

基于生境模拟法的赣江尾闾四大家鱼产卵生境模拟

王克军¹, 陈锐琪², 毛劲乔², 张培培²

(1. 江西省赣抚尾闾整治有限公司, 江西 南昌 330025; 2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要:为分析水动力条件变化对赣江尾闾四大家鱼产卵生境的影响,通过耦合二维水动力模型和基于模糊逻辑法的栖息地适宜度模型,构建了鱼类产卵生境的物理栖息地模型,进而模拟了不同流量下赣江尾闾四大家鱼产卵适宜区的空间分布,分析了其产卵生境加权可利用面积的变化规律,明确了产卵所需的适宜生态流量。结果表明:当流量较小时,主支整体适宜度高于中支、南支,当流量较大时,主支整体适宜度下降明显,中支、南支适宜度增大;四大家鱼产卵生境加权可利用面积随着流量增加呈先增大后减小的趋势,相较于小流量,加权可利用面积在大流量下的减少速度更快,当流量为 4 200 m³/s 时,加权可利用面积达到最大,占研究区面积的 22.97%;四大家鱼产卵生境的适宜生态流量为 3 500~4 800 m³/s,最适宜生态流量为 4 200 m³/s。

关键词:产卵生境;四大家鱼;模糊逻辑法;物理栖息地模型;生境模拟;赣江尾闾

中图分类号:X171.4 文献标志码:A 文章编号:1006-7647(2025)06-0120-06

Simulation of spawning habitat for four major Chinese carps in lower reaches of the Ganjiang River based on habitat simulation method//WANG Kejun¹, CHEN Ruiqi², MAO Jingqiao², ZHANG Peipei² (1. Jiangxi Ganfu Weibv Renovation Co., Ltd., Nanchang 330025, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To analyze the status of spawning habitat for the four major Chinese carps in the lower reaches of the Ganjiang River under varying hydrodynamic conditions, a physical habitat model for fish spawning habitat was established by coupling the two-dimensional hydrodynamic model and the habitat suitability model based on the fuzzy logic method. This model was used to simulate the spatial distribution of suitable spawning areas for the four major carps in the lower reaches of the Ganjiang River under different flow rates, to analyze the variation patterns of the weighted usable area (WUA) of spawning habitat, and to determine the appropriate ecological flow required for spawning. The results show that the overall suitability of the main branch was higher than that of the middle branch and the south branch when the flow rate was low. When the flow was high, the overall suitability of the main branch decreased obviously while the suitability of the middle branch and the south branch increased. The WUA of spawning habitat increased initially and then decreased with increasing flow rate. Compared with the low-flow condition, the WUA decreased faster under the high-flow condition. When the flow rate was 4 200 m³/s, the WUA was the largest, accounting for 22.97% of the study area. The suitable ecological flow range of spawning habitat for the four major Chinese carps was between 3 500 and 4 800 m³/s, and the optimum ecological flow was 4 200 m³/s.

Key words: spawning habitat; four major Chinese carps; fuzzy logic method; physical habitat model; habitat simulation; lower reaches of the Ganjiang River

赣江是江西省最大的河流,也是鄱阳湖的最大支流,赣江在流经南昌市后进入尾闾地区。赣江流域盛产许多江河平原区的特色鱼类,如青鱼、草鱼、鳊鱼、鳙鱼、鲢鱼、银鲴和银飘鱼等,这些鱼类是当地渔业的重要捕捞对象。根据鱼类的主要生活环境和洄游习性,赣江鱼类大致可以分为 4 类:咸淡水洄游

型、江河半洄游型、湖泊定居型和山溪定居型^[1-2]。根据南昌市水生生物监测报告,赣江尾闾地区鱼类中,四大家鱼占一定比重。由于生态功能衰退、枯水期提早、水位下降、水面大幅萎缩等原因^[3-5],四大家鱼资源量相比上世纪有所减少,产卵时间延迟,且产卵量降低。四大家鱼种质资源保护与开发利用直接

