

郭建平,陈田萌,程小平,等.2023.中尺度天气系统适应性观测研究进展及其在大城市短临预报中的应用构想[J].暴雨灾害,42(6):313–627. GUO Jianping, CHEN Tianmeng, CHENG Xiaoping, et al. 2023. Progress in targeted observation for meso-scale convective system and some thoughts on its applications to convection nowcasting in large cities [J]. *Torrential Rain and Disasters*,42(6):313–627 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023–035

中尺度天气系统适应性观测研究进展及其在大城市短临预报中的应用构想

郭建平^{1,5},陈田萌¹,程小平²,田伟红³,尤伟²,党蕊君²,
郭晓冉¹,毋婧炎¹,李宁¹,张震^{1,4},孙玉萍^{1,4}

(1. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京 100081; 2. 中国人民解放军国防科技大学气象海洋学院,长沙,410072; 3. 中国气象局地球系统数值预报中心,北京 100081; 4. 复旦大学大气与海洋科学系,上海 200438; 5. 福建省灾害天气重点实验室,福建省气象科学研究所,福州 350007)

摘要:如何提高中尺度天气系统预报技巧是天气预报领域的重大科学问题之一。中尺度天气系统的发生和发展受到大气热动力条件、地形及污染条件等多重影响,且由于模式本身及初值的不确定性,中尺度天气系统所产生的对流天气预报仍有较大误差。通过在重点地区开展适应性观测试验降低模式初始场的不确定性是行之有效的方法之一,基于此有望更准确地揭示中尺度天气系统触发和形成机制、提高对流天气模式预报水平。首先,提出一种适应性观测试验的技术路线,即在已有的京津冀地区现代气象探测网基础上,采用集合变换卡尔曼滤波方法识别典型中尺度对流性天气的观测敏感区,结合无球探空移动观测平台,通过观测与预报互动方式,开展目标区的中尺度天气适应性观测试验,研究京津冀地区夏季对流天气触发机制,探索提高灾害性对流天气预报技巧的新方法。然后,针对大城市区域对流天气短临预报预警面临的低层大气垂直观测系统存在的“大网捞小鱼”问题,可通过构建由5个具有垂直观测能力的站点所组成的金字塔形对流层低层大气垂直观测系统,提出随云团大小和位置变化而变化的动态三角形组网观测技术,以获得不同空间尺度的大气动力廓线,进而增进对对流天气触发、发展和演变机理的认识。最后,探讨了适应性观测与大城市气象保障服务之间的内在联系,针对大城市大气垂直观测中尺度站网科学布局 and 以改进城市短临预报精度为目的的适应性观测等问题,给出具体建议,并展望以观测-预报互动为主要特征的中尺度适应性观测试验技术对大城市气象保障服务的科学价值和应用前景。

关键词: 适应性观测; 观测敏感性; 大气廓线; 大城市; 短临预报; 金字塔形; 对流层; 垂直观测系统
中图分类号: P411 **文献标志码:** A **DOI:** 10.12406/byzh.2023–035

Progress in targeted observation for meso-scale convective system and some thoughts on its applications to convection nowcasting in large cities

GUO Jianping^{1,5}, CHEN Tianmeng¹, CHENG Xiaoping², TIAN Weihong³, YOU Wei², DANG Ruijun²,
GUO Xiaoran¹, WU Jingyan¹, LI Ning¹, ZHANG Zhen^{1,4}, SUN Yuping^{1,4}

(1. *State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*; 2. *College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Changsha 410071*; 3. *CMA Earth System Modeling and Prediction Centre (CEMC), Beijing 100081*; 4. *Department of Atmospheric Science and Oceanography, Fudan University, Shanghai 200438*;
5. *Fujian Key Laboratory of Severe Weather, Fujian Institute of Meteorological Sciences, Fuzhou 350007*)

Abstract: Improving the forecasting skills of the meso-scale convective system (MCS) is one of the key scientific problems in the field of numerical weather prediction. The occurrence and development of severe convective weather are affected by multiple factors such as atmospheric thermodynamic and kinetic conditions, topography, and air pollution conditions. Due largely to the uncertainty in models and the inevitable errors of initial values, large uncertainties still exist for the accurate prediction of severe weather produced by the MCS. Therefore, to effectively improve the accuracy of severe convective weather forecasts in China, conducting targeted observation experiments in key areas of

收稿日期: 2023-02-25; 定稿日期: 2023-09-20

资助项目: 国家自然科学基金委气象联合基金项目(U2142209)

第一作者: 郭建平, 主要从事边界层气象和对流触发机制研究。E-mail: jpguo@cma.gov.cn

interest, which typically helps to reduce the uncertainty level of the model's initial meteorological field, may be one of the effective ways forward. It follows that the initiation and formation mechanisms of MCS can be revealed, and the forecast skills of severe convection will be improved. In this paper, we first propose the technology roadmap of targeted observation as follows. Based on the modern meteorological observational network over the Jing-Jin-Ji area, the typical MCS forecast sensitive regions are identified by using the Ensemble Transform Kalman filter, combined with the atmospheric sounding systems mounted on the mobile vehicle, where targeted observation experiments will be conducted. As such, convective initiation mechanisms are elucidated, and the novel methods expected to improve the forecast skill for MCS are explored. Secondly, in response to the challenge of "finding needles in a haystack" in the vertical observation of the lower atmosphere for short-term forecasting and warning of severe convective weather in large cities, the potential application value of a dynamic triangular observation mesonet in the study of triggering and development mechanisms of severe convective weather was explored through the construction of a Pyramid-shaped Lower Tropospheric Observational System (PLOTOS) that consists of five stations with simultaneous vertical observation capabilities. Finally, it is suggested that the initiation and formation mechanisms of severe convective weather be unraveled using PLOTOS, and the mesoscale targeted observation technology be developed, which is crucial to the improvement of weather observational networks in large cities and provide new ideas and methods for improving the forecast of severe convective weather processes.

Key words: targeted observation; forecast sensitivity to observations; atmospheric profile; large cities; convection nowcasting; pyramid-shaped; tropospheric; observational system

引言

中尺度对流系统是造成我国主要灾害性天气频发的系统之一(Chen et al., 2020),具有空间尺度小、生命史短、突发性强、破坏力大等特点。中尺度天气系统往往与暴雨、冰雹、大风、龙卷等灾害性天气紧密相关,其预报的准确性直接关系到多种自然灾害的科学防范和应对,对防灾减灾工作具有重要意义。然而,尽管近几十年来数值天气预报技术取得了长足进步,但由于模式初值的不确定性等问题,对中尺度天气系统的精准预报仍存在较大问题,如暴雨24 h预报的TS评分往往低于0.2。因此,提高中尺度对流天气的预报技术仍然是当前所面临的重大科学问题之一,也是我国气象科技服务于经济社会发展面临的重大挑战。

有利的大气热力、动力及水汽条件是对流天气触发的基本前提,而边界层过程和强迫作用则是对流触发的重要机制,其中边界层辐合线、地形强迫及重力波破碎等是主要的触发机制。对流天气的潜势预报很大程度上依赖于对流的大气环境变量的观测,包括温度、气压、湿度、风以及相关热动力参数等(Parker, 2014)。尽管当前地球观测系统探测能力不断提升,资料同化方案不断改进,但是与中小尺度数值模式分辨率相比,现有观测系统能够获得的观测分布依然非常稀疏且分布不均。20世纪90年代,气象学家提出了适应性观测概念,其核心思想是采用观测与数值模式相结合的方式,提高观测资料的应用效率(Rabier et al., 1996)。适应性观测又称目标观测,是指在对预报误差最为敏感的区域(敏感区)及目标区内增加观测,从而最大程度地改进预报效果。换言之,适应性观测就是为了最优地改进所关心区域和时间的天气预报,识别出目标时

间(验证时刻之前的任意时间)对应的敏感区,这样利用可能的观测工具在敏感区进行加密观测,改善敏感区的分析质量,从而改进验证区在验证时刻的预报。在有限的财力、物力以及人力等资源的条件下,适应性观测有利于高效发挥观测资源在数值天气预报中的作用。目前,尽管对流天气可预报性研究取得了不少有意义的进展,但是关于制约对流天气可预报性研究的误差增长机制的认识仍不完全清楚,这是目前对流适应性观测研究的一个难点(闵锦忠和吴乃庚, 2020)。

对于特定的中尺度对流系统,若能有效确定对流触发的关键区域和时间,在该区域增加相应敏感要素的观测,则有可能为对流预报提供更精准的初始场条件,从而提高其预报准确率;进而通过累积对流天气个例的精细观测和其观测敏感区的统计研究,为未来观测站点建设提供科学实用的布局建议,从而进一步服务于对流天气的预报预警,提高对流等高影响天气预报技术。

1 国内外适应性观测试验研究现状及发展动态

中尺度对流天气系统可预报性及其精准预报研究严重依赖于模式的初值条件,因此优化大气垂直观测网络,引入更多精密的天-空-地一体化的大气综合观测手段和更先进的资料同化技术来改进模式的初始场,成为了对流天气预报领域的发展方向。适应性观测试验则在一定程度上成为了验证这些观测及同化技术应用价值的有效手段,且能够有效服务于优化现有观测站网布局(Trapp et al., 2016)。前人的研究为对流天气发展的前期信号、适应性观测试验及资料同化的应用价值奠定了一定的研究基础,下面重点论述相关领域的主要进展和发展动态。

1.1 对流天气发展的前期信号研究

1.1.1 对流天气触发、发展及其影响因子

(1) 大气边界层热动力结构。国内外许多研究强调了热力不稳定条件和动力抬升等在对流触发和演变过程中的重要作用,而高分辨率的探空资料提供的大气热、动力条件有利于识别对流天气触发前的大气环境。王璐璐等(2023)对2021年6月14日傍晚到夜间豫南一次对流性暴雨过程进行了分析,发现此次过程发生时风场为气旋性切变和辐合,水汽条件和热力条件较好,动力强迫主要位于边界层内。Yan等(2019)结合秒级探空和地面自动站观测资料统计分析了2008—2017年北京夏季对流触发前的大气环境特征,结果表明强降水发生前的临近探空曲线中大约有45%呈现“细管型”,这是由于此类探空曲线常伴随着更丰富的水汽和不稳定能量,因此容易导致更大的垂直风切变和更强的降水。范爱芬等(2022)在分析秋季台风倒槽特大暴雨的对流特征时发现特大暴雨出现在低空水汽辐合、 θ_{se} 大值区或峰区以及大尺度强迫抬升的重叠区域,并指出倒槽区域较减弱的台风中心附近为不稳定的大气层结是出现特大暴雨的主要原因。Barthlott等(2010)在分析一次发生在德国西南部和法国东部复杂地形上的降水个例时发现,在对流有效位能(CAPE)仅为中等且对流抑制能量较高的情况下,低层强辐合能够使得上升气流穿过覆盖在边界层顶部的逆温层,从而触发深对流。

