

# 软体排护底在南京八卦洲右汊进口段 治理中的应用效果分析<sup>\*</sup>

罗 青<sup>1</sup>, 王茂枚<sup>1</sup>, 徐 慧<sup>2</sup>, 周玲霞<sup>3</sup>, 蔡 军<sup>1</sup>

(1. 江苏省水利科学研究院, 江苏南京 210017; 2. 南京市江宁区水务局, 江苏南京 211112;  
3. 南京市长江河道管理处, 江苏南京 210011)

**摘要:** 八卦洲右汊进口段实施了系混凝土软体排全断面护底工程。但由于八卦洲右汊是主汊, 水深流急、地形变化复杂, 进行河床全断面整体铺排施工难度大。为明晰软体排在该工程中的应用效果, 利用多波束测深系统多次采集工程区水下地形数据, 通过多波束效果图检测软体排铺排质量, 并利用 GIS 空间分析技术定量分析不同时期工程区河床变化, 更好地掌握工程整治与运行效果。结果表明, 完工后工程区河床由以冲刷为主转为以淤积为主, 最大淤积幅度可达 7.87 m, 工程阻止了进口断面进一步扩大; 2020 年特大洪水后, 工程区河床整体淤积量和淤积面积持续增加, 淤积面积占比由 66.6% 上升至 83.9%, 淤积量由 41.4 万 m<sup>3</sup> 上升至 54.5 万 m<sup>3</sup>; 全断面软体排护底工程运行稳定, 发挥了工程防护效果。

**关键词:** 软体排; 全断面铺排; 长江南京河段; 八卦洲右汊进口段; 冲淤分析

中图分类号: TV523; U656.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)07-0113-07

## Application effect of soft mattress in treating right-branch entrance section of Nanjing Baguazhou

LUO Qing<sup>1</sup>, WANG Maomei<sup>1</sup>, XU Hu<sup>2</sup>, ZHOU Lingxia<sup>3</sup>, CAI Jun<sup>1</sup>

(1. Jiangsu Hydraulic Research Institute, Nanjing 210017, China;  
2. Jiangning District Water Affairs Bureau of Nanjing City, Nanjing 211112, China;  
3. Nanjing Yangtze River and River Administration Office, Nanjing 210011, China)

**Abstract:** The right-branch entrance section of Baguazhou implements the full-section concrete soft mattress project. However, Baguazhou right branch is the main branch, with deep water, rapid currents, and complicated terrain changes, so the full-section layout construction in the riverbed is difficult. In order to illustrate the application effect of the soft mattress in the project, this paper uses the multi-beam bathymetry system to collect underwater topographic data in the project area many times and detects the quality of the soft mattress layout through the multi-beam effect map. Furthermore, the paper uses geographic information system (GIS) spatial analysis technology to quantitatively analyze the riverbed changes in the project area in different periods, so as to better grasp the effect of project remediation and operation. The results show that after the completion of the project, the riverbed of the project has changed from scouring to silting, and the maximum siltation range can reach 7.87 m. The project prevents the further expansion of the entrance section. After the severe flood in 2020, the overall siltation volume and siltation area of the project riverbed continue to increase, with the siltation area ratio increasing from 66.6% to 83.9% and the siltation volume increasing from 414,000 m<sup>3</sup> to 545,000 m<sup>3</sup>. The full-section soft mattress project is running stably and has played a role in engineering protection.

