

集合敏感性在预报误差及可预报性研究中的应用进展综述

王毅¹ 代刊¹ 张晓美² 唐健¹ 周非凡³ 马杰¹

(1 国家气象中心, 北京 100081; 2 中国气象局公共气象服务中心, 北京100081;

3 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

摘要: 研究大气的可预报性和预报误差产生的原因, 对于改进数值预报, 提升业务预报技巧具有重要意义。集合敏感性基于具有流依赖特性的集合预报, 通过建立预报与初始场或前期预报大气状态之间的统计关系, 为揭示与预报对象可预报性相关的动力学特征及理解预报误差来源和传播机制提供了一种新方法。同时, 介绍了集合敏感性的定义和度量, 并综述了其针对典型天气系统和高影响天气事件研究的进展, 并讨论了该方法的优势和局限性。

关键词: 集合敏感性, 可预报性, 集合预报

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.02.007

Research Progress in Study of Forecast Errors and Predictability Based on Ensemble Sensitivity

Wang Yi¹, Dai Kan¹, Zhang Xiaomei², Tang Jian¹, Zhou Feifan³, Ma Jie¹

(1 National Meteorological Centre, Beijing 100081

2 Public Meteorological Service Centre of China Meteorological Administration, Beijing 100081

3 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract: Research on the atmospheric predictability and causes of forecast errors has important significance to improvements of numerical weather prediction and operational forecast skill. Based on flow-dependent ensemble, ensemble sensitivity determines relationships between forecasts and initial or early forecast atmospheric conditions. It provides a new methodology to reveal dynamic features relevant to the predictability of the forecast variable of interest and to understand origin of forecast errors with its propagation. This paper introduces the definition and measures of ensemble sensitivity and then reviews its application progress for typical weather systems and high-impact weather. Finally, the strength and limitation of the ensemble sensitivity is discussed.

Keywords: ensemble sensitivity, predictability, ensemble forecast

0 引言

近几十年来, 模式系统的改进与资料同化技术的发展使得数值模式预报的水平稳步提高^[1,2]。然而, 大气是一个复杂的非线性系统, 任何初始的微小误差都会导致预报结果存在很大的不确定性^[3], 即大气的可预报性问题。Lorenz^[4]提出了两类可预报性问题, 即与初始条件不确定性有关的第一类可预报性问题, 以及与模式不确定性有关的第二类可预报性问题。

目前, 天气和气候的可预报性研究已经成为当代气象科学研究领域的前沿热点问题, 并从传统的可预

报性问题延伸至探讨研究预报结果不确定性(预报误差)产生的原因和机制, 并寻求减小预报不确定性的方法和途径^[5-6]。敏感性分析是研究可预报性问题的重要方法之一, 旨在分析输入变量或模型的变化对所关心的变量的影响程度。就数值预报模式而言, 敏感性研究包括采用多种方法(如奇异向量法、卡尔曼滤波、伴随模式等)分析初始条件或模式(如物理参数化方案)对预报误差^[7]、集合离散度^[8]、动力过程^[9-10]的影响。

集合预报是为了解决数值预报对初始条件微小误差的敏感性问题^[11], 已成为估计预报不确定性信息的重要工具。Evensen提出了集合卡尔曼滤波器(EnKF)方法^[12], 它利用集合成员估计预报误差的协方差矩阵, 再利用观测资料通过同化方法更新协方差矩阵, 得到分析集合成员, 构成了集合预报成员的初

收稿日期: 2019年8月6日; 修回日期: 2019年10月21日

第一作者: 王毅(1982—), Email: yiwang@cma.gov.cn

资助信息: 国家科技支撑项目(2015BAC03B01); 国家重点研发计划(2017YFC1502004)

始场。EnKF的一大优点就是其背景误差协方差的结构具有流依赖特征。集合敏感性分析方法是在EnKF基础上由Hakim等^[13]提出的, 基于WRF模式采用EnKF生成集合分析场和预报场, 研究了温带气旋预报对相关大气状态量的敏感性。集合敏感性可以用于研究预报量与初始扰动以及前期预报状态量之间的关系, 探讨预报不确定性背后的动力学过程, 并且可以用于目标观测的敏感区识别^[14-15]。Ancell等^[16]比较了伴随敏感性和集合敏感性的关系, 发现基于集合敏感性得到的结果更能反映天气尺度的动力学演变特征。另外, 集合敏感性无需切线性和伴随模式, 计算量较小。Schumacher^[17]首次将集合敏感性方法应用于采用奇异向量和随机物理过程扰动的欧洲中期天气预报中心(ECMWF)集合预报系统, 将集合敏感性方法的应用范围拓展至业务中心运行的集合预报模式。

近十年来, 集合敏感性分析这一新技术已被应用于不同尺度的天气系统和高影响天气的预报误差和可预报性研究, 如暴雨^[18-21]、强对流^[22-23]、阻塞高压^[24-25]、温带气旋^[26-27]、热带气旋^[28-31]、东风波^[32]、风速预报^[33]等, 采用的集合模式以及集合敏感性的度量各有不同。本文将首先介绍集合敏感性方法, 然后对其在典型天气系统及高影响天气的预报误差和可预报性研究上的应用进行详细介绍, 最后对集合敏感性的优势和不足进行总结, 并展望其应用前景。

1 集合敏感性分析方法简介

Hakim等^[13]在2008年提出了集合敏感性分析(Ensemble Sensitivity Analysis)方法, 其假设集合预报模式的初始(或某个时间的预报)场在某个点上的扰动与随后预报之间存在线性关系。通过建立预报量(因变量)和初始(或之前某个时刻的预报)扰动状态量(自变量)的线性回归方程, 将集合敏感性用线性回归方程的斜率来表示。根据定义, 集合预报如果有 M 个预报成员, 任一预报量 J 对初始时刻(或某个时刻的预报)扰动状态量 X_i 的集合敏感性 S 定义为:

$$S = \frac{\partial J}{\partial X_i} = \frac{cov(J, X_i)}{var(X_i)}, \quad (1)$$

