

# Advances

in Meteorological Science and Technology

# 气象科技进展

ISSN 2095-1973

CN 10-1000/P

## No.2

2018年4月  
第8卷 第2期



龙卷预报与研究

气象科技 **进展**  
Advances in Met S&T



中国气象局气象干部培训学院 主办

**主管** 中国气象局  
**主办** 中国气象局气象干部培训学院  
**出版** 《气象科技进展》(英文)编辑部

**名誉主编** 丑纪范 中国气象局气象干部培训学院  
**主编** 许小峰 中国气象局

**副主编**

王志强 中国气象局气象干部培训学院  
肖子牛 中国科学院大气物理研究所  
翟盘茂 中国气象科学研究院  
罗云峰 中国气象局  
李维京 国家气候中心  
胡永云 北京大学  
谈哲敏 南京大学  
孙健 中国气象局公共气象服务中心  
费建芳 国防科技大学  
赵立成 国家气象信息中心  
张鹏 国家卫星气象中心  
管兆勇 南京信息工程大学  
何建新 成都信息工程大学  
黄建平 兰州大学  
廖小琴 中国科学院地理科学与资源研究所  
贾朋群 (专职) 中国气象局气象干部培训学院

**常务编委** (按音序排名)

成秀虎	高学浩	龚建东	郭虎	郭学良
李柏	李国平	倪允琪	曲晓波	任国玉
任小波	沈文海	王存忠	王卫丹	武炳义
杨修群	俞小鼎	张朝林	张庆云	赵平

**编委** (按音序排名)

毕宝贵	陈镜明	陈云峰	陈振林	崔春光
崔讲学	董文杰	杜钧	封国林	何金海
何清	胡欣	胡跃文	姜彤	金飞飞
雷小途	李集明	李俊	李良福	李耀辉
李跃清	李忠明	梁旭东	刘晶森	刘黎平
刘立成	刘实	刘征宇	卢乃锰	陆日宇
罗兵	罗亚丽	马舒庆	马耀明	彭莹辉
浦一芬	王燕	索渺清	汤绪	田红
万齐林	王斌	王斌(海外)	王东海	王东海
王建林	王武功	王延青	王迎春	王元
王自发	卫晓莉	温敏	王翁富忠	吴立广
谢志辉	闫冠华	延晓冬	杨萍	杨崧
杨昭明	姚学祥	伊兰	翟武全	张大林
张广俊	张立祥	张小玲	张跃堂	赵广忠
周定文	周建华	周凌晔	周显信	朱定真
朱小祥	朱玉洁	祝燕德	邹立尧	邹晓蕾

**编辑部**

张萌 侯美亭 秦莲霞 冀文彬 江剑民  
地址: 北京市中关村南大街46号,  
中国气象局气象干部培训学院 100081  
电话: (010) 68409927/68409933  
邮箱: amst@cma.gov.cn  
Notes: 气象科技进展编辑部/图书馆/干部学院/CMA  
网址: <http://cmalibrary.cn/amst>  
投稿系统: <http://qxkjjz.cbpt.cnki.net/EditorCN/Quit.aspx>  
官方微博: <http://weibo.com/2115232930/profile>  
印刷: 北京金吉士印刷有限责任公司

本期责任编辑: 张萌

ISSN 2095-1973  
CN 10-1000/P  
定价: 30元



本刊已被万方数据、《中国学术期刊网络出版总库》和CNKI系列数据库以及《中文科技期刊》(维普网)全文收录,相关著作权使用费与本刊稿酬一次性给付。作者向本刊提交文章发表的行为(除事先声明外)视为同意文章被上述数据库收录。

本期封面设计:《中国科学》杂志社

## 目次

第8卷 第2期 2018年4月

(龙卷预报与研究 专辑)

(本期特约编辑: 杜钧、郜吉东、张小玲)

### 1 许小峰: 主编语

## 研究论文

## 龙卷预报与研究

### 研究进展

- 8 王东海, 李兆慧, 高枳亭, 柳崇健, 朱建军, 炎利军, 杜钧: 中国与欧美龙卷统计特征比较分析及研究进展
- 24 高守亭, 左群杰, 杨帅: 龙卷生成动力学初探
- 28 姚聃: 龙卷数值模拟研究进展
- 36 钱维宏, 梁卓轩, 罗未萌, 杜钧: 用瞬时扰动法考察龙卷环境系统的模式预报
- 44 郑永光, 朱文剑, 田付友: 2015年“东方之星”翻沉事件和2016年阜宁EF4级龙卷对流风暴环境条件、结构特征和机理
- 55 郑永光, 田付友, 周康辉, 朱文剑: 雷暴大风与龙卷的预报预警和灾害现场调查

## 科学观察

### 特写

- 6 杜钧, 薛明: 研发中的美国强天气(龙卷、大冰雹和局地强降水)预报系统FACETS
- 62 张萌: “龙卷”主题文献计量分析

## 主编语

龙卷是一种生命周期短、空间尺度小的强天气系统，伴随高速旋转漏斗状云柱的强风涡旋，其所到之处常会发生拔起大树、掀翻车辆、摧毁房屋等现象。龙卷在世界上许多地区都有发生，其中美国是遭受龙卷侵袭最多的国家，其年平均龙卷个数超过1000个。龙卷的形成既需要有暖湿空气交汇提供对流条件，又要求高低空环流的配合，还需要有较平坦的地形，美国中西部特殊的地理、气候环境非常有利于龙卷的形成，使得其被称为“龙卷之乡”。我国的龙卷在东北、华北、长三角和珠三角平原等地均有发生，尤其是长三角地区。但总体来说，由于我国的山脉多东西走向，没有大范围的平原地形，因此冷空气无法长驱南下，使得我国龙卷的发生频次和强度要远低于美国。

龙卷的研究起源于17世纪的欧洲，那时欧洲正由文艺复兴向近代早期过渡。19世纪80年代开始，美国龙卷研究开始发力，如今其龙卷的数据库建设、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。我国龙卷研究则起步较晚，始于20世纪60年代。据统计，自20世纪50年代以来，我国龙卷发生的频次不及美国的十分之一，未发生过EF5级的龙卷。而2016年6月23日，江苏省盐城市阜宁县发生了历史罕见的EF4级龙卷，风力超过17级，导致99人死亡、846人受伤，再一次将中国气象界的目光聚焦到龙卷研究及

预报预警上。

鉴于龙卷的研究与预报在全球范围内被越来越多的学者关注。本刊特别组织了龙卷等强对流天气预报及研究的相关专辑，邀请了国内外从事该项研究的学者，针对这一强对流天气，从其观测、预报、理论和模拟等方面进行深度分析和探讨。

由于版面的限制，专辑将分为两期刊载，本期主题为“龙卷预报与研究”，主要从龙卷的统计特征、动力分析、数值模拟、预报预警等方面进行介绍。其中，王东海等比较分析了中国与欧美龙卷统计特征（P8）；高守亭等初步探讨了龙卷的动力学因素（P24）；姚聃对龙卷数值模拟研究的发展进行了综述（P28）；钱维宏等用瞬时扰动法检验了龙卷环境系统的模式预报（P36）；郑永光等分别对龙卷的环境和结构特征（P44），以及预报预警和灾害调查进行了阐述（P55）。杜钧等则介绍了研发中的美国强天气预报系统——FACETS（P6）。

为更好地把握学科前沿进展，使专辑内容更加权威，特别邀请了美国海洋和大气管理局的杜钧研究员、郜吉东研究员和国家气象中心的张小玲研究员作为专辑特约编辑，承担专辑的策划、约稿及审稿工作。对三位专家的辛勤付出表示衷心感谢！

许小峰

## 论坛

- 64 段京蕾：浅析多媒体融合环境下中国气象频道的多维模式构建
- 68 刘银峰：新媒体环境下气象影视资料的再开发与利用价值初探——基于中国气象频道的实践

## 往事钩沉

### 人物

- 70 杨萍，邓京勉，张萌：霍华德——为云而生的英国气象学之父

## 科学观察

- 2 读图 数字 榜单

## 阅读

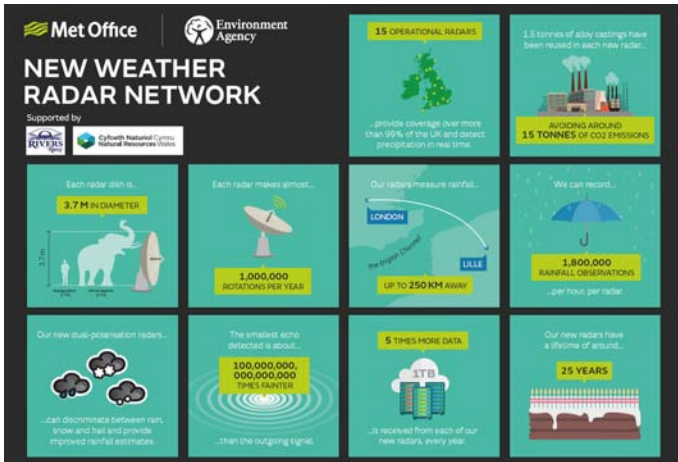
### 信息

P2

- 23 新书架
- 75 高被引论文选编
- 77 编辑选编
- 79 涓流细雨
- 封3 媒体扫描



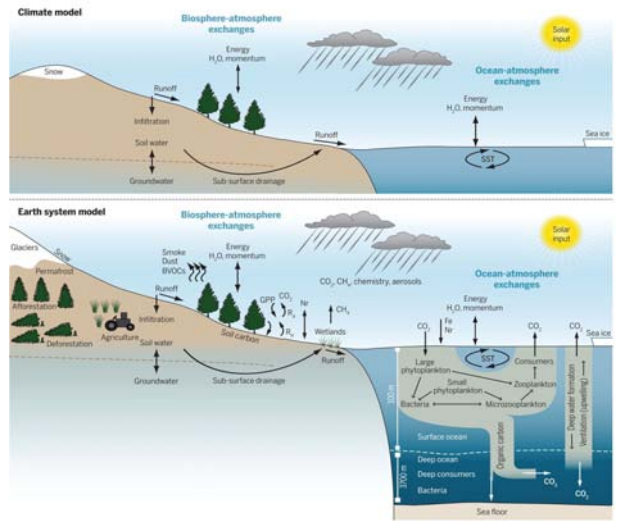
封3



### 英国气象雷达网完成更新

2018年2月，英国气象局（UKMO）宣布，投入千万英镑，汇集包括双极化等最新技术的英国天气雷达网更新项目完成。英国最早的天气雷达于1974年建成，目前雷达网由分布在全国的15部雷达组成，因为更新项目是在UKMO内部实施，一些商业化雷达尚没有的技术得以实现。更新后雷达网的数据量增加了5倍，每部雷达每年的数据近1 TB，每部雷达每小时可以记录多达1800万个降水记录，并首次能够记录雨滴及雪花的大小和形状，区分25英里以外成群的昆虫或鸟群。

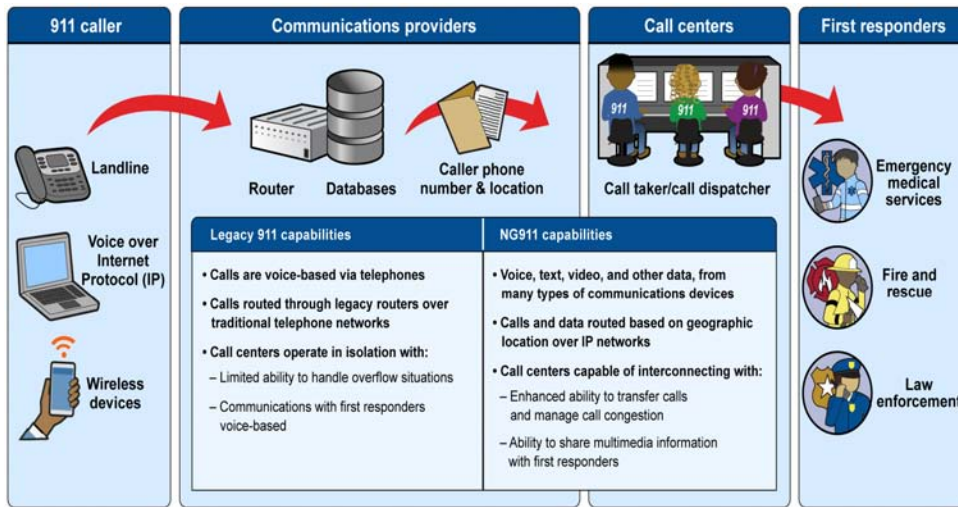
来源：UKMO



### 地球系统模式

美国学者在最新发表的一篇评述文章里，阐述了地球系统模式（ESM）中包含的生物圈要素，并与气候模式进行了对比。一些重要的过程，如大气CO<sub>2</sub>对化石燃料排放和陆地及海洋生物地球化学的反馈，碳循环中的基础生产总量（GPP）、自氧呼吸（RA）和非自氧呼吸（RH），林火等过程，均包含在内。

来源：Science



Source: Based on GAO analysis of public safety industry documents. | GAO-18-252

### 下一代911：更智能应急

从2015年开始，美国各州和地方陆续推出下一代911应急（NG911），然而截至目前，18个州并没有制定新老系统之间转化的方案，而这一每年数百万次被呼叫的重要国家应急系统如何在国家层面上规范化，需要回答很多问题。美国审计署（GAO）最新的报告试图就这些涉及资金、转化技术和业务维持与管理的问题给出权威的回答。图中给出911多样化通信和处置的全景图，并对NG911的新功能进行了解读。

来源：GAO

**1/4** 德国学者利用全球海洋及陆相气候记录网重新评价气候多变性，发现从未次盛冰期以来，全球气候多变程度下降至之前的1/4，随着北极变暖加速，气候多变性会继续减小。

**3200** 亿美元 WMO的最新报告指出，2017年激烈天气和气候事件造成的损失达到3200亿美元，其中美国的3个飓风（Harvey, Irma和Maria）造成的损失就高达约2650亿美元。

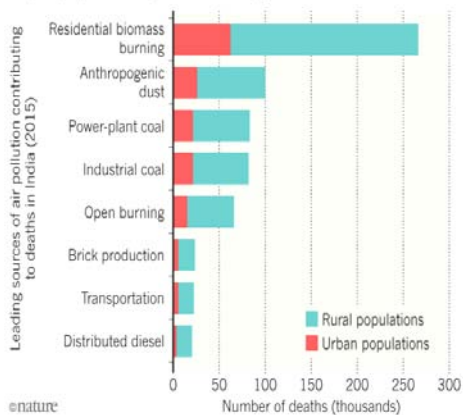
**15** 个月 NOAA局长缺位已经达到创记录的15个月之久，之前美国总统2017年10月提名的NOAA局长，来自美国天气企业的迈尔斯没能在参议院获得通过，原因是该企业利用NOAA数据提供天气服务，有可能存在潜在的利益冲突。

国际“龙卷”主题被引频次最高的前10篇论文

排名	篇名	第一作者	来源	被引频次
1	A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes	Hong, SY	Monthly Weather Review, 2006, 134(9)	1832
2	The Advanced Regional Prediction System (ARPS) - A multi-scale nonhydrostatic atmospheric simulation and prediction model. Part I: Model dynamics and verification	Xue, M	Meteorology and Atmospheric Physics, 2000, 75	551
3	Tornadoes and downbursts in the context of generalized planetary scales	Fujita, TT	Journal of the Atmospheric Sciences, 1981, 38(8)	423
4	The Advanced Regional Prediction System (ARPS) - a multi-scale nonhydrostatic atmospheric simulation and prediction tool. part II: model physics and applications	Xue, M	Meteorology and Atmospheric Physics, 2001, 76	387
5	A baseline climatology of sounding-derived supercell and tornado forecast parameters	Rasmussen, EN	Weather and Forecasting, 1998, 13(4)	325
6	Forest damage and recovery from catastrophic wind	Everham, EM	Botanical Review, 1996, 62(2)	317
7	Close proximity soundings within supercell environments obtained from the rapid update cycle	Thompson, RL	Weather and Forecasting, 2003, 18(6)	251
8	The Advanced Regional Prediction System (ARPS), storm-scale numerical weather prediction and data assimilation	Xue, M	Meteorology and Atmospheric Physics, 2003, 82	245
9	Landscape patterns and legacies resulting from large, infrequent forest disturbances	Foster, DR	Ecosystems, 1998, 1(6)	232
10	Temporal fluctuations in weather and climate extremes that cause economic and human health impacts: A review	Kunkel, KE	Bulletin of the American Meteorological Society, 1999, 80(6)	230

DEATHS FROM AIR POLLUTION IN INDIA

In 2015, the burning of biomass in homes contributed to the deaths of nearly 270,000 people in India, most of them living in rural areas.



印度空气污染：死亡人数每年超过100万

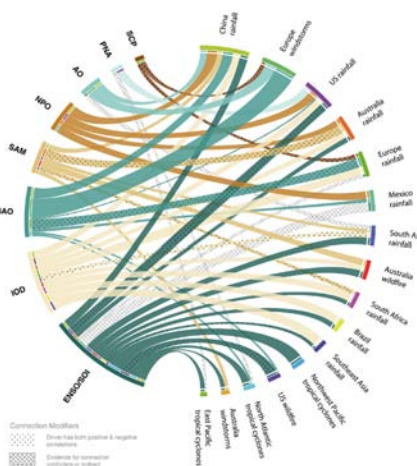
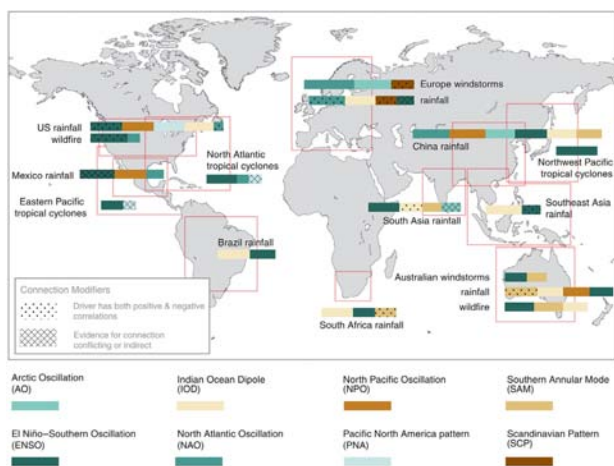
印度多家机构合作最新发表的一篇报告指出，2015年因空气污染导致该国110万人死亡。其中，家中使用燃料导致了26.8万人死亡，占比约25%。印度是目前空气污染最严重的国家，几乎所有国民生活在世界卫生组织制定的空气质量指导标准之下。

来源：Nature

来源：SCI-E数据库

检索时间：2018年2月25日

张萌 提供



会诊全球极端天气和遥相关

英国气象局学者与合作者在最新的研究中，给出了全球16个关键区域灾害天气与北极涛动、ENSO等8种遥相关机制之间的联系图。

来源：Rev Geophys

5.5m

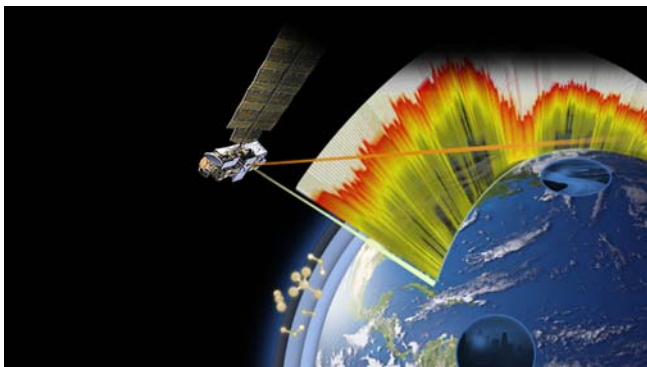
我国计划在2018年12月搭载发射的首颗极地观测小卫星BNU-1重量约20 kg，可提供800 km幅宽、50 m × 50 m分辨率的多光谱影像，对两极地实现每2天一次的完整覆盖。星上中高分辨率相机可在突发事件中提供地面分辨率5.5 m × 5.5 m的可见光遥感数据。

59亿美元

美国国会最新批准的2018财年预算中，NOAA获得59亿美元的预算，较上年度增加了2.34亿美元，从而避免了2月总统预算案中被大幅度消减的命运。

0.84/0.9℃

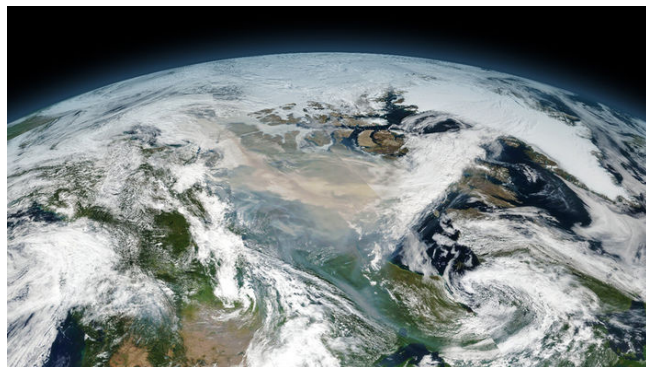
美国NOAA和NASA依据各自独立数据，得到2017年全球平均温度分别比20世纪平均值和1951—1980年平均值高了0.84和0.9℃，两家机构因此将2017年分别排在第三和第二暖年。



### 向第一颗卫星污染物监测卫星告别

2004年NASA发射的第一台用于监测大气最低层臭氧的对流层排放光谱仪（Tropospheric Emission Spectrometer, TES）在运行了近14年之后，于2017年1月31日停止工作。TES的设计寿命仅5年，其实际的长寿表明了该仪器具有极好的韧性。图中显示的是TES收集到低层大气臭氧等气体的谱“信号”情景。

来源：NASA

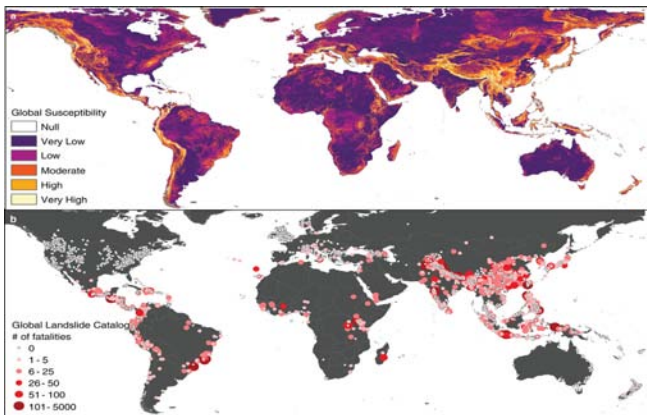


2017年8月中旬林火烟雾完全覆盖了加拿大北部  
(来源：NASA Earth Observatory)

### 林火堪比火山喷发

法国学者利用卫星在轨观测资料和烟尘漂浮观测资料，分析了2017年夏季北美林火灾害带来的影响，发现在林火灾埃最显著的8月，林火带来的尘灰对阳光的阻挡作用甚至超过2009年俄罗斯萨雷切夫火山喷发。

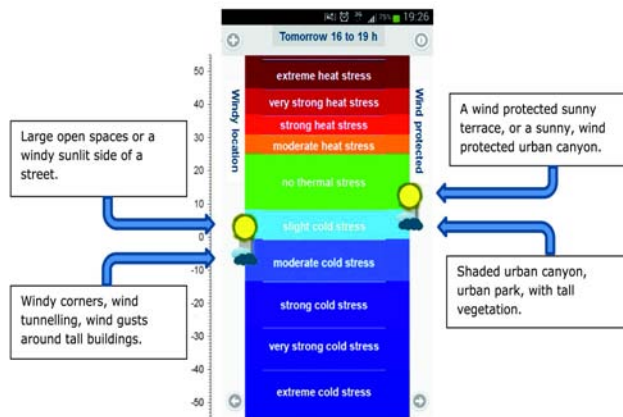
来源：Geophysical Research Letters



### 用卫星数据预警滑坡灾害的全球视野

美国NASA学者最新研制了几乎覆盖全球的基于卫星的降水触发滑坡灾害评估模式（landslide hazard assessment model for situational awareness, LHASA），可以每30 min给出滑坡发生可能性预警。图为基于地表波度、地质、断裂带、道路网和森林减少等信息给出的全球滑坡敏感分布（上图）和滑坡发生统计（2007—2016年）（下图）。

来源：NASA



### 智能手机告诉你更多天气信息

美国和荷兰学者在一篇综述手机app在方便提供人体热舒适预报方面的进展时，指出在温度预报之外，智能手机app软件基于UTCI（通用热气候指数，universal thermal climate index）可以给出出行时段的热压力预报以及其他城市微气候状况。

来源：BAMS

数字

**3335** 亿美元

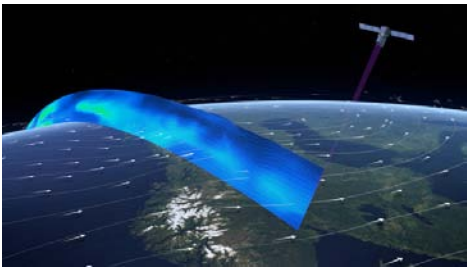
据彭博新闻报道，2017年全球清洁能源投入为3335亿美元，较2016年增加3%，为历史上第二高，其中太阳能投资占比达到48%。

**-42.55** °C

温度在0°C以下不结冰形成的“过冷水”，以往纪录是-40°C。据《物理评论快报》报道，最新的研究通过建立水滴大小和水滴温度的关系，“过冷水”的温度达到了-42.55°C。这项研究有助于理解大气结冰现象，提高气候模式的精度。

**19%**

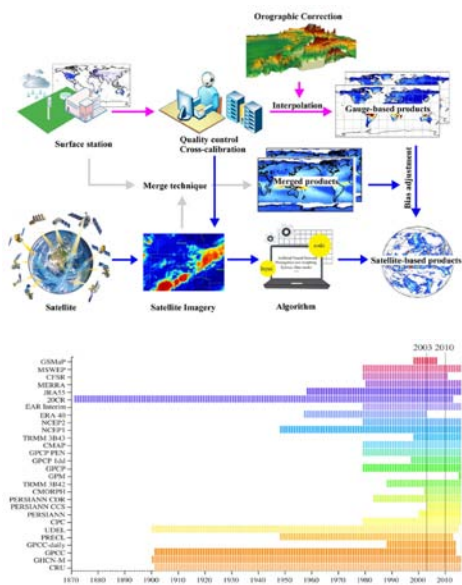
美国伯克利国家实验室的学者针对哈维飓风的最新研究表明，人类导致的气候变化可能导致哈维飓风的总降水量至少增加了19%，气候变化可能使得可观测到的降水出现的机会增加至少2.5倍。



“风神”卫星将开展风层结观测

欧空局 (ESA) 计划2018年下半年发射的地球探测“风神”卫星 (Aeolus), 将开创天基全球风廓线探测的先河, 目前该卫星发射前的各项工作在稳步推进。

来源: ESA



全球降水数据: 向全面覆盖方向发展

目前, 被学者和相关业务采用的30个全球降水数据库, 可以通过测站观测、卫星数据反演和再分析等过程获得 (上图), 中国学者对这些数据库 (下图) 进行的梳理和分析表明, 这些数据库极端降水可变性, 在较低纬度地区要高于较高纬度地区。

来源: Rev Geophys

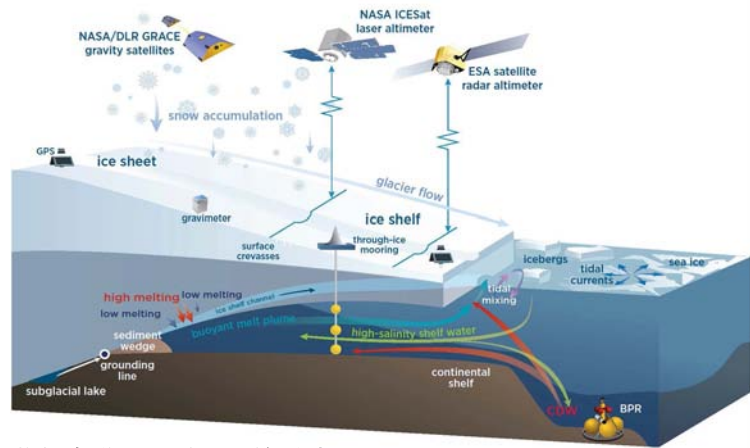
中国“龙卷”主题被引频次最高的前10篇论文

排名	篇名	第一作者	来源	被引频次
1	新一代天气雷达与强对流天气预警	俞小鼎	高原气象, 2005, (3)	199
2	雷暴与强对流临近天气预报技术进展	俞小鼎	气象学报, 2012, (3)	186
3	安徽一次强烈龙卷的多普勒天气雷达分析	俞小鼎	高原气象, 2006, (5)	179
4	一次强对流系列风暴个例的多普勒天气雷达资料分析	廖玉芳	应用气象学报, 2003, (6)	168
5	2012年7月21日北京特大暴雨成因分析	俞小鼎	气象, 2012, (11)	158
6	一次伴随强烈龙卷的强降水超级单体风暴研究	俞小鼎	大气科学, 2008 (3)	157
7	不同类型大尺度环流背景下强对流天气的短时临近预报预警研究	郑媛媛	气象, 2011, (7)	115
8	上海LAP-3000边界层风廓线雷达在强对流天气预报中的应用初探	杨引明	成都信息工程学院学报, 2003, (2)	87
9	中国龙卷风的若干特征	魏文秀	气象, 1995, (5)	78
10	2003年7月8日安徽系列龙卷的新一代天气雷达分析	郑媛媛	气象, 2004, (1)	64

来源: CAJD数据库

检索时间: 2018年2月25日

张萌 提供



卫星监视海洋潮汐对冰川的影响

美国学者针对海洋潮汐影响南极和格陵兰冰架的研究中, 利用多个卫星高度计和重力探测传感器获得冰架与海洋交界处各种相关数据。其中对潮汐高度的观测, 除了沿海潮汐站外, 还可以通过安装在海底压力计、安装在冰架表面的重力计和GPS等获得, 而基于卫星的雷达和激光观测给出冰架和海洋表面的垂直运动情况。

来源: Rev Geophys

**80%** 美国多所高校联合开展的一项研究, 通过分析1980—2015年36年里每小时的天气数据发现, 太阳能发电和风能发电能可靠地满足该国80%的电力需要。

**45.5°C** 2018年3月30日, 巴基斯坦出现了45.5°C的高温, 创下3月高温纪录的极值。3月29日伊拉克也出现了43.77°C的高温, 超过了2010年的纪录 (42.38°C)。

**51.28%** 中国民用航空局发布《2017年全国民航航班运行效率报告》显示, 2017年天气为导致航班延误的最主要因素, 占51.28%。

**3.3 mm/a** 国家海洋局最新发布的《2017年中国海平面公报》指出, 1980—2017年中国沿海海平面上升速率为3.3 mm/a, 高于同期全球平均值。

# 研发中的美国强天气（龙卷、大冰雹和局地强降水）预报系统FACETs

杜钧 薛明

美国强风暴实验室（NSSL）正在研发的FACETs系统预报对象包括龙卷、大冰雹和局地强降水，这套系统把预报信息同社会影响、人的心理行为和经济效益等学科相结合，把预报信息转化为同用户直接相关的问题。

目前，美国气象局的龙卷预警系统是基于观测的，即当雷达已经看到有强天气的早期迹象或已观测到强天气现象，才运用短临预报方法外推发布预警。但因龙卷等强天气变化快、生命期很短，所以这种基于观测的预警系统可用时效很短，如目前对龙卷的预警只能提前13 min左右，并且预报是确定性的，即只有出现或不出现龙卷的二分预报，而没有该预报的可信度度量。为了延长预报时效，目前正在研究试验的是“基于（数值）预报的预警（Warn on Forecast, WOF）”（图1）<sup>①</sup>，目标是争取能提前30~60 min预报出龙卷形成的地点、强度、移动方向和路径等，并且定量给出这一预报可信度（概率）的时空分布，以适用于更广泛的用户群，同时这一预报同最新的观测资料（包

括爱好龙卷的“追风者”实时从现场传回的信息）进行比较并订正，这样的预报会在数分钟后不断快速地更新。如图1所示，要实现这个目标的关键技术包括对流尺度的数值预报模式、雷达观测资料同化能力、模式运算快速更新的能力（如每间隔10 min积分一次）、快速更新风暴（雷暴）尺度集合预报系统和实时的精细观测技术（包括短临预报方法）。

以WOF为核心预报技术加上行为科学（考虑心理、社会和经济因素的决策），美国国家海洋和大气管理局（NOAA）下属的美国强风暴实验室（NSSL）正在研发下一代强天气预警系统“对环境潜在危险的全方位预报系统”（Forecasting a Continuum of Environmental Threats, FACETs, 图1）<sup>②</sup>，预报对象包括龙卷、大冰雹和局地强降水，并且这套系统把预报信息同社会影响、人的心理行为和经济效益等学科相结合，把预报信息转化为同用户直接相关的问题，如：这一风暴会影响我吗？风暴已造成多大损失？最坏会是什么结果？什么时间开始影响、什么时间结束？预报有多可信？我该做什么？所以预报员可以用它来发布面向用户的、能被用户所理解的预报信息。这个系统包括七大部分（图2）：危险天气预报概率的网格点资料、观测包括气候和指导预报、预报员意见、处理网格资料的强天气软件包工具、可供用户直接决策的预报信息输出、用户应该采取的有效行动指南、事后检验。

FACETs同美国国家气象局正在实施的总体计划“对紧急天气事件时刻有防范的社会”（Weather Ready Nation, WRN）<sup>③</sup>理念一致、互相匹配。FACETs的研发也紧密与实践相结合，它有一个非常有效的试验平台，即NOAA的“危险性天气试验基

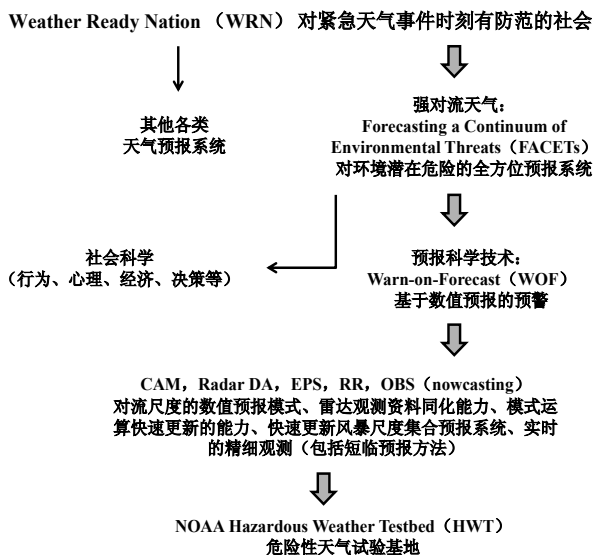


图1 研发中的基于WOF为核心预报技术的美国强天气（龙卷、大冰雹和局地强降水）预报系统FACETs以及与其他项目的关系示意图

① <https://www.nssl.noaa.gov/projects/wof/>。

② <https://www.nssl.noaa.gov/projects/facets/>。

③ <https://www.weather.gov/wrn/>。

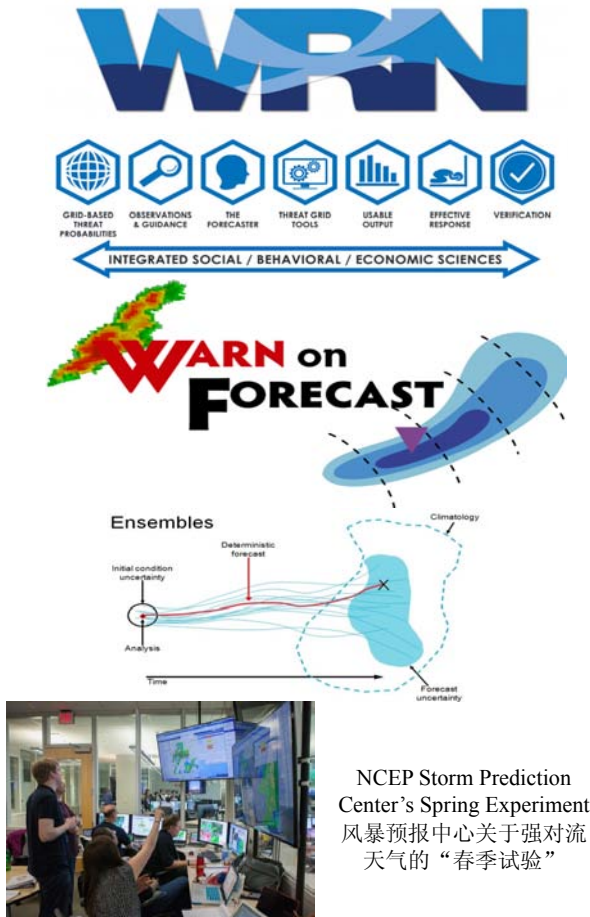


图2 同FACETs有关的各种项目标识图徽  
(来源: www.nssl.noaa.gov)

地” (Hazardous Weather Testbed, HWT)<sup>①</sup>, 帮助它在实时业务环境中边研发边应用, 这样可以不断检验效果、根据预报员的反馈意见进行改进。每年春季(4—5月), 美国国家环境预报中心(NCEP)的风暴预报中心(Storm Prediction Center)会进行关于强对流天气预报的“春季试验”<sup>②</sup>来测试和FACETs有关的技术和产品, 如近几年主要集中在对流尺度模式(convection-allowing model, CAM)和雷暴尺度集合预报(storm-scale ensemble)的应用和检验。参加人员除了业务预报员外, 还有预报系统开发人员、

研究所和大学的研究员和教授, 以及其他国家数值预报研发专家等。图1~2大致勾画出了这一关系。除了对流天气, NOAA的HWT还在NCEP的天气预报中心(Weather Prediction Center)进行冬季天气试验(1—2月)、局地强降水试验(6—7月)<sup>③</sup>和在航空天气预报中心(Aviation Prediction Center)进行航空天气预报的夏季试验(8月)<sup>④</sup>, 所有这现行的四个试验都以集合预报系统和产品为中心, 可见美国预报员已经把如何对待天气预报中的不确定性作为改进天气预报服务的重心。如何在决策中正确考虑天气预报的不确定性也是WRN建设的关键。

对流尺度数值模式对龙卷的模拟能力近年也有长足的进步。图3是美国俄克拉荷马大学薛明教授领导的团队用水平分辨率为 $25\text{ m} \times 25\text{ m}$ 的ARPS (Advanced Regional Prediction System) 模式所模拟的凝结云的三维图像, 云底的超级龙卷清晰可见。



图3 水平分辨率为 $25\text{ m} \times 25\text{ m}$ 的ARPS模式所模拟的凝结云三维图像(图由Pittsburgh超算中心的Greg Foss先生提供)

致谢: 本文图2、图3, 及本期封面素材分别由NOAA及Pittsburgh超算中心的Greg Foss先生提供, 特此感谢!

(作者单位: 杜钧, 美国国家海洋和大气管理局国家环境预报中心; 薛明, 俄克拉荷马大学气象学院和风暴预报分析中心)

① <https://hwt.nssl.noaa.gov/>。

② [https://hwt.nssl.noaa.gov/spring\\_experiment/](https://hwt.nssl.noaa.gov/spring_experiment/)。

③ <http://www.wpc.ncep.noaa.gov/hmt/experimentsummaries.shtml>。

④ <https://testbed.aviationweather.gov/>。

# 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

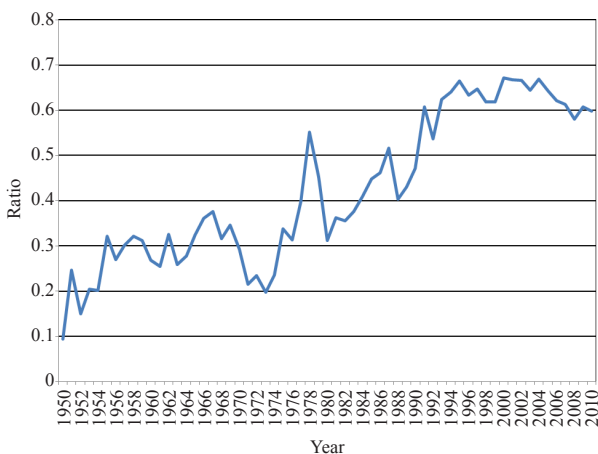


图1 1950—2010年 (E) F0级龙卷占总龙卷的比例<sup>①</sup>  
Fig. 1 Ratio of (E) F0 tornado reports to total reports for 1950-2010

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,

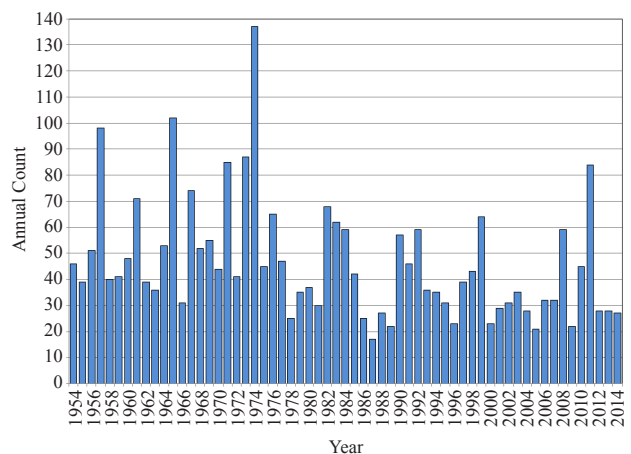


图2 1954—2014年EF3及以上强龙卷数量统计特征<sup>②</sup>  
Fig. 2 Annual count of strong to violent tornadoes (F3+) for 1954-2014 in USA

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。

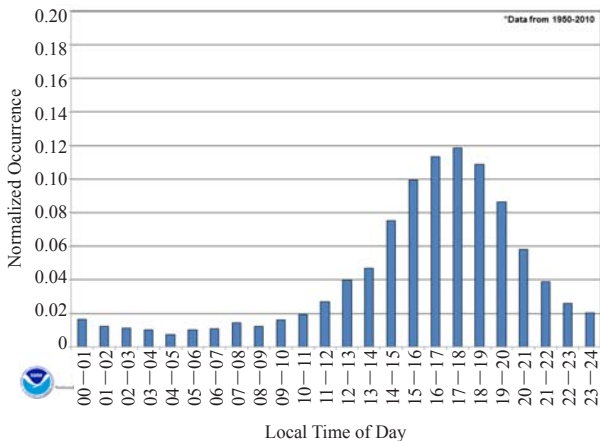


图3 1950—2010年美国龙卷出现的日变化统计特征<sup>①</sup>  
Fig. 3 Daily changes of tornado occurrence for 1950–2010 in USA

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

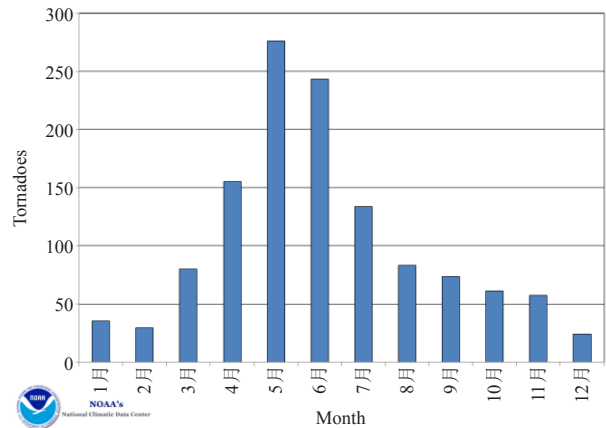


图4 1991—2010年美国龙卷各月出现的平均个数<sup>②</sup>  
Fig. 4 Monthly average number of tornadoes for 1991–2010 in USA

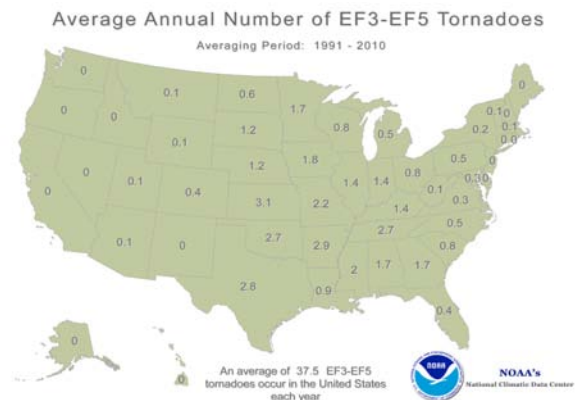


图5 1991—2010年美国各州年平均强龙卷（EF3–EF5）发生个数分布图<sup>③</sup>  
Fig. 5 Distribution of average annual number of EF3–EF5 tornadoes in States of USA for 1991–2010

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，出现龙卷时空高风较强。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)。

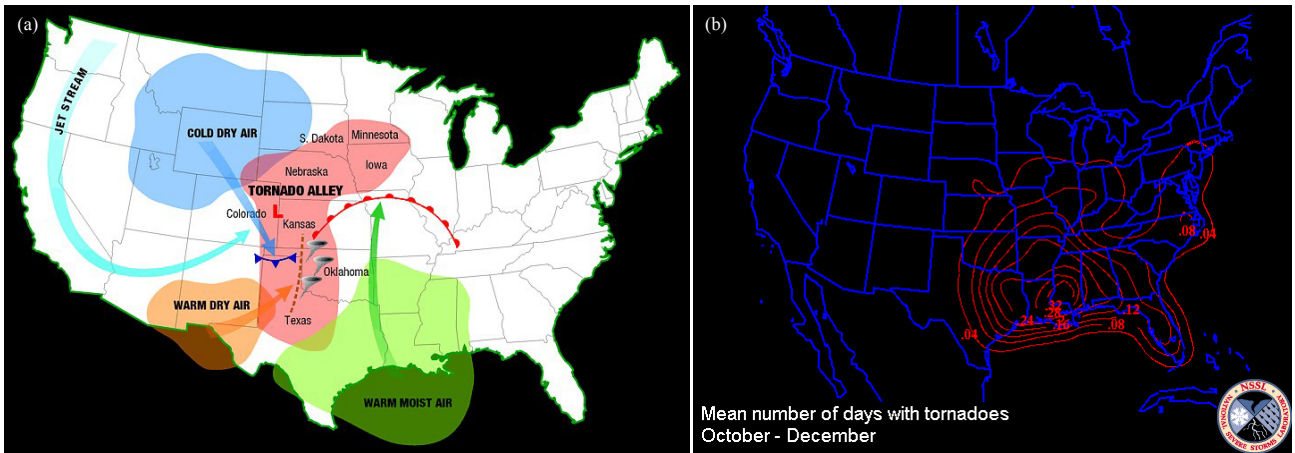


图6 龙卷走廊示意图 (a)<sup>①</sup> 和迪克西走廊 (b)<sup>②</sup> (等值线为10—12月龙卷发生的平均日数)

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。

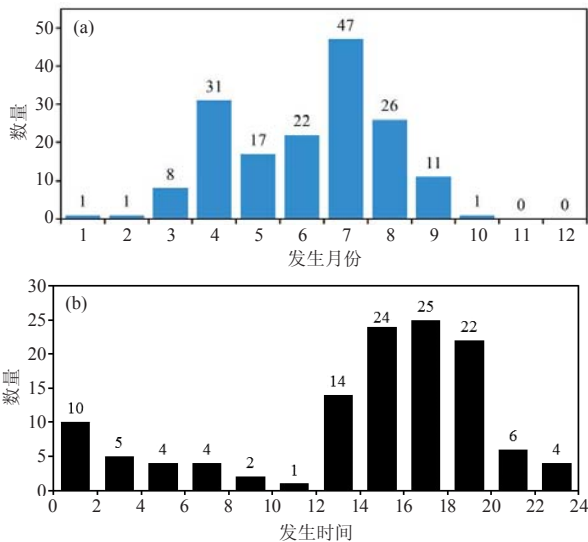


图7 1961—2010中国EF2或以上级龙卷发生数月变化 (a) 和日变化 (b) [48]

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 km·h<sup>-1</sup>，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

