

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2024.05.004

大渡河上游某河段鱼类栖息地适宜性评价

李美萍¹, 段 斌¹, 王海胜¹, 覃事河¹, 万 帆²

(1. 国能大渡河金川水电建设有限公司, 四川 阿坝 624100;
2. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065)

摘要:以大渡河上游某水电站坝下 13 km 大渡河干流河段和坝下支流入大渡河汇合口以上 4 km 支流河段鱼类栖息地为研究河段,从鱼类有效栖息地面积计算、支流河底连通性模拟两方面开展栖息地适宜性评价,重点分析评价了产卵期齐口裂腹鱼和重口裂腹鱼两种目标鱼类对流速与水深的适宜性指标,得到了研究河段鱼类栖息地适宜性指数和等级:坝下干流鱼类栖息地适宜性指数为 0.68,适宜性等级为适宜;支流河口以上 4 km 河段鱼类栖息地适宜性指数为 0.58,适宜性等级为一般适宜评价。

关键词:大渡河上游;鱼类栖息地;有效栖息地面积;河底连通性;适宜性评价

中图分类号:TV697.1;TV213.9 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2024)05-0030-07

Suitability evaluation of fish habitat for one upper reach of Dadu River

LI Meiping¹, DUAN Bin¹, WANG Haisheng¹, QIN Shihe¹, WAN Fan²

(1. CHE Energy Dadu River Jinchuan Hydropower Construction Co., Ltd., Aba 624100, China;
2. Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, China)

Abstract: By selecting the fish habitats at the main stream of Dadu River 13 km below the dam of a hydropower station and in the upper tributary reaches 4 km above the confluence of Dadu River and tributary as studying objects, the habitat suitability evaluation was carried out from two aspects: the calculation of effective habitat area for fish and the simulation of river bottom connectivity of the tributary. The suitability indexes of two target fish, *Schizothorax prenanti* and *Schizostomus distomus*, in spawning period were analyzed and evaluated to obtain the suitability index of fish habitat suitability index and grade of fish habitat suitability index in the study reach. The habitat suitability index of fish in the main stream below the dam was 0.68, and the suitability grade was suitable. The habitat suitability index of fish in the 4 km river above the mouth of the tributary is 0.58, and the suitability grade is generally suitable.

Key words: upper reach of Dadu River; fish habitat; weighted usable area; river bottom connectivity; suitability evaluation

水电站建设在给社会发展带来巨大经济效益的同时,也对鱼类生存与繁殖带来了不利影响;大坝建设造成河流生境片段化影响鱼类洄游和基因交流,河流水文情势、水动力学条件发生改变破坏鱼类栖息空间等^[1-2]。面对水电站建设带来的负面生态效应,现有的生态流量泄放、过鱼设施、增殖放流等保护措施都无法从根本上解决鱼类种群资源量下降的问题^[3-4]。栖息地保护和生境修复是保护鱼类种群资源量最根本有效的方式^[5-7],而开展鱼类栖息地适宜性评价是提出鱼类栖息地保护与生境修复方案与措施的基础^[8]。李方平等^[1]以金沙江旭龙水电站为例,评估了栖息地适宜性等级,提出了针对性的栖息地保护与修复措施,可为梯级水电开发影响下的鱼类栖息地保护范围筛选提供参考。鲁芸等^[9]以黑水河为实例,通过构建评价指标体系对河流鱼类产卵期栖息地质量进行了评价。景梦园等^[10]运用 River2D 中的二维水动力模型模拟了呼兰河干流不同流量工况下的流速、水深和适宜性栖息地分布情况,得到七星鱼枯水期、平水期和丰水期的适宜生态流量范围为 2.75~27.5 m³/s。杨露等^[11]将基于 Godunov 格式有限体积法求解的水动力模型与栖息地适宜模型相耦合,并引入 GPU 加速技术,建立了高效、高精度栖息地适宜模型。姜利等^[12]基于三维水流数学模型,探讨了正挑丁坝区鱼类栖息地水力生境指标的分布特征。李慧峰等^[13]将鱼类声学探测、生境遥感定量制图分析和三维水动力模拟相结合,分别绘制出 3 种不同体长鱼类群落的水深、流速、坡度等单因子生境适宜度指数曲线,并利用乘法法建立了栖息地适宜性指数(habitat suitability indices, HSI)模型。杨彦龙

作者简介:李美萍(1995—),女,硕士,主要从事水利水电工程生态环境保护研究。E-mail:2879320883@qq.com

引用本文:李美萍,段斌,王海胜,等.大渡河上游某河段鱼类栖息地适宜性评价[J].河海大学学报(自然科学版),2024,52(5):30-36.

LI Meiping, DUAN Bin, WANG Haisheng, et al. Suitability evaluation of fish habitat for one upper reach of Dadu River[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2024, 52(5): 30-36.

