

基于黄河上游厚唇裸重唇鱼适宜栖息地模拟的生态流量研究

石文良 李平 潘文光 杨志 赵娜 侯轶群 石小涛

ECOLOGICAL FLOW STUDY BASED ON SIMULATION OF SUITABLE HABITAT FOR *GYMNODIPLOCHEILUS PACHYCHEILUS* IN THE UPPER REACHES OF THE YELLOW RIVER

SHI Wen-Liang, LI Ping, PAN Wen-Guang, YANG Zhi, ZHAO Na, HOU Yi-Qun, SHI Xiao-Tao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7541/2025.2024.0284>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

繁殖洄游期青海湖裸鲤雌雄个体及群体对栖息地底质偏好选择的差异

DIFFERENCES IN HABITAT SUBSTRATE PREFERENCES BETWEEN MALE AND FEMALE INDIVIDUALS AND GROUPS OF *GYMNOCYPRIS PRZEWALSKII* DURING THEIR BREEDING AND MIGRATION PERIOD

水生生物学报. 2024, 48(10): 1780–1788 <https://doi.org/10.7541/2024.2024.0064>

秦岭细鳞鲑仔稚鱼分布模式及其栖息地环境特征

DISTRIBUTION PATTERNS AND HABITAT ENVIRONMENTAL CHARACTERISTICS OF *BRACHYMYSTAX TSINLINGENSIS* LARVAL FISH

水生生物学报. 2024, 48(10): 1716–1723 <https://doi.org/10.7541/2024.2023.0428>

调水调沙影响下黄河山东段鱼类群落格局及多样性

FISH COMMUNITY PATTERN AND DIVERSITY AFFECTED BY WATER AND SEDIMENT REGULATION IN SHANDONG SECTION OF THE YELLOW RIVER

水生生物学报. 2024, 48(6): 889–897 <https://doi.org/10.7541/2024.2023.0148>

黄河调水调沙对河口及邻近海域鱼卵、仔稚鱼群落结构的影响

THE WATER–SEDIMENT REGULATION SCHEME ON THE COMMUNITY STRUCTURE OF ICHTHYOPLANKTON IN THE YELLOW RIVER ESTUARY

水生生物学报. 2024, 48(3): 488–503 <https://doi.org/10.7541/2024.2023.0241>

光唇鱼仔稚鱼肠道菌群与养殖水体细菌群落的相关性

CORRELATION BETWEEN THE INTESTINAL MICROBIOTA OF LARVAL AND JUVENILE *ACROSSOCHEILUS FASCIATUS* AND BACTERIAL COMMUNITY OF CULTURE WATER

水生生物学报. 2023, 47(8): 1313–1322 <https://doi.org/10.7541/2023.2022.0330>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

doi: 10.7541/2025.2024.0284

CSTR: 32229.14.SSSWXB.2024.0284

基于黄河上游厚唇裸重唇鱼适宜栖息地模拟的生态流量研究

石文良^{1,2} 李平³ 潘文光³ 杨志² 赵娜² 侯轶群² 石小涛¹

(1. 三峡大学水利与环境学院, 宜昌 443002; 2. 水利部中国水利水电科学研究院水工程生态研究所, 水利部水工程生态效应与生态修复重点实验室, 武汉 430079; 3. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 西安 710065)

摘要: 为进行黄河上游一规划梯级电站的生态流量研究, 选择厚唇裸重唇鱼(*Gymnoditychus pachycheilus*)作为指示物种, 考虑到厚唇裸重唇鱼对栖息地流速和水深适宜度, 采用HEC-RAS一维水动力学模型模拟不同来水流量及蓄水水位工况下目标调度河段的水深及流速分布情况。基于水动力模拟的结果, 采用CASiMiR-Fish栖息地模型, 模拟得到目标鱼类在生态调度目标河段栖息地适宜性分布。结合厚唇裸重唇鱼适宜生境面积在不同流量条件下的变化和2002—2022年研究区域下游唐乃亥水位断面4—6月的日均流量分布的分析, 结果表明: 当羊曲水库在2710 m生态限制水位运行时, 在厚唇裸重唇鱼主要的繁殖季节(4—6月), 班多下泄的最小流量应该在50 m³/s, 适宜生态流量范围为50—515 m³/s, 在此流量范围内厚唇裸重唇鱼形成较大面积产卵生境。

