

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2020.05.10

梯级电站运行下拉萨河干流水文情势变异及归因分析

黄草^{1,2,3}, 黄梦迪¹, 胡国华^{1,2,3}, 曾杭^{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;)

摘要: 梯级水电站不同的调度模式对河流水文情势产生的影响存在差异。为了定量分析拉萨河干流梯级水电站不同调度模式对水文情势变化的影响,采用水文变异指标法及变化范围法(IHA-RVA),综合评价了旁多、唐加和拉萨3个水文站32项水文情势指标的改变度及综合改变度。结果表明:常规调度模式下,3站的水文情势发生了轻度改变,综合改变度分别为0.17、0.21和0.20;电力调度模式下,3站的综合改变度分别为0.50、0.54和0.48,属于中度改变。采用多系列贡献率分割法,研究了天然径流量变化、河道外引水退水以及梯级电站调度运行3因素对月均径流改变的贡献率。研究表明:常规调度模式下,3因素对拉萨水文站月均流量改变度的贡献率分别为0.81、0.02和0.17,主导因素为天然径流量变化;电力调度模式下,3因素的贡献率分别为0.56、0.06和0.38,梯级电站调度运行因素的贡献率显著提高,电力调度下梯级电站调度运行对拉萨水文站月均流量改变度的贡献率比常规调度提高了124%。

关键词: 梯级电站; 水文情势; IHA-RVA; 综合改变度; 贡献率; 拉萨河

中图分类号:TV697.1⁺2; P333

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2020)05-0062-08

Influence and attribution of the cascade hydropower station operation on the hydrological regimes in Lhasa River

HUANG Cao^{1,2,3}, HUANG Mengdi¹, HU Guohua^{1,2,3}, ZENG Hang^{1,2,3}

(1. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Key Laboratory of Water & Sediment Science and Water Hazard Prevention of Hunan Province, Changsha 410114, China; 3. Key Laboratory of Dongting Lake Aquatic Eco-environmental Control and Restoration of Hunan Province, Changsha 410114, China)

Abstract: Different operation modes of cascade hydropower stations may have different effects on the hydrological regimes of a river. In order to quantitatively analyze the influence of different operation modes of the cascade hydropower stations on the hydrological regimes in Lhasa River, the indicators of hydrologic alteration – range of variability approach (IHA-RVA) was applied to analyze the changing degrees of Pangduo, Tangjia and Lhasa station. The results showed that the hydrological regimes of Lhasa River changed slightly under the conventional operation mode (COM), with the comprehensive changing degrees of 0.17, 0.21 and 0.20 respectively. Whereas the comprehensive changing degrees of these three stations reached 0.50, 0.54 and 0.48 respectively under the maximum-hydropower operation mode (MOM), which was classified as moderate changes. Then, the multi-series contribution rate segmentation was used to analyze the contribution rates of the variation of natural runoff, water diversion and cascade reservoir operation with different operation modes to the average monthly runoff. The contribution rates of these three factors to the change of the average monthly runoff of the Lhasa station were 0.81, 0.02 and 0.17 respectively under the COM, indicating that the dominant factor was the variation of natural runoff. The contribution rates of these three factors were 0.56, 0.06 and 0.38 respectively under the MOM, showing a significant increase in contribution rate of cascade reservoir operation. The contribution

收稿日期:2020-01-15; 修回日期:2020-05-31

基金项目:国家自然科学基金项目(51709019、91647204); 湖南省水利科技项目(XSKJ2018179-07)

作者作者:黄草(1985-),湖南衡阳人,博士,讲师,研究方向为流域水资源综合规划与管理。

通讯简介:胡国华(1965-),男,湖南永州人,博士,教授,研究方向为水资源演变规律。

rate of the cascade reservoir operation of the MOM was 124% higher than that of the COM.

Key words: cascade hydropower station; hydrological regime; indicators of hydrologic alteration – range of variability approach (IHA – RVA); comprehensive changing degree; contribution rate; Lhasa River

1 研究背景

河流的水文情势对于河流物理化学条件、两岸植被分布以及流域内生物群落的分布范围和生活习性等具有重要意义^[1],河川径流及其过程控制了河流生态系统主要的生境参数,如水深、速度以及生境容量^[2]。在河流上建坝,阻断了天然河道,导致河道的流态发生变化,这一变化会对河流生态环境造成不利影响。

不同的梯级电站调度方式对径流的影响程度不同,良好的调度模式可以减弱大坝的修建与运行对河流水文情势的影响程度^[3]。对于如何定量分析梯级电站的建设和运行对河流健康的影响,国内外学者开展了诸多研究。20世纪末,Richter建立的水文变异指标体系(indicators of hydrologic alteration, IHA)以及在此基础上提出的变化范围法(range of variability approach, RVA),为定量研究河流水文情势提供了基础^[4-5]。该方法构建了5大类共32项含有生态意义的水文指标来定量分析河流的水文情势特征,被广泛应用于研究我国长江^[6-7]、黄河^[2,8]和淮河^[9]流域及各支流^[10-11]的水库建设对河流造成的水文及生态影响。

河川径流的变化除受到水库运行影响外,还与当地气象因素、下垫面条件变化以及人类生产生活取水情况等相关。分析河流水文情势变化的影响因素以及量化不同因素的贡献率是近年来的热点问题,较常用的方法有水文模型法、拐点分析法^[12-14]、关联度分析^[15]等。目前,研究者们将径流变化影响因素归为气候变化和人类活动两大类,但有关人类活动的细分项,如水利设施的修建和运行、工农业引水用水、水土保持措施等,对径流变化的影响及其贡献率分析成果较少。多系列贡献率分割法^[8]通过选定可代表多种径流变化影响因子的不同序列,反映不同影响因子对于河流水文情势影响的差异,其选定的影响因子可根据当地实际情况进行选择搭配,适用于分析气候变化、水库运行、工农业取水等多种因素,计算较为简便。