等^[14]建立了基于一般曲线坐标系下的平面二维水流数学模型,并应用于大渡河乐山段安谷水电站鱼类栖息地设计,设计的生态措施对河道鱼类栖息改善具有较好效果。Broom 等^[15]以南非佛得角生态区的 Rondegat 河为例,评估了栖息地的群落组成和物种特异性的非生物相对丰度。邢宝龙等^[16]以清泥河生态修复重要节点双龙湖为模拟区域,建立了二维水力模型,分析了区域水力适应性情况。戴凌全等^[17]选取水深和流速作为定居性鱼类产卵生境的关键影响因子,建立生境适宜性曲线,基于物理栖息地模型定量评估鱼类产卵生境适宜性的空间变化特征,分析了三峡水库出库流量变化对洞庭湖定居性鱼类产卵生境的影响。洪思扬等^[18]以大渡河流域为例,构建了包含水深、流速、过水面积等 5 个参数的栖息地评价指标体系,选择大渡河上游具有代表性的河段,确定了指示鱼类不同阶段的最低流量适宜值。

目前大渡河流域鱼类栖息地适宜性方面的研究成果还较少,本文通过开展大渡河上游某河段鱼类栖息地水力适应性评价和支流河底连通性模拟计算,得到研究河段鱼类有效栖息地面积 (weighted usable area, WUA) 和支流河底连通性程度,并结合生物多样性调查结果得出研究河段鱼类 HSI 和等级,可为针对性提出研究河段鱼类栖息地保护及修复措施提供参考。

1 研究区概况

大渡河上游某水电站位于四川省阿坝州金川县境内,该水电站将坝址下游 13 km 大渡河干流河段和坝下支流入大渡河汇合口以上 4 km 支流河段作为鱼类栖息地进行保护 (图 1)。

HSI 对栖息地数学模拟的准确性具有至关重要的作用,通常以 0~1 之间的数值来量化物种对栖息地的喜好程度。根据该水电站环评文件,将齐口裂腹鱼及重口裂腹鱼作为主要保护鱼类。结合该水电站裂腹鱼类游泳能力研究试验成果,确定齐口裂腹鱼、重口裂腹鱼产卵繁殖适宜的流速为 0.07~1.5 m/s,其中最适宜流速为 0.2~0.8 m/s;适宜水深为 0.15~1.5 m,其中最适宜水深为 0.2~0.8 m。根据该水电站主要保护鱼类水力适宜性研究成果,确定了研究河段目标鱼类在产卵繁殖季节对流速、水深的适宜度曲线,如图 2 所示 (图中 v 、 d 分别为流速和水深, I_v 、 I_d 分别为流速、水深的适宜度指数)。

2 研究方法

2.1 WUA 的计算

采用河道水流增量法 (instream flow incremental methodology, IFIM) 计算目标鱼类产卵期环境流量,通过构建研究区域二维水力模型,得到河段内水深、流速等水力条件,结合目标鱼类对流速、水深的适宜度曲线,确定不同流量下各网格区对应的 HSI,根据式 (1) 计算得到该流量下的 WUA,最终得出鱼类栖息地 Q -WUA 关系曲线 (Q 为干流流量)。 Q -WUA 的关系曲线拐点对应的流量即为适宜鱼类栖息地的环境流量。

WUA 被定义为计算单元的 HSI 和该单元面积的乘积:

$$A = \sum_{i=1}^n I_i A_i$$

(1)

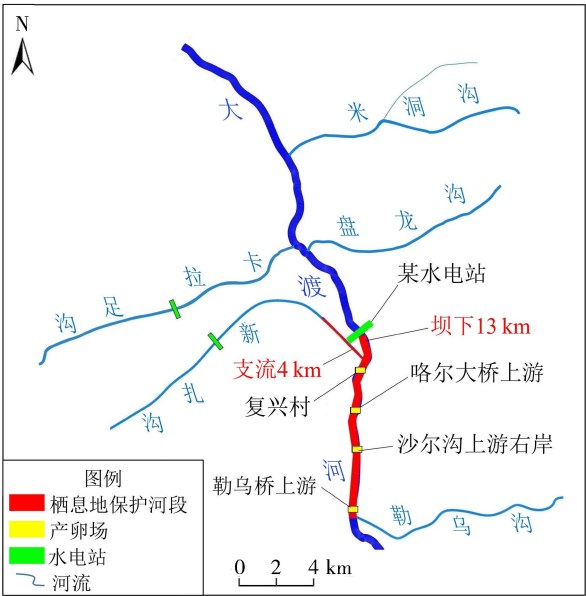


图 1 大渡河上游某河段鱼类栖息地保护范围

Fig. 1 Fish habitat protection scope of a section in the upper reach of Dadu River

