水产学报
JOURNAL OF FISHERIES OF CHINA
DOI: 10.11964/jfc.20241014732
Science Press

柯森繁, 石小涛, 孙攀, 等. 过鱼设施设计有关的鱼类行为学研究进展 [J]. 水产学报, 2026, 50(3): 039501.
Ke S F, Shi X T, Sun P, *et al*. Advancements in fish behavioral research related to fish passage facility design [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2026, 50(3): 039501 (in Chinese).

·综述·

过鱼设施设计有关的鱼类行为学研究进展

柯森繁[1,2]，石小涛[1,2*]，孙　攀[1]，袁银豪[1]，庞凯文[1]，李冬晴[1]，姜泽文[1]，俞晓伟[1]，涂志英[2,3]
(1. 三峡大学水利与环境学院，湖北 宜昌　443002；
2. 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；
3. 三峡大学生物与制药学院，湖北 宜昌　443002)

摘要：鱼类行为特征是指导水电工程过鱼设施设计重要的基础数据支撑。本文聚焦与过鱼设施设计强相关的鱼类游泳能力、鱼类行为与流场响应关系、诱驱鱼技术及过鱼设施过鱼效果监测等 4 个方面的鱼类行为学研究，回顾了与上述行为学研究有关的 121 篇文献，总结了各行为学试验实施过程中测试条件要求及强调的关键技术参数，提出了针对当前鱼类行为学试验设计不足的建议，旨在进一步科学合理设计与过鱼设施有关的鱼类行为学试验，以提升过鱼设施过鱼能力。

关键词：过鱼设施；鱼类行为学；游泳能力；诱驱鱼技术；过鱼效果
中图分类号：S 956；TV 131.61　　**文献标志码：**A

水电是我国贡献最大的清洁可再生能源，也是我国能源革命阶段的主力军。新时期的水电开发强调要以“生态优先，绿色发展”为理念，从电站大坝规划-施工-运行的整个建设过程要始终贯彻绿色可持续发展[1-2]。然而，近几年水电建设在带来巨大经济效益的同时引发了一系列生态问题[3]，其中以“鱼类保护”为主题的河流生态修复研究广受关注。水电大坝建设改变了原有水系连通格局及河流生境条件，鱼类生活史需求的生命廊道受阻，洄游鱼类上下行完成索饵、越冬及产卵过程必然遭受巨大挑战[4-6]。为减缓水电大坝建设对鱼类造成的负面影响，修建过鱼设施是恢复鱼类洄游通道的主要途径之一。过鱼设施主要包括鱼道、升鱼机、仿自然通道、集运鱼系统和鱼闸[7]。据不完全统计，截至 2023 年我国已建过鱼设施数量达 210 余座，其中鱼道占比高达 67%[8-10]，而已规划未建的过鱼设施工程正大量开展。尽管近几年我国过鱼设施建设增量加快，但大多数已建过鱼设施过鱼效果并不理想，过鱼设施进口诱鱼难、内部局部水流的流速过大、流态紊乱、出口鱼类趋流反应弱等问题仍是制约鱼类成功上溯的关键病灶。因此，开展过鱼设施设计相关的鱼类行为学研究对提升过鱼设施效果至关重要。

为提升过鱼设施进口-内部-出口三个关键部

收稿日期：2024-10-25　　**修回日期：**2025-05-14
资助项目：国家自然科学基金 (52279069，U2340218)；湖北省自然科学基金创新群体项目 (2023AFA005)
第一作者：柯森繁，从事生态水利及鱼类行为学研究，E-mail：15926989126@163.com
通信作者：石小涛，从事生态水利学研究，E-mail：fishlab@163.com

位过鱼效率，通常需要回答 3 个关键问题：①过鱼对象在上溯时行为特征及游泳能力；②过鱼对象上溯时的偏好流场；③如何提高过鱼对象上溯成功率。开展过鱼对象游泳能力测试、解析过鱼对象游泳行为与流场响应关系、确定过鱼设施进口物理驱诱鱼关键参数和定量评价过鱼设施过鱼效果普遍认为是解决问题的突破口。随着流场可视化及鱼类行为定量技术的发展，通过物理模型试验、原型监测与计算机数值模拟等方法可有效获取鱼类游泳能力指标、过鱼设施水力指标、物理驱诱鱼指标及过鱼效果评价指标等关键参数[11-12]。然而，因现实条件限制，不同研究者采用的试验装置、条件和方法等存在区别，同一种鱼测试结果也可能表现出显著差异，如阿氏双边鱼 (*Ambassis agassizii*)、杜氏虹银鱼 (*Melanotaenia duboulayi*)、圆尾麦氏鲈 (*Macquaria ambigua*) 在体积为 10 L 的 Loligo 水槽中测得的临界游泳速度分别为 (5.5±0.3)、(5.6±0.3) 和 (4.6±0.3) BL/s (体长每秒)，在体积为 185 L 的 Loligo 水槽中测得的临界游泳速度分别为 (8.6±0.3)、(7.9±0.1) 和 (5.9±0.4) BL/s，水槽类型对临界游泳速度的结果有显著影响[13]。过鱼设施设计若选择以某种鱼为研究对象，应了解行为学实验设计要求，选择合适环境变量，采用认可度高的研究方法，以保证测试结果具有可靠性和普适性。

鉴于此，本文从鱼类游泳能力测试、鱼类行为与过鱼设施流场响应关系、驱诱鱼技术和过鱼设施效果监测四个方面，搜集了国内外与过鱼设施设计有关的鱼类行为学实验技术资料，总结了与过鱼设施设计关联的行为学试验方法及重要参数，为涵盖过鱼设施建前规划-过鱼设施建设过程-过鱼设施建后评价-过鱼设施优化设计提供全过程数据支撑。

1　游泳能力测试

鱼类游泳能力表征鱼类克流能力强弱，决定鱼类索饵、逃逸、突破各种水流障碍的难易程度，对鱼类生存及繁殖具有重要意义[14-16]。当前游泳能力已被认为是过鱼设施设计最重要的基础数据参考，也已成为过鱼设施建设前鱼类行为学研究的“必选项”。常用于过鱼设施设计的鱼类游泳能力指标主要包括感应流速、临界游泳速度、爆发游泳速度和游泳耐力等。过鱼设施不同区域设计流速要求互有差别，多数研究表明过鱼设施进口的流速应大于过鱼对象临界游泳速度，小于爆发游泳速度；过鱼设施内流速应大于感应流速，小于临界游泳速度；过鱼通道的出口流速宜大于鱼的感应流速，在修建较长的鱼道时，通过鱼类的耐久游泳能力计算其最大游泳距离，以此确定休息池的距离[17-18]。然而，有学者研究发现，同一种过鱼对象的相同游泳能力指标在不同测试条件下也会具有显著性差异，如何选取合适的测试条件成为难题。如学者采用不同测试方法测定相同发育阶段大黄鱼 (*Larimichthys crocea*) 的临界游泳能力时，所得结果分别为 (28.32±6.11)、(32.75±7.60) cm/s，具有显著差异[19]。可见，差异的主要原因是测量方法、实验装置和实验环境等条件，导致同一种鱼相同游泳能力指标有明显区别。因此，本文从 36 篇游泳能力文献中，统计了感应流速[20-21]、临界游泳能力[22-23]、爆发游泳能力[24-26] 和游泳耐力测试[27] 常需考虑的 7 个测试条件 [水槽类型、递增流速、递增时间、适应时间、适应流速、L/BL (实验区长/鱼体长) 和疲劳贴网时间] 的方案选择占比 (表 1)，发现测定 4 种游泳能力指标时采用封闭水槽占比最高，选择适应时间为 1 h 最多，L/BL 为 2~5 占比最大。感应流速测定采用递增流速法，大多数选择采用递增流速为 1 cm/s 和递增时间为 5 s；临界游泳速度采用递增流速法，大多数选择采用递增流速为 1 BL/s 和递增时间为 20 min；爆发游泳速度也采用递增流速法，大多数选择递增流速为 1 BL/s 和递增时间为 20 s。测定临界游泳速度、爆发游泳速度和游泳耐力时，选择适应流速 1 BL/s 和疲劳贴网时间为 20 s 的占比最高。本文总结的不同游泳能力测试条件比较可为未来其他鱼种游泳能力测试方法的选取提供重要参考，高重合度方法选择有利于增加游泳能力数据适用的延展性，提升数据利用价值。

