

刘德强,冯杰,丁瑞强,等. 台风目标观测研究进展回顾[J]. 地球科学进展, 2021, 36(6): 564-578. DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2021.069.
[LIU Deqiang, FENG Jie, DING Ruiqiang, et al. Review of the research progress in targeted observing for typhoons [J]. Advances in Earth Science, 2021, 36(6): 564-578. DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2021.069.]

台风目标观测研究进展回顾*

刘德强^{1,2,3,4}, 冯杰⁵, 丁瑞强⁶, 李建平^{7,8*}

(1.福建省气象台,福建 福州 350001;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.福建省灾害天气重点实验室,福建 福州 350001;4.武夷山国家气候观测台,福建 武夷山 354306;
5.复旦大学大气与海洋科学系,上海 200438;6.北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室,
北京 100875;7.中国海洋大学深海圈层与地球系统前沿科学中心/物理海洋教育部重点实验室/
海洋高等研究院 山东 青岛 266100;8.青岛海洋科学与技术国家实验室
海洋动力过程与气候功能实验室 山东 青岛 266237)

摘要:台风目标观测对于弥补常规观测资料不足和提升台风数值预报技巧等具有重要意义。总结了2类理论方法的发展过程和优缺点:基于伴随的非线性方法能够较好地刻画非线性项的影响,而基于集合的方法在计算速度上更具有优势。同时回顾了一些能够代表当前气象观测水平的新装备和新技术在中国近海登陆台风外场观测试验中的应用,并从个例分析和统计分析两个角度总结了开展台风目标观测的有效性。通过总结发现,切线性近似、模式误差、度量范数和集合成员个数等都是影响台风目标观测的主要因素,它们可能会导致识别得到的台风敏感区之间存在一定差异,因此不能被忽略。未来应该更加关注台风强度目标观测的研究,在此基础上进一步推动非线性方法和数值模式的发展,并探索能够适合我国业务实际情况的台风目标观测实施方案。

关键词:台风;目标观测;观测平台;外场试验

中图分类号: P457.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8166(2021)06-0564-15

1 引言

Lorenz^[1-3]发现数值预报误差对于初值具有敏感的依赖性,在确定的非线性系统里,一个微小的初始误差可能会导致最终计算结果的完全不同。从业务经验的角度来看,观测资料的缺少可能会导致数值预报可预报性的降低。人们普遍认为常规观测资料,例如探空资料和气象站资料等的增加可能会提高数值预报的可预报期限^[4,5]。然而,要想对所有区域进行加密观测,无论在实践中或者经济上都

不易实现。因此有必要在时间和空间上有针对性地优化观测布局,在初始分析误差能够对数值天气预报技巧产生最大影响的区域(敏感区)里增加非常规观测。

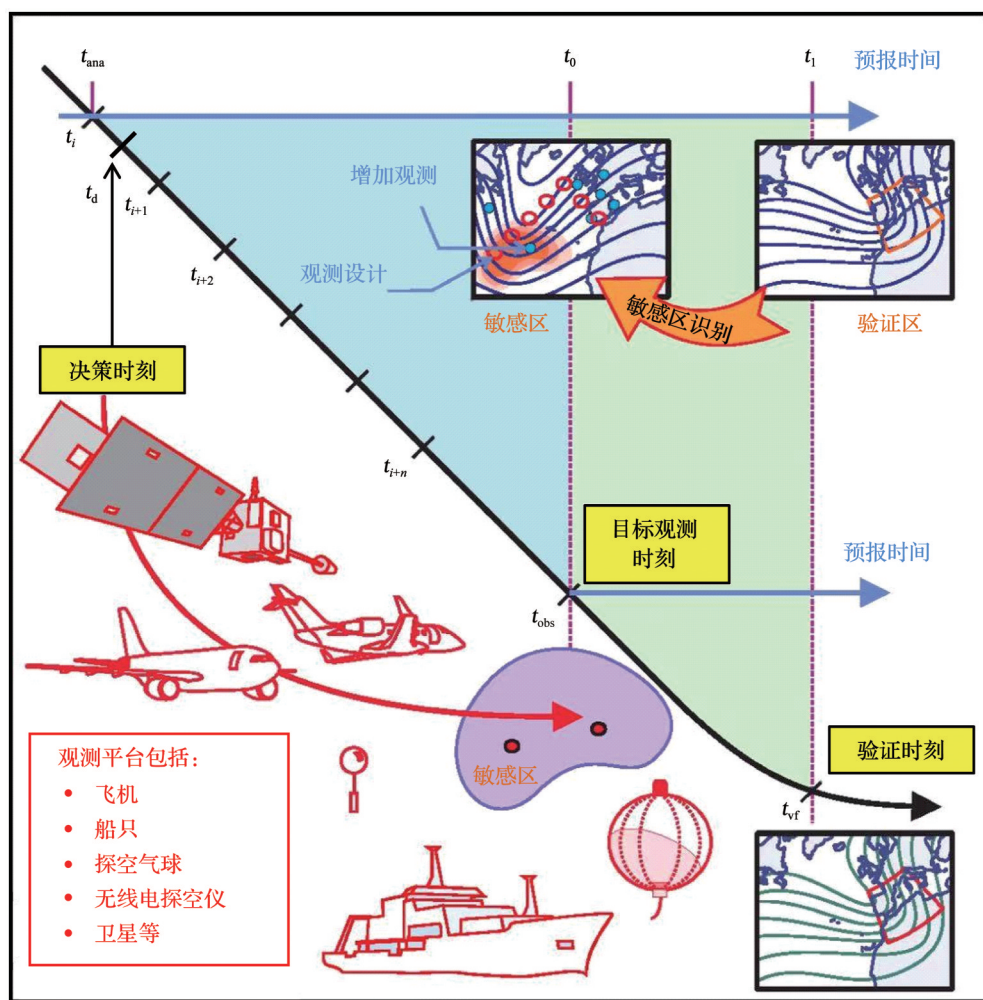
目标观测(又称适应性观测)被提出并用于解决此类问题。它是一种改善数值预报质量的技术和方法,即在确定敏感区的前提下,在这些敏感区通过移动观测手段增加额外观测,并结合同化方法减小数值模式中的初始分析误差,从而达到减小预报不确定性、延长预报时效的目的^[6-13](图1^[14])。目

收稿日期:2021-03-25;修回日期:2021-05-21.

* 基金项目:福建省自然科学基金面上项目“台湾海峡地区台风强度可预报性全局特征研究”(编号:2020J01100);灾害天气国家重点实验室开放课题“台湾海峡台风局部气候敏感区研究”(编号:2020LASW-B10)资助。

作者简介:刘德强(1987-),男,黑龙江海伦人,高级工程师,主要从事可预报性研究. E-mail: deqiang_1987@163.com

* 通信作者:李建平(1969-),男,山西山阴人,教授,主要从事气候动力学与可预报性、季风、环流模及其影响研究. E-mail: lj@ouc.edu.cn

图1 目标观测流程示意图^[14]Fig. 1 Illustration of the typical procedure for the deployment of targeted observations^[14]

$t_i, t_{i+1}, t_{i+2}, t_{i+n}$ 等代表观测时刻, 其中 t_d, t_{obs}, t_{vf} 分别是决策时刻、目标观测时刻和验证时刻; t_{ana} 是分析时刻, t_0 和 t_1 是对应 t_{obs} 和 t_{vf} 的预报时刻
 t_i, t_{i+1}, t_{i+2} and t_{i+n} represent the observation time, and t_d, t_{obs}, t_{vf} is the decision time, the targeted observation time and the verification time, respectively. t_{ana} is the analysis time, t_0 and t_1 indicate the forecast time corresponding to t_{obs} and t_{vf}

前, 目标观测是国内外大气科学领域的研究热点之一, 在超级单体^[15,16]、台风^[15,17-25]、El Niño-Southern Oscillation (ENSO)^[26-28]、Indian Ocean Dipole (IOD)^[29]、North Atlantic Oscillation (NAO)^[30] 和黑潮^[31,32] 等天气和气候事件的预报研究中都有应用。其理论发展与应用对于弥补常规观测资料不足、优化观测资源配置和提升高影响天气系统预报技巧等都具有重要的指导意义与实用价值。

台风是西北太平洋地区一类非常重要的灾害性天气系统, 在其中心周围一般会伴随着较强的降水、雷暴和强风等恶劣的天气现象^[33], 具有很强的破坏力, 对人们的生命和财产安全造成极大的威胁^[18,19,34-37]。准确的初始场可以改进台风的数值预报技巧。然而, 受海洋上的观测站点较少、分布不

均匀, 台风稠密云雨对于卫星遥感信号的强烈衰减作用等因素的影响, 我们很难获得台风结构及其变化特征的精确观测资料^[12,38]。因此, 有必要围绕台风在时间和空间上进行针对性的观测优化布局, 增加对台风的直接观测。

由于台风带来的危害往往与台风的位置和剧烈程度紧密联系^[34], 目前业务中的短期预报(1~3天)常常将台风路径和强度作为重要预报对象。影响台风路径和强度预报不确定性的来源主要可以归为两类^[39-41]: 一类是初值误差, 即由观测资料中的系统和随机误差、观测系统的时空分布不均匀和资料同化系统中的近似带来的误差组成; 另一类是模式误差, 这类误差一般是由描述大气运动的方程中存在的物理缺陷、求解中的数值近似和次网格参数