21世纪以来,拉萨河干流陆续建成直孔和旁多两级水电站,梯级水电站的建设及运行调度改变了拉萨河中下游的水文情势,对水生态环境产生了不利影响,优化梯级电站的调度运行方式成为修复拉

萨河中下游区生态环境的重要选择之一。因此,本文以拉萨河为例,采用水文变异指标法及变化范围法(IHA – RVA),研究拉萨河旁多 – 直孔两级电站不同调度模式下(常规调度与电力调度)下游水文情势的变化,分析水文情势的变化特征及规律;采用多系列贡献率分割法分离天然径流变化、河道外引水退水以及梯级水电站调度运行3个因素对拉萨河干流月均径流量变化的贡献率,为量化分析梯级水电站不同调度方式对水文情势的影响提供技术方法,也为拉萨河梯级水电站调度方式优化和开展生态调度提供技术支持。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

拉萨河流域属高原温带半干旱大陆性气候区,年平均降雨量400~500 mm,降雨主要集中在6~9月。拉萨河干流全长568 km,流域面积 3.18×10^4 km²,多年平均径流量为 90.9×10^8 m³,是雅鲁藏布江五大支流之一。流域内湿地众多,维护河流原始水文情势对于保护当地生物栖息地和维持物种稳定具有重要意义。拉萨河发源于念青唐古拉山,由源头南流的麦地藏布与支流“麦曲”汇合形成“色荣藏布”,两河交汇点以上为拉萨河上游,以下为拉萨河中游;拉萨河中游河段称为“热振藏布”,陆续汇入“桑曲”、“乌鲁龙曲”、“雪绒藏布”3条支流。在“乌鲁龙曲”汇入点以下建有旁多水利枢纽,“雪绒藏布”汇入点附近建有直孔水电站,直孔水电站以下为拉萨河下游。

图1为拉萨河流域水系以及干流已建水电站和水文站分布图。表1为拉萨河干流旁多 – 直孔两级电站特征参数统计表。表2为拉萨河干流水文站基本情况说明。目前,拉萨河干流已建成旁多与直孔两座水电站。旁多电站具有年调节能力,是拉萨河干流中游河段水电梯级开发方案中的首级水库,直孔电站具有日调节能力,是拉萨河干流中游河段水电梯级开发方案中的末级电站。两座水库总库容 14.46×10^8 m³,占拉萨河年平均径流量的15.9%。

拉萨河干流现有旁多、唐加和拉萨3个水文站(见图1和表2)。其中,旁多站位于旁多电站下游,唐加站位于直孔电站下游,拉萨站位于拉萨市市区,3站均具有长系列的日流量实测资料。研究这3个

站点的水文情势及其变化特征,可表征梯级电站运行下拉萨河干流水文特征的变化情况。

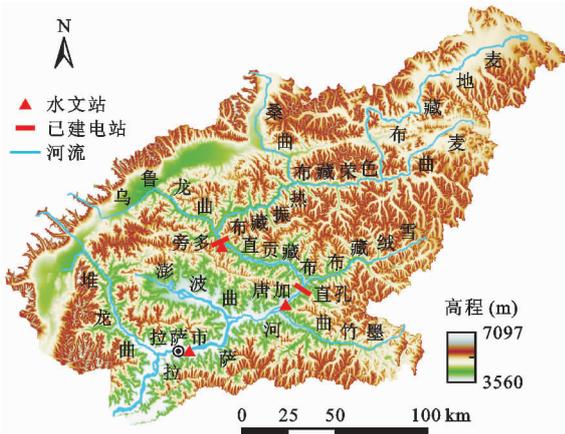


图1 拉萨河流域水系以及干流已建水电站和水文站分布图

表1 拉萨河干流旁多-直孔两级水电站特征参数

电站名称	控制流域面积/ km^2	多年平均流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	总库容/ 10^8 m^3	装机容量/ MW	建成年份
旁多	16370	189	12.22	160	2015
直孔	20100	237	2.24	100	2007

表2 拉萨河干流水文站基本情况

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

2.2 数据来源

研究所采用的基础数据为拉萨河干流旁多、唐加和拉萨3个水文站的实测日流量,3站的日流量资料系列长度见表2。

相关研究表明,IHA-RVA法在选用的日径流系列长度超过20a时,能较准确地反映河流水文情势的变化^[16]。拉萨河干流旁多-直孔两级水电站建成较晚,缺乏梯级电站调度运行后的长系列日径流资料,梯级电站建成后的日径流系列代表性不足。为了延长梯级电站调度后日径流系列的长度,提高其代表性,本文基于旁多-直孔梯级电站常规调度和电力调度规则,采用MODSIM-DSS^[17](一种常用的决策支持系统, <http://modsim.engr.colostate.edu>)构建梯级电站调度模型,以1976-2000年梯级

电站修建前的日流量数据作为模型输入,模拟生成梯级电站不同调度模型下的长系列日径流资料,作为水文情势变化分析的依据。表3为电站运行前实测日径流数据和两种不同调度模式下模拟出的日径流数据序列长度情况。

表3 不同调度模式下拉萨河干流水文资料序列情况

调度模式	日径流系列		
	梯级电站建设前	梯级电站建设后	模拟生成梯级电站建设后
常规调度	1976-2000	2015-2016	1976-2000
电力调度	1976-2000	2015-2016	1976-2000
模型验证期		2015-2016	2015-2016

为了验证拉萨河长系列模拟径流的有效性,采用2015-2016年实测日径流进行验证。结果表明模拟日径流与实测日径流存在良好的相关性,相关系数 R 为0.975,纳什效率系数 NSE 为0.947^[18]。

