

拉萨河干流梯级水库库容-径流响应关系

黄 草^{1,2,3}, 黄梦迪¹, 胡铁松⁴, 胡国华^{1,2,3}, 李志威^{1,2,3}

(1. 长沙理工大学水利工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114;
3. 洞庭湖水环境治理与生态修复湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114;
4. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘要:针对新建或待建水库群实测径流系列不足的问题,采用 MODSIM-DSS 模拟生成拉萨河干流 5 座梯级水库群建设后的日径流系列,采用水文变异指标法及变化范围法 (IHA-RVA),分析现状和规划期的拉萨河水文情势变化。结果表明,拉萨河水库群对单项水文指标的累积影响有正有负,单项指标改变度最大月份的为 3 月和 10 月,月平均流量的改变度均大于 0.9,属于重度改变;现状条件下唐加水文站水文情势综合改变度为 0.21,为轻度改变,重度改变指标占总指标数量 7.8%;规划期唐加水文站的水文情势综合改变度为 0.41,为中度改变,重度改变指标占总指标数量 28.1%;综合改变度随库容系数的增大而增大,增大速率呈现“小-大-小”的特征。

关键词:梯级水库;水文情势;IHA-RVA;综合改变度;拉萨河

中图分类号:TV212

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2020)01-0064-07

Storage-runoff response of cascade reservoirs in mainstream of Lhasa River//HUANG Cao^{1,2,3}, HUANG Mengdi¹, HU Tiesong⁴, HU Guohua^{1,2,3}, LI Zhiwei^{1,2,3} (1. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Key Laboratory of Water-Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha 410114, China; 3. Hunan Key Laboratory of Dongting Lake Aquatic Eco-Environmental Control and Restoration, Changsha 410114, China; 4. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: To solve the problem of insufficient measured runoff data for new-built or to-be-built cascade reservoirs, five comparable daily runoff series of the Lhasa River were generated by using MODSIM-DSS for the post construction scenario. The indicators of hydrologic alteration and range of variability approach (IHA-RVA) was used to analyze the hydrological regime variation of the Lhasa River during the current situation and in the planning period. The results show that the cascade reservoirs have positive or negative accumulated impacts on a single indicator. The severest changing degree for a single indicator occurs in March and October, during which the changing degree of the monthly averaged discharges are both greater than 0.9, being regarded as a severe change. The comprehensive hydrologic changing degree (CHCD) in the current situation is 0.21, belonging to a slight change, in which the severe changed indicators account for 7.8% of the total number. The CHCD in the planning year is 0.41, belonging to a medium change, and the severe changed indicators account for 28.1% of the total number. The CHCD increases as the increase of the total storage coefficient with a slow-fast-slow increasing rate.

Key words: cascade reservoir; hydrological regime; IHA-RVA; comprehensive hydrologic changing degree; Lhasa River

水库的建设与运行对人类调控与优化水资源的时空分布,促进经济社会可持续发展做出了重要贡献^[1-2],但也改变河流的自然流态,对河流生态系统产生了较多的负面影响^[3-6]。河流径流的大小及其时间过程是影响河流生态系统(包括河床河滩栖息地和水生生物群落)的主要驱动力^[7]。因此,传统

的水库-生态响应研究以水库-径流响应研究为基础,以恢复筑坝前的自然径流过程为理想目标,众多学者围绕水库或水库群系统对河流径流改变的定量评价、补偿技术与方法等开展了研究。Richter等^[8-10]提出的水文变异指标法及变化范围法(IHA-RVA)是应用最广泛的水库系统对河流水文情势及

基金项目:国家自然科学基金(51709019;91647204);湖南省自然科学基金(20195550667)

作者简介:黄草(1985—),男,讲师,主要从事水文水资源研究。E-mail:huangcao@outlook.com

通信作者:李志威(1984—),男,副研究员,主要从事高原河流动力学研究。E-mail:lzhiwei2009@163.com

生态影响的评价方法,它先建立一套评估生态水文变化过程的指标体系,包含月平均流量、极端流量和持续时间、极值出现时机、高低流量脉冲频率和持续时间、涨水落水速率等5个方面32个指标,然后计算这些指标在水库建设前后的均值及变差系数的变化,以此评价水库运行前后水文情势的改变情况。变化范围法(IHA-RVA)在国内外有较多的应用与发展,如Magilligan等^[3]采用IHA指标体系分析断面的流量变化情况以研究大坝的修建对河流原有水文情势的改变;Gao等^[11]采用IHA指标分析了美国189处大坝河流水文改变情况,并指出IHA在指导水库群调度中的不足,即需要找寻出一套简单的IHA指标体系以取代常用的33个参数,以便设计出合乎逻辑的水库运行指导规则;张洪波等^[12-16]从实际问题着手,以变化范围法为基础分别提出了具有一定针对性的改进方法或生态水文指标体系。

