

# 人工塑造生境条件下中华倒刺鲃的栖息偏好研究

刘瀚<sup>1</sup>, 林俊强<sup>1</sup>, 王先政<sup>2</sup>, 班学君<sup>1,3</sup>, 王东胜<sup>4</sup>, 张迪<sup>1</sup>, 彭期冬<sup>1</sup>, 靳甜甜<sup>1</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038;

2. 四川圣达水电开发有限公司, 四川 乐山 614000;

3. 河海大学农业与工程学院, 江苏 南京 211100;

4. 水电水利规划设计总院, 北京 100120)

**摘要:** 为了促进受水电工程影响河段鱼类资源的恢复, 选择中华倒刺鲃(*Spinibarbus sinensis*), 依托大型生态试验场, 人工塑造多种近自然微地形生境, 营造适宜鱼类栖息的水文水动力环境, 研究其栖息行为偏好特性。设置0.3、0.6、1.0、1.5、2.0、3.0 m<sup>3</sup>/s共6种流量工况, 分别进行多地形组合、沙洲地形局部偏好、深潭浅滩地形局部偏好鱼类栖息生境选择试验。采用PIT射频识别系统实时监测鱼类栖息行为, 选取流速、涡量、湍流动能和床体切应力4个水动力指标, 计算对应流场条件下的中华倒刺鲃栖息适宜度, 并基于随机森林和CART算法筛选影响中华倒刺鲃栖息选择的主要水动力指标, 探究其栖息行为的水动力选择机制。结果表明, 深潭浅滩及沙洲河段的进出口是中华倒刺鲃喜好栖息场所, 涡量和流速是影响其栖息的主要水动力指标。流速高于0.545 m/s、低于2.3 m/s, 涡量高于0.72/m、低于15.7/m时的流场条件, 为试验工况下中华倒刺鲃的最适宜栖息环境。研究结果为鱼类栖息地生态修复及生态调度提供了理论依据和技术支撑。

**关键词:** 中华倒刺鲃; 微地形; 水文水动力; 鱼类行为; 流速; 涡量

**中图分类号:** Q142 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3075(2024)01-0134-09

河流是全球水能循环的重要组成部分(Wang et al, 2019), 水电工程建设很大程度改变了河流生态系统, 淹没了众多淡水物种的栖息地(Barbarossa et al, 2020)。河流生态修复技术是改善生境和生物多样性的有效措施(Li et al, 2022); 综合考虑水电工程影响下鱼类洄游变化、地貌变化和人文情势变化等因素间的响应关系, 是当下河流鱼类栖息地修复工作的重点(Hecht et al, 2019)。

河流的物理结构、水动力条件与鱼类栖息生境、群落结构的多样性息息相关。在复杂河流地形与水文条件形成的非均匀流动条件中, 鱼类行为存在可变性。因此, 众多学者开展了对不同河道结构的流速、涡量、湍流动能、剪切应力等水动力条件研究。如在不同底质的生境结构下布设不同的半球结构研究湍流流态和床层剪切应力变化(Shamloo et al,

2001); 构造不同缺口尺寸鱼道对池堰鱼道的三维平均流量和湍流结构进行研究(Yagci, 2010)。基于此, 结合复杂地形水力条件与鱼类行为规律的研究也在广泛展开(齐亮等, 2012)。Silva等(2011)构建了室内全尺寸池室鱼道, 发现雷诺剪切应力与鱼类迁移时间相关性最高; Zha等(2021)在室内水槽添加圆柱结构, 发现圆柱涡结构对鲟的游泳姿态稳定性具有重要意义, 卡门步态受速度、涡量和剪应力的显著影响; Maeda等(2018)定量分析了鱼巢、深潭及对照河段的湍流动能、剪切应力与鱼类行为能量消耗的相关关系, 发现鱼巢与深潭环境更适宜鱼类栖息。

河道形态、水力指标与鱼类种群生境利用的定量关系是当下鱼类栖息地修复工作的前提基础和热点。然而, 以上研究多在室内水槽尺度及小尺度场地中进行, 难以直接应用于工程实际。为进一步探究近自然流场条件下鱼类的栖息偏好, 明晰不同地形与水流条件下鱼类的栖息选择机制, 本研究选择安谷大型生态试验场, 应用仿自然河道人为营造典型微地形, 建立中试尺度的人工生境条件, 采用PIT射频识别系统监测鱼类栖息行为, 结合不同流量下的河道水动力指标, 探究中华倒刺鲃(*Spinibarbus sinensis*)在多种微地形与复杂水动力条件下的栖息选择机制, 以为河道鱼类栖息地修复工程的规划、设计与应用提供参考。

收稿日期: 2023-10-27

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFC3200304); 国家自然科学基金联合基金(U2240214)。

作者简介: 刘瀚, 1995年生, 男, 博士研究生, 研究方向为水生态修复。E-mail: 134175299@163.com

通信作者: 林俊强, 1984年生, 男, 正高级工程师, 主要从事生态水力学研究。E-mail: junquang-lin@hotmail.com

## 1 材料和方法

### 1.1 试验场地

安谷水电站是大渡河干流梯级开发的最后一级,坝址位于四川省乐山市市中区安谷镇,该区域位于大渡河、青衣江、岷江的三江交汇口,鱼类资源丰富。安谷生态试验场位于安谷水电站业主营地,研究基于沿岛屿地形地势规划的蜿蜒型仿自然河道,采用进水闸、出水闸直接引入大渡河河水,用于开展相关生态水力学研究。

### 1.2 试验区构建

为削弱上下游进出水闸的异常流态影响,研究选择蜿蜒型河流中部约140 m河段作为试验河道。根据遥感影像和实际勘察,安谷河网地区河道形态多样、沙洲众多、深潭浅滩密布,因此在试验区直线河段和弯曲河段的基础上,人工塑造深潭浅滩及沙