化造成的。

这两类误差都是影响台风数值预报技巧的重要原因,但是在当前的数值模式发展水平下,两者对于实际业务中台风路径预报和强度预报的影响表现出了不同的特征。研究表明,准确的初始场是提升台风路径数值预报的关键因素,随着大气动力与物理框架的不断完善,初始同化分析场的误差及其快速增长是目前导致台风路径预报结果变差的主要原因^[42-46]。而对于台风强度预报,虽然基于完美模型(不考虑模式误差)的理想试验表明^[47-50],准确的初始强度、风场、垂直风切变和内核区水汽等初始场可以在一定程度上改进台风强度预报技巧。但是在实际业务预报中,模式误差不可避免地存在,台风强度预报技巧的改进并没有理想中期望的大,说明模式误差是现阶段影响台风强度预报效果的主要因子^[51]。

两类误差影响台风预报的特征差异可能与数值模式描述或刻画影响台风路径和强度的物理因子及关键过程的准确性有关。研究表明^[52,53]台风的移动方向与大尺度环境流场紧密联系,如西太平洋地区副热带高压的位置和强度对于台风移动方向具有重要的影响,模式通过较为准确地模拟副高西南侧的引导流场,得到较为精确的台风路径预报。而与台风路径不同,台风强度预报除了受垂直风切变^[49,50,54,55]、海表温度^[56,57]和海气交换^[58,59]等大尺度环境变量影响外,还容易受到眼墙结构^[60,61]、内核区湿对流^[48]等中小尺度过程的影响。由于这些过程里的小尺度误差增长较为迅速,模式很难对其进行精确模拟,导致台风强度预报效果较差^[62]。

目标观测手段主要关注初值问题,因此前人的台风目标观测研究主要是围绕提升台风路径预报技巧开展的。

2 台风目标观测理论方法的发展

敏感区依赖于预报轨迹,随着基流的时间演化而变化,因此并非每天相同^[20,43]。在敏感区内,尽管初始误差非常小,但是仍然可能增长很快,导致数值预报结果变差,而在敏感区之外,即便初始误差较大,其增长仍可能小于敏感区内较小误差的增长,所以如何确定敏感区的位置成为目标观测研究中的核心问题^[63,64]。

在早期对目标观测的研究中,敏感区位置的识别一般是基于对天气图上重要上游天气结构位置的客观分析而得到^[63]。这种方法在美国中纬度天

气预报应用中取得了成功^[65],并且成为早期监测热带气旋的初级方法^[66,67]。然而随后的研究表明,由于天气图分析方法不能反映能量在天气尺度和次天气尺度之间的交换过程,所以有时并不能准确识别敏感区的位置,因此需要基于数值的客观识别敏感区的方法^[68]。近年来,目标观测的研究不断进步,众多台风外场观测试验的实施促使了一些识别敏感区方法的发展及在实际应用中的检验。穆穆等^[69]指出当前目标观测中识别敏感区的方法主要可以归结为2类,一类是基于伴随模式的方法,包括奇异向量方法^[20,43,46,68]、伴随敏感性方法^[70]、条件非线性最优扰动方法(Conditional Nonlinear Optimal Perturbation, CNOP)^[18]、梯度方法^[71]、准线性求逆方法^[72-74]和伴随敏感性引导向量方法(Adjoint-Derived Sensitivity Steering Vector, ADSSV)^[75,76]等。另一类是基于集合的方法,包括集合离散度方法^[77]、集合变换方法^[78]、集合变换卡曼滤波方法^[79]和快速求解CNOP算法^[80-82]等。此外还包括繁殖向量方法^[77,83]和非线性局部Lyapunov向量方法^[13,84-97]等。其中,ADSSV方法在观测系统研究与可预报性试验(The Observing System Research and Predictability Experiment, THORPEX)太平洋—亚洲区域试验(THORPEX Pacific Asian Regional Campaign, T-PARC)中被首次应用^[98],是较早应用于目标观测试验的方法,发挥了重要作用。而奇异向量(Singular Vector, SV)方法和集合方法是当前台风目标观测实际应用的2种主流方法。

2.1 奇异向量方法及其发展

SV方法是在一定范数的限制下,求解扰动的切线性增长算子及其伴随算子乘积的奇异值,从而找到最大奇异值对应的奇异向量即为该段时间内增长最快的扰动^[68,99]。欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)从1992年开始用奇异向量方法为业务集合预报系统提供初始扰动^[100,101],随后该方法被应用于目标观测研究,并在若干个外场实验中得到了较好的验证^[20,21,43,63],THORPEX计划把该方法列为识别敏感区的主要方法之一^[40]。

Anderson^[102]指出可以将不同方向初始分析误差构成的相空间分解为增长和非增长两部分。由于误差的增长部分迅速增大而非增长部分迅速衰减,导致不同方向的初始分析误差会随着时间增长迅速向误差最快增长方向收敛^[83],虽然增长部分只占了相空间中的一小部分,但是它代表了误差能够

最快增长的方向,也是我们要寻找的敏感区。研究表明,第一奇异向量可以用于表征初始分析误差增长相空间里的主导结构^[71,103],这也是奇异向量方法能够用于敏感区识别的基础前提。

此外,奇异向量方法假设初始扰动无穷小,在较短的演化时间内,该初始扰动的非线性发展可以用非线性模式的切线性模式刻画^[11],但是对于一些初始误差较大或者误差增长较快的个例来讲,线性近似不再成立,所以奇异向量方法在一定程度上受到限制。为了克服线性假设的不足,我国学者穆穆等^[18,104]在奇异向量方法的基础上提出了CNOP方法,其主要目的是在一定约束条件下寻找通过非线性发展导致最大预报误差的初始扰动。目前已经在二维准地转模式、Zebiac-Cance模式以及中尺度大气模式中验证了CNOP在预报时段内的发展要优于线性奇异向量这一事实,并将该方法成功应用于台风、ENSO等天气事件的目标观测问题的研究^[105-108]。由于CNOP方法在计算过程中会使用伴随模式,而当前的中尺度数值模式(如The Weather Research and Forecasting Model, WRF)的伴随模式还存在不足,影响台风敏感区的识别,因此许多研究^[80-82,109-111]尝试发展不基于伴随模式的CNOP求解算法,这些工作的提出对于目标观测问题的研究有着重要的理论与实际应用意义。

2.2 集合方法及其发展

20世纪60年代,卡尔曼和布赛提出了一种线性滤波和预测理论,被称为卡尔曼滤波方法,最初被应用于控制系统工程领域。这种方法假设系统状态随时间线性演变,通过递推的方式利用观测量对预测量进行逐步修正,从而实现对系统真实运动状态的最优估计。但是对于复杂的非线性动力系统,求解预报误差协方差时对计算资源需求较大,因此卡尔曼滤波方法在天气数值预报的实际应用中不易实现。Evensen^[112]提出了利用集合预报的样本协方差对误差协方差进行估计的想法,并在此基础上发展了集合卡尔曼滤波方法(Ensemble Kalman Filter, EnKF)。EnKF方法克服了卡尔曼滤波方法仅局限于处理线性问题的弱点,而且不再需要伴随性模式。

但是对于EnKF方法在台风目标观测中的应用,为了考察不同的观测方案对于台风数值预报效果的影响需要多次重新运行集合模式,因而会耗费大量的计算资源,效率较低。Bishop等^[78]在1999年提出了集合变换(Ensemble Transform, ET)的方法,

该方法通过构造集合变换,将集合扰动投影到标准化的正交向量空间,然后利用这组正交化的扰动向量来表征观测方案的变化对于预报误差协方差的影响。ET方法可以有效避免重复运算模式,解决了集合方法在实际目标观测应用中对计算资源需求过大的问题。

在ET方法的基础上,Bishop等^[79]和Majumdar等^[113]进一步提出了集合变换卡尔曼滤波(Ensemble Transform Kalman Filter, ETKF)的方法。ETKF方法同样不依赖于伴随模式,它通过逐个格点比较预报误差方差对观测资料的敏感性,得到预报误差方差减少的空间分布图,改进最为明显的区域为敏感区。NCEP在1999—2000年的冬季风暴监测计划应用到ETKF,在该方法识别的敏感区增加观测,使用同化手段后,使得美国大陆地区24~72小时的预报得到了改善^[20,114]。值得注意的是,这些早期应用集合方法的目标观测试验大多是基于分辨率较粗的集合预报模式实现的。随着计算水平的发展,对于那些高影响天气事件的集合模拟往往是通过高时空分辨率的模式来实现的。因此,在识别敏感区时,逐个格点计算敏感性的集合方法依然不可避免地会耗费一定的计算资源。Zhang等^[115]基于ET方法提出了集合变换敏感性(Ensemble Transform Sensitivity, ETS)的方法,通过计算预报误差方差相对分析误差方差的梯度来快速识别敏感区,避免了逐个格点计算敏感性,大大节省了计算资源。

