

# 基于时空不确定性的对流尺度集合预报 效果评估检验\*

马申佳<sup>1,2</sup> 陈超辉<sup>1,2</sup> 智协飞<sup>2,3</sup> 何宏让<sup>1,2</sup> 吴丹<sup>1,2</sup>  
MA Shenjia<sup>1,2</sup> CHEN Chaohui<sup>1,2</sup> ZHI Xiefei<sup>2,3</sup> HE Hongrang<sup>1,2</sup> WU Dan<sup>1,2</sup>

1. 国防科技大学气象海洋学院, 南京, 211101
2. 南京大气科学联合研究中心, 南京, 210009
3. 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室, 南京, 210044

1. *College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Nanjing 211101, China*  
2. *Nanjing Joint Center of Atmospheric Research (NJCAR), Nanjing 210009, China*  
3. *Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education (KLME), Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China*

2017-10-12 收稿, 2018-03-22 改回。

马申佳, 陈超辉, 智协飞, 何宏让, 吴丹. 2018. 基于时空不确定性的对流尺度集合预报效果评估检验. 气象学报, 76(4):578-589

**Ma Shenjia, Chen Chaohui, Zhi Xiefei, He Hongrang, Wu Dan. 2018. The assessment and verification of convection-allowing ensemble forecast based on spatial-temporal uncertainties. *Acta Meteorologica Sinica*, 76(4):578-589**

**Abstract** Considering the highly non-linear characteristics of convective-scale weather systems and spatial-temporal uncertainties in high-resolution numerical forecasting, a convection-allowing ensemble forecast experiment has been conducted to simulate a strong squall line. The neighborhood probability (NP) method mainly considers the spatial displacement error in high resolution model forecasts, and cannot effectively address the problem of difference in event occurrence time between forecasts and observations. Therefore, a time factor is introduced into the NP method in this study. And based on the improved NP method and fractions skill score (FSS), the precipitation forecast of the strong squall line is verified on different spatial-temporal scales. The conclusions are as follows: (1) The FSS of extreme precipitation produced by the neighborhood ensemble probability (NEP) and probability matched mean (PMM) methods is higher than that produced by the traditional ensemble mean (EM) method, and the former two methods overcome the shortcomings of the EM method in predicting extreme precipitation. (2) For the squall line process investigated in the present study, the spatial scale of 15 – 45 km can reduce the spatial uncertainty in displacement error of precipitation forecast and optimize the forecast effect. The spatial scale of 15 – 30 km exhibits a better forecast capability for smaller-scale extreme precipitation events. (3) The convective-scale precipitation forecast has a corresponding relationship between temporal scale and rainfall intensity, and different temporal scales can capture temporal uncertainties in precipitation with different magnitudes. Meanwhile, the spatial and temporal scales are inter-related for the precipitation forecast effect. (4) The improved NP method can simultaneously show temporal and spatial uncertainties in high-resolution model forecast of convective-scale precipitation, achieve comprehensive evaluation of convective-scale precipitation on temporal and spatial scales, and provide skillful probabilistic forecast results for precipitation with various magnitudes and corresponding spatial-temporal scales.

\* 资助课题: 国家重点基础研究发展计划 973 项目(2017YFC1501800)、南京大气科学联合研究中心重点项目(NJCAR2016ZD04)与面上项目(NJCAR2016MS02)。

作者简介: 马申佳, 主要从事数值模拟和集合预报研究。E-mail: masj\_nj@163.com

通讯作者: 陈超辉, 主要从事集合预报和资料同化研究。E-mail: chenchaohui2001@163.com

**Key words** Convection-allowing ensemble forecast, Spatial-temporal uncertainties, Neighborhood probability (NP) method, Fractions skill score (FSS), Spatial-temporal scales verification

**摘 要** 针对对流尺度天气系统的高度非线性特征和高分辨率模式预报结果存在时、空不确定性现象,以及当前邻域概率法主要考虑高分辨率预报结果的空间位移误差,而不能有效解决预报结果存在时间超前与滞后问题,将时间因素引入到邻域概率法中,结合一次强飊线过程进行对流尺度集合预报试验,并基于改进后的新型邻域概率法与分数技巧评分,对降水预报进行了不同时、空尺度的效果评估检验。结果表明:(1)邻域集合概率法和概率匹配平均法在极端降水的分数技巧评分远高于传统集合平均,弥补了集合平均对极端降水预报能力偏低的缺陷。(2)对于此类飊线过程的对流尺度天气系统而言,邻域半径为 15—45 km 的空间尺度能够改善降水位移误差的空间不确定性,并使其预报效果达到最优,其中 15—30 km 的邻域半径对于尺度更小的大量级降水事件预报能力更强。(3)对流尺度降水预报考虑时间尺度与降水强度存在着对应关系,不同时间尺度可以捕获到不同量级降水的时间不确定性。同时,时间尺度与空间尺度对于降水预报效果的影响是相互关联的。(4)改进的邻域概率法能够同时体现高分辨率模式预报结果在对流尺度降水事件上存在的时、空不确定性,实现了对流尺度降水在时、空尺度上的综合评估,并能为不同量级降水提供与其时、空尺度相匹配的概率预报结果。

**关键词** 对流尺度集合预报, 时、空不确定性, 邻域概率法, 分数技巧评分, 时空尺度检验

**中图分类号** P435

## 1 引言

随着人们对灾害性极端天气准确预报的需求不断提高,对流尺度天气预报的重要性日益凸显。由于对流尺度天气系统时空尺度小、动力与物理过程高度非线性,对流天气的精细化预报仍面临着巨大挑战。因此,发展高分辨率的对流尺度集合预报显得尤为重要。近年来,美国国家大气研究中心(NCAR)和俄克拉荷马大学风暴分析与预测中心(Center for Analysis and Prediction of Storms, CAPS)以降水和极端天气的指示作用作为评估重点,进行了一系列对流尺度集合预报试验(Kong, et al, 2009; Xue, et al, 2010; Clark, et al, 2012; Schwartz, et al, 2015a, 2015b)。结果表明,对流尺度集合预报能够提高一定区域范围的降水强度识别能力,对高影响的对流天气事件有指导价值。此外,王晨稀等(2008)建立了上海区域集合预报系统并对一次局地短时强降水过程进行了集合预报研究,高峰等(2010)针对美国典型超级单体风暴通过蒙特卡罗(Monte-Carlo)和增长模培育(Breeding of the Growing Mode, BGM)两种方法构造风暴尺度集合预报试验,李俊等(2015b)采用6套扰动方案对北京“7.21”暴雨进行集合降水预报试验,庄潇然等(2016)考虑不同尺度特征的初始扰动与侧边界扰动相互作用构造对流尺度集合预报,并利用混合初值扰动法对北京“7.21”暴雨进行对流尺度集合预报试验(庄潇然等, 2017),这些试验研究在对流尺度集合

