



内河生态航道建设综述*

王永兴¹, 周俊伟²

(1. 广西壮族自治区港航发展中心, 广西 南宁 530029;

2. 交通运输部天津水运工程科学研究所, 天津 滨海新区 300456)

摘要: 内河生态航道建设有利于协调生态保护和航道工程的关系。新时期新形势下开展内河生态航道建设是水运行业践行生态优先绿色发展理念、谋求航道工程建设可持续发展的必然选择。在分析大量研究资料的基础上, 本文从内河生态航道建设理论框架出发, 系统论述国内外内河生态航道建设的相关理念、技术和发展前沿, 总结了我国内河生态航道的成绩和不足。结合国内内河生态航道建设现状, 提出下一步需要重点开展生态航道架构及评价方法、生态修复、生态航道影响与效应监测等方面的研究。

关键词: 内河航道; 生态航道; 技术现状; 可持续发展

中图分类号: U 611

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)09-0106-06

Overview of ecological inland waterway engineering

WANG Yong-xing¹, ZHOU Jun-wei²

(1. Guangxi Zhuang Autonomous Region Port and Shipping Development Center, Nanning 530029, China;

2. Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Ministry of Transport, Tianjin 300456, China)

Abstract: Promoting the construction of ecological inland waterways is conducive to a more balanced relationship between ecological protection and inland waterway engineering. Carrying out the project of ecological inland waterways in the new era is an inevitable choice for the water transportation industry to implement the concept of ecological priority and green development and to seek sustainable development of waterway engineering. On the basis of analyzing a large number of research materials, starting from the theoretical framework of ecological inland waterway construction, this paper systematically summarizes the relevant concepts, technologies, and development frontiers of ecological inland waterway construction at home and abroad. Furthermore, the paper also summarizes the achievements and shortcomings of ecological inland waterway construction in China. At the end of the paper, considering the status quo of domestic ecological inland waterway construction, it is proposed that the next step should focus on the research on ecological waterway structure and evaluation methods, ecological restoration, and ecological waterway impact and effect monitoring.

Keywords: inland waterway; ecological waterway; technology status; sustainable development

内河航运作为河流水资源综合利用的重要手段, 以其占地少、耗能低、污染小、成本低、运量大的优势, 在现代综合交通运输体系中具有不可替代的重要地位。但是传统的航道建设会对局

部河段河势及水沙、边界条件带来一定改变, 而对局部水生态带来不利影响^[1]。

新形势下, 进行内河生态航道建设是解决上述问题的有效方案^[2]。内河生态航道建设将传统

收稿日期: 2022-01-28

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFE0121000); 交通运输部天津水运工程科学研究所科研创新基金项目(TKS20220511); 广西重点研发计划项目(桂科 AB22035084)

作者简介: 王永兴(1971—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事航道建设管理与研究工作。

航道功能与河流自然生态功能协调统一,使河道在发挥航运基本功能的同时具有合理的生态系统结构、良好的整体景观效果和稳定的自我恢复能力^[3]。内河生态航道建设的核心是寻求内河航道建设与河湖生态系统之间的客观联系,确定响应关系,通过运用生态技术,开发航道整治新材料、新结构,合理规划工程设施布局等措施,实现航道建设与生态保护的协同发展。

欧美发达国家已逐渐发展形成“近自然河流治理”的观念,强调遵循河流生态系统的自然规律,注重航道建设与运行过程中的生态环境恢复与保护。中国学者就内河生态航道建设提出了植被固滩、开发生态护岸新结构、设计建设鱼道、开发替代生境等一系列具体措施。本文从内河生态航道建设的理论框架、生态航道工程调查与评价、内河生态航道设计与建设技术 3 个方面介绍内河生态航道建设,并结合内河生态航道建设的发展现状,对今后的研究工作提出展望。

