

DOI: 10.12264/JFSC2025-0015

不同障碍物对 3 种幼鱼游泳能力的影响

曾钰评^{1,2}, 俞立雄², 林小菊^{1,2}, 吴池杰^{2,3}, 王敏^{2,4}, 段辛斌², 朱峰跃², 汪登强^{2*}

1. 上海海洋大学水产与生命学院, 上海 201306;
2. 中国水产科学研究院长江水产研究所, 国家农业科学重庆观测实验站, 湖北 武汉 430223;
3. 长江大学动物科学技术学院, 湖北 荆州 434025;
4. 西南大学生命科学学院, 淡水鱼类资源与生殖发育教育部重点实验室, 重庆 400715

摘要: 为了解不同障碍物所形成的复杂水流环境对鱼类游泳能力的影响, 以青鱼(*Mylopharyngodon piceus*)、中华倒刺鲃(*Spinibarbus sinensis*)和长鳍吻鲈(*Rhinogobio ventralis*)幼鱼为对象, 通过在游泳水槽中放置圆形、方形和半圆形柱状障碍物, 研究 3 种幼鱼的临界游泳速度及感应流速差异。结果表明, 青鱼幼鱼在半圆形障碍物影响下临界游泳速度与无障碍物组无显著性差异($P>0.05$), 在圆形和方形障碍物影响下临界游泳速度显著降低($P<0.05$), 绝对临界游泳速度(U_{crit}^a)分别降低了 36.3%和 15.6%, 相对临界游泳速度(U_{crit}^r)分别降低了 34.9%和 15.3%; 中华倒刺鲃幼鱼在方形障碍物下 U_{crit}^r 为(15.20±0.84) BL/s, 相较于对照组 [U_{crit}^r =(17.42±0.55) BL/s]降低了 12.7% ($P<0.05$); 长鳍吻鲈幼鱼在 3 种障碍物影响下的临界游泳速度均显著低于无障碍物组($P<0.05$), 其中圆形障碍物组影响最为显著, U_{crit}^a 和 U_{crit}^r 为(62.83±7.52) cm/s 和(8.17±0.73) BL/s。青鱼、中华倒刺鲃幼鱼感应流速在无障碍物和不同形式障碍物下均无显著性差异($P>0.05$), 长鳍吻鲈幼鱼感应流速在圆形和方形障碍物影响下差异显著($P<0.05$), 3 种幼鱼绝对感应流速(U_{ind}^a)范围为 1.60~5.20 cm/s, 相对感应流速(U_{ind}^r)范围为 0.17~0.62 BL/s。在相同障碍物环境中, 中华倒刺鲃 U_{crit}^r 和 U_{ind}^r 均显著高于青鱼和长鳍吻鲈。3 种实验鱼临界游泳速度均大于感应流速。研究发现, 障碍物对鱼类的临界游泳能力具有显著影响, 而对幼鱼感应流速的影响仅在种类间表现出显著性差异。结果可为鱼类栖息场所和鱼道设计提供参考。

关键词: 障碍物; 青鱼; 中华倒刺鲃; 长鳍吻鲈; 临界游泳速度; 感应流速

中图分类号: S917

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2025)06-0849-10

临界游泳速度(critical swimming speed, U_{crit})和感应流速(induced flow velocity, U_{ind})是评估鱼类运动能力、环境适应性及生存策略的核心指标^[1]。在自然水域中, 鱼类常需穿越由岩石、水生植被或人工结构形成的障碍物^[2], 这些障碍物通过改变流速梯度、湍流强度及涡旋结构等局部流场特性, 直接影响鱼类的游泳效率与能量消耗^[3]。近年来, 随着水利工程、航道整治等人类活动对水生生物迁徙路径的阻断问题日益严峻, 探究单一障碍物几何形状对鱼类 U_{crit} 与 U_{ind} 的差异化影响, 已成为生态水力学与鱼类生理生态学交叉领域的

重要课题。

现有研究表明, 不同形状柱状障碍物后方水流的改变显著影响鱼类游泳性能: 圆形障碍物后方的周期性涡旋脱落可以降低局部湍流强度, 减少鱼类能量消耗, 从而间接提升其 U_{crit} ^[4], Webb 等^[5]研究发现, 鳟类偏向于在圆形障碍物所形成的湍流后方游动; 方形障碍物因棱角引发剧烈流动分离, 增加鱼类运动阻力, 导致 U_{crit} 显著下降^[6]; 半圆形障碍物的流线型背侧可削弱流动分离, 但其平直面仍可能诱发不对称涡旋, 对游泳效率的影响介于圆形与方形之间^[7]。在有障碍物的过鱼

收稿日期: 2025-03-04; 修订日期: 2025-04-24.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3205903); 国家自然科学基金项目(32202942); 中国水产科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(2023TD09).

作者简介: 曾钰评(1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向为鱼类行为学. E-mail: 1991190042@qq.com

通信作者: 汪登强, 研究员, 研究方向为渔业生态. E-mail: wdq@yfi.ac.cn

通道中鱼类会自发调整游泳路径,寻找合适的流速区域进行上溯^[8]。在感应流速方面,障碍物的放置可能干扰鱼类侧线系统的信号解析能力。例如,高湍流强度可能掩盖鱼类对平均流速的感知^[9],而特定频率的涡旋可能被侧线系统主动利用以优化运动策略^[10]。在上溯过程中,鱼会利用障碍物后方或近壁低流速区域进行短暂停留,达到降低自身能量消耗的目的^[11]。在自然界,鱼也可以利用障碍物所形成的遮挡效果来躲避天敌或获取食物^[12]。

然而,当前研究主要存在以下局限:一是方法依赖性,多数研究依赖计算流体力学(CFD)模拟或复杂行为观测,缺乏对 U_{crit} 与 U_{ind} 的直接测定与系统比较;二是障碍物类型单一化,聚焦单一障碍物或特定鱼种,如鲢科鱼,缺乏对圆形、方形、半圆形柱状障碍物的梯度效应分析;三是本土物种研究空白,针对我国长江流域关键鱼类的游泳性能与障碍物相应机制研究尤为匮乏。

