

气候变化影响下黄河上游梯级水库群未来发电量预测

韩世亮¹, 陈泰霖²

(1. 安丘市下株梧水库运营维护中心, 山东 安丘 262125; 2. 山东大学土建与水利学院, 山东 济南 250100)

摘要:为分析气候变化影响下黄河上游大型水库入库来水过程及梯级发电量的时程变化规律,以黄河上游龙羊峡-刘家峡梯级水库群为例,采用 Mann-Kendall 突变检验方法对唐乃亥和小川水文序列进行突变识别,在此基础上构建了考虑融雪过程的 HBV 水文模型,利用统计降尺度方法对 CanESM2 和 GFDL_ESM2G 两种气候模式 3 种气候变化情景(RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5)下的降水、气温数据进行空间降尺度处理,并将其驱动水文模型预测未来入库来水过程,构建黄河上游梯级联合发电调度模型分析气候变化对未来发电调度过程的影响。结果表明:黄河上游径流序列突变年份集中于 20 世纪 80 年代,且 2000 年之后径流量显著减少;气候变化将导致未来(2021—2050 年)汛期 6—9 月径流增加,非汛期径流显著减少;随着时间推移,不同气候变化情景下,龙羊峡和刘家峡两库的梯级发电量变化规律不同,RCP8.5 气候变化情景下,气候模式不确定性对其影响最大。

关键词:水力发电;气候变化;水文模型;梯级水库群;龙羊峡水库;刘家峡水库;黄河流域

中图分类号:TV697.1;P333 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2022)03-0032-07

Future power generation prediction of cascade reservoirs in upper reaches of the Yellow River under climate change//HAN Shiliang¹, CHEN Tailin²(1. *Operation and Maintenance Center of Xiaozhuwu Reservoir in Anqiu City, Anqiu 262125, China*; 2. *School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250100, China*)

Abstract: In order to analyze the inflow process of large reservoirs in the upper reaches of the Yellow River and the time history variation law of cascade power generation under the influence of climate change, the Longyangxia and Liujiaxia cascade reservoirs in the upper reaches of the Yellow River were taken as examples, and Mann-Kendall method was used to identify the abrupt change of the Tangnaihai and Xiaochuan hydrological series. On this basis, the HBV model considering the snow melting process was constructed, and the statistical downscaling method (SDSM) was used to analyze the CanESM2 and GFDL_ESM2G climate models. The rainfall and temperature data of three climate change scenarios (RCP2.6, RCP4.5 and RCP8.5) was downscaled in space and was used to drive hydrological model to predict future runoff. Finally, a cascade joint generation scheduling model in the upper Yellow River was constructed to reveal the impact of climate change on future generation scheduling process. The results show that the mutation years of runoff series in the upper Yellow River are concentrated in the 1980s, and the runoff decreases significantly after 2000. From 2021 to 2050, climate change will increase the runoff from June to September, and decrease the runoff in non-flood period. With the passage of time, the change law of cascade power generation of the Longyangxia and Liujiaxia Reservoirs is different. Under RCP8.5, the uncertainty of climate model has the greatest impact on the difference.

Key words: hydropower; climate change; hydrological model; cascade reservoir; Longyangxia Reservoir; Liujiaxia Reservoir; Yellow River Basin

气候变化和高强度人类活动影响降水、气温、蒸发等气象要素^[1-4],改变了流域水资源的时空分布,进而影响水库群的发电量过程^[5-7]。水库调度是实现水库正常运行和达到水资源时空重分配的重要举措^[8]。因此,预测未来气候变化条件下河川径流量和水力发电过程的时程变化规律,可为黄河干流水资源实现可持续开发利用提供科学依据。

现有预测未来径流的方法主要包括基于统计的数据驱动方法和具有物理机制的水文模型方法,前者主要包括经典回归分析、BP 神经网络、非线性时间序列分析和模糊数学方法等,通过建立气象要素与径流数据的统计关系来预测未来径流过程^[9-12];后者利用水文模型来模拟流域降雨与径流的关系,并通过未来的降雨推断径流的时程变化趋势,该类

