

河流鱼类诱驱理论及其在过鱼设施中的应用

谭均军 孙钧键 石小涛

THEORIES OF FISH ATTRACTION AND REPULSION IN RIVERS AND THEIR APPLICATIONS IN FISH PASSAGE SYSTEMS

TAN Jun-Jun, SUN Jun-Jian, SHI Xiao-Tao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7541/2025.2024.0416>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

水生所与三峡和葛洲坝水利工程中的鱼类保护

CONTRIBUTIONS OF THE INSTITUTE OF HYDROBIOLOGY, CHINESE ACADEMY OF SCIENCES TO FISH PROTECTION IN THE CONSTRUCTION OF THREE GORGES DAM AND GEZHOUBA DAM

水生生物学报. 2020, 44(5): 1040–1044 <https://doi.org/10.7541/2020.120>

密西西比河干流大坝建设对鱼类的影响及保护措施

IMPACTS OF CASCADE DAMS ON FISH IN THE MAINSTREAM OF MISSISSIPPI RIVER AND THE MITIGATION MEASURES

水生生物学报. 2020, 44(6): 1330–1341 <https://doi.org/10.7541/2020.154>

环境DNA技术在长江口鱼类多样性分析中的应用

APPLICATION OF ENVIRONMENTAL DNA TECHNOLOGY IN FISH DIVERSITY ANALYSIS IN THE YANGTZE RIVER ESTUARY

水生生物学报. 2023, 47(3): 365–375 <https://doi.org/10.7541/2023.2022.0272>

基于eDNA技术的长江上游珍稀特有鱼类国家级自然保护区重庆段鱼类多样性研究

FISH DIVERSITY IN CHONGQING SECTION OF THE NATIONAL NATURE RESERVE FOR RARE AND ENDEMIC FISH IN THE UPPER YANGTZE RIVER BASED ON EDNA TECHNOLOGY

水生生物学报. 2022, 46(1): 2–16 <https://doi.org/10.7541/2021.2021.132>

珠江水系广西江段鱼类多样性空间分布特征

FISH DIVERSITY AND DISTRIBUTION PATTERN OF THE PEARL RIVER SYSTEM IN GUANGXI

水生生物学报. 2020, 44(4): 819–828 <https://doi.org/10.7541/2020.098>

水产动物行为及其在渔业中的应用研究进展

RESEARCH PROGRESS OF AQUATIC ANIMAL BEHAVIOR AND ITS APPLICATION IN FISHERIES

水生生物学报. 2021, 45(5): 1171–1180 <https://doi.org/10.7541/2021.2020.305>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

河流鱼类诱驱理论及其在过鱼设施中的应用

谭均军^{1,2} 孙钧键^{1,2} 石小涛^{1,2}

(1. 三峡大学湖北省鱼类过坝技术国际科技合作基地, 宜昌 443002; 2. 三峡大学水利与环境学院, 宜昌 443002)

摘要: 过鱼设施作为恢复鱼类洄游通道的重要生态补偿措施, 已广泛应用于水生态保护, 然而其过鱼效果尚未达到预期。诱驱鱼技术是提升过鱼设施过鱼效果的关键手段之一。结合近十年的室内与野外实验研究, 文章系统阐述了水流、声、光、电、气泡幕及生物因子等对鱼类行为的影响机制及诱驱理论, 总结了诱驱鱼技术在过鱼设施中的应用优势与不足, 得出结论: (1) 鱼类对诱驱鱼因素的行为响应研究逐渐深入, 由二维平面发展到三维空间(如由流速到流场、由声强到声场等); (2) 诱驱鱼因素对不同鱼类的诱驱效果呈现种属共性和特异性, 且不同大小鱼类对诱驱鱼因素也存在行为响应差异; (3) 诱驱鱼技术研究对象逐渐由海洋鱼类转向淡水经济鱼类和保护鱼种, 研究方法趋向于考虑多因子交互作用对鱼类行为的影响; (4) 诱驱鱼技术的效果受多种因素交互影响, 包括物种差异、工程布置适应性、运行管理等。未来研究应进一步解析多因子交互作用下的鱼类行为响应机制, 优化适应不同过鱼设施运行条件的诱驱鱼设计, 推动水生态保护的发展。

关键词: 水电开发; 鱼类行为; 过鱼设施; 诱驱鱼技术; 渔业保护

中图分类号: S956 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2025)01-012515-20



水电是全球最大的可再生能源, 提供了全球19%的电力供应。截至2024年6月, 中国已建成近24000座水电站, 占全球总量的40.8%^[1-3]。水利工程在支撑经济社会发展的同时, 阻断河流自然流动, 降低了河流的纵向连通性, 导致流域内河网逐步呈现碎片化^[4-6]。鱼类作为河流生态系统中极易受环境胁迫的群落, 其生命活动受到大坝的显著影响^[7]。研究表明, 澜沧江^[8]、金沙江^[9]及怒江和雅鲁藏布江^[10]等主要河流在修建一系列水电站后, 河流鱼类资源均出现不同程度的衰退; 尤其是一些地方性洄游鱼类因大坝阻隔而无法完成生命活动, 其种群数量受到严重影响^[11-13]。

过鱼设施作为减缓河流工程阻隔效应的一种重要措施, 是全球河流生态保护前沿热点^[14-16]。我国的过鱼设施研究起步较晚, 最早的过鱼设施可追溯至1958年的浙江七里垄鱼道^[17]。之后, 按照《中华人民共和国水法》等法律法规要求, 其他未建鱼

道的水库大坝预计也将陆续补建鱼道^[18]。目前, 国内已有超百座过鱼设施^[19]。然而, 过鱼设施的过鱼效率尚未达到预期, 其关键在于鱼类能否在宽阔的河道断面找到断面较窄的鱼道进口并顺利进入鱼道进口。已有研究表明, 鱼类对水流、声音、光、电、气泡幕等非生物因子及生物因子反应较为敏感, 而鱼类行为特性及其对这些环境因子的响应机制尚未得到系统深入的研究^[20]。

基于此, 本文系统回顾了近年来室内和野外研究中, 水流、声音、光、电、气泡幕及生物因子等诱驱技术对鱼类行为的影响机制, 探讨了影响诱驱鱼技术效果的主要因素, 并结合过鱼设施的实际应用, 分析了不同环境和技术条件下这些诱驱措施的适用性与局限性, 进一步总结了当前亟待解决的问题与未来的研究重点。通过深化鱼类行为学基础理论研究, 本文旨在为优化和推广诱驱鱼设施提供科学依据, 并为未来技术的创新和应用标准的建立

收稿日期: 2024-10-23; 修订日期: 2024-12-27

基金项目: 国家自然科学基金(52179070和52279069); 湖北省自然科学基金计划(创新群体项目)(2023AFA005)资助 [Supported by the National Natural Science Foundation of China (52279069 and 52179070); the Innovative Research Group Program of Natural Science Foundation of Hubei Province (2023AFA005)]

作者简介: 谭均军(1985—), 女, 副教授; 主要研究方向为工程影响鱼类保护。E-mail: tanjunjun52@163.com

通信作者: 石小涛, 男, 教授; 主要研究方向为工程影响鱼类保护。E-mail: fishlab@163.com

提供坚实的理论与实践基础。

1 鱼类行为的影响因子

鱼类行为是指鱼类在其生存环境中表现出的各种活动和反应,包括游泳、觅食、繁殖、洄游、躲避天敌等^[21]。其中,洄游行为是一种特殊且复杂的行为类型,通常是鱼类为满足繁殖、觅食或规避不利环境条件等需求而进行的主动性、周期性和定向性迁移^[22–25]。在洄游过程中,鱼类需要应对复杂多变的水环境条件,这对过鱼设施的设计提出了较高要求。深入理解鱼类行为对各种环境因子的响应规律,是开发高效诱驱技术的关键。本章将重点介绍水流、声音、光、电、气泡幕及生物因子等环境因子对鱼类洄游行为的影响。

1.1 水流

水流是影响鱼类行为的关键环境因素,尤其在洄游、觅食和栖息地选择过程中发挥着重要作用。鱼类依靠其敏感的侧线系统感知水流中的细微变化,侧线感受器能够检测水流的速度、压力梯度及紊流特征^[26]。通过这一感知系统,鱼类可以准确判断水流的方向和强度,从而在复杂的水环境中做出相应的行为反应。鱼类的趋流性(Rheotaxis)是其在水流中对流向和流速的特定行为反应,即它们会主动向着水流的来源方向游动^[21]。这一反应在洄游性鱼类中尤为明显,因为它们通常依赖于感知

水流变化来寻找洄游路径。根据水流的物理特征,鱼类会调整游动方式,表现出不同的行为,如顶流静止、顶流前进、顶流后退或顺流而下^[27, 28]。水流的流态和流速不仅会影响鱼类的行为反应,还会直接决定它们能否顺利进入并通过过鱼设施。

水流的流态通常分为均匀流和非均匀流。鱼道中的均匀流是指当每个池室的平均水深连线与鱼道底坡平行时,流态表现出流速和流量几乎无关的特征。在这种流态下,池室内的流速场稳定,有助于为鱼类提供清晰且一致的方向性引导,使其能够以较低的能量消耗顺利通过鱼道。然而,在非均匀流状态下,池中相同部位的流速、紊动能和雷诺剪切应力会随着流量的增加而显著增大,导致水流的不稳定性。这种流态会增加鱼类游动难度和生理负荷,导致其迷失方向,延误洄游过程^[29–31]。不同鱼道类型的设计会直接影响水流的流态,从而影响鱼类的洄游行为,部分研究成果见表1。竖缝式鱼道的坡度、导隔板长度与相对位置、导角等因素对流态有显著影响^[32–34]。随着鱼道坡度增大,池室内流速增加,紊流和三维复杂水流结构更易形成,从而增加鱼类的通过难度^[35]。为此,竖缝式鱼道通常将坡度控制在5%以内,以保持均匀流环境,确保游动力较弱的本土鱼类(如鲤科鱼类)能够顺利通过^[36, 37]。此外,导隔板长度增加能够有效降低流速差异,减少紊流形成,从而提高鱼类通过率^[32]。

表1 近十年(2014—2024年)国内外关于鱼类对水流因子响应的研究进展

Tab. 1 Advances in domestic and overseas studies on fish responses to hydraulic factors in the past decade (2014—2024)

研究方法 Study method	实验鱼种 Fish species	具体表现 Specific performance	文献来源 Reference
1:2.5物理模型	鲢 <i>Hypophthalmichthys nobilis</i>	鲢在流速为0.15—0.45 m/s, 紊动能为0.020—0.043 m ² /s ² , 紊动耗散率为0.020—0.065 m ² /s ³ 和应变率为2—7/s的通过次数较多, 且紊动能和流速是影响竖缝式鱼道中鲢通过时间的关键水力参数	[31]
原型鱼道	短须裂腹鱼 <i>Schizothorax wangchiachii</i>	平行补水时鱼道进口平均吸引效率为26.47%, 垂直补水时鱼道进口平均吸引效率为13.11%, 补水角度和流量显著影响进口鱼类吸引时间	[50]
1:10物理模型	草鱼 <i>Ctenopharyngodonidella</i>	在3种鱼道入口和河道的角度(30°、45°和60°)条件下, 入口角度从30°增加到60°时, 草鱼的能量消耗范围从1.26—3.59×10 ⁻³ J增加到3.32—7.33×10 ⁻³ J, 且鱼头部偏转角度增加	[51]
物理模型	异齿裂腹鱼 <i>Schizothorax oconnor</i>	在鱼道高流速、低紊动能区域易发生折返现象, 而折返后鱼类多选择低流速、高紊动能区域重新上溯	[52]
数值模拟	/	竖缝式鱼道模型中, 延长转弯段上下游长度的同时增设整流导板可有效引导主流居中, 维持主流稳定, 避免转弯段内产生大尺度回流区, 具有良好的上溯条件	[53]
数值模拟	/	竖缝式鱼道模型中, 转弯角度大于90°时, 主流冲击程度河回流区尺度较大。在增设整流导板后, 转弯角度α的逐渐增加, 整流较好的导板位置趋于稳定	[54]
原型鱼道	虹鳟 <i>Oncorhynchus mykiss</i>	当池堰式鱼道坡度为10%时, 最大紊动能增加到0.22 m ² /s ² ; 当坡度为4%且堰距较大时, 最大紊动能减小到0.05 m ² /s ² , 达到鱼在堰间池中休息的最佳条件	[55]
物理模型	鳙 <i>Aristichthys nobilis</i>	鳙幼鱼上溯游泳行为主要受紊动强度的影响, 其偏好紊动强度范围在5.25—8.40 cm/s	[56]
数值模拟	齐口裂腹鱼 <i>Schizothorax prenanti</i>	鱼道模型3个进口均处于坝下左岸最大概率预测洄游路线上	[57]
数值模拟	四大家鱼 Four major Chinese carps	当流速处于0.24—0.70 m/s时, 四大家鱼数量与流速呈正线性相关; 当水深值处于2.4—3.9 m时, 四大家鱼数量与水深呈正线性相关关系; 紊动能在0—0.0012 kg·m ² /s ² 和0.0015—0.0040 kg·m ² /s ² 时, 四大家鱼数量与紊动能分别呈正相关和负相关关系	[58]

当导隔板间距(隔板顶端中点到导板顶端中点的距离/池室长) $b_0/L=0.15$ 时, 池室内水流流态最佳^[34]。对于丹尼尔鱼道, 水流流态主要受坡度、隔板断面型式和隔板底孔的影响^[38, 39]。池堰式鱼道由于对鱼类跳跃和游泳能力要求较高, 目前仅在青海湖等地针对特定保护鱼种有所应用^[40]。仿自然鱼道通过使用自然材料(如卵石、植被、水生植物)构建, 更贴近自然河道的流态^[14, 41, 42]。通过设置透水卵石墙可以显著改善水流流态, 为多种鱼类提供适宜的洄游条件^[43, 44]。

