

区域集合预报扰动方法研究进展综述

张涵斌^①, 智协飞^{②③*}, 陈静^④, 吴志鹏^⑤, 夏宇^⑥, 张歆然^⑦

① 中国气象局 北京城市气象研究所, 北京 100089;

② 南京大气科学联合研究中心, 江苏 南京 210044;

③ 南京信息工程大学 气象灾害教育部重点实验室, 江苏 南京 210044;

④ 中国气象局 数值预报中心, 北京 100081;

⑤ 重庆市气象台, 重庆 401120;

⑥ 南京信息工程大学 大气科学学院, 江苏 南京 210044;

⑦ 南京信息工程大学 大气物理学院, 江苏 南京 210044

* 联系人, E-mail: zhi@nuist.edu.cn

2016-04-05 收稿, 2016-10-07 接受

国家自然科学基金资助项目(41605082;91437113); 北极圈开放研究基金—南京大气科学联合研究中心基金(NJCAR2016ZDXX); 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201506005)

摘要 集合预报方法是解决单一数值预报不确定性问题的有效手段, 而针对强天气预报的中尺度区域集合预报技术已逐渐受到国内外的重视。对于区域集合预报而言, 由于其不确定性来源较为复杂, 如何发展有效的扰动方法是研究的热点和难点。本文根据国内外区域集合预报的研究进展, 从初值扰动、模式扰动以及侧边界扰动三个方面进行了总结和回顾, 并对扰动方法的发展趋势进行了介绍。对于初值扰动, 较为主流的方法有动力降尺度, 沿用传统的由全球集合扰动方法发展而来的技术为区域集合产生初值, 以及专门为区域集合设计的扰动方法。鉴于这些方法各有利弊, 目前对于初值扰动方法的研究已经开始发展充分包含大尺度和小尺度不确定性信息的混合扰动方法。区域集合预报模式扰动的研究以物理过程扰动为主, 典型方法为多物理过程组合以及随机物理过程扰动, 其中多物理过程组合方法简单有效, 而随机物理过程扰动方法的物理意义更为明确, 是物理过程扰动的趋势。通过多模式组合进行模式扰动的方法也开展了一些相关研究, 且对于台风等强天气预报均显示出相对于单模式集合较好的效果。侧边界扰动的主流方法是由大尺度集合预报场来为区域集合提供不同的侧边界, 研究结果表明此种侧边界扰动方法简便易行, 且有助于提高区域集合预报较长预报时效离散度和预报技巧。

关键词

数值预报

区域集合预报

扰动方法

为了解决由于初值误差、模式误差以及大气的混沌特性所引起的单一数值预报的不确定性问题, Leith(1974)提出了集合预报思想。集合预报的发展预示着确定性预报向概率预报的转变, 可以为用户提供更全面完整的信息, 因此集合预报技术已在各国数值天气预报业务中发挥了重要作用(Toth and Kalney, 1993, 1997; Houtekamer et al., 1996;

Molteni et al., 1996; Bowler et al., 2008)。

集合预报技术发展至今, 已经从全球大尺度数值预报扩展到了中尺度区域数值预报领域。鉴于区域集合预报(regional ensemble forecast, REF)对于提高灾害性强天气的预报准确率具有重要意义, 相关技术的研究开始受到越来越多的关注(Du and Tracton, 2001; Gritmit and Mass, 2002; Du et al.,

引用格式: 张涵斌, 智协飞, 陈静, 等, 2017. 区域集合预报扰动方法研究进展综述[J]. 大气科学学报, 40(2): 145-157.

Zhang H B, Zhi X F, Chen J, et al., 2017. Achievement of perturbation methods for regional ensemble forecast[J]. Trans Atmos Sci, 40(2): 145-157. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20160405001. (in Chinese).

2003; Stensrud and Yussouf, 2007; Duan et al., 2012)。集合预报研究面临的首要科学问题是通过对恰当的扰动方法来估计数值预报误差源和分布特征,构造合理的集合预报系统(陈静等,2002;智协飞和陈雯,2010),对区域集合预报而言也是如此。中尺度强天气过程的发生发展具有突发性、转折性,物理、动力机制较为复杂,因此面向此类强天气的区域数值预报具有较大的不确定性(孙建华等,2013)。如何针对区域数值预报中的不确定性发展有效的区域集合预报扰动方法,是目前的研究热点和难点(Migliorini et al., 2011; Wang et al., 2014; 李俊等,2015; Weidle et al., 2016)。

本文针对国内外区域集合预报扰动方法,从初值扰动、模式扰动、侧边界扰动的角度,介绍目前区域集合预报扰动方法的研究现状和发展趋势,为目前国内业务区域集合预报系统的构建及区域集合预报研发方向提供参考。

1 集合预报理论简介

在数值预报已经广泛应用的今天,传统的确定性预报表现出了较大的局限性,因为初值场的质量和数值模式并不完美,而且许多理论和研究表明,大气存在内在的可预报性,即使以最理想的观测系统也只能做出2周左右的有用预报。在当前模式水平没有明显提高的情况下,如果要使预报技巧得到进一步改善,需要针对三个方面入手,即预报误差的三

个主要来源——初值(Rabier et al., 1996),模式(Buizza et al., 1999)和大气的混沌特性(Lorenz, 1963)。

鉴于单一的数值预报存在不确定性,Epstein (1969)首先提出了动力随机预报理论,人们逐步认识到对于数值预报,需要从“确定性”的思想转变为“随机论”,需要找出数值预报的概率密度函数(Probability Density Function, PDF)来代替单一的数值解,并且需要找到一个途径来得到数值预报的所有可能解。在此基础上Leith(1974)提出了Monte-Carlo预报的概念:当扰动能够较为准确的表示初值误差,则通过一组成员得到的预报集合可以优于单个成员预报,这就是经典的集合预报思想。简单地说,集合预报是由“一组”相关不大的初始场经过模式积分,获得“一组”预报值的方法(图1;杜钧和陈静,2010)。

一个集合预报系统合理与否,需要考虑如下几个条件:首先,从统计上来说各个集合成员的预报准确度应大致接近,即没有特别好或者特别差的成员,这就是预报成员的等同性,只有预报能力较为接近的成员,才能使集合预报有意义。其次,集合成员足够发散,能够包含真实大气状况。一个好的集合预报系统具有合理的离散度,较为接近实际单模式预报的均方根误差,离散度过大会导致虚假预报,过小则会导致较多漏报。目前多数集合预报系统均有离散度不足的问题。集合预报系统成员的离散度能够

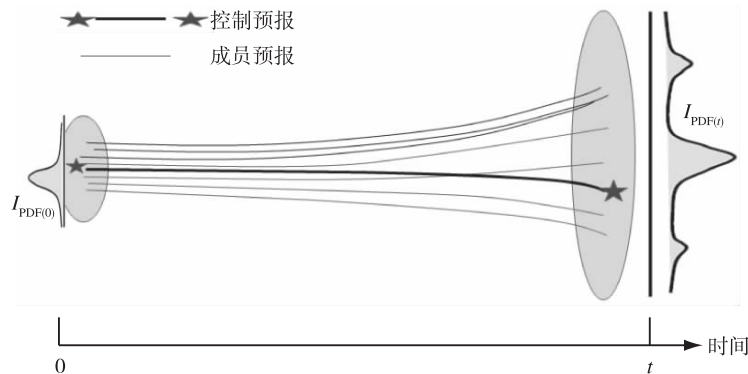


图1 集合预报示意(左边椭圆表示初始条件不确定性范围,右方椭圆表示随机预报出现的范围,线条表示各成员的预报轨迹)

