

# Does the Dynamical-Statistical Downscaling Method Perform Better than the Single Downscaling Method at the Evaluation of Hydrological Response?

Han Liu, Jie Chen\*, Guiyang Wu

State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan Hubei  
Email: hanliuzl@whu.edu.cn, \*jiechen@whu.edu.cn

Received: Sep. 30<sup>th</sup>, 2019; accepted: Nov. 11<sup>th</sup>, 2019; published: Nov. 18<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

The downscaling can be generally classified into dynamical, statistical and dynamical-statistical downscaling. These downscaling methods were widely applied to evaluating the impact of climate change on streamflow, while there were few studies on the comparison and evaluation of different types of downscaling methods in runoff simulation. To figure out whether dynamical-statistical downscaling method is superior to single downscaling method in terms of runoff simulation, three downscaling methods are compared for its performance on runoff simulation over three watersheds in this study. The results show that: 1) The precipitation and temperature simulated by Global climate model (GCM) and its corresponding regional climate model (RCM) are very biased, indicating that the dynamical downscaling method does not effectively reduce the deviation between GCM outputs and observations at the watershed scale; 2) The bias correction methods are capable of correcting biases of GCM- and RCM-simulated precipitation and temperature, and can reproduce streamflow more realistically. In addition, there are no obvious advantage of using dynamical-statistical downscaling over single statistical downscaling in runoff simulation, thus it can directly apply bias correction method to GCM outputs; 3) The bias correction method taking the temporal sequence of precipitation into account has certain advantages in the simulation of daily precipitation, monthly runoff and water quantity, but it performs similarly to the method that only corrects the wet-day frequency of precipitation in the daily runoff simulation. The above results can provide references for the selection of downscaling methods in hydrological climate change impact studies.

## Keywords

Dynamical Downscaling, Statistical Downscaling, Dynamical-Statistical Downscaling, Climate Model, Precipitation, Streamflow

---

作者简介: 刘寒(1995), 女, 硕士研究生, 研究方向: 统计降尺度。  
\*通讯作者。

文章引用: 刘寒, 陈杰, 吴桂扬. 径流响应评估中基于动力与统计相结合的降尺度方法是否优于单一的降尺度方法[J]. 水资源研究, 2019, 8(6): 535-546. DOI: 10.12677/jwrr.2019.86061

# 径流响应评估中基于动力与统计相结合的降尺度方法是否优于单一的降尺度方法

刘 寒, 陈 杰\*, 吴桂场

武汉大学水资源与水电科学国家重点实验室, 湖北 武汉

Email: hanliuzl@whu.edu.cn, \*jiechen@whu.edu.cn

收稿日期: 2019年9月30日; 录用日期: 2019年11月11日; 发布日期: 2019年11月18日

## 摘 要

降尺度一般可以分为动力降尺度、统计降尺度、动力与统计降尺度相结合的方法。以上方法均被广泛应用于气候变化对流域径流的影响评估中, 然而对以上不同类型的降尺度方法在径流模拟中的对比评价尚不多见。本文以崇阳河流域、东江流域和湘江流域为研究对象, 对比了以上三种不同类型的降尺度方法在径流模拟中的表现, 旨在回答在径流响应中动力与统计相结合降尺度方法是否优于单一的方法。同时通过使用两种不同的统计降尺度方法(偏差校正方法)研究校正降水时序对径流模拟的影响。研究表明: 1) 全球气候模式(GCM)和与之相对应的区域气候模式(RCM)模拟的降水和气温均具有较大的偏差, 说明动力降尺度方法并不能有效的降低GCM输出变量在流域尺度上的偏差; 2) 偏差校正方法可以很好的校正降水与气温的偏差, 并能较好的模拟流域的径流量, 同时动力与统计相结合的方法在径流模拟方面没有明显的优势, 因此在径流响应评估中可以绕过RCM直接对GCM进行偏差校正; 3) 考虑降水时序的偏差校正方法在日降水、月径流以及水量模拟方面具有一定的优势, 但在日径流模拟方面与只考虑降水概率校正的方法类似。以上结果可为径流响应评估中降尺度方法的选择提供参考。

## 关键词

动力降尺度, 统计降尺度, 动力-统计降尺度, 气候模型, 降水, 径流

Copyright © 2019 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

气候变化对人类的生产生活有着不容忽视的影响, 其对水文水资源的影响也是气候学及水文学领域研究的热点[1] [2]。全球气候模型(Global Climate Model, GCM)是评估气候变化影响的重要工具, 然而其较低的分辨率和系统偏差使得 GCMs 的输出并不能直接作为水文模型的输入[3] [4], 降尺度方法由此衍生[5] [6]。降尺度方法可以分为动力降尺度、统计降尺度、动力与统计相结合的降尺度[7] [8]。动力降尺度方法以大气动力学方程为基础, 基于 GCMs 的初始和边界条件驱动区域气候模型(Regional Climate model, RCMs)以产生更高分辨率的气候信息[9] [10]。RCMs 物理意义明确, 不受观测资料条件限制, 能较为准确的模拟出区域尺度的气候变量特征[7] [11]。然而, RCMs 的计算代价较高, 兼容性差, 且由于继承了 GCMs 的偏差, 以及本身对气候系统的不完全理解所产生的偏差, 导致其结果不能直接用于流域尺度或者站点尺度的径流响应评估[10] [12]。统计降尺度方法可以在一定程度上弥补动力降尺度方法的不足[13] [14], 其原理为通过建立区域气候模式输出的大尺度气候因子

与当地气候变量之间的统计关系来进行降尺度[7]。由于计算量小,运用灵活,且能将大尺度的气候变量相对准确地校正至区域或者流域尺度的特性[15],该方法被广泛应用于气候变化影响研究中[11][16][17][18]。然而,已有研究表明,直接采用统计降尺度对 GCM 输出进行后处理,而不通过动力降尺度依然可以较好的产生站点或流域尺度的气候变化情景[19][20][21],并能较好的反应在径流模拟中[22][23]。尽管统计降尺度方法和动力-统计降尺度方法均能较好的模拟出降水及相应的径流响应,但很少有研究比较过这两者方法在降水及径流模拟上的具体差别。目前的大多数研究都集中于对单一的统计降尺度与动力降尺度方法的对比[12][16][24],或是仅停留在气象要素层面上的两种或者三种降尺度方法的对比[25][26]。不同的研究目标下对于降尺度方法有不同的选择标准,系统的比较三类降尺度方法在降雨径流模拟上的差别对该类研究具有重要的参考价值。

本文以崇阳溪流域,东江流域,湘乡流域为研究区域,以 CORDEX 中全球气候模式 HadGEM2-AO 及五个区域气候模式为基础,评价了动力降尺度模型的效果,并运用两种统计降尺度方法对气候模型的降水及气温进行偏差校正,而后输入新安江模型模拟径流,以探讨以下问题 1) 动力降尺度方法对于降水及气温的模拟效果是否较原始 GCM 输出有较大改进; 2) 动力与统计相结合的降尺度方法在降水与径流模拟中是否优于单一的降尺度方法; 3) 具有校正降水时序特性的偏差校正方法对于降水径流的模拟是否优于传统的偏差校正方法。

## 2. 研究区域与数据

### 2.1. 流域概况

本研究以崇阳溪,东江和湘江流域最大子流域为研究区。其中,崇阳溪流域是闽江流域上游建溪流域的主要支流所控制的流域;东江流域是珠江水系的主要河流之一;湘江流域为衡阳站以上的集水区域。表 1 列出了三个流域的基本信息。