1 内河生态航道建设理论框架

国内外内河生态航道建设是伴随着河流水环境治理和生态恢复展开的。国际上,西方国家在二战后工业急剧发展,城市规模不断扩大,导致河流严重污染,20 世纪 50 年代起,西方国家展开了以水污染控制为重点的河流水质恢复工作。至 80 年代初期,河流污染问题缓解,河流保护工作逐渐从改善水质转换到小型和山区河流的生态恢复,一些内河生态航道建设的理论框架相继提出:如德国、瑞士等国家提出的“近自然河流治理”理论,日本提出的“近自然工事”理论和美国开展的“自然河道设计技术”等。到 80 年代末期,发展出以单一物种恢复为标志的大型河流恢复工程,如欧洲莱茵河“鲑鱼-2000 计划”和美国“密苏里河再自然化工程”等。90 年代以来,发展为流域尺度的河流生态整体性恢复,例如“欧盟水框架指令”。

中国的内河航道生态建设理论起步较晚,随着河流管理逐渐从水污染治理到水生态修复转变,近年来得到了逐步发展和重视。唐涛等^[4]总结我国有关河流水质状况的研究主要借助化学手段,

指出河流生态系统健康理论及评价体系应成为河流管理的主要依据。董哲仁^[5]指出水利工程在满足人类社会需求的同时,应兼顾淡水生态系统健康与可持续性需求,首次提出“生态水工学”概念。王薇等^[6]认为我国河流生态修复的研究与实践多偏重于污染水体修复,注重水质改善,强调应加强河流生态系统结构和功能的修复研究。严登华等^[7]提出在内河生态航道建设中要对河流生态系统进行系统性、持续性监测。王俊仕^[8]则再一次强调内河生态航道建设需要按照航道安全、生态环境、水资源利用、航道文化、航道区域等多方面进行评价,建立相应指标,研究内河生态航道的等级划分。

目前,内河生态航道建设理论的初步框架已基本形成,包括理论研究、规划设计、工程措施、监测评估、管理维护和投资建设 6 个方面,见图 1。

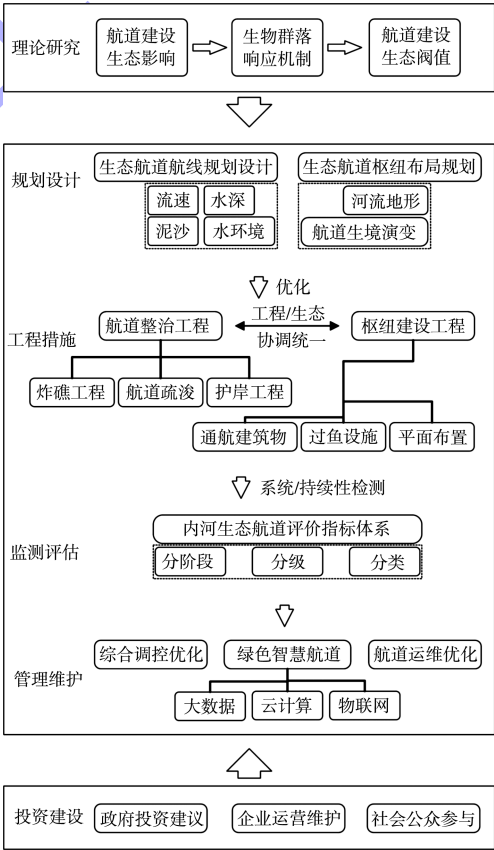


图 1 内河生态航道建设理论框架

2 生态航道工程调查与评价

2.1 航道工程生态调查

针对当前内河航道工程水生态环境影响、珍

稀濒危水生生物保护、生物入侵等生态环境问题，以环境生化指标和水生生物（底栖动物）为对象，逐渐形成从生态护岸到航道水体的水陆一体的航道生态系统调查监测方法^[9]。航道工程生态调查有助于全面掌握工程前、施工期、工程后的比较情况，观测点一般涵盖航道工程上游、工程结构关键位置、工程下游 3 个主要区域。监测内容包括：生物指标、生境指标、人为干扰指标、陆域生态现状指标、生态环境敏感性指标、水环境敏感目标等；相关的监测方法有：人工计数法、物理观测法、化学试验法等^[10]。

2.2 航道水生态模拟技术

数学模型方面，航道水生态模拟从航道水力模拟的基础上发展而来，在研究整治河段指示生物所需的生境因子（范围）的基础上，通过构建生境因子适宜度模型，模拟各生境参数的空间分布。近年来，关注流速适宜度、水深适宜度的二维水生态模拟方法已日趋成熟，新近的航道整治工程生态影响研究向温度适宜度、含沙量适宜度、底质适宜度等方向拓展，逐步从二维向三维模型发展，如航道三维水温结构模拟模型、三维水沙-生态动力学模型等。