Fig.1 Description of an ensemble forecast (the ellipse on the left indicates the range of initial state uncertainty, the ellipse on the right indicates the range of forecast state uncertainty, and the lines represent the respective forecast trajectories of the various members)

反映出真实大气的可预报性,比如在不确定性较大区域,集合离散度较大,反映出较低的可信度;在不确定性较小的区域,集合离散度较小,反映出较高的可信度(Molteni et al., 1996)。集合预报系统的构建,需要兼顾以上原则。

集合预报研究主要集中于两个方面,一个是集合预报扰动方法,一个是集合预报后处理(李泽椿和陈德辉,2002;马旭林等,2015)。其中集合预报的扰动方法是集合预报研究的核心问题(陈静等,2002)。国际上最初着眼于初始扰动的产生(Toth and Kalney, 1993; Buizza and Palmer, 1995; Zhang et al., 2006),通过对初始场误差进行随机采样来估计初始误差的概率分布,如国外最初发展的 Monte-Carlo 随机扰动法(Hollingsworth, 1980; Mullen and Buizza, 1994)及滞后平均法(Lagged Average Forecasting, LAF)(Hoffman and Kalnay, 1983)均是基于这种思想。然而,此类方法存在一定的局限性,其在斜压不稳定区不能产生具有不稳定能量结构的扰动,因此集合离散度难以增长(Palmer et al., 1990)。随后发展的扰动方法着眼于捕捉相空间中误差增长最快的方向,得到一组具有动力学增长特征的扰动成员,如增长模繁殖法(Breeding Growing Mode, BGM)(Toth and Kalnay, 1993, 1997)、奇异向量法(Singular Vectors, SVs)(Buizza and Palmer, 1995; Molteni et al., 1996)和观测扰动法(Perturbed Observation, PO)(Houtekamer et al., 1996; Buizza et al., 2005)。随着技术的进一步发展,目前已经逐步应用综合考虑集合预报和资料同化一致性的新一代初值扰动方法,如集合变换法(Ensemble Transform, ET)、再尺度化集合变换法(Ensemble Transform with Rescaling, ETR)(Bishop and Toth, 1999; Wei et al., 2008)、集合变换卡尔曼滤波法(Ensemble Transform Kalman Filter, ETKF)(Bishop et al., 2001; Wang and Bishop, 2003; Wei et al., 2006; 马旭林等, 2008)等。

模式不确定性是导致数值预报不准确的重要因素,如模式中的物理过程参数化方案的不完善会使预报结果产生不确定性或随机性,因此只采用初值扰动方法构建的集合预报系统存在着预报离散度偏小的问题。随着集合预报理论研究的深入和技术的发展,集合预报系统开始考虑模式的不确定性

(Houtekamer et al., 1996; Buizza et al., 1999; Stensrud et al., 2000)。目前集合预报主要的模式扰动方法有如下几种:1)通过一个模式不同的物理过程参数化方案组合来体现模式物理过程的不确定性(Houtekamer et al., 1996)。2)在模式中引入随机参数化方案来体现大气运动方程数值求解过程中所存在的不确定性,如随机扰动参数化倾向方案(Stochastically Perturbed Parameterization Tendencies, SPPT)(Buizza et al., 1999; Lin and Neelin, 2000; Palmer et al., 2009; Charron et al., 2010; 任志杰等, 2011; 谭宁等, 2013)、随机动能后向散射方法(Stochastic Kinetic Energy Backscatter, SKEB)(Shutts, 2005; Berner et al., 2009; Bowler and Mylne, 2009),还有 NCEP 全球集合预报系统中采用的随机扰动模式总倾向项技术(Hou et al., 2008)。3)采用多模式集成的方法来体现模式物理过程和动力过程的不确定性(Krishnamurti et al., 1999, 2000, 2003; 林春泽等, 2009; Zhi et al., 2012)。

综上所述,集合预报理论方法的研究已取得较为丰富的成果,其初值、模式扰动研发中的理论方法及经验,为更高分辨率的区域集合预报的研究奠定了较好的基础。

2 区域集合预报扰动方法研究进展

2.1 区域集合预报研究概况

随着业务部门对中小尺度强天气预报越来越重视,以提高此类强天气预报准确率为目的的区域集合预报技术研究已逐渐成为热门(Sindic-Rancic et al., 1998; Du and Tracton, 2001),目前也在世界各国的一些业务单位得到了发展和应用(Marsigli et al., 2005; Frogner et al., 2006; Bowler et al., 2008)。暴雨等强天气现象时空尺度较小,其发生、发展不仅受大尺度环流场影响,更与中小尺度天气系统密切相关,对此类天气预报不确定性的把握较为困难,需要考虑多方面因素:首先是初始条件的不确定性,这其中包含了来自大尺度环流和中尺度对流系统等各种因素引起的不确定性;其次,模式物理过程的不确定性也对中尺度数值预报的影响较大(赵鸣, 2008),中小尺度天气系统的发生发展对许多非绝热物理过程十分敏感,如辐射传输过程、水汽相变过程、湍流对热量、动量和水汽的交换过程等。数值模式能否

准确描述这些非绝热物理过程对中尺度强天气的预报具有非常重要的影响(陈静等,2006;Posselt and Vukicevic,2010);另外,中尺度区域数值预报的侧边界也是很大一部分不确定性来源,因为侧边界条件会显著影响区域模式的积分过程,从而影响中尺度强天气现象预报的准确性(Saito et al.,2011;Vié et al.,2011;张涵斌等,2014a)。针对以上中尺度区域数值预报的不确定性因素,开展区域集合预报扰动方法的研究,是目前的热点。

2.2 区域集合预报初值扰动

集合预报的初值扰动是指采用某种方法得到一组扰动值,然后将扰动值加在模式初值上,得到一组集合成员的初值场,以描述初值的不确定性。区域集合预报研究的首要问题是针对初值的不确定性来构建合理的初值扰动方案(关吉平和张立凤,2009)。对于一个好的区域集合预报初值扰动方法而言,不仅能充分表现初值场中大尺度天气条件的不确定性,还应该更加强调准确描述局地性中小尺度波动的不确定性(Stensrud and Fritsch,1994;陈静等,2005)。

国内外进行了一系列研究来探索区域集合预报初值扰动方法,其中较为常用的是基于全球集合预报的研发成果,采用传统的初值扰动生成方法,如BGM(Toth and Kalnay,1993,1997),SVs(Buizza et al.,1995;Molteni et al.,1996),ETKF(Wang and Bishop,2003)等直接为区域集合预报产生扰动(Stensrud et al.,1999;Walser et al.,2006;Bojarova et al.,2011)。此种方式的好处是可以充分利用全球集合预报研究中的成果,并能为区域集合预报产生一定的效果,如NCEP的短期集合预报计划(Short-Range Ensemble Forecast,SREF)采用BGM方法来产生初值扰动(Du et al.,2003),经过验证表明SREF系统能够提供较好的概率定量降水预报效果。Bishop et al.(2009)将ET方法(Wei et al.,2008)应用于高分辨率区域集合预报。由于ET方法的分析扰动由模式自循环产生,因此能够获得模式分辨率下所有尺度的扰动,试验结果表明区域集合预报系统具有较好的集合平均预报,其各个预报变量如动量、降水等的离散度—技巧关系较为合理。对于区域SVs方法的研究较为初步(Stappers and Barkmeijer,2011),挪威气象局的区域集合预报系统