其中, J 代表集合预报 M 个成员的 M 个预报量值, 是一维标量; X_i 代表模式区域范围内第 i 个格点上的 M 个状态量值, 是二维标量; cov 表示 J 和 X_i 之间的协方差, var 表示状态量的方差。从公式(1)可以看出, S 与状态量的方差成反比。

从气候角度来讲, 低纬地区的方差一般比高纬地区低, 因此会导致低纬地区的集合敏感性普遍高于高纬地区。为了消除这一差异, Garcies等^[34]提出对集合

敏感性进行标准化, 标准化集合敏感性 S_{norm} 定义为:

$$S_{norm} = \frac{\partial J}{\partial X_i} \cdot \sigma_{X_i} = S \cdot \sigma_{X_i}, \quad (2)$$

其中, σ_{X_i} 代表状态量的标准差。 S_{norm} 表示状态量变化1个标准差引起的预报量的变化大小。标准化的优势是 S_{norm} 的单位就是预报量的单位, 而且可以方便地比较预报量对于不同时效起报的不同状态量的敏感性, 从而找出对预报量影响最大的状态量或天气系统以及敏感区。

很容易证明, J 和 X_i 的相关系数与集合敏感性及标准化集合敏感性成正比:

$$cor(J, X_i) = \frac{cov(J, X_i)}{\sigma_J \cdot \sigma_{X_i}} = S \cdot \frac{\sigma_{X_i}}{\sigma_J} = \frac{S_{norm}}{\sigma_J}. \quad (3)$$

其中, σ_J 代表预报量的标准差。对于给定的某一时刻的预报量标量, 其标准差是固定的。因此, 可以将 S_{norm} 简化为相关系数来表示集合敏感性。相关系数作为无量纲数, 能够反映状态量和预报量之间线性关系的强弱, 但是不能给出状态量对预报量的影响程度。

集合成员样本是有限的, 因此需要对集合敏感性进行统计显著性检验, 通常采用95%或99%的显著性水平来验证集合敏感性或相关系数。

2 集合敏感性研究进展综述

表1给出了基于集合敏感性的部分代表性研究及其所用的集合预报模式。可以看出, 集合敏感性研究大多数是基于EnKF及相关方法(如集合调整卡尔曼滤波, EAKF)生成的区域集合分析场及预报, 也有应用ECMWF全球集合预报模式的, 因为后者是当今预报水平较高的业务集合预报模式, 并且THORPEX交互式全球预报大集合(简称TIGGE)提供了所需的集合预报资料。由于ECMWF集合模式不是采用EnKF的

表1 集合敏感性的代表性研究及所用的集合模式特征与敏感性度量

Table 1 Representative research based on ensemble sensitivity and the characteristic of ensemble model used with measure of sensitivity

扰动方法或模式	水平分辨率/km	集合成员个数	敏感性度量	文献
EnKF	100	100	S	Hakim等, 2008 ^[13]
EnKF	45	90	S	Torn等, 2009 ^[35]
EnKF	T85 (≈ 150)	80	cor	Chang等, 2013 ^[26]
ECMWF	T399 (≈ 50)	51	cor	Schumacher, 2011 ^[17]
ECMWF	0.5° (≈ 50)	51	S_{norm}	Parker等, 2018 ^[38]
ECMWF	T639 (≈ 32)	51	S_{norm}	Zheng等, 2013 ^[27]
EAKF	12, 4	50	S	Bednarczyk等, 2015 ^[36]
EAKF	12, 4	96	S_{norm}	Wile等, 2015 ^[37]
ECMWF, NCEP, UKMO	1° (≈ 100)	96	S_{norm}	Quandt等, 2019 ^[25]

方法产生初始场，因此需要模式积分一定时间（一般为12~36 h）让集合预报反映流依赖特性。

集合敏感性不仅利用水平分辨率较粗的集合预报模式研究大尺度天气，也采用高分辨率模式来研究中小尺度对流天气。从集合敏感性的度量上来看，标准化集合敏感性 S_{norm} 使用得更为广泛。下面，将分类阐述集合敏感性针对不同典型天气系统和高影响天气事件的研究进展。

2.1 针对温带气旋的集合敏感性研究

温带气旋是影响中高纬度大范围天气变化的一个重要天气系统，受斜压不稳定驱动，能够造成激烈的天气现象，如极端暴雨（雪）、强风暴和风暴潮等。集合敏感性方法主要用于研究温带气旋强度、位置及路径的不确定性问题。Hakim等^[13]提出集合敏感性方法就是对美国一次春季温带气旋开展的研究，基于EnKF利用WRF模式生成了包含100个成员的集合分析场，研究了预报时效为24 h的温带气旋的海平面气压中心值（预报量）对初始分析场（高度场、风场等状态量）的敏感性。

爆发性温带气旋相比一般性的温带气旋可预报性更低。Chang等^[26]基于包含80个成员的集合模式研究了两次太平洋温带气旋。他们将集合敏感性方法拓展至了中期时效（7.5 d）。除了将海平面气压最小值作为预报量，还对气旋中心附近的海平面气压作了经验正交函数（EOF）分解，再将EOF主分量作为预报量。结果表明，利用EOF主模态揭示的敏感性信号更加清楚。Zheng等^[27]利用ECMWF模式分析了北美一次冬季温带气旋强度和路径的可预报性，也利用EOF方法对海平面气压进行了分解，EOF的第一模态、第二模态分别反映了气旋的强度和位置，识别出的敏感性（相关系数）以类似Rossby波包的方式传播。

