

DOI: 10.13476/j.cnki.nsqdqk.2022.0119

韦经豪, 黄迎春, 姚成. 降水预报产品在不同水文气象分区中小流域的适应性评估[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2022, 20(6): 1208-1219. WEI J H, HUANG Y C, YAO C. Assessment of precipitation forecasting product's adaptability in small and medium-sized basins in different hydrometeorological regions[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(6): 1208-1219. (in Chinese)

# 降水预报产品在不同水文气象分区中小流域的适应性评估

韦经豪<sup>1</sup>, 黄迎春<sup>2</sup>, 姚成<sup>1</sup>

(1. 河海大学水文水资源学院, 南京 210024; 2. 福州大学土木工程学院, 福州, 350108)

**摘要:**以位于不同水文气象分区的屯溪流域和绥德流域为研究对象, 选取 TIGGE(THORPEX Interactive Garnd Global Ensemble) 数据集中 NCEP(National Centers for Environmental Prediction)、ECMWF(European Centre for Medium-range Weather Forecasts)、CMA(China Meteorological Administration) 3 种预报产品的 2010—2015 年控制预报数据, 基于分位数映射法中的 QUANT(non-parametric quantile mapping using empirical quantiles) 法和 RQUANT(non-parametric quantile mapping using robust empirical quantiles) 法进行预报降雨修正, 并采用多分类预报检验、连续型预报检验和概率型预报检验等方法, 对不同水文气象分区、不同预报产品和不同修正方法进行比较与适用性分析; 同时, 以屯溪流域实测降雨为例, 通过增加噪声项对降雨重采样, 基于新安江模型分析降雨不确定性对水文模拟结果的影响。结果表明: 在研究流域, 所选的预报产品对无雨和小雨期的预报精度都较高, 但随着降雨量的增加, 各产品的预报能力均出现较为明显的下降。多分类和连续型检验表明绥德流域的降雨预报效果更佳, NCEP 和 ECMWF 在研究流域的整体预报精度较高, CMA 的整体预报精度在研究流域略低于其他产品。各产品在修正后大部分检验指标预报精度提高, 其中: ECMWF 在绥德流域修正后预报精度最高, 对两种修正方法都有很好的适用性; 在屯溪流域, NCEP 和 ECMWF 在不同修正方法后各指标预报精度各有高低, CMA 在修正后仅在大雨量级的 TS 评分预报精度高于其他产品。降雨的不确定性会对水文模拟产生消极影响, 并导致参数的不确定性和水文模拟精度的下降。

**关键词:** TIGGE; 降雨评估; 分位数映射法; 流域对比; 降雨不确定性

中图分类号: TV213;P456.7 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



中小河流洪水的特点是暴雨强度大, 洪水历时短, 预警预报难度大<sup>[1]</sup>, 如何提高预报精度、延长预见期是中小河流洪水预报的重点。降雨作为水文模型最重要和敏感的驱动因子, 直接影响流域的径流形成过程, 是影响预报精度的主要因素。此外, 中小河流汇流时间短, 预见期往往难以满足洪水防控的需求, 如果要将预见期延长至超过流域的汇流时间, 就必须引入定量降雨预报技术<sup>[2]</sup>。目前, 定量

降雨预报主要依赖于数值天气预报模式<sup>[3]</sup>。定量降雨预报由于影响其时间变化和空间分布的变量太多, 被认为是数值天气预报模式最困难的挑战之一<sup>[4-5]</sup>。目前没有数值模式能完美地描述大气的真实情况, 所有数值预报系统都存在一定偏差<sup>[6-7]</sup>, 因此为改善模拟精度, 为水文模型提供一套更为精确的驱动数据, 对模式模拟降雨进行订正是必不可少的<sup>[8-9]</sup>。

收稿日期: 2022-04-18 修回日期: 2022-09-05 网络出版时间: 2022-10-17

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20221017.0925.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(51909059; 51979070); 江苏省自然科学基金项目(BK20190492)

作者简介: 韦经豪(1998—), 男, 海南海口人, 主要从事水文预报研究。E-mail: [weijinghao@hhu.edu.cn](mailto:weijinghao@hhu.edu.cn)

通信作者: 黄迎春(1984—), 女, 福建龙岩人, 博士后, 主要从事水文预报研究。E-mail: [yingchunhuang@hhu.edu.cn](mailto:yingchunhuang@hhu.edu.cn)

THORPEX(The Observing System Research and Predictability Experiment)交互大全球集合(THORPEX Interactive Garnd Global Ensemble, TIGGE)是使用最广泛的数据集之一,它是观测系统研究和可预测性实验(THORPEX)项目的关键组成部分,旨在提高1 d至2周天气预报的准确性<sup>[10]</sup>,此数据集的区域气候模式(Regional Climate Modal, RCM)包括欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-range Weather ForecastsE, CMWF)、美国气象环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)、中国气象局(China Meteorological Administration, CMA)等若干个全球业务集合预报中心。研究表明,ECMWF是目前精度最高的全球尺度大气环流模式,在中国区域内,其估测降雨的精度明显高于NCEP再分析产品<sup>[11]</sup>。赵琳娜等<sup>[12]</sup>利用ECMWF、NCEP和CMA的集合预报资料结合站点观测资料,评估超级集合和各个单中心的降水,结果显示超级集合要优于单中心的集合预报。Matsueda等<sup>[13]</sup>使用TIGGE的集合预报来预测恶劣天气,发现大集合预报比单中心集合预报更可靠。然而如果数值预报模式结果不经过任何误差订正,直接用于水文研究,会进一步放大降雨偏差,导致更多的不确定性<sup>[14-15]</sup>。分位数映射法是典型的频率订正方法,是近年来国际上降雨资料误差订正的主流方法。Piani等<sup>[16]</sup>使用基于Gamma分布的概率密度函数对RCM模拟的欧洲日降雨数据进行误差订正,结果表明该方法订正整体效果较好。Themessl等<sup>[17]</sup>使用6种订正方法对阿尔卑斯地区的RCM降尺度日降雨进行订正,结果表明分位数映射法效果最佳,尤其是在高值区,适用于订正极端降雨事件。雷华锦等<sup>[18]</sup>等对由NCEP开发的新一代天气预报模式WRF(weather research and forecasting model)模拟的黑河上游日降雨输出数据进行误差订正,订正后流域内年降雨空间分布更加合理,年降雨量也更接近于观测降雨插值结果。

目前有许多针对TIGGE数据集和后处理方法的评估,但是针对在不同水文气象分区各个预报产品的适用性评估研究并对产品进行修正以提高预报精度的研究还不足。通过对不同水文气象分区的屯溪流域和绥德流域应用不同修正方法后的预报精度进行详细评价,寻求不同水文气象分区中小流域适用的数值预报产品和降雨修正方法,同时开展了降雨不确定性对水文模拟的影响评估,力求为

提高中小河流洪水预报精度和预见期提供可靠依据。

## 1 研究流域与降雨数据处理

### 1.1 研究流域

选取安徽屯溪流域和陕西绥德流域为典型研究区域,开展TIGGE数值预报产品在不同水文气象分区的预报精度与适用性比较。屯溪流域地处安徽省东南部,流域内设9个雨量站(黟县、儒村、岩前、休宁、呈村、上溪口、五城、石门及屯溪),出口处的屯溪水文站位于黄山市屯溪区阳湖镇黄口村,地理坐标为东经118°20′,北纬29°43′,流域控制面积约为2670 km<sup>2</sup>,属于典型的亚热带季风气候,植被丰富,森林覆盖率达70%以上。绥德流域地处陕西省北部,流域内设14个雨量站(青阳岔、绥德、李家河、曹坪、石湾镇、砖庙、白狼城、新窑台、高镇、艾好崮、林湾疙坨、刘家崮、阳克郎湾及李孝河),绥德水文站位于绥德县薛家畔居委会,地理坐标为东经110°14′,北纬37°30′,流域控制面积约为3893 km<sup>2</sup>,属于典型大陆性季风气候,植被覆盖率较低。屯溪流域的多年平均降雨量约为1600 mm,降雨主要集中在汛期,汛期内降雨约占全年总降雨量的60%以上;绥德流域多年平均降雨量约为486 mm,降雨量的年内分配不均,主要集中在6—9月,雨量占比可达全年的60%~70%。

