大。

2) 副热带气旋：发生于副热带气旋的暖区，700 hPa和500 hPa为一较强的低值系统，低层有强水汽辐合、水平和垂直切变以及不稳定层结。

对于江淮流域，特别是长江中下游而言，有利的天气形势有：

1) 副高外围的南支气流：低压槽引导的南支气流位于副高西侧时，地面伴随着中尺度系统（闭合低压系统或者边界层辐合），外加上充足的水汽，是龙卷发生的优良条件。

2) 静止锋：当长江中下游平原地区的锋面边界层逐渐静止，850和700 hPa伴随着强劲的南支气流，气旋波动则会在准静止锋上部逐渐发展，从而导致龙卷风暴产生。

3) 台风：当台风从福建省向北移动并逐渐减弱，其北部位于长江下游的平原地区上空时，低层则存在气旋式切变，东南与东北气流形成辐合线，外加上700 hPa有干冷空气时，层结变得不稳定，从而有利于龙卷生成。

4) 副热带气旋：龙卷发生在副热带气旋的暖区，此处有丰富的水汽条件，850 hPa湿轴位于冷锋前。这与美国经典龙卷天气相似，中层有干冷空气，高低层都有急流存在。

5) 锋前飚线：强冷锋从北部南下到长江流域平原地区时，龙卷可能伴随飚线出现，特别是当锋面靠近已经存在的中尺度边界层辐合时，龙卷出现概率很高。

对于华南地区，有利的天气形势主要有：

1) 台风：当台风登陆后向西北方向移动并逐渐减弱，其第一象限位于华南地区上空时，低层存在气旋式切变，东南与东北气流形成辐合线，外加上中低层有干冷空气时，层结变得不稳定，从而有利于龙卷触发生成。

2) 锋面或飚线：当偏南气流与冷空气相遇而引发锋面或飚线系统时，其不稳定能量高，容易在飚线中出现龙卷。

### 2.3.3 中国近几年典型龙卷个例概述及比较

近年中国龙卷频发，有的强度较弱，仅EF0到EF1级，生命史仅几分钟，也有的强度较强，达到EF3或EF4级，生命史持续30~50 min。无论从出现地点或形成机理看，个例之间的差异很大，下面列出的仅是其中比较典型的个例，更多的例子可参阅本期龙卷专辑的其他有关文章。

1) 台风引发龙卷

受1522号台风“彩虹”外围螺旋云带中的对流系统影响，2015年10月4日15:28—16:00（北京时间）广东佛山出现了EF3级强龙卷并伴随着降水。此次龙卷发生在台风登陆减弱期间，位于台风前进方向的右前方，即东北象限，触地时长为32 min，受灾路径

长度为31.7 km，最大灾情直径为577 m（图8），平均速度约为 $60 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ，具有“移动速度快，影响范围广，破坏力强”的特点。幸运的是，此次龙卷过程有大量的目击者拍摄到龙卷视频和照片，其间还捕捉到多涡旋龙卷（图8b1）、卫星龙卷（图8b2），以及龙卷翻越80多米高的一处楼盘后涡管中断后再

次触地继续向前移动（图8b3）等精彩瞬间。龙卷在其经过的路径上造成了不同程度的灾情（图8a1~8a3），雷达回波上也表现出明显的钩状回波和正负速度对（图8b~8g）。

