

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2020.04.002

# 基于鱼类栖息地需求的雅鲁藏布江中游环境流量计算

侯俊<sup>1,2</sup>, 黄喻威<sup>1,2</sup>, 苗令占<sup>1,2</sup>, 邵国毅<sup>1,2</sup>, 吴森<sup>1,2</sup>

(1. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏南京 210098;  
2. 河海大学环境学院, 江苏南京 210098)

**摘要:**针对水利工程影响下,河道下游天然水文情势改变造成鱼类产卵场面积减小和质量降低等潜在生态问题,通过数值模拟与统计建立拉萨裸裂尻鱼产卵期栖息地适宜度模型,采用栖息地模拟法计算了雅鲁藏布江中游藏木水电站坝下米林—尼洋河汇口处 38.9 km 河段的环境流量。结果表明:拉萨裸裂尻鱼产卵期适宜水深为 0.7~1.0 m,适宜流速为 0.4~0.6 m/s;研究河段内拉萨裸裂尻鱼产卵期环境流量为 432 m<sup>3</sup>/s。

**关键词:**环境流量;鱼类栖息地;拉萨裸裂尻鱼;栖息地适宜度指数;加权可利用面积;雅鲁藏布江中图分类号:TV213.4 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2020)04-0008-05

**Calculating environmental flows in middle reach of Yarlung Tsangpo River based on fish habitat requirements**// HOU Jun<sup>1,2</sup>, HUANG Yuwei<sup>1,2</sup>, MIAO Lingzhan<sup>1,2</sup>, SHAO Guoyi<sup>1,2</sup>, WU Miao<sup>1,2</sup> (1. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resources Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** In view of the potential ecological problems such as the reduction of fish spawning area and quality caused by the change of natural hydrological situation in the lower reaches of the river under the influence of water conservancy projects, a habitat suitability model for the spawning period of *Schizopygopsis younghusbandi* was established through numerical simulation and statistics. We calculated the environmental flow within 38.9 km from the confluence of Milin and Niyang River, in the downstream of the dam of Zangmu Hydropower Station, middle reaches of the Yarlung Tsangpo River, with habitat simulation method. The results show that the suitable water depth during the spawning period of *Schizopygopsis younghusbandi* is 0.7~1.0 m and the suitable velocity is 0.4~0.6 m/s. The environmental flow during the spawning period of *Schizopygopsis younghusbandi* is 432 m<sup>3</sup>/s.

**Key words:** environmental flow; fish habitat; *Schizopygopsis younghusbandi*; habitat suitability index; weighted available area; Yarlung Tsangpo River

水电开发为人类社会创造巨大的经济效益和社会效益的同时,也在改变着河流的水文情势及水流形态,对河道原有的连续性、多样性和完整性造成不利影响<sup>[1]</sup>。对于特定河流,需要保持一定水量、时间和频率的一系列流量排放<sup>[2]</sup>。这些流量过程必须保证维持复杂的水生栖息地和河流生态系统健康,被称为“生态流量”“生态用水需求”“环境流量”“环境用水需求”等<sup>[3]</sup>。2007年第十届国际环境流量大会上发布的“布里斯班宣言”将环境流量描述为“维持河道及河口自然生态系统和维持人类生存发展所依赖的生态系统所需要的水量、时间和

水质”<sup>[4]</sup>。2018年新发布的“布里斯班宣言”对保障环境流量的全球行动计划做了进一步的描述。

目前计算环境流量的方法有 200 多种<sup>[5]</sup>,主要包括水文学法、水力学法、栖息地模拟法和整体法 4 类。栖息地模拟法不仅将流量变化与自然栖息地变化联系在一起,还把这一信息应用到具体物种的栖息地需求上,来确定环境流量的范围。最典型的栖息地模拟法是 20 世纪 70 年代美国渔业及野生动物署 (USWFS) 提出的河道内流量增加法 (instream flow incremental methodology, IFIM),考虑了流速、水深、底质等因子变化引起的特定物种处于不同生命

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0401709);国家自然科学基金(51421006,51479065,51722902)

