

Projected Changes of Extreme Precipitation Characteristics for the Poyang Lake Basin Based on Statistical Downscaling Model

Xingjun Hong^{1,2}, Shenglian Guo^{1,2}, Jiali Guo^{2,3}, Yukun Hou^{1,2}, Le Wang^{1,2}

¹State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan

²Hubei Provincial Collaborative Innovation Center for Water Resources Security, Wuhan

³College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang

Email: hongxingjun1989@gmail.com

Received: Oct. 16th, 2014; revised: Nov. 16th, 2014; accepted: Nov. 20th, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

Abstract

As climate change will certainly result in strong response from extreme climatic events, investigating the spatio-temporal distribution and evolution laws of extreme climatic events is of great importance. Based on the daily precipitation from 1961 to 2005 from thirteen meteorological stations within the Poyang Lake basin, daily precipitation for future period of 2010-2099 is simulated using the SDSM statistical downscaling model. Coupling a BCC-CSM1.1 GCM with three representative concentration pathways (RCPs), the changing characteristics of magnitude, intensity and persistence of extreme precipitation are studied by means of several extreme precipitation indices. A bias correction procedure should be applied to the SDSM simulated historical precipitation before it can be used to simulate future precipitation. The extreme precipitation magnitude and intensity, as well as the persistence all show significantly increasing trends. Upgrading flood mitigation difficulties due to a concentration tendency of precipitation, as well as the increasing potential of abrupt alternation between flood and drought will threaten the water resources security of the Poyang Lake basin.

Keywords

Climate Change, CMIP5, Statistical Downscaling, Extreme Precipitation, Prediction Analysis, Poyang Lake Basin

作者简介: 洪兴骏(1989-), 男, 广东梅州人, 博士研究生, 主要从事水文统计方面的研究。

基于统计降尺度模型预测鄱阳湖流域未来极值降水变化趋势

洪兴骏^{1,2}, 郭生练^{1,2}, 郭家力^{2,3}, 侯雨坤^{1,2}, 王 乐^{1,2}

¹武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉

²水资源安全保障湖北省协同创新中心, 武汉

³三峡大学水利与环境学院, 宜昌

Email: hongxingjun1989@gmail.com

收稿日期: 2014年10月16日; 修回日期: 2014年11月16日; 录用日期: 2014年11月20日

摘 要

本文以鄱阳湖流域为研究对象, 研究变化环境下极端气候事件的时空分布及演变规律。利用流域内13个代表站点1961~2005年的逐日降水量资料, 选用BCC-CSM1.1全球气候模式和三种(高、中、低)温室气体典型浓度路径排放情景, 并与SDSM统计降尺度模型耦合, 分析预测未来极值降水量级、强度和持续性指标的变化趋势。得出以下主要结论: 进行偏差校正后的SDSM统计降尺度模型可应用于未来极值降水指标的计算; 鄱阳湖流域未来极值降水量级、强度和持续性主要呈增加趋势; 流域有降水集中化的趋势, 这对于流域防洪较为不利, 且未来可能面临较大的“旱涝急转”的风险。

关键词

气候变化, CMIP5, 统计降尺度, 极值降水, 预测分析, 鄱阳湖流域

1. 引言

工业革命以来大气中显著增加的温室气体(如二氧化碳等), 已经引起了地球气候系统的深刻改变。近年来, 日益频繁发生的极端气候事件, 以及伴随其产生的洪涝、干旱灾害, 给人类生活和生态环境都造成了严重的影响和破坏。联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)近期发布的第五次气候变化评估报告(AR5)指出, 未来全球平均气温上升的趋势仍将持续[1]。研究表明, 气候要素平均态和变率的微小变化, 可能对其极端值产生深刻影响[2]。Katz 和 Brown 指出, 相较于气候的平均态, 极值气候事件对气候变化更为敏感[3]。

在全球仍将持续变暖的背景下, 未来极端气候事件发生频率与强度的可能变化, 已成为学术界普遍关注的问题。全球气候模式(Global Climate Models, GCMs)为气候模拟和未来气候变化情景预估提供了量化研究工具。许多学者应用世界各个国家和组织开发的 GCMs, 对全球及各地区的极端气候进行了模拟和预估。Xu 等采用 6 个 GCMs 进行多模式集合, 预估了长江流域未来一个世纪的 7 个极端气温和降水指标在三种温室气体排放情景下的时空变化情况, 指出未来长江流域大部分地区将同时面临更为频繁的干旱和洪涝灾害的风险[4]。Yang 等采用贝叶斯模式平均(Bayesian Model Averaging, BMA)方法耦合 5 个 IPCC AR4 提供的 GCMs, 对青藏高原 21 世纪的 7 个极值气候指数进行了预估, 认为青藏地区未来低温灾害可能减少, 但强降雨可能增多且更为集中化[5]。Guo 等选用 9 个极值降水指数, 评估了长江流域历

史上极值降水事件量级、强度和持续性等方面的时空分布规律，并利用 ASD(Automated Statistical Downscaling)统计降尺度方法将 SRES A2 和 B2 情景下的 HadCM3 模式因子进行尺度降解，预估了流域极值降水指数的演变趋势，得出未来长江下游地区发生“旱涝急转”现象的可能性增加的结论[6]。

