

DOI:10.3969/j.issn.1007-9580.2023.01.001

“碳中和”压力下长江生态修复工程的实施路径研究

车 轩

(中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所,农业农村部长江水域生态修复研究中心,上海 200092)

摘要:工程建设和经济发展通过栖息地均质化、生境碎片化等累积效应对长江生态系统产生深远影响,作为反馈,生物多样性的降低正在危及生态稳定的可持续性和生态系统的服务功能,从而威胁人类自身安全。为实现“碳中和”目标,未来8年内长江上游的水电工程将迎来大规模建设期,由于长江生物多样性密集分布区与水能资源丰富区高度重叠,生态恢复面临的挑战将更加复杂严峻。“生态修复”与“碳中和”是中国的两大可持续发展目标,协同水生态安全与长江经济带绿色发展是近年来政府努力的目标,研究实现途径成为亟待解决的科学问题。本研究通过综述基础生态学、河流工程学、保护生态学、生态恢复动力学等领域在水生生物栖息地修复中的研究进展,提出了实施长江生态系统修复的“连通性恢复(Reconnection)、微生境修复(Restoration)、物种池构建(Rehabilitation)、功能性恢复(Recovery)、生态再平衡(Rebalance)”的5R路径,为精准开展全流域、多尺度的科技创新和成果应用提供参考。

关键词:长江生态系统;生态修复工程;鱼类栖息地;实施路径;碳中和

中图分类号:Q148

文献标志码:A

文章编号:1007-9580(2023)01-0001-008

河流生境退化导致的水生生物多样性下降和温室气体排放造成的气候变化是人类面临的两大全球性挑战^[1]。目前,全球33%的淡水物种面临灭绝的威胁,自1970年以来,全球淡水物种数量下降了84%,平均每年降低4%,物种消失的速度是海洋和陆地生态系统的2倍^[2]。许多研究一致认为,河流物种水平下降的主要原因是人类活动导致的全球到微观尺度的栖息地物理条件退化^[3-7]。在“大陆—流域”尺度,水坝的建设和运行导致了河流生态廊道的碎片化,损害了水流动力学条件^[8-13];河流护岸和河道整治极大降低了地理变异和自然景观,从而在“江段—微观”尺度上造成了栖息地的异质性水平下降^[14];由于人类活动的累积效应,河流生态过程的均质化在全球范围内对生物多样性构成了严重威胁^[15-19]。

栖息地是水生生物赖以生存、繁衍的空间和环境,关系着生物的食物链及能量流,是河流生态系统健康的根本^[20-24]。近年来,长江水生态系统受损使濒危物种数量急剧增加,濒危程度不断加剧,列入《中国濒危动物红皮书》的濒危鱼类物种

已达92种,列入《濒危野生动植物国际贸易公约》附录的物种已近300种,白鱀豚、长江鲟鱼、白鲟相继功能性灭绝,长江江豚数量已不足大熊猫数量的一半,中华鲟、长江鲟停止自然产卵,“四大家鱼”鱼苗量下降90%^[25]。长江水生生物链中的各个物种正面临全面衰退,生态系统服务功能连年下降,严重威胁长江经济带的可持续安全发展。

为扭转长江生态环境恶化趋势,长江干流和重要支流、大型通江湖泊等重点水域,自2021年开始实施常年禁捕以来,濒危水生生物获得了一线生机,然而,由于主要限制因素并未移除^[27],长江生态恢复健康的前景仍然充满变数。目前,中国经济转型面临更加复杂的形势,为缓解气候变化,确保如期实现“碳中和”目标,国务院发布了《2030年前碳达峰行动方案》,提出“十四五、十五五期间分别新增水电装机容量4000万千瓦”,主要布局在水能资源丰富的西南地区^[28]。然而,与之矛盾的是,西南地区也是长江濒危、特有物种广泛分布的热点区域,生态地位十分重要,独特的自然条件支撑起了丰富的生物多样性,水电开发的

收稿日期:2022-07-05

基金项目:科技基础资源调查专项(2022FY100404);中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所基本科研业务费专项资金(2022YJ5005)

作者简介:车轩(1981—),男,研究员,硕士,研究领域:水域生态工程。E-mail:chexuan@fmiri.ac.cn

进一步加强势必导致该地区的珍稀物种的消失,长江生态敏感区的保护形势将更加严峻。修复长江生态与减缓气候变化是中国生态安全、环境安全的重大问题,两个目标之间存在复杂的互馈关系,因此,从科学角度探索协同实现途径成为重要的科学问题。

20 世纪 70 年代,河流工程对生态系统的负面影响逐渐被认识,为修复河流栖息生境,欧美国家开展了大量的研究,并实施了广泛的工程实践^[29]。如在《欧盟水框架指令》的法律框架下,欧洲的所有河流均须实施栖息地修复工程,将鱼类作为指示生物,使种类数恢复到历史最好水平^[30-32]。《欧盟水框架指令》在 2015 年到期后,欧盟又发布了《欧洲水资源保护蓝图》,持续开展江河生态修复工程的研究与应用,以保持河流的良好状态。

