

适应性观测研究现状和展望^{* 1}

马旭林¹ 于月明¹ 陈德辉²
MA Xulin¹ YU Yueming¹ CHEN Dehui²

1. 气象灾害教育部重点实验室/南京信息工程大学, 南京, 210044

2. 国家气象中心, 北京, 100081

1. *Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, NUIST, Nanjing 210044, China*

2. *National Meteorological Center, Beijing 100081, China*

2014-03-13 收稿, 2014-12-02 改回.

马旭林, 于月明, 陈德辉. 2015. 适应性观测研究现状和展望. 气象学报, 73(2):221-235

Ma Xulin, Yu Yueming, Chen Dehui. 2015. The present situation and prospects of the adaptive observation. *Acta Meteorologica Sinica*, 73(2):221-235

Abstract The adaptive observation refers to those effective supplement observations in a sensitive area /duration to the regular observing network, which, through data assimilation, optimally improves forecasts of high-impact weather events of importance to society in a specified region. This new strategy is aimed at improving the skill of the numerical weather prediction has been paid great attention in the world in the past decade. A number of field observation experiments have been carried out successfully. Many research works on the adaptive observation strategies have been conducted to identify sensitive areas and quantitatively evaluate the impact of targeted observation assimilation on numerical weather predictions. In this paper, after a brief introduction of the objectives of targeted observations, the progress on the various methods to identify sensitive areas and the impact of targeting observations on the skill of numerical weather prediction is reviewed, and some key scientific issues for the use of targeted observations in the future to maximize the positive impact on forecasts are also discussed.

Key words Numerical weather prediction, Data assimilation, Adaptive observation, Sensitive area

摘要 适应性观测是指为了有针对性地提高高影响天气数值预报的质量,在已有观测系统基础上对特定敏感区域/特定时段进行补充性加强观测。十多年来,这种旨在提高数值预报质量的新策略在国际上引起高度重视,成功开展了多个系列外场观测试验,并在适应性观测敏感区识别方法的发展和适应性观测资料同化后对数值预报质量影响的定量评估等方面均取得了重要的研究成果。文中简述了适应性观测问题及其目的,着重分析和总结了目标敏感区识别方法及其特点和适应性观测对数值预报质量的影响等方面的研究进展,并讨论了适应性观测资料改进未来数值预报质量需要解决的关键科学问题。

关键词 数值预报, 资料同化, 适应性观测, 观测敏感区

中图法分类号 P456.7

1 引言

数值天气预报近几十年来取得了显著进步,但由于数值模式系统的不确定性,数值天气预报尤其

高影响天气预报仍然常会失败。造成数值预报不确定性的主要因素一是支配大气运动的物理规律和次网格过程的参数化方案的不确定性;二是由于观测的系统误差和随机误差、观测时空覆盖范围的非均

* 资助课题:国家自然科学基金项目(41275111、41105057)、重大研究计划培育项目(91437113)、科技部公益行业(气象)专项(GYHY201106050)、江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)。

作者简介:马旭林,主要从事数值预报资料同化与集合预报研究。E-mail: xulinma@nuist.edu.cn

通讯作者:陈德辉,主要从事数值预报研究。E-mail: chendh@cma.gov.cn

一性、观测系统在模式格点分辨的时空尺度代表性以及资料同化系统中的线性近似等所引起的初始条件的不确定性。天气尺度系统的预报误差通常是由于初始条件的不准确所引起,这些初始误差在预报初期可能很小但增长迅速,或者由于观测资料的缺乏和模式初始场误差偏大而较大。尽管资料同化方案在持续完善,地球观测系统的探测能力也迅速提高,卫星遥感、无线电探空仪、机载雷达、飞机下投式探空、雷达风廓线仪等新型观测设备的快速发展,均为改进数值预报的初值质量提供了新的机遇,但是,依托现有观测系统所获得的观测资料相对于模式分辨率依然非常稀疏,且资料分布不均匀,尤其海洋区域更为稀少。另外,卫星辐射率资料又常受云的影响而处理起来困难较多,从而导致数值预报的初值误差依然较大。

数值预报中,观测信息的有效使用是做出准确预报的核心基础。近年来,随大气状态变化的最优观测配置的识别问题是一个非常活跃的研究方向。关于高影响天气系统预报误差增长、传播和可预报性的研究表明,其上游区域通常存在一个初值敏感区,若在该敏感区域加强观测,则对改善数值预报模式初值质量具有显著的贡献。据此,气象学家提出了适应性观测的思想(Rabier, et al, 1996; Snyder, 1996; Emanuel, et al, 1997; Bergot, 1999)。世界气象组织(WMO)在2003年提出的一项为期10 a,旨在推进观测预报一体化、改进天气预报服务的世界天气研究国际科学计划——《全球观测系统研究与可预报性试验(THORPEX)》(Shapiro, et al, 2004),已将这种改善数值预报技巧的新思想纳入提高全球高影响天气确定性预报的科学框架。该科学计划以快速提高1—14 d预报准确率为主要目的,以观测系统布设和数值天气预报系统的发展研究为核心内容,以建立全球交互式预报系统为最终目标。适应性观测主要涉及该计划中观测系统、观测策略与资料同化两个方面的科学问题。中国也实施了相应的《观测系统研究与可预报性试验-中国计划(THORPEX-China)》(THORPEX 中国委员会, 2006)。因此,研究解决适应性观测相关科学技术问题成为国际大气科学研究的核心目标之一。

自从THORPEX科学计划实施以来,国际上对基于适应性观测的交互式观测预报系统开展了积极研究。适应性观测对于补充已有观测资料的不足具

有重要作用,同时也是改进观测系统布设、提高观测资料应用效率的有效方法。新的观测策略意味着观测与预报系统紧密联系,适应性观测敏感区需要通过数值模式预报结果进行识别,而预报质量又由观测敏感区的补充资料得到改善,这无疑为提高高影响天气的预报技巧提供了新思路。未来的天气预报可能从单向预报转变为“交互式”的观测与预报,以便更有针对性地提供气象服务。针对这一观测与预报交互作用研究的前沿科学问题愈加受到科学家的重视,外场观测试验和适应性观测方法的研究也都取得了丰硕的成果。

THORPEX资料同化和观测系统工作组(DAOS WG)对适应性观测资料和各种适应性观测方法的阶段性成果做了评估(Rabier, et al, 2008),为下一步的外场观测试验和全球观测系统配置提供指导,Majumdar等(2011a)也结合过去十多年来国际上适应性观测的研究和外场试验进行了分析总结,但都没有涉及中国科学家在此领域的研究工作和取得的成果。穆穆(2013)也对目前国际上大气和海洋科学研究与应用中适应性观测的现状与发展进行了分析讨论。随着观测系统的快速发展和数值预报模式分辨率的提高以及物理参数化方案、资料同化系统等进一步完善,最近的研究也指出适应性观测对分析和预报的影响并不如之前预期的效果明显(Hamill, et al, 2013)。本研究从适应性观测问题的提出、观测敏感区识别方法、外场试验等方面,结合中国科学家在适应性观测研究和应用方面取得的科研成果,对十多年来适应性观测领域的研究进展进行了较全面的综合分析和总结,指出了现阶段取得的研究成果和可能存在的问题,希望为中国资料同化和观测系统配置的进一步研究和实际应用提供参考。

2 适应性观测问题

观测系统最优配置的研究长期以来受到气象学家的重视,其中以改善指定验证区预报质量为目的的观测敏感区(或瞄准区)的识别逐步成为研究重点(Toth, et al, 2001)。Snyder(1996)在1995年的工作会议上首次明确提出了适应性观测的理念,指出适应性观测策略的目的在于对分析误差较大且增长迅速,同时预报误差对其比较敏感的区域,通过移动加强观测平台获取敏感区的加强观测资料以改善验

证区的数值天气预报技巧。具体来说,适应性观测是指为了进一步改善某一特定时刻(验证时刻)、特定区域(验证区)的天气预报质量,减小具有重大社会或经济影响的天气事件预报的不确定性,通过客观方法首先识别出该验证区主要天气系统对应的通常位于其上游地区的观测敏感区,然后在该敏感区域利用机载雷达、下投式探空等加强气象观测,并将该观测资料与原有常规和非常规观测资料一起同化,以改进该上游区域气象初始场的质量,从而达到减小验证时刻、验证区数值天气预报误差的目的。显然,为实现观测资料最优配置,观测敏感区的准确识别是适应性观测的关键科学问题之一。通常,这种观测区域和时间具有较强适应性的加强观测亦称为目标观测。