方法综合考虑流域下垫面特征及流域产流、汇流特征,具有一定的物理机制,已得到了广泛应用^[12]。针对气候变化影响下的水力发电预测,国内外研究者开展了大量研究,并取得了丰硕的研究成果。例如:夏军等^[13]分析了气候变化对黄河流域水资源的影响,并指出 21 世纪 30 年代黄河流域水资源脆弱性将进一步加剧;袁林山等^[14]以黄龙滩水电站为例,揭示了气候变化影响下水库入库流量的不均性增加,降低了水电站的保证出力;刘志明^[15]通过耦合全球气候模式(global climate model,GCM)和梯级水库群联合供水优化调度,探明了未来气候变化对梯级水库群联合供水优化调度的影响。然而,已有研究以历史径流序列作为黄河流域梯级水库群联合调度模型输入的研究居多。例如:贾一飞等^[16]以黄河上游龙羊峡和刘家峡水库为例,构建了黄河上游水库群优化调度模型,并利用改进的逐步优化算法对模型进行求解分析;李克飞等^[17]构建了以龙羊峡-刘家峡-小浪底梯级水库群为核心的联合调度模型,模拟了汛期和用水高峰期黄河上下游不同水库的调度规律特征。黄河作为我国西北和华北的重要水源,也是农业灌溉高耗水区,气候变化严重制约了黄河流域水资源可持续利用,给粮食生产带来一定的影响^[13]。

本文以黄河上游龙羊峡-刘家峡梯级水库群为例,构建了龙羊峡和刘家峡梯级水库发电量最大优化调度模型,以分析气候变化对未来不同时期水库调度过程的影响。

1 研究区概况及研究数据

黄河横跨青藏高原、黄土高原和华北平原,最后汇入渤海,干流全长 5 464 km,流域面积约为 79.5 万 km²^[18]。黄河流域幅员辽阔,总库容超过 1 亿 m³的水库有 24 座,而龙羊峡和刘家峡水库分别具有多年和年调节能力,对流域发电、供水、防凌效益有重要影响。随着气候变化加剧,流域梯级水库群的运行方式发生了一定的改变^[19]。本文选择黄河上游刘家峡水库以上为研究区域,流域地处 96° E ~104.5° E 和 32° N ~37° N 之间,选择唐乃亥和小川水文站径流过程分别作为龙羊峡和刘家峡水库的入库过程。

娄伟等^[20]研究发现气候模式 CanESM2 和 GFDL_ESM2G 在黄河流域的适应性较好,同时为了降低单一气候模式不确定性对入库来水过程及梯级发电量的影响,本文选择这两种气候模式来获取未来降水、气温要素。研究所用数据为流域周边及内部 26 个基本气象站 1965—2010 年气象资料以及同

期唐乃亥和小川水文站逐日径流、美国国家环境预报中心(NCEP)的再分析数据以及国际耦合模式比较计划第五阶段(CMIP5)的 CanESM2 和 GFDL_ESM2G 两种气候模式数据。表 1 为 CMIP5 的两种气候模式研发机构及研究区域栅格经纬度范围。NCEP 数据和 CMIP5 的两种气候模式数据均选取 8 个预报因子,分别为 hur、psl、rhs、sfcWind、tas、va、ua 和 wap。

表 1 两种气候模式研发机构和研究区域栅格经纬度范围

气候模式	研发机构	经度 (东经)/ (°)	纬度 (北纬)/ (°)	气候变化 情景
CanESM2	加拿大气候 模拟与分析中心	95 ~ 105	32 ~ 37	RCP2.6
				RCP4.5
				RCP8.5
GFDL_ESM2G	NOAA 地球物理 流体动力学 实验室	95 ~ 105	32 ~ 37	RCP2.6
				RCP4.5
				RCP8.5

气象和水文资料分别来自国家气象共享服务网和黄河流域水文年鉴,NCEP 数据来自美国环境预报中心,GCM 数据从 <https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip5/> 下载。龙羊峡水库以上(以下简称“龙上流域”)来水用唐乃亥水文站实测径流数据,龙羊峡到刘家峡区间(以下简称“龙刘流域”)来水用龙羊峡水库出库加上区间入流获得。

2 研究方法

首先采用非参数 Mann-Kendall 突变检验方法对唐乃亥和小川水文站的年径流序列进行突变检验,识别出突变年份,在此基础上,选择突变点之前的时段构建 HBV 水文模型,目的是消除人类活动对水文过程的影响;其次,基于收集的 CanESM2 和 GFDL_ESM2G 两种气候模式数据,采用统计降尺度模型(statistical downscaling model,SDSM)对降水、气温要素进行降尺度处理,从而获得高分辨率的黄河上游未来情景数据;最后,构建梯级水库群发电调度模型,并采用粒子群优化算法(particle swarm optimization algorithm,PSO)对其进行求解。

2.1 非参数 Mann-Kendall 突变检验方法

Mann-Kendall 突变检验方法广泛应用于检测气象、水文序列的突变性特征^[21]。将统计量 UF 和 UB 曲线绘制在同一坐标系中,当 UF 统计值大于 0 时,意味着该序列呈上升趋势,反之下降,当两条曲线超过临界值 $U_{\alpha/2}$ 时,则认为其显著上升或下降。两条曲线在临界值区间内的交叉点即为突变年份,其计算公式详见文献[20]。

