

# 气候变化对水电站发电出力的影响研究

袁林山<sup>1</sup>, 张家余<sup>2</sup>, 张 力<sup>1</sup>, 刘德地<sup>2</sup>

(1. 国网湖北黄龙滩水力发电厂, 湖北 十堰 442000; 2. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072)

**摘要:** 气候变化使全球水循环、水资源分布状况发生了巨大改变, 河川径流作为人类采用天然水资源、水能最主要的载体, 其未来变化情况也深受气候变化影响, 因此考虑未来气候变化, 研究能够调节河川径流并提取水能的水电站的发电出力有着重要意义。本文以黄龙滩水电站为例, 以全球气候模式(GCM)模拟结果作为未来气候情景, 将降尺度处理后的气象要素输入 SWAT 模型以预测黄龙滩水电站未来(2020-2080年)入库流量序列, 在与历史(1961-2017年)入库流量序列进行一致性分析后, 根据水能计算推求不同来水条件下水电站保证出力与多年平均年发电量, 进而分析气候变化对水库发电出力的影响。结果表明, 气候变化下的未来入库流量与历史入库流量具有非一致性, 历史、未来 RCP4.5 情景、未来 RCP8.5 情景下推求的黄龙滩水电站保证出力分别为 5.98、5.26、4.82 万 kW; 对应的黄龙滩水电站多年平均年发电量分别为 7.43、7.79、7.31 亿 kWh。在气候变化的影响下, 水库的入库流量不均性增加, 降低了水电站的保证出力, 给水电站的运行与调度带来了新的要求与挑战。

**关键词:** 气候变化; 未来径流; 水电站; 发电出力

中图分类号: TV213 文献标识码: A

## Research on the Impacts of Climate Change on the Power Generation of Hydropower Station

YUAN Lin-shan<sup>1</sup>, ZHANG Jia-yu<sup>2</sup>, ZHANG Li<sup>1</sup>, LIU De-di<sup>2</sup>

(1. State Grid Hubei Huanglongtan Hydropower Plant, Shiyan 442000, Hubei Province, China;

2. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** Climate change has greatly changed the water cycle and the distribution of water resources. River runoff, as an important carrier of human use of natural water resources and water energy, will also be affected by climate change in the future through the water cycle. Therefore, considering the future climate change, it is of great significance to study the generation capacity of hydropower stations which can regulate river runoff and extract water energy. This paper takes Huanglongtan Hydropower Plant as an example, setting the future climate change scenario by the global climate model (GCM) simulation results, the meteorological elements after downscaling treatment are input into SWAT hydrological model to predict the future (2020-2080) inflow flow series of Huanglongtan Reservoir. After the consistency analysis with the historical (1961-2017) inflow flow series, inflow scenarios are determined for water energy calculation. The guaranteed output and average annual power generation of hydropower stations are calculated, and then the impacts of climate change on the power generation of reservoirs are also analyzed. The results show that the future inflow and the historical inflow under the climate change are inconsistent. The guaranteed outputs of Huanglongtan Hydropower Plant under the the future RCP4.5 scenario and the future RCP8.5 scenario are 59 800, 52 600 and 48 200 kW respectively, while its annual average power generation are 743 million, 779 million and 731 million kWh respectively. The impacts of climate change on the discrete degree of reservoir inflow flow increases, which reduces the guaranteed output of hydropower stations, and brings new requirements and challenges to the operation of hydropower stations.