现有研究在单水库修建前后水文情势的变化方面成果较多^[17-18],但水库群系统对河流生态系统的累积效应的研究方法与成果不足。水库群系统对河流生态系统的影响与单水库系统有所不同,甚至相反^[19-20]。水库群对河流生态系统存在修复和累积效应,单水库对水文情势及河流生态影响的线性叠加不等于水库群对河流水文情势和生态的综合影响。同时,流域梯级开发及水库群分期建设导致用于研究水库群修建前后的水文序列长度不一致,特别是水库群修建后的水文序列代表性不足。基于此,本文以拉萨河的梯级水库开发为例,以1976—2016年长系列日流量系列为基础,采用MODSIM-DSS构建拉萨河水库群调度模型,模拟生成现状年以及规划年不同数目的水库群运行条件下主要水文站的日流量过程;采用变化范围法研究不同数目的水库群系统对拉萨河径流的累积影响与规律,建立流域库容系数(水库兴利库容与坝址处多年平均径流量的比值,是反映水库对径流量调控能力的无量纲参数)与水文情势综合改变度的响应关系,为深入认识新建或待建水库群的径流与生态影响以及拉萨河库容-径流的互反馈机制提供科学基础,也为开展拉萨河梯级水库综合优化生态调度提供参考。

1 研究区概况

拉萨河位于西藏中南部,全长568 km,流域面积3.18万 km²,是雅鲁藏布江五大支流之一。目前,拉萨河干流已建成旁多和直孔两座水电站,流域内尚有3座水库处于规划阶段(图1),已建和规划水库的总库容为20.6亿 m³(表1),占拉萨水文站多年平均径流量的22.6%。

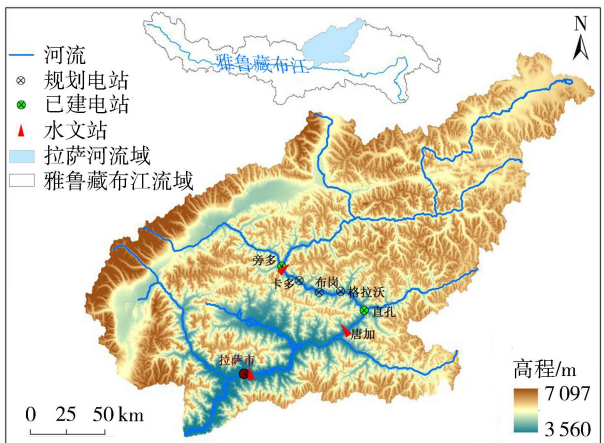
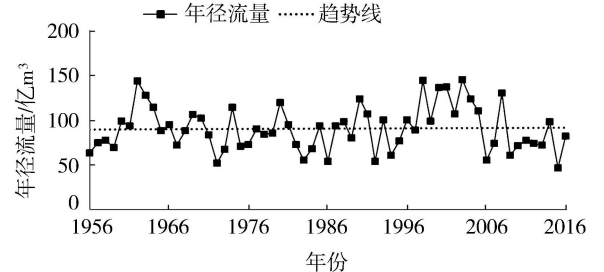


图1 拉萨河流域水系及干流梯级电站分布

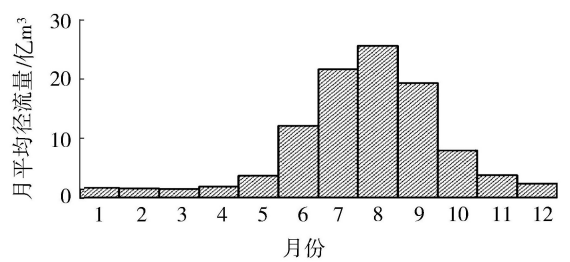
表1 拉萨河干流梯级水电站特征参数

水电站名称	总库容/亿 m ³	装机容量/万 kW	控制流域面积/km ²	多年平均流量/(m ³ ·s ⁻¹)	建设情况	调节性能
旁多	12.22	160	16370	189	2015年建成	年调节
卡多	1.14	90	16700	193	规划	日调节
布岗	2.63	90	17100	198	规划	日调节
格拉沃	2.35	90	17400	201	规划	日调节
直孔	2.24	100	20100	237	2007年建成	日调节