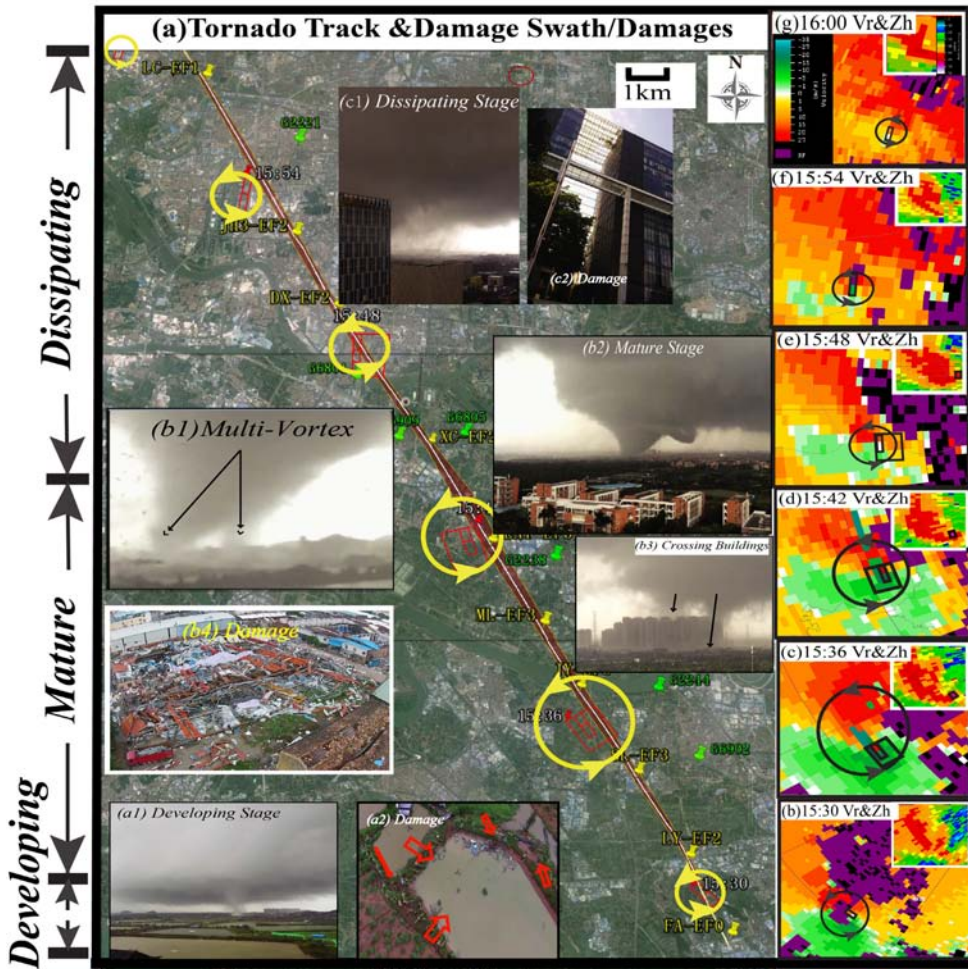


图8 (a) 为2015年10月4日佛山龙卷路径 (白色实线) 及其灾情影响范围 (红色阴影) 和灾情图片, 底图来自谷歌地球卫星影像图。(a1), (b1)~(b3), (c1) 为分别为龙卷初生、成熟、消亡阶段的形态图, (a2), (b4), (c2) 分别为龙卷初生、成熟、消亡阶段地面灾情图; 图中6个带箭头的黄色圆为15:30—16:00 (间隔6 min) 广州番禺多普勒雷达 (距离佛山24 km) 0.5°仰角径向速度图中中气旋 (Meso-Cyclone) 所在位置, 其中相邻两个红色小矩形为正负速度对所在位置, 大矩形为当时次钩状回波的最大回波反射率 (c), (d) 和 (e) 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°仰角径向速度 Vr, 其右上角小图为当时次0.5°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° 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。

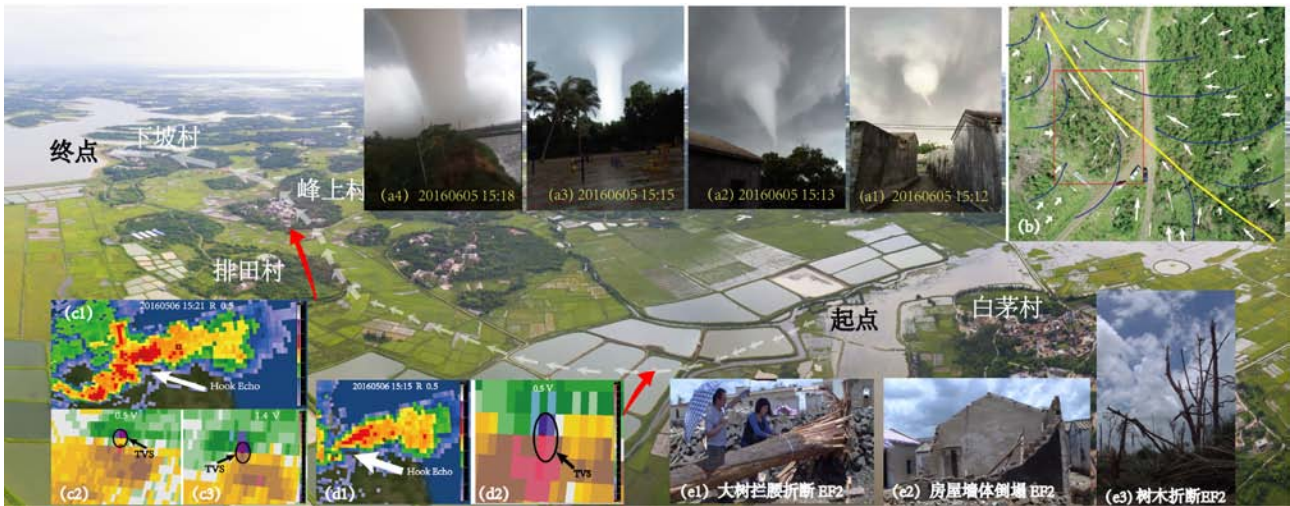


图9 2016年6月5日海南龙卷路径(白色虚线箭头)及形态图(a1~a4)、地面灾情指示物倒伏的流场分布(b)、雷达反射率回波及径向速度图(c~d)及地面灾情照片(e1~e3);(底图为无人机所拍的照片)

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

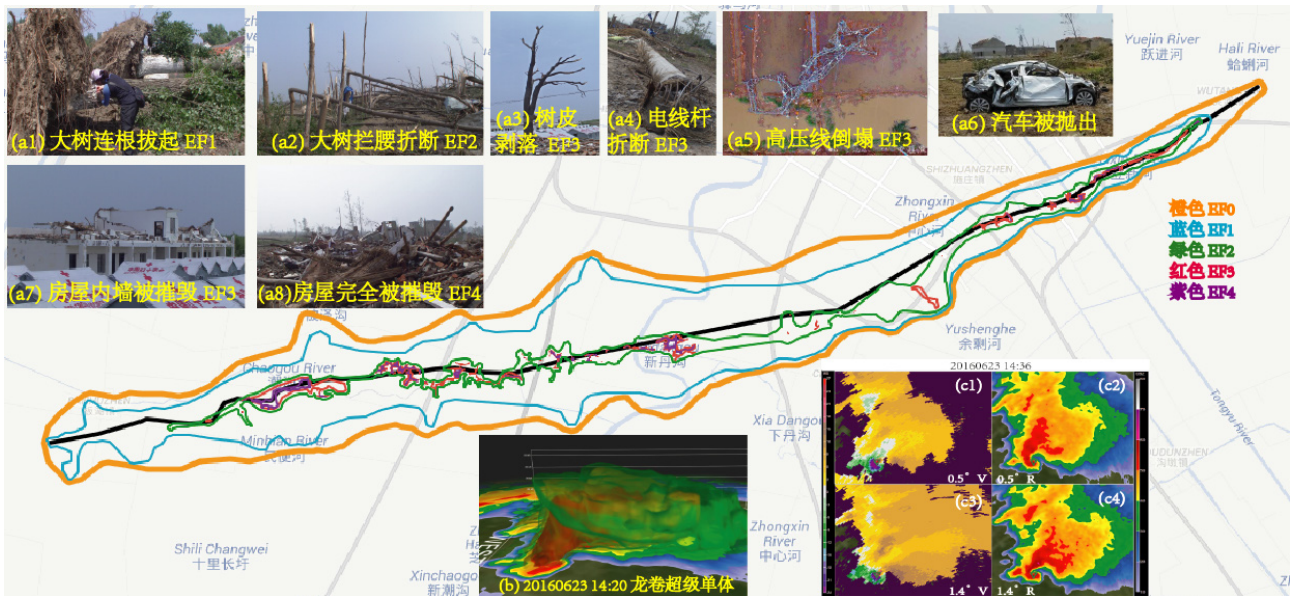


图10 2016年7月23日江苏省盐城市阜宁龙卷路径（橙色到紫色实线）、灾情（a1~a8）及雷达反射率回波及径向速度图（b~c）

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。

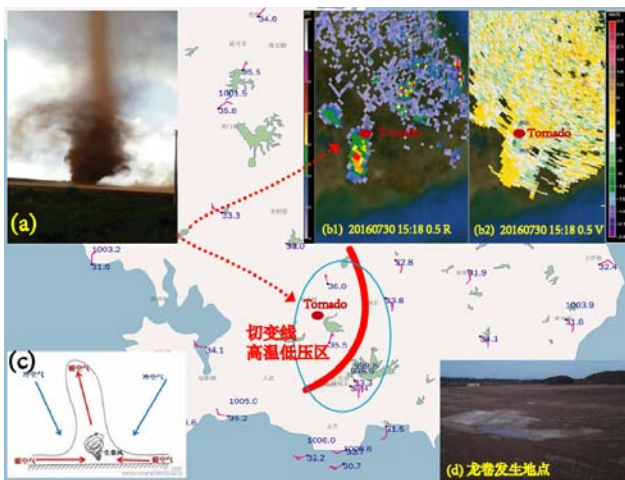


图11 2016年7月30日广东省湛江市徐闻龙卷照片(a)、雷达反射率回波及径向速度图（b1~b2）、尘卷风物理机制图（c）及龙卷发生地照片（d）（底图为广东地面自动站分布图）

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

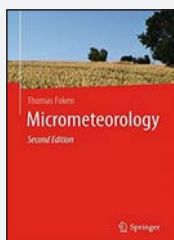
- [1] Antonescu B, Schultz D M, Lomas F, et al. Tornadoes in Europe: synthesis of the observational datasets. *Monthly Weather Review*, 2016, 144(7): 2445-2480.
- [2] Peterson R E, Letzmann J. A pioneer in the study of tornadoes. *Weather and Forecasting*, 1992, 7(1): 166-184.
- [3] Peltier J C A. *Météorologie: 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.
- [4] Wegener A. *Wind- und Wasserhosen in Europa (Tornadoes and Waterspouts in Europe)*. Braunschweig: Vieweg, 1917: 301.
- [5] Letzmann J. *Tromben im ostbaltischen gebiet (Tornadoes in the east Baltic area)*. Sitzber Naturforsch Gesellsch, 1920, 26: 7-46.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Letzmann J. Experimentelle Untersuchungen an Luftwirbeln (Experimental investigations on air vortices). *Beitr. Geophys*, 1931, 33: 130-172.
- [9] Feuerstein B, Groenemeijer P. In memoriam Nikolai Dotzek. *Atmosphere Research*, 2011, 100(4): 306-309.
- [10] Rauhala J, Schultz D M. Severe thunderstormand tornado warning in Europe. *Atmosphere Research*, 2009, 93(1-3): 369-380.
- [11] 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.
- [12] Fujita T T. Tornadoes and downbursts in the context of generalized planetary scales. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1981, 38(8): 1511-1534.
- [13] Fujita T T. The Teton-Yellowstone tornado of 21 July 1987. *Monthly Weather Review*, 1989, 117(9): 1913-1940.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Samaras T, Lee J. Measuring tornado dynamics with In-Situ instrumentation. *Structures Congress*, 2006: 1-10.
- [17] 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.
- [18] 查玉泉. 一次龙卷的雷达回波探讨. *气象*, 1979, 5(4): 30-34.
- [19] 甄长忠, 刘德荣. 一次龙卷回波分析. *高原气象*, 1982, 1(31): 95-98.
- [20] 徐良炎. 一九八七年我国龙卷灾害. *灾害学*, 1988, 3(2): 60-62.
- [21] 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.
- [22] 魏文秀, 赵亚民. 中国龙卷风的若干特征. *气象*, 1995, 21(5): 37-40.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [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.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [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报. *高原气象*, 2012, 31(6): 1721-1730.
- [39] 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.
- [40] 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

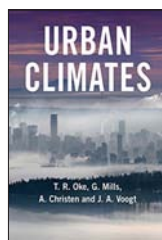
## NEW BOOK

 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

# 龙卷生成动力学初探

高守亭<sup>1, 2</sup> 左群杰<sup>1</sup> 杨帅<sup>1</sup>

(1中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴实验室, 北京 100029; 2中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 初步探讨了龙卷生成的动力学因素, 其中包含垂直运动的产生、能量的集中和释放以及涡旋的发展。强对流中的强垂直运动取决于对流层中层水平运动的风速, 对流层中层大风的出现是强对流发展的信号, 也是一种预报指标。同时, 大的垂直运动必造成大气中层及其以下的强辐合, 因此中层以下的强辐合区也是一个预报积云发展的重要指标。在能量分析过程中最主要的是寻找能量辐合线。如果这条辐合线遇到了较大的垂直运动上升区, 会使能量在这条辐合线的垂直运动最大上升区处得以释放, 使积云系统进一步发展。在较平坦的地带如果辐合线及能量极值线上出现较大的浮力旋度, 则会产生涡旋。这种涡旋又进一步引起速度的变化及垂直运动的形成, 促进旋转区垂直运动的加强, 形成极小范围的涡旋柱, 即出现龙卷。

**关键词:** 龙卷, 动力, 涡旋

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2018.02.002

## A Preliminary Study on the Dynamics of Tornado Formation

Gao Shouting<sup>1, 2</sup>, Zuo Qunjie<sup>1</sup>, Yang Shuai<sup>1</sup>

(1 Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Severe Storms (LACS), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

**Abstract:** In this paper, the kinetic factors of tornado formation are discussed, including vertical motion, energy concentration and release, and vortex development. Strong vertical motion in strong convection depends on the horizontal wind velocity in the middle troposphere. The occurrence of strong wind in the middle troposphere is the signal of strong convective development, and is also a prediction index. At the same time, the large vertical motion must causes strong convergence between the middle and low troposphere, so the strong convergence zone below the middle troposphere is also an important index to predict the development of cumulus. In the process of energy analysis, the most important thing is to find the energy convergence line. If the convergence line encounters a larger vertical motion, the energy will be released at the regions of the maximum vertical motion of the convergence line, so that the cumulus system will be developed. In relatively flat areas, if there is buoyancy curl in larger convergence line and energy extreme line, the vortex will be produced. This vortex further causes the formation of horizontal velocity and vertical movement, then it strengthens the vertical movement of the rotational zone, so that vortex column forms, namely the tornado appears.

**Keywords:** tornado, dynamics, vortex

### 0 引言

龙卷是迅速旋转的空气柱, 这个空气柱可以接触到地面, 也就是说龙卷是柱状的涡旋, 会带来大风, 甚至暴雨和冰雹, 所以通常又称为龙卷风。在干旱或沙漠地区也有龙卷存在, 它是以携带沙尘和碎石而被人们观测到的旋转气柱。在海上或湖泊里也会出现水龙卷, 可

以看到水面以上的空中水柱及漏斗云的存在。

龙卷的生命史很短, 大部分生命史是10 min到1 h, 影响范围从几米到2 km, 但龙卷旋转性强, 风力大, 带有很大的破坏性, 常造成大树连根拔起、房屋倒塌、人员伤亡等灾害。

我国龙卷多发生在苏北、河南中东部以及广东佛山、湛江一带(图1), 即相对较平坦的地区。同样, 在美国多发生在俄克拉荷马及周边地区也是相对平坦的地方。因为在这样比较平坦的地方其下层容易因为热力差异而造成明显的空气辐合及因大气中低层强风切变而造成上升运动产生局地对流, 进而发展成龙卷。

在国外, 特别是美国, 对龙卷的研究很多, 如

收稿日期: 2017年8月11日; 修回日期: 2018年2月4日  
第一作者: 高守亭(1944—), Email: gst@mail.iap.ac.cn  
通信作者: 左群杰(1982—), Email: zqj@mail.iap.ac.cn  
资助信息: 国家自然科学基金重大研究计划(91437215);  
国家自然科学基金项目(41575047, 41575064)

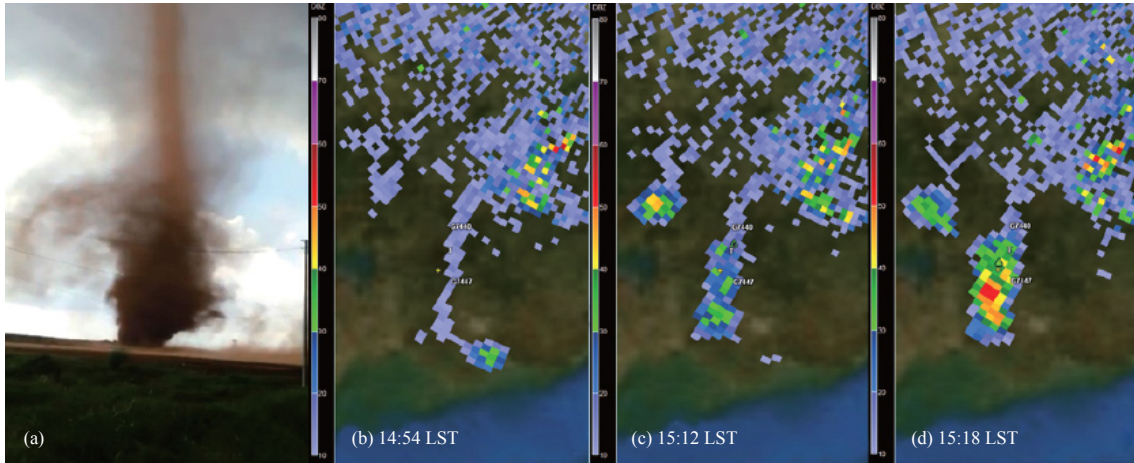


图1 广东湛江龙卷<sup>[1]</sup>  
Fig. 1 A tornado occurred in Zhanjiang of Guangdong Province

Agee等<sup>[2]</sup>, Alexander等<sup>[3]</sup>, Bluestein<sup>[4-5]</sup>, Brown等<sup>[6]</sup>, Davies-Jones<sup>[7-8]</sup>在我国对龙卷也做过一些研究,特别是北京大学孟智勇<sup>[9]</sup>。但目前主要限于观测事实的揭露和结构动力的诊断分析,对其发展的动力学在我国甚至在世界范围内都很少研究。

### 1 龙卷发展过程中的动力学

龙卷的生成有4个阶段。第一,对流单体的生成与发展;第二,能量的集中与释放;第三,涡旋的形成与变化;第四,涡度的集中与收缩。依据这4个阶段对龙卷的发展有如下动力学看法。

#### 1.1 对流云中强垂直运动的出现

以往对垂直运动的估计有几种不同的方法,主要有连续性方程计算方法,即利用P坐标系中的连续性方程,通过积分而得到垂直运动。这种方法有一定缺陷,因为垂直运动满足了连续性方程但是不一定满足热力方程和动量方程。真正垂直运动的计算还是应从动量方程出发求得。在任何短的瞬间,运动可以看成定常的,即有 $\frac{\partial V}{\partial t} \approx 0$ ,于是有

$$\frac{dV}{dt} + f\mathbf{k} \times V = -\alpha_0 \nabla p' + B\mathbf{k}, \quad (1)$$

即为

$$V \cdot \nabla V + f\mathbf{k} \times V = -\alpha_0 \nabla p' + B\mathbf{k}, \quad (2)$$

其中 $B\mathbf{k}$ 为浮力。

方程(2)两边同时点乘速度方向上的位移 $d\mathbf{r}$ ,于是有

$$(V \cdot \nabla V) \cdot d\mathbf{r} + (f\mathbf{k} \times V) \cdot d\mathbf{r} = -\alpha_0 \frac{\partial p'}{\partial z} \cdot d\mathbf{r} + Bdz, \quad (3)$$

或写为

$$\nabla \left( \frac{1}{2} V \cdot V \right) \cdot d\mathbf{r} + [(\nabla \times V) \times V] \cdot d\mathbf{r} = -\alpha_0 p' + Bdz, \quad (4)$$

即

$$d\left(\frac{1}{2} V^2\right) = -\alpha_0 dp' + Bdz, \quad (5)$$

两边积分得

$$\int d\left(\frac{1}{2} V^2\right) + \alpha_0 \int dp' - \int Bdz = 0, \quad (6)$$

从方程(6)可知

$$\frac{1}{2} |V^2|_{\text{end}} - \frac{1}{2} |V^2|_{\text{initial}} + \alpha_0 p'_{\text{end}} - \alpha_0 p'_{\text{initial}} - \int Bdz = 0, \quad (7)$$

对初始远离积云发展区的运动的空气质点,可认为 $p'_{\text{初}}=0$ ,则初始时也有 $B=0$ 。方程(7)可简化为

$$\frac{1}{2} |V^2| - \frac{1}{2} |V^2|_{\text{initial}} + \alpha_0 p' = 0, \quad (8)$$

得到

$$\alpha_0 p' = \frac{1}{2} |V^2|_{\text{initial}} - \frac{1}{2} |V^2|, \quad (9)$$

对在从对流层低层向对流层中层运动的空气质点,有理由认为 $|V|$ 的值 $>|V|_{\text{initial}}$ 的值,因为空气质点在保持动量守恒的过程中,从低层走向高层时,空气的密度明显减小,而迫使质点的速度加大,以满足动量守恒,于是可推测到

$$\frac{1}{2} |V^2| = \frac{1}{2} |V^2|_{\text{initial}} + \alpha |V^2|, \quad (10)$$

其中 $0 < \alpha < 1$ 。

将方程(10)代入到方程(9)得到

$$\alpha_0 p' = \frac{1}{2} |V^2| - \frac{1}{2} |V^2|_{\text{initial}} - \alpha |V^2| = -\alpha |V^2|, \quad (11)$$

将方程(11)代入到方程(7),并认为是在对流区内,则有

$$\frac{1}{2} w_m^2 = \frac{1}{2} |V^2|_{\text{initial}} + \alpha |V^2| + \int Bdz, \quad (12)$$

在对流层中层CAPE可表示为

$$CAPE = \int_{\text{自由对流高度}}^{\text{中层}} Bdz, \quad (13)$$

故有

$$w_m^2 = 2CAPE + |V^2|_{\text{initial}} + \alpha |V_m^2| \quad (14)$$

由此可以看出，强对流系统中垂直运动 $w$ 的值应如式(14)表达，同时也应满足连续性方程。由于对流层中层风速较大，所以 $w_m$ 的值明显取决于对流层中层水平运动的风速 $V_m$ 。可见，对流层中层大风的出现是强对流发展的信号，也是一种预报指标。再者，由于 $w_m$ 应满足连续性方程，大的垂直运动必造成大气中层及其以下的强辐合，因此中层以下的强辐合区也是一个预报积云发展的重要指标。

## 1.2 能量的集中与释放

任何系统的发展都需要能量的供给。因此寻找局地能量集中区，也是龙卷发展过程中的重要环节。由于能量集中一般在时间尺度上是短时的，所以不用考虑科氏力的作用，所以有如下运动方程<sup>[10]</sup>

$$\rho \frac{dV}{dt} = -\nabla p - \rho \nabla \phi, \quad (15)$$

这里 $\phi$ 是重力势，单位体积的动能为 $K = \rho V^2 / 2$ 。

方程(15)两边同时点积 $V$ ，则有

$$\frac{1}{2} \rho \frac{dV^2}{dt} = -V \cdot \nabla p - V \cdot \rho \nabla \phi = -\nabla \cdot (pV) + \rho \nabla \cdot V - \rho V \cdot \nabla \phi, \quad (16)$$

对短时间天气过程来说，可以看成是绝热的，因此有内能变化为

$$\rho \frac{dI}{dt} = -p \nabla \cdot V, \quad (17)$$

其中 $I = c_v T$ ，且有

$$\rho \frac{d\phi}{dt} = \rho V \cdot \nabla \phi, \quad (18)$$

利用式(16)~(18)可以得到

$$\rho \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} V^2 + I + \phi \right) = -\nabla \cdot (pV), \quad (19)$$

利用质量连续性方程有

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \nabla \cdot [(p+E)V] = 0, \quad (20)$$

其中： $E = \rho \left( \frac{1}{2} V^2 + I + \phi \right)$

方程(20)可进一步写为

$$\frac{\partial E}{\partial t} = -\nabla \cdot [(p+E)V], \quad (21)$$

可见预报 $\frac{\partial E}{\partial t}$ 最大值的地区是很重要的，由于 $\nabla \cdot [(p+E)V] = (p+E)\nabla \cdot V + V \cdot \nabla(p+E) = V \cdot \nabla(p+E)$ 故

$$\frac{\partial E}{\partial t} = -V \cdot \nabla(p+E). \quad (22)$$

可见在能量分析过程中第一步要先寻找能量梯度集中处，然后要看风场对能量梯度的平流。当然最

主要的是寻找能量的极值，即 $\frac{\partial E}{\partial t} = 0$ 的位置。由公式(22)可知必有 $-V \cdot \nabla(p+E) = 0$ ，即能量辐合线上。可见有两边风场对吹，使能量集中而有稳定少动的能量辐合线的存在是很重要的。如果这条辐合线遇到了较大的垂直运动上升区，才会使能量在这条辐合线的垂直运动最大上升区处得以能量释放，使积云系统进一步发展。因此，在天气图上或数值模拟分析图上寻找 $V = 0$ 的辐合线以及 $\nabla(p+E) = 0$ 的能量极值线是非常重要的。爬线的发生常与这种辐合线与能量极值线的重合有关，也就是在这条线上促进了强对流云的发展。

## 1.3 涡旋的发展

对龙卷来说，不是通常定义下的用里查逊数 $Ri$ 来研究其不稳定。如在 $Ri < 1$ 时会出现对称不稳定，在 $Ri < 0.25$ 时会出现切边不稳定。因为用里查逊数表示的不稳定都是一种波动类型的不稳定，其不稳定可使扰动以波动的形式增长或衰减。可是，龙卷最大的特性是其旋转性，是涡旋的发展及加强。针对这种问题，有两种讨论方法，其一是如果这个龙卷是从地表发展起来的，那它很可能与地表加热或与近地面风切变有关，因为在垂直涡度方程中有

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -V \cdot \nabla \zeta + \left( \frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial \omega}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \frac{\partial \omega}{\partial x} \right) - \zeta \nabla_H \cdot V + J(p, \alpha), \quad (23)$$

方程(23)右边第二项是水平涡度向垂直涡度的转换项。从这一项中可以看出，如果有明显的水平涡度向垂直涡度转换，则要求 $\frac{\partial u}{\partial z}$ 或 $\frac{\partial v}{\partial z}$ 要大。在平原地带通常会出现925 hPa上的低空急流，因此在下边界出现了 $\frac{\partial u}{\partial z}$ 或 $\frac{\partial v}{\partial z}$ 较大的条件，但是在山区因地形不平坦，不易出现925 hPa上的低空急流，所以很难形成 $\frac{\partial u}{\partial z}$ 或 $\frac{\partial v}{\partial z}$ 的大值，这也是为什么龙卷总是在平坦地区出现而不会出现在山区的原因。另一方面与 $\frac{\partial \omega}{\partial y}$ 及 $\frac{\partial \omega}{\partial x}$ 也有关系。前面讲过高能区或零风速线是产生强对流的源地。在这条零风速线上或高能线上，可得到 $\frac{\partial \omega}{\partial x} \approx 0$ 。因只要设 $x$ 方向沿零风速线即会出现在 $x$ 方向上垂直运动变化不大，而通常有 $\frac{\partial \omega}{\partial y}$ 比较大，这和爬线的产生机制是一致的。爬线前有较明显的入流上升运动而其后有明显的下沉运动，所以南北对比 $\frac{\partial \omega}{\partial y}$ 比较大。这里的关键因素还是取决于 $\frac{\partial u}{\partial z} > 0$ ，可见低空急流是促进水平涡度向垂直涡度转换的关键因素。从涡度方程(23)中还可以看出 $\nabla_H \cdot V < 0$ 时即水平辐合也是使涡度增长的重要

因素。在零风速线上明显存在着水平风的辐合有利于涡度的发展。在这里还有一个关键因素是

$$J(p, \alpha) = \frac{\partial p}{\partial x} \frac{\partial \alpha}{\partial y} - \frac{\partial p}{\partial y} \frac{\partial \alpha}{\partial x} = \mathbf{k} \cdot (\nabla p \times \nabla \alpha) = \mathbf{k} \cdot (\nabla_H p \times \nabla_H \alpha) = \mathbf{k} \cdot (\nabla_H p \times \nabla_H T) \frac{R}{p} \quad (24)$$

在爬线或大的对流单体发生的时候，由于其前的入流及其后的出流会形成气压及温度梯度分布，这样就有利于涡度生成。

另一方面还可以从环流的角度来考察涡度的生成。在Boussinesq近似下，运动方程可写为

$$\frac{d\mathbf{V}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p' + B\mathbf{k}, \quad (25)$$

由于  $\oint \nabla \frac{p}{\rho} \cdot d\mathbf{l} = 0$ ，所以有  $C = \oint \mathbf{V} \cdot d\mathbf{l}$ ，得到

$$\frac{dC}{dt} = \oint \frac{d\mathbf{V}}{dt} \cdot d\mathbf{l} = \oint B\mathbf{k} \cdot d\mathbf{l}, \quad (26)$$

由stokes原理得知  $\frac{dC}{dt} = \oint B\mathbf{k} \cdot d\mathbf{l} = \iint (\nabla \times B\mathbf{k}) \cdot d\mathbf{A}$ ，于是有

$$\frac{dC}{dt} = -\mathbf{V} \cdot \nabla C + \iint (\nabla \times B\mathbf{k}) \cdot d\mathbf{A}, \quad (27)$$

由于发生在零风速线上，可以认定  $-\mathbf{V} \cdot \nabla C \approx 0$ ，因此得到

$$\frac{dC}{dt} = \iint (\nabla \times B\mathbf{k}) \cdot d\mathbf{A}, \quad (28)$$

同时，也有  $\iint \frac{\partial \zeta}{\partial t} d\mathbf{A} = \frac{\partial}{\partial t} \iint \zeta d\mathbf{A} = \frac{\partial C}{\partial t}$ ，可见  $\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \nabla \times B\mathbf{k} = \frac{\partial B}{\partial y} \mathbf{i} - \frac{\partial B}{\partial x} \mathbf{j}$ ，浮力  $B\mathbf{k}$  的旋度是涡度生成的源。由于  $B = -\frac{\rho'}{\rho} g = \frac{T'}{T} g$ ，地面热源满足  $Q \approx T'$ ，与扰动温度成比例，可见地表加热及南北涡度梯度的加大都会造成涡度的加强。

以上是从涡度和环流的方法分析涡度的加强与变化。还要回到最初设定  $\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} \approx 0$  的情况。事实上强旋转的系统都有一个共同的特点，其流动可称为Beltrami流<sup>[8]</sup>，即有涡度  $\boldsymbol{\omega}$  与速度场有如下关系

$$\boldsymbol{\omega} = \lambda \mathbf{V}, \quad (29)$$

其中  $\lambda$  是异常量<sup>[11]</sup>。运动方程可参考文献[8]，如下

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \nabla \left( \frac{V^2}{2} \right) - \mathbf{V} \times \boldsymbol{\omega} = -\nabla \sigma - \frac{1}{Re} \nabla \times \boldsymbol{\omega}, \quad (30)$$

其中  $-\nabla \sigma$  是非静力气压梯度力。  $Re$  是雷诺数 ( $Re = HW_0 / \nu$ )， $\nu$  是定常扰动黏性系数。

$$\sigma = G \frac{H_0}{H} \left[ \left( \frac{p}{p_0} \right)^\kappa - 1 \right] + Gz, \quad (31)$$

这里， $g$  是重力加速度， $p_0$  是地表静压； $H_0 = c_p \theta_0 / g$  是绝热大气标高； $G = gH / W_0^2$  是无量纲重力加速度； $H$

是研究区域的高度， $W_0$  是初始最大垂直速度。

由 (29) 可知，(30) 式为

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} = -\nabla \left( \sigma + \frac{V^2}{2} \right) - Re^{-1} \lambda \mathbf{V}, \quad (32)$$

由于在能量极值线上有  $-\nabla \left( \sigma + \frac{V^2}{2} \right) = 0$ ，于是有

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} = -Re^{-1} \lambda \mathbf{V}, \quad (33)$$

可见，速度的局地变化与雷诺数有关。对于自由大气来说  $Re$  很小，可以认为  $\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} \approx 0$ ，这说明文章开始时假定  $\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} \approx 0$  是相对合理的。

再者，(33) 式可写为

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} = -Re^{-1} \lambda \boldsymbol{\omega}, \quad (34)$$

可见旋转会引起速度的变化。同时， $\nabla \times \nabla \times \mathbf{V} = \lambda \nabla \times \mathbf{V} = \lambda^2 \mathbf{V}$  并利用恒等式  $\nabla \times \nabla \times \mathbf{A} = \nabla (\nabla \cdot \mathbf{A}) - \nabla^2 \mathbf{A}$  便知有  $\nabla \times \nabla \times \mathbf{V} = \lambda^2 \mathbf{V}$  的垂直分量为 (同时利用连续性方程  $\nabla \cdot \mathbf{V} = 0$ )

$$\nabla^2 w + \lambda^2 w = 0. \quad (35)$$

这说明涡度的旋度可以引起垂直运动。因此水平风场与旋转的不均匀都会引起垂直运动。

由以上分析可以看出，龙卷的发生最容易出现在较平坦的地带，因为在平坦地带才容易形成925 hPa上的低空急流，造成大气低层明显的垂直风切变，使空气质点具有较大的水平涡度。再者，大气对流层中层要有较大的风速或者中层急流得以存在，使得对流层中层有较强上升运动出现，这样就会有强对流发展。如果这种强对流是发生在风场辐合线上或在高能极值线上，就会出现像爬线一样的对流系统。如果在辐合线及能量极值线上出现某处的浮力旋度较大，则会产生涡旋。这种涡旋又进一步引起速度的变化及垂直运动的形成，促进旋转区垂直运动的加强，使对流层中低层空气质点由水平运动向垂直运动转化，也使水平涡度转变成垂直涡度，形成极小范围的涡旋柱，即出现龙卷。我国学者薛明等<sup>[11]</sup>利用自主研发的四维集合卡尔曼滤波方法同化雷达资料首次获得龙卷涡旋内部结构。从高度风场和涡度的回波以及钩状区风场、涡度和气压扰动的垂直剖面中可以看出明显的低层涡旋中心和钩状回波以及深厚的涡旋伴随的强上升运动和负气压扰动。

## 2 结论

这里从动力学上初步分析了龙卷小概率事件发生的可能条件，但由于问题复杂还需进一步探讨。

(下转35页)

# 龙卷数值模拟研究进展

姚聃

(中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081)

**摘要:** 龙卷尺度小、生命期短, 对其精细化观测十分困难, 数值模拟是可行而有效的分析研究工具。龙卷的数值模拟主要分为3类: 第一类龙卷模拟针对简化的类龙卷涡旋进行模拟, 研究龙卷的计算流体力学特征, 不考虑母体风暴; 第二类龙卷模拟以水平均匀初始场触发强对流过程, 研究超级单体风暴和其中生成的龙卷的精细化结构和演变过程, 其初始环境可以基于理想化或者实测探空廓线; 第三类龙卷模拟基于再分析资料和资料同化进行模拟, 研究实际环境中超级单体风暴触发环境及龙卷的形成过程。重点回顾龙卷数值模拟方法和主要工作进展, 分析影响龙卷数值模拟效果的关键问题, 包括龙卷生成机制、湍流过程与大涡模拟、数值敏感性以及受损物残骸等因素对龙卷模拟的影响。希望通过对这些工作的回顾促进我国龙卷数值模拟研究和龙卷预报预警业务。

**关键词:** 龙卷, 超级单体, 生成机制, 触发环境, 高分辨率, 大涡模拟

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2018.02.003

## Recent Progresses in the Numerical Simulation of Tornadoes

Yao Dan

(State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

**Abstract:** Numerical simulation is a powerful and feasible method to investigate the genesis and structures of tornadoes, due to their too small sizes and short duration to be captured by observations. This article briefly reviews the progress in simulating tornadoes. Laboratory simulators and highly theoretical tornado simulations are introduced first, followed by idealized simulations initiated with soundings and initial perturbations, as well as real-scenario simulations initiated with reanalysis data and data assimilation techniques. Key scientific issues concerning tornado simulation will be discussed, including the mechanism in tornadogenesis, turbulence and large eddy simulation, sensitivity and predictability, as well as the impact of tornado debris. It is hoped that this review may provide some useful information for performing high-resolution modeling studies of tornadoes in China.

**Keywords:** tornado, supercell, tornadogenesis/formation mechanism, trigger environment, high resolution, large eddy simulation (LES)

### 0 引言

近年来, 我国重大龙卷灾害多次发生, 造成严重的人员伤亡和经济损失, 引起了全社会的广泛关注。例如, 2015年6月1日发生在湖北监利的“东方之星”客轮倾覆事件曾经被认为是由龙卷所造成的, 其死亡人数超过400人<sup>[1]</sup>。2016年6月23日发生在盐城阜宁的EF4级强龙卷, 死亡人数高达98人<sup>[2]</sup>。迫切需要针对我国龙卷发生机理和结构演变的理论研究工作, 为龙卷预报预警提供科学依据。

龙卷是剧烈旋转的小尺度涡旋系统。它往往形成于超级单体风暴的对流云底部, 直径仅有几十米至几

百米, 维持时间仅有几分钟到几十分钟。即便是在龙卷灾害严重、研究较为充分的美国, 针对龙卷的有效预警时间也仅有短短的十几分钟, 并且预报准确率十分有限<sup>[3-4]</sup>。即使采用世界上最先进的高分辨率、快速扫描的移动雷达系统进行观测, 对于龙卷精细化结构和演变的分析研究仍然十分困难<sup>[5]</sup>。对于龙卷的完整认识, 离不开重建其近地面层次的三维风场和热力结构, 而这正是现有观测的难点所在。数值模拟成为研究龙卷的生成环境、内部结构以及发生发展过程的重要手段。

龙卷的数值模拟可以划分为理想模拟与实际模拟两大类。具体而言又可以细分为以下几种类型: 1) 高度简化、不考虑母体风暴发展的计算流体力学模拟; 2) 基于理想化或者实测探空廓线、考虑母体风暴发展的理想模拟; 3) 基于再分析资料并结合资料

收稿日期: 2017年9月13日; 修回日期: 2018年3月13日

第一作者: 姚聃(1987—), Email: yaod@cma.gov.cn

资助信息: 国家自然科学基金项目(41705028); 中国气象科学研究院基本科研业务费项目(2017Y018)

同化的实际模拟。几类方法各有其特色与优势,着眼于解决不同尺度的龙卷动力学问题。本文将首先回顾龙卷数值模拟的主要方法和研究进展,然后讨论当前龙卷数值模拟研究中存在的主要问题,最后是对我国龙卷数值模拟研究的展望,以期为我国亟待加强的龙卷数值模拟研究和龙卷预报预警业务提供参考。

## 1 龙卷数值模拟的基本方法与研究成果

### 1.1 龙卷的计算流体力学模拟

最初的龙卷模拟采用的是实验室转盘装置<sup>[6]</sup>,随后衍生出与此相对应的计算流体力学数值模拟方法。这类模拟高度简化了龙卷的生成环境和母体对流风暴,而仅仅关注于类龙卷涡旋(tornado-like vortices)的生成和结构。基于该方法的龙卷数值模拟为理解龙卷涡旋的动力结构提供了依据。这些实验揭示了仅包含有上升运动的单核龙卷、包含有中心下沉气流的双核龙卷以及围绕中心旋转的多涡旋龙卷的基本形态<sup>[7]</sup>。大量理论和模拟研究表明,龙卷在近地面的旋转可以达到比中层旋转强两个数量级的程度<sup>[8]</sup>。龙卷生成与加强的核心问题在于,中层旋转在近地面如何加强。Lewellen等<sup>[9-10]</sup>研究发现,近地面旋转与入流之间的拐角气流(corner flow)的崩溃过程对于龙卷的加强十分关键,近地面入流的差异是结构相似的超级单体能否产生龙卷的可能影响因子。

### 1.2 基于理想背景的龙卷模拟

尽管龙卷的计算流体力学模拟可以给出龙卷涡旋的流场结构,但其最主要的局限在于,模拟出的龙卷过程并不是在母体风暴中孕育形成的。为解决这一问题,采用三维非对称的非静力平衡模式的数值模拟工作应运而生。模拟的方案是在水平均匀初始场上叠加反映对流触发的初始扰动。初始场可以采用理想化的探空廓线生成,或者采用实际观测探空以及多探空合成的垂直廓线。前者可以测试热力场和风场对于超级单体和龙卷生成的影响及其机理,后者则通过采用实际龙卷个例的临近探空(proximity sounding)来模拟精细化的龙卷结构和演变过程,其优势在于可以使用有限的运算资源针对龙卷进行高分辨率精细模拟。初始扰动的方案有许多,最常用的是旋转椭圆形热泡(warm bubble)。Naylor等<sup>[11]</sup>提出了强迫抬升(updraft-nudging)方案,控制初始对流的启动在一段时间内保持恒定。Letkewicz等<sup>[12]</sup>设计了基态探空替换(base-state substitution)方案,在保留模式积分中已形成扰动的基础上实现了对环境场的调整。

Markowski等<sup>[13]</sup>使用冷源与热源相互分离的干过程模拟测试了冷池强度与低层垂直风切变对龙卷生

成的影响,并指出,中等强度的冷池以及较强的垂直风切变是强近地面类龙卷涡旋发生的必要条件。Nowotarski等<sup>[14]</sup>研究了切变对流边界层中,水平对流卷(horizontal convective rolls)的存在对于超级单体低层中气旋的影响机理。与水平均匀初始场相比,当超级单体移动方向与对流卷垂直时,其低层中气旋减弱;当超级单体移动方向与对流卷平行时,其低层中气旋加强。除了针对低层旋转增强机制的研究以外,Davenport等<sup>[15]</sup>使用基态探空替换方案研究了环境场的不均匀性对于超级单体维持和消亡的影响。

Orf等<sup>[16]</sup>对于实际龙卷过程进行了精细化理想模拟(图1)。该工作采用CM1模式<sup>[17]</sup>R16版本进行,水平分辨率高达30 m。模拟初始场的探空廓线来自美国快速更新循环系统(Rapid Update Cycle, RUC)的1 h预报中,2011年5月24日俄克拉荷马州中部地区的一次EF5级龙卷过程的风暴右侧区域。该环境具有很大的不稳定能量(CAPE值为 $4893 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ )及垂直风切变(0~6 km切变为 $27 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )。模拟所得到的超级单体生命期超过2.5 h,并表现出典型超级单体特征,与观测接近。模拟中的龙卷达到EF5级,生命期为118 min,移动轨迹长度120 km;观测中的龙卷生命期为105 min,移动轨迹长度101 km。该模拟完整展现了龙卷的生成、维持和消亡过程。前侧下沉气流的流出边界处交替形成的正负涡度对沿着该边界向后侧移动,并在前侧和后侧下沉气流出流边界的交汇点聚集,逐渐形成龙卷涡旋。

Yao等<sup>[18]</sup>针对造成严重破坏的2016年6月23日江苏省盐城市阜宁县EF4级龙卷进行了数值模拟(图2)。模拟使用CM1模式R18版本,采用伸缩网格设计将龙卷附近最高分辨率提升至25 m。模拟结果与雷达观测特征和灾害调查数据基本相符。模拟中的龙卷伴随有清晰的漏斗云,并呈现出已有研究中未受关注的双螺旋型结构。龙卷生成过程中,最初的信号是在云底降低的扰动气压,随之形成同时向上和向下发展的强垂直速度和涡度中心。龙卷消亡过程中,涡度中心出现下沉气流并显著增强,其维持受到抑制。分析表明,造成风灾的是超级单体内部相互影响的3个强风区域,而不仅是龙卷环流本身。

### 1.3 基于真实背景的龙卷模拟

随着计算技术的提升,对超级单体风暴乃至龙卷过程的直接模拟逐渐成为可能。Xue等<sup>[19]</sup>采用ARPS模式对一次超级单体龙卷过程进行了数值模拟,其最内层网格的水平分辨率为50 m。通过在模拟中引入下垫面摩擦过程,该工作表明,地面摩擦作用产生的

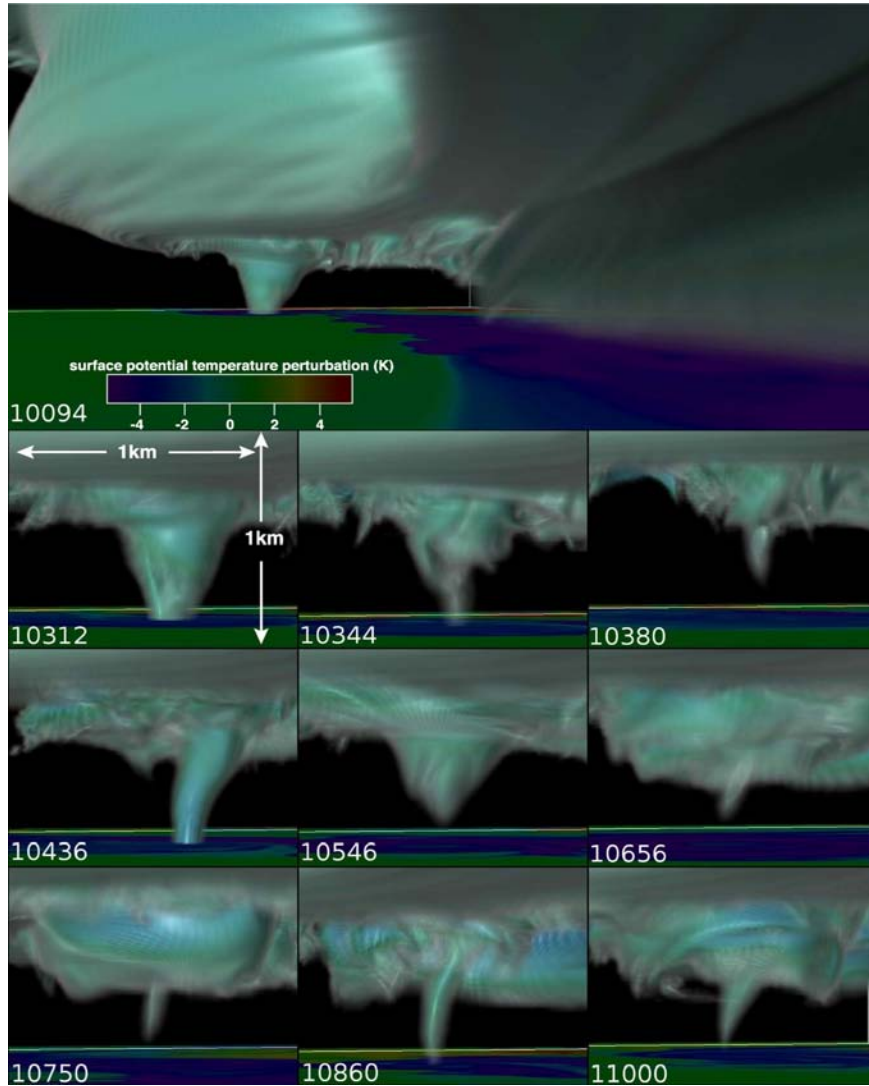


图1 美国俄克拉荷马州“5.24”龙卷数值模拟结果示例<sup>[16]</sup>  
Fig. 1 Simulated structure of the tornado on 24 May 2011 in El Reno, Oklahoma, U.S.<sup>[16]</sup>