洲微地形,形成4种试验河道类型。在深潭浅滩河道中构建2组不同尺寸的深潭、浅滩地貌(深潭1:低于河床0.3 m,浅滩1:高于河床0.5 m;深潭2:低于河床0.4 m,浅滩2:高于河床0.7 m);在沙洲河段构建2组不同大小的沙洲(沙洲1:底长2.4 m,底宽0.9 m,高1.3 m;沙洲2:底长4.0 m,底宽1.5 m,高1.5 m)。其中,沙洲塑造尺寸均参考实际江心洲平面形态参数分布,深潭浅滩塑造参考自然河流深潭浅滩形态的振幅波长比范围(Buffington & Montgomery,1999),设置河床振幅(深潭浅滩高低落差)分别为0.8 m和1.1 m。在河道中布设无线射频系统(RFID)监测试验区鱼类行为,考虑到短距离内设备间的信号干扰及有限的设备数量,将试验区分为3组,分别为多地形组合监测试验区、深潭浅滩河段精细化监测试验区及沙洲河段精细化监测试验区(图1)。

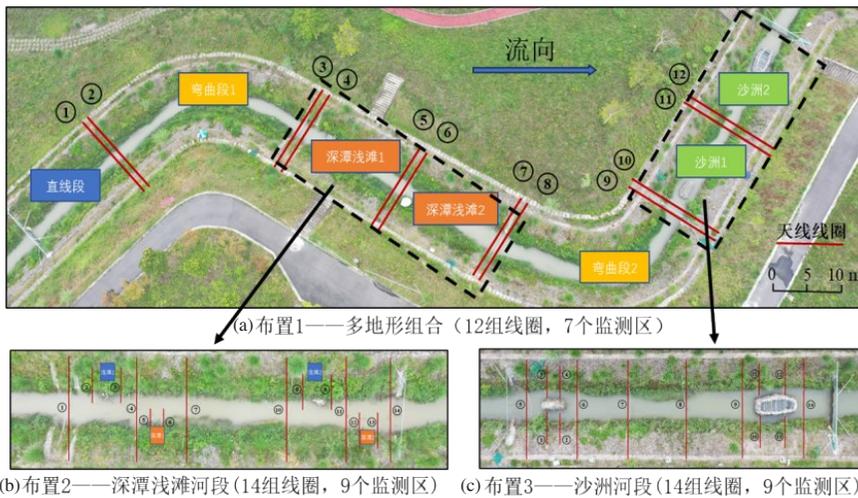


图1 试验区布置

Fig.1 Schematic diagram of the test area

### 1.3 试验鱼

1.3.1 品种选择 根据安谷地区的主要经济与保护鱼类、安谷水电站鱼道的过鱼对象以及试验场周边河道的鱼类资源调查结果,选取代表性鱼类中华倒刺鲃作为试验对象。中华倒刺鲃属于鲤形目、鲤科、倒刺鲃属,为河道型底层鱼,喜栖息于底质为砾石的山地河流当中,在自然条件下喜栖息于水清流急的溪流或江段。从试验场增殖站及周边养殖场选取活力良好、规格相近的3~4龄鱼30尾,于2022年8月7日至9月15日开展试验。试验鱼的形态参数见表1。

1.3.2 暂养 将收集来的30尾中华倒刺鲃试验鱼暂养于距试验河道100 m的安谷水电站鱼类增殖站圆形敞开水池,暂养用水为大渡河河水,水温为(12±1)℃,

整个试验期间保持充氧,保持溶氧量大于6 mg/L。试验鱼标记手术后,持续暂养并观察2周,均保持活跃状态。

表1 中华倒刺鲃的形态参数

Tab.1 Morphological parameters of *Spinibarbus sinensis*

全长/mm		体长/mm		体重/g	
范围	均值	范围	均值	范围	均值
360.0~400.0	382.0	290.0~335.0	312.4	600.0~800.0	667.8

1.3.3 标记 基于无源集成应答器(PIT)技术的射频识别系统是当下复杂河流环境中有效鱼类行为监测手段。使用MS-222麻醉剂让试验鱼短暂迷晕后,将PIT标签(2.12 mm×12 mm, 0.1 g, 134.2 kHz)植入到鱼

的背部肌肉中,随后将注射完成的试验鱼放回没有麻醉药的清水中,待其 1~2 min 醒来并恢复正常游泳行为。试验鱼继续暂养 2 周,其背部肌肉伤口基本愈合,无死亡个体。

当携带 PIT 标签的鱼进入与收发器连接天线的磁场范围时,每个 PIT 标签的唯一识别码及当下时间将被识别并记录。当携带 PIT 标记的试验鱼短时间内反复穿过监测天线范围时,终端仅记录其第 1 次经过该线圈的信息;当试验鱼离开磁场范围超过 20 s 后再次游经该天线范围时,PIT 标签信息将再次被记录。

#### 1.4 鱼类行为监测

试验前将 30 尾试验鱼全部放入试验河段并持续 7 d,以提前适应环境。期间保持河道 0.1~0.3 m<sup>3</sup>/s 的低流量环境,使试验鱼逐渐恢复其天然情况下的游泳能力。经过充分适应后,通过调整进水闸门开度、改变河道流量,分别进行 3 组鱼类栖息生境选择试验。流量工况的上下限设计参考安谷河网地区自然泄放生态流量,各地形的流速为 0.2~2.8 m/s;据此,3 组试验均设置 6 种流量工况,即 0.3、0.6、1.0、1.5、2.0、3.0 m<sup>3</sup>/s。

