J. Lake Sci.(湖泊科学), 2027, 39(2):000-000
DOI 10.18307/2027.0202
©2027 *by Journal of Lake Sciences*

鱼类过坝后的生态陷阱问题分析*

李冬晴[1,2]，石小涛[1,2**]，柯森繁[1,2]，邬玉娇[1,2]，林晨宇[1,2]，胡艺钟[1,2]
(1：三峡大学水利与环境学院，宜昌 443002)
(2：三峡大学湖北省鱼类过坝技术国际科技合作基地，宜昌 443002)

摘　要：过鱼设施的修建可能引发“鱼类陷入库区生态陷阱”是我国鱼类过坝领域亟需进行深入审视与探讨的问题。目前鱼类过坝技术的研究聚焦两个问题：坝下鱼怎么过坝及过鱼设施能过多少鱼，关于鱼类过坝后能否存活、产卵和孵化及下行的系统性研究鲜有涉及，导致无法科学判断库区是否成为“生态陷阱”。本文系统梳理了生态陷阱的概念、形成机制及其对鱼类的影响，首次从“坝下生境条件、上溯诱导机制、库区生境质量及下行设施配置”四个维度提出了生态陷阱的基础判别条件，突破了既有研究中将过坝后生命活动受阻直接视为生态陷阱的认知局限，深化了鱼类过坝后生态陷阱的科学认识。未来应聚焦生态需求定量化、形成机制实证化和评估体系综合化三方面的研究，为鱼类过坝后生态陷阱的识别与工程调控提供更加科学的理论支撑与技术指导。
关键词：生态陷阱；鱼类过坝后；过鱼设施；水利工程

Analysis of ecological trap issues after fish passage over dams*

Li Dongqing[1,2], Shi Xiaotao[1,2**], Ke Senfan[1,2], Wu Yujiao[1,2], Lin Chenyu[1,2]& Hu Yizhong[1,2]
(1: *College of Hydraulic and Environment Engineering, China Three Gorges University, Yichang* 443002, *P.R.China*)
(2: *Hubei International Science and Technology Cooperation Base of Fish Passage, China Three Gorges University, Yichang* 443002, *P.R.China*)

Abstract: The construction of fish passage facilities may lead fish into ecological traps within reservoir areas, representing a critical issue requiring further investigation in China's fish passage research. Previous studies on fish passage technologies have primarily focused on two core aspects: cross-dam fish migration routes and the passage efficiency of facilities. Few systematic studies have examined the survival, spawning, hatching, and downstream migration of fish after they pass through dams, which limits the scientific assessment of ecological trap effects in reservoirs. This study systematically reviews the concept, formation mechanisms, and fish-related consequences of ecological traps. It proposes, for the first time, fundamental identification criteria for ecological traps, encompassing four dimensions: downstream habitat conditions, upstream attraction mechanisms, reservoir habitat quality, and the configuration of downstream passage facilities. This framework addresses a conceptual gap in earlier work that often equated post-passage life-history disruptions with ecological traps, and enhances the scientific understanding of fish ecological traps following dam passage. Future research should prioritize quantifying ecological requirements, empirically testing formation mechanisms, and integrating assessment frameworks. The findings can provide solid theoretical support and technical guidance for identifying and regulating fish ecological traps induced by dam passage.
Keywords: Ecological traps; post-dam passage of fish; fish passage facilities; hydraulic engineering

水电开发在优化我国能源结构、保障能源安全、支撑区域经济发展中发挥了重要作用，同时也改变

* 2026-02-02 收稿；2026-06-09 收修改稿；2026-06-10 录用。
国家自然科学基金原创探索计划项目（52553010）、国家自然科学基金项目（52509101）、湖北省国际科技合作项目（2025EHA023）和国家自然科学基金重点国际（地区）合作研究项目（W2511058）联合资助。
** 通信作者；E-mail：fishlab@163.com。

了河流的自然连通性，直接阻断了鱼类洄游通道，引发水电开发与物种保护之间的矛盾[1-2]。过鱼设施已成为我国水利工程建设背景下恢复鱼类洄游通道的“标配”[3-5]。然而，鱼类通过过鱼设施上溯过坝后并不意味着其关键生命活动能够顺利完成。过坝后仍可能面临库区生境难以满足其生活史需求的生态风险，初步被认为鱼类过坝后陷入了库区“生态陷阱”[6-10]。修建过鱼设施可能引发“鱼类过坝后陷入生态陷阱”的问题正成为目前水电开发与鱼类生态保护争议的焦点。

鱼类过坝后生态陷阱的形成，本质上是鱼类被诱过坝进入库区后，库区生境与鱼类洄游习性及生活史需求之间发生的生态错配，可能会影响鱼类过坝后存活、产卵和孵化及下行等关键生命活动，对鱼类存活率、繁殖成功率及种群延续形成负面效应[11-12]。目前，国外学者已初步构建了适用于南美新热带大型河流洄游鱼类生态陷阱的理论框架，并围绕鱼类过坝后生态陷阱问题开展了部分研究，主要针对鲑科和脂鲤科鱼类开展被诱上溯进入库区后的行为追踪、存活率、产卵行为及下行行为研究[13-15]。例如，Britto 于 2000-2004 年间通过定点捕捞、标记重捕、分子鉴定等方法监测鱼类上溯后的产卵行为，监测结果表明，上溯至库区的 371 尾大颚小脂鲤（*Salminus brasiliensis*）和条纹鲶脂鲤（*Prochilodus lineatus*）均未在库区发生产卵行为[16]。然而，我国研究仍主要集中在评估鱼类过坝效率，如过鱼设施通过率、过鱼设施入口尝试率及吸引率等行为规律的研究，鲜有研究关注鱼类过坝后上溯群体的生境适宜性以及产卵、索饵、越冬和下行行为等[17-21]。与国外已形成的初步研究体系相比，我国对鱼类过坝后生态陷阱问题的认知尚显不足，缺乏统一的判定标准，对生态陷阱的概念、识别方法及其生态效应尚未形成共识。

鉴于此，本文聚焦鱼类过坝后的生态陷阱问题，系统梳理鱼类过坝的生态需求及生态陷阱的概念，厘清生态陷阱的形成机制，重点阐述生态陷阱对鱼类过坝后的存活、产卵及孵化和下行逃逸等关键生命过程的影响，针对库区近坝段、中间过渡段及上级坝下河段及支流段的空间范围，从“坝下生境条件、上溯诱导机制、库区生境质量及下行设施配置”四个维度提出生态陷阱的基础判别条件及解决途径，为鱼类过坝后生态陷阱的风险预判、生态效应评估及适应性管理提供科学依据。

1 鱼类过坝的生态需求

大坝建设改变了河流纵向连通性，阻断了鱼类洄游通道，使得洄游鱼类过坝完成产卵、索饵及越冬等关键生命活动遭受巨大挑战[22]。具有强烈过坝需求的鱼类主要是生命周期中需要跨越不同栖息生境的物种[23]。根据生活史特征，过坝鱼类可系统划分为三类：（1）河海洄游，包括在海洋与淡水间进行跨生境迁徙的溯河/降河洄游鱼类；（2）江湖洄游，即高度依赖河流干流与通江湖泊间的连通性，溯河进行产卵、索饵或越冬迁徙的半洄游性鱼类；（3）河流洄游，即完全栖息于内陆水系，在河流干支流或上下游纵向区间内进行溯河生殖或越冬洄游的鱼类[24-25]。鱼类过坝后需要特定的生境条件才能完成其关键生命活动，例如，上行过坝产卵鱼类，过坝后需要到达具有适宜水动力条件和底质结构的产卵生境产卵[26]，如圆口铜鱼（*Coreius guichenoti*），上行过坝后需要洄游至水流湍急、卵石底质的特定水域产卵[27]；上行过坝索饵或越冬鱼类，过坝后需要饵料生物丰富的水域进行育肥，而越冬群体则需要寻找水体较深、流速较缓且隐蔽条件良好的水域作为越冬场[28]，如小头裸裂尻鱼（*Schizopygopsis microcephalus*），秋季水温下降后洄游至水深>0.81m，水温<0.9℃的水域越冬[29]。