中,利用基于干物理过程的目标性SVs构建了初值扰动(Frogneret al.,2006)。Li et al.(2008)基于加拿大气象服务中心区域集合预报系统试验了基于干物理过程和湿物理过程的SVs扰动,结果表明在斜压性较强的系统中,湿物理过程的SVs试验结果要比干物理过程的SVs试验效果更好。虽然此类基于全球集合预报发展起来的传统的初值扰动方法对区域集合预报具有一定效果,但也存在局限性。Bowler et al.(2009)尝试采用ETKF方法为区域集合预报系统生成扰动,通过波谱能量分析表明区域模式自身繁殖产生的扰动虽然能够捕捉小尺度不确定性信息,但是扰动包含大尺度分量有限,因此对大尺度不确定性描述不足。

我国也有一些学者采用传统的初值扰动方法结合区域模式开展了一系列区域集合预报研究,结果表明此类方法相对于控制预报以及随机扰动方法,均有明显改进,如王太微(2008)基于GRAPES-Meso区域模式,评估了ETKF和BGM两种区域集合预报初值扰动方法,试验表明两种方法差异不大,均能在一定程度上描述中尺度不确定性。邓国等(2010)介绍了国家级区域集合预报系统研发和检验情况,该系统基于WRF中尺度模式,采用BGM初值扰动方法构建,能够提供较好的降水概率预报。高峰等(2010)基于WRF模式进行了风暴尺度集合预报试验,结果表明BGM方法比Monte-Carlo方法具有显著的优势。肖玉华和何光碧(2011)基于AREM模式,利用BGM方法建立了区域集合预报系统,并设计了静态扰动和动态扰动方法,分析了不同类型扰动对强降水预报的影响,结果表明,静态和动态扰动都对中尺度暴雨预报具有积极的作用。也有学者尝试专门为区域集合预报设计初值扰动方法,如陈静等(2005)提出了异物理模态初值扰动方案,结果表明该方案产生的扰动具有显著的中尺度特征,集合预报效果明显优于控制预报。总体上看,国内研究人员得出的试验结果与国外相似,遇到的问题也类似,如传统的扰动方法应用于区域集合预报时,产生的集合离散度较为有限,其中模式的动力约束可能是一部分原因(田伟红和庄世宇,2008;龙柯吉等,2011)。另外,此类方法虽然能够产生足够的中小尺度扰动分量,但是包含大尺度扰动信息有限,从而在一定程度上限制了离散度的发展(张涵

斌等,2014a)。

另外一种常用的区域集合预报初值扰动方法是全球集合预报初值场直接动力降尺度,此方法较简便易行,因此在国际上一些业务中心得到了采用,如ECMWF有限区域集合预报系统(COSMO-LEPS)采用聚类方法,对ECMWF全球集合预报系统选取具有代表性的成员进行动力降尺度来构建区域集合的初值(Marsigli et al., 2005)。挪威气象局有限区域集合预报系统(LAM-EPS)也基于ECMWF全球集合SVs扰动,采用直接动力降尺度的方法构建初值(Frogner et al., 2006)。英国气象局集合预报系统MOGREPS采用全球ETKF扰动场动力降尺度为区域集合提供初值(Bowler et al., 2008)。我国学者也对动力降尺度方法进行了一些研究,如纪永明等(2011)利用TIGGE全球集合预报资料,通过降尺度获得GRAPES区域集合预报的初值扰动,表明此方法能够得到较大的初值扰动场振幅。总体而言,动力降尺度方法较为简便易行,在区域集合预报中的应用效果也较好,但是由于受到分辨率的限制,降尺度扰动只体现全球集合预报扰动的特征,不能充分包含区域模式所能分辨的小尺度扰动信息(Zhang et al., 2015a)。

关于采用传统扰动方法为区域集合生成初值扰动和动力降尺度两种手段孰优孰劣,目前尚无定论。李俊等(2010a)基于AREM模式进行区域集合预报初值扰动试验,表明采用BGM方法产生的初始扰动明显优于全球集合动力降尺度扰动,而Bowler and Mylne(2009)、Saito et al.(2011)的研究结果表明,动力降尺度方法具有略高的评分技巧。不可否认的是,采用传统扰动方法为区域集合生成的初值扰动包含大尺度的信息有限,而降尺度方法包含的小尺度扰动信息不足,有鉴于此,目前国际上开始探索混合扰动方法。Wang et al.(2011, 2014)采用滤波和谱分析方法从BGM扰动中提取小尺度扰动,并从ECMWF全球集合预报中提取大尺度扰动,将两者混合获得扰动场,结果表明该混合扰动场能够保留充分的大尺度和小尺度扰动信息,并能有效提高奥地利气象局区域集合预报系统的预报技巧。Ono et al.(2010)发展了一种将全球SVs扰动和区域SVs扰动混合的初值扰动方法,研究结果表明对强降水和弱降水预报,该方法均有较好表现。Caron

(2013)也进行过类似的混合扰动试验,表明该方法可以解决大尺度侧边界扰动和区域集合的初值在模拟区域边界的不协调问题。Zhang et al.(2015b)利用T639全球集合预报降尺度扰动和ETKF扰动,开展了多尺度混合扰动试验(Multi-Scale Blending, MSB),结果表明多尺度混合扰动相对于ETKF能够显著增加大尺度扰动分量,改善概率预报技巧。总体而言,混合扰动方法可以兼顾大尺度和小尺度不确定性信息,因此该方法对不管是大尺度强迫较强还是大尺度强迫较弱(强对流性)的天气均具有较好的适用性,已逐渐引起相关科研人员的关注(庄潇然等,2016)。

2.3 区域集合预报模式扰动

模式扰动方法也是区域集合预报研究的重要方面,对于提高较长预报时效的集合离散度具有重要作用。国际上一些典型的区域集合预报系统普遍针对模式物理过程进行扰动,其中以随机物理过程SPPT(Buizza et al., 1999)和SKEB方法(Shutts, 2005)为主。英国气象局MOGREPS系统最初采用随机物理过程扰动为区域集合提供模式扰动(Bowler et al., 2008),随后模式物理过程升级为SKEB方案(Bowler et al., 2009),升级后有效提高了区域集合预报的离散度和预报技巧。Li et al.(2008)在Lin and Neelin(2000)工作的基础上,对基于一阶自回归模式(马尔科夫过程)随机过程在空间上进行球谐函数展开(水平)和傅立叶展开(垂直方向),使得所构造的随机型不仅随时间变化(相关),且具有空间变化特征,并利用这种随机型进行了模式物理过程参数化方案敏感参数的扰动试验,验证了此种方法有助于提高降水概率预报效果。Berner et al.(2009)试验了SKEB方法,并与多物理过程组合方法进行了对比(Berner et al., 2011),结果表明SKEB方法总体上优于多物理过程组合,并指出同时考虑SKEB和多物理过程组合来代表模式不确定性的方案效果最优。Bouttier et al.(2012)采用SPPT方法在法国准业务对流尺度区域集合预报系统中进行了试验,结果表明该方法能显著提高该系统的预报技巧。