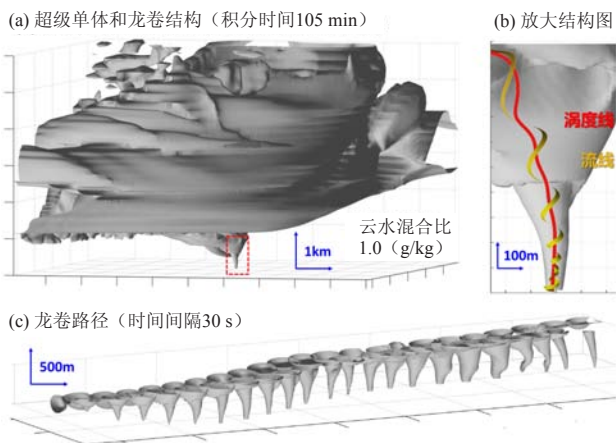


图2 江苏盐城“6.23”龙卷数值模拟结果示例<sup>[17]</sup>  
Fig. 2 Simulated structure of the tornado on 23 June 2016 in Funing County, Yancheng, Jiangsu Province<sup>[17]</sup>

水平涡度是龙卷低层涡度的重要来源。在对于龙卷的实际模拟中，多普勒天气雷达资料的有效同化是改进模拟效果的重要保障。Mashiko<sup>[20-21]</sup>使用日本气象厅研发的非静力平衡模式对2012年5月6日发生在筑波市（Tsukuba）的EF3级龙卷进行了数值模拟。该模拟采用的地形分辨率高达50 m，采用三重单向嵌套网格，最内层水平分辨率为50 m，近地面垂直分辨率为20 m。模式的初始场和边界条件采用了四维变分同化。对龙卷生成过程的环流分析表明，低层中气旋的增强来源于超级单体前侧阵风锋所造成的斜压性涡度，以及地表摩擦贡献<sup>[20]</sup>；而龙卷形成的触发因子则是后侧下沉气流流出与抬升气流的交汇对后侧阵风锋斜压性涡度的抽吸作用<sup>[21]</sup>。

在上述工作中，资料同化对于模拟效果起到了

重要的作用。为测试资料同化对于龙卷实际模拟和预报的效果, Supinie等<sup>[22]</sup>采用VORTEX2外场观测试验中得到的多种资料进行对比测试。结果表明, 绝大多数移动雷达观测资料和加密观测的临近探空对于2009年6月5日Goshen龙卷过程的模拟都有正效果。具体而言, 上游入流区域的探空会造成入流速度的减弱, 从而造成风暴抬升强度的降低。抬升的增强和由此导致的低层涡旋拉伸作用的增大导致了预报后期抬升螺旋度(updraft helicity, UH)的增强。

需要指出的是, 资料同化对于龙卷实际模拟而言并非必不可少。Hanley等<sup>[23]</sup>采用英国气象局一体化模式MetUM, 在不应用资料同化的条件下使用100 m分辨率模拟对2013年5月20日美国Moore龙卷进行模拟, 成功再现了超级单体结构、龙卷漏斗云以及近地面强风。尽管模拟结果存在位置和时间上的偏差, 其结果表明, 在缺少雷达资料进行边界强迫的条件下, 对龙卷性超级单体的高分辨率实际模拟是可能的, 这对于龙卷模式预报技术研究有重要意义。

除上述工作外, 由于计算资源的限制, 大多数实际模拟很难精细到龙卷的尺度。在这种情况下, 超级单体中所包含的抬升螺旋度及低层中气旋往往被用来作为识别龙卷的指标, 以研究龙卷形成的环境以及对龙卷的预报。Yokota等<sup>[24]</sup>使用350 m分辨率数值模拟对发生在日本的一次龙卷过程的研究表明, 低层中气旋的模拟强度对于风暴前侧的低层辐合以及风暴后侧的低层相对湿度具有较强的敏感性, 近地面观测资料的有效同化对于龙卷的模式预报具有十分关键的影响。

此外, 也有一些工作采用水平非均匀场的模拟研究地形在龙卷生成过程中的作用机制。比如, 在同时受到山地和海气作用影响的地中海沿岸地区, 地形影响下的龙卷生成机制与美国大平原地区相比更加复杂。在降低山体高度以后, 山后形成的龙卷超级单体逐渐减弱; 当山体高度降低至20%以下, 背风坡涡旋显著减弱并不再形成超级单体<sup>[25]</sup>。而针对墨西哥一次罕见夜间龙卷过程的数值模拟研究则表明, 适当降低山体高度会使得对流增强, 但山体高度继续降低后对流不再生成<sup>[26]</sup>。

## 2 龙卷数值模拟的关键问题和研究趋势

### 2.1 龙卷的生成机制

目前比较成熟的理论认为, 典型的超级单体性龙卷的形成过程通常包含3个关键步骤: 1) 中层旋转形成中层中气旋, 2) 低层旋转形成低层中气旋, 3) 近地面旋转加强生成龙卷<sup>[27]</sup>。由于中层中气旋的形成理论已然成熟, 研究的焦点在于近地面旋转的来

源和增强机制<sup>[28]</sup>。有一些观测和模拟结果发现了超级单体冷池所产生的斜压区域对龙卷生成过程的重要影响<sup>[14,29-30]</sup>。斜压理论强调了下沉气流的动力作用<sup>[31-32]</sup>。在该理论中, 一个核心问题是, 相对于环境低层风切变而言, 冷池的强度必须适中: 过弱的冷池不足以形成足够的近地面涡旋, 而过强的冷池则不利于近地面涡旋维持在中气旋抽吸作用的范围内<sup>[13,33]</sup>。

也有观点认为, 经典斜压理论夸大了斜压涡度生成机制的作用。在形成龙卷级别强涡旋的过程中, 下垫面的拖曳作用可能起到决定性的影响<sup>[34]</sup>。对于涡度来源的诊断分析表明, 摩擦力的引入会增强低层垂直风切变产生近地面涡度, 并进一步增强低层中气旋的辐合, 显著提升数值模拟中龙卷的强度<sup>[35]</sup>。除超级单体性龙卷以外, 对于同样可能产生龙卷以及近地面大风的弓形回波系统(bow echo)的中涡旋结构(mesovortex)的模拟研究也得到了相似的结果<sup>[36-37]</sup>。同时, 在下垫面光滑的条件下, 垂直涡度在收缩和增强的过程中会在达到旋衡风平衡之后不再增长, 而摩擦力的存在则会破坏旋衡风平衡, 从而使龙卷涡旋继续收缩, 垂直涡度显著加强<sup>[27]</sup>。这两种理论的正确性和适用条件仍在争议之中, 目前尚无定论<sup>[38-39]</sup>。涡度来源和增长机制的模拟分析仍然是龙卷前沿研究中的焦点。

### 2.2 湍流过程与大涡模拟

越来越多的工作表明, 大涡模式的引入对于龙卷的数值模拟具有重要的促进作用。Rotunno等<sup>[40]</sup>研究证实, 龙卷模拟中的不稳定性 and 湍流过程需要真实解析, 仅仅采用大涡模拟和参数化方案会带来较大差异。然而, 现有的龙卷大涡模拟工作中存在的一个主要问题在于, 所模拟的流场中(特别是产生关键影响的龙卷低层入流)是否真实包含了“大涡”过程<sup>[38]</sup>。事实上, 在大多数工作中, 这一问题的答案是否定的, 即模拟中并未真正包含边界层湍流性涡旋<sup>[8]</sup>。Bryan等<sup>[41]</sup>采用将湍流场独立模拟并“注入”内层网格的方案以保证大涡模式对涡旋的真实解析。采用该方案模拟得到的龙卷在结构上与传统大涡模拟存在显著不同。该方案的验证、完善和推广有助于促进对于龙卷精细化结构的认知。

基于上述方案, Nolan等<sup>[42]</sup>采用高度理想化的模拟方案首次研究了在完全解析湍流过程条件下龙卷涡旋的结构, 从而分析环境强迫机制、下垫面摩擦与龙卷涡度的结构、强度和风场的关系。分析表明, 龙卷内部的大涡结构会降低最大风速位置的实际风速, 对龙卷结构和演变过程的精细化数值模拟结果造成影响。

## 2.3 数值敏感性与可预报性

龙卷的数值模拟对于初始条件和物理参数化方案有着显著的敏感性。比如,大量研究表明,龙卷近地面涡度的增强对云物理参数化方案的选取十分敏感<sup>[43-45]</sup>。云物理参数化方案会对数值模拟中风暴的结构和演变过程产生显著影响<sup>[46]</sup>。三阶矩(3-moment, 又称三参数)微物理参数化方案的引入可以使得超级单体在回波结构、冷池强度以及偏振参数方面与观测更为接近<sup>[45,47]</sup>。Dawson等<sup>[43-44]</sup>研究证实,三阶矩方案可以有效改进对水汽相变潜热释放的模拟,进而显著调整龙卷低层入流的热力性质并最终影响龙卷垂直动量收支及其对近地面涡旋的拉伸作用。

对于实际模式的龙卷数值模拟和预报而言,目前最根本的制约还在于超级单体系统的可预报性局限。Markowski等<sup>[48]</sup>指出,在简化的理想环境下,超级单体和龙卷的模拟对于冷池强度和位置的差别都有着很强的敏感性。在实际模拟中该敏感性将很有可能更大,从而制约其可预报性。Zhang等<sup>[49]</sup>研究表明,模拟时间和地形设置等模式参数的微小改变在几小时的积分过程中足以产生误差,导致龙卷性超级单体模拟结果的显著差异。超级单体乃至龙卷的数值模拟存在着难以克服的可预报性问题<sup>[50]</sup>。因此,在实际的业务中,单一确定性预报可能是行不通的,而需要集合模式<sup>[51]</sup>来预报龙卷。

## 2.4 受损物残骸与龙卷强度

在现有的模式构架中,大气中的尘埃和受损物残骸并未予以考虑。然而,对于实际龙卷过程而言,其高度集中的残骸含量会对流场产生影响。Lewellen等<sup>[52]</sup>采用相互耦合的双流体系统对气流和残骸分别进行模拟,发现龙卷环流中残骸与气流之间的相互作用十分复杂,会造成多普勒天气雷达对于龙卷结构观测的偏差。Bodine等<sup>[53]</sup>使用大量的拉格朗日粒子表征残骸并进行模拟和追踪。研究表明,大量残骸的存在对龙卷最大风速的降低作用可以高达50%。也就是说,现有的不包含受损物残骸的模拟结果对龙卷风场存在不可忽视的高估。

需要指出的是,实际龙卷灾害中,受损物残骸的形状、材质和质量等是复杂多样的,难以通过统一的粒子模型进行描述。同时,即使实际风速下降,残骸的存在可能会带来相同甚至更大的冲量以及破坏力。更为重要的是,现有的龙卷强度和风速估计主要以灾害指示物的受损情况与EF等级标准所提供的风速查算表为依据,而其中并未考虑(也难以考虑)残骸存在对风速和实际破坏力的影响,因此灾害调查中对于龙

卷风速的估计也可能存在系统性偏差。合理引入受损指示物残骸的龙卷数值模拟对于科学认识龙卷和龙卷等级评定而言有着重要意义。

## 3 结论与展望

随着多普勒天气雷达站网的建立,我国龙卷研究逐渐增多,探索龙卷时空分布特征和发生规律<sup>[54-55]</sup>。近年来,随着重大龙卷过程的发生,精细化龙卷灾害调查工作开始出现,我国龙卷灾情信息的完整性和科学性不断提升<sup>[1,56-60]</sup>。有不少工作针对中气旋和龙卷式涡旋特征(tornadic vortex signature, TVS)进行分析<sup>[61-62]</sup>,并结合对天气形势和探空环境的诊断分析,研究了我国不同区域龙卷个例的特征<sup>[63]</sup>、发生机制<sup>[64-74]</sup>以及基于雷达产品的龙卷监测和预警方法<sup>[75-79]</sup>。还有一些工作基于常规观测和再分析资料研究我国龙卷的生成环境以及有利于龙卷形成的探空指标<sup>[80-83]</sup>。然而,已有研究工作大多停留于天气尺度的大气环流形势分析,受到观测资料的限制只能达到钩状回波(hook echo)、中气旋和TVS的尺度,难以深入到接近龙卷尺度的特征<sup>[84-86]</sup>。对龙卷本体结构和演变的直接观测仍然十分困难。以现有技术而言,基于观测分析研究龙卷存在短期内难以逾越的技术瓶颈。

在数值模拟方面,国内有部分研究工作尝试针对龙卷事件的天气背景和环流形势进行模拟<sup>[87-92]</sup>。近年来已有研究团队开始引入资料同化和集合预报思想开展更为精细的数值模拟,可以成功捕捉超级单体的生成和演变,并且以抬升螺旋度为标准考察中气旋和近地面涡旋中心的生长<sup>[49-50,93]</sup>。然而,受到模拟技术和计算资源的限制,针对龙卷本体和漏斗云结构的数值模拟研究依然十分缺少<sup>[18]</sup>。可分辨龙卷尺度的数值模拟目前仍然是我国龙卷研究领域的关键技术难题。

当前,龙卷的研究主要存在以下3方面的问题。第一,现有的模拟工作往往难以深入到龙卷尺度,部分研究过度理想化。第二,国际上对于龙卷发生发展机理的现有认知主要以美国龙卷个例为基础,其规律是否适用于我国天气气候背景下的龙卷目前还没有答案。同时,针对龙卷涡度来源的研究仍没有定论,而对于龙卷维持和消亡的研究则更为不足。第三,我国的龙卷研究受到观测资料和模拟手段的限制,难以深入到龙卷本体的精细化结构。值得注意的是,我国龙卷的形成环境与美国大平原地区不同,切变和不稳定能量往往较弱,而水汽条件则更为充足,并常伴随有大范围强降水发生。也就是说,我国龙卷的冷池特征与美国经典模型可能不同,其形成机制也很有可能存在差异。因此,对于我国龙卷的研究工作

将很有可能对现有龙卷理论进行补充和完善。

在当前条件下,通过理想模拟与实际模拟相结合的研究手段,开展针对我国龙卷个例的数值模拟研究具有较大可行性,可以深入了解我国典型龙卷的发生机理和结构演变,并与美国龙卷过程进行对比,得到我国典型气候环境下的龙卷发生发展概念模型。这一方面可以增进了解我国特殊的地理和天气背景下龙卷的发生发展机制,还将有可能完善国际上关于龙卷形成机制的现有理论体系,具有重要的科学意义和实际应用价值。

致谢:作者感谢美国马里兰大学张大林教授、美国国家环境预报中心杜钧教授以及两位匿名审稿人对本文的帮助和指导。感谢北京大学孟智勇教授、美国俄克拉荷马大学薛明教授、美国宾夕法尼亚州立大学张福青教授和Paul Markowski教授的讨论和指导。

#### 参考文献

- [1] Meng Z, Yao D, Bai L, et al. Wind estimation around the shipwreck of oriental star based on field damage surveys and radar observations. *Science Bulletin*, 2016, 61(4): 330-337, doi:10.1007/s11434-016-1005-2.
- [2] Xue M, Zhao K, Wang M, et al. Recent significant tornadoes in China. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2016, 33(11): 1209-1217, doi:10.1007/s00376-016-6005-2.
- [3] Wurman J, Dowell D, Richardson Y, et al. The second verification of the origins of rotation in tornadoes experiment: VORTEX2. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2012, 93(8): 1147-1170, doi:10.1175/BAMS-D-11-00010.1.
- [4] Anderson-Frey A K, Richardson Y P, Dean A R, et al. Investigation of near-storm environments for tornado events and warnings. *Weather and Forecasting*, 2016, 31(6): 1771-1790, doi:10.1175/waf-d-16-0046.1.
- [5] Wurman J, Kosiba K, Robinson P. In Situ, Doppler radar, and video observations of the interior structure of a tornado and the wind-damage relationship. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2013, 94(6): 835-846, doi:10.1175/BAMS-D-12-00114.1.
- [6] Church C R, Snow J T, Agee E M. Tornado vortex simulation at Purdue university. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1977, 58(9): 900-908, doi:10.1175/1520-0477(1977)058<0900:tvapu>2.0.co;2.
- [7] Rotunno R. The fluid dynamics of tornadoes. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2013, 45(1): 59-84, doi:10.1146/annurev-fluid-011212-140639.
- [8] Lewellen D C, Lewellen W S, Xia J. The influence of a local swirl ratio on tornado intensification near the surface. *Journal Of the Atmospheric Sciences*, 2000, 57(4): 527-544, doi:10.1175/1520-0469(2000)057<0527:tioals>2.0.co;2.
- [9] Lewellen D C, Lewellen W S. Near-surface vortex intensification through corner flow collapse. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2007, 64(7): 2195-2209, doi:10.1175/jas3966.1.
- [10] Lewellen D C, Lewellen W S. Near-surface intensification of tornado vortices. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2007, 64(7): 2176-2194, doi:10.1175/jas3965.1.
- [11] Naylor J, Gilmore M S. Convective initiation in an idealized cloud model using an updraft nudging technique. *Monthly Weather Review*, 2012, 140(11): 3699-3705, doi:10.1175/mwr-d-12-00163.1.
- [12] Letkewicz C E, French A J, Parker M D. Base-state substitution: an idealized modeling technique for approximating environmental variability. *Monthly Weather Review*, 2013, 141(9): 3062-3086, doi:10.1175/mwr-d-12-00200.1.
- [13] Markowski P M, Richardson Y P. The influence of environmental low-level shear and cold pools on tornadogenesis: insights from idealized simulations. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2013, 71(1): 243-275, doi:10.1175/jas-d-13-0159.1.
- [14] Nowotarski C J, Markowski P M, Richardson Y P, et al. Supercell low-level mesocyclones in simulations with a sheared convective boundary layer. *Monthly Weather Review*, 2015, 143(1): 272-297, doi:10.1175/mwr-d-14-00151.1.
- [15] Davenport C E, Parker M D. Impact of environmental heterogeneity on the dynamics of a dissipating supercell thunderstorm. *Monthly Weather Review*, 2015, 143(10): 4244-4277, doi:10.1175/mwr-d-15-0072.1.
- [16] Orf L, Wilhelmson R, Lee B, et al. Evolution of a long-track violent tornado within a simulated supercell. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2017, 98(1): 45-+, doi:10.1175/bams-d-15-00073.1.
- [17] Bryan G H, Fritsch J M. A benchmark simulation for moist nonhydrostatic numerical models. *Monthly Weather Review*, 130(12): 2917-2928, doi:10.1175/1520-0493(2002)130<2917:ABSFMN>2.0.CO;2.
- [18] Yao D, Xue H, Yin J, et al. Investigation into the formation, structure and evolution of an EF4 tornado in east china using a high-resolution numerical simulation. *Journal of Meteorological Research*, 2018, 32(2): 157-171, doi:10.1007/s13351-018-7083-0.
- [19] Xue M, Hu M, Schenkman A D. Numerical prediction of the 8 May 2003 Oklahoma city tornadic supercell and embedded tornado using ARPS with the assimilation of WSR-88D data. *Weather and Forecasting*, 2014, 29(1): 39-62, doi:10.1175/waf-d-13-00029.1.
- [20] Mashiko W. A numerical study of the 6 May 2012 Tsukuba city supercell tornado. Part I: vorticity sources of low-level and midlevel mesocyclones. *Monthly Weather Review*, 2015, 144(3): 1069-1092, doi:10.1175/mwr-d-15-0123.1.
- [21] Mashiko W. A numerical study of the 6 May 2012 Tsukuba city supercell tornado. Part II: mechanisms of tornadogenesis. *Monthly Weather Review*, 2016, 144(9): 3077-3098, doi:10.1175/mwr-d-15-0122.1.
- [22] Supinie T A, Jung Y, Xue M, et al. Impact of VORTEX2 observations on analyses and forecasts of the 5 June 2009 Goshen county, Wyoming, supercell. *Monthly Weather Review*, 2016, 144(1): 429-449, doi:10.1175/mwr-d-15-0171.1.
- [23] Hanley K E, Barrett A I, Lean H W. Simulating the 20 May 2013 Moore, Oklahoma tornado with a 100-metre grid-length NWP model. *Atmospheric Science Letters*, 2016, 17(8): 453-461, doi:10.1002/asl.678.
- [24] Yokota S, Seko H, Kunii M, et al. The tornadic supercell on the Kanto plain on 6 May 2012: polarimetric radar and surface data assimilation with EnKF and ensemble-based sensitivity analysis. *Monthly Weather Review*, 2015, 144(9): 3133-3157, doi:10.1175/mwr-d-15-0365.1.
- [25] Miglietta M M, Mazon J, Rotunno R. Numerical simulations of a tornadic supercell over the Mediterranean. *Weather and Forecasting*, 2017, 32(3): 1209-1226, doi:10.1175/waf-d-16-0223.1.
- [26] Barrett B S, Farfan L M, Raga G B, et al. The unusual early morning tornado in Ciudad Acuna, Coahuila, Mexico, on 25 May 2015. *Monthly Weather Review*, 2017, 145: 2049-2069, doi:10.1175/mwr-d-16-0252.1.
- [27] Davies-Jones R. A review of supercell and tornado dynamics. *Atmospheric Research*, 2014: 158, 274-291, doi:10.1016/j.atmosres.2014.04.007.
- [28] Markowski P, Richardson Y. What we know and don't know about tornado formation. *Physics Today*, 2014, 67(9): 26-31, doi:10.1063/pt.3.2514.
- [29] Bluestein H B, Weiss C C, French M M, et al. The structure of tornadoes near Attica, Kansas, on 12 May 2004: high-resolution, mobile, Doppler radar observations. *Monthly Weather Review*, 135(2): 475-506, doi:10.1175/mwr3295.1.

- [30] Markowski P, Richardson Y, Marquis J, et al. The pretornadic phase of the Goshen County, Wyoming, Supercell of 5 June 2009 intercepted by VORTEX2. Part II: intensification of low-level rotation. *Monthly Weather Review*, 2011, 140(9): 2916-2938, doi:10.1175/mwr-d-11-00337.1.
- [31] Davies-Jones R, Markowski P. Lifting of ambient air by density currents in sheared environments. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2013, 70(4): 1204-1215, doi:10.1175/jas-d-12-0149.1.
- [32] Davies-Jones R. Can a descending rain curtain in a supercell instigate tornadogenesis barotropically? *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2008, 65(8): 2469-2497, doi:10.1175/2007jas2516.1.
- [33] Schultz D M, Richardson Y P, Markowski P M, et al. Tornadoes in the central United States and the "Clash of Air Masses". *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2015, 95(11): 1704-1712, doi:10.1175/bams-d-13-00252.1.
- [34] Schenkman A D, Xue M, Hu M. Tornadogenesis in a high-resolution simulation of the 8 May 2003 Oklahoma city supercell. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2014, 71(1): 130-154, doi:10.1175/jas-d-13-073.1.
- [35] Roberts B, Xue M, Schenkman A D, et al. The role of surface drag in tornadogenesis within an idealized supercell simulation. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2016, 73(9): 3371-3395, doi:10.1175/jas-d-15-0332.1.
- [36] Cao S, Wang J, Cao J, et al. Experimental study of wind pressures acting on a cooling tower exposed to stationary tornado-like vortices. *Journal of Wind Engineering And Industrial Aerodynamics*, 145: 75-86, doi:10.1016/j.jweia.2015.06.004.
- [37] Schenkman A D, Xue M. Bow-echo mesovortices: a review. *Atmospheric Research*, 2016, 170: 1-13, doi:10.1016/j.atmosres.2015.11.003.
- [38] Markowski P M, Bryan G H. LEs of laminar flow in the PBL: a potential problem for convective storm simulations. *Monthly Weather Review*, 2016, 144(5): 1841-1850, doi:10.1175/mwr-d-15-0439.1.
- [39] Markowski P M. An idealized numerical simulation investigation of the effects of surface drag on the development of near-surface vertical vorticity in supercell thunderstorms. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2016, 73(11): 4349-4385, doi:10.1175/jas-d-16-0150.1.
- [40] Rotunno R, Bryan G H, Nolan D S, et al. Axisymmetric tornado simulations at high Reynolds number. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2016, 73(10): 3843-3854, doi:10.1175/jas-d-16-0038.1.
- [41] Bryan G H, Dahl N A, Nolan D S, et al. An eddy injection method for large-eddy simulations of tornado-like vortices. *Monthly Weather Review*, 2017, 145(5): 1937-1961, doi:10.1175/mwr-d-16-0339.1.
- [42] Nolan D S, Dahl N A, Bryan G H, et al. Tornado vortex structure, intensity, and surface wind gusts in large-eddy simulations with fully developed turbulence. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2017, 74(5): 1573-1597, doi:10.1175/jas-d-16-0258.1.
- [43] Daniel T, Dawson I, Xue M, et al. Sensitivity of real-data simulations of the 3 May 1999 Oklahoma city tornadic supercell and associated tornadoes to multimoment microphysics. Part II: analysis of buoyancy and dynamic pressure forces in simulated tornado-like vortices. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2016, 73: 1039-1061, doi:10.1175/jas-d-15-0114.1.
- [44] Dawson D T, Xue M, Milbrandt J A, et al. Sensitivity of real-data simulations of the 3 May 1999 Oklahoma city tornadic supercell and associated tornadoes to multimoment microphysics. Part I: storm- and tornado-scale numerical forecasts. *Monthly Weather Review*, 2015, 143(6): 2241-2265, doi:10.1175/mwr-d-14-00279.1.
- [45] Dawson D T, Xue M, Milbrandt J A, et al. Comparison of evaporation and cold pool development between single-moment and multimoment bulk microphysics schemes in idealized simulations of tornadic thunderstorms. *Monthly Weather Review*, 2010, 138: 1152-1171, doi:10.1175/2009mwr2956.1.
- [46] Dawson D T, Wicker L J, Mansell E R, et al. Impact of the environmental low-level wind profile on ensemble forecasts of the 4 May 2007 Greensburg, Kansas, tornadic storm and associated mesocyclones. *Monthly Weather Review*, 2012, 140(2): 696-716, doi:10.1175/mwr-d-11-00008.1.
- [47] Dawson D T, Mansell E, Jung L, et al. Low-level Z(DR) signatures in supercell forward flanks: the role of size sorting and melting of hail. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2014, 71(1): 276-299, doi:10.1175/jas-d-13-0118.1.
- [48] Markowski P M, Richardson Y P. Large sensitivity of near-surface vertical vorticity development to heat sink location in idealized simulations of supercell-like storms. *Journal of Atmospheric Sciences*, 2017, 74: 1095-1104, doi:10.1175/jas-d-16-0372.1.
- [49] Zhang Y J, Zhang F Q, Stensrud D J, et al. Practical predictability of the 20 May 2013 tornadic thunderstorm event in Oklahoma: sensitivity to synoptic timing and topographical influence. *Monthly Weather Review*, 2015, 143(8): 2973-2997, doi:10.1175/mwr-d-14-00394.1.
- [50] Zhang Y, Zhang F, Stensrud D J, et al. Intrinsic predictability of the 20 May 2013 tornadic thunderstorm event in Oklahoma at storm scales. *Monthly Weather Review*, 2016, 144: 1273-1298.
- [51] 杜钧, 李俊. 集合预报方法在暴雨研究和预报中的应用. *气象科技进展*, 2014(5): 6-20.
- [52] Lewellen D C, Gong B, Lewellen W S. Effects of finescale debris on near-surface tornado dynamics. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2007, 65(10): 3247-3262, doi:10.1175/2008jas2686.1.
- [53] Bodine D J, Maruyama T, Palmer R D, et al. Sensitivity of tornado dynamics to soil debris loading. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2016, 73(7): 2783-2801, doi:10.1175/jas-d-15-0188.1.
- [54] 范雯杰, 俞小鼎. 中国龙卷的时空分布特征. *气象*, 2015, 41(7): 793-805.
- [55] 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.
- [56] Meng Z Y, 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, doi:10.1175/waf-d-13-00052.1.
- [57] 郑永光, 田付友, 孟智勇, 等. "东方之星"客轮翻沉事件周边区域风灾现场调查与多尺度特征分析. *气象*, 2016, 42(1): 1-13.
- [58] Zhao K, Wang M, 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*, 2017, 98(9): 1821-1831.
- [59] 郑永光, 朱文剑, 姚聃, 等. 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.
- [60] 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, doi:10.11676/qxxb2017.013.
- [61] 俞小鼎, 郑媛媛, 张爱民, 等. 安徽一次强烈龙卷的多普勒雷达分析. *高原气象*, 2006, 25(5): 914-924.
- [62] 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): 38-40.
- [63] 刘勇, 王川. 陕西龙卷的统计和中尺度特征. *陕西气象*, 1998, 6-9.
- [64] 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*, 2014, 32(3): 415-423.
- [65] 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.
- [66] 李云艳, 郑艳, 杨仁勇. 一次龙卷天气过程中小尺度特征分析. *农业灾害研究*, 2014, 4(5): 34-37.
- [67] 李改琴, 许庆娥, 吴丽敏, 等. 一次龙卷风天气的特征分析. *气象*, 2014, 40(5): 628-636.
- [68] 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): 961-973.
- [69] 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.
- [70] 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. *科技导报*, 2009, 27(7), 80-84, doi:10.3321/j.issn:1000-7857.2009.07.018.
- [71] 吴海英, 沈树勤, 蒋义芳, 等. 龙卷诱发原因的实例分析. *气象科学*, 2009, 19(3): 335-341.
- [72] 刘娟, 朱君鉴, 魏德斌, 等. 070703天长超级单体龙卷的多普勒雷达典型特征. *气象*, 2009, 32(10): 32-39.
- [73] 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.
- [74] 姚叶青, 俞小鼎, 郝莹, 等. 两次强龙卷过程的环境背景场和多普勒雷达资料的对比分析. 热带气象学报, 2007, 23(5): 483-490.
- [75] 俞小鼎, 周小刚, 王秀明. 雷暴与强对流临近天气预报技术进展. 气象学报, 2012, 70(3): 311-337.
- [76] 刁秀广, 万明波, 高留喜, 等. 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, 2014, 40(6): 668-677.
- [77] 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. 高原气象, 2012, 31(6): 1721-1730.
- [78] 李延江, 孙丽华, 杨梅. 一次山区龙卷的双部雷达回波监测分析. 高原气象, 2011, 30(6): 1701-1708.
- [79] 郑媛媛, 朱红芳, 方翔, 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.
- [80] 王霁吟, 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. 气候与环境研究, 2015, 20(4): 411-420.
- [81] 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, 2014, 72(2): 306-317.
- [82] 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.
- [83] 王毅, 郑媛媛, 张晓美, 等. 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, 2012, 38(12): 1473-1481.
- [84] 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.
- [85] 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. 气象, 2015(8): 942-952.
- [86] 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.
- [87] 刘宁微, 马雁军, 刘晓梅, 等. 辽宁省“05-6”龙卷风过程的诊断与数值模拟. 自然灾害学报, 2007, 16(5): 84-90.
- [88] 吕丽, 肖辉, 吕博. 一次龙卷过程的WRF模拟及多普勒雷达反演风场研究. 安徽农业科学, 2014(17): 5598-5603, 5659, doi:10.3969/j.issn.0517-6611.2014.17.094.
- [89] 张玲, 张艳玲, 陆汉城, 等. 不稳定能量参数在一次强对流天气数值模拟中的应用. 南京气象学院学报, 2008, 31(2): 192-199.
- [90] 周后福, 郭品文, 翟菁. 两类强对流天气过程的模式模拟及其比较. 热带气象学报, 2010, 26(3): 379-384.
- [91] 赵海军, 刁秀广, 王庆华, 等. 非超级单体龙卷风暴低层流场特征及模拟分析. 山东气象, 2016, 36(2): 1-9, doi:10.3969/j.issn.1005-0582.2016.02.001.
- [92] 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.
- [93] Xue M. Preface to the special issue on the “observation, prediction and analysis of severe convection of China” (OPACC) national “973” project. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2016, 33(10): 1099-1101, doi:10.1007/s00376-016-0002-3.

(上接27页)

际上在该方面也没有成功的探究, 也没有固定方法可循。这里只是起了一个抛砖引玉的作用, 希望读者对该方面有兴趣共同探究。最后, 如果龙卷是从云中掉下来的, 甚至不到地面, 那还要与水物质相态转换及潜热释放有关, 这里不再阐述。

#### 参考文献

- [1] Xue M, Zhao K, Wang M, et al. Recent significant tornadoes in China. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2016, 33(11): 1209-1217.
- [2] Agee E M, Snow J T, Clare P R. Multiple vortex features in the tornado cyclone and the occurrence of tornado families. *Monthly Weather Review*, 1976, 104: 552-563.
- [3] Alexander C R, Wurman J. The 30 May 1998 Spencer, South Dakota, storm. Part I: the structural evolution and environment of the tornadoes. *Monthly Weather Review*, 2005, 133: 72-97.
- [4] Bluestein H B. A tornadic supercell over elevated, complex terrain: the divide, colorado, storm of 12 July 1996. *Monthly Weather Review*, 2000, 128(3): 795-809.
- [5] Bluestein H B. A review of ground-based, mobile, W-band Doppler-radar observations of tornadoes and dust devils. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 2005, 40(3): 163-188.
- [6] Brown R A, Wood V T. The tornadic vortex signature: an update. *Weather and Forecasting*, 2012, 27(2): 525-530.
- [7] Davies-Jones R P. Tornadogenesis in supercell storms: What we know and what we don't know. Extended abstracts, 23rd Conference on Severe Local Storms, November 6-10, St. Louis, MO, American Meteorological Society, Boston, 2006. [https://ams.confex.com/ams/Annual2006/techprogram/meeting\\_Annual2006.htm](https://ams.confex.com/ams/Annual2006/techprogram/meeting_Annual2006.htm)
- [8] Davies-Jones P R. Can a descending rain curtain in a supercell instigate tornadogenesis barotropically? *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2008, 65(8): 2469-2497.
- [9] 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.
- [10] Yang S, Zuo Q J, Gao S T. Image of local energy anomaly during a heavy rainfall event. *Chinese Physics B*, 2017, 26(11): 119201. doi: 10.1088/1674-1056/26/11/119201.
- [11] Aris R. Vectors, tensors, and the basic equations of fluid mechanics. Prentice-Hall, 1962: 268.

# 用瞬时扰动法考察龙卷环境系统的模式预报

钱维宏<sup>1</sup> 梁卓轩<sup>1</sup> 罗未萌<sup>1</sup> 杜钧<sup>2</sup>

(1 北京大学物理学院大气与海洋科学系, 北京 100871; 2 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:** 龙卷作为局地强对流性天气事件的发生与天气和次天气尺度的扰动系统有关。应用“扣除瞬变气候场”的瞬时扰动法对两个全球模式 (ECMWF和GFS) 预报的中国和美国龙卷“扰动系统”进行了考察。回顾了近期研究的2016年6月23日发生在中国东部阜宁的龙卷事件扰动系统和2011年4月27—28日发生在美国南部的多龙卷过程扰动系统。ECMWF对前者的龙卷环境扰动系统能够提前54 h, GFS能够提前18 h预报出低层大气的低压扰动和高层大气的高压扰动以及冷暖扰动气团的变化与对比。ECMWF分别提前3、5、7和9 d对上述美国南部的多龙卷预报出了与观测相吻合的高度扰动和温度扰动, 包括它们的空间结构和随时间的变化。

**关键词:** 瞬时扰动, 全球模式, 龙卷环境系统

**DOI:** 10.3969/j.issn.2095-1973.2018.02.004

## Examining Performances of Numerical Models in Predicting Tornado Environmental Systems

Qian Weihong<sup>1</sup>, Leung Jeremy Cheuk-Hin<sup>1</sup>, Luo Weimeng<sup>1</sup>, Du Jun<sup>2</sup>

(1 Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, Peking University, Beijing 100871

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

**Abstract:** The tornado formation is largely influenced by the synoptic-scale and sub-synoptic scale anomalous systems. In this paper, the “anomalous weather chart”, which removes the temporal climatology from the conventional weather chart, is applied to analyze the tornado-related anomalous systems and evaluate the global forecasting models’ (ECMWF model and NCEP GFS) performances in predicting such anomalous systems. In this paper, two cases were studied: 1) the recent tornado event occurring in Funing County, China on 23 June 2016 and 2) the strong tornado outbreak in Southern US during 27-28 April 2011. Results showed that both cases are associated with the lower-level anomalous low pressure, upper-level anomalous high pressure systems and the contrast of anomalous warm/cool air masses in the troposphere. The ECMWF model and the NCEP GFS can predict the tornado-related anomalous system for the case 1 in advance of 54 hours and 18 hours, respectively. Furthermore, the ECMWF model is able to predict the spatial structures of strong geopotential height and temperature anomalies, and their evolution for the case 2 in advance of 3, 5, 7, 9 days.

**Keywords:** temporal climatology, global model, tornado environmental systems

### 0 引言

龙卷是强对流天气中破坏力最强的一种。美国是龙卷多发国家, 平均每年发生一千多个龙卷, 大多是强度较弱的EF-0级别的龙卷。我国龙卷主要发生在东部平原地区, 尤其以江淮地区为多<sup>[1]</sup>。龙卷的尺度小、生命史短, 预报难度极大。目前在美国只能提前15 min做出定时、定点的龙卷预警。美国龙卷的发生多与中尺度对流系统中的超级单体相联系。这些超级单体<sup>[2]</sup>有组织地发生在天气尺度或近地面次天气(百千米)尺度的低压系统中。美国龙卷常常是多个同时发生, 路径长达几千米到十几千米, 而发生在中国的龙卷路径相对较短。美国气象学词典描述的龙

卷爆发 (tornado outbreak) 为多个龙卷同时出现在一个天气尺度系统中<sup>[3]</sup>。可以把这样的天气(次天气)尺度系统称为龙卷和中涡旋发生的环境条件。但是, 大气中出现了这样的环境(次天气尺度系统)条件时可能出现的不一定是龙卷, 而可能的是下击暴流、冰雹或雷雨大风等其他强对流天气。天气和次天气尺度系统的形成只可以看作强对流天气发生的必要(环境)条件。

ECMWF和GFS中期数值天气预报模式产品已经在各地气象台得到了广泛的应用。针对发生在中国和美国的龙卷例子, 考察当前这两个全球模式对龙卷天气一次天气尺度系统的预报能力。这两个例子分别发生在美国南部2011年4月27—28日和中国东部2016年6月23日<sup>[4-5]</sup>。

收稿日期: 2017年6月20日; 修回日期: 2017年12月4日  
第一作者: 钱维宏(1957—), Email: qianwh@pku.edu.cn

## 1 资料和方法

使用的资料有三套。美国国家环境预报中心(NCEP)提供的美国国家气象局全球预报系统(GFS)分析资料及预报资料(<http://www.emc.ncep.noaa.gov/index.php?branch=GFS>)。GFS分析场的时间间隔是6 h, 时间点在00、06、12和18时(世界时, 下同), 水平空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的经纬格点, 垂直分26层(<http://www.emc.ncep.noaa.gov/index.php?branch=GFS>)。GFS预报场提供从每天00、06、12和18时起报的15日预报, 预报时间间隔为6 h。欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的预报资料(<http://tigge.ecmwf.int/>)提供的是每天00和12时起报的15日预报, 时间间隔为6 h(00、06、12和18时), 水平空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 经纬格点, 垂直分8层。ERA Interim的分析场<sup>[6]</sup>和两个模式的预报场分别应用于分析对比中。

传统天气图已经使用了一个多世纪。传统天气图上包含了多时空尺度的波动信息。传统的做法是用数学正交分解的原理得到不同的波动分量。由于数学分解函数的不同和选择区域的不同, 分解的波动分量结果也就不同。为了避免传统分解上的不唯一, 把任一大气变量场分解成为瞬变气候分量场和相对瞬变气候的瞬时扰动场两个部分<sup>[7]</sup>。前者准静态地反映了地球大气中一个固定点上相对太阳辐射年循环和日循环与下垫面辐射达到平衡的状态, 而后者是相对这个平衡态的偏差。后者的偏差场可以绘制成扰动天气图。理论上, 基于扰动场的“扰动天气系统”是产生极端(异常)天气事件的直接原因。所以, 大气变量分解后的扰动场分析是极端天气预报的基础。

根据以上的约定, 任一大气变量场 $F_d(\lambda, \varphi, p, t)$ , 如观测时刻 $t$ (每年的第 $d$ 天的第 $t$ 时刻, 每天24 h)的位势高度、温度和风可以分解为瞬变气候场 $\tilde{F}_d(\lambda, \varphi, p)$ 和瞬时扰动场 $F'_d(\lambda, \varphi, p, t)$ <sup>[7]</sup>, 即

$$F_d(\lambda, \varphi, p, t) = \tilde{F}_d(\lambda, \varphi, p) + F'_d(\lambda, \varphi, p, t), \quad (1)$$

这里,  $\lambda$ 、 $\varphi$ 和 $p$ 是大气变量所在点的位置(经度、纬度和气压层次), 下标 $d$ (1~365 d)是资料所在日相对每年1月1日的第 $d$ 日。

固定点上的瞬时气候是存在的, 但要准确得到它是困难的。用这个点上几百年的逐时观测资料做瞬时平均(相互抵消掉多变的扰动)是估算瞬时气候的一种方法。由于受到观测资料长度的限制, 研究中的气候场可由30年(1981—2010年)的再分析资料估算得到

$$\tilde{F}_d(\lambda, \varphi, p) = \sum_{t=1981}^{2010} F_d(\lambda, \varphi, p, t) / 30. \quad (2)$$

这里假定, 在这30年中第 $d$ 日的同一时刻, 正的和负的瞬时扰动相互抵消了, 得到的是准平衡的瞬变气候态。由式(2)定义的气候是逐小时和逐日变化的, 它是用历史资料计算(估算)出的, 不需要预报。这一分解方法已经在我国的区域暴雨和极端温度事件分析中得到了应用<sup>[8-10]</sup>。所以, 在本文后面的分析中所提到的“扰动系统”都是指扣除瞬变气候后的扰动天气图上的剩余“天气系统”。

## 2 中国东部龙卷扰动环境场的实况和模式预报

### 2.1 实况

数值预报模式产品的天气图表达仍然是常规天气预报的基本方法。在以往的暴雨、热浪和低温事件分析中, 能够看到地面极端天气事件发生地的上空存在着天气或次天气尺度的扰动系统。为此, 用欧洲再分析资料中的基本变量考察当时龙卷发生地对对流层大气中是否也存在一个异常的天气或次天气尺度的扰动系统。

考察龙卷发生地( $33.5^\circ\text{N}$ ,  $120^\circ\text{E}$ )23日的上空大气温度场和高度场上发生了什么变化。常规天气图上难以指示龙卷可能发生的信息, 这是因为常规天气图中除了有扰动信息外, 还存在着基数较大的气候信息, 即总场变量中的异常信息难以用一般的绘图方法表达出来。为了突显出异常信息, 图1是用总场减去了瞬变气候后的扰动变量。00时(图1a)龙卷发生地以南出现了低层高温异常, 整个对流层大气出现了正的高度异常。其中, 正高度异常中心就在龙卷发生地上空的对流层上部。06时(图1b), 龙卷地上空出现了上升气流, 800 hPa以下的负高度扰动轴线(虚线)与近地面层上温度扰动的冷暖气团对比零线对应, 龙卷发生在扰动暖气团的一侧。这个与龙卷对应的地面低压扰动水平尺度达到600 km, 属于次天气尺度扰动系统。到12时(图1c), 来自北方中层的低压扰动到达阜宁县。与北京2012年7月21日局地暴雨类似的扰动环流形势<sup>[11]</sup>一致, 暴雨发生在低层大气低压扰动和冷暖气团对比的边界线上。扰动天气图上的温度扰动与高度扰动满足静力平衡关系, 即这样的温度扰动可以用静力平衡方程由高度扰动计算得出<sup>[12]</sup>。扰动天气图上的这些扰动结构可以从强度和位置上直观地表达地面上极端天气事件可能发生的信号。

图2是2016年6月18日00时至25日18时, 经过阜宁龙卷发生地上空每6 h间隔的高度扰动和温度扰动随时间的变化, 表现出了明显的扰动结构。20—23日的4天中出现了3次次天气尺度的高度扰动, 先是在对流

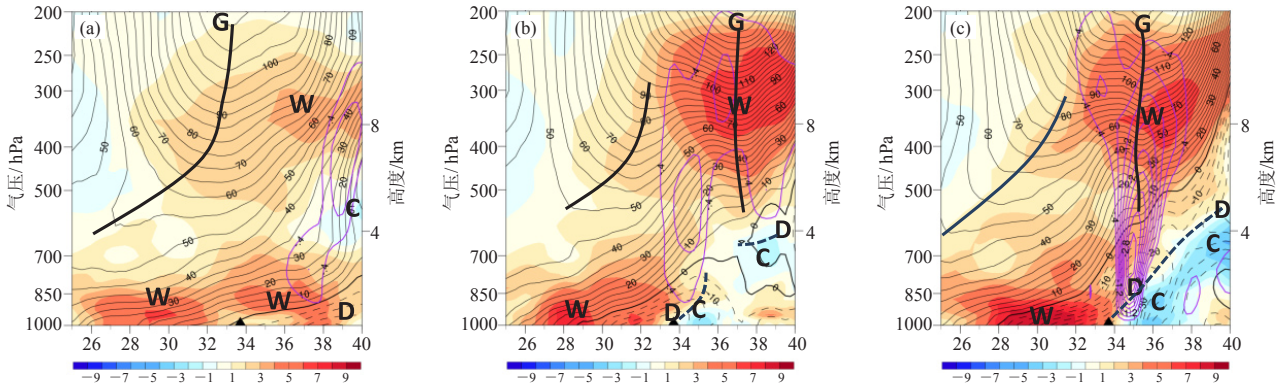


图1 基于再分析 (ERA Interim) 资料沿119.5°E做出的剖面 (a为00时, b为06时, c为12时) (等值线为扰动天气图上的高度扰动, 单位: gpm; 阴影为温度扰动, 单位: °C; 紫色实线为上升速度, 单位: Pa·s<sup>-1</sup>; G和D为高度中心; W和C为暖冷中心; 粗实线为正高度扰动轴, 粗虚线为负高度扰动轴; ▲处为龙卷发生地)<sup>[4]</sup>

Fig. 1 Vertical-latitude cross sections of height anomalies (solid and dashed lines, unit: gpm) and temperature anomalies (shading, unit: °C) along 119.5°E at 00 UTC (a), 06 UTC (b), and 12 UTC (c) 23 June 2016 (Heavy solid and dashed lines are axes of positive and negative height anomalies while the purple lines indicate the ascending velocity, unit: Pa·s<sup>-1</sup>. Letters H/L are high/low centers of height and W/C are warm/cold centers of temperature anomalies, respectively. Symbol ▲ indicates the location of tornado. The data used are from the ERA Interim)

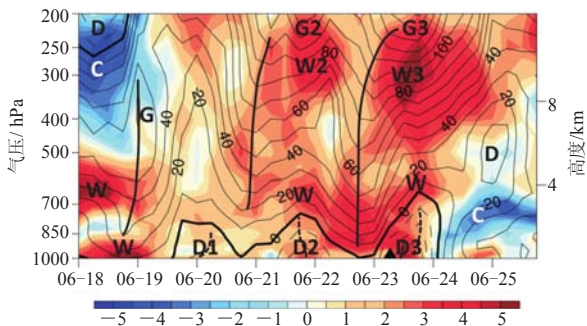


图2 基于再分析资料 (ERA Interim) 的2016年6月18日00时—25日18时龙卷发生地 (阜宁) 上空6 h间隔的高度扰动 (等值线, 单位: gpm) 和温度扰动 (阴影, 单位: °C) 随时间的变化<sup>[4]</sup>

Fig. 2 Vertical-time sections of height anomalies (solid and dashed lines, unit: gpm) and temperature anomalies (shading, unit: 0.5°C) averaged over 33.5°N and 119.5°E, where the tornado occurred (Symbol ▲ indicates the occurring time of tornado. The data are derived from the ERA Interim)

层中上部出现正高度扰动轴线, 然后在近地面层出现负高度扰动中心。对流层上部出现的三个正高度扰动中心, 与对流层中下部的三个暖中心和地面上的三个扰动低压是完全对应的。特别是在23日, 正高度扰动中心 (G3)、暖温度扰动中心 (W3) 和地面低压扰动 (D3) 都是最强的。这些扰动特征是在传统天气图上看不到的。为什么前3日中的2次低压扰动没有发生龙卷呢? 细致考察图2中的第3次扰动中近地面还有两个中心, 一个是在中午, 强的是在晚上, 分别反映的是先龙卷后暴雨的辐合中心。