预报扰动方法方面得到了一些有意义的结论。在强降水预报后处理方面,陈朝平等(2010)和张宇彤等(2016)分别针对四川暴雨和北京“7.21”暴雨利用贝叶斯方法对集合概率预报产品进行修正,结果表明该方法能够提高强降水预报的准确率。刘琳等(2013)通过对中国 T213 集合预报资料建模得到极端降水天气预报指数,结果表明该指数对极端降水具有较高的识别能力。李俊等(2015a)提出将“频率匹配法”用于集合降水预报进行订正研究,结果表明该方法相比集合平均能够改善强降水预报效果。Li等(2017)针对飊线开展对流尺度集合预报试验,并利用概率匹配平均(Probability Matched Mean, PMM)法对降水预报结果进行处理,表明该方法能够显著提高对强降水的预报能力。此外,评估高分辨率模式预报效果也是研究对流尺度集合预报的重要任务之一。

由于对流尺度集合预报的分辨率足够精细,使得传统评分在评估高分辨率模式预报效果时面临着以下两个问题。首先,传统评分通常要求预报和观测事件在网格尺度上匹配,而空间上往往缺乏足够稠密的观测,使得高分辨率模式评估不够客观(Baldwin, et al, 2006);其次,由于对流尺度天气的物理过程和模式参数化方案不完全清楚,高分辨率预报模式往往产生一些细小的位移误差,通过传统的点对点检验方法评估高分辨率预报结果时,没有考虑这些位移误差会导致较差的客观评估结果(Schwartz, et al, 2010)。因此,传统评分在评估高

分辨率模式降水预报能力上存在缺陷,使得高分辨率预报模式处于“两难”局面,即尽管能够揭示对流尺度空间结构信息,但评估结果反而低于低分辨率模式(Mittermaier, et al,2010)。

基于上述问题,Ebert(2008)提出了“邻域”思想的空间检验方法——邻域法,并对邻域法检验高分辨率降水的基本框架进行了系统阐述。Roberts等(2008)为提升高分辨率预报的对流降水事件准确率,采用邻域法选择合适的空间尺度产生了更有技巧的降水预报。Weusthoff等(2010)基于邻域法在不同空间尺度上检验高分辨率模式及其对应的低分辨率模式,结果表明高分辨率模式的预报能力更高。Schwartz等(2010)应用邻域法将美国俄克拉荷马大学风暴分析与预测中心的高分辨率集合预报资料生成概率预报,并在不同空间尺度上检验高分辨率集合预报效果。Clark等(2011)利用不同空间尺度的相对作用特征曲线(relative operating characteristic, ROC)面积作为对流尺度定量降水概率预报的度量。潘留杰等(2015)利用邻域法评估欧洲中期天气预报中心(EC-MWF)、日本和中国 T639 模式预报结果在不同空间尺度上的预报能力,表明使用较大邻域来评定局地性降水并不合理。在时间尺度方面,Duc等(2013)将时间维度引入高分辨率模式检验并进行初步探索。然而,对流尺度天气预报的时间超前或滞后与空间位移误差同等重要,针对高分辨率模式降水预报性能时间尺度变化的分析研究仍然较少。

本研究采用增长模培育法对一次强飚线过程进行对流尺度集合预报试验,引入概率匹配平均法以重点关注极端降水事件。基于当前邻域概率法主要考虑高分辨率预报结果的空间信息不确定性,而不能有效解决预报结果存在时间超前与滞后的问题,将时间因素引入邻域概念中,采用改进后的邻域概率法与分数技巧评分在不同时间、空尺度上对预报效果进行评估检验,进而确定能够有效减小高分辨率对流降水事件时、空不确定性的时、空尺度。

## 2 方案设计与资料

试验采用中尺度非静力模式 WRFv3.6,模式设置为双向两重嵌套方案(图 1)。嵌套网格分辨率分别为 9 和 3 km,内层区域满足对流尺度预报模式的高分辨率要求。粗网格中心位于(35°N,115°E),格点数为 367×268,细网格区域(d02)格点数为 292×

256,垂直不等距分为 42 层。试验分为培育阶段和预报阶段。培育阶段采用增长模培育法生成初值扰动成员,在整个区域运行模式,从 2014 年 7 月 26 日 18 时(世界时,下同)至 29 日 18 时采用动态调整的方式(Li, et al, 2017)共培育 3 d,每 6 h 为一个培育周期,设置 35 个集成员。利用培育 3 d 后得到的扰动构成初值扰动集成员进行集合预报。预报阶段采用双向两重嵌套预报,从 7 月 29 日 18 时预报至 31 日 00 时。

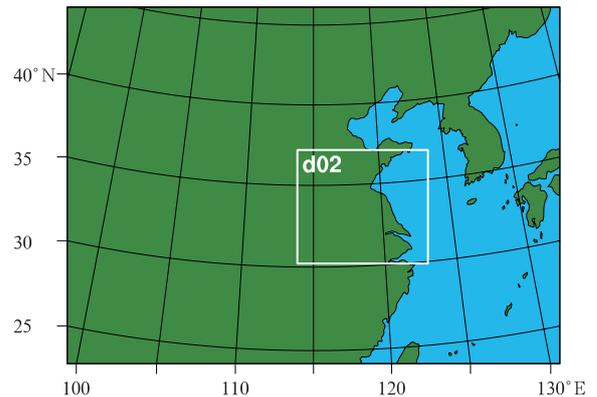


图 1 WRF 模式区域设置

Fig.1 WRF model domain

采用 NCEP  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$  全球预报系统(GFS)资料驱动模式,以中国国家气象信息中心发布的  $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$  CMORPH 卫星与自动气象观测站的逐时降水量融合产品资料作为实况降水进行评估检验。

## 3 研究方法

### 3.1 概率匹配平均法

集合平均(Ensemble Mean, EM)作为传统的集合预报结果处理方法,虽然能够综合所有集成员的信息,但已有研究(Kong, et al,2006; Clark, et al,2009)表明,简单平均后大量级的降水预报值被平滑,降低了集合预报对极端降水事件的预报能力。概率匹配平均法(Ebert,2001)作为一种改进的集合平均方法,考虑到对流尺度天气系统内部时、空变化迅速的特点,综合了所有集成员的格点预报值,突出大量级的预报信息,同时还保证了传统集合平均场的基本结构。生成概率匹配平均降水预报场的步骤如下:

(1) 将所有  $n$  个集成员的格点降水值从大到小排列得到序列 1;

(2) 从序列 1 中每隔  $n$  个选取一个预报值,得到新的序列 2(序列 2 的数值个数与每个预报场的格点数相同);

(3) 将集合平均降水预报场从大到小排列得到序列 3;

(4) 将序列 2 中的降水值赋给对应序列 3 所在的格点,得到概率匹配平均降水预报场。

### 3.2 邻域概率法

集合预报根据所有集合成员的格点降水信息提供降水概率预报,这种方法将每个格点视为独立的,未考虑降水时、空分布的连续性。由于对流尺度天气系统的强非线性,同时高分辨率预报模式往往产生小尺度的时、空不确定性,因此格点的相互作用不容忽视。基于此,引入邻域概率法(Neighborhood Probability, NP)(Ebert, 2009; Schwartz et al, 2009, 2010)进行集合预报结果的后处理,综合格点邻域范围内的降水值,从而得到更真实的降水时、空分布概率。