本研究以长江流域具有江河洄游习性的青鱼^[13]、短距离洄游习性的中华倒刺鲃^[14]及急流适应性的长鳍吻鲈^[15]幼鱼为研究对象,开展障碍物-游泳性能关联研究,以期了解圆形、方形及半圆形柱状障碍物如何差异化影响 3 种鱼类的临界游泳速度与感应流速阈值,以及不同鱼类的游泳能力对同一障碍物的响应是否具有显著差异。通过控制实验直接测定临界游泳速度与感应流速,规避复杂模型的假设依赖性,提供可推广至其他本土鱼种的标准化参数,解析不同障碍物形状对 3 种鱼类的“运动限制-感知干扰”双刃剑效应,研究结果将为鱼道设计、栖息地连通性修复及水利工程生态影响评估提供依据。

1 材料与方法

1.1 实验对象

本次实验所用的青鱼和中华倒刺鲃,均来自湖北监利老江河四大家鱼原种场,体长分别为 (9.59 ± 0.35) cm、 (6.39 ± 0.47) cm,体重分别为 (14.23 ± 1.96) g、 (4.41 ± 0.90) g。长鳍吻鲈由湖北省荆州市沙市区中国水产科学研究院长江水产研究所窑湾实验场提供,体长为 (8.30 ± 1.01) cm,体重为 (8.48 ± 3.21) g。实验开始前,将实验鱼放置于循环

养殖水槽内暂养一周。每日投喂一次且保证饵料充足,并及时清理粪便与残渣。实验用水为经过 48 h 曝气处理的自来水,水温稳定在 (25 ± 1) °C,溶解氧含量维持在 7.0~8.0 mg/L。正式实验开始前,实验鱼禁食 24 h。

1.2 实验组设计

每种鱼随机挑选 40 尾,分为临界游泳速度组和感应流速组,每组 20 尾实验鱼。本研究障碍物设置为 4 组,以无障碍物作为对照,另设圆形障碍物组、方形障碍物组及半圆形柱状障碍物组,每组均测 5 尾鱼,每个障碍物的平面长度均为 3 cm,高度为 20 cm^[16],材质为光滑的浅色亚克力块。实验时提前将实验鱼转移至游泳测试水槽中适应 1~2 h,控制水槽中的水温、溶氧等环境条件与暂养时一致。实验水温控制为 (25 ± 1) °C,溶解氧 7.0~8.0 mg/L。

1.3 实验装置

实验装置为封闭式环形游泳水槽,如图 1 所示,总容积为 90 L,通过调节变频器控制电动机的转速,进行水流速度调节,测试区水流速度使用测试区 LS25-3A 型旋桨式流速仪(重庆华正水文仪器有限公司)测定。水槽中游泳测试区域长 70 cm、宽 20 cm、高 20 cm。在进水口 15 cm 处设置障碍物,确保障碍物左右两侧的距离相等(图 1)。

1.4 临界游泳速度测定

采用流速递增法测定临界游泳速度。先将待测鱼放入游泳水槽中,流速设为 0.5 BL/s (body length, BL),等待 1 h 以消除实验鱼的应激反应。然后,以 1.0 BL/s 的初始速度进行测试,每隔 20 min 增加水流速度,流速增量为 1.0 BL/s^[17],直至鱼疲劳,具体表现为实验鱼贴于拦网上超过 20 s,无法保持静止或进行上溯行为,即完成测试^[18],通过以下公式计算绝对临界游泳速度(U_{crit}^a ,单位为 cm/s):

$$U_{crit}^a = U_{max} + (t/\Delta t) \times \Delta U \quad (1)$$

式中, U_{max} 为实验鱼能持续游泳 20 min 的最高流速; t 为实验鱼在最高流速时,维持游泳状态的时间; Δt 作为时间步长,体现了每次时间计量的间隔; ΔU 为流速增量。

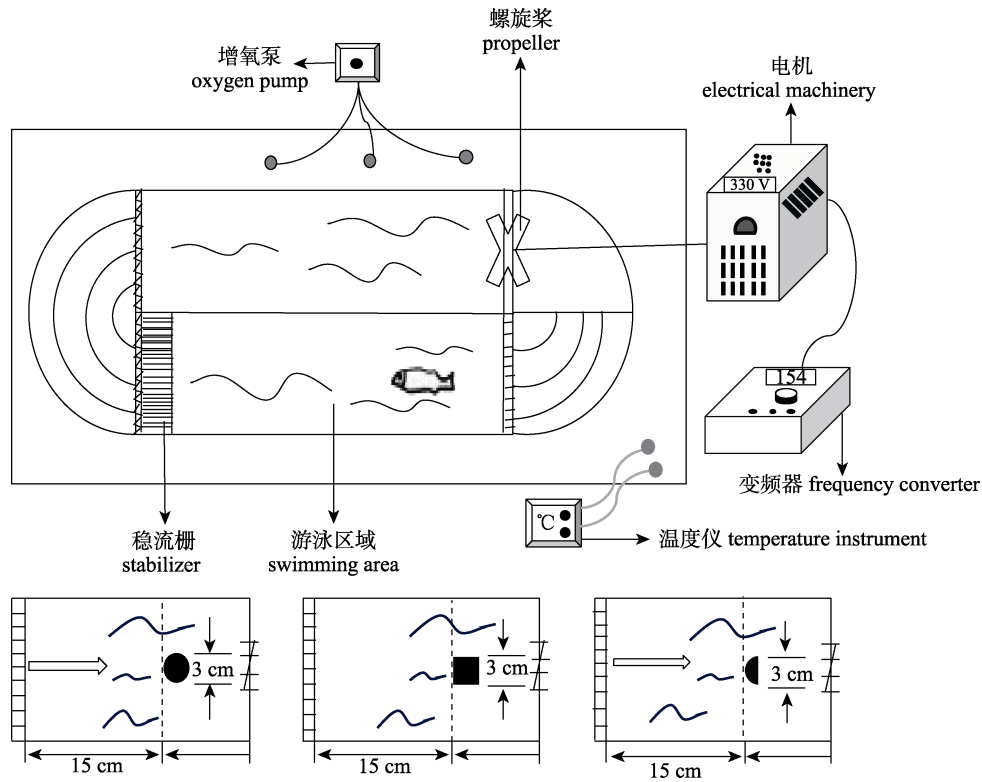


图 1 测试水槽示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the test tank

相对临界游泳速度(U_{crit}^r , 单位为 BL/s)测定公式为:

$$U_{crit}^r = U_{crit}^a / BL \quad (2)$$

1.5 感应流速的测定

实验开始时, 随机选择 1 尾实验鱼放入测试水槽中, 待实验鱼保持静止或无明显变向行为^[19]后, 以 0.01 m/s 为初始速度, 每隔 20 s, 速度增加 0.01 m/s, 当实验鱼开始调整身体姿势由顺流游动转变至逆流游动时, 此时的水流速度为实验鱼的感应流速, 即绝对感应流速(U_{ind}^a , 单位为 cm/s)。

