

水利水电工程学报

HYDRO-SCIENCE AND ENGINEERING

气候变化对南方典型小水电站入库径流及发电的影响

王乐扬, 张建云, 宁忠瑞, 贾雨凡, 郭心仪, 张睿, 鲍振鑫

Effects of climate change on inflow and small hydropower generation in southern China

WANG Yueyang, ZHANG Jianyun, NING Zhongrui, JIA Yufan, GUO Xinyi, ZHANG Rui, BAO Zhenxin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20230922002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

气候变化下黄河流域未来水资源趋势分析

The future water resources regime of the Yellow River basin in the context of climate change
水利水电工程学报. 2020(2): 1 <https://doi.org/10.12170/20200216001>

海河流域径流变化趋势及其归因分析

Analysis of runoff change trend and its attribution in Haihe River basin
水利水电工程学报. 2017(4): 59 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.04.009>

黄河流域典型流域水文气象变化与径流过程模拟

Typical hydro-meteorological changes and runoff process simulation in Yellow River basin
水利水电工程学报. 2019(5): 36 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.05.005>

近20年中国水资源及用水量变化规律与成因分析

Change law and cause analysis of water resources and water consumption in China in past 20 years
水利水电工程学报. 2019(4): 31 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.04.005>

大渡河流域年径流变化特征及其归因分析

Variation characteristics of annual runoff and its attribution analysis in Dadu River basin
水利水电工程学报. 2021(3): 96 <https://doi.org/10.12170/20200608001>

基于随机森林与支持向量机的水库长期径流预报

Long-term inflow forecast of reservoir based on Random Forest and support vector machine
水利水电工程学报. 2020(4): 33 <https://doi.org/10.12170/20190626001>



扫码进入官网, 阅读更多精彩文章



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI:10.12170/20230922002

王乐扬, 张建云, 宁忠瑞, 等. 气候变化对南方典型小水电站入库径流及发电的影响 [J]. 水利水运工程学报, 2024(2): 1-9.
(WANG Yueyang, ZHANG Jianyun, NING Zhongrui, et al. Effects of climate change on inflow and small hydropower generation in southern China[J]. Hydro-Science and Engineering, 2024(2): 1-9. (in Chinese))

气候变化对南方典型小水电站入库径流及发电的影响

王乐扬^{1,2,3,4}, 张建云^{1,2,3,4}, 宁忠瑞^{1,2,3,4}, 贾雨凡^{1,2,3,4}, 郭心仪⁴, 张 睿⁵, 鲍振鑫^{1,2,3}

(1. 河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210098; 3. 河海大学 水安全与水科学协同创新中心, 江苏 南京 210098; 4. 水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210029; 5. 重庆师范大学 地理与旅游学院, 重庆 401331)

摘要: 在全球气候变化不断加剧的背景下, 降水、气温、蒸发等气象要素的变化对流域水文和水力发电产生重要影响; 中国作为水能资源丰富的国家, 水力发电在能源结构中具有重要地位, 研究气候变化对入库径流和水力发电的影响, 对实现水资源和水电能源的可持续开发利用具有重要意义。以位于北江支流的官溪水电站为研究对象, 基于 19 个 CMIP6 全球气候模式数据, 利用 RCCC-WBM 模型分析了未来气候变化对官溪水电站入库径流和发电量的影响。结果表明: (1) 在 SSP2-4.5 情景下, 官溪水电站以上流域的气温、降水均呈现上升趋势; (2) 尽管不同 GCMs 模式预估结果存在一定差异, 从 19 个模式集合平均结果看, 官溪水电站未来入库径流和水力发电量将有所增加; (3) 与基准期(1981—2020 年)相比, 2031—2060 年和 2061—2090 年官溪水电站入库流量将增加 3.55%[-34.14%, 39.84%] 和 5.66%[-32.27%, 41.96%], 发电量将可能增加 5.87%[-29.3%, 50.1%] 和 8.03%[-27.3%, 52.4%]。未来径流和发电潜能的增加为官溪水电站的扩容改造提供了一定的科学依据。

关 键 词: 气候变化; 水资源; RCCC-WBM 模型; 入库径流; 水力发电

中图分类号: P33; TV74

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2024)02-0001-09

气候变化已成为全球和当代社会面临的重大挑战之一^[1]。气候变化改变了降水、气温、蒸发等气象要素的时空分布, 进而对流域水文情势和水电站的发电量产生影响^[2]。中国河流众多, 特别是南方地区, 开发水能资源具有先天优势; 截至 2023 年, 中国水电装机容量占全部装机容量的 16.82%, 表征着水力发电在中国能源结构中起到重要作用^[3]。因此, 研究气候变化对入库径流和水力发电的影响, 可为水资源和水能资源可持续开发利用提供科学依据。

