

· 聚焦国家重点研发计划 ·

DOI:10.15961/j.jsuese.201700029

长江黄金航道整治技术研究构想与展望

刘怀汉¹, 杨胜发², 曹民雄³

(1. 长江航道局 国家内河航道整治工程技术研究中心, 湖北 武汉 430010;

2. 重庆交通大学 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074; 3. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210024)

摘 要:当前,长江黄金航道面临着长江三峡枢纽和上游水库群联合运行带来的水沙条件新变化,以及防洪、航运、发电、供水、生态等水资源综合利用的新需求,亟待深入认识新水沙条件下航道演变机理及发展趋势,科学评估航道承载力及提升潜力,系统研发水资源综合高效利用目标下的航道整治技术,有效促进航道整治与生态环境保护的协调融合。“长江黄金航道整治技术与示范项目”以提高航道通过能力,实现长江航道资源高效利用为目标,凝练了四大关键科学和技术问题:1)水沙变化条件下长江航道演变机理及发展趋势;2)长江重要生物-生境对航道整治工程的响应机制;3)多因素影响下长江航道滩群联动整治方法与技术;4)基于河流完整性的航道整治生境融入及再造技术。结合关键科学问题和技术内涵,提出五大重点研究内容:1)研究长江不同类型河段复杂动力过程与滩槽演变的相互作用机理,预测长江航道演变趋势;2)研究长江生态航道的架构及评价体系;3)评估多功能河流航道承载力及可提升潜力;4)研究多库联调下山区河流卵石滩群联动航道整治技术、防洪-通航协同下中游强冲刷河段航道整治技术、下游复杂多分汊河段航道滩槽调控技术、径潮流河段深水航道协调治理与减淤技术等;5)研究长江航道整治工程的生境融入及再造技术,构建生态友好型航道整治模式。最后,将五大重点研究内容细分为八大前沿研究方向:1)新水沙条件下长江航道演变机理及趋势预测;2)长江生态航道架构及评价方法体系;3)多目标协同下长江黄金航道承载力及提升潜力;4)多库联调下卵石滩群联动航道整治技术;5)防洪-通航协同下强冲刷河段航道整治技术;6)复杂多分汊河段航道滩槽调控技术;7)径潮流河段深水航道协调治理与减淤技术;8)长江典型生态保护段航道整治技术。基于以上内容,初步构建长江航道整治技术研究体系,以期为提高黄金航道通过能力提供理论基础和技术支撑。

关键词:长江黄金航道;整治技术;生态航道;航道承载力;研究构想与展望

中图分类号:TV133.1

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2017)02-0017-11

Advances in ‘Golden Waterway’ Regulation Technologies of the Yangtze River

LIU Huaihan¹, YANG Shengfa², CAO Minxiong³

(1. National Inland Waterway Regulation Eng. Research Center, Changjiang Waterway Bureau, Wuhan 430010, China;

2. National Inland Waterway Regulation Eng. Research Center, Chongqing Jiaotong Univ., Chongqing 400074, China;

3. Nanjing Hydraulic Research Inst., Nanjing 210024, China)

Abstract: At present, the ‘Golden Waterway’ of the Yangtze River confronts with new changes of flow and sediment conditions induced by integrated operation of the Three Gorges dam and its upstream reservoir groups. Meanwhile, there are new demands from flood risk management, navigation, electricity generation, water supply and ecology, etc. It is urgent to reveal mechanism of bed morphology evolution and predict its tendency, to develop methods for evaluating waterway capacity and potential, to develop novel waterway technologies satisfying demands of the integrated high efficiency utilization of water resources, and to merge waterway regulation and ecology protection. In the view of actual waterway situation, the project, aiming to enhance the transportation capacity of the Yangtze River and improve the water resources utilization efficiency, has condensed four key scientific issues: 1) mechanism of waterway evolution and its tendency

收稿日期:2016-12-29

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFC0402100)

作者简介:刘怀汉(1965—),男,教授级高级工程师,博士。研究方向:水沙科学;航道工程。E-mail:516930205@qq.com

网络出版时间:2017-01-25 11:36:23 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/51.1596.T.20170125.1136.002.html>

<http://jsuese.ijournals.cn> <http://jsuese.scu.edu.cn>

under variation condition of water and sediment;2) biology and habitat response to waterway regulation;3) theory and technology for shoals groups regulation of the Yangtze River under multi-factors;4) merge and rehabilitated technology of waterway regulation based on river completeness. Moreover, combining the connotation of the key scientific issues, five key research contents have been proposed:1) investigate complex dynamic process and interaction between channel and bar for different types reaches, and predict waterway evolution trend;2) build framework and evaluation system for ecologic waterway of the Yangtze River;3) evaluate waterway transportation capacity and its potential for the multi-function river;4) study on technologies for gravel bar groups interlocking in the mountain river under operation of multi-reservoirs, strong erosion in the middle Yangtze River with demands of both flood defense and navigation, channel and bar regulation featuring with multi-channel branches in the lower Yangtze River, coordination regulation and deposition mitigation in the reaches under influence of river and tidal;5) develop merging and rehabilitation technology of waterway in the Yangtze River, build framework for ecology-friendly waterway regulation. Finally, eight frontiers have been specified from the five key research contents:1) river evolution mechanism and trend prediction under new water and sediment condition;2) framework and evaluation system for ecological waterway in the Yangtze River;3) transportation capacity and potential of the golden Yangtze River with multi-targets;4) regulation technology of gravel bar groups interlocking under operation of multi-reservoirs;5) regulation technology for strong erosion reaches with demands of both flood defense and navigation;6) regulation technology for channel and bar regulation featuring with multi-channel branches;7) regulation technology for coordination regulation and deposition mitigation under influence of river and tidal;8) regulation technology for typical ecological protection reach in the Yangtze River. Thus, the research system of waterway regulation of the Yangtze River is initially constructed, aiming to provide a theoretical and technical foundation for enhancing the navigation capacity of the ‘Golden Waterway’ of the Yangtze River.