**Table 1.** The watershed area, mean of annual maximum and minimum temperature, annual precipitation and streamflow  
**表 1.** 研究流域的面积、年平均最高和最低气温、降水量和径流量

流域名	面积(Km <sup>2</sup> )	年平均最低气温(°C)	年平均最高气温(°C)	年降水量(mm)	年径流量(m <sup>3</sup> /s)
崇阳溪	4848	14.4	23.8	1843	174
东江	25325	17.5	26.0	1758	736
湘江	52150	14.8	22.4	1464	1394

### 2.2. 研究数据

本文所使用的气象观测数据为各流域及周边的气象站所提供的 1961~2005 年的降水和最高、最低气温数据,来源于国家气象信息中心的中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)。径流观测资料为流域内水文站点的逐日流量数据。其中东江流域和湘江流域均选取了各自流域出口 1961~2005 年的日流量数据,而由于崇阳溪流域径流资料有限,选取的是建阳站 2001.1~2005.10 及 2006.3~2013.8 的日流量数据。

本文使用的气候模型为“世界气候研究计划”(WCRP)所运行的 CORDEX-EA (<https://esgdata.gfdl.noaa.gov/search/esgf-gfdl/>)中全球气候模型 HadGEM2-AO 及以此为驱动进行动力降尺度的五个区域气候模型 YSU-RSM、HadGEM3-RA、SNU-MM5、SNU-WRF 和 RegCM4,从 1980~2005 年共 26 年的历史期日降水和最高与最低气温大模拟数据。

## 3. 偏差校正方法

### 3.1. 基于分位数的偏差校正方法

本研究采用日偏差校正方法(daily bias correction, DBC) [17],其概念简单,应用方便且具有较好的校正效果

被广泛应用于气候变化的相关研究中[17] [18] [27]。该方法是降水强度缩放(local intensity scaling, LOCI)和日降水转换(daily translation, DT)方法的结合,因此兼具了 LOCI 方法在校正湿日频率和 DT 方法在校正降水量上的优势。其进行偏差校正的具体步骤如下:第一步以月为基础,基于观测数据的降水发生频率,确定模型降水的阈值,使得参考期降水频率等于观测降水频率,并将该阈值用于未来期模拟降水以确定湿日频率。第二步首先计算出观测数据(降水、最高和最低气温)和模拟数据在参考期各百分位数上的偏差,然后再去除未来期模拟数据各相应百分位数上的偏差。

由于 DBC 方法为单变量偏差校正方法,并未考虑到变量间的相关性,而降水与气温的相关性对于径流的模拟十分重要[20] [28]。因此,本文采用 Iman 和 Conover 1982 年提出的自由分布法[29]来建立 DBC 方法校正后降水与气温的相关性,以进行后续的径流模拟。

### 3.2. 基于马尔科夫链的偏差校正方法

尽管 DBC 方法能够较好的校正降水的发生频率以及降水量的概率分布,但没有考虑降水时序的校正[30] [31],而准确的降水时序对于小流域极端水文事件及作物生长等都具有重要的作用[16] [32]。研究发现,马尔科夫链能校正各种气候条件下的降水时序[33] [34],这个过程中涉及到降水转移概率  $P_{01}$  和  $P_{11}$ 。 $P_{01}$  表示的是前一天是无降水的条件下,第二天有降水的概率, $P_{11}$  则为前一天有降水的条件下,第二天降水的概率。此外,有研究表明降水转移概率与月降水均值之间存在线性关系[35]。由观测数据建立该种线性关系后,根据 DBC 方法校正的月降水均值可插值得到校正后的降水转移概率,从而生成降水序列,然后从 DBC 校正得到的相应月份的降水量数据中抽样以生成降水序列中湿日的降水量,具体步骤参见[36]。该方法是由 DBC 方法与马尔科夫链相结合的偏差校正方法,被称为“基于马尔科夫链的偏差校正方法”(Markov Chain-based bias correction method, MCBC)。由 MCBC 方法的原理可知,该方法也为单变量偏差校正方法,故也采用自由分布法重建降水和气温的相关性。

### 3.3. 新安江模型

新安江模型是由水文学家赵人俊于 1973 年提出的概念性降雨径流模型,该模型在湿润地区模拟效果较好且应用广泛[37] [38]。本研究采用三水源新安江模型进行产流划分,即将流域产流划分为地面径流,壤中流和地下径流。蒸散发采用上层、下层和深层的三层蒸发模式。汇流则分为坡面汇流和河网汇流,其中,坡面汇流中的地表径流采用单位线法进入河网进行汇流计算。本研究中利用三个流域日径流数据及其同期气象数据对新安江模型进行参数率定,模型参数优选采用单纯多边形进化算法(SCE-UA),并将克林效率系数(KGE)最高作为目标函数寻求最优解。

### 3.4. 实验设计

本研究首先计算 CORDEX 中 GCM 及其驱动的 5 个 RCM 输出的降水,最高与最低气温月均值及均方差,以简要评价单一的动力降尺度方法对于降水和气温的模拟效果。而后用两种偏差校正方法对上述气候模型数据进行偏差校正,以湿日频率,湿日降水的均值,均方差及 95th 分位数降水为指标评估三种降尺度方法对降水的模拟效果,同时绘制了干湿天累计频率曲线以探究两种降尺度方法在时序校正上的不同。最后,将降尺度后的数据输入率定好的新安江模型,以日径流的均值、高水流量(95%)、低水流量(5%)、多年平均月径流过程线及水量偏差为指标,评价动力与统计降尺度方法与单一降尺度方法所模拟的径流响应的区别。