然而，筑坝拦蓄系统性地重构了库区环境的水文水动力特征及物理生境与底质结构（图 1）。（1）水文水动力特征：我国大型河流的开发通常以梯级方式展开，上游水体会沿着河道纵轴线形成特殊的河湖分相格局[30]，纵向河段的水文水动力特征呈现三区段分布格局，区段一，库区近坝段，受强烈回水效应影响，流速降低，水体由典型河流态向深水缓流态突变，湍动强度与流向稳定性明显降低，局部易形成回流及弱剪切区[31]；区段二，库区中间过渡段，此河段表现出高度湖泊化特征呈现弱紊动状态，流速低且水流方向性弱，水动力过程在时间尺度上变化缓慢、在空间尺度上趋于均一，整体表现为稳定但活性较低的水动力环境[32-33]；区段三，上级坝下河段及支流段，回水效应逐渐减弱，流速增大、流向明确且稳定，水体紊动强度增强，受河道形态及支流汇入影响，河道局部形成高紊动区，水动力结构转变为河流态特征[34-35]。此外，高坝大库的建设改变了河流水面宽度、水深、水力停留时间等，重塑水体的热力结构，可能导致水库中出现水温分层现象[36-38]。（2）物理生境与底质结构：库区蓄水后，原本高度连

通的深潭-浅滩交替形态被深水淹没，河床演变为形态单一的深水盆地[39]。库区河湖分相形成后，原有急流浅滩型栖息地减少，历史产卵场及其功能在不同程度上受到淹没或退化，可能导致喜流性鱼类的生存空间被压缩、栖息地质量与繁殖能力下降[40]。水生植被被淹没，导致粘性鱼卵可能无法找到可以附着的水生植被[41]。此外，库区细颗粒底质沉积增强，底质环境转变为以砂质、淤泥覆盖为特征的细颗粒底质条件，库区底质结构趋于单一化[42-43]。河床底质细化及水动力弱化削弱了底栖无脊椎动物和附着藻类的生境条件，导致依赖急流和粗颗粒底质的生物类群减少[44-45]；库区蓄水延长了水力停留时间，增加了沉积物滞留和沉降，营养物浓度升高，有利于浮游生物的生长与累积，使浮游生物资源量增加[46-48]，可能对部分静水适应种和滤食性鱼类有利，但对依赖流水生境完成繁殖和索饵的过坝鱼类而言可能不利。

筑坝蓄水不仅阻断了鱼类洄游通道，也重塑了其完成产卵、索饵及越冬等关键生命活动所依赖的水文水动力、物理生境与底质结构。此时，对于过坝后的洄游鱼类，其所面临的是经蓄水作用重塑后的库区环境。若该环境无法提供与其后续关键生命阶段相匹配的适宜生境条件时，可能导致其过坝后难以完成其关键生命活动。

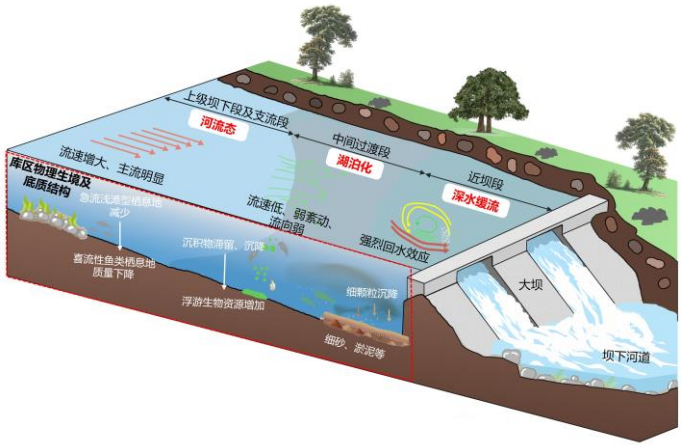

图 1 库区水文水动力特征、物理生境及底质结构变化示意图

Fig.1 Schematic diagram of changes in hydrological and hydrodynamic characteristics, physical habitat, and substrate structure in the reservoir area

2 生态陷阱概念与成因

“生态陷阱”的概念最早由 Dwernychuk 等人于 1972 年提出，其核心在于“误导性选择”，即动物对某些表面有利的栖息地线索产生偏好或选择，但该生境的实际适宜度较低，从而导致个体存活、繁殖成功或种群补充受到不利影响[49]。

鱼类陷入生态陷阱的形成过程并非由单一因素构成。本文根据 Pelicice 等提出的理论框架[13]，对鱼类过坝情境下的生态陷阱形成机制进行归纳与重构，主要概括为三个相互关联的核心机制：（1）能进去：坝下河段具备能支撑鱼类完成关键生命过程的适宜生境，且能维持种群数量稳定，却被过鱼设施入口吸引流诱导进入库区环境；（2）活不了：库区生境难以满足鱼类过坝后的产卵、索饵及越冬等关键生命活动的生态需求，导致过坝后的鱼类种群难以维持稳定或增长趋势；（3）出不来：过鱼设施仅为单向洄游通道，缺乏有效的下行洄游通道，使得鱼类被诱上溯后发现库区环境无法支撑其完成关键生命活动后，却又难以返回坝下原有适宜生境。上述三种机制共同作用，构成鱼类过坝后生态陷阱的形成过程（图 2）。

3 生态陷阱对鱼类的影响

根据生态陷阱的概念及其形成机制，当鱼类被诱上溯进入水文水动力结构、物理生境与底质结构发生变化的生境后，其关键生命活动将遭到破坏，且难以逃逸。这种陷阱效应，不仅直接威胁鱼类个体的

存活状态，更阻断了其种群的繁衍与逃逸路径。因此，本文将生态陷阱对鱼类的影响总结为存活难、产卵和孵化难及下行逃逸难三个关键层面：

图 2 生态陷阱的形成过程

Fig.2 Formation process of an ecological trap

(1)存活难：个体存活是鱼类过坝后能完成各生活史阶段的前提条件。鱼类被诱上溯过坝需要跨越坝下河道、过鱼设施、库区三个不同场景，并面临三个场景间的环境突变及存活危机[50]。此时，被诱上溯的鱼类不论是成鱼还是幼鱼，在经历了长时间远距离的过坝过程后，身体处于能耗较高，恢复能力受限的生理状态，导致其过坝后可能发生剧烈的生理应激，存活风险上升，甚至个体死亡[51]。此外，库区突变的生境，可能对处于高耗能状态的鱼类构成致命的威胁。对于上溯过坝的成鱼，当其在生理透支状态下进入库区后，突变的水流环境（深水缓流、弱紊动、低流速且水流方向性弱等）可能会使其陷入“水库迷宫”，最终难以找到适宜生境和产卵场，无法完成关键生命活动，导致个体的生存率降低[52]；对于上溯过坝的幼鱼，当其处于急需索饵发育的阶段进入库区后，突变的物理生境（沿岸庇护所丧失、饵料生物发生变化）可能会使其躲避敌害的能力减弱、摄食效率下降，从而影响其早期索饵生长发育这一关键生命过程，导致个体的存活率降低[53]（图3）。例如，西顿大坝位于加拿大不列颠哥伦比亚安德森流域，红鲑鱼（*Oncorhynchus nerka*）受西顿竖缝式鱼道（长度：107 m、坡度：6.9%）吸引流诱导上溯后，Roscoe等采用声学遥测和生理采样技术系统监测其过坝后的行为状态、能量消耗及存活率，监测结果表明，经历过坝过程的鱼类进入库区后的死亡率为27%[54-56]。此外，红鲑鱼在到达产卵场之前，需要经历长距离、高能耗并承受环境与生理压力共同作用的迁移过程，因而在前往产卵场的途中大量死亡，难以到达产卵场完成关键生命过程[57]。