**Keywords:** soft mattress; full-section soft mattress layout; Nanjing section of the Yangtze River; right-branch entrance section of Baguazhou; scouring and silting analysis

收稿日期: 2022-09-23

\*基金项目: 江苏省水利科技项目 (2019001、2020007、2021063)

作者简介: 罗青 (1988—), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为水下地形测绘。

通讯作者: 王茂枚 (1983—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为水下地形测绘。E-mail: wangmaomei@163.com

软体排是在江河护岸工程实践中创新优化的新型防护结构，排体一般由土工布排垫和混凝土压重块组成，具有反滤、隔离、防冲、适应河床变形能力强等优点，被广泛应用于护岸、护底和护滩等江河航道整治工程中，对河流河势稳定及堤防安全具有积极作用。张景明<sup>[1]</sup>根据软体排在长江口深水航道治理工程中的应用，指出软体排具有保土透水、避免河床泥沙免受水流冲刷的功能；曹棉<sup>[2]</sup>结合软体排在长江航道整治工程中的施工情况，指出排布、压载物、排体搭接质量是工程质量控制要点；李文全等<sup>[3]</sup>通过资料分析与模型试验，指出在排体接缝处会因为排体搭接宽度不足而产生排体破坏现象。而软体排护底工程为水下隐蔽工程，因排体薄，铺排后水下地形变化不明显的特点使得水下质量检测困难。研究人员对此也进行了一系列的研究，利用新技术、新方法提高排体水下质量检测精度。赵钢等<sup>[4]</sup>在充分对比各种水下检测技术的基础上，指出多波束测深技术在检测软体排铺设质量方面具有较大的优势；赵建群等<sup>[5]</sup>总结分析水下铺排采用检测技术在工程中的应用，指出侧扫声呐可清晰反映排体水下铺设情况。

随着软体排施工工艺与水下质量检测技术的发展，南京八卦洲右汊进口护底工程也选用了软体排进行施工。但八卦洲右汊是主汊，水深流急、地形变化复杂，进行右汊进口段河床全断面整体铺排施工难度大，工程完工后能否取得良好的整治效果以及能否稳定运行值得研究。因此，本文采用多波束测深仪采集工程区施工前、后以及工程运行经历 2020 年特大洪水后等多期水下地形点云数据，并利用地理信息系统(GIS)空间分析技术对监测数据进行叠置分析，获取河床的冲淤数据。再对冲淤数据进行聚合分析、统计分析、栅格计算等一系列 GIS 空间分析，定量分析工程的整治效果以及工程经历了 2020 年特大洪水后的运行情

况，科学评价工程整治与运行情况，为长江类似河道整治工程提供参考依据。

## 1 工程概况

八卦洲汊道位于长江南京河段中下段，起于下关止于西坝，主泓长约 18 km，为鹅头分汊型河道，右汊为主汊，是长江下游重点治理河段之一<sup>[6-7]</sup>。八卦洲汊道近期演变以 1983—1993 年的集资整治工程为界，集资整治工程实施前，八卦洲头水下鱼嘴尚未形成，处于自然演变状态<sup>[8]</sup>。集资整治工程对洲头及洲头左右缘实施了护岸工程，洲头形成分水鱼嘴，八卦洲汊道步入人工控制阶段。目前，由于河势演变的复杂性及三峡水库运行后清水下泄影响，八卦洲头水下鱼嘴出现了多条横向冲槽，洲头右缘深槽向近岸和下游发展，现有护岸工程出现了不同程度的淘刷，危及河势稳定及防洪安全，影响洲头鱼嘴及洲头右缘的稳定。为了控制和稳定河势，防止右汊进口断面进一步扩大，保障防洪安全，促进经济社会的可持续发展，对八卦洲右汊进口段实施护底工程。

八卦洲右汊进口段水下地形变化较大，靠近洲头水深流急，水底高程超过 -40 m。河床的主要物质为松散-稍密状粉砂，厚度 11.4~14.3 m，抗冲刷能力差，一般形式的护底工程易产生冲刷淘蚀。而软体排适应河床变形能力强，且保土透水，能有效地避免河床泥沙被冲刷。因此，采用软体排作为八卦洲右汊进口段护底措施。工程位置如图 1 所示。对右汊进口 -30 m 上深槽尾部与 -30 m 下深槽头部之间的河床采用全断面系混凝土块软体排护底，工程顺水流向长 450 m、宽 800 m，面积 36.45 万 m<sup>2</sup>。工程于 2019-03-31 开工，铺设 4 块排体后，为了确保施工安全、工程质量可靠，于 2019 年汛期停工，后于 2019-10-30 复工，2020-01-17 完工。

