

Advances

in Meteorological Science and Technology

气象科技进展

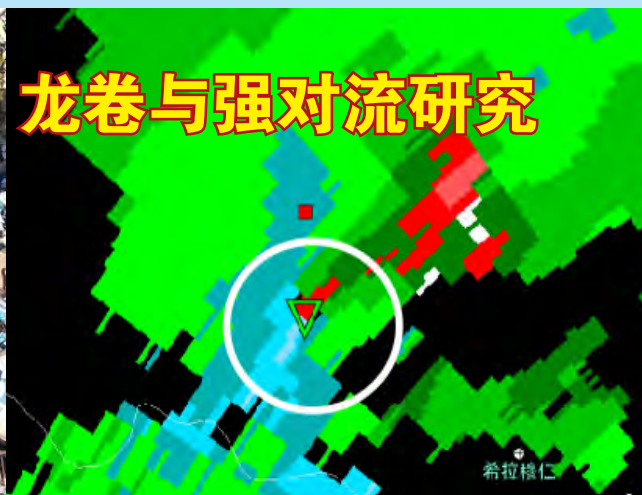
ISSN 2095-1973
CN 10-1000/P

No.6

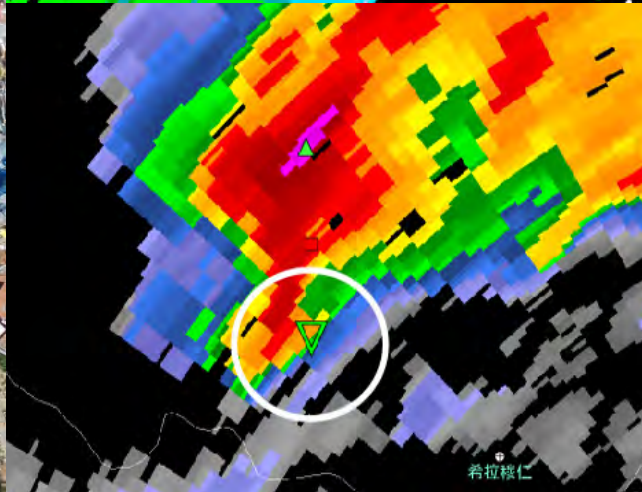
2020年12月20日
第10卷 第6期



进展报告2020: 龙卷与强对流研究



希拉穆仁



希拉穆仁



出现



15:36



15:38 减弱趋势

2020年8月达茂旗龙卷过程



中国气象局气象干部培训学院
中国气象学会

主办

主管 中国气象局
主办 中国气象局气象干部培训学院
中国气象学会
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
王金星 中国气象学会
肖子牛 中国科学院大气物理研究所
翟学祥 中国气象科学研究院
姚学祥 中国气象局
李维京 国家气候中心
胡永云 北京大学
谈哲敏 北京大学
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
廖小罕 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)

陈金阳	成秀虎	龚建东	郭虎	郭学良
李柏	李国平	罗云峰	倪允琪	曲晓波
任国玉	任小波	沈文海	王存忠	王怀刚
武炳义	熊绍平	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
雷小途	李集明	李俊	李良福	李耀辉
李跃清	李忠	梁旭东	刘晶	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	宋燕	索沙清	汤绪	田红
万齐林	王斌	王斌(海外)	王东海	王建林
王式功	王卫丹	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	伊兰	于玉斌	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	邹立尧	邹晓蕾

编辑部

张萌 侯美亭 李莉 冀文彬 江剑民
崔晓军

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

网址: <http://cmalibrary.cn/amst>

投稿系统: <http://qxkjjz.cbpt.cnki.net/EditorCN/Quit.aspx>

印刷: 北京金吉士印刷有限责任公司

本期责任编辑: 侯美亭 张萌

ISSN 2095-1973

CN 10-1000/P

定价: 30元

目次

第10卷 第6期 2020年12月20日

(内含: 进展报告2020“龙卷与强对流研究”)

1 许小峰: 主编语

科学观察

- 2 许小峰: NEXRAD: 走进“新一代”——天气雷达探测技术的起步与发展
- 8 张文建: WMO走过70年: 中国气象与世界共同发展

进展报告 2020 龙卷与强对流研究

支持单位: 佛山市龙卷风研究中心

11 俞小鼎: 对佛山市龙卷研究中心的几点印象

特写

- 12 贾朋群, 李兆明: 关注龙卷将我国激烈天气研究引向深入——记2020年全国龙卷学术交流会
- 14 高玉春, 陈浩君, 步志超, 陶法, 徐鸣一, 王箫鹏, 张乐坚, 李瑞义, 文浩, 马舒庆: 从第39届国际气象雷达会议看相控阵天气雷达发展
- 19 姚聃: 龙卷预报预警体系建设——气象现代化的前沿挑战
- 52 褚红星, 麦文强: 佛山靶向发布系统应用成效显著

研究进展

- 23 李婉仪, 黄先香, 蔡康龙, 植江玲, 张晶晶, 周晓仪, 田良钰: 2020年5月31日佛山超级单体龙卷过程分析
- 28 植江玲, 李彩玲, 蔡康龙, 黄先香: 雷州半岛一次台风外围龙卷天气过程分析
- 34 周晓敏, 郑永光: 2020年梅雨期江苏两次龙卷过程环境背景和龙卷母风暴形态特征分析
- 43 顾伯辉, 黄先香, 张少婷, 植江玲: 瞬时扰动法在佛山一次台风龙卷的环境背景分析和模式预报中的应用
- 53 蔡康龙, 植江玲, 李彩玲, 黄先香, 李兆明, 彭斯琪: 微型无人机在龙卷灾情调查中的应用
- 60 郭瑞玲, 钟立华, 麦玲玲, 余晓健, 王硕甫, 梁华玲, 蔡康龙, 黄先香: 佛山初春冰雹天气层结构及雷达特征初探
- 69 郑永光: 中国龙卷气候特征和环境条件研究进展综述
- 76 郑艳, 林正扬, 蒋贤玲: 海南龙卷统计特征
- 80 张羽, 田聪聪, 傅佩玲, 黄辉: 广州X波段双偏振相控阵天气雷达观测试验进展
- 86 张晶晶, 李兆明, 黄先香: 佛山强降水与微压计滑动离散功率谱前置信号关联分析
- 90 褚红星, 李兆明, 麦文强, 杨云茜: 网络媒体信息在海南8.29龙卷灾情调查中的应用分析

主编语

龙卷是一种空间尺度小、突发性强、生命史短、破坏力很大的天气系统，无论是对其监测捕捉，还是预报预警，从技术角度看，都属难中之难的问题。

2013年，广东佛山成立了全国第一个龙卷专门研究机构——佛山市龙卷风研究中心，尝试对龙卷监测预警这道世界性难题有所突破。2018年，他们成功发布了三次龙卷预警，可以说是经过几年努力后所取得的可喜成果。2019年，他们开始启动X波段相控阵天气雷达网建设，目前已完成七部小雷达组网，并投入业务应用，全部建成后将极大提升探测和跟踪中小尺度天气系统演变的能力，同时也将进一步提高对其他灾害性天气的预警能力。本刊从2018年开始对该龙卷风研究中心进行追踪报道，不定期刊登相关进展文章。本期专刊更是汇总了该中心及合作部门在龙卷过程研究(P23、P28、P34)、观测试验(P80)、灾害调查(P53)等方面的进展以及经验，期待对龙卷等强对流天气的研究者和相关机构带来有益的启发。

如果说相控阵雷达为龙卷监测带来了更多期待，那么无人机观测技术则为龙卷灾后调查与龙卷定级提供了有力支持。近年来快速发展的无人机，可方便迅速地获取龙卷灾情的高清图像，有助于判断龙卷的移动路径。本刊编辑专门参与了佛山市龙卷风研究中心于2020年8月针对内蒙古达拉特旗龙卷的现场

灾调工作，直观感受到无人机所发挥的优势。虽然我国龙卷发生概率较低(P69)，但近几年出现的多个强龙卷事件引起了极大的社会关注。现代通信技术与社交媒体的快速发展，也使得龙卷等气象灾害信息能够迅速被公众获取(P90)，而借助各种媒体手段构建包括易受风灾影响建筑物在内的强对流天气灾害预警信息靶向发布系统(P52)对于及时防灾自救具有重要意义。

2020年行将结束，而对于贯穿全年的新冠疫情，可以说既没有猜到开始，也还没有等来结尾。随着新冠疫苗研发的不断推进，也许意味着“新冠”的影响已处于关键转折期。本期专门推出了“新冠疫情气象服务”专栏(P140—146)，尝试从气象角度解读武汉新冠疫情，回顾疫情期间的气象保障服务。2020年也正值世界气象组织(WMO)70周年，本刊特邀请WMO助理秘书长张文建先生撰写了WMO 70年评述文章(P8)，并表达了对中国气象的寄语。

佛山市龙卷风研究中心作为本期“刊中刊”的支持单位，在论文撰写、组织等方面做了大量工作；来自中山大学、中国气象局气象干部培训学院等机构的专家参与了论文的评审，并以不同的视角提出了许多宝贵意见和建议。借此机会，向上述及所有参与此项工作的单位和学者表达衷心的感谢。

许小峰

研究论文

研究进展

- 95 官晓东, 刘玉, 卜银军: 基于风廓线雷达对暖式切变和冷式切变大范围强降水的风垂直结构观测与差异分析
- 101 王威, 何筱仙, 张深寿: 基于雷达的多源信息森林火灾监测模型应用研究
- 106 蔡银寅: 中国大气环境资源的地理分布

气象发展前沿报告

- 118 刘苏潇, 孙兰东, 吴蔚, 刘校辰, 杨涵涓: 城市适应气候变化行动方案——国内外应对气象灾害的典型案例分析

论坛

- 125 达月珍: 移动新媒体气象信息传播现状分析及发展思考——以气象微信公众号为例
- 128 李陶陶, 李梁威, 任珂, 田依洁: 《气象知识》读者群体特点及其知识获取偏好调查与分析
- 131 郭俊萍: 提升气象预警信息传播效果的分析与建议
- 134 赖雨薇, 杨宝回, 林美言, 白龙: 面对群体差异的气象服务——以广西为例
- 137 郑治斌, 任永建, 王凯: 湖北省高温灾害特征及其影响分析

专题 新冠疫情气象服务

- 140 杨培强, 何兵, 易亮: 新冠肺炎疫情期间武汉火神

山医院气象保障服务效益评估研究

- 143 何明琼, 陈正洪, 谭静, 贾文茜, 陈英英, 王明: COVID-19在湖北爆发和流行的几种可能的影响因素分析
- 146 刘立成, 胡倩倩: 武汉封城战“疫”中气象短信的共情传播

阅读

会评

- 149 贾朋群, 曾智琳, 周莘睿: 粤港澳大湾区: 或将成为极端天气气候研究关注的“特区”——第一届粤港澳大湾区极端天气气候及灾害风险学术会评介

编辑选编

- 152 CloudRoots: 先进仪器技术和亚小时、亚千米陆—气交互过程模拟的集成/连续极端干旱年份导致的人工落叶松生长停滞风险

AMS词汇

- 封3 张伊, 武欣蕊: 板架云(shelf cloud)与飓风(回波)带(hurricane band)

往事钩沉

台站巡礼

- 153 路雅恬, 李蓓蓓: 新中国泰山气象站的发展
- 155 麻碧华: 民国时期浙江气象机构的考证

NEXRAD: 走进“新一代” ——天气雷达探测技术的起步与发展

■ 许小峰

在气象探测科技与业务发展中，天气雷达无疑占有举足轻重的地位，特别是在强对流灾害性天气的监测预警业务中发挥着无可替代的作用。以NEXRAD的发展脉络为主线，对天气雷达技术发展和业务布局进程进行了梳理，也大致介绍了中国天气雷达近期发展情况。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.06.001

1 走进NEXRAD

天气雷达技术是在第二次世界大战中伴随军事雷达技术发展起来的。1940年，英国人通过雷达监视飞机时发现信号会被天气回波干扰，引发了对云雨信号影响的研究。在“二战”中这一成果开始得到应用，对监测飞机航线上发生的雷暴等危险天气发挥了作用。1944年4月，世界上首个“天气雷达网”诞生，美国在巴拿马面向大西洋的两个港口安装了天气监测雷达。二战后，天气雷达技术伴随实际气象服务需求而得到快速发展，最初发展的天气雷达大多是通过军用雷达改造而成的。1946年，美国气象局（Weather Bureau）从海军获得了25部AN/AP2F型S波段军用雷达，并将这些雷达改装用于气象监测，包括有WSR-1s、-1As、-3s和-4s等型号，是后期发展的WSR系列天气雷达的前身。随后又发展了WSR-57、WSR-74C、WSR-74S等，还有其他一些不同功能和型号的雷达，如AN/APQ-13、AN/CPS-9、AN/FPS-103等，一直发展到目前在业务上使用的WSR-88D雷达。

对强天气系统的监测预警是促进天气雷达技术进步和业务发展的重要因素。20世纪50年代，美国航空业进入到快速发展阶段，大型枢纽机场和喷气机开始运营和投入使用。但由天气原因引发的空难事故也随之增多，引起了各方关注。如1959年，马里兰州上空一架子爵号客机的油箱被闪电击中，伴随爆炸和火灾导致了致命的坠机，31人在事故中丧生。接连发生的这类与恶劣天气相关的灾难性事件引起气象和相关部门的关注，于1961年启动了国家强风暴计划（NSSP），开始了有针对性的研究，总部设在密苏里

州堪萨斯城，并于1962年在俄克拉何马州的诺曼建立了一个野外观测站，也称为天气雷达实验室，安装了一台用于研究的天气监测雷达（WSR-57）。WSR-57是当时USWB业务上用的常规雷达，于1957年完成设计，1958年在业务中开始应用，当时布设了31部，很长时间内一直是气象局业务中当家的旗舰雷达，直到20世纪90年代NEXRAD部署后，最后一部WSR-57才于1996年12月在南卡罗来纳州退役。

1963年，整个NSSP转移到了诺曼，在那里重组后组建为国家强风暴实验室（NSSL）。时任USWB局长罗伯特·怀特提出要在NSSL开发更先进的雷达处理和显示系统，以满足强天气监测预警的业务需求，提出的主要目标是发展可以测风的多普勒天气雷达

另一个与天气雷达发展密切相关的事件是对龙卷风的探测。1958年6月，美国气象局的技术人员在堪萨斯州的埃尔多拉多市通过雷达发射的连续波探测到了龙卷风，当时使用的是从美国海军获得3 cm波长的多普勒雷达，在康奈尔航空实验室进行了改造（图1），这一成功探测显然激发了人们对多普勒天气雷达技术的强烈兴趣，为连续监测强天气系统的风场变化找到了途径，促进了后来的多普勒天气雷达发展。

NSSL成立后，便致力于多普勒天气雷达的研发工作，到1964年，通过改造海军的雷达，制造了第一台3 cm脉冲多普勒雷达，被用于降水物理学、风暴内流场和晴空回波变化等相关问题的研究，直到1970年退役。

NSSL的专家在使用3 cm多普勒雷达进行研究时，已发现了其固有弱点，如波长短很难穿透强风暴、单部多普勒雷达难以获取风暴中完整风场。但由

资助信息：国家自然科学基金重点项目（91637211）



图1 20世纪50年代末USWB使用的连续波3 cm多普勒雷达，设计了并排的发射和接收天线

于当时美国气象局很难给与足够的经费支持，改进设想难以实现，如安装三部雷达从不同角度观测天气系统的方案就一直被搁置。直到20世纪60年代后期，才与康奈尔大学合作首次开展了双多普勒雷达探测实验。同时，为了降低信号衰减，提升多普勒雷达电磁波穿透强风暴的能力，发展10 cm雷达的计划在经历了一些曲折后终于在1967年得以实施。与引入3 cm雷达的方式类似，在多方协调下，从美国空军远程预警雷达网项目中获得了一部10 cm雷达（FPS-18）。1969年初，俄克拉何马大学的校园内，耸立起了10 cm多普勒雷达，后期由NSSL的专家负责改造升级（图2）。



图2 1969年NSSL的10 cm脉冲多普勒天气雷达天线和开放式塔架，发射机位于旁边的机房（右），左边为WSR-57天气雷达

1971年春季，改造后的雷达开始正式投入探测使用，成为当时世界上少有的几部10 cm波长的多普勒雷达，在随后的几年中，多次捕捉到了强风暴和龙卷风天气系统的发生发展。如1973年5月24日发生在俄克拉何马州的联合城的一次龙卷风，追风小组实地跟踪拍摄了龙卷风形成后的照片（图3），与多普勒雷达连续探测到的信息进行了对比检验，给出了龙卷风

发生过程中的时空特征和螺旋结构演变的完整过程。涡旋在高空形成25 min后开始下降，龙卷云接地后风速达到最强，然后逐渐减弱消失。由于多普勒雷达在对识别强天气中的涡旋结构特别有效，使得龙卷风在母体云系中形成后较容易被捕捉到，从而显著提高了预警时效。



图3 1974年5月24日龙卷风穿过俄克拉何马联合城

实践结果完全打消了人们对投入这一先进设备所能获取回报的所有疑虑，为天气雷达的进一步发展扫除了障碍。1974年，NSSL又获得了第二部10 cm多普勒天气雷达，同样是由FPS-18型雷达改造而成，开始了双多普勒雷达运行，共同探测追踪强天气系统。

为了进一步掌握准确信息及获得更广泛支持，在全国大范围布局建设10 cm多普勒雷达，全面提升对强天气的监测预警能力，美国国家天气局（NWS，原USWB）、美国空军天气服务局（AWS）和联邦航空局（FAA）决定共同实施一个联合多普勒业务试验计划（JDOP），并于1977—1978年春季的龙卷风多发期在俄克拉何马的诺曼运行，使用的是NSSL的10 cm多普勒雷达。结果表明，对于发布的强风暴和龙卷风警报，准确率明显提高，且误报减少，警报的提前量从2 min提高到21 min。

基于JDOP的成功，多普勒天气雷达发展项目获得商务部、国防部、交通部的一致认可，NWS、AWS和FAA在华盛顿建立了联合系统项目办公室，负责监管如何采购新一代雷达（NEXRAD），计划在全国范围建设多普勒天气雷达网（图4）。

新雷达系统的一个重要的特点是实现了完全自动化运行，不再需要人为操作硬件，雷达自动产生连续的三维探测数据，交由处理软件生成各类应用产品，业务人员只需要在主用户处理器（PUP）的计算机显示终端上就可以操作显示各类数据产品，发现潜在的影响天气系统。显然，这一包括多种复杂算法的软件处理系统充分体现了新一代雷达优势，也成为



图4 坐落在诺曼的WSR-88D新一代雷达

NEXRAD最终能在业务中成功应用的关键。PUP的另一个特点是可以脱离雷达硬件单独运行，即一部雷达可以配备多个PUP终端，从而满足在一个区域多个用户共享雷达产品的需求。美国布设了161部WSR-88D雷达，但配备的PUP终端超过了400个。

1990年，安装在诺曼的第一部WSR-88D新一代10 cm多普勒天气雷达开始运行，1996年完成了全部160余部的全国布网，成为当时全球最大的现代天气雷达网，也被认为是美国20世纪90年代气象业务建设效益最好的项目。

在美国发展NEXRAD网建设进程中，中国也于1994年制订了新一代天气雷达发展规划，借鉴美国发展经验，提出在全国布设126部新一代雷达的方案。在实际操作上，确定引进美国最新的WSR-88D技术，在中国合资生产新一代天气雷达，并鼓励国内厂商参与合作和按同样规格自主生产，设定了不同型号，统称为CINRAD。当时尽管有了规划，也解决了技术引进和转化问题，并开始组织生产，但整体进展并不顺利，由于缺乏资金而使建设停滞不前。到1997年，仅有一部从美国原装进口的WSR-88D型雷达坐落于上海浦东，成为国内第一部业务运行的新一代雷达。1998年发生在长江和松花江、嫩江流域的特大洪水，改变了雷达布网建设的命运，面对现实发生的应对重大气象灾害的迫切需求，雷达建设资金被纳入国债项目，消除了建设新一代天气雷达网的最后屏障。1999年9月，在我国生产的第一部CINRAD-SA型新一代天气雷达在安徽省合肥市落成，象征着我国新一代天气雷达网建设全面启动（图5）。

中国的新一代天气雷达建设持续至今，布网雷达已达210多部，远超过了最初的规划，与美国共同构成了全球最大的两个新一代天气雷达网。



图5 被称为“庐阳银珠”的合肥新一代多普勒天气雷达

2 升级NEXRAD

美国NEXRAD业务化布网后，已运行了20多年，对雷达的改造和升级一直没有停止。从探测能力上看，现在的雷达与20年前相比，已有了很大变化，有些可以说是质的飞跃。

2.1 双极化改造

常规天气雷达可以测量大气中云雨粒子的距离和强度，多普勒天气雷达增加了对粒子径向速度和谱宽的测量，具备了对天气系统动力场结构的识别能力，而要获取粒子特性或降水类型的信息，则需要对雷达进一步升级改造，增加双极化功能。

双极化技术通过天气雷达同时发射水平和垂直极化的电磁波，通过接收极化回波，测量雷达的反射率因子、差分反射率、差分相位、共偏相关系数和退极化比，估算降水粒子的形状、大小、滴谱和指向角的分布情况，从而对云雨结构、类型和降水过程特征可以有更为完整的认识和识别。对在天气雷达上使用双极化技术的关注始于20世纪60年代，70年代做了较广泛的研究，进入到研究实验阶段。80年代，一些技术开始在实际探测中取得效果，如美国大气研究中心（NCAR）1983年在CP-2雷达上应用了双极化技术，成功地通过差分反射率探测到了冰雹的结构特征，研究结果发表在知名杂志《科学》上。同一时期，NSSL也在开始了双极化技术研究。进入到90年代，双极化技术逐步进入到科研和业务应用阶段。

科学研究与实验的成功促进了对实际业务运行中的雷达进行技术改造，由于在NEXRAD发展过程中，双极化技术的研究和实验一直在同时跟进，当161部WSR-88D布设刚完成后不久，NWS、DOD和FAA就已确定要对全网雷达进行双极化改造。首部双极化多普勒天气雷达的原型机于1997年在NSSL的研究雷达

上实现, NSSL的技术人员按业务要求进行了开发和实验, 提出了技术标准, 交由企业进行改造设计。

2005年, 美国国家海洋和大气管理局(NOAA)的雷达运行中心(ROC)将雷达数据采集系统(RDA)升级为开放系统(ORDA), 由于此项改造影响到了基础数据, 包括反射率、速度、谱宽等, 会进一步会影响到数据产品, 成为关键环节。为此成立了专门评估小组, 要确保任何因信号改变生成的基础数据不会影响到雷达产品生成(RPG)环节的质量。ROC从各单位调集人员, 工作进行得非常艰苦, 小组成员由最初的十几个人, 发展到80多人, 每周都要开会, 对各类数据进行分析, 持续了近5年时间。数据质量问题仅是雷达升级改造中的一个重要环节, 还有许多其他难点需要克服, 也经历了艰辛的过程。

2011年9月, 全网雷达双极化改造正式启动, 2013年完成, 实现了NEXRAD网建成后一次技术最为复杂、规模也最大的技术升级改造。

2.2 分辨率提升

NEXRAD网建成后, 基数据中反射率为 $1\text{ km}\times 1^\circ$ 极向网格分辨率, 径向速度和谱宽的分辨率为 $250\text{ m}\times 1^\circ$ 。对一般天气系统而言, 这样的分辨率可以捕捉到, 但对于尺度在几十千米以下的强天气系统, 就显得不够了。如对于强烈发展的中尺度气旋或龙卷的探测, 若能将分辨率提升到 $250\text{ m}\times 0.5^\circ$, 可以对其结构有较为清晰的识别, 通过模拟信息与WSR-88D的常规资料对比可以印证这一改进的效果。为了满足提高分辨率的需求, 几乎在进行双极化试验的同时, NWS又安排NSSL对预期的分辨率改进提高进行量化评估, 并提出方案。

提升雷达的探测分辨率, 需要通过改变雷达发射方式, 在更精细的网格上获取频谱信息, 这样做会牺牲一些雷达的探测距离, 在实际业务化设计时要进行平衡取舍。沿径向方向, 通过调整发射器脉冲宽度, 发射短脉冲($1.57\text{ }\mu\text{s}$), 并结合接收器滤波器响应的调整可达到将分辨率从 1 km 提高到 250 m 的效果。同时, 在方位角方向的分辨率高低则取决于本征天线波束分布, 需要通过压缩有效天线波束宽度来提高雷达分辨率, 这对数据处理提出了更高的要求。经过改进, 可以将雷达数据的方位分辨率从 1° 提高到 0.5° 。通过在硬件和软件技术对径向到方位两个方向上的改进, 达到了将分辨率提升到 $250\text{ m}\times 0.5^\circ$ 的目标。分辨率的提高会涉及到数据处理和产品生成等进一步的问题, 每一步都要细致分析, 相互协调, 并经过严格检验和评估, 最终达到提供业务使用的要求。

经过技术实现和业务检验后, NWS从2006年开始对NEXRAD网进行了高分辨率升级, 2008年全部完成, 虽然从工作量和复杂程度上不及双极化技术改造, 但从对强天气系统的识别角度确实取得了很好的提升效果, 是一次成功的改进。

2.3 扫描模式改进

WSR-88D有多种体扫模式(VCP), 每一种模式对应着不同的扫描方式, 包括一次体扫时间、扫描角度和次数, 如较常用的降雨模式VCP-21, 规定在 6 min 内完成一次对应9个仰角的体扫。在实际应用中发现, 在捕捉一些快速变化的强天气系统时, 如快速多变的结构风场, 当一个体扫完成后, 已发生很大改变, 不利于保持信息的连续性。

2012年, NWS针对强天气体扫模式VCP-12和VCP-212的扫描方式进行了改进试验, 增加了体扫间低仰角补充扫描方案, 即当出现剧烈变化的强天气时, 新的体扫模式会自动在最低仰角(0.5°)增加扫描次数, 从而获取更多在这一层天气变化的连续信息。2016年春季, 该模式得以在业务上得到应用, 提高了对强天气(如龙卷)变化过程信息的捕捉。

根据雷达技术的不断变化和美国对NEXRAD网的改造提升, 中国也在持续跟进。到目前为止, 已有50余部多普勒天气雷达进行了双极化升级, 起步较早的广东省从2016年开始进行区域性改造, 全省12部多普勒雷达先后都已增加了双极化功能, 可以更清晰地获取降水系统内部的精细化分类信息。高分辨率模式改进虽然起步时间不长, 但取得了显著进展。从杭州天气雷达的改进试验结果看, 仅从分辨率提高的角度, 已超越了美国当前的模式, 径向分辨率的提升可以实现 250 、 125 和 62.5 m 三个档次, 还发展了回波识别智能探测模式, 自动根据天气系统变化进行判别, 调整探测模式, 达到平衡兼顾的目的, 体扫的时间也可由 6 min 提高到 4 min 左右, 这一结果对中小尺度强天气的监测显然将发挥重要作用。从图6的对比可以看出分辨率提高后, 精细化观测效果显著提升。

3 后NEXRAD时代

3.1 分布式协同自适应探测(DCAS)网络雷达系统

已运行了20多年的NEXRAD网, 一些固有的弱点仍难以克服。如WSR-88D雷达扫描半径可以达到 230 km 以上, 但由于受地球曲率影响, 在这样的距离上的探测信息基本覆盖不到 1 km 以下的空间, 且由于波束宽度的扩展, 探测分辨率也会降低, 这会影响到对中小尺度强对流天气的探测质量。探测远距离天气系统时, 还难免会受到地形等障碍物的遮挡, 也

会妨碍探测效果。作为多普勒雷达网，如何获取到大气完整风场信息，而不仅限于径向速度，也是需要考虑解决的重要问题。2003年，在美国国家科学基金会（NSF）组织下，成立了大气协同自适应遥感（CASA）工程研究中心（ERC），四所大学（科罗拉多州立大学、马萨诸

塞大学、俄克拉何马大学和波多黎各大学马亚古兹分校）和工业界及政府实验室组成的这个联合体，提出了小雷达组网探测技术，与NEXRAD网互补，可以弥补远距离探测覆盖不足问题。首期试验项目于2006年1月开始，在俄克拉何马州东南部布设了4个低功耗、3 cm多普勒双极化雷达（图7），可以提供时间分辨率为60 s和空间分辨率为100 m的高分辨率数据。从实际试验结果看，确实达到了低空加密探测、提高分辨率、时效增强、获取部分三维风场等功能。基于此，有人提出在全美布设数千个小雷达，与NEXRAD网形成互补的方案。

类似的工作在中国也有开展，如2013年，中国科学院大气物理研究所与相关单位合作在南京及周边地区筹建了网络化雷达。也由四部X波段雷达组成，有效探测距离为60 km，布设在南京及其周边地区，也取得了很好的效果，可以成为CINRAD网的有益补充。

从实际进展看，网络雷达经过了15年以上的试验和改进，取得了不少科研和应用成果，但并没有在业务上全面展开。这或许与其自身存在某些弱项有关，

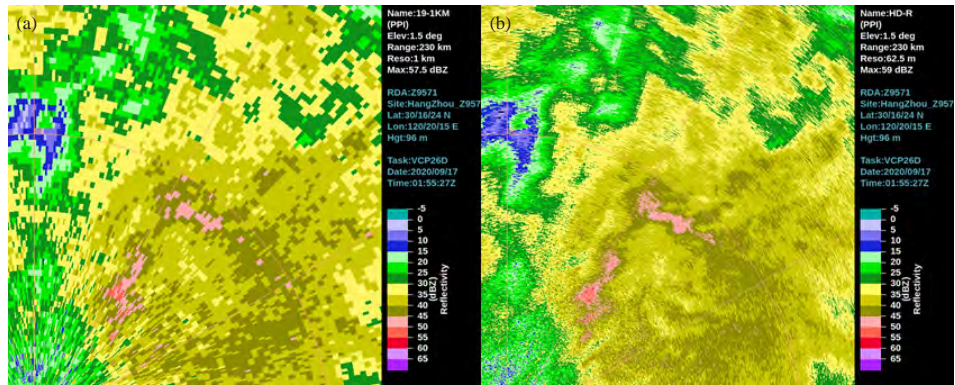


图6 2020年9月17日杭州雷达探测到的天气系统1 km (a) 和62.5 m (b) 分辨率对比

如在三维风场的获取方面，还只能在一些关键区发挥作用，这与传统雷达扫描方式有关，较难获取完整、准确的三维协同风场信息。另一方面，随着相控阵技术的逐步开始应用，使天气雷达的探测扫描方式出现了新的变化，由于可以在一个方位角上快速获取多个仰角方向的信息，显著提升了探测时效，各类相应的探索与试验相继展开，给未来的选择增添了变数。

3.2 相控阵天气雷达

相控阵雷达的研发在美国起步较早，包括未来有可能替代NEXRAD的S波段相控阵雷达，及可以替代网络雷达X波段相控阵雷达。NSSL和俄克拉何马大学高性能雷达研究中心（OU-ARRC）目前已研发了一部多功能柱形极化相控阵天气雷达（CPPAR），于2018年7月安装在距诺曼KOUN雷达不远处，在不断进行测试和改进，试验的目标定位在检验相控阵雷达对于强天气监测的实际效果；对相控阵雷达增加双极化功能后信号检验评估；相控阵雷达是否可以作为未来WSR-88D雷达的替代方案选择。

目前，美国、日本等国在X波段相控阵雷达技术发展上给与了更多关注，如2015年开始，日本在大阪建立了相控阵雷达示范网络，首次采用两部相控阵天气雷达（PAWR）组网实时运行，雷达分别安装在日大阪大学和日本神户的国家信息与通信技术研究所。PAWR体扫周期小于30 s，探测范围约为60 km，天线沿方位角机械旋转，垂直方向采用0~90°全仰角高密度电子扫描。

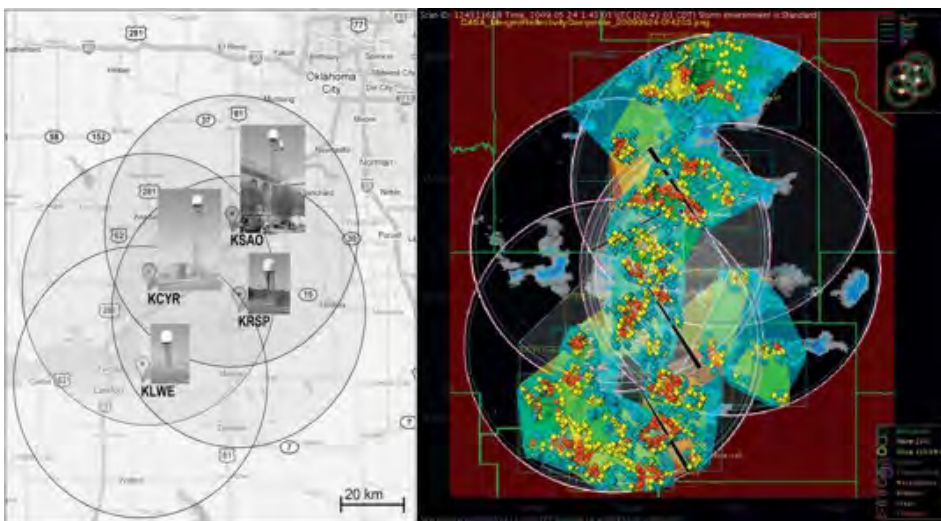


图7 俄克拉何马州东南部布设的四部组网小雷达

从相控阵天气雷达的研发与试验的进展看,中国目前的进度与国际先进水平已较接近,提出了一些先进的设计理念,有了可供科研和业务试验的不同种类产品,中科院大气所、中国气象科学研究院、中国气象局大气探测中心、成都信息工程大学等单位和相关企业都先后开展了产品研发与试验,区域性的业务化布局也在展开。发展比较快的是广东和长江流域一些

省份,如广东大湾区已经建起了一个由10余部X波段双极化相控阵雷达组成的探测网络,通过高时空分辨率探测、实时RHI扫描等特性获取小尺度以及部分中尺度天气系统的精细结构及生消演变过程,从而精确地描述对流系统的短时演变,提高对中小尺度强对流天气系统的监测预警能力。从区域组网对中小尺度精细化监测能力看,已走在了国际前列(图8)。



图8 广东大湾区X波段双极化相控阵雷达精细化探测网

广东佛山也建设了由7部X波段相控阵雷达组成的阵列网络精细化监测系统,采用相控阵多波束扫描技术,通过4个发射波束和64个接收波束覆盖 $0\sim 90^\circ$ 仰角,方位角通过机械扫描覆盖 360° ,一个体扫时间约为12 s,其对风场的精准快速同步定位对于捕捉中小尺度强对流天气中的风场结构具有独特优势。湖南、上海、河北等地也引入了这一技术开展了组网试验,取得了很好的效果。

4 结语

1) 天气雷达是强天气监测预警的重要手段,在未来的气象监测业务中发展中仍将处于难以取代的地位,需要在发展布局中优先考虑。

2) 在发展过程中要注意数据应用、技术改进和

提升工作,在充分发挥雷达建设直接效益的同时,要针对雷达探测的特点和弱点,通过不断投入改进,保持其生命力和先进性。

3) 要注意业务升级前的准备工作,包括对升级效益、数据质量、系统协调、应用培训、性价比等的综合考虑。

4) 相控阵多普勒双极化天气雷达或许是未来的发展方向,要予以关注,特别是对于已经开始试验和业务布局的单位,要注意总结经验,发现问题,为后人的跟进创造条件。

5) 大小雷达网的结合互补已经历了10多年的探索,如何使这种互补效益达到最大化是最终能否推动业务实现的根本,需要在一些关键环节上着力,如三维风场获取问题。

深入阅读

- Bringi V N, Seliga T A, Aydin K. 1984. Hail detection with a differential reflectivity radar. *Science*, 225(4667): 1145-1147.
- Brown R A, Lewis J M. 2005. Path to NEXRAD: Doppler radar development at the National Severe Storms Laboratory. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 86(10): 1459-1470.
- Brown R A, Wood V T, Sirmans D. 2002. Improved tornado detection using simulated and actual WSR-88D data with enhanced resolution. *J Atmos Oceanic Technol*, 19: 1759-1771.
- Hiroshi K, Tomoo U, Fumihiko M, et al. 2018. Improving the accuracy of rain rate estimates using X-band phased-array weather radar network. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 56: 6986-6994.
- Sachidananda M, Zrnich D S. 1985. ZDR measurement considerations for a fast scan capability radar. *Radio Science*, 20(4): 907-922.

- Whiton R C, Smith P L, Bigler S G, et al. 1998. History of operational use of weather radar by U.S. weather services. Part I: The pre-NEXRAD era. *Weather and Forecasting*, 13(2): 219-243.
- Whiton R C, Smith P L, Bigler S G, et al. 1998. History of operational use of weather radar by U.S. weather services. Part ii: Development of operational doppler weather radars. *Weather & Forecasting*, 13(2): 244-252.
- 程元慧, 傅佩玲, 胡东明, 等. 2020. 广州相控阵天气雷达组网方案设计及其观测试验. *气象*, 46(6): 823-836.
- 李思腾, 陈洪滨, 马舒庆, 等. 2016. 网络化天气雷达协同自适应观测技术的实现. *气象科技*, 44(4): 517-527.
- 马舒庆, 陈洪滨, 王国荣, 等. 2019. 阵列天气雷达设计与初步实现. *应用气象学报*, 30(1): 1-12.

(作者单位: 中国气象局)

WMO走过70年：中国气象与世界共同发展

■ 张文建

对于世界气象组织：持续开展适应时代要求的改革和更加的开放包容，是其长盛不衰的生命力所在。对于中国气象：全面深入融入和引领世界气象组织的发展和改革，并使其与中国气象现代化发展相得益彰，是战略远见和睿智之举。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.06.002

1950年成立的具有政府间合作性质和法律约束力的世界气象组织（WMO），是1873年成立的非政府间合作但没有法律约束力的国际气象组织（IMO）传承演化而来的。1950—2020年是WMO迅猛发展的时期，从1963年的全球天气监测计划，到2009年的全球气候服务框架，高准确度天气预报的时效从1950年时期只能可靠预报1天天气，发展到今天的10天左右有效可靠天气预报；气候服务已经遍布国民经济的各个行业和领域。

1 WMO核心体制和机制面临的挑战和应对

古人云：人过七十古来稀，但是对于WMO这个在联合国组织体系中负责天气、气候、水和相关环境事务的特设机构（组织）来说，随着2019年第十八次世界气象大会批准的WMO治理机制改革方案的实施所带来的新机构、新机制、新活力，世界气象组织的70华诞实际上迎来了她的新生！WMO的治理机制改革可以高度地概括为：

1) 对外强化开放合作，标志是：

- 成立了高层科学指导委员会（SAP）和研究理事会，技术委员会也开放接纳气象部门以外的专家参与技术委员会工作，这些新的组织和举措让更多的世界级科学家和技术专家为WMO发展献计献策和贡献技术；

- 在联合国可持续发展目标（SDG）框架下全面加强了和世界粮农组织（FAO），世界卫生组织（WHO），国际民航组织（ICAO）和联合国水计划协调机制（UN Water）等的在全球和区域的合作，成立WMO-IOC（国际海洋委员会）合作理事会等；

- 加强与私营部门和学术界的合作。第十八次世界气象大会批准的“日内瓦宣言——2019年：构建天气、气候和水等行动共同体，提出WMO的如下作用不断演变，即促进建立和扩大公共、私营和学术等部门各利益相关者之间的伙伴关系，从而显着提高所

有国家的高质量天气、气候、水和其他相关环境信息和服务的可用性；

- WMO将更加积极主动地在联合国大家庭中发挥作用，例如参加联合国气象变化行动峰会并主持科学分会，和联合国秘书长共同发布全球气候变化声明等等，不断提高本组织的知名度。

2) 对内大力整合优化，举措是：

- 将原有的八个技术委员会改革成为只有两个技术委员会：即基础设施系统委员会和服务与应用委员会（图1），极大地减少了交叉和重复。每个技术委员会都对应着发展和实施WMO新的发展战略中确定的长期发展战略目标及所明确的本财年的负有领导责任。每个技术委员会都会有负责规范性工作的常设委员会和为探索性工作或专家团队设立的研究委员会。

- 广泛的专家网络的参与和在小型团队中工作的灵活性将确保更有效和基于结果的工作进展；秘书处结构的进一步改革实现了新的技术司和两个新的技术委员会以及研究理事会的明确对应，分工清楚责任明确，并有切实可行的内部协调加强相互支持的机制。

WMO新的发展战略确定了本组织向地球系统发展（开展地球系统观测，数据交换，地球系统模式发展，预报和服务），这将大大拓展全球气象事业发展领域，极大地促进气象事业的发展及其全面提升气象服务在国民经济和社会发展中的地位和作用。以上改革举措的落实就是实施WMO新的发展战略的重要保证。

2 WMO庆祝七十华诞的活动介绍和意义分析

2020年是纪念WMO组织具有里程碑意义的70周年纪念日。纪念活动从2020年3月23日气象日开始。与40、50和60周年不同的是，过去的每个十年的庆祝活动主要是以发表纪念专辑为主。但是2020年的活动

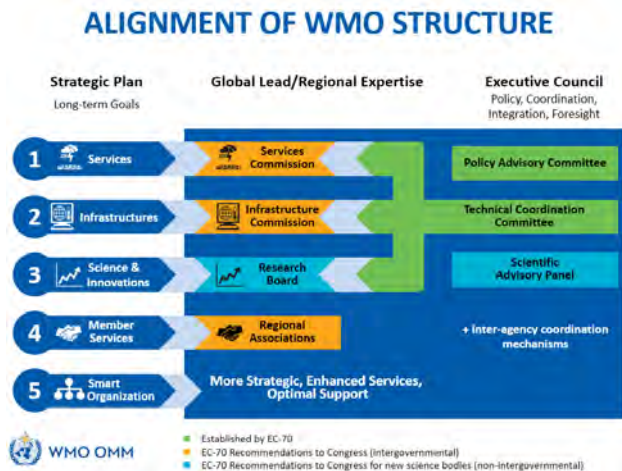


图1 世界气象组织结构调整

展示出多样化的色彩:

1) 2020年世界水日(3月22日)和世界气象日(3月23日)联合举办并使用相同的主题——“水与气候变化”

水和气候有着千丝万缕的联系。我们认为,可以通过监测水的变化来应对气候变化的影响:更多的水造成洪水,更少的水造成更多的干旱,更多的水污染影响水的饮用。所以,联合国水机制主席兼国际农业发展基金会主席吉尔伯特·F·洪博(Gilbert F. Hounbo)和WMO秘书长佩特里·塔拉斯(Petteri Taalas)决定组织联合的世界水日和世界气象日庆祝活动并发布联合信息,强调水和气候变化的关联以便气候辩论中提高水的重要性。联合国《2020年世界水发展报告》警告说,气候变化将影响人类基本需求所需的水的可用性、质量和数量,从而损害数十亿人享有安全饮用水和卫生设施的基本权利。作者呼吁各国做出更具体的承诺以应对这一挑战。目前,估计有22亿人无法获得安全管理的饮用水,而42亿人(占世界人口的55%)没有安全管理的卫生设施。在过去的一个世纪中,用水量增长了6倍,并且每年以大约1%的速度增长。而且,气候变化以及极端事件(风暴,洪水和干旱)的发生频率和强度不断增加,将加剧目前已经处于“缺水”状态的国家的状况,并在尚未受到严重影响的地区产生类似问题。此外,报告强调了一个事实,即水资源管理不善往往加剧气候变化不仅对水资源,而且对整个社会的影响。

2) 发表系列的具有回顾性和前瞻性的70周年特别纪念出版物,反映本组织的重要历史里程碑以及它对全世界气象学的贡献

包括前面提及的WMO前任主席(1995—2003年)John W. Zillman先生编写的WMO第40号决议的

起源、影响和后果方面的专题文章。巧合的是,2019年6月召开的第十八届世界气象大会确定的一项任务就是全面审查WMO的数据政策和实践,包括第40号决议的政策和实践,并要求WMO在2020年召开全球数据大会(已经召开)。第二个有回顾和前瞻意义的出版物,就是由前WMO/IOC海洋学和海洋气象学联合技术委员会(JCOMM)联合主席彼得·德克斯特(Peter Dexter)编写的海洋学和海洋气象学专题文章,以纪念世界海洋日和政府间海洋学委员会(IOC)成立60周年。文中他以30年的个人参与、观点和回忆,回顾了JCOMM建立过程的历史,包括背景、驱动力和关键要素。由于海洋气象学与海洋学之间的紧密关系,这使得WMO和IOC之间迎来了长时间的激烈竞争,但也进行了密切合作。他在文中用生动的方式介绍为JCOMM的发展铺平了道路的重要历史事件和人物,包括1853年的布鲁塞尔海事会议、IMO的成立、无线电报的发展以及IMO建立海事气象委员会(CMM),为WMO成立70年来鲜为人知的一段历史注入了生命。我们鼓励读者深入研究他的故事,引用西奥多·罗斯福(Theodore Roosevelt)的话:“对过去的了解越多,对未来的准备就越好”。

3) 举办全球手机天气应用软件大赛,国家地理图片(气象)展览和WMO 2021年年度日历图片大赛

2020年12月15日WMO在线上通过直播方式举行了全球手机天气应用软件竞赛(Weather Apps Awards)及其年度日历竞赛的获奖者的颁奖典礼。全球手机天气应用软件竞赛表彰在不断改进的基于移动的应用程序方面的卓越表现,这些应用程序已成为公众访问和使用天气信息的最广泛方式。现已提供数百种天气应用程序,覆盖全球、区域或本地。它们是由私营部门和国家气象、水文部门等公共机构开发的。大多数应用程序用于一般天气信息,但也有专门用于特定用途的应用程序,例如体育、农业、旅游等。

“手机天气应用软件不仅可以告诉用户将要发生的事情,还可以做更多事情——它们在紧急情况下可以成为至关重要的决策工具。这意味着应用程序开发是天气和气候服务交付链中的关键环节。”WMO国际天气应用奖的目标是:比赛将刺激全球的应用程序开发,帮助确定和建立天气应用程序的高标准,并将促进良好做法和创新。它将特别关注发展中国家并为弱势社区提供获得高质量信息的途径,鼓励和协助国家气象、水文服务部门和私营公司进一步开发应用程序,包括加强公共服务与私营部门和/或学术界的合作伙伴关系及创新发展,以改善对气象公众和广泛的经

济社会领域的气象服务。

比赛于2020年8月启动，收到了来自世界各地的118项参赛作品。提交的材料包括公共部门（38%）、私营部门（41%）和其他部门（21%），在大学、研究机构和私人天气爱好者之间保持了很好的平衡。由13名具有天气和气候、IT、通信和社会科学等各个领域专业知识成员组成的国际评审团

在三个类别中表彰了18位获奖者和14位荣誉提名。

WMO日历比赛颁奖典礼向WMO的2021年日历大赛的获奖者颁奖。它以天气、气候、水和海洋为主题，吸引了来自世界各地的1100多张照片。WMO评审委员会根据WMO成立70周年，选择了70名决赛选手进行社交媒体公开投票。基于照片和艺术价值，气象兴趣和地理平衡以及这些照片在Facebook和Instagram上的受欢迎程度，照片最终选择了13位获奖者和12个荣誉奖。所有获奖照片将在整个2021年的WMO社交媒体频道及其网站上展出。

作为70年庆祝活动的一部分，WMO还举办了国家地理图片（气象）展览，聚集了全球世界各国摄影家拍摄的世界海拔最高天气/气候站和世界水塔观测站的图片。从今年的世界气象日开始，WMO开放了天气科学年表在线博物馆并将开展社交媒体幻灯片放映活动，以浏览天气研究的历史，了解支持地球系统科学进步的人员和机构的踪迹。从20世纪初期的天气研究开始到第一台电子计算机和卫星的出现，然后是彻底改变了数值天气预报的超级计算机的出现等等。

3 中国和WMO合作和共同发展

WMO的70年里，也是我国通过世界气象组织这个重要的国际平台，参与、影响和引导全球气象事业发展的70年。期间，我国高层领导人和高级别专家担任了许多WMO的重要职务和参与了许多重要活动。利用WMO这个国际平台，通过这些高层活动和高层任职，把我国气象事业密切服务于经济社会发展（需求牵引）的理念；气象法所赋予气象事业在全国的法律地位和法律保障的法律意识；注重长期发展战略和长期规划相结合的超前眼光和视野；全国（国家、



图2 WMO主席墙照片

省、市、县）四级布局的气象服务和空天一体化的观测体系及开放我国数据全球共享；注重新兴技术应用不断提升气象业务现代化以及广泛宣传气象服务的经济社会效益等等，这些远见卓识和发展实践不断并深刻地影响和引领了世界气象组织的发展导向和政策与计划的实施。

我国也通过世界气象组织框架积极参与和贡献与全球数据交换，信息和技术共享，全球和区域合作，这些对我国的气象事业现代化的发展和全面深入融入国际气象体系非常重要。我在此只举一例证明：在本次WMO七十年庆典的系列出版物中，由前世界气象组织主席John Zillman编撰的《WMO 40号决议的起源、影响和风波》专门报告中，他回忆到邹竞蒙局长作为WMO主席（图2）主持的第十二届世界气象大会上，是邹局长高超的主持和谈判技巧促使大会通过了这一具有巨大历史意义和深远影响的决议；WMO许多重要的并对当前和未来仍有影响的决议，例如成立政府间气候变化委员会（IPCC，1988年）；全球大气监测计划（GAW，1989年）；第二次世界气候大会（1990年），WMO/UNEP联合组织第一次联合国气候变化框架公约政府间谈判委员会并促成了UNFCCC（1991—1992年）等，连同世界气象组织总部新大楼奠基（1993年），这些重要决策都是在邹竞蒙局长任WMO主席的8年期间完成的，是我国气象领导人引领世界气象组织辉煌发展和取得成就的有力例证。

传承与发展是个永恒的主题，3年以后将迎来IMO的150周年庆典，让我们届时再次见证全球气象合作的辉煌！

（作者单位：世界气象组织）

【编者语】本期进展报告,在广东省佛山市龙卷风研究中心的支持下,刊载了一组该中心及其合作机构近些年在龙卷监测、龙卷预警、龙卷灾害调查等领域取得的研究成果。

特约专家

俞小鼎 (中国气象局气象干部培训学院)
王东海 (中山大学)
伍志方 (广东省气象台)
炎利军 (佛山市龙卷风研究中心)
黄先香 (佛山市龙卷风研究中心)
李兆明 (佛山市龙卷风研究中心)

特约编辑

李兆明 (佛山市龙卷风研究中心)
植江玲 (佛山市龙卷风研究中心)

支持机构

佛山市龙卷风研究中心

对佛山市龙卷研究中心的几点印象

俞小鼎

龙卷是对流云产生的破坏力极大的小尺度灾害性天气,龙卷的监测预警研究具有很大的挑战性。珠江三角洲地区是除了江苏北部以外,中国龙卷最多发的地区。位于珠江三角洲的广东省佛山市龙卷风研究中心(以下简称“龙卷中心”)作为基层的以充满朝气的年轻人为主要构成的小型科研机构,敢于迎接挑战,勇气可嘉。纵观该中心成立7年来的表现还是可圈可点的。

首先,在龙卷灾害调查上,形成了实操性很强的灾调流程。2015年10月4日“彩虹”台风龙卷发生后,不到1个月时间,龙卷中心制作了国内迄今为止最为详尽的30 km龙卷全路径航拍视频。近些年,龙卷中心在全国进行包括龙卷和下击暴流在内的风灾调查49次,行程超过9万km,在收集龙卷和下击暴流等风灾现场第一手宝贵资料的同时,激发了国内基层气象单位对龙卷和下击暴流的认识和理解。目前龙卷中心已经成为中国强对流天气灾调(主要是龙卷和下击暴流)的一支经验丰富的重要力量。

其次,在龙卷天气研究上,首次提出了产生珠三角台风龙卷的台风“第一影响路径”和“第二影响路径”,配合物理量参数和多普勒雷达监测指标,构建了珠三角地区台风龙卷的预警流程,为台风龙卷的区域性业务试验开拓出了可行的做法。

第三,在龙卷预报预警上,在国内首次成功发布了专门的台风龙卷预警预报。2018年6月8日,提前58 min预警了一次台风外围龙卷;2018年9月17日,提前1 d预报了发生龙卷的可能潜势,并提前37 min预警了龙卷,还在技术上支持了肇庆市气象台发布龙卷预警。与以往混合在雷暴大风预警中的龙卷提示不同,



这种专门的龙卷临近预警精细到镇、街,提高了社会公众的警惕性和政府防灾组织的针对性。3次成功的龙卷临近预警提供了宝贵的实践经验,增强了中国气象工作者在龙卷高发区进一步探索和不断改进龙卷临近预警的信心。

另外,在龙卷组网探测上,龙卷中心2020年在原有4部X波段双极化多普勒天气雷达基础上,在佛山龙卷高发区又建设了7台X波段相控阵多普勒天气雷达,其中三部具有双极化功能,而广州SA型双极化多普勒天气雷达距离佛山中心只有50 km,初步建成了S波段和X波段天气雷达结合的高分辨率的雷达探测网,为进一步提升中小尺度灾害天气监测能力,为我国华南的龙卷预警试验奠定了坚实基础。

希望该中心继续努力,进一步推进龙卷临近监测预警技术和相关的研究,增强中小尺度灾害天气的短期短时潜势预报和临近预警能力,持续提升防灾减灾水平。

(作者单位:中国气象局气象干部培训学院)

关注龙卷将我国激烈天气研究引向深入 ——记2020年全国龙卷学术交流会

■ 贾朋群 李兆明

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.06.003

2020年11月17—18日, 2020年全国龙卷学术交流会在美丽的佛山市南海区召开, 来自全国12个省(区、市)的气象业务部门以及北京大学、中山大学、成都信息工程大学等高校近140位学者就龙卷研究、灾调、模拟等多个主题, 以大会报告和分会场报告(线上和线下)方式, 开展了较为深入的交流。会议还增加了龙卷灾调培训讲座, 深受到会青年学者的欢迎。

目前, 美国是世界上龙卷发生最多的国家, 实际上, 在二次大战前, 欧洲对龙卷的研究要多于美国, 同时形成了针对龙卷的统计, 对其起因研究形成了不同学派(图1)。来到近代, 因为龙卷在美国最频繁出现且随着探测和预报技术的进步, 龙卷预报气象业务逐步在美国气象部门形成(参见本期姚聘等文章)。

在中国, 近年来因为龙卷几乎每年光顾, 且造成

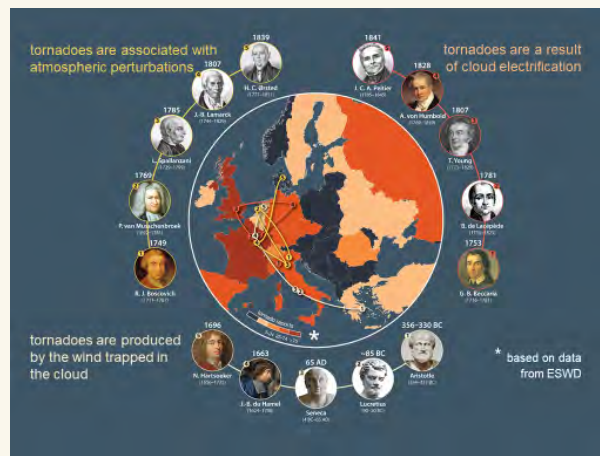
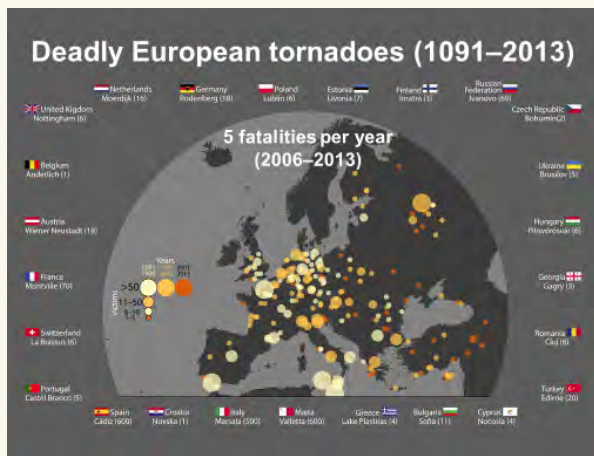


图1 欧洲900多年龙卷发生的统计(左)和解释龙卷成因的3个主流学派(右)

较为严重的生命和财产损失, 气象学界一直对龙卷兴趣不断。一方面, 如佛山市科学技术协会党组书记、主席郑伟雄在会议致辞中所言, 龙卷可以与地震、海啸并列, 是给人类带来巨大灾难却难以预报的自然灾害; 另一方面, 近年来包括自动气象站和天气雷达在内的我国气象监测网的完善, 以及改进的强对流模拟能力, 为包括龙卷在内的中小尺度天气灾害预报预测带来希望。这些进步直接带来了针对龙卷业务进步: 从以灾害发生的事后分析为主, 转到试图借助最新的探测和龙卷规律认识, 实现提前预报预警。

1 新探测平台捕捉龙卷信息, 为预报打下坚实基础

龙卷是生命期一般在30 min左右, 最长伴随其附着着的系统可以维持数小时。龙卷的活动区域一般在数

十千米范围内。目前较为成熟的天气预报模式, 因为模式格距一般在10 km左右和数小时的时间更新尺度, 以及模式对中小尺度动力和热力过程解析能力的限制, 真实的龙卷, 甚至是类似的流场等, 在模式结果输出中都难见其踪影。龙卷预报必须在研究层面上, 借助时空分辨率更高和分辨率更好的模式, 开展研究和试验性预报。

全球最早开展国家天气雷达网建设的美国, 也同时是世界上龙卷发生最多的国家, 中国气象局许小峰研究员在会上介绍的美国新一代雷达网设备上, 龙卷成为这类专门探测设备的重要标签(见本期3页图1)。同时指出天气雷达在气象监测业务发展中仍将处于难以取代的地位, 需要在发展布局中优先考虑, 保持其生命力和先进性。

2 识别龙卷需要得到各种中小尺度强对流天气的精确素描

本次会议很大比例的报告，涉及到灾调这一针对龙卷天气独有的研究方式。灾调既是确定是否发生龙卷及其等级的最令人信服和科学的方式，更是精确给出风灾损失不可或缺的程序。会议很多报告将灾调结果与雷达监测对比开展分析，这些分析得到的启发，对于一线预报员无疑最有意义。当然，如许小峰介绍，美国很多龙卷案例的精确认知，得益于“追风者”无畏的更专业化和实时、准确的一手资料，这些资料的获知并与雷达数据相互印证，能够得到更加详实的事实，甚至成为说服美国国会投资的最重要依据。本次会议揭示的中国龙卷多发地区，尤其可称为龙卷小型“通道”的，分别位于以佛山为中心的珠江三角平原地区、江浙和东北。未来，也还会出现一些专业的中国追风志愿者队伍，为龙卷等强对流天气的预报带来转机的机会。

3 龙卷预警在佛山等地入列气象业务，引领强对流天气的深刻认知

业务化龙卷预报的成熟，需要科研持续陪伴，是典型的研究型业务。正如国家气象中心郑永光研究员在报告中发问：（业务预报的）关键信号在哪儿？回答这个问题学者有自己的感觉，或许为未来研究方法的多样性描绘了蓝图。如郑永光对AI技术寄予希望；而美国俄克拉何马大学薛明教授在远程视频报告中则瞄准了涡度，尤其是针对低层龙卷涡度来源进行深耕，期待更准确地把握龙卷发生机制。不管怎样，北京大学孟智勇教授团队针对近年来龙卷发生地的统计，给出的全国龙卷高发“窗区”或者小“走廊”（图2）已经引起了气象部门重视，个例积累到一定程度的少数地区，如会上交流的信息表明，在佛山和江苏部分地区业务化龙卷预报已经在路上。其中，佛山市龙卷风研究中心黄先香首席介绍了业务化龙卷预报的流程，是我国气象预报业务延伸到龙卷的重要标志。诚然，会上尝试开展预报试验的业务机构，都如

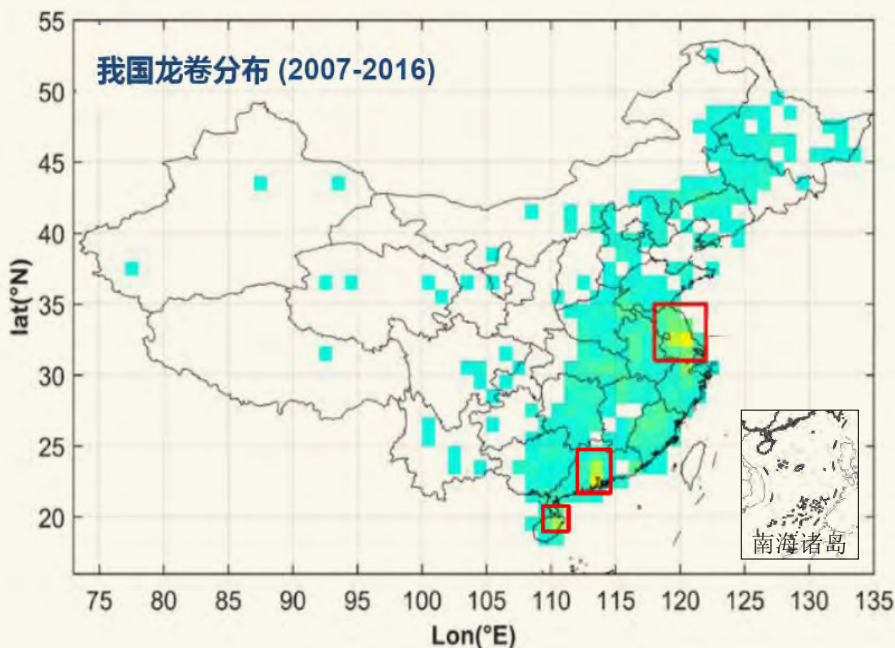


图2 近年来我国龙卷高发的3个地区

实给出预报各种指标，既有成功预报的喜悦，也有误报、空报的不解与遗憾。但是这些数字在业务初创期是必然的，手里每年有比中国多10倍以上个例的美国同行，目前龙卷空、误报次数也在量级上等同于准确预报。更何况黄先香首席介绍的业务化流程，目前还主要基于距离佛山较远的广州雷达，而佛山最新建成并成功业务化的7部（很快更新到9部）相距30 km的相控雷达阵列的投入使用，让人们有了更多期待，甚至弯道超车也不算意外，这是多数会议代表在佛山市龙卷风研究中心了解到其最新业务能力后心中的感悟和期盼。

本次全国龙卷学术交流会是我国气象行业首次以龙卷为专题的学术盛会，包括特邀报告16个、专题报告22个，覆盖面较广，总共吸引了13万人次在网上参会，是2020年末得到学界和业界广泛关注的成功交流。会后，与会专家还前往佛山市龙卷风科普展厅进行调研，重点了解佛山在龙卷等强对流天气监测、预警试验、科研攻关、灾害调查等研究成果。正如广东省气象局梁建茵研究员在开幕式致辞中指出的，作为国内首次专注于龙卷的学术会议，今后要办下去，并吸引全球目光、打造平台和品牌。中国龙卷人用不多的案例，已经开启了高起步的龙卷以及相关的强对流研究。

（作者单位：贾朋群，中国气象局气象干部培训学院；李兆明，佛山市龙卷风研究中心）

从第39届国际气象雷达会议看 相控阵天气雷达发展

高玉春 陈浩君 步志超 陶法 徐鸣一 王箫鹏 张乐坚 李瑞义 文浩 马舒庆

相控阵多波束快速扫描的特点，成为气象和大气探测领域的关注点。会议上交流了不同类型的短程探测相控阵天气雷达的共同点：径向探测范围大部分为几十千米，峰值发射功率较小（几百瓦量级），采用有源天线体制，采用数字波束形成技术（DBF），一维相控阵（俯仰电扫、方位机械扫描），体扫时间显著缩短。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.06.004

相控阵天气雷达相比其他天气雷达，技术更复杂，采样速度成倍提高。2002年，美国强风暴实验室（NSSL）联合多家单位把宙斯盾舰船上的相控阵雷达改装成一个相控阵天气雷达（NWRT），并进行了外场探测试验，这是天气雷达历史上的第一部具有相控阵快速扫描的雷达，随着NWRT外场试验展现出的精细化探测结果，相控阵技术逐渐走入天气雷达领域。2009年，美国新研制的一维X波段车载相控阵天气雷达MWR-05XP参与了VORTEX2的风暴观测实验，与移动X波段、W波段天气雷达联合观测，得到了龙卷、超级单体等强对流天气的精细结构。日本大阪大学和东芝公司研制了X波段的相控阵天气雷达（PAWR），第一部安装在大阪大学，并于2012年7月开始进行场外试验，该雷达可以在1 min内对积雨云进行三维探测，通过该雷达的探测数据，证明了雷电活动和风暴结构之间的关系。我国电科集团14所、38所、航天科工第23所、湖南宜通华盛公司、珠海纳睿达公司也研制了相控阵天气雷达，在北京、上海、广东、江苏、湖南等地开始试验和应用。相控阵天气雷达的研发与应用已成为天气雷达领域的重要发展趋势。

第39届雷达气象学国际会议于2019年9月16—20日在日本奈良召开，这是美国气象学会（AMS）主办的雷达气象学国际年会，是当前世界上规模最大的雷达气象学学术交流会议，26个国家和地区的426位专家参加了这次会议（图1），就9个方面主题进行了交

流（图2）。

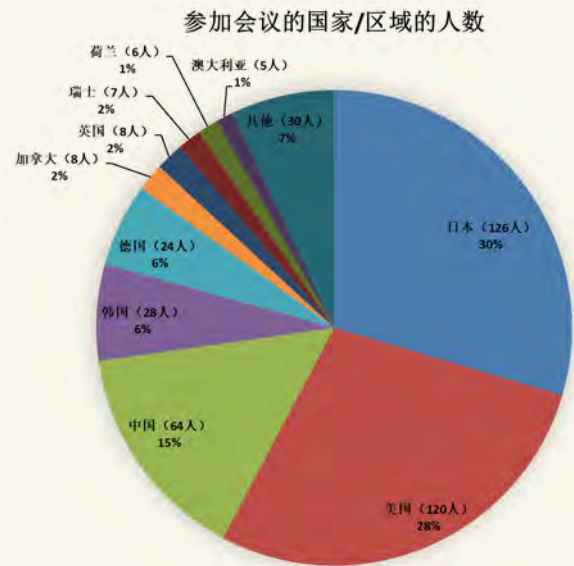


图1 参会国家/区域的人数分布

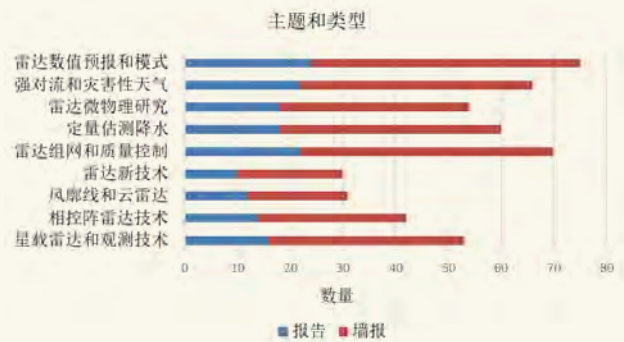


图2 会议交流主题和类型

收稿日期：2020年5月26日；修回日期：2020年11月5日
第一作者：高玉春（1961—），Email: gycaoc@cma.gov.cn

中国气象局系统向会议提交了19 篇论文，口头交流2篇。来自上海市气象局的专家在大会上做了相控阵阵列天气雷达应用报告，介绍了我国自主设计、研制的新型相控阵天气雷达——阵列天气雷达和新颖的应用成果。

1 相控阵天气雷达技术发展特点

相控阵天气雷达由天线阵列、接收发射模块组件、信号处理组件、伺服、电源等构成，在这次会议的相控阵雷达交流中报告了天线、信号处理、天线罩等方面的新技术。

1.1 相控阵天线技术

相控阵雷达天线是相控阵天气雷达最有代表性关键部件，会议中多个报告介绍了相控阵天线研制。

相控阵天线的方向图可以在远场和近场进行测量。两者都需要特殊的设计，包括接近天线范围或在天线前安装探头的复杂机制。所有指向的方向图测量极其耗时。仿真计算是一种很好的实用方法。东京都立大学设计了平面型、圆柱型和半球型三种类型的相控阵天线，利用仿真技术对三种天线的差分反射率、差分相位相移、相关系数等偏振参数进行数值模拟，评估三种天线对雷达参数估计的影响。结果表明，由于平板天线波束宽、斜向旁瓣高，与圆柱形和半球形天线相比，平板天线的雷达反射率因子被高估，在水平方向（如方位角），真值与估计值之间的平均绝对误差约为3.0 dB。对于圆柱形天线，仅在垂直方向被高估，绝对误差是1.4 dB。半球形天线的估计精度与抛物面天线的估计精度相当，绝对误差是1.0 dB。

俄克拉何马大学等针对共形天线阵列方向图，提出了一种改进的粒子群优化算法。其主要目标是优化圆柱偏振相控阵雷达的波束形成权重。提出了一种新的两步目标优化方法，实现换向扫描所需的方向图。该算法首先定义水平偏振的粒子群优化算法，使得水平偏振达到低旁瓣和所有转换波束的期望波束宽度。第二步，对垂直偏振进行多目标优化，以获得高匹配的水平垂直共混模式以及低狭缝垂直偏振。提出了转换波束扫描的优化方向图，并与单波束机械扫描进行了比较。仿真和测量结果都证实了转换扫描双偏振方向图高度匹配。

三菱电气公司设计研制了一种注塑树脂制成的波导隙缝阵列天线，在交叉偏振特性和天线效率方面，与传统贴片阵列天线相比，具有良好的性能，对减轻重量和降低成本也有贡献。天线口径为3.2 m×3.2 m。天线由每个偏振74×16子阵组成，每个子阵有4个辐射单元。阵列的波束宽度小于1.2°，

实现低于-30 dB的旁瓣电平。

1.2 波束形成技术

传统的天气雷达体积观测的更新时间（体扫时间）是驻留时间和波束位置数的乘积。相控阵天气雷达通过数字波束形成（DBF）发射更宽的波束，同时产生多个窄接收波束，从而大大缩短了体扫时间。此外，DBF允许雷达波束自适应成形，以更好地抑制地杂波、干扰等，并提供更好的天气观测。大会上针对自适应波束形成技术做了展板交流，Shuhei Uchida等采用基于最小均方误差的自适应波束形成（MMSE）技术对相控阵天气雷达（MP-PAWR）进行了改进，以减小地杂波的影响。

1.3 数据传输和处理技术

相控阵天气雷达体扫时间短，数据更新快，覆盖仰角范围大，因此数据量和数据流量远大于抛物面天线雷达，数据传输的问题突显出来。日本国家地球科学和抗灾研究所（NIED）、名古屋大学等开发了一个流数据处理系统，可以从相控阵天气雷达（MP-PAWR）的观测数据中实时生成各种产品。在主机和处理系统之间建立一个TCP流。由MP-PAWR同时观测到的多个高程数据组成的数据块立即通过流发送给国家地球科学与抗灾研究所。到达的数据存储在处理服务器的共享内存中。接下来数据处理程序从共享存储器中搜索到的数据，并执行质量控制、差分相位常数（KDP）估计、衰减校正等。这个过程逐项并行，10 s内完成，结果保存在共享内存中。

1.4 脉冲压缩技术

相控阵天气雷达通常采用固态有源发射技术，因此脉冲压缩技术是相控阵天气雷达信号处理的关键技术之一。脉冲压缩后会有具有距离旁瓣，并可能导致来自相邻距离位置的污染。即使理论上设计的压缩波形具有可接受的距离旁瓣电平，由系统引入的实际效果可能会使这些旁瓣电平超过可接受的限度。俄克拉何马州的中尺度气象研究所为了满足严格的距离分辨率要求，在波形设计过程中考虑实际的系统效应，典型的解决方案包括预失真波形或失配滤波器的设计。一方面，波形预失真可以降低灵敏度为代价在距离旁瓣电平方面产生更好的性能；另一方面，由于接收数据的欠采样性质，与预失真发射波形相比，使用失配滤波器来补偿实际效果可能不是很有效。此外，水平偏振和垂直偏振的系统畸变可能不同，也会影响偏振变量估计的质量。

1.5 天线罩技术

雷达天线罩是雷达系统的重要组成部分，提供

结构强度，以保护雷达天线免受风载，并提供稳定性和完整性，以应对温度、湿度和压力等环境因素。此外，天线罩有利于系统的运行和维护，延长了系统的使用寿命。天线罩的一个不利影响是当外表面存在水或冰时雷达信号的性能下降。由于雨强不同，天线罩上形成了各种各样的水层，产生不同的衰减。根据工作频率，降雨强度，风力条件，以及天线罩的形状和材料，天线罩会显著地衰减、反射和消偏雷达信号。对于低于2.0 GHz 的频率，湿天线罩的影响相对较小。双偏振天气雷达对偏振产品，如差分反射率（ZDR）和线性退偏振比（LDR）的精度要求很高。水平偏振和垂直偏振之间的不匹配，以及交叉偏振分量的上升，在ZDR和LDR的测量中引入了偏差。俄克拉何马大学开展这项研究旨在调查雷达天线罩表面不同水层对偏振相控阵雷达信号质量的影响。对不同形状的天线罩进行了分析，包括球形、圆柱形天线罩。提出了一种实时校准技术，以减小湿天线罩产生的H偏振信号与V偏振信号之间的失配。

2 相控阵天气雷达和国家天气雷达网发展

相控阵天气雷达与抛物面天线天气雷达气象学意义上的差别就是相控阵天气雷达能够多波束同时扫描，而抛物面天线天气雷达只能单波束扫描。如果相控阵天气雷达同时N个波束扫描，那么，在脉冲重复周期、FFT点数、扫描俯仰角、扫描方位角、方位分辨率、俯仰分辨率等等决定体扫时间的参数相同情况下，相控阵天气雷达体扫时间是抛物面天线天气雷达时间的1/N。体扫时间减少带来的意义：一是时间分辨率提高，容易发现短周期的天气变化，容易捕捉小尺度天气；二是使得同一体扫资料不同空间位置的资料可比性提高。现在的新一代天气雷达体扫时间6 min，那么对于6 min内的变化就难以了解；再者，零度仰角的资料与最高仰角资料差6 min。对于分析天气的垂直结构增加了很大困难。正是相控阵天气雷达多波束同时扫描，大大缩短体扫时间的能力吸引了国内外气象人。美国国家气象局NWS明确提出了利用相控阵雷达达到建立更快的扫描速度的国家雷达网更新换代目标。

美国国家天气雷达网从20世纪80年代末开始建设到现在，已经30多年了。美国国家天气雷达网如何发展，从这次会议上美国专家发表的报告看，他们已经将目光投向了相控阵雷达。美国国家海洋和大气管理局（NOAA）的几个国家实验室已经开始评估到2040年更换气象监视雷达（WSR-88D）网的战略。NWS明确提出了更快的扫描速度的“客观”要求，这可能会增加龙卷风和其他高影响天气的警报提前时间，并

提高相关的检测概率，降低虚警概率。美国已提出一个时间表，2020年开始雷达技术和应用评估，2025年推出原型机，开始业务验证和评估工作，2030—2035年完成采购，开始生产，2040完成布设。

由NOAA、联邦航空管理局、林肯实验室、通用动力任务系统和俄克拉何马大学联合开发了先进的验证雷达（Advanced Technology Demonstrator, ATD），ATD是一个S波段双偏振有源的相控阵天气雷达，有发射单元4864个，48（2×24）个接收机。伺服系统俯仰180°旋转、方位360°旋转。与我们现有S波段业务雷达不同，其不采用真空管作为发射源，采用固态发射技术，利用脉冲压缩波形来满足灵敏度和距离分辨率要求。这个雷达是一个验证平台。根据近几年ATD系统的研究成果，美国计划基于现有ATD系统再开发二代系统，支持美国国家气象局（NWS）主导的相控阵雷达运行评估，为探讨下一代用于国家雷达网的相控阵雷达技术和业务建立提供支撑。

在过去的4年里，通过NOAA海洋及大气研究中心（OAR）的持续资助，以及可行性研究支持的高效率国家监视雷达（SENSR）计划，在气象标准化的研究方面取得如下进展：1）体系结构（阵列大小、数字化水平）；2）偏振标定和补偿；3）与WSR-88D标准相比的数据质量差异；4）相控阵雷达技术的发展（能力和成本）；5）扫描策略、预报员接口、同化方法；6）预报和预警服务效益；7）雷达网和辅助传感器的布局。

美国气象部门在研究用相控阵雷达作为下一代国家天气雷达网的组网雷达，所做的工作和取得的成果，我们清楚的看到了两点：1）相控阵天气雷达相对与WSR-88D有明显的时间分辨率优势，对于扩展国家雷达网捕捉小尺度强烈天气，提高防灾减灾预警能力有重要作用；2）相控阵天气雷达用于国家天气雷达网具有技术和业务可行性。鉴于这两点，相控阵雷达成为国家天气雷达网的组网雷达将成为一种发展趋势。

3 多种类型短程探测相控阵天气雷达

2003年，美国CASA计划提出了短程雷达近距离布设，协同观测的概念，由此，多雷达短程（几十千米）协同观测成为天气雷达一个新的重要发展方向，中科院大气物理研究所也开展这方面工作。CASA计划的几个子计划都采用了抛物面天线雷达，因此，在对天气系统的空间覆盖和数据时差（同一空间点不同雷达数据获取时间的差）都难以满足应用需求。用相控阵天气雷达将很好的弥补上述不足。这次会议除了报告远程探测相控阵天气雷达，如ATD外，更多报告介绍了多种短程探测相控阵天气雷达，这些雷达

有双偏振雷达，单偏振雷达，有X波段雷达，也有C和S波段雷达。这些相控阵雷达有一些共同特点：径向探测范围为几十千米；峰值发射功率不大，在几百瓦量级；采用有源天线体制；采用数字波束形成技术（DBF）；一维相控阵（俯仰电扫，方位机械扫描）；体扫时间几十秒。

美国俄克拉何马大学的高级雷达研究中心研发了一种移动式X波段相控阵雷达（AIR），AIR使用数字波束成形技术（DBF）来进行垂直方向扫描，在方位角上通过机械转向。该雷达在 110° 方位角 $\times 20^\circ$ 仰角扇区体积上以7 s的时间分辨率获得观测数据。

俄克拉何马大学的高级雷达研究中心正在与NOAA的国家强风暴实验室合作，开发S波段数字波束双偏振相控阵移动天气雷达（Horus）。Horus雷达具有1024（ 32×32 ）个双偏振信道，在自适应波束形成等方面将具有极大的灵活性。每个信道将产生10多瓦的峰值功率，支持10%的占空比，在50 km处的灵敏度约为12.5 dBZ。

美国国家科学基金会资助的移动C波段相控阵天气雷达系统（PAIR），借鉴了AIR和其他雷达系统的开发和部署中的经验教训，提高了可靠性、可维护性、易用性、安全性和可现场快速部署能力等。PAIR的体系结构提供了独特的扫描灵活性，以及双偏振探测，具有快速的体扫时间，PAIR能够同时在仰角方向上执行DBF操作，通过机械旋转实现方位角覆盖。最快体扫时间为6~10 s。

日本无线电有限公司研发了一种单偏振X波段相控阵天气雷达。它只需要30 s就可以完成半径80 km以内，高度20 km内的体积扫描。它从16个缝隙天线单元发射水平偏振波，126个缝隙天线单元接收回波信号，采用数字波束形成DBF，空间分辨率高达50 m。

美国俄克拉何马大学牵头研制的圆柱形偏振相控阵雷达（CPPAR），首次采用圆柱形相控阵天线进行气象探测应用，使用单束机械扫描和换向束电子扫描，可以在各个方向上具有方位角和偏振扫描不变束的特性，从而可以进行高质量的天气测量。

中国气象科学研究院采用X波段相控阵天气雷达和两个极化天气雷达开展联合探测强对流天气。通过对2016年5月9日广东佛山发生的一次超级单体的观测分析，超级单体中的偏振特征与特定的微物理过程有关，这些过程可以揭示风暴演变的不同阶段。相控阵雷达的观测在短时间尺度上显示了抛物面天线雷达无法观测到的详细变化。中国气象科学研究院开展了相控阵天气雷达雷达定标技术研究和应用。

会议报告的多种短程探测相控阵天气雷达，从种

类的和数量可以看出短程探测将是相控阵天气雷达发展的极为重要的方向。这些短程探测相控阵雷达体扫时间大大缩短，仰角 $0^\circ \sim 90^\circ$ 覆盖条件下，一般体扫时间不超过60 s，在时间分辨率上具有显著优势。距离分辨率也比较高，一般都是几十米。在小尺度强烈天气，如冰雹、龙卷、短时强降水探测中，能更精细的揭示其结构。随着短程探测相控阵天气雷达的应用，短临预报将得到新的发展。

4 阵列天气雷达及动力学与热力学结合探测

在这次会议上上海市气象局报告了独具特色的阵列天气雷达（AWR）试验。中国气象局气象探测中心、上海市气象局和湖南宜通华盛公司在上海开展AWR探测试验。AWR是由气象部门和湖南宜通华盛公司共同设计和研制的，并于2018年11月开始在上海安装。目前，S和C波段抛物面雷达系统已被证明是一种有效的天气监测系统，特别是在100 km以上的大范围内。然而，典型的S波段或C波段雷达系统在空间和时间解析度上的局限性不足以捕捉迅速变化的小尺度天气，更重要的是目前的天气雷达主要提供的是天气系统的热力学信息，通过回波强度和偏振量可知大气产生了凝结、凝华，释放了潜热，将产生对流，然而对流的强度，整个流场的变化并不能知道，虽然可探测到径向速度，但仍然不能准确确定3维风场分布。AWR是一种新型的分布式相控阵天气雷达，AWR包括至少三个相控阵子阵（AWR的前端）。本次试验中安装的三个子阵列，分别位于上海宝山、浦东和崇明三个地区，形成一个类似于等边三角形的观测网络。三个子阵列作为一个整体进行同步扫描，保证同一空间点的数据时差小于5 s，从而利用子阵列的径向速度合成正确的流场。AWR的一次体扫时间是30 s。覆盖整个天空，距离分辨率30 m，距离探测范围43 km。子阵采用俯仰电扫数字波束形成技术，方位采用机械旋转方式。它发射4个宽波束，接收64路后向散射信号。在上海市区开展了探测试验，与S波段雷达系统的初步比较表明，AWR不仅可获得强度（反射率因子）数据，并探测得到的高分辨率三维风场，获取了动力学信息，能更详细地反映降水的结构和动态过程。这样不仅能得到降水天气系统的云降水的水成物信息，同时也得到对应的动力学结构和变化，这将为短临预报的进一步发展提供了新的参量。

5 小结

第39届国际气象雷达会议第一次将相控阵天气雷达列为一个交流主题。从相控天气雷达交流的内容，可以看到天气雷达的发展和相控阵天气雷达的重大作用。

1) 会议交流展示出了对天气雷达的发展有影响

力的工作成果。美国气象部门表达了选择相控阵天气雷达作为国家雷达网组网雷达的基本观点——利用相控阵快速扫描的特点，缩短体扫时间，提高雷达网捕捉小尺度天气系统的能力。他们在技术层面和业务层面的研究，让人们看到了相控阵天气雷达作为下一代业务使用天气雷达的可能性。

2) 短程探测将是相控阵天气雷达发展的极为重要的方向。这些短程探测相控阵雷达体扫时间一般体扫时间不超过60 s。距离分辨率也比较高，一般都是几十米。在小尺度强烈天气，如冰雹、龙卷、短时强降水探测中，能更精细的揭示其结构。

3) 介绍了不同类型的相控阵天气雷达，在波段上有S、C、X，在偏振方式上有单偏振、双偏振。这些相控阵天气雷达也有不少共同点，大部分径向

探测范围为几十千米；峰值发射功率不大，在几百瓦量级；采用有源天线体制；采用数字波束形成技术（DBF）；一维相控阵（俯仰电扫，方位机械扫描）；体扫时间短。

4) 这次会议的相控阵雷达交流报告中涉及到了天线、信号处理、天线罩等相控阵天气雷达的主要技术。其中注塑树脂制成的波导缝隙阵列天线和多输入输出技术都是过去未采用的新技术，这些技术对于相控阵天气雷达发展有可能带来重要影响。

5) 报告了我国独立设计研制的新型相控阵天气雷达——阵列天气雷达，AWR采用分布式技术体制和扫描同步技术，解决了阻碍风场合成的时差过大问题，实现了风场与云降水相结合的探测。

深入阅读

Andrew M, Kyle P, Yu T Y, et al, 2019. Assessing the benefits of a rapid-scanning phased array weather radar. 39th international conference on radar meteorology. Nara, Japan.

Bluestein H, Howard B, French M, et al, 2010. A mobile phased-array Doppler radar for the study of severe convective storms. Bull Amer Meteor Soc, 91: 579-600.

Casey G, David B, Javier L, et al, 2019. High-temporal resolution observations of weak-echo reflectivity bands in the 16 may 2017 wheeler, Texas, Tornado. 39th international conference on radar meteorology. Nara, Japan.

Chen H J, Mu H Z, Wang Q D, et al, 2019. Shanghai Urban Array Weather Radar Network Experiment. 39th international conference on radar meteorology. Nara, Japan.

David S, Sebastián M T, 2019. Design of practical pulse compression waveforms for polarimetric phased array radar. 39th international conference on radar meteorology. Nara, Japan.

Igor R, David S, 2019. A first look at the ATD data corrections. 39th international conference on radar meteorology. Nara, Japan.

Jorge L S, 2019. The impact of a wet radome on polarimetric quality of phased array weather radars: analysis and calibration. 39th international conference on radar meteorology. Nara, Japan.

Kento N, Hiroshi K, Tomoaki M, et al, 2019. Preliminary analysis to design C-band polarimetric phased array weather radar. 39th international conference on radar meteorology. Nara, Japan.

Mark E W, Kurt H, 2019. Research to operations strategy for meteorological phased array radar. 39th international conference on radar meteorology. Nara, Japan.

Mohammad H G H, Hadi S M, Zhang G F, 2019. Pattern synthesis for conformal phased array antenna using a multi-objective optimization. 39th international conference on radar meteorology. Nara, Japan.

Robert P, Caleb F, Jorge S, et al, 2019. An update on the “Horus” all-digital polarimetric phased array weather radar. 39th international conference on radar meteorology. Nara, Japan.

Shigeharu S, Kazuomi i, Saori K, et al, 2019. X-band phased array weather radar observations of a mesocyclone in the Tokyo urban area. 39th international conference on radar meteorology. Nara, Japan.

Takeshi M, Kaori K, Koyuru I, et al, 2019. Streaming data processing

for multi-parameter phased array weather radar (MP-PAWR) data. 39th international conference on radar meteorology. Nara, Japan.

Tomoya M, Ikuya K, Yoshihiko K, et al, 2019. Development of a dual-polarized slotted waveguide array antenna made of injection-molded resin. 39th international conference on radar meteorology. Nara, Japan.

Wu C, Liu L P, 2014. Comparison of the observation capability of an X-band phased-array radar with an X-band Doppler radar and S-band operational radar. Adv Atmos Sci, 31(4): 814-824.

Wu C, Liu L P, Liu X, 2018. Advances in Chinese dual-polarization and phased-array weather radars: observational analysis of a supercell in southern china. Journal of atmospheric and oceanic technology, 35(9):1785-1806.

Wu T, Takayanagi Y, Yoshida S, et al, 2013. Spatial relationship between lightning narrow bipolar events and parent thunderstorms as revealed by phased array radar. Geophysical Research Letters, 40(3): 618-623.

Wurman J, Dowell D, Richardson Y, et al, 2012. The second verification of the origins of rotation in tornadoes experiment: VORTEX2. Bull Amer Meteor Soc, 93(8): 1147-1170.

Yu T Y, Matthew S M, Jorge L, et al, 2019. Development of a shared mobile c-band polarimetric atmospheric imaging radar (pair). 39th international conference on radar meteorology. Nara, Japan.

Yu T Y, Matthew S, Jorge L, et al, 2019. Development of a Shared Mobile C-band Polarimetric Atmospheric Imaging Radar (PAIR). 39th international conference on radar meteorology. Nara, Japan.

刘黎平, 胡志群, 吴翀, 2016. 双线偏振雷达和相控阵天气雷达技术的发展和应用. 气象科技进展, 6(3): 28-33.

刘黎平, 吴翀, 汪旭东, 等, 2015. X波段一维扫描有源相控阵天气雷达测试定标方法. 应用气象学报, 26(2):129-140.

刘黎平, 吴林林, 吴翀, 等, 2014. X波段相控阵天气雷达对流过程观测外场试验及初步结果分析. 大气科学, 38(6): 1079-1094.

马舒庆, 陈洪滨, 王国荣, 等, 2019. 阵列天气雷达设计与初步实现. 应用气象学报, 30(1): 1-12.

吴翀, 刘黎平, 汪旭东, 等, 2014. 相控阵雷达扫描方式对回波强度测量的影响. 应用气象学报, 4(3): 406-414.

杨金红, 高玉春, 程明虎, 2008. 相控阵技术在大气探测中的应用及面临的挑战. 地球科学进展, 23(2): 142-150.

(作者单位: 高玉春、步志超、陶法、徐鸣一、王箫鹏、张乐坚、李瑞义、文浩、马舒庆, 中国气象局气象探测中心; 陈浩君, 上海市气象局)

龙卷预报预警体系建设 ——气象现代化的前沿挑战

■ 姚聃

以雷达为核心的龙卷监测预警系统在准确性方面优于数值模式预报产品，能更有效地对龙卷落区和持续时间进行预报预警，但其依赖于已发生的超级单体和中气旋，在预报时效上往往难以保证。而数值模式产品的适当引入则可以弥补这一不足，完善龙卷监测预报预警体系。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.06.005

龙卷因其较小的尺度和较短的持续时间而成为天气预报业务体系中难以监测预警的灾害性天气系统。可以说，龙卷的预报预警是气象现代化进程中面临的难以克服而又必须面对的重要课题。不过，龙卷预警并非无法实现。具体而言，实现途径主要有两条，一是基于以雷达为核心的观测系统针对超级单体和钩状回波开展识别和追踪，二是基于高分辨率（风暴尺度）数值产品开展龙卷发生潜势预报。以雷达为核心的监测预警系统在准确性方面优于数值模式预报产品，可以更准确更有效地针对龙卷落区和持续时间进行预报预警，但其依赖于已发生的超级单体和中气旋，在预报时效上往往难以保证。而数值模式产品的适当引入则可以弥补这一不足，完善龙卷监测预报预警体系。在这方面，美国的经验给了我们一些启示，我国气象部门也已经在不断摸索中取得了一些进展。

1 需求带来发展——从美国的龙卷预警谈起

美国的龙卷及灾害性天气预警体系由预警（watch）和警报（warning）两个部分组成。龙卷预警是指在未来2~8 h会有龙卷发生，包括了多龙卷和单一强龙卷的可能性，也包括大冰雹和灾害性强风的潜在威胁。龙卷预警是由位于俄克拉何马州Norman市的美国国家环境预报中心（NCEP）下属的风暴预报中心（SPC）统一发布，目标区域包括美国全境，不受到州和区域的限制。龙卷警报是指已经观测到强天气过程的发生，即使没有发生龙卷，但是龙卷发生的可能性已经很大。龙卷警报是由美国各地的基层气象台直接发布的。预警的发布主要是基于当前已有的雷

达观测资料和风暴目击志愿者的目击观测，范围往往比较具体。

预警和预报的发布主要是依靠媒体。在美国，电视、互联网、天气软件等都对龙卷灾害高度重视。在龙卷预警发布后，公众可以在天气软件的手机客户端获得推送消息，主流媒体也会通过各种形式进行提醒。在龙卷警报发布后，覆盖地区迅速拉响警笛（包括城镇户外区域和公共建筑内部），同时手机会通过小区广播形式强制向所有用户推送警报，确保公众可以迅速获取信息并及时撤离。这是一种快捷有效的预警信息发布方案。此外，对于危险性极大的过程（较大概率发生EF2及以上级别龙卷），会发布“特别危险情况”（PDS）警报。

由于美国公众和媒体对于龙卷等灾害性天气的特殊关注，各大电视台（而不只是天气频道）都会将龙卷天气过程作为突发性事件进行全程报道，在雷暴发生之后就会通过现场直播向公众播发灾害性天气系统的最新进展。电视台会将自己拥有最出色的天气解说员、最精彩的现场风暴追逐资料作为品牌竞争力，使得公众可以实时查看到当前强风暴的最新进展。这一现象促使美国公众在加强安全意识的同时，拥有了丰富的科普知识，了解龙卷天气的成因、危害以及紧急避险措施，同时也保证了社会不会对于龙卷的突然发生毫无准备。

2 推动龙卷业务提高的基石——美国春季预报试验

美国龙卷的高发区域是素有“龙卷走廊”之称

收稿日期：2020年12月7日；修回日期：2020年12月16日

作者：姚聃（1987—），Email: yaod@cma.gov.cn

资助信息：国家重点研发计划（2018YFC1506103）；国家自然科学基金青年基金项目（41705028）

的中部大平原地区，高发时间为春季，特别集中在5月。针对这一特征，春季预报试验（SFE）应运而生。该试验是由美国国家海洋大气管理局（NOAA）开展的“危险性天气试验基地”（HWT）的重要组成部分，旨在测试强风暴预报的新技术与新方法。春季预报试验由NOAA下属的气象科研部门美国国家强风暴实验室（NSSL）和NCEP下属的气象业务部门SPC共同举办，既是科研成果向业务转化的平台，也是业务需求向科研反馈的媒介。通过科研与业务的结合，科学家与预报员在春季预报试验的框架下，提高了对强风暴灾害的科学理解和业务水平。春季试验是一个系统性的龙卷预报预警试验平台，会有来自不同机构的众多集合预报模式参与高分辨率区域数值天气预报，每年都会有改进版本的新方案、新模式加入试验，测试预报效果。同时，SPC会组织来自各地的专家学者、预报员以及研究生参与试验。试验参与者的工作是基于全部观测产品和试验平台中的高分辨率区域模式预报产品进行预报和评估。这是科研与业务结合的范例。这既保证了每天的预报都能有大量的信息和讨论，同时又可以根据试验参与者反馈的信息对于模式效果进行评估，从而获知下一年的改进方向。美国的业务预报模式正是在这样的框架下，在每一年龙卷季的失败与成功中不断完善。

春季预报试验的核心任务包括实时预报与评估检验两部分。其中，评估检验部分是实现科研与业务结合的关键因素，也是春季试验的特色所在。在试验过程中，专家团队会在每日针对前一天数值预报产品的效果进行主观评估和模式检验。模式研发团队会针对参与试验的模式产品设计评估问题，对比不同模式的效果差异，考察新技术和新方案的改进效果。在每年的春季试验结束之后，模式研发团队还将对当年全部试验数据进行系统性客观评估，并于专家团队的主观评估效果一起进行综合分析，以确定下一年度技术方案的取舍和改进方向。最后，根据评估反馈结果改进后的新版模式系统将进入下一年度春季试验的预报与评估，开始新一轮的测试、评估和改进周期，以实现不断推动模式研发及业务应用的目标。

春季预报试验项目正式启动于2000年。通过春季试验的合作平台，预报员提升了对模式产品释用的理解，而模式研发人员则加深了对数值模式在预报业务中的应用和需求的认识。基于当年试验的反馈信息，主办者明确了下一年度试验的主要关注点和具体科学问题，即数值模式能否更有效地应用于对流触发、强度和演变过程的预报，而不再只依赖于观测资料本

身。科研人员的加入促进了预报员对数值模式可靠性和准确性的理解。两项最重要的变化在于将更多试验性的模式产品作为每日预报的重要参考，以及引入量化评分表开展模式方案效果对比的主观评估。这两项变化很好地推动了春季试验的不断完善，并一直沿用至今。

自2003年起，对流可分辨模式（CAMs）开始在春季预报试验中得到测试和应用。对流可分辨模式的水平分辨率在4 km或更高，可以直接解析对流发生发展过程，不再依赖于积云对流参数化方案。以对流可分辨模式为基础，风暴尺度集合预报（SSEF）系统应运而生。美国俄克拉何马大学风暴分析与预报中心（CAPS）于2007年搭建了首个实时运行的风暴尺度集合预报系统，并在之后的数年中不断根据试验效果进行改进。至2010年，春季预报试验已加入覆盖全美地区的包含26个集合成员的水平分辨率为4 km的多模式风暴尺度集合预报产品，以及1个水平分辨率达到1 km的高分辨率确定性预报产品。至2015年，春季预报试验加入了基于个人电脑的反馈机制，参与者不再以小组为单位提交对模式主观评估的集体意见，而是可以独立进行预报、检验和评估。

随着春季预报试验的不断推进，越来越多的集合预报模式加入其中。然而，由于这些模式都是独立设计研发的，难以对其效果差异及成因进行明确的归因，也因此无法找到最优的集合设置。为解决此问题，自2016年起，春季预报试验引入了“社区推动一体化集合”（CLUE）系统，以统一的标准规范各家集合预报模式的模式网格、物理过程等设置。

3 突破可预报性的瓶颈——基于预报的龙卷预警

与台风、暴雨等尺度更大、持续时间更长的天气系统不同，龙卷的预报很难基于数值模式实现。基于雷达观测的龙卷预警，美国地区的平均预报时效只有13 min，并且虚警率高达75%。即使将雷达数据传输和预警发布所消耗的时间缩减至最小，留给公众避难的时间仍然十分短暂，并且在龙卷触发区域难以给出有效的预警。而数值模式性能以及计算资源的不断提升，特别是雷达资料的实时处理和快速更新同化系统的发展，使得基于高分辨率数值模式开展龙卷及强风暴预警逐渐成为可能。真正制约龙卷模式预报预警发展的瓶颈在于龙卷系统对生成环境条件以及对流发展过程的高度敏感性以及与此相关的可预报性问题。为解决这一问题，NSSL和SPC于2010年共同提出并建立了基于数值预报的预警（Warn on Forecast, WoF）研

究计划。该计划的核心目标是将多普勒天气雷达及新型雷达（包括双偏振雷达和相控阵雷达）观测到的风暴内部信息同化到数值模式中，形成对流尺度集合和概率预报产品。

实现基于预报的预警主要依赖于两点，一是可以快速基于雷达观测数据生成三维分析产品的基本系统，二是在此基础上不断完善该系统的大量科学与技术性改进。其中既需要不断提升对强风暴和中尺度对流系统可预报性的理解，也离不开可靠而快速的观测资料质量控制。模式分辨率的提高以及与此相匹配的物理过程参数化的改进可以有效减小模式误差的增长。观测试验和灾害调查的数据有助于最终提升龙卷和强对流灾害预警能力。

对于无法直接解析龙卷的对流可分辨尺度模式而言，使用同时表征了垂直速度和垂直涡度大小的上升螺旋度（UH）可以有效识别旋转上升气流，作为判定中气旋和超级单体的指标，从而实现龙卷发生可能性的替代性概率预报。其较高的运算效率和可接受的误差范围为龙卷的模式预报提供了更多可能。这一方案在2008年春季预报试验中得到了测试和检验，并在之后的集合预报产品中获得推广和应用。然而，中气旋的存在并不一定产生龙卷，同时龙卷的发生也不一定伴随有强烈的中层旋转。低层旋转是比中层旋转更为直接的判定龙卷发生的指标。2015年春季预报试验集合预报产品的测试结果表明，0~3 km上升螺旋度具有比2~5 km上升螺旋度更准确的龙卷预报效果，直接使用垂直涡度在更高分辨率的模式产品中具有潜力。需要指出的是，这里涉及的主要还是预报可能产生龙卷的超级单体，而不是直接预报龙卷本身。

模式分辨率的不断提高对于对流可分辨模式预报龙卷能力的提升具有显著效果。基于2010—2017年497次龙卷过程的不确定性后报试验表明，1 km分辨率数值模拟相较于3 km模式在识别龙卷性对流风暴方面具有明显优势，而次公里级别的效果提升更加值得期待。0~1 km上升螺旋度具有最优的龙卷识别和预警效果，是区分龙卷与非龙卷天气事件的最佳判定指标。相比而言，2~5 km上升螺旋度更加适用于预报由超级单体造成的冰雹等其他灾害性天气。目前已有一些工作基于资料同化开展了龙卷可分辨尺度数值模拟。这些研究性质的后报试验体现了龙卷可分辨尺度模拟对于重现龙卷生成和演变过程的必要性。然而，由于预报误差的快速增长，龙卷预报存在难以克服的可预报性局限，集合预报对于预报龙卷强度、路径、时间和不确定性等信息而言必不可少。在CAPS开展

的分辨率高达50 m对流可分辨尺度集合预报试验中，全部10个集合成员都可以预报出2013年5月20日美国Moore龙卷，其中4个成员可以成功预报出与实际观测一致的EF5级超强龙卷。这充分体现了对流可分辨集合预报模式对于龙卷预报的巨大潜力。但其惊人的计算量对于当前计算机性能来说还远远无法实现业务化。

4 困境与希望同在，机遇与挑战并存——我国龙卷预警

在我国，龙卷的预报预警需要加强之处主要包括以下几个方面。

第一，亟需加密探空观测，并保证探空质量。与美国中部大平原地区经常出现的大范围有利于龙卷发生条件不同，我国龙卷的有利环境条件往往是局地性的，因此难以被观测捕捉。虽然美国的标准探空也只有每天两次，但是在龙卷及灾害性天气发生危害较高的时段，某些具有代表性的重点台站会开展加密探空观测。我国常规的探空观测时间是北京时间08时和20时。一些台站会在汛期增加14时观测。事实上，由于龙卷多发时段通常在午后到傍晚，08时探空条件往往还未能形成有利条件，而20时探空则往往已经在对流发展、能量消亡以后，因此也不具有代表性。如果可以保证更多台站推广14时探空，甚至采用动态机制对于特殊天气过程追加其他关键时次临近探空，这对于龙卷预报预警和灾后分析将起到关键作用。

第二，提升多普勒天气雷达观测数据质量。我国的多普勒天气雷达已经有了较好的覆盖度。但是，由于厂家不同，某些台站的雷达质量控制算法未能统一和完善，数据质量难以保证。以2019年辽宁开原龙卷为例，虽然伴随龙卷出现的钩状回波结构在反射率因子图上有清晰的体现，但是表征龙卷旋转性风场的径向速度特征却不明显，很有可能与质量控制有关。此外，在我国某些区域，龙卷的雷达观测会受到山地等障碍物的影响，也就是说现有雷达组网的覆盖度仍有欠缺。我国不少地区已修建了更高观测精度但观测距离较短的X波段雷达区域观测网络，比如龙卷发生相对集中的广东佛山地区。这对于重点地区是十分有益的，但因成本问题并不适合在全国推广。另外，现有X波段雷达标准没有统一，质控方面存在更多问题。综上所述，完善雷达观测数据质量控制体系是提高龙卷预警能力的关键。

第三，提高数值模式对于龙卷天气的预报能力。我国现有的天气预报，主要是基于国内外数值天气预报模式。国家气象中心以及北京、上海、广东等省

(市)气象部门也研发并运行了全国或者特定地区的区域预报模式。然而,除了模式分辨率和准确率方面的问题之外,现有模式对于龙卷等小尺度天气过程的信号关注不够。相比而言,美国的模式产品会提供龙卷等强天气过程的潜势指数,预报员和专家在预报预警过程中也会关注模式产品所预报的探空信息,并与实测进行比较。事实上,由于模式可预报性的局限,依赖模式产品准确判断强天气过程的发生发展是十分困难的,而天气环境的变化趋势往往可以有更好的可信度。在现有的数值天气模式系统基础之上,如果提供更多中小尺度潜势信息,并引导预报员更多关注,那么有可能在龙卷潜势预报方面提供更多有益的参考。

第四,提高天气预报员对龙卷灾害的判断能力。由于龙卷发生概率较低,我国预报员往往没有意识,也没有勇气发布龙卷预警。而这一现状可以从提升龙卷多发区如江苏北部、安徽北部、广东珠江三角洲地区和雷州半岛、海南岛、内蒙古东部和黑龙江等地预报员意识的角度着手。在模式预报出现了强天气高发潜势的情况下,如果实际观测数据的演变也与预报相符合,则应引起特别关注。在风暴系统已经发生的情况下,预报员如果仅关注降水、冰雹、雷电、大风等天气过程,往往会习惯于只看雷达组合反射率拼图。而如果要预警龙卷,则需要密切关注辖区内每一部多普勒雷达的低层仰角、垂直剖面以及三维等值面结构,实时查看最新资料中有没有出现钩状回波、中气旋,乃至更小尺度的龙卷涡旋特征等信息。这一部分是美国实际发布龙卷警报的关键依据。

令人欣慰的是,2016年江苏阜宁超强龙卷发生以来,国家气象中心及相关省份气象台对于龙卷的预报预警工作高度重视。中国气象局气象干部培训学院积极推动针对龙卷预报预警方法的业务培训,提高预报员的技能和意识。2020年6月12日江苏高邮龙卷发生之前,高邮市气象局成功发布了暴雨黄色预警信号,特别提醒公众注意强降水和与之相伴的龙卷。在佛山市龙卷风研究中心的技术支持下,佛山市气象局2018年2次提前30 min以上成功针对龙卷发布预警,龙卷预警精细到镇街,实现我国龙卷预警的历史性突破。更为令人惊叹的是,佛山市气象局将全市4万余个铁皮工棚的坐标信息及安全责任人信息录入龙卷风及雷雨大风等灾害预警信息靶向发布系统,第一时间向受影响区域的责任人推送龙卷预警信息,同时也在第一时间获取龙卷灾情反馈信息。这既是积极运用智慧气象和大数据技术的精细化服务,也充分体现了全心全意为人民服务的社会担当与人文关怀。

5 结语

笔者永远不会忘记,在2015年6月1日湖北监利“东方之星”客轮倾覆事件的风灾现场以及2016年6月23日江苏阜宁超强龙卷风灾现场开展灾害调查时的触动。在破坏力极强、发生又极其突然和迅速的龙卷面前,人的力量是如此渺小。即便我们可以成功预测出龙卷的发生,我们又能让群众及时逃离灾难呢?经过大约5年的时间,情况发生了改变。气象部门多年以来的探索,特别是佛山市龙卷风研究中心等机构积极、成功的实践给了我们希望与信心。诚然,与美国龙卷预报预警相比,我国的业务体系还不完备,经验也不充分。短期而言,数值天气预报模式的准确率还亟待提高,基于预报的龙卷预警在中国还有很长的路要走。但是,我们并没有必要完全沿着国外的经验发展。通过多年来的积累,我国气象部门已经初步摸索出一套适合我国国情的龙卷预报预警方法。在“创新驱动发展”和“人才强局”战略的大力支持下,龙卷预报预警业务体系的建设与完善指日可待。让我们共同见证!