中国的河流生态修复工程的研究刚刚起步,在长江生态环境急速变化的背景下,采用基础研究进行知识积累的路径并不现实,因此,本研究在

综述国际上江河水生生物栖息地修复的科技创新与工程实践进展的基础上,结合长江生态修复取得的阶段性成果,提出了长江生态修复工程的实施路径,为应对挑战提供潜在解决方案。

1 长江生态修复工程的实施路径

长江生态修复工程的目标是恢复生物多样性,如何保证生态修复的流域性、系统性与整体性是保护科学与工程科学的重要挑战之一。因此,针对导致生态恶化的人为作用、环境变化与生物压力等多个驱动因素的叠加影响,长江生态系统的修复应在不同生境尺度上,采取“连通性恢复(Reconnection)、微生境修复(Restoration)、物种池构建(Rehabilitation)、功能性恢复(Recovery)、生态再平衡(Rebalance)”的实现路径(简称“5R”路径)如表 1 所示。在鱼类栖息地不断被压缩、原生境保护范围非常有限的背景下,提高适应性工程措施的有效性尤为重要。

表 1 长江生态系统修复的“5R”路径
Tab. 1 "5R" path of yangtze river ecosystem restoration

空间尺度范围 ^[33]	应对性措施	栖息地维度	针对的限制因子	推荐的工程方法
中观尺度 (1~100 km)	连通性恢复	物理结构	(1)生境破碎化 (2)洄游通道不畅 (3)生态恢复驱动力不足	(1)小水电拆除 (2)仿自然鱼道
微观尺度 (<1 km)	微生境修复	物理结构	(1)生境同质化 (2)栖息地物理条件退化	(1)地形地貌塑造 (2)河漫滩结构修复 (3)人工鱼礁
微观尺度 (<1 km)	物种池构建	物理结构	(1)物种扩散力有限 (2)种群拓殖能力下降	(1)“上下游”物种池 (2)“洲滩—河道”物种池 (3)“湖泊”物种池
宏观尺度 (≥100 km)	功能性恢复	生态功能	(1)密度依赖效应	(1)生态预测模型
宏观尺度 (≥100 km)	生态再平衡	结构+功能	(1)生态恢复力差 (2)生态阈值限制 (3)稳态转化困难	(1)多维度次生演替 (2)流域空间格局优化

注:工程方法的选择应考虑长江干支流、上中下游的生态状况和问题的不同,采用多种措施融合的跨尺度方案

2 研究进展及应用于长江生态修复的重点

2.1 连通性恢复

河流的水文情势和水沙过程是生态系统健康的直接驱动力。河流连通性包括纵向、侧向、河湖的空间连通性和水位季节性消落的时间连通性,保证物质流(水体、泥沙和营养物质)、物种流(鱼

类洄游、卵苗漂流)和信息流(洪水节律等)的通畅,为生物多样性创造基本条件^[34]。大量观测发现,河流物种数量、生物量、鱼类丰度与河网连通性程度呈极显著的正相关关系,Shao 等^[35]研究了 135 篇关于不同河流连通性类型和形式对鱼类多样性影响的论文结论,发现工程构筑物造成了河流的结构连通性和功能连通性遭到破坏,通过影

响栖息地连接、生境容量、环境变异度和食物网结构等机制,导致生物多样性下降,从而危害整个河流网络生态系统的完整性^[36]。

针对生境破碎化现状,各国从不同角度开展的连通性恢复工程卓有成效^[37-38]。1968–2019年间,美国拆除了1 654座水坝,其中,86%是高度低于7.5 m的低坝,且拆坝的数量从20世纪80年代开始大幅上升^[4]。目前,北美和西欧的拆坝速度已高于建造速度^[39-42],据预测,到21世纪中期,美国将有4 000~36 000座水坝被拆除。大多数情况下,清除河流上的障碍物会在短期内使鱼类群落开始恢复^[43]。有研究观察到,洄游鱼类在拆除水坝后的第一年即开始出现^[44];丹麦的长期研究表明,水坝的拆除显著提高了上下游的鱼类种群数量^[45];美国 Woolen Mills 水坝拆除使镖鲈能到达新的河段,从而有效提高了土著鱼类数量比例^[46];爱达荷州 Clearwater 河的水电站拆除提高了栖息地质量,恢复了努克鲑的洄游通道^[42]。然而,拆坝过程的负面影响也应注意,施工导致的水体悬浮物上升有可能在短期内威胁下游生物的存活,俄亥俄州 Olentangy 河在水坝拆除后的第9个月出现了大型无脊椎动物的下降,15个月后恢复^[47];而 Elwha 河的拆坝工程使水库65%沉积物进入河道,5年后才恢复^[48-49]。另一方面,存在较多外来物种的河流实施拆坝具有生物入侵的风险^[50]。