关键词: 黄河上游; 生态流量; 栖息地模型; 厚唇裸重唇鱼

中图分类号: S932.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2025)07-072501-06



黄河上游河段总体上以高山峡谷地貌为主, 河道束窄, 水流湍急, 龙羊峡以上依次规划有三座水电站, 分别是茨哈峡水电站(规划梯级)、班多水电站(已建)、羊曲水电站(已建)。鱼类重要生境主要集中在局部宽谷河段, 其中班多水电站坝下至唐乃亥干支流河段及羊曲坝下河段为土著鱼类的重要产卵栖息场所, 分布有多种珍稀鱼类、国家保护鱼类、特有鱼类^[1,2]。受库区蓄水和下泄水量调控影响, 下游河道水深、流速等水文条件同天然河流发生很大变化, 进而对生物栖息环境造成影响^[3]。水文特性是鱼类栖息地主要生境因子之一^[4,5]。河段水文情势的改变进一步对鱼类栖息生长和发育繁殖产生影响, 从而对河流生态系统的健康产生影响^[6]。研究确定河流的生态流量, 制定合理的生态调度方案能有效缓解河流水文情势变化引发的生态问题, 是生态保护的重要措施之一^[7,8]。

目前, 全球范围内关于生态流量的研究方法超过200种^[9], 大体分为水文学法、水力学法、栖息地

模拟法和整体综合法。栖息地模拟法通过模拟流量与指示物种栖息地质量之间的定量关系, 可以获得物种不同生命阶段的生态流量^[10,11], 与其他计算方法相比, 具有更加明晰的物理机制, 因而得到了广泛应用。李建等^[12]通过栖息地模拟确定了目标鱼种的产卵期生态需水量, 建立了流量与栖息地面积关系曲线, 为三峡及葛洲坝工程的生态调度提供建议。蒋红霞等^[13]考虑不同水力条件下对鱼类不同生命时期的生态需水量, 通过PHABSIM模型计算优势种的最佳生态流量, 并得以验证。蔡玉鹏等^[14]以长江中华鲟作为目标物种, 采用二维水力学模型结合鱼类栖息地模型对中华鲟产卵场的栖息地条件进行分析, 计算中华鲟自然繁殖期间流量与栖息地加权可利用面积的关系, 得到中华鲟自然繁殖适合生态流量。费启航等^[15]选择四大家鱼作为汉江下游的指示物种, 模拟不同流量下四大家鱼适宜栖息地状况的变化, 提出维持四大家鱼产卵期与生长期需求的生态流量及高流量脉冲。本研究选取黄

收稿日期: 2024-07-20; 修订日期: 2024-10-30

基金项目: 国家自然科学基金(U2340218); 湖北省自然科学基金创新群体项目(2023AFA005)资助 [Supported by the National Nature Science Foundation of China (U2340218); the Innovative Research Group Program of Natural Science Foundation of Hubei Province (2023AFA005)]

作者简介: 石文良(2000—), 男, 硕士研究生; 研究方向为生态调度。E-mail: 1422857812@qq.com

通信作者: 石小涛(1981—), 男, 教授; 主要从事生态水力学研究。E-mail: fishlab@163.com

河上游一规划梯级电站段鱼类产卵栖息地典型区域作为研究对象,以厚唇裸重唇鱼(*Gymnodiptychus pachycheilus*)为目标鱼类,利用栖息地模拟法分析流量变化对鱼类栖息地的影响,计算不同流量条件下目标鱼种的适宜栖息地面积,基于鱼类生境质量分级方法分析不同流量响应鱼类生境质量的变化特征分析研究河段的生态流量,进而为生态调度方案的制定提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域

根据规划,茨哈峡水电站为季调节电站,具有一定的调蓄能力;下游的班多水电站为径流式电站,无调节能力,泄水主要受上游来水影响。根据规划梯级电站河段的重要生境分布,该河段水量调度主要影响生境为班多坝下至唐乃亥河段,作为本研究的目标区域(图1)。

1.2 目标鱼类及其水深、流速适宜度曲线

根据潘文光等^[16]的研究,研究河段生态调度目标种类有8种,其中生态调度需求得分最高的鱼类为厚唇裸重唇鱼。本研究以厚唇裸重唇鱼的生境需求为目标进行栖息地模拟。

依据黄河上游的水域特征和厚唇裸重唇鱼生活习性,最适宜栖息的流速为0.4—1.0 m/s,最适宜栖息的水深为1.2—3 m,水深与流速适应性曲线见图2。适宜性指数的数值为0—1,1赋值为最适宜生