鱼类能否成功进入过鱼设施, 水流流速是关键因素之一^[45]。为了使鱼类能够识别并进入鱼道, 鱼道进口位置通常布设在流速变化显著的区域, 如泄水闸下游、溢洪道出口等^[46]。鱼道进口流速需要高于鱼类的感应流速, 确保其能够有效感知并主动游向进口区域。同时, 由于不同鱼种的感应流速差异显著, 设计时必须充分考虑这些差异, 尤其是在多物种鱼道的设计中。洄游性鱼类如草鱼和鳊倾向于被高流速环境所吸引^[30], 而底栖性鱼类如黄颡鱼则偏好低流速区域^[47]。因此, 在进行过鱼设施设计时应通过分区流速控制或设置多个进口来兼顾不同鱼类的过鱼需求。同时, 为避免鱼类被流量更大的尾水区域吸引, 通常在鱼道进口处设置明显的区别流; 鱼道进口流量应至少达到河流总流量的 2%—5%, 以保证足够的吸引力^[48]。由于许多已建鱼道流量受到限制, 吸引流不足, 近年来, 补水措施被逐渐应用于提升鱼道进口诱鱼效果。张文传等^[49]通过数值模拟发现采用补水措施可显著改善鄱阳湖水利枢纽鱼道进口的流场环境, 扩大了进口诱鱼流速的适应范围。谭均军等^[50]发现平行补水效果优于垂直补水, 且当进水口流量在 $0.16\text{—}0.58\text{ m}^3/\text{s}$ 、补水流量在 $0.94\text{—}2.42\text{ m}^3/\text{s}$ 时鱼道进口诱鱼效果最佳。

1.2 声

声音是水生生态系统中一个关键的环境因子, 其在水中的传播对鱼类的行为和生理反应具有显著影响。声音包括声波的频率和振幅, 还涉及声波在水体中传播时所引发的声压变化(Sound pressure)和粒子运动(Particle motion)^[59, 60]。鱼类感知声压一般通过鱼鳔和侧线, 而感知粒子运动一般通过侧线和内耳内的耳石, 前者主要影响鱼类对中高频声音的探测, 后者则在低频声波感知中占据重要地位, 鱼类的听觉在这两种感知方式之间存在连续性^[61, 62]。为了探究鱼类对声压和粒子运动的感知机制及其在不同声音下的行为反应, 研究人员通常使用水听器测量声压, 这种设备能够准确捕捉水体中的声压变化; 而测量粒子运动则依赖于加速度计

或矢量传感器, 这些仪器可以感知并记录介质质点在声波传播过程中的加速度和运动方向。许多研究表明, 几乎所有鱼类都能检测和利用粒子运动, 特别是在低于几百赫兹的频率下, 但其探测声压的能力差别却很大, 即存在听觉阈值差异^[60—64]。随着国外研究粒子运动对鱼类行为影响的认识不断深入, 相关技术的应用也取得了显著进展, 不仅在实验室中得到了验证^[65, 66], 也扩展到了自然环境中的现场研究^[67, 68]。相比之下, 国内研究更多地聚焦于声压对鱼类行为的影响, 对粒子运动的探究相对较少, 相关测量仪器的使用和数据分析也相对滞后。

在水生环境中, 具有信号意义的声音能够引发鱼类多种行为反应, 这些反应统称为趋音性(Phonotaxis)。根据鱼类听到声音后的反应方向, 趋音性可分为正趋音性(鱼类趋向声源)和负趋音性(鱼类远离声源)^[21]。近十年来, 关于鱼类趋音性的研究取得了重要进展, 不仅扩展了针对海洋鱼类的声音驯化研究, 还增加了许多淡水鱼类的关键数据, 同时研究中涉及的声音类型也变得更加多样化, 有关鱼类趋音性的部分研究成果见表 2。基于正趋音性, “海洋牧场”和“声诱渔业”通过结合投饵和声音对鱼类进行驯化, 逐步建立声音与食物之间的条件反射, 从而实现精准的鱼群引导和集群控制^[69]。然而, 鱼类对环境噪声(如引擎声、天敌叫声、打桩声和船舶噪声)常表现出负趋音性, 导致捕食频率降低, 逃逸行为增加以及社会行为改变(如配偶选择)^[70—73]。尽管所有鱼类在某种程度上都对声音敏感, 但不同鱼类及个体对同种声音的反应敏感程度存在差异, 反之亦然^[74]。例如, 骨鳔鱼类(如鲤科和鲇科)由于具备韦伯氏器(Weberian apparatus), 能够更高效地将鱼鳔振动信号传递至内耳, 因此在感知声音, 尤其是声压变化方面, 比非骨鳔鱼类(如鲈科鱼类)更为敏感^[74—77]。即使是同种鱼类, 鱼类的听觉敏感性也可能因个体发育阶段、健康状况及周围环境(如水质、水温和流速)等因素发生变化。此外, 鱼类对噪声的反应并非一成不变, 它们能够通过调整行为策略, 如改变觅食时间或迁移路径, 来减少噪声干扰的影响。这种适应能力受到生境、行为习性及进化历史的综合影响^[78]。

1.3 光

光是调控水生生态系统的重要环境因子, 对鱼类的生长、觅食、迁移和繁殖等生理与行为起着重要作用。光的基本属性包括波长和强度, 分别决定了光色(Light color)和光强(Light intensity)^[88]。鱼类通过视觉器官, 主要是视网膜中的感光细胞, 来检测光信号^[89, 90]。鱼类的感光细胞分为两类: 视锥

细胞和视杆细胞。视锥细胞对颜色敏感,尤其对红光、绿光和蓝光最为敏感,主要在高光照条件下(如白天或明亮环境中)发挥作用;而视杆细胞则对低光照环境敏感,主要负责黑白视觉,在夜间或弱光环境下起作用,但无法感知颜色^[89,90]。不同鱼类的视锥细胞与视杆细胞比例存在显著差异,这种差

异不仅影响它们对光的敏感度,还决定了其在不同光环境下的行为策略,即使是同一鱼种在不同发育阶段也可能表现出不同的光感知能力。因此,光周期、光强和光色等变化对鱼类行为的影响成为当前研究的热点。例如,Keep等^[91]发现调节昼夜光周期可以显著改变如点带硬头鱼和西氏后鳍鲑等日

表2 近十年(2014—2024年)国内外关于鱼类对声因子诱驱响应的研究进展

Tab. 2 Advances in domestic and overseas studies on fish attraction and repulsion responses to acoustic factors in the past decade (2014—2024)

鱼种 Fish species	声音类型 Sound type	趋音性 Phonotaxis	具体表现 Specific performance	实验类型 Experimental type	文献来源 Reference
黑鲮 <i>Sparus macrocephalus</i>	300和400 Hz正弦波 交替音	正趋音性	正弦波交替音对黑鲮的反应和聚集具有明显的效果	室内实验	[69]
鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	短吻鳄吼叫声 0—2000 Hz扫频音	负趋音性 负趋音性	打桩声和鸣笛声对鲢无显著驱赶效果, 0—2000 Hz扫频音和短吻鳄吼叫声有显著驱赶效果,且吼叫声效果更好	室内实验	[70]
草鱼 <i>Ctenopharyngodon idella</i>	打桩声 船舶噪声 1000 Hz单频音 复杂音(鱼游动声、 引擎声、短吻鳄吼 叫声、打桩声和游 艇声)	相对无趋音性 相对无趋音性 负趋音性	单频音对草鱼无显著驱赶效果,而复杂音对草鱼有显著驱赶效果,体现在相比单频音显著更高的反应次数、趋音速度和运动时间	室内实验	[71]
美洲拟鲈 <i>Pseudopleuronectes americanus</i>	船舶噪声	负趋音性	暴露于船舶噪声环境中的美洲拟鲈幼鱼的捕食行为明显少于无噪声对照组	室内实验	[72]
草鱼 <i>Ctenopharyngodon idella</i>	500—3000 Hz 单频音 扬子鳄吼叫声	均负趋音性	草鱼对扬子鳄吼叫声敏感程度远高于单频音,平均反应次数高达(5.0±0.9)次,且发生逃窜行为	室内实验	[79]
草鱼 <i>Ctenopharyngodon idella</i>	500—3000 Hz 单频音 摄食声	相对无趋音性 正趋音性	单频音对草鱼无显著诱驱效果,而摄食声对草鱼有显著聚集作用,体现在相比单频音显著更高的趋音游泳速度和逗留时间	室内实验	[80]
拉萨裸裂尻鱼 <i>Schizopygopsis younghusbandi</i> 双须叶须鱼 <i>Ptychobarbus dipogon</i> 斯氏高原鳅 <i>Triplophysa stoliczkae</i>	扬子鳄吼叫声	均负趋音性	三种鱼对扬子鳄吼叫声均表现回避反应,且拉萨裸裂尻鱼和双须叶须鱼对吼叫声更为敏感	野外实验	[81]
拉萨裸裂尻鱼 <i>Schizopygopsis younghusbandi</i>	扬子鳄吼叫声 汽艇噪声 打桩噪声	负趋音性 相对无趋音性 相对无趋音性	拉萨裸裂尻鱼对扬子鳄吼叫声表现为负趋音性,且声强增加,负趋音性增强,但其对汽艇噪声和打桩噪声的负趋音性不显著,且不受声强影响	室内实验	[82]
大黄鱼 <i>Larimichthys crocea</i>	船舶噪声	负趋音性	当噪声声压级<60 dB时,大黄鱼幼鱼负趋音性不强烈,但声压级增大,趋避行为强度增大,依次表现出:游泳速度加快、鱼与鱼之间及鱼与桶壁之间发生碰撞、瞬间反应无序和跳跃等行为	室内实验	[83]
裸腹叶须鱼 <i>Ptychobarbus kaznakovi</i>	摄食声 河流噪声 1000 Hz单频音	均正趋音性	摄食声引发裸腹叶须鱼显著的正趋声性,效果优于1000 Hz单频音和河流噪声	室内实验	[84]
裸腹叶须鱼 <i>Ptychobarbus kaznakovi</i>	500—3000 Hz 单频音 扬子鳄吼叫声	均负趋音性	只有15%的裸腹叶须鱼对单频音有一次反应,而裸腹叶须鱼对扬子鳄吼叫声反应更剧烈,平均有8.4次反应	室内实验	[85]
真鲮 <i>Phoxinus phoxinus</i>	106—212 Hz倍频带 噪声 1556—3112 Hz倍频 带噪声 150 Hz正弦波 2200 Hz正弦波	均负趋音性	真鲮对4种声音都会受到惊吓,会降低平均群体游泳速度,且低频正弦波音对群体行为的影响最大	室内实验	[86]
大鳞吸口鱼 <i>Moxostoma aureolum</i> 淡水石口鱼 <i>Aplodinotus grunniens</i> 大口黑鲈 <i>Micropterus salmoides</i> 虹鳟 <i>Oncorhynchus mykiss</i>	涡轮机噪声	负趋音性 正和负趋音性 相对无趋音性 相对无趋音性	大鳞吸口鱼对持续的涡轮机噪声表现负趋音性,保持远离声源;淡水石口鱼在中等音量下,先表现出负趋音性后表现出正趋音性,而大口黑鲈和虹鳟对涡轮机噪声表现相对无趋音性	室内实验	[87]

间活动鱼类的觅食行为。McIlvenny等^[92]发现大西洋鲑等典型洄游鱼类的迁移行为也受到光周期精确调控的影响。

光源作为重要的环境信号, 可以引发鱼类的多种行为反应, 这些反应被统称为趋光性(Phototaxis)。近十年来, 关于鱼类趋光性的研究取得了显著进展, 主要体现在光强、光色等因素对鱼类行为影响的深入探索, 以及实验鱼种的不断丰富。特别体现在多因素交互影响的研究逐渐增多, 如将光强、光色与水流或温度等环境因子结合, 进一步揭示了光照条件对鱼类迁徙、觅食等行为的复杂影响。与此同时, 研究发现自然状态下的光周期对鱼类上溯行为具有重要作用, 尤其是在昼夜节律的调控下, 鱼类在光暗条件下的上溯轨迹、速度及行为选择存在显著差异。这表明光周期的影响也是光诱驱鱼技术优化的重要方向。有关鱼类趋光性的部分研

究成果见表 3。根据鱼类检测到光源后的反应方向, 趋光性可分为正趋光性(鱼类趋向光源)和负趋光性(鱼类远离光源)^[93]。不同鱼类对光色的反应存在显著差异, 展现出不同的适应策略。以红光为例, 斑马鱼^[94]和花鳉^[95]对红光表现明显的正趋光性; 然而, 对于拉萨裂腹鱼^[96]和孔雀鱼^[97], 红光则诱发负趋光性, 促使它们避开红光区域。作为光色的综合属性, 光源的色温(Color temperature)不同对鱼类的趋光性也会产生显著影响。邓青燕等^[98]研究了白色光源的3种色温(暖白光、中性光和冷白光)对斑马鱼趋光行为的影响发现, 在短时间光照条件下, 斑马鱼对中性光的敏感性最强, 其次是冷白光和暖白光。此外, 鱼类群体对光色的集体反应由群体行为的协调性和社会性主导, 相比于个体对光色的反应, 群体性趋光反应可能存在差异。例如, 张林等^[99]发现, 秦岭细鳞鲑群体在绿光下表现出明显的偏好

表 3 近十年(2014—2024年)国内外关于鱼类对光因子诱驱响应的研究进展

Tab. 3 Advances in domestic and overseas studies on fish attraction and repulsion responses to light factors in the past decade (2014—2024)

