文章编号：1000-0615(2026)01-019110-11

水产学报, 2026, 50(1): 019110

水产学报
JOURNAL OF FISHERIES OF CHINA
DOI: 10.11964/jfc.20250414977

Science Press

石小涛, 包春鹏, 王妍, 等. 复杂变化水力环境下的草鱼稳定偏好水流速度 [J]. 水产学报, 2026, 50(1): 019110.
Shi X T, Bao C P, Wang Y, *et al*. Stabilized preferred flow velocity of *Ctenopharyngodon idella* under complex dynamic hydraulic conditions [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2026, 50(1): 019110 (in Chinese).

复杂变化水力环境下的草鱼稳定偏好水流速度

石小涛[1,2]， 包春鹏[1,2]， 王 妍[1,2]， 徐 勖[1,2]， 苏歆懿[1,2]， 吴 帅[1,2]，
宋年雄[1,2]， 陈小龙[1,2]， 孙钧键[1,2]， 王远铭[3]， 李敏讷[1,2*]

(1. 三峡大学，三峡库区生态环境教育部工程研究中心，湖北 宜昌 443002；
2. 三峡大学，湖北省鱼类过坝技术国际科技合作基地，湖北 宜昌 443002；
3. 四川大学，山区河流保护与治理全国重点实验室，四川 成都 610065)

摘要：【目的】为探究草鱼在复杂变化水力环境下是否存在稳定的自主偏好水流速度范围。**【方法】**以长江流域重要经济鱼类草鱼 (全长 20.5~25.5 cm) 为对象，在开放自循环变频水槽中设置 3 种沿水流方向等宽平行分布的流速范围，并设置包含 3 种不同流速 (低、中、高) 的所有组合工况，分别为工况Ⅰ (高-低-中工况，0.65-0.32-0.47 m/s)、工况Ⅱ (低-高-中工况，0.27-0.78-0.48 m/s) 与工况Ⅲ (低-中-高工况，0.23-0.43-0.91 m/s)，对比分析草鱼在 3 种复杂变化水力环境工况下的自主上溯行为，通过将背景流场与鱼类运动轨迹相耦合，结合两者概率密度函数布尔运算量化草鱼偏好流速范围。**【结果】**①草鱼在 3 种复杂变化水力环境中的停留时间随流速减小而延长，偏好选择低、中流速区而避开高流速区；②3 种工况下，草鱼均偏好停留在靠近水槽边壁的低、中流速区域，偏好流速范围分别为工况Ⅰ：0.40~0.45 m/s 与 0.60~0.67 m/s、工况Ⅱ：0.41~0.50 m/s与工况Ⅲ：0.18~0.31 m/s；③背景流速概率密度分布相似时 (如工况Ⅰ与工况Ⅱ)，草鱼存在稳定的偏好流速范围，为 0.41~0.45 m/s，当背景流速概率密度分布不同时(如工况Ⅲ与工况Ⅰ、Ⅱ)，草鱼的偏好流速不同，其偏好背景流速中概率密度分布较高且流速较低的区域。**【结论】**草鱼均偏好 3 种工况下的低、中流速区，且在复杂变化水力环境中草鱼存在稳定偏好水流速度。本研究结果可为塑造符合鱼类生态习性的鱼道水力环境及鱼类栖息地生境修复方案提供科学参考。

关键词：草鱼；复杂变化流场；偏好流速；游泳行为；鱼类保护

中图分类号：S 917.4　　**文献标志码：**A

水利工程的运行在发挥防洪、灌溉等重要功能的同时，阻断了河流连通性，导致洄游性鱼类无法顺利完成关键生活史活动[1-4]。鱼道作为重要生态补偿措施，是后水电开发背景下恢复河流生态连通性及洄游性鱼类生命通道的重要措施[5-6]。然而，目前鱼道监测结果表明，大多数鱼道运行

收稿日期：2025-04-25　　**修回日期：**2025-06-20
资助项目：国家自然科学基金青年基金 (52509100)；三峡库区生态环境教育部工程研究中心开放基金 (KF2022-10)；山区河流保护与治理全国重点实验室开放基金 (SKHL2424)
第一作者：石小涛，从事鱼类生态水文及水动力学、工程影响鱼类保护与过坝技术、环境毒理学研究，E-mail：fishlab@163.com
通信作者：李敏讷，从事过鱼设施水力学、鱼类行为学及水文水动力变化情势下的水生生物栖息地保护研究，E-mail：liminne@ctgu.edu.cn

©《水产学报》编辑部（CC BY-NC-ND 4.0）
中国水产学会主办　sponsored by China Society of Fisheries
Copyright © Editorial Office of Journal of Fisheries of China (CC BY-NC-ND 4.0)
https://www.china-fishery.cn

效果远未达预期目标[7]，其重要原因之一为鱼道内的水流环境与过鱼目标生态习性的不匹配[8]。此外，在鱼类生境栖息地修复过程中，合理调控栖息地流速环境对于提升栖息地适宜性、促进鱼类自然繁殖及其生长具有重要意义[9]。偏好流速作为鱼类在稳定游泳状态下主动选择的适宜流速区间[10]，有助于优化鱼道池室内的流态结构。同时通过降低上溯鱼类的能量损耗，为栖息地生境修复的流态塑造提供科学支撑[11]。

近年来，国内外学者围绕鱼类偏好流速展开了大量研究。主要采用两类技术路径：一是基于室内变速实验装置的可控条件测量；二是结合野外鱼类资源分布与河流水动力特征的耦合分析。在室内变速实验研究方面，李敏讷等[12]对鲢 (*Hypophthalmichthys molitrix*)、鳙 (*Aristichthys nobilis*) 幼鱼在过水断面呈收缩式的实验装置中进行偏好流速测试，得到鲢幼鱼的偏好流速小于 0.30 m/s，鳙幼鱼的偏好流速小于 0.30 m/s 与 0.50~0.55 m/s。谭均军等[13]通过耦合鱼道水力环境与鱼类运动轨迹，对鳙与草鱼 (*Ctenopharyngodon idella*) 幼鱼进行偏好流速测量，得到两种幼鱼偏好流速范围为 0.16~0.40 m/s。通过在明渠水槽中加入不同障碍物创造不同的特征流场，研究实验鱼在特征流场下的自主游泳行为，也是流速偏好测量的一种方法。王渊洋等[14]采用流速障碍装置测得青鱼 (*Mylopharyngodon piceus*)、草鱼、鲢及鳙幼鱼的共同偏好流速为 0.23~0.45 m/s。Li 等[15]采用齐口裂腹鱼 (*Schizothorax prenanti*) 在明渠水槽中进行偏好流速测量，得到齐口裂腹鱼的偏好流速范围为 0.25~0.50 m/s。在野外鱼类偏好流速研究方面，杨宇等[16]用三维数值模拟方法计算河段的流场特征，并结合鱼类声呐探测结果获得中华鲟 (*Acipenser sinensis*) 的偏好流速范围为 1.17~1.54 m/s。然而，目前对于鱼类偏好流速的研究仍存在一些局限性，如供鱼类自主选择的流速范围概率分布不均、流速工况单一及边壁效应对实验结果的影响等，致使复杂变化水力环境下鱼类是否存在稳定的偏好流速尚不明晰，因此有必要开展复杂变化流场下的鱼类偏好流速研究。

