

# 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国地区的包含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,我们又能让多少时间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)