在中国东部地区的区域暴雨分析中, Qian等<sup>[10]</sup>提出了扰动散度与扰动比湿乘积的扰动指标量 (湿散度扰动) 和扰动涡度与扰动比湿乘积的扰动指标量 (湿涡度扰动)。它们的表达式分别为

$$D'Q' = \left( \frac{\partial u'}{\partial x} + \frac{\partial v'}{\partial y} \right) q', \quad (3)$$

$$V'Q' = \left( \frac{\partial v'}{\partial x} - \frac{\partial u'}{\partial y} \right) q'. \quad (4)$$

比较23日三个时次的850 hPa湿散度扰动分布看出, 中午时刻有一个湿散度扰动中心在阜宁上空 (图3b)。同样, 850 hPa湿涡度扰动也是在中午时刻有一个大值带经过阜宁的上空 (图3e)。这些扰动指标量的分布基本上是沿沿海内陆地面风辐合线走向的并与地面上的辐合线相交于阜宁上空。这里用扰动天气分析的方法得到了近地面扰动系统可能发展的环境和潜势条件。

## 2.2 模式预报

首先考察ECMWF对阜宁垂直—时间剖面图中高度扰动和温度扰动 (图2) 的预报。图4中清楚地显示出, 欧洲模式提前54 h (图4a) 和提前30 h (图4b) 预报出了可与实况对比的23日中午的高度扰动和温度扰动。提前90和102 h, 预报出了高度扰动和温度扰动, 但其扰动强度要弱一些。

分析中, 图3的850 hPa湿散度扰动和湿涡度扰动在23日中午时刻指示出了有利于强对流天气发生的环境扰动条件。如果模式预报产品中也能够计算得到这些扰动量的位置, 这对预报员在考虑局地地面和模式预报的高度—温度扰动环境条件的同时推断未来时刻

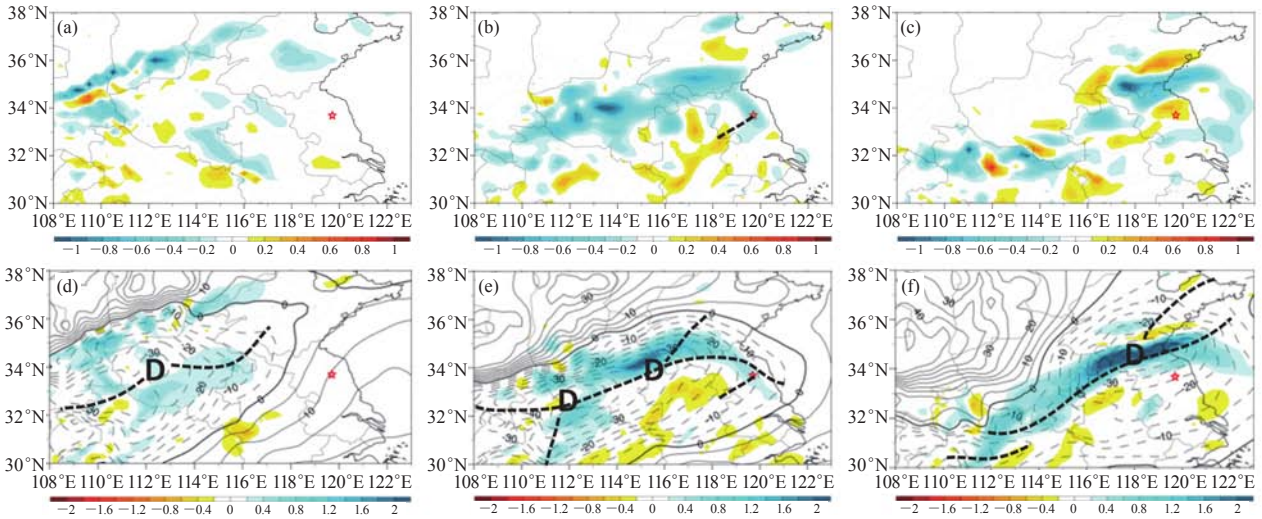


图3 基于模式初始场的850 hPa湿散度扰动 (单位:  $10^{-6}\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ) 在2016年6月23日00时 (a), 06时 (b) 和12时 (c) 的分布, 以及对应三个时刻的925 hPa高度扰动 (实线和虚线, 单位: gpm) 和850 hPa的湿涡度扰动 (阴影单位:  $10^{-6}\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ) (d~f, 粗黑虚线为高度扰动槽线, 黑虚线为地面风辐合线, ☆为阜宁龙卷发生地)<sup>[4]</sup>

Fig. 3 Moist divergence anomaly (shading, unit:  $10^{-6}\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ) at 850 hPa at 00 UTC (a), 06 UTC (b), and 12 UTC (c) on 23 June, 2016; (d—f) As same as in (a—c) but for moist vorticity anomaly (unit:  $10^{-6}\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ) at 850 hPa and height anomaly (solid and dashed lines, unit: gpm) (The black dashed line is the convergence line of the surface wind. The data is derived from the GFS)

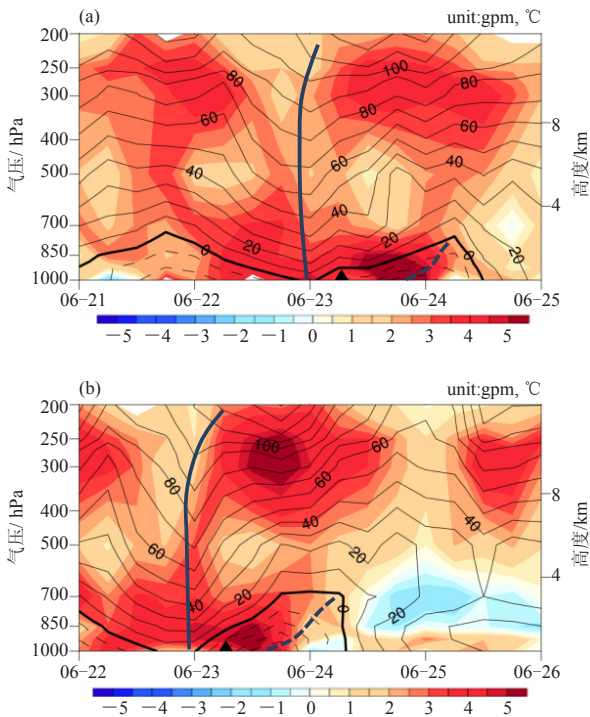


图4 同图2, 但为ECMWF提前54 h (a) 和30 h (b) 预报的高度扰动和温度扰动<sup>[4]</sup>

Fig. 4 As same as in Fig. 2 but for height-temperature anomalies of the ECMWF prediction in advance of 54 h (a) and 30 h (b)

可能出现的强对流天气发生位置是有帮助的。集中分析和评估两个模式对925 hPa高度扰动和850 hPa湿

度扰动 (图3e) 的预报。图5是对ECMWF预报提前102 h到提前6 h预报产品的分析<sup>[4]</sup>。虽然提前102和90 h预报中在925 hPa出现了负的高度扰动, 但850 hPa的湿涡度扰动都在阜宁以北地区 (图5a和5b)。从提前78 h开始 (图5c) 到提前54 h (图5e), 预报850 hPa的湿涡度扰动轴线稳定在阜宁上空。从提前42 h (图5f) 到提前6 h (图5i) 的预报, 925 hPa层的槽线和850 hPa层的湿涡度扰动轴线都稳定出现在阜宁上空, 与图3e基本一致。可见, ECMWF至少提前42 h预报出了阜宁低层大气中强烈的高度扰动和湿涡度扰动信息。

同样地, 钱维宏等<sup>[4]</sup>也分析了GFS预报提前102 h到提前6 h预报的扰动量 (图6)。可以看出, 美国模式提前102 h到30 h的7个时刻, 925 hPa的高度扰动中心位置是不稳定的, 阜宁也没有出现850 hPa的湿涡度扰动。在提前42 h (图6f) 和提前30 h (图6g), 预报的925 hPa高度扰动槽影响到阜宁。在提前18 h和提前6 h的预报图 (图6h和6i) 上, 925 hPa上的高度扰动中心、槽线和850 hPa上的湿涡度扰动都与图3e一致了。说明, GFS提前18 h预报出了阜宁低层大气中强烈的高度扰动和湿涡度扰动信息。

### 3 美国南部龙卷扰动环境场的实况和模式预报

#### 3.1 实况

2011年4月27—28日美国南部多龙卷发生后, 美

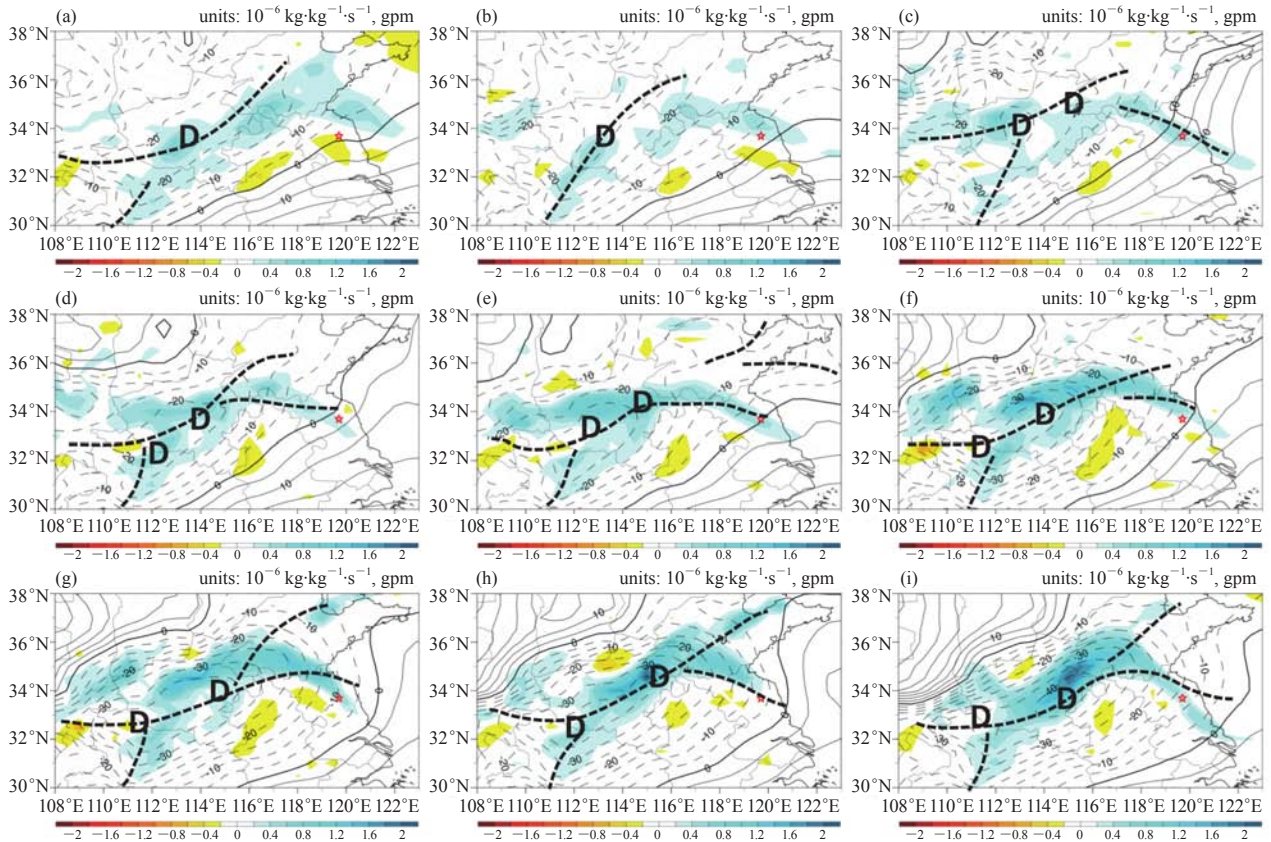


图5 同图3e, 但为ECMWF预报: 提前102 h (a), 90 h (b), 78 h (c), 66 h (d), 54 h (e), 42 h (f), 30 h (g), 18 h (h) 和6 h (i) 的扰动量分析<sup>[4]</sup>

Fig. 5 As same as in Fig. 3e, but for the ECMWF prediction in advance of 102 h (a), 90 h (b), 78 h (c), 66 h (d), 54 h (e), 42 h (f), 30 h (g), 18 h (h), and 6 h (i)

国研究人员<sup>[2]</sup>也用传统的天气图做了环境场的分析。传统天气图上, 总高度的时间变化没有清楚的波动, 只有总温度垂直剖面上能够看到一些波动, 但这些波动难以指示27日夜间的龙卷。与传统天气图的表达不同, 图7a和7b分别是沿88°W和84°W位置上高度异常和温度异常随时间的变化。龙卷发生在地面附近低压扰动出现的时候, 也对应高层大气正的高度扰动和低层大气正温度扰动转为负温度扰动的时候。

图8是2011年4月27—28日美国南部多龙卷发生期间4个时间点上的925 hPa (图8a~8d) 和垂直剖面 (图8e~8h) 上的高度扰动和温度扰动分布。龙卷和降水位置位于925 hPa低压扰动附近靠近暖气团的一侧。由于降水的原因, 925 hPa的暖气团中龙卷发生地范围内温度扰动为负值 (图8a和8b)。日常业务中, 预报员很少画高度和温度的垂直剖面图。关注图8e~8h的高度扰动和温度扰动的垂直剖面分布。在龙卷和暴雨发生位置的上空对流层—平流层大气中, 存在4个 (两对) 温度扰动气团并与一对高低压扰动

中心对应。在正 (负) 的高度扰动中心的下方是正 (负) 的温度扰动, 而在其上 (下) 方是负 (正) 的温度扰动。垂直方向上分布的一对高度扰动与两对温度扰动是满足静力平衡关系的, 即用高度扰动场可以根据静力平衡关系计算出温度扰动的分布。在一个有限的范围内, 高度扰动与温度扰动的强度和对比越强烈, 则暖 (冷) 气团靠近低压一侧的上升 (下沉) 速度会越大。这是扰动大气中有效位能释放并转变成动能的结果。于是, 在暖气团的一侧会出现龙卷和暴雨, 而在冷气团的一侧会出现下击暴流。图8c和图8g是2011年4月27—28日期间龙卷最多和最强的时刻, 扰动气团之间的温度对比也是最强的。

### 3.2 模式预报

关注ECMWF对图7a和7b的预报。图9是ECMWF起报时间为2011年4月25日00时 (a), 23日00时 (b), 21日00时 (c) 和19日00时 (d) 分别提前3、5、7和9 d预报的扰动场。发生龙卷和暴雨的扰动形势是低层大气出现负的高度扰动, 高层大气出现正的高

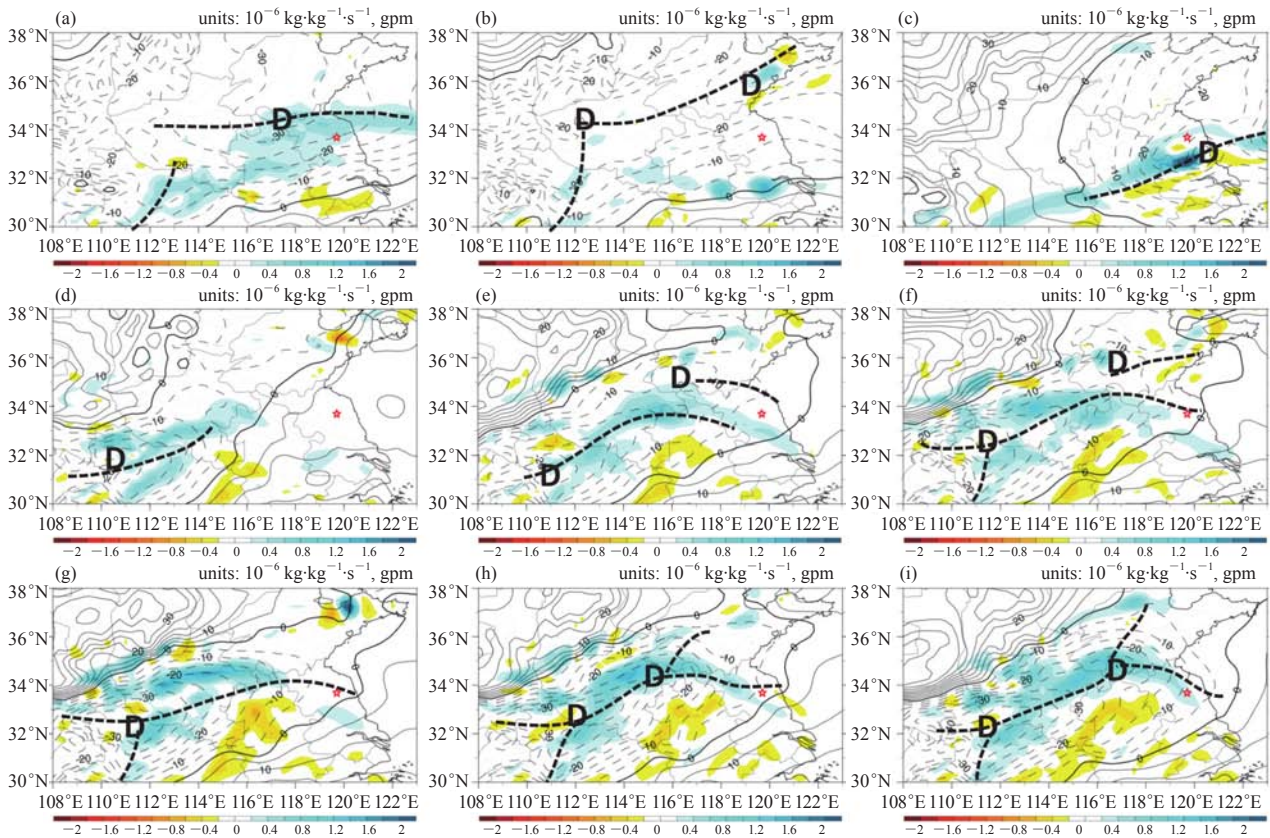


图6 同图5和图3e, 但为GFS预报的各时次925 hPa高度扰动和850 hPa的湿湿度扰动<sup>[4]</sup>

Fig. 6 As same as in Fig. 5 and Fig. 3e, but for the GFS prediction in advance of 102 h (a), 90 h (b), 78 h (c), 66 h (d), 54 h (e), 42 h (f), 30 h (g), 18 h (h), and 6 h (i)

度扰动, 温度扰动从正异常转为负异常。提前3、5和9 d的预报都满足上述扰动形势, 只是提前7 d的温度扰动预报没有达到条件。这也说明, 模式也会在一些起报时刻由于初值误差会影响到未来几天的环流形势预报结果。

#### 4 结论

龙卷属于小尺度的强对流性天气事件, 对其发生地点(路径)预报尤为困难。但是这样的小尺度强对流天气是大气热力和动力状态大大偏移了平衡态的结果, 即出现了剧烈的次天气尺度扰动系统。这个平衡态的瞬变气候具有日循环和年循环的变化, 它们是不需要预报的, 只需要认识。这样的瞬变气候是一个随时间变化的参考态。大气瞬时扰动变量及其构成的扰动系统如果接近地面就会产生地面上的极端天气事件。因此, 需要从观测、再分析和模式预报的资料中减去瞬变气候参考态, 得到扰动变量并绘制扰动天气图。后者就可以比较直观地应用于龙卷和暴雨等地面极端天气事件的落区预报了。由扰动基本变量可以构造具有物理含义的指标量, 如扰动湿湿度和扰动湿散

度等<sup>[10]</sup>。指标量达到一定的阈值就有可能出现确定的极端天气事件。

龙卷相对其他的极端天气事件, 如暴雨、冰雹和雷暴等, 其强度更强。近期的比较也可以看出<sup>[5]</sup>, 龙卷发生时和发生前对应的一对(两个相邻)的高度扰动系统和两对(四个相邻)的温度扰动系统也特别强烈。这些天气尺度和次天气尺度的扰动系统说明, 龙卷发生前和发生时是有大气扰动信号的。地面上极端天气事件的发生是前期大气扰动能量不断积累到最后迅速释放的结果。

对2016年6月23日发生在中国东部阜宁的龙卷事件, ECMWF能够提前54 h, GFS能够提前18 h预报出了低层大气的低压扰动和高层大气的高压扰动以及冷暖扰动气团的变化与对比。对2011年4月27—28日发生在美国南部的多龙卷过程, ECMWF分别提前3、5、7和9 d预报出了与观测对应的高度扰动和温度扰动, 包括它们的空间结构随时间的变化。因此, 在全球中期模式预报产品的解释应用中, 强烈建议预报员使用扰动天气图代替传统天气图。

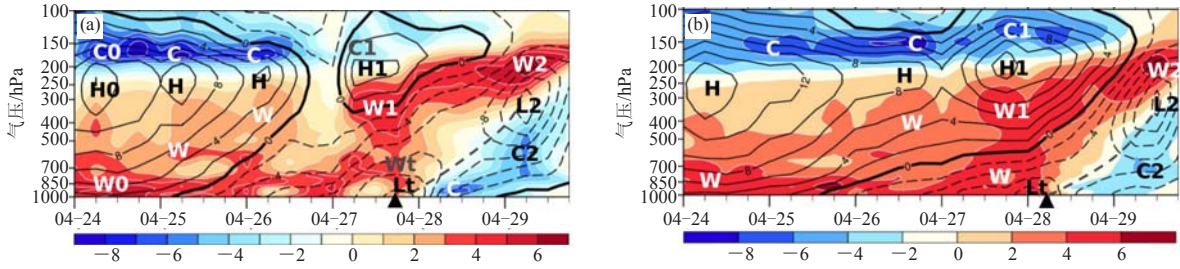


图7 沿32°—38°N平均的垂直—时间剖面图：88°W (a) 和84°W (b) 位置上高度扰动 (等值线, 单位: dagpm) 和温度扰动 (阴影, 单位: K) (▲为龙卷在2011年4月27日18时和 4月28日06时的位置; H/L和W/C为高低压中心和冷暖中心)<sup>[5]</sup>  
 Fig. 7 Vertical pressure–time sections of height anomalies (contours, unit: dagpm) and temperature anomalies (shading, unit: K) averaged over latitudes of 32°–38°N at 88°W(a) and at 84°W(b) (Symbol ▲ indicates the central position of tornadoes at 18 UTC 27 and 06 UTC 28 April 2011. The heavy dashed line links two low centers of L1 and L2. Letters H/L and W/C indicate the centers of height and temperature anomalies, respectively)

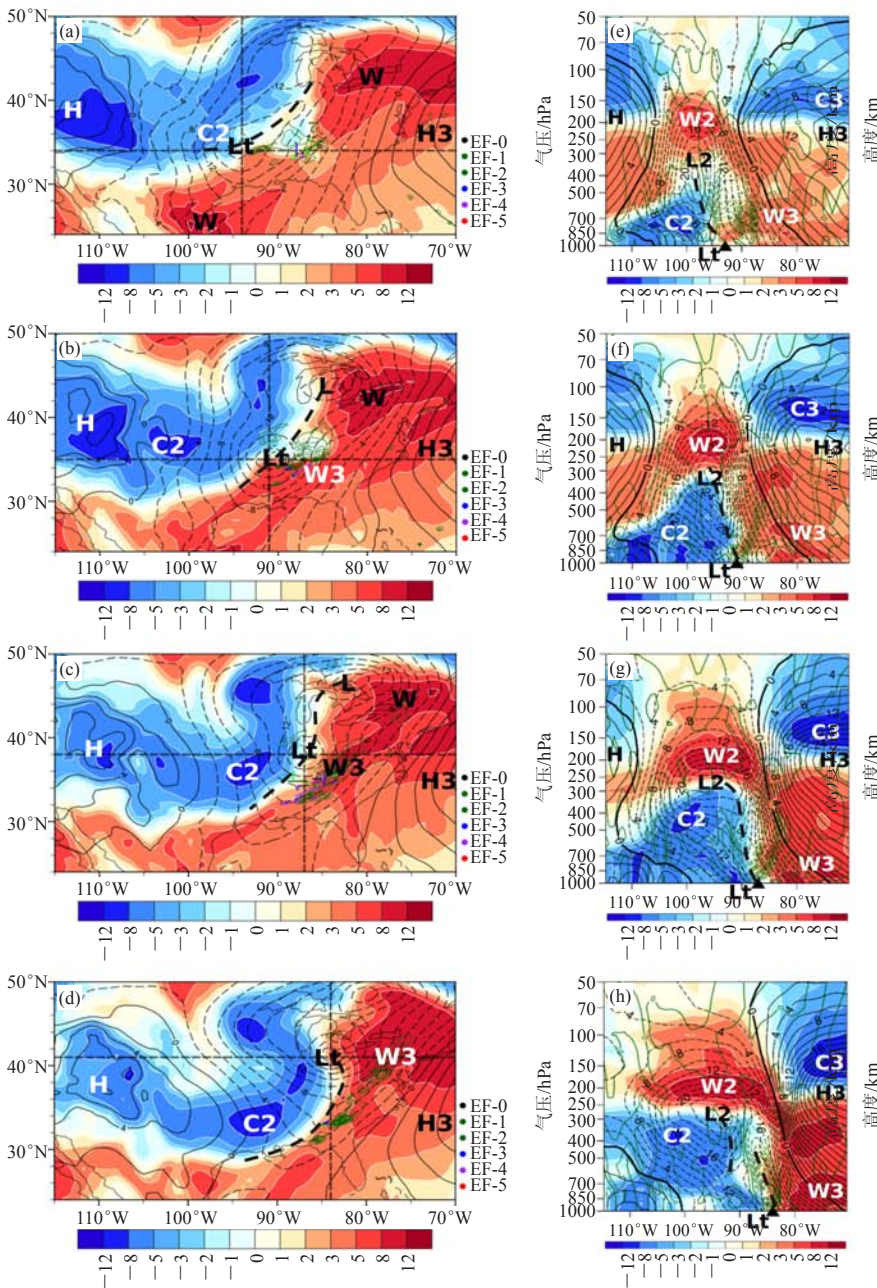


图8 2011年4月27日12时 (a), 18时 (b) 及28日00时 (c) 和06时 (d) 925 hPa上的高度异常 (等值线, 单位: dagpm) 和温度异常 (阴影, 单位: K)<sup>[5]</sup>, 以及其沿34°N (e), 35°N (f), 38°N (g) 和41°N (h) 的垂直分布 (左侧绿线为降水率 (2.5 mm·h<sup>-1</sup>), 粗虚线为高度扰动槽, 颜色线段为龙卷路径; ▲为扰动低压的中心位置, 绿线指示垂直速度 (单位: Pa·s<sup>-1</sup>))

Fig. 8 Horizontal height anomalies (contours, unit: dagpm) and temperature anomalies (shading, unit: K) at 925 hPa at 12 UTC 27 April (a), 18 UTC 27 April (b), 00 UTC 28 April (c), and 06 UTC 28 April (d) 2011, and vertical distributions along 34°N (e), 35°N (f), 38°N (g), and 41°N (h)<sup>[5]</sup> (In Figs. 8a–8d, green line indicates the hourly precipitation rate (unit: mm·h<sup>-1</sup>) and the thick dashed line denotes the trough of height anomalies along with the front of temperature anomalies. In Figs. 8e–8h, symbol ▲ indicates the central position of low (Lt) in surface anomaly, while thick dashed lines indicate the trough axis in height anomalies, the green solid and dashed lines respectively indicate anomalous sinking and rising pressure velocities (unit: Pa·s<sup>-1</sup> interval))

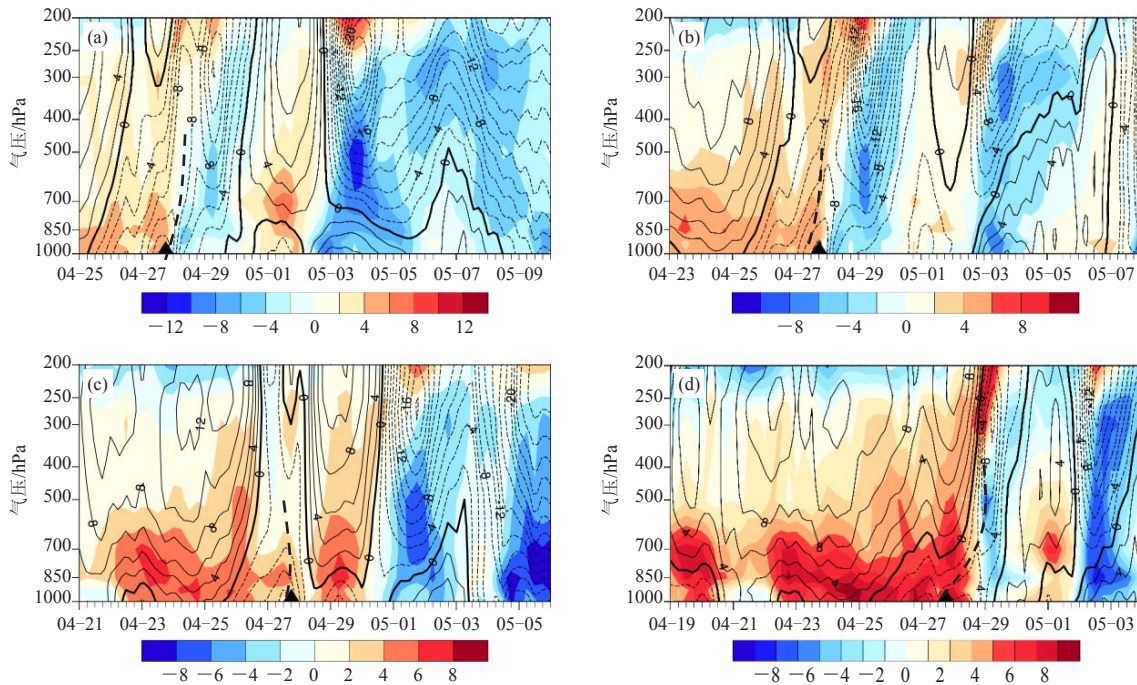


图9 同图7a沿88°W，但为ECMWF预报，起报时间为2011年4月25日00时（a），23日00时（b），21日00时（c）和19日00时（d），分别提前3、5、7和9 d预报的扰动场<sup>[5]</sup>

Fig. 9 As same as in Figure 7a along 88°W, but for ECMWF model prediction initiated at 00 UTC 25 April (a) in advance of 3 days, at 00 UTC 23 April (b) in advance of 5 days, at 00 UTC 21 April (c) in advance of 7 days, and at 00 UTC 19 April (d) in advance of 9 days

#### 参考文献

- [1] 范雯杰, 俞小鼎. 中国龙卷的时空分布特征. 气象, 2015, 41(7): 739-805.
- [2] Knupp K R, Murphy T A, Coleman T A, et al. Meteorological overview of the devastating 27 April 2011 tornado outbreak. Bulletin of the American Meteorological Society, 2014, 95: 1041-1062, doi:10.1175/BAMS-D-11-00229.1.
- [3] Glickman T. Glossary of Meteorology (2nd ed). American Meteorological Society, 2000.
- [4] 钱维宏, 梁卓轩, 金荣花, 等. 扰动变量在强对流天气分析和模式评估中的应用——以苏北里下河地区引发龙卷的扰动系统为例. 气象, 2017, 43(2): 129-143.
- [5] Qian W H. Temporal Climatology and Anomalous Weather Analysis. Springer, 2017.
- [6] Dee D P, et al. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2011, 137(656): 553-597.
- [7] Qian W, Shan X, Liang H, et al. A generalized beta-advection model to improve unusual typhoon track prediction by decomposing total flow into climatic and anomalous flows: GBAM for Improving Unusual Typhoon Track. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2014, 119(3):1097-1117.
- [8] 钱维宏, 江漫, 单晓龙. 大气变量物理解析原理及其在区域暴雨分析中的应用. 气象, 2013, 39(5): 537-542.
- [9] 钱维宏, 于甜甜. 大气变量物理解析法在极端温度事件前期信号提取中的应用. 气象, 2013, 39(6): 665-674.
- [10] Qian W H, Jiang N, Du J. Anomaly based weather analysis vs. traditional total-field based weather analysis for depicting regional heavy rain events. Weather and Forecasting, 2016, 31(1): 71-93.
- [11] Jiang N, Qian W, Du J, et al. A comprehensive approach from the raw and normalized anomalies to the analysis and prediction of the Beijing extreme rainfall on July 21, 2012. Natural Hazards, 2016, 84(3): 1551-1567.
- [12] 钱维宏, 张广文, 黄静. 不同资料大气扰动分量对2010年台风鲇鱼强度变化的描述. 气象, 2015, 41(7): 806-815.

# 2015年“东方之星”翻沉事件和2016年阜宁EF4级龙卷对流风暴环境条件、结构特征和机理

郑永光 朱文剑 田付友  
(国家气象中心, 中国气象局, 北京 100081)

**摘要:** 2015年“东方之星”翻沉事件(简称2015年事件)和2016年阜宁EF4级龙卷(简称2016年事件)都是极其罕见的极端强对流大风事件。利用多种观测资料、综合应用“配料法”的分析思路对比分析了两次事件的环流背景、环境条件、对流风暴的结构特征和地面大风与龙卷的形成机制。结果表明,两次事件虽然发生在有些类似的环流背景下,但环境条件存在很大差异。2015年事件对流层中层的显著干层使得大气具有较大下沉对流有效位能是有利于地面大风的重要环境条件,而0~6 km垂直风切变强度则为中等;2016年事件则具备了有利于中气旋龙卷的所有有利环境条件。2015年对流风暴为一个主要伴随负地闪、质心低、最大反射率因子约50 dBz的 $\beta$ 中尺度弓形线状对流系统;而产生2016年龙卷的则为一个主要伴随正地闪、质心高、最大反射率因子超过65 dBz的 $\beta$ 中尺度经典超级单体对流风暴。2015年对流风暴存在多个微下击暴流区,约5 km高度的中层附近存在强后侧入流区和中涡旋结构;而2016年超级单体风暴存在底高低于1 km、自下向上、向东北方向倾斜的强中气旋和龙卷涡旋特征,以及钩状回波和回波悬垂等特征,并在高分辨率静止气象卫星可见光图像上有明显的旋转特征。2016年超级单体风暴冷出流与环境地表大气温度差小于4 °C,显著弱于2015年对流风暴,这种不太强的下沉气流是该超级单体风暴能够产生龙卷的重要原因之一。

**关键词:** 龙卷, 极端大风, 下击暴流, 中气旋

**DOI:** 10.3969/j.issn.2095-1973.2018.02.005

## Environmental Conditions, Structures, and Mechanisms of Convective Storms of 2015 “Oriental Star” Capsizing Event and 2016 Funing EF4 Tornado

Zheng Yongguang, Zhu Wenjian, Tian Fuyou  
(National Meteorological Centre, China Meteorological Administration, Beijing 100081)

**Abstract:** The “Oriental Star” capsizing event in 2015 (Hereafter 2015 event) and the Funing EF4 tornado event in 2016 (Hereafter 2016 event) are extremely rare damaging wind events caused by severe convective storms. Based on multi-source data, this paper applied the “ingredients-based” method to compare the atmospheric circulation backgrounds, environmental conditions, structure and mechanisms between these two events of convective storms. Results show that both these events occurred in partially similar circulation backgrounds, but there are considerable differences in the environmental conditions. For the 2015 event, the most important environmental conditions conducive to high surface winds are the significantly dry layer in the middle troposphere that makes a larger downdraft convective available potential energy, and 0-6 km vertical wind shear has only a medium intensity. For the 2016 event, all the environmental conditions are very favorable for mesocyclone tornado. The 2015 convective storm was a meso- $\beta$  scale bow-shaped quasi-linear convective system with significant negative lightning flash, low mass center of reflectivity, and about 50 dBz of the maximum reflectivity. However, the 2016 convective storm was a meso- $\beta$  scale classical supercell with significant positive lightning flash, high mass center of reflectivity, and about 65 dBz of the maximum reflectivity. There were multiple shallow downbursts in the low troposphere, and strong rear inflows and a mesovortex at about 5 km altitude in 2015 convective storm. Nevertheless, the 2016 supercell storm had a strong mesocyclone with base height less than 1 km and tilting northeastwards from bottom to top, and a tornadic vortex signature, and hook echo and overhang echo signatures; besides, it appeared rotating on the high-resolution visible images observed from geostationary meteorological satellites. The surface air temperature differences between the cold outflow of the 2016 supercell storm and the environment was less than 4°C, and they were weaker than those in 2015 event, therefore, not strong downdraft is one of the important mechanisms that produced a tornado in the 2016 event of supercell storm.

**Keywords:** tornado, extreme wind, downburst, mesocyclone

收稿日期: 2017年8月14日; 修回日期: 2017年9月21日  
第一作者: 郑永光(1974—), Email: zhengyg@cma.gov.cn  
资助信息: 国家自然科学基金项目(41375051); 国家重点研发计划(2017YFC1502003)

## 0 引言

近年来,龙卷和下击暴流导致的雷暴大风等强对流天气因其强致灾性受到公众广泛关注,尤其2015年6月1日21:30时(北京时间,下同)左右使得“东方之星”客轮翻沉导致四百多人遇难的下击暴流事件<sup>[1-2]</sup>(简称2015年事件)和2016年6月23日14:00—15:00时造成98人死亡、800多人受伤的江苏省盐城市阜宁县EF4级(最大阵风风速的下限值为74 m/s)特大龙卷灾害<sup>[3-4]</sup>(简称2016年事件)更是受到了公众和众多科研人员的关注。

相关分析已经确认导致2015年“东方之星”客轮翻沉的直接原因是一次线状对流系统中的下击暴流<sup>[1-2]</sup>,而2016年阜宁龙卷是由一个经典超级单体对流

风暴产生<sup>[3-4]</sup>,并伴有直径达2~3 cm的大冰雹天气。对2015年事件的风灾现场调查表明,强风灾害具有显著的小尺度时空分布特征;现场调查估计该次事件中地面最大风速达12级以上(>32.6 m/s),而该次事件周边气象站监测到的最大瞬时风速仅为16.4 m/s,发生在距事发点约35 km的尺八自动气象站<sup>[1]</sup>;根据现场调查估计2016年阜宁龙卷为EF4级,其瞬时风速的下限值为74 m/s,远大于周边气象站监测到的最大瞬时风速34.6 m/s(12级)<sup>[3]</sup>。对2015年事件和2016年事件现场调查获得的风灾分布见图1。对这两次强对流事件的现场调查表明,目前我国虽然已经布设完成了较为完备的气象业务观测体系,但仍然难以全面监测该类极端强对流天气。

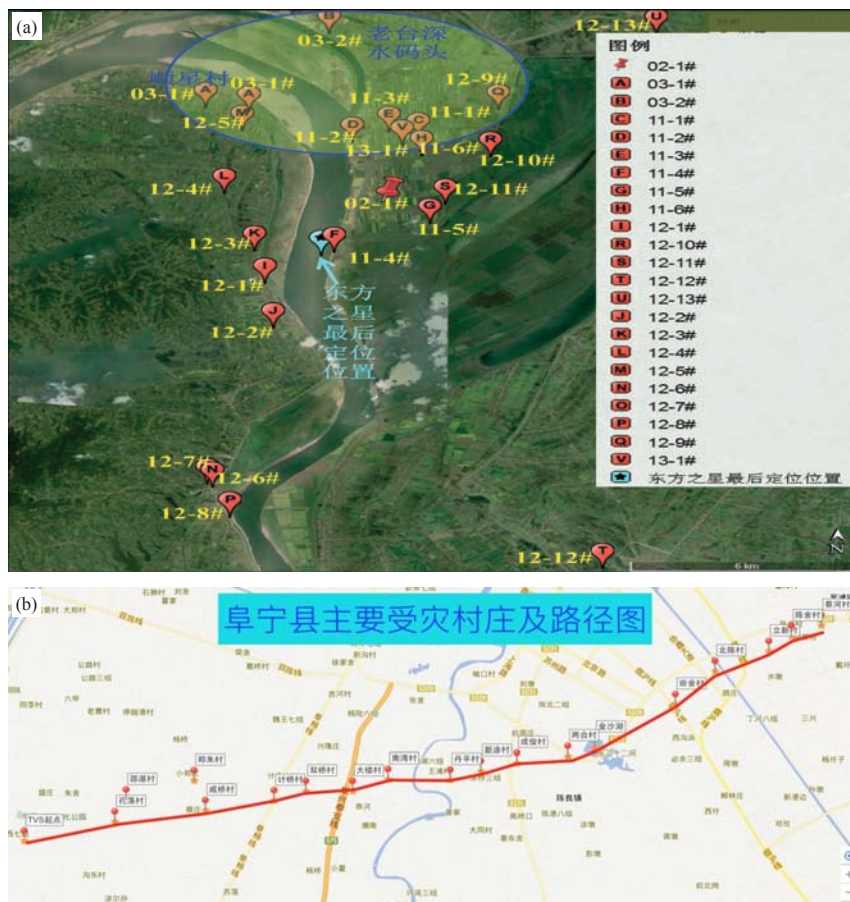


图1 2015年“东方之星”客轮翻沉区域及周边卫星影像和风灾地点分布<sup>[1]</sup>(a)、2016年阜宁龙卷灾害路径<sup>[3]</sup>(b)(a中风灾地点按照日期和调查时间先后编号,如11-4#表示2015年6月11日第4个调查点,“东方之星”客轮最后定位位置数据来自长江海事局)

Fig. 1 (a) Survey sites for 2015 event (Survey sites are represented with the date and the survey order, such as 11-4# indicating the fourth survey site on 11 June 2015, the capsizing location of “Oriental Star” is provided by the Yangtze River Maritime Bureau); (b) 2016 Funing tornado damage track

我国强对流天气通常指的是直径 $\geq 5$  mm的冰雹、或者龙卷、或者 $\geq 17$  m/s(或者8级)的雷暴大风、或者小时雨量 $\geq 20$  mm的短时强降水等天气<sup>[5]</sup>,具有

时空尺度小、局地性强、持续时间短等特征,属于小概率天气事件。我国重大强对流天气通常指的是小时雨量 $\geq 50$  mm的短时强降水、或者直径 $\geq 20$  mm的冰

雹、或者 $\geq 25$  m/s（或10级）的雷暴大风、或者EF2级（阵风可达50 m/s以上）及以上级别龙卷等天气<sup>[6]</sup>；这类强度更强的天气发生概率更低。2015年事件是长江航运史上从未出现过的极端突发事件<sup>[1]</sup>；而2016年EF4级龙卷事件则是1950年以来我国第6个、江苏省第2个EF4级龙卷<sup>[3,7-8]</sup>；直到目前，我国尚未记录到EF5级龙卷<sup>[8]</sup>。因此，这类天气事件的预报预警难度较通常的强对流天气更大。

目前，基于“配料法”<sup>[9-10]</sup>的强对流天气分析方法已经得到了广泛应用。“配料法”就是基于构成要素的预报方法，其首先需要确定预报的基本构成要素或“配料”；这些构成要素一般是相对独立的基本气象变量。该方法给预报员提供了天气预报的一条清晰的思路，与流型辨识方法具有很强的互补性。

基于对流风暴和不同类型对流天气发生条件<sup>[5-6,11]</sup>，应用“配料法”<sup>[9-10]</sup>和对流天气分析思路和规范<sup>[12-13]</sup>，综合使用美国NCEP（国家环境预报中心）CFRS（气候预报系统再分析） $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 再分析资料、探空资料、自动气象站观测资料、地球静止气象卫星观测资料、云一地闪电（简称地闪）资料和新一代天气雷达观测资料，本文来对比分析导致2015年“东方之星”客轮翻沉事件和2016年阜宁EF4级龙卷事件的对流风暴环境条件和中尺度结构特征及其地面大风成因，比较二者的异同，从而进一步加深对该类天气的机理认识和提升对该类事件的业务预报预警能力。

## 1 环流背景和对流环境条件

2015年事件和2016年事件的大气环流背景具有一定的相似性，但差异更为显著。图2a和2b表明二者都发生在500 hPa西太平洋副热带高压边缘的584 dagpm等值线附近，位于北方冷涡环流的南侧；二者的500 hPa温度都在 $-4 \sim -2^\circ\text{C}$ 。但二者的500 hPa环流也明显不同，2015年事件地点上空500 hPa等位势高度线更为平直，虽然冷涡较强但中心位置偏北，事件发生地点上空无明显急流，风速仅为15 m/s左右（见图2a和图3a），垂直风切变较弱，对我国来说属于中等强度垂直风切变；而2016年事件的500 hPa低槽更为显著一些，从而更有利于大尺度的上升气流，冷涡虽然强度较弱但中心位置更偏南，且龙卷事件发生地点位于急流南侧，风速超过20 m/s（见图2b和图3b），属于强度较强垂直风切变。从500 hPa温度场来看，2015年事件发生在500 hPa温度脊北侧，温度梯度较小，有较显著的暖平流（见图2a，且图3a中风向为顺转），有利于零度层高度的升高和静力不稳定性度的减弱；而2016年事件发生在500 hPa温度槽附近，温度梯度较

大，但温度平流不显著（见图2b，且图3b中风向变化不明显），有利于静力不稳定性度的维持或者加强。

图2a和2b还表明二者都发生在850 hPa低空急流左前侧，并存在明显的西南风转东南风的水平风切变；二者也都位于850 hPa温度脊的北侧，温度约为 $20^\circ\text{C}$ ，并有显著的暖湿平流（850 hPa比湿分布图未给出），为强对流天气的发生发展提供了非常有利的暖湿条件和抬升条件，并有利于静力不稳定性度的加强。二者850 hPa风场差异主要在于切变线北侧的偏北气流和西南低空急流的强度与地理分布范围有所不同，其中2016年事件的切变线北侧的偏北气流和西南低空急流强度都更强一些。

海平面气压分布（图2c和2d）表明二者都发生在低压槽区，但2015年事件发生在低压区内，而2016年事件发生在低压和高压之间的大气压梯度区，这表明2015年事件主要发生在暖区，而2016年事件的发生与东海的冷高压具有一定关系，这也可从后文给出的地面自动站温度场和风场分布得出类似结论。此外，2016年事件的低压槽区地理分布范围更为宽广，这表明2016年事件的暖湿空气更为强盛，这与2016年事件中850 hPa低空急流更为强盛相一致。

从大气可降水量（ $PW$ ）和地面对流有效位能（ $CAPE$ ）来看（图2c和2d），两次强对流天气事件都发生在高温高能区， $PW$ 数值达到70 mm， $CAPE$ 数值约为2500 J/kg，这都是非常有利于强对流发展的水汽和能量条件<sup>[5-6,14]</sup>。但2016年事件中超过70 mm的 $PW$ 地理分布范围显著大于2015年事件，这也表明2016年事件的中暖湿空气更为强盛。还需要指出的是，图2c和图2d是CFRS再分析资料计算的 $PW$ 和地表 $CAPE$ ，其与直接根据探空资料（如图3）计算的 $PW$ 和 $CAPE$ 值存在一些差异，其计算的数值大于根据探空资料计算的数值，这应该与CFRS再分析资料的湿度分析偏差相关，可参见王秀明等<sup>[15]</sup>分析的NCEP再分析资料的物理量偏差。

从邻近两次强对流天气事件最近探空站的临近时次倾斜 $T-\log p$ 图来看（图3），两次强对流天气事件虽然都发生在具有显著暖平流（风向随高度顺时针转变）、高温（地表气温超过 $26^\circ\text{C}$ ）、高湿（地表露点超过 $23^\circ\text{C}$ ）和高能（ $CAPE$ 超过1000 J/kg）的环境大气中，但是也存在明显差异。需要说明的是，2016年6月23日14时射阳站探空并没有完整地探测到整个对流层的数据，其最大探测高度仅为374 hPa；为了完整显示整个对流层的温湿风的垂直分布和方便计算相关物理量，考虑到对流层上层大气状态变化较为缓慢，本文直接使用了当日08时的374 hPa以上到100 hPa层之

