

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20210363

# 基于二元混合分布分位数映射法的长江上游区域气候模式模拟降水偏差校正

李冰雪<sup>1</sup>, 李振华<sup>2</sup>, 王德全<sup>3</sup>

(1. 上海民航职业技术学院航空制造系, 上海 200232;  
2. 萨斯喀彻温大学 全球水安全研究院, 萨斯卡通 S7N3H5;  
3. 宁夏大学 土木与水利工程学院, 宁夏 银川 750021)

**摘要:**采用4组多参数的二元混合分布QM法对RegCM4模式输出的长江中上游流域日降水进行偏差校正,并对不同单分布和混合分布QM法的偏差校正性能进行评估。结果表明:在选取的单分布中,伽马分布对长江上游流域降水的适用性最高,超过50%的降水事件可由其解释,耿贝尔分布适用性最差,仅能解释10%左右的降水事件。采用二元混合分布QM法订正的模拟降水在均方根误差、和方差、相关系数等性能参数整体优于单分布QM法的校正结果。基于伽马-广义极值分布的QM法对流域内降水的订正效果最佳,能显著降低RegCM4模式中模拟的降水湿偏差。

**关键词:**混合分布;分位数映射法;RegCM4;降水

**中图分类号:**TV125

**文献标识码:**A

**文章编号:**1000-0852(2023)01-0024-06

## 0 引言

气候模式是当前研究全球尺度和区域尺度气候变化的重要手段,但区域气候模式RCMs或全球气候模式GCMs中各类气候要素(如:降水和气温)的动力降尺度预估结果与研究区实际观测之间通常存在较大偏差,这既影响对未来气候变化效应尤其是极端事件的评估,也破坏了其在水文领域中的直接应用<sup>[1-2]</sup>。因此,在水文领域中应用RCMs和GCMs的未来气候预估成果之前需对偏差进行校正。

目前对RCMs输出的气候变量的常规订正方法有Delta法<sup>[3]</sup>,局部强度缩放法<sup>[4]</sup>以及分位数映射法(QM)等<sup>[5-6]</sup>。虽然大多数偏差校正法对气候变量的平均气候态具有良好订正效果,但对于标准差和概率密度等统计特性指标的订正性能还有待提高<sup>[7]</sup>。Themebl等<sup>[6]</sup>曾比较了大量气候模式降水的偏差校正方法后发现

QM法对于RCMs模拟降水的整体校正效果最佳,尤其在改善对极端降水事件的模拟性能方面。童尧等<sup>[8]</sup>和韩振宇等<sup>[9]</sup>则采用非参数方法RQUANT的QM法分别对RegCM4模拟的中国区域降水和气温进行了校正,并获得了良好的校正结果。

以往的大量研究表明,基于非参数的QM法可以有效校正RCMs或GCMs模拟的当前气候变量中存在的大量偏差,但其校正的效果明显受限于现有的观测资料,对观测之外的极端气候事件具有明显的局限性<sup>[10]</sup>。因此,基于多参数统计分布的QM法被广泛应用于RCMs和GCMs的输出变量的偏差校正<sup>[10]</sup>。然而,基于多参数单分布的QM法对气候模式输出变量的偏差校正仍有局限性,如韦伯分布对极端事件偏差校正性能较好,但对于一般的气候事件校正效果并不理想;指数分布和伽马分布对一般的气候模式模拟降水具有良好的校正效果,但由于其分布的轻尾特性,使

收稿日期:2021-09-07

网络首发日期:2023-01-20

网络首发地址:<https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1814.p.20230117.1818.013.html>

基金项目:宁夏水利工程一流学科重点项目(NXYLXK2021A03)

作者简介:李冰雪(1965—),女,浙江温州人,硕士,副教授,主要研究方向为流体数值模拟。E-mail:13701954929@163.com

通信作者:李振华(1978—),男,苗族,湖南怀化人,博士,副研究员,主要研究方向为区域气候模拟。E-mail:zhenhua.li@me.com

其对气候模式预估的极端气候事件校正效果较差<sup>[5]</sup>。为了克服以上基于单分布的QM法对气候模式降水偏差校正的局限性,Shin等<sup>[9]</sup>和Teng等<sup>[11]</sup>尝试采用基于混合分布的QM法对气候模式输出的降水进行订正,结果表明该方法能有效订正极端降水。

