



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2017.06.003

杜雅玲, 陆桂华, 吴志勇, 等. 基于 TIGGE 数据的中期降水预报在江苏省的应用效果评估[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(6): 17-25, 44. DU Y L, LU G H, WU Z Y, et al. Assessment of TIGGE medium term precipitation forecast in Jiangsu Province[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(6): 17-25, 44. (in Chinese)

# 基于 TIGGE 数据的中期降水预报在江苏省的应用效果评估

杜雅玲<sup>1,2</sup>, 陆桂华<sup>1,2</sup>, 吴志勇<sup>1,2</sup>, 何海<sup>1,2</sup>

(1. 河海大学 水文水资源学院, 南京 210098; 2. 河海大学 水问题研究所, 南京 210098)

**摘要:** 预见期长达 14 d 的中期降水预报对于旱涝预测与水资源调度管理等具有重要意义, 全球多模式集合预报 (TIGGE) 资料为区域中期降水预报提供了新基础。基于 2008–2013 年江苏省实测降水数据, 采用 TS、BS 评分、平均偏差和均方根误差等评估指标, 重点评估了 CMA、CMC、ECMWF、JMA 和 NCEP 这五个 TIGGE 代表模式在江苏省的中期预报效果。结果表明: 整个预见期内各模式对于中小雨的预报评分都较高, 小雨的 TS 评分值最高多在 0.5 左右, 中雨以上等级降水存在较明显的漏报。预见期长达 15 d 的日累积降水量预报只存在 3 d 的衰减期, 之后各项误差指标值能维持稳定, 3 d 以上预见期的误差主要为预报值偏大。同时, 5 d 以上累积降水量预报也较实际偏大, 且冬季预报效果最好夏季最差, 苏北地区好于苏南地区。就各代表模式而言, ECMWF 与 JMA 模式分别在降水分级预报和日累积降水量预报中表现最好。

**关键词:** TIGGE; 中期降水预报; TS 与 BS 评分; 降水量级; 江苏省

**中图分类号:** P333; P459 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2017)06-0017-09

## Assessment of TIGGE medium term precipitation forecast in Jiangsu Province

DU Yaling<sup>1,2</sup>, LU Guihua<sup>1,2</sup>, WU Zhiyong<sup>1,2</sup>, HE Hai<sup>1,2</sup>

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Research Institute of Water Problems, Research Academy of Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** The 14-day medium range precipitation forecast is important for drought and flood forecasting and water resources scheduling management. TIGGE (THORPEX Interactive Grand Global Ensemble) provides basic data for regional medium range ensemble precipitation prediction. Based on the ensemble forecasts of CMA, CMC, ECMWF, JMA and NCEP in the TIGGE datasets in Jiangsu Province, we evaluated their medium range precipitation forecast results. We mainly used such evaluation methods as the TS, BS, mean absolute deviation, and mean square root error. The results showed that the forecast scores of light and moderate rain during the entire forecast period were all relatively high. The light rain had the highest TS (mostly around 0.5) statistically. However, there were obvious missing reports of precipitations above the moderate level. For the 15-day forecast of daily cumulative rainfall, there was only a 3-day decay period, after which all the error indicators remained stable. The prediction bias in a lead time of over 3 days was mainly overprediction. Meanwhile, the cumulative rainfall forecast of over 5 days was significantly larger than the actual value. The forecast effect was the best in winter and the worst in summer, and the effect in northern Jiangsu was better than that in southern Jiangsu. Across the five representative modes, the ECMWF and JMA modes respectively showed the best performance in rainfall categorical forecast and daily cumulative rainfall forecast.

**Key words:** TIGGE; medium term precipitation; TS and BS score; precipitation level; Jiangsu Province

收稿日期: 2017-03-23 修回日期: 2017-08-20 网络出版时间: 2017-11-14

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20171114.1742.003.html>

基金项目: 国家自然科学基金(51579065); 水利部公益性行业科研专项经费项目(201301040; 201301070); 全国优秀博士学位论文作者专项资金资助项目(201161); 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-12-0842)

Funds: National Natural Science Foundation of China (51579065); Special Fund for Public Welfare Research of Ministry of Water Resources (201301040; 201301070); A Foundation for the Author of National Excellent Doctoral Dissertation of PR China (201161); Program for New Century Excellent Talents in University of Ministry of Education (NCET-12-0842)

作者简介: 杜雅玲(1991-), 女, 湖北人, 主要从事水文水资源方面研究。E-mail: 277820708@qq.com

通讯作者: 陆桂华(1962-), 男, 浙江东阳人, 教授, 博士生导师, 主要从事水文水资源方面研究。E-mail: lugh@hhu.edu.cn

中期降水预报时效长, 可靠性高, 是天气预报中的重要环节之一<sup>[1]</sup>。1~14 d 内的日降水预报可输入到水文模型中实行洪水预警、应用到水库预报实时调度增加防洪和发电调度的预见期以及结合流域土壤的初始状态进行中长期径流预测, 减少预报径流的不确定性; 多日累积降水预报可以应用到干旱预警为抗灾赢得更多防御时间, 保障生命安全、减少财产损失<sup>[2,3]</sup>, 亦可为水资源的调配和安全保障提供决策支持。在较长预见期内实现高预报精度是中期降水预报的主要目标, 但由于天气过程本身的随机性以及混沌性, 随着预报时效的延长, 不确定性越大, 中期预报的精度难以保证。采用集合预报技术代替单一的确定性预报, 能够较好的改善中期降水预报结果。

20 世纪 90 年代以来, 集合预报技术在许多国家气象中心相继投入业务使用。THORPEX 交互式全球预报大集合(简称 TIGGE) 项目的实施, 将全球各国的集合预报产品集中起来, 形成超级集合预报系统, 以提高 1~14 d 预报时效上的预报精度<sup>[4,5]</sup>。随后, 比较各中心的预报效果和如何充分利用各中心的集合预报资料提高预报准确率成为各国气象部门的研究热点<sup>[6]</sup>。多模式集合预报技术就是一个充分利用各中心模式预报结果以减小模式系统性偏差的有效途径, 一些研究表明集合多个预报模式的多模式预报结果较单一预报模式更具技巧<sup>[7,8]</sup>。在多模式集合预报的实际应用中, 如何赋予每个预报中心合理的权重系数是提高预报精度的关键。而在考虑如何分配各模式不同权重之前, 先行评估各模式的预报能力是有益的。

目前对 TIGGE 预报结果的评估已取得一定的进展, 针对不同方面进行评估, 其结果并不相同, 就某一模式而言, 总能找到该模式的优点<sup>[9,10]</sup>。近年来一些研究主要侧重于 TIGGE 逐日降水预报的应用, 关于 TIGGE 中期降水预报性能的研究并不多, 而 TIGGE 对江苏省的预报效果目前未见报道, 江苏省作为东亚季风区南北气候过渡地区、海陆交接特殊地区, 评估多模式的预报效果, 分析结果差异的原因, 对于改进中期预报具有重要参考意义。故本文选用 CMA、CMC、ECMWF、JMA 和 NCEP 这五个中心在江苏省 2008–2013 年的降水预报产品, 利用中国地面降水日值  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  格点数据集(V2.0) 进行验证, 评估这五个中心在 1~14 d 预见期内对降水量级、日降水量及多日累积降水的预报效果。对 TIGGE 各模式的中期降水预报效果进行区域性评估, 对后期进行误差订正以及多模式集成从而提高