我国也不断有人尝试在区域集合预报系统中引入模式扰动。陈静等(2003a, 2006)利用中尺度非静力MM5模式,分析了不同积云对流参数化方案

对华南暖区暴雨数值预报的不确定性影响,讨论了利用模式扰动方法开展中国暴雨集合预报的可行性,并指出基于多物理过程的高分辨率集合预报可提供有价值的预报信息,能反映模式在降水预报中存在的确定性(陈静等,2003b)。谭燕和陈德辉(2007)、谭燕和陈葆德(2014)、王太微(2008)、张涵斌等(2014a,2014b)基于 GRAPES-Meso 模式进行了区域集合预报试验,均表明引入多物理过程参数化方案组合能够提高区域集合预报效果。黄红艳等(2015)基于 WRF 模式进行了区域集合预报试验,表明单一的初值扰动产生的离散度有限,而多物理过程组合模式扰动与初值扰动相结合可以有效提高集合离散度,并对降水预报有明显改善。国内对于区域集合预报随机物理过程扰动方法研究较少,国家数值预报中心正在基于 GRAPES-Meso 模式开展相关工作(袁月等,2016),并有望在近期业务化。多模式扰动方面,周文友和智协飞(2012)采用 TIGGE(THORPEX Interactive Grand Global Ensemble)资料不同模式预报结果对西太平洋热带气旋进行多模式集成预报,表明多模式集成预报的表现始终优于最好的单模式预报及集合平均。智协飞等(2015)基于 WRF 模式建立了台风路径和强度的集合预报试验系统(WRF-EPS),并将此集合预报结果与 TIGGE 集合预报资料中 4 个中心的预报进行多模式集成,对 2009 年 8 月 1—31 日西北太平洋台风路径和强度进行 24~72 h 集成预报,结果表明 WRF-EPS 与 TIGGE 多模式预报结果进行集成的预报效果较好。唐圣钧等(2015)基于 ARPS 和 WRF 模式的两组集合预报系统,设计了 ARPS 集合、WRF 集合和 ARPS-WRF 多模式集合 3 组试验,并针对 2013 年 5 月 8 日华南地区强降水过程,对比分析了多模式集合预报法与传统方法的降水预报效果,结果表明 ARPS-WRF 多模式集合在降水落区和量级预报上均优于传统单模式集合预报方法。

可以看出,目前区域集合预报模式扰动,对提高集合离散度以及概率预报技巧有显著作用,而国内外均已取得了不错的成果,其中随机物理过程扰动方法在国外的应用较广泛,而国内应用较多的还是多物理过程组合,随机物理过程扰动技术尚有待进一步发展。

2.4 区域集合预报侧边界扰动

侧边界条件会显著影响区域模式的积分过程,

从而影响中尺度强天气现象预报的准确性,因此区域集合预报必须充分考虑边界条件引起的不确定性(Anthes et al., 1989; Hamill and Colucci, 1997; Hou et al., 2001)。

目前对区域集合侧边界扰动采用的方法不是太多,基本上是通过直接由全球或者大尺度集合为区域集合提供边界条件,从而达到侧边界扰动的目的。目前相关的研究主要是探索侧边界扰动对区域集合的影响。Nutter et al.(2004a,2004b) 试验了粗分辨率边界条件对区域集合预报发散度的影响,对 100 个个例研究的统计结果表明侧边界条件扰动能够提高嵌套的区域集合的离散度,特别是对较小的模拟区域作用尤其显著,因为侧边界扰动能够迅速传遍整个嵌套的区域。Saito et al.(2010)采用日本气象厅全球集合预报为热带气旋区域集合预报提供边界,初步验证了引入了边界条件扰动相对于单一侧边界条件能够提高区域集合 50% 的离散度。进一步试验表明,无论初值扰动采用 ETKF 还是 BGM,引入侧边界条件扰动均能够极大地提高集合离散度,并减小均方根误差(Saito et al., 2012)。Vié et al.(2011)研究了初值扰动和边界扰动对云分辨率集合预报的影响,结果表明侧边界扰动能显著提高较长预报时效的离散度。美国 NCEP 区域集合预报系统的试验也得到了类似的结果(Du et al., 2003)。

国内方面,陈静和薛纪善(2004)参照观测扰动法,设计了通过扰动常规观测资料产生扰动的侧边界条件的计算方案,表明扰动侧边界对大尺度环流预报改善较大,对降水预报也有正面影响。孙凤娟(2009)针对山东一次暴雨过程,开展了两种侧边界扰动试验,一种为对水平侧边界内位温扰动项进行随机扰动,另一种为利用不同侧边界方案所构造的成员进行集合预报试验。结果表明第一种初始时刻离散度为 0,但随着积分迅速增加;另一种在积分初始时刻即存在较大离散度,评分检验效果更好。李俊等(2010b)基于我国科学家自主开发的 AREM 区域中尺度模式,同时考虑模式初值和侧边界条件的不确定性进行了区域短期集合预报试验,结果表明集合预报优于单一确定性预报。张涵斌等(2014b)基于 GRAPES-Meso 中尺度模式,开展了多初值、多初值多物理、多初值多物理多边界值集合预报对比试验,结果表明同时引入初值、模式及侧边界扰

动的集合方案是最优的。

可以看出,目前区域集合预报侧边界扰动主要由全球集合或者大区域粗分辨率集合来提供,研究结果也表明此种方法较为简便易行,并能够有效提高离散度。需要注意的是,侧边界扰动与初值扰动的有机结合也对区域集合预报具有重要影响,如区域集合自身繁殖的初值扰动与大尺度侧边界扰动有可能在边界产生不匹配,激发虚假波动,这也是侧边界扰动需要解决的问题之一(Caron,2013)。

3 结论与讨论

近年来以提高强天气预报质量为目的的高分辨率区域集合预报研究有了长足发展,并且相关的研究还在不断深入。本文对国内外区域集合预报初值、模式以及侧边界扰动方法的发展进行了回顾,并总结了相关扰动方法的发展趋势和亟待解决的问题,得出如下结论:

1)对区域集合预报初值扰动而言,传统扰动方法是普遍采用的手段,能够生成与区域模式分辨率一致的扰动,但包含大尺度扰动分量有限,使得区域集合预报离散度增长不理想。动力降尺度方法较为简便有效,在国内外业务上得到了广泛应用,但此方法产生的扰动包含小尺度扰动信息有限。目前区域

集合初值扰动设计过程中更多地考虑兼顾多尺度不确定性信息,并解决初值和边界的不协调问题,混合方法是目前较为有效的手段。

2)区域集合预报模式不确定性的研究以物理过程扰动为主,并辅以多模式扰动,典型方法为多物理过程组合、随机物理过程扰动以及多模式集成。多物理过程组合目前相对较为成熟,且在国内得到了较多的应用,目前国内外主要研究趋势是对随机物理过程方法的发展以及进一步的改进。

3)目前侧边界扰动采用的方法主要是与大尺度集合进行耦合,由驱动有限区域集合预报的大尺度集合预报场来提供不同的边界条件,而是否存在其他替代的有效手段,目前鲜有报道。国内外主要是针对侧边界扰动对区域集合的影响开展理论研究,普遍结果表明引入侧边界条件扰动可以显著改善区域集合预报的离散度,对较长预报时效的预报效果,作用尤其显著。

可以预见,区域集合预报扰动方法将继续快速发展,相关研究成果对提高业务区域集合预报水平和混合资料同化质量(马旭林等,2014)等会起到推动作用,区域集合预报系统也将会在各大业务中心扮演越来越重要的角色。

参考文献(References)