鱼种 Fish species	偏好光色 Preferred light color	偏好光强 Preferred light intensity	具体表现 Specific performance	实验类型 Experimental type	文献来源 Reference
点带硬头鱼 <i>Craterocephalus stercusmu- scarum</i> 西氏后鳍鲑 <i>Retropinnasemoni</i>	/	100—200 lx	点带硬头鱼和西氏后鳍鲑在昼夜光周期的调节下表现出显著的日间偏好。光照时间延长时, 它们的活动范围显著增加, 且克服迁徙障碍的概率也大幅增加	室内实验	[91]
大西洋鲑 <i>Salmo salar</i>	/	/	大西洋鲑在日照时间逐渐变短的季节, 鲑鱼会启动长距离洄游, 以确保在适宜的环境中完成繁殖	野外实验	[92]
斑马鱼 <i>Danio rerio</i>	绿光 紫光 红光	/	个体斑马鱼显著偏好绿光, 群体斑马鱼显著偏好紫光、红光和绿光, 个体群体均对黄光无趋光性	室内实验	[94]
拉萨裂腹鱼 <i>Schizothorax waltoni</i>	绿光 蓝光	/	拉萨裂腹鱼在绿光和蓝光下表现为正趋光性, 在红光和黄光下表现为负趋光性	室内实验	[96]
秦岭细鳞鲑 <i>Brachymystax sinlingensis</i>	绿光	10—25 lx	秦岭细鳞鲑稚鱼个体对3种光照强度(1—5、5—10和10—25 lx)和4种光照颜色(黄、红、绿和蓝)无明显趋避性, 而群体对强光和绿光有明显趋避性	室内实验	[99]
草鱼 <i>Ctenopharyngodon idellus</i>	/	34.62—52.45 lx	草鱼幼鱼在静水、0.1和0.2 m/s流水情况下, 光强期望值分别为52.45、34.62和37.86 lx	室内实验	[103]
鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	红光 蓝光 绿光	3.268—5.444 lx 0.033—10.511 lx 3.776—9.833 lx	鲢的应激程度在红和绿光条件下随照度增加先增后减, 活跃性单调递增; 鲢的应激程度在蓝光条件下单调递增, 活跃性波动上升	室内实验	[104]
拉萨裸裂尻鱼 <i>Schizopygopsis younghusbandi</i>	蓝光/深蓝光	/	在动水无底质条件下, 拉萨裸裂尻鱼均偏好于蓝光或深蓝光, 次亮光; 在静水有底质条件下主要偏好于暗光, 在无底质条件下偏好于次亮光	室内实验	[106]
斑马鱼 <i>Danio rerio</i>	红光 绿光 紫光	/	斑马鱼对红光、绿光和紫光的喜好程度较高, 对黄光的喜好程度较低	室内实验	[107]
齐口裂腹鱼 <i>Schizothorax prenanti</i>	绿光 白光	100—1000 lx 0—1000 lx	在100—1000 lx绿光条件下, 齐口裂腹鱼的尝试次数显著高于10—100 lx绿光以及同照度白光, 其他照度会引起其逃逸频率或滞留时间的提升	室内实验	[108]
大麻哈鱼 <i>Oncorhynchus keta</i> 马苏大麻哈鱼 <i>Oncorhynchus masou</i>	/	7.05 lx 11.83—31.7 lx	在强光条件下, 大麻哈鱼呈负趋光性, 未发现正趋光性; 而马苏大麻哈鱼无负趋光性, 但正趋光性随光强增大会减少	室内实验	[109]
白鲟 <i>Acipenser transmontanus</i>	绿光	/	鲟鱼在白天和夜间条件下都表现出积极的趋光性, 且绿光引起的吸引力最大	室内实验	[110]
中华倒刺鲃 <i>Spinibarbus sinensis</i>	绿光	/	中华倒刺鲃幼鱼鱼群更倾向于绿光, 其群体协调性和凝聚力相比白光有明显提高	室内实验	[111]

性。除了光色,光强在调节鱼类行为方面也扮演着关键角色。光强的变化不仅会影响鱼类对光源的感知,还可能进一步影响鱼类的避敌、觅食及迁徙等行为。研究发现,在低光照条件下,美洲灯鱼(*Hemigrammus rhodostomus*)个体间及与环境障碍物的互动减少,而游泳方向的变化频率增加^[100];而眼斑拟石首鱼(*Sciaenops ocellatus*)在低光照条件下表现出的摄食频率显著降低^[101];此外,在强光环境下,部分鱼类如大菱鲆(*Scophthalmus maximus*)的摄食频率也会受到抑制^[102]。

1.4 电

电是水生环境中的关键物理因素,主要包括水体中的电场和电流现象。电既源于自然界的电磁活动,也包括人为施加的电场。当水中施加电场时,鱼类会表现出趋电性,通常会向阳极游动,远离阴极或脱离电场^[112]。这一特性为电驱鱼技术提供了理论基础,成为其关键应用方向。目前,电驱鱼设备中常用的电流类型包括直流电(Direct current)、交流电(Alternating current)和脉冲直流电(Pulsed direct current)。其中,脉冲直流电由于刺激效应较强,对鱼类伤害较小,能耗较低,是电驱鱼技术应用最广泛的电流类型^[112-114]。

在实际应用中,电驱鱼技术通常与拦鱼电栅结合,利用鱼类的趋电性来阻止其进入特定区域或引导其进入特定路径,有关鱼类趋电性的部分研究成果见表4。欧美国家在防治生物入侵领域已有较成熟的应用。例如,Parker等^[115]在伊利诺伊河上游设置了拦鱼电栅,有效阻止了入侵物种鲢和鳙进入密歇根湖,从而保护了本地鱼类及水生生态系统的平衡。类似研究还表明,对于鲤^[116,117]和虹鳟^[118]等入侵物种,仅需较小电压梯度即可取得显著的阻拦效果。国外学者通过大量室内实验,针对不同电学参数(如电极布置方式、脉冲电压、脉冲宽度和脉冲频率)进行了广泛研究,旨在优化拦鱼电栅的设计。例如,Johnson等^[119]发现垂直电栅比水平布置对虹鳟阻拦效果更佳,尤其适用于水深较浅的区域。Weber等^[120]研究了多种脉冲电压与宽度的组合,发现电栅显著减少了大体型鱼类的逃逸率,但脉冲宽度和电压的变化对逃逸率显著影响。此外,拦鱼电栅电学参数与环境因子的交互作用也受到国内外研究学者广泛关注。例如,研究发现水流速度会显著影响电栅的阻拦效果,多种鱼类如齐口裂腹鱼、大渡河软刺裸裂尻鱼和黄石爬鮡^[121]、鲢^[122]、草鱼^[123]、欧洲鳗鲡^[124]在流速增加时阻拦率下降。然而,某些鱼类如鲢在高流速下对电栅的阻拦率并未显著变化,表明不同电学参数在不同鱼种和流速

下的效果可能存在阈值差异^[125]。

1.5 气泡幕

气泡幕是一种通过水中释放气体形成的密集气泡幕状结构,其主要物理特性主要包括气泡的浮力、上升速度,以及在水中形成的视觉遮挡效应^[129-131]。此外,气泡幕能够反射和散射声波,显著改变水中的声环境^[132,133]。这些物理特性通过视觉屏障、声学刺激及机械压力对鱼类行为产生复合影响。

在过鱼设施中,气泡幕通过创建水下视觉和声学屏障,在气泡幕在导鱼和诱鱼方面已有大量的应用^[130,134],部分研究成果见表5。气泡幕技术的优势在于其低成本、灵活性和可调性。它可以快速适应不同水体的水流特性,甚至在复杂的紊流水域中保持良好的功能^[135,136]。此外,通过调节气泡幕的摆放角度、气量、孔径和孔距,可以显著提高其在复杂水流条件下对不同鱼种的引导效果。然而,气泡幕对不同鱼种的引导效果差异较大。一些鱼类,尤其是具有较强适应能力的物种,可能对气泡幕刺激不敏感,甚至会主动游向气泡区域^[137,138]。

1.6 生物因子

生物因子(Biological factor)是指对鱼类行为产生影响的各种生物学因素,包括生物密度、竞争关系、饵料资源、捕食者-猎物关系以及外来物种的引入等^[151]。这些因素通常与鱼类的生活史特征密切相关,并在很大程度上决定了鱼类的行为模式。生物密度(Biomass density)是指在特定区域内,某一物种或多个物种的个体数量或生物量(即生物体的总质量)^[152]。区域内生物密度的增加会显著加剧种内和种间竞争,进而引发种群动态和行为模式的改变。例如,高密度饲养大斑杜父鱼(*Cottus perifretum*)的围场中,鱼的整体质量相比低密度围场有所降低,证实了种内竞争的加剧^[153]。类似地,在低生物密度情况下,凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)个体表现更活跃的摄食行为^[154]。但在高密度养殖环境中,凡纳滨对虾则会表现出攻击性的摄食行为^[155]。饵料资源的丰度、种类以及分布也可以调整鱼类的觅食行为。例如,鲫、鲤等产粘性卵鱼类倾向于栖息在饵料充足的水草密集区域^[156]。然而,在食物严重匮乏、营养压力极大的情况下,鱼类在危险区域(如浅滩、近岸栖息地等)觅食的频率也可能会增加。研究发现,部分营养严重不足的金鱼会脱离鱼群,冒险进入危险觅食区域^[157]。部分鱼类还会进行有组织的集群觅食以应对被捕食者捕食的风险。例如,高体鳊鲂(*Rhodeus ocellatus*)幼鱼在觅食期间表现出明显的集群行为^[158],且四大家鱼中的

草鱼^[159]、鲢^[160]和鳙^[161]也发现有类似的集群行为。然而,并非所有鱼类都会表现这种集群策略。例如,研究发现,饥饿状态并未影响锦鲤鱼群的凝聚力^[162]。

此外,当河流中出现或人为引入外来物种时,它们会加剧本土鱼类的种间竞争,也可能通过捕食、传播疾病或改变栖息地结构来影响本地物种的行为

表 4 近十年(2014—2024年)国内外关于鱼类对电因子响应的研究进展

Tab. 4 Advances in domestic and overseas studies on fish responses to electrical factors in the past decade (2014—2024)

鱼种 Fish species	电学参数 Electrical parameters	具体表现 Specific performance	实验类型 Experimental type	文献来源 Reference
海七鳃鳗 <i>Petromyzon marinus</i> 虹鳟 <i>Oncorhynchus mykiss</i>	垂直布置: 3种脉冲电压(68.57、90.39和113.57 V)、4种电压梯度(0.43、0.68、0.72和0.94 V/cm)和4种脉冲宽度(1.6、8.2ms、41.8ms和300ms)交互组合 水平布置: 3种脉冲电压(16、20和40 V)、3种电压梯度(0.05—0.34、0.06—0.42和0.15—0.85 V/cm)、脉冲频率3 Hz和脉冲宽度2ms交互组合	垂直布置和水平布置的脉冲直流电鱼栅均能有效引导海七鳃鳗,但垂直布置的电鱼栅对虹鳟的阻拦效果显著优于水平布置	室内实验	[112]
鳙 <i>Hypophthalmichthys nobilis</i> 鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	脉冲电压0.91 V/cm	在芝加哥的伊利诺斯河,拦鱼电栅用于防止入侵鲢鳙上溯进入密歇根湖,尽管拦鱼电栅对两种鱼的阻拦效果良好,但在自身洄游需求和环境水流刺激下,鱼类会在拦鱼电栅附近停留	野外实验	[115]
鲤 <i>Cyprinus carpio</i>	脉冲电压30 V、电压梯度0.2—0.4 V/cm、脉冲宽度0.3 ms和脉冲间隔时间10ms	通电后,在电场的作用下,鲤通过拦鱼电栅的次数明显减少,且在刺激期布设电栅,鲤鱼离开电屏障的时间比刺激前和刺激后更长	室内实验	[116]
鲤 <i>Cyprinus carpio</i>	脉冲电压70 V、脉冲宽度0.4ms和脉冲间隔时间6ms	垂直电栅在三个阶段中对鲤的季节性迁徙都有极好的阻拦效果,阻拦率在95.8%—98.6%	野外实验	[117]
虹鳟 <i>Oncorhynchus mykiss</i>	脉冲电压30 V、电压梯度0.2—0.4 V/cm、脉冲宽度0.3 ms和脉冲间隔时间10ms	通电后,拦鱼电栅使虹鳟通过的时间明显减少,且远离电栅时间更长。在停止通电后,虹鳟仍保持远离电栅	室内实验	[118]
大眼狮鲈 <i>Sander vitreus</i>	3种脉冲电压(0、60和80 V)和4种脉冲宽度(0.3ms、0.5ms和0.8ms)交互组合	脉冲直流电不仅减少了大眼狮鲈的靠近,还导致其偏转避开电屏障的几率增加,这导致了近80%的逃逸率	室内实验	[120]
鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	3种脉冲电压(80、110和140 V)、3种脉冲频率(6、8和10 Hz)和3种脉冲宽度(10ms、20ms和30ms)交互组合	影响拦鱼电栅对鲢阻拦效果由大到小的因素依次为脉冲电压、脉冲宽度、电极布置方式、脉冲频率,在静水条件下,拦鱼电栅对鲢的平均阻拦率在水流速度增至0.3 m/s时仍可达100%,但进一步增至0.5 m/s时阻拦率有一定下降	室内实验	[122]
草鱼 <i>Ctenopharyngodonidellus</i>	4种脉冲电压(120、160、200和240 V/m)、4种脉冲频率(2、4、6和8 Hz)和4种脉冲宽度(10ms、12ms、14ms和16ms)交互组合	影响拦鱼电栅对草鱼阻拦效果由大到小的因素依次为脉冲电压、脉冲频率、脉冲宽度;静水条件下脉冲电压160V/m、脉冲频率6 Hz和脉冲宽度16 ms的拦鱼电栅效果最好	室内实验	[123]
欧洲鳗鲡 <i>Anguilla anguilla</i>	3种脉冲频率(2 Hz单脉冲、2 Hz双脉冲和10 Hz单脉冲)	相比双脉冲,单脉冲需要更低的电场强度才能引起欧洲鳗鲡抽搐,而电场强度对其反应无影响	室内实验	[124]
鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	3种脉冲电压(80、110和140 V)、3种脉冲频率(6、8和10 Hz)和3种脉冲宽度(10ms、20ms和30ms)交互组合	影响拦鱼电栅对鲢阻拦效果和损伤率由大到小的因素依次为电极布置方式、脉冲电压、脉冲宽度和脉冲频率,且阻拦效果和损伤率随流速增加无显著差异	室内实验	[125]
虹鳟 <i>Oncorhynchus mykiss</i>	3种脉冲电压(51.4、69.0±0.8和91.4±0.8 V)、电压梯度0.00—0.45 V/cm、脉冲频率30 Hz和脉冲宽度0—0.7ms	当脉冲宽度较大时,虹鳟鱼幼鱼和成年虹鳟鱼避开了电栅,当脉冲宽度为0.7ms时,通过电栅的虹鳟数量比脉冲宽度为0.1ms时少,且未发现电压梯度对阻拦效果的影响	室内实验	[126]
鲤 <i>Cyprinus carpio</i>	3种电极布置方式(垂直于水流方向且两排电极间距为80 cm、垂直于水流方向且两排电极间距为160 cm及与水流方向呈68°且两排电极间距为80 cm)、3种脉冲电压(80、110和140 V)、3种脉冲频率(6、8和10 Hz)和3种脉冲宽度(10、20和30 ms)	影响拦鱼电栅对鲤阻拦效果由大到小的因素依次为电极布置方式、脉冲宽度、脉冲频率和脉冲电压。垂直水流间距80 cm布置、脉冲电压140 V、脉冲频率10 Hz以及脉冲宽度10ms拦鱼效果最佳,且随着脉冲宽度的增加,平均受伤尾数相应增加,随着脉冲电压的增加,平均受伤尾数降低	室内实验	[127]
点纹似白鱼 <i>Alburnoides bipunctatus</i> 欧洲鳗鲡 <i>Anguilla Anguilla</i>	脉冲电压38 V、脉冲宽度0.3ms和脉冲间隔时间7ms	拦鱼电栅对点纹似白鱼和欧洲鳗鲡的保护效果较好,对前者的保护率可达96%,对后者的保护率也有86%	室内实验	[128]

