

生态航道功能区划的理论框架与长江实践

杨威 陈兴潼 张先炳 杨胜发 李文杰 王伟栋

THEORETICAL FRAMEWORK OF FUNCTIONAL ZONING FOR ECOLOGICAL WATERWAYS AND ITS PRACTICE IN THE YANGTZE RIVER

YANG Wei, CHEN Xing-Tong, ZHANG Xian-Bing, YANG Sheng-Fa, LI Wen-Jie, WANG Wei-Dong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7541/2025.2024.0121>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于鱼类物种状况的长江生态环境质量评估

ECOLOGICAL ASSESSMENT OF THE YANGTZE RIVER ENVIRONMENT BASED ON FISH SPECIES RICHNESS

水生生物学报. 2021, 45(6): 1385–1389 <https://doi.org/10.7541/2021.2021.0269>

基于中华鲟繁殖群体数量的长江中、下游生态环境考核指标

ECOLOGICAL AND ENVIRONMENTAL ASSESSMENT INDEX IN THE MIDDLE-LOWER REACHES OF THE YANGTZE RIVER BASED ON THE SPAWNING POPULATION SIZE OF CHINESE STURGEON

水生生物学报. 2021, 45(6): 1396–1399 <https://doi.org/10.7541/2021.2021.0266>

长江生态考核指标: 基于被动声学监测的长江江豚数量

ECOLOGICAL ASSESSMENT INDICATOR OF THE YANGTZE RIVER: PASSIVE ACOUSTIC MONITORING BASED POPULATION SIZE OF THE YANGTZE FINLESS PORPOISE

水生生物学报. 2021, 45(6): 1390–1395 <https://doi.org/10.7541/2021.2021.0263>

长江江豚对孤立栖息地斑块利用规律研究及潜在因子分析

UTILIZATION PATTERN AND POTENTIAL FACTORS OF THE YANGTZE FINLESS PORPOISE IN AN ISOLATED HABITAT PATCH

水生生物学报. 2024, 48(10): 1633–1641 <https://doi.org/10.7541/2024.2023.0188>

基于协同发展的北方湿地公园生态修复技术研究——以琉璃河湿地公园为例

ECOLOGICAL RESTORATION TECHNOLOGY OF THE NORTHERN WETLAND PARK, —TAKE THE LIULI RIVER WETLAND PARK AS AN EXAMPLE

水生生物学报. 2022, 46(10): 1535–1545 <https://doi.org/10.7541/2022.2022.0150>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

生态航道功能区划的理论框架与长江实践

杨威^{1,2,3} 陈兴潼² 张先炳^{1,2,3} 杨胜发^{1,2,3} 李文杰^{1,2,3} 王玮栋^{3,4}

(1. 航道建设与生态保护重庆市重点实验室, 重庆 400074; 2. 重庆交通大学河海学院, 重庆 400074; 3. 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074; 4. 长江航道局, 重庆 400074)

摘要: 长江“生态航道”建设在支持区域经济发展、河流生态与航运效益协同方面具有重要意义, 同时也为全球河流治理的生态化转型提供了参考路径。文章系统回顾了“生态航道”理念的发展历程与长江流域的实践经验, 基于河流功能视角重新阐释了“航道”的概念, 提出其应被视为基于航运需求划定的功能区而非河流实体。结合长江航道整治的实践, 文章分析了当前建设中存在的生态措施缺乏系统性规划和评估体系的复杂化两个核心问题, 并从功能区划的科学性、技术体系的生态性和评估框架的高效性三个方面提出优化路径。文章提出, 通过强化航运功能与生态功能的动态平衡、优化功能区划与技术协同设计, 以及构建聚焦河流生态功能的精简评估体系, 可实现航运效益与生态保护的协调发展。文章为长江“生态航道”的可持续建设提供系统化理论依据, 并为国际河流航道生态化发展提供借鉴。

关键词: 生态航道; 航道整治; 河流生态功能; 栖息地; 生态评估体系

中图分类号: Q178.1; U612.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2025)06-062518-07



长江作为我国东西向经济大动脉, 不仅是贯穿东、中、西部的重要河流, 更是全球运输最繁忙、运量最大的天然航道^[1]。在长江经济带建设、“碳达峰”“碳中和”目标及长江大保护等国家战略的推动下, 长江航道建设正面临从传统高效航运向“生态优先、绿色发展”模式转型的重大需求^[2,3]。这一转型不仅决定着航运效率的持续提升, 还对区域生态系统保护和社会经济的协调发展提出了全新要求。

传统航道建设以提升通航能力为核心, 常通过炸礁、疏浚、修筑整治构筑物等方式大规模改造河流地貌。这种模式虽然在短期内显著改善了航运条件, 创造了显著经济效益, 但其对水生生物栖息地的破坏及河流生态系统的干扰问题逐渐显现^[4]。在“生态优先”和“绿色发展”理念的推动下, “生态航道”理念逐步发展, 成为应对航运开发与生态保护冲突的重要科学路径。与传统模式不同, “生态航道”在航道规划、设计、施工和维护的全生命周期

