

Simulation and Prediction of Future Precipitation and Runoff Change in the Ganjiang Basin

Le Wang¹, Shenglian Guo¹, Xingjun Hong¹, Jiali Guo², Zhangjun Liu¹

¹State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Hubei Provincial Collaborative Innovation Center for Water Resources Security, Wuhan University, Wuhan

²College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang

Email: lewangwhu@126.com

Received: Oct. 30th, 2014; revised: Nov. 22nd, 2014; accepted: Nov. 30th, 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

The SDSM statistical downscaling technique was adopted to degrade the output of BCC-CSM1.1 model under three representative concentration pathways: RCP2.6, RCP4.5 and RCP8.5 scenarios recommended by IPCC5. Future precipitation and temperature series were as inputs of distributed two-parameter monthly water balance model to simulate and predict future runoff change in the Ganjiang basin. The results show that under three representative concentration pathways, simulated annual runoff volumes of 2020s and 2050s are both less than the reference value in the recent period, but there are differences for 2080s period: under RCP2.6 and RCP4.5 concentration pathways, the simulated annual runoff volumes are almost equal to the recent reference value, while more than the recent reference value under RCP8.5 concentration pathways. Meanwhile, future runoff volume decreases in the main flood season and increases in dry season, which implies that climate change is likely to alleviate flood control pressure during flood season and water supply pressure during dry season to some extent in the Ganjiang basin.

Keywords

Climate Change, Runoff Prediction, IPCC5, Monthly Water Balance Model, Ganjiang Basin

赣江流域未来降雨径流变化模拟预测

作者简介: 王乐(1992-), 女, 湖南衡阳人, 硕士研究生, 主要从事流域水文模拟研究。

王 乐¹, 郭生练¹, 洪兴骏¹, 郭家力², 刘章君¹

¹武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 水资源安全保障湖北省协同创新中心, 武汉

²三峡大学水利与环境学院, 宜昌

Email: lewangwhu@126.com

收稿日期: 2014年10月30日; 修回日期: 2014年11月22日; 录用日期: 2014年11月30日

摘 要

本文采用BCC-CSM1.1全球气候模式, 在IPCC5推荐的三种代表性浓度路径RCP2.6、RCP4.5和RCP8.5情景下, 应用SDSM统计降尺度技术将GCM输出进行降解, 并作为分布式两参数月水量平衡模型的输入, 模拟预测赣江流域未来的降雨径流变化。结果表明: 在三种浓度路径下, 2020s和2050s时期年径流量均比近期减少, 2080s时期则存在差异: RCP2.6和RCP4.5浓度两种路径下的年径流量与近期基本持平, 而RCP8.5浓度路径下相对近期有明显的增加。同时, 未来主汛期径流减少, 非汛期径流呈现不同程度的增加, 气候变化在一定程度上有可能减轻赣江流域未来汛期的防洪压力和枯水期的供水压力。

关键词

气候变化, 径流预测, IPCC5, 月水量平衡模型, 赣江流域

1. 引言

由于全球气候变化和人类活动的影响, 地球上的水文循环和水资源状况发生了改变, 变化环境下水文循环机理及其演变规律的研究已成为水文学领域的研究热点[1]。GCMs 气候模式与流域水文模型耦合是目前研究气候变化背景下流域未来径流变化趋势最为常用的方法, 国内外学者作了大量的研究工作。Arnell [2]研制了以水量平衡模型为基础的大尺度分布式水文模型, 并耦合 Hadley 中心的 6 个气象情景估计了气候变化对全球范围内分辨率为 60 km × 60 km 网格的径流的影响; 袁飞等[3]应用 VIC 模型与区域气候 PRECIS 模式耦合, 对气候变化情景下海河流域水资源的变化趋势进行预测; 郭靖等[4]应用统计降尺度法将全球气候模式 CGCM2 和 HadCM3 与 VIC 分布式水文模型进行耦合, 研究未来 A2 气候情景下汉江流域降水径流变化情况; 肖恒等[5]利用 CMIP5 中 5 个相对独立的全球气候模式耦合 VIC 模型, 评估了 IPCC RCP4.5 情景下未来 30 年珠江流域洪水对气候变化的响应。

目前大多数对未来气候变化预估的研究均基于 IPCC SRES 情景下的输出结果研究[6] [7]。IPCC 为第五次评估报告(以下简称 IPCC5)开发了一套代表性浓度路径情景(Representative Concentration Pathways, RCPs), RCPs 包括了低排放(RCP2.6)、中低排放(RCP4.5)、中排放(RCP6.0)和高排放(RCP8.5)4 种情景, 每个情景都提供了一种受社会经济条件和环境、气候影响等的排放路径, 并给出 2100 年相应的辐射强迫值[8], 已被各国模式研究组用于计算相应的气候变化和影响评估。基于 RCPs 情景的区域气候变化分析可在很大程度上丰富科学家及政府决策者对未来气候变化趋势的理解和认识[9]。然而, 我国基于 RCPs 情景的区域气候变化趋势研究目前还相对较少[10], 有必要进一步地深入研究。