**Key words:** climate change; future runoff; hydropower plant; hydropower generation

收稿日期: 2019-11-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(91647106, 51879194, 51579183)

作者简介: 袁林山(1966-), 男, 高级工程师, 主要从事水库调度、水文水资源研究与应用。E-mail: htylslf@126.com。

通讯作者: 刘德地(1980-), 男, 教授, 主要从事水文水资源理论与方法研究。E-mail: dediliu@whu.edu.cn。

## 0 引言

在气候变化的影响下,全球水循环、水资源分布状况均发生了巨大改变。IPCC 在 2013 年发布的第五次评估报告中指出,随着 CO<sub>2</sub> 等温室气体的增排,未来气温及辐射强迫将持续上升,会给水文循环过程带来更加深远的影响<sup>[1]</sup>。水文循环系统中,淡水对人类社会与活动极其重要,但其储量却不足全球总水量的 1%<sup>[2]</sup>。可供人采用的淡水资源最主要载体便是河川径流,水库作为一种调节河川径流的工程,在使河川径流更适合人类社会采用、综合利用水资源与水能及维持生态环境方面发挥着重要的作用。因此研究气候变化对未来河川径流的影响,进而研究未来径流变化对水库水力发电的影响有着重要意义。

气候变化条件下的未来径流变化近年来已成为水文学领域的研究热点,其中以全球气候模式数据驱动水文模型,进行流域未来径流模拟预测研究,逐渐成为研究气候变化对流域水资源影响的主流和热点。郭靖等<sup>[3]</sup>、王乐等<sup>[4]</sup>采用统计降尺度方法,将两参数月尺度水量平衡模型与全球气候模式进行耦合,分别对南方湿润地区的丹江口水库和赣江流域在不同气候模式下未来径流的变化趋势进行了分析研究; Nilawar 等<sup>[5]</sup>利用 SWAT 模型在 RCP4.5 和 RCP8.5 两种情况下模拟了印度 Purna 流域未来 2009-2031 年、2032-2053 年、2054-2075 年和 2076-2099 年 4 个时期月径流变化情况,发现气候变化影响下的未来月径流发生了巨大改变。气候变化通过气象因素的改变影响未来径流过程,而未来径流的变化又直接影响着水库的发电出力过程。张建敏等<sup>[6]</sup>模拟了未来气候情景,进而分析气候变化对于未来三峡水库运行期间的发电、洪涝和干旱风险的影响。尽管现有大量的研究讨论了气候变化对于未来径流及水库优化调度的影响,但水库优化调度过程中考虑了多个目标,水库发电出力与水库的优化调度之间并不是简单的线性关系,因此研究气候变化下未来径流条件影响水库发电出力的机理具有深远意义。

本文以黄龙滩水电站为研究对象,采用 SDSM 统计降尺度方法,在 RCP4.5(中排放)、RCP8.5(高排放)<sup>[7]</sup>两种典型浓度路径下,将 BCC-CSM1.1 气候模式输出的未来预估数据降尺度到研究区域,然后将降尺度数据输入到率定好的 SWAT 水文模型,从而得到黄龙滩水电站入库径流模拟结果(2020-2080 年),并与历史径流数据(1961-2017 年)进行一致性检验,进而计算不同径流条件下黄龙滩水电站的发电出力情况,分析评价气候变化对水库发电出力的影响,进而构建分析气候变化对水电站发电出力影响的范式。

## 1 研究区域概况

黄龙滩水电站位于汉江支流堵河的下游,湖北十堰市黄龙滩镇以上 4 km 的峡谷口处,水电站大坝控制面积 11 140 km<sup>2</sup>,占整个堵河流域面积的 95%,坝址多年平均径流量 191 m<sup>3</sup>/s。水库总库容 11.7 亿 m<sup>3</sup>,调节库容 5.985 亿 m<sup>3</sup>,设计洪水位 248.2 m,正常蓄水位 247.0 m,死水位 222.0 m。

黄龙滩水电站于 1976 年竣工,是一个以发电为主,同时具

有供水、航运、发展渔业等综合效益的大型水利枢纽。黄龙滩水电站位于丹江口水库坝址上游约 152 km,直接受丹江口水库回水顶托影响。堵河流域及黄龙滩水电站示意图如图 1 所示。