物理模型方面，航道水生态模拟可分为水槽试验和缩尺试验^[11-12]。水槽试验边界条件简单，多用以研究特定生态构型的基本物理特性、受保护鱼类的行为学特征等，如研究生态护坡的抗冲刷能力、生态沟渠植被的局部水头损失系数、典型鱼类游泳特性等^[13-15]。缩尺试验根据研究区地形及河床特征建立正态模型，可准确模拟研究区流场分布，多用以特定河段的生态功能的评价和优化^[16]。缩尺物理模型结合栖息地适宜度指数、流速多样性指数等，可模拟不同来流条件下的生态特征分布^[17]。

2.3 航道工程影响评价

航道工程评价对象的类型有：渠化工程、整治工程、疏浚吹填工程、航道清礁工程等。不同类型航道工程引起的生态效应的广度具有很大的差异，如渠化枢纽工程生态效应涉及的范围较为

广泛，而整治工程、疏浚清礁工程生态效应的范围相对较小且历时短。

不同工程评价对象因规划目标和约束边界的不同而具有不同的生态功能要求，因此，相应的评价指标和标准应依据航道建设等级、建设阶段及河流生态功能分区的差异，分阶段、分对象构建。一般情况下，航道工程建设分为规划可研、工程设计和工程施工 3 个阶段；工程实施按类型可分为平面布置、渠化工程、整治工程、清礁工程、疏浚工程、设备工艺等内容。航道工程水生态指标体系见图 2。

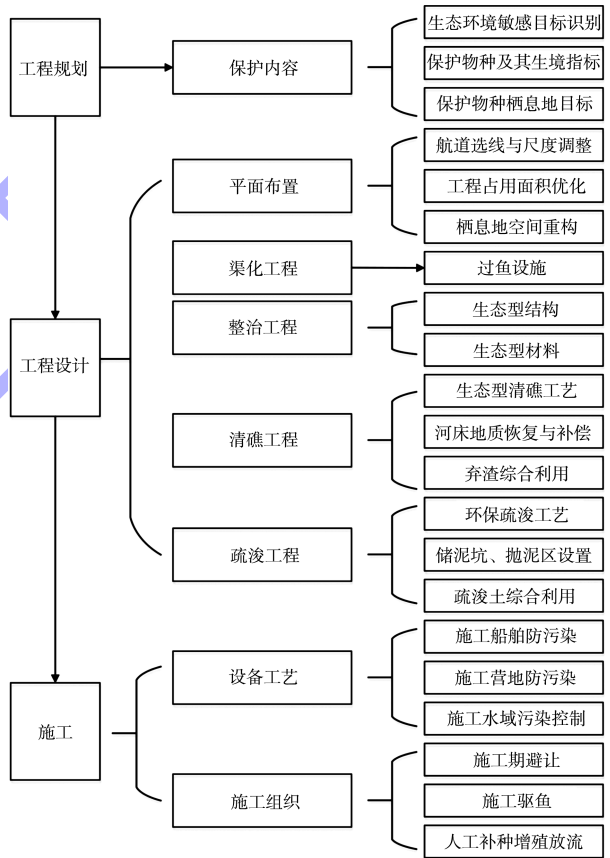


图 2 航道工程水生态指标体系

在航道工程水生态指标体系的基础上，航道工程影响评价需要进行量化评估。根据对评价指标间逻辑关系的理解和各项指标阈值的测定，建立评价数学模型或指标敏感性分析方法对评价结果进行分等定级，最终完成生态航道的量化评价。相应的等级数学模型有：线性等级模型、阶梯等级模型、梯形等级模型等。