**1.4.1 多地形组合试验** 每种工况持续 9 h。通过各断面线圈获取的标记信号频次及时间,得出试验鱼在直线河段、2 组弯曲河段、2 组深潭浅滩河段及 2 组沙洲不同流量工况下的栖息偏好。

**1.4.2 沙洲地形局部偏好试验** 每种工况持续 3 h,监测试验鱼在直线河段、2 组沙洲进口河段、2 组沙洲出口河段以及 4 组分汊河段不同流量工况下的栖息偏好。

**1.4.3 深潭浅滩地形局部偏好试验** 每种工况持续 3 h,监测试验鱼在直线河段、2 组深潭区域、2 组浅滩区域以及 4 组其他区域的栖息偏好。

#### 1.5 分析方法

**1.5.1 PIT 数据** PIT 信号统计可以表征鱼类游经某区域的时间点并推算鱼类在各监测区域的栖息时间。栖息时间统计采用自定义的鱼类栖息时间计算规则,基于接收相邻 2 个信号的线圈序号确定鱼类栖息区域,并根据 2 个信号的接收时间差得出试验鱼在该区域的栖息时间。具体规则如图 2(以多地形组合试验首先获得 1 号线圈信号为例),通过不断累加栖息时间,即可得出试验鱼在各区域的栖息总时间。由于试验过程中存在线圈被水流冲刷变形导致精度降低,试验鱼的游泳行为脱离磁场范围及其长期不移动不产生初始信号等原因,导致 PIT 信号接收存在一定遗漏,影响上述频次及栖息时间的统计。在计算过程中,舍弃信息遗漏造成的不准确过程,仅保留准确行为过程。

**1.5.2 流场数据监测与模拟** 基于实际测量与数值模拟相结合的方式,获得各流量工况下不同试验区的水动力条件(图 3)。现场实测采用华测 i70II 惯导版口袋 RTK 进行试验区河段地形定位与高程测量,采用声学多普勒测速仪(ADV)进行试验区表层三维流速数据测量;数值模拟采用 Fluent (Ansys 2021R1) 进行流场仿真,结合校准得出 6 个流量工况下各区域流场条件。3 个实测流速断面分别布置于直线河段与弯曲河段的交界面、浅滩进口处以及沙洲出口处,测量 0.3、0.6、1.0、1.5 m<sup>3</sup>/s 实际工况,其余 2 个工况由于测量难度过大未测量。3 个监测断面表层 16 个测点的实测值及模拟值的误差率为 90.96%,误差主要来自于实际河道岸边的植被。