江苏省中期降水预报精度具有一定的参考价值。

## 1 研究区域、数据和方法

### 1.1 研究区域

江苏省位于  $116^\circ 18' - 121^\circ 57' E$ ,  $30^\circ 45' - 35^\circ 20' N$  之间, 面积 10 72 万  $km^2$ , 共 13 个地级市: 南京市、苏州市、无锡市、常州市、淮安市、南通市、宿迁市、徐州市、连云港市、扬州市、镇江市、泰州市、盐城市(图 1)。在气候上, 江苏省属于东亚季风区, 又属亚热带和暖温带的过渡区, 以淮河、苏北灌溉总渠一线为界, 以北属暖温带湿润、半湿润季风气候, 以南属亚热带湿润季风气候。全省年平均气温为  $13 \sim 16^\circ C$ , 江苏省年降水量为 724~1 210 mm。由于受季风气候影响, 降水季节分配不均匀, 夏季多, 冬季少, 且地区差异明显, 东部多于西部, 南部多于北部。受海陆分布、大气环流、季风降水的共同影响, 江苏省是我国典型的旱涝灾害频发区, 提高中期降水预报精度, 发挥集合预报优势, 预测及抵抗气象灾害对于江苏省的发展显得尤为重要。



图 1 江苏省行政区

Fig. 1 Administrative divisions of Jiangsu Province

### 1.2 数据及其处理

本文所用资料为 TIGGE 资料下五个模式的降水数据和地面降水日值  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  格点数据集(V2.0), 具体的资料情况见表 1。

表 1 预报与实测资料的基本信息

数据类型	CMA	CMC	ECMWF	JMA	NCEP	实测
预见期	240 h	384 h	360 h	216 h	384 h	24 h
起报时间	12: 00(世界时间)					8: 00 (北京时间)
预报步长	6 h					24 h
资料长度	2008 年 1 月 1 日 - 2013 年 12 月 31 日					
区域范围	江苏省区域: 北纬 $30^\circ 00' - 36^\circ 00'$ , 东经 $116^\circ 00' - 122^\circ 00'$					
空间分辨率	$0.5^\circ \times 0.5^\circ$					

(1) 预报资料。目前 WMO 设立了三个 TIGGE 资料中心,即中国气象局(CMA)、欧洲中期天气预报中心(ECMWF)和美国国家大气研究中心(NCEP),这3个中心收集来自全球十多个主要预报中心的集合预报产品,预报时效达到10~16 d。本文应用的 TIGGE 数据来自于 ECMWF(欧洲中心)的 CMA(中国)、CMC(加拿大)、ECMWF(欧洲)、JMA(日本)和 NCEP(美国)这五个模式,各模式的集合预报产品均已提前处理成集合平均结果。

(2) 实测资料。实测降水数据来自国家气象信息中心气象资料室建立的中国地面降水日值  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  格点数据集(V2.0)。该套数据集基于我国 2474 个国家级地面气象站日降水量观测数据,利用薄盘样条法和 GTOPO30 数据(分辨率为  $30'' \times 30''$ )重采样生成,尽可能地消除了高程因素对降水空间插值结果的影响。质量评估结果表明:格点数据较气象站点实测数据之间普遍偏小,且偏差主要集中在  $-20\% \sim 10\%$  之间,占总数的 85.26;二者之间的相关系数普遍较高,大多区域均在 0.80 以上。因此该套数据集可以用于我国南方地区降水格局的研究。但夏季插值误差高于冬季,东南地区误差普遍高于其他地区<sup>[14]</sup>。

对比两种不同类型的数据,须将其统一到同一时间和空间尺度上,因此需要对 TIGGE 和地面数据进行预处理。具体处理方法为:空间上 TIGGE 与实测资料均统一成  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  网格,并将江苏省 13 个省辖市的网格降水量提取出来,再通过面积加权法求出各省辖市的预报及实测的面平均降水量,然后基于各省辖市的面雨量利用不同检验指标进行评估,江苏省的评估结果为 13 个省辖市的平均。由于实测 24 h 累积降水资料的起始时间为北京时间 8 时,而 TIGGE 资料预报起始时间为世界时间 12 时,因此选取与实测时间对应的前一天 12~36 h 的预报降水量作为日降水预报在第 1 天预见期的降水量, $> 36 \sim 60$  h 的降水量为第 2 天预见期的降水量,依次类推;5 d、9 d 及 14 d 的累积降水预报值分别为前一天 12~132 h、12~228 h 及 12~348 h 的累积降水量。CMA 和 JMA 模式预见期最长为 240 h 和 216 h,因此 9 d 累积降水预报未考虑 JMA 模式,14 d 未考虑 CMA 及 JMA 模式。

### 1.3 评估方法

本文旨在对 CMA、CMC、ECMWF、JMA、NCEP 这五类 TIGGE 预报模式在江苏省的整体预报效果作出评估,包括降水分级预报以及不同累积时段降水量预报效果的检验。

1~14 d 的日降水预报可以延长洪水预警、水库实时调度以及径流预报等的预见期,提高预报要素的可利用性。而大气的混沌特性使得数值模式对初值误差具有高度的敏感性,即虽然初值的误差很小,预报误差也会随着积分时间的增长而大幅度增长<sup>[12-13]</sup>。分析误差随预见期的变化情况可以反映 TIGGE 日降水预报在江苏省的应用效果;比较不同模式在 1~14 d 预见期内对于降水分级预报及日累积降水量预报的结果差异,为后期通过降水订正、多模式集合等手段改进中期降水预报提供一定的参考。

水资源调配与干旱预警等问题更关注某一段时间内天气要素的累积变化,如干旱前期 5~15 d 的总降水量,而并不关注具体某一天的雨量。对 5 d 以上累积降水量的预报效果分季节分区域进行评估,揭示不同 TIGGE 模式对于较长累积时段降水的可预报性,对后期针对不同季节不同区域改进 TIGGE 各模式对于多日累积降水的预报效果有一定的帮助,进而为江苏省水资源调配及干旱预警等重大问题提供决策基础。

采用的检验方法分别针对降水分级预报和降水量预报。参照中国气象局 TS 技巧评分中雨量等级的划分标准,将 24 h 降水量划分为  $0.1 \sim 10.0$  mm(小雨)、 $> 10.0 \sim 25.0$  mm(中雨)、 $> 25.0 \sim 50.0$  mm(大雨)、 $> 50.0 \sim 100.0$  mm(暴雨)。对于 24 h 降水,检验不同模式在 1~14 d 预见期内的预报效果。对于多日累积降水量,先将 2008~2013 年的数据分季节处理,来揭示不同季节不同累积时段各模式的预报差异,然后对比苏南苏北代表省辖市的预报误差来揭示各预报模式的地域性差异。

