

一种优化混合式电站生态流量过程的模式

刘清园¹,李永^{1*},李嘉¹,张鹏¹,张志广²

(1.四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室,四川成都610065;2.中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司,北京100024)

摘要:针对采用传统生态基流量计算方法所确定的流量难以兼顾生态效益和经济效益的难题,提出了一种适用于混合式水电站的生态流量过程的优化模式。以栖息地加权可用面积为决策指标,认为优化前后基流量所对应加权可用面积相同时河道生境不发生较大改变,通过优化天然河道生境不适区的方式调整引水比使生态经济效益达到联合最优。以昌波水电站为例,选取长丝裂腹鱼为保护目标,利用丁坝对减水河道生境不适区进行优化,结合目标水生生物繁殖敏感期对水力生境的需求,重点研究了生境不适区的水文情势变化情况并确定了优化后的全年河道生态流量过程。结果表明:当选取3个生境不适区进行优化时,河道生态基流量为多年平均流量的10%,所对应的栖息地加权可用面积为87 782.02 m²,而传统方法所得的基流量为多年平均流量的20%,所对应的栖息地加权可用面积为87 726.2 m²。在保证水力生境条件不变的情况下,前者的流量比后者降低了10%。依据优化后所得生态基流量及对河道涨落水率的研究结果推求得到的昌波水电站生态流量过程,在满足目标鱼类生存繁殖所需水量的同时,较好地保留了天然栖息地的径流涨落变化和流量脉冲过程,为营造保护鱼类适宜生境和确定优化混合式电站生态流量过程提供了示范,同时为电站的生态调度管理提供了依据。

关键词:混合式电站;长丝裂腹鱼;生态流量优化;引水比;生态流量过程

中图分类号:X174

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2018)02-0091-08

A Model for Optimizing Ecological Flow Regime of Dam-diversion Type Hydroelectric Station

LIU Qingyuan¹, LI Yong^{1*}, LI Jia¹, ZHANG Peng¹, ZHANG Zhiguang²

(1.State Key Lab. of Hydraulics and Mountain River Eng.,Sichuan Univ.,Chengdu 610065,China;

2.PowerChina Beijing Eng. Corp. Ltd.,Beijing 100024,China)

Abstract: Aiming at the problem that the flow determined by the traditional ecological basic flow method is difficult to consider both the ecological and economic benefits, in this paper we propose an optimization model suitable for the ecological flow process of the dam-diversion type hydroelectric station. This model adjusts the diversion ratio by optimizing the vulnerable areas of hydraulic factors in natural river channels to make the ecological and economic benefits reach the joint optimum, in which the WUA is adopted as the decision index and a hypothesis is assumed that the fish habitat does not change greatly if the WUA of improved ecological base flow keeps in line with that before improvement. Taking the Changbo Hydropower Station for example, this paper emphasized on the changes of hydrological regime in the vulnerable areas of hydraulic factors and the improved ecological flow process of the river channel was determined after considering the fish of *Schizothorax dolichonema*'s requirement for the hydraulic factors in its spawning period when the vulnerable areas were optimized through using the spur dike. The results showed that when selected 3 vulnerable areas to optimize, the river ecological base flow is 10% of the average annual flow while the calculation results of traditional methods is 20%, the two corresponding effective area is 87 782.02 m² and 87 726.2 m² respectively. The former flow rate was decreased by 10% compared with the latter under the condition that the habitat's hydraulic condition remained unchanged. The ecological flow process of Changbo Hydropower Station which could preserve the basis of the optimized ecological fluctuation of runoff and process of flow pulse while satisfying the water demand of target fish is obtained on the basis of the optimized ecological base flow and the study res-

收稿日期:2017-09-27

基金项目:国家重点研发计划重点专项资助(2016YFC0401709);国家自然科学基金资助项目(51379136)

作者简介:刘清园(1994—),女,硕士生。研究方向:生态水力学。E-mail: 943521576@qq.com

*通信联系人 E-mail: li_yong@scu.edu.cn

网络出版时间:2018-03-20 16:22:07

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20180320.1622.009.html>

<http://jsuese.ijournals.cn>

<http://jsuese.scu.edu.cn>

ults of rise rate and fall rate. This process provides a demonstration for the establishment of appropriate hydraulics habitat for protected fish and the optimization of the ecological flow regime of mixed type hydropower stations. Meanwhile, it also provides a basis for the ecological dispatching management of power station.

Key words: dam-diversion type hydroelectric station; *Schizothorax dolichonema*; ecological flow optimization; diversion ratio; ecological flow regime

