

十美堂、陈家嘴采区采砂对澧水尾间、 松虎航道水流条件的影响*

刘涛^{1,2}, 雷泽文^{1,2}, 朱博渊^{1,2}, 谢景彧³, 程永舟^{1,2}

(1. 长沙理工大学 水利与海洋工程学院, 湖南 长沙 410114;

2. 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114;

3. 长沙泰湘工程咨询有限公司, 湖南 长沙 410007)

摘要: 为研究十美堂、陈家嘴两采区采砂对澧水尾间、松虎航道水流影响, 采用 2021、2022 年实测地形与水文资料, 构建平面二维水流运动数学模型, 计算采砂前后不同水文条件下航道水动力场变化。结果表明: 初步采砂方案实施对澧水、松虎两航道均无不利影响, 但若采砂后十美堂采区隔离带全线垮塌, 枯水期澧水航道水位最大下降 0.16 m, 危及通航安全; 优化采砂方案中, 在隔离带垮塌的极端情况下, 澧水航道枯水期水位降幅随采区面积缩小而明显减小, 推荐采砂方案对应的枯水期水位不再降低, 但两航道涨、退水过程中最大水位差分别为 0.20、0.30 m, 两采区附近滩地最大流速均接近 1.00 m/s, 可能造成滩地冲刷。洪水期采区及附近流速较大, 泥沙可能被带入航道中造成淤积, 建议定期对航道进行扫床, 并对采区附近滩地采取工程措施守护、严防垮塌。

关键词: 采砂; 澧水尾间; 松虎航道; 水动力; 数学模型

中图分类号: TV143; U612

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)06-0104-10

Impact of sand excavation within Shimeitang and Chenjiazui mining areas on channel hydrodynamics of lowest Lishui River and Songhu River

LIU Tao^{1,2}, LEI Zewen^{1,2}, ZHU Boyuan^{1,2}, XIE Jingyu³, CHENG Yongzhou^{1,2}

(1. School of Hydraulic and Ocean Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2. Key Laboratory of Water-Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha 410114, China;

3. Changsha Taixiang Engineering Consulting Co., Ltd., Changsha 410007, China)

Abstract: In order to investigate the impact of sand excavation within Shimeitang and Chenjiazui mining areas on channel hydrodynamics of the lowest Lishui River and Songhu River, we adopt data of riverbed terrain and hydrology in 2021 and 2022 to build numerical model of planar 2D flow motion, and calculate hydrodynamics changes in the two channels for different hydrological conditions before sand excavation and after. The results show that the initial sand excavation scheme does not endanger Lishui channel and Songhu channel, but water level during dry season maximally declines by 0.16 m within the Lishui channel as the isolation beach of Shimeitang mining area entirely collapses after sand excavation, endangering the navigation safety. Among all optimized schemes, water-level drop within the Lishui channel decreases with mining-area contractions during dry season for the extreme situation of

收稿日期: 2024-09-02

*基金项目: 国家自然科学基金项目(52209079); 湖南省科技创新计划资助项目(2024RC3178); 湖南省自然科学基金面上项目(2025JJ50326); 流域水循环模拟与调控国家重点实验室开放研究基金项目(IWHR-SKL-KF202211)

作者简介: 刘涛(2000—), 男, 硕士研究生, 从事河床演变及航道整治相关研究。

通信作者: 朱博渊(1989—), 男, 博士, 副教授, 从事水力学及河流动力学研究。E-mail: boyuan@csust.edu.cn

isolation beach collapse and water level no longer declines under the recommended scheme. However, the maximum water-level differences between the two channels reach 0.20 m and 0.30 m during water flood and recession stages, and the two mining areas produce a maximum flow velocity of 1.00 m/s on adjacent beaches and result in scour of beaches. During flood season, high flow velocities occur in mining areas and vicinities, and deposition may happen as sediment is carried into the shipping channels. Therefore, regular monitoring is advised to be implemented on riverbed of channels, and protection project is also needed to prevent beaches to collapse.

Keywords: sand excavation; lowest Lishui River; Songhu channel; hydrodynamics; numerical model

2023年9月,湖南省水利厅发布《湖南省湘资沅澧干流及洞庭湖河道采砂规划(2023—2027年)》^[1](简称《规划》),新一轮集中采砂正式启动。澧水航道和松虎航道是船舶在洞庭湖区、支流和长江干流间往来的重要通道,其交汇处砂砾石资源丰富。2016年启动澧水(澧县—午口子)及松虎(安乡—茅草街)1 000吨级航道建设工程,见图1a),两航段长度分别约98和53 km,现均已建成Ⅲ级航道,下接常站2 000吨级航道^[2-3]。常德市鼎城区十美堂、安乡县陈家嘴两采区位于澧水尾间与松虎航道交汇处,见图1b),均为《规划》中的采区,须关注采砂活动对两航道水流条件的影响。