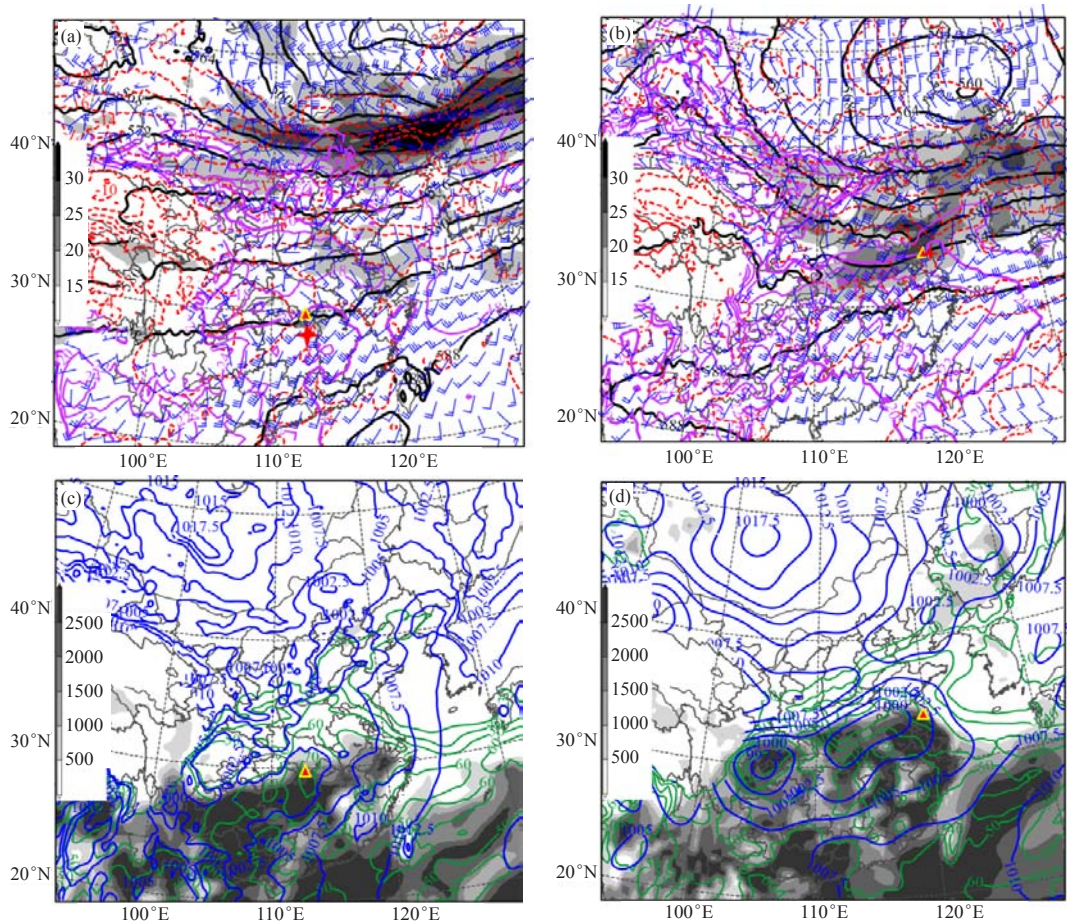


图2 两次强对流天气事件的大气环流背景和对流天气环境条件

(其中图2a和2c为2015年6月1日20时, 图2b和2d为2016年6月23日14时; 黄边红心三角形分别表示“东方之星”客轮翻沉位置和阜宁县城位置; 红色+表示距离事件发生地点最近的探空站位置, 图2a中+表示长沙探空站位置, 图2b中+表示射阳探空站位置; 图2a和2b中黑色实线为500 hPa位势高度等值线, 单位: dgpm, 间隔4 dgpm; 红色划线为500 hPa等温线, 单位:  $^{\circ}\text{C}$ , 间隔 $2^{\circ}\text{C}$ ; 灰度填色为500 hPa  $\geq 15$  m/s大风速区, 单位: m/s, 间隔5 m/s; 紫色实线为850 hPa等温线, 单位:  $^{\circ}\text{C}$ , 间隔 $2^{\circ}\text{C}$ , 其中加粗等值线为 $20^{\circ}\text{C}$ 等温线; 蓝色风羽为850 hPa风场, 长划线为4 m/s, 短划线为2 m/s; 图2c和2d中蓝色等值线为海平面气压场, 单位: hPa, 间隔2.5 hPa; 绿色等值线为大气可降水量场, 单位: mm, 间隔10 mm; 灰度填色为CAPE, 单位: J/kg, 间隔500 J/kg)

Fig. 2 Circulations and environmental conditions

(Figs. 2a and 2c are for 20 BT 1 June 2015, and Figs. 2b and 2d are for 14 BT 23 June 2016. Yellow triangles with red centers respectively “Oriental Star” capsizing location and Funing County. Red cross denotes the nearest locations of sounding stations in the two events: Changsha station in Fig. 2a, Sheyang station in Fig. 2b. In Figs. 2a and 2b: black solid lines are 500 hPa geopotential height contour in 4 dgpm interval, unit: dgpm; red lines are 500 hPa isotherm in  $2^{\circ}\text{C}$  interval, unit:  $^{\circ}\text{C}$ ; gray colors indicate  $\geq 15$  m/s wind speeds at 500 hPa in 5 m/s interval, unit: m/s; purple lines are 850 hPa isotherm in  $2^{\circ}\text{C}$ ; interval and thick purple lines representing  $20^{\circ}\text{C}$  isotherm, unit:  $^{\circ}\text{C}$ ; blue barbs are winds at 850 hPa: long line for 4 m/s and short line for 2 m/s. In Figs. 2c and 2d: blue contour for sea level pressure in 2.5 hPa intervals, unit: hPa; green contour for precipitable water in 10 mm intervals, unit: mm; gray colors for CAPE in 500 J/kg intervals, unit: J/kg)

间探空数据补充为14时的相应层次数据。

由于2016年事件射阳站大气底层存在弱的逆温层, 因而地面气温低于2015年东方之星事件长沙站地面气温, 但2016年事件射阳站大气底层露点显著高于2015年事件。从探空资料计算的PW数值来看二者基本相当, 都约为60 mm; 但计算的CAPE和对流抑制能量(CIN)有较显著差异: 2015年事件计算的最大

CAPE值为1335 J/kg, CIN为86 J/kg, 而2016年事件计算的最大CAPE值为2705 J/kg, CIN为12 J/kg。如前所述, 由于再分析资料存在一定的偏差<sup>[15]</sup>, CAPE和PW值同CFRSR资料计算的相应数值存在一些差异。

2015年事件没有冰雹天气报告, 2016年事件伴有显著的冰雹天气。不太高的 $0^{\circ}\text{C}$ 气温层高度和较大的垂直减温率是有利于冰雹天气的重要环境条

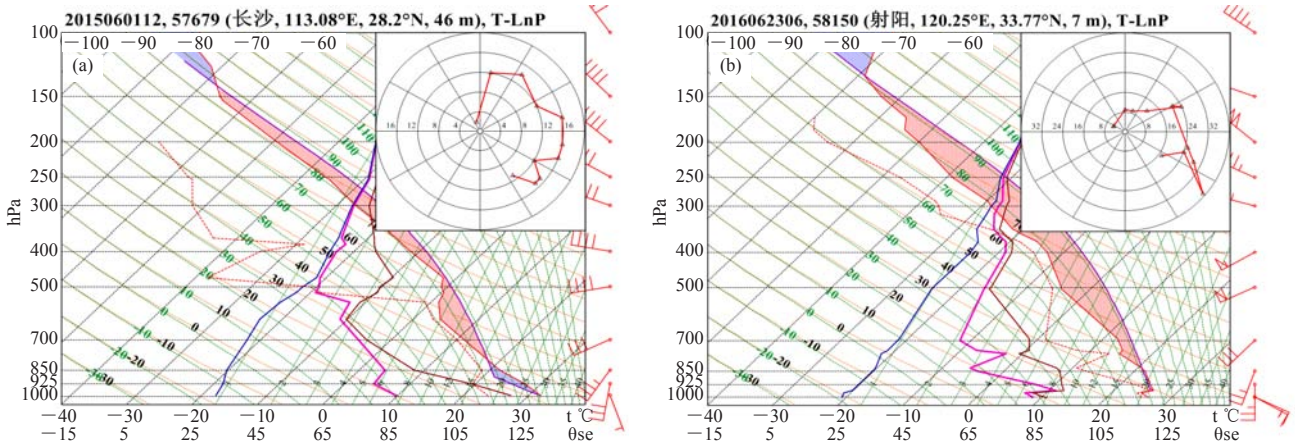


图3 两次强对流天气事件的倾斜 $T$ - $\log p$ 图和风矢端图

(其中图3a为2015年6月1日20时长沙探空, 3b为2016年6月23日14时射阳探空, 探空站地理位置可见图2a和2b中的标注; 其中红色实线为温度廓线, 红色划线为露点垂直廓线, 蓝色实线为位温廓线, 紫红色实线为假相当位温廓线, 深红色实线为饱和假相当位温廓线, 红色填充区域为CAPE; 需要注意的是, 位温、假相当位温和饱和假相当位温廓线并非使用的是倾斜温度坐标轴, 其使用的坐标轴为标注为 $\theta_{se}$ 的坐标轴; 红色风羽为风的垂直分布, 三角为20 m/s, 长划线为4 m/s, 短划线为2 m/s; 每幅图的右上角为风矢端图, 单位: m/s)

Fig. 3 Skew  $T$ - $\log p$  and hodograph for the two events

(Fig. 3a For Changsha sounding at 20 BT 1 June 2015; Fig. 3b For Sheyang sounding at 14 BT 23 June 2016; the sounding station locations are labeled in Figs. 2a and 2b. Red solid line is temperature profile, red dashed line is dewpoint profile, blue solid line is potential temperature profile, magenta solid line is pseudo equivalent potential temperature profile, deep red solid line is saturated pseudo equivalent potential temperature profile, and red filled area is CAPE.

Note that potential temperature, pseudo equivalent potential temperature and saturated pseudo equivalent potential temperature profile are in the coordinate axis labeling  $\theta_{se}$ ; red barbs are winds with triangle of 20 m/s, long line of 4 m/s, and short line of 2 m/s. Hodograph is shown on the right top corner of each Fig. unit: m/s)

件<sup>[11,16-18]</sup>。2015年事件 $0^{\circ}\text{C}$ 层高度约为5.6 km, 高度较高, 850 hPa与500 hPa温差为 $22.5^{\circ}\text{C}$ , 垂直减温率较小; 2016年事件则约为5 km, 850 hPa与500 hPa温差为 $26.3^{\circ}\text{C}$ , 垂直减温率较大。已有研究表明,  $0^{\circ}\text{C}$ 层海拔高度平均在 $4.1\sim 4.3\text{ km}$ <sup>[16,18]</sup>有利于冰雹天气的发生, 但这个数值仅是一个平均值, 部分冰雹天气个例的 $0^{\circ}\text{C}$ 层海拔高度会超过5 km<sup>[18]</sup>; 而部分冰雹天气个例的850 hPa与500 hPa的垂直温差平均值可达 $29^{\circ}\text{C}$ <sup>[16]</sup>(约相当于 $7^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ), 这是相当大的垂直减温率<sup>[6,19]</sup>, 而曹艳察等<sup>[18]</sup>较为完整的统计结果显示我国第一和第二阶段冰雹天气的垂直减温率通常的分布范围为 $6.3\sim 7.9^{\circ}\text{C}/\text{km}$ (换算为850 hPa与500 hPa温差约为 $26\sim 32^{\circ}\text{C}$ )。因此, 从 $0^{\circ}\text{C}$ 气温层高度和垂直减温率来看, 2016年事件的环境条件更有利于冰雹天气发生。

从二者气温和露点温度垂直廓线的分布可以看到, 2015年事件850 hPa以下层次以及大约550 hPa以上层次存在显著的干层(相对湿度极低, 温度露点差最大达 $36^{\circ}\text{C}$ ), 且550 hPa以上层次存在一个显著的下沉逆温区, 这些特征都是有利于对流风暴产生强下沉气流形成下击暴流从而导致地面雷暴大风的非常有利的环境条件; 而2016年事件在925~500 hPa之间也

存在两个显著的干层, 虽然这也是较有利于对流风暴产生较强的下沉气流的温湿垂直分布条件, 但这个有利条件显著弱于2015年事件的有利条件。这些有利于对流风暴产生较强的下沉气流的环境条件可以用下沉对流有效位能(DCAPE)这个物理量来表征<sup>[5-6,11]</sup>。从计算的DCAPE数值来看, 2015年东方之星事件为 $1158\text{ J/kg}$ , 而2016年阜宁龙卷事件仅为 $686\text{ J/kg}$ , 因此从该物理量大小的比较来看, 2015年事件对流风暴产生的下沉气流强度要显著强于2016年事件。

强冰雹、F2/EF2级以上龙卷和区域性的雷暴大风天气通常出现在强垂直风切变环境下<sup>[11,20]</sup>。2015年事件长沙探空站地表至500 hPa(近似为 $0\sim 6\text{ km}$ )的垂直风切变为 $16.5\text{ m/s}$ , 而2016年事件射阳探空站地表至500 hPa的垂直风切变为 $27.5\text{ m/s}$ 。通常,  $0\sim 6\text{ km}$ 垂直风切变达 $15\sim 20\text{ m/s}$ 为中等强度垂直风切变, 超过 $20\text{ m/s}$ 为强垂直风切变<sup>[16]</sup>; 而相关统计也表明,  $0\sim 6\text{ km}$ 垂直风切变数值达到 $15\sim 20\text{ m/s}$ 以上是超级单体形成的必要条件之一<sup>[21]</sup>, 美国F2/EF2级及以上龙卷对流风暴的 $0\sim 6\text{ km}$ 垂直风差值普遍超过 $20\text{ m/s}$ <sup>[19,22]</sup>, 最大可超过 $25\text{ m/s}$ 。因此, 2016年事件的 $0\sim 6\text{ km}$ 强的垂直风切变更有利于龙卷的发生。

二者的低层垂直风切变都较大，但由于2015年事件中长沙探空站位于低空急流核附近，2016年事件射阳探空站位于低空急流的顶端，因此2015年事件的低层垂直风切变稍大于2016年事件，其中2015年事件地表至925 hPa（近似为0~1 km）的垂直风切变

为10.3 m/s，2016年事件地表至925 hPa的垂直风切变为7.8 m/s，都与美国F2/EF2级及以上龙卷对流风暴的0~1 km垂直风差值普遍达10 m/s以上<sup>[22]</sup>的结果接近。

有利于超级单体风暴的环境条件不仅包括深厚湿对流所需的环境条件，还包括较大的CAPE和强的

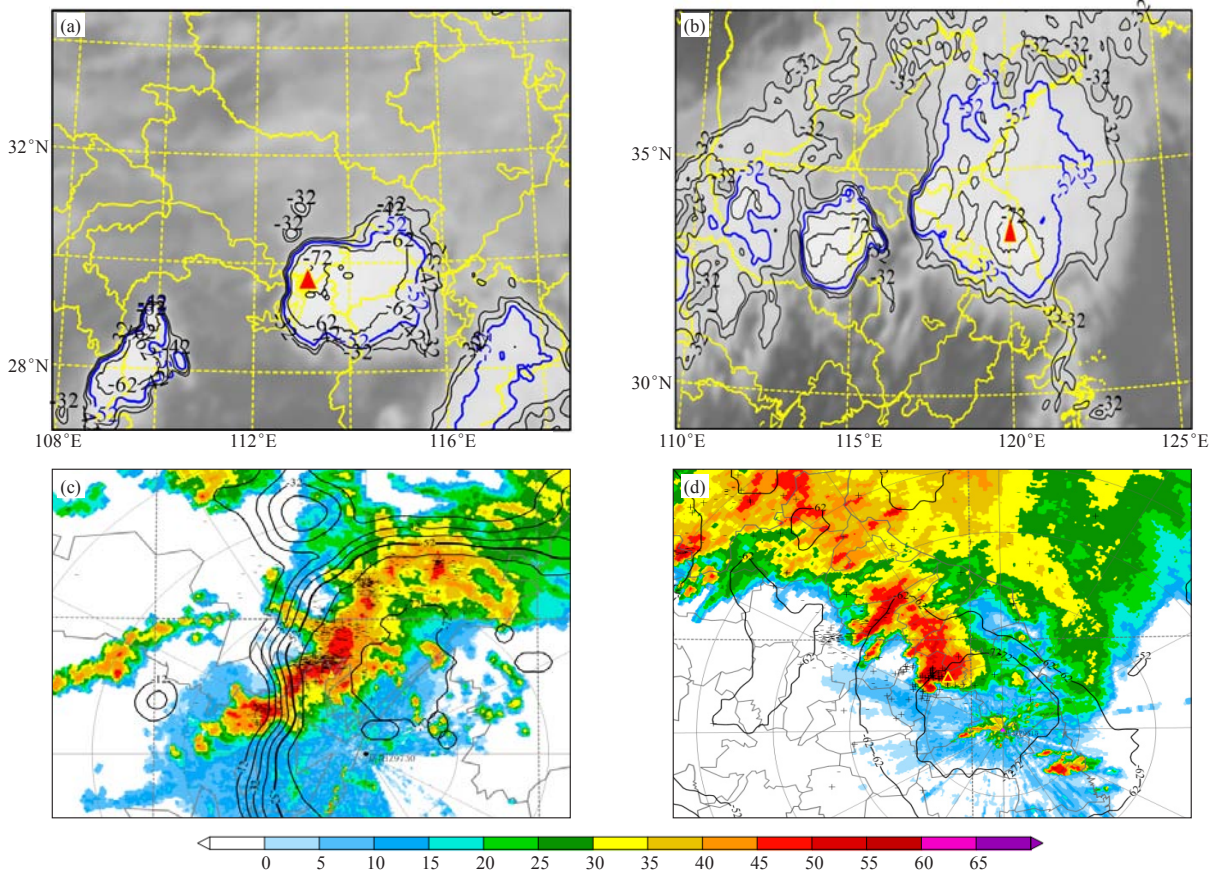


图4 两次强对流天气事件红外云图、雷达回波、地闪和红外TBB分布以及2016年事件的高分辨率可见光云图（其中图4a为2015年6月1日21:30时FY-2E红外云图与TBB等值线，单位： $^{\circ}\text{C}$ ，图4c和4e为21:26时岳阳雷达 $0.5^{\circ}$ 仰角观测，但二者的地理范围不同。图4b为2016年6月23日14:30时FY-2G红外云图与TBB等值线，单位： $^{\circ}\text{C}$ ，图4d和4f为14:30时盐城雷达 $0.5^{\circ}$ 仰角观测，但二者的地理范围不同。黄边红三角分别表示“东方之星”客轮翻沉位置和阜宁县城位置；图4c和4d中填色为雷达反射率因子，等值线分别为2015年6月1日21:30时FY-2E TBB、2016年6月23日14:30时FY-2G TBB分布，单位： $^{\circ}\text{C}$ ；“+”和“-”符号分别表示2015年6月1日21:00—21:30时和2016年6月23日14:00—14:30时地闪分布，其中“+”表示正地闪，“-”表示负地闪；图4e和4f中填色图为雷达径向速度；需要注意的是，图4f中气旋区域负径向速度区包裹的正速度区为速度模糊区；其中图4e和4f中白色实线分别表示图5中垂直剖面位置；图4g为2016年6月23日14:30时葵花8号500 m分辨率可见光云图）

Fig. 4 Satellite infrared imageries with TBB contours, and radar echoes with lightning flashes and infrared TBB contours for the two events, and Hamawari-8 satellite visible imagery for the 2016 event (Fig. 4a For FY-2E satellite infrared imagery with TBB contours at 21:30 BT 1 June 2015. Figs.4c and 4e For Yueyang radar observations at  $0.5^{\circ}$  elevation at 21:26 BT, but they have different geographical areas. Fig. 4b For FY-2G satellite infrared imagery with TBB contours at 14:30 BT 23 June 2016. Figs.4d and 4f For Yancheng radar observations at  $0.5^{\circ}$  elevation at 14:30 BT 23 June 2016, but they also have different geographical areas. Yellow triangles with red center indicate respectively “Oriental Star” capsizing location and Funing County. In Figs.4c and 4d, shaded colors are radar reflectivity, contours of FY-2E TBB at 21:30 BT 1 June 2015, and FY-2G TBB at 14:30 BT 23 June 2016, respectively, unit:  $^{\circ}\text{C}$ ; The “+” and “-” symbols represent cloud-ground lightning flashes at 21:00—21:30 BT 1 June 2015, and at 14:00—14:30 BT 23 June 2016, respectively, where “+” denotes positive flashes, and “-” negative flashes. In Figs.4e and 4f, shaded colors are radar radial velocities. Note that the positive radial velocities surrounded by the negative radial velocity zone of the mesocyclone are velocity aliasing in Fig.4f. The white solid lines in Figs.4e and f are locations of vertical cross sections in Fig. 5. Fig. 4g For the Hamawari-8 satellite visible imagery at 500 m horizontal resolution at 14:30 BT 23 June 2016)

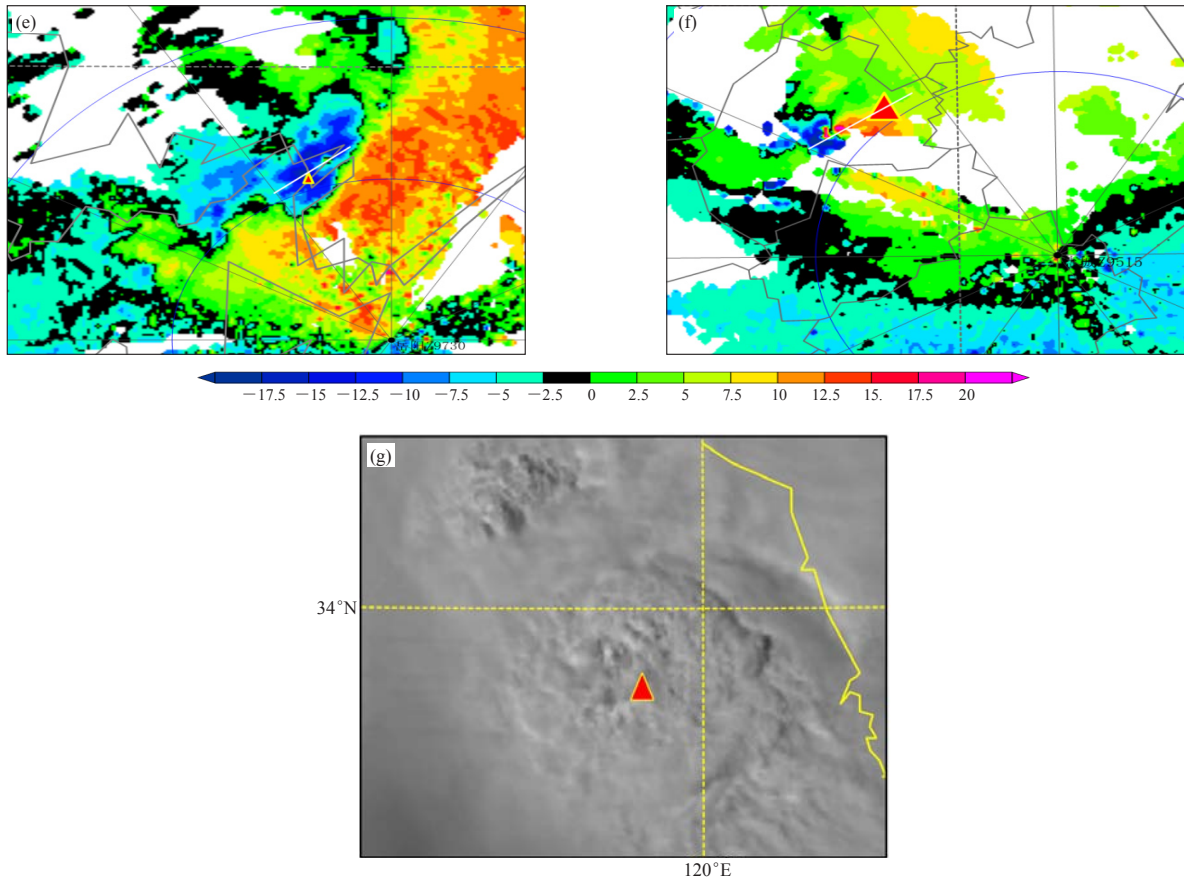


图4 续  
Fig. 4 Continued

0~6 km垂直风切变<sup>[23]</sup>, 有利于F2/EF2级及以上中气旋龙卷的环境条件不仅需要有利于超级单体风暴的环境条件, 还需要较高的0~1 km相对湿度<sup>[24]</sup>、较低的抬升凝结高度和较大的低层(0~1 km)垂直风切变<sup>[19, 22]</sup>。对比以上环境条件可以看到, 2016年事件的大气环境既满足了深厚湿对流所需的水汽、抬升和不稳定条件, 也满足了较大的CAPE和强的0~6 km垂直风切变条件, 还满足了低层高的相对湿度(接近饱和)、较低的抬升凝结高度(CIN值很小)和较大的低层(0~1 km)垂直风切变条件, 因此2016年事件的环境条件非常有利于产生F2/EF2级及以上中气旋龙卷, 而2015年事件则有较多条件没有满足, 比如CAPE值较小、0~6 km垂直风切变条件较弱、低层相对湿度较小等。

## 2 对流风暴演变和结构特征

如引言中所述, 已有文献给出2015年“东方之星”客轮翻沉是由一次线状对流系统中的下击暴流所导致<sup>[1-2]</sup>, 2016年阜宁龙卷是由一个超级单体对流风暴产生<sup>[3-4]</sup>。本部分使用自动站观测资料、地球静止气象卫星观测资料、地闪资料和新一代天气雷达观测资料

来综合分析两次事件的中尺度对流系统的演变、结构和地面气象要素分布特征(图4、图5和图6)。

FY-2E地球静止气象卫星红外TBB(相当黑体亮度温度)演变(图未全部给出)显示, 导致2015年“东方之星”客轮翻沉的线状对流系统于6月1日14时左右初生于鄂西山区与湖南省交界处的湖北省一侧, 空间尺度仅约30 km, 为近似圆形的β中尺度对流系统, 最低TBB约为-48℃, 可见光图像的云顶纹理分布还较为光滑(图略), 雷达观测为较为分散的团状对流分布模态(图略); 至20时左右(图略), 卫星观测的该对流系统仍保持近似为圆形, -52℃ TBB空间尺度已达到约200 km, 已达α中尺度, 最低TBB约为-72℃, 雷达观测则表明其已发展为线状对流系统(图略)。至接近于“东方之星”客轮翻沉时刻的21:26时左右, 卫星观测的该对流系统仍保持近似为圆形(图4a), -52℃ TBB空间尺度约250 km, 最低TBB已低于-72℃(图4a); 雷达观测表明该对流系统已经发展为一个长度约180 km较典型的弓形线状对流系统(图4c和4e), 其在0.5°仰角负径向速度区域表现出的弓形特征(图4 e)较该仰角反射率因子的特

征更为突出和典型。图4c表明,该线状对流系统上有多个强对流风暴单体,并存在后侧入流槽口<sup>[25]</sup>,最强反射率因子达50 dBz左右,尤其是扫过长江导致“东方之星”客轮翻沉的对流风暴尺度最大、强度最强,并存在多个朝向雷达的大径向速度中心(图4e),也就是存在多个下击暴流区,最大朝向雷达的径向速度达19 m/s,这些下击暴流区与图1a中给出的风灾分布<sup>[1]</sup>基本一致。需要注意的是,在图4e“东方之星”客轮翻沉地点右侧的大片负径向速度区包围了一个风速较小的正径向速度区,该区域并非存在速度模糊,从而与其左侧的负径向速度形成了一个中涡旋结构,但由于其旋转速度较小并未达到中气旋的标准。此外,21:00—21:30时地闪分布(图4c)显示该对流系统主要产生的为负地闪,表明该系统是主要产生强降水的对流系统,其产生冰雹天气的可能性较低<sup>[26]</sup>。

FY-2G地球静止气象卫星红外TBB演变(图未全部给出)表明,产生2016年阜宁龙卷的对流系统于6月23日08时左右初生于安徽北部,位于一个近似椭圆形的、镶嵌在大片梅雨锋云系中的 $\alpha$ 中尺度对流系统(M $\alpha$ CS)南侧,最低TBB达-40℃,可见光图像可看到发展高度明显不同的积云(图略);虽然从TBB分布来看,这个对流系统与北侧的M $\alpha$ CS连接在一起,但从雷达观测来看,为一孤立的 $\beta$ 中尺度对流系统(M $\beta$ CS);至14时,该对流系统向东向南移动和发展增强,-52℃ TBB分布显示此时其与北侧的M $\alpha$ CS已合并发展成为一个水平尺度约500 km左右、近似圆形的中尺度对流复合体(MCC),最低TBB低于-72℃(图4b),可见光图像(图4g)可看到其云顶纹理较为粗糙,具有明显的上冲云顶特征,动画500 m分辨率的可见光图像(图4g)可见显著的圆形涡旋旋转特征;但雷达反射率因子分布则表明强对流风暴排列成为近似为“人”字形的分布形态(图4d,需要说明的是该图受所显示地理范围的限制,并未完全展示出“人”字形左侧对流风暴的分布形态),导致阜宁龙卷的经典超级单体风暴就发生在“人”字形强对流风暴带右侧的最南端,属于Grams等<sup>[22]</sup>对龙卷风暴模态分类中的第3类模态——团状模态<sup>[4]</sup>,其他两类模态分别为孤立对流模态和线状对流模态<sup>[22]</sup>。该龙卷超级单体风暴具有明显的由强上流入流导致的钩状回波特征,其最强反射率因子超过65 dBz(图5c),超过50 dBz的强反射率因子最大高度将近12 km,大大超过了一20℃层的8.5 km高度,因此具有产生大冰雹对流风暴的强反射率因子特征。与超级单体定义<sup>[27]</sup>相一致,图4f给出的雷达径向速度场清楚表明该对流风暴的钩状回波顶端存在很强的中气旋和TVS(龙卷涡

旋特征)特征,其最大旋转速度超过了26 m/s,需要注意的是图4f的中气旋区域负径向速度区包裹的正速度区为速度模糊区。这种强旋转特征也从高分辨率静止气象卫星可见光图像上得到了验证(图4g)。从时间的演变还可以看到中气旋在14:14时后迅速加强并持续到14:36时之后,且其底高低于1 km<sup>[4]</sup>。此外,14:00—14:30时地闪分布(图4d)表明该超级单体风暴主要产生的为正地闪,这也说明该对流风暴中存在较多的冰相粒子,与冰雹天气密切相关<sup>[28-29]</sup>。

图5是穿过对流风暴中强反射率因子、大径向速度区和中涡旋的垂直剖面分布,其进一步展示了两事件对流风暴结构的巨大差异。2015年事件反射率因子垂直分布(图5a)表明,该对流风暴为低质心强降水风暴,最大反射率因子在50 dBz左右,不是特别强,但其产生的最大小时雨量超过90 mm;该对流风暴垂直发展依然非常旺盛,回波顶高超过12 km;0℃气温层(海拔高度约5.6 km)至-20℃气温层(海拔高度约8.8 km)之间反射率因子在30~50 dBz之间,表明存在液态过冷水、软雹等混合相态水物质,有利于较大密度的负地闪产生<sup>[30]</sup>,并有利于强降水和强下沉气流的产生<sup>[26]</sup>。2015年事件径向速度垂直剖面(图5b)进一步展示了对流风暴的下击暴流区域的气流结构,对流风暴的近地面层为下击暴流导致的较浅薄冷池,为朝向雷达站的负径向速度区,并在距岳阳雷达站53 km处、方位角344°~346°区域存在一个较弱的中涡旋(可见前文分析);2~4 km高度主要为正径向速度区,也就是线状对流系统的暖湿入流上升运动区;8~10 km高度为显著的负径向速度区,其为高层西风气流区;值得注意的是,在4~6 km高度、距岳阳雷达站50~51 km处、方位角338°~342°区域,有一显著的朝向岳阳雷达的负径向速度区域,并与正径向速度也形成中涡旋结构,此负径向速度为该线状对流系统的中层后侧强入流区域,该强后侧入流把干冷空气卷入对流系统,使得液态过冷水、软雹等混合相态水物质强烈蒸发、融化或者升华,吸收大量热量,使得大气剧烈降温形成强下沉气流(下击暴流)从而导致地面强风。

2016年事件超级单体的结构截然不同于2015年事件的线状对流系统。该超级单体风暴低层具有明显的穹隆结构,这与钩状回波特征相对应;回波质心较高,最大反射率因子在65 dBz左右,这是产生冰雹天气的重要特征;该对流风暴垂直发展更为旺盛,超过30 dBz的反射率因子可达16 km高度;0℃气温层(海拔高度约5.1 km)至-20℃气温层(海拔高度约8.5 km)之间反射率因子在35~65 dBz,且较多区域

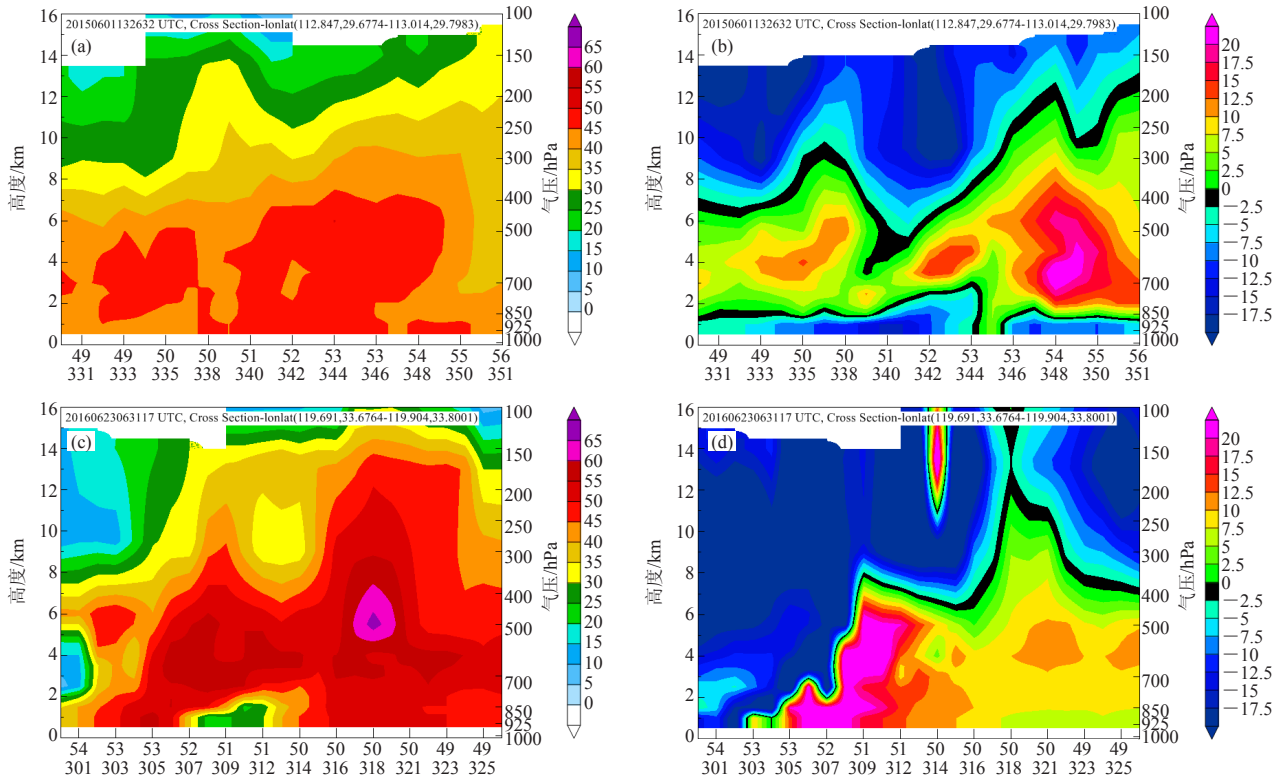


图5 两次强对流天气事件的对流风暴的垂直剖面特征

(其中图5a和5b为2015年6月1日21:26时岳阳雷达观测,图5c和5d为2016年6月23日14:30时盐城雷达观测,图5a和5c为雷达反射率因子垂直剖面,图5b和5d为雷达径向速度垂直剖面;需要注意的是,5d中2 km高度下方和10 km上方左侧负径向速度区包裹的两个正速度区为速度模糊区;横坐标下方标注的上排数字是离雷达站的距离,单位: km,标注的下排数字是方位角,单位:°,正北为0°,顺时针增加;左侧纵坐标为海拔高度,单位: km,右侧为相应气压层,单位: hPa)

Fig. 5 Vertical cross sections of convective storms for the two events

(Figs.5a and 5b For Yueyang radar observations at 21:26 BT 1 June, 2015 Figs.5c and 5d For Yancheng radar observations at 14:30 BT 23 June 2016. Figs.5a and 5c For reflectivity, and Figs. 5b and 5d For radial velocity. Note that, on the left side of Fig. 5d, two positive velocity areas below 2 km altitude and above 10 km altitude surrounded by negative radial velocity area are the velocity aliasing. The top digits below the abscissa are distances from radar station, unit: km; and the bottom digits are azimuth angles, unit:°, north 0°, and clockwise increase. Altitudes are on the left side of the ordinate, unit: km, and their corresponding pressures are on the right, unit: hPa)

超过55 dBz,表明该高度区间存在大量以冰相粒子为主的水物质,有利于产生正地闪<sup>[28-29]</sup>和大冰雹。2016年事件超级单体风暴径向速度垂直剖面如图5d,但需要注意的是,图5d中2 km高度下方和10 km上方左侧负径向速度区包裹的两个正径向速度区为速度模糊区。图5d最显著的特征是该超级单体的中气旋自下向上向东北方向倾斜,在8 km高度以下存在很强的旋转气流;8 km高度以上中气旋明显减弱,并显著偏向东北方向,这与该高度以上为强西北风(见图3b)使得干冷空气卷入对流风暴相关,使得液态过冷水、冰相粒子等水物质蒸发、融化或者升华,因此从图5c可以看到该高度附近区域的反射率因子显著小于周边区域,类似于弓形回波的“后侧入流槽口”<sup>[25]</sup>,但其位于对流层高层,并不同于弓形回波的位于大气低层的“后侧入流槽口”。

Lemon等<sup>[31]</sup>总结产生龙卷的超级单体风暴概念模型时得出:龙卷发生在钩状回波顶端,后侧下沉气流与前侧上升气流交界面,也就是壁云的附近。龙卷的生成离不开超级单体风暴中的下沉气流已经得到广泛认可<sup>[32-36]</sup>。但下沉气流导致的冷出流与周边环境之间的地表大气温度差需要有一个平衡点<sup>[36]</sup>,这个温度差通常小于4°C<sup>[33, 37-38]</sup>;而对于非龙卷超级单体地表强冷出流导致的最大温度差可达20°C以上<sup>[33]</sup>。因此本文对2015年和2016年这两次强对流天气事件的地表气温分布特征进行了对比,如图6。2015年事件冷出流地表气温约为24~26°C,周边环境气温约为28~31°C,二者气温差约为5°C;2016年事件冷出流地表气温约为25~26°C,周边环境气温约为28~29°C,二者气温差约为3°C;因此从两次事件的地表冷出流与周边环境气温的差异也可以看到,2016年事件更有利于龙卷生

成。从自动站风场分布也可以看到二者地表冷出流的差异，2015年事件对流风暴产生的冷出流导致了地面自动站观测到了较强的偏北风，而2016年事件地面自动站观测到的偏北风明显弱于2015年事件，但观测到了明显的地面涡旋风场分布。但就如引言中指出的，虽然现场调查表明2016年事件导致地面灾害的极端大风显著强于2015年事件，但由于目前的地面自动站分布仍然无法完全捕捉到这些极端大风事件，因此从地面自动站观测的总体风场分布来看是2015年事件强于2016年事件，这也是与前文分析的地表气温分布特征相一致的，导致该特征的根本原因在于2016年事件的龙卷空间尺度远小于2015年事件的下击暴流空间尺度的缘故，这也可由图6中二者雷达反射率因子分布差异看出。

### 3 结论和讨论

2015年“东方之星”客轮翻沉事件和2016年阜宁EF4级龙卷事件导致了极大的社会影响。为了更有效地认识到此类天气的机理，从而为未来发布相关预报和预警提供帮助，本文总结和对比分析了2015年导致“东方之星”客轮翻沉的弓形线状强对流风暴和2016年阜宁龙卷超级单体强对流风暴的环流形势、对流环境条件和对流风暴演变及其结构特征，分析了前者下击暴流导致地面大风和后者龙卷的形成机理，得到如下结论。

1) 两次事件对流风暴都发生在500 hPa冷涡南侧和西北太平洋副高边缘，850 hPa低空急流和暖舌的左前侧，海平面气压的低压槽中。但2015年事件500 hPa无明显急流，且存在较明显暖平流；而2016年事件位于500 hPa急流的南侧边缘，温度平流不明显，其

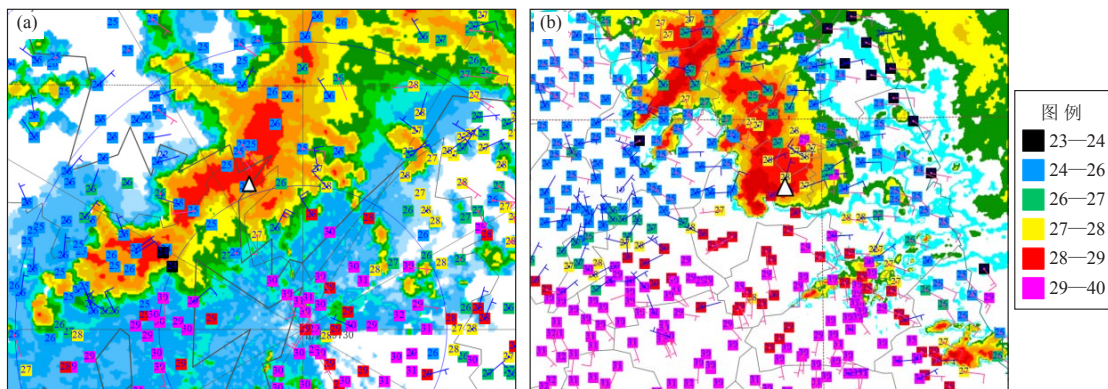


图6 两次强对流天气事件的雷达0.5°仰角反射率因子和地面自动站观测

(其中图6a中填色为2015年6月1日21:26时岳阳雷达0.5°仰角反射率因子，不同颜色色块和数字为22:00时自动站温度，风羽为22:00时自动站风场；图6b中填色为2016年6月23日14:30时盐城雷达0.5°仰角反射率因子，不同颜色色块和数字为14:30时自动站温度，风羽为14:30时自动站风场；风羽的表示方式同图2中风场，但偏南风为红色、偏北风为蓝色或者黑色；黑边白三角分别表示“东方之星”客轮翻沉位置和阜宁县城位置)

Fig. 6 Reflectivity at 0.5° elevation and AWS temperatures and winds

(Fig. 6a For Yueyang radar reflectivity at 0.5° elevation at 21:26 BT 1 June 2015 in shaded colors, rectangles with different colors labeled digits indicate air temperatures from AWS at 22:00 BT, and bars denote winds from AWS at 22:00 BT. Fig. 6b For Yancheng radar reflectivity at 0.5° elevation at 14:30 BT 23 June 2016 in shaded colors rectangles with different colors labeled digits indicate air temperatures from AWS at 14:30 BT, and bars denote winds from AWS at 14:30 BT. Bars of wind are the same as Fig. 2, but southerly in red, northerly in blue or black. Black triangles with white center indicate respectively the “Oriental Star” capsizing location and Funing County)

0~6km垂直风切变达到特别强的级别，显著大于前者。

2) 两次事件都发生在高温(地表气温 $>26^{\circ}\text{C}$ )、高湿(地表露点 $>23^{\circ}\text{C}$ 、 $PW$ 数值约60 mm)、高能( $CAPE>1000\text{ J/kg}$ )和较大的低层垂直风切变的环境下。2015年事件对流层中层的中层是有利于地面大风的重要环境条件， $DCAPE$ 较大，但其 $0^{\circ}\text{C}$ 气温层较高、垂直减温率较小；而2016年事件具备了有利于中气旋龙卷的所有有利环境条件：较大的 $CAPE(>2000\text{ J/kg})$ 、强的0~6 km垂直风切变(27.5 m/s)、低层高的相对湿度

(接近饱和)、极低的抬升凝结高度( $CIN$ 值为12 J/kg)和较大的0~1 km垂直风切变(约8 m/s)条件，且其 $0^{\circ}\text{C}$ 气温层较低、垂直减温率较大有利于冰雹天气。

3) 从地球静止气象卫星红外图像来看，导致2015年事件的对流系统为一个近似圆形的 $\alpha$ 中尺度对流系统，而产生2016年龙卷的对流系统为一个典型的中尺度对流复合体。雷达观测资料则表明2015年对流风暴为一个 $\beta$ 中尺度弓形线状对流系统，质心较低，最大反射率因子约50 dBz，主要伴随负地闪；而产生

2016年龙卷的则为一个 $\beta$ 中尺度经典超级单体对流风暴, 具有明显的钩状回波和穹隆结构特征, 质心高, 最大反射率因子超过65 dBz, 主要伴随正地闪。

4) 2015年对流风暴存在多微下击暴流区, 最大朝向雷达的径向速度达19 m/s, 并存在强的中层(约5 km高度)后侧强入流区和中涡旋结构, 低层也有一个弱的中涡旋结构; 2016年超级单体风暴存在很强的中气旋和TVS(龙卷涡旋特征)特征, 最大旋转速度超过26 m/s, 其底高低于1 km, 且自下向上向东北方向倾斜, 在高分辨率可见光图像上能够看到明显的旋转特征。

5) 2015年对流风暴冷出流明显强于2016年超级单体风暴, 2016年事件的不太强下沉气流导致的冷出流(温度差小于4℃)是该超级单体风暴能够产生龙卷的重要机制。

本文虽然分析总结了2015年和2016年两次重大强对流天气事件的对流条件和地面大风成因, 但还有较多科学问题并不完全清楚, 还需要做更进一步的深入研究, 比如2015年事件对流风暴中低层中涡旋的形成机制及其对对流风暴的维持和产生地面大风的作用, 2016年龙卷生成的关键机制是中气旋下降导致低层垂直涡度加强、还是地面冷出流导致的垂直涡度生成、还是二者同等重要的作用等。

#### 参考文献

[1] 郑永光, 田付友, 孟智勇, 等. “东方之星”客轮翻沉事件周边区域风灾现场调查与多尺度特征分析. 气象, 2016, 42(1): 1-13.

[2] Meng Z, Yao D, Bai L, et al. Wind estimation around the shipwreck of Oriental Star based on field damage surveys and radar observations. Science Bulletin, 2016, 61(4): 330-337.

[3] 郑永光, 朱文剑, 姚聃, 等. 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.

[4] 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.

[5] 郑永光, 周康辉, 盛杰, 等. 强对流天气监测预报预警技术进展. 应用气象学报, 2015, 26(6): 641-657.

[6] 郑永光, 陶祖钰, 俞小鼎. 强对流天气预报的一些基本问题. 气象, 2017, 43(6): 641-652.

[7] Xue M, Zhao K, Wang M, et al. Recent significant tornadoes in China. Advances in Atmospheric Sciences, 2016, 33(11): 1209-1217.

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

[9] Doswell C A, Brooks H E, Maddox R A. Flash flood forecasting: an ingredients-based methodology. Weather and Forecasting, 1996, 11: 560-581.

[10] 俞小鼎. 基于构成要素的预报方法: 配料法. 气象, 2011, 37(8): 913-918.

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

[12] 张涛, 蓝渝, 毛冬艳, 等. 国家级中尺度天气分析业务技术进展 I: 对流天气环境场分析业务技术规范改进与产品集成系统支撑技术. 气象, 2013, 39(7): 894-900.

[13] 蓝渝, 张涛, 郑永光, 等. 国家级中尺度天气分析业务技术进展 II: 对流天气中尺度过程分析规范和支撑技术. 气象, 2013, 39(7): 901-910.

[14] Tian F, Zheng Y, Zhang T, et al. Statistical characteristics of

environmental parameters for warm season short-duration heavy rainfall over central and eastern China. Journal of Meteorological Research, 2015, 29(3): 370-384.