引水式水电站利用水体势能进行发电,相较于其他水电开发形式,这种方式对河道流量要求小且坝体高度低,易恢复物种生境连通性,河段流水生境静水化程度低,在水资源丰富但河道流量较小的山区丘陵地区发展较快。然而引水式水电站的开发通常会在坝址和下游厂房之间形成减水河段,使得该河段天然水文情势发生巨大改变,水量大幅减少,不仅对沿河生态景观和河流生态环境产生负作用,而且也水生生物,尤其是鱼类的生存繁衍造成巨大影响^[1-2]。随着人们生态意识不断增强,生态保育及生态工程等问题逐渐被重视,鱼类作为河道生态系统状态优劣及生物多样性完整度的指示物种,减水河段对其生命活动及水力生境条件的影响也越来越受到人们的关注^[3]。为了减缓工程建设对生态系统的影响,最大程度保留河道天然水文信息,保护下游鱼类正常产卵繁殖,通常采用设置生态机组的办法来调配河道生态水量,并结合生态调度以保障减水河段生态用水需求。然而生态流量下泄与水力资源发电效益之间仍存在一定冲突^[4],各学者对满足电站经济和生态效益前提下的生态基流量分别进行了研究^[5-7],但未将水文生物要素与工程开发效益相结合,针对将鱼类产卵所需水文信号考虑在内的混合式电站生态流量过程的研究更是鲜见报道。现有方法所确定的生态基流量往往不能保证一坝两厂混合式电站的水能资源得到最合理的利用,故本文提出优化混合式电站生态流量过程的确定模式,从鱼类微生境尺度出发,以其生存繁衍所需水力参数为基础,通过生境优化措施调整该类电站的最优引水比(坝式厂房引用流量与引水式厂房引用流量之比),建立既能满足下游鱼类生境要求,又能最大限度提升发电指标的生态流量过程的确定方法,为未来混合式水电站的生态化开发提供技术基础,同时也为电站建成后的生态调度提供依据。

作者以金沙江上游昌波水电站为例,以省级保护鱼类长丝裂腹鱼为研究目标,分别采用生态水力学法和生境模拟法初步确定非产卵期和产卵期的生态基流量,根据水深、流速适宜度综合确定生境优化措施的方案,并结合目标鱼类的生态水文学指标,得到生态流量过程,达到优化电站引水比的目的,同时也为电站机组设计提供依据。

1 工程概况及目标鱼种

1.1 工程概况

昌波水电站为金沙江上游干流梯级规划“一库十三级”中的第11个梯级电站,上游梯级为苏洼龙水电站,下游梯级为旭龙水电站。昌波电站的回水末端与苏洼龙电站衔接,引水式发电厂房下游左岸500 m处有支流麦曲河汇入。电站为混合式开发,可利用水头为83 m,坝址多年平均流量952 m³/s,具有水头低、流量大、引水系统规模大的特点,是一座具有日调节性能的电站。电站运行后坝下形成减水河段,河段水面面积减少,流速变缓,水深和湿周也随之减少,枯水期甚至出现断流的情况,导致该河段原来适应于急流环境产黏沉性卵的长丝裂腹鱼生存空间和生存环境受到巨大影响,物种生存面临极大威胁。本文选择昌波坝址至引水式厂房之间形成的12.5 km减水河段作为研究河段,计算河段所需生态基流量并结合长丝裂腹鱼生态水文学指标推求生态流量过程,为电站生态调度提供依据。研究河段所在区域水系概况详见图1。

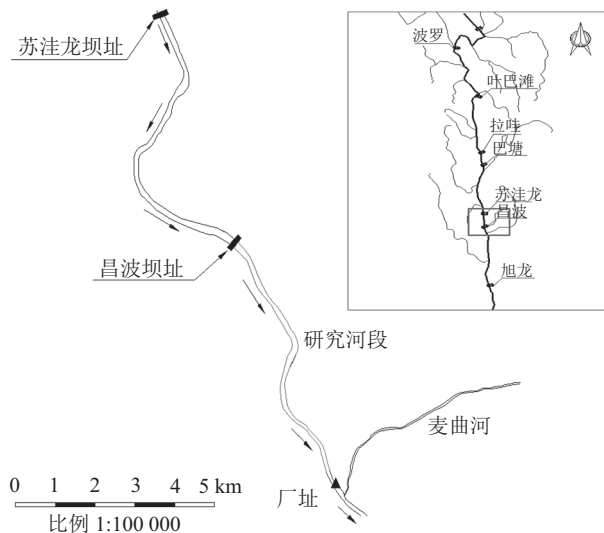


图1 研究河段所在区域水系图

Fig.1 Water system of research area

1.2 目标鱼类

根据水利部中国科学院水工程生态研究所对昌波水电站水域水生生态的现场调查以及相关文献记录,研究河段的鱼类区系中省级保护鱼类长丝裂腹鱼分布较广,为研究河段优势物种,同时也是四川野

生物保护种。长丝裂腹鱼产沉黏性卵,产卵发生时间为每年的3~4月^[8-9],产卵时需要一定的水流刺激和底质条件,并进行短距离的生殖洄游,对水力生境要求较高。昌波水电站建成后,径流发生变化,水量减少将使河道环境有异于天然情况,对长丝裂腹鱼产卵繁殖产生不利影响。因此,为保证该江段长丝裂腹鱼产卵繁殖和生存需求,下泄满足保护对象需求的生态基流量和合理的生态流量过程显得尤为重要。

2 生态基流量初步分析

2.1 原理和方法

国内外常用的河流生态需水量计算方法大致可以分为四类:水文学法、水力学法、生态水力学法^[10]和生境模拟法。根据研究河段的水文特征和水生生态特点,分别使用生态水力学法和生境模拟法初步确定目标鱼类非产卵期和产卵期所需生态流量。计算非产卵期生态基流量时,使用纵向1维水动力学模型计算不同流量情况下研究河段的过水断面的面积、最大水深、水面宽、湿周、平均水深等水力学参数值。产卵期生态基流量的计算采用河道内流量增加法^[11-12](instream flow incremental methodology, IFIM),结合目标鱼类的生态水力学需求,使用以浅水方程为基础的River2D平面2维水动力学模型,计算目标鱼类的栖息地加权可用面积(weighted usable area, WUA),建立A-Q关系曲线,以曲线上拐点对应的流量作为目标鱼类产卵期的生态基流量^[13],模型控制方程如式(1)~(3):