拉萨河流域年平均降水量400~500 mm,拉萨水文站1956—2016年多年平均径流量为90.9亿 m³,占雅鲁藏布江总径流量的6.69%,天然径流的年际变化相对稳定,不存在明显的突变年份^[21];年内天然径流主要集中在夏季,6—9月径流量约占全年径流量的76%(图2)。拉萨河干流现有旁多、唐加和拉萨3个水文站(表2)。



(a) 1956—2016年径流量



(b) 月平均径流量

图2 拉萨水文站1956—2016年径流量过程及月平均径流量

表2 拉萨河干流水文站基本情况

水文站名称	位置	多年平均降水量/mm	日径流系列
旁多	拉曲、达隆曲汇合口下游约2 km	544.3	1976年至今
唐加	唐加乡,原直孔水文站1963年下迁	531.6	1960年至今
拉萨	拉萨市大桥上游134 m	447.7	1955年至今

2 研究方法

2.1 水文情势改变度评价方法

水库群的建设与运行改变了河流的水文情势,量化水文情势的改变趋势和改变程度,有利于调整现行的水库调控措施和规则,尽量减小水文情势的改变,从而减小对河流生态系统的负面影响。变化范围法是通过分析河流受扰动前后32个水文因子的数值变化来确定河流生态情势的改变,在我国黄河流域、长江流域、淮河流域均有应用^[22-24]。变化范围法的水文参数及其生态意义如表3所示。

统计水库建设前后变化范围法(IHA-RVA)水文指标参数的均值和变差系数,共计64个特征参数,反映不同时间序列水文情势的特征。均值和变差系数计算公式为

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

$$C_v = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

式中: \bar{x} 为指标平均值; C_v 为指标变差系数; x_i 为指标值; n 为某一指标值参与统计的总个数。对于月平均流量和流量过程的频率, n 为时间序列的总年数;对于某一流量过程的流量、持续时间、平均上升速率和平均下降速率, n 为时间序列内出现该流量过程的总次数。

参数的改变度计算公式为

$$d_k = \frac{1 - \exp(-av_k)}{1 + \exp(-av_k)} \quad (3)$$

其中

$$v_k = \frac{P_{kA} - P_{kB}}{P_{kB}}$$

表3 变化范围法(IHA-RVA)中水文指标参数及生态意义

IHA统计组	水文指数	生态学意义
流量	各月平均流量	满足水生生物及沿岸动植物的用水需求,反映当地径流年内分配
年极端流量	最大1d、3d、7d、30d、90d平均流量,最小1d、3d、7d、30d、90d平均流量	满足植被扩张;生物体忍耐平衡;河渠地形塑造;自然栖息地物理条件培养;河流和漫滩的养分交换;湖、池塘、漫滩的植物群落分布的需求;影响河道生态系统稳定性
年极端流量发生时间	年最小、最大流量发生时间	满足鱼类产卵要求,影响生物繁殖期栖息地条件
高低频脉冲频率及发生时间	年高、低流量脉冲发生次数及平均历时	影响植物所需土壤湿度的频率与尺度,促进或抑制生物进化
水情变化率及变化频率	上涨率、下降率年平均值及上涨、下降次数	影响植物干旱压力;促成岛上漫滩,有机物诱捕;影响水生生物干燥胁迫

式中: d_k 为第 k 个参数的改变度,是指受影响后河流水文情势第 k 个特征参数相对于受影响前的改变程度; P_{kA} 、 P_{kB} 分别为第 k 个参数干扰前和干扰后的值;参数 $k=1 \sim 64$, $a=3$ 。当 $|d_k| < 0.33$ 时,参数 k 为轻度改变; $0.33 \leq |d_k| < 0.67$,参数 k 为中度改变; $|d_k| \geq 0.67$,参数 k 为重度改变。

以所有特征参数改变程度的平均值,表示受影响后河流水文情势的整体改变情况,即整体改变度 D_T :

$$D_T = \frac{1}{64} \sum_{k=1}^{64} |d_k| \quad (4)$$

同样,当 $|D_T| < 0.33$ 时,河流水文情势整体为轻度改变; $0.33 \leq |D_T| < 0.67$,河流水文情势整体为中度改变; $|D_T| \geq 0.67$,河流水文情势整体为重度改变。