[15] 王秀明, 俞小鼎, 朱禾. NCEP再分析资料在强对流环境分析中的应用. 应用气象学报, 2012, 23(2): 139-146.

[16] 樊李苗, 俞小鼎. 中国短时强对流天气的若干环境参数特征分析. 高原气象, 2013, 32(1): 156-165.

[17] 章国材. 强对流天气分析与预报. 北京: 气象出版社, 2011: 84-93.

[18] 曹艳察, 田付友, 郑永光, 等. 我国两阶梯地形的冰雹天气环境物理量特征. 高原气象, 2018, 37(1): 185-196.

[19] Craven J P, Brooks H E. Baseline climatology of sounding derived parameters associated with deep moist convection. National Weather Digest, 2004, 28: 13-24.

[20] Johns R H, Doswell C A. Severe local storms forecasting. Weather and Forecasting, 1992, 7: 588-612.

[21] Weisman M L, Klemp J B. The dependence of numerically simulated convective storms on wind shear and buoyancy. Monthly Weather Review, 1982, 110: 504-520.

[22] Grams J S, Thompson R L, Snively D V, et al. A climatology and comparison of parameters for significant tornado events in the United States. Weather and Forecasting, 2012, 27: 106-123.

[23] Brooks H E, Doswell C A, Cooper J. On the environments of tornadic and nontornadic mesocyclones. Weather and Forecasting, 1994, 9(4): 606-618.

[24] Doswell C A, Evans J S. Proximity sounding analysis for derechos and supercells: an assessment of similarities and differences. Atmospheric Research, 2003, 67-68: 117-133.

[25] Przybylinski R W. The bow echo: observations, numerical simulations, and severe weather detection methods. Weather and Forecasting, 1995, 10: 203-218.

[26] Branick M L, Doswell C A. An observation of the relationship between supercell structure and lightning ground-strike polarity. Weather and Forecasting, 1992, 7: 143-149.

[27] Brown K A, Lemon L R, Burgess D W. Tornado detection by pulsed Doppler radar. Monthly Weather Review, 1978, 106: 29-38.

[28] MacGorman D R, Burgess D W. Positive cloud-to-ground lightning in tornadic storms and hailstorms. Monthly Weather Review, 1994, 122: 1671-1697.

[29] Stolzenburg M. Observations of high ground flash densities of positive lightning in summertime thunderstorms. Monthly Weather Review, 1994, 122: 1740-1750.

[30] Carey L D, Rutledge S A. The relationship between precipitation and lightning in tropical island convection: a C-band polarimetric radar study. Monthly Weather Review, 2000, 128: 2687-2710.

[31] Lemon L R, Doswell C A. Severe thunderstorm evolution and mesocyclone structure as related to tornadogenesis. Monthly Weather Review, 1979, 107: 1184-1197.

[32] Davies-Jones R, Trapp R J, Bluestein H B. Tornadoes and tornadic storms. Severe Convective Storms. Meteorological Monographs, American Meteorological Society, 2001, 28(50): 167-221.

[33] Markowski P, Richardson Y. Mesoscale Meteorology in Midlatitudes. Chichester: John Wiley and Sons Ltd, 2010: 245-260.

[34] Markowski P M, Richardson Y P. The influence of environmental low-level shear and cold pools on tornadogenesis: insights from idealized simulations. Journal of Atmospheric Sciences, 2014, 71: 243-275.

[35] Bluestein H B. Severe Convective Storms and Tornadoes: Observations and Dynamics. Heidelberg: Springer-Praxis, 2013: 307-360.

[36] Schultz D M, Richardson Y P, Markowski P M, et al. Tornadoes in the Central United States and the “Clash of Air Masses”. Bulletin of American Meteorological Society, 2014, 95(11): 1704-1712.

[37] Markowski P M, Straka J M, Rasmussen E N. Direct surface thermodynamic observations within the rear-flank downdrafts of nontornadic and tornadic supercells. Monthly Weather Review, 2002, 130(7): 1692-1721.

[38] Markowski P M, Richardson Y P. Tornadogenesis: our current understanding, forecasting considerations, and questions to guide future research. Atmospheric Research, 2009, 93(1-3): 3-10.

# 雷暴大风与龙卷的预报预警和灾害现场调查

郑永光 田付友 周康辉 朱文剑  
(国家气象中心, 中国气象局, 北京 100081)

**摘要:** 近年来强雷暴大风与龙卷导致的灾害事件引发广泛关注。在总结雷暴大风和龙卷机理、短期预报技术和天气形势特征基础上, 给出了这两类天气的监测和短时临近预报预警技术, 最后简要总结了灾后现场调查工作和风灾强度评估方法。雷暴大风多数是由对流风暴内强烈下沉气流产生; 而龙卷一类由中气旋产生, 另一类由辐合线上的中小尺度涡旋和快速发展对流风暴中的强上升气流共同作用形成。但归根结底, 巨大的静力不稳定能量是产生强雷暴大风与龙卷(热带气旋龙卷除外)的必要条件。新一代天气雷达观测是雷暴大风与龙卷的监测和临近预警主要手段。自动气象站观测风场能够相当程度上监测大风天气, 地球静止气象卫星和自动气象站变压、变温等观测资料也能够辅助监测雷暴大风天气, 但龙卷监测尚无法直接使用这两类资料。对这两类天气所致灾害的现场调查工作依然必不可少。快速更新或者集合的高时空分辨率数值模式预报及其后处理是这两类天气短时预报的主要途径。

**关键词:** 雷暴大风, 下击暴流, 龙卷, 监测, 预报预警, 现场调查

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2018.02.006

## Forecasting Techniques and Damage Survey of Convectively Driven High Winds and Tornadoes

Zheng Yongguang, Tian Fuyou, Zhou Kanghui, Zhu Wenjian  
(National Meteorological Centre, China Meteorological Administration, Beijing 100081)

**Abstract:** In recent years, the disasters, which were caused by convectively driven high winds and tornadoes, attracted more attention in China. This paper firstly summarizes the mechanisms, short-range forecasting techniques and synoptic situations of convectively driven high winds and tornadoes, then presents techniques of monitoring and warning on them, finally gives brief summary of damage survey and wind estimation methodology for them. Most of convectively driven high winds are caused by strong rear downdrafts of convective storms. However, one type of tornadoes was generated from mesocyclones, another type of tornadoes was caused by the combining effect of mesovortices and strong updrafts of convective storms in convergence line. Massive convective available potential energy is one of the necessary conditions favorable for convectively driven high winds and tornadoes (except for tropical cyclone tornadoes). Monitoring and warning convectively driven high winds and tornadoes depend on the observations by new generation weather radar network. Observational winds from automatic weather station (AWS) can monitor convectively driven high winds to a great extent, and observations from geostationary meteorological satellites and pressure tendency and temperature tendency from AWS are also useful to monitor convectively driven high winds, but these data cannot directly be used to monitor tornadoes. Damage survey for the disasters caused by these two types of weather is still necessary. Short-term forecasting these two types of weather depends mainly upon a rapid update high-resolution (ensemble) numerical model and post-processing.

**Keywords:** convectively driven high winds, downburst, tornado, monitoring, forecasting and warning, damage survey

### 0 引言

极端强对流大风事件由于其突发性和预报难度大易于导致重大经济损失和人员伤亡, 近年来其导致的灾害尤其突出, 如2015年6月1日21:30左右强下击暴流导致的雷暴大风使“东方之星”客轮翻沉四百多人

遇难<sup>[1-2]</sup>、2016年6月23日14:00—15:00江苏省盐城市阜宁县EF4级(最大阵风风速的下限值为74 m/s)龙卷造成98人死亡和800多人受伤<sup>[3-4]</sup>、2016年4月13日凌晨强飚线导致的雷暴大风(现场调查估计地面大风为11级)使广东东莞龙门吊倾倒致18人遇难、2016年6月4日下午强飚线雷暴大风使四川广元白龙湖游船翻沉造成13人死亡和2人失踪。2015年“东方之星”客轮翻沉事件是长江航运史上从未发生过的极端事件<sup>[1]</sup>。我国从未记录到过EF5级龙卷, 2016年阜宁EF4级龙卷事件是1950年以来我国第6个、江苏省第2个

收稿日期: 2017年8月14日; 修回日期: 2018年1月14日  
第一作者: 郑永光(1974—), Email: zhengyg@cma.gov.cn  
资助信息: 国家自然科学基金项目(41375051); 国家重点研发计划(2017YFC1502003)

EF4级龙卷<sup>[3, 5-6]</sup>。虽然雷暴大风和龙卷的形成机理<sup>[7-9]</sup>显著不同,但这些事件都具有很强的突发性,都是发生概率极低的极端天气事件。

Fujita和Wakimoto<sup>[10]</sup>总结了强对流风暴导致的3类灾害性大风:龙卷大风、直线大风和下击暴流大风。雷暴大风指的是由强对流风暴导致的非龙卷大风。龙卷大风通常是高度辐合的旋转性风场,其路径一般相对比较狭窄;非辐散性直线大风通常发生在前进式阵风锋之后;而下击暴流大风通常是具有明显辐散特征直线或者曲线型大风。

对2015年“东方之星”客轮翻沉事件和2016年阜宁EF4级龙卷事件的风灾现场调查都表明,强风灾害具有显著的小尺度时空分布特征<sup>[1, 3]</sup>。现场调查估计2015年“东方之星”客轮翻沉事件中地面最大风速达12级以上( $>32.6\text{ m/s}$ ),而该次事件自动气象站监测到的最大瞬时风速仅为 $16.4\text{ m/s}$ <sup>[1]</sup>;现场调查估计2016年阜宁EF4级龙卷其最大瞬时风速下限值为 $74\text{ m/s}$ ,远大于自动气象站监测到的最大瞬时风速 $34.6\text{ m/s}$ (12级)<sup>[3]</sup>。因此,目前我国虽然已经布设完成了较为完备的气象业务观测体系,但仍然难以全面监测该类极端强对流天气,因此对地面大风等灾害天气的现场调查工作依然必不可少。

虽然我国强对流天气国家级预报业务和各级气象台短时临近预报业务起步晚于美国等国家,但目前我国已经布设完成了覆盖全国的新一代多普勒天气雷达网、发射了多颗风云2号业务和风云4号试验地球静止气象卫星、布设了较为完备的地面自动气象观测站网等,也将在“十三五”期间对93部SA和10部CA新一代天气雷达进行双偏振技术升级,并建设形成由282部雷达组成的全国风廓线雷达业务网<sup>[11]</sup>。同时开发建设了基于多源资料的分类强对流天气实况监测系统、中尺度天气分析规范和分析工具、分类客观预报系统、灾害性天气短时临近预报系统(SWAN)和强对流天气综合业务支撑平台等,并实时发布分类强对流天气预报和预警产品<sup>[12-17]</sup>。但雷暴大风和龙卷预报仍然是业务天气预报的难点和重点之一,因此非常有必要综合利用观测和数值预报等多源资料,尤其新型观测和高分辨率数值预报资料进一步加强和提高该类天气事件的预报预警能力。本文将首先总结雷暴大风和龙卷机理及其短期预报技术,然后给出其监测和短时临近预报预警技术,再对该类天气事件的灾害现场调查工作进行简要总结,以期能够对该类天气的业务预报预警工作提供借鉴和参考。

## 1 雷暴大风与龙卷的机理和短期预报

雷暴大风与龙卷的短期预报是做好其短时临近预警的重要基础。绝大多数雷暴大风是由对流风暴内强烈下沉气流(下击暴流)所导致<sup>[18]</sup>,只有极少数雷暴大风是由对流风暴的强烈入流气流导致。通常对流层中层或以上有明显干层、对流层中下层大气较大垂直减温率的环境条件下易导致对流风暴的强下沉气流,这种环境条件下计算的下沉对流有效位能(DCAPE)通常都较大,比如2015年导致“东方之星”翻沉的下击暴流就具有明显的对流层中层干层特征(温度露点差最大达 $36^{\circ}\text{C}$ )<sup>[9]</sup>;但是较高海拔地区的大气低层存在干层时( $T\text{-log}p$ 图上呈现倒V形的温湿廓线分布)的对流风暴也能够导致强下沉气流<sup>[17]</sup>,甚至会产生干下击暴流;在对流层大气都较湿的情况下,强降水的拖曳和蒸发作用也会导致强下沉气流(湿下击暴流),加之动量交换作用,是强降水也时常伴随大风的直接原因。由于产生大冰雹的环境条件要求有较大的对流有效位能、较强的中层垂直风切变和合适的湿球零度层高度,因此要求环境大气有较大的温度递减率,这既有利于强上升气流,也有利于强下沉气流;并且云中冰相粒子在下落过程中融化、升华吸收大量环境大气热量会非常有利于加强下沉气流<sup>[19-20]</sup>,这些因素都是大冰雹天气通常伴随大风天气的重要原因。有研究认为 $850\text{ hPa}$ 与 $700\text{ hPa}$ 之间较大的垂直减温率更有利于雷暴大风天气<sup>[21]</sup>。根据这些环境条件,一些研究定义了不同的雷暴大风指数或者下击暴流指数<sup>[22-27]</sup>。

从天气形势来看,我国的雷暴大风天气易发生在春季和夏初大气斜压性较强、温度直减率较大的天气背景下,比如春季西风槽和冷锋、春末夏初北方冷涡(尤其冷涡的西南象限)、水汽云图上的暗区等背景下发展起来的强对流风暴,如2006年4月28日山东(西风槽和冷锋影响)、2009年6月3日河南(冷涡影响)、2013年3月19日江南和华南(西风槽和冷锋影响)、2015年6月1日“东方之星”客轮翻沉事件(冷涡影响)、2016年6月30日山东、2018年3月4日江西等雷暴大风个例等,这是因为在这些天气形势下对流层大气中层通常会存在干层和垂直减温率较大的缘故。

龙卷通常分为两类,一类为中气旋龙卷,另一类为非中气旋龙卷<sup>[8, 28-29]</sup>。通常中气旋龙卷强度较强<sup>[8, 30]</sup>,但仅约25%甚至更少的雷达探测到的中气旋会生成龙卷<sup>[8, 31-32]</sup>。目前只有对中气旋龙卷有可能进行有效预警<sup>[7-8, 28]</sup>。EF2级及以上中气旋龙卷除了要求有利于超级单体风暴的环境条件一定的对流有效位能和强的 $0\sim 6\text{ km}$ 垂直风切变外,还包括低的抬升凝结高度和

较大的低层(0~1 km)垂直风切变<sup>[7-8, 33-35]</sup>, 比如, 2016年阜宁EF4级龙卷事件就具备了所有以上这些有利于中气旋龙卷的有利环境条件<sup>[9]</sup>。不过, 热带气旋中产生中气旋龙卷环境大气的CAPE值一般较小<sup>[8, 36-37]</sup>。非中气旋龙卷通常由辐合线上的中小尺度涡旋和快速发展对流风暴中的强上升气流共同作用形成<sup>[27]</sup>, 通常辐合线具有较强的水平风切变和垂直涡度, 而垂直风切变一般较弱<sup>[9, 28, 38]</sup>; 与下击暴流相联系的弓形回波会生成小尺度的中涡旋(mesovortices)<sup>[39]</sup>也能够发展为强度可达F4或者EF4级的龙卷<sup>[29]</sup>, 因此, 产生龙卷的爬线多为弓型回波或者波动型线状回波(LEWP)<sup>[9, 28]</sup>。对流风暴的出流气流对龙卷的生成至关重要, 其观测证据是龙卷发生发展在超级单体风暴的壁云(wall cloud)附近, 而壁云的形成是超级单体的入流气流和出流气流混合作用的结果<sup>[40]</sup>。对流风暴的冷出流与环境之间形成的地表大气温度差需要有一个平衡点(sweet spot)才有利于龙卷生成<sup>[41]</sup>, 这个温度差通常小于4℃<sup>[8, 28, 42]</sup>。

从天气形势来看, 我国龙卷易发生在暴雨或者台风这样的天气背景下, 比如2012年7月21日北京通州(暴雨背景)、2015年10月4日广东佛山(彩虹台中)、2016年6月23日江苏阜宁(暴雨背景)等龙卷个例, 这是因为在这样的天气形势下经常会存在低空急流(即低空垂直风切变较大)和较低的抬升凝结高度的缘故。

由于受该类天气时空尺度较小、分布不连续的特点和可预报性的限制, 目前的数值模式在短期预报时效内还不能直接做出雷暴大风和龙卷预报。因此, 雷暴大风和龙卷的短期预报主要基于数值天气预报资料, 从其发生发展机理和所依赖的环境条件出发, 根据不同的诊断物理量对该类天气的指示意义来进行<sup>[7-8, 13, 15, 17]</sup>, 也就是现在广泛应用的“配料法”。

由于雷暴大风和龙卷的发生发展需要多个方面的物理条件, 且较多研究给出的物理量统计结果表明不可能找到一个完全明确的单一物理量阈值来表征该类天气发生发展的物理条件<sup>[43-44]</sup>, 因此类似模糊逻辑和机器学习等这些能够综合应用代表不同物理条件的多个物理量的技术方法是当前强对流天气预报技术研究的重要方面。应用模糊逻辑方法的雷暴大风或者龙卷预报技术一般基于探空资料或者数值模式预报资料, 通过挑选对不同类型强对流天气具有指示意义的物理量, 根据历史个例的统计结果分别来构建独立隶属函数, 并赋予不同物理量不同的权重来给出最终的综合预报结果。因此, 其发生发展所需环境条件的气

候分布特征是制作分类强对流预报的必要基础工作, 目前已有一些研究工作<sup>[40-41]</sup>。基于集合数值预报的强对流短期(概率)预报技术是当前预报技术的重要发展方向。美国SPC已经建立了比较完整的基于多尺度数值集合预报的强对流分类预报产品体系, 而NCEP的区域短期集合预报系统(Short Range Ensemble Forecast, SREF)和全球集合预报系统(GEFS, Global Ensemble Forecast System)分别为SPC 1~3 d和SPC 3~8 d的对流天气短期预报和中期展望提供数值预报依据<sup>[45-47]</sup>。

但目前不同等级的雷暴大风和极端雷暴大风天气预报以及预报精细化方面还存在较大不足。而我国龙卷由于发生频率远低于美国<sup>[3, 6]</sup>, 其短期预报难度则更大, 我国现有业务中尚没有龙卷的主客观短期预报产品。因此, 需要综合利用多源观测资料和高分辨率数值(集合)预报资料, 在综合统计不同强度和极端强度的多物理量分布特征的基础上, 应用模糊逻辑或者机器学习等方法进一步提升该类天气的(概率)预报准确率和精细化水平。

## 2 雷暴大风与龙卷的监测和短时临近预报预警

雷暴大风与龙卷的监测和临近预警主要依赖新一代天气雷达网。自动气象站观测风场能够相当程度上监测雷暴大风, 但如引言中所述, 由于强风灾害具有显著的小尺度时空分布特征<sup>[1, 3]</sup>, 因此目前的自动气象站网还几乎无法监测到雷暴大风过程中的最大风速分布。龙卷监测就更为困难, 除了依靠雷达资料外, 更多依靠的是目击者报告、互联网资料、灾害现场调查或者其他部门(如交通部门等)的视频监控等。

中层径向速度辐合(MARC)<sup>[7, 48]</sup>、强反射率因子核心下降<sup>[49]</sup>、后侧入流槽口<sup>[50]</sup>和弓形回波<sup>[7]</sup>等是指雷暴大风天气的重要雷达观测特征。当对流风暴周边干空气被夹卷进入风暴内部后, 导致其下沉气流内雨滴迅速蒸发使下沉气流降温而导致加强的向下加速度, 这种对流层中层干空气的夹卷进入对流风暴的过程在径向速度图上表现为MARC特征和反射率因子图上的后侧入流槽口。利用MARC预警雷暴大风的提前时间约为10~30 min。在有利于雷暴大风的环境条件下, 中气旋可以更有效地将环境干空气夹卷进入下沉气流内导致雨滴、冰物质蒸发或者升华大气降温形成向下加速度从而加强下沉气流使得地面风速进一步增加<sup>[7]</sup>。当对流风暴距离雷达站较近(约70 km以内)时, 若雷达观测的0.5°仰角径向速度场有超过20 m/s左右以上的风速大值区需要关注地面雷暴大风的可能

性<sup>①</sup>，如2015年6月1日“东方之星”客轮翻沉事件过程中0.5°仰角径向速度场有超过19 m/s的风速大值区。移动越快的对流风暴其产生雷暴大风的可能性和强度越大，据估计，12 m/s左右以上的移速有可能产生8级左右地面大风，19 m/s左右以上的移速可能产生10级左右地面大风<sup>①</sup>。如果天气雷达上能够观测到明显的阵风锋，则可能表明对流风暴的冷池强度较大，其产生较大地面风速的可能性也较大。不仅地面自动气象站的风场能够监测地面大风，地面自动气象站监测的强3 h变压<sup>①</sup>或者强变温也能够监测对流风暴冷池的强度从而可辅助监测雷暴大风天气。地球静止气象卫星对雷暴大风天气也有一定的监测能力，如前所述的水汽图像的暗区中发展的对流云、具有上冲云顶的对流云、呈现“胡萝卜”或者尖锥状的对流云系产生雷暴大风的可能性较大等。未来，利用风云4号卫星提供的垂直探测资料计算雷暴大风指数结合其他监测资料能够更好地监测和临近预警雷暴大风天气<sup>[26]</sup>。

多普勒天气雷达探测到的中气旋是目前龙卷临近预警主要依据<sup>[7, 17]</sup>，但如前所述，美国的统计表明仅约有25%甚至更少的雷达探测到的中气旋会生成龙卷，但当中气旋底距离地面高度小于1 km时，龙卷的发生概率则约为40%<sup>[7, 31]</sup>。目前美国业务发布龙卷警报的依据主要是：在有利于龙卷的环境条件下，探测到强中气旋或中等以上强度中气旋，并且其底高不超过1 km<sup>[7]</sup>。美国的移动X波段多普勒雷达（DOW）在龙卷研究中发挥了重要作用，其观测到的最大龙卷风速达135 m/s。2016年6月23日江苏阜宁龙卷发生时，江苏省气象台根据这些依据指导阜宁县气象台在14:39时发布的雷暴橙色预警信号中明确指出将有龙卷发生。美国基于中气旋的龙卷警报平均提前时间约为10~20 min。但由于多普勒天气雷达的中气旋产品本身就存在很多误识别，再加之大多数中气旋并不会产生龙卷，因此基于中气旋的龙卷预警存在很高的虚警率。多普勒天气雷达有时能够探测到的龙卷涡旋特征（TVS）是龙卷临近预警的另一重要依据<sup>[7, 17]</sup>，但对当时当地的龙卷已经几乎没有预警提前时间，不过可以对龙卷移动方向的下游地区具有提前临近预警作用。由于部分产生龙卷的经典超级单体存在明显的钩状回波，因此这也是龙卷预警的参考依据之一，比如2016年6月23日产生江苏阜宁龙卷的经典超级单体就具有非常明显的钩状回波特征<sup>[4, 9]</sup>。目前的地球静止气象卫星和自动气象站网观测资料还不可能在龙卷监测和临近预警中发挥直接作用，但我国将在“重大自然

灾害监测预警与防范”重点专项支持下发展龙卷探测雷达，以期能够提高龙卷等小尺度涡旋的探测能力。

双偏振天气雷达观测资料能够提高降水粒子形态的识别能力<sup>[51-52]</sup>和识别龙卷所破坏物体的碎片被卷入龙卷中所导致的双偏振雷达观测特征（TDS）<sup>[53]</sup>，能够提高冰雹粒子的识别率和判断冰雹在落地之前是否完全融化还是部分融化等<sup>[54]</sup>，从而有助于监测龙卷以及与冰雹天气相伴随的雷暴大风天气，但这些双偏振雷达必须具有较高的空间分辨能力才可能探测这些小尺度的天气系统。此外，基于多普勒天气雷达资料中的这些特征，中气旋、雷暴大风等的自动识别算法也得到了发展和完善<sup>[55-56]</sup>。

由于临近预报最长时效仅为1~2 h，因此雷暴大风与龙卷的短时预报更多依赖于快速更新或者集合的高时空分辨率数值模式系统预报。目前这些天气的短时预报的主要依据是高分辨率数值预报资料的对流天气环境条件分析和基于中小尺度机理的客观预报产品，也就是依赖“对流可分辨”高分辨率（集合）数值预报产品后处理。目前，已有很多国家都在探索从对流风暴的中尺度结构和发展机理方面如何应用“对流可分辨”的高分辨率数值模式（集合）预报产品进行强对流分类预报<sup>[15, 57]</sup>，如美国Oklahoma大学的风暴分析与预报中心（CAPS）风暴尺度集合预报SSEF产品<sup>[52]</sup>、美国的强风暴预报中心（SPC）<sup>[15]</sup>和我国中央气象台强天气预报中心发展了多模式集合的预报产品等。为了获取尺度小、变化快的天气系统在模式中的反映，Kain等<sup>[58]</sup>从模式预报的每个时间步的物理量场输出逐小时时段内的每一个格点的物理量最大值，称为逐时最大场。他们发现可能与雷暴大风和龙卷关系密切的物理量有：最大上升气流、3~6 km高度之间的最大下沉气流速度、表征对流强度的地面上空1 km高度的最大反射率因子、最大上升气流螺旋度、最大地面10 m风速等<sup>[52]</sup>。但需要指出的是，虽然基于高分辨率数值（集合）预报的强对流天气的短时预报技术取得了一定进展，但还有非常多的工作需要开展以提高其预报性能，比如模式框架本身性能的改进、不同微物理过程的改进、资料同化技术、不同类型强对流天气的精细化预报等多个方面<sup>[15]</sup>。

### 3 雷暴大风与龙卷灾害现场调查

如前所述，目前我国的气象业务观测体系仍然难以全面监测雷暴大风和龙卷等极端强对流天气，尤其是极端大风风速，因此，现场天气调查依然是分析和确认这些灾害性大风天气精细分布的最重要的直接手

① 郑媛媛, 2017. 雷暴大风和龙卷短临预报预警. 2017年强对流天气汛前预报技术准备会。

段,从而确定大风的具体发生时间和地点、灾情、灾害路径长度和宽度、风向等,并可根据风速等级标准估计风速和判断风灾强度。现场调查的主要装备包括智能手机、相机、GPS定位仪、无线网络通信和无人机等,目前,无人机在现场调查中发挥了重要的无可替代作用。美国也有人提出使用双偏振天气雷达观测到的TDS特征来估计龙卷灾害分布<sup>[59]</sup>,但这需要这些雷达观测具有较现有业务雷达高得多的空间分辨率。通过现场调查确定风灾强度可以满足人们和科研人员了解风灾强度的需求,可以获得风速与相关设施结构性能的关系,并可从气候上评估龙卷和下击暴流等导致的小尺度风灾给人们和基础设施所带来的风险。但由于灾害标识物(DI)的复杂性,通过灾害程度来评估风速必然有较大不确定性,因此需要一定的等级来表征不同物体受灾程度所指示的风速范围,比如已广泛应用的“藤田等级”(F等级)或者“改进的藤田等级”(EF等级)。

Fujita开创性地开展了风灾调查工作<sup>[60]</sup>,并于1971年提出了F等级<sup>[61]</sup>,用来估计龙卷和台风等导致的风灾强度。F等级在1970年代初被美国天气局采用作为估计龙卷强度的官方标准。到目前,F等级已得到了广泛应用,但也存在一些问题,比如并没有进行过校准,对F3—F5级风速存在明显的高估、低等级风速存在低估,其DI种类较少、主要是结构良好的框架房屋等。因此,美国得克萨斯技术大学风科学和工程中心联合多个部门专家对F等级进行了修订,称为EF等级<sup>[62]</sup>。EF等级主要调整了F等级每一级别所对应的风速上下限,并采用了28类DI,且每一类DI给出了多个灾害等级(DoD)。EF等级的DI以各类不同建筑结构的房屋或建筑物为主,共有23类;树木分为硬木和软木两类DI;其它DI还包括电线杆、电力线铁塔、通讯铁塔等。EF等级中去除了F等级中有关飞射物的DI,也未把沥青路面被剥掉这一灾害现象列为DI。2007年美国气象局开始采用EF等级作为估计龙卷强度的等级标准,目前还有加拿大、法国等国采用了该等级标准,并根据当地DI情况对其进行了修正,而我国的龙卷强度等级标准正在制定中。还需指出的是,F等级的风速为地面10 m高度处最快1/4 mile(约400 m)平均风速,EF等级的风速为地面10 m高度处3 s平均阵风风速,二者有所不同<sup>[3]</sup>。

美国现已形成了较为规范完整的龙卷和下击暴流所致风灾的调查体系<sup>[63-65]</sup>。近年来,我国的风灾调查体系也已逐步建立,如Meng等<sup>[66]</sup>详细调查了2012年7月21日北京特大暴雨期间发生的一次龙卷所致灾害

情况,中国气象局组织北京大学、南京大学等单位联合调查了2015年6月1日“东方之星”客轮翻沉事件、2015年10月4日彩虹台风中的佛山龙卷、2016年6月23日江苏阜宁龙卷等重大强对流天气灾害情况<sup>[1-3,67]</sup>。

有研究使用F等级和EF等级详细估计了2015年6月1日“东方之星”客轮翻沉事件和2016年6月23日江苏阜宁龙卷的现场灾害情况<sup>[3]</sup>,本文仅以F1和EF1级灾害评估为例说明二者的异同,此外,F1和EF1级风灾在我国发生频率相对较高,从而可为地方气象部门的相关工作提供一定参考。F1和EF1级灾害属于中等程度破坏。一些树被连根拔起或者折断、屋顶的屋瓦被刮掉都属于F1级灾害(图1)。软木类树木(松树、杨树、杉树、柏树等)折断和硬木类(橡树、枫树、桦树、白蜡树)树木被连根拔起属于EF1级灾害,如2015年6月1日湖北监利四台村附近水渠两侧(图1a)和顺星村附近(图未给出)杨树折断等。不少于20%屋顶屋瓦被刮掉属于F1级和EF1级灾害,如图1b中为2016年6月23日阜宁龙卷所致;而在2015年6月1日长江监利段两岸村庄中发现部分房屋的少量屋瓦(图未给出)被吹掉,未超过20%,因此这些房屋灾害等级可估计为F1级,但未达到EF1级<sup>[3]</sup>。



图1 F1和EF1级灾害<sup>[3]</sup>

(a) 2015年6月1日湖北监利四台村附近水渠两侧折断的杨树; (b) 无人机拍摄的2016年6月23日江苏阜宁计桥村被刮掉屋瓦的房屋

Fig. 1 F1 and EF1 damages<sup>[3]</sup>

(a) Snapped aspens occurred on 1 June 2015 at Sitai Village, Jianli County, Hubei Province; (b) Partially untiled roofs by storm occurred on 23 June 2016 at Jiqiao Village, Funing County, Jiangsu Province

## 4 结论

强雷暴大风与龙卷具有非常强的致灾性,近年来我国该类灾害事件引发广泛关注。本文系统总结了雷暴大风与龙卷的监测和预报预警技术以及大风灾害现场调查和估计方法。

1) 雷暴大风天气多与对流层大气存在干层和较大垂直减温率有关,EF2级及以上中气旋龙卷通常要

求有一定的对流有效位能、强的垂直风切变（0~6 km）、低的抬升凝结高度和较大的低层（0~1 km）垂直风切变。目前雷暴大风的短期预报主要基于数值预报和“配料法”，但我国现有业务中尚没有龙卷的主客观短期预报产品。

2) 除了自动气象站观测的地面风场外，指示雷暴大风天气的雷达观测特征包括中层径向速度辐合、雷达低仰角观测到的大径向速度区、强反射率因子核心下降、后侧入流槽口和弓形回波等；对流风暴的快速移动也能够指示雷暴大风天气。目前我国龙卷临近预警主要依据是中气旋和TVS特征以及低层钩状回波特征等。目前的地球静止气象卫星和自动气象站风场、变压、变温等观测资料能够辅助监测雷暴大风天气，但还不可能直接监测龙卷。

3) 雷暴大风与龙卷的短时预报主要依赖快速更新或者集合的高时空分辨率数值模式系统预报及其后处理，但还有非常多的工作需要开展以提高其预报性能。

4) 现场天气调查工作依然是分析和确认雷暴大风和龙卷大风精细分布的最重要的直接手段，但风速估计具有较大的不确定性。目前使用的最为广泛的风速等级标准是F等级和EF等级，美国、加拿大、法国等国已采用了EF等级。我国的风灾调查体系也已逐步建立，并正在发展自己的龙卷强度等级标准。

#### 参考文献

- [1] 郑永光, 田付友, 孟智勇, 等. “东方之星”客轮翻沉事件周边区域风灾现场调查与多尺度特征分析. 气象, 2016, 42(1): 1-13.
- [2] Meng Z, Yao D, Bai L, et al. Wind estimation around the shipwreck of Oriental Star based on field damage surveys and radar observations. Science Bulletin, 2016, 61(4): 330-337.
- [3] 郑永光, 朱文剑, 姚聃, 等. 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.
- [4] 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.
- [5] Xue M, Zhao K, Wang M, et al. Recent significant tornadoes in China. Advances in Atmospheric Sciences, 2016, 33(11): 1209-1217.
- [6] 范雯杰, 俞小鼎. 中国龙卷的时空分布特征. 气象, 2015, 41(7): 793-805.
- [7] 俞小鼎, 周小刚, 王秀明. 雷暴与强对流临近天气预报技术进展. 气象学报, 2012, 70(3): 311-337.
- [8] 郑永光, 陶祖钰, 俞小鼎. 强对流天气预报的一些基本问题. 气象, 2017, 43(6): 641-652.
- [9] 郑永光, 朱文剑, 田付友. 2015年“东方之星”翻沉事件和2016年阜宁EF4级龙卷对流风暴环境条件、结构特征和机理. 气象科技进展, 2018, 8(2): 44-54.
- [10] Fujita T T, Wakimoto R M. Five scales of airflow associated with a series of downbursts on 16 July 1980. Monthly Weather Review, 1981, 109(7): 1438-1456.
- [11] 高玉春. 气象业务发展对新一代天气雷达技术性能提升的要求. 气象科技进展, 2017, 7(3): 16-21.
- [12] 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. 气象, 2010, 36(7): 33-42.
- [13] 郑永光, 林隐静, 朱文剑, 等. 强对流天气综合监测业务系统建设. 气象, 2013, 39(2): 234-240.
- [14] 张涛, 蓝渝, 毛冬艳, 等. 国家级中尺度天气分析业务技术进展 I: 对流天气环境场分析业务技术规范改进与产品集成系统支撑技术. 气象, 2013, 39(7): 894-900.
- [15] 蓝渝, 张涛, 郑永光, 等. 国家级中尺度天气分析业务技术进展 II: 对流天气中尺度过程分析规范和支撑技术. 气象, 2013, 39(7): 901-910.
- [16] 郑永光, 周康辉, 盛杰, 等. 强对流天气监测预报预警技术进展. 应用气象学报, 2015, 26(6): 641-657.
- [17] 杨波, 郑永光, 蓝渝, 等. 国家级强对流天气综合业务支撑体系建设. 气象, 2017, 43(7): 845-855.
- [18] Johns R H, Doswell III C A. Severe local storms forecasting. Weather and Forecasting, 1992, 7(4): 588-612.
- [19] Wakimoto R M, Kessinger C J, Kingsmill D E. Kinematic, thermodynamic, and visual structure of low-reflectivity microbursts. Monthly Weather Review, 1994, 122(1): 72-92.
- [20] Wilson J W, Wakimoto R M. The discovery of the downburst: T. T. Fujita's contribution. Bulletin of the American Meteorological Society, 2001, 82(1): 49-62.
- [21] Ellrod G P. Environmental conditions associated with the Dallas microburst storm determined from satellite soundings. Weather and Forecasting, 1989, 4(4): 469-484.
- [22] McCann D W. WINDEX: a new index for forecasting microburst potential. Weather and Forecasting, 1994, 9(4): 532-541.
- [23] Atkins N T, Wakimoto R M. Wet microburst activity over the southeastern United States: implications for forecasting. Weather and Forecasting, 1991, 6(4): 470-482.
- [24] Ellrod G P. Experimental microburst image products derived from GOES sounder data. Preprints, 16th Conference on Weather Analysis and Forecasting, Phoenix, AZ, American Meteorological Society, 1998, 16: 43-45.
- [25] Pryor K L, Ellrod G P. Recent improvements to the GOES microburst products. Weather and Forecasting, 2004, 19: 582-594.
- [26] Pryor K L, Ellrod G P. WMSI: a new index for forecasting wet microburst severity. Electronic Journal of Operational Meteorology, 2004.
- [27] Pryor K L. Progress and developments of downburst prediction applications of GOES. Weather and Forecasting, 2015, 30(5): 1182-1200.
- [28] Wakimoto R M, Wilson J W. Non-supercell tornadoes. Monthly Weather Review, 1989, 117(6): 1113-1140.
- [29] Markowski P, Richardson Y. Mesoscale Meteorology in Midlatitudes. Chichester: John Wiley and Sons Ltd, 2010: 245-260.
- [30] Agee E, Jones E. Proposed conceptual taxonomy for proper identification and classification of tornado events. Weather and Forecasting, 2009, 24(2): 609-617.
- [31] Davies-Jones R, Trapp R J, Bluestein H B. Tornadoes and tornadic storms. Severe Convective Storms. Meteor Monogr, American Meteorological Society, 2001, 28(50): 167-221.
- [32] Trapp R J, Stumpf G J, Manross K L. A reassessment of the percentage of tornadic mesocyclones. Weather and Forecasting, 2005, 20(4): 680-687.
- [33] Brooks H E, Lee J W, Craven J P. The spatial distribution of severe thunderstorm and tornado environments from global reanalysis data. Atmospheric Research, 2003, 67: 73-94.
- [34] Craven J P, Brooks H E. Baseline climatology of sounding derived parameters associated with deep moist convection. National Weather Digest, 2004, 28(1): 13-24.
- [35] Grams J S, Thompson R L, Snively D V, et al. A climatology and comparison of parameters for significant tornado events in the United States. Weather and Forecasting, 2012, 27(1): 106-123.
- [36] McCaul E W. Buoyancy and shear characteristics of hurricane-tornado environments. Monthly Weather Review, 1991, 119(8): 1954-1978.
- [37] 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. 气象, 2015, 41(8): 942-952.
- [38] Bluestein H B. Severe Convective Storms and Tornadoes: Observations and Dynamics. Heidelberg: Springer-Praxis, 2013: 307-360.
- [39] Atkins N T, Bouchard C S, Przybylinski R W, et al. Damaging surface wind mechanisms within the 10 June 2003 Saint Louis bow echo during BAMEX. Monthly Weather Review, 2005, 133(8):

- 2275-2296.
- [40] Doswell C A, Burgess D W. Tornadoes and tornadic storms: a review of conceptual models. *The Tornado: Its Structure, Dynamics, Prediction, and Hazards*. Washington DC: American Geophysical Union, 1993: 161-172.
- [41] Schultz D M, Richardson Y P, Markowski P M, et al. Tornadoes in the Central United States and the "Clash of Air Masses". *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2014, 95(11): 1704-1712.
- [42] Markowski P M, Straka J M, Rasmussen E N. Direct surface thermodynamic observations within the rear-flank downdrafts of nontornadic and tornadic supercells. *Monthly Weather Review*, 2002, 130(7): 1692-1721.
- [43] 樊李苗, 俞小鼎. 中国短时强对流天气的若干环境参数特征分析. *高原气象*, 2013, 32(1): 156-165.
- [44] Tian F, Zheng Y, Zhang T, et al. Statistical characteristics of environmental parameters for warm season short-duration heavy rainfall over central and eastern China. *Journal of Meteorological Research*, 2015, 29(3): 370-384.
- [45] Bright D R, Weiss S J, Levit J J, et al. The evolution of multi-scale ensemble guidance in the prediction of convective and severe convective storms at the Storm Prediction Center. Preprints, 24th Conference Severe Local Storms, Savannah GA, 2008.
- [46] Guyer J L, Bright D R. Utility of SPC short-range ensemble forecast (SREF) guidance for forecasting the development of severe convection. Preprints, 24th Conference Severe Local Storms, Savannah GA, 2008.
- [47] Du J, Dimego G, Toth Z, et al. NCEP short-range ensemble forecast (SREF) system upgrade in 2009. 19th Conference on NWP and 23rd Conference on WAF, 2009.
- [48] Schmocker G K, Przybylinski R W, Lin Y J. Forecasting the initial onset of damaging downburst winds associated with a mesoscale convective system (MCS) using the mid-altitude radial convergence (MARC) signature. Preprints, 15th Conference on Weather Analysis and Forecasting, Norfolk, American Meteorological Society, 1996: 306-311.
- [49] Roberts R D, Wilson J W. A proposed microburst nowcasting procedure using single-Doppler radar. *Journal of Applied Meteorology*, 1989, 28(4): 285-303.
- [50] Przybylinski R W. The bow echo: observations, numerical simulations, and severe weather detection methods. *Weather and Forecasting*, 1995, 10(2): 203-218.
- [51] Park H, Ryzhkov A V, Zrnic D S, et al. The hydrometeor classification algorithm for the polarimetric WSR-88D: description and application to an MCS. *Weather and Forecasting*, 2009, 24(3): 730-748.
- [52] Al-Sakka H, Boumahmoud A A, Fradon B, et al. A new fuzzy logic hydrometeor classification scheme applied to the French X-, C-, and S-band polarimetric radars. *Journal Applied Meteorology and Climatology*, 2013, 52(10): 2328-2344.
- [53] Ryzhkov A, Schuur T J, Burgess D W, et al. Polarimetric tornado detection. *Journal of Applied Meteorology*, 2005, 44(5): 557-570.
- [54] Heinselman P L, Ryzhkov A V. Validation of polarimetric hail detection. *Weather and Forecasting*, 2006, 21(5): 839-850.
- [55] Elizaga F, Conejo S, Martín F. Automatic identification of mesocyclones and significant wind structures in Doppler radar images. *Atmospheric Research*, 2007, 83(2): 405-414.
- [56] 李国翠, 刘黎平, 张秉祥, 等. 基于雷达三维组网数据的对流性地面大风自动识别. *气象学报*, 2013, 71(6): 1160-171.
- [57] 郑永光, 薛明, 陶祖钰. 美国NOAA试验平台和春季预报试验概要. *气象*, 2015, 41(5): 568-582.
- [58] Kain J S, Dembek S R, Weiss S J, et al. Extracting unique information from high-resolution forecast models: monitoring selected fields and phenomena every time step. *Weather and Forecasting*, 2010, 25(5): 1536-1542.
- [59] Bodine D J, Kumjian M R, Palmer R D, et al. Tornado damage estimation using polarimetric radar. *Weather and Forecasting*, 2013, 28(1): 139-158.
- [60] Fujita T T, Bradbury D L, van Thullenar C F. Palm sunday tornadoes of April 11, 1965. *Monthly Weather Review*, 1970, 98(1): 29-69.
- [61] Fujita T T. Proposed characterization of tornadoes and hurricanes by area and intensity. SMRP Research Paper, University of Chicago, 1971, 91: 42.
- [62] McDonald J R, Mehta K C. A recommendation for an enhanced Fujita scale (EF-scale). Wind Science and Engineering Center, Texas Tech University, 2006.
- [63] Bunting W F, and Smith B E. A guide for conducting convective windstorm surveys. US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Weather Service, Scientific Services Region, 1993.
- [64] Doswell C A. A guide to F-scale damage assessment. US Dept. of Commerce, NOAA/NWS, 2003.
- [65] Edwards R, LaDue J G, Ferree J T, et al. Tornado intensity estimation: past, present, and future. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2013, 94(5): 641-653.
- [66] 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.
- [67] 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.