关系到鄱阳湖流域家鱼鱼苗的产量,其物种多样性的维持对我国淡水渔业的可持续发展具有重要意义。因此,需要进一步明确水动力条件对尾间地区四大家鱼产卵生境状况的影响。

目前,对于鱼类产卵生境的研究多采用生境模拟法。生境模拟法是一种结合水动力学模型和水生生物生活需求,通过量化流量与栖息地面积之间的关系确定目标物种适宜生态流量的方法^[6-7]。常用的方法有 River2D 模型和物理栖息地模型。景梦园等^[8]改进了 River2D 模型,耦合了水动力与栖息地模型,模拟了七星鱼栖息地面积与流量的关系,确定了各水文期的生态流量区间,并验证了其合理性,可为七星鱼的保护和生态调度提供依据;高超^[9]通过耦合 River2D 水动力模型和适宜度指数模型,构建了澜沧江下游鱼类栖息地生态流量模型,分析了不同保护目标下的流量需求。物理栖息地模型以水生生物为指标,全面考虑目标物种不同时期的流量需求,结果更贴合实际生态需求^[10-12]。戴凌全等^[13]通过建立物理栖息地模型,量化了不同出库流量下四大家鱼的栖息地面积,确定了适宜生态流量,为金沙江下游水库生态调度提供参考;班璇等^[14]建立了底栖动物的物理栖息地模型,分析了流量变化对其栖息地的影响,并提出不同水文期的生态流量调节方案,以优化三峡大坝的生态调度策略;吴倩等^[15]利用物理栖息地模型分析了三峡水库补水调度对东洞庭湖沉水植物生境的影响,确定了刺苦草生长的适宜水深及出库流量范围,为东洞庭湖水生态修复提供了调度依据。物理栖息地模型主要由水动力模型和栖息地适宜度模型组成,传统栖息地适宜度模型因难以精确描述复杂的生态系统及多因素影响,常需与模糊逻辑法、人工神经网络、回归模型等方法结合使用。面对数据不完备的情况,模糊逻辑法能更好地利用不精确数据和专家经验,适用于复杂环境下的栖息地适宜度评估,如李友光等^[16]基于模糊逻辑法构建了多物种栖息地模型,量化了河流生境质量与径流的关系,得出了更精准的生态流量范围。

综上,针对赣江尾间区域鱼类生境方面的研究成果较少的问题,本文通过耦合二维水动力模型与基于模糊逻辑法的栖息地适宜度模型,建立四大家鱼产卵生境的物理栖息地模型,模拟不同流量下赣江尾间四大家鱼产卵适宜区的空间分布,阐明不同流量下赣江尾间四大家鱼产卵生境的加权可利用面积的变化规律,明确四大家鱼产卵所需要的适宜生态流量,以期为赣江尾间四大家鱼的保护以及枢纽工程的生态调度提供参考。

1 研究区概况

赣江发源于赣闽交界的武夷山西麓,自南向北纵贯江西全省,流经 44 个县市,全长 820 km,流域面积约 82 810 km²,占鄱阳湖流域的 51.5%。进入南昌段后,赣江自八一大桥下游的裴家洲、扬子洲分为东西两河。西河在樵舍镇分为北支和主支,北支经沙汊河和官港河汇入鄱阳湖,主支全长 65 km,最终在吴城注入鄱阳湖;东河在礁矶头分为中支和南支,分别在朱港和三江口汇入鄱阳湖。研究区域如图 1 所示。