本文将采用 BCC-CSM1.1 气候模式, 在 IPCC5 推荐的三种代表性浓度路径 RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5 情景下, 应用 SDSM 统计降尺度技术将 GCM 输出的大尺度气候因子降解到流域尺度, 作为分布式两参数月水量平衡模型的输入, 模拟预测赣江流域降雨径流过程, 分析评估气候变化对赣江流域水文循环和

水资源系统的影响。

2. 研究区域及数据资料

鄱阳湖是我国最大的淡水湖泊,承纳赣江、抚河、信江、饶河、修河五河来水,经调蓄后注入长江,是长江洪水重要的调蓄场所,在长江流域治理、开发和保护中占有重要的作用。此外,鄱阳湖流域内水旱灾害频发,未来气候变化将对流域降雨-径流过程产生影响,导致径流量的时空重新分配[1]。赣江是鄱阳湖水系最大的一条河流,因此,研究气候变化背景下赣江流域未来降雨径流变化对流域水资源规划设计、洪涝灾害管理具有重要意义。

赣江流域位于东经 113°30'~116°40',北纬 24°29'~29°11',流域集水面积 80,948 km²。赣江流域属于亚热带湿润季风区,气候温和,降水丰沛,年平均降水量 1400~1800 mm,降雨径流时空分布不均,年际、年内变化明显,具有明显的季节性和区域性。流域降雨主要集中在每年的 4~6 月,降雨量占全年降雨量的 50%,洪水多发生在 5~6 月,7~8 月受台风影响,也可能出现较大洪水[11]。

本文选取了赣江流域内 6 个国家气象站点(宜春、吉安、遂川、赣州、南昌、樟树),这些站点分布比较均匀,基本上能代表该区域的气候特征。选取 1961~2005 年为研究基准期(其中 1961~1995 年为模型率定期,1996~2005 年为模型检验期),2010~2099 年作为未来时段。研究需要的数据包括三类:6 个气象站点 45 年实测资料(月降雨、月气温和月蒸发观测资料)以及外洲站 45 年实测流量资料;大尺度气候观测资料(NCEP 大尺度预报因子);气候情景资料(CMIP5 中 BCC-CSM1.1 模式降尺度后在 RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5 三种情景下模拟的当前和未来气候条件下的输出数据)。

3. 研究方法

3.1. 两参数月水量平衡模型

两参数月水量平衡模型具有结构简单、参数较少、物理概念明确、对资料要求不高、参数优化值稳健、模拟精度高等优点,经检验在东江、赣江和汉江 70 个子流域上应用效果很好,在气候变化研究中得到了很好的应用[11]-[13]。模型的主要计算模块如下:

1) 月实际蒸发量 E 的计算

$$E(t) = C \times EP(t) \times \tanh(P(t)/EP(t)) \quad (1)$$

式中: $E(t)$ 为流域月实际蒸发量, $EP(t)$ 为月蒸发皿观测值, $P(t)$ 为月降水量,系数 C 是模型中的第一个参数,综合反映蒸发和降水变化情况。

2) 月径流量 Q 的计算

$$Q(t) = S(t) \times \tanh(S(t)/SC) \quad (2)$$

式中: $Q(t)$ 为月径流量, $S(t)$ 为当月土壤净含水量, SC 是模型中的第二个参数,为流域最大蓄水能力。

3) 模型的数值计算方法

已知月降水量 $P(t)$, 月蒸发皿观测值 $EP(t)$, 则流域月实际蒸散发量 $E(t)$ 可采用公式(1)来计算。扣除蒸散发之后的土壤含水量为 $(S(t-1) + P(t) - E(t))$, 其中 $S(t-1)$ 为第 $(t-1)$ 个月月底,第 t 个月初的土壤含水量,然后再根据公式(3)来计算流域月产流量 $Q(t)$:

$$Q(t) = (S(t-1) + P(t) - E(t)) \times \tanh((S(t-1) + P(t) - E(t))/SC) \quad (3)$$

