

刘雪晴, 陈静, 陈法敬, 等. 2020. 降水邻域集合概率方法尺度敏感性试验 [J]. 大气科学, 44(2): 282–296. LIU Xueqing, CHEN Jing, CHEN Fajing, et al. 2020. Scale Sensitivity Experiments of Precipitation Neighborhood Ensemble Probability Method [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(2): 282–296. doi:[10.3878/j.issn.1006-9895.1903.18228](https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1903.18228)

降水邻域集合概率方法尺度敏感性试验

刘雪晴¹ 陈静² 陈法敬² 夏宇³ 范宇恩¹ 徐致真⁴

¹ 成都信息工程大学, 成都 610225

² 中国气象局数值预报中心, 北京 100081

³ 南京信息工程大学, 南京 210044

⁴ 中国气象科学研究院, 北京 100081

摘要 降水邻域集合概率法是处理高分辨率降水集合预报不确定性的新方法。利用 2017 年 5~7 月 GRAPES (Global and Regional Assimilation and Prediction Enhanced System) 区域集合预报系统 24 h 降水预报资料, 进行 GRAPES 降水邻域集合概率方法试验, 并针对邻域概率法的等权重和邻域尺度问题, 设计了邻域格点权重修正邻域方案以及二分类权重修正邻域方案, 进行降水的集合概率法、等权重邻域集合概率方法、权重修正邻域集合概率方法和二分类权重修正邻域集合概率方法等四种方法的格点相关及敏感性试验, 并利用多种概率预报检验评估上述四种方法的预报效果。试验结果表明: (1) 尽管采用邻域计算方案的三种邻域集合概率方法的降水概率预报评分各有优劣, 如等权重邻域集合概率法的相对作用特征曲线面积评分略优, 而权重修正邻域集合概率法和二分类权重修正邻域集合概率法的降水概率预报可靠性更高, 但采用了邻域计算方案的降水概率预报评分均优于传统的集合概率方法; (2) 降水邻域集合概率方法的预报技巧对邻域尺度很敏感, 统计评分最优的邻域半径为 5~8 倍模式水平格距; (3) 引入了权重修正的两个邻域集合概率预报方法在 24 h 降水量超过 10 mm 时改进较明显, 能够提供更加客观的概率预报结果。总体上看, 降水邻域集合概率方法具有较好的应用前景, 恰当的邻域概率方法及邻域半径可以获得更合理的降水概率预报结果。

关键词 集合预报 降水概率预报 邻域法 权重修正 邻域半径

文章编号 1006-9895(2020)02-0282-15

中图分类号 P456

文献标识码 A

doi:[10.3878/j.issn.1006-9895.1903.18228](https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1903.18228)

Scale Sensitivity Experiments of Precipitation Neighborhood Ensemble Probability Method

LIU Xueqing¹, CHEN Jing², CHEN Fajing², XIA Yu³, FAN Yuen¹, and XU Zhizhen⁴

¹ Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

² Numerical Weather Prediction Center of China Meteorological Administration, Beijing 100081

³ Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

⁴ Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract The precipitation neighborhood ensemble probability method is a new method to deal with the uncertainty of

收稿日期 2018-09-10; 网络预出版日期 2019-07-04

作者简介 刘雪晴, 女, 1993 年出生, 硕士研究生, 主要从事集合预报研究。E-mail: liuxqzy@163.com

通讯作者 陈静, E-mail: chenj@cma.gov.cn

资助项目 科技部科技支撑项目 2015BAC03B01, 国家重点研发计划项目 2018YFC1507405, 中国气象局公益性行业(气象)科研专项 GYHY201506005

Funded by National Science and Technology Support Program (Grant 2015BAC03B01), National Key Research and Development program of China (Grant 2018YFC1507405), Special Scientific Research Fund of Meteorological Public Welfare (Grant GYHY201506005)

high-resolution ensemble forecast. Based on the 24 h accumulated precipitation data of May to July 2017 of GRAPES (Global and Regional Assimilation and Prediction Enhanced System) regional ensemble forecast system, experiments of precipitation neighborhood ensemble probability method were carried out. Moreover, aiming at the equal weight and neighborhood scale problems of the neighborhood probabilistic method, two kinds of weight correction schemes (weight correction neighborhood scheme and binary weight correction neighborhood scheme) were designed. Meanwhile, the grids correlation and sensitivity experiments of four groups of precipitation probability forecasts were implemented using the ensemble probability forecast, equal weight neighborhood ensemble probability method, weight correction neighborhood ensemble probability method, and binary weight correction neighborhood ensemble probability method. The results of precipitation probability prediction were verified by multiple probability scores, which showed that: (1) The precipitation probability scores of the neighborhood calculation scheme are superior to the original ensemble probability forecast method. The precipitation probability scores of the three neighborhood ensemble probability methods have their own advantages and disadvantages. For example, the relative operating characteristic area (AROC) score of the equal weight neighborhood ensemble probability method is slightly better; however, the higher reliability of precipitation probability prediction is determined by the weight correction neighborhood ensemble probability method and the binary weight correction neighborhood ensemble probability method. (2) The forecast skill of the precipitation neighborhood ensemble probability methods is very sensitive to the neighborhood scale. The optimal neighborhood radius is 5–8 times the horizontal grid scale of the model. (3) The two neighborhood ensemble probability methods combined with weight correction largely improved the forecast skill of the threshold by over 10 mm in 24 hours and provided more objective probability forecast results. Generally, the precipitation neighborhood ensemble probability method has good application values. By selecting the appropriate neighborhood probability method and the neighborhood radius, more objective prediction results can be obtained.

Keywords Ensemble forecast, Precipitation probability forecast, Neighborhood method, Weight correction, Radius of neighborhood

1 引言

降水是天气预报中必不可少的气象要素之一, 随着数值模式预报技术的发展, 定量降水预报水平已得到明显提高(李泽椿等, 2004; 矫梅燕, 2010)。但是由于降水本身存在着自然变率的不确定性, 加之模式误差会导致定量降水预报结果存在不确定性, 如何减少模式定量降水预报误差获得了气象科技人员的广泛重视, 成为近年来气象领域的研究热点。

许多学者开展了模式定量降水预报误差的订正方法研究。这些方法总体可分为两类, 一类是通过一定的统计方法, 对定量降水预报值进行直接订正, 获得一个新的预报值, 比如统计降尺度方法(Wilby and Wigley, 1997)、统计降尺度与多模式超级集合相结合的方法(Chakraborty and Krishnamurti, 2009; 王海霞和智协飞, 2015)、频率匹配降水订正法(李俊等, 2014)等。Wilby and Wigley(1997)对比了6种统计降尺度方法对美国逐日降水预报订正效果; Chakraborty and Krishnamurti(2009)将统计降尺度与多模式超级

集合方法相结合, 并用于印度季风区降水预报, 结果表明降水预报准确率有所提高; 王海霞和智协飞(2015)利用TIGGE资料对东亚地区降水量进行统计降尺度处理, 结果表明统计降尺度订正后的预报结果比直接插值更加准确, 多模式集成的预报效果优于单模式结果; 李俊等(2014)针对AREM模式降水预报偏差特征, 开展了降水偏差订正实验, 结果显示“无雨或有雨”的定性降水预报质量有了明显的改善, 并能够有效订正降水的强度。另一类是针对定量降水预报时间和空间的不确定性, 将确定性的定量降水预报转换为概率预报, 提供更为科学合理的降水预报概率值, 如贝叶斯模型平均法(Sloughter et al., 2007; 韩焱红等, 2013)、降水邻域概率法(Theis et al., 2005)、概率匹配方法(周迪等, 2015)等。韩焱红等(2013)利用贝叶斯产品处理技术得到集成贝叶斯降水概率预报, 并认为其可靠性高于集合预报直接得到的概率预报; Theis et al.(2005)提出了邻域概率法的思想, 该方法着眼于格点的时空邻域, 通过邻域格点的确定性预报获得中心格点的概率预报; 周迪等(2015)研究了暴雨集合预报—观测概率匹配订正法, 并在

四川盆地进行了订正预报试验。

近年来,降水邻域概率方法获得了越来越多的关注。降水邻域概率方法的思想是利用某格点(x, y)及其邻域空间若干点的降水概率值代替格点(x, y)的降水值,将模式输出的定量降水预报转变为概率预报。邻域概率法的研究结果表明,降水概率预报在预报一致性、预报质量等方面都优于确定性模式预报结果(Theis et al., 2005)。Azadi and Zakeri(2010)基于Theis et al.(2005)提出的方法,对伊朗地区进行降水预报试验,认为该方法易于实现、计算需求量少且结果优于确定性模式直接输出的预报结果。在已有的邻域法概率预报计算方案中,邻域空间各格点大都是等权重参与计算,没有考虑对中心点(x, y)的相关性,因此使用等权重处理邻域格点信息不够客观,邻域概率预报结果仍然不够准确。此外,杜钧和李俊(2014)指出,邻域概率法的本质上是一种增尺度方法,对中心点(x, y)的邻域半径如何选择也是一个值得关注的关键问题。

众所周知,高分辨率集合预报是一种新型的随机动力预报技术(Krishnamurti et al., 2000; 陈静等, 2003, 2005; Buizza et al., 2005; 袁月等, 2016; 王婧卓等, 2018)。通过集合预报成员计算得到一系列降水概率预报结果,如降水集合预报平均、降水等级概率预报、降水量邮票图等(林良勋, 2001; 毛恒青等, 2002),提高了确定性数值预报的参考价值。尽管高分辨率集合预报能够更好地提供对流过程预报,但由于忽略了模式自身偏差,得到的降水概率预报产品包含的不确定信息不够完整,仍然存在偏差。Schwartz et al.(2010)将高分辨率集合预报与邻域概率法相结合,发展了降水邻域集合概率预报方法,该方法相当于增加了成员数量,补充了集合预报概率密度函数信息。近年来,降水邻域集合概率预报方法的研究越来越多。Clark et al.(2011)利用不同集合成员数量及不同空间尺度的相对作用特征曲线面积(Relative Operating Characteristic Area, AROC)评价集合预报系统的概率降水预报,Johnson and Wang(2012)对多模式集合中基于邻域和对象的降水概率预报进行检验和订正,Bouallègue et al.(2013)将高分辨率集合预报系统与邻域方法和时间滞后法相结合,并评估得到的降水概率预报,Bouallègue and Theis(2015)对比了集合预报中采用邻域概率法

