

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2017.04.003

气候变化下新安江-富春江水电站径流响应模拟及适应性调度研究

闻 昕^{1,2}, 丁紫玉¹, 方国华¹, 雷晓辉², 王 浩²

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098;

2. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘要:评估了气候变化对新安江-富春江水电站控制流域径流的影响,提出不同气候变化情景下的适应性调度方案,并对不确定性进行了分析。结果表明,2016—2099年,新安江水库流域径流量预计降幅为5.4%~5.8%,金华江流域径流量预计增幅为6.2%~7.5%,衢江流域径流量的预计增幅在0.8%以内。在适应性调度模式下,新安江-富春江水电站未来总发电量比常规调度提高3.43%~3.85%,新安江和富春江水电站的最大下泄流量可分别下降22.74%~33.29%和16.57%~17.63%,两电站总弃水量降幅可达81.61%~99.99%和52.98%~58.64%,综合效益显著,且该调度模式对于辐射强度以及不同模式间的不确定性具有良好的适应性。

关键词:径流;BCSD降尺度;水文模拟;自适应遗传算法;不确定性;新安江-富春江水电站

中图分类号:TV697.1

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2017)04-0010-10

Study on runoff response simulation and adaptive scheduling of Xin'anjiang-Fuchunjiang hydropower station under climate change

WEN Xin^{1,2}, DING Ziyu¹, FANG Guohua¹, LEI Xiaohui², WANG Hao²

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin,

China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: We evaluated the impact of climate change on the runoff of the Xin'anjiang-Fuchunjiang hydropower station basin, put forward the adaptive scheduling scheme under different climate change scenarios, and analyzed the uncertainty. The results show that, during 2016—2099, the runoff of Xin'anjiang Reservoir Basin will decrease by 5.4%—5.8%, and the runoff of the Jinhua River Basin and Qujiang River Basin will increase by 6.2%—7.5% and less than 0.8%, respectively. Under the adaptive scheduling mode, the total generating capacity of the Xin'anjiang-Fuchunjiang hydropower station is expected to increase by 3.43%—3.85% compared with the conventional dispatching. The maximum discharge of the Xin'anjiang and Fuchunjiang hydropower stations will decrease by 22.74%—33.29% and 16.57%—17.63%, respectively. The total abandoned water of the two hydropower stations will decrease by 81.61%—99.99% and 52.98%—58.64%, respectively. In addition, the scheduling mode adapts well to the radiation intensity and the uncertainty among different GCMs.

Key words: runoff; BCSD downscaling; hydrological simulation; adaptive genetic algorithm; uncertainty; Xin'anjiang-Fuchunjiang hydropower station

基金项目:国家自然科学基金(51609061);长江科学院开放研究基金(CKWV2016370/KY);水力学与山区河流开发保护国家重点实验室开放合作基金(SKHL1621);江苏高校优势学科建设工程资助项目

作者简介:闻昕(1987—),男,讲师,博士,主要从事资源规划及利用、水利水电系统规划与优化调度等方面研究。E-mail:njwenxin@163.com

通信作者:方国华,教授。E-mail:hhufgh@163.com

近百年来,全球气候持续变暖,海陆热力差异进一步加剧大尺度环流结构变化,流域原有产汇流过程与特性被改变,引起径流在多个时空尺度上的重新分配。流域历史水文序列平稳性假定被打破,原有水利工程的调度规则和基于历史经验的调度方式将难以适应新的变化环境。在此背景下,根据未来流域径流的时空变化规律,挖掘水利工程体系的特点与优势,充分利用拦、蓄、泄、分等技术,建立不同变化情景下的调度策略与系统应对机制,对于提高我国水利对气候变化的适应能力、充分发挥水利工程综合效益具有重要的科学意义和实际应用价值。

气候变化的影响与适应性研究是全球变化与水科学领域的交叉前沿科学问题,涉及水文模拟、系统优化、工程调度等诸多研究领域。王国庆^[1]对参数进行网格化,通过构建 YRWBm 水文模型对黄河中游地区径流量进行了分布式计算。Acosta 等^[2]通过构建 REA 模型,评估了 Lerma-Chapala 流域在 21 世纪 A1B 情景下的水资源脆弱性。徐宗学等^[3]用 GCM(general circulation model)数据驱动分布式水文模型 VIC 和 SWAT 模型,对气候变化对流域水循环的影响进行定量研究。秦南秀等^[4]同样用 GCM 数据,采用基于 ArcGIS 的地理分析模块建立的气温-降水-径流关系及双参数气候径流弹性指数方法,分析了气候变化对乌江流域水文水资源的影响。在适应性方面,夏军等^[5-6]系统阐述了气候变化适应性的概念与内涵,指出适应性调度是指根据未来气候变化下流域水文响应与变化情况,优化水利工程调度规则,减轻气候变化对于流域的不利影响。周研来等^[7]以丹江口水库为研究对象,构建 VIC 分布式水文模型,预测气候变化条件下汉江流域的径流变化,发展多目标调度图优化模型指导气候变化情景下水库调度运行。Maran 等^[8]着重从适应性管理策略的角度分析了气候变化对于 Alpine 流域水能开发活动的影响。Ashofteh 等^[9]利用 HadCM3 气候模型的 A2 情景,预测气候变化对 Aidoghmoush 流域的入库径流和灌溉用水的影响,并以提高供水可靠性为目标进行水库适应性调度。Yang 等^[10]制定适应气候变化条件下的水库优化调度规则,以兼顾发电和供水的要求。Zhou 等^[11-12]研究了单一水利工程的适应性调度方法。

综上,目前在气候变化影响与适应方面已有了一定的研究和探索,但在不确定性等方面成果仍不丰富,尚未形成“预估-检测-适应”的研究体系。为此,本文模拟并预估气候变化下新安江-富春江水电站控制流域的径流时空响应,解析未来径流时空演变特征,建立不同气候变化情景下的适应性调度

方案,并对调度结果的不确定性进行分析,以期为气候变化影响评估与适应性管理提供技术参考。

1 研究区域概况及数据来源

1.1 研究区域概况

新安江水电站和富春江水电站是钱塘江流域最大的两座水电站。新安江水电站位于钱塘江支流新安江上,是华东电网中装机容量最大、库容最大的电站,它主要承担电网调峰、调频、事故备用的任务。富春江水电站位于浙江省桐庐富春江七里垅峡口,距上游新安江水电站约 60 km,距下游杭州市约 110 km。富春江水电站是一座低水头大流量的河床式水电站,电站主要功能为发电,兼有航运、养殖、灌溉、供水、旅游等任务。新安江和富春江水电站工程特征值见表 1。研究区域包括新安江水库流域、衢江流域和金华江流域 3 个子流域,新安江、富春江水电站的位置以及流域分区情况见图 1。