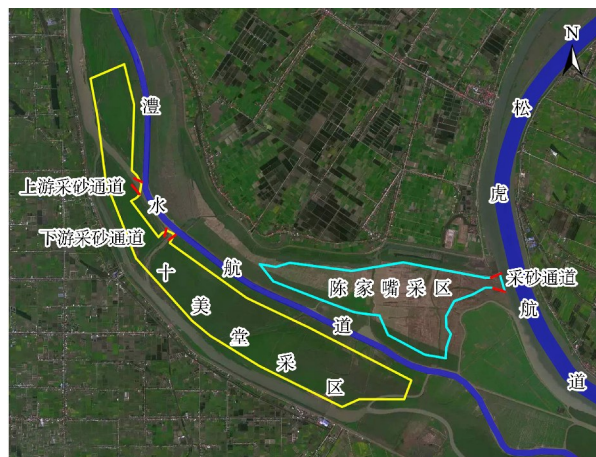
松虎航道为松滋东支与虎渡河交汇后的合称,是横跨湘、鄂两省南北向重要水运通道,河槽窄深且流速小,近年河势较为稳定。澧县小渡口以下为澧水尾间段,河道两岸堤距较宽使得水流分散,河段泥沙落淤严重,洲滩极其发育,中枯水期水流归槽,各汊环绕洲滩交替消长,形如“藕节”,主航道细窄,最窄处河宽仅90 m,洪水期与松虎航道水流相互顶托,加之下游受西洞庭湖回水顶托影响,全洪道水流混乱,水沙运动及河床演变复杂。十美堂采区左侧紧邻澧水航道,通过窄沟与澧水航道连通;陈家嘴采区位于松虎、澧水两航道之间的滩地上,通过窄沟与澧水航道连通、通过拟开挖的采砂通道与松虎航道连通。中枯水期水流未漫出河道,两航道水流在午口子交汇,洪水期水流淹没两采区及附近洲滩,水流交汇范围较大。

采砂是引起河道水动力条件变化的重要因素之一,当前关于采砂对河床演变、通航条件影响的研究较多^[4-9],不同采砂方案布置对航道水位、

流速^[10]产生重要影响。本文根据2021、2022年研究河段实测地形和相关水文站流量、水位资料建立平面二维水流运动数学模型,计算采砂前后不同水文条件下航道内水位、流速变化,分析对两航道的影响,并就采区隔离带稳定和航道通航安全提出建议。



a) 航道工程布置



b) 采砂工程布置

图1 研究区段位置与工程布置

Fig.1 Location of study area and arrangement of engineering projects

1 研究区域概况

根据《规划》和前期咨询,初步划定的采区范围见图 1b)。两采区均位于澧水尾闾洲滩上,其中十美堂采区沿程长约 9 km、呈条带状,陈家嘴采区相对较短,两采区左侧和右侧边界与澧水航道之间隔离带滩地宽度仅约 100 m,为防止隔离带垮塌,实际采砂方案将两采区隔离带均加宽至 200 m。十美堂、陈家嘴采区面积分别为 6.69、3.43 km²,控采总量分别为 0.73 亿、0.44 亿 t,控采高程均为 -6 m(1985 国家高程基准)。两采区均通过采砂通道与航道相连,采砂工程实施不会改变现有航道布置及航道尺度,十美堂采区采砂通道利用澧水航道右岸两条自然甬沟,陈家嘴一期采区采砂通道布置在松虎航道右岸,见图 1b),两采区采砂通道均采用喇叭口形式,底宽为 100 m、两侧均按 1:3 放坡。

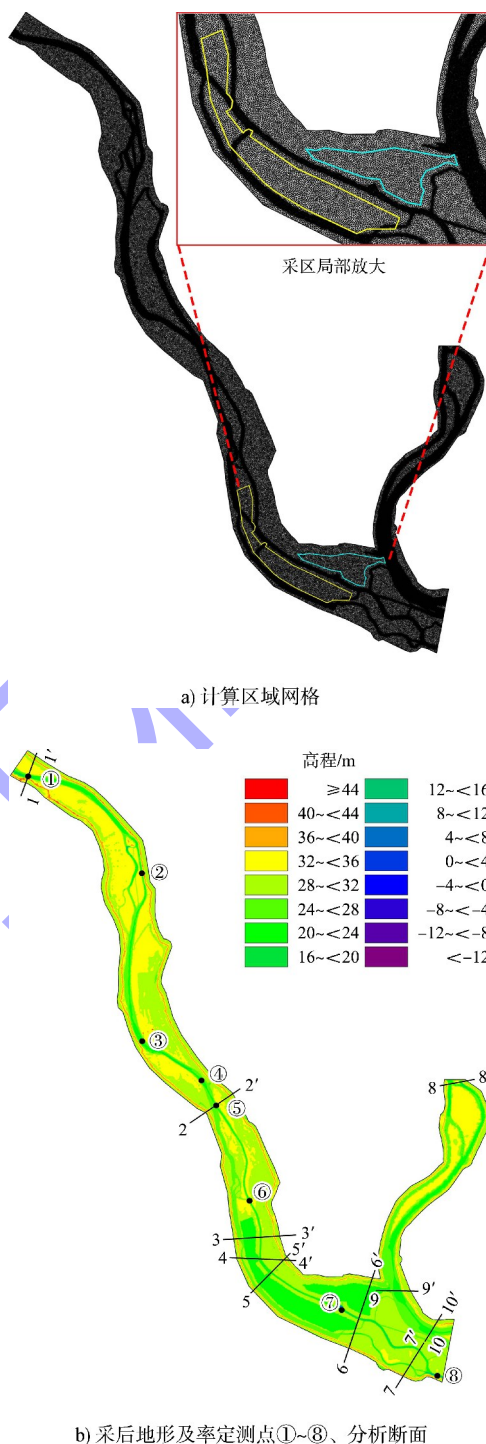
澧水航道最低通航水位取 95% 保证率,松虎航道最低通航水位取 98% 保证率,两航道最高通航水位均取 20 a 一遇洪水位,两航道设计航道尺度均为 2.0 m×60 m×480 m(水深×航宽×弯曲半径)。