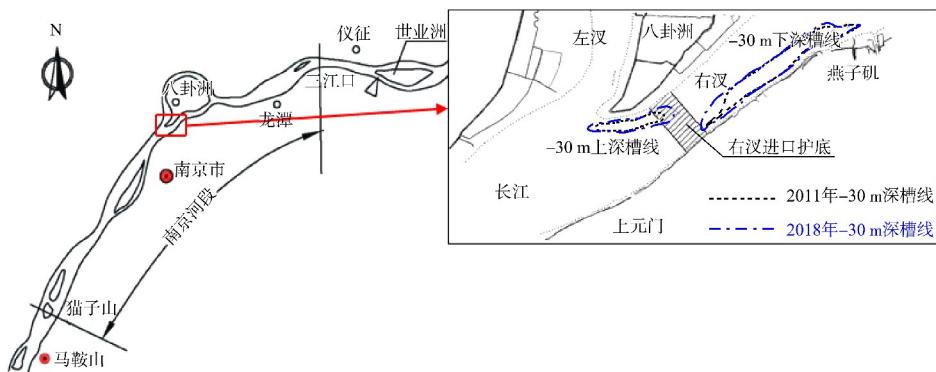


图1 工程位置

## 2 软体排施工

### 2.1 软体排设计

系混凝土块软体排主要由混凝土压重块和土工布排垫组成。根据设计文件,当流速小于3 m/s时,沉排压重块规格可采用102 kg/m<sup>2</sup>。根据数学模型计算和物理模型试验,八卦洲右汊设计流速为3.0 m/s,考虑到工程区域流态比较复杂,故采用约160 kg/m<sup>2</sup>的“王”字型C20素混凝土预制压重块,设计尺寸为400 mm×260 mm×120 mm(长×宽×厚)。排垫为320 g/m<sup>2</sup>的丙纶长丝机织布,沿排垫长度方向缝制70 mm宽的加筋条,加筋条首、尾缝制成直径为50 mm的圆环,圆环间采用直径20 mm的尼龙绳。工程共布设49块系混凝土软体排,其中43块排体尺寸为230 m×40 m(长×宽),6块排体尺寸为230 m×22 m,用于部分深水区域铺设。

### 2.2 软体排施工

工程使用水上沉排施工工艺,在沉排船上完成排体铺放、压重混凝土块绑扎。首先是卷排,利用吊机将排头布平展在翻板上,绷紧排布,使其无折皱无收缩;然后,校准船位开始排头沉放,在排布上放置混凝土块,利用土块自身重力使排头徐徐沉入江底。再进行混凝土块吊装与绑系,利用专门制作的吊装机保证土块基本水平,利用缆风绳牵引土块至标识的排体上进行绑扎固定;最后进行沉排,利用缆绳控制铺排船移动,控制卷扬机速度,使排体均匀下沉。利用全球导航卫星系统(GNSS)实时定位,动态控制沉排轨迹和搭接宽度,保证排体最小搭接宽度不得少于2 m,保

证护底范围和搭接宽度满足设计要求。

### 2.3 软体排质量检测方法

排布、混凝土块、排体搭接质量是否满足设计要求,是工程质量控制要点。在材料进场后,大规模施工前对排布、混凝土块及其附属材料进行物理性能抽检,确保施工材料满足设计要求。铺排为水下隐蔽施工,排体搭接质量是影响工程质量的关键因素之一,而排体薄,铺排后水下地形变化不明显,甚至部分区域的水下高程会出现负增长,难以从水下高程的变化程度反映出排体的情况,导致检测难度高。而多波束测深技术具有全覆盖、高精度和高分辨率的特性<sup>[9]</sup>,能精确反映河床的细微变化。根据多波束的水下地形效果图可以直接观察水下排体情况,了解铺排的均匀程度、铺排后排体的长度、宽度以及排体之间的搭接情况。因此,本文采用多波束测深技术对铺排效果进行精细化检测。