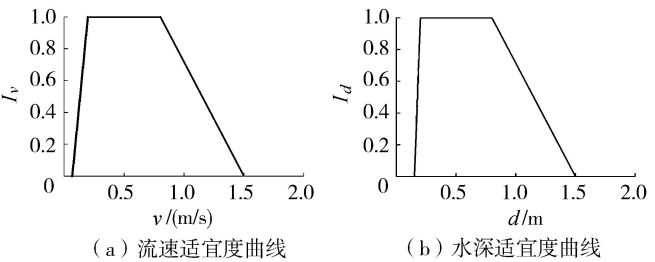


图 2 大渡河裂腹鱼类生态习性适宜度曲线

Fig. 2 Ecological suitability curve of schizothorax fish in Dadu River

其中

$$I = I_{vi} I_{di} I_{ci}$$

式中: A 为 WUA; A_i 为计算单元 i 的面积; n 为计算单元个数; I_i 为计算单元 i 的 HSI; I_{ci} 为河道特征(主要为河床覆盖物和底质情况)的适宜度指数。

研究河段鱼类的产卵场主要为沙砾底质的河漫滩区,河段减水对河床底质的影响较小,故未考虑河床底质的适宜性(取 $I_{ci}=1$),重点研究产卵期两种裂腹鱼对流速与水深的适宜性指标。为更好地区别栖息地的质量高低以及不同质量的栖息地面积大小,利用航空侦察覆盖地理信息系统 ArcGIS 的空间属性处理能力对具有水力学条件属性的河道网格进行筛选和分析,获得研究河段的流量-WUA 关系曲线。将 WUA 划分为高、中、低质量 3 种类型。定义当水深及流速两个水力学条件均在目标鱼类对其适宜性为 1 的范围内时,为高质量 WUA;二者只有一个条件在目标鱼类对其适宜性为 1 且另一条件不为 0 时,为中质量 WUA;二者均不在目标鱼类对其适宜性为 1 的范围内且不为 0 时,即为低质量 WUA,其余网格不计。

2.2 支流河底连通性模拟

计算范围选取支流入干流交汇口至上游 4 km 处,沿程共选取 21 个计算点,22 个计算断面,通过连接断面的最低点形成深泓线。水动力计算上游边界采用流量边界条件,下游采用水位边界条件,其中水位边界根据平面二维自由表面流模型(MIKE21 模型)计算的交汇口水位资料提取。水动力模型中,河道糙率类型为 Manningsn,河道糙率通过对比模拟值和实测资料,经分析及验证,取为 0.05。

3 结果与分析

3.1 支流 WUA 计算结果与分析

基于支流二维水动力模型,计算不同流量下支流的流速和水深分布(划分为 4 段进行计算),然后将各流量下的流速及水深分布换算成鱼类 HSI 分布。由于坝下支流无水文站,支流多年月均流量数据采用坝址下游大渡河右岸一级支流革什扎河布科水文站(参证站)流量数据折算得出。根据该水文站 1961—1987 年逐月均流量资料,计算各月不同保证率(10%、50%、90%)的平均流量,采用面积比折算法,得出支流多年月均流量。支流 WUA 计算工况见表 1。

表 1 支流 WUA 计算工况
Table 1 WUA calculation condition of tributary

工况编号	$Q_1/(m^3/s)$	Q_1 组成
1	2.22	3 月月均流量($1.91 m^3/s$)+水深 1 m 时流量($0.31 m^3/s$)
2	3.87	4 月月均流量($2.56 m^3/s$)+水深 1 m 时流量($0.31 m^3/s$)+补水($1 m^3/s$)
3	6.29	5 月月均流量($4.98 m^3/s$)+水深 1 m 时流量($0.31 m^3/s$)+补水($1 m^3/s$)

注: Q_1 为支流流量。

由图 3 可知, $Q_1=2.22 m^3/s$ 时,河道中的最适宜度指数即

红色区域呈零星状出现,未出现最适宜度通道,但在 4 km 坝下支流流域内,有符合适宜度值的鱼类上溯通道,即绿色区域和黄色区域贯通坝下支流 4 km 范围。通过计算可知,WUA 为 $22231 m^2$,其中高质量 WUA 为 $8685 m^2$,中质量 WUA 为 $11621 m^2$,低质量 WUA 为 $1925 m^2$ 。 $Q_1=3.87 m^3/s$ 时,河道中最适宜度指数即红色区域呈零星状出现,未出现最适宜度通道,但在 4 km 坝下支流流域内,有符合适宜度值的鱼类上溯通道,随着流量的增大,通道面积较 $Q_1=2.22 m^3/s$ 时在逐渐减小。通过计算可知,WUA 为 $20004 m^2$,其中高质量 WUA 为 $4470 m^2$,中质量 WUA 为 $13778 m^2$,低质量 WUA 为 $1756 m^2$ 。 $Q_1=6.29 m^3/s$ 时,河道中最适宜度指数即红色区域仍然呈零星状出现,未出现最适宜度通道,但在 4 km 坝下支流流域内,有符合适宜度值的鱼类上溯通道,通道面积随着流量的增大仍呈减小趋势。通过计算可知,WUA 为 $17911 m^2$,其中高质量 WUA 为 $3653 m^2$,中质量 WUA 为 $11175 m^2$,低质量 WUA 为 $3083 m^2$ 。