作者简介:侯俊(1979—),男,研究员,博士,主要从事水环境保护与生态修复研究。E-mail: huj\_hj@hhu.edu.cn

阶段的偏好变化,通过模拟计算出不同流量  $Q$  条件下栖息地加权可利用面积 (weighted usable area, WUA),根据  $Q$ -WUA 关系来评估环境流量过程<sup>[6]</sup>。杨宇等<sup>[7]</sup>在总结前人研究的基础上,将栖息地水力条件划分为水流特征量、河道特征量和无量纲量,并给出了适用范围;侯俊等<sup>[8]</sup>运用 MIKE 数值模拟与栖息地适宜度指数 (habitat suitability index, HSI) 模型结合的方法,得到了保护息县枢纽工程闸下长春鳊的环境流量;魏卿等<sup>[9]</sup>运用 IFIM 和 PHABSIM 模型得到  $Q$ -WUA 曲线,并计算得到洪泽湖鳊鱼产卵期最小生态流量;韩仕清等<sup>[10]</sup>根据目标物种产卵场逐日流量资料,分析构建了水深、流速适宜度曲线,并采用 IFIM 得到水电站下泄的生态流量。

水生生物生境资料的难于获取是目前制约栖息地模拟法发展的重要因素<sup>[11]</sup>,目前针对雅鲁藏布江流域特有鱼类及其环境流量需求的研究极少,主要原因也是水文和鱼类生境等基础资料难以获取。本文采用河道内流量增加法对雅鲁藏布江中游河段进行环境流量计算,以期为缺乏生境资料的河流环境流量计算提供思路,同时也为雅鲁藏布江水电开发情况下水生生物栖息地保护提供理论和方法指导。

## 1 研究区域概况

雅鲁藏布江流域位于西藏境内,流域面积为 24.6 万  $\text{km}^2$ ,平均海拔约 4 500 m,干流全长为 2 057 km,流域内总落差为 5 435 m,平均水力坡降在中国境内所有大型河流中排首位。雅鲁藏布江有着丰富的水电开发潜力,是西藏水能资源最丰富的河流,其干流和五大支流(多雄藏布江、年楚河、拉萨河、尼洋河、帕隆藏布江)的理论水能蕴藏量约为 1.13 亿 kW,仅次于长江流域。

雅鲁藏布江中游指的是里孜至米林县派镇河段,长约 1 340 km,总落差达 1 200 m。目前该河段已建成雅鲁藏布江干流上的第一座大型水电站——藏木水电站,并于 2015 年开始运行。其坝址处多年平均流量为  $1 010 \text{ m}^3/\text{s}$ ,坝址控制流域面积约 15.8 万  $\text{km}^2$ ,水库正常蓄水位为 3 310 m,最大坝高为 116 m,相应库容约 0.866 亿  $\text{m}^3$ ,电站总装机容量达 51 万 kW,多年平均年发电量约 25 亿  $\text{kW} \cdot \text{h}$ ,是西藏最大的水电开发项目。

根据雅鲁藏布江梯级开发的规划,藏木水电站下游还规划建设米林电站(水库)。根据已掌握的基础资料情况,同时为了排除支流尼洋河(多年平均流量约占其入汇处雅鲁藏布江干流流量的 40%)对雅鲁藏布江干流水文情势的干扰,选取藏木水电站下游米林—尼洋河汇口处河段作为本次研究区

域。研究区域位于东经  $94^\circ 13' \sim 94^\circ 28'$ 、北纬  $29^\circ 14' \sim 29^\circ 25'$  范围内,河段长 38.9 km,断面宽为 0.25 ~ 2.24 km,平均水深约为 4.5 m,面积约为 33.4  $\text{km}^2$ ,多年平均流量为  $1 440 \text{ m}^3/\text{s}$ 。选用栖息地模拟法来计算天然状态下该河段维持拉萨裸裂尻鱼产卵繁殖适宜栖息地所需的环境流量,为已建藏木水电站以及日后米林水电站运行过程中水生生物栖息地保护提供理论支持。

在雅鲁藏布江中游主要分布有拉萨裸裂尻鱼、双须叶须鱼、拉萨裂腹鱼、巨须裂腹鱼、异齿裂腹鱼和尖裸鲤共 6 种裂腹鱼类,是当地特有的土著经济鱼类<sup>[12]</sup>。李雷等<sup>[13]</sup>分别在 2015 年和 2017 年春季对雅鲁藏布江中游鱼类进行了采样调查,根据打捞物中各鱼类的质量和数量来计算分布频率,统计分析了 6 种鱼类的相对重要性指数(index of relative importance, IRI),结果显示异齿裂腹鱼的平均 IRI 最高,约为 9 800,可视为优势种群;其次为拉萨裸裂尻鱼,平均 IRI 约为 2 200,可视为亚优势种群。另外李雷等<sup>[13]</sup>在对 6 种鱼类地理分布范围的调查中发现,在藏木水电站下游江段(朗县、米林)中,仅拉萨裸裂尻鱼和巨须裂腹鱼两次均被采集到样本。因此在研究藏木水电站下游鱼类栖息地需求时拉萨裸裂尻鱼具有较好的代表性。