Key words: ‘Golden Waterway’ of the Yangtze River; regulation technologies; ecological waterway; waterway capacity; research plan and prospects

长江航道作为沟通中国东、中、西部地区的运输大动脉,是构建长江经济带综合立体交通走廊的主骨架,在航运方面具有独特优势和巨大发展潜力,在流域经济社会发展中的地位极其重要。本文系统梳理并总结了国内外在航道治理方面开展的大量科学研究和工程实践所取得的丰硕成果;认识到在面对长江三峡枢纽和上游水库群联合运行带来的水沙条件新变化,以及防洪、航运、发电、供水、生态等水资源综合利用新需求的情况下,亟待深入认识新水沙条件下航道演变机理与发展趋势,科学评估航道承载力及提升潜力,系统研发水资源综合高效利用目标下的航道整治技术,有效促进航道整治与生态环境保护的协调融合;分析并总结航道整治的总体研究状况、最新研究进展和未来发展趋势。

1 航道整治研究进展

1.1 新水沙条件引起航道水沙运动规律及演变趋势发生变化

水沙运动规律和航道演变特征是航道整治的理论基础之一。由于航道是河道的一部分,因此河流泥沙运动和演变特征研究成果同样适用于航道。有关河流泥沙运动和演变特征研究成果可参考相关文献^[1-5]。但是,河道和航道泥沙问题研究所关注的时间尺度和空间范围有所不同。对于航道水沙运动规律及航道演变而言,在关注来水来沙、边界条件、

河道形态、水沙输移、河段间关联性等对象的同时,重点关注航道内水沙运动规律和较小地貌形态之间相互作用、航道碍航特征分析和航道尺度变化。近年来,通过大量的科学研究和工程实践经验的总结,取得了山区河流非均匀沙推移质的运动特征^[6]、平原径流河流水沙输移特性及河床演变规律^[7]、河口高浊度河段航道泥沙回淤机理^[8]等不同类型河道水沙输移特性和河床演变的理论成果。然而,受长江三峡枢纽及上游水库群联合运行的影响,长江航道水沙条件和演变发生了深刻变化。具体表现为,长江上游山区河段水流呈现大变幅非恒定特性,水沙输移引起卵石滩群出现碍航新问题^[9-11];长江中游坝下河段出现河床普遍冲刷、坝下水位持续下降及滩槽稳定性下降的新情况^[12-25];长江下游多分汉河段的滩槽格局调整剧烈、航道条件难以长期稳定^[26-30];长江下游深水航道受径潮流双重作用,其建设与港口岸线利用、河势控导的协调难度加大,深水航道回淤量巨大^[31-32]。目前,对新水沙条件下长江航道滩槽演变与水沙条件变化的自适应动力学机制和演变趋势的认识尚不成熟。

在航道整治技术研究手段上,国内外主要有实测资料分析、数值模拟和实体模型试验等。基于实测资料可以初步分析判断原型航道演变规律及趋势,但由于水、沙、河床边界间相互作用的复杂性,单纯依靠实测资料定性研判从而开展航道整治,存在

一定风险。数值模拟具有周期短、成本低、能考虑多约束条件、多治理目标、便于方案比较和优化等优势,在航道整治研究中得到广泛应用。伴随着电子计算技术的进步,高精度高性能的数学模型得到了长足的发展。目前已经有很多比较成熟的1维模型,可用于模拟长时间长河段的水沙输移和河床变形过程^[12,33]。对于整治建筑物局部水流结构、泥沙运动和河床演变则需采用2维和3维模型。目前水流模型已发展比较成熟,但泥沙模型由于受到作为模型基础的水、沙、河床动力学自适应机制等的研究水平的限制,计算准确性还有待提高。实体模型试验是研究自然情况下及修建航道整治建筑物后预测水沙运动和航道演变的重要手段之一,特别对一些3维性较强的问题,理论计算困难较大,通过模型试验方法更为有效^[5]。目前实体模型试验已达到相对成熟阶段,被广泛应用于长江航道整治,但大时空尺度的相似理论仍不成熟,动床模型试验模拟方法仍需优化,在模型试验中应着重解决几何变态和时间变态带来的一系列问题。近期的研究重点为构建物理机制更加完善的长河段水沙数学模型。通过修正及改进卵石输沙模式、河床粗化模式、不同河型洪中枯期主流摆动模式及洲滩变形与水沙动力因子之间的关系,突破非恒定流条件下卵石推移质运动、强冲刷条件下洲滩变形、径-潮流共同作用下的滩槽演变的模拟难题。

1.2 航道承载力及提升潜力评估方法不明确

在航道承载力与可提升潜力研究方面,国内外都没有明确的概念和评估办法。在国外相关研究主要包括航运发展需求预测方法、通过能力计算、航运发展适应性等方面。在航运发展需求预测方法方面,主要包括时间序列、回归分析、灰色模型、弹性系数、神经网络和线性组合预测模型等方法;在航道通过能力方面,国内外计算公式比较多,主要有西德公式、波兰公式和排队论等。此外,计算机仿真技术也被运用到航道通过能力的计算研究之中。在航运发展适应性方面研究多集中在航运能力与区域经济适应性分析上。国内对水资源承载力的研究主要通过区域水资源与社会经济系统、生态环境系统之间关系的分析,研究区域水资源对人口、社会经济和生态环境支撑能力的指标,如可承载人口数、可承载经济发展规模、可承载污染排放物数量等;并研究了加强控制工农业用水量与工业污染治理,提高灌溉节水效率等对水资源承载力的影响。在航道可提升潜力研究方面,多侧重于通过分析航道通过能力与主要

影响因素的相互关系确定航道最大通过能力,如航道通过能力与社会经济发展、航道通过能力与水资源综合利用、航道通过能力与生态环境等相互关系^[34-36]。综上,航道承载力及可提升潜力研究主要体现在航道通过能力上,尽管目前能够在相对简单的条件下评估航道最大通过能力,但对航道承载力与水资源、经济、生态等多因素互适应影响机理的认识尚未明晰,对水资源综合利用下的航道承载力和可提升潜力的研究方法还不完善。因此,亟需创建多功能耦合的长江黄金航道承载力评价方法和体系;通过建立基于承载力评价体系的长江黄金航道承载力多目标耦合计算模型,综合评估长江黄金航道承载力时空动态变化,进而确定长江黄金航道在多目标协同下的提升潜力。

1.3 新水沙条件和多因素影响下的航道整治技术尚不成熟

在航道整治技术方面,国外对通航河流的治理主要采取梯级开发技术或河流渠化技术,取得了较好的效果^[34,37]。但中国的大江大河水沙量及其年内变化很大,河床演变剧烈,受人类活动影响巨大,通航条件复杂,国外的治理技术难以完全适用。经过多年的航道整治技术研究和整治工程实践,中国已初步形成了长江上、中、下游和径潮流等不同类型的单滩航道整治技术。针对长江上游航道日调节明显、卵石沙波运动剧烈等特征,研发了卵石滩群航槽控导技术,提出了卵石滩群关联关系分析和检测方法,创新了调整输移带和局部整治相结合的水沙调控技术,突破了卵石滩群协同控导技术^[9-11]。针对长江中游航道在三峡水库蓄水以来,由于清水下泄,坝下游河道发生长距离、长时段的沿程冲刷与河势调整等特征,提出适合新水沙条件下长江中游各典型河段的航道整治原则;形成了“固滩稳槽”航道整治技术^[12-25]。针对长江下游分汊河段主流摆动频繁,河势变化剧烈,主支汊周期性兴衰交替等特征,提出通航主汊道选择原则,建立了分汊河段通航主汊引导恢复技术^[27-30,38]。针对径潮流河段受径流和潮流的双重影响,江面展宽、多汊并存、沙细易动、演变复杂、整治工程规模大、技术难度高等特征,提出潮汐影响多汊河段航道整治滩槽总体控导技术^[31-32]。此外,在航道整治技术工程化应用过程中,中国经过多年的航道整治技术研究和整治工程实践,提出长河段航道整治原则和整治设计参数确定的方法,完善了分汊、弯曲、顺直等不同类型河段航道整治措施,研发出新型软体排、透水坝、透水框