最后得到第 t 个月月底,第 $(t-1)$ 个月初的土壤含水量 $S(t)$:

$$S(t) = S(t-1) + P(t) - E(t) - Q(t) \quad (4)$$

3.2. 统计降尺度模型

统计降尺度法主要采用统计学的方法建立大尺度气候因子和区域水文气象变量之间的关系,然后再把这种关系应用于 GCMs 输出的大尺度气候信息,来模拟和预测区域未来水文气象变量(如降水和气温)的变化情况。统计降尺度方法计算量较小,节省机时,可以很快地模拟出百年尺度的区域气候信息,同时很容易应用于不同的 GCM 模式[14]。原理式为:

$$Y = F(X) \quad (5)$$

式中: Y 为区域气候预报变量; X 为大尺度气候预报因子; F 为建立的大尺度气候预报因子和区域气候变量间的一种统计关系。

SDSM (Statistical Downscaling Scaling Model)是英国 Wilby 等建立的一种基于 Windows 界面,研究区域和当地气候变化影响的决策支持工具[15]。该模型融合了天气发生器和多元线性回归技术,是一种混合统计降尺度方法。经过近 10 年的发展,SDSM 已经发展到第 4 代,并在气候变化中得到广泛的应用[14]-[16]。SDSM 的工作流程主要包括两部分:一是建立预报量(区域尺度或站点气象要素数据)与预报因子(大气环流因子)之间的统计关系,并确定天气发生器所需参数;二是利用 GCM 预估数据和第一步中生成的参数模拟预报量的未来日序列。本文将应用其对赣江流域的月降水和月气温进行降尺度。

3.3. 蒸发计算

在研究气候变化对水文水资源影响时,由于未来不可能有实测蒸发观测资料,必须建立起蒸发与气候因子之间的经验关系,即用气候学方法(如彭曼公式)计算流域蒸发量。现有一些常用的蒸发计算公式都需要多个气候因子,数据需求量大,且不易获得,因此本文中通过建立蒸发能力 $EP(t)$ 与平均气温 $T(t)$ 之间的关系,通过未来月平均气温预测未来月平均蒸发。有研究表明 $EP(t)$ 与 $T(t)$ 服从指数关系[17],公式如下:

$$EP(t) = A \times \exp(B \times T(t)) \quad (6)$$

式中: A , B 为系数,可通过最小二乘法确定。

4. 结果与分析

4.1. 模型的率定和检验

首先利用赣江流域内 21 个子流域的资料,率定两参数月水量平衡模型的参数 SC 和 C 。将 1961~1995 年作为模型的率定期,1996~2005 年作为模型的检验期,采用 Nash 模型效率系数 R^2 和径流总量相对误差 RE 作为目标函数,利用各子流域出口控制站的月径流资料对每个子流域进行参数率定。模型参数优选采用人工和计算机联合优选法:第一步,通过控制径流总量相对误差 RE 来优选上垫面参数 C 值;第二步,在参数 C 值保持固定的前提下,优选流域下垫面参数 SC 。两步优选法可以减少参数间的相关性,优化方法采用比较稳健的单纯形法[13]。

然后将参数网格化,建立分布式两参数月水量平衡模型。基于 $30 \text{ km} \times 30 \text{ km}$ 的网格,赣江流域共可划分为 129 个网格,包括边界网格和流域中间网格($30 \text{ km} \times 30 \text{ km}$),利用赣江流域的地理信息资料(土壤、植被类型等),将其与模型参数联系起来,对模型参数进行网格化处理,图 1 给出了赣江流域各网格的模型参数值 C 和 SC [11]。

将赣江流域 6 个国家气象站点的月降雨、月蒸发观测资料,采用距离倒数平方法插值得到 129 个网格对应的月降雨量和月蒸发能力,输入到分布式两参数月水量平衡模型,计算得到各网格径流深,再将

各网格的径流深加权平均即可得到流域的平均径流深，进而可求得赣江流域出口控制外洲站的径流深。计算结果表明：模型率定期和检验期的 Nash 效率系数 R^2 分别为 0.76 和 0.74，径流总量相对误差 RE 分别为 -17.76% 和 -16.41%。赣江流域率定期和检验期的实测与模拟月径流过程如图 2 和图 3，整体来说，模拟月径流与实测值拟合效果较好。说明所建立的分布式两参数月水量平衡模型精度较高，可以用来模拟预测气候变化条件下赣江流域未来径流变化情况。