气候变化及其对水资源的影响是目前研究的热点^[4-5], 全球增温背景下强降水事件发生的可能性会增加, 水资源是受气候变化影响最直接和最敏感的领域^[6-7]。Wang 等^[8]利用 VIC 模型和 RCM-PRECIS 气候模型预估的气候情景评估了中国未来径流变化趋势, 结果表明到 2050 年中国平均年径流量整体将会增加 3%~10%, 但北干南湿的局面不会发生改变; Zhai 等^[9]研究了中国 10 个水资源一级区在《巴黎协定》的增温目标下的径流变化, 结果表明在全球升温 1.5 °C 及 2.0 °C 情景下, 水资源一级区的年均径流相对于基准时期(2006—2015 年)普遍呈现增加趋势, 且径流的年际变异性随着增温幅度增大而增大。

气候变化对水能资源理论蕴藏量的影响日渐受到关注^[10]。目前, 气候变化下水能资源理论蕴藏量的计算通常以数理统计方法为主, 基于入库径流量、水头等数据进行计算, 其中入库径流量多通过水文模型模拟得到^[11]。Liu 等^[12]计算分析了未来中国主要江河的水能资源理论蕴藏量, 结果表明, 在 2020—2050 年和

收稿日期: 2023-09-22

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体项目(52121006); 湖南省水利科学项目(XSKJ2023059-06)

作者简介: 王乐扬(2000—), 男, 山东成武人, 博士研究生, 主要从事气候变化、水文水资源方面的研究。

E-mail: yueyangwang413@163.com 通信作者: 鲍振鑫(E-mail: zxbao@nhri.cn)

2070—2099 年中国水能资源理论蕴藏量较基准期(1971—2000 年)可能变化-1.7%~2.0% 和 3%~6%; Van Vliet 等^[13]依据 CMIP5(Coupled Model Intercomparison Project Phase 5)的多个 GCMs(Global Circulation Models)驱动 3 个全球水文模型估算了全球水能资源理论蕴藏量,认为未来全球水能资源理论蕴藏量总体呈上升趋势,上升地区主要集中在中非、印度、中亚和北半球高纬度地区。

目前关于气候变化对水资源和水电能源的研究大多以中大尺度流域为对象^[14-15],限于资料收集的难度,对中小尺度区域的研究相对有限,而小尺度区域水文变化会直接影响小水电的开发和利用。小水电开发具有投资小、见效快的优势。目前,随着小水电开发的不断拓展,小水电发电潜在在助力双碳目标实现方面具有不可或缺的作用。为实现水资源的高效利用和国家双碳目标,现阶段迫切需要分析气候变化情势下小水电潜力,以有效应对气候变化、减轻气候变化对水资源和能源安全的潜在威胁。

1 资料与方法

1.1 研究区概况及资料来源

官溪水电站位于北江支流,地处广东省南水河中游乳源瑶族自治县侯公渡镇干溪村上游约 800 m,控制流域面积 838 km²。区域内森林茂密,植被良好。官溪水电站于 1980 年开工建设,1986 年建成发电;大坝坝高 12 m,正常蓄水位 69.50 m,正常库容仅 56 万 m³;水电站安装 3 台水轮发电机组,总装机容量 3×1 600 kW,多年平均发电量 1 500 万 kW·h。官溪水电站无水文监测资料,水电站上游南水水文站建于 1986 年,控制流域面积为 608 km²。图 1 为官溪水电站以上流域水系、水文站及气象格点地理位置信息。

尽管南水水文站建站年份较早,但前期(2010 年之前)主要是汛期监测,且存在数据记录不准确、缺失等问题,从数据质量考虑,收集整理了南水水文站 2011—2020 年的逐月流量数据;官溪水电站以上没有气象观测站,但包括了 2 个气象格点,从中国气象局收集了官溪水电站以上区域 2 个气象格点 1961—2020 年的降水、气温、蒸发皿实测蒸发等气象数据。

第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)发布了 112 个全球气候模式^[16],已有研究表明,有 19 个气候模式在中国具有相对较好的适应性(表 1),特别是中国南部地区^[17]。因此,本研究采用这 19 个气候模式的气候情景预估研究区未来的气候变化趋势。由于气候模式情景分辨率相对较粗,采用由国家气候中心提供的降尺度气候情景,数据长度为 1961—2100 年,空间分辨率为 0.25°;在研究区内包括 2 个气象格点,总体可满足分析需要。不同排放情景下未来气候变化趋势存在差异,中等排放情景 SSP2-4.5 既考虑环境保护也考虑未来经济发展,是未来最可能发生的排放情景^[18],因此,本研究只采用 SSP2-4.5 排放情景下的气候情景。基于降尺度气候情景评估未来气候变化趋势及其对水文情势和发电潜能的影响。

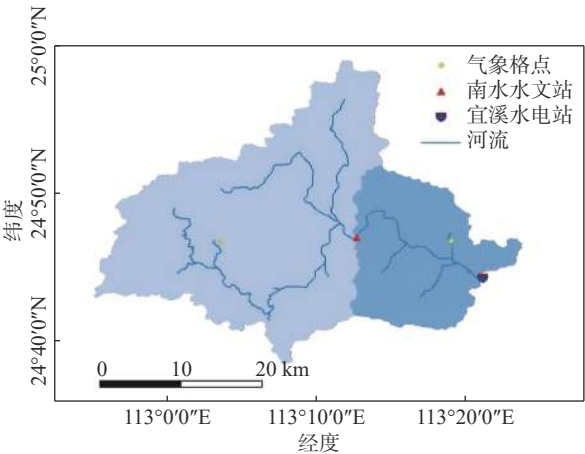


图 1 官溪水电站以上流域水系及水文站位置

Fig. 1 The river system and spatial distribution of hydrological stations upstream of Guanxi Hydropower Station