本研究以长江流域典型河湖洄游性鱼类草鱼为实验对象，在开放自循环变频水槽中设置 3 种沿水流方向等宽平行分布的特征流场，分别为工况 Ⅰ (高-低-中工况，0.65-0.32-0.47 m/s)、工况 Ⅱ (低-高-中工况，0.27-0.78-0.48 m/s) 与工况 Ⅲ (低-中-高工况，0.23-0.43-0.91 m/s)。获取草鱼在复杂变化水力环境下的运动轨迹，将草鱼运动轨迹与不同背景流速进行耦合分析，探讨草鱼偏好流速的分布规律与流场特征之间的关系。研究旨在为鱼道内部符合鱼类生态习性的水流环境构建及栖息地修复提供科学参考。

1　材料与方法

1.1　实验装置

实验水槽采用自主设计的开放式自循环变频水槽系统 (图 1)，该系统由前蓄水池、中间实验区、后蓄水池及水循环系统组成。前蓄水池尺寸为 1.20 m × 1.00 m × 2.20 m，中间实验区为矩形钢化玻璃明渠水槽 (尺寸为 4.30 m × 1.00 m × 0.50 m)，坡度为 0°，底部贴白色反光纸，正上方架设 2 台红外网络摄像头 (杭州海康威视数字技术股份有限公司)。中间实验区沿水流方向依次为整流区、分流区、游泳测试区与适应区 (图 1)。整流区与适应区均采用两副尺寸为 0.95 m × 0.01 m × 0.50 m 的不锈钢可拆卸拦网围成，确保来流均匀并防止实验鱼逃逸至前后蓄水池。分流区设置了 3 个 0.33 m 等宽进口，每个进口的前端插入不同数量的长方体格栅 (尺寸为0.05 m × 0.01 m × 0.60 m)，对流量进行分流，实现不同流速区域 (低、中、高) 的位置变换。当进口前端插入并变换的格栅数量分别为 5、3 与 0 块时，营造 0.33 m 等宽并行流速梯度区的排列组合。采用 2 块亚克力挡板 (1.00 m × 0.01 m × 0.50 m) 黏贴于实验水槽底部形成分流区，分流区至适应区中间段为游泳测试区，水槽出口设置水位调控闸门，用于调节实验水深。后蓄水池尺寸为 3.50 m × 1.00 m × 2.20 m。水循环系统由可调节频率的潜水泵与循环管道组成。潜水泵配有变频控制箱，通过控制变频箱的频率调节潜水泵泵送流量。为使得中间试验区的水流速度匹配目标鱼类游泳能力需求，本实验通过调整潜水泵泵送流量频率与出口水位调控闸门开度，共同塑造满足中间试验区流速需求的入流量。调试过程中发现当水泵频率为 190.28 Hz 且水位闸门全开时，中间试验区内流速满足设计需求，此时试验水槽水深为 14 cm，流量为 0.07 m^3/s。

1.2　实验暂养鱼

本研究用鱼由湖北宜都渔场提供，通过充氧

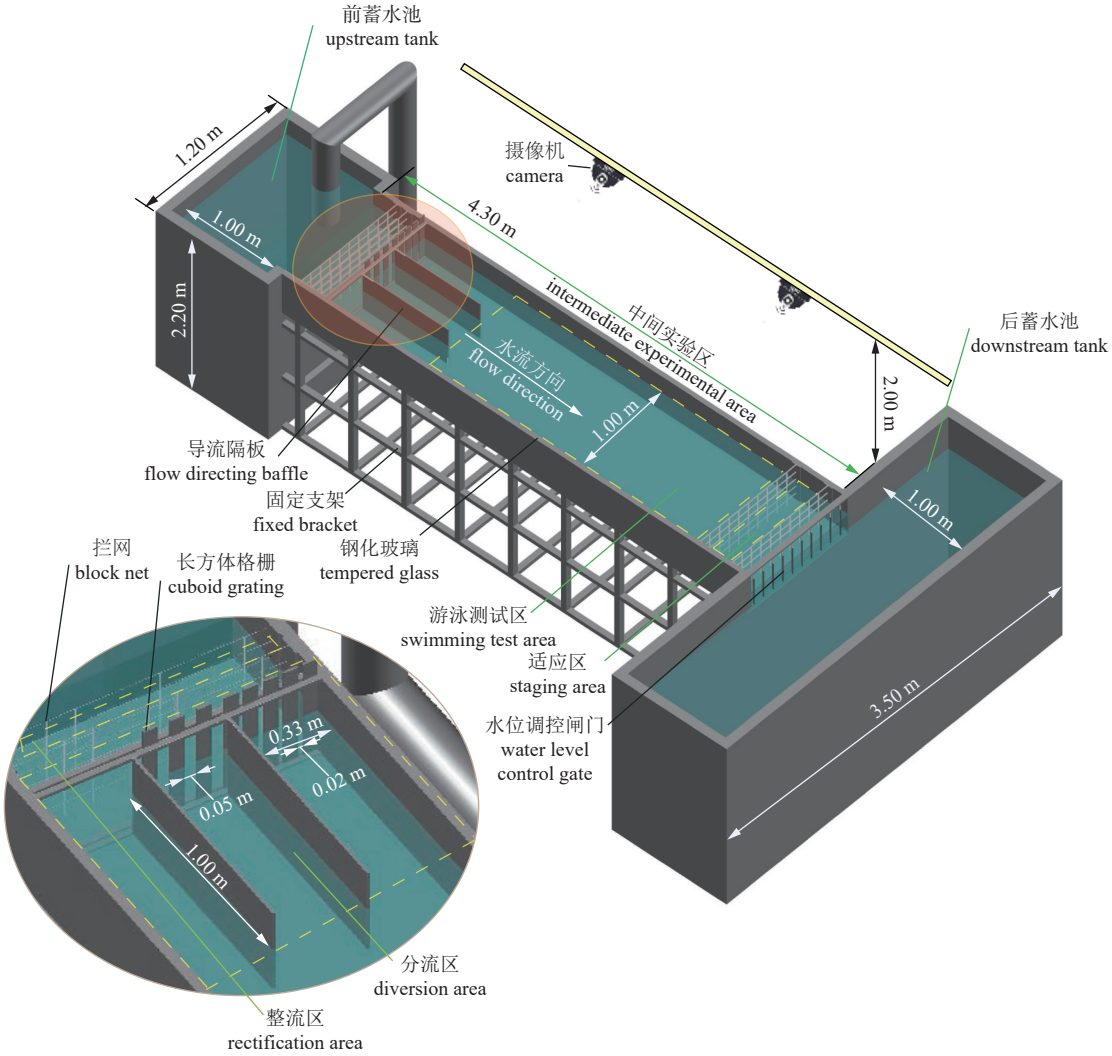

图 1　鱼类流速偏好实验装置

Fig. 1　Experimental device for flow velocity preferences of fish

水包运至三峡大学水科学与工程楼副楼生态水利学实验室。运输完成后，即刻将鱼转移至实验室暂养池内进行恢复，暂养水温保持在草鱼适宜水温范围内，暂养池内为充分曝气的自来水，暂养时长为 72 h，其间 24 h 持续充氧，每天更换暂养水的 30%，正式实验前禁食 48 h。暂养结束后，选取无外伤、行为正常的个体进行草鱼游泳偏好试验。本实验所有操作严格遵守动物福利伦理和动物试验安全审查规范，并按照水产动物试验伦理审查委员会制定的规章制度执行。