2) 海风锋引发龙卷

受中尺度海风锋辐合线触发，2016年6月5日

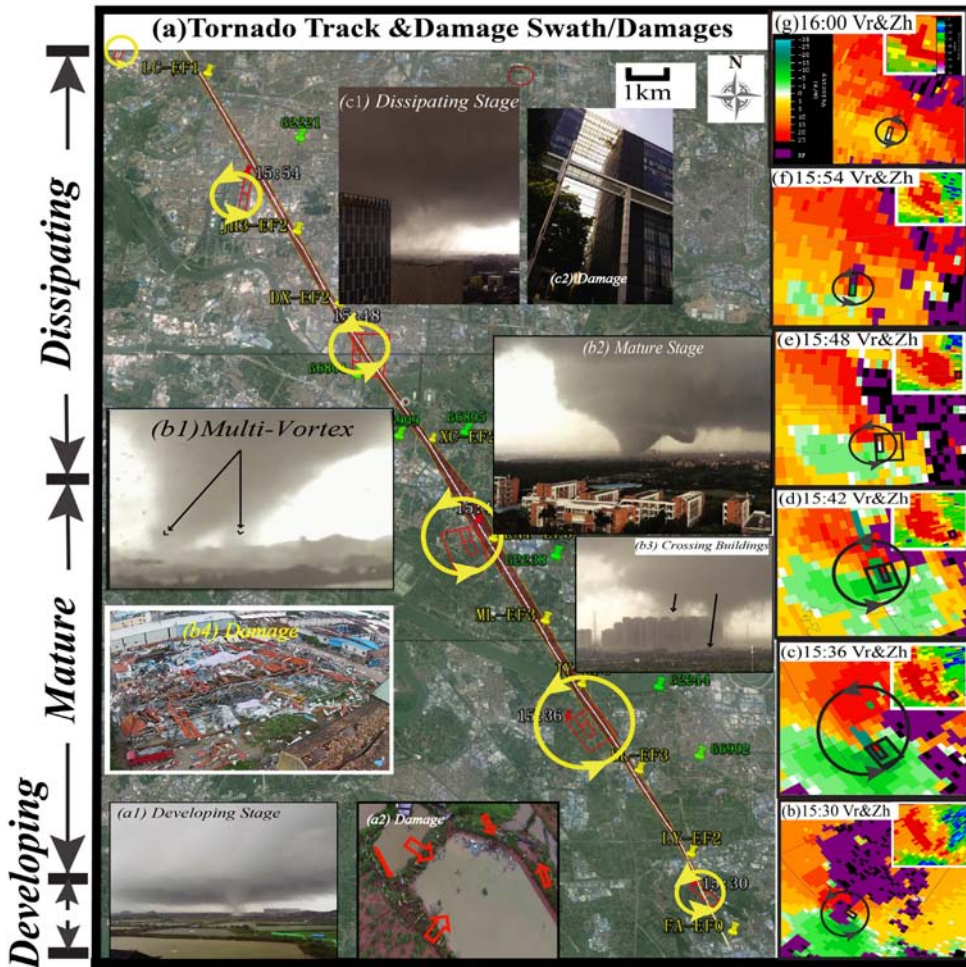


图8 (a) 为2015年10月4日佛山龙卷路径 (白色实线) 及其灾情影响范围 (红色阴影) 和灾情图片, 底图来自谷歌地球卫星影像图。(a1), (b1)~(b3), (c1) 为分别为龙卷初生、成熟、消亡阶段的形态图, (a2), (b4), (c2) 分别为龙卷初生、成熟、消亡阶段地面灾情图; 图中6个带箭头的黄色圆为15:30—16:00 (间隔6 min) 广州番禺多普勒雷达 (距离佛山24 km)  $0.5^\circ$  仰角径向速度图中中气旋 (Meso-Cyclone) 所在位置, 其中相邻两个红色小矩形为正负速度对所在位置, 大矩形为当时次钩状回波的最大回波反射率 (c), (d) 和 (e) 右上角小图) 所在位置; (b) 15:30, (c) 15:36, (d) 15:42, (e) 15:48, (f) 15:54, (g) 16:00 为广州雷达 $0.5^\circ$  仰角径向速度 Vr, 其右上角小图为当时次 $0.5^\circ$  仰角的回波反射率因子 Zh, 图中的圆圈和方形标记与 (a) 中一致; (a) 左侧为龙卷的3个阶段示意图, 地图的方向 (指北针) 和标尺位于图右上角

Fig.8 (a) Tornado track (white solid line) and damage swath (red shading) on 4 October 2015 in Foshan, the satellite map is from Google Earth. (a1), (b1)–(b3), (c1) for the stages of developing, mature and dissipating respectively, and (a2), (b4), (c2) the damage picture for above mentioned 3 stages respectively. The six yellow circles with arrows denote the location of Meso-Cyclone during the period from 15:30 to 16:00 BT, observed by a  $0.5^\circ$  PPI of the Guangzhou Doppler Radar. The two neighboring rectangles represent the inbound and outbound velocity couples, while the bigger rectangles represent the maximum reflectivity in the hook echo at 15:36, 15:42 and 15:48 BT respectively. (b) The radial velocity Vr and base reflectivity Zh (upper-right insets) by the 0.5 degree PPI at 15:30, and at 15:36 (c), at 15:42 (d), at 15:48 (e), at 15:54 (f), at 16:00 (g) BT respectively. The circles and rectangles indicate the same meaning as in (a). The three stages of the tornado life, the developing, mature and dissipating stages, were marked on the left side, and the map direction and the scale were given in the upper-right corner in (a)

15: 12—15: 27 (北京时) 海南省文昌市出现一次EF2级龙卷。此次龙卷由海风锋触发后, 向西移动并受到由西向东移的雷暴(图9c1左侧)的外流边界影响而加强, 生命史持续时间15 min, 受灾路径长3.65 km, 最大灾情直径205 m(图9)。龙卷路径由于后期与雷暴系统合并而发生转折(排田村东侧处), 最后移动到湖面消失, 推测这应该与下垫面温度变化有一定关系。此次龙卷过程亦收集到不少目击者拍摄到的照片和视频, 从图9a1~9a4可以看出龙卷涡管逐步触地、发展并加强的过程。图9c~9d可看出此次龙

卷过程也出现了明显的钩状回波和正负速度对。图9d表明此时龙卷超级单体已经与西侧的雷暴系统合并, 其移动路径已经发生了转折。通过现场的灾情调研发现, 此次地面的灾情指示物倒伏流场沿龙卷前进方向呈现明显的辐合分布, 反映出龙卷存在强烈上升运动, 使得地面周围的气流向龙卷中心辐合。此次过程虽然造成了椰子树等大量树木连根拔起及拦腰折断、屋内内墙倒塌, 可以定为EF3级, 但是鉴于屋舍已经存在几十年, 不是很坚固, 所以将此次龙卷级别酌情定为EF2级更合适。