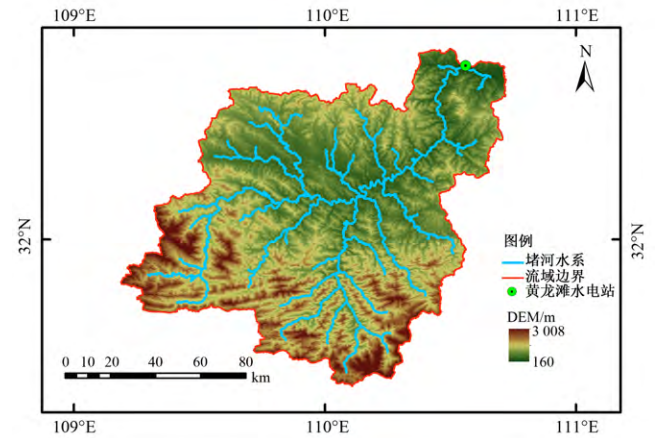


图 1 黄龙滩水电站示意图

Fig.1 Study area

众多研究表明,气候变化下汉江流域未来径流情况将发生巨大变化<sup>[8-10]</sup>。堵河作为汉江的重要支流,研究其径流过程对气候变化的响应及对水电站发电出力的影响具有重要价值。

## 2 研究方法

本文采用 SDSM 统计降尺度方法,在 RCP4.5、RCP8.5 两种典型浓度路径下,将 BCC-CSM1.1 气候模式输出的未来预估数据降尺度到研究区域,然后将降尺度数据输入到已率定好的 SWAT 水文模型,得到黄龙滩水电站入库径流模拟结果,并与历史径流数据进行一致性检验,进而计算不同径流条件下黄龙滩水电站的发电出力情况,对比分析评价气候变化对水库发电出力的影响。具体实施流程如图 2 所示。

### 2.1 气候模式与统计降尺度

全球气候模式(GCM)是目前进行大尺度气候模拟和研究气候变化最为可行的方法,但 GCM 的输出结果受到分辨率的限制,只能反映出较大尺度的网格气候变化平均特质。流域水文模型所需要的区域特征精度要求较高,GCM 输出结果无法满足,现有研究表明,使用统计降尺度方法<sup>[11,12]</sup>常常能够弥补 GCM 区域预测的不足<sup>[13-15]</sup>,该方法与其他方法相比计算简单且效果良好<sup>[16,17]</sup>。

气候模式数据来自美国环境与保护中心的全球再分析日数据,空间分辨率为 2.5°×2.5°。历史降水、气温数据(1961-2017 年)则选择汉江流域上游 8 个国家气象站点(略阳、佛坪、石泉、镇安、万源、商州、安康、西峡)的观测数据。

在选择气候预测因子方面,根据 Wilby 等<sup>[11]</sup>的研究,应主要考虑 3 个方面:①选取的预测因子与预测量之间应具有较强的相关关系;②预测因子可以从全球气候模型输出中相对容易地获取;③全球气候模型能够较为准确地模拟选取的预测因子<sup>[18]</sup>。

堵河流域所在地区属于副热带季风气候,该地区的降水主要影响因素有位势高度场、海平面气压以及湿度等因素<sup>[18]</sup>。因此,本文选取 850 hPa 位置比湿、平均海平面气压、500 hPa 位

