



沅水尾闾金石垸、太湖垸采砂 对航道水流条件的影响*

朱博渊^{1,2}, 刘涛^{1,2}, 谢景彧³, 李贇³, 王敬文^{1,2}, 高月星³

(1. 长沙理工大学水利与环境工程学院, 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: 分汊河段内采砂易改变汊道原有分流比, 进而影响航道水流条件, 危及主航道通航安全。为研究沅水尾闾金石垸、太湖垸采砂对航道水流影响, 采用2016、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, 计算采砂前后不同地形和水文条件下水动力场变化。结果表明, 研究河段滩槽形势稳定, 采砂不会引起主航道尺度明显变化和泥沙淤积; 若采砂后中汊锁坝被冲毁, 中汊分流比增大7.12%以上; 采砂后主航道最小水深仍大于3 m, 满足通航要求, 锁坝封堵使得河段进口至汊道分流口水面比降减小4%。若采砂后锁坝被冲毁, 枯水期主航道水位最大下降0.10 m; 采砂前后河段流场整体变化不大, 采区附近流速变小, 局部流速最大偏转角小于23°, 不影响采砂船进出; 锁坝封堵使得洪水中汊流速减小0.52 m/s。锁坝对稳定总体河势起控制作用, 可避免中汊冲刷发展造成主航道水位陡降、尺度萎缩甚至改线, 同时采区边界附近流速较大、冲刷滩地, 建议对锁坝和滩地进行守护。

关键词: 沅水尾闾; 分汊河道; 采砂; 锁坝; 航道; 数学模型

中图分类号: U611; TV133

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)01-0093-09

Impact of sand mining of Jinshi and Taihu embankments at lowest reach of Yuanjiang River on hydrodynamics of nearby shipping channel

ZHU Boyuan^{1,2}, LIU Tao^{1,2}, XIE Jingyu³, LI Yun³, WANG Jingwen^{1,2}, GAO Yuexing³

(1. School of Hydraulic and Environmental 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 Tai Xiang Engineering Consulting Co., Ltd., Changsha 410007, China)

Abstract: Flow partition ratios of branching channels are easily altered by sand mining activities in bifurcating reaches, which affects flow conditions of shipping channels and may threaten navigation safeties. To investigate the impact of sand mining in Jinshi and Taihu embankments at the lowest reach of Yuanjiang River on hydrodynamics of nearby shipping channel, we use data of riverbed terrain and hydrology in 2016 and 2022 to establish numerical model of planar 2D flow motion, from which hydrodynamic changes are calculated for different terrain and hydrology combinations before and after sand mining. The results show that beach-channel regime is stable in the study reach, and no obvious change of the navigation-channel dimension and sediment deposition is triggered by sand mining. The flow partition ratio of the middle branch will be enhanced by larger than 7.12% if blocking dams within this branch are destroyed by rush of water after sand mining. The minimum water depth in the

收稿日期: 2024-03-26

*基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52209079); 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-SKLF202211); 湖南省自然科学基金资助项目(2021JJ40607)

作者简介: 朱博渊(1989—), 男, 博士, 副教授, 从事水力学及河流动力学研究。

navigation channel is still larger than 3 m after sand mining, which meets the navigation requirement. The blocking dams reduce the water surface slope by 4‰ between the entrances of the study reach and the bifurcating area. If blocking dams are destroyed after sand mining, water level along the main shipping channel will drop by 0.10 m in dry season. The whole flow field changes little before and after sand mining. Flow velocities around the two embankments decrease and the maximum deflection angle is smaller than 23°, which do not hamper sand dredger access. Blocking dams reduce flow velocity in the middle branch by 0.52 m/s in wet season. Blocking dams control the overall stability of river regime and prevent the middle branch from erosion and development which might lead to steep water-level drop, dimension shrinkage and even rerouting in the shipping channel. Meanwhile, high flow velocities occur around mining area boundaries and scour beaches, so it is recommended to protect the blocking dams and beaches.