适应性观测研究主要包含观测敏感区的识别方法、适应性观测的实施和资料同化及预报等方面。观测敏感区可以通过多种适应性观测方法进行识别定位,适应性观测资料主要包括飞机下投式探空、机载雷达、无线电探空仪等直接观测资料或者雷达风廓线仪、卫星遥感资料等。适应性观测是观测策略研究的一项重要内容,当前国际上开展了大量的外场观测试验和深入研究,在观测敏感区识别方法和同化方案优化等方面积累了较丰富的实践经验。观测敏感区的确定通常具有相互关联的两种不同方式。首先,针对有限的观测资料实施观测以获得最优分析。Lorenz等(1998)与Morss等(2001)提出了基于集合预报初始误差的估计来识别确定性预报初始误差最大区域的方法,通过在确定性预报初始误差较大的区域(即观测敏感区)加强观测并同化,实现数值预报模式初始场质量的最大改善。这种方案主要考虑尽可能有效减小初值误差,从而间接提高确定性预报的质量;另一种方式则是以直接减少确定性预报误差为最终目标。针对可能存在最大预报误差的验证区,通过适应性观测方法找出对确定性预报误差的减少具有最大贡献的观测敏感区,实施加强观测。将适应性观测资料与常规和非常规观测资料通过资料同化形成数值预报模式的初值场,从而有效地实现最大程度改善验证时刻、验证区的预报质量。

基于伴随或者集合预报的适应性观测方法通常可以提前1 d或更长时间识别出实施加强观测的“观测敏感区”。这里,观测敏感区的确定通常基于

以下方面考虑:(1)初始误差较大或能够快速增长;(2)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。实际上,天气系统的观测敏感区并非固定不变,而且也依赖不断变化的具体天气形势和预报验证区的位置和范围。同一天气系统的观测敏感区往往因适应性观测方法的不同而存在程度不等的差异。因此,对于具体的天气系统,有效确定最优观测敏感区的客观科学方法依然是适应性观测研究的一个重要内容。

3 适应性观测研究进展

3.1 观测敏感区识别方法

观测敏感区识别方法是适应性观测研究的关键问题。随着研究的不断深入和外场观测试验的实施,气象学家从分析误差与预报误差的角度先后提出了多种识别观测敏感区的适应性观测方法。对于给定的资料同化和模式预报方案,Majumdar等(2011a)认为理想情况下适应性观测方法需要考虑:(1)高影响天气事件的预报误差;(2)常规观测和其他原有观测在适应性观测资料同化时刻的影响;(3)资料同化方案的特征;(4)适应性观测的类型和精度的特征;(5)同化适应性观测资料对预报的可能影响等。最初的观测敏感区识别方法,如总能量奇异向量、集合变换等,只是给出了预报对初始条件“敏感性”的简单估计。新的适应性观测方法不仅包含分析不确定性的估计信息,也考虑了观测资料与同化过程的内在关系。这些方法大致可以分为两类:第一类为基于线性近似的预报误差动力学传播确定观测敏感区,典型方法有准反向线性模式法(Pu, et al, 1997)、奇异向量法(SVs, Palmer, et al, 1998)、伴随敏感性法(Bergot, 1999)和观测敏感性法(Baker, et al, 2000)等。同时,基于集合预报的非线性预报误差传播及其分析、预报不确定性的第二类目标观测方法也得到快速发展,如以集合预报为基础的集合发散法(Lorenz, et al, 1998)、集合变换法(Bishop, et al, 1999)和集合卡尔曼变换方法(ETKF, Bishop, et al, 2001),以及结合三维变分同化的Hessian奇异向量法(HSVs, Barkmeijer, et al, 1998)、分析奇异向量法(Gelaro, et al, 2002; Hamill, et al, 2003)和利用集合卡尔曼滤波改善背景误差协方差结构的适应性观测方法(Hamill, et

al, 2002)等。2003年大西洋 THORPEX 区域试验(A-TReC)和以后的外场试验中,奇异向量与集合卡尔曼变换方法得到更加充分的应用与检验。随着外场观测试验的不断实施和研究的逐步深入,集合敏感性方法(Torn, et al, 2008)和针对热带气旋的伴随敏感性引导向量方法(ADSSV, Wu, et al, 2007a)等新的观测敏感区识别方法得以发展,其中ADSSV方法在 THORPEX 太平洋-亚洲区域试验(T-PARC)夏季期间首次被应用到热带气旋的中尺度模式中(Reynolds, et al, 2010)。中国科学家提出的一种新的适应性观测方法——条件非线性最优扰动法(CNOP, 穆穆等, 2007),在适应性观测研究中也取得了良好的效果。

3.1.1 奇异向量方法

基于Lorenz(1965)与Farrell(1989, 1990)提出的奇异向量思想,Palmer等(1998)发展了奇异向量方法——在预报时效内,根据预报误差协方差矩阵的主特征向量确定适应性观测敏感区。该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。这种线性近似通常假定初始误差具有比较小的扰动振幅,而且有效预报时间限制在满足线性传播机制的72 h以内。奇异向量方法中,全部奇异向量的线性组合能够准确描述初始误差的结构特征。因此,如果初始误差符合随机误差分布,而且满足预报误差线性传播的假设条件,则前有限个主奇异向量就能够很好地解释确定性预报验证区的主要预报误差方差。

奇异向量方法忽略模式预报误差,从而预报误差协方差矩阵只是理论上的最优估计(Ehrendorfer, et al, 1997)。由于观测和分析误差协方差的估计不能足够准确,可能会对奇异向量方法确定的最优观测敏感区造成较大影响。因此,在实际应用中通常利用总能量奇异向量(Palmer, et al, 1998)识别观测敏感区。总能量奇异向量方法的试验表明,主奇异向量方向上分析场较小的变化就可以引起预报误差的较大改善,显示了该方法能够具有准确识别对目标时刻分析场具有重要意义的适应性观测高敏感区的能力(Gelaro, et al, 1998, 2000)。在此基础上,采用更加可靠的分析误差协方差,进一步提出了Hessian奇异向量方法(Barkmeijer, et al, 1998, 1999)。该方法解释的预报误差比总能量奇异向量

法至少增加48 h,观测敏感区的准确度也相对更高。虽然目前还没有理论或试验结果表明奇异向量方法能够精确地识别观测敏感区,但将奇异向量与观测梯度方法结合,则可以直接通过奇异向量定量识别出主奇异向量方向上验证区内预报误差方差的减少量(Gelaro, et al, 2002),从而较准确地确定适应性观测敏感区。

基于奇异向量的适应性观测方法,本质上是寻找初始场中较小变化可能导致较大预报误差的区域作为观测敏感区,但它没有显式地考虑适应性观测资料对预报误差的影响,这是与理论上最优的适应性观测方法(Berliner, et al, 1999)的显著区别。另外,该方法有效应用的前提是线性模式能够近似描述初始误差的发展,亦即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的影响。因此不能代表非线性模式中的增长最快的有限振幅的初始误差(Mu, et al, 2003a)。尽管如此,作为较早提出的一种适应性观测方法,实践证明奇异向量方法确定的观测敏感区还是能够比较有效地改善确定性预报中验证区内的预报技巧。

3.1.2 集合卡尔曼变换方法

集合卡尔曼变换(ETKF, Bishop, et al, 2001; Majumdar, et al, 2002a)是集合变换(Bishop, et al, 1999)的扩展,二者均属于最优适应性观测方案的范畴,且都是以同化适应性观测资料以减少验证时刻的预报误差方差为目的。集合卡尔曼变换方法根据确定的验证时刻验证区(即高影响天气可能发生的区域),直接利用一组集合预报扰动的线性组合近似表示出集合估计的预报误差协方差;在集合子空间求解集合卡尔曼误差更新方程得到变换矩阵,从而将集合估计的预报误差协方差变换为分析误差协方差,获得适应性观测引起的预报误差方差的减少量,即验证区对应的信号方差;然后根据信号方差的空间分布结构,定量地估计出观测敏感区的位置。这里,信号方差由不同高度的风场、温度场和气压场等构造合适的度量函数(如总能量、全能量等)进行定量表示。虽然集合估计的误差协方差矩阵可能不满秩,也没有显式考虑模式误差,但该方法隐式包含了预报误差随天气形势变化的属性,实践中能较好地描写误差协方差的主要特征。同时,集合卡尔曼变换方法在集合子空间通过特征值分解计算变换矩阵,快速地得到验证区对应的信号方差,极大地减少

了计算量,在实际运行中比集合变换具有更强的实用性。

值得注意的是,预报误差动力学线性传播是集合卡尔曼变换方法中将预报误差协方差结合观测资料信息变换为分析误差协方差的假定条件。在满足该条件的基础上,若集合估计的预报误差协方差矩阵和分析误差协方差矩阵近似准确,并与资料同化系统一致,则表征预报误差减少的信号方差与适应性观测资料引起的预报误差方差的减少具有等价关系(Bishop, et al, 2001)。当然,这也依赖于预报模式的预报性能和质量。如果分析误差协方差和预报误差协方差与资料同化系统不完全一致,那么即使集合估计的误差协方差相对准确,集合卡尔曼变换系统中随具体天气形势变化的误差统计结构仍然会影响信号方差空间结构的准确程度,可能导致该方法过高估计适应性观测资料对预报质量改善的影响(Majumdar, et al, 2002a)。针对这一问题,在实际应用中,通常将集合卡尔曼变换方法的误差结构与资料同化方案的背景误差结构进一步协调(Hamill, et al, 2002);同时,在集合估计的预报误差协方差的主特征向量方向上,结合扩展梯度敏感性方法共同确定适应性观测资料引起的预报误差方差的减少量。此外,在集合卡尔曼变换方法确定观测敏感区的过程中,集合扰动的样本数对集合卡尔曼变换的信号方差具有较明显的影响(Petersen, et al, 2007a; 马旭林, 2008)。较少的集合成员所估计的误差协方差难以准确表示实际大气误差方差分布的物理结构和扰动振幅,从而影响观测敏感区的识别质量。因此,集合扰动的样本必须足够准确地描述预报误差的结构特征。另外,该方法中表征信号方差的度量函数对观测敏感区的可信度也具有一定影响(Palmer, et al, 1998)。针对中国中尺度典型天气系统适应性观测的研究中,将引入湿度信息的全能量作为度量函数,相对于总能量的度量函数而言,其观测敏感区的质量得到了进一步改善(张宇等, 2012; 马旭林等, 2014a)。尽管集合卡尔曼变换方法依然存在一些局限,但在早期开展的美国冬季风暴监测试验(WSR)(Toth, et al, 1999)和美国国家环境预报中心的飞机下投式探空试验(Szunyogh, et al, 2000; Majumdar, et al, 2002b)以及后来实施的其他目标观测试验中,该方法大多取得了成功,观测敏感区的资料较明显地提高了预先指定的验证