## 3 工程效果分析

### 3.1 施工效果分析

利用多波束测深系统按照施工进度对铺排效果进行精细化检测,如果发现施工缺陷区,可以精准定位缺陷区并指导施工。铺排后多波束侧扫效果见图2。从区域a的放大图可见明显的排体痕迹,排体铺排均匀,相邻排体间存在明显的搭接区域。对区域内可见排体进行量测,排体长度范围221~224 m,宽度范围35~39 m,与原始尺寸相近,对区域b排体搭接宽度进行抽检,宽度范围2~6 m,满足设计要求,说明施工效果较好,河床全断面铺排切实可行。

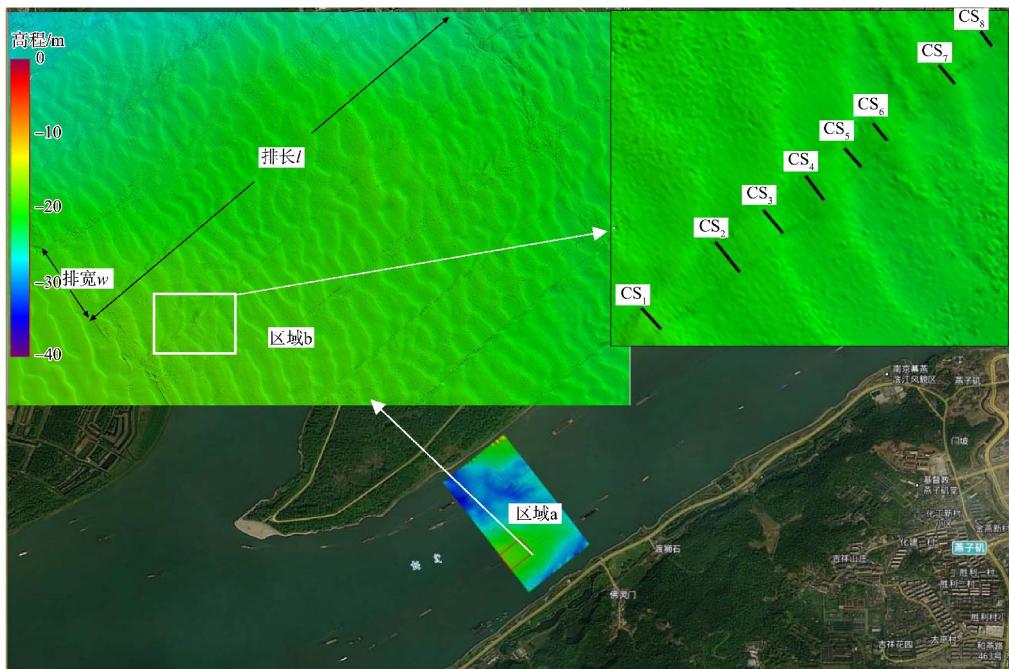


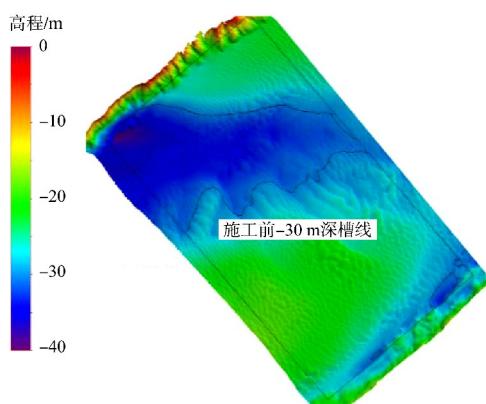
图 2 铺排后施工区的部分多波束水下地形

### 3.2 工程效果分析

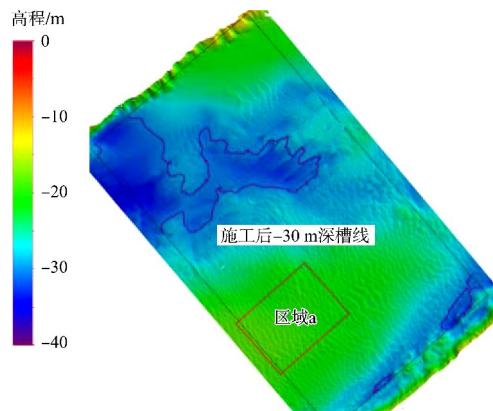
由《长南京河段八卦洲汊道河道整治工程初步设计报告》<sup>[10]</sup>可知, 2015—2018 年八卦洲右汊河床基本上为冲刷, 八卦洲头右缘深槽进一步冲刷发展, 冲刷最严重的区域为深槽上段, 八卦洲鱼嘴右侧最大冲刷深度约 6 m。根据动床模型试验结果可知, 8 个水文年以后, 八卦洲右汊冲刷 370 万 m<sup>3</sup>, 洲头右缘深槽、燕子矶深槽、天河口深槽平均冲刷幅度约 3 m。