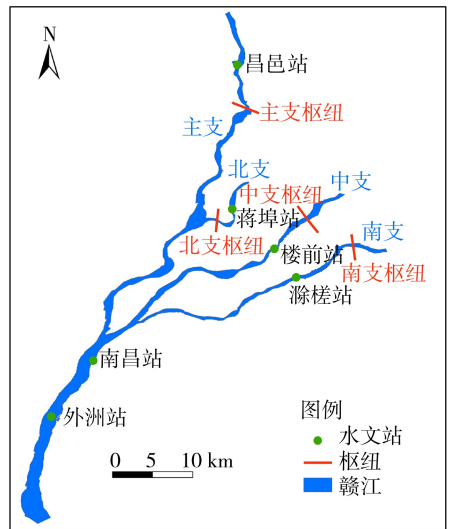


图 1 研究区域示意图

2 研究方法

2.1 物理栖息地模型

为较好地模拟赣江尾间四大家鱼产卵的生境状况^[17-18],采用水动力模型和基于模糊逻辑法的栖息地适宜度模型构建物理栖息地模型。具体构建步骤包括:①收集四大家鱼的产卵地点、时间、数量及其环境因素;②构建二维水动力模型,模拟四大家鱼产卵期间的水域水动力分布特征;③确定四大家鱼适宜流速范围和适宜水深范围,据此制定流速隶属度函数、水深隶属度函数、适宜度隶属度函数以及模糊规则;④输入由水动力模型模拟得到的各网格单元流速、水深,经模糊化、模糊逻辑推理、去模糊化等一系列操作得到每个网格单元对应的适宜度指数,乘以相应面积得到四大家鱼产卵生境的加权可利用面积。

2.2 水动力模型

模型采用平面二维水动力模型,地形边界采用 2013 年赣江尾间河道地形,采用非结构化不规则三角形网格对流域进行网格划分,网格节点总数 3 311 个,网格单元总数 5 445 个。模型上游边界采

用外洲站 2019—2021 年逐日流量数据,下游边界采用昌邑站、滁槎站、楼前站、蒋埠站 2019—2021 年逐日水位数据。

选取南昌站 2019 年逐日水位实测资料进行率定,率定结果见图 2。模拟水位与实测水位拟合效果较好,决定系数为 0.995,平均相对误差为 2.12%,纳什效率系数为 0.986。

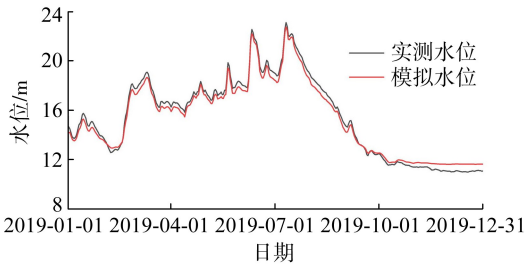


图 2 模型率定结果

选取南昌站 2020 年和 2021 年逐日水位实测资料进行验证,验证结果见图 3。拟合效果均较好。2020 年决定系数为 0.996,平均相对误差为 2.59%,纳什效率系数为 0.971;2021 年决定系数为 0.988,平均相对误差为 2.89%,纳什效率系数为 0.961。

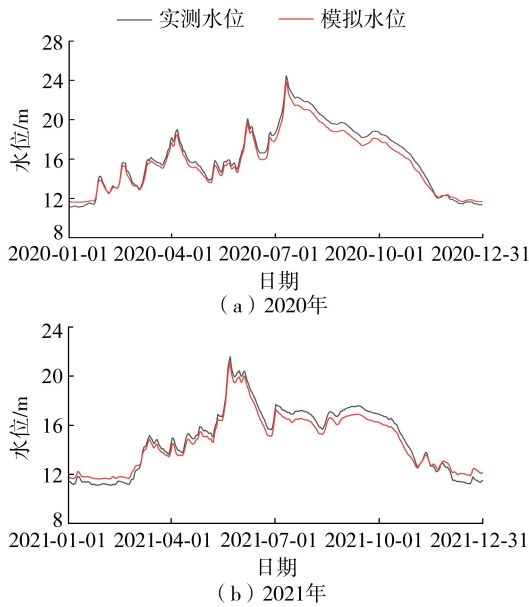


图 3 模型验证结果

2.3 基于模糊逻辑法的栖息地适宜度模型

2.3.1 模糊逻辑原理

模糊逻辑的核心是模糊集和模糊规则。与传统方法的明确隶属关系不同,模糊集没有明确边界,对象可以部分属于某个集合,隶属度在 0 到 1 之间。隶属度为 0 表示完全不属于,为 1 表示完全属于,介于两者之间表示部分属于,隶属度函数反映变量值与隶属度的关系^[19]。基于模糊逻辑法的栖息地适宜度模型构建内容主要包括模糊化、模糊逻辑推理以及去模糊化过程。