常规调度按照各电站的设计调度规则进行模拟调度。旁多水库从每年6月初开始蓄水,当蓄至汛限水位后,维持汛限水位不变至9月上旬,9月下旬至12月末维持水库正常蓄水位运行;从翌年1月初开始降低水库水位,至5月末消落至水库汛限水位以下^[18]。旁多水库除承担防洪发电任务外,还负责向邻近城乡输送城市用水和灌溉农业用水。直孔水库只承担防洪发电任务,无河道外引水。

电力调度以旁多-直孔电站总发电量最大为目标,以旁多-直孔水库联合优化调度方案^[19]为基础,通过输入1976-2000年天然日径流,模拟生成旁多-直孔水库联合优化调度后的1976-2000年日径流系列。

2.3 研究方法

2.3.1 水文情势变化分析方法 河流水文条件是河流生态系统各种理化和生物过程的基础,水文条件变化会引起河流生态系统的改变。IHA-RVA法是先通过分析河流受扰动前后的月均流量、年极值流量、极值流量出现时间、高低流量脉冲以及洪水上涨下降变化率等5个方面共32项水文因子的变化来确定河流水文情势的状态,然后评价32项指标共64个特征参数(每1项指标包含均值和变差系数2个特征参数)在梯级水电站建设前后的差异与变化,以全面反映梯级水电站的运行对河流水文情势的影响。表4为本文选取的IHA指标及采用的指标符号说明。

表 4 IHA 水文指标体系

指标类别	指标名称	指标符号 (均值)	指标符号 (变差系数)
月均流量	1 - 12 月月均流量	$F_1 \sim F_{12}$	$F_{13} \sim F_{24}$
年极值流量	最大 1、3、7、30、90 d 流量	$F_{25} \sim F_{29}$	$F_{37} \sim F_{41}$
	最小 1、3、7、30、90 d 流量	$F_{30} \sim F_{34}$	$F_{42} \sim F_{46}$
极值流量	年最大流量出现时间	F_{35}	F_{47}
出现时间	年最小流量出现时间	F_{36}	F_{48}
高低流量	年高流量脉冲发生次数	F_{49}	F_{57}
	年低流量脉冲发生次数	F_{50}	F_{58}
	高流量脉冲平均历时	F_{51}	F_{59}
脉冲	低流量脉冲平均历时	F_{52}	F_{60}
	上涨率年平均值	F_{53}	F_{61}
洪水涨落	下降率年平均值	F_{54}	F_{62}
变化率	上涨次数	F_{55}	F_{63}
	下降次数	F_{56}	F_{64}

上述 64 个特征参数的量纲不完全一致,引入归一化函数 (sigmoid 函数) 计算 64 个特征参数的改变度,则每个特征参数均为无量纲数,且取值范围均为 $(-1, 1)$ 。

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

$$v_k = \frac{P_{kB} - P_{kA}}{P_{kA}} \quad (2)$$

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; k 为参数的个数, $k = 1 \sim 64$; a 为系数, $a = 3$; v_k 为河流第 k 个特征参数受扰动的偏离量; P_{kA} 、 P_{kB} 分别为河流受扰动前、受扰动后第 k 个特征参数的统计值^[18]。

综合改变度 D_T 为所有特征参数改变度 d_k 绝对值的平均值,反映河流水文情势受扰动的程度。将综合改变度 D_T 的取值范围等分为 3 个区间,分别对应轻度改变、中度改变和重度改变 3 个层次,具体分级标准为:当 $|D_T| < 0.33$ 时,河流水文情势整体为轻度改变^[5]; $0.33 \leq |D_T| < 0.67$ 时,河流水文情势整体为中度改变; $|D_T| \geq 0.67$ 时,河流水文情势整体为重度改变^[18]。

2.3.2 水文情势变化归因分析方法 采用多系列贡献率分割法^[8],通过对比不同系列相应的水文情势差异研究每个影响因子对水文情势的影响,即贡献率。

基于梯级水电站运行期的水量平衡方程分析,引起拉萨河水文情势变化的主要因素为天然径流量变化、河道外引水退水以及梯级电站调度运行等(忽略水库的蒸发和渗漏损失)。因此,构建梯级电站模拟调度日径流、无梯级电站调度的实测日径流、河道外引水退水还原后天然日径流以及无人人类活动影响的基准日径流 4 个水文序列,进行水文情势变化的贡献率分离分析。所选用的水文序列应满足以下条件:

(1) 各水文序列长度应不少于 20 a;

(2) 基准日径流序列应较少受人类活动影响或基本无影响。

各序列分割方法如下:

$$v_{i,1} = (F_{i,1} - F_{i,4})/F_{i,4} \quad (3)$$

$$v_{i,2} = (F_{i,2} - F_{i,4})/F_{i,4} \quad (4)$$

$$v_{i,3} = (F_{i,3} - F_{i,4})/F_{i,4} \quad (5)$$

$$C_n = \left| \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (V_{i,2}/V_{i,1}) \right| \quad (6)$$

$$C_w = \left| \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ((V_{i,3} - V_{i,2})/V_{i,1}) \right| \quad (7)$$

$$C_r = 1 - C_n - C_w \quad (8)$$

式中: $F_{i,1}$ 、 $F_{i,2}$ 、 $F_{i,3}$ 、 $F_{i,4}$ 分别为梯级电站模拟调度日径流序列(1976 - 2000 年)、无梯级电站调度的实测日径流序列(1976 - 2000 年)、河道外引水退水还原后天然日径流(1976 - 2000 年)和无人人类活动影响的基准日径流序列(1956 - 1975 年)对应的第 i 个 IHA 指标值; $V_{i,1}$ 、 $V_{i,2}$ 、 $V_{i,3}$ 分别为上述前 3 个序列第 i 个 IHA 指标值相对于无人人类活动影响的基准日径流序列第 i 个 IHA 指标值的变化幅度; n 为 IHA 指标的个数; C_n 、 C_w 、 C_r 分别为天然径流量变化、河道外引水退水以及梯级电站调度运行对 IHA 指标值变化的贡献率。 $F_{i,1}$ 、 $F_{i,2}$ 、 $F_{i,3}$ 、 $F_{i,4}$ 、 $V_{i,1}$ 、 $V_{i,2}$ 、 $V_{i,3}$ 、 C_n 、 C_w 、 C_r 均为无量纲数。为了避免 $V_{i,1}$ 过小引起影响因子在部分指标上的贡献率过大,当 $V_{i,1}$ 的绝对值不超过 10% 时认为该指标与基准系列基本相同,不统计影响因子对该指标的贡献率。