## 2 研究方法

### 2.1 环境流量求解方法

采用 IFIM 来计算目标鱼类产卵期环境流量,通过构建研究区域二维水动力模型,得到河段内水深、流速等水力条件,再与鱼类栖息地适宜度模型相结合,建立不同流量和目标鱼种有效栖息地 WUA 之间的关系,从  $Q$ -WUA 关系曲线上找出拐点对应的流量作为保障适宜鱼类栖息地的环境流量,来为河流流量过程的生态调控提供依据。

在鱼类栖息地适宜度模型模拟中,一般采用鱼类栖息地适宜度指数来表征鱼类在具体生活史阶段对栖息地内不同水力条件(如水深、流速、河床底质)的偏好程度,这一适宜度指数通常用鱼类栖息地适宜度曲线来表示<sup>[14]</sup>。目前国内暂无雅鲁藏布江上特有裂腹鱼类的可用栖息地适宜度模型,本文通过数值模拟和统计的方法来构建目标鱼类的栖息地适宜度模型。

### 2.2 目标鱼类栖息地适宜度模型构建方法

本文基于雅尼湿地干流河段(尼洋河汇口处—奴下断面)产卵期历史水文资料,采用数值模拟与统计的方法<sup>[15]</sup>,构建拉萨裸裂尻鱼产卵期栖息地适宜度模型。拉萨裸裂尻鱼繁殖时间主要在 3—4 月<sup>[16-17]</sup>,因此选取 3—4 月的水文数据来构建模型。拉萨裸裂尻鱼的产卵场位于慢流河湾地区或浅滩流

水处,拉萨裸裂尻鱼一般产黏性卵于砾石底质的边滩、心滩交界的水域,之后受精卵会落入石砾缝中,孵化过程同时伴随着水流的冲刷。产卵期水深的阈值范围为 0.5 ~ 1.5 m<sup>[18]</sup>。

以米尼村附近断面地形为例,如图 1 所示,主河槽与边滩交界处急流与缓流混杂,利于鱼类产卵,满足拉萨裸裂尻鱼的产卵需求。因此,将此交界处定义为地形突变点,该点附近水域可以视为拉萨裸裂尻鱼的产卵适宜区域。选取雅尼湿地干流河段 8 个实测断面,提取各断面地形突变点,作为产卵场水力条件模拟的代表区域。

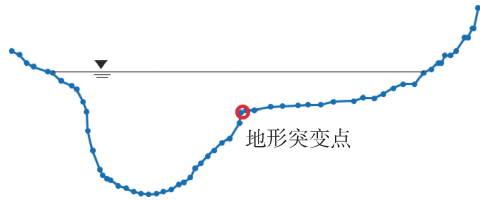


图 1 米尼村断面地形

Fig. 1 Section topography at Mini Village

采用 MIKE21 水动力模型来对产卵场代表区域进行水动力学模拟,上断面流量根据奴下断面的实测流量数据及控制面积的比例来推算,下断面水位采用奴下断面的实测水位数据,模拟区域为尼洋河汇口处—奴下断面,模拟时间为 2006—2010 年的 3—4 月。利用模拟区域内水面线实测数据对模型进行参数率定的结果表明,各验证点位误差在 0 ~ 0.15 m 之间,绝对平均值为 0.08 m,模型选取的参数较为合理,能较好模拟研究区域内的水力条件。

提取 8 个地形突变点的水深、流速计算结果,并参考张志广等<sup>[18]</sup>对裂腹鱼栖息地生态水力学特征的研究,舍弃水深不满足 0.5 ~ 1.5 m 的计算结果。统计拉萨裸裂尻鱼产卵场各水深、流速区间内样本的数量和分布频率,并进行归一化处理,绘制拉萨裸裂尻鱼流速、水深栖息地适宜度指数曲线。