**1.5.3 栖息适宜度** 由于射频设备数量的限制,在详细监测深潭浅滩及沙洲断面的同时,无法监测鱼类

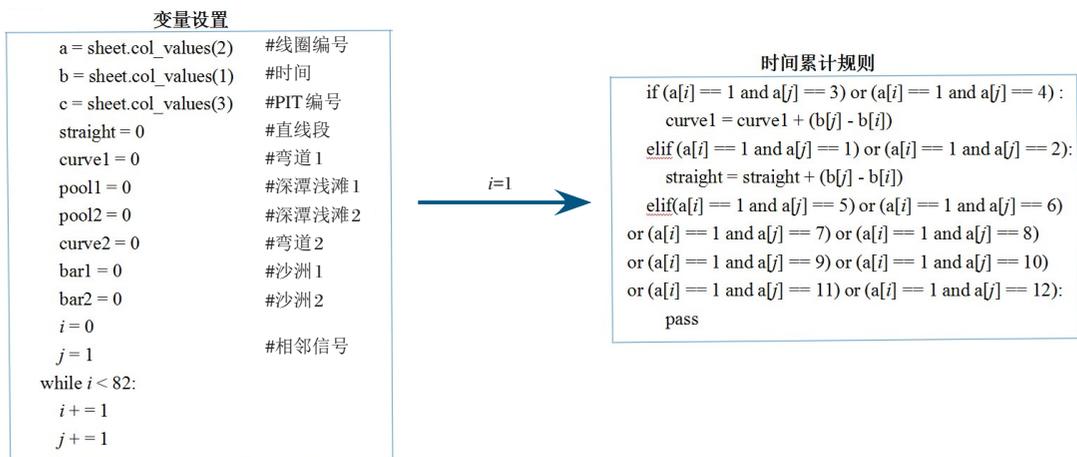


图 2 鱼类栖息位置判断规则

Fig.2 Judgement rules for fish habitat location

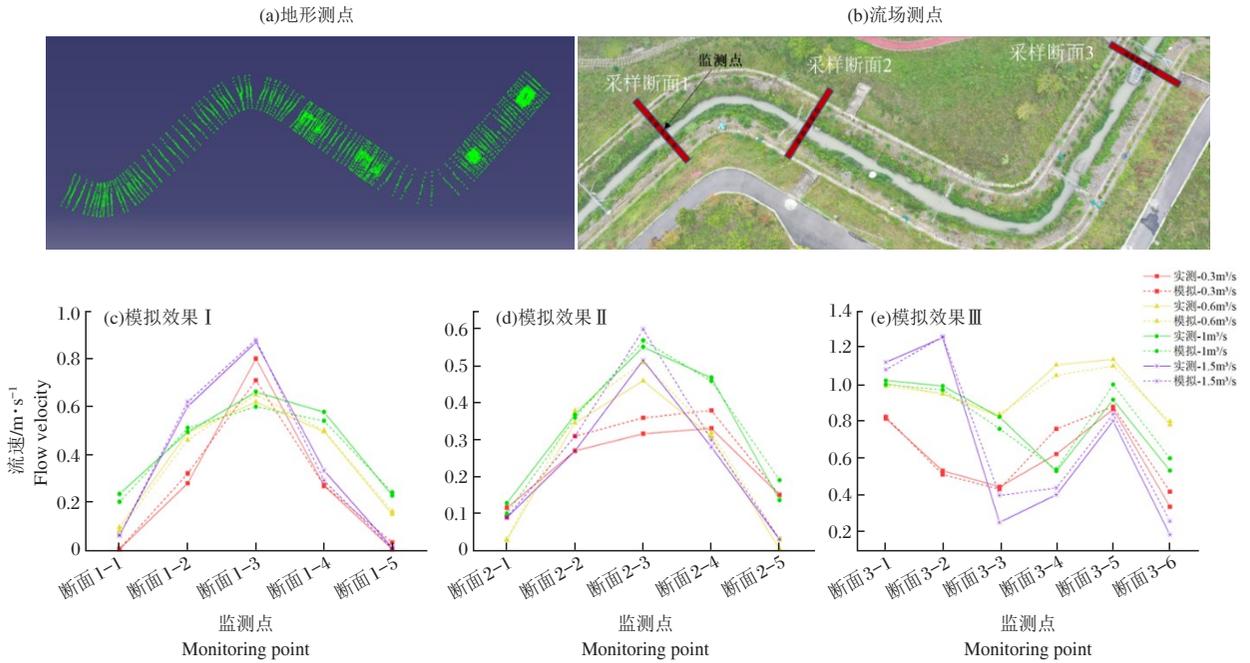


图3 地形流场测量及流场模拟

Fig.3 Terrain and flow field measurement and flow field simulation

在其他地形的栖息时间。因此,根据多地形组合试验9h的时长监测结果,得出了各流场条件下鱼类在直线段(1个区域)和2组弯曲段(2个区域)与深潭浅滩段、沙洲段的栖息时间比,并估算了6种流场条件下21个区域的试验鱼栖息时间分布,即试验鱼在不同流场条件下共计126种流场的栖息时间分布。为获得在不同水流条件下的栖息地适宜性,首先计算试验鱼在不同区域停留的时间占总时间的比例,而后将该比例乘以相应区域面积的倒数,得出试验鱼对该特定区域的偏好指数。最后,对这些指数进行归一化处理,即可得出流场的生境适宜度。计算公式如下:

$$S = \frac{t_{ij}}{\left( \sum_{m=1}^9 t_{i,m} + \sum_{n=1}^9 t_{i,n} + t_{i,s} + t_{i,b1} + t_{i,b2} \right)} \times \frac{1}{A_k} \quad (1)$$

$$i = \{1, 2, \dots, 6\}, j = \{1, 2, \dots, 21\} \quad (1)$$

$$SI = \frac{S - \min(S)}{\max(S) - \min(S)} \quad (2)$$

式中: $S$ 为鱼类区域偏好指数, $i$ 为6种流量工况, $j$ 为21个不同的区域, $t_{i,m}$ 为在深潭浅滩河段9个区域中试验鱼的平均栖息时间, $t_{i,n}$ 为在沙洲河段9个区域中试验鱼的平均栖息时间, $t_{i,s}$ 为在直线河段试验鱼的平均栖息时间, $t_{i,b1}$ 和 $t_{i,b2}$ 为在2个弯曲河段试验鱼的平均栖息时间, $A_k$ 为21个区域的面积, $SI$ 为鱼类栖息的适宜度。

1.5.4 栖息选择算法 随机森林法依赖于决策树的投票选择并决定最后的分类结果。模型从原始数据集中随机抽取样本(有放回的抽样)构建决策树;训练完成后,每个特征均会有一个与之相关的重要性得分,基于平均得分的大小即可得出指标重要性排序。

为进一步体现指标选择过程,鱼类的栖息选择机制采用分类回归树算法(CART);该算法采用二分递归分割技术,将基尼系数(gini)作为特征划分的度量,这样不仅可以处理二分属性,也可用来处理连续属性;当特征指标数据间存在自相关关系时,依旧可识别和预测多变量数据间的复杂层次关系。在基于CART构建决策模型的过程中,为降低模型复杂性并消除模型的过泛问题,分别对模型进行预剪枝及后剪枝以降低模型交叉验证误差。预剪枝主要选用max\_depth、min\_sample\_split、min\_samples\_leaf共3个参数,具体设置为限制最大层深7,最小样本枝干4,最小样本叶子节点2。后剪枝在模型数构建完成后,采用代价复杂度剪枝法(Cost-Complexity Pruning, CCP),使以下损失函数最小化。

## 2 结果与分析

### 2.1 鱼类行为监测

2.1.1 多地形组合 在多地形组合试验中,读取分析每条携带标记试验鱼在各河段的停留时间。6个流量工况(0.3~3.0 m<sup>3</sup>/s)下,分别接收到21、23、22、

21、23、22尾试验鱼的信号,存在少数不活跃试验鱼、逃逸或死亡现象,但总数保持稳定(图4)。监测结果(表2)表明,绝大部分中华倒刺鲃均表现出对深潭浅滩地形和沙洲地形的偏好;随着流量的增长,对沙洲区域的栖息偏好呈增加趋势,在高流量工况下(2.0、3.0 m<sup>3</sup>/s),60%以上的中华倒刺鲃均长时间栖息于沙洲河段,2.0 m<sup>3</sup>/s 流量工况下的沙洲1河段出现了中华倒刺鲃的最长时间集聚。表明微地形对试验鱼存在一定的吸引作用,吸引程度随流量的变化而改变。