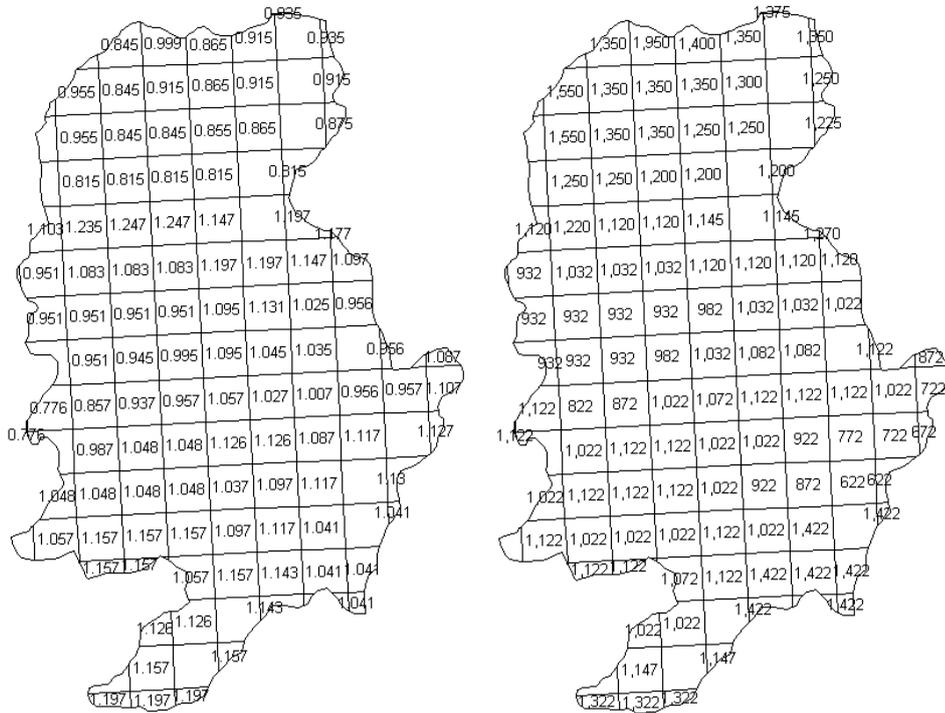


Figure 1. Parameter C and SC for each grid of the Ganjiang basin

图 1. 赣江流域模型参数 C 和 SC 值分布图

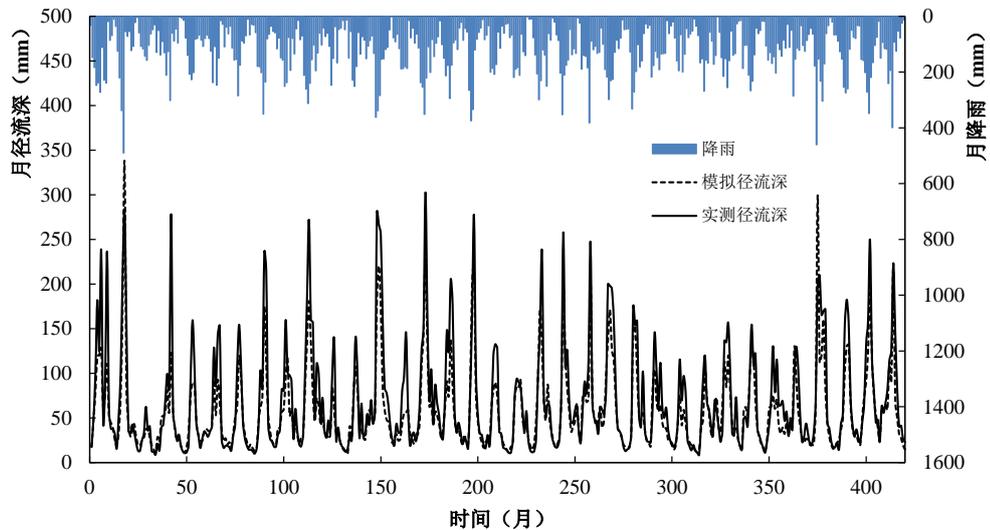


Figure 2. Simulated and observed monthly runoff during calibration period at Waizhou station in the Ganjiang basin

图 2. 率定期赣江流域外洲站实测与模拟月径流过程

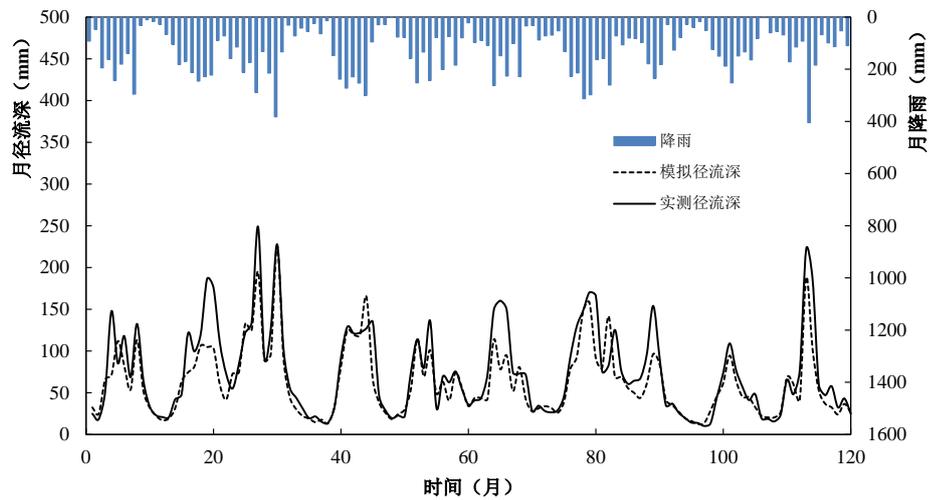


Figure 3. Simulated and observed monthly runoff during verification period at Waizhou station in the Ganjiang basin