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(Uq_x) + \frac{\partial}{\partial y}(Vq_x) + \frac{g}{2} \frac{\partial}{\partial x} H^2 = gH(S_{0x} - S_{fx}) + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial}{\partial x} (H\tau_{xx}) \right) + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial}{\partial y} (H\tau_{xy}) \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(Uq_y) + \frac{\partial}{\partial y}(Vq_y) + \frac{g}{2} \frac{\partial}{\partial y} H^2 = gH(S_{0y} - S_{fy}) + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial}{\partial x} (H\tau_{yx}) \right) + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial}{\partial y} (H\tau_{yy}) \right) \quad (3)$$

式中, H 为水流平均深度, U 、 V 分别为 x 、 y 方向平均速度, q_x 、 q_y 分别为 x 、 y 方向单位宽度的流量, S_{0x} 、 S_{0y} 分别为 x 、 y 方向河床坡度, S_{fx} 、 S_{fy} 分别为相应的摩擦阻力, τ_{xx} 、 τ_{yy} 、 τ_{xy} 、 τ_{yx} 分别为相应的水平剪切应力。

栖息地加权可用面积用 A 表示。计算公式如式(4)~(5):

$$A = \sum_{i=1}^n CS I_i \times A_i \quad (4)$$

$$CS I_i = V_i \times D_i \times C_i \quad (5)$$

式中, $CS I_i$ 为每个计算单元中各影响因子的综合栖息地适宜性值, n 为划分的单元数, V_i 、 D_i 、 C_i 分别为流速、水深、河道指数(包含底质和覆盖物情况)的适宜性值, A_i 为计算单元的面积。

2.2 计算结果

2.2.1 非产卵期河段生态需水量

昌波电站坝址多年平均流量为952 m³/s,工程研究河段河道平均比降为0.51%。根据昌波水电站工程研究河段鱼类的生理特征、生活习性等生态学资料及鱼类生境原有水力学条件分析,以R2-Cross法^[14]和生态水力学法^[1,10]的水力参数标准对流速、水深、水面宽、湿周率等的要求为参照,结合目标鱼类野外调查结果,确定了研究河段目标鱼类生存所需的生境水力学参数限值,见表1。

表1 研究河段鱼类需求的水力生境参数标准

Tab.1 Hydraulic characteristics standard of fish requirements

水力参数	最大水深/m	平均水深/m	平均流速/(m·s ⁻¹)	水面宽/m	湿周率/%
最低标准	1.2	0.8	0.4	30	>50

注:受地形影响,要求水力参数达到最低标准的河段累计长度占总研究河段长度的百分比大于80%。

计算下泄流量分别取多年平均流量的6%、8%、10%、10.5%、12.5%、15%、20%、30%以及实测最小流量,各计算流量分别为57.1、76.2、95.2、100.0、119.0、142.8、190.4、285.6及153.0 m³/s。各流量情况下生境指标累计河段长度百分比(参数达标率)统计结果见表2。

表2 不同流量时生境水力参数达标率统计表

Tab.2 Statistics of hydraulic characteristics standard rate under all conditions

流量/(m ³ ·s ⁻¹)	参数达标率/%				
	最大水深	平均水深	平均流速	水面宽	湿周率
57.1	72.88	59.10	90.75	71.54	75.20
76.2	79.37	76.76	95.10	71.54	86.91
95.2	79.93	79.37	100.00	78.03	92.66
100.0	80.09	81.62	100.00	82.66	92.66
119.0	80.09	83.55	100.00	85.43	94.58
142.8	80.87	92.29	100.00	92.26	98.37
190.4	87.90	98.18	100.00	96.58	98.37
285.6	98.18	100.00	100.00	96.58	100.00
153.0	83.11	98.18	100.00	92.26	98.37

当下泄流量100 m³/s时,河段的水力生境参数均满足目标鱼种的生境标准要求。此时河道的最大水深集中在1.2~4.0 m、平均水深集中在0.8~3.0 m、平均流速集中在1.0~4.0 m/s,水面宽度大于30 m有较

好的水深、流速条件和生境连通性。研究河段的鱼类体形均较小, 体型较长的鱼仅有300 mm左右, 故河道水力参数可满足目标鱼类非产卵期在水中自由活动、藏身、觅食等生境要求。因此初步确定非产卵期昌波坝址处需要下泄的生态基流量为 $100 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

2.2.2 产卵期河段生态需水量

由于研究河段的人为扰动小, 河槽未受破坏, 故在不考虑底质和覆盖物对物种数量和分布造成影响的情况下, 仅以微生境(水深、流速)为影响因素进行研究(河道指数取值为1)。计算流量分别为多年平均流量的5%、6%、7.5%、10%、13%、15%、20%、30%、35%, 用River2D软件进行水动力模拟, 结合张志广等^[15]在研究苏洼龙水电站时提出的长丝裂腹鱼产卵期生态水力学特征, 得到A-Q关系曲线如图2所示。

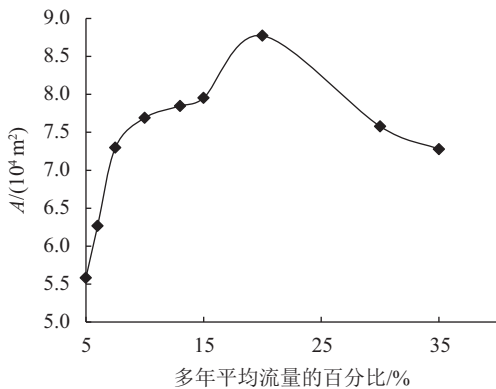


图2 产卵期A与研究河段流量关系曲线

Fig.2 Relationship curve between A and quantity of flow in study reach during spawning period