和升尺度法的降水概率预报效果。这些研究表明,降水邻域集合概率预报方法可以改进集合预报直接输出的概率预报技巧。

中国气象局数值预报中心于2014年8月建立了GRAPES区域集合预报系统(Global and Regional Assimilation and Prediction Enhanced System-Regional Ensemble Prediction System, 以下简称GRAPES-REPS)并实现业务化,对中尺度降水概率预报的发展和业务应用具有重要意义。本文利用GRAPES区域集合预报系统降水预报资料,进行GRAPES降水邻域集合概率方法试验,并针对邻域概率法的等权重和邻域尺度问题,设计了邻域格点权重修正邻域方案以及二分类权重修正邻域方案,进行邻域格点相关和尺度敏感性试验,通过多种概率预报检验方法,评估GRAPES降水邻域集合概率方法的预报效果,以期改进GRAPES区域集合预报降水概率预报技巧,更好地满足预报业务和服务需求。

2 集合预报模式及资料简介

集合预报模式为中国气象局数值预报中心业务运行的GRAPES区域集合预报系统,控制预报模式为GRAPES-MESO(Global and Regional Assimilation and Prediction System in Mesoscale)模式,系统参数如表1所示。由表可见,水平格点数为 502×330 ,垂直层次为50层,预报时效为72 h,垂直坐标为地形追随高度坐标,集合成员数为15个,包含14个扰动预报和1个控制预报,预报区域覆盖整个中国范围($15^{\circ} \sim 65^{\circ}\text{N}$, $70^{\circ} \sim 145^{\circ}\text{E}$),模式水平分辨率为 $0.15^{\circ} \times 0.15^{\circ}$ 。集合预报初值扰动方法采用基于ETKF(Ensemble Transform Kalman Filter)的多尺度混合初值扰动(Multi-Scale Blending, MSB&ETKF)方法(张涵斌等, 2014),模式扰动采用多物理过程组合方法和模式物理参数化倾向随机扰动方案(Stochastically Perturbed Parameterization Tendencies, SPPT)(袁月等, 2016),模式背景场和边界扰动由中国气象局数值预报中心T639全球集合预报系统提供。

降水集合预报资料为GRAPES区域集合预报2015~2016年5~9月和2017年5~7月的逐日24 h降水预报资料。观测资料为同期CMPAS(CMA Multi-source merged Precipitation Analysis System)中国区域地面—卫星—雷达三源融合降水分析产

表 1 GRAPES-REPS (Global and Regional Assimilation and Prediction Enhanced System-Regional Ensemble Prediction System) 4.0.0.0参数配置

Table 1 Parameter configuration of GRAPES-REPS (Global and Regional Assimilation and Prediction Enhanced System-Regional Ensemble Prediction System) 4.0.0.0

参数项Parameter terms	参数配置Parameter configurations
模式model version	GRAPES-REPS 4.0.0.0
水平分辨率horizontal resolution	$0.15^{\circ} \times 0.15^{\circ}$
垂直层次vertical levels	50
初值扰动方案initial perturbation method	多尺度混合初值扰动 Multi-scale blending initial perturbation
模式物理扰动model physical perturbation method	多物理组合+SPPT multiple physical process parameterization scheme + SPPT
边界扰动boundary perturbation method	T639全球集合预报 T639 global ensemble forecast
模式区域 model region	($15^{\circ} \sim 65^{\circ}\text{N}, 70^{\circ} \sim 145^{\circ}\text{E}$)
集合成员数ensemble member number	14+1
预报时效forecast length	72 h

品, 空间分辨率为 $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$, 空间覆盖范围为 ($15^{\circ} \sim 60^{\circ}\text{N}, 70^{\circ} \sim 140^{\circ}\text{E}$) (潘旸等, 2015)。

我国中东部地区城市和人口稠密、经济发达、科技水平高, 也是我国降水量多、雨涝灾害较严重的地区之一。且中东部地区观测站点较为密集, 观测资料更加可信。因此, 本文选择 ($20^{\circ} \sim 45^{\circ}\text{N}, 105^{\circ} \sim 120^{\circ}\text{E}$) 作为研究区域。GRAPES 区域集合预报模拟区域与研究区域的配置如图 1 所示。

3 研究方法及试验设计

3.1 传统的等权重邻域概率法简介

通常, 集合预报计算概率采用等权重方法, 对

单格点所有集合预报成员提供的降水信息进行处理, 即认为在集合预报系统中各成员权重相同, 当集合成员数为 N 时, 若预报某格点发生超过降水阈值的集合成员有 M 个, 那么, 未来该格点发生超过该降水阈值的概率为 M/N 。

传统的等权重邻域概率法则通过对比预报与观测场中对应格点邻域内的特征, 考虑预报的不确定性, 从而得到格点的邻域概率值 NP (Neighborhood Probability), 其计算步骤如下:

首先, 为了获得不同降水阈值的二进制降水概率 BP (Binary Probability), 将降水场进行二进制处理, BP 在单个格点的取值仅为 1 或 0。选择一个累积降水阈值 q , 则单个网格点 (i,j) 的 BP 为

$$\text{BP}_{(i,j)} = \begin{cases} 1 & F_{(i,j)} \geq q \\ 0 & F_{(i,j)} < q \end{cases}, \quad (1)$$

其中 $F_{(i,j)}$ 为预报格点的累积降水。

选择适当的邻域范围, 则可以得到中心格点的邻域概率值:

$$\text{NP}_{(i,j)} = \frac{1}{N_b} \sum_{m=1}^{N_b} \text{BP}_{m(i,j)}, \quad (2)$$

其中, N_b 为邻域范围内的格点总数, $\text{BP}_{m(i,j)}$ 为二进制降水概率场, $\text{NP}_{(i,j)}$ 为格点 (i,j) 的邻域降水概率。对于预报场内格点, 给定邻域范围内的格点数相同, 但邻域内的 BP 是与中心格点一一对应的。

图 2 是以 5 倍格距为例的降水等权重邻域概率法计算示意图。图中阴影区域为预报值超过阈值的格点, 邻域范围为 5 倍格距的方形网格框, 邻域内包含了 25 个格点的降水信息, 因此中心格点的邻

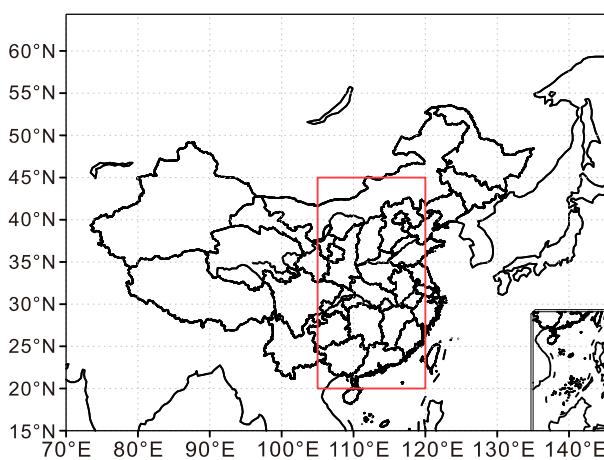


图 1 GRAPES-REPS (Global and Regional Assimilation and Prediction Enhanced System-Regional Ensemble Prediction System) 模拟区域与研究区域 (红框中为研究区域)

Fig. 1 The GRAPES-REPS (Global and Regional Assimilation and Prediction Enhanced System-Regional Ensemble Prediction System) domain and study region (red box represents study region)

+	+	+	+	+
+		+	+	+
+	+	+		+
	+	+	+	+
+	+	+	+	+

图2 邻域概率法计算示意图，以5倍格距为例（阴影为预报降水量超过阈值的格点）

Fig. 2 Schematic diagram of the neighborhood probability method, taking five times the grid length as an example. The forecast precipitation exceeds the accumulation threshold in the shaded boxes

域概率值为36%。

邻域窗通常可以选择圆形或者正方形，经验表明，邻域窗形状的选择对结果几乎没有影响(Ebert, 2009)。方形邻域窗可以和预报模式格点相匹配而且计算相对简便，因此，本文采用正方形邻域窗计算降水邻域概率。

将等权重邻域概率法分别应用于每个集合成员，就可以得到n个邻域概率场。考虑到全体集合成员的邻域概率值，则可以在各成员邻域概率场的基础上生成中心格点的邻域集合概率(Neighborhood Ensemble Probability, NEP)：

$$\text{NEP}_{(i,j)} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \text{NP}_{k(i,j)}, \quad (3)$$

其中，n为集合成员个数， $\text{NP}_{k(i,j)}$ 为中心格点上各集合成员的邻域概率值。

3.2 权重修正邻域方法的设计

作者考虑邻域格点与中心格点的相关性，通过引入气候学中分析大气遥相关现象时使用的一点相关法计算邻域格点与中心格点的相关系数。一点相关法是由Wallace and Gutzler (1981)提出的。该方法首先计算相关系数矩阵R，矩阵的元素为气象要素场中各网格点之间的相关系数。相关系数矩阵R中的每一列 R_i ，是网格点i与气象要素场中所