深入阅读

- Clark A J, Jirak I L, Dembek S R et al., 2018. The Community Leveraged Unified Ensemble (CLUE) in the 2016 NOAA/Hazardous weather testbed Spring forecasting experiment. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 99: 1433-1448.
- Clark A J, Weiss S J, Kain J S et al., 2012. An overview of the 2010 hazardous weather testbed experimental forecast program spring experiment. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93: 55-74.
- Snook N, Xue M, Jung Y, 2019. Tornado-Resolving ensemble and probabilistic predictions of the 20 May 2013 Newcastle-Moore EF5 tornado. *Monthly Weather Review*, 147: 1215-1235.
- Sobash R A, Kain J S, Bright D R et al., 2011. Probabilistic forecast guidance for severe thunderstorms based on the identification of extreme phenomena in convection-allowing model forecasts. *Weather and Forecasting*, 26: 714-728.
- Sobash R A, Romine G S, Schwartz C S et al., 2016. Explicit forecasts of low-level rotation from convection-allowing models for next-day tornado prediction. *Weather and Forecasting*, 31: 1591-1614.
- Sobash R A, Schwartz C S, Romine G S et al., 2016. Next-day prediction of tornadoes using convection-allowing models with 1-km horizontal grid spacing. *Weather and Forecasting*, 34: 1117-1135.
- Sobash R A, Schwartz C S, Romine G S et al., 2016. Severe weather prediction using storm surrogates from an ensemble forecasting system. *Weather and Forecasting*, 31: 255-271.
- Stensrud D J, Wicker L J, Xue M et al., 2013. Progress and challenges with Warn-on-Forecast. *Atmospheric Research*, 123: 2-16.
- Stensrud D J, Xue M, Wicker L J et al., 2009. Convective-scale warn-on-forecast system: A vision for 2020. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90: 1487-1500.

(作者单位: 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室)

2020年5月31日佛山超级单体龙卷过程分析

李婉仪¹ 黄先香² 蔡康龙² 植江玲² 张晶晶² 周晓仪¹ 田良钰¹

(1 广东省佛山市高明区气象局/佛山市高明区突发事件预警信息发布中心, 佛山 528000;

2 广东省佛山市气象局/佛山市龙卷风研究中心, 佛山 528000)

摘要: 利用常规高空地面观测、广东区域自动站以及广州多普勒雷达等资料对2020年5月31日发生在佛山市高明区的西风带超级单体龙卷天气过程进行分析, 结果表明: 高层辐散场与中低层弱辐合区叠交, 中低层深厚强盛的西南暖湿气流, 配合地面辐合线长时间维持, 为龙卷超级单体风暴发生发展提供了有利的天气背景; 大的CAPE、较强的低层垂直风切变和低的抬升凝结高度为龙卷的发生提供了有利的环境条件; 龙卷产生于 β 中尺度超级单体风暴, 雷达探测到较明显的钩状回波、回波悬垂和低层中等强度中气旋, 但中气旋尺度较大, 龙卷触地前后中气旋直径在6 km以上, 龙卷出现在钩状回波顶端和中气旋中心。

关键词: 龙卷, 西风带系统, 环境背景, 雷达回波特征, 中气旋

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.06.006

Analysis of Supercell Tornado in Westerly Zone of Foshan on 31 May 2020

Li Wanyi¹, Huang Xianxiang², Cai Kanglong², Zhi Jiangling², Zhang Jingjing², Zhou Xiaoyi¹, Tian Liangyu¹

(1 Foshan Gaoming District Weather Service/Gaoming Emergency Early Warning Release Center, Foshan 528000

2 Foshan Weather Service/Foshan Tornado Research Center, Foshan 528000)

Abstract: Based on the data of conventional meteorological observations, Guangdong regional automatic weather stations and Guangzhou Doppler radar, the weather process of westerly supercell tornado occurred in Gaoming District of Foshan City on 31 May 2020 was analyzed. The results show that the high-level divergence field which overlaps with the weak convergence area in the middle and low-level, and the deep and strong southwest warm and humid air flow in the middle and low-level, combined with the long-term maintenance of the surface convergence line, provide favorable weather background for the occurrence and development of supercell storm. Large Cape, strong low-level vertical wind shear and low LCL provide favorable environmental conditions for tornado occurrence. Tornado is produced in meso- β scale supercell storms, and radar detects obvious hook echo, echo suspension and low-level moderate intensity mesocyclone, but the mesocyclone scale is large and the diameter of mesocyclone is more than 6 km before and after the tornado hits the ground, and the tornado appears at the top of hook echo and the center of mesocyclone.

Keywords: tornado, westly system, weather background, radar echo features, mesocyclone

0 引言

龙卷是对流云产生的破坏力极大的小尺度灾害系统, 虽然持续时间短, 但其产生的强烈阵风常造成重大的财产损失和人员伤亡^[1]。与短时强降水、雷雨大风等类型强对流相比, 龙卷属于小概率事件, 短临预报预警技术欠缺。为加强龙卷研究, 最大程度做好龙卷防灾工作, 不少学者对龙卷在我国的地域分布^[1-4]、

龙卷发生的大气环流形势、物理量条件和雷达回波结构特征^[5-13]进行了分析, 并对开展超级单体龙卷和非超级单体龙卷的监测预警技术进行了深入探讨^[14-18]。

佛山是珠三角及广东龙卷最为高发的地区之一, 根据影响天气系统, 佛山龙卷大致分为四类: 台风外围型、锋面暖区型、地面辐合线型和热带扰动型^[19], 其中, 锋面暖区型和地面辐合型主要发生在西风带系统的环流背景中。佛山龙卷以台风外围龙卷为主^[17, 20-24], 西风带系统龙卷相对较少。从龙卷落区看, 佛山龙卷主要发生在佛山东部的平原地带, 西部山区和丘陵地带鲜有发生^[19]。2020年5月31日19时(北京时, 下同)左右, 佛山市西部的高明区丘陵地带发生了龙卷灾害, 这在历史上是少见的。为此, 本文利用预报员

收稿日期: 2020年10月9日; 修回日期: 2020年11月5日

第一作者: 李婉仪(1992—), Email: leewanyilwy@163.com

通信作者: 黄先香(1974—), Email: fsqxj@163.com

资助信息: 广东省科技厅社会发展科技协同创新体系建设专项(2019B020208015); 灾害天气国家重点实验室开放课题(2018LASW-B18)

日常可获取的多种气象资料，对此次龙卷进行细致分析，旨在为此类极端天气过程监测预警提供经验参考。

1 龙卷灾情概况

2020年5月31日11—21时，佛山高明区出现强降雨天气，更合镇、明城镇出现暴雨，最大阵风6级。其中，19时许佛山市高明区更合镇停步工业区附近出现大风灾害，造成两家公司严重经济损失，没有人员伤亡。经佛山市龙卷风研究中心和高明区气象局对灾害现场沿线的目击者走访、影像资料收集、勘查取证、无人机航拍等方式，再结合天气雷达等多种气象数据综合分析研判，确认局地风灾为龙卷造成的。龙卷影响时间是18:59—19:01，龙卷主要在停步工业区造成明显破坏痕迹，最大破坏直径80 m，影响路径长度约670 m，两棵直径10 cm的芒果树被拦腰截断，龙卷破坏程度对应我国龙卷强度行业标准二级，相当于EF1级；目击者拍摄的多个视频以及工厂监控视频可见，被卷起的厂房铁皮顶及其他碎片逆时针方向旋转上升，且旋转时间超过1 min（图1a—1d）；航拍破坏现场可见，破坏痕迹狭长，纵横比大，是明显的龙卷风破坏特征（图1e）。该龙卷大风范围小，周边区域气象自动站布设仍较稀疏，距离龙卷发生地最近的3个气象站均在3 km以上，仅有处龙卷发生地下游方向的歌乐村委站录得极大风速达6级（12.9 m/s）。

2 天气背景和环境条件

2.1 天气背景

由2020年5月31日08时环流形势（图2）可见，500 hPa副热带高压（以下简称副高）较为强盛，588线控制广东，但受高原上西风槽东移下滑和云桂交界处短

波槽东传的影响，副高有所减弱，广东处于短波槽前和副高不稳定边缘间不断增大的西南风场中，广东中西部一带的西南风风速由08时的14 m/s增至20时的16 m/s。700~925 hPa贵州附近有低涡发展，广东受低涡东南侧与副高西北侧之间的强盛西南气流影响，700、850、925 hPa存在一支风速分别为12、10、8 m/s的显著西南气流，由海上向珠江口西侧输送水汽和不稳定能量。同时，200 hPa广东处于南亚高压西北侧和高空急流轴右侧之间的辐散区内。31日午后，地面暖低压槽稳定少动，佛山处于槽前，南部沿海风力较大，有利于海上水汽向广东输送，且珠江口北侧经佛



图1 2020年5月31日18:59高明区更合镇龙卷视频截图（a—d）和灾情（e）（弧线箭头为飞物方向）

Fig. 1 Video screenshots (a–d) and disaster situation (e) of the tornado occurred in Genghe Town, Gaoming District on May 31, 2020 (The arc arrows show direction of flying objects)

山有一条东北—西南走向的地面辐合线，佛山高明区正好处于辐合区（图略）。综上所述，低层辐合、高层辐散的配置以及中低层显著西南气流在珠江口西侧的叠加汇聚，为强天气的发生发展提供了较为有利的天气尺度条件。

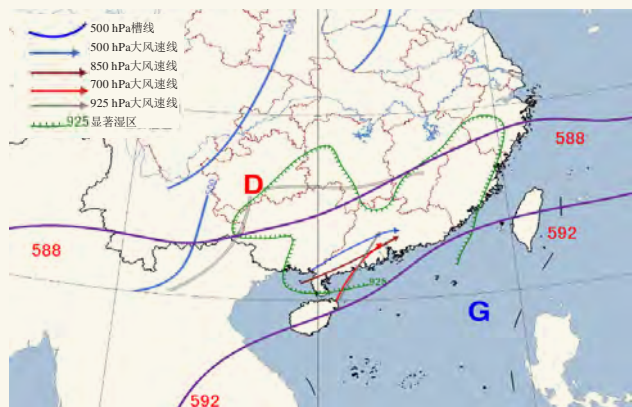


图2 2020年5月31日08时高空形势综合图

Fig. 2 High altitude situation data at 08:00 BT 31 May 2020

2.2 环境条件

图3给出了2020年5月31日08时龙卷发生地周边的清远和阳江站T-lnP图。可以看到，佛山高明区周边大气具有较大的对流不稳定能量，对流有效位能CAPE在2100~2700 J/kg，用14时高明区更合地面自动站气温和露点资料订正后，CAPE高达4000 J/kg以上，呈现出强的条件不稳定；整个对流层的湿度都很大，接近或基本处于饱和状态；对流抑制很小，CIN为0 J/kg，抬升凝结高度LCL很低，在350 m以下，有利于深厚湿对流的触发。

龙卷等强天气的产生与抬升凝结高度及垂直风切变特别是低层的垂直风切变有密切的关系。表1给出了具体的环境参数，可以看到，清远0~6 km垂直风切变为13.0 m/s，属于中等偏弱的深层垂直风切变，阳江站0~6 km垂直风切变只有7.0 m/s，属于弱的深层垂直风切变；两个站的0~3 km的垂直风切变为10 m/s，属于较大的中层垂直风切变；0~1 km垂直风切变分别为5.7、7.1 m/s，属于较弱的低空垂直风切变。31日18:30—19:00广州雷达VWP风廓线显示0.3~1.2 km的风矢量差值为12.0 m/s，是一个相对比较大的低层垂直风切变。另外，风暴相对螺旋度SRH和能量螺旋度EHI也是判别超级单体风暴和龙卷形成的重要指标^[25]。从表1还可以看到，风暴相对螺旋度SRH在48~65 m²/s²，明显小于珠三角台风龙卷发生的SRH值^[26]；能量螺旋度EHI在0.6~1.0，用14时高明更合地面气温和露点资料订正后EHI在1.4~1.9，环境条件有利于超级单体风暴发展的潜势。

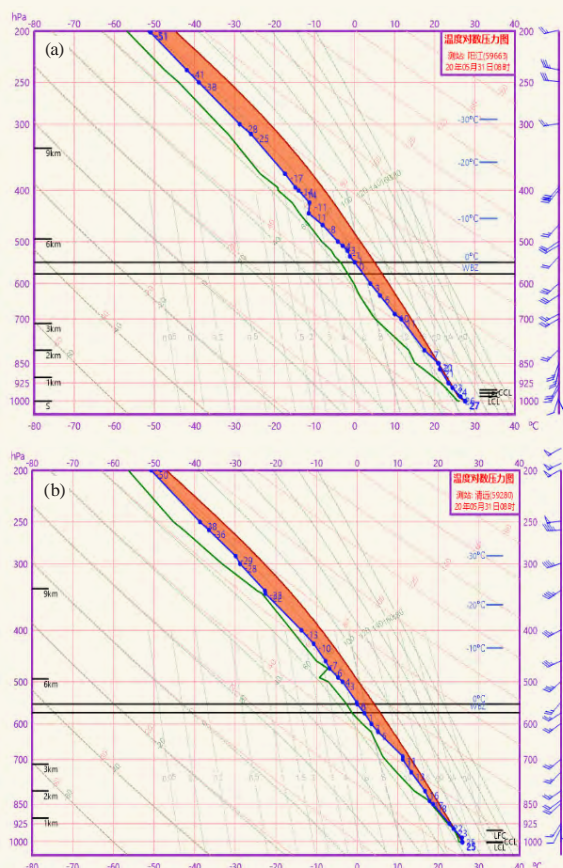


图3 2020年5月31日08时阳江站和清远站T-lnP图

Fig. 3 T-lnP data of Yangjiang station and Qingyuan station at 08:00 BT 31 May 2020

2.3 地面风场

根据区域气象自动站监测资料（图4）可以看出，18:00—18:30肇庆到云浮有地面切变线发展，并缓慢东移，南风加大，在更合镇与偏东风辐合，两条辐合线逐渐并拢，呈人字形分布，并在高要与高明边界形成小尺度涡旋；18:50—19:00随着南风进一步加强，辐合线发展，两区交界处及更合镇出现强对流，并出现12.7 m/s阵风（6级），离龙卷发生地最近的3个自动站（围绕龙卷发生地呈三角分布）录得风向呈现向龙卷发生地辐合分布，意味着这段时间内龙卷发生地处于辐合中心的上升区域，当涡旋与辐合上升区相遇，便有可能由于涡旋拉伸，使旋转加速形成龙卷；地面辐合线减弱，高明中西部地区转为偏北风，小尺度涡旋消散。

高明区处于珠三角西翼，呈西、南、北部三面环山、自西南向东北倾斜的地形。本次龙卷发生地更合镇处于高明区西北侧，四周以低山丘陵为主，故本次龙卷过程持续时间短，强度弱。

表1 2020年5月31日08时清远和阳江探空站环境参数

Table 1 Environmental parameters at Yangjiang station and Qingyuan station at 08:00 BT 31 May 2020

环境参数	CAPE/ (J/kg)	CIN/ (J/kg)	LCL/m	0~6 km风矢量差 / (m/s)	0~3 km风矢量差 / (m/s)	0~1km风矢量差 / (m/s)	SRH/ (m ² /s ²)	EHI
清远	2154	0	50	13.0	10.0	5.7	48	0.6
阳江	2706	0	349	7	10.0	7.1	65	1.0

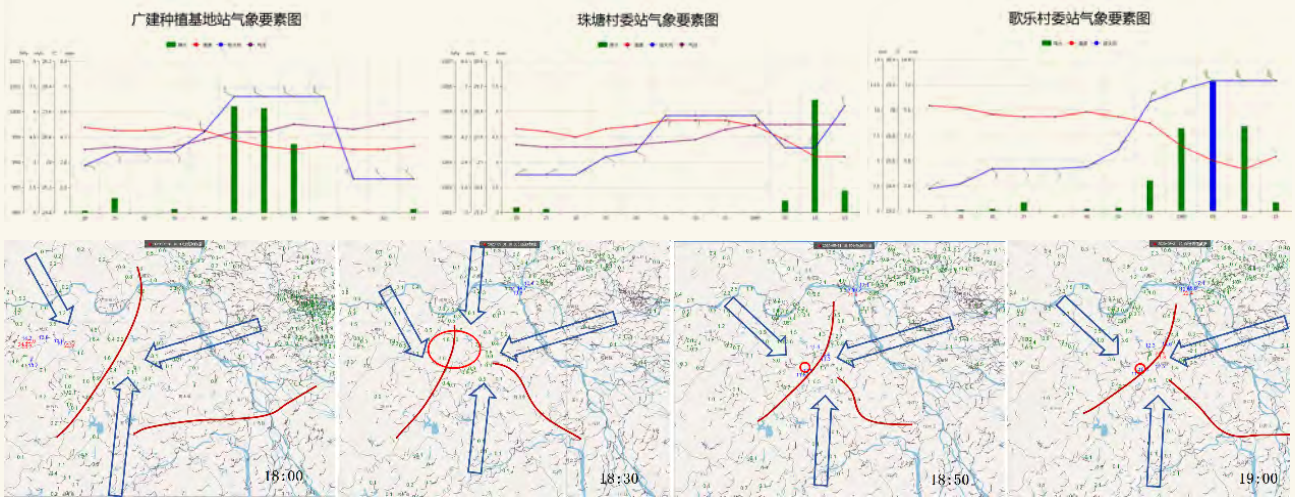


图4 2020年5月31日18: 00—19: 00地面气象要素 (箭头为气流, 实线为辐合线、圆圈为小尺度气旋式环流)

Fig. 4 Surface meteorological elements between 18:00 and 19:00 BT 31 May 2020 (Arrows show airflows, solid lines show convergence lines, circles show small-scale cyclonic circulations)

3 雷达回波特征

根据广州多普勒雷达0.5°反射率因子产品显示, 2020年5月31日18: 00—18: 30云浮到高要方向有零散雷雨云团向东移近高明西北部地区, 并在高要与高明边界处连成西南—东北向的带状回波, 强度逐渐加强。18: 36, 对流风暴移入更合境内, 强度继续加强。18: 48, 对流风暴发展为超级单体, 最强反射率因子为63 dBZ, 低层开始出现钩状回波和入流缺口, 中层出现回波悬垂结构 (图5a—5c); 径向速度图0.5°仰角上探测到气旋式旋转的速度对, 底高约1.4 km, 旋转速度约8 m/s, 距离广州雷达约86 km, 速度对尺度较大, 直径约8km (图略)。沿着与穿过中气旋中心的方向做反射率因子和径向速度的垂直剖面 (图5j—5k), 18: 48可观测到有界弱回波区, 水平尺度约5 km, 该超级单体的强反射率因子顶高约8 km, 中气旋从底部2 km处向上延展至5 km左右, 并在13 km左右高度上, 气流成反气旋式向外辐散。18: 54—19: 00, 回波强度略有减弱, 最强反射率因子为58 dBZ, 但钩状回波更加明显, 速度对旋转速度增强至10 m/s, 距离广州雷达约85 km, 达到弱中气旋标准, 其直径逐渐缩小至6.8 km左右, 高明更合龙卷发生在19时前后, 龙卷出现在钩状回波的弱回波区附近和弱中气旋中心 (图5d—5i), 此时超级单

体弱回波区仍隐约可见, 强反射率因子顶高仍保持在7~8 km, 中气旋延伸高度下降至3~4 km (图略)。可见, 引发本次龙卷的超级单体风暴中气旋直径较大。

4 结论

1) 本次龙卷过程发生在较有利的大气环流背景和环境条件下。高层辐散与低层辐合的上下配置, 中低层深厚的显著西南暖湿气流汇聚叠加, 配合地面辐合线长时间维持, 为强天气的发生提供了有利的天气背景。大的CAPE、较强的低层垂直风切变和低的抬升凝结高度为龙卷的发生提供了较为有利的环境条件。

2) 地面辐合线是有利于龙卷发生的中小尺度系统。这次过程发生在珠江口暖湿气流与渗透到广东省中部弱冷空气交汇处, 高明区处在“人”字形地面辐合线上, 有利于形成小尺度涡旋, 进而有助于龙卷的发生发展。

3) 龙卷产生于β中尺度超级单体风暴, 雷达监测到较为明显的钩状回波、回波悬垂和低层中等强度中气旋, 龙卷出现在钩状回波顶端和中气旋中心附近; 中气旋维持4个扫体, 但其尺度较大, 龙卷触地前后中气旋直径在6 km以上, 属于尺度较大而强度较弱的中气旋, 因此龙卷强度也较弱。

高明多山地丘陵, 发生龙卷的概率极低。本次

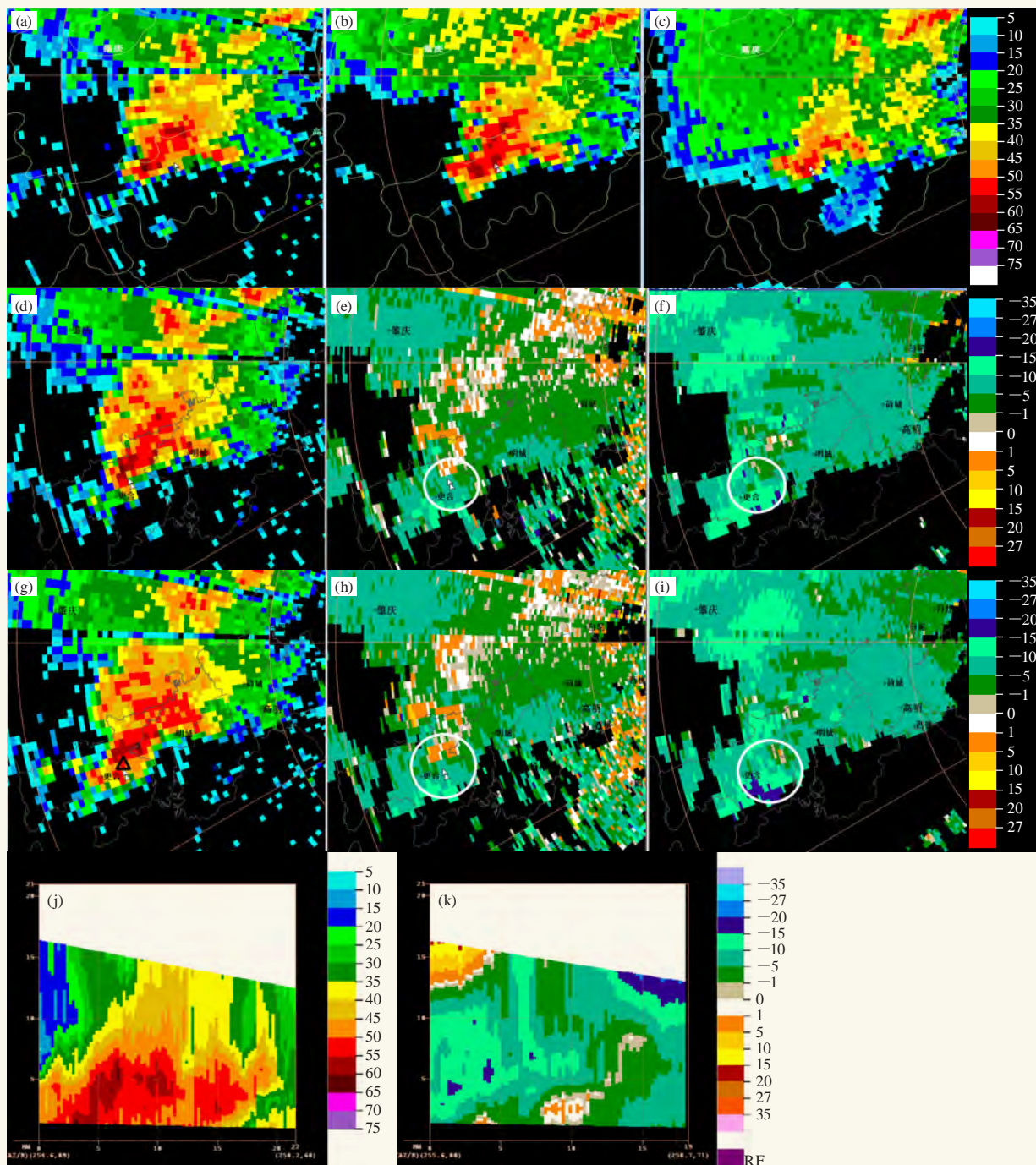


图5 2020年5月31日18:48广州雷达0.5°、2.4°、4.3°反射率因子(单位:dBZ)(a-c)和18:54—19:00广州雷达0.5°反射率因子(单位:dBZ)和0.5°、1.5°径向速度(单位:m/s)(d-f, g-i)(三角形为龙卷发生地,圆圈为中气旋所在位置)和18:48反射率因子(单位:dBZ)(j)、径向速度(单位:m/s)垂直剖面(k)

Fig. 5 Guangzhou Radar 0.5°, 2.4°, 4.3° reflectivity factor at 18:48 BT 31 May 2020 (a-c) and Guangzhou radar 0.5° reflectivity factor and 0.5°, 1.5° radial velocity diagram between 18:54 and 19:00 (d-f, g-i) (The triangle show the place where the tornado occurs, circles show the location of the mesocyclone) and reflectivity factor (j), vertical profile (k) at 18:48

天气过程的对流云团在高明及高要边界丘陵地带的迎风波得到进一步发展加强,进入高明境内在较为有利的环境条件下触发了龙卷,但很可能是受地理地貌影响,龙卷持续时间短、强度弱。对于复杂下垫面如何影响龙卷的发生发展还需要通过模式进一步研究。

参考文献

- [1] 魏文秀,赵亚民.中国龙卷风的若干特征.气象,1995,21(5):36-40.
- [2] 范雯杰,俞小鼎.中国龙卷的时空分布特征.气象,2015,41(7):793-805.
- [3] 冯佳玮,闵锦忠,庄潇然.中国龙卷时空分布及其环境物理量特征

(下转68页)

雷州半岛一次台风外围龙卷天气过程分析

植江玲^{1,2} 李彩玲^{1,2} 蔡康龙^{1,2} 黄先香^{1,2}

(1 广东省佛山市气象局, 佛山 528000; 2 广东省佛山市龙卷风研究中心, 佛山 528000)

摘要: 2013年11月11日早晨, 距离第30号台风海燕中心约350 km的湛江市徐闻县出现了龙卷, 强度为EF1级。利用现场灾情调查、常规高空和地面观测、广东省地面自动站观测和湛江S波段多普勒天气雷达数据等, 对此次龙卷天气过程进行分析。结果表明, 龙卷发生在副热带高压和台风海燕之间的东南急流辐合的环流形势下, 环境条件表现为中等强度对流有效位能、低的对流抑制能量和抬升凝结高度、强的0~6 km和0~1 km垂直风切变以及大的低层相对湿度; 地面层的中尺度辐合线和小尺度涡旋提前于龙卷出现, 龙卷发生在小尺度涡旋附近。龙卷风暴母体的下沉气流导致的地面冷池气温与周围环境的温差约为1~4 °C, 较小的温差有利于龙卷的形成。龙卷风暴母体为低质心的微超级单体, 低层具有钩状回波和入流缺口特征, 伴有中等到强中气旋和TVS特征, 中气旋和TVS伸展高度在2 km以下; 龙卷触地前, 中气旋强度增大, 直径缩小, 底高降低, TVS特征较龙卷提前约24 min出现。

关键词: 台风龙卷, 环境条件, 雷达特征, 中气旋

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.06.007

Analysis of Typhoon-Tornado Weather Process in Leizhou Peninsula

Zhi Jiangling^{1,2}, Li Cailing^{1,2}, Cai Kanglong^{1,2}, Huang Xianxiang^{1,2}

(1 Foshan Meteorological Service, Foshan 528000 2 Foshan Tornado Research Center, Foshan 528000)

Abstract: On the morning of November 11, 2013, a tornado occurred in Xuwen County, Zhanjiang City, about 350 km away from the center of Typhoon No.30 "Haiyan", with the intensity of tornado event was rated EF1. Based on the disaster investigation, conventional observations data, surface automatic weather station, a Zhanjiang S-band Doppler radar and so on, the environmental background and radar echo characteristics of tornado occurrence and development are analyzed. The results show that the tornado was generated southeast jet convergence zone between the subtropical high and typhoon. The atmospheric conditions show that typhoon-tornado occurred in an environment with medium convective available potential energy, weak convective inhibitory energy, low elevation condensation height, strong 0-6 km and 0-1 km vertical wind shear and large low-level relative humidity. The surface mesoscale convergence line and micro vortex occurred before the tornado. The difference between the temperature of the ground cold pool caused by the sinking airflow of the tornado storm and the environment is about 1-4 °C and the smaller temperature difference is conducive to the formation of tornado. The convective storm which produced tornado was mini supercell storm with low center of mass, which has the characteristics of hook echo, inflow gap, moderate to strong mesocyclone and TVS in the lower layer. The mesocyclone and TVS have an extension height below 2 km. Before the tornado occurs, the intensity of the mesocyclone increases, the diameter decreases and the base height decreases. The TVS appears about 24 minutes earlier than the tornado.

Keywords: typhoon-tornado, environmental background, radar echo characteristics, mesocyclone

0 引言

龙卷是大气最猛烈的大气对流现象, 可在短时间内造成重大的人员伤亡和财产损失^[1]。由于突发性强、时空尺度小以及生命史短等特点, 对龙卷的预报预警难度大, 对龙卷的研究仍是中小尺度天气学的难点。龙卷多发生在华南、华东以及东北等地的地势平坦地带^[2]。在我国的东部沿海, 部分龙卷的产生在台

风外围(以下简称台风龙卷), 而华南和江浙的平原地带和海南岛作为台风龙卷的高发区^[2-3], 许多学者上述地区的台风龙卷进行了研究。黄先香等^[3]、李彩玲等^[4]、郑媛媛等^[5]、郑艳等^[6]对珠江三角洲、长江三角洲和海南岛等20多次台风龙卷过程的活动特征和环境条件进行分析指出, 台风龙卷多发生在台风前进方向的东北象限, 所处的环境多为中等强度的大气热力不稳定环境条件、低的抬升凝结高度和较强的低层垂直风切变, 产生龙卷的风暴母体多为微型超级单体, 与一般西风带系统中的超级单体不同, 风暴伸展高度低, 产生龙卷的中气旋尺度小。李兆慧等^[7]利用地面

收稿日期: 2020年7月21日; 修回日期: 2020年8月18日
第一作者: 植江玲(1990—), Email: 252335251@qq.com
资助信息: 广东省佛山市气象局科技项目(201905)

自动气象站观测资料对2015年10月发生在佛山境内的一次EF3级台风龙卷进行分析,指出气象要素表现出受龙卷影响的特征,气压下降、风速增大、风向明显改变,且龙卷移动路径上风场呈气旋性辐合。

由于观测手段所限,灾害现场调查仍然是分析龙卷和下击暴流等中小尺度强风天气过程的风力和精细分布的重要手段。Fujita等^[8]在1970年开创性的开展了风灾调查工作,根据破坏程度和风速的对应关系,将龙卷分成6个等级,F0~F5级,即“藤田级别”或F等级。2000年起,美国得克萨斯技术大学联合多部门对F等级进行修订,采用28类灾害标识物(DI),每一类标识物有多个灾害等级(DoD),调整F等级各个级别对应的风速,即为“增强藤田级别”或EF等级^[9]。目前EF等级已被美国、法国和加拿大等各国广泛使用并进行修订^[10]。虽然雷州半岛作为龙卷的易发区之一^[11],但过去对发生在雷州半岛的龙卷天气的环境背景和雷达特征等研究还较少。本文利用现场灾情

调查、高空和地面常规观测、广东地面自动气象站观测资料、湛江s波段多普勒天气雷达,对发生在雷州半岛徐闻县的一次台风外围龙卷过程的环境背景、物理量参数和雷达特征进行分析,以期增强对发生在雷州半岛的台风龙卷天气过程的环境条件和风暴特征的认识,为今后同类天气的预警提供借鉴。

1 龙卷过程及现场灾情调查

2013年11月11日07:06—07:12(北京时,下同),广东省湛江市徐闻县前山镇复兴村、后岭村和麟角村先后出现龙卷(图1a)。经现场灾情调查,龙卷造成瓦房被刮坏或掀顶、树木和农作物倒伏或拦腰折断(图1b)。由于龙卷没有经过地面自动气象站,因此参照“改进的藤田级别”(Enhanced Fujita Scale, EF-Scale)龙卷定强标准来判断此次龙卷的强度,根据此次龙卷灾害特点,软木树干折断对应的风速期望值为46.5 m/s,小于20%的屋顶受损,对应风速期望值为35.3 m/s,认定强度为EF1级,属于弱龙卷。



图1 龙卷移动路径(a)及受灾现场图片(b)
Fig. 1 Tornado path (a) and damage picture (b)

2 天气背景

2.1 台风海燕活动概况

2013年第30号台风海燕于11月4日在西北太平洋生成后,强度快速增强,8日以超强台风级登陆菲律宾中部莱特岛北部沿海,横穿菲律宾中部地区后,夜间进入南海东南部海域,11月10日下午从海南岛西南部近海掠过并转向偏北方向移入北部湾,11日05:00前后以台风级别在越南广宁省沿海登陆,09:00移入广西境内。龙卷发生在11日07:00前后,距离台风登陆越南后2.0 h,此时“海燕”处于减弱阶段,为强热带风暴级别,龙卷发生在台风海燕前进方向东南象限约350 km处的螺旋雨带中(图2)

2.2 环流背景

11月11日08时(图3),200 hPa上雷州半岛处于南海高压脊后的辐散区,500 hPa西太平洋副热带高压(以下简称副高)主体偏东偏南,脊线位于20°N附近,雷州半岛位于副高西侧边缘与“海燕”外围东侧之间的强劲东南气流中,同时700 hPa、850 hPa和925 hPa上低空急流风速强劲,各层风速都在20 m·s⁻¹以上,雷州半岛处于东南风与偏南风气流辐合区,为强对流天气的产生提供了充足的水汽和暖湿不稳定能量;地面上,冷高压中心位于华北到华东地区,锋面南压到广西中北部,有弱冷空气影响到广东中南部并在雷州半岛中部形成一条东北风与东南风汇合的辐合



图2 台风海燕移动路径 (红色三角形为龙卷发生地)

Fig. 2 The path of Typhoon "Haiyan" (The tornado is marked by red triangle)

线。徐闻龙卷发生在地面冷暖空气交界处的暖空气一侧，同时也是低空急流和高空辐散耦合的区域，提供了有利的天气尺度动力强迫。

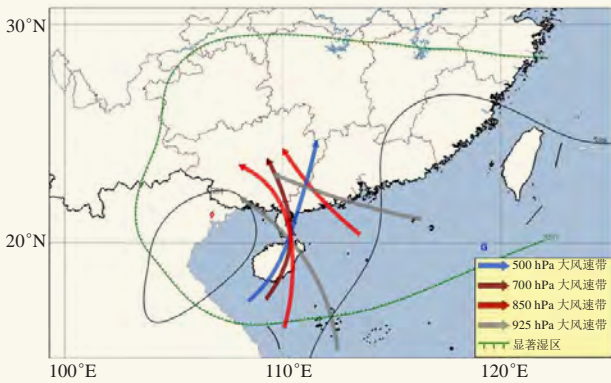


图3 2013年11月11日08时环流综合形势

Fig. 3 The synoptic map at 08:00 BT on 11 November 2013

3 环境条件分析

研究表明，龙卷的风暴母体多产生在条件不稳定且低层水汽充沛的环境下，而对流有效位能 (CAPE) 和对流抑制能量 (CIN) 常用来表征大气深厚湿对流发生的潜势；抬升凝结高度、低层垂直风切变和风暴相对螺旋度也是判断龙卷潜势的重要对流参数^[3, 12-13]。

3.1 热力条件分析

探空站观测通常能代表站点附近100~200 km以内的大气状态，选取位于龙卷发生地上游最近的约50 km的海口站的探空资料进行分析。10日20时和11日08时 (图4)，海口站上空的风随高度顺转，表明低层有暖平流，各层风速都在20 m/s⁻¹以上，风速强劲。大气湿层从地面向上延伸到400 hPa以上，湿层深厚，400~850 hPa温差为31 °C，与温度廓线接近的湿中性曲线400~850 hPa的温差30 °C相差不大，表明

龙卷发生在弱的条件不稳定环境中。从表1可见，10日20时—11日08时海口站对流有效位能 (CAPE) 从510 J/kg明显增大为1064 J/kg，达到中等强度大小。可见近地层上游地区通过偏南气流为两次龙卷发生地都输送了较好的水汽和热量。由于低层相对湿度和露点

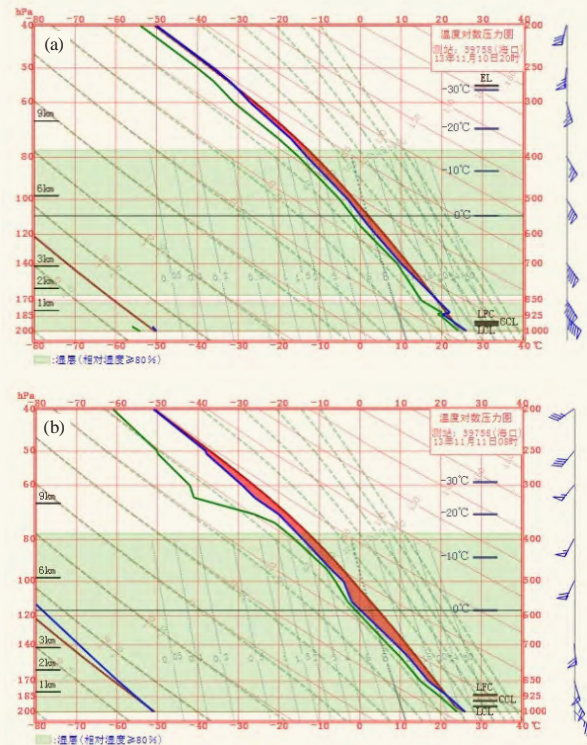


图4 2013年11月10日20时 (a) 和11日08时 (b) 海口探空曲线 (蓝色和绿色实线分别为环境温度和露点温度，红色实线为状态曲线)

Fig. 4 T -log P chart at Haikou sounding station at 20:00 BT on 10 November 2013 (a) and at 08:00 BT on 11 November 2013 (b) (The blue and green solid line denote the environmental temperature and dew-point temperature, the red solid line is the state curve)

表1 2013年11月10日20时和11日08时海口探空站环境参数
Table 1 Parameters of Haikou Sounding Station at
20:00 BT on 10 November 2013 and at 08:00 BT on 11
November 2013

时间	CAPE/ (J/kg)	CIN/ (J/kg)	LCL/m	0~6 km风矢量 差/(10^{-3} /s)	0~1 km风矢量 差/(10^{-3} /s)
10日20时	510	3.6	287.0	3.8	33.1
11日08时	1064	14	332.0	3.6	13.4

都很大, 大气环境的对流抑制能量 (CIN) 都很小, 表明大气稳定层很薄, 极易触发深厚湿对流天气。

3.2 水汽条件分析

有利于中气旋龙卷的环境条件需要较大的低层相对湿度, 较高的低层相对湿度有助于风暴母体的下沉气流不至于太强^[14-15]。10日20时和11日08时 (图4), 海口站的温湿探空曲线显示近地层相对湿度很大, 湿层从地面向上伸展到400 hPa, 非常深厚。大气环境中低层的水汽充沛, 为雷暴的生成提供了充足的能量来源, 且大气中低层较大的湿度不利于中层空气卷入导致的蒸发冷却形成负浮力, 导致下沉气流不会太强, 配合低层饱和的大气环境保证了风暴后侧的下沉气流形成的冷池强度不至于太强, 配合风暴前部的暖湿上升气流, 使得近地面的水平顺流涡度倾斜和拉伸形成垂直涡度, 有利于龙卷的发生。

3.3 垂直风切变分析

研究表明, 中等到强的深层垂直风切变是产生超级单体风暴和冰雹的必要条件之一^[12], 而要产生超级单体龙卷, 还需要强的0~1 km垂直风切变和低的抬升凝结高度, 低空垂直风切变是造成龙卷的主要动力, 可以将低层斜压水平涡度倾斜扭转形成垂直涡度, 而低的抬升凝结高度则有利于涡旋触地形成龙卷^[16-17]。从附近海口站的探空资料可知 (表1), 10日20时和11日08时, 海口上空的抬升凝结高度都较低, 高度都在300 m以下, 有利于雷暴的触发。由于雷州半岛到海口站附近都处于台风海燕和副高之间气压梯度大值区, 东南风急流强盛, 10日20时, “海燕”强度为台风级, 距离海口站较近, 此时0~6 km和0~1 km的垂直风切变都很强, 分别为 3.8×10^{-3} /s和 33.1×10^{-3} /s; 随着“海燕”登陆后摩擦近地面风速迅速减弱, 11日08时的0~6 km垂直风切变和0~1 km垂直风切变有所减弱为 3.6×10^{-3} /s和 13.4×10^{-3} /s。Thompson等^[18]统计发现产生超级单体龙卷的0~6 km垂直风切变下限值为 3×10^{-3} /s, 0~1 km垂直风切变下限值为 5.5×10^{-3} /s。此次龙卷过程的0~6 km垂直风切变都超过统计值下限, 而0~1 km垂直风切变显著大于下限值, 虽然“海燕”台风龙卷发生在垂直风切

变减弱的过程, 但过程中仍维持较强的0~1 km垂直风切变, 有利于龙卷的产生。

4 自动站观测

超级单体中的下沉气流对龙卷的生成至关重要, 当其与环境之间形成的温差存在一个平衡点, 即通常下沉气流形成的冷出流与环境之间的温差小于4℃时, 有利于近地面垂直涡度的发展从而形成龙卷^[19]。从07:05的广东省地面自动气象站观测温度分布显示 (图5), 龙卷风暴母体的下沉气流导致的地面冷池气温约为24~25℃, 周围环境的温度约为26~29℃, 两者的温差约为1~5℃, 较小的温差有助于近地面垂直涡度的加强, 从而有利于龙卷的形成。

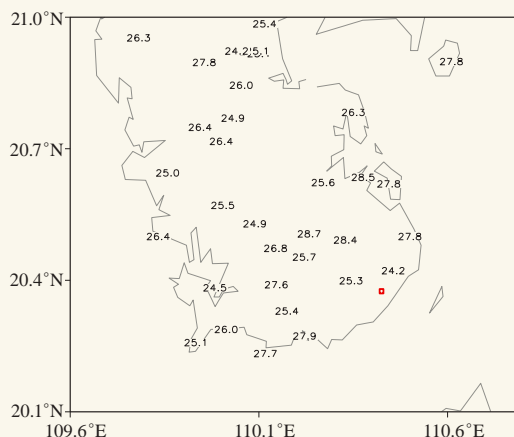


图5 2013年11月11日07:05地面自动气象站观测温度
(单位:℃, □为龙卷发生地)

Fig. 5 Temperatures of automatic weather stations at
07:05 BT 11 November 2013 (unit:℃, the tornado is
marked by red square)

进一步分析地面自动站风场发现, 11日06:30 (图6a), 在龙卷发生前, 龙卷生成地附近已经有一条地面辐合线和小尺度涡旋存在。这个涡旋和辐合线随时间向东北方向移动。07:10 (图6b), 小尺度涡旋移动到徐闻县复兴村附近时风场的气旋性涡旋特征更为明显, 风暴单体强烈发展产生龙卷。涡旋的路径走向和龙卷的移动路径对应较好, 对比地面辐合线、涡旋和龙卷出现时间, 辐合线和涡旋提前于龙卷出现, 可见地面风场辐合线和小尺度涡旋为此次强对流系统提供了有利的抬升触发条件。

5 雷达回波演变特征

湛江多普勒雷达 0.5°仰角反射率因子产品显示, 2013年11月11日早晨, 1330号台风海燕外围不断有回波自海南岛方向向北移动影响雷州半岛, 产生徐闻龙卷的对流风暴母体是来自从琼州海峡向北移动的一对流风暴。06:30, 对流风暴从海南岛向北移动进入琼

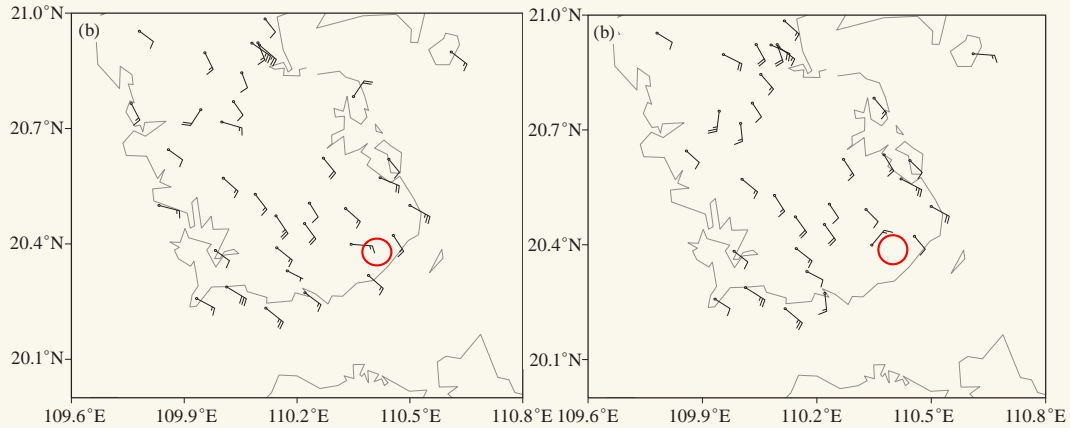


图6 2013年11月11日06:30 (a) 和07:10 (b) 地面自动气象站风场 (红色圆圈为龙卷发生地)

Fig. 6 Winds of automatic weather stations at 06:30 BT (a) and 07:10 BT (b) 11 November 2013 (The tornado is marked by red circle)

州海峡。07:00 (图7a), 对流风暴北上靠近徐闻复兴村沿岸, 最强反射率因子为54 dBZ, 此时风暴已经呈现出低层钩状回波和与暖湿气流相连接的入流缺口回波等特征, 属于微型超级单体风暴。07:06—07:12 (图7b—c), 对流风暴上岸进入徐闻县复兴村境内, 然后北上影响后岭村和连角村, 最强反射率因子为56 dBZ。07:18—07:24 (图略), 对流风暴向北

偏西方向移动, 远离连角村, 强度维持 (56 dBZ)。对应 0.5° 仰角平均径向速度图上, 06:42—06:52 (图略), 对流风暴在海上时雷达在微型超级单体风暴钩状回波附近持续探测到强中气旋; 06:42, 中气旋旋转速度为26 m/s, 底高约1.7 km, 最大入流速度和出流速度中心距离约为3.4 km, 且在在中气旋中心探测到龙卷涡旋特征 (TVS), TVS切变为50 m/s;

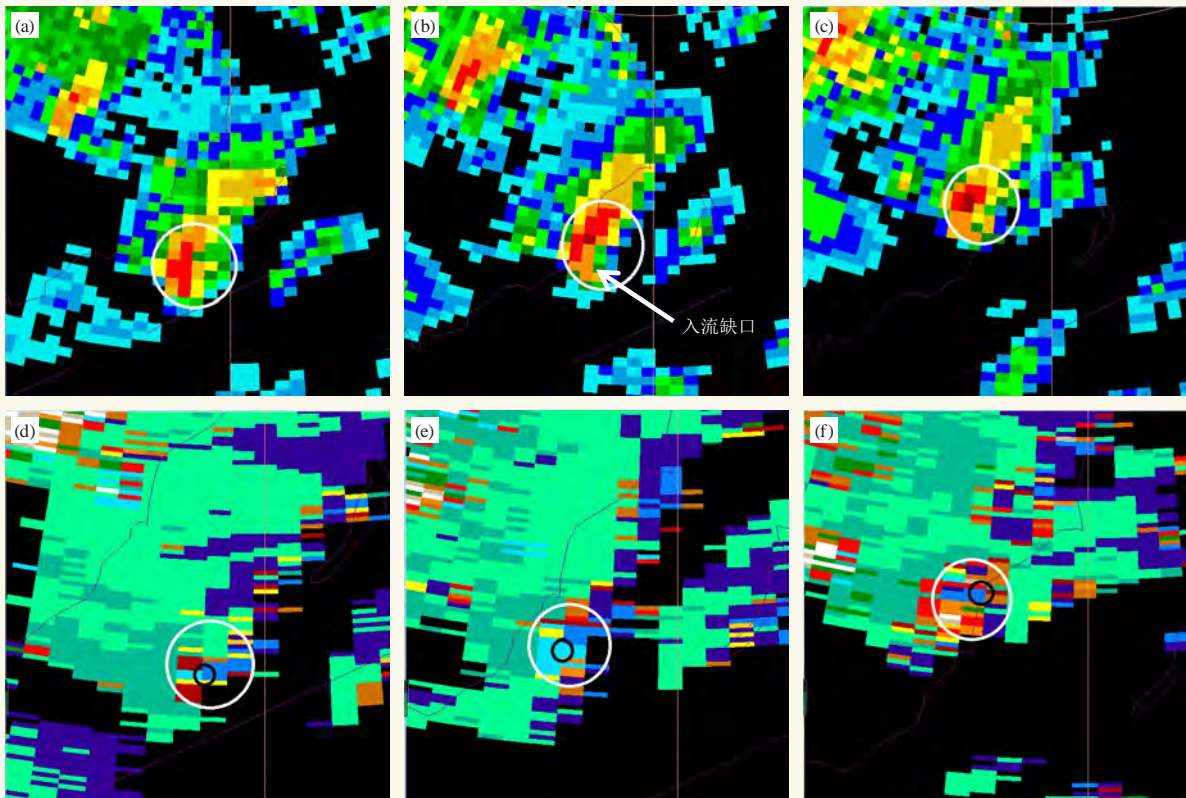


图7 2013年11月11日07:00 (a、d), 07:06 (b、e), 07:12 (c、f) 湛江S波段雷达 0.5° 仰角反射率因子 (单位: dBZ) 和和径向速度图 (单位: $m \cdot s^{-1}$) (白色圆圈为钩状回波和中气旋, 黑色圆圈为TVS)

Fig. 7 The reflectivity (unit: dBZ) and radial velocity (unit: $m \cdot s^{-1}$) of 0.5° elevation by Zhanjiang S-band radar at 07:00 (a, d), 07:06 (b, e) and 07:12 (c, f) BT on 11 November 2013 (white circles are hook echoes and mesocyclones, black circles are TVS)

06: 48—06: 52, 中气旋直径缩小至1.7 km左右, 并且在中心继续探测到龙卷涡旋特征 (TVS), TVS切变为52.0~53.0 m/s, 底高约1.4~1.6 km。07: 00 (图7d), 中气旋流出速度出现速度模糊, 退速度模糊后中气旋旋转速度为32 m/s, 在中气旋中心仍然探测到TVS特征, 切变值为54 m/s。07: 06 (图7c), 对流风暴快上岸前, 中气旋旋转速度为30 m/s, TVS切变增强为57 m/s, 底高为1.2 km。07: 12 (图7d), 对流风暴上岸进入复兴村, 中气旋旋转速度为31 m/s, TVS切变增强为54 m/s, 中气旋底高为1.1 km。07: 18开始, 中气旋强度迅速减弱, 旋转速度减弱为17 m/s, 减弱为中等强度中气旋, 中气旋中心仍然探测到像素到像素的类TVS特征, 切变值为34 m/s。17: 24, 旋转速度减小为15 m/s, 减弱为弱中气旋。结合雷达观测资料, 判断徐闻县的龙卷是在徐闻县的龙卷是发生在11月11日07: 06—07: 12, 07: 12—07: 18减弱消失, 持续时间约为6 min, 龙卷出现在微型超级单体风暴右后侧的钩状回波顶端、中气旋中心及TVS附近。钩状回波和强中气旋提前于龙卷超过30 min, 龙卷出现前中气旋和TVS旋转速度处于最强阶段, 底高降到1.1 km附近。07: 18后, 虽然回波强度维持, 但中气旋迅速减弱后, 龙卷消失。

6 结论

本文利用常规高空和地面观测、广东省地面自动站观测和湛江S波段多普勒天气雷达数据以及现场灾害调查资料等, 对2013年11月11日早上湛江市徐闻县龙卷的天气背景、环境条件、自动站观测和雷达回波等观测事实进行分析, 主要结果如下:

此次龙卷在台风外围螺旋雨带中出现的, 强度为EF1级, 影响时间约为6 min, 龙卷发生在台风前进方向的右前侧的东北象限内, 距离台风中心约350 km。龙卷发生时, “海燕”强度处于减弱阶段, 为强热带风暴量级。

龙卷发生副高和台风之间的强劲东南气流影响的环流形势下, 高空辐散和低空各层急流耦合的配置为龙卷提供了有利的天气尺度动力强迫。龙卷发生前, 临近的海口探空表现为中等强度对流有效位能、低的对流抑制能量和抬升凝结高度、强的0~6 km和0~1 km垂直风切变, 尤其是低层0~1 km垂直风切变远远大于统计值下限, 有利于龙卷等强对流天气的发生。充足的水汽为强对流天气的发生奠定了物质基础, 尤其是低层大的相对湿度不利于中层空气卷入导致的蒸发冷却形成负浮力, 导致下沉气流不会太强, 有助于龙卷的产生。

3) 分析地面自动气象站风场发现, 地面层的中尺

度辐合线和小尺度涡旋提前于龙卷出现, 龙卷发生在小尺度涡旋附近, 辐合线和小尺度涡旋为龙卷的产生提供了有利的动力抬升作用。地面自动气象站温度观测显示, 龙卷风暴母体的下沉气流导致的地面冷池气温约为24~25 °C, 周围环境的温度约为26~28 °C, 两者的温差约为1~4 °C, 较小的温差有助于近地面垂直湍度的加强, 从而有利于龙卷的形成。

4) 龙卷产生于台风外围螺旋雨带中低质心的微超级单体, 低层具有钩状回波和入流缺口特征, 对应径向速度图上低层出现中等到强中气旋和TVS特征, 中气旋和TVS伸展高度在2 km以下, 龙卷触地前, 中气旋强度增大, 直径缩小, 底高降低, TVS特征较龙卷提前约24 min出现。龙卷出现在钩状回波的弱回波区附近, 当中气旋逐渐增强、直径收缩、底高不断降低时龙卷触地产生。

参考文献

- [1] 俞小鼎, 姚秀萍, 熊廷南, 等. 多普勒天气雷达原理与业务应用. 北京: 气象出版社, 2006.
- [2] 范雯杰, 俞小鼎. 中国龙卷的时空分布特征. 气象, 2015, 41(7): 793-805.
- [3] 黄先香, 俞小鼎, 炎利军, 等. 珠江三角洲台风龙卷的活动特征及环境条件分析. 气象, 2019, 45(6): 777-790.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 郑艳, 俞小鼎, 任福民, 等. 海南一次超级单体引发的强烈龙卷过程观测分析. 气象, 2017, 43(6): 675-685.
- [7] 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.
- [8] Fujita T T, Brandbury D L, Van Thullenar C F. Palm Sunday tornadoes of April 11 1965. Mon Wea Rev, 1970, 98(1): 29-69.
- [9] McDonald J R, Mehta K C. A Recommendation for An Enhanced Fujita Scale (EF-scale). Wind Science and Engineering Center, Texas Tech University, 2006.
- [10] 郑永光, 田付友, 周康辉, 等. 雷暴大风与龙卷的预报预警和灾害现场调查. 气象科技进展, 2018, 8(2): 55-61.
- [11] 纪文君, 张羽. 雷州半岛强对流天气及触发机制分析. 海洋预报, 2005, 22(3): 1-4.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Doswell III C A, Evans J S. Proximity sounding analysis for derechos and supercells: an assessment of similarities and differences. Atmos Res, 2003, 67-68: 117-133.
- [15] 郑永光, 蓝渝, 曹艳察, 等. 2019年7月3日辽宁开原EF4级强龙卷形成条件、演变特征和机理. 气象, 2020, 46(5): 589-602.
- [16] Weisman M L, Klemp J B. The dependence of numerically simulated convective storms on vertical wind shear and buoyancy. Mon Wea Rev, 1982, 110(6): 504-520.
- [17] McCaul E W. Buoyancy and shear characteristics of hurricane-tornado environments. Mon Wea Rev, 1991, 119: 1954-1978.
- [18] Thompson R L, Edwards R, Hart J A. An assessment of supercell and tornado forecast parameters with RUC-2 model close proximity soundings. Preprints 21st Conf On Severe Local Storm. San Antonio: American Meteorological Society, 2000.
- [19] Markowski P M. Hook echoes and rear-flank downdrafts: a review. Mon Wea Rev, 2002, 130(4): 852-876.

2020年梅雨期江苏两次龙卷过程环境背景和龙卷母风暴形态特征分析

周晓敏 郑永光

(国家气象中心, 北京 100081)

摘要: 2020年6—7月, 江苏省发生了两次龙卷事件, 分别在6月12日高邮以及7月22日宿迁、连云港、盐城三市。利用观测与再分析资料对产生两次龙卷的雷达资料特征、天气背景和对流环境条件特征进行了对比分析。雷达回波显示产生两次龙卷的对流系统特征显著不同: 6月12日是独立于主雨带回波外的离散单体, 在高邮市产生了一个龙卷, 持续时间较长; 而7月22日产生龙卷的单体镶嵌于主雨带回波南端, 生命史内跳跃式移动, 影响了邻近的几个市县; 但都有识别到超级单体特征。这两次龙卷均发生在我国东部龙卷最高发的地区和季节, 天气尺度背景都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高低空急流耦合区域, 不同之处在于前一次的系统稳定少动, 后一次则相对发展更加快速且强烈。从对流环境条件来看, 两次过程都有有利于龙卷发生的中等偏强的对流有效位能、较好的低层湿度条件以及强的低层垂直风切变条件, 而7月22日的条件更加有利, 抬升凝结高度105 m, 0~1 km和0~6 km垂直风切变分别达11和26 m/s。

关键词: 龙卷, 梅雨期暴雨, 江淮气旋, 对流条件

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.06.008

Analysis of Environmental Conditions and Tornado Storm Features of Two Tornadoes in Jiangsu during the Meiyu Period in 2020

Zhou Xiaomin, Zheng Yongguang

(National Meteorological Centre, China Meteorological Administration, Beijing 100081)

Abstract: In June and July of 2020, two tornadoes occurred in Jiangsu Province, which were located in Gaoyou on 12 June and Suqian, Lianyungang and Yancheng on 22 July, respectively. The property in the above areas was damaged, and no one was killed. We use observation and reanalysis data to compare and analyze the weather background and convective environmental conditions that produced the two tornadoes in this paper. The radar echo shows that the characteristics of the convection system that produced the two tornadoes are significantly different: On June 12, there was a discrete unit independent of the echo of the main rainband, which produced a tornado in Gaoyou City and lasted a long time; while on July 22, the unit that produced the tornado was inlaid at the southern end of the main rain belt echo, it moved leaps and bounds in the life history, affecting several nearby counties. The both tornadoes occurred in the regions and seasons where tornadoes occur most in eastern China, and the synoptic-scale backgrounds are typical rainstorm circulation during the Meiyu period. The mesoscale convective systems that produce the tornados occur in the high-low-level jet coupling area on the south side of the ground warm front. The difference is that the previous system was stable and less moving, and the latter developed more rapidly and intensely. From the perspective of convective environmental conditions, both processes have moderate to strong CAPE, better low-level humidity conditions and large low-level vertical wind shear that are conducive to the occurrence of tornadoes, especially the conditions on July 22 are more favorable, with lower lifting condensation level of 105m and stronger 0-1 km and 0-6 km vertical wind shear of 11 m/s and 26 m/s, respectively.

Keywords: tornado, rainstorm during the Meiyu period, Jianghuai cyclone, convective condition

0 引言

龙卷是强对流天气中最猛烈的一种, 易于造成

严重的人员伤亡和财产损失, 同时又因尺度小、发展快速, 在实际业务中预报预警难度很大, 是强对流领域内重要的研究对象之一。魏文秀等^[1]对1981—1993年我国的龙卷统计分析指出, 中国龙卷风的高发区有两个, 第一个就是自长江三角洲经苏北平原至黄淮平原, 呈南北走向, 最大中心在山东和江苏交界处的平

收稿日期: 2020年9月3日; 修回日期: 2020年10月29日
第一作者: 周晓敏(1991—); Email: zhouxm@cma.gov.cn
资助信息: 国家重点研发计划(2018YFC1506104)

原湖泊处。范雯杰等^[2]利用1961—2010年的龙卷记录进一步指出,江苏是我国强龙卷发生最多的省。孙继松等^[3]也指出,苏皖平原是我国龙卷天气发生最为频繁的地区之一,时间分布上以6—8月出现最多。从气候上来说,6—7月江淮地区正处于梅雨季节,暴雨过程频繁,对流条件好,因此常常有龙卷伴随在梅雨期强降水过程中发生。据曾明剑等^[4]的统计结果,这类龙卷约占江苏龙卷的30%,在2016年,盐城市阜宁县更是发生了EF4级的强龙卷,造成了98人死亡,846人受伤,死亡人数居历年之首^[5-7]。

近几年来,已经有很多研究从个例分析或统计的角度对梅雨期江淮地区龙卷进行了探索,对龙卷产生的环境条件以及对流演变、风暴结构等都有了一定的研究结果^[8-11]。姚叶青等^[12]对发生在梅雨期间的两次强龙卷过程分析中指出,梅雨期间较好的低层暖湿气流、中层弱冷空气、低空急流或低层低涡为强龙卷的产生创造了良好的环境。何彩芬等^[13]分析了宁波市一次台风前部龙卷发生发展的环境特征和雷达回波特征,认为下湿中干、强的垂直风切变及地形条件等有利于局地弱龙卷的产生。张一平等^[14]对河南两次暴雨过程中的弱龙卷过程的天气背景、环境特征以及雷达特征进行了分析,提出了一些与暴雨相伴的龙卷过程的预报预警思路。但是,针对梅雨期江淮地区EF2级及以下强度的龙卷过程的分析还有不足,有待更多个例的研究。

2020梅雨期间,江苏省发生了两次初步判断为EF2级强度的龙卷事件,分别于6月12日发生在高邮以及7月22日发生在宿迁沭阳、连云港灌南和盐城响水,前者位于江淮地区东部,后者位于淮北东部,均是龙卷高发地区。本文利用自动站观测资料、多普勒雷达资料以及 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的NCEP FNL分析资料对这两次龙卷过程进行了对比分析,重点分析了其天气学环流背景、对流环境条件以及雷达上龙卷母风暴形态特征,希望能为梅雨期江淮地区龙卷过程的预报思路提供一些参考。

1 天气实况和雷达回波特征

1.1 天气实况

2020年6月12日13:48—14:10(北京时,下同),江苏省高邮市城南区勤王、管伙、浩芝三个村镇出现了龙卷天气。龙卷及地宽度80 m左右,路径长达1 km,袭击范围内造成了群众房屋以及基础设施等不同程度的损毁。根据房屋损害、树木折损程度和目击描述,按照龙卷EF等级标准,江苏省气象局确定此次龙卷等级为EF2级。

此次龙卷事件实际发生在一次持续的强降水过程中,6月上旬刚刚入梅,受西风带短波槽和持续的江淮气旋影响,从6月11日夜间到17日,长江沿江一带尤其江淮地区连续出现大到暴雨天气,同时伴有雷电、短时强降水和雷暴大风等强对流天气。图1是区域自动站在龙卷发生前后时段内的天气实况,可以看到在13和14时两个小时内,安徽东部到江苏北部出现了20 mm以上的短时强降水,主雨带沿西北—东南向移动加强,从安徽扫向江苏,同时在雨带南侧多站出现8级以上雷暴大风天气。值得注意的是,龙卷发生的位置在主雨带东南侧,该区域内仅一个自动站(高邮镇)监测到了孤立的雷暴大风,小时极大风速17.5 m/s,在13:57测得。而该站点在14时小时降水为11.1 mm。

7月22日22时左右的一个小时内,江苏省宿迁、连云港、盐城市部分地区接连遭遇龙卷风袭击,三处龙卷影响时间都在5 min以内,宽度约为100~200 m,接地范围长1~2 km左右,根据灾情情况,经江苏省气象局预报专家组与国家气象中心初步验证判断也是一次EF1~EF2级龙卷。

7月22日,江苏刚刚出梅。此次龙卷事件同样发生在一个强降雨过程中,但与6月12日的龙卷不同的是,此次强降雨过程是一个快速而强烈的过程,从7月22日午后开始,雨带自西向东快速扫过山东南部 and 苏皖北部,造成以上地区出现持续的短时强降水,同时伴随有雷电和8~10级雷暴大风,到23日凌晨已经入海。区域自动站监测(图2)显示,22日22和23时,陆地上强回波移动到山东东南部和江苏北部,主要影响连云港南部和盐城北部部分县镇,影响区域内小时降水量在20~50 mm,最强在灌南县三口镇站72.9 mm。该区域内同时伴随有8~10级雷暴大风天气,龙卷发生时段前后共有3个自动站的瞬时极大风速超过8级,其中一个在灌南县花园乡站测得19.7 m/s,时间为22:31,该站点距第一个龙卷发生地李集镇不到20 km;还有一个是在22:49于响水县四明镇测得的19.9 m/s的大风,基本位于龙卷发生位置。

1.2 雷达回波特征

经典超级单体龙卷一般发生在钩状回波后侧下沉气流和上升气流交界处^[15],而伴随暴雨的弱龙卷则可能发生在暴雨螺旋雨带中部强回波向东凸起的强降水下沉气流和上升气流交界处^[14]。然而,龙卷的形成主要受小尺度过程的控制,大尺度和中尺度环境条件对于龙卷的形成仅有指示作用,所以即使在环境条件类

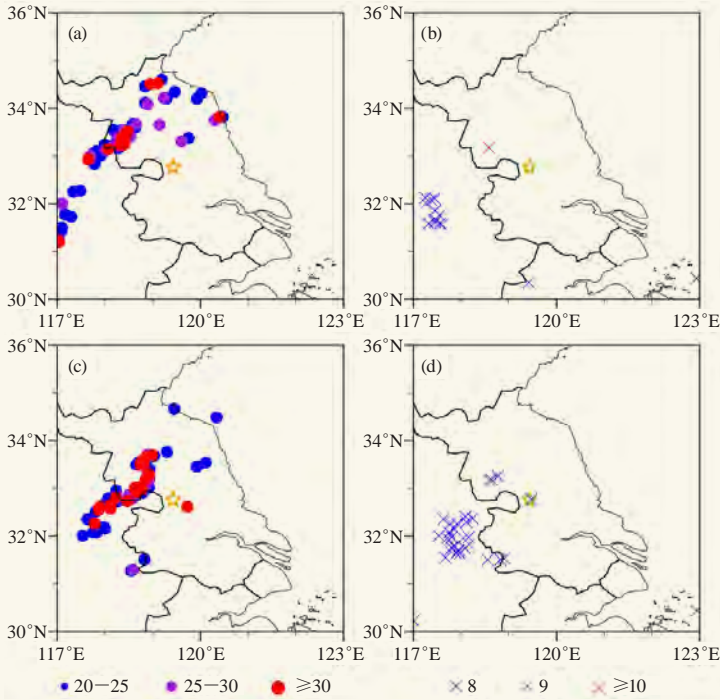


图1 2020年6月12日12—13时 (a、b)、13—14时 (c、d) 自动站观测的1 h降水量 (单位: mm, 星标: 高邮市) 和瞬时极大风 (单位: 风级) (星标处为龙卷影响区域)

Fig. 1 The 1-hour precipitation (unit: mm, star: Gaoyou city) and instantaneous extreme wind (unit: wind level) observed by automatic stations at 12–13 (a, b) and 13–14 BT (c, d) 12 June 2020 (The star indicates the area affected by the tornado)

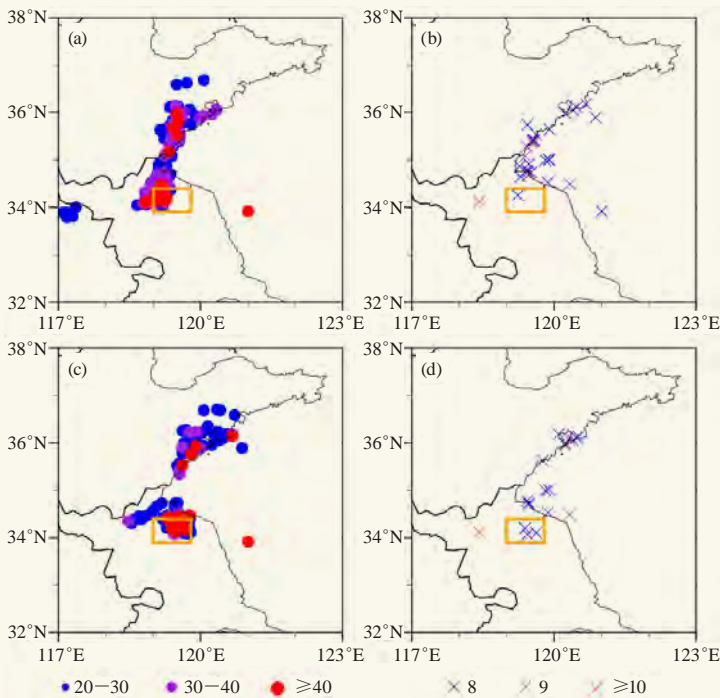


图2 同图1, 但为7月22日21—22时 (a、b) 和22—23时 (c、d) (矩形框内为龙卷影响区域)

Fig. 2 Same as Fig. 1, but at 21–22 (a, b) and 22–23 (c, d) 22 July 2020 (The area affected by the tornado is in the rectangular frame)

似的情况下, 是否会形成龙卷仍然具有很大的随机性^[16]。我国梅雨期龙卷的雷达探测分析发现, 梅雨期龙卷或由镶嵌于梅雨雨带中的对流单体发展引发, 或由梅雨带南侧的孤立对流单体强烈发展所致^[4]。而本文中所研究的两个个例恰好分别属于以上两类。

6月12日造成龙卷的对流单体从11: 30开始从安徽省天长市境内开始生成, 此时主雨带回波还在其西北方向上, 之后主雨带回波开始东移加强并组织化, 形成了一条准现状对流带, 而天长境内的对流单体同时也快速加强东移, 大约在13: 30已经完全进入江苏高邮市界, 回波中心强度超过了65 dBZ, 且在13: 25已经有明显的中气旋速度对 (图略)。图3是南京雷达13: 48的反射率因子和径向速度图, 可以看到, 此时主雨带呈细长的线状对流带, 从安徽中东部伸向江苏北部, 大片40 dBZ以上的回波区。而位于该主回波带右侧高邮境内的孤立超级单体, 具有钩状回波特征, 最强回波超过60 dBZ, 中气旋最大旋转速度达到了26 m/s, 维持了约10 min左右, 龙卷即发生在此时段内。随后, 该单体减弱东移。

7月22日从午后开始, 在河南东南部、山东南部到苏皖北部有大片回波开始发展, 在东移过程中西边界逐渐组织化形成了一条准现状对流带, 其南段从17: 30开始从安徽北部扫过, 之后该对流带继续加强东移, 形态逐渐变粗, 北段入海, 南段进入江苏北部, 到21: 30左右, 其南端生成超级单体, 该单体完全镶嵌在对流带中, 回波中心强度最强达到了60 dBZ, 最强回波顶高超过了9 km; 且已经有明显的中气旋速度对, 最大旋转速度约26 m/s, 此中气旋维持, 于21: 48左右在宿迁市沭阳县形成了龙卷 (图4a, 宿迁雷达), 接地持续了3 min左右。到此时, 回波主体已经基本不成带状, 镶嵌其中的超级单体继续东移进入连云港市灌南县, 强度维持 (图4b, 宿迁雷达), 随之龙卷袭击了李集镇, 持续了约5 min。接着, 随着这片主回波的接续东移, 该单体移动到了盐城市响水县, 反射率因子强度有所减弱, 超级单体的回波特征已经不明显, 但仍然可以识别到显著的中气旋 (图4c, 盐城雷达), 且可以看到

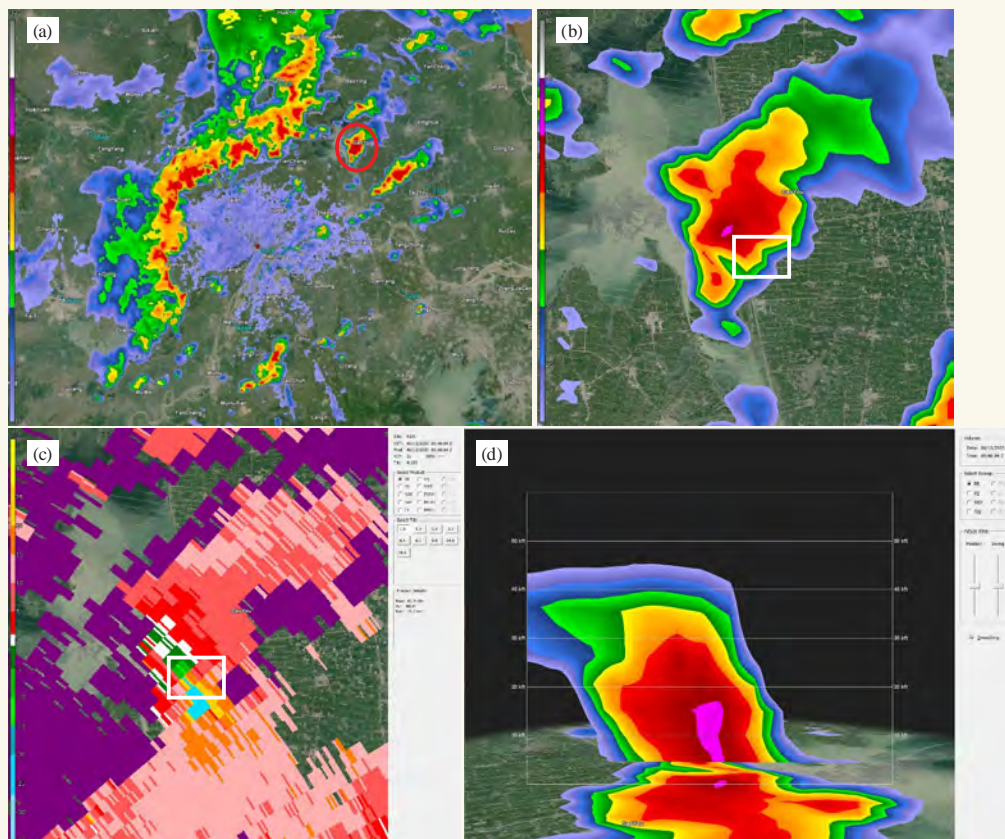


图3 2020年6月12日13: 48南京雷达0.5°仰角反射率因子 (a、b)、径向速度 (c) 以及反射率因子垂直剖面 (d) (红圈表示孤立超级单体, 白框表示龙卷大致影响区域, 下同)

Fig. 3 The reflectivity (a, b), radial velocity (c) at 0.5° elevation and the vertical cross section of reflectivity (d) from Nanjing radar at 13:48 BT 12 June 2020 (The red circle indicates the isolated supercell, and the white box indicates the area affected by the tornado, the same below)

出现了速度模糊, 退模糊后最大出流速度达31 m/s, 最大旋转速度约23 m/s, 于22: 40左右龙卷袭击了小尖镇两个村, 维持时间约2 min。随后, 龙卷母体风暴逐渐减弱, 整片回波也东移入海, 此次强对流过程趋于结束。

从以上分析可以看到, 这两次龙卷过程都发生在一次梅雨期暴雨过程中, 但一个是独立于主回波带之外的孤立单体造成, 而另一个则镶嵌于主回波带上; 前者产生的龙卷持续时间较长, 而后者产生的龙卷则在移动过程中呈现跳跃式, 在多处接地, 每处持续时间都更为短暂。2016年阜宁龙卷与前者情况相近, 但强度要远远强于此次过程, 其中具体物理机制还有待更深入的研究。

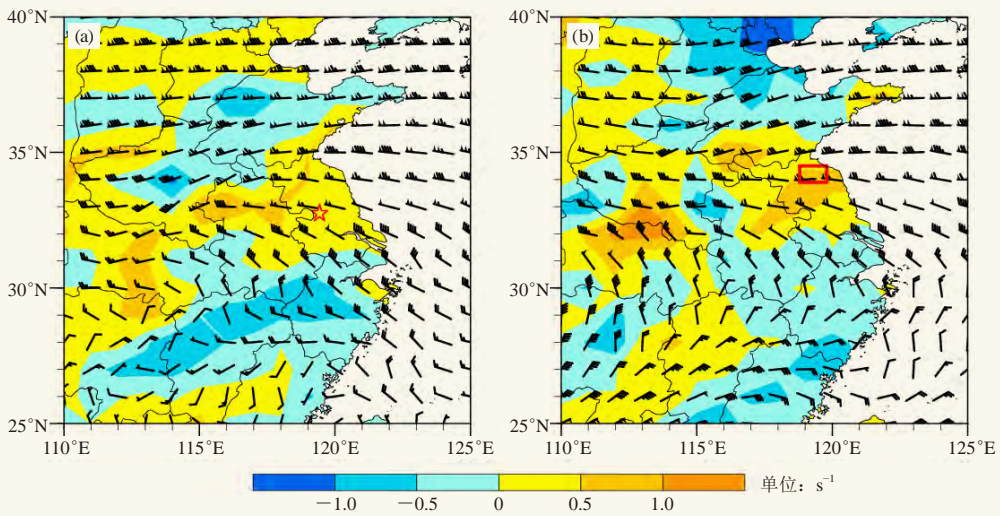
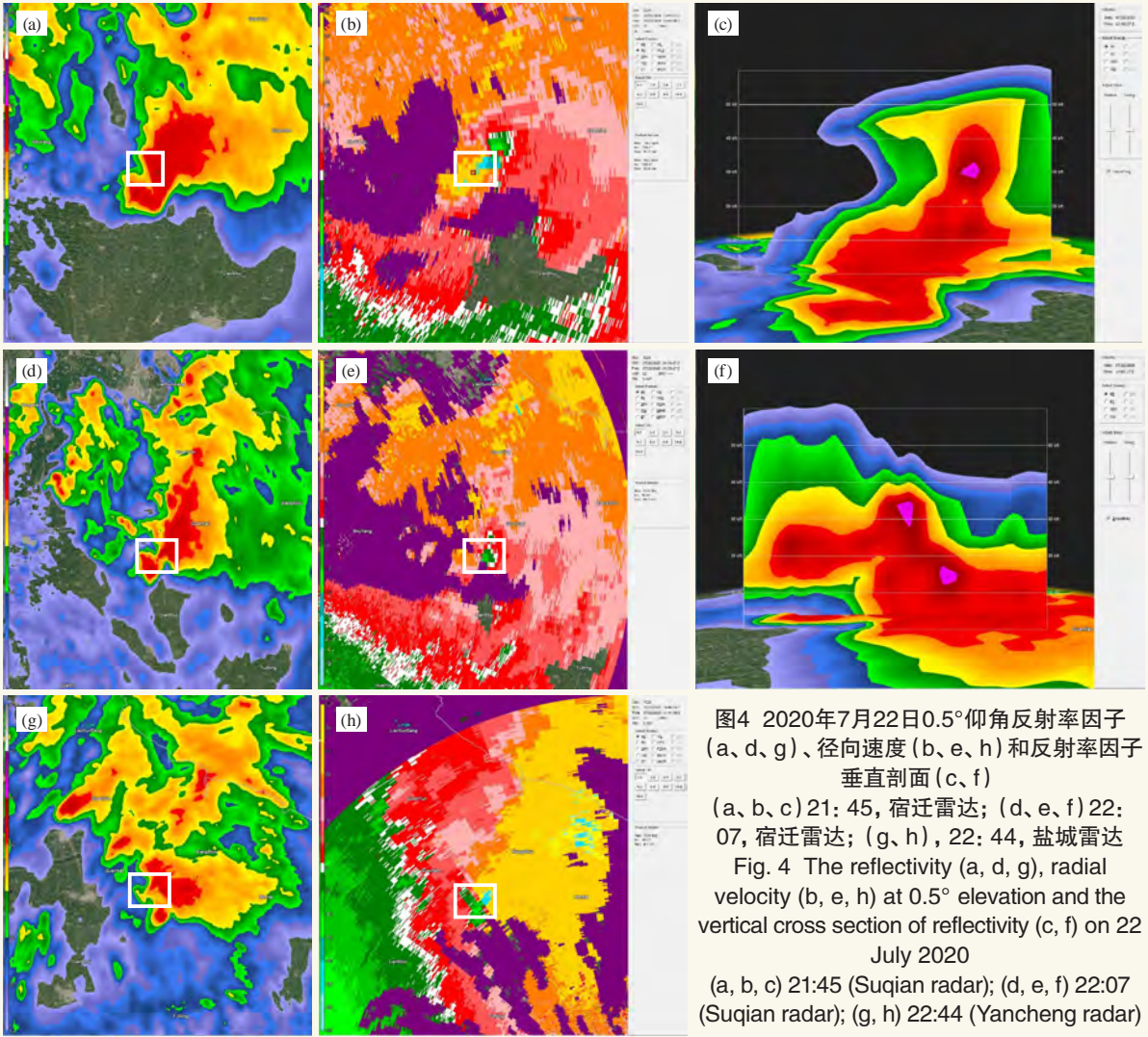
2 天气背景及环境条件

6—7月, 江淮地区正处于梅雨期。西太平洋副热带高压西侧低层西南气流北上, 向苏皖地区持续输送水汽和热量; 与此同时, 有西风槽不断自西向东影响; 受高空槽和西南暖湿气流共同影响, 正是典型

的梅雨期暴雨环流形势, 也符合西风带龙卷发生的概念条件, 如2016年阜宁EF4级强龙卷也正是发生在这一时间段内。以上条件是本文所研究的两个个例环流背景的共同之处, 但仍有其不同之处, 具体分析如下。

6月12日的龙卷发生在6月11—17日江淮地区持续强降水的一次高峰之中, 而7月22日的龙卷则发生在一次比较快速的强对流及暴雨天气过程中。在高空200 hPa上, 两次过程中苏皖地区中北部都处于急流右侧的显著分流区 (图5), 所以高空辐散作用显著, 有利于对流的深厚发展。

从500 hPa位势高度图 (图6a) 可以看出, 中纬度地区有西风槽东移, 6月12日08时副高脊线位于24°N附近, 充足的暖湿气流向江南地区输送, 槽后冷空气与副高西侧的暖湿气流交汇于江淮地区; 700 hPa上有弱切变位于山东南部到河南中部一带, 之后逐渐转向, 而且西南急流明显, 08时最大风速约12 m/s, 苏皖地区中部正位于急流出口区; 地面上沿江地区被宽



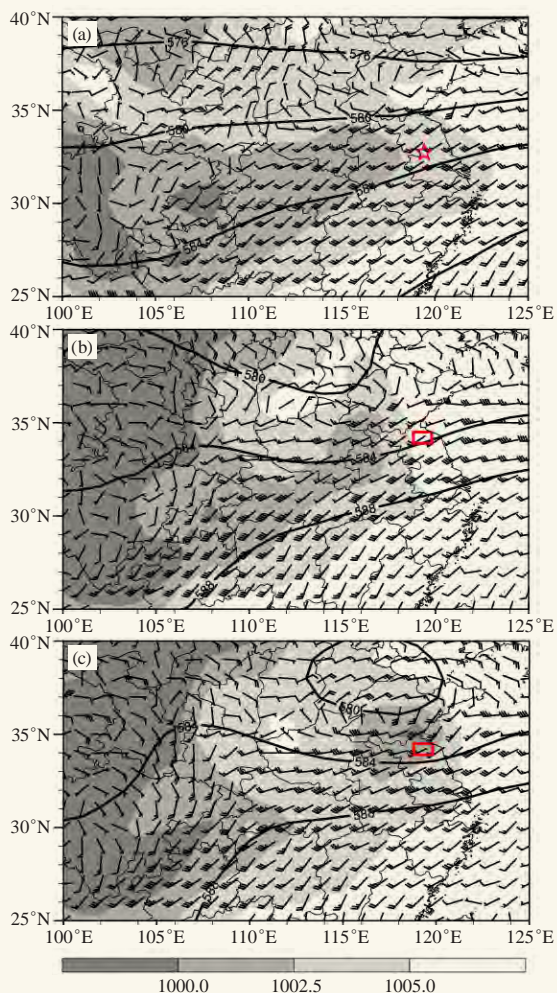


图6 500 hPa位势高度(等值线, 单位: gpm)、700 hPa风场(单位: m/s)和海平面气压场(填色, 单位: hPa)
(a) 2020年6月12日08时, (b) 2020年7月22日14时,
(c) 2020年7月22日20时
Fig. 6 500 hPa geopotential height (contour, unit: gpm), 700 hPa wind field (unit: m/s) and sea level pressure field (shade, unit: hPa) at 08:00 (a) on 12 June, 14:00 (b) and 20:00 (c) on 22 July 2020

广的锋区控制, 地面锋沿长江向东北方向延伸至安徽东北部, 江苏中部处于暖锋南侧(图7a), 产生龙卷的中尺度对流系统往往容易在此区域内产生^[5-7]。从环流背景来看, 此形势与2016年阜宁龙卷形势相似, 但阜宁龙卷有东北冷涡后部的强盛冷空气南下影响^[5], 所以使得锋面附近的对流发展的更为强盛。

而7月22日时, 江苏已经开始出梅, 副高进一步西伸北抬, 588线已经压至苏皖地区, 584和588线之间的区域变窄, 高空槽明显更深。700 hPa急流明显强于6月12日的过程, 急流大值中心正好位于584和588线之间, 中心最大值达24 m/s, 而且急流北侧08时已经形成低涡中心, 位于河南中部, 暖切伸至山东南部。对应在地面上, 气旋锋面生成, 暖锋影响到安徽

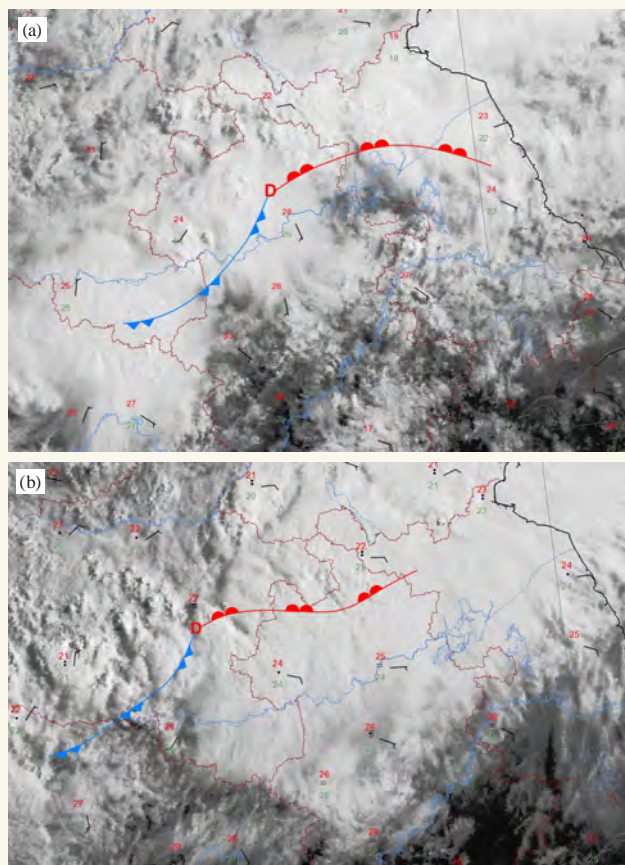


图7 FY-4可见光云图和地面自动气象站观测温度(红色数字)、露点(绿色数字)和风场
(a) 2020年6月12日08时; (b) 2020年7月22日08时
Fig. 7 FY-4 visible images and automatic weather station observed temperature (red digits), dewpoint (green digits) and winds at 08:00 on 12 June 2020 (a) and 22 July 2020 (b)

地区(图7b)。从高低空整体配置来看, 此次过程比6月12日要强, 是典型的梅雨期江淮气旋系统影响, 而且系统发展迅速。14时(图6b), 高空槽进一步东移加深, 槽底已达河南、山东南部, 700 hPa低涡中心也更加显著, 随着槽前气流向东北方向移动已经到达河南东北部, 就位于500 hPa槽底位置, 急流也进一步加强北顶, 江苏北部急流风速超过了26 m/s, 地面对应的气旋中心也移动到了河南、山东与苏皖交界处, 江苏处于暖锋右侧。而20时(图6c), 500 hPa上580线已经出现闭合中心, 且与700 hPa上低涡中心及地面低压中心位置接近重合, 辐合上升气流加强, 对流活动加剧, 有利于龙卷母体风暴的生成。

从低层850 hPa风场可以看到6月12日08时在这一层上有低涡中心生成(图8a), 位于河南东北部与山东交界处, 低涡的暖切伸至江苏北部; 在925 hPa上低涡中心与暖切位置更加偏南, 暖切位于安徽北部到江苏中部一带(图9a), 两层切变配合作用, 提供了

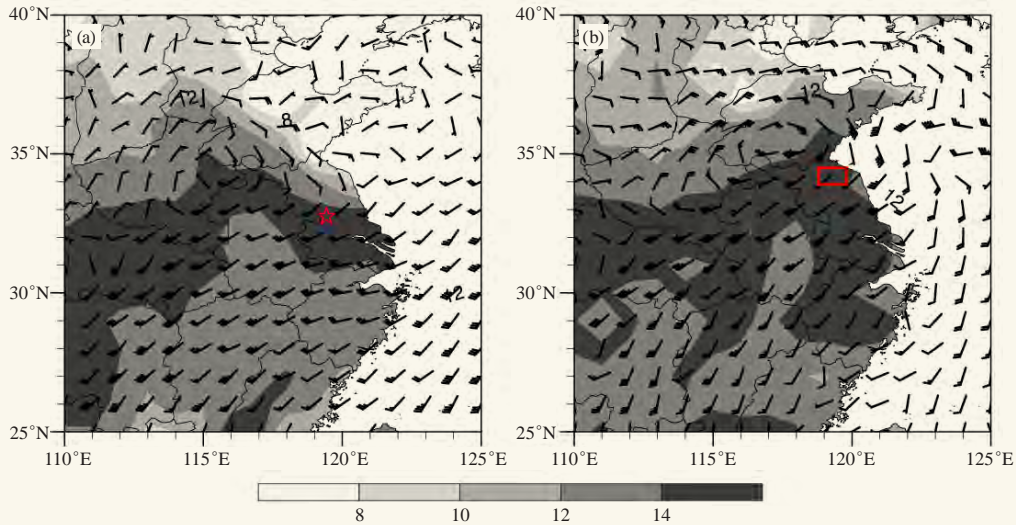


图8 850hPa风场(单位: m/s)和比湿(填色, 单位: g/kg)
(a) 2020年6月12日08时, (b) 2020年7月22日20时

Fig. 8 850hPa wind field (unit: m/s) and specific humidity (shade, unit: g/kg) at (a) 08:00 on 12 June, (b) 20:00 on 22 July 2020

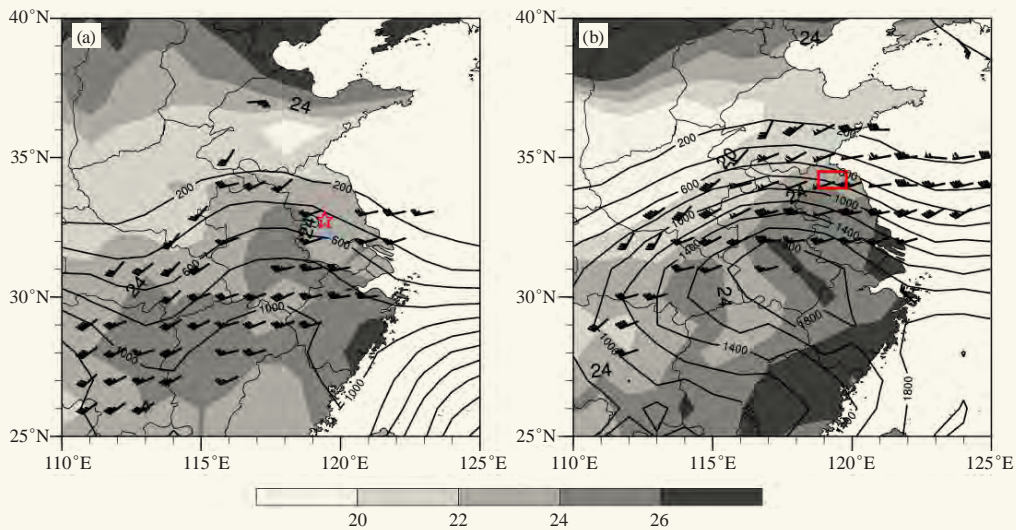


图9 对流有效位能(等值线, 单位: J/kg)和850~500 hPa温差(填色, 单位: °C)以及0~1 km风切变(单位: m/s)
(a) 2020年6月12日08时, (b) 2020年7月22日14时

Fig. 9 Convective effective potential energy (contour, unit: J/kg) and temperature difference between 850—500 hPa (shade, unit: °C) and 0—1 km wind shear (unit: m/s) at 08:00 (a) on 12 June, 14:00 (b) on 22 July 2020

好的动力抬升条件。另外, 整个江南到江淮地区在850 hPa上被西南急流控制, 急流前部从安徽北部伸向了江苏北部, 低层急流不仅提供了较好的低层垂直风切变及其北侧的气旋性切变条件, 同时输送了充沛的水汽, 在江苏中南部地区850 hPa上比湿超过14 g/kg, 整层可降水量高达65 mm以上。08时之后, 该低涡切变系统基本维持在该位置没有移动, 水汽条件更加转好, 有较明显的增湿(图略)。总的来说, 低层暖湿气流与高空槽携带的冷空气垂直叠置在江淮上空, 促进了这一地区对流不稳定层结的发展, 配合好的低层

水汽条件以及较大的湿层厚度^[17], 十分有利于龙卷的发生, 最终龙卷基本就发生在925切变线与水汽大值中心重合区域上。

相比6月12日而言, 7月22日低涡系统更强且移动快速(图8b), 850 hPa和925 hPa上低涡中心从08时的湖北北部向东北方向快速移动, 经过河南到20时已经到达山东南部, 两层暖切叠加作用在江苏东北部地区(图9b)。850 hPa急流偏南分量更大, 且风速也更大, 20时江苏北部超过了20 m/s, 925 hPa上也达16 m/s。同时, 水汽大值中心也顶至了苏皖北部,

850 hPa比湿超过14 g/kg，整层可降水量达到65 mm。与6月12日过程相同，此次过程中龙卷也基本发生在低层切变线与大值中心重合区域内。

梅雨锋伴随的龙卷是在低层有明显的风切变的有利形势下产生的，环境场具有较强的对流不稳定性、大的低层垂直风切变和较低的对流凝结高度^[10, 18]。俞小鼎等^[18-19]认为大的低层垂直风切变、低的抬升凝结高度和地面阵风锋的存在有利于F2级以上强龙卷产生。美国F2级以上的强龙卷的动力条件为0~1 km风切变15 m/s，0~6km为25 m/s；抬升凝结高度750~1000 m^[20]。张一平等^[14]通过分析两次暴雨过程中的弱龙卷过程，给出了F2级龙卷环境场的具体物理量条件：对流有效位能大于1000 J/kg，K指数大于36 °C，0~1.5 km垂直风矢量切变达15 m/s，而抬升凝结高度很低，在0~300 m。从这些研究来看，对于F2级以上的强龙卷和以下的弱龙卷来说，环境条件在定量上没有明确的差别。我们也进一步分析了这两

次龙卷过程的环境条件。从图9可以看到，6月12日08时（图9a），整个淮河以南地区大气都处于较强的不稳定状态，最有利抬升指数（BLI）值小于-2 °C。该区域内对流有效位能（CAPE）在500~600 J/kg，属于中等强度。同时，0~1 km风切变十分显著，在江苏中南部达10 m/s。7月22日的过程整体条件要更强，尤其从14时开始（图9b），安徽到江苏中南部地区850和500 hPa之间的温差超过了22 °C，说明不稳定性明显加强。江淮地区CAPE已经大范围超过了1000 J/kg。同时，此次过程中的风切变也要更强，14时在江苏中北部0~1 km风切变最大达到了22 m/s，为龙卷的发生提供了有很有利的动力条件。另外，不论是从850和500 hPa之间温差上还是CAPE大值区上都可以看到，两次过程最强的不稳定区域在偏南地区，而龙卷都发生在北侧的梯度大值区，即暖湿舌附近。

利用距两次龙卷发生地点最近的格点探空物理量可以更加直观定量地得到其环境条件。图10a是6

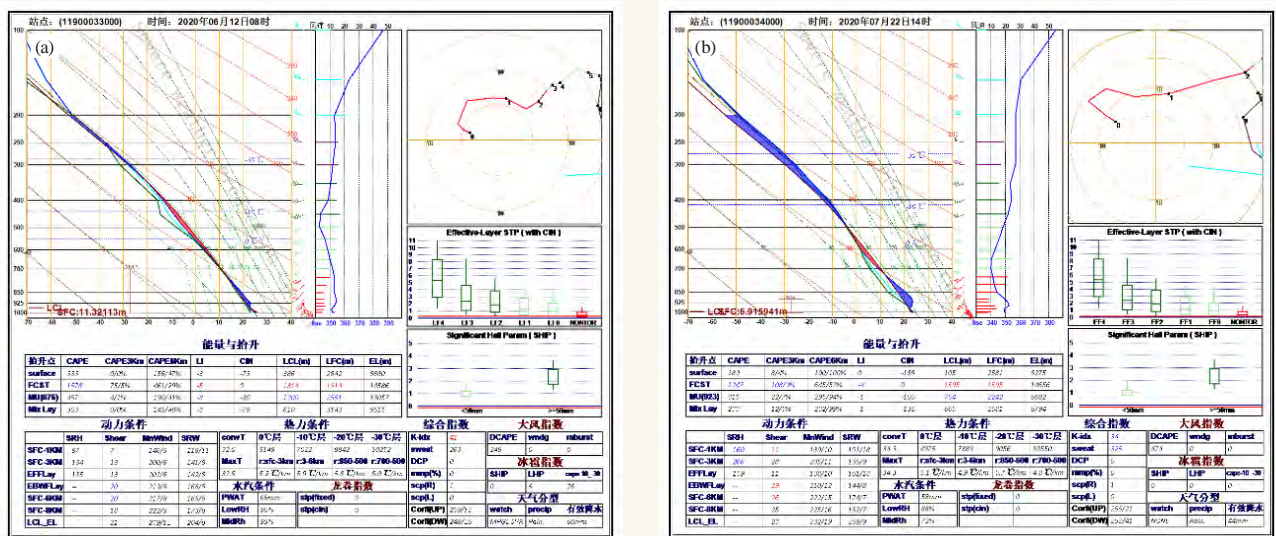


图10 龙卷附近位置T-logP图及探空物理量

(a) 2020年6月12日08时 (33°N, 119°E)，(b) 2020年7月22日14时 (34°N, 119°E)

Fig. 10 T-logP and sounding physical parameters near the tornado at 08:00 (a) on 12 June (33°N, 119°E), 14:00 (b) on 22 July 2020 (34°N, 119°E)

月12日08时高邮市附近 (33°N, 119°E) 探空，可以看到CAPE值为333 J/kg，FCST CAPE达1578 J/kg；0~1 km风切变7 m/s，0~6 km则有20 m/s；抬升凝结高度（LCL）为386 m。与Craven等^[21]所指出的有利于龙卷发生的1200 m以下的LCL和10 m/s以上的0~1 km风切变相比较，其低层的垂直风切变条件相对较弱。而在7月22日14时沭阳和灌南县附近 (34°N, 119°E)（图10b），CAPE和FCST CAPE分别为189和1247 J/kg，0~1和0~6 km风切变分别为11和26 m/s，LCL为105m；与6月12日相比较，能量条

件更弱，而不稳定和动力条件则要更加有利一些，这在综合指数SWEAT（强天气威胁指数）上也有明确指示（分别为263和325）。与2016年阜宁龙卷相比，垂直风切变和抬升凝结高度相当^[5]，但对流有效位能明显较低。总的来说，两次过程中不稳定条件、能量条件以及风切变条件等都十分有利于龙卷的生成，尤其7月22日要更加优于6月12日，可以说与2016年阜宁龙卷过程相当，但最终产生的龙卷强度显然远未达到阜宁龙卷的强度，由此也说明从短期预报角度来说，梅雨期间江淮地区龙卷走廊上的龙卷是有一定的短期可

预报性的，但真正要定位产生龙卷的中尺度对流系统的发生时间、位置以及强度，在短期预报时效内具有极大的难度，还需要更深入的研究。

3 结论

本文对2020年6月12日和7月22日江苏省两次龙卷过程发生的天气背景和对流环境特征进行了初步分析，所得结论如下：

1) 通过对雷达回波特征的简单分析发现，6月12日龙卷与2016年阜宁龙卷类似，是独立于主雨带回波外的离散单体，雷达回波图像和速度图像上表现出超级单体龙卷结构特征，该单体在高邮产生了一个龙卷，持续时间较长；而7月22日产生龙卷的单体镶嵌于主雨带回波南端，并且于生命史内跳跃式移动，影响了邻近多地，每处持续时间都较为短暂。

2) 两次龙卷均发生在梅雨期有利于暴雨发生的天气背景下，高低空急流耦合、地面暖锋南侧高湿高能的不稳定气层是两次龙卷发生的共同有利环境条件，但不同的是，6月12日龙卷发生在一个持续的过程中，影响系统停滞在江淮地区，稳定少动；而7月22日则是一次强烈而快速的江淮气旋影响过程，龙卷发生在气旋锢囚阶段。

3) 这两次龙卷发生的环境条件为中等偏强的热力条件以及强的低层垂直风切变条件和低的抬升凝结高度，定量上对流有效位能在500 J/kg以下，0~1 km垂直风切变在10 m/s左右，0~6 km风切变超过了20 m/s，抬升凝结高度在0~300 m，SWEAT指数达300左右。尤其7月22日的条件要更加有利，0~1 km垂直风切变达11 m/s，抬升凝结高度仅105 m。

江苏是我国强龙卷发生最多的省，尤其在近几年来还发生了如阜宁龙卷的EF4级强龙卷，对人民生命财产安全造成了重大损害，因此针对该地区龙卷的研究十分必要。本文主要针对2020年截至目前发生的龙卷进行了天气学和雷达特征上的一些分析，并与阜宁龙卷进行了一些简单对比，发现与强龙卷个例的环境条件相比，今年两次龙卷的能量条件较差，低层垂直风切变也处于中等程度。而今年两次过程的整体条件比较接近，后一次过程的环境条件相对更有一

些，最终产生的龙卷强度相当，但风暴形态及移动特征等还是有显著区别。本文希望能通过这两次个例的分析为把握梅雨期江淮地区暴雨形势下的龙卷过程的潜势条件以及母风暴形态特征提供一定的帮助，在实际业务中想要更精确的预报预警龙卷还需要更多精细的研究；且针对中尺度对流特征的分析也有待进一步深入。

参考文献

- [1] 魏文秀, 赵亚民. 中国龙卷风的若干特征. 气象, 1995, 21(5): 37-40.
- [2] 范雯杰, 俞小鼎. 中国龙卷的时空分布特征. 气象, 2015, 41(7): 793-805.
- [3] 孙继松, 戴建华, 何立富, 等. 强对流天气预报的基本原理与技术方法—中国强对流天气预报手册. 北京: 气象出版社, 2014.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 郑永光, 朱文剑, 姚琳, 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 何彩芬, 姚秀萍, 胡春蕾, 等. 一次台风前部龙卷的多普勒天气雷达分析. 应用气象学报, 2006, 17(3): 370-375.
- [14] 张一平, 俞小鼎, 吴葵, 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.
- [15] 郑媛媛, 俞小鼎, 方翀, 等. 一次典型超级单体风暴的多普勒天气雷达观测分析. 气象学报, 2004, 62: 317-328.
- [16] 唐晓文, 李峰, 刘高平. 龙卷形成过程及母体风暴结构与演变研究进展. 成都信息工程大学学报, 2018, 33(6): 599-605.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] Grams J S, Thompson R L, Snively V, et al. A climatology and comparison of parameters for significant tornado events in the United States. Wea Forecasting, 2012, 27: 106-123.
- [21] Craven J P, Brooks H E. Baseline climatology of sounding derived parameters associated with deep moist convection. Natl Wea Dig, 2004, 28: 13-24.

