



基于多波束的滨海港护岸水下 地形冲淤变化监测*

孟祥勇, 薛国栋, 曹豹杰, 高瑞超, 孟宪阔, 王洪伟, 刘仕星

(中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 天津 300220)

摘要: 基于多波束测深系统监测滨海港物流园护岸外侧海域的短期冲淤变化。研究发现, 护岸拐角处外侧海域存在一个呈东西走向的冲刷坑, 长约 570 m, 宽约 110 m, 其边缘已至护岸底部, 存在严重的安全隐患。通过对 2023 年 5 月—11 月期间的监测数据分析, 发现冲刷坑边缘持续侵蚀, 且未见减缓趋势, 研究结果为后续护岸工程提供了准确的数据支撑。多波束测深系统能够准确识别护岸水下地形的时空变化, 为类似护岸变形监测提供了有效参考。

关键词: 多波束; 港口工程; 水下地形; 冲淤变化

中图分类号: U656.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)02-0191-06

Monitoring of underwater terrain erosion and sedimentation changes at Binhai Port embankments based on multi-beam technology

MENG Xiangyong, XUE Guodong, CAO Baojie, GAO Ruichao, MENG Xiankuo, WANG Hongwei, LIU Shixing
(CCCC First Harbor Consultants Co., Ltd., Tianjin 300220, China)

Abstract: multi-beam echo sounder system is used to monitor short-term erosion and sedimentation changes in the offshore area of the logistics park embankment in Binhai Port. It is found that there is an east-west oriented scour hole on the outer side of the embankment corner, which is about 570 m long and 110 m wide, and its edge has reached the bottom of the embankment, posing significant safety hazards. Through the analysis of monitoring data from May to November 2023, it is found that the edges of the scour hole continues to erode and showed no signs of slowing down. The research results provide accurate data support for subsequent embankment projects. The multi-beam echo sounder system can accurately identify the spatiotemporal changes in underwater topography, offering effective reference for similar embankment deformation monitoring.

Keywords: multi-beam; port engineering; underwater terrain; erosion and sedimentation change

1855 年黄河北归流入渤海, 陆源泥沙供应断绝, 江苏北部废黄河三角洲持续受到海洋动力的侵蚀冲刷^[1]。废黄河三角洲突出部位的侵蚀作用最为剧烈, 深水区更为贴岸, -15 m 等深线距岸仅 3.95 km, 这为滨海港建设提供了重要的深水近岸条件^[2]。2008 年 12 月—2011 年 11 月, 滨海港环抱式防波堤北堤和南堤相继建造完成, 2014 年

10 月滨海港 10 万吨级通用码头开港通航^[3], 滨海港在为当地创造巨大经济效益的同时, 也可能产生航道淤积、海床侵蚀等海洋工程环境问题^[4]。

现有研究表明, 港口和航道工程会对近岸水动力和泥沙环境产生一定的影响, 但此类研究在具有强侵蚀特性的废黄河三角洲还较为缺乏。为了能够理清滨海港区建设对废黄河三角洲近海水

收稿日期: 2024-05-21

*基金项目: 中交第一航务工程勘察设计院有限公司科技研发项目 (ZDIXM2024-33)

作者简介: 孟祥勇 (1988—), 男, 工程师, 从事海洋测绘工程研究。

通信作者: 曹豹杰 (1998—) 男, 硕士, 助理工程师, 从事港口与近海工程测绘研究。E-mail: caobaojie27@sina.com

沙场的影响程度，国内有关高校和工程单位利用实测水文泥沙资料和波浪潮流泥沙模型开展了深入的数值模拟研究，研究结果普遍认为港区建设后，防波堤内航道淤积较强，防波堤外近岸冲刷较强^[5-6]。数值模拟结果能够为滨海港建设决策、运行维护、防淤护岸提供参考依据，但是具体的航道清淤、堤岸防护工程的设计施工仍需要更加精细的水下地形冲淤监测数据^[7-8]。

1 工程监测

为加强滨海港物流园护岸使用期及地基处理施工期安全稳定，使用多波束测深声呐开展监测工作，于 2023 年 5 月、7 月、9 月和 11 月共开展 4 次定期测量，从而获取高时空分辨率的护岸外侧水下地形，通过变化检测得到海床冲淤的时空变化特征，为后续护岸工程提供有效准确的数据支撑。多波束测深系统的监测范围见图 1。