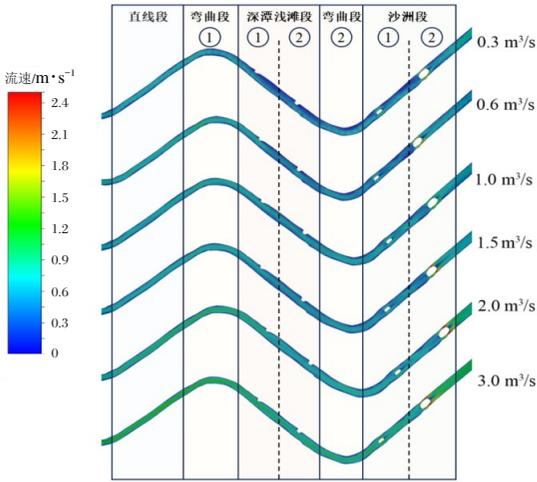


图 4 不同流量工况下的河道流场分布

Fig.4 Monitoring results of river flow field under different flow conditions

表 2 不同流量工况下的试验鱼栖息偏好监测结果  
Tab.2 Monitoring results of fish habitat preference under different flow conditions

流量/ m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup>	河段分布占比/%						
	直线 段	弯曲 段1	深潭 浅滩1	深潭 浅滩2	弯曲 段2	沙洲 段1	沙洲 段2
0.3	0.29	12.02	11.44	26.92	8.36	31.38	9.59
0.6	0.11	1.48	12.18	47.13	11.38	26.16	1.57
1.0	0.97	6.16	7.03	28.74	9.77	46.63	0.69
1.5	0.26	4.51	4.24	55.43	18.86	16.55	0.16
2.0	0.13	2.52	4.60	16.93	9.81	64.98	1.03
3.0	0.30	2.62	7.04	14.28	20.60	43.63	11.53

2.1.2 局部地形偏好

(1)深潭浅滩河段。在各流量条件下,多数中华倒刺鲃在深潭浅滩河段均存在栖息行为。A1、A6、A9是其主要栖息河段,尤以低流量工况(0.3、0.6 m<sup>3</sup>/s)下的 A9 河段是中华倒刺鲃最偏好的栖息环境(图5-a,b)。

(2)沙洲河段。B1、B5、B9为中华倒刺鲃主要栖息区域,均为沙洲进出口区域(其中B5由于划分面积大,不存在较高的参考意义)。中华倒刺鲃在流量达到1.5 m<sup>3</sup>/s及以上时,在沙洲河段表现出聚集行为,并随着流量的增大,聚集位置从2组沙洲河段间的连接河段逐渐向下游转移。当流量为3.0 m<sup>3</sup>/s时,超过50%的试验鱼长时间栖息于下游沙洲出口处(图5-c,d)。

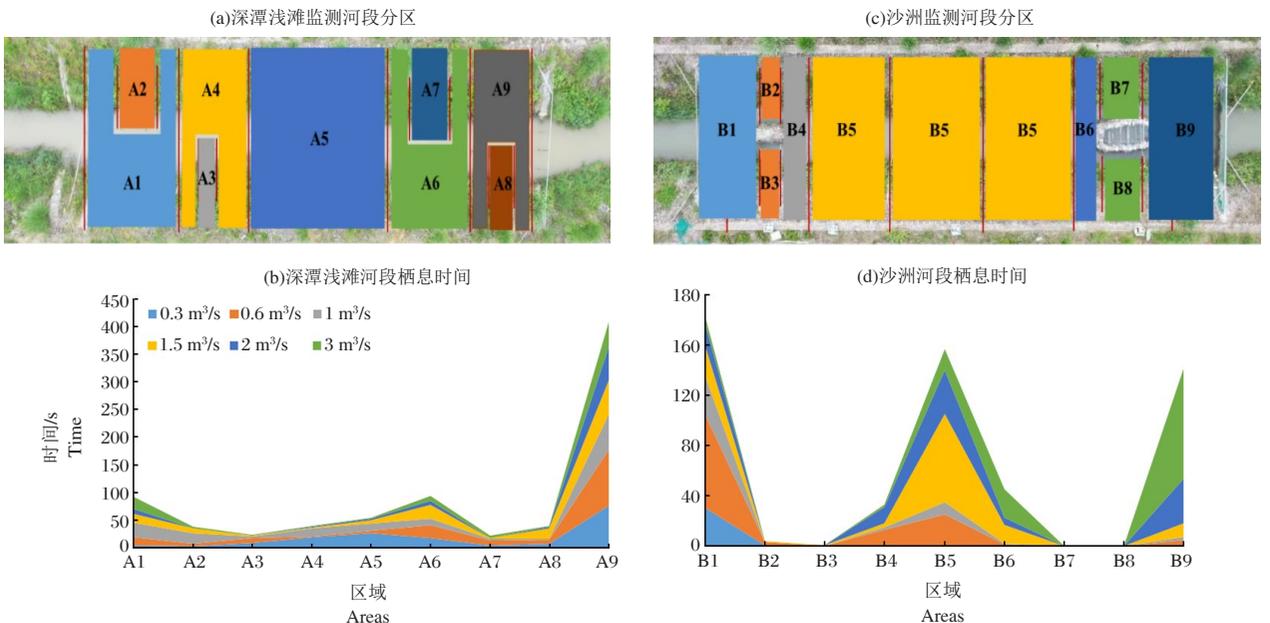


图 5 监测区分布及各流量工况下的平均栖息时间累计分布

Fig.5 Monitoring area distribution and cumulative distribution of mean habitation time under each flow condition