3 台风目标观测实践的发展

3.1 台风目标观测平台的发展

在20世纪40~50年代,卫星气象观测技术尚不发达的时候,飞机携带的下投式无线电探空仪就被用于台风目标观测,是当时海上台风目标观测最主要的观测方式之一,在一系列的業務和科学外场试验中得到了广泛应用。如1943年,美国空军率先开创了利用机载下投式探空仪观测海上台风的先河,成功获取了能够反映台风内部结构的风、温、压、湿廓线数据。在随后的大多数台风目标观测外场试验中,机载下投式探空仪进一步得到了使用,该仪器的稳定性和精确性经受住了检验。

我国也是受台风灾害影响较为频繁的国家,重点关注了对登陆台风的追踪观测,一系列陆基和移动观测设备被投入使用,如始于2002年的中国科技部社会公益研究专项“中国登陆台风观测试验

(China Landfall Typhoon Experiment, CLATEX)”计划中,集成了自动气象站观测系统和大气边界层观测系统,综合运用风廓线仪、多普勒雷达、探空、超声风速仪、光学雨量计、铁塔和移动观测车等设备,在广东阳江海陵岛对登陆台风“黄蜂 0214”进行了加密观测^[116]。截至 2009 年,我国首次实现了利用机载下投式探空仪对台风进行加密观测^[38]。近年来,随着气象观测装备技术的快速发展,一些能够代表当前气象观测水平的新装备、新技术,如微波辐射计、无人机和气象观测飞艇等,被尝试应用于台风观测,并取得了一定效果。2018 年,中国气象局启动了高空大型无人机海洋综合气象观测试验——“海燕计划”,并于 2020 年 8 月通过无人机投放 30 枚探空仪,配合毫米波雷达,完成了对第 3 号台风“森拉克”外围云系的温、湿、压和水凝物廓线的观测任务。2020 年 10 月,在针对第 16 号台风“浪卡”的台风观测试验中,综合运用多款无人机、无人飞艇、机载激光雷达、火箭弹、探空气球、有人飞机、移动观测车和卫星等平台完成对台风登陆过程中低空不同层次和距台风中心不同距离的温、压、湿秒级观测数据,并且首次成功实施了探空气球爆裂后投放下沉式探空仪的“二次探空”试验。

目前,我国气象部门正在组织开展利用卫星对台风进行目标观测的业务试验研究。2019 年 8 月,风云四号 A 星大气垂直探测仪对利用 CNOP 方法识别的台风“利奇马”的观测敏感区开展加密观测,每 30 分钟完成 1 次目标区观测,提供了敏感区内的大气温度和湿度廓线数据。此外,在对 2020 年第 7 号台风“海高斯”、第 9 号台风“美莎克”、第 14 号台风“灿鸿”和第 16 号台风“浪卡”的观测试验中也采用了 FY-4 和 CNOP 方法的结合。卫星和台风目标观测手段的结合是传统卫星观测方式的一次变革,大大提升了卫星的观测效率,保证能够及时收集到台风敏感区内的观测资料,在同化进入数值模式后提升台风的数值预报水平。

3.2 外场观测试验

世界气象组织于 2003 年 5 月制定实施了一项为期 10 年的大气科学研究计划——THORPEX,以期提高 1~14 天高影响天气的预报精度。目标观测被认为是一个实现该目标的重要手段^[40,117,118]。至今为止,已经围绕冬季风暴、急流和热带气旋等天气系统展开了一系列的大型目标观测外场试验^[17,42,46,63,119,120],如锋面与大西洋风暴试验(Fronts and Atlantic Storm-Track Experiment, FASTEX,

1997 年)、北太平洋试验(North Pacific Experiment, NORPEX, 1998 年)、冬季风暴监测试验(Winter Storm Reconnaissance, WSR, 1999—2000 年)、中国台湾附近地区的台风追风试验(Dropwindsonde Observation for Typhoon Surveillance near the Taiwan Region, DOTSTAR, 2003—2005 年)、THORPEX 太平洋—亚洲区域计划(T-PARC)等。

我国的台风外场试验开展较晚,并且主要集中在登陆台风的近岸观测,如台风现场科学业务试验(Campaign of Typhoon Experiment, CATEX, 1982 年)和中国登陆台风观测试验(CLATEX, 2002 年)等。2009 年,我国首次飞机探测台风的试验仅仅围绕台风“莫拉克”(200908)和“天鹅”(200907)的外围进行了下投式探空观测,没有抵达台风的目标观测敏感区。2014 年由 中国气象局上海台风研究所联合香港天文台组织实施的亚太近海及登陆台风强度变化科学试验(Experiment on Typhoon Intensity Change in Coastal Area, EXOTICCA, 2014 年)将目标观测技术应用于台风观测,并获得了成功,为我国的台风目标观测外场试验奠定了实践基础。2020 年 10 月,中国气象局上海台风研究所联合海南省气象局和香港天文台等单位在台风“浪卡”(202016)登陆期间实施了多平台协同观测试验。在 CNOP 算法确定的目标观测方案的指导下,成功对台风登陆前后的边界层结构、云系、风浪和温湿风廓线等特征进行了海天空一体化协同观测,这代表我国基于观测预报协同互动的观测理论技术真正走向实际业务应用,并逐渐成熟。

3.3 台风目标观测的有效性

近年来,国内外学者和业务部门围绕台风目标观测有效性的验证开展了大量的工作。应用一系列的外场试验资料和研究方法,前人分别从个例分析和统计分析两个角度评估了敏感区观测资料对于台风数值预报效果的影响,验证了目标观测研究的可行性,并得到了许多令人振奋的结果。

从个例分析角度,Buizza 等^[20]应用奇异向量方法,利用北大西洋的 5 个气旋个例的非常规观测资料,验证了目标观测的可行性,发现同化目标观测资料后,预报质量平均改善了 13%。Yamaguchi 等^[21]利用奇异向量方法识别得到了台风“Conson”(2004)的敏感区,随后利用同化试验验证了敏感区内的 DOTSTAR 资料对于台风路径预报技巧具有明显的改进作用。Kim 等^[19]考察了 T-PARC 资料对于台风“Sinlaku”(2008)和“Jangmi”(2008)的路径预报

技巧的影响,他们发现台风南部的中层 500~850 hPa 是台风的敏感区,在同化了这些区域内的观测资料后,台风路径预报技巧显著提升。除此之外,台风下游各气象要素场预报的改进也是人们较为关注的问题。欧洲中期天气预报中心的预报结果显示,在同化了 T-PARC 的非常规观测资料后,台风中心下游中纬度地区 500 hPa 位势高度场的预报有了十分明显的改进^[22]。Kim 等^[23]和 Mu 等^[18]的工作同样指出敏感区内的资料对于台风数值预报结果改善具有显著的作用。

从统计分析角度,前人开展了多样本台风的目标观测应用,如 Chou 等^[17]应用 DOTSTAR 和 T-PARC 的投放式观测资料从统计角度评估了敏感区内的观测资料对于台湾海峡地区 35 个台风个例的路径预报技巧的影响。Chen 等^[24]应用 DOTSTAR 资料考察了台湾海峡地区 20 个台风个例时的情形。类似的研究还有 Weissmann 等^[22]、Wu 等^[25]和 Chou 等^[121]的工作。这些研究一致指出,目标观测手段对于台风路径预报技巧的改进具有显著作用,在同化了敏感区的非常规观测资料之后,大部分台风的路径预报误差改进率可达 10%。前人的研究重点关注了移动式的目标观测手段对于台风数值预报效果的影响,验证了对台风进行目标观测,提升初始场准确性以提高台风预报技巧的可行性。

4 影响敏感区确定的主要因子

4.1 切线性近似的影响

敏感区识别方法对于敏感区的大小、形状和位置等存在着不同程度的影响。Ancell 等^[122]在研究北美西海岸的冬季气旋时,发现基于不同方法得到的敏感区,在位置、范围大小上都存在着一定差异。Chen 等^[24]发现在 MM5 模式中利用 CNOP 方法识别得到的台风“Nida”(2004)的敏感区呈螺旋状分布在台风中心周围,而利用第一奇异向量(First Singular Vector, FSV)方法识别的敏感区被分割成了两部分,一部分位于台风中心西南,而另一部分向东偏离台风中心约 5 个经度。Qin 等^[123]的研究表明,在 MM5 模式中利用 CNOP 方法识别得到的台风“Mirinae”(2009)敏感区主要位于台风移动方向的右半象限,而利用奇异向量方法识别的敏感区主要位于台风移动方向的左后象限,存在明显不同。Zhou 等^[8]同样利用 MM5 模式比较了 CNOP 方法和 FSV 识别的台风敏感区之间的差别,他们发现 CNOP 和 FSV 对敏感区的影响取决于台风过程的非

线性程度,在非线性的较强的台风“Matsa”(2005)个例中,两种方法识别得到的敏感区差异较大,而在非线性较弱的台风“Meari”(2004)个例中,基于两种方法得到的敏感区差别较小。

