

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.06.024

考虑关键物种全生命周期的减脱水河段生态流量研究

于子铖, 张晶, 赵进勇, 彭文启, 丁洋, 张叶, 李轩

(中国水利水电科学研究院水生态环境研究所, 北京 100038)

摘要:针对引水式电站改变河流的水文水力学特性、地形地貌等天然状况,在电站与引水坝之间形成减脱水河段,使河流生态环境遭到破坏的问题,选取长江二级支流后溪镇泉大坝下游作为研究河段,通过实地调研与资料收集,以当地土著、重点鱼类齐口裂腹鱼作为指示性物种,考虑其全生命周期的生态过程,归纳得到产卵期水深、流速适宜性曲线。在识别研究河段现状地貌单元分布的基础上,考虑水深、流速阈值与底质特征,建立了水深、流速与水力单元的关系,识别了不同流量下索饵场、越冬场面积变化,并结合蒙大拿法,分时期、分阶段确定了减脱水河段的最佳、适宜、最小生态流量。

关键词:生态流量;减脱水河段;全生命周期;关键物种;水力单元;生态环境;后溪河

中图分类号:TV698 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)06-0175-10

Study on ecological flow of dewatered river sections considering whole life cycle of key species // YU Zicheng, ZHANG Jing, ZHAO Jinyong, PENG Wenqi, DING Yang, ZHANG Ye, LI Xuan (Department of Water Ecology and Environment, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: In response to the problem that the diversion power station changes the hydro-hydraulic characteristics, topography and other natural conditions of the river and forms a dewatered section between the power station and the diversion dam, which damages the ecological environment of the river, the downstream of Zhenquan Dam of Houxi River, a secondary tributary of Yangtze River, was selected as the study section. Through field research and data collection, the local indigenous and key fish, *Schizothorax prenanti*, was taken as the indicator species. Considering the ecological process of its whole life cycle, the suitability curves of water depth and flow velocity during spawning period are summarized. On the basis of identifying the distribution of current geomorphic units in the study river section, considering the threshold values of water depth and velocity and substrate characteristics, establishing the relationship between water depth, velocity and hydraulic units, identifying the area change of feeding grounds and wintering grounds. Combined with the Tennant method, the optimal, appropriate and minimum ecological flow of the dewatered section is determined in phases.

Key words: ecological flow; dewatered river reaches; whole life cycle; key species; hydraulic unit; ecological environment; the Houxi River

河流作为水生态系统的重要组成部分,其基本特征包括水体的流动性及相应的时空差异性,其功能主要是实现流域内物质的输运以及生物的生存与迁徙^[1]。近些年来,随着社会经济的快速发展,水利基础设施建设快速推进,在未考虑生态需求的背景下,大幅度改变河流的水文水力学特性、地貌特征及水文情势等,破坏河流自然动态流动机制,致使河流生物多样性发生显著变化,河流生态系统遭到破

坏^[2-4]。为复苏河流生态环境,应在合理开发、利用水资源的前提下,兼顾河流的生态需求,探求保障河流生态健康的相关水文特征^[5],科学确定合理的生态流量。生态流量旨在为可持续水资源管理提供信息,支持健康的河流栖息地,并为社会提供充足的供水^[6]。确定生态流量的科学基础是了解水文过程、组分、量化与各种生态变量之间的联系^[7]。

对于引水多、开发程度高、引水坝下游常存在减

基金项目:中国水科院创新团队专项(WE0145B042022);国家水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07105-002);水利部公益性行业科研专项(201501030)

作者简介:于子铖(1993—),男,博士研究生,主要从事河湖生态保护与修复研究。E-mail:761014057@qq.com

通信作者:赵进勇(1976—),男,教授级高级工程师,博士,主要从事河流生态修复与生态水工学研究。E-mail:zhaoyiwhr@163.com

脱水现象的小水电河流,在电站建设、运行时均需对下泄流量进行论证,不仅需要维持河流的健康状态、满足水生生物的最低要求^[8],还需要兼顾水资源的合理利用以及工程最大效益的发挥等^[9]。梳理国内外的相关文献,截至目前,有200多种方法和多个逻辑框架用于评估和计算水生生物、生态环境的用水需求,但由于出发点不同,这些方法在结果上存在很大差异^[10]。根据SL/T 796—2020《小型水电站下游河道减脱水防治技术导则》,涉及国家和地方重点保护、珍稀濒危物种或开发区域等有特殊用水要求的河段,应专题论证确定其生态流量。

结合上述分析,本文选择巫溪县大宁河支流后溪河作为研究河段。后溪河是长江的二级支流,合适的地形、水能条件,使得后溪河上水电站数量众多,且多为引水式电站。经实地调研与资料收集,明确后溪河存在属于当地重点保护物种的齐口裂腹鱼。本文基于2019年和2021年实地调研数据,将齐口裂腹鱼全生命周期分为产卵期、索饵期与越冬期3个阶段,基于River 2D模型对后溪镇泉大坝下游减脱水河段的水动力状况进行模拟与分析,以期对引水式小水电下游减脱水河段的生态修复提供依据。

1 研究区概况

后溪河位于重庆市巫溪县,距其县城约25 km。后溪河是长江的二级支流,大宁河的一级支流,位于重庆的东北方位,其流域面积为477 km²,河道全长为61.1 km,平均比降为9.86‰。本文选取后溪镇泉大坝下游减脱水河段作为研究对象,镇泉大坝为镇泉电站的引水坝,具体空间位置(北纬31°24′,东经109°38′)见图1。镇泉电站的厂房在柏杨河上,柏杨河为巫溪县境内的另一条河流,也是长江的二级支流。镇泉电站装机容量为2.5万kW,属于引水式小水电站。基于资料梳理得知,后溪河鱼类主要有齐口裂腹鱼、南方马口鱼、鲢鱼、鲤鱼、泥鳅等。结合实地现场调查,选取当地土著、重点保护鱼类齐口裂腹鱼作为目标物种。

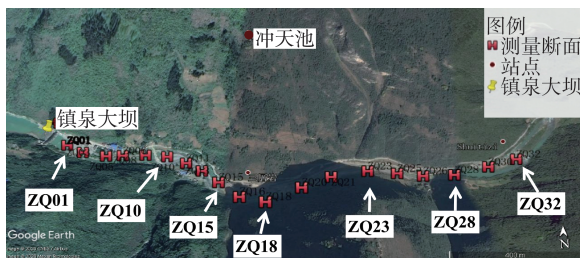


图1 研究区域位置及实测断面布局

Fig.1 Location of study area and layout of measured cross-sections

2 研究方法

2019年6月、11月利用华测i70RTK、IGS300手持GPS、LS1260B流速仪等仪器对镇泉大坝下游进行实地测量,结合研究区周边的环境、地貌特征等,沿着水流方向每50~100 m布设一个测量断面,共计32个(ZQ01~ZQ32),所测河段长约为2.5 km,具体测点依据河宽而定。经调查发现,研究河段减脱水现象严重,部分区域的河床存在大面积裸露,近乎无水,严重破坏了齐口裂腹鱼的栖息地环境。