3 结果与分析

3.1 梯级电站调度模式对水文情势的影响比较

图 2 为常规调度和电力调度两种模式下,旁多、唐加和拉萨 3 个水文站月均流量的改变程度。指标 F_i ($i = 1, 2, \dots, 12$) 为正值表示第 i 月月均流量增多,反之表示月均流量减少;指标 F_i ($i = 13, 14, \dots, 24$) 为正值表示第 1 - 12 月月均流量年际差异增大,为负值表示对应月份月均流量年际差异减小。

常规调度下(图2(a)),拉萨河干流月均流量指标($F_1 \sim F_{12}$)变化主要以轻度 and 中度变化为主,月均流量均值改变程度最大月份为3月(F_3)和10月(F_{10}),3个水文站3月流量均值改变度为0.95左右,属于重度改变;10月流量均值改变度范围为 $-0.42 \sim -0.34$,属于中度改变。月均径流变差系数($F_{13} \sim F_{24}$)多为轻度改变,3站月均径流变差系数正改变程度最大月份为2月(F_{14})和3月(F_{15}),其中旁多和拉萨站最大改变度均为0.66,属于中度改变,唐加站的最大改变度为0.94,属于重度改变;3站月均径流变差系数负改变程度最大月份为6月(F_{18}),分别为 -0.21 、 -0.10 和 -0.03 ,均为轻度改变。

电力调度下(图2(b)),拉萨河干流非汛期月均流量($F_1, F_2, F_3, F_4, F_{12}$)多为中度和重度改变;汛期月均流量(F_7, F_8, F_9, F_{10})多为轻度改变。旁多和唐加月均流量值正改变程度最大月份为2月(F_2),改变度为0.94和0.93,属于重度改变;负改变程度最大月份为6月(F_6),改变度为 -0.43 和 -0.36 ,属于中度改变。拉萨站月均流量值正改变程度最大的月份为3月(F_3),改变度为0.91,属于重度改变;负改变程度最大的月份为6月(F_6),改变度为 -0.35 ,属于中度改变。月均径流变差系数($F_{13} \sim F_{24}$)方面,旁多站和唐加站月均流量变差系数正改变程度最大的为3月

(F_{15}),改变度分别为0.88和0.92,均为重度改变;负改变程度最大的为11月(F_{23}),改变度分别为 -0.70 和 -0.68 ,为重度改变。拉萨站月均径流变差系数正改变程度最大月份为3月(F_{15}),改变度为0.46,属于中度改变;负改变程度最大月份为8月(F_{20}),改变度为 -0.46 ,属于中度改变。

上述分析表明,梯级电站腾库、蓄水以及调洪期间对月均径流量的改变较明显;电力调度下,梯级电站调度运行对月均流量均值和变差系数的影响程度大于常规调度。

图3为常规调度和电力调度两种模式下,旁多、唐加和拉萨3个水文站年极值流量的改变程度。指标 $F_{25} \sim F_{29}$ 表示最大1、3、7、30、90 d极值流量均值变化情况;指标 $F_{30} \sim F_{34}$ 表示最小1、3、7、30、90 d极值流量均值变化情况;指标为正值表示极值流量均值增加,反之表示对应的极值流量均值减少;指标 F_{35}, F_{36} 改变度为正值表示极值流量出现时间推迟,反之表示出现时间提前。指标 $F_{37} \sim F_{41}$ 表示最大1、3、7、30、90 d极值流量的年际差异变化;指标 $F_{42} \sim F_{46}$ 表示最小1、3、7、30、90 d极值流量的年际差异变化;指标为正值表示极值流量年际差异增大,反之表示对应的极值流量年际差异减小;指标 F_{47}, F_{48} 为正值表示极值流量出现时间年际差异增大,为负值表示对应极值流量出现时间年际差异减小。