- Anthes R A, Kuo Y H, Hsie E Y, et al., 1989. Estimation of skill and uncertainty in regional numerical models[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 115(488): 763-806.
- Berner J, Shutts G J, Leutbecher M, et al., 2009. A spectral stochastic kinetic energy backscatter scheme and its impact on flow-dependent predictability in the ECMWF ensemble prediction system[J]. *J Atmos Sci*, 66(3): 603-626.
- Berner J, Ha S Y, Hacker J P, et al., 2011. Model uncertainty in a mesoscale ensemble prediction system: Stochastic versus multiphysics representations [J]. *Mon Wea Rev*, 139(6): 1972-1995.
- Bishop C H, Toth Z, 1999. Ensemble transformation and adaptive observations[J]. *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[J]. *Mon Wea Rev*, 129(3): 420-436.
- Bishop C H, Holt T R, Nachamkin J, et al., 2009. Regional ensemble forecasts using the ensemble transform technique[J]. *Mon Wea Rev*, 137: 288-298.
- Bojarova J, Gustafsson N, Johansson A, et al., 2011. The ETKF rescaling scheme in HIRLAM[J]. *Tellus(A)*, 63: 385-401.
- Bouttier F, Vié B, Nuissier O, et al., 2012. Impact of stochastic physics in a convection-permitting ensemble[J]. *Mon Wea Rev*, 140(11): 3706-3721.
- Bowler N E, Mylne K R, 2009. Ensemble transform Kalman filter perturbations for a regional ensemble prediction system[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 135(640): 757-766.
- Bowler N E, Arribas A, Mylne K R, et al., 2008. The MOGREPS short-range ensemble prediction system[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 134(632): 703-722.
- Bowler N E, Arribas A, Sarah E, et al., 2009. The local ETKF and SKEB: Upgrades to the MOGREPS short-range ensemble prediction system[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 135(640): 767-776.
- Buizza R, Palmer T N, 1995. The singular-vector structure of the atmospheric global circulation[J]. *J Atmos Sci*, 52(9): 1434-1456.

- Buizza R, Miller M, Palmer T N, 1999. Stochastic representation of model uncertainties in the ECMWF ensemble prediction system [J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 125(560):2887-2908.
- Buizza R, Houtekamer P L, Toth Z, et al., 2005. A comparison of the ECMWF, MSC and NCEP global ensemble prediction systems [J]. *Mon Wea Rev*, 133(5):1076-1097.
- Caron J F, 2013. Mismatching perturbations at the lateral boundaries in limited-area ensemble forecasting: A case study [J]. *Mon Wea Rev*, 141(141):356-374.
- Charron M, Pellerin G, Spacek L, et al., 2010. Toward random sampling of model error in the Canadian ensemble prediction system [J]. *Mon Wea Rev*, 138(5):1877-1901.
- 陈静, 薛纪善, 2004. 水平侧边界条件对中尺度暴雨集合预报的影响 [C]//全国数值天气预报新理论新方法及应用学术研讨会. Chen J, Xue J S, Yan H, 2004. Influence of lateral boundary conditions on ensemble mesoscale heavy rain prediction [C]//National science seminar on new theory and application of numerical weather prediction. (in Chinese).
- 陈静, 陈德辉, 颜宏, 2002. 集合数值预报发展与研究进展 [J]. *应用气象学报*, 13(4):497-507. Chen J, Chen D H, Yan H, 2004. A brief review on the development of ensemble prediction system [J]. *J Appl Meteor Sci*, 13(4):497-507. (in Chinese).
- 陈静, 薛纪善, 颜宏, 2003a. 物理过程参数化方案对中尺度暴雨数值模拟影响的研究 [J]. *气象学报*, 61(2):203-218. Chen J, Xue J S, Yan H, 2003. The impact of physics parameterization schemes on mesoscale heavy rainfall simulation [J]. *Acta Meteor Sinica*, 61(2):203-218. (in Chinese).
- 陈静, 薛纪善, 颜宏, 2003b. 华南中尺度暴雨数值预报的不确定性与集合预报试验 [J]. *气象学报*, 61(4):432-446. Chen J, Xue J S, Yan H, 2003. The uncertainty of mesoscale numerical prediction of South China heavy rain and the ensemble simulations [J]. *Acta Meteor Sinica*, 61(4):432-446. (in Chinese).
- 陈静, 薛纪善, 颜宏, 2005. 一种新型的中尺度暴雨集合预报初值扰动方法研究 [J]. *大气科学*, 29(5):717-726. Chen J, Xue J S, Yan H, 2005. A new initial perturbation method of ensemble mesoscale heavy rain prediction [J]. *Chin J Atmos Sci*, 29(5):717-726. (in Chinese).
- 陈静, 矫梅燕, 龚建东, 等, 2006. 非绝热物理过程对北京暴雨数值预报不确定性影响 [J]. *应用气象学报*, 17(8):18-27. Chen J, Jiao M Y, Gong J D, et al., 2006. The impact of diabatic physics on the uncertainty of heavy rainfall ensemble simulations in Beijing [J]. *J Appl Meteor Sci*, 17(8):18-27. (in Chinese).
- 邓国, 龚建东, 邓莲堂, 等, 2010. 国家级区域集合预报系统研发和性能检验 [J]. *应用气象学报*, 21(5):513-523. Deng G, Gong J D, Deng L T, et al., 2010. Development of mesoscale ensemble prediction system at National Meteorological Center [J]. *J Appl Meteor Sci*, 21(5):513-523. (in Chinese).
- Du J, Tracton M S, 2001. Implementation of a real-time short-range ensemble forecasting system at NCEP: An update [C]//9th Conference on Mesoscale Processes, Ft. Lauderdale, Florida, Amer Meteor Soc:355-356.
- 杜钧, 陈静, 2010. 单一值预报向概率预报转变的基础: 谈谈集合预报及其带来的变革 [J]. *气象*, 36(11):1-11. Du J, Chen J, 2010. The corner stone in facilitating the transition from deterministic to probabilistic forecasts-ensemble forecasting and its impact on numerical weather prediction [J]. *Meteor Mon*, 36(11):1-11. (in Chinese).
- Du J, DiMego G, Tracton M S, et al., 2003. NCEP short-range ensemble forecasting (SREF) system: Multi-IC, multi-model and multi-physics approach, Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling [C]//CAS/JSC Working Group on Numerical Experimentation (WGNE), WMO Tech. Doc. 1161.
- Duan Y, Gong J, Du J, et al., 2012. An overview of the Beijing 2008 Olympics research and development project (B08RDP) [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 93(3):381-403.
- Epstein E S, 1969. Stochastic dynamic prediction [J]. *Tellus*, 21(6):739-759.
- Frogner I L, Haakenstad H, Iversen T, 2006. Limited-area ensemble predictions at the Norwegian Meteorological Institute [J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 132(621):2785-2808.
- 高峰, 闵锦忠, 孔凡铀, 2010. 基于增长模繁殖法的风暴尺度集合预报试验 [J]. *高原气象*, 29(2):429-436. Gao F, Min J Z, Kong F Y, 2010. Experiment of the storm-scale ensemble forecast based on breeding of growing mode [J]. *Plateau Meteor*, 29(2):429-436. (in Chinese).
- Grimit E P, Mass C F, 2002. Initial results of a mesoscale short-range ensemble forecasting system over the Pacific Northwest [J]. *Wea Forecasting*, 17(2):192-205.
- 关吉平, 张立风, 2009. 增长模繁殖法在华南暴雨中期集合预报中的应用 [J]. *热带气象学报*, 25(2):246-250. Guan J P, Zhang L F, 2009. Application of the method of BGM in medium-range ensemble forecast for a South China rainstorm [J]. *J Trop Meteor*, 25(2):246-250. (in Chinese).
- Hamill T M, Colucci S J, 1997. Verification of Eta RSM short-range ensemble forecasts [J]. *Mon Wea Rev*, 125(6):1312-1327.
- Hoffman R N, Kalnay E, 1983. Lagged average forecasting, an alternative to Monte Carlo forecasting [J]. *Tellus (A)*, 35(2):100-118.
- Hollingsworth A, 1980. An experiment in Monte Carlo forecasting procedure [C]//ECMWF Workshop on Stochastic Dynamic forecasting, ECMWF.