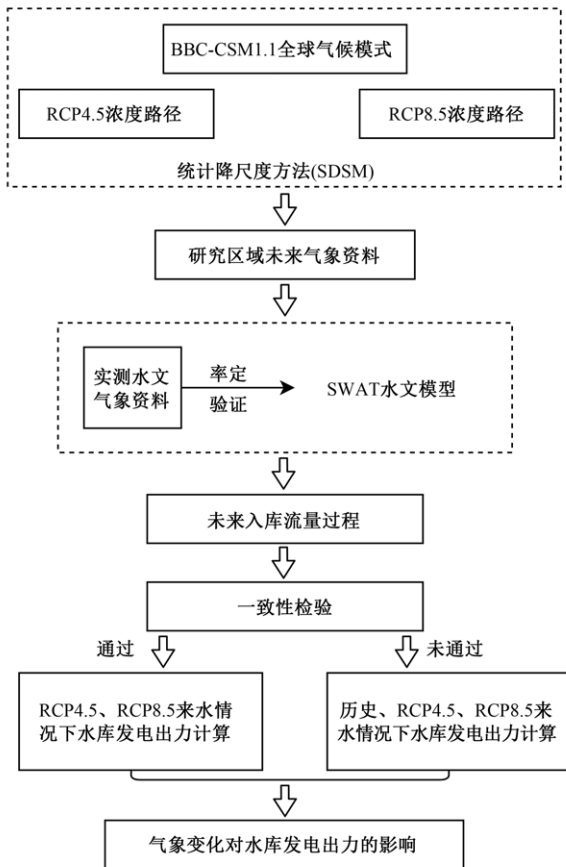


图2 研究方法流程图

Fig.2 Flow chart of research methods

置风速、500 hPa 位势高度、850 hPa 地表温度、2 m 地表平均温度这 6 个因子作为降水、气温的降尺度预测因子。

2.2 SWAT 水文模型

SWAT( Soil and Water Assessment Tool) 模型是由美国农业部( USDA) 农业研究中心于 1994 年开发的流域尺度水文模型, 该模型具备相对完备的物理机制且具有连续性, 是基于 GIS 的半分布式水文模型<sup>[19]</sup>。SWAT 模型具有良好的用户交互界面, 且有着较强的空间数据管理、分析和表达的能力, 在众多的水文模型中具有较强的应用优势<sup>[20]</sup>。SWAT 模型可模拟流域中多种水文物理化学过程, 并且在模拟和预测下垫面、气候因素变化对流域水文循环的影响方面有着较好应用<sup>[21]</sup>。

利用历史实测数据进行 SWAT 模型的率定, 并将 SDSM 得到的堵河流域降雨和温度数据输入到 SWAT 模型中, 可模拟出未来情景下堵河流域各子流域出口断面的径流过程, 最后演算得到黄龙滩水电站入库径流过程。

2.3 一致性检验

本文采用方纽曼比率法和累积偏差方法检验未来径流与历史径流的一致性。

方纽曼比率被定义为:

$$N = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (Y_i - Y_{i+1})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (1)$$

其中  $\bar{Y}$  表示  $Y_i$  系列的平均值。如果样本不连续  $N$  值往往低于预期值。

累积偏差法则需构造统计量:

$$S^* = 0 \quad S_k^* = \sum_{i=1}^k (Y_i - \bar{Y}) \quad k = 0, 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

将  $S^*$  除以样本标准偏差得到重新调整的调整部分和:

$$S_k^{**} = \frac{S_k^*}{D_Y} \quad k = 0, 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

$$D_Y^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}{n} \quad k = 0, 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

用以审查一致性的参数为:

$$R = \max_{0 \leq k \leq n} S_k^{**} - \min_{0 \leq k \leq n} S_k^{**} \quad (5)$$

$R$  的高值反映了在水平上的改变, 我们一般审查统计量  $R/\sqrt{n}$  的大小来判断序列的一致性。

2.4 水库调度与发电出力计算

水库调度的月水量平衡方程为:

$$V_{t+1} = V_t + I_t + P_t - E_t - Q_t - q_t - N_t \quad (6)$$

式中:  $V_t$  为第  $t$  月初的水库蓄水量, 万  $m^3$ ;  $V_{t+1}$  为第  $t$  月末的水库蓄水量, 万  $m^3$ ;  $I_t$  为第  $t$  月的水库入流量, 万  $m^3$ ;  $P_t$  为第  $t$  月的库面降水量, 万  $m^3$ ;  $E_t$  为第  $t$  月的库面蒸发量, 万  $m^3$ ;  $Q_t$  为第  $t$  月的发电用水量, 万  $m^3$ ;  $q_t$  为第  $t$  月的水库弃水量, 万  $m^3$ ;  $N_t$  为第  $t$  月水库渗漏量, 万  $m^3$ 。