区内的确定性预报技巧。

相对于奇异向量方法,集合卡尔曼变换方法由包含观测资料信息的集合估计的误差协方差求解变换矩阵得到分析误差协方差,定量地表达适应性观测资料产生的预报误差方差的减少,从而体现出适应性观测资料对预报质量的改善。尽管其同化过程中背景误差信息与实际的资料同化系统配置并不完全一致,但集合卡尔曼变换方法显式地考虑了资料同化的影响。另外,理论上奇异向量方法并不能识别出最优的观测敏感区,只是给出一个适应性观测的次优近似区域;而集合卡尔曼变换方法依据标准化的信号方差综合图信息,可以直接确定不同敏感程度的最优适应性观测区的空间位置(Majumdar, et al, 2002a)。借助集合预报隐式地包含预报误差随天气形势变化(即流依赖特征)的信息是集合卡尔曼变换方法区别于奇异向量方法的另一个重要特征。

集合卡尔曼变换与奇异向量相结合共同识别观测敏感区,形成了新的 Hessian 奇异向量方法(Leutbecher, et al, 2004),可以较好地弥补二者的不足而提高观测敏感区的识别质量。虽然该方法中 Hessian 矩阵仍然属于不满秩矩阵,预报误差也不具有流依赖特征,但其不仅显式地包含了资料同化过程,且其资料同化配置可以与业务同化方案一致,因此在理论上优于单纯的奇异向量方法。从实际应用结果来看,相对于奇异向量与集合卡尔曼变换适应性观测方法,新的 Hessian 奇异向量方法对观测敏感区的识别能力还是表现出良好的效果和优势。

3.1.3 条件非线性最优扰动方法

条件非线性最优扰动(CNOP)方法(Mu, et al, 2003a)是线性奇异向量在非线性领域的扩展,它克服了线性奇异向量不能表示非线性系统最大扰动发展的局限性。由于条件非线性最优扰动能够表征满足约束条件且在预报时刻具有最大非线性发展的特点,从而在敏感性和稳定性研究中代表了有限时段非线性最不稳定(或最敏感)的初始扰动(Mu, et al, 2004),穆穆等(2007)首次将条件非线性最优扰动方法引入到适应性观测的研究。根据条件非线性最优扰动表征的非线性空间中增长最大的初始误差,通过消除这种增长最大的初始误差而提高预报技巧(穆穆, 2013)。在应用条件非线性最优扰动方法识别观测敏感区时,首先依据具体的物理问题合

理地构造目标函数和选取约束条件,然后利用预报模式的伴随模式识别出非线性空间中对应于预报时刻最快增长的初始误差,再通过适当的度量函数(如干能量)表示出该初始误差的空间分布,从而估计出相应的观测敏感区。

条件非线性最优扰动是针对奇异向量线性近似假设的不足和在预报时刻最大非线性发展的初始扰动所提出的可预报性研究方法。起初主要用于 ENSO 可预报性 (Mu, et al, 2003a) 和海洋热流敏感性问题的研究 (Mu, et al, 2004, 2006), 有效地解决了大气运动的非线性和敏感性问题 (穆穆等, 2005)。本质上, 条件非线性最优扰动是非线性动力系统中满足一定物理约束条件, 且在预报时刻具有最大非线性发展的一类初始扰动。它不仅可以代表某一天气或气候事件的“最优前期征兆”, 而且可以用来研究预报时刻对预报结果有最大影响的初始误差 (穆穆, 2013)。随后, 条件非线性最优扰动方法应用于适应性观测研究中强降水天气过程的目标观测敏感区的识别, 取得了令人鼓舞的结果 (穆穆等, 2007)。与此同时, 条件非线性最优扰动方法也被应用于台风的目标观测研究中, 如 Mu 等 (2009)、Zhou 等 (2011) 与 Qin 等 (2011) 等。这些研究结果表明, 用条件非线性最优扰动方法确定的敏感区进行适应性观测对台风预报的改善程度总的说要大于奇异向量方法。此外, 谭晓伟等 (2011)、Zhou 等 (2012a, 2012b)、周非凡等 (2014) 对影响敏感区识别的几种要素进行了分析, Wang 等 (2011) 考虑背景误差协方差信息, 提高了条件非线性最优扰动方法在台风等适应性观测方面的应用能力。这些工作为更好地应用条件非线性最优扰动方法识别敏感区奠定了基础; 进一步, Qin 等 (2012, 2013) 与 Chen 等 (2013) 分别借助观测系统模拟试验和观测系统试验利用热带气旋适应性观测试验 (DOTSTAR, Wu, et al, 2005) 资料证明了条件非线性最优扰动识别的敏感区的有效性; 另外, 王晓雷等 (2013) 还应用条件非线性最优扰动方法探讨了中国南海台风的适应性观测和双台风的相互作用问题。

相对于因预报误差传播线性近似而难以准确描述非线性模式中初始误差结构的奇异向量方法, 条件非线性最优扰动方法能够有效地捕获预报时刻最大非线性发展的初始扰动。正因为如此, 条件非线性最优扰动方法比线性奇异向量方法更能抓住台风

预报中初始误差的敏感区域, 而且具有相对较弱的模式依赖性 (穆穆, 2013)。针对该方法需要求解大规模非线性最优化问题, 且需要伴随模式, 不仅发展难度较大, 也有计算量过大的问题, Wang 等 (2010) 基于经验正交分解提出了一种求解条件非线性最优扰动的快速算法, 避免了伴随模式的求解, 并利用观测系统模拟试验验证了确定敏感性区的有效性和可行性 (王斌等, 2009)。

综合各种适应性观测方法的特点可知, 适应性观测敏感区的准确定位以及影响因素因适应性观测方法的不同而存在一些差异。Hamill 等 (2002) 认为源于集合卡尔曼滤波的背景误差协方差估计确定的观测敏感区, 因目标时刻的预报误差协方差结构具有随天气形势变化的属性, 可以忽略适应性观测系统与确定性预报同化系统的误差统计结构不一致而引起的误差问题, 而仅需要最大程度地改善目标观测时刻的同化分析质量。不同模式的奇异向量方法识别的最优观测敏感区的主要特征基本相似, 但与集合卡尔曼变换和 ADSSV 方法确定的观测敏感区具有本质区别 (Majumdar, et al, 2006; Wu, et al, 2009)。ADSSV 主要用来识别热带气旋附近副热带高压中层引导气流以及与热带气旋相互作用的槽的敏感区 (Wu, et al, 2009), 而集合卡尔曼变换主要用来确定中纬度风暴路径下游区域槽脊附近的目标观测敏感区 (Majumdar, et al, 2011b)。目前, 尚没有一种适应性观测方法全面地考虑了所有可能的影响因素。因此, 适应性观测方法的持续优化和完善依然需要深入研究。

3.2 适应性观测外场试验

适应性观测问题的提出和相关理论研究工作的开展, 不仅快速推动了观测敏感区识别方法等相关领域的研究, 一些数值天气预报业务和研究中心也相继组织实施了一系列的适应性观测外场试验。1997 年 1—2 月实施的锋面和大西洋风暴路径试验 (FASTEX) 项目 (Joly, et al, 1997) 是第一个目标观测外场试验, 主要目的是提高登陆气旋及爱尔兰与英国的锋面波的短期预报质量。为了进一步研究适应性观测问题, 1998 年 1—2 月在东北太平洋实施了北太平洋观测试验 (NORPEX, Langland, et al, 1999a)。冬季风暴监测试验 (WSR) 是美国国家海洋大气局 (NOAA) 为了改善美国天气尺度高影响天气系统的 24—96 h 预报不确定性, 在东北太平

洋地区每年实施的下投式探空观测试验(Toth, et al, 1999; Szunyogh, et al, 2000; 2002)。该试验于1999年起至今连续进行,并于2001年进入美国国家气象局的适应性观测业务框架(Toth, et al, 2002),在研究和实际预报应用中均取得了良好的效果。

