

DOI:10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221401

梯级枢纽条件下信江下游四大家鱼繁殖期水文情势分析

张越¹,张洁¹,毛苇²,严如玉³,陶艳¹,凌铭¹,计勇¹

(1. 南昌工程学院水利与生态工程学院, 江西 南昌 330099; 2. 江西省高等级航道事务中心, 江西 南昌 330038;
3. 南昌工程学院土木与建筑工程学院, 江西 南昌 330099)

摘要:为探究梯级枢纽建设及运行对信江下游四大家鱼产卵场水文情势的潜在影响,选取21项参数建立鱼类产卵场水文评价指标体系,采用一维水动力模型分析了大溪渡产卵场河段在梯级枢纽建设前后的水文情势,并采用变动范围法分析了梯级枢纽建设前后产卵场繁殖期生态水文变化情况。结果表明,四大家鱼繁殖期流量在枢纽运行后呈下降趋势,研究区域断面流量趋于平均;高流量脉冲数量减少,降低了脉冲流量对四大家鱼产卵的刺激信号。研究量化了信江下游梯级枢纽建设对库区内产卵场繁殖期生态水文的影响,为当地枢纽调度运行的方案设计提供科学指导。

关键词: 梯级枢纽; 四大家鱼; 繁殖期; 水文指标体系; 信江

中图分类号: TV147 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)05-0018-04

1 概况

信江下游梯级枢纽包含已修建完成的界牌枢纽及处于修建过程中的八字嘴枢纽。其中界牌枢纽位于江西省余江县,八字嘴枢纽分为虎山咀枢纽与豕皮岭枢纽,位于余干县境内,距上游界牌枢纽49 km。研究区域内四大家鱼产卵场位于大溪渡附近,产卵场断面距下游八字嘴枢纽约7.3 km,距离上游界牌枢纽约41.7 km,见图1。研究表明^[1]信江下游鲤科鱼类占多数,主要有产漂流性卵类群与产静水粘性卵类群。水利枢纽建设人为改变天然径流情势、影响河流水文规律、破坏河湖生态系统结构和功能的完整性^[2]。已有研究证明^[3]水文情势的变化会在不同时空尺度上改变鱼类产卵场条件,影响其生长发育繁殖等生命过程。目前,IHA-RVA法能方便快捷评估河流生态水文改变情况,该指标虽以水文数据为基础,但每项指标均有相对应的生态影响,能在水文情势评价中表达丰富的生态信息。因此,该指标体系在水文情势评价研究中应用广泛^[4]。信江为鄱阳湖水系五大河之一,计勇等^[5,6]对该流域的研究主要

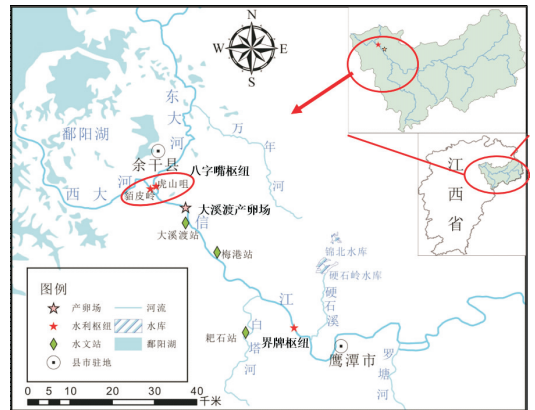


图1 研究区域水系及产卵场位置图

Fig. 1 Drainage distribution and location of spawning sites

集中在水资源承载力及水质分析等方面,未涉及当地枢纽建设对鱼类产卵场的影响,同时产卵场附近水文站缺乏长时间序列水文资料。为此,本文利用MIKE模型模拟计算信江下游产卵场繁殖期生态水文指标,分析了信江下游梯级枢纽建设对四大家鱼繁殖期的影响程度,以为当地生态环境保护及工程调度运行提供科学依据。

2 研究方法

收稿日期: 2022-07-11, 修回日期: 2022-08-12

基金项目: 江西省科技厅项目(20202BBGL73094; 20182BCB22013); 江西省“双千计划”资助项目(JXSQ2019201021); 江西信江航运枢纽工程项目科研课题(2019C0003); 南昌工程学院研究生创新计划项目(YJSCX202001); 江西省研究生创新专项资金项目(YC2020-S631; YC2021-S807; YC2021-S812)