为了分析工程是否有效地抑制了八卦洲右汊发展, 防止了右汊进口断面进一步扩大, 利用多波束测深仪多次对工程区进行全覆盖扫测, 通过数据对比分析, 了解工程区河床的变化情况。为了充分利用高分辨率的多波束点云数据, 深度分析和挖掘工程区空间信息的地理价值, 利用 GIS 空间分析功能精确计算与展示铺排后水下空间的变化情况, 定量分析软体铺排对水下地形的改善作用。通过对不同时期数据的叠置分析, 获取河床的冲淤信息, 再对冲淤数据进行聚合分析、统

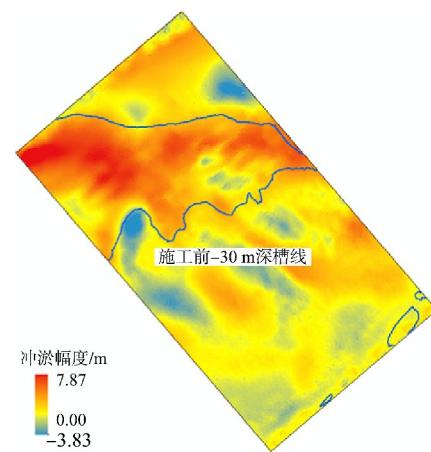
计分析、栅格计算等一系列 GIS 空间分析, 了解工程河床的冲淤变化, 包括河床冲淤的空间分布、冲淤的面积占比、冲淤量等信息, 能更好地掌握工程整治与运行效果。本文选取 3 期数据进行分析, 分别为大面积施工前的 2019 年 10 月、完工后的 2020 年 1 月以及工程完工后运行经历了 2020 年长江中下游特大洪水后的 2020 年 10 月多波束测深数据, 3 期多波束效果见图 3, 冲淤图见图 4, 冲淤统计信息见表 1。



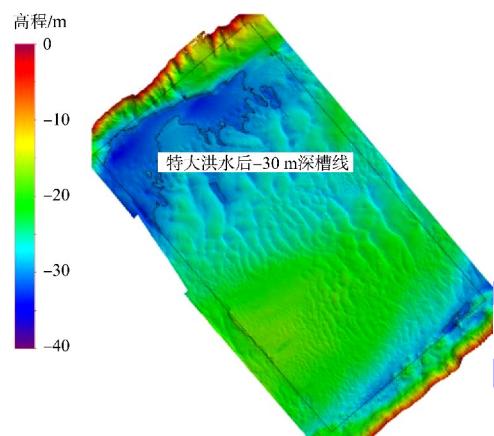
a) 施工前 (2019年10月)



b) 完工后(2020年1月)



a) 施工前与完工后



c) 汛期后(2020年10月)