国内学者也开展了相关研究。针对引发2016年7月19—20日华北极端降水的黄河气旋，代刊等^[39]基于ECMWF集合预报资料，对黄河气旋的中期预报误差的来源和演变进行了分析，揭示出对气旋强度和路径预报不确定性影响最大的系统及区域。Li等^[40]基于WRF集合预报模式，采用相关系数研究了西南涡位置和强度的短期预报（60 h）对初始时刻扰动的敏感性，发现短期预报的敏感区都位于西南涡系统的附近，而不是类似于中期时效位于一定距离的上游地区。

2.2 针对热带气旋的集合敏感性研究

与温带气旋类似，集合敏感性方法也可用于研究热带气旋的强度和路径预报不确定性问题。针

对热带气旋（台风），Ito等^[41]将台风的位置作为预报量，提出了基于台风位置的集合敏感性分析方法（TyPOS）。Torn^[42]利用集合敏感性的思想开展了针对台风的目标观测试验，基于下投式探空仪观测资料设计了四组中尺度模式WRF的集合预报，结果发现同化了敏感区资料的预报对台风强度的预报效果最好，700 hPa及以下的风场对气旋强度的预报影响最大。

虽然目前数值模式对于台风路径的预报准确率总体在稳步提高，但对于台风路径的突变以及台风的生成等过程，预报误差仍然较为明显。Qian等^[28]在分析1013号超强台风“鲇鱼”突然北折时，利用相关系数研究了台风路径特别是其转向角度的关键影响因子，指出台风水平尺度的大小相比强度对“鲇鱼”台风路径的北翘更加重要。Shu等^[43]基于ECMWF集合预报采用集合敏感性等方法分析了赤道波动对1330号超强台风“海燕”生成的影响。Torn等^[44]针对三个处于变形场环流中的台风个例，基于ECMWF集合预报利用集合敏感性研究了台风位置的预报不确定性，结果发现台风附近（500 km以内）引导气流对台风位置预报最为敏感，因此变形场环流中的台风预报存在较大不确定性。

热带气旋的温带变性过程有时会出现较大的预报误差。Torn等^[35]基于WRF模式研究了2004年和2005年两次西太平洋台风的温带变性过程，利用集合敏感性评估变性时期初始场误差和预报误差之间的关系。结果发现，存在两个敏感区：一是台风中心附近，二是上游的蒙古和西伯利亚。表明预报误差既与台风本身位置有关，也和与台风产生相互作用的上游副热带低槽有关（图1）。

2.3 针对阻塞高压的集合敏感性研究

阻塞高压（以下简称“阻高”）的长期持续可造成大范围地区的天气气候异常。集合敏感性分析主要应用于研究阻高的可预报性、远距离前兆信号等问题。2010年夏季，欧洲东部和俄罗斯出现了严重的热浪天气，而巴基斯坦发生了严重的洪涝灾害，这些极端天气事件都与中高纬阻塞形势的长时间维持有关。Quandt等^[25]利用TIGGE资料的三个全球集合预报模式共96个成员，基于集合敏感性方法研究了阻高生命史中不同阶段的可预报性问题。在计算集合敏感性时，采用不同的预报量来代表阻高生命周期的不同阶段。例如，阻高建立期，预报量选为某个区域的500 hPa高度场最大值，状态量选取的是500 hPa高度场、海平面气压和垂直积分水汽通量。结果发现，阻高建立期的预报不确定受到天气尺度波列及非绝热加热过程的

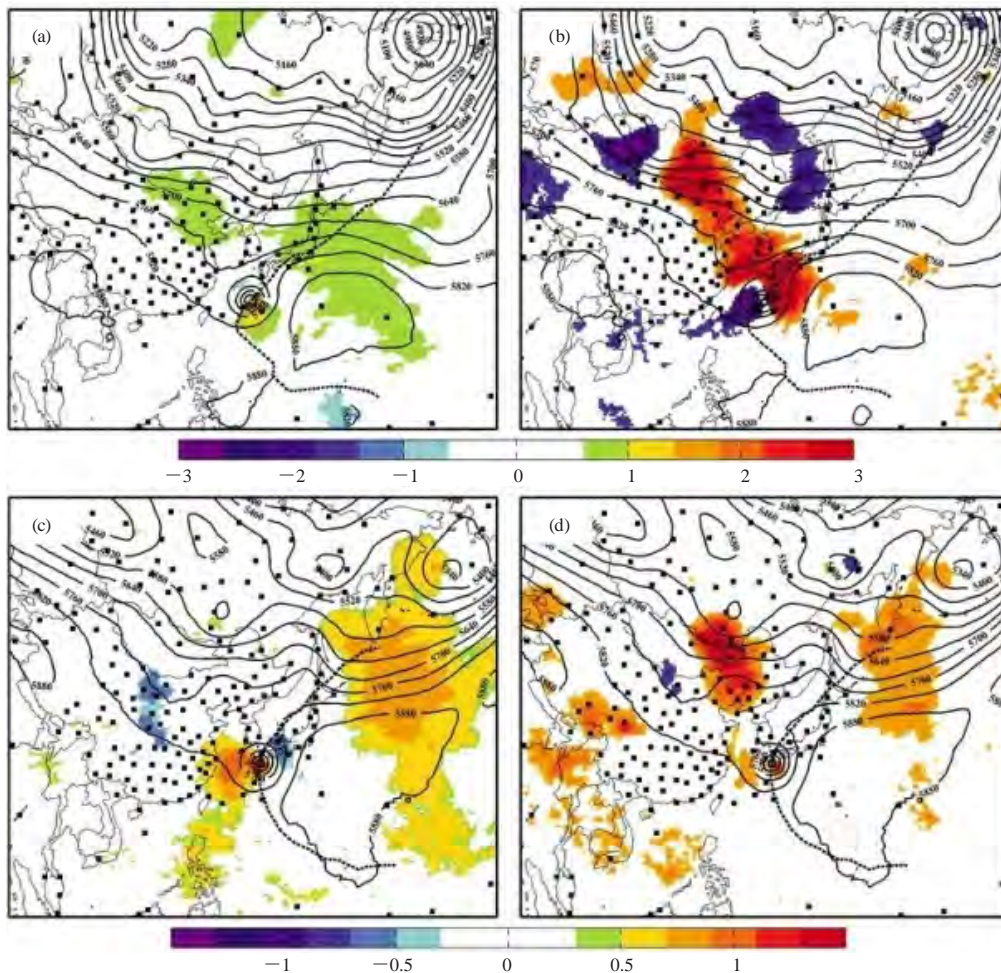


图1 2004年10月19日12时起报的台风“蝎虎”24 h (a) 和48 h (b) 的海平面气压最小值对500 hPa高度分析场的敏感性(填色, 单位: hPa); (c)、(d) 同(a)、(b), 但为2005年9月6日00时起报的台风“彩蝶”, 等值线为500 hPa高度分析场的集合平均^[35]