表 1 本研究采用的 19 种全球气候模式信息

Tab. 1 Overview of 19 global climate models employed in the research

序号	气候模式	国家	经向栅格数×纬向栅格数	序号	气候模式	国家	经向栅格数×纬向栅格数
1	ACCESS-CM2	澳大利亚	192×144	11	IITM-ESM	俄罗斯	180×120
2	ACCESS-ESM1-5	澳大利亚	192×144	12	INM-CM4-8	俄罗斯	180×120

续表 1

序号	气候模式	国家	经向栅格数×纬向栅格数	序号	气候模式	国家	经向栅格数×纬向栅格数
3	BCC-CSM2-MR	中国	320×160	13	MIROC-ES2L	日本	128×64
4	CMCC-CM2-SR5	意大利	288×192	14	MIROC6	日本	256×128
5	CNRM-CM6-1	法国	256×128	15	MPI-ESM1-2-HR	德国	384×192
6	CNRM-ESM2-1	法国	256×128	16	MPI-ESM1-2-LR	德国	192×96
7	FGOALS-f3-L	中国	288×180	17	MRI-ESM2-0	日本	320×160
8	FGOALS-g3	中国	180×80	18	NESM3	中国	192×96
9	GFDL-CM4	美国	288×180	19	NorESM2-LM	挪威	144×96
10	GFDL-ESM4	美国	288×180				

1.2 气候变化对水文情势及发电量影响的评价方法

河流水文情势受气候变化直接影响,水电站的发电量不仅与来水情势有关,而且与水库特性、电站装机容量等水库电站参数密切联系,因此,气候变化对水电站的影响不仅要考虑未来气候情景,而且必须考虑电站设计和运行特征。

采用水文模拟的途径分析未来气候变化下的水文情势,基于未来水电站的来水情势,预估未来气候变化下的发电潜力,具体评价步骤如下:

(1)利用官溪水电站上游南水水文站控制流域 2011—2020 年的实测水文气象资料,率定 RCCC-WBM 模型,获取流域水文参数。

(2)利用官溪水电站控制流域的历史(1961—2020 年)实测资料和未来(2031—2090 年)气候情景资料驱动 RCCC-WBM 模型,模拟过去及未来入库径流过程;利用发电量模型和模拟的入库流量,模拟不同时期的发电量。

(3)以 1981—2020 年为基准期,2031—2060 年为未来近期,2061—2090 年为未来远期,根据模拟的历史和未来径流及发电量过程,分析气候变化对径流及发电量的影响。

RCCC-WBM 模型^[19-20]具有结构简单、参数少、易于率定、适用气候条件范围较广等优点,已应用全球数千个流域的气候变化影响研究,对不同气候区均具有较好的适应性。模型考虑了地面径流、地下径流和融雪径流等 3 种径流成分,其中,地面径流线性正比于时段降水量及土壤含水量,地下径流按土壤含水量线性出流计算。针对官溪水电站流域,由于南方地区气温较高,不存在降雪,因此不考虑降雪和融雪过程;模型以月为计算时段,不考虑地面径流的汇流过程,认为地下径流的出流在时间上滞后 1 个计算时段。

模型要求输入逐月气温、降水、蒸发能力资料,有 4 个水文参数需要率定,分别为地表径流系数、地下径流系数、最大土壤蓄水容量和蒸发折减系数。以 Nash-Sutcliffe 效率系数和相对误差为目标函数,采用 Rosenbrock 方法进行参数优化^[21]。

水库的水力发电与发电引用流量和水库发电水头密切相关^[22-23]。水库入流由模型预测得到,小水电站的水库库容较小,调节能力弱,因此,假设水库出库流量等于水库入库流量,同时,水库发电引用流量受控于电站的最大过流能力;根据水量平衡计算各时段末水库蓄水量,根据水位库容曲线得到上游水位,由下游水位与流量关系曲线查得下游水位,上下游水位差即为发电水头;根据出力基本公式($N_t = KQ_{Rt}H$,其中: N_t 为 t 时刻的出力; K 为综合出力系数,取 7.0~8.5; Q_{Rt} 为出库流量; H 为发电水头)和发电量公式($E_t = N_t\Delta t$, E_t 为 Δt 时段的发电量)计算各时段出力值和发电量。

2 结果与讨论

2.1 官溪水电站以上流域气温、降水演变趋势

基于官溪水电站以上流域 2 个气象格点资料,分析 1961—2020 年流域气温和降水演变趋势;基于 19 个全球气候模式在 SSP2-4.5 情景下降尺度的气温和降水资料,分析流域未来 2031—2100 年的气候变化