- Hou D, Kalnay E, Droegemeier K K, 2001. Objective verification of the SAMEX '98 ensemble forecasts [J]. *Mon Wea Rev*, 129(129): 73-91.
- Hou D, Toth Z, Zhu Y, et al., 2008. Impact of a stochastic perturbation scheme on NCEP global ensemble forecast system [C]//In proceedings of the 19th AMS conference on probability and statistics. New Orleans, Louisiana.
- Houtekamer P L, Lefaiivre L, Derome J, et al., 1996. A system simulation approach to ensemble prediction [J]. *Mon Wea Rev*, 124(124): 1225-1242.
- 黄红艳, 齐琳琳, 刘健文, 等, 2015. 多物理 ETKF 在暴雨集合预报中的初步应用 [J]. *大气科学*, 40(4): 657-668. Huang H Y, Qi L L, Liu J W, et al., 2015. Preliminary application of a multi-physical ensemble transform Kalman filter in precipitation ensemble prediction [J]. *Chin J Atmos Sci*, 40(4): 657-668. (in Chinese).
- 纪永明, 陈静, 矫梅燕, 等, 2011. 基于多中心 TIGGE 资料的区域 GRAPES 集合预报初步试验 [J]. *气象*, 37(4): 392-402. Ji Y M, Chen J, Jiao M Y, et al., 2011. The preliminary experiment of GRAPES-MESO ensemble prediction based on TIGGE data [J]. *Meteor Mon*, 37(4): 392-402. (in Chinese).
- Krishnamurti T N, Kishtawal C M, Larow T E, et al., 1999. Improved weather and seasonal climate forecasts from multimodel superensemble [J]. *Science*, 285(5433): 1548-1550.
- Krishnamurti T N, Kishtawal C M, Shin D W, et al., 2000. Multi-model superensemble forecasts for weather and seasonal climate [J]. *J Climate*, 13(23): 4196-4216.
- Krishnamurti T N, Rajendran K, Kumar T S V, et al., 2003. Improved skill for the anomaly correlation of geopotential heights at 500 hPa [J]. *Mon Wea Rev*, 131(6): 1082-1102.
- Leith C E, 1974. Theoretical skill of Monte Carlo forecasts [J]. *Mon Wea Rev*, 102(6): 409-418.
- 李俊, 杜钧, 王明欢, 等, 2010a. AREM 模式两种初值扰动方案的集合降水预报试验及检验 [J]. *热带气象学报*, 26(6): 733-742. Li J, Du J, Wang M H, et al., 2010a. Precipitation verifications to an ensemble prediction system using two initial perturbation schemes based on AREM [J]. *J Trop Meteor*, 26(6): 733-742. (in Chinese).
- 李俊, 王明欢, 公颖, 等, 2010b. AREM 短期集合预报系统及其降水预报检验 [J]. *暴雨灾害*, 29(1): 30-37. Li J, Du J, Gong Y, et al., 2010b. Precipitation verifications to an ensemble prediction system based on AREM [J]. *Torrential Rain and Disasters*, 29(1): 30-37. (in Chinese).
- 李俊, 杜钧, 刘羽, 2015. 北京“7. 21”特大暴雨不同集合预报方案的对比试验 [J]. *气象学报*, 73(1): 50-71. Li J, Du J, Liu Y, 2015. A comparison of initial condition-, multi-physics- and stochastic physics-based ensembles in predicting Beijing “7. 21” excessive storm rain event [J]. *Acta Meteor Sinica*, 73(1): 50-71. (in Chinese).
- Li X, Charron M, Spacek L, et al., 2008. A regional ensemble prediction system based on moist targeted singular vectors and stochastic parameter perturbations [J]. *Mon Wea Rev*, 136(2): 443-462.
- 李泽椿, 陈德辉, 2002. 国家气象中心集合数值预报业务系统的发展及应用 [J]. *应用气象学报*, 13(1): 1-15. Li Z C, Chen D H, 2002. The development and application of the operational ensemble prediction system at National Meteorological Center [J]. *J Appl Meteor Sci*, 13(1): 1-15. (in Chinese).
- 林春泽, 智协飞, 韩艳, 等, 2009. 基于 TIGGE 资料的地面气温多模式超级集合预报 [J]. *应用气象学报*, 20(6): 706-712. Lin C Z, Zhi X F, Han Y, et al., 2009. Multi-model superensemble forecasts of the surface temperature using the TIGGE data [J]. *J Appl Meteor Sci*, 20(6): 706-712. (in Chinese).
- Lin W B, Neelin J D, 2000. Influence of a stochastic moist convective parameterization on tropical climate variability [J]. *Geophys Res Letters*, 27(22): 3691-3694.
- 龙柯吉, 陈静, 马旭林, 等, 2011. 基于集合卡尔曼变换的区域集合预报初步研究 [J]. *成都信息工程学院学报*, 26(1): 37-46. Long K J, Chen J, Ma X L, et al., 2011. The preliminary study on ensemble prediction of GRAPES-meso based on ETKF [J]. *Journal of Chengdu University Of Information Technology*, 26(1): 37-46. (in Chinese).
- Lorenz E N, 1963. Deterministic nonperiodic flow [J]. *J Atmos Sci*, 20: 130-141.
- 马旭林, 薛纪善, 陆维松, 2008. GRAPES 全球集合预报的集合卡尔曼变换初始扰动方案初步研究 [J]. *气象学报*, 66(4): 526-536. Ma X L, Xue J S, Lu W S, 2008. Preliminary study on ensemble transform Kalman filter-based initial perturbation scheme in GRAPES global ensemble prediction [J]. *Acta Meteor Sinica*, 66(4): 526-536. (in Chinese).
- 马旭林, 陆续, 于月明, 等, 2014. 数值天气预报中集合—变分混合资料同化及其研究进展 [J]. *热带气象学报*, 30(6): 1188-1195. Ma X L, Lu X, Yu Y M, et al., 2014. Progress on hybrid ensemble-variational data assimilation in numerical weather prediction [J]. *J Trop Meteor*, 30(6): 1188-1195. (in Chinese).
- 马旭林, 时洋, 和杰, 等, 2015. 基于卡尔曼滤波递减平均算法的集合预报综合偏差订正 [J]. *气象学报*, 73(5): 952-964. Ma X L, Shi Y, He J, et al., 2015. The combined descending averaging bias correction based on the Kalman filter for ensemble forecast [J]. *Acta Meteor Sinica*, 73(5): 952-964. (in Chinese).
- Marsigli C, Boccanera F, Montani A, et al., 2005. The COSMO-LEPS mesoscale ensemble system: Validation of the methodology and verification [J].