2.3.2 构建隶属度函数

每年 4—6 月是四大家鱼的主要繁殖期,其繁育需要适宜的流速环境,选择流速、水深作为赣江尾间四大家鱼产卵生境的影响因子^[20]。基于专家分析、现场观测及文献分析,设定流速、水深、适宜度变量值并确定相应的隶属度函数,采用梯形及三角形隶属度函数对生境适宜度进行描述,流速由极慢(VL)、慢(L)、中(M)、快(H)、极快(VH) 5 个模糊子集描述,水深由极浅(VL)、浅(L)、中(M)、深(H)、极深(VH) 5 个模糊子集描述,适宜度由极低(VL)、低(L)、中(M)、高(H)、极高(VH) 5 个模糊子集描述,对应的隶属度函数如图 4 所示。

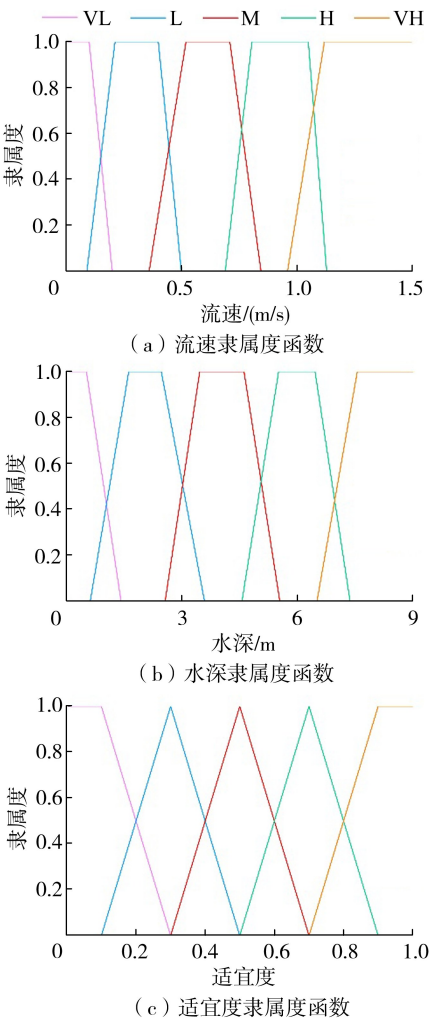


图 4 隶属度函数

2.3.3 制定模糊规则

采用模糊规则描述环境变量与物种栖息地适宜度之间的关联。在各隶属度函数模糊子集的基础上,结合现有研究成果和当地鱼类专家经验总结确定了 25 条模糊规则,如表 1 所示。

模糊规则的构建主要依据专家分析、现场调查及相关文献研究,专家判断多为定性或半定量,在一定程度上增加了计算的主观性^[21],相应模糊规则的

表 1 栖息地适宜度模糊规则

流速	水深	适宜度	流速	水深	适宜度
VL	VL	VL	M	H	H
VL	L	VL	M	VH	VL
VL	M	VL	H	VL	VL
VL	H	VL	H	L	VL
VL	VH	VL	H	M	H
L	VL	VL	H	H	M
L	L	VL	H	VH	VL
L	M	H	VH	VL	VL
L	H	M	VH	L	VL
L	VH	VL	VH	M	VL
M	VL	L	VH	H	VL
M	L	M	VH	VH	VL
M	M	VH			