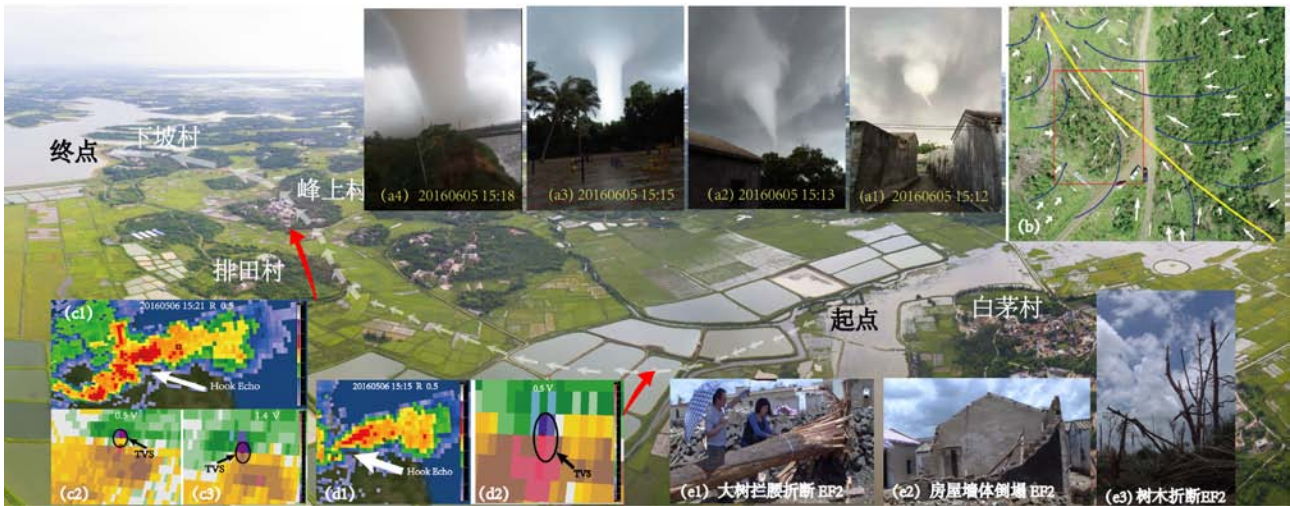


图9 2016年6月5日海南龙卷路径(白色虚线箭头)及形态图(a1~a4)、地面灾情指示物倒伏的流场分布(b)、雷达反射率回波及径向速度图(c~d)及地面灾情照片(e1~e3);(底图为无人机所拍的照片)

Fig. 9 (a1-a4) The tornado track (white dashed arrows) and image on 5 June 2016, in Hainan; (b) The fall pattern of the surface damage indicators; (c-d) The base reflectivity  $R$  and radial velocity  $V$  observed by the 0.5/1.4 degree PPI; (e1-e3) Surface damage image (The back ground picture was taken by an unmanned drone)

### 3) 超级单体引发龙卷

受副高西侧西南气流中的强降水超级单体的触发, 2016年7月23日14: 10—15: 00江苏省盐城市阜宁县出现一次EF4级强龙卷。这是江苏省历史上第二次出现EF4级强龙卷。本次龙卷过程伴随着强降水, 其移动路径较直, 全长约33 km, 持续时间为50 min左右, 最大灾情直径为4.45 km(图10), 对地面的破坏程度相当严重, 大量树木连根拔起, 拦腰折断, 还发现树干被剥皮的现象, 多处电线杆及高压线杆折断或扭曲倒塌, 大量民舍受到不同程度的损毁, 有的内墙倒塌, 有的全部倒塌, 还发现大量飞射物, 如多辆汽车、集装箱等被抛出数百米远(图10a1~10a8)。龙卷路径表现出从外向内龙卷灾情等级不断增强(EF0~EF4)的特点。此次龙卷由于其直径大, 发生时伴随着强降水, 所以没有收集到目击者拍摄的龙卷形态照片, 从搜集到的视频发现龙卷已经进入消散

阶段, 只能看到空中有杂物做螺旋状飞舞。从雷达反射率的三维结构形态图可以看到龙卷超级单体形态(图10b), 并且也能看到龙卷的钩状回波和强的正负速度对(图10c1~10c4)。

### 4) 热力差异引发龙卷

由于午后陆面受热不均, 2016年7月30日15: 16—15: 23(北京时)广东省湛江市徐闻县出现一个高200 m左右的红色龙卷(图11a), 因其卷起地面大量红色尘土而得名, 其位置少动, 强度较弱, 龙卷出现时没有伴随降水。龙卷直径约50 m左右, 持续时间约7 min。由于龙卷发生于一块较平坦的空地上, 较少移动, 没有造成人员及财产损失(图11d)。通过地面自动站观测数据得知, 龙卷发生时其附近的地面自动站温度高于周围其他测站2~3℃, 气压低于周围测站, 形成一个局地热低压, 同时还有切变线存在(图11)。根据雷达回波反射率可见此次龙卷没有

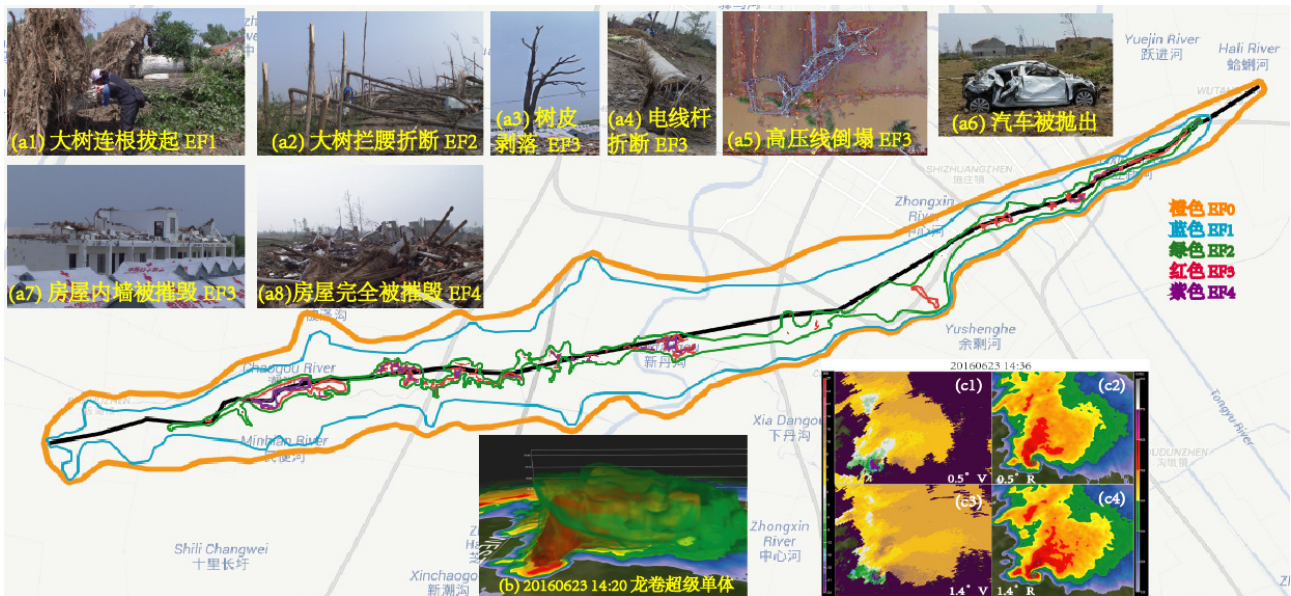


图10 2016年7月23日江苏省盐城市阜宁龙卷路径（橙色到紫色实线）、灾情（a1~a8）及雷达反射率回波及径向速度图（b~c）

Fig. 10 Tornado track (solid line) on 23 July 2016 in Funing County, Yancheng City, Jiangsu Province (a1–a8) The surface damage images; (b–c) Base reflectivity  $R$  and the radial velocity  $V$  observed by the 0.5/1.4 degree PPI