1.3　实验方法

根据草鱼游泳能力设置相应的实验工况[17]。为研究草鱼在复杂变化水力环境下的游泳行为，实验共设置 3 种工况，图 2 所示为工况Ⅲ的结构示意图。为达到所需设计流速要求，通过两方面进行设计流速的调控，分别为调整分流区不同进口处格栅数量及潜水泵泵送频率。调试过程中发现当不同进口处格栅数量为 0、3 及 5 块，且泵送频率为 190.28 Hz 时，满足不同进口中间位置 a、b、c 处的流速分别接近 0.80、0.50 与 0.20 m/s，即试验工况设计流速。

本研究使用声学多普勒点式流速仪 (ADV，Nortek 公司，挪威) 对 3 种流速工况中间试验区流速进行测量。每个工况沿水流方向与垂直于水流方向的测量点间距均为 10 cm，共设置 407 个测量点。为分析不同流速区域 (低、中、高) 的流速特征，在计算平均流速时，对所有测量点进行统计分析，剔除明显异常值后，取 5%~95% 区间内的数据进行平均值计算，得出最终的流速分布范围，计算结果见表 1。

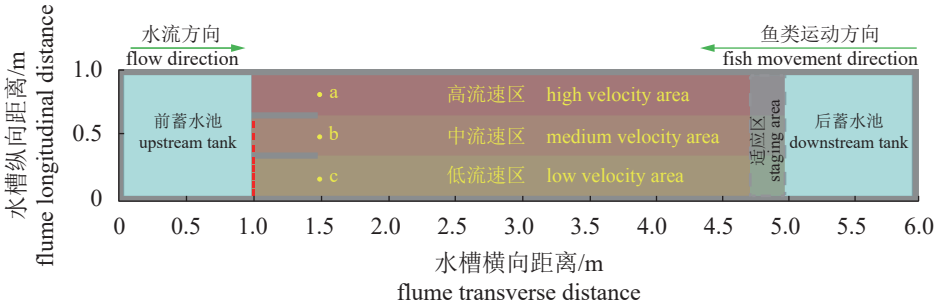

图 2　工况 III 低-中-高流速区组合流场示意图

图中字母代表不同流速区出口处流速测量标点。

Fig. 2　Schematic diagram of the combined flow field in the low-medium-high flow velocity area for case III

The letters in the figure represent the flow velocity measurements at the outlets of different flow areas.

表 1　3 种工况下不同流速区平均流速

Tab. 1　The average flow velocity in different flow velocity areas under three working conditions　m/s

工况 condition	低流速区 low velocity area	中流速区 medium velocity area	高流速区 high velocity area
I (高-低-中)　I (high-low-medium)	0.32 ± 0.09	0.47 ± 0.06	0.65 ± 0.08
II (低-高-中)　II (low-high-medium)	0.27 ± 0.14	0.48 ± 0.08	0.78 ± 0.15
III (低-中-高)　III (low-medium-high)	0.23 ± 0.08	0.43 ± 0.09	0.91 ± 0.19

在实验开始前，采用 ADV 对分流区下游 1/2 水深位置的平均流速进行测量[18]，以确保 3 种流速工况中分流区出口中部位置 (图 2 中，分别对应位置 a、b、c) 的流速分别接近 0.80、0.50 与 0.20 m/s，分别对应高、中与低流速区。确定流速之后，将草鱼放置在适应区适应 30 min，打开拦网，进行上溯。每组工况下共进行独立重复试验 30 次，通过对运动轨迹数据分析，发现每种工况下均有试验鱼表现出未上溯、原地停留的情况，且部分试验鱼运动轨迹重合度较高。前期运动轨迹分析为初步清洗无效数据，为获取有效鱼类行为信息且保证不同工况下分析样本一致性，本研究从 3 种工况下各筛选了 10 尾典型运动轨迹进行深入分析以更加明晰鱼类应对复杂变化水力环境时的行为响应规律。实验结束后，对选择试验个体的形态学指标进行测量记录，测量结果均采用平均值±标准差 (mean±SD) 的形式表示，详见表 2。

表 2　草鱼形态学指标

Tab. 2　Morphological indexes of *C. idella*

工况 condition	水温/℃ water temperature	体长/cm body length	全长/cm total length	体重/g body weight	肥满度*/(g/cm³) condition factor	实验鱼/尾 experimental fish
I (高-低-中)　I (high-low-medium)	27.34 ± 2.81	20.63 ± 1.53	23.63 ± 1.43	146.50 ± 34.10	1.63 ± 0.12	30
II (低-高-中)　II (low-high-medium)	26.62 ± 0.40	19.45 ± 1.40	22.85 ± 1.34	125.30 ± 34.44	1.67 ± 0.16	30
III (低-中-高)　III (low-medium-high)	26.40 ± 0.82	18.34 ± 0.83	22.19 ± 1.22	103.63 ± 17.48	1.65 ± 0.10	30

注：*.肥满度= 体重/ 体长^3×100。

Notes: *. condition factor = body weight / body length ^{3} ×100.

1.4　数据分析

偏好流速的量化表征　采用 ADV 实测流场，ADV 测点探头位于距离水槽槽底 7 cm 的位置，即 1/2 水深处。在水槽中，按 0.10 m × 0.10 m 的网格布设测点，每个工况下测量 407 个点 (图 3)，共计测量 1 221 个点，采样频率为 50 Hz，单次测试时长 60 s。实验视频经过轨迹跟踪处理，提取草鱼在 1 h 内的运动轨迹。草鱼的偏好流速通过其在不同流速工况下的停留时间来评估。每个工况下独立重复 30 尾放鱼实验，共计 90 组。采用 Matlab R2020b 软件绘制概率密度分布图，将轨迹点所在流速概率密度分布与 ADV 实测流速概率密