有网格点的相关系数，将它填成的相关系数分布图，称为以i为基本点的“一点相关图”。

为比较观测降水场与模式预报降水场的相关特征，在处理计算中心格点与邻域范围内各点相关系数的问题上，首先由模式降水预报历史资料计算得到模式降水预报场中每一格点的月平均降水量，由观测降水历史资料计算得到观测降水场中每一格点的月平均降水量；其次利用一点相关法计算观测降水场中心格点与该点所对应模式预报降水场格点邻域范围内各格点的月平均降水量相关系数 $r_{m(i,j)}$ ；而后除去相关系数为非正的格点，只保留与中心格点呈正相关的格点，以此相关系数为各正相关格点所对应的权重系数 $\alpha_{m(i,j)}$ ，即：

$$\alpha_{m(i,j)} = \begin{cases} r_{m(i,j)} & r_{m(i,j)} > 0 \\ 0 & r_{m(i,j)} \leq 0 \end{cases}, \quad (4)$$

将邻域内的二进制概率BP配以不同的权重系数，从而计算出中心格点的权重修正邻域概率值(Weight correction Neighborhood Probability, WNP)：

$$\text{WNP}_{(i,j)} = \frac{\sum_{m=1}^{N_b} \alpha_{m(i,j)} \text{BP}_{m(i,j)}}{\sum_{m=1}^{N_b} \alpha_{m(i,j)}}. \quad (5)$$

与邻域集合概率的计算过程相同，将权重修正邻域方法分别应用于每个集合成员，就可以得到n个权重修正邻域概率场，考虑到全体集合成员的权重修正邻域概率值，则可以在各成员权重修正邻域概率场的基础上生成中心格点的权重修正邻域集合概率(Weight Correction Neighborhood Ensemble Probability, WNEP)：

$$\text{WNEP}_{(i,j)} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \text{WNP}_{k(i,j)}, \quad (6)$$

其中，n为集合成员个数， $\text{WNP}_{k(i,j)}$ 为中心格点上各集合成员的权重修正邻域概率值。

3.3 二分类权重修正邻域方法的设计

与权重修正邻域方法第一步相同，生成观测场中心格点与模式预报场邻域内格点的降水相关系数集后，将与中心格点呈正相关格点的权重系数记为1，呈负相关及不相关格点的权重系数记为0，即：

$$\alpha_{m(i,j)} = \begin{cases} 1 & r_{m(i,j)} > 0 \\ 0 & r_{m(i,j)} \leq 0 \end{cases}, \quad (7)$$

中心格点的二分类权重修正邻域概率(Binary

Weight Correction Neighborhood Probability, BWNP) 的计算公式为

$$\text{BWNP}_{(i,j)} = \frac{\sum_{m=1}^{N_b} \alpha_{m(i,j)} \text{BP}_{m(i,j)}}{\sum_{m=1}^{N_b} \alpha_{m(i,j)}}. \quad (8)$$

同样考虑到全体集合成员的二分类权重修正邻域概率值, 则可以在各成员二分类权重修正邻域概率场的基础上生成中心格点的二分类权重修正邻域集合概率 (Binary Weight Correction Neighborhood Ensemble Probability, BNEP) :

$$\text{BNEP}_{(i,j)} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \text{BWNP}_{k(i,j)}, \quad (9)$$

其中, n 为集合成员个数, $\text{BWNP}_{k(i,j)}$ 为中心格点上各集合成员的二分类权重修正邻域概率值。

二分类邻域权重修正方法除去了邻域内与观测场中心格点呈负相关或不相关的模式预报格点, 并利用正相关格点以等权重生成中心格点的邻域概率值。此方法相当于在等权重邻域概率法中除去邻域内的与中心格点呈负相关或不相关的格点。

3.4 试验设计及检验方法

3.4.1 试验设计

本文选择 ($20^{\circ}\sim45^{\circ}\text{N}$, $105^{\circ}\sim120^{\circ}\text{E}$) 为研究区域, 并设计了四组试验, 分别对 2017 年 5~7 月进行降水阈值为 24 h 累积降水 0.1 mm、10 mm、25 mm 以及 50 mm, 邻域半径为 1 至 10 倍格距的逐日 24 h 降水概率预报独立样本试验, 并将试验结果对比分析。四组方案设计如下:

试验 1 使用单格点概率法计算研究区域内的降水集合预报概率 EP (Ensemble Probability)。试验 2 使用等权重邻域概率法计算研究区域内的降水邻域集合概率。试验 3 和试验 4 分别使用权重修正邻域方案以及二分类权重修正邻域方案得到研究区域内的降水权重修正邻域集合概率。其中, 试验 3 和 4 中使用的相关系数集由以下方法得到, 采用 2015~2016 年 5~9 月的 GRAPES 区域集合预报系统逐日 24 h 降水预报资料以及同期的三源融合逐日 24 h 累积降水格点分析资料, 使用临近格点插值方法, 将观测降水格点分析资料插值到模式预报格点上, 并利用一点相关法计算出所需的观测场与模式预报场邻域格点相关系数集。例如, 图 3 为

北京、南京、武汉和广州邻域半径为 10 个格距的一点相关图, 表示 10 格距模式预报场邻域范围内各格点与观测场中心格点间的相关系数。

3.4.2 检验方法

检验方法选取分数技巧评分 FSS (Fractions Skill Score) (Roberts and Lean, 2008)、AROC 评分 (钟有亮等, 2017)、BS (Brier Score) 评分及其分解项, 对 2017 年 5~7 月逐日 24 h 降水概率预报试验结果进行检验。下面详细介绍 BS 分解项特征。

对于特定的二分类事件, 针对 N 个样本, Murphy (1973) 提出了 BS 评分有指导意义的代数分解:

$$\text{BS} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^K n_i (f_i - o_i)^2 - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^K n_i (o_i - \bar{o})^2 + \bar{o}(1 - \bar{o}), \quad (10)$$

其中, K 为概率区间数目; n_i 为第 i 个概率区间内的样本数; f_i 为第 i 个概率区间的预报概率, o_i 为当预报概率为 f_i 时被检验事件出现的观测频率; \bar{o} 为在总样本中被检验事件出现的观测频率。公式 (10) 右边三项依次为可靠性 REL (reliability)、分辨率 RES (resolution) 和不确定性 (uncertainty)。

第一项是可靠性项, 它衡量预报中预报值与子样本中检验事件的相对频率之间的差异。对于完全可靠的预报, 子样本相对频率恰好等于每个子样本中的预报概率。对于可靠的或者校准良好的预报, 可靠性项将接近于零。

第二项是分辨率项, 反应了预报将事件分为不同相对频率子样本的能力。理想的情况下, 预报将观测值分为相对频率与总样本气候学概率基本不同的子样本, 则分辨率项将是一个大值。

第三项是不确定性, 它仅取决于观测值的变化, 不受预报的影响, 取值范围 $0\sim0.25$ 。

4 结果分析

4.1 分数技巧评分 FSS

图 4 给出了不同阈值下分数技巧评分 FSS 随着邻域半径的变化情况。以 24 h 降水超过 10 mm、105 km 邻域半径为例, 集合概率法的 FSS 值为 0.687, 而等权重邻域集合概率方法、权重修正邻域集合概率方法和二分类权重修正邻域集合概率方法分别为 0.762、0.764 和 0.765。总体上等权重邻域集合概率方法、权重修正邻域集合概率方法和二分类权重修正邻域集合概率方法的 FSS 评分均高于集合概率方法, 这里的集合概率方法仅为参考,

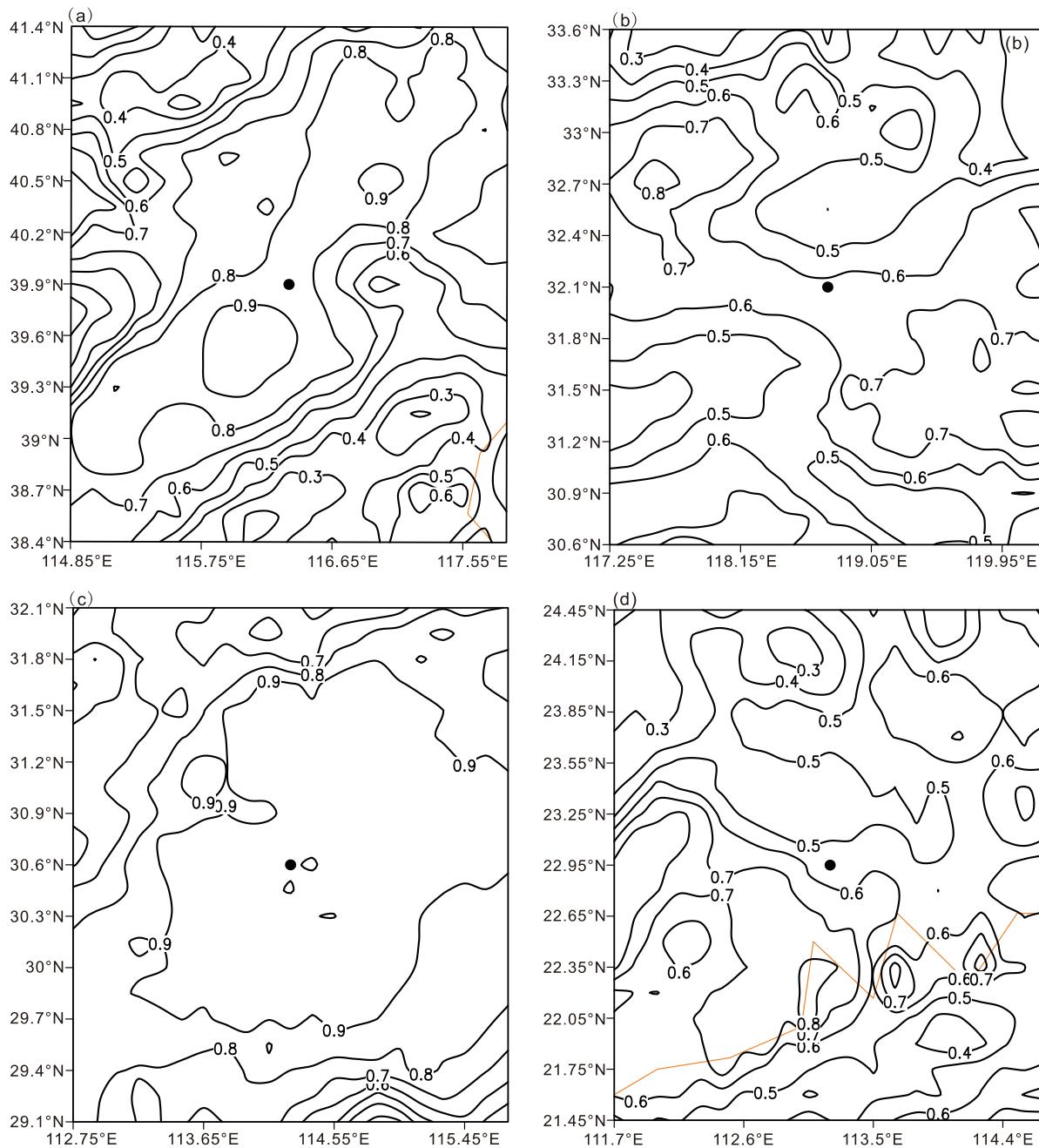


图 3 (a) 北京、(b) 南京、(c) 武汉和 (d) 广州邻域半径为 10 个格距的一点相关图 (图中等值线为区域内各点与中心点相关系数; 红色实线为底图边界)