由图2可知, 当流量为多年平均流量的20%时, A-Q关系曲线上存在一个最大值, 此流量状态下研究河段鱼类的可利用栖息地面积最大。故昌波电站坝下河段维持鱼类产卵繁殖所需的生态流量初步推荐值为 $190.4 \text{ m}^3/\text{s}$, 此时栖息地加权可用面积为 $87\,726.2 \text{ m}^2$ 。

3 优化生态基流量

鱼类产卵期为其生命过程中的敏感期, 对生境条件要求最为严苛, 若能保障产卵期所需水深、流速条件, 即可满足该物种生存繁殖需求^[16]。根据计算分别得到长丝裂腹鱼非产卵期和产卵期所需生态流量初步推荐值为多年平均流量的10.5% ($100 \text{ m}^3/\text{s}$) 和20% ($190.4 \text{ m}^3/\text{s}$), 故应以多年平均流量的20%作为基流量推求生态流量过程。但为了能够在保证生态保护对象产卵繁殖所需条件的前提下, 对水资源进行合理利用, 将天然情况下产卵期所需生态基流量的加权可用面积作为河道鱼类生存繁殖所需栖息地面积的下限值, 通过使用优化措施的方式在保持低

流量下水力生境质量的情况下, 以多年平均流量的20%(下称为天然基流量)为基础, 调整目标鱼类产卵时期生态机组下泄流量。

3.1 优化方案的确定

为改善鱼类产卵场的水力生境, 可通过工程措施和非工程措施^[17]对生境不适区域进行优化改造。相较于非工程措施, 工程措施因建设周期短、固化性好等特点多被应用在工程中。丁坝是其中使用较广泛的河道整治和维护建筑物, 具有抗冲刷侵蚀能力强、束窄河道、塑造微生境、维护河相等优势, 适用于对减水河段进行生境优化。结合工程特性和目标鱼种需求, 以丁坝为例对生境进行优化, 旨在探讨设置丁坝前后研究河段生态基流量的变化情况, 认为在丁坝设置后目标鱼类的栖息地加权可用面积与天然基流量的栖息地加权可用面积相等时, 减水河段鱼类生境不发生较大变化, 并以影响鱼类产卵的典型水力学指标水深、流速^[18]为生境水力指示参数对生境质量进行评价。

3.1.1 方案设置

由于天然基流量下河段两岸流速适宜度计算结果差异不大, 未见流速适宜度明显降低区域, 因此丁坝位置的设置主要依据水深不适区确定; 由计算结果可知, 研究河段存在5个水深适宜度偏小的突出区域, 如图3所示, 蓝色部分代表该区域适宜度值较小, 为0.1~0.2, 根据丁坝可局部壅高水位的特性在水深适宜度较小区域选择阻水率为0.35^[19]的非淹没单丁坝, 全河段共5个水深适宜度不适区, 依次编号为1[#]~5[#], 生境不适区的水深适宜度和编号情况见图3。

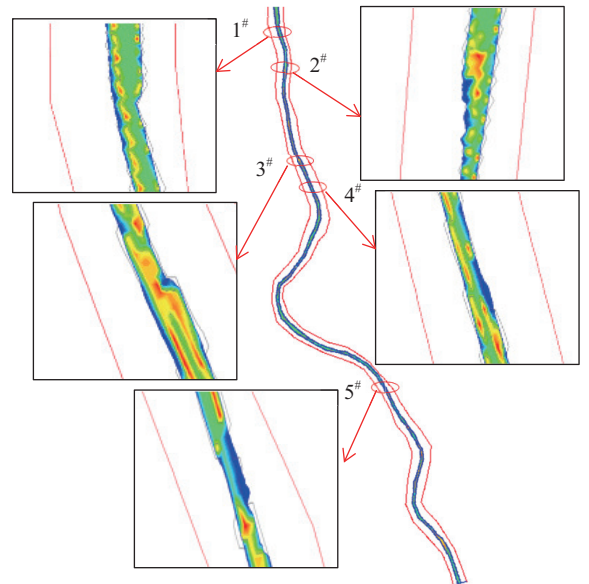


图3 水深适宜度生境不适区编号情况

Fig.3 Diagram of weak spots of depth suitability

根据各不适区作用面积和不利程度建立不同设置方案, 分别计算各方案下研究河段所需生态基流量。由于旨在研究优化措施生态经济要素的合理可行性而非工程本身, 这里选取其中效果较好的两个方案进行分析。方案1选择1[#]、2[#]、5[#]设置3个丁坝进行优化, 方案2选择1[#]~5[#]全部5个不适区设置丁坝。利用River2D分别计算各工况为多年平均流量的5%、6%、7.5%、10%、13%、15%、20%、30%时两个方案所得的栖息地加权可用面积。