(2)产卵和孵化难：繁殖过程是鱼类生命周期中对环境变化最敏感的环节。库区环境的改变对鱼类繁殖的约束主要体现在产卵行为及卵粒孵化两个方面。①库区水文水动力特征的改变导致鱼类缺乏关键水动力信号刺激使得产卵意愿降低[58]；泥沙淤积导致原有砾石或卵石底质被细颗粒覆盖，使依赖特定底质进行产卵的物种失去适宜的产卵场[59]；水温节律的变化也可能扰乱鱼类的产卵行为，导致其产卵延迟或产卵成功率降低[60]。②库区水文水动力特征及物理生境与底质结构的改变会显著影响卵粒孵化过程。对于产漂流性卵的鱼类，如四大家鱼等，库区流速减缓，导致大量漂流性卵无法维持悬浮状态，易沉入水底缺氧区域，导致孵化率大幅下降[61]。对于产粘性卵的鱼类，如异齿裂腹鱼（*Schizothorax oconnori* Lloyd）、胭脂鱼（*Myxocyprinus asiaticus*）等，底质的淤泥化破坏了卵粒的附着基质，粘性卵易被淤泥覆盖，导致卵粒窒息死亡[62]（图4）。例如，卡诺阿斯大坝工程位于巴西巴拉那帕内马河中游，于2000年修建鱼梯辅助鱼类过坝[63-65]。Britto于2000—2004年间通过定点捕捞、标记重捕法、分子鉴定监测大鄂小脂鲤（*Salminus brasiliensis*）、条纹鲮脂鲤（*Prochilodus lineatus*）被诱上溯后能否在库区成功产卵，累计监测371尾大鄂小脂鲤、条纹鲮脂鲤上溯至库区，但分子标记鉴定结果显示过坝后的371尾鱼类均未在库区

产卵[16]。尽管鱼梯运行初期发挥了一定的连通功能吸引大量鱼类成功越过大坝，但长期的监测结果表明鱼类过坝后面临产卵难的问题，导致后代无法补充，种群数量持续衰退。

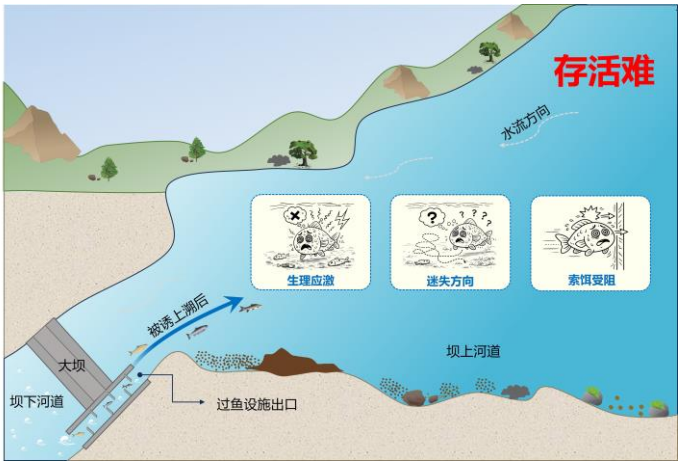

图 3 存活难示意图

Fig.3 Schematic diagram illustrating survival difficulties

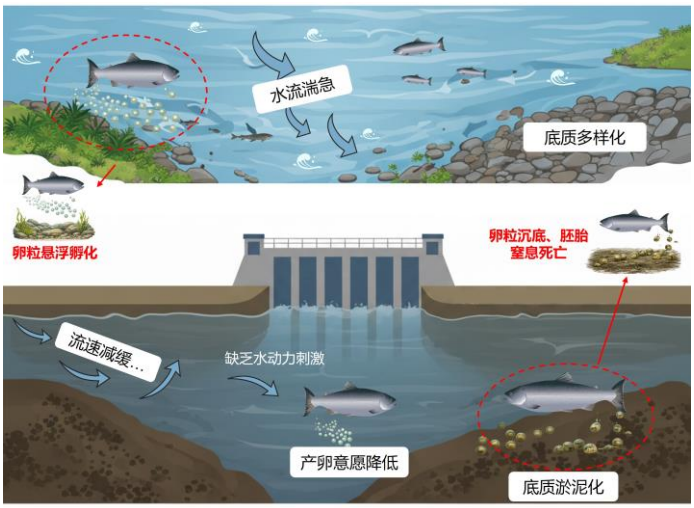

图 4 产卵和孵化难示意图

Fig.4 Schematic diagram illustrating difficulties in spawning and hatching

(3)下行逃逸难：下行逃逸过程是鱼类被诱上溯进入库区后，在缺乏适宜生境条件下摆脱不利生境、保障个体存活的重要补救环节。对于需要下行的亲鱼、仔幼鱼及成鱼，下行过程面临的首要问题是过高的致死致伤风险。在过鱼设施难以满足鱼类下行需求的情况下，鱼类往往只能依赖水轮机、溢洪道、船闸等设施完成下行行为，此类设施并非以鱼类安全下行为设计目标，其设施内部的强水流剪切力、瞬时压强突变、机械撞击等胁迫因子，会给下行鱼类带来极高的致死、致伤风险[66-68]。此外，库区的水力环境可能会增加幼鱼的滞留时间，加剧其下行过程中的能量损耗与被捕食概率，导致过坝后的鱼类面临下行逃逸难的问题[69]。对于下行的仔幼鱼，个体微小、游泳能力极弱，对水动力条件依赖强，正常情况下主要借助天然径流完成被动漂流下行。然而，库区蓄水后流速降低、紊动减弱，使仔幼鱼漂移受阻、滞留时间增加，不仅加剧其下行过程中的能量损耗，也显著提高被捕食的风险[70]（图5）。例如，洛斯帕德雷斯大坝位于北美卡梅尔河，大坝右岸设置了鱼梯、溢洪道（长度196 m、坡度9°）及下行旁路通道[71]。虹鳟（*Oncorhynchus mykiss irideus*）被诱上溯进入库区产卵后，其产卵后的部分亲鱼和幼鱼于2-6月需要

下行摄食补充体力[72]。通过标记追踪发现，库区仅有36%的目标鱼采用旁路通道下行，且仅有9%能下行至坝下河道[73]，尽管此工程修建了下行过鱼设施，但此设施并未充分发挥其生态功能，导致大量鱼类无法顺利下行，存活率极低，繁殖周期无法完成，种群数量难以维持。

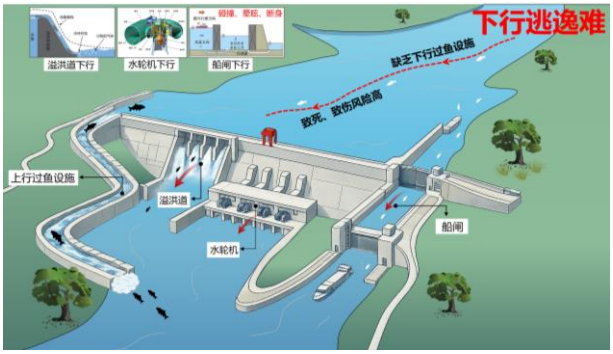

图 5 下行逃逸难示意图

Fig.5 Schematic diagram illustrating difficulties in downstream escape

4 生态陷阱的基础判别条件

为了避免生态陷阱概念在鱼类过坝领域的泛化使用，本文在明确适用对象与评估范围的基础上，对其基础判别条件进行系统界定（图 6）。该判别思路主要适用于在淡水生态系统中上行过坝完成产卵、索饵及越冬等关键生命活动，并具有江湖洄游、河流洄游或河海洄游特征的鱼类。判别空间限定于坝下河段、过鱼设施及库区-支流构成的连续生态单元，聚焦鱼类在此空间范围内能否完成关键生命活动及种群维持状况。本文将生态陷阱的前提条件归纳为以下四点：（1）坝下是否存在适宜且能被鱼类高效利用的生境（A+：是；A-：否），用于判别目标鱼类在未进入库区前，是否能够在坝下完成关键生命活动并维持种群数量稳定或增长；（2）鱼类是否受过鱼设施入口吸引流诱导上溯（B+：是；B-：否），用于判别鱼类是否受到“误导性选择”而进入库区；（3）库区是否存在适宜且能被鱼类高效利用的生境（C+：是；C-：否），用于判别鱼类进入库区后，能否继续完成关键生命活动并维持种群数量稳定或增长；（4）过鱼设施是否满足下行需求（D+：是；D-：否），用于判别鱼类能否在库区环境不能使其完成关键生命活动时返回坝下生境。

