

周正, 于子钺, 任志雄, 等. 基于鱼类栖息需求的生态流量过程研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2026, 57(1): 118-130. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.01.009

ZHOU Zheng, YU Zicheng, REN Zhixiong, et al. Study on ecological flow processes based on fish habitat requirements[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2026, 57(1): 118-130. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.01.009

基于鱼类栖息需求的生态流量过程研究

周正^{1,2}, 于子钺^{1,2}, 任志雄³, 丁洋⁴, 王少飞³, 刘哲³,
李书芳^{1,2}, 张景洲^{1,2}, 任冲³

(1. 河北工程大学 河北省智慧水利重点实验室, 河北 邯郸 056038; 2. 河北工程大学 水利水电学院, 河北 邯郸 056038; 3. 河北省水利工程局集团有限公司, 河北 石家庄 050000;
4. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘要:【目的】为有效解决河流栖息地结构受损、功能退化这一现实问题,【方法】以滹沱河流域灵寿段为研究区,基于现场踏勘、生态监测、文献调研、数值模拟等手段,引入水力单元概念,科学筛选目标鱼类,梳理归纳其水文-地貌栖息需求,定量研判水文变化下不同鱼类关键阶段的栖息地空间分布。【结果】结果表明:不同流量变化下水力单元空间分布差距明显,水力单元多样性指数在 $200\text{ m}^3/\text{s}$ 时取得最大值,当流量为 $120\text{ m}^3/\text{s}$ 时,深潭区域面积最大为 $796\,956\text{ m}^2$,当流量为 $240\text{ m}^3/\text{s}$ 时,急流区域面积最大为 $1\,005\,619\text{ m}^2$,以4种目标鱼类栖息需求为导向明确了研究区生态流量过程,在5—6月鱼类产卵集中期生态流量可达 $200\sim 240\text{ m}^3/\text{s}$,越冬期间为 $80\sim 120\text{ m}^3/\text{s}$,索饵期可达 $120\sim 200\text{ m}^3/\text{s}$ 。【结论】通过对水力单元时空分布的量化分析,统筹考虑关键物种不同生命周期的需求,分期动态确定了受损河流生态流量过程,从而为区域河湖生态修复提供理论支撑。

关键词: 鱼类栖息地; 不同生命周期; 数值模拟; 生态流量; 水力单元; 滹沱河; 环境 DNA

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.01.009

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV62; TV882.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2026)01-0118-13



听语音
聊科研

Study on ecological flow processes based on fish habitat requirements

ZHOU Zheng^{1,2}, YU Zicheng^{1,2}, REN Zhixiong³, DING Yang⁴, WANG Shaofei³, LIU Zhe³,
LI Shufang^{1,2}, ZHANG Jingzhou^{1,2}, REN Chong³

(1. Key Laboratory of Intelligent Water Resources of Hebei Province, Hebei University of Engineering, Handan 056038, Hebei, China; 2. School of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hebei University of Engineering, Handan 056038, Hebei, China; 3. Hebei Provincial Water Conservancy Engineering Bureau Group, Shijiazhuang 050000, Hebei, China;
4. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

收稿日期: 2024-11-27; 修回日期: 2024-12-24; 录用日期: 2025-01-02; 网络出版日期: 2025-03-26

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFC3209402); 河北省自然科学基金项目(E2024402110); 河北省水利科技计划项目(2023-85); 河北工程大学创新基金项目(SJ2401002103)

作者简介: 周正(2001—),男,硕士研究生,主要从事生态水利工程的相关研究。E-mail: 2410336486@qq.com

通信作者: 李书芳(1981—),女,副教授,博士,主要从事水力学及河流动力学的相关研究。E-mail: shuili_1981@126.com

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

Abstract: [Objective] To effectively address the issues of damaged river habitat structure and functional degradation. [Methods] The Lingshou section of the Hutuo River Basin was selected as the study area. Based on field surveys, ecological monitoring, literature research, and numerical simulations, the concept of hydraulic units was introduced. Target fish species were scientifically selected, and their hydrological and geomorphic habitat requirements were systematically summarized. The spatial distribution of habitats for different fish species during key stages under hydrological variations was quantitatively analyzed. [Results] The result revealed significant differences in the spatial distribution of hydraulic units at different flow rates. The hydraulic unit diversity index reached its maximum value at a flow rate of $200 \text{ m}^3/\text{s}$. When the flow rate was $120 \text{ m}^3/\text{s}$, the area of deep pools reached a maximum of $796\,956 \text{ m}^2$. At a flow rate of $240 \text{ m}^3/\text{s}$, the area of rapids reached a maximum of $1\,005\,619 \text{ m}^2$. Based on the habitat requirements of four target fish species, the ecological flow process in the study area was determined. During the concentrated spawning period from May to June, the ecological flow ranged from 200 to $240 \text{ m}^3/\text{s}$. During the overwintering period, it ranged from 80 to $120 \text{ m}^3/\text{s}$, and during the foraging period, it ranged from 120 to $200 \text{ m}^3/\text{s}$. [Conclusion] Through quantitative analysis of the spatiotemporal distribution of hydraulic units and comprehensive consideration of the needs of key species at different stages of life cycle, the ecological flow process of the damaged river was dynamically determined in stages. The findings provide theoretical support for the ecological restoration of regional rivers and lakes.

Keywords: fish habitat; different life cycle stages; numerical simulation; ecological flow; hydraulic unit; Hutuo River; environmental DNA

0 引言

水利工程的建设与运行为社会经济发展提供保障的同时,也不可避免地会对河湖的连通性产生影响,进而改变河流的水文特征,包括流量、水温、溶解氧含量和水位等^[1-2],破坏水生生物的栖息地,对其生长和繁殖形成胁迫。在幸福河湖建设、母亲河复苏的背景下,亟需开展受损河湖的生态修复^[3]。鱼类作为河流生态系统中的顶级捕食者,其种群生物多样性的变化直接反映了河湖生态系统的健康状况。以其为对象开展适宜生态流量过程的研究,是当前河湖生态修复的热点^[4]。生态流量计算方法多样,可分为水力学法、水文学法、栖息地模拟法、整体分析法^[5]。栖息地是指生物个体、种群或群落生活、繁衍的空间地段,是保障和维护河流生态功能的前提和基础条件。其中,栖息地模拟法因考虑到关键物种的栖息生存需求,在国内外得到了广泛应用。YOUNG等^[6]通过生境模拟法将鱼类生长情景和流域水收支分析联系起来,评估了目标鱼类与坝后定量入流的兼容性,确定了该流域供水系统中宽鳍鱮的适宜流量。QIU等^[7]基于物理的耦合模型框架,以三峡水库下长江中游为研究区域,识别四大家鱼(FMCC)产卵栖息地对大坝不同下泄流量条件下的水力学和水温状态的时空变化响应,提出了适宜三峡水库生态调度中的生态下泄流量。王瑞玲等^[8]基于生境模拟法,研究了黄河下游黄河鲤鱼生态学特性及其栖息生境与水文水环境因子之间的关系,建立了黄河鲤鱼生境状况与河川径流条件

定量响应关系。YAN等^[9]采用二维水动力模型,精确评估各水电站运行条件下鱼类栖息地的质量状况,并明确界定与目标鱼类生存需求相匹配的生态流量最优值。上述研究多聚焦于单一物种或单一生命周期来推算生态流量,对鱼类生命周期考虑较少,这种方法存在一定的局限性,XIN等^[10]以元盆地贾SA(JSA)-马渡山(MS)级联油气藏为研究区,采用物理栖息地模拟模型对目标鱼种在不同生命阶段的水文需求进行量化,提出多水电系统运行优化规则。易燃等^[11]以长江中游的葛洲坝-宝塔河河段为研究区域,基于改进的栖息地法求解多种产漂流性卵鱼类生态流量。上述研究聚焦单一物种多生命周期或单一生命周期多物种推求生态流量,但由于生活习性难定量描述、适宜性曲线难科学表征等问题,考虑多物种全生命周期的研究仍不多见。

在上述背景,本文引入水力单元概念,以滹沱河为研究区,利用环境DNA技术摸清区域鱼类种类及其分布,依据层次分析法(AHP)确定关键鱼类,基于二维水动力模型引入水力单元分类和多样性指数。以目标鱼类生命周期各阶段的水文需求为导向,重点探讨了不同鱼类在产卵期、越冬期和索饵期等关键阶段的生态流量需求,旨在促进滹沱河物种多样性的恢复^[12]。水力单元是地貌单元的下一级,是不同水文过程的直接表现形式。水文过程是塑造鱼类栖息地的重要驱动要素,其直接决定了鱼类栖息地的面积和范围^[13]。由于河道地形的变化及其空间异质性,水文变化对河流中水生生物栖息地的影响通常是不对

等的, 例如, 美国西弗吉尼亚河流水文-地貌研究表明^[14], 在减少 96% 的河流流量情况下, 鱼类的缓流浅滩区(slack water)丧失了 52%, 而深潭(pool)仅减少了 2%, 这对溪流鱼类具有重要影响, 而适应缓流生境的鱼类则影响很小^[15]。因此引入水力单元探究多物种全生命周期的鱼类栖息需求的生态流量过程研究具有一定的可行性。