因此,本研究选取具有复杂降水机制的长江上游流域作为研究区,并基于多参数二元混合分布QM法对区域气候模式RegCM4模拟的逐日降水进行偏差校正。通过与流域内观测降水资料进行对比,检验不同混合分布对降水的订正效果,选取其中性能最佳的混合分布函数进行深入研究。研究结果可为该区域的降水订正选取最佳分布函数提供依据。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

研究选取湖北宜昌站以上的长江中上游流域(见图1)。长江上游流域降水常年受东亚夏季风的影响,夏季降水量占全年总降水量的80%以上,夏季洪涝灾害频发<sup>[12]</sup>。由于该流域具有多变的区域气候以及复杂的降水机制,RCMs和GCMs对该地区降水的模拟性能普遍较差,模拟结果通常难以直接应用于水文领域相关研究,因此需要进行大量的气候要素偏差校正。

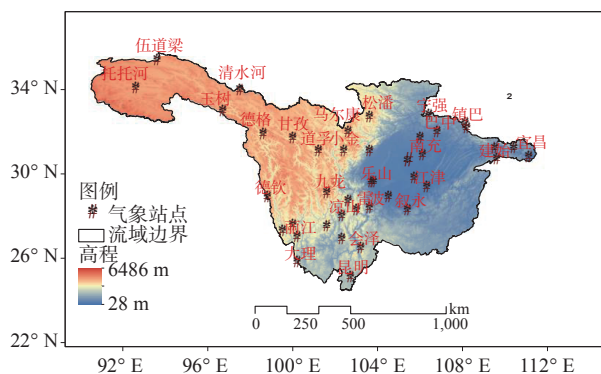


图1 研究区海拔及气象站点

Fig.1 Altitude and meteorological stations in the study area

### 1.2 数据来源

使用的数据有区域气候模式RegCM4动力降尺度试验输出的降水数据以及用于订正效果性能评估的观测数据。RegCM4输出的降水数据是基于ERA-Interim再分析资料进行的50 km分辨率动力降尺度试验结果。研究中的模型配置方案参考Huang等<sup>[13]</sup>在长江上游流域的研究成果。

订正性能评估所采用的降水观测数据由流域内42个气象站点1961—2015年逐日观测数据以及CN05

数据集。CN05数据集是中国气象局采用基于“距平逼近”法对2400多个国家地面气象站点观测数据插值制作而成<sup>[14]</sup>。为了便于分析比较观测降水与RegCM4模拟降水之间的差异,本研究使用双线性插方法将RegCM4模式输出的降水数据插值到CN05数据网格中心。

## 2 研究方法

### 2.1 混合分布分位数映射法

传统的分位数映射法(QM)<sup>[15]</sup>通过将RCMs模拟的气候要素 $x$ 的概率分布调整为观测数据 $y$ 的概率分布,使得观测值 $y$ 与模拟值 $x$ 的累计概率密度CDF值一致,通过QM法将气候模式模拟的气候要素CDF映射到对应的观测数据(OBS)获取校正值。该方法的一个基本假设是气候分布不会随时间发生很大的变化,即分布的方差和偏度是平稳的,只有均值变化<sup>[16]</sup>。本文定义混合分布为 $f(x)$ 表达式如下:

$$f(x) = \sum_{i=1}^n \sigma_i f_i(x; \delta_i) \quad (1)$$

式中: $\delta_i$ 为第 $i$ 个分布函数的各项参数; $\sigma_i$ 为单个参数分布组的权重系数, $0 < \sigma_i < 1$ ;  $n$ 为混合分布数量,本研究中 $n=2$ 。

由于多参数多元混合分布模型具有较高的复杂性,需要耗费大量计算资源,仅有Shin等<sup>[9]</sup>和Teng等<sup>[11]</sup>在韩国和澳大利亚等地使用二元混合QM法对气候模式输出降水进行订正,并取得了较好的订正结果。本研究采用多参数二元混合分布模型进行分析,选取在水文气象研究中广泛应用的多参数单分布函数,如伽马分布(G)、指数分布(E)、广义极值分布(V)、耿贝尔分布(U),并设置4种混合分布: $G-G$ 、 $G-E$ 、 $G-V$ 、 $G-U$ <sup>[5]</sup>。