Keywords: the lowest reach of Yuanjiang River; bifurcating channel; sand mining; blocking dam; shipping channel; 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)》(以下简称“规划”)^[1],新一轮采砂活动正式启动。沅水在常德以下汇入洞庭湖,尾闾段洲滩逐年淤高,砂石资源储量丰富。2021年10月启动沅水常德—鲇鱼口2000吨级航道建设工程,将航道等级由Ⅲ级提升为Ⅱ级,当前仍在建设中,其中安彭港上游航道水深条件较好,满足2000吨级航道通航要求^[2]。常德市汉寿县金石垸、太湖垸两采区位于该河段内,为2019—2022年和2023—2027年两期规划^[3]中的采区,需关注采砂活动对航道通航水流条件的影响。

当前,关于采砂对河道水动力条件、通航条件影响的研究较多,多借助平面二维水沙数学模型^[4-10],采砂方案布置对分汊河道河势演变和河段整体动态平衡产生重要影响^[11-12]。本文根据2016年和2022年研究河段实测地形和相关水文站、水文监测断面的流量、水位、流速资料建立平面二维水流运动数学模型,计算采砂前后不同地形、水文条件组合下河段内分流比、水位和流速变化,分析对航道的影响,并就维护采区和航道安全提出建议。

1 工程概况

沅水常德—鲇鱼口2000吨级航道工程见图1。

采区河段为分汊河道,主航道位于北汊,南汊为临时航道,中汊金石河不通航,见图2。金石河自1970年人工开挖形成以来,河势长期保持稳定,河宽较窄,金石垸、太湖垸一期采砂工程(2019—2022年)由金石河向两侧洲滩逐步开挖、显著拓展了金石河宽度,二期采砂工程(2023—2027年)在二期基础上进一步增大其宽度,但未涉及金石河进口段,其宽度变化不大。一期采砂工程完成后,横向受两岸堤防控制,河段岸坡稳定少变;纵向河段整体呈冲刷趋势,其中主航道河段深槽呈现上游段拓宽、中间段变化较小、下游段束窄,安彭港下游河段泥沙淤积,南汊河槽整体保持稳定,金石河受采砂影响,上游进口段和下游出口段略有冲刷,但两岸岸坡基本稳定,采区段河槽拓宽、河床高程下降^[13]。当地管理部门于2023年4月在金石河上游进口和下游出口处均堆建了1道锁坝,有利于减少金石河过流、维持主航道分流比。



图1 常鲇2000吨级航道工程
Fig. 1 2000-ton waterway project from Changde to Nianyukou



图 2 研究区段工程布置
Fig. 2 Engineering layout of studied area

2 研究区域与方法

2.1 采砂方案与航道条件

一、二期采区均位于北汉主航道、南汉临时航道和中汉金石河分割成的大、小泛洲上,二期规划中金石垸、太湖垸采区面积分别为 4.67、0.57 km²,控采总量分别为 1.0 亿、0.2 亿 t,控采高程均为-5 m。两采区直接与河道连通,采砂船进出通道无需专门开挖。金石河上游锁坝在其进口下游 612 m 处,下游锁坝在出口上游 346 m 处。两锁坝均为堆石坝,筑坝材料为采区内粗颗粒卵石,粒径 100~200 mm。

常德—鲇鱼口 213 km 现状 III 级航道可通航 1 000 吨级船舶,全线航道水深达 2 m,大部分航道水深 3 m 以上。安彭港上游航道平均水深 5 m,最小通航水深 3.4 m,达到 II 级航道标准,整段无整治工程。常鲇 II 级航道最低通航水位取 98% 保证率水位,最高通航水位为 20 a 一遇洪水位,设计航道尺寸为 3.0 m×75 m×550 m(水深×双线航宽×弯曲半径)。

2.2 数学模型建立

2.2.1 计算范围及网格

采用 MIKE 21 中水动力模块开展平面二维水流运动数值计算,考虑采砂工程可能的影响范围及地形资料情况,计算区域上边界定为新兴嘴上游 3 km 处,下边界定为鱼子桥滩处,沿河道中心线长度为 15.5 km,计算范围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 12.619 9 万个网格,陆域和水域网格尺寸分别按不超过 1 000 m² 和 200 m² 控制,对地形变化较大和需重点关注的区域适当加密,见图 3。

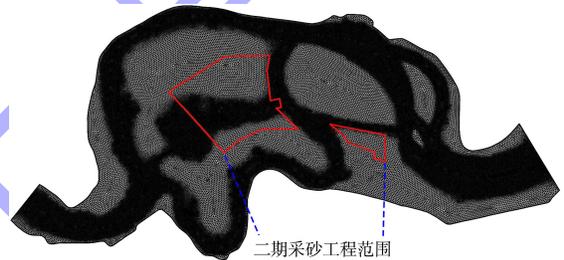


图 3 计算区域网格
Fig. 3 Grids of calculation area

2.2.2 地形处理

在 2016 年(一期采前)和 2022 年(现状)地形测图上提取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,并对地形进行平滑处理,见图 4a)、b)。在 2022 年(现状)地形基础上,根据地勘报告中各钻孔位置附近可采深度^[16-17]相应降低网格高程,得到采砂后地形,见图 4c)。