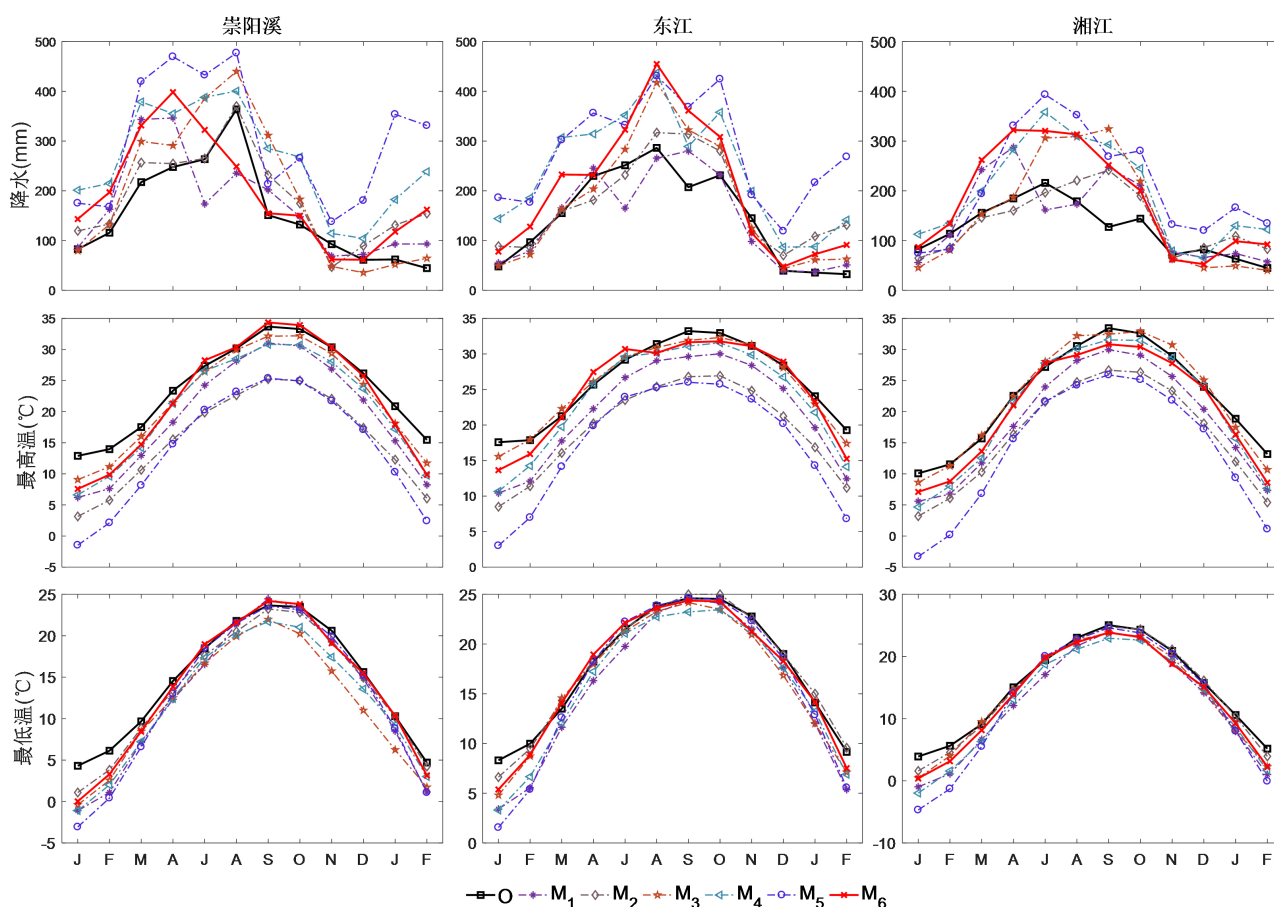
## 4. 结果分析

### 4.1. 动力降尺度结果

图 1 给出了多年平均月降水量、月最高气温和最低气温的实际观测值和气候模型模拟结果。总体而言,所



有气候模式对于降水和气温的模拟都存在较大的偏差。各模式对气温的模拟效果优于对降水的模拟效果，且六个气候模式都能模拟出气温的年内分布，但在冬季(12月、1月和2月份)仍存在较大偏差，其中YSU-RSM(M5)在这三个月的模拟偏差均超过 $10^{\circ}\text{C}$ 。此外，大部分的区域气候模式对于月均气温的模拟偏差比全球气候模式HadGEM2-AO(M6)的偏差更大。六个气候模型都能够大致的模拟出降水的年内分布但存在较大的偏差，一些月份降水的相对偏差甚至超过100%。图2显示的是观测及模型模拟的月降水量、最大及最小气温的标准差，各模型模拟的降水及气温标准差与实际值之间都存在较大偏差。综上所述，在CORDEX中的GCM和RCM对三个流域的降水和气温模拟均具有较大的偏差，动力降尺度后的降水和气温输出精度与原始的GCM数据相比并没有较大的改进，需要进一步后处理才能应用于水文模拟中。



**Figure 1.** Annual mean of monthly precipitation, maximum and minimum temperature of observation and that of climate models simulation at three watersheds. For the six legends, O represents observation, M1 to M5 are represent regional climate models of HadGEM3-RA, RegCM4, SNU-MM5, SNU-WRF, respectively, M6 represents the driven model HadGEM2-AO

**图1.** 三个流域的观测及气候模型模拟的月降水、月最高气温和最低气温的多年平均值,六个图例中,O代表观测数据,M1~M5为RCM,分别为HadGEM3-RA, RegCM4, SNU-MM5, SNU-WRF, M6为驱动模型HadGEM2-AO

## 4.2. 偏差校正方法模拟时序对比

图3、图4给出了两种偏差校正方法校正后的连续湿天序列和连续干天序列的累积分布曲线。如图示,DBC方法能很好的校正降水量的分布,但除了通过对湿日频率的校正来略微改变降水时序之外,其降水时序基本等同于原始气候模型的降水时序,因此,由DBC方法校正的干天(湿天)的累计频率分布与观测的频率分布曲线具有一定的偏差。MCBC校正后的序列较好的再现了观测的连续干天和湿天的累积频次分布。其中,

经 MCBC 方法校正过的连续湿天序列的累积分布曲线与观测曲线基本重合。经过 MCBC 方法校正的连续干日的累计分布虽不如连续湿天更贴合观测结果，但也较大地减少了原始模型的偏差。此外，不论原始偏差多大，经 MCBC 校正后所有气候模型的连续干湿日累计分布曲线均较为接近，表明 MCBC 方法降低了模拟的不确定性。

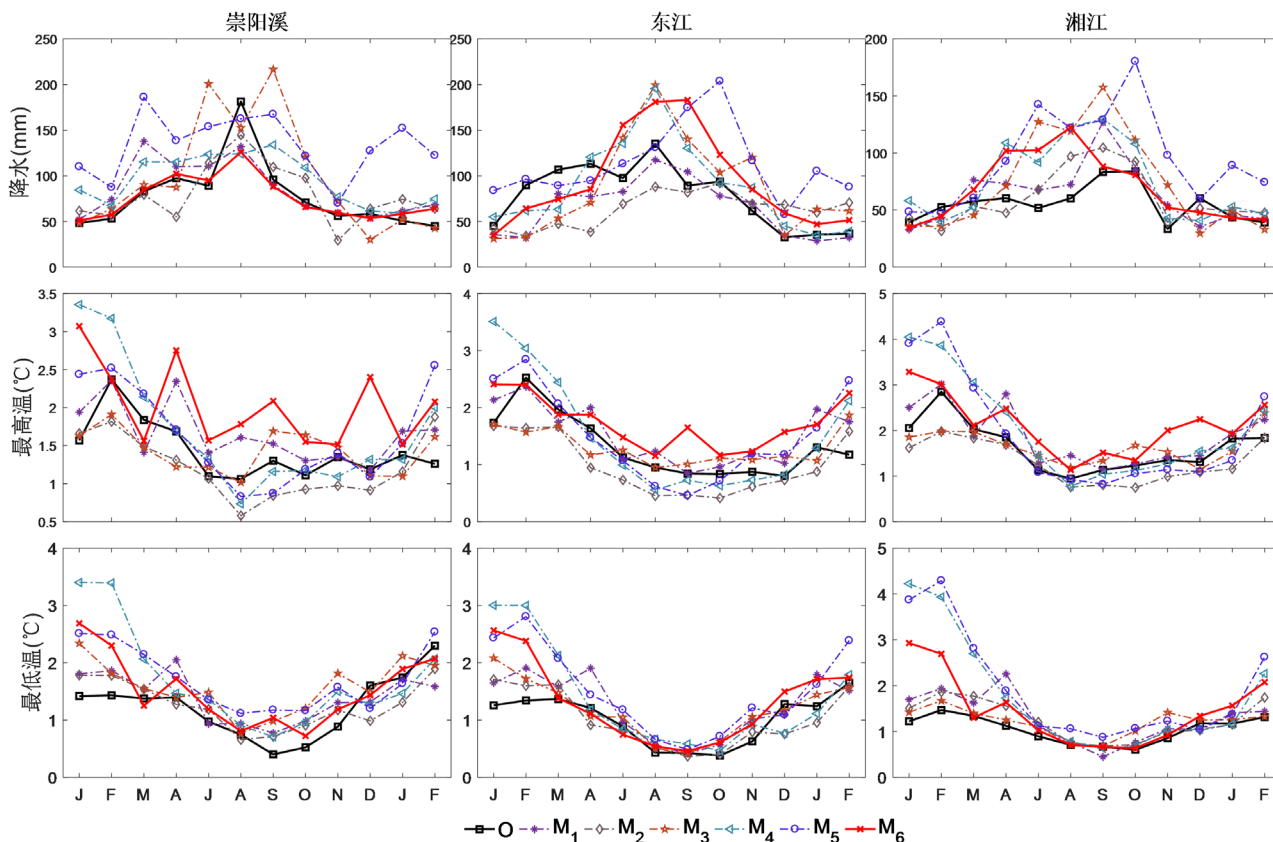


Figure 2. The standard deviation of monthly precipitation, maximum and minimum temperature of observation and that of climate models simulation at three watersheds