### 2.3 目标鱼类栖息地 WUA 计算方法

IFIM 通过 WUA 来表征鱼类可生存繁衍的有效栖息地面积,将其定义为计算单元的栖息地适宜度指数和该单元面积的乘积:

$$S = \sum_{i=1}^n I_i A_i \quad (1)$$

式中: $S$  为 WUA 的值; $A_i$  为各计算单元的面积; $n$  为计算单元个数; $I_i$  为计算单元的栖息地适宜度指数,由  $I_{vi}$ 、 $I_{di}$ 、 $I_{ci}$ , 即流速、水深、河道特征(主要为河床覆盖物和底质情况)的适宜度指数组合而成,计算方法有乘积法、几何平均法、最小值法和加权平均法,计算公式分别为

$$I_i = I_{vi} I_{di} I_{ci} \quad (2)$$

$$I_i = \sqrt{I_{vi} I_{di} I_{ci}} \quad (3)$$

$$I_i = \min(I_{vi}, I_{di}, I_{ci}) \quad (4)$$

$$I_i = k_v I_{vi} + k_d I_{di} + k_c I_{ci} \quad (5)$$

式中  $k_v$ 、 $k_d$ 、 $k_c$  分别为流速、水深和河道特征适宜度指数的权重系数。由于缺乏目标鱼类对河床覆盖物和底质的适宜度数据,将  $I_{ci}$  的值默认为 1,仅考虑流速和水深的共同作用,采用式(2)计算栖息地适宜度指数;将计算节点外围的泰森多边形的面积作为计算单元的面积,计算 WUA 值。

根据水动力模型得到不同流量下河段内的流速和水深分布情况,结合目标鱼类对流速、水深和河道特征的适宜度指数曲线,确定不同流量下各网格区对应的栖息地适宜度指数,根据式(1)和(2),即得到该流量下的 WUA,最终综合得出栖息地  $Q$ -WUA 关系曲线。

### 2.4 水动力模拟方法

选用 MIKE21 Flow Model 对研究区域(米林—尼洋河汇口处河段)的水动力进行数值模拟,得到不同流量下河段内的流速和水深分布情况。米林—尼洋河汇口处河段内水平尺度远大于垂直尺度,所以可用二维浅水方程来模拟区域内水动力特征。

本次模拟采用实测断面地形资料,研究区域内总共有 20 个断面。模型地形搭建选用非结构化的三角形网格,时间步长设为 60 s,模拟区域内共有 1818 个网格节点,三角形单元共有 2112 个。从网格地形图来看,地形模拟结果可以较好地反映研究区域内实际地形地貌。上断面以流量作为边界条件,根据羊村断面实测流量数据及控制面积的比例推求得到;下断面以流量作为边界条件,通过奴下断面的实测流量数据推求得到;其余均为陆地边界。运用“干湿判别法”处理网格内二维动边界,模型模拟中干水深值取 0.005 m,湿水深值取 0.1 m,淹没水深值取 0.05 m。

根据现场查勘,雅鲁藏布江米林—尼洋河汇口处河段河床以砂质为主,有少许砾石、卵石。根据已有水边线数据,采用不同的糙率系数  $n$  进行试算,经率定该河段糙率为 0.042。对模拟结果进行误差分析,计算得到的水深、流速验证结果的误差均在正常范围内,平均偏差分别为 6.6% 和 9.2%,且水深和流速模拟结果的变化趋势均与实测值变化情况有较好的一致性,所以此模型选取的参数合理,模型模拟结果也可信。

## 3 结果与分析

### 3.1 拉萨裸裂尻鱼栖息地适宜度指数曲线

如图 2 和图 3 所示,拉萨裸裂尻鱼产卵期可接受的水深范围为 0.5 ~ 1.3 m,其中水深为 0.7 ~ 1.0 m

时,  $I_d \geq 0.6$  (适宜水深); 水深为 0.7 m、0.9 ~ 1.0 m 时,  $I_d \geq 0.8$  (理想水深)。流速可接受的范围为 0.1 ~ 0.9 m/s, 其中流速为 0.4 ~ 0.6 m/s 时,  $I_v \geq 0.6$  (适宜流速); 流速为 0.5 m/s 时,  $I_v \geq 0.8$  (理想流速)。