Fig. 3 One-point correlation maps in the grid box with a radius of 10 times the grid length in (a) Beijing, (b) Nanjing, (c) Wuhan, (d) Guangzhou (The isolines are the correlation coefficient between the center point and each point in study region, the red solid line is the boundary line of the base map)

因为其值不会随着邻域半径的变化而变化。等权重邻域集合概率方法、权重修正邻域集合概率方法和二分类权重修正邻域集合概率方法的 FSS 评分相差不多。由图可见，在四种降水阈值下，FSS 值均随邻域半径的增加呈增大趋势，即空间尺度越大，概率预报技巧越优，但 FSS 评分仅比较邻域内预

报和观测发生频率，空间尺度的合理选择还应该结合其他评分综合评定。

4.2 相对作用特征曲线面积 (AROC) 评分

图 5 为不同阈值下四种方案 24 h 累积降水概率的 AROC 评分随邻域半径的变化。以 24 h 降水量超过 10 mm、邻域半径 15 km 和 105 km 为例，

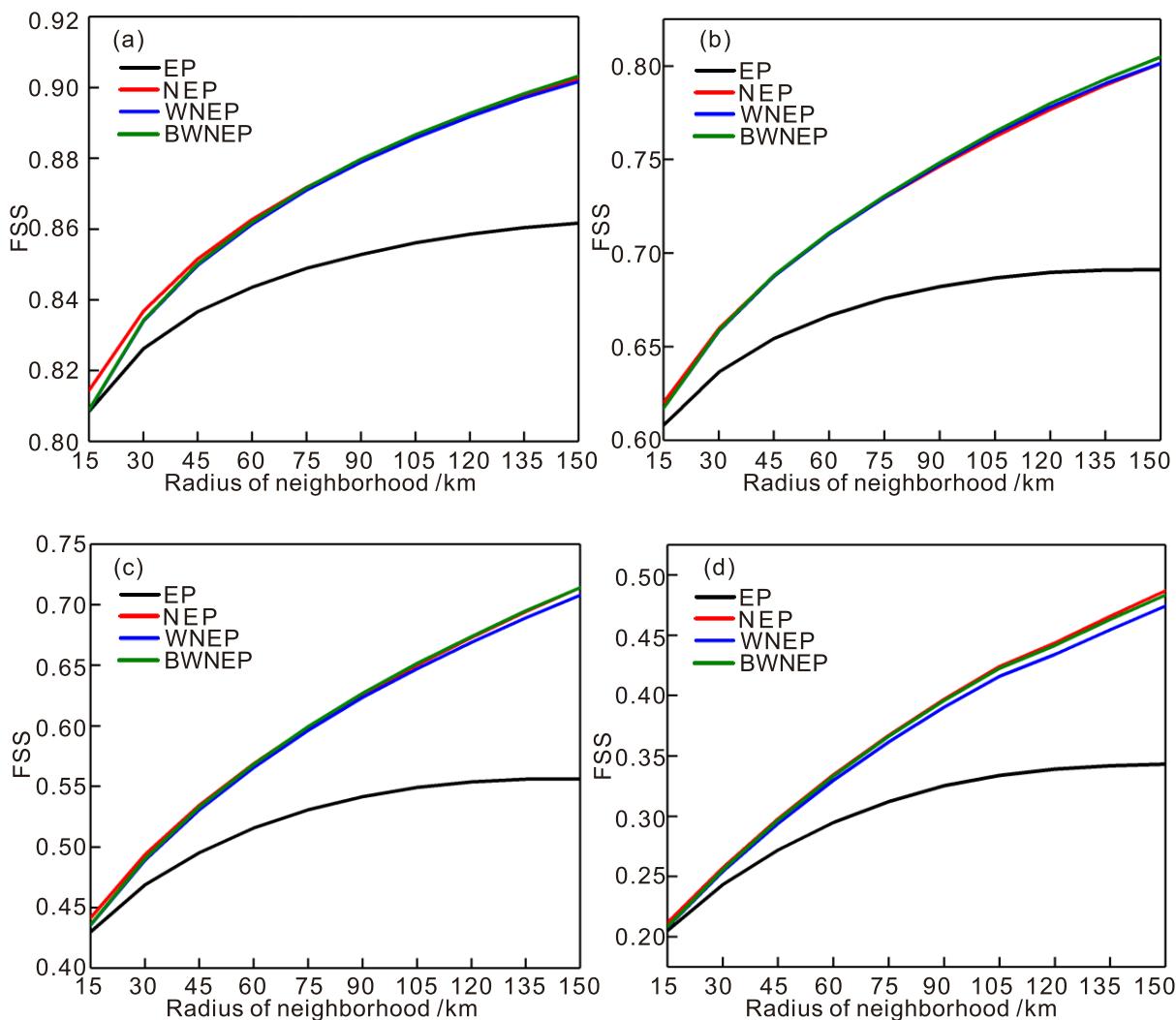


图 4 24 h 累积降水超过 (a) 0.1 mm、(b) 10.0 mm、(c) 25.0 mm、(d) 50.0 mm 概率预报的 FSS (Fractions Skill Score) 评分随邻域半径的变化。黑线、红线、蓝线和绿线分别代表集合概率法 (EP)、等权重邻域集合概率法 (NEP)、权重修正邻域集合概率法 (WNEP) 和二分类权重修正邻域集合概率法 (BWNEP)

Fig. 4 The FSS (Fractions Skill Score) of the probability forecast that 24-hour accumulated precipitation exceeds (a) 0.1 mm, (b) 10.0 mm, (c) 25.0 mm, (d) 50.0 mm vs the radius of neighborhood. The black, red, blue, and green lines indicate EP (Ensemble Probability), NEP (Neighborhood Ensemble Probability), WNEP (Weight Correction Neighborhood Ensemble Probability), and BWNEP (Binary Weight Correction Neighborhood Ensemble Probability) methods, respectively

集合概率的 AROC 值为 0.826, 而等权重邻域集合概率方法、权重修正邻域集合概率方法和二分类权重修正邻域集合概率方法, 在邻域半径为 15 km 时分别为 0.830、0.821 和 0.822, 在邻域半径为 105 km 时分别为 0.847、0.846 和 0.847。可以看出, 当邻域半径为 15 km 时, 四种阈值下两种权重修正后方案的 AROC 评分均小于集合概率法的评分, 而对于 24 h 降水量大于 0.1 mm、10 mm 及 25 mm 的降水事件等权重邻域概率法的评分仍然高于单格点概率法评分。当邻域半径增加至 30 km 以后, 等权重邻域集

合概率方法、权重修正邻域集合概率方法和二分类权重修正邻域集合概率方法的评分均高于集合概率, 即邻域方案的预报技巧更好。这可能是由于三种邻域方案都是基于升尺度原理进行, 较小的邻域半径会使空报率增加, 使评分降低。对于各降水量级, 二分类权重修正邻域集合概率法与等权重邻域集合概率法的评分差距随着邻域范围的增加而减小。从空间尺度来看, 随着邻域半径的增加, 等权重邻域集合概率方法、权重修正邻域集合概率方法和二分类权重修正邻域集合概率方法的评分也逐渐