RegCM4模拟降水通常会大量的虚假降水事件,为了与观测降水事件匹配,研究中将采用对应的历史期降水数据为基准,对RegCM4模拟的降水事件进行逐月的偏差校正,得到新的日降水序列<sup>[5]</sup>。为快速获取混合分布函数拟合参数,本研究采用传统遗传算法对所有计算格点和气象站点的参数进行自动寻优。

### 2.2 性能评估方法

为评估不同混合分布类型对RegCM4模拟的降水数据订正性能,选取对长江上游拟合性能最优的混合分布模型,本研究采用Kolmogorov-Smirnov(K-S)统计检验法对流域内的42个观测站的降水时间序列进行统计检验。K-S检验值(D)可以有效验证观测值是否

服从本研究所设置的单分布或混合分布。研究中采用通过了K-S检验95%置信水平的气象站点数( $P_{95}$ )、平均相对误差(MRE)、相关系数(R)、均方根误差(RMSE)以及误差平方和(SSE)等统计指标对订正前后的降水分位数序列进行计算,并对单分布与混合分布拟合性能进行比较分析。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 不同参数分布函数订正性能评估

表1为各分布函数拟合流域内42个站点观测降水的性能评估参数。与耿贝尔分布(U)相比,伽马分布(G)、指数分布(E)以及广义极值分布(V)的D、MRE、RMSE以及SSE均明显小于U分布,通过显著性检验的站点数 $P_{95}$ 值和相关系数R值也高于U分布。根据4种单分布的拟合性能参数大小可知,单分布中的伽马分布(G)和广义极值分布(V)相对于指数分布(E)和耿贝尔分布(U)在长江上游流域中的适用性更强。但即使性能最佳的伽马分布也仅有23个站点通过K-S显著性检验,表明单分布在全流域的降水拟合中存在明显局限性。

与4组单分布拟合性能参数相比,混合分布的拟合性能得到了明显的提升。G-G、G-E以及G-V三组多参数二元混合分布函数对观测降水的拟合性能较其各自的单分布函数拟合性能得到明显提升。其中,由单分布中表现最优的伽马分布与广义极值分布组成的G-V混合分布的 $P_{95}$ 值达到了39,接近93%的站点通过K-S显著性检验,表明G-V混合分布对于长江流域观测降水的拟合性能极佳。为此,本研究中将采用基于伽马分布-广义极值分布(G-V)的二元混合分布QM法对RegCM4模拟的长江上游流域逐日降水进行偏差订正。

表1 单分布与混合分布拟合性能对比

Table1 Comparison of fitting performance between single distribution and mixed distribution

分布名称	K-S检验参数		MRE	RMSE	SSE	R
	D	$P_{95}$				
G	0.32	23	20.59	6.87	1.66	1.00
E	0.54	8	54.90	27.08	22.74	0.98
U	0.80	0	164.92	43.75	63.23	0.94
V	0.38	14	9.32	13.44	6.01	0.99
G-G	0.18	38	1.17	1.39	0.16	1.00
G-E	0.19	40	-1.26	1.35	0.18	1.00
G-U	0.37	13	8.10	3.17	0.38	1.00
G-V	0.17	39	-1.07	1.29	0.14	1.00

由图2可知,长江上游流域内42个气象站点的降水类型均可由多参数二元混合分布函数分割成两部分进行解释。G-G、G-E、G-V以及G-U等4组混合分布中伽马分布的 $\sigma$ 中位数分别在0.5、0.7、0.8以及0.9左右,表明在长江上游流域中超过50%的降水事件符合伽马分布特征,可由伽马分布进行解释,而耿贝尔分布仅能解释流域内10%以内的降水事件。因此,伽马分布较其他3种单分布在长江流域的适用性更强,而耿贝尔分布在流域内适用性较差。