相对感应流速(U_{ind}^r , BL/s)计算公式如下:

$$U_{ind}^r = U_{ind}^a / BL \quad (3)$$

1.6 数值模拟

采用 OpenFOAM 进行数值模拟分析, 构建不同障碍物下水流变化示意图, 具体函数方程^[20]如下:

连续方程:

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (4)$$

动量方程:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \nabla \cdot (U \otimes U) = -\nabla p + \nabla \cdot [(v + v_t)(\nabla U + (\nabla U)^T)] \quad (5)$$

K 方程:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \nabla \cdot (Uk) = \nabla \cdot \left[\left(v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \varepsilon \quad (6)$$

ε 方程:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (U\varepsilon) = \nabla \cdot \left[\left(v + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon \quad (7)$$

式中, U 为时均速度场(单位为 m/s), p 为压力(Pa), v 为流体运动黏度(m^2/s)。 v_t 为湍流黏度(m^2/s), 表

达式为 $v_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$; $C_\mu = 0.0845$, T 为向量的转置。

P_k 为湍流动能生成项, 表达式为 $P_k = v_t [\nabla U : (\nabla U + (\nabla U)^T)]$; $\sigma_k = 0.719$ 。 R_ε 为 RNG 模型特有修正项; $C_{1\varepsilon} = 1.42$, $C_{2\varepsilon} = 1.68$; $\sigma_\varepsilon = 0.719$ 。

1.7 数据分析

实验数据均使用 Microsoft Excel 2021 和 SPSS 25.0 软件进行统计分析, 结果以平均值 $\pm$ 标准差($\bar{x} \pm SD$)的形式呈现。采用双因素方差分析(two-way ANOVA)方法检测种类和障碍物对 U_{crit}^r

和 U_{ind}^f 的影响。不同障碍物组对青鱼、中华倒刺鲃及长鳍吻鲃 U_{crit} 和 U_{ind} 的影响采用单因素方差分析(one-way ANOVA), 利用 Duncan 法进行多重比较以及显著性检验。

2 结果与分析

2.1 临界游泳速度比较

数值模拟分析表明(图 2), 流速为 1 m/s 的流水在经过不同障碍物后, 两侧的流速均显著增大, 后方出现低速区, 但流态差异明显, 其中圆形障碍物后方变化最显著, 形成了明显的旋涡, 旋涡内部流速低于外部; 方形次之, 水流波动剧烈; 半圆形后方流态较平缓, 水流速度改变不显著。圆形和半圆形障碍物低速区面积小于方形障碍物。

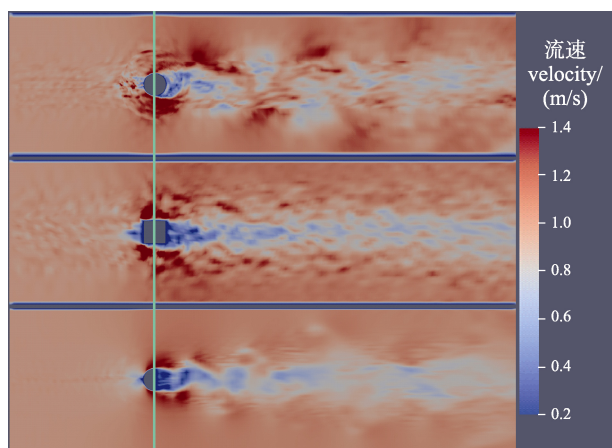


图 2 流速 1 m/s 流水在 3 种障碍物影响下流态水速变化
Fig. 2 Simulation of flow patterns of water flowing at 1 m/s under the effect of three types of obstacles

实验鱼在不同障碍物影响下临界游泳速度变化不同(图 3a、b)。青鱼对照组 U_{crit}^a 和 U_{crit}^f 分别为 (107.08 ± 4.04) cm/s 和 (10.98 ± 0.47) BL/s, 显著高于圆形和方形障碍物组的临界游泳速度($P < 0.05$), 其中圆形柱影响下 U_{crit}^a 和 U_{crit}^f 最低, 为 (68.20 ± 7.46) cm/s 和 (7.14 ± 0.51) BL/s。中华倒刺鲃在方形障碍物下 U_{crit}^a 和 U_{crit}^f 分别为 (95.41 ± 6.35) cm/s 和 (15.20 ± 0.84) BL/s, 显著低于半圆形的 (114.13 ± 4.65) cm/s 和 (17.92 ± 1.30) BL/s ($P < 0.05$), 但对对照组、圆形障碍物组和半圆形障碍物组没有显著性差异($P > 0.05$)。长鳍吻鲃在 3 种障碍物影响下的 U_{crit}^a 和 U_{crit}^f 均显著低于对照组的 (108.79 ± 9.00) cm/s

和 (11.19 ± 1.47) BL/s, 其中圆形障碍物组临界游泳速度最低, U_{crit}^a 和 U_{crit}^f 分别为 (62.83 ± 7.52) cm/s 和 (8.17 ± 0.73) BL/s。

同一障碍物影响下实验鱼种间的临界游泳速度也存在显著性差异(图 3a、3b), 例如, 圆柱形影响下中华倒刺鲃 U_{crit}^a 和 U_{crit}^f 分别为 (104.96 ± 13.30) cm/s 和 (16.50 ± 1.48) BL/s, 显著高于青鱼和长鳍吻鲃($P < 0.05$), 其中青鱼的 U_{crit}^f 最低, 为 (7.14 ± 0.51) BL/s; 在方形障碍物影响下中华倒刺鲃 U_{crit}^a 和 U_{crit}^f 最高, 青鱼次之, 长鳍吻鲃最低; 在半圆柱影响下长鳍吻鲃 U_{crit}^a 和 U_{crit}^f 最低, 分别为 (67.00 ± 12.80) cm/s 和 (8.37 ± 1.38) BL/s, 显著低于青鱼和中华倒刺鲃($P < 0.05$)。