### 1.2 数据与处理方法

#### 1.2.1 降雨数据

选取美国气象环境预报中心(NCEP)、欧洲中期天气预报中心(ECMWF)和中国气象局(CMA)共3个预报模式2010—2015年的24 h(未来1 d)控制预报产品进行分析与对比,预报数据空间分辨率为0.5°×0.5°,统一选取世界时(Universal Time Coordinated, UTC)00:00作为预报起点,这对应北京时间08:00(UTC+8:00)。

将屯溪流域和绥德流域的实测降雨资料统一采用泰森多边形法处理为流域面平均降雨,而修正前后的TIGGE预报降雨产品根据每个网格在各自流域所占的面积比重处理为流域面平均降雨,以此分析与对比TIGGE预报降雨产品在屯溪流域和绥德流域的应用情况。

为评估降雨不确定对模型模拟的影响,选取屯溪流域的2008—2017年的实测降雨,通过添加噪声项对实测降雨进行重采样,这里采用均值为0、标

准差分别为 0.1 和 0.2 的正态分布生成一系列扰动系数与实测降雨相乘, 获得(标准差为 0.1)扰动降雨和(标准差为 0.2)扰动降雨。

### 1.2.2 修正方法

分位数映射法(quantile-mapping, QM)是基于频率分布的订正方法, 被广泛应用于水文降尺度和偏差纠正<sup>[19]</sup>。QM 法在应用时传递函数的建立主要有两种方法, 一种是基于理论概率分布函数, 另一种是基于经验概率分布函数。

采用的 QUANT(non-parametric quantile mapping using empirical quantiles)法和 RQUANT(non-parametric quantile mapping using robust empirical quantiles)法是基于经验概率分布函数(empirical cumulative distribution function,  $E_{CDF}$ )建立传递函数, 不需要对降雨概率分布进行假设。主要分为 3 个步骤进行修正, 首先计算实测降雨与每个预报降雨的  $E_{CDF}$ , 其次计算实测降雨与预报降雨序列  $E_{CDF}$  的反函数在概率值为  $P_r$  时的插值即偏差纠正量  $C_F$ , 最后得到修正后的预报降雨  $X_{cor}$ :

$$C_F = E_{CDF_{obs}}^{-1}(P_r) - E_{CDF_m}^{-1}(P_r) \quad (1)$$

$$X_{cor} = X_m - C_F \quad (2)$$

非参数转换 QUANT 法分区间使用线性插值使原始输出数据的  $E_{CDF}$  尽可能与实测的  $E_{CDF}$  相近。

非参数 RQUANT 法与 QUANT 类似, 不同的是使用局部线性二乘回归对模式与观测的 ECDF 进行拟合。

## 2 降雨预报检验方法

### 2.1 多分类预报检验

根据我国气象部门制定的 24 h 降雨分级标准, 采用的等级划分见表 1。根据气象部门常用的《中短期天气预报质量检查办法》, 采用  $T_s$  评分、 $B_s$  (预报偏差) 评分、 $R_{FA}$  (空报率)、 $R_{MA}$  (漏报率)<sup>[20-21]</sup> 这 4 个评估指标来检验不同预报产品在降雨分级预报中的表现。各个指标的计算公式为

表 1 降雨等级划分标准  
Tab. 1 Classification standard of precipitation grade 单位: mm

无雨	小雨	中雨	大雨	暴雨
<0.1	[0.1,10)	[10,25)	[25,50)	≥50

$$T_s = \frac{\sum N_{A_i}}{\sum N_{A_i} + \sum N_{B_i} + \sum N_{C_i}} \quad (3)$$

$$B_s = \frac{\sum N_{A_i} + \sum N_{B_i}}{\sum N_{A_i} + \sum N_{C_i}} \quad (4)$$

$$R_{FA} = \frac{\sum N_{B_i}}{\sum N_{A_i} + \sum N_{B_i}} \quad (5)$$

$$R_{MA} = \frac{\sum N_{C_i}}{\sum N_{A_i} + \sum N_{C_i}} \quad (6)$$

式中:  $i$  代表不同降雨等级;  $N$  为总预报天数;  $A_i$  为  $i$  级降雨预报正确的样本;  $B_i$  为  $i$  级降雨预报空报的样本;  $C_i$  为  $i$  级降雨预报漏报的样本。

### 2.2 连续型预报检验

利用检验雨量预报误差的常用指标: 平均绝对误差( $E_{MA}$ )、均方根误差( $E_{RMS}$ )、预报偏小率( $S_1$ )、预报偏小误差( $X_1$ )、预报偏大( $S_g$ )和预报偏大误差( $X_g$ )来评估降雨量整体误差。

$$E_{MA} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N |F_t - O_t| \quad (7)$$

$$E_{RMS} = \left[ \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (F_t - O_t)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

$$S_1 = \frac{N_1}{N} \quad (9)$$

$$X_1 = \sum_t \frac{X_{1t}}{N_1} \quad (10)$$

$$S_g = \frac{N_g}{N} \quad (11)$$

$$X_g = \sum_t \frac{X_{gt}}{N_g} \quad (12)$$

式中:  $F_t$  和  $O_t$  分别为第  $t$  天的预报降雨和实测降雨;  $N$  为总预报天数;  $X_{1t}$  为第  $t$  天降雨偏小的误差;  $X_{gt}$  为第  $t$  天降雨偏大的误差; 若  $F_t < O_t$ , 则预报偏小,  $X_{1t} = F_t - O_t$ ,  $N_1$  为  $N$  天降雨预报中偏小的总天数; 若  $F_t > O_t$ , 则预报偏大,  $X_{gt} = F_t - O_t$ ,  $N_g$  为  $N$  天降雨预报中偏大的总天数。

### 2.3 概率型预报检验

采用 brier score( $B_{rier}$ ) 评分和 brier skill score( $B_{ss}$ ) 评分<sup>[22]</sup> 对预报产品进行概率型预报检验。 $B_{rier}$  评分

表征的是预报概率与其实测二项事件的平方误差,  $B_{ss}$  评分是  $B_{rier}$  评分的均一化技能得分,  $B_{ss}$  评分为 1 时表示完全准确的确定性预报,  $B_{ss}$  评分为 0 时表示系统的预报性能与参考系统相同,  $B_{ss}$  小于 0 时表示系统的预报要差于参考系统。

$$B_{rier} = \sum_{i=1}^N \frac{(p_i - o_i)^2}{N} \quad (13)$$

$$B_{ss} = 1 - \frac{B_{rier}}{B_{rier^*}} \quad (14)$$

式中:  $p_i$  为某一天气事件发生的预报概率;  $o_i$  为某一天气发生的实测概率, 即发生某一等级记为 1, 不发生记为 0,  $B_{rier}$  是预报系统的  $B_{rier}$  评分,  $B_{rier^*}$  是参考系统的  $B_{rier}$  评分。

## 2.4 降雨-径流模拟模型及评价指标

以屯溪流域为例, 开展降雨不确定对水文模拟的影响研究。新安江模型<sup>[23]</sup>在我国湿润和半湿润地区的径流模拟效果较好, 因此选取三水源新安江模型进行洪水模拟。选取屯溪流域 2010—2017 年的实测日降雨数据, 采用期望值 ( $\mu$ ) 为 1, 标准差 ( $\sigma$ ) 分别为 0.1 和 0.2 的正态分布函数作为干扰因子 ( $\varepsilon$ ), 对实测降雨数据进行干扰, 得到两种新的降雨序列。

$$P_{dis} = P_{obs}\varepsilon \quad (15)$$

式中:  $\varepsilon \sim N(\mu, \sigma^2)$ , 为期望值为  $\mu$ , 标准差为  $\sigma$  的正态分布生成的干扰因子;  $P_{obs}$  为实测的降雨序列;  $P_{dis}$  为进行干扰后的降雨序列。