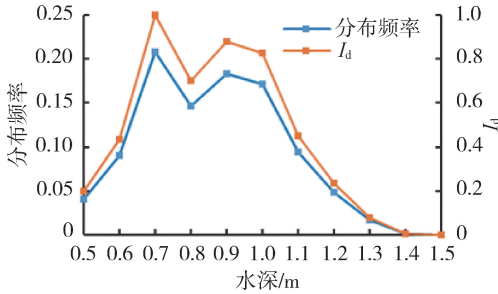


图2 水深统计及适宜度指数曲线

Fig. 2 Water depth statistics and suitability index curve

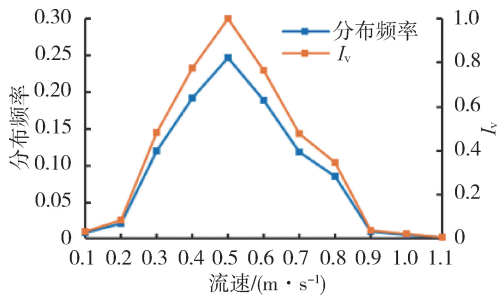


图3 流速统计及适宜度指数曲线

Fig. 3 Velocity statistics and suitability index curve

### 3.2 拉萨裸裂尻鱼栖息地 WUA 与流量关系

模拟计算米林—尼洋河汇口处河段多年平均流量 10% ~ 80% 条件下 (8 种工况) 水深、流速分布情况, 同时结合适宜度指数曲线, 计算 WUA, 得到 Q-WUA 关系曲线如图 4 所示。由图 4 可知, 流量由  $144 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $0.1Q$ ,  $Q$  为米林断面多年平均流量) 增加至  $432 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $0.3Q$ ), WUA 由  $38.2 \text{ 万 m}^2$  持续增加至  $46.6 \text{ 万 m}^2$ 。造成这一趋势的原因可能是, 米林—尼洋河汇口处河段多为辫状河道, 且区域内横向滩

地大量分布, 此时水位随流量增加抬升至边滩区域, 同时坡降沿主河槽向边滩逐渐变缓, 因此区域内 WUA 增加。流量由  $432 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $0.3Q$ ) 增加至  $864 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $0.6Q$ ), WUA 约保持  $45 \text{ 万 m}^2$  ( $\pm 1.5 \text{ 万 m}^2$ )。在该流量变化范围内, 水位持续抬升, 主河槽内水深增加, 水深适宜度指数降低; 但随着各河槽间相互连通, 水面面积有所增加, 因此 WUA 趋于稳定。流量由  $864 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $0.6Q$ ) 增加至  $1152 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $0.8Q$ ), WUA 由  $44.6 \text{ 万 m}^2$  显著增加至  $58.7 \text{ 万 m}^2$ 。此时随流量增加, 水面持续上升并淹没两岸滩地, 适宜区域面积明显增加; 同时受坡降减小影响, 滩地两侧流速、水深适宜水域均扩大, WUA 显著增加。

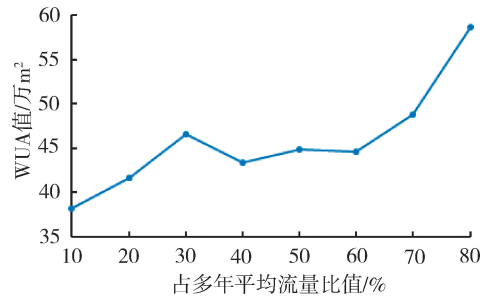


图4 拉萨裸裂尻鱼 Q-WUA 关系曲线

Fig. 4 Q-WUA curve of *Schizopygopsis younghusbandi*

### 3.3 保障鱼类产卵繁殖所需的环境流量

根据 IFIM 推求环境流量的建议, 从 Q-WUA 的关系曲线上找出拐点对应的流量作为环境流量。由图 4 可知, 受模拟河段地形影响, Q-WUA 关系曲线上存在两个拐点, 选择第一个拐点对应的流量作为研究区域保障拉萨裸裂尻鱼产卵栖息地面积的环境流量, 即米林断面多年平均流量的 30%、 $432 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