Fig. 1 Sensitivity (shading; unit: hPa) for 24 h (a) and 48 h (b) cyclone minimum SLP forecasts to the analysis of 500 hPa height for Typhoon Tokage forecast initialized at 1200 UTC 19 October 2004. (c)–(d), same as (a)–(b), but for Typhoon Nabi forecast initialized at 0000 UTC 6 September 2005. Coutours denot the ensemble mean 500 hPa height analysis^[35]

影响。

Magnusson^[45]针对2014—2016年ECMWF集合模式对欧洲地区的三次明显预报误差事件, 利用集合敏感性研究了预报误差的来源。预报量选取为模式预报第6 d的欧洲地区500 hPa高度的均方根误差(RMSE), 状态量选取的是200 hPa和500 hPa高度场等。结果表明三次过程的预报误差都与斯堪的纳维亚的阻塞形势有关, 意味着模式对该天气系统的预报难度较大。

冬季格陵兰岛上空的阻高与北大西洋涛动(NAO)密切相关, 对欧洲地区的冬季天气有着重要影响。Parker等^[38]基于集合敏感性分析, 利用ECMWF集合预报资料分析了冬季格陵兰岛26次阻高事件。研究指出, 格陵兰岛阻高不是孤立发展的, 而是对远距离的前兆信号非常敏感, 例如前期500 hPa和50 hPa高度场, 特别是大气环流的低频变化部分。此外, 集合

敏感性分析表明, 格陵兰岛阻高对热带地区的环流异常相比于极地地区更加敏感, 最强的敏感系统对应于从太平洋盆地到北美地区的罗斯贝波列。

目前, 数值模式对于阻高的建立的预报还存在不足, 特别是从纬向型环流向经向型环流的转变。最近, Maddison等^[46]利用集合敏感性分析研究发现欧洲—大西洋地区阻高的建立对其上游的气旋的位置和强度预报比较敏感。因此, 改进上游地区气旋的预报可以提高下游阻高建立的预报效果。

2.4 针对暴雨的集合敏感性研究

暴雨由于其过程复杂、发生具有很多的不确定性以及模式无法准确描述降水过程等原因, 使得降水预报尤其是暴雨的预报难度大。集合敏感性方法可以研究影响暴雨预报, 特别是确定性数值模式预报效果不好的暴雨过程的关键影响系统及其演变特征, 进而

加深对暴雨发生发展物理机制的理解。Schumacher^[17]利用ECMWF集合预报模式研究了一次暖季低涡暴雨过程及可预报性,通过相关系数探讨了上游天气系统的扰动对降水预报的影响。需要指出的是,由于全球集合预报模式的初始扰动信息主要是天气尺度的,因此,适用于研究天气尺度上的预报误差和可预报性,如一段时间或区域上的累积降水量。Lynch等^[18]利用ECMWF集合预报模式分析了一次由连续两个准静止中尺度对流系统(MCS)造成的极端暴雨过程。结果发现,降水量与中层的低槽和地面气旋密切相关。集合预报的高度场、风场的较小差别就会导致随后降水预报的较大差异,强调了集合预报对于这种不确定性较大的降水过程的必要性。

国内学者近几年也逐渐开始利用集合敏感性方法开展暴雨预报的诊断分析和可预报性研究。2012年“7·21”北京特大暴雨过程是一次高影响极端天气事件,确定性模式对此次过程的预报存在较大的偏差。Yu等^[47]利用TIGGE资料共计84个成员的多模式集合预报,分析了区域平均的24 h累积降水量与不同层次高度场、风场的集合敏感性,结果发现强降水预报对850 hPa低涡相比500 hPa高空槽更加敏感。对2016年7月19—20日华北强暴雨过程,确定性数值模式预报在中期时效出现了明显的偏差。王毅等^[48]利用ECMWF集合预报模式基于集合敏感性分析发现,对于暴雨预报最敏感的环流系统是黄河气旋,集合成员预报的黄河气旋的路径和强度对京津冀降雨的落区及强度预报至关重要。Huang等^[49]基于TIGGE资料评估检验了5个全球集合预报模式对4次典型华南前汛期暴雨的预报效果,通过集合敏感性分析指出,华南沿海地区的低层西南气流是华南地区降水预报的关键因子。

由于集合敏感性方法能够客观地评估不同状态量对预报量的敏感性,因此可以用于比较模式预报中不同天气系统对于暴雨预报的影响程度。王毅等^[50]利用ECMWF集合预报模式对一次高原涡和西南涡作用下的四川盆地暴雨过程进行了研究,结果表明,此次暴雨预报对高原涡比西南涡更加敏感,在集合预报对西南涡预报不确定性较小的情况下,集合成员对高原涡的预报是影响降水强度和落区预报的关键因子。

对于一次暴雨过程,不同阶段的降水其可预报性也可能存在差别。王毅等^[50]在研究四川盆地暴雨时发现集合敏感性分析识别出的白天和夜间暴雨的敏感性因子不同,主要原因是此次暴雨过程,夜间的动力作用更加显著,因而对反映动力学特征的状态量更加敏感。Zhang等^[51]基于集合敏感性方法对华南一次