随着世界气象组织对 THORPEX 国际科学计划的确定,为改善影响北美东海岸的欧洲风暴、地中海强降水与冬季风暴等高影响天气 1—3 d 的预报技巧,并测试准业务运行的北大西洋适应性观测方法的可行性,2003 年秋季实施了 THORPEX 支持的第一项外场观测试验——大西洋 THORPEX 区域计划(A-TReC)项目(Mansfield, et al, 2005)。该试验对新的观测敏感区识别方法进行了测试与改进,如基于分析误差估计并包含湿物理过程的伴随敏感性、观测敏感性方法、Hessian 奇异向量以及集合卡尔曼变换方法等。该试验的适应性观测资料主要包括飞机下投式探空资料、无线电探空测风资料、浮标探测资料、飞机探测资料、空基多普勒测风雷达资料、同步卫星的大气运动矢量资料等(Rabier, et al, 2008)。随后,在 THORPEX 计划的支持下,利用无线电探空测风、漂浮气球下投式探空等观测手段,针对改善非洲西部短期降水和东风波预报的试验项目(AMMA)也相继实施(Agusti-Panareda, et al, 2010)。另外,为了提高高影响天气的短期预报质量,欧洲也相继开展了一系列的适应性观测项目(Majumdar, et al, 2011a),如对流和地形导致降水研究项目(COPS)和欧洲 THORPEX 区域计划项目(E-TReC)(Wulfmeyer, et al, 2008)、GFDEx 项目(Renfrew, et al, 2008)等,并发展了一套满足适应性观测试验需求的目标资料确定系统(PREVIEW DTS)(Prates, et al, 2009)。

热带气旋适应性观测试验(Wu, et al, 2005)是中国台湾地区为了更准确地认识热带气旋内部物理结构,改进热带气旋的预报质量,从2003年开始每年在西北热带太平洋海域实施的外场观测试验。该试验在台风周围或本体上空施放机载下投式探空仪,获取台风及附近环境场的更为准确的直接观测信息,先后在天气动力学研究、模式改进和适应性观测等领域取得了一系列研究成果(Wu, et al, 2005, 2007a, 2007b; Chou, et al, 2008),并发展了识别观测敏感区的 ADSSV 方法(Wu, et al, 2007a)。

谭晓伟等(2006)利用该试验的机载下投式探空资料对中国近海台风预报敏感性试验显示,同化该资料后对台风的移动路径、台风中心位置和强度以及其他要素预报都有所改善。热带气旋适应性观测试验的适应性观测资料在美国、日本、英国等国家的业务系统中得到有效应用,有效地促进了和热带气旋有关的研究与预报质量。

THORPEX 太平洋-亚洲区域试验(T-PARC)是旨在改善北太平洋区域的高影响天气系统的预报能力,以期在提高热带气旋、夏季区域性强降水过程的预报能力方面取得新的突破。2008 年夏季阶段主要研究西北太平洋区域热带气旋生命周期内有关的各种科学问题和可预报性,包括热带气旋的形成、转向和向副热带地区的转变,以及对中纬度风暴路径中下游大气环流的影响(Elsberry, et al, 2008)。冬季阶段的主要目的是研究飞机和无线电探空的适应性观测资料对提高北美地区 1—3 d 以上的天气预报技巧的可行性。另外,为了提高地中海高影响天气预报质量,运用奇异向量和集合卡尔曼变换适应性观测方法,相继实施了 DTS-MEDEX-2008(Prates, et al, 2009)和 DTS-MEDEX-2009(Jansa, et al, 2011)项目。作为 THORPEX 项目的国际极地年计划(IPY)的一部分,利用机载下投式探空资料,旨在改善斯堪的纳维亚地区预报质量的适应性观测项目(Irvine, et al, 2010)也得以开展。在亚洲,2008 年夏秋季对华南暴雨进行了外场观测试验(Zhang, et al, 2011)。此外,中日合作青藏高原大气观测试验——JICA/Tibet 项目也于 2010 年开展。该野外试验的加密观测资料的同化,有效提高了中国东部地区灾害性天气的数值预报结果,并显示青藏高原是其下游的中国东部地区灾害天气发生的一个重要敏感区(Zhang, et al, 2012)。当前,诸多科学家通过国际科学合作,将季节尺度的气候过程和短期天气预报的科学问题相结合,正在制定和计划实施一系列的适应性观测及其相关的科学研究项目,以期能够真正提高复杂大气运动的数值预报质量。

4 适应性观测对数值预报的影响

适应性观测资料同化后理论上应该改善分析质量,减少预报误差。前期的外场观测试验的评估结果显示,虽然少数试验对预报改善不明显甚至导致

预报质量下降,但总体上来说大部分适应性观测能够明显提高验证区的预报质量(Bergot, 1999; Szunyogh, et al, 2000)。适应性观测资料对预报误差定量影响的效果评估通常采用观测系统试验、观测系统模拟试验和基于同化系统伴随模式的观测影响评估等3种方法。观测系统试验是用来评估实际观测资料对分析和预报的影响效果,观测系统模拟试验主要用观测敏感区的模拟资料评估适应性观测综合配置方案或适应性观测方法对分析和预报的潜在影响,而同化系统伴随方法(Baker, et al, 2000; Langland, et al, 2004)能够定量地给出各种有效同化的资料对短期预报误差的影响(Gelaro, et al, 2010)。观测系统试验通过比较两个平行的“控制试验”和适应性观测资料试验的预报差异,从而衡量适应性观测资料对分析和预报的贡献。这个方法是评估适应性观测资料影响效果的通用方法(Majumdar, et al, 2011a)。但是,如果两个平行的预报初始场存在很小的差异,这个微小差异可能距离观测较远从而在预报中增大而影响预报质量,尤其是对流区域,当然也有可能发展到足够大以至于影响大气环流(Hodyss, et al, 2007),尤其在连续循环同化试验中这种较小的差异可以积累从而影响高影响天气事件的预报技巧(Abersson, et al, 2011)。另外,观测系统试验对于多种观测资料的评估需要设计和运行大量的同化和预报循环,计算量较大;观测系统模拟试验虽然可以较好地用于评估适应性观测方法和资料同化方案等的效果,但其“真值”的构造非常复杂和困难;而同化系统伴随方法由于受到切线性假定条件的限制而通常只适用于短期天气预报。因此,在评估适应性观测资料对分析和预报的影响效果时,需要考虑每种方法的特点和适用范围。

4.1 敏感区识别方法的效果

早期的 FASTEX 与 NORPEX 试验中,奇异向量方法对 2 d 短期预报质量的提高平均超过 10% (Langland, et al, 1999b; Langland, 2005)。欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的分析显示,若剔除奇异向量识别的观测敏感区资料,将导致太平洋和大西洋区域 500 hPa 高度场的 48 h 预报误差分别增大 4% 和 2%,而增加每天两次的观测敏感区内的卫星辐射资料可以降低南半球夏季 3—4 d 预报的误差(Buizza, et al, 2007; Bauer, et al, 2011)。初期的集合卡尔曼变换方法也可以较准确预报 1—3 d

预报误差方差的减少(Majumdar, et al, 2001, 2002a),并且通常认为集合卡尔曼变换识别的观测敏感区与奇异向量等基于伴随的方法基本一致(Majumdar, et al, 2002b)。WSR 试验的集合卡尔曼变换观测敏感区资料对地面气压的均方根误差可减少 10%—25%,约 70% 的个例均可以提高预报质量(Szunyogh, et al, 2002)。DOTSTAR 试验中对集合卡尔曼变换与 ADSSV 方法评估表明,西北太平洋热带气旋 1—3 d 路径预报误差的减少均大于 14%,尤其采用 NCEP GFS 模式,42 个个例中 60% 个例的集合卡尔曼变换观测敏感区资料对 1—5 d 路径预报误差平均减少 10%—20% (Wu, et al, 2007b; Chou, et al, 2011)。最近的研究也认为,集合卡尔曼变换方法能够有效识别追踪热带气旋上游大气的观测敏感区,有效时间甚至可以达到 6 d (Sellwood, et al, 2008; Majumdar, et al, 2010)。Chen 等(2012)对台风的适应性观测研究表明,条件非线性最优扰动方法能够有效识别出随机误差发展最大的观测敏感区,而且相对奇异向量等其他方法,条件非线性最优扰动识别的观测敏感区内条件非线性最优扰动类型初始误差对预报结果不确定性的影响最大。针对台风系统的观测系统试验进一步验证了条件非线性最优扰动方法确定的观测敏感区在改进台风预报技巧中的有效性(Chen, 2011)。

NORPEX 的多数试验个例中,总能量奇异向量与集合卡尔曼变换方法的目标观测区基本一致,下投式探空资料对北美西部 2 d 的预报误差平均减少 10% 以上,但也有一些个例存在明显差异,尤其是对于小尺度天气系统的目标区特征(Majumdar, et al, 2002a);而 ECMWF 的分析奇异向量方法的观测敏感区与 NORPEX 试验并不一致,ECMWF 预报系统的效果评估也显示,观测敏感区的下投式探空资料对确定性预报技巧只有相对较小的提高(Cardinali, et al, 2003)。与 NORPEX 试验中各种适应性观测方法识别的敏感区基本一致的结果明显不同,A-TReC 试验中约 50% 的个例显示奇异向量与集合卡尔曼变换方法识别的观测敏感区都具有较大差异(Leutbecher, et al, 2004)。相对于 FASTEX、NORPEX 和 WSR 外场观测试验,ECMWF 和 NCEP 的综合评估表明,A-TReC 试验的适应性观测资料对数值预报技巧的提高也相对偏小(Fourrié, et al, 2006)。T-PARC 夏季试验中,集