中嵌入生态保护理念, 倡导优化技术措施与管理机制, 以实现航运效益与生态保护的协调发展^[5,6]。

近年来, 基于“生态航道”理念的工程实践在长江流域取得了积极进展。例如, 南京段深水航道整治通过生态护坡和滩涂修复技术, 改善了航道整治与生态保护的兼容性; 武汉至安庆段通过生态鱼巢砖和透水框架等创新技术, 优化了水生生物栖息地的结构与功能; 朝天门至涪陵段则采用环保清礁等手段, 有效降低了对鱼类生境的干扰^[7-9]。这些实践表明, “生态航道”在兼顾生态保护和航运效率方面具备广阔的应用前景。然而, 在如何实现航运功能与生态功能的动态平衡、增强技术措施的协同性, 以及简化评估体系并提升其实用性等方面, 理论与实践之间仍存在一定脱节^[10-12]。如何系统化推广生态技术和管理机制, 依然是长江“生态航道”建设亟待破解的核心难题。

本文通过系统梳理长江“生态航道”建设的理

收稿日期: 2024-05-07; 修订日期: 2024-12-09

基金项目: 国家重点研发项目(2023YFB2604705和2024YFC3212500)资助 [Supported by the National Key Research and Development Program of China (2023YFB2604705 and 2024YFC3212500)]

作者简介: 杨威(1985—), 男, 副教授; 主要研究方向为航道建设与河流生态协同保护。E-mail: cqjtuyw@qq.com

通信作者: 张先炳(1985—), 男, 教授; 主要研究方向为流域水生态与鱼类资源保护。E-mail: zhangxb11@qq.com

论与实践进展,分析当前存在的主要问题,从河流功能视角重新阐释“生态航道”的内涵与定位,并提出未来发展的关键方向与研究建议。通过理论总结与实践启示,为长江航道的高质量发展提供科学依据,同时为国际河流航道生态化建设提供参考路径。

1 “生态航道”的认知与实践过程

“生态航道”作为一种新兴的航道建设理念,其发展历程反映了人类对河流生态系统价值认识的不断深化及技术手段的持续创新。

早期阶段,“生态航道”的理论基础主要围绕减少工程建设对河流生态环境的直接破坏展开。20世纪初期,受到工业化需求驱动,航道建设以满足航运功能为核心,对河流形态的干预较为粗放,工程活动对生态环境的影响也引起了一定争议。在这一背景下,德国提出的“近自然河流治理”理念和美国的“自然河道设计技术”逐渐被认可,这些技术主张通过减少混凝土使用和恢复自然形态来降低工程对河流的物理破坏^[10, 11]。这一阶段的研究主要关注河流形态改造与生态保护的平衡,推动了河流开发与环境保护的初步结合。但总体来看,其理论与实践仍停留在降低生态损失的层面,未能全面考虑河流生态服务功能的复杂性。

20世纪后期,“生态航道”的研究逐渐从“减少破坏”向“恢复功能”转变。随着生态学理论的深化,人类对河流生态系统整体服务功能的认识不断提高,研究者开始从更系统的角度探讨河流的生态功能。欧洲的“鲑鱼-2000计划”和美国的“密苏里河再自然化工程”成为典型案例,这些项目关注恢复河流的生物多样性、鱼类栖息地和水质等生态服务功能^[12]。这一阶段的理论和实践标志着“生态航道”从控制工程破坏向增强生态服务功能的转变,

为“生态航道”建设奠定了理论基础。然而,这一阶段的研究和实践更多地将航道视为河流整体的一部分,缺乏对航道功能定位的清晰认识,航运功能与生态功能之间的协调性问题逐渐显现。

进入21世纪,生态航道的理念逐渐从理论探索迈向系统化实践。随着全球可持续发展理念的普及,航道建设不仅需要满足航运需求,还需兼顾生态保护和效益^[13]。在这一背景下,我国在政策和技术两方面不断推动生态航道理念的深化与落地。2011年发布的《新理念——内河航道建设指南》成为生态航道发展的重要里程碑,提出了“多功能航道”的建设理念。这一理念强调航道建设需关注全生命周期的环境友好性,倡导施工组织的优化、施工时段与生态敏感期的适配,以及生态补偿机制的引入^[14]。与此同时,研究者进一步完善了生态航道的管理框架,提出通过强化工程管理、运营管控、跟踪监测和科学评价体系,以实现航道建设的规范化和科学化。

近年来,生态航道理念长江航道整治项目中得到应用,并通过创新的工程技术措施和材料开发,进一步推动了实践的深化(表 1)。例如,在长江中游武汉至安庆段航道整治中,通过采用透水框架和生态鱼巢砖技术,改善了生物栖息地的多样性和稳定性;在长江下游南京段,基于自然滩涂的保护和人工牡蛎礁生态系统的构建,成功实现了航道整治与生态保护的平衡^[7]。此外,国内还在技术创新方面不断推进,包括生态护坡、固滩、环保清礁等工程措施的实施^[15–19],以及新型环保材料(如砂性混凝土和无砂砼六角块)的研发^[20]。这些实践和技术创新不仅体现了生态航道理念的可操作性,也为河流生态系统的恢复提供了有效支撑。