第五阶段耦合模式相互比较项目(The fifth phase of the Coupled Model Intercomparison Project, CMIP5)收录了 40 余个 GCMs 试验结果，是撰写 IPCC AR5 的重要科学依据，也为新阶段研究全球气候变化提供了充足的数据支持[7]-[10]。然而，当前的模式基本上可以模拟气象变量的大尺度变化特征，但在区域模拟方面则存在较大的不足，流域尺度更是鲜有研究。同时，各模式对于气候平均态的模拟效果已经得到了较充分的验证，但对于气象变量极值的模拟能力还有待检验。基于此，本文选用我国鄱阳湖流域 13 个气象站点 1961~2010 年的实测逐日降水量数据和 CMIP5 收录的 BCC-CSM1.1 模式的输出结果，基于目前广泛使用的极值降水指标，从极端降水的量级、强度和历时等方面，分析鄱阳湖流域未来的极端降水的时空演变特征，为加强气候变化对鄱阳湖流域极端气候事件的影响评估及其预测预警提供参考。

2. 研究区域与资料

2.1. 研究区域

鄱阳湖是我国最大的淡水湖泊，位于长江中下游南岸，控制流域面积 162,225 km²，占长江流域面积的 9%。鄱阳湖汇聚赣江、抚河、信江、饶河、修水五大水系，经湖盆调蓄后，由湖口注入长江(见图 1)。鄱阳湖对长江中下游地区的水安全和生态安全影响重大，然而鄱阳湖流域近年来频繁遭受极端气候事件的威胁，尤以极端降水事件为甚。一些学者针对鄱阳湖流域近半个世纪以来的极端降水事件的特征、成

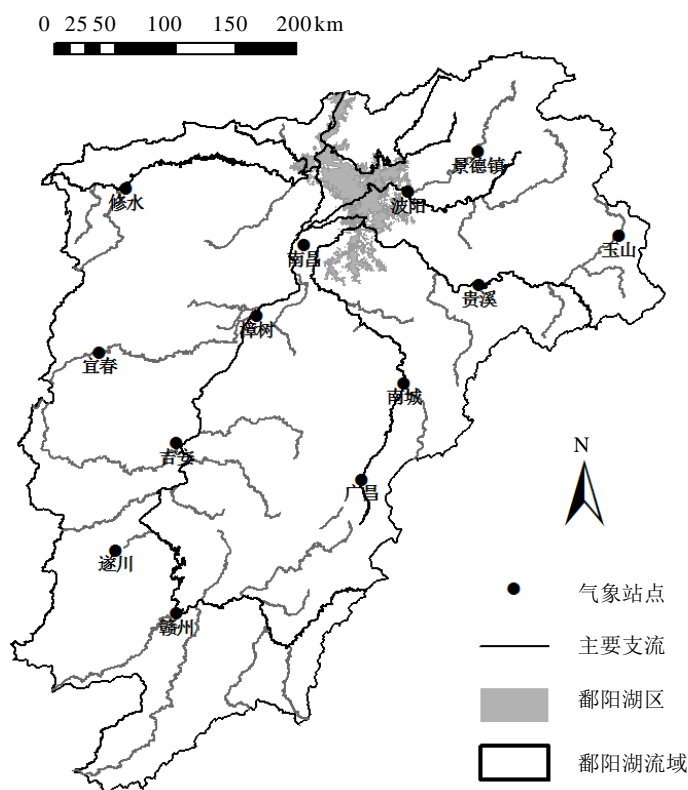


Figure 1. Spatial distribution of the meteorological gauging stations at the Poyang Lake basin

图 1. 鄱阳湖流域气象站点分布图

因和影响等,做了许多有益的探讨[11]-[14]。这些研究均指出鄱阳湖流域大部分地区的极值降水频率和强度呈现不同程度的增加趋势。随着气候变暖的进一步加剧,极端气候事件必将做出相应的响应。因而在变化环境下,研究鄱阳湖流域极端降水事件的时空分布和演变规律,对于鄱阳湖流域的防洪安全和水资源规划,具有重要意义。

2.2. 所用资料

本研究采用的实测降雨数据为鄱阳湖流域 13 个国家气象站点(见图 1)1961~2010 年共 50 a 逐日降雨量,数据来自中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/index.jsp>)。

CMIP5 的全球气候模式与 CMIP3 相比,采用了更合理的参数化方案、通量处理方案和耦合器技术,以提高气候模式的模拟和预估能力,增强了对气候系统变化的机理性认识,代表了目前相关领域的最高水平[7]。目前,全球各国气候模式组 40 多个 CMIP5 气候模式的模拟数据已提交完毕并提供下载(<http://pcmdi9.llnl.gov/esgf-web-fe/>)。本研究采用由中国北京气候中心开发的 BCC-CSM1.1 模拟的大尺度气候因子历史(1961~2005 年)和未来(2006~2099 年)输出数据作为实验数据。