采用实测降雨和受干扰的两种降雨数据分别驱动新安江模型, 进行参数率定和交叉验证, 从而分析降雨数据误差对模型的影响。在模型率定中, 采用 Nash-Sutcliffe( $E_{NS}$ ) 系数作为评价指标:

$$E_{NS} = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_o(t) - Q_m(t))^2}{\sum_{t=1}^T (Q_o(t) - \bar{Q}_o)^2} \quad (16)$$

式中:  $Q_o(t)$  和  $Q_m(t)$  分别为实测流量和模拟流量;  $\bar{Q}_o$  为实测流量的均值。

## 3 评估结果

### 3.1 多分类预报检验评估

#### 3.1.1 屯溪流域多分类预报检验结果

图 1 为屯溪流域数值预报模式修正前后的综合

检验效果对比。在使用修正方法之前, 各个产品的无雨和小雨的  $T_s$  评分都为 0.4~0.6,  $R_{FA}$  和  $R_{MA}$  也保持在 0.4 以下, 说明各个产品对降雨量级为无雨和小雨的预报能力较高, 随着降雨量级的增大, 小雨等级以上的降雨  $T_s$  评分呈现明显下降趋势, 而  $R_{FA}$  和  $R_{MA}$  显著增加, 表明随着降雨量的增加, 各个产品的预报能力出现明显下降。从  $T_s$  评分来看, ECMWF 在无雨和小雨的  $T_s$  评分最高, 预报效果最佳, 在中雨和大雨的量级上, 各个产品的  $T_s$  评分相近, 为 0.2~0.3, 除了 NCEP 在大雨的  $T_s$  评分低于 0.2, CMA 在暴雨上的  $T_s$  评分表现最佳, 达到了 0.3。从  $R_{MA}$ 、 $R_{FA}$  和  $B_s$  评分来看, 各个产品的小雨和中雨的  $B_s$  评分都明显大于 1, 这表明各个产品的在降雨量级小雨和中雨的预报误差主要来源于空报, 相反, 各个产品的无雨、大雨和暴雨的  $B_s$  评分基本都小于 1, 表明在降雨量级无雨、大雨和暴雨的预报误差主要来源于漏报。

无论是在 QUANT 法还是 RQUANT 法修正后, 各个产品在小雨和中小雨的预报性能变化基本一致, 无雨的  $T_s$  评分都从 0.60 左右上升到 0.70 左右, 而小雨和中雨的  $T_s$  评分没有发生明显的变化。ECMWF 在无雨、小雨和中雨的  $T_s$  评分预报效果最好,  $T_s$  评分分别达到了 0.74、0.53 和 0.25 左右, 在大雨量级下, QUANT 法修正后, CMA 的  $T_s$  评分预报效果最好, 而在 RQUANT 法修正后, ECMWF 的  $T_s$  评分预报效果最好, NCEP 在暴雨的  $T_s$  评分预报效果最好, 且在修正后得到明显改善, RQUANT 法修正后比 QUANT 法修正后的  $T_s$  评分预报效果更好,  $T_s$  评分最高达到了 0.37。从  $R_{MA}$ 、 $R_{FA}$  和  $B_s$  评分来看, 各个产品不同量级的  $B_s$  评分都接近于 1 左右,  $R_{MA}$  和  $R_{FA}$  的整体数值下降, 说明修正后各个产品的预报性能都得到了提升。

#### 3.1.2 绥德流域多分类预报检验结果

需要指出的是, 绥德流域在 2010—2015 年不存在大于 50 mm 的降雨, 所以各产品在暴雨的  $R_{MA}$  均为 0, 在图 2 中未标出该点距。图 2 为绥德流域数值预报模式修正前后的综合检验效果对比, 可以看出, 在修正之前, NCEP 在无雨和小雨的  $T_s$  评分预报效果最好, 3 种预报产品在小雨的  $T_s$  评分都达到了 0.7 以上, 表明 3 种预报产品对无雨的预报能力较高, NCEP 和 ECMWF 在小雨的  $T_s$  评分达到了 0.5 左右, 而 CMA 在小雨的  $T_s$  评分不到 0.4, CMA

在小雨的  $T_s$  评分预报效果差于 NCEP 和 ECMWF 在小雨的  $T_s$  评分预报效果,在中雨和大雨的降雨量级上,ECMWF 的  $T_s$  评分预报效果最好,  $T_s$  评分均

达到了 0.3。从  $R_{MA}$ 、 $R_{FA}$  和  $B_s$  评分来看,各个产品的  $B_s$  评分预报效果差别不大,除了 NCEP 在大雨量级的  $B_s$  评分为 0.2 左右,预报效果较差。