2 数学模型

2.1 数学模型建立

本文采用 MIKE 21 FM 对研究区域水流运动条件进行模拟,该模型已在河道水动力学计算领域得到广泛应用^[11-13]。本文通过计算不同水流条件下采砂工程实施前后河道水位、流速、横向流速变化,分析采砂对航道水流条件的影响。

考虑到采砂工程可能的影响范围及现有地形资料情况,计算区域澧水侧进口边界定为石龟山水文站,松虎侧进口边界定为武圣宫滩,出口边界距下游南嘴水文站 9.2 km,澧水侧计算河段长 44.8 km,松虎侧计算河段长 17.8 km,计算区域陆地边界紧靠两岸大堤外侧。为保证模型计算精度和速度,共剖分 24.003 9 万个网格,陆域和水域网格面积分别按不超过 1 200 和 200 m² 控制,根据地形测点疏密分布情况划分网格疏密,同时对地形变化较大和须重点关注的区域适当加密,见图 2a)。



b) 采后地形及率定测点①~⑧、分析断面

图 2 模型网格及地形

Fig. 2 Grids and terrain of model

地形为 2021 年 4 月、2021 年 9 月和 2022 年 6 月分段测得,提取地形测图上测点位置坐标和高程,利用克里金方法^[14-15]插值到网格节点上,并对插值后地形进行平滑处理。根据《常德市鼎城区澧水洪道砂砾石资源勘察报告》^[16]和《安乡县澧水河道(陈家嘴河段)砂石储量分析地质勘察报告》^[17]中

各钻孔位置附近可采深度相应降低网格高程,其中在靠近采区隔离带处开挖深度按阶梯状控制,以保证隔离带稳定,采砂通道处根据开挖深度、长度、宽度和坡比进行概化,得到采砂后地形,见图2b)。

模型上游进口边界澧水侧给定石龟山流量,松虎侧流量为松滋东支与虎渡河流量之和、代表站分别为安乡水文站和董家垸水文站,下游出口边界给定水位。由于枯、中水期两航道水流未在出口边界处交汇,故分别给定下边界水位,澧水侧出口边界水位由蒿子港和南嘴两站水位内插得到,松虎侧出口边界水位根据两航道实测水位差推算得到。洪水期两侧水域在模型出口边界附近连成一片,根据蒿子港和南嘴两站水位内插给定同一水位。陆地边界不过流,法向流速设置为0 m/s。

2.2 数学模型验证

根据 JTS/T 231—2021《水运工程模拟试验技术规范》^[18](简称《规范》),采用2021年枯水(11月18日)、中水(6月25日)、洪水(7月3日)三次澧水洪道沿程①~⑧测点实测水位资料对模型进行验证,石龟山处流量分别接近设计最小通航流量、多年平均流量和常年洪水流量,分别为199、746和1 240 m³/s,松虎侧相应流量分别为475、1 180和1 950 m³/s。洪水期,两侧航道出口边界水位均为29.79 m;中水期,澧水侧和松虎侧出口边界水位分别为27.83和27.79 m;枯水期,澧水侧和松虎侧出口边界水位分别为26.42和26.34 m。

通过调整模型糙率,使得水位计算值与实测值相差仅-0.03~0.03 m(图3)、相对误差仅-0.09%~0.11%,流场整体平顺、滩槽水流运动区分明显,且流态与河道沿程地形符合较好。最终确定河槽糙率取值范围为0.015~0.035,滩地糙率取值范围为0.035~0.050,与现有研究成果^[19]接近,模型可用于后续计算分析。考虑到采砂过程中采区被大幅挖低、植被被挖除,根据《水力计算手册》^[20],适当调整采区内糙率。