现有计算工况下,未出现 WUA 拐点。因此增加模拟工况 18 个,对应的流量分别为 0.20、0.40、0.50、0.60、0.80、1.00、1.20、1.40、1.60、1.80、2.00、2.20、2.40、2.56、2.87、3.37、4.37、4.87 m^3/s 。根据水动力学模型计算不同流量下河段的流速和水深分布,结合目标鱼类的适宜度曲线,获得不同流量下 WUA。研究河段总面积为 $98765 m^2$,不同流量下 WUA 及占河段总面积的比例见表 2。

由表 2 可知,支流流量为 $0.2 m^3/s$ 时,WUA 最小,占河段总面积的 15.00%;随着支流流量的增大,WUA 呈先增大后降低的趋势,当流量为 $1.4 m^3/s$ 时,WUA 最大,为 $23038 m^2$,占河段总面积的 23.33%,而后 WUA 开始降低,当流量为 $4.87 m^3/s$ 时,WUA 降为 $19083 m^2$,占河段总面积的 19.32%。可知,目标鱼类在支流流量 $0.2 \sim 0.5 m^3/s$ 和 $4.37 \sim 4.87 m^3/s$ 时 WUA 占比小于 20%,流量 $0.6 \sim 3.87 m^3/s$ 时占比高于 20%。