### 2.2 鱼类栖息适宜度

根据鱼类在各区域的栖息时间及各区域面积大小,采用公式①计算得出鱼类在126种流场下的栖息适宜度。在监测时段内的140 m河段中,栖息时间平均占比为100%,约0.7%/m,将低于栖息时间平均占比50%的流场环境(0.35%/m)划分为低适宜(栖息适宜度0.03);高于栖息时间平均占比1倍的流场环境(1.4%/m)划分为高适宜(栖息适宜度为0.15);其间为中适宜(高于0.35%/m、小于1.4%/m,栖息适宜度为0.03~0.15),以此确定中华倒刺鲃栖息地3类适宜度。以此为基准,在考虑鱼类栖息行为的同时,保证3类样本数量的均衡,避免样本权重失衡,提高模型计算准确性。分析不同流场工况下栖息适宜度与流场最大流速(水体流动速度)、涡量(断面漩涡强度)、河床切应力(床体摩擦消耗)和湍流动能(水体紊动

程度)4个水动力指标的对应分布,结果见图6。中华倒刺鲃的高适宜栖息流场水动力指标分别为0.35~2.3 m/s、0.72~14.5/m、2.7~77.7 Pa、0.016~0.41 m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>。高适宜区均出现在深潭浅滩及沙洲河段,但难以采用单一水动力指标作为评价阈值判断鱼类栖息适宜区域。因此,拟采用多指标综合判别的方式,探究中华倒刺鲃的栖息行为选择机制。

### 2.3 鱼类栖息选择机制

分别基于随机森林及CART算法,构建中华倒刺鲃的栖息适宜度与流速、涡量、壁面切应力和湍流动能的决策关系。模型数据集为试验鱼在21个监测区6种流量条件下的栖息适宜度及对应4个水动力指标,共计126组数据。输入4个水动力因子特征值,输出的栖息适宜度划分为高、中、低适宜3类,以此构建适宜选择决策树(图7)。

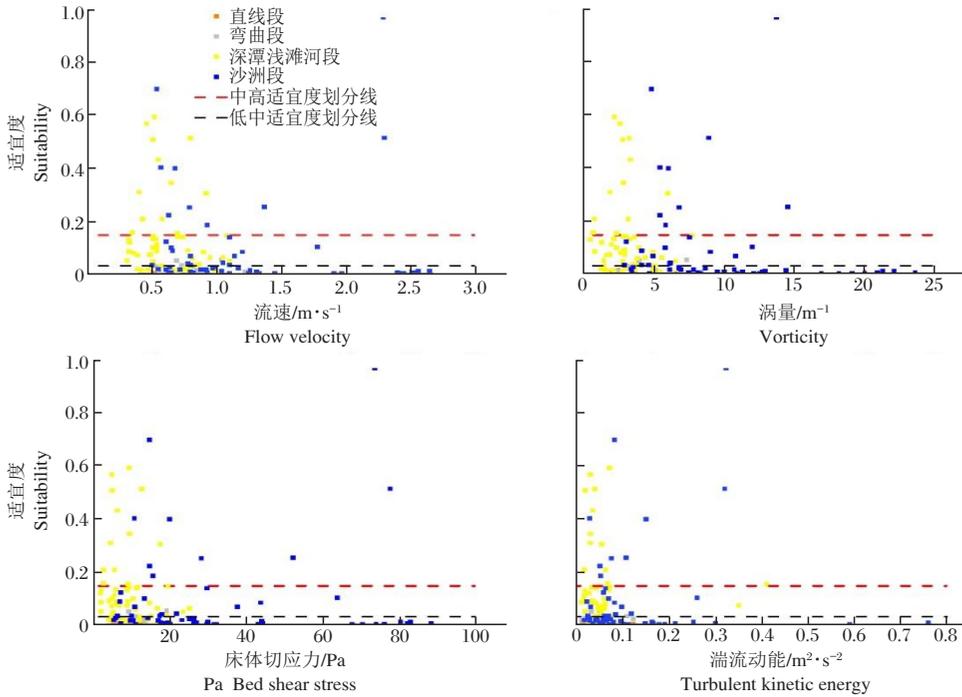


图6 鱼类栖息适宜度与流场水动力指标的分布关系

Fig.6 Distribution of fish habitat suitability in relation to hydrodynamic indicators of flow field

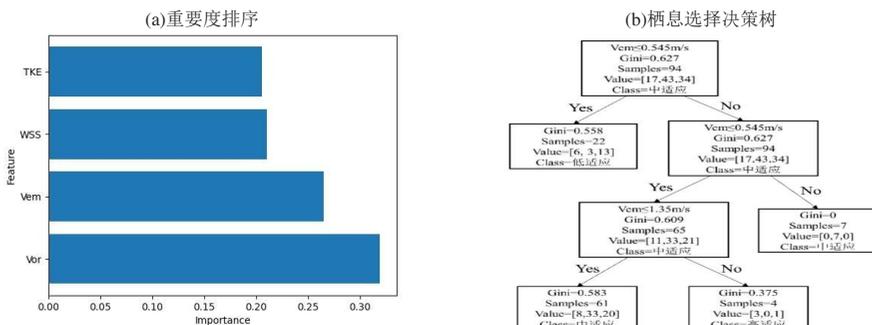


图7 鱼类水动力选择决策树

Fig.7 Hydrodynamic selection decision tree of fish habitation

随机森林法生成的重要性排序表明,影响中华倒刺鲃栖息适宜度的水动力指标重要性排序为涡量(Vor)、流速(Vem)、河床切应力(WSS)和湍流动能(TKE)。根据前剪枝和后剪枝训练生成的试验鱼栖息选择决策表明,采用流速及涡量作为判断指标即可得出较好的中华倒刺鲃栖息适宜性分类预测效果。分类决策树的机制解释如表3所示,其判断结果表明,中华倒刺鲃的高适宜栖息环境多出现在高流速( $>1.35$  m/s)流场中,涡量过大( $\geq 15.7$  m<sup>2</sup>/s)也会导致适宜性的降低。流场流速过低( $\leq 0.545$  m/s)也不适宜试验鱼栖息。