2　鱼类行为与过鱼设施流场响应关系

明晰鱼类行为与过鱼设施流场响应关系对优化过鱼设施设计至关重要。为精细刻画过鱼设施特征流场下鱼类上溯行为过程，一系列过鱼设施缩尺放鱼试验近几年在国内广泛开展，以确定影响鱼类上溯行为的关键驱动水力因子及其响应阈值，为过鱼设施流场结构优化提供数据支撑。本文从 25 篇有关过鱼设施鱼类上溯行为试验的文章中，

表 1　4 种游泳能力测试条件方案占比

Tab. 1　Proportion of four swimming ability test condition schemes

游泳速度类型 swimming speed types	水槽类型 flume types	递增流速 increasing flow velocity	递增时间 increasing time	适应时间 adaptation time	适应流速 acclimation flow velocity	L/BL	疲劳贴网时间 fatigue net contact time	文献 references
感应 sensed swimming speed	封闭：94.1% 开放：5.9%	1 cm/s：53.3% 其他：46.7%	5 s：73.3% 其他：26.7%	1 h：71.4% 2 h：21.4% 5 min：7.2%	0 m/s：46.2% 其他：53.8%	2~5：73.9% >5：17.4% <2：8.7%		[20-21]
临界 criticl swimming speed	封闭：93.5% 开放：6.5%	1 BL/s：54.8% 0.5 BL/s：16.1% 其他：29.1%	20 min：43.8% 15 min：37.5% 其他：18.7%	1 h：73.1% 2 h：23.1% 30 min：3.8%	1 BL/s：38.5% 0.5 BL/s：34.6% 其他：26.9%	2~5：71.4% >5：23.2% <2：5.4%	20 s：57.1% 10 s：17.9% 其他：25.0%	[22-23]
爆发 burst swimming speed	封闭：95.8% 开放：4.2%	1 BL/s：62.5% 其他：37.5%	20 s：59.1% 60 s：18.2% 其他：22.7%	1 h：70.0% 2 h：25.0% 其他：5.0%	1 BL/s：42.1% 0.5 BL/s：36.8% 其他：21.1%	2~5：63.6% >5：31.8% <2：4.6%	20 s：52.6% 10 s：36.8% 其他：10.6%	[24-26]
耐久 sustained swimming speed	开放：25.0% 开放：75.0%			1 h：71.4% 30 min：28.6%	1 BL/s：57.1% 0.5 cm/s：28.6% 其他：14.3%	2~5：75.0% >5：25.0%	20 s：66.7% 其他：33.3%	[27]

注：“%”为各类型在全体样本中的占比。

Notes: “%” represents the percentage of each type in the total sample.

总结了常需关注的 5 个实验设计参数 (实验时长、适应时间、行为指标、单尾/多尾和模型比尺)，统计了各试验参数的方案选择占比，发现过鱼设施缩尺模型放鱼试验主要选取的模型比例为 1∶4 [(1∶4)：57.1%；(1∶2.5)：28.6%；其他：14.3%]，实验以单尾鱼为主 (单尾：60.9%；多尾：39.1%)、适应时间以 30 min 为主 [30 min：38.4%；15 min：30.8%；10 min：30.8%]、实验时长以 1 h 为主 [1 h：38.1%；20 min：23.8%；其他：38.1%]，行为指标 90% 以上选择上溯轨迹[28-36]。上溯轨迹是鱼类应对过鱼设施流场表现出连续运动过程的游泳行为策略[37]。提取上溯轨迹对应的流场背景值，可量化过鱼对象偏好水力因子及响应阈值。可见，上溯轨迹获取基本是放鱼试验行为首选指标。

本文从以往研究中归纳了国内 8 种鱼类对不同水力因子偏好范围 (表 2)，发现总体上流速偏好阈值区间为 0~0.800 m/s，紊动能偏好阈值区间为 0~0.070 m^2/s^2，雷诺切应力偏好阈值区间为 0~0.500 Pa，紊动能耗散率偏好阈值区间为 0.020~0.065 m^2/s^3，对应变率偏好阈值区间为 0.200~7.000 s^{-1}。我国水电工程保护鱼种繁多，未来仍需建立多目标鱼类水力因子偏好数据库，以确定过鱼对象共性和个性水力偏好范围。

3　诱驱鱼技术

过鱼设施过鱼效果不佳，问题常出现在进鱼口。进鱼口相比坝下河道宽度甚窄，进鱼口形成区别于河道的诱鱼水流范围有限，大部分鱼难以顺利找到进鱼口[45]。为辅助进鱼口集诱鱼，相关诱驱鱼技术在过鱼设施中的应用备受关注。本文从 49 篇诱驱鱼文献中，发现诱驱鱼手段主要包括水流、声、光、电、气泡幕和底质 (表 3)。表征鱼类发生驱诱行为的特征指标主要有吸引率、阻拦率、通过率、昏厥率、分布率、聚集率、停留时间、分布时间、阻拦时间、聚集时间、通过频次、尝试次数等。水流主要是通过流速、紊动能、雷诺切应力、应变、紊动能耗散率等因素对鱼产生影响；声音主要分析声压大小、声音信号和音频的驱诱鱼作用；光主要考虑光照颜色、光照强度和光照模式；电主要考虑脉冲电压、脉冲频率、脉冲宽度、电场强度、电压梯度、电栅电极直径和电极间距；气泡幕主要考虑气泡幕孔径、孔距和气量；底质主要考虑底质类型和底质颜色。本文也罗列了部分主要过鱼对象对水流、声、光、电、气泡幕和底质的趋避阈值(表 4)。如短须裂腹鱼在竖缝式鱼道进水口流量范围为 0.160~0.580 m^3/s、补水通道进水口流量为 0.940~2.420 m^3/s 时鱼道进口诱鱼效果最佳[57]。裸腹叶须鱼偏好摄食声，鲢躲避短吻鳄 (*Osteolaemus tetraspis*) 吼叫声反应最强[59]。拉萨裂腹鱼和异齿裂腹鱼最偏好绿光[61]。拦鱼电栅在电极间距为 80 cm、脉冲电压 80 V、脉冲频率 10 Hz、脉冲宽度 30 ms 下对鲢阻