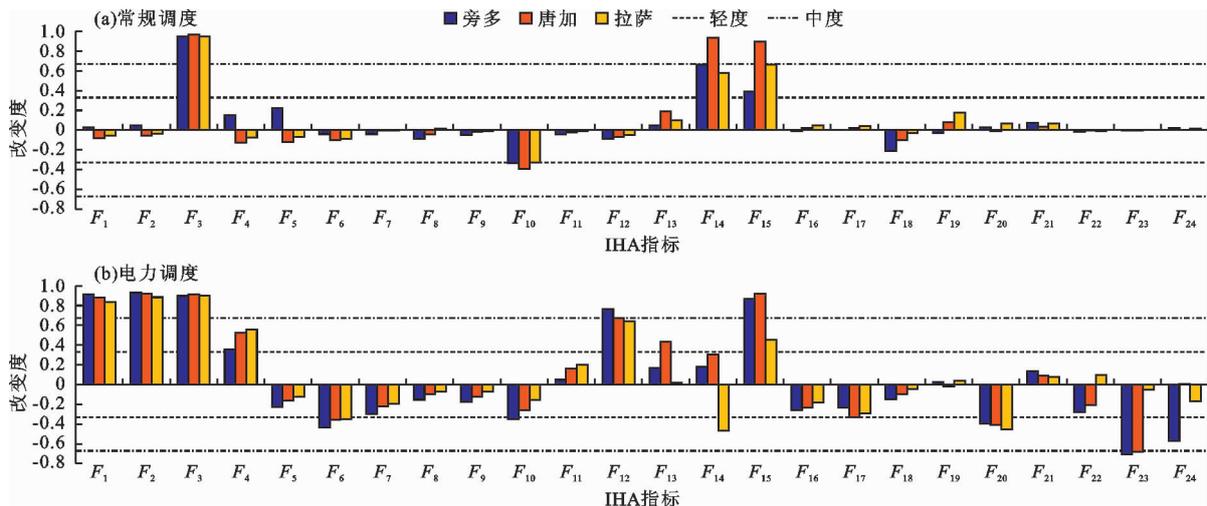


图2 旁多-直孔梯级电站不同调度模式下拉萨河干流各水文站月均流量改变程度

由图3(a)可知,常规调度下,拉萨河干流年极值流量均值改变度多为轻度改变。最小90 d流量均值(F_{34})增多最为明显,其中,旁多和拉萨站的改变度分别为0.39和0.37,属于中度改变,唐加站的改变度为0.30,为轻度改变。在3站的极值流量均值中,旁多站最大1 d极值流量均值(F_{25})改变最

大,改变度为 -0.13 ;唐加站最小1 d极值流量均值(F_{30})改变最大,改变度为 -0.17 ;拉萨站最小3 d极值流量均值(F_{31})改变最大,改变度为 -0.13 ;但均属轻度改变。电站运行后,3站极大值流量的出现时间(F_{35})改变度很小,表示电站运行前后极大流量出现的时间基本不变;但极小值流量的出现时

间有所变化,旁多站极小流量出现时间提前,而唐加和拉萨站的极小流量出现时间有所推迟。

由图 3(a)还可看出,旁多站最大 3 d 流量年际差异(F_{38})增大最明显,改变度为 0.48,唐加站和拉萨站最大 1 d 流量年际差异(F_{37})增大最明显,改变度为 0.56,均为中度改变。经过梯级电站调度后,3 个水文站中的唐加和拉萨站极小流量的年际变化($F_{42} \sim F_{46}$)均为正值,表示极小流量的年际差异增加;但旁多站极小流量的年际变化有正有负,且多为负值,表示旁多站的极值流量年际差异减小。

由图 3(b)可知,电力调度下,拉萨河干流 3 个水文站最大 1 d 和最小 1 d 的极值流量均值发生了中度改变,而最大 3、7、30、90 d 的流量均值均为轻度改变,最小 3、7、30、90 d 流量均值均为重度改变,最大改变度为 0.93。年极值流量年际差异变化方面,最大 1、3、7、30、90 d 流量的年际变化改变度逐

渐减少,由重度改变向轻度改变过渡;而最小 1、3、7、30、90 d 流量的年际变化改变度均很大,接近于 1.0,属于重度改变。

基于以上分析,梯级电站调度运行对最小 1、3、7、30、90 d 流量均值和年际差异的改变度明显大于最大 1、3、7、30、90 d 流量均值和年际差异的改变度;电力调度模式对 1、3、7、30、90 d 极值流量均值和年际差异的改变度明显大于常规调度模式。

图 4 为常规调度和电力调度两种模式下,旁多、唐加和拉萨 3 个水文站的高低流量脉冲及洪水涨落的改变程度。指标 $F_{49} \sim F_{56}$ 为正值表示对应的水文指标统计值增大(洪水脉冲出现频率增大或洪水脉冲历时延长),为负值表示对应的水文指标统计值减小;指标 $F_{57} \sim F_{64}$ 为正值表示对应的水文指标统计量年际差异增大,为负值表示对应的水文指标统计量年际差异减小。