瞬时扰动法在佛山一次台风龙卷的环境背景分析和模式预报中的应用

顾伯辉^{1,3} 黄先香^{2,3} 张少婷² 植江玲^{2,3}

(1 广东省佛山市三水区气象局, 佛山 528144; 2 广东省佛山市气象局, 佛山 528315;

3 广东省佛山市龙卷风研究中心, 佛山 528315)

摘要: 结合欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) ERA5再分析数据与S2D模式输出产品, 利用瞬时扰动法先提取了2018年9月17日台风“山竹”在佛山地区诱发的台前龙卷前期“扰动天气系统”, 接着评估了业务模式对此过程前期扰动天气系统的预报能力。结果表明: 龙卷易发生于负高度扰动轴线和冷暖气团对比零线的重合之处; 龙卷是在台风登陆之后高空扰动暖气团和近地面负高度扰动明显减弱阶段发生的, 此时近地面有扰动冷气团开始发展; 佛山在龙卷发生前1 h转受近地面的较强的东南风和偏南风扰动辐合影响, 而中高层大气受冷平流扰动影响, 大气层结变得不稳定; 负高度扰动和正湿涡度扰动有利于台风龙卷母体风暴发生发展, 但会抑制下沉气流扰动的出现, 而正湿散度扰动增大引起的下沉气流扰动增强; 业务模式起报时间为最新时次的预报结果对全部扰动场的综合预报能力是最好的, 预报提前量有12 h。

关键词: 瞬时扰动, 业务模式, 台风龙卷, 环境背景

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.06.009

The Applying of Temporal Climatology Method in the Analysis of both Environmental Background and Model Forecasting for a Typhonic Tornado in Foshan

Gu Bohui^{1,3}, Huang Xianxiang^{2,3}, Zhang Shaoting², Zhi Jiangling^{2,3}

(1 Sanshui Meteorological Service, Foshan 528144 2 Foshan Meteorological Service, Foshan 528315 3 Foshan Tornado Research Center, 528315)

Abstract: Basing on the ERA5 reanalysis data and S2D model output of European Centre for Medium-Range Weather (ECMWF), this paper extracts the tornado-related anomalous systems, occurring in Foshan in September 17, 2018 induced by the typhoon ‘mangkhut’, by using temporal climatology method and evaluates the operational forecasting model. The conclusions are listed below. Firstly, this tornado was more likely located at the overlap between axis of negative anomalous height and zero line of anomalous temperature. Secondly, this tornado occurred during the decay stage of both the positive anomalous temperature in the higher and negative anomalous height in the lower, accompanying with a development of negative anomalous temperature. Thirdly, The influence of prevailing wind in Foshan, before this tornado arised, shifted to the convergence between the anomalous southeaster and southerly wind near the ground and the mid-level atmosphere above was affected by negative anomalous advection, resulting in a unstable atmospheric stratification. Fourthly, negative anomalous height and positive anomalous moist vorticity were in favor of strengthening of tornadic parent storm and suppressing the downdraft, while positive anomalous moist divergence can enhance the downdraft. Lastly, the capacity of forecast of operational forecasting model, for all fields generally, is the best when the initial forecast time is latest, which can predict this tornado in advance of 12 hours.

Keywords: temporal climatology, operational forecasting model, typhonic tornado, environmental background

收稿日期: 2020年10月9日; 修回日期: 2020年10月28日
第一作者: 顾伯辉 (1990—), Email: 317510533@qq.com
资助信息: 广东省科技厅社会发展科技协同创新体系建设专项 (2019B020208015); 灾害天气国家重点实验室开放课题 (2018LASW-B18); 佛山市气象局科学技术研究项目 (201913)

0 引言

龙卷是最猛烈的大气对流现象。佛山市地处亚热带的平原地带, 是龙卷多发的区域。由于龙卷具有尺度小、生命史短等特点, 预报难度极大。短临监测预警是目前减少龙卷造成人员伤亡和财产损失的最有效手段, 多普勒雷达通过探测中气旋和龙卷涡旋特征

(TVS)来对龙卷发生进行提示。然而,90%以上的中气旋伴随有强雹(直径 $>2\text{ cm}$)、强风及龙卷等灾害性天气,但仅有20%~25%左右的中气旋发展成龙卷。此外,当雷达探测到TVS时,通常已出现或即将出现龙卷,这给提高龙卷预警发布的提前量和准确性造成了很大困难^[1]。因此,如何提高龙卷的预报预警提前量对防灾减灾十分重要。

数值模式已经成为了世界各气象部门的主要预测工具,尤其是强对流天气的短临监测预警。虽然龙卷警报通常限制在10~20 min,长期大量的研究仍然在寻找有利于龙卷可能发生的天气(次天气)尺度早期信号^[2-4]。这样的天气(次天气)尺度环境条件受到研究和预报人员的广泛关注^[5-8]。这些研究使用传统天气图和动力-热动力学的诊断方法,来分析龙卷爆发的例子。然而,由于传统天气图和直接观测变量揭示的天气尺度系统也难以精确地确定龙卷的爆发,这些环境条件研究的结果在预报业务中还没有得到真正的应用^[9]。综上,如何在数值模式里面提取有效的信息对龙卷发展的扰动系统进行预报是关键的科学问题。

寻找有明确天气学和动力意义的简单、快捷和方便的强对流指标量,对科研成果应用到强对流预警业务有实质性的帮助。近年来有研究将传统天气图上的变量分解为瞬时气候和扰动后发现,扰动分量及其指标量对多种地面发生的极端天气时间有指示意义^[10-12]。钱维宏等^[13-14]利用该方法进一步分析和评估业务模式对两个江淮龙卷个例发生前的扰动系统,结果表明欧洲中心数值(EC)模式可以提前54 h预报出龙卷扰动系统,美国全球预报模式(GFS)则可以提前18 h。类似地,钱维宏将该方法也应用到暴雨环境背景扰动系统的预报中,取得了良好的预报效果。因此,应用瞬时扰动法提高强对流预报显示出良好的应用前景。然而,西风带龙卷与台风龙卷之间存在诸多区别,例如台风龙卷一般由微超级单体产生,具有更高的风暴相对螺旋度以及低空垂直切变,但对流有效位能明显偏小等。此外,由于影响江淮地区与珠三角地区的下垫面以及天气尺度系统也并不完全相同,常用的业务数值模式对佛山地区产生台风龙卷的扰动天气系统的预报能力如何还不清楚。因此,本文基于瞬时扰动法分析佛山台风龙卷环境背景的扰动指标量以及评估业务模式对龙卷发生前的扰动系统的预报能力。

1 资料和方法

本研究所使用到的模式数据为欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的预报资料,从每天00时(北京时间,下同)和12时起报的2018年9月17日预报,时间

间隔为6 h,水平空间分辨率是 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 经纬格点,垂直分17层。再分析数据使用ECMWF的ERA5数据集,时间间隔为1 h,水平空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 经纬格点,垂直分37层。

分析的个例时间为2018年9月17日09:37—10:00,在登陆台风“山竹”外围螺旋雨带中,具体位置在广东省佛山市三水区到肇庆市四会区发生的EF2级强龙卷。龙卷路径长度18 km,持续时间23 min,平均时速47 km/h,导致不少建筑物损毁。本次过程佛山市进行了龙卷预警试验,提前37 min发布了龙卷预警,龙卷没有造成人员伤亡^[7]。

由于传统天气分解一般使用正交分解方法,但不同区域和分解函数的不同,分解的波动量也不同。为了避免这种不唯一,Qian等^[15]把任一大气变量场分解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,后者可以反映扰动天气系统。理论上,基于扰动场的“扰动天气系统”是产生极端天气事件的直接原因,所以通过分解得到的扰动天气场可以作为龙卷发生发展的环境背景预报基础。

本文拟通过瞬时扰动方法(有关原理参见文献[13-15])分解台风发生当日和逐时的水平和垂直方向上的高度、温度、风速风向、湿涡度和湿散度的扰动场,以期分析热动力扰动条件对台风龙卷形成的指示作用以及数值模式对这些扰动天气系统的预报能力。

2 佛山台风龙卷扰动环境场分析

2.1 台风“山竹”概况

1822号台风“山竹”最早于9月7日10时在西太平洋生成,16日17时以强台风级在广东台山海宴镇登陆,登陆时中心附近最大风力14级(45 m/s),登陆后维持西北偏西方向移动,强度不断减弱,17日14时减弱为热带低压。佛山市三水区白坭镇龙卷发生在17日09:37前后、距离台风登陆已有16.5 h,此时台风中心位于广西南宁市境内,强度为热带风暴级。龙卷产生于距台风“山竹”中心东北象限约490 km处螺旋雨带中的一个微型超级单体^[7]。

2.2 实况

台风外围螺旋雨带的龙卷一般出现在台风的东北侧象限^[16-17]。2018年9月17日,台风“山竹”西侧外围螺旋雨带触发的龙卷位于(23°N , 112.75°E)附近,雷达回波显示强对流雨带呈南北带状分布^[7]。因此,沿着 112.75°E ,剖面分析了17日08—10时温度扰动、高度扰动和垂直速度的垂直分布随时间的变化(图1)。在08时(图1a)在龙卷发生地南北两侧的低层大气上均有

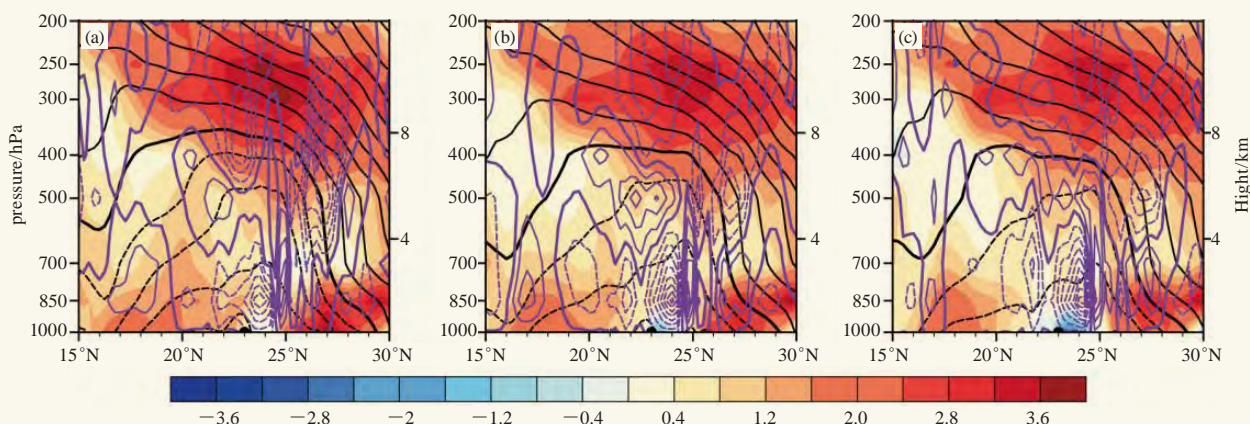


图1 基于ERA5资料沿着112.75°E做出的剖面图，分别是2018年9月17日08时(a)、09时(b)、10时(c) (北京时)的温度扰动场(阴影填色，单位： $^{\circ}\text{C}$)、高度扰动场(黑色等值线，单位： gpm)和垂直速度扰动场(紫色等值线，单位： $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$)。实线为正值，虚线为负值，黑色实心半圆为龙卷发生纬度

Fig. 1 Vertical-latitude cross sections of temperature anomalies (shading, unit: $^{\circ}\text{C}$), height anomalies (black contour, unit: gpm) and vertical velocity anomalies (purple contour, unit: $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$) along 112.75°E at (a) 08:00 BT, (b) 09:00 BT, and (c) 10:00 BT 17 September 2018 based on ERA5 reanalysis. Solid lines represent the positive value, while dashed lines indicate the negative value. The black solid semi-circle indicates the location of tornado

明显扰动暖气团，在上空也有显著的扰动暖气团。高空扰动暖气团对应中低层有明显的负高度扰动，近地面的负高度扰动中心内有弱的下沉扰动气流出现，北侧低空有明显的上升扰动气流，对应近地面有弱的扰动冷气团出现。09时(图1b)高空暖气团略有减弱北移，对应的中低层负高度扰动也有所减弱。然而，负高度扰动中心内下沉扰动气流、北侧上升扰动气流和扰动冷气团都继续增强，扰动冷暖气团南侧交汇处基本与负高度扰动轴线(虚线)重合。10时(图1c)高空暖气团继续减弱北移，中低层负高度扰动也减弱，但上升气流和扰动冷气团进一步增强，减弱了南侧的下沉气流。综上所述，高空扰动暖气团随时间减弱北移，引起中低空负高度扰动的减弱，但负高度扰动轴线处伴随的上升气流，不仅引起低空近地面扰动冷气团的发展，还使得南侧近地面出现下沉气流，反映了台风内微超级单体的发展过程，下沉气流北侧即为龙卷发生地。因此，台风高空扰动暖气团以及中低空对应的负高度扰动是诱发龙卷的重要原因，龙卷易发生于负高度扰动轴线和冷暖气团对比零线重合之处。

图2给出了龙卷发生地上空温度扰动和高度扰动的垂直分布在2018年9月15—19日随时间的变化，发现在15日08时—16日08时850 hPa以下存在明显的扰动暖气团，但16日08时低层扰动暖气团消失，500 hPa以上开始出现扰动暖气团并逐渐增强，在16日下午达到最强，此后不断减弱。对应地，负高度扰动从15日08时不断发展增强，并在16日下午达到最强，此后不断减弱，17日午后基本消失。实际上，温度扰动与高

度扰动随时间的变化过程是与台风移动密切相关的，反映的是台风来临前的外围环流温压场扰动形势。15日08时—16日08时，受台风“山竹”外围下沉气流影响，佛山地区晴天为主，低层扰动暖气团和正高度

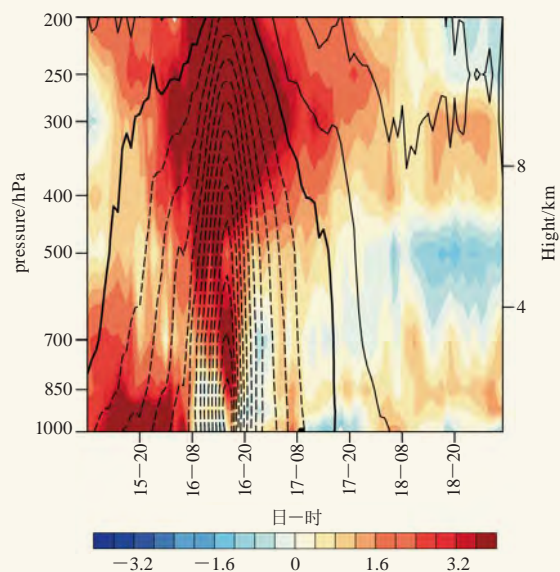


图2 基于ERA5资料的2018年9月15日08时—19日07时龙卷发生地上空1 h间隔的高度扰动(等值线，单位： gpm)和温度扰动(阴影，单位： $^{\circ}\text{C}$)随时间的变化。黑色实心半圆是龙卷发生时间

Fig. 2 Vertical-time distribution of height anomalies (black contour, unit: gpm) and temperature anomalies (shading, unit: $^{\circ}\text{C}$) over the location of tornado from 8:00 15th to 7:00 19th September 2018 with 1h time interval basing on ERA5 reanalysis. Solid lines represent the positive value, while dashed lines indicate the negative value. Black solid semi-circle indicates the arising time of tornado

扰动发展，16日08—17时台风不断移近，受外围螺旋雨带影响佛山上空云量增多，低空扰动暖气团减弱，中高空扰动暖气团和正高度扰动迅速发展。16日17时台风登陆广东台山，此后向西北向移动，强度逐渐减弱，温度扰动和高度扰动也相应减弱。值得注意的是，龙卷是在台风登陆之后高空扰动暖气团和近地面负高度扰动明显减弱阶段发生的，在正温度扰动和正高度扰动的发展以及最强盛阶段并没有发生，而且龙卷发生时对应近地面有扰动冷气团开始发展。这里存在着台风大尺度的温压场扰动结构和有利于龙卷发生的中小尺度温压场扰动。

台风龙卷的生成，不仅与中气旋发展增强有关

系，也与地面辐合或者气旋性涡旋有关系^[18]。高空槽引导的冷空气可以加强登陆后的台风强度，因此也更容易激发出龙卷^[16, 19]。进一步分析了17日02—10时台风“山竹”登陆之后1000 hPa水平风扰动和250 hPa温度平流扰动的逐时变化（图3）。结果表明，1000 hPa风气旋式切变最大的区域基本维持在22°—23°N、110°—114°E，随着台风往西北向移动并逐渐远离佛山，17日08—10时佛山地区也逐渐转成受较强的东南风和偏南风扰动辐合控制，23°N附近的气旋式切变已经明显减弱。龙卷发生地佛山三水白坭金竹村上空持续有冷平流扰动，有利于该处持续有深对流发生。通过分析龙卷发生地上空的温度平流扰动垂直分布随时

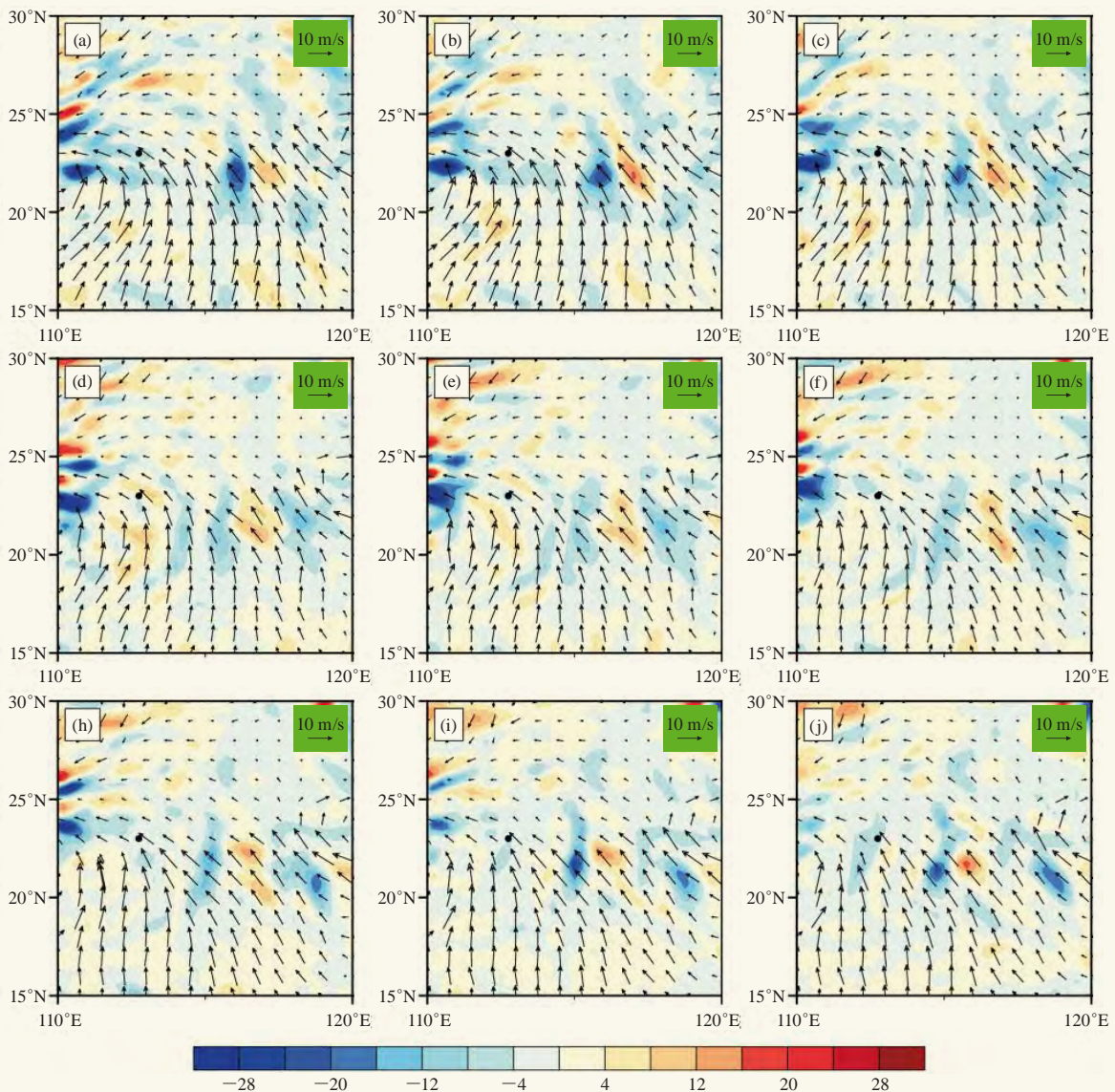


图3 基于ERA5资料在17日02—10时（a—j）的1000 hPa水平风扰动（单位：m/s）和250 hPa温度平流扰动的逐时变化（阴影，单位： $10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ ）。黑色点为龙卷发生地（23°N，112.75°E）

Fig. 3 Horizontal distribution of wind anomalies (unit:m/s) at 1000 hPa and temperature advection anomalies (shading, unit: $10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$) at 250 hPa from 2:00 to 10:00 17 September 2018 (a-j) with 1h time interval basing on ERA5 reanalysis. Black dot indicates the location of tornado

间的变化(图4),发现低层大气在台风登陆前主要以暖平流扰动为主,中层以冷平流扰动为主,但由于台风外围的下沉气流影响以及相对湿度持续偏低,始终无法产生对流。在台风登陆之后到16日上半夜,低层大气开始转受冷平流扰动,中高层大气转受暖平流扰动,大气层结趋于稳定。17日开始,低层大气又转受暖平流扰动,这种暖平流扰动主要是由东南风和偏南风扰动带来的,中层大气受弱冷平流扰动影响,层结处于不稳定状态。因此,台风登陆之后,近地面的较强的东南风和偏南风扰动辐合有利于龙卷触底,中高层大气受冷平流扰动和低层大气受暖平流扰动影响的大气不稳定层结配置有利于深对流的发展,这些热力扰动结构都非常有利于台风龙卷的出现。

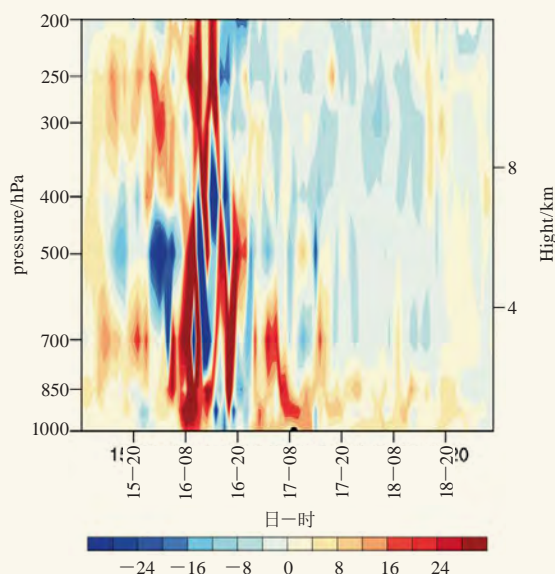


图4 基于ERA5资料的2018年9月15日08时—19日07时龙卷发生地上空1 h间隔的温度平流扰动(阴影,单位: $10^{-5} \text{C} \cdot \text{s}^{-1}$) 随时间的变化。黑色实心半圆是龙卷发生时间
Fig. 4 Vertical-time distribution of temperature advection anomalies (shading, unit: $10^{-5} \text{C} \cdot \text{s}^{-1}$) from 8:00 15th to 10:00 17th September 2018 with 1h time interval basing on ERA5 reanalysis. Black solid semi-circle indicates the location of tornado

湿涡度和湿散度是反映强对流发生背景的热动力结构的两个综合指标, Qian等^[10, 14]应用这两个指标对中国东部地区的区域暴雨和2015年阜宁龙卷进行环境背景分析,效果良好。造成台风龙卷的微超级单体,水平尺度和伸展高度都很低^[20],因此对“扰动天气系统”的低空要素场进行分析。图3的研究结论表明,在17日08—10时佛山地区已经由受气旋性弯曲扰动气流转为受较强的东南风和偏南风扰动气流影响。由于地面辐合配合中气旋下降是龙卷触底的关键过程,而下沉气流又是中气旋下降的重要原因^[18]。根据图1的

分布,引起龙卷生成的下沉气流出现在近地面,因此先分析了17日08—10时1000 hPa垂直速度和925 hPa的湿散度(图5a—5c),结果发现,在08时的龙卷发生地上空,虽然有较强的扰动气流辐合,但正湿散度扰动较弱,对应的下沉气流也较弱。09时,正湿散度扰动增强,对应的下沉气流也有所增强,龙卷发生地位于正、负湿散度扰动交界处。10时,龙卷所在地附近的湿散度扰动变为负值,对应的下沉气流消失,变为上升气流。

接着分析3个时次对应的925 hPa湿涡度扰动和925 hPa高度扰动(图5d—5e),发现龙卷发生地上空在3个时次都处于负高度扰动轴线中,对应有正湿涡度扰动,但负高度扰动随时间减弱西退,正湿涡度在09时比08时要强,10时有所减弱。虽然负高度扰动和正湿涡度扰动有利于微超级单体的发生发展,但对下沉气流起抑制作用。从图5a—5c可知,并不是所有正湿散度都对应下沉气流扰动,说明下沉气流的出现是各种力的综合结果。综上所述,负高度扰动和正湿涡度扰动有利于台风龙卷母体风暴发生发展,但会抑制下沉气流扰动的出现,而正湿散度扰动增大引起的下沉气流扰动增强。

2.3 模式预报

发生在台风外围螺旋雨带上的龙卷致灾往往具有叠加效应。虽然目前业内广泛认可的临近预报时段是0~6 h,实际上大多数情况下对雷暴和强对流能够做到定点、定时和定性的有效预报时效大多数情况下不超过1 h,而对龙卷的提前预警时间平均只有10~20 min,这给防灾减灾工作的开展制造了很大困难^[21]。毫无疑问,数值模式是增加对流预报预警提前量最具有潜力的工具,但模式对“扰动天气系统”的预测能力如何仍不清楚。数值天气预报模式对台风龙卷环境背景的“扰动天气系统”的预测能力,决定了台风龙卷的潜势预报技巧。为了考察常用业务数值模式(EC S2D)对龙卷发生前的“扰动天气系统”预测能力,对温度扰动、高度扰动和垂直速度扰动沿着龙卷发生经度进行垂直剖面,从起报时间为11日08时—16日20时,预报时次为17日08时的12个预报结果中,选取与图1a垂直结构特征相近的4个预报结果(图6),分别是11日08时、15日08时、16日08时和16日20时,对应的预报时长为144 h、48 h、24 h和12 h。它们都具有龙卷发生地的偏北高空有扰动暖气团,且处于负高度扰动中心和扰动冷暖气团对比零线之中等特征。其他时次无法预报出17日08日基本特征的主要原因是预报的扰动暖气团位置偏南,近地面负

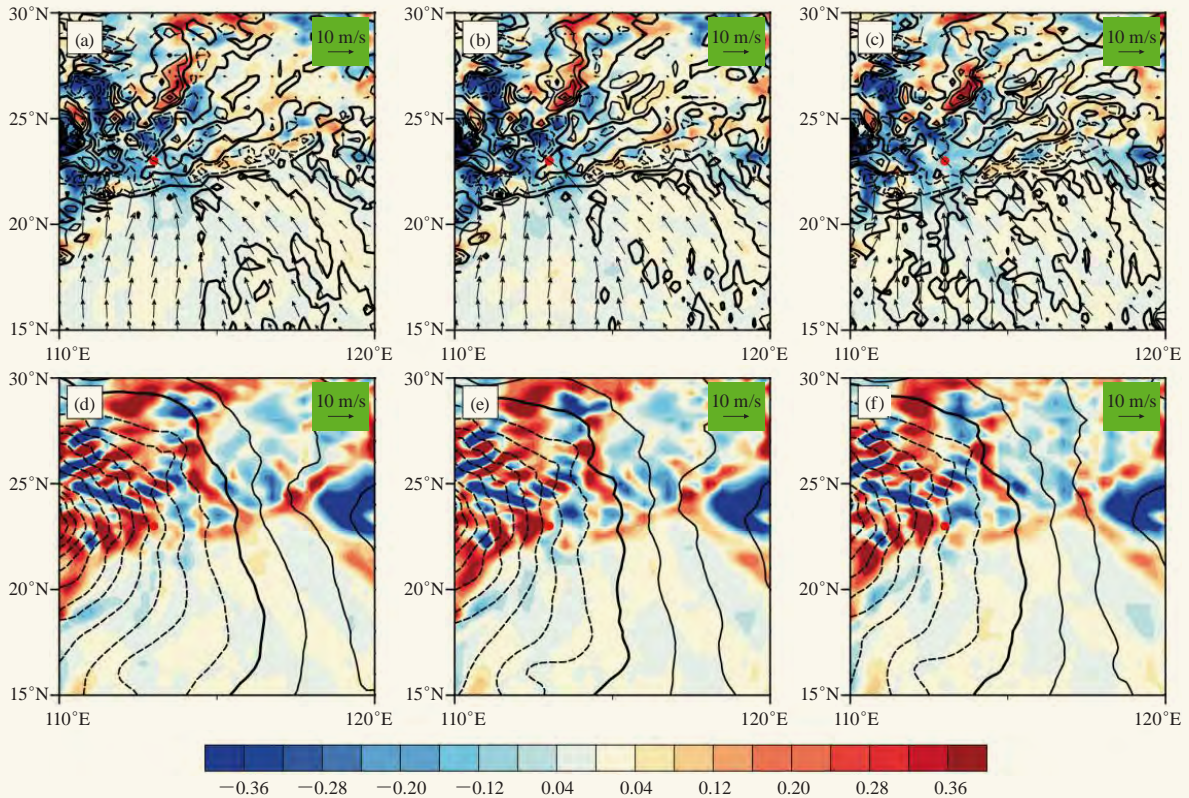


图5 基于ERA5数据的1000 hPa风场扰动 (单位: m/s)、1000 hPa垂直速度扰动 (等值线, 单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$) 和925 hPa湿散度扰动 (阴影, 单位: $10^{-6} \text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) 在17日08时 (a)、09时 (b) 和10时 (c) 的分布, 以及对应三个时刻 (d—f) 925 hPa高度扰动 (等值线, 单位: gpm) 和925 hPa湿涡度扰动 (阴影, 单位: $10^{-6} \text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)。d—f 中, 实线为正值, 虚线为负值。红色圆点是龙卷发生地

Fig. 5 Horizontal distribution of wind anomalies (unit:m/s) at 1000hPa, vertical velocity anomalies (contour, unit: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$) at 1000 hPa and moist divergence anomalies (shading, unit: $10^{-6} \text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) at 925hPa at (a) 08:00 BT, (b) 09:00 BT, and (c)10:00 BT 17 September 2018 based on ERA5 reanalysis. (d-f) are height anomalies (contour, unit: gpm) at 925 hPa and moist vorticity (shading, unit: $10^{-6} \text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) at 925 hPa corresponding to (a-c). Solid lines represent the positive value, while dashed lines indicate the negative value. Red dot indicates the location of tornado

高度扰动也对应偏南。这4个预报结果, 虽然可以基本把径向的垂直热动力结构特征预报出来, 但负高度扰动仅存在于850 hPa以下, 明显比实况偏弱, 使得龙卷南侧下沉气流扰动也明显偏强。此外, 由于高空正温度扰动的强度以及位置与实况基本吻合, 因此与图1a最接近的是图6a的预报结果。以上分析说明, 虽然业务数值模式对这次台风龙卷的温度扰动和高度扰动最早可以提前144 h进行预报, 但高层大气温度梯度刻画能力仍然有待改进。

类似地, 选取了模式预测的1000 hPa风场扰动、1000 hPa垂直速度扰动和925 hPa湿散度扰动分布与图5a相近的4个预报结果, 起报时间分别是11日08时、11日20时、15日08时和16日20时 (图7)。4个预报结果都符合23°N附近有最大风切, 龙卷发生地附近有较强的偏南风 and 东南风扰动辐合且东侧有弱湿散度平流的基本特征。最接近图5a的预报结果图7b, 起报时间

是11日20时, 预报提前量为132 h, 另外3个是144 h、48 h和12 h。其他预报结果一部分没有预报出龙卷发生地东侧正湿散度, 一部分没有预报出较强的东南风和偏南风扰动辐合, 可能与台风运动路径和东南风预报偏差较大有关 (图略)。接着选取了模式预测的925 hPa高度扰动和925 hPa湿涡度扰动分布与图5d相近的4个预报结果 (图8), 这些结果基本符合龙卷发生地上空存在负高度扰动轴线以及正湿涡度的特征。图8a—8c的高度扰动的强度明显弱于实况, 对应的正湿涡度扰动也偏弱。图8d是最接近图5d的预报结果, 起报时间是16日20时, 预报提前量是12 h, 另外3个分别为72 h、60 h和36 h。

无论是热动力扰动的纬向垂直分布 (图6), 还是低空风场扰动、湿散度、湿涡度以及高度扰动 (图7和图8), 都是只有4个预报结果符合对应实况的基本特征, 而且这4个预报结果的起报时间并不连续,

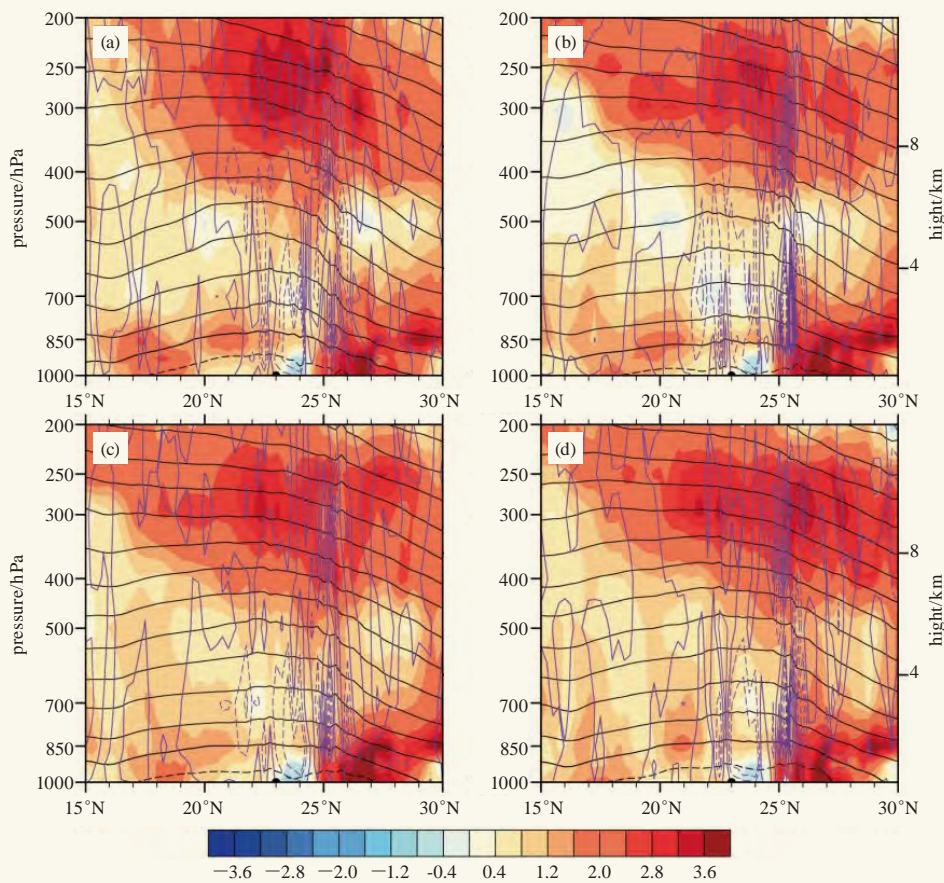


图6 同图1，但数据为EC S2D模式输出结果，时间分别是11日08时 (a)、15日08时 (b)、16日08时 (c) 和16日20时 (d)。为了突出下沉气流，a—c中，等值线只显示正值。d—f中，虚线为负值，实线为正值。红色圆点是龙卷发生地
Fig. 6 Same as Fig.1, but the data used is basing on the output of EC S2D operational model and times are (a) 08:00 11th, (b) 08:00 15th, (c) 08:00 16th and (d) 20:00 16th, respectively. Solid lines represent the positive value, while dashed lines indicate the negative value. Black solid semi-circle indicates the location of tornado

与实况最接近的并不一定是最临近的预报结果。需要指出的是，虽然这次龙卷是在台风登陆之后生成的，但温度扰动和高度扰动的纬向垂直分布以及近地面风场扰动和湿散度扰动，与实况最接近的预报结果对应的起报时间，都是在台风登陆之前，说明模式对台风龙卷的预报性能不够稳定，这在一定程度上影响了台风龙卷的潜势预报能力。究其原因，可能是因为业务数值模式目前对高层温度扰动、低层的高度扰动和风场扰动等物理过程刻画能力仍然不足，同时对台风登陆后的路径和强度的预测有偏差。综合来看，起报时间为16日20时的预报结果预测龙卷发生前的“扰动天气系统”基本特征都与实况接近（图6—图8），可以有12 h的预报提前量，比分析实况数据得到“扰动天气系统”的提前量要大大增加。因此，预报的时候我们不仅要重点关注最新时次的预报结果，基于瞬时扰动法分解出影响台风龙卷发生发展的“扰动天气系统”，同时也要配合实况资料去订正预报结果。通过

确定“扰动天气系统”的发生发展时间和落区，可以在一定程度上提高台风龙卷的潜势预报技巧和预警准确率。

3 结论

传统的大气变量场分解，一般是基于正交分解或者滤波等数学方法进行，以此得到不同时空尺度的波动信息。然而，这些分解或者滤波一般都是针对某些区域进行的，分解函数的选取不同，分解结果也并不唯一性，这是纯数学分解伴随的问题。因此，本研究采用Qian等^[15]提出的分解方法，把任一大气变量场分解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，利用瞬时扰动部分对2018年9月17日台风“山竹”在佛山市触发的EF2级强龙卷的环境背景进行分析，研究扰动天气系统热动力结构特征。该方法具有明显的物理意义，能够更好的解释扰动天气系统对龙卷生成的影响。本文先基于ERA5再分析数据，分析了实况中“扰动天气系统”的热动力垂直结构特

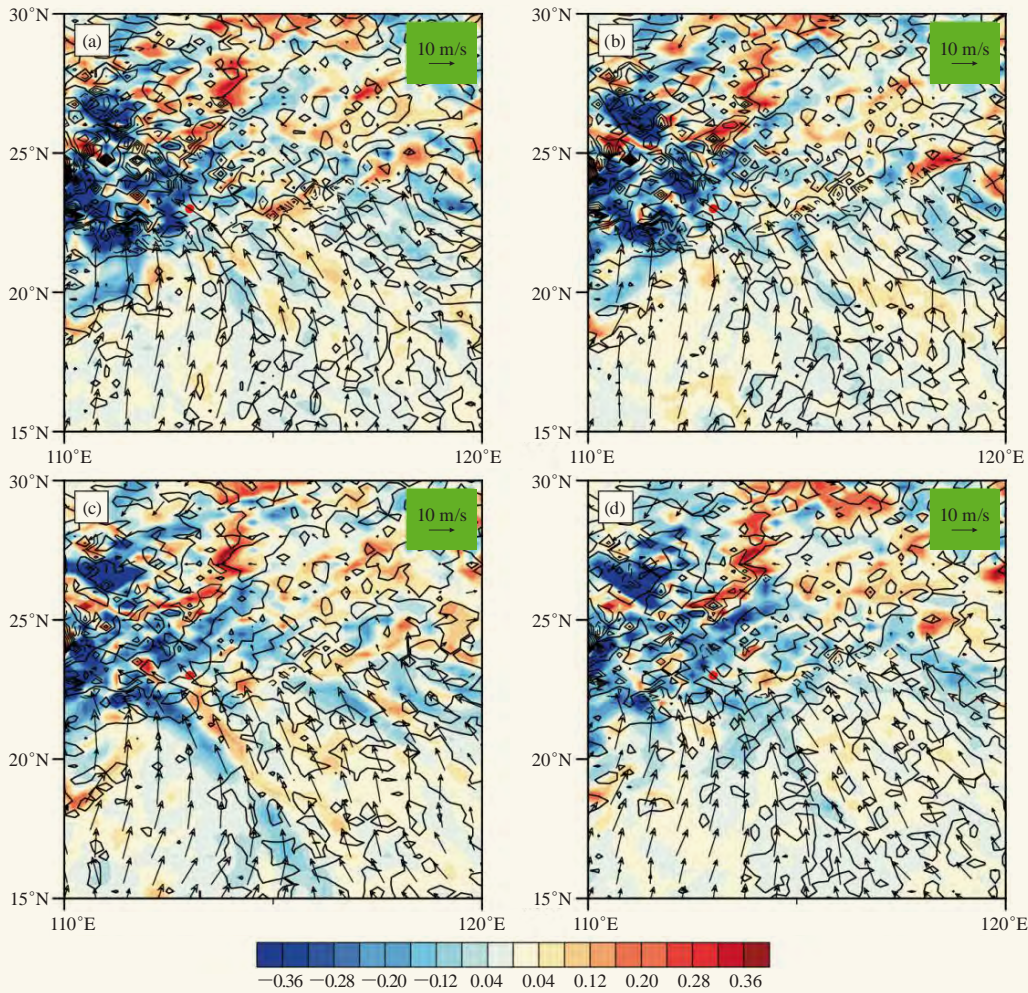


图7 基于EC S2D模式输出结果的1000 hPa风场扰动 (单位: m/s)、1000 hPa垂直速度扰动 (等值线, 单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$) 和925 hPa湿散度扰动 (阴影, 单位: $10^{-6} \text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) 在11日08时 (a)、11日20时 (b)、15日08时 (c) 和16日20时 (d) 的分布。实线为正值, 虚线为负值。红色圆点是龙卷发生地

Fig.7 Horizontal distribution of wind anomalies (unit:m/s) at 1000 hPa, vertical velocity anomalies (contour, unit: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$) at 1000 hPa and moist divergence anomalies (shading, unit: $10^{-6} \text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) based on the output of EC S2D operational model at (a) 08:00 11th, (b)20:00 11th, (c) 08:00 15th and (d) 20:00 16th September 2018. Solid lines represent the positive value, while dashed lines indicate the negative value. Red dot indicates the location of tornado

征, 后面基于EC S2D模式输出结果评估了常用业务模式对“扰动天气系统”预报能力, 寻找预报误差的可能来源。

高空正温度扰动和低空的负高度扰动, 是“扰动天气系统”的主要热动力结构。高空扰动暖气团随时间减弱北移, 会引起中低空对应的负高度扰动减弱。负高度扰动轴线处伴随的上升气流, 不仅引起了低空近地面扰动冷气团的发展, 还使得南侧近地面出现下沉气流, 下沉气流北侧即为龙卷发生地。龙卷易发生于负高度扰动轴线和冷暖气团对比零线重合之处。

温度扰动与高度扰动随时间的变化过程与台风移动密切相关。龙卷是在台风登陆之后高空扰动暖气团和近地面负高度扰动明显减弱阶段发生的, 此时近地

面有扰动冷气团开始发展, 而在正温度扰动和正高度扰动的发展以及最强盛阶段并没有发生。

台风龙卷的生成与触底, 与高层冷空气和近地面辐合或涡旋关系密切。佛山在龙卷发生前1 h转受近地面的较强的东南风和偏南风扰动辐合影响, 中高层大气受冷平流扰动和低层大气受暖平流扰动影响, 大气层结不稳定, 高中低空的热动力配置都非常有利于台风龙卷的出现。

湿涡度和湿散度是两个反映“扰动天气系统”较好的综合指标。负高度扰动和正湿涡度扰动有利于台风龙卷母体风暴发生发展, 但会抑制下沉气流的出现, 而正湿散度扰动的增大会引起下沉气流扰动增强。

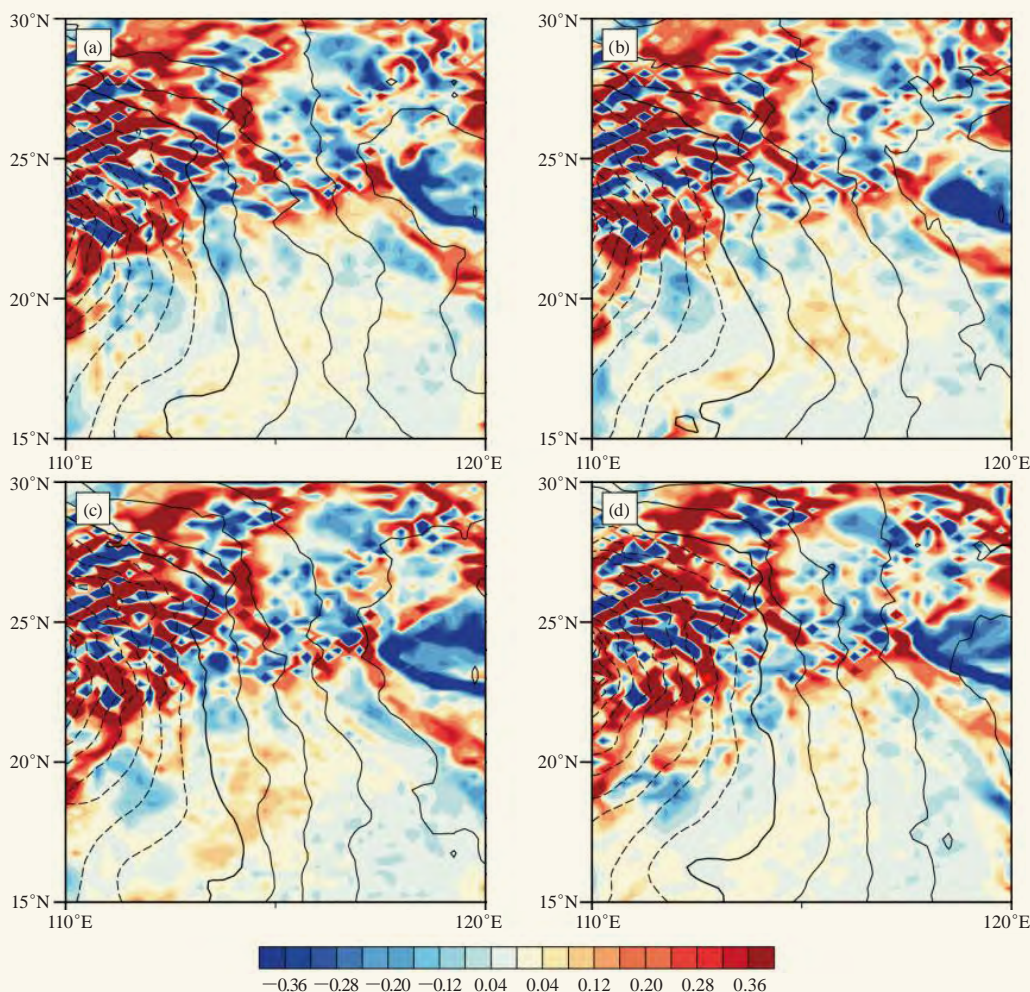


图8 同图7, 但为925 hPa高度扰动(等值线, 单位: gpm)和925 hPa湿涡度扰动(阴影, 单位: $10^{-6} \text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)
Fig. 8 Same as Fig.7, but for height anomalies (contour, unit:gpm) and moist vorticity anomalies (shading, unit: $10^{-6} \text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) at 925 hPa

模式对台风龙卷的预报能力并不是稳定。业务模式对17日08时的温度、高度、风场、湿散度和湿涡度等扰动场与实况最接近的预报结果, 起报时间并不一定是最新时次, 有可能是台风登陆之前。综合来看, 起报时间为最新时次的预报结果对全部扰动场的预报能力是最好的, 预报提前量有12 h, 比分析实况数据得到“扰动天气系统”的提前量要大大增加。

本研究结果揭示了无论是分析实况数据还是业务模式输出结果, 都可以利用瞬时扰动法寻找到有利于“扰动天气系统”发展的前期信号, 这些是台风龙卷的重要可预报源。然而, 由于“扰动天气系统”受台风移动的影响, 热动力结构变化比较快, 在本研究的实况中预报提前量只有1h。虽然借助业务数值模式, 提前量可增加到12 h, 但由于业务数值模式目前对高层温度扰动、低层的高度扰动和风场扰动等物理过程刻画能力仍然不足, 同时对台风登陆后的路径和强度

的预测有偏差, 使得模式对“扰动天气系统”的预报稳定性较差, 而这些系统的预报预警准确率又依赖于模式。除此之外, 本研究仅用了一个个例进行分析, 研究结果仍需用更多的个例去验证。尽管如此, 通过寻找“扰动天气系统”前期信号来提高台风龙卷的潜势预报, 是一个值得努力的方向。

参考文献

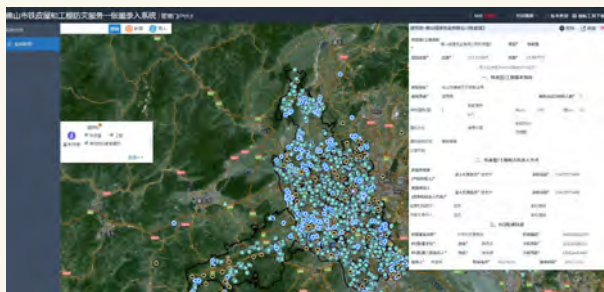
- [1] 周小刚, 王秀明, 俞小鼎, 等. 逾量旋转动能在区分我国龙卷与非龙卷中气旋中的应用. 高原气象, 2012, 31(1): 137-143.
- [2] Fujita T T, Bradbury D L, Thullenar C F V. Palm Sunday tornadoes of April 11, 1965. Monthly Weather Review, 1970, 98(1): 29-69.
- [3] Agee E, Church C, Morris C, et al. Some synoptic aspects and dynamic features of vortices associated with the tornado outbreak of 3 April 1974. Monthly Weather Review, 1975, 103(4): 318-333.
- [4] Metz N D, Bosart L F. Derecho and MCS development, evolution, and multiscale interactions during 3-5 July 2003. Monthly Weather Review, 2010, 138(8): 3048-3070.
- [5] Weisman M L, Evans C, Bosart L. The 8 May 2009 superderecho: Analysis of a real-time explicit convective forecast. Weather & Forecasting, 2013, 28(3): 863-892.
- [6] 黄先香, 俞小鼎, 炎利军, 等. 广东两次台风龙卷的环境背景和雷

- 达回波对比. 应用气象学报, 2018, 29(1): 70-83.
- [7] 黄先香, 炎利军, 王硕甫, 等. 1822号“山竹”台风龙卷过程观测与预警分析. 热带气象学报, 2019, 35(4): 458-469.
- [8] 黄先香, 俞小鼎, 炎利军, 等. 1804号台风“艾云尼”龙卷分析. 气象学报, 2019, 77(4): 645-661.
- [9] Mercer A E, Shafer C M, Doswell C A, et al. Synoptic composites of tornadic and nontornadic outbreaks. Monthly Weather Review, 2012, 140(8): 2590-2608.
- [10] Qian W, Jiang N, Du J. Anomaly-based weather analysis versus 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] Chen Y, Hu Q, Yang Y, et al. Anomaly based analysis of extreme heat waves in Eastern China during 1981-2013. International Journal of Climatology, 2017, 37(1): 509-523.
- [13] 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): 40-54.
- [14] 钱维宏, 梁卓轩, 罗未萌, 等. 用瞬态扰动法考察龙卷环境系统的模式预报. 气象科技进展, 2018, 8(2): 38-45.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Bai L, Meng Z, Sueki K, et al. Climatology of tropical cyclone tornadoes in China from 2006 to 2018. Science China Earth Sciences, 2020, 63(1): 37-51.
- [18] Davies-Jones R. A review of supercell and tornado dynamics. Atmospheric Research, 2014, 158(5): 274-291.
- [19] Tochimoto E, Niino H. Structure and environment of tornado-spawning extratropical cyclones around Japan. Journal of the Meteorological Society of Japan, 2018, 96(4): 355-380.
- [20] Burgess D W, Lee R R, Parker S S, et al. A study of mini supercells observed by WSR-88D radars//Preprints, 27th Conference on Radar Meteorology. Vail CO: Amer Meteor Soc, 1995.
- [21] 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.

佛山靶向发布系统应用成效显著

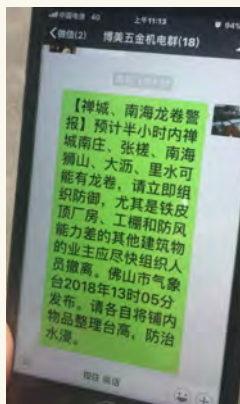
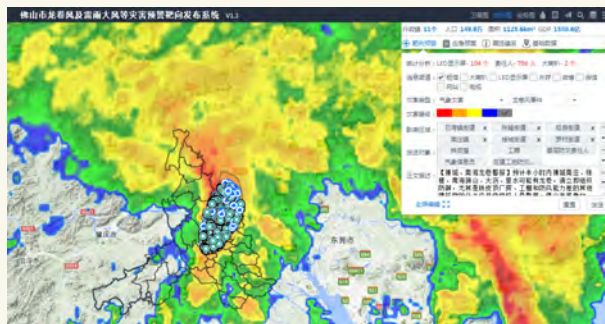
■ 褚红星 麦文强

为了强化佛山预警发布系统支撑,提升佛山龙卷等致灾性雷暴大风监测和预警信息发布能力,2017年,佛山市气象局开展了佛山市龙卷风及雷雨大风等灾害预警信息靶向发布系统(以下简称靶向发布系统)建设和全市铁皮屋和工棚等易受风灾影响建筑物普查及培训工作,截至2020年10月系统共录入铁皮屋数据4.1万条。



靶向发布系统通过融入了实况监测、灾害模型、龙卷风险指标、公众报料信息等辅助研判数据,以及铁皮屋和工棚、电力设施、学校、地质灾害点、危化品企业等易灾主体的责任人信息,实现灾害性天气快速研判和预警信息的精准发布。

靶向发布系统的建设有效提升了佛山市气象局预警信息的精准发布能力,在2018年佛山发生的两



次龙卷过程中发挥了重要作用。2018年6月8日台风“艾云妮”影响期间,首次利用系统成功发布了龙卷警报,共精准发布短信14407人次。2018年9月17日台风“山竹”影响期间,再次利用系统精准靶向发布6800人次,两次过程的预警信息发布速度均高达800条/s,为公众自救互救赢得宝贵时间。

(作者单位:广东省佛山市气象局/佛山市突发预警事件发布中心)

微型无人机在龙卷灾情调查中的应用

蔡康龙^{1,2} 植江玲¹ 李彩玲¹ 黄先香^{1,2} 李兆明¹ 彭斯琪³

(1 广东省佛山市气象局/佛山市龙卷风研究中心, 佛山 528000; 2 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081; 3 广东省佛山三水区气象局, 三水 528100)

摘要: 微型无人驾驶飞机(简称无人机)是龙卷灾害进行精细调查重要工具之一。无人机航拍可获取灾情的高清图像,为龙卷灾情特征分析提供资料。简要介绍了龙卷灾情调查的常用无人机型号的性能和特点,如不同情形的无人机型号选择和相关备件搭配、无人机起飞条件、作业的天气条件、无人机续航配置,最后结合的灾情调查个例总结出无人机灾情调查航拍方法、灾情指示物识别的四个要点和识别龙卷移动方向和宽度的优势。

关键词: 微型无人机, 航拍, 精细调查, 灾情特征, 应用

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.06.010

Application of Miniature Unmanned Aerial Vehicle in Tornado Damage Survey

Cai Kanglong^{1,2}, Zhi Jiangling¹, Li Cailing¹, Huang Xianxiang^{1,2}, Li Zhaoming¹, Peng Siqu³

(1 Foshan Meteorological Service /Foshan Tornado Research Center, Foshan 528000

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

3 Sanshui Meteorological Service, Foshan 528100)

Abstract: Miniature unmanned aircraft vehicle (UAV) is one of the important tools of tornado damage precise survey. UAV can obtain high-precision image and video to analyze the tornado damage characteristics. This paper introduces features and performance of common UAV that using to tornado damage survey, such as UAV selection and related spare parts in the different situations, weather condition, take-off condition, range configuration. In addition, this paper summaries the damage survey method of UAV, the four main points to identify damage indicators and the advantages of identifying tornado moving direction and width by using damage survey examples.

Keywords: miniature unmanned aerial vehicle, air photographs, precise survey, damage characteristic, application

0 引言

龙卷是大气中最强烈的涡旋现象^[1], 容易导致重大经济损失和人员伤亡。例如, 2015年10月4日广东佛山EF3级造成4人死亡、80人受伤和大量建筑损毁^[2-3], 2016年6月23日江苏省盐城市阜宁县EF4级龙卷造成98人死亡、800多人受伤和大量建筑损毁^[4-5], 2019年7月3日辽宁开原EF4级强龙卷^[6]。根据佛山龙卷风研究中心龙卷灾情调查资料, 2016—2019年我国可确认的龙卷有40次, 平均每年有8次龙卷。这些龙卷强度定级

及灾情指示物^[7]的分析主要基于无人机航拍的资料, 无人机成为现场天气调查的最重要的工具之一。

无人机主要包括飞行器、控制台、飞行控制系统、图像传输系统、云台及相机等。无人机具有成本低, 操作简单等特点, 能快速获取高分辨率、高精度、高时效的影像^[7-9], 非常适合用于地震、泥石流、台风、下击暴流和龙卷等自然灾害的灾情评估工作^[10-14]。例如, 2015年使用无人机对“东方之星”客轮翻沉事件进行风灾调查^[14-15]。由于出现龙卷灾情后, 现场往往会被快速清理, 造成树木倒向和风灾造成的碎片等痕迹有可能被破坏而变得不可信, 给龙卷风灾情特征分析增加了难度。因此, 灾情调查人员要及时到达现场, 利用无人机快速航拍原始的灾情, 获取第一手资料进行分析龙卷强度、龙卷灾害带长度和宽度等特征。

本文根据多次灾情调查的实践与探索, 介绍常见的无人机性能、无人机作业因素、无人机在龙卷灾情

收稿日期: 2020年6月3日; 修回日期: 2020年8月21日
第一作者: 蔡康龙(1988—), Email: 35642480@qq.com
资助信息: 灾害天气国家重点实验室开放课题
(2020LASW-A03, 2018LASW-B18); 广东省
科技厅社会发展科技协同创新体系建设专项
(2019B020208015); 佛山市气象局科技项目
(201906)

调查方法和灾情指示物识别要点。

1 灾情调查对无人机性能的需求

进行龙卷灾情调查常见的无人机型号有大疆御mini、御2、精灵4、悟2（性能参数如表1所示），这几款无人机都可以满足灾情调查基本的航拍需求，但在不同的龙卷灾情调查需求选择合适的无人机型号可提高作业效率。从到达受灾区域时间快慢的角度考

虑，若受灾区是在省外，调查组优先搭乘民航客机，此时应该携带轻巧的御系列无人机。与悟2无人机对比，御系列无人机更轻，电池体积和容量更小，单电池的持续时间更长，在不要求更高清的图像质量情况，航拍灾情航拍效率更高；若受灾区在省内，优先选择自驾汽车，则选择悟2提高航拍图像的质量。

考虑无人机返航时间、无机电池折旧等损耗

表1 常见大疆系列无人机型号和性能参数
Table 1 Types and performance parameters of the common DJI UAVs

型号	轴距/mm	起飞重量/g	照片最大分辨率	录像最大分辨率	抗风能力	飞行时间/min	单块电池重/g
御mini	213	249	4000×2250	2720×1530	4级风	30（单块）	100
御2	354	905	5472×3684	3840×2160	5级风	31（单块）	297
精灵4 RTK	350	1391	5472×3078	4096×2160	5级风	30（单块）	468
悟2	605	4250	6016×3200	6016×3200	5级风	23（双块）	515

时间，表1中各款无人机航拍作业时间约为飞行时间的0.6倍，所以表1的无人机实际作业时间都小于20 min。无人机灾情调查内容主要包括寻找大致灾情以确定龙卷的走向、航拍灾情的视频和航拍灾情指标物的特征（以照片为主）。2019年9月17日广东省佛山三水区发生龙卷，持续时间约23 min，移动路径长度达18 km^[16]。该龙卷灾情调查资料统计可知，单无人机单日最长的航拍视频时间约为92 min，其视频大小约29 GB。若此次作业由御2无人机执行，航拍灾情的视频要消耗6块电池的电量，寻找大致灾情和航拍灾情指标物这两部分作业消耗电池数量需根据实际情况而定，一般需准备4块电池。如果龙卷灾情范围，可以使用多无人机作业和车载充电器补充电池电量。

此外，还要准备足够的电池给遥控器的外接显示屏（包括手机，平板和专业显示屏）使用，御系列和精灵系列无人机的遥控器外接显示屏一般是手机，而悟2则使用平板或者高亮屏，使用充电宝给手机和平板的补充电量，高亮屏则准备2~3块配套的电池。在配备10次飞行的电池的无人机情况下，精灵和悟2无人机（一次起飞消耗两块电池）的装备箱比较笨重，其中悟2装备（包括放置无人机箱和装着20块电池的防静电箱）重量约25 kg，在乘坐民航时较为麻烦，但是航拍视频和相片质量高。而由于御mini和御2都是折叠式无人机，重量轻体积小，方便携带，但御mini无人机抗风能力较差，录像分辨率最低，灾情航拍效率较低；而御2不存在这样的问题。综合分析：乘坐公共交通工具到灾区可以优先选择御2无人机，全程自驾到灾区则推荐使用精灵和悟2无人机。

2 无人机作业的影响因素

无人机能否顺利航拍的龙卷灾情，取决以下方面

的因素。

2.1 起飞准备

无人机作业前要了解灾区的空域属性，应向相关部门了解限制区域的划设情况^[17]。无人机在非禁飞区域（除飞行禁区、限制区和危险区外）作业情况下，必须先进行实名登记和获取飞行执照才能作业，作业的过程要符合安全飞行的相关规定，如飞行高度要保持在120 m以下等规定。若在禁飞限制区域必须到灾区的行政归属地的公安机关或者民航局等机关申请。

2.2 天气条件

龙卷灾调中无人机作业常考虑的天气条件有大风环境和雨天情况。

2.2.1 大风环境情况下

有部分龙卷发生在临近海边的地方，无人机在这种地方作业，容易遇到大风情况。除了御mini无人机外，表1中的其他型号无人机可抵抗5级风力（约10 m/s）。在大于5级风力环境中，无人机将无法稳定飞行，甚至会出现无人机被大风吹走的问题。当无人机提示大风警告，操作者应该及时降低飞行高度并尽快返航。

2.2.2 有明显降雨情况下

灾情刚刚发生后，天气条件尚不稳定，无人机在航拍过程看容易遇到雨水，不但会影响航拍视频的质量，而且会对无人机造成一定程度的损坏，遇到此情况应该及时返航。表1中的无人机均属于消费级别的无人机，不具备防水的能力。大疆经纬200系列有液体防护3级的功能，可以在小雨情况下飞行，但下雨影响航拍视频的质量。

2.2.3 有雷电及浓雾情况下

无人机在航拍过程中出现雷电及浓雾情况下，都

应该立即返航，保证安全作业。

3 航拍方法

根据气象资料和网络拍摄视频对灾情进行提前判断，如受灾区域内的气象自动观测站气压出现短暂的下降，瞬时风速短暂增大和天气雷达资料径向速度图上低层出现中等到强的中气旋和类龙卷风涡旋特征^[18]，结合网络拍摄视频或者图片有明确漏斗状云，可以初步判断是龙卷灾情。下面主要结合2019年4月13日广东省徐闻县龙卷（以下简称徐闻个例）的灾情分析给出龙卷灾情航拍的具体步骤，能有效说明灾情航拍的相关工作开展情况。



图1 徐闻个例无人机航拍路线图

Fig. 1 UAV aerial route map in Xuwen County

步骤1：应该根据相关媒体报道或者相关部门的资料找出至少一个明显受灾点的地理位置作为第一个起飞点。在徐闻个例中，和安镇政府（图1中的起飞点1）是灾情严重的地方之一，考虑到人口密集的地方灾情清理会比较快，第一个航拍点选择点1，并在手机导航上记录点1以及每次无人机起飞点的位置。

步骤2：无人机一般以50 m高度以上和云台俯角 $30^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 航拍搜索点1的东、南、西、北四个方向500 m以内（图1中点1绿色箭头所代表的飞行方向）的信息，若实际灾情范围较大，可调整无人机飞行高度和搜索距离以提高搜索的范围，根据四个方向的灾

情特征找出灾情明显的点作为下一个航拍起飞点，简称“十字搜索法”。遇到灾情范围较大的情况，悟系列的无人机可以使用广角镜头，同时给电池进行充电。低空航拍（一般30 m高度以下的航拍）第一个起飞点到第二个起飞点之间的灾情。考虑到无人机在低空飞行时，较高的建筑遮挡和地磁场的变换会影响无人机与遥控器之间的图像信号传输，无人机航拍起飞点之间的距离保持在400~500 m可以保证其信号的正常传输，如图1中的2、3和4点主要是鱼塘和海湾，无人机可适当增加低空飞行距离以提高灾情调查的效率。

在徐闻个例中，按照高空搜索步骤操作后，在无人机向东飞行超过120 m、向南和向西飞行超过100 m后找不到明显灾情，而向北飞行接近500 m时，灾情比较连续，左侧的灾情比右侧的明显，故选择点1以北400 m左右处选址灾情明显并且方便无人机起飞降落操作的点2作为下一个起飞点，点2的灾情主要是树木倒伏和折断（图略）。

低空航拍点1和点2之间灾情，记录各个灾情指示物，并初步分析树木倒伏方向及房屋的受损情况，结合灾情的整体情况对龙卷的移动路径进行判断。图2a（位于图1中的A点）中根据的黄槿树（硬木）倾倒方向、房屋顶过半瓦片吹落方向和电线杆折断的倒向整体偏向东南，判断龙卷在此位置的走向大致是东南方。图2b树木倒伏是点1和安镇镇政府的灾情，该位置的树木整体倒向是东南方，可初步判断点1位置的龙卷移动方向是东南方。由于龙卷移动方向在短距离内比较一致，由此可初步判断点2处的龙卷以东南方向移动到点1处，下一步航拍操作点1向东南和点2向西北搜索。

步骤3：下一个航拍起飞点优先按照步骤2进行航拍和分析，若航拍过程中灾情依然比较连续（图1的点2、点3、点4、点5、点6、点7相邻两点之间），则只使用步骤2；若在航拍时出现较大间隔（100 m以上，要结合实际地面情况而定，如大面积的鱼塘，灾情就显现不连续，此时可以增大判断间隔）的灾情不连续的情况（图1的点4和点7），使用步骤1的“十字搜索法”，按照图1的点4和点7的绿色箭头的四个方向搜索航拍，当出现灾情破坏等级变小，受灾指示物从少到无，可以初步判断龙卷灾情的起点和终点，但也存在因为龙卷跳跃或者再次升起^[19]而造成灾情不连续的情况。在龙卷移动轨迹跟点2到点3白色虚线轨迹出现较大偏差时，根据航拍的灾情分布调整无人机航拍路线，保持无人机航拍到有效的灾情。



图2 徐闻个例中灾情指示物
(a) 图1中位置A的灾情图; (b) 和安镇镇政府的灾情图
Fig. 2 Damage indicator in Xuwen County

(a) The damage in location A of Fig. 1; (b) the damage in He'an Town Government

步骤4: 由于无人机不具有夜视功能, 晚上对无人机的电池和遥控器充电, 并将无人机全部航拍资料与气象观测资料进行初步分析, 若在龙卷移动轨迹附近的雷达资料有中气旋和龙卷风涡旋特征等有可能出现龙卷的特征, 仍有必要到出现龙卷特征对应位置走访和使用无人机搜索。

步骤5: 根据无人机的飞行记录上的经纬度信息和航拍视频资料, 将灾情指示物的位置及其他信息录入地理信息系统或者卫星地图, 制作龙卷灾情范围图, 统计出此次龙卷灾情的特征。

4 灾情指示物识别的分析方法

4.1 着重观察同类型地物颜色的连续性

无人机在高度50 m以上重点观察颜色跟周边颜色不一致的区域, 如图3a是2019年8月16日辽宁省营口市龙卷(简称营口个例)灾情图, 龙卷吹掉楼盘顶的防水层材料和部分铁皮(图3a红框位置), 导致此区域的楼盘颜色与其他区域的不同, 遇到此情况, 应该低空航拍楼顶、搜索楼盘的每层玻璃窗是否完好、墙上是否有抛射物和墙上瓷砖是否有脱落。图3b是2019年8月29日海南省屯昌县龙卷(简称屯昌个例)灾情

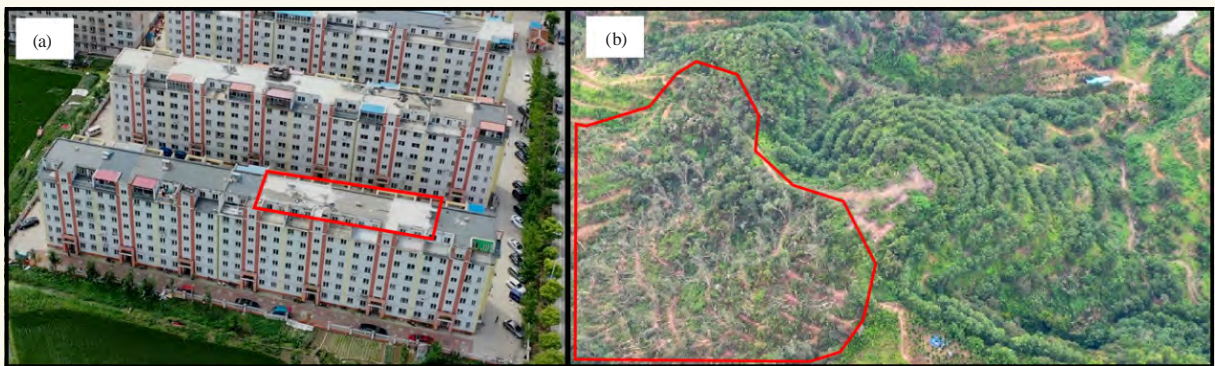


图3 2019年8月16日营口个例(a)和2019年8月29日屯昌个例(b)的灾情图
Fig. 3 Damages of Yingkou on 16 August 2019 (a) and Tunchang on 29 August 2019 (b)

图, 龙卷吹倒大量树木后, 由于树木枯萎使树叶颜色变暗, 与周边健康的树木颜色不一致。

4.2 高低空、多视角航拍

图4是对无人高空航拍和低空航拍图像进行对比, 图4a是50 m高度的航拍, 图像可快速找到受灾地点和了解整体灾情, 但受灾细节比较模糊。低空航拍能了解灾情的细节, 但是比较耗时。低空航拍图4a的物体a、b和c, 可以清晰看到条状物体a是水泥电线

杆, 折断倒伏在地面上(图4b); 物体b(图4c)是瓦片房, 从地面的瓦片颜色可判断是最近吹掉的; 从图4d可判断物体c是哪个品种的树及其倒伏的原因(虫病或风灾等)。

4.3 结合百度全景图像和网络视频

图5a是营口个例的营大路附近的灾情图, 由于灾情出现在营大路两侧, 灾情组到现场前倒伏树木已经被清理干净, 导致无人机航拍难于发现此类情况的



图4 徐闻个案调查中无人机高低空航拍效果对比图

(a) 50 m高空航拍图；(b)、(c)、(d) 分别对应于图a红框位置物体a、b和c的低空航拍图

Fig. 4 Comparison of aerial photography effect of UAV at high and low altitude in Xuwen County
(a) Aerial photograph at 50 m; (b), (c) and (d) correspond to the low altitude aerial photos of objects a, b and c in the red box of Figure a, respectively

灾情，需要结合百度全景图像和网络视频协助航拍。从网络视频（图5c和5d）观察到龙卷风（图5c和5d中的黄色实心箭头）大致移动方向（图5a中的黄色空心箭头），龙卷移动过程中部分树木被吹走（图5d中的蓝色虚线方框），故该位置要补充低空航拍或者走访。在百度地图上查看该位置最新的全景信息（2018年2月），能清晰看到主行道路两侧的树数量（图5b

是图5a的红框对应位置的截图，两图的树木位置相对应），而航拍时发现图5a中红圈位置泥土是新的，和周边颜色不一致，可初步了解到龙卷在此位置影响范围及移动方向，提高航拍的效率。

4.4 针对疑似对象，分析并走访排查

图6a是徐闻个案灾情调查中发现香蕉树成片倒伏，而旁边的桉树没有倒伏和树枝折断的情况发生，

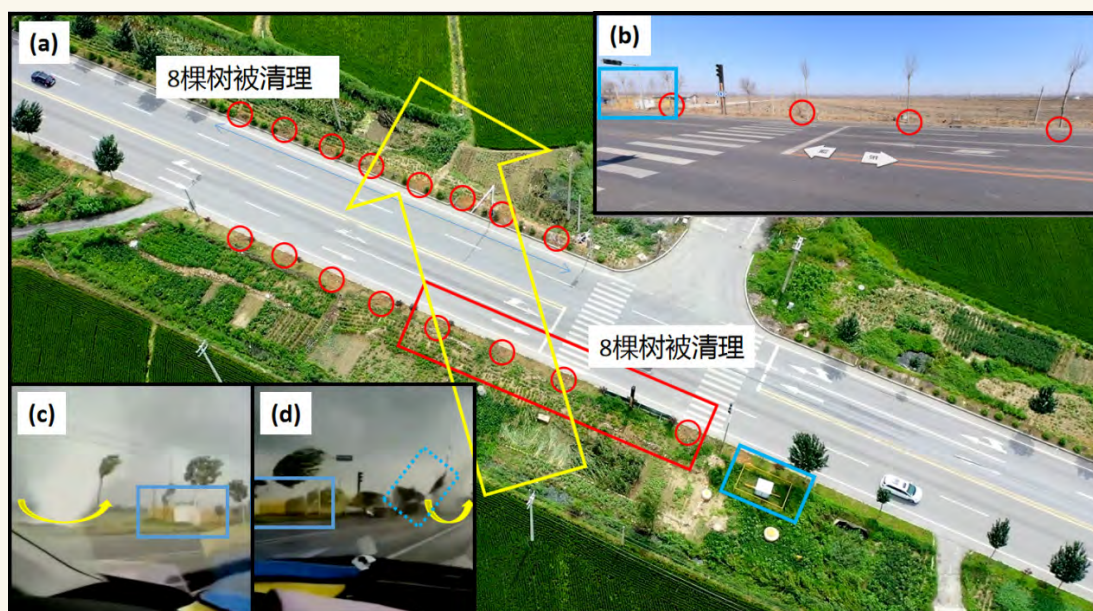


图5 2019年8月16日营口个案中营大路的灾情图（蓝框位置的电箱是位置参照物）

(a) 无人机航拍图，黄色空心箭头表示从红圈表示被清理树木的位置；(b) 图a红框位置的2018年2月的百度全景图；(c) 和 (d) 是网络视频图

Fig. 5 Damage of Zhongying Road in Yingkou on 16 August 2019 (The electric box in the blue frame is the position reference)

(a) aerial photos of UAV, the yellow white arrow indicates the direction of tornado movement; (b) the panorama of Baidu in February 2018 corresponding to the red box position in Fig. a; (c) and (d) are screenshots of online video



图6 徐闻个例的灾情图：(a) 发生在图1点7附近位置；(b) 发生在和安镇镇政府
Fig. 6 Damage in Xuwen County: (a) near point 7 in Fig. 1; (b) in the He'an Town Government

考虑到香蕉树的抗风能力比桉树要差，而且香蕉倒向不是明显辐合的，故把香蕉树倒伏作为疑似对象，经过走访村民是龙卷发生前一天大风吹倒的。图6b是电线杆折断，但是周边的树木只有树枝折断，铁皮棚比较完好，故将此电线杆作为疑似对象，经走访和安镇镇政府人员，是附近树木压断的，树木已被清理。

5 无人机在灾情调查中的优势

5.1 快速识别龙卷破坏带

破坏带是龙卷特有的灾情特征，结合雷达资料、

现场树木倒向和走访信息可以判断龙卷移动的方向。部分龙卷破坏带识别可以直接从航拍资料直接识别浅色的路径，其他的则通过全面分析航拍资料绘制灾情图来分析判别。无人机能忽略大部分地形的障碍并快速寻找到龙卷的破坏带（图7），单靠在走访判断龙卷移动方向是不可能短时间完成的，而使用无人机航拍可大大提高灾情调查的效率。但并不是全部龙卷都会留下明显的破坏带，这与龙卷经过的下垫面相关。图7是近四年使用无人机航拍龙卷灾情时发现的

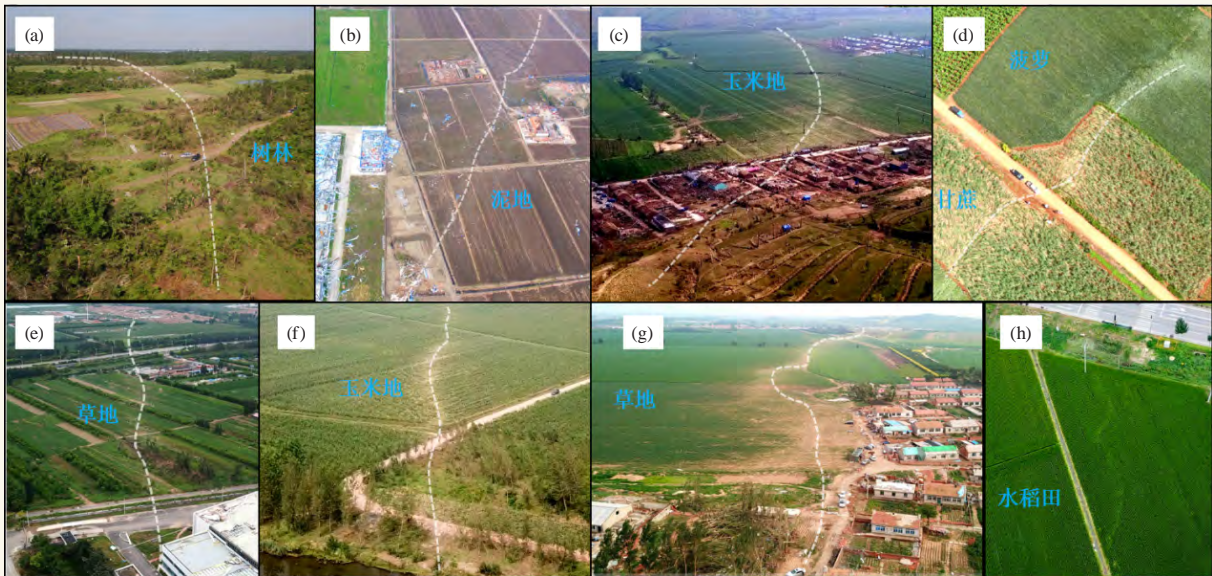


图7 无人机识别出的浅色龙卷破坏带（白色虚线是表示龙卷路径）

(a) 2016年6月5日海南文昌龙卷；(b) 2016年6月23日江苏阜宁龙卷；(c) 2017年8月14日内蒙古赤峰龙卷；(d) 2017年8月16日广东湛江龙卷；(e) 2018年8月13日天津静海龙卷；(f) 2019年8月19日江苏徐州龙卷；(g) 2019年7月3日辽宁开原龙卷；(h) 2019年8月16日辽宁营口龙卷

Fig. 7 Light tornado damage swath identified by UAV (the white dotted line indicates the tornado path)

(a) Wenchang tornado in Hainan Province on 5 June 2016; (b) Funing tornado in Jiangsu Province on 23 June 2016; (c) Chifeng tornado in Inner Mongolia on 14 August 2017; (d) Zhanjiang tornado in Guangdong Province on 16 August 2017; (e) Jinghai tornado in Tianjin on 13 August 2018; (f) Xuzhou tornado in Jiangsu Province on 19 August 2019; (g) Kaiyuan tornado in Liaoning Province on 3 July 2019; (h) Yingkou tornado in Liaoning Province on 16 August 2019

龙卷路径，下垫面有民房、树林、泥地、草地和庄稼，其中玉米田和草地从航拍画面更容易判别。航拍若未发现浅色龙卷破坏带，则可通过全面分析灾情分布特征来判别龙卷的破坏带（如图1中徐闻个例中的红色阴影区域）。

无人机作业要注意以下细节以提高调查的效率。无人机拍摄起飞周边环境的照片和在手机导航软件上收藏此位置，并标记收藏点的时间；当无人机处于灾情正上方时，要拍摄照片，根据照片经纬度信息描绘完整的龙卷破坏带。灾情线路图并与雷达图的中气旋产品路径对比，避免因龙卷跳跃或者升起造成地面灾情不连接的对龙卷路径的判断失误。

5.2 快速了解龙卷灾情宽度

龙卷影响宽度是比较重要的参数，如图8所示，红色箭头根据树木倒向及相关走访信息判断出来的龙卷移动方向，此位置龙卷的影响宽度 a 可通过无人机摄像头视角范围（FOV）、拍摄画幅（ $a:b=16:9$ ）及拍摄高度 h 可计算。图8是无人机在200 m高度航拍，实际宽度 a 约为280m。范雯杰等^[7]指出龙卷宽度与等级强度没有明确的对应关系。

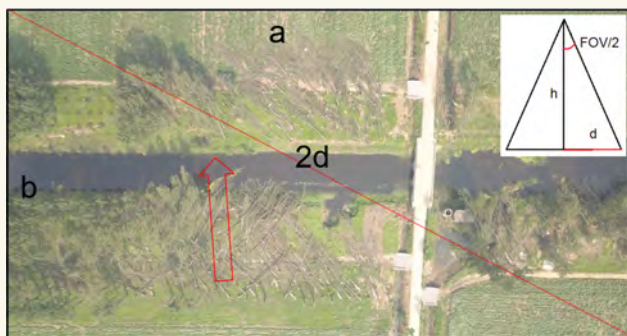


图8 现场测试龙卷影响宽度示意图

Fig. 8 Schematic diagram of tornado influence width in field test

6 结论

通过多次灾情调查的实践和探索，得到以下认识和结论。

1) 关注无人机的新型号及相关管理规定，考取相关的无人机驾驶证，保证无人机使用符合相关管理规定；

2) 针对不同情况，使用不用型号的无人机，乘坐民航等交通工具可优先选择御2无人机；遇到严重和大范围的灾情时，优先使用搭配广角摄像头的悟2无人机，或者两台以上无人机分段航拍，并考虑现场

及时给电池充电的方法以提高灾情调查效率；

3) 考虑天气条件，5级风以上和下雨天气的情况下无人机不能起飞，保证无人机使用的安全性；

4) 注意航拍方法，以灾情最明显的地方作为第一个航拍点，以400~500 m分段高低空和多角度航拍，期间根据灾情特征不断微调航拍线路，直到航拍完整的龙卷灾害范围；

5) 注重灾情指示物识别的四个要点，同类型地物颜色不连续，则有可能是灾情导致的；同个灾情指示物使用高低空、多视角航拍有助于全面了解其特征；对于疑似对象要及时走访排查，最后结合百度全景图像和网络视频分析龙卷的影响范围和移动方向。

6) 无人机提供高空俯瞰的图像，可以快速识别龙卷的灾情破坏带、判断龙卷移动方向和估算龙卷宽度。

参考文献

- [1] Davies-Jones, R. Trapp R J, Howard B. Tornadoes and tornadic storms. Meteorological Monographs, 2001, 28(50): 167-221.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 郑永光, 朱文剑, 姚聘, 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.
- [5] 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.
- [6] 李彩玲, 黄先香, 蔡康龙, 等. 2019年中国龙卷等对流大风过程及灾情特征. 气象科技进展, 2020, 10(1): 7-14.
- [7] 范雯杰, 俞小鼎. 中国龙卷的时空分布特征. 气象, 2015, 41(7): 793-805.
- [8] 高姣姣. 高精度无人机遥感地质灾害调查应用研究. 北京交通大学, 2010.
- [9] 陆博迪, 孟迪文, 陆鸣, 等. 无人机在重大自然灾害中的应用与探讨. 灾害学, 2011, 26(4): 122-126.
- [10] 李云, 徐伟, 吴玮. 灾害监测无人机技术应用与研究. 灾害学, 2011, 26(1): 138-143.
- [11] 邓飞, 窦爱霞, 吴玮莹, 等. 基于无人机遥感的四川九寨沟地震极灾区灾情快速调查. 灾害学, 2018, 33(3): 210-215.
- [12] 杨小凤, 曹云刚, 冯薪朗, 等. 基于无人机高分影像的七盘沟泥石流风险性评价. 灾害学, 2016, 31(2): 206-212.
- [13] 汤剑雄, 徐礼来, 李彦旻, 等. 基于无人机遥感的台风对城市树木生态系统服务的损失评估. 自然灾害学报, 2018, 27(3): 153-161.
- [14] 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.
- [15] Meng Z Y, Yao D, Bai L Q, 等. Wind estimation around the shipwreck of Oriental Star based on field damage surveys and radar observations. Science Bulletin, 2016, 61(4): 330-337.
- [16] 黄先香, 炎利军, 蔡康龙, 等. 2018年中国龙卷活动特征. 气象科技进展, 2019, 9(1): 50-55.
- [17] 中国民用航空局. 轻小无人机运行规定 (AC-91-FS-2015-31). 北京, 2015.
- [18] 黄先香, 炎利军, 王硕甫, 等. 1822号“山竹”台风龙卷过程观测与预警分析. 热带气象学报, 2019, 35(4): 458-469.
- [19] Fujita T T, Smith B E. Aerial survey and photography of tornado and microburst damage. The Tornado: Its Structure, Prediction, and Hazards, Geophys Monogr, No 79. Amer Geophys Union, 1993.

佛山初春冰雹天气层结结构及雷达特征初探

郭瑞玲¹ 钟立华¹ 麦玲玲² 余晓健¹ 王硕甫² 梁华玲^{1, 2} 蔡康龙³ 黄先香³

(1 广东省佛山市南海区气象局, 佛山 528200; 2 广东省佛山市气象局, 佛山 528200;

3 广东省佛山市龙卷风研究中心, 佛山 528200)

摘要: 采用MICAPS资料、探空资料、雷达资料以及NCEP 2.5° × 2.5°再分析资料对近2年佛山地区的3次初春(2—3月)冰雹事件进行分析,发现:1) 2019年2月21日和2020年3月27日的冰雹过程属于锋面低槽型,2020年3月18日冰雹过程属于高架雷暴型。2) 3次过程“上冷下暖”层结结构不明显,不满足 ΔT_{85} 越大、冰雹直径越大的规律,但“上干下湿”层结结构明显;2019年2月21日和2020年3月27日的冰雹过程最大热浮力强度大于6 °C,具备出现大冰雹潜势;满足 $H-/H+$ (冷云和暖云厚度比值)值越大,冰雹直径越大规律。3) 雷达图上悬垂回波明显,2019年2月21日和2020年3月27日的冰雹过程还探测到前侧暖湿气流流入缺口和明显中气旋,3月27日冰雹过程高仰角处还探测到明显三体散射长钉;3次过程的VIL值不大,这可能是初春冰雹与夏季冰雹区别之一。

关键词: 冰雹, 大气层结, 雷达回波, 初春, 佛山

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.06.011

Preliminary Study on Atmospheric Stratification Structure and Radar Characteristics of Hail Weather in Early Spring in Foshan

Guo Ruiling¹, Zhong Lihua¹, Mai Lingling², Yu Xiaojiang¹, Wang Shuofu²,
Liang Hualing¹, Cai Kanglong³, Huang Xianxiang³

(1 Nanhai Meteorological Service, Foshan 528200 2 Foshan Meteorological Service, Foshan 528200

3 Foshan Tornadoes Research Center, Foshan 528200)

Abstract: This study used MICAPS data, sounding data, radar data and NCEP2.5×2.5 reanalysis data to analyze the three hail events in Foshan in early spring (February to March) in the past two years. The results suggest: (1) The weather situation of the hails on 21 February 2019 and on 27 March 2020 were both the frontal low trough type, and the weather situation of the hail on 18 March 2020 was the elevated thunderstorm type. (2) The “cold upper and warm lower” stratification structures in the processes of the three hails were not obvious, which does not satisfy the rule that the larger the ΔT_{85} , the larger the hail diameter, but the “dry upper and wet lower” stratification structure were obvious; the maximum thermal buoyancy intensity in the processes of the hails on 21 February 2019 and 27 March 2020 were over 6 °C, which had the potential for large hail and satisfy the rule that the larger the $H-/H+$ (the ratio of the thickness of cold cloud to warm cloud), the larger the hail diameter. (3) The overhang echoes on the radar chart were obvious. V-shaped gaps and obvious medium cyclones were also detected in the processes of the hails on 21 February 2019 and 27 March 2020, and three-body scattering spikes were obviously detected at high elevation angles in the process of the hail on 27 March; the VIL value of the three processes of the hails were not big, which may be one of the differences between hail in early spring and hail in summer.