当前,“生态航道”理念已从初期的生态修复与污染控制,发展为涵盖经济、环境与社会效益的综

表 1 “生态航道”理念下的航道整治工程实践

Tab. 1 Implementation of waterway regulation projects within the framework of “Ecological Waterway” concept

案例名称Case	工程技术措施Main characteristics and measures	生态效果Ecological effect
长江下游南京段12.5 m深水航道 ^[6]	淤积土吹填上滩形成陆域,保育自然滩涂,促进滩涂植被生长,筑建丁坝,抛填扭王字块	确保了长江口滩槽河势稳定,扩大了滩涂生态面积,增强了长江口深水航道及两侧滩槽格局稳定性 ^[21] ,并成功形成了人工牡蛎礁生态系统
长江中游武汉至安庆段航道 ^[7]	开展河流局部生态修复,实施生态护岸,建设湿地与生态涵养试验区,铺设透水框架和鱼巢等生态友好型结构	保证了河势稳定,提高了护岸绿化率,改善了滩面生境,透水框架与鱼巢排有助于底沙沉积和有机质富集,从而提供了更为稳定的鱼类栖息地 ^[22]
长江中游荆江河段航道 ^[23]	实施大面积生态固滩工程,设置深槽护底带、护滩(底)带、高滩守护带等,广泛采用透水框架和鱼巢砖等生态友好型结构	保障了浅水河槽及洲滩稳定,成功形成了良好的洲滩湿地,并被交通运输部评为“全国内河航道生态环保示范工程”
长江上游朝天门至涪陵段航道 ^[8]	采用环保清礁工艺清除碍航礁石,弃渣不再抛填于鱼类栖息的深潭,而是堆砌成水下浅梗以重新营造鱼类生境	成功营造4个适应长江上游鱼类的生境区,面积约100万m ² ,并增设了人工鱼礁,有利于底栖生物和底层鱼类的生态恢复 ^[24]
长江上游重庆至宜宾段航道(规划建设) ^[25]	拟结合航道疏浚工程修复历史采砂破坏的洲滩,建设鱼骨坝群并采用疏浚土回填固滩;清礁石料等将用于鱼类生境营造	旨在解决上游洲滩清水冲刷问题,通过回淤恢复原有滩貌、稳定河势并避免串沟,从而对洲滩的鱼类栖息地的恢复起到积极作用

合理论体系,逐步形成了包括理论研究、规划设计、工程实施、监测评估和管理维护在内的系统性框架^[12]。这一框架标志着生态航道理念逐步实现理论与实践的深度融合,充分展现了生态学理论在航道建设中的潜在价值。然而,随着理念的不断深化,航道功能定位的模糊性和多目标管理的复杂性逐渐显现^[26-28],前者导致航道建设规划与设计目标的统一性不足,而多目标管理的复杂性则增加了协调与实施的难度。这些问题为生态航道理念的优化与完善提出了新的课题。

2 长江“生态航道”面临的问题

当前,国内在生态理念融入航道规划、设计和维护过程中尚处于探索阶段,这种应用的不成熟性导致了对“生态航道”概念的偏差性理解。从交通运输的视角来看,航道(Waterway)或航槽(Navigation channel)通常被视为河流结构的一部分,因此“生态航道”常被等同于“生态河流”。在这一模式下,生态理念被直接引入航道建设中,工程设计倾向于叠加各种生态修复措施以维护或重建河流生态系统^[29-32]。然而,这种方法未能准确界定“航道”的功能定位,而是将其直接纳入多功能河流的框架,导致功能属性模糊、目标设定失衡,并在实践中引发了一系列问题,在长江“生态航道”建设中尤为突出^[33,34]。

生态措施的无序叠加已成为当前生态航道建设中的一个显著问题。在“能上尽上”的理念下,生态护坡、连通式鱼巢砖结构等技术手段被广泛应用。然而,这些措施的设计与应用缺乏系统性规划,忽视了不同措施间的协同性及其与整体生态目标的契合度。局部措施虽能在短期内改善生态环境,但因缺乏与整体目标的统一性,不仅难以实现预期效果,甚至可能破坏河流生态系统的动态平衡。此外,生态措施的长期效益评估也面临不足。现有监测工作多集中于施工完成后的短期阶段^[35],尚未建立系统化的动态反馈机制,难以全面反映措施的长期成效。这种局限性不仅削弱了技术改进的科学依据,也使资源投入难以充分转化为治理成效,进一步影响了“生态航道”建设的可持续发展。

评价体系的复杂化显著加剧了生态航道建设的实际挑战。为全面、客观地反映航运、泄洪、输沙、供水和生态保护等多维功能,研究人员尝试构建多目标评价体系,以期生态航道提供更综合的效益衡量标准^[36]。然而,随着实践推进,评价指标的种类和数量不断扩展,目前已涵盖生态系统干扰度、景观协调性、亲水性、服务丰富度等多达