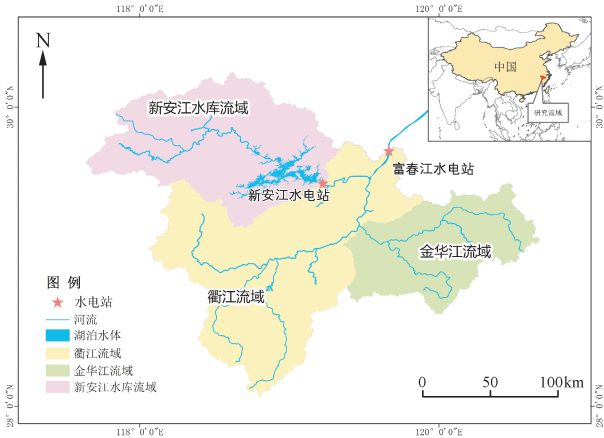


图 1 新安江-富春江水电站位置及流域分区

1.2 数据来源

所采用数据包括 3 类:历史气象观测数据、历史径流观测数据和气候数值模拟数据。其中,历史气象观测数据采用 Climatic Research Unit (CRU) 3.24 版本高分辨率气象再分析月数据,变量为温度、降水和蒸散发,空间尺度为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 网格,时间范围为 1901 年 1 月—2015 年 12 月。历史径流资料采用 1989—2015 年新安江水库、金华江流域和衢江流域出口的实测日径流资料。气候模式输出来自于 CMIP5 (coupled model intercomparison project phase 5) 多模式数据。本文选用美国 NASA、中国气象局等九家研究机构所研发的 GCM 模拟数据,详见表 2。历史模拟时段为 1901 年 1 月—2015 年 12 月,未来预估时段为 2016 年 1 月—2099 年 12 月,基于 RCP (representative concentration pathways) 的未来气候变化情景,选用 RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5 分别代表低、中、高排放 3 种气候变化情景。

表 1 新安江和富春江水电站工程特征值

电站	总库容/ 亿 m ³	正常高水位/m	正常高水位水面面积/ km ²	正常高水位水库容积/ 亿 m ³	死水位/m	汛期防洪限制水位/m	设计洪水水位/m	校核洪水水位/m	校核洪水库容积/ 亿 m ³	最大调洪库容/ 亿 m ³	最大泄洪流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	装机容量/ MW	设计年发电量/ (亿 kW·h)	设计洪水流量/ (m ³ ·s ⁻¹)
新安江电站	220.0	108.0	580.0	178.4	86.0	106.5	111.0	114.0	216.26	47.32	13 200	662.4(2005 年前) 810(2005 年扩容后)	18.6	27 600
富春江电站	9.2	23.0	56.0	4.4	21.5	—	24.7	28.2	8.75	—	18 700	297.2	9.23	23 100

表 2 CMIP5 中 GCM 模型选用

CMIP5 GCM 名称	大气分辨率 (经度×纬度)	机构名称(国家)
bcc-csm1-1	~2.8°×2.8°	中国气象局国家气候中心(中国)
CanESM2	~2.8°×2.8°	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis(加拿大)
CCSM4	1.25°×0.9°	National Center for Atmospheric Research(美国)
CSIRO-Mk3.6.0	1.875°×1.875°	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization in Collaboration with the Queensland Climate Change Centre of Excellence(澳大利亚)
GISS-E2-R	2.5°×2°	NASA Goddard Institute for Space Studies(美国)
IPSL-CM5A-LR	3.75°×1.875°	Institute Pierre-Simon Laplace(法国)
MIROC5	~1.4°×1.4°	Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology(日本)
MPI-ESM-LR	1.875°×1.875°	Max-Planck-Institut für Meteorologie(德国)
NorESM1-M	2.5°×1.875°	Norwegian Climate Centre(挪威)

2 研究方法

2.1 误差订正与空间分解降尺度

误差订正与空间分解(bias correction spatial disaggregation,BCSD)方法是 Wood 等^[13]于 2004 年提出的统计降尺度方法,可有效克服 GCM 模拟偏差、分辨率低的缺陷,该方法主要包括 2 个步骤:误差订正和空间分解。

GCM 的输出结果与实际观测值相比存在一定误差,因此需要对 GCM 的输出结果进行误差订正。对高分辨率的观测资料进行升尺度处理,将其尺度升至 GCM 网格对应的分辨率上;在每个网格点上,对模式资料的累积概率分布依据观测资料进行修正,使其具有相同的概率分布。

空间分解的目的是在空间上将误差订正后的 GCM 数据从粗尺度降解到所需的细尺度。首先,根据低分辨率网格的模式将高分辨率的观测气候态资料进行升尺度。然后,将经过误差订正的模式资料除以(或减去)经过升尺度的观测资料气候值得到修正因子;将此修正因子用 SYMAP(synteny mapping and analysis program)插值法插值到高分辨率的原始观测资料网格上^[14]。最后,将插值后的修正因子场乘以(或加上)高分辨率的观测资料气候值,得到模拟资料降尺度的结果。

2.2 新安江月水量平衡模型

根据气候变化评估研究的特点,对三水源新安江水文模型进行简化,构建新安江月水量平衡模型,

并运用遗传算法估计模型参数,模拟气候变化条件下流域水文响应过程。

新安江月水量平衡模型由蒸散发计算、产流计算、水源划分计算和汇流计算 4 个层次共同构成。其中,蒸散发计算采用 3 层蒸发模式,产流计算用蓄满产流方法,水源划分则采用自由水蓄水库的方法将其划分为地表径流和地下径流,汇流计算将坡地汇流过程分解为地表径流汇流和地下径流汇流 2 个部分。新安江月水量平衡模型的核心由张力水蓄水体和自由水蓄水体 2 个蓄水体构成。其中,张力水蓄水体控制产流,即控制流域对降水量的分配,决定其形成径流还是消耗于蒸散发;自由水蓄水体控制汇流,即控制流域对径流的时空分配,决定其形成快速还是慢速响应。

在进行新安江水文模型参数估计时,通常以模拟流量与实测流量之间平均相对误差最小或确定性系数最大为适应度函数^[16],计算公式为

$$R_e = \frac{Q_s(i) - Q_j(i)}{Q_s(i)} \tag{1}$$

$$D_c = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T [Q_j(t) - Q_s(t)]^2}{\sum_{t=1}^T [Q_s(t) - \overline{Q_s}]^2} \tag{2}$$

式中: R_e 为模拟流量 $Q_s(i)$ 与实测流量 $Q_j(i)$ 之间平均相对误差; D_c 为确定性系数; t 为计算时段; T 为时段总数; $Q_s(t)$ 为第 t 时段实测径流量,m³/s; $Q_j(t)$ 为第 t 时段模拟径流量,m³/s; $\overline{Q_s}$ 为实测径流量的均值,m³/s。

