



东江中游采砂对航道整治的影响*

赵佳源¹, 张春泽^{1,2}, 谢灵运³, 胡俊杰⁴

(1. 重庆交通大学, 西南水运工程科学研究所, 重庆 400074; 2. 内河航道整治技术
交通行业重点实验室, 重庆 400074; 3. 重庆西科水运工程咨询中心, 重庆 400074;
4. 重庆市水利电力建筑勘测设计研究院 重庆 400010)

摘要: 东江中游横沥至沥口段航道连续出浅有待整治, 而该河段同时又承担采砂任务。为探究在航道扩能升级工程已实施背景下河段采挖砂工程的可行性, 采用深度积分水动力学数值试验, 研究航道整治方案和采砂规划同时实施后该河段水深、流速、水面线变化, 并结合反馈信息调整航道整治方案。结果表明: 在航道整治后实施采砂规划, 会直接导致上游水位单调下降以及水流归槽流态恶化等问题, 必须通过新一轮整治才能满足通航要求。整体来看, “十三五”采砂规划可以结合航道整治来实现, 但将来在保障航道运输能力的前提下, 东江河段已无规划采砂工程的客观条件。

关键词: 采砂; 航道整治; 数值模拟; 通航条件

中图分类号: U 617

文献标志码:

文章编号: 1002-4972(2021)06-0104-06

Influence of sand excavation on channel regulation in the middle reaches of the Dongjiang River

ZHAO Jia-yuan¹, ZHANG Chun-ze^{1,2}, XIE Ling-yun³, HU Jun-jie⁴

(1. Chongqing Southwestern Research Institute for Water Transport Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Key Laboratory of Inland Waterway Regulation Engineering of Ministry of Communications, PRC, Chongqing 400074, China;

3. Chongqing Xike Consultation Center for Water Transport, Chongqing 400074, China;

4. Chongqing Surveying and Design Institute of Water Resources, Electric Power and Architecture, Chongqing 400010, China)

Abstract: The channel from Hengli to Likou in the middle reaches of the Dongjiang River is continuously shallowing and needs to be regulated. Meanwhile, this section undertakes the task of sand mining. To explore the feasibility of sand mining in the river reach under the background of the implementation of waterway expansion and upgrading project, the depth integral hydrodynamics numerical experiment is used to study the changes in water depth, velocity, and water surface profile of the reach after the implementation of the channel improvement plan and the sand mining plan at the same time. Thus the regulation scheme is adjusted combined with feedback information. The results show that the implementation of sand mining planning after waterway regulation will directly lead to the monotonous decline of upstream water level and the deterioration of water flow in the channel. So a new round of regulation must be carried out to meet the navigation requirements. On the whole, the 13th five-year plan for sand mining can be realized in combination with waterway regulation. However, in the future, under the premise of ensuring the waterway transportation capacity of the channel, the Dongjiang River reach has no objective condition for planning sand mining projects.

Keywords: sand excavation; channel regulation; numerical simulation; navigation condition

收稿日期: 2020-08-24

*基金项目: 国家重庆研发计划项目(2016YFC0402003, 2016YFC0402004); 重庆市教育委员会科学技术研究项目(KJQN201800712); 重庆交通大学河海学院研究生科研创新(创新基金)项目(YC2020004)

作者简介: 赵佳源(1997—), 男, 硕士研究生, 从事航道整治研究。

通讯作者: 张春泽(1987—), 男, 博士, 高级工程师, 从事复杂三维流场数值模拟研究。E-mail: zhangchunze@whu.edu.cn。

近年来, 随着我国基础设施建设的高速发展, 河砂采挖量也相应大幅增加。大范围的超量采砂对所采河道的稳定性造成显著影响, 常使得承担航运任务的水道出现航槽易位、航深不足、流态变差、航行条件恶化等不利现象。因此准确把握不同程度河道采挖对航道条件的影响, 对科学调整航道整治方案有着重要意义。诸多学者就此展开了广泛研究^[1-6], 李顺超等^[7]通过二维水流数学模型, 对受挖砂采石影响的岷江下游不同滩段从通航水流条件、挖槽稳定性以及船舶自航上滩等方面出发, 提出了有针对性的整治方案; 杨建东等^[8]研究采砂施工对船舶通航要求, 提出了采砂平面布置和局部河段设置航道优化调整方案。