20余项指标^[37]。指标的无序扩展与缺乏权重分配的标准化方法,显著增加了数据采集与分析的复杂性,同时削弱了评价结果的科学性和实际应用价值。复杂的指标体系未能为航道建设提供清晰的决策依据。管理人员在面对技术要求提高和指标内涵复杂化时,往往难以有效运用评价结果,从而进一步降低了评估体系的落地性和指导作用^[38]。评价体系未能实现设计初衷,反而在一定程度上限制了“生态航道”建设的效率与决策效果。

“生态航道”被直接纳入“多功能河流”的框架,导致“航道”功能界定模糊,目标设定分散。这种对“生态航道”本质的认识偏差直接引发了技术措施的无序叠加和评价体系的复杂化,严重制约了生态航道建设的整体效能。要实现理论与实践的深度融合,关键在于重新厘清航道与河流的功能关系。

3 “生态航道”的新视角

为有效解决传统航道管理中生态保护与航运开发的矛盾,亟需从功能区划的角度重新定义“航道”概念,厘清“航运”“航道整治”和“生态航道”在功能上的差异。本文的核心观点在于,“航道”是基于河流航运需求科学划定的功能区,而非河流实体的直接替代。这一视角从理论上明确了航道的功能属性,为航运与生态保护的协同提供依据。

具体而言,“航运”是河流生态系统服务的重要组成部分,指河流通过其自然形态和水力特性支持船舶通航的能力。“航道”是基于航运需求而划分的水域,并不必然意味着对河流形态的物理改造。在通航条件较好的河段,航道管理部门可通过水深、宽度和弯曲半径等参数划定适宜水域作为航道,并设置航标以规范船舶通行(图 1a)。这一划定方式不改变河流的自然特性,仅在船舶流量增加时可能对生态系统产生间接影响^[39]。例如,长江上游三峡库区航道在蓄水期通过提升水位改善通航条件,但其实际尺度仍限制在满足航运需求的范围内(如4.5 m×150 m×1000 m,航深×航宽×弯曲半径)。此时“航道”更接近于“航线”概念,体现了航道功能的区域化属性。此外,需要特别指出的是,在某些特殊情况下(如大雾或横风),航运功能的暂停并未对河流整体性能造成任何实质性影响。

相比之下,“生态功能”是指河流通过其形态和水力特性,维持水生生物多样性并促进栖息环境动态平衡的能力^[40]。河流复杂的地貌特征和多样化的形态为鱼类提供了产卵、洄游、觅食和越冬等生命活动所需的环境与资源,满足了其个体生命周期的基本需求。同时,河流生境的异质性塑造了独

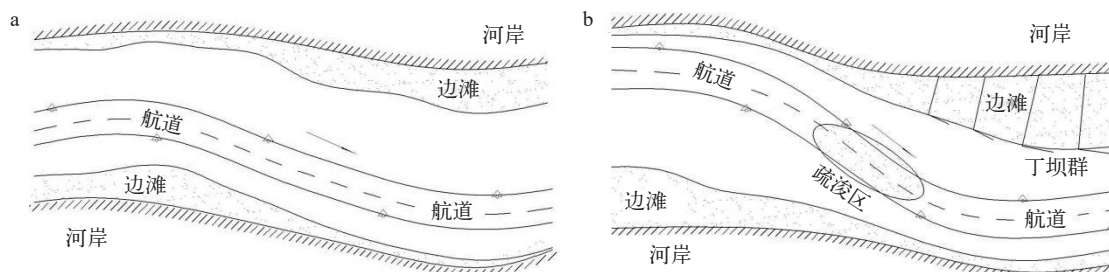


图1 航道设置未改变河流地貌和水力特征(a)及航道整治工程直接影响鱼类重要栖息地(b)

Fig. 1 The channel setting has not changed the topography and hydraulic characteristics of the river (a), and the waterway regulation project directly affects the important habitats of fish (b)

特的水动力和栖息条件,为鱼类群落创造了多样化的生态位,并在此基础上维持了群落结构的动态稳定^[41]。从这一视角出发,水生生物的重要栖息地构成了河流生态功能的核心支撑区域。例如,长江上游复杂的地貌形成了“鱼类三场”区域^[42],不仅满足了珍稀和特有鱼类的生存需求,还通过多样化生境支撑了区域生态系统的整体功能。

天然河道复杂的形态特征难以完全满足现代社会对高效航运的需求^[43]。为改善通航条件,航道整治工程成为常用的技术手段,主要通过建造整治构筑物、炸礁和疏浚等措施对河流形态和水力特性进行调整,以满足船舶通行对水深、宽度和流态的基本要求^[44—47]。这类工程的实施往往集中在航运功能区与生态功能区空间重叠的区域,其生态影响主要体现在对关键栖息地的破坏及水生生物群落结构的干扰。例如,整治构筑物(如丁坝群)的建设可能侵占卵石滩地等鱼类产卵场,永久性改变其地形和水文条件,从而削弱产卵场的生态功能;而疏浚工程则可能导致河槽区水体浑浊,破坏生境条件,进而影响鱼类洄游通道的连通性和群落的稳定性(图1b)。这些干扰不仅降低了水生生物重要栖息地的适宜性^[48—50],还削弱了其对河流生态功能的核心支撑作用,在更大尺度上可能进一步扰动河流生态系统的动态平衡。