表 2　鱼类对不同水力因子的偏好阈值

Tab. 2　Preference thresholds of fish for different hydraulic factors

水力因子 hydraulic factor	鱼种 fish species	偏好范围 preference range	文献 references
流速/(m/s) flow velocity	齐口裂腹鱼　*Schizothorax prenanti*	0.500~0.800	[38]
	异鳔　*Parazacco spilurus*	0~0.200	[39]
	鲢　*Hypophthalmichthys molitrix*	0.160~0.400	[40]
	马口鱼　*Opsariichthys bidens*	0.300~0.350	[41]
	鲮　*Cirrhinus molitorella*	0~0.200	[39]
	鳙　*Aristichthys nobilis*	0.150~0.450	[42]
紊动能/(m^2/s^2) turbulent kinetic energy	鳙　*A. nobilis*	0.020~0.043	[42]
	鲢　*H. molitrix*	0.020~0.035	[40]
	异鳔　*P. spilurus*	0~0.070	[39]
	鲮　*C. molitorella*	0~0.070	[39]
雷诺切应力/Pa reynolds shear stress	草鱼　*Ctenopharyngodon idella*	0~0.500	[43]
	异鳔　*P. spilurus*	0.001~0.004	[39]
	鲮　*C. molitorella*	0.001~0.004	[39]
	齐口裂腹鱼　*S. prenanti*	2.210~0.370、0.200~0.330和0.060~0.230	[44]
应变/s^{-1} strain	齐口裂腹鱼　*S. prenanti*	0.160~0.140	[44]
	鲢　*H. molitrix*	1.800~4.000	[40]
	鳙　*A. nobilis*	2.000~7.000	[42]
紊动能耗散率/(m^2/s^3) turbulent kinetic energy dissipation rate	鲢　*H. molitrix*	0.023~0.042	[40]
	鳙　*A. nobilis*	0.020~0.065	[42]

表 3　主要诱驱鱼技术参数

Tab. 3　The main parameters of fish attraction and repulsion techniques

诱驱鱼技术 fish attraction and repulsion technology	类型 type	文献 references
水流　flow	流速、紊动能、雷诺切应力、应变、紊动能耗散率	[46]
声　sound	声压大小、声音信号、音频	[47-48]
光　light	光照颜色、光照强度、光照模式	[49-50]
电　electric	脉冲电压、脉冲频率、脉冲宽度、电场强度、电压梯度、电栅电极直径和电极间距	[51-52]
气泡幕　bubble curtain	气泡幕孔径、孔距和气量	[53-54]
底质　substrate	底质类型、颜色	[55-56]

拦效果最好，阻拦率高达 100%[62]。在气泡幕密度 (孔距 1.0 cm、孔径 2.0 mm) 时对花鳉阻拦效果最好[64]。青海湖裸鲤对底质的偏好，雌鱼：沙砾；雄鱼：中小卵石>沙砾>底泥附着型>大卵石和大石块；群体只有雄鱼：中小卵石；群体中只要有雌鱼：沙砾[66]。不同鱼种对水流、声、光、电、气泡幕和底质特征指标趋避反应互有区别，这可能与不同目标鱼洄游类型、身体形态、栖息环境、产卵条件、索饵需求和能量代谢过程等属性有关[67-68]，建议未来根据属性特征进行重要性排列，构建鱼类生活史过程行为相似性评价模型，筛选出可能对水流、声、光、电、气泡幕和底质具有相似趋避反应的鱼种集合，寻求能对该鱼种集合具有广适性的驱诱鱼参数。

4　过鱼设施过鱼效果监测评估

过鱼效果监测是过鱼设施建成后必不可少的关键环节，主要目标是识别过鱼困难区域，诊断优化过鱼设施设计，实现过鱼设施过鱼能力的提质增效。随着我国水电工程过鱼设施数量不断增

表 4　部分鱼种趋避响应阈值

Tab. 4　Thresholds of avoidance and attraction responses for selected fish species

诱驱鱼技术 fish attraction and repulsion technology	鱼种 fish species	趋避响应 approach-avoidance response	文献 references
水流　flow	短须裂腹鱼 *S. wangchiachii*	鱼道进口适宜流速范围为0.410~1.000 m/s，适宜紊动能范围为0~0.040 m^2/s^2	[57]
	—	当竖缝式鱼道进水口流量范围为0.160~0.580 m^3/s、补水通道进水口流量为0.940~2.420 m^3/s时，鱼道进口诱鱼效果最佳	[58]
声　sound	裸腹叶须鱼　*P. kaznakovi*	偏好：摄食声>纯音和河流噪声	[59]
	鲢　*H. molitrix*	回避：短吻鳄吼叫声>0~2000 hz扫频音>无声音	[60]
光　light	异齿裂腹鱼　*S. heterodon*	偏好：光照颜色：绿>黄>黑>蓝>红；光照强度：黄光：0.65~0.80 lx，绿光：1.50~0.35 lx	[61]
	拉萨裂腹鱼　*S. waltoni*	绿>蓝>红>黄	
电　electric	鲢　*H. molitrix*	电极间距为80 cm、脉冲电压80 V、脉冲频率10 Hz、脉冲宽度30 ms，阻拦率为100%	[62]
	草鱼　*C. idella*	脉冲电压160 V/m、脉冲频率6 Hz、脉冲宽度16 ms，阻拦效果最好	[63]
气泡幕 bubble curtain	白甲鱼　*O. sima*	孔距5.0、10.0、20.0 cm，平均阻拦率分别为75.1%、55.4%、54.5%	[64]
	花鳍　*H. maculatus*	孔距1.0 cm、孔径2.0 mm，阻拦率为95.33%±2.65%	
底质　substrate	短须裂腹鱼　*S. wangchiachii*	偏好：嵌有鹅卵石的沙子>部分嵌入的鹅卵石>宽间距的卵石>基岩	[65]
	青海湖裸鲤　*G. przewalskii*	雌鱼：沙砾；雄鱼：中小卵石>沙砾>底泥附着型>大卵石和大石块；群体只有雄鱼：中小卵石；群体中只有雌鱼：沙砾	[66]

注：“—”为数值模拟所得结果，未使用实验鱼。

Notes: "—" denotes the results obtained from numerical simulation, where no experimental fish were employed.

加，过鱼设施过鱼效果的监测手段发展呈多样化。以过鱼设施典型工程类型之一的鱼道为例，从国内多篇文献中发现，过鱼效果监测方法主要包括张网法、视频观测法、水声学监测法和标记遥测方法 (无线电、超声波、PIT) 等[69-70]。张网法是采用网具布置在鱼道进口或出口处，捕捞河道自然状态下进入鱼道或通过鱼道的目标鱼，监测指标为鱼种、过鱼数量和形态学参数等[71-72]。视频观测法是在鱼道内某个休息池设置观察室，采用摄像头实时记录目标鱼上溯行为，监测指标为上下行过鱼数量、鱼种、体长大小和运动轨迹等[73]。水声学监测是采用声学设备在鱼道进口或出口探测自然上溯鱼类的声学影像，监测指标为上下行过鱼数量、体长大小和运动轨迹等[74]。标记遥测法包括 PIT 遥测、无线电遥测、声学遥测，主要是指通过给鱼类植入内部标签或者附加外部标签定量分析鱼类行为的方法，为定量解析鱼道过鱼效率提供了更加精细化的工具，超声波和无线电多用于坝址上下游鱼类行为的监测。PIT 标记多用于鱼道内鱼类通过性的监测，监测指标为尝试率、通过率、尝试时间、通过时间和折返率等[75-76] (图 1)。过鱼设施效果监测过程中一般需同步采集影响鱼类上溯效果的水文水动力因子，主要包括流量、流速、水位、水温、溶解氧、浊度、水体 pH 值等，以建立过鱼效果与各水文水动力因子响应关系曲线[77-83]，旨在揭示提升过鱼设施过鱼效果的水文水动力调控策略。