图3 水下地形多波束三维模拟图

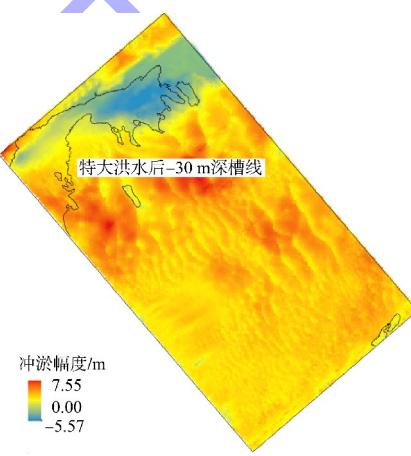
b) 完工后与汛期后  
注:冲刷为负,淤积为正。

图4 冲淤图

表1 冲淤信息

时间段	冲刷面积占比/%	淤积面积占比/%	冲刷量/万 m <sup>3</sup>	淤积量/万 m <sup>3</sup>	平均冲深/m	平均淤厚/m
2019年10月—2020年1月	31.9	66.6	7.79	41.43	0.32	1.71
2020年1月—2020年10月	14.5	83.9	4.48	54.50	0.85	1.78

由图3a)可知,相比图1的2018年-30 m深槽,施工前2019年10月-30 m深槽发展迅速,已经贯穿工程区;由图3b)可知,完工后2020年1月-30 m深槽线萎缩,工程区域有清晰的排体痕迹,说明工程对水下地形改善明显,抑制了深槽进一步发展;由图3c)可知,2020年汛期特大洪水后,工程区表面可见清晰沙波,软体排已被泥沙完全覆盖,相比图3a)和b)工程区大部分区域水深变浅,结合地形数据分析,表明汛期后,工程区以泥沙淤积为主。2020年10月-30 m深槽形状有所改变,但面积没有明显变化,说明特大洪水后,

工程有效地抑制了八卦洲右汊的发展。但深槽有向近岸、下游发展的趋势,须持续监测和分析。

由图4a)可知,完工后工程区以淤积为主,施工前-30 m深槽处的淤积最明显,淤积幅度可达7.87 m。由表1的2019年10月—2020年1月的冲淤情况可知,完工后工程区河床以淤积为主,淤积面积、淤积量远大于冲刷面积和冲刷量,淤积面积占比66.6%,平均淤厚1.71 m。由图4b)可知,相比完工后,汛期后工程区出现大幅度的淤积,淤积幅度达7.55 m。由表1可知,相比施工前和完工后的冲淤面积占比,施工后和汛期后

的冲刷面积占比由 31.9% 降至 14.5%，淤积面积占比由 66.6% 升至 83.9%。大通站 2015—2020 年水沙情况见表 2。可以看出，2016 和 2020 年都发生了大洪水，根据《长江西陵河段八卦洲汊道河道整治工程初步设计报告》，2016 年洪水后，八卦洲右汊进口段冲刷发展，而软体排河床全断面护底工程完工后，虽经历了 2020 年特大洪水，右汊河床却以淤积为主。可见，护底工程发挥了作用，且运行稳定，八卦洲右汊发展得到了有效抑制。

表 2 2015—2020 年大通站水沙情况

年份	年径流量/亿 m <sup>3</sup>	年输沙量/亿 t
2015	9 139	1.16
2016	10 450	1.52
2017	9 378	1.04
2018	8 028	0.83
2019	9 334	1.05
2020	11 180	1.64

### 3.3 冲刷区原因分析

经以上研究发现，汛后 -30 m 深槽有向近岸、下游发展的趋势。由图 4b) 可见，汛期后工程区北岸下游侧的局部区域冲深幅度加剧。分析发现，此区域是由 2019-03-31 最早施工的 4 块软体排区域，因水深、流急及排体荷载作用，导致上游锚机轴承变形、轴套开裂，为了确保施工安全，工程于 2019-04-08 停工，于 2019 年 10 月汛期结束后复工。由于此处区域冲淤变化较大，故对该区域进行单独分析。