2.3 气候变化下水电站群适应性调度模型

2.3.1 模型建立

新安江-富春江水电站适应性调度的目标涉及防洪、供水、发电和生态 4 个方面,属多目标决策问题。根据研究区域水资源调度的要求与特点,本文以水电站发电经济效益为基本目标,将防洪、供水、生态等目标转化为不等式约束,采用约束法将多目标优化调度问题转化成单目标优化调度问题进行求解,以该水电站群联合发电量最大为目标函数,公式为

$$\max(E) = \sum_{n=1}^2 \sum_{t=1}^T A_n H_{n,t} Q_{n,t} \Delta t \quad (3)$$

式中: E 为水电站总发电量, $\text{kW} \cdot \text{h}$; n 为水电站序号; A_n 为第 n 个水电站出力系数; $H_{n,t}$ 为第 n 个水电站 t 时段上下游水头差, m ; $Q_{n,t}$ 为第 n 个水电站 t 时段发电流量, m^3/s ; Δt 为计算时段区间, s 。新安江电站出力系数为 8.5,富春江电站出力系数为 8.3。

新安江-富春江水库适应性调度模型的约束条件包括水量平衡约束、水位约束、下泄流量约束、水轮发电机组过流能力约束以及发电机组出力约束。

a. 水量平衡约束。

$$S_{n,t+1} = S_{n,t} + (w_{n,t} - Q_{\text{出},n,t}) \Delta t - I_{n,t} \quad (4)$$

式中: $S_{n,t}$ 为第 n 个水电站第 t 时段末的蓄水量, 亿 m^3 ; $w_{n,t}$ 为第 n 个水电站 Δt 时段内的入流量, m^3/s ; $Q_{\text{出},n,t}$ 为第 n 个水电站 Δt 时段内的出流量, m^3/s ; $I_{n,t}$ 为第 n 个水电站 t 时段末的损失水量, 亿 m^3 。

b. 水位约束。

$$Z_{n,t}^{\min} \leq Z_{n,t} \leq Z_{n,t}^{\max} \quad (5)$$

式中: $Z_{n,t}$ 为第 n 个水电站 t 时段末的水位, m ; $Z_{n,t}^{\min}$ 为第 n 个水电站 t 时段末允许的最低水位, m ; $Z_{n,t}^{\max}$ 为第 n 个水电站 t 时段末允许的最高水位, m 。

c. 下泄流量约束。

$$Q_{\text{泄},n,t}^{\min} \leq Q_{\text{泄},n,t} \leq Q_{\text{泄},n,t}^{\max} \quad (6)$$

式中: $Q_{\text{泄},n,t}$ 为第 n 个水电站 t 时段末的下泄流量, m^3/s ; $Q_{\text{泄},n,t}^{\min}$ 为第 n 个水电站 t 时段末允许最小下泄流量, m^3/s ; $Q_{\text{泄},n,t}^{\max}$ 为第 n 个水电站 t 时段末允许最大下泄流量, m^3/s 。

d. 水轮发电机组过流能力约束。

$$q_{m,t}^{\min} \leq q_{m,t} \leq q_{m,t}^{\max} \quad (7)$$

式中: m 为机组数; $q_{m,t}$ 为水电站第 m 台机组 t 时段末的发电流量, m^3/s ; $q_{m,t}^{\min}$ 为水电站第 m 台机组 t 时段末允许的最小发电流量, m^3/s ; $q_{m,t}^{\max}$ 为水电站第 m 台机组 t 时段末允许的最大发电流量, m^3/s 。

e. 发电机组出力约束。

$$N_{m,t}^{\min} \leq N_{m,t} \leq N_{m,t}^{\max} \quad (8)$$

式中: $N_{m,t}$ 为水电站第 m 台机组 t 时段末的出力, 万 kW ; $N_{m,t}^{\min}$ 为第 m 台机组 t 时段末允许的最小出力, 万 kW ; $N_{m,t}^{\max}$ 为第 m 台机组 t 时段末允许的最大出力, 万 kW 。

2.3.2 模型求解

采用自适应遗传算法 (adaptive genetic algorithm, AGA) 对新安江-富春江水电站适应性调度模型进行求解,由于常规遗传算法中交叉概率和变异概率是固定的,因此不容易找到适用于所有问题的最佳值,AGA 算法针对其不足,主要对交叉、变异概率的确定进行改进,将个体交叉概率和变异概率随着其适应度的大小进行动态调整。当个体的适应度与最大适应度越接近时,其对应的交叉概率和变异概率的取值越小;若个体的适应度值接近或等于最大适应度值,则其交叉概率和变异概率接近或等于 0,从而更加快速地找到所求问题的最佳值^[17-18]。本文中初始种群规模为 500,交叉概率取 0.6,变异概率取 0.01,最大迭代次数为 300。

3 气候变化对新安江-富春江水电站入库径流影响分析

3.1 未来气温与降雨要素降尺度分析

利用 BCSD 方法对 CMIP5 中 RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5 3 种气候变化情景下的新安江-富春江水电站控制流域气温、降水和蒸散发 GCM 预估结果进行降尺度分析,目标尺度为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 。

以历史观测气象资料为基准,分别计算模式降尺度前与降尺度后数据的模拟偏差,绘制气温、降水与蒸散发降尺度改进效果概率直方图 (图 2),评估 BCSD 降尺度效果。GCM 模式对流域气温的模拟偏差主要分布在 $-1.2 \sim 1.8^\circ \text{C}$,偏差离散度较大,而 BCSD 改进后的模拟偏差则更加集中,主要在 $-0.6 \sim 1.2^\circ \text{C}$ 。BCSD 对模式降水数据的改进效果更加显著,降尺度后偏差基本全部集中在 $\pm 10 \text{ mm}$ 附近。BCSD 对流域蒸散发模拟偏差也有较好的改进,从 $0 \sim 20 \text{ mm}$ 降低至 $0 \sim 10 \text{ mm}$ 。综上,BCSD 降尺度方法对研究区域气温、降水和蒸散发模式输出都有很好的改进效果。

3.2 气候变化下新安江-富春江水电站控制流域径流响应模拟

3.2.1 新安江月水量平衡模型参数率定与验证

对新安江水库流域、衢江流域和金华江流域 3 个子流域分别建立新安江月水量平衡模型,并用遗传算法进行参数率定。其中,1989—2008 年为率定期,2009—2015 年为检验期,新安江-富春江水电站水库入库月径流模拟结果见图 3。