#### 1.3.1 降水量级预报检验指标

利用 TS 评分(临界成功指数)、BS 评分(预报偏差)、PO(漏报率)及 ETS 评分(技巧评分)<sup>[14-18]</sup> 这四个评估指标来检验不同模式在降水分级预报中的表现。

$$TS_i = \frac{\sum_N N a_i}{\sum_N N a_i + \sum_N N b_i + \sum_N N c_i} \quad (1)$$

$$BS_i = \frac{\sum_N N a_i - \sum_N N b_i}{\sum_N N a_i + \sum_N N c_i} \quad (2)$$

$$PO_i = \frac{\sum_N N c_i}{\sum_N N a_i + \sum_N N b_i + \sum_N N c_i} \quad (3)$$

$$ETS_i = \frac{\sum_N N a_i - e_i}{\sum_N N a_i + \sum_N N b_i + \sum_N N c_i - e_i} \quad (4)$$

$$e_i = \frac{\sum_N P_i \times \sum_O i}{N}$$

式中:  $i$  代表不同降水量级;  $N$  为总预报天数;  $\sum_N N a_i$ 、 $\sum_N N b_i$ 、 $\sum_N N c_i$  分别为  $i$  级降水预报正确、空报及漏报的总天数。TS 评分表征正确预报占总预报天数的百分比, 主要用于评估预报事件相对观测事件的一致性程度, 其分数范围为 0~1, 0 表示无预报技巧, 1 为完美评分; 预报偏差 BS 反映预报相对实测的偏离程度, BS 评分大于 1 代表预报的范围过大, 反之偏小, 越接近 1 说明预报效果越好; 漏报率 PO 进一步揭示 TIGGE 模式预报偏小的程度, 其值越大说明漏报越严重; ETS 技巧评分是对 TS 评分方法的改进, 其理想评分是 1, 取值范围是 -1/3~1, 0 表示没有技巧。一般而言, 该评分低于 TS 评分, 降水较多地区 ETS 评分会显著低于 TS 评分。

### 1.3.2 降水量预报检验指标

利用检验雨量预报误差的常用指标: 均方根误差(RMSE)、平均绝对偏差(Bias)、预报偏小率( $S_l$ )、预报偏小误差( $X_l$ )、预报偏大率( $S_g$ )及预报偏大误差( $X_g$ )<sup>[19-20]</sup>来评估降水量预报效果。

$$Bias = \frac{\sum_{t=1}^N (F_t - O_t)}{N} \quad (5)$$

$$RMSE = \left[ \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (F_t - O_t)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$$S_g = \frac{N_g}{N} \quad X_g = \frac{\sum_{t=1}^{N_g} X_{gt}}{N_g} \quad (7)$$

$$S_l = \frac{N_l}{N} \quad X_l = \frac{\sum_{t=1}^{N_l} X_{lt}}{N_l} \quad (8)$$

式中:  $F_t$  和  $O_t$  分别为第  $t$  天的预报降水和实测降水;  $N$  为预报天数;  $X_{gt}$  为第  $t$  天降水偏大的误差;  $X_{lt}$  为第  $t$  天降水偏小的误差。若  $F_t > O_t$  则预报偏大,  $X_{gt} = F_t - O_t$ ,  $N_g$  为  $N$  天降水预报中偏大的总天数; 反之若  $F_t < O_t$  则预报偏小,  $X_{lt} = F_t - O_t$ ,  $N_l$  为  $N$  天降水预报中偏小的总天数。平均绝对偏差 Bias 反映预报序列偏离实测的程度; 均方根误差 RMSE 反映预报场和实况场差别的平均大小; 预报偏小率( $S_l$ )与偏小误差( $X_l$ )、预报偏大率( $S_g$ )与偏大误差( $X_g$ )分别反应出降水系列预报值相对实测值的平均偏小和偏大程度。

## 2 结果与讨论

以 2008-2013 年江苏省实测网格降水数据作为参照, 对 CMA、CMC、ECMWF、JMA 以及 NCEP 五类 TIGGE 预报模式在江苏省的中期降水预报效果进行基本的检验和评估。主要包括: (1) 日降水分

级预报与日累积降水量预报效果检验; (2) 多日累积降水量预报评估。以下检验指标计算值均为 2008-2013 年的平均结果。

### 2.1 日累积降水预报效果评估

#### 2.1.1 日降水分级预报

分析 TIGGE 五个预报模式对于江苏省 2008-2013 年不同降水量级的预报结果, 预见期为 1~14 d, 采用 TS 评分(临界成功指数)、BS 评分(预报偏差)、PO(漏报率)及 ETS 评分(技巧评分)这四个评估指标。由各等级降水的 TS 评分结果图(如图 2)可知, 小雨的 TS 评分值大多在 0.4~0.6 之间, 中雨在 0.2~0.4 之间, 说明各预报模式对于中小雨的探测能力均较高, 但随着降水量级的增加, 模式预报能力也逐渐下降, 如暴雨的 TS 评分值多在 0.1 左右; 随着预见期的延长, 各模式对不同降水量级的预报能力也有所降低, 中雨以上降水量级随预报时效增加而衰减显著, 小雨较稳定, 如 ECMWF 模式的小雨 TS 评分在 14 d 内从 0.58 下降到 0.50, 只降低了 0.08 左右, 而中雨的 TS 评分从 0.33 下降到 0.14, 大雨从 0.29 到 0.06, 暴雨的 TS 评分值较不稳定, 但总体趋势还是下降。

将模式之间进行对比, 可发现只有在小雨预报时差异性较显著, ECMWF 模式的预报效果最好, TS 值最高为 0.62, BS 评分值达到了 0.92, 其次为 JMA、NCEP、CMA、CMC, ECMWF 在第 14 d 的 TS 评分比 CMC 第 1 d 的还高。对于中雨以上降水量级各模式预报效果相当, 总体而言 ECMWF 与 JMA 模式好于另外三个模式。ETS 技巧评分值普遍小于 TS 评分值, 但也可以得出与 TS 一致的结论。从预报偏差 BS 评分以及漏报率 PO 来看, 各模式对不同降水量级的预报都普遍偏小, 存在较严重的漏报现象, 且随着预见期的延长以及降水量级的升高漏报现象越严重, 说明预报较实测一致性偏小是引起降水量级预报偏差的主要原因。

#### 2.1.2 不同省辖市日降水分级预报

选取 12~36 h 预报时效(其他预报时效结果类似, 不一一赘述)的江苏省 13 个省辖市面雨量的 TS、BS 评分结果作分布图(如图 3), 分析各模式在不同省辖市对不同量级降水的预报情况。由图易知, 各模式在 13 个省辖市对于中小雨的预报均较好, 无明显差异, 而大雨以上量级各省辖市表现出较大差异。对于大雨预报, CMA 模式在无锡、苏州、淮安和连云港的 TS 评分分别为: 0.19、0.20、0.31 和 0.29, 均高于其他模式; CMC 模式在扬州、徐州