图 3. 检验期赣江流域外洲站实测与模拟月径流过程

4.2. 未来径流变化预测分析

4.2.1. 气温 - 蒸发回归分析

通过降尺度方法处理的 GCMs 气候模式输出为月降水、月气温，为了将月气温系列转换成两参数月水量平衡模型所需要输入的月蒸发资料，可分析赣江流域 6 个气象站点的多年实测月蒸发观测值 $EP(t)$ 与月平均气温 $T(t)$ 之间的关系。根据 1961~2005 年(45 年)各气象站点的实测资料，对各站点的月蒸发观测值 $EP(t)$ 与月平均气温 $T(t)$ 进行回归分析，结果见表 1。由表 1 可知，两者关系密切，相关系数都在 0.9 以上，采用的指数模型表达两者关系是合理可行的。

4.2.2. 未来降水蒸发和径流预测

选用耦合模式比较计划第五阶段(CMIP5)中应用较广泛的 BCC-CSM1.1 全球气候模式和 IPCC5 推荐的三种代表性浓度路径 RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5 情景，应用 SDSM 统计降尺度模型将 GCM 输出的大尺度气候因子降解到流域尺度，作为分布式两参数月水量平衡模型的输入，模拟预测赣江流域未来降水、蒸发和径流的变化情况。时间上，选用 1961~2005 年作为基准年，2010~2099 年作为未来时段。为了便于统计，将未来气候情景分为 3 个时期：2020s (2010~2039 年)，2050s (2040~2069 年)，2080s (2070~2099 年)。

表 2 给出了不同代表性浓度路径下赣江流域未来年降水、蒸发和年径流量变化情况。由表 2 可知，3 种代表性浓度路径下的赣江流域未来年气温、蒸发的总体趋势均呈现出不同程度的增加趋势，而未来年降水在 RCP2.6 情景下先减小后增加，在 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下均呈现增加趋势；在三种浓度路径下，2020s 和 2050s 时期模拟年径流量均比近期减少，而 2080s 时期则存在差异：RCP2.6 和 RCP4.5 浓度路径下的模拟年径流量与近期基本持平，RCP8.5 浓度路径下则相对近期有明显的增加。随着时间的推移，未来年径流量呈现先减小后增加的趋势。对于未来同一时期，RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5 情景下的径流量依次增加。

图 4、图 5、图 6 分别给出了不同代表性浓度路径下赣江流域月降水、月实际蒸发以及月径流量变化情况。结合表 2 发现，从年尺度上看，降水的变幅小于蒸发的变幅，导致径流先减小后增加。从月尺度来看，降水的年内分布差异高于蒸发，径流的年内分布不均匀主要是由降水决定。

Table 1. Regression analysis results of measured monthly evaporation and monthly temperature
表 1. 月蒸发观测值与月平均气温回归分析结果

气象站点	系数 A	系数 B	相关系数 R
宜春	25.53	0.0617	0.96
吉安	24.97	0.0630	0.97
遂川	26.48	0.0605	0.96
赣州	25.55	0.0617	0.97
南昌	29.22	0.0580	0.96
樟树	25.42	0.0614	0.95

Table 2. The annual precipitation, evaporation and runoff change in the future in the Ganjiang basin
表 2. 赣江流域未来年降水、蒸发和径流量变化情况

代表性浓度 路径	变量	近期	未来					
			2020s	变幅(%)	2050s	变幅(%)	2080s	变幅(%)
RCP2.6	P (mm)	1554.6	1511.0	-2.81	1543.0	-0.75	1582.4	1.79
	T (°C)	18.24	18.43	1.04	18.42	1.02	18.30	0.35
	E (mm)	828.5	854.8	3.17	863.0	4.16	844.7	1.95
	W (10 ⁸ m ³)	551.6	514.8	-6.67	506.6	-8.17	548.6	-0.55
RCP4.5	P (mm)	1554.6	1568.7	0.90	1574.2	1.26	1606.3	3.32
	T (°C)	18.24	18.45	1.19	18.69	2.47	18.70	2.57
	E (mm)	828.5	849.1	2.48	862.6	4.11	860.3	3.83
	W (10 ⁸ m ³)	551.6	532.7	-3.44	524.2	-4.97	551.8	0.03
RCP8.5	P (mm)	1554.6	1582.7	1.81	1618.2	4.09	1704.0	9.61
	T (°C)	18.24	18.46	1.21	18.72	2.69	19.02	4.31
	E (mm)	828.5	861.3	3.95	882.2	6.47	883.7	6.66
	W (10 ⁸ m ³)	551.6	537.8	-2.50	536.7	-2.71	624.7	13.24