为了更好地兼顾下游水生生物的生态需求,依据目标鱼类的生活史,分阶段对减脱水河段的生态流量进行确定。经梳理文献及询问当地人员得知,齐口裂腹鱼产卵期在3—6月,越冬期在11月至次年2月,其余月份为索饵期^[11-13]。梳理前人相关研究,得到了产卵期水深流速的适宜性曲线,基于实测地形,利用水动力模型River 2D进行模拟分析,结合生境模拟法确定该阶段最佳与适宜生态流量。关于另外两个阶段的相关研究较少,引入地貌单元与水力单元的概念,推求流量与越冬场、索饵场面积的相关关系,考虑不同流量下水力单元多样性的变化趋势,从而确定越冬期与索饵期的最佳、适宜生态流量。此外,依据蒙大拿法,结合研究河段实际水文状况,确定研究河段的最小生态流量。

2.1 生境模拟法

依据河道内流量增加法(intra-river flow increase method, IFIM),利用生境模拟法进行相关研究。具体为基于水动力模型建立起鱼类适宜生存栖息地的质量、数量与流量之间的相关关系,从而评估流量变化对栖息地适宜性的相关影响^[14]。结合2019年6月、11月实地调研数据,发现研究河段底质较为均匀,所以本文只考虑受电站下泄流量影响栖息地的流速和水深。

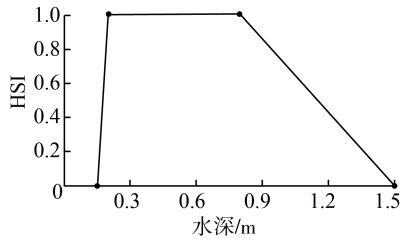
River 2D模型由加拿大Alberta大学研制开发,可用于进行鱼类栖息地的相关模拟分析^[15],本文利用River 2D模型进行栖息地模拟。具体分3步:①明晰目标鱼类各微生境因子的适宜性曲线,计算各定义单元的适宜性值;②将各因子适宜性值按顺序进行组合与分析,得到定义单元的综合适宜性值;③汇总分析,确定目标鱼类的加权可利用的面积(weighted usable area, WUA)^[16]。

$$A_{WU} = \sum_{i=1}^n C_{SF}(S_{vi}, S_{Ci}, S_{Di})A_i \quad (1)$$

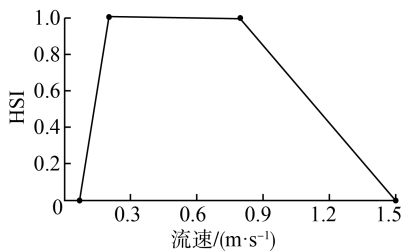
式中: A_{WU} 为WUA值; n 为单元个数; A_i 为单元*i*的面积; S_{vi} 、 S_{Ci} 、 S_{Di} 分别为单元*i*的流速、河床底质与

水深的适宜度指数; $C_{SF}(S_{vi}, S_{Ci}, S_{Di})$ 为单元 i 的综合适宜性值。本文仅考虑水深与流速的影响。

基于孙莹等^[17]的相关研究,结合实际踏勘收集的资料,得到齐口裂腹鱼的产卵期的适宜流速水深曲线(图 2)。适宜度指数 HSI (habitat suitability index) 是对目标鱼类栖息地适宜程度的定量描述,数值范围为 0 ~ 1, HSI 值越大,适宜性越好。



(a) HSI 与水深



(b) HSI 与流速

图 2 适宜性曲线

Fig. 2 Suitability curve

2.2 水力单元分类

河流是复杂的系统,非生物和生物成分在不同的时空尺度上相互作用^[18],较小的时空层次嵌套在较大的时空尺度内。在这个嵌套的层次结构框架内,地貌单元(geomorphic unit)是河段的组成部分,是水流和泥沙输送过程的物理表现形式^[19]。在河段尺度内,地貌单元能够反映河流生态系统的结构、功能和过程,同时地貌单元及其组合为生物提供了适宜的栖息地^[20]。水力单元(hydraulic unit)一般指特定水文和生态元素的集合,如大型木质碎屑河床、水生植被和单个水流障碍物,呈现均一化的特点,即底质、水深、流速阈值等相近或相同,在层级嵌套结构中为地貌单元的下一级,水力单元的面积、类型会随着水文过程的变化而改变^[21-23]。基于现场观测与调查数据,结合大坝下游减脱水河段特点及前人的分类方式^[24-27],依据水深与流速的差异、不同单元的底质特征,将研究河段现状地貌单元分布进行识别,具体分布如图 3 所示。其中边滩、心滩枯水期不被淹没,为砂砾堆积体;深潭为流速缓、水较深,底质多为砂砾石,是一种侵蚀单元;浅滩由冲积物堆积而成,水较浅,主要由砾石和小鹅卵石组成;跌坡是一种相对较短的单元,河床近乎垂直的下落;

急滩是冲积或半冲积地貌单元,水流湍急、水深较浅,主要由巨砾和大卵石形成。

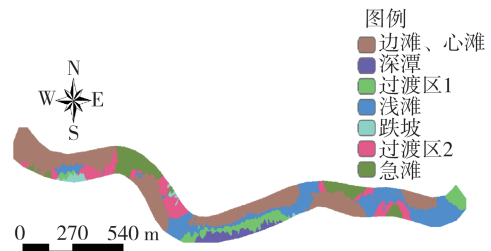


图 3 研究河段地貌单元分布

Fig. 3 Distribution of geomorphic units in study river section

在识别地貌单元基础上,结合现场观测数据,查阅相关文献^[21,28-29],得到水深 D 和流速 v 的阈值,将研究河段划分成不同的水力单元类型(图 4)。其中,急流浅滩区、浅水过渡区、平坦河床区主要集中在边滩、浅滩、急滩等地貌单元区域;实地调查中发现研究河段的跌坡和深潭底质和结构相对均匀,故没有再细分。水力单元越丰富,地貌异质性越高。地貌异质性是空间异质性的重要组成部分,空间异质性越高,生物越能稳定生存。基于前人的相关研究^[13,30-32],依据 2019 年 6 月、10 月、11 月及 2021 年 6 月的实地观测数据,结合询问当地村民、相关技术人员等,明确齐口裂腹鱼的越冬场为水面宽、流速较小的深水区域,幼鱼的索饵场主要为水流较缓的浅水区域,成鱼的索饵场主要为水流较急的浅水区域。结合图 4,越冬场主要包含的水力单元类型为深潭,潜在包含水力单元类型为深水区;成鱼、幼鱼索饵场主要包含急流浅滩区、平坦河床区,潜在包含水力单元类型分别为浅水过渡区与缓流过渡区。

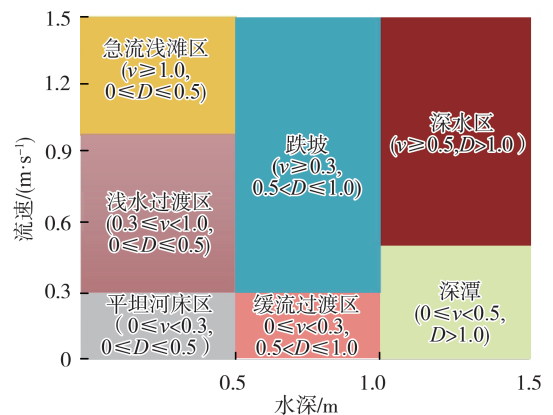


图 4 基于水深、流速的河流水力单元分类

Fig. 4 Classification of river hydraulic units based on water depth and flow velocity