由于黄龙滩水电站的入库流量是通过 SWAT 水文模型计算得到, 已经考虑了库面降水量  $P_t$ 、库面蒸发量  $E_t$  以及水库渗漏量  $N_t$ , 所以上式可以简化为:

$$V_{t+1} = V_t + I_t - Q_t - q_t \quad (7)$$

式中: 水库入流量  $I_t$  的计算采用气候变化条件下的区域水资源模拟; 水库发电用水量  $Q_t$  的计算采用等流量调节的水能计算方法。

水电站月出力  $N_t$  的计算公式为:

$$N_t = KQ_t H_t \quad (8)$$

式中:  $K$  为出力系数, 根据黄龙滩水电站特性, 取 7.9;  $H_t$  为第  $t$  月净水头  $m$ 。

黄龙滩水电站下游水位直接受丹江口水库回水顶托影响, 因此黄龙滩水电站下游水位直接采用丹江口水库常规调度月平均水位计算。

3 结果与讨论

3.1 入库径流模拟预测

将 BCC-CSM1.1 模式在代表性浓度路径 RCP4.5、RCP8.5 情景下, 采用 SDSM 的降尺度模型输出的气温系列和降水结果, 采用反距离加权法在 SWAT 模型进行插值, 并将其作为输入模拟未来情景( 2020-2080 年) 堵河流域的径流过程。黄龙滩水电站历史( 1961-2017 年) 和未来( 2020-2080 年) 的多年平均流量年内分配情况如图 3 所示。

从图 3 可以看出, 未来情景下丰水期黄龙滩水电站入库流量增加, 而枯水期入库流量降低。汛期流量的增加加剧了黄龙滩水电站的防洪压力, 而蓄水期流量降低、年内径流非均匀程

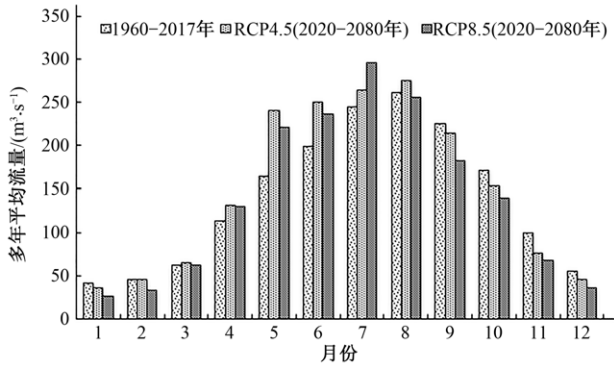


图3 黄龙滩水电站多年平均入库流量年内分配图

Fig.3 Annual average inflow distribution of Huanglongtan Hydropower Station

度锐化给水库发电出力带来了更大的挑战。

### 3.2 一致性检验结果

利用方纽曼比率法和累积偏差方法分别进行历史入库径流序列与 RCP4.5、RCP8.5 预测的未来入库径流序列的一致性检验。

(1) 由方纽曼比率法可知,根据历史(1961-2017年)年径流资料与 RCP4.5 情景下的未来年径流资料(2020-2080年),可以求得  $N=0.99$ ; 而根据历史(1961-2017年)年径流资料与 RCP8.5 情景下的未来年径流资料(2020-2080年)求得  $N=1.12$ 。所求  $N$  值均大于临界  $N_c$ , 故在 95% 的置信水平下,未通过一致性检验,历史径流资料与未来径流资料是非一致性序列。

(2) 由累积偏差方法可知,根据历史(1961-2017年)年径流资料与 RCP4.5 情景下的未来年径流资料(2020-2080年),可以求得  $R/\sqrt{n}=1.50$ ; 而根据历史(1961-2017年)年径流资料与 RCP8.5 情景下的未来年径流资料(2020-2080年)求得  $R/\sqrt{n}=1.65$ 。所求  $R/\sqrt{n}$  均大于临界值,故在 95% 的置信水平下,未通过一致性检验,历史径流资料与未来径流资料是非一致性序列。