从前人的研究可知,造成这种差别的原因可能与识别方法的自身限制有关。早期经常被用于敏感区识别的奇异向量方法和 ETKF 方法都是建立在线性理论框架的基础上,均假设误差是线性增长的^[107]。但是在实际中,随着误差的增长,系统最终会进入非线性阶段,切线性近似不再成立,因此需要发展基于非线性误差增长理论的敏感区识别方法。为了对比非线性误差增长理论和线性误差增长理论在识别敏感区时的区别,Chen 等^[24]利用 MM5 模式通过观测系统试验(Observation System Experiments, OSEs)评估了 2003—2005 年 DOTSTAR 外场观测试验中的 20 个台风敏感区内的资料对于台风路径数值预报效果的平均影响,其研究发现在同化了利用 CNOP 方法识别的敏感区资料后,24 小时台风路径预报误差平均改善了 4.3%,而同化了利用奇异向量方法识别的敏感区资料后,平均改善为 3.8%。Qin 等^[123]利用 MM5 模式通过观测系统模拟试验(Observation System Simulation Experiments, OSSEs)评估了 2009 年 7 个台风个例敏感区资料对于 24~72 h 台风路径数值预报的影响,发现在 6 个个例的结果中,同化了 CNOP 方法识别的敏感区内的资料后,预报改进百分率可达 13%~46%,而利用 SV 方法的改进为 14%~25%。这些研究表明在台风敏感区识别上,非线性理论方法相对于线性方法更具有优势。

4.2 度量范数的影响

识别敏感区时,一般都需要先定义一个度量范数(又称引导性变量)来表征某种观测方案所代表的观测敏感程度。例如,Palmer 等^[68]利用 SV 方法开展观测敏感区研究时,分别选取了涡度拟能、总能量、动能和流函数变量作为度量范数,Buizza 等^[20]选取了总能量作为度量范数。穆穆等利用 CNOP 方法研究敏感区识别问题时选取了干能量作为度量范数^[11,18,24,107,108,123~125]。王斌等^[80]选取了湿能量并利用快速求解 CNOP 算法开展了敏感区识别研究。Bishop 等^[78]在研究 ET 方法在目标观测中的应用时选取了经过数学变换后的涡度和流函数作为度量范数。Majumdar 等^[113]定义总能量为度量范数研究了 ETKF 方法在敏感区识别中应用的可行性。

这些研究结果表明,敏感区位置和结构明显依赖于度量范数的选取。Palmer等^[68]发现初始奇异向量对于度量范数较为敏感,在选择了不同的度量范数后,初始扰动在结构、空间分布和量级上都会有很大不同。Mu等^[18]基于3个台风个例,利用动能和干能量的度量范数比较了CNOP扰动和FSV扰动在空间结构上的区别,研究表明度量范数是影响2种扰动空间分布的一个重要因子。谭晓伟等^[82]基于一种快速求解条件非线性最优扰动的算法,识别了台风“麦莎”(0509)的观测敏感区,并比较了3种度量范数对于敏感区位置和数值预报效果的影响。他们指出,利用3种度量范数识别的敏感区位置存在一定差异,且不同的敏感区对于预报效果的改善程度不一致。

4.3 集合成员个数的影响

基于集合的方法一般利用集合预报的误差协方差矩阵近似代替真实的背景误差协方差矩阵,因此对集合预报成员个数存在一定要求^[126]。质量好的集合预报要求所有成员的初始扰动在模式中的演变方向要尽可能发散,具有结构多样性的扰动向量空间可以保证预报集合能够尽可能包含大气中出现的所有情况^[79]。然而,在实际的目标观测应用中,集合成员个数往往要小于真实大气状态向量的长度,基于扰动集合估计得到的误差协方差矩阵一般是秩亏的,并不足够精确,因此对观测敏感区位置的识别可能存在一定影响^[113]。

在FASTEX外场试验计划里所有基于ET方法的敏感区研究中,70%个例的敏感区是基于美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)7个成员的集合预报来识别的,这些敏感区对于预报效果的改进程度要弱于基于ECMWF 20个成员的集合预报识别的敏感区,这说明在集合成员个数越多的情况下,利用ET方法识别得到的敏感区越准确^[43]。Petersen等^[114]研究了集合成员个数对于观测敏感区位置的影响,发现成员个数分别为50、25、10和5时,利用ETKF方法识别得到的敏感区位置存在一定差异,利用25和50个成员的集合预报识别得到的敏感区中,约有25%的区域是不同的。

此外,研究还表明初始集合扰动成员的方向对于集合预报质量具有重要的影响,如Feng等^[96,97]基于非线性局部Lyapunov向量(Nonlinear Local Lyapunov Vectors, NLLVs)应用Lorenz63和Lorenz96的理论模型生成集合预报的试验发现,利用正交化

后的NLLVs生成的集合预报的离散度与集合平均误差的一致性更好,优于繁殖向量方法(Bred Vectors, BVs)和蒙特卡罗方法(Monte Caelo, MC)。Huo等^[127]基于CNOP方法应用于第五代中尺度模式(Mesoscale Model 5, MM5)模式生成集合预报的研究同样表明,利用正交化后的CNOPs生成的集合预报质量要明显优于利用正交化后的SVs、BVs和随机向量生成的集合预报,在采用CNOPs方法后,台风路径具有更好的预报效果。因此,初始集合扰动成员的方向可能通过影响集合预报质量,进而对基于集合方法识别得到的敏感区位置产生影响。

4.4 模式误差的影响

模式误差对于目标观测应用存在一定的影响。Buizza等^[20]发现奇异向量依赖于预报轨迹的准确性,预报的时效越长,奇异向量方法识别的敏感区越不准确。研究^[34,128,129]显示模式的空间分辨率和切线性、伴随模式中包含的物理过程对台风的奇异向量结构都存在影响,说明不能忽略模式误差对于奇异向量方法的影响。Majumdar等^[113]的研究表明,由于误差协方差矩阵的准确性依赖于集合预报的质量,所以基于集合方法识别得到的敏感区位置也会受到模式误差的影响。此外,前人的研究结果中,并不是所有研究个例的预报质量在同化了非常规资料后都得到了改善。Langland等^[64]发现在同化非常规资料后,即便初始场误差得到了改善,但是对流层高层的预报技巧仍然变差。Morss^[130]也指出,尽管目标观测使预报技巧变差的情况并不普遍,但是在某些情形下仍然存在这种风险。尤其对于台风强度预报,模式误差更是起到十分重要的作用^[51,62,131,132]。因此仅仅减小初值不确定性不一定能帮助改善台风预报技巧,需要关注模式误差对于目标观测的影响。

Duan等^[133]提出利用非线性强迫奇异向量(Nonlinear Forcing Singular Vector, NFSV)方法来刻画模式误差对于可预报性的非线性影响。利用一个二维的非线性准地转模型,他们对比了NFVS和线性强迫奇异向量(Linear Forcing Singular Vector, LFSV)刻画的模式误差模态对于预报误差的影响,发现由NFSV引起的预报误差要明显大于由LFSV引起的,说明考虑了非线性影响的NFSV能够刻画最优的模式误差分布模态。Qin等^[51]将NFSV方法进一步应用到台风可预报性的研究当中。他们的工作表明不仅仅在初值问题里存在敏

感区,在模式误差里也存在敏感区的问题。这打破了传统台风目标观测研究大多只考虑改进初始场的界限,将目标观测研究拓展到了模式误差领域,即模式误差也可以通过目标观测方法进行改善。

此外,李建平研究团队^[84,85,89,90,94,134]提出了非线性局部 Lyapunov 指数 (Nonlinear Local Lyapunov Exponent, NLLE) 方法,利用该指数,他们将局部动力相似 (Local Dynamical Analog, LDA) 方法应用于观测资料,结合大气的动力学特征,分别研究了大气中不同变量场天气可预报性和气候可预报性的时空分布,天气可预报性的年代际变化,以及海温可预报性的时空分布等问题^[86-88,91-95],并利用理论模型探讨了 NLLE 方法应用观测资料进行目标观测研究的可行性^[13]。这种方法用于识别敏感区的核心思想是:在 n 维相空间中,不同位置上的初始状态对于初始误差的敏感性存在差异,根据初始误差相对增长率的大小可以将相空间内存在的初始状态分为敏感的和非敏感的两类。对于敏感的初始状态,即使对其叠加的初始误差是无穷小的,其误差也能达到快速增长,而对于非敏感的初始状态,即使对其叠加较大的初始误差,其误差相对增长率仍然很小。因此,对于目标观测研究中所要寻找的敏感区,实际上就是初始场里分析误差增长较快的敏感初始状态所在的区域。该方法的提出也为研究模型误差对于目标观测研究的影响提供了一个新的思路。

5 总结和展望

5.1 总结

台风是对我国产生重要影响的一类灾害性天气系统,由于台风内核精细结构观测资料的不足而带来的初始误差,是影响台风数值预报效果的重要因素之一。虽然目前卫星技术迅速发展,为我们提供了广阔洋面上的大气遥感探测资料,大量洋面上的卫星观测资料进入模式显著改善了台风数值预报效果,但是当台风发生时,受稠密云雨对卫星遥感信号衰减作用的影响,我们仍然很难获得边界层底层台风内核区的结构及其变化特征的精确观测资料,需要围绕台风在时间和空间上进行针对性的观测优化布局,增加对台风的直接观测。目标观测技术恰好能够满足这种需求,它通过移动观测平台在观测敏感区进行加密观测,并结合同化方法来减小初始分析误差,从而提升台风数值预报技巧。