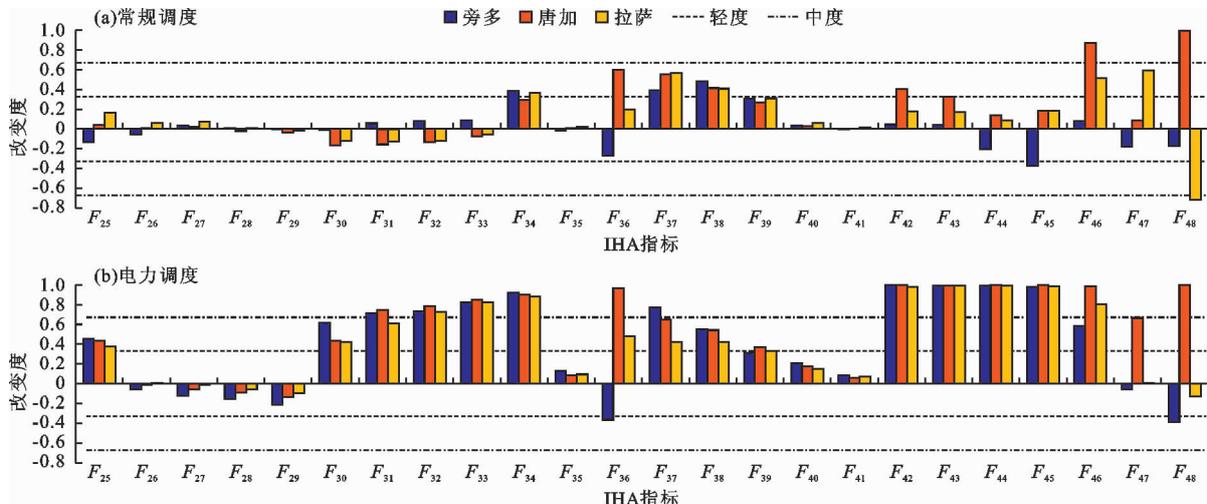


图 3 旁多 - 直孔梯级电站不同调度模式下拉萨河干流各水文站极值流量改变程度

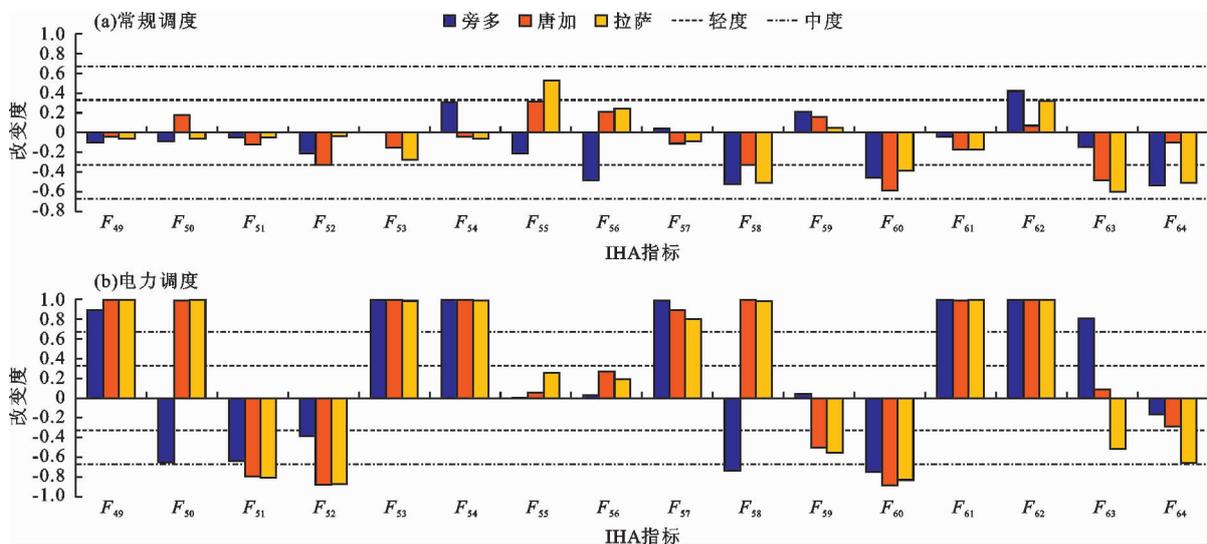


图 4 旁多 - 直孔梯级电站不同调度模式下拉萨河干流各水文站高低流量脉冲及洪水涨落改变程度

常规调度下(图4(a)),拉萨站高流量、低流量脉冲的发生次数减少(F_{49} 、 F_{50} 为负值),但减少幅度较小;高流量和低流量脉冲的历时(F_{51} 、 F_{52})无明显变化。高流量脉冲发生次数年际差异减小(F_{57} 为负值),高流量脉冲历时(F_{59})的年际差异略微增大;低流量脉冲发生次数(F_{58})和历时(F_{60})的年际差异均减小,改变度达 -0.51 和 -0.39 ,为中度改变。同时,拉萨站洪水下降速率变差系数(F_{62})改变度为正值,上涨速率(F_{61})及涨落频率变差系数(F_{63} 、 F_{64})改变度为负值,表明拉萨站洪水下降速率年际差异增大,上涨速率及涨落频率年际差异减小。

电力调度下(图4(b)),拉萨站高流量、低流量脉冲事件发生平均次数(F_{49} 、 F_{50})增加,平均历时(F_{51} 、 F_{52})缩短约15 d;高流量、低流量脉冲发生次数(F_{57} 、 F_{58})的年际差异增大,平均历时(F_{59} 、 F_{60})的年际差异减小。其中,洪水涨落速率的均值(F_{53} 、 F_{54})和变差系数(F_{61} 、 F_{62})显著增大,改变度均达到0.99以上,为重度改变。电力调度下,拉萨河干流不同站点高低流量脉冲及洪水涨落速率的改变比常规调度更明显。

常规调度和电力调度两种模式下,拉萨河干流水文情势的综合改变度如表5所示,不同改变程度的水文指标个数统计如图5所示。

表5 旁多-直孔梯级电站运行后不同站点水文情势的综合改变度

调度模式	水文站		
	旁多	唐加	拉萨
常规调度	0.17	0.21	0.20
电力调度	0.50	0.54	0.48

由表5和图5可知,常规调度模式下,拉萨河干流水文情势发生了轻度改变,旁多、唐加和拉萨3站点的水文情势综合改变度分别为0.17、0.21和0.20。在统计的64个特征参数中,3站轻度改变的

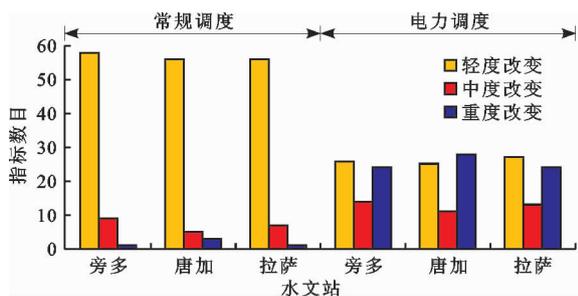


图5 不同调度模式下各站点不同改变程度的水文指标个数统计图

指标个数分别为58、56和56,分别占总指标数的91%、88%和88%;重度改变的指标个数分别为1、6和1,分别占总数的2%、9%和2%。电力调度模式下,拉萨河干流水文情势发生了中度改变,旁多、唐加和拉萨3站点的水文情势综合改变度分别为0.50、0.54和0.48。在统计的64个特征参数中,3站轻度改变的指标数分别为26、25和27,分别占总指标数的41%、39%和42%;重度改变的指标个数分别为24、28和22,分别占总数的38%、44%和34%。即拉萨河干流梯级电站电力调度模式对河流水文情势的影响明显高于常规调度。