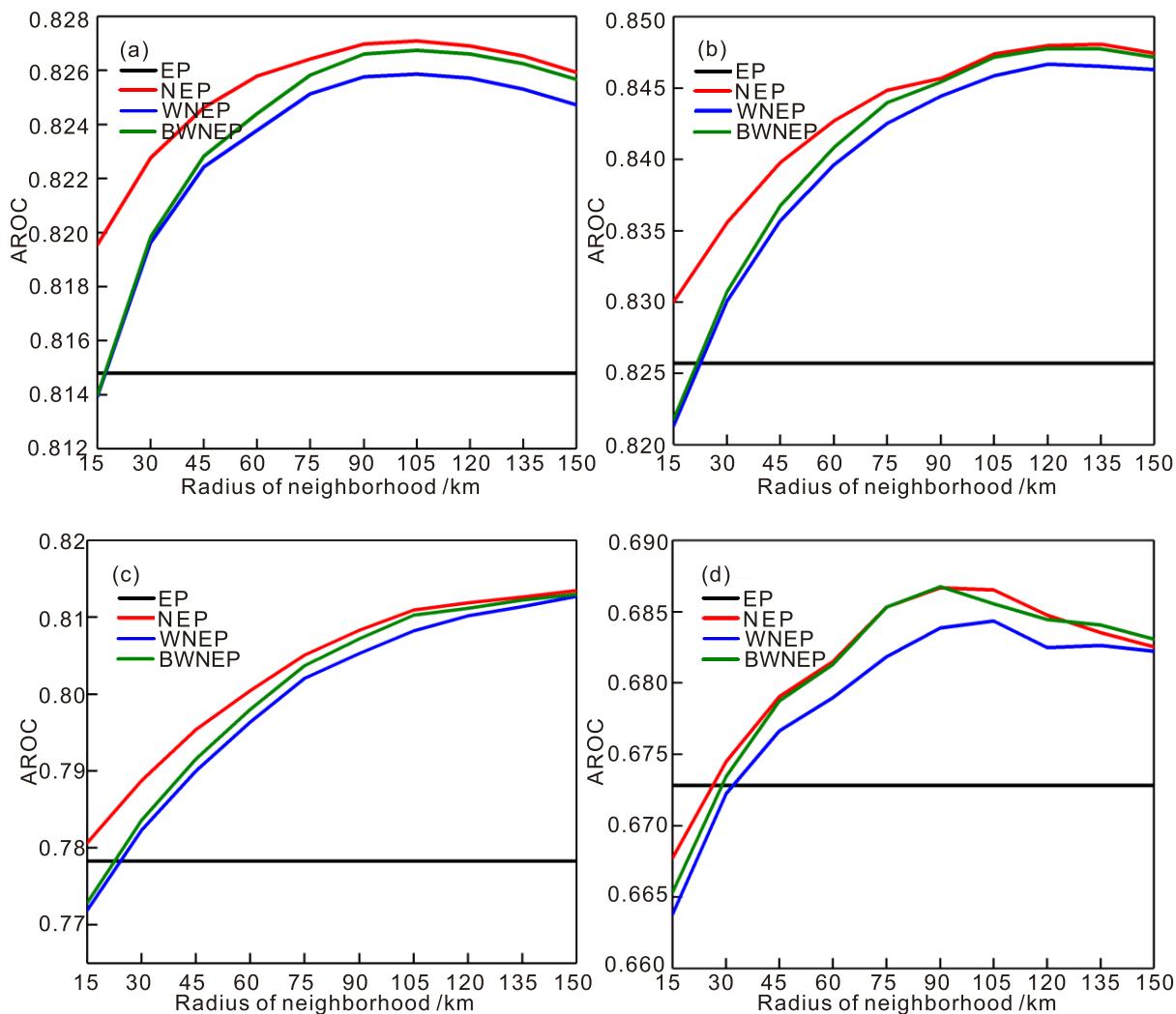


图 5 同图 4, 但为相对作用特征曲线面积 (AROC)

Fig. 5 Same as Fig. 4, but for the relative operating characteristic area (AROC)

增加, 但当邻域半径达到某一空间尺度以后, 评分开始降低或增长缓慢, 不同邻域方案在不同降水阈值条件下的最优空间尺度各不相同, 例如 24 h 降水量大于 50 mm 时等权重邻域集合概率法和二分类权重修正邻域集合概率法评分在邻域半径为 90 km 时取得极大值, 而权重修正邻域集合概率法的评分在邻域半径为 105 km 时取得极大值。可见, AROC 评分的最优空间尺度范围在 90~120 km。

4.3 Brier Score (BS) 评分及 BS 分解项

4.3.1 BS 评分

图 6 给出了不同阈值下四种方案 24 h 累积降水概率的 BS 评分随邻域半径的变化情况。以 24 h 降水量超过 10 mm、105 km 邻域半径为例, 集合概率法的 BS 值为 0.082, 而等权重邻域集合概率方法、权重修正邻域集合概率方法和二分类权重修

正邻域集合概率方法分别为 0.072、0.071 和 0.071。对于四种降水阈值而言, 等权重邻域集合概率方法、权重修正邻域集合概率方法和二分类权重修正邻域集合概率方法的 BS 评分均小于集合概率法, 即采用了邻域方案的概率预报比集合概率预报理想。等权重邻域集合概率方法、权重修正邻域集合概率方法和二分类权重修正邻域集合概率方法在不同降水阈值条件下表现各不相同: 当 24 h 降水量超过 0.1 mm 时三种方案相差不多; 超过 10 mm 时权重修正邻域集合概率和二分类权重修正邻域集合概率评分相当且均小于等权重邻域集合概率法; 超过 25 mm 和 50 mm 时, 二分类权重修正邻域集合概率法和等权重邻域集合概率法相差不多且均小于权重修正邻域集合概率法。从空间尺度看, 随着邻域半径的增加, 等权重邻域集合概率方法、权重修

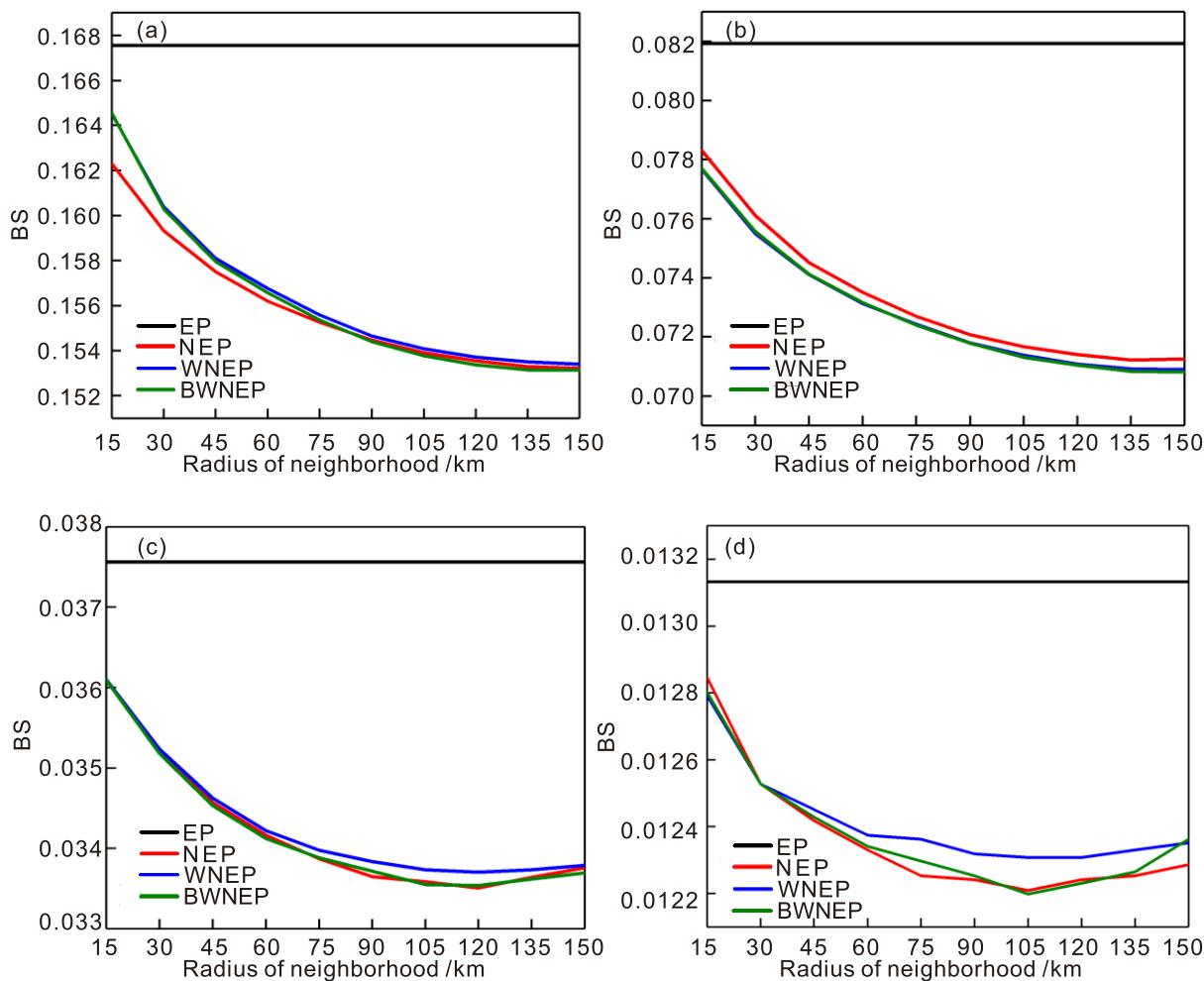


图 6 同图 4, 但为 BS 评分

Fig. 6 Same as Fig. 4, but for Brier Score (BS)

正邻域集合概率方法和二分类权重修正邻域集合概率方法的评分也逐渐减小, 但当邻域半径达到某一空间尺度以后, 评分开始增大或减小缓慢。由图可见, 24 h 降水量超过 0.1 mm 和 10 mm 降水事件的 BS 评分随着邻域半径的增加而减小, 并在 105 km 处减小速度缓慢; 对于 24 h 降水量超过 25 mm 和 50 mm 降水事件的 BS 评分分别在邻域半径为 120 km 和 105 km 处取极小值。

4.3.2 BS 分解第一项可靠性 (REL)

图 7 为不同阈值下四种方案 24 h 累积降水概率的可靠性 REL 随邻域半径的变化情况。以 24 h 降水量超过 10 mm、105 km 邻域半径为例, 集合概率法的 REL 值为 0.014, 而等权重邻域集合概率方法、权重修正邻域集合概率方法和二分类权重修正邻域集合概率方法分别为 0.009、0.008 和 0.008。在四种降水阈值下, 采用邻域思想的三种