生态陷阱的判定不能取决于单一条件的存在与否，而应基于多重条件组合后所产生的连续生态效应进行综合辨析。根据坝下是否存在适宜且能被鱼类高效利用的生境及鱼类是否受过鱼设施入口吸引流诱导上溯的组合形式，分为被诱上溯（A+、B+）、自主上溯（A-、B+）、滞留坝下（A+、B-和 A-、B-）三类情景。其中，被诱上溯表明鱼类原本可在坝下完成关键生命活动，却因过鱼设施的吸引流诱导进入库区；自主上溯表明坝下生境不能支撑鱼类完成其关键生命活动，鱼类受生存本能驱使，自主选择进入库区并非存在误导性选择；滞留坝下则表明鱼类未受诱导、未进入库区，能否完成关键生命活动并维持种群数量稳定或增长主要取决于坝下是否存在适宜且能被高效利用的生境。

鱼类“被诱上溯”是进一步判别典型生态陷阱的关键前提。后续还需结合库区是否存在适宜且能被鱼类高效利用的生境及过鱼设施是否满足下行需求进行下一步辨析。当鱼类被诱上溯进入库区后，若库区存在适宜生境但未被高效利用或库区没有适宜生境支撑其完成关键生命活动，且又难以满足其下行需求返回坝下生境时（C-、D-），此情景判定为典型生态陷阱；此外，若库区存在适宜生境但未被高效利用或库区没有适宜生境，但鱼类可返回坝下生境完成关键生命活动，并维持种群数量稳定或增长（C-、D+），此情景判定为非生态陷阱。当鱼类被诱上溯进入库区后，若库区具有适宜生境且能被鱼类高效利用，可支撑鱼类完成关键生命活动，并维持种群数量稳定或增长，还可返回坝下生境时（C+、D+），此情景实现了生态连通，判定为非生态陷阱；若库区具有适宜生境且能被鱼类高效利用，可支撑鱼类完成关键生命活动，并维持种群数量稳定或增长，最终在库区形成独立种群（C+、D-），此情景判定为非生

态陷阱。

若鱼类出现“自主上溯”或“滞留坝下”而未被诱导进入库区，其产生的生态效应一般不被归为生态陷阱。对于“自主上溯”情景，若鱼类难以在库区完成关键生命活动，则应视为库区环境胁迫，而非生态陷阱；若鱼类可以在库区完成关键生命活动，并能维持种群数量稳定或增长，此情景实现了生态连通，判定为非生态陷阱。对于“滞留坝下”情景，若鱼类可以在坝下完成关键生命活动，并能维持种群数量稳定或增长，则表明坝下生境具备可利用性，应判定为非生态陷阱；若鱼类难以在坝下完成关键生命活动，此时坝下生境破碎化，同样判定为非生态陷阱。因此，鱼类过坝后是否陷入生态陷阱，本质上是由“坝下生境基础、误导性选择、库区生境适宜性及下行逃逸可能性”四个连续判别条件共同决定的，只有以上 4 个条件共同作用才符合典型生态陷阱的严格定义。

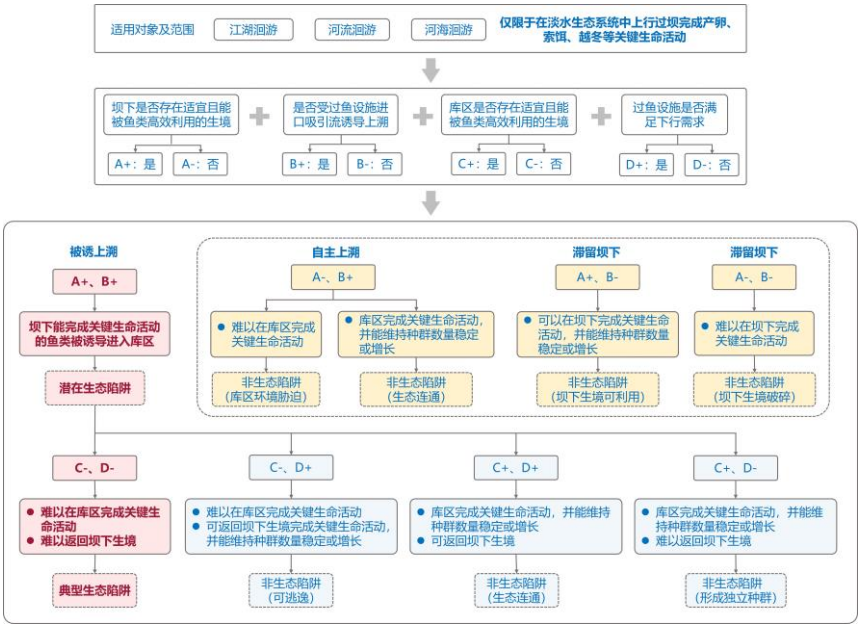

图 6 鱼类过坝后是否陷入生态陷阱的判别

Fig.6 Discriminant diagram for determining whether fish enter an ecological trap after dam passage

5 生态陷阱的解决途径

典型生态陷阱表明，在坝下存在适宜且能被鱼类高效利用生境的情况下，鱼类受过鱼设施入口吸引流诱导进入库区后，因库区缺乏适宜生境而难以完成产卵、索饵和越冬等关键生命活动，且难以及时返回坝下适宜生境。因此，生态陷阱的解决途径应遵循源头防控优先、工程补救为辅的生态管理原则，重点围绕防控部分鱼类进入库区、营造库区适宜生境及修建下行过鱼设施三个方面推进。

5.1 防控部分鱼类进入库区

坝下现有生境条件下能完成关键生命活动的鱼类是防控过坝后陷入潜在生态陷阱的重点关注目标。防控不需要过坝的鱼类进入生态陷阱的重要突破口在于从源头进行防控，降低或阻止鱼类被误导进入库区。防控的措施可以通过水力诱导或物理阻隔等技术手段，在上行过鱼设施入口及内部，降低或消除误导鱼类进入的吸引流信号。上行过鱼设施入口可根据目标鱼类的过坝需求、游泳能力及趋流特性，调整入口位置及下泄流量，改变入口吸引流强度及流场结构，形成易于目标鱼类识别和进入，但非目标鱼类不易进入或主动回避的选择性水力条件[74]。结合鱼类体型特征、游泳能力及行为响应差异，在上行过鱼设施入口设置物理屏障或行为驱诱系统，例如，布设导鱼栅、拦鱼网及柔性隔离结构等物理阻隔设施，或利用声、光、电及气泡幕等行为驱鱼设施，引导非目标鱼类远离入口区域，降低其进入库区的行为动机[75]。若非目标鱼类误入了上行过鱼设施内部，可在过鱼设施出口设置集鱼池和分拣装置，对非目标鱼

类进行识别分拣，并转运至坝下适宜生境中释放避免其进入库区。

5.2 营造库区适宜生境

库区环境是鱼类被诱进入库区后首个停留的关键水域，其生境条件的好坏直接关系到被诱上溯的鱼类能否在库区完成关键生命活动。当鱼类已被诱导进入库区后，且库区没有适宜生境时，过坝后的鱼类可能难以完成关键生命活动，陷入典型生态陷阱。此时，生态陷阱的防控思路应为功能补偿，通过营造库区适宜生境，满足鱼类完成关键生命活动的生态需求，从而减轻生态陷阱对鱼类产生的不利影响。

库区生境营造需以满足目标鱼类完成产卵、索饵及越冬等关键生命活动的生态需求为核心原则。产卵生境的营造旨在恢复鱼类完成繁殖所需的水动力条件、底质结构及环境因素[76]。对依赖特定流速、紊动强度和底质粒径进行产卵的鱼类，可在库尾河段、支流入口及回水影响相对较弱区域，营造满足鱼类产卵的适宜流速、底质条件及环境因素[77-78]；对依赖涨落水过程触发产卵行为的鱼类，可通过库区水位调控模拟自然涨落水等工程措施，在关键产卵期营造涨落水过程，营造触发鱼类产卵所需的水文水动力条件[79-81]。索饵生境的营造主要围绕鱼类进入库区后的能量补给与生长发育需求展开。重点加强近岸浅水带、库湾、支汊缓流区、消落带稳定区域及其他饵料资源相对丰富水域的生境修复，通过恢复水生植被、构建复合岸带、布设沉水的鱼-草-木共生的生境斑块等措施，增强局部水动力异质性，形成避敌、觅食和补能的庇佑场，提升饵料生物的承载能力与可利用性，为鱼类索饵提供稳定的摄食空间[82-83]。越冬生境的营造应结合库区地形、水温分布和溶氧状况，通过选择性取水、分层取水、局部水体交换等方式，缓解不利温度结构和溶氧条件对鱼类越冬的影响[84]。此外，可通过局部深挖、缓坡化整治构造梯形断面，形成具备足够水深、较缓流速与较高环境稳定性的越冬庇护生境，增强鱼类在低温期对不利水温分层、冰冻扰动及溶氧波动的抵御能力[85]。