趋势。采用 Mann-Kendall 趋势检验法诊断气温及降水演变趋势及其显著性,得出 1961—2020 年和 2031—2090 年两个时期气候要素演变的线性趋势及其显著性,以及 2031—2090 年流域气温、降水较基准值变化的演变过程(见图 2)。

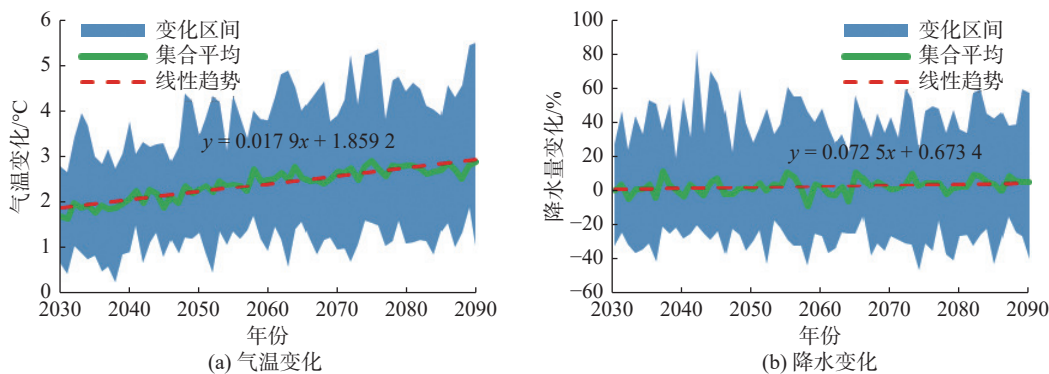


图 2 官溪水电站以上流域 2031—2090 年气温变化和降水变化过程

Fig. 2 Evolution of temperature and precipitation in the basin upstream of Guanxi Hydropower Station (2031-2090)

1961—2020 年官溪水电站以上流域气温和降水线性倾向率分别为 $0.0163\text{ }^{\circ}\text{C/a}$ 和 3.457 mm/a , 均呈现显著上升趋势;在 SSP2-4.5 排放情景下,2030—2090 年官溪水电站以上流域气温和降水也均呈现显著增加趋势,线性倾向率分别为 $0.0179\text{ }^{\circ}\text{C/a}$ 和 1.086 mm/a 。相比而言,未来气温的线性增加率高于历史阶段,但未来降水的线性增加率略小于历史时期。

由图 2 可以看出:相较基准时期 1981—2020 年,未来气温升幅介于 $1\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$,升温趋势明显;未来降水量变化介于 $\pm 30\%$ 之间,2031—2090 年多模式集合平均降水量呈现增加趋势。统计结果表明,相较基准期,未来近期 2031—2060 年官溪水电站以上流域气温和降水将分别变化 $2.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ [$1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $3.5\text{ }^{\circ}\text{C}$] 和 2.03% [-28.4% , 44.4%];未来远期 2061—2090 年气温和降水将比基准期分别变化 $2.69\text{ }^{\circ}\text{C}$ [$1.23\text{ }^{\circ}\text{C}$, $4.55\text{ }^{\circ}\text{C}$] 和 3.85% [-29.5% , 42.6%]。

同时,也可以发现,不同气候模式对未来气温和降水的预估存在一定的差异,气温的预估结果差异可达 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,降水的预估结果最大差异接近 100% ,不确定性是气候变化预估不可忽视的问题。

2.2 气候变化对入库径流的影响

利用官溪水电站上游南水水文站的径流资料和水文站以上流域的气象资料率定 RCCC-WBM 模型,由于南水水文站实测径流资料序列为 2011—2020 年,为保证模型模拟结果的可靠性,以 2011—2016 年为率定期,以 2017—2020 年为验证期。南水水文站实测与模拟的月流量过程见图 3。

由图 3 可见, RCCC-WBM 模型对南水水文站实测径流具有较好的模拟效果,实测径流与模拟径流总体拟合良好,并且 Nash-Sutcliffe 效率系数在率定期和验证期均超过 70% ,同时相对误差也较小,介于 $\pm 3\%$ 之间。根据《水文情报预报规范》,水文模拟吻合度达到乙级水平,模拟精度达到优秀水平^[24],这说明利用该模型能够较好地模拟出研究流域径流量过程,可以用于水电站径流序列的模拟重建。

将官溪水电站以上流域历史(1961—2020 年)气象资料和未来(2031—2100 年)19 个气候模式的降尺度气候情景资料驱动率定的 RCCC-WBM 模型,模拟历史和未来不同阶段的径流过程(见图 4)。

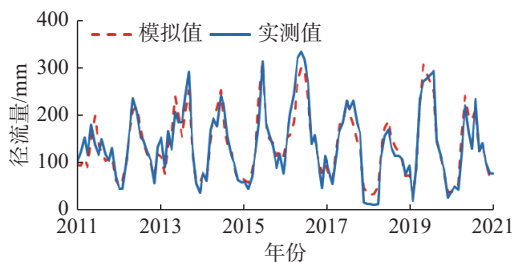


图 3 南水水文站 2011—2020 年实测与模拟月流量过程

Fig. 3 The observations and simulations of monthly flow patterns at Nanshui Hydrometric Station (2011-2020)