图 2. 三个流域的观测及气候模型模拟的月降水、月最高气温和最小气温标准差

### 4.3. 气象与水文模拟

图 5 展示的是原始气候模型、经 DBC 方法以及 MCBC 方法校正后的湿日频率、降水日的均值、95th 百分位数、标准差的相对偏差。气候模型模拟的降水在各个指标上都存在较大偏差，大部分模型模拟的相对偏差大于 20% (或小于 -20%)，甚至大于 40%。相较于 GCM 的模拟结果，五个 RCM 的模拟结果并未有明显改善，甚至在一些指标上相对偏差比 GCM 偏差更大，表明动力降尺度后的结果仍具有较大偏差，还需进一步偏差校正处理。DBC 大大减少了气候模型对日降水的模拟偏差。除 SNU-MM5 (M3)，其它模型在经 DBC 方法校正后，日均降水相对偏差都在 8% 以内，而湿日频率均在 -5% 以内。对日降水标准差，DBC 方法的校正效果虽不如前三个指标的校正效果明显，但相对偏差也基本在 10% 左右。以 DBC 方法为基础，MCBC 模拟的降水相对偏差明显减少。其中，MCBC 方法所模拟的日均降水的偏差在 5% 以内，湿日频率相对偏差在 3% 以内，95th 百分位数上的降水相对偏差在 ±5% 之间，标准差的相对偏差也有所减少。MCBC 相对于 DBC 方法的改进在于对降水时序的校正，降水时序校正导致湿日频率变化，因此在降水总量与 DBC 方法一致的前提下，能更好的模拟日降水的其他指标。

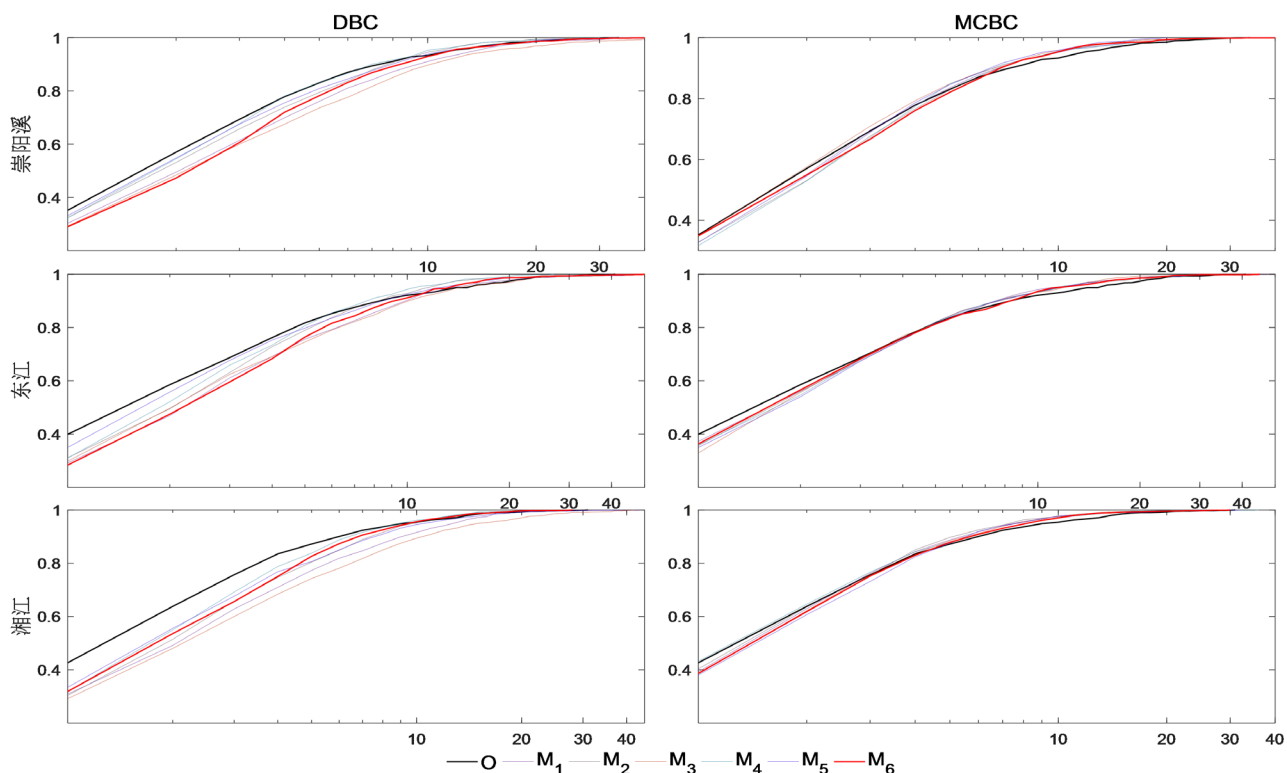


Figure 3. The observed, DBC-corrected and MCBC-corrected cumulative frequencies of dry spell lengths for three watersheds. The black line represents the cumulative frequencies of observation. The X-axis is at a logarithmic scale