增设过鱼设施是恢复河流连通性的另一项措施,然而,传统鱼道的过鱼目标单一、施工影响大、运行管理不畅,作用有限。即使成功的案例也存在小鱼不能通过,鱼梯下鱼群聚集易被捕食等问题,而鲟鱼等由于体型巨大,难以利用鱼道过坝^[51]。相比之下,仿自然过鱼通道由于模拟天然河流的水流流态、坡度平缓、过鱼效率高、建造成本低等优点,近年来备受关注,如 Ruppoldingen 水电站的仿自然鱼道^[52]。

中国在河流连通性恢复工程的实施虽然起步较晚,但发展迅速,通过小水电整治拆除了经济效益低下的水电站3 000余座,为长江流域生态完整性的恢复提供了可能性,特别是赤水河流域的373座小水电的拆除、整改进展迅速。然而,水电站的拆除成本很高,拦河坝的拆除应充分考虑经济、社会、生态效益,由于水坝在很多地方发挥着

重要的发电、防洪、灌溉等多重功能,在长江全流域推广的代价巨大且没必要。因此,在不具备拆坝条件的区域,应优先采用仿自然鱼道,尤其是在长江上游干流梯级开发进一步加强的情况下,重要支流的连通性应尽快恢复,为水生生物提供替代生境,如汉江的一级支流涪水河、岷江的一级支流越溪河等均具备建设仿自然鱼道的条件。长江中下游无大型水电站,但河网的闸坝密集分布,且常年关闭,应将目前防洪抗旱为单一目的转变为多目标的生态调度,在保证防洪抗旱的前提下,保持闸口常年开启,恢复鱼类洄游通道。

2.2 微生境修复

微生境是承载水生生物多样性的基本单位,在生境的空间尺度上,主要包括低于长度1 km的江段和面积小于1 hm²的栖息地^[53]。由于面积范围易于施工,这个生境尺度的栖息地生态修复工程是目前全球研究的集中点,主要分布在欧洲的河网、美国五大湖的连接河道等区域,由于很多工程已实施并运行了几十年,使科研人员能在足够大的时空尺度对生态修复的效果进行监测研究,研究范围包括了修复鱼类栖息地的所有可能选项,如引入砾石及大石块、建设近岸消浪带、清除硬化河岸、设置粗糙沉木浮木、恢复岸线植被、投放人工鱼礁等,科学识别了行之有效的工程手段^[54]。Lu等^[55]对全球55个河流修复工程生态影响的meta-analysis研究结果表明,相对于沉木、石块的引入,地形地貌塑造、消浪带设置的有效性更加显著,而河道岸线植被恢复几乎不具备支撑鱼类物种多样性的功能,仅提供一定的景观效益。近几年,河流生境修复的研究取得了可观的积极进展,最重要的阶段性成果是,证实了河流栖息地的退化在较小的生境尺度是可逆的,且能通过工程干预的方式进行人为操纵,恢复的程度取决于项目移除的生态过滤因子的级别。

通过地形地貌塑造提高鱼类栖息地的物理结构是恢复自然水文条件的必要措施。研究结果表明,河流鱼类的生存高度依赖于水动力和水形态条件,而这两方面的水力状态是由栖息地的地形地貌决定的。栖息地的地形地貌决定一个江段水力形态的多样性,鱼类物种的多样性与水力形态的多样性成正比^[56]。因此,欧洲将地形地貌塑造推荐为栖息地生态修复的优先选项,复杂的地形地貌能有

效改善水动力学条件,为不同类型的水生生物创造多样性的栖息生境(如鱼类、软体动物、大型无脊椎动物^[57-59])。在修复工程的选址上,应重点考虑渠道化与筑坝导致的水文改变或者农业开发造成的土地利用变化的江段,但应谨慎选择施工材料,如砂岛由于易冲垮而逐年消失^[60]。

长江作为高度改造的河流,发挥着航运、行洪等多重社会经济功能,生态恢复措施的实施受到极大限制,在干流主航道开展栖息地修复工程困难重重。河漫滩在长江干支流分布广泛,是水生生物重要的栖息地之一,应作为实施栖息地地形地貌塑造的重点区域加以关注。针对挖砂堆场、河滩农业等造成的河漫滩生态环境破坏、萎缩退化等问题,开展河漫滩生态修复,提高水生生物宜栖性,恢复各类生物生息的自然空间,是修复长江栖息地、避免高昂经济代价的可行途径。中国在河漫滩栖息地修复方面已经起步,如在长江上游四川省泸州市江段开展的鱼类栖息地修复工程,采用了地形塑造和人工鱼礁相结合的技术方案,恢复了河流物理特性,塑造了水文环境多样性的湍流条件,形成的激流—缓流、深潭—浅滩交替分布的空间格局提高了栖息地质量和多样化水平^[61]。