风廓线雷达可以连续观测到具有更高时间和垂直分辨率的三维风场,进而很容易地从实测风的垂直廓线中导出水平风的垂直切变和温度平流等动力参数。但目前国内对于风廓线雷达的应用,大部分仍停留在对单部雷达的大气廓线资料分析。近年来风廓线雷达在全国范围内广泛开展建设,多地相继建成空间稠密、相邻站点间距较小的风廓线雷达中尺度网,为利用多站点组网反演三维辐合辐散场进行对流风暴的前期信号研究奠定了坚实的观测支撑。

垂直风场观测组网的思想早在20世纪40年代就被应用于分析对流天气的形成机制(Bellamy, 1949),主要利用三个不共线的站点上空水平风观测计算其组成的三角形区域内的水平散度、垂直涡度和垂直速度。Byers和Rodebush(1948)基于上述三角形法利用探空观测统计了1946年夏季佛罗里达半岛上空辐合特征,以此探究雷暴发生的可能机制,结果表明虽然白天的太阳辐射加热为对流区的形成提供不稳定条件,但低层海风的辐合是导致对流雷暴发生的直接原因。20世纪80年代开始,国内学者引进了三角形法来计算我国各个探空站点间的涡度、散度等物理量,并

提出了各种改进方案。刘梦娟和杨引明(2017)将散度和涡度计算的三角形法应用到风廓线中尺度组网,可以实时监测局地辐合辐散特征及其变化,对捕捉中尺度天气系统的发生发展过程提供了更丰富的动力学信息,进而为短时临近预报尤其是强降水精细预报提供参考。Guo等(2023)借助京津冀和长三角地区稠密的风廓线雷达中尺度网络观测,提出了最优三角形算法,大幅度提升了水平散度、涡度和垂直速度等动力参数反演精度,并基于该算法全面厘清了散度廓线和对流触发的关系,并指出了风廓线组网观测可助力对流天气短临预警水平提升。

(2) 对流云结构及生命周期。20世纪90年代以来,静止气象卫星、天气雷达等先进遥感观测仪器的资料被广泛应用于对流降水的临近预报中。例如, Mecikalski等(2008)利用美国海洋大气局的地球同步业务环境卫星(Geostationary Operational Environmental Satellites, GOES),系统研究了美洲地区中尺度对流系统产生的云时空分布特征及其发展演变规律。近年来,欧洲新一代气象卫星MSG (Meteosat Second Generation)被广泛用于探究欧洲和非洲的对流云演变特征(Klein et al., 2018)。而在亚太地区,我国风云4号静止气象卫星(Min et al., 2017)和日本葵花-8号静止卫星(Chen et al., 2020)被广泛应用于夏季对流云监测预警研究和业务中。王小龙等(2022)利用常规观测资料、区域自动站资料和日本葵花-8号静止卫星资料,对2016年4—9月甘肃省陇东南地区出现的43次强对流天气过程进行分析,确立了强对流云团识别指标、追踪方法及预报指标。Wilson和Schreiber(1986)利用多普勒天气雷达识别出边界层辐合线,并发现其大多出现在雷暴强回波移动方向前方0.5~5 km宽的区域,辐合线长度在十到几百公里之间,在其上可能引发新的风暴或加强原有的风暴。Kumjian和Ryzhkov(2008)使用天气雷达的弱回波区、中气旋、基于雷达反射率的垂直积分参数和双极化特征来识别和区分强风暴和非强风暴。相比之下,由于近年来在时空采样方面的改进,卫星遥感观测已越来越多应用于强风暴顶部探测(Gravelle et al., 2016),包括云顶快速冷却、异常云顶流场特征(强散度和正负涡度)、过冲风暴顶以及云砧以上卷云羽有关的其他特征(Mecikalski and Bedka, 2006),这些特征均与强风暴内的强烈上升运动有关。在卫星图像中,这些特征往往是强风暴发展的有力证据,为风暴发展的追踪及分类提供了有效的帮助。

(3) 气溶胶-云-降水相互作用。气溶胶会引起大气加热率廓线、地面感热和潜热通量发生一定程度改变,进而对云和降水过程产生显著影响。Gu等(2006)

模拟发现东亚地区边界层气溶胶的辐射效应抑制了热带对流,且边界层温度和湿度可有效控制对流有效位能(Donner and Phillips, 2003)。不论是边界层对流还是深对流单元,其能量最终来源于地表的加热和水分(Medeiros et al., 2005)。因此,边界层可以影响到深对流,尤其是存有吸收性气溶胶的时候,边界层以上的对流有效位能将增强(Wang et al., 2013)。故气溶胶廓线对深对流发生及发展均能产生较为深远的影响,同时在对流发展的前期影响其他气象因子,从而改变对流云发展的触发时间及强度。因此,气溶胶廓线观测对深对流系统预报也有着重要作用。

越来越多的观测和数值模拟研究表明,气溶胶的变化对地表太阳辐射、大气边界层、大气稳定度以及区域强降水等产生重要影响(Lee et al., 2016; Guo et al., 2017),如Zheng等(2020)利用近10 a的地面降水和气溶胶观测资料分析发现,北京城市地区的降水在污染日出现的时间比清洁日要早得多,高峰时间提前1~2 h。Zhang等(2020)通过数值模拟发现,较高的气溶胶含量和由此产生的暖云反射率增加,使得地面温度降低,大气趋于更稳定,从而抑制了组织良好的对流系统的发生,导致中国南部4月降雨量减少。Lee等(2016)研究表明,在气溶胶辐射效应强于气溶胶微物理效应的情况下,对流和降水受到抑制,而在气溶胶微物理效应强于气溶胶辐射效应的情况下,对流加强和降水增加。

前人的研究成果提供了大量对流天气触发的大气条件及结构特征,综合天-空-地基主被动遥感观测及地基大气参数观测,能够实现对对流天气的实时监测。基于长期积累的观测数据可总结出对流天气的前期信号,为进一步开展适应性观测试验及观测站网评估提供坚实的观测研究基础。

1.1.2 针对中尺度对流天气系统前期信号的观测试验

20世纪80年代起,美国的许多野外观测试验中,包括美国中部风暴区域初步试验(Preliminary Regional Experiment for STORM-Central, PRE-STORM),逐步开始使用固定或移动设备释放间隔较近的无线电探空仪来了解平原地区的对流和对流触发环境(Cunning, 1986)。2002年开始的国际水工程项目(The International H₂O Project in 2022, IHOP_2002)对水汽的三维结构及时空变化进行了观测,用于更好地理解水汽条件对对流过程的影响(Weckwerth et al., 2004)。2013年美国中部大平原开展了中尺度可预报性试验(Mesoscale Predictability Experiment, MPEX),其主要目标为研究上游、风暴前中尺度和次天气尺度环境特征对区域尺度对流风暴数值预报的影响,并针对孤立的深对流风暴,研究环境对其的增强效应,以及这些效应对对流

尺度动力学和可预测性的反馈(Trapp et al., 2016)。2015年美国西部开展的夜间平原高架对流科学试验(Plains Elevated Convection at Night, PECAN),同样采用了移动探空小组对对流云触发前期的大气环境及其垂直结构进行了探测分析。Hitchcock等(2019)利用该试验数据,分析了15个中尺度对流系统发生前后大气廓线的变化,发现在不稳定性增强的情况下,相当位温的剖面往往随时间迅速演变,在可能中性的情况下则不然,同时在不稳定性增强的情况下,高层的水汽含量和水汽平流比其潜在的中性对应层更高。

另外,在欧洲同样开展过许多类似的观测试验。2006年在德国开展的对流单体预报、识别及追踪试验(Prediction, Identification and Tracking of Convective Cells, PRINCE),利用了拉曼激光雷达、C波段多普勒雷达、测风雷达、无线电探空仪及机载下投式探空仪等垂直探测手段,研究了对流触发前期的大气背景、大气垂直结构。Groenemeijer等(2009)通过试验数据发现了对流云发展中的下沉气流的变化。2007年在欧洲中部开展的对流降水和地形降水研究(Convective and Orographically-induced Precipitation Study, COPS)是第一个有关低矮山区对流降水的世界气象研究项目,试验涵盖了水汽激光雷达、温度激光雷达、测风激光雷达及探空、同步飞机观测、地面观测、GPS水汽柱总量、卫星观测等多源观测资料。Behrendt等(2011)通过开展野外科学观测试验发现,热力驱动的环流系统在局地形成了辐合区,大尺度辐合可能同时叠加在其上,在充足的水汽条件和上升运动条件下,随之而来的潜热释放总体上为辐合区的维持带来正反馈,而水汽场的差异导致对流抑制的差异,进而使得山脉上空的对流发展为较浅且稀疏的对流云系,而固定的辐合带区域不断地将感热和潜热输送到对流触发区域从很大程度上决定了对流云的产生。2012年在科西嘉岛开展的地中海水循环试验(Hydrological cycle in the Mediterranean Experiment, HyMex)同样发现了热力驱动的山谷风环流和大尺度平流均可以产生水汽输送,形成高湿层,从而导致了山脉上下的积分水汽含量变化。该试验还发现对流前大气条件的空间不均匀性及其演变是影响深厚对流系统时空分布的关键因素(Adler et al., 2016)。

大量研究表明加强上游观测对于短期灾害性天气预报的潜在价值。例如, Benjamin等(2004)讨论了美国国家海洋和大气局风廓线雷达网所提供的风速风向观测能力对改进快速循环同化系统(Rapid Update Cycle, RUC)的短期预报方面的价值。Benjamin等(2010)进一步讨论了各种观测数据集(包括飞机、风廓线、无线电探空仪等)在改善RUC中的短期(3~12 h)预报方面