作者简介: 张越(1997-),男,硕士研究生,研究方向为水文水资源与生态水利, E-mail: 576317149@qq.com

通讯作者: 张洁(1980-),女,副教授、硕导,研究方向为水利水电工程, E-mail: zhangjie@nit.edu.cn

2.1 水文数据及繁殖期确定

水文数据源于江西省上饶市水文局水文站实测官方数据,选取上饶市余干县梅港水文站 1956~2020 年逐日流量资料为基础水文资料。根据已有研究对信江鱼类习性的调查,参考鄱阳湖休渔期时间,同时借鉴我国大型水电站针对鱼类产卵保护的实践情况,将 3~6 月作为信江下游四大家鱼繁殖期^[7]。

2.2 生态水文指标及水文改变度计算方法

IHA(Indicators of Hydrologic Alteration) 指标体系将流量过程划分为五组共 32 项参数,为定量评价水文指标受干扰后的变化程度,在 IHA 方法基础上提出了变动范围法及改变度 D_i 量化水利工程建设对河流水文情势的影响,常俊超^[8]提出整体水文变化度 D_0 量化整体水文特征的改变程度,即:

$$D_0 = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_i^2 \right)^{0.5} \quad (1)$$

其中 $D_i = \left| \frac{N_{oi} - N_e}{N_e} \right| \times 100\% \quad (2)$

式中, D_i 为第 i 个 IHA 指标的改变度; N_{oi} 、 N_e 分别为第 i 个 IHA 指标受干扰后的观测年数落在 RVA 目标阈值范围内的年数、预期数,取天然水文序列中各指标 25%~75% 区间范围作为生态水文目标上下限阈值。取 33%、67% 分别为低度改变、高度改变阈值, D_0 范围取值同 D_i 。

结合 IHA 指标体系中各项参数所对应的生态影响,为有效分析信江下游产卵场繁殖期水文情势变化对鱼类生命活动的影响,参考已有研究,选取与鱼类发育繁殖相关的包含月均流量、极值流量、高低脉冲流量及流量变化率四组共 21 项参数作为生态水文指标^[9],将分析数据限制在繁殖期内,得出信江下游梯级枢纽建设对四大家鱼的影响。

2.3 模型建立、率定及验证

2.3.1 模型建立

利用 MIKE11 模型模拟得到河道水动力数据,结合生态水文指标可对河道生态水文情势进行有效分析,水动力模型依据一维圣维南方程组建立,连续方程、运动方程式^[10]分别为:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_t \quad (3)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial z}{\partial x} + g \frac{Q |Q|}{C^2 AR} = \frac{Q}{A} q_t \quad (4)$$

式中, t 为时间坐标; x 为距离坐标; A 为断面过水面积; Q 为断面流量; Z 为水位; q_t 为侧向入流

单宽流量; g 为重力加速度; C 为谢才阻力系数; R 为过水断面的水力半径。

研究区域在模型中分别被处理为主河及东大河两条河流,支流白塔河处理为从旁侧流。模型中的水工建筑物包括上游界牌枢纽及下游八字嘴枢纽,河道断面资料采用 2016 年绘制的《信江八字嘴枢纽航道库区 1:5 000 地形图》,平均每 200 m 提取一个断面。河网概化情况见图 2。

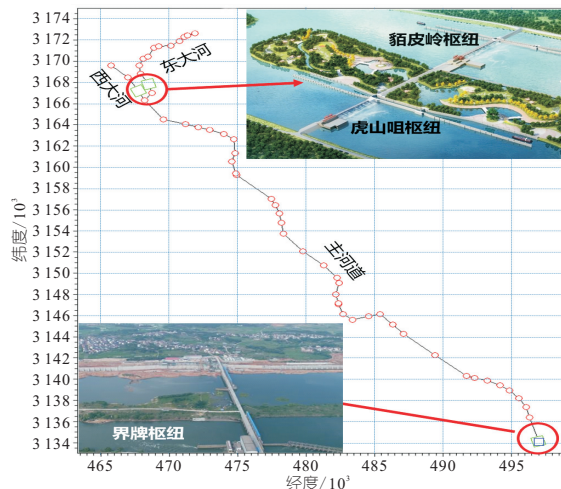


图 2 研究区域河网布置图

Fig. 2 River network layout of the study area

2.3.2 率定与验证

采用典型年份 1977、2005 年梅港站实测水位数据对模型进行率定及验证,结果见图 3。由图 3 可知,模型模拟结果与实测数据误差在 5% 以内,因此所建模型能准确模拟信江下游河段流量变化过程。