珠江三角洲的东江流域, 为支持区域内基建工程高速发展承担着大量的采砂任务; 同时又因流域内社会经济快速发展, 其航运承载能力还需相应提高。然而, 在生产实践过程中, 采砂与保障航运往往存在一定的不相容性, 需要通过科学的方法寻找二者发展的平衡点。鉴于此, 本文针对东江中游河段建立了深度积分浅水数学模型。模拟航道整治工程与规划采砂工程同时开展后航道航深、水流流态、航道水面线的变化; 结合水动力信息反馈结果, 动态调整航道整治方案、提出合理采挖建议, 为后续统筹结合航道整治工程

进行采挖砂工程项目提供借鉴经验。

1 工程概况

1.1 河道概况

东江系珠江水系干流之一, 其中下游段已建成连续梯级, 仅游剑潭库尾横沥镇上溯至沥口约50 km 河道目前仍处于天然状态。该河段目前航道等级为内河V级。河段内多为平原冲积性浅滩, 枯水期流域内芦洲、砂梨园、鹅塘洲以及瘦狗龙等浅滩段等都存在航深不足问题, 且浅滩分布密集、单滩持续距离长, 航槽内最小水深仅0.5 m, 严重制约航运发展。

1.2 航道扩能升级规划

根据《广东省航道“十三五”建设规划》, 拟将研究河段航道等级提升为Ⅲ级, 相应设计尺度为2.5 m×60 m×480 m, 通航保证率95%。

1.3 河道采挖砂规划

根据《东江干流惠州河段采砂控制规划报告(2016—2020年)》, 规划在东江河段布置多处采砂区域, 该研究河段内主要有泸州、鹅塘洲、瘦狗龙共3处采挖砂区域, 采砂区总长12.8 km, 规划采砂总量为238万m³, 平均采砂宽度100~150 m, 主要布置于河床主槽内, 开挖方式为在挖砂规划区域内垂直向下开挖, 采砂区域布置与具体参数见图1、表1。

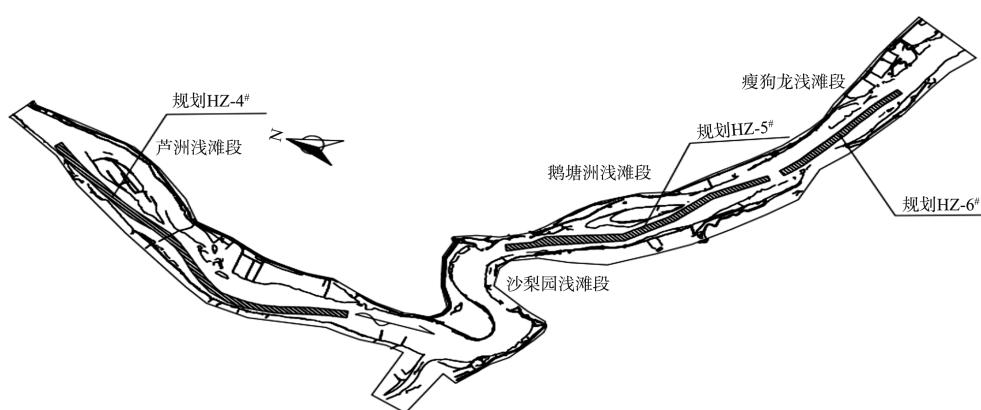


图1 研究河段河势图与采砂布置方案

表 1 河段采砂区域参数

滩段名称	采砂区	采砂长度/km	采砂平均宽度/m	规划采砂量/万 m ³	平均采挖深度/m
芦洲	HZ-4 [#]	6.3	115	117	1.62
鹅塘洲	HZ-5 [#]	4.0	150	96	1.60
瘦狗龙	HZ-6 [#]	2.5	100	25	1.00