Keywords: hail, atmospheric stratification, radar echo, early spring, Foshan

0 引言

冰雹与雷雨大风、短时强降水等同属广东常见的强对流天气,冰雹具有突发性强、生命史短、局地性强、破坏力大等特点,一旦发生对农作物、基础设施及厂棚房屋造成较为严重的破坏,并对户外人员的生

命安全构成威胁,尤其是大冰雹。虽然广东省并不属我国冰雹的多发区,但冰雹具有较强致灾性,一直以来被广东气象工作者重视并深入开展研究。有从统计角度分析冰雹特征,如陈立祥等^[1]统计分析了1984—1986年广州地区冰雹等强对流天气特征,并根据对流层中水平风的垂直切变将广州地区强对流天气分为2类4型;林仲青^[2]利用1990—1997年的资料,分析了广东省2—5月冰雹的分布特征;伍志方等^[3]对产生冰雹的中小尺度天气系统的多普勒雷达回波特征进行了

收稿日期: 2020年9月9日; 修回日期: 2020年11月10日

第一作者: 郭瑞玲(1982—), Email: 18691718@qq.com

资助信息: 广东省科技厅社会发展科技协同创新体系建设专项(2019B020208015)

分析;李怀宇等^[4]对2004—2013年广东冰雹天气的时空分布、天气形势、物理量等进行了统计分析;曾智琳等^[5]统计分析了2004—2017年发生在广东的23个大冰雹事件的大气层结状态与结构特征,定量诊断了大冰雹的融化效应,并建立了判别大冰雹的物理参数模型。有着重历史个例分析,如林志强等^[6]对1996年4月19日的一次冰雹过程进行了综合分析;叶爱芬等^[7]分析了2003年广东省一次冰雹强对流天气的成因;谢健标等^[8]分析了伴有强冰雹的广东2005年3·22强飚线天气过程。

总的来看,以往研究主要侧重于全年冰雹特征统计及历史个例,对于季节性冰雹研究得较少。由于近年来强对流天气呈现早发趋势,因此分析春季冰雹天气形势、层结结构及雷达回波有助于早春强对流天气预报预警提供有价值参考。

1 资料与方法

本文收集了近2年佛山地区初春(2—3月)的冰雹事件,冰雹的确认主要通过三防办工作人员、村居信息员报告的时间和地点以及冰雹尺寸,并结合多普勒天气雷达观测到的风暴单体资料,进一步验证冰雹出现的时间和地点,由于冰雹从相应的雹暴系统中产生到降落到地面,再被目击者见到并报告,存在时间差,因此允许雷达回波的雹暴单体与冰雹报告存在一定的时间差和空间距离,一般在冰雹观测记录点附近10 km内必须存在相对应的强风暴单体,时间差为1 h内。以日为单元,对于同一天在多个时段或多个地区观测冰雹,或同一个风暴形成的多个冰雹观测记录均记为同一个冰雹过程。经过上述处理,近2年共收集到3个佛山初春冰雹过程,分别出现在2019年2月21日、2020年3月18日和3月27日。

对挑选出来的冰雹个例采用MICAPS资料、探空资料等进行天气形势和大气层结对比分析,再利用NCEP 2.5°×2.5°再分析资料计算垂直上升速度和温度平流并进行对比分析,另外结合广州雷达资料对冰雹过程进行雷达回波特征分析。统计发现这3次冰雹事件发生的时间在早晨、下午至傍晚,由于高空观测资料仅有08时、20时(北京时,下同),利用探空资料时采取未受对流系统影响、距离最近的08时(20时)探空资料。

2 环流形势特征

2.1 天气实况

2019年2月21日15—20时佛山市出现大雨到暴雨,伴有强雷电、7~8级阵风和局地冰雹,南海大沥北村水闸录得最大阵风19.8 m/s(8级),16:00—16:15,南海里水宏岗村、白岗村、文教社区、贤僚村先后遭受冰

雹袭击,持续时间约5 min,冰雹最大直径2~3 cm,将该次过程简称2·21过程。2020年3月18日08—10时佛山市出现短时强降水、雷电、7~8级阵风和局地冰雹,高明荷城高富石油录得阵风17.2 m/s(8级)、南海九江水务所录得全市最大阵风18.9 m/s(8级),08:48,南海九江下西社区出现小冰雹,持续时间1~2 min,简称3·18过程。

2020年3月27日16—23时佛山市普降暴雨,伴有强雷电、短时强降水、7~8级阵风和局地冰雹,高明荷城高富石油录得全市最大阵风18.3 m/s(8级),18时左右南海黄岐、沙溪、横杠一带出现冰雹,持续时间约10 min,冰雹最大直径1~2 cm,20时左右高明更合出现直径约2 cm冰雹,持续时间约5 min,简称3·27过程。上述3次过程伴随冰雹出现的最大阵风约8级,较夏季冰雹出现时伴随阵风9~11级要小,这可能的原因是春季零度层高度低,地面气温较夏季低,冰雹挣脱上升气流下降所需的动力较夏季小。

2.2 形势分析

如图1所示,2·21过程前期地面受变性冷高压控制,气温回升,随后地面冷高压推动冷锋南压进入广东省,21日08时地面冷锋到达粤北;低层(925 hPa、850 hPa)切变线跟随地面冷锋南压,切变线南侧为西南急流,偏南暖湿气流为对流提供充足水汽和不稳定能量;500 hPa槽线位于108°E附近,槽后强盛西北气流推动高空槽东移,有相应温度冷槽配合。20时地面冷锋南压至我省中南部,已移过佛山,850 hPa温度脊区位于地面冷锋上空,中低层切变线、槽线伴随地面冷锋东传南压,大风急流轴随之东传,对流过程结束。

3·27过程前期有低槽发展,气温回升,随后地面冷高压推动冷锋南压,27日08时地面冷锋到达华南北部;同时低层(925 hPa、850 hPa)切变线也位于华南北部,切变线南侧有西南急流;700 hPa、500 hPa槽线位于108°E附近,槽前有强盛偏西到西南气流。20时地面冷锋南压进入广东省,伴随925 hPa切变线南压进入广东省;850 hPa切变线略有南压,其南侧仍维持强盛西南气流;500 hPa槽线已移入粤西,槽后强盛西北气流推动高空槽东传,有温度冷槽配合,此时强对流天气仍没结束。

3·17过程地面受冷高压后部均压场,925 hPa切变线位于广西东部—湖南南部—江西北部一带,切变线南侧为东南气流;850 hPa切变线位于广西中部—湖南南部—江西中部—安徽南部,其南侧西南急流为对流提供了充足水汽;500 hPa槽线南段位于西南—江淮一带,-12℃冷中心位于粤北,叠加在850 hPa暖脊上,使大气层结变得不稳定。之后随着低层切变线南压进入广东省,影响佛山市对流活动开始。

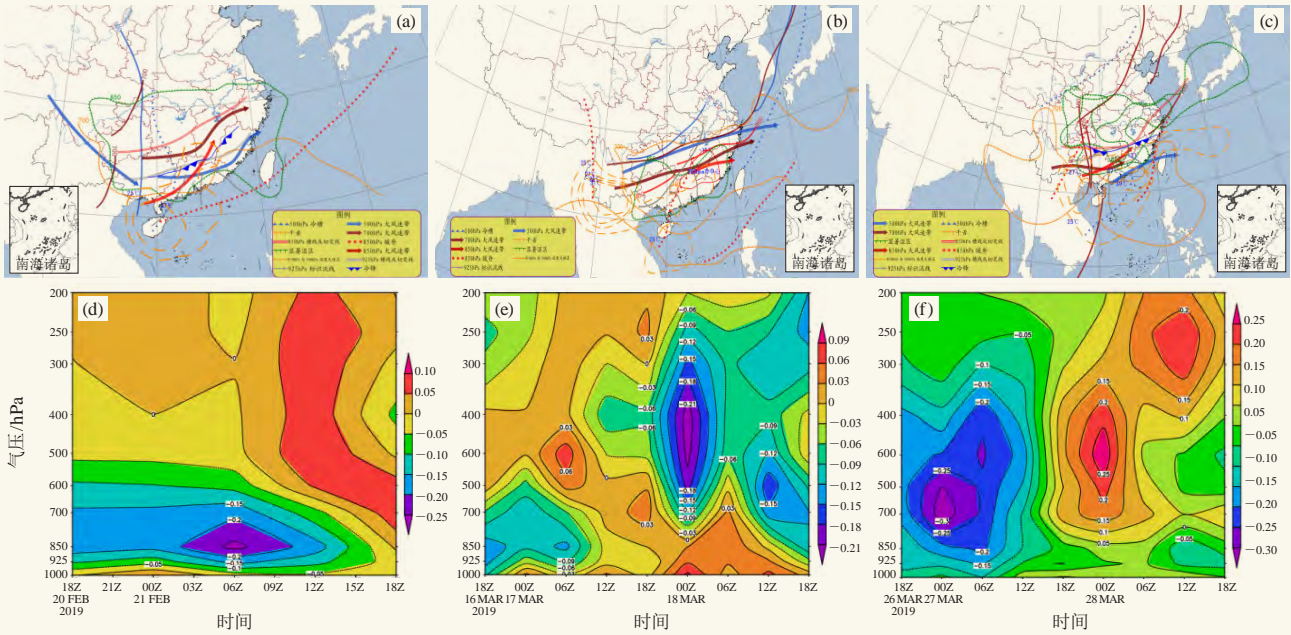


图1 中尺度分析图 (a, b, c) 及垂直上升速度 (单位: m/s) 图 (d, e, f)
 (a) 2019年2月21日08时; (b) 2020年3月17日20时; (c) 2020年3月27日08时;
 (d) 2019年2月21日; (e) 2020年3月17日; (f) 2020年3月28日

Fig. 1 Mesoscale analysis diagram at 08:00 BT 21 February 2019 (a), 20:00 BT 17 March 2020 (b), 08:00 BT 27 March 2020 (c), and vertical velocity (unit: m/s) on 21 February 2019 (d), 17 March 2020 (e), and 28 March 2020 (f)

从上述形势分析可知, 2·21和3·27过程前期地面有低槽发展或变性冷高压控制, 气温回升, 随后地面冷高压推动地面冷锋南压进入广东省; 低层切变线跟随地面冷锋往南移动, 切变线南侧强盛偏南暖湿气流为对流提供水汽和不稳定能量; 500 hPa槽线位于108°E附近, 槽后强盛西北气流推动高空槽东移, 并有相应的温度槽相随; 垂直上升速度图可看出这2次过程对流抬升是从地面开始, 属锋面低槽型, 冰雹出现在高空槽前, 地面冷锋、低层切变线附近。而3·17过程地面是冷高压后部均压场, 近地层大气层结稳定, 500 hPa冷中心叠加在850 hPa暖脊上, 使大气层结变得不稳定; 垂直上升速度图可明显看出此次过程对流抬升不是从地面开始, 而是从800 hPa开始, 符合高架雷暴特征, 冰雹出现在低层切变线附近, 属高架雷暴型。

3 大气层结

3.1 物理量分析

在有利的环流形势背景下, 冰雹需要在适宜的环

境特征下生长, 为此对这3次冰雹过程开始前6~12 h一些物理量进行分析 (表1)。温度露点差越大表示空气越干燥, 此3次过程 $T-T_d$ 最大值均超过20℃, 2·21过程 $T-T_d$ 最大值达到31℃, 而3·18过程 $T-T_d$ 最大值是这3次过程里最小, 但 $T-T_d$ 最大值所在高度最高达到466 hPa, 整层比湿积分3·18过程是3次强对流过程里最大的, 为4382, 也就是说3·18过程干层高度高, 水汽含量大。3次过程总指数都接近或超过50℃; K指数超过35℃, 3·18过程更是达到46.7℃; 沙氏指数SI均小于-1℃, 3·27过程达到-5.16℃; 雷暴瑞士指数小于5.3℃说明有出现雷暴天气的可能, 3次过程雷暴瑞士指数远小于5.3℃, 其中3·18和3·27分别达到-0.2和-4.7℃; CAPE值只有2·21超过1000 J/kg, 其余2次过程都少于100 J/kg, 3·18过程CAPE=0 J/kg, 把对流抬升高度提高到800 hPa, 同样得到CAPE=0 J/kg, 当天广东省其余探空站点CAPE值都很小, 最大也就只有30多, 但下沉对流有效能挺大, 达到200多, 这可能与高架雷暴近地层是冷性稳

表1 冰雹天气物理量参数
 Table 1 Physical parameters of hail weather

时间	($T-T_d$) 最大值/℃	($T-T_d$) 最大值所在高度/hPa	IQ/℃	TT/℃	K/℃	SI/℃	SWISS00/℃	CAPE/(J/kg)	0℃层/m	-20℃层/m
2019年2月21日 08时	31	591	3838.3	49	35	-1.16	2.3	1230.4	3935.3	7313.3
2020年3月17日20时	23.6	466	4382	48.2	46.7	-1.01	-0.2	0	4126	7539.4
2020年3月27日08时	23.9	558	3841.5	54.2	40.2	-5.16	-4.7	99.2	3793	7233.8

定层结有关; 0 °C层和-20 °C层高度均低于广东春季平均0 °C层(4291 m)和-20 °C层(7619 m)高度,说明冰雹雷暴云中的冰雹能下降到地面的可能性很大。

3.2 垂直温湿层结特征

环境大气的垂直热力分布直接影响降水粒子的相态转化,从对流系统内产生的雹胚、到雹胚长大,大气的层结状态在其中发挥着重要作用,为此选取强对流开始前的6~12 h温湿层结状态作分析,为以后预报冰雹提供帮助。

通常认为大气呈“上冷下暖”结构分布代表着层结不稳定,一般用850 hPa与500 hPa的温度差(ΔT_{85})作为考量大气层结“上冷下暖”的特征值,是判断是否有强雷暴等天气的重要依据,有研究^[4-5]表明广东冰雹过程 ΔT_{85} 一般为19~30 °C、平均值为24~25 °C,显然本文所选取的3次过程的 ΔT_{85} 都超过24 °C,3·27过程甚至达到27.1 °C,具备出现冰雹的潜势。从实况数据得到2·21过程冰雹直径比3·27过程冰雹直径大,而2·21过程 ΔT_{85} 小于3·27,因而不满足 ΔT_{85} 越大、冰雹直径越大的规律,这与高晓梅等^[9]的结果不一致,但与曾智琳等^[5]研究结果相吻合,这可能与所处纬度高低有关。

造成风雹等强对流天气的深厚湿对流绝大部分具有斜压性特征,这种斜压不稳定相当程度是高低空温度平流差异的结果。选取这3次强对流天气过程冰雹发生前8~12 h内的温度平流分析(图2),发现2·21和3·27过程属于低空暖平流型,冰雹发生前700 hPa以下有明显暖平流活动,暖平流强度介于 $5 \times 10^{-5} \sim 12 \times 10^{-5} \text{ K s}^{-1}$,并且暖平流最强位置出现在850 hPa附近,这表明低空暖性强迫可能对冰雹产生

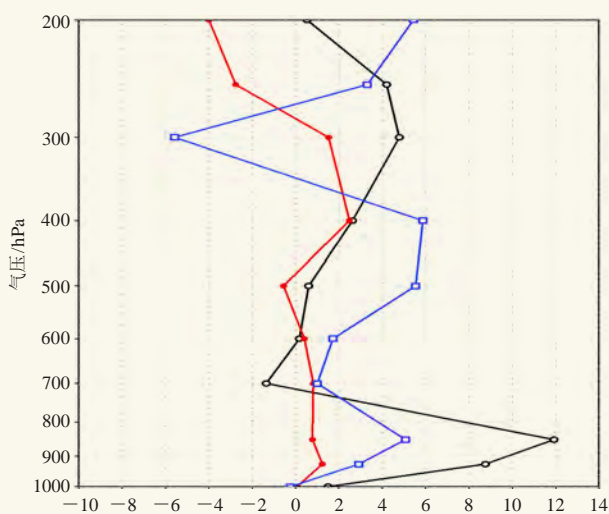


图2 垂直方向温度平流(黑色:2019年2月21日08时,红色:2020年3月17日20时,蓝色:2020年3月27日08时)
Fig. 2 Vertical temperature advection at 08:00 BT 21 February 2019 (black), 20:00 BT 17 March 2020 (red), 08:00 BT 27 March 2020 (blue)

有一定作用。3·18过程属于弱温度平流类,中低层温度平流在 $\pm 2 \times 10^{-5} \text{ K s}^{-1}$,这与高架雷暴对流开始前大气层结是稳定层结相关,冰雹事件发生后12 h内边界层可发现冷平流活动,这说明冰雹产生与对流触发有关。但这3次过程对流层中层(400~700 hPa)的冷平流强度非常弱,还不到 $-2 \times 10^{-5} \text{ K s}^{-1}$,说明“上冷下暖”的层结结构不明显。那么这3次过程的对流层势不稳定很可能不是由“上冷下暖”层结形成的,因而有必要分析这3次过程的垂直湿度层结。

当低层有湿空气或湿平流、中高层有干空气或干平流就可能造成对流不稳定层结。为了从探空角度揭示这种特征,有研究^[5]把探空温湿曲线满足500 hPa温度露点差大于等于15 °C定义为对流层中层存在干层,当700~1000 hPa有最小温度露点差小于2 °C定义为对流层低层存在湿层,满足这两个条件即为“上干下湿”不稳定结构,但这3次过程有2次是不满足的,实际的温湿廓线可以看出明显的“喇叭口”上干下湿的层结,所以用500 hPa温度露点差大于等于15 °C作为中层干层不适合2·21和3·27过程。由于露点温度在等压过程中是保守量,露点温度的高低反映出该层的干湿程度,选取850 hPa与500 hPa的露点温度差(ΔT_{d85})表征大气“上干下湿”,广东冰雹过程的 ΔT_{d85} 为20~67 °C、平均值为31.7~46.3 °C,此3次过程 ΔT_{d85} 都超过30 °C,3·18和3·27过程 ΔT_{d85} 达到40 °C,说明3·18和3·27过程“上干下湿”层结特征比2·21过程更加突出(表2)。

表2 温湿特征层参数

Table 2 Temperature and humidity characteristic layer parameters

时间	$T_{850-500}/^{\circ}\text{C}$	$T_{d850-500}/^{\circ}\text{C}$	$(T-T_d)/500/^{\circ}\text{C}$	700~1000 hPa是否存在最小温度露点差 $\leq 2^{\circ}\text{C}$
2019年2月21日 08时	25.0	31.0	7.0	是
2020年3月17日 20时	24.1	40.1	16	是
2020年3月27日 08时	27.1	40.0	12.9	是

由此可见,除了环境温度“上冷下暖”的特征,环境湿度“上干下湿”的特征更能促进热力不稳定增长,因而在做冰雹潜势预报时需多加关注垂直湿度层结结构。

3.3 冰雹特殊层结特征

冻结层高度(DBZ)是考虑是否有冰雹产生的一个重要特殊高度,影响着降水粒子在空中的相态变化和冰雹下降融化的空间距离。研究^[5]表明,冰质粒子融化层高度更接近于湿球温度零度层(WBZ)高度,对比这3次过程的DBZ和WBZ高度比较接近,相差最大的3·18过程也仅为236 m,相差最小的3·27过程只有70 m,说明这3次冰雹过程低层大气比较湿。

垂直方向的冷云层和暖云层的分布特征是影响冰雹循环增长的重要因素，决定着对流风暴内雹胚能否增长得更大。将平衡高度（ EL ）与干球零度层高度（ DBZ ）之间的高度差定义为冷云厚度， DBZ 与抬升凝结高度（ LCL ）之间高度差定义为暖云厚度。对比这3次冰雹过程，3·27过程冷云厚度最薄，仅为

2757 m，而2·21过程比3·27过程厚得多，达到5577 m，冷云厚度大，有利于雹胚在过冷水层增长。进一步分析冷暖云厚度比值 $H-/H+$ ，2·21过程冷暖云厚度比值比3·27过程大1倍左右，根据冰雹实况资料满足冷暖云厚度比值越大，冰雹直径越大（表3）。

从探空反映的CAPE在不同高度的分布代表着不

表3 环境参数及特殊高度层
Table 3 Environmental parameters and special heights

时间	LCL/m	WBZ/m	EL/m	H_{-10}/m	H_{-30}/m	$H-/m$	$H+/m$	$H-/H+$	最大热浮力高度/m	最大热浮力强度/ $^{\circ}C$
2019年2月21日 08时	136	3865	9512	5505	9185	5577	3799	1.5	5820	6
2020年3月17日20时	80	3890	—	5603	8883	—	4046	—	—	—
2020年3月27日08时	80	3642	6550	5482	9974	2757	3713	0.7	4800	6

同高度的热浮力大小，因而把CAPE内气块绝热上升形成的状态曲线与环境温度（层结曲线）最大温差定义为最大热浮力强度，而状态曲线与层结曲线差值最大位置即为最大热浮力高度，在此高度上气块具有最大垂直加速度。3·18过程因CAPE=0，故无法确定最大热浮力强度。2·21和3·27这两次冰雹过程最大热浮力强度均为 $6^{\circ}C$ ，但它们的最大热浮力高度不一样，3·27最大热浮力高度比2·21低约1000 m，位于冰雹有效增长层（ $-30\sim-10^{\circ}C$ 高度）之下，那么上升气流很难把雹胚顶托进有效增长层，雹胚不能发展为更大的冰雹，这可能也就是3·27实况冰雹没2·21过程来得大的原因之一。

4 雷达回波特征

2019年2月21日中午开始肇庆地区不断有回波生成，多个雷暴单体独立发展。14: 54，回波开始有组织地合并；15: 12，回波开始影响佛山市北部；15: 54，回波单体移入佛山后快速发展，回波强度增大至55dBZ，强回波单体出现前侧暖湿气流流入流缺口（图3）；16: 00强回波中心开始移入南海区里水镇，回波强度增大至65 dBZ，回波悬垂结构明显，60 dBZ强回波中心高度位于5 km以上，大约 $-10^{\circ}C$ 层高度，位于冰雹有效增长层内，有利于雹胚增长，径向速度图上 $3.4\sim 6.0^{\circ}$ 仰角出现明显中气旋，此时南海区里水镇VIL=33 kg/m^3 ；16: 06仍可见前侧暖湿气流流入流缺口，60 dBZ强回波中心高度维持在5 km以上，径向速度图 3.4° 仰角中气旋依然存在，南海区里水镇VIL=35.5 kg/m^3 ；16: 12，前侧暖湿气流流入流缺口仍可见，60 dBZ强回波中心高度仍位于5 km以上，65 dBZ强回波中心抬升到7 km左右，可见明显悬垂结构，说明上升气流非常旺盛，径向速度图上 3.4° 仰角仍探测到中气旋，但南海里水VIL下降至29.5 kg/m^3 ；16: 24，强回波单体已移出南海区里水镇。

2020年3月18日7: 40—9: 30，飚线系统自北向南影响佛山市。8: 20，飚线南段强回波主体经肇庆市高要进入佛山市高明区，回波强度增大至67 dBZ，在引导气流作用下强回波主体继续向东南方向移动；08: 36强回波主体进入南海区九江镇，此时飚线北段回波结构松散，强度也有所减弱；08: 42，南段回波进一步加强至69 dBZ，结构密实，呈明显“指状”回波特征，55 dBZ强回波中心高度达到6 km，大约 $-10^{\circ}C$ 层高度，位于冰雹有效增长层内，有利于雹胚长大，65 dBZ强回波中心高度5 km左右，回波悬垂结构明显，径向速度图上可以看到高明区荷城镇附近出现大风区以及南海九江镇和西樵镇交界处存在切变，液态水含量VIL值大约30 kg/m^3 ；08: 48，指状回波强度维持69 dBZ，55 dBZ强回波中心高度开始下降至5 km附近，65 dBZ强回波中心高度下降至3 km，此时南海区九江镇出现小冰雹，也就是说强回波中心下降时伴随着冰雹下降，径向速度图上大风区东移至南海九江镇和西樵镇交界附近，此时VIL值大约30 kg/m^3 ；08: 54回波强度减弱至65 dBZ，55 dBZ强回波中心高度进一步下降至5 km以下，径向速度图上大风区减弱消失，南海九江镇VIL值下降至20 kg/m^3 以下（图4）。

2020年3月27日14—23时，佛山不断受东移南压强回波云团影响。17: 48，影响南海区狮山镇的回波突然加强，回波强度达到65 dBZ；18时（图5），强回波横穿狮山镇，开始影响大沥镇，此时回波强度增大至71 dBZ，65 dBZ强回波中心高度位于6~7 km，位于 $-10^{\circ}C$ 层之上，55 dBZ强回波中心高度达到7~8 km，位于 $-20^{\circ}C$ 层之上，回波悬垂结构明显，表明对流很旺盛，并且在 14.6° 仰角上探测到明显三体散射长钉，径向速度图上 $3.4\sim 6.0^{\circ}$ 出现中气旋特征，VIL值不大，仅为30.5 kg/m^3 ；18: 06，强回波主体影

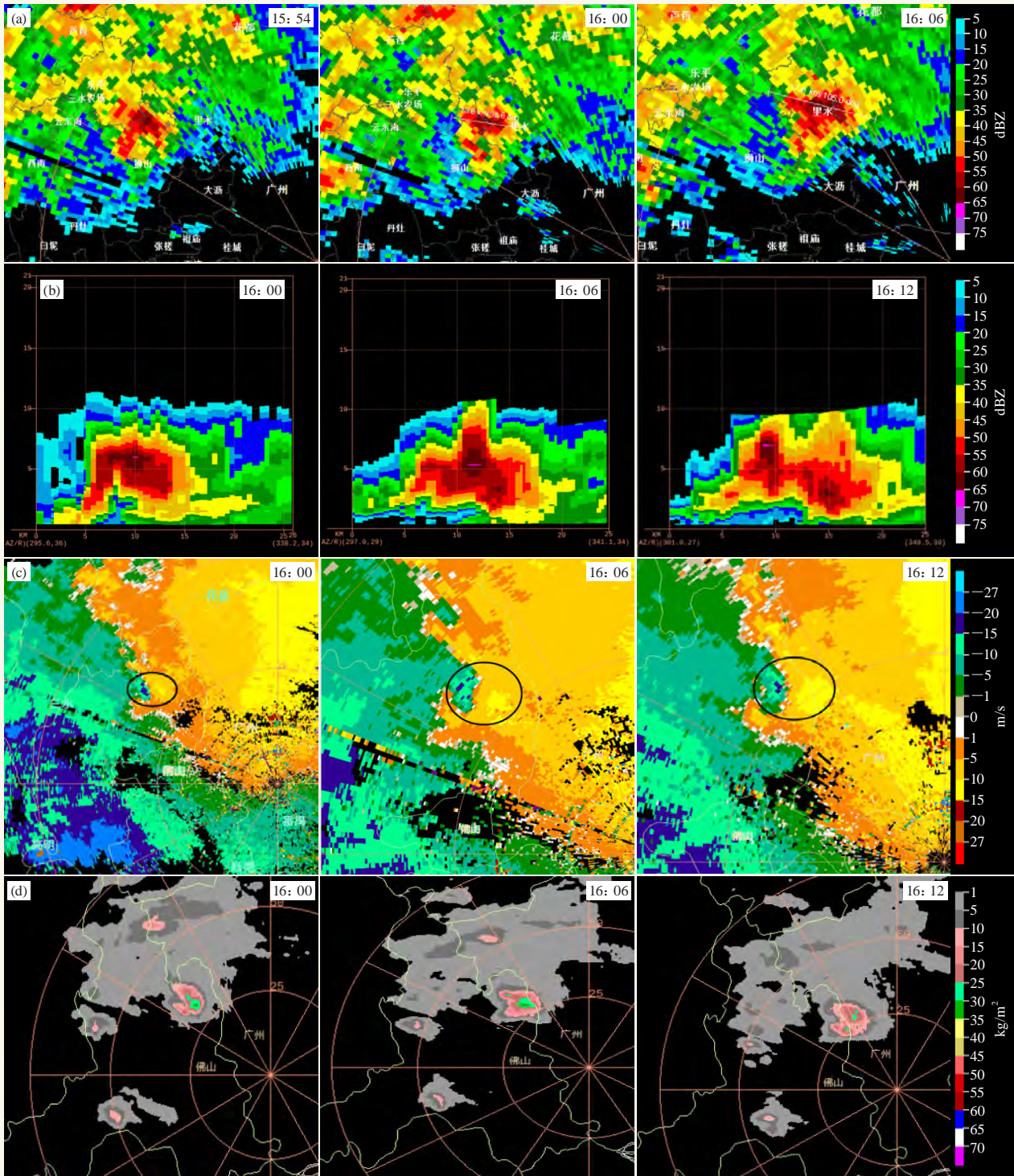


图3 2019年2月21日15:54—16:12广州雷达1.5°仰角

(a) 反射率因子; (b) 径向速度图; (c) 反射率因子垂直剖面; (d) 液态水含量

Fig. 3 The reflectivity (a), radial velocity (b), reflectivity vertical profile (c) of 0.5° elevation and liquid water content (d) by Guangzhou radar during 15:54—16:12 BT 21 February 2019

响大沥镇，反射率因子图上可看到前侧暖湿气流流入流缺口，19.5°仰角出现明显三体散射长钉，65 dBZ强回波中心高度下降至5 km左右，大概在-10 °C层，仍在冰雹有效增长层内， $VIL=34.5 \text{ kg/m}^3$ ；18: 12，

强回波仍位于大沥镇，回波强度有所下降，但最大回波强度仍有68 dBZ，强回波中心高度明显下降，65 dBZ强回波中心高度下降至5 km以下，同时65 dBZ强回波中心面积明显减小，仍可见明显悬垂回波，

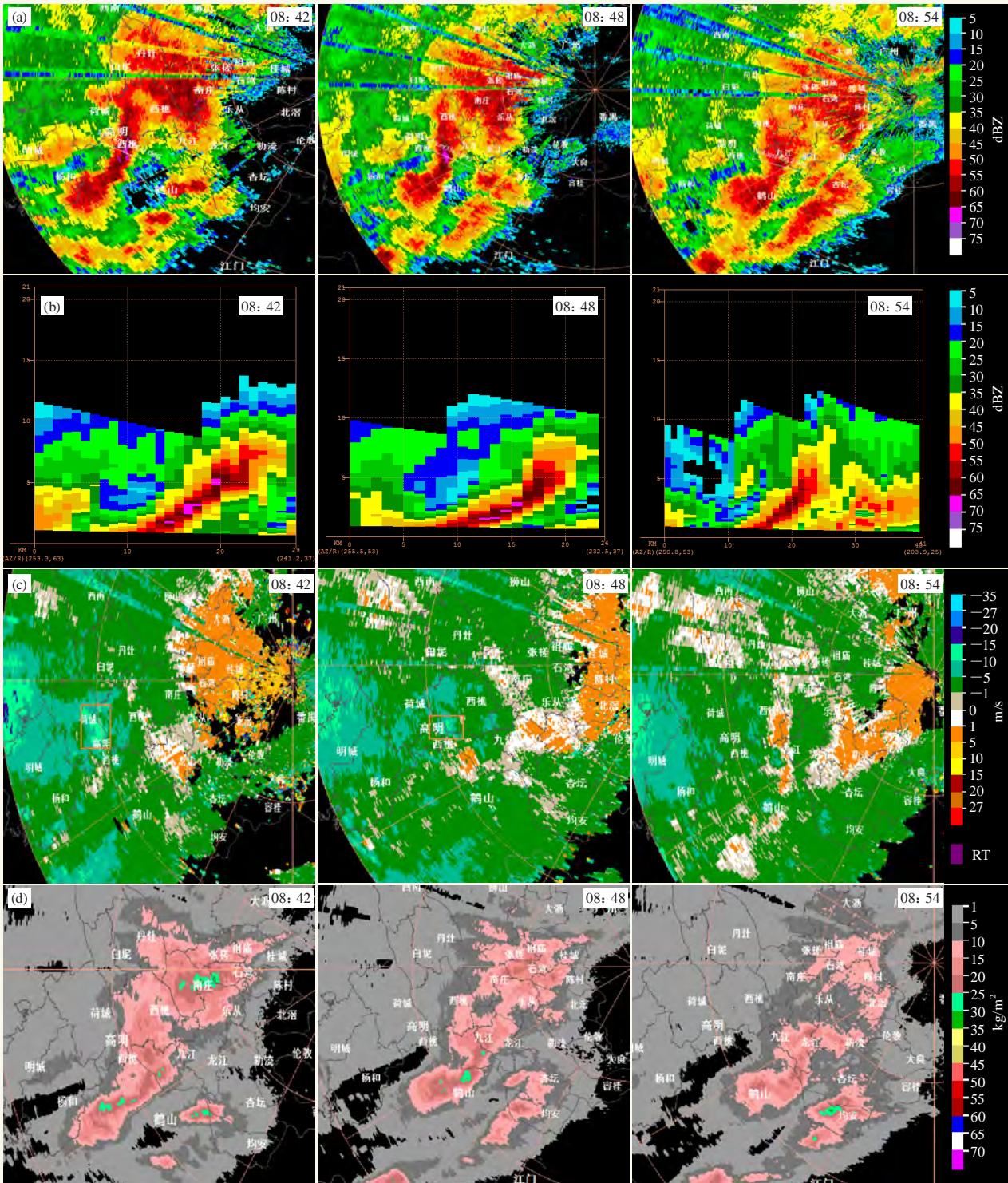


图4 2020年3月18日08:42—08:54广州雷达1.5°仰角

(a) 反射率因子; (b) 径向速度图; (c) 反射率因子垂直剖面; (d) 液态水含量

Fig. 4 The reflectivity (a), radial velocity (b), reflectivity vertical profile (c) of 0.5° elevation and liquid water content (d) by Guangzhou radar during 08:42 BT—08:54 BT 18 March 2020

$VIL=31 \text{ kg/m}^3$; 18: 18, 强回主体移出大沥进入广州市境内。20时前后, 影响高明的强回波强度最强时达到75 dBZ, 6.0°仰角20: 12—20: 24连续3个体扫出现明显三体散射长钉, 径向速度图上0.5°仰角20:

12—20: 18连续2个体扫出现中气旋(图略), 其余特征值不详细叙述。

总的来说, 此3次冰雹过程雷达图上出现明显悬垂回波, 只是悬垂高度和强回波中心到达的高度不

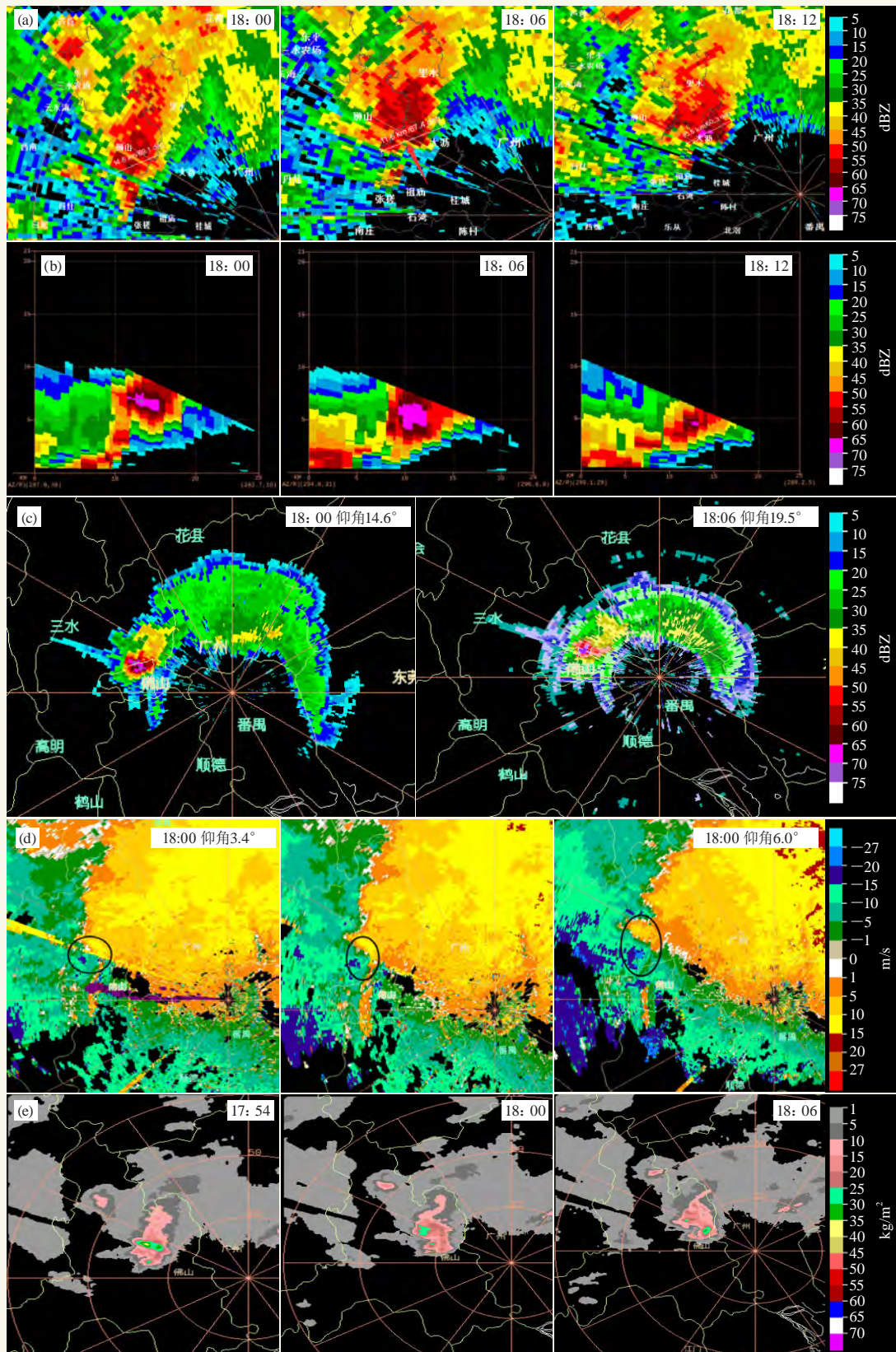


图5 2020年3月27日18: 00—18: 12广州雷达1.5°仰角
 (a) 反射率因子; (b) 反射率因子垂直剖面; (c) 径向速度; (d) 液态水含量; (e) 三体散射
 Fig. 5 The reflectivity (a), reflectivity vertical profile (b), radial velocity (c) of 1.5° elevation, liquid water content (d) and three-body scattering(e) by Guangzhou radar during 18:00–18:12 BT 27 March 2020

同, 3·27过程回波强度最强, 强回波中心范围最大。2·21和3·27过程出现前侧暖湿气流流入流缺口、明显中气旋, 3·27过程在高仰角还探测到明显三体散射长钉。值得注意的是, 这3次冰雹过程VIL值不大, 可能的原因是春季地面气温较低, 垂直上升气流较夏季弱, 冰雹不需要长得很大就能下降到地面, 这可能是春季冰雹与夏季冰雹区别之一, 但春季冰雹是否具有低VIL还需要更多事件验证。

5 小结

本文对近2年影响佛山地区的3次春季冰雹天气过程进行天气形势、层结结构及雷达回波特征进行分析, 得出如下结论:

1) 2·21和3·27冰雹过程是地面冷高压推动冷锋南压进入广东省, 低层切变线跟随地面冷锋向南移动, 冰雹出现在锋面、切变线附近, 高空槽前, 属锋面低槽型, 强对流启动时间在午后至傍晚。3·18冰雹过程对流抬升从800 hPa开始, 中高层有切变线、高空槽配合, 地面是冷脊后部均压场, 属高架雷暴型, 强对流启动时间在早晨。

2) 表征不稳定的物理量总指数、K指数、沙氏指数表现很好, 达到广东强对流发生的高阈值, 但CAPE表现不太理想, 只有2·21过程超过1000 J/kg, 其余2次过程均低于100 J/kg, 3·18过程低CAPE值可能是高架雷暴的一个特性, 另一个低CAPE值过程有待更深入研究。3次过程“上冷下暖”层结结构不明显, 不满足 ΔT_{85} 越大, 冰雹直径越大的规律; “上干

下湿”层结结构明显, 3·18和3·27过程“上干下湿”层结特征比2·21过程更加突出, “上干下湿”的特征更能促进热力不稳定增长, 因而在做冰雹潜势预报时需多加关注垂直湿度层结结构。2·21和3·27冰雹过程最大热浮力强度大于6 °C, 具备出现大冰雹潜势, 但3·27过程最大热浮力高度都位于冰雹有效增长层之下, 使得雹胚不能生长成更大的冰雹, 这可能是实况出现小冰雹原因之一。2·21和3·27冰雹过程满足 $H-H+$ 值越大, 冰雹直径越大的规律。

3) 3次冰雹过程出现明显悬垂回波, 2·21和3·27冰雹过程还出现前侧暖湿气流流入流缺口、明显中气旋, 3·27冰雹在高仰角还探测到明显三体散射长钉, 但3次冰雹过程的VIL值都不大, 可能是初春冰雹与夏季冰雹区别之一。

参考文献

- [1] 陈立祥, 刘运策. 广州地区强对流天气的统计特征和分类特征. 热带气象学报, 1989, 5(2): 170-178.
- [2] 林仲青. 广东省2—5月各类强对流天气的时空分布. 广东气象, 1999(1): 21-22.
- [3] 伍志方, 叶爱芬, 胡胜, 等. 中小尺度天气系统的多普勒统计特征. 热带气象学报, 2004, 20(4): 391-399
- [4] 李怀宇, 何如意, 胡胜, 等. 近10年广东冰雹的统计特征及天气形势. 气象科技, 2015, 43(2): 261-268.
- [5] 曾智琳, 湛芸, 朱克云, 等. 广东省大冰雹事件的层结特征与融化效应. 大气科学, 2019, 43(3): 598-615.
- [6] 林志强, 李献洲, 庄旭东. 一次强风暴天气过程分析. 气象, 1998, 24(12): 22-26.
- [7] 叶爱芬, 伍志方, 程元慧. 一次春季强冰雹天气过程分析. 气象科技, 2006, 34(5): 583-586.
- [8] 谢健标, 林良勋, 颜文胜. 广东2005年“3·22”强飚线天气过程分析. 应用气象学报, 2007, 18(3): 321-329.
- [9] 高晓梅, 俞小鼎, 王令军, 等. 鲁中地区分类强对流天气环境参量特征分析. 气象学报, 2018, 76(2): 196-212.
- [10] 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.
- [11] 黄先香, 炎利军, 王硕甫, 等. 1822号“山竹”台风龙卷过程观测与预警分析. 热带气象学报, 2019, 35(4): 458-469.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 黄先香, 俞小鼎, 炎利军, 等. 1804号台风“艾云尼”龙卷分析. 气象学报, 2019, 77(4): 645-661.
- [15] 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(05): 403-414.
- [16] 黄先香, 俞小鼎, 炎利军, 等. 广东两次台风龙卷的环境背景和雷达回波对比. 应用气象学报, 2018, 29(1): 70-83.
- [17] 黄先香, 炎利军, 蔡康龙, 等. 1415号“海鸥”台风龙卷天气过程分析. 灾害学, 2018, 33(4): 114-121.
- [18] 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.
- [19] Davies J R. Streamwise vorticity: The origin of updraft rotation in supercell storms. J Atmos Sci. 1984, 41: 2991-3006.
- [20] 黄先香, 俞小鼎, 炎利军, 等. 珠江三角洲台风龙卷的活动特征及环境条件分析. 气象, 2019, 45(6): 777-790.

(上接27页)

- [1] 征. 热带气象学报, 2017, 33(4): 530-539.
- [2] 黄先香, 炎利军, 蔡康龙, 等. 2018年中国龙卷活动特征. 气象科技进展, 2019, 9(1): 49-55.
- [3] 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): 942-925.
- [4] 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.
- [5] 俞小鼎, 姚秀萍, 熊延南, 等. 多普勒天气雷达原理与业务应用. 北京: 气象出版社, 2017.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 郑永光, 蓝渝, 曹艳察, 等. 2019年7月3日辽宁开原EF4级强龙卷形成条件、演变特征和机理. 气象, 2020, 46(5): 589-602.
- [9] 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.
- [10] 朱君莹, 蔡康龙, 龚佃利, 等. 登陆台风“摩羯”(1814)在山东引发龙卷的灾情调查与天气雷达识别. 海洋气象学报, 2019, 39(4): 21-34.
- [11] 黄先香, 炎利军, 植江玲, 等. 2014年6月3日佛山龙卷风过程分析. 广东气象, 2016, 38(4): 1-6.
- [12] 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.
- [13] 刁秀广, 孟宪贵, 张立, 等. 台风“摩羯”与“温比亚”环流中龙卷小尺度涡旋特征及可预警性分析. 海洋气象学报, 2019, 39(3):

中国龙卷气候特征和环境条件研究进展综述

郑永光

(国家气象中心, 北京 100081)

摘要: 虽然中国龙卷发生概率极低, 但近几年的多个强龙卷事件引起了极大的社会关注。总结了我国龙卷气候分布特征、环流背景和环境条件研究进展, 包括总体气候分布和热带气旋(TC)龙卷气候分布特征以及梅雨期、冷涡和TC龙卷的环境条件特征等。中国龙卷除了东部和部分中部平坦地区是多发区外, 也需要关注河北北部和内蒙古的东南同辽宁交界附近区域也有较多龙卷发生; 此外, 青藏高原也有弱龙卷发生; 平均每年约发生5次TC龙卷。中国记录到最强的龙卷强度为EF4级, 1951—2020年共记录到7次。中国发生较多龙卷的天气环流背景是梅雨、冷涡和TC。梅雨背景下的强龙卷通常具备了中气旋龙卷所有有利条件, 冷涡背景下强龙卷较不利的环境条件是较差的低层湿度条件, 而TC龙卷的环境条件之一是对流有效位能值较低(约200~1000 J/kg)。下一步, 建立一个可靠的我国龙卷个例数据库非常必要, 我国中气旋龙卷和非中气旋龙卷的环境条件和机理研究都还需要进一步深入完善。

关键词: 龙卷, 气候, 天气环流背景, 环境条件

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.06.012

Review of Climatology and Favorable Environmental Conditions of Tornado in China

Zheng Yongguang

(National Meteorological Centre, Beijing 100081)

Abstract: Although the occurrence probability of tornadoes in China is extremely low, several intense tornado events have received a great deal of attention in recent years. This paper summarizes the research progress on the climatological distribution characteristics, circulation backgrounds and environmental conditions of tornadoes in China, including the overall climatology and the climatology of tropical cyclone (TC) tornadoes, as well as the environmental conditions of tornadoes occurring inside the Meiyu systems, cold vortex and TC. In addition to the central plain areas in the eastern part and central part of China which frequently experience tornadoes, attention should also be paid to the northern Hebei and southeastern Inner Mongolia border areas with Liaoning. In addition, weak tornadoes also occur in the Qinghai Tibet Plateau. TC tornadoes occur about 5 times per year on average. The most intense tornadoes recorded in China reached EF4, with 7 tornadoes recorded from 1951 to 2020. The synoptic background for more tornadoes in China is Meiyu, cold vortex and TC. Strong tornadoes under the background of Meiyu usually have all the favorable conditions of mesocyclone tornadoes. The low-level humidity of tonado environment under the cold vortex is low, while the convective available potential energy of TC tornado is weaker (200–1000 J / kg). It is necessary to establish a reliable database of tornado cases in China, and the environmental conditions and mechanisms of mesocyclonic and non-mesocyclonic tornado still need to be further studied.

Keywords: tornado, climatology, synoptic background, environmental condition

0 引言

龙卷发生概率极低, 但是地球大气中最为剧烈和最具有破坏性的天气现象, 其预报预警依然存在极大的困难。全球每年仅约2000个龙卷发生。美国是龙卷

发生频率最高的国家, 每年可超过1200个。中国龙卷每年的发生次数仅约美国的十分之一^[1], 显著低于美国, 但近年来, 2015年10月4日台风彩虹外围佛山EF3级龙卷、2016年6月23日江苏阜宁EF4级龙卷和2019年7月3日辽宁开原EF4级龙卷都造成了严重的人员伤亡和巨大经济损失, 引起了极大关注。

龙卷通常分为两类: 一类为中气旋龙卷(也称为超级单体龙卷), 另一类非中气旋龙卷(也称为非超级单体龙卷)^[2-3]。但对美国龙卷的统计发现, 仅约有25%的中气旋能够产生龙卷^[2]。非中气旋龙卷通常比

收稿日期: 2020年8月31日, 修回日期: 2020年11月9日

作者: 郑永光(1974—), Email: zhengyg@cma.gov.cn

资助信息: 国家重点研发计划项目(2018YFC1507504和2017YFC1502003); 国家自然科学基金面上项目(41375051); 中国工程科技中长期发展战略研究领域战略研究项目(2019-ZCQ-06)

中气旋中龙卷弱,也可分为两类^[4-5]:一类非中气旋龙卷出现在飏线或者弓形回波前部的 γ 中尺度涡旋(又称中涡旋)内;另一类非中气旋通常出现在地面辐合切变线上,由瞬变涡旋被对流中的强上升气流垂直拉伸加强形成^[4]。已经得到广泛认可,EF2级及以上强度中气旋龙卷除了要求有利于超级单体风暴的环境条件,也就是一定的对流有效位能(CAPE)和强的0~6 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^[4,5,6]。

最近,俞小鼎等^[5]回顾了中国包括了龙卷的强对流天气研究和业务进展,但有关龙卷的研究综述篇幅有限。因此,非常有必要进一步回顾和总结中国龙卷的研究成果。由于篇幅所限,本文仅总结中国龙卷气候特征和环境条件研究成果;由于中气旋龙卷强度通常较强,且多普勒天气雷达观测特征较为明显^[4,5,7],研究较多,因此,本文环境条件研究成果总结只针对中气旋龙卷。

1 气候特征

1.1 总体气候特征

包澄澜等^[7]给出了1962年和1963年上海的7次龙卷记录;徐良炎^[8]展示了1987年我国的龙卷灾害情况;魏文秀和赵亚民^[9]综合给出了中国1980—1993年灾害性龙卷风的部分记录分布,指出有2个龙卷风多发带,一是自长江三角洲经苏北平原至黄淮海平原,另一个是在广东和广西,呈东西走向。这些分析虽然具有一定的学术价值,但受资料限制,工作还比较初步。

Yao等^[10]、范雯杰等^[1]和Chen等^[11]分别给出了非常详细的中国龙卷气候分布。王东海等^[12]则利用已有文献结果对比分析了中国与欧美龙卷气候统计特征。Yao等^[12]使用中国气象观测站的天气现象观测资料给出了1960—2009年中国龙卷气候分布,但该研究不能给出龙卷强度信息。范雯杰等^[1]则使用了《中国气象灾害大典》《中国气象灾害年鉴》、气候影响评价、台站地面气象观测月报表、地方志、媒体和互联网等信息,给出了1961—2013年中国龙卷及其强度气候分布。Chen等^[13]给出了1948—2012年中国龙卷气候分布,使用的资料与范雯杰等^[1]所用资料基本一致,但还包括了现场调查和中国部分核电厂周边的龙卷调查结果资料。这些研究给出了基本一致的中国龙卷地理分布、月变化和日变化特征。范雯杰等^[1]和Chen等^[13]都大致估计中国每年发生约100个龙卷。中国龙卷大多发生在4—9月;具有明显的日变化特征,大多发生在15—19时(北京时,下同),少量发生在午夜后。中国龙卷主要发生在东部和部分中部平坦地区,包括

江淮地区、两湖平原、华南地区、东北地区和华北地区东南部等平原地区,其中江苏和珠三角尤其是江苏北部是中国龙卷最多发的地区,但强龙卷基本发生在中国中东部^[1,13]。

姚叶青等^[12]利用1960—2009年气象观测资料,发现安徽省128次龙卷多发于4—9月平原丘陵地带的江淮东部,山区极少。范雯杰等^[1]的分析结果表明:1)1961—2010年共记录到165次强龙卷,含EF2级145次、EF3级16次、EF4级4次,年均3.3次;2)2004—2013年共记录到143次EF1或以上级龙卷,其中EF1级121次、EF2级19次、EF3级3次,年均EF1或以上级龙卷14.3次。Chen等^[13]给出的1948—2012年中国F0、F1、F2和不小于F3强度的龙卷数目分别为4676、2467、555和42,但他们没有对不小于F3强度的龙卷进行区分。

黄先香等^[13]给出2018年中国可确认的龙卷天气过程有10次、共产生22个龙卷;其中,EF1级或以上强度的龙卷有19个,EF1级或以上强度龙卷数量明显多于2004—2013年的龙卷记录年平均值^[1];台风相关的龙卷天气过程是2018年龙卷事件的主要特征,台风龙卷有16个,占到总数的73%。而2019年,综合佛山市龙卷风研究中心的统计结果和相关新闻报道,中国可确认的龙卷仅10个,其中,EF4级龙卷1个,EF3级龙卷1个和EF2级龙卷2个。

但需要指出的是,从图1可以看到,河北北部和内蒙古的东南同辽宁交界附近区域也有较多龙卷发生;比如,据新闻报道,2017年8月11日16时许,内蒙古赤峰市克什克腾旗和翁牛特旗遭受龙卷袭击,造成5人死亡,50余人受伤,该龙卷至少达EF3级;2019年6月17日,河北张家口尚义县发生龙卷。图1a和1c还显示,中国西部也有一定数量的龙卷发生;但Chen等^[13]指出这些龙卷的强度都很弱。比如,据新闻报道,2010年9月1日,青海湖一天内两次发生龙吸水(水龙卷)现象。不过,图1b显示2004—2013年中国西部也有两个达到EF1级的龙卷发生。

到目前为止,中国未记录到EF5级龙卷。结合范雯杰等^[1]的统计结果和近几年的龙卷发生情况,1951—2020年共记录到EF4级龙卷7次(见表1)。此外,1977年4月16日湖北安陆等地EF3级龙卷造成118人死亡,1978年4月14日陕西省乾县EF3级龙卷造成84人死亡。

1.2 热带气旋(TC)龙卷气候特征

沈树勤^[4]分析了1962—1984年在江苏境内产生的11个TC外围雨带上龙卷过程,发现TC龙卷大致为两

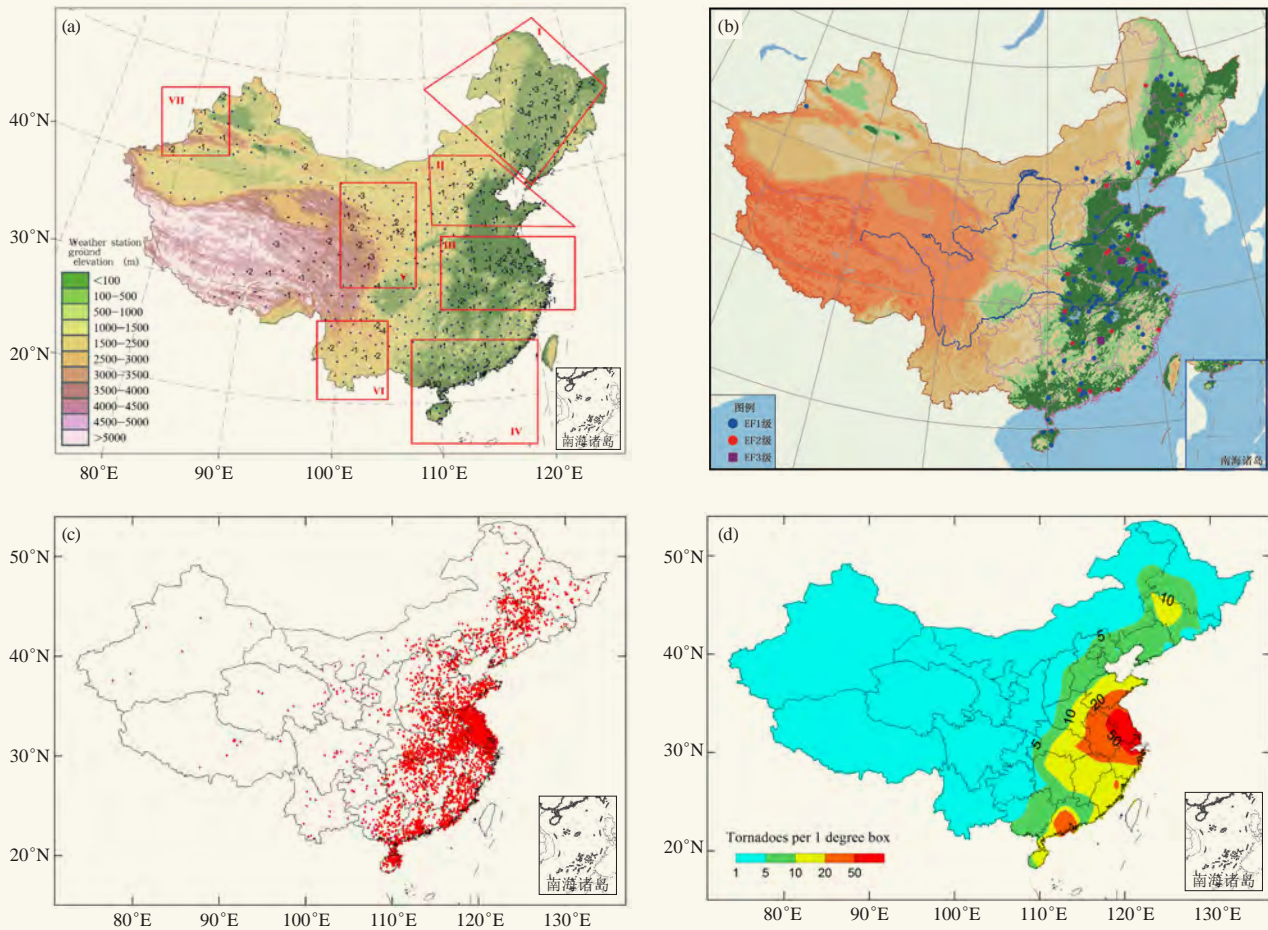


图1 中国龙卷气候分布 (未统计台湾地区)

(a) 1960—2009年国家基本气象站 (黑点) 观测的龙卷发生次数 (黑色数字) (彩色填充为地形)^[12]; (b) 2004—2013年143次EF1级以上龙卷分布图 (彩色填充为地形)^[1]; (c) 1948—2012年中国龙卷发生地点分布 (红点)^[13]; (d) 1948—2012年中国1° × 1° 网格的龙卷发生数目分布^[13]

Fig. 1 Climatological distribution of tornado in China (excluding Taiwan)

(a) Tornado occurrences (black numbers) observed at the national principal observation stations (dark blue dots) during the period of 1960—2009 (Color shaded: topography)^[12]; (b) 143 tornadoes with intensities of no less than EF1 during the period of (Color shaded: topography)^[1]; (c) Distribution of tornado occurrence (red dots) during the period of 1948—2012^[13]; (d) Frequency numbers in 1° (longitude) × 1° (latitude) grids, inverse-square-distance interpolated results during the period of 1948—2012^[13]

年一遇, 发生在TC的迅速减弱阶段和台风运动方向的右前象限。郑媛媛等^[15]分析了10次TC龙卷过程, 同样发现大多数出现在台风前进方向的东北侧。基于Chen等^[13]所用龙卷资料、其他相关论文和日本气象厅最佳台风路径资料等, 白兰强等^[16]全面调查了2006—2018年中国TC龙卷的发生情况 (图2), 共获得64次TC龙卷记录, 平均每年发生约5次; 中国2018年的TC龙卷尤其活跃^[15, 18], 共有24次TC龙卷记录, 占总样本数的37.5%。但尚没有研究给出TC龙卷强度的气候分布特征。

中国最近明确记录到的TC龙卷爆发事件发生于2018年登陆台风摩羯中, 至少有11个龙卷生成^[15, 18-17]; 而

2006年8月4日10:50—15:28, 位于登陆台风派比安外围的佛山市南海与三水区约30~40 km的范围内发生了5个龙卷^[18]。

约1/3的中国登陆TC至少有一个龙卷生成^[18], 而美国约59%登陆TC^[19]和日本约40%登陆TC至少生成一个龙卷^[20]。TC龙卷主要发生于距离TC中心500 km范围内, 江苏和广东是中国TC龙卷发生频次最多的两个省份; 中国的TC龙卷主要生成于TC中心的东北象限, 而非TC移动方向的右前象限; 中国大多数TC龙卷生成于强度相对较弱的TC (如热带低压、热带风暴)^[18], 这可能是由于TC登陆后通常强度迅速减弱^[21]的缘故。

表1 中国EF4级龙卷的灾情统计特征（根据范雯杰等^[1]整理和补充）
Table 1 Table of disaster situations of the EF4 tornadoes in China

发生地点 (县区级)	发生日期	级别	人员伤亡		房屋受损/间		典型灾害现象
			亡	伤	倒塌	损坏	
上海浦东	1956年9月24日	EF4	68	842	倒损近千		一座重10 t, 有5人作业的储油罐被卷起腾空约15 m, 抛至120 m远; 一座钢筋混凝土结构房屋被掀倒; 一座四层结构牢固的教学楼被削去半栋。
河北霸州	1969年8月29日	EF4	98	763	1400	—	倒塌房屋中有1106间全部夷平, 屋顶被卷跑; 1人接近窗口时被刮出窗外10 m。该龙卷其后入天津境内, 摧毁一座学校大礼堂, 摧毁6个工厂。
江苏常州	1979年7月21日	EF4	2	231	倒损2914		将一家三间楼房齐地端起, 腾空数丈, 螺旋飞舞, 突然下坠, 迸裂破碎, 楼址夷为平地, 家具什物刮至200 m以外。
湖南湘阴	1983年4月27日	EF4	伤亡83		倒损2.4万		将围径3.15 m的百年古樟树拔起, 使地物呈毁灭性破坏, 数目竹枝呈麻花状旋扭; 一人被卷起30 m, 2名学生被卷出300 m摔死; 一座古塔被卷去8层, 重200 kg麻石像纸片一样缓缓坠落; 高压电杆被卷离原地6 m; 《中国气象报》将其列为20世纪全球10大风灾之一。
黑龙江海伦	1987年7月31日	EF4	12	185	—	—	当天黑龙江全省共有14个县、市受到飏线和龙卷袭击, 其中, 齐齐哈尔北部出现6条龙卷, 海伦先后遭4股强龙卷袭击。海伦某村房屋全部倒塌; 一台3.5 t重的脱谷机被风卷起落到1 km外, 摔碎。
江苏阜宁	2016年6月23日	EF4	98	846	倒损房屋1347户 3200间		多座水泥砖砌和混凝土预制楼板结构二层房屋顶层完全被毁、大量房屋被夷平、完全倒塌的水塔、抛出400~500 m左右1~2 t的空集装箱和汽车、部分树木树叶被剥光和被剥皮
辽宁开原	2019年7月3日	EF4	7	190多	4300户多损坏		钢混框架结构二层房屋全毁, 钢架结构厂房全毁、墙皮剥落、民房掀顶、墙塌、树木枝叶卷光, 民房房顶整体掀飞、墙塌、半米粗砖砌门柱全塌

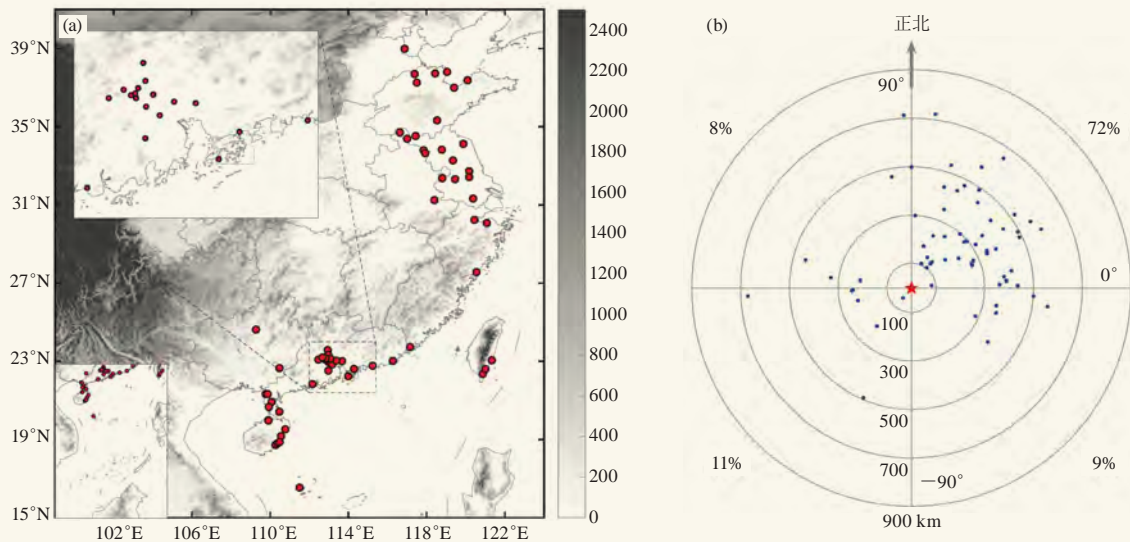


图2 2006—2018年中国TC龙卷分布^[18]

(a) TC龙卷 (红点) 的地理分布, 灰度阴影为地形海拔高度 (单位: m); (b) TC龙卷 (圆点) 相对于TC中心 (五角星) 的空间分布, 百分数分别表示各象限的龙卷样本占总样本的比例

Fig. 2 TC tornadoes in China during 2006—2018^[18]

(a) Locations of TC tornadoes (red dots). The region around the Pearl River Delta is enlarged in the upper-left corner. Terrain heights (shaded) are also shown for reference; (b) Locations of TC tornadoes (dots) relative to the eye of their parent TC (star) at the time of each tornado shown on Earth-related coordinates

2 环流背景和环境条件

如引言中所述, 非中气旋龙卷大多与飏线或者地面辐合切变线有关, 所以这类非中气旋龙卷的天气背景和环境条件就是有利于出现这些对流风暴的背景和条件。有利于超级单体风暴的环境条件是一定的CAPE和强的0~6 km垂直风切变^[4-5, 7-8, 22]。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^[23]、较低的抬升凝结高度和较大的低层(0~1 km)垂直风切变^[4-5, 7-8, 24]。

中国龙卷虽然可发生在多种有利的天气尺度背景下^[11, 14], 但发生较多龙卷的天气背景是梅雨^[25-26]、冷涡^[27]和TC^[17-18, 30], 这是因为在这样的天气形势经常存在低空急流 (即低空垂直风切变较大) 和较低的抬升凝结高度的缘故^[4], 不过, 冷涡背景下的抬升凝结高度偏高^[32-28]。

早在1964年,包澄澜等^[9]根据稠密测站网的资料分析了1962和1963年上海3次龙卷过程,发现龙卷发生在高空槽和地面冷锋前方的对流性不稳定的气团之中,其上游方向存在着一条明显的低空急流。但他们没有给出深层垂直风切变的情况。

梅雨期的强龙卷通常具备了有利于超级单体龙卷的所有有利条件。不过,不同个例CAPE数值存在差异。2003年7月8日23时20分发生在安徽无为的一次EF3级龙卷CAPE达2800 J/kg^[27],2016年江苏阜宁EF4级龙卷的CAPE达2705 J/kg^[29];不过,2005年7月30日11时30分安徽灵璧发生的一次由强降水超级单体导致的EF3级龙卷^[28,30]和2007年7月3日下午发生在安徽天长到江苏高邮的一次EF3级龙卷^[29,35]也都发生在梅雨期暴雨背景下,具有类似2003年7月8日安徽无为龙卷的环境条件,然而其CAPE值显著偏小,仅达1000多J/kg,为中等强度,但与美国龙卷的CAPE中值大致相当^[26,31]。姚叶青等^[30]分析了1960—2009年安徽省128次龙卷环流背景,发现龙卷与冰雹、雷雨大风在4个方面存在明显差异:中低层比湿、中低层垂直风切变、风暴相对螺旋度和0℃层以下的对流有效位能与整层对流有效位能比值,前3个量均是龙卷最大,龙卷是冰雹和雷雨大风的2~3倍,对流有效位能主要集中在0℃层以下,而冰雹和雷雨大风主要集中在0℃层以上。

冷涡背景下不利龙卷的环境条件是低层湿度较差。王秀明等^[32]分析了2002—2013年东北13个龙卷个例的环境特征,发现:1)龙卷多发生在东北冷涡背景下,直接影响系统为冷涡南侧次天气尺度短波槽,且常出现在槽区或前倾槽后;2)东北龙卷环境温度直减率较大,850~500 hPa温差达30~33℃;3)低层水汽含量及湿层厚度较之江淮及华南龙卷显著偏低,地面露点温度可低至13℃,850 hPa露点多在8℃以下;4)龙卷环境中常出现强低空急流和对流层中层急流,且对流层中层急流通常与干下沉气流相伴;5)东北地区龙卷风暴主要由干线及其伴随的强边界层辐合触发。郑永光等^[33]分析发现,2019年7月3日辽宁开原EF4级龙卷发生在前倾槽系统中,地面西南暖湿气流风速大,地面露点达19℃左右;地面露点显著高于王秀明等^[32]统计的多数东北龙卷相应数值;该次龙卷满足了有利于超级单体龙卷的大CAPE值(达3450 J/kg)、强0~6 km垂直风切变条件、较小对流抑制能量(CIN)和较强0~1 km垂直风切变条件;但0~1 km垂直风切变的增强具有中尺度特征;本次龙卷发生的不利环境条件与王秀明等^[32]的相应统计结果

较为一致,即开原附近区域对流层中低层存在干层,相对湿度低,抬升凝结高度较高;但分析发现,龙卷产生前,对流风暴的前部先在开原及周边地区产生了降水迅速改善了湿度条件。

TC龙卷的环境条件一个重要的特征是CAPE较低。郑媛媛等^[17]发现TC龙卷的环境条件(图3)为弱CAPE(200~1000 J/kg)和风随高度强烈顺转的强低空风的垂直切变环境,0~1 km风的垂直切变超过10 m/s,风暴的相对螺旋度很大,粗理查孙数很小。白兰强等^[18]发现中国的TC龙卷倾向于在具有较大低层风暴相对螺旋度、较小的CIN和较大的考虑夹卷效应的对流有效位能的环境中产生(图4)。但需要指出的是,较大的考虑夹卷效应的CAPE实际上是考虑环

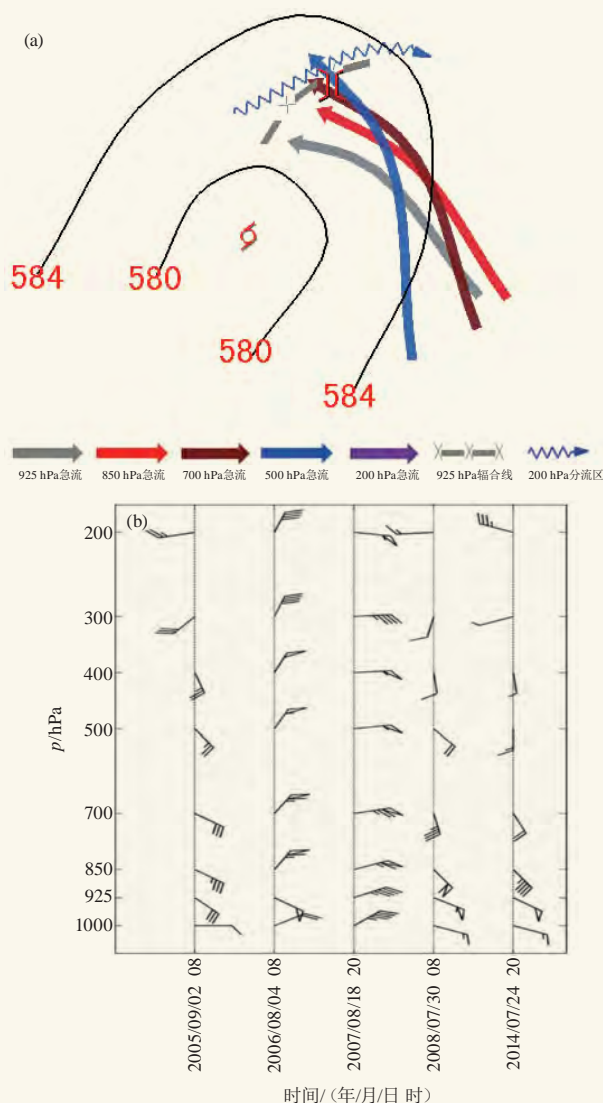


图3 TC外围龙卷高空形势综合图(a)和5次TC龙卷过程探空风垂直廓线(b)^[17]

Fig. 3 Composite analysis on the upper-level circulation of TC tornadoes (a), and wind profiles of five TC tornado processes (b)^[17]

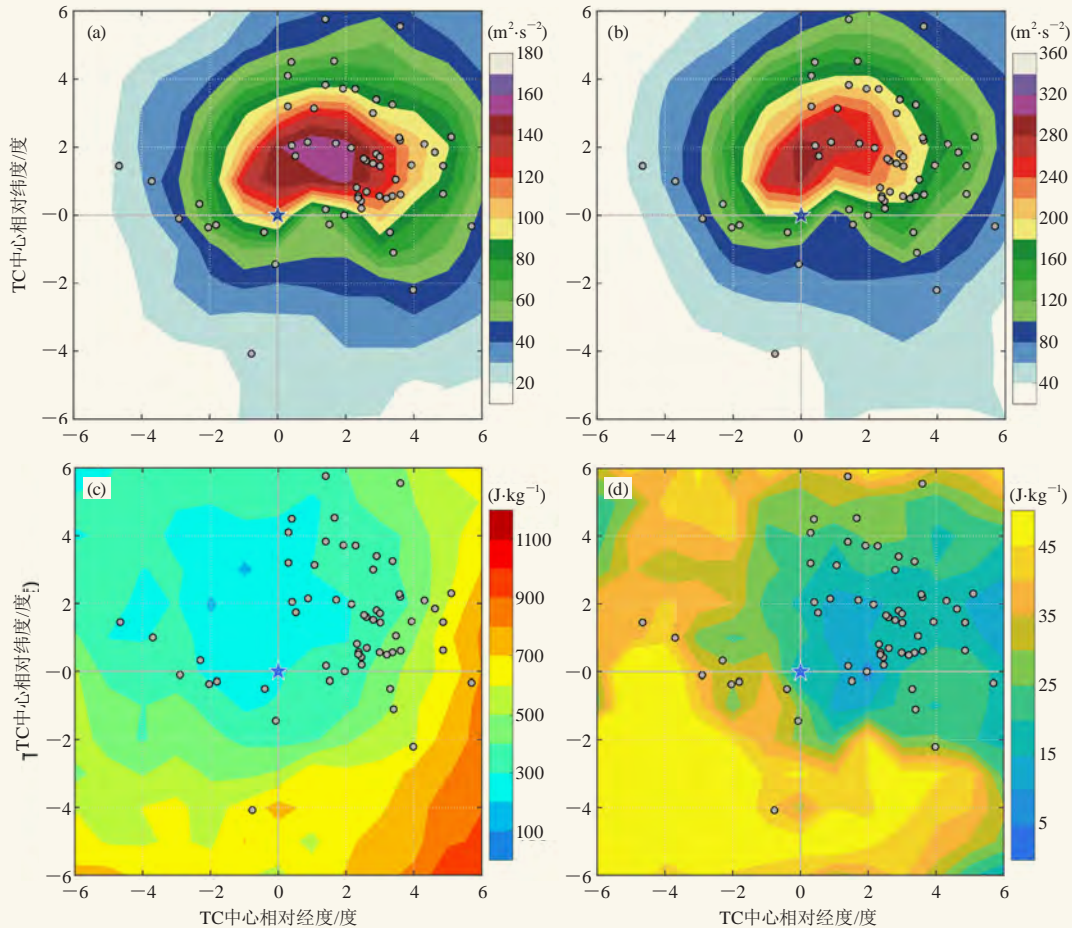


图4 中国2006—2018年TC龙卷个例的环境场合成^[18]: 0~1 km (a)和0~3 km (b)的风暴相对螺旋度、CAPE (c)和CIN (d) (五角星表示TC中心, 圆点为相对TC中心的龙卷位置)

Fig. 4 Composite horizontal distributions^[18] of the (a) 0~1 km and (b) 0~3 km SRH, CAPE (c) and CIN (d) around the TC eyes (blue stars). The solid gray circles represent the locations of TC tornadoes during 2006—2018 relative to the eye of their parent TC. The X (Y) axis is arranged in the TC eye relative longitude (latitude) for convenience

境自由大气总体的相对湿度较高对CAPE数值影响的反映。

3 总结和讨论

中国龙卷为发生概率极低的小尺度天气系统, 观测和预报都非常困难。尽管如此, 通过收集文献、现场调查等手段, 中国龙卷的气候特征已经非常清晰, 易于发生龙卷的环流背景和环境条件也已获得。

Yao等^[12]、范雯杰等^[1]和Chen等^[13]分别给出了中国龙卷气候特征。中国龙卷主要发生在东部和部分中部平坦地区, 其中江苏和珠三角尤其是江苏北部是中国龙卷最多发的地区。强龙卷基本发生在中国中东部。但河北北部和内蒙古的东南同辽宁交界附近区域也有较多龙卷发生, 中国西部青藏高原也有龙卷发生。中国尚未记录到EF5级龙卷; 1951—2020年共记录到EF4级龙卷7次。

2006—2018年中国共获得64次TC龙卷记录, 平

均每年约5次; 约1/3的中国登陆TC至少有一个龙卷生成; TC龙卷主要生成于TC中心的东北象限^[18]。

中国发生较多龙卷的天气背景是梅雨、冷涡和TC。梅雨背景下的强龙卷通常具备了中气旋龙卷所有有利条件, 但不同个例的CAPE值差异较大, 一些个例CAPE可达3000 J/kg左右, 而有些个例CAPE达1000多J/kg。冷涡背景下强龙卷的环境条件除了较差的低层湿度条件较不利和较高的抬升凝结高度外, 其他有利中气旋龙卷条件通常都具备。而TC龙卷的环境条件除了较弱的CAPE (200~1000 J/kg) 外, 其他有利条件也都具备。

但需要指出的是, 在进行龙卷气候特征分析时, 由于历史条件、观测数据和文献资料的限制, 历史龙卷的确定存在一定的不可靠性, 因此, 从目前开始, 通过现场调查、新闻报道和互联网图片、视频等手段, 建立一个可靠的中国龙卷个例数据库非常必要。

建立这样的数据库需要全国各气象部门的共同努力。该数据库除了包括龙卷本身的相关信息外,还应包括各种观测数据资料,从而为完善中国龙卷的气候特征、环境条件和机理研究等奠定坚实的基础。

中国龙卷的环境条件研究需要进一步完善深入,比如,冷涡背景下龙卷的大气低层湿度条件通常较差,其在发生龙卷时是否会有改善? TC龙卷的CAPE通常较低,是否其是产生TC龙卷对流风暴的强上升气流的主要原因?考虑夹卷效应的CAPE是否更具有代表性?还是有其他的因素导致了TC龙卷风暴中的强上升气流?此外,针对中国非中气旋龙卷研究还非常欠缺,既包括气候分布特征,也包括环境条件和机理研究等。

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): 793-805.
- [2] Davies-Jones R, Trapp R J, and Bluestein H B. Tornadoes and tornadic storms. Severe Convective Storms, American Meteorological Society, 2001: 167-221.
- [3] Bluestein H B. Severe Convective Storms and Tornadoes: Observations and Dynamics. Springer-Praxis, 2013.
- [4] 郑永光,田付友,周康辉,等.雷暴大风与龙卷的预报预警和灾害现场调查.气象科技进展,2018,8(2): 55-61.
- [5] 俞小鼎,郑永光.中国当代强对流天气研究与业务进展.气象学报,2020,78(3): 391-418.
- [6] Wakimoto R M, and Wilson J W. Non-supercell tornadoes. Monthly Weather Review, 1989, 117: 1113-1140.
- [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] 包澄澜,赵刚然.上海地区龙卷风的初步分析.南京大学学报(自然科学版),1964,(01): 168-192.
- [10] 徐良炎.1988.一九八七年我国龙卷灾害.灾害学,1988,(02): 60-62.
- [11] 魏文秀,赵亚民.中国龙卷风的若干特征.气象,1995,21(5): 36-40.
- [12] Yao Y Q, Yu X D, Zhang Y J, et al. Climate analysis of tornadoes in China. Journal of Meteorological Research, 2015, 29(3): 359-369.
- [13] Chen J Y, Cai X H, Wang H Y, et al. Tornado climatology of China. International Journal of Climatology, 2018, 38: 2478-2489.
- [14] 王东海,李兆慧,高枫亭,等.中国与欧美龙卷统计特征比较分析及研究进展.气象科技进展,2018,8(2): 8-23.
- [15] 黄先香,炎利军,蔡康龙,等.2018年中国龙卷活动特征.气象科技进展,2019,9(1): 50-55.
- [16] 沈树勤.台风前部龙卷风的一般特征及其萌发条件的初步分析.气象,1990,16(1): 11-15.
- [17] 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.
- [18] 白兰强,孟智勇, Sueki K, 等.中国热带气旋龙卷的气候统计特征(2006-2018).中国科学:地球科学,2020,50: 619-634.
- [19] Yao D, Liang X D, Meng Q, et al. Importance of identifying tropical cyclone tornadoes in typhoon warning and defense systems. Science Bulletin, 2019, 64: 143-145.
- [20] 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.
- [21] McCaul E W. Buoyancy and shear characteristics of hurricane tornado environments. Monthly Weather Review, 1991, 119: 1954-1978.
- [22] Mitsuta Y. 1983. Studies on wind disasters caused by Tatsumaki (tornadoes and waterspouts) and severe local storms in Japan (in Japanese with English abstract). Final Report of the Special Research Project for Natural Disaster Sponsored by the Ministry of Education. 124.
- [23] Zheng Y G, Chen J, Tao Z Y. Distribution characteristics of the intensity and extreme intensity of tropical cyclones influencing China. Journal of Meteorological Research, 2014, 28(3): 393-406.
- [24] 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.
- [25] Doswell III 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.
- [26] Craven J P, Brooks H E. Baseline climatology of sounding derived parameters associated with deep moist convection. National Weather Digest, 2004, 28: 13-24.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 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,2009,35(10): 32-39.
- [30] 姚叶青,郝莹,张义军,等.安徽龙卷发生的环境条件和临近预警[J].高原气象,2012,31(6): 1721-1730.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] 郑永光,蓝渝,曹艳察,等.2019年7月3日辽宁开原EF4级强龙卷形成条件、演变特征和机理.气象,2020,46(5): 589-602.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 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.

海南龙卷统计特征

郑艳^{1,2} 林正扬^{1,3} 蒋贤玲^{1,2}

(1 海南省南海气象防灾减灾重点实验室, 海口 570203; 2 海南省气象台, 海口 570203;
3 海南省三沙市气象局, 三沙 573199)

摘要: 统计了2004—2019年海南岛及其沿海(不包括南海海域)的陆龙卷和水龙卷,按照影响系统将陆龙卷分为热带气旋龙卷和非热带气旋。结果表明:1)热带气旋龙卷以9月最为多发,主要发生在夜间到次日凌晨;约90%的龙卷是由台风或强台风引发的,龙卷发生时台风中心距离龙卷发生地约200~400 km;海南岛南部西行的台风引发的龙卷出现在东部沿海,中部西行的台风引发的龙卷出现在北部沿海,东部西北行的台风龙卷出现在北部沿海。2)非热带气旋龙卷主要出现在春季,其中以5月最为多发,超过90%的非热带气旋龙卷发生在午后;海风锋引发的龙卷落区位于海南岛北部地区,最强可达EF2级,边界层中 β 尺度海风锋辐合线是这类龙卷发生发展的关键因素;干冷空气引发的龙卷落区位于海南岛北部和东部地区,约23%为EF1级,其余均为EF0级,边界层切变线是这类龙卷的触发机制。

关键词: 热带气旋龙卷, 非热带气旋龙卷, 水龙卷

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.06.013

Statistical Characteristics of Tornado in Hainan Province

Zheng Yan^{1,2}, Lin Zhengyang^{1,3}, Jiang Xianling^{1,2}

(1 Key Laboratory of South China Sea Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Hainan Province, Haikou 570203
2 Hainan Meteorological Observatory, Haikou 570203 3 Sansha Meteorological Bureau, Sansha 573199)

Abstract: Land tornadoes and water tornadoes of Hainan Island and along the coast (excluding the South China Sea) from 2004 to 2019 were analyzed. According to the impact system, land tornadoes are divided into tornadoes associated with tropical cyclones (TCs) and non-TCs. The results show that: (1) tornadoes associated with TCs occur most frequently from night to next early morning in September. About 90% of the tornadoes are caused by typhoons or severe typhoons. When the tornado occurs, it is 200–400 km away from the center of the typhoon. Tornadoes caused by the westward typhoons through the southern part of Hainan Island appeared in the eastern coastal region, while those caused by the westward typhoons through the middle and northwestward through the east appeared in the northern coastal region. (2) Tornadoes associated with non-TCs mainly occur in spring, with the most frequent occurrence in May, and more than 90% occur in the afternoon. Tornadoes triggered by the sea breeze front are located in the northern area of Hainan Island, with the strongest reaching EF2 level. The meso- β scale sea breeze front convergence line in the boundary layer is a key factor for the development of this type of tornado. The dry cold air induced tornadoes are located in the northern and eastern areas of Hainan Island, and about 23% are of EF1 level, with others EF0 level. The boundary layer shear line is the trigger mechanism of this type of tornado.

Keywords: tropical cyclone tornado, non-tropical cyclone tornado, waterspout

0 引言

龙卷是最强烈的强对流天气,最大地面风速可达140 m/s,因其具有突发性强、生命史短等特点,实际业务预报和预警难度较大。随着我国多普勒雷达陆续布网投入业务应用,业务一线的预报员^[1-7]先后对广东、江苏、安徽、湖南和东北地区多个龙卷个例的雷达回波特征进行分析,为龙卷业务监测和短临预警提

供依据。

近年来,多位学者对中国以及区域的龙卷时空特征和环境条件进行统计分析,以期实现对龙卷这种小概率的极端天气用相似法进行统计预报^[8]。王秀明等^[9]对发生在东北的13个龙卷个例环境特征进行分析,表明东北龙卷多发生在东北冷涡背景下,直接影响系统为冷涡南侧次天气尺度短波槽,且常出现在槽区或前倾槽后,龙卷风暴主要由干线及其伴随的强边界层辐合触发。曾明剑等^[10]对江苏梅雨期龙卷天气的环境特征进行合成分析,表明地面中尺度气旋的右侧附近(100 km)、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是龙卷易

收稿日期: 2020年7月15日; 修回日期: 2020年10月11日
第一作者: 郑艳(1970—), Email: hnzyan@126.com
资助信息: 海南省气象局重点项目(HNQXZD201410),
海南省气象局青年基金项目(HNQXQN202004)

发区。黄先香等^[11]分析珠江三角洲台风龙卷的活动特征,指出多数龙卷位于台风中心的东北象限,台风中心在广东湛江—广西东南部或北部湾附近时是珠江三角洲龙卷发生的高风险期。范雯杰等^[12]对1961—2010年中国165次EF2或以上级强龙卷统计分析表明,强龙卷主要分布在中国江淮地区、两湖平原、华南地区、东北地区和华北地区东南部等平原地区。

海南省属于热带海洋性气候,也是我国龙卷多发的省份之一^[13],EF2级龙卷往往造成重大的人员伤亡和财产损失,加强龙卷过程统计分析对防灾减灾意义重大。目前对海南龙卷的研究仅限于个例分析^[14-17]。本文对2004—2019年海南龙卷进行分类统计分析,以期对热带地区的龙卷预报预警提供依据和参考。

1 资料来源和个例说明

1.1 资料来源

龙卷资料主要来源于《海南省气象灾情报表》《海南省气象灾害大事记》《中国气象灾害年鉴》等。2004年以来,收到灾情后,海南省气象台和市县气象局相关人员一般均能在第一时间赶赴受灾地进行实地调查、走访,结合加密自动站和雷达资料等对龙卷进行定级,并通过灾情直报系统上传至中国气象局。

1.2 个例统计范围和分类

龙卷个例仅限于出现在海南岛及其沿海(不包括

南海海域)的陆龙卷和水龙卷。我国龙卷主要分为西风带龙卷和热带气旋龙卷^[18-19]。在弱的大尺度大气背景下,由于午后海陆热力差异,海南岛北半部地区维持的中尺度海陆风辐合线触发的龙卷不能归属为西风带龙卷,因此本文将海南陆龙卷分为热带气旋龙卷和非热带气旋龙卷。

2004—2019年,海南共有8次热带气旋龙卷过程、10个龙卷,20次非热带气旋龙卷过程、21个龙卷,3次水龙卷过程、3个龙卷。

2 热带气旋龙卷统计特征

2.1 热带气旋龙卷时间分布

表1给出了2004—2019年海南热带气旋龙卷过程概况。海南热带气旋龙卷均出现在8—10月,其中9月最为多发,占总数的62.5%。热带气旋龙卷主要发生在夜间到次日凌晨,其中有8个龙卷的发生起始时间在21时—次日06时,占到总数的80%,另外2个龙卷发生在傍晚17—18时。夜间到次日凌晨正是中低层干冷空气容易向南侵入海南岛的时段,中低层干冷空气激发热带气旋外围螺旋雨带中的超级单体产生,同时增大低层垂直风切变,从而引发龙卷^[14]。珠江三角洲热带气旋龙卷主要发生在白天(10—20时),白天经过太阳辐射后,大气层结最不稳定、强对流天气最易发生,夜间20时—次日06时龙卷较少发生^[11]。海南热带气旋龙卷与珠江三角洲热带气旋龙卷的形成机理可

表1 2004—2019年海南热带气旋龙卷过程概况
Table 1 Tropical cyclone tornado survey in Hainan Province in 2004—2019

序号	时间	地点	台风编号名称	等级	主要灾情
1	2005年9月27日01:00	临高临城镇	0518达维	EF2	6人死亡,10多人受伤,倒塌房屋6间
2	2006年8月2日18:40	文昌蓬莱镇	0606派比安	EF0	损失轻微
3	2006年9月30日23:20	万宁南桥镇、东澳镇	0616象神	EF2	1人死亡,12人受伤,倒塌损坏房屋77间
4	2008年9月24日06:03	澄迈桥头镇	0814黑格比	EF1	掀翻30间房屋屋顶
5	2012年10月27日17:00	琼海博鳌镇	1223山神	EF2	倒塌损坏房屋10间,8根电杆刮倒
6	2013年9月30日03:50	万宁后安镇	1321蝴蝶	EF2	2人受伤,房屋倒塌、树木和电杆折断数目不详
7	2014年9月15日21:45	澄迈桥头镇	1415海鸥	EF1	倒塌房屋15间
8-1	2019年8月29日02:30	屯昌新兴镇、西昌镇	1912杨柳	EF2	房屋受损面积为1720 m ²
8-2	2019年8月29日04:00	儋州那大镇	1912杨柳	EF2	8人死亡8人受伤,115间房屋受损,若干电线杆、路灯刮倒
8-3	2019年8月29日04:40	白沙打安镇、七坊镇	1912杨柳	EF0	大面积橡胶树折断

能有所不同。

2.2 龙卷与台风路径

海南热带气旋龙卷主要由台风或强台风引发的,约占总数的90%,与中国热带气旋龙卷特征不一致^[20]。按照龙卷落区与同时刻台风的相对位置将8次热带气旋龙卷过程分为3类(图1):1)龙卷发生在台风移动方向右后侧,约占总数的50%;2)龙卷发生在台风移动方向左前侧,约占总数的40%;3)龙卷发生在台风移动

方向右前侧,约占总数的10%。

1类特征:均为秋季台风(9—10月),龙卷发生时台风强度为12~15级(台风或强台风级),龙卷强度为EF2级。海南岛南部西行的台风引发的龙卷出现在东部沿海,龙卷发生时台风位于109°—110°E、16°—17°N(图1a);海南岛中部西行的台风引发的龙卷出现在北部沿海,龙卷发生时台风位于北部湾海面。这类龙卷发生时台风距离龙卷发生地

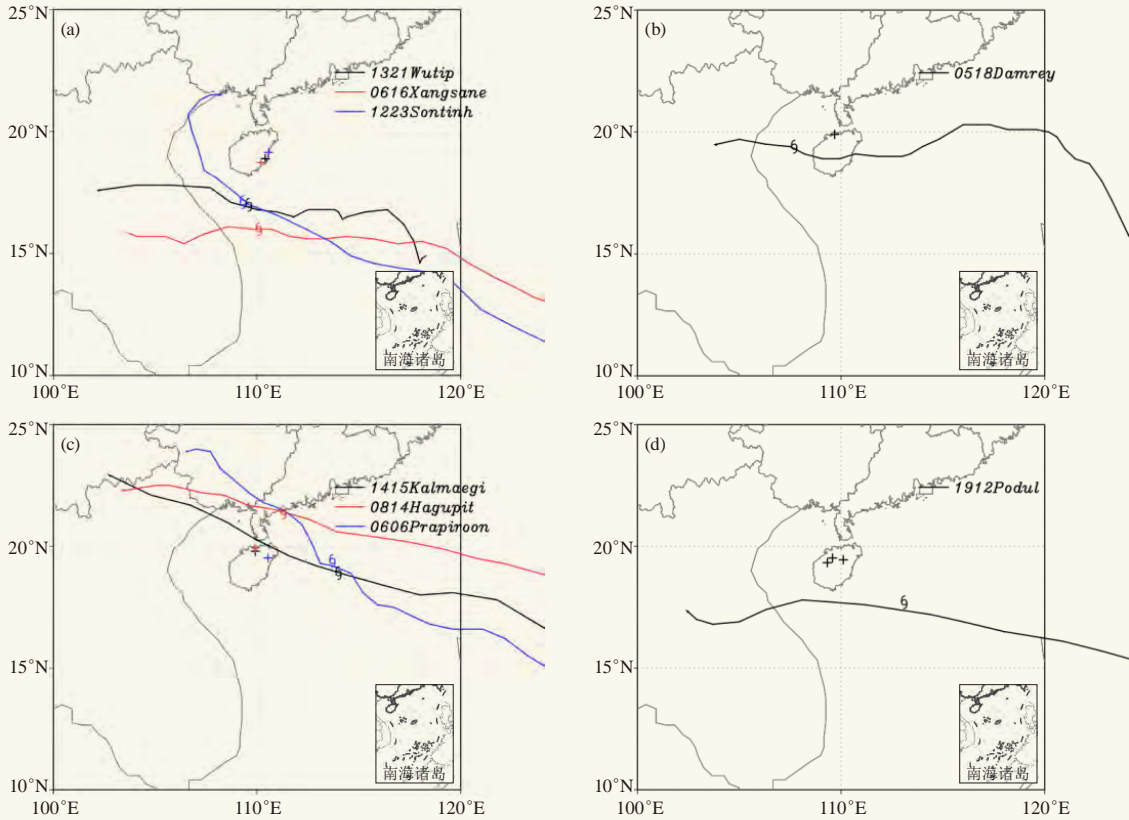


图1 2004—2019年海南引发龙卷的台风路径 (+代表龙卷落区; 6代表龙卷发生时台风位置)
Fig. 1 The path of the typhoon that triggered the tornado in Hainan Province in 2004—2019
(+: tornado; 6: typhoon position)

200~300 km (图1b)。

2类特征: 8—9月台风自海南岛东部西北行; 龙卷发生时台风强度为12~15级(台风或强台风级); 龙卷强度较1类偏弱, 秋季台风引发的龙卷为EF1级, 夏季台风引发的龙卷更弱为EF0级; 龙卷出现在北部沿海; 龙卷发生时台风位于109°—110°E、16°—17°N, 距离龙卷发生地220~440 km (图1c)。

3类特征: 2019年8月29日凌晨1912“杨柳”台风在南海中部向海南岛南部西行过程中台前飢线中的超级单体引发了屯昌、儋州、白沙系列龙卷, 龙卷最大强度为EF2级; 龙卷发生时台风强度为9级(热带风暴级); 龙卷出现在内陆地区; 龙卷发生时台风距离龙卷发生地约400 km (图1d)。

3 非热带气旋龙卷统计特征

3.1 非热带气旋龙卷时空分布

表2给出了2004—2019年海南非热带气旋龙卷过程概况。海南非热带气旋龙卷主要出现在春季(3—5月), 其中以5月最为多发, 占总数的30%。超过90%的非热带气旋龙卷发生在午后13—17时, 龙卷落区位于海南岛北部和东部沿海地区, 其中海口最多为

10个, 约占总数47.6% (图2); 白天地面太阳辐射加热迅速增大的CAPE值为超级单体风暴的生成提供了有利的环境条件, 海陆风效应而显著增大低层垂直风切变午后由于海陆热力差异, 海南岛北半部地区维持的中尺度海陆风辐合线触发的龙卷^[15]。

3.2 非热带气旋龙卷分类

3.2.1 海风锋引发龙卷

海风锋引发的龙卷落区位于海南岛北部地区, 最强可达EF2级。边界层中 β 尺度海风锋辐合线是这类龙卷发生、发展的关键因素^[15-16]。龙卷发生当日地面西南热低压中心一般在四川盆地附近维持, 海南岛处于低压槽控制下, 受持续偏南风影响, 白天最高气温北部地区普遍升至36~38℃, 午后海陆风效应增强, 海南岛北部地区维持中尺度海风锋辐合线; 大气环境整层较干, 特别是中层干层显著, 环境温度垂直递减率较大, 且低层垂直风切变较大。雷暴在海风锋辐合线附近触发从而引发龙卷。

3.2.2 干冷空气引发龙卷

干冷空气引发的龙卷落区位于海南岛北部和东部地区, 强度较海风锋引发的龙卷偏弱, 约23%为EF1

表2 2004—2019年海南非热带气旋龙卷过程概况
Table 2 Non-tropical Cyclone Tornado survey in Hainan Province in 2004–2019

序号	时间	地点	等级	灾情
1	2004年4月16日16:00—17:00	海口红旗镇、三门坡镇	EF1	直径30 cm橡胶树折断, 经济损失约1000万元
2	2008年5月29日16:40	海口三江镇	EF2	损坏房屋211间, 4艘渔船掀上岸, 10根电杆折断
3	2009年3月24日23:00	海口三门坡镇	EF0	损坏房屋46间, 经济损失约526万元
4	2009年3月29日17:30	文昌蓬莱镇	EF1	大批橡胶树折断, 经济损失约70万元
5	2009年4月13日15:30	文昌公坡镇	EF0	损坏房屋20间
6	2009年4月18日05:30	海口演丰镇	EF0	损坏房屋25间
7	2009年6月23日16:26、17:30	海口三江镇、云龙镇	EF0	经济损失约125万元
8	2012年7月27日16:00	琼海嘉积镇	EF0	经济损失约10万元
9	2013年4月30日14:45	海口东山镇	EF0	损坏房屋20间
10	2014年5月16日15:10	澄迈福山镇	EF0	经济损失约9万元
11	2014年5月17日16:00	澄迈福山镇	EF0	经济损失约4万元
12-1	2014年5月20日14:00—14:30	澄迈仁兴镇	EF1	大批橡胶树折断, 损坏房屋40间
12-2	2014年5月20日16:00—16:20	文昌东路镇	EF0	3人受伤, 损坏房屋11间
13	2014年8月21日16:00	海口大致坡镇	EF0	损失轻微
14	2015年5月24日15:30	海口大致坡镇	EF0	损失轻微
15	2016年6月5日15:12—15:27	文昌锦山镇、冯坡镇	EF2	1人死亡、11人受伤, 倒塌房屋44间、掀顶250间
16	2016年9月4日13:10	万宁万城镇	EF0	25间房屋受损, 其中严重损坏房屋5间, 直接经济损失约60万元
17	2017年3月31日14:30	万宁龙滚镇	EF0	大树连根拔起, 多处房屋被掀瓦, 经济损失约250~300万元
18	2019年2月18日17:50	海口三江镇	EF1	4间房屋房顶被掀翻, 车辆被掀翻, 经济损失约16万元
19	2019年4月19日16:50—17:10	定安富文镇	EF1	61间瓦房屋顶瓦片不同程度受损, 经济损失32.3万元
20	2019年5月21日15:30	海口新海港	EF0	无明显灾情

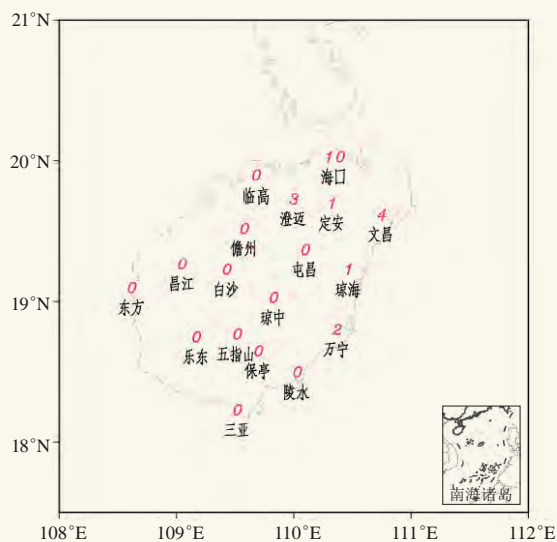


图2 2004—2019年海南非热带气旋龙卷个数分布
Fig.2 Number distribution of Non-tropical Cyclone Tornado in Hainan Province in 2004—2019

级, 其余77%为EF0级。边界层切变线是这类龙卷发生、发展的关键因素。龙卷发生当日08时, 地面锋面一般位于华南沿海, 925 hPa切变线南压至海南岛北部地区, 东路冷空气(地面冷高中心在110°E以东)为东北风与东南风切变, 西路冷空气(地面冷高中心在110°E以西)为西北风与东南风切变; 大气环境中层(600 hPa附近)干层显著, 环境温度垂直递减率较

大, 且低层垂直风切变较大。雷暴在切变线附近触发从而引发龙卷。

4 水龙卷

2004—2019年, 海南共观测到3次水龙卷过程, 均出现在海南岛西部的儋州和昌江沿海, 强度为EF0级(表3), 较2016年深圳宝安机场附近水龙卷以及2017年东洞庭湖水龙卷明细偏弱^[21-22]。由于水龙卷对生命财产没有造成明显的影响, 目前海南还没有对水龙卷进行过详细分析。

表3 2004—2019年海南水龙卷过程概况
Table 3 Waterspout survey in Hainan Province in 2004–2019

序号	时间	地点	等级	灾情
1	2016年7月28日 16:28—16:36	儋州洋浦小铲滩码头	EF0	无明显灾情
2	2019年7月2日 11:05	昌江海尾镇新港	EF0	无明显灾情
3	2019年10月5日 16:35	儋州南丰镇松涛水库	EF0	无明显灾情

5 结论

通过统计分析2004—2019年海南岛龙卷过程, 得到了如下结论:

1) 热带气旋龙卷均出现在8—10月, 其中以9月最为多发, 主要发生在夜间到次日凌晨; 约90%的龙

(下转89页)

广州X波段双偏振相控阵天气雷达观测试验进展

张羽¹ 田聪聪¹ 傅佩玲¹ 黄辉²

(1 广东省广州市气象台, 广州 511430; 2 广东省珠海纳睿达科技有限公司, 珠海 519000)

摘要: 为了弥补现有业务雷达的探测盲区, 增强小尺度强对流天气监测能力, 广州市气象部门自2017年开始组织开展X波段相控阵雷达(XPAR)布网观测试验, 截至到2020年1月, 已经建成5部具备双偏振功能的X波段相控阵雷达。X波段相控阵雷达通过一体化和模块化设计, 体积小、运行稳定, 可实现无人值守, 但是对数据的传输和存储提出了更高的要求; 相控阵雷达探测数据可靠, 能够清晰地识别出融化层特征。快速扫描体制有利于天气系统的精细观测, 利用其双偏振功能可以进一步观测到降水的相态演变过程。

关键词: 相控阵雷达, 双偏振雷达, 雷达组网, 精细观测

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.06.014

Progress of Observation Experiment for X-band Dual Polarization Phased Array Radars in Guangzhou

Zhang Yu¹, Tian Congcong¹, Fu Peiling¹, Huang Hui²

(1 Guangzhou Meteorological Observatory, Guangzhou 511430 2 Naruida Technology Co. Ltd. in Zhuhai, Zhuhai 519000)

Abstract: To cover the detection blind area of existing operational radar and enhance the monitoring capability of meso-micro scale severe convective weather, Guangzhou Meteorological Bureau carry out an observation experiment since 2017. Five X-band dual polarization phased array radars (XPAR-D) have been built by January 2020. Based on integrated and modularization design, X-band Dual Polarization Phased Array Radars can use smaller antennas for a desired half-power beam width (which aids deployment and transportability and reduces costs) and realize unattended with stable operation, while higher requirements are put forward for data transmission and storage. The rapid scanning system of phased array radar is conducive to the fine observation of weather system, and the evolution process of precipitation can be further observed by using its dual polarization function.