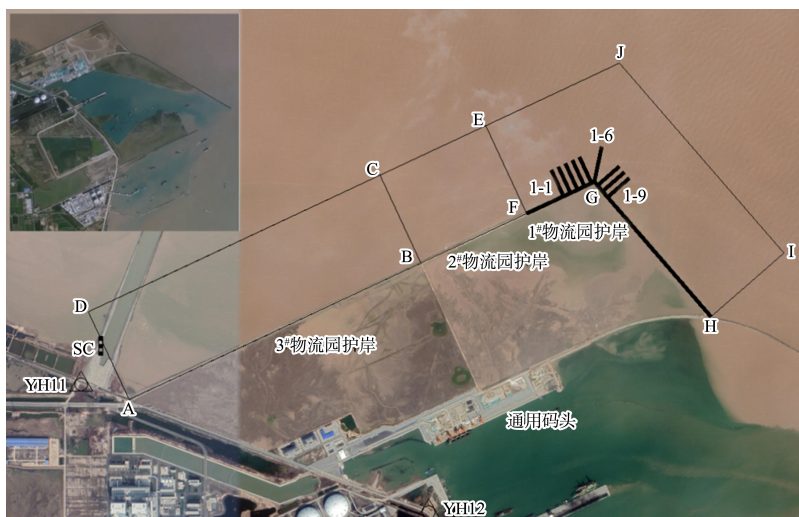


图 1 滨海港测区范围 (E-F-G-H-I-J)

Fig. 1 Survey area of Binhai Port (E-F-G-H-I-J)

2 多波束测深系统

相较于传统的单波束回声测深仪，多波束测深系统每发射 1 个脉冲，可获得垂直于航行方向的扫测面内的多个水深值，每条测线可获得具有一定带宽的全覆盖水深点云条带，通过拼接不同测线条带得到目标海域的全覆盖水深点云，进而得到高分辨率的海底地形模型^[9]。使用美国 R2 Sonic 公司生产的 2024 型多波束测深系统，用于多波束全覆盖水深测量，该测深系统为宽带高分辨率多波束声呐，仪器的精度指标见表 1。

表 1 R2 Sonic 2024 多波束回声测深仪技术参数
Tab. 1 Technical specifications of R2 Sonic 2024 multi-beam echo sounder

工作频率/ kHz	波束角/ (°)	波束数目/ 个	最大扫宽/ (°)	最大测深量程/ m	脉冲宽度/ μs	测深精度/ cm
200~400	0.5~2.0	256	160	500	10~1 000	1.25

使用美国 Trimble 公司生产的 SPS 351 型 DGPS 信标机，用于多波束测深系统的导航定位，其水平定位精度通常小于 1 m，垂直定位精度小于 5 m。广州中海达公司的 HD370 单波束测深仪集测深系统与计算机系统于一体，在计算机系统中安装测深及导航定位软件，可以进行水深定位数据同步采集。使用法国 IXBLUE 公司的 Octans 光纤罗经实时测量船体运动姿态，其航向动态精度为 0.1°，分辨率为 0.01°，姿态(横摇、纵摇、艏摇)精度均为 0.01°，分辨率 0.001°。使用无锡海鹰加科公司的 HY1200B 自容式声速剖面仪，用于测定测区声速剖面，其声速精度为 ±0.2m/s。使用瑞士 KELLER 公司的 DCX-25 型验潮仪，用于水深测量期间的潮位及气压观测，其标称压力精度为 0.05%FS。

2 测量实施

2.1 设备安装

R2 Sonic 2024 多波束测深系统由甲板单元、电脑系统、发射接收换能器、表面声速仪、光纤罗经等组成。多波束测深仪采用侧舷安装方式, Sonic 2024 多波束换能器垂直安装在测量船舷中间位置。DGPS 定位设备安装在多波束换能器一侧。IXSEA Octans 光纤罗经安装在近似船舶中心位置。

2.2 安装校准

在多波束外业测量工作期间,在测区进行多波束系统的安装校准,测定了多波束系统的安装校准参数(声呐换能器相对姿态传感器的偏差角度)。多波束测深系统的校准内容包括 GPS 时延(latency)校准、横摇(roll)校准、纵摇(pitch)校准、艏摇(yaw)校准。本工程使用的多波束测深系统已通过同步采集 GPS ZDA(时间和日期, time and date)数据和 1 PPS(每秒脉冲数, pulse per second)信号,将多波束测深系统时间同步到 GPS 内部时钟,因此该多波束测深系统不需进行 GPS 时间延迟改正。通过海底平坦区域同线同速反向的条带断面测量数据测定横摇偏差数据。通过水深变化大的区域同线同速反向的中央波束测量数据测定纵摇偏差数据。通过水深变化大的区域异线(间距为覆盖宽度的 2/3 的 2 条测线)同速同向的边缘波束测量数据测定艏摇偏差数据。