2 数学模型与验证

2.1 控制方程

水流连续方程为:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

动量方程为:

$$h \frac{\partial u}{\partial t} + hu \frac{\partial u}{\partial x} + hv \frac{\partial u}{\partial y} = -gh \frac{\partial(h+z_b)}{\partial x} +$$

$$\frac{h}{\rho} \left(\varepsilon_{xx} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \varepsilon_{yx} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + (\tau_{sx} - \tau_{bx}) + fp \quad (2)$$

$$h \frac{\partial v}{\partial t} + hu \frac{\partial v}{\partial x} + hv \frac{\partial v}{\partial y} = -gh \frac{\partial(h+z_b)}{\partial y} +$$

$$\frac{h}{\rho} \left(\varepsilon_{yx} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \varepsilon_{yy} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + (\tau_{sy} - \tau_{by}) + fq \quad (3)$$

式中: h 为水深; u 和 v 分别为 x 和 y 方向流速; t 为时间; g 为重力加速度; z_b 为床面高程; ρ 为水密度; τ_{sx} 和 τ_{sy} 为表面切应力的 x 和 y 方向分量; τ_{bx} 和 τ_{by} 为底部切应力的 x 和 y 方向分量; ε_{ij} 为涡黏系数; f 为科氏力系数; p 和 q 分别为 x 和 y 方向单宽流量。

2.2 模型范围和网格尺寸

根据 2017 年实测江床地形建立数学模型, 计算河段上起芦洲浅滩, 下至瘦狗龙浅滩, 全长约 15.3 km, 模型采用非结构化三角形网格, 同时, 为适应河道现状以及整治方案的布置, 提高航道整治计算精度, 在丁坝、规划航槽附近网格进行局部加密, 基础网格数合计 2.3×10^5 个。

2.3 参数率定

根据水面线及流速实测资料对研究河段糙率进行率定。主槽内糙率取值范围为 0.025~0.030, 浅滩或者丁坝区糙率取值范围为 0.035~0.050。

2.4 模型验证

采用当年实测水位对模型进行验证。计算水面线与实测水面线水位最大偏差小于 0.10 m, 见

图 2。流速分布趋势大致相同, 见图 3。

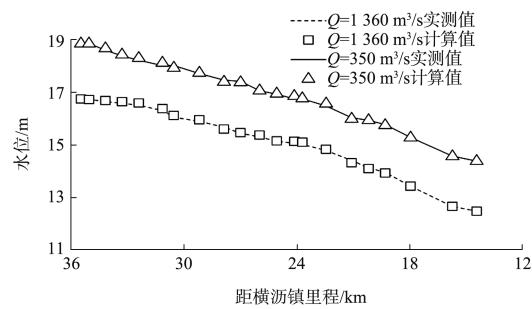


图 2 研究河段水面线验证

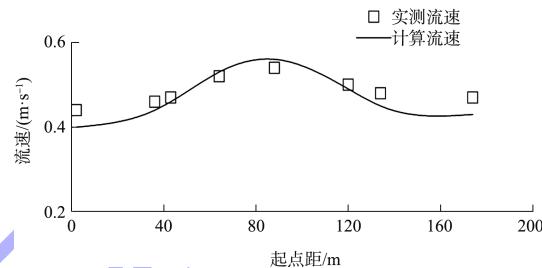
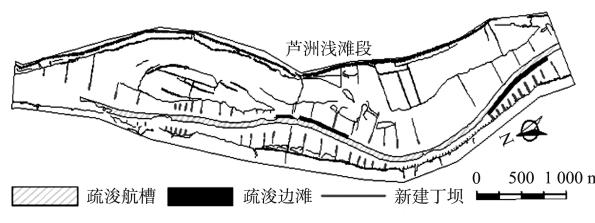