2.2 径流模拟与生成

2.2.1 梯级电站调度规则

旁多水库正常蓄水位为4 095 m,防洪限制水位4 093.5 m,死水位4 045 m,总库容12.3亿 m^3 ,兼具灌溉、防洪、发电等综合效益,装机容量160 MW,多年平均发电量为5.38亿 $kW \cdot h$ 。旁多水库每年6月初开始蓄水,在保证灌溉和供水水量基础上,按保证出力进行发电调度,蓄至防洪限制水位后维持该水位至9—12月水库维持正常蓄水位运行,从翌年1月初开始加大水库出流,至5月末消落至水库防洪限制水位以下。

直孔水库正常蓄水位为3 888 m,汛限水位为3 885 m,死水位为3 878 m,总库容为2.24亿 m^3 ,主要任务为发电,兼具防洪作用,装机容量为100 MW,多年平均发电量为4.11亿 $kW \cdot h$ 。直孔水库每年6月初开始蓄水,按保证出力进行发电调度,蓄至防洪限制水位后维持该水位至9月,9—12月水库按照天然径流发电出流,维持正常蓄水位运行,从翌年1月初开始加大水库出流,至5月末消落至水库死水位。

依据相关规划卡多、布岗、格拉沃水库正常蓄水位分别为4 030 m、3 988 m和3 944 m;死水位分别为4 015 m、3 973 m和3 929 m;装机容量均为90 MW。

规划水库的调度规则参考直孔水库。

2.2.2 调度模型构建及验证

拉萨河干流梯级电站修建之前的长系列日均流量资料(1976—2000年)较为完整,但梯级电站修建之后的流量系列(2008—2016年)较短,资料代表性不足;规划水电站对河流水文情势的影响尚无资料可用。为了分析不同工况下,水库群调度对拉萨河水文情势的累积影响,采用 MODSIM-DSS 构建拉萨河干流梯级电站调度模型(图3),模拟生成不同工况下水库群调度后的长系列逐日平均流量系列(表4)。MODSIM-DSS 是由美国科罗拉多州立大学开发的水资源综合管理与调度软件,具有开源、可视化、大规模等特征,在国内外有较多应用实例^[25-26]。

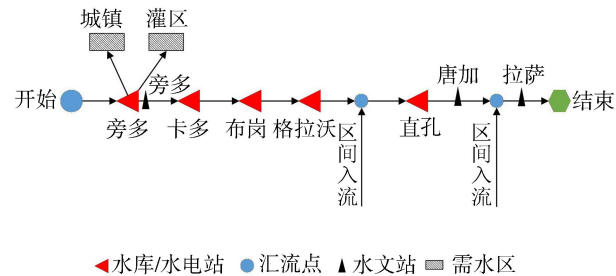


图3 拉萨河干流梯级电站及水系概化

拉萨河干流梯级电站调度模型采用逐级模拟的方式,即先以旁多水文站1976—2000年实测日均流量数据作为模型的输入数据,扣除城镇和灌区引水量,依照旁多水库调度规则进行模拟调度,旁多水库出流数据作为下一级水库的输入数据。

为验证 MODSIM-DSS 模拟径流的有效性,采用2015—2016年的唐加水文站实测日均流量与工况2的唐加水文站模拟日均流量进行对比分析,结果表明模拟日均流量与实测日均流量存在良好的相关性,相关系数为0.975,纳什效率系数为0.947,如图4所示。

3 结果分析

基于5种工况下模型输出的1976—2000年逐日平均流量数据与梯级电站修建前的日平均流量数据,采用 IHA-RVA 计算唐加水文站的水文情势改变度,结果如图5所示。计算结果表明,工况2(现状

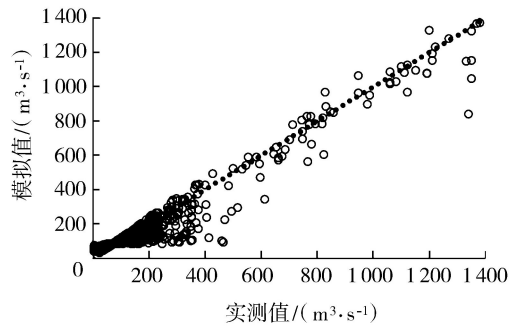


图4 MODSIM-DSS 模拟与实测日平均流量比较

条件)时,唐加水文站水文情势综合改变度为0.21,64个生态水文指标中,5个指标为重度改变,7个指标为中度改变,52个指标为轻度改变,重度改变指标占总指标数量的7.8%,可见旁多和直孔电站的运行已经对拉萨河的水文情势产生了一定的影响。工况5(剩余3座规划水库全部建成后)时,唐加水文站水文情势综合改变度为0.41,18个指标为重度改变,10个指标为中度改变,36个指标为轻度改变,重度改变指标占总指标数量28.1%。从工况1至工况5,唐加站水文情势综合改变度逐渐增大,重度改变的水文指标数目持续增加,轻度改变的水文指标数目减少(图6)。综合旁多、唐加和拉萨水文站的结果分析,随着水库数目的增加,多数指标的改变度逐渐增大,即水库群对水文情势的影响更显著;沿着河流流向,下游唐加水文站的水文情势综合改变度大于上游旁多水文站;若两站之间无水库,区间入流对下游站的水文情势改变有一定的补偿作用,即拉萨水文站综合改变度小于唐加水文站。