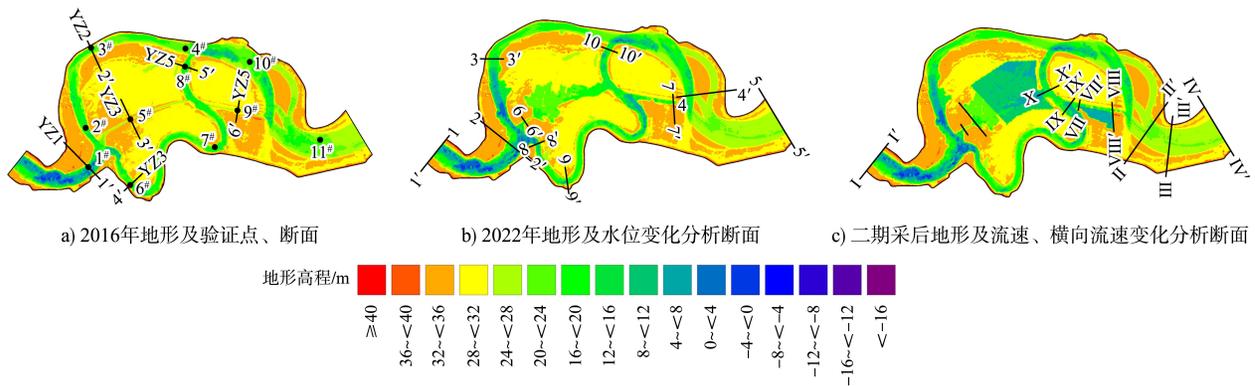


图 4 计算区域地形及验证点、断面
Fig. 4 Terrain, verification points and sections in calculation area

2.2.3 边界处理

模型上游进口边界给定桃源站或常德站流量，下游出口边界给定水位，该水位由牛鼻滩和周文庙2站水位内插得到。陆地边界不过流，法向流速设为0。

2.3 计算工况

为充分识别河床演变、采砂工程、锁坝等因素对航道水流条件的影响，选取5种地形条件，并根据JTS/T 231—2021《水运工程模拟试验技术规范》(简称《规范》)^[18]要求采用枯水期(设计最小通航流量)、中水期(多年平均流量)及洪水期(设计最高通航流量)3种水文条件、共计15种计算工况(表1)，枯水、中水、洪水期模型进口流量分别为393、2 053、24 290 m³/s，出口水位分别为26.99、28.26、38.63 m。不同地形条件分组对比情况见表2。

表1 计算工况

Tab.1 Working conditions for calculation

地形条件	水文条件	工况编号
一期采砂前(2016年地形)	枯、中、洪	1,2,3
一期采砂后(2022年地形+金石河未封堵)	枯、中、洪	4,5,6
现状地形(2022年地形+金石河封堵)	枯、中、洪	7,8,9
二期采砂后(2022年地形+金石河封堵+二期采砂)	枯、中、洪	10,11,12
二期采砂后锁坝被冲毁	枯、中、洪	13,14,15

表2 地形分组对比

Tab.2 Group comparison of terrain

组次	对比地形	影响(差异)说明
1	一期采砂后与一期采砂前	一期采砂和全河段地形变化的影响
2	现状地形与一期采砂前	现状地形与一期采砂前的差异
3	二期采砂后与现状地形	金石河封堵状态下二期采砂的影响
4	二期采砂后锁坝被冲毁与现状地形	二期采砂后的最不利情况
5	二期采砂后锁坝被冲毁与一期采砂前	二期采砂后最不利情况与一期采砂前的差异
6	现状地形与一期采砂后	锁坝的影响
7	二期采砂后锁坝被冲毁与一期采砂后	二期采砂的影响

3 模型验证

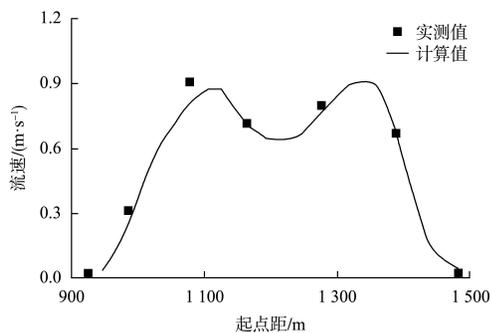
采用2016年5月16日实测中洪流量下汉道分流比和断面流速分布对模型滩槽糙率进行率定，计算对应的模型进、出口边界流量和水位分别为5 310 m³/s和31.78 m；采用枯水(2022-10-16)、中水(2022-08-04)、洪水(2022-06-04)3次沿程实测水位对模型糙率进行验证，分别接近设计最小通航流量、多年平均流量和常年洪水流量对应的水文条件，模型进、出口边界流量和水位分别为393、2 053、17 509 m³/s和26.99、28.26、35.07 m。