目标观测是台风观测领域的一个热点研究问

题。近年来,一系列研究目标观测的理论方法迅速发展,并逐渐成熟,被成功用于观测实践。在这些理论方法的基础上,利用天海空地多平台协同观测,开展了一系列的台风外场观测试验。应用这些外场试验资料,前人评估了敏感区观测资料对于台风数值预报效果的影响,验证了目标观测研究的可行性和必要性,为目标观测手段在实际业务中的应用积累了大量的观测经验。

限制目标观测手段在台风观测中应用的因素是多方面的,切线性近似是最重要的因素之一。大量的研究表明,基于非线性误差增长理论的方法在目标观测中应用的效果要明显优于线性误差增长理论方法,说明描述误差增长的非线性项不能被忽略。模式误差也是限制台风目标观测的主要因素之一,一般目标观测对数值模式的模拟技巧具有一定要求,假设模式近似完美,但是在实际的台风数值模拟中,模式误差的影响有时仍然较大。比如,由于描述模式中海气交换过程的参数方案存在缺陷,针对台风强度的模拟效果还较差,由模式缺陷引起的预报误差不能被忽略,导致识别得到的台风强度敏感区的位置可能与真实敏感区位置存在较大差异,所以模式缺陷是影响台风目标观测效果不确定性的一个重要来源,未来随着模式中物理参数过程的进一步完善,台风目标观测的效果可能会得到进一步提升。度量范数和集合成员个数也是限制台风目标观测效果的因素,但并不是主要因素。度量范数的影响可以根据预报目标需求,通过选择不同的度量范数来减小,而集合成员个数的选择通常受计算机资源的影响,随着未来计算能力的不断提升,可以通过增加集合成员个数来提升扰动向量空间的多样性,进而降低其影响。

总的来讲,当前台风目标观测研究的方法在理论上已经相对成熟,在外场观测试验和业务观测中也经受住了检验。在国外,目标观测技术在实际业务中应用较早,形成了相对完善的业务观测体系。在国内,受经费、观测平台技术水平等因素的影响,该技术真正在台风观测中的应用起步较晚,并且主要集中在台风登陆期间的近岸或近海的观测,但是经过多年来广大科研和业务人员的实践和探索,形成了一套极具特色的多平台协同观测体系,实现了如无人机、火箭弹和无人飞艇等多种新型观测设备的观测试验。

5.2 展望

未来我国的台风目标观测研究可能聚焦在以

下几个方面:

(1)进一步在传统目标观测线性方法的基础上发展非线性的方法。而且针对以往研究方法大多关注初始误差里非线性影响的问题,尤其要推动能够刻画模式误差非线性影响的方法的发展。

(2)针对近年来台风强度预报的改善要远远小于台风路径预报的现实,在发展能够刻画模式误差影响的非线性方法的基础上,要强化针对台风强度的目标观测研究,一个是利用非线性方法明确究竟是哪些模式参数对于台风强度预报存在较大影响,进而为下一步的模式参数方案改进明确方向,再一个就是可以基于识别得到的最优模式误差模态,通过同化目标观测提高台风强度业务预报的准确率。

(3)目前美国已经实现了飓风目标观测的业务化运行,而我国还处在业务化应用前的探索阶段,因此应该进一步聚焦目标观测技术在实际台风业务中的应用策略研究,探索能够适合我国业务实际情况的台风观测模式,大力发展新型台风观测平台和观测技术研究,努力缩小与发达国家的差距。

(4)敏感区依赖于预报轨迹,随着基流的时间演化而变化。以往目标观测技术多被用于一次台风天气过程的移动观测策略研究,不能满足针对台风这类系统的固定观测站网布局设计需求。如何基于目标观测技术确定感兴趣区域内台风系统的长期敏感性分布特征,并在此基础上开展对现有观测站网布局的科学性进行评估、对未来观测站网布局的优化设计研究可能会成为未来的一个热点业务研究问题。

参考文献(References):

- [1] LORENZ E N. Deterministic nonperiodic flow [J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 1963, 20(2): 130-141.
- [2] LORENZ E N. A study of the predictability of a 28-variable atmospheric model [J]. *Tellus*, 1965, 17(3): 321-333.
- [3] LORENZ E N. Effects of analysis and model errors on routine weather forecasts [C]//Annual seminar on 10 years of medium-range weather forecasting. Reading, UK: European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), 1989: 115-128.
- [4] THOMOPSON P. Uncertainty of initial state as a factor in the predictability of large scale atmospheric flow patterns [J]. *Tellus*, 1957, 9(3): 275-295.
- [5] MORSS R E, EMANUEL K A. Influence of added observations on analysis and forecast errors: results from idealized systems [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2002, 128(579): 285-321.
- [6] LANGLAND R H. Issues in targeted observing [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2005, 131(613): 3 409-3 425.
- [7] MORSS R E, EMANUEL K A, SNYDER C, *et al.* Idealized adaptive observation strategies for improving numerical weather prediction [J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 2001, 58(2): 210-232.
- [8] ZHOU Feifan, MU Mu. The impact of horizontal resolution on the CNOP and on its identified sensitive areas for tropical cyclone predictions [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2012, 29(1): 36-46.
- [9] MAJUMDAR S J, BISHOP C H, BUIZZA R, *et al.* A comparison of ensemble-transform Kalman-filter targeting guidance with ECMWF and NRL total-energy singular-vector guidance [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2010, 128(585): 2 527-2 549.
- [10] HUANG Ling, MENG Zhiyong. Quality of the target area for metrics with different nonlinearities in a mesoscale convective system [J]. *Monthly Weather Review*, 2014, 142(7): 2 379-2 397.
- [11] MU Mu, WANG Hongli, ZHOU Feifan. A preliminary application of conditional nonlinear optimal perturbation to adaptive observation [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2007, 31(6): 1 102-1 112. [穆穆, 王洪利, 周非凡. 条件非线性最优扰动方法在适应性观测研究中的初步应用 [J]. 大气科学, 2007, 31(6): 1 102-1 112.]
- [12] MA Xulin, YU Yueming, CHEN Dehui. The present situation and prospects of the adaptive observation [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2015, 73(2): 221-235. [马旭林, 于月明, 陈德辉. 适应性观测研究现状和展望 [J]. 气象学报, 2015, 73(2): 221-235.]
- [13] LIU Deqiang, DING Ruiqiang, LI Jianping, *et al.* Preliminary application of the nonlinear local Lyapunov exponent to target observation [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2015, 39(2): 329-337. [刘德强, 丁瑞强, 李建平, 等. 非线性局部 Lyapunov 指数方法在目标观测中的应用初探 [J]. 大气科学, 2015, 39(2): 329-337.]
- [14] MAJUMDAR S J, ABERSON S, BISHOP C H, *et al.* Targeted observations for improving numerical weather prediction: an overview [R]. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization (WMO), WWRP/THORPEX No. 15, 2011.
- [15] LIMPET G L, HOUSTON A L. Ensemble sensitivity analysis for targeted observations of supercell thunderstorms [J]. *Monthly Weather Review*, 2018, 146(6): 1 705-1 721.
- [16] KERR C A, WANG Xuguang. Ensemble-based targeted observation method applied to radar radial velocity observations on idealized supercell low-level rotation forecasts: a proof of concept [J]. *Monthly Weather Review*, 2019, 148(3): 877-890.
- [17] CHOU K H, WU C C, LIN P H, *et al.* The impact of dropwindsonde observations on typhoon track forecasts in DOT-STAR and T-PARC [J]. *Monthly Weather Review*, 2011, 139(6): 1 728-1 743.
- [18] MU Mu, ZHOU Feifan, WANG Hongli. A method for identifying the sensitive areas in targeted observations for tropical cyclone prediction: conditional nonlinear optimal perturbation