2.2 感应流速比较

图 3c、3d 显示 3 种幼鱼感应流速和差异显著性检验结果。青鱼、中华倒刺鲃在不同障碍物影响下的感应流速没有显著性差异($P > 0.05$), 长鳍吻鲃对照组和方形障碍物组的 U_{ind}^a 差异显著($P < 0.05$)。相同障碍物下, 幼鱼种间的 U_{ind}^a 在 3 种障碍物影响下两两间存在显著性差异($P < 0.05$)。中华倒刺鲃的 U_{ind}^a 在不同条件下均与其他 2 种鱼存在显著性差异($P < 0.05$)。无论有无障碍物, 3 种幼鱼的 U_{ind}^a 均表现为中华倒刺鲃最大, 长鳍吻鲃次之, 青鱼最低, 其中最高的是中华倒刺鲃方形障碍物组, 为 (0.55 ± 0.08) BL/s, 最低的是青鱼半圆形障碍物组, 为 (0.26 ± 0.05) BL/s。

2.3 种类和障碍物对实验鱼游泳参数影响

以 3 种幼鱼的游泳速度作为协变量, 种类和障碍物为固定变量, 对实验所得的 U_{crit}^f 和 U_{ind}^f 进行双因素协方差分析(表 1)。结果表明, 鱼种类和障碍物对 U_{crit}^f 有显著性影响, 两者的交互效应对实验鱼也表现出显著性差异($P < 0.05$)。对于 U_{ind}^f , 仅鱼种类对其产生显著性影响($P < 0.05$), 障碍物及二者的交互作用均未对 U_{ind}^f 表现出显著差异($P > 0.05$)。

3 讨论

3.1 障碍物对鱼类临界游泳速度的影响

临界游泳速度不仅是评价鱼类有氧运动的重要指标, 也是鱼类克服水流障碍能力的强弱表征^[21-22]。

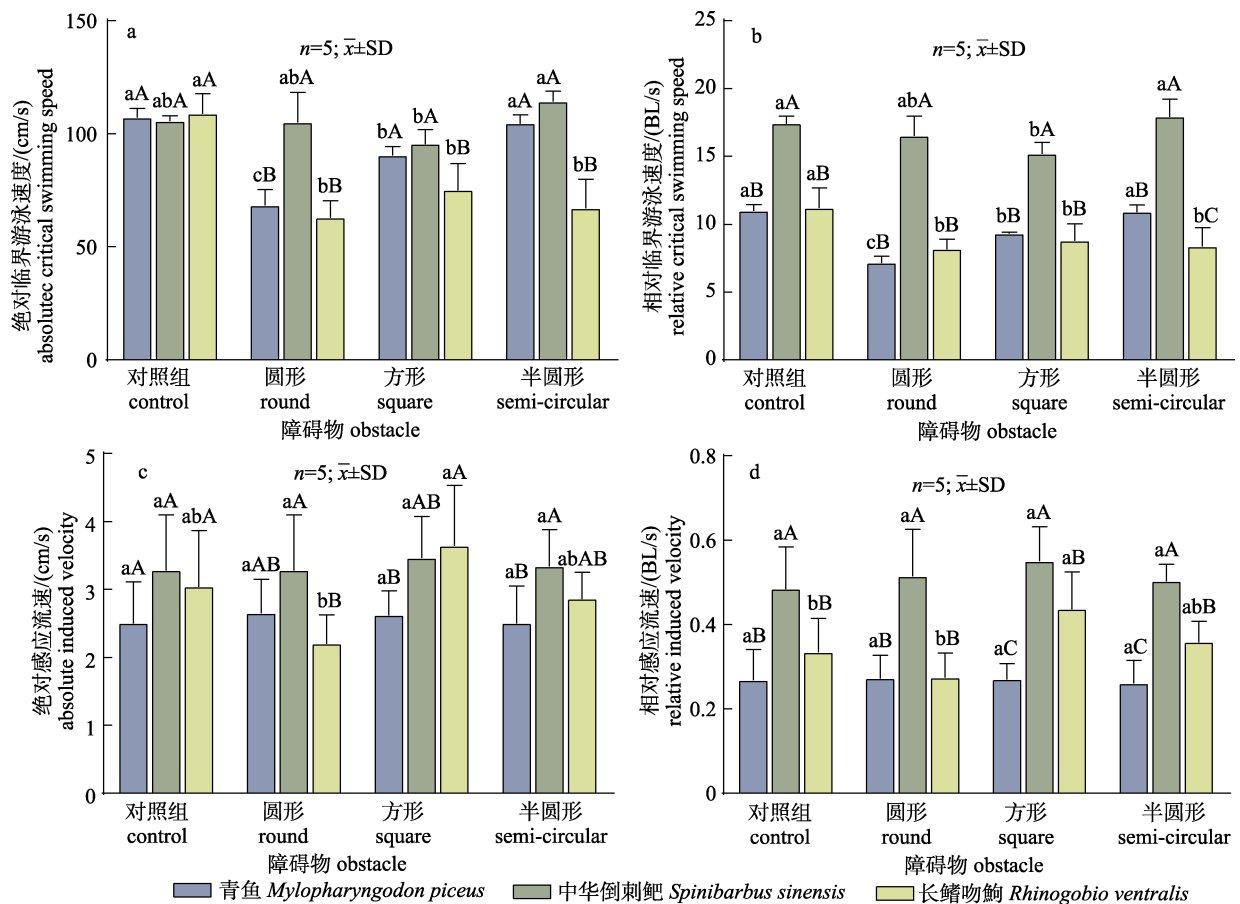


图 3 不同障碍物影响下 3 种鱼类游泳速度变化

不同小写字母表示同一鱼种在不同障碍物组间游泳速度差异显著($P<0.05$);
不同大写字母表示不同鱼种在相同障碍物组间游泳速度差异显著($P<0.05$).

Fig. 3 Changes in swimming speed of three fish species under the effect of different obstacles
Different lowercase letters indicate significant differences in swimming speed between different obstacle groups for the same fish species ($P<0.05$). Different capital letters indicate significant differences in swimming speed between different fish species in the same obstacle group ($P<0.05$).