Keywords: phased array radar, dual polarization radar, radar networking, fine observation

0 引言

2001年广州建成了广东省第一部新一代多普勒天气(CINRAD/SA)雷达, 并于2016年完成双偏振改造。新一代多普勒天气雷达探测范围广, 投入运行以来, 在台风、暴雨、强对流等灾害性天气监测预警中发挥了重要作用。但由于其天线采用机械扫描方法, 业务运行采用VCP21模式, 最快只能在6 min内完成9个仰角的扫描。这种模式扫描周期过长, 垂直方向分辨率较差, 不能满足龙卷、微下击暴流、冰雹等小尺度天气系统的监测。由于这些小尺度天气系统突发性强, 生消发展迅速, 是目前气象监测预警领域的难点, 而且其一旦发生, 就会产生较大的气象灾害^[1-3]。

为了实现对重点区域强对流天气系统的精细观测, 2003年美国开始了CASA(Collaborative Adaptive Sensing of the Atmosphere)计划, 利用多部X波段天气雷达组成网络化雷达系统, 实现对关注重点区域的协同自适应观测, 在此种模式下, 多部雷达相互协作, 多个雷达波束覆盖相互之间的盲区并且实现对同一地区的同步观测, 获取远高于单部雷达的时空覆盖和分辨率^[4-5]。2013年中国科学院大气物理研究所与南京恩瑞特公司合作, 中国气象局大气探测中心和中国气象科学研究院参与, 在南京建设了国内第一个X波段网络化雷达试验平台。试验网络化雷达平台由4部X波段天气雷达组成。4部雷达以菱形分布, 雷达间距约为40km。利用该试验平台, 建立单雷达自适应和多雷达协同的试验观测模式, 并应用该模式对一个个例进行观测, 验证观测模式的合理性^[6]。国内外的研究都表明X波段雷达的协同组网观测可以提高中小尺度强对流天气系统监测的准确性, 提高预报预警时间。但是由于它们采用的都是机械扫描体制的X波段

收稿日期: 2020年8月3日; 修回日期: 2020年10月11日
第一作者: 张羽(1986—), Email: 312404880@qq.com
资助信息: 广东省重点领域研发计划(2020B1111200001);
国家重点研发计划(2017YFC1501701); 国家自然科学基金项目(41705020); 广东省气象局科研项目(GRMC2018Z01)

雷达,受天线扫描速度制约,几部雷达完成协同探测区需要1~2 min,对快速变化的小尺度天气系统,造成强度数据和速度数据合成失效^[7]。

相控阵天气雷达通过相位控制扫描,其波束的转换更为灵活迅速,能够在1 min之内完成一个体扫。世界主要发达国家较早开展了相控阵天气雷达的观测与应用研究,并取得了一些重要的成果。2002年美国国家雷达技术委员会推荐相控阵技术为美国下一代雷达发展的方向,并于2003年组织了美国强风暴实验室、雷达运行中心和俄克拉何马大学等9家单位对退役的宙斯盾(SPY-1)二维相控阵雷达进行气象探测改造,建立了相控阵天气雷达试验平台。2006年开始着手建立了一维相扫体制的X波段相控阵天气雷达(MWR-05XP),垂直电扫与水平机械扫描相结合,2007—2008年进行了外场试验,观测龙卷、超级对流单体、飚线等天气过程,结果表明,其观测资料质量与多普勒天气雷达相当,但扫描速度远高于WSR-88D雷达^[8-9]。在我国,早期相控阵雷达技术主要用于军事和航天等领域,近年来也开展了相控阵天气雷达技术的相关研发工作。2007年,中国气象科学研究院与中国电子科技集团公司第十四研究所等单位合作,研制出了一部S波段相控阵天气雷达,实现了军用相控阵雷达向天气雷达的转化,观测试验验证了相控阵天气雷达技术的可行性^[10-11]。2009年,中国气象科学研究院与安徽四创电子股份有限公司合作研制车载X波段相控阵天气雷达,2013年的外场观测试验表明相控阵雷达能够精细观测到强对流单体触发、发展和演变过程^[12]。

在相控阵的基础上实现双偏振功能,将进一步增强相控阵雷达的探测能力。双偏振相控阵天气雷达既具有相控阵雷达快速扫描的特点,又拥有双偏振雷达获取天气系统丰富探测信息的优势,从而使其具备了快速获取中小尺度、快变天气系统详细信息的能力,在探测天气系统内部完整、精细的结构上具有极大的优势,同时还可对降水粒子的形状、相态、滴谱分布等微物理结构进行分析。2017年开始,依托中国气象局超大城市综合气象观测试验,广州市气象局与珠海纳睿达科技有限公司合作,开展了X波段相控阵雷达的观测试验,该雷达还同时具备双偏振探测能力^[13]。截至到2020年1月,广州已经建成5部X波段相控阵雷达并开展观测试验。本文主要介绍广州X波段相控阵雷达的建设及初步观测情况。

1 广州地区相控阵雷达的建设情况

广州现有的CINRAD/SA雷达位于广州市番禺区,距离中心城区较近,随着城市的发展,高层建筑越来越多,新一代天气雷达扫描的低层仰角存在越

来越大的遮挡,加上雷达扫描固有的静锥区,限制了雷达的探测能力,导致存在较大的探测盲区。为了实现CINRAD/SA雷达盲区的有效覆盖,需要在CINRAD/SA周边部署多部X波段相控阵天气雷达。雷达站点的选址主要参考了中国气象局颁布的《新一代天气雷达选址规定》,综合考虑地理环境,净空环境、电磁环境、电力通信等条件,选址过程中优先考虑了气象部门现有的地面观测场地,以减少基础建设的成本和难度。广州5部相控阵雷达的建设地点分别位于番禺、花都、帽峰山、南沙和佛山南海(图1)。雷达间距在30~40 km,其中有两部雷达以上共同覆盖的区域基本覆盖了荔湾、越秀、天河、海珠等中心城区。通过多部相控阵雷达联合组网观测,不但可以扩大覆盖区域,相互弥补静锥区,还可以避免单部X波段雷达易受强降水衰减的影响。

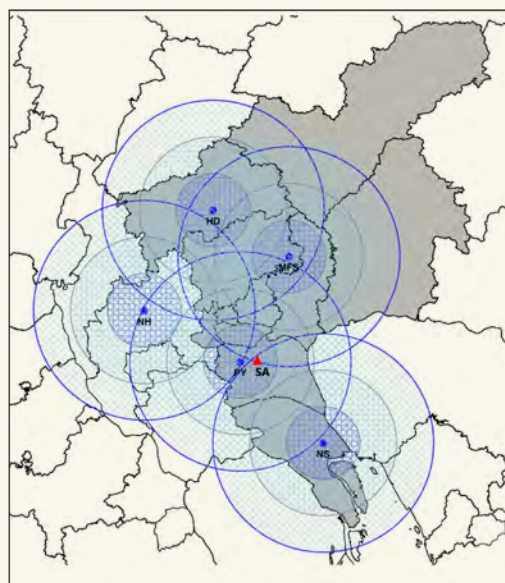


图1 广州X波段相控阵天气雷达分布图

(蓝色实心圆点表示花都(HD)、帽峰山(MFS)、南海(NH)、番禺(PY)、南沙(NS)5部相控阵雷达位置;雷达为圆心的三个蓝色圆分别为10、20和30 km的探测范围;红色三角形表示广州S波段业务雷达位置(SA))

Fig. 1 X-band phased array weather radar Network of Guangzhou

(The blue solid dots represent the positions of five phased array radars: Huadu (HD), Maofengshan (MFS), Nanhai (NH), Panyu (PY) and Nansha (NS); the three blue circles stand for range 10 km, 20 km and 30 km away from the radar; the red triangle represents the S-band radar position (SA))

2 X波段相控阵雷达性能介绍

从外观上看,X波段相控阵雷达主要由天线阵面、GPS授时系统、信号处理机柜、空调制冷系统、雷达底座和转台六部分组成(图2)。从功能上,分

为双线偏振相控阵列天线、伺服系统、收发单元、标定单元、波束控制与合成单元、信号处理单元、监控与显示单元和附属设备等。雷达的主要性能指标如表1所示。天线系统采用全固态收发 TR 组件的设计,通过在空间进行多路能量合成而得到所需的发射功率以及在接收通道进行多路信号同相合成。一共使用了64个全固态相参收发 T/R 组件,在收发TR组件的损

坏率不超过10%情况下,雷达还可以正常工作,进一步提高了雷达长期运行的可靠性与稳定性。雷达还采用了固态发射机,结合非线性调频脉冲压缩技术,由100:1的压缩比例将20 μs的宽脉冲压缩为0.2 μs。由于宽脉冲造成了约3 km的探测盲区,雷达采用长短脉冲相结合的方式来进行补盲,兼顾最近和最远距离的探测。

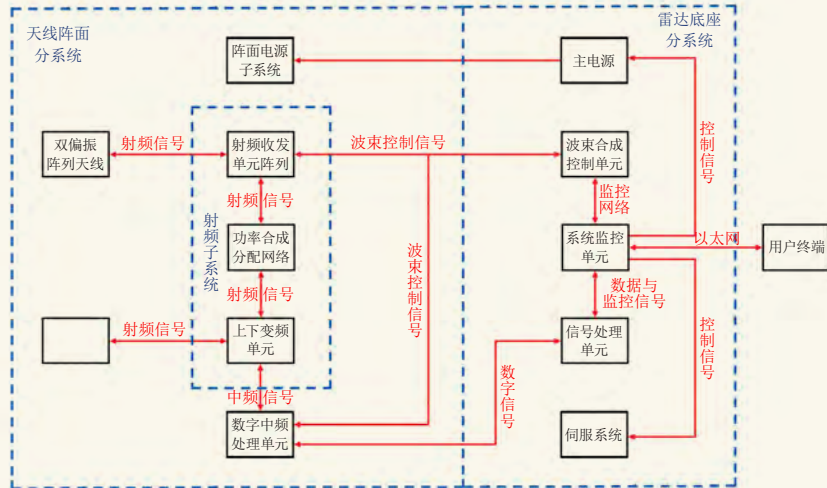


图2 X波段双偏振相控阵雷达外观与系统框图

Fig. 2 System frame diagram of XPAR (X-band phased-array radar)

表1 X波段相控阵雷达主要性能参数

Table1 The parameters of XPAR (X-band phased-array radar)

项目	参数指标
天线形式	一维电子扫描相控阵体制
扫描策略	水平机械扫描, 垂直相控阵扫描
天线尺寸	长1.3 m, 宽0.7 m
工作频率	9.3~9.5 GHz
天线增益	≥36 dB
波束宽度	水平3.6°, 垂直1.8°
极化方式	水平垂直双极化
极化隔离度	≥30 dB
脉冲宽度	20 μs (未压缩), 0.2 μs (压缩)
峰值功率	256 W
探测距离	≥42 km
距离分辨率	30 m
脉冲重复频率	≤4 kHz

3 广州地区相控阵雷达运行情况

3.1 运行维护

传统机械雷达需要建造独立的雷达机房, 专人值守, 相控阵天气雷达采用一体化和模块化设计, 将射频前端、数据处理、机械控制等集成一体, 具有体积小、重量轻、易操作等特点, 无需专门的雷达室。雷达系统运行控制界面设置在远端的中央监控室, 通过局域网和控制软件实现雷达远程操作监控和升

级, 实现无人值守, 降低人力成本。相控阵天气雷达可24 h不间断地连续工作, 其系统的平均无故障工作时间 (MTBF) 不低于30000 h, 平均故障修复时间 (MTTR) 应不大于0.5 h。

3.2 相控阵雷达扫描策略

相控阵雷达的扫描方式与目前业务布网的天气雷达不同 (图3), 业务雷达天线扫描时水平和垂直方向都采用机械驱动, 扫描时按照PPI模式进行 (如在VCP21模式下6 min内完成9个仰角的扫描), 在水平方向扫描完毕一个PPI仰角层后, 抬升电机俯仰切换下一个仰角扫描, 直到扫描最高仰角后, 再经过一个复位时间回到最低仰角, 如此循环往复。广州部署的X波段相控阵雷达属一维相扫体制雷达, 其在水平方向采用机械驱动, 垂直方向采用相控阵扫描。扫描时首先在方位上进行相控阵RHI扫描, 然后切换到另一个方位角, 再继续完成多层仰角扫描, 完成垂直方向连续无间隔多层仰角扫描只需约0.25 s。与业务雷达的扫描模式相比, 相控阵雷达更有利于对降水系统垂直结构进行进行观测。

相控阵雷达可以设置多种扫描模式, 以适应天气观测的需要。平面模式下雷达以一个固定的仰角进行发射, 方位电机做匀速旋转电子扫描, 波束的垂直

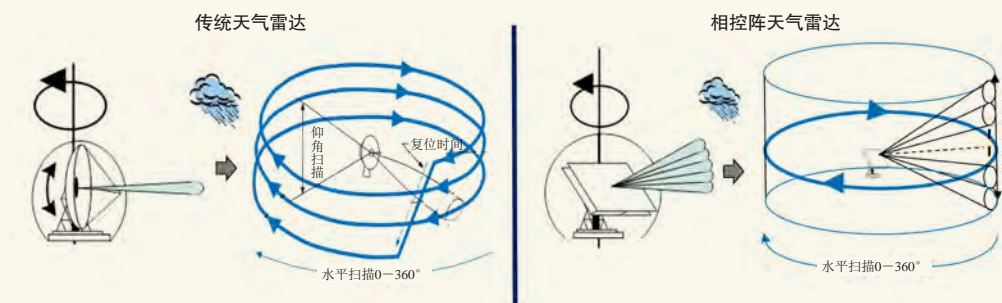


图3 传统天气雷达与相控阵雷达扫描方式对比

Fig. 3 Comparison of scanning modes between traditional weather radar and phased array radar

指向角度可以在 $-5^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 设置；垂直高度扫描模式下雷达方位角转到一个指定的方位角固定，然后波束的俯仰角随着电扫描的控制而改变，进行垂直扫描；扇形扫描模式下天线阵面在两个指定的方位角之间来回旋转，在俯仰方向进行电子扫描，该模式一般可用于对某个感兴趣的区域进行快速扫描；体扫模式下天线阵面在方位角上进行匀速旋转运动，天线在垂直方向进行电子扫描，可以看做是平面扫描模式的扩展，这也是相控阵雷达的默认工作模式。目前广州主要采用90 s完成一次体扫模式，扫描仰角从 $0.9^{\circ}\sim 20.7^{\circ}$ 仰角，共12层。

3.3 数据的传输和存储

由于相控阵天气雷达超高的时空分辨率，从而与传统天气雷达相比，拥有更大的数据吞吐量。例如，按照目前单台相控阵雷达单个体扫 360° ，扫描12层仰角计算，每台雷达至少需要20M bit/s的光纤传输能力。由前端网络传输而来的雷达基数据首先要在数据中心完成本地在线存储，五台雷达每天将产生约1T的数据量，一年将产生360 TB；存储基数据时，对基数据进行编码压缩处理，可将原有数据量降为原先的约1/6，则五台雷达每年所需数据量约为60 TB/a。若考虑双备份，则至少需要存储空间120 TB/a。对数据传输能力以及数据处理能力和数据存储空间都提出了极大的要求。因此，需要建立专门的相控阵雷达数据服务中心，包括高速数据传输线路、高性能海量数据处理计算机集群以及相关配套大空间存储器阵列等。

4 观测个例

4.1 层状云降水观测

2020年4月5日，布设在广州市气象局观测场的X波段相控阵雷达观测到了一次层状云降水过程。位于附近的SA雷达也观测到此次过程，两者相距约3.5 km，天线海拔差约120 m，可以近似认为两部雷达共点。通过两部雷达的对比观测，可以检验相控阵雷达观测数据的准确性。

图4为2020年4月5日17:48番禺相控阵雷达观测到的 8.1° 仰角的反射率、径向速度、差分反射率和相关系数产品，图5为广州S波段雷达观测的 6.0° 仰角的反射率、径向速度、差分反射率和相关系数产品。图像的显示距离均为42 km。从反射率看，两部雷达观测的回波分布、回波强度基本相当，主要介于 $5\sim 30$ dBZ，降水强度不大，与地面自动站录得的降水情况符合；区别主要表现在相控阵雷达空间分辨率高，观测的回波结构更加细腻，S波段雷达发射功率大，灵敏度高，观测的回波面积更大，能观测到更多的弱回波。从速度图看，两部雷达观测的径向速度值和零速度线基本一致，低层为东北风，中层为东南风，高层为西风。从偏振产品 Z_{DR} （差分反射率）和CC（相关系数）看，出现了清晰的环状回波，环状回波内的 Z_{DR} 值为2.5 dB左右，明显高于周围地区。环状回波内的CC值大多在0.92以下，明显低于周围地区。从附近的清远探空资料看，环状回波所在的高度与当天的 0° 层接近（都在3.8 km左右）。在零度层亮带内，存在大量的冰水转换过程，因此表现出较大的 Z_{DR} 和较小的CC。在零度层以下，基本由小雨滴构成，因此观测到的 Z_{DR} 接近于0，相关系数接近1。这些都说明相控阵雷达数据质量较好，能够反映出层状云降水的偏振特性。

4.2 强对流过程观测

X波段相控阵雷达相对传统雷达扫描速度更快，空间分辨率更高，因此更适用于快速变化的小尺度强对流天气系统的观测。2020年3月27日傍晚，位于南海的X波段相控阵雷达观测到一次强对流风暴快速合并增强，并出现局地小冰雹的天气过程。在这次过程中，相控阵雷达采用体扫模式，90 s完成12层的PPI扫描（ $0.9^{\circ}\sim 20.7^{\circ}$ ），方位和仰角的分辨率分别是 0.9° 和 1.8° 。图6给出了17:20—17:29时 4.5° 仰角的强度和径向速度的PPI产品图。从强度图看，17:20开始，多个分散的对流单体向靠近雷达站一侧移动，移动过程中发生了多个单体的合并，合并后回波强度明显增强，回波组织结构更严密，最终形成一条长15 km、宽5 km的线状对流。另外，在强回波的后侧，出现了明显的“V”型缺口，主要是由于强回波

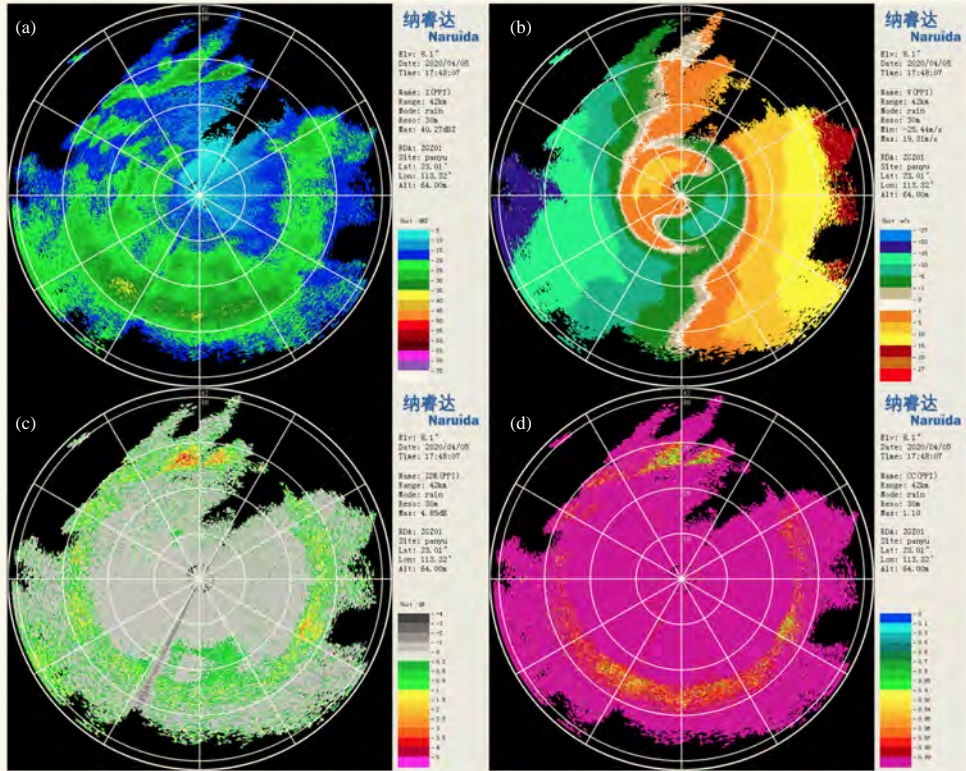


图4 番禺相控阵雷达观测的8.1°仰角的反射率 (a)、径向速度 (b)、差分反射率 (c) 和相关系数 (d)
 Fig. 4 Reflectivity (a), radial velocity (b), differential reflectivity (c) and correlation coefficient (d) of 8.1° elevation observed by Panyu phased array radar

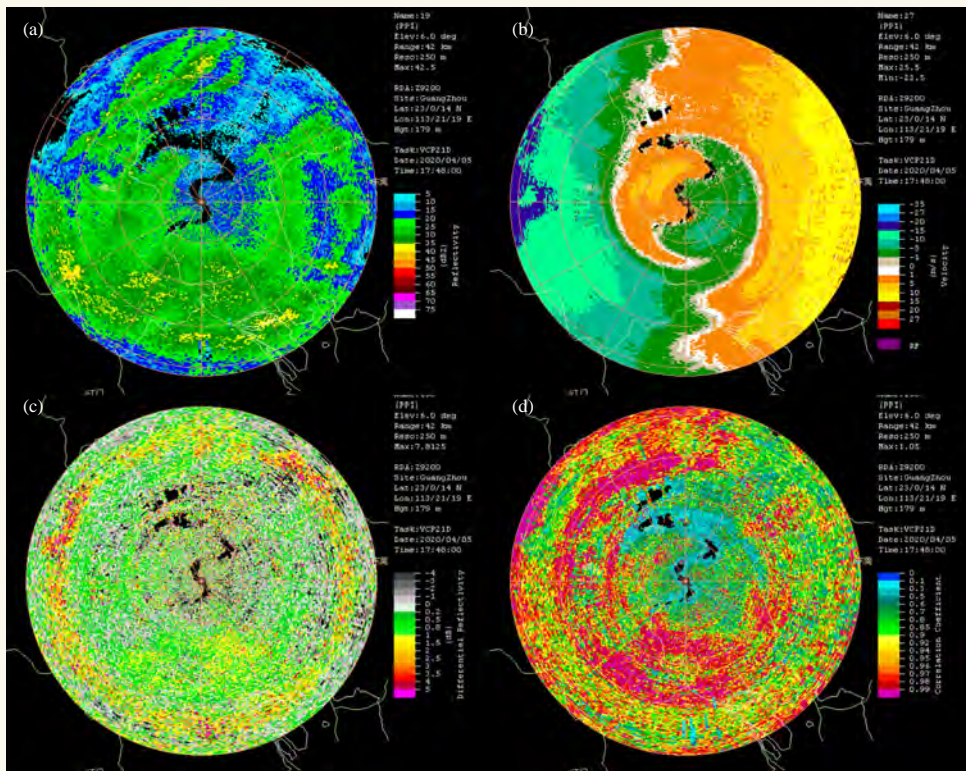


图5 广州S波段雷达6.0°仰角反射率 (a)、径向速度 (b)、差分反射率 (c) 和相关系数 (d) 产品
 Fig. 5 The reflectivity (a), radial velocity (b), differential reflectivity (c) and correlation coefficient (d) by Guangzhou S-band radar at 6.0°elevation

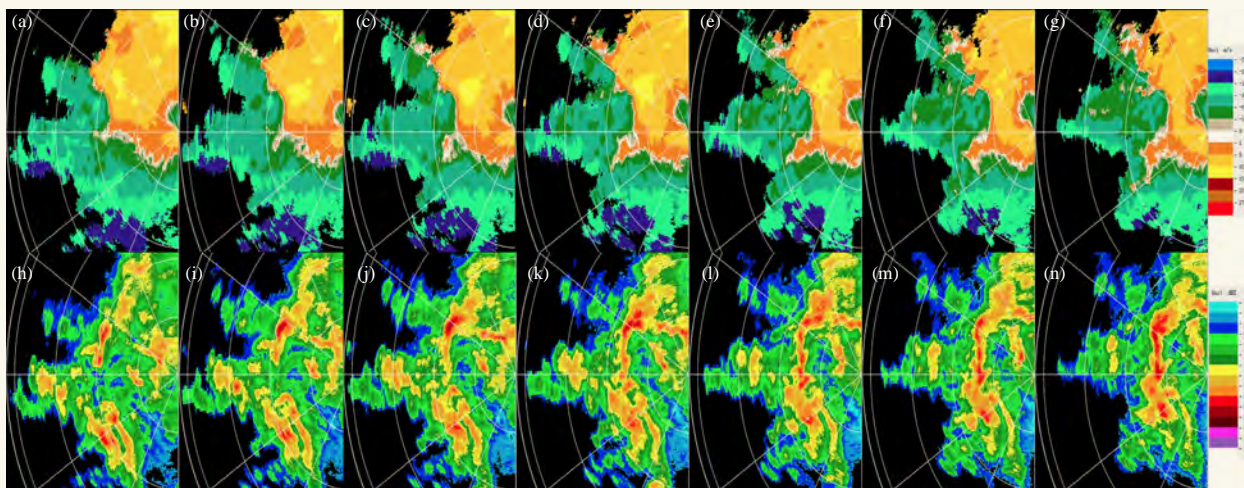


图6 2020年3月27日17:20—17:29南海相控阵雷达4.5°仰角反射率(a, b, c, d, e, f, g)和径向速度(h, i, j, k, l, m, n)演变
Fig. 6 Fig. 6 The reflectivity (a, b, c, d, e, f, g) and radial velocity (h, i, j, k, l, m, n) observed by Nanhai phased array radar at 4.5° elevation at 17:20–17:29 BT 27 March 2020

对雷达的显著衰减造成。从径向速度图上看，对流单体合并加强的过程中，风场上出现了明显的辐合，对流单体沿着辐合线发展、合并增强。整个合并演变过程仅十分钟，相控阵雷达精细的监测到了对流单体详细的演变过程，这对未来研究小尺度对流系统的发展演变提供非常大的帮助。

5 结论

相控阵天气雷达是技术更先进的大气探测设备，也是下一代天气雷达发展的重要方向。结合最新阵列技术和双偏振技术，能够高效准确监测中小尺度强对流天气，增强气象防灾减灾的手段和能力，有效降低气象灾害造成的人员伤亡和经济损失。本文介绍了广州双偏振相控阵雷达建设及初步应用情况，得到以下初步结论。

1) X波段相控阵雷达具有更高时空分辨率优势，扫描方式灵活，可以作为业务雷达补充，减少探测盲区，但是由于其探测距离短，受衰减影响大，需要多雷达组网建设。

2) 相控阵雷达扫描速度快，数据量更大，对数据传输能力、数据处理能力和数据存储空间都提出了更高的要求。

3) 相控阵雷达采用一体化设计，集成度高，运维简便，可实现无人值守运行。

4) 相控阵雷达观测数据可靠，能够清晰识别出融化层特征，能够精细监测强对流单体快速演变的过程，这对未来研究小尺度强对流系统的发展演变提供非常大的帮助。

本文是对广州相控阵雷达的观测试验情况的初步介绍，为了更好地发挥相控阵雷达在灾害性天气监测

预警中的应用潜力，未来还有很多的研究需要开展，如X相控阵雷达衰减订正问题、扫描策略问题、多部雷达的协同控制问题、多波束扫描问题等。另外，目前除广州外，佛山、珠海、江门、深圳等地都相继开展了X波段相控阵雷达的建设，根据《粤港澳大湾区气象发展规划（2020—2035）》，粤港澳大湾区将建设由40部相控阵雷达和其他天气雷达组成的高密度雷达试验网。

参考文献

- [1] 胡胜, 罗聪, 张羽, 等. 广东大冰雹风暴单体的多普勒天气雷达特征. 应用气象学报, 2015, 26(1): 57-65.
- [2] 傅佩玲, 胡东明, 张羽, 等. 2017年5月7日广州特大暴雨微物理特征及其触发维持机制分析. 气象, 44(4): 500-510.
- [3] 李彩玲, 黄先香, 蔡康龙, 等. 2019年中国龙卷等对流大风过程及灾情特征. 气象科技进展, 2020, 10(1): 7-14.
- [4] David J, McLaughlin D. Distributed Collaborative Adaptive Sensing (DCAS) for improved detection, understanding, and prediction of atmospheric hazards. IOAS-AOLS San Diego, CA, AMS, 2005.
- [5] Junyent F, Chandrasekar V, McLaughlin D, et al. The CASA integrated project 1 networked radar system. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2010, 27(1): 61-78.
- [6] 李思腾, 陈洪滨, 马舒庆, 等. 网络化天气雷达协同自适应观测技术的实现. 气象科技, 2016, 44(4): 517-527.
- [7] 马舒庆, 陈洪滨, 王国荣, 等. 阵列天气雷达设计与初步实现. 应用气象学报, 2019, 30(1): 1-12.
- [8] Weber M E, Cho J Y N, Herd J S, et al. The next-generation multimission U.S. surveillance radar network. Bulletin of the American Meteorological Society, 2007, 88: 1739-1752.
- [9] Bluestein H B, French M M, Popstefanija I, et al. A mobile, phased-array doppler radar for the study of severe convective storms. Bulletin of the American Meteorological Society, 2010, 91: 579-600.
- [10] 刘黎平, 胡志群, 吴翀, 等. 双线偏振雷达和相控阵天气雷达技术的发展和运用. 气象科技进展, 2016, 6(3): 28-33.
- [11] 吴翀, 刘黎平, 张志强. S波段相控阵天气雷达与新一代多普勒天气雷达定量对比方法及其初步应用. 气象学报, 2014, 72(2): 390-401.
- [12] 刘黎平, 吴林林, 吴翀, 等. X波段相控阵天气雷达对流过程观测外场试验及初步结果分析. 大气科学, 2014, 38(6): 1079-1094.
- [13] 程文慧, 傅佩玲, 胡东明, 等. 广州相控阵天气雷达组网方案设计及其观测试验. 气象, 2020, 46(6): 823-836.

佛山强降水与微压计滑动离散功率谱前置信号关联分析

张晶晶 李兆明 黄先香

(广东省佛山市龙卷风研究中心, 佛山 528000)

摘要: 通过对佛山微压计站收集的气压数据进行滑动离散功率谱处理, 以3 h作为窗口, 每分钟进行一次功率谱分析, 分解出2~90 min信号, 对后续强降水过程进行关联分析, 得到如下结论: 微压计滑动离散功率谱前置信号出现在强降水发生前大概1 h左右的时间, 并且伴随降水增强; 风场和气压场信号对强降水没有提前预警信号出现, 只在降水过程中可能出现响应; 重力波信号提前量在不同强降水过程中不尽相同, 在研究时段内, 对70%以上的降水过程有0.5 h的信号超前预警, 50%的强降水能在发生1 h之前获取重力波信号; 微压计滑动离散功率谱前置信号可以作为短时强对流的预警信号之一, 后续可以考虑把信号系统化, 或加入到气象模型中。

关键词: 滑动离散功率谱, 微压计, 强降水

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.06.015

The Analysis Between Foshan Heavy Precipitation and Pre-Signal of Sliding Discrete Power Spectrum on Micromanometer

Zhang Jingjing, Li Zhaoming, Huang Xianxiang

(Foshan Tornado Research Center, Foshan 528000)

Abstract: Using the sliding discrete power spectrum processing of the atmospheric pressure data collected by Foshan micro pressure meter station, taking 3 hours as the window, we decomposed the 2-90 min signal. The correlation analysis was carried out for the follow-up heavy rainfall process. The results show that the micro barometer sliding discrete power spectrum pre signal occurred about 1 hour before the occurrence of heavy rainfall, and was accompanied by the rainfall enhancement. The signals of wind and pressure field had no early warning signal for heavy rainfall, but only had possible response when the precipitation was in progress. For more than 70% of heavy precipitation processes, the signals can be forewarned for 0.5 h, and 50% can be ahead of 1 h. The front signal of micro barometer sliding discrete power spectrum can be used as one of the early warning signals of short-term severe convection In the future, and the signal would be systematized or added to the meteorological models.

Keywords: dynamic spectrum analysis, micro piezometer, heavy precipitation

0 引言

大气重力波与强对流天气关系密切, 并受到气象工作者的重视与关注。重力波不仅仅是天气过程的产物, 天气尺度过程中产生的重力波可以激发中尺度强对流过程^[1-4]。Hung^[5-6]发现美国中部陆龙卷在接地前1~2 h有周期为10~20 min的电离层重力波激发。Koch^[7]指出高空急流区下方切变不稳定气层产生的重力波对强对流的激发有影响, 同时急流中的垂直切变也是重力波的能量源。Curry等^[8]在英国伦敦使用3个连网的微压计进行大气重力波观测, 发现在雷暴过程

中有重力波产生, 并观测到大气重力波在超过数百千米的远距离中传播。由此可见, 大气重力波对龙卷及强对流天气的预报预警能起到重要作用。

由于一般天气情况下, 大气重力波的振幅都在0.1 hPa以下, 而强对流过程只在对流发展到极盛时才产生常规气压仪器可测出的压力波动。因次, 对重力波的研究受到传感仪器灵敏度的限制。一直以来, 由于缺乏重力波数据, 重力波与强对流天气关系的相关研究较少且不够深入。

20世纪90年代, 李启泰等^[9-10]使用高灵敏度的电容式微压波传感器, 将3个探头布置成三角形阵列, 根据同一波阵面到达各阵点(探头)的时间差及各阵点参数计算出重力波的来向及水平波速、波长并计算

收稿日期: 2020年7月31日; 修回日期: 2020年10月14日
第一作者: 张晶晶(1990—), Email: 786104448@qq.com

出了重力波的振幅和周期，独创了重力波观测系统，应用于冰雹过程的预警中，并取得很好效果。赵彩等^[11]利用重力波观测资料统计分析了贵州大气重力波的季节特征，发现其具有明显的季节性，且对冷空气活动和雷暴活动有很强的联系。覃卫坚等^[12]研究了冰雹发生前后的重力波活动特征。

要有效的监测重力波，必须要具有超灵敏度的气压监测系统。2016年起，为加强针对龙卷及强对流天气的监测，佛山布设微压计并陆续投入使用，目前已有7台微压计投入使用，利用这些微压计资料，本文分析了重力波与强对流天气的关系。

1 资料与方法

利用佛山市布设的微压计单站数据，结合同期气象资料，对佛山2018—2020年强降水过程对应时段的重力波特征进行分析。该微压计分辨率为1 Pa，采样频率为1次/s，数据时间为2018年1月—2020年5月，共29个月。利用连续大气重力波动态普资料，约24480 h（每分钟一次重力波周期—振幅）。将气压数据进行标准化处理，每3 h计算一次平均的周期—振幅谱（采样周期6 s，每分钟进行一次不同波周期（2~90 min）的傅里叶分析，计算出在该时间到达的重力波振幅和周期，每分钟计算一条波周期—振幅谱线，经过连续运算得到大气重力波的动态谱。

通过微压计滑动功率谱对，其中大型的天气过程与具体生成的过程存在异同。通过举例分析下面过程中情况，对强降水与微压计功率谱信号进行关联分析。

2 强降水过程与其对应重力波功率谱个例分析

2.1 2020年冷空气混合降水过程分析

以2020年2月15日强降水过程为例（图1），此次主要降水过程从2020年2月15日01时（北京时，下同）开始，在次日07时左右结束，全天各时间段都

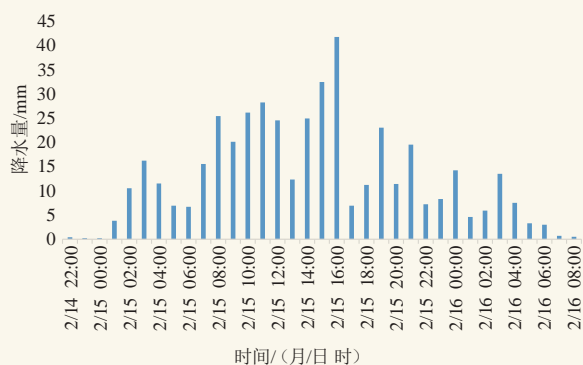


图1 2020年2月15日最大小时累计降水量分布
Fig. 1 The maximum accumulated precipitation on 29 February 2019

有较大降水量，其中15日15—16时出现时雨量大于30 mm的短时强降水。此次降水过程为锋面降水，其中由于有冷空气补充，降水过程明显，尤其在后续冷空气到达后，降水明显增强。

从最大气压变化（图2）可以看到，气压在降水开始前和降水出现的时维持较为稳定的日周期波动，后续冷空气过境后气压一直上升，没有出现气压在降水前明显的前置信号。最大10 min风速分布（图2）中也可以看出，在降水开始前同样并没有明显的风速上升或者下降，只在2月15日03时出现较弱的风速增幅，风速激增伴随着进一步的降水生成，但风速的变化同样没有提前预警降水的生成。

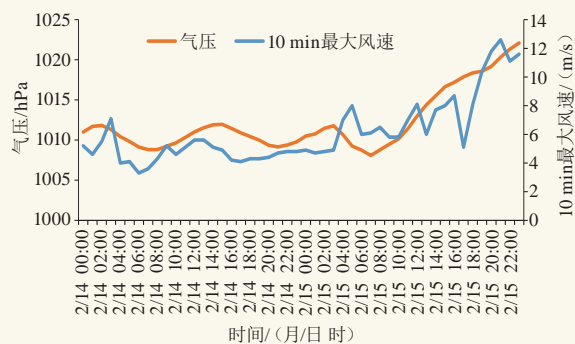


图2 2020年2月14—15日小时最大气压变化情况和最大10 min风速分布

Fig. 2 Variation of hourly maximum pressure and Distribution of maximum 10 minutes wind speed from 14 to 15 February 2020

对微压计单站取得的气压数据进行标准化处理，使用功率谱为3 h滑动平均。图3为摘选15~30 min周期的滑动功率谱分析，窗口为3 h。从图中可以看出，25~30 min周期波动对本次过程有较好的提前相应作用：从2月15日22—23时开始，25~30 min周期的振幅明显加强，对强降水过程有约2~3 h的提前预警可能性。在后续强烈降水出现前，波动持续保持在较高的

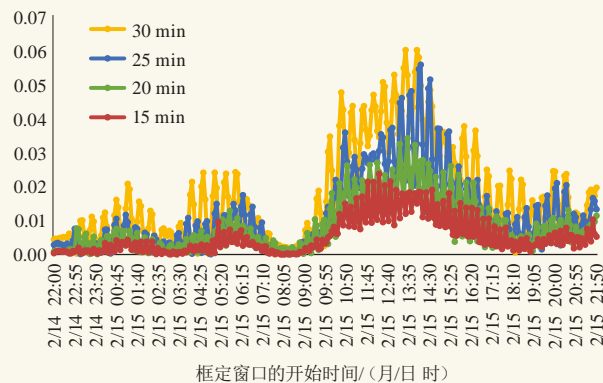


图3 2020年2月14—15日滑动功率谱振幅分布
Fig. 3 Amplitude distribution of sliding power spectrum from 14 to 15 February 2020

振幅,对15日15—16时,出现超过30 mm/h的短时强降雨,也有明显的信号提前量且振幅波动尤为剧烈。由于冷空气比降水先到达站点,对于这次冷锋过程,25~30 min的微压计气压频率波动出现了2~3 h提前相应。重力波在天气系统到来前先出现,故可以通过捕捉异常波动,对后续天气过程进行预估,而原来的气压和风速原始数据较难发现此类天气过程的提前响应。

2.2 2019年夏季短时强降雨过程分析

以2019年7月29日凌晨开始的短时强降雨为例(图4),降水开始时间为29日03时,降水时间主要集中在03—20时,时雨量存在两次波峰,即有两次短时强降雨过程,峰值达到45 mm/h以上。同样,在图5中可以看到:气压和风速不存在明显的前置信号,且风速在时雨量第2个峰值处才出现强度响应。

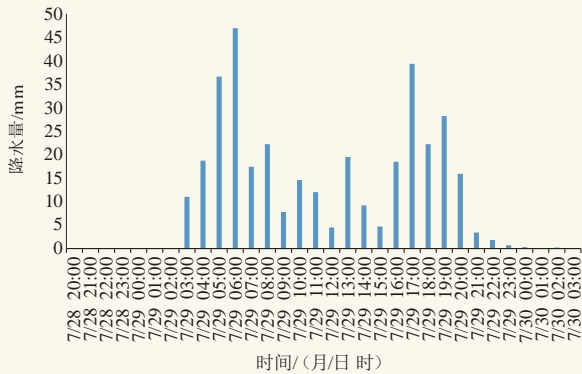


图4 2019年7月29日最大小时累计降水量分布

Fig.4 The maximum accumulated precipitation on 29 July 2019

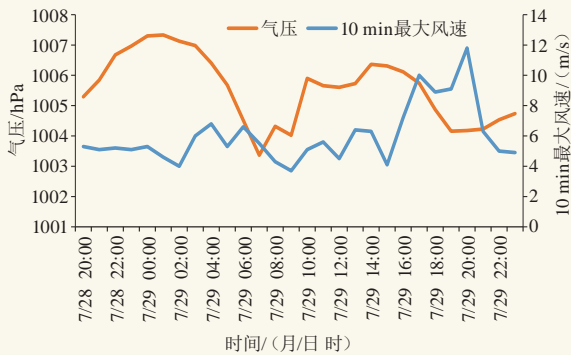


图5 2019年7月28—29日小时最大气压变化情况与最大10 min风速分布

Fig. 5 Variation of hourly maximum pressure and distribution of maximum 10 minutes wind speed from 28 to 29 July 2020

而从图6可以看到:在29日00时窗口的时间中,气压开始出现较强的25~30 min周期波动,对本次降水过程有2~3 h左右的提前效应,而在后续波动最强出现在04时左右,一小时后降水出现时雨量大于30

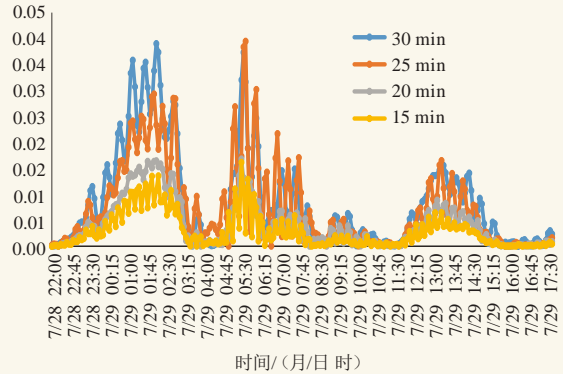


图6 2019年7月28—29日滑动功率谱振幅分布

Fig. 6 Amplitude distribution of sliding power spectrum from 28 to 29 July 2020

mm的降水,存在1 h左右的信号超前。图5未提及重力波信号提前量,图6的重力波信号提前量为3 h左右,凌晨前后功率谱增大,3 h后出现降水。

2.3 强降雨与波动前置关系分析

经统计,在无降水时间段,30 min周期的波动振幅主要在0.15强度以下,故选取0.15作为临界,将30 min波动振幅在0.15强度以上的过程定义为较强波动。通过对强降雨最大降水时间点前寻找降水开始时间,同时在强降雨时间点往前推找到微压计中25~30 min周期的较强波动开始出现的时间点,通过两个时间点进行相减得到下列出现强降雨时间点与两者时间差的关系(图7),在不同强降雨过程中,前置时间大多不一样。从图8中可以看到70%以上降水过程能有0.5 h的微压计功率谱信号超前预警,50%过程能在1 h之前出现功率谱信号提前。重力波信号出现的时间早于强降雨天气过程,可以通过对重力波功率谱信号异常波动捕捉,对后续天气过程进行预估。强降雨发生时段和气压下降时段一致,均为04—06时,气压对降水有明显的提前量信号,最大风速则是在降

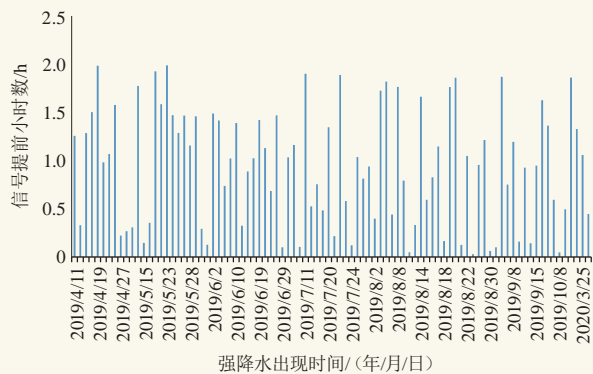


图7 强降雨出现时间与信号提前小时数分布

Fig.7 Distribution of occurrence time of heavy precipitation and signal advance

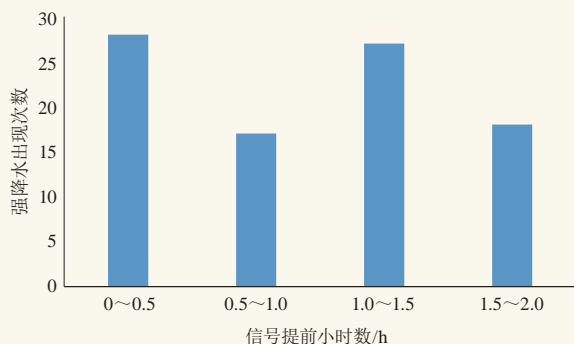


图8 信号提前小时数统计
Fig. 8 Statistics of signal advance hours

水后出现, 同样对降水没有提前预警信号。

3 结论

1) 强降水发生前往往能探测到微压计滑动离散功率谱前置信号, 伴随信号增强雨强也可能随之增大。

2) 风场和气压场信号对强降水没有提前预警信号出现, 只在降水正在进行中出现可能响应。

3) 微压计功率谱的信号提前在不同强降水过程中不尽相同, 70%以上降水过程能有0.5 h的微压计功率谱信号超前预警, 50%过程能在1 h之前出现功率谱

(上接79页)

卷是由台风或强台风引发的, 龙卷发生时台风中心距离龙卷发生地约200~400 km; 海南岛南部西行的台风引发的龙卷出现在东部沿海, 中部西行的台风引发的龙卷出现在北部沿海, 东部西北行的台风龙卷出现在北部沿海。

2) 非热带气旋龙卷主要出现在春季, 其中以5月最为多发, 超过90%的非热带气旋龙卷发生在13—17时; 海风锋引发的龙卷落区位于海南岛北部地区, 最强可达EF2级, 边界层中 β 尺度海风锋辐合线是这类龙卷发生、发展的关键因素; 干冷空气引发的龙卷落区位于海南岛北部和东部地区, 约23%为EF1级, 其余77%为EF0级, 边界层切变线是这类龙卷发生、发展的关键因素。

另外, 目前海南还没有对水龙卷进行过详细分析, 有待于今后进一步研究。

参考文献

- [1] 黄先香, 炎利军, 王硕甫, 等. 1822号“山竹”台风龙卷过程观测与预警分析. 热带气象学报, 2019, 35(4): 458-469.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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

信号提前。

4) 微压计滑动离散功率谱前置信号可以作为短时强对流的预警信号之一, 后续可以考虑把信号系统化, 或加入到气象模型中。

参考文献

- [1] Hines C O. Gravity waves in the atmosphere. Nature, 1972, 239: 73-78.
- [2] Nagpal O P. The sources of atmospheric gravity waves. Contemp Phys, 1979, 20(6): 593-609.
- [3] 丁一汇. 高等天气学. 北京: 气象出版社, 1991.
- [4] 李麦村. 重力波对特大暴雨的触发作用. 大气科学, 1978, 2(3): 201-209.
- [5] Hung R J. Ray tracing of gravity waves as a possible warning system for tornado storms and hurricane. J Appl Meteor, 1978, 17: 3-11.
- [6] Hung R J. Case studies for gravity wave associated with isolated tornadic storms on 13 January 1976. J Appl Meteor, 1979, 18: 460-466.
- [7] Koch S E. Observed interaction between strong convection and internal gravity waves. Preprints at the 14th Conference on Severe Local Storms, 1985.
- [8] Curry M J, Murty R C. Thunderstorm-generated gravity waves. J Atmos Sci, 1974, 31: 1402-1408.
- [9] 李启泰, 李诗明, 赵彩. 大气重力波布阵探测灾害性冰雹过程的研究. 贵州地质, 2001, 18(2): 73-78.
- [10] 李启泰, 谢金来, 杨训仁. 灾害性冰雹过程的重力波演变特征. 气象学报, 1993, 51(3): 361-367.
- [11] 赵彩, 田英, 周涛. 贵州中部大气重力波活动的天气气候学分析. 高原气象, 1998, 17(4): 420-426.
- [12] 覃卫坚, 寿绍文, 高守亭, 等. 一次冰雹过程的惯性重力波观测及数值模拟. 地球物理学报, 2010, 53(5): 1039-1049.

研究. 高原气象, 2009, 28(3): 617-625.

- [6] 张晰莹, 吴迎旭, 张礼宝. 利用卫星、雷达资料分析龙卷发生的环境条件. 气象, 2013, 39(6): 728-737.
- [7] 王宁, 王婷婷, 张硕, 等. 东北冷涡背景下一次龙卷过程的观测分析. 应用气象学报, 2014, 25(4): 463-469.
- [8] 陶祖钰, 赵翠光, 陈敏. 谈谈统计预报的必要性. 气象科技进展, 2016, 6(1): 6-13.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 黄先香, 俞小鼎, 炎利军, 等. 珠江三角洲台风龙卷的活动特征及环境条件分析. 气象, 2019, 45(6): 777-790.
- [12] 范雯杰, 俞小鼎. 中国龙卷的时空分布特征. 气象, 2015, 41(7): 793-805.
- [13] 魏文秀, 赵亚民. 中国龙卷风的若干特征. 气象, 1995, 21(5): 36-40.
- [14] 吴俞, 薛湛彬, 郝丽清, 等. 强台风“山神”外围超级单体引发的龙卷分析. 热带气象学报, 2015, 31(2): 213-222.
- [15] 郑艳, 俞小鼎, 任福民, 等. 海南一次超级单体引发的强烈龙卷过程观测分析. 气象, 2017, 43(6): 675-685.
- [16] 符式红, 王秀明, 俞小鼎. 相似环流背景下海南两次不同类型强对流天气对比研究. 气象学报, 2018, 76(5): 742-754.
- [17] 王秀明, 俞小鼎. 热带一次致灾龙卷形成物理过程研究. 气象学报, 2019, 77(3): 387-404.
- [18] 黄先香, 炎利军, 蔡康龙, 等. 2018年中国龙卷活动特征. 气象科技进展, 2019, 9(1): 51-55.
- [19] 李彩玲, 黄先香, 蔡康龙, 等. 2019年中国龙卷等对流大风过程及灾情特征. 气象科技进展, 2020, 10(1): 8-14.
- [20] 白兰强, 孟智勇, Sueki K, 等. 中国热带气旋龙卷的气候统计特征(2006-2018). 中国科学: 地球科学, 2020, 50(5): 619-634.
- [21] 陈元昭, 俞小鼎, 陈训来, 等. 2015年5月华南一次龙卷过程观测分析. 应用气象学报, 2016, 27(3): 334-341.
- [22] 杨伟, 方阳, 蒋帅, 等. 2017年8月13日洞庭湖水龙卷特征. 应用气象学报, 2020, 31(3): 328-338.

网络媒体信息在海南8.29龙卷灾情调查中的应用分析

褚红星¹ 李兆明² 麦文强¹ 杨云茜¹

(1 广东省佛山市气象局/佛山市突发预警事件发布中心, 佛山 528000;

2 广东省佛山市气象局/佛山市龙卷风研究中心, 佛山 528000)

摘要: 搜集2019年8月29日海南龙卷发生后多家媒体机构及网站报道, 结合龙卷发生前后的气象资料, 确定了龙卷发生的影响范围和受灾情况。通过对比网络媒体信息与现场灾情调查的龙卷影响范围和受灾情况, 网络媒体信息主要反映受灾严重的区域, 通过受灾现场的灾情指示物受损情况的判断分析, 网络媒体信息能够准确地预估出龙卷强度级别。综合网络媒体信息能够为后续的现场灾情调查提供准确的信息, 具有重要的参考价值。

关键词: 网络媒体, 龙卷信息, 影响范围, 受灾情况

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.06.016

Comparative Analysis of Influencing Zone and Disaster Condition of Tornado Based on Media Information and Disaster Investigation

Chu Hongxing¹, Li Zhaoming², Mai Wenqiang¹, Yang Yunqian¹

(1 Foshan Meteorological Service, Foshan Emergency Early Warning Release Center, Foshan 528000

2 Foshan Meteorological Service, Foshan Tornado Research Center, Foshan 528000)

Abstract: Reports of Hainan tornado occurred on 29 August 2019 from various media agencies and websites were collected. Based on these reports and the meteorological data before and after the tornado, the influencing zones and disaster conditions of the tornado were determined. By comparing the influencing zone and disaster condition of the tornado from disaster investigation, the media information was mainly concentrated on the severely affected areas. From damage degree of indicators, the strength level of the tornado can be accurately estimated by online media. In summary, the media information can provide more accurate information for the subsequent disaster investigation and can be taken as an important reference.

Keywords: internet media, tornado information, influencing zone, disaster condition

0 引言

龙卷是对流风暴中产生的最猛烈的天气现象, 常与冰雹、强降水等强对流系统同时出现。龙卷虽然是小概率灾害性极端天气事件, 但是其突发性强, 时空尺度小, 能够在短时间内造成极大的破坏。因此, 龙卷的监测预警是世界性难题。龙卷个例的搜集与整理是龙卷研究工作的重要组成部分, 很多国家建立了龙卷风数据库, 美国国家气候数据中心 (NCDC) 和风暴预测中心 (SPC) 共同建立了国家级龙卷风数据库, 涵盖了美国1950年至今的龙卷风数据^[1]。欧洲强风暴实验室 (ESSL) 于2006年建立了欧洲强天气数据

库 (ESWD)^[2]。中国气象局国家气候中心于2008年开始建立中国龙卷风灾情普查数据库, 截止目前收集整理了1984年以来的中国龙卷风灾情。范雯杰等^[3]对1961—2010年中国EF2或以上强龙卷及2004—2013年中国EF1或以上龙卷的时空分布、发生频次和灾害特征进行了统计分析。黄大鹏等^[4]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年中国龙卷风发生频次及其灾情进行了统计分析。龙雅琼等^[5]利用1981—2017年冰雹灾情信息资料分析了北京地区发生冰雹的年代际变化、年变化以及空间分布特征。刘丽华^[6]基于情感分析和主题建模建立了分析自然灾害微博舆情的社会计算模型, 选取了2016年武汉水灾、江苏盐城6.23龙卷等自然灾害事件进行了应用研究。龙卷等强对流天气过程的影响范围与受灾情况主要通过灾情调查进行确定, 灾情调查时主要通过

收稿日期: 2020年7月20日; 修回日期: 2020年8月13日
第一作者: 褚红星 (1986—), Email: chuhongxing52@163.com
资助信息: 广东省气象局科学技术研究项目 (GRMC2017M31)

无人机航拍、现场走访、收集灾情相关的视频等方式获取龙卷影响范围的重要信息。孟智勇等^[7]通过对北京7.21暴雨过程进行灾情调查,发现狭长的受灾路径及辅合状的树木倒伏等龙卷特征。郑永光等^[8]分析了2015年“东方之星”翻沉事件和2016年阜宁EF4级龙卷灾情。李彩玲等^[9]总结了2019年中国龙卷等对流大风过程及灾情特征。张涛等^[10]对2019年7月3日辽宁开原龙卷灾害现场调查,得出此次龙卷的生命史、发生时间、路径、灾害宽度和强度分布。

现代通信技术与社交媒体的快速发展,使得龙卷等气象灾害信息通过电视媒体、网站、移动新媒体等不同媒体迅速传播,也为龙卷的监测预警及灾情调查提供更为及时有效的信息,但是这方面的研究还没有开展。本文选取2019年8月29日海南儋州龙卷个例,通过收集与龙卷有关的网络媒体及气象资料,大致描述龙卷影响范围及受灾情况,与实地灾情调查后的分

析结果相比较,探讨通过网络媒体信息收集龙卷的可能性。

1 资料与方法

1.1 资料来源

2019年8月29日04时(北京时,下同)左右海南儋州龙卷发生后,央视新闻、人民网、网易新闻和澎湃新闻等多家媒体机构及网站采用专题的方式对此次龙卷灾情进行报道。对媒体机构发布的信息按照龙卷信息的时间顺序进行详细的收集整理,包括龙卷信息发布时间、龙卷信息来源、龙卷发生时间、龙卷发生地点、受灾情况、预估龙卷灾情等级、是否有对应的图片或视频等(表1)。同时,收集了龙卷发生前后的气象资料,包括海南省单站雷达图、海南省气象部门发布的预警信息等,对龙卷的影响范围的甄别提供参考信息。

表1 网络媒体发布的龙卷信息汇总
Table 1 Summary information of tornado released by media

媒体	网络发布时间	龙卷发生时间	龙卷发生地点	受灾情况	预估强度	受灾图片与视频
网易新闻 海南日报	2019-08-29 09: 59	8月29日凌晨	儋州市那大镇海拓香洲工地	大量树木倒塌、铁皮房掀倒、电线杆断倒、路灯倾倒,造成8人死亡1人重伤人员伤亡等	强度达到三级 (国际标准EF2级)	图片
澎湃 海南日报客户端	2019-08-29 10: 13	8月29日凌晨	儋州市那大镇	大量树木倒塌、铁皮房掀倒、电线杆断倒、路灯倾倒、人员伤亡等气象灾害。造成7人死亡1人重伤	强度达到三级 (国际标准EF2级)	无
新浪 海南日报客户端	2019-08-29 10: 13	8月29日凌晨	儋州市那大镇	大量树木倒塌、铁皮房掀倒、电线杆断倒、路灯倾倒、人员伤亡等气象灾害。造成7人死亡1人重伤	强度达到三级 (国际标准EF2级)	无
海南日报客户端	2019-08-29 10: 24	8月29日04时左右	儋州市那大镇中兴大街与工业路交叉口,海拓香洲及相邻工地	树木倒塌、铁皮房掀倒、电线杆断倒、路灯倾倒等特征,造成8人死亡1人重伤人员伤亡	龙卷强度为三级 (国际标准EF2级)	图片
中新网	2019-08-29 11: 04	8月29日04时左右	儋州市那大镇中兴大街与工业路交叉口,海拓香洲及相邻工地	树木倒塌、铁皮房掀倒、电线杆断倒、路灯倾倒等特征,造成8人死亡1人重伤人员伤亡	龙卷强度为三级 (国际标准EF2级)	图片
新京报我们视频	2019-08-29 11: 18	8月29日	海南儋州那大镇海拓香洲工地及相邻工地	大量树木倒塌,工人宿舍倒塌。宿舍倒塌已致7人死亡、1人重伤、1人轻伤。相邻工地因工棚倒塌死亡1人。截至目前共有8人死亡	突发三级龙卷风	视频
中国天气网	2019-08-29 11: 28	8月29日凌晨	海南儋州市市区中兴大街与工业路交叉口附近区域	两处工地宿舍发生倒塌,造成8人遇难,2人受伤,还造成附近多处房屋和供电线路受损,一些树木被刮倒	三级强龙卷	图片,龙卷统计,防灾指引
央视新闻V	2019-08-29 11: 29	8月29日03: 30左右	海南儋州	两处工地宿舍发生倒塌,造成8人遇难,2人受伤,还造成附近多处房屋和供电线路受损,树木被刮倒	无	图片
澎湃新闻V	2019-08-29 11: 38	8月29日03: 30左右	海南儋州市市区中兴大街与工业路交叉口附近区域	两处工地宿舍发生倒塌,造成8人遇难,两人受伤,附近多处房屋和供电线路受损,一些树木被刮倒	强度达到三级	视频
人民网V	2019-08-29 11: 45	8月29日凌晨	海南儋州	造成8人死亡,2人受伤。龙卷风还造成附近多处房屋和供电线路受损,一些树木被刮倒	突发三级龙卷风	
新华网	2019-08-29 14: 35	8月29日04时左右	海南省儋州市那大镇	目前已造成8人死亡	无	图片
中国气象数据网V	2019-08-29 17: 58	8月29日03: 30左右	海南儋州市市区中兴大街与工业路交叉口附近区域	两处工地宿舍发生倒塌,造成8人遇难,两人受伤	强度达到三级	
人民日报V	2019-08-29 20: 02	8月29日04时左右	海南省儋州市那大镇	目前已造成8人死亡	无	图片

从2019年8月29日04:04 (a、b)与04:09 (c、d)海口SA雷达0.5°仰角反射率因子、径向速度图以及中气旋位置(红色圆圈)可以看出,可以看出,强回波中心位于儋州市,强度从2019年8月29日04:04 (a、b)

与04:09 (c、d)海口SA雷达0.5°仰角反射率因子,径向速度图以及中气旋位置(红色圆圈)可以看出,在50 dBZ以上,部分区域强度超过60 dBZ,与龙卷发生地点相吻合。

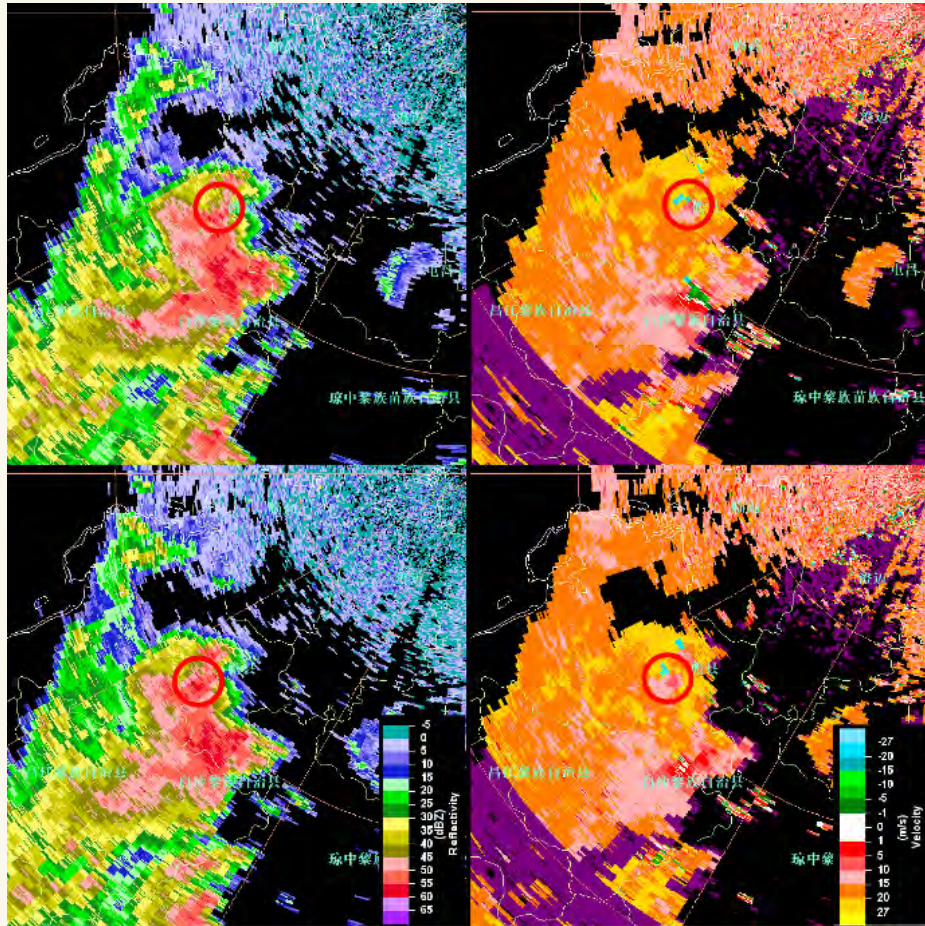


图1 2019年8月29日04:04与04:09海口SA雷达0.5°仰角反射率因子 (a、b, 单位: dBZ) 和径向速度图 (c、d, 单位: $m \cdot s^{-1}$) (红色圆圈为中气旋位置)

Fig. 1 The reflectivity (unit: dBZ) and radial velocity (unit: $m \cdot s^{-1}$) of 0.5°elevation by Haikou SA radar at 04:04 (a, b) and 04:09 (c, d) on 29 Aug 2019 (Red circles are the location of mesocyclone)

海南省气象台预计2019年8月28日“杨柳”将以35 km/h左右的速度向西偏北方向移动,强度逐渐增强,最强可达强热带风暴级(10级, 25~28 m/s),向海南岛东南部沿海靠近,并可能于29日下午到夜间在琼海到三亚一带沿海登陆(9~10级, 23~28 m/s),也有可能掠过海南岛南部海面,然后趋向越南北部沿海。台风为龙卷的发生发展提供了足够的能量、充足的水汽条件和有利的动力抬升条件。

1.2 灾情信息处理方法

根据收集的网络媒体信息中提到的位置信息,包括受灾区域、受灾视频或者图片中地点等,在Google地图上标识,根据受灾图片结合EF等级确定受灾范围及等级,然后结合气象资料对标识的区域进行甄

别。对于不同的网络媒体提到的受灾点位置信息,如果是相同的受灾点,则按原来的范围;如果是不同的受灾点,则在Google地图上进行标识。

2 基于网络媒体的龙卷影响范围及受灾情况

按照上述方法,分析了2019年8月29日海南儋州龙卷的影响范围及受灾情况(图2),可以看出,网络媒体提到的龙卷受灾范围主要集中在儋州市那大镇中兴大街与工业路交叉口(图2中的a区域)和海拓香洲及相邻工地(图2中的b区域),造成的受灾情况包括:大量树木倒伏、铁皮房掀倒、电线杆折断、路灯倾倒,8人死亡、2人受伤等。通过分析受灾情况,初步确定龙卷等级为行标三级(EF2)。



图2 网络媒体信息反映的海南儋州龙卷的受灾区域 (Google地图)
Fig. 2 Influencing zone of tornado in Danzhou from media information



图3 海南儋州龙卷风路径及受灾范围
Fig. 3 Tornado path and influencing zone by disaster investigation in Danzhou



图4 海南屯昌县龙卷风路径及受灾范围
Fig. 4 Tornado path and influencing zone by disaster investigation in Tunchang County

3 龙卷灾情实地调查情况

此次龙卷发生后,通过察看受灾现场破坏程度、走访龙卷风目击者、多渠道获取视频照片资料等方式,确认此次龙卷风随对流云团从东北向西南方向移动,主要影响儋州市与屯昌县。经实地调查和分析,并对受灾现场的灾情指示物(树木、铁皮厂房及电线杆等)受损情况的判断分析,认定儋州市龙卷破坏程度相当于行标三级(EF2级),图3为经过现场勘查确认的龙卷风行进轨迹及其影响范围,其中龙卷路径长度约5 km,最宽位置约400 m。屯昌县龙卷破坏程度相当于EF2级,图4为经过现场勘查确认的龙卷风行进轨迹及其影响范围,其中龙卷路径长度约9 km,最宽位置约150 m。

4 对比分析

海南儋州龙卷发生约6 h后,央视新闻、人民日报、人民网、新华网、中新网、中国天气网、中国气象数据网、海南日报、新京报、网易新闻和澎湃新闻等多家媒体机构及网站采用专题的方式陆续对此次龙卷灾情进行报道,及时传递灾情信息。报道中通过视频、图片等方式详实地记录了主要受灾区域及受灾情况,特别是中国天气网总结了海南龙卷发生特点及龙卷防御指引,增加了大众对龙卷的了解,有效地进行气象科普宣传。

与现场灾情调查后的受灾范围相比,网络媒体报道主要集中在受灾严重的区域。经实地调查和初步分析,至少发生两次龙卷过程,分别在屯昌县和儋州市,其中儋州市龙卷路径长度约5 km,影响范围最宽位置约400 m;屯昌县龙卷路径长度约9 km,最宽位置约150 m。网络媒体报道主要集中在儋州市那大镇中兴大街与工业路交叉口,海拓香洲及相邻工地,这些地方的铁皮厂房被吹倒,也造成了人员伤亡。

通过对现场灾情指示物的搜集,并对受灾现场的灾情指示物受损情况的判断分析,认定儋州市龙卷主要造成工地宿舍倒塌,铁皮厂房顶被撕碎,电线杆被吹倒,树木被刮倒,铁片被刮起并镶嵌在树干上等,破坏程度相当于行标三级(EF2级),屯昌县龙卷主

要造成树木的倒伏,部分树木折断,破坏程度相当于行标三级(EF2级)。根据网络媒体的信息,可以对此次龙卷强度做出较为准确的估计。

5 结论与讨论

网络媒体信息能够及时报道龙卷发生情况,央视新闻、人民网、网易新闻和澎湃新闻等主流媒体以及地方性媒体都对此次龙卷进行了报道,传播迅速且范围广。报道中通过视频、图片等方式详实的记录了主要影响区域及受灾情况,具有强烈的感官性,为后续的现场灾情调查提供较为准确的参考信息。通过对比网络媒体报道与现场灾情调查的龙卷影响范围和受灾情况,网络媒体信息重点反映受灾严重的区域灾情,在对整个龙卷影响范围和受灾的全面报道方面稍微欠缺。通过受灾现场的灾情指示物受损情况的判断分析,根据网络媒体信息,可以对此次龙卷强度做出较为准确的估计。因此,网络媒体信息对龙卷灾情调查有重要的参考价值。下一步通过多个龙卷个例对比分析,开发实时监测网络媒体有关龙卷信息的预警系统。

参考文献

- [1] 黄大鹏,高歌,叶殿秀,等.龙卷风研究进展及预警业务现状.科技导报,2017,35(5):45-53.
- [2] 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.
- [3] 范雯杰,俞小鼎.中国龙卷的时空分布特征.气象,2015,41(7):793-805.
- [4] 黄大鹏,赵珊珊,高歌,等.近30a中国龙卷风灾害特征研究.暴雨灾害,2016,35(2):97-101.
- [5] 虎雅琼,边宇轩,黄梦宇,等.基于灾情信息的1981—2017年北京地区降雹特征.应用气象学报,2019,30(6):710-721.
- [6] 刘丽华.自然灾害微博舆情的社会计算模型建构研究.武汉:武汉大学,2018.
- [7] 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.
- [8] 郑永光,朱文剑,田付友,等.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.
- [9] 李彩玲,黄先香,蔡康龙,等.2019年中国龙卷等对流大风过程及灾情特征.气象科技进展,2020,10(1):7-14.
- [10] 张涛,关良,郑永光,等.2019年7月3日辽宁开原龙卷灾害现场调查及其所揭示的龙卷演变过程.气象,2020,46(5):603-617.

基于风廓线雷达对暖式切变和冷式切变 大范围强降水的风垂直结构观测与差异分析

官晓东 刘玉 卜银军
(福建省三明市气象局, 三明 365000)

摘要: 应用福建省连城县风廓线雷达等资料, 对2018年6月5—7日福建省一次暖式切变和冷式切变交替下形成的大范围强降水天气进行分析。结果表明: 1) 水平风脉动和垂直风脉动出现的时间与降水出现的时间较为对应, 水平风脉动大小和水平风脉动出现的高度与降水强度存在一定的正相关, 垂直风脉动出现的高度与降水强度存在一定的正相关; 暖式切变形势下强水平风脉动和垂直风脉动出现的较为集中且高度较高, 冷式切变下强水平风脉动和垂直风脉动出现的较为分散且高度较低。2) 降水前或降水出现增大前在2~3 km高度附近出现水平风的垂直风切变并向低层传播, 降水时低层和高层的水平风的垂直风切变增大超过 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; 暖式切变形势下低层水平风的垂直风切变增强时间较降水早2~6 h; 冷式切变形势下低层水平风的垂直风切变的增强时间与降水同步。3) 暖式切变形势下, 低空急流指数相对连续, 且波动较大, 对应降水的强度较强, 降水分布不均; 冷式切变形势下, 低空急流指数较为分散, 波动较小, 对应降水强度较弱, 降水分布均匀; 降水前低空急流指数的增大超前1~4 h。4) 暖式切变降水阶段, 信噪比(SNR)强回波区在降水初期出现在较高的高度上, 在降水趋于减弱时低层SNR值开始增大; 冷式切变降水阶段, SNR强回波区在低层长时间维持。

关键词: 风廓线雷达, 暴雨, 风脉动, 信噪比

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.06.017

Wind Vertical Structure Observation and Difference Analysis of Large Range Heavy Rainfall with Warm Shear and Cold Shear Based on Wind Profiler Radar

Guan Xiaodong, Liu Yu, Bu Yinjun
(Sanming Meteorological Office of Fujian Province, Sanming 365000)

Abstract: Based on the wind profiler radar data of Liancheng county, Fujian province, the analysis of the heavy rainfall were caused by alternating warm shear and cold shear in Fujian province from 5 to 7 June 2018. Results show that: 1) the occurrence time of horizontal and vertical wind pulsation corresponds to the occurrence time of precipitation. The magnitude of horizontal wind pulsation and the height of horizontal wind pulsation are positively correlated with precipitation intensity, while the height of vertical wind pulsation is positively correlated with precipitation intensity. The strong horizontal and vertical wind pulsation are concentrated and high in warm shear potential, while the strong pulsation and vertical wind fluctuations are dispersed and low in cold shear potential. 2) Before precipitation or before precipitation increase, vertical wind shear of horizontal wind appears near 3 km altitude and propagates to the lower level. Vertical wind shear of horizontal wind at lower and upper levels increases to more than $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ during precipitation; The vertical wind shear enhancement time of low-level horizontal wind under warm shear potential is 2-6 hours earlier than that of precipitation; the vertical wind shear enhancement time of low-level horizontal wind under cold shear potential is synchronized with precipitation. 3) Under the warm shear potential, the low-level jet index is relatively continuous and fluctuates greatly, corresponding to the intensity of precipitation is stronger, and the precipitation distribution is uneven; under the cold shear potential, the low-level jet index is more dispersed and fluctuates less, corresponding to the intensity of precipitation is weaker, and the precipitation distribution is uniform. The increase of low-level jet index is 1-4 hours ahead of precipitation. 4) In the warm shear precipitation stage, the SNR strong echo region appears at a higher altitude in the early stage of precipitation, and increases at the lower level when precipitation tends to weaken. In the cold shear precipitation stage, the SNR strong echo region maintains for a long time in the lower level.

Keywords: wind profiler radar, heavy rain, wind pulsation, power spectral density

收稿日期: 2019年5月8日; 修回日期: 2019年9月9日
第一作者: 官晓东(1985—), Email: gxdnj522@163.com
资助信息: 福建省气象局基层科技专项项目(2018J05);
国家自然科学基金面上项目(91637105); 国家
重点研发计划重点专项项目(2018YFC1507804)

0 引言

风廓线雷达是通过向高空发射不同方向的电磁波束,接收并处理这些电磁波束因大气垂直结构不均匀而返回的信息进行高空风场探测的一种遥感设备。风廓线雷达利用多普勒效应能够探测其上空风向、风速等气象要素随高度的变化情况,由于风廓线雷达具有探测时空分辨率高、自动化程度高等优点,许多学者应用该资料对不同天气进行分析。周志敏等^[1]指出风廓线雷达早于天气图获知冷空气入侵时间,并能清楚地分析出冷暖平流的分布形势。董保举等^[2]应用风廓线雷达对暴雨进行分析,结果表明三维风的脉动变化较大,水平风在垂直方向上存在风速切变,最大探测高度明显升高。王彦等^[3]利用风廓线雷达资料分析一次强降水过程,其指出垂直风切变对短时强降水的形成具有参考价值,降水开始前到出现降水时垂直风切变增大并由中层下降到中底层。张怪怪等^[4]、刘淑媛等^[5]利用风廓线雷达资料分析低空急流的脉动与暴雨关系,分析表明在低空急流指数迅速加强后1~2 h内将出现强降水。王秀玲等^[6]指出风廓线雷达能很好地观测到稳定性降水过程中冷、暖切变的小扰动和急流的下传过程。陈娟等^[7]也利用风廓线雷达资料分析了江西梅雨锋暴雨天气过程,其指出1 km或0.7 km高度以下水平风在垂直方向上的风切变的增大与下游降水的增强关系较为密切。戴建华等^[8]应用风廓线雷达观测资料对上海一次飚线特征做了细致的分析,提出较大的垂直风切变和风暴相对螺旋度对飚线的维持和发展起重要作用。李峰等^[9]指出降水发生前,对流层的信噪比会明显增强,降水发生时5个波束径向速度自地面向上均转为正值且径向速度不同,存在风的影响。

福建风廓线雷达于2013年开始逐步在全省展开布设应用,由于建立不久,特别是福建内陆丘陵山区在应用风廓线雷达资料对降水天气监测方面的研究较少,因此本文利用福建省连城县风廓线雷达资料,对2018年6月5—7日福建省一次暖式切变和冷式切变交替下形成的大范围强降水天气进行分析,通过分析不同天气形势下降水前后风廓线雷达资料特征,为风廓线雷达资料在暴雨天气中的应用积累经验。

1 资料

本文风廓线雷达资料来源于龙岩市连城县观测站(25.7°N, 116.7°E) CFL-06型低对流层风廓线雷达,最大探测高度≥6 km,最低探测高度150 m,4 km以下垂直分辨率为120 m,4 km以上垂直分辨率为240 m,雷达以偏东、南、西、北各14°及垂扫描方向共5个波束

观测,风速测量均方根误差≤1.0 m·s⁻¹,探测风速范围0~60 m·s⁻¹,风向测量均方根误差≤10°,探测风向范围0~360°,风速分辨率0.1 m·s⁻¹,风向分辨率0.5°(数据来源:建设项目验收现场测试报告)。数据采用每6 min实时采样高度上的产品数据,半小时平均的采样高度上的产品数据,一小时平均的采样高度上的产品数据和功率谱数据进行分析。

2 暴雨过程概述

2018年6月5—7日,福建省出现了一次较大范围的暴雨过程。通过分析该过程的环流背景和天气形势发现,此次暴雨过程分为两个阶段,即4日12时—6日00时(世界时,下同)暖式切变下形成的暴雨和6日00时—7日12时冷式切变下形成的暴雨。4日12时,500 hPa贝加尔湖以西上空存在冷性低涡,华南位于河套以南西风槽前的西南气流控制;6日00时,贝加尔湖以西的低涡演变成高空槽与河套以南的西风槽合并东移动,影响我国中东部及华南地区。6日00时之前,850 hPa华南地区始终维持西南气流控制,且达到了低空急流标准,925 hPa在福建上空始终维持一暖式切变(图1a);6日00时起,随着500 hPa槽的东移,低层冷空气南下,福建上空由暖式切变转为冷式切变(图1b)。此次暴雨过程全省有24个国家气象站出现100 mm以上的降水,4日12时—6日00时有6个国家气象站降水达100 mm以上,6日00时—7日12时有1个国家气象站降水达100 mm以上。连城站在此次降水过程中达到了127.7 mm,降水量时序分布为6日00时前降水强于6日00时后降水(图2e、2f)。

3 降水前后风廓线雷达资料分析

3.1 水平风和垂直风脉动分析

风的运动由两种运动组合而成,即一种简单的平均运动上叠加一种尺度范围广、起伏不规则的脉动运动,风脉动定义为风的瞬时值与平均值的差值^[10]。由于风脉动强烈程度与高空空气的动力不稳定相关,脉动越剧烈说明高空动力越不稳定,能为降水提供动力条件。以时间间隔为1 h计算水平(V)和垂直(W)风的平均值,以整点第30分为V、W风的瞬时值,计算该小时V、W风的脉动^[2]。

图2a为4日01时—5日23时的水平风脉动,4日03—15时大气中出现弱水平风脉动,4日16—19时出现一次强水平风脉动,最大脉动值出现的高度达到5 km,5日03—08时同样出现弱水平风脉动,5日09—23时出现两次强水平风脉动,其中10时最大脉动值出现高度达到10 km,对应连城站的降水量可以发现(图2e),4日16时出现6.5 mm·h⁻¹的降水,5日10

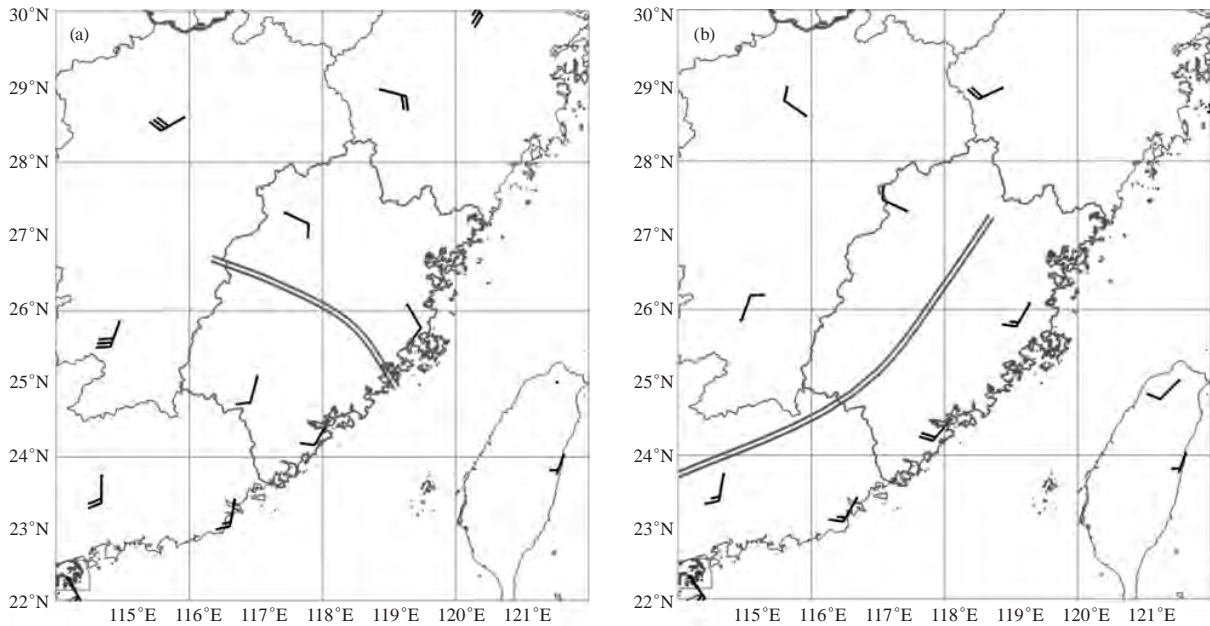


图1 925 hPa测站风 (双实线为切变线)

(a) 2018年6月5日12时; (b) 2018年6月6日12时

Fig. 1 925 hPa station wind (Double solid lines are shear lines)

(a) 12:00 on 5 June 2018, (b) 12:00 on 6 June 2018

时出现 $34.9 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的降水, 5日20时出现 $13.3 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的降水。图2b为6日01时—7日23时的水平风脉动, 6日01—7日02时出现强水平风脉动, 但分布较为分散, 且强水平风脉动值出现的最大高度约为4.5 km, 对应6日连城站出现连续性弱降水天气(图2f)。

图2c为4日01时—5日23时的垂直风脉动, 5日06—09时大气中出现弱的垂直风脉动, 4日16—21时和5日09—18时出现明显的垂直风脉动, 其中5日09—10时出现明显垂直风脉动的高度较高, 这与10时出现 $34.9 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的强降水相对应, 大气出现的垂直风脉动的高度较高, 说明对流云团发展的较为旺盛, 相应出现较大的小时降雨量。图2d为6日01时—7日23时的垂直风脉动, 6日01时—7日08时出现明显的垂直风脉动, 垂直风脉动的最大高度在4.5 km以下, 且分布较为分散, 对应降水为连续性弱降水。查看风廓线雷达实时采样高度产品数据发现4日20—21时未出现降水, 且垂直方向可信度为50%, 因此对出现垂直风脉动奇异大值不予分析。

通过以上分析可以发现, 水平风脉动和垂直风脉动出现的时间与降水出现的时间较为对应, 降水前出现较弱的水平风和垂直风脉动, 与降水时脉动值差距较大, 降水前出现的弱脉动是否为未来降水提供不稳定能量, 提前出现的弱脉动对未来降水是否具有指示意义还需进一步验证, 这与风廓线雷达资料在暴雨天

气过程特征分析中的应用^[2]所提出的观点有所不同。水平风脉动大小和强水平风脉动出现的高度与降水强度存在一定的正相关, 垂直风脉动出现的高度与降水强度存在一定的正相关。暖式切变形势下, 风垂直结构上强水平风脉动和垂直风脉动出现的较为集中且出现最大高度较高, 对应降水强度较大且时序分布较为集中; 冷式切变形势下, 强水平风脉动和垂直风脉动出现的较为分散且出现的最大高度较低, 对应降水强度较小且时序分布均匀, 说明此次降水过程暖式切变下降水云发展较冷式切变下降水云发展的高度更高, 对流性更强。

3.2 水平风垂直切变

由图3可见, 2018年6月4日04时在2 km附近出现 $6.0\sim 7.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的水平风的垂直风切变, 4日10时水平风的垂直风切变高度降低至1 km以下, 且强度增强到 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上, 4日16时从地面到高空都出现大于 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 水平风的垂直风切变, 此时地面出现降水; 4日19时—5日08时低空水平风的垂直风切变始终存在, 但强度先减弱后增大, 高空水平风的垂直风切变减弱, 对应期间为无降水; 4日20时2 km附近出现 $4.5\sim 6.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的水平风的垂直风切变, 并再次出现向下传播的现象, 5日07时1 km以下水平风的垂直风切变再次加强, 5日09时起低层和高空出现 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上的水平风的垂直风切变, 对应5日09—23时出现

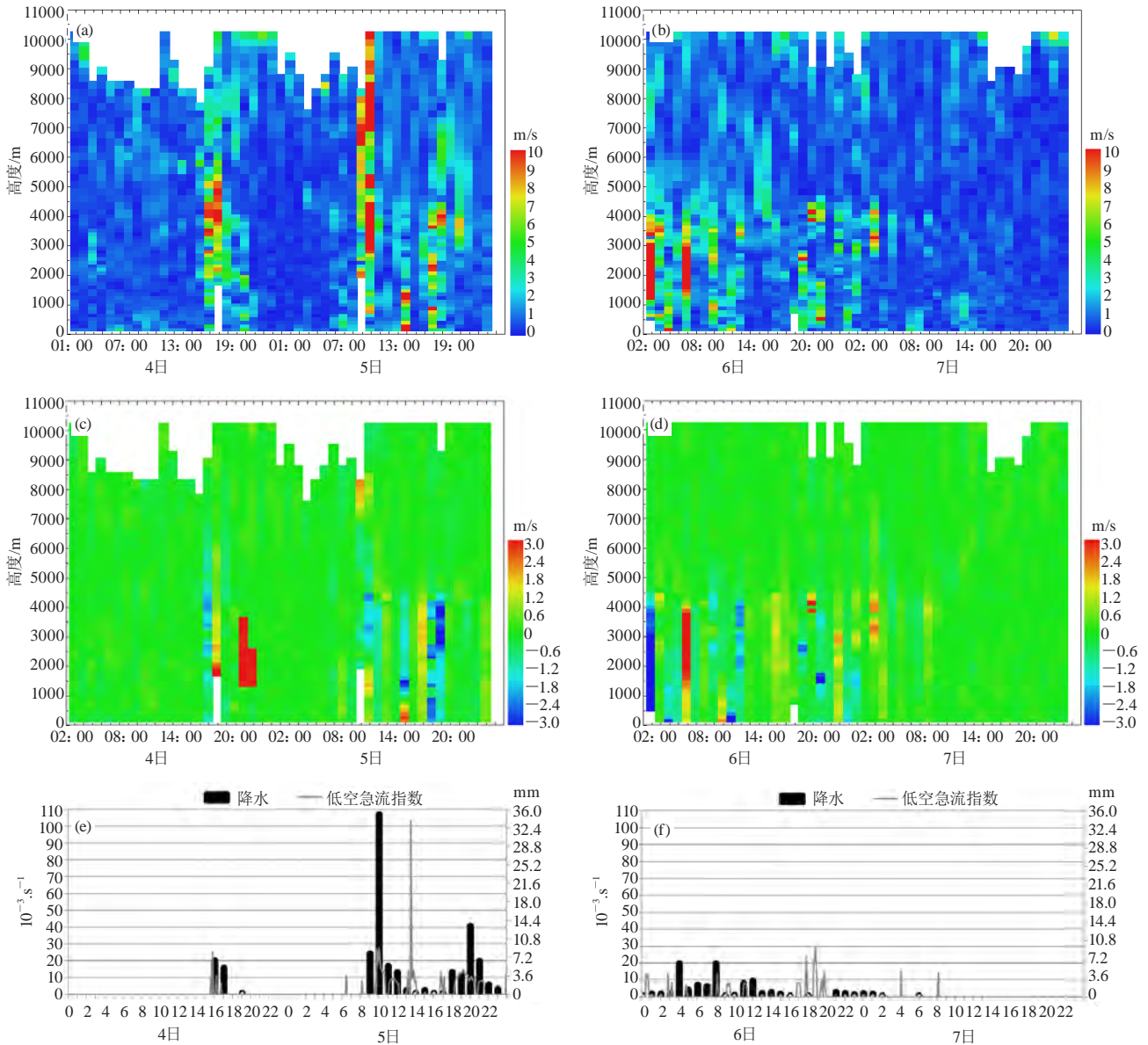


图2 2018年6月4—5日 (a、c、e) 和6—7日 (b、d、f) 的水平风脉动 (单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)、垂直风脉动 (单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)、低空急流指数 (单位: 10^{-3}s^{-1}) 和连城站小时雨量 (单位: mm)

Fig. 2 Horizontal wind fluctuations (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), vertical wind fluctuations (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), low level jet index (unit: 10^{-3}s^{-1}) and hourly rainfall (unit: mm) at Liancheng station on 4 to 5 June 2018 (a, c, e) and 6 to 7 June 2018 (b, d, f)

降水。

5日22时—6日04时低空和高层水平风的垂直风切变先减小后增大, 期间降水先减小后增大; 6日00时起在2.5 km附近出现 $7.5 \sim 12.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 水平风的垂直风切变, 并开始出现向下传播, 低层水平风的垂直风切变再次增大到 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上, 降水期间高空同样出现大于 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的水平风的垂直风切变, 7日00时低空和高空的水平风的垂直风切变开始减弱, 对应降水先增大后减小, 并于7日06时降水结束。

通过以上分析发现, 降水前或降水出现增大前在

2~3 km高度附近出现水平风的垂直风切变增大并向低层传播, 这与王彦等^[3]对一次强降水过程分析中所述的一致, 说明降水前或降水出现增大前出现水平风的动量下传。降水时低空和高层的水平风的垂直风切变增大至 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上。暖式切变形势下, 低层水平风的垂直风切变增强时间较降水早2~6 h, 高空水平风的垂直风切变增大时段与降水同步, 说明在降水前大气提前出现扰动, 整层大气扰动时间短, 对应降水为短时间的对流性降水; 冷式切变形势下, 低层水平风的垂直风切变的增强时间与降水同步, 高空水平风

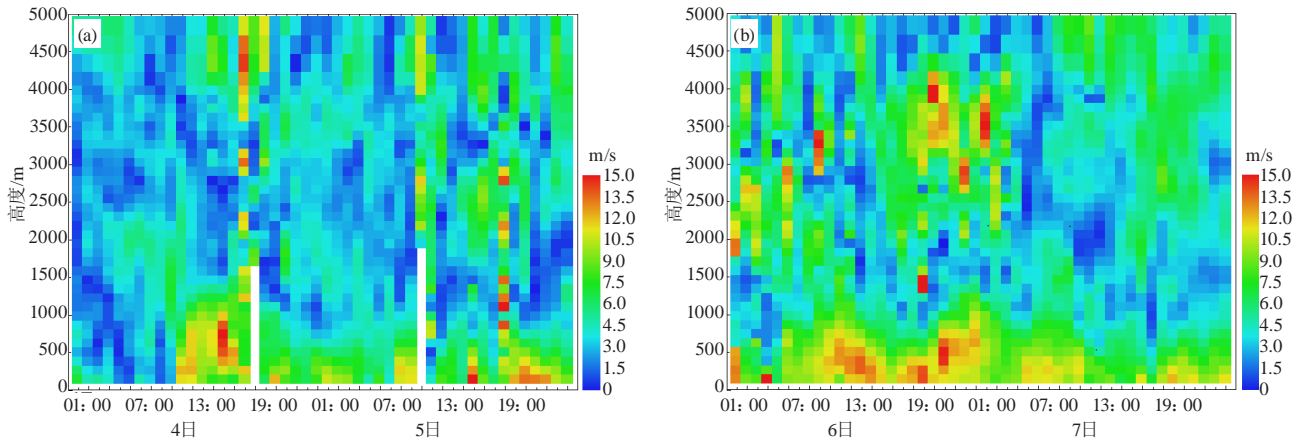


图3 水平风的垂直风切变 (单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
 (a) 2018年6月4—5日; (b) 2018年6月6—7日,
 Fig. 3 Vertical wind shear of horizontal wind (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
 (a) 4 to 5 June 2018, (b) 6 to 7 June 2018

的垂直风切变增大的持续时间较长, 说明冷式切变大气未提前出现扰动, 整层大气扰动时间长, 对应降水为持续性弱降水。

3.3 低空急流指数

华南大暴雨发生时常伴有对流层下部的低空急流的加强, 而低空急流轴上的中小尺度的脉动与强降水过程有密切关系^[11], 李侃等^[12]分析暴雨成因时指出, 低空急流的出现及向地面扩展程度与暴雨之间存在密切关系。本文通过计算低空急流指数, 分析低空急流指数与降水的关系。

定义低空急流指数为 $I=V/D$, 其中 V 为 2 km 高度以下边界层急流中心最大风速 (单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), D 为 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风速在此刻的最低位置 (单位: km)^[5], 因此 D 越大说明低空急流越强, 所在高度越低, 越容易触发对流不稳定能量的释放, 对降水就越有利。

4日15时 I 指数增大, 15时连城开始下雨, 17时 I 指数减小为0, 降水结束 (图2e)。5日06—22时 I 指数再次增大, 时序分布上较为连续, 并且出现多个峰值, 对应降水明显增大。 I 指数相对6日00时前较小, 且不连续, 对应小时雨强较弱, 随着降水的结束, I 指数减小为0 (图2f)。通过对比分析发现暖式切变形势下, 低空急流指数相对连续, 且波动较大, 对应降水的强度较强, 降水分布不均; 冷式切变形势下, 低空急流指数出现的较为分散, 波动较小, 对应降水强度较弱, 降水分布均匀。降水前低空急流指数的增大有超前1~4 h 的现象, 这与刘淑媛等^[5]所得出的结论相同。另外从图2中也可看出低空急流指数增大的幅度与降水强度不相匹配, 这是由于影响降水的因素较多, 对降水趋势有一定的指示作用, 但与降水强度无明确的

定量关系。

3.4 信噪比及功率谱密度

功率谱密度分布包含大气返回的信号, 当出现降水时返回信号中还包含降水粒子返回信号^[13]; 信噪比 (SNR) 是风廓线雷达返回信号中气象信号与噪声之比, 反映的是回波功率, SNR 越大对应回波功率越强^[14]。通过研究这次降水过程中信噪比和功率谱密度在垂直方向上分布的特征变化, 来揭示冷暖切变下降降水性质的不同。

图4a的SNR数据可以看出, 在4日15时30分附近3 km以下出现大于30 dB的值, 对应15时起出现降水; 5日05:30 SNR值由低层开始增大, 09:30在4 km以下的高度出现大于30 dB的值, 11:30 SNR大值开始下传, 17:30 SNR值再次增大, 21:30高度在0.5 km以下SNR出现增大, 这期间10时和20时出现两个降水峰值。图4b的SNR数据可以看出, 6日00时—7日07时SNR在2 km高度以下逐渐增大, 特别是6日11:30—7日07时在0.5 km高度以下出现大于30 dB的值, 回波较为密实, 2 km高度以上的SNR值在不断减小, 回波变得较为松散, 这期间出现较为平缓的弱降水。

图4c功率谱密度数据中, 顶波速功率谱密度数据在 $7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 附近出现波峰, $1.23 \sim 3.63 \text{ km}$ 在 $0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 附近出现弱波峰, 由于风廓线雷达较高的探测灵敏度, 使其探测得到的降水返回信号较强, 其回波强度比大气返回信号要大, 降水信号的功率谱密度峰值远大于大气运动的功率谱密度峰值^[10], 因此这两个波峰对应的速度分别为雨滴下落速度和环境大气的垂直运动速度。其余的4个波速同样能观测到大于 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 正速

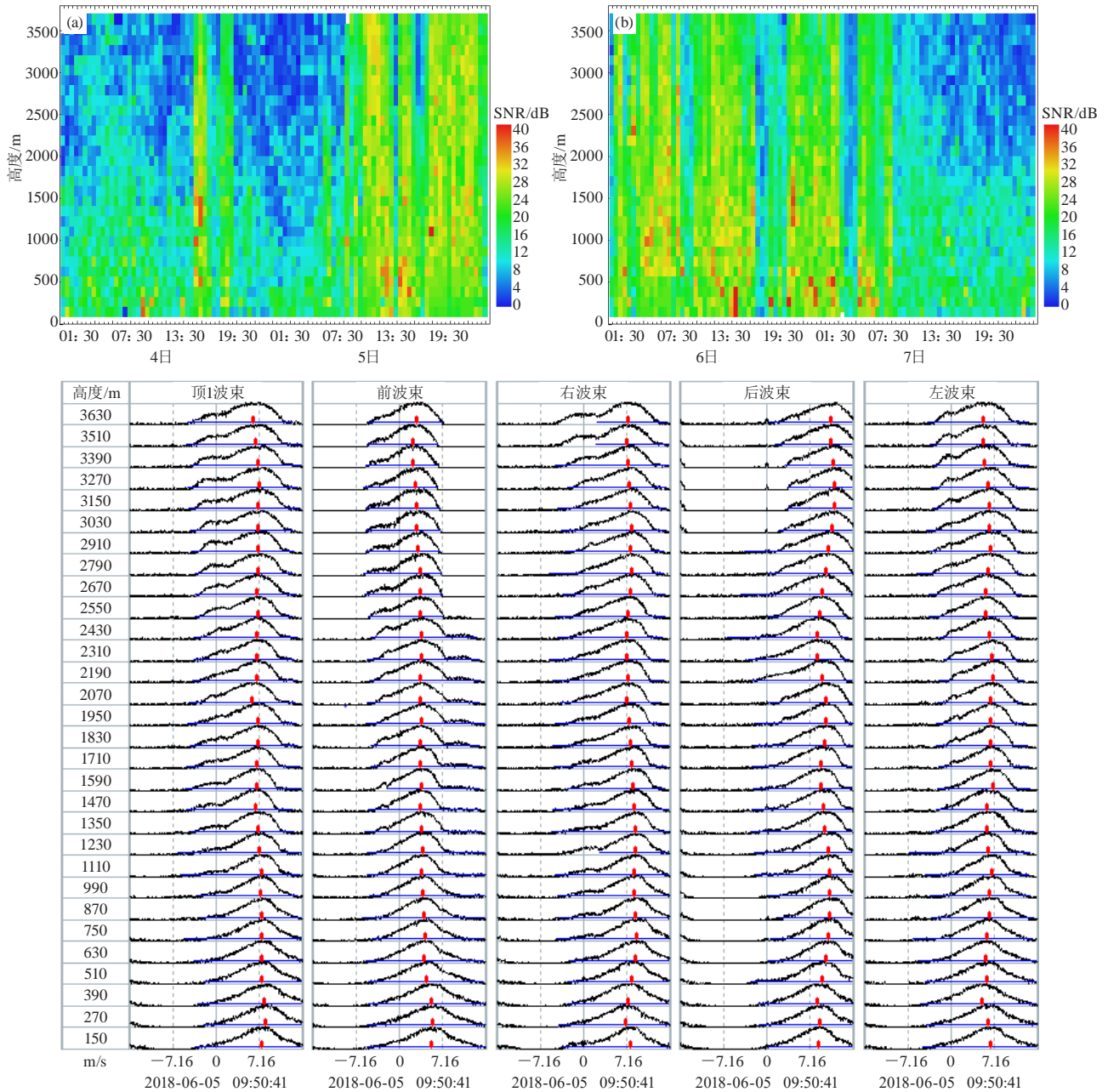


图4 2018年6月4—5日 (a) 和6—7日 (b) 的信噪比 (SNR) ; 2018年6月5日09:50的功率谱密度 (c)
Fig. 4 SNR (dB) on 4 to 5 June 2018 (a) and 6 to 7 June 2018 (b), power spectral density at 09:50 on 5 June 2018 (c)

度区出现一个谱峰, 在 $0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 速度附近出现一个较弱的谱峰。这进一步说明了该时间出现了雨滴降落。通过查看每个时次的谱线图, 可进一步说明4日15—17时, 5日08时—7日02时为降水时段。

暖式切变降水阶段, SNR强回波区在降水初期出现在较高的高度上, 在降水趋于减弱时低层SNR值开始增大; 冷式切变降水阶段, SNR强回波区逐渐下降并在低层长时间维持; 冷式切变降水阶段SNR值在高层较暖式切变降水阶段弱; 以上分析说明暖式切变形

势下为对流云降水, 天气形势在转为冷式切时, 降水转为混合云降水。

4 结论

1) 水平风脉动和垂直风脉动出现的时间与降水出现的时间较为对应, 水平风脉动大小和水平风脉动出现的高度与降水强度存在一定的正相关, 垂直风脉动出现的高度与降水强度存在一定的正相关; 暖式切变形势下强水平风脉动和垂直风脉动出现的较为集中

(下转105页)

基于雷达的多源信息森林火灾监测模型应用研究

王威¹ 何筱仙¹ 张深寿²

(1 湖南省岳阳市气象局, 岳阳 414000; 2 福建省龙岩市气象局, 龙岩 364000)

摘要: 为实现对森林火灾的及时扑救, 提高森林火灾监测效率, 利用雷达数据, 结合气象传感器获取的温度、降水、相对湿度、风速等信息, 通过信息层、特征层、决策层的数据处理, 建立了基于雷达的多源信息森林火灾监测模型, 并利用模型对2015—2017年岳阳市森林火灾实例资料进行分析, 得出基于雷达的森林火灾发生概率等级多源信息融合值。利用模型对岳阳市2018年雷达监测范围内的火情进行实时监测, 结果表明, 该模型能够较准确的监测森林火灾, 火情命中率可以达到83%。

关键词: 森林火灾, 多源信息融合, 雷达, 气象

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.06.018

Study on Multi-source Information Forest Fire Monitoring Model Based on Radar

Wang Wei¹, He Xiaoxian¹, Zhang Shenshou²

(1 Yueyang Meteorological Bureau, Yueyang 414000 2 Longyan Meteorological Bureau, Longyan 364000)

Abstract: In order to timely put out forest fires and improve the efficiency of forest fire monitoring, by using radar data, meteorological sensors of temperature, precipitation, relative humidity, wind speed and other information, through information layer, feature layers and data processing from decision makers, radar source information model of forest fire monitoring was developed. We used the model to investigate forest fires instance data from 2015 to 2017 in Yueyang. Results show forest fire probability based on radar level values of multi-source information fusion. The model was used for real-time monitoring of fires within the radar monitoring range of Yueyang in 2018. The model was found to efficiently monitor forest fires and the fire hit rate reached 83%.