2.2 SDSM 模型

SDSM 模型是耦合多元线性回归分析和随机天

气发生器的统计降尺度模型,能够将低分辨率的 GCM 气候模式输出数据转换为气象站点气候要素的日序列。其降尺度过程为:先构建站点气象要素与 NCEP 大气环流因子之间的统计关系^[20, 22],然后利用 GCM 数据驱动 SDSM 模型,将 GCM 输出的未来气候变化情景降尺度到流域各个气象站点,生成各个站点的未来情景数据(降水、日最低和最高气温、风速等数据序列)。该模型广泛应用于欧洲、美洲、亚洲的气象、水文等领域,其基本原理为

$$\omega_i = \alpha_0 + \sum_{j=1}^n \alpha_j P_{ij} \tag{1}$$

$$R_i^{0.25} = \beta_0 + \sum_{j=1}^n \beta_j P_{ij} + e_i \tag{2}$$

$$T_i = \gamma_0 + \sum_{j=1}^n \gamma_j P_{ij} + e_i \tag{3}$$

式中: ω_i 为第*i*天降水的发生概率; R_i 为降水量; T_i 为气温; P_{ij} 为第*i*天对应的第*j*个预报因子; α 、 β 、 γ 为模型参数; e_i 为误差项; n 为预报因子总数。

2.3 HBV 水文模型

HBV 水文模型是概念性、半分布式融雪径流水文模型,由瑞典气象和水文研究所开发^[22]。HBV 水文模型由 5 个概念库(积雪、融水、土壤水分、快速径流和缓慢径流)和降雨-径流转化的产汇流过程组成,其中采用度日因子方法区分降水和降雪(若参数 TT 小于 0,则为降雪,否则为降水)。该模型共有 14 个参数,其中 5 个参数参与融雪过程(TT、CFMAX、SFCF、CWH 和 CFR),3 个参数(FC、LP 和 β)参与蓄水量的变化过程,参数 K_0 和 K_1 参与快速径流过程,参数 PERC 和 K_2 参与下渗和缓慢径流过程。由于黄河上游地区为高海拔山区,冬季气温较低,存在一定的降雪累积和融雪过程,故此采用 HBV 水文模型模拟高山气候区的水文演变过程,预测流域历史和未来水资源量。

2.4 模型适应性评价指标

采用纳什效率系数、相关系数和水量平衡误差 3 个评价指标对构建的龙上和龙刘流域 HBV 水文模型进行适应性评价,并采用粒子群优化算法对其进行参数校准,具体计算过程可参见文献[15]。

2.5 梯级水库群发电调度模型

黄河上游梯级水库群起调节作用的主要是龙羊峡和刘家峡水库,两水库分别为多年调节和年调节水库,有效库容分别为 193.5 亿 m³ 和 20.3 亿 m³,死水位分别为 2530 m 和 1696 m,正常高水位分别为 2600 m 和 1735 m,汛限水位分别为 2594 m 和 1726 m,多年平均发电量设计值分别为 59.24 亿 kW·h 和 57.6 亿 kW·h。

构建的梯级水库群发电量最大优化调度模型

如下:

$$\max(E) = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T (N_{kt} \Delta T) \tag{4}$$

式中: N_{kt} 为第*k*电站在*t*时段的平均出力,MW; ΔT 为调度时段时长,月; E 为梯级发电量,亿 kW·h。

模型约束条件包括水量平衡约束、水库水位约束、水库泄流约束和电站出力约束:

$$V_{k(t+1)} = V_{kt} + (Q_{in,kt} + Q_{b,kt} - Q_{kt}) \Delta T \tag{5}$$

$$H_{kt,min} \leq H_{kt} \leq H_{kt,max} \tag{6}$$

$$Q_{kt,min} \leq Q_{kt} \leq Q_{kt,max} \tag{7}$$

$$N_{kt,min} \leq N_{kt} \leq N_{kt,max} \tag{8}$$

式中: V_{kt} 、 $V_{k(t+1)}$ 分别为第*k*电站水库时段始末库容,亿 m³; $Q_{in,kt}$ 、 $Q_{b,kt}$ 、 Q_{kt} 分别为第*k*电站水库第*t*时段内入库流量、区间流量和出库流量,m³/s; $H_{kt,min}$ 、 $H_{kt,max}$ 分别为第*k*电站第*t*时段的水位下限和上限,m; H_{kt} 为第*k*电站第*t*时段的水位,m; $Q_{kt,min}$ 、 $Q_{kt,max}$ 分别为第*k*电站第*t*时段的出库流量下限和上限,m³/s; $N_{kt,min}$ 、 $N_{kt,max}$ 分别为第*k*电站第*t*时段的最小和最大出力,MW; N_{kt} 为第*k*电站第*t*时段的出力,MW。