3.2 梯级电站运行对水文情势变化的归因占比分析

基于公式(3)~(8),采用多系列贡献率分割法分析了天然径流量变化、河道外引水退水以及梯级电站调度运行3因素对于拉萨河干流月均径流变化的贡献率。

图6为常规调度和电力调度两种模式下天然径流量变化、河道外引水退水以及梯级电站调度运行3因素对拉萨河干流月均径流变化的贡献率。图6表明,电力调度模式下,导致拉萨河干流月均径流变化的主要因素为梯级电站的调度运行,旁多站天然径流量变化、河道外引水退水和梯级电站调度运行的贡献率分别为35%、22%和43%;唐加站3因素的贡献率分别为37%、5%和58%;拉萨站3因素的贡献率分别为56%、6%和38%。常规调度模式下,导致拉萨河干流月均径流变化的主要因素为天然径流量变化,旁多站3因素的贡献率分别为68%、6%和26%;唐加站3因素的贡献度分别为65%、7%和28%;拉萨站3因素的贡献度分别为81%、2%和17%。电力调度模式下,梯级电站调度运行对月均径流变化的贡献程度明显增加,电力调度下拉萨站梯级电站调度运行的贡献率比常规调度增长了124%。两种调度模式下河道外引水退水对于月均径流变化的影响均较小。

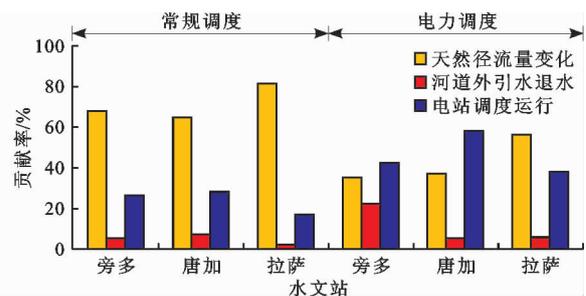


图6 不同调度模式下3因素对拉萨河干流月均径流量变化的贡献率

4 讨论

本研究以拉萨河为例,提出了量化分析新建水库群调度对河流水文情势的影响的分析框架和方法,可为优化流域生态调度方式提供技术支持。

(1)针对新建和待建梯级电站调度后径流系列代表性不足的问题,采用 MODSIM - DSS 模拟生成不同情景下梯级电站调度后的长系列日径流数据,然而径流模拟的精度受到多方面因素的影响,如梯级电站的调度规则及优化方案,河道外引水及退水的还原,水库群的蒸发渗漏损失等,导致模拟径流整体略小于实测径流。径流模拟方法与结果对规划层面的水文 - 生态响应研究具有一定的指导意义。

(2)常规调度下,拉萨河干流水文情势发生轻度改变;电力调度下,水文情势发生中度改变。这证实了不同的梯级电站调度方式对径流的影响程度存在较大差异。同时,相关研究表明拉萨河旁多 - 直孔梯级电站电力调度比常规调度可增加发电量 4.49%^[19]。对比两种调度模式下水文情势的改变幅度和发电量的改变幅度,结果表明:拉萨河干流梯级电站电力调度所产生的经济效益增幅小于其带来的水文情势改变增幅。因此,以总发电量最大为目标的电力优化调度虽能小幅提高经济效益但对河流水文情势的影响也更大,梯级水库调度应更加重视生态调度目标,更好地协调经济效益与河流生态环境保护的矛盾。

(3)河流水文情势变化是天然径流量变化、河道外引水退水和梯级电站调度运行等多方面因素共同作用结果。多系列贡献率分割法能够分离人类活动中河道外引水退水和梯级电站调度运行对月均径流变化的影响,在流域水资源供需用基础资料及生态环境监测资料缺乏时可用于探讨梯级电站运行所引发生态 - 水文响应及程度。但应用多系列贡献率分割法时受水文系列资料限制,一方面水文系列难以准确分割出气候变化之前的水文序列,另一方面天然径流量变化、河道外引水退水以及梯级电站调度运行在各水文系列中不完全独立,难以绝对分离。建立梯级电站调度模拟模型或流域水资源配置模型能一定程度弥补实测水文序列的不足。

(4)目前,拉萨河干流梯级电站尚有卡多、布岗、格拉沃水电站规划待建。若5级电站全部投入运行后,梯级电站调度运行对拉萨河中、下游的生态水文情势的改变作用将会更加显著,应进一步协调梯级电站的调度目标,优化拉萨河干流梯级电站联

合调度方式,以减弱梯级电站建设与运行给河流生态系统带来的危害,强化梯级电站调度运行的生态作用,保障区域水生态环境和安全。

5 结论

(1)旁多 - 直孔梯级电站常规调度下,拉萨河干流水文情势发生轻度改变,旁多、唐加和拉萨站综合改变度分别为 0.17、0.21 和 0.20;电力调度下,水文情势发生中度改变,旁多、唐加和拉萨站综合改变度分别为 0.50、0.54 和 0.48。

(2)拉萨河干流梯级电站腾库、蓄水以及调洪期间对月均流量的改变较明显;常规调度和电力调度两种模式下,最小 1、3、7、30 和 90 d 流量的改变度均大于最大 1、3、7、30 和 90 d 流量的改变度;电力调度模式对 1、3、7、30 和 90 d 极值流量的改变度明显大于常规调度模式。

(3)常规调度模式下拉萨河干流水文情势变化的主导因素为气候变化引起的天然径流量变化,贡献率为 65% ~ 81%;而电力调度模式下其主导因素为梯级电站的调度运行,贡献率为 38% ~ 58%。以拉萨站为例,电力调度下梯级电站调度运行的贡献率比常规调度增长了 124%。河道外引水退水对于拉萨河水文情势改变的影响均较小。