Keywords: forest fire, multi-source information fusion, radar, meteorology

0 引言

及早发现森林火灾, 并组织人力合理扑救, 能极大减少森林损失。目前监测森林火情的手段有卫星、雷达、人工瞭望、飞行巡航等^[1-2], 相较于人工瞭望和飞机巡航, 雷达具有覆盖面广、耗费少的优点, 相较于卫星监测, 雷达具有高时间、高空间分辨率的优点^[3]。但雷达在监测火情时易受弱降水、地物等影响, 监测准确率还有待提高^[4]。

近年来, 研究者发现利用多源信息融合技术监测火灾能提高火灾监测准确率。余福波等^[1]将自适应加权数据融合算法和D-S证据理论应用于智能火灾预警预报系统中, 有效提高了系统对火灾的识别能力。朱泽明^[2]将BP-RBF多源信息融合算法应用于森林火灾报警系统中, 提高了整个森林火灾报警系统的可靠性。

为实现对森林火灾监测快速、准确、便捷的目标, 本文提出基于雷达的多源信息融合技术, 并就该技术应用效果进行检验。该技术能实现对森林火灾快速识别, 有助于及早掌握火情、扑灭火灾, 潜在的社会、经济效益不可估量。

1 资料选取

森林火灾的产生需要同时具备三个条件, 即可燃物、林火环境和火源。林火环境包括天气、林地、小气候和氧气条件等, 其中天气条件是引发森林火灾、影响林火的重要因子^[5-7]。研究^[8-9]发现, 森林火灾的发生与最高气温、最大风速值、最小相对湿度值、未降水天数四个气象要素值关系最为密切。因此, 本文选取温度传感器、湿度传感器、雨量传感器、风速传感器, 结合雷达探测系统进行多源信息融合。

本研究通过实地调查访问获取岳阳市2015—2017年121起森林火灾发生的时间、地点、持续时间等基础资料。

收稿日期: 2019年6月21日; 修回日期: 2019年11月18日
第一作者: 王威(1988—), Email: 657484303@qq.com

2 火灾气象条件分析

气象条件是决定森林火灾发生与否的重要因素，其中以气温、相对湿度和降水因子最为密切。为了提高多源信息融合火灾监测模型准确性和实用性，需要对火灾发生时的条件进行分析，以达到简化模型的目的。为此笔者分析了岳阳市2015—2017年121起森林火灾发生时的气温、相对湿度、和降水气象条件和雷达回波特征，并得到表1~表5。

表1 森林火灾日最高气温与火灾发生次数统计表
Table 1 Statistical of daily maximum temperature and occurrence frequency of forest fire

日最高温度值/°C	<10	[10, 15)	[15, 20)	[20, 25)	[25, 30)	[30, 35]
火灾发生次数	4	7	34	70	4	2

由表1可知，当最高气温<25 °C时，森林火灾发生概率随着温度的升高而增加，当25 °C≤最高温度<35 °C时，火灾发生概率随着温度的升高而减小。这主要是因为岳阳地处亚热带季风气候区，雨热同期，到了夏季气温升高的同时，降水集中期来临，不易产生森林火灾。

表2 森林火灾日相对湿度与火灾发生次数统计表
Table 2 Statistical of daily relative humidity and occurrence frequency of forest fires

相对湿度/%	<20	[20, 30)	[30, 40)	[40, 50)	[50, 60)	[60, 70)	[70, 80)	[80, 90)
火灾次数	19	67	26	2	3	1	0	3

由表2可知，森林火灾发生概率与日相对湿度呈负相关，即日相对湿度越高森林火灾发生概率越低。由于岳阳市出现相对湿度<20%的天气占比少，导致该区间段森林火灾发生次数较20%≤相对湿度<30%的区间段发生次数偏少。

表3 森林火灾日最大风速与火灾发生次数统计表
Table 3 Statistical of maximum daily wind speed and occurrence frequency of forest fires

风速/(m/s)	1.6~3.3	3.4~5.4	5.5~7.9
火灾次数	11	49	61

由表3可知，森林火灾发生概率与日最大风速呈正相关，即日最大风速越大森林火灾发生概率越高，这主要是因为较大的风力能使森林火灾得到蔓延扩大。

表4 森林火灾日连续未降水天数与火灾发生次数统计表
Table 4 Statistical of fire days without precipitation and occurrence frequency of forest fires

连续未降水天数/d	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
火灾次数	4	4	8	6	5	23	28	31	3	5	4

由表4可知，当日连续未降水天数<8 d时，森

林火灾发生概率与日连续未降水天数呈正相关。未降水天数越长，空气越干燥，植物和土壤含水量越低，森林火灾越易发。

表5 森林火灾雷达回波与火灾发生次数统计表
Table 5 Statistical of forest fire radar echo and fire occurrence frequency

雷达回波/dBZ	≤5	(5, 15]	(15, 30]	(30, 45]
火灾次数	1	6	44	6

岳阳雷达在非汛期（10月至次年3月）非全天运行，导致森林火灾发生时没有对应的雷达资料，在2015—2017年的121次森林火灾有57次林火被雷达监测到，本文仅对这57次林火回波进行分析（表5），发现森林火灾的发生概率与雷达回波反射率呈正相关，雷达回波反射率≤30 dBZ时，森林火灾发生概率随着回波反射率的增加而增加，当反射率>30 dBZ时，火灾发生概率反而减小。

3 多源信息融合过程

通过分析发现，森林火灾的发生与温度、相对湿度、雨量、风速、雷达回波具有一定的相关性。为进一步提高森林火灾辨识准确率和效率，本文引用多源信息融合系统。系统采用三层次融合结构，即数据层、特征层、决策层。数据层融合过程是对采集的火灾现场气象要素进行预处理的过程；特征层融合通过对不同传感器数据的分析，提取多传感器数据中与森林火灾发生相关的特征，该层次融合是对数据去冗余的过程，能有效剔除环境中的干扰信号^[10]；决策层融合采用合适的融合算法对数据进行再次融合，发挥传感器的联合作用，提高系统的可靠性。它的虚拟处理流程如图1所示。

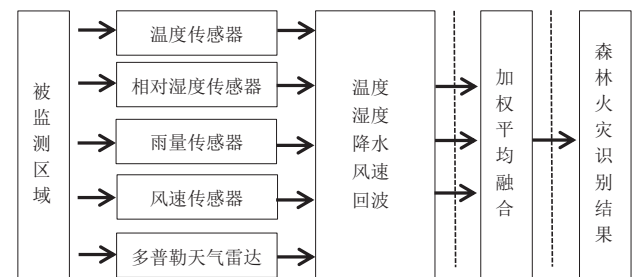


图1 基于雷达的多源信息森林火灾模型框架设计
Fig. 1 Framework design of multi-source information forest fire detection system based on radar

3.1 多源信息数据层融合

基于雷达的多源信息森林火灾探测系统信息层包括温度、相对湿度、降水、风速、雷达反射率等信息。火灾点温度、相对湿度、降水、风速传感器数据通过相邻观测点的气象传感器进行采集，并通过滑动

平均法获得火灾点的气象要素值。火灾点雷达探测特征主要包括回波反射率、径向速度、回波顶高等，这些特征可以通过“火灾杂波过滤法”进行提取。

3.2 多源信息特征层融合

在多传感器对森林火灾进行识别时，每一种传感器都只能获取火灾现场某一方面的信息，单一特征仅包含有限信息，要实现森林火灾的监测，需将多种传感器具有的特征进行提取、融合，综合分析火灾发生的可能性，为后续决策做基础。

由上文可知，影响森林火灾发生的气象要素值存在区间变化的趋势^[11]。因此可以采用逻辑回归算法对数据特征进行提取，本文利用Origin8.0数据分析软件对数据做逻辑回归曲线拟合，得到模型如下：

$$y_1 = \frac{4.25 + \frac{158.76}{e^{\frac{2(x_1-19.9)^2}{3.17}}}}{121}, \quad (1)$$

$$y_2 = \frac{1.13 + \frac{76.05}{1 + (\frac{x_2}{33.42})^a}}{121}, \quad (2)$$

$$y_3 = \frac{-0.44 + \frac{70.87}{e^{\frac{2(x_3-5.67)^2}{2.9}}}}{121}, \quad (3)$$

$$y_4 = \frac{31.2 - \frac{25.6}{1 + (\frac{x_4}{4.8})^b}}{121}, \quad (4)$$

$$y_5 = \frac{1.33 + 1541.5e^{\frac{2(\frac{x_5-30.92}{6.48})^2}}}{57}, \quad (5)$$

式中， $a=14.31$ ， $b=19.3$ ； y_1 、 y_2 、 y_3 、 y_4 、 y_5 表示火灾发生概率； x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 、 x_5 分别表示日最高温度值、日最小相对湿度值、日最大风速值、日连续未降水天数、雷达回波组合反射率值。

3.3 多源信息决策层融合

决策层融合采用加权平均融合算法。加权平均融合算法通常选用数学平均式，即将各个传感器的权值选取近似相等。该方法是最简单最实用的实时处理信息的融合方法，能比较简便地处理来自传感器的原始冗余信息。加权平均算法中，假设在 n 个传感器的融合系统中，传感器 T_1 、 T_2 、 T_3 、...、 T_n 对同一个目标进行状态估计，各传感器的测量值分别为 x_1 、 x_2 、 x_3 、...、 x_n ，是 x 的无偏估计，且彼此相互独立，其方差分别为 σ_1^2 、 σ_2^2 、...、 σ_n^2 ^[12]。设各个传感器的权重分别是 W_1 、 W_2 、...、 W_n ，则融合后的状态估计值和权重满

足的条件为：

$$\tilde{x} = \sum_{i=1}^n w_i x_i, \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1. \quad (7)$$

假设权值相等且为 W ，由式(7)可知 $W=1/n$ ，经过融合后的状态估计值为：

$$\tilde{x} = \sum_{i=1}^n w_i x_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (8)$$

4 结果分析

4.1 融合等级分析

在多源信息融合的过程中发现，即使所有的要素值都最有利于火灾发生，最后的融合值也达不到100%。因此，本文将各要素中最利火灾发生的数值进行融合，获取基准融合值。最有利于火灾发生的各要素值和融合值如表6所示。

表6 基于多源信息融合的森林火灾发生概率

Table 6 Forest fire occurrence probability based on multi-source information fusion

最高气温 / °C	相对湿度 / %	最大风速 / (m/s)	连续未降水 日数/d	回波反射率 / dBZ	融合值 / %
22.0	20.0	5.7	7	38	52.7

根据森林火灾气象等级划分标准，按照首尾少中间多的顺序升序排列，森林火险气象等级比例设定为10%，20%，40%，80%，100%^[13]，再通过基准融合值(52.7%)对森林火险等级进行划分，得到森林火灾概率等级多源信息融合值表(表7)。

表7 森林火灾发生概率等级多源信息融合值表

Table 7 Multi-source information fusion values of forest fire occurrence probability levels

森林火灾等级	概率/%	融合值/%
极度风险	(90, 100]	(45, 53]
重度风险	(70, 90]	(35, 45]
高度风险	(30, 70]	(15, 35]
中度风险	(10, 30]	(5, 15]
低度风险	(0, 10]	[0, 5]

4.2 实例分析

2015年12月18日自14:04开始，岳阳市雷达图上有一回波块符合林火回波特征，跟踪发现，该回波连续出现了11个体扫(图2)，回波顶高为1.0 km，面积为15.3 km²，平均回波强度为9.1 dBZ，最大回波强度为28 dBZ。为进一步判断该回波是否为林火回波，利用雷达系统监测的位置，通过插值法查找到该监测点多传感器数据，根据本文所研究的基于雷达的多源信息融合森林火灾监测技术，对多传感数据进行融

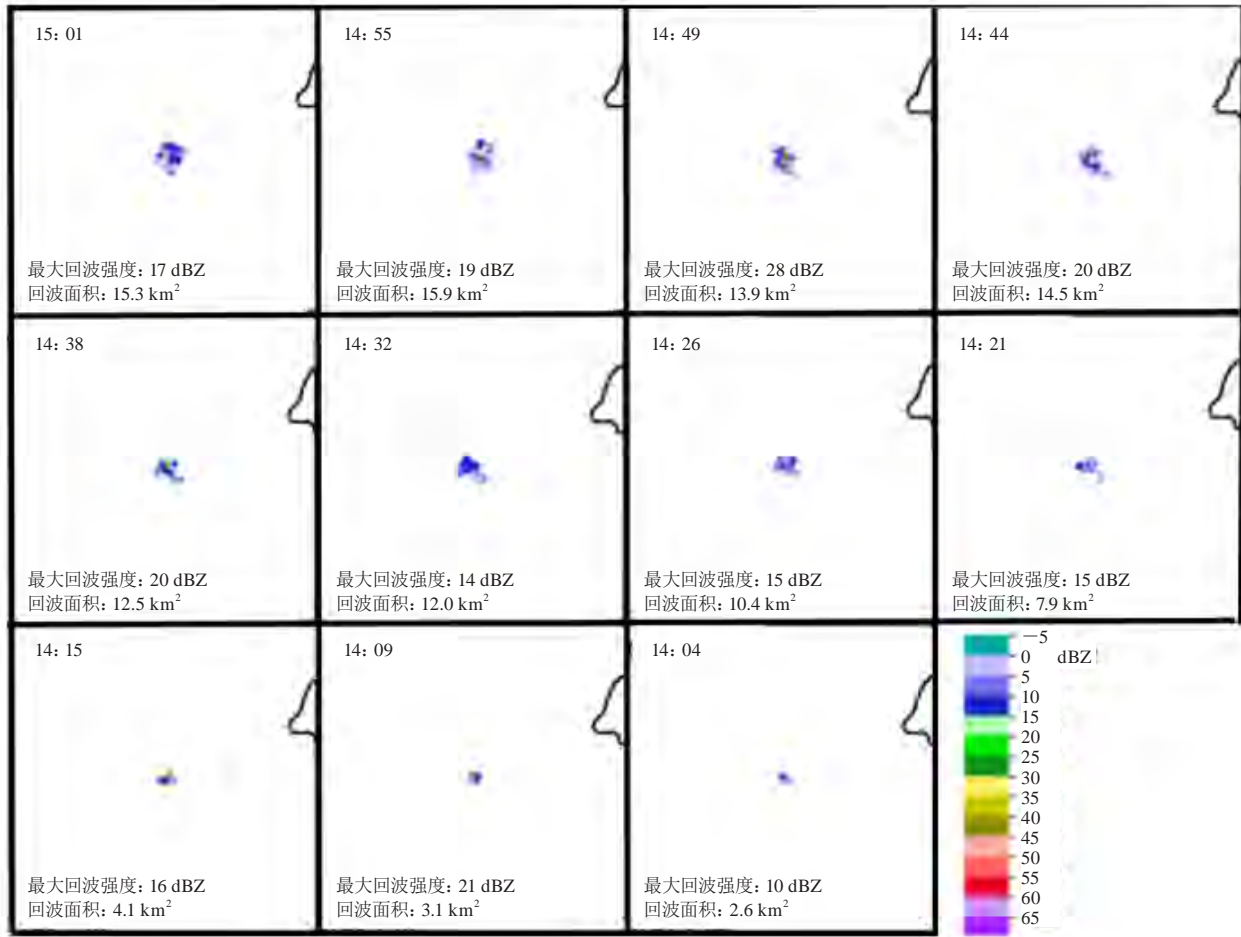


图2 岳阳市林火的雷达反射率回波时序图 (0.5°仰角)

Fig. 2 Radar reflectivity echo timing sequence diagram of Yueyang forest fire (0.5°elevation)

合, 得出林火发生概率值 (表8)。

表8 基于多源信息融合的森林火灾发生概率

Table 8 Forest fire occurrence probability based on multi-source information fusion

	最高气温 /°C	相对湿度 /%	最大风速/ (m/s)	连续未降水 日数/d	回波反射率/ dBZ	融合值 /%
要素值	17.8	30	5.4	5	6	20
概率/%	58.0	52.7	57.2	19.1	49.5	47.3

模型融合值为47.3%, 根据森林火灾发生概率等级多源信息融合值表可知, 该处发生森林火灾的概率等级为极度风险, 因此可以更进一步明确, 该地有森林火灾发生, 该事实也已经被林业部门确认。

4.3 模型检验结果

基于雷达的多源信息融合森林火灾监测模型建立后, 利用模型对岳阳市2018年该地区雷达监测范围内的火情进行实时监测。期间, 系统发出了82起预警信号, 实际没有发生森林火灾但是系统误判发布报警信号的有17起, 实况发生火灾但系统没有发出森林火灾

预警信号的有9起。参照文献[4]中的火情报警的命中率、误警率和临界成功指数的计算方法, 得到系统的火情预警命中率 (表9)。

表9 雷达林火回波监测系统预警命中率统计表

Table 9 Statistical of early warning percentage of radar forest fire echo monitoring system

	命中率	误警率	临界成功指数
概率分布/%	83	10	74

根据钟敏等^[14]对风暴识别与跟踪算法对单体识别的命中率研究结果可知, 雷达林火回波监测系统命中率与CINRAD/SB系统对雷达回波单体识别命中率相当。因此, 该系统的运行结果参考意义较大, 系统可以应用于业务工作之中。

5 结论

基于雷达资料的多源信息森林探测模型建立后, 通过雷达对林火进行定位, 查找疑似火灾点气象信息, 对火灾发生概率进行计算, 查对森林火灾发生概率等级多源信息融合值表, 判断林火发生概率, 决定

是否向森林防火部门发布森林火灾预警信息,有利于及早发现森林火灾,并对火灾进行及时扑救。经验证,该模型对森林火灾的监测精度较高,命中率达到83%,误警率为10%,临界成功率为76%。

多传感器信息融合过程中,在数据处理、特征提取和决策层融合时,采用的算法较普通,在今后的研究中,可以利用不同算法建立模型,选择对森林火灾识别准确率最高的模型,应用到实际业务中,将能极大提高森林火灾监测效率和准确性。

参考文献

- [1] 余福波,吴薇.多源信息融合技术在智能楼宇火灾监测系统中的应用.科技创新与应用,2011(24):16-17.
- [2] 朱泽明.基于物联网技术的智能型森林火灾报警系统的研究及应用.安徽:安徽理工大学,2015.
- [3] 陈永林,曹晓岗,邵玲玲,等.上海一次重大火灾烟雾的雷达回波特征研究.气象科学,2010,30(1):121-125.

- [4] 黄克慧,朱景,黄以平,等.基于多普勒天气雷达的火情自动识别系统.气象,2013,9(2):241-248.
- [5] 文东新,张明军,龙定华,等.广西森林火灾时空分布及其影响因素.中南林业科技大学学报,2007,27(5):83-86.
- [6] Fang L, Yang J, Zu J X. Quantifying influences and relative importance of fire weather, topography, and vegetation on fire size and fire severity in a Chinese boreal forest landscape. Forest Ecology and Management, 2015, 356(SI): 2-12.
- [7] 张伟.关于大兴安岭地区森林火灾与气象因素的模型及分析.哈尔滨:东北林业大学,2015.
- [8] 郑焕能.应用火生态.哈尔滨:东北林业大学出版社,1998.
- [9] 傅泽强,陈动,王玉彬.大兴安岭森林火灾与气象条件的相互关系.东北林业大学学报,2001,29(1):12-15.
- [10] 王世刚.基于现代时间序列分析方法的通用信息融合白噪声估值器.黑龙江:黑龙江大学,2008.
- [11] 王威,冯慧,丁俊琦,等.影响森林火灾发生的气象因子分析.通讯世界,2019(3):227-228.
- [12] 黄健,徐永刚,孙中廷.多传感器数据融合技术在煤矿井下的应用.煤矿机械,2015(7):242-244.
- [13] 郭海峰,禹伟.湖南省森林火灾天气等级预测模型研究.中南林业科技大学学报,2016,36(12):44-47.
- [14] 钟敏,吴翠红,王珊珊,等.CINRAD/SA雷达两种识别跟踪产品的评估分析.气象,2012,38(6):722-727.

(上接100页)

且高度较高,冷式切变下强水平风脉动和垂直风脉动出现的较为分散且高度较低。

2) 降水前或降水出现增大前在2~3 km高度附近出现水平风的垂直风切变并向低层传播,降水时低层和高层的水平风的垂直风切变增大至10 m·s⁻¹以上;暖式切变形势下低层水平风的垂直风切变增强时间较降水早2~6 h,整层大气扰动时间短;冷式切变形势下低层水平风的垂直风切变的增强时间与降水同步,整层大气扰动时间长。

3) 暖式切变形势下,低空急流指数相对连续,且波动较大,对应降水的强度较强,降水分布不均;冷式切变形势下,低空急流指数较为分散,波动较小,对应降水强度较弱,降水分布均匀。降水前低空急流指数的增大超前1~4 h。

4) 暖式切变降水阶段,SNR强回波区在降水初期出现在较高的高度上,在降水趋于减弱时低层SNR值开始增大;冷式切变降水阶段,SNR强回波区在低层长时间维持。

参考文献

- [1] 周志敏,万蓉,崔春光,等.风廓线雷达资料在一次冰雹过程分析中的应用.暴雨灾害,2010,29(3):251-265.
- [2] 董保举,付志嘉,李明,等.风廓线雷达资料在暴雨天气过程特征分析中的应用.气象科技,2012,40(1):74-86.
- [3] 王彦,刘一玮,孙晓磊.利用风廓线雷达资料分析一次强降水过程的风垂直切变特征.暴雨灾害,2017,36(2):172-176.
- [4] 张怪怪,胡明宝,邓少格,等.利用风廓线雷达资料对暴雨与低空急流关系的分析.气象水文海洋仪器,2011,28(1):32-35.
- [5] 刘淑媛,郑永光,陶祖钮.利用风廓线雷达资料分析低空急流的脉动与暴雨关系.热带气象学报,2003,19(3):285-290.
- [6] 王秀玲,陈昱.层状云降水过程中的风廓线特征.气象科技,2010,38(4):439-421.
- [7] 陈娟,尹洁,何文,等.风廓线雷达资料在江西梅雨锋暴雨天气过程中的分析应用.气象与减灾研究,2016,39(3):206-215.
- [8] 戴建华,陶岚,丁杨,等.一次罕见飑前强降水超级单体风暴特征分析.气象学报,2011,70(4):619-627.
- [9] 李峰,施红蓉.一次多相态天气过程的风廓线雷达探测资料特征分析.气象,2014,40(8):992-999.
- [10] 许玉貌,刘红年,徐桂玉.大气科学概论.南京:南京大学出版社,2000.
- [11] 陆汉城.中尺度天气原理和预报.北京:气象出版社,2000.
- [12] 李佩,周佳茜,叶小峰,等.基于动力因子的萍乡市一次区域性暴雨落区诊断分析.气象与减灾研究,2016,39(1):41-47.
- [13] 王晓蕾,阮征,葛润生,等.风廓线雷达探测降水云体中雨滴谱的试验研究.高原气象,2010,29(2):498-505.
- [14] 张培昌,杜秉玉,戴铁丕.雷达气象学.北京:气象出版社,2001.

中国大气环境资源的地理分布

蔡银寅

(南京信息工程大学大气环境经济研究院, 南京 210044)

摘要: 利用《中国大气环境资源报告2018》的数据, 对中国大气环境资源的地理分布进行研究, 以生态级大气环境保护为战略目标, 提出“安康分界线”的思路, 将中国大气环境资源大致分为四个区域: 安康以东以南地区为丰富区; 安康以西以南地区为一般区; 安康以东以北地区为相对匮乏区; 安康以西以北地区为匮乏区。下调大气环境资源等级, 中国大气环境资源的地理分布会发生变化, 相对匮乏区的资源量上升, 这一规律对当前的大气污染防治工作具有重要的现实意义。同时, 还探讨了大气环境区域分级管理, 以及区域分级过程中的生态公平和经济公平问题。

关键词: 大气环境资源, 地理分布, 安康分界线

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.06.019

Geographical Distribution of the Atmospheric Environmental Resources in China

Cai Yinyin

(Institute of Atmospheric Environmental Economics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044)

Abstract: The geographical distribution of the atmospheric environmental resources in China was researched by employing the data of Report on China's atmospheric environmental resources (2018). Considering the ecological criteria for air pollution control, a proposed boundary Ankang borderline divided China into four parts, namely rich area, general area, relative deprivation area, deprivation area. Where rich area locates southeast of Ankang; general area locates southwest of Ankang; relative deprivation area locates northeast of Ankang; and deprivation area locates northwest of Ankang. With the degradation of criteria for air pollution control, the geographical distribution of the atmospheric environmental resources in China shows a change that relative deprivation area turn into rich area. This rule has an important and practical meaning to the current work on air pollution control. Meanwhile, the issue of hierarchical region management on atmospheric environment, ecological justice and economic equity were discussed too.

Keywords: atmospheric environmental resources, geographical distribution, Ankang borderline

0 引言

大气环境成为一种资源是社会发展到某个阶段的经济产物, 就像煤炭、石油、天然气和水一样, 因其可以满足人类的某种需求而又无法零成本获得使然。在人类发展的初级阶段, 人类活动水平相对较低, 对大气环境造成的影响很小, 清洁空气无限供应, 也不存在所谓大气环境资源问题。随着工业文明的不断进步, 人类活动产生的污染物越来越多, 不断释放到大气环境中, 造成不可忽略的影响, 大气环境也随即成为一种资源。

简单地说, 大气环境的资源性主要体现在其自然净化能力方面。如果大气环境不具备自然净化能力, 污染物排放就会对大气环境产生持续性的不可逆

改变, 大气污染呈现线性上升的态势, 人类将无法生存, 当然也就不考虑其资源性的问题。正因为大气环境存在一定的自然调节和恢复能力, 才使得其具有成为一种资源的可能性。大气自然净化能力的产生包含温度、湿度、气压、风、降水等多要素的共同作用, 是大气活动综合水平的体现, 既有实时性, 又有周期性的特征^[1]。大气自然净化能力指大气环境对进入其中的污染物的自然清除能力, 而这种清除能力与天气条件有关。同一个地方, 不同时间会经历不同的天气过程, 因此不同时间的大气自然净化能力也会不同, 这就决定了大气自然净化能力具有实时性特征。然而, 同一个地方, 一个周期内(如一年)天气变化的总体情况却保持着相对的稳定性, 也即所谓的气候特征, 则决定了大气自然净化能力的周期性规律。

除自然源排放以外, 大气污染物主要是人类经济活动的副产品。当人类活动产生的污染物超出大气环

收稿日期: 2020年7月9日; 修回日期: 2020年7月29日
第一作者: 蔡银寅(1985—), Email: yyincai@nuist.edu.cn

境的最低自然净化能力时, 污染物就会在大气环境中留存并持续一段时间, 从而对人类健康、动植物和资产等产生一定程度的损害^[2]。此时, 人们面临两个选择: 一是承受大气污染造成的损失; 二是牺牲经济增长, 减少一些排放。也就是说, 这种情况下想要获得完全无害的大气环境(清洁空气)就必须支付一定的成本, 大气自然净化能力不再无限供应(获取的边际成本不再为零), 已经成为一种稀缺资源, 需要考虑其经济配置, 才能获得最大的经济效益^[3]。

然而, 在传统的环境经济学框架下, 大气环境的异质性通常没有得到充分的体现, 自然也就不存在所谓大气环境资源的概念以及配置的问题。如果接受大气环境存在显著差异的事实, 就不得不重新考虑大气污染的问题。一方面, 大气污染不再是污染物排放单方面的事情, 而是污染物排放与大气自然净化能力之间的平衡问题; 另一方面, 大气自然净化能力的时空分布, 意味着大气污染防治成本的差异性。在不同的地方, 不同的时间, 削减一个单位的污染物排放, 其产生的空气质量改良结果不同。也就是说, 获得相同水平的空气质量改善(或恶化), 在不同的地方, 不同的时间, 所产生的经济成本(或效益)也大不相同。

大气环境资源作为一个经济学概念, 相当于扩大了生产要素的投入范围。在传统的经济学框架下, 生产要素包括劳动力、土地、资本、技术等, 随着生产力水平的提高, 以及人类对生存环境的重视, 环境也被看作是一种要素投入, 因为环境改变会带来一些损失(环境污染对人、动植物、资产的损害), 或者想要保持环境状态不变, 就需要支付更多的成本(比如使用污染物回收技术)。单位污染物对环境的改变程度, 与环境的耐受力有关。当然, 这个问题比较复杂, 如果把污染物分为积累性污染物和非积累性污染物, 则单位污染物对环境造成的边际改变程度, 不仅与环境的耐受力有关, 也与污染物的积累量(保有量)有关。对于大气污染来说, 大气污染物既有积累性污染物的性质, 又有非积累性污染物的性质。

本文主要考虑大气污染物作为非积累性污染物的性质, 即污染物在大气环境中的留存时间有限, 属于能够被及时清理类型的污染物。同时, 还要考虑大气污染物的影响范围, 是局部的, 还是区域的, 或者是全球的, 同样, 这里主要侧重于其局地性特征的考虑, 即本地大气污染物主要污染本地的情况。历史上, 大气污染特别严重的时期, 大气污染的区域性也比较突出, 比如上个世纪中期的伦敦, 20世纪90年代

中国南方的酸雨, 都是典型的区域性污染。随着工业脱硫脱硝技术的普及, 大部分工厂电厂都实现了达标排放, 大气污染也从超重污染阶段转向较重污染或中度污染阶段, 局地污染也就成了主要方面。

因此, 大气环境资源的经济学含义是: 大气环境的边际改变程度所接受的污染物排放量, 或者单位污染物排放量所产生的大气环境的边际改变程度。相同的污染物排放量, 如果造成的大气环境边际改变程度小, 则意味着大气环境资源丰富。如果将大气环境资源看作是一种生产投入, 其含义则是, 单位产量产生的污染物所需大气环境的边际改变程度。由于大气自然净化能力具有实时性和周期性特征, 所以大气环境资源也是一种不可存储的资源。生产(消费)活动中, 大气环境资源的投入, 取决于其生产的时间和空间安排, 生产(消费)过程(污染物排放过程)即大气环境资源的消耗过程。

值得注意的是, 大气环境资源的多寡, 主要体现在其趋势上, 而与实际消耗程度无关。对大气环境资源的优化配置, 也可以描述为对大气自然净化能力的充分利用, 即对污染物排在时间和空间上的安排问题。由于不同地方自然地理环境和气象气候特征不同, 就造成了不同地方大气环境资源的显著差异, 特别是对于中国这样幅员辽阔、地形复杂多变的大国来说更是如此。想要提升污染物排放空间安排的效率, 首先要掌握大气环境资源的空间特征。因此, 厘清中国大气环境资源的地理分布, 具有重要的战略意义。

1 大气环境资源及其统计方法

清洁空气不能无限供应, 是大气环境成为资源的前提条件。污染物在大气环境中的留存量和持续时间是大气污染的核心问题。现实中, 空气中污染物的浓度是衡量大气污染程度的主要指标^[4]。大气环境的资源性, 主要源于其对污染物这两个方面的影响。

大气环境对进入其中污染物的作用主要表现为两个方面: 一是清除作用, 即大气环境的自然净化作用; 二是强化作用, 即对二次污染物生成的影响。二次污染物的生成依赖两个因素, 一是生成原料, 二是生成条件。作为二次污染物生成的外部条件, 大气环境实际上相当于增加了污染物的排放强度。在《中国大气环境资源报告2018》中, 二次污染物生成系数(GCSP)描述了大气环境的这一特征^[5]。严格意义上说, 大气环境的二次污染物生成特征, 也是大气环境资源的一部分。假定其他条件不变, 较大的二次污染物生成能力, 意味着相同排放条件下, 二次污染物生成量多, 大气污染程度高。二次污染物生成能力相

当于给污染物排放加了一个放大系数，不同大气环境下，放大程度不一样。

大气环境对污染物的清除作用，是大气环境资源的本质体现。污染物进入大气环境后，会经历扩散、搬运、沉降、移除等一系列过程，最终离开大气环境回到地面、水体、动植物表面等，这个过程称为大气环境的自然净化过程。在不同的大气环境下，污染物经历这一过程的时间长短不同。这一过程的时间反映了大气自然净化能力的强弱，时间越短，意味着大气的自然净化能力越强，反之则越弱。大气自然净化能力反映了大气环境对污染物的清除能力和制造清洁空气的速度，是大气环境资源配置的主要依据。

概括起来，二次污染物生成能力和大气自然净化能力共同构成了大气环境的资源特征。现实计算中，二次污染物生成能力相当于给大气环境资源做减法，可以看作是对污染物排放的强化或对大气自然净化能力的削弱。当然，大气自然净化能力的强弱，对二次污染物的生成也有一定的影响，因为较强的大气自然净化能力，会显著减少二次污染物的生成原料。长期看，自然净化能力是大气环境资源的主要方面。因此，对中国大气环境资源地理分布的研究，主要是对不同地区大气自然净化能力总量差异和时间特征的分析。

大气自然净化能力指数模型（ASPI-Model）是实时计算大气自然净化能力强弱的一种方法，其原理如下：首先，针对污染物在大气环境中的留存时间与气象要素之间的关系建立方程。其次，使用计量模型和大数据分析技术，对气象历史数据、空气质量历史数据和自然地理条件进行经验分析，反复计算查找影响空气质量的主要气象因子，并对其贡献按照大小排序。第三，将气象因子的贡献转化为对污染物在大气环境中留存时间的影响程度。第四，将转化后的气象因子作为自变量引入方程，同时将自然地理条件等固化为可变常参数，方程的左边为污染物在大气环境中的留存时间，右侧为气象因子和可变常参数。最后，对污染物在大气环境中的留存时间进行标准化处理，变成0~100的实数，作为衡量大气自然净化能力强弱的一个指标。

理论上，大气自然净化能力指数模型是一个经验模型，它大致描述了不同地区、不同时间、不同气象条件下，大气自然净化污染物的能力强弱。利用这一模型，输入气象历史数据、地理信息数据和常参数数据，就可以计算该地区某一时间点的大气自然净化能力强弱，也可以评估某一段时间，该地区的大气自

然净化能力的强弱。《中国大气环境资源报告2018》列举了中国2018年2290个地方的大气环境资源样本，覆盖到县一级。单个样本包括该地的ASPI、GCSP等五项指标数据，数据频次为3 h或8 h，基本反映了该地的大气环境资源状况。利用《中国大气环境资源报告2018》的数据，可以对中国大气环境资源的地理分布，做一个简要的分析。

2 大气环境资源的战略分级

一个地区一年内大气自然净化能力的总量，反映了一个地区大气环境资源的相对丰腴程度。然而，大气自然净化能力强弱在时间上的分布，对大气环境资源也有重要意义。假定污染物的排放由经济活动规律决定，相对于大气自然净化能力的时间分布是一个随机事件。也就是说，污染物的排放并不会考虑大气自然净化能力的变化，只是根据自身活动需要进行。基于这种假定，将大气自然净化能力看作是一个外生变量，其时间分布特征对大气环境资源的意义就显得尤为重要。例如，A地和B地全年的大气自然净化能力总量相等，A地大气自然净化能力的时间分布比较平均，而B地大气自然净化能力的时间分布则比较集中，且强弱悬殊。如果AB两地的污染物排放情况一致，则B地更容易出现大气污染。因为在大气自然净化能力较弱的时段，污染物排放很容易超过大气自然净化能力，产生大气污染，而在大气自然净化能力较强的时段，由于污染物排放不会随之提高，大气自然净化能力的作用没有完全发挥。

当然，如果污染物排放强弱可以根据大气自然净化能力进行适时调节，那么大气自然净化能力的时间分布就不那么重要了。但是，除非适时调节的成本可以忽略或者调节成本相对于减少排放来说收益更为明显，否则这种理想的适时调节都不可能。至少在目前看来，调节污染物排放时间的成本还不能忽略。因此，在不考虑污染物排放适时调节的情况下，可以根据一个地方大气自然净化能力的时间（强弱）分布情况，对大气环境资源进行战略分级。

大气环境资源战略分级的基本假设如下：1) 污染物排放与大气自然净化能力是两个相对独立的事件，不存在相互依存关系；2) 一个地方的大气自然净化能力变化具有明显的周期性特征，即具有整体稳定性的特征，年度波动不明显或者可以忽略；3) 一个地方大气自然净化能力强弱的时间分布虽然不同，但不同水平的大气自然净化能力占全年的比重相对稳定。例如，一个地方较弱的净化能力可能出现在3月，也可能出现在4月，但全年较弱大气自然净化能

力出现的频次和时间长短大致稳定。基于这三个假设,可以对大气环境资源进行战略分级(表1)。

表1 大气环境资源的战略分级标准和含义

Table 1 The strategic grading standard and implications of atmospheric environmental resources

	生态级 大气环境资源	宜居级 大气环境资源	发展级 大气环境资源	大气环境 资源储量
大气环境资源的战略分级标准	全年大气自然净化能力指数10%分位数	全年大气自然净化能力指数25%分位数	全年大气自然净化能力指数50%分位数	全年大气自然净化能力指数平均值
大气环境保护的目标含义	全年不到10%的时间超过大气自然净化能力时对应的污染物排放强度	全年不到25%的时间超过大气自然净化能力时对应的污染物排放强度	全年不到一半的时间超过大气自然净化能力时对应的污染物排放强度	大气自然净化能力相对丰腴程度

不考虑污染物排放的适时调整,想要获得相应的空气质量,就需要根据如表1所示的标准制定排放计划。假定,想要保持空气质量处于生态保护区水平,污染物排放强度超过大气自然净化能力的时间,不能超过全年的10%。也就是说,对该地大气自然净化能力进行强弱排序,找到倒数第10%的那个大气自然净化能力,然后将污染物排放水平定在该大气自然净化能力以下,就可以获得生态级的空气质量。以此类推,想要获得宜居级的空气质量,也可以找到对应的污染物排放强度限值。

按照表1的思路,大气环境资源的战略分级实际上是先确定大气环境的控制目标,然后再根据这个控制目标,结合本地的大气自然净化能力特征,计算对应的污染物排放水平。换句话说,在相同的控制目标下,对应的污染物排放水平越高,意味着该地的大气环境资源越丰富。如果将污染物排放强度与大气自然净化能力看作是一组对应关系,则可以直接用大气自然净化能力来表示大气环境资源的多寡。因此,《中国大气环境资源报告2018》将大气环境资源分为生态、宜居和发展三级,分别用ASPI的10%、25%和50%分位数来表示对应目标下大气环境资源的丰富程度。

其实,大气环境资源的战略分级主要是考虑到污染损失和减排损失的平衡关系。如前面所说,当污染物排放强度超过大气自然净化能力时,产生大气污染,此时人们面临两个选择:一是直接承受大气污染带来的损失;二是用控制排放的方式保持空气质量,承受减排带来的经济损失。到底该选择哪种方式,实际上是一个经济问题。在经济发展的初级阶段,物质生活相对匮乏,人们对环境的效用评价较低,经济增长的收益高,承受污染的损失低,人们大概率会选择直接承受大气污染的损失。随着经济发展水平越来越

高,物质条件越来越好,人们对环境的效用评价也会越来越高,直接承受大气污染的损失越来越大。相对而言,由于经济活动的选择范围扩大,替代性增强,减排的经济损失则越来越小,两者相较,这时候,通过排放控制获得较好的空气质量是一个好的选择。中国的大气污染治理历程,大致也反映了这一事实^[6]。

选择什么样的空气质量控制目标,就等于确定了大气环境资源的分级标准。如果将空气质量管理目标定在宜居级,那么就应该考虑宜居级的大气环境资源分布状况及其配置方案。类似地,如果将空气质量管理目标定在生态级,就应该考虑生态级大气环境资源分布状况。因此,在分析中国大气环境资源地理分布的过程中,同样要考虑大气环境资源的分级问题。不同分级条件下,中国大气环境资源的地理分布不同,其空间配置方式和结果也不会相同。

对大气环境资源进行战略分级,主要是考虑到污染物排放的不可适时调节性。如果污染物排放的时间调整成本降低,就可以更充分地利用大气自然净化能力。这时候,大气环境资源的丰富程度,则主要由大气自然净化能力的总量来反映。如表1所示,本文将考虑污染物排放时间调整时的大气环境资源定义为大气环境资源储量,用大气自然净化能力的均值表示。值得注意的是,大气环境资源储量与发展级大气环境资源在数值上虽然比较接近,但含义却不相同。发展级大气环境资源,强调的是在不考虑污染物排放时间调整的情况下,为了获得较好的经济发展,而承受一定程度污染损失时,大气环境资源的可利用状况。大气环境资源储量,强调的是污染物排放时间调整的空间,即最大可利用的大气环境资源状况。

3 中国大气环境资源的地理分布

无论按照什么样的分级标准,由于自然地理条件和气象气候特征的差异,中国的大气环境资源都应该有明显的地理分布规律。《中国大气环境资源报告2018》分别列出了2018年全国2290个样本的生态级大气环境资源、宜居级大气环境资源、发展级大气环境资源和大气环境资源储量数据。利用这些数据,可以对中国大气环境资源的地理分布情况进行初步的分析。

虽然大气环境资源与煤炭、石油、天然气等矿藏资源,以及土地、水资源等类似,其丰富程度都可以用多寡来衡量,但大气环境资源还有一些相对特殊的特征。首先,大气环境资源与其他资源相比,不是有无的概念,而更多是大小或多少的概念。即使在大气环境资源极度匮乏的地区,也不能说其大气环境资

源为零，只能说该地的大气环境资源，比较接近基准低量。大气环境资源的这一特征主要是由大气自然净化能力的最低水平决定的。也就是说，即使在最不利的气象条件和地形下，开放性的大气环境所具备的自然净化能力也不是零，而只是一个相对低值。比如，可以将这个相对低值，定义为基准低量。任何一个地方，其大气环境资源的匮乏程度，最多也就是无限趋近这个基准低量。其次，无论是用大气自然净化能力的总量还是分位数来衡量大气环境资源，都是一个相对概念。不像煤炭、石油那样，用蕴含量来反映多寡。

基于以上两点，简单起见，用高值样本占比这一指标来反映大气环境资源的丰富程度。其含义是，在一个区域内，如果大气环境资源高值样本占比较高，意味着该区域的大气环境资源丰富。具体计算方法是，对于不同等级的大气环境资源数据，先对《中国大气环境资源报告2018》中的2290个样本进行排序，规定排在前25%左右的样本为高值样本，具体分类标准如表2所示。

表2 高值样本分类标准

Table 2 Classification criteria of high-value samples

	生态级 大气环境资源	宜居级 大气环境资源	发展级 大气环境资源	大气环境资源 储量
高值样本 分类标准	>30	>33	>37.5	>45

按照表2的分类标准，首先分析中国大气环境资源沿经度的变化规律(图1)。纵轴表示不同分级条件下高值样本的占比(为自然比，比值区间为0~1)，横轴表示经度基准线，即中国该经度以东的地区。例如，横轴110表示中国110°E以东地区，横轴115则表示中国115°E以东地区。图1中的曲线，代表中国每向东移动1个经度，区域内高值样本所占比例的变化趋势，

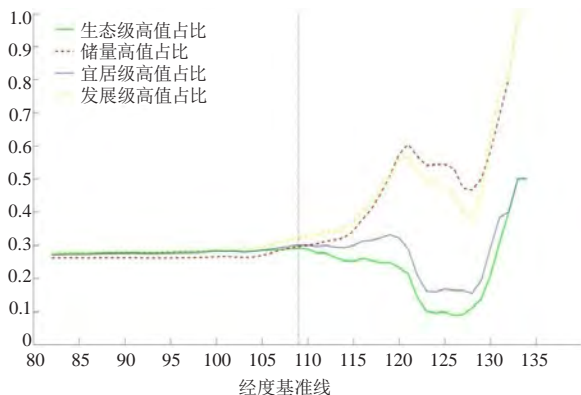


图1 中国大气环境资源沿经度变化

Fig. 1 The change of atmospheric environmental resources in China with longitude

也即大气环境资源丰富程度的变化趋势。

从图1可以大致看出，中国大气环境资源分布东西方向上存在显著差异，在109°E附近，有一个明显的变化。也就是说，109°E以东地区，中国的大气环境资源分布与以西地区相比，存在显著差异。为了更清楚地显示这一变化，表3列出了95°—125°E，每向东移2个经度高值样本所占比例的变化，用百分比表示。同样可以大致看出，109°E具有分界线的作用。

类似地，用同样的方式分析中国大气环境资源沿纬度的变化(图2)。纵轴表示不同分级条件下高值样本的占比(为自然比，比值区间为0~1)，横轴表示纬度基准线，即中国该纬度以南的地区。例如，30表示中国30°N以南的区域，40表示中国40°N以南的区域。

从图2可以大致看出，整体而言，中国大气环境资源呈现南多北少的状况，随着纬度基准线的北移，大气环境资源丰富程度下降。在33°—47°N附近，中国大气环境资源分布有两个典型的变化。与109°E分界线类似，33°N和47°N，同样可能具有纬度分界线的含义。

表4列出了21°—53°N，每向北移动2个纬度，中国大气环境资源的变化情况。可以看出，33°N以南地区，大气环境资源相对丰富。33°N以北地区，每向北移动2个纬度，大气环境资源丰富程度的下降趋势开始趋于平缓，说明33°N以北地区，大气环境资源相对匮乏，移动到47°N附近，大气环境资源的丰富程度几乎不再变化。由于中国47°N以北区域占全国比重较小，所以47°N线没有多少实际的分界意义。

由图1、图2、表3和表4的分析可以大致确定，中国的大气环境资源存在明显的地理分布特征，下面将对其地理分布特征和含义做进一步的阐述。

4 安康分界线

如前面分析，中国大气环境资源分布东西方向大致以109°E为界，南北方向大致以33°N为界。根据这一分界原则，中国大体被分为四个区域。由于109°E，33°N位于陕西省安康市境内，因此可以称之为中国大气环境资源的安康分界线。地理分界线的确定，有利于提高对中国大气环境资源的空间认知水平，促进大气环境资源的空间优化配置。在不同的历史时期，有很多著名的地理分界线^[7]，对社会经济发展和知识传播都起到非常重要的作用，如标记中国人口疏密分布的胡焕庸线^[8-9]、划分南北方的秦岭淮河线等，一直深深地影响着人民生活的种种方面。同时，在较小的专业领域，也有一些地理分界线的提法，

表3 中国大气环境资源沿经度变化趋势（自西向东）^[5]
Table 3 The change tendency of atmospheric environmental resources in China with longitude
(from west to east)^[5]

经度基线	样本总量	生态级大气环境资源		宜居级大气环境资源		发展级大气环境资源		大气环境资源储量	
		高值量	百分比/%	高值量	百分比/%	高值量	百分比/%	高值量	百分比/%
95°E	2167	606	27.96	598	27.60	607	28.01	566	26.12
97°E	2156	606	28.11	598	27.74	607	28.15	566	26.25
99°E	2129	602	28.28	596	27.99	605	28.42	563	26.44
101°E	2065	583	28.23	582	28.18	594	28.77	551	26.68
103°E	1964	552	28.11	549	27.95	567	28.87	518	26.37
105°E	1834	523	28.52	524	28.57	541	29.50	495	26.99
107°E	1683	483	28.70	494	29.35	522	31.02	481	28.58
109°E	1533	446	29.09	461	30.07	495	32.29	454	29.62
111°E	1344	373	27.75	399	29.69	446	33.18	409	30.43
113°E	1122	296	26.38	331	29.50	383	34.14	355	31.64
115°E	871	219	25.14	261	29.97	321	36.85	299	34.33
117°E	618	157	25.40	195	31.55	262	42.39	253	40.94
119°E	394	98	24.87	131	33.25	201	51.02	201	51.02
121°E	238	51	21.43	69	28.99	136	57.14	144	60.50
123°E	148	15	10.14	24	16.22	73	49.32	80	54.05
125°E	101	10	9.90	17	16.83	48	47.52	55	54.46

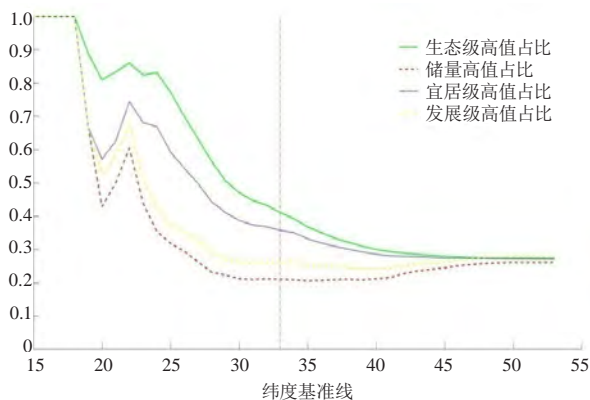


图2 中国大气环境资源沿纬度变化

Fig. 2 The change of atmospheric environmental resources in China with latitude

如风速与能见度关系的地理分界线^[10]，但影响范围较小。安康分界线的提出，对于中国大气环境资源的空间配置来说，希望能起到化繁为简的效果。

首先，考虑安康分界线下生态级大气环境资源的分布（表5）。可以看出，109°E以东，33°N以南地区，生态级大气环境资源非常丰富，高值样本占比接近一半。109°E以西，33°N以南地区，生态级大气环境资源下降，高值样本占比不到三分之一。而在33°N以北地区，生态级大气环境资源非常匮乏，尤其109°E以西地区，高值样本占比仅为8.01%。

从经济发展的长期规律看，空气质量的最终控制目标应该是生态级。基于这个考虑，对中国大气环

境资源的地理划分，应该以生态级大气环境资源为基础，然后再研究其他分级条件下，大气环境资源变化情况。因此，根据表5的数据，可以将中国的大气环境资源大致划分为四个区域（图3），即安康以东以南地区为丰富区，以南以西地区为一般区，以西以北地区为匮乏区，以东以北地区为相对匮乏区。

从图3可以看出，中国生态级大气环境资源大致呈现了南多北少、东多西少的基本规律。在丰富区，广东、海南、广西东部、福建大部，江西、安徽、湖北、江苏、浙江的部分地区，生态级大气环境资源相对丰富。在匮乏区和相对匮乏区，华北大部、西北大部，生态级大气环境资源都比较匮乏。

在生态级大气环境资源分区的基础上，考察宜居级大气环境资源的分布情况（表6）。可以看出，放宽空气质量控制标准，中国大气环境资源分布的地区差距缩小。与生态级大气环境资源相比，丰富区宜居级大气环境资源高值占比下降了5.51%，一般区宜居级大气环境资源高值占比下降了5.03%，而匮乏区宜居级大气环境资源高值占比上升了1.75%，相对匮乏区宜居级大气环境资源高值占比上升了6.3%。当然，四个区域的整体趋势并没有发生逆转。

表6呈现的规律，从图4可以更明显地看出，中国宜居级大气环境资源的区域差异明显缩小，尤其在匮乏区和相对匮乏区，还出现了零星的高值集中区，使得这两个区域宜居级大气环境资源上升。在一般区，

表4 中国大气环境资源沿纬度变化趋势 (自南向北)^[5]

Table 4 The change tendency of atmospheric environmental resources in China with latitude (from south to north)^[5]

纬度基线	样本总量	生态级大气环境资源		宜居级大气环境资源		发展级大气环境资源		大气环境资源储量	
		高值量	百分比/%	高质量	百分比/%	高值量	百分比/%	高值量	百分比/%
21°N	24	20	83.33	15	62.50	14	58.33	12	50.00
23°N	91	75	82.42	62	68.13	46	50.55	40	43.96
25°N	273	211	77.29	162	59.34	102	37.36	87	31.87
27°N	479	303	63.26	239	49.90	156	32.57	126	26.30
29°N	703	356	50.64	289	41.11	191	27.17	157	22.33
31°N	957	428	44.72	358	37.41	248	25.91	201	21.00
33°N	1163	478	41.10	416	35.77	303	26.05	245	21.07
35°N	1369	504	36.82	455	33.24	343	25.05	282	20.60
37°N	1617	540	33.40	500	30.92	400	24.74	339	20.96
39°N	1812	561	30.96	530	29.25	440	24.28	378	20.86
41°N	1960	576	29.39	551	28.11	478	24.39	423	21.58
43°N	2072	592	28.57	577	27.85	532	25.68	488	23.55
45°N	2141	598	27.93	587	27.42	564	26.34	525	24.52
47°N	2203	607	27.55	602	27.33	601	27.28	563	25.56
49°N	2241	615	27.44	610	27.22	621	27.71	585	26.10
51°N	2255	617	27.36	613	27.18	626	27.76	590	26.16
53°N	2258	617	27.33	613	27.15	626	27.72	591	26.17

表5 安康分界线下生态级大气环境资源分布

Table 5 The geographical distribution of the atmospheric environmental resources with ecological criteria divided by Ankang borderline

区域		样本总量	高值样本数量	百分比/%	分区
经度范围	纬度范围				
≥109°E	≤33°N	690	329	47.68	丰富区
<109°E	≤33°N	477	149	31.24	一般区
<109°E	>33°N	287	23	8.01	匮乏区
≥109°E	>33°N	841	117	13.91	相对匮乏区

表6 安康分界线下宜居级大气环境资源分布

Table 6 The geographical distribution of the atmospheric environmental resources with livable criteria divided by Ankang borderline

区域		样本总量	高值样本数量	百分比/%	分区
经度范围	纬度范围				
≥109°E	≤33°N	690	291	42.17	丰富区
<109°E	≤33°N	477	125	26.21	一般区
<109°E	>33°N	287	28	9.76	匮乏区
≥109°E	>33°N	841	170	20.21	相对匮乏区

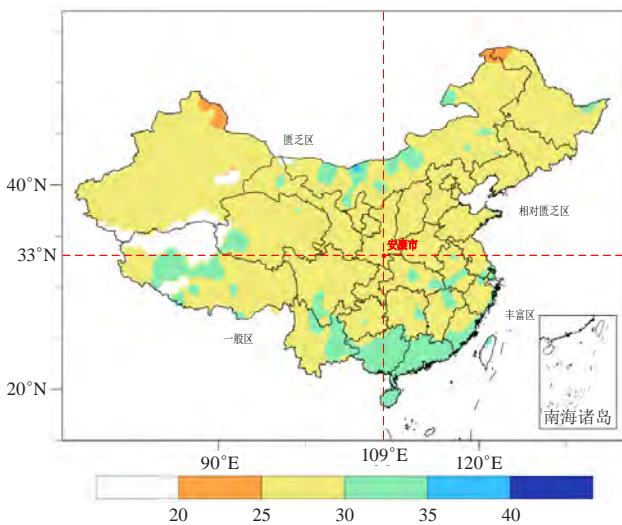


图3 中国生态级大气环境资源的地理分界线—安康线

Fig. 3 The geographic boundary of the atmospheric environmental resources in China with ecological criteria—Ankang borderline

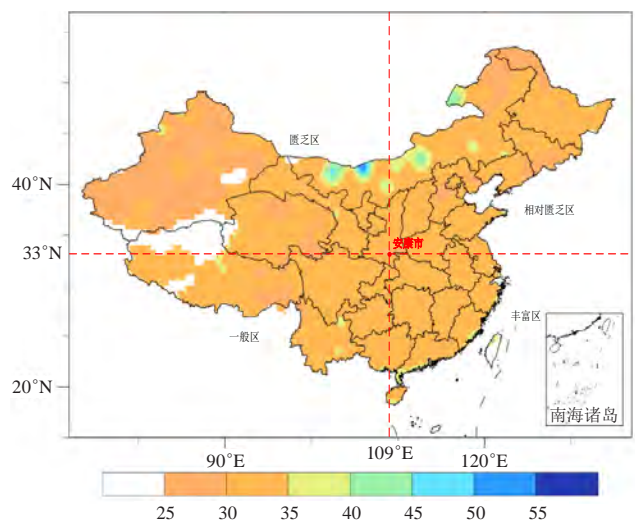


图4 中国宜居级大气环境资源的地理分界线—安康线

Fig. 4 The geographic boundary of the atmospheric environmental resources in China with livable criteria—Ankang borderline

西藏东部部分地区拉低了整体水平。丰富区虽然没有明显的高值集中区，但海南、广东、福建、浙江沿海的优势比较突出，更重要的是，丰富区与其他三个区域相比，没有明显的低值集中区。因此，在大气环境资源的宜居级水平下，四个区域的划分仍然是合理的，丰富区的优势也是明确的，这一点与表6中的数据也相一致。

继续降低大气污染控制目标，将大气环境资源分级下调到发展级。如表7所示，四个区域的发展级大气环境资源的差距进一步缩小，丰富区和一般区高值占比继续下降，相对匮乏区和匮乏区的高值占比继续上升，并且发生了逆转。如果按照发展级大气污染控制目标，相对匮乏区的大气环境资源最为丰富，甚至还高于丰富区1.43%。匮乏区的发展级大气环境资源已经与一般区接近。

表7 安康分界线下发展级大气环境资源分布

Table 7 The geographical distribution of the atmospheric environmental resources with developmental criteria divided by Ankang borderline

区域		样本总量	高值样本数量	百分比/%	分区
经度范围	纬度范围				
≥109°E	≤33°N	690	219	31.74	丰富区
<109°E	≤33°N	477	88	18.45	一般区
<109°E	>33°N	287	45	15.68	匮乏区
≥109°E	>33°N	841	279	33.17	相对匮乏区

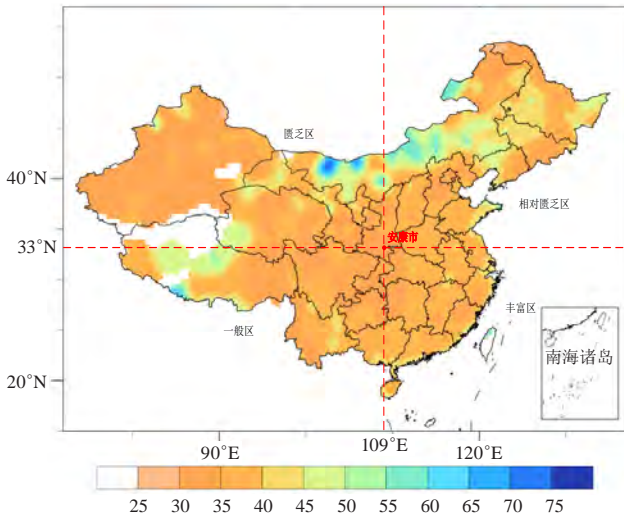


图5 中国发展级大气环境资源的地理分界线—安康线
Fig. 5 The geographic boundary of the atmospheric environmental resources in China with developmental criteria—Ankang borderline

从图5可以看出，相对匮乏区发展级大气环境资源上升，主要是因为在内蒙古东部、东北大部分、山东半岛、辽东半岛等地区出现了大量的高值集中区。

在丰富区，虽然发展级大气环境资源整体上仍处于优势，但缺乏明显的高值集中区，这也是造成丰富区整体水平下降的原因。发展级水平下，匮乏区也出现了明显的高值集中区，这使得匮乏区与一般区的差距缩小。

进一步考察四个区域的大气环境资源储量分布（表8）。相对匮乏区的大气环境资源储量，高值占比已经超过了1/3，而丰富区大气环境资源储量的高值占比与生态级相比，下降了一半以上，减少了24.35%，已经不足1/4。匮乏区与一般区相比，高值占比已经非常接近，且出现了逆转。也就是说，就大气环境资源的储量而言，一般区已经成了匮乏区，丰富区变成了一般区，相对匮乏区变成了丰富区。

表8 安康分界线下大气环境资源储量的分布

Table 8 The geographical distribution of the atmospheric environmental resources in reserve divided by Ankang borderline

区域		样本总量	高值样本数量	百分比/%	分区
经度范围	纬度范围				
≥109°E	≤33°N	690	161	23.33	丰富区
<109°E	≤33°N	477	86	18.03	一般区
<109°E	>33°N	287	54	18.82	匮乏区
≥109°E	>33°N	841	293	34.84	相对匮乏区

从图6可以看出，除了京津冀、陕北外，相对匮乏区的大气环境资源储量丰富。对于丰富区来说，江西大部、福建西部山区、皖南、浙西南、以及湘鄂西部，大气环境资源储量都相对较少，使得丰富区的大气环境资源储量整体下降。一般区的情况和丰富区类似，川渝黔大部分地区大气环境资源储量不足，拉低

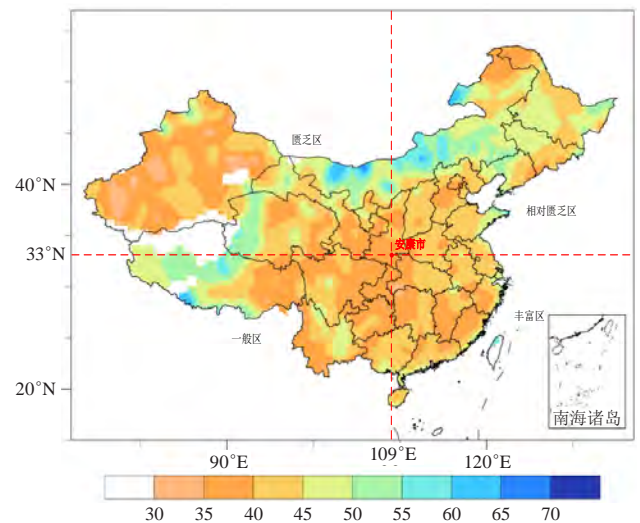


图6 中国大气环境资源储量的地理分界线—安康线
Fig. 6 The geographic boundary of the atmospheric environmental resources in China in reserve criteria—Ankang borderline

了一般区的整体水平，使其成为大气环境资源储量的匮乏区。匮乏区的情况则与相对匮乏区相似，出现了储量丰富的集中区，拉高了整体水平。

由于图3—图6为渲染图，每个色阶代表的ASPI相差为5，并且同时画出了所有的样本点，使得四个区域的颜色区分看上去不是特别明显，尤其是图4。实际上，只要ASPI的周期性数值相差超过1，就可以将两地的大气环境资源看作是具有明显差异。因此，图3—图6很难突出ASPI数值在1~5的差别。

为了清楚地呈现安康分界线的区分效果，图7给

出了不同分级条件下中国大气环境资源高值样本分布的散点图。其中图7a是生态级大气环境资源的高值样本分布，可以比较清楚地看出，安康以南以东地区，高值样本比较集中。值得注意的是，安康分界线划分的四个区域，样本总量不同，不能只通过高值样本的绝对数量来判断大气环境资源的丰富程度，而应该用高值占比来衡量。尽管如此，通过对图7中四张子图的比较，以及结合图1和图2所反映的高值样本占比沿经纬度的变化趋势，还是可以比较清楚地看出，安康线下四个区域大气环境资源的显著差异。

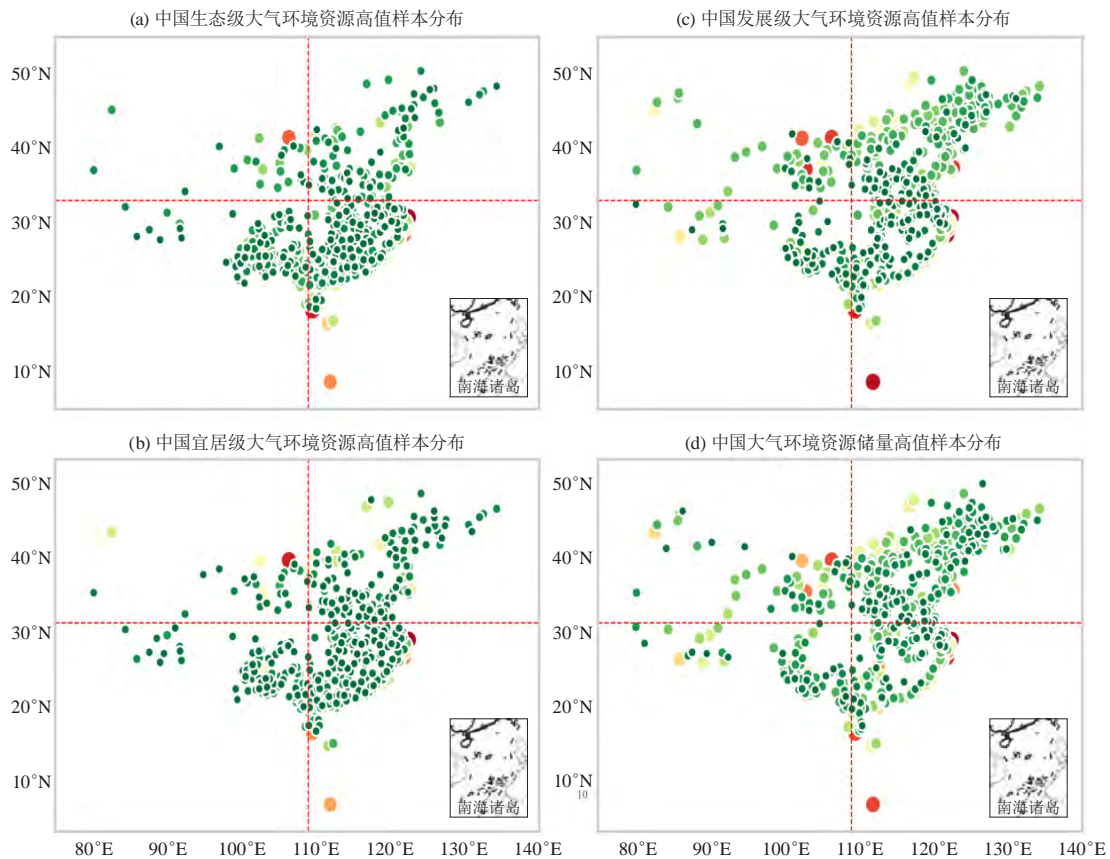


图7 中国大气环境资源的高值样本分布（不同分级）

Fig. 7 The distribution of high-value samples of the atmospheric environmental resources in China (different classification criteria)

图7对不同分级条件下四个区域大气环境资源丰富程度的变化规律，表现得更为明显。图7c与图7b相比，丰富区和一般区的高值样本数量显著减少，而相对匮乏区的高值样本数量显著增加。很明显，发展级大气环境资源，是相对匮乏区发生逆转的分野，这同样也可以看作是中国大气环境资源南北方的等级分野。这意味着，如果将大气污染防治的标准定在发展级，即允许一定程度的污染，这时候，南北方的大气环境资源相差并没有那么悬殊。然而，一旦上调大气

污染防治的标准，比如将空气质量定在宜居级，南北方大气环境资源的差距就会变得比较明显。

整体而言，安康分界线对于中国大气环境资源的地理划分具有典型意义。不考虑污染物排放的时间调整问题，安康分界线下，丰富区的大气环境资源较为丰富。尤为重要是，丰富区的大气环境资源，很少出现低值集中区。因此在丰富区，只要不是污染物排放强度特别高，出现重污染的几率一般较低。与丰富区相比，一般区内出现污染的几率上升，但总体的风

险并不高。而对于相对匮乏区和匮乏区来说，大气污染的几率很高。

前面提到，当污染物排放强度超过大气自然净化能力的最低值时，就会出现大气污染。从这个角度看，大气环境资源匮乏区和相对匮乏区最先出现污染的概率很高。当然，如果考虑到具体的排放问题，由于匮乏区地处西北，人口较少、经济发展相对落后，排放强度有限，出现大面积污染的可能性较低，而地处华北、东北的相对匮乏区，人口密集、经济发达，尤其存在集中布局的重工业，排放强度很大，最容易出现大面积的重污染。相对匮乏区的京津冀及其周边地区，就是典型的代表。当然，在匮乏区的关中地区，由于工业也相对集中，也出现了重污染。相对而言，匮乏区虽然大气环境资源匮乏，但由于排放强度有限，大气污染的程度并不是特别严重。

大气环境资源丰富区，实际上也是经济发达区，中国的经济产出，有一半以上布局在这个区域，排放

强度远超其他三个区域。然而，由于这个区域的大气环境资源丰富，尤其是超低净化能力的占比较低，使这个区域的大气污染程度与相对匮乏区相比，还不算严重。虽然在长三角地区，部分城市的空气质量达不到优良水平，但考虑到其庞大的经济总量和排放强度，空气质量则属于较好的区域，大气环境资源的意义非常明显^[11]。

5 大气环境资源分级变化规律的含义

下调大气环境资源的等级，相对匮乏区和匮乏区的大气环境资源上升，而丰富区和一般区的大气环境资源下降。这一规律可以用大气自然净化能力波形特征来解释（图8）。其中纵轴表示大气自然净化能力指数，即ASPI的大小，取值区间为0~100，值越大，代表大气自然净化能力越强，反之越弱。横轴表示不同的ASPI值占总体的比例。图8给出了四个区域大气自然净化能力的代表波形示意，大致反映了不同区域大气自然净化能力的典型特征。

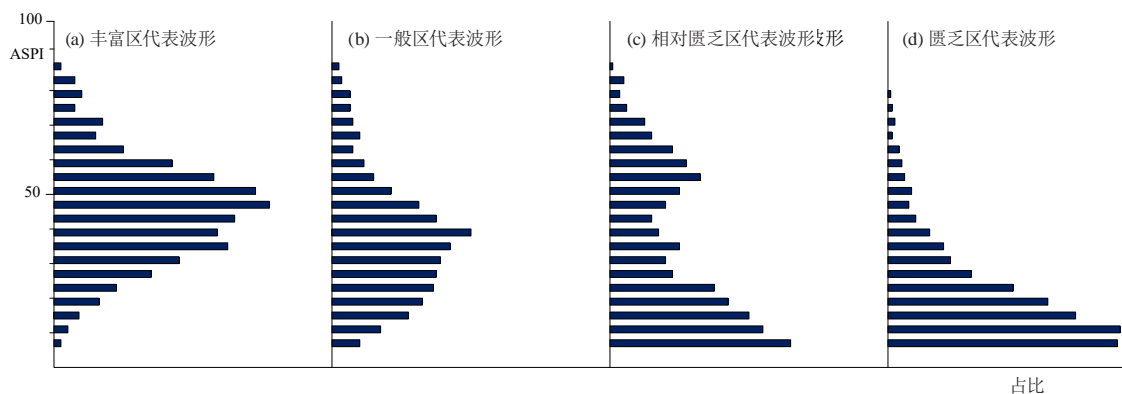


图8 四大区域大气自然净化能力波形特征示意
Fig. 8 Schematic characteristic of air self-purification in four area

丰富区的大气自然净化能力波形整体呈正态分布状，较低的大气自然净化能力和较高的大气自然净化能力占比都较小，中等水平的大气自然净化能力占比最高，并呈现向两侧递减的趋势。这意味着，在不考虑污染物排放时间调整的条件下，污染物排放和大气自然净化能力作为两个相互独立的事件，大气环境自然净化能力的自然配置水平较高。也就是说，处于完全放任状态的污染物排放，由于大气自然净化能力趋于正态分布状，较高排放水平遇到较低净化能力的概率较低，相当于自然状态下提高了大气自然净化能力的利用效率，从而减少了大气污染发生的频次。

一般区的大气自然净化能力波形可以看作是变异的正态分布状，较低的大气自然净化能力占比升高，较高的大气自然净化能力占比下降，大气自然净化能

力整体在中等以下水平集中。这种波形特征的含义是，大气环境资源的整体水平下降，且较低水平的大气自然净化能力占比较高，与丰富区相比，自然状态下的配置效率降低，相同排放情况下，发生大气污染的频次上升。

匮乏区的大气自然净化能力波形特征也比较明显，它已经完全不再具备正态分布的特征，而是整体呈现明显的向下集中趋势，即低水平的大气自然净化能力占比较高，随着大气自然净化能力的提高，占比越来越低。从自然状态下的配置效率看，匮乏区出现大气污染的概率最高。大气自然净化能力的这种分布特征，最容易出现污染物排放超过大气自然净化能力的情况，而出现大气污染。同时，由于较低大气自然净化能力连续出现的比例较大，其发生超重污染的可

能性也比较高。

相对匮乏区的大气自然净化能力波形特征比较特殊，它既有匮乏区的特征，又有丰富区的特征。相对匮乏区的大气自然净化能力波形具有两个占比高值，一个是较低的大气自然净化能力占比较高，另一个是中等以上水平的大气自然净化能力也有一个相对显著的占比。当然，中等以上水平大气自然净化能力占比与较低水平大气自然净化能力占比相比，其绝对水平还是较低的，只是从趋势上看，相对匮乏区的大气自然净化能力在相对高值部分有一个显著的优势，这是其他三个区域不具备的。

其实，可以将相对匮乏区的大气自然净化能力波形分作两部分看。中等净化能力水平以下，它更接近匮乏区的大气自然净化能力波形特征。较低水平的大气自然净化能力占比较大，随着净化能力的升高，占比较小。在发生大气污染的几率方面，相对匮乏区与匮乏区的特点相似，都比较容易发生。由于较低水平的大气自然净化能力占比较高，且容易集中。在相同排放条件下，与丰富区相比，相对匮乏区更容易发生大气污染。同时，相对匮乏区中等水平以上的大气自然净化能力也有一个相对较高水平的占比，这就使得相对匮乏区的大气环境资源，又部分具有丰富区的特征。从统计数据看，相对匮乏区的这一特征主要表现为发展级大气环境资源和大气环境资源储量较高。

中国大气环境资源分级变化规律具有重要的现实意义，具体表现如下：

第一，如果采取放任的环境政策，对大气污染物的排放不进行控制。从大气污染的结果看，大气环境资源储量高的区域具有一定的优势。也就是说，如果走先污染后治理的路子，一开始污染物排放自由放任，工业任意布局（不考虑大气污染因素），等到发展级大气环境资源消耗完毕，大气污染处于超重阶段时再进行治理。在这个过程中，大气环境资源储量高的地区具有更大的环境容量和纳污能力优势。1990年之前的中国大致就处于这个状态，大气环境政策相对宽松，污染物排放控制主要集中在烟尘方面。随着工业化进程的加速，接下来的10年间（1991—2000年），大气污染问题主要表现为酸雨。这一阶段，地处丰富区的东南部发达省份的大气污染比地处相对匮乏区的华北省份要严重，因为此时大气污染处于超重阶段，丰富区的大气环境资源储量并不具有明显的优势。21世纪第一个10年（2001—2010年）间，中国工业化过程逐渐完成，二氧化硫排放增幅放缓，总量进入稳定阶段。当然，此时也是中国大气污染最严重的

阶段，大气环境资源储量消耗殆尽，重污染天气频发。2012年开始，中国进入了以结构性减排为代表的大气污染治理新阶段，同时采用新的空气质量标准，并从总量控制思路转向结果控制思路，以扭转超重污染的局面。

事实上，2010年之前，相对匮乏区的大气环境资源具有一定的优势。由于此时对大气污染的容忍程度较高，空气质量等级较低，环境政策比较宽松，相对匮乏区凭借其丰富的大气环境资源储量，一直在增加污染物的排放强度，直到进入超重污染阶段。2010年前后，京津冀地区的污染物排放总量，比地处丰富区的长三角、珠三角要高出3~4倍甚至更多，而大气污染程度并不比丰富区严重太多。也就是说，在超重污染阶段，相对匮乏区的大气环境资源优势是明显的，这一点对于深入理解中国大气污染的历史过程非常重要。

第二，2012年，中国大气污染治理工作进入新阶段。此后，污染物排放开始出现下降趋势，大气污染从超重阶段转向较重阶段。在这个过程中，相对匮乏区的大气污染治理成效与其他区域相比会比较明显。正如图8所示，相对匮乏区的大气自然净化能力在中等水平以上有一个明显的集中区。这意味着，随着污染物排放强度的下降，一旦触及大气自然净化能力的中等水平区，空气质量就会有一个明显的好转过程，此时相当于释放了一个较大比重的大气自然净化能力，对于空气质量改善具有显著的作用。2013—2019年，京津冀地区通过大幅度削减排放使空气质量获得明显改善就是这个道理。其实，京津冀地区作为大气环境资源相对匮乏区的核心区域，大气污染从超重阶段转向较重阶段的过程中，起作用的正是图7（c）中波形的上半部分，这个过程，减排的效果会比较明显。

第三，随着大气污染治理的不断深入，污染进入较重阶段后，相对匮乏区的大气环境资源储量优势不再起作用，可利用的大气环境资源进入下半段，开始表现为相对匮乏的一面。这意味着，2020年以后，安康以东以北地区，也即华北大部和东北地区，将进入大气污染治理的新阶段。这一阶段，结构性减排的效果会越来越差，空气质量每向前改进一步，都需要付出较大的代价。也就是说，在相对匮乏区，空气质量达到发展级是相对容易，但想要从发展级进入宜居级，则要付出很大代价，而想要从宜居级进入生态级，成本会更高。本质上，这是由相对匮乏区的大气环境资源特征决定的。对于未来10年相对匮乏区的

大气污染治理成效，决不能以2013—2019年的经验推定。

第四，从现实的大气污染控制标准看，安康分界线的意义明显。如果最终要实现生态级的空气质量标准，则丰富区的大气环境资源优势明显。相对匮乏区和匮乏区需要付出很大的经济代价，才能获得生态级空气质量。虽然现阶段相对匮乏区的大气污染治理取得了一定的成绩，但以后的工作会越来越难。大气污染治理成效与污染物排放减少不是等比例变动的，其变动关系主要取决于该地区的大气自然净化能力波形特征，以及大气污染所处的阶段。或者也可以表述为，大气污染治理成效与污染物排放的关系，主要取决于大气环境资源的整体特征，以及大气环境资源的消耗程度。

第五，大气环境的分级管理问题，应该以大气环境资源为基础，而不是以大气污染的现实状况为基础^[12]。如果不考虑各区域大气环境资源的差异，制定相同的空气质量标准。对于大气环境资源较少的区域来说，就必须牺牲大量的经济活动，以减少大气环境资源的消耗。当然，这还要看空气质量的具体标准。如果将空气质量标准定在发展级，即承受一定程度的大气污染，此时各区域只要将大气环境资源的消耗控制在发展级以下就行。这种情况下，发展级大气环境资源是各区域制定排放控制目标的依据。是否具有大气环境资源方面的优势，主要取决于发展级大气环境资源的多寡。类似地，如果将空气质量标准定在宜居级，就需要按照宜居级大气环境资源的多寡来判断是否具有大气环境资源优势。因此，对于以安康线为基础划分的四个区域来说，采用不同的空气质量标准，其大气环境资源的优势也不同。如果采取相对严格的空气质量标准，则相对匮乏区和匮乏区的劣势明显。最近几年，中国加快了生态文明建设的步骤，空气质量标准提升，环境政策收紧，执行力加强，地处相对匮乏区的华北地区、东北地区 and 地处匮乏区的关中地区，经济增长与大气污染治理的矛盾明显加剧，表现出前所未有的压力。

不同地区采取相同的空气质量标准，主要考虑的是生态公平问题，不能因为大气环境资源少就应该承受污染。当然，如果考虑到经济公平问题，则不同地区应该采取不同的空气质量标准，进而建立大气环境分级管理体系。现阶段，一种比较适宜的分级原则是，坚持生态公平优先，同时兼顾经济公平。首先，划定一个空气质量的下限，比如发展级空气质量标准，所有区域的空气质量不能低于该标准，以保障生

态公平。同时，为了体现经济公平，大气环境分级管理的目标应该是让各地的排放水平接近相同，而空气质量标准不同。然后，根据不同地方的大气环境资源状况，在保障空气质量基本目标的前提下，制定差异化的空气质量标准。既保障生态公平，又不失经济公平。例如，在大气环境资源匮乏区和相对匮乏区，可以将空气质量标准定在发展级，在大气环境资源一般区，则定在宜居级，而在大气环境资源丰富区，则定在生态级。当然，在大的区划内，还应该考虑小尺度的大气环境资源差异，如不同地市和县域之间。不管如何，大气环境的分级管理思路，应该以大气环境资源为基础，而不应该以大气污染的现实情况为基础。根据大气污染的现实情况制定大气环境分级管理标准，既不可能保证生态公平，也不能保证经济公平。

其实，坚持生态公平优先，同时兼顾经济公平的原则也只是权宜之计，只是相对于单一标准的优化，并不能从根本上解决问题。长期看来，想要实现大气环境资源的有效配置，最好的方法是收取类似大气环境资源使用税性质的资源费，让大气环境资源以生产要素的形式真正参与到经济活动中来^[13]。结合不同地区的经济发展状况，核算大气污染造成的边际损失，按照损失等价原则，推动大气环境资源的合理定价，通过价格机制，最终实现中国大气环境资源的空间优化配置。

6 结论

大气环境资源是大气环境经济性的体现，也是人类发展到一定阶段的产物。中国的大气环境资源整体呈现南多北少，东多西少的状况。109°E线和33°N线可以作为中国大气环境资源分布的地理分界线，即安康分界线。安康分界线根据生态级大气环境资源分布情况将中国大致分为四个区域，陕西省安康市以东以南地区为丰富区，以西以南地区为一般区，以东以北地区为相对匮乏区，以西以北地区为匮乏区。中国生态级大气环境资源分布空间差异明显，丰富区与匮乏区相差悬殊。下调大气环境资源等级，大气环境资源分布的空间差异性缩小趋势明显。尤其大气环境资源储量方面，丰富区与相对匮乏区甚至出现了逆转。中国大气环境资源分级变化规律具有重要的现实意义，不仅可以解释近几十年来中国大气污染治理的历史进程，还可以作为大气环境分级管理的基础，指导未来的大气污染防治工作。明确中国大气环境资源的地理分布，有助于平衡大气污染治理与经济矛盾的矛盾，为制定差异化的大气环境管理目标提供理论依据和数

(下转124页)

城市适应气候变化行动方案 ——国内外应对气象灾害的典型案例分析

刘苏潇^{1,2} 孙兰东^{1,2} 吴蔚^{1,2} 刘校辰^{1,2} 杨涵洺^{1,2}

(1 上海市气候中心, 上海 200030; 2 中国气象局上海城市气候变化应对重点开放实验室, 上海 200030)

摘要: 回顾了为了适应由气候变化引起的高温灾害、水灾害与海平面上升, 全球范围内不同国家在城市适应气候变化方面采取的措施行动。通过分析发现, 尽管各地区拥有不同地域规模、气候条件与人文环境, 面对的气候灾害问题也不尽相同, 但在适应气候变化的策略制定方面, 却有着一定的共性, 包括: “以各级政府为主导; 强调各机构之间的沟通合作; 制定策略时应当考虑当地实际环境, 因地制宜; 将气候变化的长期影响纳入考量; 在适应性工程的建设上考虑可持续性; 提升城市韧性, 将灾害适应性纳入城市基础设施建设; 调动社会各阶层的积极性, 充分利用各渠道的社会资源”等。目前, 虽然国内各城市在适应气候变化方面的相关策略与措施相较于发达国家、地区起步较晚, 但近几年经过国家的重视、政府的主导、专家学者的学习与探索后也逐步取得了一定进展, 部分城市针对“十三五”期间城市气候适应性的研究与规划已经表现出更高的合理性与成熟性, 相关的试点改造也在一定程度上取得了积极成果。

关键词: 城市适应气候变化, 韧性, 高温, 干旱, 雨洪, 海平面上升, 海绵城市

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.06.020

Action Programs of Urban Adaptation to Climate Change — Typical Domestic and Overseas Cases of Response to Meteorological Disasters

Liu Suxiao^{1,2}, Sun Landong^{1,2}, Wu Wei^{1,2}, Liu Xiaochen^{1,2}, Yang Hanwei^{1,2}

(1 Shanghai Climate Center, Shanghai 200030; 2 Key Laboratory of Cities' Mitigation and Adaptation to Climate Change in Shanghai, China Meteorological Administration, Shanghai 200030)

Abstract: This paper reviews measures, aiming to adapt high-temperature disaster, water disaster and sea level rise, taken by different countries around the world, of urban adaptation to climate change. According to analysis, there exists several universal rules of developing climate change adaptation strategies, although the geographical scales, climate conditions and social environments are various in different regions. The rules include: leading roles of governments at all levels, cooperation between different organizations, strategies adjusted to local conditions, consideration of long-term influence of climate change, sustainability of adaptation program construction, inclusion of disaster adaptation to urban infrastructure, encouragement of the whole society. Currently, comparing with developed counties or regions, although Chinese cities started relatively late on making strategies and measures related to urban climate change adaptation, some progress has been achieved with national attention, governmental leading, academic study and exploration. Some researches and projects on urban climate adaptability in some cities for the 13th Five-Year Plan have been more rational and mature. Some positive achievements in related pilot projects also exist.