为简便起见,将 1990 年 7 月至 2010 年 6 月时段定义为基准期,2021 年 7 月至 2031 年 6 月、2031 年 7 月至 2041 年 6 月、2041 年 7 月至 2051 年 6 月和 2051 年 7 月至 2061 年 6 月分别用 A、B、C、D 时期表示。利用相应时段 HBV 水文模型获得的未来来水过程驱动黄河上游龙羊峡-刘家峡梯级水库群联合优化调度,进而进行统计分析。龙羊峡-刘家峡梯级水库群联合调度方案如表 2 所示。

表 2 龙羊峡-刘家峡梯级水库群联合调度方案

气候模式	气候变化情景	系列长度
历史系列		基准期
CanESM2	RCP2.6	A、B、C、D
	RCP4.5	A、B、C、D
	RCP8.5	A、B、C、D
GFDL_ESM2G	RCP2.6	A、B、C、D
	RCP4.5	A、B、C、D
	RCP8.5	A、B、C、D

3 研究结果与分析

3.1 黄河上游主要水文站径流突变检验结果

图 1 为采用 Mann-Kendall 突变检验方法得到的唐乃亥和小川水文站 1965—2010 年年径流量突变检验结果。分析图 1 发现,唐乃亥和小川水文站的年径流量均于 1985 年发生突变,上下游之间径流量变异在时间上具有同步性。鉴于两站点的突变年份相同,因此选择龙上流域和龙刘流域的 HBV 水文模型预热期均为 1977 年,率定期和验证期分别为 1978—1981 年和 1982—1984 年。

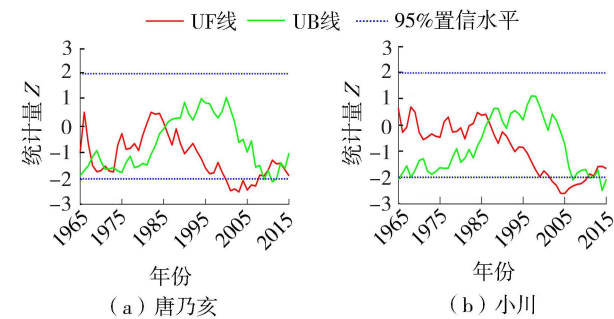


图1 黄河上游主要水文站 1965—2010 年径流序列突变检验结果

UF 曲线的变化趋势表明,两个水文站的 UF 曲线在突变前均介于统计量 $Z=0$ 附近,但突变后均呈下降趋势,尤其是 2000 年之后,下降趋势超过了 95% 置信水平线,即两个水文站的年径流量自 1985 年之后逐年减少,21 世纪初期减少趋势显著,这可能是因为突变年之后,我国处于经济社会的高速发展期,用水量显著增加,这与李雯晴等^[10]得到的人类活动是径流减少的主要影响因素的结论一致。

3.2 SDSM 模型和 HBV 水文模型适应性评估

3.2.1 SDSM 模型

图 2 和图 3 为 1965—2005 年龙上流域和龙刘流域对应的面月实测降水量、月平均气温与 SDSM 模型模拟的月降水量、月平均气温的适应性评价结果。分析图 2 可以发现:①两种气候模式下,SDSM 模型模拟的月降水量、月平均气温与实测值的相关性较好,但降水的相关性低于气温;②龙上流域 CanESM2 气候模式下获得的模拟月降水量、月平均气温与实测值的拟合结果优于 GFDL_ESM2G 气候模式,月降水量 CanESM2 和 GFDL_ESM2G 气候模式下对应的相关系数分别为 0.92 和 0.90,月平均气温的相关系数分别为 0.98 和 0.97;③龙刘流域