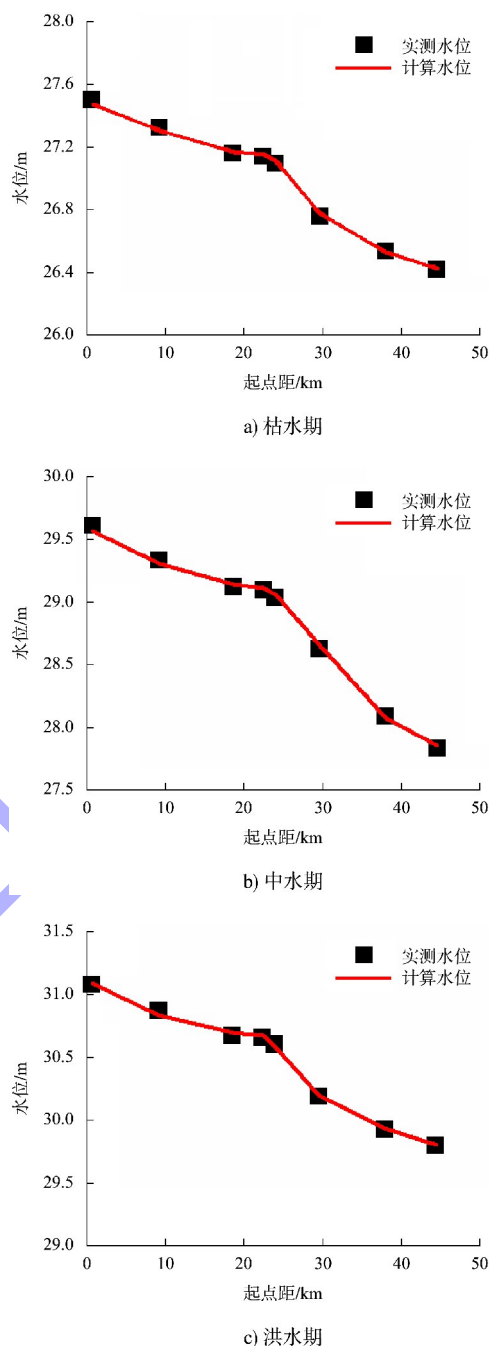


图3 水面线验证

Fig. 3 Verification of water surface profile

2.3 计算工况

根据《规范》,需要计算枯水期(设计最小通航流量)、中水期(多年平均流量)及洪水期(设计最大通航流量)的水流运动情况,并增加水流恰好漫过隔离带滩顶的不利水文工况。研究河段枯水期、中水期、洪水期、漫滩时澧水侧进口边界流量分别为91、839、11 537、2 510 m³/s,松虎侧进口边界流量分别为111、1 259、9 735、4 020 m³/s,

枯、中水期澧水侧出口边界水位分别为 26.13、28.25 m，松虎侧出口边界水位分别为 26.05、28.21 m，洪水期、漫滩时两侧航道出口边界水位相同，为 37.45、32.60 m。考虑十美堂采区隔离带全线垮塌的极端风险情况，并保留两采区隔离带宽度 100 m 情况作为对比工况，共计 10 种工况，见表 1。

表 1 初步采砂方案计算工况
Tab. 1 Calculation cases for preliminary sand mining schemes

工况	水文条件	工况说明
1	枯水	工程前
2		工程后
3		工程后(十美堂隔离带全线垮塌)
4		工程后(两采区隔离带宽度 100 m)
5	中水	工程前
6		工程后
7	洪水	工程前
8		工程后
9	漫滩	工程前
10		工程后

3 采砂方案研究

3.1 初步方案结果

为量化采砂工程实施对航道水流条件的影响，重点分析采砂前后航道水位、流速及横向流速变幅，选取沿程 10 个典型断面的计算结果进行分析说明，断面位置见图 2b)。

3.1.1 水位变化

水位变化结果见表 2。可以看出：在枯水期，隔离带宽度为 200 和 100 m 时，采砂前后两航道水位均无明显变化；若十美堂采区隔离带全线垮塌，澧水航道 6-6'断面以上水位均下降，3-3'断面降幅达 0.16 m；十美堂采区下游以及松虎侧水位无明显变化。在中水期，采砂后澧水侧水位均出现小幅下降，十美堂采区上游区段水位最大降幅 0.03 m，越靠近采区上边界水位降幅越大，3-3'和 4-4'断面降幅最大，为 0.07 m；松虎侧水位无明显变化。在洪水期和漫滩时，滩槽均被淹没，两航道水位均无明显变化。

表 2 水位变化

Tab. 2 Water level variations

水文条件	对比工况	澧水侧断面水位变化/m							松虎侧断面水位变化/m		
		1-1'	2-2'	3-3'	4-4'	5-5'	6-6'	7-7'	8-8'	9-9'	10-10'
枯水	2 与 1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	3 与 1	-0.04	-0.05	-0.16	-0.07	-0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	4 与 1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
中水	6 与 5	-0.02	-0.03	-0.07	-0.07	-0.06	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
洪水	8 与 7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
漫滩	10 与 9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

综上，仅采砂工程实施不会造成枯水期航道水位下降、水深不足的不利后果，但在十美堂采区隔离带全线垮塌极端工况下枯水期水位降幅较大，存在风险。

3.1.2 流速、横向流速变化

流速变化见表 3，横向流速变化见表 4。可以看出，在枯水期和中水期，采砂后两航道流速、横向流速多为减小，对通航有利，工况 4 流速、横向流速略有增大，增加值分别为 0.05、0.03 m/s，不影响通航；在洪水期和漫滩时，采砂后十美堂采

区下边界流速和下游采砂通道处横向流速最大增幅为 0.14 m/s，其余位置流速、横向流速增幅均在 0.10 m/s 以内。该两种水文条件下澧水航道流速最大值分别为 2.10 和 1.04 m/s、横向流速最大值分别为 0.42 和 0.34 m/s，松虎航道流速最大值分别为 1.05 和 0.81 m/s、横向流速最大值分别为 0.35 和 0.26 m/s，尽管流速和横向流速增幅均相对不大，但其绝对值均较大，船舶在航道内行驶时应注意操作安全。

表 3 流速变化
Tab. 3 Flow velocity variations

水文 条件	对比 工况	澧水侧面流速变化/(m·s ⁻¹)							松虎侧面横向流速变化/(m·s ⁻¹)		
		1-1'	2-2'	3-3'	4-4'	5-5'	6-6'	7-7'	8-8'	9-9'	10-10'
枯水	2 与 1	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	3 与 1	0.00	0.00	-0.06	-0.09	-0.17	-0.03	0.00	0.00	0.00	0.00
	4 与 1	0.00	0.00	0.00	0.05	-0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
中水	6 与 5	0.00	0.01	0.02	-0.02	-0.14	-0.05	-0.02	0.00	-0.01	0.00
洪水	8 与 7	0.00	0.00	0.09	-0.15	-0.04	0.14	-0.01	0.00	-0.01	0.04
漫滩	10 与 9	0.00	0.00	0.02	-0.30	-0.15	-0.08	0.00	0.00	-0.01	0.00