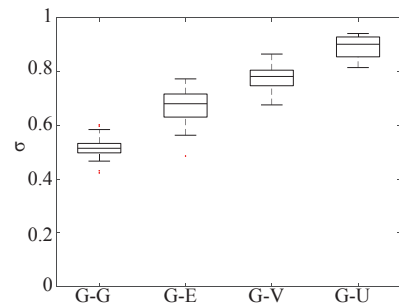
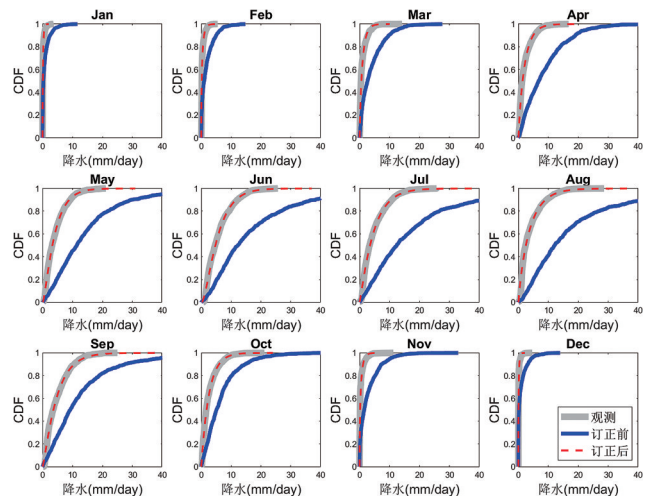


图2 混合分布中Gamma分布权重系数

Fig.2 Weight coefficient of Gamma distribution in mixed distribution

#### 3.2 基于G-V分布的站点降水订正性能评估

如图3所示,位于马尔康站订正前降水CDF与观测降水CDF偏差最大,尤其在3~9月份之间。采用基于G-V二元混合分布的QM法校正后,马尔康站各月份的降水CDF得到了大幅修正,尤其CDF在0.9以上的降水事件中存在的大量湿偏差(与观测降水之差大于零)得到明显改善。同样,位于长江上游流域西部的托托河站和东部的巴东站的CDF在校正后与观测降水的CDF基本一致(图略)。



注:灰色曲线为观测的CDFs,蓝色曲线为校正前的CDFs,红色曲线为校正后的CDFs。

图3 马尔康逐月降水CDF

Fig.3 Monthly precipitation CDF of Maerkang



如图4所示,托托河站观测的多年月平均最大降水量在6月份约为1.8 mm/day,而偏差校正前的流域多年月平均最大降水量出现在每年的5月,约为2.4 mm/day。马尔康站观测与订正前的多年月平均最大降水量均发生在6月份,降水量分别为5.3 mm/day和21.2 mm/day。订正前的巴东站内降水循环过程呈明显的双峰形,多年月平均最大降水量最大的5月和8月均超过10 mm/day,而实际观测的年内降水循环过程为单峰形,且最大月份降水量仅为3.8~5 mm/day。与观测的年内降水循环过程相比,订正前的托托河站、马尔康站以及巴东站内降水循环过程与实际存在偏差,尤其是托托河站和巴东站。与订正前相比年内降水循环过程相比,订正后的年内降水循环过程与观测基本一致,各月份降水湿偏差也得到校正。以上结果表明,基于伽马分布-广义极值分布(G-V)的多参数二元混合分布QM法对RegCM4模拟的长江上游流域东部、中部以及西部站点的降水CDF以及年内循环过程均有良好的订正效果,对长江上游流域不同地区气象站点降水偏差校正具有较强的适应性与稳健性。

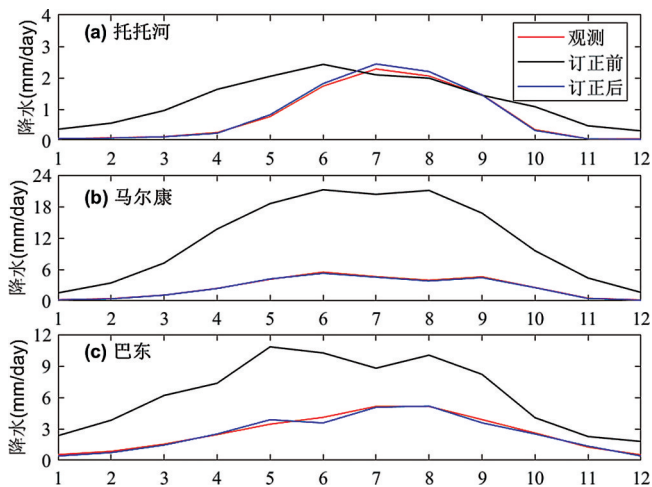
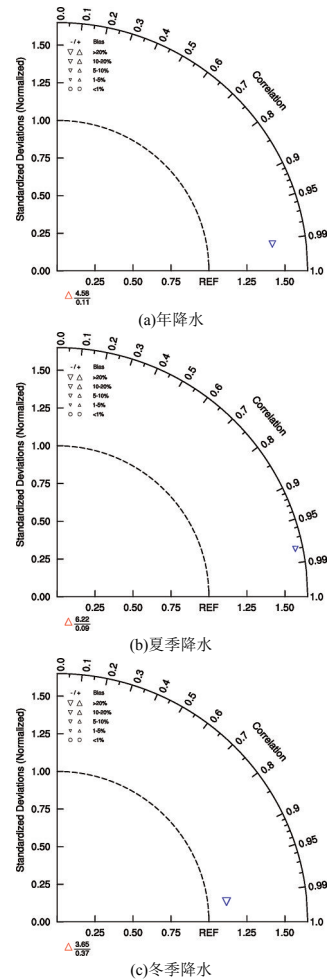