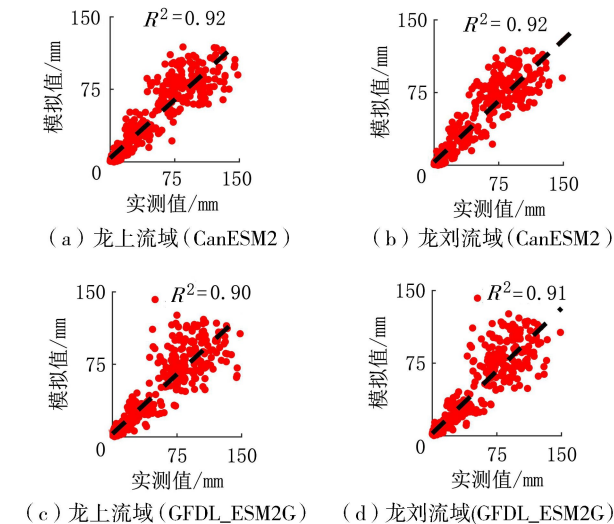


图2 1965—2005 年龙上和龙刘流域月降水量的适应性评估结果

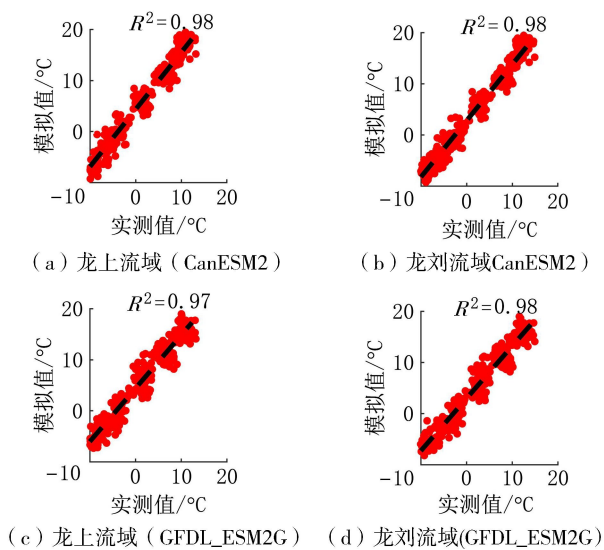


图3 1965—2005 年龙上和龙刘流域月平均气温的适应性评估结果

CanESM2 和 GFDL_ESM2G 气候模式下模拟月降水量和实测月降水量的相关系数分别为 0.92 和 0.91,模拟月平均气温与实测月平均气温的相关系数均为 0.98;④小雨至中雨事件下,模拟值与实测值相关性较好,而大雨事件下其相关性较差,即气候变化影响下,SDSM 模型对极端大雨事件的捕捉能力较差,且存在气候模式不确定性。

根据 SDSM 模型模拟得到的气象要素(降水、气温、风速、太阳辐射等),采用 Penman-Monteith 公式计算出各气象站点逐日潜在蒸发量,并利用 ArcGis 软件中的泰森多边形方法计算出面潜在蒸发量,最后将降水、气温、蒸发等数据驱动 HBV 水文模型,模拟流域未来水文过程。

图 4 为两个流域的月尺度未来径流量(2020—2050 年)与历史时期(基准期 1965—2005 年)径流量的相对变化结果(图中柱状图为不同气候变化情景下两种气候模式的集合平均值)。由图 4 可以看

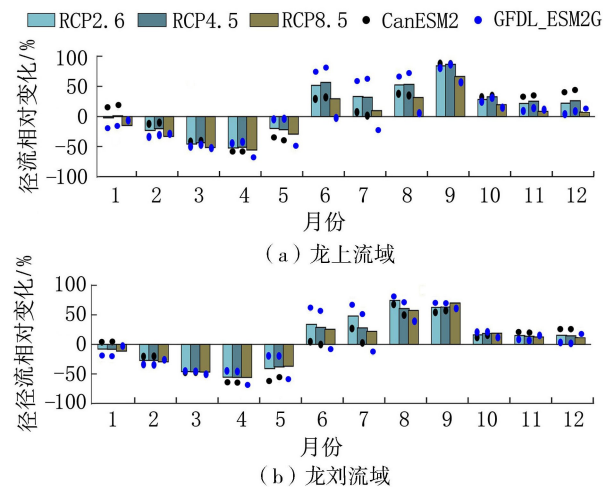


图4 两种气候模式下流域未来径流变化情况

出:①较基准期,龙上和龙刘流域未来径流年内相对变化趋势相同,整体呈现为1—5月径流量减少,6月至次年2月径流量增加,尤其是汛期6—9月显著增加的趋势,这意味着未来汛期(丰水期)水资源供需矛盾将有所缓解,而非汛期(枯水期)供需矛盾加剧;②以龙上流域为例,未来3—4月径流相对减少量大于50%,而6、8和9月径流相对增加量大于50%,且不同气候变化情景下差异较大,如6月RCP2.6情景下,径流相对变化量为58.63%,而RCP8.5情景下仅为32.46%;③对比两种气候模式3种气候变化情景下的径流相对变化量可以看出,GFDL_ESM2G模式下汛期的径流相对变化量明显高于CanESM2模式,即气候模式不确定性对未来径流量预测的影响较大。

3.2.2 HBV 水文模型

HBV 水文模型采用粒子群优化算法进行参数校准(目标函数为纳什效率系数),辅助使用水量平衡误差和相关系数对其进行精度评价。

表3和图5为两个流域率定期和验证期的模型精度评价和水文过程模拟结果。由表3可知,龙上和龙刘流域率定期和验证期模拟精度较好,且前者优于后者(纳什效率系数更大且水量平衡误差更小);龙上和龙刘流域的率定期纳什效率系数分别为0.83和0.74,验证期分别为0.72和0.71,这意味着率定期模型模拟精度优于验证期。由图5可以看出,龙上和龙刘流域的水文模拟过程与实测水文