持续暴雨不同阶段降水的影响因子进行了分析。两个阶段的暴雨都对低空急流比较敏感,第一、二阶段暴雨的预报不确定性分别来源于低空急流位置预报和宽度预报的不确定性。Du等^[20]分析华南暴雨过程时发现,锋面(暖区)暴雨预报的离散度小(大),集合平均预报误差小(大),表明两类暴雨的可预报性存在差异。通过集合敏感性分析发现,西南低空急流(850~700 hPa)和偏南超低空急流(925 hPa)是分别影响锋面暴雨和暖区暴雨的关键系统。此外,影响锋面暴雨和暖区暴雨的急流的敏感区也存在差异(图2)。

2.5 针对强对流天气的集合敏感性研究

强对流天气由于中小尺度误差的快速增长和强非线性,使得其可预报性问题一直是研究的热点。近些年来,相关研究证明了集合敏感性应用在强对流天气上也是可行的,一般应用的是分辨率较高的中尺度模式,主要关注大气环境场对对流发生发展的敏感性。在计算敏感性时,预报量选取的是基于中尺度模式得到的变量,例如反射率、垂直速度、(局地)降水等。Bednarczyk等^[36]针对美国南部一次引发了多个龙卷的春季强对流天气,利用WRF模式研究了对流变量对上游天气系统及低层热力和动力特征的敏感性。研究表明,集合敏感性分析的结果能够反映出实际的对流特征,对流的预报与中层天气尺度系统的位置以及低层的热动力学特征(温度和湿度)密切相关。Hill等^[22]对美国春季两次干线对流的触发进行了中尺度数值模拟,发现对流的触发主要对上游地区对流发生前(0~12 h)的温度和露点场敏感。作者指出,虽然使用的预报量(最大组合反射率)不符合正态分布,但是集合敏感性分析仍然可以得出有意义的结果。

此外,一些学者利用中尺度可预报性试验(MPEX)^[52]来开展集合敏感性的研究,重点研究上游预报不确定性如何影响下游的对流预报^[53-54]。另外,Torn等^[55]针对美国两次弱天气尺度强迫的MPEX强对流个例开展了集合敏感性分析。结果发现,对流预报对对流层低层的水汽和前期南部干线附近的纬向风敏感。Kerr等^[56]将集合敏感性方法应用于研究对流与风暴附近环境场的相互关系,预报量为对流风暴平均反射率、降水及上升螺旋度,探讨了对流风暴—环境场之间的正反馈关系。

近年来,集合敏感性分析也被应用于更小尺度的对流天气研究。Limpert等^[23]针对超级单体雷暴,利用包含101个成员的1 km分辨率的云模式集合预报开展了基于集合敏感性的目标观测研究。结果表明,虽然

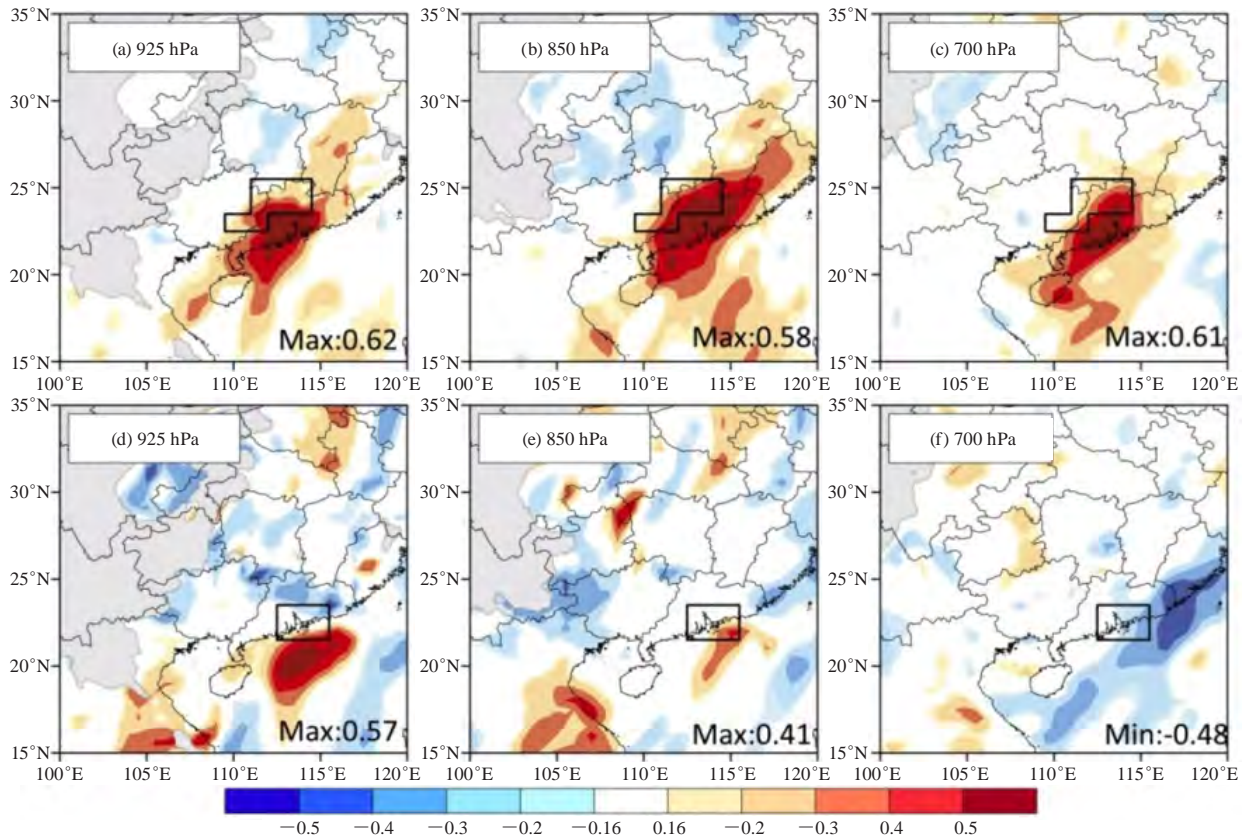


图2 2014年5月11日00—06时北区 (a~c), 南区 (d~f) 区域平均降水量对5月11日00时925 hPa (a和d), 850 hPa (b和e), 700 hPa (c和f) 经向风的敏感性^[20]