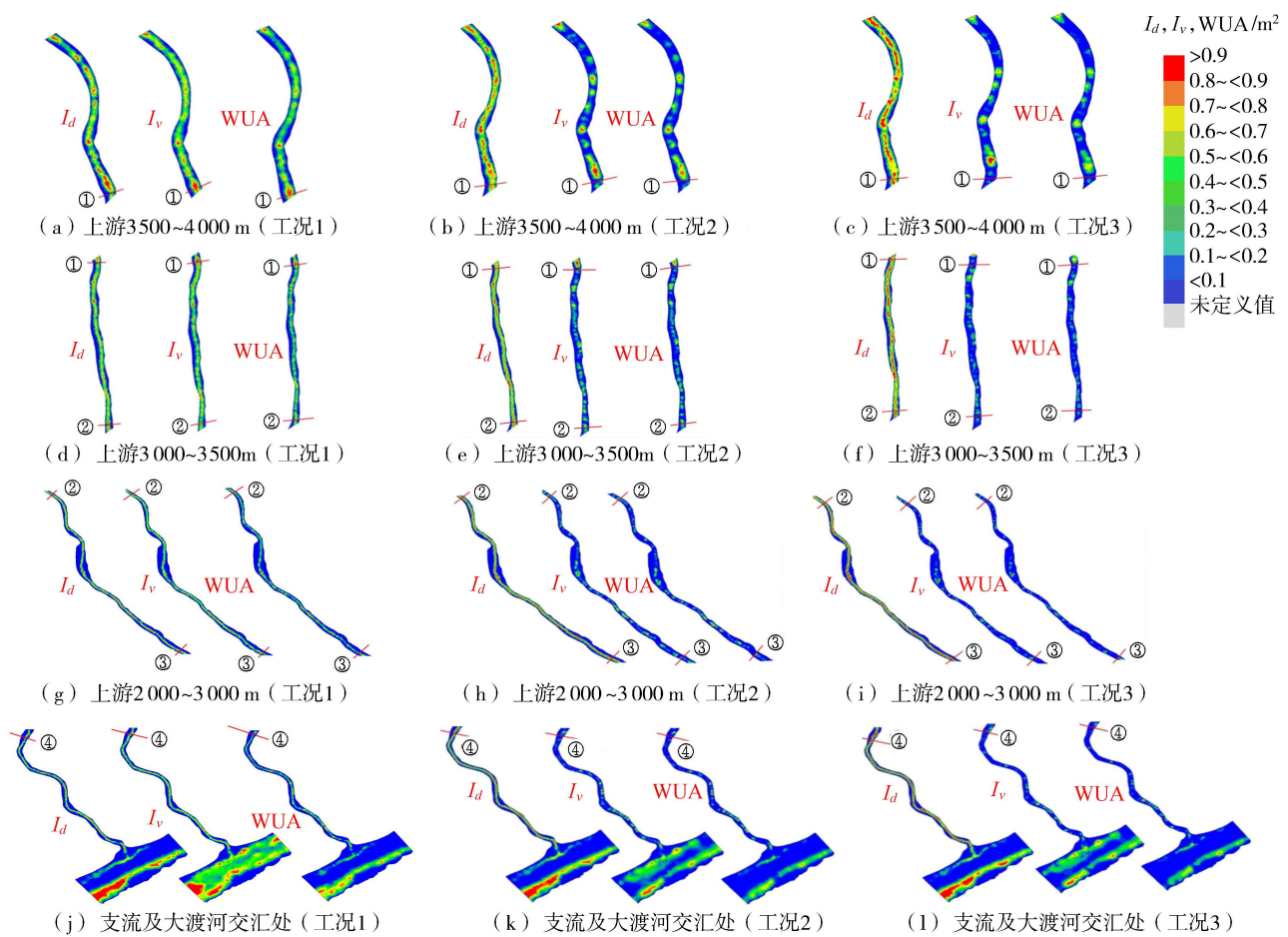


图3 不同工况下的适宜度指数和 WUA 分布

Fig.3 Suitability index and WUA distribution under different working conditions

WUA 占研究河段总面积的比例是衡量生物生存空间的重要指标,戴凌全等^[19]研究表明,当该比例达到 20% 左右时,栖息地即可满足目标鱼类上溯与下行所需的空间,因此支流适宜生态流量范围为 0.6 ~ 3.87 m³/s。

3.2 干流 WUA 计算结果与分析

干流 WUA 计算工况 3 个,流量 Q 分别为最小下泄流量 103 m³/s、天然情况 4 月多年平均流量 238 m³/s、天然情况 9 月多年平均流量 979 m³/s。利用大金站 1957 年 6 月至 2011 年 5 月共 54 年完整连续的流量径流系列资料,采用 P-Ⅲ型曲线通过适线法确定统计参数,计算得到大金水文站多年平均流量(6 月至翌年 5 月)和枯水期(11 月至翌年 4 月)流量,再根据面积比折算法,计算得出坝下 13 km 干流河段多年月均流量。3 种流量对应的淹没区域及水深、流速分布见图 4 和图 5, WUA 分布见图 6,图中红色边线代表河道边界线。

由图 4、图 5 可知,复兴村产卵场河床形态由宽变窄,其中部有一河心岛,该河心岛上游河道宽浅,为适宜鱼类产卵区域,下游河道窄深,为适宜鱼类越冬区域。随着流量的增大,该河心岛逐渐被淹没,最终完全消失。由图 4 可知,计算河段上游的产卵区域水深均相对较小, $Q=103\text{ m}^3/\text{s}$ 对应最大水深为 3.1 m,其余区域水深主要在 2.5 m 以下,是浅滩集中区域。而随流量增大,水深增幅也较为明显, $Q=979\text{ m}^3/\text{s}$ 对应最大水深可达 5.7 m,绝大部分区域水深均在 3 m 以上,

表 2 不同支流流量下的 WUA

Table 2 WUA with different tributary flows

支流流量/(m ³ /s)	WUA/m ²	WUA 占比/%
0.20	14814	15.00
0.40	17998	18.22
0.50	19248	19.49
0.60	20284	20.54
0.80	21685	21.96
1.00	22321	22.60
1.20	22723	23.01
1.40	23038	23.33
1.60	22938	23.22
1.80	22854	23.14
2.00	22524	22.81
2.20	22227	22.51
2.22	22231	22.51
2.40	22010	22.28
2.56	21841	22.11
2.87	21327	21.59
3.37	20688	20.95
3.87	20004	20.25
4.37	19548	19.79
4.87	19083	19.32
6.29	17911	18.13

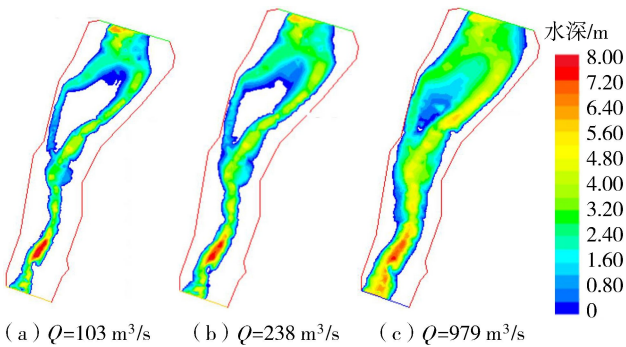


图4 3种流量对应的产卵场水深分布

Fig.4 Water depth distribution of spawning ground corresponding to three kinds of flows

浅滩区域大幅减少。由图5可知,计算河段上游的产卵区域流速亦相对较小, $Q=103\text{ m}^3/\text{s}$ 对应流速多在 2.5 m/s 以下,仅河心滩周边区域由于河床被束窄,水流湍急,流速较大。

由图6可知, $Q=103\text{ m}^3/\text{s}$ 对应的产卵场有效栖息地成片分布,且适应性较好,主要分布于河心岛及河岸周边。而 $Q=238\text{ m}^3/\text{s}$ 对应的有效栖息地分布则较为分散, $Q=979\text{ m}^3/\text{s}$ 对应的有效栖息地仅在岸边有零星分布。其中 $Q=103、238、979\text{ m}^3/\text{s}$ 对应的WUA分别为 $11\,579、8\,220、2\,024\text{ m}^2$, $Q=103\text{ m}^3/\text{s}$ 对应的WUA比 $Q=238\text{ m}^3/\text{s}$ 高出 0.4 倍,比 $Q=979\text{ m}^3/\text{s}$ 高出 4.7 倍。