3.1 月平均流量变化

唐加水文站多年月平均径流量变化表现为:全年径流总量轻微减少(受城市供水和灌区灌溉用水影响),但年内径流分布差异加大(图5(a))。年内各月径流均值改变度最大的是3月和10月,其中3月受水库群放水影响,月流量均值和变差系数均大幅改变,改变度分别为0.97和0.91,属于重度改变;10月受水库群蓄水影响,月平均径流量减少了27.4%(图5(b))。随着水库数量增加,其累积影响越显著,且非汛期的累积影响大于汛期。

表4 拉萨河干流梯级电站建设前后径流资料

工况	梯级电站	总库容/ 亿 m ³	调节库容/ 亿 m ³	日均流量资料年份		
				建设前	建设后	建设后(模型生成)
工况1	直孔	2.24	1.07	1976—2000年	2008—2015年	1976—2000年
工况2	直孔、旁多	14.46	9.18	1976—2000年	2015—2016年	1976—2000年
工况3	直孔、旁多、卡多	15.60	10.02	1976—2000年	无	1976—2000年
工况4	直孔、旁多、卡多、布岗	18.23	11.83	1976—2000年	无	1976—2000年
工况5	直孔、旁多、卡多、布岗、格拉沃	20.58	13.39	1976—2000年	无	1976—2000年