本文分别于 2019 年 4 月铺排停工后和 2019 年 5 月汛前对该区域进行多波束扫测，多波束效果见图 5，并对这两期数据进行冲淤分析，冲淤结果如图 6 所示。由图 5a) 可知，前期 4 块排体施工结束后，图中有较为明显的排体痕迹，而图 5b) 的排体痕迹减弱，水深变浅，结合地形数据分析，表明铺排施工后至汛期前该区域产生泥沙淤积。由图 6 可知，该施工区大面积发生淤积，淤积幅度可达 3.94 m。由此推断，该区域先经历了大幅淤积后又冲刷的过程，故大洪水后出现大幅冲刷的情况。

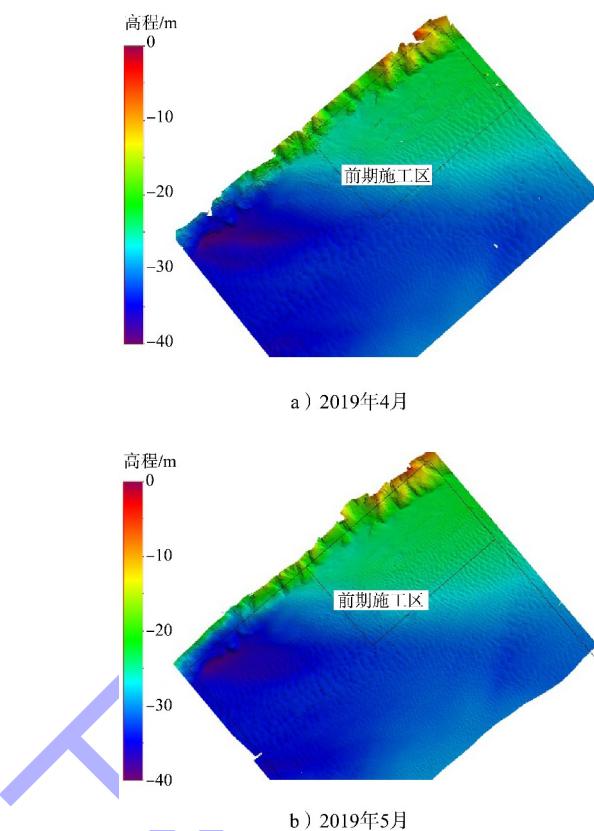


图 5 2019 年 4 和 5 月多波束效果图

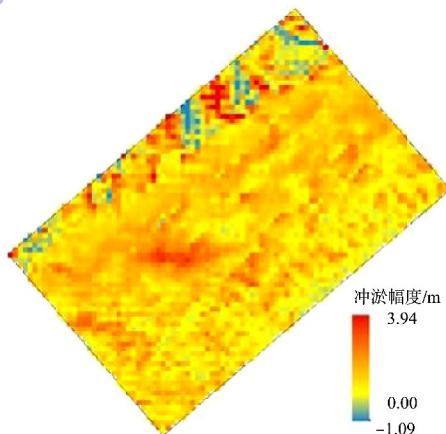


图 6 前期施工区冲淤

### 4 结论

1) 本工程为长江河床全断面铺排，施工及运行效果表明河床软体排全断面铺排切实可行，且工程运行情况良好，可为今后河床护底工程提供参考。

2) 本文研究使用了超高分辨率多波束测深技术，对八卦洲软体排护底工程进行精确检测，解决了排体检测难题。检测结果显示，排体铺排范

围覆盖了设计区域,排体铺排均匀,排体长度、宽度以及相邻排体搭接宽度满足设计要求。

3) 施工后,工程区河床由冲刷发展向淤积转变,施工前的-30 m深槽处淤积幅度最大,最大淤积幅度可达7.87 m,可见软体排对深槽有明显的改善作用。

4) 经历2020年特大洪水后,工程区河床淤积面积由完工后的66.6%上升至83.9%,工程区河床整体以淤积为主,表明软体排抗冲刷能力强,工程运行稳定,八卦洲右汊河势得到了较好的控制;-30 m深槽有向下游、左岸近岸发展的趋势,需要进一步监测,密切关注右汊河势的发展。