设定应由多位生态学和鱼类学专家共同讨论并确定。

2.3.4 栖息地适宜度指数推求

模糊推理是推求栖息地适宜度指数的关键过程,通过模糊规则将输入的模糊集映射到相应的输出模糊集。例如“如果流速适中并且水深适中,则栖息地适宜度极高”,其中,“流速”和“水深”是输入模糊集,“栖息地适宜度指数”是输出模糊集。不同的流速和水深会激活不同的模糊规则,同一流速和水深如果对应不同的模糊子集也会激活不同的模糊规则,综合不同的模糊规则后进行模糊输出。

对模糊输出进行去模糊化,去模糊化是将模型中的河流栖息地模糊描述转换为精确的适宜度指数。常用方法包括最大隶属度法、加权平均法和重心法,其中重心法应用较广^[22]。本文采用重心法,通过计算输出隶属度曲线与横轴围成区域的重心,作为最终适宜度指数值。

3 结果与分析

通过耦合二维水动力模型和栖息地适宜度模型,模拟赣江尾间四大家鱼产卵生境适宜度的分布状况,以外洲站为代表,计算不同流量下的加权可利用面积,拟合其与流量的定量关系曲线,并推求适宜生态流量。

3.1 不同流量下产卵生境分布状况

根据模糊逻辑法计算每个网格单元的适宜度指数 I_{HS} ,将产卵期四大家鱼的生境质量划分为极低适宜度($0 < I_{HS} \leq 0.2$)、低适宜度($0.2 < I_{HS} \leq 0.4$)、中适宜度($0.4 < I_{HS} \leq 0.6$)、高适宜度($0.6 < I_{HS} \leq 0.8$)、极高适宜度($0.8 < I_{HS} \leq 1$)5个等级,得到生境适宜度分布图。

不同流量下产卵生境适宜度指数的空间分布如图5所示。当流量 Q 为 $2800\text{ m}^3/\text{s}$ 时,栖息地平均流速为 0.246 m/s ,平均水深为 5.473 m ,平均适宜度指数为 0.192 ,各支适宜度指数较小;当流量为 $3500\text{ m}^3/\text{s}$ 时,栖息地平均流速为 0.301 m/s ,平均水深为 6.128 m ,平均适宜度指数为 0.210 ,主支适宜度指数增大,中支、南支适宜度指数保持不变;当流量为 $4200\text{ m}^3/\text{s}$ 时,栖息地平均流速为 0.359 m/s ,平均水深为 6.736 m ,平均适宜度指数达到最大值 0.229 ,由于主支昌邑站河底高程在四支中最低,分流的水量比例在四支中最高,主支整体适宜度进一步增加,高适宜度区域主要集中在昌邑站及其附近弯道处,流速和水深较为适宜;当流量为 $5200\text{ m}^3/\text{s}$ 时,栖息地平均流速为 0.396 m/s ,平均水深为 7.355 m ,平均适宜度指数下降至 0.216 ,主支适宜度指数降低,根据赣江尾间四支分流比的相关研究,中支、南支分流比随着流量的增大而增大,在流量大于 $5000\text{ m}^3/\text{s}$ 时,分流比增大显著,因此中支、南支整体适宜度指数相比流量较小时增加明显;当流量为 $6100\text{ m}^3/\text{s}$ 时,栖息地平均流速为 0.436 m/s ,平均水深为 7.908 m ,平均适宜度指数为 0.205 ,主支适宜度进一步下降,中支、南支适宜度有所下降;当流量为 $7300\text{ m}^3/\text{s}$ 时,栖息地平均流速为 0.474 m/s ,平均水深为 8.363 m ,平均适宜度指数为 0.189 ,主流流速、水深过大,适宜度下降显著,中支、南支适宜度均下降。