架等系列的整治建筑物新结构,开发了复杂条件下航道整治典型工程新工艺与新装备,发明了复杂工况条件下软体排的施工工法,研制了内河航道首艘具有施工智能控制的 40 m 铺排船,初步形成了长江上中下游不同类型的单滩航道整治技术。尽管国内航道整治工程积累了不少成功经验,但针对新水沙条件和多因素影响下(防洪、发电、供水等)不同类型长河段航道滩群联动整治技术及航道整治建筑物结构型式的研究尚需系统深入的研究。

1.4 航道整治的生境融入技术需求日益增加

水沙运动及由此产生的河流演变是引起水环境与水生生态演化的重要参与者,目前在此领域的研究尚不成熟与完善,学科交叉中常见的碎片化现象十分明显。而近期的大规模水利工程建设导致河流生态与环境受到前所未有的影响,其变化过程及其最终结果要求必须开展水沙情势与生态环境长期累积的影响、河流物质通量对生态环境的交互作用机理等跨学科交叉研究,以适应当前社会面临的水环境、水生态问题研究需求^[33]。在生态航道建设方面,国外的相关研究主要体现在河流生态修复与生物评估方面,包括生态护岸、环保疏浚、疏浚泥沙利用、生境重建、河流系统健康等内容^[39]。国内除了关注河流生态修复和治理^[40]、航道生态环境监察与审核等方面外,还在一些城市河流及中小河流采用绿色生态护滩护岸结构,如近年来在长江沿岸采用的生态混凝土现浇网格、土工格栅、钢丝网石笼垫、加筋 3 维网垫等护滩护岸整治建筑物结构^[41-46]。国内外现有研究较少关注航道建设与河流生态系统功能的关系,对生态航道尚未形成共识^[46],主要表现在生态航道的定义及内涵不清晰,航道建设与生态功能的关系不清楚,生态航道评价指标体系不健全,生态型整治建筑物结构有待创新。因此,亟需构建生态航道建设总体构架及综合评价体系,构建生态航道基本概念体系、评价方法与治理技术体系,揭示新型航道整治建筑物生态效应机理,研发新型功能化生态建筑物,开发航道生态功能修复及生境营造技术。

2 长江黄金航道整治技术研究的学术思想

面对长江三峡枢纽和上游水库群联合运行带来的水沙条件新变化,以及防洪、航运、发电、供水、生态等水资源综合利用的新需求,初步凝练出四大关键科学问题,并提出五大重点研究内容和八大前沿研究方向,科学地构建长江黄金航道治理研究体系,从而提高长江黄金航道通过能力、实现水资源高

效开发利用提供支撑。

2.1 关键科学问题的凝练

1) 关键科学问题一:水沙变化条件下长江航道演变机理及发展趋势。

水沙变化条件下长江航道演变机理及发展趋势是进行航道整治的先决条件。探明新水沙条件下长江航道演变机理,揭示长江不同类型河段复杂动力过程与滩槽演变的相互作用机理,建立物理机制更加健全的数学模型,预测长江航道演变趋势,为长江黄金航道整治技术奠定理论基础。

2) 关键科学问题二:长江重要生物-生境对航道整治工程的响应机制。

长江黄金航道整治技术需要与防洪、航运、发电、供水、生态等协调发展,其中保护长江生态已经成为长江经济带发展的优先选项。目前,生态航道的建设正处于起步阶段,多功能河流生态航道评价方法体系尚不成熟。建立大型多功能河流生态航道评价方法体系、不同航道特征条件下工程建设生态环境保护监察与审核技术体系,制定河流物质通量变化下航道治理全过程生态保护与建设对策,为长江航道实现“绿色整治”提供理论支撑。

3) 关键科学问题三:多因素影响下长江航道滩群联动整治方法与技术。

受长江三峡枢纽及上游水库群联合运行的影响,长江航道水沙条件和演变发生了深刻变化。具体表现为:长江上游山区河段水流呈现大变幅非恒定特性,水沙输移引起卵石滩群出现碍航新问题;长江中游坝下河段出现河床普遍冲刷、坝下水位持续下降及滩槽稳定性下降的新情况;长江下游多分汊河段的滩槽格局调整剧烈,航道条件难以长期稳定;长江下游深水航道受径潮流双重作用,其建设与港口岸线利用、河势控导的协调难度加大,深水航道减淤技术仍不成熟。针对长江上游卵石河段,研发多库联调下山区河流卵石滩群联动航道整治技术;针对长江中游强冲刷段,研发防洪-通航协同下中游强冲刷河段航道整治技术;针对长江下游多分汊段,研发复杂多分汊河段航道滩槽调控技术;针对径潮流河段,研发径潮流河段深水航道协调治理与减淤技术。研发长江黄金航道滩群联动整治技术,可为提升长江干线航道通过能力提供技术支撑。

4) 关键科学问题四:基于河流完整性的航道生境融入及再造技术。

生态航道整治技术研究不全面、不深入,难以满足生态航道建设的需求。研究长江航道整治工程的

生境融入及再造技术,研发与生态协调发展的航道整治新技术,可为长江航道实现“绿色整治”提供重要依托。

2.2 重点研究内容

长江三峡枢纽和上游水库群联合运行带来的水沙条件新变化,以及防洪、航运、发电、供水、生态等水资源综合利用的新需求,对长江黄金航道治理提出重大挑战,围绕长江黄金航道整治技术研究四大关键问题,需要重点研究以下五方面的内容。

1)研究长江不同类型河段复杂动力过程与滩槽演变的相互作用机理,预测长江航道演变趋势。针对新水沙条件下长江航道整治的新需求,研究梯级水库群等重大工程综合作用下不同类型河段航道演变动力驱动因子的变化,揭示水沙变化条件下长江不同类型河段复杂动力过程与滩槽演变的相互作用机理,识别水沙过程改变对不同类型河段浅滩演变特性调整的驱动机制,构建适用于多库联调下山区卵石河床河段、强冲刷条件下冲积平原河段及径潮流共同作用河段、物理机制更加完善的长河段水沙数学模型,预测航道演变趋势。

2)研究长江生态航道的架构及评价体系。分析河流主要功能及其关系,提出生态航道系统架构,建立生态航道评价方法体系,进行长江生态航道评价;构建航道整治工程生态环境保护监测方法体系、典型河段环境监察与审核参照体系,建立黄金航道生态环境保护监察与审核技术体系;研究航道整治工程对河流全物质通量及航道整治工程对河流水文-生境的影响,提出航道治理全过程生态保护与建设对策。