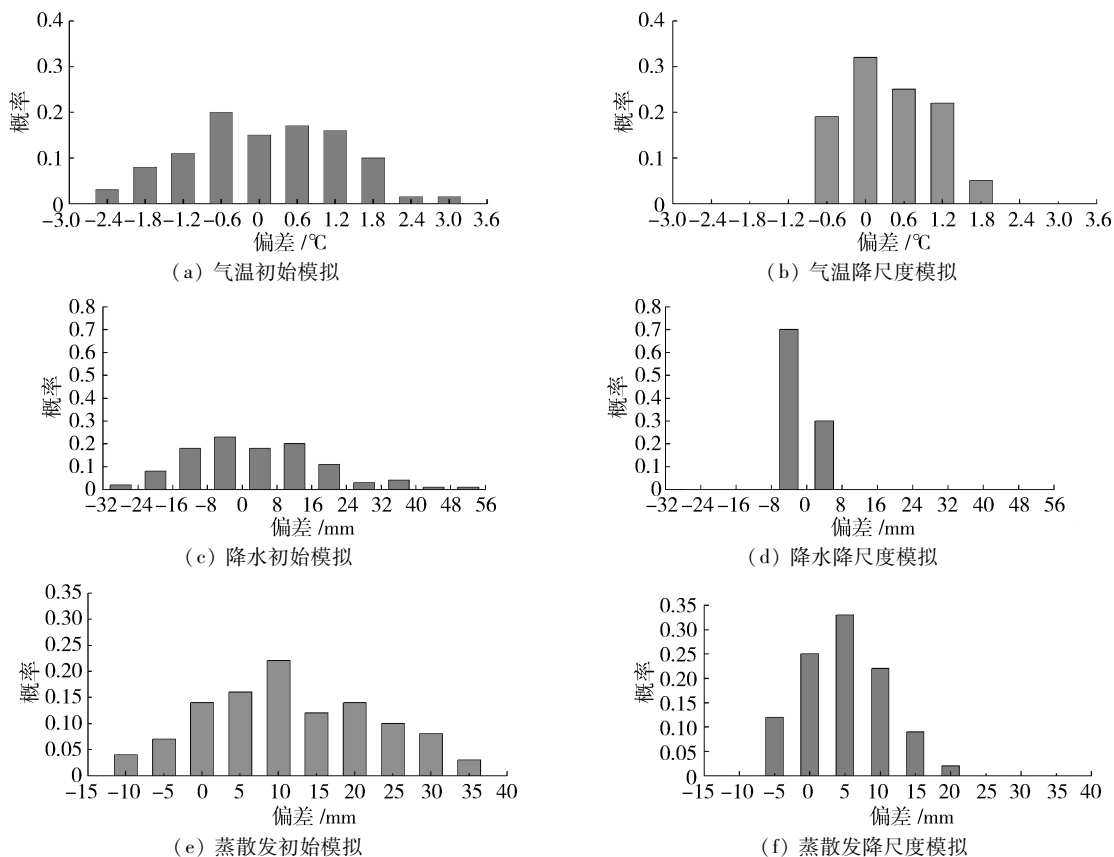


图2 气温、降水、蒸散发降尺度改进效果概率直方图

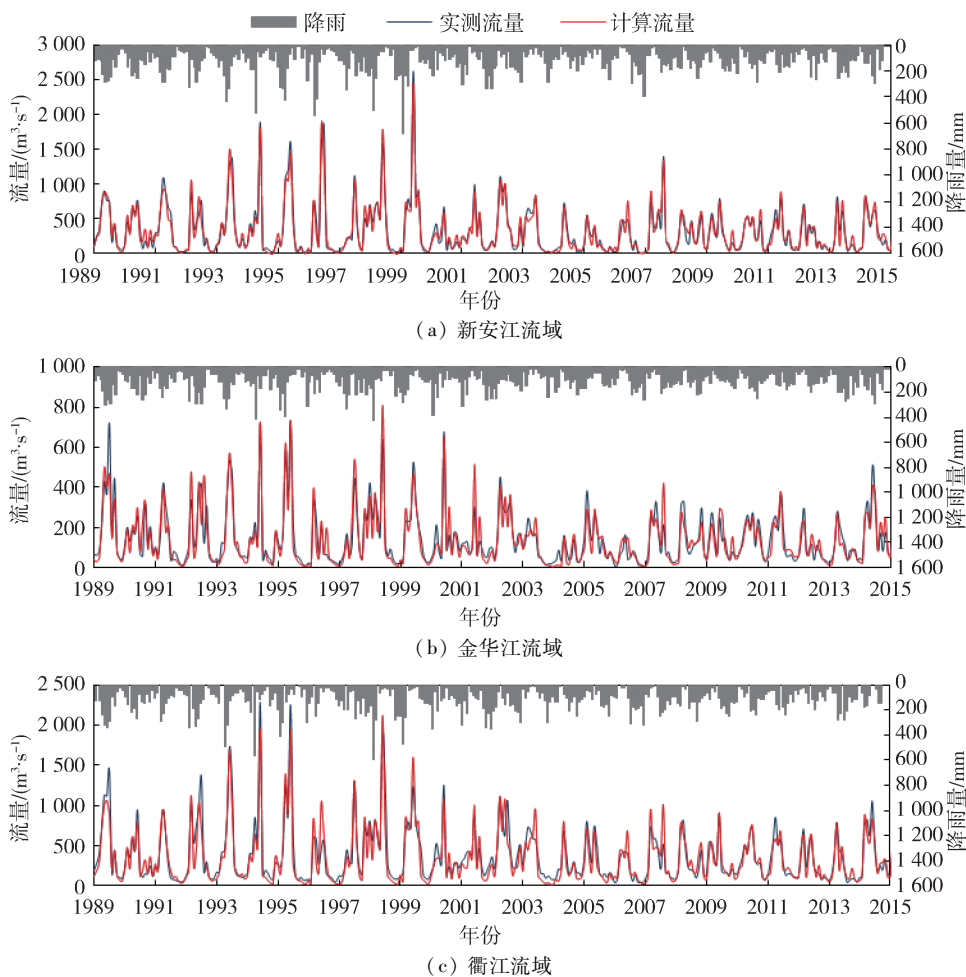


图3 新安江-富春江水电站水库入库月径流模拟结果

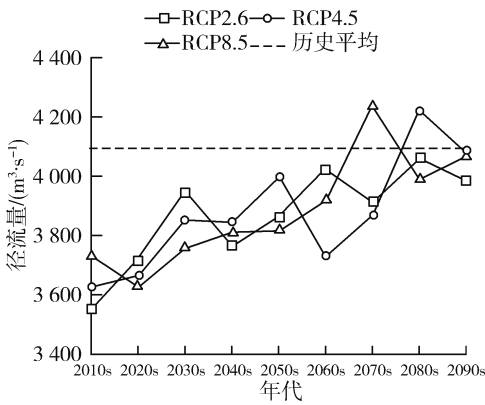
新安江水库流域率定期和检验期的平均确定性系数分别为 0.903 1 和 0.926 7,年径流模拟平均相对误差分别为 5.38% 和 4.85%;金华江流域率定期和检验期的平均确定性系数分别为 0.675 4 和 0.751 1,年径流模拟平均相对误差分别为 9.25% 和 8.17%;衢江流域率定期和检验期的平均确定性系数分别为 0.809 6 和 0.767 7,年径流模拟平均相对误差分别为 11.41% 和 6.19%。从整体来看,新安江月模型模拟径流曲线形状与实测径流曲线形状比较吻合,模拟径流的总水量偏差总体表现也比较好,可见,模型参数合理,可较准确地模拟流域月径流量。