出现勾状回波，速度图上也没有明显的速度对（图11b1~11b2），因切变线存在，龙卷南侧有对流系统发展并逐步北移。由于龙卷发生时天空云量较少，并没有伴随着系统性的超级单体而发生，推测应该属于非超级单体龙卷，其形成机制与尘卷风有类似之处，即由于局部受热不均匀而导致暖区的空气明显上升，

从而使地面出现明显辐合而触发龙卷（图11c）。

通过以上几个个例的比较分析发现，台风引发的龙卷的高度较低，属于浅对流龙卷，上述佛山龙卷的高度只有4~5 km左右，且没有发现上冲云顶，而上述海南龙卷属于超级单体龙卷，其高度可达到16 km，并且有明显的上冲云顶存在。对于直径较大且强度较强的龙卷（阜宁龙卷）而言，其移动路径较直，而直径较小且强度较弱的龙卷则容易受地形或相邻的天气系统的影响而改变其路径，如海南龙卷受东移而来的雷暴系统影响其路径发生明显转折。不同的下垫面对龙卷的生命史有一定的影响，如上述的海南龙卷消失在湖面上。另外，相对超级单体龙卷而言，非超级单体龙卷一般强度较弱，移动较慢或少动，生命史短，不需要明显的天气系统，有热力差异就可以触发。

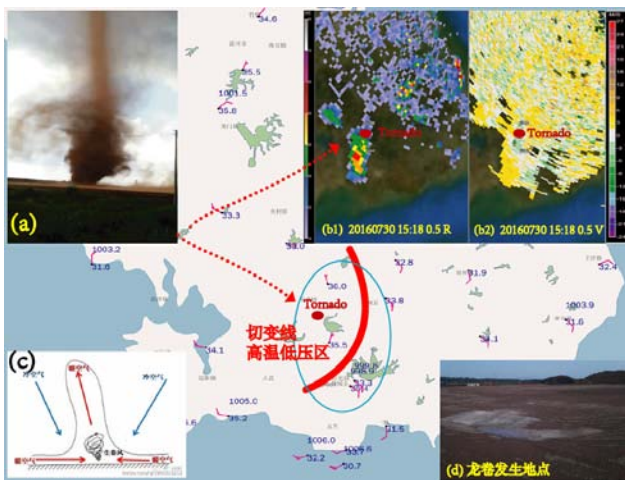


图11 2016年7月30日广东省湛江市徐闻龙卷照片(a)、雷达反射率回波及径向速度图（b1~b2）、尘卷风物理机制图（c）及龙卷发生地照片（d）（底图为广东地面自动站分布图）

Fig. 11 (a) Tornado image on 30 July 2016 in Xuwen County, Zhanjiang City, Guangdong Province; (b1–b2) The base reflectivity  $R$  and radial velocity  $V$  at 0.5 degree PPI; (c) The physical mechanism of the dust devil; (d) Tornado site picture (The back ground map shows the automatic weather stations)

### 3 龙卷分类及其地域差异分析

#### 3.1 龙卷分类

龙卷可分为很多种类型，除了超级单体龙卷以外，还有非中气旋龙卷。非中气旋龙卷包括水龙卷，还有一种类似于水龙卷，但是发生在陆地上的称为陆龙卷（landspouts）；另外还有一种通常发生在阵风锋前沿的称为阵风锋龙卷（gustnadoes）。伊利诺伊大学的Bruce Lee 和Bob Wilhelmsom成功模拟出了非中气旋龙卷，通过近年来的研究发现，这种龙卷是由于边界场的涡度所引发的；龙卷和中气旋也被称为准线性对流系统（quasi-linear convective system, QLCSs），

在2000年初美国一数值模拟试验对准线性对流系统的涡旋强度进行了模拟分析，并于2005年发表了《准线性对流系统龙卷气候学》。

多年以前研究者就发现了热带气旋中的龙卷，特别容易发生在热带气旋登陆的时候。1974年Novlan和Gray对热带气旋龙卷进行了气候学分析。随后又有不少学者对热带气旋的环境场进行了综合分析。1997年Spratt等利用WSR-88D雷达对热带气旋龙卷进行观测。诸多的研究表明，不管是发生在海上还是陆地上的龙卷，大多数龙卷母体都是浅对流超级单体，有较低的对流层顶，或叫做微型超级单体，一些甚至没有中气旋存在。虽然这些浅对流超级单体的对流层顶低，但是其内部的垂直切变却非常强。

龙卷的分类除了根据发生地点以及形成机制来定义以外，也可根据其旋转方式来定义。通常龙卷都是气旋性的，但是反气旋龙卷也时有发生。经众多学者的研究发现，反气旋龙卷的出现通常伴随着不远处的气旋性龙卷。