2.3 物种池构建

零星分布的栖息地生态修复工程对重建一个较大尺度江段自然种群的成效往往是有限的^[62-63],进一步强调了开展整体性修复的重要性。由于微生境修复主要关注栖息地的水力形态学等非生物因素,而仅使用这些变量来评价修复工程是否成功或达到设计目标非常困难^[64],在这种背景下,决定栖息地生态修复工程成败的生物因素正受到越来越多的关注,生态学家称之为“物种池”^[65]。成功的修复工程能形成多样化的鱼类群落,发挥“物种池”的功能,“物种池”的拓殖能力取决于物种扩散力、江段水形态与生物竞争力,其中,物种扩散力是关键指标,“物种池”中没有或扩散力较差的鱼类无法拓殖到整个江段^[66-68]。一项研究发现,单个栖息地修复项目的有效作用范围约为上下游 10 km,超过这一范围的江段具有不同的鱼类群落结构,而有效范围内的鱼类群落结构是由“物种池”的潜在种群数量和规模决定的^[69]。生境条件显著影响鱼类的扩散力,如流速直接影响鱼类的移动能力,而栖息地

喜好、食性种类等间接影响生物群落构建,且物种的分类学地位可以作为鱼类扩散力的指示指标^[66]。

“物种池”的研究进展为长江生态系统的整体修复提供了重要借鉴,在生物多样性分布的热点江段,科学布局栖息地修复项目,形成产卵场、索饵场、越冬场的“上下游、河湖库、左右岸、干支流”联动分布格局。其中,产卵场与幼鱼索饵场的修复尤为关键,因为只有在实现鱼类繁殖并成功育幼的情况下,栖息地修复才能发挥持续性的“物种池”作用,那些集鱼而无法自然增殖的项目仅能改变鱼群的地理分布。Che 等^[70]研究了栖息地修复工程对长江上游鱼类群落结构的短期影响,发现鱼类多度、渔获量和物种丰富度分别增加 98.1%、62.7%和 22.5%,珍稀特有鱼类从 4 种增加到 9 种,濒危物种数的占比提高了 8.4%,并在工程区域内发现了大量幼鱼,证明了“物种池”在长江鱼类自然群落重建中的可行性,应进一步开展“物种池”拓殖范围的研究。长江河道内的“物种池”构建应结合实施地的自然地理条件和鱼类生态特点,识别主要限制因子,因地制宜,一地一策,灵活选用地形塑造、护岸生态改造、人工鱼礁(巢)设置、生态河漫滩构建、底栖生物恢复等多种形式。天然湖泊应重点保护入江生态廊道的畅通,如鄱阳湖与长江间尚无工程构筑物,自然消落的水文节律对刀鱼、长江江豚等物种的保存起到了关键作用,在水位高时,水生生物进入鄱阳湖繁殖、育肥,到了冬季水位下降,则回到长江完成生活史,鄱阳湖在这一过程中发挥的天然“物种池”功能给了研究人员极大的启示。

2.4 功能性恢复

与栖息地物理结构修复相比,生态功能的恢复具有“延滞性”,不同类型水生生物的群落结构恢复往往要经历数年时间,且各不相同。栖息地生态工程实施后 5~8 年,鱼类群落开始稳定,大型无脊椎动物的恢复时间一般为 5~10 年,而水生植物远远落后于动物,平均为 30 年,人为缩短这些时间的努力不容易取得成效^[71]。生态系统功能与生物多样性(biodiversity-ecosystem functioning, BEF)具有级联效应,试验观测发现,生物多样性与生态系统功能之间存在强烈的、不饱和的正相关关系^[72]。栖息地修复工程通过提

高物种数目和种群规模来促进河流的功能性恢复;物种数目增加时,不同物种执行相似、相同或者互补功能的概率增大,有助于增大群落的稳定性、维持系统功能的正常发挥、强化系统的功能承载力;而种群规模通过“密度依赖效应”发挥作用,单个物种的种群规模越大,越有可能实现定殖,激发生态系统功能的正向响应^[73]。

因此,在长江关键区域实施栖息地修复工程后,不应过多干预生态系统功能的恢复过程,工作重点应转向对自然恢复的效果监测,制定并执行科学的长期观测方案,收集群落中物种的功能性状与环境变异互作数据,建立生态模型。Theodoropoulos 等^[74]的研究结果表明,如不应用模型对河流修复的生态效益进行预测与方案优化,很有可能导致项目结果与预期目标不相符。国外的河流栖息地修复工程起步较早,研发了功能全面、特点各异的预测模型,如 WUA、WASH 等^[75]。但长江的地质条件、演变历史、水文环境与生物谱系不同于国外,直接采用这些模型可能不准确,因此,长江生态系统的建模工作对提高栖息地修复工程的成功率非常重要。与物种丰富度等分类学数据相比,生物多样性的功能组成更能预测生态系统功能^[73],这一结论显示,应选择鱼类功能性状指标作为变量来量化工程对生物多样性格局的影响。