此外, 进一步分析该流量下模拟得到的适宜度指数和 WUA 分布情况 (图 5), 可以看出, 水域流动性好、连通性强的滩地附近更容易出现集中的适宜

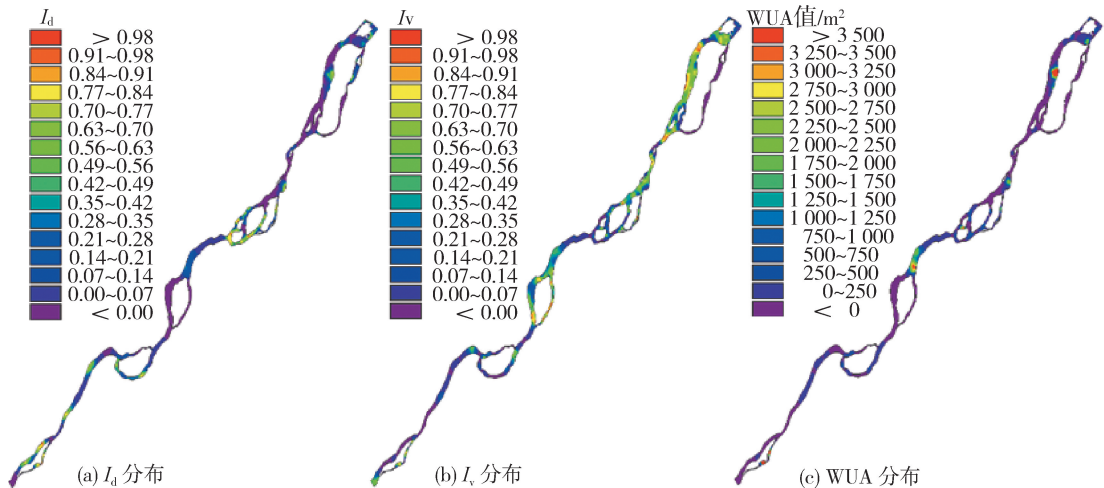


图5 流量  $432 \text{ m}^3/\text{s}$  时适宜度指数和 WUA 分布

Fig. 5 Distribution of suitability index and WUA at  $Q = 432 \text{ m}^3/\text{s}$

产卵区域,这也与拉萨裸裂尻鱼的实际产卵场特征相符。

### 3.4 不同方法计算的环境流量比较

为评价栖息地模拟法的计算结果,将水文学法中的 Tennant 法的环境流量计算结果与本文的结果进行对比分析。

Tennant 法一般将多年平均流量的 10% 作为水生生物生长低限,在本研究河段即为  $144 \text{ m}^3/\text{s}$ ,可见栖息地模拟法的计算结果明显高于 Tennant 法推荐的环境流量值。这是因为 Tennant 法没有考虑具体水生生物对流量的需求,仅根据历史多年平均流量资料给出河道内流量的最低下限,不能反映鱼类对栖息地的适应性。通常来说,栖息地模拟法得出的环境流量数值要大于水文学方法的计算结果,适用于受人类活动影响较小的天然河流。

产卵期是鱼类生活史最重要的阶段,对栖息地的要求也较高。Tennant 法给出的能保持河流生态系统健康的最小流量为  $144 \text{ m}^3/\text{s}$ ,此时研究河段的适宜栖息地面积为  $38.2 \text{ 万 m}^2$ ,为栖息地模拟法计算结果的 82%,不能很好地保证拉萨裸裂尻鱼的产卵需求。

## 4 结论

a. 基于数值模拟和统计得出拉萨裸裂尻鱼的栖息地适宜度指数曲线,适宜水深 ( $I_d \geq 0.6$ ) 为  $0.7 \sim 1.0 \text{ m}$ ,适宜流速 ( $I_v \geq 0.6$ ) 为  $0.4 \sim 0.6 \text{ m/s}$ 。

b. 流量由  $144 \text{ m}^3/\text{s}$  增加至  $432 \text{ m}^3/\text{s}$  (占多年平均流量的 10% ~ 30%), WUA 由  $38.2 \text{ 万 m}^2$  缓慢增加至  $46.6 \text{ 万 m}^2$ ; 流量由  $432 \text{ m}^3/\text{s}$  增加至  $864 \text{ m}^3/\text{s}$  (占多年平均流量的 30% ~ 60%), WUA 约保持  $45 \text{ 万 m}^2$  ( $\pm 1.5 \text{ 万 m}^2$ ); 流量由  $864 \text{ m}^3/\text{s}$  增加至  $1152 \text{ m}^3/\text{s}$  (占多年平均流量的 60% ~ 80%), WUA 由  $44.6 \text{ 万 m}^2$  显著增加至  $58.7 \text{ 万 m}^2$ 。

c. 维持拉萨裸裂尻鱼产卵场适宜栖息地面积的米林断面处最小环境流量为  $432 \text{ m}^3/\text{s}$  (占多年平均流量的 30%), 对应的 WUA 为  $46.6 \text{ 万 m}^2$ 。

d. 与 Tennant 法相比,栖息地模拟法计算得到的环境流量考虑了鱼类对栖息地的需求情况,更能保证拉萨裸裂尻鱼产卵期的生境需求。

### 参考文献:

[ 1 ] POFF N L, ALLAN J D, BAIN M B, et al. The natural flow regime [ J ]. *BioScience*, 1997, 47 ( 11 ): 769-784.  
[ 2 ] JAGER H I, SMITH B T. Sustainable reservoir operation; can we generate hydropower and preserve ecosystem values? [ J ]. *River Research and Applications*, 2008, 24

( 3 ): 340-352.