3.2.2 气候变化下新安江-富春江水电站水库入库径流响应预估及演变特征分析

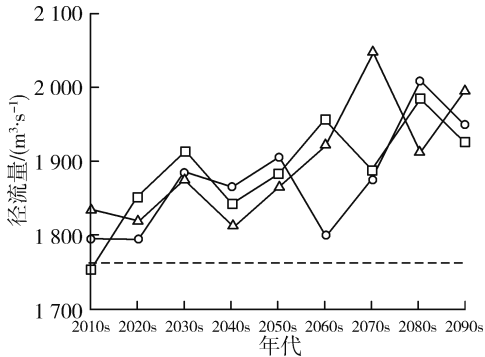
用 2016—2099 年降尺度后的气象模式输出驱动率定好的新安江月水量平衡模型,生成不同气候变化情景下的 3 个子流域月径流分布情况,并对径流的时空变化特征进行分析。

2016—2099 年,新安江-富春江水电站控制流域月径流总量整体呈上升趋势,新安江水库、金华江、衢江流域每 10 年年径流量的线性倾向速率依次为 49.69 ~ 58.48 m³/s、19.37 ~ 22.89 m³/s 和 49.08 ~ 53.32 m³/s。流域径流量的峰值预计将出现在 2070 年代与 2080 年代期间,此后略有下降。与 1989—2015 年流域历史径流情况相比,新安江水库未来径流量预计将低于历史平均水平,平均降幅 5.4% ~ 5.8%;金华江流域径流量则显著高于历史水平,增幅 6.2% ~ 7.5%;衢江流域总体持平,增幅在 0.8% 以内,径流变化情况见图 4。同时,研究区域径流变化对于辐射强迫的变化并不敏感,3 种情景下径流变化的趋势基本一致,变率差别并不显著。RCP4.5 情景下的新安江、金华江、衢江流域在 2060 年代时段径流量较 2050 年代时段分别下降 6.5%、5.5%、4.6%,之后径流量开始继续增加,而 RCP2.6 与 RCP8.5 下未体现出此波动变化。

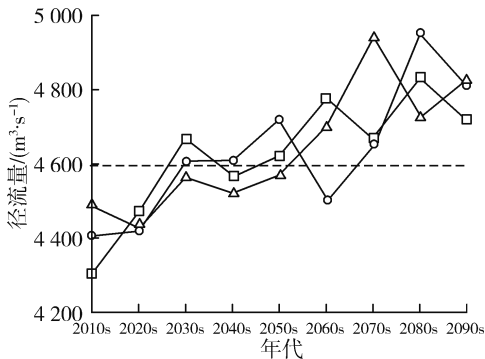
在未来气候变化下,新安江-富春江水电站控制流域的径流仍主要集中在春、夏 2 季,其中汛期(4—10 月)总径流量 7 458.5 ~ 7 635.6 m³/s,非汛期(11 月—次年 3 月)总径流量 2 760.8 ~ 2 889.1 m³/s。如图 5 所示,未来主汛期 6 月的径流量仍为年内最大,新安江、金华江、衢江流域的平均月径流量分别达 761.6 ~ 782.2 m³/s、385.6 ~ 401.3 m³/s 和 872.2.6 ~ 896.4 m³/s,与历史情况相比,新安江流域下降显著,降幅达 14.9% ~ 17.1%,金华江流域增长 15.0% ~ 19.7%,衢江流域略有降低,降幅 3.0% ~ 5.6%。此外,流域汛初 3—4 月的径流量与



(a) 新安江流域



(b) 金华江流域



(c) 衢江流域

图 4 2016—2099 年气候变化情景下研究区域多模式平均径流序列

历史相比略有下降,平均降幅 15.6% ~ 17.1%,汛末 8—10 月的径流量则显著上升,平均增幅 38.6% ~ 40.1%。另外,流域径流的年内分布情况对于辐射强迫的变化并不敏感。

气候变化下新安江-富春江水电站水库入库径流的演变主要受降水、蒸散发等因素的综合影响。相对于基准期 1901—2015 年,2016—2099 年新安江-富春江水电站控制流域不同情景的多年平均降水量基本呈增加趋势,增加幅度整体上由北向南递增,衢江流域和金华江流域降水量增幅较大,新安江流域的降水增幅较小;流域在蒸散发方面的空间分布形式相对稳定,蒸散发量整体上呈增加趋势,增加幅度由北向南递减,新安江流域的蒸散发增幅较大,