#### 参考文献:

- [1] 张景明.长江口深水航道治理工程护底软体排结构设计[J].水运工程,2006(S2):20-23.
- [2] 曹棉.软体排在长江航道整治工程中的应用[J].水运工程,2004(9):70-73.
- [3] 李文全,雷家利,王伟峰,等.长江中下游航道整治软体排护滩带结构优化设计[J].水运工程,2012(1):88-92.
- [4] 赵钢,黄俊友,王冬梅,等.混凝土铰链沉排护岸工程水下部分铺设质量检测技术研究与探讨[J].长江科学院院报,2013,30(6):31-34.
- [5] 赵建群,林成亭.水下铺排检测技术[J].水运工程,2017(S1):113-116.
- [6] 章志强,李涛章,周玲霞.长南京八卦洲汊道治理与沿岸经济发展探讨[J].人民长江,2011,42(21):11-14,36.
- [7] 侯卫国,胡春燕,谢作涛.长南京八卦洲河段演变分析及治理对策探讨[J].人民长江,2011,42(7):39-42.
- [8] 李健庸,刘开平.长江八卦洲汊道河床演变对航道的影响及对策[J].水力发电,2002(5):17-19,75.
- [9] 李家彪.多波束勘测原理技术与方法[M].北京:海洋出版社,1999.
- [10] 长江勘测规划设计研究有限责任公司,南京市水利规划设计院股份有限公司.长南京河段八卦洲汊道河道整治工程初步设计报告[R].南京:长江勘测规划设计研究有限责任公司,2018.

(本文编辑 王璁)

(上接第104页)

2) 由于模拟船舶过闸时操作过程的复杂性,准确预测船舶进出船闸时的下沉量是非常困难的。目前通行的做法是分析船舶进出船闸时影响航行下沉量的主要因素,通过现场试验,建立估算航行下沉量的经验公式。不同经验公式有各自的适用条件,式(1)适用于船舶通过船闸和升船机时的航行下沉量估算。

3) 自航船舶在限制性航道内行驶存在一个极限航速,极限航速是船舶的阻塞系数和水深的函数,可用式(4)估算。

4) 门槛水深中的富裕水深除航行下沉量外还应考虑最小安全富裕水深,主要用于补偿航行下沉量估算的可能误差和枢纽运行中的推移波产生的水面波动,枢纽运行中产生的非恒定流是推移波的主要来源,一般情况下最小安全富裕水深可取30 cm,当预计推移波对门槛水深的影响比较显著时,应开展专门研究。

#### 参考文献:

- [1] SPITZER D, SÖHNGEN B. Field investigation and numerical calculations concerning modern vessels entering and exiting Lüneburg ship lift[C]//PIANC. Proceedings of the 31st PIANC Congress, Brussels: PIANC, 2006.
- [2] SPITZER D, SÖHNGEN B. On the longitudinal dynamics of ship entry and exit at locks[C]//PIANC. Proceedings of PIANC Smart Rivers 2013 Conference. Brussels: PIANC, 2013.
- [3] PIANC. Ship behaviour in locks and lock approaches: PIANC report No. 155[R]. Brussels: PIANC, 2015.
- [4] 长江三峡通航管理局,南京水利科学研究院,中交水运规划设计院有限公司.三峡船闸过闸船舶吃水控制标准关键技术研究[R].宜昌:长江三峡通航管理局,2011.
- [5] VAN KONINGSVELD M, VERHEIJ H J, TANEJA P, et al. Ports and waterways-navigating the changing world [R]. Delft: Delft University of Technology, 2021: 302-311.

(本文编辑 王璁)