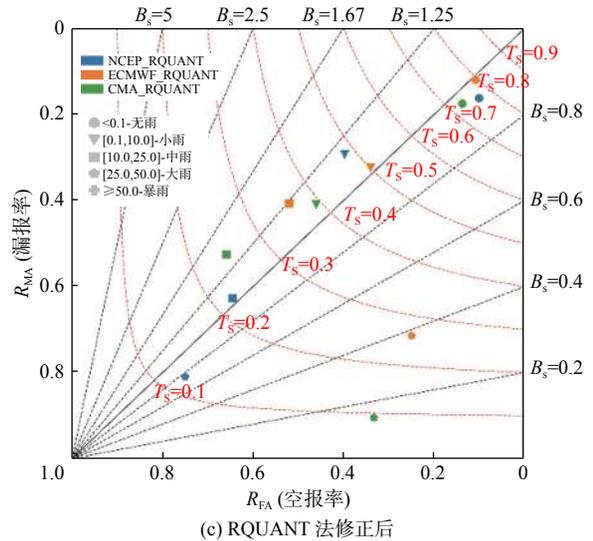
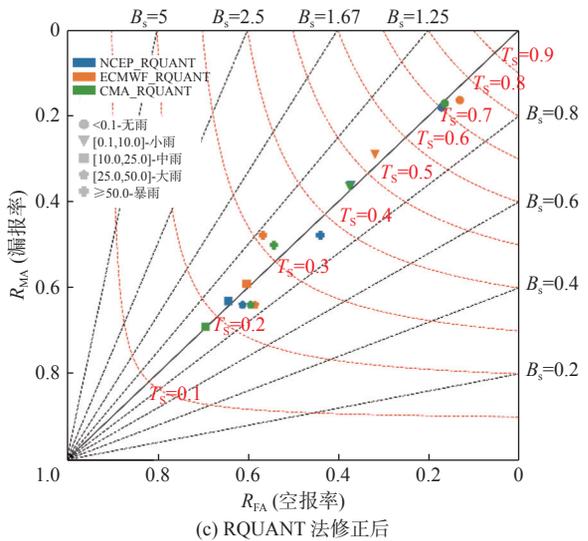
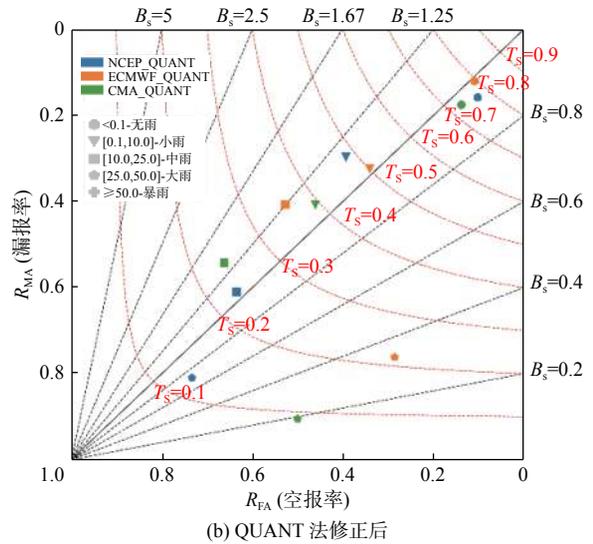
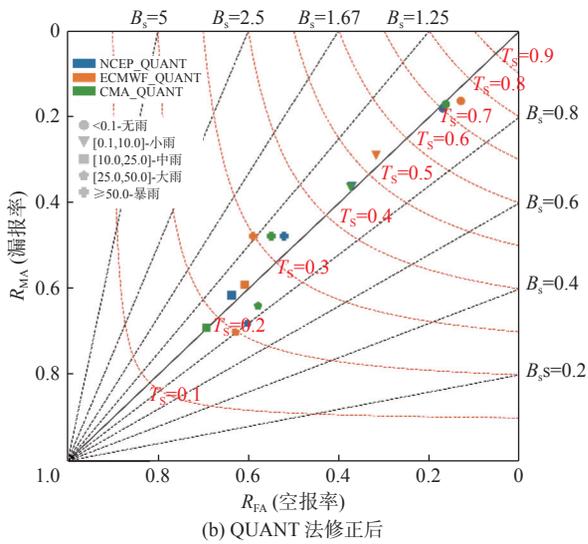
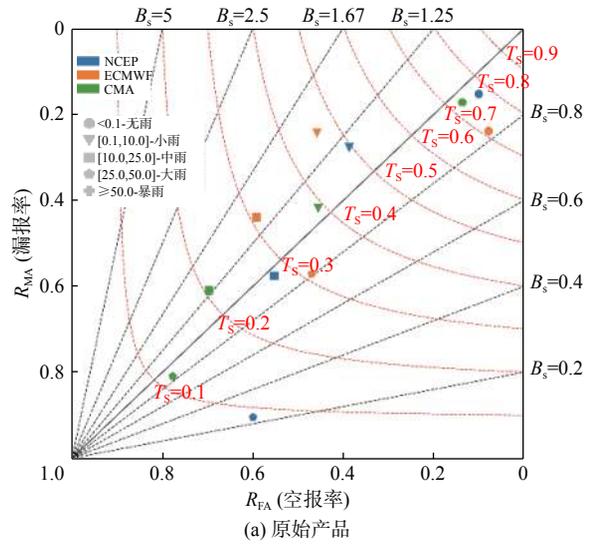
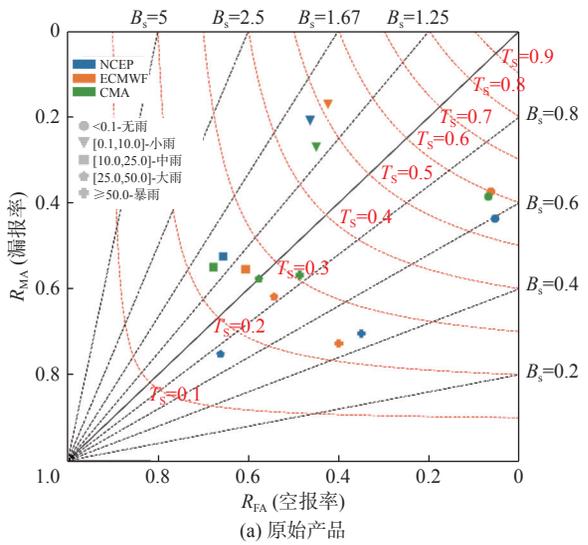


图 1 屯溪流域不同修正方法的综合检验图

Fig. 1 Comprehensive inspection map of different correction methods in Tunxi basin

图 2 绥德流域不同修正方法的综合检验图

Fig. 2 Comprehensive inspection map of different correction methods in Suidi basin

在进行修正之后,在无雨和小雨的降雨量级,NCEP和CMA在修正后的 $T_s$ 评分预报效果变化不大,而ECMWF在用QUANT法和RQUANT法修正后在无雨、小雨和中雨的 $T_s$ 评分预报效果基本一致,在这3种量级 $T_s$ 评分的预报效果均得到改善,无雨量级的 $T_s$ 评分从0.71上升到了0.79,小雨量级的 $T_s$ 评分从0.46上升到0.50,ECMWF修正后在无雨和小雨的 $T_s$ 评分预报效果均是最好,在中雨和大雨的降雨量级,ECMWF仍然保持着 $T_s$ 评分最好的预报效果。从 $R_{MA}$ 、 $R_{FA}$ 和 $B_s$ 评分来看,NCEP在大雨的 $B_s$ 评分上修正后预报效果得到明显提升,从0.2左右到0.8左右, $R_{MA}$ 的预报效果也得到一定改善,ECMWF修正后在无雨、小雨和中雨的 $B_s$ 评分预报效果更好, $R_{MA}$ 和 $R_{FA}$ 的预报效果也得到了改善,但是在大雨量级,ECMWF在修正后 $B_s$ 评分的预报效果更差。CMA在修正后在无雨、小雨和中雨的 $B_s$ 评分预报效果变化不大,而在大雨量级,CMA在修正后的 $B_s$ 评分预报效果变得很差,从0.8下降到0.2左右。

### 3.1.3 多分类预报检验流域对比

从修正前的各个预报产品来看,在无雨和小雨量级,在屯溪流域ECMWF的 $T_s$ 评分预报效果最好,而在绥德流域NCEP的 $T_s$ 评分预报效果最好,在中雨和大雨量级,在屯溪流域各个预报产品在 $T_s$ 评分的预报效果差别不大,但在绥德流域ECMWF的 $T_s$ 评分预报效果最好。从 $B_s$ 评分来看,绥德流域的各个预报产品的整体 $B_s$ 评分比屯溪流域的各个预报产品的整体 $B_s$ 评分预报效果更好,整体 $B_s$ 评分更接近于1。

从修正后的各个预报产品来看,在无雨和小雨量级,无论是在QUANT法还是RQUANT法修正后,在屯溪流域ECMWF的 $T_s$ 评分仍然是预报效果最好,而在绥德流域在使用两种修正方法后ECMWF的 $T_s$ 评分预报效果得到明显改善,并且在各个产品中预报效果最好。在中雨量级,在屯溪流域CMA的 $T_s$ 评分预报效果最好,而绥德流域ECMWF的 $T_s$ 评分预报效果最好。在大雨量级,屯溪流域使用QUANT法和RQUANT法呈现出不同的表现,使用QUANT法修正后CMA的 $T_s$ 评分预报效果最好,而使用RQUANT法修正后ECMWF的 $T_s$ 评分预报效果最好,在绥德流域ECMWF的 $T_s$ 评分预报效果最好。在屯溪流域,各个预报产品修正后的 $B_s$ 评分预报效果得到明显改善, $B_s$ 评分均接近于1,而在绥

德流域,各个预报产品修正后的 $B_s$ 评分预报效果差异不大。

总体来看,在屯溪流域,进行修正前ECMWF的整体预报效果略优于其他产品,在进行修正后使用RQUANT法修正后ECMWF的整体预报效果更好,而使用QUANT法修正后在不同量级各个产品互有优势。在绥德流域,进行修正前NCEP和ECMWF在不同量级各有良好预报效果,在进行修正后无论是哪种方法,ECMWF的整体预报效果最好。