的相对价值,尤其是无线电探空仪在改善12 h短时预报中的价值。Roebber等(2008)发现对于美国西北部15 km的降水预测而言,中尺度可预报性与大尺度观测数据质量密切相关。Schumacher(2011)发现长寿命的中尺度对流系统集成预报结果对上游地区的位势高度和风观测非常敏感。Wandishin等(2008)进一步强调了为提高中尺度对流系统的可预报性而需大力改进中尺度观测的必要性。因此,开展科学观测试验仍是改进中尺度对流系统预报技术的重要途径。

1.2 适应性观测方法的理论与应用研究

适应性观测是一种结合预报与观测同化来获得数值模式初始值的方法(Snyder, 1996),其基本思路为:(1) 在关注区域内识别对预报影响较大的区域,即敏感区;(2) 在敏感区进行加强观测(或称目标观测);(3) 同化加强观测资料以获得更接近真实情况的模式初始场,从而改善预报效果。学者们已围绕适应性观测问题开展了大量的理论和应用研究,为本文第2节提出的适应性观测构想奠定了坚实基础。

1.2.1 观测敏感区识别

敏感区的识别是适应性观测的核心,也是适应性观测研究的重点之一。敏感区识别准确与否主要取决于两个因素:一是天气系统本身的动力学特性,该因素主要决定初始误差的增长特征;二是初始条件的不确定性,即初始分析。对于同一天气系统,观测敏感区并非固定不变,其依赖于不断变化的天气形势和预报验证区的位置和范围。观测敏感区的确定通常基于:(1) 初始误差较大或能够快速增长;(2) 加强观测资料的有效同化能够减小分析误差;(3) 通过一次或连续多次实施适应性观测并同化,可以减小确定性预报验证区域的预报误差。早期敏感区识别方法主要通过主观经验方法确定(Burpee et al., 1996),随着研究不断深入和外场观测试验的实施,气象学家从分析误差(分析敏感性)和预报误差(观测敏感性)两个角度提出了多种识别观测敏感区的方法(Majumdar, 2016)。

分析敏感性方法假定大气运动状态的时间演变过程中,线性化的动力学方程能够准确反映预报误差的非线性传播机制。分析敏感性方法主要包括奇异向量法(Singular vectors, SVs) (Palmer et al., 1998)、伴随敏感性法(Langland et al., 1999)等。以往适应性观测方法大都假设预报误差动力学传播的线性近似来确定观测敏感区,如SVs只能刻画非线性模式中充分小的初始误差的短期发展,而不能揭示非线性对初始误差增长的影响。为了克服SVs不能处理非线性过程的局限性,Mu等(2003)首次将条件非线性最优扰动方法

引入到目标观测的研究中,进而有效捕获预报时刻最大非线性发展的初始扰动。

观测敏感性方法不仅考虑了分析的不确定性,同时将观测资料和资料同化方案整合到适应观测方法中,此类方法大都采用集合方法。比如,集合转换卡尔曼滤波方法(Ensemble Transform Kalman Filter, ETKF)利用资料同化(Bishop et al., 1999; 2001)系统,预估实施目标观测后,验证区域内预报误差方差(信号方差)的减小程度,进而确定目标敏感区。又如美国冬季风暴监测试验(WSR)采用ETKF方法(Szunyogh et al., 2000),MPEX试验采用集合敏感性方法(Weisman et al., 2015)。此类方法还包括集合卡曼滤波方法(Ensemble Kalman filter, EnKF) (Hamill and Snyder, 2002)和集合敏感性方法(Ancell and Hakim, 2007)等。此类方法一方面可以借助集合预报隐式地包含了预报误差随天气形势变化(即流变或流依赖特征)信息;另一方面,同化过程考虑了资料的影响,且同化系统不需要伴随系统,在成熟业务系统中,所需计算机资源相对较少。但是,基于集合估计的适应性观测也存在一些不足之处,如由于集合成员样本数的限制,必然存在预报误差协方差矩阵不满秩问题,这将导致不能获取预报误差全部信息等困难。

1.2.2 观测敏感区及敏感要素评估

根据适应性观测试验的思路,在敏感区投入真实观测无疑是检验不同观测方案优劣和提高预报准确率的有效手段。然而,由于观测仪器的调度较为困难、成本较高等问题,依此开展适应性观测试验的难度较大。而利用观测模拟试验来研究观测对预报误差敏感性的方法则可以有效代替真实观测来验证敏感区和敏感要素对预报结果的影响,这不仅大大降低了成本,而且能够辅助指导观测网络的科学布设。这种评估观测对预报贡献的方法主要包括:观测系统模拟试验(Observing System Simulation Experiments, OSSE)、观测系统试验(Observing System Experiments, OSEs)、基于伴随的预报对观测的敏感性分析(Forecast Sensitivity to Observations, FSO) (Baker and Daley, 2000; Langland and Baker, 2004)等。

集合敏感性分析方法通过开展大量OSSE试验来定量评估不同位置的初始条件误差对预报的影响,以有效验证初始条件误差的增长和天气过程的可预报性。传统的观测评估OSEs,通过增加或减去特定的观测来评估其对预报准确性的影响。与OSSE试验相似,这必然涉及大量试验才能得到准确的敏感要素和敏感区,而基于伴随的预报对观测的敏感性方法FSO (Baker and Daley, 2000),则灵活高效得多,其在科学研

究和业务系统中应用广泛。Langland 和 Baker (2004) 比较了观测对美国海军作战全球大气预报系统 24 h 和 36 h 预报的影响, 以及不同季节观测贡献的差异。Gelaro (2009) 对 OSEs 和第五代 Goddard 地球观测系统大气同化系统伴随诊断方法做了详细对比, 结果表明尽管二者在原理和方法上存在重大差异, 但对大多数观测子集在减少 24 h 预报误差的估计上比较一致。Mallick 等(2017)评估了不同卫星反演的风场观测对全球 24 h 预报误差的作用, 为卫星观测资料的应用提出建议。Lorenz 和 Marriott (2014) 将 FSO 系统集成到英国气象局全球数值天气预报系统中, 将试验计算结果同 Cardinali (2009) 的结果进行比较, 验证了该系统的可行性和有效性, 之后 Joo 等(2013)使用该系统评估了卫星数据的相对影响。Jung 等(2013)首次应用中尺度天气预报模式数据同化系统(The Weather Research and Forecasting-Data Assimilation System, WRF-DA)对应的 FSO 诊断工具 WRFDA-FSO 研究了有限区

域模型框架内误差协方差参数敏感性, 与 OSEs 对比评估了东亚及西北太平洋地区 2008 年台风季节的观测的贡献。

1.2.3 适应性观测野外科学试验

适应性观测野外科学试验大都针对天气尺度高影响天气系统的 1~4 d 预报不确定性开展, 如 1997 年开展多国锋面和大西洋风暴轨迹野外观测试验 (Fronts and Atlantic Storm-Track EXperiment, FASTEX) (Snyder 1996; Joly et al., 1999), 美国冬季风暴监测试验 (WSR) (Szunyogh et al., 2000), 观测系统研究与可预报性试验(The Observing System Research and Predictability Experiment, THORPEX) 计划的大西洋 THORPEX 区域计划(A-TReC)项目试验(Mansfield et al., 2005; Parsons et al., 2017), 2003 年在欧洲大陆针对高影响天气开展的 A-TReC 试验(Rabier et al., 2008)。其他代表性的针对全球地区不同天气系统所开展的适应性观测试验空间分布见图 1。

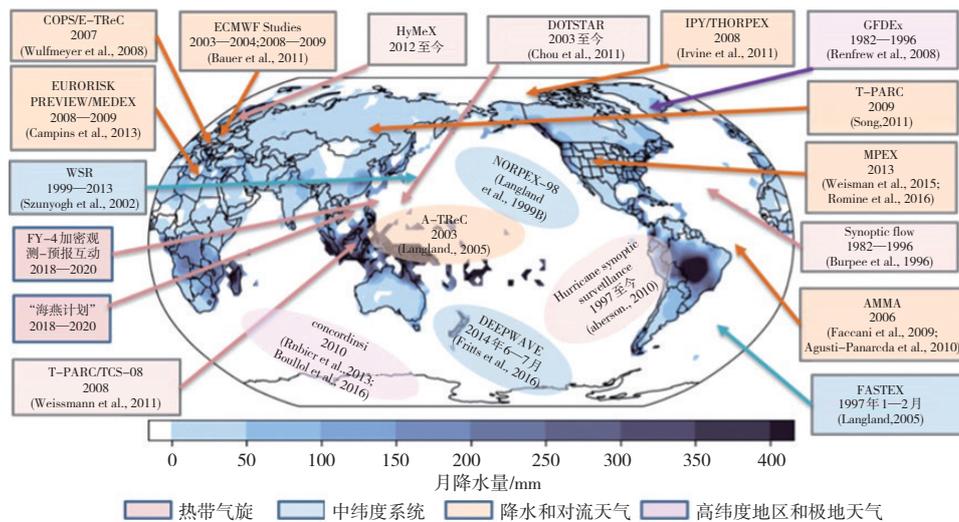


图 1 全球针对不同类型灾害性天气开展的适应性观测试验分布图

Fig.1 Global distribution of major field campaigns launched for adaptive observation strategy, which was mainly designed to improve the prediction skill of several types of severe storms

许多研究总结了适应性观测野外科学试验的相关经验。雷荔傑和谈哲敏(2008)综述几种主要的适应性观测方法或策略的相关理论, 从观测误差、同化方案、模式误差等方面讨论了适应性观测对预报改进的影响因素。Majumdar 等(2011)对过去十几年国际上适应性观测的研究和外场试验进行了总结分析。穆穆(2013)讨论了目前国际上在大气和海洋科学研究领域目标观测的现状与发展。

在我国适应性观测在台风预报技术提升方面有较广泛的应用。如田伟红(2006)针对 2003 年 13 号台风“杜鹃”, 设计了利用 ETKF 方法进行适应性观测试验的分析系统, 并使用该系统进行了简单试验。而基于 ETKF 理论的

适应性观测的基础是大、中尺度天气系统预报误差及其传播机制。通过试验表明, 所搭建的区域预报系统估计得到的预报误差协方差减少最多的区域与深层平均风方法得到的敏感区位置存在相同的地方。马旭林(2008)结合多种集合预报产品, 搭建了针对我国典型高影响天气的天气系统特征的适应性观测敏感区估算系统(ETKF-M2008)。然而, 我国针对陆地中尺度对流系统所开展的适应性观测试验仍然偏少。

尽管数值天气预报模式在对流精准预报方面具有很大贡献, 但其预报准确性通常在几个小时内会迅速下降(Weygandt et al., 2004)。造成这种现象的一个重要原因是环境场的分析误差。众所周知, 对流风暴