2.5 生态再平衡

临界转变(critical transitions)是恢复生态学的重要概念之一,外源扰动使长江的生态系统从一个平衡态跃变到另一个相对较次的平衡态,并且不易恢复^[76]。生态修复工程重建或形成的水生生物栖息地是次生境,次生境生态系统的恢复程度受到区域资源条件和生态恢复阈值(threshold)的限制,外界条件达到临界点(tipping point),会触发并加速生态系统在不同稳态之间的切换。双稳态(bistability)理论认为,生态恶化与恢复的临界点并不重叠,两个临界点的差值代表生态系统的恢复力,差值越大,恢复的难度越大^[77]。基于近期的空间数学模型研究和对真实生态系统观测提出的“图灵理论(Turing theory)”备受关注和认可,强调小规模栖息地能通过空间自组织,生成并聚集成大规模的局域性互作结构,从而协助复杂系统的恢复^[76]。该理论已成功

运用在植被生态系统的修复,研究发现,基于多维度的次生演替能实现陆生系统的快速、大幅度恢复^[78]。

因此,迫切需要在不同时空尺度上明确长江生态系统恢复阈值的制约机制,并在此基础上优化栖息地恢复工程的全流域空间格局与异质化水平,研究表明,具有异质性和空间自组织特征的生态系统具有相对较小的延滞圈(hysteresis loop),从而加快生态恢复临界点的出现,实现生态系统的再平衡^[79]。

3 结语

生态系统稳定性是保证人与自然和谐可持续发展的关键因素。人类活动导致的生物多样性快速下降是备受关注的重要问题,生态系统修复的相关研究已成为生态学和保护科学的前沿热点。在近二十年里,生态系统修复工程对改善生态系统服务做出了重大贡献,河流恢复生态工程学发展迅速,已成为现代科学发展最快的前沿工程研究领域之一。随着长江经济带建设的深入,对长江水资源的开发利用进一步强化,长江生态环境保护与经济社会发展的矛盾逐渐突出。保护和修复长江生态环境是目前与未来很长一段时间的重点工作,是科研工作者与政策制定者必须解决好的艰巨任务,其中,生物多样性是保护的核心目标,面临的挑战也最多。长江经济带作为国家生态文明建设的先行示范带,肩负着率先实现“双碳”目标的重大使命,在“碳中和”背景下,长江上游的水电开发强度显著增加,进一步压缩了水生生物的生存空间,许多稀有物种无法适应快速变化的水文环境,可以肯定的是,如不采取应对性行动,长江生物多样性的衰退趋势将有所加速。时间紧迫,对长江水生生物栖息地的修复应尽快展开,将生态学的重要进展应用于水生群落恢复,解决实际问题,充分利用有限的河流地理空间与自然资源进行工程实践,采取“边实施、边研究、边应用”的策略,提高栖息地生态修复的科学性、有效性、精准性,保护好我们赖以获得各种生存资源的长江生命线。□

参考文献

- [1] WINEMILLER K O, MCINTYRE P B, CASTELLO L, et al.