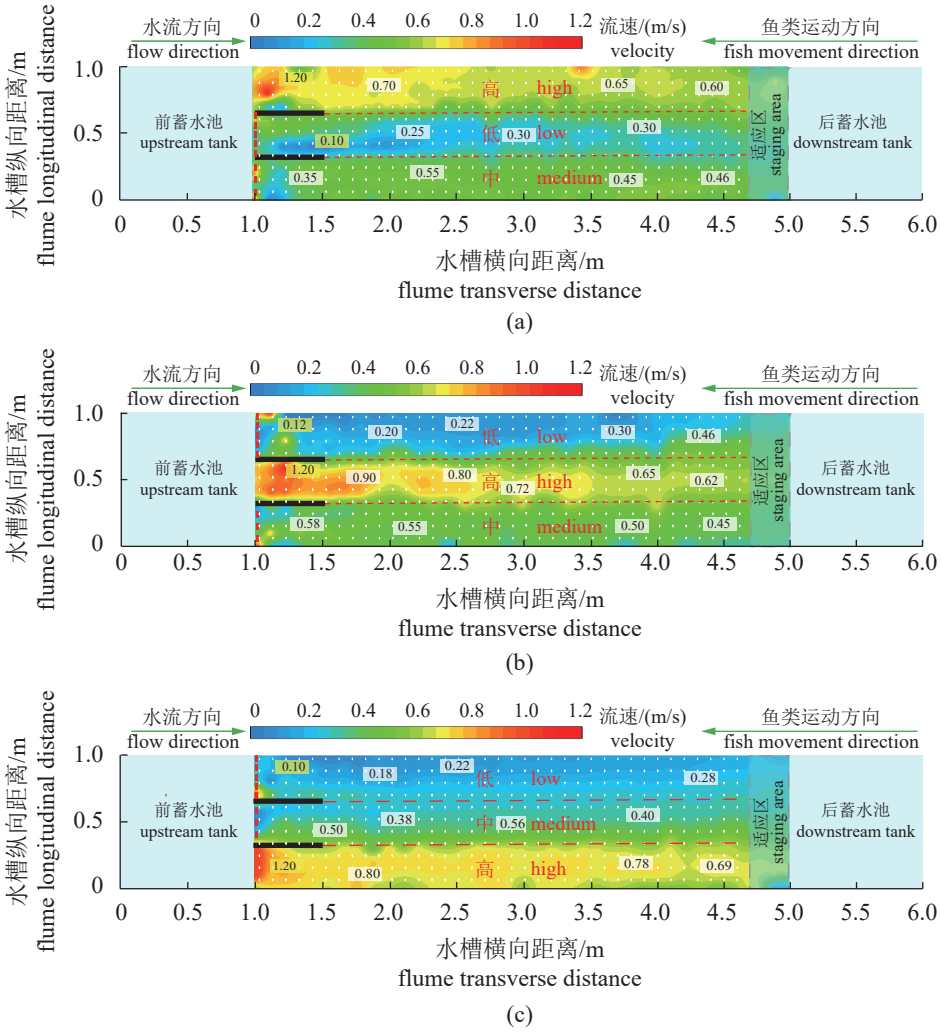

图 3　3 种工况下流速分布示意图

(a) 工况 Ⅰ (高-低-中)，(b) 工况 Ⅱ (低-高-中)，(c) 工况Ⅲ (低-中-高)，图 4 同。

Fig. 3　Schematic diagram showing flow velocity distribution under three conditions

(a) condition Ⅰ (high-low-medium), (b) condition Ⅱ (low-high-medium), (c) condition Ⅲ (low-medium-high), the same as Fig 4.

度分布相减，获得草鱼在不同流速条件下的偏好流速曲线图，以 $Y=0$ 为基准，Y 值大于 0 的区间即为草鱼的偏好流速范围[19]。

实验视频分析方法　使用 Format Factory 4.9.0 软件转换视频格式，将 MP4 视频文件格式转为 AVI，使用 De Fishr 1.0 软件对视频进行畸变处理，使用 Tracker 软件对视频进行轨迹跟踪处理，处理时间间隔为 0.10 s (FPS:10 帧/s)。

数据分析　实验数据采用 SPSS 22.0 软件进行统计分析，使用 Surfer 13 软件绘制流场图 (图 3) 与流场轨迹叠加图 (图 4)，采用 win ADV 软件对测点流速数据进行处理。测点流速 V 为测点 x、y、z 三个方向上的合速度值，测点处三个方向的时间平均速度分量分别记为 $\bar{u}$、$\bar{v}$、$\bar{w}$。本研究中 ADV 测点均处于同一水平面，即草鱼游泳轨迹对应的平面，因此最后进行耦合分析的为草鱼运动平面所处的二维流场数据，测点流速：

$$V=\sqrt{\bar{u}^2+\bar{v}^2+\bar{w}^2}$$

2　结果

2.1　不同工况下特征流场分布

图 3 展示了 3 种特征流场下实测流速分布，流场内均匀分布白点为 ADV 实测流速点。3 种工况下流速分区明显，高流速区、中流速区与低流速区的表征颜色依次为黄色、绿色与蓝色。水槽内流速范围为 0.10~1.20 m/s，高流速区为 0.60~