## 3.2 连续型预报检验评估

### 3.2.1 屯溪流域连续型预报检验结果

屯溪流域各个产品修正前后的检验指标统计见表2。从 $E_{MA}$ 和 $E_{RMS}$ 来看,在未进行修正以前,3种产品 $E_{MA}$ 和 $E_{RMS}$ 的变化范围为3.56~4.54 mm和9.35~11.14 mm,ECMWF在两个指标中预报精度最高。在进行修正后,使用QUANT法修正的3种产品 $E_{MA}$ 和 $E_{RMS}$ 的变化范围为4.10~4.61 mm和10.66~12.29 mm,同样ECMWF达到了最好的预报精度。使用RQUANT法修正的3种产品 $E_{MA}$ 和 $E_{RMS}$ 的变化范围为3.88~4.48 mm和10.19~11.62 mm, $E_{MA}$ 预报精度最高的是ECMWF, $E_{RMS}$ 预报精度最高的是NCEP。从修正前后比较来看,3种产品在使用两种方法修正后在 $E_{MA}$ 和 $E_{RMS}$ 上的预报精度更低,RQUANT法修正比QUANT法修正后的 $E_{MA}$ 和 $E_{RMS}$ 的预报精度更高。

表2 屯溪流域修正前后检验指标统计

Tab. 2 The statistics of the inspection indicators before and after the correction in the Tunxi basin

预报产品	$E_{MA}/mm$	$E_{RMS}/mm$	$S_i$	$X_i/mm$	$S_g$	$X_g/mm$
NCEP	4.10	9.54	0.24	9.44	0.49	3.78
NCEP N_QUANT	4.35	10.83	0.33	6.29	0.28	8.04
NCEP N_RQUANT	4.22	10.19	0.33	6.43	0.28	7.42
ECMWF	3.56	9.35	0.27	8.03	0.43	3.20
ECMWF E_QUANT	4.10	11.71	0.31	5.84	0.29	7.86
ECMWF E_RQUANT	3.88	10.66	0.31	5.87	0.29	7.08
CMA	4.54	11.14	0.23	8.30	0.47	5.51
CMA C_QUANT	4.61	12.29	0.32	6.76	0.29	8.48
CMA C_RQUANT	4.48	11.62	0.32	6.80	0.28	8.00

从预报偏小率、预报偏小误差、预报偏大率和预报偏大误差这些指标来看:在进行修正前,3种产品的 $S_i$ 的变化范围为0.23~0.27, $S_g$ 的变化范围为0.43~0.49, $X_i$ 的变化范围在8.03~9.44 mm, $X_g$ 的变

化范围在 3.20~5.51 mm,说明 3 种产品的预报偏大现象偏多,但预报偏大误差较小,预报偏小现象偏少,但预报偏小误差较大。在进行修正后,两种方法修正后的 3 种产品的  $S_i$  和  $S_g$  的变化范围是一样的,分别为 0.31~0.33 和 0.28~0.29。QUANT 法修正后的  $X_i$  的变化范围在 5.84~6.76 mm,  $X_g$  的变化范围在 7.86~8.48 mm, RQUANT 法修正后的  $X_i$  的变化范围在 3.87~6.80 mm,  $X_g$  的变化范围在 7.08~8.00 mm,说明 3 种产品在修正后的预报偏大现象偏多的情况得到了改善,但预报偏大误差的预报精度更低。

### 3.2.2 绥德流域连续型预报检验结果

绥德流域各个产品修正前后的检验指标统计见表 3。从  $E_{MA}$  和  $E_{RMS}$  来看,原始产品  $E_{MA}$  和  $E_{RMS}$  的变化范围为 1.03~1.29 mm 和 3.30~4.22 mm,这 NCEP 预报精度最高。在进行修正后,使用 QUANT 法修正的 3 种产品  $E_{MA}$  和  $E_{RMS}$  的变化范围为 0.89~1.12 mm 和 2.75~3.52 mm,使用 RQUANT 法修正的 3 种产品  $E_{MA}$  和  $E_{RMS}$  的变化范围为 0.90~1.12 mm 和 2.75~3.53 mm,在进行修正后,ECMWF 在  $E_{MA}$  和  $E_{RMS}$  的指标上预报精度最高,说明这两种修正方法适用于 ECMWF。从修正前后对比,3 种产品在使用两种方法修正后在  $E_{MA}$  和  $E_{RMS}$  上的预报精度更高。

表 3 绥德流域修正前后检验指标统计

Tab. 3 The statistics of the inspection indicators before and after the correction in the Suide basin

预报产品	$E_{MA}/mm$	$E_{RMS}/mm$	$S_i$	$X_i/mm$	$S_g$	$X_g/mm$
NCEP	1.03	3.30	0.18	3.46	0.23	1.81
NCEP N_QUANT	1.06	3.47	0.19	3.01	0.22	2.28
NCEP N_RQUANT	1.07	3.50	0.18	2.99	0.23	2.30
ECMWF	1.06	3.47	0.19	3.01	0.22	2.28
ECMWF E_QUANT	0.89	2.75	0.19	2.78	0.19	1.88
ECMWF E_RQUANT	0.90	2.75	0.19	2.77	0.19	1.91
CMA	1.29	4.22	0.17	3.15	0.25	2.99
CMA C_QUANT	1.12	3.52	0.19	3.4	0.23	2.06
CMA C_RQUANT	1.12	3.53	0.19	3.4	0.23	2.09

从预报偏小率、预报偏小误差、预报偏大率和预报偏大误差这些指标来看:在进行修正前,3 种产品的  $S_i$  的变化范围为 0.17~0.19,  $S_g$  的变化范围为 0.22~0.25,  $X_i$  的变化范围在 3.01~3.46 mm,  $X_g$  的变化范围在 1.81~2.99 mm,这说明 3 种产品的预报偏大现象与预报现象出现的情况相当,但是预报偏小

误差大于预报偏大误差。在进行修正后,两种方法修正后的 3 种产品的  $S_i$  和  $S_g$  的变化范围相差不大,分别为 0.18~0.19 和 0.19~0.23。QUANT 法修正后的  $X_i$  的变化范围在 2.78~3.40 mm,  $X_g$  的变化范围在 1.88~2.28 mm, RQUANT 法修正后的  $X_i$  的变化范围在 2.77~3.40 mm,  $X_g$  的变化范围在 1.91~2.30 mm,说明 3 种产品在修正后的预报偏大现象和预报偏小现象的情况有所改善,但预报偏大误差和预报偏小误差的预报精度变化不大。

### 3.2.3 连续型预报检验流域对比

从修正前的各个预报产品来看,从  $E_{MA}$  和  $E_{RMS}$  两个指标来看,在屯河流域 ECMWF 预报精度最高,在绥德流域 NCEP 预报精度最高,各个产品在绥德流域比在屯河流域预报精度更高。从预报偏小率、预报偏小误差、预报偏大率和预报偏大误差这些指标来看,在屯河流域,各个产品预报偏大现象偏多,而在绥德流域,各个产品预报偏大现象与预报偏小现象情况相当,两个流域的预报偏小误差都大于预报偏大误差。

从修正后的各个预报产品来看,在  $E_{MA}$  和  $E_{RMS}$  两个指标,在屯河流域,各个产品预报精度更低, RQUANT 法修正比 QUANT 法修正后的预报精度更高,在绥德流域,各个产品预报精度更高,两种修正方法的预报精度相当。从预报偏小率、预报偏小误差、预报偏大率和预报偏大误差这些指标来看,在屯河流域各个产品预报偏大现象偏多的情况得到了改善,但预报偏大误差的预报精度更差,绥德流域各个产品预报偏大现象和预报偏小现象的情况有所改善,但预报偏大误差和预报偏小误差的预报精度变化不大。

总体来看,在修正前后,在  $E_{MA}$  和  $E_{RMS}$  指标,各个产品在屯河流域都小于在绥德流域的预报精度。在修正后,绥德流域的  $E_{MA}$  和  $E_{RMS}$  预报精度变得更高,屯河流域反而更差。在修正前,屯河流域的预报偏大现象偏多,绥德流域的预报偏大和偏小情况相当,两个流域预报偏小误差都偏大。在修正后,两个流域的这些现象都得到改善。