3)评估多功能河流航道承载力及可提升潜力。研究长江航道承载力影响因素体系,界定航道承载力的内涵。研究长江航道承载力与航运、防洪、供水、生态环境、经济社会发展互适应机理。构建黄金航道承载力评价体系,提出评价指标,预测长江航道承载力。分析上、中、下游承载力关键制约条件,研究长江航道承载力动态变化和提升潜力。

4)研发多因素影响下长江航道滩群联动整治技术。在上游山区河段,研究非恒定流对船舶航行的影响,探讨坝下游航道整治线宽度公式;构建推移质造床力学模型;研究多因素影响下卵石滩群碍航特性;研究调整输移带和局部整治相结合的航槽水沙调控方法;研发卵石滩群协同控导技术。在中游强冲刷河段,研究防洪限制条件下航道整治参数的确定方法;研究强冲刷河道滩体生成发育模式及促

淤结构;研发防洪-通航协同下复杂河段洲滩守护与塑造技术、防洪限制下促淤技术、通航协同下典型急弯段滩槽控制技术。在下游径流分汊河段,研发多分汊河段滩槽调控复合模拟技术,提出多分汊河段航道最优滩槽格局调控航道整治建筑物可靠性评估方法,研发分汊河段滩槽调控技术,提出多汊通航条件下的航道整治水位和整治线宽度参数的确定方法;研发通航主汊道选取理论与技术,研究综合目标条件下最优滩槽形态,研究确定多分汊航道最优滩槽格局调控技术;研究多分汊河段航道整治建筑物稳定性,提出航道整治建筑物可靠性评估技术,研发多分汊河段航道整治建筑物新结构。在长江径潮河段,研究活动边滩治理关键技术;研究潮汐分汊河段河势受控特点及影响因素、潮汐分汊河段河势控导与航道条件响应,提出滩槽格局、航槽与河势稳定等整治目标下的整治措施、工程布置原则、布置形式等;研究复杂动力环境深水抛石落点预测和成堤形态控制方法,研发径潮流作用下深水抛石施工作业窗口预报技术,研究深水心滩潜堤服役寿命;研发径潮流复杂河段深水航道减淤技术,研究径潮流作用下复杂河段深水航道回淤影响因子,研究径潮流作用下深水航道减淤工程方案,研发基于疏浚施工组织管理的径潮河段深水航道减淤技术;研发径潮流河段深水航道高效节能疏浚装备。

5)长江航道整治工程的生境融入及再造技术与示范。研究典型生态保护河段水生生物和栖息地与航道治理互馈机制,探明典型生态保护段水生生物和栖息地特性,研究典型生态保护段航道演变与治理及其生态效应;研究长江上游山区河流航道整治典型生态结构关键技术,研发山区河流生态型堤坝结构,研究新型生态堤坝结构生态效应及航道整治效果;研发长江中游鹅头型弯曲分汊河段湿地保护与航道整治协调技术;研发长江下游典型(感潮)河段生境异质性提升关键技术,研发生境异质性提升护滩或堤身结构,研究新型航道整治护滩或堤身结构生态效应。

2.3 研究体系的构建

研究体系以提高航道通过能力,实现长江航道资源高效利用为导向,针对长江三峡枢纽和上游水库群联合运行带来的水沙条件新变化,以及防洪、航运、发电、供水、生态等水资源综合利用新需求,系统深入探索水沙变化条件下航道演变机理,探明多功能河流航道承载力及可提升潜力,并针对不同河段航道特点及约束条件,研发多目标协同下航道滩群联动整治技

术,突破与生境协调融合的航道整治技术的研究方案,形成长江“黄金航道”整治的成套技术。围绕长江黄金航道整治涉及的四大关键科学问题,将五大重点研究内容细分为长江“黄金航道”整治技术研究的八大前沿方向,主要包括:

- 1) 新水沙条件下长江航道演变机理及趋势预测;
- 2) 长江生态航道架构及评价方法体系;
- 3) 多目标协同下长江黄金航道承载力及提升潜力;
- 4) 多库联调下卵石滩群联动航道整治技术;
- 5) 防洪 - 通航协同下强冲刷河段航道整治技术;
- 6) 复杂多分汊河段航道滩槽调控技术;
- 7) 径潮流河段深水航道协调治理与减淤技术;
- 8) 长江典型生态保护段航道整治技术。

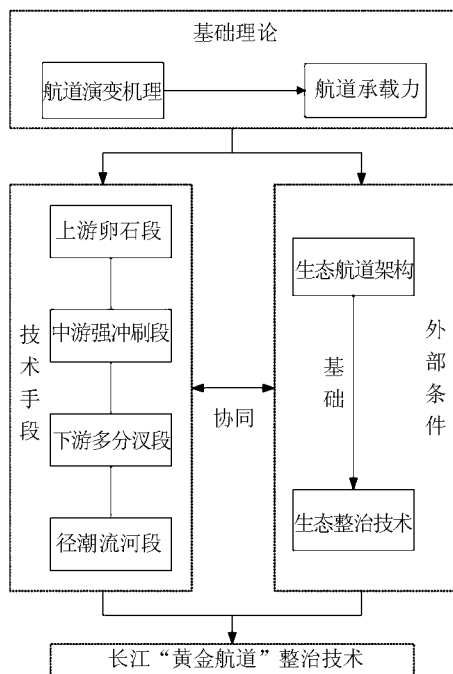


图1 长江黄金航道整治技术与示范项目研究体系

Fig.1 Research system of the ‘Golden Waterway’ regulation technologies of the Yangtze River

3 长江黄金航道整治的基础理论探索

针对长江三峡枢纽和上游水库群联合运行下航道演变与水沙动力的相互作用机制及其对水沙条件变化的自适应机理尚不清楚的问题,亟需探明新水沙条件下长江航道演变机理,揭示长江不同类型河段复杂动力过程与滩槽演变的相互作用机理,建立物理机制更加完善的数学模型,预测长江航道演变趋势,为长江黄金航道整治技术奠定理论基础。针

对航道承载力及提升潜力不明晰的问题,有待攻克航道承载力评估的理论难题,创建航道承载力评价体系,建立多目标耦合的航道承载力计算模型,探明多功能河流航道承载力及可提升潜力,为确定长江航道建设标准提供科学依据。

3.1 新水沙条件下长江航道演变机理及趋势预测

1) 梯级水库群等重大工程综合作用下长江航道演变驱动动力因子变化的研究。研究多库联调下山区卵石河床段航道演变驱动动力因子变化;研究三峡下游冲积平原河道航道演变驱动动力因子变化;研究径潮流作用下分汊河段航道演变驱动动力因子变化。

2) 多库联调下山区卵石河床段航道演变机理及趋势预测研究。研究泥沙补给与输沙能力双重限制下山区卵石河床段浅滩演变机理;研发山区卵石河床段航道演变过程数值模拟技术;预测山区卵石河床段航道趋势。

3) 强冲刷条件下冲积平原河道航道演变机理及趋势预测研究。研究近坝砂卵石河床段水位变化和航道演变机理;研究强冲刷条件下沙质河床段航道演变机理;研发强冲刷条件下滩槽剧烈变形的长河段水沙数值模拟技术;分析强冲刷条件下航道发展趋势。