1 研究内容与方法

1.1 研究区域

滹沱河地处 113° 83' E—116° 09' E, 39° 28' N—38° 20' N 之间, 位于山西省、河北省境内, 在河北平山县流入河北省途径黄壁庄水库至献县, 与滏阳新河及滏阳河汇流于子牙河, 全长 587 km, 流域面积 2.73 万 km², 是石家庄市的母亲河及生态环境空间的重要组成部分。本研究区域为黄壁庄水库下游滹沱河灵寿县段, 河中心有一座 112 hm² 的中山生态岛, 河段长 9.6 km。为准确了解滹沱河鱼类的现状, 并为后续研究提供基础数据, 于 2023 年 5 月、11 月开展了实地调研, 对鱼类数据、水文水动力、地形地貌进行了监测与分析, 空间位置如图 1 所示。

1.2 目标鱼类选择

鱼类栖息地的质量优劣对河流生态系统的结构和功能具有重要影响。在进行河流生态修复工作时, 往往选择鱼类作为代表性生物进行研究。2023 年 5 月、11 月在滹沱河灵寿县段选取 6 个采样点(见图 1), 在现场踏勘的基础上, 利用环境 DNA 技术, 对采集的样本进行检测与分析, 并成功注释出 13 种鱼类(见表 1), 为后续目标鱼类的选取提供了重要科学依据。

本研究采用层次分析法(AHP), 综合考虑滹沱河灵寿县段的生态特点与相关研究成果^[16], 提出了一系列科学合理的筛选原则(见表 2)。在这些筛选原则的基础上, 构建了目标鱼类判断矩阵(见表 3), 并通过计算得出该矩阵的最大特征根为 15.375。经一致性检验, 判断矩阵的一致性比率(CR 值)为 0.067, 明显小于 0.1, 表明计算得到的权重具有高度的一致性和可靠性。进一步分析结果表明, 鲢鱼在滹沱河灵寿县段鱼类中的排序权值最高, 表明其在该水域具有显著的代表性和生态重要性(见图 2)。其次为鲇鱼、草鱼和鲫鱼, 鲇鱼作为底栖肉食性鱼类, 其生态需求与其他物种不同; 草鱼虽然与鲢鱼同为四大家鱼, 但其栖息地和繁殖习性与鲢鱼有所区别; 而鲫鱼则因其较广泛的分布范围, 并且与前三种鱼类的生态特征差异较大。通过对这四种鱼类生命周期中不同阶段的栖息需求进行分析, 可以更全面地反映滹沱河灵寿县段水域的栖息地质量和生态需求。因此, 本研究最终确定以鲢鱼、草鱼、鲇鱼和鲫鱼为滹沱河灵寿县段的关键鱼类, 并基于这一结论, 为后续研究提供了科学依据。

1.3 水力单元分类

水力单元(Hydraulic Unit)是河流样式分类体系中的最精细层次^[17], 涉及多种水文和生态因素的综合考量。水力单元的形态特征会随着时间的推移而发生变化, 其变化的时间尺度可能从几小时到几个月不等。此外, 其面积和类型通常会随水文过程的波动而动态变化。本研究在结合黄壁庄水库下游河段的水文特征与前人分类方法的基础上, 通过现场观测和实地调查数据, 依据水深和流速的差异, 将研究区域划分为不同类型的水力单元(见图 3)。每个水力单元的特性与其水文过程密切相关, 且不同水力单元的空间

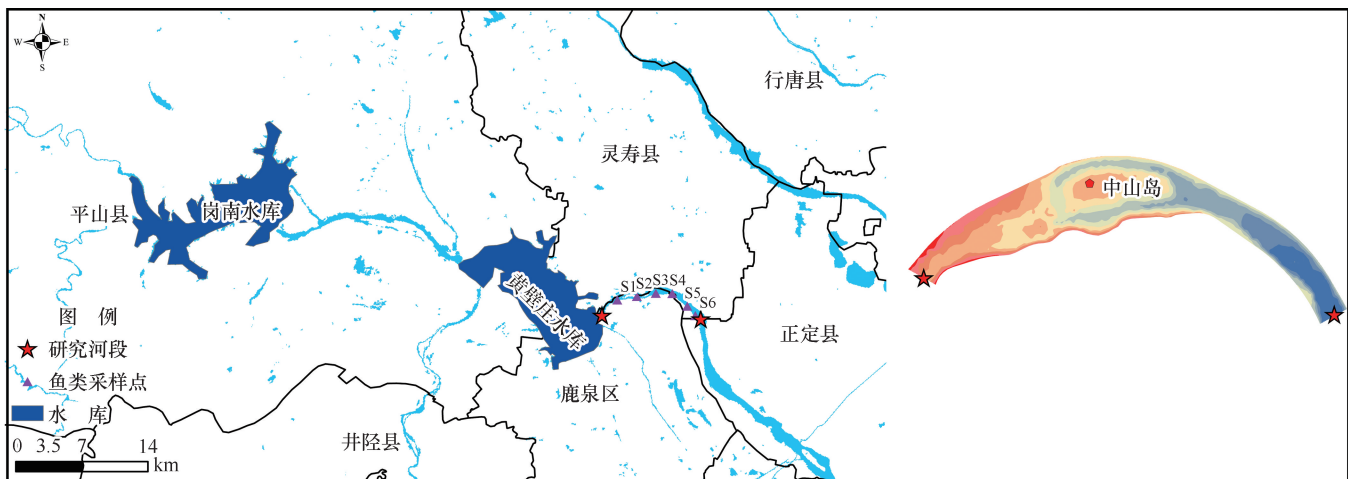


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

表1 溱沔河灵寿段鱼类统计

Table 1 Statistics of fish species in Lingshou Section of

Hutuo River

种名	S1	S2	S3	S4	S5	S6
白鲢	√	√	√	√	√	√
鳊鱼	√	√	√	√	√	√
黑鳍鳊	√	√	√			
麦穗鱼	√	√	√	√	√	√
鲫鱼	√	√	√	√	√	√
鲤鱼				√		
鲢鱼			√	√	√	√
草鱼				√	√	
马口鱼	√	√	√	√	√	
青鱼				√	√	
黄颡鱼					√	√
鳊	√	√				√
乌鳢	√	√				√

表2 溱沔河灵寿段目标鱼类筛选原则

Table 2 Selection criteria for target fish species in

Lingshou section of Hutuo River

筛选条件	说明
繁殖年龄	优先选择性成熟年龄为1~2年的鱼类
产卵场环境要求	优先考虑产卵场有流速要求的鱼类
食性	杂食性由于优于草食性及肉食性
生活环境特征	喜居于水体中上层鱼类优先于底层及淤泥的鱼类
分布范围	分布广的鱼类优先于分布狭窄的鱼类
经济价值	优先考虑地域特有及经济价值较高的鱼类

异质性呈现出一定的变化规律^[18]。水力单元的种类越丰富, 水域的空间异质性越强, 生态环境越有利于生物的多样化生存与繁衍^[19]。在文献调研的基础上, 通过与当地村民、技术人员的访谈和交流, 结合实地观察数据, 进一步了解不同鱼类在不同生命周期阶段的生态需求(见表4)。

表3 溱沔河灵寿段目标鱼类判断矩阵

Table 3 Evaluation matrix for target fish species in Lingshou section of Hutuo River

种类	白鲢	鳊鱼	黑鳍鳊	麦穗鱼	鲫鱼	鲤鱼	鲢鱼	草鱼	马口鱼	青鱼	黄颡鱼	鳊	乌鳢
白鲢	1.00	3.00	1.00	1.00	0.33	0.25	0.33	0.25	0.50	0.20	0.50	0.25	0.33
鳊鱼	0.33	1.00	0.33	0.33	0.25	0.25	0.25	0.25	0.33	0.25	0.25	0.20	0.20
黑鳍鳊	1.00	3.00	1.00	1.00	0.33	0.25	0.33	0.25	0.50	0.20	0.50	0.25	0.33
麦穗鱼	1.00	3.00	1.00	1.00	0.33	0.25	0.33	0.25	0.50	0.20	0.50	0.25	0.33
鲫鱼	3.00	4.00	3.00	3.00	1.00	1.00	0.50	0.50	3.00	1.00	2.00	2.00	2.00
鲤鱼	4.00	4.00	4.00	4.00	0.50	1.00	0.50	1.00	1.00	2.00	1.00	0.25	0.33
鲢鱼	3.00	4.00	3.00	3.00	2.00	2.00	1.00	3.00	4.00	5.00	3.00	2.00	2.00
草鱼	4.00	4.00	4.00	4.00	0.50	1.00	0.33	1.00	4.00	2.00	3.00	0.50	0.50
马口鱼	2.00	3.00	2.00	2.00	0.33	1.00	0.25	0.25	1.00	1.00	0.50	0.25	0.33
青鱼	5.00	4.00	5.00	5.00	1.00	0.50	0.20	0.50	1.00	1.00	0.50	0.33	0.33
黄颡鱼	2.00	4.00	2.00	2.00	0.50	1.00	0.33	0.33	2.00	2.00	1.00	0.33	0.33
鳊	4.00	5.00	4.00	4.00	0.50	4.00	0.50	2.00	4.00	3.00	3.00	1.00	1.00
乌鳢	3.00	5.00	3.00	3.00	0.50	3.00	0.50	2.00	3.00	3.00	3.00	1.00	1.00