方法的 REL 均小于集合概率法, 即采用了邻域方案的概率预报, 预报值与子样本的相对频率之间的差更小, 较集合概率法具有较高的可靠性。对于 24 h 降水量超过 0.1 mm、10 mm 以及空间尺度大于 60 km 时降水量大于 25 mm 的降水事件, 权重修正邻域集合概率法的可靠性较高, 如在 24 h 降水量超过 0.1 mm 且邻域半径为 90 km 时, 权重修正邻域集合概率法的 REL 为 0.0139, 而集合概率法、等权重邻域集合概率法和二分类权重修正邻域集合概率法分别为 0.0210、0.0146 和 0.0142; 暴雨以上量级, 二分类权重修正邻域集合概率法更优。在试验的十个空间尺度内, 24 h 降水量超过 0.1 mm、10 mm 的 REL 评分随着邻域半径的增加而减小, 并在邻域半径增至 105 km 时 REL 评分减小缓慢, 而 24 h 降水量超过 25 mm、50 mm 时各方案的最优空间尺度范围分别在 90~120 km 和 75~105 km。

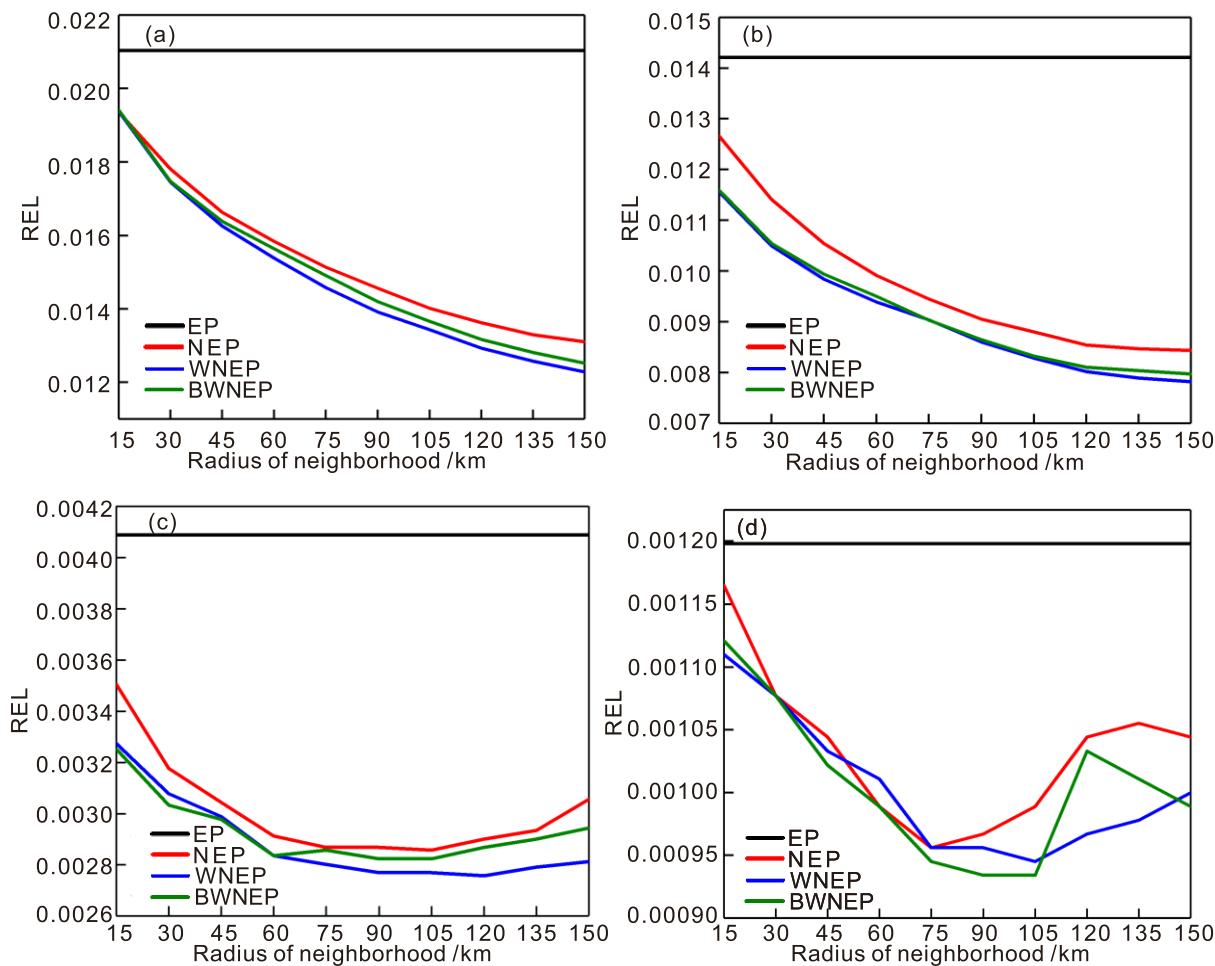


图 7 同图 4, 但为 BS 分解的可靠性项 (REL, Reliability)

Fig. 7 Same as Fig. 4, but for REL (Reliability)—The first term of BS decomposition

4.3.3 BS 分解第二项分辨率 (RES)

由图 8 可以看出, 以 24 h 降水量超过 10 mm、105 km 邻域半径为例, 集合概率法的 RES 值为 0.033, 而等权重邻域集合概率方法、权重修正邻域集合概率方法和二分类权重修正邻域集合概率方法均为 0.038。在四种降水阈值下, 采用邻域思想的三种方法的 RES 均高于集合概率法, 邻域方案将降水分成不同相对频率子样本的能力更高, 较集合概率法具有更高的事件分辨率。当 24 h 降水量超过 0.1 mm 或 50 mm 时, 等权重邻域集合概率法的 RES 高于权重修正邻域集合概率法以及二分类权重修正邻域集合概率法; 当 24 h 降水量超过 10 mm 或 25 mm 时的 RES 项, 二分类权重修正邻域集合概率法与等权重邻域集合概率法相差不多。各降水阈值下每种方案 RES 均随邻域半径增加而增大, 达到某一邻域半径后开始减小, 各方案取得极大值的邻域半径范围为 75 km 至 120 km。例如当 24 h

降水量超过 50 mm 时, 等权重邻域集合概率法和二分类权重修正邻域集合概率法的评分在邻域半径为 90 km 取得极大值, 而权重修正邻域集合概率法在邻域半径为 75 km 时取得极大值。

4.4 典型降水个例分析

本文选择“5.7”广州暴雨进行个例试验分析, 对此次降水过程分别采用四种方案进行 24 h 累积降水不同阈值的概率预报试验, 本文分析以 24 h 降水量大于 25 mm 为例。

图 9 为 2017 年 5 月 6 日 12 时 (协调世界时, 下同) 至 5 月 7 日 12 时的实况降水分布和 24 h 降水量大于 25 mm 的二进制概率分布图、集合概率分布图、采用等权重邻域集合概率方法、权重修正邻域集合概率方法和二分类权重修正邻域集合概率方法在邻域半径为 30 km、90 km 和 120 km 时的概率预报分布图。对比降水实况以及二进制概率分布图, 四种方案预报结果均基本能够给出降水落区

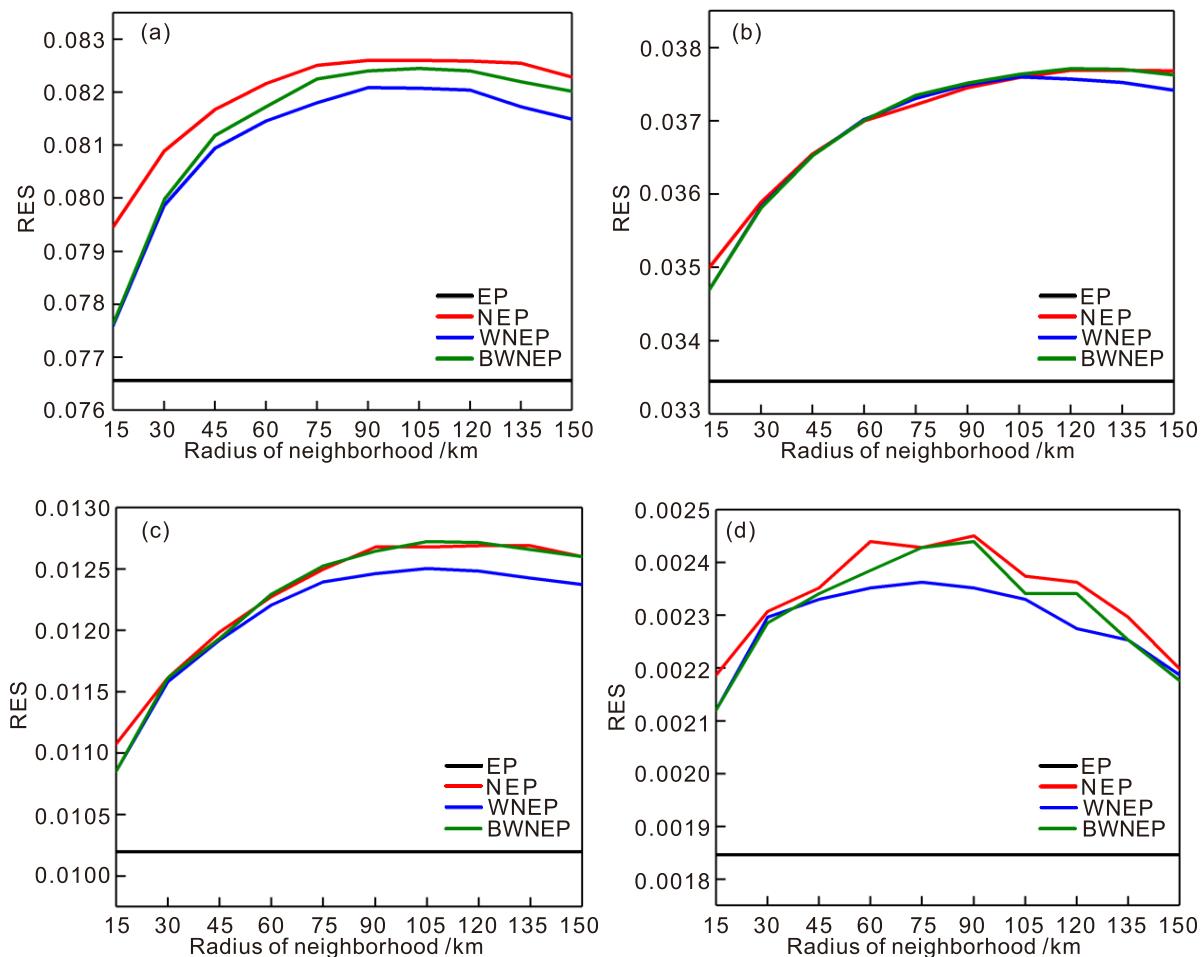


图 8 同图 4, 但为 BS 分解的分辨率项 (RES, Resolution)

Fig. 8 Same as Fig. 4, but for RES (Resolution)—The second term of BS decomposition.