的特征与其所处的环境有着密切联系,因此在模式中准确地表达和描述初始场环境对于准确预报对流天气具有重要意义(Benjamin et al., 2010)。Fabry (2010)指出无线电探空仪得到的温度、风和湿度观测(尤其是中层湿度)对4 km网格上0~6 h的降水预报有很大影响。

1.3 基于适应性观测的观测站网评估

气象观测网的科学布局能够有效提高数值预报的准确率。OSSE是一种用来评估新的观测系统配置合理性、分析模拟观测资料效果的有效方式(Arnold and Dey, 1986)。适应性观测的一个主要应用在于利用数值模拟方法指导气象观测站的合理布局,这也是当前国际流行的一种布站方法(雷荔傑和谈哲敏, 2008)。许多研究利用适应性观测试验方法,考虑初始条件的不确定性并分析天气系统的流体力学特征,从而确定对数值预报产生显著影响的初始场敏感区,并在敏感区内进行加强观测。相比于传统的平均插值法,适应性观测方法更加严谨且物理意义更加明确,虽然该方法只能指导敏感要素观测站点的合理布网(张宇等, 2012)。王佳和陈耀登(2019)采用FSO方法构建了FSO系统,有效评估了2018年7—8月国家级地面自动站、探空和风廓线雷达观测对华东区域12 h预报的影响,并初步讨论台风预报对观测的敏感性。

综上所述,通过开展大量的OSSE试验或采取预报敏感性试验方案,并在过程中引入统计分析,能在一定程度上得出观测敏感区的统计特征,并对当前观测站网的布局进行有效评估。通过开展适应性观测试验,不仅能够提供局部加密的观测资料,对深入解析中尺度对流系统发生及发展提供重要观测支撑,同时也可以进一步验证新的站网布局的可行性和可靠性。因此,发展观测与模式互动的适应性观测方法能够有效提高中尺度对流天气的预报技术、为观测站网的科学布局提供指导,具有极高的研究价值及应用价值。

2 适应性观测试验方案构想

2.1 晴空-成云-致雨无缝隙对流层低层大气垂直观测系统

研究表明,产生降水的对流云系统不仅包括孤立的积云,也包括许多和大尺度环流系统相联系的中尺度对流系统;而降水所产生的冷池或锋面系统所产生的阵风锋也会激发新的对流云。因此,与对流系统相关的云系在多尺度相互作用的影响下,其发展过程的不同阶段往往呈现各种不同形态(Chen et al., 2020)。但驱动这些变化的云下大气热动力特征及其演变机制尚不清晰,亟需在中尺度对流频发的重点区域构建中尺度大气垂直观测系统。

目前我国日常业务的探空气球观测只能实现08:00(北京时,下同)和20:00一天两次的高空垂直观测,时空观测密度远远满足不了预报精确度的需要。而风廓线雷达、测风激光雷达、微波辐射计等大气主、被动遥感垂直探测设备具有连续观测、自动化程度高等优势,是提高灾害性天气监测能力和短期数值天气预报水平的重要手段。这些垂直探测设备可提供温度、湿度、水平风速、风向、垂直速度、折射率结构常数等,以及不同高度的垂直风切变产品,帮助初步分析固定区域的边界层垂直湍流混合等热动力特征。同时,也能为适应性观测试验的开展提供可能的数据保障。

超大城市下垫面复杂,由于地形、城市热岛、气溶胶污染等多种因素影响,大城市暴雨等对流天气的预报仍然存在短板。通过合理整合大城市观测资源,并集成天、空、地等多源观测资料,可以在对流天气系统触发前后形成从晴空-成云-致雨全过程的无缝隙观测平台。在对流触发前的晴空到有云阶段,可以借助L波段探空、风廓线雷达、微波辐射计、云雷达等大气廓线观测业务组网观测设备,结合加强观测试验获得的气溶胶廓线,构建对流层低层大气垂直观测系统(Lower Tropospheric Observational System, LOTOS),实现对流层低层大气温度、气压、湿度、风、气溶胶和水凝物廓线时空连续的组网观测。而在积云、高积云或层积云等出现后,可以借助云雷达和风云4号或葵花8/9号等静止气象卫星,获取云宏、微观特性,并动态识别、追踪对流云的合并和分裂过程,获得对流云从初生到成熟再到消亡等整个生命周期的云演变过程。在对流触发后,可以借助成熟的天气雷达监测系统,结合静止气象卫星实现从云滴到雨滴的云水(云雨)的观测获得云和降水的宏、微观物理特征及其演变过程。最终构建一个从晴空到成云致雨全过程的无缝隙大气观测平台(图2)。

该平台不仅可为对流天气的区域监测预警提供重要的观测支撑,而且对于适应性观测方案的设计,当确定的观测敏感区与LOTOS存在重合区域时,相应区域内属于LOTOS的大气垂直廓线、气溶胶和云雨探测也能够成为适应性观测中同化资料的组成部分,从而有效改善模式初值场。

2.2 与对流云观测相适应的金字塔形低层大气垂直观测系统

大气动力条件在对流触发中发挥着至关重要的作用,往往能够驱动对流云的发展和演变。随着更精细化的观测系统的布设,构建涵盖大气垂直探测的中尺度观测网成为了对流等灾害性天气监测的重要环节。本文提出了利用风廓线探测反演区域辐合、

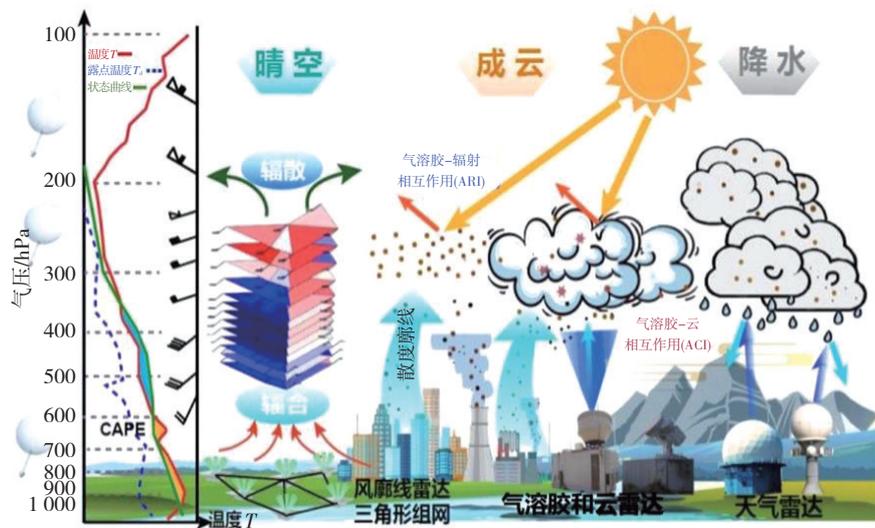


图2 由无线电探空、风廓线雷达中尺度观测网和云雷达以及天气雷达组成的从晴空-云-降水无缝隙大气垂直廓线观测系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of the observational network comprised of a suite of instruments such as radiosonde, radar wind profiler mesonet, cloud radar, and precipitation radar from clear sky to cloudy sky until precipitation

辐散及垂直速度等大气动力参数的中尺度网络观测新模式。

结合中国气象局目前大气垂直廓线观测网络条件,可以由相邻两个站点间距不超过 100 km 的三个不共线的风廓线雷达构成三角形观测网格,从而实现在云团经过该三角形网格时对其大气动力垂直结构的监测。而当区域内存在 5 个风廓线雷达站点时,则可以组成金字塔形对流层低层大气垂直观测系统(Pyramid-shaped Lower Tropospheric Observational System, PLOTOS),详见图 3。该系统可根据云的大小和位置调用观测网络中任意三个点组成新的动态三角形网格,并利用三角形法(Bellamy, 1949)计算三角形区域内的大气散度、涡度和垂直速度剖面。

以图 3 为例,根据云团的位置和大小,利用 5 部风廓线雷达可构建与云相适应的 8 个动态三角形。按照三角形面积膨胀法,给定任意一个三角形三个顶点经纬度坐标和地球半径,可算出该三角形三边的位移分量 $(\Delta x_i, \Delta y_i)(i=1, 2, 3)$; 然后结合风廓线雷达观测范围内某一高度处 3 个站点的水平风速 $(u_i, v_i)(i=1, 2, 3)$, 可计算出三角形面积平均的水平散度 (D) 和相对涡度 (ζ) , 其计算公式如下

$$D = \frac{(u_2 - u_1)(\Delta y_3 - \Delta y_1) - (u_3 - u_1)(\Delta y_2 - \Delta y_1) + (\Delta x_2 - \Delta x_1)(v_3 - v_1) - (\Delta x_3 - \Delta x_1)(v_2 - v_1)}{(\Delta x_2 - \Delta x_1)(\Delta y_3 - \Delta y_1) - (\Delta x_3 - \Delta x_1)(\Delta y_2 - \Delta y_1)} \quad (1)$$

$$\zeta = \frac{(v_2 - v_1)(\Delta y_3 - \Delta y_1) - (v_3 - v_1)(\Delta y_2 - \Delta y_1) - (\Delta x_2 - \Delta x_1)(u_3 - u_1) + (\Delta x_3 - \Delta x_1)(u_2 - u_1)}{(\Delta x_2 - \Delta x_1)(\Delta y_3 - \Delta y_1) - (\Delta x_3 - \Delta x_1)(\Delta y_2 - \Delta y_1)} \quad (2)$$

在此基础上,在对空气密度做滞弹性近似的假设

条件下,任意三角形区域上空的大气垂直速度 (w) , 可视为垂直方向的积分散度)可利用大气连续方程解算得到

$$D + \frac{\partial \rho w}{\rho \partial z} = 0 \quad (3)$$

其中, z 指海拔高度(单位:m), ρ 指大气密度(单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), 可利用探空温度计算的虚温求得。考虑到风廓线雷达在近地面观测存在很大误差,此处需假定离地 0.5 km 高度处的 w 为 0。

利用上述公式遍历 PLOTUS 系统 8 个三角形,可得到该区域上空任意高度上动态三角形网格内的水平散度和相对涡度,进而给出该区域上空时空连续的大气辐合、辐散和垂直速度等动力参数廓线产品。该产品可用于对流风暴前期信号的监测。而通过结合深度学习等灾害性天气预警技术,该产品还能够有效服务于灾害性天气的短临预警(Wu et al., 2023)。