5　结论

本文总结了与过鱼设施设计有关的鱼类游泳能力、鱼类行为与过鱼设施流场响应关系、驱诱鱼技术和过鱼设施效果监测的鱼类行为学研究发展态势。然而，上述行为学研究成果用于指导过鱼设施设计仍需考虑以下四点建议。

5.1　游泳能力测试规范化

当前绝大多数研究采用封闭水槽，鱼类被迫以固定递增流速游泳，这可能限制鱼类自主游泳行为，使测定的游泳能力存在一定的低估[20]。此外，占比最高的递增流速 (如感应流速测试为 1 cm/s，临界游泳速度与爆发游泳速度测试为 1 BL/s) 及递增时间 (临界游泳速度 20 min，爆发游泳速度 20 s) 虽然普遍采用，但并不意味着这些标准方法最能准确反映鱼类的真实游泳能力，仅能说明方法的一致性和便利性。

为提高测试结果对过鱼设施设计的参考价值，

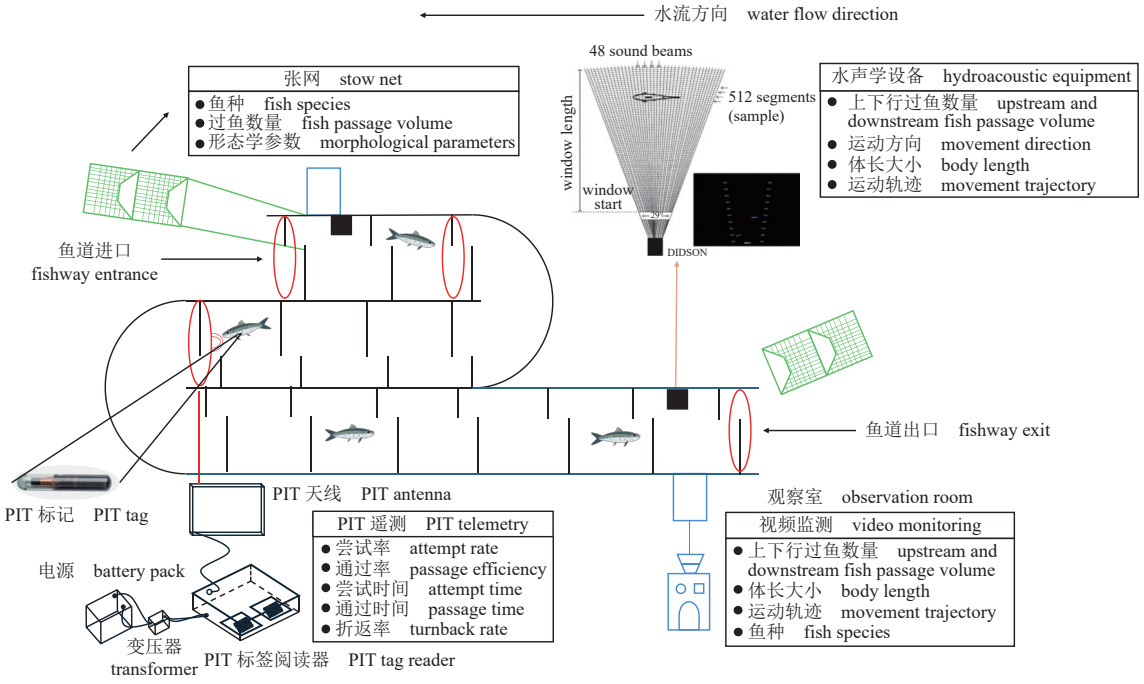

图 1　鱼道过鱼效果监测方法

Fig. 1　Methods for monitoring fish passage efficiency

未来建议开展以下工作：①在条件允许下建设更加贴近自然条件的开放式泳道，以减少封闭水槽带来的鱼类行为限制，测定鱼类在自主游泳状态下的真实游泳能力指标。②开展不同递增流速和递增时间对同种鱼游泳能力测试结果的对比研究，以确定更能反映鱼类真实游泳能力的最优测试条件，并在过鱼设施设计中采用更为精确的流速指标。

5.2　鱼类行为学试验设计优化

当前鱼类响应过鱼设施流场的行为学实验研究大多采用小比例尺的鱼道模型，并以单尾鱼实验为主。这种研究方法虽然可以在一定程度上揭示个体鱼的上溯行为及其对水力因子的响应特征，但仍存在明显的不足：①鱼类本身无法随鱼道模型进行等比例缩放，导致目标鱼对模型缩尺鱼道流场的行为感知与真实环境存在较大差异，从而可能影响实验结果的准确性和普适性；②单尾鱼的实验模式难以真实反映自然条件下鱼群集群上溯的行为特征，忽视了鱼群内部社会互动对个体行为的影响，因而个体实验获得的行为数据可能不能全面代表鱼群的实际行为规律。

为提高鱼类行为学实验的科学性与适用性，未来研究建议：①加强原型尺度下的行为学实验研究，尽可能减少模型缩尺效应对鱼类行为感知造成的影响；②进一步开展群体放鱼实验，以解析鱼群互动对上溯行为的具体影响，揭示鱼群整体响应原型过鱼设施流场的规律；③综合采用数值模拟、物理模型和原型观测等多种方法，建立更为全面和可靠的鱼类水力偏好阈值数据库，以更有效地指导实际工程中的过鱼设施设计优化。

5.3　诱驱鱼技术开发及改进

当前水流、声、光、电、气泡幕和底质等多种物理诱驱鱼技术已被广泛用于实验研究中，表明它们在引导或阻拦鱼类方面具有潜在应用价值。然而，这些技术目前主要应用于室内小水体环境，在真实复杂水域的实际工程中应用较少，存在诸多限制。具体不足：①诱驱效果易受环境条件变化和鱼类适应性增强而减弱，持续诱导效果难以保障；②缺乏系统化的多因子联合实验研究，不同技术间协同效应机制尚不明确；③相关技术参数缺乏标准化，难以直接应用于工程实践。

未来驱诱鱼技术的发展应以装备集成化、功能多样化和场景适应性为方向，重点推动以下几个方面：①开发集成水流、声、光、电、气泡幕与底质等多因子的复合型驱诱鱼设备，实现多维度诱导鱼类行为；②在室外自然水体和实际过鱼

设施中开展中试和工程示范应用，验证诱驱鱼设备在不同环境条件下的实际效果与稳定性；③建立不同鱼类在关键生活史阶段对各驱诱因子的趋避响应数据库，为多目标鱼种过鱼设施的个性化设计与参数优化提供数据支撑。

5.4　过鱼设施效果监测技术革新

现有过鱼设施效果监测技术的应用尚存在明显的不足[84]，主要表现：①传统监测手段 (如张网法、视频观测法、水声学监测和标记遥测方法) 在复杂环境中局限性明显，难以全面获取鱼类真实过鱼行为；②自动化与智能化水平偏低，长期、大规模、精准的连续监测能力不足，导致监测数据获取效率低下；③环境因子 (如流量、流速、水温、溶解氧等) 与鱼类行为相互作用的综合监测能力薄弱；④现有监测技术会对鱼类生理和行为产生干扰，可能影响监测数据的真实性和有效性。

未来过鱼设施过鱼效果监测技术的发展趋势主要体现为：①强化监测手段的智能化、精细化与生态化，发展无损、无干扰的先进监测技术；②突破复杂水环境下数据自动化采集与处理的技术瓶颈，提升监测设备的适应性与可靠性；③加强水文水动力条件与鱼类行为综合监测能力建设，开发能更全面反映鱼类真实过鱼行为的新型监测技术和指标体系。

此外，目前国内的过鱼设施监测通常仅在鱼类洄游高峰期开展，忽视了非洄游期具有过坝需求鱼类的行为，导致监测数据无法全面反映全年及整个鱼类生命周期的过坝需求和行为特征，修复河流连通性的重要目标是打通鱼类上下行通道，实现全生命周期鱼类能自由上下行，完成关键生活史过程[85-86]。因此，未来建议实施长时间序列的监测项目，覆盖鱼类整个生命周期，以期更加准确地评估过鱼设施全年过鱼效果，明确鱼类全年洄游生活史特点，从而为优化过鱼设施设计和河流生态修复提供更为科学的支撑。

（作者声明本文无利益冲突）

参考文献 (References)：

[1] 栗欣如, 姜文来, 关鑫, 等. 我国水利绿色发展研究进展 [J]. 中国农业资源与区划, 2020, 41(11): 49-55.
Li X R, Jiang W L, Guan X, *et al*. An overview of water conservancy green development in China[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2020, 41(11): 49-55 (in Chinese).