图 3. 三个流域的观测及由 DBC 和 MCBC 校正的连续干日的频率累计分布曲线。黑线代表观测的累计频率线，横轴为对数坐标轴

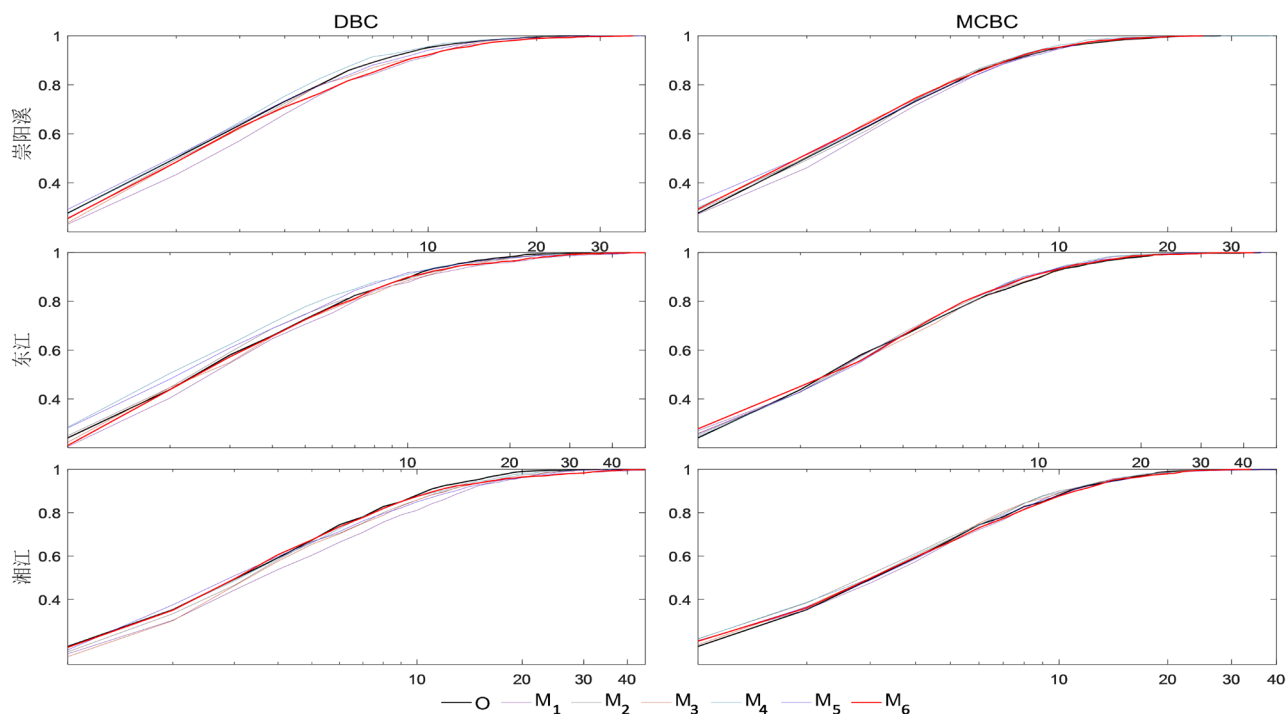
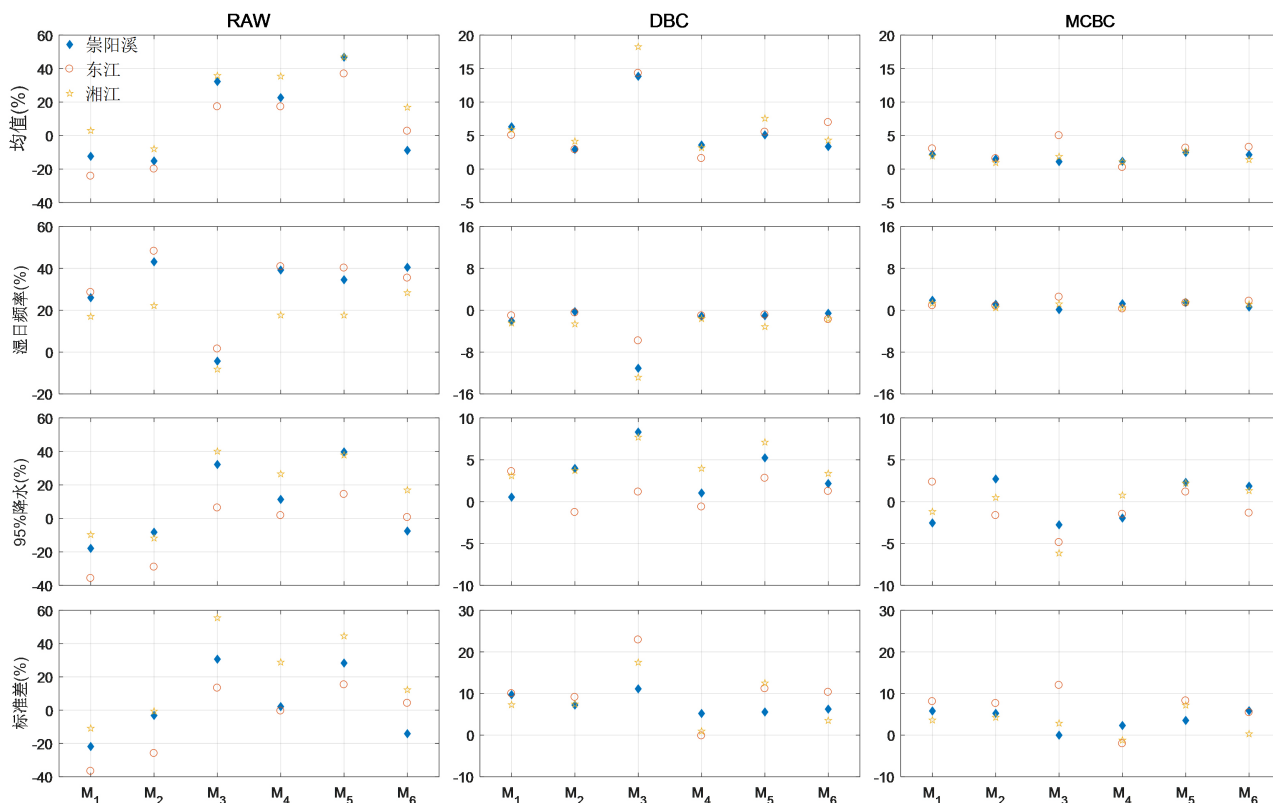


Figure 4. The observed, DBC-corrected and MCBC-corrected cumulative frequencies of wet spell lengths for three watersheds. The black line represents the cumulative frequencies of observation. The X-axis is at a logarithmic scale

图 4. 三流域的观测及由 DBC 和 MCBC 校正的连续湿日的频率累计分布曲线。黑线代表观测的累计频率线，横轴为对数坐标轴



**Figure 5.** The relative error of mean, wet day frequency, 95th percent and standard deviation of daily precipitation of climate models simulation and that of DBC-correction and MCBC-correction at three watersheds