因此,从河流功能的视角理解“生态航道”,广义上体现为航运功能开发与生态功能维持之间的动态平衡;狭义上则集中于航道整治过程中对水生生物重要栖息地的协同保护(图2)。这一理念不仅通过功能区划明确了航运开发与生态保护之间的协调关系,更在实践中为栖息地保护提供了科学路径。由此,“生态航道”作为航运与生态功能平衡的综合体现,为可持续发展的航道建设提供了理论依据与实践方向。

4 长江“生态航道”建设展望

根据前文对“生态航道”的认知与实践总结,以

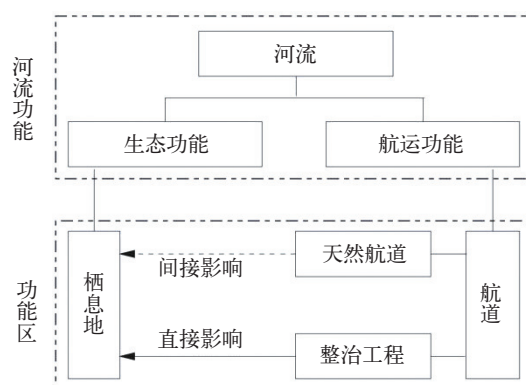


图2 河流的功能与功能区

Fig. 2 Functions and functional zones of rivers

及从河流功能的角度对其理解和阐述,未来长江“生态航道”建设的关键在于强化功能区划的科学性、技术体系的生态性和评估框架的高效性,以实现航运开发与生态保护的协调发展。以下是未来发展方向的核心关键问题:

在功能区划层面,需要进一步明确航运功能区与生态功能区的边界及动态关系。通过结合航运需求与生态敏感性空间叠加分析^[51],建立适配长江河段特性的分区规划体系^[52]。重点在于充分考虑洲滩、滩槽和深水区等重要区域的独特功能,并针对不同类型河段设计差异化的开发保护方案,以避免开发强度过高对生态系统的负面影响。从功能区划出发的保护理念需要在未来建设中得到深化。

在技术体系层面,生态友好型技术的进一步开发与应用是长江“生态航道”建设的核心方向。优化施工设计应以减少生态扰动为目标^[53],强调整治设计与栖息地保护的协同性。结合长江航道实践,可推广透水框架、生态护坡和环保清礁等技术,并探索基于生态恢复目标的创新性措施,以最大程度降低施工对河流生境的干扰,确保航运功能提升的同时实现生态效益最大化。

在评估体系层面,需要针对现有指标复杂性高、指导性弱的问题进行简化与优化。未来评估

框架应聚焦关键生态功能和核心指标,例如洄游通道连通性、栖息地适宜性和河流生态系统动态稳定性。在数据支持方面,可通过引入遥感监测和实时动态分析技术,加强工程效果的全流程评估能力。同时,评估体系需关注多目标之间的权衡关系,通过优化指标关联性,提高决策支撑能力,为长江航道的长期可持续发展提供科学依据。

总之,长江“生态航道”建设需要在理论与实践不断深化,从顶层设计的完善到工程技术的优化再到评估方法的革新,全面推进航运与生态保护的协调发展。这一方向不仅为长江航道的高质量发展奠定基础,也将为河流生态文明建设提供中国方案。(作者声明本文符合出版伦理要求)

参考文献:

- [1] Liu H H, Liu Q, Lei G P, *et al.* Research progress and prospect of ecological waterway technology in Yangtze River [J]. *Yangtze River*, 2020, **51**(1): 11-15. [刘怀汉, 刘奇, 雷国平, 等. 长江生态航道技术研究进展与展望 [J]. 人民长江, 2020, **51**(1): 11-15.]
- [2] Chen X J, Xu W, An H S. Transportation structure, market size and economic growth [J]. *The Journal of World Economy*, 2021, **44**(6): 72-96. [陈晓佳, 徐玮, 安虎森. 交通结构、市场规模与经济增长 [J]. 世界经济, 2021, **44**(6): 72-96.]
- [3] Jing M, Zheng W. Economic development advantages of low-carbon economy under waterway transportation [J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, **780**(6): 062029.
- [4] Li X T, Wang Y M, Liang R F, *et al.* A review and prospect for ecological integrity assessment of river systems [J]. *China Environmental Science*, 2024, **44**(4): 2256-2272. [李欣桐, 王远铭, 梁瑞峰, 等. 河流系统生态完整性评估的回顾与展望 [J]. 中国环境科学, 2024, **44**(4): 2256-2272.]
- [5] Li M, Liu Q. Study on theory and practice of ecological waterway construction [J]. *China Water Transport*, 2021, **21**(2): 80-82. [李明, 刘奇. 生态航道建设理论与实践研究 [J]. 中国水运(下半月), 2021, **21**(2): 80-82.]
- [6] Li P, Xue J, Xia W, *et al.* Health assessment of the waterway from Chongqing to Yibin in the Upper Yangtze River, China [J]. *Water*, 2022, **14**(19): 3007.
- [7] Lou F, Ji L, Li H, *et al.* Construction direction of planned ecological channel in the Yangtze River Estuary [J]. *Port & Waterway Engineering*, 2023(1): 75-81. [楼飞, 季岚, 李蕙, 等. 长江口规划生态航道建设方向研究 [J]. 水运工程, 2023(1): 75-81.]
- [8] Ye L J, Wang K, Liu S P, *et al.* Effect of ecological restoration on the Lianhuazhou port channel [J]. *Journal of Hydroecology*, 2023, **44**(5): 25-32. [叶丽娟, 王珂, 刘绍平, 等. 莲花洲港航道工程的生态修复效果初步研究 [J]. 水生态学杂志, 2023, **44**(5): 25-32.]
- [9] Zhu B H, Liu Z F, Du X W, *et al.* Evaluation of the maintenance and dredging effects and strategy optimization for zhajiao beach in the fluctuating backwater area of the Three Gorges Reservoir [J/OL]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 1-7 [2024-12-11]. [朱彬华, 刘作飞, 杜新文, 等. 三峡水库变动回水区渣角滩养护疏浚效果评估与策略优化 [J/OL]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 1-7 [2024-12-11].]
- [10] Pan B, Yuan J, Zhang X, *et al.* A review of ecological restoration techniques in fluvial rivers [J]. *International Journal of Sediment Research*, 2016, **31**(2): 110-119.
- [11] Li P, Li D, Sun X, *et al.* Application of ecological restoration technologies for the improvement of biodiversity and ecosystem in the river [J]. *Water*, 2022, **14**(9): 1402.
- [12] Wang Y X, Zhou J W. Overview of ecological inland waterway engineering [J]. *Port & Waterway Engineering*, 2022(9): 106-111. [王永兴, 周俊伟. 内河生态航道建设综述 [J]. 水运工程, 2022(9): 106-111.]
- [13] Anderson E P, Jackson S, Tharme R E, *et al.* Understanding rivers and their social relations: a critical step to advance environmental water management [J]. *WIREs Water*, 2019, **6**(6). DOI: [10.1002/wat2.1381](https://doi.org/10.1002/wat2.1381).
- [14] Wu C H, Ju M S. International experience of river ecological restoration and its enlightenment to the Yangtze River Protection [J]. *Water Resources Protection*, 2021, **37**(3): 136-144. [吴宸晖, 鞠茂森. 河流生态修复的国际经验及对长江大保护的启示 [J]. 水资源保护, 2021, **37**(3): 136-144.]
- [15] Jian L, Wang P, Wang M, *et al.* Experimental study on hydraulic characteristics of new ecological slope protection structure [J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2022, **40**(12): 1508-1519.
- [16] Liu M, Luo Y, Li F, *et al.* Experimental research on erosion characteristics of ecological slopes under the scouring of non-directional inflow [J]. *Sustainability*, 2023, **15**(20): 14688.
- [17] Yunping Y, Ming L, Wanli L, *et al.* Relationship between potential waterway depth improvement and evolution of the Jingjiang Reach of the Yangtze River in China [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2023, **33**(3): 547-575.
- [18] Liu L P, Huang J Y, Yu L, *et al.* Study on underwater dredging and reef cleaning construction technology of waterway regulation project below Longtoushan junction in Fengcheng, Ganjiang River [J]. *China Water Transport*, 2023(12): 83-86. [刘立平, 黄建宇, 喻龙, 等. 赣江丰城龙头山枢纽以下航段航道整治工程水下疏浚清礁施工工艺研究 [J]. 中国水运, 2023(12): 83-86.]
- [19] Li Y, Lu H W, Li K F, *et al.* Determination of ecological base flow process of mountainous rivers by taking into account the prenat's schizothoracin's spawning requirements. [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, **24**(5): 809-815. [李永, 卢红伟, 李克锋, 等. 考虑齐口裂腹鱼产卵需求的山区河流生态基流过程确定 [J]. 长江流域资源与环境, 2015, **24**(5): 809-815.]
- [20] Zhang X, Zhang X, Zhang Z, *et al.* Measures, methods and cases of river ecological restoration [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2023, **1038**(1): 012001.