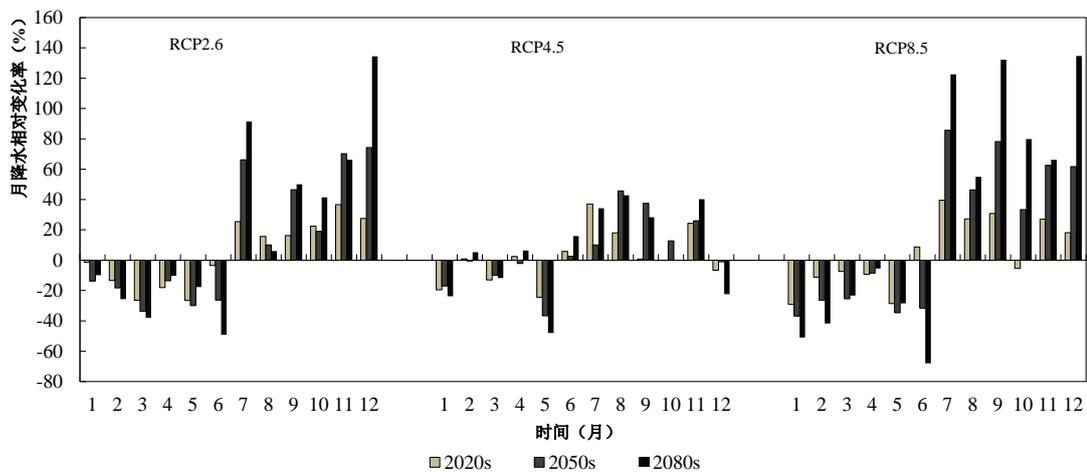


Figure 4. The monthly precipitation change under different comprehensive concentration pathways in the future in the Ganjiang basin

图 4. 不同代表性浓度路径下赣江流域未来月降水变化情况

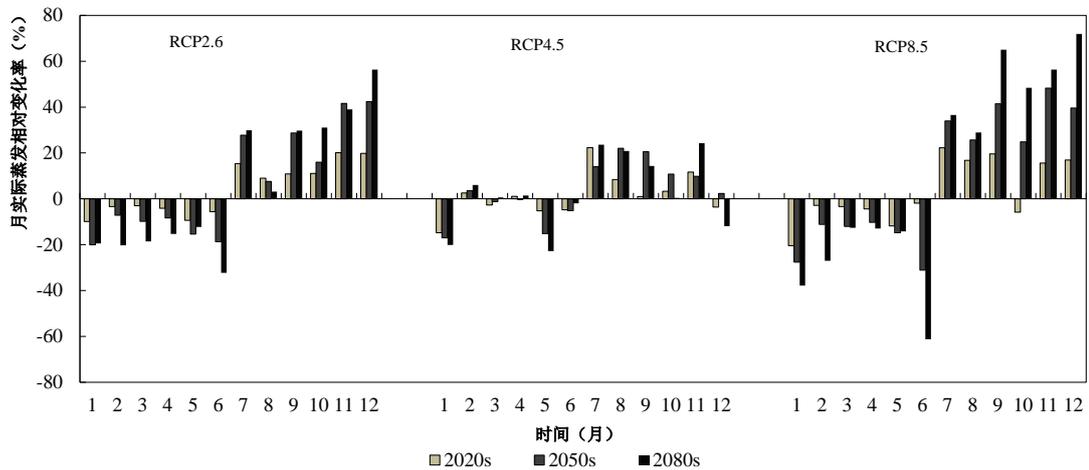


Figure 5. The monthly actual evaporation change under different comprehensive concentration pathways in the future in the Ganjiang basin