表 4 横向流速变化
Tab. 4 Transverse flow velocity variations

水文 条件	对比 工况	澧水侧面横向流速变化/(m·s ⁻¹)							松虎侧面横向流速变化/(m·s ⁻¹)		
		1-1'	2-2'	3-3'	4-4'	5-5'	6-6'	7-7'	8-8'	9-9'	10-10'
枯水	2 与 1	-0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	3 与 1	-0.02	0.00	0.00	0.01	-0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
	4 与 1	-0.02	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
中水	6 与 5	0.00	0.01	0.00	-0.02	0.02	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.00
洪水	8 与 7	0.00	0.00	0.01	-0.11	0.14	0.05	0.02	0.00	0.03	0.00
漫滩	10 与 9	0.00	0.00	0.01	-0.19	0.03	0.01	0.00	0.00	0.02	0.00

3.1.3 采砂通道附近水位、流速

根据计算结果,两采区采砂通道内水面比降均接近 0,枯水和中水期十美堂采区上下游采砂通道内流速、横向流速均不大,不影响采砂船进出,陈家嘴采区采砂通道内横向流速最大值达 0.35 m/s,采砂船进出时应注意操作安全。洪水期和漫滩时禁采,采砂通道内流速和横向流速大小不影响采砂船安全。

不同水文条件下,两航道靠采砂通道侧的流场均较为平顺,航道水流向通道口偏移不明显。澧水航道靠十美堂采区上游采砂通道侧的流速、横向流速最大增幅分别为 0.15 和 0.10 m/s,靠十美堂采区下游采砂通道侧的流速、横向流速最大增幅分别为 0.13 和 0.27 m/s,松虎航道靠陈家嘴采区采砂通道侧的流速、横向流速最大增幅分别为 0.04 和 0.07 m/s。总体而言,采砂通道对两航道流速、横向流速影响均不大,不会威胁航道内船舶航行安全。

此外,中水期十美堂采区内西北角区域受上

游窜沟分流影响较大,流速最大达 0.44 m/s,采砂船应避免进入此区域。

3.1.4 采区附近冲淤

根据《常德市鼎城区澧水洪道砂砾石资源勘察报告》和《安乡县澧水河道(陈家嘴河段)砂砾石储量分析地质勘察报告》,两采区及附近上覆层主要为粉质黏土,下部为砂砾石层,最大粒径为 26.5 mm,其中粒径范围 0.075~4.75 mm 的砂为主要组分。计算结果表明,采砂工程实施后,洪水条件下采区附近流速和横向流速最大值分别超过 1.0 和 0.6 m/s。根据《水力计算手册》中不同粒径泥沙的允许不冲流速范围,采区附近水流可造成 5.0 mm 以下粒径泥沙(黏土和砂)冲刷。

3.2 方案优化

初步采砂方案实施后,对两航道水位、流场影响不大,但若干美堂采区隔离带全线垮塌,澧水航道沿程水位降低明显,枯水期最大降幅 0.16 m,位置见图 4。为规避枯水期澧水航道水位降幅过大的风险,对初步采砂方案进行优化。

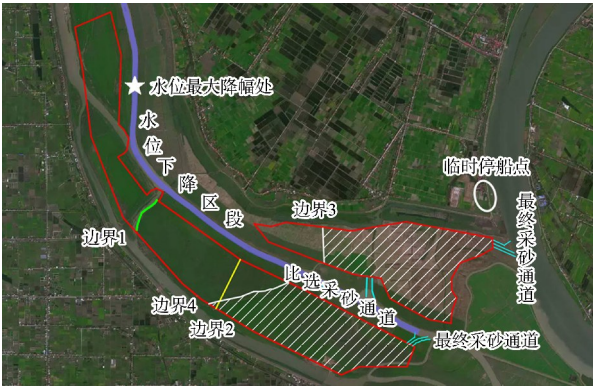


图 4 新采砂方案采区布置
Fig. 4 Mining area arrangements of
new sand mining schemes

3.2.1 采区优化及工况设置

隔离带垮塌后过流面积增大是航道水位下降的主要原因,由于水位下降主要集中在十美堂采区上段左侧的澧水航道内,考虑缩减采区范围,保留开采洲滩较宽的下游区域,且尽量保证洲滩的整体性,并将采砂通道移至采区下边界。对于陈家嘴采区,增加采砂通道开在靠澧水航道侧的情况作为比选。

各方案为:1) 方案 1,将十美堂采区上边界移至原下游采砂通道处(边界 1),陈家嘴采区范围不变;2) 方案 2,将十美堂采区上边界移至陈家嘴采区上边界对岸(边界 2),陈家嘴采区范围不变;3) 方案 3,将十美堂采区上边界移至陈家嘴采区上边界对岸(边界 2),陈家嘴采区上边界下移至甬沟处(边界 3);4) 方案 4,考虑到边界 2 以下的十美堂采区范围内仍有 1 道较大甬沟,为保障采区滩体稳定,将十美堂采区上边界进一步下移至该甬沟处(边界 4),陈家嘴采区上边界维持边界 3。