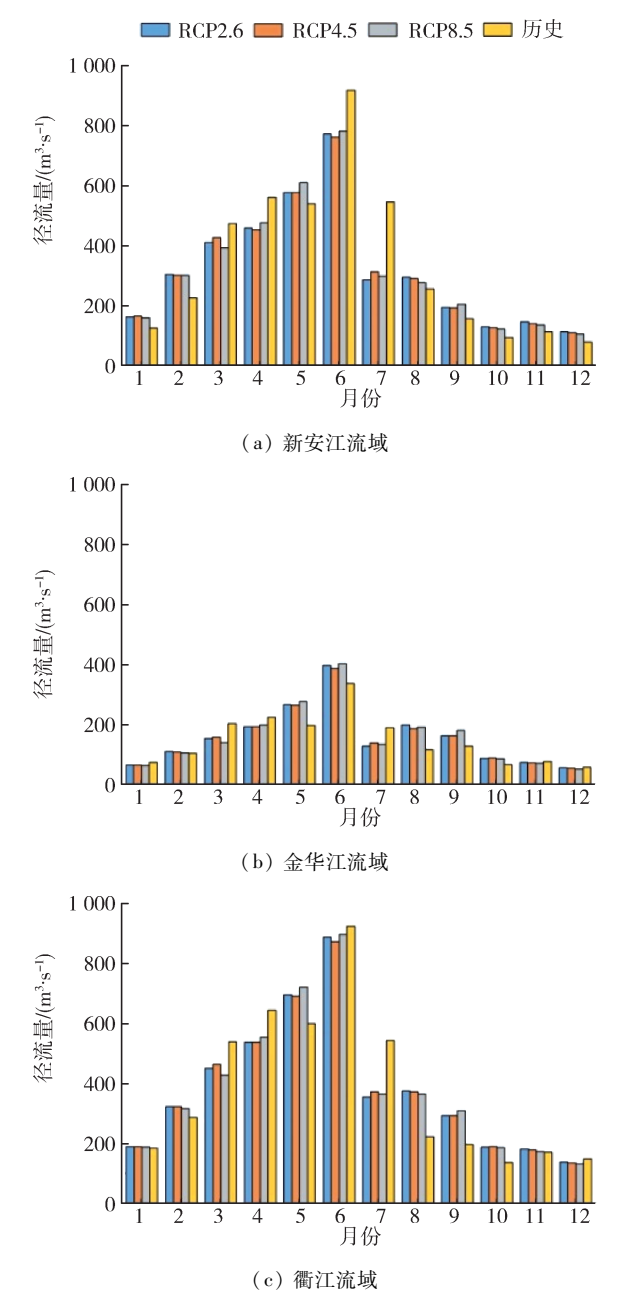


图5 2016—2099年气候变化情景下研究区域月平均径流变化

表3 新安江-富春江水电站适应性调度发电效益分析

气候情景	适应性调度发电量/ (亿 kW·h)		常规调度发电量/ (亿 kW·h)		发电量增幅/ (亿 kW·h)		发电量增长率/ %	
	新安江	富春江	新安江	富春江	新安江	富春江	新安江	富春江
RCP2.6	1 793.83	933.16	1 714.57	921.97	79.26	11.19	4.62	1.21
RCP4.5	1 798.00	933.63	1 718.97	919.14	79.03	14.49	4.60	1.58
RCP8.5	1 795.49	931.62	1 711.97	914.14	83.52	17.48	4.88	1.91

表4 新安江-富春江水库不同调度模式下多年弃水总量分析

气候情景	适应性调度下弃水量/ 亿 m³		常规调度下弃水量/ 亿 m³		弃水量降幅 /亿 m³		弃水量下降率/ %	
	新安江	富春江	新安江	富春江	新安江	富春江	新安江	富春江
RCP2.6	0	366.59	48.67	886.44	48.67	519.85	99.99	58.64
RCP4.5	0	375.42	27.45	839.36	27.44	463.94	99.99	55.27
RCP8.5	11.04	471.83	60.07	1003.57	49.03	531.74	81.61	52.98

金华江和衢江的蒸散发增幅相对较小。由于新安江流域的蒸散发增加幅度较降水显著,因此新安江流域未来的径流呈下降趋势,而金华江和衢江流域有一定程度的增加。此外,未来降水的丰枯季节的差距变小,使得径流间的丰枯差异变小,因此流域丰水期与枯水期的界限变得相对模糊。

4 气候变化下新安江-富春江水电站适应性调度研究

选择2006年3月—2099年2月为研究时段,共计93个水文年,以月为单位。新安江水库起调水位为98.4 m(兴利库容一半所对应的库水位),2099年2月时段末水位回到起调水位98.4 m。

4.1 发电效益分析

在适应性调度模式下,2016—2099年新安江-富春江电站总发电量达2 726.99亿~2 731.63亿kW·h,比常规调度提高3.43%~3.85%,见表3。其中,新安江电站发电效益显著提高,多年总发电量达1 793.83亿~1 798.00亿kW·h,比常规调度提高4.60%~4.88%,富春江电站多年总发电量达931.62亿~933.63亿kW·h,增幅1.21%~1.91%。同时,在3种气候变化情景下,新安江-富春江水电站在适应性调度模式下的发电量相对稳定且无显著差异,对于辐射强度的变化并不敏感。

GCM模式间差异对于新安江和富春江水电站的发电量存在较大影响,特别GISS-E2-R、IPSL-CM5A-LR及MIROC5 3个模式相对于其他6个模式的发电量明显偏少,主要由于这3个GCM模式下的研究区域径流量模拟结果总体偏小。此外,新安江-富春江流域适应性调度下发电量相对于常规调度的增幅对于模型间的差异表现较稳定,无显著变化,且各模型中发电量的变化对于辐射强迫的变化也并不敏感,见图6。

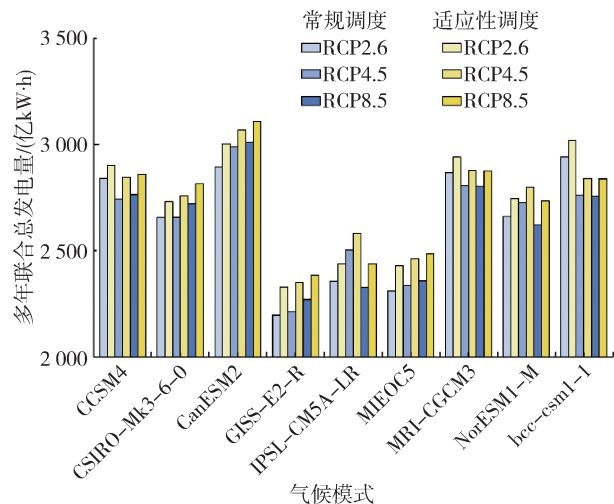


图6 新安江-富春江电站适应性调度发电效益模式间差异对比

4.2 弃水分析

2016—2099年,新安江与富春江水库在适应性调度下的总弃水量较常规调度大幅下降,水资源利用效率显著提高。其中,新安江水库可充分发挥多年调节特性的优势,多年总弃水量下降27.44亿~49.03亿 m^3 ,降幅81.61%~99.99%,特别在RCP2.6和RCP4.5 2种气候变化情景下无弃水产生;富春江水库为日调节水库,在适应性调度下,通过对新安江水库进行错峰调度,富春江水库多年总弃水量下降463.94亿~531.74亿 m^3 ,降幅52.98%~58.64%,见表4。适应性调度下水库弃水量与辐射强迫的变化呈现正相关关系,随着气候变化情景由RCP2.6变化至RCP8.5,新安江水库的多年总弃水量由0增长至11.04亿 m^3 ,富春江流域的多年总弃水量由366.59亿 m^3 增长至471.83亿 m^3 。

气候变化条件下,水库适应性调度对于弃水量同样展现出良好的适应性。在不同GCM模拟的径流时空分布情况下,新安江水库的调节特性得以充分发挥,弃水始终维持在较低状态。相比较而言,常规调度下不同GCM模拟新安江水库的弃水情况则存在较大差异,其中CanESM2和NorESM1-M所模拟的弃水总量相对较高,见图7。与之相比,GCM间的不确定性对富春江水库的弃水量造成了相对较大的影响,各GCM在适应性调度下的弃水量相较于常规调度均有显著下降,但模型间适应性调度与常规调度的总弃水量存在较大差异,见图8。

4.3 最大下泄流量分析

在适应性调度下,新安江与富春江水库多年平均最大下泄流量均呈显著下降趋势,其中新安江水库下降352.37~597.91 m^3/s ,降幅22.74%~33.29%,富春江水库下降749.62~874.61 m^3/s ,降幅16.57%~