图 5. 不同代表性浓度路径下赣江流域未来月实际蒸发变化情况

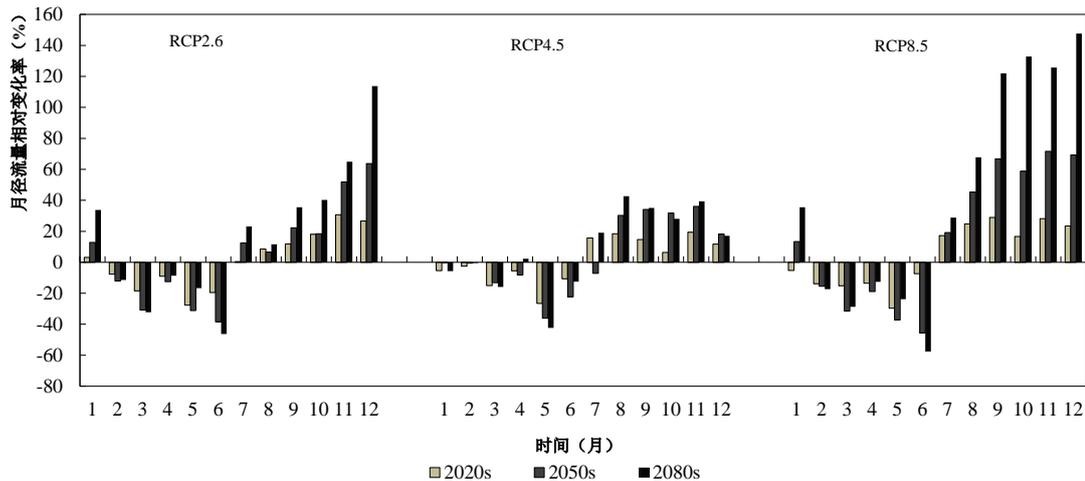


Figure 6. The monthly runoff change under different comprehensive concentration pathways in the future in the Ganjiang basin

图 6. 不同代表性浓度路径下赣江流域未来月径流量变化情况

从径流年内分布来看,赣江流域未来径流年内分布的总体趋势为1~6月径流减少,7~12月径流增加,年内分配不均匀得到缓和。赣江流域汛期为4~9月(主汛期为4~6月),非汛期为10月~次年3月,统计得到不同代表性浓度路径下赣江流域未来主汛期、非汛期的径流量变化情况如图7所示。由图7可以发现,赣江流域未来三个时段的主汛期径流均减少,非汛期径流呈现不同程度的增加,表明气候变化有可能在一定程度上减轻赣江流域未来的防洪压力和枯水期的供水压力,水资源供需矛盾得到进一步缓解。

5. 结论

本文采用 BCC-CSM1.1 全球气候模式,在 IPCC5 推荐的三种代表性浓度路径 RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5 情景下,应用 SDSM 统计降尺度技术将 GCM 输出的大尺度气候因子降解到流域尺度,作为分布式两参数月水量平衡模型的输入,模拟预测赣江流域未来的降雨径流变化。主要研究结论如下:

- 1) 在三种浓度路径下,2020s 和 2050s 时期年径流量均比近期减少,2080s 时期则存在差异:RCP2.6

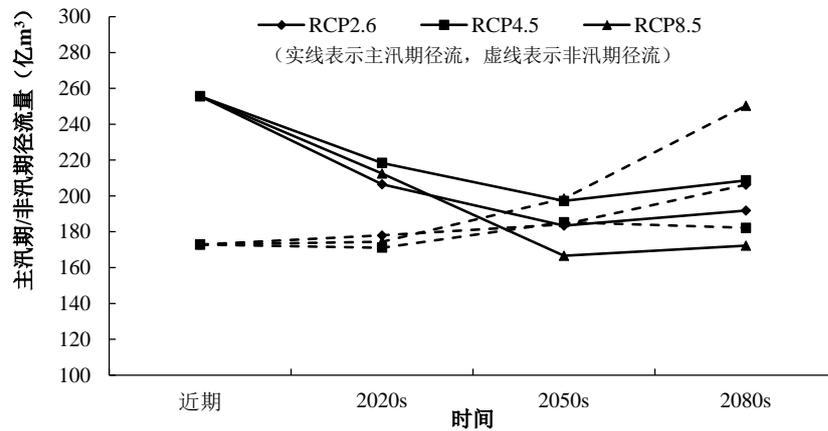


Figure 7. Runoff change during flood and dry seasons under different comprehensive concentration pathways during future periods in the Ganjiang basin
图 7. 不同代表性浓度路径下赣江流域未来主汛期、非汛期径流量变化情况

和 RCP4.5 浓度两种路径下的年径流量与近期基本持平，而 RCP8.5 浓度路径下相对近期有明显的增加。随着时间的推移，未来年径流量呈现先减小后增加的趋势。

2) 未来气候变化条件下，降水的变幅小于蒸发，导致径流量先减小后增加；降水的年内分布差异大于蒸发，径流的年内分布不均匀主要是由降水决定。

3) 未来三个时段的主汛期径流减少，非汛期径流呈现不同程度的增加，表明气候变化有可能在一定程度上减轻赣江流域未来汛期的防洪压力和枯水期的供水压力，水资源供需矛盾有望得到缓解。

基金项目

国家自然科学基金资助项目(51190094)。

参考文献 (References)