优化方案优先关注采砂后隔离带垮塌情况下,澧水航道枯水期水位变幅,共设置 7 种工况,见表 5。

表 5 优化采砂方案计算工况
Tab. 5 Calculation conditions of optimized
sand mining schemes

工况	水文条件	工况说明
11	枯水	方案 1+十美堂隔离带全线垮塌
12		方案 2+两侧隔离带均不垮塌
13		方案 2+十美堂隔离带全线垮塌
14		方案 2+陈家嘴隔离带全线垮塌
15		方案 2+陈家嘴隔离带全线垮塌+陈家嘴采砂通道位于澧水侧(比选方案)
16		方案 3+陈家嘴隔离带全线垮塌
17		方案 4+十美堂采砂通道上游 100 m 长度范围内隔离带垮塌

3.2.2 优化方案计算结果

优化采砂方案下澧水航道沿程水位变化见图 5。在整体上可以看出,优化采区范围后,在隔离带全线垮塌的极端不利情况下,采砂前后枯水期澧水航道水位降幅大幅减小,松虎航道水位基本无变化,陈家嘴采区 2 种采砂通道布置(工况 14、15)方案下水位变幅差别不大。

每种工况的具体变化情况为:工况 11,十美堂原初步方案采区及上游区段水位均略有下降,采区上、下游采砂通道处水位最大降幅 0.08 m,采区下游水位基本无变化;工况 12,采砂前后沿程水位无变化;工况 13,十美堂原初步方案采区上边界—陈家嘴原初步方案采区上边界区段水位最大降幅 0.04 m,其余区段基本无变化;工况 14,十美堂原初步方案采区上边界—边界 3 区段水位最大降幅 0.05 m,其余区段基本无变化;工况 15,十美堂原初步方案采区上边界—陈家嘴原初步方案采区上边界区段水位最大降幅 0.04 m,其余区段基本无变化;工况 16,十美堂原初步方案采区上边界—边界 3 段水位最大降幅 0.03 m,其余区段基本无变化;工况 17,采砂前后沿程水位无变化。

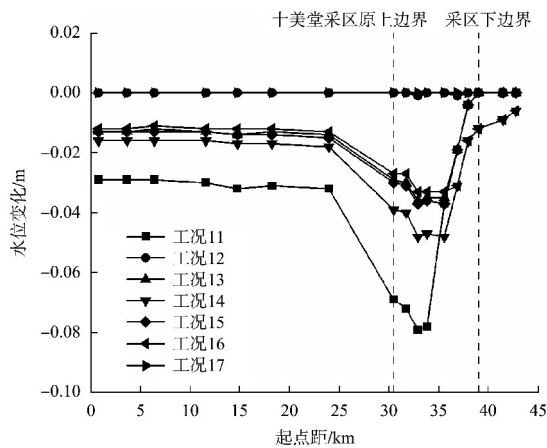


图5 优化采砂方案下澧水航道沿程水位变化
Fig.5 Water level variations along Lishui channel under optimized sand mining schemes

3.2.3 涨退水过程

考虑到涨、退水过程中两航道水位落差可能较大,加大采区附近流速,造成隔离带和滩地冲刷,且前文仅分析枯水期水位变化,因此计算全年涨、退水过程以分析河道及采区附近的水动力场变化。

对比近5年(2019—2023年)研究河段水位、

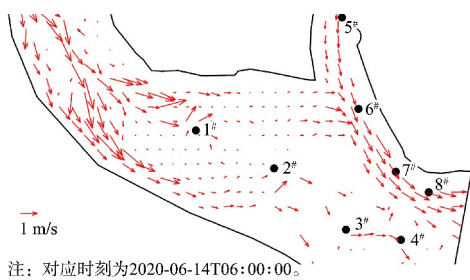
流量系列可知,2020年石龟山和安乡水文站最枯流量接近两侧航道的最小通航流量,且洪峰流量为近5年最大,造成的两侧航道水位落差和附近流速也可能最大,以其作为涨、退水过程计算的典型水文年。根据优化方案计算结果,方案4实施后对航道水位影响最小,涨、退水过程计算采用方案4的采区范围,且不考虑隔离带垮塌。

涨退水过程中澧水、松虎航道水位差最大值见表6。可以看出,澧水航道与松虎航道最大水位差在涨水阶段为0.20 m、退水阶段为0.30 m、漫滩状态时最大水位差为0.17 m,且上游两侧水位差较大,越靠近两航道下边界水位差越小。涨、退水过程中陈家嘴采区内沿采砂通道方向最大水位差仅0.02 m(2020-06-23T04:00:00)。采区附近涨、退水阶段最大流速或分流速对应的流场见图6。可以看出,无论涨水或退水阶段,两采区上边界以上和十美堂采区右侧滩地流速均较大,最大值接近1 m/s,且枯水期水流归槽后整个陈家嘴采区对应的澧水航段内流速水平分量均较大。

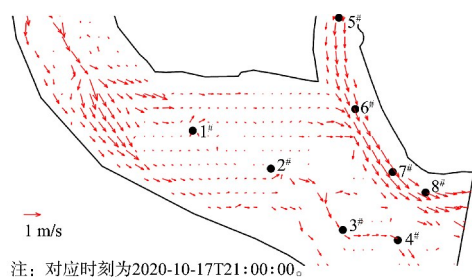
表6 涨、退水阶段澧水、松虎航道水位差最大值

Tab.6 Maximum water level differences between Lishui and Songhu channels during flooding and recession stages