存情况,0赋值为最不适宜生存情况,曲线的峰值区间则代表最适宜鱼类生存的范围^[17]。

1.3 研究方法

利用HEC-RAS构建适用于目标调度河段水深、流速模拟的一维水动力学模型,模拟预测不同来水流量及蓄水水位工况下,目标调度河段的水深及流速分布情况。一维水动力计算的效率更高,并且适应性更广,降低了资料收集的难度,但建模参数的选取和校准可能会对结果产生显著影响。因此在建模时应根据具体需求综合考虑各种因素,以提高模拟结果的准确性和可靠性。

基于水动力学模型结果,整合生态调度目标鱼类的栖息地适宜度曲线及生境适宜度评估规则,采用CASI-MiR-Fish栖息地模型,模拟不同工况下的栖息地加权可利用面积,具体计算方法:

以水动力模型模拟结果为基础,将指示鱼类关键生境因子的适宜性指数与河道各水动力参数进行匹配计算,得到 V_i 和 D_i 的适宜性值,并对不同生境因子的适宜性值进行乘积计算得到综合适宜性值(CSF),最后将CSF与对应的栖息地面积相乘,得到加权可利用面积(WUA)。计算公式:

$$CSF_i = V_i \times D_i \quad (1)$$

$$WUA = \sum_{i=1}^n (CSF_i \times A_i) \quad (2)$$

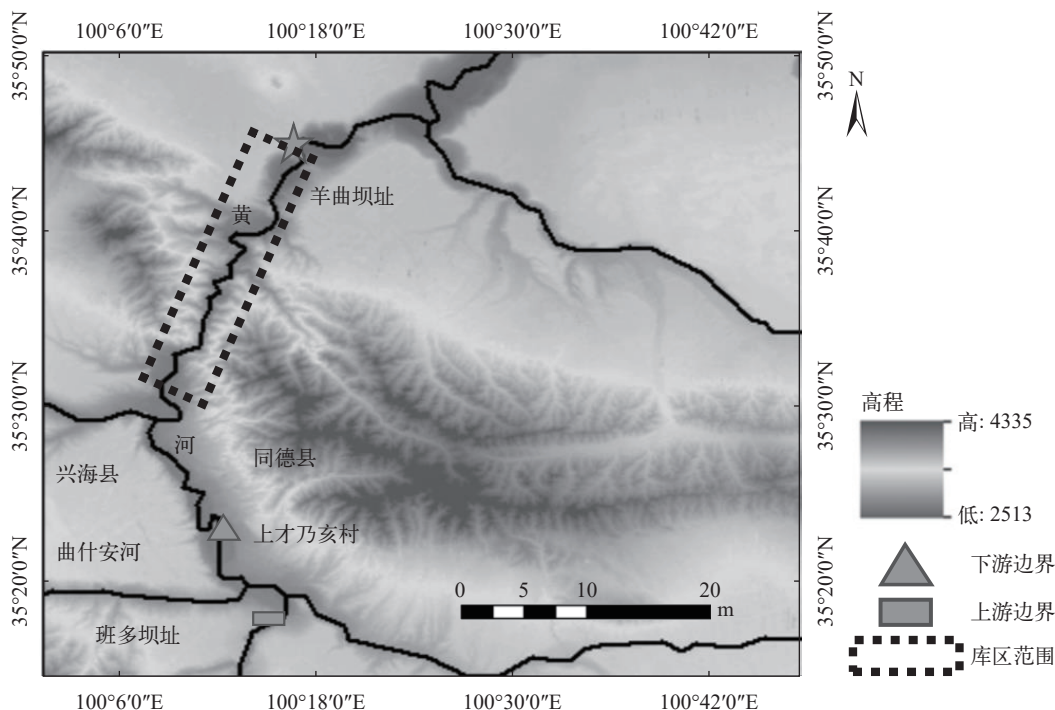


图1 研究区域示意图

Fig. 1 Study area diagram

式中, CSF_i 为第 i 个单元格的综合适宜性值; WUA 为研究河段的加权可利用面积; V_i 和 D_i 分别为第 i 个单元格中流速、水深的适宜性值为 0—1, 1 代表最适宜; A_i 表示第 i 个单元格的面积^[18]。