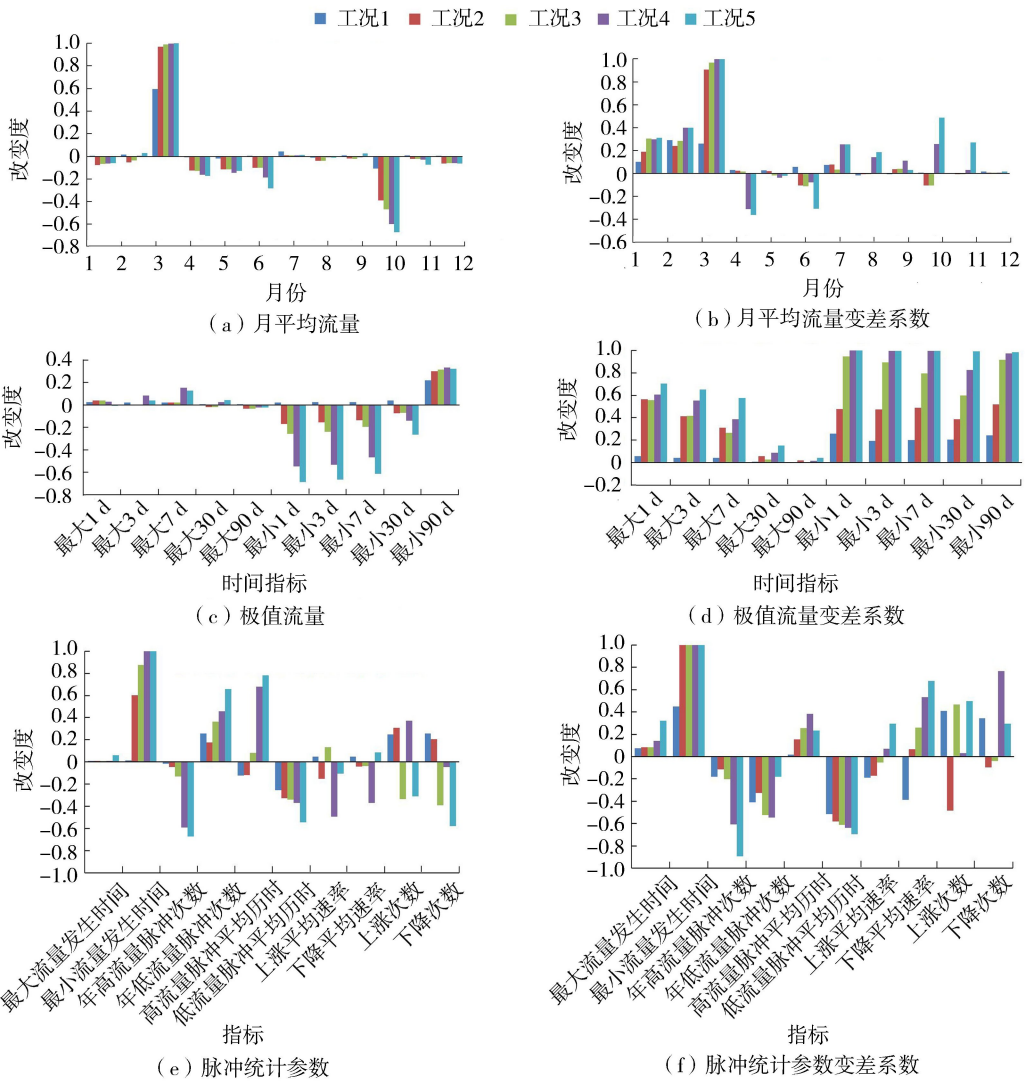


图5 不同工况下唐加水文站32项水文情势指标均值及变差系数改变度

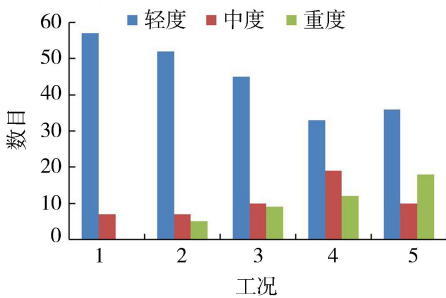


图6 唐加水文站水文情势不同程度改变的数目

3.2 年水文极值变化

梯级水库群对拉萨年水文极值的影响主要表现为1d、3d、7d、90d最大流量改变较小,1d、3d、7d、90d最小流量改变明显;最大和最小流量的变差系数明显增大(图5(e)(d))。以1d极值流量为例,水库群对水文极值的累积影响逐渐增强。工况1最小1d流量均值改变度为0.02,属轻度改变;工况5最小1d流量均值改变度为0.69,属于重度改变。工况1最大1d流量的变差系数为轻微改变,工况2至工况4最大1d流量的变差系数属中度改变,改变

度分别为0.56、0.56和0.60,工况5最大1d流量的变差系数为重度改变,改变度为0.70;工况1最小1d流量变差系数为轻度改变,但工况3至工况5最小1d流量变差系数为重度改变,改变度分别为0.95、1.0和1.0。唐加水文站3d、7d以及90d的极值流量变化趋势与1d极值流量的变化趋势一致,但变化幅度较小。

3.3 洪水脉冲频率及涨落速率变化

水库群的运行导致拉萨水文站洪水脉冲上升与下降的平均速率降低,但洪水上升和下降的变差系数以及发生次数变化没有明显规律(图5(e)(f))。如在洪水脉冲上升与下降次数方面,唐加水文站5种工况的洪水脉冲次数均增加,但拉萨水文站工况1和工况2的洪水脉冲次数减少,工况3至工况5的洪水脉冲次数又增加,即水库群运行可能导致洪水脉冲次数减少或增加,其影响与实时调度决策相关,存在一定的不确定性。

3.4 综合改变度分析

对比不同工况下拉萨河干流各水文站的径流改

变度,水库群的联合调度对于拉萨河干流水文生态的干扰程度与水库群总调节库容大小有关,但两者并不是单一的线性关系(图7)。以唐加水文站为例,现状条件下唐加水文站水文情势综合改变度为0.21,为轻度改变;规划期唐加水文站的水文情势综合改变度为0.41,为中度改变。唐加水文站的综合改变度随上游水库群的库容系数增大而增大,但增大速率呈现“先小后大再小”的特征,即当库容系数 $\beta \leq 0.1$ 时(表示水库群调节能力小于月调节能力),综合改变度随库容系数增大缓慢增大;当 $0.1 < \beta \leq 0.15$ 时(表示水库群具有季调节能力),综合改变度随库容系数增大迅速增大;当 $\beta > 0.15$ 时(表示水库群接近或具有不完全年调节能力),综合改变度再次缓慢增大并逐渐逼近极限值。