阶段	发生时刻	全时段最大					漫滩最大				
		澧水航道		松虎航道		水位差/ m	澧水航道		松虎航道		水位差/ m
		测点	水位/m	测点	水位/m		测点	水位/m	测点	水位/m	
涨水	2020-06-13 T21:00:00	1 [#]	29.970	5 [#]	29.774	0.195	1 [#]	29.970	5 [#]	29.774	0.195
		2 [#]	29.957	6 [#]	29.756	0.201	2 [#]	29.957	6 [#]	29.756	0.201
		3 [#]	29.848	7 [#]	29.737	0.112	3 [#]	29.848	7 [#]	29.737	0.112
		4 [#]	29.785	8 [#]	29.729	0.056	4 [#]	29.785	8 [#]	29.729	0.056
退水	2020-11-27 T07:00:00	1 [#]	27.351	5 [#]	27.052	0.299	1 [#]	29.765	5 [#]	29.593	0.172
		2 [#]	27.229	6 [#]	27.040	0.189	2 [#]	29.736	6 [#]	29.573	0.163
		3 [#]	27.174	7 [#]	27.033	0.141	3 [#]	29.648	7 [#]	29.556	0.092
		4 [#]	27.119	8 [#]	27.032	0.087	4 [#]	29.593	8 [#]	29.548	0.045



a) 涨水阶段采区附近最大流速对应流场



b) 退水阶段采区附近最大流速对应流场

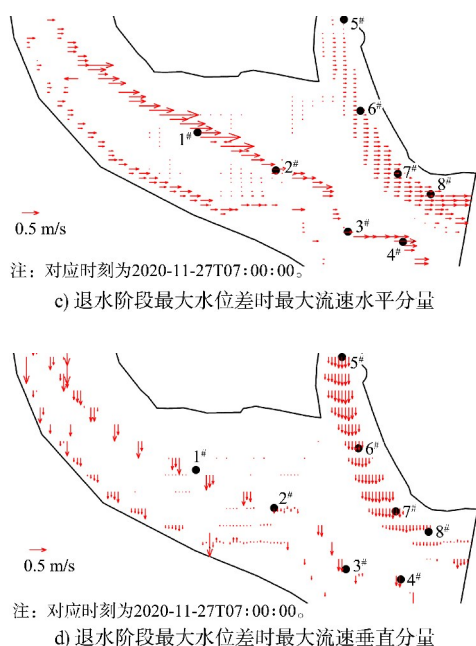


图6 涨、退水阶段流场

Fig. 6 Flow fields during flooding and recession stages

3.3 方案比选及建议

3.3.1 方案比选

综合分析可知,初步方案实施对两航道水位、流场无不利影响,但若十美堂隔离带全线垮塌,澧水航道沿程水位降低明显,枯水期最大降幅0.16 m,危及通航安全。优化方案有效减小了隔离带垮塌情况下澧水航道水位降幅,方案3水位降幅已降至0.03 m,不会对通航产生不利影响,但该方案对应的十美堂采区范围内靠上游侧包含1道窜沟,对滩体稳定不利,方案4则将十美堂采区上边界直接下移至该窜沟处,在保障采区附近滩体稳定的同时按该方案实施后航道水位也无变化。对比工况14、15的结果可知,陈家嘴采区采砂通道两种布置方案对两航道水位影响均不大,而将采砂通道设置在松虎航道右岸,既能缓解当前航运繁忙的澧水航道通航压力,又能充分利用上游临时停船点(图4),优于采砂通道布置在澧水航道左岸的比选方案。最终推荐采用方案4,且陈家嘴采区采砂通道布置在松虎航道右岸。

3.3.2 建议

研究河段近年河势稳定,但涨、退水过程中两侧航道水位差最值较大,两采区附近滩地流速

相应较大,可能造成滩地冲刷,故建议对隔离带新建护岸工程加以保护,可采用平顺式护岸,护岸结构为抛石护脚和雷诺护坡,护岸顶高程与洲滩高程齐平。采砂通道靠主航道一侧的横向流速及其变化值的最大值在0.3 m/s,采砂船进出采砂通道时应规范操作,避免发生事故。洪水条件下采区及附近流速和横向流速最大值达到泥沙的起动流速和允许不冲流速,可能将采区泥沙带入航道中,建议主管部门定期对航道进行扫床,若出现显著淤积,应及时与航道部门协商,确定疏浚方案。同时,应对采砂通道实施护坡工程,保障其安全稳定,并加强对河势影响的观测和评估。

4 结论

1) 数学模型中水位、流场验证结果较好,对应的河槽和滩地糙率取值范围分别为0.015~0.035和0.035~0.050。

2) 按初步采砂方案实施后,两航道水深、流速均满足通航要求,但若十美堂采区隔离带全线垮塌,枯水期澧水航道水位最大下降0.16 m,可能引起通航水深不足。

3) 优化采砂方案后,采砂工程实施不会对航道造成不利影响,即使出现隔离带垮塌极端工况,航道水位、流场也基本无变化,故推荐采砂方案为:十美堂采区上边界下移至边界4、采砂通道布置在采区下边界,陈家嘴采区上边界下移至边界3、采砂通道布置在松虎航道右岸。

4) 采砂方案应尽量避免破坏滩体整体性,同时保证航道与采区之间的隔离带安全稳定,采砂船进出应注意规范操作,并加强对河床冲淤与河势变化的监测与评估。

参考文献:

[1] 湖南省水利厅. 湖南省湘资沅澧干流及洞庭湖河道采砂规划(2023—2027年)[A]. 长沙: 湖南省水利厅, 2023.