3 内河生态航道设计与建设技术

3.1 生态岸坡整治新结构

生态岸坡整治新结构兼顾航道整治功能和河流生态修复保护功能，研究成果主要集中在各类鱼槽砖、生态岸坡材料、植被固滩构型等领域^[18]。与传统岸坡相比，生态型岸坡额外考虑结构自身透水性、多样流态营造能力、促淤和微生境营造方面的能力^[19]。其材料以天然竹、木、卵石、贝壳和石材等天然材料为主，或者采用生态型混凝土、防腐耐磨的镀高尔凡钢丝和其他可降解的人工材料等^[20]，这些材料有一定的透水性、易附着、可作为有机生长基质，有利于河滨带植物、底栖、浮游生物、鱼类等的生长和栖息。

目前，欧洲莱茵—美因—多瑙运河、中国长江、京杭运河等主要通航河流上已经应用了许多透空形、自带孔隙和孔洞的混凝土预制构件，或合金钢丝石笼网等适宜生物附着、隐蔽、繁殖产卵和具备植物生长基质的结构形式，在应用河段起到了积极效果，改善了河滨浅水生境。图 3 是德国斯普雷河上的板桩复合护岸。



图 3 德国斯普雷河板桩复合护岸

3.2 生态护滩(底)、生态坝体新结构

生态护滩(底)技术相比于传统硬质护滩结构，通过优化横断面布置、镂空混凝土块体结构、铺设大孔土工格栅等方式给植被留以充分生长空间，能有效保护滩地生态环境^[21]。相关研究主要集中在耐淹植物挑选、植物护滩结构设计、新型混凝土块结构设计等方面^[22]。其中，大孔土工格栅加十字连锁块压载护底的新型生态护滩结构在长江中下游航道整治工程中应用广泛^[23]。相比于传统刚性护滩结构，生态护滩结构坚固美观、对环境

影响小^[24]。采用生态型护滩能减少石材用量，降低施工成本，产生额外的经济效益。

生态坝体新结构的研究主要集中在大坝泄水消能降噪和对传统混凝土面板堆石坝面的生态化改造上^[25]。泄水降噪能显著降低航电枢纽泄水运行的噪声污染，促成水生态、人文、社会的进一步和谐。泄流结构优化设计、水工模型试验是实现大坝泄水降噪的主要研究手段。生态坝面改造技术主要用来改善传统的混凝土面板堆石坝坝面无土壤附着，植物、微生物生长条件差的现状，目前应用较广的方案有植生袋和固土种植 2 种^[26]。现有的生态坝坡技术能在保证大坝坝坡不变且不影响大坝主体结构安全、稳定性的前提下，实现传统混凝土坝与环境融合，但仍存在保水性较差、管护成本高的问题。

3.3 疏浚土资源化利用

疏浚土包括清礁工程产生的礁石碎渣和疏浚工程产生的疏浚泥。清礁工程产生的礁石碎渣是天然的石材，可用于河床底质恢复、边滩生态涵养区营造、局部流态改善和石笼充填料等方面。疏浚泥的资源化利用主要有 2 类：一类是利用疏浚土吹填造陆，为鸟类、野生动物营造岛、滩、湿地等的栖息场所，见图 4；另一类是以疏浚泥为主要原料制备人工块体，辅以机械力和水化等作用提高密实度和强度，通过添加纤维、减缩剂等提高强度，如何降低制备成本是这类研究的关键问题^[27]。

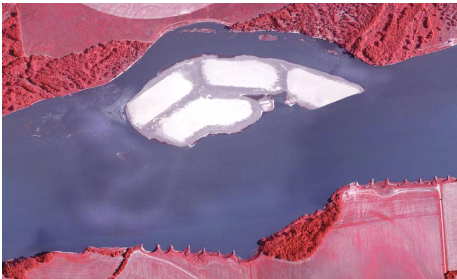


图 4 美国密苏里河疏浚土吹填造岛(滩)

3.4 鱼道与过鱼设施

航电枢纽阻隔水生生物洄游通道，给洄游型鱼类的繁衍造成了严重不利影响^[28]。鱼道与过鱼设施是恢复河流生物洄游通道的生态保护措施，

鱼类行为学研究是过鱼设施的设计基础。与过鱼设施相关的鱼类行为特征主要是鱼的游泳能力,指标包括感应流速、持续游泳速度、耐久游泳速度、临界游泳速度、突进游泳速度等。

过鱼设施按类型可分为:升鱼机、集运鱼移动平台、仿自然通道、竖缝鱼道等。将过鱼设施水力学特征与鱼类洄游行为特征相匹配是保障过鱼效率的关键,包括鱼道进口位置的选择、鱼道运行的流速、流量等。此外,近年来基于声、光、电技术开发的集鱼、诱鱼、驱鱼技术逐渐成为除过鱼通道水力环境优化以外的重要过鱼辅助手段。