### 3.2 龙卷的地域差异

欧洲各国龙卷观测与分析研究进展参差不齐。以下拟以法国作为欧洲的重点与美国进行比较。

法国1680—1988年龙卷数据显示，法国共发生107例龙卷，其中50个F2级，44个F3，2个F5，主要分布在法国西北部，其次是法国南部的地中海沿岸。夏季和冬季龙卷发生的位置不同，夏季主要发生在内陆，而冬季发生在两个沿海地区。这和美国有类似的地方，冬天在密西西比河较低纬度附近，而夏天则移动到中部平原地区。这与冬季的沿海地区的动能和潜热能（沿海地区的风力较大），夏季内陆下垫面加热有关。

6月和8月是龙卷发生最多的月份（美国龙卷高发期为5月和6月），16:00—17:00 UTC为龙卷高发期，其次是18:00—19:00 UTC，龙卷高发期的平均时间为15:12 UTC，夏季平均时间为15:46 UTC，冬季平均时间为13:22 UTC，相差144 min；美国同样，夏季龙卷发生平均时间为下午偏晚，与冬季相差51 min。法国龙卷夏季出现的时间较集中（下午），而冬季出现时间较分散，龙卷较弱，可见冬季龙卷与太阳加热造成的不稳定关系不大。美国东南部龙卷日变化呈现双峰型，第二个高峰出现在日出时刻。相较于晚春而言，冬季龙卷出现时间较分散，所以冬季龙卷更多依赖于动力强迫。

法国的地形特征变化明显，相关实验室的研究<sup>[70]</sup>以及数值模拟表明不同下垫面特征对龙卷的长度，宽

度和强度有明显影响：在森林里，龙卷的平均长度为17.1 km，平均宽度为850 m；而在其他地方，龙卷平均长度为6.8 km，平均宽度为180 m。下垫面粗糙度越大，龙卷中心的半径就越大。由于龙卷的宽度与长度成正比，从而导致龙卷的长度越长。

夏天，龙卷发生的天气形势为500 hPa，一闭合低压系统位于比斯开湾，即法国和西班牙中部，或者大西洋西部，高压区位于撒哈拉沙漠（非洲北部），两个高低压系统的存在使得法国上空的中层盛行 $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的西南气流，地面为低压系统。有时在龙卷西面存在一个移动较慢，强度较弱的锋面系统，地面风场通常较弱。通过等熵面的模拟发现，来源于南面地中海的低层入流缓慢的向法国中部移动，位于伊比利半岛上空的高层气流来自于大西洋中部，移动速度较快，然后转向东北方向后进入法国上空。这种天气形势与美国中部类似。

从支持龙卷发生的大尺度天气背景场而言，法国是一个缩小版的美国，其低层有移动速度较慢的地中海气流，高层有来自大西洋的冷流；而美国则为来自南面墨西哥湾的低层赤道气流以及来自太平洋高空气流。这正好解释了为何法国是欧洲强龙卷的高发区之一。但是法国的地形多变，没有足够的时间让雷暴酝酿出龙卷，从而使得法国的龙卷数量只有美国的1/15。

### 3.3 水龙卷

水龙卷俗称龙吸水或龙吊水等。我们通常把发生在水面上的龙卷叫作水龙卷（water spout），它是一种偶尔出现在温暖水面上空的龙卷，上端与雷雨云相接，下端直接延伸到水面，一边旋转，一边移动。饱含水气快速旋转的气柱状水龙卷，其危险程度不亚于龙卷，内部风速可超过 $200 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 。许多水龙卷形成在离雷雨系统很远的地方，甚至出现在相当晴朗的天气里。水龙卷可以是相当透明，刚形成时，只有经由它在水面形成的不寻常图案才会注意到它存在。相对于龙卷而言，其破坏程度较小，主要是对来往的船只造成一定的威胁。我国不少海湾湖泊都出现过水龙卷。例如2010年7月27日09时许，深圳湾海面出现较为罕见的“龙吸水”，水天相接的“龙吸水”持续约17 min。2014年7月19日14:40左右，台湾屏东里港乡出现高达50层楼的“黑尾水龙卷”。2014年8月5日早上，珠海机场附近海域上方突然出现一道疑似龙卷的“擎天水柱”。水柱最大直径处约20 m，高度达到70~80 m，水柱以逆时针方向由西向东移动，整个过程持续了40 min。2014年10月20日09:50，青海湖海

心山北侧出现“龙吸水”壮观场景。目击者称,在约40 min内先后共有九条“龙吸水”白色水柱从天空垂直与湖面相接(图12)。2016年9月7日12:50左右,广东湛江观海长廊海面突然出现时间长达十多分钟的海上龙卷。2017年8月4日11:20左右,在广东省汕尾市海丰县附城镇的鹿境村附近,出现罕见的俗称“龙吸水”的龙卷景象。由于水龙卷并没有对生命财产造成过大的影响,所以我国至今还没有对水龙卷进行过有规模的统计及分析。



图12 2014年10月20日,青海湖海心山北侧出现水龙卷<sup>①</sup>  
Fig. 12 The water sprouts in Qinghai Lake on 20 October 2014

由于欧洲有很多岛国,所以水龙卷的数量较多,欧洲学者将龙卷生命史全部位于水面的龙卷称为水龙卷,而只要龙卷在其生命史内移动到陆地上的,全部归为龙卷的范畴。本节着重讨论欧洲水龙卷的统计特征。

从水龙卷的月变化而言,统计得到,由于水体的气象要素变化相对于大气边界层而言较滞后,所以水龙卷出现的时间相对较晚。西欧的水龙卷集中在夏末(6—8月)出现。希腊的龙卷出现高峰6—7月,水龙卷高峰出现在9—10月。在Adriatic海,水龙卷可以出现在任何季节,两个主要的高发期一个是夏季的6—8月,另一个是晚秋的11月。对土耳其而言,龙卷高发期位于10月到次年1月,由此可反映其水龙卷出现的时间偏爱“冷季”。