4) 复杂分汊河段航道演变机理及趋势预测研究。研究复杂分汊河段滩槽冲淤调整及航道演变机理;研发分汊河段主流摆动及洲滩变形数值模拟技术;预测复杂分汊河段航道演变趋势。

5) 径潮流作用下分汊河段滩槽演变机理及航道演变趋势研究。研究径潮流作用下分汊河段滩槽演变机理与水沙输移的关系;研发径潮流作用下分汊河段滩槽演变数值模拟技术;预测径潮流作用下分汊河段演变趋势。

3.2 多目标协同下长江黄金航道承载力及提升潜力

1) 长江黄金航道承载力评价体系研究。

分析防洪、水资源及生态等对长江航道发展总体制约特征;研究长江航道承载力影响因素;研究长江航道承载力与航运、防洪、供水、生态环境、经济社会发展等互适影响机理;研究河流多功能耦合的长江黄金航道承载力评价体系。

2) 长江上游黄金航道承载力及提升潜力研究。分析山区河段航道承载力关键制约条件;研究长江上游航道承载力动态变化;研究多库联调下长江上游航道提升潜力。

3) 长江中游黄金航道承载力及提升潜力研究。

分析长江中游航道承载力关键制约条件;综合研究强冲刷情势下长江中游航道承载力;研究河道治理与航道整治协调下的长江中游航道提升潜力。

4) 长江下游黄金航道承载力及提升潜力研究。分析长江下游湖口至南京航道承载力关键制约条件;研究复杂多分汊河段航道承载力动态变化;研究生态保护与航道整治协调下的长江下游航道提升潜力。

4 长江黄金航道整治关键技术研发

受长江三峡枢纽及上游水库群联合运行的影响,长江航道水沙条件和演变发生了深刻变化。具体表现为:长江上游山区河段水流呈现大变幅非恒定特性,水沙输移引起卵石滩群出现碍航新问题;长江中游坝下河段出现河床普遍冲刷、坝下水位持续下降及滩槽稳定性下降的新情况;长江下游多分汊河段的滩槽格局调整剧烈,航道条件难以长期稳定;长江下游深水航道受径潮流双重作用,其建设与港口岸线利用、河势控导的协调难度加大,深水航道减淤技术仍不成熟。研发航道滩群联动整治技术,可为提升长江干线航道通过能力提供技术支撑。

4.1 多库联调下卵石滩群联动航道整治技术

针对多库联调下长江上游航道所面临的卵石滩群联动引起的碍航问题,揭示非恒定流特征参数与船舶安全航行响应机制,构建多尺度湍流结构推移质造床力学模式,获得卵石滩群碍航特性,提出卵石滩群协同控导整治技术,研发整治环保切礁装备,为实现长江上游航运、生态效益的协调发展提供技术支撑。研究内容包括:

1) 水富至重庆河段非恒定流下通航条件研究。分析坝下水富至重庆段水流流量、悬移质含沙量及推移质非恒定响应关系;确定多库(乌东德、白鹤滩、溪洛渡和向家坝等)联合调度运行水库泥沙淤积和出库非恒定水沙变化;提出满足通航安全的水位日变幅和小时变率等控制指标,探讨坝下游航道整治线宽度公式,分析非恒定流-航深影响作用;揭示非恒定流特征参数与船舶安全航行响应机制。

2) 多因素影响下卵石滩群碍航特性研究。构建多尺度湍流结构-卵石群体输移模式;分析卵石滩群联动引起的碍航特性;计算卵石滩群长时段卵石输移过程。

3) 卵石滩群协同控导整治技术。开展不同类型卵石滩群多水动力条件概化模型试验;研究卵石滩群在航道内适应性调整机制,提出调整输移带和

局部整治相结合的航槽水沙调控方法;研发卵石滩群多级整治建筑物协同控制技术,适用于日变幅4.5 m的非恒定流影响。

4) 长江上游航道整治环保切礁装备研发。研究磨料射流与机械刀齿联合破岩机理;揭示流-固耦合作用下岩体的损伤-裂隙演化规律;建立磨料射流联合机械刀齿流固耦合作用下破岩模型;集成环保切礁装备。

4.2 防洪-通航协同下强冲刷河段航道整治技术

针对三峡水库运行以来,坝下航槽演变新情况,提出防洪-通航协同下强冲刷河段的整治参数确定方法,形成复杂河段枯水位下降控制技术和滩槽控制技术,建立航道整治工程设计和施工信息化技术,并研制航道浚测一体化设备。研究内容主要包括:

1) 防洪-通航协同下航道整治参数确定方法研究。研究整治参数与整治强度的关联性;研究有效整治流量;防洪限制条件下航道整治参数确定方法。

2) 坝下砂卵石河段水位控制技术研究。研究流量补偿与枯水位变化动态关系;研究护底加糙结构型式;河床加糙结构分布研究及运用。

3) 防洪-通航协同下复杂河段洲滩守护与塑造技术研究。分析航槽稳定敏感性;研究强冲刷河道滩体生成发育模式及促淤结构;研发防洪限制下促淤技术。

4) 防洪-通航协同下典型急弯段滩槽控制技术研究。研究清水下泄条件下长江中游典型急弯河段水沙输移与河床演变机理,揭示该急弯河段水沙分布和滩槽演化互馈机制等;提出考虑不同控制性要素的典型急弯段滩槽控制技术。

5) 航道整治工程信息化技术及浚测设备研究。研究航道整治工程 BIM 项目应用导则;研究 BIM 模型与 GIS 平台的集成技术和内容标准;研究物模和数模方面的水沙环境动态成果,以及后期整治效果检验成果在 GIS 管控平台集成技术;研究航道浚测一体化装备。

4.3 复杂多分汊河段航道滩槽调控技术

针对新水沙条件下长江中下游多分汊河段存在的滩槽格局调整剧烈,通航河道交替时有发生,航道条件难以长期稳定的问题,建立河道稳定性评价理论方法,揭示多分汊河段平面形态成因;建立复杂分汊河段滩槽调整过程模拟预测、工程布置方案、工程效果评价一体化的复合模拟技术;提出滩槽调控整治建筑物适应性及耐久性评价方法;形成复杂多分

汉河段滩槽调控关键技术,并在长江中下游典型分汉河段开展应用示范。研究内容主要包括:

1)复杂分汉河段通航汉道稳定性评价及平面形态成因研究。研究多因素作用下分汉河段汉道交替机制;研究弯曲连接段-分汉段河流阻隔性特点及其传递效应;研究复杂多分汉河段主通航汉道稳定的平面形态成因。

2)多分汉河段航道滩槽调控复合模拟技术及整治参数研究。研发多分汉河段滩槽调控复合模拟技术;探索分汉河段滩槽格局调整的联动过程和关系;多汉通航条件下的航道整治水位和整治线宽度参数确定方法。