从不同流量条件下产卵生境适宜度指数的空间分布特征可以看出,支流之间适宜度的差异不仅受局部水动力条件的影响,还与河道地形特征和流量分配机制密切相关。根据断面地形资料,昌邑站所在的主支河床高程最低,平均为 6.4 m ,楼前站和滁

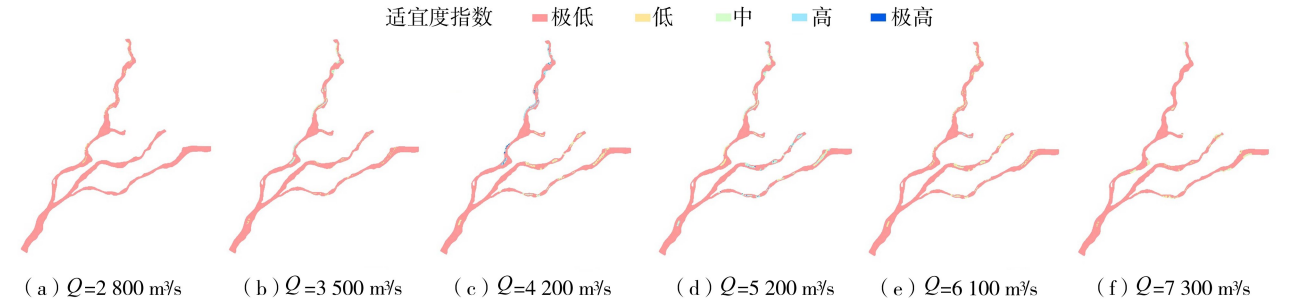


图 5 不同流量下适宜度指数的空间分布

糙站的河床平均高程分别为 11.7 m 和 13.3 m。在中小流量条件下,主支由于河床高程较低,天然条件下所分配的水量比例较高,相应形成了更适宜的水深与流速组合,适宜度水平在各支流中相对较高。相比之下,中支和南支由于河床高程较高,在中小流量时,受来流量分配限制,栖息地水动力条件改善有限,适宜度变化较为缓慢。而在大流量时,由于总的来水量增加及其在支流间的重新分配,中支和南支的分流比明显提升,进而改善了河段的水深与流速条件,适宜度随之提高。

3.2 产卵适宜生境面积及生态流量

以 2019—2021 年鱼类产卵期 4—6 月为分析时段,计算不同流量条件下满足赣江尾间四大家鱼产卵流速、水深要求的生境面积。图 6 为外洲站流量与产卵适宜生境面积的模拟结果和拟合曲线。

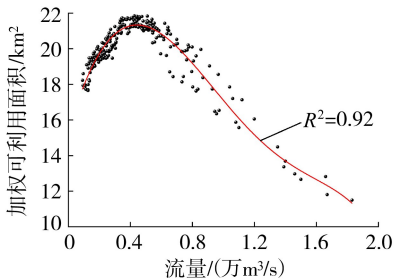


图 6 流量与加权可利用面积的关系曲线

由图 6 可知,四大家鱼产卵适宜生境面积随流量呈单峰变化。随着流量不断增大,鱼类的产卵适宜生境面积先逐渐增大,当流量增加到一定值时,产卵适宜生境面积逐渐减小。具体表现为当流量为 4200 m³/s 时,产卵适宜生境面积达到最大值 21.33 km²,约占研究区面积的 22.97%。当流量低于或超过这一临界值时,鱼类产卵适宜生境面积都会减少,但相比于低流量,产卵适宜生境面积在高流量下的减少速度更快,表明鱼类产卵适宜生境面积对高流量的变化更加敏感,四大家鱼在上溯过程中通常会避免进入流速过大的区域,因为在这些区域游动会变得不稳定,增加能量消耗,导致洄游受阻;水位大幅上升会使原本适宜产卵的浅滩被淹没,使其失去原有的生态特征和功能。当流量增大至 8000 m³/s 左右时,产卵适宜生境面积出现急剧下降趋势,因此可认为赣江尾间四大家鱼产卵生境的适宜生态流量范围为 3500~4800 m³/s,最适宜生态流量为 4200 m³/s。