2.3 观测与预报互动的适应性观测试验

本文以京津冀地区为例作为初步探索,期望通过适应性观测试验,在中尺度对流天气位置及强度预报技术提升方面取得一定的进展。每年 7 月伴随着副热带高压(以下简称副高)北抬,副高外围低空暖湿平流输送使不稳定能量积聚,在外围西风槽影响下,容易沿地形或地面辐合线触发中尺度对流系统,并在西南气流的引导下继续向东北方向移动(图 4)。在这种天气形势影响下,京津冀地区对流天气多发,对流降水占到所有强降水过程中的 30%,其受到的影响因素多、预报难度大。针对上述典型天气系统引发的对流降水,本文提出了观测与模式互动的适应性观测新思路。

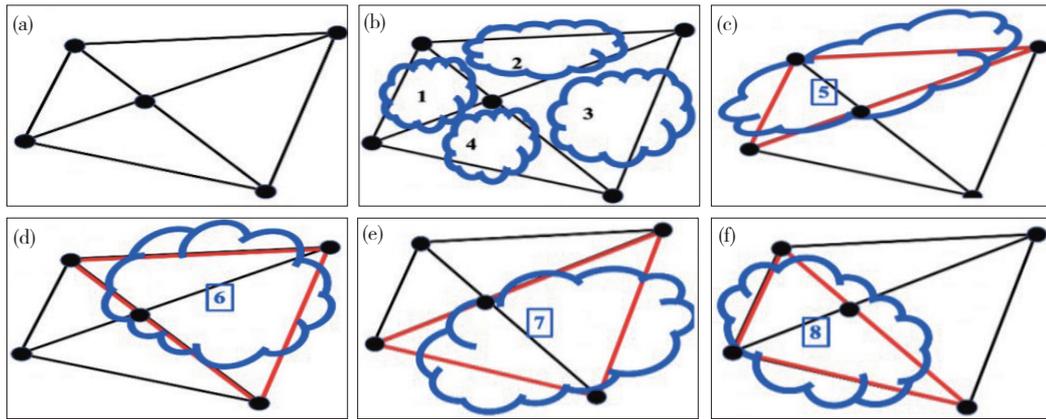


图3 由5个风廓线雷达站点组成的金字塔形对流层低层大气垂直观测系统(PLOTOS) (a)以及根据云的大小形态分别采取8个不同三角形方案计算大气动力参数(b—f)示意图

Fig.3 Schematic of (a) Paramid-shaped LOrwer Tropospheric Observational System (PLOTOS) and (b—f) denote the eight triangles constructed to calculate the vertical profiles of atmospheric dynamical variables

2.3.1 针对副高外围对流天气系统的适应性观测思路

结合京津冀地区 PLOTOS 观测资料对对流触发前期信号进行系统分析,得到对流性天气触发的频发区及影响对流触发的大气要素。针对不同天气系统归纳统计相应“参考大气”廓线,进一步计算对流触发区域、强降水上游区域等地大气温度、湿度、风切变、湍流、辐合、辐散、垂直速度等大气热动力参数的垂直结构特征,并将大气温、湿、风等观测资料加入到快速循环更新同化系统中,以提高对流天气预报的准确性。

图4给出针对副高外围西风槽中尺度对流系统观测与模式互动示意图,利用华北地区空间分辨率为1 km、时间分辨率为1 h的分析预报循环更新系统(CMA-meso)和WRF快速同化循环系统开展对流天气预报,提前12 h得到强降水的发生时刻和位置预报。当预报的对流天气系统落入研究区域时,利用

CMA-meso 区域集合产品以及ETKF方法寻找京津冀地区对流系统预报的观测敏感区。根据科学试验实施的可行性综合考虑敏感区及目标观测时间指导外场移动试验观测车进行适应性观测,将得到的移动观测进行实时同化预报,以改进京津冀地区夏季典型天气系统影响下的对流天气系统预报。

移动观测平台能够提供连续、高时间分辨率的大气垂直廓线观测,大大弥补了业务站网观测疏密不均、对流天气触发及发展的重点区域偶然性大等因素所导致的观测网难以捕捉的短板,具有极强的灵活性。通过将这些宝贵的大气垂直廓线观测资料输入快速循环更新系统中,形成观测与模式互动的适应性观测预报,很可能在一定程度上提高灾害性对流天气触发位置及强度的预报和预警准确度。

利用CMA-meso区域模式和WRF模式指导适应

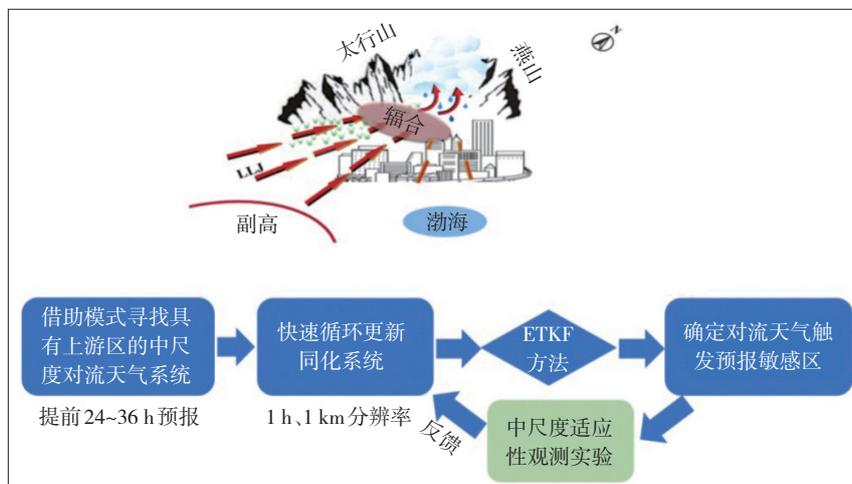


图4 针对副高外围西风槽中尺度对流系统观测与模式互动示意图 (北京城区的上游区位于河北中南部平原地区)

Fig.4 Schematic diagram of observation and model interaction for the mesoscale convective system around the western trough of the subtropical high, in which upstream regions for urban areas of Beijing are mainly located in the central and southern plain regions of Hebei province

性观测,试验技术路线如图5所示,假设 t_0 时刻的预报显示 t_3 时有对流天气发生,试验中同化两种数据源:(1) 现有的地面、天气雷达、探空和风廓线雷达等气象观测业务站网资料;(2) 通过移动观测车观测得到的温湿廓线资料。通过集合估计方法,将同化两种观测数据源后得到的预报协方差与不同化移动观测资料的预报协方差之差定义为信号,这种信号的变化可以认为是一种随机过程,可用其方差表示。通过ETKF方法能够快速估算出不同组合观测方案的分析误差协方差,从而得到信号方差。在比较每个观测方案的信号方差之后,找到最优的观测方案,结合静止气象卫星提供的对流云发生发展的前期信号,从而确定对流天气预报的敏感区。

此时,模式工作组将敏感区位置信息及时反馈给观测组,并建议实施移动观测时间为 t_1 (即01:00 UTC)时刻,实时指导移动观测工作组在后续时段内在敏感区开展适应性移动观测。适应性观测工作组于 t_0 开始驾车,在 t_1 时刻赶到敏感区,开始敏感区移动观测,移动观测所得到的数据实时传输到服务器提供同化系统用于改进 t_3 时刻的预报。若确定 t_1 、 t_2 时刻的敏感区分别位于图5的第3、4个三角形中,第一组观测人员将在 t_1 时刻前将一辆搭载微波辐射计(或拉曼激光雷

达)和测风激光雷达的移动观测车停放至 t_1 时刻敏感区内进行大气垂直结构的加密观测,而另一组观测人员则同时驾驶第二辆移动观测车在下游 t_2 时刻敏感区附近待命。这种特种探空的移动观测平台可提供从地面到高空10 km区域内温度、相对湿度、水汽密度和垂直风廓线等实时观测数据,用其分析对流触发区域前期的大气水汽、不稳定性等条件。

适应性观测期间,同化分析预报系统每天预报4次(间隔6 h),需要CMA_GFS全球模式提供背景场和侧边界条件。通过模式同化敏感区的加密观测和已有观测资料形成模式预报的初始场,从而达到改进模式预报的目的。事后再做一组使用常规业务气象观测资料的同化预报试验,与增加移动观测的预报试验结果的对流系统发生时刻和位置进行综合对比分析,用来验证适应性移动观测对对流天气预报的影响。

在观测过程中,观测人员将在模式预报工作组的快速循环更新预报系统指导下开展观测试验。具体来说,基于不断变化的风暴运动特征和路径分布等要素进行部署决策。便携式计算机被用来实时获取激光雷达数据并进行质量控制,随后将数据传输给模式组,使其同化到快速循环更新预报系统中以修正对流系统下游 t_2 时刻敏感区的位置,第二辆移动观测车将

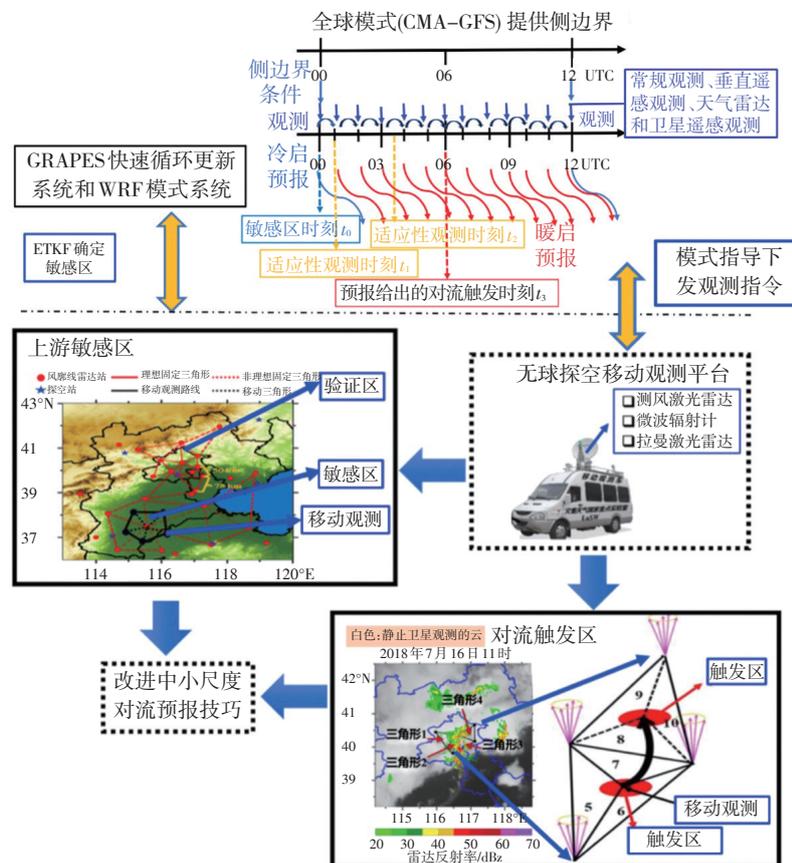


图5 京津冀地区夏季对流适应性观测技术路线示意图

Fig.5 Schematic diagram showing how the targeted observational experiment is conducted for the summertime convection system over the Jing-Jin-Ji area