表3 鱼类栖息适宜性选择机制

Tab.3 Selection mechanisms for fish habitat suitability

序号	选择机制	适宜度	准确率/%
1	流速 $>1.35$ m/s, 涡量 $\leq 15.7$ m <sup>2</sup> /s	高	75.0
2	流速 $>0.545$ m/s, 涡量 $>15.7$ m <sup>2</sup> /s	中	100
3	$0.545$ m/s $<$ 流速 $\leq 1.35$ m/s, 涡量 $\leq 15.7$ m <sup>2</sup> /s	中	54.1
4	流速 $\leq 0.545$ m/s	低	68.4

### 3 讨论

#### 3.1 中华倒刺鲃栖息的空间分布特性

在过往有关长江鱼类生境特性的研究中,发现其分布位置多位于回水沱河段、分汊河段及深潭河段,主要原因在于特殊地形形成的漩涡水流结构为鱼类提供了多样的栖息环境,促进了上下水层浮游动物的交换(徐观兵,2022);同时,环境本身也为鱼类提供了良好的避险场所(刘一漩,2021)。因此,通过丁坝、潜坝、圆木等组合布置的方式构建深潭浅滩、江心洲,是人工营造鱼类适宜栖息空间广为应用的方法(王首鹏,2019)。本研究表明,中华倒刺鲃多分布在深潭浅滩及沙洲河段,低流量条件下偏好于深潭浅滩河段,高流量条件下更偏好于沙洲河段。在仿自然环境的深潭浅滩河段试验中,高差较大的深潭及浅滩区域更吸引鱼类栖息;在沙洲河段,沙洲的进口段和出口段更吸引中华倒刺鲃。复杂地形对鱼类栖息更具备吸引力这一研究结果与前人研究结果类似,不同流量条件及不同地形高差的影响仍需进一步验证。

#### 3.2 水动力条件对中华倒刺鲃栖息的影响

中华倒刺鲃的栖息行为水动力选择机制表明,其对深潭浅滩和沙洲河段存在显著的栖息偏好,涡量和流速是影响其栖息偏好的重要水动力指标。流

速高于 $1.35$  m/s、低于 $2.3$  m/s,涡量高于 $0.72$  m<sup>2</sup>/s、低于 $15.7$  m<sup>2</sup>/s时,为高适宜栖息地;流速低于 $0.545$  m/s,为低适宜栖息地;流速和涡量均较大时(流速大于 $0.545$  m/s、涡量大于 $15.7$  m<sup>2</sup>/s),为中适宜栖息地。由此可以发现,中华倒刺鲃偏好栖息于存在一定流速及涡量的区域,流速高于 $0.545$  m/s、低于 $2.3$  m/s,涡量高于 $0.72$  m<sup>2</sup>/s、低于 $15.7$  m<sup>2</sup>/s时,存在较大概率出现中华倒刺鲃的适宜栖息地。涡量对中华倒刺鲃栖息影响的研究尚缺,已有的研究探讨了栖息于不同生境中鱼类的游泳能力和偏好游泳速度及其生理机制,对比了5种淡水鱼类的游泳能力,发现中华倒刺鲃心鳃系统的供氧能力较高,导致其游泳能力高于其他鱼类(付翔等,2020);水流速度达到中华倒刺鲃体长的2.0倍/s可以抑制其肌细胞凋亡,增强其运动能力(于丽娟等,2014);同时,流速还是中华倒刺鲃胚胎发育的重要影响因子,较高流速( $>0.6$  m/s)的河道会提高胚胎发育率,降低畸形率,是适宜中华倒刺鲃的产卵场所(李西雷等,2017)。

#### 3.3 基于鱼类需求的河流结构修复与生态调度

鱼类栖息地修复是当下河流生态修复工作中的重点,世界各地均已开展建设类型众多的生态水利工程,如河床内修建人工堰坝(V型、W型)。相关的水力条件在试验室尺度均已进行了研究,但试验室条件受流量条件、底质条件、光照条件、鱼类活动范围等的限制,难以直接应用于实际的工程建设中;同时,现有的大多数河流生态修复效果尚不明确,如何明晰工程修复效果差异的内在机理,如何改造现有河流结构修复工程,使其达到设计应有的吸引鱼类栖息的效果,是当下河流修复工作中的重点。本研究选择近自然河道,量化了中小尺度河流生态修复工程的水动力需求与鱼类栖息偏好程度的关系,为河流结构修复工程效果的改善提供了理论依据和技术支撑。在今后的研究中,可通过对河网地区鱼类主要栖息地的水动力模拟结果,依据不同流量、不同地貌单元的水动力特性及鱼类不同生命周期的栖息行为选择机制,调整合适的生态调度方案。

### 4 结论

(1)复杂地形对中华倒刺鲃的栖息存在吸引作用,深潭浅滩及沙洲河段的进出口是中华倒刺鲃的偏好栖息场所。

(2)涡量和流速是影响中华倒刺鲃栖息的主要水动力指标,流速高于 $0.545$  m/s、低于 $2.3$  m/s,涡量高于 $0.72$  m<sup>2</sup>/s、低于 $15.7$  m<sup>2</sup>/s,吸引中华倒刺鲃栖息的概率较大。