[2] 顾国彪, 郑小康, 阮琳. 浅谈中国未来大型水电装备技术挑战与创新 [J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(17): 6959-6972.
Gu G B, Zheng X K, Ruan L. Discussion on the technical challenges and Innovations of large hydropower equipment in the future in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(17): 6959-6972 (in Chinese).

[3] Kuriqi A, Pinheiro A N, Sordo-Ward A, *et al*. Ecological impacts of run-of-river hydropower plants—current status and future prospects on the brink of energy transition[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 142: 110833.

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

[5] Chen Q W, Li Q Y, Lin Y Q, *et al*. River damming impacts on fish habitat and associated conservation measures[J]. Reviews of Geophysics, 2023, 61(4): e2023RG000819.

[6] Hauser M, Doria C R C, Pécheyran C, *et al*. Quantitative impacts of hydroelectric dams on the trans‐Amazonian migrations of goliath catfish[J]. Conservation Letters, 2024, 17(5): e13046.

[7] Silva A T, Lucas M C, Castro-Santos T, *et al*. The future of fish passage science, engineering, and practice[J]. Fish and Fisheries, 2018, 19(2): 340-362.

[8] 陶江平, 温静雅, 贺达, 等. 上行过鱼设施过鱼效果监测研究进展 [J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(10): 2270-2282.
Tao J P, Wen J Y, He D, *et al*. Review on monitoring and evaluating of fish passage facilities for upper migration[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(10): 2270-2282 (in Chinese).

[9] 温静雅, 陈昂, 曹娜, 等. 国内外过鱼设施运行效果评估与监测技术研究综述 [J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(5): 49-55.
Wen J Y, Chen A, Cao N, *et al*. A review of effectiveness assessment and monitoring technologies for fish passage facilities[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(5): 49-55 (in Chinese).

[10] 蔡露, Christos K, 金瑶, 等. 中国鲤科鱼类游泳能力综合分析和应用 [J]. 湖泊科学, 2022, 34(6): 1790-1803.
Cai L, Christos K, Jin Y, *et al*. Comprehensive analysis and application of Chinese Cyprinidae swimming ability[J]. Journal of Lake Sciences, 2022, 34(6): 1790-1803 (in Chinese).

[11] An D, Huang J Z, Wei Y G. A survey of fish behaviour quantification indexes and methods in aquaculture[J]. Reviews in Aquaculture, 2021, 13(4): 2169-2189.

[12] Wang C, Zhang Y L. Numerical investigation on the wave

power extraction for a 3D dual-chamber oscillating water column system composed of two closely connected circular sub-units[J]. Applied Energy, 2021, 295: 117009.

[13] Kern P, Cramp R L, Gordos M A, *et al*. Measuring U_{crit} and endurance: equipment choice influences estimates of fish swimming performance[J]. Journal of Fish Biology, 2018, 92(1): 237-247.

[14] 付世建, 曹振东, 曾令清, 等. 鱼类游泳运动——策略与适应性进化 [M]. 北京: 科学出版社, 2014: 1-10.
Fu S J, Cao Z D, Zeng L Q, *et al*. Fish swimming locomotion: strategies and adaptive evolution [M]. Beijing: Science Press, 2014: 1-10 (in Chinese).

[15] Downie A T, Illing B, Faria A M, *et al*. Swimming performance of marine fish larvae: review of a universal trait under ecological and environmental pressure[J]. Reviews in Fish Biology and Fisheries, 2020, 30(1): 93-108.

[16] Zeng J J, Feng M S, Deng Y C, *et al*. Deep learning to obtain high-throughput morphological phenotypes and its genetic correlation with swimming performance in juvenile large yellow croaker[J]. Aquaculture, 2024, 578: 740051.

[17] Cai L, Chen J H, Johnson D, *et al*. Effect of body length on swimming capability and vertical slot fishway design[J]. Global Ecology and Conservation, 2020, 22: e00990.

[18] 王永猛, 柯森繁, 林晨宇, 等. 红河 (元江) 流域的典型鱼类游泳能力探究及在过鱼设施流速设计中的应用 [J]. 湖泊科学, 2021, 33(6): 1820-1831.
Wang Y M, Ke S F, Lin C Y, *et al*. Investigation of the swimming ability of typical fish in the Red River (Yuanjiang) basin and its application to the design of fish passage facilities[J]. Journal of Lake Sciences, 2021, 33(6): 1820-1831 (in Chinese).

[19] Zeng J J, Liu W, Deng Y C, *et al*. Swimming performance in large yellow croaker: effects of group size, test protocol, and recovery time on critical swimming speed[J]. Marine Biotechnology, 2024, 26(2): 380-388.

[20] 蔡露, 侯轶群, 金瑶, 等. 鱼游泳能力对体长的响应及其在鱼道设计中的应用 [J]. 农业工程学报, 2021, 37(5): 209-215.
Cai L, Hou Y Q, Jin Y, *et al*. Response of fish swimming ability to body length and its application in fishway design[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(5): 209-215 (in Chinese).

[21] 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.

[22] 王永猛, 李志敏, 涂志英, 等. 基于雅砻江两种裂腹鱼游泳能力的鱼道设计 [J]. 应用生态学报, 2020, 31(8): 2785-2792.
Wang Y M, Li Z M, Tu Z Y, *et al*. Fishway design based on the swimming ability of two *Schizothorax* species in the Yalung River, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(8): 2785-2792 (in Chinese).

[23] Li Y X, Hou Y Q, Zhang B, *et al*. The kinematics and dynamics of *Schizopygopsis malacanthus* swimming during U_{crit} testing[J]. Animals, 2022, 12(20): 2844.

[24] 邓楚可, 黄青峰, 李平, 等. 不同生活史阶段秦岭细鳞鲑与同域物种拉氏鲈爆发游泳能力比较研究 [J]. 生态学报, 2024, 44(9): 3999-4008.
Deng C K, Huang Q F, Li P, *et al*. Comparative studies on burst swimming performance of *Brachymystax tsinlingensis* and sympatric *Phoxinus lagowskii* in different life history stages[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(9): 3999-4008 (in Chinese).

[25] 熊锋, 王从锋, 刘德富, 等. 松花江流域青鱼、草鱼、鲢及鳙突进游速比较研究 [J]. 生态科学, 2014, 33(2): 339-343.
Xiong F, Wang C F, Liu D F, *et al*. Comparative study of burst swimming speed of black carp, grass carp, silver carp and bighead carp from Songhua River[J]. Ecological Science, 2014, 33(2): 339-343 (in Chinese).