[ 3 ] 涂晶晶,陈森林,艾学山,等. 河流生态流量特征图及生态流量评价方法 [ J ]. *水资源保护*, 2015, 31 ( 1 ): 99-105. ( TU Jingjing, CHEN Senlin, AI Xueshan, et al. Diagram of river ecological flow characteristics and evaluation method of ecological flow [ J ]. *Water Resources Protection*, 2015, 31 ( 1 ): 99-105. ( in Chinese ) )  
[ 4 ] POFF L R, MATTHEWS J H. Environmental flows in the Anthropocene: past progress and future prospects [ J ]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2013, 5 ( 6 ): 667-675.  
[ 5 ] THARME R E. 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 ( 5/6 ): 397-441.  
[ 6 ] ARMOUR C L, TAYLOR J G. Evaluation of the instream flow incremental methodology by U. S. fish and wildlife service field users [ J ]. *Fisheries*, 1991, 16 ( 5 ): 36-43.  
[ 7 ] 杨宇,严忠民,乔晔. 河流鱼类栖息地水力学条件表征与评述 [ J ]. *河海大学学报 ( 自然科学版 )*, 2007, 35 ( 2 ): 125-130. ( YANG Yu, YAN Zhongmin, QIAO Ye. Characterization and commentary for hydraulic variables of riverine fish habitats [ J ]. *Journal of Hohai University ( Natural Sciences )*, 2007, 35 ( 2 ): 125-130. ( in Chinese ) )  
[ 8 ] 侯俊,裴佳琦,黄喻威,等. 基于鱼类需求的息县枢纽工程闸下河段环境流量研究 [ J ]. *水资源保护*, 2020, 36 ( 2 ): 8-12. ( HOU Jun, PEI Jiaqi, HUANG Yuwei, et al. Study on environmental flow of lower reach of Xi County hub project based on fish demand [ J ]. *Water Resources Protection*, 2020, 36 ( 2 ): 8-12. ( in Chinese ) )  
[ 9 ] 魏卿,薛联青,张敏,等. 淮河流域环境流变化及其对洪泽湖鱼类栖息地的生态影响 [ J ]. *水资源保护*, 2019, 35 ( 4 ): 89-94. ( WEI Qing, XUE Lianqing, ZHANG Min, et al. Changes of environmental flow in Huaihe River Basin and its ecological impact on fish habitat in Hongze Lake [ J ]. *Water Resources Protection*, 2019, 35 ( 4 ): 89-94. ( in Chinese ) )  
[ 10 ] 韩仕清,李永,梁瑞峰,等. 基于鱼类产卵场水力学与生态水文特征的生态流量过程研究 [ J ]. *水电能源科学*, 2016, 34 ( 6 ): 9-13. ( HAN Shiqing, LI Yong, LIANG Ruifeng, et al. Study on ecological flow regime based on hydraulics and eco-hydrological characteristics of fishing spawning area [ J ]. *Water Resources and Power*, 2016, 34 ( 6 ): 9-13. ( in Chinese ) )  
[ 11 ] 陈凯麒,陶洁. 河流生物栖息地的生态水文学研究 [ J ]. *水资源保护*, 2015, 31 ( 6 ): 52-56. ( CHEN Kaiqi, TAO Jie. Research on eco-hydrology of river habitat [ J ]. *Water Resources Protection*, 2015, 31 ( 6 ): 52-56. ( in Chinese ) )

( 下转第 20 页 )