3.3 支流河底连通性结果与分析

利用MIKE11计算支流各流量下沿程水深情况,根据水深判断河川连续性,分析是否满足过鱼条件,结果见表3。支流水深变幅最大为 0.43 m ,两个点位之间水深变幅多在 $0.1\sim0.2\text{ m}$ 之间变化,支流纵向连通 12.5 km ,长于栖息地保护河段,两种目标鱼类在支流河口至最上游均可实现上溯,不存在阻隔。

表3 不同支流流量下水深情况

Table 3 Water depths under different tributary flows

与汇流口的 距离/m	水深/m					
	$Q_1=2.22\text{ m}^3/\text{s}$	$Q_1=2.87\text{ m}^3/\text{s}$	$Q_1=3.87\text{ m}^3/\text{s}$	$Q_1=4.37\text{ m}^3/\text{s}$	$Q_1=4.87\text{ m}^3/\text{s}$	$Q_1=6.29\text{ m}^3/\text{s}$
50	0.83	0.89	1.01	1.06	1.11	1.24
150	0.78	0.88	1.02	1.08	1.14	1.29
334	0.80	0.9	1.03	1.09	1.15	1.29
457	0.72	0.81	0.92	0.98	1.03	1.17
842	0.79	0.88	1.01	1.06	1.12	1.25
1110	0.61	0.67	0.74	0.78	0.80	0.87
1270	0.59	0.64	0.72	0.76	0.80	0.89
1434	0.51	0.58	0.67	0.71	0.75	0.84
1620	0.68	0.75	0.84	0.88	0.92	1.01
1850	0.51	0.57	0.66	0.70	0.74	0.84
2065	0.66	0.73	0.83	0.87	0.91	0.99
2273	0.61	0.67	0.76	0.80	0.84	0.93
2503	0.82	0.90	1.01	1.06	1.10	1.20
2670	0.47	0.53	0.63	0.67	0.71	0.81
2900	0.60	0.67	0.77	0.81	0.85	0.97
3285	0.49	0.55	0.63	0.67	0.71	0.81
3500	0.80	0.91	1.00	1.03	1.07	1.20
3800	0.48	0.49	0.66	0.74	0.80	0.91
4000	0.75	0.92	0.92	0.92	0.93	1.04

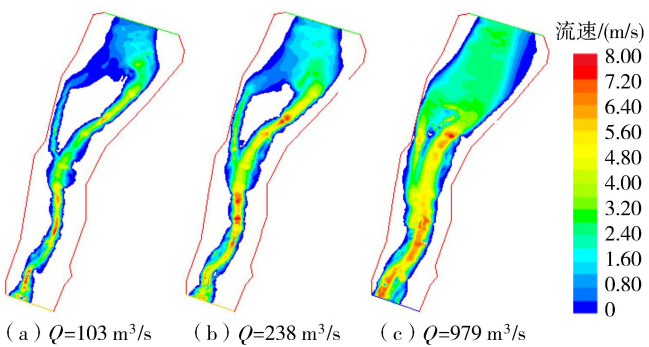


图5 3种流量对应的产卵场流速分布

Fig.5 Velocity distribution of spawning field corresponding to three kinds of flows

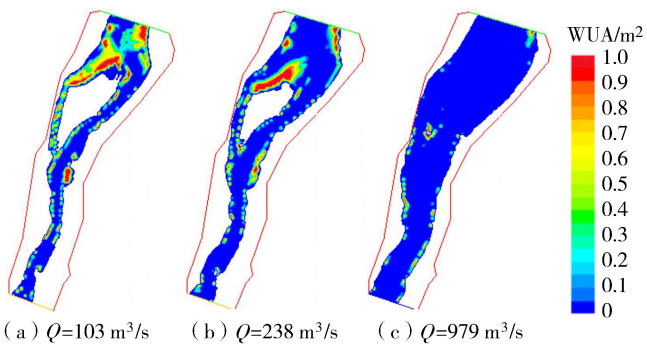


图6 3种流量对应的产卵场 WUA 分布

Fig.6 WUA distribution of spawning fields corresponding to three kinds of flows

3.4 鱼类栖息地适宜性评价

根据 NB/T 10485—2021《河流水生生物栖息地保护技术规范》评价研究河段栖息地适宜性。本次鱼类栖息地适宜性评价采用保护适宜性进行表征,采用河流连通性和生态健康性两个指标评价,其中生态健康性采用生物多样性指数(H' ,由研究河段的浮游植物和浮游动物的现状监测调查数据得出)和水力栖息地适应性指数表征。评价标准为当 $H' \geq 3$,水生态状况良好; $2 \leq H' < 3$,水生态状况较好; $1 \leq H' < 2$,水生态状况一般; $H' < 1$,水生态状况较差。河流生物多样性指标 D_9 应根据生物多样性指数的计算结果赋分,并应将生物多样性指标按照从高到低的顺序划分为 5 个等级,生物多样性指标赋分等级应符合表 4 的规定,具体评价结果见表 5。