人类活动导致的未来气候变化情景设计,一直是 IPCC 的重要工作内容。在前一阶段的气候变化影响研究中,广泛采用的情景是 2000 年 IPCC 在《排放情景特别报告》中定义的 SRES 排放情景,但 SRES 情景没有考虑应对气候变化的各种政策对未来排放的影响。为了协调不同科学研究机构和团队的相关研究工作,强化排放情景对研究者和决策者研究和应对气候变化的参考作用,IPCC 为第五次评估报告开发了以稳定浓度为特征的代表性浓度路径(Representative Concentration Pathways, RCPs)情景。

RCPs 包括 RCP8.5, RCP6.0, RCP4.5 和 RCP2.6 情景,分别以 2100 年之前温室气体浓度持续上升(RCP8.5),不超过目标水平达到稳定(RCP6.0 和 RCP4.5)或达到峰值后下降(RCP2.6)为路径形状,为每一种情景提供了受社会经济条件和气候影响等的排放路径,并给出了 2100 年相应的辐射强迫值[15]。本研究拟采用 RCP8.5, RCP4.5 和 RCP2.6 情景,分别作为高、中、低排放情景,探讨气候变化条件下鄱阳湖流域极值降水的变化情况。

3. 研究方法

3.1. SDSM 降尺度方法

尽管 CMIP5 模式的水平分辨率较之以往有所提高,但仍然较为粗糙,在区域尺度或者局地尺度的气候模拟及变化预估等方面存在较大的偏差。考虑到区域或流域尺度的气候变化信息对于制定应对气候变化政策的重要性,迫切需要对 CMIP5 模式结果进行尺度降解研究,以期得到更加可靠的区域尺度气候变化信息。

降尺度方法是弥补 GCMs 预测区域气候情景不足的有效工具,常用的降尺度方法包括动力降尺度和统计降尺度。其中统计降尺度方法通过多年的观测资料,建立大尺度气候因素(主要为大气环流)和区域气候要素之间的统计关系,并用相对独立的观测资料检验这种关系,最后将这种关系应用于 GCMs 输出的未来的大尺度气候信息,获得区域未来的气候变化情景预估[16],具有简便灵活,计算量小的特点。本文采用的实测大尺度气候因子资料为美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)提供的全球再分析数据集(<http://www.esrl.noaa.gov/psd/>),由于 BCC-CSM1.1 仅提供到 2005 年的历史模拟数据,故 NCEP 气候因子也取 1961~2005 年时间段。

在统计降尺度模式建立的过程中,气候因子的选择至关重要,一般要求其与其预报量(本文为逐日降水量)有明确的物理联系,并与预报量有较强的相关性和一致性。首先将各雨量站点所在 NCEP 格点及周围 8 个格点内的 NCEP 各气候因子值按各格点中心位置与站点所在位置的距离,按反距离权重(IDW)插值方

法插值到站点所在位置，建立各站点的备选气候因子集。通过季节性相关分析、偏相关分析等，从备选的因子集中选择出能最好模拟预报量的因子。经筛选比较，各站点均选用以下六个大尺度预报因子：850 hPa 位置比湿、850 hPa 位置温度、500 hPa 位置纬向风速、500 hPa 位势高度、平均海平面气压和地表平均温度，这些气候因子经验证均能被 GCMs 较好地模拟。

SDSM (Statistical Downscaling Scaling Model)统计降尺度模型是一种耦合多元线性回归和随机天气发生器的统计降尺度方法[17]。该模型在气候极值模拟和情景预估中已经得到了广泛的应用和较为理想的效果[18]-[20]。该模型首先利用大尺度气候因子模拟降水在某天发生的条件概率：

$$\omega_t = \alpha_0 + \sum_{j=1}^n \alpha_j \hat{u}_t^{(j)} + \alpha_{t-1} \omega_{t-1} \quad (1)$$

式中： t 为时间，这里指日； ω_t 为日发生降水的条件概率； $\hat{u}_t^{(j)}$ 为标准化后的预报因子； α_j 为利用最小二乘法得到的回归系数； ω_{t-1} 为 $t-1$ 日发生降水的条件概率； α_{t-1} 为 $t-1$ 日回归系数。需要事先设定一个均匀分布的随机数 $\gamma_t (0 \leq \gamma_t \leq 1)$ ，当 $\omega_t \leq \gamma_t$ 时， t 日将发生降水。

降水日，降水可由分布 z -score 表示：

$$Z_t = \beta_0 + \sum_{j=1}^n \beta_j \hat{u}_t^{(j)} + \beta_{t-1} Z_{t-1} + \varepsilon \quad (2)$$

式中： Z_t 是分布在 t 日的值； β_j 为回归系数； β_{t-1} 为 $t-1$ 日的回归系数； Z_{t-1} 为分布在 $t-1$ 日的值； $\varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$ 为随机误差。