水龙卷的日变化与龙卷不同。从北欧的芬兰、南欧的西班牙、希腊和克罗地亚、西欧的瑞士以及东欧的波兰的统计结果显示,水龙卷频发时段较龙卷有所提前,主要出现时段是07:00—15:00 UTC,其中高峰时段为09:00—13:00 UTC。欧洲强天气数据库ESWD

的统计结果显示,与龙卷不同的是,水龙卷的日变化在冬天和夏天没有太大差异,这与水体的温度变化较小有关<sup>[63]</sup>。在西班牙和希腊的水龙卷有两个高峰期,07:00—10:59 UTC以及13:00—16:59 UTC。Dotzeck<sup>[71]</sup>指出水龙卷出现于早晨的有利条件是一天中水面与大气边界层的温度在太阳出来前后存在最明显的差异,从而易在水面上形成潮湿的不稳定层结,导致非超级单体龙卷出现。对于希腊,水龙卷日变化的两个高峰点为10:00 UTC和14:00 UTC,这与海陆锋环流引起的低层不稳定和切变有极大关系<sup>[72]</sup>。

#### 4 结论

本文对欧洲、美国以及中国龙卷的研究历程和统计特征进行了总结和比较分析,纵观各国龙卷研究的发展历程,美国是世界上龙卷发生频率最高的国家,所以对龙卷的研究较为深入,已经开展了不少理论研究、实验室模拟以及龙卷尺度的数值模式的开发和模拟研究工作,也开展了不少大型的外场观测试验,其龙卷观测设备也在不断的发展和改进之中,所以其龙卷研究已有不少成果。而欧洲和中国则由于龙卷的数量偏少、关注度不高而尚未步入深入龙卷研究的行列,特别是中国,还处于起步阶段。但是近几年由于出现了多次强龙卷而提高了人们对龙卷的关注度,进而增强了学者对龙卷研究的热情,也使得中国在龙卷的观测设备以及科研水平上都有所进展。

在龙卷的统计特征方面,欧洲年平均龙卷个数为72,中国年平均龙卷个数约为85,而美国年平均龙卷个数则超过1000,可见美国龙卷发生概率之高。三个地区的EF0~EF1级弱龙卷比例都占70%以上,而EF4~EF5级强龙卷比例则很小。龙卷月变化的高峰期在三个地区较一致,主要出现在春季、夏季和秋季。在具体月份上稍有差别,欧洲大部分地区高峰在6—8月,美国高峰期出现在5—6月,而中国则出现在4月和7月。虽然3个地区全年都有龙卷出现,但是美国冬季龙卷出现的概率较欧洲和中国高很多。在日变化方面,3个地区龙卷出现的高峰期基本在中午、下午以及傍晚这段时间。

在天气系统方面,引发美国龙卷走廊地区的天气系统主要是不同性质的气团相遇而触发的锋面及爬线系统,美国东南部的天气系统则主要是与海风环流相关的中尺度强迫有关。欧洲地区除了强天气系统与锋面系统中的雷暴以外,由于其水体较多,海陆热力差异成为引发龙卷的主要因素。中国则在不同的地区有不同的影响系统,东北地区主要为东北冷涡,江淮流

① 图片来自百度图片库。

域主要是副高西侧的西风带中的对流系统，而华南则主要为台风以及华南前汛期冷暖空气对峙引发的锋面和飚线系统。

另外欧洲地区与美国和中国的一个显著差别在于其水龙卷较多，由于其欧洲岛国及水体较多的缘故，水龙卷很容易移动到陆地上从而引起人们的关注。相较于欧洲龙卷而言，水龙卷的月变化的高峰期偏晚，但是其日变化的高峰时段却偏早，集中在上午到中午。龙卷的日变化夏天比冬天早，但是水龙卷的日变化则由于水体温度变化较小而在冬天和夏天没有太大差异。

在对近几年中国出现的几个龙卷个例的比较分析发现，台风引发的龙卷的高度较低，属于浅对流龙卷，佛山龙卷的高度只有4~5 km左右，且没有发现上冲云顶，而海南龙卷属于超级单体龙卷，其高度可达到16 km，并且有明显的上冲云顶存在。对于直径较大且强度较强的龙卷（阜宁龙卷）而言，其移动路径较直，而直径较小且强度较弱的龙卷则容易受地形或相邻的天气系统的影响而改变其路径，如海南龙卷受东移而来的雷暴系统影响其路径发生明显转折。不同的下垫面对龙卷的生命史有一定的影响，如上述的海南龙卷消失在湖面上。另外，相对超级单体龙卷而言，非超级单体龙卷一般强度较弱，移动较慢或少动，生命史短，不需要明显的天气系统，有热力差异就可以触发。