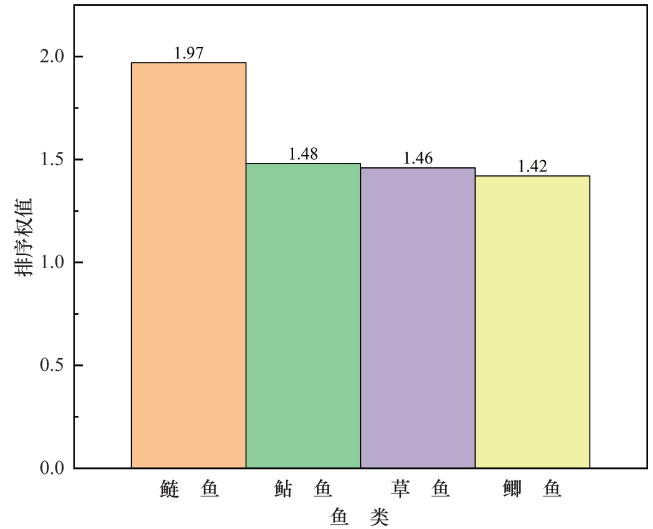


图2 溱沔河灵寿段目标鱼类选择排序权值

Fig. 2 Ranking weights for selection of target fish species in Lingshou section of Hutuo River

根据水力单元的分类, 可以明确不同鱼类在各个生长周期中的关键栖息区域特征。四种主要鱼类的越冬场均集中在深潭型水域^[20], 这些区域水深较大、流速较缓, 水温相对稳定。鲢鱼和草鱼的产卵场主要位于急流区, 这些区域水流较急、溶解氧含量较高。相比之下, 鳊鱼和鲫鱼则偏好缓流区作为产卵场, 这些区域水流平缓、环境稳定, 有利于它们的卵粒附着和发育。在觅食阶段, 鲢鱼更倾向于栖息于滑水区, 这类水域流速适中, 有利于其通过悬浮物和浮游生物获取食物。草鱼和鲫鱼则更喜欢在缓流区觅食, 这些区域水流缓慢, 适合它们觅食底栖生物和水生植物。而鳊鱼则偏向于深潭区觅食, 深潭区水域提供了丰富的食物资源, 并且其相对较低的流速有助于鳊鱼利用其强大的捕食能力^[21]。

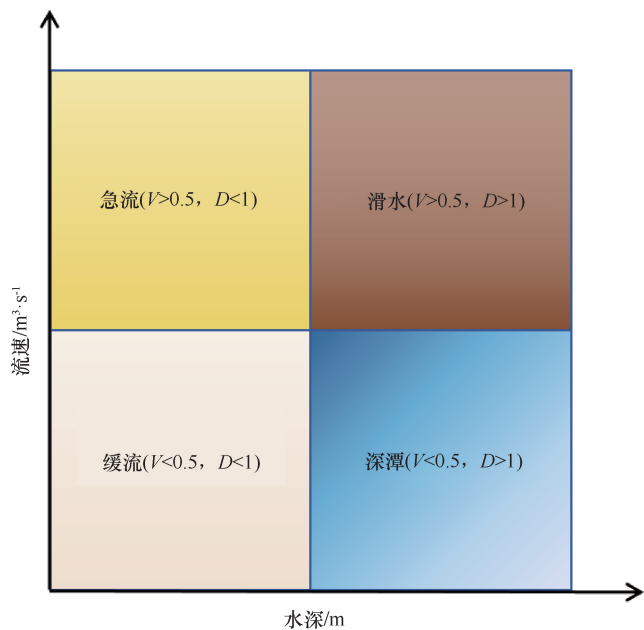


图3 基于水深、流速的河流水力单元分类

Fig. 3 Classification of river hydraulic units based on water depth and flow velocity

1.4 水力单元多样性指数

水力单元的多样性决定了水体的栖息环境,其单元越丰富,地貌异质性越高,生物越能稳定生存。在这一过程中,Shannon多样性指数的应用提供了一个定量工具,用来衡量水域景观的复杂度和异质性程度。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。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

$$H = - \sum_{i=1}^m P_i \log_2 P_i$$

$$P_i = A_i / A_T$$

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。

1.5 模型搭建及率定

本文结合二维水动力模型River2D与ArcGIS,基

于实地高程数据测量,生成研究区的高程图(见图1)。以 $20 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $40 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $80 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $120 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $160 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $200 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $240 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $260 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $280 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $300 \text{ m}^3/\text{s}$ 作为模型边界输入值,以 82.5 m 作为下游水位边界。选择断面S3($114^\circ 36' 32'' \text{E}$, $38^\circ 27' 06'' \text{N}$)、S5($114^\circ 38' 55'' \text{E}$, $38^\circ 26' 95'' \text{N}$)作为校核断面,通过对比 $40 \text{ m}^3/\text{s}$ 下不同河床糙率模拟的特征点水深(S3和S5)与实测水深,定量明晰河床糙率取 0.035 时相对误差较小,分别为 0.016% 、 0.028 ,均在 0.05% 以内,因此采用该糙率系数进行后续模拟。

2 结果分析

2.1 流速水深分布情况

基于二维水动力学模型,本研究探讨了研究区域在不同流量边界条件下的流速和水深变化特征。模拟结果显示(见图4、图5),在不同流量条件下,河段的流速、水深和水面面积呈现出显著的变化趋势。随着流量的增加,水深和流速均呈现上升态势,而水面面积也逐步扩大。当流量增至 $300 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,河段的无水段面积占比由流量为 $20 \text{ m}^3/\text{s}$ 时的 72% 减少至 50% ,表明水体面积在流量增大过程中不断扩展,这为河流中的水生生物提供了更加广阔的栖息空间。与此同时,流速和水深在不同流量下表现出较强的空间变异性和动态变化特征,反映了水动力过程对流量变化的敏感性及其空间分布的复杂性。二维水动力模型通过精确模拟水流的空间分布与动态变化,不仅有效揭示了不同流量条件下水深和流速的变化规律,并且为水生态修复和水资源管理等方面提供了科学指导。

2.2 不同流量下水力单元分布

随着流量的增加,河流水面面积从 $2\,324\,410 \text{ m}^2$ 增加至 $3\,729\,682 \text{ m}^2$ 。在不同流量条件下,水力单元的空间分布呈现出明显的差异。随着流量增大,水力单元在空间上的分布模式逐渐呈现出更为多样化的特征(见图6)。具体而言,四种水力单元类型在流量变化的影响下,相互之间发生了转化和动态演化。这

表4 不同鱼类在不同生命周期阶段的生态需求

Table 4 Ecological requirements of different fish species at different life cycle stages

种类	产卵期	越冬期	索饵期
鲢鱼	通常在每年的5—6月,偏向于水流较急、富氧的浅水区	通常在每年的11月—翌年2月,偏向于水流较缓的深水区	通常在每年的春季与秋季,特别是7—11月,偏向于水流适中的深水区进行觅食
鳊鱼	通常在每年的5—6月,偏向于水流平稳河流浅水区	通常在每年的11月—翌年2月,偏向于水流较缓的深水区	通常在每年的春季与秋季,偏向于水流相对较缓的深水区
草鱼	通常在每年的4—6月之间,比较集中在5月间,倾向选择水流较急的浅水区域进行繁殖	通常在每年的11月—翌年2月,偏向于水流较缓的深水区	主要出现在每年的3—5月与7—11月,水草丰富、流水较缓的浅水区
鲫鱼	一般在4—6月之间,鲫鱼偏好水流较缓的水域进行产卵	通常在每年的11月—翌年2月,偏向于水流较缓的深水区	通常出现在春季和秋季,偏向于水流平缓的区域