结果表明，分流比计算值与实测值相差-0.79%~0.69%(表3)，断面流速分布基本一致(图5)，水位计算值与实测值相差-0.03~0.03 m(图6)，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。最终确定河槽糙率范围为0.015~0.022，滩地糙率范围为0.038~0.045，与现有研究成果接近^[19]。考虑到采砂过程中大、小泛洲被大幅挖低、植被被挖除，且金石河上、下游有2道锁坝，根据《水力计算手册(第二版)》^[20]，适当调整采区和锁坝处糙率。

表3 分流比验证

Tab.3 Verification of flow partition ratio

断面	实测流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	计算流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	实测分 流比/%	计算分 流比/%	分流比 差值/%
YZ 1-1'	5 240	5 309	100.00	100.00	0.00
YZ 2-2'	2 430	2 504	46.37	47.17	-0.79
YZ 3-3'	330	321	6.30	6.05	0.25
YZ 4-4'	2 480	2 484	47.33	46.79	0.54
YZ 5-5'	2 430	2 422	46.05	45.62	0.43
YZ 6-6'	417	383	7.90	7.21	0.69



a) YZ 1-1'

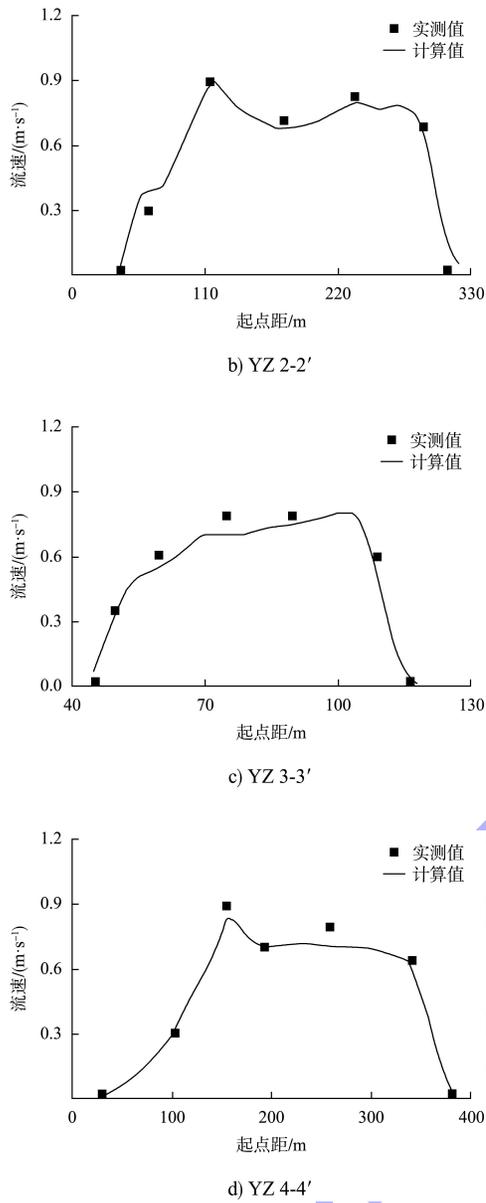


图 5 断面流速分布验证

Fig. 5 Verification of velocity distribution of sections

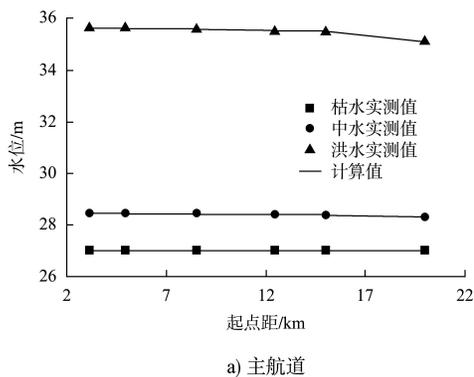


图 6 各汊沿程水位验证

Fig. 6 Water level verification along each branch

4 计算结果分析

对比组次 1~7, 重点分析枯水期和洪水期对通航和河势安全不利水文条件下的水动力场变化。考虑到中水期水流未漫滩, 用于地形对比组次 6、7 中, 体现锁坝阻水和二期采砂工程吸流的影响。