3.1.2 计算结果

两种方案下得到的A-Q关系曲线如图4所示。方案1中, 当生态下泄流量为多年平均流量的10%(95.2 m³/s)时, 栖息地加权可用面积为88 612.38 m², 天然基流量的栖息地加权可用面积为87 726.2 m², 根据栖息地加权可用面积相同, 可维持相同生境条件的假设可知, 该设置条件下具有与天然基流量基本相同的栖息地加权可用面积。故方案1中, 可维持目标鱼类生境条件的生态基流量为95.2 m³/s。若采取方案2对全部5个生境不适区设置丁坝进行优化, 在8%(76.2 m³/s)时为可维持目标鱼类生境条件一定的生态基流量, 此时栖息地加权可用面积为87 782.02 m²。在采取优化措施后, 目标鱼类产卵期生态基流量分别在天然基流量的基础上减少了10%和12%, 且各方案的生态基流量所对应栖息地加权可用面积不低于87 726.2 m², 说明在保证生物生存繁殖的生境条件得到保障的前提下, 科学、合理地利用工程措施调整生态流量以达到生态与经济的联合最优是可行的。

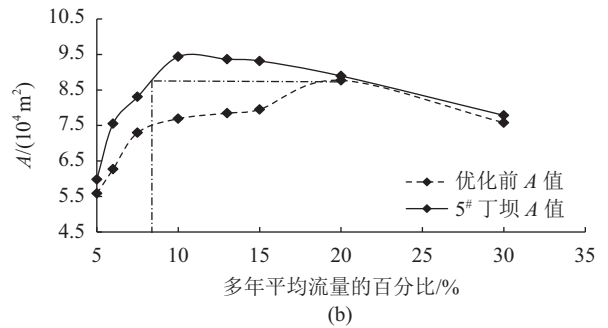
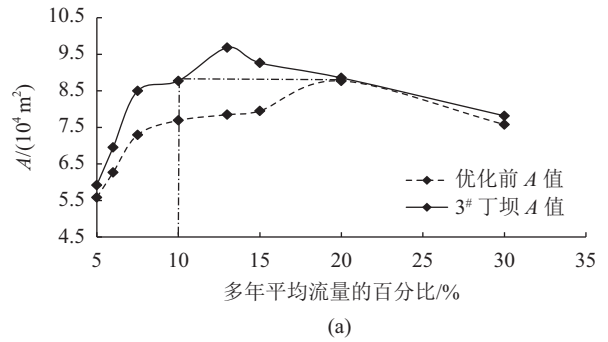


图4 两种方案下的A-Q曲线图

Fig.4 Curves of A-Q under two different plans

3.2 优化后生态基流量的确定

两种方案下的生态基流量分别为天然基流量的8%(方案2, 76.16 m³/s)和10%(方案1, 95.2 m³/s)。天然情况下5[#]位置处生境条件最差, 故以5[#]丁坝为例, 分析不同方案河道的流场变化, 比较生境指示参数适宜度差异, 确定优化后的生态基流量。两种方案的计算结果如图5、6所示。