2.3 水力单元多样性指数

水力单元越丰富,地貌异质性越高,生物越能稳定生存。结合相关研究及研究区的实际状况,

引入水力单元多样性指数。Shannon 多样性指数可以用来表示景观异质性的程度,其值越大,景观异质性程度越好,景观内的生物越能稳定生存,景观异质性包含空间异质性^[33]。水力单元多样性指数(H)是基于 Shannon 多样性指数提出的,其计算公式为

$$H = - \sum_{i=1}^m P_i \log_2 P_i \quad (2)$$

其中 $P_i = A_i/A_T$
式中: m 为研究区域水力单元类型的总数; P_i 为水力单元 i 的面积 A_i 占研究河段总面积 A_T 的比例。

2.4 蒙大拿法

根据 SL/T 796—2020《小型水电站下游河道减脱水防治技术导则》,对于非季节性河流可采用蒙大拿法进行减脱水河段生态流量的确定。蒙大拿法(Tennant 法)将年平均流量的百分比作为生态流量^[34],具体可参考 SL/Z 479—2010《河湖生态需水评估导则(试行)》。根据上述导则以及后溪河所处流域及气候条件,分为汛期、非汛期两个时段,汛期为 4—10 月,非汛期为 11 月至次年 2 月。考虑逐月流量变化较大,为更好地兼顾社会与生态的要求,汛期取对应月均径流量的 20%,非汛期取对应月均径流量的 10%,以此作为保护鱼类的最小生态流量^[35]。

3 模型构建与数据处理

3.1 模型构建与率定

基于实地调研数据,利用 River 2D 模型进行水力模拟分析,结合现场调查,河床地形见图 5,河床糙率取 0.035。根据研究区水文数据,考虑引水式小水电发电用水需求,以 $1 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $5 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $7.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $10 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $12.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $15 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $20 \text{ m}^3/\text{s}$ 作为模型边界输入值,以 282 m 作为下游水位边界。选择断面 ZQ18(北纬 $31^\circ 27' 55''$,东经 $109^\circ 30' 6''$)、ZQ26(北纬 $31^\circ 27' 47''$,东经 $109^\circ 30' 22''$)作为校核断面,对比分析流量 $1 \text{ m}^3/\text{s}$ 下模拟水位与实测水位,相对误差分别为 0.013%、0.037%,均在 0.05% 以

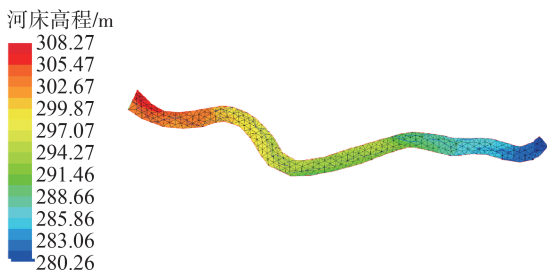


图 5 河床地形

Fig. 5 Riverbed topography

下,表明搭建的水动力模型可以较好地反映研究区实际状况。

3.2 水文数据处理

因相关限定与人为因素,未收集到后溪河的水文数据。考虑到后溪河为大宁河的一级支流,其水文特征、地形地貌等具有一致性与相似性,因此参考大宁河干流的巫溪水文站(北纬 $31^\circ 24' 8''$,东经 $109^\circ 38' 5''$)的数据,以后溪河流域的天星水文站(北纬 $31^\circ 27' 60''$,东经 $109^\circ 34' 12''$)为设计站,利用水文比拟法得到后溪河水文数据^[36-37]。大宁河径流量、降水量及后溪河降水量等水文数据均从当地相关部门获得,准确可靠。

通过 ArcGIS 相关测量功能,分别得到大宁河与后溪河的流域面积。基于巫溪站、天星站水文数据,依据式(3)得到后溪河水文数据,结果见表 1。

$$Q = K_1 K_2 Q_C \quad (3)$$

其中 $K_1 = A/A_C$ $K_2 = P/P_C$
式中: Q 、 Q_C 分别为设计、参证流域的多年平均流量; K_1 、 K_2 分别为流域面积、年降水量的修正系数; A 、 A_C 分别为设计、参证流域的面积; P 、 P_C 分别为设计、参证流域的多年平均降水量。

表 1 水文数据

Table 1 Hydrological data

月份	月均降水量/mm		月均径流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	
	大宁河	后溪河	大宁河	后溪河
1月	32.8	30.1	14.8	3.6
2月	50.9	43.8	15.4	3.5
3月	47.8	41.2	24.4	5.5
4月	134.9	142.2	49.7	13.8
5月	211.5	200.2	67.7	16.9
6月	229.3	208.8	86.8	20.8
7月	330.9	297.9	131.1	31.0
8月	154.7	131.3	79.7	17.8
9月	427.1	446.1	96.8	26.6
10月	300.1	329.3	74.7	21.6
11月	33.5	33.2	38.8	10.1
12月	3.7	8.7	21.4	13.2

4 结果与分析

4.1 $Q-A_{WU}$ 曲线

图 6 为不同流量下 WUA 分布情况。基于模拟结果,结合后溪河水文数据与齐口裂腹鱼产卵期适宜性曲线,建立 $Q-A_{WU}$ 关系曲线,曲线的转折点初步定为目标鱼类产卵期的适宜生态流量,最高点定为目标鱼类产卵期的最佳生态流量,结果见图 7。可见,齐口裂腹鱼的 $Q-A_{WU}$ 关系曲线在 Q 为 $12.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 时出现转折,在 $15 \text{ m}^3/\text{s}$ 时达到最大值,此时的 A_{WU} 为 4191.1 m^2 。