表3 HBV 水文模型率定期和验证期精度评价结果

流 域	率定期			验证期		
	纳什效率系数	相关系数	水量平衡误差	纳什效率系数	相关系数	水量平衡误差
龙上流域	0.83	0.92	20.52	0.72	0.87	40.65
龙刘流域	0.74	0.76	82.03	0.71	0.74	86.35

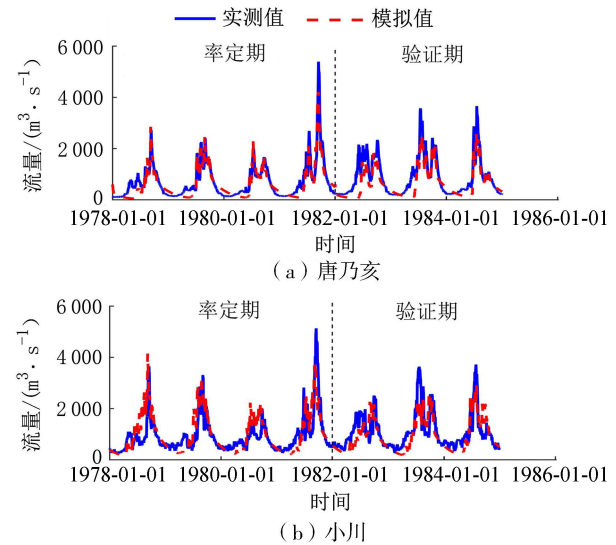


图5 HBV 水文模型率定期和验证期水文模拟过程

过程的变化趋势基本一致,但不同时段二者之间的误差差异显著,汛期模型拟合程度较好,非汛期较差,这可能是因为黄河上游属于半湿润、半干旱气候区,而 HBV 水文模型采用的蓄满产流方式对枯水期水文过程的捕捉能力较差。

3.3 梯级水库群联合调度模拟结果

图6为基于历史实测入库来水过程和 HBV 水文模型模拟的未来入库来水过程,采用粒子群优化算法对梯级水库群发电调度模型进行求解,得到的基准期和未来不同代际龙羊峡水库、刘家峡水库多年平均发电量及龙羊峡-刘家峡梯级水库群多年平均发电量结果。

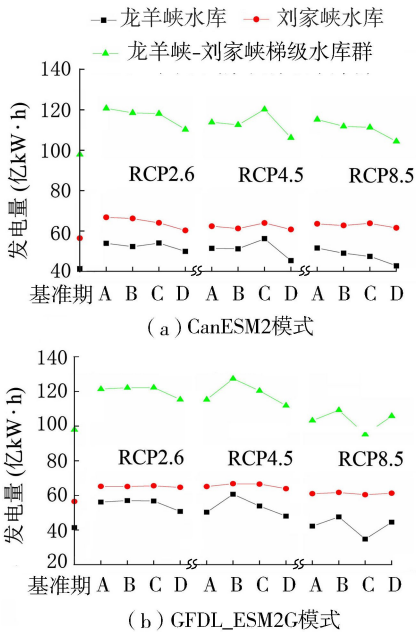


图6 不同气候模式下龙羊峡-刘家峡梯级水库群联合调度模拟结果

a. 较基准期调度结果,两种气候模式不同气候变化情景下,龙羊峡水库、刘家峡水库的多年平均发电量均有所增加,龙羊峡水库多年平均发电量增幅为3.35%~35.8%,刘家峡水库多年平均发电量增幅为6.79%~18.16%,龙羊峡-刘家峡梯级水库群多年平均发电量增幅为6.62%~23.3%。其中,龙羊峡水库发电量变化较大,刘家峡水库发电量变化相对平稳。

b. 从同一气候变化情景下不同代际径流的调度模拟结果来看,除少数代际调度结果较上一代际调度结果增加外,龙羊峡水库和龙羊峡-刘家峡梯级水库群多年平均发电量均呈下降趋势。

c. 对于同一气候模式,RCP2.6气候变化情景下龙羊峡-刘家峡梯级水库群多年平均发电量变化较为平稳,RCP4.5气候变化情景下梯级水库群多年平均发电量呈现先增后减现象,RCP8.5气候变

化情景下两种气候模式得到的梯级水库群多年平均发电量变化规律不同,GFDL_ESM2G 模式下,梯级水库群多年平均发电量整体呈“增大—减小—增大”的变化规律,而 CanESM2 模式下,梯级水库群多年平均发电量逐年减小。