从而， t 日的降水量 y_t 为：

$$y_t = F^{-1}[\phi(Z_t)] \quad (3)$$

式中： $\phi(\cdot)$ 为正态分布的累积分布函数； F 为 y_t 的经验分布函数。

3.2. 极值降水指数

定义与极端事件相关的代用气候指数，通过分析这些气候指数的变化特征来反映极端事件的变化情况，是分析研究极端气候事件演变规律的常用方法[21]。目前，世界各地的研究团体，如气候变化监测和指标专家组 ETCCMDI 和欧盟 STARDEX 计划等，均根据自身研究需要，建立了不同的极值降水指标体系。Qian 和 Lin 指出极值降水指标应该包括三个方面的特性：量级、强度和持续性[22]。基于此，本文从众多指标中选择了如表 1 所示的 6 个指标组成本文的极值降水指标体系。这些指标均具有低噪声、强指示性的特点。

Table 1. Definition of extreme precipitation indices

表 1. 极值降水指标表

类别	指标	符号	单位	定义
降水量级	极端降水总量	R95p	mm	一年中日降水量超过长期 95%分位数的降水量总和
	极端降水日数	R90N	d	一年中日降水量超过长期 90%分位数的日数总和
降水强度	最大连续五日降水量	Rx5day	mm	一年中连续最大 5 天降水量
	简单降水强度	SDII	mm/d	年降水总量/有雨日数
降水持续性	最长连续干天	CDD	d	一年中最大无雨持续天数
	最长连续湿天	CWD	d	一年中最大湿天(日降雨 > 1.0 mm)持续天数

4. 结果与分析

4.1. 统计降尺度模式对于极值降水指标的模拟能力

为检验 SDSM 统计降尺度模型对于鄱阳湖流域极值降水指标的模拟能力, 以 1961~1990 为率定期, 以 1991~2005 为检验期, 建立鄱阳湖流域 13 个代表站点逐日降水量的 SDSM 统计降尺度模型, 由 NCEP 数据得到各站点的模拟逐日降水量。按照表 1 中各极值降水指标的定义, 统计得到各站点逐年的实测和模拟极值降水指标值。将鄱阳湖流域 13 个站点的极值降水指标计算结果经算术平均得到鄱阳湖 6 个子流域, 即修水(修水)、赣江(宜春、吉安、遂川、赣州、樟树)、抚河(南城、广昌)、信江(贵溪、玉山)、饶河(景德镇)和湖区(南昌、波阳)的实测和模拟极值降水指标序列。

图 2 给出了率定期(1961~1990)鄱阳湖流域及各子流域实测逐年各极值降水指标与由 NCEP 数据模拟得到的指标比较图。为进一步验证所建立的统计降尺度模式的适用性, 同时为未来情景预估建立基准, 将由 NCEP 率定得到的模式参数应用于 BCC-CSM1.1 模式输出的历史时期气候因子的尺度降解, 得到的极值降水指标计算结果同样列于图 2。图中每一指标任一流域小框内, 第一个箱形图为实测值, 第二个为基于 NCEP 数据的模拟值, 第三个为基于 GCM 输出的历史模拟值, 箱形图的中心为 50% 序列分位数, “箱”的上下边界分别为 25% 和 75% 分位数, 两“须”分别为 10% 和 90% 分位数。由图中可以看出, 对 NCEP 数据尺度降解而来的极值降水指标与降解 GCM 输出得到的指标相比, 与实测值更为接近。但不论是由 NCEP 数据模拟的极值降水指标, 还是由 GCM 输出的历史气候因子模拟得到的指标, 均存在明显的偏差。其中模拟得到的 R95p、Rx5day、CDD 和 CWD 指标普遍较实测值偏小, 而 SDII 指标则明显大于实测值, R90N 的模拟均值与实测值较为接近。同时, 所有的模拟指标的变化范围均明显窄于实测值, 即模拟值均不能合理地估计极值降水指标的方差。

综上, SDSM 模型对于极值降水事件的模拟能力较差, 模拟的极值指标还不能直接应用于未来变化情景下的极值降水事件的预估分析, 需要进行偏差校正(Bias Correction, BC)。本研究采用杜涛等提出的偏差校正方法[23], 根据实测极值降水指标修正模拟指标系列的均值和方差。该方法的修正极值指标序列表达式如下:

$$\text{Ind}_{t, bc} = \eta \text{Ind}_{t, sim} + \varphi \quad (4)$$

其中: $\text{Ind}_{t, bc}$ 为修正后的极值指标, $\text{Ind}_{t, sim}$ 为修正前的指标, 在历史基准期, 为基于 NCEP 和 GCM 历史输出模拟值, 在未来为 GCM 未来输出模拟值, η 为方差修正因子, φ 为均值修正因子, 其计算方法分别如式(5)和式(6)表示:

$$\eta = \text{SD}_{\text{obs, his}} / \text{SD}_{\text{sim, his}} \quad (5)$$

$$\varphi = \text{Ave}_{\text{obs, his}} - \eta \text{Ave}_{\text{sim, his}} \quad (6)$$

式中: $\text{SD}_{\text{obs, his}}$ 和 $\text{SD}_{\text{sim, his}}$ 分别为基准期实测和模拟极值指标序列的标准差, $\text{Ave}_{\text{obs, his}}$ 和 $\text{Ave}_{\text{sim, his}}$ 分别为基准期实测和模拟极值指标序列的均值。