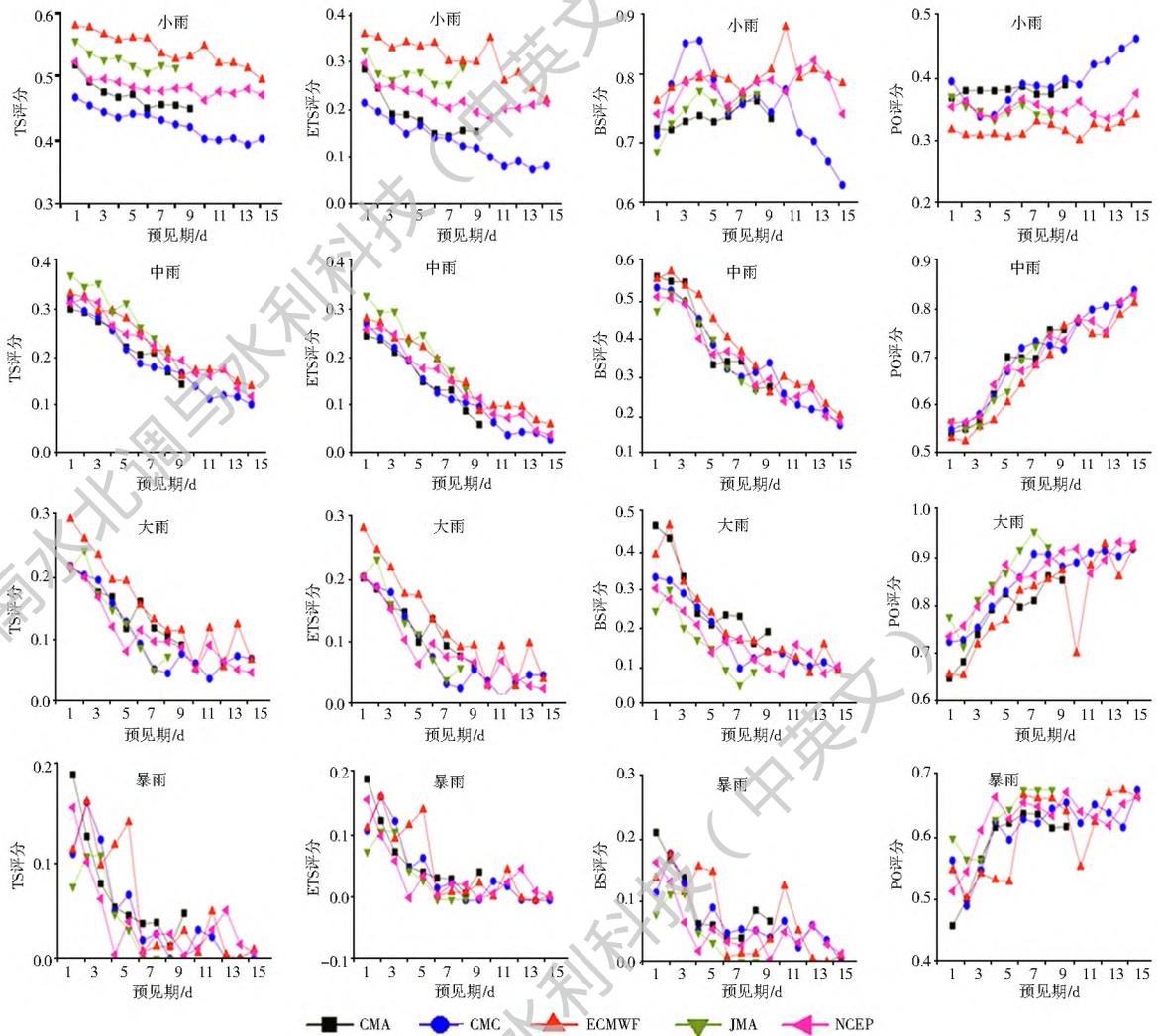


图2 1~14 d 预见期内的降水分级预报评分结果

Fig. 2 The scores of the 1~14 day lead time forecasts of different precipitation levels

和宿迁表现最好, TS 评分分别为: 0.25、0.30 和 0.18; ECMWF 在盐城、泰州、镇江、南京和常州表现最好, TS 评分分别为 0.24、0.29、0.12、0.29 和

0.23; NCEP 在南通的 TS 评分为 0.19 高于其他模式。对于暴雨预报, 五个模式在各省辖市均无良好表现。

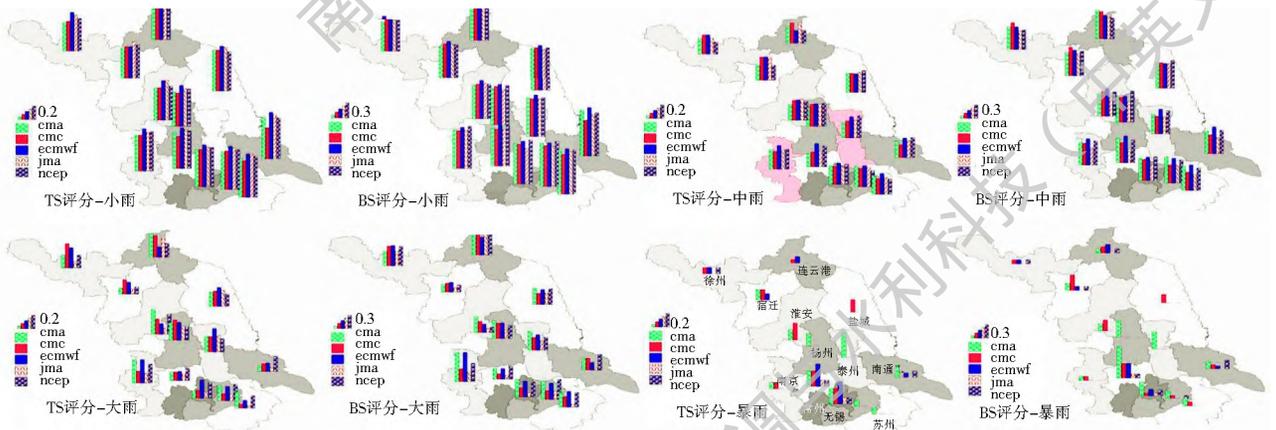


图3 12~36 h 累积降水在江苏省 13 个省辖市的平均 TS、BS 分布

Fig. 3 The TS and BS scores of the 12~36 h cumulative precipitation forecasts in 13 cities of Jiangsu Province

### 2.1.3 日累积降水量预报

除降水量级预报效果评估外, 对于 24 h 降水量的预报进行整体评估也很有必要。针对 1~14 d 预

见期, 计算了 CMA、CMC、ECMWF、JMA 以及 NCEP 这五个模式在江苏省 2008-2013 年日累积降水量的预报偏大率( $S_g$ )、预报偏小率( $S_l$ )、预报偏

大误差 ( $X_g$ )、预报偏小误差 ( $X_l$ )、均方根误差 ( $RMSE$ ) 以及平均绝对偏差 ( $Bias$ ) 相当。

从图 4 中预报偏小率 ( $S_l$ ) 与预报偏大率 ( $S_g$ ) 随预见期的变化可见, 预报值偏大率变化范围为 0.3~0.6, 偏小率变化范围为 0.3~0.5, 前 3 d 偏大率与偏小率持平, 之后除 CMC 外其他模式偏大率增长较快, 偏小率较稳定甚至稍微有所降低, 说明与降水量级预报显著偏小不同, 降水量同时存在偏大和偏小现象, 且 3 d 之后的预报误差主要来自预报偏大。各模式的偏大率与偏小率存在差异, 由  $S_g$  变化图可知 ECMWF 模式除在 7~9 d 天预见期内偏大率小于 CMA 外, 其他预见期偏大率均高于其他四种模式; CMC 模式在 1~14 d 预见期内偏大率均低于其他模式; CMA、JMA 和 NCEP 三种模式偏大率

从  $Bias$ 、 $RMSE$ 、 $X_g$  以及  $X_l$  这四个误差指标随预见期的变化可知, 前 3 d 是各模式预报误差主要增长期, 之后 4~14 d 预见期内较稳定无明显增长。第 1 d 的预报效果较好, JMA 与 CMC 模式的平均绝对偏差甚至接近于 0, 1~3 d 预见期内的预报偏大误差、预报偏小误差、平均绝对偏差以及均方根误差的变化范围分别为 3~8 mm、-2.5~5.0 mm、-0.5~2.5 mm 及 4~12 mm, 除 JMA 模式各项误差值最小而 CMA 最大外其他模式预报误差相差不大, 说明 TIGGE 数据对于日降水量的预报效果较好, 且只存在 3 d 的衰减期之后效果稳定。需要注意的是, 整个预见期内各模式的预报偏大误差均大于偏小误差, 后者预报质量高于前者。