4.1 分流比变化

各组次对比下分流比变化见表 4。

组次 1: 枯水期, 金石河大泛洲段增大 7.05%, 南汉减小 8.40%; 洪水期, 金石河小泛洲段增大 5.02%。

组次 2: 枯水期, 主航道增大 4.71%, 南汉减小 4.68%; 洪水期, 金石河小泛洲段增大 4.88%。

组次 3: 洪水期, 金石河小泛洲段增大 5.10%, 主航道相应减小。

组次 4: 枯水期, 金石河大泛洲段增大 7.12%, 南汉、主航道相应减小; 金石河小泛洲段增大 5.24%, 主航道相应减小。洪水期, 金石河大泛洲段增大 5.34%, 主航道相应减小。

表 4 各分组对比下分流比变化

Tab. 4 Flow partition ratio changes in different groups

组次	水文条件	对比工况	大泛洲段滩槽分流比变化/%				小泛洲段滩槽分流比变化/%		
			主航道	金石河	洲滩	南汉	主航道	金石河	洲滩
1	枯	4 与 1	1.35	7.05	0.00	-8.40	-1.40	1.40	0.00
	洪	6 与 3	-1.38	1.39	0.05	-0.06	-1.03	5.02	-3.99
2	枯	7 与 1	4.71	-0.03	0.00	-4.68	0.38	-0.38	0.00
	洪	9 与 3	-0.96	0.58	0.40	-0.02	-0.81	4.88	-4.07
3	枯	10 与 7	0.05	0.00	0.00	-0.05	0.00	0.00	0.00
	洪	12 与 9	-0.74	0.15	0.81	-0.22	-2.92	5.10	-2.18
4	枯	13 与 7	-3.59	7.12	0.00	-3.54	-5.24	5.24	0.00
	洪	15 与 9	-1.21	0.97	0.50	-0.26	-3.26	5.34	-2.08
5	枯	13 与 1	1.12	7.10	0.00	-8.22	-4.86	4.86	0.00
	洪	15 与 3	-2.17	1.55	0.90	-0.28	-4.07	10.22	-6.15
6	中	8 与 5	4.22	-8.48	0.00	4.26	3.57	-3.57	0.00
7	中	14 与 5	-0.56	0.08	0.00	0.48	-6.62	6.62	0.00

组次 5: 枯水期, 金石河大泛洲段增大 7.10%, 南汉减小 8.22%; 金石河小泛洲段增大 4.86%, 主航道相应减小。洪水期, 金石河小泛洲段增大 10.22%, 主航道相应减小。

组次 6: 中水期水流未漫过金石河锁坝, 金石河不过流, 南汉、主航道增大 3.57%~4.26%。

组次 7: 金石河小泛洲段增大 6.62%, 主航道相应减小。

综上, 一期采砂工程大幅拓宽了金石河, 枯水期金石河大泛洲段分流比增大 7.05%; 二期采砂工程实施后, 采区吸流作用增强, 洪水期金石河分流比明显增大, 小泛洲段增幅达 5.10%; 若二期采砂后锁坝被冲毁, 金石河分流比增幅在 7.12% 以上, 主航道和南汉分流比则明显减小。

4.2 水位变化

各组次对比下最大水位变幅的变化见表 5。

表 5 各分组对比下沿程水位变化

Tab. 5 Water level changes in different groups

组次	水文条件	对比工况	水位变化/m									
			主航道					金石河		南汉		
			1-1'	2-2'	3-3'	4-4'	5-5'	6-6'	7-7'	8-8'	9-9'	10-10'
1	枯	4 与 1	-0.08	-0.08	-0.10	-0.05	0.00	-0.08	-0.04	-0.09	-0.10	-0.07
	洪	6 与 3	-0.03	0.00	0.02	0.05	0.00	-0.01	0.05	0.01	0.01	0.04
2	枯	7 与 1	-0.03	-0.03	-0.02	0.02	0.00	-0.03	0.02	-0.03	-0.03	0.00
	洪	9 与 3	-0.03	0.01	0.02	0.05	0.00	0.00	0.07	0.02	0.02	0.04
3	枯	10 与 7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	洪	12 与 9	-0.03	-0.03	-0.03	0.00	0.00	-0.03	0.01	-0.03	-0.02	-0.01
4	枯	13 与 7	-0.07	-0.07	-0.07	-0.06	0.00	-0.08	-0.06	-0.07	-0.07	-0.06
	洪	15 与 9	-0.03	-0.03	-0.03	0.00	0.00	-0.04	0.00	-0.03	-0.03	-0.01
5	枯	13 与 1	-0.10	-0.10	-0.10	-0.05	0.00	-0.11	-0.04	-0.10	-0.10	-0.07
	洪	15 与 3	-0.06	-0.02	-0.01	0.05	0.00	-0.04	0.06	-0.02	-0.01	0.03
6	中	8 与 5	0.03	0.03	0.05	0.02	0.00	0.04	0.05	0.03	0.04	0.03
7	中	14 与 5	-0.02	-0.02	0.00	0.00	0.00	-0.02	0.02	-0.02	0.00	0.00