图4 年内降水循环过程  
Fig.4 Annual cycle of precipitation

### 3.3 基于G-V分布的流域降水订正性能评估

订正前的模拟和观测的多年平均降水的空间相关系数仅为在0.11(见图5(a))。冬季降水的空间相关系数达到0.37(见图5(c)),在订正前的整体模拟性能略优于夏季,但模拟的降水湿偏差通常在25%以上。采用多参数G-V二元混合分布分位数进行降水偏差校正后,RegCM4模拟与观测的多年平均降水空间相关系数从校正前的0.11增至校正后的0.99。RegCM4模拟的降水湿偏差由校正前的25%缩至校正后的10%左右。与校正前后的夏季降水相比,基于G-V的二元

混合分布分位数映射法对冬季降水的偏差校正效果更优((见图5(b,c))。



注:订正前的降水与观测值偏差较大,无法在扇区内显示,采用红色三角形显示在左下角。蓝色表示订正后降水。

图5 订正前后降水泰勒图

Fig.5 Taylor diagrams of precipitation before and after the correction

观测的长江上游流域东部以及中部的多年平均年降水量较高(1000 mm以上),而长江上游流域西部的多年平均年降水量小于500 mm(见图6(a))。与观测相比,订正前RegCM4模拟的流域降水与观测降水之间存在较大湿偏差,在环绕四川盆地的山区存在明显的湿偏差(见图6(d~f))。四川盆地西部的松潘高原、西南的云贵高原以及东南的巫山模拟的年降水量可达到1500 mm以上,与当地观测值相差一倍以上。RegCM4模拟的夏季和冬季降水与观测相比也有较大的湿偏差,这些湿偏差主要集中在地形复杂的高山地区。通过偏差校正后,RegCM4模拟的长江中上游流域降水湿偏差得到显著改善,多年平均降水、夏季降水以及冬季降水的空间分布特征与观测数据基本一致(见图6(g~i))。