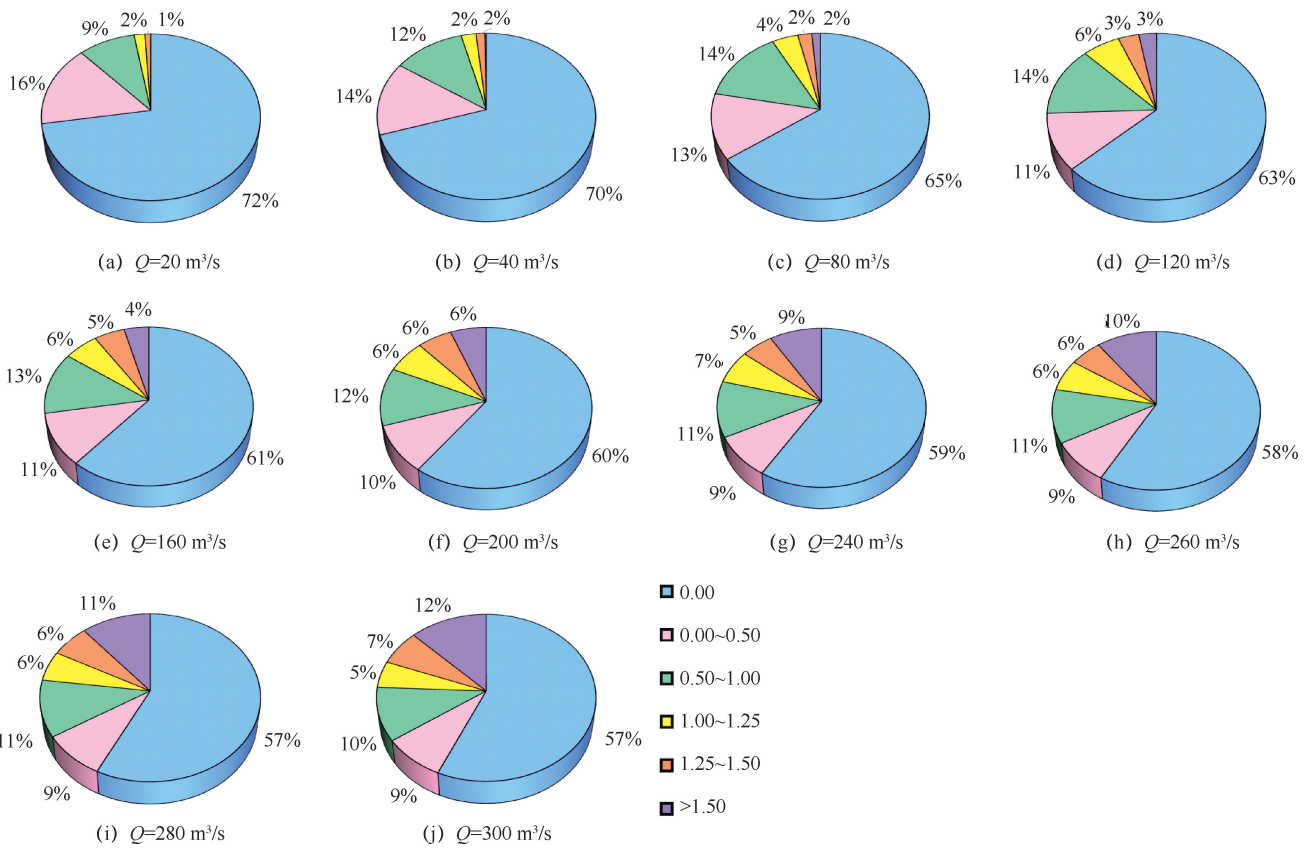


图4 不同流量下水深分布

Fig. 4 Water depth distribution at different flow rates

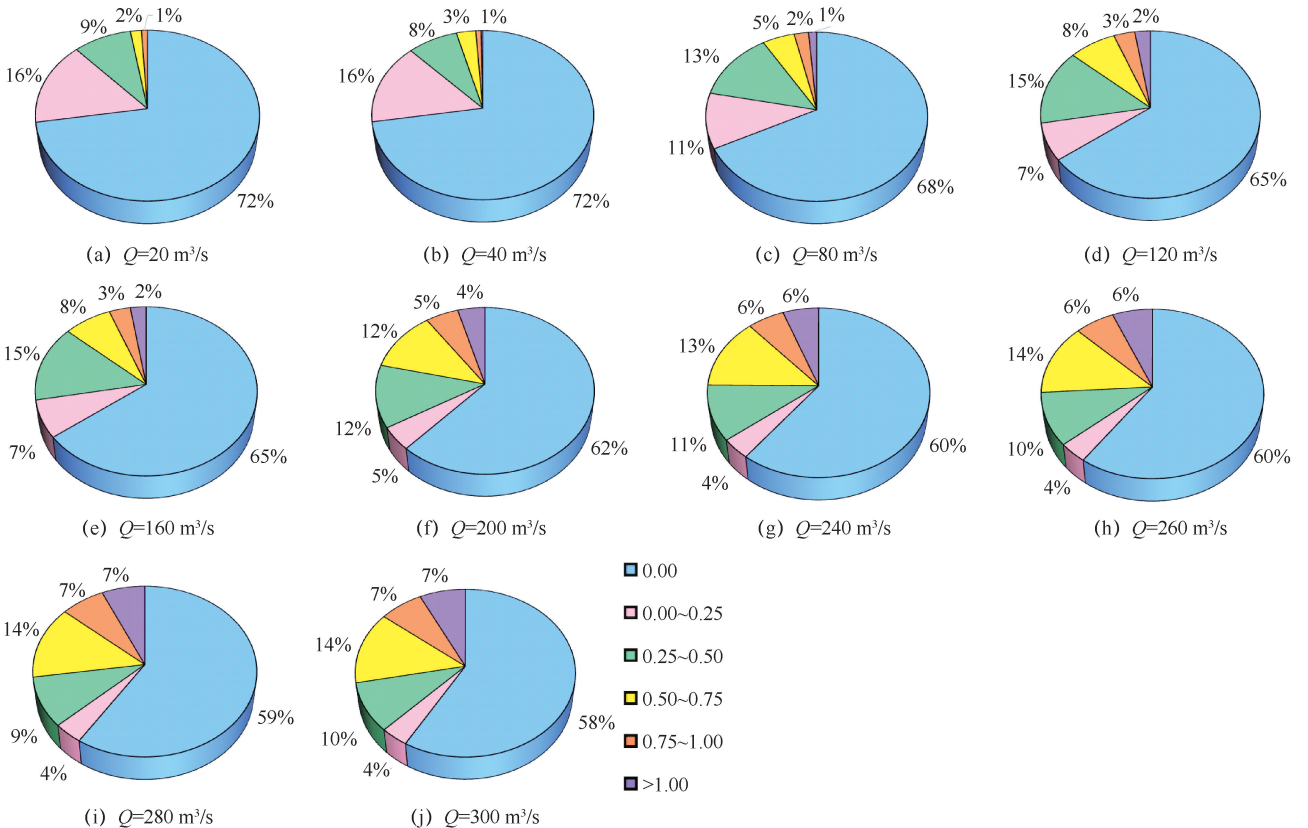


图5 不同流量下流速分布

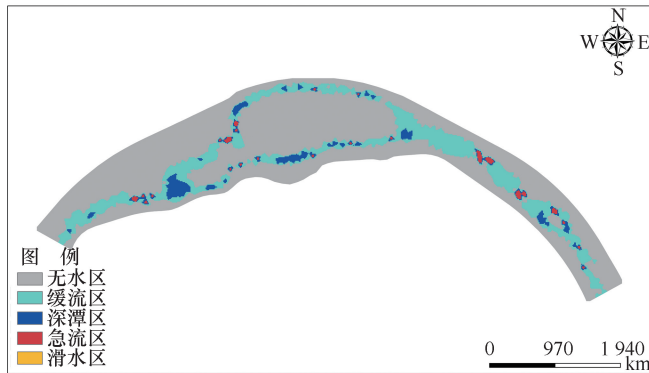
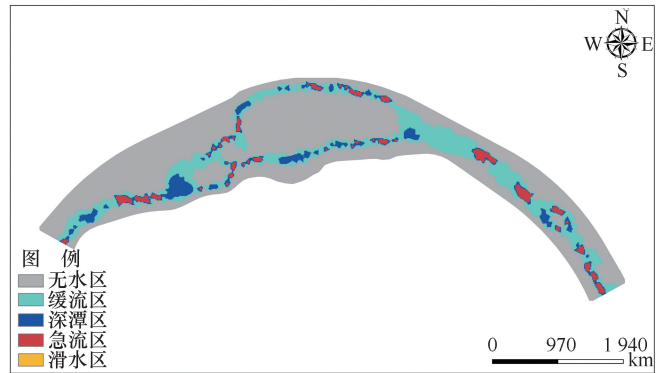
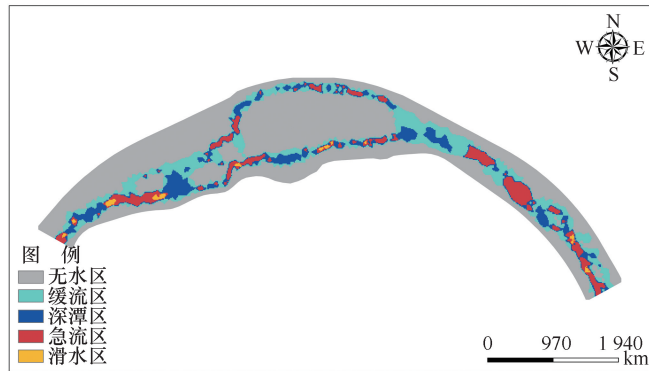
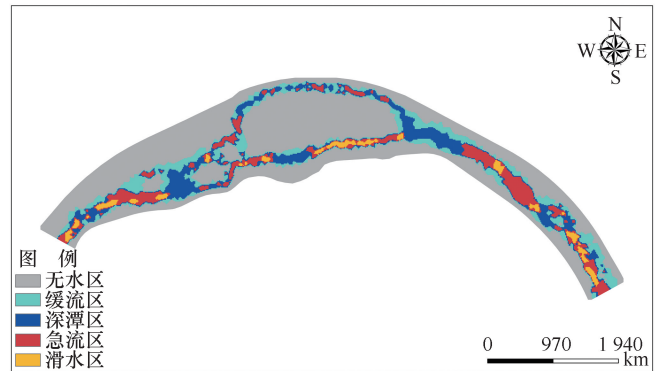
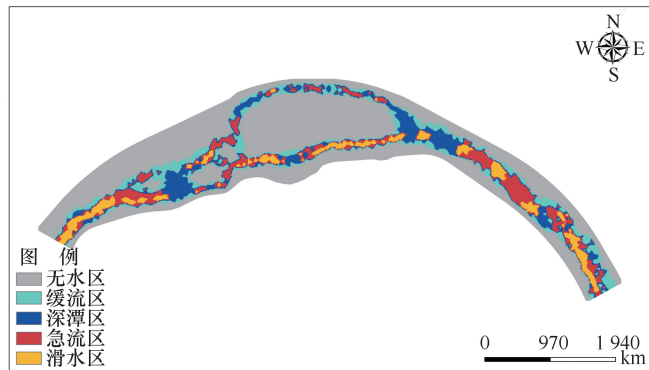
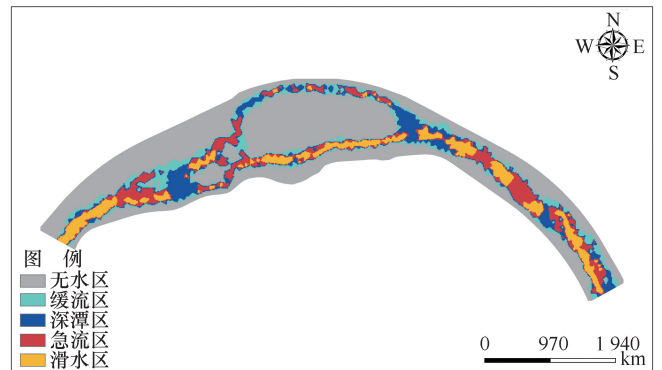
Fig. 5 Velocity distribution at different flow rates