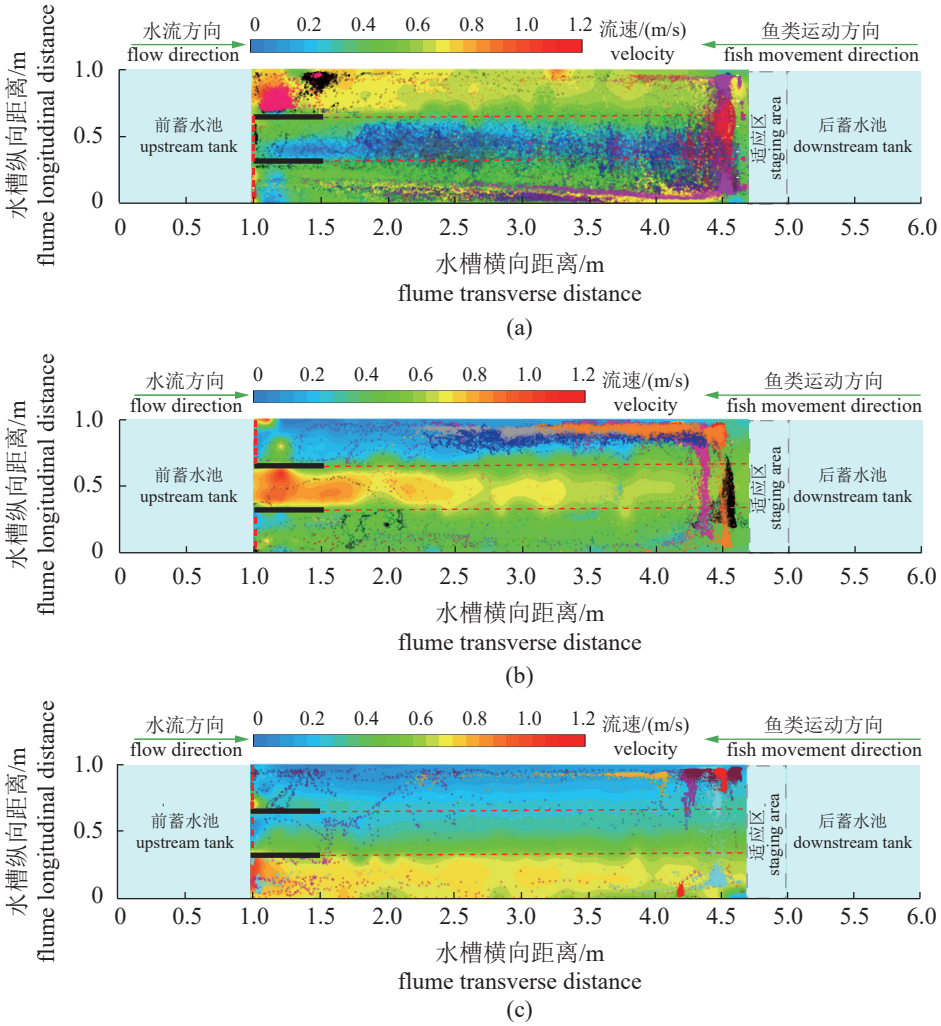

图 4　3 种工况下流速与鱼类轨迹叠加分布示意图

Fig. 4　Schematic diagrams showing superimposed flow velocity and fish trajectories under three conditions

1.20 m/s，中流速区为 0.35~0.58 m/s，低流速区为 0.10~0.46 m/s，沿着 X 轴方向流速分区逐渐出现部分掺混。在每个工况下，水槽最大流速均在高流速区的进口处，且最小流速均位于低流速区。

2.2　草鱼游泳轨迹与流场耦合

将 3 种工况下的流场与该工况下 10 尾鱼的游动轨迹进行耦合，每个工况下不同颜色的点代表不同鱼的完整运动轨迹点 (图 4)。工况 Ⅰ 下，实验水槽后部靠近适应区及中流速区边壁附近轨迹点最多，其次为中间低流速区，而高流速区的轨迹点密度最低，仅有少量轨迹点分布在高流速区的出口附近。工况 Ⅱ 下，草鱼的分布较为明显，低流速区后段轨迹点最多，中流速区与末尾靠近适应区有部分轨迹点，中间高流速区轨迹点最少。工况 Ⅲ 下，轨迹点集中于低流速区末端，中流速区与高流速区均有轨迹点分布，但轨迹点较少。3 种工况下草鱼的轨迹点分布显示出其对不同流速区的偏好。在低流速与中流速区，尤其是靠近适应区的位置，草鱼的活动较为频繁，而在高流速区，草鱼的活动相对较少。

2.3　草鱼上溯流场偏好

本研究中，提取 3 种工况下所有测量点水流速度数据 (明显异常值除外)，分别绘制其概率分布点，并利用 Matlab 中的 ksdensity 函数进行曲线拟合，生成平滑的流速概率密度函数曲线 (图 5-a)。而试验鱼轨迹点对应流速概率密度曲线则是通过提取 3 种工况下鱼类轨迹点对应的水流速度，同理分别绘制其概率分布点，并利用 Matlab 中 ksdensity 函数进行曲线拟合 (图 5-b)。

图 5-a 为 3 种工况下 ADV 实测背景流场的流

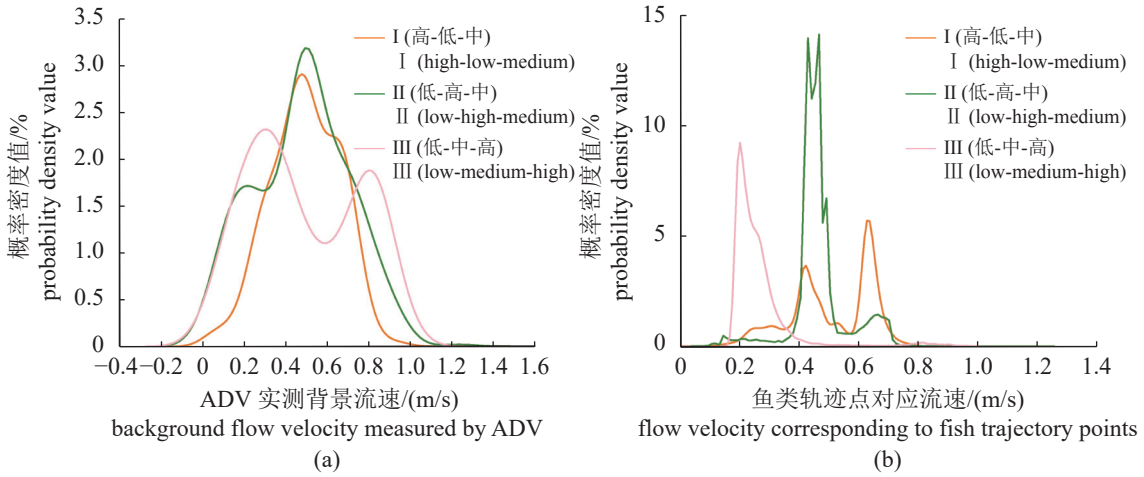

图 5　流速概率密度分布图

Fig. 5　Probability density distribution of flow velocity

速概率密度分布，流速范围主要集中于 0.10~1.20 m/s。其中，工况Ⅰ与工况Ⅱ背景流场分布特征较为接近，二者在 0.40~0.60 m/s 均存在一个峰值，概率密度峰值分别为 2.9% 与 3.2%，说明两种工况下流速区域位置虽然改变，但其流场中的流速组成范围保持相对稳定，且流场中大部分流速集中于 0.40~0.60 m/s。相比之下，工况Ⅲ背景流场分布特征差异较大，在 0.20~0.40 m/s 与 0.70~0.90 m/s 两个流速范围内均出现概率密度峰值分别为 2.3% 与 1.9%。说明该工况下流速区域位置发生改变后，该工况的流速组成不再与工况Ⅰ和Ⅱ保持一致，其主要流速集中于上述两个区间内。图 5-b 展示了实验中提取的鱼类轨迹点所对应的流速概率密度分布，呈现出更明显的离散特征。工况Ⅰ条件下，草鱼轨迹点主要集中于 0.38~0.50 m/s 与 0.60~0.70 m/s 两个区间，对应的概率密度峰值分别为 3.8% 与 6.8%。工况Ⅱ条件下，草鱼轨迹点在 0.40~0.57 m/s 出现多个局部峰值，尽管分布略有波动，但整体较为集中，最大概率密度值为 12.3%。工况Ⅲ条件下，草鱼的轨迹点密度主要集中于 0.18~0.40 m/s，仅出现 1 个显著峰值，概率密度值为 9.2%。

为量化研究草鱼在不同工况下的偏好流速，提取 3 种工况下草鱼轨迹点流速数据，绘制轨迹点对应流速概率密度分布图 (图 5-b)，结合 ADV 实测背景流场的流速概率密度分布图 (图 5-a)，结合二者概率密度函数布尔运算，分别对其进行差值处理，得到各工况下的流速偏好曲线图 (图 6)。图中在 $Y=0$ 参考线以上的区域均为该工况下草鱼的偏好流速范围。