2.3 潮位及声速改正

在测区附近设置验潮点,验潮站采用压力自容式验潮仪自动记录海水总压力数据(水压和大气压之和),并采用气压计同步采集验潮站附近的大气压数据。验潮期间在验潮点进行人工水位同步观测,观测时间间隔为 10 min。根据验潮仪记录的观测值、气压计观测值计算各时刻验潮站水深值,利用高低潮同步观测水位的方法,由验潮点人工观测水位推算得到验潮站验潮仪零点高程,进而得到验潮站水深测量期间的水位^[10]。

由于受海水中压强、温度和盐度变化的影响,水声信号在水中的传播速度会在不同时间、不同海区、不同深度的条件下产生变化。因此,在多波束外业测量工作开始、期间、结束时,在测量区域水深较深的地方进行声速剖面测定^[11],声速测量按照深度进行采样,采样间隔设定为 0.5 m。

2.4 数据采集

分别于 2023-05-28、2023-07-26、2023-09-29、2023-11-11 对测区水域进行多波束外业测量,测量期间天气良好,能见度高,测区风浪小,适合进行多波束外业测量工作^[12]。测量过程中船速基本控制在 6 kn 以内,测量船与测线之间的最大偏航距不超过 5 m。

外业测量期间,使用 HD370 型测深仪进行测线导航和航迹线数据采集, Trimble SPS 351 型信标机定位仪输出定位数据, Octans 输出姿态数据, R2 Sonic 2024 型多波束测深系统输出水深数据, Qinsy8.1 多波束数据采集软件实时采集多波束水深数据、定位数据、姿态数据、航向数据等^[13]。

2.5 多波束内业处理

使用 CARIS/HIPS7.1 软件对多波束数据进行内业处理。将每个传感器的安装参数(包括吃水)输入到船文件中,并将采集的原始数据进行数据转换,导入到项目中。检查姿态数据、导航数据、多波束水深数据,剔除粗差,过滤虚假信号。求取并输入校准参数,对水深数据进行声速剖面改正(按最近时间进行声速剖面改正)、水位改正,然后进行数据合并。根据测区测线布设情况,平均每 4~6 条测线为 1 组,逐区进行数据清理,确保多波束条带没有假信号。本次多波束测量数据信号质量良好,潮位和声速数据准确,条带间水深情况良好。使用 CARIS GIS 4.5 软件,按照水深点间距 5 m 采用取浅方式进行数据压缩和输出。

2.6 测深精度评定

水深测量期间进行单波束测深检查线测量，用以检查多波束测深精度。测深检查线总长 4.9 km，大于主测深线 44.0 km 的 5%。多波束测量水深数据与单波束水深数据比较，水深情况良好，计算测深误差为±0.09 m，满足测量规范要求。水深比对互差统计见表 2。

表 2 多波束测深精度

Tab. 2 Multi-beam depth measurement accuracy

差值/cm	总数(正)/个	总数(负)/个	总数/个	百分比/%
[0,5)	41	0	41	40.6
[5,15)	40	15	55	54.4
[15,25)	1	4	5	5.0

3 测量成果

3.1 地貌对比

本文采用反距离加权算法^[14]插值得到测区的水下数字高程模型(digital elevation model, DEM)，护岸拐角处的高分辨率海底地形见图 2，四期海底地形见图 3。从海底地形图可以准确识别出水下地形地貌特征，通过对比四期 DEM 成果分析滨海港护岸外侧海底地形冲淤变化。由图 3 可以看出，1#物流园护岸外侧海底地形变化较大，尤其是护岸拐角处变化最为剧烈，该处形成了一个呈东西走向，长约 570 m、宽约 110 m 的冲刷坑。由图 2 可知，目前该冲刷坑边缘已至护岸坡底，该处护底块石缺失严重，目前此处最大水深值 12.9 m，较周边护底石块变深约 7.8 m。通过图 2 和 3 可以看出，1#物流园护岸拐角外侧海底冲刷现象明显，冲刷坑范围呈持续扩大趋势。