图 3 研究河段流速验证

3 不考虑采砂的航道整治方案

针对研究河段连续长浅滩分布密集、航深严重不足的现象分区进行疏浚, 疏浚深度在设计水位以下 3.5~4.0 m。然而, 由于直接疏浚航槽后, 枯水期将出现水流归槽、流态紊乱的问题, 因此需疏浚为复式断面^[9]。将视浅滩段水流情况确定在航道两侧开挖宽度为 20~35 m、深度为设计水位下 2.5 m 的边滩, 以减少枯水期水流归槽对流态的影响。此外, 还将在河道两岸新建 66 座丁坝以调顺水流。坝顶高程按整治水位设定, 主要在整治流量附近发挥作用, 对汛期洪水的壅水作用有限。整治区域与新建丁坝位置见图 4, 疏浚总量为 200.8 万 m³。方案实施后水位及航深变化见图 5, 整治后航深基本达到设计要求, 由于航槽及边滩的疏浚导致河床降低, 沿程水位较整治前下降明显, 局部区域水位下降达到 1.5 m。



a) 芦洲浅滩段

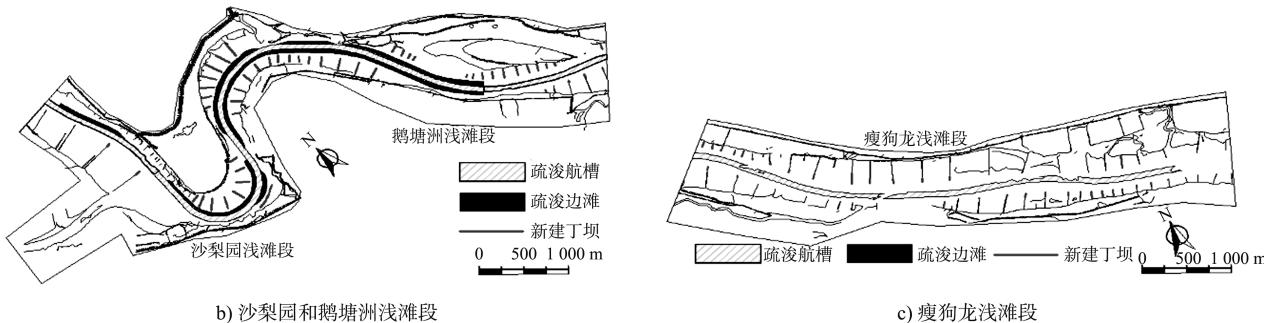


图4 推荐整治方案布置

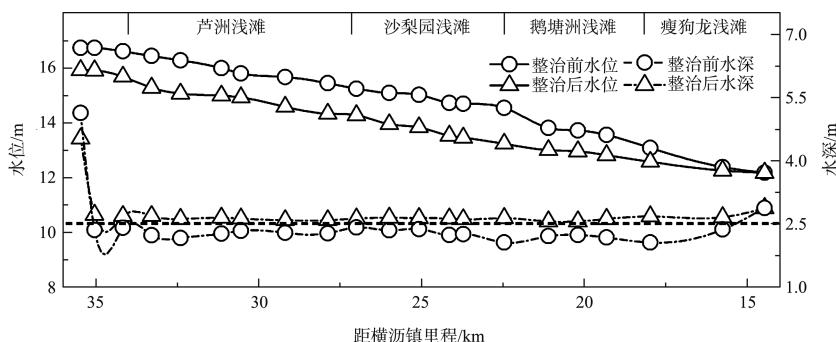


图5 整治前后水面线与航深比较

4 局部采砂对整治方案的影响

4.1 局部采砂后整治方案调整

河段内各处浅滩经多年大幅采砂，局部河床严重下切，部分滩段已形成一定距离的深潭段，参考物理模型试验经验，采砂敏感性分析选用实施整治方案后的瘦狗龙至芦洲段开展研究。在推荐方案的基础上，按照规划布置3处采砂区。