的信息, 三种邻域方案的概率分布较集合概率分布图边缘平滑。使用了邻域概念的三种方案都减少了单格点概率法在主落区以外的部分空报信息, 例如降水实况表明 (27°N , 107°E) 附近区域没有发生大雨以上量级的降水, 集合概率分布图上表明此区域 24 h 降水量超过 25 mm 的概率为 5%~15%, 而邻域半径为 30 km 时等权重邻域集合概率方法、权重修正邻域集合概率方法和二分类权重修正邻域集合概率方法的概率分布图均显示在此区域 24 h 降水量超过 25 mm 的概率为 0。

由图可以看出, 随着邻域半径的增加, 等权重邻域集合概率方法、权重修正邻域集合概率方法和二分类权重修正邻域集合概率方法的概率分布都逐渐平滑, 且概率数值逐渐减小。这是由于随着邻域半径的增加、影响范围的扩大, 包含了更多格点信息, 而这些格点中有累积降水量小于降水阈值的格点。因此, 概率值随邻域半径变化是增加还是减

少, 与原始预报降水分布有关, 权重修正邻域集合概率法和二分类权重修正邻域集合概率法中, 概率值也与所增加的格点的权重有关。然而, 在大多数情况下, 随着邻域半径的增加清晰度会下降, 使概率值减小且分布逐渐平滑 (Roberts and Lean, 2008), 因此应选择合适的邻域半径使得概率预报的结果更加合理。对比发现, 当邻域半径增加至 90 km 时, 等权重邻域集合概率法和二分类权重修正邻域集合概率法的高概率中心值下降至 35%~40%, 而权重修正邻域集合概率法的高概率中心值为 40%~45%, 即随着邻域半径的增加, 权重修正邻域集合概率较等权重邻域集合概率以及二分类权重修正邻域集合概率减小速度慢。当邻域半径大于 90 km 时, 降水概率较小, 但概率中心仍然对降水预报有一定指示作用。由于等权重邻域集合概率方法、权重修正邻域集合概率方法和二分类权重修正邻域集合概率方法的概率预报依赖于原始降水预

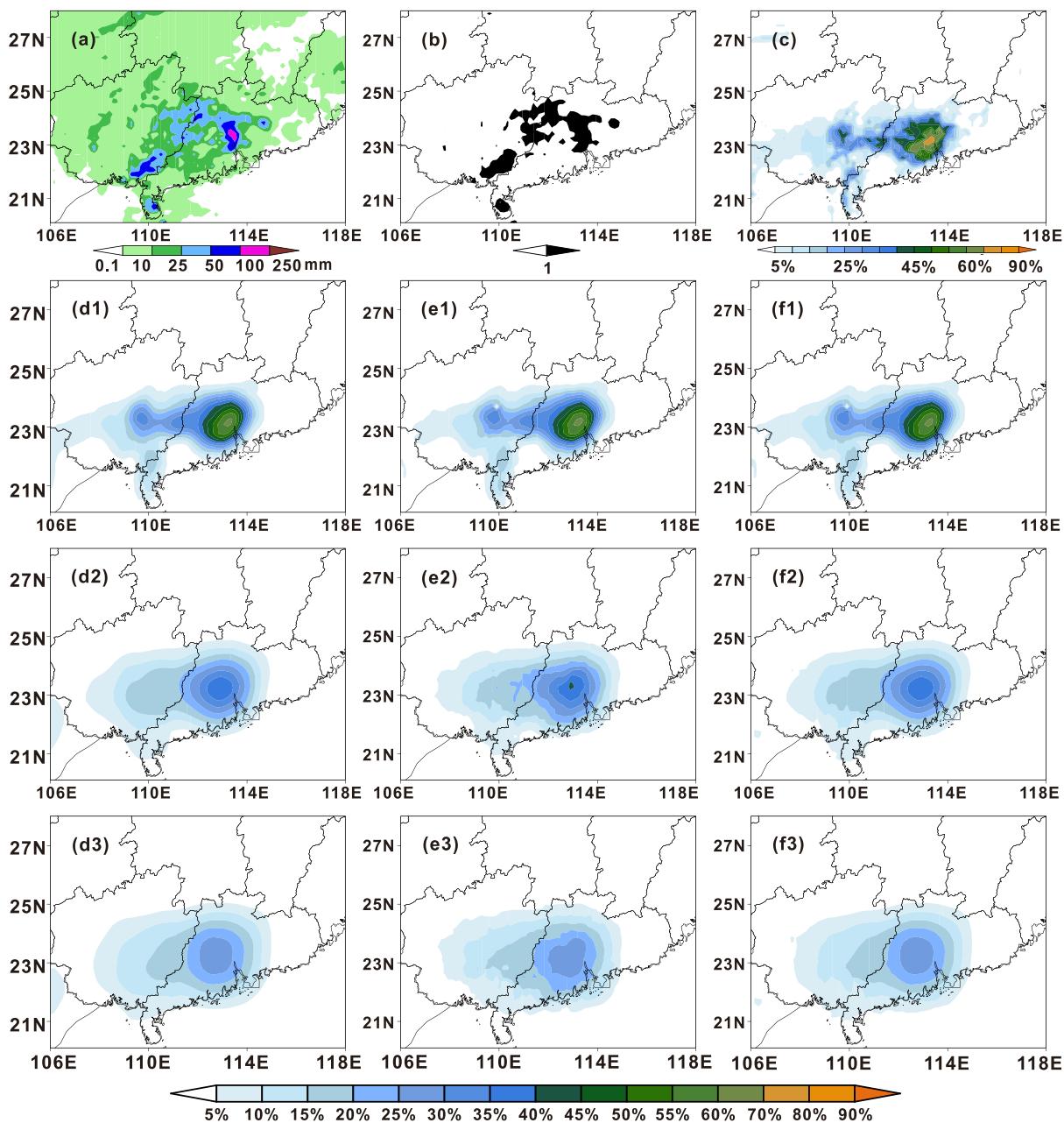


图9 2017年5月6日12时至5月7日12时的(a)24 h累积降水量(阴影,单位:mm),24 h降水量超过25 mm的(b)二进制概率分布、(c)集合概率分布、(d1-d3)等权重邻域集合概率、(e1-e3)权重修正邻域集合概率及(f1-f3)二分类权重修正邻域集合概率的分布(阴影)。邻域半径依次为(d1, e1, f1)30 km、(d2, e2, f2)90 km、(d3, e3, f3)120 km

Fig. 9 (a) The 24-h accumulated precipitation (shadow, units: mm), when the accumulated precipitation exceeds 25 mm in 24 hours, the probability distributions (shadow) of (b) BP (binary probability), (c) EP (ensemble probability), (d1–d3) NEP (equal weight neighborhood ensemble probability), (e1–e3) WNEP (weight correction neighborhood ensemble probability), and (f1–f3) BWNEP (binary weight correction neighborhood ensemble probability) from 1200 UTC 6 to 1200 UTC 7 May 2017. The neighborhood radii in turn are (d1, e1, f1) 30 km, (d2, e2, f2) 90 km, and (d3, e3, f3) 120 km.

报场,同时两种权重修正方案的概率预报值也与邻域内格点权重有关,因此选择合适的邻域半径以及邻域内格点权重系数,可以得到更加合理的概率预报结果。但需要注意的是,对一些强降水中心,邻

域概率计算结果较单格点集合概率值更为平滑(如图9中的广西东南部和雷州半岛的强降雨中心),因此,将邻域概率计算方法应用于强降水概率预报时,需要进行更多的研究。

5 结论与讨论

本文将权重系数引入到邻域概率法中,设计了权重修正邻域方案以及二分类权重修正邻域方案。使用 GRAPES 区域集合预报 2017 年 5~7 月逐日 24 h 累积降水量资料,进行了集合概率法、等权重邻域集合概率法、权重修正邻域集合概率法以及二分类权重修正邻域集合概率法的降水概率预报试验和邻域半径为 1 至 10 个格距的邻域尺度降水概率预报敏感性试验,并采用 AROC 评分、BS 评分及其分解项以及分数技巧评分对试验结果进行检验评估,得出如下结论:

(1) 考察四种试验方案在 24 h 降水量超过 0.1 mm、10 mm、25 mm 以及 50 mm 的概率预报综合预报效果,尽管采用邻域计算方案的三种邻域集合概率方法的降水概率预报评分各有优劣,如等权重邻域集合概率法的 AROC 评分略优,而权重修正邻域集合概率法和二分类权重修正邻域集合概率法的降水概率预报可靠性更高,但采用了邻域计算方案的降水概率预报评分均优于传统的集合概率方法。

(2) 通过对不同邻域半径的试验可以看出,无论是两种进行了权重修正的邻域集合概率法还是等权重邻域概率法,均对邻域尺度很敏感。并非邻域半径越大概率预报效果越好。不同邻域方案在不同降水阈值下的最优邻域尺度略有不同,从各项统计评分综合来看,邻域半径在 5~8 倍模式水平格距时,三种邻域集合概率方法的评分最优。选择恰当的邻域方案以及邻域半径可以得到更加合理的概率预报结果。