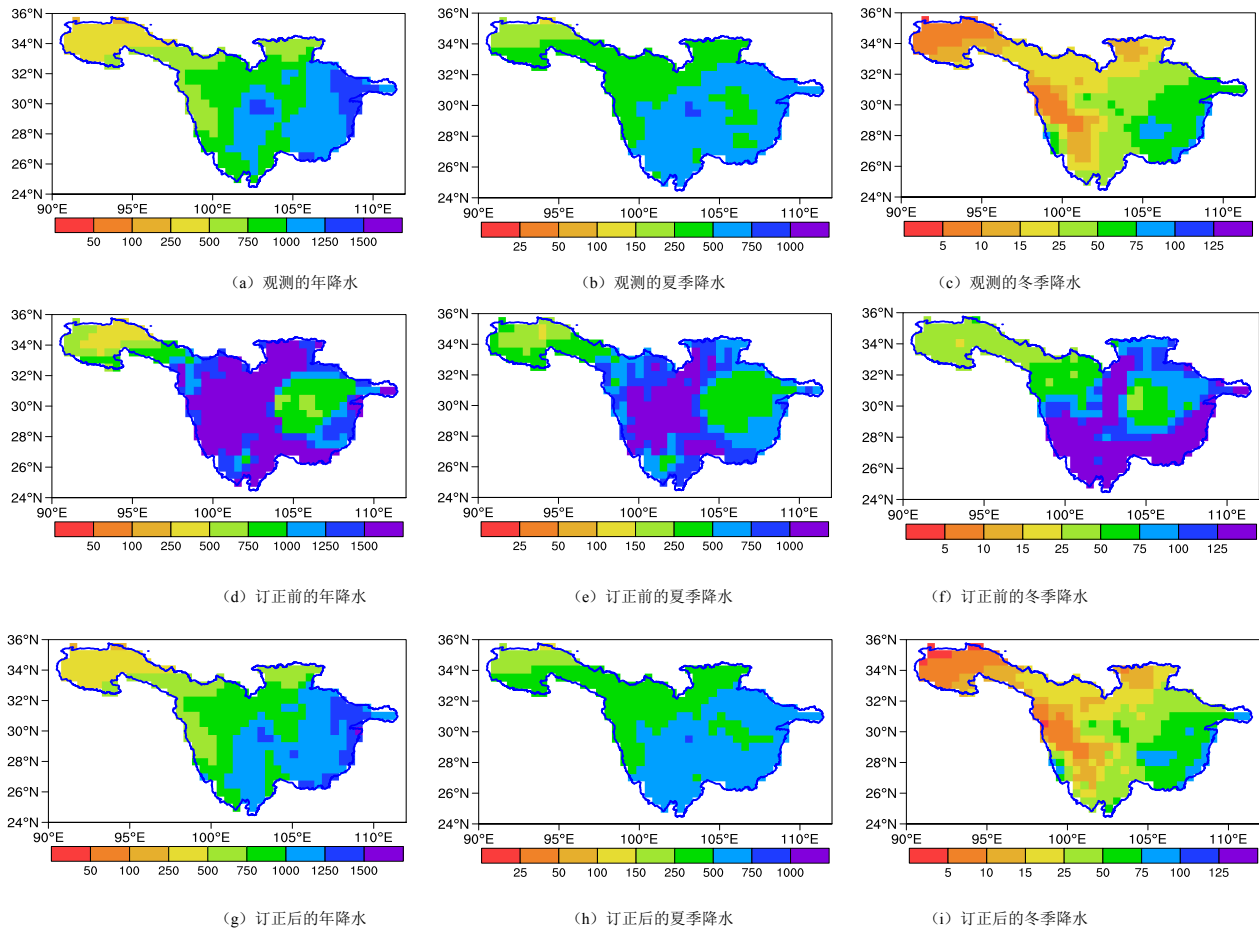


图6 长江上游多年平均降水空间分布(mm)

Fig.6 Spatial distribution of multiyear average precipitation in the upper Reaches of the Yangtze River

## 4 结论

为了更好的将区域气候模式 RegCM4 模拟降水应用于水文模拟,本研究通过基于不同多参数二元混合分布分位数映射法对 RegCM4 模拟的日降水进行逐月偏差校正,比较了不同单分布和二元混合分布对历史观测降水的拟合效果,对其中表现较好的伽马分布-广义极值分布(G-V)进行了深入分析,主要研究结论如下:

(1)在各种单分布中,伽马分布在流域内适用性最高,超过50%的降水事件可由其解释,耿贝尔分布适用性最差,仅能解释10%左右的降水事件,表明耿贝尔分布并不适用于长江上游流域降水拟合分析。

(2)采用混合分布订正后的降水在均方根误差、和方差、相关系数等性能参数整体优于单分布订正结果,表明基于多参数二元混合分布的分位数映射法对长江上游流域 RegCM4 模拟降水的偏差校正效

果最佳。

(3)在各种混合分布中,基于伽马-广义极值混合分布的分位数映射法对流域内降水的订正效果最佳,能显著降低 RegCM4 模式中降水湿偏差。

总的来说,采用基于伽马-广义极值二元混合分布分位数映射法对长江上游流域区域气候模式模拟降水的数值和空间分布上具有良好校正效果。但该混合分布仍未使得流域内所有观测站点降水拟合性能通过 K-S 检验,这也表明该方法存在进一步的优化空间。下一步工作中,我们将验证基于三元混合分布的分位数映射法对区域气候模式降水的订正效果,并在订正模型中加入时变参数,为气候变化影响评估以及风险分析提供更适用及可靠的订正数据。

## 参考文献:

- [1] HADDELAND I, HEINKE J, VOB F, et al. Effects of climate model radiation, humidity and wind estimates on hydrological simulations [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2012,16(2):305-318.