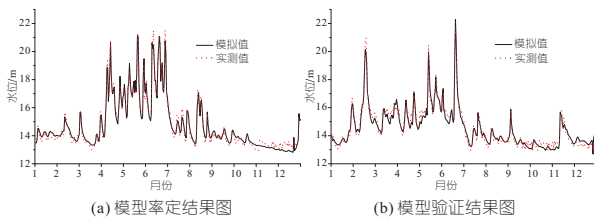


图 3 水动力模型率定及验证结果图

Fig. 3 Calibration and verification result of hydrodynamic model

3 结果与讨论

结合趋势检验及梯级枢纽建设时间,综合拟定 2003 年为研究区域河段径流突变点,取 1956~2003 年为枢纽建设前时期,2004~2020 年为枢纽建设后时期。通过模型模拟并提取产卵场断面水文数据,计算繁殖期生态水文指标见表 1。经计算,产卵场繁殖期整体水文变化程度为 47.56%,呈中度改变。

3.1 月均流量变化分析

第一组指标月均流量变化情况统计了梯级枢

表1 梯级枢纽建设前后产卵场生态水文变异指标对比分析

Tab.1 Comparative analysis of ecohydrology indicators before and after the construction of cascade hubs at spawning grounds

组别	生态水文指标	均值		阈值		水文改变度/%	
		枢纽建设前	枢纽建设后	下限	上限		
第一组指标	3月月均流量	664	565.9	-14.81	348.6	979.8	29.41(L)
	4月月均流量	1 008	813.4	-19.32	567.2	1 449	-5.88(L)
	5月月均流量	1 140	929.1	-18.51	554.3	1 726	17.65(L)
	6月月均流量	1 482	1 503	1.417	504.5	2 460	64.71(M)
	变化情况						
第二组指标	最小1d流量	150	187.1	24.73	73.8	226.1	64.71(M)
	极端流量	158.9	201.6	26.82	79.9	238.0	41.18(M)
	最小3d流量	182.1	221.7	21.78	88.0	276.1	52.94(M)
	变化情况						
	最小30d流量	272	334.6	23.01	119.7	424.3	41.18(M)
第三组指标	最小90流量	414.9	451.3	8.775	206.5	623.3	76.47(H)
	最大1d流量	6 105	5 278	-13.55	3 659.0	8 551.0	64.71(M)
	最大3d流量	5 187	4 563	-12.03	2 891.0	7 483.0	52.94(M)
	最大7d流量	3 990	3 358	-15.84	2 080.0	5 901.0	52.94(M)
	最大30d流量	2 433	2 126	-12.64	1 202.0	3 665.0	17.65(L)
第四组指标	最大90d流量	1 782	1 656	-7.06	1 045.0	2 856.0	76.47(H)
	低脉冲数量/次	4.771	4.824	1.11	2.7	6.9	17.65(L)
	低脉冲历时/d	17.58	11.11	-36.84	4.3	35.2	29.41(L)
	变化情况						
	高脉冲数量/次	4.708	4.529	-3.8	2.1	7.4	29.41(L)
第五组指标	高脉冲历时/d	8.968	7.975	-11.08	2.5	22.1	17.65(L)
	涨幅率	380.4	278.6	-26.76	150.1	610.6	41.18(M)
	流量变化率	-94.18	-80.4	-14.63	-144.7	-43.6	76.47(H)
及频率	逆转次数/次	38.23	41.41	8.325	32.5	44.0	5.88(L)

注:涨幅率、降幅率单位均为 m³/s/d。

枢纽建设前后信江下游四大家鱼繁殖期(3~6月)的平均流量,该流量为水生生物提供栖息地,影响水温、溶解氧及光合作用等。流量变化改变了鱼类栖息地面积,很大程度影响其产卵数量及分布,适当的流量过程是保证鱼卵漂浮的重要条件^[11],因此枢纽建设对河道繁殖期流量大小的改变将直接影响四大家鱼产卵条件及鱼卵存活度。