- [J]. *Monthly Weather Review*, 2009, 137(5): 1 623-1 639.
- [19] KIM H M, KIM S M, JUNG B J. Real-time adaptive observation guidance using singular vectors for typhoon Jangmi (200815) in T-PARC 2008 [J]. *Weather & Forecasting*, 2011, 26(5): 634-649.
- [20] BUIZZA R, MONTANI A. Targeting observations using singular vectors [J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 1999, 56(17): 2 965-2 985.
- [21] YAMAGUCHI M, IRIGUCHI T, NAKAZAWA T, *et al.* An observing system experiment for Typhoon Conson (2004) using a singular vector method and DOTSTAR data [J]. *Monthly Weather Review*, 2009, 137(9): 2 801-2 816.
- [22] WEISSMANN M, HAMISCH F, WU C C, *et al.* The influence of assimilating dropsonde data on typhoon track and mid-latitude forecasts [J]. *Monthly Weather Review*, 2011, 139(3): 908-920.
- [23] KIM H M, JUNG B J. Singular vector structure and evolution of a recurving tropical cyclone [J]. *Monthly Weather Review*, 2009, 137(2): 505-524.
- [24] CHEN Boyu, MU Mu, QIN Xiaohao. The impact of assimilating dropwindsonde data deployed at different sites on typhoon track forecasts [J]. *Monthly Weather Review*, 2013, 141(8): 2 669-2 682.
- [25] WU C C, CHEN J H, LIN P H, *et al.* Targeted observations of tropical cyclones based on the adjoint derived sensitivity steering vector [J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 2007, 64(7): 2 611-2 626.
- [26] ZHOU Qian, DUAN Wansuo, HU Junya. Exploring sensitive area in the tropical Indian Ocean for El Niño prediction: implication for targeted observation [J]. *Journal of Oceanology and Limnology*, 2020, 38(16): 1 602-1 615.
- [27] HU Yajun, DUAN Wansuo. Relationship between optimal precursory disturbances and optimally growing initial errors associated with ENSO events: implications to target observations for ENSO prediction [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2016, 121(5): 2 901-2 917.
- [28] DUAN Wansuo, HU Yajun. The initial errors that induce a significant "spring predictability barrier" for El Niño events and their implications for target observation: results from an Earth system model [J]. *Climate Dynamics*, 2015, 46(11/12): 3 599-3 615.
- [29] FENG R, DUAN W, MU M. Estimating observing locations for advancing beyond the winter predictability barrier of Indian Ocean dipole event predictions [J]. *Climate Dynamics*, 2016, 48(3): 1 173-1 185.
- [30] DAI G, MU M, JIANG Z. Targeted observations for improving prediction of the NAO Onset [J]. *Journal of Meteorological Research*, 2019, 33(6): 1 044-1 059.
- [31] ZHANG Xing, MU Mu, WANG Qiang, *et al.* Application of the conditional nonlinear optimal perturbation method in targeted observation studies of Kuroshio [J]. *Journal of Marine Meteorology*, 2018, 38(1): 1-9.[张星, 穆穆, 王强, 等. 条件非线性最优扰动方法在黑潮目标观测中的应用 [J]. 海洋气象学报, 2018, 38(1): 1-9.]
- [32] WANG Qiang, MU Mu, DIJKSTRA H A. The similarity between optimal precursor and optimally growing initial error in prediction of Kuroshio large meander and its application to targeted observation [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, 118(2): 869-884.
- [33] HU Shu, LI Ying, WEI Na. Diagnostic analysis on Nari(0116) structure and intensity changes during its landfall process on Taiwan Island [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2013, 37(1): 81-90.[胡姝, 李英, 魏娜. 台风Nari(0116)登陆台湾过程中结构强度变化的诊断分析 [J]. 大气科学, 2013, 37(1): 81-90.]
- [34] LANG S T K, LEUTBECHER M, JONES S C. Impact of perturbation methods in the ECMWF ensemble prediction system on tropical cyclone forecasts [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2012, 138(669): 2 030-2 046.
- [35] WU C C, CHEN S G, LIN S C, *et al.* Uncertainty and predictability of tropical cyclone rainfall based on ensemble simulations of Typhoon Sinlaku (2008) [J]. *Monthly Weather Review*, 2013, 141(10): 3 517-3 538.
- [36] CHAN S T, DAVIDSON J, CAROFF P, *et al.* Track, intensity, and structure changes at landfall-forecasting challenges [C]//The third international workshop on tropical cyclone landfall processes, Jeju, republic of Korea: World Meteorological Organization (WMO), 2014.
- [37] CHEN T C, WU C C. The remote effect of Typhoon Megi (2010) on the heavy rainfall over northeastern Taiwan [J]. *Monthly Weather Review*, 2016, 144(9): 3 109-3 131.
- [38] LEI Xiaotu, ZHANG Xuefen, DUAN Wansuo, *et al.* Experiment on coordinated observation of offshore typhoon in China [J]. *Advances in Earth Science*, 2019, 34(7): 671-678.[雷小途, 张雪芬, 段晚锁, 等. 近海台风立体协同观测科学试验 [J]. 地球科学进展, 2019, 34(7): 671-678.]
- [39] LIU Deqiang, ZHANG Xubin, FENG Yerong, *et al.* Analysis of uncertainties in forecasts of Typhoon Soudelor (2015) from ensemble prediction models [J]. *SOLA*, 2018, 14(0): 203-209.
- [40] SHAPIRO M A, THORPE A J. THORPEX international science plan version 3 [R]. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization (WMO), WWRP/THORPEX No.2, 2004.
- [41] DUAN Wansuo, DING Ruiqiang, ZHOU Feifan. Several dynamical methods used in predictability studies for numerical weather forecasts and climate prediction [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2013, 18(4): 524-538.[段晚锁, 丁瑞强, 周非凡. 数值天气预报和气候预测可预报性研究的若干动力学方法 [J]. 气候与环境研究, 2013, 18(4): 524-538.]
- [42] ZHANG Z, KRISHNAMURTI T N. Adaptive observations for hurricane prediction [J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2000, 74(1/4): 19-35.
- [43] BERGOT T. Adaptive observations during FASTEX: a systematic survey of upstream flights [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1999, 125(561): 3 271-3 298.

- [44] SZUNYOGH I, TOTH Z, EMANUEL K A, *et al.* Ensemble-based targeting experiments during FASTEX: the effect of dropsonde data from the lear jet [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1999, 125(561): 3 189-3 217.
- [45] REYNOLDS C A, WEBSTER P J, KALNAY E. Random error growth in NMC's global forecasts [J]. *Monthly Weather Review*, 1994, 122(6): 1 281-1 305.
- [46] GELARO R, LANGLAND R H, ROHALY G D, *et al.* As assessment of the singular vector approach to targeted observing using the FASTEX dataset [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1999, 125(561): 3 299-3 327.
- [47] EMANUEL K, ZHANG F. On the predictability and error sources of tropical cyclone intensity forecasts [J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 2016, 73(9): 3 739-374.
- [48] EMANUEL K, ZHANG F. The role of inner-core moisture in tropical cyclone predictability and practical forecast skill [J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 2017, 74(7): 2 315-2 324.
- [49] ZHANG F, TAO D. Effects of vertical wind shear on the predictability of tropical cyclones [J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 2013, 70(3): 975-983.
- [50] TAO D, ZHANG F. Effects of vertical wind shear on the predictability of tropical cyclones: practical versus intrinsic limit [J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2015, 7(4): 1 534-1 553.
- [51] QIN Xiaohao, DUAN Wansuo, XU Hui. Sensitivity to tendency perturbations of tropical cyclone short-range intensity forecasts generated by WRF [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2020, 37(3): 291-306.
- [52] MUNSELL E B, ZHANG F. Prediction and uncertainty of Hurricane Sandy (2012) explored through a real-time cloud-permitting ensemble analysis and forecast system assimilating airborne Doppler radar observations [J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2014, 6(1): 38-58.
- [53] YAMAGUCHI M, MAJUMDAR S J. Using TIGGE data to diagnose initial perturbations and their growth for tropical cyclone ensemble forecasts [J]. *Monthly Weather Review*, 2010, 138(9): 3 634-3 655.
- [54] EMANUEL K A, DESAUTELS C, HOLLOWAY C, *et al.* Environmental control of tropical cyclone intensity [J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 2004, 61(7): 843-858.
- [55] TANG B, EMANUEL K A. Sensitivity of tropical cyclone intensity to ventilation in an axisymmetric model [J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 2012, 69(8): 2 394-2 413.
- [56] BUIZZA R, HOUTEKAMER P L, PELLERIN G, *et al.* A comparison of the ECMWF, MSC, and NCEP global ensemble prediction systems [J]. *Monthly Weather Review*, 2005, 133(5): 1 076-1 097.
- [57] KUNII M, MIYOSHI T. Including uncertainties of sea surface temperature in an ensemble Kalman filter: a case study of Typhoon Sinlaku (2008) [J]. *Weather Forecasting*, 2012, 27(6): 1 586-1 597.
- [58] CHEN S S, ZHAO W, DONELAN M A, *et al.* Directional wind-wave coupling in fully coupled atmosphere-wave-ocean models: results from CBLAST-Hurricane [J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 2013, 70(10): 3 198-3 215.
- [59] LIN I I, BLACK P, PRICE J F, *et al.* An ocean coupling potential intensity index for tropical cyclones [J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(9): 1 878-1 882.
- [60] ROGERS R. Convective-scale structure and evolution during a highresolution simulation of tropical cyclone rapid intensification [J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 2010, 67(1): 44-70.
- [61] ROZOFF C M, KOSSIN J P, SCHUBERT W H, *et al.* Internal control of hurricane intensity variability: the dual nature of potential vorticity mixing [J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 2009, 66(1): 133-147.
- [62] JUDT F, CHEN S S, BERNER J. Predictability of tropical cyclone intensity: scale-dependent forecast error growth in high-resolution stochastic kinetic-energy backscatter ensembles [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2016, 142(694): 43-57.
- [63] LANGLAND R H, TOTH Z, GELARO R, *et al.* The North Pacific Experiment (NORPEX-98): targeted observations for improved North American weather forecasts [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1999, 80(7): 1 363-1 384.
- [64] LANGLAND R H, GELARO R, ROHALY G D, *et al.* Targeted observations in FASTEX: adjoint-based targeting procedures and data impact experiments in IOP17 and IOP18 [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1999, 125(561): 3 241-3 270.
- [65] LORD S J. The impact on synoptic-scale forecasts over the United States of dropwindsonde observations taken in the northeast Pacific [C]//11th conference on numerical weather prediction. Norfolk: American Meteorology Society, 1996: 70-71.
- [66] BURPEE R W, FRANKLIN J L, LORD S J, *et al.* The impact of omega dropwindsondes on operational hurricane track forecast models [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1996, 77(5): 925-933.
- [67] ABERSON S D, FRANKLIN J L. Impact on hurricane track and intensity forecasts of GPS dropwindsonde observations from the first-season flights of the NOAA Gulfstream-IV jet aircraft [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1999, 80(3): 421-427.
- [68] PALMER T N, GELARO R, BARKMEIJER J, *et al.* Singular vectors, metrics, and adaptive observations [J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 1998, 55(4): 633-653.
- [69] MU Mu, ZHOU Feifan. The research progress of the typhoon targeted observations based on CNOP method [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2015, 5(3): 6-17. [穆穆, 周非凡. 基于 CNOP 方法的台风目标观测研究进展[J]. 气象科技进展, 2015, 5(3): 6-17.]
- [70] BAKER N L, DALEY R. Observation and background adjoint sensitivity in the adaptive observation-targeting problem [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2000,