Keywords: urban adaptation to climate change, resilience, high temperature, drought, rainfall flood, sea level rise, sponge city

0 引言

随着城市的快速发展, 人类活动对气候变化的影响逐渐增加。反之, 气候变化频繁引起的各类气候现象也对城市应对极端气候事件(如高温、干旱、洪水等)的能力提出了更大挑战^[1]。2002年, 倡导

地区可持续发展国际理事会(Local Governments for Sustainability, ICLEI)在联合国可持续发展全球峰会(Sustainable Development Goals, SDGs)上重提“韧性(Resilience)”概念, 描述系统在不改变自身基本状况的前提下, 对干扰、冲击或不确定性因素的抵抗、吸收、适应和恢复能力^[1]。后续研究进而由此引申出“城市韧性(Urban Resilience)”, 用以指代城市系统在受到扰动或冲击(如极端气候事件)时, 可以承受负面影响或迅速恢复原有城市功能, 并通过适

收稿日期: 2019年11月27日; 修回日期: 2020年3月13日
第一作者: 刘苏潇(1994—), Email: liusuxiao@foxmail.com

应手段更好地应对未来潜在灾害的能力^[2]。“韧性”的重提与引申,表现出21世纪以来,全球范围内对城市受气候变化影响相关研究的重视与规范化趋势,同时也反映出气候变化的进一步加剧对城市影响的逐步升级。

全球气候变化对城市的影响主要包括高温、降水、干旱、飓风、洪水、海平面上升等,这些气象灾害进而会影响城市沿海生态系统、基础设施、水资源安全、人类健康及财产安全等^[3]。具体表现为:高温会对城市的能源消耗、空气质量和居民健康产生不利影响;降雨频次的改变造成城市水资源储备的不稳定性;极端天气(如风暴、洪水、热浪及干旱等)对城市设施、系统正常运作造成冲击;海平面上升严重威胁沿海城市的城市安全等^[4]。值得注意的是,许多经济发达的城市往往位于沿海或河口三角洲地区,独特的地理位置带来经济发展潜力的同时也使得城市气候变化脆弱性较高,面对的极端气候事件更为频繁,相应的负面影响也可能更加严重。由此可见,在全球性气候变化的背景下,必须充分考虑气候变化给城市带来的潜在影响因素,对气候变化影响进行评估、预测,编制应对气候变化规划,以改进原有城市的气候适应性策略,或建立应对气候变化的新规划体系,保证城市发展的稳定与可持续性。

本文着眼于城市适应气候变化相关方案,回顾了21世纪以来,在面对由气候变化引起或激化的部分典型气象灾害或极端气候事件时,国内外部分城市、地区已采取或可能采取的最新应对策略。以期对城市适应气候变化的相关概念、发展过程及未来趋势有更清晰的认识。文章包括引言、国内外适应方案概述、常见城市气候灾害应对措施、总结四部分。其中,“国内外适应方案概述”介绍了城市应对气候变化的两项基本思路——减缓(mitigation)与适应(adaptation),并就“适应”这一方案初步展开,简要列举了近年来国内外部分已开始相关应对措施的城市范例;“常见城市气候灾害应对措施”描述了高温灾害、水灾害(含干旱和雨洪)、海平面上升3项典型气候灾害,并分别介绍分析了国内外部分城市针对单项灾害已采取或计划采取的相关措施,以期在参考城市气候适应性国际经验的同时,对国内相关领域目前的学习、发展、进步与不足进行分析与探讨。

1 国内外适应方案概述

如上文所述,目前,城市应对气候变化的方案主要从“减缓”与“适应”两方面展开^[5]。前者指采取各类措施控制温室气体排放,以控制或减少大气中

温室气体总量,延缓全球变暖的趋势,从而削弱衍生气象灾害或极端气候现象的频率、强度和影响;后者则是对实际或预期的气候变化的影响做出城市政策或建设规划方面的调整,以降低气候变化带来的潜在负面影响^[6]。换言之,适应气候变化目的是在变化发生之前,努力发展恢复力来应对潜在的气候影响,同时通过政策推行、机制设计和人物等资源配,更加灵活地应对气候变化、管理气候灾害风险。这种灵活应对能力,不仅包括气候灾害风险的防控能力,也保护快速恢复、可持续性发展及挖掘新的发展机遇的能力^[7]。本文也将着重对21世纪以来的部分典型“适应”方案进行回顾与探讨。

为应对气候变化引起的一系列异常天气活动对城市基础建设和系统造成的潜在社会经济损失,各国、各地方政府及相关组织在这一领域展开了积极的探索与实践。近20年来,美国纽约^[8]、芝加哥^[9]、英国伦敦^[10]、加拿大温哥华^[11]、多伦多^[12]、丹麦哥本哈根^[13]、荷兰鹿特丹^[14]、南非开普敦^[15]、日本东京^[13]等发达国家的部分地区已相继开展城市适应气候变化工作,目前已积累一定经验。而中国起步稍晚,但经过国家的重视、政府的主导、专家学者的研究学习后也逐步取得了一定成效。

2014年9月,国家发展和改革委员会发布了《国家应对气候变化规划(2014—2020)》,2016年2月国家发展改革委、住房和城乡建设部联合印发了《关于印发城市适应气候变化行动方案的通知(发改气候(2016)245号)》^[17],2017年2月联合发布《关于印发气候适应型城市建设试点工作的通知(发改气候(2017)343号)》^[18],将内蒙古自治区呼和浩特市、辽宁省大连市等28个地区作为气候适应型城市建设试点,一系列的举措标志着国家对于城市适应气候变化方向上的重视程度愈发提高,可以预见,在此趋势下,中国城市适应气候变化建设工作也将逐渐与国际接轨,从而步入新的里程。

2 城市气候灾害应对措施

2.1 高温

城市高温灾害是指城市中长时间处于气温过高状态,对生活在该地区的人和生物生理机制产生影响的一种气象灾害^[19]。同时,高温也会对城市的能源消耗及空气质量造成一定程度上的负面影响^[4]。目前,对于高温灾害尚未有统一的标准定义,多以日最高温度与持续时长进行判断^[20]。以中国的城市高温灾害标准为例:是指日最高气温超过35℃,并持续超过3d的高温天气^[4]。近年来,随着气候变化联动全球变暖,

城市化的进程显著改变了城市下垫面类型，导致地表储存更多的热量，加之人为热排放增加，城市热岛效应更加显著，城市极端高温屡创新高，高温日数明显增加，城市高温灾害愈加剧烈。为提高城市适应高温灾害的能力，许多国家地区的政府机构及相关领域的专家学者展开了积极的探索与实践。

2011年，为了提高城市应对极端气候能力和市民生活质量，英国伦敦发布了《城市气候变化适应战略—管理风险和增强韧性》，将适应计划分为预防（prevent）、准备（prepare）、响应（respond）和恢复（recover）4个层次，降低灾害发生前、灾害发生过程中和灾害发生后各阶段的负面影响。在应对城市高温方面，适应计划中主要行动包括了：创建气象观测网络，识别高温风险区域；增加城市绿化覆盖，增强市区热量处理容量；提高企业能源利用效率，减少热排放等。伦敦的高温适应策略，充分考虑了从灾害开始前预防到灾害结束后恢复所涉及到的诸多规则与技术手段，为应对高温灾害设计了较为完备的指导方针。

2017年，针对中国城市岳阳“湖陆风”盛行，山地效应明显，城市热岛效应显著，易受高温灾害侵袭的现状，邓玲等^[21]从政策、技术、工程3个层面提出了相应建议。1) 政策方面：主要由政府引导，因地制宜地推动大规模的城市改造，包括增大绿地覆盖、采用高效高性能外墙保温系统提高建筑气密性及推广旧建筑节能改造等。2) 技术方面：加强城市气候背景分析和热岛效应评估研究、加强岳阳高温热浪脆弱性评估，以及对不同领域的影响、科学评估岳阳海绵城市工程建设对城市热岛的影响。3) 工程方面：则要进一步完善城市热岛监测系统、构建城市绿地生态系统、打通城市通风廊道。

2018年，韩贵锋等^[19]梳理21世纪以来城市高温灾害及其城市规划响应的研究脉络，揭示城市规划应对高温灾害的问题，总结主要响应途径和措施。分析得出，城市适应高温灾害的途径主要涉及土地利用、道路交通、空间结构、绿化景观及建筑等途径（表1）^[19]，这些因素与城市反射太阳辐射能力、通风散热能力、温室气体控制排放能力等息息相关。

表1 2000—2016年城市规划应对高温灾害情况^[19]
Table 1 Summary of urban planning response to high temperature disaster^[19]

城市	规划名称	空间结构	土地利用	交通	建筑	绿化景观
伦敦	《伦敦应对气候变化》		√			√
哥本哈根	哥本哈根气候计划			√	√	
马尔默	3次城市环境规划：《气候变化计划》	√	√		√	√
雷根斯堡	德国雷根斯堡太阳社区			√	√	√
斯图加特	环境气候图		√	√		√
罗马	Saline Ostia Antica				√	√
纽约	《纽约市规划报告》	√	√	√	√	
芝加哥	芝加哥《气候变化行动方案（2008）》			√	√	√
波特兰	气候行动计划		√	√	√	√
西雅图	气候行动计划			√	√	√
多伦多	《弹性城市——为极端气候事件做准备（2013）》	√		√	√	√
芬兰	Vuores生态城	√	√	√		√
首尔	《低碳和绿色增长的总体规划（2009）》			√	√	√
江陵	江陵低碳环保城	√	√	√	√	√
东京	《东京巨变：10年规划（2006）》《气候变化应对策略》			√	√	
北九州市	北九州生态工业园区			√		√
香港	《香港规划设计标准与准则》		√	√	√	√
武汉	《武汉市城市总体规划（2010—2020）》	√	√	√	√	√
上海	世博会园区（2010）	√			√	√

可以看出，城市适应高温灾害的风险，主要有4个方面不可或缺：完整的高温灾害评估体系、由微观到宏观的全面应对体系、严格的城市规划标准及气候友好型城市规划设计方法^[19]。尽管目前国内许多地区的最新高温灾害应对策略还主要停留在专家学者的理

论阶段，但香港、武汉和上海已根据自身实际情况制定并实施了相应策略。可以预见，随着全球变暖进一步引起的高温应对策略需求以及相关科学理论的完善完备，国内将有更多城市在未来拥有适合自己的高温适应方案。

2.2 水灾害

2.2.1 干旱

城市干旱和水污染、河道洪水、城市内涝等一样，都属于水灾害事件中的一员。不同于其他水灾害事件发生、发展迅速、具有突发性的特点，干旱的发生往往是一个缓慢的积累过程^[22]。在气候变化的背景下，降雨频次的改变可能导致城市水资源储备的不稳定，进而提高极端干旱事件的出现概率和强度^[23]。对城市而言，极端干旱事件可能会对城市生态、居民健康、经济发展和周边农作物产量等造成负面影响，若处理不当（如灾害期间水资源分配不均），甚至可能会在一定程度上引起社会阶层对立。对此，开普敦、伦敦和岳阳等城市已经采取了应对干旱的相应措施或从专家学者方面积极寻求具备可行性的适应方案。

以开普敦为例，其可用水资源供应主要依赖于西开普省供水系统（The Western Cape Water Supply System, WCWSS）。该系统主要由大坝和水库组成，其最初的建造标准是应对平均50年一遇的旱灾。然而，该水库储水完全依赖于降雨，整个供水系统极易受到气候变化引起的降水频率强度变化的影响，具有极大的不稳定性。2018年伊始，在连续3年降水量不足的情况下，南非共和国开普敦市面临着极端干旱事件，并几乎迎来该城市历史上出现的第一个“零日（Day Zero）”（城市可用水资源储备量低于总容量13.5%的预估日）^[15]。尽管水资源耗尽的情况最终没有到来，这场危机仍暴露出开普敦市水资源系统的供应与管理方面有所欠缺，单一的可用水资源获取方式在面对近年来发生概率及强度不断提升的潜在干旱危机时也缺乏韧性。

开普敦大学的Gina Ziervogel与Mark New在一次采访中指出：“尽管气候变化可能并非导致开普敦极端干旱事件的全部原因，但开普敦的干旱风险确实因气候变化而提高。基于全球气候模型的预测，相较于20世纪中后期开始全球变暖之前，开普敦目前的干旱风险提高了3倍，而到2040年该风险甚至可能提高4~5倍，且发生的频率也可能提高到20年一次。”这已远超WCWSS的设计应对能力^[23]。为此，帝国理工大学的Robbie Parks等人建议开普敦应该建立一项长期性的策略用以指导当地的供水用水（表2）。

在此次极端干旱事件中，考虑到与增加供水相比，对现有水资源的合理分配能以较低成本更快地产生效果，开普敦政府将限制水的供应放在首位，对水库中剩余的水资源实行配给制。该制度的重点是促进家庭的节水行为和强制控制过度用水的各类工程项

表2 城市适应极端干旱事件应对方案^[3, 15, 21, 23]

Table 2 Schemes of urban adaptation to arid extreme events^[3, 15, 21, 23]

城市	适应方案
开普敦	实行水资源配给制
	建立更合理的灾害预警系统
	增加水资源来源
	建立地方、区域和国家各级政府间的合作
	保证各部门间顺畅的信息传递与交流
伦敦	制定公平的水资源供给规划
	建立合理的节水激励机制
	发布伦敦水管理战略，包括饮用水和洪水管理
	提高用水效率，应对干旱和水资源的长期变化
	鼓励税务监管机构帮助水务公司提高节水效率，加大水利基础设施投资
岳阳	提高家庭、公共和商业建筑能源和水的利用效率
	制定干旱应急规划
	推进水资源管理思路 and 理念转变，优化水资源配置
	将气候变化影响纳入水资源评价和规划的范畴中
	通过专题研究掌握气候变化对岳阳水资源的影响，针对性地制定适应对策
	加强水资源保护体系建设、节约水资源

目。除了开普敦政府的主导作用，公民、西开普敦地方政府、私营企业和开普敦的学术界都在减少城市用水需求方面发挥了自己的价值，包括节约用水、实行阶梯式用水收费政策、安装供水管理设备、安装相关电子设备应用和减少农业用水等方面^[15]。

由开普敦、伦敦、岳阳的方案可以看出，适应气候变化加剧的干旱事件，主要需要：

- 1) 由政府主导，优化水资源管理与配置；
- 2) 将气候变化的长期影响纳入考量，建立更完善的评估与预警系统；
- 3) 提高用水效率，节约现有水资源；
- 4) 因地制宜，有针对性地建立适合当地情况的干旱应对预案；
- 5) 调动社会各阶层的主观能动性，充分利用各种渠道的社会资源。

2.2.2 雨洪

随着气候变化，许多地区（如上海、开普敦等）的降水分布逐渐发生变化，呈现出强降水增多、小雨减少、降水频率减少的长期发展趋势^[15, 24]。同时，城市化进程则会产生城市开发强度高、硬质铺装多等一系列问题，进而引起下垫面的过度硬化，改变城市原有的自然生态环境和水文特征，使得城市排水能力的增长可能落后于单次强降水强度增长，由排水不畅导致城市内涝的发生。此外，暴雨的增强还可能致使水道汛情超出原有沿岸防洪系统的防灾上限，进而引发洪灾。在气候变化的背景下，部分城市和地区原有

的防洪防汛体系已逐步显出颓势，可以预见，在不断提高防洪上限、试图杜绝洪水进入城市的传统防洪思想下建立的防洪体系，一旦面对超出原有应对上限的雨洪灾害，体量被一再提高的洪水会使沿水道城市及周边乡镇遭受严重的社会、经济损失。近年来，不同于“堵”“防”为中心的传统防洪体系，将雨洪灾害纳入城市韧性考量、具备一定灾害入城容错性的“海绵城市”体系在气候变化的背景下被众多国家、地区（美国、中国等）愈发重视^[25]。

“海绵城市”是一种城市水系统综合治理模式。其以城市水文及其伴生过程的物理规律为基础，以城市规划建设和管理为载体，将水环境与水生态紧密结合起来，形成完整的水生态服务系统。在“海绵城市”体系中，河流、湖泊、池塘等水系以及绿地、可渗透路面等城市设施，被认为是提高城市气候灾害、尤其是水灾害适应性的“海绵体”。雨水通过海绵体

渗透、滞留和集蓄，其中部分被净化后再利用，其余的经管网和泵站向外排出，以此可以缓解城市的内涝危机和压力。

然而，城市开发建设破坏了自然的“海绵体”，导致洪涝灾害频发、水环境污染、水资源紧缺和水安全缺乏保障等一系列问题的出现，而人为地建设类“海绵体”工程可以有效解决这一困境，这种建设工程即“海绵城市”的建设。顾名思义，“海绵城市”具有应对自然灾害的韧性，该城市体系可以像海绵一样在一定限度内对水资源有着吸收和释放的能力。在集中降水时，“海绵城市”设施通过自然与人造海绵体实现降水的渗透、滞留和集蓄；在干旱时期，其可以将储存和净化的雨水释放，以循环使用和排水相结合实现水的补给。对于发生频率较高降水的城市，海绵城市措施可有效贮存雨水、调控径流，缓解城市的内涝问题。

表3 雨洪管理代表方案^[26-28]
Table 3 Representative schemes of rainfall-flood management^[26-28]

国家	方案	方案特点
美国	低影响开发 (LID)	采用的是源头削减、过程控制以及末端处理方法进行渗透、过滤、蓄存以及滞留，并融合了基于经济及生态可持续发展的设计策略，减排防涝。通过一系列分布式措施来构建与自然状态下匹配的水文和土地景观，维持区域自然水文机制，以此减轻区域水文过程畸变带来的生态环境负效应
英国	可持续城市排水系统 (SUDS)	侧重“蓄存、滞留、渗透”，主要通过4种途径（蓄水箱、渗水坑、滞留池、人工湿地）处理雨水，以减轻城市排水系统的压力
澳大利亚	水敏感性城市设计 (WSUD)	侧重“净化、循环利用”，强调城市水循环过程的“拟自然设计”

海绵城市建设的核心是雨洪管理。目前，根据发达国家先行者的经验与实践，城市雨洪管理代表理念主要有3个，分别为美国的低影响开发（Low Impact Development, LID）、英国的可持续城市排水系统（Sustainable Urban Drainage System, SUDS）和澳大利亚的水敏感性城市设计（Water Sensitive Urban Design, WSUD），在适应雨洪灾害方面分别有不同的侧重点。其中，LID由于处理方面较多、符合现代城市开发建设理念，被广泛采用。

目前，中国的“海绵城市”建设大多停留在理论阶段，全面、系统的模拟及评价研究依旧在进程中。由于我国幅员辽阔，各个城市的气候条件、地理分布、水文条件差异较大，因此应根据区域的实际情况进行研究、规划，选择适合的海绵城市建设措施，并针对措施的结构、建造材料、植物选择进行深入研究，结合区域政策及经济状况，制定最合理的方案，确保海绵城市对城市内涝的防控效果。

2.3 海平面上升

近年来，由于全球变暖引起的两极冰川融化及海水的膨胀，海平面高度在全球各区域呈现不同的上

升趋势，低洼地区和沿岸系统即将经历越来越多的洪涝、下沉和侵蚀。海平面上升虽然是一个持续、缓慢的过程，但也将对海洋灾害的频率和危害程度起到推波助澜的作用。目前，海平面上升是国际社会普遍关注的全球性热点问题之一。海平面上升会淹没滨海低地，破坏海岸带生态系统，加剧风暴潮、海岸侵蚀、洪涝、咸潮、海水入侵与土壤盐渍化，威胁沿海基础设施安全，给沿海地区经济社会发展带来多方面的不利影响^[29]。

新加坡作为一个四面环海，占地719.1 km²（2015年）的岛国，填海造地是其解决地形制约所贯彻的主要发展策略之一（图1），相关工程的历史可以追溯到1819年^[28]。可以预见，气候变化引起的海平面上升将对其沿海地区的人员、设施、财产安全和现有国土面积造成巨大威胁。对此，新加坡政府针对气候变化与海平面上升问题制定了相应的适应策略。首先，总理办公室成立了直属部门——国家气候变化委员会（The National Climate Change Secretariat）来负责协调新加坡的气候变化事宜，并统辖城市建设、环境、基础设施等多个国家部门和机构。其次，新加坡还设立了多个专门的研究机构，比如依托南洋理工大学建

图1 新加坡填海时间梯度^[30]Fig. 1 Time gradient of sea reclamation in Singapore^[30]

立了灾害风险研究所，依托新加坡国立大学建立了风险管理研究所和热带海洋科学研究所，分别针对气候变化和海平面上升等问题做出策略分析和研究^[31]。在实际应对中，考虑到撤退沿海居民、设施的“退让”政策会使得已开发建设完成的核心城市、港口损失过大，新加坡政府主要采取了风险评估、保护措施、适应措施等手段（表4）。

除了新加坡，美国、澳大利亚、南非在应对海平面上升的问题上也有着积极探索，其在各级政府主导下逐步完善起来的、用以保障相关灾害适应性措施实施的法律体系尤为突出^[29]，可以看出，城市适应海

表4 新加坡应对海平面上升主要措施^[31]Table 4 Main measures in Singapore response to sea level rise^[31]

措施	目的	具体行动
风险评估	预测气候变化对新加坡海平面上升程度的影响和对公共卫生、能源消耗及生物多样性的长效影响	2007年，新加坡国家环境局委托新加坡国立大学热带海洋科学研究所从事新加坡脆弱性研究 2013年，根据研究成果，新加坡建设局于制订出了新加坡风险地图，这份地图清晰表明新加坡各个沿海区域对海平面上升和气候变化的风险等级，从而指导城市开发和建筑设计
保护措施	通过工程技术手段阻止和减少海平面上升和极端海平面事件对城市造成影响。通过工程手段增强海岸的抵御能力（硬质保护）	硬质保护：在建设局专门设立了海岸与工程管理部，专门负责海岸的防护问题。目前大概70%~80%的新加坡的海岸是由海墙和防波堤组成，仅小部分保留了部分自然海岸。众多工程中，2007年建成的滨海湾大坝（Marina Barrage）是较为突出的成果之一，具备淡水储蓄、泄洪防涝与作为城市公共空间3项功能
	生态修复和海滩养护（软质保护）	软质保护：由新加坡公园局领导，成立一个多学科的团队，目标修复新加坡周边的红树林，用更加可持续的、对环境更加友好的软质工程来保护海岸地带，提案之一是建设一个由礁石和红树林组成的并且能够被降解的保护环来保护新加坡的沿海区域
适应措施	通过在城市空间和建筑设计等方面采取行动，保证在海平面上升的情况下，城市能够正常运转	环境与水资源管理局对洪水保护措施和排水工程进行普查和重新设计，以提高新加坡抗击洪水的能力 公共事务局正在协同新加坡水资源管理部门升级洪水管理和预测的系统，通过模型模拟、加宽排洪渠和拓宽排水沟等方式来提高新加坡抵抗灾害的能力

平面上升的措施依旧是由政府主导，将气候变化的长远影响代入相关评估和预测研究系统中，并根据结果制定相关政策、法规，以指导后续工程建设。除此以外，根据潜在受灾地区的当地实际情况因地制宜制定方案，贯彻可持续发展思路，更多考虑“适应”而非“防御”（“海绵城市”思路），是目前城市应对海平面上升的主体思路。

3 结论

本文通过对高温灾害、水灾害、海平面上升3项典型气候灾害及全球部分地区近年来的相应适应措施进行了回顾。可以看出，尽管城市的城市规模、气候条件与人文环境不尽相同，但其在气候变化方面的适应策略却存在一定的共通性，包括：1）各地、各级政府机构在城市适应气候变化治理中处于主要领导地位；2）各地、各级政府机构均要保持有力、畅通的交流与协作；3）策略的制定需要因地制宜，应符合当地的气候、地理环境、经济发展水平和基础建设状况；4）将气候变化的长远影响纳入考量，远近结合，即解决当前危机，也有着持续的评估系统，能防范未来的潜在风险；5）在适应性工程的建设上考虑

可持续性；6）提升城市韧性，将灾害适应性纳入城市基础建设；7）调动社会各阶层的积极性，充分利用各种渠道的社会资源。

在城市适应气候变化方面，国外城市，尤其是欧美发达国家地区的策略比国内城市发展更早，应对极端气候事件的基础建设与处理经验也更为丰富，有着比较重要的参考借鉴价值。中国由于发展中国家的特殊性质，在早年有着更为现实的问题（例：生产力低下、经济发展缓慢、人民物质生活水平不平衡）需要优先解决，对城市适应气候变化方面的研究与发展有所忽视，甚至在一定程度上背道而驰（过度城市化）。此外，中国幅员辽阔，各地的气候条件、地理分布、水文条件差异较大，不能一概而论，需要因地制宜的特性，也给城市气候变化适应性的全面推广与提升带来一定难度，使得目前这一领域的诸多举措依旧暂留在理论评估的层面上。然而，随着国内政府的重视、社会意识的觉醒，以及相关领域专家学者对国外先进经验的学习、研究与探索，可以看出，中国部分地区在“十三五”期间对于城市适应气候变化策略的建议与策略制定已经表现出更高的合理性与成熟

性, 部分地区的试点改造也在一定程度上取得了积极成果。尽管如此, 城市应对气候变化的工作依然任重道远, 今后也需要更多的政策支持及人力、科技与经济投入。

参考文献

- [1] 郑艳. 推动城市适应规划构建韧性城市: 发达国家的案例与启示. 世界环境, 2013(6): 50-53.
- [2] Tyler S, Moench S. A framework for urban climate resilience. *Climate and Development*, 2012(4): 311-326.
- [3] 冯潇雅, 李惠民, 杨秀. 城市适应气候变化的国际经验与启示. 生态经济, 2016(11): 120-124, 135.
- [4] 管力. 韧性城市下应对气候变化的适应性规划探索. 共享与品质: 2018中国城市规划年会论文集(01城市安全与防灾规划). 中国城市规划学会、杭州市人民政府、中国城市规划学会, 2018: 9.
- [5] 国家发展和改革委员会. 国家应对气候变化规划(2014—2020). 2014 [2019-08-20]. <http://www.sdpc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201411/W020141104584717807138.pdf>.
- [6] 洪亮平, 华翔, 蔡志磊. 应对气候变化的城市规划响应. 城市问题, 2013(7): 18-25.
- [7] 姜允芳, Eckart L, 石铁矛, 等. 城市规划应对气候变化的适应发展战略: 英国等国的经验. 现代城市研究, 2012, 27(1): 13-20.
- [8] The City of New York. PlaNYC 2030: a greener, greater New York. 2019 (2019-08-15). <https://www1.nyc.gov/site/sirr/report/report.page>.
- [9] 杨佳杰, 朱霞. 大城市气候响应规划研究: 以“芝加哥气候行动计划”为例. 中国城市规划年会论文集, 2015: 430-438.
- [10] Greater London Authority (GLA). Managing risk and increasing resilience: the mayor's climate change adaptation strategy. 2011 [2019-10-26]. <http://www.london.gov.uk/sites/default/files/Adaptation-oct11.pdf>.
- [11] The Vancouver City Council. Climate change adaptation strategy. (2012-11-07)[2019-06-25]. <http://vancouver.ca/files/cov/VancouverClimate-Change-Adaptation-Strategy-2012-11-07.pdf>.
- [12] Toronto Environment Office, City of Toronto. Ahead of the storm preparing Toronto for climate change. 2008 [2019-04-18]. http://www.toronto.ca/teo/pdf/ahead_of_the_storm.pdf.
- [13] The City of Copenhagen. Copenhagen climate adaptation plan. 2015 (2019-02-19). <http://www.kk.dk/english>.
- [14] The City of Rotterdam. Rotterdam climate adaption strategy. (2012-12-10) [2019-01-10]. http://www.deltacities.com/documents/20121210_RAS_EN_lr_versie_4.pdf.
- [15] Parks R, McLaren M, Toumi R, et al. Experiences and lessons in managing water from Cape Town. Grantham Institute Briefing

- paper, 2019.
- [16] 杨巍, 高续续. 三大世界城市应对气候变化的经验与启示. 北京化工大学学报: 社会科学版, 2015 (2): 46-50.
 - [17] 国家发展和改革委员会, 住房和城乡建设部. 关于印发城市适应气候变化行动方案的通知(发改气候〔2016〕245号). (2016-02-16) [2019-08-20]. http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201602/t20160216_774721.html.
 - [18] 国家发展和改革委员会, 住房和城乡建设部. 关于印发气候适应型城市建设试点工作的通知(发改气候〔2017〕343号). (2017-02-27)[2019-08-20]. <http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201702/W020170227362192328438.pdf>.
 - [19] 韩贵锋, 陈明春, 曾卫, 等. 城市高温灾害的规划应对研究进展. 西部人居环境学刊, 2018, 33(2): 77-84.
 - [20] Robinson P J. On the definition of a heat wave. *Journal of Applied Meteorology*, 2001, 40(4): 762-775.
 - [21] 邓玲, 彭洁, 李好, 等. 城市发展适应气候变化策略研究: 以岳阳为例. 中国气象学会第35届中国气象学会年会 S6 应对气候变化、低碳发展与生态文明建设. 中国气象学会: 中国气象学会, 2018: 10.
 - [22] 李少轩. 干旱事件的过程化描述及其识别应对研究. 西安理工大学, 2019.
 - [23] Ziervogel G, New M, Liu W. Making cities water-wise and climate-resilient: lessons and experience from the Cape Town drought. *Landscape Architecture Frontiers*, 2019, 7(3): 94-99.
 - [24] 上海市气候变化研究中心, 上海市节能减排中心. 上海市“十三五”适应气候变化专门规划(上报稿). 2016(10).
 - [25] 朱黎青, 彭菲, 高翅. 气候变化适应性韧性城市视角下的滨水绿地设计: 以美国哈德逊市南湾公园设计研究为例. 中国园林, 2018, 34(4): 41-46.
 - [26] Liu Y. The reference value of American low impact development to the theory and application of Chinese sponge city. *Proceedings of the 2019 3rd International Forum on Environment, Materials and Energy (IFEME 2019)*, 2019.
 - [27] Arahueta A, Olcina J. The potential of sustainable urban drainage systems (SuDS) as an adaptive strategy to climate change in the Spanish Mediterranean. *International Journal of Environmental Studies*, 2019, 76(2): 1-16.
 - [28] Kazemi F, Golzarian M R, Myers B. Potential of combined water sensitive urban design systems for salinity treatment in urban environments. *Journal of Environmental Management*, 2018, 209: 169-175.
 - [29] 李梦琦, 王慧. 域外国家沿海地区适应海平面上升的法律保障机制及启示. 浙江海洋大学学报: 人文科学版, 2018, 35(5): 1-7.
 - [30] 周韵, 陈天, 张赫. 新加坡填海造地地区的空间演变与规模变化趋势. 国际城市规划, 2016, 31(3): 71-77.
 - [31] 王量量, 韩洁. 新加坡海平面上升应对策略对我国沿海城市发展的启示. 城市建筑, 2017(28): 119-123.

(上接117页)

据支撑, 做到生态公平优先, 兼顾经济公平。当然, 想要实现大气环境资源的长期有效配置, 还要结合地区经济差异, 核算污染物排放的边际影响和经济损失, 进而通过大气环境资源的有效定价来实现长期可持续发展。

参考文献

- [1] 蔡银寅. 大气污染治理的经济学方法. 北京: 科学出版社, 2017.
- [2] Zivin J G, Neidell M. Environment, health, and human capital. *Journal of Economic Literature*, 2013, 51(3): 689-730.
- [3] 蔡银寅, 马力. 数值化的大气环境资源——2017年中国大气环境资源统计与政策建议. 阅江学刊, 2018, 10(5): 30-40.
- [4] Muller N Z, Mendelsohn R, Nordhaus W. Environmental accounting for pollution in the United States economy. *The American Economic Review*, 2011, 101(5): 1649-1675.

- [5] 蔡银寅. 中国大气环境资源报告2018. 北京: 社会科学文献出版社, 2020.
- [6] 柴发合. 我国大气污染治理历程回顾与展望. *环境与可持续发展*, 2020, 45(3): 5-15.
- [7] 胡德志. 重要的地理分界线. 学知报, 2011-8-1-B03.
- [8] 胡焕庸. 中国人口之分布: 附统计表与密度图. *地理学报*, 1935, 2(2): 33-74.
- [9] 龚胜生, 陈云. 中国人口疏密区分界线的历史变迁及数学拟合与地理意义. *地理学报*, 2019, 74(10): 2147-2162.
- [10] 程叙耕, 何金海, 车慧正, 等. 1980—2010年中国区域地面风速对能见度影响的地理分布特征. *中国沙漠*, 2013, 33(6): 1832-1839.
- [11] 贾艳红, 陆赛娣, 冯小莉, 等. 中国雾霾分布及其组成相关性分析. *测绘与空间地理信息*, 2015, 38(12): 9-12.
- [12] 柴发合, 王淑兰, 王鐸一, 等. 中国城市空气质量分级管理战略探讨. *环境与可持续发展*, 2011, 36(5): 5-7.
- [13] Ng Y K. Quasi-Pareto to social improvements. *The American Economic Review*, 1984, 74(5): 1033-1050.

移动新媒体气象信息传播现状分析及发展思考 ——以气象微信公众号为例

■ 达月珍

气象微信公众号普遍存在着不遵循移动新媒体传播特性，不尊重新媒体用户的阅读习惯、个性化需求等问题。要谋求更大的发展，气象微信公众号的建设和运作应该进一步拓宽视野，在提升传播效果、增加用户数量的前提下，研究如何增加气象微信公众号同样作为科学类传播平台的功能，实现用手机等移动端将科学信息融入一般大众的日常生活这一重要目标。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.06.021

近年来，随着我国移动新媒体应用的快速发展，利用微信、App等获取各类气象信息成为公众的首选。有关调查表明，94.3%的人群通过互联网获取天气信息。目前，用户规模庞大的天气应用App多由民营企业运营，气象微信公众号则由各级气象部门自主运营，且从县级到国家级各级气象部门大部分都开设了官方微信公众号。不过，除了“广东天气”等少数公众号外，全国绝大部分省（区、市）气象局官方微信公众号用户体量相对较小。

1 数据和方法

本文研究数据和信息来自于2018年6月11日—7月10日连续一个月全国31个省（区、市）和中国天气网共32个气象微信公众号（中国天气网、云南气象、安徽省气象台、辽宁气象服务、龙江气象、新疆气象、内蒙古气象服务、河南气象、福建气象、江苏气象、江西气象、青海微气象、宁夏气象、四川气象、湖南天气、天津气象、重庆天气、湖北气象、黔气象、吉林气象、气象北京、广东天气、广西天气、山西气象、上海天气、西藏气象、浙江气象、陕西气象、甘肃气象、山东气象、河北气象、海南气象）的实时收集。采用定量、个例和归纳总结的研究方法进行分析。

2 基于受众规模的气象微信公众号信息传播现状及问题分析

移动新媒体时代，受众读解信息更加本位，与传统传播语境相比较，受众不再只是单向度、被动地接

收信息，同时也可以根据自己的喜好发布信息，具有信息接受者和生产传播者的双重身份。基于受众规模来分析气象信息传播现状及问题，显然更符合移动新媒体特性。

2.1 受众规模

本文气象微信公众号受众规模数据主要来源于32个公众号30日推荐文章总阅读数，因为阅读数量是衡量新媒体影响力的一个重要因子，而选择推荐文章是因为它的内容较为丰富，有天气预报预警、实况、天气分析、气象科普等多重内容，分析推荐文章阅读人数，有助于总结受众变化与信息之间的关联性；二是通过电话咨询多个微信公众号的运作单位，各省比较重视推荐文章的编排和推送，80%以上的省份有专人负责推荐文章的撰写，且各省推荐文章点击率明显高于其他栏目；三是推荐文章实时推送且置于公众号顶部，不需要通过后台查询，作者可实时收集。因此，本文中关于气象微信公众号受众规模指推荐文章阅读总数。

通过一个月的连续收集，得到了2018年6月11日—7月10日期间全国32个气象微信公众号推荐文章阅读人次260万，但除了少量公众号外，大部分阅读量并不高。在全国32个气象微信公众号中，仅有2个公众号没有推荐文章，仅有5个公众号受众阅读人次月规模超过10万，中国天气网达到了80.69万，排列第一；广东天气一个月仅推出3篇推荐文章，但阅读人次达到29.7万，每篇文章的平均阅读量接近10

收稿日期：2019年5月30日；修回日期：2020年8月17日
作者：达月珍（1972—），Email: qu_raining@163.com

万人次。月规模5万人次以下的公众号有25个，占比78.1%。整体用户规模体量非常小。

2.2 栏目设置与其他功能

32个气象微信公众号栏目设置大概归纳为天气预报预警、旅游、交通、农业、空气质量、互动等8个内容，栏目设置普遍较为复杂，影响用户体验，如重庆天气设置了四级菜单，其互动栏目设置在“重庆天气”（一级目录）下“重庆微天气”（二级目录）中“玩天气”（三级目录）目录下的“报天气、播天气、气象知识问答”（四级目录）等。通过推荐文章下的留言区可以看出，一些用户甚至不知道怎样使用栏目去查询天气信息。

仅有不到10个公众号可以查询全国乃至全球多个城市天气，60%以上的公众号只能查询所在地城市天气，且不能精准定位。所有的公众号几乎没有互动性，用户参与感不强。有18个公众号设置互动栏目，但仅有西藏气象公众号中的“机器人”语音查询和重庆天气公众号中“天气在线”可以随时参与活动。其余公众号在统计期间均不能互动，相当一部分栏目甚至都不能正常使用，日常维护较差。

2.3 受众对重要天气信息的关注度

在2018年6月11日—7月10日，除了少数公众号，如江苏气象推出蚊子出没预报、中国天气网推出彩虹预报等外，93%以上的气象微信公众号栏目设置基本无变化，信息量变化主要体现在推荐文章推出的频次和内容，内容则主要体现在重要天气过程、热点事件关注等这几个方面（表1）。

表1 全国32个气象微信公众号推荐文章频次及内容、热点信息传播情况统计表（2018年6月11日—7月10日）

推荐文章频次或内容	热点事件关注	涉及该内容的公众号数量/个	备注
30篇及以上		21	中国天气网等
17篇		1	吉林气象
1~4篇		8	广东天气、上海天气等
无推荐文章		2	山西气象、广西气象
	世界杯与天气	9	上海天气等
	中考天气	6	重庆天气等
	端午节天气	21	云南气象等
	父亲节	5	中国天气网等
	风云二号气象卫星新闻	9	河北天气等
	发布重要天气信息	17	云南气象等

在统计期间，遇足球世界杯开赛、端午节、父亲节、中考、风云卫星新闻等热点事件和节日，但无论是21个公众号关注的端午节天气及习俗，还是10个公众号关注的世界杯天气，这些非天气气候直接的资讯

信息，点击率都极其低下。唯有遇到包括中国天气网在内的17个公众号发布的重要天气信息，点击率立刻飚升，如四川气象等公众号阅读人数几乎是平常的8倍以上（图1）。



图1 全国32个气象微信公众号推荐文章不同信息阅读人数对比图（2018年6月11日—7月10日）

分析发现，32个公众号深度挖掘的内容体现地方性天气需求和天气气候特色的并不多，全国天气预报等基本信息多个公众号重复体现。但通过归纳公众号推荐文章信息类别，发现同样面对高温、暴雨等重要天气信息，不同地域的用户关注度截然不同。东部沿海地区的用户普遍关注台风、梅雨等天气气候现象，重庆、江西等地用户普遍关注高温天气，而我国中部、北部和南部的用户则普遍关注暴雨天气（表2）。

表2 部分气象微信公众号日最大阅读人数与气象信息类别对应表（2018年6月11日—7月10日）

公众号名称	30日日平均阅读人数/人次	30日日最大阅读人数/人次	天气信息类别	日期
气象北京	1.22万	4.9万	大到暴雨消息	7月10日
陕西气象	6620	1.3万	最强暴雨消息	6月29日
上海天气	6.48万	10万	入梅、出梅	6月19日、7月8日
浙江气象	579	2060	台风玛莉亚	7月10日
		1937	入梅	6月19日
江西气象	1428	4421	台风玛莉亚	7月10日
		2795	高温预警信息	6月24日
江苏气象	2112	7377	蚊子出没预报	7月4日
		5750	出梅	7月9日
重庆天气	1860	2553、2454	高温天气消息	6月23日、24日
四川气象	1409	1.1万	暴雨预警	7月10日

3 对策建议

3.1 重视公众号传播平台运营

移动新媒体时代的传播平台是一个“虚构”出来的概念，它包含了生产、服务中的各环节，是一种开放式的运营环境。移动新媒体的传播不再只是信息告知活动，而是社会群体信息共享的活动。至于刚性天

气信息，不仅要注重本地天气气候的特点和重大天气信息，还要注重每一条天气信息的完整有效和趣味编排。要通过软硬实力包装，让平台有本地化和个性特色。让每一个人成为天气信息的接受者，也是朋友圈中天气信息的发布者。

策划活动和话题吸粉最成功的例子，当属目前我国气象微信公众号用户数量排名第一的“深圳天气”（2018年10月102万关注人数），2013年面向公众以来，在5次快速吸纳用户的事件中，3次来源于公众号传播平台策划的台风天气专题活动。如2018年增加用户17万人，但仅是台风“山竹”专题活动单日涨粉3.8万人（数据来源于深圳气象局内部资料）。

3.2 以经济学“长尾效应”思维运作气象微信公众号

2004年10月，美国《连线》杂志主编Chris Anderson第一次提出长尾理论，他认为：商业和文化的未来不在热门产品，不在传统需求曲线的头部，而在于需求曲线中那条无穷长的尾巴。长尾效应的意义就在于它的数量上，将所有非流行的市场累加起来就会形成一个比流行市场还大的市场。

对于气象微信公众号而言，其存在的最大价值便是传播公众需要的各种气象信息。这当中，常规天气预报信息人人想要，而那些关联着健康、旅游、农业生产、交通出行、电力等的气象信息则因人而异。受众主体不同，内容要求和诉求就不同。

包括2小时至7天天气预报、天气实况监测、重大天气过程预警信息等天气变化和实况的信息就是“长尾效应”中的“头”部，是所有气象信息中的核心信息。作为最普遍的用户，每个人都会有这样的经验，天气变化仅仅只是作为一种信息被提示，它本身并没有任何意义，用户真正需要的是这种天气变化对他的生活和工作会带着什么样的影响，这才是他客观需要知道的信息。所以，每个人对气象信息的要求是有差异的。这些差异化信息就是“长尾效应”中的“尾部”。

目前全国气象部门与农业、水利、交通、旅游、国土资源、林业等多个部门和行业开展了广泛的合作，开发出了一些有别于常规天气预报的其他类气象信息服务产品，就如多个微信公众号栏目中设置的农业气象信息、旅游气象信息等。这些气象观测数据与其他相关数据碰撞融合开发出来的延伸性信息、精细化天气预报、天气形势深度分析、各种灾害性天气动

态跟踪、气象科普读取等符合每一个行业、甚至每一个用户个性化需求的不同类别的气象信息就是长尾效应中长长的“尾”。比如，日本保险公司与气象公司合作推出樱花险，进行花期预测，一旦花期不符就可以获得赔偿。我国一些省市气象部门效仿此举推出了高温险、赏月险等，尝试“天气+保险”的服务。

“头”部核心天气信息传播应深度切合移动新媒体传播特性。搭建在移动互联网基础上的移动新媒体完全打破了传统信息传播中的时空限制和交互模式，决定了移动新媒体受众、传播媒介和信息的场景化（可随时随地获取各种信息，且受众可随时能与他人分享）、碎片化（包括信息的碎片化，能让受众快速捕捉到信息；媒体的碎片化，媒体传播者的分散；受众碎片化，受众对媒体和信息选择的个性化）的趋势。因此，移动新媒体上作为刚需的天气预报信息，一定要及时、简洁、实用地传播。

“尾”部信息要立足于受众需求实现信息差异化。英国传播学者斯图亚特·霍尔认为，受众的心理与媒体是一种互动关系。只有更好地把握受众的需求和心理，并采取与之相适应的传播方式和内容，才能创造更好传播效果。这一理论用于解读移动新媒体受众与信息传播的关联更为适用。因为移动新媒体传播语境里，受众不再局限于时间和地点，完全根据自己的需要和喜好主动搜索自己感兴趣的信息。纵览“今日头条”这样的新媒体运营者，其成功的诀窍在于注重对受众的关注点进行数据分析，然后进行信息的精准化推送。

深入阅读

- 蔡雨坤, 2017. 新媒体科学传播特色研究: 基于6个科学类微信公众号的内容分析. 科普研究, 12(5): 50-57, 109.
- 崔恒勇, 范钦儒, 2014. 试析数字出版平台与大数据结构. 出版发行研究, (4): 9-12.
- 达月珍, 2019. 浅析气象部门运作天气类app和气象微信公众号的优势. 气象科技进展, 9(3): 60-64.
- 彭兰, 陈婧, 2008. 长尾理论述评. 决策信息: 财经观察, (4): 26-26.
- 王迪, 王慧敏, 2015. 大数据视域下微信公众号影响力提升策略研究. 新闻研究导刊, 6(15): 189.
- 王芳, 2018. 新媒体传播与受众参与式文化的发展. 科技传播, 10(4): 140-141.
- 熊茵, 江山, 邢若南, 2018. 微信舆情的传播特征、机制及引导构想. 情报科学, 36(11): 54-60.
- 张振寰, 2018. 新媒体环境下对受众研究的再思考. 记者摇篮, (7): 101-102.

（作者单位：云南省气象局）

《气象知识》读者群体特点及其知识获取偏好调查与分析

李陶陶 李梁威 任珂 田依洁

基于从微信公众号的受众问卷调查中所获得的数据,对当前《气象知识》杂志受众的整体特点、阅读倾向、科普载体接受度等进行了分析,并从供给侧角度对气象科普存在的问题和改进的可能进行了讨论。本调研与分析可为传统气象科普纸媒向气象科普融媒体延伸提供科学依据。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.06.022

《气象知识》一直秉承宣传普及气象知识、弘扬科学文化、反对和破除封建迷信的办刊宗旨,紧紧围绕气候变化以及防灾减灾等内容,策划、组织、发表了众多优秀气象科普文章。然而随着时代的进步,互联网、大数据、人工智能等信息技术飞速发展,新的传播生态下,公众对科普传播方式也提出了便利化、体验化的新需求,微博、微信、微视频等自媒体以及虚拟现实等人机互动方式为公众喜闻乐见,这需要气象科普供给水平进一步提高。随着公众信息获取方式发生变化,气象科普多元化、差异化需求明显,要求气象科普更有内涵、有特色,信息推送更及时、更精准,服务更贴心,依托全媒体传播进行多样化展示、多介质推送,从而让气象科普活起来,更富吸引力和影响力。在这种形势下,《气象知识》等传统气象科普平台如何在融媒体时代充分利用互联网思维,同时又把握传统媒体优势,取长补短,在知识传播过程中实现科普效果倍增效应,值得深入调查、分析、研究。

本文基于《气象知识》现有风格和内容,设计了面向其受众或潜在受众(以下统称“受众”)的调查问卷,在有较高影响力的气象微信公众号发布,并对回收的问卷进行了分析和研究,以期为进一步探讨《气象知识》发展、气象科普纸媒如何充分利用融媒体的理念和技术提供科学依据。

1 问卷设计

本调研设计的问卷由两大部分组成:一是气象科普知识的受众特点,包括受众的性别、年龄、受教育程度、所在地域等;二是受众对气象知识的关注点及

载体的喜好倾向,包括受众获取气象知识的偏好、途径、目的等。调查问卷据此设计了10个问题,分为单选和多选两种,具体包括:性别(单选)、年龄(单选)、受教育程度(单选)、所在地域(填空,相当于单选)、获取气象知识的频次(单选)、获取渠道(多选)、关注的知识点(多选)、喜欢的产品形式(多选)、倾向的知识载体(多选)、关注气象知识的目的(多选)。

本调查问卷在“气象知识”微信公众号及“环球气象”微信公众号上发布,共计回收来自我国大陆及台湾地区的有效问卷946份。

2 基本数据及分析结论

2.1 受众自身特点

从本次有效填写调查问卷的人群来看,男性占比约65%,比女性高近一倍。需要说明的是,虽然本次回收的有效调查问卷显示被调查人群的男女比例差距较大,但这不一定能说明男性比女性更关注气象方面的信息和知识。因为这种差异也可能是使用手机或参加问卷调查积极性的性别差异而导致的,因此不能简单认为对气象知识感兴趣的人群一定有如此之大的性别差异。

青少年(14~20岁)占比仅为3.38%,反馈人数随着年龄增加而递增,50岁以上的人数占比近50%(图1)。答卷人群的年龄特点表明,中老年人对气象方面的信息和知识的关注度更高。同时考虑到当前网络用户的主体实际以青少年为主,气象知识对于青

收稿日期:2020年6月5日;修回日期:2020年8月31日

第一作者:李陶陶(1974—),Email:2307473067@qq.com

资助信息:中国气象局气象宣传与科普中心青年基金资助项目

少年的吸引力显得比较低，令人深思。

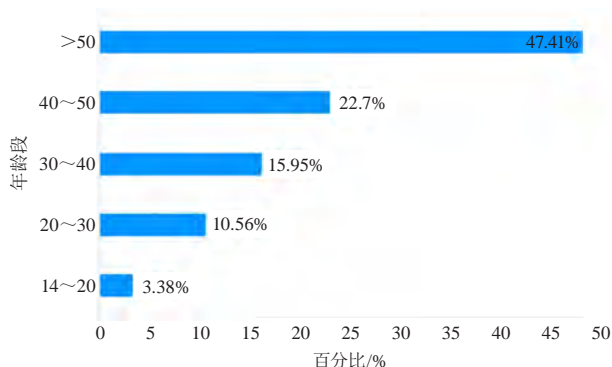


图1 被调查者年龄分布

本次调查问卷显示，参与填写问卷的受众受教育程度，中学及以下占比为47.04%，大学学历占比为48.2%，研究生以上学历仅为约5%。除去14~20岁尚在九年义务教育的青少年和尚未取得大学学历的青年（3.38%）外，本调查显示关注者以低学历者居多。这可能与关注气象知识的受众年龄偏高有关，因为老年人因所处时代原因学历普遍较当今社会偏低。考虑到高学历人士对气象知识再普及的潜力更大，有必要采取有效措施加大对这部分人群的气象知识科普力度。

从本次有效填写调查问卷人群的居住地来看，居于前五位的是山东、河南、北京、江苏、河北，均为人口密度较大的省或直辖市（图2）。其中山东省约占问卷反馈人数的12%。在参与人数较少的省份中，除台湾省外，后六位为贵州、宁夏、重庆、青海、海南、西藏，均为西部地区。考虑到参加调查的样本有限，且不同省（区、市）人口基数差异较大，对气象知识科普的态度是否存在地域特点，需要基于更大样本的研究和分析。

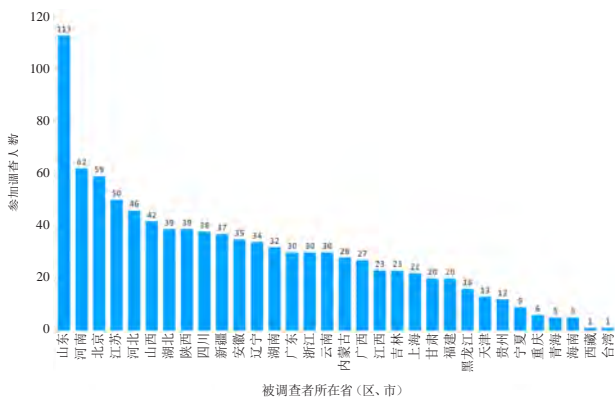


图2 被调查者所在省（区、市）

2.2 受众对气象知识及载体的喜好倾向

调查显示，每天都会查看的受众占比近58%，当

出现特殊天气过程会主动获取的占比约31%，二者相加为近90%（图3）。可见受众对气象方面的信息获取频率非常高，近半数的人在日常生活中有经常了解气象知识的习惯，而在出现特殊天气时，大部分人都主动了解气象知识。这说明气象部门的知识普及不仅具有良好的群众基础，并且，充分利用天气变化和气候事件的舆情效应，可以显著提高气象知识普及的效益。



图3 被调查者主动获取气象知识的频率

从关注内容来看，对气象方面的实用知识很感兴趣的人数高达2/3以上，天气事件紧随其后，也为受众高度关注，可见与自身工作生活紧密相关的气象知识是人们的关注重点（图4）。与此相反，科学故事和科技动态关注度较低。这一结果显示，不少科普工作者认为提高气象科普的传播力，应努力在故事性和前沿性上下功夫，这似乎与本次调查所显示的受众需求兴趣点并不吻合。

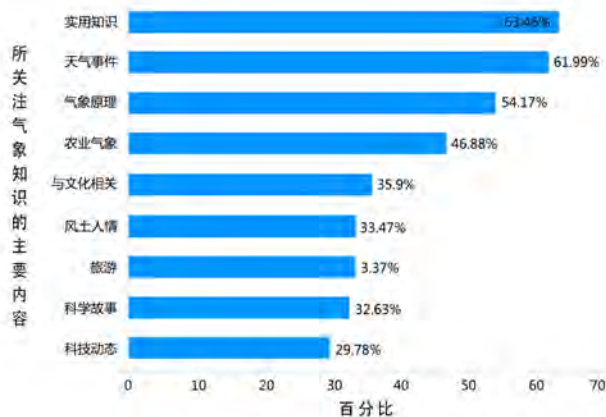


图4 被调查者比较关心的气象知识

以生活参考为目的的关注远远超出其他类关注目的，其中安排出行达到近67%，这说明气象服务于普通大众的根本目的还是为他们的日常生活提供必要的参考。防灾减灾占比四成以上，考虑到参加问卷调查的人员是以个体而非集体的身份参加，这一比例显得较高，表明气象知识科普在防灾减灾方面起到了不可或缺的作用。

调查问卷显示，本次填写有效问卷的人群获取

气象知识渠道以微信公众号等移动客户端居多，占比近69%。这当然不排除本次调查问卷是在微信公众号上发布的原因，但从网络获取此类信息的比例也较高（68.32%），已超过从电视上获取（其比例为56.07%），可见新媒体已成为人们获取气象知识不可替代的途径，即便是传播面足够的传统媒体也应该充分考虑利用新媒体进行二次传播。

相应地，微博、微信等移动客户端被认为是最适合发布气象知识的载体，高居榜首，显示出当前移动网络的普及率之高（图5）。专业科普产品占比四成，表明人们对此类产品的需求量也比较高。利用生活用品传播气象知识也有相当的受众需求。而纸媒产品位列最末，这与当前纸媒衰退的大形势一致。

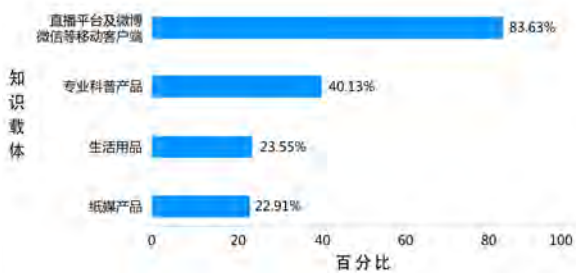


图5 被调查者认为最合适气象知识的载体

排除本次调查是从微信公众号上发布因而选择微信公众号居多的因素，选择文字方面的气象知识产品居高，位列第一；通过图文、电视、动漫以及微视频展示推送的气象知识产品的关注度紧随其后（图6）。可见，目前图文类气象科普产品仍是气象科普宣传中被普遍接受的形式，但如想进一步吸引年轻受众，似乎需要尽快拓展与之相应的展示及输出渠道，以防后继乏力。

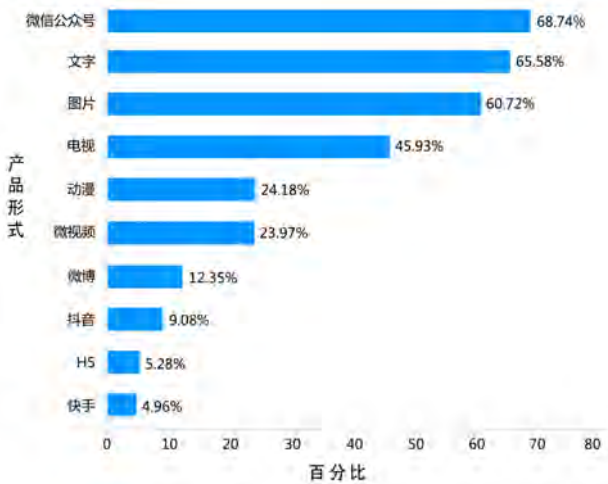


图6 被调查者喜欢的气象知识产品形式

本次调研的目的是要了解被调查者对于气象知

识的兴趣点和传播形式的偏好，问题的设计具有普遍性，并不针对特别的群体。但是，由于本次参与调查的受众可能与《气象知识》读者群及潜在读者群有较大交集，因此上述分析所得到的结论或更适用于《气象知识》杂志。

3 讨论与思考

一是科普提供者缺少对受众群体的分析。通常而言，科普提供者对受众群体的分析不够深入，缺乏对科普对象的特点把握，其结果就是因为把受众当成某类特定阶段的学生进行对待，以至收效甚微。对于受众而言，由于性别、年龄、爱好、地区、文化程度、职业等不同，必然形成不同群体。准确定位，针对性投放，是科普宣传达到优质高效的重要环节。以科普期刊为例，准确的读者定位能使期刊尽可能多地覆盖有效读者，有助于传播力的提升。而大数据技术的应用，可使期刊供给方快速了解受众方的构成，明确目标群体。同时，期刊在出版经营过程中，利用大数据也可跟踪读者的动态变化，随时调整办刊思路，促进期刊稳定、快速发展。对于受众面相对较窄的气象科普更是如此，根据准确的受众定位进行分众化传播，是让受众真正接受科普的最重要一步。本次调查表明，对气象知识感兴趣的人群近一半未能接受大学教育，且70%为近中年或老年人（40岁以上）。这就不难理解为什么本次受调查的人群对实用知识和天气事件最为关注，并使用相关知识来安排自身日常活动。针对这样的群体，到底应如何设计气象科普产品，值得深入研究。从另一角度来讲，研究生及以上学历者对气象知识的关注度不到5%，可见现有并使用的科普平台似乎失去了对年轻且受教育程度较高的群体的吸引力，这也解释了为何快手、抖音、微博等这些年轻人最为喜爱并使用的平台在本次调研中占比几乎都低于10%的原因，这一现象值得深思。

二是科普途径未能完全适应当今技术进步。时代在发展，新媒体不断涌现，传统科普方式显然不适用于当今社会，难以满足受众的真实需求并获得认同。进入“互联网+”时代，诸多科普网站、手机科普平台等储存及发布了大量电子科普书籍、期刊、报纸，承担起宣传普及科学知识重任，相较传统纸质媒介，这些网站和平台上发布的科普产品具有内容海量、结构立体、查询便捷，个性化自定义等特点。本次调查结果显示，网络（包括移动网络）是最受欢迎的科普知识获取渠道。究其原因，除了其便利性的特点之外，也因新媒体可以提供极其丰富的表现形式，

（下转151页）

提升气象预警信息传播效果的分析与建议

■ 郭俊萍

气象预警信息传播处于气象灾害分析研判与防灾减灾救灾之间的重要节点位置，起着承上启下的重要作用。长期以来，对首尾两端都非常重视，但相对忽略了中间传播环节，使得前端气象预警分析与后期防灾减灾救灾没有做到完全无缝衔接。在信息时代，借助互联网等新一代信息传播平台和工具，有效提升气象预警信息的传播效果，既有着现实需要，也具有技术保障。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.06.023

气象灾害种类很多，最常见的诸如洪涝、干旱、风暴等，不但发生频次高，还与人民群众的生产生活和生命财产安全密切相关，常常造成巨大的破坏。做好事前灾害预防，不但能有效保护人们的生命财产安全，对避免次生灾害的作用更大。

1 气象灾害预警信息传播中存在的问题

我国的气象灾害预警信息传播基本实现了横向到边、纵向到底的全覆盖，在过去的历年历次灾害预报预警过程中都发挥了巨大作用，保障了人民群众的生命财产安全。正因为如此，关注天气预报信息，成为了广大群众的生活习惯。调查显示，有60.6%的公众每天必看天气预报，有28.7%的公众通过了解天气信息之后安排计划，有10.6%的公众出于兴趣关注天气预报。但是也要看到，目前我国的气象预报预警信息传播，存在着模式固化、形式固化等弊端，需要及时加以改进。

1.1 气象灾害预报传播方式协同不够

过去我国的气象预报信息传播以传统媒体为主，尤其是从中央电视台到省、市、县电视台每天固定播出的天气预报节目，成为人民群众了解气象信息的主渠道。随着互联网的广泛应用，网络媒体以其实时性、便捷性、容量无限性，吸引了越来越多的受众。而电视等传统媒体的受众和影响力都呈现不断下降的趋势，及时性不足的弊端也越来越明显。尤其是中央电视台播放的天气预报，通常以省为单位，而由于省域面积过大，同一时间内不同地区甚至不同县乡的天气都有明显不同，也让受众感觉到气象信息发布的针对性、实用性不强。虽然专业气象网站、政府平台、

微信、短信、微博、App的即时性、可达性优势明显，但目前还宣传不足、推广不够，作用没有充分发挥，尚未与传统传播渠道形成强大合力。尤其需要注意的是新技术、新手段日新月异，传播渠道多元化，但相关的监管手段和监管措施没有及时跟上，容易造成民众对气象灾害预警信息的获取混乱。特别是有些新媒体采集的信息不准确，传播出去可能造成不可预见的损失。为此，相关主管部门应加以重视，及早制定制度和采取措施，从源头上规范气象灾害预警信息发布行为（表1）。

表1 传统媒体与新媒体在气象信息传播中的异同

传播媒介	传统媒体	新媒体
	电视、广播、报刊等	专业网站、微信、微博、短信、App等
传播速度	固定时间发布	即时传播
受众面	受众广泛	受众精准
信息量	信息精炼	信息详尽

1.2 提升市县一级气象部门的技术水平

气象信息传播只是手段，最终效果如何，依仗的是气象分析的准确性。长期以来，基层气象部门人员偏少等各种原因导致一些基层气象部门预报的精准性不足。气象分析具有明显的网格化特征，因而本地气象监测有着不可替代的优势。只有做好基层气象部门技术人员的培训工作，提高科技水平和业务能力，做到对当地气象状况的精准预测，辅以及时传播，才能起到服务当地百姓，及时防灾减灾的作用。此外，在服务型政府建设的大背景下，气象工作人员更要提升服务意识，树立气象预报无小事的理念，全链条细化流程、提升水平。

收稿日期：2020年9月5日；修回日期：2020年11月20日
作者：郭俊萍（1968—），Email: 984836961@qq.com

1.3 地方政府对气象部门的重视程度和支持力度不够

气象部门长期处于弱势地位，地方政府对气象部门的重视程度不够，特别是在资金和人员方面的支持明显偏弱。一些地方政府没有建立完善的灾害应急协调机构，导致气象部门在政府体系内部缺乏发声渠道，无法给领导在防灾减灾救灾决策上提供专业指导意见。一些基层气象部门的资金缺口大，勉强能够满足职工的工资支出，技术设备更新缓慢。尤其是异常天气少、气象灾害少的地方，气象部门更是难以得到人员和资金保障。即便是气象灾害多发地区，气象部门通常也只是受到季节性重视。

1.4 气象职业待遇偏低难以留住人才

气象部门表面上看并不直接产生经济效益，即使为减灾工作做出了突出贡献，其效益也难以量化。气象职工收入水平普遍低于同地区其部门的职工，而且很多工作岗位处于偏僻的地方，条件相对艰苦。向上流动空间有限、渠道狭窄，职务晋升和职称评定比较困难，导致一些基层气象部门技术人才流失严重。气象专业人才需要常年一线工作的经验积累，人才本来就处于短缺状态，基层科技人才的不断流失，更使得人才短缺状况雪上加霜。特别是气象灾害预报预警信息人才，既要懂气象专业技术知识，又要懂现代信息传播技术与手段，还需要跨领域的资源储备，属于典型的复合型人才。当前这种专业人才极度缺乏，制约了气象灾害信息传播的效果。

2 提升气象灾害预警信息传播的建议

通过将预警信息传播的单一因子作为指数，分为1~5分五个级别，将发布时间限制以及受众大小、技术要求、传播效率、运行成本的核算程度、影响程度大小、抗干扰性等7方面作为评价因子，从而进行综合考虑5种传播形式的优缺点（表2）。

表2 预警信息传播对比指数表

预警手段	广播	电视	网络	公众终端	短信
发布时间限制	3	3	4	5	5
受众大小	4	2	5	5	5
技术要求	3	3	3	3	3
传播效率	2	3	5	5	4
运行成本的核算程度	3	4	3	3	4
影响程度大小	2	3	4	4	5
抗干扰性	2	3	4	4	4

2.1 强化气象灾害预警的及时性

通过电视台进行气象信息传播，虽然具有传播力强、影响面广的优势，但由于是在固定时段，也会

产生气象信息特别是对时效性要求强的气象灾害信息传播的时滞现象。我国的互联网应用非常普及，截至2019年底，全国手机用户已接近11亿，其中智能手机占据绝对主流，即使考虑一人多机情况，手机也是毫无争议的第一信息传播工具。手持移动终端、微博、微信、QQ等社交媒体由于其具有极强的时效性、提供信息的稳定性、克服空间的局限性、公众的参与性等媒介特性，其优势越来越明显。应充分利用这些信息工具，结合互联网、大数据等新兴技术，做到即时传递气象预报预警信息。目前，日本等气象灾害多发国家，在运用互联网和大数据实时精准推送防灾减灾信息方面都取得了良好效果。日本气象厅还建立了全国联网的灾害信息系统，涵盖中央、地方各级政府部门和主要新闻机构，监测到自然灾害信息后向全国播发。

2.2 提升气象灾害预警的精准性

气象预报特别是极端气象情况下的灾害分析，是人类认识大自然的一项科学探索，有着非常多的未知因素，过去不能、现在不能、将来也不能做到百分之百精准，这就给气象灾害预警信息发布带来了一定风险性。如洪涝灾害、飓风预报等，如果预报过轻，会耽误宝贵的预防和组织人员物质转移时间，有可能带来重大人身财产损失；如果预报过重，地方政府提前采取人员转移、停工停产停课等措施，事后发现是误报，责任人不但可能会受到责难，还会影响人民群众对气象预报工作的信任和配合。为此，必须向科技要成果，不断提高气象灾害信息预报的精准性。应进行区域细分，在中国气象网等专业网站上，不仅要有全国范围、各省范围的，还要有各市（区）县的气象预报预警信息，做到一网知晓全国甚至全世界。市（区）县级气象部门在与当地媒体建立常态化信息发布机制的同时，还要争取与地方政务平台合作，扩大气象预报预警信息发布渠道。

2.3 改善气象灾害预警的可达性

气象灾害预警的真正价值实现，在于信息传播的可达性，即在最短时间内传递给最需要的目标群体。同时还有一个不容忽视的情况，不管是通过传统的电视播报还是新媒体的手机推送，都会遗漏掉一部分目标群体。如洪涝灾害特别是山洪泥石流灾害等，往往都是发生在偏僻乡村甚至边远山区，这些地方一是人员稀少，二是经济条件差，三是老人多、妇女多、孩子多，四是缺少电视、手机等信息工具。这些人基本属于现代信息条件下被边缘化的群体，难以及时获得应知灾害信息。这就需要在进行气象灾害预报预警

时,将现代通讯技术与传统办法结合起来,如通过农村大喇叭甚至人员上门通知等,实行地毯式拉网,在防范气象灾害时绝不漏掉一家一户一人。

2.4 加强基层气象人才队伍建设

气象院校是培养输送气象人才的主力军,应根据我国对气象人才的实际需要,核算缺口数量,制定专门计划,实行定招扩招,加快对气象人才的培养。中国气象局、省气象局以及气象院校、科研院所等,应充分发挥自身气象专业人才密集的优势,定期组织开展人员轮训,特别是对基层气象科技人员进行培训,让其知识得到及时更新,水平得到不断提高。由于基层气象部门人手紧张,上级单位、气象院校、科研机构的专家还可以采用送科技、送培训下基层的方式,进行巡回培训。要制定激励机制,提供与气象人才能力水平相适应的收入报酬、职称评定、职务晋升通道,使高水平气象人才能够安心工作。同时还要通过特殊人才引进机制,吸引高水平的气象专家学者能够充实到气象队伍中来。如加强国际间的气象合作,通过研讨会、客座教授等方式,邀请国际知名专家学者进行学术交流指导,及时分享国际上最先进的气象科研成果等。

2.5 支持基层气象部门更新设备

地方政府应对本地气象部门加大财政支持力度,对气象防灾亟需的先进设备进行及时升级。在气象灾害多发地区,地方政府应对气象部门建立制度化的奖励机制,如预报精准及时,有效防范了极端气象引发的灾害,保护了人民生命财产安全,就对有功单位进行表彰,对有功个人进行奖励,以激发气象工作者的荣誉感和使命感。地方政府领导应改变气象部门不创造经济价值的传统观念,意识到防灾减灾就是创造最大的经济价值。一些地方每年因气象灾害造成的直接损失高达亿计、十亿计甚至百亿计,支持气象部门做好灾害预警信息发布工作,其社会效益与经济效益都十分巨大。

2.6 各地政府要建立专门应急频道

地方政务平台或者政务App中,要建立专门的应急频道,发布各种有关自然灾害与非自然灾害的防范、预警、求助、善后信息,组织专业力量,提供专

业建议。应将气象灾害预警信息通过政务服务平台进行适时推送,遇到重大突发灾情时,随时进行信息推送。同时还可以通过应急频道,发布最急需的应急救援物质信息。防灾减灾救灾就是和时间赛跑,只有做到人尽其材、物尽其用,才能最大限度避免或者减轻灾害对人民生命财产所造成的损失。同时,气象部门对于地质灾害易发点,要注重气象信息发布实效和滚动订正,并及时与国土等相关部门协调沟通,推动由气象信息发布到气象灾害风险管理转变。

2.7 建立防灾教育培训体制机制

相关部门不仅要建立部门间协调和响应机制,还要建立常态化、制度化的教育培训体系。灾害是针对全社会的,因此不能只让某些部门、某些群体加以注意,其他人麻痹大意。有些气象灾害之所以给人民群众造成巨大的生命财产损失,很可能就是细节方面的防范之失。应以城市街道社区和农村乡镇为单元,由防灾救灾专业人员定期进行灾害预防演练。普通民众应养成关注气象灾害信息发布的习惯,特别是在雨季、台风等气象灾害高发期,特定地区的民众更要加强防范措施。受过专业训练的自愿者,从接到灾害预警信息开始,就能够积极组织行动起来,有条不紊地开展灾前预防,以及中后期的灾害救助工作。值得称赞的是近年来,我国民众对气象灾害预警的关注度越来越高。有关调查数据显示,近五年我国民众对气象灾害预警服务的满意度逐年提高,2019年高达90.7分,较2018年提高0.9分;其中农村91.5分,城市90.1分,较2018年分别提升0.8分和0.9分。2019年民众对气象灾害预警服务的知晓率为89.6%,接收率更是达到了92.7%。人民群众的积极响应和配合,为今后我国进一步提升气象灾害预警成效,提供了有力保证。

深入阅读

- 刘美,吴建成,盛飞兵,2017.气象趋利避害科普信息应用的传播学分析——基于拉斯韦尔的“5W”传播模式.海峡科学,(1):38-40.
- 张玉成,钟波,2019.气象灾害重大突发事件气象信息传播构建策略.黑龙江气象,(4):30-32.
- 朱定真,董丽丽,2010.气象服务信息有效传播能力探讨.气象科学,30(3):522-525.

(作者单位:中国气象局公共气象服务中心(国家预警信息发布中心))

面对群体差异的气象服务——以广西为例

■ 赖雨薇 杨宝回 林美言 白龙

2017年广西公共气象服务的总体满意度为87.25分。“预报不准确”“发布不及时”是公众对气象服务不满意的主要原因，其次是“获取气象信息不方便”。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.06.024

公众气象服务是公益性、基础性的公共服务，开展公众气象服务满意度的调研和评估，可以检验公共气象服务的成效，使气象部门更有针对性地改进和完善气象服务，挖掘气象部门需要优先考虑的新需求。吴先华等采用结构方程模型，评估了公众认知、感知价值与灾害气象服务满意度之间的关系。罗慧等提出了CSIWS测量模型，并以此对2008年协办城市奥运气象服务满意度进行评估。近几年，不少学者对公共气象服务满意度进行调研、对评价方式展开研究。

当前公众气象服务满意度调研存在一些问题，如样本覆盖不够全面；公众气象服务满意度评价通常采用顾客满意度评价方法，但是对行业细化调研现状和优化方案可行性缺乏考虑。本文基于2017年广西公共气象服务满意度调查数据，采用的指标计算参照国家统计局进行的气象服务评价项目计算方法，样本量大，覆盖面广。在调查的基础上，结合公众主观认知因素和不同群体对气象满意度评价的差异性进行研究，重点在考虑气象行业特殊性的同时，在现有服务渠道的基础上给出可行的政策建议。

1 数据与方法

1.1 数据来源

调查采用计算机辅助电话访问系统(Cati)进行电话访问，样本抽取由计算机完成，调查由接线员完成，访问员与被访者一对一进行。调查对象为18岁及以上的城乡常住居民，样本覆盖了广西14个地市，样本量 ≥ 12000 个，固定电话和移动电话访问比例约为1:1。

1.2 样本分布

被访者中：城镇居民占60%，农村居民占40%；男性占59.47%，女性占40.53%。样本年龄、文化水

平、职业分布分别在图1—图3中给出。

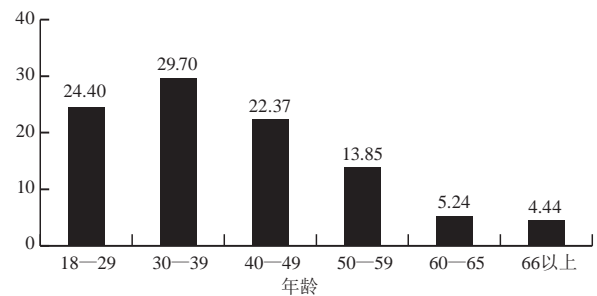


图1 被访者年龄分布 (%)

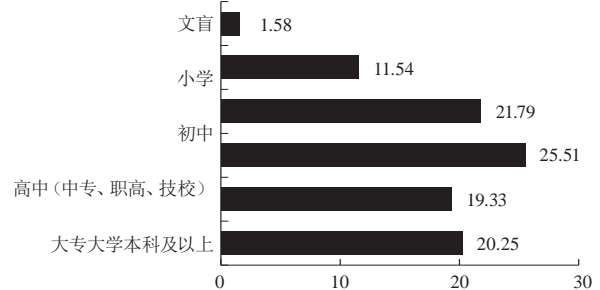


图2 被访者文化程度分布 (%)

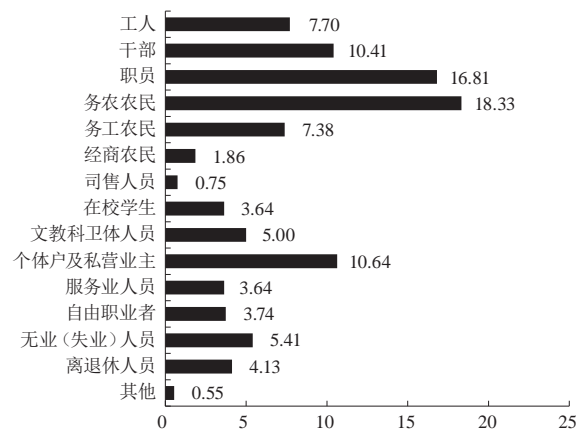


图3 被访者职业分布 (%)

收稿日期：2019年4月23日；修回日期：2019年8月4日

第一作者：赖雨薇（1989—），Email: laiyuwei721@163.com

通信作者：杨宝回（1963—），Email: nnqxwx@163.com

资助信息：广西区气象局气象科研计划项目（桂气科2017M14）；广西区气象局软科学研究项目（[2018]第M05号）

1.2 问卷设计

公众气象服务满意度指标体系是一个多指标的综合体，其结构评价指标是层次化的结构。根据公共气象服务满意度评价的探索实践和现阶段业务流程，调查问卷围绕公众气象服务满意度、气象风险预警服务的现状与需求、气象主要传播渠道的知晓率、接收率展开。考虑到科普宣传是我国公众气象服务的重要环节，因此气象服务科普宣传也应纳入公众气象服务满意度评价指标。调查问卷设置了4个一级指标，10个二级指标和15个三级指标（表1），调研分析结论也主要围绕这些指标进行。

表1 2017年广西公众气象服务评价指标

一级指标	二级指标	三级指标
公众气象服务满意度	总体服务效果的评价指标	气象服务满意度
	气象服务信息发布评价指标	信息发布的及时性 获取渠道的便捷性
	气象服务信息内容质量评价指标	信息内容的实用性 天气预报的准确性
	公众对气象服务的期望	天气预报准确性的期望度
气象风险预警服务的现状与需求	气象灾害预警服务的现状	预警信息知晓率 预警信息覆盖率
	气象灾害预警服务的需求	气象防灾减灾常识了解程度
主要传播渠道的知晓率、接收率	主要传播渠道的知晓率、接收率	气象微信知晓率 气象预警大喇叭知晓率
	气象预警大喇叭的实用性	气象大喇叭对生产生活的帮助
	气象知识科学普及程度	气象科普宣传知识的普及率 获取气象科普宣传知识难易程度
	气象科普知识实用性	气象科普知识信息的实用性

1.3 计算方法

满意度采用了目前普遍适用的李克特（Likert）5级量表的形式对指标进行测评，满意度S根据被访者中不同程度的满意情况对应的分值进行加权平均，权重是选择各满意值的频数。S的单位为“分”，评分越高表示公众对该项越满意。

2 公众气象服务满意度调查结果分析

2.1 调查结果

调查结果显示，2017年广西公共气象服务的总体满意度为87.25分。“预报不准确”“发布不及时”是公众对气象服务不满意的主要原因，其次是“获取气象信息不方便”。本文针对上述影响气象满意度的主要因素进行分析。

2.2 指标与满意度的相关性

表2给出了不同指标与满意度的相关性，其中，心理落差指标（简称心理落差）定义为=公众对天气

表2 不同指标与满意度的相关性

指标	心理落差	准确性	及时性
r	-0.942	0.905	0.842

预报准确性的期望值（ $E \times 100$ ）-公众对预报准确性评价得分。

2.2.1 心理落差

公众对预报准确率的期望值为85.57分，而对准确率的评价为73.12分，心里落差分达到12.45分，公众对预报准确性存在较大心里落差。

满意度评价体系中准确率的计算方法、群众对预报准确率的主观评价和常规业务中预报准确率的计算方法三者有较大的出入，是造成心理落差的主要因素。公众对预报的准确率评价和实际业务中预报准确率评分有较大差距。以南宁为例，公众的期望值为85.61分，而对准确性评价得分为70.15分。而在气象现代化评估的指标体系中，南宁预报准确率为85.23%。业务范畴的评价基本达到公众期望值，但是明显低于公众评价价值（图4）。

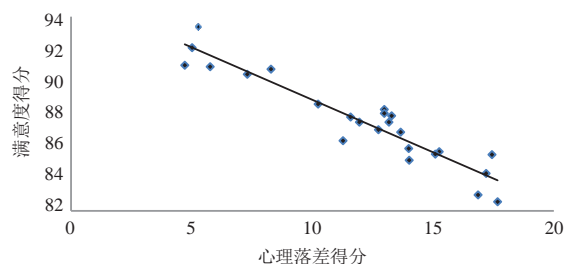


图4 心里落差和满意度得分的关系

2.2.2 气象信息发布时及时性

调查结果显示及时性评价得分为82.30分。气象信息发布有严格制度规范和业务流程，通常遇到的不是“发布不及时”，而是“接收不及时”。目前，广西各级气象部门发布渠道在硬件建设上基本实现了100%覆盖，但是软着陆方面仍然不够，预警信息“最后一公里”问题仍需要进一步解决。例如，手机短信虽然开辟绿色通道，但由于运营商流量限制原因，仍存在接受滞后的现象；气象预警大喇叭和电子信息显示屏虽然基本实现村村覆盖，但是信息频次不够密集，在线率稳定度不够，导致信息传递延时。

2.2.3 公众对气象信息的认知

公众的认知显著影响公众对于气象灾害服务的满意度。评价结果显示：预警信息知晓率、预警信号含义了解程度等方面评分较低。预警信号业务已经运行多年，虽然覆盖率评分达87.26分，但是预警信号的含义及相应的防御措施得分仅有62.33分。发生灾害性天气，绝大多数人群可以接受到预警信息，但是群众对

预警的种类、严重程度、相应的防御措施了解不足。了解预警信息的意义和防御措施，可避免人身伤害、减少财产损失，帮助群众感知气象服务的价值，提升满意度。

2.3 群体差异性分析

调查结果表明：评价指标存在着群体差异，为了体现不同群体对公众气象服务满意度的差异情况，对不同年龄、不同职业、不同学历的公共气象服务满意度（表3）进行离散度分析。

离散程度可以反映差异程度，本文以标准差来计算群体差异。标准差越大，表明差异性越大，主要指标的标准差见表4。

通过离散程度计算可知，不同学历的群体对满意度的各项指标评分差异不大，不同年龄及不同职业的群体评分差异较大。

满意度评价较高的群体有：干部、离退休人员、科教文卫体从业者，50岁以上人群，他们的满意度评价在90分以上，心理落差在10分以下，信息发布及时性的评分在86分以上。满意度评价较低的人群有：自由职业者和在校学生，18~39岁的年轻群体，满意度评价不足86分，心理落差在15分以上，对信息发布的及时性评价在80分以下。公众是气象信息的接收者，但是不同的学历、职业和背景造成公众对气象信息的认知差异较大，直接影响到满意度评价。随着时代的发展，年轻群体获取气象信息的方式更多，需求更大，服务难度更大。日后的服务应该转变方式，应加大对年轻群体的渗透，选择更能被年轻群体接受的新方式发布气象信息。

3 小结

本文表明，心理落差是影响满意度的首要因素，其次为预报准确性和气象信息发布的及时性；不同学历人群对满意度评价差距不大，不同年龄和不同职业群体对评价差异较大。

表3 不同群体的评价指标得分

分类	样本分布	满意度	准确性	心理落差	及时性
年龄	18~29	84.32	68.47	17.19	78.53
	30~39	85.50	70.78	15.09	79.96
	40~49	88.60	75.52	10.24	85.17
	50~59	90.44	77.67	7.30	85.70
	60~65	93.38	79.62	5.26	88.54
	66岁以上	91.00	79.93	4.71	86.33
学历	文盲	85.13	67.83	14.01	76.09
	小学	87.49	71.73	11.94	79.75
	初中	88.02	71.52	12.98	82.06
	高中	86.87	72.11	13.65	81.55
	大专	87.86	75.02	11.58	83.79
	本科及以上	86.33	75.37	11.27	83.99
职业	离退休人员	92.08	80.92	5.02	88.85
	干部	90.90	81.49	5.76	89.04
	科教文卫体	90.75	78.78	8.28	87.61
	职员	85.86	72.64	13.99	82.03
	工人	87.88	72.34	13.28	81.97
	务农农民	87.49	70.77	13.17	81.07
	无业人员	85.47	68.28	17.44	79.72
	自由职业者	82.98	68.08	16.86	79.38
	务工农民	87.01	71.18	12.73	79.17
	服务业人员	85.65	70.46	15.25	79.09
	司售人员	88.26	70.99	12.98	78.24
	在校学生	82.56	67.40	17.67	77.51

表4 不同群体评价指标的标准差

	满意度	准确性	心理落差	及时性
年龄	3.1483	4.3366	4.7503	3.5714
学历	0.9884	2.5088	1.0388	2.6947
职业	2.8624	4.6975	4.0821	3.9964

今后应注意：1) 解释天气预报技术难点，减小心理落差；2) 寻求渠道合作，提高气象信息传输效率；3) 转变重心，拓宽服务领域；4) 加大宣传投入，融入社会力量。

(作者单位：南宁市气象局)

湖北省高温灾害特征及其影响分析

■ 郑治斌 任永建 王凯

高温是湖北省夏季常见的灾害性天气。江汉平原及东北部地区容易出现高温灾害，而西南部地区不易出现高温灾害。湖北省高温天气一般与西太平洋副热带高压活动密切相关，而城市热岛效应也是高温灾害发生不可忽视的原因。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.06.025

受全球气候变暖和城市化、工业化造成的城市热岛效应的双重影响，长江流域及其以南地区几乎每年都会出现持续10 d以上的强度大、范围广的极端高温灾害天气。据世界气象组织最新发布信息显示，2018年全球平均温度比1981—2010年平均值偏高0.38℃，比工业化前平均温度高出约1℃，2014—2018年是有完整气象观测记录以来最暖的5年。有不少学者对湖北省高温进行过研究，如任永建等研究表明湖北省极端高温事件的发生频率与年平均气温呈正响应；田士如等研究表明湖北省年极端最高气温呈弱增温趋势，年极端最低气温呈显著的上升趋势；陈正洪等研究表明湖北省1961—2000年气温倾向率多为正，即呈增温趋势，但时空分布不均，热岛效应影响着显著的随时间增大的趋势。

湖北省地处长江中游，夏季高温是常见的灾害性天气之一，对人体健康及工农业生产带来危害和不利影响，还引发城市水电严重的供需矛盾。本文在借鉴有关研究的基础上，对湖北省高温灾害的特征及其影响进行研究，为防御高温灾害和应对气候变化提供一定的依据。

1 资料与方法

1.1 资料

选用1961—2018年湖北省国家气象站（共76站）的日平均气温、日最高气温、日最低气温等资料，资料来源于湖北省气象信息与技术保障中心。

1.2 有关定义与划分标准

高温是夏季常见的灾害性天气。高温天气的强度达到一定程度时就有可能产生灾害。高温灾害主要是气温太高而引起人员、动植物不能适应的现象。中国

气象局的业务规范规定，日最高气温达到或超过35℃以上为高温天气，达到或超过37℃以上时称为酷暑，连续3 d以上的高温天气称为高温热浪。连续7 d以上的日最高气温达到或超过35℃以上、连续5 d以上的日最高气温达到或超过38℃以上称为连晴高温。由于我国幅员辽阔，气候差异很大，不同地区高温日存在着明显的差异性。因此，中国气象局同时还规定，各省（市、区）可以根据本地天气气候特征规定界限温度值。湖北省采用以上界限温度值界定年平均高温日数、连续高温、极端高温和极端连续高温事件等。本文极端高温站次比是指按照湖北省达到极端高温事件标准的站次数与湖北省76个站点的比例。

2 湖北省高温天气的气候特征

2.1 年平均高温日数

1961—2018年，湖北省年平均高温（最高气温 $\geq 35^\circ\text{C}$ ）日数呈上升趋势（图1），上升速率为0.8 d/10 a。2000年以来，除2008、2014、2015年外，其余年份平均高温日数均较常年值偏多。2018年湖北省平均高温日数达34.6 d，较常年偏多18.2 d，为第

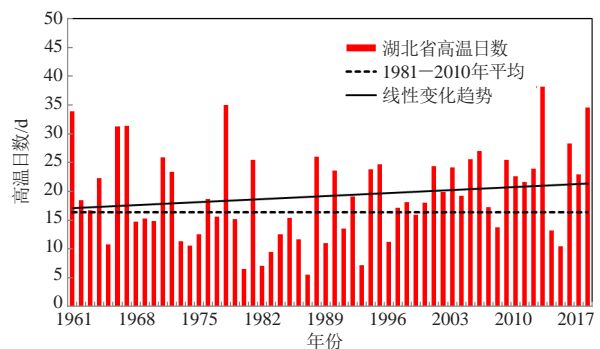


图1 1961—2018年湖北省年平均高温日数逐年变化图

收稿日期：2020年2月14日；修回日期：2020年5月22日
第一作者：郑治斌（1964—），Email: zhzb646@126.com

三高。

从空间分布看，湖北省年平均高温日数鄂东大部、三峡河谷及鄂西北局部20~34 d，鄂西南部、江汉平原局部及鄂西北局部10 d以下，其他地区10~20 d。

2.2 极端高温

湖北省极端高温山区河谷地区高于平原，江汉平原一般在40℃以下，其中公安只有38.3℃，是全省除高海拔山区外的最低值；兴山—鄂西北山区、大别山区为高值区，约41.5~43.4℃；鄂东南幕阜山区在40.3~41.7℃；鄂西南的恩施自治州大部在37.6~41.2℃。

1961—2018年，湖北省极端高温站次比存在较明显的年代际变化特征（图2）。20世纪90年代以前，极端高温站次比变化较大，60、70年代高温事件相对较多，80年代较少，90年代以后趋于稳定，2000年以后极端高温事件又有所增加，尤其2013年为历史最高，极端高温站次比达2.2。2018年湖北省极端高温事件较常年偏多，高温持续时间长，盛夏期出现2段持续高温天气过程（7月14日—8月3日、8月7—15日）。期间谷城等8站共出现21站次极端高温事件。

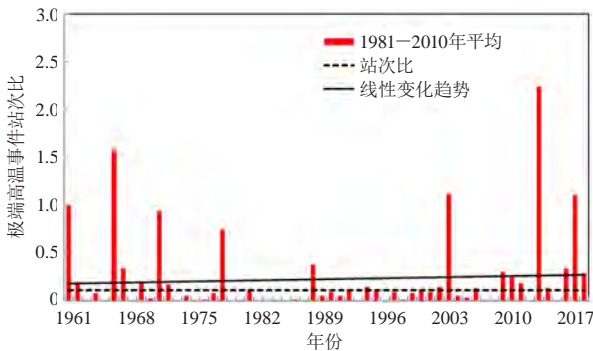


图2 1961—2018年湖北省极端高温事件站次比逐年变化

2.3 极端连续高温

1961—2018年，湖北省极端连续高温事件站次比变化不明显（图3），20世纪60、70年代相对为多发期，80年代较少发生，90年代趋于多发，2000年后又趋于减少，2012年后又多发，特别是2016—2018年极端连续高温事件站次比较高。

3 湖北省高温致灾机制分析

3.1 气象条件

湖北省高温天气一般与西太平洋副热带高压活动密切相关。夏季当天气形势比较稳定，副热带高压偏西偏强长期控制湖北省时，大气热量持续累积，导致早晨基础温度高，气温也日益增高，往往出现持续高

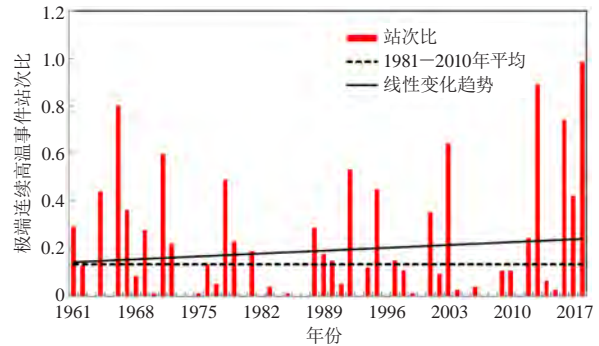


图3 1961—2018年湖北省极端连续高温事件站次比逐年变化

温，时间越长对湖北省的危害越重。

3.2 城市热岛效应

城市下垫面，如道路、广场、建筑物等，都是由沙石、沥青、钢筋混凝土、岩矿等各种石料，人为烧制的砖瓦和金属构件等组成，具有导热率高、吸热能力强、热容量大等特点。下垫面可能是通过所获得的感热和释放的潜热的不同来影响近地面层温度的，同一时间城区温度普遍高于周围的郊区，高温的城区处于低温的郊区包围之中。

3.3 地理环境

湖北省西、北、东边三面环山，中间环抱着低平的江汉平原，构成了南部向洞庭湖敞开的不完整盆地。境内河流纵横，湖泊众多，地貌类型复杂多样，因而对高温灾害有很大影响。

山地对湖北省气温的影响主要是通过“焚风效应”来实现的。当环境风场为偏西风时，气流在迎风坡上升到一定高度后，由于水汽凝结使空气变得干燥，然后在背风坡一侧顺坡下沉，并以接近于干绝热率增温，使背风坡平原地区气温上升，加剧了背风坡高温的强度。夏季在稳定的高压控制时，下沉增温的“焚风效应”常常形成湖北省山区、河谷地区严重的晴热天气和高温灾害。

4 高温灾害对湖北省经济社会发展影响

4.1 危害人体健康

研究指出，当气温达到30~34℃时，人体生理活动开始受到影响，当气温达到35℃以上时，人体的调节功能大减，容易出现疲劳、烦躁等，易发生“高温病”。湖北省高温灾害对人体健康的影响主要是发生高温中暑，如1978、1988、2003、2013、2016年等，其中1988年7月14日—8月15日，武汉市一直在热浪笼罩下，持续高温使中暑病人不断出现。在7月上、中、下旬中暑人数分别为335、803、127人。到9月底，武汉全市共有1436人中暑，其中非生产性中暑

1381人,占96.17%;生产性中暑55人,占3.83%,因中暑死亡34人。7月下旬,孝感市因高温无雨,使得乙型肝炎在部分地区流行,据调查,发病223人、死亡21人。

4.2 影响城市供电供水

近年来,湖北省高温灾害造成城市供电供水负荷连创新高或刷新历史记录的典型事件年份主要有2013、2016、2018年,其中2018年7月14日—8月3日、8月7日—8月15日,湖北省大部地区出现两段持续高温天气过程,其中7月14日—8月3日持续时间最长。受持续高温影响,7月24日武汉市水务集团的日供水量刷新历史记录,达到330.1万吨。继7月19日湖北电网全口径最高负荷达3649万千瓦刷新历史最高纪录后,7月20日又创新高,达3702.98万千瓦,7月25日达到过程最大值3732.3万千瓦。25日21时10分,武汉电网最大负荷达到1151.79万千瓦,刷新了2017年的历史最高纪录。

4.3 对农作物的影响

平均温度上升会导致部分农作物生育期缩短与早熟,从而造成有效分蘖减少,穗重下降、产量降低。高温灾害是高温对植物(生物)生长发育和产量形成所造成的损害,一般是由于高温超过植物(生物)生长发育上限温度造成的,主要包括高温热害和果树林木日灼及畜、禽、水产鱼类热害等。

5 结论与讨论

1) 高温是湖北省夏季常见的灾害性天气。江汉平原及东北部地区高温灾害容易出现,而西南部地区不易出现高温灾害。高温灾害主要发生在湖北省中、东部地区。

2) 湖北省年平均高温(最高气温 $\geq 35^\circ\text{C}$)日数呈上升趋势,上升速率为0.8 d/10 a,鄂东大部、三峡河谷及鄂西北局部高温日数较多;极端高温站次比存

在较明显的年代际变化特征,山区、河谷地区高于平原;极端连续高温事件站次比变化不明显。

3) 湖北省高温天气一般与西太平洋副热带高压活动密切相关,城市热岛效应造成高温强度增强、频率增加,成为高温灾害发生不可忽视的原因。湖北省地理环境对高温灾害的出现频次和程度有一定的贡献。

深入阅读

- 张书娟,尹占娥,刘耀龙,等,2011.基于GIS的华东地区高温灾害危险性分析.灾害学,26(2):59-65.
- 宛霞,李威,王德毅,2019.中国气候变化蓝皮书(2019)发布:气候系统变暖趋势进一步持续.中国气象报,2019-04-09(1).
- 任永建,杜良敏,肖莺,等,2012.近49年来湖北省极端高温事件及其对区域增温的贡献.气象,38(9):1145-1149.
- 田士如,代侦勇,2015.1961—2012年湖北省极端气温时空变化特征分析.国土与自然资源研究,(5):45-48.
- 陈正洪,王海军,任国玉,等,2005.湖北省城市热岛强度变化对区域气温序列的影响.气候与环境研究,10(4):771-779.
- 邵末兰,向纯怡,2009.湖北省主要气象灾害分类及其特征分析.暴雨灾害,28(2):179-185.
- 吕凯,2014.高温灾害对皖北地区玉米的影响及防御对策.农业灾害研究,4(10):78-81.
- 王守荣,2011.气候变化对中国经济社会可持续发展的影响与应对.北京:科学出版社.
- 王迎春,郑大玮,李青青,2009.城市气象灾害.北京:气象出版社.
- 湖北省气象局,2019.湖北省气候变化监测公报(2018).湖北气象网,2019-07-05.
- 周月华,2019.湖北省气候业务技术手册.北京:气象出版社.
- 崔讲学,2015.湖北省公共气象服务手册.北京:气象出版社.
- 徐靓丽,高迅芝,王欣,2017.39.7℃武汉人度过史上最热一天.长江商报,2017-07-28(A03).
- 郑柞芳,王迎春,刘伟东,2006.地形及城市下垫面对北京夏季高温影响的数值研究.热带气象学报,22(6):672-676.
- 毛以伟,王兴涛,韩琦,等,2014.湖北省2012年主要气象灾害分析评估.安徽农业科学,42(2):503-505.
- 张磊,张宁,2015.山西省高温天气对农业生产的影响研究.中国农业信息(11):93.
- 彭莹辉,2017.气象灾害非工程性防御研究.北京:气象出版社.
- 曹涤环,2015.高温热害对农业的危害与预防.科学种养(5):5-6.

(作者单位:郑治斌,湖北省气象学会;任永建,湖北省气象服务中心;王凯,武汉区域气候中心)

新冠肺炎疫情期间武汉火神山医院 气象保障服务效益评估研究

■ 杨培强 何兵 易亮

气象服务准确性与时效性存在的差距与现阶段气象部门预警预报能力和服务水平不足有关。准确性是精准预报的基础，时效性是精细服务的前提，提高准确性和时效性依然是当前服务工作的重点。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.06.026

从2020年1月24日—4月16日，武汉市蔡甸区气象局为武汉火神山医院（以下简称火神山医院）院区建设运行及新冠肺炎患者救治工作提供了精细化气象预报预警服务，开展了大气电场监测网建设、自动气象站建设和气象数据查询等一系列气象保障服务。气象服务质量从服务落实度调查，到感知质量调查，再到满意度指数模型调查，是验证这些服务的主要方式。本文采用简单随机抽样进行问卷调查，对火神山医院气象保障服务满意度进行调查分析，采用气象服务用户满意度指数CSIWS模型评估其服务效益。本文借助学者提出的各类气象服务效益评估方法、模型与体系的梳理、研究和各地气象部门进行的不同类型气象服务效益评估工作的具体实践。评估方式的多样性使得气象服务效益评估技术逐渐成熟，为气象工作的有序开展提供科学依据。

1 火神山医院建设和运行期间的气象服务需求和内容

1.1 服务需求与对象

火神山医院是一所集中收治新冠病毒肺炎患者的应急医院，其气象保障服务的需求也相应较为特殊。在医院建设时期，阴雨天气加大施工难度，影响施工进度，需多关注降水等；在医院运行时期，因病房多为箱式板房结构，受雷电、雨雪天气影响较大，更多关注降水、雷电、温度、大风等气象因子。气象部门为火神山医院提供专项气象保障服务，其中直接服务对象主要为火神山医院工程建设指挥部、联勤保障部队战勤部办公室、火神山医院后勤保障部等相关单位。

1.2 定制性气象服务

气象部门为火神山医院开展多种定制性气象服务：提供精细化气象预报服务，如未来7 d逐日、未来24 h逐小时（08时起）、未来24 h逐3 h（20时起）火神山医院气象服务专报三类时间分辨率产品，共发布专报类产品209期；提供火神山医院灾害性天气预警服务，建立单独短信群组，共发布各类预警信号20期；建立火神山医院自动站和加密站，同时开展气象监测，提供气象要素数据查询，共产生气象要素数据26655个，定期提供逐小时雨量查询统计服务；安装火神山大气电场仪并进行组网监测，其数据用于实际雷电预警业务。

1.3 业务平台应急应用

依托武汉地区气象预报预警服务系统开展火神山医院精细化气象保障服务，该系统包括综合观测、临近预警、智能预报、产品发布等功能，逐小时滚动更新1 km分辨率的各类气象要素（气温、雨量、风向、风速、相对湿度等）预报资料，可根据疫情提升等不同应急情况发布多种时效性的精细化定点网格预报产品。

2 火神山医院气象服务评估的数据与方法

2.1 评估问卷设计

本研究通过问卷设计展开火神山医院救治及院区建设运行气象服务调查，采用致函或电询等沟通方式，与火神山医院和地方参与医院建设或运行维护单位协调气象服务满意度问卷调查的有关事宜，在受访单位的协助下发送调查问卷网络链接给指定范围的被

收稿日期：2020年5月26日；修回日期：2020年8月4日
第一作者：杨培强（1990—），Email: 924272982@qq.com

调查者, 受访人完成问卷提交后, 调查结果自动转至后台并形成分析报告。

问卷采用国际通用的李克特量表 (likert scale), 设置五个评估指标, 通过调查问卷分别测评各项评估指标的期望度和满意度, 最终测评其差值与满意度指数 (表1)。每个指标的期望度和满意度调查都设置了受访者感觉程度由强到弱的五个选项, 统计时五个等级选项分值按高到低的顺序分别对应着5、4、3、2、1, 最后通过评价分值的加权计算来进行用户群满意程度测量。

表1 评估指标和测量项目

评估指标	测评项目
气象服务对于医院救治及院区建设运行工作的支撑作用	
气象预警预报服务的准确性	期望度 (E)、
气象预警预报服务的时效性	满意度 (S)、
气象服务人员专业形象和素质	差值 (E-S)、
气象服务产品用语	满意度指数 (S/E)

2.2 问卷样本分析

2020年4—6月进行了新冠疫情火神山医院救治与院区建设运行工作气象服务满意度调查。受访者主要为火神山医院和地方参与医院建设或运行维护单位的决策管理人员 (16.81%)、医务工作人员 (60.11%)、建设维护人员 (后勤人员, 10.54%) 和其他工作人员 (12.54%)。共回收有效问卷351份。

3 火神山医院气象保障服务效益评估分析

3.1 满意度和期望度结果案例

各项评估指标满意度、期望度以及差值情况如表2所示。

表2 火神山医院救治和院区建设运行工作气象保障服务期望度和满意度以及差值

评估指标	期望度 (E) /%	满意度 (S) /%	差值 (E-S) /%
气象服务对医院救治及院区建设运行工作的支撑作用	87.75	83.82	3.93
气象预警预报服务准确性	91.68	84.84	6.84
气象预警预报服务时效性	93.56	87.35	6.21
气象服务人员专业形象和素质	94.87	89.29	5.58
气象服务产品用语	97.38	94.02	3.36
综合 (平均) 评估	93.05	87.86	5.19

1) 院区建设。1月24—26日出现了持续性的阴雨相间天气, 此时正值火神山医院建设的关键时期, 阴雨天气造成了院区建设场地平整、铺设防污染膜、室外焊接等工作无法有效开展等问题, 同时还减低了医院病区污水处理系统建设效率, 极大影响了施工

进度。建设指挥部和相关单位根据气象信息及时采取了降水间隙加快施工、防雨棚遮挡雨水, 用设备吸除水渍等有效防护措施, 保证了火神山医院按照10天工期顺利交付军方医疗队。在实际的调查中, 气象服务对医院救治及院区建设运行工作的支撑作用用户满意度与其用户期望度差值为3.93%, 在各项指标差值对比中较小, 分析结果表明, 用户群对气象服务产生的支撑作用符合预期。但是该指标满意度仅为83.82%, 在各项指标满意度对比中为最低, 在调查统计中有19.37%的受访者认为气象服务对医院救治及院区建设运行工作的支撑作用一般, 表明了用户群对气象服务的支撑作用的满意度仍然有提升空间, 应切实提高气象保障服务能力, 同时加强宣传, 加深用户对气象服务业务的了解。

2) 预警服务。2020年2月14日夜间至凌晨火神山医院出现了雷雨天大风天气, 过程中出现了7~8级大风, 最大极大风速达到了18.0m/s, 并伴有明显雷电。由于火神山医院病房多为箱式板房, 受雷电大风天气影响较大, 有遭受雷击、病区墙体渗水等情况发生的可能。医院根据预警预报信息提前采取了防雷、防风和防雨等相关防护措施, 医院建设指挥部维保部门及时增派维保人员, 加强线路设备巡查检修, 提前准备并铺设了屋面防雨布, 加固风机风管, 同时医院及时转移医疗卫生用品, 调整病人床位房间。极端天气发生后, 据媒体相关报道, 医院救治工作顺利开展, 病区未出现漏水, 医院供电系统运作正常, 医院排风管在出现八级大风的情况下无损坏。通过调查发现, 有86.89%的受访者认为气象预报非常准确和较准确, 这表明用户群基本认可预警预报服务的准确性。然而气象预警预报服务准确性用户满意度仅为84.84%, 该指标期望度和满意度差值 (6.84%) 最大, 说明其服务的准确性仍然有待提高, 应加强提高预警预报准确性新技术的研发, 同时不断提升气象服务水平, 用以弥补预报能力不足。

3) 预报时效。气象部门主动及时向火神山医院提供了未来24 h逐1 h、未来24 h逐3 h、未来7 d逐日等不同时效的精细化服务产品, 预警信息可提前20~30 min发布, 不同时效性的气象服务产品能满足用户群的需求。调查结果显示, 有89.74%的受访者认为气象预警预报服务非常及时或较及时, 表明了大多数用户对气象服务产品时效性的认可态度。然而气象预警预报服务时效性用户满意度与期望度差值通过数据计算是6.21%, 在各项评估指标对比中为次大, 说明用户群体非常重视气象服务产品的时效性, 同时在今后的服务中应更加注重产品时效性问题, 做到及时

主动的精细化服务。

4) 服务素质。在火神山医院气象保障服务期间,气象部门建立了直通式气象服务渠道,在灾害性、转折性天气来临时,随时通过电话、微信和短信等多种连续跟进的方式增强服务效果。评估结果显示,气象服务人员专业形象和素质用户满意度较高,为89.29%,表明气象服务人员为适应当前经济社会的快速发展,其综合素质能力也不断提升。然而期望度与满意度差距仍然较大,为5.58%,说明气象服务人员的专业形象和素质与用户的期望值仍存在一定差距,应在今后的服务活动中进一步提升服务人员服务素质。

5) 服务用语。在服务过程中特别关注产品用语的通俗性,为了便于用户群正确理解和合理使用气象服务产品,在产品用语上增加防范措施建议,并减少“专业性”的词汇。数据计算结果,气象服务产品用语用户满意度在各项满意度中最高,为94.02%,期望度和满意度差值为3.36%,在五项评估指标中,其差值最小,且只有4.76%的受访者认为气象服务产品通俗性一般,其他用户均认为产品用语通俗易懂或比较通俗。评估结果表明,坚持气象服务产品通俗性更加有利于用户群合理使用气象服务产品。

3.2 满意度指数

火神山医院救治和院区建设运行工作气象保障服务各项指标满意度指数均在92.00%以上,其中气象保障服务综合(总体)满意度指数为94.42%,气象服务产品用语、气象服务对医院救治及院区建设运行工作的支撑作用、气象服务人员专业形象和素质、气象预警预报服务时效性和气象预警预报服务准确性用户满意度指数依次为96.55%、95.52%、94.11%、93.36%、92.54%。分析结果显示,气象服务产品用语和气象服务对医院救治及院区建设运行工作的支撑作用用户满意度指数相对较高,然而气象预警预报服务准确性和时效性用户满意度指数比较低,较综合(总体)满意度指数分别低1.89%和1.07%,较气象服务人员专业形象和素质满意度指数差距更大,分别为4.01%和3.19%。分析结果表明,气象服务准确性与时效性方面存在的差距与现阶段气象部门预警预报能力和服务水平不足有关,准确性是精准预报的基础,时效性是精细服务的前提,提高准确性和时效性依然是当前服务工作的重点。

对比不同气象保障服务的满意度指数,火神山医院气象保障服务综合(总体)满意度指数94.42%,这一比率低于潘进军等评估的国庆60周年庆祝活动气象服务平均满意度指数97.00%,与吴林荣等评估的2010

年陕西省政府决策气象服务满意度指数95.83%和杜莉丽等评估的2012年陕西省政府决策气象服务满意度指数94.10%相近,高于吴林荣等评估的2019年陕西省级决策气象服务综合满意度指数92.84%,说明火神山医院对气象保障服务工作的满意度总体较高,但对比其它气象服务仍存在一定差距,在今后的重大突发公共事件气象保障服务活动中还需要不断提升综合服务能力。

致谢:论文撰写过程中,湖北省气象服务中心陈正洪教授对笔者进行了指导、提出了宝贵修改建议,在此表示衷心感谢。

深入阅读

- 杜莉丽,吴林荣,李美荣,等. 陕西2012年省级决策气象服务效益评估. 科技与创新, 2014, (15): 138-140.
- 韩颖,蒲希. 中国的气象服务及其效益评估. 气象科学, 2010, 30(3): 420-426.
- 蒋蕾,朱奕,周琪瑶. 服装市场调查样本容量确定方法探析. 东华大学学报(社会科学版), 2010, 10(12): 89-94.
- 金勇根,龙余良,杨华,等. 江西省高速公路气象服务效益评估及气象灾害影响分析. 气象与减灾研究, 2019, 42(1): 54-58.
- 刘旭. 手机用户获取气象信息满意度的调查研究. 郑州大学, 2018.
- 罗慧,李良序. 气象服务效益评估方法与应用. 北京: 气象出版社, 2009.
- 罗慧,谢璞,薛允传,等. 奥运气象服务社会经济效益评估的AHP/BCG组合分析. 气象, 2008, 34(1): 59-65.
- 罗慧,谢璞,俞小鼎. 奥运气象服务社会经济效益评估个案分析. 气象, 2007, 33(3): 89-94.
- 潘进军,段欲晓,马晓青,等. 国庆60周年庆祝活动气象服务满意度评估. 气象, 2011, 37(11): 1409-1411.
- 彭嘉栋,郭海峰,段丽洁,等. 电力调度气象服务效益评估研究——以长沙市为例. 气象科技进展, 2017, 7(5): 32-36.
- 王丽娟,吕明辉,庞小琪. 一种基于过程的台风气象服务综合评价方法. 气象科技进展, 2017, 7(1): 143-148.
- 王秋京,王晾晾,马国忠,等. 黑龙江省主要农作物气象灾害气象服务贡献率及其效益评估. 气象与环境学报, 2016, 32(6): 142-147.
- 王秀荣,魏丽,姚鸣明,等. 浅析国家级决策气象服务业务技术现状及发展. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2016, 38(3): 271-275.
- 吴林荣,刘环,杜莉丽,等. 陕西2019年省级决策气象服务评估. 陕西气象, 2019, (5): 40-43.
- 吴林荣,罗慧,鲁渊平,等. 2010年陕西决策部门气象服务需求调查分析. 陕西气象, 2011, (4): 33-35.
- 吴先华,赵飞,郭际,等. 交通气象服务效益评估——以沪宁高速公路为例. 气象科学, 2013, 33(5): 555-560.
- 邢彩盈,张京红,车秀芬,等. 海南省台风气象服务效益评估研究. 气象与环境科学, 2019, 42(4): 55-62.
- 姚秀萍,张晓美,吕明辉. 公众气象服务满意度评价指标体系的构建方法. 气象与环境科学, 2014, 37(4): 102-108.
- 于庚康,申双和,罗艳,等. 基于江苏省公众气象服务效益的分析与研究. 气象, 2012, 38(12): 1546-1553.
- 喻迎春,吴楠,黄震宇,等. 基于大数据的公共气象服务需求分析与效益评估. 气象与减灾研究, 2018, 41(3): 226-230.
- 张铁仁,匡晓燕,潘双迪,等. 农业气象服务效益评估方法研究. 气象与环境学报, 2014, 30(2): 101-106.