根据数值模拟结果，采砂工程实施后河段水位下降显著，在设计流量 $Q=238 \text{ m}^3/\text{s}$ 时，沙梨园前段至鹅塘洲段长达8 km的上游非采砂区河段航槽内航深严重不足，占研究河段近40%，最小航深处于鹅塘洲后半段，达到1.94 m，见图6。因

此，在实施局部采砂后，河段水深连续出浅，须对原推荐整治方案进行进一步调整，以满足航道提升要求。然而，对局部进行疏浚后，又势必降低其上游河段最低通航水位。经过反复试算，发现仍须在原整治方案基础上将航槽加深0.2~1.3 m。届时，该河段浅滩处河床开挖深度需要达到推荐整治方案实施前设计水位以下3.7~5.3 m，方可基本达到设计航深2.5 m的要求。在采砂和航道疏浚双重作用下，河段内水位下降严重。设计流量 $Q=238 \text{ m}^3/\text{s}$ 时，采砂后疏浚方案相应水位较原整治方案下降约1.11 m，经估算本次整治方案调整将新增疏浚量96.4万 m^3 ，总疏浚量将达到297.2万 m^3 。

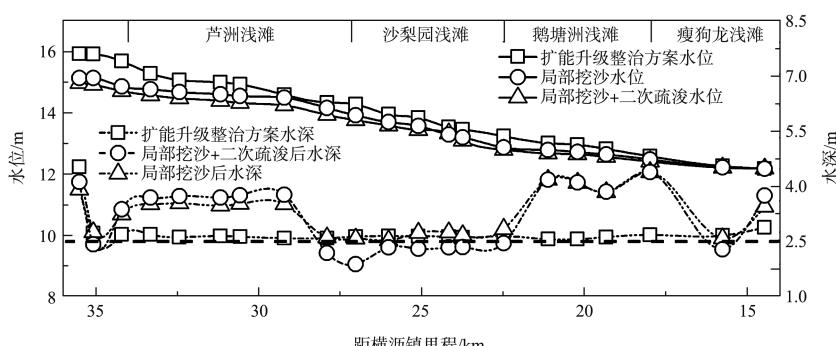
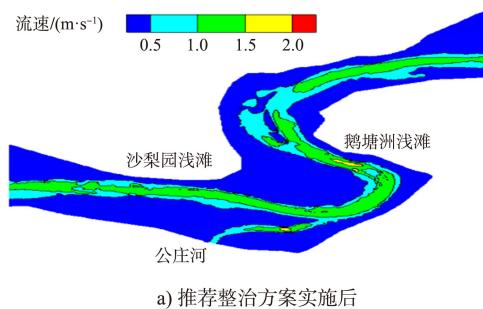


图6 局部采砂各方案水面线、航深计算结果

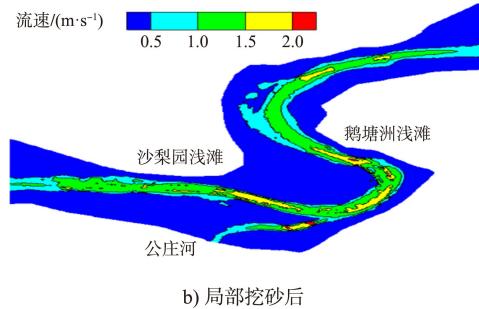
4.2 航道流态分析

经过采砂后的二次疏浚，非采砂区河段航槽高程显著下降，致使在枯水期出现水流归槽现象，槽内流速显著增大。整治流量 $Q=700 \text{ m}^3/\text{s}$ 时，沙梨园及鹅塘洲滩段等局部区域流态紊乱，最大流速达 2.1 m/s ，流速增幅在 $0.1\sim0.5 \text{ m/s}$ ，部分航段已无法满足通航要求，见图 7。为使航道水流流