[26] Cai L, Hou Y Q, Johnson D, e*t al*. Swimming ability and behavior of Mrigal carp *Cirrhinus mrigala* and application to fishway design[J]. Aquatic Biology, 2018, 27: 127-132.

[27] 侯轶群, Lynda N, 蔡露, 等. 基于固定流速法的鳡 (*Aristichthys nobilis*) 幼鱼游泳能力 [J]. 生态学杂志, 2016, 35(6): 1583-1588.
Hou Y Q, Lynda N, Cai L, *et al*. Swimming performance of juvenile *Aristichthys nobilis* under fixed velocity swimming tests[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(6): 1583-1588 (in Chinese).

[28] 金志军, 马卫忠, 张袁宁, 等. 异齿裂腹鱼通过鱼道内流速障碍能力及行为 [J]. 水利学报, 2018, 49(4): 512-522.
Jin Z J, Ma W Z, Zhang Y N, *et al*. Assessing the swimming ability and performance of *Schizothorax oconnori* to cross velocity barriers in fishway[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(4): 512-522 (in Chinese).

[29] 李广宁, 柳松涛, 柳海涛, 等. 基于鱼类上溯行为的导鱼堰设计与效果评估 [J]. 农业工程学报, 2024, 40(7): 117-123.
Li G N, Liu S T, Liu H T, *et al*. Design and effect evaluation of the fish guide weir based on fish migration behaviour[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(7): 117-123 (in Chinese).

[30] 吴震, 杨忠勇, 石小涛, 等. 异齿裂腹鱼上溯过程中的折返行为及其与水力条件的关系 [J]. 生态学杂志, 2019, 38(11):

3382-3393.

Wu Z, Yang Z Y, Shi X T, *et al*. The reentry behavior and its relationship with hydraulic conditions during upstream migration of *Schizothorax o'connori*[J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(11): 3382-3393 (in Chinese).

[31] 罗凯强, 康昭君, 夏威, 等. 鱼道进口不同补水形式对齐口裂腹鱼上溯行为的影响 [J]. 生态学杂志, 2019, 38(4): 1182-1191.

Luo K Q, Kang Z J, Xia W, *et al*. Effects of water supply conditions in fishway entrance on migration behavior of *Schizothorax prenanti*[J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(4): 1182-1191 (in Chinese).

[32] 张浩男, 李广宁, 韩延成, 等. 齐口裂腹鱼幼鱼在竖缝式鱼道模型中的上溯行为研究 [J]. 水利水电技术, 2020, 51(12): 180-187.

Zhang H N, Li G N, Han Y C, *et al*. Study on migration behaviors of juvenile *Schizothorax prenanti* in a vertical slot fishway model[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(12): 180-187 (in Chinese).

[33] 朱天然, 孙林, 李嘉, 等. 齐口裂腹鱼集群行为对流态的响应 [J]. 农业工程学报, 2022, 38(11): 144-150.

Zhu T R, Sun L, Li J, *et al*. Response of the behavior of the *Schizothorax prenati* to the flow pattern[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(11): 144-150 (in Chinese).

[34] 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).

[35] 柳松涛, 李广宁, 石凯, 等. 竖缝式鱼道桩柱结构过鱼效果探究 [J]. 水生态学杂志, 2024, 45(2): 148-158.

Liu S T, Li G N, Shi K, *et al*. Optimizing vertical slot fishway hydraulics with a pool cylinder[J]. Journal of Hydroecology, 2024, 45(2): 148-158 (in Chinese).

[36] 马卫忠, 安瑞冬, 李敏讷, 等. 洄游鱼类坝下集群的水动力学特征与行为预测 [J]. 北京师范大学学报 (自然科学版), 2021, 57(3): 433-440.

Ma W Z, An R D, Li M N, *et al*. Habitat hydrodynamic characteristics and behavior forcasting for migratory fish downstream of dams[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2021, 57(3): 433-440 (in Chinese).

[37] Liu H, Lin J Q, Wang D S, *et al*. Experimental study of the behavioral response of fish to changes in hydrodynamic indicators in a near-natural environment[J]. Ecological Indicators, 2023, 154: 110813.

[38] 廖磊, 安瑞冬, 李嘉, 等. 齐口裂腹鱼趋流行为的水力学特性研究 [J]. 水电能源科学, 2019, 37(5): 69-72.

Liao L, An R D, Li J, *et al*. Study on hydraulic characteristics of *Schizothorax prenantis* rheotaxis behavior[J]. Water Resources and Power, 2019, 37(5): 69-72 (in Chinese).

[39] Wang Y, Wai O W H, Chen Q W. 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, 2021, 598: 125736.

[40] Tan J J, Tao L, Gao Z, *et al*. Modeling fish movement trajectories in relation to hydraulic response relationships in an experimental fishway[J]. Water, 2018, 10(11): 1511.

[41] 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).

[42] Tan J J, Liu Z B, Wang Y, *et al*. Analysis of movements and behavior of bighead carps (*Hypophthalmichthys nobilis*) considering fish passage energetics in an experimental vertical slot fishway[J]. Animals, 2022, 12(13): 1725.

[43] Zhang D, Xu Y H, Deng J, *et al*. Relationships among the fish passage efficiency, fish swimming behavior, and hydraulic properties in a vertical-slot fishway[J]. Fisheries Management and Ecology, 2024, 31(3): e12681.

[44] Li M N, Chen M, Wu W X, *et al*. Differences in the natural swimming behavior prenanti Individual and schooling in spatially heterogeneous turbulent flows[J]. Animals, 2023, 13(6): 1025.

[45] 祁昌军, 曹晓红, 温静雅, 等. 我国鱼道建设的实践与问题研究 [J]. 环境保护, 2017, 45(6): 47-51.

Qi C J, Cao X H, Wen J Y, *et al*. The practice and problems of the fishway construction in China[J]. Environmental Protection, 2017, 45(6): 47-51 (in Chinese).

[46] 姜昊, 陆波, 蔡跃平. 4 种高原裂腹鱼类对水流和底质的趋性研究 [J]. 安徽农业科学, 2020, 48(9): 117-120,124.

Jiang H, Lu B, Cai Y P. A preference study on the four species of plateau *Schizothorax* to flow and sediment[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2020, 48(9): 117-120,124 (in Chinese).

[47] 王明云, 沈修俊, 任开元, 等. 摄食声对草鱼幼鱼的诱集作用

[J]. 水生生物学报, 2021, 45(1): 153-160.

Wang M Y, Shen X J, Ren K Y, *et al*. The attractive effect of feeding sound to juvenile grass carp *Ctenopharyngodon idellus*[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2021, 45(1): 153-160 (in Chinese).

[48] 杨吉, 邬玉娇, 李晓兵, 等. 草鱼敏感的负趋音筛选 [J]. 水产学报, 2024, 48(4): 049718.

Yang J, Wu Y J, Li X B, *et al*. Screening acoustic deterrents against *Ctenopharyngodon idella*[J]. Journal of Fisheries of China, 2024, 48(4): 049718 (in Chinese).

[49] 卢克祥, 许柳雄, 邓青燕. 不同光照条件对斑马鱼趋光行为的影响 [J]. 上海海洋大学学报, 2022, 31(3): 792-800.

Lu K X, Xu L X, Deng Q Y. Effects of different light conditions on phototactic behavior of Zebrafish[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2022, 31(3): 792-800 (in Chinese). Lu B, Shi X T, Liu D F, *et al*. White and black substrate preference and hiding behavior of *Pelteobagrus vachelli*[J]. Journal of Hydroecology, 2012, 33(5): 36-40 (in Chinese).