首先,对降水场进行“0/1”二进制处理,即超过某降水阈值的格点记为 1,反之为 0,从而得到不同降水阈值的二进制降水概率场  $P_B(i, j)$ 。而后将邻域范围内的二进制概率场进行平均处理,得到中心格点的邻域概率

$$P_N(i, j) = \frac{1}{N_{nr^2}} \sum_{k=1}^{N_{nr^2}} P_B(i, j) \quad (1)$$

式中,  $i$  为经向格点,  $j$  为纬向格点,  $r$  为邻域半径,  $N_{nr^2}$  为圆形邻域范围内格点数,  $P_B(i, j)$  为二进制降水概率场,而  $P_N(i, j)$  为邻域概率场。

图 2 为邻域概率法得到降水概率的示意图,超过降水阈值格点用阴影表示,取 2.5 倍格距的邻域半径,共包含 21 个格点信息。因此,中心格点的邻域概率为 42.86%。能够看出,对每一个降水场都可以通过邻域概率法得到与之对应的概率分布,方便集合预报、对照预报和实况进行直接地比较。因此,  $P_N(i, j)$  是集合平均、概率匹配平均、对照预报和各集合成员的降水场应用邻域概率法得到各自的邻域概率场,后文的分数技巧评分部分不再赘述。

当前邻域法的研究主要集中在空间尺度方面,而对于时间邻域考虑较少。然而,对于灾害性对流降水事件,强降水发生的时间点预报同样重要。因此,对于预报结果存在时间超前与滞后的现象必须加以考虑。文中将时间因素引入到邻域概率法中,

考虑降水的时间差异性,从而使得概率预报结果更加客观。引入的时间邻域时次数为 3 次和 5 次(以发生时刻  $\tau = t$  为例,考虑  $\tau = t \pm 1$  和  $t \pm 2$  时刻),取更长的时间邻域将失去对流尺度天气系统短时强降水的研究意义。在  $\tau = t$  时刻,则  $(i, j)$  格点的邻域值为

$$P_N(t, i, j) = \frac{1}{N_t \times N_{nr^2}} \sum_{q=1}^{N_t} \sum_{k=1}^{N_{nr^2}} P_B(\tau, i, j) \quad (2)$$

式中,  $N_t$  为考虑的时次数,这里取 1、3 和 5,其余符号同式(1)。同时,考虑全体集合成员的邻域概率,从而得到整个集合预报系统的邻域集合概率(Neighborhood Ensemble Probability, NEP),是综合考察集合预报系统性能和邻域概率法的重要指标之一。需要指出的是,邻域集合概率提供的是二维降水量概率预报场,并不能提供确定性降水预报场。

$$P_{NE}(t, i, j) = \frac{1}{N_m} \sum_{s=1}^{N_m} P_N(t, i, j) \quad (3)$$

式中,  $N_m$  为集合成员总数,  $P_{NE}(t, i, j)$  为  $t$  时刻的邻域集合概率。

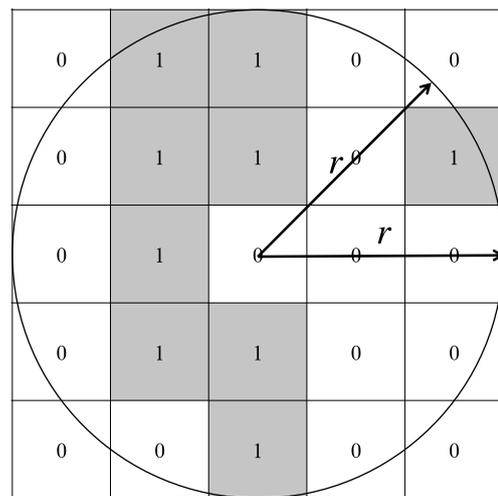


图 2 邻域概率法示意  
(以 2.5 倍格距的邻域半径为例)

Fig. 2 Schematic diagram of the neighborhood probability method  
(The neighborhood radius of 2.5 times the grid length is shown as an example)

### 3.3 分数技巧评分

Roberts 等(2008)针对邻域概率法定义了分数技巧评分(Fractions Skill Score, FSS),该评分得到

的预报效果评估包含空间尺度信息,而没有涉及时间尺度信息。文中创新性地同时考虑时、空尺度信息得到评分结果。首先通过上一小节邻域概率法得到某邻域半径  $r$  在  $t$  时刻的预报场和观测场每个格点的邻域概率  $P_{NF}(t, i, j)$  和  $P_{NO}(t, i, j)$ , 预报场和观测场的误差方差定义为分数布赖尔评分(Fractional Brier Score, FBS)。

$$FBS = \frac{1}{m \times n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (P_{NF}(t, i, j) - P_{NO}(t, i, j))^2 \quad (4)$$

式中,  $m$  和  $n$  分别为研究区域的经向和纬向格点数。当  $P_{NF}(t, i, j)$  不考虑时间不确定性时 ( $N_t = 1$ ), 即只考虑空间不确定性的传统评分; 当  $P_{NF}(t, i, j)$  考虑时间不确定性时 ( $N_t = 3, 5$ ), 此时的评分同时考虑到了时、空尺度的信息。而观测场作为实况不在时间维度上进行平均, 从而检验考虑时间不确定性的预报效果。

分数布赖尔评分是一种负向评分指数, 其值越小说明概率预报技巧越高。进而考虑预报场和观测场的概率完全不重叠时, 此时的误差方差最大, 即概率预报效果最差

$$FBS_{\text{worst}} = \frac{1}{m \times n} \left( \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n P_{NF}^2(t, i, j) + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n P_{NO}^2(t, i, j) \right) \quad (5)$$

最后为剔除无降水格点对结果的影响, 将分数布赖尔评分通过转换得到分数技巧评分

$$FSS = 1 - \frac{FBS}{FBS_{\text{worst}}} \quad (6)$$

分数技巧评分为 0—1, 其值为 1 时表示概率预报技巧最高。

## 4 结果分析

### 4.1 空间尺度结果分析

#### 4.1.1 空间邻域概率分布

图 3 给出了降水最强时刻(第 14 小时)的实况降水分布和 1.0 mm/h 降水阈值下采用邻域集合概率法在不同邻域影响半径下得到的邻域概率分布。首先, 从 7 月 30 日 07—08 时实况降水分布能够看出(图 3h), 降水呈东西带状分布, 强降水中心位于江苏宿迁和安徽宿州地区, 能够展示此次强对流过程的基本情况。对比实况降水, 邻域集合概率分布