- distribution in relation to environment variables in the lower Yangtze River Channel from Nanjing to the estuary [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2019, 25(3): 553-560. (in Chinese)
- [25] 江慧, 陈惟肖. 江苏省长江岸线管控分区与措施研析 [J]. 环境影响评价, 2019, 41(4): 16-19. (JIANG Hui, CHEN Weixiao. Study on delimitation and control measures of Yangtze River shoreline resources in Jiangsu Province [J]. Environmental Impact Assessment, 2019, 41(4): 16-19. (in Chinese))
- [26] 朱逸凡, 雷智鹤, 封学军, 等. 基于 AIS 大数据的长江江苏段船舶大气污染物排放清单研究 [J]. 环境科技, 2019, 32(4): 41-46. (ZHU Yifan, LEI Zhiyi, FENG Xuejun, et al. River based on AIS big data [J]. Environmental Science and Technology, 2019, 32(4): 41-46. (in Chinese))
- [27] 申哲民, 张涛, 马晶, 等. 富营养化与温度因素对太湖藻类生长的影响研究 [J]. 环境监测与预警, 2011, 3(2): 1-4. (SHEN Zhemin, ZHANG Tao, MA Jing, et al. Study of effects of eutrophication and temperature on algal growth in Taihu Lake [J]. Environmental Monitoring and Forewarning, 2011, 3(2): 1-4. (in Chinese))
- [28] 王利利. 水动力条件下藻类生长相关影响因素研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
- [29] 张敏. 嘉兴水域叶绿素  $\alpha$  和初级生产力的时空分布特征及影响因素 [D]. 杭州: 杭州师范大学, 2017.
- [30] 王菁, 陈家长, 孟顺龙. 环境因素对藻类生长竞争的影响 [J]. 中国农学通报, 2013, 29(17): 52-56. (WANG Jing, CHEN Jiazhang, MENG Shunlong. The effects of environmental factors on the growth and competition of algae [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(17): 52-56. (in Chinese))
- [31] 赵海萍, 李清雪, 陶建华. 渤海湾浮游细菌分布特征及环境影响因素 [J]. 水资源保护, 2018, 34(5): 88-94. (ZHAO Haiping, LI Qingxue, TAO Jianhua. Distribution characteristics of bacterioplankton in Bohai Bay and its environmental influence factors [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(5): 88-94. (in Chinese))
- [32] 郑晓宇, 顾詠洁, 金妍, 等. 不同氮、磷质量浓度下四尾栅藻的生长研究 [J]. 生态环境学报, 2010, 19(11): 2663-2668. (ZHENG Xiaoyu, GU Yongjie, JIN Yan, et al. Study on the growth of Scenedesmus quadricauda under different nutrients [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(11): 2663-2668. (in Chinese))
- [33] 娄方瑞, 刘明涛, 程光平, 等. 岩滩水库水质与浮游生物完整性灰色关联分析 [J]. 广东农业科学, 2015, 42(17): 147-152. (LOU Fangrui, LIU Mingtao, CHENG Guangping, et al. Grey relation analysis between Plankton-index of biotic integrity and water quality in Yantan reservoir [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2015, 42(17): 147-152. (in Chinese))

(收稿日期: 2019-10-11 编辑: 彭桃英)

(上接第 12 页)

- [12] 杨汉运, 黄道明, 谢山, 等. 雅鲁藏布江中游渔业资源现状研究 [J]. 水生态学杂志, 2010, 3(6): 120-126. (YANG Hanyun, HUANG Daoming, XIE Shan, et al. Research status of fishery resources in the middle section of Brahmaputra River [J]. Journal of Hydroecology, 2010, 3(6): 120-126. (in Chinese))
- [13] 李雷, 马波, 金星, 等. 西藏雅鲁藏布江中游裂腹鱼类优先保护等级定量评价 [J]. 中国水产科学, 2019, 26(5): 914-924. (LI Lei, MA Bo, JIN Xing, et al. Quantitative evaluation of priority conservation of the Schizothoracinae fishes in the middle Yarlung Zangbo River [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2019, 26(5): 914-924. (in Chinese))
- [14] 易雨君, 程曦, 周静. 栖息地适宜度评价方法研究进展 [J]. 生态环境学报, 2013, 22(5): 887-893. (YI Yujun, CHENG Xi, ZHOU Jing. Research progress in habitat suitability assessment methods [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(5): 887-893. (in Chinese))
- [15] 张陵蕾, 吴宇雷, 张志广, 等. 基于鱼类栖息地生态水文特征的生态流量过程研究 [J]. 水电能源科学, 2015, 33(3): 10-13. (ZHANG Linglei, WU Yulei, ZHANG Zhiguang, et al. Determination of ecological flow regime based on eco-hydrological characteristics of fish habitat [J]. Water Resources and Power, 2015, 33(3): 10-13. (in Chinese))
- [16] 段友健. 拉萨裸裂尻鱼个体生物学和种群动态研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2015.
- [17] 沈红保, 郭丽. 西藏尼洋河鱼类组成调查与分析 [J]. 河北渔业, 2008(5): 51-54. (SHEN Hongbao, GUO Li. Investigation and analysis of fish composition in Niyang River, Tibet [J]. Hebei Fisheries, 2008(5): 51-54. (in Chinese))
- [18] 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. (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. (in Chinese))

(收稿日期: 2020-03-13 编辑: 熊水斌)