3.5 内河生态航道设计与布局

内河生态航道设计与布局需要兼顾多目标如行洪、通航、生态、景观等的综合需求,结合河势和岸线的特点,因地制宜地从布局上制定工程方案,其本质是从规划阶段对河流行洪空间、生物栖息空间和航行空间进行合理配置。我国河流生态修复的研究与实践多偏重于污染水体的修复,注重水质的改善,而不强调河流生态系统结构、功能的修复,此类研究在我国实际应用仍较少^[29],相关设计与布局方式可学习欧美发达国家的经验。

图 5 是莱茵河上游的一段航道,德国卡尔斯鲁厄市通过在右侧河流凸岸 10 条整治丁坝群坝身上设置缺口,制造连线的过流通道,实现了坝田区破碎生境的连接,形成了近岸幼鱼洄游通道,扩大了坝田区鱼类栖息生境。这一布局同时满足了主航道 2 000 吨级单船和 4 000 吨级顶推船队的通航需求,以及坝田区鱼类、野鸭、天鹅的栖息需求,航道改善与栖息地保护相得益彰。



图 5 莱茵河德国卡尔斯鲁厄河段航道工程布局

图 6 是美国密西西比河上一种布置于航槽一侧的钝头 V 字坝。坝后可形成半封闭的静水区域,

为鱼类栖息提供庇护场地;坝后淤积水下浅滩,水深较浅,光照充足,水温适宜,利于水生植物生长。这类内河生态航道的设计主要是通过航道整治建筑物自身特点,改善局部流态,营造水域栖息空间,从而实现航道工程生态保护的目的。



图 6 美国密西西比河钝头 V 字坝

4 结论与建议

1)内河生态航道相关研究包括理论研究、规划设计、工程措施、监测评估、管理维护和投资建设 6 个方面,内河生态航道建设有利于传统航道功能与河流自然生态功能的协调统一。

2)近年来,国内对内河生态航道建设理论与技术积极探索,取得了一定进展,但生态航道建设技术水平还不适应航道扩能升级的需要,下一步需要重点开展生态航道架构及评价方法、生态整治新材料新结构、生态修复、生态航道影响与效应监测、工程效果评价和疏浚土资源化利用方面的理论与技术研究。

3)内河生态航道建设方兴未艾,代表着内河航道的发展趋势,下阶段应紧密跟踪生态航道技术前沿,主动谋划绿色航运发展规划,加强国内外生态航道前沿技术的交流与合作,提升生态航道建设水平。

参考文献:

[1] 陈振武,严军,蔡显赫,等. 长江干线生态航道建设探析[J]. 河南科学, 2021, 39(5): 789-794.

[2] 李海生,陈帆,李天威,等. 内河航道建设须兼顾流域生态保护[J]. 环境保护, 2013, 41(8): 34-36.

[3] 刘欣怡. 我国内河生态航道建设发展研究[J]. 工程技术研究, 2017(1): 249-250.

[4] 唐涛,蔡庆华,刘建康. 河流生态系统健康及其评价[J].

应用生态学报, 2002(9): 1191-1194.

[5] 董哲仁. 生态水利工程原理与技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社. 2007.

[6] 王薇, 李传奇. 河流廊道与生态修复[J]. 水利水电技术, 2003(9): 56-58.

[7] 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.

[8] 王俊仕. 内河生态航道建设理论框架及关键问题[J]. 珠江水运, 2020(15): 7-8.

[9] 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.

[10] 薛智博. 湖嘉申线湖州段生态航道建设实践研究[J]. 珠江水运, 2018(21): 90-91.

[11] 李健, 王平义, 付中敏, 等. 新型生态护坡结构物理模型动床试验研究[J]. 水运工程, 2022(2): 87-94.