# “龙卷”主题文献计量分析

张萌

龙卷主题论文除了发表在大气科学领域的期刊外,还有相当一部分发表在安全科学与灾害防治等领域的期刊,可见龙卷灾害对于人民生命财产安全的巨大威胁。

## 1 数据来源和统计方法

基于web of science平台的SCI-E数据库及中国知网《中国学术期刊(网络版)》(以下简称CAJD)数据库检索了国内外有关“龙卷”主题的研究论文,尝试分析全球和我国相关机构及学者在龙卷研究领域的现状,并结合文献的年代分布、来源出版物分布等数据审视该领域的发展历程及未来趋势。在SCI-E数据库中使用检索式TS="tornado" OR "waterspout",文献种类限制为“article or review”,检索年限为1900—2017年,检索得到龙卷主题文献2691篇;在CAJD数据库中使用检索式“主题="龙卷"或"龙卷风"”,同时为聚焦研究类型的文献,将学科类别限定在理、工、农、医及信息科技类,检索年限为1915—2017年,检索命中文献950篇(检索时间为2018年2月25日)。

## 2 统计结果及分析

### 2.1 论文产出量

SCI-E数据库中检索到的最早的有关龙卷的研究论文是题为*Javaugues Tornado (Haute-Loire) on the 3 June 1902*的文章,作者是法国的地球物理学家Bernard Brunhes,该文于1902年发表于*Comptes Rendus Hebdomadaires des Seances de L'Academie des Sciences*第134卷。CAJD中能检索到的最早的一篇则是1964年发表于《南京大学学报(自然科学版)》的题为《上海地区龙卷风的初步分析》的文章,第一作者为南京大学的包澄瀾。

图1给出了SCI-E和CAJD数据库龙卷主题研究论文的逐年产出量,以及中国作者在SCI-E的发文情况。SCI-E数据库中,总体产出量呈现出3个阶段:20世纪70年代前半段之前年发文量基本稳定在个位数;之后年发文量上升到十几篇,这一状况一直持续到1990年;1990年之后,国际上关于龙卷的研究论文在波动中平稳增加,尤其到2010年前后,年发文量接近或超过100篇,且每年都有大幅度的增长。中国

作者于1997年开始发表龙卷主题SCI-E文章,2014年之后,年发文量大于10篇,2017年达26篇。同样,CAJD数据库中,国内龙卷主题论文也是从1990年后进入稳定增长阶段,并于2016年达到峰值(70篇),这可能与2015年中国发生了多次强龙卷事件有关。SCI-E与CAJD数据库中龙卷主题论文被引频次最高的榜单见本期P3和P5页。

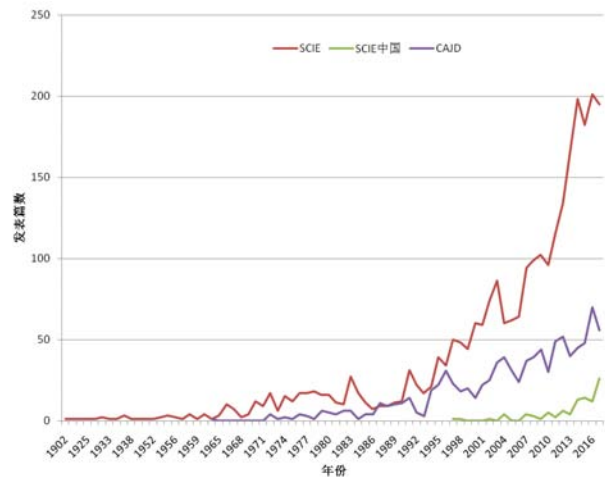


图1 1902—2017年SCI-E和CAJD数据库“龙卷”主题文献发文量分布

### 2.2 国家和机构的产出及其影响力

美国作为世界上遭受龙卷灾害最严重的国家,其龙卷研究的体量以绝对优势领先其他国家,其发文数占比高达59%,一些指标甚至比排名前十的其他国家大一个数量级(表1)。值得注意的是,论文产出量位于第二梯队末位的德国,其总被引次数、篇均被引次数及h指数均仅次于美国,位列第二位,其在龙卷研究领域的国际影响力不容小觑。中国的论文产出量位于第三梯队首位,但其国际影响力还有待提升。

从龙卷研究领域论文的产出机构来看(表2),产出量在国际上排在前10的机构中除俄罗斯科学院之外,其余9家均为美国的高校及科研机构,再一次印

表1 “龙卷”主题论文 (SCI-E) 产出排名前10的国家和地区及其影响力

国家和地区	发文数	总被引次数	篇均被引次数	h指数
美国	1588	34587	21.78	78
俄罗斯	126	755	5.99	14
日本	115	727	6.32	14
加拿大	104	1194	11.48	16
英格兰	104	1548	14.88	19
德国	104	1890	18.17	25
中国	97	551	5.68	13
澳大利亚	65	981	15.09	18
西班牙	60	976	16.27	17
法国	49	541	11.04	11

表2 SCI-E和CAJD数据库“龙卷”主题论文的产出机构

产出机构 (SCI-E)	发文数	产出机构 (CAJD)	发文数
NOAA	444	中国气象局气象干部培训学院	27
俄克拉荷马大学系统	347	南京信息工程大学	24
俄克拉荷马大学-诺曼	341	中国气象局	21
NCAR	105	中国气象科学研究院	18
俄罗斯科学院	84	西北大学	16
宾夕法尼亚联邦高等教育系统	66	北京大学	15
宾夕法尼亚州立大学	63	国家气象中心	13
科罗拉多州立大学	61	东南大学	13
北卡罗莱那大学	58	国家气候中心	11
阿拉巴马大学系统	51		

证了美国在龙卷研究领域强大的科研实力。国内发表龙卷领域论文最多的机构为南京信息工程大学,中国气象局及其各直属单位均榜上有名。值得一提的是,西北大学和东南大学等高校发表的文章并非是对龙卷本身的研究,而是有关龙卷形成原理在设备制造、建筑设计等领域的应用。

表3 国内外“龙卷”主题论文的高产作者

作者 (SCI-E)	机构	发文数	作者 (CAJD)	机构	发文数
Bluestein H B	俄克拉荷马大学-诺曼	68	俞小鼎	中国气象局气象干部培训学院	21
Xue M	俄克拉荷马大学-诺曼; 南京大学	43	郝惠娣	西北大学	15
Wurman J	美国强天气研究中心	38	吕令毅	东南大学	13
Brooks H E	美国国家强天气风暴实验室	34	郑媛媛	江苏省气象局	8
Doswell C A	美国国家强天气风暴实验室	32	周小刚	中国气象局气象干部培训学院	6
Trapp R J	伊利诺伊大学厄本那-香槟分校	24	王亚军	北京理工大学	6
Wakimoto R M	科罗拉多大学波德分校	24	郑永光	国家气象中心	6
Brown R A	俄克拉荷马大学-诺曼; NOAA	22	黄平	北京理工大学	6
Markowski P M	宾夕法尼亚州立大学	21			
Straka J M	俄克拉荷马大学-诺曼	21			

表4 SCI-E和CAJD数据库刊载“龙卷”主题论文的主要期刊

来源出版物 (SCI-E)	刊载论文数	JCR分区	来源出版物 (CAJD)	刊载论文数
Monthly Weather Review	305	Q2	气象	74
Weather and Forecasting	255	Q3	气象科技	35
Atmospheric Research	121	Q1	生命与灾害	27
Bulletin of the American Meteorological Society	103	Q1	气象科技进展	21
Journal of the Atmospheric Sciences	88	Q2	广东气象	19
Natural Hazards	66	Q2	高原气象	15
Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*	47	/	中国减灾	14
Journal of Atmospheric and Oceanic Technology	40	Q2	灾害学	14
Journal of Applied Meteorology and Climatology	35	Q2	暴雨灾害	12
Weather Climate and Society	34	Q2		

注: JCR分区参考InCites Journal Citation Reports 2016版(学科仅限meteorology); \*为该期刊不属于大气科学类期刊。

### 2.3 高产作者及来源期刊

国际上龙卷研究领域排名前十的高产作者无一例外来自美国,来自俄克拉荷马大学-诺曼的学者占据了半壁江山,其中知名的华裔气象学家薛明位列第二。国内高产作者中,高校及中国气象局多个部门的多位作者榜上有名(表3)。

表4给出了两个数据库中刊载龙卷主题论文最多的期刊。SCI-E数据库中,排名前十的SCI-E期刊发表了约40%的该主题论文。从SCI-E期刊的分区来看,绝大多数期刊位于1、2区,侧面说明龙卷研究领域的论文总体水平相对较高。从中文期刊来看,龙卷主题论文除了发表在大气科学领域的期刊外,还有相当一部分发表在安全科学与灾害防治等领域的期刊,可见龙卷灾害对于人民生命财产安全的巨大威胁。

### 3 小结

近几年,中国多次出现较强的龙卷并造成了严重的人员伤亡。在中国积极开展龙卷研究以及龙卷预报预警业务呈现出紧迫性和必要性。尽管我国在龙卷主题的论文产出上处于世界前列,但影响力还需进一步提升。建议对能够造成大量伤亡的气象灾害,如龙卷、飑线等中小尺度强对流天气进行深入研究,不断提升我国在强对流天气领域的科研与预报实力。

(作者单位:中国气象局气象干部培训学院)

# 浅析多媒体融合环境下中国气象频道的 多维模式构建

■ 段京蕃

除了及时捕捉气象热点和重大气象灾害的报道需求，还要善于拓展气象科普片的外延，充分发挥气象媒体资源和渠道优势。

2006年5月18日，中国气象频道正式开播。它以“防灾减灾、服务大众”为宗旨，为公众提供精细化、专业化、实用性的气象信息服务和科普宣传。经过十余年的发展，频道已经在全国314个地级以上城市实现了信号落地（全国共有地级以上城市337个），覆盖数字电视用户超过9200万。目前，中国气象频道正在积极推进纳入国家直播星“户户通”工程，届时覆盖人口将再次扩大到2亿。随着互联网时代的到来，智能手机和平板电脑的视频观看量大幅增长，对整个电视频道的市场空间都形成了进一步挤压。移动互联网的便捷性、强黏度，以及强大的覆盖率、渗透度和创新能力，对于机构化、组织化、官僚化的传统媒介具有一种摧毁性的压力。

## 1 中国气象频道发展现状

历经十余年的摸索和实践，中国气象频道的定位已从最初的为公众提供精细化、专业化、实用性的气象信息服务和科普宣传平台，逐步向公益性的防灾减灾特色电视频道过度；从最初的气象信息发布终端向国家级综合防灾减灾内容提供平台转变。其节目体系从以预报预警、新闻资讯、专栏纪录片三大类节目形态迈向重构节目体系，朝着集约资源、拓展全媒体渠道，重点打造品牌的方向寻求突破。

### 1.1 现有业务和技术模式

中国气象频道目前采取“国家级集中制作、省级补充分发”的两级制播方式，其中由中国气象局公共气象服务中心（以下简称“公服中心”）负责主干节目制作、播出和整体运行保障。

其中2015年栏目首播量总时长1533小时，日首播量约为4小时。2015年直播总时长912.5小时，日均直播2.75小时。（其中新闻资讯类2小时5分钟，图文预报类25分钟、自制专题15分钟）；而由省级气象服务中心负责本地化节目插播（25/56）以及地方新闻制作

和本地化业务运行保障。插播节目按照国家级统一制作分发、统一制定规范和标准，省级按照自我意愿和国家规范插播，负责落地推广。国家级统一制作，建立中国气象频道基本的、统一的图文类天气预报插播节目模板，建立自上而下的数据分发通道和本地化数据订正通道。各地日首播量均能达到5档及以上（深圳除外）。本地化节目内容大多以基础图文天气预报为主。

#### 1.1.1 直播平台

中国气象频道充分借鉴美国气象频道的节目体系，构建了全天候新闻直播平台，能够随时针对突发灾害和公共应急事件启动直播，真正实现频道与天气变化的实时联动。一旦灾害事件发生，频道能够第一时间通过滚动字幕新闻发布应急内容和各类预警预报信息，同时打通全频道所有时段，24小时报道应急内容。

在直播节目大行其道的今天，中国气象频道的直播有别于非气象专业的媒体，它充分利用自身的专业资源优势，不仅追求记者在灾害天气的现场报道展示，而且对整个天气事件做到发生前、发生中、发生后的全程监测和跟踪报道，科学地揭示天气发生的背景、灾害影响程度、如何采取预防措施、天气演变规律等。专业的气象分析师会根据天气实况画面及相关的大数据来进行分析、解读。并对未来的天气发展趋势进行科学预测。因此，其灾害现场报道更加真实、专业。

#### 1.1.2 全国联动

为了更敏锐地捕捉全国各地的灾害天气，中国气象频道利用各省、自治区、直辖市及重点地区的气象服务中心，建立了中国气象频道的记者站。利用自身的优势，培养了一批记者和摄像。这些专业的队伍能够在第一时间对当地的灾害天气进行拍摄，通过覆盖全国的气象灾害联动传输网将视频素材及相关的报

道第一时间回传中国气象频道，并在中国气象频道播出。这样大规模的全国联动报道有效地保证了中国气象频道灾害报道的及时性、准确性和全面性。

同时，作为唯一能够通过数字信号传输插播技术的电视平台，中国气象频道能够实现不同省区“本地化”节目实时插播。

### 1.1.3 现场报道

灾害报道是中国气象频道的核心竞争力。经过多次实战摸索，组建了一支由气象专家、资深记者、摄像等组成的专业“灾害现场报道小组”，也称“追风小组”。每当台风、暴雨、洪涝等重大天气事件发生时，总能在第一时间看到这支队伍的身影。他们或直击风暴中心，或在暴雨洪涝中深入受灾一线，与频道的演播室进行同步直播。

2016年7月的洪水灾情报道中，在“雨情告急”特别节目的直播连线中，频道还首次尝试了超越时空，三方对话的形式，即两路记者和主持人同框出现。主持人与两位记者可以同台登场，互通有无。

### 1.1.4 科普栏目

中国气象频道依托建设中的三万分钟素材的中国最大的气象科普片库，年制作、播出地球科学、环境科学、气象科学科普专题节目300余集，是气象科普宣传的有效窗口与平台。目前共有10档自制专题栏目、11档改编专题栏目，2档引进节目，在播气象科普栏目共计23个。

## 2 多媒体融合环境下中国气象频道面临的挑战

### 2.1 收视率低，用户反馈少

随着互联网时代的到来，移动互联网的便捷性、强黏度，以及强大的覆盖率、渗透度和创新能力，对于机构化、组织化、官僚化的传统媒介具有一种摧毁性的压力。

据央视CTR调研数据显示，近5年来我国电视观众日均收视时长不断下降。2015年上半年观众收看时间为156分钟，相比2011年上半年的168分钟，下降了12分钟。2015年上半年观众的平均到达率由2011年的70%下降至62.1%，下降了7.9个百分点。而随着智能手机和平板电脑的普及，45岁以下的年轻观众电视消费时长逐年下降，这类观众在远离传统电视，而新媒体在这类观众群中不断扩大着自己的影响力，正对整个电视频道的市场空间形成进一步的挤压。

目前中国的付费电视还处于成长期，气象频道的收视虽然在数字付费频道中处于前列，但是收视率整

体仍然偏低。没有足够的收视人群，来自有效用户的反馈信息偏少，直接导致节目的定位容易出现偏差，创新动能不足。

### 2.2 经营困局亟需突破

面对纷繁复杂、变幻莫测的数字电视市场，中国气象频道对于内容市场的开发和运营策略合理与否、有效与否，不仅关系到频道能否尽快盈利、盈利大小，也将关系到频道能否健康持续发展。频道自创建以来，在节目内容及形式方面做过很多的探索和尝试，但是真正将节目推向市场还只是刚刚起步。频道最近新成立了市场推广部门，抽调精干力量组建营销推广队伍，通过整合内外部资源、开启频道销售模式以及品牌经营等三方面来突破中国气象频道的经营困局。

目前频道的部分栏目已经在爱奇艺上线，并与腾讯联动，在灾害天气发生时进行联动直播共享。未来，还会与其合作网络直播节目；另外，频道还和优酷等多个视频网站签约，加大节目的推广。前期主要通过点击量来分成，后面还可以扩大到广告分成。2015年中国气象频道分别与视频类、音频类、新闻类网站与手机客户端签订了为期一年的PGC合作协议。

通过与音视频媒体的合作，频道的知名度得到了大幅提升并与新媒体建立了良好的关系，为今后频道与新媒体的深入合作创造了优势条件。

### 2.3 加强科普专题策划，建设科普素材库

目前气象频道在播的科普栏目有23个，但科普精品仍偏少，而且部分栏目日播的改编节目还是几年前的题材，时效性不强。对于新近发生的重大气象灾难，还缺乏新制作、新投入，没有及时跟进拍摄，导致节目内容老旧，不适应频道创建精品栏目的需求。

未来，频道应该加强科普专题节目的策划，建立起自身的节目研发创新团队，除了及时捕捉气象热点和重大气象灾害的报道需求，制作一批时效性强、有视觉震撼力和警示力的专题片，还要善于拓展气象科普片的外延，充分发挥气象媒体资源和渠道优势，创新科普形式，寓科普宣传于日常节目业务服务之中，融入各行各业，融入生产生活。

频道目前已经开始尝试与各部委开展合作，比如与民政部联合制作的《中国减灾》；与中国科协科普中国合作，探索科普资源合作共享机制以及针对重大事件和灾害的科普视频制作工作。下一步，还可以进一步拓展渠道，联合其他部委办好一批防灾减灾和应对气候变化的重点节目和重点科普专题节目，内容可以涵盖人文、地理、科技等“大气象”范畴，关注气象防灾减灾，应对气候变化，气象与生活，气象与农

业,气象与环保,古气候探秘,气象基础知识,气象事业发展及人文、自然、地理等多方面。

与此同时,作为国家级多媒体气象影视科普素材库建设也亟需进一步加强,只有双管齐下,才能提高气象影视科普资源支撑公共气象服务和气象科普宣传的共享水平。

### 3 中国气象频道的全媒体应对之策

如何应对多媒体融合环境下中国气象频道面临的挑战?应该在探索建立全媒体传播模式上下功夫。这种传播模式的具体表现形式是:建立强大的内容集成平台、内容操控平台以及独立的社交媒体平台,并且加强新技术在全媒体传播中的运用。

#### 3.1 全媒体平台建设

全媒体不仅是一个内容集成平台、信息发布平台,更重要的是它是一个开放的综合服务平台。全媒体时代新闻竞争的即时性、新闻事实的多变性,更强调新闻报道的整体策划和团队执行。在全媒体时代,要借鉴美国等发达国家全媒体制播模式,面向全媒体来策划、制作和播出节目。

首先,中国气象频道要建立强大的全媒体内容集成平台。要有专门的人员通过各种渠道收集、上传各类图片、视频和互动的内容;气象专家无疑是气象频道区别于其他媒体的稀缺资源,气象专家和气象图形人员则根据不同的节目需求,出镜解读天气变化,勾勒媒体播出的天气线索,制作天气图形、科普图形以及半成品图形,以供各平台制作人员根据各自节目的传播特点来选取制作。

在2015年7月台风“莲花”和“灿鸿”的直播报道中,中国气象频道充分运用全媒体气象产品室挖掘及分析的台风历史数据资料,通过新闻小片、专家解读等形式进行全面展现,及时将最新信息快速发布。

其次,要建立全媒体内容操控平台。做到电视、手机、网络等多种媒体形态的共同传播。通过内容操控平台实时监控相关媒体的播出情况,包括高清、标清电视播出信号是否正常,网站、手机点击量、流量以及问题反馈。

再次,要建立独立的社交媒体平台。加强与线上线下观众的互动,面向全媒体,24小时实时监控、关注、反馈互动信息。比如,在2015年的台风季,当“灿鸿”“莲花”和“浪卡”三台共舞之时,频道充分运用全媒体传播网络,在中国气象视频网及中国天气网开辟台风直播特别专区,并收集网友热议话题,实时展开互动。7月9日当天,中国天气网直播页半天流量超过20万,为网友互动最多的一次。同时,频

道将此次报道中独家预测和服务信息等视频进行片段剪辑,在优酷、爱奇艺、微博、微信等新媒体渠道传播,对频道节目进行密集式二次推广。7月7—11日,中国气象频道台风资讯在爱奇艺网站的播出总量高达357.1万次,其中单日最高播出量达193.1万次。此外,中国气象频道利用官方微博及时发布台风相关信息50余条,阅读量达到近70万次,直播期间微博粉丝数量激增至30200人。使得媒体视角得以延伸,并不断拓展媒体商业价值。

最后,要调整现有体制机制。爱奇艺高级副总裁耿晓华认为,媒体融合是跟随用户获取信息的情景和场景变化,改变信息传播的方式过程。其中,调整组织机构的体制机制,成为媒体深度融合的关键环节。

2016年4月,中国气象频道和中国天气网合作,大力推动台网联动,就重大灾害事件联合报道、日常策划共同参与、节目创新共同探索、基础数据共建共享、省级资源共同利用、品牌推广共同开展进行探索。并落实了汛期重点灾害前期策划、天气网“数据说天气”视频化、旅游交通节目策划等重点工作,共同打造全媒体融合机制。

为破除部门行政壁垒,推动全媒体融合。2016年6月,中国气象频道与数据应用部门就如何做到日常媒资共享,深化数据应用进行联合研讨,真正将双方业务设计为采编播流程中的具体环节。

深度融合已经成为广电媒体的历史性和革命性选择。从以组织融合和流程再造为突破口,只有实现从“+互联网”到“互联网+”的深度融合转型,才能产生“你就是我,我就是你”的化学反应。

#### 3.2 新技术在全媒体传播中的运用

有了全媒体的平台,还需要加强新技术在全媒体传播中的运用。

“工欲善其事,必先利其器”,由公服中心相关单位研发的三大系统在全媒体传播中成为利器:“等风来”台风风场环流显示系统,以流线型身姿和靓丽色彩再现台风“真容”;“触屏雷达显示系统”则聚焦台风结构和雨势变化,直观呈现台风风雨影响;“风云即拍”app通过手机3G或4G信号,实现追风记者与演播室的零距离沟通,最快呈现现场情况。

不仅如此,在气象频道在对台风的直播中,还不时穿插有关台风的气象科普专题片,而在这些科普片中,编导匠心制作,巧妙地将图形、三维虚拟原件、天气原理动画等手段,让科普“活”起来,更接“地气儿”,更易理解。

### 3.3 建立全媒体的传播模式

媒体融合的根本原因在于互联网天生具有强大的融合能力，媒体融合的主体无疑是互联网。传媒人特别是传媒管理者依旧把互联网看成“一个媒介、一个渠道，因此从自身发展的角度，把互联网作为延伸自己价值和影响力的一个平台、一个锦上添花的工具”。事实上，传统媒体内容互联网化，或者用互联网工具加载传统媒体内容和价值观，都是以传统媒体思路来处理新媒体问题，根本没有采用互联网思维来重塑传统媒体。

在互联网已渗透到社会每一个细胞的时代，互联网用它独有的互联网思维、互联网精神、互联网力量，改造世界、改造媒体。传统媒体被跨界、被融化、被碎片化，已经不是完整意义上的传统媒体。在媒体融合的大背景下，一定要认清全媒体的核心内涵是用户的选择，这不仅仅是改变了输送新闻资讯终端，或者是把原来在电视上播出的采访稿扔给微博、微信。传统媒体与新媒体的平台传播存在很大差异，同一条新闻在不同的传播载体上需要以不同的形态呈现。

而媒体人才的培养模式也要能跟得上媒体融合发展的脚步。“全媒体记者”的培养已经迫在眉睫。“全媒体记者”是指能够运用多种技术采集多源信息、随时进行动态整合，并让新闻资源可以多次发布、实现资源共享的媒体记者。一名全媒体记者，需要了解不同传播平台的用户阅读习惯与需求，提供的新闻素材要符合不同传播平台的发布标准。

当手机移动端替代传统媒体成为新闻的第一落点时，要求发布新闻的速度要更加快速，才能跟上人们对信息的迫切需求；由于受众接触媒体途径越来越多，对报道会有更高的要求，如何在众多媒体中实现突围，需要报道方式更加丰富和多元，报道品质一定要始终如一。

有了全媒体的记者，还需要有全媒体的采编报道队伍，要做到前后方协同作战，才能高效地进行信息的有效整合和传播。目前，中国气象频道使用多种工具和传播手段，不只是记者在现场的第一时间报道，还要利用中国气象频道的官方微信、微博来做展示，并做到更新及时；对于记者在第一现场发回的最新的图文和视频信息，当回传到新闻中心之时，后期编辑

一定要学会再加工，以便于在频道网站和微信公众号上推送，便于扩大影响力；在移动端预热报道气氛时，组织深度的新闻报道，专业的气象分析。

### 3.4 产品服务最终取代形式媒介

在媒体融合发展的大潮下，新媒体产品如雨后春笋，“两微一端”成为一些传统媒体融合发展的“标配”。据微信公众号新媒体排行榜的数据显示，近一年来，传统媒体建立的微信公众号达3万个左右；自建移动客户端也有700~800个。而注册新浪微博的媒体机构，几乎覆盖了所有的媒体类型。

全媒体的工作理念，就是要做到内容呼应、策划统一、资源共享、品牌统一。作为气象专业频道，要保有自身的传播特色，多媒体融合的是资源和品牌，只是打通渠道还是过于表面，最终的落脚点还是要怎么做内容，怎么做气象，怎么做突发事件的应急，这才是媒体的社会责任与担当的最集中体现。

中国气象频道迫切需要在现有节目体系上进行重构，突出频道的节目特色。一方面，突出气象特色，另一方面，则是突发事件应急。在直播类新闻节目之外，还要适当引进相关纪录片、专题片、电影，增强自主制作节目的针对性、突出防灾减灾和突发事件应急处置的节目主线和服务功能。

未来，中国气象频道将以策划为牵引，从完善的策划中提炼需求，真正调动包括气象影视系统、合作媒体、新华社、网络媒体热点以及各大主流电视媒体的音视频、文字、图片等一切媒资素材，让频道的影视产品素材更加丰富，同时，能发挥媒资的大数据分析功能，基于素材场记进行相关的筛选、应用，并能通过媒资素材找出规律和价值，创造频道独家的影视产品。

#### 深入阅读

- 范以锦, 黎妙娟, 2012. 对“全媒体记者”的几个认识误区. 传媒观察, (5): 5-7.
- 杨丽娟, 徐鑫, 2015. 媒体融合深开掘 六大困惑待破解. 桥 纪录影视, 6: 49.
- 喻国明, 2015. 关于未来媒介生态的预测. 桥 纪录影视, 6: 53-54.
- 郑君, 2011. 记录风雨 防灾减灾——中国气象频道在坚守与突破中前行. 中国电视(纪录), (3): 29-31.

(作者单位: 中国气象频道)

# 新媒体环境下气象影视资料的再开发与利用 价值初探

## ——基于中国气象频道的实践

■ 刘银峰

气象影视资料最重要的价值在于它的可开发性和可重复利用性，使用频率越高的气象影视资料，其体现的价值也越高。

随着信息技术和网络技术的飞速发展，基于数字技术和网络技术基础上发展起来的互联网电视、手机电视、有线互动电视、楼宇电视、移动电视等新媒体，越来越受到人们的青睐。新媒体多样化的传播方式和内容形态，使传统媒体的传播功能得到了极大扩展。近年来，广播电视充分发挥内容资源等方面的优势，积极发展新媒体，占领了新媒体的舆论宣传阵地，同时新媒体业务的开发，为广播电视开辟了新的经济增长点。

目前，新媒体产业正由“渠道稀缺”向“内容稀缺”转变。在新媒体的环境下，作为气象影视节目制作者的全国各级气象影视制作机构，拥有国内最丰富的气象影视节目资源，如何抓住新媒体发展契机，加速气象影视资料的产业化开发利用已是迫在眉睫。

本文主要以中国气象频道内容资源管理、利用为实例，旨在对新媒体环境下气象影视资源如何再开发、利用做一些思考，以期抛砖引玉，共同推进气象影视资源的开发与利用。

### 1 丰富新媒体的内容资源

气象影视资料的开发利用对于丰富新媒体业务的内容资源具有重要的作用，一方面它可以提高视频画面的说服力、真实性及竞争力；另一方面使节目制作人员在构思之中有广泛的内容可以借鉴，以利用气象影视资料进行二度、三度创作，使已有内容编辑出新节目，使新节目通过已有内容的点缀而变得丰富多彩，可视可信。

例如，中国气象频道的《气象万千》栏目根据节目内容的划分，建立了气象短片资源库。栏目组将生产的各类节目依据不同内容分到不同类别，在不同的类别中还细分了不同的节目形式。如首先将库的内容

划分为防灾减灾、气候变化、科技服务、天气生活这四大类，而在防灾减灾这一大项内容中，包含了台风系列、暴雨系列等内容，而在台风系列节目中，又包含了台风科普知识、台风防御措施、风暴故事等。各种节目在入库时，清楚标明本期节目的内容介绍、时间、地点、人物等要素，便于入库整理和出库查询。同时，库存内容要便于有效的排列组合，组合之后形成新的节目内容。就雾这一主题来说，可以制作1分钟短片介绍雾是如何形成的，2分钟短片介绍雾的危害，2分钟短片介绍雾的预警符号，3分钟短片介绍雾天行车技巧，2分钟短片介绍雾天行船技巧，2分钟短片介绍雾凇美景，1分钟短片介绍收集雾水解决干旱问题的技术等的系列短片。这样，不同时长、不同内容的短片就可以相互自由组合，产生不同类型的新节目，从而满足新媒体观众多样化的信息需求。

### 2 缩短新媒体内容的制作周期

根据生产过程的一般理论，新媒体内容的制作过程，是节目制作人员根据预先的设计方案与摄制工具相结合的过程。节目具有的二重性理论，其中有一部分节目就是商品。例如，节目的制作，从构思开始，节目就进入制作周期，一人或多人开始构思相关主题，搜集相关内容，写出节目脚本，然后进入最繁忙的工作拍摄录制，而后进行编辑混录直至所有工作全部结束，完成整个工作所需要的时间就是节目的一个制作周期。

但由于种种原因，也许会在某一个阶段停下来，而停顿的时间越长，停顿的次数越多势必延长节目的制作周期。延长节目的制作周期，就意味着要付出更多的人力、物力及财力。因此，制作新媒体内容就应当考虑气象影视资料的开发利用问题。因为气象影视

资料的开发利用,一方面省去了外拍时所花的时间、人力和物力,另一方面也使缩短新媒体内容制作周期成为可能。

例如,中国气象频道所承担的中组部新媒体节目《气象万千》,节目的策划和制作只有一周时间,要按正常节目制作流程,这是一项不可能完成的工作,但节目制作人员创造性的将长期积累的气象影视资料进行“天气现象”“天气过程”“气象灾害”等主题分类整理、整合和二度创作,使已有内容编辑出新的节目;2017年夏季,我国华北地区遭遇高温、干热风天气,中国气象频道第一时间与干热风影响较大的河北、山东、河南等地气象影视中心联系,直观报道当地农业受高温、干热风天气影响的同时,频道还派出两路记者,一路记者携带无人机设备奔赴受干热风影响的天津武清等地,实地拍摄当地农田受干热风的影响情况。另一路记者采访专家,由专家权威解析此次高温、干热风对农业的影响及防御措施。此外,频道还利用气象影视资料库中丰富的“气象灾害”视频资料,通过视频资料加动画演示、字幕提示的方式,及时制作了《干热风及危害》主题科普小片,通过电视、网站、微博、微信等发布渠道和手段,实现重大气象灾害全媒体融合报道,促进预警预报信息快速、高效传播。

### 3 削减新媒体内容的制作成本

分析节目制作成本对于新媒体的发展具有重要意义。因为,一个节目从拍摄到发行涉及人员工资、设备折旧、材料耗费、差旅费、宣传费等,所以在节目制作过程中要注重成本分析,树立成本意识,明确成本的含义及其构成,正确处理投入与产出的关系,以此提高节目的成本利用率,实现节目社会效益和经济效益的最优组合。

那么,对于新媒体业务来说,怎样才能更好地削减节目内容的制作成本呢?只有对各气象影视制作机构长期积累的气象影视资料进行重新整合、开发和再利用,才能真正意义上削减新媒体内容的制作成本。因为气象影视资料最重要的价值在于它的可开发性和可重复利用性,使用频率越高的气象影视资料,其体现的价值也越高。对影视资料进行反复地、多方面、多层次地开发利用,使得新媒体内容制作成为一个既省钱又省力的传播方式。

例如,中国气象视频网利用中国气象频道丰富的内容资源,从为网民提供天气预报和防灾减灾信息的角度出发,将《新闻联播天气预报》《中国减灾》《天气直播间》《三农新气象》等节目进行精编后重

新上线播出,这不仅削减了气象视频网内容的制作成本,还使播过的气象影视节目继续发挥社会效益和经济效益。

### 4 扩大节目发行与发布渠道

每年,我国各气象影视制作机构都会制作大量的气象节目,如气象新闻节目、气象预报节目、气象科普节目、气象专题节目、气象访谈节目和纪录片节目等,在这些节目类型当中,除了气象科普节目、气象专题节目因为其市场化程度较高能够被多次发行之外,其他的节目基本上在首播和重播后,就被存入节目库不再使用了,造成资源的极大浪费。所以各气象影视制作机构要充分利用好长期积累下来的气象影视资料,在注重利用本单位气象影视资料的同时,也利用外台,以及其他电视节目制作机构的气象影视资料,互通互享,从而拓展己方、对方的节目发行、发布渠道,以此来扩大受众面。

例如,华风气象传媒集团有限责任公司以出版VCD、DVD的形式,对其制作的电视专题片《徽州》《中国地理探奇》《气象百问》《四季养生堂》《二十四节气》《远离灾害》等影视内容进行二度开发,这不仅有效地扩大了气象影视节目的影响力,而且以出版物的形式使气象影视节目真正进入了商品市场,便于其他相关机构开发使用。

### 5 增加新媒体业务的横向联系,实现资源共享

随着新媒体业务信息发布量的增大,新媒体业务制作要求和能力的提高,气象影视资料开发利用也越来越频繁,相应地,人们对气象影视资料方便利用的需求也越来越高。在传统管理方式下,同一份气象影视资料只能轮流使用,人们虽然迫切需要使用但是却不能同时使用,各个部门的内容重复而且很难相互共享,这就限制气象影视资料发挥自身价值,增加了制作成本、降低了制作效率。

如今,互联网的出现为气象影视资料共享创造了很好的技术条件。一是互联网支持的多媒体格式解决了信息的统一格式问题;二是互联网为跨地域的信息共享提供了通信网络环境;三是互联网解决了不同硬件平台、操作系统及网络设备的兼容问题;四是互联网提供的浏览器使大家有了共同的用户界面。在此基础上就可以建立台内联网,资源共享。

事实上,进入气象影视库的资料的存在价值恰恰在于其开发利用,再好的内容如果深藏闺中,是实现不了其价值的。以往各气象影视制作机构的影视内容

(下转80页)

# 霍华德——为云而生的英国气象学之父

■ 杨萍 邓京勉 张萌

尽管科学和艺术表达形式存在差异，但从根源上来看，都是人类认识世界的体现，都是对万千世界创新性的一种描述，都来源于实践和观察。

卢克·霍华德 (Luke Howard, 1772—1864年, 图1), 英国著名的气象学家。他闻名于世的贡献是通过对云的命名和分类, 创造了一套关于云的术语并广为流传。然而, 霍华德在气象学的个人成就不止于此, 他的著作《气象学七讲》被认为是气象学史上第一部专业性教材, 他撰写的《伦敦气候》被认为是城市气候学的第一部专著。霍华德在气象学的成就还激发了歌德、雪莱等艺术家的创作激情。尽管有人认为霍华德只是一个大气现象的观察者, 但他在观察之后, 通过归类和推理等总结得到的知识, 对后世的影响巨大。



图1 卢克·霍华德 (Luke Howard, 1772—1864年)

霍华德在英国气象学历史上功绩斐然, 也有诸多关于他的研究论文和著作, 并在英国被尊称为“气象学之父”。但是, 国内学者对于霍华德的研究甚少, 除了刘昭民《西洋气象史》有霍华德关于云的分类介绍外, 能够找到的中文资料非常有限。这或许由于在气象科技的发展历程中, 进入20世纪后, 随着挪威学派和芝加哥学派的崛起, 英国气象学的发展速度减慢, 国内对英国气象学家的重视程度不够。

本文在概述霍华德的生平基础上, 介绍了霍华德在云的分类、城市气候学等气象学领域的贡献, 并初步探讨了其对艺术的影响, 在此基础上, 围绕霍华德的科学贡献谈了几点启示。

## 1 霍华德的一生

### 1.1 生平简介

霍华德是19世纪初期英国著名的气象学家, 其

在气象学领域最杰出的贡献是对云进行科学分类和命名。霍华德出生于一个做锡铁的生意人之家。关于他早年的生活, 相关记载比较零星, 从目前已有的资料看, 霍华德于1780—1786年在英格兰牛津郡 (Oxfordshire) 附近的博福德 (Burford) 的一家私立学校读书。在那段时间, 他认为自己除了学习了系统的拉丁语外, 并没有太多其他的收获 (事实证明, 这段拉丁语的学习生涯对其后来的成就帮助不小)。离校后, 他回到家中, 一边给父母帮忙, 一边开始探索自己非常感兴趣的大气现象, 他每天两次用雨量计、温度计和气压计观察天气并记录结果。不久后, 他被父亲送到了在一个零售药剂师那里做学徒, 一学就是6年。在此期间, 他因学习繁忙而中断了所热爱的科学研究。学成后, 霍华德回到伦敦, 说服父亲给他足够的钱自立门户开展药剂业务, 成为老板的霍华德终于可以灵活安排时间, 系统学习了法语、植物学、化学, 并深受法国化学家拉瓦锡 (Antoine-Laurent de Lavoisier) 的学术影响。后来, 他认识了志同道合的药剂师阿伦 (Willam Allen), 成为其掌管药剂公司的合伙人。有了这一经济来源, 霍华德将所有的情感和时间都用在了科学研究上。阿伦在开药剂公司的同时, 还建立了一个研讨自然科学的论坛, 称为爱斯克辛学会 (Askesian Society), 1800年开始, 霍华德先后在这个学会上发表了多篇论文, 如《平均气压计》 (Average Barometer)、《雨的理论》 (Theories of Rain) 等, 其中最具有影响力的文章应属《云的多变形态》 (On the Modification of Clouds), 由于霍华德对云研究所做的巨大贡献, 1896年被命名为国际云年, 同年, 第一张国际云图出版。霍华德对气象学的其他方面也有诸多贡献, 1817年完成了《气象学七讲》 (Seven Lectures on Meteorology), 1837年正式出版 (图2)。1818年, 霍华德完成的另一本重要著作《伦敦气候》 (The Climate of London) 被后人认为是第一部关于城市气象学的著作。1827年, 霍华德获得了英国科学家的最高荣誉——皇家学会会员, 霍华德也被称为英国的气象学之父。



Seven Lectures on Meteorology

Luke Howard

图2 《气象学七讲》(Seven Lectures on Meteorology)封面

## 1.2 霍华德的人生关键年

回顾霍华德的一生，他以药剂师为职业，却凭借着兴趣在大气领域做出了诸多贡献。他在写给歌德的信中曾提及自己与气象的不解之缘，称自己“被1783年夏天异常的大雾和极光深深地吸引了”。当时霍华德还在私立学校读书，那年的6月8日，冰岛和日本的火山爆发，熔岩如房子般大小，摧毁了很多小镇和村庄，这场灾害导致了疾病蔓延、害虫滋生等很多衍生灾害，这次事件也被一些专家认为是历史上最惨重的一次火山爆发事件。这次火山爆发一直持续到次年2月7日，上百吨酸性物质被喷入大气层中，大量的火山气体在欧洲大陆的大部分地区上空烟雾弥漫，由于天空持续落尘，英国历史也以“尘夏”称呼1783年的夏天。该年，欧洲夏季酷热干旱，冬季严重的暴风雪，给农作物也带来的极大损害。除此之外，当年8月18日晚9时多，天空中出现了奇异的现象，一颗大流星划过北欧上空，英伦三岛等地的居民都看到了这个天体，还是少年的霍华德也在其列。对霍华德进行研究的不少学者都认为历史上难忘的1783年与霍华德后来从事气象学研究存在着某种可能联系，霍华德在后来的回忆中也表示这一年给他留下了非常深刻的影响。

## 2 霍华德对气象学的贡献

### 2.1 对云理论的贡献

在18世纪，气象学尚未成为一门独立的学科，尽管人们尝试创造一系列术语来描述天空的云，但是，自然哲学家和诸多学者很难对其达成一致。造成这一状况的原因之一是由于云的多变使其难以分类，同时人们也认为云的种类过于繁多无法准确命名。最早尝试打破这一局面的是法国科学家拉马克(Jean Baptiste Lamarck, 1744—1829年)，他是一位博物学家，曾于1801年在《气象年鉴》(Annuaire Météorologique)上发表了关于云的分类的论文，用法语命名了五种不

同类型的云，然而这一成果却未能引起重视，甚至在法国都鲜有人关注，原因或许是法语的通用性较弱，也或许是其发表的《气象年鉴》上的天气预报都是基于占星数据的缘故。加上当时法国领袖拿破仑(Napoléon Bonaparte)反对其进行气象学研究，拉马克未能给出更深入的研究。

一年之后，霍华德在爱斯克辛学会上首次公开了学术论文《云的多变形态》(Essay on the Modification of Clouds)，爱斯克辛学会成立于1796年，是由包括霍华德在内的几名来自不同领域的专业人士共同组建的，定期选择不同的主题撰写论文并进行讨论，这里无疑为霍华德提供了良好的学术氛围，也使他的想法得以展示。1803年，霍华德这篇关于云的分类的论文正式发表于《哲学杂志》(Philosophical Magazine)上，名为《云的多变形态，以及它们产生、悬浮、消逝的原理》(On the modifications of clouds, and on the principles of their production, suspension, and destruction)。与拉马克只定义及命名了一定数量的云不同，霍华德着手建立了一套完整的分类体系，力图涵盖所有的云形。他认为云的多种形态与其他大气变量一样，都是隐藏在其背后的物理机制的体现，对古今气象学都起着至关重要的作用。霍华德将云的多变形态称之为“大气的脉搏”，为了让气象学家更好地将分析结果应用到研究其他大气因素中去，同时也为了方便自己的记录简洁准确，才萌生了将云分类命名的想法。他提出尽管云的形状数之不尽，但是独特的云形并不多，认为云的形成过程是基于一定物理机制的大气过程的体现，云的形状也是能够预测的。受到卡尔·林奈(Carl Linnaeus, 1707—1778年)用拉丁语为生物命名的启发，霍华德将云分成了三种基本类型，并用拉丁语为其分别命名为卷云(cirrus)、积云(cumulus)和层云(stratus)。他还认为，这3种云形能够相互转化，在转化过程中的混合型也非常重要，因此，在上述分类的基础上，霍华德还定义了其他4种类型的云(卷积云、卷层云、积层云、卷积层云)。后来，霍华德设计了一套云的形态的速记符号，基本符号为卷云“\”，积云“Λ”，层云“\_”，综合运用便可表示所有云形。关于这七种云形，霍华德对其特征进行了逐一解释(表1)。

从霍华德对云的研究中可以看到，他是一个特别细致的观察者。实际上，除了对云命名外，霍华德对云的形成、云的特性进行了大量的解释和分析，他提出，卷云一般出现在晴朗无云的天气之后，中等尺度的积云多且离地面近、巨型积云少且离地面远，在持

表1 国际云图的分类及定义与霍华德工作的对比

国际云图		霍华德	
名称	定义	命名	描述
卷云	孤立，形态呈白色丝状，或（大部分）呈白色片状或细带。这种云表面呈纤维状，或如丝质光泽，或两者具备。	卷云	密度最小，位于高空中，呈片状和现状。呈平行、弯曲或交叉的絮状，可向任意方向扩散。
卷积云	云薄呈白色，成云层，无阴影，由颗粒状或波浪形的云块或分离或合并组成，较为有序，单独个体小于1°。	卷积云	由纤维状卷云向下扩散而成，呈圆块状。呈小而规则的圆球状，近水平面。
卷层云	呈透明、白色的纤维状，或者表面光滑，可以全部或者部分遮盖天空，常引发光晕现象。	卷层云	由纤维状层云水平扩散而成。单独或是多个云块组成，云块呈水平或轻微向下倾斜的团状，边缘处略薄，向下弯曲或起伏。
高积云	颜色呈白色或灰色，或灰白相间，形状呈片或层。常伴有阴影，由薄片、圆球或滚轴聚集而成，部分呈纤维状或四散，不一定合并在一起。排列较为有序，组成个体小通常在1°~5°。		
高层云	呈浅灰或淡蓝色，表面呈条纹状、纤维状或均匀分布，可遮蔽整个天空，较薄，可朦胧看见太阳，无法造成光晕现象。		
雨层云	呈灰色，较阴暗，形态因连续降水或降雪而四散，雨雪可落地。云厚可遮蔽太阳，常出现在雨层云下，不一定相交。		
层积云	呈灰色或白色，或灰白色，形状呈块状、片状或成云层，大部分有阴影。如棋盘排列，呈圆块状或滚轴状，不具备纤维形态，有时并拢，有时分离。排列较为有序，组成个体大于5°。		
层云	大多数呈灰色，云底较为一致，可带来毛毛雨、冰雹或雪花，透过云层可清晰看见太阳。不会产生光晕现象，除非云层温度极低。	层云	所处海拔最低，呈片状水平扩散。水平面上呈大而连续的片状，从下往上递增。
积云	孤立存在，大部分密度较厚，轮廓分明，垂直伸展，顶部呈圆形或塔状。受日光照射，大部分时候光线都呈明亮，云底则较暗，形状扁平。偶有碎云。	积云	密度最大，位于低空中，在水平基础上，顶部呈球状隆起。水平向上凸起，或成圆锥状。
积雨云	密度大而厚的云层，垂直伸张，通常云顶有部分表面光滑，呈纤维状或条状，也有部分平展如铁砧或羽毛状，云底非常暗，常伴有碎云，降水时呈带状。	积层云	浓密的蘑菇状云，由积云变化而来，是降雨的先兆。卷层云和积云的混合体，具备积云的凸起特点，或是下层基座部分面积较大。
		卷积层云	预示降雨的云。水平云层，在卷云之上，积云从侧面向上横切。

续性小雨过程中，会存在大量混合形态的云等等。

霍华德对云的分类研究对后来气象发展中对云的探索奠定了坚实的基础。在1840年，德国气象学家克米兹（Kaemtz）在霍华德的基础上加入了“层积云”；到1887年，希尔德·布兰得逊（Hilde Brandsson）和艾伯克龙比（Abercromby）合作发表了有关云的分类的论文，依旧延续了霍华德的体系。1891年，国际气象大会（International Meteorological Conference）决议出版云图，1896年第一版国际云图（International Cloud Atlas）面世，作为官方文件被世界各国广泛使用。

对比霍华德的论文可以看出（表1），虽然国际云图中对云的分类描述更加具体，并且详尽到数字，但是整体框架依旧延续了霍华德的体系，在当时缺乏足够的基础数据的前提下，霍华德对云的研究所做出的贡献可谓巨大，虽然他对于云的某些解释和分析并不完全准确，但这种超越时代的思维方式和研究能力足以让后世称颂。

## 2.2 对气候学的贡献

除了关注云之外，霍华德对大气的诸多现象进行研究，并围绕大气这一主题做了不少有价值的工作。1806—1809年，霍华德在《雅典娜神庙》（*The Athenaeum*，这是一本关于文学和其他信息

的杂志）上连载了《气象学记录》（*Meteorological register*），1817年在伦敦北部的托特纳姆（Tottenham）所做的七课时演讲中，霍华德整理了基于高度来划分云的7个变种体系，并完成了关于气象学综合理论的讲稿《气象学七讲》（*Seven Lectures on Meteorology*），这本书在20年之后的1837年得以正式出版，被后人认为是历史上的第一本气象学教材，它包含了大气的组成、风、气候、季节、温度循环、蒸发及降雨、云、暴风雨和气象仪器，并且在最后一章讲述了各种现象包括流星和极光。在《气象学七讲》一书中，霍华德得到了诸多科学家的启发，给气象学做了明确的定义，他认为，“气象学是一门研究大气、天气现象、季节变化以及他们所呈现出的各种有趣现象的科学”。当《气象学七讲》出版时，曾经给过他很多启发的英国化学家道尔顿（John Dalton）这样评价：“我们之间所建立的40年的友谊，其原动力来自于我们对科学共同的爱”。

1818—1820年，霍华德出版了另一本著作《伦敦气候》（*The Climate of London*），这是城市气候学领域比较公认的第一部关于城市气象学的著作，霍华德也被称为城市气候研究的第一人。这部著作研究了城市周围的大气现象和气候特征，并首次提出了热岛的概念。他认为，在温暖的天气条件下，城市的气温会明显高于周围郊区的温度，造成这一现象的一个

原因是城市中吸收热量的公路等一些“暗色设施”增多，也就是现在人们常说的城市下垫面性质的改变，另一原因是城市中各种燃料的大规模使用。他还提出，城市热岛使天气变得更热，空气调节装置的需求大幅增加，导致污染更加严重，形成了恶性循环。对于污染问题，霍华德进一步讨论了独特的伦敦城市雾气——烟和被污染的雾气混合而成的污浊气体，也就是现今的废气问题。这部著作出版后，受到了广泛的关注，因此，1833年又出版了第二版，并将结构增加到3卷。

除此之外，霍华德关于降水理论的研究不为后人广泛知晓。他的论文《降水及大气电的可能原因》(Proximate causes of rain, and on atmospheric electricity)和云的研究在同一时期(1804年)发表在爱斯克辛学会。在文章的开头，他质疑了前人关于降水的一些结论，并提出他在观察大气现象中有一些新的发现。他提出，他写这篇论文的目的在于希望大气中的电能够引起人们的足够重视。遗憾的是，他并没有能够得到关于降水原因的确切结论。不过，该研究的重要意义在于表达了霍华德基于云的研究衍生出其对于大气中电的认识，他认为，与晴天共存的正电荷在降水前常常会转化为负电荷，40%的降水带负电，尽管在这前后大气电荷为正电荷，带正电的降水发生于带正电的大气的概率可能只有15%，没有掺杂雨的雪和雹基本都是带正电的，等。尽管其中一些结论受到辛普森(Simpson)等学者的质疑，但霍华德在大气电学的研究方面仍旧跨出了不小的一步。之后，霍华德对农业产生兴趣，基于他长时间的气象观测资料，研究了伦敦气候的周期性问题的，他认为气候周期性的研究对于农业生产的帮助将是无价的，但是由于观测序列不够长，相关的研究成果尚不足够让人信服。

### 3 霍华德对艺术的影响

霍华德一生最大的贡献是对云进行了命名，同时，他在气象学的诸多领域多有成果，除此之外，霍华德对文学和艺术的影响也值得后人研究。

#### 3.1 对诗人歌德的影响

德国著名的哲学家和诗人歌德(Johann Wolfgang von Goethe, 1749—1832年)是推崇霍华德的文学大师。他认为霍华德的理论与他对艺术和科学的看法不谋而合，希望能为霍华德撰写传记，那时候的歌德已经73岁。霍华德听闻后，当即回复一封长信，详细介绍了自己的家庭、生活、教育以及成长历程。两人通过信件来往，使歌德进一步了解了这位气象天才。歌德为霍华德和他的云类系统专门创作了一系列的诗，

以此向霍华德致敬。据记载，歌德曾经这样评价霍华德，认为霍华德对云的发现激发了人们对天气的关注，人们因此开始注意漂浮的薄雾以及天空的云。从对歌德生平资料来看，歌德除了是一位伟大的诗人之外，还是一位对各类科学非常感兴趣的科学研究者，也许正是因为这位艺术家有着对科学的热爱和追求，才能够受到来自霍华德的重要影响。

#### 3.2 对画家约翰·康斯特布尔的影响

约翰·康斯特布尔(John Constable, 1776—1837年)是英国皇家美术学院的院士，19世纪英国最伟大的风景画家，他在1820—1822年创作了两百多幅包含了云这一元素的油画作品。约翰·康斯特布尔在此期间为何会创作如此多的云题材油画一直被后人所猜测。有研究认为，其创作激情的重要原因之一是受到了霍华德所出版的《关于云的分类》这本著作的影响。有据可依的历史事实是，约翰·康斯特布尔极有可能拥有福斯特(Thomas Forster)于1815年所著的一本《大气现象研究》(*Researches on Atmospheric Phenomena*)，因为约翰·康斯特布尔曾经在给别人的书信中提到，他比较反对这本书中关于气象学理论的一些观点。而在这本书中，有一章节专门记载了霍华德关于云的分类学说。也有人认为，约翰·康斯特布尔本人也是极其热衷于对天气现象的观测，同时，他在1820—1822年创作这些油画时是否看过了霍华德关于云的分类学说也值得考证。尽管霍华德对其作品的影响程度仍旧存在争议，但这也从侧面说明了霍华德关于云的分类得到了各个领域学者的关注和讨论。

#### 3.3 对英国诗人雪莱的影响

前人对雪莱(Shelley, 1792—1822年)的研究表明，雪莱是一位非常热爱观察大自然各种现象的伟大诗人。在雪莱的诗歌《云》(*The cloud*)中，霍华德所命名的各种云形大多有涉及。这里从其诗歌中摘选个别关于对云的描述如下：

雨云：我挥动冰雹的连枷，把绿色的原野捶打成银装素裹，再用雨水把冰雪消融，我轰然大笑从雷声中走过(I wield the flail of the lashing hail, and whiten the green plains under, and then again I dissolve it in rain, and laugh as I pass in thunder)。

积云：我为绿叶披上淡淡的凉荫，当他们沉浸在午睡的梦境(I bear light shade for the leaves when laid in their noonday dreams)。

层云：从我翅膀上摇落下露珠，去唤醒每一朵香甜的蓓蕾(From my wings are shaken the dews that waken the sweet buds every one)。

雪莱的《云》这首诗创作于1820年，涉及了雨云、积云、层云、卷云、卷积云、卷层云这6种云形，雪莱用艺术的形式描述了不同云形的特征，其专业性和清晰度虽然不及霍华德的分类和定义，但却用艺术的手段将云的特性得以流芳百世。值得一提的是，霍华德所定义的卷积层云并未在诗歌中有体现，卷积层云这种云形在霍华德的分类中属于定义最不清楚的一类，在后来人们的改良中也被剔除了，有学者由此推测，雪莱能如此精准地去除了霍华德当时定义不太清晰的卷积层云，也许意味着雪莱对于云的观测并不亚于霍华德。

## 4 结论与讨论

### 4.1 兴趣是科学研究的第一要素

爱因斯坦的名言“热爱是最好的老师”在霍华德的一生研究中得到了很好的诠释和体现。不难想象，没有对气象学足够的热爱，霍华德很难几十年如一日地进行大气现象的观察，也就很难从大量观测事实中去总结规律。真正的科学研究一定离不开坚持和兴趣，竺可桢在《为什么中国古代没有产生自然科学》一文中总结到，中国古人过重实用，缺乏纯粹的科学兴趣和科学精神，导致了与西方的科技水平相差悬殊。尽管当今气象学领域的研究中，一直强调培养创新人才，但是中国自古以来传承的实用主义以及当代科学研究及人才的评价体制的问题，都在一定程度上抑制了个体的科学兴趣，建立一种以科学兴趣为前提的科研体制尚需探讨和努力。

### 4.2 重视观测是气象学研究的基础

进入17世纪以后，科学研究开始倾向于理性思维，并重视观察和实验，在这样的时代背景下，各种观测仪器的发明如雨后春笋般出现，进入霍华德生活的18—19世纪，以观测为基础的气象学研究已经盛行。在这样的时代背景下，霍华德亲眼目睹了1873年这样历史罕见的火山爆发和大流星，直观的感觉刺激对其从事气象学研究起到了助推剂的作用。在霍华德之后几十年的研究中，大量观测事实的记录和积累使他能够从变幻莫测的天气现象中总结出规律的基础和保障。即便今天，重视观测仍旧是气象学研究的法宝之一，没有准确可靠的观测数据，进行科学的气象学研究几乎是寸步难行。

### 4.3 科学可以融入艺术

科学以严肃著称，艺术以美感彰显。关联度貌似不高的两者在霍华德的人生经历中得到了完美的结合。这也给我们一个启示，尽管科学和艺术表达形

式存在差异，但从根源上来看，都是人类认识世界的体现，都是对万千世界创新性的一种描述，都来源于实践和观察。气象学是研究奇妙大气现象的科学，大气现象的变化莫测和大自然的鬼斧神工给气象学平添了艺术的元素，以霍华德研究的云为例，将千姿百态的云用如此简洁的语言表达出来，并为全世界人民知晓，这已经超越了科学本身，这也是为何霍华德能够被很多艺术家所推崇和景仰。霍华德的经历给我们的一个启示，当代气象学的研究在重视严谨科学成果的同时，是否能够更多地融入艺术元素，让气象学的研究成果流传更加广阔和为大众接受。

在霍华德那个年代，气象学尚未成为一门真正的学科，云作为自然界神奇的产物，其纷繁复杂的种类和变幻莫测的形状让很多热爱者望而却步，但霍华德却在坚持不懈的观察中，凭借着超凡的智慧将复杂的云用如此简单的语言表达出来，其思维方式和分类方法在当时最直接的影响是成就了英国海军蒲福（Sir Francis Beaufor）的“蒲福分级”。现在看来，他同样给后人留下了很多值得思考和借鉴之处，历史是一面镜子，古为今用是老生常谈的一句话，但是，如何真正深入地挖掘历史人物中的科学方法和科学思想，在科学史研究的漫漫征程中仍然任重道远。

致谢：本文得到中国气象局“气象科技史研究”项目以及国家自然科学基金项目（41375069）的共同资助。

#### 深入阅读

- Blench B J R, 1963. Luke Howard and his contribution to meteorology. *Weather*, 18: 83-92.
- Boudreau B A, 2012. John Constable's 1821 and 1822 cloud studies: the artist as a scientist? *Weather*, 53(10): 357-362.
- Day J A, Ludlam F H. Luke Howard and his clouds: a contribution to the early history of cloud physics. *Weather*, 2012, 27(11): 448-461.
- Hamblyn R, 2001. *The Invention of Clouds: How an Amateur Meteorologist Forged the Language of the Skies*. New York: Picador Press.
- Ludlam F H, 1972. The meteorology of the ode to the west wind. *Weather*, 27: 503-514.
- Pedgley D E, 2003. Luke Howard and his clouds. *Weather*, 58: 51-55.
- Thornes J E, 1979. The weather dating of John Constable's cloud studies. *Weather*, 34: 308-315.
- Thornes J E, 1984. Luke Howard's influence on art and literature in the early nineteenth century. *Weather*, 39: 252-255.
- 凯瑟琳·库伦, 2014. 破解天气变化——10位气象学领域的科学家. 刘彭, 译. 上海: 上海科学技术文献出版社.
- 刘昭民, 1981. 西洋气象史. 台北: 中国文化大学出版社.
- 杨萍, 叶梦姝, 陈正洪, 2014. 气象科技的古往今来. 北京: 气象出版社.