[50] Lin C Y, Dai H C, Shi X T, *et al*. Investigating feasible light configurations for fish restoration: an ethological insight[J]. Fisheries Research, 2021, 234: 105807.

[51] 贺晓科, 曹振东, 付世建. 鲤幼鱼快速启动游泳能力及电刺激参数的影响 [J]. 生态学杂志, 2011, 30(11): 2523-2527.

He X K, Cao Z D, Fu S J. Fast-start swimming performances of juvenile *Cyprinus carpio* and the effects of electrical stimulation parameters[J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(11): 2523-2527 (in Chinese).

[52] 黄晓龙, 白艳勤, 姜伟, 等. 不同电极布置方式和电学参数下拦鱼电栅对鲢的阻拦效果 [J]. 生态学杂志, 2023, 42(9): 2176-2183.

Huang X L, Bai Y Q, Jiang W, *et al*. The blocking effects of electric barrier with different electrode arrangements and electrical parameters on silver carp[J]. Chinese Journal of Ecology, 2023, 42(9): 2176-2183 (in Chinese).

[53] 范纹彤, 刘雁, 王谦, 等. 气泡幕对异齿裂腹鱼的阻拦效果 [J]. 生态学杂志, 2019, 38(5): 1433-1437.

Fan W T, Liu Y, Wang Q, *et al*. The blocking effect of bubble curtain on *Schizothorax oconnori*[J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(5): 1433-1437 (in Chinese).

[54] 周默, 黄六一, 尤鑫星, 等. 气泡幕对虹鳟阻拦效果研究 [J]. 水生生物学报, 2023, 47(12): 2003-2010.

Zhou M, Huang L Y, You X X, *et al*. Obstructing effect of bubble curtain on rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2023, 47(12): 2003-2010 (in Chinese).

[55] 顾孝连, 庄平, 章龙珍, 等. 长江口中华鲟幼鱼对底质的选择[J]. 生态学杂志, 2008, 27(2): 213-217.

Gu X L, Zhuang P, Zhang L Z, *et al*. Substrate preference of juvenile Chinese sturgeon *Acipenser sinensis* captured from Yangtze River estuary[J]. Chinese Journal of Ecology, 2008, 27(2): 213-217 (in Chinese).

[56] Li W W, Bao J H, Zhang C S, *et al*. Group size influences light-emitting diode light colour and substrate preference of David's Schizothoracin (*Schizothorax davidi*): relevance for design of fish passage facilities[J]. River Research and Applications, 2022, 38(2): 280-292.

[57] 谭均军, 王德辰, 王渊洋, 等. 不同补水方式下鱼道进口诱鱼效果分析 [J]. 湖泊科学, 2025, 37(2): 555-565.

Tan J J, Wang D C, Wang Y Y, *et al*. The efficiency of fishway with different water replenishment methods[J]. Journal of Lake Sciences, 2025, 37(2): 555-565 (in Chinese).

[58] 廖伯文, 安瑞冬, 李嘉, 等. 高坝过鱼设施集诱鱼进口水力学条件数值模拟与模型试验研究 [J]. 工程科学与技术, 2018, 50(5): 87-93.

Liao B W, An R D, Li J, *et al*. Numerical simulation and model test study on the hydrodynamic conditions of fish luring inlet of fish-crossing facility in high dams[J]. Advanced Engineering Sciences, 2018, 50(5): 87-93 (in Chinese).

[59] Wang M Y, Wang Q F, Ni M, *et al*. Can feeding sound attract flower fish (*Ptychobarbus kaznakovi*)?[J]. Journal of Comparative Physiology A, 2021, 207(5): 617-627.

[60] 李卫东,白艳勤,李阳希, 等. 鲢幼鱼对 4 种不同声音的回避行为 [J]. 水生态学杂志, 2025, 46(3): 173-181.

Li W D, Bai Y Q, Li Y X, *et al*. The avoidance behavior of juvenile silver carp *Hypophthalmichthys molitrix* to four different types of sounds[J]. Journal of Hydroecology, 2025, 46(3): 173-181 (in Chinese).

[61] Xu J W, Lin C Y, Dai H C, *et al*. Influence of low-intensity light on phototactic behaviour of *Schizothorax oconnori* Lloyd[J]. River Research and Applications, 2020, 36(2): 296-304.

[62] 李阳希, 侯轶群, 金瑶, 等. 不同电学参数下拦鱼电栅对 3 种鱼类的驱鱼效果 [J]. 生态学杂志, 2022, 41(9): 1853-1861.

Li Y X, Hou Y Q, Jin Y, *et al*. Repellency of electric barrier with different parameters on three fish species[J]. Chinese Journal of Ecology, 2022, 41(9): 1853-1861 (in Chinese).

[63] 石迅雷, 胡成, 达瓦, 等. 不同电学参数和流速下的拦鱼电栅对草鱼幼鱼的拦导效率 [J]. 水产学报, 2022, 46(2): 310-321.

Shi X L, Hu C, Da W, *et al*. Blocking efficiency of electrified barrier for guiding juvenile grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) by pulsed direct current with different electric paramet-

ers at different flow velocities[J]. Journal of Fisheries of China, 2022, 46(2): 310-321 (in Chinese).

[64] 白艳勤, 罗佳, 牛俊涛, 等. 不同密度气泡幕对花鱼骨和白甲鱼的阻拦效应 [J]. 水生态学杂志, 2013, 34(4): 63-69.
Bai Y Q, Luo J, Niu J T, *et al*. Avoidance responses of *Hemibarbus maculates* and *Onychostoma sima* to bubble curtains with different density[J]. Journal of Hydroecology, 2013, 34(4): 63-69 (in Chinese).

[65] Hou Y Q, Yang Z, An R D, *et al*. Water flow and substrate preferences of *Schizothorax wangchiachii* (Fang, 1936)[J]. Ecological Engineering, 2019, 138: 1-7.

[66] 石小涛, 卢建雨, 柯森繁, 等. 繁殖洄游期青海湖裸鲤雌雄个体及群体对栖息地底质偏好选择的差异 [J]. 水生生物学报, 2024, 48(10): 1780-1788.
Shi X T, Lu J Y, Ke S F, *et al*. Differences in habitat substrate preferences between male and female individuals and groups of *Gymnocypris przewalskii* during their breeding and migration period[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2024, 48(10): 1780-1788 (in Chinese).

[67] Villamizar N, Blanco-Vives B, Migaud H, *et al*. Effects of light during early larval development of some aquacultured teleosts: a review[J]. Aquaculture, 2011, 315(1-2): 86-94.

[68] Deleau M J C, White P R, Peirson G, *et al*. Use of acoustics to enhance the efficiency of physical screens designed to protect downstream moving European eel (*Anguilla anguilla*)[J]. Fisheries Management and Ecology, 2020, 27(1): 1-9.

[69] 王义川, 王煜, 林晨宇, 等. 鱼道过鱼效果监测方法述评 [J]. 生态学杂志, 2019, 38(2): 586-593.
Wang Y C, Wang Y, Lin C Y, *et al*. A review on monitoring methods for the effectiveness of fishway[J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(2): 586-593 (in Chinese).

[70] 金瑶, 王翔, 陶江平, 等. 基于 PIT 遥测技术的竖缝式鱼道过鱼效率及鱼类行为分析 [J]. 农业工程学报, 2022, 38(4): 251-259.
Jin Y, Wang X, Tao J P, *et al*. Fish passage efficiency and fish behavior analysis in the vertical slot fishway using the PIT telemetry technology[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(4): 251-259 (in Chinese).