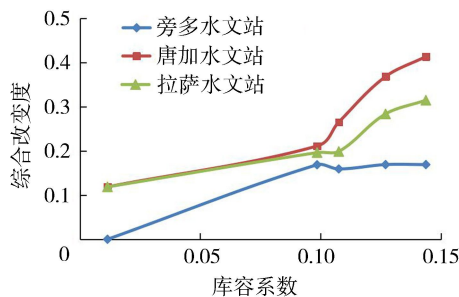


图7 库容-径流改变度响应关系

4 结论

利用 MODSIM-DSS 模拟了拉萨河干流不同数目水库群条件下相同时间尺度的日径流结果,采用 IHA-RVA 方法分析了拉萨河干流现状和规划水库群运行对水文情势的影响,提出了拉萨河干流梯级电站的库容-径流响应关系。

a. 现状条件下,拉萨河唐家水文站水文情势综合改变度为0.21,发生了轻度改变,其中,枯季最大流量、汛期最大流量、年最小流量发生时间、洪水涨落次数和高低流量脉冲历时较其他水文情势指标改变明显。

b. 随着流域水库数量的增加,水库建设与运行对水文情势的负效应增大。规划期(5座电站全部建成),唐加水文站的水文情势综合改变度为0.41,为中度改变,但水库数目的增加对于径流特征变化的累积效应并不是线性叠加关系。

c. 从规划期各站点水文情势综合改变度来看,流域水文情势的综合改变度随着流域水库群的库容系数增大而增大,增大速率呈现“先小后大再小”的特征,当水库群接近或具有不完全年调节能力(库容系数 $\beta > 0.15$)时,水文情势的综合改变度逐渐逼近极限值。

本文为研究新建或待建水库群对河流水文情势的影响提供了思路和方法,分析了拉萨河干流梯级水库对径流的累积影响,为深入开展拉萨河梯级水库综合优化生态调度提供了有益参考。但本文仅讨论了梯级电站运行对拉萨河水文情势的影响,未考虑气候变化、生产生活引水以及土地利用变化等因素的影响。

参考文献:

- [1] 夏正海,毛子明,陈波. 浙江省水库建设移民前期隐性损失及对策探讨[J]. 水利经济,2018,36(3):74-76. (XIA Zhenghai, MAO Ziming, CHEN Bo. Recessivelosses and compensation of reservoir resettlement during early stage of project construction in Zhejiang Province [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2018, 36(3): 74-76. (in Chinese))
- [2] 施国庆,王玥琳,张虎彪.“一带一路”视角下我国水库移民资金的自治管理[J]. 水利经济,2018,36(2):73-77. (SHI Guoqing, WANG Yuelin, ZHANG Hubiao. Management of reservoir immigration funds in China from the perspective of “One Belt and One Road” [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2018, 36(2): 73-77. (in Chinese))
- [3] MAGILLIGAN F J, NISLOW K H. Changes in hydrologic regime by dams [J]. Geomorphology, 2005, 71(1): 61-78.
- [4] 卢纯.“共抓长江大保护”若干重大关键问题的思考[J]. 河海大学学报(自然科学版),2019,47(4):283-295. (LU Chun. Reflection on several key issues regarding the “Making Efforts to Protect the Yangtze River Together” project [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47(4): 283-295. (in Chinese))
- [5] BLABOLIL P, LOGEZ M, RICARD D, et al. An assessment of the ecological potential of Central and Western European reservoirs based on fish communities [J]. Fisheries Research, 2016, 173: 80-87.
- [6] 黄显峰,贾永乐,方国华,等. 基于 PP-RVA 法的水电站下游河流水文情势评价[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(6):479-485. (HUANG Xianfeng, JIA Yongle, FANG Guohua, et al. Hydrological regime evaluation of hydropower station downstream based on the PP-RVA method [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018, 46(6): 479-485. (in Chinese))
- [7] JUNK W J. The flood pulse concept in river-floodplain systems [J]. Canadian Journal Special Publication of Fishery & Aquatic Science, 1989, 106:110-127.
- [8] RICHTER B D, BAUMGARTNER J V, POWELL J, et al. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems [J]. Conservation Biology, 1996, 10(4): 1163-1174.