致谢：感谢海南省文昌市气象局在龙卷灾调过程中给予的帮助；感谢徐闻县气象局提供的龙卷相关信息。

#### 参考文献

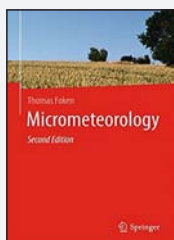
- Antonescu B, Schultz D M, Lomas F, et al. Tornadoes in Europe: synthesis of the observational datasets. *Monthly Weather Review*, 2016, 144(7): 2445-2480.
- Peterson R E, Letzmann J. A pioneer in the study of tornadoes. *Weather and Forecasting*, 1992, 7(1): 166-184.
- Peltier J C A. *Météorologie: observations et recherches expérimentales sur les causes qui concourent à la formation des trombes (Meteorology: observations and experimental research on the causes that contribute to the formation of tornadoes)*. Paris: H Cousin, Libraire-Editeur, 1840: 444.
- Wegener A. *Wind- und Wasserhosen in Europa (Tornadoes and Waterspouts in Europe)*. Braunschweig: Vieweg, 1917: 301.
- Letzmann J. *Tromben im ostbaltischen gebeit (Tornadoes in the east Baltic area)*. Sitzber Naturforsch Gesellsch, 1920, 26: 7-46.
- Letzmann J P, Koschmieder H. Richtlinien zur Erforschung von Tromben, Tornado, Wasserhosen und Kleintromben (Guidelines for research on funnels, tornadoes, waterspouts and whirlwinds). International Meteorological Organization. *Climate Communication*, 1937, 38: 91-110.
- Peterson R E, Letzmann and Koschmieder's Guidelines for research on funnels, tornadoes, waterspouts and whirlwinds". *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1992, 73(5): 597-611.
- Letzmann J. Experimentelle Untersuchungen an Luftwirbeln (Experimental investigations on air vortices). *Beitr. Geophys*, 1931, 33: 130-172.
- Feuerstein B, Groenemeijer P. In memoriam Nikolai Dotzek. *Atmosphere Research*, 2011, 100(4): 306-309.
- Rauhala J, Schultz D M. Severe thunderstormand tornado warning in Europe. *Atmosphere Research*, 2009, 93(1-3): 369-380.
- Dotzek N, Groenemeijer P, Feuerstein B, et al. Overview of ESSL's severe convective storms research using the European severe weather database (ESWD). *Atmosphere Research*, 2009, 93(1): 575-586.
- Fujita T T. Tornadoes and downbursts in the context of generalized planetary scales. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1981, 38(8): 1511-1534.
- Fujita T T. The Teton-Yellowstone tornado of 21 July 1987. *Monthly Weather Review*, 1989, 117(9): 1913-1940.
- McDonald J R. T. Theodore Fujita: His contribution to tornado knowledge through damage documentation and the Fujita scale. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2001, 82(1): 63-72.
- Browning K A. Airflow and precipitation trajectories within severe local storms which travel to the right of the winds. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1964, 21(6): 634-639.
- Samaras T, Lee J. Measuring tornado dynamics with In-Situ instrumentation. *Structures Congress*, 2006: 1-10.
- Straka J M, Rasmussen E N, Fredrickson S E. A mobile mesonet for finescale meteorological observations. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 1996, 13(5): 921-936.
- 查玉泉. 一次龙卷的雷达回波探讨. *气象*, 1979, 5(4): 30-34.
- 甄长忠, 刘德荣. 一次龙卷回波分析. *高原气象*, 1982, 1(31): 95-98.
- 徐良炎. 一九八七年我国龙卷灾害. *灾害学*, 1988, 3(2): 60-62.
- 黎清才, 刘可先. 鲁中地区一种龙卷天气学条件的分析. *气象*, 1988, 15(3): 19-33.
- 魏文秀, 赵亚民. 中国龙卷风的若干特征. *气象*, 1995, 21(5): 37-40.
- 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. *高原气象*, 2006, 25(5): 914-924.
- 俞小鼎, 郑媛媛, 廖玉芳, 等. 一次伴随强烈龙卷的强降水超级单体风暴研究. *大气科学*, 2008, 32(3): 508-522.
- 吴芳芳, 俞小鼎, 张志刚, 等. 对流风暴内中气旋特征与强烈天气. *气象*, 2012, 38(11): 1330-1338.
- 吴芳芳, 俞小鼎, 张志刚, 等. 苏北地区超级单体风暴环境条件与雷达回波特征. *气象学报*, 2013, 71(2): 209-227.
- 黄先香, 炎利军, 王硕甫, 等. 佛山市龙卷风活动的特征及环流背景分析. *广东气象*, 2014, 36(3): 20-24.
- 李彩玲, 杨宇声, 郑启康, 等. 一次台风暴雨中的龙卷风天气. *广东气象*, 2007, 29(3): 26-29.
- 李彩玲, 炎利军, 李兆慧, 等. 1522号台风彩虹外围佛山强龙卷特征分析. *热带气象学报*, 2016, 32(3): 416-424.
- 郑媛媛, 俞小鼎, 方翀, 等. 2003年7月8日安徽系列龙卷的新一代天气雷达分析. *气象*, 2004, 30(1): 38-45.
- 郑媛媛, 朱红芳, 方翀, 等. 强龙卷超级单体风暴特征分析与预警研究. *高原气象*, 2009, 28(3): 617-625.
- 郑媛媛, 张备, 王晔华, 等. 台风龙卷的环境背景和雷达回波结构分析. *气象*, 2015, 41(8): 942-952.
- 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成因探讨. *科技导报*, 2009, 27(7): 80-84.
- 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. *气象学报*, 2014a, 72(2): 306-317.
- 周后福, 施丹平, 刁秀广, 等. 2013年7月7日苏皖龙卷环境场与雷达特征分析. *干旱气象*, 2014b, 32(3): 415-423.
- 朱江山, 刘娟, 边智, 等. 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*, 2015, 41(2): 182-191.
- 徐学义, 赵振东, 梁红新. 三次非超级单体龙卷风暴多普勒雷达特征对比分析. *高原气象*, 2014, 33(4): 1164-1172.
- 姚叶青, 郝莹, 张义军, 等. 安徽龙卷发生的环境条件和临近预报. *高原气象*, 2012, 31(6): 1721-1730.
- 张一平, 俞小鼎, 吴蓁, 等. 区域暴雨过程中两次龙卷风事件分析. *气象学报*, 2012, 70(5): 961-773.
- 麦雪湖, 炎利军, 李兆慧. 2015年10月4日佛山强龙卷风灾害过程