**图 5.** 原始气候模型模拟及由 DBC 和 MCBC 方法校正的三个流域的日降水的均值、湿日频率、95th 降水和标准差相对偏差

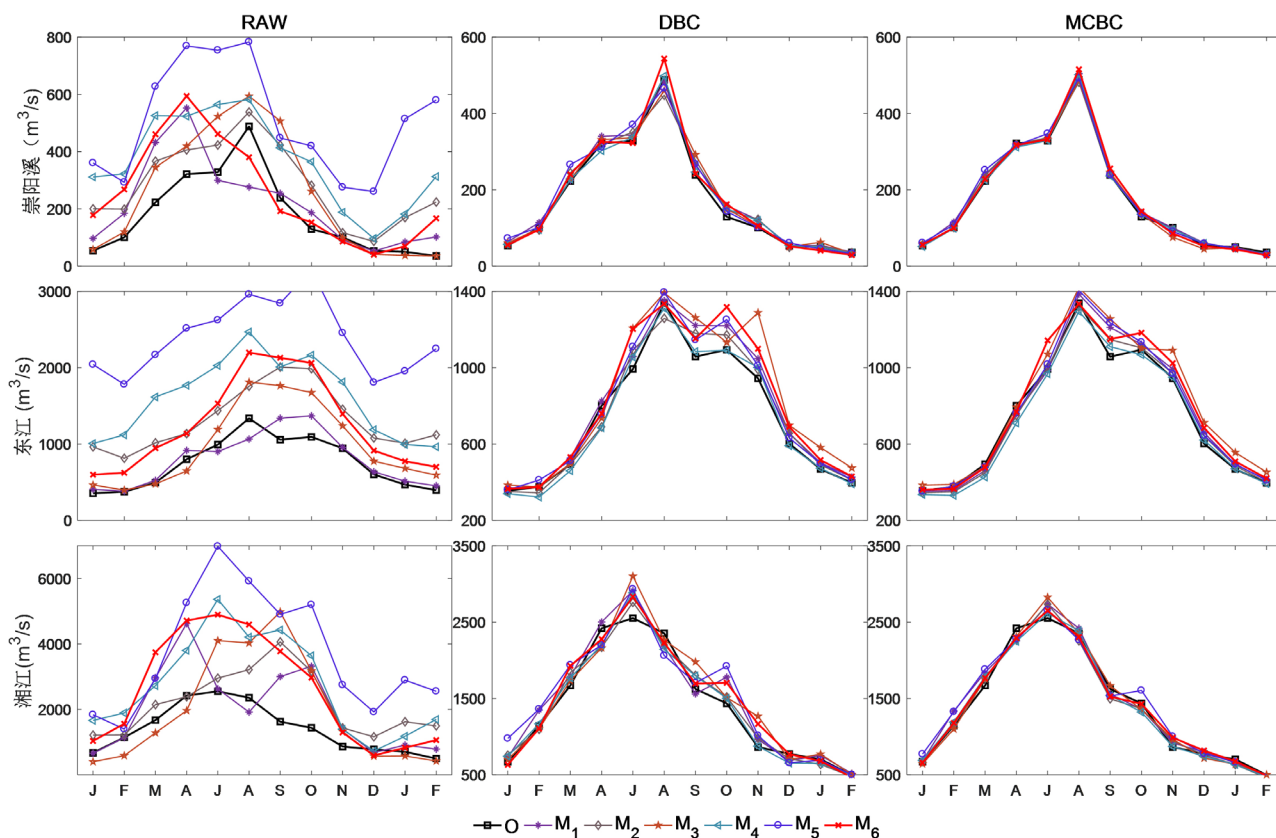
在使用观测数据对新安江模型进行率定时，三个流域率定期的克林效率系数均在 0.90 以上，在验证期也均高于 0.8 (表 2)，表明了新安江模型在这三个流域较强的适用性。为消除水文模型带来的偏差，本文用观测的气象数据输入率定好的新安江模型所生成的径流来代替观测径流。图 6 分别展示了由 GCM、RCM 模拟的、以及经 DBC 与 MCBC 方法校正后的得到的降水气温数据所模拟的月径流过程线及观测的月径流过程线。气候模型数据直接模拟的多年平均月径流过程存在较大偏差，YSU-RSM (M5)及 SNU-WRF (M4)模型模拟的月径流过程远远偏离了观测径流过程，而其他几个模型也未能较好的模拟出径流的年内分布。DBC 方法有效的校正了各模型的偏差，校正后各模型在崇阳溪流域和湘江流域模拟的径流过程线几乎重合，而在东江流域的校正效果相对较差。MCBC 方法也较好的再现了径流的年内分布，对于东江流域 6、7、8 月份的径流模拟要远远优于 DBC 方法，在其他流域的其他月份也有明显的改进。由气候模型模拟及两种偏差校正方法校正过的多年水量的相对偏差如表 3 所示。GCM 模型模拟的径流水量偏差在三个流域分别为 43.6%、70.5%和 92.8%。五个区域气候模型中，HadGEM3-RA (M1)和 SNU-MM5 (M3)的模拟偏差小于 GCM 模拟偏差，而 SNU-WRF (M4)及 YSU-RSM (M5)模型的模拟偏差远远大于 GCM 的模拟偏差。DBC 方法和 MCBC 方法均有效的降低了气候模拟的模拟偏差，使得模拟偏差基本低于 10%，且 MCBC 方法的水量偏差大都小于 DBC 方法。

**Table 2.** The Kling-Gupta efficiency of the Xianjiang model at three watersheds

**表 2.** 新安江模型下三个流域的克林效率系数

流域	崇阳溪	东江	湘江
率定期	0.92	0.91	0.94
验证期	0.89	0.81	0.89





**Figure 6.** Multi-year average monthly streamflow of observation, climate simulation and that of DBC-correction and MCBC-correction at three watersheds

**图 6.** 三个流域的观测、由气候模型模拟及由 DBC 和 MCBC 方法校正的多年平均月径流过程图

**Table 3.** Multi-year average water storage error of raw climate models simulation and that of DBC-correction and MCBC-correction at three watersheds

**表 3.** 气候模型模拟的及由 DBC 和 MCBC 方法校正后的三个流域的多年平均水量相对偏差(%)

	RAW			DBC			MCBC		
	崇阳溪	东江	湘江	崇阳溪	东江	湘江	崇阳溪	东江	湘江
HadGEM3-RA	23.1	6.3	44.1	6.3	7.5	6.0	2.9	3.0	1.9
RegCM4	62.2	77.1	56.6	3.8	2.5	1.6	1.1	0.6	-1.0
SNU-MM5	43.7	31.6	40.9	4.0	12.5	6.7	-1.0	8.9	0.9
SNU-WRF	107.0	114.5	96.4	2.5	-1.2	1.2	0.2	-2.7	-1.0
YSU-RSM	187.3	221.5	167.7	5.7	6.5	7.6	2.8	4.1	3.3
HadGEM2-AO	43.5	68.5	86.3	4.4	9.7	4.8	1.6	5.7	0.5

与月径流模拟结果类似，由气候模型数据直接模拟的日径流也存在较大误差(图 7)。如图示，GCM 模拟的日径流均值，低水流量(5th 百分位数的径流)和高水流量(95th 百分位数的径流)的相对偏差分别在 40%到 90%，80%到 120%及 20%到 100%之间。除 M3 所代表的 SNU-MM5 在三个指标的模拟上都优于 M6 代表的 GCM 的模拟外，其它 RCM 的模拟对于三个指标的模拟均部分或者全部比 GCM 模拟的偏差大，从而反映出单一的动力降尺度方法输出的结果不可直接用于径流响应研究。DBC 方法和 MCBC 方法均能有效的校正气候模型模拟的

偏差,模拟的日径流均值及高水流量相对偏差均在-5%到 15%之间,而低水流量的相对偏差较大,在-5%到 55%之间。另外,MCBC 方法对于日降水指标的模拟要优于 DBC 方法,但是并没有体现在日径流的指标上。两种方法的模拟效果类似,但也有细微差别,例如,DBC 方法模拟的日径流均值及高水流量基本大于观测值,相对偏差为正数,而 MCBC 方法的模拟则出现较多负偏差。