- 126(565): 1 431-1 454.
- [71] LANGLAND R H, ROHALY G D. Adjoint-based targeting of observations for FASTEX cyclones [C]//Proceedings of the 7th Mesoscale Processes Conference. American Meteorological Society, 1996: 369-371.
- [72] PU Zhaoxia, LORD S J, KALNAY E. Forecast sensitivity with dropwindsonde data and targeted observations [J]. *Tellus A*, 1998, 50(4): 391-410.
- [73] PU Zhaoxia, KALNAY E. Targeting observations with the quasi-inverse linear and adjoint NCEP global models: performance during FASTEX [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1999, 125(561): 3 329-3 337.
- [74] REYNOLDS C A, GELARO R, Palmer T N. Examination of targeting methods in a simplified setting [J]. *Tellus A*, 2000, 52(4): 391-411.
- [75] WU C C, CHOU K H, LIN P H, *et al.* The impact of dropwindsonde data on typhoon track forecasts in DOTSTAR [J]. *Weather & Forecasting*, 2007, 22(6): 1 157-1 176.
- [76] WU C C, CHEN J H, MAJUMDAR S J, *et al.* Intercomparison of targeted observation guidance for tropical cyclones in the northwestern Pacific [J]. *Monthly Weather Review*, 2015, 137(8): 2 471-2 492.
- [77] LORENZ E N, EMANUEL K A. Optimal sites for supplementary weather observations: simulation with a small model [J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 1998, 55(3): 399-414.
- [78] BISHOP C H, TOTH Z. Ensemble transformation and adaptive observations [J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 1999, 56(11): 1 748-1 765.
- [79] BISHOP C H, ETHERTON B J, MAJUMDAR S J. Adaptive sampling with the ensemble transform Kalman filter. Part I: theoretical aspects [J]. *Monthly Weather Review*, 2001, 129(3): 420-436.
- [80] WANG Bin, TAN Xiaowei. A fast algorithm for solving CNOP and associated target observation tests [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2009, 67(2): 175-188.[王斌, 谭晓伟. 一种求解条件非线性最优扰动的快速算法及其在台风目标观测中的初步检验[J]. 气象学报, 2009, 67(2): 175-188.]
- [81] WANG Bin, TAN Xiaowei. Conditional nonlinear optimal perturbations: adjoint-free calculation method and preliminary test [J]. *Monthly Weather Review*, 2010, 138(4): 1 043-1 049.
- [82] TAN Xiaowei, WANG Bin, WANG Dongliang. Impact of different guidances on sensitive areas of targeting observations based on the CNOP method [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2010, 24(1): 17-30.
- [83] TOTH Z, KALNAY E. Ensemble forecasting at NCEP and the breeding method [J]. *Monthly Weather Review*, 1997, 125(12): 3 297-3 319.
- [84] DING Ruiqiang. Nonlinear error dynamics and predictability study [D]. Beijing: Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 2006.[丁瑞强. 非线性误差增长理论与可预报性研究 [D]. 北京: 中国科学院大气物理研究所, 2006.]
- [85] DING Ruiqiang, LI Jianping. Nonlinear error dynamics and predictability study [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2007, 31(4): 571-576.[丁瑞强, 李建平. 误差非线性增长理论与可预报性研究[J]. 大气科学, 2007, 31(4): 571-576.]
- [86] DING Ruiqiang, LI Jianping. Application of nonlinear error growth dynamics in studies of atmospheric predictability [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2009, 67(2): 241-249.[丁瑞强, 李建平. 非线性误差增长理论在大气可预报性中的应用[J]. 气象学报, 2009, 67(2): 241-249.]
- [87] DING Ruiqiang, LI Jianping. The temporal-spatial distributions of weather predictability of different variables [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2009, 67(3): 343-354.[丁瑞强, 李建平. 天气可预报性的时空分布[J]. 气象学报, 2009, 67(3): 343-354.]
- [88] LI Jianping, DING Ruiqiang. Temporal-spatial distributions of predictability limit of short-term climate [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2008, 32(4): 975-986.[李建平, 丁瑞强. 短期气候可预报期限的时空分布[J]. 大气科学, 2008, 32(4): 975-986.]
- [89] LI Jianping, DING Ruiqiang. Studies of predictability of single variable from multi-dimensional chaotic dynamical system [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2009, 33(3): 551-556.[李建平, 丁瑞强. 混沌系统单变量可预报性研究[J]. 大气科学, 2009, 33(3): 551-556.]
- [90] DING Ruiqiang, LI Jianping. Nonlinear finite-time Lyapunov exponent and predictability [J]. *Physics Letters A*, 2007, 364(5): 396-400.
- [91] DING Ruiqiang, LI Jianping, HA K J. Trends and interdecadal changes of weather predictability during 1950s-1990s [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, 113: D24112.
- [92] DING Ruiqiang, LI Jianping, SEO K H. Predictability of the Madden-Julian oscillation estimated using observational data [J]. *Monthly Weather Review*, 2010, 138(3): 1 004-1 013.
- [93] DING Ruiqiang, LI Jianping, SEO K H. Estimate of the predictability of boreal summer and winter intraseasonal oscillations from observations [J]. *Monthly Weather Review*, 2011, 139(8): 2 421-2 438.
- [94] LI Jianping, DING Ruiqiang. Temporal-spatial distribution of atmospheric predictability limit by local dynamical analogues [J]. *Monthly Weather Review*, 2011, 139(10): 3 265-3 283.
- [95] LI Jianping, DING Ruiqiang. Temporal-spatial distribution of the predictability limit of monthly sea surface temperature in the global oceans [J]. *International Journal of Climatology*, 2013, 33(8): 1 936-1 947.
- [96] FENG Jie, DING Ruiqiang, LIU Deqiang, *et al.* The application of nonlinear local lyapunov vectors to ensemble predictions in the lorenz systems [J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 2014, 71(9): 3 554-3 567.
- [97] FENG Jie, DING Ruiqiang, LI Jianping, *et al.* Comparison of nonlinear local Lyapunov vectors and bred vectors in estimating the spatial distribution of error growth [J]. *Journal of Atmo-*