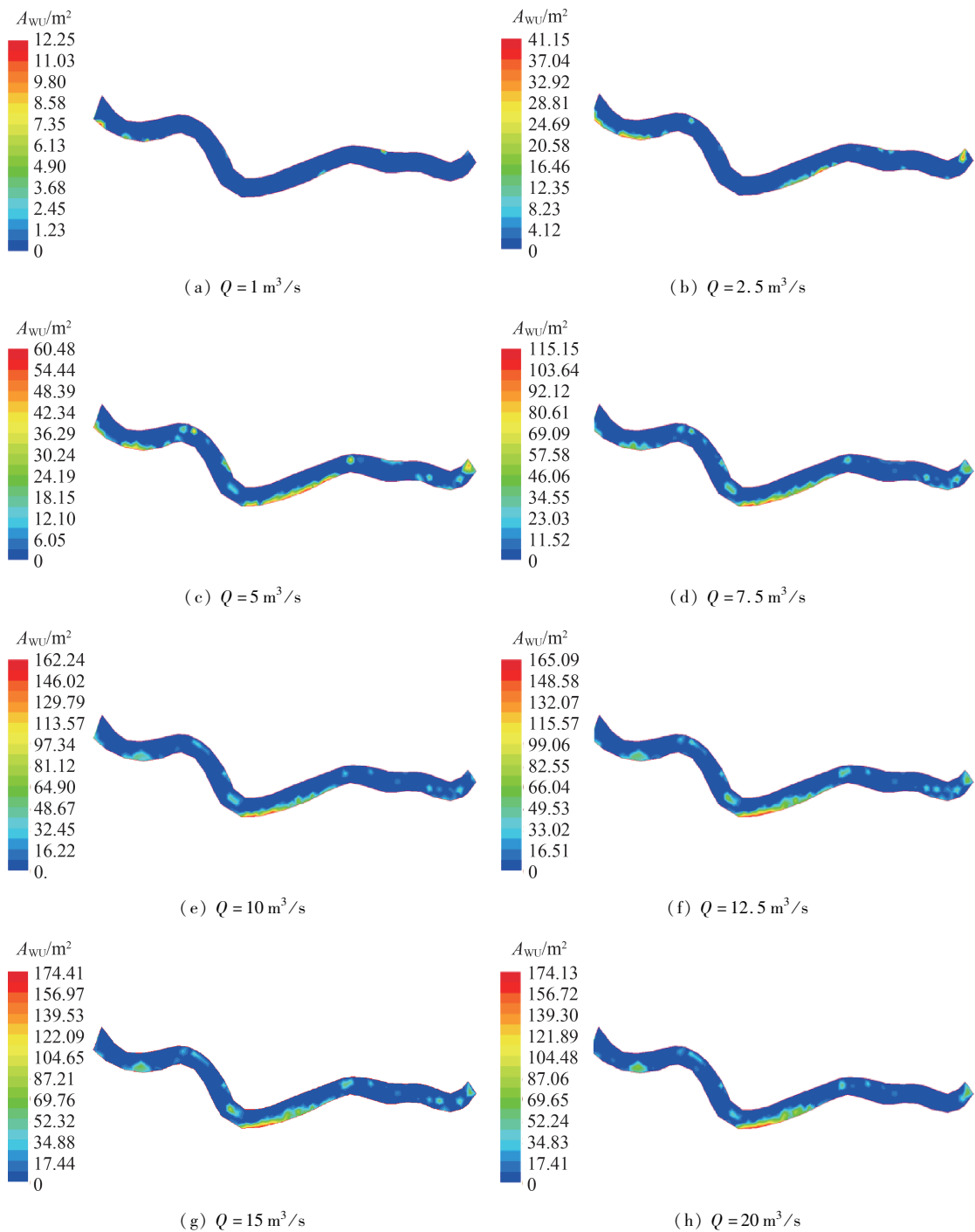


图 6 不同流量下 WUA 分布

Fig. 6 WUA distribution under different flow

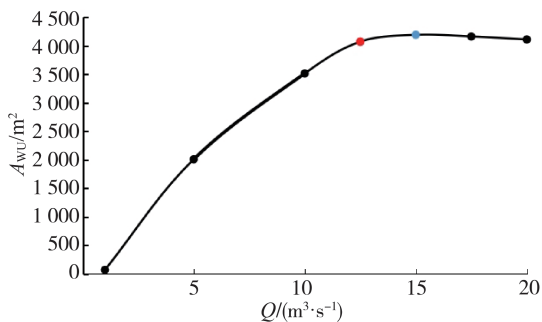


图 7 Q - A_{WU} 曲线

Fig. 7 Q - A_{WU} curve

4.2 不同流量下水力单元分布

图 8 为不同流量下水力单元分布情况,可见,随着流量的增加,水力单元类型逐渐变多,呈现多样化分布。河道有水区域随着流量的增大而变多,河道水面面积由 $33\ 108.5\ \text{m}^2$ 增长至 $103\ 614.7\ \text{m}^2$ 。不同流量下,河段都有平坦河床区、缓流过渡区、深潭 3 种类型水力单元,尤其是深潭,多集中在河道弯曲处。水流急、水较深的深水区单元在流量为 $15\ \text{m}^3/\text{s}$ 时才出现,在深潭的附近。浅水过渡区随着流量的增加,分布变化最明显,在流量为 $20\ \text{m}^3/\text{s}$ 时,几乎贯