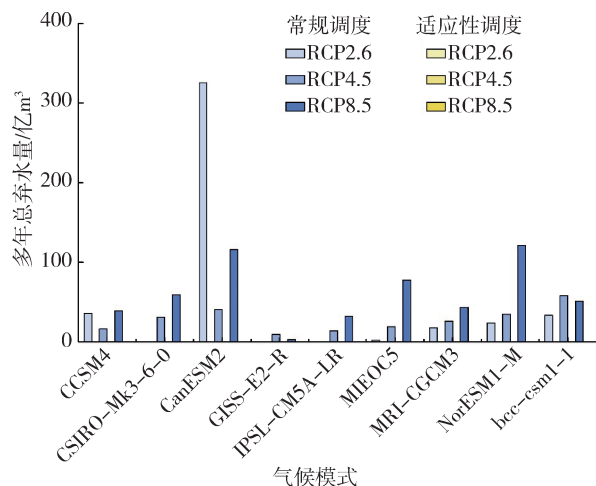


图7 新安江水库不同GCM模拟下常规调度与适应性调度多年弃水总量对比

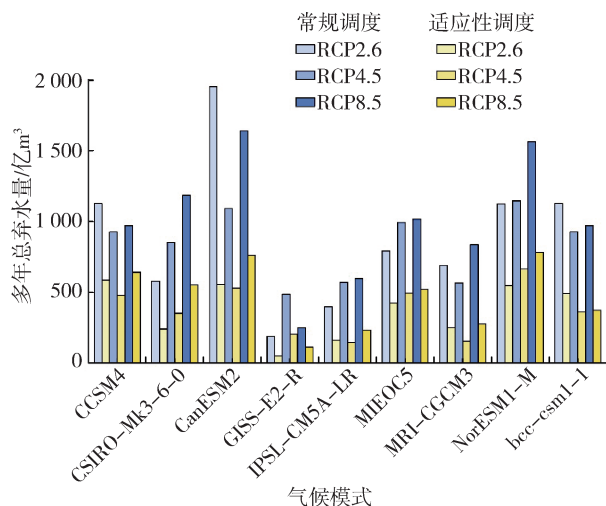


图8 富春江水库不同GCM模拟下常规调度与适应性调度多年弃水总量对比

17.63%,见表5。适应性调度充分发挥了新安江水库的多年调节特性,遭遇洪水前提前腾出库容以降低水库的最大下泄流量,虽然富春江水库无调节特性,但新安江水库的错峰调度作用在适应性调度中得以充分发挥,特别在兰江流域遭遇洪水时,控制新安江水库下泄流量,可以降低富春江水库的最大下泄流量,减轻流域防洪压力。同时,常规调度下两水库的最大下泄流量随着辐射强迫的增加呈显著增加趋势,而钱塘江流域适应性调度机制很好地适应了辐射强迫的变化,在不同气候情景下新安江水库的最大下泄流量均较稳定,无显著区别,而富春江水库由于不具备调节性能,最大下泄流量略有增加,但增幅仍小于常规调度。

气候变化条件下,新安江水库在适应性调度下的最大下泄流量对于不同GCM未显示显著差异,均略低于其机组最大过流能力1200 m^3/s ,但常规调度下的最大下泄流量则表现出较为显著的差异。与之

表 5 2016—2099 年新安江-富春江水库多年平均最大下泄流量对比

气候情景	适应性调度下最大下泄流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)		常规调度下最大下泄流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)		最大下泄流量降幅/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)		最大下泄流量下降率/%	
	新安江	富春江	新安江	富春江	新安江	富春江	新安江	富春江
RCP2.6	1 196.97	3 773.70	1 549.34	4 523.33	352.37	749.62	22.74	16.57
RCP4.5	1 197.79	3 808.18	1 671.90	4 584.02	474.11	775.84	28.36	16.92
RCP8.5	1 198.02	4 086.27	1 795.93	4 960.87	597.91	874.61	33.29	17.63

相比,富春江水库的最大下泄流量则表现出较大的模型间不确定性,在适应性调度和常规调度下不同 GCM 间的最大下泄流量情况存在较大差异,如图 9~10 所示,不同 GCM 适应性调度下的最大下泄流量仍小于常规调度,适应性调度的防洪效益仍得到充分的发挥。

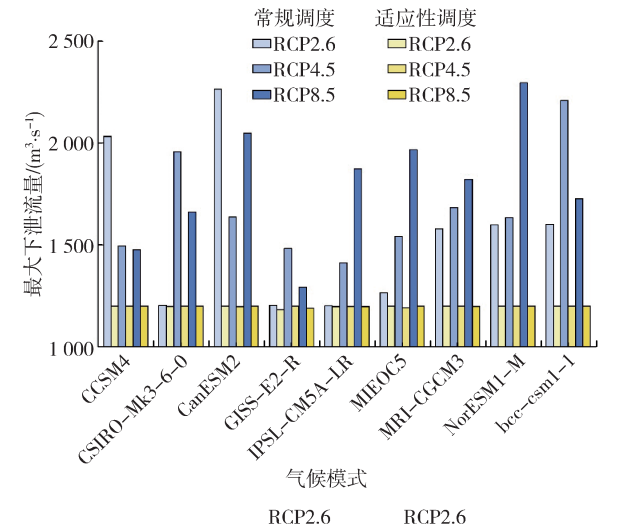


图 9 新安江电站不同 GCM 适应性调度与常规调度最大下泄流量对比

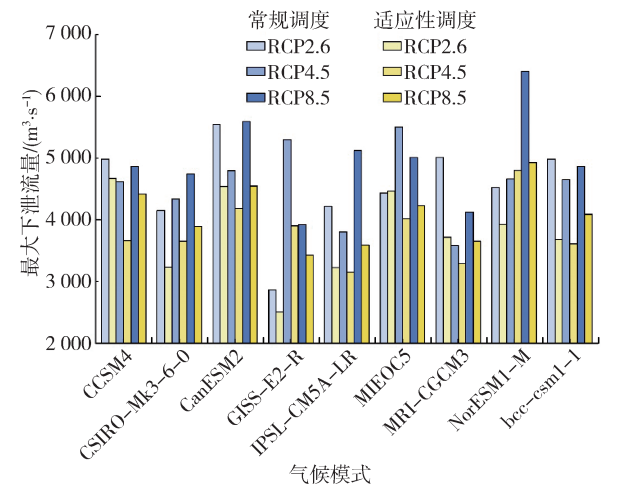


图 10 富春江水库不同 GCM 适应性调度与常规调度最大下泄流量对比

5 结 论

a. 降尺度后,流域气温的偏差主要集中在 $-0.6 \sim 1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,降水偏差主要在 $\pm 10\text{ mm}$ 左右,蒸散发偏差主要集中在 $0 \sim 10\text{ mm}$ 以内,BCSD 降尺度对于 GCM 误差修正的效果良好。

b. 2016—2099 年,预计流域径流整体上呈现上升趋势。与历史径流情况相比,新安江水库流域径流量将下降 $5.4\% \sim 5.8\%$,金华江流域径流量预计将增长 $6.2\% \sim 7.5\%$,衢江流域径流量的增幅在 0.8% 以内。同时,流域径流年内差异减小,丰水期与枯水期的界限变得相对模糊。

c. 在适应性调度模式下,新安江-富春江水电站未来总发电量比常规调度下提高 $3.43\% \sim 3.85\%$,新安江水库和富春江水库的最大下泄流量可分别下降 $22.74\% \sim 33.29\%$ 和 $16.57\% \sim 17.63\%$,两水库多年总弃水量降幅可达 $81.61\% \sim 99.99\%$ 和 $52.98\% \sim 58.64\%$,综合效益显著。

参考文献:

[1] 王国庆. 气候变化对黄河中游水文水资源影响的关键问题研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.