- Nonlinear Processes Geophys, 12(4):527-536.
- Migliorini S, Dixon M, Bannister R, et al., 2011. Ensemble prediction for nowcasting with a convection-permitting model— I: Description of the system and the impact of radar-derived surface precipitation rates[J]. *Tellus*, 63(3):468-496.
- Molteni F, Buizza R, Palmer T N, et al., 1996. The ECMWF ensemble prediction system: Methodology and validation[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 122(122):73-119.
- Mullen S L, Baurahfner D P, 1994. Monte Carlo simulations of explosive cyclogenesis[J]. *Mon Wea Rev*, 122(7):1548-1567.
- Nutter P, Stensrud D, Xue M, 2004a. Effects of coarsely resolved and temporally interpolated lateral boundary conditions on the dispersion of limited-area ensemble forecasts[J]. *Mon Wea Rev*, 132(10):2358-2377.
- Nutter P, Xue M, Stensrud D, 2004b. Application of lateral boundary condition perturbations to help restore dispersion in limited-area ensemble forecasts [J]. *Mon Wea Rev*, 132(10):2378-2390.
- Ono K, Honda Y, Kunii M, 2010. Development of a mesoscale ensemble prediction system using a singular vector method[C]//CAS/JSCWGNE Res. Act. Atmos. Ocea. Modell;40.
- Palmer T N, Mureau R, Molteni F, 1990. The Monte Carlo forecast[J]. *Weather*, 45(45):198-207.
- Palmer T N, Buizza R, Doblas-Reyes F, et al., 2009. Stochastic parametrization and model uncertainty[J]. ECMWF Technical Memorandum.
- Posselt D J, Vukicevic T, 2010. Robust characterization of model physics uncertainty for simulations of deep moist convection[J]. *Mon Wea Rev*, 138(5):1513-1535.
- Rabier F, Klinker E, Courtier P, et al., 1996. Sensitivity of forecast error to initial conditions[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 122(529):121-150.
- 任志杰, 陈静, 田华, 2011. T213 全球集合预报系统物理过程随机扰动方法研究[J]. *气象*, 37(9):1049-1059. Ren Z J, Chen J, Tian H, 2011. Research on T213 ensemble prediction system stochastic physics perturbation[J]. *Meteor Mon*, 37(9):1049-1059. (in Chinese).
- Saito K, Kuroda T, Kunii M, et al., 2010. Numerical simulation of myanmar cyclone Nargis and the associated storm surge Part II: Ensemble prediction [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 88(3):547-570.
- Saito K, Hara M, Seko H, et al., 2011. Comparison of initial perturbation methods for the mesoscale ensemble prediction system of the meteorological research Institute for the WWRP Beijing 2008 Olympics research and development project (B08RDP) [J]. *Tellus(A)*, 63:445-467
- Saito K, Seko H, Kunii M, et al., 2012. Effect of lateral boundary perturbations on the breeding method and the local ensemble transform Kalman filter for mesoscale ensemble prediction[J]. *Tellus*, 64(1):1-4.
- Shutts G, 2005. A kinetic energy backscatter algorithm for use in ensemble prediction systems[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 131(612):3079-3102.
- Sindic-Rancic G, Toth Z, Kalnay E, 1998. Storm scale ensemble experiments with ARPS model preliminary results[C]//12th conference on numerical weather prediction. Amer Meteor Soc, Phoenix, Arizona; 279-280.
- Stappers R, Barkmeijer J, 2011. Properties of singular vectors using convective available potential energy as final time norm[J]. *Tellus(A)*, 63(3):373-384.
- Stensrud D J, Fritsch J M, 1994. Mesoscale convective systems in weakly forced large-scale environments. Part II: Generation of a mesoscale initial condition[J]. *Mon Wea Rev*, 122(9):2068-2083.
- Stensrud D J, Yussouf N, 2007. Reliable probabilistic quantitative precipitation forecasts from a short-range ensemble forecasting system[J]. *Wea Forecasting*, 22(1):3-17.
- Stensrud D J, Brooks H E, Du J, et al., 1999. Using ensembles for short-range forecasting[J]. *Mon Wea Rev*, 127(4):433-446.
- Stensrud D J, Bao J W, Warner T T, 2000. Using initial condition and model physics perturbations in short-range ensemble simulations of mesoscale convective systems[J]. *Mon Wea Rev*, 128(128):2077-2107.
- 孙凤娟, 2009. 风暴尺度集合预报侧边界扰动技术研究[D]. 南京: 南京信息工程大学. Sun F J, 2009. Study on the lateral boundary condition perturbation method for storm-scale ensemble forecast[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology. (in Chinese).
- 孙建华, 赵思雄, 傅慎明, 等, 2013. 2012年7月21日北京特大暴雨的多尺度特征[J]. *大气科学*, 37(3):705-718. Sun J H, Zhao S X, Fu S M, et al., 2013. Multi-scale characteristics of record heavy rainfall over Beijing area on July 21, 2012[J]. *Chin J Atmos Sci*, 37(3):705-718. (in Chinese).
- 谭宁, 陈静, 田华, 2013. 两种模式随机扰动方案比较及扰动传播分析[J]. *气象*, 39(5):543-555. Tan N, Chen J, Tian H, 2013. Comparison between two global model stochastic perturbation schemes and analysis of perturbation propagation[J]. *Meteor Mon*, 39(5):543-555. (in Chinese).
- 谭燕, 陈德辉, 2007. 基于非静力模式物理扰动的中尺度集合预报试验[J]. *应用气象学报*, 18(3):386-406. Tan Y, Chen D H, 2007. Meso-scale ensemble forecasts on physical perturbation using a non-hydrostatic model[J]. *J Appl Meteor Sci*, 18(3):386-406. (in Chinese).
- 谭燕, 陈德德, 2014. 多种扰动组合的热带气旋路径集合预报技术研究[J]. *高原气象*, 33(4):1012-1021. Tan Y, Chen B D, 2014. Study of multiple perturb tropical cyclone ensemble forecast[J]. *Plateau Meteor*, 33(4):1012-1021. (in Chinese).