1.4 工况选择及数据来源

(1)流量工况: 在厚唇裸重唇鱼的主要繁殖季节 4—6 月, 研究区域干流流量为 150—2750 m^3/s ; 研究水域的全年流量为 50—2800 m^3/s , 本研究综合考虑去掉防洪调度流量工况, 选取 50—2600 m^3/s 系列工况进行模拟分析。同时, 研究区域进口流量除干流上游来水外, 还有曲什安河、巴沟河的来流, 分别按照两条支流在主要繁殖季节的对应流量数值计入。

(2)水位工况: 研究区域主要受下游羊曲水库水位影响, 水位工况为羊曲水库生态限制水位 2710 m、至规划设计运行最高水位 2715 m (表 1)。

(3)边界条件: 模型上下游边界分别为班多断面和上才乃亥断面, 模型上游以流量作为边界条件, 下游边界以水位作为边界条件。采用不同的糙率系数进行试算, 经率定得到研究河段的糙率系数为 0.038。并采用班多水位数据对模型进行验证, 相对误差在 $\pm 3.6\%$ 以内, 模拟精度可满足要求。

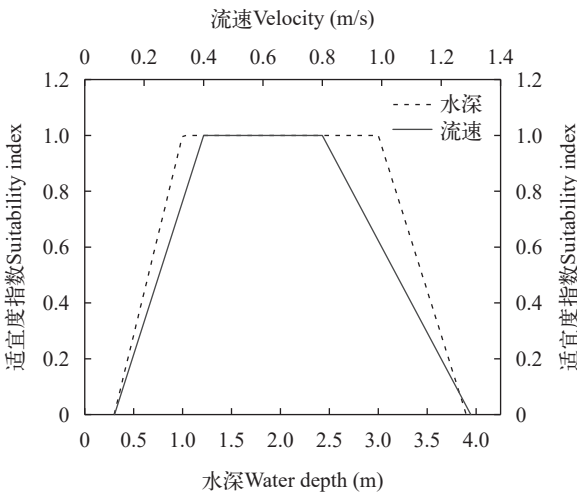


图 2 厚唇裸重唇鱼流速和水深适宜度曲线

Fig. 2 Velocity and depth suitability curve of *Gymnocheilus pachycheilus*

表 1 模拟工况

Tab. 1 Simulated condition

工况 Conditon	水位Water level (m)	流量Flow (m^3/s)
	2710	50、150、200、400、515、600、800、1000、1200、1400、1600、1800、2000、2200、2400、2600
	2715	50、150、200、400、515、600、800、1000、1200、1400、1600、1800、2000、2200、2400、2600

(4)水下地形: 地理数据包含班多坝址至唐乃亥集中产卵河段的水下地形数据, 通过空间插值后模拟河道水下地形分布。精度为 0.5, 断面间隔 350 m。

2 结果

2.1 水动力模拟结果分析

根据 HEC-RAS 一维水动力学模型模拟不同来水流量及蓄水水位工况下目标调度河段的水深及流速分布情况。研究河段部分典型流量下的水深和流速分布如图 3 和图 4 所示。

不同水位条件下研究河段的水深分布情况如图 3 所示, 结果显示: 当流量在 150 m^3/s 时, 在 2710 m 水位下, 大部分区域的水深处于 9 m 以下 (许多河道点的水深在 3 m 以下, 适宜厚唇裸重唇鱼栖息的区域相对低流量时增多), 水深超过 12 m 河段的长度极少; 当水位在 2715 m, 水深处于 12 m 以上的河道的长度明显增加。当流量在 200 m^3/s 及以下时, 研究河段内水深在 3 m 以下的河段较多, 然而当流量在 1200 m^3/s 及以上时, 研究河段内除部分边滩处的水深在 3 m 以下以外, 大部分河段的水深均大于 3 m。

在不同水位条件下, 研究河段的流速分布情况如图 4 所示, 当流量在 150 m^3/s 时, 在 2710 m 水位下, 研究河段内大部分区域的流速在 0.5—1.5 m/s ,