(3) 多种评分结果综合来看,在最优邻域半径内,引入了权重概念的邻域方案在 24 h 降水量超过 10 mm 时较等权重邻域概率法略有改进,能够提供更加客观的概率预报结果。

(4) 个例试验可以看出,权重修正邻域集合概率分布平滑度低于等权重邻域集合概率和二分类权重修正邻域集合概率。等权重邻域概率法、权重修正邻域集合概率法以及二分类权重修正邻域集合概率法能够提供一些预报不确定信息,但其生成的概率场与原始预报降水场有很强的相关性。随着邻域半径的增加,降水概率场逐渐平滑,且概率值逐渐减小。

将权重系数引入到邻域概率计算中,考虑了邻

域格点与中心格点降水的相关性,能够提高概率预报的可靠性。然而除本文设计的两种权重修正方案外,是否还有改进效果更好的权重系数选择方法,以及若同时考虑时间不确定性是否会产预报效果更好的概率预报等问题仍需进一步研究。此外,将邻域概率计算方法应用于强降水概率预报时,需要进行更多的研究。

参考文献 (References)

- Azadi M, Zakeri Z. 2010. Probabilistic precipitation forecasting using a deterministic model output over Iran [J]. *Research Journal of Environmental Sciences*, 4(2): 138–148. doi:10.3923/rjes.2010.138.148
- Bouallègue Z B, Theis S E, Gebhardt C. 2013. Enhancing COSMO-DE ensemble forecasts by inexpensive techniques [J]. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(1): 49–59. doi:10.1127/0941-2948
- Bouallègue Z B, Theis S E. 2015. Spatial techniques applied to precipitation ensemble forecasts: from verification results to probabilistic products [J]. *Meteorological Applications*, 21(4): 922–929. doi:10.1002/met.1435
- Buizza R, Houtekamer P L, Pellerin G, et al. 2005. A comparison of the ECMWF, MSC, and NCEP global ensemble prediction systems [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 133(5): 1076–1097. doi:10.1175/MWR2905.1
- 陈静,薛纪善,颜宏. 2003. 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 Jing, Xue Jishan, Yan Hong. 2003. The impact of physics parameterization schemes on mesoscale heavy rainfall simulation [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 61(2): 203–218. doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2003.02.006
- 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 Jing, Xue Jishan, and Yan Hong. 2005. A new initial perturbation method of ensemble mesoscale heavy rain prediction [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 29(5): 717–726. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2005.05.05
- 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 [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 139(5): 1410–1418. doi:10.1175/2010MWR3624.1
- 杜钧,李俊. 2014. 集合预报方法在暴雨研究和预报中的应用 [J]. *气象科技进展*, 4(5): 6–20. Du Jun, Li Jun. 2014. Application of ensemble methodology to heavy-rain research and prediction [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology (in Chinese)*, 4(5): 6–20. doi:10.3969/j.issn.2095-1973.2014.05.001
- Ebert E E. 2009. Neighborhood verification: A strategy for rewarding close forecasts [J]. *Weather and Forecasting*, 24(6): 1498–1510. doi:10.1175/2009WAF222251.1
- 韩焱红,矫梅燕,陈静,等. 2013. 基于贝叶斯理论的集合降水概率预报方法研究 [J]. *气象*, 39(1): 1–10. Han Yanhong, Jiao Meiyuan, Chen Jing, et al. 2013. Study on the method of rainfall ensemble probability forecast based on Bayesian theory and its preliminary experiments [J]. *Meteor. Mon. (in Chinese)*, 39(1): 1–10. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2013.01.001

- 矫梅燕. 2010. 天气业务的现代化发展 [J]. *气象*, 36(7): 1–4. Jiao Meiyian. 2010. Modernization process of weather forecast [J]. *Meteor. Mon. (in Chinese)*, 36(7): 1–4. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2010.7.002
- Johnson A, Wang Xuguang. 2012. Verification and calibration of neighborhood and object-based probabilistic precipitation forecasts from a multimodel convection-allowing ensemble [J]. *Monthly Weather Review*, 140(9): 3054–3077. doi:10.1175/mwr-d-11-00356.1
- Chakraborty A, Krishnamurti T N. 2009. Improving global model precipitation forecasts over India using downscaling and the FSU superensemble. Part II: Seasonal climate [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 137(9): 2736–2757. doi:10.1175/2009mwr2736.1
- Krishnamurti T N, Kishtawal C M, Zhang Z, et al. 2000. Multimodel ensemble forecasts for weather and seasonal climate [J]. *Journal of Climate*, 13(23): 4196–4216. doi:10.1175/1520-0442(2000)013<4196:MEFFWA>2.0.CO;2
- 李俊, 杜钧, 陈超君. 2014. 降水偏差订正的频率(或面积)匹配方法介绍和分析 [J]. *气象*, 40(5): 580–588. Li Jun, Du Jun, Chen Chaojun. 2014. Introduction and analysis to frequency or area matching method applied to precipitation forecast bias correction [J]. *Meteor. Mon. (in Chinese)*, 40(5): 580–588. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2014.05.008
- 李泽椿, 毕宝贵, 朱彤, 等. 2004. 近30年中国天气预报业务 [J]. *气象*, 30(012): 4–10. Li Zechun, Bi Baogui, Zhu Tong, et al. 2004. Advance in operational weather forecast in China [J]. *Meteor. Mon. (in Chinese)*, 30(012): 4–10. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2004.12.002
- 林良勋. 2001. 集合预报系统及其产品应用综述 [J]. *广东气象*, 23(2): 44–46. Lin Liangxun. 2001. Ensemble forecast and application of products [J]. *Guangdong Meteorology (in Chinese)*, 23(2): 44–46. doi:10.3969/j.issn.1007-6190.2001.02.018
- 毛恒青, 陈谊, 陈德辉. 2002. 中期集合数值预报产品的业务应用 [J]. *应用气象学报*, 13(1): 56–61. Mao Hengqing, Chen Yi, Chen Dehai. 2002. The operational application of the SHENWEI medium-range ensemble prediction products [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 13(1): 56–61. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2002.01.006
- Murphy A H. 1973. A new vector partition of the probability score [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 12: 595–600. doi:10.1175/1520-0450(1973)012.0.CO;2
- 潘旸, 沈艳, 宇婧婧, 等. 2015. 基于贝叶斯融合方法的高分辨率地面—卫星—雷达三源降水融合试验 [J]. *气象学报*, 73(1): 177–186. Pan Yang, Shen Yan, Yu Jingjing, et al. 2015. An experiment of high-resolution gauge-radar-satellite combined precipitation retrieval based on the Bayesian merging method [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 73(1): 177–186. doi:10.11676/qxb2015.010
- Roberts N M, Lean H W. 2008. Scale-selective verification of rainfall accumulations from high-resolution forecasts of convective events [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 136(1): 78–97. doi:10.1175/2007MWR2123.1
- 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 [J]. *Weather and Forecasting*, 25(1): 263–280. doi:10.1175/2009waf2222267.1
- Sloughter J M, Raftery A E, Gneiting T, et al. 2007. Probabilistic quantitative precipitation forecasting using Bayesian model averaging [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 135(9): 3209–3220. doi:10.1175/mwr3441.1
- Theis S E, Hense A, Damrat U. 2005. Probabilistic precipitation forecasts from a deterministic model: A pragmatic approach [J]. *Meteorological Applications*, 12(3): 257–268. doi:10.1017/S1350482705001763
- 王海霞, 智协飞. 2015. 基于TIGGE多模式降水量预报的统计降尺度研究 [J]. *气象科学*, 35(4): 430–437. Wang Haixia, Zhi Xiefei. 2015. Statistical downscaling research of precipitation forecast based on TIGGE multimodel ensemble [J]. *Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese)*, 35(4): 430–437. doi:10.3969/2014jms.0058
- 王婧卓, 陈静, 庄照荣, 等. 2018. GRAPES区域集合预报模式的初值扰动增长特征 [J]. *大气科学*, 42(2): 367–382. Wang Jingzhuo, Chen Jing, Zhuang Zhaorong, et al. 2018. Characteristics of initial perturbation growth rate in the regional ensemble prediction system of GRAPES [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 42(2): 367–382. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1708.17141
- Wallace J M, Gutzler D S. 1981. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 109(4): 784–812. doi:10.1175/1520-0493(1981)109<0784:titghf>2.0.co;2
- Wilby R L, Wigley T M L. 1997. Downscaling general circulation model output: A review of methods and limitations [J]. *Progress in Physical Geography*, 21(4): 530–548. doi:10.1177/030913339702100403
- 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 Yue, Li Xiaoli, Chen Jing, et al. 2016. Stochastic parameterization toward model uncertainty for the GRAPES mesoscale ensemble prediction system [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 42(10): 1161–1175. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2016.10.001
- 张涵斌, 陈静, 智协飞, 等. 2014. 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 Hanbin, Chen Jing, Zhi Xiefei, et al. 2014. Design and comparison of perturbation schemes for GRAPES_Meso based ensemble forecast [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 37(3): 276–284. doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2014.03.003
- 钟有亮, 陈静, 王静, 等. 2017. GRAPES区域集合预报系统对登陆台风预报的检验评估 [J]. *热带气象学报*, 33(6): 953–964. Zhong Youliang, Chen Jing, Wang Jing, et al. 2017. Evaluation of the forecast for landed typhoons by GRAPES-REPS regional ensemble prediction system [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 33(6): 953–964. doi:10.16032/j.issn.1004-4965.2017.06.016
- 周迪, 陈静, 陈朝平, 等. 2015. 暴雨集合预报—观测概率匹配订正法在四川盆地的应用研究 [J]. *暴雨灾害*, 34(2): 97–104. Zhou Di, Chen Jing, Chen Chaoping, et al. 2015. Application research on heavy rainfall calibration based on ensemble forecast vs. observed precipitation probability matching method in the Sichuan basin [J]. *Torrential Rain and Disasters (in Chinese)*, 34(2): 97–104. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2015.02.001