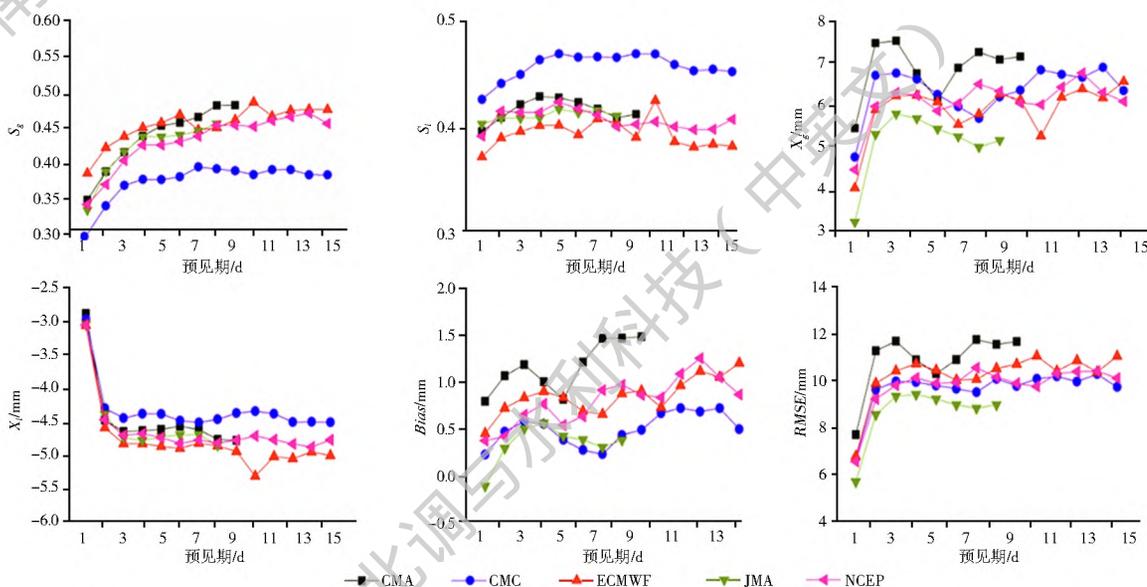


图 4 1~14 d 预见期内降水量预报检验结果

Fig. 4 The verification results of the 1-14 day lead time precipitation forecasts

## 2.2 多日累积降水预报效果评估

### 2.2.1 不同季节多日累积降水预报

选取 5 d、9 d、14 d 的累积降水量进行中期降水评估, 由于 5 d 以上累积降水量预报一致偏大, 因此只选用均方根误差 ( $RMSE$ )、平均绝对偏差 ( $Bias$ )、预报偏大率 ( $S_g$ ) 以及预报偏大误差 ( $X_g$ ) 作为评估指标, 并分不同季节揭示 TIGGE 资料在江苏省不同省辖市的预报情况。由于各省辖市预报结果的季节性差异类似, 只选取宿迁、南京作为苏北、苏南地区代表, 分析其多日累积降水预报结果 (如图 5、图 6 所示)。

预报偏大率  $S_g$  接近 1 表明 5 d 以上累积降水量预报误差主要由于预报偏大引起。对比不同季节评估结果, 秋季的平均绝对偏差小于其他季节, 冬季

的均方根误差、预报偏大率以及预报偏大误差均最小, 而夏季的各项误差均明显大于其他季节。以宿迁为例, 各模式在冬季对于 5 d、9 d 及 14 d 累积降水预报的均方根误差以及平均偏大误差值分别小于 10 mm、20 mm 及 30 mm, 是夏季预报的 1/5 左右, 南京市也可以得到类似结论。冬季预报效果最好而夏季最差可能与冬季多小雨夏季多大到暴雨, 而各模式对于小雨的预报效果好于大暴雨有关。

对比不同模式的偏大率  $S_g$ , 发现与上文日降水量预报结果一致, 整体而言, CMC 模式预报偏大次数少于其它模式, NCEP 其次, ECMWF 模式预报偏大次数最多, 且随着累积时段的增加差异性越显著。对比平均绝对偏差、均方根误差以及预报偏大误差的分析结果, 对于 5 d 以上累积降水, 各模式预报效果整体上并无较明显的优劣, 但存在较显著的季节

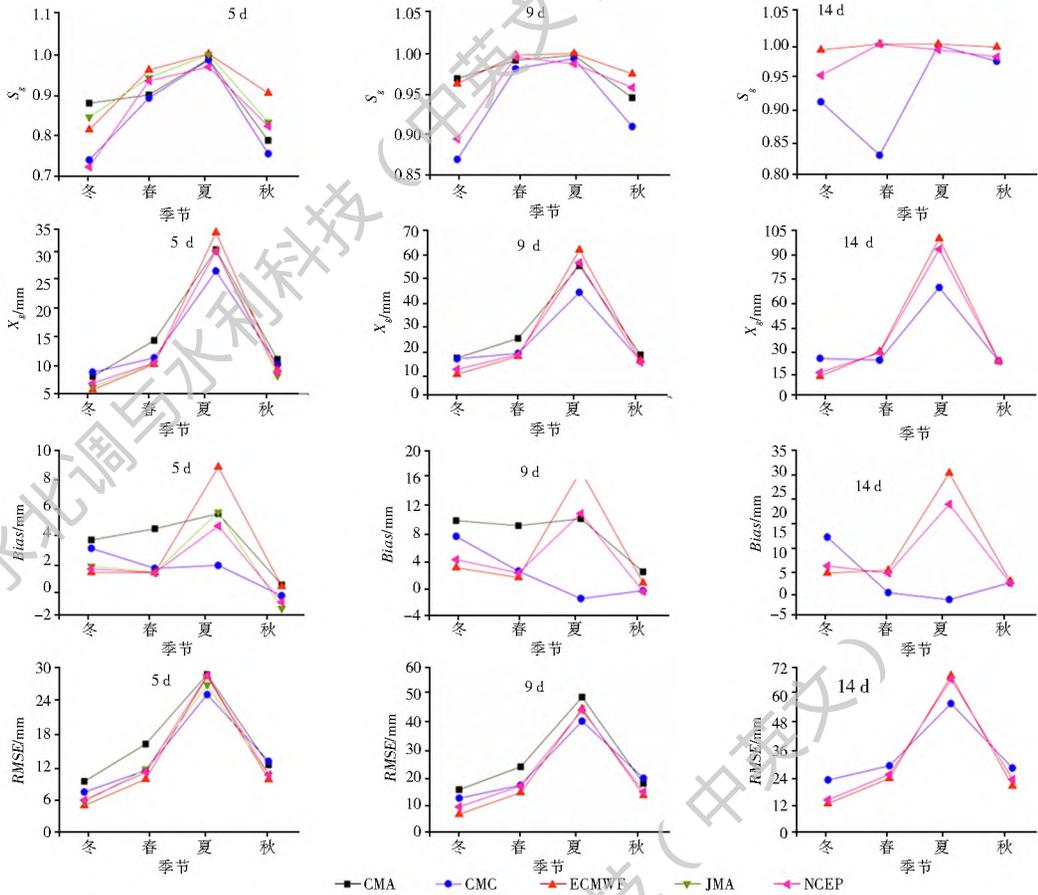


图 5 宿迁市不同累积时段不同季节降水预报检验结果

Fig. 5 The verification results of forecasts for different periods in different seasons in Suqian