表明, 水力单元的空间分布不仅受到流量变化的直接作用, 还受到流动过程中复杂交互作用的影响。基于数理统计方法得出不同流量下水力单元面积占比的变化(见图7), 可以观察到, 在低流量条件下, 缓流区域的面积占比最大, 并占据主导地位。随着流量的增加, 尤其是当流量达到 $300 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 滑水区域的面积占比显著增大, 最终成为主导区域。这一趋势揭示了流量变化对水力单元空间分布的深刻影响, 反映了水力区域的动态转变过程。随着流量的不断增加缓流区的面积呈现递减趋势, 且在流量为 $40 \text{ m}^3/\text{s}$ 时达到最大值; 深潭区面积则表现为先增大后减小的趋势, 其中在流量为 $120 \text{ m}^3/\text{s}$ 时面积最大; 急流区面积同

样呈现先增大后减小的趋势, 最大值出现在流量为 $240 \text{ m}^3/\text{s}$ 时; 而滑水区面积则持续增大, 在流量为 $300 \text{ m}^3/\text{s}$ 时达到最大值(见表5)。不同鱼类在其生命周期的各个阶段对水力单元的需求存在显著差异。因此, 深入分析不同流量条件下水力单元的变化趋势, 对于河流生物多样性的恢复具有重要的指导意义。

2.3 不同流量下水力单元多样性

计算不同流量条件下各水力单元在研究河段中的占比, 进而得到相应的水力单元多样性指数(见图8)。研究表明, 随着流量的增加, 水力单元的多样性呈现出一定的变化趋势。具体而言, 水力多样性

(a) $Q=20 \text{ m}^3/\text{s}$ (b) $Q=40 \text{ m}^3/\text{s}$ (c) $Q=80 \text{ m}^3/\text{s}$ (d) $Q=120 \text{ m}^3/\text{s}$ (e) $Q=160 \text{ m}^3/\text{s}$ (f) $Q=200 \text{ m}^3/\text{s}$

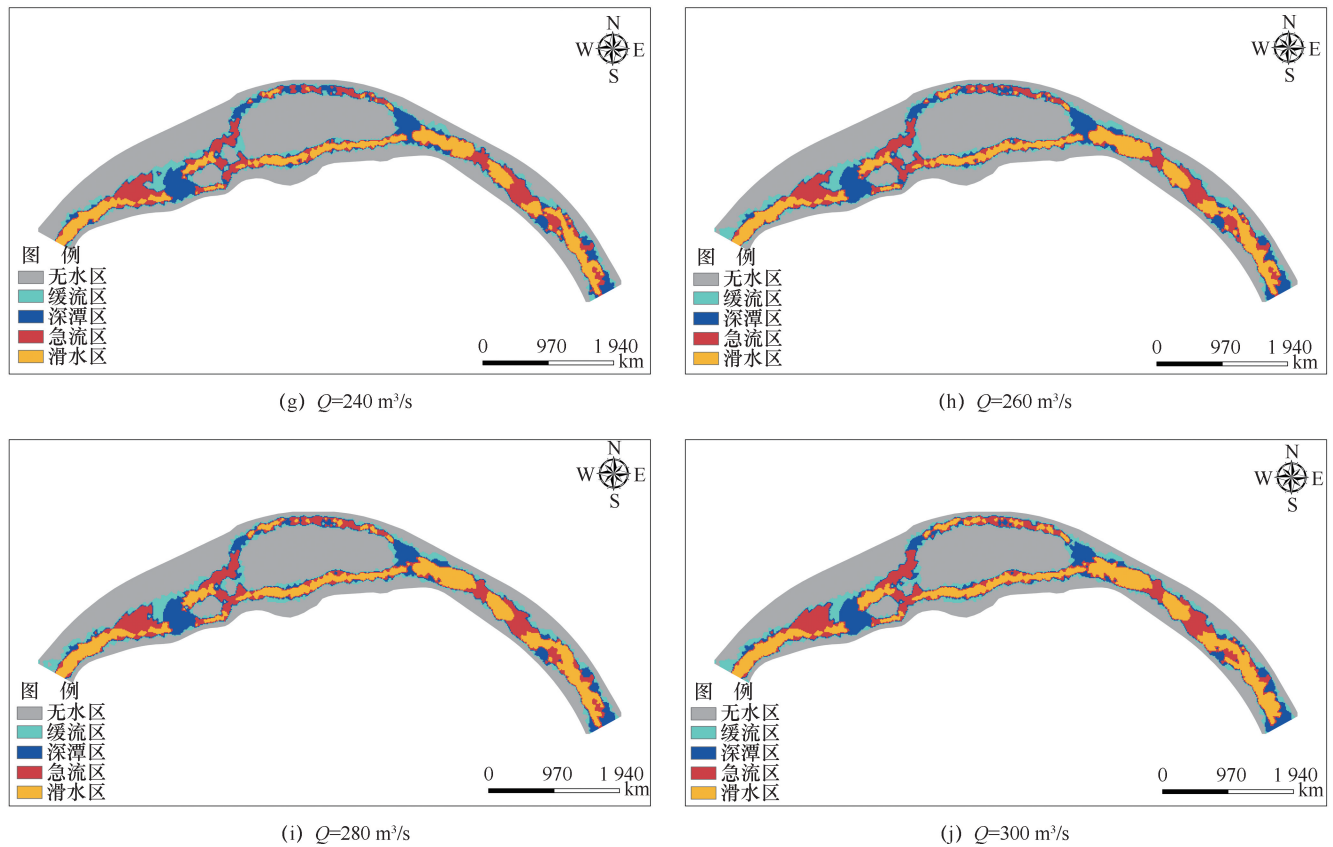


图6 不同流量下水力单元空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of hydraulic units at different flow rates

表5 不同流量下水力单元面积

Table 5 Area of hydraulic units at different flow rates

$Q/m^3 \cdot s^{-1}$	水力单元面积/ m^2				总面积/ m^2
	缓流	深潭	急流	滑水	
20	1 660 906	237 068	117 373	0	2 015 347
40	1 626 426	339 613	358 371	0	2 324 410
80	1 410 618	634 028	678 869	49 307	2 772 821
120	1 077 615	796 956	875 741	262 436	3 012 747
160	923 083	742 825	936 660	560 067	3 162 634
200	760 869	682 620	960 242	858 769	3 262 500
240	756 148	618 842	1 005 619	1 130 495	3 511 104
260	745 148	626 524	993 471	1 245 903	3 611 045
280	743 006	590 797	977 753	1 369 354	3 680 911
300	704 596	609 020	953 993	1 462 074	3 729 682