- Balancing hydropower and biodiversity in the Amazon, Congo, and Mekong[J]. *Science*, 2016, 351(6269): 128-129.
- [2] HANNAH R, MAX R. Fish and Overfishing[EB/OL]. (2021-10-09) [2021-10-09]. <https://ourworldindata.org/fish-and-overfishing>.
- [3] CARLISLE D M, FALCONE J, WOLOCK DM, et al. Predicting the natural flow regime: models for assessing hydrological alteration in streams[J]. *River Research and Applications*, 2010, 26(2): 118-136.
- [4] HABEL M, MECHKIN K, PODGORSKA K, et al. Dam and reservoir removal projects: a mix of social-ecological trends and cost-cutting attitudes[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 19210.
- [5] BUNN SE, ARTHINGTON A H. Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity[J]. *Environmental Management*, 2002, 30(4): 492-507.
- [6] POFF L R, OLDEN J D, MERRITT D M, et al. Homogenization of regional river dynamics by dams and global biodiversity implications[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104(14): 5732-5737.
- [7] POFF N L, ALLAN J D, BAIN M B, et al. The natural flow regime[J]. *BioScience*, 1997, 47(11): 769-784.
- [8] KARR J R. Defining and measuring river health[J]. *Freshwater Biology*, 1999, 41(2): 221-234.
- [9] LEHNER B, LIERMANN C R, REVENGA C, et al. High-resolution mapping of the world's reservoirs and dams for sustainable river-flow management[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2011, 9(9): 494-502.
- [10] GRILL G, LEHNER B, THIEME M, et al. Mapping the world's free-flowing rivers[J]. *Nature*, 2019, 569(7755): 215-221.
- [11] GRILL G, LEHNER B, LUMSDON A E, et al. An index-based framework for assessing patterns and trends in river fragmentation and flow regulation by global dams at multiple scales[J]. *Environmental Research Letters*, 2015, 10(1): 015001.
- [12] NILSSON C, REIDY C A, DYNESIUS M et al. Fragmentation and flow regulation of the world's large river systems[J]. *Science*, 2005, 308(5720): 405-408.
- [13] ERICKSON C L. An artificial landscape-scale fishery in the Bolivian Amazon[J]. *Nature*, 2000, 408(6809): 190-193.
- [14] WOHL E. *Rivers in the Landscape*[M]. Hoboken, USA: Wiley Press, 2020.
- [15] POWER M E, DIETRICH W E, FINLAY J C. Dams and downstream aquatic biodiversity: Potential food web consequences of hydrologic and geomorphic change[J]. *Environmental Management*, 1996, 20(6): 887-895.
- [16] MCCLUNEY K E, POFF L R, PALMER M A, et al. Riverine macrosystems ecology: sensitivity, resistance, and resilience of whole river basins with human alterations[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2014, 12(1): 48-58.
- [17] PALMER M A, RICHARDSON D C. Provisioning services: focus on fresh water[M]. Princeton, USA: Princeton University Press, 2009.
- [18] STRAYER D L, DUDGEON D. Freshwater biodiversity conservation: recent progress and future challenges[J]. *Freshwater Science*, 2010, 29(1): 344-358.
- [19] FAUSCH K D, TORGERSEN C E, BAXTER C V, et al. Landscapes to riverscapes: bridging the gap between research and conservation of stream fishes[J]. *Bioscience*, 2002, 52(6): 483-498.
- [20] 李鸿源, 胡通哲. 河川廊道栖息地恢复: 理论与实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.
- [21] 曹文宣. 有关长江流域鱼类资源保护的几个问题[J]. *长江流域资源与环境*, 2008(2): 163-164.
- [22] 高天珩, 田辉伍, 叶超, 等. 长江上游珍稀特有鱼类国家级自然保护区干流段鱼类组成及其多样性[J]. *淡水渔业*, 2013, 43(2): 36-42.
- [23] 刘飞. 长江上游珍稀特有鱼类的最后庇护所[J]. *大自然*, 2014(2): 28-31.
- [24] 段辛斌, 田辉伍, 高天珩, 等. 金沙江一期工程蓄水前长江上游产漂流性卵鱼类产卵场现状[J]. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(8): 1358-1365.
- [25] 高天珩. 长江上游鮡亚科鱼类资源及生境选择策略研究[D]. 重庆: 西南大学, 2016.
- [26] 李倩. 长江上游保护区干流鱼类栖息地地貌及水文特征研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2013.
- [27] WANG H J, WANG P, XU C, et al. Can the "Ten-Year Fishing Ban" Rescue Biodiversity of the Yangtze River? [J]. *The Innovation*, 2022, 3(3): 9-10.
- [28] 中华人民共和国中央人民政府网. 国务院关于印发 2030 年前碳达峰行动方案的通知[EB/OL]. (2021-10-24) [2021-10-26]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content_5644984.htm.
- [29] TOCKNER K, UEHLINGER U, ROBINSON C T. *Rivers of Europe*[M]. Heidelberg, Germany: Academic Press, 2009.
- [30] PANDER J, GEIST J. Ecological indicators for stream restoration success[J]. *Ecological Indicators*, 2013, 30(1): 106-118.
- [31] GEIST J. Trends and directions in water quality and habitat management in the context of the European water framework directive[J]. *Fisheries*, 2014, 39(5): 219-220.
- [32] GEIST J. Seven steps towards improving freshwater conservation[J]. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 2015, 25(4): 447-453.
- [33] THORP J H, THOMS M C, DELONG M D. *The riverine ecosystem synthesis*[M]. Amsterdam, Netherlands: Academic Press/Elsevier, 2008.
- [34] 董哲仁. 论水生态系统五大生态要素特征[J]. *水利水电技术*, 2015, 46(6): 42-47.
- [35] SHAO X, FANG Y, JAWITZ J W, et al. River network connectivity and fish diversity[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 689(1): 21-30.
- [36] MEYER J L, STRAYER D L, WALLACE J B, et al. The