表 1 鱼种和障碍物对实验鱼游泳参数影响的双因素方差分析

Tab.1 Two-way ANOVA of the effect of species and obstacles on swimming parameters of experimental fish			
n=5; $\bar{x}\pm SD$			
处理组 treatment group	种类 species	障碍物 obstacle	交互效应 interactive effect
自由度 degree of freedom	2	3	6
U_{crit}^a	$F=372.805$ $P<0.0001^*$	$F=21.532$ $P<0.0001^*$	$F=6.111$ $P<0.0001^*$
U_{ind}^a	$F=58.747$ $P<0.0001^*$	$F=2.397$ $P=0.080$	$F=1.309$ $P=0.272$

注: *表示影响显著($P<0.05$).
Note: *indicates significant effect ($P<0.05$).

除了天然河道底部障碍物形成的复杂水流环境外, 过度的水利工程建设, 如大坝、水库、道路和桥

梁等, 都会导致河流底部环境发生变化, 从而影响鱼类能否上行或下行通过障碍物并完成其生命活动^[23]。相较于自然来流状态, 在水流路径中放置障碍物后, 水流在障碍物后方通常会形成卡门涡街(Karman vortex street), 导致障碍物后方的流速和流态发生改变^[24], 形成复杂流场。本研究结果显示, 不同形式障碍物对青鱼、中华倒刺鲃及长鳍吻鲈 3 种幼鱼临界游泳速度产生影响显著, 方形障碍物后方虽然会形成较大的低流速面积, 但高流速下流态较紊乱, 横向剪切力大, 从而导致 3 种幼鱼临界游泳速度均显著下降, 这与罗金梅等^[6]研究发现方形显著降低了鳊幼鱼临界游泳速度的结论一致; 圆形障碍物则显著性降低了青鱼和长鳍吻鲈的临界游泳速度, 其中青鱼 U_{crit}^a 和

U_{crit}^f 分别降低了 36.3% 和 34.9%，长鳍吻鲈则分别降低了 42.2% 和 27.0%，圆形障碍物后方会形成明显的涡流和湍流区域，水流的分离与附着会导致较大的流动不稳定性，并且这一结果与黑斑须雅罗鱼(*Semotilus atromaculatus*)在垂直排列的圆柱下方时，其临界游泳速度下降 10% 的结果相似^[25]。流态的变化直接影响幼鱼的游泳效率，当幼鱼长时间面对复杂流态时，需要消耗更多能量来维持自身的位置和游泳方向^[26]，从而导致临界游泳速度的下降。魏园杰^[27]的研究也表明在鱼类游泳过程中，鱼类更偏向于选择低紊动能的区域。半圆柱显著降低了长鳍吻鲈的临界游泳速度，对青鱼与中华倒刺鲃影响不大。虽然半圆形障碍物后方流态较稳定，但可能由于长鳍吻鲈的背鳍与臀鳍的显著延长^[28]，在半圆形障碍物后方受侧向力影响较大，从而导致临界游泳速度下降。结果表明，在不同障碍物后方鱼类为了维持身体平衡并进行上溯活动，需消耗更多的能量来克服流场的不稳定性，导致游泳速度下降，除此之外鱼类本身的形态特点也会对鱼类临界游泳速度造成改变。

面对相同障碍物时，不同种类的幼鱼所展现出来的游泳能力存在差异，可能与种类自身的体型结构、栖息的水流环境以及在游泳时所采取的姿态等因素密切相关^[29]。比较 U_{crit}^f 发现，中华倒刺鲃的 U_{crit}^f 显著高于青鱼和长鳍吻鲈(图 3a, 3b)，可能原因不仅与中华倒刺鲃喜好栖息于水流湍急的底层流水的生活环境有关，也与体型有密切关系。青鱼^[30]和长鳍吻鲈^[28]体型为圆筒形，而中华倒刺鲃呈纺锤形^[31]，这种形状能够更有效的减少水流的阻力，使鱼能够更加灵活高效的游动^[32]。这与中华倒刺鲃的临界游泳速度高于异育银鲫(*Carassius auratus gibelio*)、岩原鲤(*Procypris rabaudi*)、青鱼及胭脂鱼(*Myxocyprinus asiaticus*)的研究结果一致^[33]。此外，三种幼鱼面对不同障碍物时所受影响程度是不同的，以 U_{crit}^f 为例，相较于对照组，青鱼圆形、方形及半圆形障碍物组游泳速度分别下降了 34.9%、15.3% 和 0.6%；中华倒刺鲃圆形和方形障碍物组分别下降了 5.3% 和 12.7%，但半圆形障碍物组上升了 2.9%；长鳍吻

鲈在 3 种障碍物下则分别下降了 27.0%、21.4% 和 25.2%。出现这一现象的原因与障碍物改变了水流速度和方向有关外，也与不同幼鱼对水流的偏好不同相关，在激流水体的鱼类更偏好较高的水流速度^[34]。并且相较于青鱼和长鳍吻鲈，中华倒刺鲃在障碍物后方所受影响程度最低，进一步印证了纺锤形体型能够减少水流阻力，优化游泳效率。在半圆柱下中华倒刺鲃的 U_{crit}^f 相比于自由来流显著提高，这与鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)^[35]的结果一致。相较于圆形和方形障碍物，半圆形障碍物后方流态更稳定，更有利于促进鱼类的临界游泳速度。

3.2 障碍物对鱼类感应流速的影响

自然流淌的河流不仅给鱼类等底栖生物提供适宜的栖息环境，也能促进河流生态系统物质循环和能量流动的正常运转^[36]。人类活动导致河流连通性受到干扰，对鱼类的繁殖、栖息和洄游等生命活动产生不良影响^[37-38]。感应流速是鱼类感知水流方向的最小流速，依据感应流速设计过鱼设施最低流速，可以有效减轻高坝对洄游鱼类上溯活动的阻碍，进而维护河流水生态系统的完整与稳定^[39-40]。本研究采用不同障碍物进行模拟实验，结果表明在不同障碍物下，青鱼、中华倒刺鲃和长鳍吻鲈的 U_{ind}^a 与自然来流时相比没有显著性差异，这可能与水流速度较低、障碍物后的流速与流态变化不大、卡门涡街未充分形成有关系。但在方形障碍物下，3 种幼鱼的感应流速均高于自然来流时的流速，这可能是因为方形障碍物的棱角导致水流发生分离，在障碍物后方形成了较大的低流速区有关。