与种群动态。

2 鱼类诱驱理论在过鱼设施中的应用

为提高过鱼设施的效率,合理应用鱼类诱驱技术能够有效引导更多鱼类通过设施,从而提升其功能效果。鱼类诱驱理论是基于这种需求而提出的一种行为调控框架,如图 1所示。该理论通过利用特定环境因子(如水流、声、光、电、气泡幕及生物因子等)主动引导或排斥鱼类,实现其在水体中

的定向运动或行为调控。本章将重点介绍诱驱理论在过鱼设施中的应用以及未来优化研究方向。

2.1 水流

水流诱鱼技术是提高鱼道进口诱鱼效率的重要手段,通过喷射水流制造显著的水动力特征,增强鱼类对洄游路径的感知。以金沙江支流黑水河松新鱼道的补水设施为例,该设施布置在松新竖缝式鱼道入口,具备垂直和平行两种补水模式(图 2)。补水流量有效缓解了鱼道原吸引流不足的问题,过

表 5 近十年(2014—2024年)国内外关于鱼类对气泡幕响应的研究进展

Tab. 5 Advances in domestic and overseas studies on fish responses to bubble curtains in the past decade (2014—2024)

鱼种 Fish species	气泡幕结构 Bubble curtain structure	具体表现 Specific performance	实验类型 Experimental type	文献来源 Reference
鲤 <i>Cyprinus carpio</i>	30 cm孔距和2.5 cm气泡幕; 5 cm孔距和2.5 cm孔径梯度泡幕; 5 cm孔距和2.5 cm孔径粗泡幕	梯度泡幕和粗泡幕可以减少鲤在上溯和下行两个方向通过气泡幕率几率达75%—85%	室内实验	[129]
虹鳟 <i>Oncorhynchus mykiss</i>	4种孔距(1.0、2.0、3.0和4.0 cm), 4种孔径(0.5、1.0、1.5和2.0 mm)和3种气量(60、120和180 L/min)交互组合	光照环境下,孔径1.0 mm、孔距2.0 cm和气量120 L/min的气泡幕阻拦效果最好,可达(96.32±3.99)%,而黑暗条件气泡幕的阻拦率有所降低,为(87.48±2.55)%	室内实验	[131]
光倒刺鲃 <i>Spinibarbus hollandi</i>	3种孔距(1.0、2.5和4.0 cm), 3种孔径(1.0、1.5和2.0 mm)交互组合	静水时,9种组合产生的气泡幕对光倒刺鲃均有较好的阻拦效果,达90%以上。流水环境提升了阻拦效果,而闪光对光倒刺鲃有吸引作用	室内实验	[134]
鲤 <i>Cyprinus carpio</i> 鳊 <i>Hypophthalmichthys nobilis</i> 鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	15 cm孔距和3 mm孔径	气泡幕对鳊、鲢和鲤均具有显著且相似的阻拦效果,使其通过原路径的次数减少了73%—80%	室内实验	[135]
鲤 <i>Cyprinus carpio</i>	5 cm孔距和2.5 cm孔径梯度泡幕	气泡幕对下行迁移的鲤幼鱼表现出较强的阻拦效果,而对上溯成鱼的阻拦效果则相对较弱	野外实验	[136]
大泷六线鱼 <i>Hexagrammosotakii</i>	2种孔径(1.0和2.0 mm), 2种孔距(2.5和5.0 cm)交互组合	4种组合产生的气泡幕均有明显的阻拦作用,其中孔径1.0 mm与孔距2.5 cm组合的气泡幕阻拦效果最好,平均阻拦率为53.2%	室内实验	[137]
异齿裂腹鱼 <i>Schizothorax oconnori</i>	3种气量(60、90和120 L/min)	3种气量的气泡幕均有明显的阻拦效果,气量60 L/min的气泡幕阻拦率最高,为81.3%;而其他气量的气泡幕附近存在鱼类停留现象	室内实验	[138]
异齿裂腹鱼 <i>Schizothorax oconnori</i>	2种摆放角度(与水流方向呈90°和45°)下, 3种气量(15、30和45 L/min)交互组合	相比于静水条件,流水条件下的气泡幕的影响距离更远,垂直于水流方向布置效果更好,且异齿裂腹鱼在尝试6次后会表现出适宜性	室内实验	[142]
鳊 <i>Hypophthalmichthys nobilis</i> 鲤 <i>Cyprinus carpio</i> 大口黑鲈 <i>Micropterus salmoides</i>	30 cm孔距和2.5 cm气泡幕	声波与气泡幕结合对三种鱼相比单独布置气泡幕有更好的阻拦效果,当和20—2000 Hz的循环声音结合,可有效阻拦97%的入侵鳊	室内实验	[143]
大西洋鲑 <i>Salmo salar</i>	1 cm孔距和1 mm孔径	在光线充足的白天,气泡幕对大西洋鲑幼鱼的引导效率在实验室条件下达到95%,自然环境中也能达到90%;而在黑暗环境下,效果显著降低	室内实验和野外实验	[144]
食蚊鱼 <i>Gambusia affinis</i>	/	日间条件下,气泡幕显著增加了其两侧鱼类数量,但夜间气泡幕两侧的诱鱼效果并不显著	野外实验	[145]
大鳞大麻哈鱼 <i>Oncorhynchus tshawytscha</i>	2.0 L/s的单位长度气泡速率	气泡幕与频闪灯和噪声发生器结合组成的生物声学鱼屏障,有效引导了大鳞大麻哈鱼幼鱼避开低生存率的迁徙路线	野外实验	[146]
大泷六线鱼 <i>Hexagrammosotakii</i>	3种气量(60、120和180 L/min)	3种气量的气泡幕对大泷六线鱼均有明显的阻拦效果,且180 L/min气泡幕阻拦效果最好	室内实验	[147]
鳊 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	8种气量(10、20、30、40、60、80、100和120 L/min)	8种气量的气泡幕对鳊幼鱼都有阻拦效果,其中,20和30 L/min气泡幕阻拦效果最好,气泡幕的气量与阻拦效果呈先上升后下降的趋势	室内实验	[150]

鱼效果有所提升^[50]。然而,目前针对水流诱鱼技术的系统性研究仍然不足,尤其在不同水动力参数与多物种鱼类行为响应的匹配性方面尚有待深入探索。后续研究可从以下几方面进一步展开:(1)通过高精度水动力学模型,结合鱼类行为监测数据,系统评估不同空间尺度流场特征对鱼类洄游路径选择的影响,优化鱼道进口的流场设计。(2)进一步细化多物种鱼类感应流速的生理和行为研究,建立基于多物种流速需求的优化模型,并采用可调节流速的分区设计来实现高效诱鱼。(3)引入基于生命周期的经济效益和生态影响评估框架,通过长期监测和模拟分析,优化补水技术的设计参数,确保其在生态和经济上的可持续性。

2.2 声

声诱驱鱼技术能够利用鱼类的趋音性,通过播放特定声音来引导鱼类移动或避开特定区域,同时不对水环境造成物理扰动,因而在过鱼设施中逐渐得到应用。湘河水库鱼道的声驱鱼设施位于2号鱼道入口上游河道,由两台水下扬声器组成,通过播放扬子鳄的吼叫声对鱼类进行驱赶(图3)。PIT标记实验表明,多条目标鱼在天敌声的驱赶下,更倾向于进入鱼道入口^[81]。然而,现有技术仍面临声音参数优化不足及复杂环境适应性有限的问题。未来研究需聚焦以下方面:(1)优化实验声音参数设计以降低鱼类听觉疲劳,针对不同鱼种及其发育阶段,

系统评估长期暴露于高强度声音环境下的鱼类听觉损伤程度,并建立鱼类听觉疲劳的阈值模型。通过优化声源频率、强度及播放时长等参数,设计更加环保且低干扰的声诱驱鱼方案。(2)建立复杂环境中的声音传播模型,整合水声学与流体力学原理,构建更加精准的声音传播模型,考虑水流速度、温度梯度、盐度分布及障碍物等因素对声波传播的综合影响。通过实地测量与模拟相结合,优化声诱驱鱼设备的布置方式与播放策略。

2.3 光

光诱驱鱼技术作为一种非物理性鱼类行为调控手段,在过鱼设施中展现出广泛的应用潜力。例如,研究人员在北盘江马马崖一级水电站布置以缓慢推进式为主,间隔开启式为辅的灯光系统,有效提升了集运鱼系统的诱鱼效果(图4)。然而,该技术仍存在应用适应性和生态影响等问题亟待解决。未来研究可从以下方面进一步开展:(1)开展跨物种的系统性对比研究,涵盖更多的鱼类种类和生态类型,以揭示不同鱼种及其发育阶段对光的响应规律,为制定更具普适性的光诱驱鱼技术提供参考。(2)在自然条件下进一步研究光强、光色与其他环境因子(如水温、水流、水浊度)的交互作用对鱼类行为的影响。特别是探索复杂环境中光诱驱鱼技术的优化方式,如动态调节光源属性以应对水体浑浊度和自然光周期的变化。(3)研究光源长期使

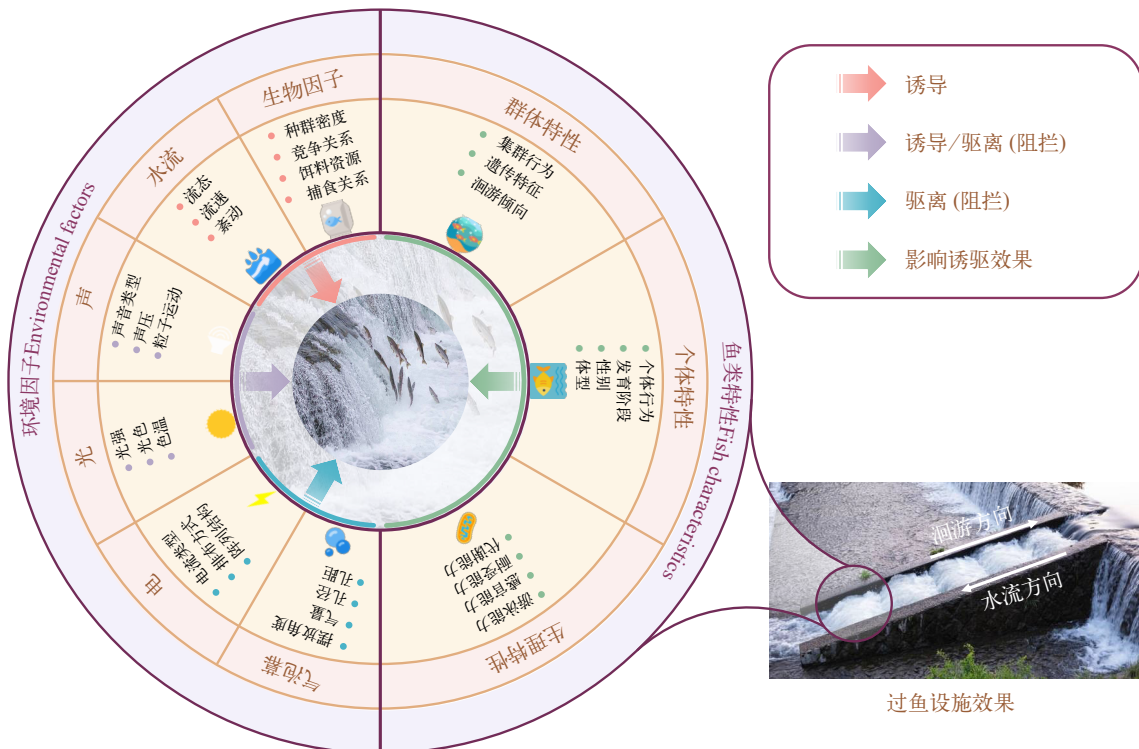


图1 环境因子和鱼类特性对洄游行为及过鱼设施效果的影响关系示意图

Fig. 1 Diagram of the influence of environmental factors and fish traits on migratory behavior and fishway effectiveness



图2 松新鱼道水流诱鱼设施实拍图

Fig. 2 Photograph of the water flow-based fish attraction facility at Songxin Fishway



图3 湘河鱼道声驱鱼设施实拍图

Fig. 3 Photograph of the sound-based fish repulsion facility at Xianghe Fishway

用对鱼类行为、适应性和群落结构的潜在影响,尤其是对洄游鱼类种群动态和生态系统平衡的影响,评估光诱驱鱼技术的生态可持续性。

2.4 电

目前,自然条件下应用电驱鱼技术的案例较少,但根据鱼类对电场的趋向性和行为反应,这一技术在过鱼设施中仍表现出巨大的潜力。例如,在果多水电站的集鱼平台,研究人员布置了一套拦鱼电栅。电栅安装在集鱼平台上游的回流区,有利于鱼类的聚集与电栅的布置(图5)。电栅采用双排式电极设计,安装角度为 45° 时阻拦效果最佳,并且在不同流速条件下均展现出明显的驱鱼效果。然而,该技术的广泛应用仍面临科学与实践上的挑战,未来研究可聚焦以下方面: (1)针对不同鱼类的物种特性,开展对电场响应的实验研究,包括有鳞鱼与无鳞鱼种、不同体型及年龄阶段的差异,确定各类鱼群的电学参数阈值范围。同时,针对电极布置方式