- contribution of headwater streams to biodiversity in river networks [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2007, 43 (1): 86-103.
- [37] GARCIA DE, LEANIZ C. Weir removal in salmonid streams; implications, challenges and practicalities [J]. *Hydrobiologia*, 2008, 609(1): 83-96.
- [38] MORAN E F, LOPEZ M C, MOORE N, et al. Sustainable hydropower in the 21st century [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115 (47): 11891-11898.
- [39] WAGNER B, HAUER C, HABERSACK H. Current hydropower developments in Europe [J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2019, 37(1): 41-49.
- [40] POHL M M. Bringing down our dams; trends in American dam removal rationales [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2002, 38(6): 1511-1519.
- [41] CHEN X, CHE X, LIU X, et al. Fish habitat restoration on the basis of water morphology simulation [J]. *Peer J*, 2022, 10: e13943.
- [42] SHUMAN J R. Environmental considerations for assessing dam removal alternatives for river restoration [J]. *Regulated Rivers: Research & Management*, 1995, 11(3/4): 249-261.
- [43] NODA K, HAMADA J, KIMURA M, et al. Debates over dam removal in Japan [J]. *Water and Environment Journal*, 2018, 32 (3): 446-452.
- [44] HART D D, JOHNSON T E, BUSHAW-NEWTON K L, et al. Dam Removal: Challenges and Opportunities for Ecological Research and River Restoration; We develop a risk assessment framework for understanding how potential responses to dam removal vary with dam and watershed characteristics, which can lead to more effective use of this restoration method [J]. *BioScience*, 2002, 52(8): 669-682.
- [45] IVERSEN T M, KRONVANG B, MADSEN B L, et al. Re-establishment of Danish streams; Restoration and maintenance measures [J]. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 1993, 3(2): 73-92.
- [46] STAGGS M, LYONS J, VISSER K. Habitat Restoration Following Dam Removal on the Milwaukee River at West Bend [R]. Wisconsin Department of Natural Resources, 1995.
- [47] MARKS J C, HADEN G A, O' NEILL M, et al. Effects of flow restoration and exotic species removal on recovery of native fish; lessons from a dam decommissioning [J]. *Restoration Ecology*, 2010, 18(6): 934-943.
- [48] RITCHIE A C, WARRICK J A, EAST A E, et al. Morphodynamic evolution following sediment release from the world's largest dam removal [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8 (1): 13279.
- [49] RATHBURN S L, WOHL E E. Mitigation of sedimentation hazards downstream from reservoirs [J]. *International Journal of Sediment Research*, 2003, 18(2): 97-106.
- [50] BECK R W. Condit Hydroelectric Project Removal; Summary Report Engineering Considerations [R]. Seattle: Pacificorp, 1998.
- [51] DADSWELL M J. The Removal of Edwards Dam, Kennebec River, Maine; Its Effects on the Restoration of Anadromous Fishes [R]. Maine: Draft Environmental Impact Statement, Kennebec River, 1996.
- [52] PICA J. Design of Nature-Like Fishways for Fish Passage; Bypass Channels and Rock Ramps; Concurrent Sessions A [C]. Oregon State University: International Conference on Engineering and Ecohydrology for Fish Passage, 2013.
- [53] POOLE G C. Stream hydrogeomorphology as a physical science basis for advances in stream ecology [J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 2010, 29(1): 12-25.
- [54] MUELLER M, PANDER J, GEIST J, et al. The ecological value of stream restoration measures; An evaluation on ecosystem and target species scales [J]. *Ecological Engineering*, 2014, 62: 129-139.
- [55] LU W, ARIAS FONT R, CHENG S, et al. Assessing the context and ecological effects of river restoration -A meta-analysis [J]. *Ecological Engineering*, 2019, 36: 30-37.
- [56] SCHMUTZ S, KREMSER H, MELCHERA, et al. Ecological effects of rehabilitation measures at the Austrian Danube; a meta-analysis of fish assemblages [J]. *Hydrobiologia*, 2014, 729(1): 49-60.
- [57] GEIST J. Integrative freshwater ecology and biodiversity conservation [J]. *Ecological Indicators*, 2011, 11(6): 1507-1516.
- [58] FISCHER J L, FILIP G P, ALFORD L K, et al. Supporting aquatic habitat remediation in the Detroit River through numerical simulation [J]. *Geomorphology*, 2020, 353(1): 107001.
- [59] RENÖFÄLT B M, LEJON A G, JONSSON M, et al. Long-term taxon-specific responses of macroinvertebrates to dam removal in a mid-sized Swedish stream [J]. *River Research & Applications*, 2013, 29(9): 1082-1089.
- [60] KONDOLF G M. Five elements for effective evaluation of stream restoration [J]. *Restoration ecology*. 1995, 3(2): 133-136.
- [61] 张俊, 车轩, 贾广臣, 等. 人工坝体对长江上游鱼类栖息地流域水动力学特性的影响 [J]. *农业工程学报*, 2021, 37(5): 140-146.
- [62] SUNDERMANN A, ANTONS C, CRON N, et al. Hydromorphological restoration of running waters; effects on benthic invertebrate assemblages [J]. *Freshwater Biology*, 2011, 56(8): 1689-1702.
- [63] PALMER M A, MENNINGER H L, BERNHARDT E S. River restoration, habitat heterogeneity and biodiversity; a failure of theory or practice? [J]. *Freshwater Biology*, 2009, 55(S1): 1-18.
- [64] PALMER M A, AMBROSE R F, POFF N L. Ecological theory and community restoration ecology [J]. *Restoration Ecology*, 1997, 5(4): 291-300.
- [65] SUNDERMANN A, STOLL S, HAASE P. River restoration success depends on the species pool of the immediate surroundings [J]. *Ecological Applications*, 2011, 21(6): 1962-1971.