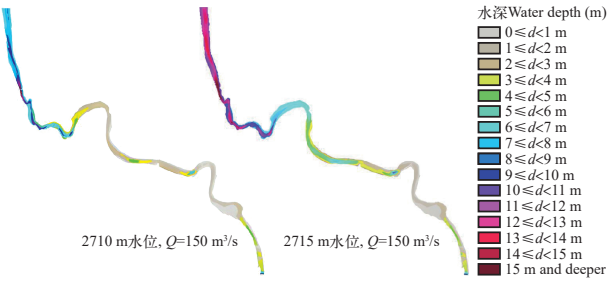


图 3 研究河段 2710 和 2715 m 水位典型流量下的水深分布

Fig. 3 The water depth distribution of typical discharge under 2710 and 2715 m

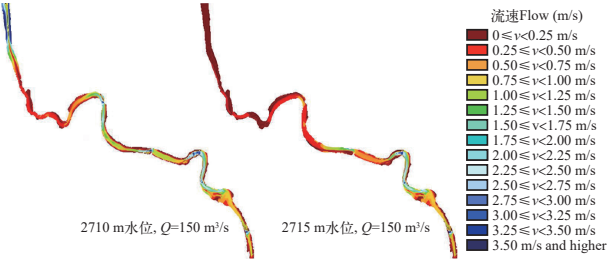


图 4 研究河段 2710 和 2715 m 水位典型流量下的流速分布

Fig. 4 The velocity distribution of typical discharge under 2710 and 2715 m

极少部分河段区域的流速在0.5 m/s以下, 主要分布在模拟分析区域的下游区域, 流速在0.5—1.5 m/s的区域明显增大; 当水位在2715 m, 大部分区域的流速在1.5 m/s以下, 低流速区域范围明显增大(处于厚唇裸重唇鱼适宜栖息流速范围内的区域明显增多)。从整个河道来看, 在河道的弯曲处流速较小, 在弯曲处的前后区域流速较大, 在窄深的顺直河道处流速较大。断面来看河道中间流速较大, 两边河岸处流速较小。

2.2 栖息地模拟结果分析

基于水动力模拟的结果, 采用CASiMiR-Fish栖息地模型, 模拟得到目标鱼类在生态调度目标河段栖息地适宜性分布结果。部分典型流量条件下厚唇裸重唇鱼在研究江段的栖息地适宜性分布结果如图5所示。

厚唇裸重唇鱼研究江段内的栖息地适宜性指数的空间分布结果显示: 在相同流量下, 相比于2715 m水位, 2710 m水位时栖息地适宜性指数值大于0.6的区域更多, 保持羊曲水库在2710 m限制水位运行, 对于尽可能地增加厚唇裸重唇鱼适宜产卵场的生境面积具有重要的意义。同时, 对比分析发现, 在低流量时(50—200 m³/s), 适宜厚唇裸重唇鱼产卵的生境面积比高流量时更大。通常地, 厚唇裸重唇鱼在河道的两岸浅水处, 以及在岸滩和江心洲的周围都有适宜度比较高的绿色和蓝色斑块分布。

2.3 生态流量分析

根据各研究河段不同流量下厚唇裸重唇鱼栖息地模拟结果, 适宜栖息地面积(可加利用面积, WUA)与流量的关系曲线如图6所示。随着流量的增加, WUA呈现先增加, 然后再减少的趋势; 在2710 m水位条件下, 当流量在150 m³/s时, WUA最大, 为312005.16 m²; 在2715 m水位条件下, 当流量在170 m³/s时, WUA最大, 为194812.95 m²; 在相同流量条件下, 2715 m水位工况的WUA值比对应的

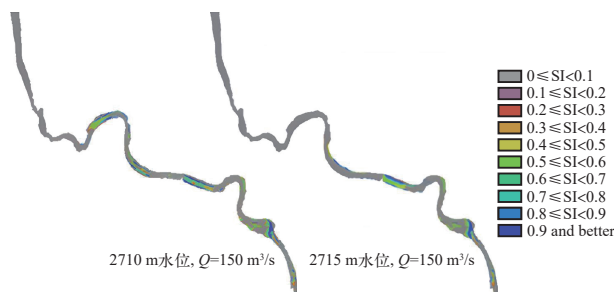


图5 研究河段2710和2715m水位典型流量下厚唇裸重唇鱼栖息地适宜性分布

Fig. 5 The habitat suitability distribution of *Gymnodiplocheilus pachycheilus* under 2710 and 2715 m