和阵列结构进行优化设计,提升引导与阻拦效果。此外,可通过增加动态调节功能,根据实时环境条件和鱼类行为特征调整电场参数,增强技术适应性。(2)结合声、光、水动力等外部刺激因素,构建多模态诱导系统,通过协同效应提升鱼类对电栅的感知力。具体研究方向包括不同刺激组合的优化设计、刺激强度和频率的动态调整,以及多因素作用下鱼类行为特性的精确量化,探索复杂环境中的最佳组合模式。(3)深入评估电驱鱼技术对非目标物种及其他水生生物的潜在影响,开展生态适应性实验,探索更具选择性的电场设计。重点研究不同电压梯度和脉冲频率对目标鱼类与非目标鱼类的差异性影响,确保技术在减少非目标生物伤害的同时仍具有有效性。

2.5 气泡幕

气泡幕能够在不直接接触鱼类的情况下影响其行为,减少对鱼类生理上的潜在伤害,展现了其在引导保护物种洄游方面的巨大潜力。例如,研究



图4 马马崖一级水电站集运鱼系统光诱鱼设施实拍图

Fig. 4 Photograph of the light-based fish attraction facility in the fish transport system at Mamaya I Hydropower Station



图5 果多水电站集运鱼系统电驱鱼设施实拍图

Fig. 5 Photograph of the electricity-based fish repulsion facility in the fish transport system at Guoduo Hydropower Station

人员建议在马堵山水电站坝下河段布置如图 6 所示的气泡幕设施, 选址于流速较小的区域以降低水流对拦鱼效果的影响。气泡幕以 45° 角布设, 气体流量为 120 L/min , 可显著提高目标鱼进入集运鱼装置的概率^[164]。然而, 其实际效果可能因不同环境条件和鱼类行为特性而受到限制。未来优化气泡幕技术的应用研究可集中在以下方面: (1) 针对鱼类对气泡幕的种间差异性反应, 开展实验和现场研究, 明确不同鱼种对气泡幕刺激的敏感度及行为模式, 探索其对气泡大小、密度、上升速度等关键参数的响应规律。根据不同目标鱼类的行为特性, 优化气泡幕设计, 实现更具针对性的引导效果。(2) 在复杂水流条件下, 通过改进气泡幕孔径、孔距、排布角度和气体流量等设计参数, 提升其稳定性和屏障效果。结合数值模拟技术和现场试验, 研究气泡幕在强水流和紊流环境中的动态表现, 为其在多种流域环境中的应用提供科学指导。(3) 将气泡幕与声、光、水流等其他诱驱技术相结合, 研究其协同作用下的综合引导效果。

2.6 生物因子

尽管生物因子对鱼类行为的影响已有广泛研究, 但其在过鱼设施中的实际应用仍较为有限。与物理性诱鱼技术相比, 生物因子的应用具有一定优势, 例如它更贴近鱼类的自然行为模式, 对其干扰较小, 同时适用于多种鱼类的诱导。例如, 利用饵料资源或引入特定气味物质可以吸引鱼类靠近目标区域(如过鱼设施进口), 通过模拟自然水体中的饵料分布以优化鱼类对鱼道的选择性。然而, 未来研究应重点关注以下方面, 为生物因子的安全高效应用提供科学依据: (1) 加强对鱼类响应生物因子的机制研究, 明确其对饵料资源和气味信号等生物因子的敏感性。(2) 评估生物因子长期应用可能带来

的适应性变化与生态风险, 开展长期监测和行为学研究。

3 诱驱鱼技术的关键技术问题与未来研究重点

3.1 诱驱鱼技术的关键技术问题

环境因子的复杂交互与鱼类行为响应 环境因子的复杂交互与鱼类行为响应表现为不同鱼类对环境因子的反应具有显著的物种特异性, 同时这些因子及其相互作用对鱼类行为的影响也具有不同的重要性。例如, 根据鱼类对水流的偏好, 可以将其分为嗜流水性、嗜静水性以及广适性^[7]。根据鱼类对声音的敏感程度则将其分为声音敏感型和声音不敏感型^[164]。电场敏感性方面, 鱼类可分为电敏感型、非电敏感型及能自主产电^[165]。此外, 依据日间和夜间活动特性, 鱼类可划分为日行性、夜行性及昼夜兼行性^[89]。这些分类方式不仅揭示了鱼类对单一环境因子的反应差异, 更突显了多种环境因子交互作用对鱼类行为的综合影响。例如, 夜行性鱼类如鲇和鳗在强光照条件下对声学信号的反应可能会显著减弱^[166]。相反, 在弱光照的夜间环境下, 其行为响应可能同时受到光和声的影响, 甚至光的作用可能超过声的作用, 导致实验结果出现一定偏差。而以结合声、光和水流因子的气泡幕, 其效果取决于这些因子的综合作用^[130]。例如, 声音敏感型鱼类可能主要受到气泡幕产生的噪声驱避, 而光敏感型鱼类则可能对气泡散射的光线更为敏感。同时, 一些对水流变化敏感鱼类可能更容易受到气泡幕改变水流流态的影响。因此, 鉴于不同的环境因子在不同鱼类的行为中发挥着不等的作用, 这些差异使得在应用诱驱鱼技术时需全面考虑各环境因子对鱼类行为的综合影响, 而不仅局限于单一因子, 以确保技术的广泛适应性和有效性。

诱驱鱼设施的适应性 诱驱鱼设施在特定环境条件下呈现出较好的效果, 但在实际应用中常因环境变化而呈现出不稳定性。由于诱驱鱼设施的适应性与鱼类行为的密切相关。不同鱼类的洄游季节、昼夜节律等行为特性会显著影响设施的诱驱效果。诱驱鱼设施需要能够根据这些时空尺度的行为变化进行动态调整, 以适应不同鱼类的迁移模式。同时, 诱驱鱼设施还需考虑环境因子的时变特性, 如水温、水量和浊度的季节性波动, 以确保稳定的诱驱效果。因此, 诱驱鱼设施不仅需具备适应多变环境的能力, 还应能在动态变化的条件下持续发挥作用。这也意味着, 诱驱鱼设施应与过鱼设施的日常运营管理紧密结合, 包括定期监测设施

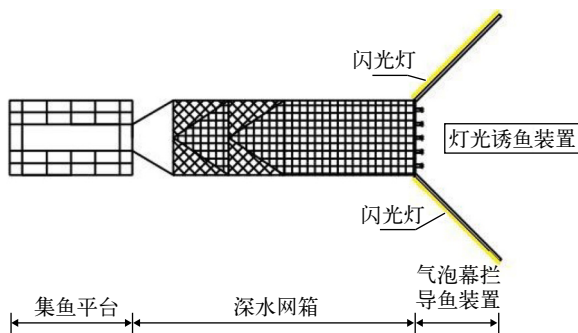


图 6 马堵山水电站集运鱼系统气泡幕拦鱼设施示意图(图片来源于[164])

Fig. 6 Schematic diagram of the bubble curtain-based repulsion and guidance facility in the fish transport system at Madushan Hydropower Station (sourced from [164])

的运行状态, 及时进行调整和维护, 以确保其在不同季节和水文条件下的持续有效性, 且可为未来设施的设计优化提供实地数据支持。

系统性评估与野外数据支持 我国过鱼设施的建设数量相对有限, 导致在野外验证诱驱鱼设施效果的机会稀缺, 使得当前对该技术的野外数据相对匮乏, 无法开展全面的系统性评估。对于已展开的野外实验, 也存在规模较小和时间跨度不足的局限性, 无法准确评估诱驱鱼设施的长期效能。尽管近年来实验室研究在探讨环境因子对鱼类行为的影响方面取得了显著进展, 为诱驱鱼技术的应用提供了理论基础, 但实验室中的结果在野外应用中的可行性和有效性往往难以直接推广, 尤其是在我国各水系鱼类区系多样性较大、不同水域环境差异显著的情况下。因此, 亟需开展大规模、长期的野外试验, 以获得更为广泛的适用数据。通过在多种环境条件下进行持续性研究, 对诱驱鱼设施的效果进行全面系统的评估。此外, 鼓励在不同水系和生态环境中采集并分析长时间跨度的野外数据, 有助于提升研究成果的广泛适用性与技术推广的科学性。

3.2 诱驱鱼技术的未来研究重点

鱼类行为的基础理论深化 未来的诱驱鱼技术研究需深入探讨鱼类行为的基础理论, 尤其是针对珍稀物种和经济鱼种。当前对洄游、觅食和繁殖行为的研究多集中在常见鱼类, 且缺乏对珍稀物种如中华鲟在复杂水文条件下行为模式的深入理解。不同发育阶段的行为差异、个体间行为多样性以及其对多因子环境刺激的响应, 尚有较大研究空白。例如, 针对中华鲟等物种的洄游路径选择、栖息地偏好及其在河流环境中如何应对水流变化和噪声干扰的研究极为有限。未来的基础研究应通过长期观测、实验室和野外结合的方式, 建立更为全面的行为学理论框架, 尤其是在多种环境条件下的行为响应模型。这些理论的深化将为诱驱鱼技术提供更加精准的依据, 从而提升其有效性和生态适应性。

河流鱼类行为的精细化量化研究 河流鱼类行为的精细化量化研究是未来提高诱驱鱼技术效率的关键。目前, 已有关于水流、声音、光、电及气泡幕等因子对鱼类行为影响的实验数据, 但这些研究大多局限于实验室环境, 难以完全模拟自然河流的复杂动态。未来的研究应更聚焦自然河流, 采用遥感技术、GPS跟踪系统、遥测技术结合DST (Data storage tag) 数据存储技术^[13, 144, 167], 精确测量鱼类在真实水文条件下的行为模式。这包括量化

鱼类在不同流速、浊度、温度等因素下的运动轨迹、洄游路径及其对诱驱设施的响应。结合大数据和人工智能技术, 未来研究应致力于构建或完善本土化和全面化的鱼类生态行为数据库, 从中提炼出关键行为模式, 实现对鱼类行为的精准预测和动态反馈调整。

诱驱鱼技术的应用优化与技术集成 在技术应用层面, 未来研究应注重诱驱鱼技术的优化与多技术集成, 以提升设施在不同水域条件下的广泛适用性。现有的诱驱技术(如声诱导、电刺激及气泡幕)在某些特定环境下表现良好, 但面对不同河流环境的复杂变化, 其有效性往往受限。因此, 未来的研究应重点探索如何将多种诱驱技术进行集成与协同应用, 形成组合策略, 以提高在多变水文条件下的稳定性和适应性。此外, 技术的应用优化也应依赖于实时监测和动态反馈机制, 通过对鱼类行为和环境条件的持续追踪, 实时调整诱驱设施的工作参数, 确保其在实际应用中的持续有效性。这种技术集成和优化不仅能提高过鱼设施的整体效能, 还将为更广泛的水生生态修复和保护工程提供借鉴。

(作者声明本文符合出版伦理要求)

参考文献:

- [1] Zhu D S. River Development and Watershed Ecological Security [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2012. [朱党生. 河流开发与流域生态安全 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.]
- [2] He Y Y, Liu Y Y, Zhang F B, et al. Genetic diversity and population structure of *Saurogobio dabryi* under cascade water conservancy projects in the Jialing River [J]. *Biodiversity Science*, 2024, **31**(11): 23160. [何艺玥, 刘玉莹, 张富斌, 等. 梯级水利工程背景下的嘉陵江干流蛇鮈群体遗传多样性和遗传结构 [J]. 生物多样性, 2023, **31**(11): 23160.]
- [3] International Commission on Large Dams. General Synthesis: Number of Dams by Country Members [EB/OL]. [2024-08-01]. https://www.icold-cigb.org/article/GB/world_register/general_synthesis/number-of-dams-by-country-members.
- [4] 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. [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.]
- [5] Chen Q W, Zhang J Y, Mo K L, et al. Effects of hydropower development on aquatic eco-environment and adaptive managements [J]. *Advances in Water Science*, 2020, **31**(5): 793-810. [陈求稳, 张建云, 莫康乐, 等. 水电工程水生态环境效应评价方法与调控措