由表1可知,枢纽建设后信江产卵场断面处6月月均流量变化不大,其余月份流量均有不同程度下降,其中4月月均流量下降19.32%,均值偏离量最大。图4为梯级枢纽建设前后繁殖期月均流量变化图。由图4可知,枢纽建设后3~5月月均值流量落入生态水文目标阈值内的年份与预期数量接近,均发生轻度改变,而6月月均值流量呈中度改变。造成这一现象的主要原因是上游枢纽蓄水发电及提高通航需求,降低下游流量,恶化了产卵条件。同时月均流量的下降也间接改变了溶解氧、水温等鱼类产卵的关键因子,对水生生物栖息地蓄水及生物迁移造成影响。

3.2 极端流量变化分析

第二组指标极端流量变化情况统计了梯级枢纽建设前后产卵场3~6月中最小及最大1、3、7、30、90d平均流量。由表1可知,信江下游河段四大家鱼产卵场断面年均最小流量在枢纽建设运行的影响下均呈上升趋势,最大流量均有所下降,7项指标达到中度变化。极端流量整体变化显著,

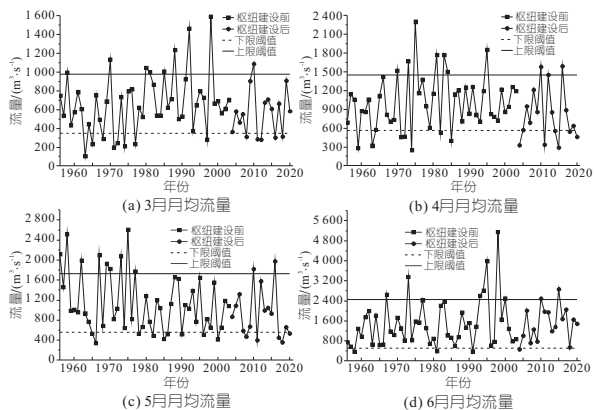


图4 梯级枢纽建设前后繁殖期月均流量变化图

Fig.4 Variation average flow during spawning period before and after the construction of cascade junction

原因是枢纽建设及水库的调度运行使库区河段各时期流量趋于平均,该变化弱化了产生脉冲流量的条件,影响其繁殖发育。

极端水文事件对河流及洪泛区的结构及功能有重要的调节作用,影响生物竞争的平衡。受水库“蓄洪补枯”作用的影响,水利枢纽的建设会显著改变河道极端流量大小。陈昌春等^[12]应用低流量范围标准揭示了赣江流域枢纽建设后多项极端流量指标发生高度改变的情况,为当地水库生态调度提供参考。产漂流性卵鱼类产卵区域流速需维持在“腰点”范围内,保证鱼卵及鱼苗不下沉,因此分析产卵场产卵期最小流量变化情况是判断当地鱼卵能否存活的重要依据。

3.3 流量脉冲变化分析

第三组指标流量脉冲变化情况包括繁殖期高、低流量发生次数及平均历时。由表1可知,信江下游梯级枢纽建设后研究区域低脉冲历时、高脉冲数量及历时均有减小,图5为梯级枢纽建设前后流量脉冲变化图。由图5可知,枢纽建设后繁殖期内低流量脉冲数量变幅加大,分析原因为枢纽配套电站开关机时产生发电流量,造成河道下游发生低流量程度的陡升陡降。四项指标呈轻度改变,但枢纽建设产生的削峰补枯作用使产卵场断面流量脉冲情况整体呈弱化趋势,降低了流量脉冲事件发生的频率,影响四大家鱼产卵行为。

低流量构成水生生物群落基本的限制;高流量则为鱼类及其他水生生物提供更多进入上游或下游区域的通道。赵越等^[13]通过生态流组法分析四大家鱼繁殖期生态水文事件的组成,证明了流量脉冲的洪峰过程会刺激四大家鱼的排卵受精活动,是其繁殖发育的重要影响因素。参考方春林等^[14]对信江流域鱼类资源调查情况可知枢纽建设前信江流域鱼类资源丰富,2013年监测出鱼