- [9] RICHTER B, BAUMGARTNER J, WINGTON R, et al. How much water does a river need[J]. *Freshwater Biology*, 1997, 37(1):231-249.
- [10] RICHTER B D, BAUMGARTNER J V, BRAUN D P, et al. A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network [J]. *River Research & Applications*, 1998, 14(4):329-340.
- [11] GAO Y, VOGEL R M, KROLL C N, et al. Development of representative indicators of hydrologic alteration [J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 374(1):136-140.
- [12] 张洪波, 黄强, 彭少明, 等. 黄河生态水文评估指标体系构建及案例研究[J]. *水利学报*, 2012, 39(6):675-683. (ZHANG Hongbo, HUANG Qiang, PENG Shaoming. An eco-hydrologic index system and its application on Yellow River [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, 39(6):675-683. (in Chinese))
- [13] 陈昌春, 王腊春, 张余庆, 等. 基于 IHA/RVA 法的修河流域上游大型水库影响下的枯水变异研究[J]. *水利水电技术*, 2014, 45(8):18-22. (CHEN Changchun, WANG Lachun, ZHANG Yujing, et al. IHA/RVA-based study on variation of low water flow under influences of upstream large reservoirs in Xiushui River Basin [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2014, 45(8):18-22. (in Chinese))
- [14] 张宗娇, 张强, 顾西辉, 等. 水文变异条件下的黄河干流生态径流特征及生态效应[J]. *自然资源学报*, 2016, 31(12):2021-2033. (ZHANG Zongjiao, ZHANG Qiang, GU Xihui, et al. Changes of eco-flow due to hydrological alterations in Yellow River Basin [J]. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(12):2021-2033. (in Chinese))
- [15] 陈伟东, 包为民. 改进 IHA 法的应用研究[J]. *中国农村水利水电*, 2016(12):79-83. (CHEN Weidong, BAO Weimin. The application of the improved IHA method [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2016(12):79-83. (in Chinese))
- [16] 程俊翔, 徐力刚, 姜加虎. 水文改变指标体系在生态水文研究中的应用综述[J]. *水资源保护*, 2018, 34(6):24-32. (CHENG Junxiang, XU Ligang, JIANG Jiahu. Review of application of hydrologic alteration index system in eco-hydrology research [J]. *Water Resources Protection*, 2018, 34(6):24-32. (in Chinese))
- [17] 周毅, 崔同, 高满, 等. 考虑不同水文年及 IHA 指标相关性的水文特征评估方法[J]. *水文*, 2017, 37(2):20-25. (ZHOU Yi, CUI Tong, GAO Man, et al. A new method to assess hydrological regime alterations considering hydrological year types and correlation among IHA [J]. *Journal of China Hydrology*, 2017, 37(2):21-25. (in Chinese))
- [18] XIANG Yan, FU Zhimin, MENG Ying, et al. Analysis of wave clipping effects of plain reservoir artificial islands based on MIKE21 SW model [J]. *Water Science and Engineering*, 2019, 12(3), 179-187.
- [19] WANG Y, ZHANG N, WANG D, et al. Investigating the impacts of cascade hydropower development on the natural flow regime in the Yangtze River, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 624:1187-1194.
- [20] 张洪波, 黄强, 张双虎. 梯级水库运行对黄河上游水文条件的累积影响[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2011, 39(2):137-142. (ZHANG Hongbo, HUANG Qiang, ZHANG Shuanghu. Cumulative effects of operation of cascade reservoirs on hydrological conditions in upper reaches of Yellow River [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2011, 39(2):137-142. (in Chinese))
- [21] 洛珠尼玛, 王建群, 徐幸仪. 拉萨河流域水循环要素演变趋势分析[J]. *水资源保护*, 2012, 28(1):51-53. (Luozhunima, WANG Jianqun, XU Xingyi. Variation trend of water cycle factors in Lhasa River Basin [J]. *Water Resources Protection*, 2012, 28(1):51-53. (in Chinese))
- [22] 马真臻. 基于河流天然流量过程的生态评价及其用水调度研究[D]. 北京:清华大学, 2012.
- [23] GAO B, YANG D, ZHAO T, et al. Changes in the eco-flow metrics of the Upper Yangtze River from 1961 to 2008 [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 448/449:30-38.
- [24] 胡巍巍. 蚌埠闸及上游闸坝对淮河自然水文情势的影响[J]. *地理科学*, 2012, 32(8):1013-1019. (HU Weiwei. The influence on the natural hydrologic regimes of the Huaihe River by Bengbu Sluice and its upstream dams [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2012, 32(8):1013-1019. (in Chinese))
- [25] FREDERICKS J W, LABADIE J W. Decision support system for conjunctive stream-aquifer management [J]. *Journal of Water Resources Planning & Management*, 1998, 124(2):69-78.
- [26] 康玲, 周丽伟, 李争和, 等. 长江上游水库群非线性安全度防洪调度策略[J]. *水利水电科技进展*, 2019, 39(3):1-5. (KANG Ling, ZHOU Liwei, LI Zhenghe, et al. Nonlinear safety degree flood control strategy of multi-reservoirs in upper Yangtze River [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2019, 39(3):1-5. (in Chinese))

(收稿日期:2019-01-02 编辑:郑孝宇)