态趋于稳定，将对河段进行进一步整治。经计算，需将研究河段内边滩相应加深 $0.1\sim0.4 \text{ m}$ ，方可使航道内水流流态基本满足要求。更重要的是，加深边滩后，沿程水位将进一步降低，再次使基本满足要求的航深低于设计要求，为航道整治工程带来巨大困难。



a) 推荐整治方案实施后



b) 局部挖砂后

图 7 局部采砂沙梨园—鹅塘洲段整治流量下流速分布

5 超量采砂对整治方案的影响

5.1 超量采砂后航道整治方案调整

在实际采砂过程中，超采问题一直是管理的难点。假设发生超采，超采量为规划挖砂量的 2 倍（即采砂总量为 476 万 m^3 ，采砂范围不变，开挖深度调整为规划挖砂的 2 倍），按此条件研究后续采砂对航道通航条件的影响。挖砂方案实施后，在设计流量 $Q=238 \text{ m}^3/\text{s}$ 时，出浅区域相较于非超采方案无明显变化，仍主要集中于沙梨园前段至鹅塘洲后半段等未承担采挖砂任务的河段。然而，

研究河段出浅程度更加显著，最小航深处于鹅塘洲后半段，仅 1.75 m 。

试算结果显示，在发生超采后，需要在原方案基础上继续加深航槽 $0.3\sim1.5 \text{ m}$ （开挖深度将达到原整治方案实施前设计水位以下 $3.8\sim5.5 \text{ m}$ ）方可使航道基本达到设计航深 2.5 m 的要求，见图 8。经估算超采引起的整治疏浚量为 113 万 m^3 ，河段整治总疏浚量将达到 313.8 万 m^3 ，工程量大幅增加。经过整治与挖砂的双重作用，设计流量下研究河段入口水位相较于现状天然情况下降约 1.32 m 。

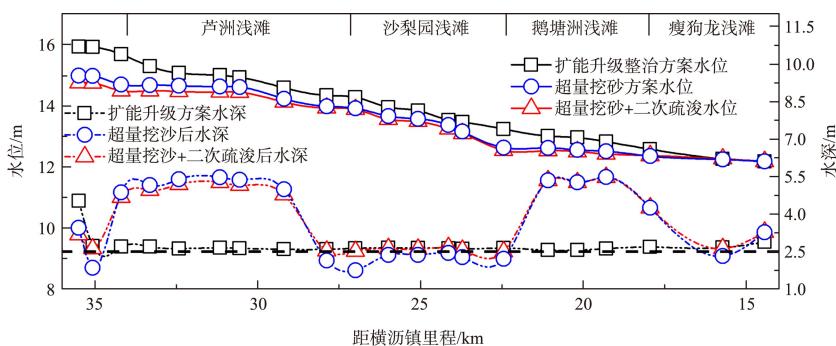


图 8 超量采砂各方案水面线、航深计算结果

5.2 航道流态分析

超采及二次整治后，直接导致更加严重的枯期水流归槽现象。整治流量 $Q=700 \text{ m}^3/\text{s}$ 时，槽内流

速普遍达到 $1.4\sim2.2 \text{ m/s}$ （最大流速可达 2.5 m/s ），位置仍集中在沙梨园至鹅塘洲滩段急弯区域，较原推荐整治方案成果增加约 $0.2\sim0.8 \text{ m/s}$ ，通航水

流条件严重恶化,见图9。又需要以复式河槽的形式,将边滩继续加深0.3~0.6 m,用以调整航道流速。然而,这一工程措施又将引起河段枯期水位下降,持续增加整治难度。