工况Ⅰ下草鱼表现出 2 个偏好流速区间，分别为 0.40~0.45 m/s 与 0.60~0.67 m/s；工况Ⅱ下偏好流速集中于 0.41~0.50 m/s；工况Ⅲ下偏好流速范围为 0.18~0.31 m/s (图 6)。工况Ⅲ下草鱼的偏好流速范围最低，在工况Ⅰ与工况Ⅱ下草鱼有相同的偏好流速范围为 0.41~0.45 m/s。

3　讨论

本研究通过对比分析 3 种工况下草鱼的自主上溯行为，定量分析了其在不同工况下的偏好流速范围。Li 等[15] 以齐口裂腹鱼为研究对象，实验工况与本实验工况Ⅲ的高-中-低流速组合特征流场类似，通过观察齐口裂腹鱼在特征流场下的轨迹分布规律，进行了偏好流速研究，结果显示，实验鱼具有趋向靠近边壁低流速区 (0.25~0.50 m/s) 且避开高流速区域 (1.50~2.50 m/s) 的行为特征。石小涛等[20] 以短须裂腹鱼 (*S. wangchiachii*) 为对象进行竖缝式鱼道内上溯研究，也发现实验鱼运动轨迹明显避开高流速区域的规律，大多数鱼选择 0.05~0.30 m/s 的流速区域。在多种流速共存的复杂流场中，鱼类在自主上溯的过程中依靠其敏感的侧线系统感知周围水流中的细微变化，侧线感受器能够检测水流的速度[21-22]，选择合适的上溯路径，鱼类趋向于选择低流速区而避开高流速区，可能的原因是低流速区可以帮助鱼类减少鱼体能耗[23]。这与本实验草鱼在 3 种特征流场中的停留时间随流速增加而降低，且偏好低、中流速区而避开高流速区的结果一致。

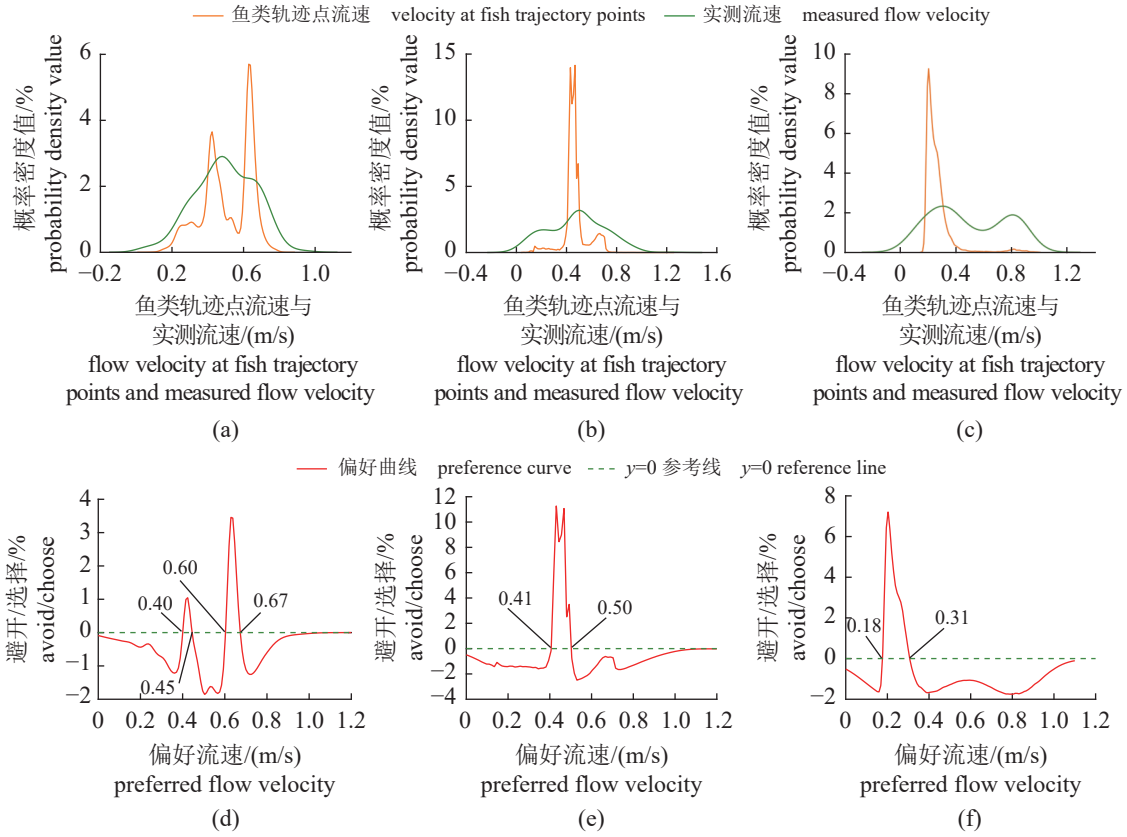

图 6　3 种工况下流速概率密度分布图

(a) Ⅰ(高-低-中) 流速概率密度分布图，(b) Ⅱ (低-高-中) 流速概率密度分布图，(c) Ⅲ (低-中-高) 流速概率密度分布图，(d) Ⅰ(高-低-中) 流场偏好曲线图，(e) Ⅱ (低-高-中) 流场偏好曲线图，(f) Ⅲ (低-中-高) 流场偏好曲线图。

Fig. 6　Probability density distribution diagrams of flow velocity and turbulent kinetic energy under three conditions

(a) Ⅰ (high-low-medium) flow velocity probability density distribution map, (b) Ⅱ (low-high-medium) flow velocity probability density distribution map, (c) Ⅲ (low-medium-high) flow velocity probability density distribution map, (d) Ⅰ (high-low-medium) flow preference curve, (e) Ⅱ (low-high-medium) flow preference curve, (f) Ⅲ (low-medium-high) flow preference curve.