- 施 [J]. 水科学进展, 2020, **31**(5): 793-810.]
- [6] 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.
- [7] Benitez J P, Dierckx A, Rimbaud G, *et al.* Assessment of fish abundance, biodiversity and movement periodicity changes in a large river over a 20-year period [J]. *Environments*, 2022, **9**(2): 22.
- [8] Yi Y J, Tang C H, Yang Z F, *et al.* Influence of Manwan Reservoir on fish habitat in the middle reach of the Lancang River [J]. *Ecological Engineering*, 2014(69): 106-117.
- [9] Xiong F, Zhang W, Zhai D D, *et al.* Changes of species, taxonomic and functional diversity of fish assemblages in the Xiangjiaba Reservoir of the lower Jinsha River after impoundment [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2024, **36**(1): 200-212. [熊飞, 张伟, 翟东东, 等. 蓄水后向家坝库区鱼类物种、分类和功能多样性变化 [J]. *湖泊科学*, 2024, **36**(1): 200-212.]
- [10] Liu M D, Ma B, Zhang C, *et al.* Distribution pattern and environmental impact factors of Schizothoracinae fishes in the rivers of Tibet: The case of Nujiang River and Yalu Zangbo River [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 1792, **29**(9): 1792-1800. [刘明典, 马波, 张驰, 等. 西藏河流裂腹鱼类分布格局及环境影响因素——以怒江和雅鲁藏布江为例 [J]. *生态环境学报*, 1792, **29**(9): 1792-1800.]
- [11] Chen K Q, Tao J, Chang Z N, *et al.* Difficulties and prospects of fishways in China: An overview of the construction status and operation practice since 2000 [J]. *Ecological Engineering*, 2014(70): 82-91.
- [12] Branco P, Amaral S D, Ferreira M T, *et al.* Do small barriers affect the movement of freshwater fish by increasing residency [J]? *Science of the Total Environment*, 2017(**581**): 486-494.
- [13] Sun J R, Du W L, Lucas M C, *et al.* River fragmentation and barrier impacts on fishes have been greatly underestimated in the upper Mekong River [J]. *Journal of Environmental Management*, 2023(327): 116817.
- [14] Chen K Q, Chang Z N, Cao X H, *et al.* Status and prospection of fish pass construction in China [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, **43**(2): 182-188+197. [陈凯麒, 常仲农, 曹晓红, 等. 我国鱼道的建设现状与展望 [J]. *水利学报*, 2012, **43**(2): 182-188+197.]
- [15] Katopodis C, Williams J G. The development of fish passage research in a historical context [J]. *Ecological Engineering*, 2012(48): 8-18.
- [16] 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.
- [17] Zhang D Y. Influence of water conservancy and hydropower engineering on fish and protection measures [J]. *Water Resources Protection*, 2011, **27**(5): 75-77. [张东亚. 水利水电工程对鱼类的影响及保护措施 [J]. *水资源保护*, 2011, **27**(5): 75-77.]
- [18] 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. [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.]
- [19] Shi X T, Ke S F, Tu Z Y, *et al.* Swimming capability of target fish from eight hydropower stations in China relative to fishway design [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2022, **79**(1): 124-132.
- [20] Castro-Santos T, Shi X T, Haro A. Migratory behavior of adult sea lamprey and cumulative passage performance through four fishways [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2017, **74**(5): 790-800.
- [21] He D R, Cai H C. Ichthyology of Fish Behavior [M]. Xiamen, China: Xiamen University Press, 1998. [何大仁, 蔡厚才. 鱼类行为学 [M]. 厦门: 厦门大学出版社, 1998.]
- [22] Hu W B, Han D J, Gao Y, *et al.* Restoration of fish migration: Practice of foreign countries and strategies of China [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2008, **17**(6): 898-903. [胡望斌, 韩德举, 高勇, 等. 鱼类洄游通道恢复——国外的经验及中国的对策 [J]. *长江流域资源与环境*, 2008, **17**(6): 898-903.]
- [23] 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.
- [24] Clay C H. Design of Fishways and Other Fish Facilities [M]. Boca Raton, FL: Lewis Publishers, CRC Press, 2017: 256.
- [25] Schütz C, Henning M, Czerny R, *et al.* Addition of auxiliary discharge into a fishway-A contribution to fishway design at barrages of large rivers [J]. *Ecological Engineering*, 2021(167): 106257.
- [26] Liao J C, Beal D N, Lauder G V, *et al.* Fish exploiting vortices decrease muscle activity [J]. *Science*, 2003, **302**(5650): 1566-1569.
- [27] Ke S F, Chen K X, Luo J, *et al.* Correlation analysis between upstream swimming speed and tail-beat behavior of *Hypophthalmichthys molitrix* [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2017, **41**(3): 401-406. [柯森繁, 陈渴鑫, 罗佳, 等. 鲢顶流游泳速度与摆尾行为相关性分析 [J]. *水产学报*, 2017, **41**(3): 401-406.]
- [28] Yang G, Wang L, Yang S F, *et al.* Study on the effect of continuous exercise and wild environment training on the rheotaxis of juvenile grass carp [J]. *Yellow River*, 2023, **45**(S1): 56-57. [杨根, 王丽, 杨胜发, 等. 持续运动野化训练对草鱼幼鱼趋流性影响研究 [J]. *人民黄河*, 2023, **45**(S1): 56-57.]
- [29] Fu J J, Li J, An R D, *et al.* Study of creating vertical slot fishway flow field based on swimming ability of *Schizothorax prenanti* [J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2013, **45**(3): 12-17.

- [傅菁菁, 李嘉, 安瑞冬, 等. 基于齐口裂腹鱼游泳能力的竖缝式鱼道流态塑造研究 [J]. 四川大学学报(工程科学版), 2013, **45**(3): 12-17.]
- [30] 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. [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.]
- [31] Tan J J, Gao Z, Dai H C, *et al.* Effects of turbulence and velocity on the movement behaviour of bighead carp (*Hypophthalmichthys nobilis*) in an experimental vertical slot fishway [J]. *Ecological Engineering*, 2019(127): 363-374.
- [32] Jia Z W, Huang Z Y, Wang M, *et al.* Research on hydraulic characteristics of vertical slot fishway pools of Xizang Zhala Hydropower Station [J]. *Express Water Resources & Hydropower Information*, 2024, **45**(6): 69-75+115. [贾召文, 黄子叶, 王猛, 等. 西藏扎拉水电站竖缝式鱼道池室水力特性研究 [J]. 水利水电快报, 2024, **45**(6): 69-75+115.]
- [33] Han L, Lü C W, Wang Z J, *et al.* Influence of pier head angle on hydraulic characteristics of vertical slot fishway [J]. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2024, **41**(6): 84-90+97. [韩雷, 吕春玮, 王正君, 等. 墩头角度对竖缝式鱼道水力特性的影响 [J]. 长江科学院院报, 2024, **41**(6): 84-90+97.]
- [34] Lü Y Y, Yang L H, Wang F, *et al.* Influence of structure and interval variation on hydraulic characteristics of vertical slot fishway [J]. *Water Resources and Power*, 2023, **41**(7): 150-153+126. [吕阳阳, 杨路华, 王凡, 等. 墩头结构及间距变化对竖缝式鱼道水力特性的影响 [J]. 水电能源科学, 2023, **41**(7): 150-153+126.]
- [35] Yuan H, Chen B Y, Sun Q, *et al.* Deciphering the effect of variation in slope on flow characteristics in a vertical slot fishway [J]. *Journal of Hydro-Environment Research*, 2024(54): 1-12.
- [36] Cai L, Katopodis C, Jin Y, *et al.* Comprehensive analysis and application of Chinese Cyprinidae swimming ability [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2022, **34**(6): 1788-1801. [蔡露, Katopodis C, 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): 1788-1801.]
- [37] Chen B Y, Yuan H, He X L. Research on the effect of the slope gradient variation on the hydraulic characteristics of the vertical slot fishway [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2022(10): 242-248. [陈柏宇, 袁浩, 何小澧. 坡度变化对竖缝式鱼道水力特性的影响研究 [J]. 中国农村水利水电, 2022(10): 242-248.]
- [38] Tong X F, Li W M, Liu D F, *et al.* Test research on turbulence dynamic characteristics of water flow in Daniel fishway [J]. *Water Resources and Power*, 2016, **34**(2): 94-97+128. [佟雪丰, 李卫明, 刘德富, 等. 丹尼尔式鱼道内水流紊动特性试验研究 [J]. 水电能源科学, 2016, **34**(2): 94-97+128.]
- [39] Zhu C H, Li W M, Guo Z Y, *et al.* Study on the influences of Denil fishway partition type on hydraulic characteristics [J]. *Water Power*, 2019, **45**(7): 61-65. [朱澄浩, 李卫明, 郭泽云, 等. 丹尼尔式鱼道隔板形式变化对水力特性的影响研究 [J]. 水力发电, 2019, **45**(7): 61-65.]
- [40] Ke S F, Goerig E, Pang K W, *et al.* Evaluation of pool-and-weir fishway efficiency for the upstream spawning migration of Qinghai Lake's naked carp [J]. *Ecological Engineering*, 2024(208): 107373.
- [41] Fan S X, Jiang G C, Huang T B. Research and application of the hydraulic connection section in Nanmujiang River Fishway at Datengxia Water Conservancy Project [J]. *Pearl River*, 2022, **43**(12): 6-12. [范穗兴, 蒋光灿, 黄天宝. 大藤峡水利枢纽南木江鱼道水力衔接段的研究应用 [J]. 人民珠江, 2022, **43**(12): 6-12.]
- [42] Sun J J, Shi J Y, Zhang Q, *et al.* Survey on performance of vertical slot and nature-like fishways at Angu hydropower station, Southwest China [J]. *Water Science and Engineering*, 2024, **17**(1): 83-91.
- [43] Li G N, Sun S K, Liu H T, *et al.* Improving effect of hydraulic characteristics of nature-like fishway with pools and cobblestone weirs [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, **33**(15): 184-189. [李广宁, 孙双科, 柳海涛, 等. 仿自然鱼道中卵石墙对池室水力特性改善效果 [J]. 农业工程学报, 2017, **33**(15): 184-189.]
- [44] Zhang Y Y, Hu X Z, Yang F, *et al.* Experimental study on structure improvement and hydraulic characteristics of artificial natural-like fishway [J]. *Yangtze River*, 2021, **52**(4): 225-229. [张艳艳, 胡晓张, 杨芳, 等. 仿自然型鱼道结构形式改进及水力特性试验研究 [J]. 人民长江, 2021, **52**(4): 225-229.]
- [45] 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.
- [46] Chen M, An R, Li J, *et al.* Identifying operation scenarios to optimize attraction flow near fishway entrances for endemic fishes on the Tibetan Plateau of China to match their swimming characteristics: A case study [J]. *Science of the Total Environment*, 2019(693): 133615.
- [47] Bai Y Q, Lu B, Luo J, *et al.* Induction velocity of juvenile grass carp, silver carp, and darkbarbel catfish [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, **32**(8): 2085-2089. [白艳勤, 路波, 罗佳, 等. 草鱼、鲢和瓦氏黄颡鱼幼鱼感应流速的比较 [J]. 生态学杂志, 2013, **32**(8): 2085-2089.]
- [48] Elings J, Bruneel S, Pauwels I S, *et al.* Finding navigation cues near fishways [J]. *Biological Reviews*, 2023, **99**(1): 313-327.
- [49] Zhang W C, Chen J, Gan L, *et al.* Study on the layout of fishway and environmental flow field simulation of entrances in Poyang Lake Water Control Project [J].

- Water Resources and Power*, **291**(11): 73-78. [张文传, 陈江, 甘亮, 等. 鄱阳湖水利枢纽鱼道布置方案及进口环境流场模拟研究[J]. 水电能源科学, **291**(11): 73-78.]
- [50] Tan J J, Wang D C, Wand Y Y, *et al.* The efficiency of fishway with different water replenishment methods [J/OL]. *Journal of Lake Sciences*. <https://link.cnki.net/urlid/32.1331.p.20240927.1346.002>. [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/OL]. 湖泊科学. <https://link.cnki.net/urlid/32.1331.p.20240927.1346.002>.]
- [51] Mi Y M, Tan J J, Tan H L, *et al.* *Ctenopharyngodon idella*'s movement behavior in response to hydraulics at fishway entrance with different entrance angles [J]. *Water*, 2024, **16**(15): 2168.
- [52] 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. [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.]
- [53] Yang C, Tan J J, Liu Z B, *et al.* Study on hydraulic characteristic and structural optimization of flow in 180° turning pools for vertical slot fishways [J]. *Water Resources and Power*, 2023, **41**(7): 141-145. [杨超, 谭均军, 刘振彪, 等. 竖缝式鱼道180°转弯段水力特性与结构优化研究[J]. 水电能源科学, 2023, **41**(7): 141-145.]
- [54] Li G L, Chen S, He W, *et al.* Study on hydraulic characteristics and optimization of 90°~180° turning section of vertical slot fishway [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2024(5): 113-121. [李国岭, 陈胜, 贺蔚, 等. 竖缝式鱼道90°~180°转弯段水力特性及优化研究[J]. 中国农村水利水电, 2024(5): 113-121.]
- [55] Shahabi M, Ghomeshi M, Ahadiyan J, *et al.* Do fishways stress fish? Assessment of physiological and hydraulic parameters of rainbow trout navigating a novel W-weir fishway [J]. *Ecological Engineering*, 2021(169): 106330.
- [56] Song J Q, Wang J B, Huang W, *et al.* The response of swimming behavior of juvenile *Aristichthys nobilis* to turbulence intensity [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, **37**(4): 1211-1219. [宋基权, 王继保, 黄伟, 等. 鳊幼鱼游泳行为与紊动强度响应关系[J]. 生态学杂志, 2018, **37**(4): 1211-1219.]
- [57] Liu X F, An R D, Li J, *et al.* Response of *Schizothorax prenanti* to the downstream flow pattern of dam and prediction of upstream movement route in the near dam area [J]. *Water Resources and Power*, 2020, **38**(1): 112-115+138. [刘小帆, 安瑞冬, 李嘉, 等. 齐口裂腹鱼对大坝下游流态的响应及近坝区上溯路线预测[J]. 水电能源科学, 2020, **38**(1): 112-115+138.]
- [58] Li F, An R D, Ma W Z, *et al.* Research on the response pattern of fish schooling effect on hydraulic conditions under the dam [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2018(10): 87-91+117. [李芳, 安瑞冬, 马卫忠, 等. 鱼类坝下集群效应对水力学条件的响应规律研究[J]. 中国农村水利水电, 2018(10): 87-91+117.]
- [59] Popper A N, Carlson T J. Application of sound and other stimuli to control fish behavior [J]. *Transactions of the American Fisheries Society*, 1998, **127**(5): 673-707.
- [60] Popper A N, Hawkins A D. An overview of fish bioacoustics and the impacts of anthropogenic sounds on fishes [J]. *Journal of Fish Biology*, 2019, **94**(5): 692-713.
- [61] Zielinski D P, Sorensen P W. Silver, bighead, and common carp orient to acoustic particle motion when avoiding a complex sound [J]. *PLoS One*, 2017, **12**(6): e0180110.
- [62] Dinh J P, Radford C. Acoustic particle motion detection in the snapping shrimp (*Alpheus richardsoni*) [J]. *Journal of Comparative Physiology a-Neuroethology Sensory Neural and Behavioral Physiology*, 2021, **207**(5): 641-655.
- [63] Carr C E. Pressure and particle motion enable fish to sense the direction of sound [J]. *Nature*, 2024, **631**(8019): 29-30.
- [64] Veith J, Chaigne T, Svanidze A, *et al.* The mechanism for directional hearing in fish [J]. *Nature*, 2024, **631**(8019): 118-124.
- [65] Campbell J, Shafiei Sabet S, Slabbekoorn H. Particle motion and sound pressure in fish tanks: A behavioural exploration of acoustic sensitivity in the zebrafish [J]. *Behavioural Processes*, 2019(164): 38-47.
- [66] Schulz-Mirbach T, Ladich F, Mittone A, *et al.* Auditory chain reaction: Effects of sound pressure and particle motion on auditory structures in fishes [J]. *PLoS One*, 2020, **15**(3): e0230578.
- [67] Jones I T, Gray M D, Mooney T A. Soundscapes as heard by invertebrates and fishes: Particle motion measurements on coral reefs [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2022, **152**(1): 399-415.
- [68] Vedenev A I, Kochetov O Y, Lunkov A A, *et al.* Airborne and underwater noise produced by a hovercraft in the north caspian region: Pressure and particle motion measurements [J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, **11**(5): 1079.
- [69] Liang J, Chen D H, Wang W D, *et al.* Acoustic taming on *Sparus macrocephalus* by sine wave alternate sounds [J]. *Journal of Marine Sciences*, 2014, **32**(2): 59-66. [梁君, 陈德慧, 王伟定, 等. 正弦波交替音对黑鲮音驯化的实验研究[J]. 海洋学研究, 2014, **32**(2): 59-66.]
- [70] 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/OL]. *Journal of Hydroecology*. <https://doi.org/10.15928/j.1674-3075.202301310022>. [李卫东, 白艳勤, 李阳希, 等. 鲢幼鱼对四种不同声音的回避行为[J/OL]. 水生态学杂志. <https://doi.org/10.15928/j.1674-3075.202301310022>.]
- [71] He C R, Li X B, Da W, *et al.* The negative phonotactic responses of juvenile grass carp *Ctenopharyngodon idel-*