指数表现出先快速增大后逐渐变缓减小的变化趋势。在流量为 $40 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 水力单元多样性指数为 1.18, 而在流量达到 $200 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 指数增至最大值 1.99。值得注意的是, 流量在 $160 \text{ m}^3/\text{s}$ 处出现了明显的拐点, 此时多样性指数为 1.97。进一步分析不同流量区间内水力单元多样性指数的变化速率: 在流量为 $40 \sim 160 \text{ m}^3/\text{s}$ 的区间内, 水力单元多样性指数的增长速率为 0.006 5; 在流量为 $160 \sim 200 \text{ m}^3/\text{s}$ 的区间内,

增长速率显著减缓, 降至 0.000 4; 而在流量为 $200 \sim 300 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 水力单元多样性指数呈现下降趋势, 减少速率为 0.007。通过对不同流量下水力单元多样性指数的研究, 可以更全面地反映水力单元多样性的动态变化。指数值的增加意味着水力单元类型的丰富度提高, 进而促进河段地貌异质性的增加。更高的水力多样性指数通常表明该水域的生态环境更稳定, 有利于水生生物的生存与栖息。

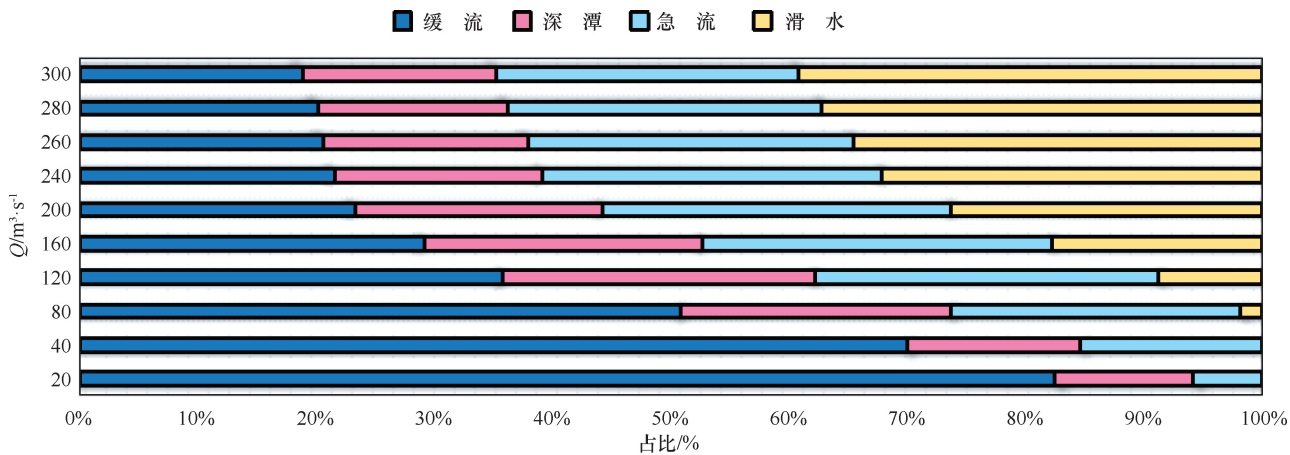


图7 不同流量下水力单元面积占比

Fig. 7 Proportion of hydraulic unit areas at different flow rates

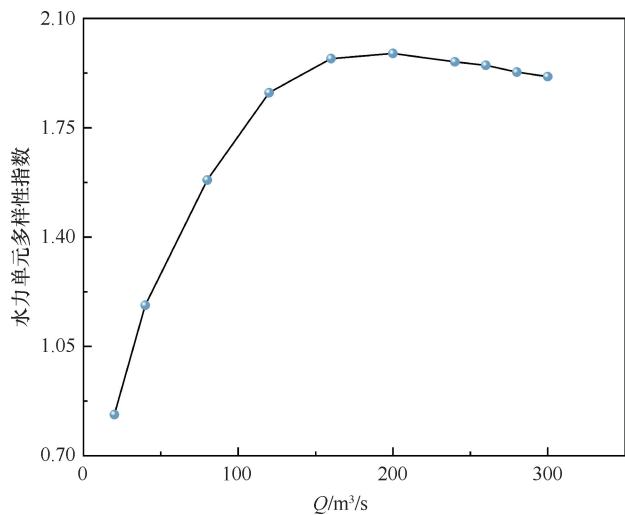


图8 不同流量下水力单元多样性指数

Fig. 8 Diversity index of hydraulic units at different flow rates

3 结果讨论

3.1 水力单元的相关性分析

利用 SPSS 对流量与水力单元面积进行斯皮尔曼相关性分析, 结果如表 6 所列。由表 6 可见, 流量变化与缓流区、急流区等, 4 种水力单元面积均呈现相关关系^[22]。其中, 流量变化与深潭区、急流区、滑水区面积呈现正相关关系, 与缓流区面积呈现负相关关系^[23]。除深潭区外其余类型与流量均呈极强相关(相关系数 0.8~1.0)。因此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, 但部分水力单元仍需结合实际进一步分析。急流和缓流相关性指数为-0.830, 呈现极强负相关; 滑水和缓流相关性指数为-0.997, 呈现极强负相关; 急流和滑水相关性指数为 0.827, 呈现极强正相关。不同水力单元之间

存在紧密的相关关系, 结合图 5, 流量达到一定数值后, 不同水力单元之间可以实现转化。

表 6 相关性分析结果

Table 6 Results of correlation analysis

水力单元	Q	缓流	深潭	急流	滑水
缓流	-1.000**				
深潭	0.079	-0.079			
急流	0.830**	-0.830**	0.200		
滑水	0.997**	-0.997**	0.073	0.827**	1.000

3.2 生态流量的确定

不同目标物种, 或同一物种在不同生命周期阶段的栖息地需求存在显著差异。这些需求受物种特定生态习性和生理需求的影响, 因此生态流量并非恒定不变^[24], 而是随着时间推移和生命周期各阶段的变化而动态调整。生态流量的确定不应仅依赖单一流量值作为标准, 而应综合考虑多种因素, 特别是随着栖息地模拟法的不断完善, 为全面评估生态流量的时空变化和动态需求提供了有效途径。在生态流量的研究过程中, 必须深入分析目标物种在不同生命周期阶段的关键栖息需求, 例如, 繁殖、越冬和觅食等生存活动所需的水文条件^[25]。不同生命周期阶段对栖息地的需求在空间和时间上可能具有显著差异, 因此, 生态流量需要根据物种的季节性变化、生命周期特征及栖息地需求进行动态调整^[26]。换言之, 生态流量研究应反映出物种对栖息地的时空变化特征^[27], 并且采取动态流量管理模式, 确保满足物种多样性所需的生态需求。这一动态调整机制不仅有助于为目标物种提供适宜的栖息环境, 还能增强生态系统的整体稳定性和可持续性。近年来, 随

着滹沱河生态修复工程和南水北调生态补水项目的实施,滹沱河逐渐恢复生机,为河流生物多样性恢复提供了新的契机。基于这一背景,本研究以不同鱼类全生命周期各阶段的水文需求为导向,着眼于滹沱河物种多样性的恢复,提出了针对不同目标鱼类不同生命阶段(如产卵期、越冬期、索饵期)所需

的生态流量^[28]。不同鱼类的觅食期和产卵期具有时间差异(见表7),根据不同鱼类生命周期栖息需求差异,结合不同水力单元变化曲线(见图9),得到适宜鱼类栖息需求的生态流量过程线(见图10)。该生态流量过程线可为上游黄壁庄水库的生态调节时间与下泄流量提供重要的参考和支持。

表7 不同鱼类的觅食期和产卵期的时间差异

Table 7 Temporal differences in foraging and spawning periods among different fish species

鱼类	索饵期	产卵期	索饵期与产卵期的时间区别
鲢鱼	4—6月	5—6月	索饵期早于产卵期1~2个月,时间重叠较多
草鱼	4—5月	5月	索饵期和产卵期重叠较多,差距较小
鲇鱼	4—6月	5—6月	索饵期和产卵期时间接近,重叠较多
鲫鱼	3—4月	4—6月	索饵期早于产卵期1~2个月,重叠较少

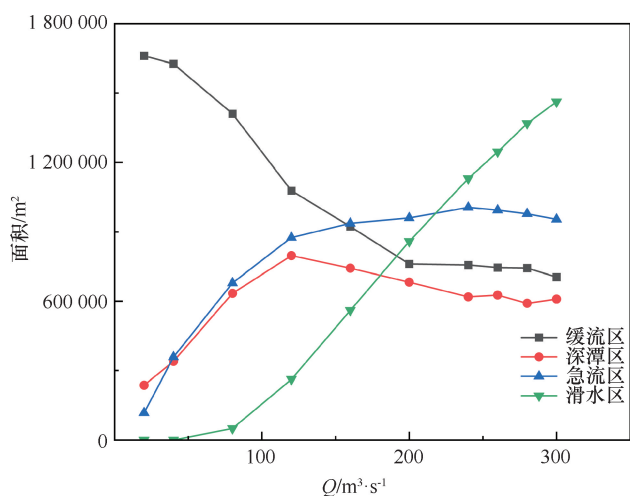


图9 不同流量下各水力单元面积变化曲线

Fig. 9 Variation curves of different hydraulic unit areas at different flow rates