- [66] STOLL S, KAIL J, LORENZ A W, et al. The importance of the regional species pool, ecological species traits and local habitat conditions for the colonization of restored river reaches by fish [J]. *PlosOne*, 2014, 9(1): 84741.
- [67] RAHEL F J. Homogenization of freshwater faunas [J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 2002, 33(1): 291-315.
- [68] ALBANESE B, ANGERMEIER P L, PETERSON J T. Does mobility explain variation in colonization and population recovery among stream fishes [J]. *Freshwater Biology* 54(7): 1444-1460.
- [69] STOLL S, SUNDERMANN A, LORENZ A W, et al. Small and impoverished regional species pools constrain colonisation of restored river reaches by fishes [J]. *Freshwater Biology*, 2013, 58(4): 664-674.
- [70] CHE X, LIU X G, ZHANG J. et al. Fish Habitat Reclamation Based on Geographical Morphology Heterogeneity in the Yangtze River and the Short-Term Effects on Fish Community Structure [J]. *Water*, 2022, 14(10): 1554.
- [71] MORENO-MATEOS D, POWER M E, COMIN F A, et al. Structural and functional loss in restored wetland ecosystems [J]. *PLoS Biology*, 2012, 10(1): 1001247.
- [72] PIMM S L. The complexity and stability of ecosystems [J]. *Nature*, 1984, 307(5949): 321-326.
- [73] MOUILLOT D, GRAHAM N A J, VILLÉGER S, et al. A functional approach reveals community responses to disturbances [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2013, 28(3): 167-177.
- [74] THEODOROPOULOS C, STAMOU A, VARDAKAS L, et al. River restoration is prone to failure unless pre-optimized within a mechanistic ecological framework | Insights from a model-based case study [J]. *Water Research*, 2020, 173(1): 115550.
- [75] STALNAKER C, LAMB B L, HENRIKSEN J, et al. The Instream Flow Incremental Methodology: A Primer for IFIM [R]. Washington, USA: Department of Interior National Biological Service Biological Report, 1995.
- [76] MAX R, ROBBIN B, SWARNENDU B, et al. Evasion of tipping in complex systems through spatial pattern formation [J]. *Science*, 2021, 374(6564): 0359.
- [77] DAKOS V, MATTHEWS B, HENDRY A, et al. Ecosystem tipping points in an evolving world [J]. *Nature Ecology & Evolution*, 2019, 3(3): 355-362.
- [78] VELDKAMP E, SCHMIDT M, POWERS J S, et al. Deforestation and reforestation impacts on soils in the tropics [J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2020, 1(11): 1-16.
- [79] CRAVEN D, EISENHAEUER N, PEARSE W D, et al. Multiple facets of biodiversity drive the diversity-stability relationship [J]. *Nature Ecology & Evolution*, 2018, 2(1): 1579-1587.

Study on the implementation approach of the Yangtze River Ecological Restoration Engineering in the context of "Carbon Neutralization"

CHE Xuan

(Fishery Machinery and Instrument Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences;
Research Center of Ecological Restoration of the Yangtze River Basin,
Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 200092, China)

Abstract: Engineering construction and economic development have a far-reaching impact on the Yangtze River ecosystem through cumulative effects such as habitat homogenization and habitat fragmentation. As feedback, the reduction of biodiversity is endangering ecological stability and the ecosystem service function, thus threatening human security. To achieve the goal of "Carbon Neutrality", hydropower projects in the upper reaches of the Yangtze River will be developed on a large scale in the next eight years. As a result, the challenges of ecological restoration will be more complex and severe. Ecological restoration and carbon neutralization are China's two major sustainable development goals. Coordinated water ecological security and green development of the Yangtze River economic belt are the goals of the government's efforts in recent years. Studying the ways to achieve them has become an urgent scientific problem to be solved. By reviewing the research progress in the fields of basic ecology, river engineering, conservation ecology, and ecological restoration dynamics, this paper proposed the "5R" path for the multi-scale implementation of the Yangtze River ecosystem restoration for the whole basin, which included "Reconnection, Restoration, Rehabilitation, Recovery and Rebalance".

Key words: Yangtze River ecosystem; ecological restoration project; fish habitat; implementation approach; Carbon Neutralization