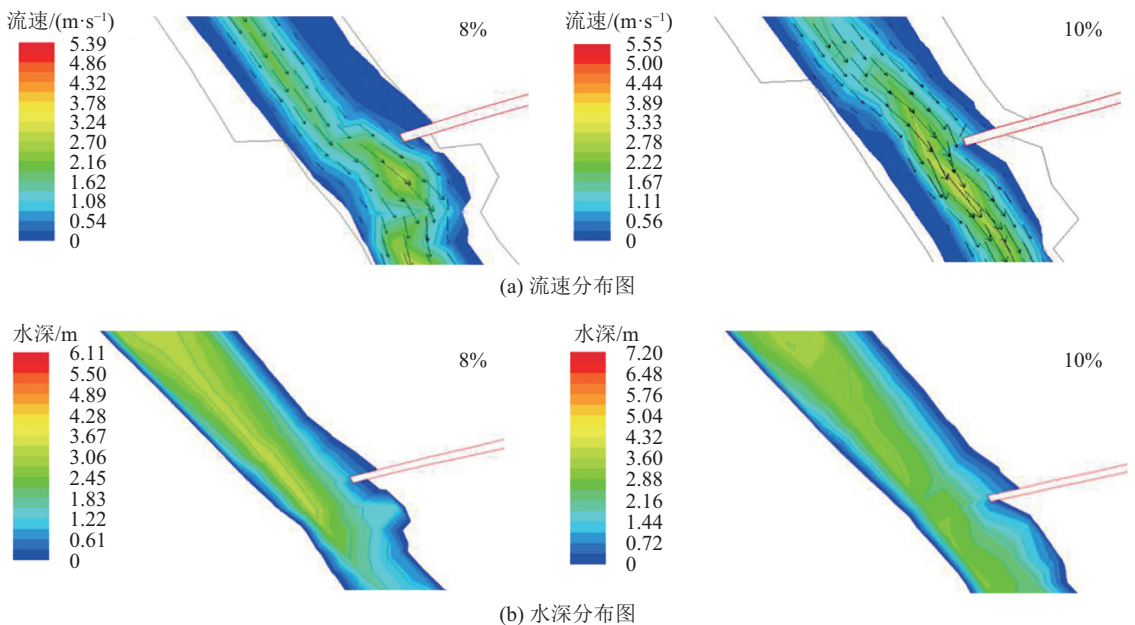


图5 不同方案下5[#]丁坝流速和水深分布

Fig.5 Velocity and depth fields of 5[#] spur bike in different plans

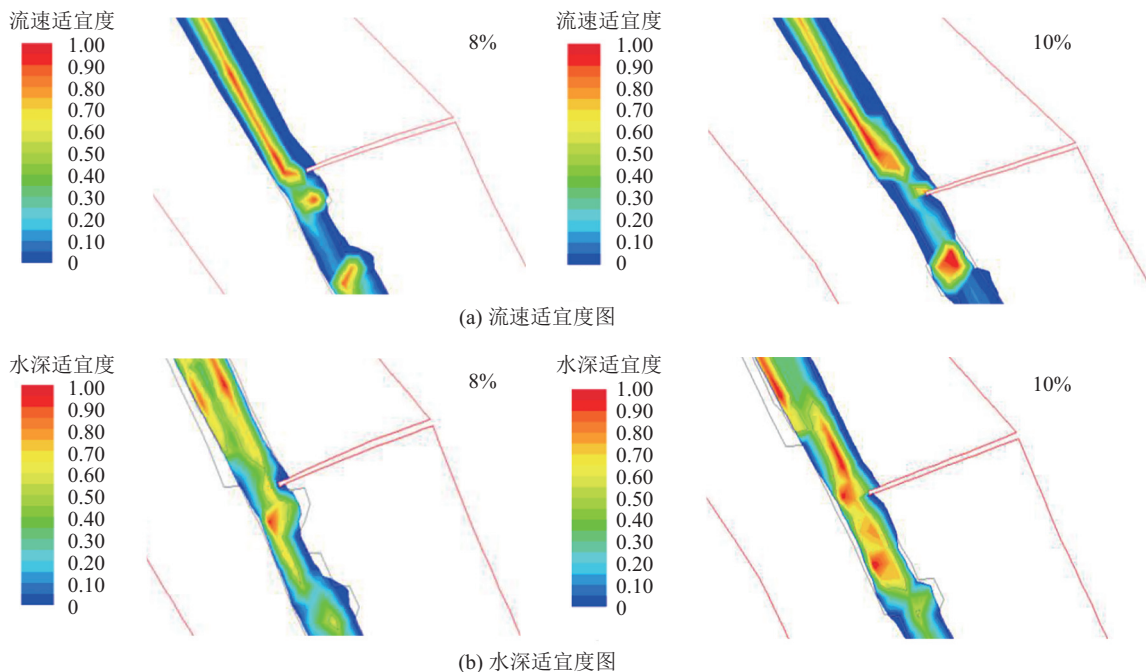


图 6 不同方案下5#丁坝流速和水深适宜度

Fig.6 Velocity and depth suitability of 5# spur bike in different plans

分析图5可知,相较于多年平均流量的8%,取10%时坝前河道中心壅水增多,流速增加,近左岸浅水区域流速变大,水体流动性增强;丁坝处河宽束窄,坝头处流速亦较低流量时增加,且当水流绕过坝头后,河道宽度逐渐恢复,下游水深基本能维持稳定不变。结合鱼类偏好习性,对可利用水力生境的适宜度进行分析,由图6(a)可知,当生态基流量为多年平均流量的10%,5#丁坝上游区域流速适宜度相对于多年平均流量的8%时有明显升高,适宜度较大的范围从河道中心向两岸扩增,且在坝头右侧位置出现适合鱼类生存的流速区,河道沿程的流速连续性增强;分析图6(b),生态基流量为多年平均流量的8%时,上游河道两岸基本消除水深完全不利区(水深适宜度为0的区域),当流量为 $95.2\text{ m}^3/\text{s}$ 时,丁坝附近河道中心的水深适宜度和范围都明显增加,虽然上游左岸仍然存在部分水深薄弱点,但鱼类仍可在河道右岸和下游左岸部分区域内获得适合生存繁殖的水深条件,且通过分析图6(b)可知,河道纵向水深连通性也得到增强,带状区域内适宜度为0.7~0.9。综上,当选取方案1中的生态基流量时,不论是河道适宜度还是生境连通性都优于方案2,较大的流量值能够为河道提供更高的生态保证率,同时丁坝数量的减少能够降低成本,更大程度地保证河道的天然性并满足合理利用水资源的要求。此外,由于该生态基流量更能保障长丝裂腹鱼产卵期对生境的苛刻需求,且长丝裂腹鱼在非产卵期对水力生境要求不高,可以认为 $95.2\text{ m}^3/\text{s}$ 是该

物种完成整个生命史的最低流量限值,故选取 $95.2\text{ m}^3/\text{s}$ 作为优化后河道的全年生态基流量。

4 生态流量过程的推求

鱼类的适生趋向性使得该物种能够选择适宜生存的环境作为栖息地,栖息地的形成是水流在年内和年际的持续动态变化过程中形成的,长丝裂腹鱼在不断的进化过程中,已经适应了天然情况下河道涨落水过程。为了更好地保障适宜鱼类生存繁殖的生境条件,应尽可能恢复河道水文环境的天然变化过程。结合对金沙江上游长丝裂腹鱼栖息地1960—1968年、1971—1988年、1992—2012年共58年的逐日流量资料进行统计分析和归一化处理,选择分布频率高、分布指数(各变量区间对应的频率值与最大频率值之比)较大的涨落水率区间作为目标鱼类偏好的栖息地生态水文学指标范围,如表3所示。以优化生境后IFIM法确定的河段全年生态基流量 $95.2\text{ m}^3/\text{s}$ 为基础,推求生态流量过程曲线。

表 3 目标鱼类栖息地适宜的涨落水率统计

Tab.3 Suitable rise rate and fall rate of habitat of research fish

时期	生态水文学指标	适宜范围
产卵期(3—4月)	日涨水率	0.005~0.015
	日落水率	0.005~0.015
非产卵期(5—10月)	日涨水率	0.010~0.050
	日落水率	0.020~0.040