在鲤(*Cyprinus carpio*)、鲫(*Carassius auratus*)、鲢、鳙(*Aristichthys nobilis*)及蒙古鲌(*Culter mongolicus mongolicus*)的感应流速测定中发现，这几种种鱼对水流的敏感程度显著高于其他鱼类^[41]。李阳希等^[42]对大渡河下游的齐口裂腹鱼(*Schizothorax prenanti*)、重口裂腹鱼(*S. davidi*)和短尾高原鳅(*Triplophysa breviceuda*)的 U_{ind}^a 与花斑裸鲤(*Gymnocypris eckloni*)、黄河裸裂尻鱼(*Schizopygopsis pylzovi*)的 U_{ind}^a 比较，表明不同鱼种感应流

速之间存在明显差异。本实验结果与上述研究结果相似,在相同障碍物下,3种幼鱼 U_{ind}^c 均表现为中华倒刺鲃最大,长鳍吻鲈次之,青鱼为最低,这可能由于中华倒刺鲃和长鳍吻鲈主要栖息于湍急的底层水体,青鱼则偏向栖息于中下层静水水体中有关。林小菊等^[43]发现生活在缓流静水区域的鱼类,感应流速低于生活在急流区域的鱼类,本研究实验结果与其一致。这可能是鱼类侧线系统对环境适应性进化的表现,在不同水流环境下,鱼类主要依靠侧线系统来感知外界变化,在湖泊等缓流区域的鱼类可能需要更加敏锐的感知周围动静,以寻找食物及检测潜在危险^[44];而在急流区域鱼类需要更准确的感知水流方向和强度,以便在湍急水流中保持稳定的游动方向并及时发现猎物或躲避天敌。因此不同鱼类侧线系统在发育过程中侧线管神经丘与体表神经丘感觉细胞的分布数量及位置存在差异^[45],也是不同种鱼类之间感应流速存在区别的原因。

4 结论

综上所述,圆形、方形及半圆形柱状障碍物下水流流速和流态发生改变,对鱼类游泳能力的影响存在显著差异,相较于圆形和方形障碍物,半圆形障碍物与流速的组合更能营造出适合鱼类的栖息环境及上溯洄游通道,结果可为鱼道设计等提供参考,也有利于降低鱼类资源的进一步衰退,实现资源的可持续发展。

参考文献:

- [1] Shi X T, Chen Q W, Huang Y P, et al. Review on the methods to quantify fish's ability to cross velocity barriers in fish passage[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(22): 6967-6972. [石小涛, 陈求稳, 黄应平, 等. 鱼类通过鱼道内水流速度障碍能力的评估方法[J]. 生态学报, 2011, 31(22): 6967-6972.]
- [2] Silva A T, Santos J M, Ferreira M T, et al. 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, 2011, 27(3): 360-373.
- [3] Liu Z X, Zhou C, Huang M H. Situation and development of fishway research and application[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2010, 27(4): 28-31, 35. [刘志雄, 周赤, 黄明海. 鱼道应用现状和研究进展[J]. 长江科学院院报, 2010, 27(4): 28-31, 35.]
- [4] Liao J C, Beal D N, Lauder G V, et al. Fish exploiting vortices decrease muscle activity[J]. Science, 2003, 302(5650): 1566-1569.
- [5] Webb P W. Entrainment by river chub *Nocomis micropogon* and smallmouth bass *Micropterus dolomieu* on cylinders[J]. Journal of Experimental Biology, 1998, 201 (Pt 16): 2403-2412.
- [6] Luo J M, Shi X T, Tao Y, et al. Effect of obstacles on swimming kinematics in juvenile bighead carp (*Aristichthys nobilis*)[J]. Chinese Journal of Ecology, 2023, 42(2): 352-360. [罗金梅, 石小涛, 陶宇, 等. 障碍物对鳊幼鱼游泳行为的影响[J]. 生态学杂志, 2023, 42(2): 352-360.]
- [7] Przybilla A, Kunze S, Rudert A, et al. Entraining in trout: A behavioural and hydrodynamic analysis[J]. Journal of Experimental Biology, 2010, 213(Pt 17): 2976-2986.
- [8] Shi X T, Chen Q W, Liu D F, et al. Critical swimming speed of young Chinese sucker (*Myxocyprinus asiaticus*)[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2012, 36(1): 133-136. [石小涛, 陈求稳, 刘德富, 等. 胭脂鱼幼鱼的临界游泳速度[J]. 水生生物学报, 2012, 36(1): 133-136.]
- [9] Luo R L, Li C X, Wang F. Underwater motion target recognition using artificial lateral line system and artificial neural network method[J]. Ocean Engineering, 2024, 303: 117757.
- [10] Wang M M, Jin B, Liu G J, et al. The moving vibration source perception using bionic lateral line system and data-driven method[J]. Ocean Engineering, 2022, 247: 110463.
- [11] Cheong T S, Kavvas M L, Anderson E K. Evaluation of adult white sturgeon swimming capabilities and applications to fishway design[J]. Environmental Biology of Fishes, 2006, 77(2): 197-208.
- [12] Yan L. Numerical investigation of fish self-propelled swimming under the interference of obstacles based on machine learning[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2020. 严嫻. 基于机器学习的鱼体自主游动及障碍物干扰情况下的数值模拟研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2020.
- [13] Gan M Y, Yuan X, Jiang Q, et al. Effects of acute temperature declining on swimming performance of juvenile black carp[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2015, 37(3): 35-39. [甘明阳, 袁喜, 蒋清, 等. 急性降温对青鱼幼鱼游泳能力的影响[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2015, 37(3): 35-39.]
- [14] Zhou L Y, Li X M, Fu S J. The effect of predation