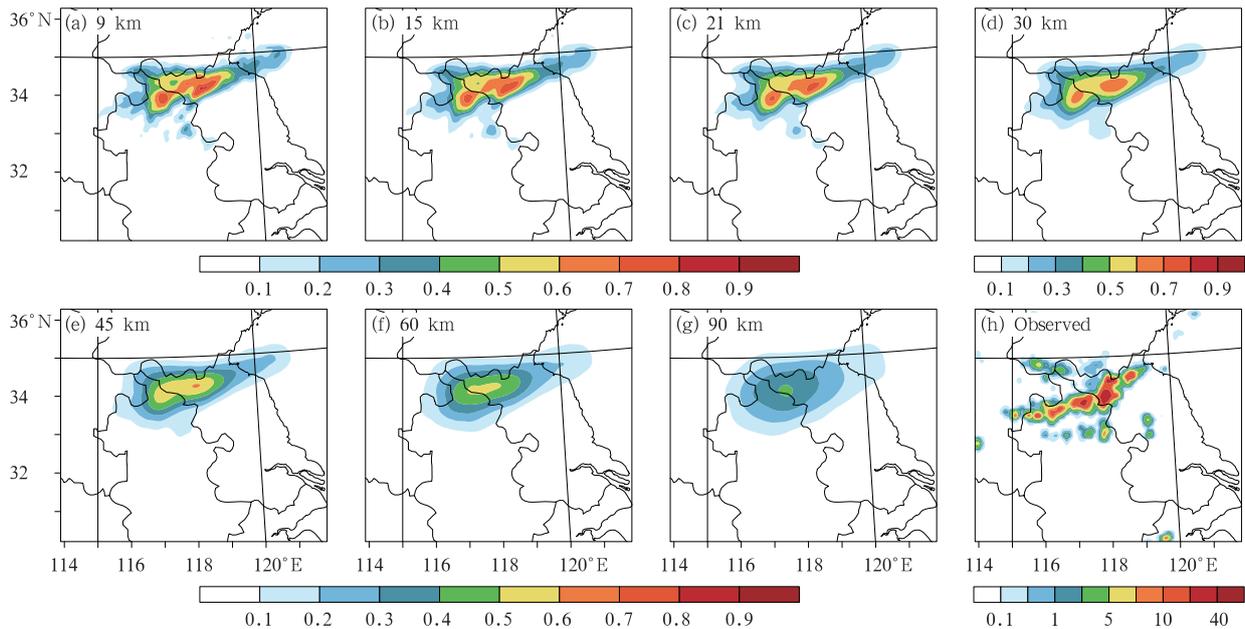


图 3 预报第 14 小时降水量超过 1.0 mm/h 的邻域集合概率分布  
(a—g. 邻域半径分别为 9、15、21、30、45、60、90 km, h. 对应时刻的实况降水分布(单位: mm))

Fig. 3 Neighborhood ensemble probability distributions of precipitation exceeding 1.0 mm/h at the 14th forecast hour

(The neighborhood radii in (a) – (g) are 9, 15, 21, 30, 45, 60 and 90 km, respectively.  
Observed precipitation distribution is displayed in (h) (unit: mm))

基本能够给出有指导意义的概率预报结果。随着邻域半径的增大,概率分布呈现出越来越平滑的趋势;同时邻域概率在数值上存在减小的趋势,这是因为随着邻域范围增大,可能考虑到此类对流降水以外区域的缘故。因此,选择合适空间尺度的邻域半径使得概率预报结果更加合理,是值得探讨的问题。可以看出,在邻域半径小于 45 km 时,概率预报结果不仅较为准确预报出大于 1.0 mm/h 降水事件的概率范围,同时高概率中心与两个实况降水中心位置一致,说明 45 km 的空间尺度能够综合对流尺度系统的小量级降水信息,并为强降水发生提供指示作用。当邻域半径大于 45 km 时,降水发生概率偏小,但概率中心仍能够对降水有一定的指示作用。

#### 4.1.2 分数技巧评分结果

由于对流尺度天气系统存在强烈的非线性特征,导致高分辨率对流尺度降水预报结果存在局地空间差异。那么,选择多大的空间尺度可以表征对流尺度系统及其对流降水空间差异,需要利用客观检验方法来讨论。图 4 给出降水最强时刻(第 14 小时)在不同邻域影响半径下的分数技巧评分变化。可见在所有降水阈值下,分数技巧评分值随着邻域半径的增大而增大,并在 45 km 处增速放缓,之后的分数技巧评分值随空间尺度增大的变化很小,说明 45 km 的空间尺度基本包含了此类对流尺度系统的局地小尺度信息。而更大的空间尺度人为地降低了空间分辨率,对小尺度信息存在平滑减弱

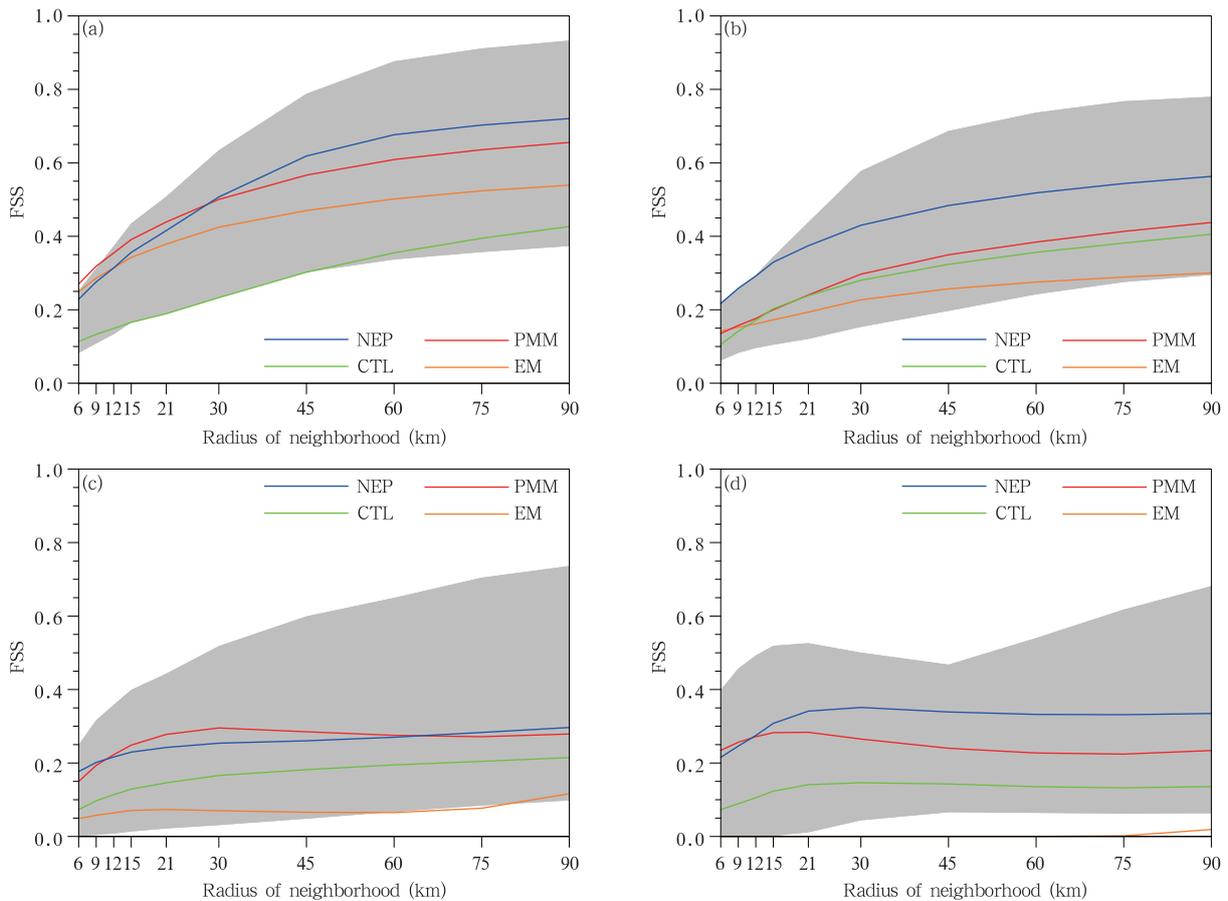


图 4 预报第 14 小时降水超过(a)1.0、(b)5.0、(c)10.0、(d)16.0 mm/h 的分数技巧评分随邻域半径的演变 (绿线为对照预报,蓝线、黄线和红线分别为邻域集合概率法、集合平均法和概率匹配平均法,阴影部分为所有集合成员的评分范围)