4 结 论

- a. 黄河上游径流序列突变年份集中于 20 世纪 80 年代,且 2000 年之后显著下降,这可能与工业、农业取用水过程相关。
- b. 不同气候模式下,流域未来(2021—2050 年)汛期 6—9 月径流量增加,但非汛期径流量显著减少,尤其是 3—4 月,且 GFDL_ESM2G 模式下预测的径流量大于 CanESM2 模式。
- c. 较历史时期,流域未来梯级发电量增加,且随着时间的推移,不同气候变化情景下,龙羊峡—刘家峡梯级水库群多年平均发电量的变化趋势不同,且 RCP8.5 气候变化情景下气候模式不确定性对流域径流预估的影响较大。
- d. 由于气候模式和降尺度方法等不确定性均会对水库来水预测产生重要影响,因此,对多种气候模式的模拟值取集合平均,可一定程度上降低气候模式输出不确定性的影响。

参考文献:

[1] 刘攀,张晓琦,邓超,等. 水库适应性调度初探[J]. 人民长江, 2019, 50 (2) : 1-5. (LIU Pan, ZHANG Xiaoqi, DENG Chao, et al. Study on key technology for adaptive operation of reservoir[J]. Yangtze River, 2019, 50 (2) : 1-5. (in Chinese))

[2] 黄显峰,吴志远,李昌平,等. 基于改进粒子群-逐次逼近法的水库调度图多目标优化[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41 (2) : 1-7. (HUANG Xianfeng, WU Zhiyuan, LI Changping, et al. Multi-objective optimization of reservoir operation chart based on IPSO-DPSA [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41 (2) : 1-7. (in Chinese))

[3] 韩先明,左德鹏,李佩君,等. 雅鲁藏布江流域植被覆盖变化及其对气候变化的响应[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41 (1) : 16-23. (HAN Xianming, ZUO Depeng, LI Peijun, et al. Spatiotemporal variability of vegetation cover and its response to climate change in Yarlung Zangbo River Basin [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41 (1) : 16-23. (in Chinese))

[4] 班璇,师崇文,郭辉,等. 气候变化和水利工程对丹江口大坝下游水文情势的影响[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40 (4) : 1-7. (BAN Xuan, SHI Chongwen, GUO

Hui, et al. Effects of climate change and water conservancy projects on hydrological regime downstream of Danjiangkou Dam [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40 (4) : 1-7. (in Chinese))

[5] 吴丽,张爱静. 气候变化和人类活动对大凌河上游流域径流的影响[J]. 水利水电科技进展, 2016, 36 (2) : 10-15. (WU Li, ZHANG Aijing. Effects of climate change and human activities on runoff in upper Daling River Basin [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36 (2) : 10-15. (in Chinese))

[6] 甘晓静,王义民,张泽中. 环境变化对径流的影响研究综述[J]. 水资源与水工程学报, 2011, 22 (5) : 74-77. (GAN Xiaojing, WANG Yimin, ZHANG Zezhong. Review of influence of environment change on runoff [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2011, 22 (5) : 74-77. (in Chinese))

[7] 吴安琪,石朋,陆美霞,等. 气候变化对淮河径流及洪峰流量的影响[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2021, 43 (1) : 13-17. (WU Anqi, SHI Peng, LU Meixia, et al. Impacts of climate change on runoff and peak flow of Huai River [J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2021, 43 (1) : 13-17. (in Chinese))

[8] FAN J L, HU J W, ZHANG X, et al. Impacts of climate change on hydropower generation in China [J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2020, 167 : 4-18.

[9] 武桂芝,王程. 基于拟合改进的径流灰色预测模型研究[J]. 人民黄河, 2020, 42 (10) : 34-36. (WU Guizhi, WANG Cheng. Research on runoff grey prediction based of improved fitting [J]. Yellow River, 2020, 42 (10) : 34-36. (in Chinese))

[10] 李雯晴,刘招,王丽霞,等. 联合 EEMD 与 BP 神经网络的灌区水源情势预测研究[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39 (10) : 108-114. (LI Wenqing, LIU Zhao, WANG Lixia, et al. Predicting change in water availability for Jinghui irrigation district using ensemble empirical mode decomposition and back propagation neural network [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39 (10) : 108-114. (in Chinese))

[11] 孙贺阳. 基于 SWAT 模型塔布河流域水文模拟与预测[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2018.

[12] CHEN L, SUN N, ZHOU C, et al. Flood forecasting based on an improved extreme learning machine model combined with the backtracking search optimization algorithm [J]. Water, 2018; 10 (10) : 1362-1368.