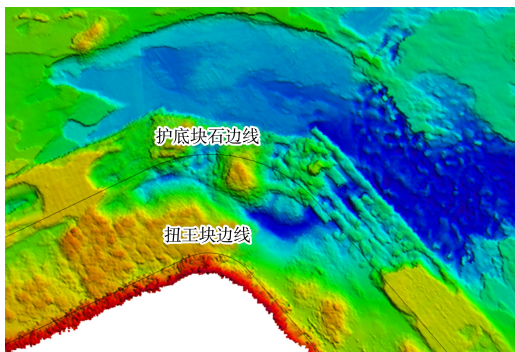
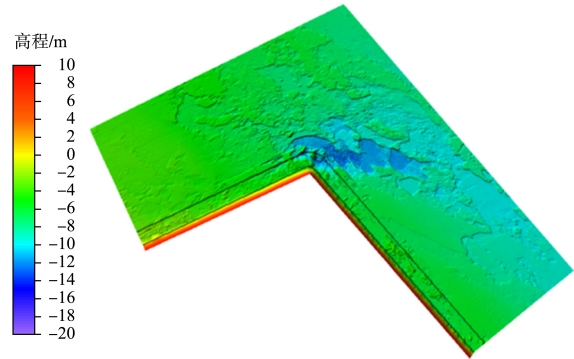
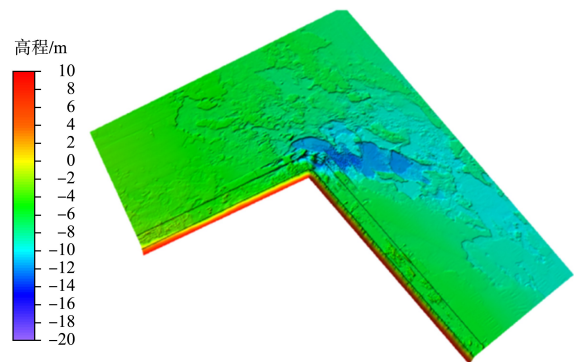


图 2 护岸拐角处海底地形

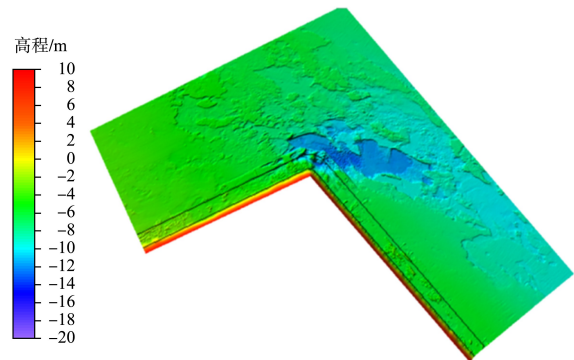
Fig. 2 Seafloor topography at revetment corner