表 4 生物多样性指标赋分等级
Table 4 Ranking of biodiversity indicators

指标等级	生物多样性指标	生物多样性指数
1	$0.8 < D_9 \leq 1$	$H' > 4$
2	$0.6 < D_9 \leq 0.8$	$3 < H' \leq 4$
3	$0.4 < D_9 \leq 0.6$	$2 < H' \leq 3$
4	$0.2 < D_9 \leq 0.4$	$1 < H' \leq 2$
5	$0 < D_9 \leq 0.2$	$0 \leq H' \leq 1$

表 5 鱼类 HSI 评价结果

Table 5 Habitat suitability index of fish in the upper reach of Dadu River

评价指标	河段划分	HSI 计算结果	说明
河流连通性指标	坝下干流	1	坝下干流 13 km 全部纵向连通
	坝下支流	1	支流纵向连通 12.5 km,长于栖息地保护河段
生物多样性指标	坝下干流	0.5	$H' = 1.61$ (浮游植物); $H' = 2.44$ (浮游动物)
	坝下支流	0.5	$H' = 1.75$ (浮游植物); $H' = 2.13$ (浮游动物)
水力栖息地适应性指数	坝下干流	0.55	现存产卵场具有较高 WUA
	坝下支流	0.23	WUA 占支流计算区域面积比例

由表 5 得出评价结果:坝下干流鱼类 HSI 为 0.68,适宜性等级为适宜;支流河口以上 4 km 河段鱼类 HSI 为 0.58,适宜性等级为一般适宜。

4 结 论

- a. 随着支流流量的增大,WUA 呈先增加后降低的趋势,当流量为 $1.4 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,WUA 最大,为 $23\,038 \text{ m}^2$ 。支流适宜生态流量的范围为 $0.6 \sim 3.87 \text{ m}^3/\text{s}$ 。干流最小下泄生态流量对应的 WUA 为 $11\,579 \text{ m}^2$,天然条件 4 月多年平均流量对应的 WUA 为 $8\,220 \text{ m}^2$,天然条件 9 月多年平均流量对应的 WUA 为 $2\,024 \text{ m}^2$ 。
- b. 支流河口以上 4 km 河段水深变幅最大为 0.43 m,两个点位之间水深变幅多在 0.1 ~ 0.2 m 之间变化,支流纵向连通 12.5 km,长于栖息地保护河段,重口裂腹鱼和齐口裂腹鱼两种目标鱼类在支流河口至最上游均可实现上溯,不存在阻隔。
- c. 该水电站坝下干流鱼类 HSI 为 0.68,适宜性等级为适宜;支流河口以上 4 km 河段鱼类 HSI 为 0.58,适宜性等级为一般适宜。

参考文献:

[1] 李方平,张登成,王孟,等.金沙江旭龙水电站鱼类栖息地适宜性评价[J].水生态学杂志,2023,44(6):53-62. (LI Fangping,ZHANG Dengcheng,WANG Meng,et al. Suitability assessment of fish habitat in the riverine section at Xulong Hydropower Station on Jinsha River[J]. Journal of Hydroecology,2023,44(6):53-62. (in Chinese))

[2] 谭民强,梁学功.水利水电建设中鱼类保护的有效措施:适宜生境的人工再造[J].环境保护,2007(24):73-74. (TAN Minqiang,LIANG Xuegong. Effective measures for fish protection in water conservancy and hydropower construction; artificial reconstruction of suitable habitat[J]. Environmental Protection,2007(24):73-74. (in Chinese))

[3] 刘元元,侯永平,张信.河流水电开发中鱼类关键保护措施研究与实践[J].云南水力发电,2017,33(5):27-29. (LIU Yuanyuan,HOU Yongping,ZHANG Xin. Research and practice on key protection measures for fish in river hydropower development[J]. Yunnan Water Power,2017,33(5):27-29. (in Chinese))

[4] 许勇.“一条江”水电开发模式下的鱼类保护实践[J].人民长江,2018,49(20):24-28. (XU Yong. Fish protection practices under condition of entire river hydropower development by a single company[J]. Yangtze River,2018,49(20):24-28. (in Chinese))

[5] 张志永,刘枚,彭安成,等.鄱阳湖鱼类生境面临的主要问题及修复措施探讨[J].水生态学杂志,2011,32(1):134-136.

(ZHANG Zhiyong,LIU Mei,PENG Ancheng,et al. Main problems and restoration measures of fish habitat in Poyang Lake[J]. Reservoir Fisheries,2011,32(1):134-136. (in Chinese))

[6] 邱阳凌. 黑水河生态河貌模拟及鱼类替代生境评价[D]. 重庆:重庆交通大学,2018.