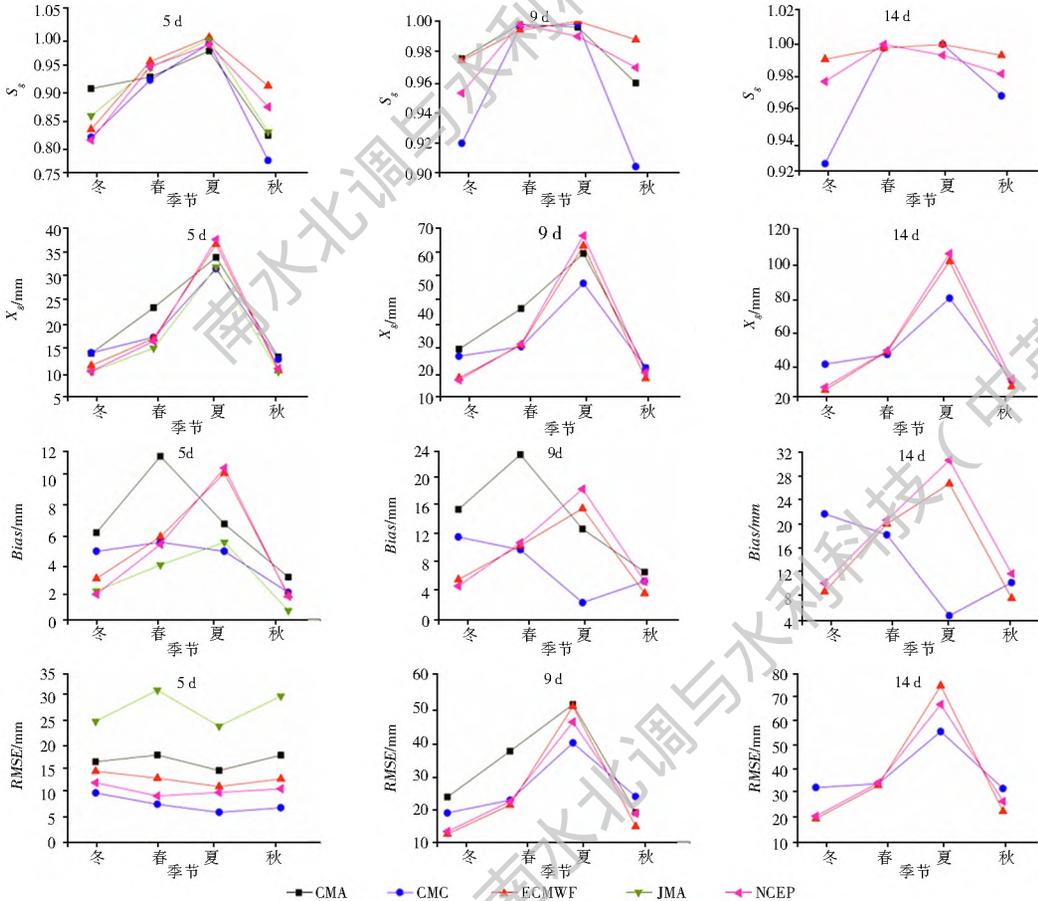


图 6 南京市不同累积时段不同季节降水预报检验结果

Fig. 6 The verification results of forecasts for different periods in different seasons in Nanjing

差异性,即 ECMWF 在夏季表现最差,在冬季最好; CMC 模式在冬季表现较差,仅次于 CMA 模式,在夏季表现最好。这是由于 ECMWF 模式预报小雨的能力最强,CMC 模式最弱,而冬季多小雨夏季多暴雨的原因。另外,随着累积时段的增加,模式预报误差明显增大。

### 2.2.2 不同地区多日累积降水预报

分析江苏省 13 个省辖市的多日累积降水预报结果,发现苏南地区与苏北具有一致性差异,故将南京市与宿迁市作为代表,对其 2008–2013 年的平均预报误差作对比分析(图 7)。显然,各模式对于宿

迁市的预报好于南京市,且随着累积时段的增加差异性越显著,这是由于南京市的预报误差随累积时段增长较快而宿迁市较为稳定的原因;由预报偏大率  $S_g$  图可知苏南苏北的预报偏大次数接近,但南京市的预报偏大误差  $X_g$  明显大于宿迁市,这是引起两省辖市多日降水预报效果不同的主要原因;对比不同模式偏大率  $S_g$ ,ECMWF 模式偏大次数最多,CMC 模式最少。对比预报偏差  $Bias$ 、均方根误差 RMSE 以及平均偏大误差  $X_g$ ,可知大多情况下 CMC 模式预报误差小于其他四种模式,而 CMA 模式误差最大。

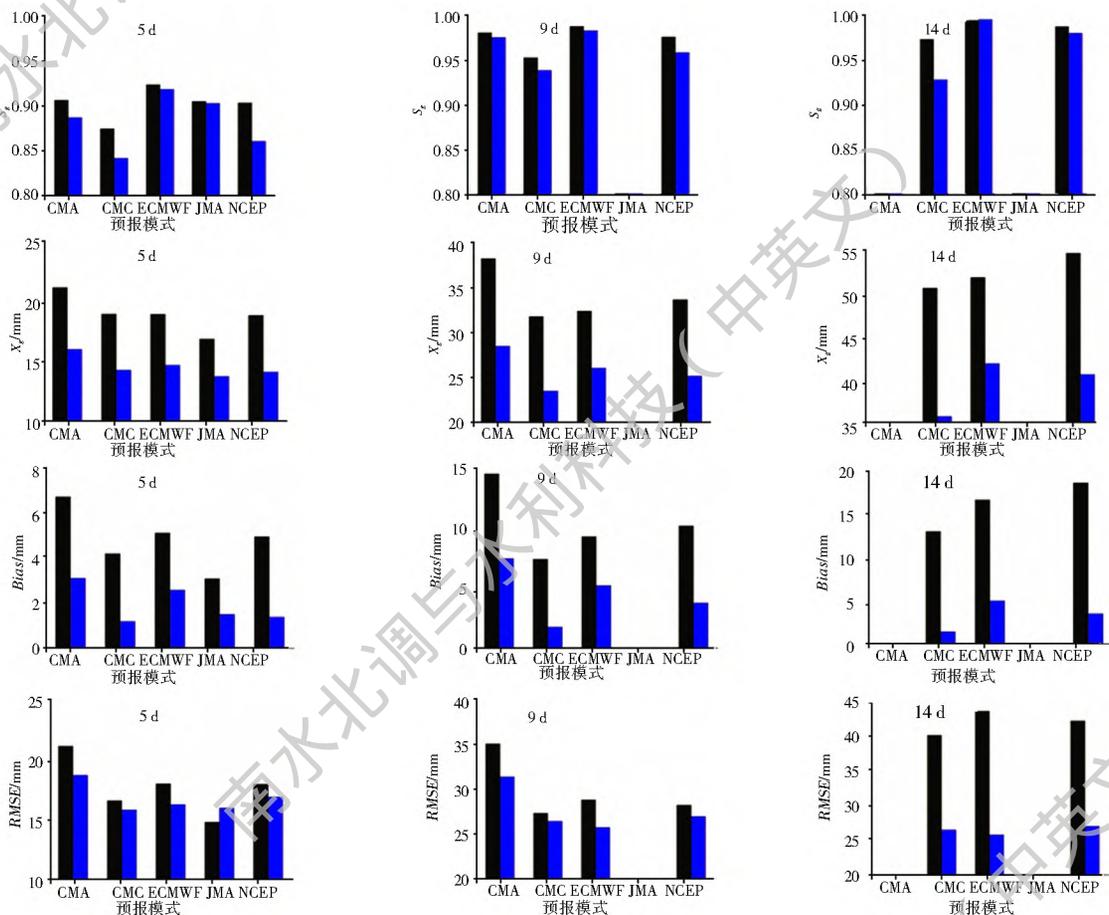


图 7 代表省辖市(南京与宿迁)不同累积时段降水预报检验结果

Fig. 7 The verification results of forecasts for different periods in Nanjing and Suqian