金沙江上游11月—次年2月为枯水期,取生态基流量 $95.2\text{ m}^3/\text{s}$ (多年平均流量的10%)作为枯水期的下泄生态流量;3—4月为长丝裂腹鱼的产卵期,由于该时期研究河段天然河流水文情势主要为涨水,故在长丝裂腹鱼产卵期构造了一个持续涨水过程,3月1日—3月14日为缓慢涨水过程,日涨水率为0.005,持续14 d;3月下旬至4月末为长丝裂腹鱼产卵行为较为集中的时段,为保证流水刺激,日涨水率增加为0.015,该时间段内持续涨水;结合天然情况下5—10月的河道流量情况,构造了一个涨落水变化过程,其中5月1日—7月10日,涨水以10 d为一个调度单位,

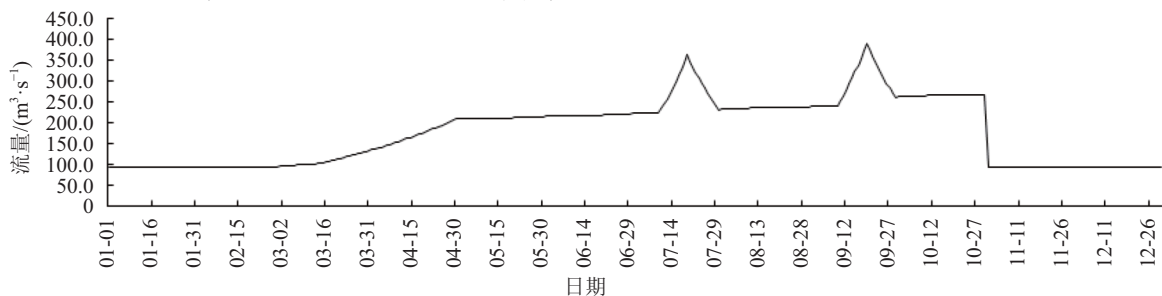


图7 昌波电站减水河段生态流量下泄过程线

Fig.7 Ecological flow regime curve of Changbo hydropower station

5 结论

以昌波水电站为例,提出了一种优化电站生态流量过程的确定方法,在保证生态保护对象所需水力生境条件的前提下,通过优化措施解决传统的生态基流量计算方法所确定的流量难以兼顾满足生态效益和经济指标效益的难题。以长丝裂腹鱼为保护对象,重点讨论了采取方案1和方案2设置丁坝以稳固生境不适区基底值时,不同方案所得到的生态基流量,并通过分析生境最不利断面附近的河道水文情势变化,结合鱼类生态水文特征,以生境参数适宜度为决策指标,确定了减水河段全年生态基流量并给出了生态流量过程线。所得结论如下:

1)传统方法确定的非产卵期和产卵期生态基流量分别占多年平均流量的10.5% ($100\text{ m}^3/\text{s}$)和20% ($190.4\text{ m}^3/\text{s}$),考虑鱼类产卵期的敏感性取较大的全年生态基流量时,该流量下栖息地加权可用面积为 $87\ 726.2\text{ m}^2$,具有较好的适宜生存面积,但此时机组经济指标变差。

2)通过方案1和方案2所确定的优化生态基流量分别为多年平均流量的10% ($95.2\text{ m}^3/\text{s}$)和8% ($76.2\text{ m}^3/\text{s}$),栖息地加权可用面积分别为 $87\ 728.73\text{ m}^2$ 和 $87\ 782.02\text{ m}^2$,均优于天然基流量下的栖息地加权可用面积。但方案1对原河道生境不适区的优化程

每个调度单位内每天流量相同,每调度单位间涨水率为0.01;7月11日—7月31日制造一次人工流量脉冲事件,日涨水率为0.05,持续涨水10 d,日落水率为0.04,持续落水10 d;8月1日—9月10日,每隔10 d涨一次水,涨水率为0.01;9月11日—9月30日制造一次人工流量脉冲事件,日涨水率为0.05,持续涨水10 d,日落水率为0.04,持续落水10 d;10月1日—10月31日,每隔10 d涨一次水,区间涨水率为0.01;11月1日河道进入枯水期,流量降低到 $95.2\text{ m}^3/\text{s}$ 并保持该流量至次年2月末。由此获得的昌波水电站坝下减水河段生态流量过程见图7。

度、水力生境指示参数适宜度、生态保证率及经济成本等要优于方案2,故选取多年平均流量的10% ($95.2\text{ m}^3/\text{s}$)作为减水河段全年的生态基流量。优化后的生态基流量在保证鱼类产卵需求的前提下,比天然基流量降低了10%,说明混合式开发电站作为山区河流水能的主要利用方式仍然具有经济可开发性和生态可持续性。

3)河道的天然流量涨落过程具有随机性,为了便于电站调度管理以及满足长丝裂腹鱼生命过程所需的水文信号刺激,在金沙江流域水文资料统计的结果上,考虑了河道涨落水过程和流量脉冲现象,尽可能保留天然情况下的河道水文信息,为减水河段的鱼类保护和水电站生态调度提供一条更加完善的生态流量过程线。

参考文献:

- [1] Wang Yurong, Li Jia, Li Kefeng, et al. Hydraulic parameter of habitat requirement for fish in water reduced river reach due to diversion of hydropower station[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(1): 107–111. [王玉蓉, 李嘉, 李克锋, 等. 水电站减水河段鱼类生境需求的水力参数[J]. 水利学报, 2007, 38(1): 107–111.]
- [2] 杨持. 生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008.
- [3] Song Lanlan, Lu Guihua, Liu Ling. Estimation of instream flow based on hydrological indexes[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(11): 1336–1341. [宋兰兰, 陆桂华, 刘