组次 1: 枯水期, 河段水位沿程降低, 主航道最大降幅 0.10 m; 洪水期, 进口段水位略有降低, 其余区段水位抬升, 主航道最大抬升 0.05 m。

组次 2: 枯水期, 主航道最大降幅仅 0.03 m, 部分区段甚至略有抬升; 洪水期, 水位沿程变化特征与组次 1 对比类似, 但进口段水位降幅进一

步减小, 其余区段水位继续抬升, 金石河小泛洲段抬升 0.07 m。

组次 3: 枯水期, 金石河锁坝封堵状态下不过流, 二期采砂工程未产生影响, 沿程水位均无变化; 洪水期, 水位以降低为主, 主要位于大泛洲段, 但降幅很小, 各汊最大降幅均为 0.03 m。

组次 4: 枯水期, 沿程水位普遍大幅降低, 进口段和主航道大泛洲段降低 0.07 m, 主航道小泛洲段降低 0.06 m 左右, 出口段无变化; 金石河锁坝上游水位陡降 0.08 m, 两锁坝间水位降幅减小至 0.06 m 左右; 南汊水位降低 0.06~0.07 m。洪水期, 各汊水位降幅均不大。

组次 5: 枯水期, 沿程水位降幅较组次 4 对比更大, 主航道、金石河、南汊水位最大降幅分别达 0.10、0.11、0.10 m。洪水期, 主航道和金石河水位最大降幅分别为 0.06、0.04 m, 南汊进口段水位也小幅降低。

组次 6: 中水期, 金石河锁坝封堵状态下不过流, 主航道水位沿程抬升, 最大抬升 0.05 m; 金

石河上、下游锁坝前水位最大抬升 0.04、0.05 m; 南汊水位最大抬升 0.04 m。

组次 7: 中水期, 沿程水位整体降低, 但降幅不大。

主航道枯水期水位在一期采砂后最大下降 0.10 m, 金石河锁坝存在时二期采砂后水位无变化, 若锁坝垮塌则水位下降 0.07 m, 可见锁坝能有效削弱采砂对主航道水位降落的影响。一期采砂后安彭洲上游区段河床冲刷降低、下游区段河床淤高(现河段河床出口比进口高 15 m 以上), 壅水效应是安彭州下游河段水位抬升的主要原因。锁坝修建后, 枯水期研究河段进口至大泛洲头部分汊口区段水面比降减小 4‰。二期采砂完成后主航道最小水深仍在 3 m 以上, 满足 II 级航道通航要求。

4.3 流速变化

各工况下横向流速变化均不大, 主要提取各组次对比中流速增幅最大断面处的变化结果, 见表 6。

表 6 各分组对比下沿程流速变化

Tab. 6 Flow velocity changes in different groups

组次	水文条件	对比工况	流速变化/(m·s ⁻¹)									
			主航道				金石河				南汊	
			I-I'	II-II'	III-III'	IV-IV'	V-V'	VI-VI'	VII-VII'	VIII-VIII'	IX-IX'	X-X'
1	枯	4 与 1	0.00	0.08	0.07	0.00	0.10	0.01	-0.03	0.00	-0.09	-0.01
	洪	6 与 3	0.00	0.18	0.14	0.02	-0.07	-0.46	-0.06	-0.02	-0.10	0.17
2	枯	7 与 1	0.00	0.08	0.07	0.00	0.00	0.00	-0.03	-0.01	-0.09	0.00
	洪	9 与 3	0.00	0.18	0.14	0.02	-0.14	-0.52	-0.06	-0.14	-0.10	0.17
3	枯	10 与 7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	洪	12 与 9	0.00	-0.02	0.00	0.00	0.02	0.00	0.14	-0.06	0.08	-0.01
4	枯	13 与 7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.01	0.01	0.03	-0.01	-0.01
	洪	15 与 9	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.08	0.06	0.15	0.08	0.13	0.00
5	枯	13 与 1	0.00	0.08	0.07	0.00	0.10	0.01	-0.02	0.02	-0.09	-0.01
	洪	15 与 3	0.00	0.17	0.13	0.02	-0.06	-0.46	0.09	-0.06	0.03	0.17
6	中	8 与 5	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.41	-0.07	-0.02	-0.08	0.02	0.03
7	中	14 与 5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.06	0.12	-0.01	-0.03