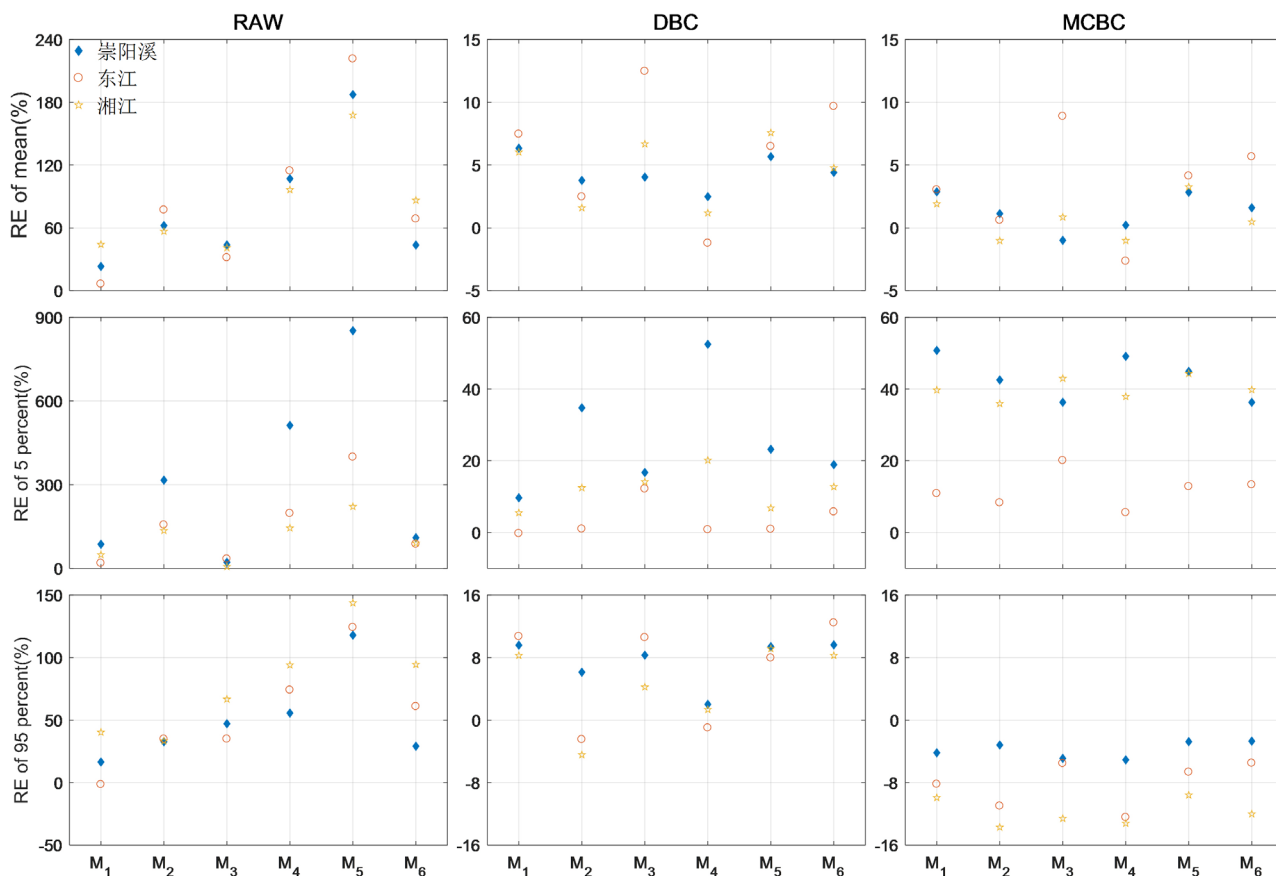


Figure 7. The relative error of mean, 5<sup>th</sup> and 95<sup>th</sup> of daily streamflow of climate models simulation and that of DBC-correction and of MCBC-correction at three watersheds

图 7. 气候模型模拟的及由 DBC 和 MCBC 方法校正的三个流域日径流在均值、5 分位数和 95 分位数上的相对偏差

## 5. 结论

本研究首先提取了 CORDEX 中全球气候模式 HadGEM2-AO 及其驱动五个区域气候模型在崇阳溪流域、东江流域和湘江流域模拟的数据,并利用 DBC 方法和 MCBC 方法对以上数据进行偏差校正,而后输入新安江模型进行径流模拟,得到如下结论:

1) CORDEX 中全球气候模式 HadGEM2-AO 及其驱动的 5 个区域气候模型对三个流域的气温与降水模拟都存在较大偏差,大部分模型的月降水均值相对偏差超过 100%。相较于 GCM 模型,动力降尺度后得到的区域气候模型的模拟效果并不理想,甚至比 GCM 的偏差更大。

2) 经两种偏差校正方法校正后,所有模型模拟的降水及相应的径流的偏差大大减少且量级相当,表明与单一的统计降尺度方法相比,动力与统计相结合的方法在降水的校正上没有明显差异,对径流的模拟也不存在明显优势。在气候变化对流域径流的影响评估中,可以直接对 GCM 进行偏差校正。

3) 对于两种偏差校正方法而言,由于 MCBC 方法能较好的再现观测降水的时序从而模拟出更精确的降水,

其对多年平均月径流的模拟要优于 DBC 方法，但两种降尺度方法对于日径流的模拟并无明显差异。

## 基金项目

国家自然科学基金(51779176)。

## 参考文献

- [1] 林而达, 许吟隆, 蒋金荷, 等. 气候变化国家评估报告(II): 气候变化的影响与适应[J]. 气候变化研究进展, 2006, 2(2): 51-56.  
LIN Erda, XU Yinlong, JIANG Jinhe, et al. National assessment report on climate change (II): Impact and adaptation of climate change. Progress in Climate Change Research, 2006, 2(2): 51-56. (in Chinese)
- [2] 张建云, 王国庆. 气候变化对水文水资源影响研究[M]. 北京: 科学出版社, 2007.  
ZHANG Jianyun, WANG Guoqing. Research on the impact of climate change on hydrology and water resources. Science Press, 2007. (in Chinese)
- [3] CHEN, J., BRISSETTE, F. P. and LCONTE, R. Uncertainty of downscaling method in quantifying the impact of climate change on hydrology. Journal of Hydrology (Amsterdam), 2011, 401(3-4): 190-202.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.02.020>
- [4] 高谦, 江志红, 李肇新. 多模式动力降尺度对中国中东部地区极端气温指数的模拟评估[J]. 气象学报, 2017, 75(6): 69-85.  
GAO Qian, JIANG Zhihong and LI Zhaoxin. Simulation evaluation of extreme temperature index in central and eastern China by multi-mode dynamic downscaling. Acta Meteorologica Sinica, 2017, 75(6): 69-85. (in Chinese)
- [5] DICKINSON, R. E., ERRICO, R. M., GIORGI, F., et al. A regional climate model for the western United States. Climatic Change, 1989, 15(3): 383-422. <https://doi.org/10.1007/BF00240465>
- [6] GIORGI, F. Simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model. Journal of Climate, 1990, 3(9): 941-963. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1990\)003<0941:SORCUA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1990)003<0941:SORCUA>2.0.CO;2)
- [7] 陈杰, 许崇育, 郭生练, 等. 统计降尺度方法的研究进展与挑战[J]. 水资源研究, 2016(4): 299-313.  
CHEN Jie, XU Chongyu, GUO Shenglian, et al. Research progress and challenges of statistical downscaling methods. Water Resources Research, 2016(4): 299-313. (in Chinese)
- [8] 王慧娟, 吴洪星, 仵建勋. 降尺度方法在月预报中的应用研究[J]. 气象水文海洋仪器, 2011, 28(1): 27-31  
WANG Huijuan, WU Hongxing and WU Jianxun. Application of downscaling method in monthly forecasting. Meteorological, Hydrological and Marine Instruments, 2011, 28(1): 27-31 (in Chinese)
- [9] CHEN, J., BRISSETTE, F. P. and LCONTE, R. Downscaling of weather generator parameters to quantify hydrological impacts of climate change. Climate Research, 2012, 51(3): 185-200. <https://doi.org/10.3354/cr01062>
- [10] 刘向培, 王汉杰, 何明元. 应用统计降尺度方法预估江淮流域未来降水[J]. 水科学进展, 2012, 23(1): 29-37.  
LIU Xiangpei, WANG Hanjie and HE Mingyuan. Application of statistical downscaling method to predict future precipitation in the Jianghuai River Basin. Advances in Water Science, 2012, 23(1): 29-37. (in Chinese)
- [11] BENNETT, J. C., GROSE, M. R., CORNEY, S. P., et al. Performance of an empirical bias-correction of a high-resolution climate dataset. International Journal of Climatology, 2014, 34(7): 2189-2204. <https://doi.org/10.1002/joc.3830>
- [12] TEUTSCHBEIN, C., SEIBERT, J. Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. Journal of Hydrology (Amsterdam), 2012, 456-457: 12-29.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.05.052>
- [13] MURPHY, J. An evaluation of statistical and dynamical techniques for downscaling local climate. Journal of Climate, 1999, 12(8): 2256-2284. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1999\)012<2256:AEOSAD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012<2256:AEOSAD>2.0.CO;2)
- [14] WILBY, R. L., WIGLEY, T. M. L. Downscaling general circulation model output: A review of methods and limitations. Progress in Physical Geography, 1997, 21(4): 530-548. <https://doi.org/10.1177/030913339702100403>
- [15] 陈鹏翔, 江志红, 彭冬梅. 基于 BP-CCA 统计降尺度的中亚春季降水的多模式集合模拟与预估[J]. 气象学报, 2017(2): 46-57.  
CHEN Pengxiang, JIANG Zhihong and PENG Dongmei. Multi-model set simulation and prediction of spring precipitation in Central Asia based on BP-CCA statistical downscaling. Acta Meteorologica Sinica, 2017(2): 46-57. (in Chinese)
- [16] CHEN, J., BRISSETTE, F. P., CHAUMONT D., et al. Finding appropriate bias correction methods in downscaling precipitation for hydrologic impact studies over North America. Water Resources Research, 2013a, 49(7): 4187-4205.  
<https://doi.org/10.1002/wrcr.20331>
- [17] CHEN, J., BRISSETTE, F. P., CHAUMONT, D., et al. Performance and uncertainty evaluation of empirical downscaling methods in quantifying the climate change impacts on hydrology over two North American river basins. Journal of Hydrology,