(作者单位:武汉市蔡甸区气象局)

COVID—19在湖北爆发和流行的几种可能的影响因素分析

何明琼 陈正洪 谭静 贾文茜 陈英英 王明

新冠肺炎爆发年与全球性流感爆发年，均出现在太阳黑子极值年前后。2000年以来，太阳黑子极值年前后多次出现新型病毒。太阳黑子数有11年的周期变化，政府及相关部门应关注可能出现的太阳黑子极值年，提前制定灾害防御预案。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.06.027

2019年12月，湖北省武汉市出现了中国首例新型冠状病毒（COVID-19，也称新冠肺炎）病例。2020年1月10日进入春运，人员流动加大，武汉九省通衢，新冠肺炎出现蔓延趋势，截至到2月29日24时，中国内地新冠肺炎确诊病例为79824例，死亡2870例，港澳台地区确诊病例144例，其影响程度已远超2003年SARS事件，成为国际关注的突发公共卫生事件。

新冠肺炎主要是呼吸系统传染病，呼吸系统传染病爆发、流行与气象条件的关系，国内外学者开展了大量研究，气象条件对传染性呼吸系统疾病的发生、发展和传播，具有明显的季节性特征。呼吸道感染等疾病高发期则以寒冷季节为主，还与极端气候变化有关。自新冠肺炎爆发以来，国内外学者在流行病学、医学、疾病防控等方面开展了不少研究。其中，Wang等通过统计各地确诊人数和对应节点的气温，提出新冠肺炎的爆发与气候之间存在密切关系，提示病毒的传播存在最适温度。

本文根据湖北省17个行政区每日疫情上报数据，结合气象、天文等因子，开展疫情爆发前及爆发期间的几种可能的影响因素分析。

1 资料与方法

1.1 研究资料种类、来源

资料种类及来源见表1。跟踪收集2020年1月1日—2月29日湖北省卫生健康委员会官方网站（<http://wjw.hubei.gov.cn/>）发布的湖北各地每日新冠肺炎总确

诊病例数据，使用数理统计方法，对新冠肺炎病毒爆发和流行的情况进行分析研究。

表1 资料类别及时段、来源

资料类别	资料时段	资料来源
新冠肺炎确诊病例	2020.01.01—2020.02.29	湖北省卫生健康委员会官方网站 http://wjw.hubei.gov.cn/
气象资料	2019.01.01—2020.02.29	湖北省气象资料档案馆
太阳黑子资料	1850.01—2020.01	比利时皇家天文台，布鲁塞尔 http://sidc.oma.be/silso
人口总数、人口密度	截至2018.12.31	湖北省统计年鉴

1.2 确诊病例分布特征

图1为湖北省新冠肺炎确诊人数空间分布图，截至2月29日24时，武汉市确诊病例达49122例，紧邻武汉、并且人口较多的孝感、黄冈在2900~3520例，恩施为252例，潜江为198例，神农架仅11例，其他行政区在490~1600例。时间分布上，1月23日“封城”当日确诊病例武汉为507例，孝感为22例，黄冈为12

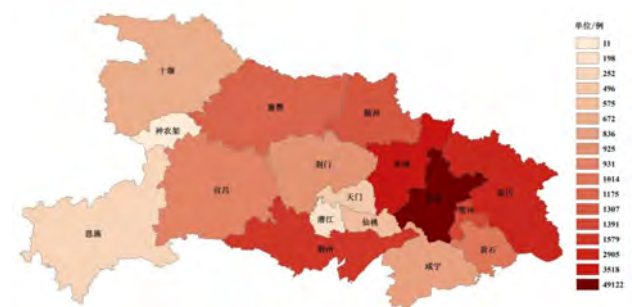


图1 湖北省新冠肺炎总确诊病例空间分布(截至2020年2月29日)

收稿日期：2020年6月10日；修回日期：2020年8月21日
第一作者：何明琼（1966—），Email: hmqlight01@163.com.
通信作者：陈正洪（1964—），Email: chenzh64@126.com.
资助信息：湖北省气象局科研基金项目（2021Y10）

例，其他行政区在0~8例；截至2月23日武汉“封城”一个月，新冠病毒在武汉仍处于蔓延状态外，湖北其他大部分行政区病毒传播得到有效控制。2月23—29日，武汉市新增确诊病例为2515例，孝感增加53例，咸宁和神农架0增长，湖北其他行政区新增确诊病例均为个位数。

新冠病毒从武汉向湖北各地传播和流行的速度不同，武汉市“封城”一个月的时间里，神农架累计增长11例，孝感从22例增长到3645例，黄冈从12例增长到2904例。新冠肺炎的爆发和流行究竟与哪些因素相关，是哪些原因导致了病毒传播速度的差异？本文对此进行了分析。

2 分析及结果

2.1 太阳黑子数异常与新冠肺炎爆发的关系

大气物理学规定，太阳黑子周期由极小年开始。1745年开始的11年周期定为0周期以来，目前正处于第24周期向第25周期过度期间。太阳黑子最突出的特点是存在强大的磁场，最低磁场强度在100 Gs以上，随着太阳黑子面积增加，最高磁场强度可达3600 Gs。

分析1850年以来太阳黑子年变化（图2），结果表明，在太阳黑子极值年（极大值或极小值年）前后，易出现世界性流感等呼吸系统疾病、新型病毒以及长江流域大洪水。特别是在第19周期到第25周期的7个周期内，出现了9次重大灾害，其中，7次为全球性流感（或新型病毒），2次为长江流域洪涝。这些事实验证了学者们的研究。1991年吕厚东研究指出，甲型流感病毒各亚型的抗原变异和流行年代与太阳黑子活动周期的极大年和极小年有着密切的关系。当新型病毒株出现，人群普遍缺乏免疫力，流感传播迅速，流行范围超出国界和洲界，爆发世界性流感等呼吸系统疾病。

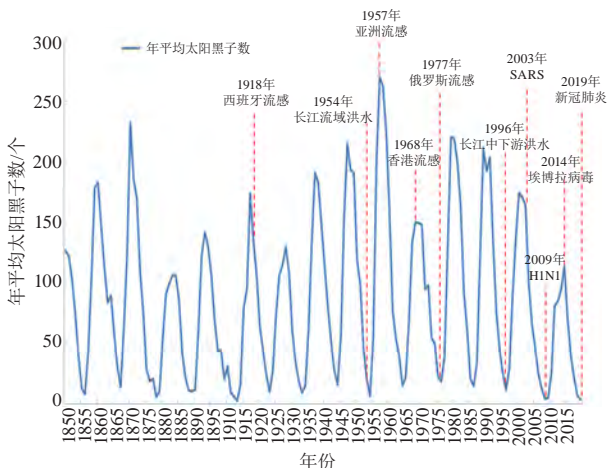


图2 1850年以来太阳黑子年变化曲线

2000年以来，太阳黑子极值对世界及中国的影响更加明显，4个极值年均出现了新型病毒。其中，2002和2009年出现了SARS病毒和H1N1流感病毒，这两年为太阳黑子极值年的次年；2014和2019年出现了埃博拉病毒、新型冠状病毒，这两年为太阳黑子极值年，其中2019年太阳黑子平均数为1914以来的最小值，即为近100年以来最小值。

太阳黑子极值年对应最强磁场年和最弱磁场年，推测在全球变暖的气候背景下，太阳黑子磁场强度量变达到一定程度时，易造成地球系统微生态环境发生质变，诱发新的病毒产生或病毒变异。

2.2 气候异常对新冠肺炎爆发和流行的影响

传染病传播与气象条件有着密切关系。流行病学研究发现，秋、冬、春季是呼吸道传染病高发期。特别是冬季人们更多时间聚集在室内、门窗紧闭，增加了易被感染的人数。另外，病毒通过受感染者咳嗽或打喷嚏时释放的呼吸道飞沫传播。当空气寒冷干燥时，飞沫更容易漂浮，病毒更容易传播。夏季空气温暖湿润，对流活动旺盛，边界层更高，有利于飞沫向上输送，或者随降雨沉落，近地面飞沫密度明显减少。

近20年来，除COVID-19外，全球还出现了3次有重大影响的传染病（SARS、MERS和H1N1）。流行性疾病的爆发和传播，影响因子很复杂，气象因子的影响是重要原因之一。湖北武汉作为中国内地新冠肺炎首发地，研究该病毒爆发前及流行期间的气象条件具有重要意义。

2019年湖北省出现了气温持续偏高、降水持续偏少、罕见的伏秋连旱、强暖冬等异常气候特征。年平均气温偏高0.7℃，年降水量偏少25%。夏季出现了大范围持续1个月的高温天气。秋季降水偏少40%，冬季平均气温偏高1.5℃，达到强暖冬标准。2019年在年、季时间尺度，湖北平均气温、降水量两个主要气候要素值均处于1961年以来的前五位或倒数前四位，气候异常特征显著。

值得注意的是，新冠肺炎在武汉爆发前期、首次出现及临近期、爆发和流行期三个时段，武汉气候不仅出现异常，还出现了由夏秋季持续干旱少雨向冬季暖湿多雨的转换（图3）。新冠肺炎爆发前期（2019年7—10月），武汉市气温持续偏高、降水持续偏少，其中，8月平均气温偏高2℃、降水偏少87.7%；9月平均气温偏高1℃、降水偏少97.8%。气温异常偏高及持续干旱少雨，微生态平衡受到强烈影响或被破坏，影响传染病病原体的活动。新冠肺炎临近及首次

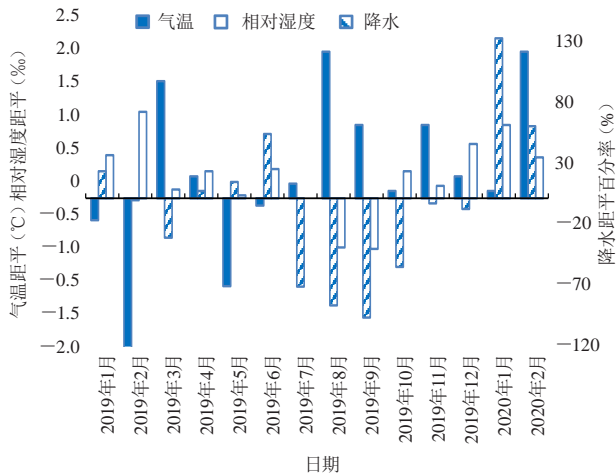


图3 2019年1月—2020年2月武汉市逐月气象要素距平

出现期（2019年11—12月），武汉市气候从前期干旱少雨转为潮湿多雨。新冠肺炎爆发和流行期（2020年1—2月），武汉气候处于异常暖湿状态，气温持续偏高，其中，2月平均气温偏高达 2°C 、降水偏多59%~131%。

从新冠肺炎首次出现到爆发流行期间（2019年12月—2020年2月），武汉正值冬季，季平均气温 6.4°C ，偏高 0.8°C ；季平均相对湿度82%，偏高7.7%；季雨量247.2 mm，偏多71.8%，可见，武汉冬季暖湿多雨特征十分明显。冬天应寒而反暖，加之雨水偏多、气候异常，使流行性疾病极易传播和爆发

3 结论

根据2020年1月1日—2月29日湖北省17个行政区每日新冠肺炎确诊病例资料，探讨了相关因素对新冠肺炎爆发和流行的影响，结果表明：

1) 新冠肺炎爆发年与全球性流感爆发年，均出现在太阳黑子极值年前后。2000年以来，太阳黑子极值年前后多次出现新型病毒。太阳黑子数有11年的周期变化，政府及相关部门应关注可能出现的太阳黑子极值年，提前制定灾害防御预案。

2) 武汉新冠肺炎爆发前期，夏、秋季持续干旱少雨；爆发期间为冬季，气候转为暖湿多雨。

3) 气候和天文因子异常，是新冠肺炎爆发和流行的诱因。要素的协同效应对新冠肺炎病毒的爆发和

流行具有叠加作用，人口总数越多、人口密度越高，病毒传播得越快，导致新冠肺炎患病人数激增，如孝感、黄冈；人口密度小，不利于新冠肺炎病毒的传播和流行，新冠肺炎患病人数较少，如神农架。

致谢：国家气候中心任国玉研究员、河北省气象服务中心付桂琴正高级工程师对本文给予了技术支持，特此致谢！

深入阅读

- 陈正洪, 杨宏青, 张鸿雁, 等, 2001. 武汉市呼吸道和心脑血管疾病气象预报研究. 湖北中医学院学报, 3(2):15-17.
- 陈正洪, 叶殿秀, 杨宏青, 等, 2004. 中国各地SARS与气象因子的关系. 气象, 30(2): 42-45.
- 付桂琴, 贾小卫, 刘华悦, 等, 2017. 河北石家庄地区气温对儿童哮喘病就诊人数的影响. 干旱气象, 35(1): 122-127.
- 付桂琴, 刘华悦, 贾俊妹, 2017. 石家庄地区气温对慢性阻塞性肺病住院人数的影响. 气象与环境科学, 33(2): 101-106.
- 李文龙, 李鸿雁, 郭希海, 等, 2019. 太阳黑子活动周期规律分析及趋势预测. 水利水电技术, 50(5): 53-62.
- 刘华悦, 付桂琴, 王洁, 2019. 石家庄市气象要素对成人哮喘住院人数的影响. 气象环境学报, 35(5): 137-143.
- 刘敏受, 钟世杰, 刘涛, 2003. 103例SARS患者发病的中医时间和运气学说特点. 中国中西医结合急救杂志, 10(4): 208-210.
- 吕厚东, 李荣华, 吕厚远, 1991. 太阳黑子活动周期与世界性流感流行关系的初探. 微生物学通报, 18(1): 23-26.
- 米娜, 谈建国, 姚克敏, 等, 2005. 南京市呼吸道疾病时间序列模型的建立与分析. 气象科技, 33(6): 554-558.
- 谈建国, 郑有飞, 2005. 近10年我国医疗气象学研究现状及其展望. 气象科技, 33(6): 550-553.
- 俞顺章, 谈建国, 穆丽娜, 2003. 影响SARS爆发和流行的气象因素浅析. 上海预防医学杂志, 15(12): 600-601.
- 曾洁, 张学海, 林爱华, 等, 2018. 2010—2013年浙江省相对湿度对呼吸系统疾病死亡的影响. 中华疾病控制杂志, 22(5): 455-458.
- 翟红楠, 张莉, 孙石阳, 等, 2009. 深圳市流感高峰发生的气象要素临界值研究及其预报方程的建立. 数理医药学杂志, 22(2): 188-192.
- 张莹, 宁贵财, 康延臻, 等, 2015. 北京市大气污染物与呼吸系统疾病入院人数的时间序列. 兰州大学学报(自然科学版), 51(1): 87-92.
- Wang M, Jiang A L, Gong L J, et al. Temperature Significantly Change COVID-19 Transmission in 429 cities. MedRxiv, 2020, doi: <https://doi.org/10.1101/2020.02.22.20025791>.
- Yang X B, Yu Y, Xu J Q, et al. Clinical course and outcomes of critically ill patients with SARS-CoV-2 pneumonia in Wuhan, China: a single-centered, retrospective, observational study. Lancet Respir Med, 2020, doi: [https://doi.org/10.1016/S2213-2600\(20\)30079-5](https://doi.org/10.1016/S2213-2600(20)30079-5).

(作者单位：湖北省气象服务中心)

武汉封城战“疫”中气象短信的共情传播

■ 刘立成 胡倩倩

武汉“封城”76天中的气象短信，就其共情传播效果而言，在共情传播中的情绪共情较好地影响了受众与传播者之间的人际关系，在短期传播效果中起决定作用，而认知共情和行为实践共情则对长期传播效果具有更为重要的作用。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.06.028

2020年1月23日10时至4月8日00时，武汉这座千万人城市断然“封城”76天。期间面对来势汹汹的新冠肺炎疫情，各类媒体主动投身抗击疫情主战场，以公开透明的信息发布、有力有效的舆论引导、形式多样的宣传传播、健康丰富的文化产品，充分发挥了媒体平台在非常时期强信心、聚民心、暖人心、筑同心的特殊作用。

在武汉“封城”的76天中，一种特殊的信息传播——武汉气象短信，充分运用共情传播理念和技巧，在传播气象信息的同时，传播了共同抗疫的决心与信心，在众多传媒中显示出其独特的传播特色、传播力量和传播效果。

1 共情传播的基本含义

共情的研究肇始于德国的美学领域。1873年，德国美学家罗伯特维斯彻解释为“人们自发地将真实的心理感受投射到所察觉的人或事物上”。1903年，里普斯将这一概念引入心理学研究领域。人本主义心理学家罗杰斯将共情应用到心理治疗领域，倡导咨询者要设身处地去感知和体验被咨询者的心理和情感，将自己的准确理解有效反馈给对方。

也有学者提出，所谓的共情（empathy，也称同理心、移情或神入等）“是一个能够理解另一个人的独特经历，并对此做出反应的能力。共情能够让一个人对另一个人产生同情心理，并做出利他主义的行动。一般认为，共情是人类根源于基因的一种天赋：共情不是一种情绪，也不是一种感受，而是人类与生俱来的一种能力”，“共情是一个人在深思熟虑之后做出的响应，而不是一个泛化的、普遍的由推论得来的当即反应”。

目前学术界对“共情传播”尚没有确切的定义，一般在传播方式或者传播效果层面上运用这个词。所谓共情传播，是传播者与受传者以同理心换

位进行信息的传播和接受，从而产生“情绪感染”（Emotional Contagion）、“观点采择”（Perspective Taking）和“共情关注”（Empathic Concern）的传播效果的一种信息传递和接受的方式与过程。

2 从描述“是什么”的角度着力打动受众情感,营造情绪共情的氛围

情绪感染是指当个体面对他人情感状态或处境时，会自发地产生情绪上的唤醒，并形成与他人同形的情绪体验。武汉封城期间的气象短信从描述我们当前面临的环境和氛围“是什么”的角度，着力构建与受众的情感纽带。

《乌合之众》里提到：“人与人之间差异最大的，或许就是智力了。但是，同一种族的所有人却有着非常相似的本能与情感。大凡事情一旦涉入到情感领域，人与人之间的差距就消失了。”

气象短信的编辑原则上不会使用超过70个字来传播气象信息。气象短信的文字编辑一般从天气状况和提示语两部分着手进行编辑。其中的提示语就是与受众产生情感共鸣的重要连接部分。气象短信编辑往往通过提示语来打动受众情感，找到和受众情绪连通的方式。

受众在平常接受气象短信所传播的天气状况信息时，往往会与日常衣食住行挂钩，关注的是气象信息对于生产、生活和生态环境方面的影响，并据此做出相应的决策。受众关注其中的提示语，也多从平常的衣食住行的角度予以解读。但是在疫情期间，尤其是武汉封城期间，受众关注气象短信传播的天气状况信息，已经完全不同于平常的天气信息，这种天气信息是在特定的抗击疫情的背景下传播的，必然受到所处的抗击疫情的特定环境的影响。这种特定环境，对于气象短信编辑来说也是一个挑战，编辑必须具备完全不同于平常状态下的思想和思维。编辑怎么写提示

收稿日期：2020年6月10日；修回日期：2020年8月12日

第一作者：刘立成（1968—），Email：401202764@qq.com

资助信息：平顶山学院2017年博士科研启动基金项目（PXY-BSQD-2018025）

词,从什么角度思考和表现提示词,也是一个完全不同于平常的挑战。

武汉封城期间,市民往往会不自觉地产生恐慌心理。气象短信编辑不回避这一实际情况,而是坦诚地向受众讲清楚我们面临的环境“是什么”——的确,我们面临的是一种新型冠状病毒的突然袭击,具有人传人的特性,市民难免产生恐惧心理。这个时候,编辑不应以高人一等的姿态出现,而应换位,以平等的角色与市民共同面对。因此,通过换位,站在市民的角度来撰写提示词,更能触及市民心底的那部分柔软,产生共情作用。气象短信编辑也因为能够瞄准受众的心理来进行精确编写,最终使气象短信营造了和受众的情绪共情氛围,满足了受众的心理需求期待,从而达到有效的共情传播。本文以下气象短信举例,均为武汉市气象台2020年发布。

例1(1月24日下午):心的拥抱也是团圆,武汉加油!武汉今晚小雨,明天白天北部小雨转雨夹雪,南部小雨,北风3到4级,阵风5到6级,4到6℃;明晚到后天小雨雪转阴。

例2(1月31日上午):身隔离,心不离;英雄的武汉,我的城,我的家,必胜!武汉今天晴到多云,早晨有雾,东风2到3级,13至0℃;明天多云转阴有零星小雨;后天小雨。

例3(2月4日上午):武汉今天白天晴天,早晨有雾,晚上晴天到多云,偏东风2到3级,气温14至2℃;明天多云转小雨;后天小到中雨转阴天,最高气温降至6℃,注意保暖。

武汉封城之初,正值中国人最重要的节日春节,家人不能团聚,还要忍受病毒带来的威胁和恐慌。这三则短信都是从武汉市民突然被隔离,茫然不知所措的心理情况出发,站在市民角度,揣摩其情绪心理而编辑的短信。

前两则运用比喻的修饰手法,把“心”团聚喻为家人的团聚,站在武汉市民角度上去为武汉加油呐喊,表示对武汉市民和武汉城市的鼓励,增强其必胜的信念。最后一则同样是站在武汉市民的立场,勉励武汉人民不要因为病毒原因被封城隔离后,放弃生活的美好追求和享受,从温差变化的角度提醒市民注意保暖。这样的短信告诉人们病毒和封城这并不能影响武汉人的正常生活,这实际上也同样是给武汉人的安慰。

3 从挖掘“为什么”的角度着力增长受众知识,构造认知共情的框架

观点采择(或称角色采择)是指自我从他人视角或他人所处的情境出发,想象、推测和理解他人态度与感受的心理过程,这属于共情的认知成分。武汉封

城期间的气象短信从挖掘“为什么”的角度着力扩大受众的知识,构造认知共情的框架。

既然我们已经在情绪上受到了感染,已经明白所处的环境之恶劣,与其抱怨,产生情绪的负能量,不如正确看待,用正能量去驱逐负面情绪的阴霾。武汉封城期间,气象短信编辑需要从科学上向受众阐明为什么面对疫情我们需要具有科学的认知,需要科学看待疫情,科学予以防范。气象短信编辑需要具备与日常编辑传播气象短信不一样的思想,即要从保持警惕心与平常心的角度,传播抗击疫情知识,提升人们的认知境界。

例1(2月10日下午):天气预报:武汉今晚阴有小雨,明天白天小雨转阴天,南风2到3级,气温6至13℃;明晚到后天多云到晴天。勤洗手,常通风,多喝水,睡眠足。

例2(3月7日上午):明日妇女节,春雨舞翩跹:武汉今天白天多云到阴天,晚上阵雨转阴天,东风2到3级,气温9至18℃;明天阴有小到中雨,局部伴有雷电;后天小雨转阴。

只有紧密贴近受众真实生活才能思虑周全。上面二则短信站在受众生活角度去考虑受众的情感和心理生活需求,从科学防疫科学生活的角度与受众产生认知共情。

第一则短信,是气象短信编辑的一种理性揣摩:疫情这一特殊时期,受众或许会忘记消毒消杀这一步骤。这一换位思考,考虑到了受众容易忽视的地方。在这样的基础上,再提出对于受众的提醒和督促,十分贴合受众真实生活,便于产生认知共情。例如2月12日下午、2月18日下午等气象短信都是如此。

第二则短信,是对受众相关的节日的提醒。武汉正处于特殊的抗击疫情时期,受众时刻关注的是疫情,不一定会将注意力转移到平常要过的节日上面来。善意地提醒妇女节即将到来,善意地提示人们应该正常地过一个妇女节,展示妇女的爱美情态,这样更容易与爱美的女士产生共情。同样3月5日上午提醒受众惊蛰节气的到来,3月23日提醒受众要关注第60个世界气象日,这一系列短信在疫情这一特殊期间能够转移受众注意力,消除紧张情绪。

4 从回答“怎么办”的角度着力推动受众实践,创造行为共情的使命

共情关注则指的是帮助他人的心理动机,如对遭受恐袭国家表现出的担心、关心、怜悯和同情等。

武汉封城期间,气象短信编辑看似一如平常在传播气象信息,而且这个时候市民宅在家里似乎也不像平常往往在户外活动受天气直接的影响,似乎天气信息没有太多的实际作用。但是,由于人们的情绪在

很多时候是受到天气等因素影响的,即使不在室外活动,由于天气的阴晴冷暖会直接给人们的心情带来不同的感受,所以气象短信编辑人员往往会把握好情感,并对不同情感进行分类并探索如何回应情感,产生共情,彰显出气象短信的人文情怀,这样也为气象短信传播营造了公信力和影响力。

所以,在武汉封城的76天内,看似与“闭门隔离”的受众毫无关系的气象短信,经过编辑的正能量的点染,实则心理上给武汉市民带去了安慰和鼓励。在气象短信传播中,这种以怎么办的形式去推动受众以正能量的情绪去驱逐不良情绪的行为共情,有利于拉近与受众距离,消除他们生活负面情绪,增强战胜困难的勇气。

为完成这种行为共情的使命,气象短信编辑采取了两种策略。第一种策略是以气象景抒战疫情,增强市民必胜信念。主要的方法是将受众对于疫情相关信息的关注转移到对美好气象景色的关注,刺激受众从消极情绪中进行自我释放,增加对于战胜疫情的信心。

例1(2月17日下午):灿烂温暖的阳光,澄澈蔚蓝的天空,抚慰你和我,坚持严防死守!武汉今晚到明天白天晴到多云,早晨有雾,东风2到3级,-1到14℃;明晚到后天多云。

例2(2月10日上午):春暖花开不远处,平安归来终有时:武汉今天白天多云转小雨,晚上小雨,南风2到3级,气温10至6℃;明天小雨转阴天;后天多云到晴天,高温16℃。

这两则气象短信运用修辞手法将天气和人、物联系起来,以此吸引人们的注意力。

第二种策略是以理性凝聚共识,让主流思想意识直入人心。理想的共情状态是基于理性的,无论接触到多少纷繁琐碎的细节,均能在里面梳理出情感和记忆的压舱石和锚点,而这个锚点往往能直入人心。

例1(3月31日下午):天气预报:武汉今晚到明天白天多云,北风2到3级,气温6至15℃;明晚到后天阴转小雨,10至17℃。白衣执甲,逆行出征,武汉人民感谢您!

例2(3月16日下午):天气预报:武汉今晚阴有短时小雨,明天白天阴转多云,南风2到3级,气温11至21℃;明晚到后天多云到晴天。青山一道同担风雨,病毒无情人间有爱。

两则短信分别站在医护人员和武汉市民角度看问题,在理性的基础上创造人们的行为共情。前者喊出了武汉人民对于白衣战士舍生忘死精神的高度赞扬和感谢,后者喊出了武汉人民对援鄂人感激的心声,所

有这些都会带给受众以鼓舞、以调整更好的心理状态去继续战斗。类似的作用效果在2月18日上午、2月27日下午、3月8日上午的气象短信中,均都能展现出来。

5 结论与讨论

武汉“封城”76天中的气象短信,就其共情传播的传播效果而言,在共情传播中的情绪共情较好地影响了受众与传播者之间的人际关系,在短期传播效果中起决定作用,而认知共情和行为实践共情则对长期传播效果具有更为重要的作用,有利于意识形态的巩固和社会的和谐发展。

事实上,武汉封城之后,中国疫情得到有效控制,中国抗击疫情工作取得重大胜利。但是从全球来说,疫情实际上已经在国际上呈现大流行态势,在受疫情影响的国家中,肯尼亚学者、世界银行前经济学家姆旺吉·瓦吉拉撰文指出:“中国以前所未有的速度甄别出病原体并第一时间同世界卫生组织和其他国家分享有关病毒基因序列。中国应对疫情的防控措施向全世界树立了新的标准。”德国和韩国在有效应对大流行中也取得良好效果,韩国对于疫情的谨慎做法表现在保护好高危人群和弱势群体,保持政府与民众之间透明的沟通,以及公众对于政府的信任。无疑,韩国保持政府与民众之间透明的沟通,是值得借鉴的,事实上,气象短信这类直达百姓生活空间的传播工具,可以有效地被各级政府用于和老百姓的密切沟通,如传递疫情进展信息和进行防疫科普等。而武汉封城期间的气象短信传播已经自发地做了一些和民众心灵沟通的工作,今后应该在疫情常态化防控中更加自觉地由政府指导并用于与群众的沟通之中。

深入阅读

- 严庆,梅丽,李志刚.深化民族团结进步教育的“共情”视角.民族教育研究,2020(01):5-12.
- (美)亚瑟·乔位米卡利.共情力:你压力大是因为没有共情能力.耿沫译.北京:北京联合出版公司,2017:3-4.
- 转引自吴飞.共情传播的理论基础与实践路径探索.新闻与传播研究,2019(05):59-76.
- 吴飞.共情传播的理论基础与实践路径探索.新闻与传播研究,2019(05):59-76.
- 古斯塔夫·勒庞.乌合之众.戴光年,译.北京:新世界出版社,2010:7.
- 曾向红,陈科睿.国际反恐话语双重标准的形成基础与机制研究.社会科学,2017(09):3-15.
- 倪光辉.习近平在全国宣传思想工作会议上强调胸怀大局把握大势着眼大事努力把宣传思想工作做得更好.人民网—人民日报,2013年08月21日07:12.
- 章洁.把典型人物放在共情传播视角下.传媒评论,2020(01):31-33.
- 于畅.沟通与共鸣:央视新式联播语态融合中的共情传播研究.传播与版权,2020(02):1-4.

(作者单位:平顶山学院新闻与传播学院)

粤港澳大湾区：或将成为极端天气气候研究关注的“特区”

——第一届粤港澳大湾区极端天气气候及灾害风险学术会评介

■ 贾朋群 曾智琳 周华睿

很多学者在这次会上用“讲好故事”的态度，表达了圆满完成项目目标、促进国家气象核心能力提升的愿望。相关领域的研究，面临将天气和气候灾害一并考虑，将预报与灾害风险管控有机结合的科学或技术问题，既是气象服务转换为决策的最关键节点，更是众多气象应用“卡脖子”问题的多发领域。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.06.029

翻开气象和大气科学发展史，不难发现一些科学突破往往围绕某一重要的天气气候现象，学术界通过研究立项、开展外场试验等方式，展开集中攻关并因此提出新理论、新观点或新方法，甚至取得实质性的突破的例子。在强对流天气领域，1970年实施的GATE试验揭开了中尺度对流系统的面纱；在气候预测领域，1982/1983年强厄尔尼诺事件让TOGA试验于1985—1994年持续了10年，极大推进了对ENSO循环基本特征的认识。

“湾”是指三面陆地一面向水的特别区域，而当“向水”为“向海”时，海湾地区就有了“连接内陆，通达海外”的特征，世界上四大湾区（除本文讨论的湾区，还有纽约湾、旧金山湾和东京湾）无一不是人类发展充分利用海湾地区独特优势，获得高速发展的案例。但是，湾区也往往是天气气候灾害多发区和脆弱区，2020年11月27—29日，在广东汕头召开的第一届粤港澳大湾区极端天气气候及灾害风险学术会瞄准了“粤港澳大湾区”这一崭新的中国战略区域，针对性地探讨湾区的气象风险及应对。来自高校、科研院所及气象相关业务部门的近百名学者，围绕大湾区极端天气气候事件及其灾害链的问题展开了富具针对性的研讨。

（1）构建大湾区精细化再分析数据集：将极端天气事件串联为趋势并与气候变化联系起来

长时间序列、高分辨率的区域再分析数据是深入理解区域气候变化成因与演变规律的重要基础，近年来再分析技术的迅速发展，为区域再分析数据集的构建提供了核心技术的支撑。粤港澳大湾区作为世界级城市群，不仅频遭台风、暴雨等极端天气侵袭，

亦受到由这些极端天气事件引发的诸如内涝、滑坡与泥石流等一系列衍生灾害的威胁。深入认识大湾区极端天气事件的客观演变规律、科学防控应对它们所带来的各类灾害，是大湾区未来发展建设中的重要战略方向。

在全球气候变暖的背景下，将区域内一段相对较长时间范围发生的极端天气这种小概率事件串联起来，进而窥探其在气候尺度的客观规律，是科学解决并应对极端天气本身及其引发各种灾害的关键一招，而这需要一个不可或缺的重要基础，即高时空分辨率的区域再分析数据。在会议上，项目首席科学家王东海教授介绍了具有针对性的大湾区再分析技术方案与框架，并提出了建立30年、水平分辨率为3千米、时间分辨率为1小时的再分析数据集的关键目标，这一目标既为未来研究本地极端天气事件的长期趋势、致灾特征与机理提供科学的、必要的数据库，亦为更具适用性、针对性的大湾区再分析技术的发展、区域数值模式的改进提供了重要契机。

（2）在前沿技术领域找寻更好的方法

会议内容涉及了很多新技术。来自国家气象信息中心的熊安元研究员在会上介绍了人工智能（AI）在气象应用方面的最新进展，指出AI从气象界较为熟悉的简单数据驱动，到目前深度学习方法的广泛应用，面临可解释性降低和预报产品风险提高的重要挑战。来自华南理工大学的陶乾副教授面对这样的挑战，在阐述图神经网络应用时，提出引入“迁移学习”的方法，瞄准解决“大数据，小样本”问题。该方法尤其适合面对大量天气数据中，剧烈天气的样本偏少的情形。迁移学习凝聚面对的主要问题（如剧烈天气），

基于不多的样本给出更可靠的信息，或许是解决可解释性问题的途径之一。

AI及大数据在气象领域应用所需的数据样本离不开观测，而天气雷达的观测是其中极为重要的部分。近年来，广东已率先完成了全省12部S波段多普勒天气雷达的双偏振升级，并规划布设40部相控阵雷达组网试验，目前已建成22部，这将成为全球密度最大的相控阵雷达网络。来自广州市气象局的张羽高级工程师详细介绍了相控阵天气雷达在广州及其附近地区组网情况，以及当前大湾区强对流天气的初步应用。他指出了相控阵雷达协同观测的优势，对相控阵雷达进行按需灵活调配，包括对多个雷达识别的重点区域进行计算、排序，即时调整体扫/扇扫模式与角度、起止方位角，最终实现对目标对象的精准监测与快速预警。最后，他特别强调了观测试验、科学研究与业务应用“三条腿”并行，充分发挥双偏振—相控阵观测的互补与协同功能，将是未来提升大湾区对中小尺度强对流天气精准监测与预警能力的关键。

（3）风险识别、监测预警与管控策略“多管齐下”

实现对粤港澳大湾区极端天气气候灾害链的管控与应对，涉及多领域、跨学科交叉研究与应用。气象监测预报预警在这其中属于“前端环节”，而“后端环节”需实现对灾害链的管控与应对，诸如相关技术规范的编制、政策措施的跨境合作与制定、灾害适应与减缓措施的执行等，既涉及不同政府部门职能的衔接、也涉及自然科学与社会科学的衔接，更涉及科学理论研究的成果转化与落地应用，这是极具挑战性的。来自广东省地质环境监测总站的柯小兵研究员在会议上聚焦灾害链“后端环节”，指出广东95%的地质灾害与强降水事件密切相关，并具有突发、群发与频发等特点。然而，针对群发性地质灾害分析与预警，广东省国土资源厅更多地是基于实时动态监测开展灾害预警，短临时效性要求更高。例如，在研究边坡稳定性及滑动过程物理力学机制的基础上，建立各边坡体的三维有限元模型，进而揭示坡面尺度地质灾害演进过程中的物质迁移与能量转化机制，最终确定地质灾害不同阶段关键致灾因子与临界转化条件。在实际应用过程中，结合监测获取的降水量与临界转化、致灾阈值条件做出及时预警响应。

国家气象中心许凤雯高级工程师在会议上介绍了中央气象台近期研发的基于Logistic地质灾害气象预警模型，该模型是从历史灾情信息与降水量因子建立逻辑回归相关，拟合灾害点发灾概率，进而完成地质灾害精细化预警。可见，上述两种针对地质灾害预警技术研发的思路是迥然不同的。气象部门主要从预报角

度出发，侧重降水因子对地质灾害的“直接影响”，而国土资源厅在降雨因子与地质灾害发生之间更多地考虑地质条件与坡面尺度动力过程。因此，跨领域、跨部门、跨学科协作研发将有助于充分认识与理解灾害链演化及致灾过程，从而真正地从技术上实现对灾害链的精细化预警。

（4）热带气旋与海平面升高：未来大湾区的最大风险

全球气候变暖的背景下，极端天气气候事件越来越频繁，各种气象灾害风险不断加剧，这几乎成为不争的事实。2019年11月，中国社会科学院—中国气象局气候变化经济学模拟联合实验室与社会科学文献出版社发布了《应对气候变化报告2019：防范气候风险》，该报告基于大湾区近百年气象观测资料和区域气候模式百年模拟结果，从多方面对大湾区的气候变化及气候风险进行系统分析。结果表明，大湾区气候总体呈暖湿化格局，气温上升、降水量增加、降水日数减少但暴雨日数增多。1961年以来，大湾区区域平均气温以 $0.21\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{年}$ 的幅度升高，至2050年，年平均气温或升高近 $1.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。报告还特别强调了大湾区极端天气气候事件的灾害风险将不断增加，包括极端降水强度进一步增强、夏季高温热浪加剧、登陆热带气旋强度增大、海平面继续上升、大气自净能力略有下降等，粤港澳大湾区所处的珠江流域将面临全年径流增加、洪水强度增强和频率增加等多种风险。挪威奥斯陆大学国际气候及环境研究中心高级研究员Maria Sand博士最近表示，根据世界银行2013年的一份报告显示，至2050年，在世界主要沿海城市中，广州将因社会经济环境变化、海平面上升等因素受到最大的经济损失。换言之，由于温室效应、海平面上升等一系列全球环境与生态的改变，包括广州在内的粤港澳大湾区都可能面临巨大的损失。

热带气旋作为影响粤港澳大湾区最严重的灾害性天气，一直以来其所受到的关注很瞩目。国家气象中心许映龙副总工程师介绍了当前我国台风业务存在的主要困难，以及未来提升热带气旋预报的关键技术，尤其指出近岸快速加强型热带气旋对大湾区的威胁，例如2017年超强台风“天鸽”在靠近大湾区过程中出现迅速加强的现象，虽然在登陆前一刻强度略减，但对大湾区造成极为严重的风暴潮灾害，潮位超百年一遇，造成了惨重的社会经济损失与人员伤亡。热带气旋近岸迅速加强的关键机制是什么？其预报着眼点是什么？在短期预报时效内如何定量把握热带气旋快速加强？这些都是当前热带气旋业务预报的瓶颈，有待科研与业务人员携手努力，以早日寻求突破。

香港浸会大学李剑锋副教授最新的研究指出，

全球变暖或使登陆热带气旋移动速度变慢,这将有利于热带气旋过程累积降水量增加,酿成洪涝灾害风险提升。香港中文大学(深圳)陈永勤教授在会议上补充解释,由于全球变暖使不同纬度之间温差减小,位势高度的经向梯度缩小,热带气旋的引导气流趋于变弱,这有利于热带气旋给沿岸地区带来更多降水。基于热带气旋登陆后移动速度减慢的统计研究结果,香港浸会大学向香港政府提交相关报告,以期改善城市防洪防涝基础设施,为未来风险更高、致灾更强的洪涝灾害做好准备。

本次会议的支持项目,“粤港澳大湾区极端天气气候灾害链的风险管控与应对”是2020年启动的一项国家重点研发计划。项目首席科学家、中山大学王东海教授指出,粤港澳大湾区作为世界第四大湾区和全国经济最具活力的地区,如何面对极端天气气候事件频发,在全球变暖背景下涉及海洋和陆地的灾害增多增强,是我国经济社会可持续发展不可绕开的问题,其中的一些在科学上带有共性问题,对于改进科学支撑决策、风险引导决策具有深刻的现实意义。

据悉,项目组为了让学术交流更加充分,会上安排了包括IPCC第六次评估报告第一工作组联合主席翟盘茂在内的9位学者做特邀报告,全面介绍了国

内外关于复合型极端事件、重大群发山地灾害、热带气旋预报、地球系统模拟和人工智能等领域的最新进展,让研发人员,尤其是参与项目的近50位研究生得到最新和最优秀成果的启发。

粤港澳大湾区建设刚刚起步,该项目具有很强的前瞻性,是国家发展大局与区域重要战略在科学研究上的迅速响应,将基础研究、业务进步和战略决策紧密地联系在一起,是基础理论与实践应用高度一体化的重点研发项目之一。很多学者在这次会上用“讲好故事”的态度,表达了圆满完成项目目标、促进国家气象核心能力提升的愿望。该项目以及相关领域的研究,面临很多的挑战,例如,将天气和气候灾害一并考虑,即是创新点,反映了最新的理念,也面临如何整合好队伍,让习惯于自我划分为天气还是气候归属的中国学者,在面对极端灾害时找到最佳融合点的挑战。实际上,一些如何将预报与灾害风险管控有机结合的科学或技术问题,既是气象服务转换为决策的关键节点,更是众多气象应用“卡脖子”问题的多发领域,我们也祝愿未来在世界漫长的海岸线上,在中国的“大湾区”唱出最美的气象创新之歌。

(作者单位:贾朋群,中国气象局气象干部培训学院;曾智琳,周莘睿,中山大学)

(上接130页)

以满足不同需求。其中最受欢迎的还是可以集文字、图片、视频、动漫等形式为一体的微信公众号(占比高达约69%),比常规主渠道电视超出23个百分点。开办科普展览、提供科普展板、以报告形式宣传科普、撰写科普文章等形式虽然还不失为必要的科普途径,但往往是以单位为主体的科普活动的主要选择,其产生的效果并不能满足人们的日常获取需求,且这种科普方式仍是灌输式为主,不是提供受众“要提供的”,而是提供者“想提供的”,供给与需求没有对接,故而效果往往事倍功半。

三是科普内容未能充分抓住受众关注点。本次调查设计了9个受众比较关心的气象知识,这9个知识点也是通常气象科普的切入点。例如,《气象知识》杂志的栏目版块就是按照这种模式加以展现的。但正如上述调查结果所显示的,除了实用知识、天气事件、气象原理等3项知识点外,其他6项关注度均未超过50%,这说明常规科普切入点未能与受众关注点相适应。有科普工作者将科学普及方式以“软”“硬”加以区分:“硬科普”是指直接用专业术语普及具体的科学知识,“软科普”是指普及科学精神、科学的世界观和人生观、科学思维方法等,也可以解释为生

涩难懂的“硬科普”以贴近公众生活的语言进行深入浅出的讲解,使专业知识变得简单易懂。实际上,当今大量科普供给内容往往还是参照教科书体系来设计并进行的,即在每次科普时都试图将相关知识以完整体系方式呈现给受众。殊不知,这种供给与移动互联网时代知识获取的快餐化特点极不相适应,往往不尽如人意,甚至让潜在受众在不敢或不愿触碰过多信息的心理作用下对这些科普敬而远之。如何将硬科普转化为软科普,也是气象科普中应该高度重视的事情。

深入阅读

- 陈泽琦, 2020. 期刊利用大数据的必要性探索. 新闻潮, (1): 62-64.
李沛涵, 2012. 新媒体时代科技传播工作的探索. 新闻传播, (12): 103-104.
李陶陶, 2018. 科普供给问题探因与对策. 三峡大学学报, (5): 113-116.
李永, 2019. “互联网+科普”时代背景下的科普工作创新路径. 科技传播, (12): 172-173.
隋安龙, 2019. 传统媒体与新媒体的对比及转型方法探析. 传媒论坛, (7): 87-88.
王波, 2020. 大数据背景下传统媒体与新媒体融合发展战略. 传播力研究, (2): 81-82.

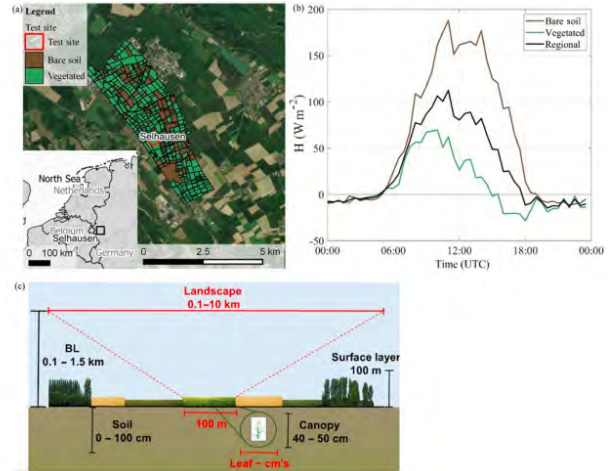
(作者单位:中国气象局气象宣传与科普中心)

编辑选编

CloudRoots: 先进仪器技术和亚小时、亚千米陆—气交互过程模拟的集成

2018年5—7月，荷兰瓦赫宁根大学等在德国 Selhausen开展了一场名为“CloudRoots”的外场试验，旨在获得一套包含土壤、植物和大气变量的综合观测数据集，以研究亚小时和亚千米尺度下非均匀地表与其大气边界层之间的相互作用。研究表明，有必要在叶片水平上进行测量，以便更好地了解生长季期间在日尺度上气孔孔径与蒸散量（ET）之间的关系。基于这些观测，获得了精确的光合和气孔开度的机械表征参数。利用这些新的参数，模型可以很好地再现气孔导度和叶片水平的光合作用。

在冠层尺度上，利用不同的测量技术，研究发现植物蒸腾作用和土壤蒸发的日变化规律是一致的。利用激光闪烁仪，可以量化在云对光合有效辐射的扰动驱动下，表面湍流通量的不稳定性。发现了云辐射影响与ET之间存在2 min延迟。研究采用了一个耦合的地表—大气概念模型，整合了从树叶到景观的不同尺度的地面和高空观测，以研究陆—气相互作用中的平流和地表非均匀性的相关性。本研究表明，在整个生长季节，气孔开度和光合作用的广泛变化导致植物蒸腾作用在叶片、植物、冠层和景观尺度上的日变化较大。将不同的先进仪器观测与模型相结合，使得能够根据测量的尺度和植物



(a) 观测区域的鸟瞰图，Selhausen试验场位于地图的中部。在观测期间，周围的农业区被划分为裸地和植被覆盖区域。(b) 裸地和植被区的感热通量(H)，区域平均值为加权平均值(植被和裸地分别为60%和40%)。(c) 影响测量的水平(红色)和垂直(黑色)长度尺度示意图。较大的水平和垂直尺度表示边界层力学的空间尺度。在水平方向上，100 m比例尺是观测场所在场地的大小。

生长阶段来确定ET的变化。

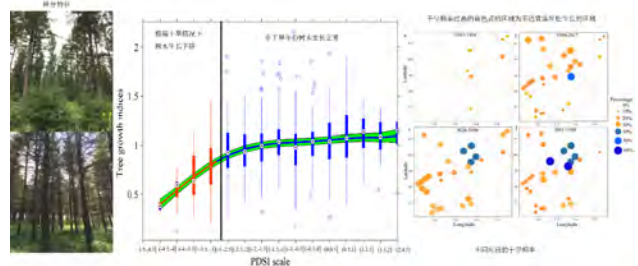
来源: J Vilà-Guerau de Arellano, Ney P, Hartogensis O et al. CloudRoots: integration of advanced instrumental techniques and process modelling of sub-hourly and sub-kilometre land-atmosphere interactions. Biogeosciences, 2020, 17: 4375–4404.

侯美亭 编译

连续极端干旱年份导致的人工落叶松生长停滞风险

植树造林是我国生态文明建设的保障，是我国实现碳中和的重要方式。华北落叶松是华北地区最重要造林针叶树种，但人工林结构单一等因素使其在气候变暖下的稳定性较差。因此，极端干旱如何影响华北地区华北落叶松的生长和分布，以及华北落叶松如何抵抗和适应干旱是预测该地区人工林稳定性的关键科学问题。为此，河北农业大学的张先亮等通过在华北地区人工落叶松林的主要分布区进行大范围的树木年轮采样，系统分析了极端干旱下华北不同干湿地区的华北落叶松生长状况及其对干旱的适应能力。

研究表明，极端干旱对华北落叶松生长造成极大的影响。在干旱程度超过极端值(PDSI<-3)后，随着干旱程度的增加，生长呈现急剧下降。在极端干旱时(PDSI<-4.5)，华北落叶松的生长近乎停滞。随着干旱程度的增加，华北落叶松对干旱的抵抗力下降，但恢复力增加。这说明华北落叶松对极端干旱抵抗能力较弱，然而由于树木处于中幼龄，树木活力较大，从而可以在经受极端干旱后迅速恢复。未来山西北部干旱区的干旱强度和频率将会进一步加大，该区域的华北落叶松有很



华北地区主要人工落叶松林分布区的林分特征，极端干旱下生长下降及未来的可能分布预测

大的死亡概率。华北落叶松的分布将会向较湿润区移动。研究提出了可能的气候适应措施：首先是可以抚育间伐措施提高抗性；其次是可以营造混交林；再次是造林时采用抗旱树种。

来源: Zhang X, Li X, Manzanedo R D et al. High risk of growth cessation of planted larch under extreme drought. Environmental Research Letters, 2020, doi: 10.1088/1748-9326/abd214.

侯美亭 编译

新中国泰山气象站的发展

■ 路雅恬 李蓓蓓

泰山气象站的前身是民国时期的日观峰气象台，1937年因抗日战争爆发而停止工作，中华人民共和国成立后原址重建，改名泰山气象站。泰山气象站是我国华北、华东地区重要的高山站，除承担基本的气象观测任务外，还具有天气预报指标站和航空保障的重要功能。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.06.030

1 发展历程

1.1 20世纪50—70年代

泰山气象站的前身是民国时期的泰山日观峰气象台，1937年因抗日战争爆发而停止工作。解放之后，由于军事需要，泰山站急需重建。“解放后华东地处重要战略位置，抗美援朝期间十分需要气象情报资料。当时已恢复重建不少过去有过的气象站，也新建了一些，但仍很不足。当时高空气象站很少，高空资料很缺。考虑到泰山位置重要，而且过去有基础，准备恢复重建^①。”可见抗美援朝战役使我国加强了对气象情报的重视。1953年9月在日观峰气象台旧址上重建了泰山气象站，顾永槐为新中国成立后泰山气象站首任负责人^②。建设时期气象系统隶属中央军委，以国防建设和军事气象服务为主要任务。同年10月20日，泰山气象站随气象部门改为政府建制，由原属各级军区建制转为各级人民政府建制。

泰山气象站重新建成后，有气象测报员、报务员、摇机员以及后勤人员，共15人左右（图1），常有人员变动。台站观测每天24小时值班，三班轮换。泰山山顶气候变化多端，大风、闪电、暴雪、雨淞雾凇等经常发生，威胁着观测人员的生命安全，偶遇疾风骤雨，雷雨云覆盖整个山顶，外出观测和电台传报十分危险。顾永槐曾在回忆录中讲到“记得有一次落地炸雷将电话线烧成好几节，有的铜丝的断头烧化成圆珠形^③。”泰山工作虽然艰苦，但也有温馨，黄珊

珊同志是第一位在泰山工作的女同志，1956年，黄珊珊与顾永槐同志在泰山山顶举行婚礼，成为泰山气象站第一对夫妻、革命伴侣。一年后，他们的大女儿在泰山出生，为此他们特意为其取名顾岱茹，这也成为了泰山气象工作中的一段佳话。



图1 1955年全站同志在新建泰山气象站前合影（徐德力提供）

韩继振是20

世纪60年代泰山气象站的负责人，1965年韩继振同志带头发起“挑山”运动，职工休班回站时都要挑运吃的、用的物品回来，少则五、六十斤，多则上百斤。泰山站的工作人员发扬艰苦奋斗的精神，一直挑到1979年10月份经济转好。十多年来，共挑运物品五万多斤。

1.2 20世纪80年代至今

改革开放以来，泰山气象站的雷达观测不断升级，还引进了我国第一台高山自动气象站。观测项目

收稿日期：2019年9月2日；修回日期：2019年12月31日

第一作者：路雅恬（1994—），Email: 598578375@qq.com

通信作者：李蓓蓓（1984—），Email: libei-SD@163.com

资助信息：中国科协2018-2019年学科发展工程项目（XKS1）；中国气象局委托项目（2018h290）

① 摘自1993年10月31日中国气象局副总工程师易仕明的信件。

② 顾永槐，1930年生，江苏射阳人，1940年参军入伍，1952年被调到华东军区丹阳气象干校任区队长并参加气象专业培训，1953年9月被调到泰山气象站任副站长并主持工作。

③ 摘自顾永槐同志回忆文章《五十年代泰山气象事业回顾》。

中酸雨观测、大气电场观测相继开展。2014年泰山气象站升级为国家基准气候站。

泰山气象站是中国气象局认定的百年气象站（75年站），是国家二类艰苦台站、国家天气雷达站、24小时航危报站。多年来泰山站（图2）多人获得“全国气象工作者”“山东省劳动模范”“山东好人”等荣誉称号。



图2 现在的泰山气象站

2 台站人员、组织和功能演进

2.1 管理体制

1937年12月，因日寇迫近泰安，泰山气象站停止工作。中华人民共和国成立后，1953年9月，山东军区在原址重建气象站，称之为中国人民解放军山东军区泰山气象站。中华人民共和国成立后泰山气象站的名称随隶属单位改变，但是一直冠以“气象站”。1958—1962年，为了突出气象台站为农业生产和人民群众生活服务工作，中央气象局将气象台、气象站、气候站分别改为气象服务台、气象服务站、气候服务站，所以此间泰山气象站曾短暂更名为“泰山气象服务站”。

2.2 台站人员

1953年重建之后，泰山站上的工作人员维持在15~20人。当时第一批到达的工作人员以顾永槐为代表，都是由华东军区气象处分配到山东军区气象科再到泰山气象站的，多为中专学历，参加过气象干校的气象培训，是中华人民共和国气象事业的开拓者。

1963年，泰山站迎来了新的气象工作人员。其中以侯振西和刘维银为代表，两人分别是新中国成立后泰山站的第三任和第五任负责人。他们是济南农校气象专业毕业生，在校期间第一年学习基础知识，第二年学习气象业务，毕业之后分配至泰山站工作。此时的台站上的工作人员大都受过专业的气象观测培训。

1976年，11名农村高中生来到泰山气象站，老气象员们以师徒形式亲自教授他们业务，这11名高中生

以姚圣贤、玄绪峰、焦安庆为代表，后来很多人成为了泰安市气象局的领导骨干。

2.3 气象业务

1953年泰山气象站复站后，一直保持高质量的地面气象观测，每天4次定时观测，24小时守班，每天发7次天气报，24小时编发航危报。观测项目主要包括云、能见度、天气现象、气温、气压、湿度、降水、风向风速、日照等，其中在1955年11月—1958年10月，增加云向云速观测。改革开放之后，泰山站又增加了雷达、酸雨等观测，使台站的观测种类和观测业务走向多元化（表1）。

表1 泰山气象站仪器设备建设和观测业务发展流程表

时间	仪器设备建设	观测业务
1983年10月	建成天气雷达（713型）站	开始进行雷达观测
1990年1月	增设酸雨观测设备	开始进行酸雨观测
1995年5月	完成雷达数字化改造（713型）	开始参加雷达全国组网
2002年8月	建立地面自动观测站	增加0~20 cm浅层地温观测
2004年5月	安装大气电场观测仪	每天24时收集大气电场变化数据
2005年9月	开始使用酸雨观测软件	每年参加中国气象局的酸雨样品考核
2006年10月	改建为新一代多普勒雷达	使用多普勒雷达观测
2019年9月	改建为双偏振天气雷达	雷达观测再次升级

2.4 人工影响天气成果

1958年，泰山顶组织了人工增雨试验。1963年11月，中央气象局观象台副台长程纯枢安排酆大雄等2人前往泰山气象站，进行了为期两个月的雪晶观测，并燃烧碘化银，进行人工消雾试验。20世纪50—60年代是新中国成立后我国气象科技发展的起步阶段，老一辈气象人利用泰山站的高山属性进行科学试验，促进了我国气象事业的发展。

自20世纪80年代起，泰山气象站充分发挥地势优势，与中科院、气科院、山东大学等科研机构 and 高校展开紧密合作，产出的科研成果颇丰。泰山工作人员根据多年来观测的数据重点分析了泰山地区的各项气候特征，包括大气化学的研究。除此之外，还有对雷达设备、泰山旅游气象的研究，种类多样。

致谢：泰安市气象局徐法彬、徐学义和徐德力同志、泰山气象站赵勇站长为本文提供宝贵资料，山东省气象局大气探测中心顾伟宗同志协助调研。

深入阅读

明发源, 2006. 气象与减灾. 北京: 解放军出版社.
史玉光, 2012. 风云前哨第一站. 中国气象报, 2012-09-07(004).
吴增祥, 2006. 中国地面气象台站（1950—2004）沿革情况概述. 成都: 中国气象学会2006年年会“气象史志研究进展”分会场论文集.

（作者单位：南京信息工程大学科学技术史研究院）

民国时期浙江气象机构的考证

■ 麻碧华

民国时期浙江气象机构众多，且分属不同的部门，因此在历次史料整理及修志过程中，都因引用资料的不同，出现不同的结论，有些不准确的结论还在各处刊物、史志中被广泛引用。对浙江民国时期气象机构所作的几条考证，就是为客观复原浙江民国时期气象机构建置历史提供史实依据。

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.06.031

浙江民国时期气象机构的设立，在《浙江省气象志》《中国气象史》《中国近代气象台站》等著述中都有全面系统的介绍，但这些著述和记载，也有许多相互不一致的地方，而搜索相关文献反映的这一时期浙江气象机构情况，更与以上著述存在较大出入。本文以《浙江省气象志》《中国气象史》《中国近代气象台站》为线索，对记载不一致或记载不准确的气象机构进行考证。

1 浙江自办最早的测候所

《浙江省气象志》将浙江省立甲种农业学校测候所列为浙江自办最早的测候所，认为该所创办于民国8年（1919年），杭州现存的1919—1933年的气象资料均来自该所。这一结论在各类志书中引用颇多，如《中国气象史》《浙江大学农业与生物技术学院院史1910—2010》《浙江省基层气象台站简史》《杭州市志》等均引用这一结论。但在收集整理史料的过程中，笔者发现成立于1911年的浙江农事试验场观测科是浙江自办最早的测候所，而省立甲种农业学校未曾设测候所。

1.1 浙江农事试验场观测科概况

清宣统三年（1911年），劝业道员董元亮聘范运枢为场长，设农事试验场于艮山门外笕桥镇泥桥头南，设作物、畜牧、农业化学、蚕桑、观测等7科，其中观测科设主任1人，助理1人。1927年，浙江省建设厅曾就是否保留观测科提出建议：“观测科器械尚完备，宜保留，但须缩小范围，仅用技师、助理各一，无须乎主任。”可见当时气象观测仍在进行。

中国第二历史档案馆保存的《各省农林机关附设观测所成绩报告》（1915.1—1920.3）也可佐证浙

江农事试验场观测科的存在。民国三年（1914年）前后，北洋政府农商部按照当时国际二等测候所通例，于“中央”直隶省及各省农林机构设立26处观测分所，浙江农事试验场附设的观测科就是其中之一。浙江省网络图书馆还保存有1916—1918年的浙江农事试验场的观测记录。1915—1920年，农商部汇编的《各省农林机构附设观测所成绩报告》《农商部观测所年报》，就包括浙江农事试验场观测科向农商部报送的气象报告。

民国十六年（1927年），笕桥建造飞机场，农事试验场裁并，蚕桑科并入原蚕种制造场，扩充为蚕业试验场，余并入“国立第三中山大学”劳农学院。1927年，“国立第三中山大学”劳农学院（1929年1月改称“国立浙江大学”农学院）与农事试验场交接工作（该档案现存浙江大学档案馆），其中就包括农事试验场观测科的交接材料。交接后，观测科更名为浙江大学劳农学院测候所（1929年起改称浙江大学农学院测候所）。1934年8月，因杭州笕桥机场扩建，“国立浙江大学”农院校舍转让给“中央航空学校”，测候场地及仪器是否交由当时成立的“中央航空学校”气象台进行，目前尚未找到佐证资料，从“中央航空学校”毛邦初、尤佳章与竺可桢的来往信函来看，1934年起，“中央航空学校”成立了气象台，加强了气象工作。

1.2 浙江省立甲种农业学校概况

浙江省立甲种农业学校前身是成立于1910年的浙江农业教员养成所，地址在马坡巷；1912年更名为浙江省中等农业学校，设农学科，因校舍不足，迁横河桥南岸，并租地二十余亩。1913年奉令改称浙江省立甲种农业学校，增设森林科，校舍迁笕桥乡间（原

收稿日期：2020年4月9日；修回日期：2020年6月10日
作者：麻碧华（1972—），Email：249055016@qq.com

清兵四十一协八十一标营地)。1917年增设兽医科。1924年浙江省议会决议改组甲种农业学校为浙江省公立农业专门学校,同时把浙江省立甲种森林学校并入,设农学、森林两科,附设高中农科。1927年,国民党“中央政府”决定浙江试行大学区制,成立“国立第三中山大学”,改组农业专门学校为大学劳农学院,聘谭煦鸿教授为首任院长,设农艺、园艺、森林、蚕桑、农业社会五学系,学制三年,这是该校从中等专科学校发展到大学部的开始。1928年改劳农学院为农学院,学制改为四年。1934年迁至杭州华家池。

《浙农》期刊由浙江省立甲种农业学校校友会编辑,目前仅存的第一号出版于1921年7月。在该刊的“沿革”一栏中,《浙江省立甲种农业学校沿革(1910—1921年)》对每年建设情况作了详细的介绍。民国八年的情况是:“八年夏,农科生毕业计二十五人。大礼堂于是年落成,其他林场事务所、雨天操场、农林产制造厂、兽医实验室、标本仪器室、药室等相继建造。九年夏……”,沿革记录细致到操场、标本仪器室、药室建设,但未提到曾建测候所。高维魏撰写的《省立甲种农业学校历史》一文中也未提到曾建立测候所^①。测候工作所用仪器多为国外购买,费用较昂贵,浙江省立甲种农业学校为中等专科教育单位,如开展测候工作,必然在沿革中有体现。

1.3 浙江省立甲种农业学校是否设有测候所

浙江省立甲种农业学校、浙江农事试验场同在杭州笕桥(现称笕桥街道),同为北洋政府农林机构,相互亦有诸多关联。浙江绍兴人周清曾于1916—1922年任浙江省立甲种农业学校校长,并兼任浙江农事试验场场长。在相隔如此近的两个部门,在周清校长任期内的1919年,周清校长在浙江省立甲种农业学校再设测候所是完全不可能的。

浙江农事试验场于1927年部分并入“国立第三中山大学”劳农学院,而浙江省立甲种农业学校即是劳农学院的前身。那么,浙江省立甲种农业学校是否曾设有测候所?也可以从1928年12月“国立浙江大学”秘书处发给劳农学院的公函以及1929年1月浙江大学回复“国立中央研究院”的公函中找到答案。

1928年12月,浙江大学秘书处转发给劳农学院的公函:贵处第506号公函节开:案准浙江省政府交到“国立中央研究院”第67号公函一件内容:以“国立中央研究院”拟统筹全国测候事业,现在计划拟分全

国为若干气象区,分任各省气象之统计及天气预报之责任,在此计划未实现以前,拟先调查各省已经设立之测候所,搜集各地气象成绩以供研究之参考,故特函请贵省,希将所属境内已成立之测候所,按照下列调查表填明赐告……。查贵院业已设有气象测候所,相应检奉表式一份,即希填明送处,以便特寄为荷。

1929年1月,“国立浙江大学”函复“中央研究院”公函中明确答复“查浙省现仅本大学农学院兼管之农事试验场设有是项观测所”。

从这两份公函可以判断,“国立浙江大学”农学院仅有一处测候所,其前身为浙江农事试验场观测科,并入“国立第三中山大学”劳农学院后改称劳农学院测候所,1929年后改为“国立浙江大学”农学院测候所。浙江省立甲种农业学校未曾设测候所。

2 民国时期浙江空军气象机构

2.1 “中央航空学校”气象台成立时间及首任台长

“中央航空学校”的前身为民国十七年(1928年)成立于南京的“中央军校航空队”。1931年秋,军政部航空学校在南京成立。是年12月,航空学校迁杭州笕桥。1932年6月扩大改组为“中央航空学校”,隶属于军事委员会航空署。

《浙江省气象志》《中国气象史》对“中央航空学校”气象台成立时间的认定是一致的,均认定为成立于1935年。其中,《浙江省气象志》认定首任台长为刘衍淮,依据是当时“笕桥中央航空学校”测候人员赵恕的一篇回忆录^②。《中国气象史》认定首任台长为胡信。但吴增祥在《中国近代气象台站》一书中,对“笕桥中央航空学校”气象台成立时间有异议,认为在学校成立时就存在,首任台长为胡信,依据是台湾气象学会叶文钦撰写的文章《刘衍淮教授与李宪之教授》^③。那么,“中央航空学校”气象台到底成立于何时?首任台长是胡信还是刘衍淮?在查阅了大量的文史资料后,笔者认为“笕桥中央航空学校”成立时就有气象组,但气象台成立于1934年,首任台长是胡信。

首先,在乐典^④《对国民党第一所中央航空学校的回忆》一文中回忆:“1933年时,校长由蒋介石兼任,副校长毛邦初负实际工作。……此外,学校还设有气象组(台),组(台)长胡XX,专任每天气象观测、预报,能飞不能飞,由该组升旗号

① 1947年《国立浙江大学校刊》复刊第156页。

② 现存浙江省气象局档案室。

③ 该文章发表在2004年潜科学网站上。

④ 乐典1933—1937年曾在“笕桥中央航空学校”担任学生总队副。

显示。……”

其次，在陈栖霞、朱鸿道、唐中和^①《笕桥中央航空学校》一文中列出了航校成立时的编制和人事情况，明确航校成立时有气象组，组长为胡信。

胡信，曾留学日本，在“中央航空学校”教授气象学，自编教材讲义进行授课。吉林省图书馆特藏部保存的《航空气象简要》出版于1935年8月29日，该书标注的作者为“中央航空学校”气象台台长胡信。

《竺可桢文集》第22卷中，收录了部分竺可桢与“中央航空学校”人员之间的往来信函。“中央航空学校”副校长毛邦初曾于1934年4月3日致信竺可桢：“敝校气象台自成立以来，装置设备俱采最新式，在国内尚不多见。……”通讯组长尤佳章也曾于1934年3月致信竺可桢：“顷者章执教航校，校中新设气象台，拟添聘气象教官兼研究员一人，视学历为断。”《中国空军百年史》记载：1934年，“笕桥中央航空学校”受命航空署正式成立气象台。

作者判断，在1931—1934年，航校应有气象组这个机构，1934年正式成立气象台。

刘衍淮任航校气象台台长的时间应为1936年10月，这在竺可桢日记中有详细的说明。笕桥航校欲敦聘高级气象专业人员前来授课，“中央航空学校”毛邦初委托“中央研究院”气象研究所竺可桢所长代寻人选，经竺可桢的推荐，1936年10月，刘衍淮以博士及教授双重资格被航空委员会任命为简任技正教官授中校官阶，应聘到“中央航空学校”担任航空气象学教官并兼航校气象台台长。

2.2 空军第十三总站测候区台

衢州空军总站测候班是抗日战争期间设立的气象机构，该机构在《浙江省气象志》《中国气象史》中都有记载。但两处将当时空军在衢州的这个测候班，都称作衢州空军总站测候班，笔者认为不够准确，应称作空军第十三总站测候区台更为合适。

2.2.1 空军第十三总站沿革

1937年8月，杭州地区空军指挥部改编为杭州空军总站，并成立测候班。1937年12月24日，杭州沦陷，中国空军总指挥部电令：“衢州空军站为我空军出袭台湾及敌寇本岛之重要基地，杭州空军总站着即改为衢州空军总站，并兼理玉山场务，原衢州航空站撤消。”任命邢劄非为衢州空军总站站长。1939年6月，衢州空军总站改名空军第十三总站，管辖衢州、建瓯、玉山、丽水等机场，任命曹文炳为站长。1940

年陈又超中校接替站长职务。1942年6—8月，日军占领衢州，空军第十三总站奉命撤至福建建瓯。1942年8月，日军撤出衢州，空军第十三总站即从福建建瓯迁回衢州。1944年6月，日军发动金衢战役，衢州又一次沦陷，空军第十三总站又迁到福建建瓯，直至1945年8月。抗日战争胜利后，南京空军总部成立，空军第十三总站的建制随即撤消。

2.2.2 测候班概况

1937年8月，成立杭州空军总站测候班，有观测员斯杰、卢祯，测候士刘振山、孙儒范及测候兵数人，由赵恕任班长。12月24日，杭州沦陷，测候班随总部撤往衢州，改称衢州空军总站测候班，地址在衢州东门街一民巷内，后迁城中公园。1939年6月，衢州空军总站改名为空军第十三总站，并成立测候区台，测候区台下设建瓯、丽水、玉山等机场测候台，开展气象观测和空军飞行气象保障服务（图1）。测候区台配有二等测候所设备一套，并负责管辖各机场测候台的测候业务。1942年，赵恕调离，由顾钧禧接任。衢州沦陷期间，测候区台撤至建瓯。1945年8月抗战胜利，南京空军总部成立，空军第十三总站的建制随即撤消。



图1 空军第十三总站测候训练班测候训练证明书
(资料来源：湘泉雅集网站)

3 海岸巡防处气象机构

《浙江省气象志》《中国气象史》《中国近代气象台站》三书中，都将北洋政府海军部海岸巡防处设在坎门、嵎山的气象机构成立时间认定为1929年，气象机构名称为测候所，测候所停止工作时间为抗日战争爆发前。但笔者在查阅民国海军部资料时，发现这一结论有误。坎门、嵎山气象机构的名称应为测候报警台，成立于1926年，抗日战争期间停测，1945年后恢复。

^① 陈栖霞，曾在国民党“中央军校航空班”、笕桥航校等处担任参谋长、飞行教官等职；朱鸿道曾任国民党空军第三队飞行员、参谋、站长等职；唐中和曾入笕桥航校第七期，于1937年毕业。

3.1 成立时间

中国国家图书馆馆藏的《海军部海岸巡防处二十年报告书》（为民国时期史料）中有一节专门介绍海军部海岸巡防处所属气象机关沿革，其中就包括崂山、坎门的情况。

崂山报警台成立小史：民国十三年八月，由本处派员赴该岛勘定设台地点，十四年从事建设，是年四月信号杆落成，是年十二月台屋及电杆工程一律完竣。十五年二月开办，迄今工作不断。

坎门报警台成立小史：民国十四年冬，由本处派员赴该岛勘定设台地点，十五年从事建设，是年八月完成。十月开办，迄今工作不断。”

关于崂山、坎门两处气象机构的成立时间，在这份资料中有详细的说明。而在吴增祥《中国近代气象台站》中，两处气象机构成立时间的依据是1935年“国立中央研究院”气象研究所的《气象机关联席讨论会特刊》。笔者认为，民国二十年海军部的这份报告书为第一手资料，应更为可信，故判断两台成立的时间是1926年。

3.2 机构名称

关于崂山、坎门两气象机构的名称，在《浙江省气象志》《中国气象史》《中国近代气象台站》都称作测候所，这是不准确的。中华民国十九年五月八日公布的《海岸巡防处暂行条例》中附录了海岸巡防处系统表（图2）。



图2 《海岸巡防处暂行条例》的附录

在该表中，详细列出了海岸巡防处的机构设置，其中就包括各测候报警台。因此，崂山、坎门两气象机构的名称应为测候报警台。海岸巡防处所属报警台包括吴淞、崂山、沈家门、坎门、厦门等报警台及东

① 陈遵鼎为当时分配至云和测候所的测候员。

沙观象台。崂山、坎门测候报警台每日观测八次，从零时起每三小时一次，观测项目包括：气压、气温、湿度、风向风力、云量云形云向、降水量降水时间、能见度、天气状况、海面状况等，观测结果通报东沙观象台、青岛观象台、南京气象研究所电台以及厦门、上海各报警台。东沙观象台属于海洋气象台，主要为航海安全服务，建于1925年12月，观测项目与测候报警台相比，还有地震、天文测量等项目，其设计优于全国其他观象台，该台先由潮海关税务司管理，后归海岸巡防处管辖。

3.3 测候报警台停办时间

《浙江省气象志》《中国气象史》认为两处测候报警台于1935年和1936年停办。吴增祥文认为两处气象观测至抗日战争爆发前夕。笔者查阅《中国海军大百科全书》及《中华民国海军史料》，认定两处观测至抗日战争爆发前夕，但1945年后又恢复。

关于两处机构沿革，《中华民国海军史料》有相关的描述：“1938年，海军东沙岛观象台及浙江崂山、沈家门、坎门和厦门各无线电报警台先后为日本海军所占据，全国海岸巡防处及分处亦先后结束，所有人员均调往各炮台、各布雷队做抗日工作。”《中国海军大百科全书》亦有记载：“抗日战争爆发后，海岸巡防处于1938年撤销，巡防事务移归海军总司令部办理。抗日战争胜利后，在海军军区之下，恢复巡防处建制，所属观象台和报警台，分设于吴淞、沈家门、坎门、崂山、厦门和东沙岛。

4 与美军合办的气象机构

《浙江省气象志》《中国气象史》记载的民国时期与美军合办的气象机构共两类：一是昆明美军总部与省测候所合办的气象机构；二是中美合作所在浙江建立的气象站。笔者在查阅相关资料过程中，发现这两类机构与笔者掌握的史实有出入。

4.1 中国东南气象学会在浙江建立的测候所

关于昆明美军总部与省测候所合办的气象机构，《浙江省气象志》《中国气象史》记载如下：“1945年4月，为配合盟军作战，在东南沿海部署反攻之时，昆明美军总部派员来云和，与省测候所合作培训17名气象人员，先后在浙江省的云和、黄岩、天台成立测候所，每天定时供给昆明美军总部（美第十航空队）气象情报。抗战胜利，美军在华任务完成后，相继返国，云和测候所迁杭州云居山，天台与黄岩测候所合并。”

笔者在查阅陈遵鼎^①撰写的回忆录《抗日战争时

期中美气象合作组织——中国东南气象学会》，所记录内容与上述情况出入较大。据陈遵鼐回忆，该机构是由美空军第十测候队与福建省气象局联合成立的“中国东南气象学会”（英文简称“MASEC”），并非昆明美军总部与浙江省测候所合办的机构。此组织经福建省批准，于1944年10月初正式成立。学会成立后，立即登报公开招生，开办短训班。学员结业后，再派往各测候所工作。由此可以判断，昆明美军总部与浙江省测候所并未合办过气象机构，当时各测候所挂牌名称均为“中国东南气象学会XX测候所”。

中国东南气象学会在浙江建立的气象机构，并非云和、黄岩和天台，而是云和、天目山和淳安，抗日战争胜利后，又在杭州、黄岩设测候站。据浙江省气象所1945年编写的《浙江三四年级加强气象测候计划》，中国东南气象学会在云和、淳安和天目山设立测候站。1945年8月，福建省气象局按美军通知即向各所宣布观测、发报工作暂停，原地待命。1945年9月3日，各测候所人员携带全部气象和电讯器材撤回永安交福建省气象局接管。所有测报人员多数由福建省气象局接收分配工作。因此，“云和测候所迁杭州云居山，天台与黄岩测候所合并”与事实不符。

应美空军要求，中国东南气象学会于1945年11月又在杭州、黄岩设立测候站，其中，杭州紫阳山测候站设于吴山汪王庙，于是年11月15日起向福建永安美军第十测候队发送气象报告。1946年初，美空军最后一批撤离前停止发报，但观测仍继续。1947年，浙江省气象所测候地点由外西湖21号（孤山博物馆）迁至此处。

4.2 中美合作所在浙江建立的气象站

中美特种技术合作所（简称：中美合作所）成立于1943年4月。为了美国太平洋舰队对日作战需要，美国海军作战总指挥、海军舰队总司令厄尼斯特·约瑟夫·金上将于1943年初委派海军准将梅乐斯到重庆，与国民政府军事委员会调查统计局戴笠协商后成立“中美合作所”。主要合作内容有：交换日军海陆空军事情报，搜集中国大陆气象情报，训练游击队，挺近日军后方，协助美军在中国沿海登陆作战，共同迅速歼灭日寇等。为此，双方同意美方可以接近并利用中国的情报组织，为美军对日战争服务。作为交换条件，美方将提供设备及培训中方人员，提高其情报能力及战斗力。此后，“中美合作所”一直从事培训和装备戴笠领导的军统部队，运作其下属的情报站，开展对日游击战，直至1945年8月日本投降。1946年3月，“中美合作所”宣布解散。

“中美合作所”的气象技术合作，主要有两个方

面：一是成立气象训练班，培训气象人员；二是建立气象总站和气象台站，进行气象观测和天气预报，为美军提供气象情报，实施气象保障服务。“中美合作所”前后培训了二百多名气象人员，相继在全国设立了165个气象站和通讯电台。

关于中美合作所在浙江建立的气象站，《浙江省气象志》《中国气象史》均认定为3个，分别是杭州、温州和海门；但吴增祥《中国近代气象台站》认定为4个，除上述三站外，还有平阳（镇霞关）。那么，中美合作所在浙江到底建立了几个气象站？

由于中美合作所的部分档案尚未解密，原始档案无从查找。但从《上海市气象志》《中国近代气象史资料》等资料可以判断，确实存在平阳（镇霞关）气象站。

《上海气象志》“总述”中记载：“1946年1月，上海气象台扩建为华东区域气象行政中心，管辖龙华、温州、屯溪、海门、杭州、平阳（镇霞关）6个气象站和定海测候所。”在《国民政府时期的中央气象局》一文中，中央气象局于1947年接收的国防部二厅气象总站暨所属各站中，也包括镇霞关三等气象站。

根据吴增祥《中国近代气象台站》的描述：镇霞关气象站由中美合作所于1945年8月设立，1946年3月“中美合作所”解散，8月“中美合作所”上海气象总站暨所属气象台站共41站（包括镇霞关，为三等站）改隶国防部二厅管辖。1947年6月，根据国民政府行政院训令，要求所有气象台站均置于民国中央气象局领导之下，国防部二厅所属的41个气象台站、气象人员归属中央气象局。中国气象局档案馆保存的“中华民国三十七年六月份各地气象要素统计”档案中，有一份上海台民国三十七年一至六月业务报告，其中也包括镇霞关的资料，注明每日观测八次。据此可以判断，1948年6月，镇霞关气象站还在正常工作。

5 东方大港测候所

关于东方大港测候所，《浙江省气象志》《海盐县志》都有介绍：即交通部东方大港筹委会于1930年3月在海盐县设立东方大港测候所一处，于1933年停止工作。这一结论，在其他志书中也出现过。但笔者在查阅各类文史资料时，发现这一结论不准确。

5.1 测候所建设主体

测候所成立时的建设主体并非交通部，而是国民党中央建设委员会东方大港筹备处。

东方大港是孙中山《建国方略》中港口建设计划

的重要内容。1929年3月，国民党中央建设委员会成立东方大港筹备处，推进这一实业计划。是年5月组织东方大港测量队到乍浦工作。1931年，该筹备处由交通部和铁道部接管，并于是年10月组建东方大港筹备委员会^①。1935年7月，该委员会裁撤。

5.2 测候所设立

东方大港筹备处设立的测候所到底是一处还是两处，在《张静江先生文集》《申报》中可以找到答案。

《张静江先生文集》（注：张静江，曾任国民党中央建设委员会委员长）中，专门介绍了东方大港的测量工作：“十八年五月组织测量队出发测量，至十九年一月止，即将三角网及精密水准测量完竣全线长七十多公里，东起乍浦、独山，西达海宁旧仓，共设混凝土永久性水准标志一百余座，又设立内河水标站多处，并于海盐、海宁等处设立气候测验所。”在1930年11月3日《申报》第七版中，也专门介绍了东方大港一年来的筹备经过：“建委会以开辟东方大港、为职责所在，十八年春特派水利处处长陈懋解及审核科科长陈湛恩，前往浙江乍浦海盐与澉浦一带，实地勘查，拟即报告，旋即购备仪器、组织测队，期作基本材料之搜集，以为将来建筑港埠设计之根据。惟以国家经费困难，乃先设立东方大港筹备处测量队，于港址一带，作三角及水准之测量，并于港区乍浦海盐澉浦内河等处，设立水标站，以观海潮与内河水位之高低，又于海盐设立气候测验所，以观测气象之变化。测量队于是年四月底筹备完毕，五月出发，

至十九年一月，即将三角网及精确水准测量完竣。全线长七十多公里，东起乍浦、独山，西达海宁旧仓，所有三角点及水准标志、均制以混凝土，以垂永久。迄十九年二月，在海宁装设气候测验所……”

在这两个史料中，均提到测候所的设立，明确东方大港测候所共有2处，即海盐和海宁各一处。

6 结语

民国时期浙江气象机构因归属不一，要真实还原历史，还需要对历史资料进行不断的收集和整理。农事试验场观测科是浙江自办最早的测候所；中央航空学校曾于1934年设立气象台，首任台长胡信；中国东南气象学会曾在浙江建立测候所等等，这些结论都是在查阅了大量的历史资料的基础上，对前期研究成果的纠正，在现阶段都是真实可信的。气象史料的挖掘和整理是一项长期的工程，随着电子档案的不断完善，历史资料的不断丰富，气象历史将更接近真实。

深入阅读

- 陈义产, 1989. 浙江农业大学的发展. 高等农业教育, 2: 62-64.
 顾国泰, 2013. 艮山门外话桑麻. 杭州: 杭州出版社.
 黄华平, 2011. 国民政府铁道部研究. 合肥: 合肥工业大学出版社.
 任振泰, 1998. 杭州市地方志编纂委员会. 北京: 中华书局.
 王德坚, 1992. 海盐县志. 杭州: 浙江人民出版社.
 王健明, 2016. 留学生与近代中国军事航空研究. 桂林: 广西师范大学出版社.
 杨志本, 1987. 中华民国海军史料. 北京: 海洋出版社.
 中国近代气象史资料编委会, 1995. 中国近代气象史资料. 北京: 气象出版社.

（作者单位：浙江省杭州市气象局）

① 《筹设东方北方两港》，《申报》，9版，1931年10月18日。

(continued in page Inside back cover)

Forum

- 125 Da Yuezhen/ Mobile New Media Meteorological Information Dissemination: Take the Meteorological Official WeChat Accounts as an example
 128 Li Taotao, Li Liangwei, Ren Ke, Tian Yijie/ Investigation and Analysis on the Characteristics of Readers of Meteorological Knowledge and Their Knowledge Acquisition Preference
 131 Guo Junping/ Analysis on Improving the Dissemination Effect of Meteorological Early Warning Information
 134 Lai Yuwei, Yang Baohui, Lin Meiyang, Bai Long/ Meteorological Services Based on Group Differences, as in the Case of Guangxi
 137 Zheng Zhibin, Ren Yongjian, Wang Kai/ High Temperature Disaster and its Effect in Hubei Province
 140 Yang Peiqiang, He Bing, Yi Liang/ The Study on the Benefit Evaluation of Meteorological Service in Wuhan Huoshenshan Hospital During the COVID-19
 143 He Mingqiong, Chen Zhenghong, Tan Jing, Jia Wenqian, Chen Yingying, Wang Ming/ Analysis on Several Possible Contributing Factors of the Outbreak and Epidemic of COVID-19 in Hubei Province
 146 Liu Licheng, Hu Qianqian/ Empathic Communication of Meteorological Messages in the COVID-19 Epidemic of Wuhan City

Feature

- 12 Jia Pengqun, Li Zhaoming/ Review on China Tornado Conference in 2020
 14 Gao Yuchun, Chen Haojun, Bu Zhichao, Tao Fa, Xu Mingyi, Wang Xiaopeng, Zhang Lejian, Li Ruiyi, Wen Hao, Ma Shuqing/ Development of Phased Array Weather Radar from the 39th International Conference on Radar Meteorology
 19 Yao Dan/ Construction of Tornado Forecast and Early Warning System: The Frontier Challenge of Meteorological Modernization
 149 Jia Pengqun, Zeng Zhilin, Zhou Shenrui/ Review of the 1st Conference on Extreme Weather, Climate and Disaster Risk in Guangdong-Hong Kong-Macau Greater Bay Area
 152 Selected Papers

History

Station

- 153 Lu Yatian, Li Beibei/ Developments of the Mount Tai Meteorological Station
 155 Ma Bihua/ Textual Research on Zhejiang Meteorological Organizations during the Republic of China Period

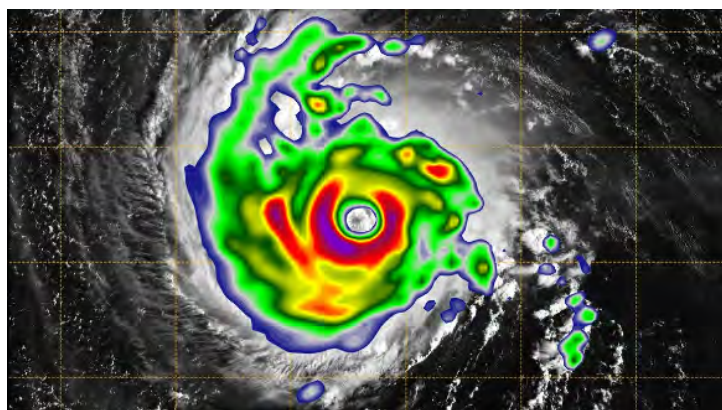
板架云 (shelf cloud, 又译作滩云), 是一种低空水平楔形弧状云, 它的形成与对流风暴的阵风锋 (有时是冷锋) 有关。板架云附着在对流风暴的云的底部。在板架云的前沿 (或外部) 可以看到上升运动, 而底部则常有湍流, 呈现破碎状。板架云和卷轴云同属于弧状云, 两者常常被进行对比。

气象出版社2012年出版的《英汉汉英大气科学词汇 (第二版)》将这种云译为板架云, 但是以板架云作为关键词在百度和谷歌中进行检索, 并未发现任何结果。检索发现滩云是这种现象更常见的译法, 以滩云为关键词的结果在百度和谷歌中分别高达10万及近3400万条。

专门对这种云进行的科学研究并不多, 在谷歌学术和SCI数据库中相关的文章寥寥, 大多是在研究暴雨、对流云团、积雨云等热门天气现象时顺带提及的。虽然在学术界的热度不高, 但是板架云往往具有奇异壮丽的外观, 能够一直延伸到地平线尽头, 是强暴风雨来临前最容易辨认和拍摄到的天气现象, 因此受到世界各地气象爱好者的追捧, 媒体也争相对这种奇观进行报道。



板架云 (shelf cloud) 与飓风 (回波) 带 (hurricane band)



飓风 (回波) 带 (hurricane band), 又作螺旋带、飓风雷达带, 气象出版社2012出版的《英汉汉英大气科学词汇 (第二版)》将其译为飓风 (回波) 带。飓风带是从强热带气旋 (飓风或台风) 内的降水区域接收到的螺旋状雷达回波。从雷达观测图中可以看出, 飓风带以气旋的方式向风暴中心弯曲, 沿飓风环流的方向围绕

风暴中心缓慢移动, 并在风暴眼周围形成一堵墙。飓风带分为两类, 如能合并到风暴眼周围的眼壁中, 则称为一级风带; 如与眼壁分离, 则为二级风带。

在Web of Science平台的SCI数据库中检索, 并未发现以hurricane band为主题词的文献。而以spiral band为主题词检索可得到39条结果, 以气象学和大气科学、地球科学领域的研究居多。在百度学术中同样未检索到以“飓风带”为主题的文献, 而以“螺旋带”为主题的文献有44篇。

表1 地球科学及相关领域被引频次前5的spiral band主题相关论文 (Web of Science)

序号	论文题目	第一作者	来源	被引次数
1	New perspectives on the Northern Hemisphere winter storm tracks	Hoskins, BJ	Journal of The Atmospheric Sciences,2002,59(6)	566
2	Observations of tornadoes and other convective phenomena with a mobile, 3-mm wavelength, Doppler radar: the spring 1999 field experiment	Bluestein, HB	Bulletin of the American Meteorological Society ,2000,81(12)	140
3	Typhoon-induced concentric airglow structures in the mesopause region	Suzuki, S.	Geophysical Research Letters,2013,40(22)	92
4	Merger of tropical cyclones Zeb and Alex	Kuo, HC	Monthly Weather Review,2000,128(8)	26
5	Dynamic characteristics of typhoon vortex spiral wave and its translation: a diagnostic analyses	Xu, XD	Chinese Journal of Geophysics-Chinese Edition,2004,47(1)	22

AMS
词汇

张伊 编辑
武欣蕊

Supervisor China Meteorological Administration (CMA)
Sponsor CMA Training Centre
Chinese Meteorological Society
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

Wang Jinxing

Xiao Ziniu

Zhai Panmao

Yao Xuexiang

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

Chen Jinyang, Cheng Xiuhu, Gong Jiandong, Guo Hu, Guo Xueliang,
Li Bai, Li Guoping, Luo Yunfeng, Ni Yunqi, Qu Xiaobo, Ren Guoyu,
Ren Xiaobo, Shen Wenhai, Wang Cunzhong, Wang Huaigang, Wu
Bingyi, Xiong Shaoyuan, 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 Weidan, 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, Yi Lan, Yu Yubin, 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, Li li, Ji Wenbin, Jiang Jianmin, Cui Xiaojun

Add: CMA Training Centre, 46 Zhongguancun Nandajie,
Beijing 100081, China

Tel: +86-10-68409927/68409933

Email: amst@cma.gov.cn

http://cmalibrary.cn/amst

Printed by

Beijing Jinjishi Printing Limited Liability Company

ISSN 2095-1973

CN 10-1000/P

RMB 30.00

Main Contents

(Including Advance Report 2020: Research on Tornadoes and Severe Convection)

- Xu Xiaofeng/ NEXRAD: Entering the "New Generation"
- Zhang Wenjian/ Seventy-years of Progress in Weather, Climate and Water Service Collaborations Facilitated by WMO: China's Leading Role, Significant Contribution, and Mutual Development

Article

- Li Wanyi, Huang Xianxiang, Cai Kanglong, Zhi Jiangling, Zhang Jingjing, Zhou Xiaoyi, Tian Liangyu/ Analysis of Supercell Tornado in Westerly Zone of Foshan on 31 May 2020
- Zhi Jiangling, Li Cailing, Cai Kanglong, Huang Xianxiang/ Analysis of Typhoon-Tornado Weather Process in Leizhou Peninsula
- Zhou Xiaomin, Zheng Yongguang/ Analysis of Environmental Conditions and Tornado Storm Features of Two Tornadoes in Jiangsu during the Meiyu Period in 2020
- Gu Bohui, Huang Xianxiang, Zhang Shaoting, Zhi Jiangling/ The Applying of Temporal Climatology Method in the Analysis of both Environmental Background and Model Forecasting for a Typhonic Tornado in Foshan
- Cai Kanglong, Zhi Jiangling, Li Cailing, Huang Xianxiang, Li Zhaoming, Peng Siqi/ Application of Miniature Unmanned Aerial Vehicle in Tornado Damage Survey
- Guo Ruiling, Zhong Lihua, Mai Lingling, Yu Xiaojiang, Wang Shuofu, Liang Hualing, Cai Kanglong, Huang Xianxiang/ Preliminary Study on Atmospheric Stratification Structure and Radar Characteristics of Hail Weather in Early Spring in Foshan
- Zheng Yongguang/ Review of Climatology and Favorable Environmental Conditions of Tornado in China
- Zheng Yan, Lin Zhengyang, Jiang Xianling/ Statistical Characteristics of Tornado in Hainan Province
- Zhang Yu, Tian Congcong, Fu Peiling, Huang Hui/ Progress of Observation Experiment for X-band Dual Polarization Phased Array Radars in Guangzhou
- Zhang Jingjing, Li Zhaoming, Huang Xianxiang/ The Analysis Between Foshan Heavy Precipitation and Pre-Signal of Sliding Discrete Power Spectrum on Micromanometer
- Chu Hongxing, Li Zhaoming, Mai Wenqiang, Yang Yunqian/ Comparative Analysis of Influencing Zone and Disaster Condition of Tornado Based on Media Information and Disaster Investigation
- Guan Xiaodong, Liu Yu, Bu Yinjun/ Wind Vertical Structure Observation and Difference Analysis of Large Range Heavy Rainfall with Warm Shear and Cold Shear Based on Wind Profiler Radar
- Wang Wei, He Xiaoxian, Zhang Shenshou/ Study on Multi-source Information Forest Fire Monitoring Model Based on Radar
- Cai Yinyin/ Geographical Distribution of the Atmospheric Environmental Resources in China
- Liu Suxiao, Sun Landong, Wu Wei, Liu Xiaochen, Yang Hanwei/ Action Programs of Urban Adaptation to Climate Change — Typical Domestic and Overseas Cases of Response to Meteorological Disasters

(continued in page 160)