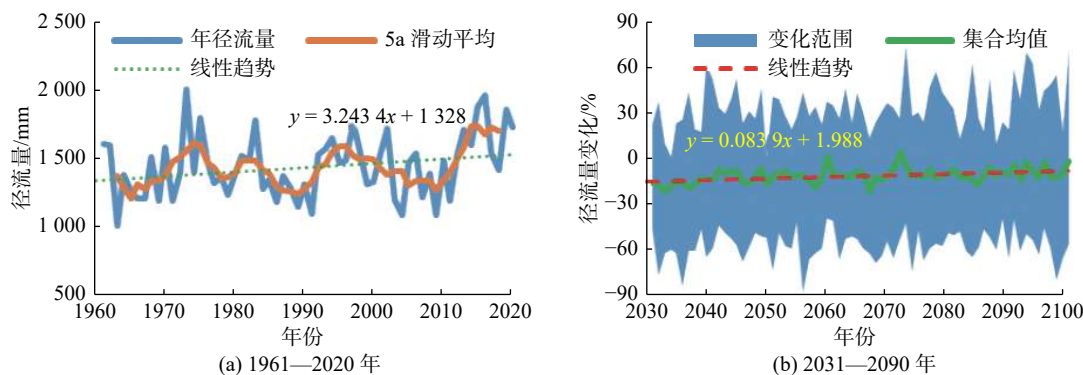


图4 官溪水电站 1961—2020 年和 SSP2-4.5 情景下 2031—2090 年入库径流量较基准期变化的演变

Fig. 4 The evolution process of changes in inflow runoff from 1961 to 2020 and from 2031 to 2090 under the SSP2-4.5 scenario at Guanxi Hydropower Station compared to the baseline period

由图4可见:(1)1961—2020年官溪水电站入库径流量总体呈现波动性增加趋势,线性倾向率为 3.24 mm/a ,其中,20世纪70年代和2010年之后的最近10年,入库径流量总体偏丰,20世纪80年代和21世纪的最初10年入库径流量相对偏低。(2)不同气候模式情景下预估的未来入库径流量变化存在差异,幅度大多介于 $\pm 40\%$,根据19个模式情景集合平均值,2030—2090年官溪水电站入库径流量呈增加趋势,其线性倾向率为 $0.082\%/a$ 。统计结果表明,与基准期(1981—2020年)相比,未来近期2031—2060年和未来远期2061—2090年官溪水电站入库径流量将分别增加 $3.55\%[-34.14\%, 39.84\%]$ 和 $5.66\%[-32.27\%, 41.96\%]$ 。

2.3 气候变化对水力发电的影响

官溪水电站的水库库容较小,调节能力弱,故假设小水电站的水库按进出库平衡的调度模式运行。根据模拟的历史和未来入库流量和水库的特征参数,计算1961—2020年和未来2031—2090年官溪水电站的发电量。1961—2020年计算的官溪水电站发电量约为 $1\,553\text{ 万 kW}\cdot\text{h}$,略大于电站运行以来实际发电量的多年均值($1\,553\text{ 万 kW}\cdot\text{h}$),分析认为,这主要是20世纪70年代入库径流量偏多造成的。总体而言,基于模拟的入库流量和水库参数,可以较好地模拟官溪水电站的发电过程。

图5给出了官溪水电站2031—2090年发电量较基准期的逐年变化过程。可以看出:(1)不同模式预估结果存在很大差异,有些模式预估未来发电量可能增多,有些预估未来发电量可能减少,未来发电量较基准期的变化大多介于 $[-30\%, 50\%]$;(2)多模式集合平均情况下,官溪水电站发电量总体呈增加趋势,其线性倾向率为 $0.0838\%/a$ 。统计结果表明,在SSP2-4.5排放情景下,2031—2060年官溪水电站发电量将比基准期平均增加 $5.87\%[-29.3\%, 50.1\%]$,2061—2090年平均增加 $8.03\%[-27.3\%, 52.4\%]$ 。

2.4 讨论

全球气候变暖对水文循环和区域水资源产生了一定影响^[25-26]。针对本文研究流域,未来2031—2060年和2061—2090年气温较基准期1981—2020年明显升高,分别增加 2.1 和 $2.7\text{ }^{\circ}\text{C}$;未来降水也以增多为主,就多年平均而言,未来2个时段的降水可能增多 2.0% 和 3.9% 。预估结果与目前已有研究总体一致,只是变化幅度存在一定差异^[27-28],这与采用的气候模式与排放情景不同密切相关,高排放情景下的升温幅度