根据方纽曼比率法与累积偏差方法,历史径流资料(1961-2017年)与 RCP4.5、RCP8.5 预测的未来径流资料(2020-2080年)是非一致性序列。

### 3.3 气候变化对水库发电出力的影响

由于历史入库流量资料(1961-2017年)与 RCP4.5、RCP8.5 预测的未来入库流量资料(2020-2080年)是非一致性系列,因此可采用分段方法进行频率分析。

利用矩法估计参数,得到历史入库流量资料的均值为  $191.0 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $C_V=0.29$ ; RCP4.5 情景下未来入库流量资料的均值为  $202.0 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $C_V=0.42$ ; RCP8.5 情景下未来入库流量资料的均值为  $191.0 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $C_V=0.42$ 。可见历史入库流量资料与未来气候模式下模拟得到的入库流量资料在参数  $C_V$  上有着较大差异,这意味着在气候变化的影响下入库流量有着更大的不均性,出现极端情况的可能性更高。各情景下水库入库流量的频率分布曲线如图 4~图 6 所示。

利用设计枯水年法(75%)采用等流量调节方式进行水能计算,推求历史及未来气候情境下的黄龙滩水电站保证出力;利用平水年法(50%)采用等流量调节方式进行水能计算,推

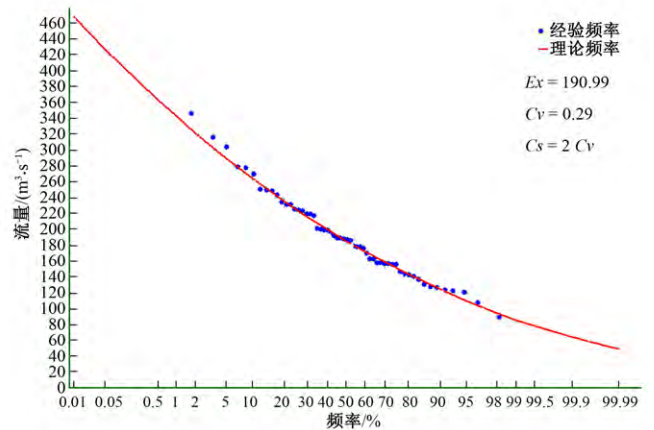


图4 历史入库流量频率分布曲线

Fig.4 Historical inflow flow frequency distribution curve

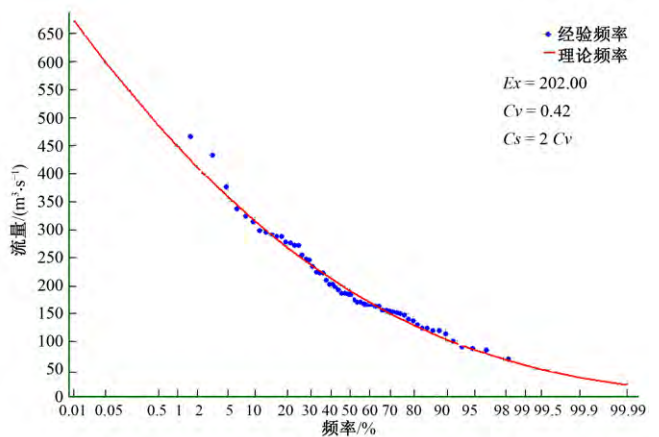


图5 RCP4.5 情景下未来入库流量频率分布曲线

Fig.5 Frequency distribution curve of future inflow flow under RCP4.5 scenario

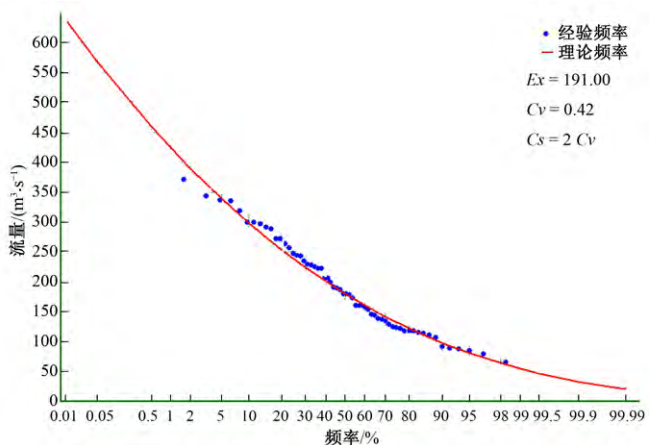


图6 RCP8.5 情景下未来入库流量频率分布曲线

Fig.6 Frequency distribution curve of future inflow flow under RCP8.5 scenario

求历史及未来气候情境下的黄龙滩水电站多年平均年发电量。结果如表 1 所示。