3)多分汉河段航道滩槽格局调控技术研究。研究通航主汉道选取理论与技术;研究综合目标条件下最优滩槽形态;研究多分汉河段航道最优滩槽格局调控技术。

4)滩槽调控航道整治建筑物适应性及耐久性研究。研究多分汉河段航道整治建筑物稳定性;研究航道整治建筑物可靠性评估技术;研究多分汉河段航道整治建筑物新结构;研究多分汉河段滩槽调控工程型式。

4.4 径潮流河段深水航道协调治理与减淤技术

针对长江下游河口段的特性,采用实测资料分析、数学模型、物理模型、现场监测、设备改造等方法,提出深水航道建设与港口岸线利用协调下的活动边滩治理、潮汐分汉河段深水航道建设与河势控导协调的综合治理、径流和潮汐交互作用下深水抛石成堤等3项技术,以及基于减淤工程措施、疏浚技术装备和施工组织管理的减淤技术方案。具体研究内容包括:

1)深水航道建设与港口岸线利用协调下活动边滩治理关键技术研究。研究径潮流河段活动性边滩的特性、成因与演化机理;研发活动边滩治理关键技术;

2)潮汐分汉河段深水航道建设与河势控导协调综合治理技术研究。研究潮汐分汉河段河势受控特点及影响因素;研究潮汐分汉河段河势控导与航道条件响应;研发深水航道建设与河势控导协调综合治理技术。

3)复杂动力环境深水抛石成堤技术及服役寿命研究。复杂动力环境深水抛石落点预测和成堤形态控制方法;研发径潮流作用深水抛石施工作业窗口预报技术;研究深水抛石心滩潜堤服役寿命。

4)径潮流复杂河段深水航道减淤技术研究。

研究径潮流作用下复杂河段深水航道回淤影响因素;开展泥沙特性机理试验;研究径潮流复杂河段深水航道减淤工程方案;基于疏浚施工组织管理的径潮流复杂河段深水航道减淤技术研究。

5)径潮流河段深水航道高效节能疏浚装备研究。研究耙吸挖泥船疏浚、输送装备;研发耙吸挖泥船疏浚作业智能优化与经济油耗控制技术;研究耙吸挖泥船动态监管与远程支持技术。

5 长江生态航道理论探索与技术研发

长江黄金航道整治技术需要与防洪、航运、发电、供水、生态等协调发展,其中保护长江生态已经成为长江经济带发展的优先选项。目前,生态航道的建设正处于起步阶段,多功能河流生态航道评价方法体系尚不成熟,生态航道整治技术研究不全面、不深入,难以满足生态航道建设需求。因此,构建长江生态航道架构体系和生态航道评价方法体系,研究长江航道整治工程的生境融入及再造技术,可为长江航道实现“绿色整治”提供重要依托。研究内容主要包括:

5.1 长江生态航道架构及评价方法体系

1)生态航道评价方法体系构建。建立生态航道架构;构建生态航道评价方法体系;开展长江生态航道评价。

2)黄金航道生态环境保护监察与审核技术体系。建立航道整治工程生态环境保护监测方法体系;构建典型河段环境监察与审核参照体系;形成航道整治工程生态环境保护监察与审核技术体系。

3)基于河流全物质通量的航道治理全过程生态保护与建设对策。研究航道整治工程对河流全物质通量的影响;研究航道整治工程对河流水文-生境的影响;制定航道治理全过程生态保护与建设对策。

5.2 长江典型生态保护段航道整治技术

为加强航道整治对长江生态环境的主动改善及保障长江典型生态保护段生态系统安全,应阐明航道整治工程对水沙、底质和地形变化的影响机制,分区域剖析重要生物资源、生物栖息地及湿地对航道整治工程的响应,揭示长江典型生态保护段航道整治的生态制约性,探索航道整治与生态环境协调机制及典型受损生境主动修复的原理和方法,研发同时兼顾航道工程功能与生态环境保护需要的生态型堤坝、护坡、护滩等航道整治成套技术,为生态航道建设提供科学依据。

1)典型生态保护段水生生物和栖息地与航道治理互馈机制。揭示典型生态保护段水生生物和栖息地特性;研究典型生态保护段航道演变与治理及其生态效应。

2)长江上游山区河流航道整治典型生态结构关键技术。研发山区河流生态型堤坝结构;研究新型生态堤坝结构航道整治效果;揭示新型航道整治堤坝结构生态效应。

3)长江中游鹅头型弯曲分汊河段湿地保护与航道整治协调技术。分析鹅头型弯曲分汊河段湿地保护与航道整治协调性;研究洲滩守护生态护坡结构稳定性;分析鹅头型弯曲分汊河段湿地保护与航道整治协调效果。

4)长江下游典型(感潮)河段生境异质性提升关键技术。研发生境异质性提升护滩或堤身结构;研究新型生态护滩或堤身结构航道整治效果;分析新型航道整治护滩或堤身结构生态效应。

6 结 论

面对长江三峡枢纽和上游水库群联合运行带来的水沙条件新变化,以及防洪、航运、发电、供水、生态等水资源综合利用的新需求,亟待深入认识新水沙条件下航道演变机理及发展趋势,科学评估航道承载力及提升潜力,系统研发水资源综合高效利用目标下的航道整治技术,有效促进航道整治与生态环境保护的协调融合。长江黄金航道整治与示范项目紧紧围绕长江航道建设所涉及的重大技术问题,在新水沙条件下长江航道演变机理、多功能河流航道承载力评价体系、多因素影响下的航道滩群联动整治技术、长江生态航道建设的关键技术等领域将取得一系列创新性成果,实现理论、方法、技术、装备的突破,并将在长江航道整治的设计、建设与维护实践中得到应用;为实现长江航道“深水化、生态化、标准化”提供重要技术支撑,提高长江黄金航道通过能力,实现水资源综合利用需求下的航道资源高效利用。

[致谢] “长江黄金航道整治技术与示范”项目(2016YFC0402100)属国家重点研发计划重点专项“水资源高效利用”。在中华人民共和国科学技术部的资助下,目前整个项目正处于理论研究和关键技术攻关阶段。感谢武汉大学陈立教授、长江勘测规划设计研究有限责任公司尹维清高级工程师、长江航道局李一兵研究员、黄召彪教授级高级工程师、天津水运工程科学研究院张明进研究员、南京水利科学研究院陆永军教高及项目所有参研人员的参与和支持。

参考文献:

- [1]倪晋仁,王光谦,张红武.固液两相流基本理论及其最新应用[M].北京:科学出版社,1991.
- [2]倪晋仁,王兆印,王光谦.江河泥沙灾害形成机理及其防治[M].北京:科学出版社,2008.
- [3]王光谦,胡春宏.泥沙研究进展[M].北京:中国水利水电出版社,2006.
- [4]王光谦.世界调水工程[M].北京:科学出版社,2009.
- [5]Wang Guangqian. Advances in river sediment research[J]. Journal of Sediment Research, 2007(2): 64-81. [王光谦.河流泥沙研究进展[J].泥沙研究, 2007(2): 64-81.]
- [6]杨胜发,高凯春,等.山区河流泥沙运动规律及航道整治技术研究[M].北京:科学出版社,2014.
- [7]刘怀汉,黄召彪,高凯春.长江中游荆江河段航道整治关键技术[M].北京:人民交通出版社,2015.
- [8]交通运输部长江口航道管理局.长江口深水航道治理工程实践与创新[M].北京:人民交通出版社,2015.
- [9]Liu Yong, Zhang Shuaishuai, He Le, et al. Channel planform and navigation-obstructing characteristics of gravel beach group in upper reaches of the Yangtze River[J]. Port & Waterway Engineering, 2016(1): 125-129. [刘勇,张帅帅,何乐,等.长江上游卵石滩群平面形态及碍航特性[J].水运工程, 2016(1): 125-129.]
- [10]Hu Zhenghong, Gan Fengyu, Liu Xingnian. Association analysis of gravel shoal group with tiny disturbance in mountain rivers [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2016(4): 680-687. [胡正红,甘丰余,刘兴年.山区河道卵石滩群小扰动关联度分析[J].应用基础与工程科学学报, 2016(4): 680-687.]
- [11]Zhao Zhizhou, Zhao Shiqiang, Xu Guangxiang. Analysis of obstruction features and regulation laws of beach groups reach in mountain river [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.]
- [12]Han Qiwei, He Mingmin. River scour downstream after construction of Three Gorges dam and its impact on flood defense [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 1995(3): 34-46. [韩其为,何明民.三峡水库修建后下游长江冲刷及其对防洪的影响[J].水力发电学报, 1995(3): 34-46.]
- [13]Sun Zhaohua, Huang Ying, Cao Qixin, et al. Spatial and temporal variations of the low flow stage in the immediate downstream reach of the Three Georges dam [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2015, 23(4): 694-704. [孙昭华,黄颖,曹绮欣,等.三峡近坝段枯水位降幅的时空分异性及成因[J].应用基础与工程科学学报, 2015, 23(4): 694-704.]
- [14]Yuan W, Yin D, Finlayson B, et al. Assessing the potential for change in the middle Yangtze River channel following impoundment of the Three Gorges Dam [J]. Geomorphology,

- 2012, 147: 27 – 34.
- [15] Liu Huaihan, Mao Changsheng, Li Ming. Navigation obstruction and countermeasures of Lujiahe waterway on the middle stream of the Yangtze River[J]. Port & Waterway Engineering, 2010(3): 112 – 116. [刘怀汉, 茆长胜, 李明. 长江中游芦家河水道碍航问题及治理对策[J]. 水运工程, 2010(3): 112 – 116.]
- [16] Gao Kaichun. Study on parameters of navigational channel regulation of the middle Yangtze River after impounding of Three Gorges reservoir[D]. Wuhan: Wuhan University, 2013. [高凯春. 三峡水库蓄水后长江中游航道整治参数确定方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2013.]
- [17] Liu Huaihan, He Mingxian. Impact of impoundment of the Three Gorges dam at 135 m on waterway of the middle Yangtze River[J]. Hydro-science and Engineering, 2003(1): 49 – 52. [刘怀汉, 何明宪. 三峡工程 135 m 蓄水运用对长江中游航道的影响[J]. 水利水运工程学报, 2003(1): 49 – 52.]
- [18] Tang Jinwu, Deng Jinyun, You Xinyin, et al. Critical width of flow returning channel in the middle Yangtze River waterway[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2012, 45(1): 16 – 20. [唐金武, 邓金运, 由星莹, 等. 长江中游航道的临界归槽河宽[J]. 武汉大学学报(工学版), 2012, 45(1): 16 – 20.]
- [19] He Chuanjin. Waterway regulation framework, countermeasures and effect of Jingjiang River in the middle of the Yangtze River[J]. Port & Waterway Engineering, 2012(10): 11 – 17. [何传金. 长江中游荆江河段航道治理思路、对策及初步成效[J]. 水运工程, 2012, (10): 11 – 17.]
- [20] Zhang Mingjin. Research on principles for channel regulation of the Jingjiang River channel improvement under new conditions of water and sediment[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014. [张明进. 新水沙条件下荆江河段航道整治工程适应性及原则研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.]
- [21] Mao Changsheng, Li Biao. Impact of water impoundment at later flood season of the Three Gorges dam on the middle Yangtze River waterway condition and suggestions for optimum operation[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2013(2): 139 – 143. [茆长胜, 李彪. 三峡水库汛末蓄水对长江中游航道条件影响及调度优化探讨[J]. 水道港口, 2013(2): 139 – 143.]
- [22] Li Cong, Deng Jinyun, Han Jianqiao. Variations of waterway design level of the middle Yangtze River after closure of the Three Gorges dam[J]. Port & Waterway Engineering, 2013(5): 88 – 93. [李聪, 邓金运, 韩剑桥. 三峡水库蓄水后长江中游航道设计水位变化研究[J]. 水运工程, 2013, (5): 88 – 93.]
- [23] Cheng Wei, Chen Li, Xu Wensheng, et al. Water stage and discharge relationship of the just lower reach of the Three Gorges dam after its closure[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2011, 44(4): 434 – 438. [程伟, 陈立, 许文盛, 等. 三峡水库蓄水后下游近坝段水位流量关系[J]. 武汉大学学报工学版, 2011, 44(4): 434 – 438.]
- [24] Xue Jun. Impact of operation of the Three Gorges dam on the maintenance of waterway in the middle Yangtze River[J]. China Water Transport, 2010(9): 32 – 34. [薛俊. 三峡工程蓄水运行对长江中游航道维护的影响[J]. 中国水运, 2010(9): 32 – 34.]
- [25] Wu Jiangpin. River evolution of waterway in the middle Yangtze River and analysis of maintain dredging plan after the closure of the Three Gorges dam[J]. China Water Transport, 2011(11): 44 – 45. [吴江平. 三峡蓄水后长江中游航道的演变及维护性疏浚方案分析[J]. 中国水运, 2011(11): 44 – 45.]
- [26] 李义天, 唐金武, 朱玲玲, 等. 长江中下游河道演变与航道整治[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [27] 刘万利, 朱玉德, 王建军, 等. 长江中下游分汉河段系统治理技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [28] Liu Wanli, Li Wangsheng, Li Yibing, et al. Navigable channel selection of typical braided reach in middle Yangtze River[J]. Port and Waterway Engineering, 2012(8): 141 – 144. [刘万利, 李旺生, 李一兵, 等. 长江中游典型微弯分汉河段择汉问题探讨[J]. 水运工程, 2012(8): 141 – 144.]
- [29] Li Qingyun, Tan Lunwu, Zhang Mingjin. Summary of waterway regulation of Dongliu reach in the lower Yangtze River[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2007(3): 169 – 172. [李青云, 谭伦武, 张明进. 长江下游东流水道航道整治经验总结[J]. 水道港口, 2007(3): 169 – 172.]
- [30] Lu Ying, Liu Qifeng, Liu Lin. River evolution and waterway regulation thoughts for the Anqing reach in the lower Yangtze River[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2012(6): 495 – 499. [陆英, 刘奇峰, 刘林. 长江下游安庆水道河床演变和航道整治思路[J]. 水道港口, 2012(6): 495 – 499.]
- [31] 南京水利科学研究院, 长江航道规划设计研究院, 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 等. 长江福姜沙、通州沙和白茆沙深水航道系统治理关键技术研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2014.
- [32] Xia Yunfeng, Cao Minxiong, Chen Xiongbo. Formation analysis and regulation plan for dredging channel of the Three Sand Shoals (Fujiang sand shoal, Tongzhou sand shoal and Baimao sand shoal) on the lower Yangtze River[J]. Journal of Sediment Research, 2001, 3: 57 – 61. [夏云峰, 曹民雄, 陈雄波. 长江下游三沙(福姜沙、通州沙、白茆沙)水道演变分析及深水航道整治设想[J]. 泥沙研究, 2001, 3: 57 – 61.]
- [33] 国家自然科学基金委员会, 中国科学院. 中国学科发展战略·水利科学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [34] 交通运输部长江航务管理局、长江航道局、交通运输部水运科学研究院等. 黄金水道通过能力提升技术总报告[R]. 南京: 南京水科院, 2015.