外洲站在四大家鱼非产卵期的月平均流量范围为 923~2833 m³/s,在产卵期 4—6 月的月平均流量范围为 3553~4773 m³/s。与非产卵期相比,产卵期流量显著增加,流量的变化与四大家鱼产卵之间存在

密切关系。基于 2023 年 4—7 月赣江尾间各支水生生物资源监测资料,鳊鱼和鲢鱼的重量占比分别为 29.04%和 12.30%,位列监测区域中前两位,且主要分布在弯曲河段,与本文所得高适宜度区域的空间分布一致,这进一步验证了物理栖息地模型的合理性。

4 结 论

a. 当流量较小时,主支整体适宜度高于中支、南支,当流量较大时,主支整体适宜度下降明显,中支、南支适宜度增大。四大家鱼产卵适宜生境面积随着流量增加呈先增大后减小的趋势,相较于小流量,产卵适宜生境面积在大流量下的减少速度更快,四大家鱼产卵生境对大流量的变化比对小流量的变化更加敏感。

b. 赣江尾间四大家鱼产卵生境的适宜生态流量范围为 3500~4800 m³/s,最适宜生态流量为 4200 m³/s。

参考文献:

[1] 王洪铸,刘学勤,王海军. 长江河流-泛滥平原生态系统面临的威胁与整体保护对策[J]. 水生生物学报,2019, 43(增刊1): 157-182. (WANG Hongzhu, LIU Xueqin, WANG Haijun. The Yangtze River-floodplain ecosystem: multiple threats and holistic conservation [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2019, 43 (Sup1): 157-182. (in Chinese))

[2] QIN Xiangchao, GONG Zheng, LIU Huanzhang. Lateral migration of fish between China's second largest freshwater lake (Dongting Lake) and the mainstem of the Yangtze River[J]. Environmental Biology of Fishes, 2019, 102(4): 527-539.

[3] 刘伟佳,邹大胜,裴青宝. 赣江尾间地区鄱阳湖湖汉健康状况评价[J]. 水生态学杂志,2021,42(2): 1-7. (LIU Weijia, ZOU Dasheng, PEI Qingbao. Health status evaluation of Poyang Lake branches in lower reaches of Ganjiang River [J]. Journal of Hydroecology, 2021, 42 (2): 1-7. (in Chinese))

[4] 黄彬彬,严登华,李卿鹏. 赣江尾间河段水环境演变规律与驱动因子分析[J]. 人民长江,2019,50(增刊2): 26-29. (HUANG Binbin, YAN Denghua, LI Qingpeng. Trend and driving factors of water quality variation in lower reaches of Ganjiang River Basin [J]. Yangtze River, 2019(Sup2): 26-29. (in Chinese))

[5] 陈界仁,刘涵心,吕婷婷. 赣江尾间河道枯水位变化与成因分析[J]. 水电能源科学,2016,34(10): 28-31. (CHEN Jieren, LIU Hanxin, LYU Tingting. Analysis of low water level variation and cause for Ganjiang trail channel [J]. Water Resources and Power, 2016, 34(10): 28-31. (in Chinese))