从表 1 可知,利用枯水年法(75%)采用等流量调节方式进行水能计算得到的历史、RCP4.5、RCP8.5 情景下的黄龙滩水电站保证出力分别为 5.98、5.26、4.82 万 kW,与历史入库流量

表 1 各来水条件下黄龙滩水电站保证出力与多年平均年发电量  
Tab.1 Guaranteed output and multi-year average annual power generation of Huanglongtan Hydropower Station under various inflow conditions

来水条件	保证出力/ 万 kW	多年平均年 发电量/亿 kWh
历史入库流量	5.98	7.43
未来(RCP4.5) 入库流量	5.26	7.79
未来(RCP8.5) 入库流量	4.82	7.31

输入计算得到的保证出力相比,RCP4.5 未来情景下得到的保证出力降低了 12.0% ,而在 RCP8.5 未来情景下得到的保证出力降低了 19.4%。未来气候情景下入库流量序列不均性增加,汛期水量更加丰沛、枯水期水量缺乏,供水期天然来流减少,降低了水电站的保证出力。

利用平水年法,采用等流量调节方式进行水能计算得到的历史、RCP4.5、RCP8.5 情景下的黄龙滩水电站多年平均年发电量分别为 7.43、7.79、7.31 亿 kWh,与历史入库流量输入计算得到的多年平均年发电量相比,RCP4.5 未来情景下得到的多年平均年发电量增加了 4.8% ,而 RCP8.5 未来情景下得到的多年平均年发电量减少了 1.6%。多年平均年发电量与水量及水库的调蓄能力有关,在 RCP4.5 情景下模拟的未来入库流量均值增大,水量增多,在水库调蓄能力足够的情况下,能够较好的利用水能进行发电。而 RCP8.5 未来情景下模拟的未来入库流量均值改变较小,水量上无较大改变,年内分配不均匀程度锐化使得汛期产生弃水、供水期发电流量较小的可能性增大,从而降低了年发电量。

#### 4 结 论

本文利用未来全球气候模式在代表性浓度路径 RCP4.5、RCP8.5 下模拟黄龙滩水电站入库流量,进行一致性分析后,通过水能计算,定量的估计了气候变化对水力发电影响的大小,模型和计算结果基本合理可行。主要结论如下。

(1) 气候变化影响下的未来径流变化情况主要体现在年内分配不均匀程度锐化,具体表现为汛期径流增加,枯水期径流减少,即“丰水更丰、枯水更枯”的特征;

(2) 气候变化带来的影响使得未来径流与历史径流的一致性发生改变,径流序列的统计整体改变将给水电及水资源的利用开发带来重大挑战;

(3) 未来径流年内分配不均匀程度锐化,给水电站发电出力带来了更大的不稳定性,降低了要求保证率下的发电出力。在未来气候变化的影响下,水电站发电出力面临着更大的挑战;