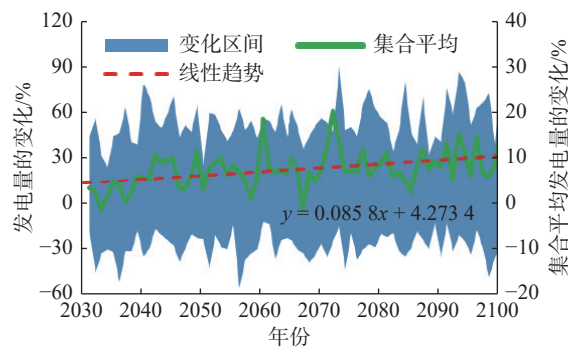


图5 SSP2-4.5情景下官溪水电站2031—2090年发电量较基准期(1981—2020)的变化

Fig. 5 The change in power generation at Guanxi Hydropower Station from 2031 to 2090 under the SSP2-4.5 scenario compared to the baseline period (1981–2020)

更大,但模式不同是降水预估差异的重要原因^[29]。

本研究采用 19 个气候模式预估未来气候变化及其对水电站的影响,尽管所有气候模式对气温预估的趋势一致,但预估的气温增幅存在差异。不同气候模式对未来降水趋势预估差异更大,甚至相反;19 个模式中有 11 个气候模式预估未来降水较基准期增加,另外 8 个气候模式预估未来降水较基准期不同程度地减小:不确定性是气候变化趋势研究中的最大问题^[30]。为在一定程度上认识气候变化研究中的不确定性,鼓励使用多个相对可靠的气候模式预估结果,而不是依赖单个气候模式^[13, 19, 25]。基于多模式结果的集合均值(中值)结合预估区间是 IPCC 最常用的描述趋势预估结果及其不确定性的方式^[31-32]。从多模式集合结果看,未来官溪水电站的水库入流及预估的发电量均较基准期(1981—2020 年)有所增加,其中,2061—2090 年的平均入库径流和发电量略高于 2031—2060 年。

“双碳”目标是国家发展的重大战略,发展水电是实现能源结构转型的重要举措。官溪电站水库总库容约为 72 万 m³,电站入库多年平均径流量约 12 亿 m³,未来气候变化下入库径流可能增加 3%~6%,在不考虑增加库容和保持目前发电机组的前提下,未来发电潜能约增加 5%~8%,未来气候变化无疑为该电站增产扩容提供了重要条件。由于全球气候变暖背景下,极端事件将增多增强^[33-34],尽管预估的未来年径流量可能增多,但水文过程的变异性将增大,这在一定程度上会影响水库效益的发挥,加强电站运行调度方式优化将在一定程度上促进电站的电能增产。

小水电站控制流域面积小,由于气候要素空间变化的异质性,对小水电站流域未来气候变化趋势预估很难借鉴其他流域的研究结果。系统开展针对小水电站的气候变化影响评估,对保障水力发电的可持续性和稳定性,以及制定适应性策略具有重要意义。

3 结 语

(1)经模拟预测,2030—2090 年,官溪水电站以上流域气温及降水均呈显著上升趋势,气温、降水的线性变化率分别为 0.017 9 ℃/a 和 1.086 mm/a;与基准期 1981—2020 年相比,2031—2060 年和 2061—2090 年气温将升高 2.1 ℃[1.0 ℃, 3.5 ℃]和 2.69 ℃[1.23 ℃, 4.55 ℃],降水将可能增加 2.03%[-28.4%, 44.4%]和 3.85%[-29.5%, 42.6%]。

(2)RCCC-WBM 模型能够较好地模拟南水水文站径流过程,Nash-Sutcliffe 效率系数在率定期和验证期均超过 70%,相对误差也较小;2030—2090 年,官溪水电站入库径流呈增加趋势,入库径流变化量的线性倾向率为 0.082%/a。

(3)未来气候变化下官溪水电站发电量总体呈增加趋势,相较基准期,2031—2060 年官溪水电站发电量将增加 5.87%[-29.3%, 50.1%],2061—2090 年将增加 8.03%[-27.3%, 52.4%]。未来官溪水电站以上流域以暖湿趋势为主,可在一定程度上增加入库流量,增大发电潜能,为小水电扩容增产提供了重要支撑条件。

参 考 文 献:

- [1] 秦大河. 气候变化科学与人类可持续发展[J]. 地理科学进展, 2014, 33(7): 874-883. (QIN Dahe. Climate change science and sustainable development[J]. Progress in Geography, 2014, 33(7): 874-883. (in Chinese))
- [2] 鲁帆, 杨姗姗, 严登华, 等. 气候-水文变化对水力发电的影响预估综述[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文), 2023, 21(4): 331-340. (LU Fan, YANG Shanshan, YAN Denghua, et al. A review on assessment of projected impacts of hydro-climatic change on hydropower potential[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2023, 21(4): 331-340. (in Chinese))
- [3] 张瑜, 胡春妍. 水能发电技术发展专利趋势[J]. 中国科技信息, 2023(18): 19-21. (ZHANG Yu, HU Chunyan. Patent trend of