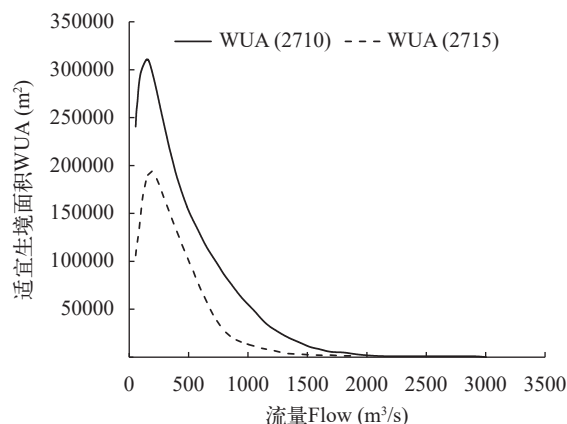


图6 不同工况下厚唇裸重唇鱼适宜栖息地面积(WUA)

Fig. 6 Optimum habitat area with thick and bare lips under different working conditions (WUA)

2710 m水位工况对应的WUA值少, 减少3.95%—76.26%, 其中流量在2600 m³/s时减少最少(该流量下两个水位工况的WUA均接近于0), 1200 m³/s时减少最多。

当羊曲水库在2710 m水位运行时, 厚唇裸重唇鱼适宜生境面积(加权可利用面积, WUA)在不同流量条件下的变化结果显示(图6): WUA值最大时的流量为150 m³/s, 达到或大于50%最大WUA的流量为50—515 m³/s。这可认为是厚唇裸重唇鱼在研究区域内形成较大面积产卵生境时的适宜流量范围^[19, 20]。

3 讨论

3.1 生态流量在实际中的验证

根据调查, 厚唇裸重唇鱼的繁殖季节为4—6月, 通过对2002—2022年研究区域下游唐乃亥断面不同月份的历史流量数据分析, 在4月时, 绝大部分日期的流量数据处于50—515 m³/s; 在5月时, 也有相对部分日期的流量数据处于50—515 m³/s; 而在6月时, 仅少数部分日期的流量数据处于50—515 m³/s。结合生态流量分析的结果, 表明厚唇裸重唇鱼在研究河段形成较大面积产卵生境的月份应该是4—5月, 而6月形成的产卵生境较小。2022年4—6月在研究河段进行的鱼类早期资源结果也显示厚唇裸重唇鱼主要产卵月份应该是4—5月, 而6月仅有少量产卵事件^[14]。由此也可以印证, 本研究得到的针对厚唇裸重唇鱼的50—515 m³/s生态流量调度范围是适宜的, 符合当地生境条件下营造适宜流量的需求。

3.2 生态流量研究

随着我国生态保护日益受到重视, 越来越多的梯级将生态调度同防洪调度、供水调度、发电调度等共同纳入综合调度系统, 减缓水利水电工程对

水生环境尤其是对鱼类的不利影响^[20-23]。我国近年来对多种重要鱼类的生态调度需求进行了研究,如蔡玉鹏等^[14]的研究表明中华鲟需要的生态流量为13000—15000 m³/s; 费启航等^[15]的研究认为汉江下游四大家鱼产卵期每年提供至少2次持续时间不低于3d、流量不低于1310 m³/s的高流量脉冲,以刺激四大家鱼自然产卵,增加产卵规模; 赵晨旭等^[24]的研究表明宽鳍鱲适宜生态流量为47.8—54.3 m³/s。但整体而言,我国鱼类生态调度需求的研究还较少,除长江水系几种重要种类有基础研究外,其他流域鱼类的调度需求资料还较为匮乏。本文以黄河上游重要土著鱼类厚唇裸重唇鱼的基础生态调查数据为基础,通过水动力学模拟、栖息地模拟确定了针对该鱼种的生态流量需求,可填补国内在黄河土著物种生态调度需求参数的空白,为黄河上游梯级生态调度提供重要支撑。

(作者声明本文符合出版伦理要求)

参考文献:

- [1] Zhao Y H, Xing Y C, Lü B B, *et al.* Species diversity and conservation of freshwater fishes in the Yellow River Basin [J]. *Biodiversity Science*, 2020, **28**(12): 1496-1510. [赵亚辉, 邢迎春, 吕彬彬, 等. 黄河流域淡水鱼类多样性和保护 [J]. *生物多样性*, 2020, **28**(12): 1496-1510.]
- [2] Niu L, Kou X M, Zhang N C, *et al.* Analysis on effect of hydroelectric development on native fish resources and protective measures system for fish above Liujia Gorge on the upper Yellow River [J]. *Design of Hydroelectric Power Station*, 2020, **36**(3): 73-76. [牛乐, 寇晓梅, 张乃畅, 等. 黄河上游刘家峡以上河段水电开发对土著鱼类资源影响及保护措施体系分析 [J]. *水电站设计*, 2020, **36**(3): 73-76.]
- [3] Guo W X, Xia Z Q, Wang Y K, *et al.* Ecological operation goals for Three Gorges Reservoir [J]. *Advances in Water Science*, 2009, **20**(4): 554-559. [郭文献, 夏自强, 王远坤, 等. 三峡水库生态调度目标研究 [J]. *水科学进展*, 2009, **20**(4): 554-559.]
- [4] Han S Q, Li Y, Liang R F, *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. [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.]
- [5] Yang Y, Yan Z M, Qiao Y. Description and review of hydraulic conditions of fish habitats [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2007, **35**(2): 125-130. [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.]
- [6] Fan C X, Li Y, Tang X L. Research on reservoir ecological operation method based on spawning period habitat requirements of fish [J]. *Sichuan Environment*, 2017, **36**(2): 132-138. [范骢骧, 李永, 唐锡良. 基于鱼类产卵期栖息地需求的水库生态调度方法研究 [J]. *四川环境*, 2017, **36**(2): 132-138.]
- [7] Hughes D A. Providing hydrological information and data analysis tools for the determination of ecological instream flow requirements for South African rivers [J]. *Journal of Hydrology*, 2001, **241**(1/2): 140-151.
- [8] Mezger G, González del Tánago M, De Stefano L. Environmental flows and the mitigation of hydrological alteration downstream from dams: the Spanish case [J]. *Journal of Hydrology*, 2021(598): 125732.
- [9] 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 and Applications*, 2003, **19**(5/6): 397-441.
- [10] Yi Y J, Zhang S H. Review of aquatic species habitat simulation method and modelling [J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2019, **49**(4): 363-377. [易雨君, 张尚弘. 水生生物栖息地模拟方法及模型综述 [J]. *中国科学: 技术科学*, 2019, **49**(4): 363-377.]
- [11] Zhang P, Yang Z, Cai L, *et al.* Effects of upstream and downstream dam operation on the spawning habitat suitability of *Coreius guichenoti* in the middle reach of the Jinsha River [J]. *Ecological Engineering*, 2018(120): 198-208.
- [12] Li J, Xia Z Q. Study on instream ecological flow of the middle Yangtze River based on physical habitat simulation [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, **42**(6): 678-684. [李建, 夏自强. 基于物理栖息地模拟的长江中游生态流量研究 [J]. *水利学报*, 2011, **42**(6): 678-684.]
- [13] Jiang H X, Huang X R, Li W H. Ecological water demand of fish in flow reducing reach based on physical habitat simulation [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2012, **31**(5): 141-147. [蒋红霞, 黄晓荣, 李文华. 基于物理栖息地模拟的减水河段鱼类生态需水量研究 [J]. *水力发电学报*, 2012, **31**(5): 141-147.]
- [14] Cai Y P, Wan L, Yang Y, *et al.* Analysis on the environmental flow requirements for natural reproduction of Chinese sturgeon based on habitat simulation methods [J]. *Journal of Hydroecology*, 2010, **31**(3): 1-6. [蔡玉鹏, 万力, 杨宇, 等. 基于栖息地模拟法的中华鲟自然繁殖适合生态流量分析 [J]. *水生态学杂志*, 2010, **31**(3): 1-6.]
- [15] Fei Q H, Peng T, You X Y, *et al.* Ecological flow in lower Hanjiang River based on habitat simulation of four major Chinese carps [J]. *Yangtze River*, 2023, **54**(10): 35-43. [费启航, 彭涛, 由星莹, 等. 基于四大家鱼栖息地模拟的汉江下游生态流量研究 [J]. *人民长江*, 2023, **54**(10): 35-43.]
- [16] Pan W G, Shi W L, Yang Z, *et al.* Target fish screening for the ecological operation of the cihaxia-Yangqu section