基于瞬变流理论和特征线法,对相继甩负荷工况下水力过渡过程开展数值模拟,结合可逆式机组特性曲线特点,分析了相继甩负荷间隔时间和尾水管进口压力最小值之间的内在联系。

b. 结果表明,存在最不利相继甩间隔时间,当尾水管进口压力最小值出现在后甩机组时,先甩机组运行轨迹点在水轮机制动区上弯点附近,后甩机组运行轨迹在水轮机制动区下弯点附近,此时的两台机组流量变化率最大值(正负向第一波)之间差值最大。

参考文献:

[1] 张健,卢伟华,范波芹,等. 输水系统布置对抽水蓄

能电站相继甩负荷水力过渡过程影响[J]. 水力发电学报,2008,27(5): 158-162.

[2] 刘蓉,杨建东. 抽水蓄能电站一洞两机相继甩负荷分析[J]. 水力发电学报,2017,36(4): 71-77.

[3] ZENG W, YANG J D, TANG R B. Extreme water-hammer pressure during one-after-load shedding in Pumped-storage stations [J]. Renewable energy, 2016, 99:35-44.

[4] CHEN SHENG, WANG JING, ZHANG JIAN, et al. Transient behavior of two-stage load rejection for multiple units system in pumped storage plants [J]. Renewable energy, 2020, 160:1012-1022.

[5] 储善鹏,何伟. 抽水蓄能电站尾水管进口压力变化内在机理研究[J]. 水电能源科学,2022,40(8): 194-197.

Study on Relationship Between Interval Time of Successive Load Shedding and Minimum Pressure of Draft Tube Inlet

ZHANG Yong-jin¹, CHU Shan-peng²

(1. Zhejiang Design Institute of Water Conservancy and Hydro-electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310000, China; 2. Zhejiang Flood Protection Technology Center, Hangzhou 310000, China)

Abstract: The purpose of the paper is to explore connection mechanism between interval time and pressure at draft tube inlet in successive load shedding case. Based on transient flow theory and method of characteristics, numerical simulation calculation of transition process in the successive load shedding case for pumped storage power station with layout of two turbines and one tunnel was carried out. The relationship between flow rate, running track of turbines and minimum pressure at draft tube inlet was analyzed. The result shows that there is a certain most unfavorable interval time making the time-domain asynchronous degree of first wave flow rate in two turbines maximized and the pressure at draft tube inlet is the minimum. At the same time, running track point of the first load shedding turbine is near the upper bending point in the inverse S-region of characteristic curve and running track point of the last one is near the lower bending point. The conclusion can provide a reference for calculation of extreme value of pressure at draft tube inlet in the pumped storage power station.

Key words: pumped storage power station; successive load shedding; interval time; pressure at draft tube inlet; flow rate; running track

(上接第 21 页)

Hydrological Regime Analysis of Breeding Period for Four Major Chinese Carps in Downstream of Xinjiang River After Cascade Junction Operation

ZHANG Yue¹, ZHANG Jie¹, MAO Wei², YAN Ru-yu³, TAO Yan¹, LING Ming¹, JI Yong¹

(1. School of Hydraulic and Ecological Engineering, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China; 2. Jiangxi Senior Waterway Affairs Center, Nanchang 330038, China; 3. School of Civil and Architectural Engineering, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China)

Abstract: To analyze the potential influence of the construction and operation of the cascade junction on the hydrologic regime of four major Chinese carps spawning sites in the downstream of the Xinjiang River, 21 parameters were selected to establish the hydrological index system of fish spawning sites. The one-dimensional hydrodynamic model was adopted to analyze the hydrological regime of Daxidu spawning site before and after the construction of the cascade junction. The range of variability approach was used to analyze the hydrological changes of spawning grounds during the breeding period before and after the construction of cascade junction. The results show that the flow during the breeding period decreases after the operation of the cascading junction, which made the variation range of water flow limited in a small range. Furthermore, the number of high flow pulse decreased, which reduced the stimulation signal to spawning of four large fishes. This study quantified the impact of the construction of cascade junction in the downstream of the Xinjiang River on the spawning grounds during the breeding period, and provided scientific guidance for the design of the local hub operation scheme.

Key words: cascade junction; four major Chinese carps; breeding period; hydrological index system; Xinjiang River