当鱼类进入目标生境后，可在关键生境区域内布设水下视频监测、水下机器人、流速仪、多参数传感器等多手段监测设备，系统监测关键生境中鱼类的产卵、索饵和越冬行为，及水温、水深、流速、溶氧、浊度等关键指标。其中，产卵行为是鱼类关键生命活动中最核心的环节，直接关系到鱼类过坝后能否完成繁殖过程并实现种群延续。针对库区鱼类产卵行为的监测，由于传统监测方法难度大，因此，可采用灵敏度高、操作简便的eDNA检测技术，通过在关键生境中采取目标鱼类到达前后的水样后，检测目标鱼类的eDNA浓度，辅助判别其在关键生境中是否发生繁殖行为[86]。需要指出的是，eDNA浓度的变化属于间接证据，不能单独作为产卵行为发生的判据，此时，还需结合卵苗采集器、亲本追踪、分子溯源及视频监测等手段综合监测鱼类的产卵行为，进一步明晰鱼类产卵的时空分布格局、产卵频率、产卵规模、卵密度、孵化率及集群特征；协同水动力模型与水温、水深、水流和底质等环境参数，揭示产卵行为与水文水动力过程的响应关系，识别影响鱼类过坝产卵的驱动因素；构建鱼类产卵规模与关键影响因素的定量关系模型，开展鱼类过坝后的繁殖效能评估。综合评估结果，判断是否需要进一步开展针对性的优化措施，以持续改善库区关键生境条件，提升被诱上溯鱼类对适宜生境的利用程度及其完成关键生命活动的生态效能。

5.3 修建下行过鱼设施

下行过鱼设施的建设是保障被诱上溯鱼类在进入库区不适宜生境时，能够及时下行逃逸的重要工程措施。当鱼类被诱上溯发现库区生境不适宜，且过鱼设施未配备有效的下行设施时，鱼类可能将长期滞留于不适宜生境中，陷入典型生态陷阱。此时，生态陷阱的防控思路应通过修建鱼类下行过鱼设施，为鱼类提供安全且有效的下行通道，降低鱼类在库区持续滞留所带来的生态风险。下行过鱼设施的建设意义不仅在于弥补传统过鱼系统中“只上不下”的结构性短板，更在于为鱼类提供摆脱不适宜生境的折返通道，从而有效解决典型生态陷阱中能进入而难折返的困境。

鱼类下行过鱼设施的修建应涵盖入口引导系统、下行通道建设、下行行为监测及效果评估等环节。为了提升鱼类对下行过鱼设施入口的识别效率，应结合鱼类行为学特征和水力条件，科学布设有效的导鱼设施，例如，导鱼栅、拦鱼网等物理引导设施，声、光、电或气泡幕等行为驱诱设施，或物理引导为主，行为驱诱为辅的组合方案，引导鱼类顺利且快速定位下行过鱼设施入口[87]。此外，根据工程现场的实际情况，建设安全高效下行过鱼通道，如可增设集运鱼系统、旁路通道等下行过鱼设施[88]；或构建“下

行过鱼设施+旁路通道+智能诱鱼系统”等复合型过鱼方案，辅助安全鱼类下行，提高下行效率。当下行过鱼设施运行后，应同步开展全过程下行行为监测和运行效果评估。根据实际工程情况，选择声学标记追踪、水下视频监测及鱼类生理标记系统等技术，实时监测下行过鱼设施入口吸引率、通过率、损伤率等指标，量化下行过鱼设施的诱导效果、过鱼效果及损伤程度，在此基础上，建立下行过鱼设施运行效果综合评价体系，系统识别影响鱼类安全下行的关键因素，并根据监测评估结果提出针对性的优化措施及调控建议，实施适应性管理，形成监测、评估、调控的闭环模式。为鱼类“摆脱”典型生态陷阱、顺利返回坝下适宜生境提供必要条件，并保障其关键生命活动的顺利延续。

6 总结与展望

本文围绕鱼类过坝后的生态陷阱问题，梳理了鱼类过坝的生态需求、生态陷阱的概念及其对鱼类的影响，基于“坝下生境条件、上溯诱导机制、库区生境质量及下行设施配置”四个维度明确了典型生态陷阱的判别条件。然而，本文仅针对淡水生态系统中上行过坝完成产卵、索饵及越冬等关键生命活动的鱼类进行了生态陷阱问题分析，提出的判别条件仍停留在概念层面，未来要更加系统地回答鱼类过坝领域中的生态陷阱问题，并服务于实际工程设计、运行与调控，仍需从以下三个方面进一步深化：

1）深化鱼类过坝前及过坝后关键生态需求的定量研究。未来应针对鱼类过坝前和过坝后的运动行为开展大尺度、长时间序列监测，明确不同鱼类在坝下及库区存活、产卵、索饵、越冬及下行阶段对库区生境条件的响应阈值，为判断坝下及库区是否适宜提供量化依据。

2）加强生态陷阱形成机制的全过程实证研究。未来应该重点验证鱼类是否真的是被诱导进入库区、进入后是否发生生境利用受阻、是否因缺少下行通道而持续滞留等关键环节开展连续性验证，进一步夯实生态陷阱判定的实证基础。

3）构建面向鱼类全生活史阶段的可量化、可操作的综合评估体系，未来应依托长期监测结果，从鱼类全生活史阶段出发，将不同坝型、不同洄游鱼类及不同生命周期纳入同一评估体系，构建生态陷阱综合评价体系，为实际工程中的生态陷阱识别提供方法支撑。

7 参考文献

[1] Shen JJ. Development analysis and technological prospect for China’s hydropower system dispatching in the new era. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2026, **57**(1): 153-167. DOI: 10.3724/j.slxb.20250597. [申建建. 新时代中国水电系统调度发展分析及技术展望. 水利学报, 2026, **57**(1): 153-167.]

[2] Yang K, Xia LM, Chen ZW *et al*. Monitoring and preliminary evaluation of fish collection effectiveness in the fish collection and transportation system at Wudongde Hydropower Station, Jinsha River. *J Lake Sci*, 2026, **38**(1): 290-303. DOI: 10.18307/2026.0136. [杨科, 夏利名, 陈志伟等. 金沙江乌东德水电站集运鱼系统集鱼效果监测与初步评价. 湖泊科学, 2026, **38**(1): 290-303.]

[3] Shan CK, Jin ZJ, Ma WZ *et al*. Research development trace and prospect on fish passage facilities in China based on bibliometrics. *Yangtze River*, 2022, **53**(1): 73-81. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2022.01.012. [单承康, 金志军, 马卫忠等. 基于文献计量的中国过鱼设施研究发展脉络与展望. 人民长江, 2022, **53**(1): 73-81.]

[4] Chen XJ, Hou YQ, Cai L *et al*. Effectiveness monitoring of fish passage facilities in the Yangtze River: Current status, challenges, and future. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2025, **34**(12): 2806-2815. DOI: 10.11870/cjlyzyyhj202512015. [陈小娟, 侯轶群, 蔡露等. 加强长江过鱼设施效果监测的若干思考.长江流域资源与环境, 2025, **34**(12): 2806-2815.]

[5] Rao JN, Wei Q, Tang L *et al*. A design of a nature-like fishway to solve the fractured river connectivity caused by small hydropower based on hydrodynamics and fish behaviors. *Environmental Science and Pollution Research*, 2024, **31**(19): 27883-27896. DOI: 10.1007/s11356-024-33034-1.