参考文献:

- [1] 吴阿娜,杨凯,车越,等. 河流健康状况的表征及其评价[J]. 水科学进展,2005,16(4):602 - 608.
- [2] 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.
- [3] 戴凌全,蔡卓森,刘海波,等. 三峡水库枯水期不同运行方式对洞庭湖生态补水效果研究[J]. 水资源与水工程学报,2019,30(3):170 - 175.
- [4] RICHTER B, BAUMGARTNER J, WINGTON R, et al. How much water does a river need? [J]. Freshwater Biology, 1997, 37(1): 231 - 249.
- [5] RICHTER B D, MATHEWS R, HARRISON D L, et al. Ecologically sustainable water management: Managing river flows for ecological integrity [J]. Ecological Applications, 2003, 13(1): 206 - 224.
- [6] 王鸿翔,查胡飞,李越,等. 三峡水库对洞庭湖水文情势影响评估[J]. 水力发电,2019,45(11):14 - 18 + 44.
- [7] 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 + 26.

(下转第 79 页)

- [26] 张倩. 喀斯特水资源系统脆弱性评价方法、比较及其研究[D]. 贵阳:贵州师范大学,2018.
- [27] 穆瑾,赵翠薇. 变化环境下2000-2015年贵阳市水资源脆弱性评价[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(9): 12-17+28.
- [28] 张凤太,赵卫权,苏维词. 面源污染视角下的岩溶区地下水脆弱性评价——基于PSR物元可拓模型的分析[J]. 人民长江, 2016, 47(19): 12-19.
- [29] 张成凤,粟晓玲,蔡焕杰. 基于区间层次分析法的榆阳区水资源配置系统和谐性评价研究[J]. 自然资源学报, 2017, 32(6): 1053-1063.
- [30] 陈清惠. 喀斯特生态环境脆弱性特征及其生态防治——以贵州省为例[J]. 山地农业生物学报, 2007, 26(3): 244-247+260.
- [31] 王崑,许新宜,王红瑞,等. 基于PSR与DCE综合模型的水资源短缺程度及变化趋势分析——以北京市为例[J]. 自然资源学报, 2015, 30(10): 1725-1734.
- [32] 杨法暄,郑乐,钱会,等. 基于DPSIR模型的城市水资源脆弱性评价——以西安市为例[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(1): 77-84.
- [33] 刘丽颖,杨清伟,曾一笑,等. 喀斯特地区水资源安全评价模型构建及其应用——以贵州省为例[J]. 中国岩溶, 2018, 37(2): 203-210.
- [34] 周念清,赵露,沈新平,等. 基于压力驱动模型评价长株潭地区水资源脆弱性[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(7): 1061-1066.
- [35] 刘绿柳. 水资源脆弱性及其定量评价[J]. 水土保持通报, 2002, 22(2): 41-44.
- [36] 夏军,雒新萍,曹建廷,等. 气候变化对中国东部季风区水资源脆弱性的影响评价[J]. 气候变化研究进展, 2015, 11(1): 8-14.
- [37] 陈亚宁,李稚,方功焕,等. 气候变化对中亚天山山区水资源影响研究[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 18-26.
- [38] 杨振华,苏维词,李威. 基于PESBR模型的岩溶地区城市水资源安全评价——以贵阳市为例[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2016, 34(5): 1-9.
- [39] 周奉,苏维词,郑群威. 基于DPSIR模型的黔中地区水资源脆弱性评价研究[J]. 节水灌溉, 2018(8): 59-65.
- [40] 黄垒,张礼中,朱吉祥,等. 基于综合指数法的保定市地表水资源脆弱性评价[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(6): 68-73.

(上接第69页)

- [8] 彭少明,尚文绣,王煜,等. 黄河上游梯级水库运行的生态影响研究[J]. 水利学报, 2018, 49(10): 1187-1198.
- [9] 王海霞,张弛,周惠成,等. 引水条件下水库生态调度方法研究[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(1): 1-6.
- [10] 张飒,班璇,黄强,等. 基于变化范围法的汉江中游水文情势变化规律分析[J]. 水力发电学报, 2016, 35(7): 34-43.
- [11] 郭文献,陈鼎新,李越,等. 基于IHA-RVA法金沙江下游生态水文情势评价[J]. 水利水电技术, 2018, 49(8): 158-165.
- [12] 吴小宏,刘招,李强,等. 泾河长系列水沙变化规律与归因研究[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(6): 144-149.
- [13] 杨思雨,姜仁贵,解建仓,等. 渭河上游径流变化特征及归因研究[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(2): 37-42.
- [14] 于泽兴,胡国华,陈肖,等. 降水变化和人类活动对浏阳河流域径流的影响[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(11): 6-11.
- [15] 周沙,黄跃飞,王光谦. 黑河流域中游地区生态环境变化特征及驱动力[J]. 中国环境科学, 2014, 34(03): 766-773.
- [16] 王海霞. 考虑生态目标的水库引水与供水联合调度研究[D]. 大连:大连理工大学, 2015.
- [17] FREDERICKS J W, LABADIE J W, ALTENHOFEN J M. Decision support system for conjunctive stream-aquifer management [J]. Journal of Water Resources Planning & Management, 1998, 124(2): 69-78.
- [18] 黄草,黄梦迪,胡铁松,等. 拉萨河干流梯级水库库容-径流响应关系[J]. 水利水电科技进步, 2020, 40(1): 64-70.
- [19] 王强,张继军. 旁多-直孔水库群联合优化调度方案研究[J]. 东北水利水电, 2018, 36(12): 1-3+10+71.