- rence Series: Earth and Environmental Science, 2020, **601**(1): 012025.
- [21] Jun C, Fan Z. Beach and trough stability study of the Xiyang Sea area of Jiangsu Province [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, **304**(2): 022049.
- [22] Liu J, Yang Z, Li M, *et al.* Evaluating the concrete grade-control structures built by modified fish-nest bricks in the river restoration: a lab-based case study [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022(314): 115056.
- [23] Qu G, Zhao Z, Zheng C. Study on the stretching mechanism of the lower reach of the distribution estuary of Alluvial River after lateral by pass flow-taking Jingjiang reach of the Yangtze River as an example [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, **376**(1): 012050.
- [24] Kraufvelin P, Bergström L, Sundqvist F, *et al.* Rapid re-establishment of top-down control at a no-take artificial reef [J]. *Ambio*, 2023, **52**(3): 556-570.
- [25] Li J P, Xuan H, Wang X X, *et al.* Comprehensive evaluation on implement effect of ecological riverbank project in deepwaterway regulation of Yangtze River [J]. *Yangtze River*, 2022, **53**(10): 211-217. [李晋鹏, 宣昊, 王学霞, 等. 长江深水航道整治生态护岸工程实施效果综合评估 [J]. 人民长江, 2022, **53**(10): 211-217.]
- [26] Yan Z P. Development modes of water transportation economy of Changjiang River of Jiangxi Province [J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 2008, **26**(1): 37-39. [严忠平. 昌江水运经济发展模式探讨 [J]. 水利经济, 2008, **26**(1): 37-39.]
- [27] Yan D H, Dou P, Cui B S, *et al.* Theoretical frame work and key issue in ecological inland waterway construction. [J]. *Journal of Beijing Normal University* (Natural Science), 2018, **54**(6): 755-763. [严登华, 窦鹏, 崔保山, 等. 内河生态航道建设理论框架及关键问题 [J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2018, **54**(6): 755-763.]
- [28] Liu J W. Analysis on the development of ecological waterway in Yangtze River [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, **24**(S1): 9-14. [刘均卫. 长江生态航道发展探析 [J]. 长江流域资源与环境, 2015, **24**(S1): 9-14.]
- [29] Bączyk A, Wagner M, Okruszko T, *et al.* Influence of technical maintenance measures on ecological status of agricultural lowland rivers—Systematic review and implications for river management [J]. *Science of the Total Environment*, 2018(627): 189-199.
- [30] Li S. Channel regulation engineering plan for Reach in Xijiang River [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, **643**(1): 012119.
- [31] Liu P, Wang N, Lei X. Structural design of the waterway regulation project of Dongbei waterway in the lower reaches of Yangtze River [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, **283**(1): 012031.
- [32] Yang D L, Dou X P, Zhang X Z, *et al.* Hydrodynamic effect of the regulation project of Yangtze River deepwater channel downstream of Nanjing [J]. *China Ocean Engineering*, 2013, **27**(6): 767-779.
- [33] Liu N, Li T H, Kuang S Y. Ecological waterway assessment of Wuhan-Anqing reach of the Yangtze River [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2021, **57**(3): 489-495. [刘念, 李天宏, 匡舒雅. 长江中下游武安段生态航道评价 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 2021, **57**(3): 489-495.]
- [34] Zhu K X, Jiang M, Li L G, *et al.* Preliminary study on the evaluation index system of ecological waterway analytic hierarchy process [J]. *China Water Transportation* (Science & Technology for Waterway), 2016(2): 10-14. [朱孔贤, 蒋敏, 黎礼刚, 等. 生态航道层次分析评价指标体系初探 [J]. 中国水运 航道科技, 2016(2): 10-14.]
- [35] Skinner S, Addai A, Decker S, *et al.* The ecological success of river restoration in Newfoundland and Labrador, Canada: lessons learned [J]. *Ecology and Society*, 2023, **28**(3): art20.
- [36] Li W J, Li W M, Yang S F, *et al.* Connotation of waterway bearing capacity and its evaluation method-taking the Upper Yangtze River as an example [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University* (Natural Science), 2019, **38**(10): 74-80. [李文杰, 李伟明, 杨胜发, 等. 航道承载力内涵及评价方法研究——以长江上游航道为例 [J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2019, **38**(10): 74-80.]
- [37] Wang Y, Chen X, Borthwick A G L, *et al.* Sustainability of global golden inland waterways [J]. *Nature Communications*, 2020, **11**(1): 1553.
- [38] Ni J R, Liu H H, Gu Z P. Research and demonstration on regulation technology of “golden waterway” in the Yangtze River [J]. *Chinese Journal of Environmental Management*, 2017, **9**(6): 112-113. [倪晋仁, 刘怀汉, 谷祖鹏. 长江“黄金航道”整治技术与示范 [J]. 中国环境管理, 2017, **9**(6): 112-113.]
- [39] Spear M J, Harris B S, Bookout T A, *et al.* Reduction of large vessel traffic improves water quality and alters fish habitat-use throughout a large river [J]. *Science of the Total Environment*, 2024(946): 172705.
- [40] Wu J N, Wang G. Progress of research on river eco-functional zoning. [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2013, **44**(9): 25-30. [吴佳宁, 王刚. 河流生态功能区划研究进展 [J]. 水利水电技术, 2013, **44**(9): 25-30.]
- [41] Ni J R, Liu Y Y. Ecological rehabilitation of damaged river system [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, **37**(9): 1029-1037. [倪晋仁, 刘元元. 论河流生态修复 [J]. 水利学报, 2006, **37**(9): 1029-1037.]
- [42] Li M Z, Ma Q, Chen L, *et al.* Natural reproduction and hydrologic requirements of pelagophil fish in the Three Gorges Reservoir [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2019, **43**(S1): 84-96. [黎明政, 马琴, 陈林, 等. 三峡水库产漂流性卵鱼类繁殖现状及水文需求研究 [J]. 水生生物学报, 2019, **43**(S1): 84-96.]
- [43] Liu J H, Yang Z H, Liu Y, *et al.* Can the regulation of Golden Inland Waterways meet the needs of navigation,