经过偏差校正之后的率定期 NCEP 和 GCM 模拟的极值指标的箱形图分别列于图 2 任一流域小框内的第四和第五列。由图中可以看出, 经过偏差校正后的模拟极值指标的统计特征与实测值变化范围更为吻合。从应用的角度, 可将偏差校正后的降尺度模式应用于流域未来极值降水事件的预估。

4.2. 极值降水指标的未来变化预估

利用已经建立好的鄱阳湖流域 13 个站点的降水 SDSM 统计降尺度模式, 将 BCC-CSM1.1 全球气候模式在 RCP8.5、RCP4.5 和 RCP2.6 三种高、中、低排放路径情景下输出的大尺度气候因子作为输入, 以

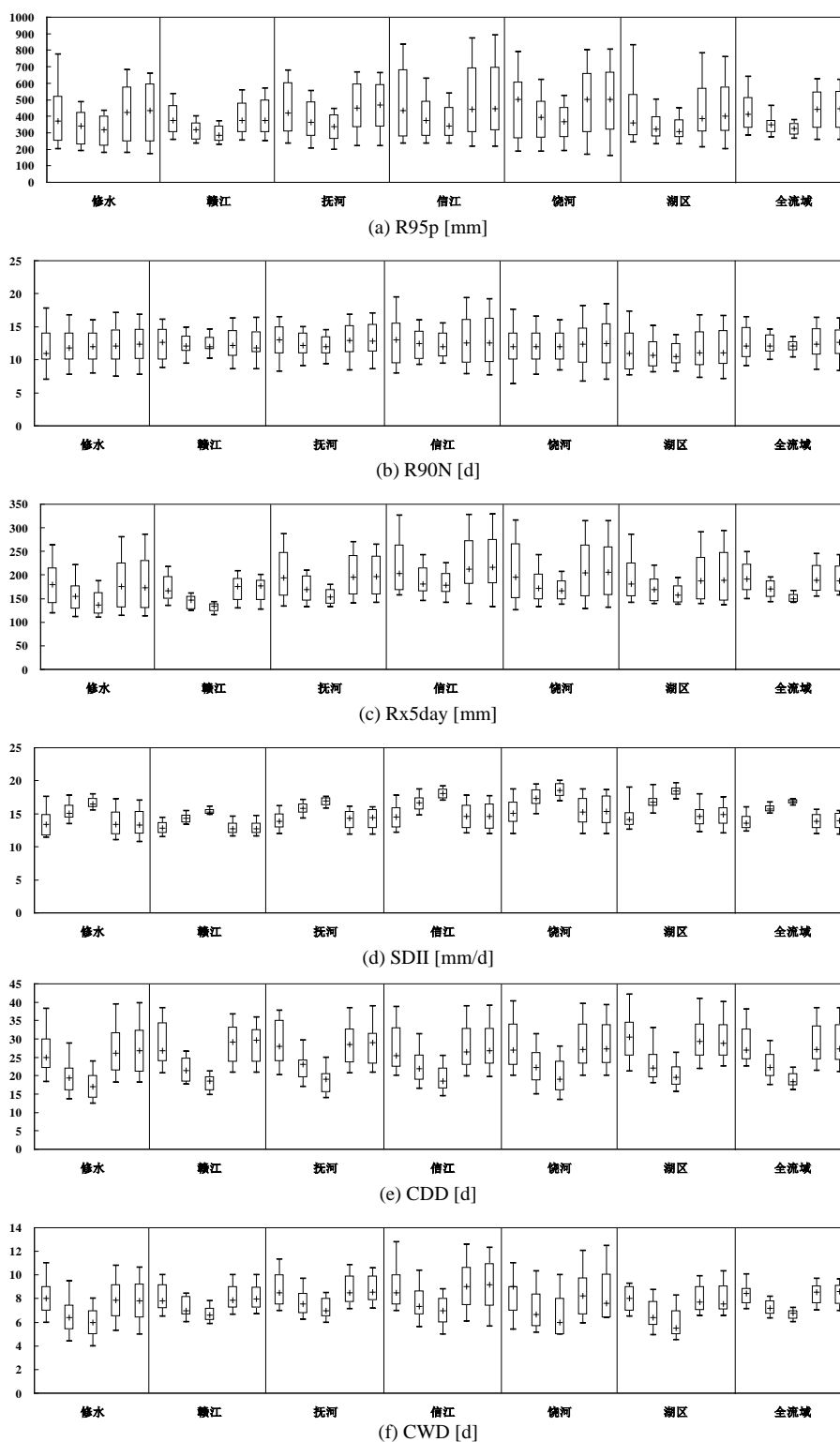


Figure 2. Comparison of observed extreme precipitation indices and simulated values with NCEP and historical BCC-CSM1.1 output the during calibration period (1961-1990) for the Poyang Lake basin

图 2. 率定期(1961~1990)鄱阳湖流域各分区实测、NCEP 模拟与 BCC-CSM1.1 历史模拟极值降水指标

1961~2005 年为历史基准期, 2010~2099 年为未来预估期, 并将未来分为 3 个时段, 即 2020s 时期(2010~2039)、2050s 时期(2040~2069)和 2080s 时期(2070~2099), 预估鄱阳湖流域未来的极值降水变化情况, 各指标各时期相对于基准期的变化情况如图 3 所示。