Fig. 2 Sensitivity for area-averaged precipitation during 0000–0600 UTC 11 May 2014 over the north region (a~c) and the south region (d~f) to meridional wind at 925 hPa (a, d), 850 hPa (b, e), 700 hPa (c, f) at 0000 UTC 11 May 2014^[20]

单点上的敏感性存在较大噪音, 但是区域平均和时间平均以后的敏感性结果更易于分析研究。同时指出, 考虑到非线性动力过程、预报量的迅速变化及自相关等现象, 集合敏感性应用于风暴尺度的研究还存在一定的局限性。

3 总结和展望

本文在前人研究的基础上, 对集合敏感性的定义、度量, 以及应用进行了详细介绍。集合敏感性的思想是利用EnKF得到分析集合成员, 以此作为初始场生成集合预报, 基于具有流依赖特性的集合预报样本研究初始扰动(或某时刻预报的)状态量对随后预报量的影响。

集合敏感性作为研究预报误差和可预报性的新工具, 经过不断改进, 已经在温带气旋、热带气旋、阻塞高压、暴雨和强对流等很多方面得到了广泛的研究和应用。在计算集合敏感性时, 预报量可以根据研究对象进行灵活的选择, 例如针对暴雨的累积降水量, 针对台风的中心气压以及针对强对流的组合反射率等。另外, 还可以采用EOF分解将主成分作为预报

量, 更深入地研究误差和不确定性的原因。集合敏感性相对于其他方法的主要优势在于: 1) 使用流依赖的集合预报样本; 2) 无需使用切线性模式和伴随模式; 3) 计算量小, 容易在业务中使用。当然, 集合敏感性也有一些不足: 比如基于线性关系的假设。另外, 敏感信号的强弱与预报量的选择(变量及其区域范围)有关。因而, 基于某次天气个例研究识别出的敏感区和敏感因子可能需要更多的个例来提炼出具有普适意义的结论。另一方面, 集合敏感性分析可以和其他方法相结合(集合组间差异分析^[57])来相互印证其结论的可靠性。

综上所述, 集合敏感性方法能够有助于揭示影响预报对象的动力学特征, 并增加对预报误差来源及传播机制的认识。此外, 集合敏感性对于实际天气预报业务也有很重要的价值。一般来说, 预报员对天气过程的关键影响系统具有一定的经验, 如果基于集合敏感性的客观结果与预报员的主观经验一致, 则有助于增加预报员使用集合预报的信心。另外, 基于集合敏感性的敏感区, 预报员可以在实际使用集合预报

过程中关注此区域，并结合滚动更新的实况观测资料对集合预报进行订正^[58]，或选择敏感区中表现较好的集合成员（或子集）^[59]，来减小未来预报的误差和不确定性。