- 2013, 479: 200-214. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.11.062>
- [18] TURCO, M., LLASAT, M. C., HERRERA, S., et al. Bias correction and downscaling of future RCM precipitation projections using a MOS-Analog technique. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, 122(5): 2631-2648. <https://doi.org/10.1002/2016JD025724>
- [19] CHEN, J., ZHANG, X. C. J. and LI, X. Q. A weather generator-based statistical downscaling tool for site-specific assessment of climate change impacts. *Transactions of the ASABE*, 2018, 61(3): 977-993. <https://doi.org/10.13031/trans.12601>
- [20] GUO, Q., CHEN, J., ZHANG, X., et al. A new two-stage multivariate quantile mapping method for bias correcting climate model outputs. *Climate Dynamics*, 2019, 53(5-6): 3603-3623. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04729-w>
- [21] TANG, J., NIU, X., WANG, S., et al. Statistical downscaling and dynamical downscaling of regional climate in China: Present climate evaluations and future climate projections. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, 121(5): 2110-2129. <https://doi.org/10.1002/2015JD023977>
- [22] LANDMAN, W. A., MASON, S. J., TYSON, P. D., et al. Statistical downscaling of GCM simulations to Streamflow. *Journal of Hydrology*, 2001, 252(1): 221-236. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00457-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00457-7)
- [23] PERVEZ, M. S., HENEBRY, G. M. Projections of the ganges-brahmaputra precipitation—downscaled from GCM predictors. *Journal of Hydrology*, 2014, 517: 120-134. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.05.016>
- [24] LAFLAMME, E. M., LINDER, E. and PAN, Y. Statistical downscaling of regional climate model output to achieve projections of precipitation extremes. *Weather & Climate Extremes*, 2016, 12(C): 15-23. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2015.12.001>
- [25] EDEN, J. M., WIDMANN, M., MARAUN, D., et al. Comparison of GCM- and RCM-simulated precipitation following stochastic postprocessing. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, 119(19): 11,040-11,053. <https://doi.org/10.1002/2014JD021732>
- [26] MARAUN, D., WETTERHALL, F., IRESON, A. M., et al. Precipitation downscaling under climate change: Recent developments to bridge the gap between dynamical models and the end user. *Reviews of Geophysics*, 2010, 48(3): 633-650. <https://doi.org/10.1029/2009RG000314>
- [27] ZHUAN, M. J., CHEN, J., SHEN, M. X., et al. Timing of human-induced climate change emergence from internal climate variability for hydrological impact studies. *Hydrology Research*, 2018, 49(2): 421-437. <https://doi.org/10.2166/nh.2018.059>
- [28] LI, Z. A new framework for multi-site weather generator: A two-stage model combining a parametric method with a distribution-free shuffle procedure. *Climate dynamics*, 2014, 43(3-4): 657-669. <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1979-2>
- [29] IMAN, R. L., CONOVER, W. J. A distribution-free approach to inducing rank correlation among input variates. *Communication in Statistics—Simulation and Computation*, 1982, 11(3): 311-334. <https://doi.org/10.1080/03610918208812265>
- [30] CHEN, J., CHEN, H. and GUO, S. Multi-site precipitation downscaling using a stochastic weather generator. *Climate Dynamics*, 2018, 50(5-6): 1975-1992. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3731-9>
- [31] RAJCZAK, J., KOTLARSKI, S. and SCH, R. C. Does quantile mapping of simulated precipitation correct for biases in transition probabilities and spell lengths. *Journal of Climate*, 2016, 29(5): 1605-1615. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0162.1>
- [32] APIPATTANAVIS, S., GUILLERMO PODESTA, R. B., et al. A semiparametric multivariate and multisite weather generator. *Water Resources Research*, 2007, 43(11). <https://doi.org/10.1029/2006WR005714>
- [33] CHEN, J., BRISSETTE, F. P. Comparison of five stochastic weather generators in simulating daily precipitation and temperature for the Loess Plateau of China. *International Journal of Climatology*, 2014, 34(10): 3089-3105. <https://doi.org/10.1002/joc.3896>
- [34] 江志红, 常奋华, 丁裕国. 基于马尔科夫链转移概率极限分布的降水过程持续性研究[J]. *气象学报*, 2013, 71(2): 286-294. JIANG Zhihong, CHANG Fenhua and DING Yuguo. Research on the persistence of precipitation process based on Markov chain transition probability limit distribution. *Acta Meteorologica Sinica*, 2013, 71(2): 286-294. (in Chinese)
- [35] ZHANG, X. C., CHEN, J., GARBRECHT, J. D., et al. Evaluation of a weather generator-based method for statistically downscaling non-stationary climate scenarios for impact assessment at a point scale. *Transactions of the ASABE*, 2012, 55(5): 1745-1756. <https://doi.org/10.13031/2013.42366>
- [36] LIU, H., CHEN, J., ZHANG, X. C., et al. A Markov chain-based bias correction method for simulating temporal sequence of daily precipitation. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* (under Review).
- [37] 赵人俊. 流域水文模拟——新安江模型与陕北模型[M]. 北京: 水利电力出版社, 1984. ZHAO Renjun. Watershed hydrological simulation—Xin'anjiang model and northern Shaanxi model. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1984. (in Chinese)
- [38] 赵人俊, 王佩兰. 新安江模型参数的分析[J]. *水文*, 1988(6): 4-11. ZHAO Renjun, WANG Peilan. Analysis of model parameters of Xin'anjiang River. *Hydrology*, 1988(6): 4-11. (in Chinese)