合卡尔曼变换和奇异向量方法识别的观测敏感区资料在 NCEP GFS 和韩国气象局的 WRF 模式中,对热带气旋路径预报误差的缩小则达到了 20%—40%(Weissmann, et al, 2011)。2012 年 WSR 试验中,NASA 的研究人员用伴随敏感性方法和自己的资料同化系统(Gelaro, et al, 2010)同化下投式探空资料,全球 24 h 预报误差取得明显的正效果(Hamill, et al, 2013)。适应性观测方法效果的准确评估非常困难,其识别的观测敏感区通常并不完全一致,但总体上看,一些典型方法还是能够较明显地提高分析和预报的质量。

4.2 典型天气外场试验的评估

典型天气系统的适应性观测外场试验效果的分析显示,不同天气系统(如大西洋风暴、热带气旋、强对流天气导致的暴雨等)的适应性观测对分析和预报质量的提高并不完全一致,虽然大多数试验都具有较明显的正效果,但也有少部分个例的效果微弱,甚至呈现出负效果。这可能与天气系统发生、发展的不同性质有一定的关系。早期的 NORPEX-98 试验,适应性观测资料平均可以减少 10%的北美太平洋冬季风暴的 2 d 短期预报误差(Langland, et al, 1999b)。FASTEX 外场观测对中纬度锋面和大西洋风暴路径试验结果显示,适应性观测资料对小于 2 d 的大西洋和西欧地区的短期预报质量具有 10%—15%的正影响。总起来看,FASTEX 的适应性观测资料对短期预报质量具有较明显的正效果(Langland, 2005)。2001 年 NOAA 冬季风暴监测(WSR01)试验中有 60%—70%的个例提高了验证区的地面气压、降水的预报质量,短期预报质量平均约有 10%的提高,基本上相当于有效延长 12 h 的预报时效(Toth, et al, 2002)。在 A-TReC 试验的 38 个预报个例中,32%试验的下投式探空资料对 UK-MO 的预报质量都有较明显的提高,而 ECMWF 的分析显示仅有 24%个例的海平面气压预报提高 10%以上(Petersen, et al, 2007b; Rabier, et al, 2008)。

对于中低纬度的飓风或热带气旋试验而言,根据 1997—2006 年 NOAA 实施的 176 次飓风监测试验评估统计结果(Abersen, et al, 2011),NCEP GFS 模式系统的前 60 h 飓风路径预报误差能够平均减少 10%—15%,但 72 h 以后的预报则呈现出较为微弱的效果。2004 年 DOTSTAR 试验的 10 个

个例中,机载下投式探空资料的同化对 1—3 d 热带气旋路径的平均预报误差至少减少了 14%(Wu, et al, 2007b)。利用 DOTSTAR 和 T-PARC 夏季适应性观测资料对两个生命周期较长的台风比较显示,台风路径预报的改进则超过 20%—40%(Weissmann, et al, 2011),而 Chou 等(2011)对 DOTSTAR 和 T-PARC 试验的适应性观测资料统计分析指出,在 60%的试验个例中,1—5 d 的热带气旋路径预报误差平均减少 10%—20%。利用区域 GRAPES m3DVAR 同化预报系统(Ma, et al, 2009b)和集合卡尔曼变换方法对登陆中国台风和江淮暴雨的预报试验也表明,无论台风路径预报、强度预报或者降水预报也都有较好的效果,但并不如天气尺度系统的改进明显(马旭林, 2008)。可以看出,适应性观测对台风路径预报均具有较明显的改进效果,而台风强度预报的改进则相对偏弱。

4.3 资料同化方案的影响

从前述外场试验的适应性观测资料效果评估来看,在简单模式中采用三维变分或集合卡尔曼滤波等资料同化方案,适应性观测比仅用原有资料绝大多数能够减少预报误差,而采用比较复杂的资料同化方案的效果更加明显,尤其是中纬度地区(Fischer, 1998; Morss, et al, 2002)。Bergot(2001)用四维和三维变分资料同化系统对 20 个 FASTEX 试验个例的下投式探空资料的分析显示,850 hPa 动能的 24 h 平均预报误差大约减小了 10%,最大的预报误差减少超过 51%,明显优于三维变分同化系统。这显示出四维变分同化系统对适应性观测资料提高预报质量具有重要作用。实际上,从 1997 年以来的适应性外场观测试验表明,适应性观测资料的同化平均减少了验证区内 10%—25%的预报误差,这基本上相当于有效延长了验证区 12—24 h 以上的预报时效。在某些效果较好的试验个例中,验证区的短期预报误差甚至能够减少 50%(Bergot, 2001; Langland, et al, 1999b)。尽管通常情况下因多种观测条件的限制,实际实施的适应性观测(如下投式探空等)并没有完全覆盖全部观测敏感区,但仍然有约 70%的试验个例的目标观测资料能够提高验证区的预报质量。显然,这不仅与适应性观测资料有关,资料同化系统的良好性能也是决定性因素之一。多数研究也显示,适应性观测资料在连续循环同化系统中通常对验证区预报质量的提高呈现出较为明

显的正贡献,也就是说前一时刻的适应性观测资料对预报质量的提高能够直接影响当前时刻同化适应性观测资料所需要的背景场质量,这进一步强调了适应性观测对提高预报质量的贡献受到资料同化方案和同化方式的重要影响。

适应性观测对数值预报和分析的影响受到观测资料、数值模式和资料同化方案以及不同性质的天气系统等诸多方面的影响,当前的评估结果基本上是基于有限个例的分析,而系统性的综合评价尚需要进一步的工作。大气可预报性的分析指出,理想情况下模式初值质量的提高可以有效减小短期预报误差(Klinker, et al, 1998; Hello, et al, 2000)。Langland 等(2002)运用完美的全球预报伴随模式对强副热带气旋系统中的温度、风与气压的分析误差进行“最优化订正”,最终减小了75%的72 h 预报误差。而实际的适应性观测,面临着不完美的资料同化方案、数值预报模式误差以及观测资料的限制,还有更重要的观测敏感区的质量不够准确等,对预报误差的减小目前还难以取得理想化的最优效果。另外,适应性观测提高高影响天气的数值预报技巧一般是在平均意义上而言,不能期望对所有天气过程或不同天气系统的预报技巧都能够有绝对的提高。况且,提高数值预报质量是一个复杂的系统工程,不仅包含资料同化系统和数值预报模式,还包括观测系统以及相关的误差统计等诸多方面。因此,就目前来看,未来提高适应性观测策略的有效贡献不仅需要进一步提高观测敏感区的定位准确性,提高观测敏感区内观测资料的质量和数量,而且还要考虑改进资料同化系统的性能,譬如采用具有流依赖属性的资料同化方案等,这也是 THORPEX 国际科学计划中亟需研究解决的关键科学问题之一。这些问题的解决,对于适应性观测提高中纬度地区和热带地区的高影响天气系统预报质量尤为重要。

5 问题与讨论

天气系统的发展以及预报误差的传播具有很强的非线性特征,不同性质的天气系统预报误差产生的机制也不尽相同,并且也具有较强的局地性。目前发展的观测敏感区识别方法基本上都是建立在预报误差成线性增长的动力学机制条件下。由于大气运动方程中非线性项的小扰动振幅远比线性项小,线性近似后对非线性扰动增长描述的准确程度产生

影响。因此,预报误差线性近似的精确性很大程度上依赖扰动振幅的大小,亦即非线性增长机制自身的特征决定了线性近似的有效预报时效。通常认为该有效预报时效为48—72 h,超过该时效,建立在预报误差线性传播假定条件下的适应性观测方法则受到限制,其观测敏感区的质量也将受到非线性误差传播机制的负面影响(Gilmour, et al, 2001)。因此,观测敏感区的信号对于天气尺度的大气运动和较短时间的预报(72 h 或者更短)具有相对较高的质量(Reynolds, et al, 2003),而对于变化较剧烈的中小尺度天气系统以及较长时间的预报,其敏感信号的准确表征能力不能令人满意。其次,湿物理过程对中低纬度观测敏感区的定义具有显著的影响。因此,在适应性观测方法中应该显式考虑其对敏感区识别的影响。Hoskins 等(2005)对影响欧洲的气旋基于奇异向量方法的可预报性研究,表明了大尺度潜热释放的重要性。当前,ECMWF 和美国海军研究实验室发展了具有湿物理过程的伴随模式方法用于观测敏感区的识别。另外,由观测信息确定的目标时刻分析场的不确定性及其预报误差还不能准确地定量分析,观测敏感区的信号还包含明显的近似,表征其信号方差的度量函数对观测敏感区的有效定位也具有重要影响。Palmer 等(1998)利用总能量、流函数、动能与涡度拟能等度量标准对分析误差协方差对比研究表明,总能量的分布特征与分析误差协方差最为相近,可以有效地近似表示观测敏感区的空间分布。而采用包含湿度信息的全能量作为信号方差的度量函数,并增加对流层中低层大气运动信息,能够进一步优化观测敏感区的质量,对改进中国的台风和暴雨预报可以显示出更好的效果(马旭林等, 2014a)。