[6] 曹文宣. 长江上游水电梯级开发的水域生态保护问题. 长江技术经济, 2017, **1**(1): 25-30.

[7] Cai L, Zhang P, Hou YQ *et al*. Demand, achievement and issues of fish passage facilities in China. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, **39**(1): 292-299. DOI: 10.13292/j.1000-4890.202001.029. [蔡露, 张鹏, 侯轶群等. 我国过鱼设施建设需求、成果及存在的问题. 生态学杂志, 2020, **39**(1): 292-299.]

[8] Chang T, Liu HZ. Impacts of cascade dams on fish in the mainstream of Mississippi river and the mitigation measures. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2020, **44**(6): 1330-1341. DOI: 10.7541/2020.154. [常涛, 刘焕章. 密西西比河干流大坝建设对鱼类的影响及保护措施. 水生生物学

报,2020,**44**(6):1330-1341.]

[9] Wu JD, Wang X, Weng YH *et al*. Scheme design of fish collection and transportation system of Wudongde Hydropower Station. *Yangtze River*, 2022, **53**(2): 88-94. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2022.02.015. [吴俊东, 王翔, 翁永红等. 乌东德水电站集运鱼系统方案设计. 人民长江, 2022, **53**(2): 88-94.]

[10] Mao X. Review of fishway research in China. *Ecological Engineering*, 2018, **115**: 91-95. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2018.01.010.

[11] Jeffres C, Moyle P. When good fish make bad decisions: Coho salmon in an ecological trap. *North American Journal of Fisheries Management*, 2012, **32**(1): 87-92. DOI: 10.1080/02755947.2012.661389.

[12] Patten MA, Kelly JF. Habitat selection and the perceptual trap. *Ecological Applications*, 2010, **20**(8): 2148-2156. DOI: 10.1890/09-2370.1.

[13] Pelicice FM, Agostinho AA. Fish-passage facilities as ecological traps in large neotropical rivers. *Conservation Biology*, 2008, **22**(1): 180-188. DOI: 10.1111/j.1523-1739.2007.00849.x.

[14] Gelder J, Benitez JP, Ovidio M. What do fish do after passing through a fishway　A radio-telemetry study on patrimonial holobiotic species. *Ecology of Freshwater Fish*, 2024, **33**(3): e12782. DOI: 10.1111/eff.12782.

[15] Britto SGC, Sirol RN. Transposição de peixes como forma de manejo: as escadas do Complexo Canoas, Médio Rio Paranapanema, Bacia do Alto Paraná. In: Ecologia de reservatórios: impactos potenciais, ações de manejo e sistemas em cascata, 2005, **2**: 285-304. DOI: 10.1590/S1679-62252007000200006.

[16] Lopes CM, de Almeida FS, Orsi ML *et al*. Fish passage ladders from Canoas Complex - Paranapanema River: Evaluation of genetic structure maintenance of *Salminus brasiliensis* (Teleostei: Characiformes). *Neotropical Ichthyology*, 2007, **5**(2): 131-138. DOI: 10.1590/s1679-62252007000200006.

[17] Tan XC, Tao JP, Huang DM *et al*. A preliminary assessment of fish migration through the Changzhou fishway. *Journal of Hydroecology*, 2013, **34**(4): 58-62. DOI: 10.15928/j.1674-3075.2013.04.014. [谭细畅, 陶江平, 黄道明等. 长洲水利枢纽鱼道功能的初步研究. 水生态学杂志, 2013, **34**(4): 58-62.]

[18] Song YT, Zeng LF, Tan XC *et al*. Passage efficiency and fish behavior of Laokou navigation junction fishway using passive integrated transponder(PIT) telemetry. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2024, **40**(8): 216-222. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.202401081. [宋韵涛, 曾令锋, 谭细畅等. 基于 PIT 技术的老口航运枢纽鱼道通行效率及鱼类行为分析.农业工程学报, 2024, **40**(8): 216-222.]

[19] Li GN, Liu ST, Liu HT *et al*. Design and effect evaluation of the fish guide weir based on fish migration behaviour. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2024, **40**(7): 117-123. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.202307206. [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.农业工程学报, 2024, **40**(7): 117-123.]

[20] Shi XT, Bai TX, Xu JW *et al*. Monitoring and evaluation of effectiveness through fishway in Songxin Hydropower Station of Heishui River, lower reaches of Jinsha River. *J Lake Sci*, 2023, **35**(3): 972-984. DOI: 10.18307/2023.0317. [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.湖泊科学,2023,**35**(3):972-984.]

[21] Ke SF, Xiang S, Kattel GR *et al*. Design and initial evaluation of a novel tubular fishway for the rubber dam on the Huangbai River, a tributary of the Gezhouba Reservoir. *Journal of Environmental Management*, 2025, **381**: 125301. DOI: 10.1016/j.jenvman.2025.125301.

[22] Chen KQ, Tao J, Chang ZN *et al*. Difficulties and prospects of fishways in China: An overview of the construction status and operation practice since 2000. *Ecological Engineering*, 2014, **70**: 82-91. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2014.04.012.

[23] 常剑波, 陈永柏,高勇等.水利水电开发项目生态环境保护研究与实践. 北京: 中国环境科学出版社, 2006.

[24] Hu WB, Han DJ, Gao Y *et al*. Restoration of fish migration: Practice of foreign countries and strategies of China. *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.长江流域资源与环境, 2008, **17**(6): 898-903.]

[25] 常剑波, 陈永柏, 高勇等. 水利水电工程对鱼类的影响及减缓对策. 中国水利学会. 中国水利学会 2008 学术年会论文集(上册). 中国科学院水生生物研究所, 中国长江三峡工程开发总公司, 2008: 696-707.

[26] Lu Y, Wu ZH, Liu QY *et al*. Evaluation of habitat restoration effect based on fish spawning requirements. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2023, **13**(2): 733-741. DOI: 10.12153/j.issn.1674-991X.20220532. [鲁芸, 吴紫涵, 刘清园等. 基于鱼类产卵需求的栖息地修复效果评价. 环境工程技术学报, 2023, **13**(2): 733-741.]

[27] Li XM, Zhu TB, Wu XB *et al*. Conservation status, challenges, and prospects for the largemouth bronze gudgeon(*Coreius guichenoti*). *Journal of*

Fishery Sciences of China, 2025, **32**(12): 1845-1854. DOI: 10.12264/JFSC2025-0158. [李学梅, 朱挺兵, 吴兴兵等. 圆口铜鱼物种保护现状、挑战与展望. 中国水产科学, 2025, **32**(12): 1845-1854.]

[28] Zhang YL, Xu BD, Zhang CL *et al*. Spatial heterogeneity in the feeding habits and feeding ground distribution of *Johnius belangerii* in Haizhou Bay during spring. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2020, **27**(3): 315-326. [张云雷, 徐宾铎, 张崇良等. 海州湾春季皮氏叫姑鱼摄食习性的空间异质性及其索饵场分布.中国水产科学, 2020, **27**(3): 315-326.]

[29] Liu CY, Li W, Zhang ZS *et al*. Deciphering hydrothermal cues for the wintering migration of endemic fish in cryospheric headwaters: A 3-year monitoring on the Tibetan Plateau. *Ecohydrology*, 2025, **18**(7): e70134. DOI: 10.1002/eco.70134.

[30] Chen QW, Zhang JY, Mo KL *et al*. Effects of hydropower development on aquatic eco-environment and adaptive managements. *Advances in Water Science*, 2020, **31**(5): 793-810. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2020.05.015. [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. 水科学进展, 2020, **31**(5): 793-810.]

[31] Sá-Oliveira JC, Hawes JE, Isaac-Nahum VJ *et al*. Upstream and downstream responses of fish assemblages to an eastern Amazonian hydroelectric dam. *Freshwater Biology*, 2015, **60**(10): 2037-2050. DOI: 10.1111/fwb.12628.

[32] Chen QW, Zhang JY, Chen YC *et al*. Inducing flow velocities to manage fish reproduction in regulated rivers. *Engineering*, 2021, **7**(2): 178-186. DOI: 10.1016/j.eng.2020.06.013.