组次 1: 枯水期, 主航道和金石河流速最大增幅分别为 0.08、0.10 m/s; 洪水期, 主航道和南汊流速最大增幅分别为 0.18、0.17 m/s。

组次 2: 枯水期, 主航道流速最大增幅 0.08 m/s; 洪水期, 主航道和南汊流速最大增幅分别为 0.18、

0.17 m/s。

组次 3: 枯水期, 研究河段流速均无变化; 洪水期, 金石河和南汊流速最大增幅分别为 0.14、0.08 m/s。

组次 4: 枯水期, 金石河流速最大增幅 0.10 m/s;

洪水期，金石河和南汊流速最大增幅分别为 0.15、0.13 m/s。

组次 5：枯水期，主航道和金石河流速最大增幅分别为 0.08、0.10 m/s；洪水期，主航道、金石河和南汊流速最大增幅分别为 0.17、0.09、0.17 m/s。

组次 6：中水期，研究河段流速以减小为主。

组次 7：中水期，金石河流速最大增幅为 0.12 m/s。

各工况下 II 级航道主航道流速小于 2.00 m/s、横向流速小于 0.30 m/s，根据 GB 50139—2014《内河通航标准》^[21]，不影响船舶安全行驶。河段整体流态平顺，采砂前后变化不大，采区附近流速普遍减小，且最大偏转角不超过 23°。二期采砂工程较一期采砂工程对研究河段流速、横向流速影响小，锁坝可使金石河流速减小达 0.52 m/s。

5 工程建议

5.1 采区隔离带滩地守护

根据地勘报告，两采区及附近上覆层由砂质黏土、淤泥质黏土、亚黏土、淤泥组成，砂粒径为 0.08~5 mm，砾石粒径在 5 mm 以上。

数学模型计算结果表明，二期采砂工程实施后，金石坑采区及附近洪水期流速最大值为 0.33 m/s，太湖坑采区及附近洪水期流速最大值为 0.68 m/s；若金石河锁坝被冲毁，两采区及附近洪水期流速最大值将分别增大至 0.33、0.77 m/s。根据《水力计算手册》(第二版)中不同粒径泥沙的允许不冲流速范围，金石坑采区及附近流场可造成 0.25 mm 以下粒径泥沙冲刷，太湖坑采区及附近流场可造成 2.5 mm 以下粒径泥沙冲刷，应对两采区与南汊之间的薄滩地进行守护，严防垮塌。

5.2 锁坝守护

若金石坑、太湖坑二期采砂工程实施后金石河上、下游 2 道锁坝被冲毁，将使得枯水期、中水期、洪水期金石河分流比最大增加 7.12%、10.18%、10.22%。综合本次模型计算结果和相关

报告成果^[22-24]对各汊分流比变化进行敏感性分析，如图 7 所示，随着研究河段进口流量增大，水流流路取直，金石河与两侧滩地分流比增大、南北汊分流比均减小，说明水流极易对金石河起到冲刷拓展作用。同时，锁坝冲毁后枯水期主航道水位将大范围下降 0.07 m 左右，可能导致通航水深不足，且主航道流速最大减小 0.26 m/s、金石河流速最大增加 0.52 m/s。长此以往，金石河将冲深拓宽，改变研究河段整体河势，甚至使得主航道因水流动力不足而明显淤积，产生航道萎缩、改线等不利后果。