基于集合估计的适应性观测方法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的困难。因此,集合成员数是直接影响观测敏感区质量的另一重要因素。在 WSR 试验的早期研究中,应用32个NOAA和ECMWF的集合预报成员,得到了比较合理的试验结果,而ECMWF应用16个集合成员进行适应性观测试验,也能够较好地描述全部预报误差结构的信息。至于多少个集合成员才能够最大程度地准确描述非线性传播的预报误差信息而基本上不影响观测敏感区的质量,需要根据各种

集合预报的质量和具体的适应性观测方法适当地确定。集合预报质量同样是影响观测敏感区识别质量的重要因素。针对集合卡尔曼变换适应性观测方法,分别利用 ECMWF 和集合卡尔曼变换初始扰动方案构造的集合预报(Ma, et al, 2009a),所得到的观测敏感区也存在一定的差异,显示了观测敏感区的准确性对集合预报质量的影响。值得注意的是,条件非线性最优扰动方法直接基于大气非线性运动系统确定观测敏感区,相比线性奇异向量方法有一定的优势,在实际应用中也表现出良好的效果,而且新的算法也解决了计算量偏大的缺陷。相信随着中国科学家的不断探索,条件非线性最优扰动方法在中国适应性观测的研究和应用中将发挥应有作用。当然,数值预报模式总是存在误差,这种误差是影响观测敏感区识别质量的另一重要原因。而更为重要的是,目前的资料同化系统尚不完善,尤其采用先验性统计信息的背景误差协方差的变分同化系统(包括四维变分同化)。由于该背景误差协方差矩阵必须满足固定、均匀和各向同性的假定条件,很大程度上限制和影响了观测资料的有效同化效果。因此,即使观测敏感区准确,适应性观测资料质量完美,但同化系统仍难以有效吸收这些观测信息以提高分析质量。这一问题的解决可能有赖于近年来提出的结合集合与变分方法的混合同化方案的发展与完善(马旭林等, 2014b)。

此外,THORPEX 国际科学计划报告指出适应性观测资料的同化效果并非一致性得到提高,Hamill 等(2013)对 2011 年 WSR 试验的对比分析也进一步证实了这个结果,这主要是适应性观测的效果受到多方面原因的影响。若单纯考虑观测敏感区的识别方法而言,理想情况下满足适应性观测系统的配置与资料同化方案相同,分析误差协方差和预报误差协方差能够准确统计等,可以认为适应性观测方法具备良好的性能。但是,近年来观测系统的快速发展使得如卫星辐射资料、掩星资料等大量丰富,资料同化系统和预报模式的进一步完善使得同化系统分析质量和预报质量得到提高,以及物理参数化方案的改善等,适应性观测对分析和预报的改善效果也将愈发减弱。因此,对于适应性观测策略改善数值预报质量的问题,需要结合当前观测资料、数值模式和资料同化方案等诸多方面的最新发展,进行深入的评价和研究,以寻求新的条件下能够切

实改善数值预报质量的科学途径,这也是适应性观测研究的一个重要科学问题。

致谢:感谢中国气象科学研究院薛纪善研究员的悉心指导和帮助。

参考文献

- 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, 126pp. Ma X L. 2008. Study on the ensemble transform Kalman filter-based adaptive observation and applications[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 126pp (in Chinese)
- 马旭林, 于月明, 姜胜等. 2014a. 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. 大气科学学报, 37(6): 749-757, doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20140314002. Ma X L, Yu Y M, Jiang S, et al. 2014a. Optimization and influence experiment on ETKF method to identify sensitive areas for target observations. Trans Atmos Sci, 37(6): 749-757, doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20140314002 (in Chinese)
- 马旭林, 陆续, 于月明等. 2014b. 数值天气预报中集合-变分混合资料同化及其研究进展. 热带气象学报, 30(6): 1188-1195. Ma X L, Lu X, Yu Y M, et al. 2014b. Progress on hybrid ensemble-variational data assimilation in numerical weather prediction. J Trop Meteor, 30(6): 1188-1195 (in Chinese)
- 穆穆, 段晚锁. 2005. 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. 科学通报, 50(24): 2695-2701. Mu M, Duan W S. 2005. Conditional nonlinear optimal perturbation and its applications for weather and climate predictability. Chin Sci Bull, 50(24): 2695-2701 (in Chinese)
- 穆穆, 王洪利, 周非凡. 2007. 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. 大气科学, 31(6): 1102-1112. Mu M, Wang H L, Zhou F F. 2007. A preliminary application of conditional nonlinear optimal perturbation to adaptive observation. Chinese J Atmos Sci, 31(6): 1102-1112 (in Chinese)
- 穆穆. 2013. 目标观测的方法、现状与发展展望. 中国科学: 地球科学, 43(11): 1717-1725. Mu M. 2013. Methods, current status and prospect of targeted observation. Sci China: Earth Sci, 43(11): 1717-1725 (in Chinese)
- THORPEX 中国委员会. 2006. 观测系统研究与可预报性试验-中国计划(THORPEX-China). 北京: 气象出版社, 112pp. THORPEX-China Committee. 2006. Study on observing systems and predictability experiments -China Plan (THORPEX-China). Beijing: China Meteorological Press, 112pp (in Chinese)
- 谭晓伟, 陈德辉, 张庆红. 2006. 一种新型的适应性观测资料应用对台风预报的影响试验研究. 热带气象学报, 22(1): 18-25. Tan X W, Chen D H, Zhang Q H. 2006. An impact study of a new type of adaptive observation data on typhoon forecast. J Trop Meteor, 22(1): 18-25 (in Chinese)

- 谭晓伟, 王斌, 王栋梁. 2011. 基于条件非线性最优扰动的目标观测中瞄准区不同引导性变量的影响试验研究. 气象学报, 69(3): 400-411. Tan X W, Wang B, Wang D L. 2011. Experimental studies of the impacts of the different guidance of targeting areas on the targeting observations based on the CNOP method. Acta Meteor Sinica, 69(3): 400-411 (in Chinese)
- 王斌, 谭晓伟. 2009. 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. 气象学报, 67(2): 175-188. Wang B, Tan X W. 2009. A fast algorithm for solving CNOP and associated target observation tests. Acta Meteor Sinica, 67(2): 175-188 (in Chinese)
- 王晓雷, 周非凡, 朱克云. 2013. 条件非线性最优扰动方法在台风“风神”和“凤凰”相互作用过程中的应用研究. 热带气象学报, 29(2): 235-244. Wang X L, Zhou F F, Zhu K Y. 2013. The application of conditional nonlinear optimal perturbation to the interaction between two binary typhoons FENG-SHEN and FUNG-WONG. J Trop Meteor, 29(2): 235-244 (in Chinese)
- 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. 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. Acta Meteor Sinica, 70(1): 91-100 (in Chinese)
- 周非凡, 张贺. 2014. 基于CNOP方法的台风目标观测中三种敏感区确定方案的比较研究. 大气科学, 38(2): 261-272. Zhou F F, Zhang H. 2014. Study of the schemes based on CNOP method to identify sensitive areas for typhoon targeted observations. Chinese J Atmos Sci, 38(2): 261-272 (in Chinese)
- Aberson S D, Majumdar S J, Reynolds C A, et al. 2011. An observing system experiment for tropical cyclone targeting techniques using the global forecast system. Mon Wea Rev, 139(3): 895-907
- Agusti-Panareda A, Beljaars A, Cardinali C, et al. 2010. Impacts of assimilating AMMA soundings on ECMWF analyses and forecasts. Wea Forecasting, 25(4): 1142-1160
- Baker N L, Daley R. 2000. Observation and background adjoint sensitivity in the adaptive observation targeting problem. Quart J Roy Meteor Soc, 126(565): 1431-1454
- Barkmeijer J, Bouttier F, Van Gijzen M. 1998. Singular vectors and estimates of the analysis error covariance metric. Quart J Roy Meteor Soc, 124(549): 1695-1713
- Barkmeijer J, Buizza R, Palmer T N. 1999. 3D-Var Hessian singular vectors and their potential use in the ECMWF ensemble prediction system. Quart J Roy Meteor Soc, 125(558): 2333-2351
- Bauer P, Buizza R, Cardinali C, et al. 2011. Impact of singular-vector-based satellite data thinning on NWP. Quart J Roy Meteor Soc, 137(655): 286-302
- Bergot T. 1999. Adaptive observations during FASTEX: A systematic survey of upstream flights. Quart J Roy Meteor Soc, 125(561): 3271-3298
- Bergot T. 2001. Influence of the assimilation scheme on the efficiency of adaptive observations. Quart J Roy Meteor Soc, 127(572): 635-660
- Berliner L M, Lu Q, Snyder C. 1999. Statistical design for adaptive weather observations. J Atmos Sci, 56(15): 2536-2552
- Bishop C H, Toth Z. 1999. Ensemble transformation and adaptive observations. J Atmos Sci, 56(11): 1748-1765
- Bishop C H, Etherton B J, Majumdar S J. 2001. Adaptive sampling with the ensemble transform Kalman filter. Part I: Theoretical aspects. Mon Wea Rev, 129(3): 420-436
- Buizza R, Cardinali C, Kelly G, et al. 2007. The value of observations. II: The value of observations located in singular-vector-based target areas. Quart J Roy Meteor Soc, 133(628): 1817-1832
- Cardinali C, Buizza R. 2003. Forecast skill of targeted observations: A singular-vector-based diagnostic. J Atmos Sci, 60(16): 1927-1940
- Chen B Y. 2011. Observation system experiments for typhoon Nida (2004) using the CNOP method and DOTSTAR data. Atmos Ocean Sci Lett, 4(2): 118-123
- Chen B Y, Mu M. 2012. The roles of spatial locations and patterns of initial errors in the uncertainties of tropical cyclone forecasts. Adv Atmos Sci, 29(1): 63-78
- Chen B Y, Mu M, Qin X H. 2013. The impact of assimilating dropwindsonde data deployed at different sites on typhoon track forecasts. Mon Wea Rev, 141(8): 2669-2682
- Chou K H, Wu C C. 2008. Development of the typhoon initialization in a mesoscale model combination of the bogus vortex and the dropwindsonde data in DOTSTAR. Mon Wea Rev, 136(3): 865-879
- Chou K H, Wu C C, Lin P H, et al. 2011. The impact of dropwindsonde observations on typhoon track forecasts in DOTSTAR and T-PARC. Mon Wea Rev, 139(6): 1728-1743
- Ehrendorfer M, Tribbia J J. 1997. Optimal prediction of forecast error covariances through singular vectors. J Atmos Sci, 54(2): 286-313
- Elsberry R L, Harr P A. 2008. Tropical cyclone structure (TCS-08) field experiment science basis observational platforms and strategy in Asia-Pacific. J Atmos Sci, 44(3): 209-231
- Emanuel K A, Kalnay E, Bishop C, et al. 1997. Observations in aid of weather prediction for North America; Report of the Prospectus Development Team Seven. Bull Amer Meteor Soc, 78: 2859-2868
- Farrell B F. 1989. Optimal excitation of baroclinic waves. J Atmos Sci, 46(9): 1193-1206
- Farrell B F. 1990. Small error dynamics and the predictability of atmospheric flows. J Atmos Sci, 47(20): 2409-2416
- Fischer C. 1998. Linear amplification and error growth in the 2 d eady problem with uniform potential vorticity. J Atmos Sci, 55(22): 3363-3380
- Fourrié N, Marchal D, Rabier F, et al. 2006. Impact study of the