- [6] VOLCHEK A, KIRVEL I, SHESHKO N. Environmental flow assessment for the Yaselda River in its Selets reservoir section[J]. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 2019, 19(1):109-118.
- [7] 高勋,陈星,卢娟娟,等. 台州主城区河道生态需水计算与水量调度[J]. *水利水电科技进展*, 2023, 43(3):55-61. (GAO Xun, CHEN Xing, LU Juanjuan, et al. Ecological water demand calculation and water volume scheduling for river channels in Taizhou's main urban area[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2023, 43(3):55-61. (in Chinese))
- [8] 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))
- [9] 高超. 澜沧江下游水库生态调度研究[D]. 西安:西安理工大学, 2018.
- [10] 毛劲乔,李智,戴会超,等. 水库调度影响下中华鲟产卵场的水动力特征[J]. *排灌机械工程学报*, 2014, 32(5):399-403. (MAO Jinqiao, LI Zhi, DAI Huichao, et al. Short-term hydrodynamic features of Chinese sturgeon spawning ground under reservoir regulation conditions[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2014, 32(5):399-403. (in Chinese))
- [11] 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))
- [12] 黄冬菁,李一平,崔广柏,等. 基于水文-水力-生境分析的河道基本生态流量计算方法[J]. *水资源保护*, 2024, 40(1):142-148. (HUANG Dongjing, LI Yiping, CUI Guangbo, et al. Calculation method of basic instream ecological flow based on hydrological-hydraulic-habitat analysis[J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40(1):142-148. (in Chinese))
- [13] 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))
- [14] 班璇,郭舟,熊兴基,等. 长江中游典型河段底栖动物的物理栖息地模型构建与应用[J]. *水利学报*, 2020, 51(8):936-946. (BAN Xuan, GUO Zhou, XIONG Xingji, et al. Applying physical habitat model of zoobenthos in typical reaches of the Yangtze River[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, 51(8):936-946. (in Chinese))
- [15] 吴倩,戴凌全,任玉峰,等. 三峡水库补水调度对东洞庭湖典型沉水植物生境适宜性的影响[J]. *环境工程技术学报*, 2023, 13(2):617-624. (WU Qian, DAI Lingquan, REN Yufeng, et al. Impact of Three Gorges Reservoir water supply regulation on habitat suitability of typical submerged plants in East Dongting Lake[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2023, 13(2):617-624. (in Chinese))
- [16] 李友光,刘士峰,王慧亮,等. 基于多物种栖息地适宜度模型的河道生态流量确定方法与应用[J]. *灌溉排水学报*, 2022, 41(5):139-146. (LI Youguang, LIU Shifeng, WANG Huiliang, et al. Determining the ecologically sustainable river flow using the multiple species habitat suitability model[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2022, 41(5):139-146. (in Chinese))
- [17] NAMAN S M, ROSENFELD J S, NEUSWANGER J R, et al. Comparing correlative and bioenergetics-based habitat suitability models for drift-feeding fishes[J]. *Freshwater Biology*, 2019, 64(9):1613-1626.
- [18] ROSENFELD J S, NAMAN S M. Identifying and mitigating systematic biases in fish habitat simulation modeling: implications for estimating minimum instream flows[J]. *River Research and Applications*, 2021, 37(6):869-879.
- [19] 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. (YI Yujun, ZHANG Shanghong. Review of aquatic species habitat simulation method and modelling[J]. *Scientia Sinica Terrae*, 2019, 49(4):363-377. (in Chinese))
- [20] 毛劲乔,戴会超. 重大水利水电工程对重要水生生物的影响与调控[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2016, 44(3):240-245. (MAO Jinqiao, DAI Huichao. Effects of large water conservancy and hydropower projects on major aquatic species and regulation[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2016, 44(3):240-245. (in Chinese))
- [21] 赵越,周建中,常剑波,等. 模糊逻辑在物理栖息模拟中的应用[J]. *水科学进展*, 2013, 24(3):427-435. (ZHAO Yue, ZHOU Jianzhong, CHANG Jianbo, et al. Application of fuzzy logic for physical habitat simulation[J]. *Advances in Water Science*, 2013, 24(3):427-435. (in Chinese))
- [22] 易燃,陶江平,杨志,等. 改进的栖息地法求解多种产漂流性卵鱼类生态流量方法研究[J]. *中国农村水利水电*, 2024(9):45-51. (YI Ran, TAO Jiangping, YANG Zhi, et al. Study on the improved habitat method for solving the ecological flow of various fish with pelagic eggs[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2024(9):45-51. (in Chinese))

(收稿日期:2024-11-29 编辑:俞云利)