- lus subjected to different sounds [J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2024, **45**(4): 86-96. [何晨睿, 李晓兵, 达瓦, 等. 不同声音对草鱼幼鱼负趋音性行为反应影响研究 [J]. *渔业科学进展*, 2024, **45**(4): 86-96.]
- [72] Gendron G, Tremblay R, Jolivet A, *et al.* Anthropogenic boat noise reduces feeding success in winter flounder larvae (*Pseudopleuronectes americanus*) [J]. *Environmental Biology of Fishes*, 2020, **103**(9): 1079-1090.
- [73] Mann D A. Acoustic communication in fishes and potential effects of noise [J]. *Advances in Experimental Medicine and Biology*, 2016(875): 673-678.
- [74] Slabbekoorn H, Dalen J, de Haan D, *et al.* Population-level consequences of seismic surveys on fishes: An interdisciplinary challenge [J]. *Fish and Fisheries*, 2019, **20**(4): 653-685.
- [75] Fleissner E R, Putland R L, Mensinger A F. The effect of boat sound on freshwater fish behavior in public (motorized) and wilderness (nonmotorized) lakes [J]. *Environmental Biology of Fishes*, 2022, **105**(8): 1065-1079.
- [76] Vetter B J, Murchy K A, Cupp A R, *et al.* Acoustic deterrence of bighead carp (*Hypophthalmichthys nobilis*) to a broadband sound stimulus [J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2017, **43**(1): 163-171.
- [77] Vetter B J, Brey M K, Mensinger A F. Reexamining the frequency range of hearing in silver (*Hypophthalmichthys molitrix*) and bighead (*H. nobilis*) carp [J]. *PLoS One*, 2018, **13**(3): e0192561.
- [78] Domenici P. Fish Locomotion: An Eco-Ethological Perspective [M]. Enfield N H: Science Publishers, 2010.
- [79] 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): 366-375. [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): 366-375.]
- [80] 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. [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.]
- [81] Li J X, Li X B, Bai Y Q, *et al.* A preliminary study on the acoustic deterrence system at Xianghe fishway in Xiang River, a tributary of the Yarlung Zangbo River [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2024, **48**(9): 163-174. [李嘉欣, 李晓兵, 白艳勤, 等. 雅鲁藏布江支流湘曲湘河鱼道声驱鱼效果初探 [J]. *水产学报*, 2024, **48**(9): 163-174.]
- [82] Qin X H, Liu Y H, Shen X J, *et al.* Spatial avoidance of tu-fish *Schizopygopsis younghusbandi* for different sounds may inform behavioural deterrence strategies [J]. *Fisheries Management and Ecology*, 2020, **27**(1): 10-19.
- [83] Lin T T, Liu X, Wang C B, *et al.* Effects of ship noise pressure level on swimming, feeding behaviors and immuno-physiological indicators of *Larimichthys crocea* juveniles [J]. *Marine Fisheries*, 2020, **42**(1): 61-72. [林听听, 刘鑫, 王昌勃, 等. 船舶噪声声压级对大黄鱼幼鱼游泳、摄食行为及免疫生理指标的影响 [J]. *海洋渔业*, 2020, **42**(1): 61-72.]
- [84] Wang M Y, Wang Q F, Ni M, *et al.* Can feeding sound attract flower fish (*Ptychobarbus kaznakovi*) [J]? *Journal of Comparative Physiology a-Neuroethology Sensory Neural and Behavioral Physiology*, 2021, **207**(5): 617-627.
- [85] Liu G Y, Wu Y J, Shen X J, *et al.* Laboratory experiments demonstrate that the hissing of the Chinese alligator can effectively inhibit movement of flower fish *Ptychobarbus kaznakovi* [J]. *Hydrobiologia*, 2019, **836**(1): 97-108.
- [86] Currie H A L, White P R, Leighton T G, *et al.* Collective behaviour of the European minnow (*Phoxinus phoxinus*) is influenced by signals of differing acoustic complexity [J]. *Behavioural Processes*, 2021(189): 104416.
- [87] Schramm M P, Bevelhimer M, Scherelis C. Effects of hydrokinetic turbine sound on the behavior of four species of fish within an experimental mesocosm [J]. *Fisheries Research*, 2017(190): 1-14.
- [88] Wisudo S H, Susanto A, Riyanto M, *et al.* The behaviour and reticular response of yellowstripe scad, *Selaroides leptolepis* to the different colors of light emitting diode [J]. *International Journal of Agriculture and Biology*, 2020, **24**(3): 454-460.
- [89] Harvey E S, Butler J J, McLean D L, *et al.* Contrasting habitat use of diurnal and nocturnal fish assemblages in temperate Western Australia [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2012(426): 78-86.
- [90] Lucena M B, Mendes T C, Barbosa M C, *et al.* Does the colors of light matter? Testing different light color in nocturnal underwater visual censuses [J]. *Marine Environmental Research*, 2021(166): 105261.
- [91] Keep J K, Watson J R, Cramp R L, *et al.* Low light intensities increase avoidance behaviour of diurnal fish species: Implications for use of road culverts by fish [J]. *Journal of Fish Biology*, 2021, **98**(3): 634-642.
- [92] McIlvenny J, Youngson A, Williamson B J, *et al.* Combining acoustic tracking and hydrodynamic modelling to study migratory behaviour of Atlantic salmon (*Salmo salar*) smolts on entry into high-energy coastal waters [J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2021, **78**(7): 2409-2419.
- [93] Bai Y Q, Chen Q W, Xu Y, *et al.* The application of light drive and trap technique in fish species protection [J]. *Journal of Hydroecology*, 2013, **34**(4): 85-88. [白艳勤, 陈求稳, 许勇, 等. 光驱诱技术在鱼类保护中的应用 [J]. *水生态学杂志*, 2013, **34**(4): 85-88.]
- [94] Deng Q Y, Lu K Y, Qian W G, *et al.* Effects of monochromatic light on phototaxis behavior of zebrafish (*Danio rerio*) [J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2020, **40**(6): 27-34. [邓青燕, 卢克祥, 钱卫国, 等.]

- 单色光对斑马鱼趋光行为的影响 [J]. *广东海洋大学学报*, 2020, **40**(6): 27-34.]
- [95] Liang J N, Yang Y, Mo W J. Photochromism of Juvenile Eel *Anguilla marmorata* [C]. The Proceedings of the 2021 Annual Academic Conference of China National Committee on Large Dams. Guangzhou, 2022: 718-727. [梁剑宁, 杨聿, 莫伟均. 花鳗鲡幼鱼光色趋向性研究 [C]. 中国大坝工程学会2021学术年会论文集. 广州, 2022: 718-727.]
- [96] Xu J W, Sang W L, Dai H C, *et al.* A detailed analysis of the effect of different environmental factors on fish phototactic behavior: Directional fish guiding and expelling technique [J]. *Animals*, 2022, **12**(3): 240.
- [97] Luo Q P, Yuan C G, Ruan C X, *et al.* Analysis of behavioral response of guppy fry in optical field [J]. *Journal of Fuzhou University (Natural Science)*, 2007(4): 631-634. [罗清平, 袁重桂, 阮成旭, 等. 孔雀鱼幼苗在光场中的行为反应分析 [J]. 福州大学学报(自然科学版), 2007(4): 631-634.]
- [98] Deng Q Y, Lu K Y, Qian W G, *et al.* Effects of color temperature on phototaxis behavior of zebrafish *Danio rerio* [J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2020, **35**(4): 536-543. [邓青燕, 卢克祥, 钱卫国, 等. 色温对斑马鱼趋光行为为影响的研究 [J]. 大连海洋大学学报, 2020, **35**(4): 536-543.]
- [99] Zhang L, Lan K Y, Song R Q, *et al.* Selective behavior of juvenile *Brachymystax tsinlingensis* depends on substrate color, light intensity, and light color [J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2023, **44**(4): 179-187. [张林, 兰开勇, 宋荣群, 等. 秦岭细鳞鲑稚鱼对底质颜色、光照强度及光色的选择行为 [J]. 渔业科学进展, 2023, **44**(4): 179-187.]
- [100] Xue T T, Li X, Lin G Z, *et al.* Tuning social interactions' strength drives collective response to light intensity in schooling fish [J]. *PLoS Computational Biology*, 2023, **19**(11): e1011636.
- [101] Wang P, Gui F K, Wu C W, *et al.* Effects of illumination conditions on the distributing and feeding of *Sciaemops ocellatus* [J]. *South China Fisheries Science*, 2009, **5**(5): 57-62. [王萍, 桂福坤, 吴常文, 等. 光照对眼斑拟石首鱼行为和摄食的影响 [J]. 南方水产, 2009, **5**(5): 57-62.]
- [102] Han J, Wang M L, Cao S N, *et al.* Effects of light color, light intensity and photoperiod on growth and feeding of juvenile turbot (*Scophthalmus maximus*) [J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2023, **38**(5): 787-794. [韩建, 王茂林, 曹胜男, 等. 光色、光强和光周期对大菱鲆幼鱼生长和摄食的影响 [J]. 大连海洋大学学报, 2023, **38**(5): 787-794.]
- [103] Zhang N, Lin C Y, Xu J W, *et al.* The effect of water flow on the phototaxis of juvenile grass carp [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2019, **43**(6): 1253-1261. [张宁, 林晨宇, 许家炜, 等. 水流对草鱼幼鱼趋光行为的影响 [J]. 水生生物学报, 2019, **43**(6): 1253-1261.]
- [104] Chai Y, Xie C X, Wei Q W, *et al.* Development of retina and behavior during Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis gray*) early ontogeny [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2007, **31**(6): 920-922. [柴毅, 谢从新, 危起伟, 等. 中华鲟视网膜早期发育及趋光行为观察 [J]. 水生生物学报, 2007, **31**(6): 920-922.]
- [105] Zhang J Y, Shi X T, Lin C Y, *et al.* The impact of light environment on the behavioral characteristics and upstream swimming activeness of juvenile *Hypophthalmichthys molitrix* [J/OL]. *Journal of Fisheries of China*. <https://link.cnki.net/urlid/31.1283.S.20240305.1510.003>. [张金玉, 石小涛, 林晨宇, 等. 光环境对鲢幼鱼行为特性与上溯趋势影响 [J/OL]. 水产学报. <https://link.cnki.net/urlid/31.1283.S.20240305.1510.003>.]
- [106] Jiang H, Zhu M E, Pan B K, *et al.* The preferable light color and intensity for *Schizopygopsis younghusbandi* [J]. *Water Power*, 2023, **49**(7): 1-4+100. [姜昊, 朱蒙恩, 潘炳坤, 等. 拉萨裸裂尻鱼对光照颜色和强度的选择 [J]. 水力发电, 2023, **49**(7): 1-4+100.]
- [107] Lu K Y, 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. [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.]
- [108] Huang J, Lin C Y, Shi X T, *et al.* Light environment optimization of culvert fishway based on the phototaxis of *Schizothorax prenanti* [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, **40**(7): 2155-2163. [黄婕, 林晨宇, 石小涛, 等. 基于齐口裂腹鱼趋光特性的涵洞式鱼道光环境优化 [J]. 生态学杂志, 2021, **40**(7): 2155-2163.]
- [109] Matsuda K. How much light intensity to induce repulsion or attraction behaviour in juvenile salmon [J]? *Hydrobiologia*, 2024(**851**): 2237-2248.
- [110] Ford M I, Elvidge C K, Baker D, *et al.* Preferences of age-0 white sturgeon for different colours and strobe rates of LED lights may inform behavioural guidance strategies [J]. *Environmental Biology of Fishes*, 2018, **101**(4): 667-674.
- [111] Bi J Q, He Y, Wang C H, *et al.* Effect of different light color environment on collective behavior of juvenile Qingbo (*Spinibarbus sinensis*) [J]. *Journal of Chongqing Normal University (Natural Science)*, 2024, **41**(3): 37-46. [毕瑾秋, 何衍, 王春花, 等. 不同光色环境对中华倒刺鲃幼鱼群体行为的影响 [J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2024, **41**(3): 37-46.]
- [112] Johnson N S, Snow B, Bruning T, *et al.* A seasonal electric barrier blocks invasive adult sea lamprey (*Petromyzon marinus*) and reduces production of larvae [J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2021(47): S310-S319.
- [113] Noatch M R, Suski C D. Non-physical barriers to deter fish movements [J]. *Environmental Reviews*, 2012, **20**(1): 71-82.
- [114] Huang X L, Bai Y Q, Cui L, *et al.* Application of electric fish driving technology in fish protection [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, **40**(10): 3364-3374.