- 2003 North Atlantic THORPEX regional campaign. *Quart J Roy Meteor Soc*, 132(615): 275-295
- Gelaro R, Buizza R, Palmer T N, et al. 1998. Sensitivity analysis of forecast errors and the construction of optimal perturbations using singular vectors. *J Atmos Sci*, 55(6): 1012-1037
- Gelaro R, Reynolds C A, Langland R H, et al. 2000. A predictability study using geostationary satellite wind observations during NORPEX. *Mon Wea Rev*, 128(11): 3789-3807
- Gelaro R, Rosmond T, Daley R. 2002. Singular vector calculations with an analysis error variance metric. *Mon Wea Rev*, 130(5): 1166-1186
- Gelaro R, Langland R H, Pellerin S, et al. 2010. The THORPEX observation impact intercomparison experiment. *Mon Wea Rev*, 138(11): 4009-4025
- Gilmour I, Leonard A, Buizza R. 2001. Linear regime duration: Is 24 hours a long time in synoptic weather forecasting. *J Atmos Sci*, 58(22): 3525-3539
- Hamill T M, Snyder C. 2002. Using improved background error covariances from an ensemble Kalman filter for adaptive observations. *Mon Wea Rev*, 130(6): 1552-1572
- Hamill T M, Snyder C, Whitaker J S. 2003. Ensemble forecasts and the properties of flow dependent analysis error covariance singular vectors. *Mon Wea Rev*, 131(8): 1741-1758
- Hamill T M, Yang F L, Cardinali C, et al. 2013. Impact of targeted winter storm reconnaissance dropwindsonde data on midlatitude numerical weather predictions. *Mon Wea Rev*, 141(6): 2058-2065
- Hello G, Lalaurette F, Thepaut J N. 2000. Combined use of sensitivity information and observations to improve meteorological forecasts: A feasibility study applied to the 'Christmas Storm' case. *Quart J Roy Meteor Soc*, 126(563): 621-647
- Hodyss D, Majumdar S J. 2007. The contamination of "Data Impact" in global models by rapidly growing mesoscale instabilities. *Quart J Roy Meteor Soc*, 133(628): 1865-1875
- Hoskins B J, Coutinho M M. 2005. Moist singular vectors and the predictability of some high impact European cyclones. *Quart J Roy Meteor Soc*, 131(606): 581-601
- Irvine E A, Gray S L, Methven J, et al. 2011. Forecast impact of targeted observations: Sensitivity to observation error and proximity to steep orography. *Mon Wea Rev*, 139(1): 69-78
- Jansa A, Arbogast P, Doerenbecher A, et al. 2011. A new approach to sensitivity climatologies: The DTS-MEDEX-2009 campaign. *Nat Haz Earth Syst Sci*, 11: 2381-2390
- Joly A, Jorgensen D, Shapiro M A, et al. 1997. The Fronts and Atlantic Storm-Track Experiment (FASTEX): Scientific objectives and experimental design. *Bull Amer Meteor Soc*, 78(9): 1917-1940
- Klinker E, Rabier F, Gelaro R. 1998. Estimation of key analysis errors using the adjoint technique. *Quart J Roy Meteor Soc*, 124(550): 1909-1933
- Langland R H, Gelaro R, Rohaly G D, et al. 1999a. Targeted observations in FASTEX: Adjoint-based targeting procedures and data impact experiments in IOP-17 and IOP-18. *Quart J Roy Meteor Soc*, 125(561): 3241-3270
- Langland R H, Toth Z, Gelaro R, et al. 1999b. The North Pacific Experiment (NORPEX-98): Targeted observations for improved North American weather forecasts. *Bull Amer Meteor Soc*, 80(7): 1363-1384
- Langland R H, Shapiro M A, Gelaro R. 2002. Initial condition sensitivity and error growth in forecasts of the 25 January 2000 east coast snowstorm. *Mon Wea Rev*, 130(4): 957-974
- Langland R H, Baker N L. 2004. A Technical Description of the NAVDAS Adjoint System. Naval Research Laboratory, Monterey, CA 93943-5502, USA
- Langland R H. 2005. Issues in targeted observing. *Quart J Roy Meteor Soc*, 131(613): 3409-3425
- Leutbecher M, Doerenbecher A, Grazzini F, et al. 2004. Planning of Adaptive Observations During the Atlantic THORPEX Regional Campaign 2003. ECMWF Newsletter No. 102, 16-25. Available from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, Reading, UK
- Lorenz E N. 1965. A study of the predictability of a 28-variable atmospheric model. *Tellus*, 17(3): 321-333
- Lorenz E N, Emanuel K A. 1998. Optimal sites for supplementary weather observations: Simulation with a small model. *J Atmos Sci*, 55(3): 399-414
- Ma X L, Xue J S, Lu W S. 2009a. Study on ETKF-based initial perturbation scheme for GRAPES global ensemble prediction. *Acta Meteor Sinica*, 23(5): 562-574
- Ma X L, Zhuang Z R, Xue J S, et al. 2009b. Developments of three-dimensional variational data assimilation system for the nonhydrostatic numerical weather prediction model-GRAPES. *Acta Meteor Sinica*, 23(6): 725-737
- Majumdar S J, Bishop C H, Etherton B J, et al. 2001. Can an ensemble transform Kalman filter predict the reduction in forecast-error variance produced by targeted observations?. *Quart J Roy Meteor Soc*, 127(578): 2803-2820
- Majumdar S J, Bishop C H, Etherton B J, et al. 2002a. Adaptive sampling with the ensemble transform Kalman filter II: Field program implementation. *Mon Wea Rev*, 130(5): 1356-1369
- Majumdar S J, Bishop C H, Buizza R, et al. 2002b. A comparison of ensemble transform Kalman filter targeting guidance with ECMWF and NRL total-energy singular vector guidance. *Quart J Roy Meteor Soc*, 128(585): 2527-2549
- Majumdar S J, Abernethy S D, Bishop C H, et al. 2006. A comparison of adaptive observing guidance for Atlantic tropical cyclones. *Mon Wea Rev*, 134(9): 2354-2372
- Majumdar S J, Sellwood K J, Hodyss D, et al. 2010. Characteristics of target areas selected by the ensemble transform Kalman filter for medium-range forecasts of high-impact winter weather