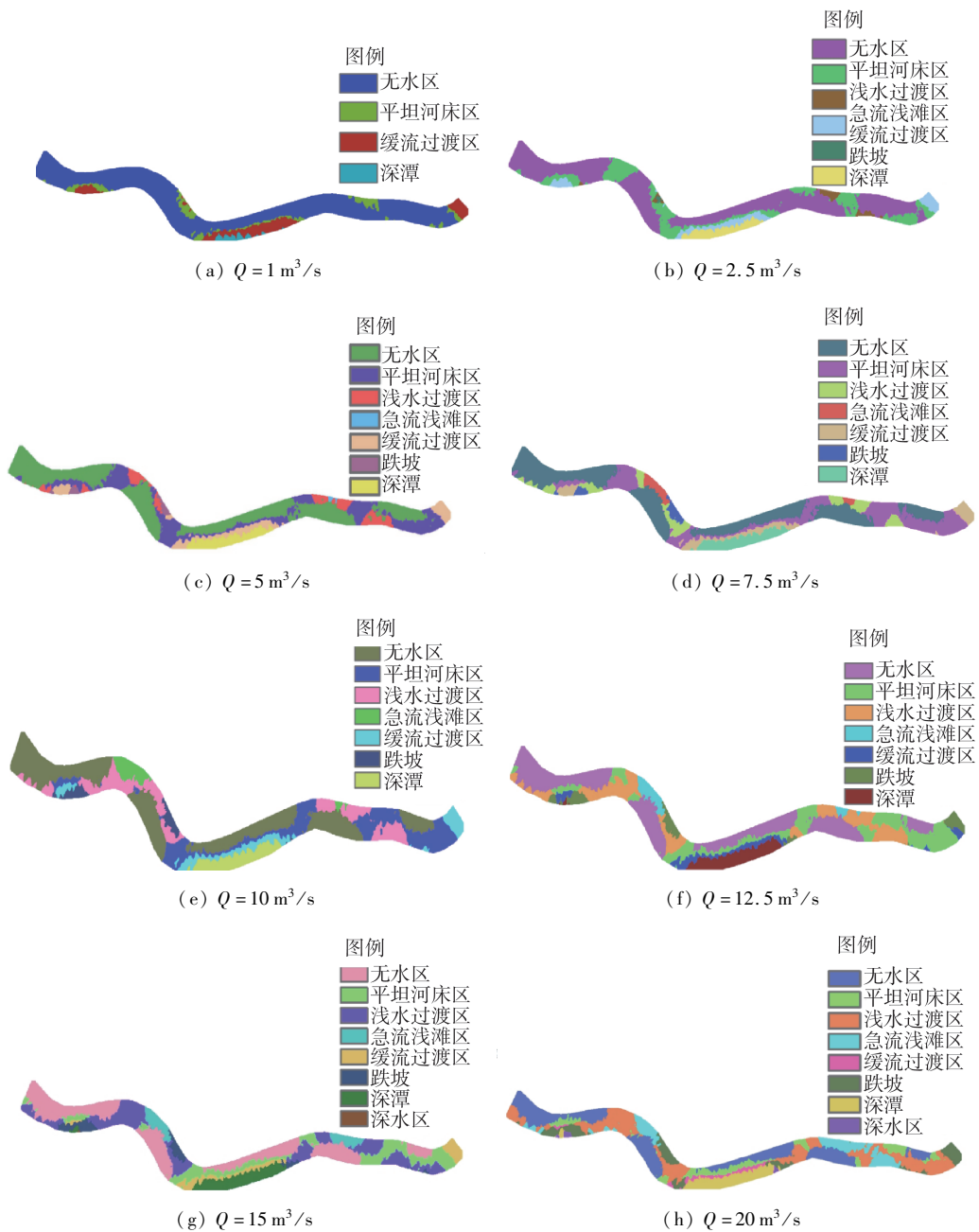


图8 不同流量下水力单元空间分布

Fig.8 Spatial distribution of hydraulic units under different flow

穿分布整个河段。将不同流量下水力单元具体分布面积进行梳理,具体见表2。由表2可见,随着流量的增加,平坦河床区面积呈现先上升后下降的趋势,在流量为 $7.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 时取得最大值,在 $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 处出现拐点;浅水过渡区面积呈现递增的趋势,在流量为 $20 \text{ m}^3/\text{s}$ 时取得最大值,在 $10 \text{ m}^3/\text{s}$ 处出现拐点;急流浅滩区面积呈现先小幅上升再下降再上升的趋势,在流量为 $20 \text{ m}^3/\text{s}$ 时取得最大值,在 $10 \text{ m}^3/\text{s}$ 处出现极大值;跌坡面积呈现先上升再小幅下降再上升的趋势,在流量为 $20 \text{ m}^3/\text{s}$ 时取得最大值,在 $12.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 处出现极大值;缓流过渡区面积整体呈现下降趋势,在 $1 \text{ m}^3/\text{s}$ 取得最大值;深水区在 $15 \text{ m}^3/\text{s}$ 时出现,

$20 \text{ m}^3/\text{s}$ 处面积取得最大值;深潭面积呈现递增趋势,在 $20 \text{ m}^3/\text{s}$ 时取得最大值,在 $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 处出现拐点。

4.3 不同流量下水力单元多样性

计算不同流量下各水力单元占研究河段的比值,从而得到不同流量下水力单元多样性指数,结果见图9和图10,可以看出,随着流量的增加,水力单元呈现多样性趋势,多样性指数由 $1 \text{ m}^3/\text{s}$ 对应的1.32增至为 $20 \text{ m}^3/\text{s}$ 对应的2.34,在流量为 $10 \text{ m}^3/\text{s}$ 处出现拐点,为2.26。流量 $1 \sim 10 \text{ m}^3/\text{s}$ 情况下,水力单元多样性指数的增长速率为0.104,流量 $10 \sim 20 \text{ m}^3/\text{s}$ 情况下,水力单元多样性指数的增长速率为0.008。

表 2 不同流量下水力单元面积

Table 2 Hydraulic unit area under different flow

$Q/$ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	水力单元面积/ m^2							总面积/ m^2
	急流浅滩区	浅水过渡区	平坦河床区	跌坡	缓流过渡区	深水区	深潭	
1	0	0	13561.2	0	16793.5	0	2753.8	33108.5
2.5	0	3834.9	35417.2	361.6	11556.6	0	8111.2	59281.5
5	387.6	12200.1	39734.3	2245.7	12131.5	0	9309.1	76008.3
7.5	4172.7	13870.9	39975.4	3677.3	12359.3	0	10206.6	84262.2
10	5668.9	24383.5	32264.8	4636.0	11786.6	0	10399.5	89139.3
12.5	5264.6	28390.9	32216.5	8407.9	8383.8	0	11792.2	94455.9
15	7951.7	34838.7	25713.1	7426.9	9466.7	61.2	12335.5	97793.8
20	16001.6	42057.8	13589.1	14138.0	4127.9	934.6	12765.7	103614.7

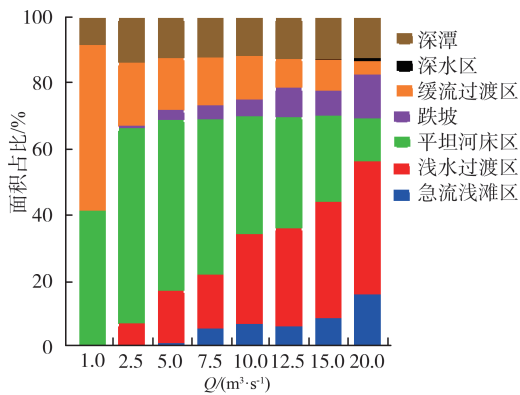


图 9 不同流量下水力单元面积占比

Fig. 9 Proportion of hydraulic unit area under different flow

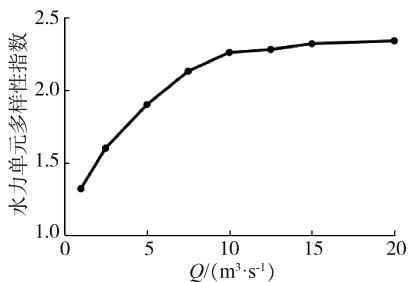


图 10 不同流量下水力单元多样性指数

Fig. 10 Diversity index of hydraulic units under different flow

5 讨论

5.1 流量与水力单元相关关系

考虑样本个数,利用 SPSS 对流量与水力单元面积进行斯皮尔曼相关性分析,结果见表 3。由表 3

可见,流量变化与急流浅滩区、浅水过渡区等 7 种水力单元面积均呈现相关关系。其中,流量变化与急流浅滩区、浅水过渡区、跌坡、深水区、深潭面积呈现正相关关系,与平坦河床区、缓流过渡区面积呈现负相关关系。除深水区面积与流量为强相关(相关系数 0.6~0.8)外,其余类型与流量均呈极强相关(相关系数 0.8~1.0)。因而,基于流量与水力单元的关系研究分析生态流量是科学合理的。

Phillips^[21]在墨西哥湾北部沿海平原萨宾河下游,6 个不同河流类型中识别出了 72 种不同水力单元,量化的研究结果表明,水力单元的数量随着流量的变大而线性增长,主河槽内的高流量对维持和塑造水力单元类型方面具有显著作用。Padmore^[38]以英格兰东北部 11 个地点的实地测量为基础,探讨了流量对形态单元(morphological units)与水力单元的影响,结果表明,流量的少量增加会促使水力单元从静水(deadwater)类型到滑水(glide)类型的转变,流量的进一步增大会促使水力单元从滑水(glide)类型变成平滑流动区(run)类型。这与本文得到的结果一致,流量变大会增加水力单元的多样性,会使水力单元类型发生变化。

结合表 3,可见不同水力单元类型之间也存在显著相关性。其中,急流浅滩区面积与浅水过渡区、跌坡、深水区、深潭面积为正相关关系,与平坦河床区、缓流过渡区面积为负相关关系;浅水过渡区面积

表 3 相关性分析结果

Table 3 Correlation analysis results

水力单元	Q	急流浅滩区	浅水过渡区	平坦河床区	跌坡	缓流过渡区	深水区	深潭
急流浅滩区	0.970**							
浅水过渡区	1.000**	0.970**						
平坦河床区	-0.857**	-0.874**	-0.857**					
跌坡	0.976**	0.922**	0.976**	-0.833*				
缓流过渡区	-0.976**	-0.922**	-0.976**	0.833*	-1.000**			
深水区	0.764*	0.768*	0.764*	-0.764*	0.655	-0.655		
深潭	0.898**	0.831*	0.898**	-0.755*	0.874**	-0.874**	0.768*	1.000

注:**表示在 0.01 级别(双尾)相关性显著;*表示在 0.05 级别(双尾)相关性显著。

与跌坡、深水区、深潭面积为正相关关系,与平坦河床区、缓流过渡区面积为负相关关系;平坦河床区面积与跌坡、深水区、深潭面积均为负相关关系,与缓流过渡区面积为正相关关系;跌坡面积与深水区面积不相关,与缓流过渡区面积呈极强负相关关系;缓流过渡区面积与深水区面积不相关,与深潭面积呈极强负相关关系;深水区面积与深潭面积呈现正相关关系。