- [黄晓龙, 白艳勤, 崔磊, 等. 电驱鱼技术在鱼类保护中的应用 [J]. 生态学杂志, 2021, 40(10): 3364-3374.]
- [115] Parker A D, Glover D C, Finney S T, *et al.* Fish distribution, abundance, and behavioral interactions within a large electric dispersal barrier designed to prevent Asian carp movement [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2016, 73(7): 1060-1071.
- [116] Kim J, Mandrak N E. Effects of vertical electric barrier on the behaviour of common carp [J]. *Management of Biological Invasions*, 2017, 8(4): 497-505.
- [117] Bajer P G, Claus A C, Wein J, *et al.* Field test of a low-voltage, portable electric barrier to guide invasive common carp into a mock trap during seasonal migrations [J]. *Management of Biological Invasions*, 2018, 9(3): 291-297.
- [118] Kim J, Mandrak N E. Effects of a vertical electric barrier on the behaviour of rainbow trout [J]. *Aquatic Ecosystem Health & Management*, 2019, 22(2): 183-192.
- [119] Johnson N S, Miehl S. Guiding out-migrating juvenile sea lamprey (*Petromyzon marinus*) with pulsed direct current [J]. *River Research and Applications*, 2014, 30(9): 1146-1156.
- [120] Weber M J, Thul M D, Flammang M. Effectiveness of pulsed direct current at reducing walleye escapement from a simulated reservoir [J]. *Fisheries Research*, 2016(176): 15-21.
- [121] 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. [李阳希, 侯铁群, 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.]
- [122] 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. [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.]
- [123] 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 parameters at different flow velocities [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2022, 46(2): 310-321. [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.]
- [124] Miller M, de Bie J, Sharkh S M, *et al.* Behavioural response of downstream migrating European eel (*Anguilla anguilla*) to electric fields under static and flowing water conditions [J]. *Ecological Engineering*, 2021(172): 106397.
- [125] Bai Y Q, Huang X L, Xie L H, *et al.* Experimentally determined effectiveness of different electric barrier arrangements on the behavioural deterrent of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) [J]. *Applied Animal Behaviour Science*, 2024(271): 106172.
- [126] Layhee M J, Sepulveda A J, Shaw A, *et al.* Effects of electric barrier on passage and physical condition of juvenile and adult rainbow trout [J]. *Journal of Fish and Wildlife Management*, 2016, 7(1): 28-35.
- [127] Shi X T, Zhang Z, Huang X L, *et al.* The barrier effect of electric fence on *Cyprinus carpio* under different electrical parameters and flow conditions [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2024, 55(3): 546-554. [石小涛, 张政, 黄晓龙, 等. 不同电学参数和水流条件下电栅对鲤 (*Cyprinus carpio*) 的阻拦效果 [J]. 海洋与湖沼, 2024, 55(3): 546-554.]
- [128] Meister J, Moldenhauer-Roth A, Beck C, *et al.* Protection and guidance of downstream moving fish with electrified horizontal bar rack bypass systems [J]. *Water*, 2021, 13(19): 2786.
- [129] Zielinski D P, Voller V R, Svendsen J C, *et al.* Laboratory experiments demonstrate that bubble curtains can effectively inhibit movement of common carp [J]. *Ecological Engineering*, 2014(67): 95-103.
- [130] Circumaru G, Chihaia R-A, Voina A, *et al.* Experimental analysis of a fish guidance system for a river water intake [J]. *Water*, 2022, 14(3): 370.
- [131] 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. [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.]
- [132] Zhao X G, Liu L D, He D R. A study on the intercepting mechanism of an air-bubble curtain on black porgy (*Sparus macrocephalus*) [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1998, 29(1): 35-40. [赵锡光, 刘理东, 何大仁. 气泡幕对黑鲷阻拦作用机制初探 [J]. 海洋与湖沼, 1998, 29(1): 35-40.]
- [133] Thodi P, Talimi V, Liu L, *et al.* Jellyfish Deflection from Marine Fish Pens Using Bubbler Technology [C]. ASME 2023 42nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Melbourne, Australia. 2023.
- [134] Luo J, Bai Y Q, Lin C Y, *et al.* The influence of bubble curtain and strobe light to approach-avoidance behavior of *Spinibarbus hollandi oshima* in different flow velocity [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2015, 39(5): 1065-1068. [罗佳, 白艳勤, 林晨宇, 等. 不同流速下气泡幕和闪光对光倒刺鲃趋避行为的影响 [J]. 水生生物学报, 2015, 39(5): 1065-1068.]
- [135] Zielinski D P, Sorensen P W. Bubble curtain deflection screen diverts the movement of both Asian and common carp [J]. *North American Journal of Fisheries Management*, 2016, 36(2): 267-276.
- [136] Zielinski D P, Sorensen P W. Field test of a bubble curtain deterrent system for common carp [J]. *Fisheries Management and Ecology*, 2015, 22(2): 181-184.

- [137] Ma D Y, Xing B B, Qi Y K, *et al.* Blocking effect of bubble curtains on fat greenling *Hexagrammos otakii* [J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2016, **31**(3): 311-314. [马丁一, 邢彬彬, 齐雨琨, 等. 气泡幕对大泷六线鱼的阻拦效果 [J]. 大连海洋大学学报, 2016, **31**(3): 311-314.]
- [138] 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. [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.]
- [139] Bai Y Q, Luo J, Niu J T, *et al.* Avoidance responses of *Hemibarbus maculatus* and *Onychostoma sima* to bubble curtains with different density [J]. *Journal of Hydroecology*, 2013, **34**(4): 63-69. [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.]
- [140] Chen Y, Zhang P D, Zhang S, *et al.* The intercepting effects of bubble curtains with different density on *Fugu rubripes* [J]. *Journal of Dalian Fisheries University*, 2002, **17**(3): 234-239. [陈勇, 张沛东, 张硕, 等. 不同密度固定气泡幕对红鳍东方鲀的阻拦效果 [J]. 大连水产学院学报, 2002, **17**(3): 234-239.]
- [141] Zhao X G, He D R, Liu L D. Comparison on the reactions of *Sparus macrocephalus* and *Epinephelus awoara* to a bubble curtain [J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 1997, **27**(1): 35-42. [赵锡光, 何大仁, 刘理东. 黑鲷和青石斑鱼对气泡幕反应的比较 [J]. 青岛海洋大学学报, 1997, **27**(1): 35-42.]
- [142] Yin R C, Lin C Y, Shi X T, *et al.* Blocking effect of static water and flowing water bubble curtain on *Schizothorax oconnori* [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2020, **44**(3): 595-602. [尹入成, 林晨宇, 石小涛, 等. 静水与流水下气泡幕对异齿裂腹鱼的阻拦效应 [J]. 水生生物学报, 2020, **44**(3): 595-602.]
- [143] Dennis C E, Zielinski D P, Sorensen P W. A complex sound coupled with an air curtain blocks invasive carp passage without habituation in a laboratory flume [J]. *Biological Invasions*, 2019, **21**(9): 2837-2855.
- [144] Leander J, Klaminder J, Hellstrom G, *et al.* Bubble barriers to guide downstream migrating Atlantic salmon (*Salmo salar*): An evaluation using acoustic telemetry [J]. *Ecological Engineering*, 2021(160): 106141.
- [145] Lin C Y, Dai H C, Shi X T, *et al.* An experimental study on fish attraction using a fish barge model [J]. *Fisheries Research*, 2019(210): 181-188.
- [146] Perry R W, Romine J G, Adams N S, *et al.* Using a non-physical behavioural barrier to alter migration routing of juvenile chinook salmon in the Sacramento-San Joaquin River Delta [J]. *River Research and Applications*, 2014, **30**(2): 192-203.
- [147] Dai L, Zhang Z, Liu J H, *et al.* A study of the effects of light, sound, and bubble curtains on the expulsion effect of *Hexagrammos otakii* [J]. *Frontiers in Marine Science*, 2024(11): 1384046.
- [148] Haberland D, McAllen R, Doyle T K. Field and flume tank experiments investigating the efficacy of a bubble curtain to keep harmful jellyfish out of finfish pens [J]. *Aquaculture*, 2021(531): 735915.
- [149] Peng Y X, Laguna A J, Tsouvalas A. A multi-physics approach for modelling noise mitigation using an air-bubble curtain in impact pile driving [J]. *Frontiers in Marine Science*, 2023(10): 1134776.
- [150] Xu S X, Lin C Y, Luo J, *et al.* Approach-avoidance behavior of juvenile silver carp to a bubble curtain at different gas flows [J]. *Journal of Hydroecology*, 2018, **39**(1): 69-75. [徐是雄, 林晨宇, 罗佳, 等. 鲢幼鱼对不同气量气泡幕的趋避行为 [J]. 水生态学杂志, 2018, **39**(1): 69-75.]
- [151] Elliott M, Hemingway K L. *Fishes in Estuaries* [M]. Oxford: Blackwell Science, 2002.
- [152] Zhang T J, Xin J, Song L M, *et al.* Spatial and temporal variation of biomass density beneath drifting fish-aggregating devices in the western and central Pacific Ocean [J]. *Fisheries Management and Ecology*, 2024, **31**(5): e12711.
- [153] Galib S M, Sun J R, Gröcke D R, *et al.* Ecosystem effects of invasive crayfish increase with crayfish density [J]. *Freshwater Biology*, 2022, **67**(6): 1005-1019.
- [154] Yi M M, Yu H N, Lin X T, *et al.* Effects of stocking densities on behavior and physiological activity in *Litopenaeus vannamei* [J]. *Journal of Jinan University (Natural Science)*, 2012, **33**(1): 81-86+110. [衣萌萌, 于赫男, 林小涛, 等. 密度胁迫下凡纳滨对虾的行为与生理变化 [J]. 暨南大学学报(自然科学与医学版), 2012, **33**(1): 81-86+110.]
- [155] Chavanich S, Viyakarn V, Senanan W, *et al.* Laboratory assessment of feeding-behavior interactions between the introduced Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei* (Boone, 1931) (Penaeidae) and five native shrimps plus a crab species in Thailand [J]. *Aquatic Invasions*, 2016, **11**(1): 67-74.
- [156] Liu F, Zhang F B, Wang X, *et al.* Relationships between reproduction activities of fishes with drifting eggs and environmental factors in the Chishui River [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2019, **43**(S1): 77-83. [刘飞, 张富斌, 王雪, 等. 赤水河产漂流性卵鱼类的繁殖活动及其与环境因子之间的关系 [J]. 水生生物学报, 2019, **43**(S1): 77-83.]
- [157] Balaban-Feld J, Mitchell W A, Kotler B P, *et al.* State-dependent foraging among social fish in a risky environment [J]. *Oecologia*, 2019, **190**(1): 37-45.
- [158] Qin Y L, Bai Y, Peng J L, *et al.* Schooling behavior of juvenile rose bitterling (*Rhodeus ocellatus*) [J]. *Journal of Hydroecology*, 2017, **38**(4): 71-76. [覃英莲, 柏杨, 彭姜岚, 等. 高体鳉鱼幼鱼集群行为研究 [J]. 水生态学杂志, 2017, **38**(4): 71-76.]
- [159] Shi X T, Shi S S, Luo J, *et al.* Effect of schooling behavior on upstream migration of juvenile grass carp and

- silver carp [J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2024, **45**(1): 33-46. [石小涛, 石尚上, 罗佳, 等. 集群对草鱼、鲢幼鱼克流上溯行为的影响 [J]. 渔业科学进展, 2024, **45**(1): 33-46.]
- [160] Foster W A, Treherne J E. Evidence for the dilution effect in the selfish herd from fish predation on a marine insect [J]. *Nature*, 1981, **293**(5832): 466-467.
- [161] Zhao H J, Han J R, Jin Y Q, *et al.* Effects of population size on the collective behavior of juvenile bighead carp [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2022, **38**(23): 143-149. [赵涵婧, 韩建蓉, 金渝钦, 等. 群体大小对鳊幼鱼的集群行为影响 [J]. 中国农学通报, 2022, **38**(23): 143-149.]
- [162] Ling H, Wang C H, Fu S J, *et al.* Nutritional status and aerobic scope on group behaviour of juvenile goldfish (*Carassius auratus*) [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2023, **47**(6): 958-972. [凌鸿, 王春花, 付世建, 等. 营养状态和代谢范围对锦鲤幼鱼群体行为的影响 [J]. 水生生物学报, 2023, **47**(6): 958-972.]
- [163] Yin R C. The influence mechanism of bubble curtain of different specifications on the approach-avoidance behavior of fishes and its engineering application design [D]. Yichang: China Three Gorges University, 2020. [尹入成. 不同规格气泡幕对鱼类趋避行为影响机制及其工程应用设计 [D]. 三峡大学, 2020.]
- [164] Iliff A J, Wang C, Ronan E A, *et al.* The nematode *C. elegans* senses airborne sound [J]. *Neuron*, 2021, **109**(22): 3633.
- [165] Caputi A A, Nogueira J. Identifying self- and nonself-generated signals: Lessons from electrosensory systems [Z]. New York: Springer, 2012.
- [166] Ricci V, Ronco F, Musilova Z, *et al.* Molecular evolution and depth-related adaptations of rhodopsin in the adaptive radiation of cichlid fishes in Lake Tanganyika [J]. *Molecular Ecology*, 2022, **31**(10): 2882-2897.
- [167] Elliott C W, Ridgway M S, Blanchfield P J, *et al.* Novel insights gained from tagging walleye (*Sander vitreus*) with pop-off data storage tags and acoustic transmitters in Lake Ontario [J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2023, **49**(2): 515-530.

THEORIES OF FISH ATTRACTION AND REPULSION IN RIVERS AND THEIR APPLICATIONS IN FISH PASSAGE SYSTEMS

TAN Jun-Jun^{1,2}, SUN Jun-Jian^{1,2} and SHI Xiao-Tao^{1,2}

(1. Hubei International Science and Technology Cooperation Base of Fish Passage, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: Fish passage facilities, as an important ecological compensation measure for restoring fish migratory routes, have been widely implemented in aquatic ecosystem conservation. However, their effectiveness in facilitating fish passage remains below expectations. Fish attraction and repulsion technologies play a critical role in enhancing fish passage performance. This paper systematically elucidates the mechanisms and guidance theories of water flow, sound, light, electricity, bubble curtains, and biological factors on fish behavior, based on nearly a decade of indoor and field experiments. The paper also summarizes the advantages and limitations of these technologies in fish passage applications. Key conclusions include: (1) Research on fish behavioral responses to attraction and repulsion factors has evolved from two-dimensional to three-dimensional perspectives (e.g., from flow velocity to flow fields, from sound intensity to sound fields); (2) The effectiveness of attraction and repulsion factors shows both commonalities and species-specific differences among fish, with varying behavioral responses across different fish sizes; (3) Research focus has shifted from marine species to freshwater economic and protected species, with increasing attention to the interactive effects of multiple factors on fish behavior; And (4) the performance of attraction and repulsion technologies is influenced by multiple interacting factors, including species-specific characteristics, engineering design adaptability, and operational management. Future research should further explore fish behavioral responses under multi-factor interactions, optimize attraction and repulsion designs for various operational conditions of fish passage facilities, and advance aquatic ecosystem conservation.

Key words: Hydropower development; Fish behavior; Fish passage facility; Fish attraction and repulsion technology; Fisheries protection