Fig. 4 Changes in FSS of precipitation exceeding (a) 1.0, (b) 5.0, (c) 10.0 and (d) 16.0 mm/h at the 14th hour with the radius of neighborhood (the green line is the control forecast (CTL), the blue, orange and red lines represent NEP, EM and PMM methods, respectively. Shaded area indicates the forecast range of all the ensemble members)

作用,已经不再适用高分辨率对流尺度预报的精细化要求。在人们更加关注的暴雨量级上(图 4d),处于 15—30 km 的邻域半径,分数技巧评分达到最高。

同时能够看出,随着降水阈值的不断增大,分数技巧评分值呈现出减小趋势。当降水量大于 1.0 mm/h 时(图 4a),邻域集合概率和概率匹配平均法的分数技巧评分是最高的,集合平均法的评分也明显高于对照预报;当降水量大于 5.0 mm/h 时(图 4b),集合平均法得到的分数技巧评分明显降低,而邻域集合概率法评分仍最高;当降水阈值为 10.0 和 16.0 mm/h 时(图 4c、d),概率匹配平均和邻域集合概率法的分数技巧评分要优于对照预报。值得注意的是,传统集合平均的评分很低,尤其是图 4d 暴雨量级降水评分几乎为 0,表明传统的集合平均方法对极端降水的预报能力差。因此,概率匹配平均和邻域集合概率法的分数技巧评分检验效果要优于对照预报;集合平均法在小量级降水检验效果优于对照预报,而在大量级上效果最差;同时,从阴影部分得知某些集合成员对降水具有很高的可预报性,在分析集合预报结果时,也应参考某些集合成员的预报结果。

特别地,集合平均邻域概率(EMNP)与邻域集合概率仅仅由于集合平均与生成“0/1”二进制预报场的运算顺序不同,在图 4 中两者的分数技巧评分存在差异,尤其是大量级降水阈值得到的分数技巧评分结果相差甚远。这可能是由于集合平均邻域概率首先对所有集合成员进行简单平均处理,存在着传统集合平均的固有缺陷,使得原始信息不加降水阈值区分,整体地进行平均,从而平滑掉大量级降水预报值。而邻域集合概率首先根据降水阈值对所有集合成员的预报场进行处理,充分且合理地考虑了预报场的降水信息,而不是简单地整体平均。因此,得到的邻域集合概率在大量级降水方面大于集合平均邻域概率,进而导致邻域集合概率得到的分数技巧评分要远高于集合平均法。而概率匹配平均法在大量级降水方面的分数技巧评分与邻域集合概率法相近。正是由于概率匹配平均法不但综合了所有集合成员的降水预报值,而且重点突出了大量级降水信息,因此,概率匹配平均法在大量级降水方面有着较高的预报技巧,弥补了集合平均法对大量级降水预报能力偏低的缺陷。

## 4.2 时间尺度结果分析

### 4.2.1 时间扩展分数技巧评分

图 5 给出了降水最强时刻(第 14 小时)3 种时间邻域的分数技巧评分随邻域半径的变化。可以看出,分数技巧评分随空间尺度的演变特征与上一节基本一致,本节重点对比不同时间邻域对分数技巧评分的影响,以探讨选择多大时间尺度可以表征对流尺度系统及其对流降水时间差异的问题。在降水量大于 1.0 和 5.0 mm/h 时(图 5a、b),分数技巧评分随着时间尺度的增大而提高,意味着如果不考虑时间不确定性,预报小量级降水的性能将被低估。这表明了在高分辨率对流尺度降水预报中时间不确定性的重要性。同时,对于集合平均法和对照预报,5.0 比 1.0 mm/h 降水阈值的分数技巧评分值随时间尺度增大的增幅减小。随着降水阈值增至 10.0 mm/h 时(图 5c),这一增幅进一步减小,即不考虑时间不确定性的分数技巧评分与时间拓展分数技巧评分相近。而集合平均法得到的分数技巧评分出现时间尺度  $3\text{ h} > 1\text{ h} > 5\text{ h}$  的现象,概率匹配平均法得到的分数技巧评分率先出现时间尺度  $1\text{ h} > 3\text{ h} > 5\text{ h}$  的现象,即分数技巧评分随时间尺度的减小而增大。当降水阈值为 16.0 mm/h 时(图 5d),概率匹配平均法得到的评分结果较 10.0 mm/h 而言,1 h 的时间尺度远大于 3 和 5 h 的时间尺度,即随着时间尺度的减小,分数技巧评分的改善程度更加显著。同时,邻域集合概率法和对照预报也呈现出分数技巧评分随时间尺度减小而增大的现象。

因此,时间尺度拓展分数技巧评分在小量级降水的预报中,时间尺度越大,分数技巧评分越大;随着降水阈值的增大,3 h 时间尺度的分数技巧评分值大于 1 和 5 h 时间尺度;随着降水阈值的进一步增大,时间尺度越小,分数技巧评分越高。这是因为 5 h 的时间尺度包含了对流尺度降水事件的小量级降水时间不确定性,随着降水量级的增大,降水的时间分布也更为集中,因此,对应的时间尺度也减小。当降水量级增大到暴雨量级时,更小的时间尺度才能减小降水时间差异以达到更好的预报效果。本试验研究的最小时间尺度为 1 h,在暴雨量级降水的分数技巧评分最高。当试验的时间分辨率提高到至分钟量级时,可以得到更小的时间尺度,对应暴雨的分数技巧评分会更高。