[2] ACOSTA I R, MARTÍNEZ M J M. Assessment of surface runoff vulnerability to climate change in the Lerma-Chapala Basin, Mexico[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2014, 140(12): 401-402.

[3] 徐宗学,刘浏. 气候变化影响下的流域水循环:以长江和黄河典型流域为例[J]. 气象科技进展, 2016, 6(3): 123-133. (XU Zongxue, LIU Liu. Impact of climate change on hydrological cycle: case studies in the Yangtze River and Yellow River basins[J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2016, 6(3): 123-133. (in Chinese))

[4] 秦年秀,陈喜,薛显武,等. 气候变化对乌江流域水文水资源的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2011, 39(6): 623-628. (QIN Nianxiu, CHEN Xi, XUE Xianwu, et al. Effects of climate change on hydrology and water resources in Wujiang Basin[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2011, 39(6): 623-628. (in Chinese))

[5] 夏军,THOMAS Tanner,任国玉,等. 气候变化对中国水资源影响的适应性评估与管理框架[J]. 气候变化研究进展, 2008, 4(4): 215-219. (XIA Jun, THOMAS Tanner, REN Guoyu, et al. Potential impacts of climate change on water resources in China: screening for adaptation and management[J]. Advances in Climate Change Research, 2008, 4(4): 215-219. (in Chinese))

[6] 方一平,秦大河,丁永建. 气候变化适应性研究综述:现状与趋向[J]. 干旱区研究, 2009, 26(3): 299-305. (FANG Yiping, QIN Dahe, DING Yongjian. A review

about the research on adaptability in climate change: present situation and tendency[J]. Arid Zone Research, 2009,26(3): 299-305. (in Chinese))

[7] 周研来,郭生练,李雨,等. 多目标调度图对气候变化的自适应研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(2): 6-10. (ZHOU Yanlai, GUO Shenglian, LI Yu, et al. Multipurpose reservoir operating rule curves adapt to climate change [J]. Journal of Huazhong University. of Science and Technology (Natural Science Edition),2014, 42(2): 6-10. (in Chinese))

[8] MARAN S, VOLONTERIO M, GAUDARD L. Climate change impacts on hydropower in an alpine catchment[J]. Environmental Science & Policy, 2014, 43(7): 15-25.

[9] ASHOFTEH P, BOZORG-HADDAD O, LOAICIGA H A. Development of adaptive strategies for irrigation water demand management under climate change[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2017, 143(2): 1-11.

[10] YANG G, GUO S, LI L, et al. Multi-objective operating rules for danjiangkou reservoir under climate change[J]. Water Resources Management, 2016, 30(3): 1183-1202.

[11] ZHOU Y, GUO S. Incorporating ecological requirement into multipurpose reservoir operating rule curves for adaptation to climate change[J]. Journal of Hydrology, 2013, 498(12): 153-164.

[12] AHMADI M, BOZORG-HADDAD O, LOAICIGA H A. Adaptive reservoir operation rules under climatic change [J]. Water Resources Management, 2015, 29(4): 1247-1266.

[13] 芮孝芳. 水文学原理[M]. 北京: 中国水利水电出版

社, 2004.

[14] 方国华,戚核帅,闻昕,等. 气候变化条件下 21 世纪中国九大流域极端月降水量时空演变分析[J]. 自然灾害学报, 2016, 25 (2): 15-25. (FANG Guohua, QI Heshuai, WEN Xin, et al. Analysis of spatiotemporal evolution of extreme monthly precipitation in the nine major basins of China in 21st century under climate change[J]. Journal of Natural Disasters,2016, 25(2): 15-25. (in Chinese))

[15] 郝振纯,鞠琴,王璐,等. 气候变化下淮河流域极端洪水情景预估[J]. 水科学进展, 2011, 22(5): 605-614. (HAO Zhenchun, JU Qin, WANG Lu, et al. Prediction of extreme floods in Huaihe River basin under climate change[J]. Advances in Water Science, 2011, 22(5): 605-614. (in Chinese))

[16] YUE S, PILON P, CAVADIAS G. Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series [J]. Journal of Hydrology, 2002, 259(1-4): 254-271.

[17] SRINIVAS M, PATNAIK L. Adaptive probabilities of crossover and mutation in genetic algorithms[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1994 (24): 656-667.

[18] 蓝天鸿,唐伟峰. 基于自适应遗传算法的去耦电容器自动选择[J]. 电子科技, 2012, 25(4): 21-24. (LAN Tianhong, TANG Weifeng. Automatic selection of the decoupling capacitors based on AGA[J]. Electronic Science & Technology,2012, 25(4): 21-24. (in Chinese))

(收稿日期:2017-03-30 编辑:王 芳)

欢迎订阅《水资源保护》杂志

中国科学引文数据库来源期刊 中国科技核心期刊

RCCSE 中国核心学术期刊 中国高校优秀科技期刊 江苏十佳精品科技期刊

ISSN 1004-6933 CN 32-1356/TV

《水资源保护》是由河海大学和中国水利学会环境水利专业委员会联合主办的科技期刊。本刊针对我国水资源短缺、水环境污染、水生态恶化等突出问题,探讨水资源管理、水环境治理、水生态修复等理论和技术,主要栏目有水资源、水环境、水生态,并根据需要开设“特约专家论坛”“水事观察”等栏目。

《水资源保护》是中国科学引文数据库(CSCD)来源期刊、中国科技核心期刊、RCCSE 中国核心学术期刊,已被美国化学文摘(CA)数据库、美国《剑桥科学文摘》(CSA)数据库、波兰哥白尼索引(IC)数据库等收录和引用,长期以来一直都是水利界和环保部门备受关注的重点期刊,2012 年、2014 年连续被教育部科技司授予“中国高校特色科技期刊”称号;2016 年被中国高校科技期刊研究会评为“中国高校优秀科技期刊”,被江苏省科技期刊学会评为“十佳精品期刊”。

《水资源保护》主要读者对象为全国从事与水资源保护工作有关的工程技术人员、科研人员、管理人员以及大专院校师生,邮发代号:28-298,双月刊,96 页,20 元/期,全年共计 120 元,每逢单月 20 日出版。可向当地邮局订阅,若无法从邮局订阅,亦可在本刊网站下载征订单。

编辑部地址:南京市西康路 1 号 邮政编码:210098 电话/传真:(025)83786642

E-mail:bh1985@vip.163.com; bh@hhu.edu.cn http://www.hehaiqikan.cn/szybh/ch/index.aspx