- acclimation on swimming behavior, stress and immune responses of juvenile *Myxocyprinus asiaticus* and *Spinibarbus sinensis*[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2021, 45(5): 1112-1119. [周龙艳, 李秀明, 付世建. 捕食驯化对胭脂鱼和中华倒刺鲃游泳行为、应激和免疫功能的影响[J]. 水生生物学报, 2021, 45(5): 1112-1119.]
- [15] Ding S B, Shi J Y, Huang B, et al. Swimming capability of six typical fish species from the lower Dadu River[J]. *Journal of Hydroecology*, 2020, 41(1): 46-52. [丁少波, 施家月, 黄滨, 等. 大渡河下游典型鱼类的游泳能力测试[J]. 水生态学杂志, 2020, 41(1): 46-52.]
- [16] Jiang Z W. The influence mechanism of D-pillar obstacles on the upward-tracking behavior of fish in imitating natural fishway[D]. Yichang: China Three Gorges University, 2021. 姜泽文. D 型柱障碍物对鱼类在仿自然鱼道上溯行为的影响机理[D]. 宜昌: 三峡大学, 2021.
- [17] Cai L, Katopodis C, Johnson D, et al. Case study: Targeting species and applying swimming performance data to fish lift design for the Huangdeng Dam on the upper Mekong River[J]. *Ecological Engineering*, 2018, 122: 32-38.
- [18] Cai L, Hou Y, Johnson D, et al. Swimming ability and behavior of Mrigal carp *Cirrhinus mrigala* and application to fishway design[J]. *Aquatic Biology*, 2018, 27: 127-132.
- [19] Hu J L, Wang P Y, Chen H B, et al. Effects of the diversity of flow velocity on the upstream migration behavior of grass carp in the reaches of spur dikes[J]. *Water*, 2023, 15(17): 3091.
- [20] Chen Y S. Elaborate simulation of wave crossing of wave wall based on OpenFOAM[J]. *Jilin Water Resources*, 2024(5): 18-22. [陈衍顺. 基于 OpenFOAM 的防浪墙越浪精细化模拟[J]. 吉林水利, 2024(5): 18-22.]
- [21] Xian X M, Cao Z D, Fu S J. The comparison of critical swimming speed and endurance at high speed of four species of juvenile fish[J]. *Journal of Chongqing Normal University (Natural Science)*, 2010, 27(4): 16-20. [鲜雪梅, 曹振东, 付世建. 4 种幼鱼临界游泳速度和运动耐受时间的比较[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2010, 27(4): 16-20.]
- [22] Zhang L B, Yao W Z, Song Y Q. Preliminary study on the induction velocity of three Cobitidae species in Heishui River[J]. *Journal of Hydroecology*, 2022, 43(2): 102-107. [张连博, 姚维志, 宋一清. 黑水河 3 种鳅科鱼类感应流速的初步研究[J]. 水生态学杂志, 2022, 43(2): 102-107.]
- [23] Du W L. Effects of river barriers on connectivity and representative fish habitat in the Lancang river[D]. Kunming: Yunnan University, 2022. 杜威龙. 河流障碍物对澜沧江连通性及代表性鱼类栖息地的影响研究[D]. 昆明: 云南大学, 2022.
- [24] Pankanin G L, Kulińczak A, Berliński J. Investigations of Karman Vortex street using flow visualization and image processing[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2007, 138(2): 366-375.
- [25] Tritico H M, Cotel A J. The effects of turbulent eddies on the stability and critical swimming speed of creek chub (*Semotilus atromaculatus*)[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2010, 213(Pt 13): 2284-2293.
- [26] Xiong Y Y, Chen L, Li Y, et al. Swimming ability of juvenile tiger puffer, *Takifugu rubripes* with different body masses and starvation levels[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2023, 47(6): 940-949. [熊玉宇, 陈雷, 李莹, 等. 不同体质量和饥饿程度对红鳍东方鲀幼鱼游泳能力的影响[J]. 水生生物学报, 2023, 47(6): 940-949.]
- [27] Wei Y J. Study on the differences of swimming behavior and physiological changes of *Hypophthalmichthys molitrix* and *aristichthys nobilis* in two typical fish passages[D]. Yichang: China Three Gorges University, 2021. 魏园杰. 两种典型鱼道布置下鲢鳙游泳行为与生理变化差异研究[D]. 宜昌: 三峡大学, 2021.
- [28] Zhou Q G, He X F. A preliminary study on biology of *Rhinogobio ventralis* in Wujiang river[J]. *Freshwater Fisheries*, 1992, 22(5): 11-14. [周启贵, 何学福. 长鳍吻鲈生物学的初步研究[J]. 淡水渔业, 1992, 22(5): 11-14.]
- [29] Fu S J, Fu C, Yan G J, et al. Interspecific variation in hypoxia tolerance, swimming performance and plasticity in cyprinids that prefer different habitats[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2014, 217(Pt 4): 590-597.
- [30] Li X M, Xu G, Fu S J, et al. The effects of continuous water flow on the body shape features of juvenile *Mylopharyngodon piceus*[J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2017, 39(2): 22-27. [李秀明, 徐桂, 付世建, 等. 持续水流刺激对青鱼幼鱼体型特征的影响[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2017, 39(2): 22-27.]
- [31] Wang F, Cao Z D, Fu S J, et al. Fast-start and escape performance of juvenile *Spinibarbus sinensis*[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(11): 2181-2186. [王芳, 曹振东, 付世建, 等. 中华倒刺鲃幼鱼的快速启动与逃逸行为[J]. 生态学杂志, 2010, 29(11): 2181-2186.]
- [32] Fu S J, Cao Z D, Yan G J, et al. Integrating environmental variation, predation pressure, phenotypic plasticity and locomotor performance[J]. *Oecologia*, 2013, 173(2): 343-354.
- [33] Fu X, Fu C, Fu S J. Comparison of swimming ability among five freshwater fish species[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(5): 1629-1635. [付翔, 付成, 付世建. 五种淡水鱼类幼鱼游泳能力的比较[J]. 生态学杂志, 2020, 39(5): 1629-1635.]