[33] Agostinho AA, Gomes LC, Santos NCL *et al*. Fish assemblages in Neotropical reservoirs: Colonization patterns, impacts and management. *Fisheries Research*, 2016, **173**: 26-36. DOI: 10.1016/j.fishres.2015.04.006.

[34] Hong YX, Liu DS, Ma HH *et al*. Effects of fish habitat substitution in tributaries under the cascade hydropower development of Lancang River. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, **42**(8): 3191-3205. DOI: 10.5846/stxb202009042303. [洪迎新, 刘东升, 马宏海等. 澜沧江梯级开发下鱼类支流生境替代效果.生态学报, 2022, **42**(8): 3191-3205.]

[35] Sun H, Yan XC, Chen QW et al. Vertical characterization of greenhouse gases in inlet tributaries of high dams and deep reservoirs and their formation mechanisms. *J Lake Sci*, 2026, **38**(2): 713-724. DOI:10.18307/2026.0253. [孙昊, 闫兴成, 陈求稳等. 高坝深库入库支流温室气体垂向特征及其形成机制. 湖泊科学, 2026, **38**(2): 713-724.]

[36] Yigzaw W, Li HY, Fang X *et al*. A multilayer reservoir thermal stratification module for earth system models. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2019, **11**(10): 3265-3283. DOI: 10.1029/2019MS001632.

[37] Dai LQ, Wang HY, Liu X *et al*. Research on selective withdrawal strategy and ecological response of Wudongde Reservoir. *Advances in Water Science*, 2025, **36**(2): 264-274. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2025.02.008. [戴凌全, 王浩宇, 刘璇等. 乌东德水库分层取水策略及生态响应. 水科学进展, 2025, **36**(2): 264-274.]

[38] Chen QW, Li QY, Lin YQ *et al*. River damming impacts on fish habitat and associated conservation measures. *Reviews of Geophysics*, 2023, **61**(4): e2023RG000819. DOI: 10.1029/2023RG000819.

[39] Pasternack GB, Bounrisavong MK, Parikh KK. Backwater control on riffle–pool hydraulics, fish habitat quality, and sediment transport regime in gravel-bed rivers. *Journal of Hydrology*, 2008, **357**(1/2): 125-139. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2008.05.014.

[40] Li T, Tang L, Wang L *et al*. Distribution characteristics and ecological types changes in fish communities under hydropower development from Xiluodu to Xiangjiaba reach. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(4): 1473-1485. DOI: 10.5846/stxb201901030025. [李婷, 唐磊, 王丽等. 水电开发对鱼类种群分布及生态类型变化的影响——以溪洛渡至向家坝河段为例.生态学报, 2020, **40**(4): 1473-1485.]

[41] Feng K, Yuan J, Zhang YZ *et al*. Application of artificial spawning substrates to support lacustrine fish recruitment and fisheries enhancement in a Chinese lake. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2023, **10**: 1062612. DOI: 10.3389/fevo.2022.1062612.

[42] Folegot S, Bruno MC, Larsen S *et al*. The effects of a sediment flushing on Alpine macroinvertebrate communities. *Hydrobiologia*, 2021, **848**(17): 3921-3941. DOI: 10.1007/s10750-021-04608-8.

[43] Lin L, Dong L, Pan X *et al*. Water and sediment changes and the eco-environment response characteristics in Three Gorges Reservoir after the impoundment. *J Lake Sci*, 2023, **35**(2): 411-423. DOI: 10.18307/2023.0204. [林莉, 董磊, 潘雄等. 三峡水库蓄水后库区水沙变化及其生态环境响应特征. 湖泊科学, 2023, **35**(2): 411-423.]

[44] Ma QQ, Zheng P, Zhang K *et al*. Impact of river-lake disconnection on the taxonomic diversity of molluscan communities in lakes of the middle and lower reaches of the Yangtze River. *J Lake Sci*, 2026, **38**(3): 1183-1194. DOI: 10.18307/2026.0336. [马强强, 郑鹏, 张昆等. 江湖阻隔对长江中下游湖泊软体动物群落分类多样性的影响.湖泊科学, 2026, **38**(3): 1183-1194.]

[45] Wu XY, Zeng CJ, Shi WQ *et al*. Effects of cascade small hydropower development on benthic macroinvertebrate communities in headwater streams. *China Environmental Science*, 2026, **46**(7): 3873-3882. DOI: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20260108.001. [吴馨怡, 曾晨军, 施文卿等. 小水电梯级开发对源头溪流底栖动物群落的影响研究. 中国环境科学, 2026, **46**(7): 3873-3882.]

[46] He FZ, Zarfl C, Tockner K *et al*. Hydropower impacts on riverine biodiversity. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2024, **5**(11): 755-772. DOI: 10.1038/s43017-024-00596-0.

[47] Wu HP, Chen J, Xu JJ *et al*. Effects of dam construction on biodiversity: A review. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **221**: 480-489. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.03.001.

[48] Song Y. Hydrodynamic impacts on algal blooms in reservoirs and bloom mitigation using reservoir operation strategies: A review. *Journal of Hydrology*, 2023, **620**: 129375. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.129375.

[49] Dwernychuk LW, Boag DA. Ducks nesting in association with gulls—an ecological trap *Canadian Journal of Zoology*, 1972, **50**(5): 559-563. DOI: 10.1139/z72-076.

[50] Marmull AG. Dams, fish and fisheries: opportunities, challenges and conflict resolution. FAO Fisheries Technical Paper No. 419. Rome (Italy): Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2001.

[51] Zydlewski J, Coghlan S, Dillingham C *et al*. Seven dam challenges for migratory fish: Insights from the Penobscot River. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2023, **11**: 1253657. DOI: 10.3389/fevo.2023.1253657.

[52] Liermann CR, Nilsson C, Robertson J *et al*. Implications of dam obstruction for global freshwater fish diversity. *BioScience*, 2012, **62**(6): 539-548. DOI: 10.1525/bio.2012.62.6.5.

[53] Říha M, Ricard D, Vašek M *et al*. Patterns in diel habitat use of fish covering the littoral and pelagic zones in a reservoir. *Hydrobiologia*, 2015, **747**(1): 111-131. DOI: 10.1007/s10750-014-2124-x.

[54] Pon LB, Hinch SG, Cooke SJ *et al*. A comparison of the physiological condition, and fishway passage time and success of migrant adult sockeye salmon at Seton River Dam, British Columbia, under three operational water discharge rates. *North American Journal of Fisheries Management*, 2009, **29**(5): 1195-1205. DOI: 10.1577/M08-114.1.

[55] Li PC, Zhang WM, Burnett NJ *et al*. Evaluating dam water release strategies for migrating adult salmon using computational fluid dynamic modeling and biotelemetry. *Water Resources Research*, 2021, **57**(8): e2020WR028981. DOI: 10.1029/2020WR028981.

[56] Roscoe DW, Hinch SG, Cooke SJ *et al*. Fishway passage and post-passage mortality of up-river migrating sockeye salmon in the Seton River, British Columbia. *River Research and Applications*, 2011, **27**(6): 693-705. DOI: 10.1002/rra.1384.

[57] Cooke SJ, Hinch SG, Farrell AP *et al*. Abnormal migration timing and high en route mortality of sockeye salmon in the Fraser River, British Columbia. *Fisheries*, 2004, **29**(2): 22-33. DOI: 10.1577/1548-8446(2004)29[22: AMTAHE]2.0.CO;2.

[58] Campton DE. Sperm competition in salmon hatcheries—The need to institutionalize genetically benign spawning protocols: Response to comment. *Transactions of the American Fisheries Society*, 2005, **134**(6): 1495-1498. DOI: 10.1577/T05-071.1.

[59] Taylor JJ, Rytwinski T, Bennett JR *et al*. The effectiveness of spawning habitat creation or enhancement for substrate-spawning temperate fish: A systematic review. *Environmental Evidence*, 2019, **8**(1): 19. DOI: 10.1186/s13750-019-0162-6.

[60] Dadras H, Dzyuba B, Cosson J *et al*. Effect of water temperature on the physiology of fish spermatozoon function: A brief review. *Aquaculture Research*, 2017, **48**(3): 729-740. DOI: 10.1111/are.13049.