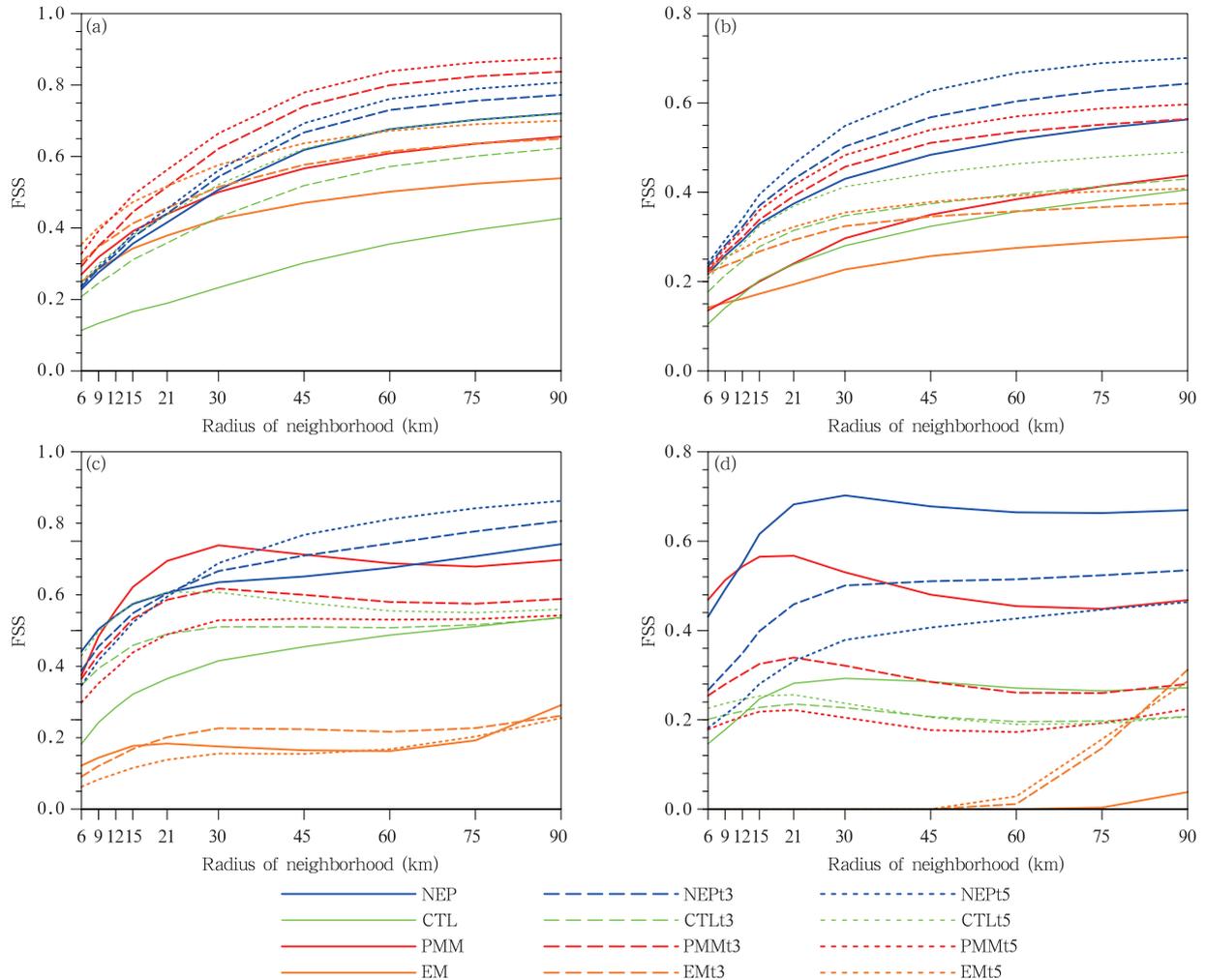


图5 预报第14小时降水超过(a)1.0、(b)5.0、(c)10.0、(d)16.0 mm/h的3种时间邻域分数技巧评分随邻域半径的演变 (实线、长虚线、短虚线分别代表1、3、5 h的时间邻域,其余同图4)  
 Fig.5 Changes in three time-neighborhood FSS of precipitation exceeding (a) 1.0, (b) 5.0, (c) 10.0 and (d) 16.0 mm/h at the 14th hour with the radius of neighborhood (the solid, long dashed and short dashed lines represent 1 h, 3 h and 5 h time neighborhoods, and colors are the same as in Fig. 4)

#### 4.2.2 时间邻域概率分布

选取具有代表性的45 km与1.0 mm/h和15 km与16.0 mm/h空间尺度和降水阈值组合,以上一小节中不同时间尺度对分数技巧评分变化规律最显著的概率匹配平均法的时间邻域概率分布为例,对比实况降水的邻域概率结果,从而展现不同时间尺度对概率预报结果的影响。图6为降水最强时刻(第14小时)3种时间邻域与实况降水的邻域概

率分布。

在1.0 mm/h的降水阈值和45 km的空间尺度下,概率匹配平均法得到的邻域概率分布基本符合实况。相比而言,5和3 h时间尺度比1 h时间尺度得到的概率分布形态更加接近实况。在16.0 mm/h的降水阈值与15 km的空间尺度下,显然时间尺度越小,得到的概率分布形态和概率值与实况越吻合。这与上一小节分析结果一致。

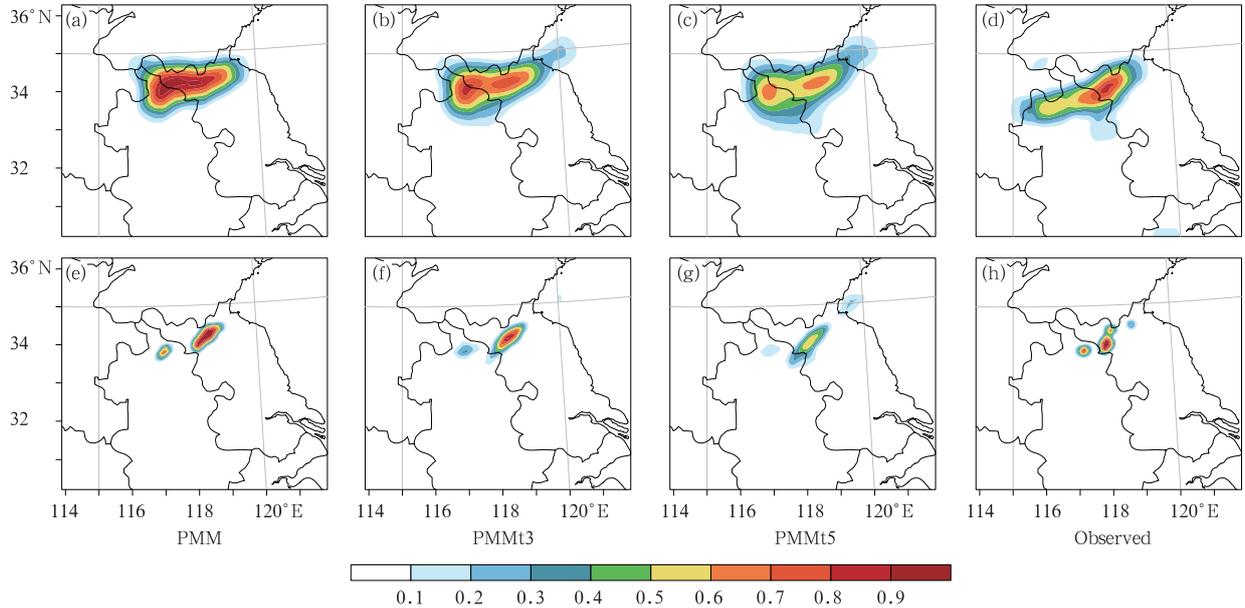


图6 预报第14小时3种时间邻域及实况的概率分布

(a—d. 降水量大于1.0 mm/h与45 km邻域半径的1、3、5 h时间邻域概率匹配平均及实况,  
e—h. 降水量大于16.0 mm/h与15 km邻域半径的1、3、5 h时间邻域概率匹配平均及实况)

Fig. 6 Probability distributions of three time neighborhoods and observation at the 14th hour. (a) – (d) represent 1, 3, 5 h time neighborhoods and observation with radius of 45 km and precipitation exceeding 1.0 mm/h; (e) – (h) are for radius of 15 km and precipitation exceeding 16.0 mm/h