### 3 结论

(1) 对于 1~14 d 天预见期内的不同降水量级与不同时段累积降水量, TIGGE 五个模式都有较强的预报能力,并有较好的预报时效性。对于降水量级预报,整体而言,随着预报时效延长,模式预报能力有所下降,但小雨预报的 TS 评分始终在 0.4~0.6 之间,中雨在 0.2~0.4 之间,整个预见期内各模式都对中小雨预报效能力都较强;对于日降水量预报,1~3 d 预见期内的预报偏大误差、预报偏小

误差、平均绝对偏差以及均方根误差的变化范围分别为 3~8 mm、-2.5~5.0 mm、-0.5~2.5 mm 及 4~12 mm,只存在三天的衰减期之后各项误差指标值维持稳定,说明 1~14 d 预见期内的降水量预报都具有一定的参考价值。

(2) 不同预报模式的表现也存在差异,ECMWF 模式的表现最佳,尤其在小雨预报中优势显著,其次分别为 JMA、NCEP、CMA,CMC 表现最差;日降水量预报前三天预见期内偏大率与偏小率持平,之后误差来源主要是预报偏大,且整体来看, JMA 模式

表现最好, CMA 最差。多日累积降水预报较实际偏大, 并表现出显著的季节差异性和地域差异性, 即冬季预报效果最好夏季最差, 苏北地区好于苏南地区。值得一提的是: ECMWF 在夏季表现最差, 在冬季最好; CMC 模式在冬季表现较差, 仅次于 CMA 模式, 在夏季表现最好。

(3) 各模式对于不同等级降水都有一定的预报能力, 即都有部分成员捕捉到了不同等级降水的可能性, 但集合平均通过平滑作用削弱了较强降水的可能性, 从而使得大到暴雨的降水预报能力不足; 模式误差可能是与成员数有关, CMA 成员数最少为 15, CMC 与 NCEP 为 21, ECMWF 与 JMA 模式成员数最多为 51, 成员数越少包含的可能性就少, 发散性也不够, 因此 CMA 与 CMC 在降水分级预报和日累积降水量预报中较差, ECMWF 与 JMA 模式则较好; 中国地面降水日值  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  格点数据集 (V2.0) 在夏季插值误差高于冬季, 东南地区误差普遍高于其他地区是导致冬季预报效果最好而夏季最差, 苏北地区预报效果好于苏南的原因之一; 降水数据网格大小为  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ , 如果有更精细的网格资料, 各模式预报的误差可能会更小; 由于 TIGGE 与实测资料自身的观测误差以及计算面雨量时未考虑地形地势等因素的影响也是引起预报误差的主要原因。

(4) 本文对 TIGGE 降水预报的检验是在江苏省的首次释用, 此次检验结果有助于进一步改进江苏省中期降水预报结果。针对以上误差分析对 TIGGE 降水资料进行订正以及参考模式差异性为不同模式分配适当权重进行超级集合, 可提高各预报要素的可利用性。针对大雨以上降水量级预报偏小显著, 而日降水量预报偏大, 可以取一个阈值, 阈值以下预报值适当减小, 阈值以上变大来同时改善降水量级与降水量的预报结果; 前 3 天日降水量预报误差变化较大, 要分别考虑修正系数。3 天之后的预报由于与第 3 天比较相似, 可以用第 3 天的修正系数进行数据修正; 而对于预报效果较好的 ECMWF、JMA 等模式可以在后期分配较高权重进行多模式集成。另外, 只选取 TIGGE 集合预报众多产品中的集合平均结果在江苏省的预报效果进行了检验分析, 未来还需在其他集合预报产品如概率预报的释用上努力。

(5) 我国灾害性天气季节性变化具有明显的中期变化规律, 并呈区域性分布特点, 因此我国区域性灾害天气的中期预报也是非常重要而且是可行的。未来可通过以下几个方面利用 TIGGE 集合预报产品推动我国中期降水预报的发展: a. 提高集合预报产

品的释用能力, 除集合平均预报外还有概率预报、控制预报、中值预报、可信度预报等; b. 提高集合预报产品的修正能力, 如基于贝叶斯原理的降水预报偏差订正、自适应卡尔曼滤波类型偏差订正方法以及降尺度订正等; c. 提高多模式集成预报水平, 对集合平均等确定性集合预报产品进行后期多模式集成, 如考虑滑动训练期的超级集成、消除偏差集成等。

#### 参考文献 (References):

- [1] 康志明, 鲍媛媛, 周宁芳. 我国中期和延伸期预报业务现状以及发展趋势[J]. 气象科技进展, 2013, 3(1): 18-24. (KANG Z M, BAO Y Y, ZHOU N F. Current situation and development of medium range and extended range weather forecast in China [J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2013, 3(1): 18-24. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2013.01.003.)
- [2] 仇永炎. 中期天气预报[M]. 北京: 科学出版社, 1985. (QIU Y Y. Mid-term Weather Forecasts [M]. Beijing: Science Press, 1985. (in Chinese))
- [3] 李泽椿. 中国国家气象中心中期数值天气预报业务系统[J]. 气象学报, 1994, 52(3): 297-307. (LI Z C. Medium range numerical weather prediction system at the National Meteorological Center of China [J]. Acta Meteorologica Sinica, 1994, 52(3): 297-307. (in Chinese))
- [4] 林春泽, 智协飞, 韩艳. 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, 2009, 20(6): 706-712. (LIN C Z, ZHI X F, HAN Y. Multi model superensemble forecasts of the surface temperature using the TIGGE data [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2009, 20(6): 706-712 (in Chinese))
- [5] 赵晓琳, 朱国富, 李泽椿. 基于 TIGGE 资料识别适应性观测敏感区的应用研究[J]. 应用气象学报, 2010, 21(4): 405-415. (ZHAO X L, ZHU G F, LI Z C. Applied Research on Adaptive Observation for Identifying Sensitive Regions Based upon TIGGE Data [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2010, 21(4): 405-415. (in Chinese))
- [6] ZHI X F, QI H X, BAI Y Q, et al. A comparison of three kinds of multimodel ensemble forecast techniques based on the TIGGE data [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2012, 26(1): 41-51. DOI: 10.1007/S13351-012-0104-5.
- [7] 刘永和, 严中伟, 冯锦明, 等. 基于 TIGGE 资料的沂沭河流 6 小时降水集合预报能力分析[J]. 大气科学, 2013, 37(3): 539-551. (LIU Y H, YAN Z W, FENG J M, et al. Predictability of 6 Hour precipitation in the Yishu River Basin based on TIGGE Data [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2013, 37(3): 539-551. (in Chinese) DOI: 10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11078.
- [8] 刘建国, 谢正辉, 赵琳娜. 基于 TIGGE 多模式集合的 24 小时气温 BMA 概率预报[J]. 大气科学, 2013, 37(1): 43-53. (LIU J G, XIE Z H, ZHAO L N. BMA probabilistic forecasting for the 24 h TIGGE multi model ensemble forecasts of surface air temperature [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2013, 37(1): 43-53. (in Chinese) DOI: 10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11232.