- spheric Sciences, 2018, 75(4): 1 073-1 087.
- [98] MA Xulin, YU Yueming, JING Sheng, *et al.* Optimization and influence experiment to identify sensitive areas for target observations on ETKF method [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2014, 37(6): 749-757. [马旭林, 于月明, 姜胜, 等. 基于集合卡尔曼变换的目标观测敏感区识别系统优化及影响试验[J]. 大气科学快报, 2014, 37(6): 749-757.]
- [99] BERGOT T, HELLO G, JOLY A, *et al.* Adaptive observations: a feasibility study [J]. *Monthly Weather Review*, 1999, 127(5): 743-765.
- [100] MOLTENI F, BUIZZA R, PALMER T N, *et al.* The ECMWF ensemble prediction system: methodology and validation [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1996, 122(529): 73-119.
- [101] BUIZZA R, PALMER T N. The singular-vector structure of the atmospheric global circulation [J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 1995, 52(9): 1 434-1 456.
- [102] ANDERSON J L. The impact of dynamical constraints on the selection of initial conditions for ensemble predictions: low-order perfect model results [J]. *Monthly Weather Review*, 1997, 125(11): 2 969-2 983.
- [103] BERGOT T, MALARDEL S, JOLY A. Sensitivity and singular vector calculations in the operational context of FASTEX [C]//Proceedings of the 7th Mesoscale Processes Conference. American Meteorological Society, 1996: 366-368.
- [104] MU Mu, DUAN Wansuo. Conditional nonlinear optimal perturbation and its applications to the studies of weather and climate predictability [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(24): 2 695-2 701. [穆穆, 段晚锁. 条件非线性最优扰动及其在天气和气候可预报性研究中的应用[J]. 科学通报, 2005, 50(24): 2 695-2 701.]
- [105] YU Yanshan, MU Mu, DUAN Wansuo, *et al.* Contribution of the location and spatial pattern of initial error to uncertainties in El Niño predictions [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2012, 117: C06018.
- [106] MU Mu, YU Yanshan, XU Hui, *et al.* Similarities between optimal precursors for ENSO events and optimally growing initial errors in El Niño predictions [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2014, 115(3/4): 461-469.
- [107] QIN Xiaohao, DUAN Wansuo, MU Mu. Conditions under which CNOP sensitivity is valid for tropical cyclone adaptive observations [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2013, 139(675): 1 544-1 554.
- [108] ZHOU Feifan, MU Mu. The impact of verification area design on tropical cyclone targeted observations based on the CNOP method [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2011, 28(5): 997-1 010.
- [109] YU H, WANG H, MENG Z, *et al.* A WRF-based tool for forecast sensitivity to the initial perturbation: the conditional nonlinear optimal perturbations versus the first singular vector method and comparison to MM5 [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2017, 34(1): 186-206.
- [110] TIAN Xiangjun, FENG Xiaobing. An adjoint-free CNOP-4DVar hybrid method for identifying sensitive areas in targeted observations: method formulation and preliminary evaluation [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2019, 36(7): 721-732.
- [111] MU Bin, REN Juhui, YUAN Shijin, *et al.* Identifying typhoon targeted observations sensitive areas using the gradient definition based method [J]. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 2018, 55(6): 1-13.
- [112] EVENSEN G. Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1994, 99(C5). DOI: 10.1029/94JC00572.
- [113] MAJUMDAR S J, BISHOP C H, ETHERTON B J, *et al.* Can an ensemble transform Kalman filter predict the reduction in forecast-error variance produced by targeted observations [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2001, 127(578): 2 803-2 820.
- [114] PETERSEN G N, MAJUMDAR S J, THORPE A J. The properties of sensitive area predictions based on the Ensemble Transform Kalman Filter (ETKF) [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2007, 133(624): 697-710.
- [115] ZHANG Yu, XIE Yuanfu, WANG Hongli, *et al.* Ensemble transform sensitivity method for adaptive observations [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2016, 33(1): 10-20.
- [116] ZHANG Guangzhi, XU Xiangde, WANG Jizhi, *et al.* A study on wind and disturbance characteristics of landing typhoon "Vongfong" by using data of CLATEX [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2004, 15(Suppl.): 110-115. [张光智, 徐祥德, 王继志, 等. 采用外场观测试验资料对登陆台风"黄蜂"的风场及湍流特征的观测研究[J]. 应用气象学报, 2004, 15(增刊): 110-115.]
- [117] GELARO R, LANGLAND R H, PELLERIN S, *et al.* The THORPEX Observation Impact Intercomparison Experiment [J]. *Monthly Weather Review*, 2010, 138(11): 4 009-4 025.
- [118] RABIER F, GAUTHIER P, CARDINALI C, *et al.* An update on THORPEX-related research in data assimilation and observing strategies [J]. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2008, 15(1): 81-94.
- [119] SZUNYOGH I, TOTTH Z, MORSS R E, *et al.* The effect of targeted dropsonde observations during the 1999 Winter Storm Reconnaissance Program [J]. *Monthly Weather Review*, 2000, 128(10): 3 520-3 537.
- [120] WU C C, CHEN S G, YANG C C, *et al.* Potential vorticity diagnosis of the factors affecting the track of Typhoon Sinlaku (2008) and the impact from dropwindsonde data during T-PARC [J]. *Monthly Weather Review*, 2012, 140(8): 2 670-2 688.
- [121] CHOU K H, WU C C. Development of the typhoon initialization in a mesoscale model—Combination of the bogus vortex with the dropwindsonde data in DOTSTAR [J]. *Monthly Weather Review*, 2008, 136(3): 865-879.
- [122] ANCELL B, HAKIM G J. Comparing adjoint- and ensemble-sensitivity analysis with applications to observation targeting

- [J]. *Monthly Weather Review*, 2007, 135(12): 4 117-4 134.
- [123] QIN Xiaohao, MU Mu. Influence of conditional nonlinear optimal perturbations sensitivity on typhoon track forecasts [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2012, 138(662): 185-197.
- [124] QIN Xiaohao, MU Mu. A study on the reduction of forecast error variance by three adaptive observation approaches for tropical cyclone prediction [J]. *Monthly Weather Review*, 2011, 139(7): 2 218-2 232.
- [125] WANG Hongli, MU Mu, HUANG Xiangyu. Application of conditional non-linear optimal perturbations to tropical cyclone adaptive observation using the Weather Research Forecasting (WRF) model [J]. *Tellus Series A—Dynamic Meteorology & Oceanography*, 2011, 63(5): 939-957.
- [126] MA Xulin. Study on the ensemble transformation Kalman filter-based adaptive observation and applications [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2008. [马旭林. 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, 2008.]
- [127] HUO Zhenhua, DUAN Wansuo, ZHOU Feifan. Ensemble forecasts of tropical cyclone track with orthogonal conditional non-linear optimal perturbations [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2019, 36(2): 231-247.
- [128] BARKMEIJER J, BUIZZA R, PALMER T N, *et al.* Tropical singular vectors computed with linearized diabatic physics [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2001, 127(572): 685-708.
- [129] PENG M S, REYNOLDS C A. Sensitivity of tropical cyclone forecasts as revealed by singular vectors [J]. *Journal of Atmospheric Sciences*, 2006, 63(10): 2 508-2 528.
- [130] MORSS R E. Adaptive observations: idealized sampling strategies for improving numerical weather prediction [D]. Cambridge, MA, USA: Massachusetts Institute of Technology, 1998.
- [131] PURI K, BARKMEIJER J, PALMER T N. Ensemble prediction of tropical cyclones using targeted diabatic singular vectors [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2001, 127(572): 709-731.
- [132] LEUTBECHER M, LOCK S J, OLLINAHO P, *et al.* Stochastic representations of model uncertainties at ECMWF: state of the art and future vision [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2017, 143(707): 2 315-2 339.
- [133] DUAN W S, ZHOU F F. Non-linear forcing singular vector of a two-dimensional quasi-geostrophic model [J]. *Tellus A*, 2013, 65(1): 1-19.
- [134] LI Jianping, DING Ruiqiang, CHEN Baohua. Review and prospect on the predictability study of the atmosphere [C]//Review and prospect of the developments of atmosphere sciences in early 21st century. Beijing: China Meteorology Press, 2006. [李建平, 丁瑞强, 陈宝花. 大气可预报性研究的回顾与展望 [C]//21 世纪初大气科学前沿与展望. 北京: 气象出版社, 2006.]

Review of the Research Progress in Targeted Observing for Typhoons*

LIU Deqiang^{1,2,3,4}, FENG Jie⁵, DING Ruiqiang⁶, LI Jianping^{7,8*}

(1.Fujian Meteorological Observatory, Fuzhou 350001, China; 2.State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China; 3.Fujian Key Laboratory of Severe Weather, Fuzhou 350001, China; 4.Wuyishan National Climatological Observatory, Wuyishan Fujian 354306, China; 5.Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, Fudan University, Shanghai 200438, China; 6.State Key Laboratory of Earth Surface Progress and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 7.Frontiers Science Center for Deep Ocean Multispheres and Earth System (FDOMES)/Key Laboratory of Physical Oceanography/Institute for Advanced Ocean Studies, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 8.Laboratory for Ocean Dynamics and Climate, Pilot Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China)

Abstract: Targeted observing for typhoons would be helpful in both the scientific endeavor and practical significance to making up the lack of conventional observations and improving numerical prediction skills. Relevant developments of two clusters of theoretical methods were summarized, and the advantages as well as the disadvantages were compared. The methods involving adjoint model can better describe the influence of nonlinear errors, while the methods based on ensembles save more computing resources. The applications of some new observation instruments and platforms which represent the current most advanced observation technology to the field campaigns for typhoons landing in China were overviewed. Then the feasibility of targeted observing for typhoon was summarized from two perspectives of individual case and multiple individual cases. Moreover, it is found that factors including tangent linearity hypothesis, model defects, selected metrics, and ensemble numbers may lead to significant differences in locating the sensitivity areas of typhoons, which should not be neglected. Future research directions should highlight the applications of targeted observing to typhoon intensity, the further developments of nonlinear methods and numerical models, and the implement schemes of typhoon targeted observing that is suitable for the meteorological operations in China.

Key words: Typhoon; Targeted observing; Observation instrument and platform; Field campaign for typhoons.

* **Foundation item:** Project supported by the Natural Science Foundation of Fujian Province "Study on the global predictability characteristics of typhoon intensity that affecting the Taiwan strait" (Grant No. 2020J01100); The Open Project of State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences "A study of the local climatological sensitivity area for typhoons affecting the Taiwan Strait" (Grant No. 2020LASW-B10).

First author: LIU Deqiang (1987-), male, Hailun City, Heilongjiang Province, Senior engineer. Research areas include numerical simulations, predictability study. **E-mail:** deqiang_1987@163.com

* **Corresponding author:** LI Jianping (1969-), male, Shanyin County, Shanxi Province, Professor. Research areas include climate dynamics and predictability, monsoons, and annular modes and their impacts. **E-mail:** lj@ouc.edu.cn