气候变化对水库未来入库流量的影响主要体现在流量序列的年内与年际分配过程不均性增加,具体表现为“丰水越丰,枯水越枯”的特征。水力发电的保证出力降低,将会改变以历史系列为基础的设计值及以之为基础的调度规则,给水电站调度提出了新的要求与挑战。同时现有气候模式的不确定性还需进一步研究。 □

#### 参考文献:

- [1] 董思言,高学杰. 长期气候变化: IPCC 第五次评估报告解读 [J]. 气候变化研究进展, 2014, 10( 1): 56-59.
- [2] 胡庆和,胡军华. 水资源管理模式发展趋势探析 [J]. 人民长江, 2007, 38( 1): 66-68.
- [3] 郭 靖,郭生练,陈 华,等. 丹江口水库未来径流变化趋势预测研究 [J]. 南水北调与水利科技, 2008, 6( 4): 78-82.
- [4] 王 乐,郭生练,洪兴骏,等. 赣江流域未来降雨径流变化模拟预测 [J]. 水资源研究, 2014, 3( 6): 522-531.
- [5] NILAWAR A P, WAIKAR M L. Impacts of climate change on stream-flow and sediment concentration under RCP4.5 and 8.5: a case study in Purna river basin, India [J]. Science of the Total Environment, 2019, 650( 2): 2685-2 696.
- [6] 张建敏,黄朝迎,吴金栋. 气候变化对三峡水库运行风险的影响 [J]. 地理学报, 2000, 55( S1): 26-33.
- [7] 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.
- [8] 张奇谋,陈 思,陈松生,等. 不同 RCP 情景下未来汉江流域气象干旱变化趋势预估研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28( 6): 1 470-1 480.
- [9] 夏智宏,周月华,许红梅. 基于 SWAT 模型的汉江流域水资源对气候变化的响应 [J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19( 2): 158-163.
- [10] 蔡新玲,孙 娴,乔秋文,等. 气候变化对汉江上游径流的影响 [J]. 气候变化研究进展, 2008, 4( 4): 220-224.
- [11] WILBY R L, HAY L E, LEAVESLEY G H. A comparison of down-scaled and raw GCM output: implications for climate change scenarios in the San Juan River basin, Colorado [J]. Journal of Hydrology, 1999, 225( 1): 67-91.
- [12] WILBY R L, Tomlinson O J, Dawson C W. Multi-site simulation of precipitation by conditional resampling [J]. Climate Research, 2003, 23( 3): 183-194.
- [13] 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.
- [14] 刘 敏,王 冀,刘文军. SDSM 统计降尺度方法对江淮地区地面气温模拟能力评估及其未来情景预估 [J]. 气象科学, 2012, 32( 5): 500-507.
- [15] 许 燕,王世杰,白晓永,等. 基于 SDSM 的珠江中上游气候模拟及未来情景预估 [J]. 中国岩溶, 2018, 37( 2): 228-237.
- [16] WILBY R L, WIGLEY T M L, Conway D, et al. Statistical down-scaling of general circulation model output: a comparison of methods [J]. Water Resources Research, 1998, 34( 11): 2 995-3 008.
- [17] DIBIKE Y B, COULIBALY P. Hydrologic impact of climate change in the Saguenay watershed: comparison of downscaling methods and hydrologic models [J]. Journal of hydrology, 2005, 307( 1): 145-163.
- [18] 杨 光,郭生练,李立平,等. 考虑未来径流变化的丹江口水库多目标调度规则研究 [J]. 水力发电学报, 2015, 34( 12): 54-63.
- [19] 董立俊,董晓华,曾 强,等. 气候变化条件下雅砻江流域未来径流变化趋势研究 [J]. 气候变化研究进展, 2019, 15( 6): 596-606.
- [20] 婧 靓,王飞儿. SWAT 模型及其应用与改进的研究进展 [J]. 东北林业大学学报, 2010, 38( 12): 111-114.
- [21] 李 峰,胡铁松,黄华金. SWAT 模型的原理、结构及其应用研究 [J]. 中国农村水利水电, 2008, 24( 3): 24-28.