- 唐圣钧,王东海,杜钧,等,2015.混合集合预报法在华南暴雨短期预报中的试验[J].应用气象学报,26(6):669-679. Tang S J,Wang D H,Du J, et al.,2015.The experiment of hybrid ensemble forecast approach in short-range forecast for South China rainstorm[J].J Appl Meteor Sci,26(6):669-679.(in Chinese).
- 田伟红,庄世宇,2008.ETKF方法在区域集合预报中的初步应用[J].气象,34(8):35-39. Tian W H,Zhuang S Y,2008.Application of ETKF method to regional ensemble forecasts[J].Meteor Mon,34(8):35-39.(in Chinese).
- Toth Z,Kalnay E,1993.Ensemble forecasting at NMC:The generation of perturbations[J].Bull Amer Meteor Soc,74(12):2317-2330.
- Toth Z,Kalnay E,1997.Ensemble forecasting at NCEP and the breeding method[J].Mon Wea Rev,125(12):3297-3319.
- Vié B,Nuissier O,Ducrocq V,2011.Cloud-resolving ensemble simulations of mediterranean heavy precipitating events:Uncertainty on initial conditions and lateral boundary conditions[J].Mon Wea Rev,139(2):403-423.
- Walser A,Arpagaus M,Appenzeller C,et al.,2006.The Impact of moist singular vectors and horizontal resolution on short-range limited-area ensemble forecasts for two European winter storms[J].Mon Wea Rev,134(10):2877-2887.
- 王太微,2008.中尺度模式不确定性与初值扰动试验研究[D].北京:中国气象科学研究院. Wang T W,2008.Study on the uncertainty and initial perturbation test of mesoscale model[D].Beijing:Chinese Academy of Meteorological Sciences.(in Chinese).
- Wang X,Bishop C H,2003.A comparison of breeding and ensemble transform Kalman filter ensemble forecast schemes[J].J Atmos Sci,60(9):1140-1158.
- Wang Y,Bellus M,Wittmann C,et al.,2011.The central European limited-area ensemble forecasting system:ALADIN-LAEF[J].Quart J Roy Meteor Soc,137(655):483-502.
- Wang Y,Bellus M,Geleyn J F,et al.,2014.A new method for generating initial condition perturbations in a regional ensemble prediction system: Blending[J].Mon Wea Rev,142(5):2043-2059.
- Wei M,Toth Z,Wobus R,et al.,2006.Ensemble transform Kalman Filter-based ensemble perturbations in an operational global prediction system at NCEP[J].Tellus(A),58(1):28-44
- Wei M,Toth Z,Wobus R,et al.,2008.Initial perturbations based on the ensemble transform (ET) technique in the NCEP global operational forecast system[J].Tellus(A),60(1):62-79.
- Weidle F,Wang Y,Smet G,2016.On the impact of the choice of global ensemble in forcing a regional ensemble Ssystem[J].Wea Forecasting,31(4):515-530.
- 肖玉华,何光碧,2010.边界层参数化方案对不同性质降水模拟的影响[J].高原气象,29(2):331-339. Xiao Y H,He G B,2010.Impact of boundary layer parameterization schemes on numerical simulation of different property precipitation[J].Plateau Meteor,29(2):331-339.(in Chinese).
- 袁月,李晓莉,陈静,等,2016.GRAPES区域集合预报系统模式不确定性的随机扰动技术研究[J].气象,42(10):1161-1175. Yuan Y,Li X L, Chen J,et al.,2016.Stochastic parameterization toward model uncertainty for the GRAPES mesoscale ensemble prediction system[J].Meteor Mon,42(10):1161-1175.(in Chinese).
- Zhang F,Odins A M,Nielsengammon J W,2006.Mesoscale predictability of an extreme warm-season precipitation event[J].Wea Forecasting,21(2):149-166.
- 张涵斌,陈静,智协飞,等,2014a.GRAPES区域集合预报系统应用研究[J].气象,40(9):1076-1087. Zhang H B,Chen J,Zhi X F,et al.,2014. Study on the application of GRAPES regional ensemble prediction system[J].Meteor Mon,40(9):1077-1088.(in Chinese).
- 张涵斌,陈静,智协飞,等,2014b.基于GRAPES-Meso的集合预报扰动方案设计与比较[J].大气科学学报,37(3):276-284. Zhang H B,Chen J,Zhi X F,et al.,2014a.Design and comparison of perturbation schemes for GRAPES_meso based ensemble forecast[J].Trans Atmos Sci,37:276-284.(in Chinese).
- Zhang H,Chen J,Zhi X,et al.,2015a.A comparison of ETKF and downscaling in a regional ensemble prediction system[J].Atmosphere,6(3):341-360.
- Zhang H,Chen J,Zhi X,et al.,2015b.Study on multi-scale blending initial condition perturbations for a regional ensemble prediction system[J].Adv Atmos Sci,32(8):1143-1155.
- 赵鸣,2008.边界层和陆面过程对中国暴雨影响研究的进展[J].暴雨灾害,27(2):186-190. Zhao M,2008.A review of the research on the effects of boundary layer and land surface process on heavy rain in China[J].Torrential Rain and Disasters,27(2):186-190.(in Chinese).
- 智协飞,陈雯,2010.THORPEX国际科学研究新进展[J].大气科学学报,33(4):504-511. Zhi X F,Chen W,2010.New achievements of international atmospheric research in THORPEX program[J].Trans Atmos Sci,33(4):504-511.(in Chinese).
- Zhi X,Qi H X,Bai Y Q,et al.,2012.A comparison of three kinds of multimodel ensemble forecast techniques based on the TIGGE data[J].Acta Meteor Sinica,26(1):41-51.
- 智协飞,孙晶,周文友,2015.2009年夏季西太平洋台风的集合预报和多模式集成预报试验[J].大气科学学报,38(5):633-640. Zhi X F,Sun J, Zhou W Y,2015.Ensemble and multimodel ensemble forecasts of western Pacific typhoons during summer 2009[J].Trans Atmos Sci,38(5):633-

640.(in Chinese).

- 周文友,智协飞,2012.2009年夏季西太平洋台风路径和强度的多模式集成预报[J].气象科学,32(5):492-499. Zhou W Y,Zhi X F,2012.Multimodel ensemble forecasts of the TC tracks and intensity over the western Pacific during the summer of 2009[J].J Meteor Sci,32(5):492-499.(in Chinese).
- 庄潇然,闵锦忠,蔡沉辰,等,2016.不同大尺度强迫条件下考虑初始场与侧边界条件不确定性的对流尺度集合预报试验[J].气象学报,74(2):244-258. Zhuang X R,Min J Z,Cai Y C,et al.,2016.Convective-scale ensemble prediction experiments under different large-scale forcing with consideration of uncertainties in initial and lateral boundary condition[J].Acta Meteor Sinica,74(2):244-258.(in Chinese).

Achievement of perturbation methods for regional ensemble forecast

ZHANG Hanbin¹, ZHI Xiefei^{2,3}, CHEN Jing⁴, WU Zhipeng⁵, Xia Yu⁶, Zhang Xinran⁷

¹Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089, China;

²Nanjing Joint Center for Atmospheric Research(NJCAR), Nanjing 210044, China;

³Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education(KLME), Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

⁴Center of Numerical Weather Prediction of CMA, Beijing 100081, China;

⁵Chongqing Meteorological Observatory, Chongqing 401120, China;

⁶School of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

⁷School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China

The ensemble forecast technique is a practical solution to the uncertainty problem of numerical weather prediction. At present, researchers around the world tend to focus on the Regional Ensemble Forecast(REF), which aims at the improvement of regional high impact weather forecast. As various uncertainty resources exist for meso-scale and small-scale weather phenomena, regional model simulation is a very complicated issue, thus how to generate effective perturbations for REF is a hot topic involving many technical difficulties. In the present paper, the progress of REF research is reviewed in terms of initial condition perturbation, model perturbation and lateral boundary condition perturbation, and the trends of methods related to these aspects are also presented. The results presented show the following: for initial condition perturbation, the mainstream methods include dynamical downscaling, using traditional methods developed from Global Ensemble to generate perturbations for REF, as well as some methods specifically designed for REF. All of these methods are characterized by some advantages and some shortcomings, as downscaling a lack of small scale and other components leads to the generation of insufficient large-scale uncertainty information. In addition, research on the REF initial condition perturbation has only begun to explore more effective methods such as blending, which consider not only sufficiently small-scale uncertainty, but also sufficiently large-scale uncertainty. Finally, the inconsistency problem between initial state and lateral boundary can also be ameliorated. Model perturbation is another important aspect for REF. This technique mostly perturbs model physics, such as multi-physics combination and stochastically perturb model physics. It has been reported that the multi-physics combination is quite simple and can effectively improve the ensemble spread of REF, while using the stochastic method to perturb model physics has greater scientific significance, thus this type of perturbation method has become the trend of model physics perturbations. Furthermore, multi-model combination is another practical method of model perturbation. Related studies have been carried out, the results of which show that this method possesses stronger skill than a single model ensemble, especially when a multi-model ensemble is applied to meso-scale severe weather forecast, such as with a Tropical Cyclone. As REF systems are constructed based on the regional models, the uncertainties originating from lateral boundary conditions cannot be

ignored. Lateral boundary condition perturbation schemes mainly use large-scale ensembles, such as Global Ensemble Forecast Products, to provide different lateral boundary conditions for REF. Studies have proven that this method can achieve the goal of perturbing the lateral boundary condition of REF, and lateral boundary condition perturbation is found to aid in amplifying the ensemble spread of REF for long-range forecast lead times. In addition, the ensemble forecast skill can also benefit from lateral boundary perturbation. Although the perturbation techniques for REF have already led to some fruitful achievements, much work is still needed, and all of the methods related to initial condition perturbations, model perturbations and lateral boundary condition perturbations are still under development. It can be predicted that, as the REF perturbation methods continue to improve, the REF will become increasingly more effective, and will play a more important role in operational numerical weather prediction centers.

Numerical Weather Prediction; regional ensemble forecast; perturbation method

doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20160405001

(责任编辑:刘菲)