立即调整观测地点并开展观测。将移动观测车的位置与风廓线雷达站点结合,即可构建更细的三角形网格,实现边界层辐合、辐散和垂直速度等大气动力条件参数的精细化观测,精准追踪对流触发前期大气垂直廓线变化以及对流触发后大气环境场的扰动,实现观测-预报互动的对流天气适应性观测。

2.3.2 个例分析

2022年7—8月期间,中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室联合中国气象局地球系统数值预报中心、河北省气象台和邢台市气象局等单位在河北中南部平原地区开展了中尺度对流系统的适应性观测试验。具体观测平台包括:1)两个由车载测风激光雷达、微波辐射计、云雷达和X波段天气雷达组成的

无球探空观测平台;2)一个由云雷达和风廓线雷达构成的移动观测方舱;3)京津冀地区地基大气遥感垂直观测网络以及常规气象站网。使用的数值模式为中国气象局地球系统数值预报中心自主研发的中尺度模式CMA-Meso_3 km (V5.1)和空间分辨率为1 km、时间分辨率为1 h的分析预报循环更新系统。按照上文所提出的适应性观测思路,开展了观测-预报互动的对流适应性观测试验。

图6显示2022年8月8日一个无球探空观测平台获取的加密风廓线观测资料影响中尺度对流系统产生降水回波的预报效果,从同化对比试验结果看,风廓线观测资料对河北中南部地区中尺度对流系统产生的强降水回波预报有正贡献。

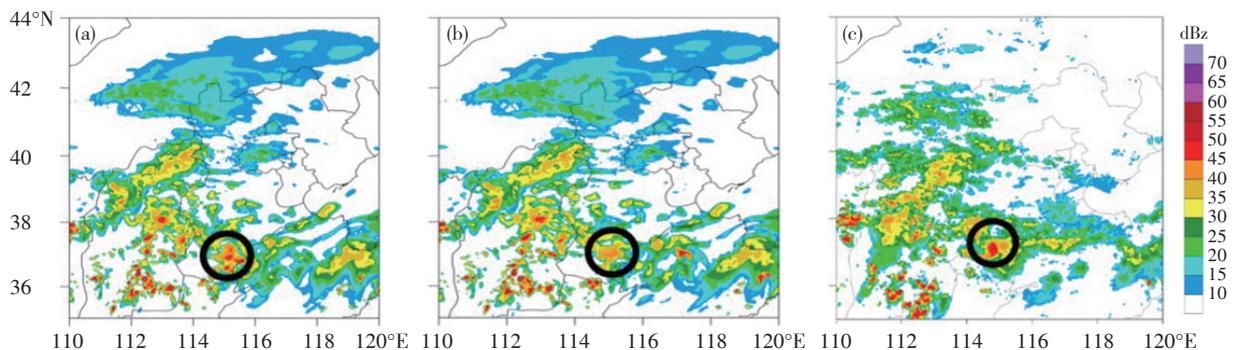


图6 2022年8月8日河北中南部地区适应性观测试验期间08时起报的同化风廓线资料(a)、未同化风廓线资料(b)的中尺度对流系统雷达组合反射率6 h 预报结果以及14时观测结果(c) (黑色圆圈代表河北中南部地区中尺度对流系统产生的强降水回波)

Fig.6 6-h forecast of radar reflectivity for a mesoscale convective system in the central and southern part of Hebei province during the targeted observational experiment (a) with assimilation of wind profiler measurement, (b) without assimilation of wind profiler measurement, (c) denotes the composite radar reflectivity from the weather radar network at 14:00 BT on 8 August 2022. The black circle represents the strong precipitation echoes generated by the mesoscale convective system in the central and southern regions of Hebei Province

3 大城市对流天气短临预报预警面临的重大挑战

在高排放和全球变暖双重叠加影响下,全球主要大城市区域的雷暴大风、对流等极端天气事件多发频发。按照Clausius-Clapeyron方程,大气温度每增加1°C,大气的持水能力将增加7%,极端降水事件也将等比例增加(Trenberth et al., 2003)。一般而言,雷暴发生要求具备大气抬升、条件不稳定和充足水汽等条件,而水汽须通过气溶胶形成的凝结核和冰核的作用才能成云致雨,由于难以分离气象条件和气溶胶对降水的影响,使得降水对气溶胶的响应估算存在较大不确定性。目前我国城市人口已超过60%,城市化进程快速发展导致土地利用类型和地面粗糙度均发生显著改变,进而出现城市“热岛效应”,形成大气次级环流并破坏城市边界层的热力稳定度,进而显著改变城市上空云的形成演变机制,出现城市“雨岛效应”,导致城市

内涝。

这其中,中尺度对流系统是城市极端降水事件的重要“制造者”之一,其触发多发生在距离地面1~2 km的边界层内,因此密度更高、更精细的云下大气热动力结构观测对于理解对流云的触发、发展和演变过程中边界层与云之间的复杂相互作用机制至关重要。我国已初步建成由自动气象站、多种波段天气雷达、探空等组成的现代气象观测网,同时也具备一系列国际一流的极轨和静止气象卫星,具有较好反演大气温度、湿度等垂直廓线信息的能力。这对深入认知边界层辐合线、对流有效位能、风切变、低空急流、大气可降水等对流前期信号具有极大价值。

北京2008年夏季奥运会天气预测示范项目的主要目标是建立北京地区精准对流天气短临预报系统,所采用的技术包括:雷达回波外推法、数值模型、数值模型和外推法融合,以及包含预报员经验和知识的短临预报技术。北京周边地区特殊地形使得对流系统

的触发、发展和消散易发生在较短的时间和较小的空间尺度,使得短临预报存在极大挑战。实践证明不同的短临预报系统难以提供一致且稳定的降水预报,而基于预报员对北京地区夏季降水预报经验和知识的方法给出的预报结果往往表现较好。针对未来降水短临预报技术的改进,Wilson等(2010)指出三个方向:一是微观和中尺度物理过程理解上的提高;二是数值模式在短临预报时间和空间尺度上的重大改进;三是边界层风和三维温、湿度场的高分辨率观测。迄今,众多研究已在前两个方向取得一定进展,而现阶段关键的制约因素在于缺乏精细的边界层风和三维温、湿度场观测。当前业务中主要依赖的天气雷达观测系统难以精细刻画从晴空到对流触发阶段的大气热动

力结构演变,而我国大气垂直廓线观测又存在时空分辨率不足的问题,这导致对流系统晴空-成云-致雨过程的无缝隙监测难以实现,造成了对流天气监测“大网捞小鱼”的窘境。

在大气垂直观测条件良好的城市及周边地区构建大气边界层温、湿、风、水凝物和气溶胶等大气垂直廓线融合观测系统是突破这一困境的有效手段之一。利用这些更高密度和分辨率的观测及其组网,能够给出更高时空分辨率的连续大气边界层热动力结构特征,包括连续的对流有效位能,高度解析的散度、涡度和垂直速度廓线等,从而能更好地支撑对流短临监测预警,实现早预警早行动,筑牢城市气象灾害防御第一道防线(图7)。

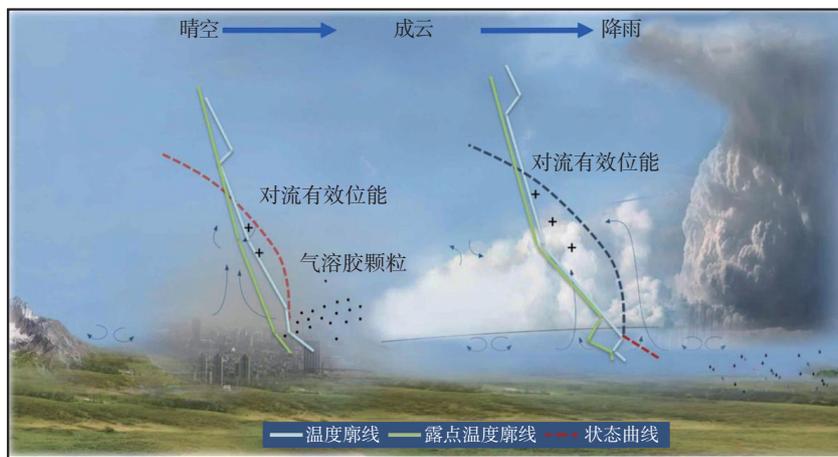


图7 晴空-成云-致雨全过程的大气热动力廓线观测示意图

Fig.7 Schematic diagram showing the seamless observation of atmospheric thermodynamic and dynamic profiles covering the stages ranging from clear-sky, cloud-topped boundary layer and precipitation

4 适应性观测-短临预报-气象保障服务之间的内在联系及建议

我国夏季易受东亚季风和南亚季风影响,高原低涡、西南涡和东北低涡均是影响我国夏季对流天气的系统。近年来,中国气象局正在强力部署和推动气象监测预警补短板工程,其中一个主要的关注点就是提高重点区域的气象要素无缝隙垂直监测能力,以增强突发性、灾害性天气监测与预报预警能力。即便如此,在许多地形复杂、对流多发的大城市区域仍然十分缺乏大气热动力垂直廓线观测。如何科学布局大气垂直廓线观测设备,实现以最小的观测设备投入取得最大预报效果提升,成为当前亟待解决的问题。

由于大城市具有复杂且非均一的下垫面,且城市上空的大气热动力特征参数等廓线信息的空间分布变化相对较大,即便模式能给出准确的敏感区位置,通过移动观测平台探测大气热动力廓线的难度仍然较大,导致进行适应性调整的难度同样很大。因此,