(3)流量调节可以引发河道诸多水动力指标的变化,通过制定适宜的生态调度方案,营造鱼类在不同地形下的偏好栖息流场环境,可以改变鱼类栖息生境,恢复鱼类群落结构。

#### 参考文献

- 付翔,付成,付世建,2020. 五种淡水鱼类幼鱼游泳能力的比较[J]. 生态学杂志, 39(5):1629-1635.
- 李西雷,苏时萍,吴谢强,等,2017. 孵化密度和流速对中华倒刺鲃胚胎发育的影响[C]//2017年中国水产学会学术年会.
- 刘一漩,2021. 蜿蜒型河流地貌特征指标体系研究[D]. 保定:河北农业大学.
- 齐亮,杨宇,王悦,等,2012. 鱼类对水动力环境变化的行为响应特征[J]. 河海大学学报(自然科学版), 40(4):438-445.
- 王首鹏,2019. 基于深潭浅滩的河流仿自然生境营造技术与应用[D]. 沈阳:辽宁大学.
- 徐观兵,2022. 三峡水库变动回水区鱼类生境特征及航道整治对其影响研究[D]. 重庆:重庆交通大学.
- 于丽娟,李秀明,易建华,等,2014. 不同水流速度对中华倒刺鲃幼鱼自由基代谢的影响[J]. 中国水产科学, 21(1):101-107.
- Barbarossa V, Schmitt R J P, Huijbregts M A J, et al, 2020. Impacts of current and future large dams on the geographic range connectivity of freshwater fish worldwide[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 117:3648-3655.
- Buffington J M, Montgomery D R, 1999. Effects of hydraulic roughness on surface textures of gravel-bed rivers[J]. Water Resources Research, 35(11):3507-3521.
- Hecht J S, Lacombe G, Arias M E, et al, 2019. Hydropower dams of the Mekong River basin: A review of their hydrological impacts[J]. Journal of Hydrology, 568:285-300.
- Li P, Li D, Sun X, et al, 2022. Application of Ecological Restoration Technologies for the Improvement of Biodiversity and Ecosystem in the River[J]. Water, 14(9):1402.
- Maeda S, Koshi Y, Hisao K, 2018. Turbulence and energetics of fish nest and pool structures in agricultural canal[J]. Paddy and Water Environment, 16:493-505.
- Shamloo H, Rajaratnam N, Katopodis C, 2001. Hydraulics of simple habitat structures[J]. Journal of Hydraulic Research, 39:351-366.
- Silva A T, Santos J M, Ferreira M T, et al, 2011. Effects of water velocity and turbulence on the behaviour of Iberian barbel (*Luciobarbus bocagei*, Steindachner 1864) in an experimental pool-type fishway[J]. River Research and Applications, 27(3):360-373.
- Wang Y, Wai O W H, Chen Q, 2021. Laboratory study on fish behavioral response to meandering flow and riffle-pool sequence driven by deflectors in straight concrete flood channels[J]. Journal of Hydrology, 598:125736.
- Yagci O, 2010. Hydraulic aspects of pool-weir fishways as ecologically friendly water structure[J]. Ecological Engineering, 36:36-46.
- Zha W, Zeng Y, Katul G, et al, 2021. Laboratory study on behavioral responses of hybrid sturgeon, Acipenseridae, to wake flows induced by cylindrical bluff bodies[J]. Science of the Total Environment, 799:149403.

(责任编辑 万月华)

## Habitat Preference of *Spinibarbus sinensis* Under Artificial Habitat Conditions

LIU Han<sup>1</sup>, LIN Jun-qiang<sup>1</sup>, WANG Xian-zheng<sup>2</sup>, BAN Xue-jun<sup>1,3</sup>, WANG Dong-sheng<sup>4</sup>,  
ZHANG Di<sup>1</sup>, PENG Qi-dong<sup>1</sup>, JIN Tian-tian<sup>1</sup>

- (1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, P. R. China;
2. Sichuan Shengda Hydropower Development Co., Ltd, Leshan 614000, P.R. China;
3. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, P. R. China;
4. China Renewable Energy Engineering Institute, Beijing 100120, P. R. China)

**Abstract :** In this study, *Spinibarbus sinensis* was selected for study, and we explored the habitat preferences of *S. sinensis* in constructed multiple microtopographic habitats, simulating the hydrologic and hydraulic conditions in natural rivers with large-scale ecological settings. Additionally, the principal hydrodynamic indicators influencing habitat selection and the hydrodynamic selection mechanism of habitat behavior were analyzed based on Random Forest and Classification and Regression Trees (CART) algorithms. The aims of the study were to provide criteria for planning, designing and carrying out habitat restoration, to facilitate the recovery of fish resources in rivers affected by hydropower projects and to create a hydrodynamic environment suitable for *S. sinensis*. On August 7 and September 15, real-time monitoring of fish habitation behaviour was conducted in the ecological experimental field using a Passive Integrated Transponder (PIT) radio frequency identification system. Four hydrodynamic indicators (flow velocity, vorticity, turbulent kinetic energy, and bed shear stress) were selected to calculate the suitability index for *S. sinensis* under different microtopographic environments (straight, meandering river sections and sections with a pool, shoal, or bars) and different flow conditions (0.3, 0.6, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0 m<sup>3</sup>/s). Results show that river sections with pool-shoal and bars were the preferred habitat for *S. sinensis*. With increasing water flow, preference for river sections with bars increased, especially at the inflow and outflow of bars. Under high water flow conditions (2.0, 3.0 m<sup>3</sup>/s), over 60% of the *S. sinensis* displayed a strong preference for the river section with bars. Flow velocity and vorticity were the primary hydrodynamic parameters affecting the habitat preferences of *S. sinensis*. Under test conditions, the most suitable field conditions for *S. sinensis* habitation is a velocity between 0.545 m/s and 2.3 m/s, and a vorticity between 0.72/m and 15.7/m. This research provides a theoretical foundation and technical support for ecological restoration and management of fish habitat.

**Key words:** *Spinibarbus sinensis*; microtopography; hydrodynamics; fish behavior; flow velocity; vorticity