- [35] Jiao Yu, Kang Yutao, Yin Xiaobei, et al. Forecasting and early-warning model of port traffic resource carrying capacity [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2012 (2): 84 - 92. [焦宇, 康与涛, 尹小贝, 等. 港口交通资源承载力预测预警模型[J]. 交通运输工程学报, 2012(2): 84 - 92.]
- [36] Yang Shengfa, Li Wenjie, Hu Xiaoqing, et al. Research of sedimentation model and waterway transit capacity improvement in the Three Gorges Reservoir [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2016, 35 (S1): 41 - 48. [杨胜发, 李文杰, 胡小庆, 等. 三峡水库航道泥沙淤积模式及航道通过能力提升研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2016, 35(增刊1): 41 - 48.]
- [37] Cao Wenhong, Chen Dong. Sediment response and enlightenment from the Aswan High dam [J]. Journal of Sediment Research, 1998(4): 79 - 85. [曹文洪, 陈东. 阿斯旺大坝的泥沙效应及启示[J]. 泥沙研究, 1998(4): 79 - 85.]
- [38] Li Yuansheng. Goose-head variation characteristics of braided river and its control measures [J]. Port & Waterway Engineering, 2013(4): 113 - 116. [李元生. 鹅头型分汉河段变化特征及治理措施[J]. 水运工程, 2013(4): 113 - 116.]
- [39] Liu Huaihan, Lei Guoping, Yin Shuran, et al. Ecological measures and technology prospect for trunk waterway management in the Yangtze River [J]. Port & Waterway Engineering, 2016(1): 114 - 118. [刘怀汉, 雷国平, 尹书冉, 等. 长江干线航道治理生态措施及技术展望[J]. 水运工程, 2016(1): 114 - 118.]
- [40] Ni Jinren, Liu Yuanyuan. Ecological rehabilitation of damaged river system [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(9): 1029 - 1043. [倪晋仁, 刘元元. 论河流生态修复[J]. 水利学报, 2006, 37(9): 1029 - 1043.]
- [41] Ding Yonghe, Luo Yehui, Liu Xiaofei, et al. Application and research of theory based on ecological design in Yanhe waterway [J]. Port & Waterway Engineering, 2011(9): 151 - 156. [丁永和, 罗业辉, 刘晓飞, 等. 生态设计理念在盐河航道中的应用和研究[J]. 水运工程, 2011(9): 151 - 156.]
- [42] Ge Hongqun. Design of ecological revetment in Yangzhou channel segment of the Grand Canal [J]. Port & Waterway Engineering, 2010(5): 75 - 78. [葛红群. 京杭运河扬州段生态护岸设计[J]. 水运工程, 2010(5): 75 - 78.]
- [43] Deng Zhuozhi, Wu Dongmin. Ecological revetment protection technology for water body purification and beauty of landscape [J]. China Water Resources, 2009(21): 57 - 58. [邓卓智, 吴东敏. 提高水体净化和景观效果的生态护岸技术[J]. 中国水利, 2009(21): 57 - 58.]

- [44] Zhou Baojia, Dai Qiong, Zhao Shiyong, et al. Analysis of ecological protection of riverbank [J]. Water Sciences and Engineering technology, 2008(5): 7 - 10. [周宝佳, 代琼, 赵仕勇, 等. 河流生态护岸浅析[J]. 水科学与工程学报, 2008(5): 7 - 10.]
- [45] Huang Yilong. Ecological embankment in Japan and its application in Shenzhen [J]. China Rural Water and Hydropower, 2009(10): 111 - 121. [黄奕龙. 日本河流生态护岸技术及其对深圳的启示[J]. 中国农村水利水电, 2009(10): 111 - 121.]
- [46] 长江航道规划设计研究院, 长江航道局, 国家内河航道整治工程技术研究中心, 等. 长江中游荆江航道整治工程建筑物新结构及施工技术研发与应用[R]. 武汉: 长江航道规划设计研究院, 2016.



刘怀汉, 长江航道局教授级高级工程师。长期从事河流泥沙与航道工程专业技术工作, 主持十余项国家和省部级重大科技项目研究, 获各类咨询、设计、科技奖 30 余项, 其中荣获国家科技进步奖 1 项、省部级一等奖 12 项。出版学术专著 4 部, 发表了 100 余篇学术论文。获国家“百千万人才工程”人选, 交通运输部“十百千人才工程”第一层次人选, 国务院政府特殊津贴专家。



杨胜发, 重庆交通大学教授, 主要从事水沙动力学与航道治理研究。国家支撑计划课题以及国家重大工程科研项目 10 多项, 获 5 项省部级科技进步奖, 其中, 一等奖 2 项, 二等奖 3 项, 获授权专利 12 项, 发表论文 100 余篇 (SCI/EI: 20 篇)。



曹民雄, 南京水利科学研究院教授级高级工程师。长期致力于河流治理、航道整治和泥沙工程等科学研究, 主持完成水流与泥沙运动理论及模拟技术、航道治理与港口工程技术等十余项国家及行业科研项目。获 8 项省部级科技进步奖, 获授权专利 12 项, 发表论文 70 余篇, 出版学术专著 3 部。

(编辑 李轶楠)

引用格式: Liu Huaihan, Yang Shengfa, Cao Minxiong. Advances in 'Golden Waterway' regulation technologies of the Yangtze River [J]. Advanced Engineering Sciences, 2017, 49(2): 17 - 27. [刘怀汉, 杨胜发, 曹民雄. 长江黄金航道整治技术研究构想与展望[J]. 工程科学与技术, 2017, 49(2): 17 - 27.]