Hunan Provincial Department of Water Resources. Sand mining planning (2023 - 2027) along mainstreams of Xiangjiang, Zijiang, Yuanshui and Lishui Rivers and

- within Dongting Lake of Hunan Province [A]. Changsha: Hunan Provincial Department of Water Resources, 2023.
- [2] 湖南省航务勘察设计研究院. 洞庭湖区澧县、安乡—茅草街航道建设工程初步设计[R]. 长沙: 湖南省航务勘察设计研究院, 2015.
- Navigation Survey and Design Institute of Hunan Province. Preliminary design of waterway construction project extending from Lixian and Anxiang counties to Maocao Street in Dongting Lake [R]. Changsha: Navigation Survey and Design Institute of Hunan Province, 2015.
- [3] 湖南省交通规划勘察设计院有限公司. 松虎航道(湖南段)建设工程初步设计[R]. 长沙: 湖南省交通规划勘察设计院有限公司, 2018.
- Hunan Provincial Communications Planning, Survey & Design Institute Co., Ltd. Preliminary design of Songhu waterway (Hunan segment) construction project [R]. Changsha: Hunan Provincial Communications Planning, Survey & Design Institute Co., Ltd., 2018.
- [4] 叶雅思, 徐观兵, 张金明. 东江沥口枢纽坝下游航道整治模型试验研究[J]. 水运工程, 2024(5): 163-168.
- YE Y S, XU G B, ZHANG J M. Experimental study on downstream waterway regulation of Likou Dam in Dongjiang River [J]. Port & waterway engineering, 2024(5): 163-168.
- [5] 毕竟, 马李伟, 马永全, 等. 澜沧江曼厅大沙坝水道无名洲滩采砂影响及对策[J]. 水运工程, 2022(12): 120-127.
- BI J, MA L W, MA Y Q, et al. Influence and countermeasures of sand mining in Wumingzhou shoal of Lancang River Mantingdashaba waterway [J]. Port & waterway engineering, 2022(12): 120-127.
- [6] 赵钢, 徐毅, 朱昊, 等. 多个大型采砂工程对长江下游局部河段水流条件的影响[J]. 水运工程, 2020(12): 98-105.
- ZHAO G, XU Y, ZHU H, et al. Influence of large-scale sand mining projects on flow conditions in the lower reaches of the Yangtze River [J]. Port & waterway engineering, 2020(12): 98-105.
- [7] 张俊宏, 王业祥, 赵正伟, 等. 长江中游黄州河段采砂影响分析[J]. 水利水运工程学报, 2016(5): 70-77.
- ZHANG J H, WANG Y X, ZHAO Z W, et al. Impact analysis of sand mining of Huangzhou reach in middle Yangtze River [J]. Hydro-science and engineering, 2016(5): 70-77.
- [8] 何熙, 邓涯, 李顺超, 等. 岷江下游典型滩群碍航特性及整治研究[J]. 水利水运工程学报, 2023(4): 62-70.
- HE X, DENG Y, LI S C, et al. Study on the characteristics of navigation-obstructing of typical serial rapids and regulation in the downstream of Minjiang River [J]. Hydro-science and engineering, 2023(4): 62-70.
- [9] 钟艳红, 岳红艳, 姚仕明, 等. 湘江典型河段采砂活动对河道演变影响研究[J]. 人民长江, 2021, 52(8): 10-15, 29.
- ZHONG Y H, YUE H Y, YAO S M, et al. Influence of sand mining on river regime in typical river channel of Xiangjiang River [J]. Yangtze River, 2021, 52(8): 10-15, 29.
- [10] 梁艳慧. 湘江尾间段枯水水位下降成因及影响[J]. 水运工程, 2018(3): 129-134.
- LIANG Y H. Reasons of water level lowering at Xiangjiang River sink and its influence [J]. Port & waterway engineering, 2018(3): 129-134.
- [11] 许续. “溇港圩田”区工程调控对河网河相及水动力的影响研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2023.
- XU X. Study on the influence of engineering regulation on river network direction and hydrodynamics in the “lougangpolder field” area [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2023.
- [12] 柳明洋, 李春光, 赵文娟, 等. 连续弯道中河心洲可侵蚀层对水动力的影响分析[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(12): 107-113, 130.
- LIU M Y, LI C G, ZHAO W J, et al. Hydrodynamic flow and sediment transport in bended river with the presence of islands [J]. Journal of irrigation and drainage, 2022, 41(12): 107-113, 130.
- [13] 曾庆慧, 胡鹏, 赵翠平, 等. 多水源补给对白洋淀湿地水动力的影响[J]. 生态学报, 2020, 40(20): 7153-7164.
- ZENG Q H, HU P, ZHAO C P, et al. Influence of multi-water resource replenishment on the hydrodynamic behavior of Baiyangdian wetland [J]. Acta ecologica sinica, 2020, 40(20): 7153-7164.
- [14] ZHANG T, XU X S, XU S B. Method of establishing an underwater digital elevation terrain based on kriging interpolation[J]. Measurement, 2015, 63: 287-298.