5.2 生态流量的确定

生态流量的确定需要研究河流随时间变化的自然流量,历史水文数据是此类研究的基本要素。这些时间序列数据不仅揭示了河流不同部分的平均流量模式,还揭示了河流生态系统历史上经历的“正常”变化范围^[39]。天然河流流量过程有起有落,水电开发使得下泄流量过程平稳单调,改变了河流的自然属性,引发了一系列生态环境问题。由于不同目标物种或同一目标物种在其不同生命阶段的特定栖息地要求不同,生态流量不是恒定的,是随着时间的推移而变化的^[40]。Wang 等^[41]提出了一种新的评价生态流量的方法,即考虑目标物种不同生命阶段的流量时间序列。为了恢复河流生态系统的多样性,胡和平等^[42]提出了生态流量过程线的概念,即满足下游各生态环境需要的流量过程范围。考虑到引水式电站需兼顾生态与社会的双目标,基于研究区相关水文数据,采用蒙大拿法确定最小生态流量。将各月平均径流量为限制条件,针对目标鱼类产卵期、越冬期、索饵期 3 个阶段分别确定最小、适宜、最佳生态流量,结果见图 11。

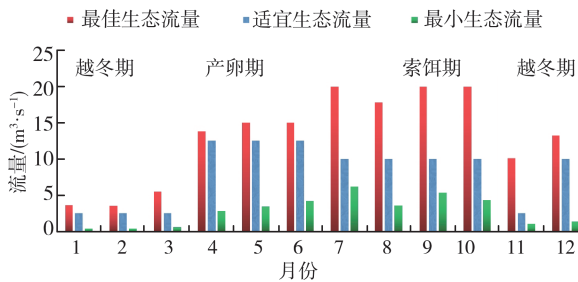


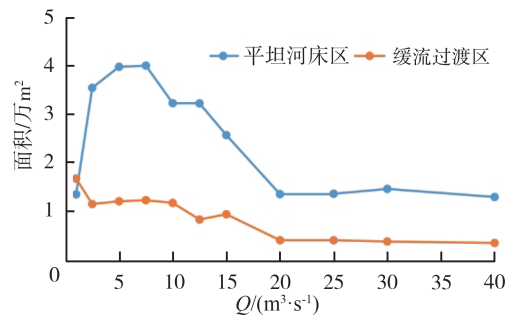
图 11 生态流量过程

Fig. 11 Ecological flow process

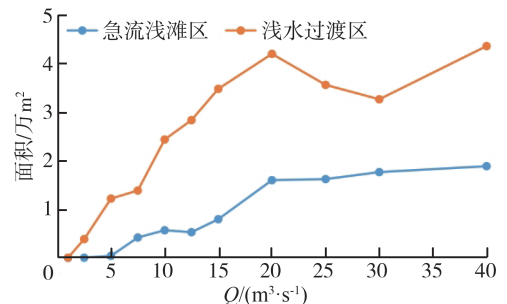
a. 产卵期(3—6 月)。基于产卵期水深流速适宜性曲线,以 WUA 最大作为最佳生态流量。结合 3—6 月的月平均径流量,分别计算 5.5 m³/s、13.8 m³/s、16.9 m³/s 和 20.8 m³/s 对应的 WUA 和水力单元多样性指数,WUA 值分别为 2 158.2 m²、4 124.6 m²、4 170.3 m²和 4 153.8 m²,均小于 15 m³/s 对应的 4 191.1 m²;水力单元多样性指数分别为 1.95、2.30、2.32 和 2.34,其中流量为 13.8 m³/s、16.9 m³/s、20.8 m³/s 时水力单元多样性指数与流量

为 15 m³/s 时的 2.32 极为相近。结合上述分析,4 月、5 月、6 月对应的最佳生态流量取 13.8 m³/s、15 m³/s、15 m³/s,适宜生态流量均取 12.5 m³/s。3 月月均平均流量为 5.5 m³/s,该流量值出在两曲线的快速增长段,因为越大越好,故 3 月最佳生态流量取 5.5 m³/s,适宜生态流量选择流量为 1 ~ 5.5 m³/s 之间的拐点,取 2.5 m³/s。以蒙大拿法的计算结果作为最小生态流量,3 月、4 月、5 月、6 月最小生态流量分别为 0.55 m³/s、2.76 m³/s、3.38 m³/s 和 4.16 m³/s。

b. 索饵期(7—10 月)。结合齐口裂腹鱼幼鱼生活习性,其索饵场主要为平坦河床区,潜在的为缓流过渡区;成鱼索饵场主要为急流浅滩区,潜在的为浅水过渡区。流量与水力单元类型之间存在相关关系,因而依据两者之间的关系确定索饵期的生态流量。图 12 为不同流量下幼鱼和成鱼索饵场变化情况,幼鱼索饵期最佳生态流量取 7.5 m³/s,拐点 2.5 m³/s 小于蒙大拿法的计算结果,因此该时段不建议适宜生态流量,以 2.5 m³/s 作为幼鱼索饵期的最小生态流量;流量为 25 m³/s、30 m³/s、40 m³/s 时,水力单元多样性指数分别为 2.33、2.34 和 2.36,与流量为 20 m³/s 时的 2.34 非常相近。结合图 10 与图 12,急流浅滩区、浅水过渡区均在流量为 20 m³/s 时存在拐点,因此 7 月、9 月、10 月取 20 m³/s 为最佳生态流量,取 10 m³/s 为适宜生态流量(水力单元多样性指数在流量为 10 m³/s 处存在拐点),8 月平均



(a) 幼鱼



(b) 成鱼

图 12 不同流量下索饵场变化

Fig. 12 Changes of feeding grounds under different flow

径流量为 $17.8 \text{ m}^3/\text{s}$, 处在两个曲线的上升段, 因此该月取 $20 \text{ m}^3/\text{s}$ 为最佳生态流量。以蒙大拿法结果作为最小生态流量, 7月、8月、9月、10月最小生态流量分别为 $6.2 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $3.56 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $5.32 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $4.32 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

c. 越冬期(11月至次年2月)。齐口裂腹鱼越冬场的水力单元类型主要为深潭, 潜在的为深水区。深潭面积在流量为 $20 \text{ m}^3/\text{s}$ 时取得最大值, 在 $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 处存在拐点; 深水区在流量为 $15 \text{ m}^3/\text{s}$ 以下均为0。因此, 越冬期生态流量依据流量与深潭面积、水力单元多样性关系进行确定, 两曲线均为单调递增, 因而最佳生态流量均取月平均流量值。1月、2月、11月的适宜生态流量均取 $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 。最小生态流量基于蒙大拿法确定, 11月、12月、1月、2月的最小生态流量分别为 $1.01 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $1.32 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $36 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $0.35 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

6 结论

a. 利用产卵期水深流速适宜性曲线和蒙大拿法, 结合现场观测, 依据 River 2D 模型得到不同流量下齐口裂腹鱼越冬场、索饵场的分布, 确定齐口裂腹鱼产卵期、越冬期、索饵期的最佳、适宜与最小生态流量。

b. 引入地貌单元和水力单元的概念, 利用模型、数理统计等方法, 证实了流量变化与水力单元类型、面积具有显著的相关关系。从而直接建立流量与齐口裂腹鱼越冬场、索饵面积的相关关系, 科学合理地考虑全生命阶段的生态流量。

c. 在对引水式电站下游生态流量进行确定时, 应结合研究区的历史水文资料。基于重点保护物种需求, 推算出的生态流量可能远远大于实际月均流量, 在无法进行生态补水引水的情况下, 可考虑引水式电站生态化改造, 使鱼类可以游到合适的生存区域; 或人工营建及改造减脱水河段的地貌单元, 增强地貌单元的多样性, 使在低流量下也可形成产卵、索饵等栖息地。

参考文献:

[1] 孙涛, 杨志峰. 基于生态目标的河道生态环境需水量计算[J]. 环境科学, 2005(5): 43-48. (SUN Tao, YANG Zhifeng. Calculation of environmental flows in river reaches based on ecological objectives[J]. Environmental Science, 2005(5): 43-48. (in Chinese))

[2] 董哲仁. 生态水利工程学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2019.