## 3.3 概率型预报检验评估

### 3.3.1 屯河流域概率型预报检验结果

图 3 为屯河流域不同预报产品修正前后  $B_{ner}$  评分,可以看出,小雨的  $B_{ner}$  评分最高,为 0.2~0.4,说明小雨预报在这几个量级中预报可靠性最差,而且随着降雨量级的提升,  $B_{ner}$  评分呈现下降趋势,暴雨量级的  $B_{ner}$  评分最小,预报可靠性最好。从进行修

正前后来看,除了暴雨量级,每个产品修正后的  $B_{rier}$  评分都呈现下降趋势,说明修正后对于大多数量级的降雨预报可靠性增加,QUANT法和RQUANT法修正后  $B_{rier}$  评分基本相等。从不同产品的比较来看,无论是在修正前后,在量级为无雨和小雨的预报中,NCEP的  $B_{rier}$  评分最高,预报可靠性最差,ECMWF的  $B_{rier}$  评分最低,预报可靠性最好,在更大量级的降雨中,各个产品没有表现出明显的差别。

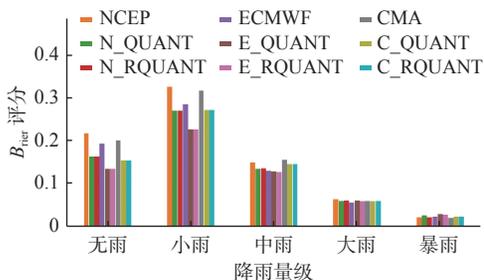


图3 屯溪流域不同预报产品修正前后  $B_{rier}$  评分

Fig. 3 The  $B_{rier}$  scores of different forecast products in Tunxi basin before and after correction

图4为屯溪流域不同预报产品修正前后  $B_{ss}$  评分,可以看出,无雨的  $B_{ss}$  评分是最高的,都大于0,说明各个产品在无雨量级的预报技巧优于参考系,但其他量级  $B_{ss}$  评分基本上都小于0,说明在这些量级上各个产品的预报技巧都不如参考系。从进行修正前后来看,各个产品修正后在无雨、小雨和中雨这些量级的  $B_{ss}$  评分都有所提高,说明预报技巧也有提高,在大雨和暴雨这些量级,各个产品修正后的  $B_{ss}$  评分没有明显的上升趋势,预报技巧并没有得到提升,QUANT法和RQUANT法修正后的各个产品  $B_{ss}$  评分基本一致。从不同产品的比较来看,除大雨和暴雨量级外,在其他量级各个产品在修正前后,ECMWF的  $B_{ss}$  评分最高,预报最好。

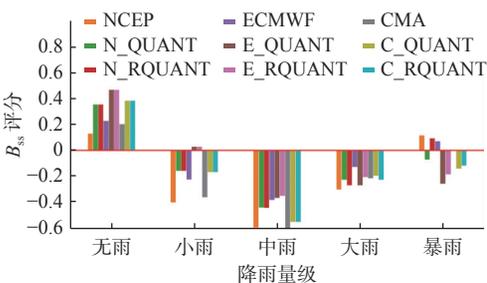


图4 屯溪流域不同预报产品修正前后  $B_{ss}$  评分

Fig. 4 The  $B_{ss}$  scores of different forecast products in Tunxi basin before and after correction

### 3.3.2 绥德流域概率型预报检验结果

由于绥德流域暴雨量级的样本过少,所以未进行暴雨量级的  $B_{rier}$  评分和  $B_{ss}$  评分的比较。图5为绥德流域不同预报产品修正前后  $B_{rier}$  评分,可以看

出,小雨的  $B_{rier}$  评分最高,为0.2~0.3,说明小雨预报在这几个量级中可靠性最差,而且随着降雨量级的提升,  $B_{rier}$  评分呈现下降趋势,大雨量级的  $B_{rier}$  评分最小,预报可靠性最好。从不同产品的比较来看,没进行修正前,NCEP在量级为无雨和小雨时的  $B_{rier}$  评分最低,预报可靠性最高,但在进行修正之后,只有ECMWF在大部分量级的  $B_{rier}$  评分在修正后呈下降趋势,而且在修正后的  $B_{rier}$  评分也是各个产品修正前后的最小值,这说明ECMWF的预报可靠性在修正后得到了提升,并且在3个产品中预报可靠性最佳,而NCEP和CMA在修正后  $B_{rier}$  评分无明显趋势,说明这两个预报产品在修正后的预报可靠性未能提升。

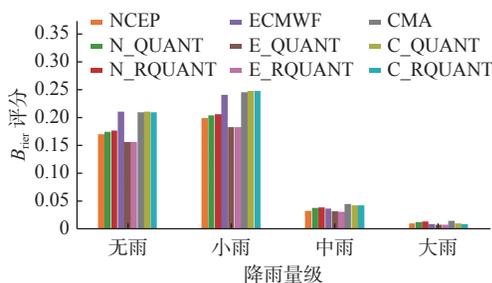


图5 绥德流域不同预报产品修正前后  $B_{rier}$  评分

Fig. 5 The  $B_{rier}$  scores of different forecast products in Suide basin before and after correction

图6展示了绥德流域不同预报产品修正前后  $B_{ss}$  评分,可以看出,在无雨量级,各个产品的  $B_{ss}$  评分大于0,各个产品在无雨量级的预报技巧优于参考系,在其他量级,各个产品在  $B_{ss}$  评分上并没有好的表现,预报技巧不如参考系。在进行修正之前,在无雨、小雨和中雨的量级,NCEP的  $B_{ss}$  评分最高,预报技巧最高,在进行修正之后,ECMWF在各个量级的  $B_{ss}$  评分都显著提升,在各个产品的比较中,  $B_{ss}$  评分最高,预报技巧最佳,在量级小雨和大雨中,修正后的ECMWF的  $B_{ss}$  评分大于0,说明其预报技巧由于参考系,NCEP和CMA在修正后的  $B_{ss}$  评分无明显差异,预报技巧未能得到提升。

### 3.3.3 概率型预报检验流域对比

从  $B_{rier}$  评分来看,研究流域修正前后的预报产品在小雨的  $B_{rier}$  评分都是最高,说明小雨量级的预报可靠性最差,而且随着降雨量级的提升,各个产品的  $B_{rier}$  评分均呈现下降趋势。无论是在修正前后,在屯溪流域ECMWF的  $B_{rier}$  评分最低,预报可靠性最好,在更大量级的降雨中,各个产品没有表现出明显的差别,在修正后屯溪流域除了暴雨量级,每

个产品修正后的  $B_{rier}$  评分都呈现下降趋势,说明修正后对于大多数量级的降雨预报可靠性增加,而绥德流域在修正前 NCEP 的  $B_{rier}$  评分最低,预报可靠性最好,在进行修正后,只有 ECMWF 在大部分量级的  $B_{rier}$  评分在修正后呈下降趋势,并且在 3 个产品中预报可靠性最佳。

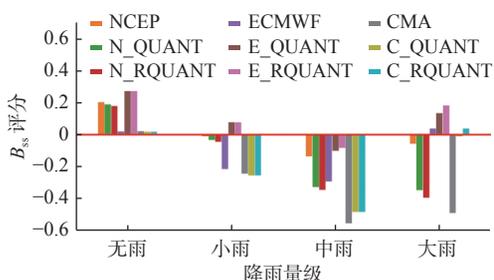


图 6 绥德流域不同预报产品修正前后  $B_{ss}$  评分  
Fig. 6 The  $B_{ss}$  scores of different forecast products in Suide basin before and after correction

从  $B_{ss}$  评分来看,研究流域修正前后的预报产品只有在无雨量级的  $B_{ss}$  评分才大于 0,预报技巧优于参考系。在大部分量级屯溪流域各个产品在修正

前后,ECMWF 的  $B_{ss}$  评分最高,预报技巧最好,而在绥德流域,在进行修正之前,在大部分量级 NCEP 的  $B_{ss}$  评分最高,预报技巧最高,在进行修正之后,ECMWF 在大部分量级的  $B_{ss}$  评分最高,预报技巧最佳,两种修正方法修正后的预报产品的预报技巧无明显差异。