流速是影响鱼类行为的重要水力因子[24]，鱼类在稳定游泳状态下对水流速度具有自主选择的行为[25]。本研究中，草鱼偏好流速范围分别对应为工况Ⅰ (0.40~0.45 m/s 与 0.60~0.67 m/s)、工况Ⅱ (0.41~0.50 m/s) 与工况Ⅲ (0.18~0.31 m/s)。可以发现，3 种不同工况下草鱼的偏好流速范围大多在 0.18~0.50 m/s。谭均军等[13] 测得草鱼幼鱼偏好流速范围为 0.16~0.40 m/s，且王渊洋等[14] 基于流速障碍装置测得草鱼幼鱼偏好流速范围为 0.12~0.49 m/s，这与本实验中测得的草鱼偏好流速基本相同。此外，工况Ⅰ与工况Ⅱ背景流场分布特征较为接近时 (图 5-a)，草鱼表现出稳定的共同流速偏好范围为 0.41~0.45 m/s，这说明当背景流场分布接近时，草鱼的偏好流速仍然存在稳定的流速范围。另外，实验选取 3 种不同工况进行复杂变化流场下草鱼偏好水流速度的研究，预期的实验结果是研究 3 种工况下背景流场相似时，草鱼的偏好流速范围不会随着不同流速区位置的改变而发生变化，但工况Ⅲ下的背景流场并未和工况Ⅰ、Ⅱ的相同，因此工况Ⅰ、Ⅱ与工况Ⅲ之间不存在稳定的偏好流速范围，但工况Ⅰ、Ⅱ下草鱼存在稳定的偏好流速范围 0.41~0.45 m/s，一定程度上说明了草鱼的偏好流速具有一定的稳定性。

本研究结果表明，在多种流速共存的条件下，实验鱼更趋向于低流速与中流速区域，而在高流速区域的停留时间最少。复杂变化水力环境下的水流环境更符合自然环境中鱼类遇到的实际情况，这为鱼道设计提供了重要的参考依据。此外，健全管理与技术问题也同样对鱼道运行效果具有重要意义。管理问题包括明确救鱼责任主体，进行有效的监督管理和责任追究并制定相应的奖惩机制，科学进行救鱼方案论证、设计与运行各个阶

段的讨论；技术问题包括完善洄游鱼类的完整生活史、进行救鱼方案的选择与设计、提出科学合理的鱼道运行与效果评价标准。同时，塑造鱼类生境栖息地修复区的流速范围为偏好流速，有助于提高鱼类游向栖息地的可达性，但栖息地水流环境营造过程中，鱼类偏好水流速度仅为塑造利于鱼体自由自主节能运动的流速范围，还应综合考虑鱼类索饵、产卵及越冬等关键生活史的水文水动力需求，如带有周期性的流量、水位、脉冲频率、发生时机、持续时间和变化率等要素信息，对鱼类完成生活史具有重要意义[26]。鱼道及栖息地内鱼类行为受到多种环境因子的影响，未来需要围绕“鱼水关系”开展更加系统的理论及野外研究，本研究结果可为鱼道工程设计及鱼类栖息地水力环境营造提供科学参考。

（作者声明本文无利益冲突）

参考文献 (References)：

[1] Grill G, Lehner B, Thieme M, *et al*. Mapping the world's free-flowing rivers[J]. Nature, 2019, 569(7755): 215-221.

[2] Lin Q C. Influence of dams on river ecosystem and its countermeasures[J]. Journal of Water Resource and Protection, 2011, 3(1): 60-66.

[3] 沐希成, 李嘉欣, 李峰, 等. 不同声音参数和水流条件下声音屏障对齐口裂腹鱼的阻拦效果初探 [J]. 水产学报, 2025, 49(7): 079512.
Mu X C, Li J X, Li F, *et al*. Preliminary study on acoustic barrier efficacy against Schizothorax prenanti under varied acoustic parameters and hydraulic conditions[J]. Journal of fisheries of china, 2025, 49(7): 079512(in Chinese).

[4] He F Z, Zarfl C, Tockner K, *et al*. Hydropower impacts on riverine biodiversity[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2024, 5(11): 755-772.

[5] Noonan M J, Grant J W A, Jackson C D. A quantitative assessment of fish passage efficiency[J]. Fish and Fisheries, 2012, 13(4): 450-464.

[6] 王琳, 冯镜洁, 李然. 鱼道内过饱和总溶解气体释放规律的试验研究 [J]. 工程科学与技术, 2017, 49(6): 30-37.
Wang L, Feng J J, Li R. Experimental study on dissipation of supersaturated total dissolved gas in a fishway[J]. Advanced Engineering Sciences, 2017, 49(6): 30-37 (in Chinese).

[7] Bunt C M, Castro - Santos T, Haro A. Performance of fish passage structures at upstream barriers to migration[J]. River Research and Applications, 2012, 28(4): 457-478.

[8] 汪靖阳, 李广宁, 郄志红, 等. 竖缝式鱼道内齐口裂腹鱼洄游行为模拟 [J]. 农业工程学报, 2023, 39(2): 173-181.
Wang J Y, Li G N, Qie Z H, *et al*. Simulation for the migration of *Schizothorax prenanti* in vertical slot fishway[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(2): 173-181 (in Chinese).

[9] 鲁芸, 吴紫涵, 刘清园, 等. 基于鱼类产卵需求的栖息地修复效果评价 [J]. 环境工程技术学报, 2023, 13(2): 733-741.
Lu Y, Wu Z H, Liu Q Y, *et al*. Evaluation of habitat restoration effect based on fish spawning requirements[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2023, 13(2): 733-741 (in Chinese).

[10] 向露露, 石小涛, 林晨宇, 等. 流速、照度与群体个体交互对鳙幼鱼趋流游泳行为的综合影响 [J]. 生态学杂志, 2024, 43(4): 946-958.
Xiang L L, Shi X T, Lin C Y, *et al*. Comprehensive impacts of flow velocity, illuminance, and individual interactions within a fish school on the rheotactic swimming behavior of juvenile bighead carp[J]. Chinese Journal of Ecology, 2024, 43(4): 946-958 (in Chinese).

[11] 杨梓静, 林晨宇, 石小涛, 等. “水力-集群”交互作用对鲢幼鱼上溯行为的影响 [J]. 水产学报, 2025, 49(7): 079513.
Yang Z J, Lin C Y, Shi X T, *et al*. Effects of hydrodynamic-schooling interaction on upstream migration behaviour of juvenile Hypophthalmichthys molitrix[J]. Journal of fisheries of China, 2025, 49(7): 079513 (in Chinese).

[12] 李敏讷, 朱海峰, 金志军, 等. 加速流对鲢、鳙幼鱼下行过程中游泳行为的影响 [J]. 水生生物学报, 2018, 42(3): 571-577.
Li M N, Zhu H F, Jin Z J, *et al*. The effect of accelerating flow on swimming behavior of juvenile *Aristichthys nobilis* and *Hypophthalmichthys molitrix* during downstream migration[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2018, 42(3): 571-577 (in Chinese).

[13] 谭均军, 高柱, 戴会超, 等. 竖缝式鱼道水力特性与鱼类运动特性相关性分析 [J]. 水利学报, 2017, 48(8): 924-932,944.
Tan J J, Gao Z, Dai H C, *et al*. The correlation analysis between hydraulic characteristics of vertical slot fishway and fish movement characteristics[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(8): 924-932,944 (in Chinese).

[14] 王渊洋, 李鸿, 柯森繁, 等. 四大家鱼幼鱼下行行为及流场偏好研究 [J]. 水生态学杂志, 2024, 45(4): 117-124.
Wang Y Y, Li H, Ke S F, *et al*. Swimming behaviours and flow field preferences of the Four Major Chinese Carps during downstream migration[J]. Journal of Hydroecology, 2024, 45(4): 117-124 (in Chinese).