- 凌.水文指数法确定河流生态需水[J].水利学报,2006,37(11):1336-1341.]
- [4] Gu Hongbin,Zhou Shaosen,Jiang Hong.Analysis of ecological flow in MingJiang hydropower planning and diversion station[C]//Proceedings of United Nations Symposium on Hydropower and Sustainable Development.Beijing: China Academic Journal Electronic Publishing House, 2004:1234-1241.[顾洪宾,周少森,蒋红.岷江水电规划与引水式电站生态流量分析[C]//联合国水电与可持续发展研讨会文集.北京:中国学术期刊电子杂志出版社,2004:1234-1241.]
- [5] Lu Youlin,Zhou Jianzhong,Wang Hao,et al.Multiobjective optimization model for ecological operation in Three Gorges cascade hydropower stations and its algorithms[J]. Advances in Water Science,2011,22(6):780-788.[卢有磷,周建中,王浩,等.三峡梯级枢纽多目标生态优化调度模型及其求解方法[J].水科学进展,2011,22(6):780-788.]
- [6] Suen J P,Eheart J W.Reservoir management to balance ecosystem and human needs:Incorporating the paradigm of the ecological flow regime[J].Water Resources Research,2006,42(3):W03417.
- [7] Liu Guomin,Jiang Cuiling,Wang Weilin,et al.Study on ecological flow under Xin'an river dam based on habitat model[J].Journal of Water Resources and Water Engineering, 2016,27(4):61-65.[刘国民,姜翠玲,王维琳,等.基于栖息地模型的新安江坝下生态流量研究[J].水资源与水工程学报,2016,27(4):61-65.]
- [8] 丁瑞华.四川鱼类志[M].成都:四川科技出版社,1994.
- [9] 曹文宣,常剑波,乔晔,等.长江鱼类早期资源[M].北京:中国水利水电出版社,2007.
- [10] Li Jia,Wang Yurong,Li Kefeng,et al.Ecohydraulics method of calculating the lowest ecological water demand in river channels[J].Journal of Hydraulic Engineering,2006,37(10):1169-1174.[李嘉,王玉蓉,李克锋,等.计算河段最小生态需水的生态水力学法[J].水利学报,2006,37(10):1169-1174.]
- [11] Rhomas B H.The future of habitat modeling and instream flow assessment techniques[J].Regulated Rivers(Research and Management),1998,14(2):405-420.
- [12] Zhong Huaping,Liu Heng,Geng Leihua,et al.Review of assessment methods for instream ecological flow requirements[J].Advances in Water Science,2006,17(3):430-434.[钟华平,刘恒,耿雷华,等.河道内生态需水估算方法及其评述[J].水科学进展,2006,17(3):430-434.]
- [13] Wu Chunhua.The habitat simulation method of research on the ecological flow in river course of Yalong mainstream[J]. Ecological Science,2007,26(6):536-539.[吴春华.雅砻江干流河道内生态需水量生境模拟法研究[J].生态科学, 2007,26(6):536-539.]
- [14] Stalnaker C,Lamb B L,Henriksen,et al.The instream flow incremental methodology:A primer for IFIM[R].Washington:U.S. Department of the Interior Notional Bidogic Service,1995.
- [15] Zhang Zhiguang,Tan Qilin,Zhong Zhiguo,et al.Study on ecological flow regime based on habitat requirements of fish[J].Water Power,2016,42(4):13-17.[张志广,谭奇林,钟治国,等.基于鱼类生境需求的生态流量过程研究[J].水力发电,2016,42(4):13-17.]
- [16] Xu Zhixia,Wang Hao,Tang Kewang,et al.Minimum ecological water requirements for lakes taking in sending out water[J].Resources Science,2005,27(3):140-144.[徐志侠,王浩,唐克旺,等.吞吐型湖泊最小生态需水研究[J].资源科学,2005,27(3):140-144.]
- [17] Chen Mingqian.Study on hydraulic characteristics of schizothorax prenanti spawning ground in the upper reaches of Minjiang River and its application[D].Chengdu:Sichuan University,2012.[陈明千.岷江上游齐口裂腹鱼产卵场水力生境研究及应用[D].成都:四川大学,2012.]
- [18] Rui Jianliang,Sheng Sheng,Bai Fuqing,et al.Fish habitat protection and restoration practices in Angu hydropower station[J].Environmental Impact Assessment,2015,37(3):18-21.[芮建良,盛晟,白福青,等.安谷水电站鱼类栖息地生态保护与修复实践[J].环境影响评价,2015,37(3):18-21.]
- [19] Liu Mingyang.Assessing research and application of hydraulic habitat restoration of *Schizothorax Prenanti* spawning site[D].Chengdu:Sichuan University,2014.[刘明洋.齐口裂腹鱼产卵场微生境修复效果评估模型的研究及应用[D].成都:四川大学,2014.]

(编辑 张琼)

引用格式: Liu Qingyuan,Li Yong,Li Jia,et al.A model for optimizing ecological flow regime of dam-diversion type hydroelectric station[J].Advanced Engineering Sciences,2018,50(2):91-98.[刘清园,李永,李嘉,等.一种优化混合式电站生态流量过程的模式[J].工程科学与技术,2018,50(2):91-98.]