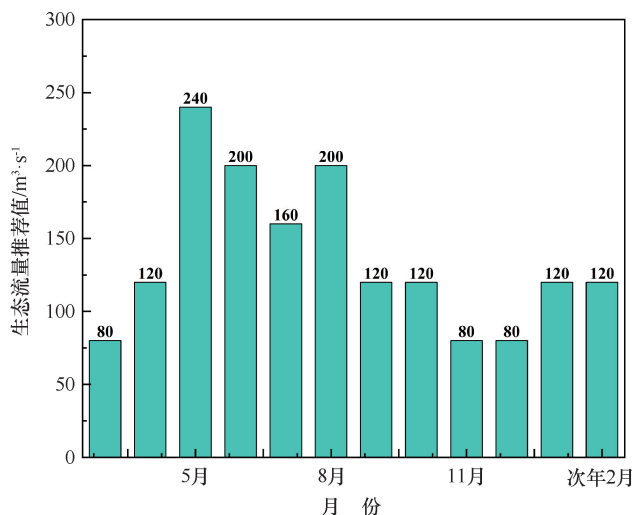


图10 生态流量过程线

Fig. 10 Ecological flow process line

(1)繁殖期(3—6月)。鲢鱼和草鱼的产卵场主要分布在急流区,而鲫鱼和鲇鱼则倾向于选择缓流区作为产卵场所。从时间尺度来看,鲢鱼的产卵期集中在5月—6月,草鱼主要在5月产卵,鲇鱼的产卵期为5月—6月,而鲫鱼的产卵期则为4—6月。在产卵期之前,鱼类会进行索饵行为,以补充能量,为即将到来的产卵提供足够的营养支持。因此,3—6月这一期间的生态需求受到两大生命活动周期(索饵和产卵)的共同影响,成为关键的生态管理时段。当流量为 $80\text{ m}^3/\text{s}$ 时,缓流区的水力单元多样性指数为1.58,缓流区面积为 $1\,410\,617.51\text{ m}^2$,急流区面积为 $678\,868.61\text{ m}^2$ 。随着流量增加至 $120\text{ m}^3/\text{s}$,水力单元多样性指数产生拐点为1.86,缓流区面积减小至 $1\,077\,614.6\text{ m}^2$,急流区面积增大至 $875\,740.51\text{ m}^2$ 。当流量为160时,急流区出现拐点,当流量进一步增加至 $200\text{ m}^3/\text{s}$ 时,水力单元多样性指数达到最大值1.98,而急流区面积也增大至 $960\,241.78\text{ m}^2$ 。在流量为 $240\text{ m}^3/\text{s}$ 时,水力单元多样性指数略微下降至1.96,急流区面积达到最大值 $1\,005\,618.79\text{ m}^2$ 。

根据不同鱼类的觅食期和产卵期的时间差异^[29-30],综合考虑各类鱼类的生态需求,建议在不同月份采用差异化的生态流量标准,以更好地满足其生长和繁殖的需要。具体而言,在3月,考虑到鱼类的活动和觅食需求,建议设定生态流量为 $80\text{ m}^3/\text{s}$;进入4月,随着鱼类繁殖活动的开始,适宜的生态流量应为 $120\text{ m}^3/\text{s}$;到5月,鱼类进入高峰产卵期,生态流量需要增加至 $240\text{ m}^3/\text{s}$,以为鱼类的产卵提供更为理想的水流条件;而在6月,考虑到鱼类的孵化及后续的繁殖需求,适宜的生态流量应维持在 $200\text{ m}^3/\text{s}$ 。

(2)索饵期(7—10月)。鲢鱼的索饵场主要分布在滑水区,而鲫鱼和鲇鱼则倾向于选择深潭区作为产卵场所,草鱼的索饵场主要分布在缓流区^[31]。从时间尺度来看,7月—8月,这几种鱼类的觅食活跃度普遍较高,特别是鲢鱼、草鱼和鲫鱼,水温适宜,食物丰富,鱼类活跃。9月水温开始逐渐下降,鱼类的觅食活跃度略有减少,特别是草鱼和鲫鱼,水草减少、温度降低影响了它们的食欲。10月随着气温进一步降低,所有鱼类的觅食活跃度逐步下降,进入冬季前的觅食期。因此,7—8月成为鱼类生长的关键时期,建议7月设定生态流量为 $160\text{ m}^3/\text{s}$,8月、9月、10月分别为 $200\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $120\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $120\text{ m}^3/\text{s}$ 。

(3)越冬期(11月—翌年2月)。四种鱼类越冬场的水力单元类型主要为深潭^[32]。深潭面积在流量 $120\text{ m}^3/\text{s}$ 时取得最大值,在 $80\text{ m}^3/\text{s}$ 取得拐点,因此根据四种鱼类生态习性,越冬期生态流量依据流量与水力单元多样性关系、深潭面积进行确定,建议11月、12月、次年1月、次年2月生态流量分别为 $80\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $80\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $120\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $120\text{ m}^3/\text{s}$ 。

3.3 生态流量过程研究的必要性

传统的栖息地模拟法主要依赖加权可利用面积(WUA)与单一目标鱼类的需求来探讨适宜生态流量^[2-27]。然而,考虑到鱼类在不同生命周期阶段的需求及水文季节性变化,生态流量应当视为一个动态变化的过程。以往的研究通常基于鱼类不同生命周期对水深和流速的适宜性,进而推算适宜的生态流量。例如,王瑞玲等^[8]基于黄河鲤鱼,建立了其繁殖期与越冬期的栖息地水深流速适宜性指数,从而推导出适宜的生态流量。这类研究可以被视为栖息地模拟法中的一个热点方向。

与传统研究相比,本文基于JOHANNES等^[33]的研究成果,提出通过营造湖滨浅水栖息地来增加目标鱼类种群(尤其是幼鱼群体)多样性,并结合水力-地貌单元反映不同水文过程的变化。在此基础上,本文根据不同鱼类生命周期的需求,制定了不同月份的适宜生态流量。这一方法具有更强的普适性,能够满足多种鱼类生命周期的生态需求。然而,值得注意的是,这种方法依赖于高精度的河流地形数据来模拟地貌变化对水文过程的影响,因此在实际应用中存在一定的局限性。

通过文献调研和实地考察,滹沱河流域的生态流量研究仍较为稀缺。冯平等^[34]采用水文学方法,基于黄壁庄水文站1956—2020年的天然径流序列数据,计算得出7月的适宜生态流量为 $54.3\text{ m}^3/\text{s}$ 。相比之

下,本文基于栖息地模拟法计算得出7月适宜的生态流量为 $160\text{ m}^3/\text{s}$ 。该生态流量值重点关注鱼类的栖息需求,相较于传统的水文学方法,具有更为深远的生态保护意义。尤其是在2021年滹沱河生态修复工程与南水北调生态补水实施后,河流的来水情况与地形发生了显著变化,因此流量值存在较大差异是合理的。

本文结合了eDNA技术对河流鱼类种群分布的调查和实测地形对水文变化过程的响应,在其他相似河流与滹沱河上游具有较强的通用性,尤其适用于具有充分鱼类种类调研和实测地形数据的其他河段。然而,水文-地貌变化所引起的空间异质性需要进行更为细致的分类。例如,于子铖等^[35]通过无人机与实地测量相结合,针对山区脱险段进行研究,提出了基于串联跌水、深潭、浅滩等10种地貌单元的分类依据。在未来的研究中,应进一步利用无人机对水力-地貌单元进行更精细化分类,并结合eDNA技术探讨精细化分类中的鱼类种群分布特征,特别是在不同生命周期阶段的种群变化。这将有助于量化不同生命周期鱼类的生态习性,进而推动生态流量研究的精细化发展。

4 结论

(1)本研究基于环境DNA宏条形码技术,开展了滹沱河灵寿段鱼类种类的多样性解析与识别工作。通过高效提取水体样本中的环境DNA,并利用宏条形码技术对其进行系统性鉴定,识别出该河段13种鱼类。进一步运用层次分析法(AHP),综合考虑各鱼类生态功能、经济价值及保护需求,排序权值前四分别为1.96、1.48、1.46和1.42,确立了鲢鱼、草鱼、鲇鱼和鲫鱼作为滹沱河灵寿段的目标物种。

(2)通过引入水力单元概念,并结合水动力模型与数理统计分析方法,当 $Q=200\text{ m}^3/\text{s}$ 时,水力多样性指数达到最大值为1.99,当 $Q=120\text{ m}^3/\text{s}$ 时,深潭面积达到最大为 $796\ 956\text{ m}^2$,当 $Q=240\text{ m}^3/\text{s}$ 时,急流区面积达到最大为 $960\ 242\text{ m}^2$ 。