- 浅析. 广东气象, 2015, 37(6): 6-8.
- [41] 张小玲, 杨波, 朱文剑, 等. 2016年6月23日江苏阜宁EF4级龙卷天气分析. 气象, 2016, 42(11): 1304-1314.
- [42] 郑永光, 朱文剑, 姚聘. 风速等级标准与2016年6月23日阜宁龙卷强度估计. 气象, 2016, 42(11): 1289-1303.
- [43] 朱文剑, 盛杰, 郑永光, 等. 1522号“彩虹”台风龙卷现场调查与中尺度特征分析. 暴雨灾害, 2016, 35(5): 403-414.
- [44] 李兆慧, 王东海, 麦雪湖, 等. 2015年10月4日佛山龙卷过程的观测分析. 气象学报, 2017, 75(2): 288-313.
- [45] Meng Z, Yao D. Damage survey, radar, and environment analyses on the first-ever documented tornado in Beijing during the heavy rainfall event of 21 July 2012. Weather and Forecasting, 2014, 29(3): 702-724.
- [46] Xue M, Zhao K, Wang M J, et al. Recent significant tornadoes in China. Advances in Atmospheric Sciences, 2016, 33(11): 1209-1217.
- [47] Zhao K, Wang M J, Xue M, et al. Doppler radar analysis of a tornadic miniature supercell during the landfall of typhoon Mujigae (2015) in South China. Bulletin of the American Meteorological Society, 2016, 98(3): 1821-1831.
- [48] 范雯杰, 俞小鼎. 中国龙卷的时空分布特征. 气象, 2015, 41(7): 793-805.
- [49] 朱红蕊, 张洪玲, 孙爽, 等. 1956—2011年黑龙江省龙卷风气候特征. 气象与环境学报, 2015, 31(3): 98-103.
- [50] 姚俊英, 朱红蕊, 孙爽, 等. 黑龙江省龙卷风气候特征及其环流背景分析. 黑龙江气象, 2013, 30(2): 1-5.
- [51] 王秀明, 俞小鼎, 周小刚. 中国东北龙卷研究: 环境特征分析. 气象学报, 2015, 73(3): 425-441.
- [52] 曾明剑, 吴海英, 王晓峰, 等. 梅雨期龙卷环境条件与典型龙卷对流风暴结构特征分析. 气象, 2016, 42(3): 280-293.
- [53] Novlan D J, Gray W M. Hurricane-spawned tornadoes. Monthly Weather Review, 1974, 102(7): 476-488.
- [54] Gentry R C. Genesis of tornadoes associated with hurricanes. Monthly Weather Review, 1983, 111(9): 1793-1805.
- [55] Weisman M L, Klemp J B. The dependence of numerically simulated convective storms on vertical wind shear and buoyancy. Monthly Weather Review, 1982, 110(6): 504-520.
- [56] Holle R L, Maier M W. Tornado formation from downdraft interaction in the FACE mesonet network. Monthly Weather Review, 1980, 108(7): 991-1009.
- [57] Wakimoto R M, Wilson J W. Nonsupercell tornadoes. Monthly Weather Review, 1989, 117(6): 1113-1140.
- [58] Elsom D M, Meaden D J, Reynolds M W, et al. Advances in tornado and storm research in the United Kingdom and Europe: the role of the tornado and storm research organisation. Atmosphere Research, 2001, 56(1): 19-29.
- [59] Doswell C A. Societal impacts of severe thunderstorms and tornadoes: lessons learned and implications for Europe. Atmosphere Research, 2003, 67-68(23): 135-152.
- [60] Groenemeijer P, Kühne T. A climatology of tornadoes in Europe: results from the European severe weather database. Monthly Weather Review, 2014, 142(12): 4775-4790.
- [61] Siedlecki M. Selected instability indices in Europe. Theoretical and Applied Climatology, 2009, 96(1-2): 85-94.
- [62] Anderson G, Klugmann D A. European lightning density analysis using 5 years of ATDnet data. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2014, 1(6): 6877-6922.
- [63] Rauhala J, Brooks H E, Schultz D M. Tornado climatology of Finland. Monthly Weather Review, 2012, 140(5): 1446-1456.
- [64] Mulder K J, Schultz D M. Climatology, storm morphologies, and environments of tornadoes in the British Isles: 1980-2012. Monthly Weather Review, 2015, 143(6): 2224-2240.
- [65] Gayà M. Tornadoes and severe storms in Spain. Atmosphere Research, 2011, 100(4): 334-343.
- [66] Giaiotti D B, Giovannoni M, Stel F, et al. The climatology of tornadoes and waterspouts in Italy. Atmosphere Research, 2007, 83(2): 534-541.
- [67] Dessens J, Snow J T. Tornadoes in France. Weather and Forecasting, 1989, 4(2): 110-132.
- [68] Brázdil R, Chromák K, Dobrovolný P, et al. The tornado history of the Czech Lands, AD 1119-2010. Atmosphere Research, 2012, 118(1): 193-204.
- [69] Antonescu B, Bell A. Tornadoes in Romania. Monthly Weather Review, 2015, 143(3): 689-701.
- [70] Diamond C J, Wilkins E M. Translation effects on simulation tornadoes. Journal of the Atmospheric Sciences, 1984, 41(17): 2574-2580.
- [71] Dotzek N. Tornadoes in Germany. Atmosphere Research, 2001, 56(1): 233-251.
- [72] Matsangouras I T, Nastos P T, Bluestein H B, et al. A climatology of tornadic activity over Greece based on historical records. International Journal of Climatology, 2014, 34(8): 2538-2555.

## 新书架

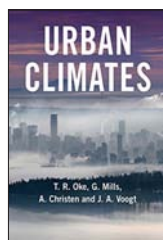
## NEW BOOK

 感兴趣的读者可以到中国气象局图书馆查阅



Micrometeorology  
《微气象学》

编著者: Thomas Foken  
出版者: Springer  
出版年: 2017



Urban Climates  
《城市气候》

编著者: T. R. Oke等  
出版者: Cambridge University Press  
出版年: 2017



《水文学导论》

编著者: 威尔·布鲁萨著;  
王忠静等译  
出版者: 气象出版社  
出版年: 2017



《气候变化背景下农业气象灾害对我国农业生产影响评估技术》

编著者: 宋艳玲等  
出版者: 气象出版社  
出版年: 2017