- hydropower generation technology development[J]. *China Science and Technology Information*, 2023(18): 19-21. (in Chinese))
- [4] MILLIMAN J D, FARNSWORTH K L, JONES P D, et al. Climatic and anthropogenic factors affecting river discharge to the global ocean, 1951-2000[J]. *Global and Planetary Change*, 2008, 62(3/4): 187-194.
- [5] WU H T J, LAU W K M. Detecting climate signals in precipitation extremes from TRMM (1998-2013): increasing contrast between wet and dry extremes during the “global warming hiatus” [J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(3): 1340-1348.
- [6] LI F P, ZHANG Y Q, XU Z X, et al. The impact of climate change on runoff in the southeastern Tibetan Plateau[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 505: 188-201.
- [7] CHEN H, XIANG T T, ZHOU X, et al. Impacts of climate change on the Qingjiang Watershed's runoff change trend in China[J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2012, 26(6): 847-858.
- [8] WANG G Q, ZHANG J Y, JIN J L, et al. Assessing water resources in China using PRECIS projections and a VIC model[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012, 16(1): 231-240.
- [9] ZHAI R, TAO F L, XU Z H. Spatial-temporal changes in runoff and terrestrial ecosystem water retention under 1.5 and 2 °C warming scenarios across China[J]. *Earth System Dynamics*, 2018, 9(2): 717-738.
- [10] GERNAAT D E H J, DE BOER H S, DAIOGLOU V, et al. Climate change impacts on renewable energy supply[J]. *Nature Climate Change*, 2021, 11(2): 119-125.
- [11] ZHOU Y, HEJAZI M, SMITH S, et al. A comprehensive view of global potential for hydro-generated electricity[J]. *Energy & Environmental Science*, 2015, 8(9): 2622-2633.
- [12] LIU X C, TANG Q H, VOISIN N, et al. Projected impacts of climate change on hydropower potential in China[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2016, 20(8): 3343-3359.
- [13] VAN VLIET M T H, VAN BEEK L P H, EISNER S, et al. Multi-model assessment of global hydropower and cooling water discharge potential under climate change[J]. *Global Environmental Change*, 2016, 40: 156-170.
- [14] 李昱, 席佳, 张弛, 等. 气候变化对澜湄流域气象水文干旱时空特性的影响[J]. *水科学进展*, 2021, 32(4): 508-519. (LI Yu, XI Jia, ZHANG Chi, et al. Impact of climate change on the spatio-temporal characteristics of meteorological and hydrological drought over the Lancang-Mekong River Basin[J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(4): 508-519. (in Chinese))
- [15] WANG L, ZHANG J Y, SHU Z K, et al. Evaluation of the ability of CMIP6 global climate models to simulate precipitation in the Yellow River Basin, China[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2021, 9: 751974.
- [16] 周天军, 邹立维, 陈晓龙. 第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)评述[J]. *气候变化研究进展*, 2019, 15(5): 445-456. (ZHOU Tianjun, ZOU Liwei, CHEN Xiaolong. Commentary on the coupled model intercomparison project phase 6 (CMIP6) [J]. *Climate Change Research*, 2019, 15(5): 445-456. (in Chinese))
- [17] SU B D, HUANG J L, FISCHER T, et al. Drought losses in China might double between the 1.5 °C and 2.0 °C warming[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(42): 10600-10605.
- [18] 谢文强, 王双双, 延晓冬. CMIP6 全球气候模式对中国年平均日最高气温和最低气温模拟的评估[J]. *气候与环境研究*, 2022, 27(1): 63-78. (XIE Wenqiang, WANG Shuangshuang, YAN Xiaodong. Evaluation on CMIP6 global climate model simulation of the annual mean daily maximum and minimum air temperature in China[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2022, 27(1): 63-78. (in Chinese))
- [19] 王国庆, 张建云, 管晓祥, 等. 中国主要江河径流变化成因定量分析[J]. *水科学进展*, 2020, 31(3): 313-323. (WANG Guoqing, ZHANG Jianyun, GUAN Xiaoxiang, et al. Quantifying attribution of runoff change for major rivers in China[J]. *Advances in Water Science*, 2020, 31(3): 313-323. (in Chinese))
- [20] GUAN X X, ZHANG J Y, ELMAHDI A, et al. The capacity of the hydrological modeling for water resource assessment under the changing environment in semi-arid river basins in China[J]. *Water*, 2019, 11(7): 1328.
- [21] 杜彦臻, 刘珈伊, 孙梦瑶, 等. 河流预报模型参数多目标优化算法研究在沁水河流域应用[J]. *中国农村水利水电*, 2018(12): 110-115. (DU Yanzhen, LIU Jiayi, SUN Mengyao, et al. Research on the multi-objective optimization algorithm for river forecast model parameters in the Qinsui River Basin[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2018(12): 110-115. (in Chinese))