[3] 赵衡, 闫旭, 王富强, 等. 基于PSR模型的三门峡库区湿地生态系统健康评价[J]. 水资源保护, 2020, 36(4): 21-25. (ZHAO Heng, YAN Xu, WANG Fuqiang, et

al. Assessment on ecosystem health of Sanmenxia Reservoir wetland based on PSR model [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(4): 21-25. (in Chinese))

[4] 张代青, 沈春颖, 于国荣. 基于河道内流量的河流生态系统服务价值评价模型研究[J]. 水利经济, 2019, 37(5): 16-20. (ZHANG Daiqing, SHEN Chunying, YU Guorong. Evaluation model for ecological service value of rivers based on instream flow[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2019, 37(5): 16-20. (in Chinese))

[5] 董哲仁, 张晶, 赵进勇. 环境流理论进展述评[J]. 水利学报, 2017, 48(6): 670-677. (DONG Zheren, ZHANG Jing, ZHAO Jinyong. Comments upon progress of environmental flows assessments[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(6): 670-677. (in Chinese))

[6] MEITZEN K M, DOYLE M W, THOMS M C, et al. Geomorphology within the interdisciplinary science of environmental flows [J]. Geomorphology, 2013, 200: 143-154.

[7] POFF N L R, THARME R E, ARTHINGTON A H. Evolution of environmental flows assessment science, principles, and methodologies [M]. New York: Academic Press, 2017: 203-236.

[8] 贾建辉, 陈建耀, 龙晓君. 水电开发对河流生态环境影响及对策的研究进展[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2019, 40(2): 62-69. (JIA Jianhui, CHEN Jianyao, LONG Xiaojun. Research progress of impact and countermeasures of hydropower development on river ecological environment [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2019, 40(2): 62-69. (in Chinese))

[9] 何怀光, 张贵金, 田大作, 等. 引水式电站减水河段最小生态需水量模型研究[J]. 人民长江, 2011, 42(19): 47-50. (HE Huaiguang, ZHANG Guijin, TIAN Dazuo, et al. Research on computing model of minimum ecological flow in flow reduced river reach due to diversion hydropower station [J]. Yangtze River, 2011, 42(19): 47-50. (in Chinese))

[10] HAHN G L, MADER T L, EIGENBERG R A. A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers [J]. River Research & Applications, 2003, 19: 397-441.

[11] 周波, 龙治海, 何斌. 齐口裂腹鱼繁殖生物学研究[J]. 西南农业学报, 2013, 26(2): 811-813. (ZHOU Bo, LONG Zhihai, HE Bin. Study on reproductive biology of Schizothorax prenanat [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2013, 26(2): 811-813. (in Chinese))

[12] 陈明千, 脱友才, 李嘉, 等. 鱼类产卵场水力生境指标体

- 系初步研究[J]. 水利学报, 2013, 44(11): 1303-1308. (CHEN Mingqian, TUO Youcai, LI Jia, et al. Preliminary study on index system describing hydraulic characteristics of fish spawning ground [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(11): 1303-1308. (in Chinese))
- [13] 徐爽, 王玉蓉, 谭燕平. 某日调节水电站下泄排水对下游河道内齐口裂腹鱼栖息地的影响[J]. 水电能源科学, 2013, 31(7): 147-150. (XU Shuang, WANG Yurong, TAN Yanping. Influence of discharge flow daily regulating hydropower station on habitat of schizothorax renanti in downstream river channel [J]. Water Resources and Power, 2013, 31(7): 147-150. (in Chinese))
- [14] MCMANAMAY R A, BREWER S K, JAGER H I, et al. Organizing environmental flow frameworks to meet hydropower mitigation needs [J]. Environmental Management, 2016, 58: 365-385.
- [15] 孙嘉宁, 张士乔, ZHU David Z, 等. 白鹤滩水库回水支流的鱼类栖息地模拟评估[J]. 水利水电技术, 2013, 44(10): 17-22. (SUN Jianing, ZHANG Shiqiao, ZHU David Z, et al. Simulative evaluation of fish habitat of backwater tributary of Baihetan Reservoir [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2013, 44(10): 17-22. (in Chinese))
- [16] 侯俊, 黄喻威, 苗令占, 等. 基于鱼类栖息地需求的雅鲁藏布江中游环境流量计算[J]. 水资源保护, 2020, 36(4): 8-12. (HOU Jun, HUANG Yuwei, MIAO Lingzhan, et al. Calculating environmental flows in middle reach of Yarlung Tsangpo River based on fish habitat requirements [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(4): 8-12. (in Chinese))
- [17] 孙莹, 牛天祥, 王玉蓉, 等. 基于地形重塑的鱼类栖息地模拟修复设计[J]. 环境影响评价, 2015, 37(3): 29-32. (SUN Ying, NIU Tianxiang, WANG Yurong, et al. Design of simulative restoration of fish habitat based on terrain remolding [J]. Environmental Impact Assessment, 2015, 37(3): 29-32. (in Chinese))
- [18] BELLETTI B, RINALDI M, BUSSETTINI M, et al. Characterizing physical habitats and fluvial hydromorphology: a new system for the survey and classification of river geomorphic units [J]. Geomorphology, 2017, 283: 143-157.
- [19] GURNELL A M, RINALDI M, BELLETTI B, et al. A multi-scale hierarchical framework for developing understanding of river behaviour to support river management [J]. Aquatic Sciences, 2016, 78(1): 1-16.
- [20] PHILLIPS J D. Geomorphic and hydraulic unit richness and complexity in a coastal plain river [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2017, 42(15): 2623-2639.
- [21] PHILLIPS J D. Hydraulic units of the lower Sabine River [M]. Colorado Springs: Copperhead Road Geosciences, 2011.
- [22] THOMSON J R, TAYLOR M P, FRYIRS K A, et al. A geomorphological framework for river characterization and habitat assessment [J]. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems, 2001, 11(5): 373-389.
- [23] BRIERLEY G J, FRYIRS K A. Geomorphology and river management: applications of the river styles framework [M]. New York: John Wiley & Sons, 2013.
- [24] PASTERNAK G B. 2D modeling and ecohydraulic analysis [M]. Charleston: Createspace Independent Publishing Platform, 2011.
- [25] STROM M A, PASTERNAK G B, WYRICK J R. Reenvisioning velocity reversal as a diversity of hydraulic patch behaviors [J]. Hydrological Processes, 2016, 30(13): 2348-2365.
- [26] BELLETTI B, RINALDI M, BUSSETTINI M, et al. Characterising physical habitats and fluvial hydromorphology: a new system for the survey and classification of river geomorphic units [J]. Geomorphology, 2017, 283: 143-157.
- [27] 贾绍凤, 柳文华. 水资源开发利用40% 阈值溯源与思考 [J]. 水资源保护, 2021, 37(1): 87-89. (JIA Shaofeng, LIU Wenhua. Tracing and thinking about 40% threshold value of water resources development and utilization ratio [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1): 87-89. (in Chinese))
- [28] 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(10): 1169-1174. (LI Jia, WANG Yurong, LI Kefeng, et al. Eco-hydraulics method of calculating the lowest ecological water demand in river channels [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006(10): 1169-1174)
- [29] MOIR H J, PASTERNAK G B. Relationships between mesoscale morphological units, stream hydraulics and Chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*) spawning habitat on the Lower Yuba River, California [J]. Geomorphology, 2008, 100(3/4): 527-548.
- [30] 蒲德成, 苏胜齐, 代昌华, 等. 大宁河齐口裂腹鱼人工繁育技术研究 [J]. 湖北农业科学, 2017, 56(20): 3917-3920. (PU Decheng, SU Shengqi, DAI Changhua, et al. Study on the artificial reproduction of Schizothorax prenanti in Daning River [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2017, 56(20): 3917-3920. (in Chinese))
- [31] 夏娟, 王玉蓉, 谭燕平. 水电工程建设对齐口裂腹鱼栖息地的影响分析 [J]. 四川水利, 2010, 31(2): 59-62. (XIA Juan, WANG Yurong, TAN Yanping. Analysis of the impact of hydropower project construction on the habitat of Schizothorax prenanti [J]. Sichuan Water Resources, 2010, 31(2): 59-62. (in Chinese))