[13] 夏军,彭少明,王超,等. 气候变化对黄河水资源的影响及其适应性管理[J]. 人民黄河, 2014, 36 (10) : 1-4. (XIA Jun, PENG Shaoming, WANG Chao, et al. Impact of climate change on water resources and adaptive management in the Yellow River Basin [J]. Yellow River,

2014,36(10):1-4. (in Chinese))

[14] 袁林山,张家余,张力,等. 气候变化对水电站发电出力的影响研究[J]. 中国农村水利水电,2020(9):231-235. (YUAN Linshan,ZHANG Jiayu,ZHANG Li,et al. Research on the impacts of climate change on the power generation of hydropower station[J]. China Rural Water and Hydropower,2020(9):231-235. (in Chinese))

[15] 刘志明. 气候变化影响下汉江上游梯级水库群联合供水优化调度研究[D]. 武汉:长江科学院,2019.

[16] 贾一飞,董增川,林梦然. 龙羊峡-刘家峡水库连续枯水年优化调度研究[J]. 水电能源科学,2019,37(3):54-57. (JIA Yifei,DONG Zengchuan,LIN Mengran,et al. Study on optimal scheduling of Longyangxia-Liujiaxia Reservoirs in continuous low hydrological years[J]. Water resources and Power,2019,37(3):54-57. (in Chinese))

[17] 李克飞,武见,赵新磊,等. 应对干旱的黄河梯级水库群调度规律研究[J]. 水力发电,2019,45(8):90-93. (LI Kefei,WU Jian,ZHAO Xinlei,et al. Study on scheduling law of Yellow River cascade reservoirs for drought resistance[J]. Water Power,2019,45(8):90-93. (in Chinese))

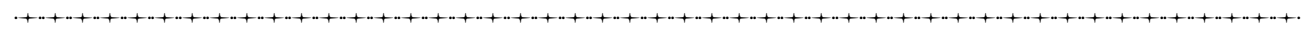
[18] 张永永,李福军,彭少明,等. 应对干旱的黄河干流骨干水库群联合调度研究[J]. 人民黄河,2019,41(9):31-35. (ZHANG Yongyong,LI Fujun,PENG Shaoming,et al. Study on the joint operation of key reservoirs to cope with drought in the Yellow River main stream[J]. Yellow River,2019,41(9):31-35. (in Chinese))

[19] 王煜,尚文绣,彭少明. 基于水库群预报调度的黄河流域干旱应对系统[J]. 水科学进展,2019,30(2):175-185. (WANG Yu,SHANG Wenxiu,PENG Shaoming. Yellow River Basin drought response system based on the prediction and operation of cascade reservoirs[J]. Advances in Water Science,2019,30(2):175-185. (in Chinese))

[20] 娄伟,李致家,刘玉环. 多模式下泾河上游流域未来降水变化预估[J]. 南水北调与水利科技,2020,18(6):1-16. (LOU Wei,LI Zhijia,LIU Yuhuan. Prediction of future precipitation changes in upper Jinghe River Basin using multiple models[J]. South-North Water Transfers and Water Science and Technology,2020,18(6):1-16. (in Chinese))

[21] 杭宜铖,范敏韬,刘智勇. 基于 REOF 的珠江三角洲河网区水位时空变异特征分析[J]. 水资源保护,2022,38(2):139-146. (HANG Yicheng,FAN Mintao,LIU Zhiyong. Spatiotemporal variation of water level in Pearl River Delta network area based on REOF[J]. Water Resources Protection,2022,38(2):139-146. (in Chinese))

[22] HUANG J,ZHANG J C,ZHANG Z X,et al. Simulation of extreme precipitation indices in the Yangtze River Basin by using statistical downscaling method (SDSM)[J]. Theoretical and Applied Climatology,2012,108:325-343. (收稿日期:2021-04-12 编辑:熊水斌)



《水利水电科技进展》征订启事

(邮发代号:28-244, CN 32-1439/TV, ISSN 1006-7647, 双月刊,A4 开本)

《水利水电科技进展》由河海大学主办,是中国科学引文数据库(CSCD)核心期刊、全国中文核心期刊、中国科技核心期刊和 RCCSE 核心期刊。曾先后被评为中国高校百佳科技期刊、中国高校优秀科技期刊、全国水利系统优秀期刊、华东地区优秀期刊和江苏省优秀期刊。主要刊登水科学、水工程、水资源、水环境、水管理方面的科技论文,主要栏目有水问题论坛、研究探讨、工程技术、专题综述、水管理、国外动态等,适合水科学、水工程、水资源、水环境领域的科研、工程、管理人员以及大专院校师生阅读。

《水利水电科技进展》由邮局发行,邮发代号:28-244,2022 年每期定价 15 元,全年 6 期共计 90 元。可在全国各地邮局订阅,也可直接向编辑部订阅。

编辑部地址:南京市西康路 1 号 河海大学《水利水电科技进展》编辑部
 邮政编码:210098 电话/传真:025-83786335
 网址:http://jour.hhu.edu.cn
 E-mail:jz@hhu.edu.cn 或 jz1981@vip.163.com
 微信公众号:“水利水电科技进展”或“slsdkjjz”