[15] Li M N, An R D, Chen M, *et al*. Evaluation of volitional swim-

ming behavior of *Schizothorax prenanti* using an open-channel flume with spatially heterogeneous turbulent flow[J]. Animals, 2022, 12(6): 752.

[16] 杨宇, 谭细畅, 常剑波, 等. 三维水动力学数值模拟获得中华鲟偏好流速曲线 [J]. 水利学报, 2007(S1): 531-534,541.
Yang Y, Tan X C, Chang J B, *et al*. Chinese sturgeon (*Acipensor sinensis*) preference velocities from river simulation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007(S1): 531-534,541 (in Chinese).

[17] 龚丽, 吴一红, 白音包力皋, 等. 草鱼幼鱼游泳能力及游泳行为试验研究 [J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2015, 13(3): 211-216.
Gong L, Wu Y H, Bai Y B L G, *et al*. Experimental study on swimming capability and swimming behavior of juvenile grass carp[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2015, 13(3): 211-216 (in Chinese).

[18] 李广宁, 孙双科, 郭子琪, 等. 仿自然鱼道水力及过鱼性能物理模型试验 [J]. 农业工程学报, 2019, 35(9): 147-154.
Li G N, Sun S K, Guo Z Q, *et al*. Physical model test on hydraulic characteristics and fish passing performance of nature-like fishway[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(9): 147-154 (in Chinese).

[19] 雷青松, 涂志英, 李志敏, 等. 马口鱼自主上溯游泳行为及对流场选择策略研究 [J]. 武汉大学学报 (工学版), 2020, 53(6): 483-491.
Lei Q S, Tu Z Y, Li Z M, *et al*. Swimming performance and flow-field selection strategy of *Opsariichthys bidend* during upstream migration[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2020, 53(6): 483-491 (in Chinese).

[20] 石小涛, 邓星勇, 陈小龙, 等. 竖缝式鱼道内短须裂腹鱼上溯行为模拟 [J]. 农业工程学报, 2025, 41(2): 175-184.
Shi X T, Deng X Y, Chen X L, *et al*. Simulation of the upstream behavior of *Schizothorax wangchiachii* in vertical slot fishway[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2025, 41(2): 175-184 (in Chinese).

[21] 齐亮, 杨宇, 王悦, 等. 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), 2012, 40(4): 438-445.
Qi L, Yang Y, Wang Y, *et al*. Fish behavior characteristics in response to change of hydrodynamic environment[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2012, 40(4): 438-445 (in Chinese).

[22] Liao J C, Beal D N, Lauder G V, *et al*. Fish exploiting vortices decrease muscle activity[J]. Science, 2003, 302(5650): 1566-1569.

[23] Rodriguez Á, Bermúdez M, Rabuñal J R, *et al*. Optical fish trajectory measurement in fishways through computer vision and artificial neural networks[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2011, 25(4): 291-301.

[24] Ruiz-Coello M X, Bottacin-Busolin A, Marion A. A Eulerian-Lagrangian model for simulating fish pathline distributions in vertical slot fishways[J]. Ecological Engineering, 2024, 203: 107264.

[25] 林晨宇, 罗佳, 刘德富, 等. 鳙幼鱼在下行过程中应对加速流的行为响应研究 [J]. 水生生物学报, 2017, 41(3): 560-564.
Lin C Y, Luo J, Liu D F, *et al*. The behavior response of juvenile *Aristichthys nobilis* to the accelerating flow during their downstream migration[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2017, 41(3): 560-564 (in Chinese).

[26] 林俊强, 彭期冬. 河流栖息地保护与修复 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2019: 9, 164.
Lin J Q, Peng Q D. River habitat protection and restoration[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2019: 9, 164 (in Chinese).

Stabilized preferred flow velocity of *Ctenopharyngodon idella* under complex dynamic hydraulic conditions

SHI Xiaotao [1,2], BAO Chunpeng [1,2], WANG Yan [1,2], XU Xu [1,2], SU Xinyi [1,2], WU Shuai [1,2], SONG Nianxiong [1,2], CHEN Xiaolong [1,2], SUN Junjian [1,2], WANG Yuanming [3], LI Minne [1,2*]

(1. *Engineering Research Center of Eco-environment in Three Gorges Reservoir Region*, *Ministry of Education*, *China Three Gorges University*, *Yichang* 443002, *China*;
2. *Hubei International Science and Technology Cooperation Base of Fish Passage*, *China Three Gorges University*, *Yichang* 443002, *China*;
3. *State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering*, *Sichuan University*, *Chengdu* 610065, *China*)

Abstract: This study investigated whether *Ctenopharyngodon idella* exhibits a consistent range of preferred flow velocities under complex dynamic hydraulic conditions. *C. idella*, a commercially important species in the Yangtze River Basin (total length: 20.5-25.5 cm), was selected as the research subject. Laboratory experiments were conducted in an open recirculating flume with variable-frequency control, where three characteristic flow scenarios were established. Each scenario consisted of three parallel flow areas of equal width arranged along the streamwise direction. These areas represented all possible combinations of three velocity levels (low, medium and high): Condition I (high-low-medium: 0.65-0.32-0.47 m/s), Condition Ⅱ (low-high-medium: 0.27-0.78-0.48 m/s), and Condition Ⅲ (low-medium-high: 0.23-0.43-0.91 m/s). The upstream swimming behavior of *C. idella* under three complex hydraulic conditions was comparatively analyzed by coupling fish trajectories with background flow fields, and Boolean operations on probability density functions were applied to quantify the preferred flow-velocity ranges of *C. idella*. The results showed that: ① fish residence time increased with decreasing flow velocity, indicating a clear tendency to avoid high-velocity areas and prefer low to medium flow regions; ② under all conditions, *C. idella* predominantly occupied areas adjacent to flume sidewalls where lower velocities prevailed, with preferred ranges identified as 0.40-0.45 m/s and 0.60-0.67 m/s in Condition I, 0.41-0.50 m/s in Condition Ⅱ, and 0.18-0.31 m/s in Condition Ⅲ; and ③ when background flow distributions were similar (Conditions I and Ⅱ), fish exhibited a stable preference for 0.41-0.45 m/s, whereas under distinct flow regimes (e.g., Condition Ⅲ different from Condition I and Condition Ⅱ), preference shifted toward areas with higher probability density and lower velocities. These findings indicate that *C. idella* consistently prefers low to medium flow regimes, and *C. idella* has a stable preferred flow velocity under complex dynamic hydraulic conditions. This study provides scientific reference to support the ecological design of fishways and flow restoration strategies tailored to the behavioral responses of native fish species.

Key words: *Ctenopharyngodon idella*; complex changing flow field; preferred flow velocity; swimming behavior; fish conservation

Corresponding author: LI Minne. E-mail: liminne@ctgu.edu.cn

Funding projects: National Natural Science Foundation of China Young Scientists Fund (52509100); Open Fund of the Engineering Research Center for Eco-environment of the Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education (KF2022-10); Open Fund of the State Key Laboratory of Mountainous River Protection and Control (SKHL2424)