亟需针对发生在城市地区的局地中尺度对流系统开展适应性观测试验,尤其是对于有明显上游区的中尺度对流系统,在大城市上游地区开展适应性观测试验具有重大科学价值和现实意义。

因此,针对影响大城市地区的主要天气尺度和中尺度对流系统,首先需要厘清影响其观测敏感区在什么位置,有哪些敏感要素需要加强观测。而以观测与预报互动为基础的适应性观测技术则成为了行之有效的方案之一。通过大量的个例分析、模拟及实际观测试验统计得到敏感区的易发位置,并将得到的敏感区根据需求进行分级,或可在一定程度上提高我国大城市灾害性天气触发监测预警准确度,并指导超大城市气象观测站点的科学布局。

围绕适应性观测与大城市气象保障服务之间的内在联系,本文基于上述几点思考提出如下建议:

(1) 加强对流前期信号研发力量。开发中尺度湍流、散度廓线产品,支撑对流触发预警预报,深入研究边界层-云耦合、湍流-对流相互作用等物理机制。

(2) 整合应急气象观测设备,在灾害性天气影响较大的重点城市构建 PLOTOS 观测系统,推进集合预报模式指导下的国家-省-市-县四级 PLOTOS 观测指挥体系的建立。

(3) 大力发展快速更新循环同化系统,提高观测数据与同化系统数据交互更新的能力。借助机动观测设施开展大城市中尺度对流天气适应性观测试验,有望解决当前地基遥感垂直观测网络“大网捞小鱼”的难题。

综上所述,为保障我国突发性对流天气预报和预警精度的有效提升,依托现有业务观测网络和移动观测平台,深入理解灾害性天气的触发及演变的物理机制,开展针对性的适应性观测试验应是行之有效的途径之一。尽管这其中仍有大量的科学问题亟待解决,但构建精细化的观测及预报系统、大力开展观测及预报技术研发,加深对灾害性天气的理解,能有效提高灾害性天气的预报和预警水平,从而更好地应对全球变暖大背景下极端天气预报及气候预测的挑战。

中国气象局气象探测中心和北京气象探测中心为本文提供京津冀地区云雷达、风廓线雷达和天气雷达等大气垂直观测数据,国家气象信息中心为本文提供常规气象资料,谨致谢忱!

参考文献 (References):

- 范爱芬,彭霞云,娄小芬,等.2022.秋季台风倒槽特大暴雨的对流特征和预报难点分析[J].暴雨灾害,41(3):298-307. Fan A F, Peng X Y, Lou X F et al. 2022. Analyses of the convection character and forecast difficulty of autumn typhoon inverted trough heavy downpour [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 41(3):298-307 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2022.03.006
- 雷荔嫫,谈哲敏.2008.适应性观测及其策略问题[J].气象科学,28(1):109-118. Lei L L, Tan Z M. 2008. On adaptive observation and adaptive observation strategies [J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 28(1):109-118 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1009-0827.2008.01.019
- 刘梦娟,杨引明.2017.基于风廓线网的散度和涡度计算[J].气象科技进展,7(1):27-32. Liu M J, Yang Y M. 2017. Calculation of horizontal divergence and vorticity using wind profiler network [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 7(1):27-32 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.2095-1973.2017.01.004
- 马旭林.2008.基于集合卡尔曼变换(ETKF)理论的适应性观测研究与应用[D].南京:南京信息工程大学. Ma X L. 2008. Study on the ensemble transform kalman filter-based adaptive observation and applications [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology. doi:10.7666/d.y1257794
- 穆穆.2013.目标观测的方法、现状与发展展望[J].中国科学:地球科学,43(11):1717-1725. Mu M. Present situation and development prospect of objective observation [J]. *Scientia Sinica Terrae*, 43(11):1717-1725 (in Chinese). doi:10.1360/zd-2013-43-11-1717
- 闵锦忠,吴乃庚.2020.近二十年来暴雨和强对流可预报性研究进展[J].大气科学,44(5):1039-1056. Min J Z, Wu N G. 2020. Advances in atmospheric predictability of heavy rain and severe convection [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 44(5):1039-1056 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2003.19186
- 田伟红.2006.集合变换卡尔曼滤波方法在集合预报和适应性观测中的初步应用[D].北京:中国气象科学研究院. Tian W H. 2006. Collection of transform kalman filter method and adaptive observation on collection forecast the preliminary application [D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences
- 王佳,陈耀登.2019.观测资料在华东区域数值预报中的敏感性研究[D].南京:南京信息工程大学. Wang J, Chen Y D. 2019. Sensitivity analysis of observation data in numerical weather prediction over east China [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology. doi:10.27248/d.cnki.gnjqc.2019.000212
- 王璐璐,贾浩松,刘静.2023.一次由边界层冷空气引发的豫南对流性暴雨成因分析[J].暴雨灾害,42(2):134-143. Wang L L, Jia H S, Liu J. 2023. Analysis of a convective rainstorm in southern Henan caused by the cold air from the boundary layer [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 42(2):134-143 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2021-246
- 王小龙,王彤,李映春,等.2022.基于“葵花8号”气象卫星的陇东南地区强对流识别跟踪技术研究[J].沙漠与绿洲气象,16(5):56-61. Wang X L, Wang T, Li Y C et al. 2022. Research on identification and tracking technology of severe convection in Southeast Gansu based on himawari-8 meteorological satellite [J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 16(5):56-61 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2022.05.008
- 张宇,陈德辉,薛纪善,等.2012.湿度因子对适应性观测敏感区估算的影响研究[J].气象学报,70(1):91-100. Zhang Y, Chen D H, Xue J S, et al. 2012. Study of the influence of the humidity factor on estimation in the adaptive observation sensitive region [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 70(1):91-100 (in Chinese). doi:10.11676/qxb2012.008
- Adler B, Kalthoff N, Kohler M, et al. 2016. The variability of water vapour and pre-convective conditions over the mountainous island of Corsica. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 142:335-346. doi:10.1002/qj.2545
- Ancell B, Hakim G J. 2007. Comparing adjoint and ensemble-sensitivity analysis with applications to observation targeting [J]. *Monthly Weather Review*, 135(12):4117-4134. doi:10.1175/2007MWR1904.1
- Arnold C P Jr, Dey C H. 1986. Observing-systems simulation experiments: Past, present, and future [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 67(6):687-695. doi:10.1175/1520-0477(1986)067<0687:OSSE PP>2.0.CO;2
- Baker N L, Daley R. 2007. Observation and background adjoint sensitivity in the adaptive observation-targeting problem [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 126(565):1431-1454. doi:10.1256/smsqj.56510
- Barthlott C, Schipper J W, Kalthoff N, et al. 2010. Model representation of boundary-layer convergence triggering deep convection over complex terrain: A case study from COPS [J]. *Atmospheric Research*, 95(2-3):172-185. doi:10.1016/j.atmosres.2009.09.010
- Behrendt A, Pal S, Aoshima F, et al. 2011. Observation of convection initiation processes with a suite of state-of-the-art research instruments during COPS IOP 8b [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(S1):81-100. doi:10.1002/qj.758
- Bellamy J C. 1949. Objective calculations of divergence, vertical velocity,