(3)本研究基于4种目标鱼类的栖息需求,构建了研究区的生态流量过程线。具体而言,结合各物种的关键生境需求,确定了生态流量的时空分布特征:在产卵关键期的5月,生态流量应维持在 $240\text{ m}^3/\text{s}$,以满足鱼类繁殖需求;在越冬期的12月,生态流量应调控至 $80\text{ m}^3/\text{s}$,确保栖息地的适宜性;而在8月的索饵期,生态流量则应为 $200\text{ m}^3/\text{s}$,以促进鱼类的觅食活动。

参考文献 (References):

- [1] 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 Z R, ZHANG J, ZHAO J Y. Comments upon progress of environmental flows assessments [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(6): 670-677.
- [2] 张尚弘, 姜琪, 唐彩红, 等. 小浪底水库运行下花园口河段黄河鲤鱼生态流量研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2024, 55(4): 151-162.
ZHANG S H, JIANG Q, TANG C H, et al. Study on the ecological flow of Yellow River carp in Huayankou river reach under the regulation of Xiaolangdi Reservoir [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024, 55(4): 151-162.
- [3] 刘爽, 陈伏龙, 姜波, 等. 基于集对分析的新疆喀什地区水资源可持续利用评价[J]. 排灌机械工程学报, 2025, 43(2): 194-201.
LIU S, CHEN F L, JIANG B, et al. Evaluation of sustainable utilization of water resources in Kashgar region of Xinjiang based on set-pair analysis [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2025, 43(2): 194-201.
- [4] 王西琴, 刘昌明, 杨志峰. 生态及环境需水量研究进展与前瞻[J]. 水科学进展, 2002, 13(4): 507-514.
WANG X Q, LIU C M, YANG Z F. Research advance in ecological water demand and environmental water demand [J]. Advances in Water Science, 2002, 13(4): 507-514.
- [5] 李强, 王俏俏, 陈红丽, 等. 生态流量方法应用现状研究[J]. 生态学报, 2024, 44(1): 36-46.
LI Q, WANG Q Q, CHEN H L, et al. Progress and perspectives on ecological flow assessment methods in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(1): 36-46.
- [6] KIM Y J, WU D, LEE J H, et al. Evaluation and securing of ecological flow by linking fish growth scenarios and basin water budget analysis[J]. Ecological Indicators, 2024, 158: 111468.
- [7] QIU R J, WANG D, SINGH V P, et al. Ecological responses of spawning habitat suitability to changes in flow and thermal regimes influenced by hydropower operation [J]. Ecohydrology, 2023, 16(2): e2507.
- [8] 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.
WANG R L, HUANG J H, GE L, et al. Study of ecological flow based on the relationship between cyprinid habitat hydrological and ecological response in the lower Yellow River [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(9): 1175-1187.
- [9] YAN S, QIN T L, ZHANG X Y, et al. Assessment of fish habitats and suitable ecological flow under hydropower operation [J]. Water, 2024, 16(4): 569.
- [10] WEN X, LV Y X, LIU Z H, et al. Operation chart optimization of multi-hydropower system incorporating the long-and short-term fish habitat requirements [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 281: 125292.
- [11] 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 R, TAO J P, YANG Z, et al. A 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.
- [12] WEGSCHEIDER B, LINNANSARI T, MONK W A, et al. Linking fish assemblages to hydro-morphological units in a large regulated river [J]. Ecohydrology, 2020, 13(7): e2233.
- [13] CHEN Q W, ZHANG J Y, CHEN Y C, et al. Inducing flow velocities to manage fish reproduction in regulated rivers [J]. Engineering, 2021, 7(2): 105-122.
- [14] 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.
- [15] HAKALA J P, HARTMAN K J. Drought effect on stream morphology and brook trout (*Salvelinus fontinalis*) populations in forested headwater streams [J]. Hydrobiologia, 2004, 515(1): 203-213.
- [16] 王丽, 陈求稳, 陈凯, 等. 淮河干流基于生态流量的目标鱼类选择研究[J]. 环境科学学报, 2017, 37(6): 2379-2386.
WANG L, CHEN Q W, CHEN K, et al. Establishment of target fishes for ecological flow in the main stream of Huaihe River [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37(6): 2379-2386.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 张晶, 于子铖, 董哲仁, 等. 河流地貌单元研究综述[J]. 水生态学杂志, 2021, 42(5): 10-18.
ZHANG J, YU Z C, DONG Z R, et al. Review of research on river geomorphological units [J]. Journal of Hydroecology, 2021, 42(5): 10-18.
- [20] 李涛, 张春泽, 周勤, 等. 从水动力学角度分析深潭对产漂流性卵鱼类繁衍的生态学意义[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2022, 44(5): 32-37.
LI T, ZHANG C Z, ZHOU Q, et al. Analysis of ecological significance of pool-riffle on the reproduction of drifting egg fish from the perspective of hydrodynamics [J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2022, 44(5): 32-37.
- [21] 刘稳, 诸葛亦斯, 欧阳丽, 等. 水动力学条件对鱼类生长影响的试验研究[J]. 水科学进展, 2009, 20(6): 812-817.
LIU W, ZHUGE Y S, OUYANG L, et al. Experimental study of the effect of hydrodynamic conditions on fish growth [J]. Advances in Water Science, 2009, 20(6): 812-817.
- [22] 于子铖, 张晶, 赵进勇, 等. 考虑关键物种全生命周期的减脱水河段生态流量研究[J]. 水资源保护, 2022, 38(6): 175-184.
YU Z C, ZHANG J, ZHAO J Y, et al. Study on ecological flow of dewatered river sections considering whole life cycle of key species

- [J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(6): 175-184.
- [23] PADMORE C L. *Physical biotopes in Representative River Channels: Identification, Hydraulic Characterization and Application* [D]. Newcastle: Newcastle University, 1997.
- [24] 张丽亭, 逢勇, 汪静娴, 等. 基于鱼类生境所需水文-水力特征的生态流量计算方法[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2025, 56(1): 100-112.
ZHANG L T, PANG Y, WANG J X, et al. A method for determining the basic ecological flow of riverways through comprehensive hydrology, water conservancy, and habitat simulation analysis[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2025, 56(1): 100-112.
- [25] 李敏讷, 王妍, 王新源, 等. 鱼类行为生态水力学模型研究现状与发展趋势[J]. *湖泊科学*, 2024, 36(5): 1323-1335.
LI M, WANG Y, WANG X Y, et al. Research status and trends of models integrating fish behavior and eco-hydraulic dynamics[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2024, 36(5): 1323-1335.
- [26] WANG L, CHEN Q W, ZHANG J Y, et al. Incorporating fish habitat requirements of the complete life cycle into ecological flow regime estimation of rivers[J]. *Ecohydrology*, 2020, 13(4): e2204.
- [27] 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 M Y, WANG L Q, CHU L L, 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.
- [28] 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 L, HOU J M, WANG P, 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.
- [29] 党莉, 马超, 练继建. 水库调节对下游鱼类栖息地适宜性的影响[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2018, 51(6): 566-574.
DANG L, MA C, LIAN J J. Effects of reservoir regulation on downstream fish habitat suitability[J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2018, 51(6): 566-574.
- [30] 董哲仁, 孙东亚, 赵进勇, 等. 河流生态系统结构功能整体性概念模型[J]. *水科学进展*, 2010, 21(4): 550-559.
DONG Z R, SUN D Y, ZHAO J Y, et al. Holistic conceptual model for the structure and function of river ecosystems[J]. *Advances in Water Science*, 2010, 21(4): 550-559.
- [31] 陈小娜, 朱红生, 假冬冬, 等. 典型城市河道生态修复需水阈值计算方法研究[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2025, 56(3): 76-86.
CHEN X N, ZHU H S, JIA D D, et al. Study on the calculation method of water demand threshold for ecological restoration of typical urban rivers[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2025, 56(3): 76-86.
- [32] QI X X, LIN Z W, GAO H M, et al. Small hydropower plants affect aquatic community diversity: A longitudinal study under ecological flow[J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 370: 122987.
- [33] RADINGER J, MATERN S, KLEFOTH T, et al. Ecosystem-based management outperforms species-focused stocking for enhancing fish populations[J]. *Science*, 2023, 379(6635): 946-951.
- [34] 冯平, 白粟, 张婷, 等. 径流变异对滹沱河流域水库生态调度的影响[J]. *水资源保护*, 2023, 39(5): 99-108.
FENG P, BAI S, ZHANG T, et al. Impacts of runoff change on ecological operation of reservoirs in the Hutuo River Basin[J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(5): 99-108.
- [35] 于子铖, 张晶, 赵进勇, 等. 小水电梯级开发河段地貌单元识别与异质性分析[J]. *水利学报*, 2022, 53(5): 574-585.
YU Z C, ZHANG J, ZHAO J Y, et al. Identification of geomorphic unit and analysis of heterogeneity in small hydropower terrace development river sections[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2022, 53(5): 574-585.

(责任编辑 王璐)