致谢：感谢在本文撰写过程中美国国家海洋局（NOAA）地球系统研究实验室（ESRL）Zoltan Toth和中国气象局数值预报中心庄照荣博士给予的帮助。

参考文献

- [1] Magnusson L, Kall E. Factors influencing skill improvements in the ECMWF forecasting system. *Monthly Weather Review*, 2013, 141(9): 3142-3153.
- [2] Bauer P, Thope A, Brunet G. The quiet revolution of numerical weather prediction. *Nature*, 2015, 525(7567): 47-55.
- [3] Lorenz E N. Deterministic nonperiodic flow. *Journal of the Atmospheric Science*, 1963, 20(2): 130-141.
- [4] Lorenz E N. Climatic predictability in the physical basis of climate and climate modeling. *WMO GARP Publ*, 1975, 16: 132-136.
- [5] 陈静, 陈德辉, 颜宏. 集合数值预报发展与研究进展. *应用气象学报*, 2002, 13(4): 497-507.
- [6] 穆穆, 段晚锁, 唐佑民. 大气-海洋运动的可预报性: 思考与展望. *中国科学(地球科学)*, 2017, 47(10): 1166-1178.
- [7] Kalnay E, Ota Y, Miyoshi T, et al. A simpler formulation of forecast sensitivity to observations: application to ensemble Kalman filters. *Tellus A*, 2012, 64: 1-9.
- [8] Hamill T, Snyder C. Using improved background-error covariances from an ensemble Kalman filter for adaptive observations. *Monthly Weather Review*, 2002, 130: 1552-1572.
- [9] Martin W, Xue M. Sensitivity analysis of convection of the 24 May 2002 IHOP case using very large ensembles. *Monthly Weather Review*, 2006, 134: 192-207.
- [10] Melhauser C, Zhang F. Practical and intrinsic predictability of severe and convective weather at the mesoscales. *Journal of the Atmospheric Science*, 2012, 69(11): 3350-3371.
- [11] Epstein E S. Stochastic dynamic prediction. *Tellus*, 1969, 21(6): 739-759.
- [12] Evensen G. Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1994, 99(C5): 10143-10162.
- [13] Hakim G J, Torn R D. Ensemble synoptic analysis. *Synoptic-Dynamic Meteorology and Weather Analysis and Forecasting: a Tribute to Fred Sanders. Meteorological Monographs*, 2008, 33(55): 147-161.
- [14] Majumdar S J. A review of targeted observations. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2016, 97(12): 2287-2303.
- [15] 马旭林, 于月明, 陈德辉. 适应性观测研究现状和展望. *气象学报*, 2015, 73(2): 221-235.
- [16] Ancell B, Hakim G J. Comparing adjoint-and ensemble-sensitivity analysis with applications to observation targeting. *Monthly Weather Review*, 2007, 135(12): 4117-4134.
- [17] Schumacher R S. Ensemble-based analysis of factors leading to the development of a multiday warm-season heavy rain event. *Monthly Weather Review*, 2011, 139(139): 3016-3035.
- [18] Lynch S L, Schumacher R S. Ensemble-based analysis of the May 2010 extreme rainfall in Tennessee and Kentucky. *Monthly Weather Review*, 2014, 142(1): 222-239.
- [19] Greybush S J, Saslo S, Grumm R. Assessing the ensemble predictability of precipitation forecasts for the January 2015 and 2016 east coast winter storms. *Weather and Forecasting*, 2017, 32: 1057-1078.
- [20] Du Y, Chen G. Heavy rainfall associated with double low-level jets over Southern China. Part I: ensemble-based analysis. *Monthly Weather Review*, 2018, 146(11): 3827-3844.
- [21] Kumpf A, Rautenhaus M, Riemer M, et al. Visual analysis of the temporal evolution of ensemble forecast sensitivities. *IEEE Trans. Visualization Comput. Graphics*, 2019, 25: 98-108.
- [22] Hill A J, Weiss C C, Ancell B C. Ensemble sensitivity analysis for mesoscale forecasts of dryline convection initiation. *Monthly Weather Review*, 2016, 144(11): 4161-4182.
- [23] Limpert G L, Houston A L. Ensemble sensitivity analysis for targeted observations of supercell thunderstorms. *Monthly Weather Review*, 2018, 146: 1705-1721.
- [24] Matsueda M, Kyouda M, Toth Z, et al. Predictability of an atmospheric blocking event that occurred on 15 December 2005. *Monthly Weather Review*, 2011, 139(8): 2455-2470.
- [25] Quandt L, Keller J H, Martius O, et al. Ensemble sensitivity analysis of the blocking system over Russia in summer 2010. *Monthly Weather Review*, 2019, 147(2): 657-675.
- [26] Chang E K, Zheng M, Raeder K. Medium-range ensemble sensitivity analysis of two extreme Pacific extratropical cyclones. *Monthly Weather Review*, 2013, 141(1): 211-231.
- [27] Zheng M, Chang E K, Colle B A. Ensemble Sensitivity Tools for Assessing extratropical cyclone intensity and track predictability. *Weather and Forecasting*, 2013, 28(5): 1133-1156.
- [28] Qian C, Zhang F, Green B W, et al. Probabilistic evaluation of the dynamics and prediction of supertyphoon Megi (2010). *Weather and Forecasting*, 2013, 28(6): 1562-1577.
- [29] Xie B, Zhang F, Zhang Q, et al. Observing strategy and observation targeting for tropical cyclones using ensemble-based sensitivity analysis and data assimilation. *Monthly Weather Review*, 2013, 141(5): 1437-1453.
- [30] Brown B R, Hakim G J. Sensitivity of intensifying Atlantic hurricanes to vortex structure. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2015, 141(692): 2538-2551.
- [31] Keller J H. Amplification of the downstream wave train during extratropical transition: sensitivity studies. *Monthly Weather Review*, 2017, 145(4): 1529-1548.
- [32] Torn R D. Ensemble-based sensitivity analysis applied to African easterly waves. *Weather and Forecasting*, 2010, 25(1): 61-78.
- [33] Zack J, Natenberg E, Young S, et al. Application of ensemble sensitivity analysis to observation targeting for short-term wind speed forecasting in the Washington-Oregon region. Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory Tech Rep, 2010.
- [34] Garcies L, Homar V. Ensemble sensitivities of the real atmosphere: application to Mediterranean intense cyclones. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 2009, 61(3): 394-406.
- [35] Torn R D, Hakim G J. Initial condition sensitivity of Western Pacific extratropical transitions determined using ensemble-based sensitivity analysis. *Monthly Weather Review*, 2009, 137(10): 3388-3406.
- [36] Bednarczyk C N, Ancell B C. Ensemble sensitivity analysis applied to a southern plains convective event. *Monthly Weather Review*, 2015, 143(1): 230-249.
- [37] Wile S M, Hacker J P, Chilcoat K H. The potential utility of high-resolution ensemble sensitivity analysis for observation placement during weak flow in complex terrain. *Weather and Forecasting*, 2015, 30(6): 1521-1536.
- [38] Parker T, Woollings T, Weisheimer A. Ensemble sensitivity analysis of Greenland blocking in medium-range forecasts. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2018, 144(716): 2358-2379.
- [39] 代刊, 毕宝贵, 朱跃建. 2016年7月华北极端降水的中期预报误差分析. *科学通报*, 2018, 63(3): 340-355.
- [40] Li J, Du J, Zhang D L, et al. Ensemble-based analysis and sensitivity of mesoscale forecasts of a vortex over southwest China. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2014, 140(680): 766-782.
- [41] Ito K, Wu C C. Typhoon-position-oriented sensitivity analysis. Part I: Theory and verification. *Journal of the Atmospheric Science*, 2013, 70(8): 2525-2546.
- [42] Torn R D. The impact of targeted dropwindsonde observations on tropical cyclone intensity forecasts of four weak systems during

(下转74页)