- and vorticity [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*,30(2): 45–49. doi:10.1175/1520-0477-30.2.45
- Benjamin S G, Schwartz B E, Szoke E J, et al. 2004. The value of wind profiler data in U.S. weather forecasting [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*,85(12):871–1886. doi:10.1175/BAMS-85-12-1871
- Benjamin S G, Jamison B D, Moninger W R, et al. 2010. Relative short-range forecast impact from aircraft, profiler, radiosonde, VAD, GPS-PW, METAR, and mesonet observations via the RUC hourly assimilation cycle [J]. *Monthly Weather Review*,138(4):1319–1343. doi: 10.1175/2009MWR3097
- Bishop C H, Toth Z. 1999. Ensemble transformation and adaptive observations [J]. *Journal of the atmospheric sciences*,56(11):1748–1765. doi: 10.1175/1520-0469(1999)056<1748:ETAAO>2.0.CO;2
- Bishop C H, Etherton B J, Majumdar S J. 2001. Adaptive sampling with the ensemble transform kalman filter. Part I: Theoretical aspects [J]. *Monthly Weather Review*,129(3):420–436. doi:10.1175/1520-0493(2001)129<0420:ASWTET>2.0.CO;2
- Burpee R W, Franklin J L, Lord S J, et al. 1996. The impact of Omega drop-windsondes on operational hurricane track forecast models [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*,77(5):925–933. doi:10.1175/1520-0477(1996)077<0925:TIOODO>2.0.CO;2
- Byers H R, Rodebush H R. 1948. Causes of thunderstorms of the florida peninsula [J]. *Journal of Atmospheric Sciences*,5(5):275–280. doi: 10.1175/1520-0469(1948)005<0275:COTOTF>2.0.CO;2
- Chen D D, Guo J P, Yao D, et al. 2020. Elucidating the life cycle of warm-season mesoscale convective systems in eastern China from the Himawari-8 geostationary satellite [J]. *Remote Sensing*,12(14):2307. doi:10.3390/rs12142307
- Coniglio M C, Hitchcock S M, Knopfmeier K H. 2016. Impact of assimilating preconvective upsonde observations on short-term forecasts of convection observed during MPEX [J]. *Monthly Weather Review*,144(11): 4301–4325. doi:10.1175/MWR-D-16-0091.1
- Cunning J B. 1986. The oklahoma-kansas preliminary regional experiment for STORM-Central [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*,67(12):1478–1486. doi:10.1175/1520-0477(1986)067<1478:TOK-PRE>2.0.CO;2
- Donner L J, Phillips V T. 2003. Boundary layer control on convective available potential energy: Implications for cumulus parameterization [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*,108(D22):4701. doi:10.1029/2003JD003773
- Fabry F. 2010. For how long should what data be assimilated for the meso-scale forecasting of convection and why? Part II: On the observation signal from different sensors [J]. *Monthly Weather Review*,138(1): 256–264. doi:10.1175/2009MWR2884.1
- Gelaro R, Zhu Y. 2009. Examination of observation impacts derived from observing system experiments (OSEs) and adjoint models [J]. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*,61(2):179–193. doi:10.1111/j.1600-0870.2008.00388.x
- Gravelle C M, Mecikalski J R, Line W E, et al. 2016. Demonstration of a GOES-R satellite convective toolkit to bridge the gap between severe weather watches and warnings: An example from the 20 May 2013 Moore, Oklahoma, tornado outbreak [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*,97(1):69–84. doi:10.1175/BAMS-D-14-00054.1
- Groenemeijer P, Barthlott C, Behrendt A, et al. 2009. Observations of Kinematics and thermodynamic structure surrounding a convective storm cluster over a low mountain range [J]. *Monthly Weather Review*,137(2): 585–602. doi:10.1175/2008MWR2562.1
- Guo J P, Su T N, Li Z Q, et al. 2017. Declining frequency of summertime local-scale precipitation over eastern China from 1970 to 2010 and its potential link to aerosols [J]. *Geophysical Research Letters*,44(11): 5700–5708. doi:10.1002/2017GL073533
- Guo X R, Guo J P, Zhang D L, et al. 2023. Vertical divergence profiles as detected by two wind profiler mesonets over East China: implications for nowcasting convective storms [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*,149(754):1629–1649. doi:10.1002/qj.4474
- Hamill T M, Snyder C. 2002. Using improved background-error covariances from an ensemble Kalman filter for adaptive observations [J]. *Monthly weather review*,130(6):1552–1572. doi:10.1175/1520-0493(2002)130<1552:UIBEFC>2.0.CO;2
- Hitchcock S M, Schumacher R S, Herman G R, et al. 2019. Evolution of preand postconvective environmental profiles from mesoscale convective systems during PECAN [J]. *Monthly Weather Review*,147(7): 2329–2354. doi:10.1175/WAF-D-17-0088.1
- Joly A, Browning K A, Bessemoulin P, et al. 1999. Overview of the field phase of the fronts and Atlantic Storm-Track EXperiment (FASTEX) project [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*,125(561): 3131–3163. doi:10.1002/qj.49712556103
- Joo S, Eyre J, Marriott R. 2013. The impact of MetOp and other satellite data within the Met Office global NWP system using an adjoint-based sensitivity method [J]. *Monthly Weather Review*,141(10):3331–3342. doi:10.1175/MWR-D-12-00232.1
- Jung B, Kim H M, Auligné T, et al. 2013. Adjoint-derived observation impact using WRF in the western North Pacific [J]. *Monthly Weather Review*,141(11):4080–4097. doi:10.1175/MWR-D-12-00197.1
- Klein C, Belusic D, Taylor C M. 2018. Wavelet scale analysis of mesoscale convective systems for detecting deep convection from infrared imagery [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*,123(6): 3035–3050. doi:10.1002/2017JD027432
- Kunjian M R, Ryzhkov A V. 2008. Polarimetric signatures in supercell thunderstorms [J]. *Journal of applied meteorology and climatology*,47(7): 1940–1961. doi:10.1175/2007JAMC1874.1
- Langland R H, Baker N L. 2004. Estimation of observation impact using the NRL atmospheric variational data assimilation adjoint system [J]. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*,56(3):189–201. doi: 10.1111/j.1600-0870.2004.00056.x
- Langland R H, Gelaro R, Rohaly G D, et al. 1999. Targeted observations in FASTEX: Adjoint-based targeting procedures and data impact experiments in IOPs-17 and 18 [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*,125(561):3241–3270. doi:10.1002/qj.49712556107
- Lee Y H, Choi Y, Ghim Y S. 2016. Classification of diurnal patterns of particulate inorganic ions downwind of metropolitan Seoul [J]. *Environmental Science and Pollution Research*,23(9):8917–8928. doi:10.1007/s11356-016-6125-3
- Lorenc A C, Marriott R T. 2014. Forecast sensitivity to observations in the Met Office Global numerical weather prediction system [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*,140(678):209–224. doi: 10.1002/qj.2122

- Majumdar S J. 2016. A review of targeted observations [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*,97(12):2287–2303. doi:10.1175/BAMS-D-14-00259.1
- Majumdar S J, Aberson S D, Bishop C H, et al. 2011. Targeted observations for improving numerical weather prediction: an overview [M]. *A World Weather Research Programme/THORPEX Publication*:15,37
- Mallick S, Dutta D, Min K H. 2017. Quality assessment and forecast sensitivity of global remote sensing observations [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*,34(3):371–382. doi:10.1007/s00376-016-6109-8
- Mansfield D, Richardson D, Truscott B. 2005. An overview of the Atlantic THORPEX Regional campaign [C]// in *Proceedings of the First THORPEX International Science Symposium, Montreal, Canada*:91–94
- Mecikalski J R, Bedka K M. 2006. Forecasting convective initiation by monitoring the evolution of moving cumulus in daytime GOES imagery [J]. *Monthly Weather Review*,134(1):49–78. doi:10.1175/MWR3062.1
- Mecikalski J R, Bedka K M, Paech S J, et al. 2008. A statistical evaluation of GOES cloud-top properties for nowcasting convective initiation [J]. *Monthly Weather Review*,136(12):4899–4914. doi:10.1175/2008MWR2352.1
- Medeiros B, Hall A, Stevens B. 2005. What controls the mean depth of the PBL? [J]. *Journal of Climate*,18(16):3157–3172. doi:10.1175/JCLI3417.1
- Min M, Wu C Q, Li C, et al. 2017. Developing the science product algorithm testbed for Chinese next-generation geostationary meteorological satellites: Fengyun-4 series [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*,31(4):708–719. doi:10.1007/s13351-017-6161-z
- Mu M, Duan W S, Wang B. 2003. Conditional nonlinear optimal perturbation and its applications [J]. *Nonlinear Processes in Geophysics*,10(6):493–501. doi:10.5194/npg-10-493-2003
- Parker M D. 2014. Composite VORTEX2 supercell environments from near-storm soundings [J]. *Monthly Weather Review*,142(2):508–529. doi:10.1175/MWR-D-13-00167.1
- Palmer T N, Gelaro R, Barkmeijer J, et al. 1998. Singular vectors, metrics, and adaptive observations [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*,55(4):633–653. doi:10.1175/1520-0469(1998)055<0633:SVMAAO>2.0.CO;2
- Parsons D B, Beland M, Burridge D, et al. 2017. Thorpex research and the science of prediction [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*,98(4):807–830. doi:10.1175/BAMS-D-14-00025.1
- Rabier F, Gauthier P, Cardinali C, et al. 2008. An update on THORPEX-related research in data assimilation and observing strategies [J]. *Nonlinear Processes in Geophysics*,15(1):81–94. doi:10.5194/npg-15-81-2008
- Rabier F, Klinker E, Courtier P, et al. 1996. Sensitivity of forecast errors to initial conditions [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*,122(529):121–150. doi:10.1002/qj.49712252906
- Roebber P J, Swanson K L, Ghorai J K. 2008. Synoptic control of mesoscale precipitating systems in the Pacific Northwest [J]. *Monthly Weather Review*,136(9):3465–3476. doi:10.1175/2008MWR2264.1
- Schumacher R S. 2011. Ensemble-based analysis of factors leading to the development of a multiday warm-season heavy rain event [J]. *Monthly Weather Review*,139(9):3016–3035. doi:10.1175/MWR-D-10-05022.1
- Snyder C. 1996. Summary of an informal workshop on adaptive observations and FASTEX [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*,77(5):953–961. doi:10.1175/1520-0477-77.5.953
- Szunyogh I, Toth Z, Morss R E, et al. 2000. The effect of targeted dropsonde observations during the 1999 Winter Storm Reconnaissance Program [J]. *Monthly Weather Review*,128(10):3520–3537. doi:10.1175/1520-0493(2000)128<3520:TEOTDO>2.0.CO;2
- Trapp R J, Stensrud D J, Coniglio M C, et al. 2016. Mobile Radiosonde Deployments during the Mesoscale Predictability Experiment (MPEX): rapid and adaptive sampling of upscale convective feedbacks [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*,97(3):329–336. doi:10.1175/BAMS-D-14-00258.1
- Trenberth K E, Dai A G, Rasmussen R M, et al. 2003. The changing character of precipitation [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*,84(9):1205–1218. doi:10.1175/BAMS-84-9-1205
- Wandishin, Matthew S, David J, et al. 2008. On the predictability of mesoscale convective systems: Two-dimensional simulations [J]. *Weather and Forecasting*,23(5):773–785. doi:10.1175/2008WAF2007057.1
- Weckwerth T M, Parsons D B, Koch S E, et al. 2004. An overview of the International H₂O Project (IHOP_2002) and some preliminary highlights [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*,85(2):253–277. doi:10.1175/BAMS-85-2-253
- Weisman M L, Trapp R J, Romine G S, et al. 2015. The Mesoscale Predictability Experiment (MPEX) [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*,96(12):2127–2149. doi:10.1175/BAMS-D-13-00281.1
- Weygandt S S, Loughe A F, Benjamin S G, et al. 2004. Scale sensitivities in model precipitation skill scores during IHOP [C]// *Proceedings of 22th Conference on Severe Local Storms, Hyannis, MA*.
- Wilson J W, Feng Y R, Chen M, et al. 2010. Nowcasting challenges during the Beijing olympics: successes, failures, and implications for future nowcasting systems [J]. *Weather and Forecasting*,25(6):1691–1714. doi:10.1175/2010WAF2222417.1
- Wilson J W, Schreiber W E. 1986. Initiation of convective storms at radar-observed boundary-layer convergence lines [J]. *Monthly Weather Review*,114(12):2516–2536. doi:10.1175/1520-0493(1986)114<2516:IOCSAR>2.0.CO;2
- Wu Y Z, Guo J P, Chen T M, et al. 2023. Forecasting precipitation from radar wind profiler and reanalysis using the random forest algorithm [J]. *Remote Sensing*,15(6):1635. doi:10.3390/rs15061635
- Yan Y, Miao Y C, Guo J P, et al. 2019. Synoptic patterns and sounding-derived parameters associated with summertime heavy rainfall in Beijing [J]. *International Journal of Climatology*,39:1476–1489. doi:10.1002/joc.5895
- Zhang H, Sharma G, Dhawan S, et al. 2020. Comparison of discrete, discrete-sectional, modal and moment models for aerosol dynamics simulations [J]. *Aerosol Science and Technology*,54(7):739–760. doi:10.1080/02786826.2020.1723787
- Zheng Z F, Zhao C, Lolli S, et al. 2020. Diurnal variation of summer precipitation modulated by air pollution: observational evidences in the Beijing metropolitan area [J]. *Environmental Research Letters*,15(9):094053. doi:10.1088/1748-9326/ab99fc

(责任编辑 唐永兰)