(下转第 201 页)

- [19] 杜梦娇,田贵良,吴茜,等. 基于系统动力学的江苏水资源系统安全仿真与控制[J]. 水资源保护, 2016, 32(4):67-73. (DU Mengjiao, TIAN Guiliang, WU Xi, et al. Simulation and control of water resources system security in Jiangsu Province based on system dynamics [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(4):67-73. (in Chinese))
- [20] 郭永奇. 基于改进三维生态足迹的自然资本动态评估:以南水北调中线工程核心水源区为例[J]. 石河子大学学报, 2020, 38(3):331-339. (GUO Yongqi. Dynamic evaluation of natural capital using the three dimension ecological footprint model; taking core water source of middle route South-to-North Water Transfer Project as an example [J]. Journal of Shihezi University (Natural Science), 2020, 38(3):331-339. (in Chinese))
- [21] 朱嘉伟,谢晓彤,李心慧. 生态环境承载力评价研究:以河南省为例[J]. 生态学报, 2017, 37(21):7039-7047. (ZHU Jiawei, XIE Xiaotong, LI Xinhui. A solution to the problem of ecological environmental carrying capacity evaluation; a case study of Henan Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(21):7039-7047. (in Chinese))
- [22] 金悦,陆兆华,檀菲菲,等. 典型资源型城市生态承载力评价:以唐山市为例[J]. 生态学报, 2015, 35(14):4852-4859. (JIN Yue, LU Zhaohua, TAN Feifei, et al. Assessment of ecological carrying capacity on the typical resources-based cities; a case study of Tangshan City [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(14):4852-4859. (in Chinese))
- [23] 刘远书,高文文,侯坤,等. 南水北调中线水源区生态环境变化分析研究[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(3):440-446. (LIU Yuanshu, GAO Wenwen, HOU Kun, et al. Analysis of ecological environment change on watershed of the middle route of South-to-North Water Diversion Project [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(3):440-446. (in Chinese))
- [24] 朱漫莉,高海鹰,徐力刚,等. 基于系统动力学方法的鄱阳湖流域水量平衡过程模拟与分析[J]. 水资源保护, 2015, 31(3):46-52. (ZHU Manli, GAO Haiying, XU Ligang, et al. Simulation and analysis of water balance process in Poyang Lake based on system dynamic approach [J]. Water Resources Protection, 2015, 31(3):46-52. (in Chinese))

(收稿日期:2021-08-05 编辑:施业)

(上接第 184 页)

- [32] 张浩男,李广宁,韩延成,等. 齐口裂腹鱼幼鱼在竖缝式鱼道模型中的上溯行为研究[J]. 水利水电技术, 2020, 51(12):180-187. (ZHANG Haonan, LI Guangning, HAN Yancheng, et al. Study on migration behaviors of juvenile *Schizothorax prenanti* in a vertical slot fishway model [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(12):180-187. (in Chinese))
- [33] 李亭玉,王玉蓉,徐爽. 鱼类产卵场微生物境异质性研究[J]. 水力发电学报, 2016, 35(1):56-62. (LI Tingyu, WANG Yurong, XU Shuang. Study on microhabitat heterogeneity of spawning ground [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(1):56-62. (in Chinese))
- [34] 金纯,姜翠玲,吴为. 基于水力水文学法的大渡河上游生态流量确定[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(2):8-14. (JIN Chun, JIANG Cuiling, WU Wei. Determination of ecological flow in upstream of Daduhe River based on hydraulic and hydrological methods [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(2):8-14. (in Chinese))
- [35] 侯昕玥,徐宗学,殷旭旺,等. 小清河济南段生态基流估算研究[J]. 中国农村水利水电, 2018(8):127-131. (HOU Xinyue, XU Zongxue, YIN Xuwang, et al. An estimation of ecological base flow in the Jinan section of the Xiaoqing River Basin [J]. China Rural Water and Hydropower, 2018(8):127-131. (in Chinese))
- [36] 刘满平. 水资源利用与水环境保护工程[M]. 北京:中国建材工业出版社, 2005.
- [37] 张叶. 引水式小水电下游减脱水河段生态流量研究[D]. 保定:河北农业大学, 2020.
- [38] PADMORE C L. Physical biotopes in representative river channels: identification, hydraulic characterization and application [D]. Newcastle: Newcastle University, 1997.
- [39] HOMA E S, VOGEL R M, SMITH M P, et al. An optimization approach for balancing human and ecological flow needs [M]. New York: Impacts of Global Climate Change, 2005:1-12.
- [40] KOUTRAKIS E T, TRIANTAFILLIDIS S, SAPOUNIDIS A S, et al. Evaluation of ecological flows in highly regulated rivers using the mesohabitat approach: a case study on the Nestos River, N. Greece [J]. Ecohydrology & Hydrobiology, 2019, 19(4):598-609.
- [41] WANG L, CHEN Q, ZHANG J, et al. Incorporating fish habitat requirements of the complete life cycle into ecological flow regime estimation of rivers [J]. Ecohydrology, 2020(7):e2204.
- [42] 胡和平,刘登峰,田富强,等. 基于生态流量过程线的水库生态调度方法研究[J]. 水科学进展, 2008(3):325-332. (HU Heping, LIU Dengfeng, TIAN Fuqiang, et al. A method of ecological reservoir reoperation based-on ecological flow regime [J]. Advances in Water Science, 2008(3):325-332. (in Chinese))

(收稿日期:2021-09-25 编辑:王芳)