- [22] OPERACZ A, GRAHL-MADSEN M. Program of hydropower potential assessment as an effective possibilities in upper Vistula water region in Poland[J]. *Acta Scientiarum Polonorum Formatio Circumiectus*, 2018, 4: 157-172.
- [23] TOBIN I, GREUELL W, JEREZ S, et al. Vulnerabilities and resilience of European power generation to 1.5 °C, 2 °C and 3 °C warming[J]. *Environmental Research Letters*, 2018, 13(4): 044024.
- [24] 中华人民共和国水利部. 水文情报预报规范: GB/T 22482—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008. (Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Standard for hydrological information and hydrological forecasting: GB/T 22482-2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008. (in Chinese))
- [25] TAO F L, YOKOZAWA M, HAYASHI Y, et al. Future climate change, the agricultural water cycle, and agricultural production in China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2003, 95(1): 203-215.
- [26] QIAO C P, NING Z R, WANG Y, et al. Impact of climate change on water availability in water source areas of the south-to-north water diversion project in China[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2021, 9: 747429.
- [27] 杨红龙, 王炳坤, 杜尧东, 等. RCPs 情景下珠江流域气候变化预估分析[J]. 热带气象学报, 2014, 30(3): 503-510. (YANG Honglong, WANG Bingkun, DU Yaodong, et al. Projected change in mean climate in the Pearl River Basin under the rcps scenarios[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2014, 30(3): 503-510. (in Chinese))
- [28] 隋月, 黄晚华, 杨晓光, 等. 气候变化背景下中国南方地区季节性干旱特征与适应 I. 降水资源演变特征[J]. 应用生态学报, 2012, 23(7): 1875-1882. (SUI Yue, HUANG Wanhua, YANG Xiaoguang, et al. Characteristics and adaption of seasonal drought in Southern China under the background of global climate change. I. Change characteristics of precipitation resource[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(7): 1875-1882. (in Chinese))
- [29] CANNON A J. Selecting GCM scenarios that span the range of changes in a multimodel ensemble: application to CMIP5 climate extremes indices[J]. *Journal of Climate*, 2015, 28(3): 1260-1267.
- [30] LEE T S, GALAVI H, HUANG Y F. Uncertainty in climate change impact studies: a review of developments and limitations[J]. *The International Journal of Climate Change: Impacts and Responses*, 2014, 6(1): 1-10.
- [31] THOMPSON J R, GREEN A J, KINGSTON D G, et al. Assessment of uncertainty in river flow projections for the Mekong River using multiple GCMs and hydrological models[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 486: 1-30.
- [32] 孙颖, 秦大河, 刘洪滨. IPCC 第五次评估报告不确定性处理方法的介绍[J]. 气候变化研究进展, 2012, 8(2): 150-153. (SUN Ying, QIN Dahe, LIU Hongbin. Introduction to treatment of uncertainties for IPCC fifth assessment report[J]. *Progressus Inquisitiones DE Mutatione Climatis*, 2012, 8(2): 150-153. (in Chinese))
- [33] ALMEIDA R M, FLEISCHMANN A S, BRÊDA J P F, et al. Climate change may impair electricity generation and economic viability of future Amazon hydropower[J]. *Global Environmental Change*, 2021, 71: 102383.
- [34] 陈亚宁, 李稚, 范煜婷, 等. 西北干旱区气候变化对水文水资源影响研究进展[J]. 地理学报, 2014, 69(9): 1295-1304. (CHEN Yaning, LI Zhi, FAN Yuting, et al. Research progress on the impact of climate change on water resources in the arid region of Northwest China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(9): 1295-1304. (in Chinese))

Effects of climate change on inflow and small hydropower generation in southern China

WANG Yueyang^{1,2,3,4}, ZHANG Jianyun^{1,2,3,4}, NING Zhongrui^{1,2,3,4}, JIA Yufan^{1,2,3,4},
GUO Xinyi⁴, ZHANG Rui⁵, BAO Zhenxin^{1,2,3}

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Yangtze Institute for Conservation and Development, Nanjing 210098, China; 3. Cooperative Innovation Center for Water Safety and Hydro Science, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing 210029, China; 5. School of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China)

Abstract: In the context of global warming, shifts in precipitation, temperature, and potential evaporation exert a substantial impact on hydrological patterns and hydropower production. China endowed with abundant hydropower potential, places significant emphasis on hydropower in its energy portfolio. Investigating the effects of climate change on reservoir inflow and hydropower output is crucial for the sustainable development and utilization of water and hydropower resources. This study focuses on the Guanxi hydropower station, utilizing projections from 19 General Circulation Models (GCMs) in the CMIP6. The findings suggest: (1) Under the SSP2-4.5 scenario, temperature, precipitation, and potential evaporation are projected to increase in the coming decades. (2) Divergent GCMs yield varying projections; however, the overall trend indicates potential increases in inflow runoff and hydropower generation based on the mean of 19 GCMs. (3) Relative to the baseline (1981-2020), Guanxia hydropower station's inflow runoff is anticipated to rise by 3.55%[-34.14%, 39.84%] and 5.66%[-32.27%, 41.96%] in the near (2031-2060) and far (2061-2090) future periods, respectively. Consequently, hydropower generation is expected to increase by 5.87%[-29.3%, 50.1%] and 8.03%[-27.3%, 52.4%] due to changes in inflow runoff. These projected increments offer scientific support for the expansion of small hydropower station construction.

Key words: climate change; water resources; RCCC-WBM model; inflow runoff; hydroelectric power generation