- flood control, and ecology? A model-based case study [J]. *Ecological Engineering*, 2023(193): 106998.
- [44] Zhao Z Z, Zhao S Q, Xu G X. Analysis of navigation hindering characteristics and regulation principle of shoal group reaches of mountain rivers [J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2013(2): 39-44. [赵志舟, 赵世强, 许光祥. 山区河流滩群河段的碍航特征与整治原则分析 [J]. *水利水运工程学报*, 2013(2): 39-44.]
- [45] Jägerbrand A K, Brutemark A, Barthel Svedén J, *et al.* A review on the environmental impacts of shipping on aquatic and nearshore ecosystems [J]. *Science of the Total Environment*, 2019(695): 133637.
- [46] Que S, Luo H, Wang L, *et al.* Canonical correlation study on the relationship between shipping development and water environment of the Yangtze River [J]. *Sustainability*, 2020, 12(8): 3279.
- [47] Liu C, Xiong H, Huang W, *et al.* Influence of Waterway Dredging Engineering on Water Ecological Environment and Countermeasures [C]. Proceedings of the 2015 International Symposium on Material, Energy and Environment Engineering, 2015: 28-29.
- [48] Li F P, Zhang D C, Wang M, *et al.* Suitability assessment of fish habitat in the riverine section at Xulong Hydropower Station on Jinsha River [J]. *Journal of Hydroecology*, 2023, 44(6): 53-62. [李方平, 张登成, 王孟, 等. 金沙江旭龙水电站鱼类栖息地适宜性评价 [J]. *水生态学杂志*, 2023, 44(6): 53-62.]
- [49] Chen X, Liu S, Wang Y, *et al.* Restoration of a fish-attracting flow field downstream of a dam based on the swimming ability of endemic fishes: a case study in the Upper Yangtze River Basin [J]. *Journal of Environmental Management*, 2023(345): 118694.
- [50] Miró J M, Megina C, Donázar-Aramendía I, *et al.* Effects of maintenance dredging on the macrofauna of the water column in a turbid estuary [J]. *Science of the Total Environment*, 2022(806): 151304.
- [51] Wan Y, Huang G, Du H, *et al.* Effects of waterway regulation structures on the planktonic community in the Upper Yangtze River [J]. *Ecological Indicators*, 2023(155): 111049.
- [52] Wortley L, Hero J M, Howes M. Evaluating ecological restoration success: a review of the literature [J]. *Restoration Ecology*, 2013, 21(5): 537-543.
- [53] Diefenderfer H L, Johnson G E, Thom R M, *et al.* Evidence-based evaluation of the cumulative effects of ecosystem restoration [J]. *Ecosphere*, 2016, 7(3): e01242.

THEORETICAL FRAMEWORK OF FUNCTIONAL ZONING FOR ECOLOGICAL WATERWAYS AND ITS PRACTICE IN THE YANGTZE RIVER

YANG Wei^{1,2,3}, CHEN Xing-Tong², ZHANG Xian-Bing^{1,2,3}, YANG Sheng-Fa^{1,2,3}, LI Wen-Jie^{1,2,3} and WANG Wei-Dong^{3,4}

(1. Chongqing Key Laboratory of Ecological Waterways, Chongqing 400074, China; 2. School of River & Ocean, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 3. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing 400074, China; 4. Changjiang Waterway Bureau, Chongqing 400074, China)

Abstract: The construction of ecological waterways in the Yangtze River plays a pivotal role in fostering regional economic growth while harmonizing river ecology and navigation efficiency. It also serves as a valuable model for the global ecological transformation of river management. This paper systematically reviews the evolution of the ecological waterway concept and its practical implementation in the Yangtze River Basin. From a river functionality perspective, it redefines the “waterway” as a functional zone delineated based on navigation needs, rather than as a physical river entity. Building on insights from Yangtze River waterway regulation projects, the study identifies two primary challenges in current ecological waterway development: the lack of systematic planning for ecological measures and the complexity of evaluation frameworks. To address these issues, the paper proposes optimization strategies in three key areas: enhancing the scientific precision of functional zoning, integrating ecological principles into technical systems, and streamlining evaluation frameworks to focus on core ecological functions of rivers. By promoting a dynamic balance between navigation and ecological functions, refining zoning and technical coordination, and establishing concise and targeted assessment frameworks, the study highlights pathways to achieve a sustainable alignment of navigation efficiency and ecological preservation. This research provides a robust theoretical foundation for the sustainable development of ecological waterways in the Yangtze River and offers actionable insights for advancing ecological river management worldwide.

Key words: Ecological waterway; Waterway regulation; River ecological function; Habitat; Ecological assessment frameworks