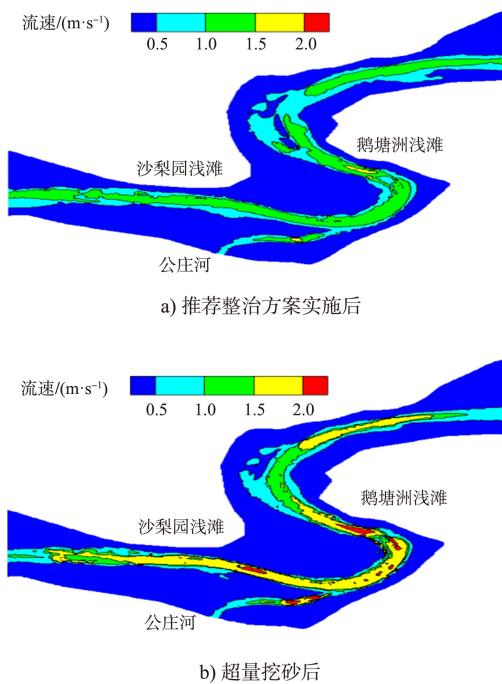


图9 超量采砂沙梨园—鹅塘洲段整治流量下流速分布

6 讨论

从东江航段的演变史来看,目前约50 km的天然河段中,下游水深十分充裕(局部可达10 m),而上游却显著出浅。近20 a的大量采砂是形成这一现状的根本原因。东江流域本身来砂量不大,加之连续梯级的拦蓄,研究河段床砂天然补给能力弱。从上述分析来看,该河段采砂与航道整治已经无法实现平衡。即使研究河段实施了整治提升,如果不终止采砂活动,航道条件将再次恶化。

研究河段多年以来由于人为影响,河道下切已十分严重。此次航道整治规划和采砂规划均可导致河段上游水位下降,并且采砂实施后,研究河段不但整体水位下降,而且也将涉及到研究河段上游航道整治方案的调整,届时整治难度与工程量都将增加,并出现“整治-采砂-再整治”的恶性循环,进而对沿岸汲水工程(农田灌溉及生活取水)造成较显著威胁,带来很大的工程失能改造

压力。想要一劳永逸地提升研究河航道的通航能力,只有永久停止采砂或全河段渠化。

另外,需要注意的是,航道整治方案的疏浚量达到规划采砂量的84%,再加上备淤疏浚量,已经可以满足采砂规划需求量。若采砂与航道整治纳入统一规划,通过以疏代采方式,既可以降低工程成本,又可以避免采砂对航道整治效果的影响。

7 结论

1)东江中游段浅滩分布密集、单滩持续距离长的整治措施基本达到预期,但研究河段水位会随着采砂规模变化而受到不同程度影响而降低,航道条件恶化将普遍存在于全河段内,为使河段保持Ⅲ级航道标准,河段又将进行系统整治。

2)采砂活动或许会使采挖区域水深充裕,但大量采挖对维持航道原有航道等级有着显著不利影响,尤其会带来大幅出浅、水流归槽等问题,将使整治条件持续恶化,整治成本和难度均显著增加。

3)以疏浚为主的航道整治方式,在本质上与采砂同属于对原有河道床面或边滩的挖掘,二者均会使河道条件单调变化。应将二者纳入统一规划,综合考虑采砂量、航深、流速、沿程水面线以及综合成本等因素后,做出科学决策。

4)河道超采对航道问题的威胁巨大。科学的采挖方式和积极的监管措施,对维持航道稳定、降低整治与维护成本有着重要意义和现实紧迫性。

参考文献:

- [1] 何进朝,母德伟.嘉陵江土湾滩航道整治模型试验研究[J].水利水运工程学报,2012(4):24-28.
- [2] 胡旭跃,沈小雄,陈健强,等.洞庭湖响水坎跌水碍航险滩整治方法研究[J].泥沙研究,2007(2):11-16.
- [3] 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.