- [2] HAGEMANN S, CHEN C, HAERTER J O, et al. Impact of a statistical bias correction on the projected hydrological changes obtained from three GCMs and two hydrology models[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2011,12(4):556–578.
- [3] LETTENMAIER D P, WOOD A W, PALMER R N, et al. Water Resources Implications of Global Warming: A U.S. Regional Perspective[J]. *Climatic Change*, 1999,43(3):537–579.
- [4] LEANDER R, BUISSHAND T A. Resampling of regional climate model output for the simulation of extreme river flows[J]. *Journal of Hydrology*, 2007,332(3):487–496.
- [5] SHIN J, LEE T, PARK T, et al. Bias correction of RCM outputs using mixture distributions under multiple extreme weather influences[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2019,137(1–2):201–216.
- [6] THEMEBL 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.
- [7] TEUTSCHBEIN C, SEIBERT J. Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate–change impact studies: Review and evaluation of different methods[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 456–457:12–29.
- [8] 童尧, 高学杰, 韩振宇, 等. 基于 RegCM4 模式的中国区域日尺度降水模拟误差订正[J]. *大气科学*, 2017, 41(6):1156–1166.
- [9] 韩振宇, 童尧, 高学杰, 等. 分位数映射法在 RegCM4 中国气温模拟订正中的应用[J]. *气候变化研究进展*, 2018, 14(4):331–340.
- [10] GUTJAHR O, HEINEMANN G. Comparing precipitation bias correction methods for high–resolution regional climate simulations using COSMO–CLM[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2013,114(3):511–529.
- [11] TENG J, POTTER N J, CHIEW F, et al. How does bias correction of regional climate model precipitation affect modelled runoff?[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2015, 19(2):711–728.
- [12] SUTCLIFFE J V. The use of historical records in flood frequency analysis[J]. *Journal of Hydrology*, 1987, 96(1):159–171.
- [13] HUANG Y, XIAO W H, HOU B D, et al. Hydrological projections in the upper reaches of the Yangtze River Basin from 2020 to 2050[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1):9720.
- [14] 吴佳, 高学杰. 一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其它资料的对比[J]. *地球物理学报*, 2013, 56(4):1102–1111.
- [15] GUDMUNDSSON L, BREMNES J B, HAUGEN J E, et al. Technical Note: Downscaling RCM precipitation to the station scale using statistical transformations &ndash; a comparison of methods[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012, 16(9):3383–3390.
- [16] LI H, SHEFFIELD J, WOOD E F. Bias correction of monthly precipitation and temperature fields from Intergovernmental Panel on Climate Change AR4 models using equidistant quantile matching[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2010, 115(D10).

## Bias Correction of Regional Climate Model Precipitation over the Upper Reaches of the Yangtze River Based on Mixed Distribution Quantile Mapping Method

LI Bingxue<sup>1</sup>, LI Zhenhua<sup>2</sup>, WANG Dequan<sup>3</sup>

(1. *Department of the Aviation Manufacturing, Shanghai Civil Aviation College, Shanghai 200232, China;*

2. *Global Institute for Water Security, University of Saskatchewan, Saskatoon S7N3H5, Canada;*

3. *School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)*

**Abstract:** This study compared multiple sets of single distribution and multi–parameter mixed distribution QM methods in terms of bias–correcting the precipitation in the middle and upper reaches of the Yangtze River basin by the RegCM4 model. The results show that among the selected single distributions, the gamma distribution has the highest applicability in the basin, and more than 50% of the precipitation events can be explained by it. The Gumbel distribution has the worst applicability, which can only explain about 10% of the precipitation events. The performance parameters such as root mean square error, and variance and correlation coefficient of corrected precipitation using mixed distribution are better than those corrected using single distribution. The QM method based on the gamma–generalized extreme value distribution performs best in correcting the precipitation in the basin and can significantly reduce the precipitation wet bias in the RegCM4 model.

**Keywords:** mixed distribution; Quantile mapping method; RegCM4; precipitation