[7] 陈锋,黄道明,赵先富,等. 新时代长江鱼类多样性保护的思考[J]. 人民长江,2019,50(2):13-18. (CHEN Feng,HUANG Daoming,ZHAO Xianfu,et al. Thinking on protection of fish diversity in Yangtze River in new era[J]. Yangtze River,2019,50(2):13-18. (in Chinese))

[8] 夏继红,秦如照,窦传彬,等. 中小河流鱼类生境适宜性评估模型与等级分区[J]. 水利水电科技进展,2022,42(3):9-13. (XIA Jihong,QIN Ruzhao,DOU Chuanbin,et al. Habitat suitability assessment model and suitability grading classification for fishes in small and medium rivers[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42(3):9-13. (in Chinese))

[9] 鲁芸,吴紫涵,刘清园,等. 基于鱼类产卵需求的栖息地修复效果评价[J]. 环境工程技术学报,2023,13(2):733-741. (LU Yun,WU Zihan,LIU Qingyuan,et al. Evaluation of habitat restoration effect based on fish spawning requirements[J]. Journal of Environmental Engineering Technology,2023,13(2):733-741. (in Chinese))

[10] 景梦园,王立权,褚丽丽,等. 基于改进 River2D 模型的呼兰河干流生态流量研究[J]. 中国农村水利水电,2023(3):102-110. (JING Mengyuan,WANG Liquan,CHU Lili,et al. Research on the ecological flow of the mainstream of the Hulan River based on the improved River2D Model[J]. China Rural Water and Hydropower,2023(3):102-110. (in Chinese))

[11] 杨露,侯精明,王盼,等. 基于高效高精度栖息地模型的生态流量研究[J]. 水力发电学报,2023,42(1):77-85. (YANG Lu,HOU Jingming,WANG Pan,et al. Study on ecological flows based on high-efficiency and high-accuracy habitat model[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2023,42(1):77-85. (in Chinese))

[12] 姜利,邓晓龙,钟亮,等. 正挑丁坝区鱼类栖息地水力生境指标分布特征数值模拟[J]. 人民珠江,2022,43(7):103-113. (JIANG Li,DENG Xiaolong,ZHONG Liang,et al. Numerical simulation of distribution characteristics of hydraulic fish habitat index in 90° spur dike areas[J]. Pearl River,2022,43(7):103-113. (in Chinese))

[13] 李慧峰,曹坤,汪登强,等. 鄱阳湖通江水道越冬时期鱼类群落的栖息地适宜性分析[J]. 中国水产科学,2022,29(3):341-354. (LI Huifeng,CAO Kun,WANG Dengqiang,et al. Habitat suitability analysis of fish community in the channel connecting the Poyang Lake and the Yangtze River in winter[J]. Journal of Fishery Sciences of China,2022,29(3):341-354. (in Chinese))

[14] 杨彦龙,程开宇,施家月,等. 二维水流数学模型在分汊河道鱼类栖息地设计中的应用[J]. 长江科学院院报,2022,39(8):65-70. (YANG Yanlong,CHENG Kaiyu,SHI Jiayue,et al. Application of 2D flow mathematical model to fish habitat design in Braided River channel[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2022,39(8):65-70. (in Chinese))

[15] BROOM C J,WEYL O L F,SOUTH J. Habitat associations of imperilled fishes after conservation intervention in the Cape Fold Ecoregion,South Africa[J]. Journal of Fish Biology,2023,102(2):317-327.

[16] 邢宝龙,宋文超. 基于数值模拟的清泥河鱼类水力生境评价[J]. 人民黄河,2019,41(12):70-72. (XING Baolong,SONG Wenchao. Hydraulic habitat assessment of fishes in Qingni River based on numerical simulation[J]. Yellow River,2019,41(12):70-72. (in Chinese))

[17] 戴凌全,张培培,常曼琪,等. 三峡水库出库流量变化对洞庭湖定居性鱼类产卵生境的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(5):38-45. (DAI Lingquan,ZHANG Peipei,CHANG Manqi,et al. Effect of outflow from Three Gorges Reservoir on spawning habitat of sedentary fish in Dongting Lake[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(5):38-45. (in Chinese))

[18] 洪思扬,王红瑞,朱中凡,等. 基于栖息地指标法的生态流量研究[J]. 长江流域资源与环境,2018,27(1):168-175. (HONG Siyang,WANG Hongrui,ZHU Zhongfan,et al. Research of ecologic flow based on habitat index method[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2018,27(1):168-175. (in Chinese))

[19] 戴凌全,王煜,戴会超,等. 金沙江下游向家坝水库不同出库流量对四大家鱼生境面积影响的定量分析[J]. 环境科学研究,2021,34(7):1710-1718. (DAI Lingquan,WANG Yu,DAI Huichao,et al. Effect of different release from Xiangjiaba Reservoir in the lower reaches of Jinsha River on habitat area of four major Chinese carps[J]. Research of Environmental Sciences,2021,34(7):1710-1718. (in Chinese))

(收稿日期:2023-10-23 编辑:刘晓艳)