- er. *Mon Wea Rev*, 138(7): 2803-2824
- Majumdar S J, Aberson S D, Bishop C H, et al. 2011a. Targeted Observations for Improving Numerical Weather Prediction: An overview. A World Weather Research Programme / THORPEX Publication No. 15, 37pp
- Majumdar S J, Chen S G, Wu C C. 2011b. Characteristics of ensemble transform Kalman filter adaptive sampling guidance for tropical cyclones. *Quart J Roy Meteor Soc*, 137(655): 503-520
- Mansfield D, Richardson D, Truscott B. 2005. An overview of the Atlantic THORPEX Regional Campaign A-TReC//Proceedings of the first THORPEX international science symposium, 6—10 December 2004, Montreal, Canada. World Meteorological Organization
- Morss R E, Emanuel K A, Snyder C. 2001. Idealized adaptive observation strategies for improving numerical weather prediction. *J Atmos Sci*, 58(2): 210-232
- Morss R E, Emanuel K A. 2002. Influence of added observations on analysis and forecast errors: Results from idealized systems. *Quart J Roy Meteor Soc*, 128(579): 285-321
- Mu M, Duan W S. 2003a. A new approach to studying ENSO predictability: Conditional nonlinear optimal perturbation. *Chinese Sci Bull*, 48(10): 1045-1047
- Mu M, Duan W S, Wang B. 2003b. Conditional nonlinear optimal perturbation and its applications. *Nonlin Processes Geophys*, 10: 493-501
- Mu M, Sun L, Dijkstra H A. 2004. Sensitivity and stability of thermohaline circulation of ocean to finite amplitude perturbations. *J Phys Oceanogr*, 34(10): 2305-2315
- Mu M, Zhang Z Y. 2006. Conditional nonlinear optimal perturbations of a two-dimensional quasigeostrophic model. *J Atmos Sci*, 63(6): 1587-1604
- Mu M, Zhou F F, Wang H L. 2009. A method for identifying the sensitive areas in targeted observations for tropical cyclone prediction: Conditional nonlinear optimal perturbation. *Mon Wea Rev*, 137(5): 1623-1639
- Palmer T N, Gelaro R, Barkmeijer J, et al. 1998. Singular vectors, metrics, and adaptive observations. *J Atmos Sci*, 55(4): 633-653
- Petersen G N, Majumdar S J, Thorpe A J. 2007a. The properties of sensitive area predictions based on the ensemble transform Kalman filter (ETKF). *Quart J Roy Meteor Soc*, 133(624): 697-710
- Petersen G N, Thorpe A J. 2007b. The impact on weather forecasts of targeted observations during A-TReC. *Quart J Roy Meteor Soc*, 133(623): 417-431
- Prates C, Sahin C, Richardson D S. 2009. Report on PREVIEW Data Targeting System. ECMWF Tech. Memo., 581, Reading, 31pp
- Pu Z X, Kalnay E, Sela J, et al. 1997. Sensitivity of forecast errors to initial conditions with a quasi-inverse linear method. *Mon Wea Rev*, 125(10): 2479-2503
- Qin X H, Mu M. 2011. A study on the reduction of forecast error variance by three adaptive observation approaches for tropical cyclone prediction. *Mon Wea Rev*, 139(7): 2218-2232
- Qin X H, Mu M. 2012. Influence of conditional nonlinear optimal perturbations sensitivity on typhoon track forecasts. *Quart J Roy Meteor Soc*, 138(662): 185-197
- Qin X H, Duan W S, Mu M. 2013. Conditions under which CNOP sensitivity is valid for tropical cyclone adaptive observations. *Quart J Roy Meteor Soc*, 139(675): 1544-1554
- Rabier F, Klinker E, Coutier P, et al. 1996. Sensitivity of forecast errors to initial conditions. *Quart J Roy Meteor Soc*, 122(529): 121-150
- Rabier F, Gauthier P, Cardinali C, et al. 2008. An update on THORPEX-related research in data assimilation and observing strategies. *Nonlin Processes Geophys*, 15: 81-94
- Renfrew I A, Petersen G N, Outten S, et al. 2008. The Greenland flow distortion experiment. *Bull Amer Meteor Soc*, 89(9): 1307-1324
- Reynolds C A, Rosmond T E. 2003. Nonlinear growth of singular-vector-based perturbations. *Quart J Roy Meteor Soc*, 129(594): 3059-3078
- Reynolds C A, Doyle J D, Hodur R M, et al. 2010. Naval Research Laboratory multiscale targeting guidance for T-PARC and TCS-08. *Wea Forecasting*, 25(2): 526-544
- Sellwood K J, Majumdar S J, Mapes B E, et al. 2008. Predicting the influence of observations on medium-range forecasts of atmospheric flow. *Quart J Roy Meteor Soc*, 134(637): 2011-2027
- Shapiro M A, Thorpe A J. 2004. THORPEX International Science Plan. WMO/TD-No. 1246 WWRP/THORPEX No. 2, 1-51
- Snyder C. 1996. Summary of an informal workshop on adaptive observations and FASTEX. *Bull Amer Meteor Soc*, 77: 953-961
- Szunyogh I, Toth Z, Morss R E, et al. 2000. The effect of targeted dropsonde observations during the 1999 Winter Storm Reconnaissance Program. *Mon Wea Rev*, 128(10): 3520-3537
- Szunyogh I, Toth Z, Zimin A V, et al. 2002. Propagation of the effect of targeted observations: The 2000 Winter Storm Reconnaissance Program. *Mon Wea Rev*, 130(5): 1144-1165
- Torn R D, Hakim G J. 2008. Ensemble-based sensitivity analysis. *Mon Wea Rev*, 136(2): 663-677
- Toth Z, Szunyogh I, Majumdar S J, et al. 1999. The 1999 Winter Storm Reconnaissance Program//Preprints for the 13th Conference on Numerical Weather Prediction. Denver CO: American Meteorology Society, 27-32
- Toth Z, Szunyogh I, Bishop C, et al. 2001. The use of targeted observations in operational numerical weather forecasting // Preprints, the Fifth Symposium on Integrated Observing Systems. Albuquerque: American Meteorology Society, 72-79
- Toth Z, Szunyogh I, Bishop C, et al. 2002. Adaptive observations

- at NCEP: Past, present, and future// Proceedings of the symposium on observations, data assimilation and probabilistic prediction. Orlando: Amer Meteor Soc, 1-7
- Wang B, Tan X W. 2010. Conditional nonlinear optimal perturbations: Adjoint-free calculation method and preliminary test. *Mon Wea Rev*, 138(4): 1043-1049
- Wang H L, Mu M, Huang X Y. 2011. Application of conditional non-linear optimal perturbations to tropical cyclone adaptive observation using the Weather Research Forecasting (WRF) model. *Tellus*, 63(5): 939-957
- Weissmann M, Harnisch F, Wu C C, et al. 2011. The influence of assimilating dropsonde data on typhoon track and mid-latitude forecasts. *Mon Wea Rev*, 139(3): 908-920
- Wu C C, Lin P H, Abernethy S, et al. 2005. Dropwindsonde observations for typhoon surveillance near the Taiwan region (DOTSTAR): An overview. *Bull Amer Meteor Soc*, 86(6): 787-790
- Wu C C, Chen J H, Lin P H, et al. 2007a. Targeted observations of tropical cyclone movement based on the adjoint-derived sensitivity steering vector. *J Atmos Sci*, 64(7): 2611-2626
- Wu C C, Chou K H, Lin P H, et al. 2007b. The impact of dropwindsonde data on typhoon track forecasts in DOTSTAR. *Wea Forecasting*, 22(6): 1157-1176
- Wu C C, Chen J H, Majumdar S J, et al. 2009. Inter-comparison of targeted observation guidance for tropical cyclones in the north-western Pacific. *Mon Wea Rev*, 137(8): 2471-2492
- Wulfmeyer V, Behrendt A, Bauer H S, et al. 2008. The convective and orographically-induced precipitation study: A research and development project of the world weather research program for improving quantitative precipitation forecasting in low-mountain regions. *Bull Amer Meteor Soc*, 89(10): 1477-1486
- Zhang R H, Ni Y Q, Liu L P, et al. 2011. South China heavy rainfall experiments (SCHeREX). *J Meteor Soc Japan*, 89A: 153-166
- Zhang R H, Koike T, Xu X D, et al. 2012. A China-Japan cooperative JICA atmospheric observing network over the Tibetan Plateau (JICA/Tibet Project): An overview. *J Meteor Soc Japan*, 90C: 1-16
- Zhou F F, Mu M. 2011. The impact of verification area design on tropical cyclone targeted observations based on the CNOP method. *Adv Atmos Sci*, 28(5): 997-1010
- Zhou F F, Mu M. 2012a. The impact of horizontal resolution on the CNOP and on its identified sensitive areas for tropical cyclone predictions. *Adv Atmos Sci*, 29(1): 36-46
- Zhou F F, Mu M. 2012b. The time and regime dependencies of sensitive areas for tropical cyclone prediction using the CNOP method. *Adv Atmos Sci*, 29(4): 705-716