### 3.4 降雨不确定对模型模拟的影响评估

表 4 为屯溪流域基于实测降雨、增加干扰后降雨数据进行模型率定的参数率定结果。其中, Group 1 表示使用实测降雨的模型率定参数组, Group 2 和 Group 3 分别表示使用(标准差为 0.1)扰动降雨和(标准差为 0.2)扰动降雨的模型率定参数组。可以看出,降雨数据的误差影响模型参数率定结果。随着误差大小的差异,参数率定结果也发生了明显的变化。表明降雨输入的不确定会在水文模型中持续传播和存在,并影响参数估计的过程,即降雨的不确定造成了参数的不确定。

对于率定得到的 3 组参数组,分别采用 3 种降

表 4 屯溪流域基于不同降雨数据的模型率定结果  
Tab. 4 Model calibration results based on different rainfall data in the Tunxi watershed

参数	参数意义	Group 1	Group 2	Group 3
$K$	蒸散发折算系数	0.935	0.942	0.996
$B$	流域蓄水容量分布曲线指数	0.362	0.394	0.355
$C$	深层散发系数	0.362	0.164	0.264
WM	张力水容量/mm	150	141	106
WUM	上层张力水容量/mm	15	17	18
WLM	下层张力水容量/mm	69	88	66
IM	不透水面积比例	0.055	0.055	0.055
SM	自由水容量/mm	19.376	19.704	23.184
EX	流域自由水容量分布曲线指数	0.19	0.19	0.19
KG	地下水出流系数	0.23	0.683	0.241
KI	壤中流出流系数	0.47	0.017	0.459
CG	地下水消退系数	0.78	0.78	0.78
CI	壤中流消退系数	0.758	0.758	0.758
$L$	河网汇流滞时/h	0	0	0
CS	河网水流消退系数	0.193	0.191	0.168
MX	马斯京根流量比重系数	0.456	0.456	0.456

雨序列进行交叉验证,得到的模型率定与参数移植结果见表 5。从表 5 可以看出,模型率定得到的确定性系数值 NS 随着降雨误差的增大呈明显的下降趋势。若将采用受干扰的降雨数据进行率定得到的参数用于实测降雨模拟,则仍然能够得到较好的

模拟效果,同时模拟精度随着参数率定期降雨误差的增大而降低。这表明在模型参数存在较大误差的情况下,高精度的降雨信息仍然可以获得较好的模拟结果,在率定期轻微的扰动甚至不影响模型在高精度降雨下的验证效果。反之,通过实测降雨率

定得到的参数组,在降雨存在误差的情况下,模拟精度会受到较大的影响。研究充分证明了降雨输入对水文模拟的高敏感性,高精度的降雨是中小河

流获取高精度预报结果的先决条件。

表 5 屯河流域基于不同降雨数据模型率定与参数移植的 NS 值

Tab. 5 NS coefficients of model calibration and parameter transplantation based on different rainfall data in Tunxi basin

率定参数	实测降雨模拟结果	(标准差0.1)扰动降雨模拟结果	(标准差0.2)扰动降雨模拟结果
Group1	0.933	0.926	0.915
Group2	0.933	0.928	0.919
Group3	0.927	0.925	0.918

#### 4 结论与讨论

以屯河流域和绥德流域为研究对象,对 TIGGE 的 NCEP、ECMWF、CMA 这 3 种数值预报产品在 2010—2015 年的 24 h 控制预报产品采用 QUANT 法和 RQUANT 法进行修正,对修正前后的各个预报产品进行预报精度分析和适用性对比,同时以屯河流域 2010—2017 年的降雨径流模拟为例,通过扰动降雨结合水文模型的方式对降雨的不确定性进行评估,结果表明:

各个产品对无雨和小雨的  $T_s$  评分预报精度较高,随着降雨量的增加,各个产品的预报能力出现明显下降。各个产品的预报偏小误差都偏大。在  $B_{rier}$  评分和  $B_{ss}$  评分上,各个产品在小雨的  $B_{rier}$  评分都是最高,预报可靠性最差,各个产品只有在无雨的  $B_{ss}$  评分大于 0,预报技巧优于参考系。

3 种预报产品修正前在屯河流域和绥德流域在不同的检验评估上表现出不同的适用性,NCEP 和 ECMWF 在两个流域的不同检验评估各有良好的预报效果,CMA 的整体预报精度在研究流域略差于其他产品,在多分类预报检验和连续型预报检验中,各个预报产品在绥德流域的  $B_s$  评分、 $E_{MA}$ 、 $E_{RMS}$  这些指标的预报效果明显优于在屯河流域这些指标的预报效果。

研究流域的各个预报产品在使用 QUANT 法和 RQUANT 法修正后在不同检验评估中的大部分指标的预报效果都优于修正之前。在屯河流域,QUANT 法和 RQUANT 法修正后的 ECMWF 和 NCEP 各有良好的表现,CMA 在修正后仅在大雨量级的  $T_s$  评分预报精度优于其他产品,而在绥德流域,无论哪种修正方法修正后,ECMWF 的各个检验指标都优于其他产品,并且整体预报效果明显优于修正之前。

降雨的不确定会导致模型参数的不确定,此外,降雨输入对水文模拟精度具有显著的影响,如何消除这种降雨不确定性是提高模型模拟精度的关键。

研究同时为不同水文气象分区选取适用的数值预报产品和修正方法提供了参考依据。类似于绥德流域的半干旱地区使用 ECMWF 修正后预报产品,在类似于屯河流域的湿润流域根据应用指标的需求选择 NCEP 和 ECMWF 产品和修正方法,能够在一定程度上减少降雨预报误差,提高洪水模拟的精度。

采用面积权重法计算各个预报产品的流域面雨量,大量研究表明,降尺度方法的选取对于降雨的不确定性有较大影响。降尺度方法主要分为动力降尺度和统计降尺度,动力降尺度物理意义明确但对计算资源要求大,统计降尺度计算快速但建立统计关系缺乏物理解释,因此,在下一步的研究中,应当进一步考虑降尺度方法对降雨的不确定性分析,考虑结合两种方法优点的动力-统计降尺度方法进一步减少降水的不确定性,从而提供更加精确的降雨输入。

#### 参考文献(References):

[1] 刘志雨,刘玉环,孔祥意.中小河流洪水预报预警问题与对策及关键技术应用[J].*河海大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(1): 1-6. (LIU Z Y, LIU Y H, KONG X Y. Problems, strategies and key technology research of flood forecasting and early warning for small and medium-sized rivers[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences Version)*, 2021, 49(1): 1-6. (in Chinese)) DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2021.01.001.

[2] CLOKE H, PAPPENBERGER F. Ensemble flood forecasting: A review[J]. *Journal of hydrology*, 2009, 375(3-4): 613-626. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2009.06.005.