19. 您会如何把集合预报的不确定性信息应用在日常的天气预报制作和服务上? (单选)
- 在现有预报规范下(即最后发布的是单一值确定预报), 预报员可以通过斟酌预报用语、调整量级等来表达对预报的把握程度, 但这种方式预报可信度信息得不到最大程度的应用。要使它能得到最大程度的应用, 现有的预报规范需要修改(由确定性预报变为概率预报) [97.61%]
 - 没有用处, 反而造成混乱 [2.39%]
20. 您觉得应不应该把这种隐藏在预报背后的预报可信度或不确定性作为天气预报的一部分如实地告诉公众和用户, 为什么? (单选)
- 应该。将预报不确定信息告诉用户, 这才是客观、科学的态度, 让用户根据预报不确定性去安排他们的行为, 将有助于最大限度地发挥预报的价值。并同时要帮助用户正确理解天气预报不确定性的内容 [83.67%]
 - 不应该。因为人们会觉得气象部门预报不准, 还把预报的责任推卸到用户身上 [5.18%]
 - 不应该。因为用户不会用带有不确定性的预报, 只会造成混乱 [11.16%]
21. 如果要求对公众和用户发布预报的可信度, 您觉得什么样的形式比较合适? (单选)
- 预报事件的概率大小 [32.27%]
 - 不同的用语(如可能性很小、中等、很大) [12.35%]
 - 用不同颜色来表达预报可信度(如红色代表可信度很低, 黄色代表中等, 绿色代表可信度高) [19.52%]
 - 根据不同情景, 所有以上这些都 [35.86%]
22. 让公众能够接受天气预报有不确定性的事实(如同治疗疾病有风险一样), 并科学地运用量化的不确定性信息来决策(使

- 社会或经济效益最优化), 您认为关键因素是什么? (单选)
- 大众科普宣传 [42.23%]
 - 学校教育(教科书) [3.59%]
 - 培训 [3.98%]
 - 气象界同用户合作 [2.39%]
 - 所有以上这些 [47.81%]

四、不足和建议

23. 您觉得目前集合预报相关产品本身的最大不足是什么? (单选)
- 集合预报产品生成的确定性产品准确率不高 [40.24%]
 - 集合预报产品的时间、空间分辨率不够 [14.74%]
 - 集合预报产品的到报时间偏晚 [19.12%]
 - 相比确定性预报没有明显优势 [13.55%]
 - 集合预报产品还不够丰富 [12.35%]
24. 您倾向于加大力度发展和使用集合预报什么类型产品? (多选)
- 全概率预报 [56.97%]
 - 离散度预报(不确定性信息预报) [37.45%]
 - 转化为更多的确定性预报 [56.97%]
25. 您觉得阻碍集合预报相关产品应用最大可能原因是什么? (单选)
- 集合预报不确定性信息的应用缺少需求 [28.69%]
 - 集合预报产品本身不够可靠、准确和丰富 [30.28%]
 - 预报员对集合预报相关产品的认知程度不够 [41.04%]
26. 您对上级业务部门目前在集合预报业务应用上的建议? (多选)
- 丰富集合预报产品的种类 [64.94%]
 - 提高集合预报产品分辨率、准确率 [69.72%]
 - 增加集合预报推广和培训 [71.71%]
 - 让预报员更多地参与集合预报研发工作 [45.02%]

(上接64页)

- PREDICT. Monthly Weather Review, 2014, 142(8): 2860-2878.
- [43] Shu S, Zhang F. Influence of equatorial waves on the genesis of super typhoon Haiyan (2013). Journal of the Atmospheric Science, 2015, 72: 4591-4613.
- [44] Torn R D, Elless T J, Papin P P, et al. Tropical cyclone track sensitivity in deformation steering flow. Monthly Weather Review, 2018, 146: 3183-3201.
- [45] Magnusson L. Diagnostic methods for understanding the origin of forecast errors. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2017, 143: 2129-2142.
- [46] Maddison J W, Gray S L, Martinez-Alvarado O, et al. Upstream cyclone influence on the predictability of block onsets over the Euro-Atlantic region. Monthly Weather Review, 2019, 147: 1277-1296.
- [47] Yu H, Meng Z. Key synoptic-scale features influencing the high-impact heavy rainfall in Beijing, China, on 21 July 2012. Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography, 2016, 68(1): 31045.
- [48] 王毅, 马杰, 代刊. “7·20”华北强暴雨集合预报的中期预报转折和不确定性分析. 气象, 2018, 44(1): 53-64.
- [49] Huang L, Luo Y. Evaluation of quantitative precipitation forecasts by TIGGE ensembles for south China during the presummer rainy season. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2017, 122: 8494-8516.
- [50] 王毅, 何立富, 代刊, 等. 集合敏感性方法在高原涡和西南涡引发暴雨过程中的应用. 高原气象, 2017, 36(5): 1245-1256.
- [51] Zhang M, Meng Z. Impact of synoptic-scale factors on rainfall forecast in different stages of a persistent heavy rainfall event in South China. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2018, 123: 3574-3593.
- [52] Weisman M L, Trapp R J, Romine G S, et al. The Mesoscale Predictability Experiment (MPEX). Bulletin of the American Meteorological Society, 2015, 96(12): 2127-2149.
- [53] Torn R D, Romine G S. Sensitivity of central Oklahoma convection forecasts to upstream potential vorticity anomalies during two strongly forced cases during MPEX. Monthly Weather Review, 2015, 143(10): 4064-4087.
- [54] Berman J D, Torn R D, Romine G S, et al. Sensitivity of northern Great Plains convection forecasts to upstream and downstream forecast errors. Monthly Weather Review, 2017, 145: 2141-2163.
- [55] Torn R D, Romine G S, Galarneau T J. Sensitivity of dryline convection forecasts to upstream forecast errors for two weakly forced MPEX cases. Monthly Weather Review, 2017, 145: 1831-1852.
- [56] Kerr C A, Stensrud D J, Wang X. Diagnosing convective dependencies on near-storm environments using ensemble sensitivity analyses. Monthly Weather Review, 2019, 147: 495-517.
- [57] Lamberson W S, Torn R D, Bosart L F, et al. Diagnosis of the source and evolution of medium-range forecast errors for extratropical cyclone Joachim. Weather and Forecasting, 2016, 31(4): 1197-1214.
- [58] 杜钧, 李俊. 集合预报方法在暴雨研究和预报中的应用. 气象科技进展, 2014, 4(5): 6-20.
- [59] Ancell B C. Improving high-impact forecasts through sensitivity-based ensemble subsets: demonstration and initial tests. Weather and Forecasting, 2016, 31: 1019-1036.