- [1] 叶许春, 刘健, 李相虎, 等. 气候和人类活动对赣江径流变化的作用分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2013, 41(3): 196-203.
YE Xuchun, LIU Jian, LI Xianghu, et al. Effects of climate variability and human activities on runoff variation of Ganjiang River Basin. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2013, 41(3): 196-203. (in Chinese)
- [2] ARNELL, N.W. A simple water balance model for the simulation of streamflow over a large geographic domain. Journal of Hydrology, 1999, 217(3-4): 314-355.
- [3] 袁飞, 谢正辉, 任立良, 等. 气候变化对海河流域水文特性的影响[J]. 水利学报, 2005, 36(3): 274-279.
YUAN Fei, XIE Zhenghui, REN Liliang, et al. Hydrological variation in Haihe River Basin due to climate change. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(3): 274-279. (in Chinese)
- [4] 郭靖, 郭生练, 张俊, 等. 汉江流域未来降水径流预测分析研究[J]. 水文, 2009, 29(5): 18-22.
GUO Jing, GUO Shenglian, ZHANG Jun, et al. Prediction of rainfall and runoff changes in the Hanjiang Basin. Journal of China Hydrology, 2009, 29(5): 18-22. (in Chinese)
- [5] 肖恒, 陆桂华, 吴志勇, 等. 珠江流域未来 30 年洪水对气候变化的响应[J]. 水利学报, 2013, 44(12): 1409-1419.
XIAO Heng, LU Guihua, WU Zhiyong, et al. Flood response to climate change in the Pearl River basin for the next three decades. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(12): 1409-1419. (in Chinese)
- [6] ARNELL, N.W. Effects of IPCC SRES emissions scenarios on river runoff: A global perspective. Hydrology and Earth System Sciences, 1999, 7(5): 619-641.
- [7] CHEN, H., GUO, S.L., XU, C.Y., et al. Historical temporal trends of hydro-climatic variables and runoff response to climate variability and their relevance in water resource management in the Hanjiang basin. Journal of Hydrology, 2007, 344(3): 171-184.
- [8] 秦大河. 气候变化科学与人类可持续发展[J]. 地理科学与发展, 2014, 33(7): 874-883.

- QIN Dahe. Climate change science and sustainable development. *Progress in Geography*, 2014, 33(7): 874-883. (in Chinese)
- [9] 杜尧东, 杨红龙, 刘蔚琴. 未来 RCPs 情景下珠江流域降水特征的模拟分析[J]. *热带气象学报*, 2014, 30(3): 495-502. DU Yaodong, YANG Honglong, LIU Weiqin. Future change of precipitation extremes over the Pearl River Basin from regional climate models. *Journal of Tropical Meteorology*, 2014, 30(3): 495-502. (in Chinese)
- [10] 王国庆, 张建云, 李岩, 等. 海河流域基于多模式的未来气候变化趋势[J]. *资源科学*, 2014, 36(5): 1043-1050. WANG Guoqing, ZHANG Jianyun, LI Yan, et al. Variation trend of future climate for the Hai River Basin based on multiple GCMs projections. *Resources Science*, 2014, 36(5): 1043-1050. (in Chinese)
- [11] 杨井, 郭生练, 王金星, 等. 基于 GIS 的分布式月水量平衡模型及其应用[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2002, 35(4): 22-26. YANG Jing, GUO Shenglian, WANG Jinxing, et al. GIS based distributed monthly water balance model and its application. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2002, 35(4): 22-26. (in Chinese)
- [12] 熊立华, 郭生练, 付小平, 等. 两参数月水量平衡模型的研制和应用[J]. *水科学进展*, 1996, 7: 80-86. XIONG Lihua, GUO Shenglian, FU Xiaoping, et al. Two-parameter monthly water balance model and its application. *Advances in Water Science*, 1996, 7: 80-86. (in Chinese)
- [13] XIONG, L.H. and GUO, S.L. A two-parameter monthly water balance model and its application. *Journal of Hydrology*, 1999, 216(1-2): 111-123.
- [14] 陈华, 郭家力, 郭生练, 等. 统计降尺度方法及其评价指标比较研究[J]. *水利学报*, 2012, 43(8): 891-897. CHEN Hua, GUO Jiali, GUO Shenglian, et al. Comparison of different statistical downscaling methods and evaluation indicators in climate change impact on runoff. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, 43(8): 891-897. (in Chinese)
- [15] WILBY, R.L., DAWSON, C.W. and BARROW, E.M. SDSM—A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Environmental and Modeling Software*, 2002, 17(2): 147-159.
- [16] CHU, J.T., XIA, J. and XU, C.Y. Statistical downscaling the daily precipitation for climate change scenarios in Haihe River Basin of China. *Journal of Natural Resources*, 2008, 23(6): 1068-1076.
- [17] 郭靖. 气候变化对流域水循环和水资源影响的研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2010. GUO Jing. Climate change impact on hydrological cycle and water resources. Wuhan: Wuhan University, 2010. (in Chinese)