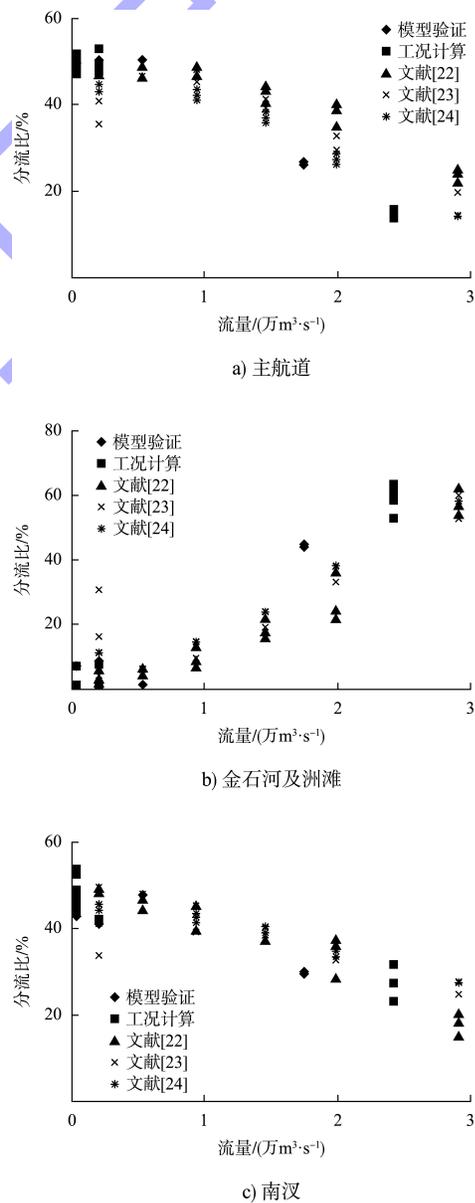


图 7 汊道分流比随流量变化敏感性分析

Fig. 7 Sensitivity analysis of flow partition ratio with flow rate

计算得到设计最高通航流量(20 a一遇洪水)金石河上、下游锁坝处流速最大值分别为2.6、2.0 m/s,小于该粒径卵石的允许不冲流速3.4~4.9 m/s。通过计算200 a一遇洪水流量情况(河段进口流量为2.755 0万 m³/s,出口水位40.95 m),得到上、下游锁坝处最大流速仍小于3.0 m/s,锁坝仍不能被冲毁。因此,锁坝自身较稳固,但为防止特大洪水冲毁锁坝的可能性,仍建议对锁坝采取加固措施。

6 结论

1) 数学模型结果与沿程水位、流速实测成果符合较好,对应的河槽和滩地糙率取值范围分别为0.015~0.022和0.038~0.045,模拟得到的各工况下水位与流场变化结果可靠。

2) 二期采砂工程对研究河段内分流比、水位、流速影响较一期采砂工程影响小,金石河锁坝能有效削弱采砂工程对航道水流条件的不利影响,若采砂后锁坝被冲毁,主航道水位最大降幅0.10 m,金石河分流比和流速最大增幅分别为10.22%和0.52 m/s。

3) 为防止采区隔离带滩体受冲垮塌,需进行守护。为避免金石河发展过快造成分汊河道河势重大变化和通航条件迅速恶化,需对上、下游2道锁坝进行守护。

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)[R]. 长沙:湖南省水利厅,2023.
- [2] 湖南省交通规划勘察设计院有限公司. 沅水常德至鲇鱼口2000吨级航道建设工程初步设计[R]. 长沙:湖南省交通规划勘察设计院有限公司,2020.
- [3] 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(2019—2022年)[R]. 长沙:湖南省水利厅,2019.
- [4] 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]. 水利水电工程学报,2016(5):70-77.
- [5] 张强,张小峰. 采砂区布置对分汊河道的影响分析[J]. 武汉大学学报(工学版),2009,42(2):153-157.
- [6] 徐芳,岳红艳. 河道采砂对航道和通航环境安全的影响[J]. 水运工程,2010(8):106-110.
- [7] 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.
- [8] 雷淳宇,王誉寰. 长江上游红灯碛滩采砂活动对航道维护的影响及治理措施[J]. 水运工程,2022(2):119-124,146.
- [9] 赵江,林勇,贾国珍. 岷江连续分汊滩段河床演变与航道条件变化分析[J]. 水运工程,2023(S1):56-62.
- [10] 金辉,陈健强,冯小香,等. 湘江营田滩河段2000 t级航道整治工程效果数值模拟[J]. 长江科学院院报,2015,32(2):5-10.
- [11] 李志威,符蔚,胡旭跃,等. 荆江河段与洞庭湖水系的采砂量计算分析[J]. 长江科学院院报,2019,36(2):8-12,38.
- [12] LANZONI S, LUCHI R, BOLLA PITTALUGA M B. Modeling the morphodynamic equilibrium of an intermediate reach of the Po River (Italy)[J]. Advances in water resources, 2015, 81(7):95-102.
- [13] 长沙泰湘工程咨询有限公司. 汉寿县金石垸、太湖垸采区航道通航条件影响评价报告[R]. 长沙:长沙泰湘工程咨询有限公司,2023.
- [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.
- [15] 张贵金,罗舸旋子,朱博渊,等. 极端条件下堆石坝溃坝风险及应急预案[J]. 水利水电科技进展,2021,41(2):28-35.
- [16] 湖南省地质矿产勘查开发局四〇三队. 湖南省汉寿县金石垸(河)砂砾石矿资源储量报告[R]. 常德:湖南省地质矿产勘查开发局四〇三队,2016.
- [17] 湖南省地质矿产勘查开发局四〇三队. 汉寿县太湖垸砂砾石矿区范围调整资源储量计算结果的说明[R]. 常德:湖南省地质矿产勘查开发局四〇三队,2020.