- of the upper Yellow River [J]. *Journal of Hydroecology*, 2024, **45**(1): 120-126. [潘文光, 石文良, 杨志, 等. 黄河上游茨哈峡至羊曲河段生态调度目标鱼类筛选 [J]. 水生生态学杂志, 2024, **45**(1): 120-126.]
- [17] Wu K Y, Zhao C X, Lü X Q, *et al.* Potential suitable distribution of *Gymnodiplocheilus pachycheilus* based on MaxEnt model [J]. *Acta Hydroecology Sinice*, 2025, **49**(3): 032501. [吴开阳, 赵春娴, 李筱芹, 等. 基于MaxEnt模型的厚唇裸重唇鱼当下潜在适宜分布 [J]. 水生生物学报, 2025, **49**(3): 032501.]
- [18] Li M P, Duan B, Wang H S, *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. [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.]
- [19] Ban X. Ecological flow requirement for Chinese sturgeon spawning habitat [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, **42**(1): 47-55. [班璇. 中华鲟产卵栖息地的生态需水量 [J]. 水利学报, 2011, **42**(1): 47-55.]
- [20] Wang R L, Huang J H, Ge L, *et al.* Study of ecological flow based on the relationship between cyprinussy carpio habitat hydrological and ecological response in the lower Yellow River [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, **51**(9): 1175-1187. [王瑞玲, 黄锦辉, 葛雷, 等. 基于黄河鲤鱼栖息地水文-生态响应关系的黄河下游生态流量研究 [J]. 水利学报, 2020, **51**(9): 1175-1187.]
- [21] Wang J N, Dong Z R, Liao W G, *et al.* An environmental flow assessment method based on the relationships between flow and ecological response: a case study of the Three Gorges Reservoir and its downstream reach [J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2013, **43**(6): 715-726. [王俊娜, 董哲仁, 廖文根, 等. 基于水文-生态响应关系的环境水流评估方法——以三峡水库及其坝下河段为例 [J]. 中国科学(技术科学), 2013, **43**(6): 715-726.]
- [22] Wang Q L, Liu Y, Hao H S, *et al.* Study on ecological flow of Jinsha River in the downstream of the intake of Dianzhong water diversion project [J]. *Water Power*, 2020, **46**(9): 28-31. [汪青辽, 刘媛, 郝红升, 等. 滇中引水工程取水口下游金沙江生态流量研究 [J]. 水力发电, 2020, **46**(9): 28-31.]
- [23] Hong S Y, Wang H R, Zhu Z F, *et al.* Research of ecologic flow based on habitat index method [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, **27**(1): 168-175. [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.]
- [24] Zhao C X, Song C, Cao Y X, *et al.* Simulation of typical fish habitats in the downstream reach of Hanjiang River Bridge Sluice Project [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2021, **32**(3): 151-157. [赵晨旭, 宋策, 曹永祥, 等. 汉江桥闸工程下游河段典型鱼种栖息地模拟研究 [J]. 水资源与水工程学报, 2021, **32**(3): 151-157.]

ECOLOGICAL FLOW STUDY BASED ON SIMULATION OF SUITABLE HABITAT FOR *GYMNODIPLOCHEILUS PACHYCHEILUS* IN THE UPPER REACHES OF THE YELLOW RIVER

SHI Wen-Liang^{1,2}, LI Ping³, PAN Wen-Guang³, YANG Zhi², ZHAO Na², HOU Yi-Qun² and SHI Xiao-Tao¹

(1. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Key Laboratory of Ecological Impacts of Hydraulic-Projects and Restoration of Aquatic Ecosystem of Ministry of Water Resources, Institute of Hydroecology, Ministry of Water Resources and Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430079, China; 3. China Power Construction Group northwest Survey and Design Research Institute Limited Company, Xi'an 710065, China)

Abstract: The study of ecological flow in a planned cascade system in the upper reaches of the Yellow River provides a foundation for developing ecological scheduling schemes. *Gymnodiplocheilus pachycheilus* was selected as the indicator species. Considering the habitat suitability of *G. pachycheilus* in terms of water velocity and depth, the HEC-RAS one-dimensional hydrodynamic model was used to simulate water depth and velocity distribution in the target scheduling reach under various flow and storage conditions. Based on the results of hydrodynamic simulation, CASiMiR-Fish habitat model was applied to assess habitat suitability for the target species within the ecological scheduling reach. Combining the changes in suitable habitat area of *G. pachycheilus* under different flow conditions and the distribution of the average daily flow from April to June of the downstream Tangnaihai water level section in the study area from 2002 to 2022, the results show that when the Yangqu Reservoir operates at the ecologically restricted water level of 2710 m, the minimum discharge of 50 m³/s Bando is required during the main breeding season (April-June), with an appropriate ecological discharge range of 50—515 m³/s.

Key words: Upper reaches of the Yellow River; Ecological flow; Habitat model; *Gymnodiplocheilus pachycheilus*