### 4.3 时、空尺度矩阵

前两节分别考虑空间尺度和时间尺度对于高分辨率对流尺度降水的时、空差异影响。本节探讨时、空尺度两个邻域因素对于预报效果的综合影响,将时间尺度引入到降水阈值-空间尺度中。在空间尺度和降水阈值保持原始形式情况下,对于每个降水阈值水平嵌入时间尺度轴,使得时、空尺度两个变量得以同时展现。图7为预报第14小时不同时、空尺度下邻域集合概率法得到的分数技巧评分随不同降水阈值变化的矩阵,横轴底部表示降水阈值大小,横轴顶部表示不同降水阈值对应的时间尺度,纵轴表示不同空间尺度,每个方格内的数值为分数技巧评分高低。能够更加直接地看出,随着降水阈值增大,分数技巧评分降低;随着空间尺度增大,分数技巧评分提高;在中小降水阈值、有意义的时间尺度范围内,时间尺度越大,评分相对越高,而在发生时间短的暴雨量级降水,时间尺度越小,评分越高。同时,在16.0 mm/h降水阈值和1 h的时间尺度下,邻域半径为15—30 km的空间尺度使得分数技巧评分最高,这与空间尺度分析的结果一致。

进一步的分析可以确定,在图7中,0.5—1.0 mm/h降水阈值对应的空间-时间平面内存在近似斜率为30 km/(4 h)的分数技巧评分常数线(典型的线已在图中标出),5.0—10.0 mm/h的降水阈值对应的空间-时间平面内存在近似斜率为15—30 km/(4 h)的分数技巧评分常数线,这些常数线显示了较小空间尺度与较大时间尺度得到的分数技巧评分等于较大空间尺度和较小时间尺度得到的分数技巧评分。例如,90 km-1 h与60 km-5 h、75 km-1 h与45 km-5 h、60 km-1 h与30 km-5 h、30 km-1 h与15 km-5 h的分数技巧评分值近似相等。这一事实表明,时、空尺度两个邻域因素对于预报效果的影响是相互关联的。

同时可以看出,在小量级降水方面,分数技巧评分常数线集中在较大的空间尺度处,斜率近似为30 km/(4 h);而随着降水阈值的增大,分数技巧评分常数线在较小的空间尺度处也存在,斜率近似为15—30 km/(4 h);当降水阈值增大到暴雨量级时,分数技巧评分常数线在图中并未体现,正是因为暴雨量级降水所考虑的时间邻域窗口更小,分数技巧

评分常数线应该处在更小的时间尺度上。这表明对流尺度降水的强度、空间尺度和时间尺度,三者存在内在联系,即不同降水阈值下分数技巧评分常数线

的斜率受到对流尺度天气系统固有的时、空尺度影响。

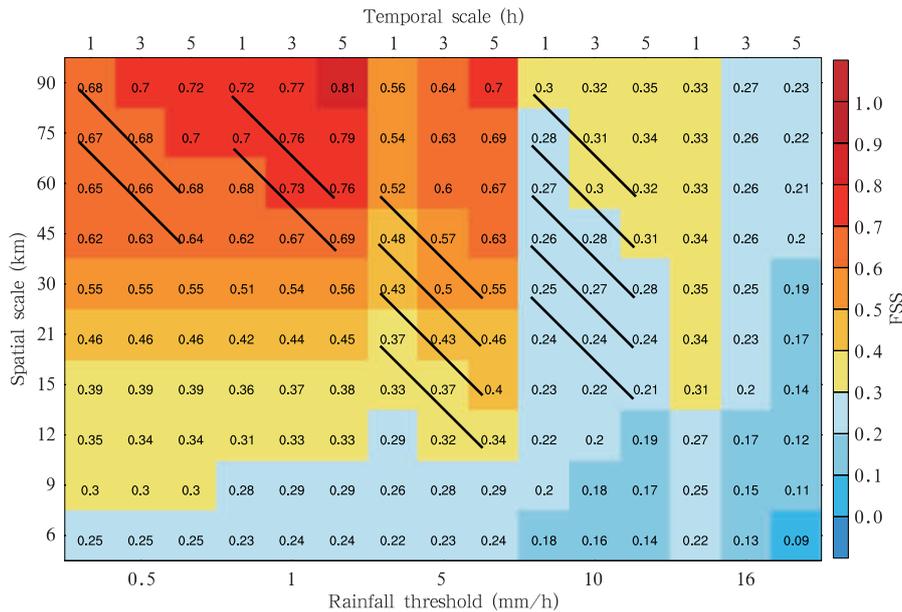


图7 预报第14小时分数技巧评分的降水阈值-时空尺度矩阵

Fig. 7 Threshold-scale diagram of FSS with temporal scales incorporated from NEP method at the 14th hour

### 5 总结与结论

结合一次强飊线过程进行对流尺度集合预报试验,引入概率匹配平均法以重点关注极端降水。并将时间维度引入邻域概率法中,采用改进后的邻域概率法生成概率预报场,并通过分数技巧评分在不同时、空尺度上对预报效果进行评估检验,进而确定能够有效减小高分辨率对流降水事件时、空不确定性的最适时、空尺度。结论如下:

(1) 基于全体集合成员的邻域集合概率法能够充分且合理地考虑预报场降水信息,对原始信息进行降水阈值区分处理,而概率匹配平均法重点突出大量级降水信息,使得邻域集合概率和概率匹配平均法的分数技巧评分在极端降水方面远高于集合平均法,两者均弥补了集合平均法对极端降水预报能力偏低的缺陷。

(2) 对于此类强飊线过程的对流尺度天气系统,邻域半径15—45 km的空间尺度能够改善降水水位移误差的空间不确定性,使其预报效果达到最优;其中15—30 km的邻域半径对于尺度更小的大量

级降水事件预报能力更高。

(3) 在小量级降水方面,时间尺度越大,分数技巧评分越高;随着降水阈值的增大,3 h时间尺度的分数技巧评分值大于1和5 h时间尺度;随着降水阈值的进一步增大,时间尺度越小,分数技巧评分越大。对流尺度降水预报所考虑的时间尺度窗口与降水量级之间存在着对应关系,不同时间尺度可以捕获到不同量级对流降水的时间不确定性,从而得到更好的预报效果。

(4) 较小空间尺度与较大时间尺度得到的分数技巧评分等于较大空间尺度和较小时间尺度得到的分数技巧评分,这一分数技巧评分常数线表明时空尺度两个邻域因素对于预报效果的影响是相互关联的。同时,空间和时间的等值尺度比例受到对流尺度天气系统固有的时空尺度影响。

(5) 改进的邻域概率法能够同时包含高分辨率模式预报结果在对流尺度降水事件上存在的时、空不确定性,并更加方便地为不同量级降水提供与其时、空尺度相匹配的概率预报结果,这对提高对流尺度降水预报技巧具有实际指导意义。

将时间尺度引入到邻域概念中,实现了对流尺度降水在时、空尺度上的综合评估,得到的分数技巧评分常数线还说明在估算对流尺度降水系统的传播速度时可能存在 15—30 km/(4 h) 的偏差。然而,关于预报具有超前或滞后偏差问题的答案,需要采用超前滞后相关的方法来进行进一步研究。同时,对流尺度天气系统的强非线性特征也要求通过不同天气系统背景下的强对流天气试验来进行时、空尺度评估检验,以提高灾害性极端天气事件的预报预警能力。