[12] 董斌. 生态河道中植草护岸曼宁系数的研究[J]. 赤峰学院学报(自然科学版), 2014, 30(4): 50-51.

[13] JAMIESON E C, RENNIE C D, TOWNSEND R D. 3D flow and sediment dynamics in a laboratory channel bend with and without stream barbs[J]. Journal of hydraulic engineering, 2013, 139(2): 154-166.

[14] 陈冈, 马兆鹏, 程兴兴. 鲫鱼流水槽生态养殖试验研究[J]. 科学养鱼, 2022(3): 17-18.

[15] 张昱, 刘超, 吴文娟, 等. 生态沟渠淹没刚性植被局部水头损失系数研究[J]. 人民黄河, 2019, 41(2): 83-87.

[16] AZINFAR H, KELLS J A. Backwater prediction due to the blockage caused by a single, submerged spur dike in an open channel [J]. Journal of hydraulic engineering, 2008, 134(8): 1153-1157.

[17] MA D G, ZHOU J W, WANG Z H, Simulation of scour and deposition in the flow field and adaptability of fishes around eco-friendly notched groins [J]. Journal of hydrology, 2022, 609: 11.

[18] 雷国平. 长江生态航道建设关键技术需求研究[J]. 中国水运(航道科技), 2016(3): 14-19.

[19] 吴志龙, 阙得静, 汤建宏, 等. 运河航道开发过程中生态带建设技术方案[J]. 水运工程, 2021(10): 256-259.

[20] 郝敬东, 徐耀坤. 打造绿色黄金水道厚植经济发展优势: 关于加快汉江航道建设促进汉江生态经济带开放开发的思考[J]. 交通与港航, 2016, 3(6): 55-61, 72.

[21] 李军, 胡扬帆. 航道整治工程中的生态护滩技术[J]. 珠江水运, 2021(15): 36-37.

[22] 刘俏武, 张成荫. 生态护滩技术在航道整治工程中的应用研究[J]. 珠江水运, 2020(8): 71-72.

[23] 高成宾. 浅析生态护滩施工技术[J]. 机电信息, 2020(5): 60-61.

[24] 吴攀, 徐雪鸿, 陆彦, 等. 植物护滩结构在航道整治中的应用及生态效应[J]. 中国水运(下半月), 2021, 21(10): 58-60.

[25] 李凤滨, 范建强. 巴溪生态坝降噪方案水工模型试验[J]. 水利建设与管理, 2021, 41(4): 27-30.

[26] 晏长军, 曾旭. 生态坝坡在混凝土面板堆石坝中的应用[J]. 红水河, 2021, 40(4): 41-44, 48.

[27] 周成成, 李明. 兼顾生态固滩与疏浚弃土生态化利用的生态航道建设技术[J]. 水运工程, 2020(8): 141-145.

[28] 许鹏山, 许乐华. 甘肃省生态航道建设思考[J]. 水运工程, 2010(9): 87-91.

[29] 王卫东. 生态航道建设关键技术分析[J]. 南方农机, 2019, 50(9): 282.

(本文编辑 王传瑜)

(上接第 105 页)

参考文献:

[1] 陈明栋, 王多银, 杨斌, 等. 桥群河段通航条件关键技术研究[R]. 重庆: 重庆交通大学, 2011.

[2] 中华人民共和国交通运输部. 内河通航标准: GB 50139—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.

[3] 彭钜新. 跨河桥群通航标准的探讨[J]. 水运工程, 2008(3): 73-78.

[4] 彭钜新. 桥洞纵深长度等对通航净宽尺度的影响[J]. 交通标准化, 2003(8): 64-65.

[5] 陈明. 山区河流桥群河段桥梁跨度与间距对通航影响的研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2010.

[6] 林巧. 重庆菜园坝桥群河段桥梁间距与通航条件研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2010.

[7] 张有林, 陈明, 魏彭林, 等. 山区桥群河段桥梁间距与净跨关系研究[J]. 水运工程, 2016(4): 136-140, 147.

[8] 杨韵, 童思陈. 船舶操纵运动数值模拟在桥梁通航孔布设中的应用研究[J]. 水运工程, 2017(6): 139-143, 161.

(本文编辑 王传瑜)