[71] 张艳艳, 何贞俊, 何用, 等. 低水头闸坝工程鱼道过鱼效果评价 [J]. 水利学报, 2017, 48(6): 748-756.
Zhang Y Y, He Z J, He Y, *et al*. Analysis on the efficiency of fishway for the low-head gate dam[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(6): 748-756 (in Chinese).

[72] Hu X Z, Zhang Y Y, Yang F, *et al*. An efficiency analysis of the low-head gate dam fishway for freshwater fish ascending Liuxi River in South China[J]. Ecological Engineering, 2020, 158: 106018.

[73] 陈国柱, 王猛, 王海胜, 等. 枕头坝一级水电站竖缝式鱼道过鱼效果初探 [J]. 水力发电, 2018, 44(7): 4-8,58.
Chen G Z, Wang M, Wang H S, *et al*. Preliminary study on fish passing effect of the vertical-slot fishway in Zhentouba I hydropower station[J]. Water Power, 2018, 44(7): 4-8,58 (in Chinese).

[74] 王珂, 刘绍平, 段辛斌, 等. 崔家营航电枢纽工程鱼道过鱼效果 [J]. 农业工程学报, 2013, 29(3): 184-189.
Wang K, Liu S P, Duan X B, *et al*. Fishway effect of Cuijiaying navigation-power junction project[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(3): 184-189 (in Chinese).

[75] Bao J H, Li W W, Zhang C S, *et al*. Quantitative assessment of fish passage efficiency at a vertical-slot fishway on the Daduhe River in Southwest China[J]. Ecological Engineering, 2019, 141: 105597.

[76] 石小涛, 白天翔, 许家炜, 等. 金沙江下游支流黑水河松新电站鱼道过鱼效果监测与评估 [J]. 湖泊科学, 2023, 35(3): 972-984.
Shi X T, Bai T X, Xu J W, *et al*. Monitoring and evaluation of effectiveness through fishway in Songxin Hydropower Station of Heishui River, lower reaches of Jinsha River[J]. Journal of Lake Sciences, 2023, 35(3): 972-984 (in Chinese).

[77] 何贞俊, 莫伟均, 杨聿, 等. 流溪河水厂坝丹尼尔式鱼道运行效果初探 [J]. 水生态学杂志, 2019, 40(1): 35-40.
He Z J, Mo W J, Yang Y, *et al*. Effectiveness of the Denil Fishway, Liuxi River at the Water Plant Dam[J]. Journal of Hydroecology, 2019, 40(1): 35-40 (in Chinese).

[78] 王晓, 高雷, 王珂, 等. 峡江水利枢纽鱼道过鱼效果的初步研究 [J]. 中国水产科学, 2022, 29(1): 130-140.
Wang X, Gao L, Wang K, *et al*. Effects of fish passing through the fishway of the Xiajiang Water Control Project[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2022, 29(1): 130-140 (in Chinese).

[79] 蔡跃平, 姜昊, 黄晋, 等. 大渡河安谷竖缝式鱼道过鱼效果监测与评估研究 [J]. 水生态学杂志, 2024, 45(5): 115-123.
Cai Y P, Jiang H, Huang J, *et al*. Monitoring and assessment of angu vertical slot fishway performance in the Dadu River[J]. Journal of Hydroecology, 2024, 45(5): 115-123 (in Chinese).

[80] 姚凡, 姜昊, 刘峰, 等. 藏木水电站竖缝式鱼道过鱼效果初探 [J]. 水电能源科学, 2023, 41(9): 107-111.
Yao F, Jiang H, Liu F, *et al*. Preliminary study on fish passing effect of vertical-slot fishway in ZM Hydropower Station[J]. Water Resources and Power, 2023, 41(9): 107-111 (in Chinese).

[81] 王猛, 金志军, 杜健康, 等. 枕头坝一级鱼道过鱼效果监测 [J]. 水力发电, 2022, 48(11): 22-27,42.
Wang M, Jin Z J, Du J K, *et al*. Monitoring on the fish passing effect of fishway in Zhentouba I Hydropower Station[J]. Water Power, 2022, 48(11): 22-27,42 (in Chinese).

[82] Sun J J, Tan J J, Zhang Q, *et al*. Attraction and passage efficiency for salmonids and non-salmonids based on fishway: a meta-analysis approach[J]. River Research and Applications, 2023, 39(10): 1933-1949.

[83] Sun J J, Yu F Q, Zhang Q, *et al*. Evaluation of a nature-like bypass for non-salmonids in the Sesan River[J]. Water, 2023, 15(3): 421.

[84] 申剑, 柳春娜, 吴必朗, 等. 过鱼效果监测技术研究和实践综述 [J]. 环境保护前沿, 2022, 12(4): 763-767.
Shen J, Liu C N, Wu B L, *et al*. Research and practice of monitoring technology of fish passing effect[J]. Advances in Environmental Protection, 2022, 12(4): 763-767 (in Chinese).

[85] Wang Z H, Feng J J, He T, *et al*. Study on the habitat evolution after dam removal in a habitat-alternative tributary of large hydropower station[J]. Journal of Environmental Management, 2024, 360: 121155.

[86] Barbarossa V, Schmitt R J P, Huijbregts M A J, *et al*. Impacts of current and future large dams on the geographic range connectivity of freshwater fish worldwide[J]. Proceedings of The National Academy of Sciences of the United States of America, 2020, 117(7): 3648-3655.

Advancements in fish behavioral research related to fish passage facility design

KE Senfan [1,2], SHI Xiaotao [1,2*], SUN Pan [1], YUAN Yinhao [1], PANG Kaiwen [1], LI Dongqing [1], JIANG Zewen [1], YU Xiaowei [1], TU Zhiying [2,3]

(1. *College of Hydraulic and Environment Engineering*, *China Three Gorges University*, *Yichang* 443002, *China*;
2. *Engineering Research Center of Eco-environment in Three Gorges Reservoir Region*, *Ministry of Education*, *China Three Gorges University*, *Yichang* 443002, *China*;
3. *College of Biological and Pharmaceutical Sciences*, *China Three Gorges University*, *Yichang* 443002, *China*)

Abstract: Fish behavioral characteristics serve as fundamental data guiding the design of fish passage facilities in hydropower projects. This study systematically examines four critical aspects closely related to fishway design: ① fish swimming capacity, ② behavioral responses to hydrodynamic conditions, ③ techniques for fish attraction and deterrence, ④ effectiveness monitoring of fish passage operations. By synthesizing 121 relevant studies across these domains, we establish standardized experimental protocols for behavioral parameter quantification and identify pivotal technical criteria, including critical swimming speeds, turbulence tolerance thresholds, and optimal flow parameters for fish guidance. The analysis reveals limitations in current experimental designs, such as insufficient ecological validity in stimulus simulation and inadequate scaling principles for engineering applications. To address these gaps, we propose enhanced methodologies integrating multi-scale experiments (laboratory to field) and data-driven adaptive monitoring systems. These advancements aim to refine the scientific rigor of fish behavior experiments and optimize the ecological performance of fish passage facilities in practical engineering contexts.

Key words: fish passage; fish behavior; swimming ability; fish attraction and repulsion techniques; fish passage efficiency

Corresponding author: SHI Xiaotao. E-mail: fishlab@163.com

Funding projects: National Natural Science Foundation of China (52279069, U2340218); Innovation Group Project of the Hubei Provincial Natural Science Foundation (2023AFA005)