- [3] 包红军, 王莉莉, 沈学顺, 等. 气象水文耦合的洪水预报研究进展[J]. *气象*, 2016, 42(9): 1045-1057. (BAO H J, WANG L L, SHEN X S, et al. A Review: Advances of flood forecasting of hydro-meteorological forecast technology[J]. *Meteorological Monthly*, 2016, 42(9): 1045-1057. (in Chinese)) DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2016.09.002.
- [4] 杜雅玲, 陆桂华, 吴志勇, 等. 基于TIGGE数据的中期降雨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)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2017.06.003.
- [5] GOLDING B W. Quantitative precipitation forecasting in the UK[J]. *Journal of Hydrology*, 2000, 239(1-4): 286-305. DOI: 10.1016/S0022-1694(00)00354-1.
- [6] BUIZZA R, LEUTBECHER M, ISAKSEN L. Potential use of an ensemble of analyses in the ECMWF Ensemble Prediction System[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society: A Journal of the Atmospheric Sciences, Applied Meteorology and Physical Oceanography*, 2008, 134(637): 2051-2066. DOI: 10.1002/qj.346.
- [7] HAMILL T M. Verification of TIGGE multimodel and ECMWF reforecast-calibrated probabilistic precipitation forecasts over the contiguous United States[J]. *Monthly Weather Review*, 2012, 140(7): 2232-2252. DOI: 10.1175/MWR-D-11-00220.1.
- [8] JIE C, BRISSETTE F P, LECONTE R. Uncertainty of downscaling method in quantifying the impact of climate change on hydrology[J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 401(3-4): 190-202. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2011.02.020.
- [9] ROOSMALEN L V, SONNENBORG T O, JENSEN K H, et al. Comparison of hydrological simulations of climate change using perturbation of observations and distribution: Based scaling[J]. *Vadose Zone Journal*, 2011, 10: 136-150. DOI: 10.2136/vzj2010.0112.
- [10] LI LIU, CHAO GAO, QIAN ZHU, et al. Evaluation of TIGGE daily accumulated precipitation forecasts over the Qu River basin, China[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2019, 33(4): 18. DOI: 10.1007/s13351-019-8096-z.
- [11] 赵天保, 符淙斌. 中国区域 ERA-40, NCEP-2 再分析资料与观测资料的初步比较与分析[J]. *气候与环境研究*, 2006, 11(1): 14-32. (ZHAO T B, FU C B. Preliminary comparison and analysis between ERA-40, NCEP-2 reanalysis and observations over China[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2006, 11(1): 14-32. (in Chinese)) DOI: 10.3878/j.issn.1006-9585.2006.01.02.
- [12] 赵琳娜, 刘莹, 党皓飞, 等. 集合数值预报在洪水预报中的应用进展[J]. *应用气象学报*, 2014, 25(6): 641-653. (ZHAO L N, LIU Y, DANG H F, et al. The progress on application of ensemble prediction to flood forecasting[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2014, 25(6): 641-653. (in Chinese)) DOI: 10.11898/1001-7313.20140601.
- [13] MATSUEDA M, NAKAZAWA T. Early warning products for severe weather events derived from operational medium-range ensemble forecasts[J]. *Meteorological Applications*, 2015, 22(2): 213-222. DOI: 10.1002/met.1444.
- [14] WOOD A W, MAURER E P, KUMAR A, et al. Long range experimental hydrologic forecasting for the eastern United States[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2002, 107(D20): ACL 6-1-ACL 6-15. DOI: 10.1029/2001jd000659.
- [15] HENRIK, FEDDERSEN, UFFE, et al. A method for statistical downscaling of seasonal ensemble predictions[J]. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 2005, 57(3): 398-408. DOI: 10.3402/tellusa.v57i3.14656.
- [16] PIANI C, HAERTER J O, COPPOLA E. Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe[J]. *Theoretical & Applied Climatology*, 2010, 99(1-2): 187-192. DOI: 10.1007/s00704-009-0134-9.
- [17] THEMESSEL M J, GOBIET A, LEUPRECHT A. Empirical-statistical downscaling and error correction of daily precipitation from regional climate models[J]. *International Journal of Climatology*, 2011, 31(10): 1530-1544. DOI: 10.1002/joc.2168.
- [18] 雷华锦, 马佳培, 李弘毅, 等. 基于分位数映射法的黑河上游气候产品降雨误差订正[J]. *高原气象*, 2020, 39(2): 266-279. (LEI H J, MA J P, LI H Y, et al. Bias correction of climate model precipitation in the upper Heihe River basin based on quantile mapping method[J]. *Plateau Meteorology*, 2020, 39(2): 266-279. (in Chinese))
- [19] GUDMUNDSSON L, BREMNES J B, HAUGEN J E, et al. Downscaling RCM precipitation to the station scale using statistical transformations: A comparison of methods[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012, 16(9): 3383-3390. DOI: 10.5194/hess-16-3383-2012.
- [20] 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): 6. (ZHANG J H, ZHU X M. Verification of prediction capability of NWP products and objective forecast methods[J]. *Meteorological*, 2006, 32(2): 6. (in Chinese)) DOI:

- 10.7519/j.issn.1000-0526.2006.2.011.
- [21] MURPHY, JAMES. An evaluation of statistical and dynamical techniques for downscaling local climate[J]. *Journal of Climate*, 2010, 12(8): 2256-2284. DOI: [10.1175/1520-0442\(1999\)0122.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)0122.0.CO;2).
- [22] FERRO C A. Comparing probabilistic forecasting systems with the Brier score[J]. *Weather and Forecasting*, 2007, 22(5): 1076-1088. DOI: [10.1175/waf1034.1](https://doi.org/10.1175/waf1034.1).
- [23] 李琼, 龚珺夫, 王洪心, 等. 湿润地区山区小流域水文模型应用与比较[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2020, 18(4): 81-86. (LI Q, GONG J F, WANG H X, et al. Application and comparison of hydrological models in small watersheds of humid regions[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2020, 18(4): 81-86. (in Chinese)) DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdkq.2020.0074](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdkq.2020.0074).

## Assessment of precipitation forecasting product's adaptability in small and medium-sized basins in different hydrometeorological regions

WEI Jinghao<sup>1</sup>, HUANG Yingchun<sup>2</sup>, YAO Cheng<sup>1</sup>

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210024, China;

2. College of Civil Engineering, Fuzhou university, Fuzhou 350108, China)

**Abstract:** Rainfall data is one of the main factors that can affect the accuracy of flood simulation in small and medium rivers, and rainfall forecasting is the most direct means of extending the forecast period. At present, there are many precipitation forecast product evaluations and post-processing methods, but the research on the applicability evaluation, accuracy improvement, and forecast of each product is still insufficient in different hydrometeorological subregions. Through the detailed evaluation after applying different correction methods, the numerical forecast products and suitable rainfall correction methods are sought for small and medium basins in different hydrometeorological regions. This research aimed to provide a reliable basis for improving the flood forecasting accuracy and forecast period of medium and small rivers.

This research took Tunxi and Suide basins and selected the 2010 to 2015 control forecast data of three products (NCEP, ECMWF, and CMA). The QUANT method and the RQUANT method were used for forecasting rainfall correction, and the multi-classification forecast test, continuous forecast test, and probabilistic forecast test methods were used to compare and analyze the applicability of different forecast products and different correction methods. Taking the measured rainfall in the Tunxi basin as an example, the rainfall was resampled by adding a noise term, and the influence of rainfall uncertainty on the hydrological simulation results was analyzed based on the Xin'anjiang model.

The results showed that the selected forecast products had high forecast accuracy for no-rain and light-rain periods. With the increase in rainfall, the forecast ability of each product decreased significantly. The test showed that the rainfall forecast effect in the Suide basin was better, and the overall forecasting accuracy of NCEP and ECMWF was well in the study basin. The forecast accuracy of CMA is slightly worse than that of other products. The prediction accuracy of most of the inspection indicators for each product was improved after the correction. Among them, ECMWF had the highest prediction accuracy in the Suide basin and had good applicability to both correction methods. The prediction accuracy of NCEP and ECMWF after different correct methods was different in the Tunxi basin. CMA's corrected TS score forecast accuracy was superior to other products only in the heavy rains weight level. The uncertainty of rainfall had a negative impact on the hydrological simulation, which led to the uncertainty of the parameters and a decrease in the accuracy of the hydrological simulation.

The research provided a reference for selecting suitable numerical forecast products and correction methods for different hydrometeorological regions. Semi-arid areas like Suide basin should use ECMWF revised forecast products, and in humid watersheds like Tunxi basin, NCEP and ECMWF products and correction methods should be selected according to the needs of application indicators, which can reduce rainfall forecast errors in certain procedures and improve the accuracy of flood simulations.

**Key words:** TIGGE; rainfall assessment; quantile mapping method; basin comparison; rainfall uncertainty