**致 谢:**感谢李湘在算法程序和行文思路方面提供的帮助。

## 参考文献

- 陈朝平,冯汉中,陈静. 2010. 基于贝叶斯方法的四川暴雨集合概率预报产品释用. 气象, 36(5): 32-39. Chen C P, Feng H Z, Chen J. 2010. Application of Sichuan heavy rainfall ensemble prediction probability products based on Bayesian method. Meteor Mon, 36(5): 32-39 (in Chinese)
- 高峰,闵锦忠,孔凡铖. 2010. 基于增长模繁殖法的风暴尺度集合预报试验. 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. Plateau Meteor, 29(2): 429-436 (in Chinese)
- 李俊,杜钧,陈超君. 2015a. “频率匹配法”在集合降水预报中的应用研究. 气象, 41(6): 674-684. Li J, Du J, Chen C J. 2015a. Applications of "frequency-matching" method to ensemble precipitation forecasts. Meteor Mon, 41(6): 674-684 (in Chinese)
- 李俊,杜钧,刘羽. 2015b. 北京“7.21”特大暴雨不同集合预报方案的对比试验. 气象学报, 73(1): 50-71. Li J, Du J, Liu Y. 2015b. A comparison of initial condition-, multi-physics-and stochastic physics-based ensembles in predicting Beijing "7.21" excessive storm rain event. Acta Meteor Sinica, 73(1): 50-71 (in Chinese)
- 刘琳,陈静,程龙等. 2013. 基于集合预报的中国极端强降水预报方法研究. 气象学报, 71(5): 853-866. Liu L, Chen J, Cheng L, et al. 2013. Study of the ensemble-based forecast of extremely heavy rainfalls in China: Experiments for July 2011 cases. Acta Meteor Sinica, 71(5): 853-866 (in Chinese)
- 潘留杰,张宏芳,陈小婷等. 2015. 基于邻域法的高分辨率模式降水的预报能力分析. 热带气象学报, 31(5): 632-642. Pan L J, Zhang H F, Chen X T, et al. 2015. Neighborhood-based precipitation forecasting capability analysis of high-resolution models. J Trop Meteor, 31(5): 632-642 (in Chinese)
- 王晨稀,姚建群. 2008. 对一次局地短时强降水过程的集合预报研究. 高原气象, 27(6): 1229-1239. Wang C X, Yao J Q. 2008. Ensemble forecasting of a local short-lived severe precipitation. Plateau Meteor, 27(6): 1229-1239 (in Chinese)
- 张宇彤,矫梅燕,陈静等. 2016. 基于贝叶斯方法的极端降水概率预报试验. 气象, 42(7): 799-808. Zhang Y T, Jiao M Y, Chen J, et al. 2016. Probabilistic forecasting of extreme precipitation experiment based on Bayesian theory. Meteor Mon, 42(7): 799-808 (in Chinese)
- 庄潇然,闵锦忠,蔡沅辰等. 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. 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. Acta Meteor Sinica, 74(2): 244-258 (in Chinese)
- 庄潇然,闵锦忠,王世璋等. 2017. 风暴尺度集合预报中的混合初始扰动方法及其在北京 2012 年“7.21”暴雨预报中的应用. 大气科学, 41(1): 30-42. Zhuang X R, Min J Z, Wang S Z, et al. 2017. A blending method for storm-scale ensemble forecast and its application to Beijing extreme precipitation event on July 21, 2012. Chinese J Atmos Sci, 41(1): 30-42 (in Chinese)
- Baldwin M E, Kain J S. 2006. Sensitivity of several performance measures to displacement error, bias, and event frequency. Wea Forecasting, 21(4): 636-648
- Clark A J, Gallus W A Jr, Xue M, et al. 2009. A comparison of precipitation forecast skill between small convection-allowing and large convection-parameterizing ensembles. Wea Forecasting, 24(4): 1121-1140
- Clark A J, Kain J S, Stensrud D J, et al. 2011. Probabilistic precipitation forecast skill as a function of ensemble size and spatial scale in a convection-allowing ensemble. Mon Wea Rev, 139(5): 1410-1418
- Clark A J, Weiss S J, Kain J S, et al. 2012. An overview of the 2010 hazardous weather testbed experimental forecast program spring experiment. Bull Amer Meteor Soc, 93(1): 55-74
- Duc L, Saito K, Seko H. 2013. Spatial-temporal fractions verification for high-resolution ensemble forecasts. Tellus A: Dyn Meteor Oceanogr, 65(1): 18171
- Ebert E E. 2001. Ability of a poor man's ensemble to predict the probability and distribution of precipitation. Mon Wea Rev, 129(10): 2461-2480
- Ebert E E. 2008. Fuzzy verification of high-resolution gridded forecasts: A review and proposed framework. Meteor Appl, 15(1): 51-64
- Ebert E E. 2009. Neighborhood verification: A strategy for rewarding close forecasts. Wea Forecasting, 24(6): 1498-1510
- Kong F Y, Droegemeier K K, Hickmon N L. 2006. Multiresolution ensemble forecasts of an observed tornadic thunderstorm system. Part I: comparison of coarse-and fine-grid Experiments. Mon Wea Rev, 134(3): 807-833
- Kong F Y, Xue M, Thomas K W, et al. 2009. A real-time storm-scale ensemble forecast system: 2009 spring experiment// Pro-

- ceedings of the 23rd Conference on Weather Analysis Forecasting/19th Conference on Numerical Weather Prediction. Omaha, Nebraska: American Meteorological Society, 16A. 3pp
- Li X, He H R, Chen C H, et al. 2017. A convection-allowing ensemble forecast based on the breeding growth mode and associated optimization of precipitation forecast. *J Meteor Res*, 31(5): 955-964
- Mittermaier M, Roberts N. 2010. Intercomparison of spatial forecast verification methods: Identifying skillful spatial scales using the fractions skill score. *Wea Forecasting*, 25(1): 343-354
- Roberts N M, Lean H W. 2008. Scale-selective verification of rainfall accumulations from high-resolution forecasts of convective events. *Mon Wea Rev*, 136(1): 78-97
- Schwartz C S, Kain J S, Weiss S J, et al. 2009. Next-day convection-allowing WRF model guidance: A second look at 2-km versus 4-km grid spacing. *Mon Wea Rev*, 137(10): 3351-3372
- Schwartz C S, Kain J S, Weiss S J, et al. 2010. Toward improved convection-allowing ensembles: Model physics sensitivities and optimizing probabilistic guidance with small ensemble membership. *Wea Forecasting*, 25(1): 263-280
- Schwartz C S, Romine G S, Weisman M L, et al. 2015a. A real-time convection-allowing ensemble prediction system initialized by mesoscale ensemble Kalman filter analyses. *Wea Forecasting*, 30(5): 1158-1181
- Schwartz C S, Romine G S, Sobash R A, et al. 2015b. NCAR's experimental real-time convection-allowing ensemble prediction system. *Wea Forecasting*, 30(6): 1645-1654
- Weusthoff T, Ament F, Arpagaus M, et al. 2010. Assessing the benefits of convection-permitting models by neighborhood verification: Examples from MAP D-PHASE. *Mon Wea Rev*, 138(9): 3418-3433
- Xue M, Kong F, Thomas K W, et al. 2010. CAPS realtime storm scale ensemble and high resolution forecasts for the NOAA hazardous weather testbed 2010 spring experiment//Proceedings of the 25th Conference on Severe Local Storms. Denver, Colorado: Amer Meteor Soc, 7B. 3pp