[61] George AE, Garcia T, Chapman DC. Comparison of size, terminal fall velocity, and density of bighead carp, silver carp, and grass carp eggs for use in drift modeling. *Transactions of the American Fisheries Society*, 2017, **146**(5): 834-843. DOI: 10.1080/00028487.2017.1310136.

[62] Vilizzi L. Abundance trends in floodplain fish larvae: The role of annual flow characteristics in the absence of overbank flooding. *Fundamental and Applied Limnology*, 2012, **181**(3): 215-227. DOI: 10.1127/1863-9135/2012/0394.

[63] Dias JH, Britto SGC, Vianna NC *et al*. Biological and ecological aspects of *Pinirampus pirinampu* (Spix, 1829), Siluriformes, Pimelodidae. Capivara reservoir, Paranapanema River, Southern Brazil. *Acta Limnologica Brasiliensia*, 2004, **16**: 293-304.

[64] de C Britto SG, Carvalho ED. Reproductive migration of fish and movement in a series of reservoirs in the Upper *Parana* River basin, Brazil. *Fisheries Management and Ecology*, 2013, **20**(5): 426-433. DOI: 10.1111/fme.12030.

[65] Duke Energy International. Relatório de monitoramento da transposição de peixes pelas escadas instaladas nas UHEs Canoas I Canoas II - Médio Paranapanema. Technical report. Chavantes, São Paulo, Brazil：Duke Energy International, 2002.

[66] Pflugrath BD, Mueller RP, Engbrecht K *et al*. American eel resilience to simulated fluid shear associated with passage through hydroelectric turbines. *Knowledge & Management of Aquatic Ecosystems*, 2021(422): 20. DOI: 10.1051/kmae/2021017.

[67] Vergeynst J, Pauwels I, Baeyens R *et al*. The impact of intermediate-head navigation locks on downstream fish passage. *River Research and Applications*, 2019, **35**(3): 224-235. DOI: 10.1002/rra.3403.

[68] Shirinzad A, Kumahor S, Tachie MF *et al*. Investigation of turbulent flows using spillway models aiming to aid downstream migration of fish. *River Research and Applications*, 2023, **39**(6): 1110-1121. DOI: 10.1002/rra.4132.

[69] Bourgeaux J, Teichert N, Gillier JM *et al*. Modelling past migrations to determine efficient management rules favouring silver eel escapement from a large regulated Floodplain Lake. *Journal for Nature Conservation*, 2022, **67**: 126192. DOI: 10.1016/j.jnc.2022.126192.

[70] Lechner A, Keckeis H, Humphries P. Patterns and processes in the drift of early developmental stages of fish in rivers: A review. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 2016, **26**(3): 471-489. DOI: 10.1007/s11160-016-9437-y.

[71] Ohms HA, Tranquilli JV, Brooks G *et al*. Flexible-pass-through antennas for half-duplex passive integrated transponder tags in medium to large rivers used to study size-selective reservoir passage. *North American Journal of Fisheries Management*, 2023, **43**(3): 687-694. DOI: 10.1002/nafm.10884.

[72] Hayes SA, Bond MH, Hanson CV *et al*. Down, up, down and “smolting” twice Seasonal movement patterns by juvenile steelhead (*Oncorhynchus mykiss*) in a coastal watershed with a bar closing estuary. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2011, **68**(8): 1341-1350. DOI: 10.1139/f2011-062.

[73] Ohms HA, Chargualaf DN *et al*. Poor downstream passage at a dam creates an ecological trap for migratory fish. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2022, **79**(12): 2204-2215. DOI: 10.1139/cjfas-2022-0095.

[74] Tan JJ, Tan HL, Goerig E *et al*. Optimization of fishway attraction flow based on endemic fish swimming performance and hydraulics. *Ecological Engineering*, 2021, **170**: 106332. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2021.106332.

[75] Bai YQ, Huang XL, Xie LH *et al*. Experimentally determined effectiveness of different electric barrier arrangements on the behavioural deterrent of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*). *Applied Animal Behaviour Science*, 2024, **271**: 106172. DOI: 10.1016/j.applanim.2024.106172.

[76] Yang Y, Yan ZM, Qiao Y. Description and review of hydraulic conditions of fish habitats. *Journal of Hohai University*: *Natural Sciences*, 2007, **35**(2): 125-130. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-1980.2007.02.002. [杨宇, 严忠民, 乔晔. 河流鱼类栖息地水力学条件表征与评述.河海大学学报: 自然科学版, 2007, **35**(2): 125-130.]

[77] Biron PM, Robson C, Lapointe MF *et al*. Deflector designs for fish habitat restoration. *Environmental Management*, 2004, **33**(1): 25-35. DOI: 10.1007/s00267-003-3080-9.

[78] McManamay RA, Orth DJ, Dolloff CA *et al*. Gravel addition as a habitat restoration technique for tailwaters. *North American Journal of Fisheries Management*, 2010, **30**(5): 1238-1257. DOI: 10.1577/M10-007.1.

[79] Li FS, Li H, You LH *et al*. Ecological operation target for fish spawning ground habitats recovering in the fluctuating backwater area of reservoirs. *China Rural Water and Hydropower*, 2023(8): 70-76, 81. DOI: 10.12396/znsd.230218. [李福霜, 李洪, 由丽华等. 水库变动回水区鱼类产卵场生境重塑的生态调度目标研究. 中国农村水利水电, 2023(8): 70-76, 81.]

[80] Dagel JD, Miranda LE. Backwaters in the upper reaches of reservoirs produce high densities of age-0 crappies. *North American Journal of Fisheries Management*, 2012, **32**(4): 626-634. DOI: 10.1080/02755947.2012.675948.

[81] Yu Y, Zhao R, Zhang JH *et al*. Identification and restoration of hydrological processes alteration during the fish spawning period. *Scientific Reports*, 2023, **13**: 11307. DOI: 10.1038/s41598-023-38441-x.

[82] Thomaz SM, Cardozo ALP, Quirino BA *et al*. A review of the ecological role of aquatic macrophytes on freshwater fish. *Hydrobiologia*, 2025, **852**(13): 3257-3290. DOI: 10.1007/s10750-025-05819-z.

[83] Winfield IJ. Fish in the littoral zone: Ecology, threats and management. *Limnologica*, 2004, **34**(1/2): 124-131. DOI: 10.1016/S0075-9511(04)80031-8.

[84] Davis MN, McMahon TE, Webb MAH *et al*. Winter survival, habitat use, and hypoxia tolerance of *Montana* Arctic grayling in a winterkill-prone lake. *Transactions of the American Fisheries Society*, 2019, **148**(4): 843-856. DOI: 10.1002/tafs.10176.

[85] 李伟, 赵良元, 赵伟华等. 一种高原鱼类的人造越冬场选址和建设方法: CN201911020033.1. [P].2021-04-23.

[86] Guan XY, Yan HL, Yin ZL *et al*. Preliminary exploration of factors influencing fish diversity in Guizhou mountain rivers based on environmental DNA technology. *J Lake Sci*, 2025, **37**(4): 1128-1145. DOI: 10.18307/2025.0406. [关晓玉, 严晗璐, 尹智力等. 基于环境 DNA 技术的贵州山区河流鱼类多样性影响因素初步探究.湖泊科学, 2025, **37**(4): 1128-1145.]

[87] Li DQ, Ke SF, Xu JW *et al*. Downstream migration of Juvenile fish at Songxin Hydropower Station on the Heishui River, lower reaches of Jinsha River. *J Lake Sci*, 2023, **35**(3): 985-997. [李冬晴, 柯森繁, 许家炜等. 金沙江下游支流黑水河松新电站幼鱼下行过坝研究. 湖泊科学, 2023, **35**(3): 985-997.]

[88] Ke SF, Xiao F, Li DQ *et al*. Recent advances in fish downstream passage pathways and injury mechanisms. *Scientia Sinica*: *Technologica*, 2025, **55**(8): 1324-1339. [柯森繁, 肖飞, 李冬晴等. 鱼类下行过坝途径及损伤成因研究进展. 中国科学: 技术科学, 2025, **55**(8): 1324-1339.]