- [34] Wu Q Y, Cao Z D, Fu S J. Flow velocity selection and its relationship to locomotive energetic metabolism in Chinese bream (*Parabramis pekinensis*) and pale chub(*Zacco platypus*) [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(13): 4187-4194. [吴青怡, 曹振东, 付世建. 鳊鱼和宽鳍鱮幼鱼流速选择与运动能量代谢特征的关联[J]. *生态学报*, 2016, 36(13): 4187-4194.]
- [35] Ke S F, Tu Z Y, Tan J J, et al. Effects of obstacles and flow velocity on locomotory behavior in juvenile, silver carp, *Hypophthalmichthys molitrix*[J]. *River Research and Applications*, 2021, 37(1): 91-99.
- [36] Xia J, Gao Y, Zuo Q T, et al. Characteristics of interconnected rivers system and its ecological effects on water environment[J]. *Progress in Geography*, 2012, 31(1): 26-31. [夏军, 高扬, 左其亭, 等. 河湖水系连通特征及其利弊[J]. *地理科学进展*, 2012, 31(1): 26-31.]
- [37] McIntyre P B, Liermann C R, Childress E, et al. Conservation of migratory fishes in freshwater ecosystems[M]// *Conservation of Freshwater Fishes*. Cambridge: Cambridge University Press, 2015: 324-360.
- [38] Tornabene B J, Smith T W, Tews A E, et al. Trends in river discharge and water temperature cue spawning movements of blue sucker, *Cycleptus elongatus*, in an impounded great Plains River[J]. *Copeia*, 2020, 108(1): 151.
- [39] Cai L, Wang W Y, Wang H L, et al. Response of induced flow speed to fish body length and its application in flow design of fish passage facilities[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(2): 176-181. [蔡露, 王伟营, 王海龙, 等. 鱼感应流速对体长的响应及在过鱼设施流速设计中的应用[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(2): 176-181.]
- [40] Wang B, Shi X T, Zhou C L, et al. Induced velocity of two species of fishes in Beipan River[J]. *Journal of Beihua University (Natural Science)*, 2013, 14(2): 223-226. [王博, 石小涛, 周琛琳, 等. 北盘江两种鱼感应流速[J]. *北华大学学报(自然科学版)*, 2013, 14(2): 223-226.]
- [41] Wang X C, Xing J J. Comparison of induction velocities for five fish species[J]. *Journal of Hydroecology*, 2018, 39(2): 77-81. [王晓臣, 邢娟娟. 5种鱼感应流速比较分析[J]. *水生态学杂志*, 2018, 39(2): 77-81.]
- [42] Li Y X, Hou Y Q, Tao J P, et al. Comparison of inductive velocity of three fish species in the lower reaches of Dadu River[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(10): 3214-3220. [李阳希, 侯轶群, 陶江平, 等. 大渡河下游3种鱼感应流速比较[J]. *生态学杂志*, 2021, 40(10): 3214-3220.]
- [43] Lin X J, Yu L X, Wu C J, et al. Effect of fasting on the swimming exercise ability of eight juvenile species[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2023, 30(12): 1457-1467. [林小菊, 俞立雄, 吴池杰, 等. 禁食对8种幼鱼游泳运动能力的影响[J]. *中国水产科学*, 2023, 30(12): 1457-1467.]
- [44] Pu J, Wang Y M, Shi X T, et al. Swimming ability of *Ptychobarbus kaznakovi* in yuqu river basin applied to fishway design[J]. *Journal of Hydroecology*, 2024, 45(5): 124-132. [蒲进, 王永猛, 石小涛, 等. 应用于鱼道设计的玉曲河流域裸腹叶须鱼游泳能力探究[J]. *水生态学杂志*, 2024, 45(5): 124-132.]
- [45] Chen Y Y, Wang X C, Wang H, et al. Comparative analysis of flow velocity perception in six benthic fish species from Han River[J]. *China Fisheries*, 2023(11): 76-78. [陈媛媛, 王晓臣, 王华, 等. 汉江六种底栖性鱼类感应流速比较分析[J]. *中国水产*, 2023(11): 76-78.]

The impact of different obstacles on swimming ability of three juvenile fishes

ZENG Yuping^{1,2}, YU Lixiong², LIN Xiaoju^{1,2}, WU Chijie^{2,3}, WANG Min^{2,4}, DUAN Xinbin², ZHU Fengyue², WANG Dengqiang^{2*}

1. College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. National Agricultural Science Observing and Experimental Station of Chongqing; Yangtze River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuhan 430223, China;

3. School of Animal Science and Technology, Yangtze University, Jingzhou 434025, China;

4. Key Laboratory of Freshwater Fish Reproduction and Development, Ministry of Education; School of Life Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: To understand the effects of the complex current environment created by different obstacles on the swimming ability of fish, juvenile black carp (*Mylopharyngodon piceus*), Chinese barb (*Spinibarbus sinensis*), and long-finned kissing fish (*Rhinogobio ventralis*) were used as target species. Critical swimming speeds and changes in induced current speeds were measured by placing round, square, and semi-circular barriers in the swimming flume. The results showed that there was no significant difference ($P>0.05$) between the critical swimming speeds of juvenile black carp under no obstacle and semicircular obstacle. The critical swimming speeds were significantly reduced ($P<0.05$) under cylindrical and square obstacles, with U_{crit}^a reduced by 36.3% and 15.6%, and U_{crit}^r reduced by 34.9% and 15.3%, respectively. The U_{crit}^r of juvenile Chinese barb was (15.20 ± 0.84) BL/s under square, which was 12.7% ($P<0.05$) lower compared to the control group (17.42 ± 0.55) BL/s. The critical swimming speeds of juvenile long-finned kissing fish were significantly lower than those of the group with no obstacle in all the three types of obstacles ($P<0.05$). The effect was most pronounced in the group with a round type obstacle U_{crit}^a and U_{crit}^r were (62.83 ± 7.52) cm/s, (8.17 ± 0.73) BL/s. There was no significant difference in the induced flow velocity of juvenile black carp and Chinese barb with no obstacle and different types of obstacles ($P>0.05$). The induced flow velocity of juvenile long finned kissing fish was significantly different ($P<0.05$) under round and square type of obstacles. The flow-sensing velocity ranges for the three species were as follows: U_{ind}^a from 1.60 cm/s to 5.20 cm/s, and U_{ind}^r from 0.17 BL/s to 0.62 BL/s. In the same obstacle environment, the U_{crit}^r and U_{ind}^r values of juvenile Chinese barbs were significantly higher than those of juvenile black carp and long-finned kissing fish. The critical swimming speeds of all the three experimental fish species were higher than their flow-sensing velocities. This study found that obstacles and their types significantly affected the critical swimming ability of fish, whereas the impact on flow-sensing velocity was significant only among different species. These results provide a reference for fish habitat and fishway design.

Key words: obstacle; *Mylopharyngodon piceus*; *Spinibarbus sinensis*; *Rhinogobio ventralis*; critical swimming speed; induced flow velocity

Corresponding author: WANG Dengqiang. E-mail: wdq@yfi.ac.cn