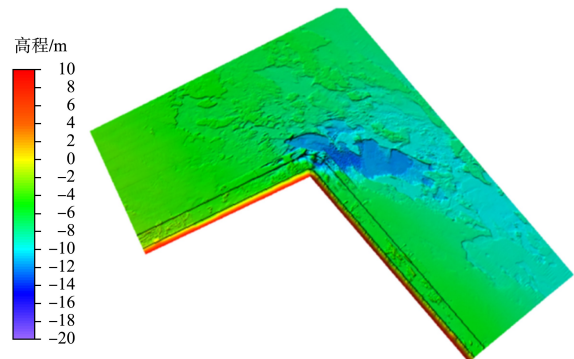
a) 2023-05-28



b) 2023-07-26



c) 2023-09-29



d) 2023-11-11

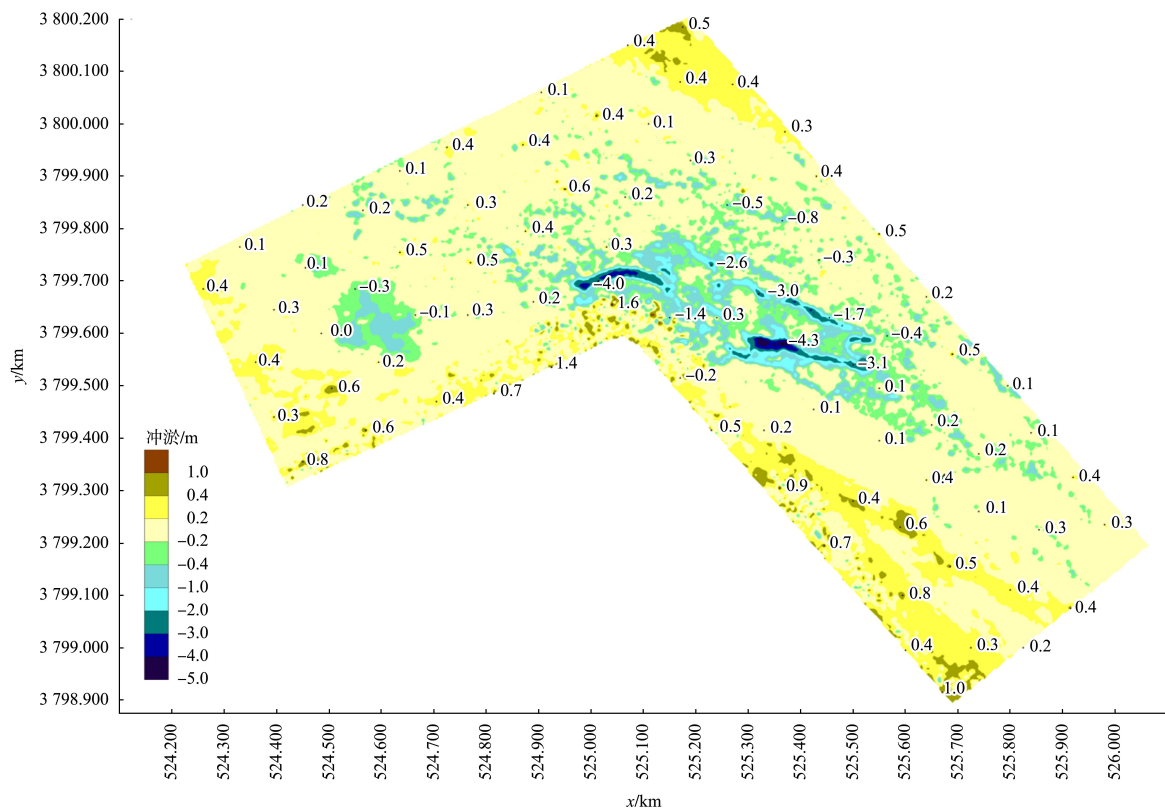
图 3 1#物流园护岸外侧海底地形

Fig. 3 Seafloor topography on outer side of revetment at logistics park 1#

3.2 冲淤变化

通过对比分析 2023 年 5 月和 2023 年 11 月的监测成果, 得到滨海港护岸外侧海底地形冲淤变化见图 4。由图 4 可以看出, 2023-05-28—2023-11-11 期间, 除冲刷坑南北两侧边缘以外, 范围内冲淤变化整体较小, 累计冲淤变化值大多在 0.4 m 以内。1#物流园护岸拐角处冲刷坑北边缘由南向北累计扩大约 23 m, 最大冲刷深度 3.7 m; 冲刷坑

南边缘由北向南累计扩大约 33 m, 最大冲刷深度 4.4 m。除了护岸拐角处的大型冲刷坑, 西部护岸海底正在形成一个小型的冲刷坑, 冲刷深度均在 1 m 以内。东南部护岸近岸海底则呈微淤状态, 淤积厚度大多在 0.4 m 以内。护岸拐角处冲刷坑附近区域呈现出较为明显的冲刷趋势, 反映出冲刷坑进一步扩大的可能性较高。



注: 正值表示淤积, 负值表示冲刷。

图 4 1#物流园护岸外侧海域 2023 年 5—11 月冲淤变化

Fig. 4 Erosion and sedimentation changes in outer sea area of revetment at logistics park 1# from May to November 2023

4 结论

1) 由监测分析结果可知, 1#物流园护岸外侧海域形成了呈东西走向的冲刷坑, 目前冲刷坑边缘已至护岸底部, 此处护底块石缺失严重, 最大水深 12.9 m, 较周边护底块石变深约 7.8 m, 对护岸存在重大安全隐患。

2) 1#物流园护岸外侧冲刷坑在 2023-05-28—

2023-11-11 期间, 冲刷坑北边缘由南向北累计扩大约 23 m; 冲刷坑南边缘由北向南累计扩大约 33 m。冲刷坑边缘持续侵蚀, 未有减缓趋势。应密切关注该区域变化情况, 适时加以维护。

3) 工程证实了多波束测深系统在护岸水下地形冲淤监测中的有效性, 并为类似护岸变形监测提供了良好的参考案例。

参考文献:

- [1] 杨肖迪. 滨海港防波堤对废黄河三角洲冲淤变化的影响因素研究[J]. 科技创新与应用, 2015(9):29-30.
YANG X D. Impact factors of coastal port breakwater on erosion and siltation changes in the disused Yellow River delta[J]. Technology innovation and application, 2015(9) 29-30.
- [2] 陈玺文, 刘玉倩. 盐城港滨海港区 30 万吨级航道方案研究[J]. 中国水运(下半月), 2017, 17(5): 164-165, 185.
CHEN X W, LIU Y Q. 300,000-DWT channel scheme for Yancheng Port Binhai Harbor[J]. China water transport (Second half of month), 2017, 17(5): 164-165, 185.
- [3] 吴永强, 朴正. 江苏滨海 LNG 码头总平面布置设计要点[J]. 港工技术, 2020, 57(1): 29-32.
WU Y Q, PARK J. Design essentials of general layout of Jiangsu Binhai LNG terminal [J]. Port engineering technology, 2020, 57(1): 29-32.
- [4] SPECHT C, LEWICKA O, SPECHT M, et al. Methodology for carrying out measurements of the tombolo geomorphic landform using unmanned aerial and surface vehicles near sopot pier, Poland [J]. Journal of marine science and engineering, 2020, 8(6): 384.
- [5] 黄哲, 刘强, 倪万洲, 等. 苏北废黄河口滨海港建设对近海水沙和床面冲淤的影响[J]. 海洋地质前沿, 2023, 39(12): 43-55.
HUANG Z, LIU Q, NI W Z, et al. Impacts of Binhai Port construction on offshore water and sediment transportation along the abandoned Yellow River mouth [J]. Marine geology frontiers, 2023, 39(12): 43-55.
- [6] 朱思谕, 卢丹. 盐城滨海港远期规划对周边水沙影响的数值模拟研究[J]. 人民珠江, 2021, 42(6): 22-28.
ZHU S Y, LU D. Numerical simulation of the effect of long-term reclamation on the flow and sediment concentration in Binhai Port, Yancheng [J]. Pearl river, 2021, 42(6): 22-28.
- [7] 邹双朝, 皮凌华, 甘孝清, 等. 基于水下多波束的长江堤防护岸工程监测技术研究[J]. 长江科学院院报, 2013, 30(1): 93-98.
ZOU S C, PI L H, GAN X Q, et al. Revetment monitoring of Yangtze River embankment by underwater multi-beam sonar system [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2013, 30(1): 93-98.
- [8] 何瑞峰, 徐本举, 姚磊, 等. 盐城滨海港区维护疏浚工程施工技术优化[J]. 水运工程, 2019(7): 217-225.
HE R F, XU B J, YAO L, et al. Construction technology optimization of maintenance dredging project in Binhai port area, Yancheng [J]. Port & waterway engineering, 2019(7): 217-225.
- [9] 刘权. 金汇港南闸外侧深坑的河床变形观测及冲淤分析[J]. 北京测绘, 2021, 35(4): 539-542.
LIU Q. Deformation observation and scour and silt analysis of riverbed in the deep pit outside of south sluice of Jinhui Port [J]. Beijing surveying and mapping, 2021, 35(4): 539-542.
- [10] 王志文, 雷力军. GPS-RTK 有无验潮模式同步进行水深测量研究[J]. 港工技术, 2022, 59(5): 113-116.
WANG Z W, LEI L J. Research on simultaneous bathymetric survey by using GPS-RTK in non-tide and tide modes [J]. Port engineering technology, 2022, 59(5): 113-116.
- [11] 高兴国, 田梓文, 麻德明, 等. GNSS 支持下的无验潮测深模式优化[J]. 测绘通报, 2018(11): 7-10.
GAO X G, TIAN Z W, MA D M, et al. Optimization of non-tidal sounding model supported by GNSS [J]. Bulletin of surveying and mapping, 2018(11): 7-10.
- [12] 曹豹杰, 高志强, 尚伟涛. 无人船近海水深测量与抗风浪能力评估[J]. 测绘通报, 2022(10): 68-72, 79.
CAO B J, GAO Z Q, SHANG W T. Assessment of the bathymetry and ability to withstand wind and waves in shallow waters for unmanned surface vessels [J]. Bulletin of surveying and mapping, 2022(10): 68-72, 79.
- [13] SPECHT M, SPECHT C, SZAFRAN M, et al. The use of USV to develop navigational and bathymetric charts of yacht ports on the example of national sailing centre in Gdańsk [J]. Remote sensing, 2020, 12(16): 2585.
- [14] GIORDANO F, MATTEI G, PARENTE C, et al. Integrating sensors into a marine drone for bathymetric 3D surveys in shallow waters [J]. Sensors, 2015, 16(1): 41.

(本文编辑 赵娟)