由图 3, 从全流域尺度上看, 除 RCP2.6 情景下的 R95p、R90N、SDII 和 CWD 指标在未来部分时期存在相对于基准期减少的情况外, 其余排放情景下的大部分指标相对于基准期均呈一定的增加态势。所不同的是, 从各个时期的相对变化趋势来看, 在 RCP2.6 情景下, 全流域尺度各指标在各时期均呈微量增减; RCP4.5 情景相对于 RCP2.6 情景, 各指标增幅变大, 但越远离基准期, R95p、R90N 和 SDII 三个指标变化幅度逐渐减小, 而另外三个指标增幅逐渐增大。在 RCP8.5 情景下, 越远离基准期, 各指标增幅持续变大。

从各个子流域的相对变化来看, 在 RCP4.5 和 RCP8.5 两种相对较高的排放路径下, 除流域西部的修水、赣江子流域在 RCP4.5 情景下的部分预估指标外, 其它子流域的大部分指标呈单调的变化趋势, 且一般是越远离基准期, 相对于基准期的变化幅度越大。而在 RCP2.6 情景下, 各指标在所有子流域相对于基准期均呈现出增减交替的变化过程, 即先减后增或先增后减。这可能是由于 RCP2.6 所模拟的大气温室气体浓度呈现先增加, 在达到顶峰后缓慢下降的排放路径形状有关。

极值降水量级指标(R95p, R90N)上, 全流域的极值降水量级在 RCP2.6 排放路径下, 先微量增加, 而后持续减小至低于基准时期; 在 RCP4.5 情景下, 虽然也是增加后持续减小, 但始终高于基准期; 而 RCP8.5 情景下, 两个指标均是持续增大。说明极值降水量级将随着排放情景的愈加恶劣, 呈现出增加的态势。在高 RCP8.5 情景下, 部分地区 R95p 在世纪末的增幅达到 30% 以上, 这对于流域防洪极为不利。湖区及近湖区东部的信江、饶河流域极值降水量级以增加为主, 流域西部的修水、赣江流域则以减少和微量增加为主。注意到在相对较恶劣的 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下, 抚河流域的极值降水量变化趋势始终与其它子流域不一致, 呈现出持续减小的趋势。

对于极值降水强度指标 Rx5day, 除低排放情景下流域南部的赣江、抚河, 和高排放情景下的抚河流域以外, 均呈现明显的增加趋势, 其中在 RCP8.5 路径下, 饶河和湖区到下世纪中后段增幅将超过 30%。鉴于 Rx5day 是指示洪水事件的关键诱发因素, 这将对流域的防洪安全造成威胁。对于 SDII 指标, 在 RCP2.6 情景下, 多数地区呈现先增后减的趋势, 而在后两种排放情景下, 除抚河流域均高于基准期, 这说明流域存在降水集中化的趋势。

最大无雨持续天数 CDD 和最大湿天持续天数 CWD 是两个指示极值降水持续性的指标。由图 3(e)和 3(f)可以看出, CDD 在各个流域各个时期均以增加为主, 在高排放情景下的个别流域增幅甚至可能超过 40%。而 CWD 在 2020s 时期可能微量减少, 后以增加为主, 到 21 世纪后半段增幅也可能超过 30%。由于 CDD 是指示极端干旱事件的重要指标, 对比其与 CWD 这一指示降水持续性的指标及其他表示降水量级和强度的指标可以发现, 未来特别是在高排放路径下, 流域将面临较大的“旱涝急转”的风险。

5. 结论

日益加剧的气候变化必将引起极端气候事件的深刻响应, 探究变化环境下极端气候事件的时空分布及演变规律具有重大意义。本文选择鄱阳湖流域为研究对象, 采用 CMIP5 收录的 BCC-CSM1.1 全球气候模式和高、中、低三种温室气体典型浓度路径排放情景, 并与 SDSM 统计降尺度模型相耦合, 探讨了流域未来极值降水量级、强度和持续性的变化趋势, 主要研究结论如下:

1) SDSM 统计降尺度模型对极值降水事件的模拟能力有限, 需要进行偏差校正, 校正后的模型可应用于未来极值降水指标的计算。

2) 全流域尺度上, 鄱阳湖流域未来极值降水量级、强度和持续性均呈增加趋势。各子流域上, 除抚

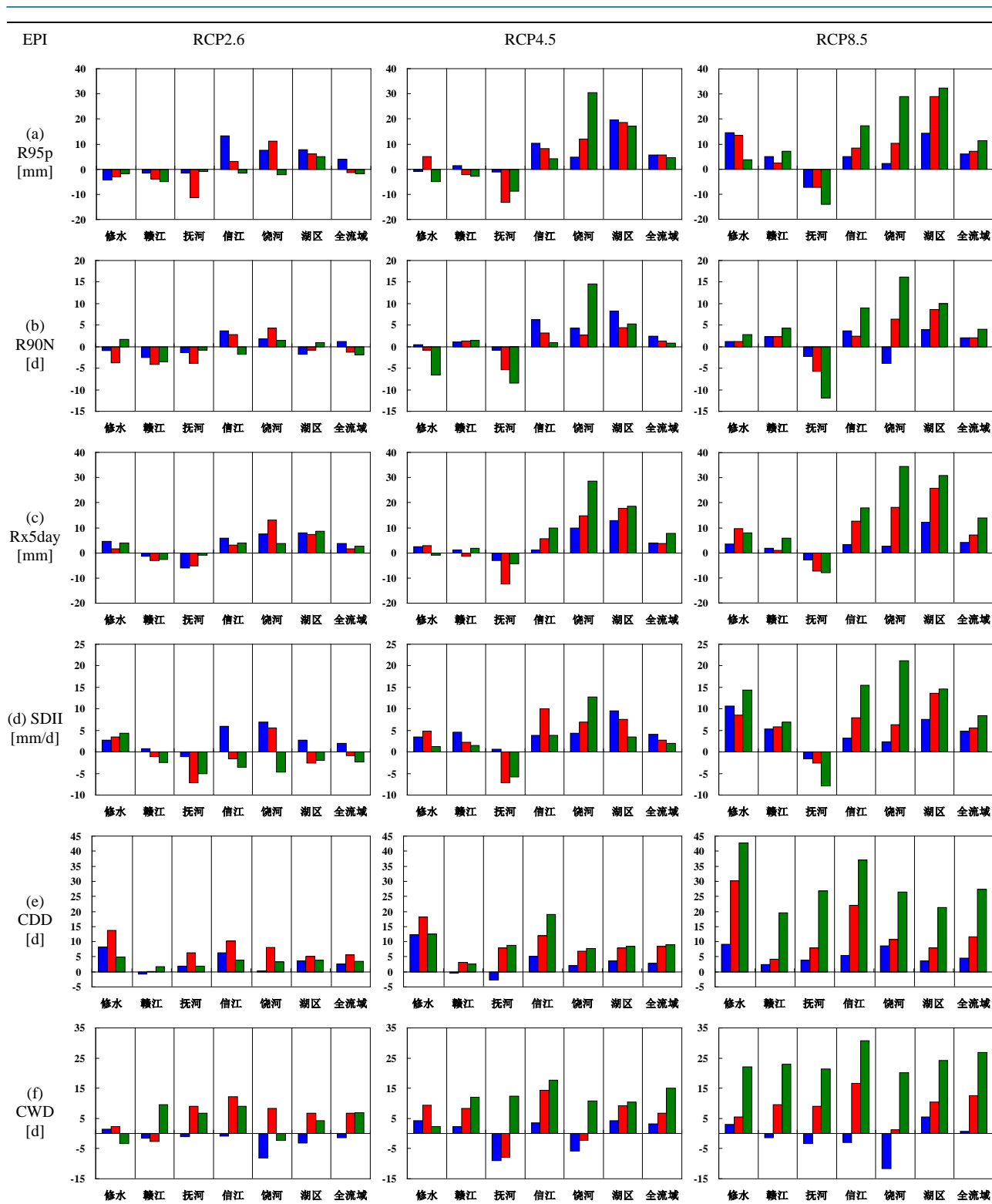


Figure 3. Relative changes of extreme precipitation indices in the future period (2010-2099) for the Poyang Lake basin
 图 3. 未来三个时期(2020s、2050s、2080s)鄱阳湖流域及各分区极值降水指标相对于基准期模拟值的变化

河流域以外，各指标均以增加为主。

3) 流域有降水集中化的趋势,且表征极值降水量级的 R95p 和强度的 Rx5day 指标增幅明显,在高排放情景下部分子流域增幅可能高达 30%,这对于流域防洪较为不利。

4) 指示干旱的降水持续性指标 CDD 在整个流域范围内均呈持续增加趋势,同时,对比 CDD 与其他降水指标,预示流域未来可能面临较大的“旱涝急转”的风险。

基金项目

国家自然科学基金(51190094)资助项目。

参考文献 (References)