(下转第 44 页)

- 38(8): 223-227. (ZHANG Q, SHEN L, CAI H J, et al. Combination forecast research on water demand based on the grey theory and regression analysis[J]. Journal of Northwest A & F University(Natural Science), 2010, 38(8): 223-227. (in Chinese))
- [16] 王金保, 曾海燕, 朱邦辉. 主成分分析法在乐安河水质评价中的应用[J]. 中国给水排水, 2009, 25(16): 104-108. (WAN J B, ZENG H Y, ZHU B H. Application of principal component analysis in evaluation of water quality of Lean river[J]. China Water and Waste Water, 2009, 25(16): 104-108. (in Chinese))
- [17] 杨建刚. 人工神经网络实用教程[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2003: 44-45. (YANG J G. Artificial neural network practical tutorial[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2003: 44-45. (in Chinese))
- [18] 崔东文. 基于 BP 神经网络的文山州水资源承载力评价分析[J]. 长江科学院院报, 2012, 29(5): 9-15. (CUI D W. Evaluation and analysis of water resources carrying capacity in Wenshan prefecture based on BP neural network[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2012, 29(5): 9-15. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1001-5485.2012.05.003.
- [19] 王小川, 史峰, 郁磊, 等. MATLAB 神经网络 30 个案例分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2002. (WANG X C, SHI F, YU L, et al. Analysis of 30 cases of MATLAB neural network[M]. Beijing: Beijing Aerospace University Press, 2002. (in Chinese))
- [20] 何斌, 张澎辉, 梁国华, 等. 基于 BP 神经网络的场次洪水河道沙量预报[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(3): 406-408, 416. (HE B, ZHANG P H, LIANG G H, et al. Flood and sediment prediction based on BP neural network[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(3): 406, 416. (in Chinese)) DOI: 10.1: 3476/j.cnki.nsbddq.2015.03.002.
- [21] 苑希民, 李鸿雁, 刘树坤, 等. 神经网络和遗传算法在水科学领域的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002. (YUAN X M, LI H Y, LIU S K, et al. Application of neural network and genetic algorithm in water science[M]. Beijing: China Water power Press, 2002. (in Chinese))
- [22] 张德丰. MATLAB 神经网络应用设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009. (ZHANG D F. MATLAB neural network design[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2009. (in Chinese))
- [23] 蔡臣, 黄涛, 李云祯. 基于 GA-BP 神经网络水下隧道涌水量预测及应用[J]. 路基工程, 2013(1): 39-42. (CAI C, HUANG T, LI Y Z. Forecast and application on water inflow of underwater tunnel based on GA-BP neural network[J]. Subgrade Engineering, 2013(1): 39-42. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1003-8825.2013.01.010.
- [24] 刘晓霞. 种群规模对遗传算法性能的研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2010. (LIU X X. Research of population size on the performance of genetic [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2010. (in Chinese))

(上接第 25 页)

- [9] 纪永明, 陈静, 矫梅燕. 基于多中心 TIGGE 资料的区域 GRAPES 集合预报初步试验[J]. 气象, 2011(4): 392-402. (JI Y M, CHEN J, JIAO M Y. The preliminary experiment of GRAPES MESO ensemble prediction based on TIGGE data[J]. Meteorological Monthly, 2011(4): 392-402. (in Chinese))
- [10] 智协飞, 季晓东, 张璟, 等. 基于 TIGGE 资料的地面气温和降水的多模式集成预报[J]. 大气科学学报, 2013, 36(3): 257-266. (ZHI X F, JI X D, ZHANG J, et al. Multimodel ensemble forecasts of surface air temperature and precipitation using TIGGE datasets[J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2013, 36(3): 257-266. (in Chinese)) DOI: 1674-7097(2013)03-0257-10.
- [11] 任正果, 张明军, 王圣杰, 等. 1961-2011 年中国南方地区极端降水事件变化[J]. 地理学报, 2014, 69(5): 640-690. (REN Z G, ZHANG M J, WANG S J, et al. Changes in precipitation extremes in South China during 1961-2011[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(5): 640-690. (in Chinese)) DOI: 10.11821/dlxb201405007.
- [12] 李佰平, 智协飞. ECMWF 模式地面气温预报的四种误差订正方法的比较研究[J]. 气象, 2012, 38(8): 897-902. (LI B P, ZHI X F. Comparative study of four correction schemes of the ECMWF surface temperature forecasts[J]. Meteorological Monthly, 2012, 38(8): 897-902. (in Chinese))
- [13] 王雨. 2004 年主汛期各数值预报模式定量降水预报评估[J]. 应用气象学报, 2006, 17(3): 316-323. (WANG Y. Evaluation of quantitative precipitation forecasting of multiple NWP models in summer of 2004[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2006, 17(3): 316-323. (in Chinese))
- [14] 张建海, 诸晓明. 数值预报产品和客观预报方法预报能力检验[J]. 气象, 2006, 32(2): 58-63. (ZHANG J H, ZHU X M. Verification of prediction capability of NWP products and objective forecast methods[J]. Meteorological Monthly, 2006, 32(2): 58-63. (in Chinese))
- [15] 杨云川, 程根伟, 范继辉, 等. 卫星降水数据在高山峡谷地区的代表性与可靠性[J]. 水科学进展, 2013, 24(1): 24-33. (YANG Y C, CHENG G W, FAN J H, et al. Representativeness and reliability of satellite rainfall dataset in alpine and gorge region[J]. Advances in Water Science, 2013, 24(1): 24-33. (in Chinese)) DOI: 1001-6791(2013)01-0024-10.
- [16] 黄嘉佑. 气象统计分析与预报方法[M]. 北京: 气象出版社, 2004. (HUANG J Y. Meteorological statistical analysis and forecast method[M]. Beijing: Meteorological Press, 2004. (in Chinese))
- [17] 国家气象中心. 气象中常用检验方法概述[M]. 北京: 气象出版社, 1991: 2-5. (The National Meteorological Center. Summary of test method commonly used in meteorology[M]. Beijing: Meteorological Press, 1991: 2-5. (in Chinese))
- [18] Murphy J. An evaluation of statistical and dynamical techniques for downscaling local climate[J]. Journal of Climatology, 1999, 12: 2256-2284. (in Chinese) DOI: 1004-9045(2007)04-0301-05.
- [19] 马清, 龚建东, 李莉, 等. 超级集合预报的误差订正与集合研究[J]. 气象, 2008, 34(3): 42-48. (MA Q, GONG J D, LI L, et al. Study of bias correction and consensus in regional multi model super ensemble forecast[J]. Meteorological Monthly, 2008, 34(3): 42-48. (in Chinese))
- [20] 王丽, 金琪, 柯怡明. 三种数值预报产品短期强降水预报定量误差评估[J]. 暴雨灾害, 2007, 26(4): 301-305. (WANG L, JIN Q, KE Y M. Quantitative evaluation of short term strong precipitation forecasting of three NWP models[J]. Torrential Rain and Disasters, 2007, 26(4): 301-305. (in Chinese))