(作者单位: 中国气象局气象干部培训学院)

# 高被引论文选编

## “龙卷”主题

来源数据库：SCI-E和CAJD，检索时段：2016—2017年

**风险和暴露的动态组合如何改变着龙卷的灾害特征**——Recipe for disaster: How the dynamic ingredients of risk and exposure are changing the tornado disaster landscape. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2018, Vol. 99, No. 1.

人类系统对龙卷灾害的暴露程度，是评估龙卷灾害及其潜在风险的重要组成部分。美国北伊利诺伊大学的Ashley等调查了美国自20世纪中期以来龙卷灾害暴露程度与龙卷风险的相互关系，以及这些动态变量是如何在国家、区域和地方尺度上单独和相互作用，以产生灾害影响和灾难潜力差异的。结果表明，不断增加的建筑环境暴露对龙卷的影响是最大的。不断增加的龙卷灾难概率在不同地形上都不均匀，其中南部地区受到的威胁最大，这是基于巨大的龙卷风的威胁和不断提高的暴露/发展速度的共同作用，这些表现在该地区龙卷灾害导致的高死亡率。研究还表明，风险和暴露的灾难成分在不同的尺度上（国家、区域和地方尺度）有显著差异，而且它们的重叠程度越高，灾难发生的可能性就越大。这些发现对所有的天气和气候灾害都有广泛的意义，短期和长期的缓解战略都需要减少未来的影响，并在危险地区继续和扩大发展的情况下建立恢复能力。

**欧洲的龙卷：观测数据集的融合**——Tornadoes in Europe: Synthesis of the observational datasets. *Monthly Weather Review*, 2016, Vol. 144, No. 6.

1800—2014年，欧洲各地对龙卷的观测不断融合，形成了一种泛欧洲的气候学。基于区域龙卷发生数据集和发表在同行评议期刊

上的文章，英国曼彻斯特大学的Antonescu等分析了它们的演变及对30个欧洲国家龙卷数据库的主要贡献。1800—2014年，欧洲共计报告了9563次龙卷，其中，1800—1850年每年有8次龙卷，而2000—2014年每年有242次龙卷。报告的大部分来自北欧、西欧和南欧，小部分来自东欧，东欧的龙卷数据库是在20世纪90年代以后发展起来的。每年的6—8月是欧洲大部分地区龙卷的高发期，而8—11月是南欧龙卷的高发期。在欧洲大部分地区，龙卷经常发生在13:00—15:00 UTC；在南欧，龙卷经常发生在09:00—11:00 UTC。对强度已知的龙卷进行统计，发现74.7%的龙卷被划分为F0和F1级，24.5%为F2和F3级，0.8%为F4和F5级。通过对比欧洲和美国的龙卷强度分布，可以发现，在西欧和东欧上空的龙卷更有可能是超级单体形成的龙卷，而北欧和南欧的龙卷可能也包括非超级单体形成的龙卷。

**对龙卷风预警区域的感知和预期的即时反应**——Perceptions and expected immediate reactions to tornado warning polygons. *Natural Hazards*, 2016, Vol. 80, No. 1.

为了向人们提供关于龙卷威胁的更具体的信息，美国国家气象局已经用较小的预警区域代替了它的基于县尺度的预警，更明确地指出了危险区域。然而，龙卷预警区域并没有一个关于龙卷袭击概率的标准定义，因此不清楚预警接受者如何理解它们。为了更好地了解这个问题，美国华盛顿大学的Lindell等收集了155名学习心理学导论课程的数据，他们参与了一项龙卷预警区域响应的实验，

作为课程要求的一部分。在查看了每个预警区域后，他们评估了龙卷可能袭击他们的位置，以及他们采取九种不同的反应行动的可能性，这些反应行动包括继续持续正常的活动、进入一辆汽车、到更安全的地方去等。结果显示，参与者认为，在预警区域的质心处，龙卷袭击概率是最高的，在区域内部和外部靠近边缘的地方较低，在其他位置最低。此外，较高的概率值与较低的持续正常活动的期望、从社会来源（但不是环境线索）寻求一些信息的更高的期望、寻求庇护（但不是撤离到他们的车中）的更高的期望都有关。这些结果表明，尽管大多数人在他们的龙卷袭击概率判断中犯了一些错误，但对这些概率的响应却是合适的。总的来说，本研究和其他研究的结果可以帮助气象学家更好地知道人们如何理解与预警区域有关的不确定性，从而改善龙卷预警系统。

**中国江苏省2016年6月23日的龙卷灾害：初步调查分析**——Tornado hazards on June 23 in Jiangsu Province, China: Preliminary investigation and analysis. *Natural Hazards*, 2017, Vol. 85, No. 1.

上海交通大学的Lyu等分析了2016年6月23日江苏省盐城市发生的龙卷灾害。这场巨大龙卷的移动轨迹是从西向东。该龙卷严重影响了江苏阜宁县的硕集、板湖、陈良、新沟、沟墩、吴滩等镇，连同暴雨和冰雹造成了严重的生命和财产损失。由于来自西北的冷空气遇到了相对较冷的水体形成的亚热带高压系统，导致了如此强烈的天气事件。强大的连接气流加强了这一龙卷的发展。根据对这一龙卷的初步调查和分析，建议采用符合成本效益的木结构，在框架的基础上具有足够的锚固结构，并在墙壁和屋顶之间建立适当的连接，以确保住户的安全，以减少类似这样的极端大风事件带来的潜在损失。此外，本研究还建议利用早期预警系统和地

理信息系统 (GIS)、全球定位系统 (GPS) 和遥感 (RS) (3S) 相结合的手段来监测和预报未来的降雨、冰雹和龙卷灾害。

(以上由侯美亭选编)

### “东方之星”客轮翻沉事件周边区域风灾现场调查与多尺度特征分析——《气象》2016年第42卷第1期

2015年6月1日21:30左右长江湖北监利段发生“东方之星”客轮翻沉特大事故。郑永光等根据事发周边陆地区域现场天气调查结果,结合卫星和雷达观测资料分析认为,6月1日21:00—21:40左右事发江段和周边区域发生了下击暴流导致的强烈大风灾害,最强风力超过12级,并具有空间分布不连续、多尺度和强灾害时空尺度小等特征。事发周边区域北部受中气旋影响陆地区域(顺星村、老台深水码头、四台村养猪场附近、新沟子养鸡场附近等)灾情较南部阵风锋及其后侧下击暴流影响的陆地区域更为显著。综合雷达观测资料和现场调查资料分析判断多数调查点灾害为显著微下击暴流所致,其中老台深水码头有龙卷发生的可能。导致此次风灾的强对流风暴气流具有显著的多尺度性;事发周边区域北部的四台村养猪场附近树林中同时发生了多条相邻的微下击暴流条迹,呈现出辐散和辐合交替分布的特征,展示了此次强对流风暴中大气运动的复杂分布特点。虽然下击暴流会伴随中小尺度的涡旋特征,但此次现场调查发现的下击暴流相联系的辐合特征水平尺度仅几十米,远小于弓形回波两端的书挡涡旋或者中涡旋等几千米级的水平尺度。

### 2016年6月23日江苏阜宁EF4级龙卷天气分析——《气象》2016年第42卷第11期

2016年6月23日,江苏省盐城市阜宁县发生了历史罕见的EF4级龙卷,导致99人死亡,846人受伤,并有大量建筑物被损毁。张小玲等利用观测资料对产生强龙卷的天气背景和

中尺度特征进行了分析,发现:阜宁龙卷发生在我国东部龙卷最高发的地区和季节,产生龙卷的天气尺度背景为典型的梅雨期暴雨环流,产生龙卷的中尺度对流系统发生在地面暖锋南侧,这里也是高低空急流耦合的区域,与高空急流相伴的动力强迫特征明显,大气热力不稳定条件为中等偏强;产生阜宁龙卷的中尺度对流系统与美国大部分强龙卷相似,为块状的离散单体对流模态,且具有经典超级单体的钩状回波和强中气旋特征,并伴有龙卷涡旋特征(tornado vortex signature, TVS);龙卷位于钩状回波顶端,主要发生在中气旋底高高度低于1 km期间。

### 2015年5月华南一次龙卷过程观测分析——《应用气象学报》2016年第27卷第3期

陈元昭等利用常规观测、珠江三角洲区域自动气象站、广州多普勒天气雷达、深圳机场廓线雷达及NCEP/NCAR等资料对2015年5月11日下午发生在深圳宝安机场附近的一次龙卷天气过程进行分析。结果表明:这次龙卷发生在500 hPa槽前、850 hPa切变线南侧以及地面冷锋的暖区一侧,上干冷、下暖湿的结构加剧了条件不稳定,环境对流有效位能很大,风垂直切变强,水汽丰富;产生龙卷的回波快速演变为逗点回波,出现钩状回波,龙卷发生在钩状回波内侧的弱回波区附近;与之对应的中气旋旋转速度不断加大,半径减小,并向低层发展。

### 风速等级标准与2016年6月23日阜宁龙卷强度估计——《气象》2016年第42卷第11期

郑永光等回顾了不同的风速等级标准,对导致重大人员伤亡的2016年6月23日江苏省盐城市阜宁县龙卷灾害和2015年6月1日导致“东方之星”客轮翻沉事件的下击暴流灾害进行了较详细的强度评估,探讨了已有等级标准存在的问题,给出了未来工作展望。基于详细的现场调查资料,评估

江苏阜宁龙卷为EF4级,而导致“东方之星”客轮翻沉事件的下击暴流仅为EF1级;对这两个典型灾害个例的强度估计展示了EF等级与F等级之间的差异;但阜宁龙卷导致的每一个受灾点的灾害等级还需要进一步详细评估。由于建筑物结构、植被自身状况、相应环境和致灾机制的复杂性,风灾强度估计必然存在一定的不确定性,且龙卷由于其复杂涡旋动力结构、气压空间分布和卷起的喷射碎片作用等因素使得强度估计的不确定性较下击暴流更大。提高风速等级评估的客观性、普适性、准确性、一致性和便捷性是评估工作的必然需求。未来还需发展综合考虑强度分布、路径长度和宽度、持续时间和移动速度等的风灾等级标准,从而为全面评估下击暴流或者龙卷的致灾性提供基础。

### 近30a中国龙卷灾害特征研究——《暴雨灾害》2016年第35卷第2期

黄大鹏等基于中国气象局气象灾害灾情普查数据库中龙卷灾情数据,采用时间序列统计分析、趋势分析和GIS空间分析方法,对1984—2013年中国龙卷发生频次及其灾情进行了统计分析,同时分析了中国龙卷及其灾害的时空分布特征。结果表明:近30a,中国龙卷灾害年发生次数和龙卷导致的死亡(含失踪)人数、倒损房屋数量和直接经济损失均呈现下降趋势,其中龙卷灾害发生频次和死亡人数下降趋势明显,而直接经济损失下降趋势较弱;中国龙卷灾害发生次数及其导致的死亡人数、倒损房屋和直接经济损失均表现为夏季最多,春季次之,其中,7月龙卷发生次数最多且灾情最重;空间分布上,中国龙卷灾害发生次数和直接经济损失均表现为西少东多的特征,死亡人数和倒损房屋数量主要分布在我国东部偏南地区;西北和西南地区龙卷灾害发生少、灾情轻,而中东部地区的江苏、安徽、湖北、湖南、江西和广东龙卷发生频次高、死亡(含失踪)人数多且经济损失较重,其中江苏和安徽最为严重。

(以上由张萌选编)

## 编辑选编

**不同的灌木树种对夏初温度的响应及其对应的生长模式**——  
Contrasting shrub species respond to early summer temperatures leading to correspondence of shrub growth patterns. *Environmental Research Letters*, 2018, in press.

北极高山生物群落正在经历迅速变暖，这导致了在许多苔原生态系统中，较高的木本物种逐渐取代了较低的物种。在北美西北部，基于遥感的归一化植被指数（NDVI）表明，北极和高山苔原的生产力有所提高，北方森林的生产力有所下降。然而，在同一地点生长的不同灌木对气候驱动的影响在很大程度上仍未被探索。德国波恩大学的Weijers等对比了两种不同物种的生长与气候之间的关系，这两种物种分别是不断扩张的较高的落叶灌木（北极柳）及其周边的常绿矮灌木（四棱岩须），它们皆来自位于加拿大西南育空地区Kluane区域Pika山谷的高山冻原地带。研究发现，这两种物种的年生长变化都强烈受到初夏气温的影响，尽管它们的特征和生境不同。两个物种的灌木生长年表都与区域气候信号相关联，并显示出与附近的高山和北极地区NDVI年际变化的空间对应关系。研究结果表明，在相同的高山环境中，初夏的气候变暖是植被变化的共同驱动力。

**中国的PM<sub>2.5</sub>污染以及因地形和气象条件而加剧**——PM<sub>2.5</sub> pollution in China and how it has been exacerbated by terrain and meteorological conditions. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2018, Vol. 99, No. 1.

最近的严重和频繁的中国PM<sub>2.5</sub>污染问题已经引起了前所未有的关注。从2013年开始，中国许多地区PM<sub>2.5</sub>浓度的小时数据已经可以从网上获取（<http://106.37.208.233:20035>），复

旦大学的Wang等分析了512站的PM<sub>2.5</sub>浓度数据（这些站点的有效数据超过两年以上），并与欧洲和美国的数据进行了对比。研究发现，中国的PM<sub>2.5</sub>平均浓度大约是欧洲和美国的5倍。通过进一步分析大气扩散对空气质量的贡献，发现大气扩散条件是反映大气驱散污染物能力的一个很好的指标，但是美国国家海洋和大气管理局（NOAA）对大气静稳条件的定义并不适用于中国，因为美国的定义依赖于垂直混合，而这在中国因受到地形影响而减弱。为了解决这一不足，本研究提出了一种新的大气静稳条件阈值，该阈值依赖于10 m风速、边界层高度和降水的发生。这种新定义的空气停滞与PM<sub>2.5</sub>浓度的日常变化密切相关。这类事件在中国比欧洲和美国更频繁，尤其是在四川盆地和京津冀地区。如果中国与欧洲有相同的大气静稳频率，那么在秋季和冬季，67%和82%的站点的目前的空气质量将分别得到改善（例如，冬季京津冀地区PM<sub>2.5</sub>浓度平均下降12%）。因此，在中国，严重污染和频繁的大气静稳条件使得对排放的控制需要比其他地方更为严格。

**近期全球变暖期间中国极端低温的弱的变冷与极端高温的持续加剧**——Weak cooling of cold extremes vs. continued warming of hot extremes in China during the recent global surface warming hiatus. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, in press.

使用1960—2015年中国437个气象站的日最高气温（ $T_{\max}$ ）、日最低气温（ $T_{\min}$ ）、日平均气温（ $T_{\text{mean}}$ ）数据，中国科学院东北地理与农业生态研究所的Shen等分析了平均气温和极端温度概率分布的变化。分析证实，在1998年以后，年平均 $T_{\max}$ 和 $T_{\min}$ 在中国经历了变暖停滞。变暖停滞也反映在中国各地极端低温的弱的变冷，但是极端高温天气继续在全国范围内、以及在中国东部、西南地区

和青藏高原等不同气候区呈现显著变暖趋势。1999—2015年，全国范围内高温天数（ $T_{x90}$ ，以1961—1990年为基准时段）和每年90百分位以上的平均 $T_{\max}$ （ $T_{xp90}$ ）分别显著增加了3.70 d/10 a和0.20°C/10 a；但是，在中国东部和东南部，同时段内，极端低温呈现出显著的变冷趋势。在变暖停滞时期内，中国东部和东南部的暖季降水的显著下降导致了不断升温的极端高温天气。而在东北地区和华北平原，暖季太阳辐射的下降和暖季降水的增加，有利于极端高温天气的弱的降温趋势。虽然在1998年之后，平均气温经历了变暖停滞，但持续变暖的极端高温天气和极端降温从变暖到弱的变冷的转变，都反映了中国温度变率的增加。

**降水变率对全球牧场的重要性不断增加**——Increasing importance of precipitation variability on global livestock grazing lands. *Nature Climate Change*, 2018, Vol. 8.

牧场及其提供的肉类和牛奶生产是全球数百万依赖牲畜获取粮食安全的关键资源。对气候变化依赖程度很高的牧草生长，在气候变化方面可能很脆弱，而这种脆弱性的程度、以及哪些区域更为敏感，都还有待探索。为此，美国明尼苏达大学的Sloat等评估了全球牧场的气候威胁，重点评价了年内降水变率（降水集中度，PCI）和年际降水变率（降水变化系数，CVP）的变化对牧场的影响。通过分析大尺度植被绿度（如归一化植被指数）与关键气候因素的关系，发现CVP是一个重要的、但经常被忽视的因素，其限制了全球牧场的植被生产力。使用独立的畜牧数据，发现具有高CVP的区域比CVP较小区域的牲畜密度更低。在全球范围内，牧场的降水年变化（ $CVP = 0.27$ ）比全球陆地平均CVP（0.21）要高。在过去的一个世纪，CVP在牧区普遍增加，尽管有正的（49%的牧区）和负的（31%的牧区）趋势存在。本研究确

定了牲畜放牧对当地食物和经济具有重要意义的区域，并讨论了在长期的区域降水变化趋势的背景下，草场放牧强度的潜力。

(以上由侯美亭选编)

### “预报失败分析”专辑——《气象》 2018年第44卷第1期

本期,《气象》杂志针对暴雨预报、弱降水预报、台风路径预报、北京初雪预报、沙尘天气预报等预报失败案例组织了17篇稿件,来进行预报偏差原因分析。其中,漆梁波等对2016年7月9日豫北特大暴雨的短期预报决策过程进行了总结和反思,主要结论如下:1)此次降水过程存在明显的对流云团之间的合并及组织化过程,这些过程涉及中小尺度系统相互作用。作为重要业务参考的全球模式(包括确定性和集合预报)均未能提前(24或12 h)对此次暴雨过程做出有效预报或提示。2)高分辨区域模式和快速同化更新系统大多表现出更好的预报能力,可提前12或6 h提示预报员豫北地区有暴雨或大暴雨。3)特大暴雨过程预报失败的主要原因是预报员过份依赖全球模式的结果,缺乏使用高分辨区域模式产品的经验或对这些模式产品信心不足。高分辨区域模式在投入业务运行之前,需加强对预报员的系统性培训,才能更有效地发挥这些模式产品的业务效能。4)在现有QPF业务流程中逐渐增加概率产品的使用,既符合新技术的发展趋势,也可望对暴雨或极端降水的预报提供更有效支撑。谌芸等对北方一次暖区大暴雨降水预报失败案例进行了剖析。2013年7月1—2日河北、天津等地出现了一次区域性大暴雨过程,降水由锋前暖区降水和锋面降水组成,特别是冀中的特大暴雨(409 mm·(24 h)<sup>-1</sup>)暖区降水占60%以上。预报员对此次过程的预报量级显著偏小,特大暴雨、暴雨均出现漏报。各家数值模式预报均不能给预报员提供足够的有用信息,给预报带来很多困难,

导致预报的失败。文章利用业务预报中常用的数值预报产品、加密自动站观测资料、常规地面、高空观测资料、新一代天气雷达资料等对此次北方暖区暴雨预报失败案例进行剖析,结果显示:高温高湿的环境中,未能捕捉到可触发对流的次天气及以下尺度的小扰动,如地面辐合线、阵风锋、冷池及中尺度涡旋等及其对强降水的影响,加之对中尺度对流系统的环境场条件,如低空急流、急流核的发展演变等的精细分析不足是导致强降水预报量级偏弱的重要因素;对于发生在深厚暖湿气团中的暖区降水的预报,需考虑高温高湿环境下地面辐合线、冷池及中尺度涡旋的相互作用对对流的触发及组织化发展导致的局地性、对流性强降水的产生;基于地面自动站资料和雷达资料等的短时临近预报可以弥补全球数值预报对中小尺度系统的捕捉能力的不足,提高暖区暴雨的预报准确率。

### 北方蒸散对气候变暖响应随降水类型转换特征——《科学通报》2018年第63卷第11期

地表蒸散量是对全球气候变暖响应最显著的水分循环分量,但以往不同研究得出的气候变暖背景下各地地表蒸散量的变化趋势差异很大,有时甚至表现出相反的趋势。然而,对于地表蒸散对气候变暖响应的差异性具有怎样的规律以及是何原因造成了这种差异至今也并不完全清楚。为此,张强等在对中国北方地区的蒸散量格点资料(FLUXNET)和全球陆面同化资料(GLDAS)进行观测试验验证的基础上,利用可靠性相对较高的蒸散量格点资料及以往研究常用的CRU和ERA-Interim气候格点资料,分析了我国北方不同降水气候空间类型时地表蒸散量对气温增加的响应特征。分析发现:地表蒸散量对气温升高的响应程度随降水气候类型不同变化比较明显,地表蒸散量的增温倾向率表现出随降水气候类

型变化的显著转换特征。降水量在200~400 mm的气候区间时,正好是倾向率发生转折的气候敏感区间;在更湿润气候类型时,气候越湿润,地表蒸散量随气温升高增加的就越明显;而在更干燥气候类型时,气候越干燥,地表蒸散量反而随气温升高减少的越明显。地表蒸散量对气候变暖的这种响应特征在全球其他气候过渡比较明显的典型地区也有不同程度的表现。同时,就地表蒸散量对气候变暖的响应机制而言,主要有气温升高直接引起的潜在蒸散力增加与气温升高通过蒸散过程造成的土壤水分损失再反过来间接抑制蒸散这两个作用过程。前者在湿润地区起主导作用,导致蒸散增强;而后者在干燥地区起主导作用,导致蒸散减弱。

### 欧洲历史上气候变化与鼠疫的关系——《中国科学(地球科学)》 2018年第48卷第2期

先前对气候变化与鼠疫关系的研究主要是针对短期气候变化对鼠疫传播的实时影响。此外,科学家们对于气候变化如何影响鼠疫传播仍然存有分歧,主要原因是相关研究的时空跨度过小,影响了气候变化与鼠疫传播动态关系研究的全面性。余柏康等通过整合前工业时期欧洲414年的鼠疫爆发记录和相应的欧洲大陆和国家的气候数据,采用普通最小二乘回归分析与小波一致性分析发现,在以下各个层面上,包括气候及大规模气候现象、欧洲大陆及国家尺度、年际及数年际尺度和线性及非线性统计方法,只有少量证据支持气候和大规模气候现象与鼠疫传播存在显著相关性。这一“零结果”并不否定先前有关气候和大规模气候现象与鼠疫传播关系的研究结论,但文章认为,在解释历史上和预测当代全球气候变化背景下的鼠疫传播时,需要全面考虑研究本身的时空跨度、研究方法的稳健性和研究地区的地理背景等因素。

(以上由张萌选编)

## 《《涓流细雨》》 贾朋群 编辑

“We've detected unexpected decreases in the lower part of the stratospheric ozone layer, and the consequence of this result is that it's offsetting the recovery in ozone that we had expected to see.”

“我们探测到平流层臭氧层下层意外的减少,其后果是它正在抵消掉我们一直期待看到的臭氧恢复。”

——一直以来,南极臭氧洞的逐步恢复被认为是现代环境治理(指1987年《蒙特利尔条约》的签订和实施)的成功案例,但是,近日一支由22位科学家组成的国际专家组对此提出了质疑,位于瑞士达沃斯物理气象观测台科学家William Ball如是说。他领导的这个国际专家组更多地关注人口众多的低纬地区,发现那里的臭氧含量发生了难以解释的下降。相关的研究论文已经在Atmospheric Chemistry and Physics上发表。

“The long-term temperature trend is far more important than the ranking of individual years, and that trend is an upward one.”

“温度的长期趋势较某个年份的排名重要得多,而这个趋势是向上的。”

——据世界气象组织分析,2016年全球温度较工业化前升高了1.2°C,是最暖年;而2017年升高的幅度为1.1°C,是非厄尔尼诺年的最暖年,会提高全球年温度。针对这些数据记录和分析,世界气象组织秘书长Petteri Taalas发表了自己的看法。

“This is almost certainly a conservative estimate. Our extrapolation assumes that sea level continues to change in the future as it has over the last 25 years. Given the large changes we are seeing in the ice sheets today, that's not likely.”

“这几乎肯定是一个保守的估计。我们的推断假设海平面未来的变化是过去25年的持续。考虑到我们今天见到的冰盖大的变化,这几乎是不可能的。”

——美国学者在最新的研究中指出,全球海平面升高的速度在最近几十年里在加速而非保持平稳升高。研究借助NASA和欧洲卫星数据得出到2100年,全球海平面将升高65 cm。谈到这个结果,最新发表在PNAS上的相关研究论文的第一作者Nerem的话中不无更多的忧虑。

“Much of what we currently know about Southern Ocean cloud, aerosol, and precipitation properties comes from satellite-based estimates, which are uncertain and have undergone few comparisons against independent data. The data collected during SOCRATES will also enable us to evaluate current satellite data over the Southern Ocean, as well as potentially help in the design of better satellite-based techniques.”

“我们目前针对南大洋云、气溶胶和降水特征的认识很多来自基于卫星的估计,具有不确定性且很少和独立数据进行比较。SOCRATES项目期间收集到的数据还能让我们评估当前南大洋卫星数据,有可能帮助设计出更好的基于卫星的技术。”

——2018年伊始,南大洋云、辐射、气溶胶传输试验研究(Southern Ocean Clouds, Radiation, Aerosol Transport Experimental Study, SOCRATES)国际项目持续6周的外场

试验如期开展,多方位获取的数据使此次外场试验被寄予很大希望,其意义如试验合作负责人,来自华盛顿大学的Roger Marchand所言,具有一定的开创意义。

“The Weather Channel is a great fit with our portfolio. We're going to invest to provide weather news nationally and globally.”

“天气频道与我们的投资方向高度吻合,我们将在国家和全球天气新闻上投入。”

——据媒体报道,1993年成立,总部位于洛杉矶的媒体公司Entertainment Studios出资3亿美元购得天气频道的母公司天气集团,这也是该集团历史上最大的一起收购。该媒体公司的拥有人Byron Allen先生用上述简约的语言诠释了这一收购。据悉,天气频道公司拥有400位雇员,Entertainment Studios一年来一直寻求收购该公司,并且在过去3~4个月着手实施。Byron Allen先生还表示,这一收购只是其在未来5年投资数十亿美元兼并媒体资产战略的一部分。不过,这笔并购并不包括天气集团流行的数字和移动销售部分,如Weather.com网站等,后者于2015年以大约25亿美元的价格被IBM购买。

“I'm super excited. I think, at the same time, really humbled. I'm a forecaster and meteorologist at heart. I've been telling everybody I've wanted to do this since I was 7 years old. We're in the heart of preparedness season. So I'm going to really hit the ground running, talking to folks about preparedness for the hurricane season. It's going to be a quick ramp-up.”

“我超级激动。我想,同时也感到责任重大。我在心底是一名预报员和气象学者。当我7岁时就一直告诉他人我想研究气象。我们位于飓风季的中心,所以我确实要积极着手做好准备,告知人们应对飓风季节。这将是一个快速的过渡期。”

——美国媒体以《一名资深预报员被选中统领美国飓风中心》为题,报道了在新飓风季节来临前,美国飓风中心新主任到任的信息。面对媒体,这位预报员出身的美国气象局官员如是说。据悉,该中心前任主任是2012年到任的Rick Knabb,自2017年5月他又回到之前工作的天气频道公司。

“This process is similar to what happens when you put oil and water in a container, with the oil floating on top because it's lighter and less dense. The same happens near Antarctica with fresh glacial meltwater, which stays above the warmer and saltier ocean water, insulating the warm water from the cold Antarctic atmosphere and allowing it to cause further glacial melting. We found that in this way increased glacial meltwater can cause a positive feedback, driving further melt of ice shelves and hence an increase in sea level rise.”

“这一过程和你在容器里加入油和水类似,油会因为较轻和比重小而浮在上面。同样的情形发生在南极附近,冰川融化的淡水,保持在较暖和更咸的海水上面,将暖水与寒冷的南极大气隔离开,并使得冰川进一步融化。我们发现这一增加冰川融水机制能引起正反馈,带来冰盖持续融化,因而使得海平面加速提升。”

——澳大利亚和日本学者在最新的研究中,揭示了之前被忽视的冰川融化和海平面上升的过程,即冰川融化水使得海洋表面层盐度下降,浮力增加,避免了冬季与深层海水的混合,使得深层暖海水继续从下方融化冰川,研究论文的第一作者,博士生Alessandro Silvano解释了这一机制。

2018年世界气象日，围绕主题“weather-ready, climate-smart”各方政要及专家诠释和表达了对主题的理解和认识。

“Now more than ever, we need to be weather-ready, climate-smart and water-wise. This is because the ever-growing global population faces a wide range of hazards such as tropical cyclone storm surges, heavy rains, heat waves, droughts and many more. WMO is therefore working to establish a global and standardized multi-hazard alert system in collaboration with National Meteorological and Hydrological Services worldwide.”

“目前我们比以往更需要天气有序、气候智能和水智慧。这是因为全球人口不断增长面对更广泛的灾害，如热带气旋风暴潮、暴雨、热浪、干旱等。因此，WMO致力于和全球国家气象及水文部门合作，建议全球化和标准化的多灾种预警系统。”

——WMO秘书长Petteri Taalas阐述了2018年气象日主题的意义所在，表达了WMO体系将把工作的重点从天气如何预报转移到更加关注天气造成什么结果上来。

“[We] take our commitment to delivering life-saving information to people in need even further with AccuWeather Ready, to educate and inform people with new weather preparedness updates and tools when it matters the most, personalizing the weather so people can improve their lives.”

“我们更进一步借助AccuWeather的有序平台，努力向需要的人提供保护生命的信息，当出现险情时向人们展示和传播灾害预防的新知识和工具，个性化天气信息让人们改善其生活。”

——美国天气企业之一AccuWeather气象学者和产品经理Becky DePodwin借气象日表达了该公司的理念和价值所在。

“Scientists are now worried that unless accelerated action is taken by 2020, the Paris goal may become unattainable. I am beginning to wonder how many more alarm bells must go off before the world rises to the challenge. Climate change is still moving much faster than we are.”

“科学家目前担心，除非在2020年前加速采取行动，否则巴黎目标无法达到。我现在开始怀疑，在世界接受挑战前还需要增加多少敲响的警钟。气候变化还在比目前更快的速度向前推进。”

——在世界气象日后一周，联合国秘书长在纽约总部和记者谈起气候变化巴黎协定及相关目标时做出了上述表态。语气中透露了一些无奈和对未来更多的忧虑，希望以此态度唤醒更多的人认真对待气候变化问题。

(上接69页)

管理，往往是重“收集”轻“使用”，收归收、管归管、用归用，“管”“用”两张皮，没有很好地结合起来，使一些有价值的气象影视资料一旦收集起来就“束之高阁”，失去了收集资料的本来意义。其中原因很多，有些是因为查找不方便，有些是使用者不了解，有些是服务不周到，有些是气象影视资料不齐全等。内容的“收”与“用”是辩证的统一，收多了自然好用，用好了自然促收，两者不可偏废，而要相互促进。

例如，在2017年第21号台风“卡努”的应急服务工作中，中国气象频道背靠中国气象局气象影视中心的专业影视资源，率先制作了动画表现形式+网络语式的《台风来了，要准备什么》的短视频，及时在各大平台推送，在不到两天的时间里就吸引了382万次的点击量。与此同时，在台风即将登陆前，频道还快速将预警中心船只回航实时监测图制作成短视频，通过今日头条、新浪微博、微信公众号、腾讯新闻、网易新闻、新浪“一直播”等多个新闻社交媒介平台的推送，引发网友热度转发。

新媒体的崛起和迅速发展给传统媒体带来了强烈的冲击，面对庞大的传播市场需求和新媒体的特色化要求，传统媒体必须依靠现代化的媒体资产管理，实现内容资源的重新整合、分类、开发和利用，以适应新媒体环境下气象影视资料多种传播形态的特色化、专业化需求。

各气象影视制作机构只有更好地、更有针对性地开发利用好长期积累的气象影视资料，才能在以后的发展中提高工作效率，在新媒体背景下更多的开展多种业务，使自己特有的无形资产——气象影视资料，成为新的经济增长点。

#### 深入阅读

- 陈川予, 2002. 广播节目制作成本管理分析. 声屏世界, (6): 41-42.  
冯敏园, 周建, 2003. 网络时代的新闻资料工作. 当代电视, (12): 58-59.  
林红, 张松, 2002. 充分利用新技术 大力推广媒体资产管理. 山东视听, (11): 63-64.  
王刚, 2002. 论电视节目制作中的资料管理. 西部电视, (2).  
叶家铮, 2000. 电视传播理论研究. 北京: 北京师范大学出版社.

(作者单位: 中国气象局公共气象服务中心)

### 《地球大数据》创刊 2018年2月

地球科学领域大数据开放获取国际学术刊物《地球大数据 (Big Earth Data)》正式创刊。该刊是全球地球科学领域的第一个大数据刊物,由国际数字地球学会 (ISDE)、中国科学院遥感与数字地球研究所、中国科学院战略性先导科技专项“地球大数据科学工程”、英国Taylor&Francis出版集团,以及中国科技出版传媒股份有限公司联合出版。中国科学院遥感与数字地球研究所郭华东院士出任主编。

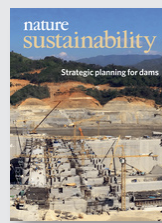


### 《科技问题》 2018年冬季

这本由美国科学院编辑的期刊,本期封面瞄准了美国基础设施如何应对未来更为激烈的天气变化问题。美国高校和林业局的作者就该问题发表文章,阐述了需要采取行动的3条建议。

### 《自然:可持续性》 2018年2月

这是《自然》子刊系列2018年3份新创刊的期刊之一,该刊致力于发表自然科学、社会科学和工程领域中有关可持续发展的重要原创性研究,促进跨学科进行重要对话,以应对时代重大挑战。该刊两期封面报道聚焦水坝的战略规划问题,多国学者针对湄公河情形给出了分析。



### 《联合国世界水资源开发 报告2018》 2018年3月

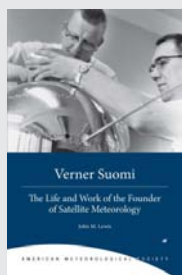
这一系列出版物2018年的主题为“基于自然的水资源解决方案”。报告认为,基于自然的解决方案 (NBS) 取灵感于自然,获支撑于自然,是使用或模仿自然过程,致力于改善水资源管理的解决方案。报告指出,尽管针对基于自然的解决方案的投资日益增长,但有证据表明,这部分投资占水资源管理基础设施投资的比例还不到1%。

## 媒体扫描 贾明群 编辑

# MEDIA SCAN

### 《气候变化情形下冬季运动的 经济贡献》 2018年2月

美国非政府组织报道的这篇最新分析报告,解析了冬季雪运动旅游对美国及州经济的贡献。报告在2012年分析报告的基础上,进一步分析了2001年以来温度升高的冬季运动对旅游业的影响,指出气候变化正在严重挤压美国冬季运动旅游业。

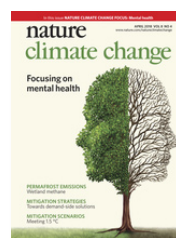


### Vernor Suomi 2018年2月

美国气象学会最新推出的这本传记,如本书的副标题所示,记录了Vernor Suomi先生作为卫星气象学的创始人的生活和工作。这本204页的书籍,讲述了一位科学家、发明家和教师围绕气象和卫星的传奇一生。

### 《自然: 气候变化》 2018年4月

本期封面报道聚焦气候变化与人类心理健康。该领域的讨论一般并不包括在气候变化对人类影响的学术讨论中,本期的数篇文章探索了气候变化影响人类心理的不同方式,指出了未来研究的重要方向。



### 《云彩收集者手册》 2018年3月

这本由译林出版社翻译出版的图书,瞄准体现地球“颜值”的重要方面——云彩,著者借助105位来自世界各地的赏云达人提供的云彩图片,谈论云彩的奇妙之处。读者可以借助这本书,认识46种云彩和大气光学现象。

**Supervisor** China Meteorological Administration (CMA)  
**Sponsor** CMA Training Centre  
**Published by** Editorial Office of Advances in Meteorological Science and Technology

**Honorary Editor** Chou Jifan, CMA Training Centre

**Editor-in-Chief** Xu Xiaofeng, CMA

### Associate Editors-in-Chief

Wang Zhiqiang  
Xiao Ziniu  
Zhai Panmao  
Luo Yunfeng  
Li Weijing  
Hu Yongyun  
Tan Zhemin  
Sun Jian  
Fei Jianfang  
Zhao Licheng  
Zhang Peng  
Guan Zhaoyong  
He Jianxin  
Huang Jianping  
Liao Xiaohan  
Jia Pengqun (executive)

### Managing Editors

Cheng Xiuhu, Gao Xuehao, Gong Jiandong, Guo Hu, Guo Xueliang, Li Bai, Li Guoping, Ni Yunqi, Qu Xiaobo, Ren Guoyu, Ren Xiaobo, Shen Wenhai, Wang Cunzhong, Wang Weidan, Wu Bingyi, Yang Xiuqun, Yu Xiaoding, Zhang Chaolin, Zhang Qingyun, Zhao Ping

### Editors

Bi Baogui, Bin Wang, Chen Jingming, Chen Yunfeng, Chen Zhenlin, Cui Chunguang, Cui Jiangxue, Dong Wenjie, Du Jun, Feng Guolin, He Jinhai, He Qing, Hu Xin, Hu Yuewen, Jiang Tong, Jin Feifei, Lei Xiaotu, Li Jiming, Li Jun, Li Liangfu, Li Yaohui, Li Yueqing, Li Zhongming, Liang Xudong, Liu Jingmiao, Liu Liping, Liu Licheng, Liu Shi, Liu Zhengyu, Lu Naimeng, Lu Riyu, Luo Bing, Luo Yali, Ma Shuqing, Ma Yaoming, Peng Yinghui, Pu Yifen, Song Yan, Suo Miaoqing, Tang Xu, Tian Hong, Wan Qilin, Wang Bin, Wang Donghai, Wang Jianlin, Wang Shigong, Wang Yanqing, Wang Yingchun, Wang Yuan, Wang Zifa, Wei Xiaoli, Wen Min, Weng Fuzhong, Wu Liguang, Xie Zhihui, Yan Guanhua, Yan Xiaodong, Yang Ping, Yang Song, Yang Zhaoming, Yao Xuexiang, Yi Lan, Zhai Wuquan, Zhang Dalin, Zhang Guangjun, Zhang Lixiang, Zhang Xiaoling, Zhang Yuetang, Zhao Guangzhong, Zhou Dingwen, Zhou Jianhua, Zhou Lingxi, Zhou Xianxin, Zhu Dingzhen, Zhu Xiaoxiang, Zhu Yujie, Zhu Yande, Zou Liyao, Zou Xiaolei

### Editorial office

Zhang Meng, Hou Meiting, Qin Lianxia, Ji Wenbin, Jiang Jianmin

Add: CMA Training Centre, 46 Zhongguancun Nandajie,  
Beijing 100081, China  
Tel: +86-10-68409927/68409933  
Email: amst@cma.gov.cn  
<http://library.cma.gov.cn/amst>  
<http://weibo.com/2115232930/profile>

### Printed by

Beijing Jinjishi Printing Limited Liability Company

ISSN 2095-1973

CN 10-1000/P

RMB 30.00

## Main Contents

(Special Issue: Tornado Study and Its Prediction)

(Invited Editors: Du Jun, Gao Jidong, Zhang Xiaoling)

1 Xu Xiaofeng/ Message from the Editor-in-Chief

### Article

- 8 Wang Donghai, Li Zhaohui, Gao Zongting, Liu Chongjian, Zhu Jianjun, Yan Lijun, Du Jun/ A Comparison of Statistical Characteristics and Research Progress of Tornadoes in China to that in Europe and USA
- 24 Gao Shouting, Zuo Qunjie, Yang Shuai/ A Preliminary Study on the Dynamics of Tornado Formation
- 28 Yao Dan/ Recent Progresses in the Numerical Simulation of Tornadoes
- 36 Qian Weihong, Leung Jeremy Cheuk-Hin, Luo Weimeng, Du Jun/ Examining Performances of Numerical Models in Predicting Tornado Environmental Systems
- 44 Zheng Yongguang, Zhu Wenjian, Tian Fuyou/ Environmental Conditions, Structures, and Mechanisms of Convective Storms of 2015 "Oriental Star" Capsizing Event and 2016 Funing EF4 Tornado
- 55 Zheng Yongguang, Tian Fuyou, Zhou Kanghui, Zhu Wenjian/ Forecasting Techniques and Damage Survey of Convectively Driven High Winds and Tornadoes

### Survey

2 Picture/ Number/ Ranking

### Feature

- 6 Du Jun, Xue Ming/ FACETS: An Innovative Storm Prediction System for Tornado, Large-Size Hail and Localized Heavy Rain Being Developed at NOAA
- 62 Zhang Meng/ A Bibliometrical Analysis of the Scientific Literature on Tornado

### Forum

- 64 Duan Jinglei/ Analysis on the Multi Dimensional Model of China Weather Channel in the Multimedia Integration Environment
- 68 Liu Yinfeng/ A Preliminary Study on Values in Redevelopment and Utilization of Meteorological Videos in New Media Context

### History

#### People

- 70 Yang Ping, Deng Jingmian, Zhang Meng/ Luke Howard: The Father of Meteorology of England for Clouds

### Reading

#### Information

- 75 Selected Papers