- [1] STOCKER, T. F., QIN, D., PLATTNER, G. K., et al. Climate change 2013. The physical science basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change-Abstract for Decision-Maker. [Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat/Intergovernmental Panel on Climate Change-IPCC, C/O World Meteorological Organization, 7bis Avenue de la Paix, CP 2300 CH-1211 Geneva 2 (Switzerland), 2013.]
- [2] 高涛, 谢立安. 近 50 年来中国极端降水趋势与物理成因研究综述[J]. 地球科学进展, 2014, 29(5): 577-589.
GAO Tao, XIE Li'an. Study on progress of the trends and physical causes of extreme precipitation in China during the last 50 years. *Advances in Earth Science*, 2014, 29(5): 577-589. (in Chinese)
- [3] KATZ, R. W., BROWN, B. G. Extreme events in a changing climate: Variability is more important than averages. *Climatic Change*, 1992, 21(3): 289-302.
- [4] XU, Y., XU, C., GAO, X., et al. Projected changes in temperature and precipitation extremes over the Yangtze River Basin of China in the 21st century. *Quaternary International*, 2009, 208(1): 44-52.
- [5] YANG, T., HAO, X., SHAO, Q., et al. Multi-model ensemble projections in temperature and precipitation extremes of the Tibetan Plateau in the 21st century. *Global and Planetary Change*, 2012, 80-81: 1-13.
- [6] GUO, J., GUO, S., LI, Y., et al. Spatial and temporal variation of extreme precipitation indices in the Yangtze River basin, China. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2013, 27(2): 459-475.
- [7] TAYLOR, K. E., STOUFFER, R. J. and MEEHL, G. A. An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2012, 93(4): 485-498.
- [8] 吴昊旻, 黄安宁, 何清, 等. 10 个 CMIP5 模式预估中亚地区未来 50a 降水时空变化特征[J]. 干旱区地理, 2013, 36(4): 669-679.
WU Haomin, HUANG Anning, HE Qing, et al. Projection of the spatial and temporal variation characteristics of precipitation over central Asia of 10 CMIP5 models in the next 50 years. *Arid Land Geography*, 2013, 36(4): 669-679. (in Chinese)
- [9] KUMAR, S., MERWADE, V., KINTER III, J. L., et al. Evaluation of temperature and precipitation trends and long-term persistence in CMIP5 twentieth-century climate simulations. *Journal of Climate*, 2013, 26(12): 4168-4185.
- [10] ZHAO, T. B., CHEN, L. and MA, Z. G. Simulation of historical and projected climate change in arid and semiarid areas by CMIP5 models. *Chinese Science Bulletin*, 2014, 59: 412-429.
- [11] 任玉玉, 任国玉. 1960-2008 年江西省极端降水变化趋势[J]. 气候与环境研究, 2010, 15(4): 462-469.
REN Yuyu, REN Guoyu. Variation tendency of the extreme precipitation in Jiangxi Province during 1960-2008. *Climatic and Environmental Research*, 15(4): 462-469. (in Chinese)
- [12] 闵岫, 刘健. 鄱阳湖区域极端降水异常的特征及成因[J]. 湖泊科学, 2011, 23(3): 435-444.
MIN Shen, LIU Jian. Characteristics and causes of the extreme precipitation anomaly in Lake Poyang area. *Journal of Lake Sciences*, 2011, 23(3): 435-444. (in Chinese)
- [13] 雒征, 郭家力. 鄱阳湖流域降水极值指标时空分布变化规律研究[A]. 梯级水库群洪水资源调控与经济运行学术研讨会论文集[C]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.
LUO Zheng, GUO Jiali. Spatio-temporal variation of extreme precipitation indices in the Poyang Lake Basin. *Proceeding of the Flood Water Resources Control and Economic Operation*. Beijing: China WaterPower Press. (in Chinese)
- [14] ZHANG, Q., XIAO, M., LI, J., et al. Topography-based spatial patterns of precipitation extremes in the Poyang Lake basin, China: Changing properties and causes. *Journal of Hydrology*, 2014, 512: 229-239.
- [15] MOSS, R., EDMONDS, J., HIBBARD, K., et al. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 2009, 463: 747-756.
- [16] 范丽军, 符淙斌, 陈德亮. 统计降尺度法对未来区域气候变化情景预估的研究进展[J]. 地球科学进展, 2005,

- 20(3): 320-329.
FAN Lijun, FU Congbin and CHEN Deliang. Review on creating future climate change scenarios by statistical downscaling techniques. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(3): 320-329. (in Chinese)
- [17] WILBY, R. L., DAWSON, C. W. and BARROW, E. M. SDSM—A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Environmental Modeling and Software*, 2002, 17(2): 145-157.
- [18] 陈威霖, 江志红, 黄强. 基于统计降尺度模型的江淮流域极端气候的模拟与预估[J]. *大气科学学报*, 2012, 35(5): 578-590.
CHEN Weilin, JIANG Zhihong and HUANG Qiang. Projection and simulation of climate extremes over the Yangtze and Huaihe River basins based on a statistical downscaling model. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2012, 35(5): 578-590. (in Chinese)
- [19] YANG, T., LI, H., WANG, W., et al. Statistical downscaling of extreme daily precipitation, evaporation, and temperature and construction of future scenarios. *Hydrological Processes*, 2012, 26(23): 3510-3523.
- [20] DEGEFIE, D. T., FLEISCHER, E., KLEMM, O., et al. Climate extremes in South Western Siberia: Past and future. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2014, 28: 1-13.
- [21] 胡宜昌, 董文杰, 何勇. 21 世纪初极端天气气候事件研究进展[J]. *地球科学进展*, 2007, 22(10): 1066-1075.
HU Yichang, DONG Wenjie and HE Yong. Progress of the study of extreme weather and climate events at the beginning of the twenty first century. *Advances in Earth Science*, 2007, 22(10): 1066-1075. (in Chinese)
- [22] QIAN, W., LIN, X. Regional trends in recent precipitation indices in China. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2005, 90(3-4): 193-207.
- [23] 杜涛, 熊立华, 江聪. 渭河流域降雨时间序列非一致性频率分析[J]. *干旱区地理*, 2014, 37(3): 468-479.
DU Tao, XIONG Lihua and JIANG Cong. Nonstationary frequency analysis of rainfall time series in Weihe River Basin. *Arid Land Geography*, 2014, 37(3): 468-479. (in Chinese)