



阳光岛海域冲淤变化对 LNG 码头工程的影响分析^{*}

曹豹杰¹, 南金刚¹, 余海见¹, 尹玮泽², 吴振付¹, 王 敖¹

(1. 中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 天津 300220; 2. 北京师范大学, 北京 100875)

摘要: 洋口港阳光岛是国内重要的 LNG 接收港, 通过对比不同时期的水下地形数据, 分析阳光岛海域滩槽演变的长期动态变化、LNG 码头区的冲淤情况以及对码头桩基的影响, 并提出码头桩基的冲刷防护措施。结果表明, 随着人工岛和码头配套设施的逐步建成, 人工岛东北侧的大洪埂子逐年往西移动; 北水道仍然维持西延、北移的趋势; 中水道头部向西延伸减缓, 有不断南压、拓宽的趋势。LNG 码头区在不同阶段呈现出不同的冲淤模式, 初期主要是微淤状态; 2010 年后, 受码头建设影响, A1、B1 码头周围出现显著冲刷; 到 2018 年, 码头区逐步转变为淤积状态, 人工岛北侧岸坡的淤长影响明显增大。拟建 A2 码头工程将采用先期防护和后期防护(预留冲刷深度)相结合的方式, 以减缓桩基的冲刷速度, 延长桩基的使用年限。

关键词: 人工岛; LNG 码头; 冲淤变化; 桩基冲刷防护

中图分类号: U656.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)12-0075-06

Analysis of seabed erosion and deposition changes in waters of Yangguang Island and their impact on LNG terminal project

CAO Baojie¹, NAN Jingang¹, YU Haijian¹, YIN Weize², WU Zhenfu¹, WANG Ao¹

(1. CCCC First Harbor Consultants Co., Ltd., Tianjin 300220, China; 2. Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Yangkou Port Yangguang Island is an important LNG receiving port in China, this paper analyzes the long-term dynamic changes of the tidal flat evolution, the erosion and deposition situation in the LNG terminal area, and the impact on the foundation piles of the terminal by comparing underwater topographic data from different periods. The results show that with the gradual completion of the artificial island and terminal supporting facilities, the Dahonggengzi sandbar on the northeast side of the artificial island has been moving westward year by year. The northern waterway continues to maintain a westward and northward extension trend. The head of the central waterway has slowed its westward extension, but shows a trend of continuous southward compression and widening. The LNG terminal area exhibits different patterns of erosion and deposition at different stages. In the early stage, it was mainly a micro-sedimentation state. After 2010, due to the impact of terminal construction, significant scour occurred around the A1 and B1 docks. By 2018, the terminal area gradually transitioned to a deposition state, and the sediment on the northern slope of the artificial island significantly increased. For the proposed A2 terminal project, a protection approach combining preliminary protection and post-construction protection with reserved scouring depth will be adopted to reduce the scouring rate of the pile foundation and prolong the service life of the pile foundation.

Keywords: artificial island; LNG terminal; erosion and deposition changes; pile foundation scour protection

洋口港阳光岛位于江苏省南通市如东县洋口
港经济开发区, 海洋学名也被称为西太阳沙人工

岛, 是全国单点布局 LNG (liquefied natural gas, 液化天然气) 接卸规模最大的港口之一, 是全国沿海

收稿日期: 2025-04-06 录用日期: 2025-06-25

*基金项目: 中交第一航务工程勘察设计院有限公司 2025 年科研课题项目 (ZDIXM2025-25)

作者简介: 曹豹杰(1998—), 男, 硕士, 工程师, 从事港口工程管理研究。

LNG 布局的重要港口^[1]。《江苏省“十四五”能源发展规划》提出“构建多元供应、多轮驱动的能源安全体系，加快推进储气设施建设”“严格落实全省形成不低于保障本行政区域内日均三天消费量的储气能力，依托南通、盐城、连云港三大沿海 LNG 接收基地大型储罐”。该项目已经纳入《江苏省“十四五”能源发展规划》发布的“储气调峰设施重点规划建设项目”及江苏省发展和改革委 2022 年发布的“2022 年江苏省重大项目清单”。

阳光岛周围海域形势见图 1。从海洋动力的角度分析,此海域处于辐射沙洲中南部,受两大潮流系统辐合的影响大,潮差大、潮流强,实测最大潮差约 8 m,最大潮流流速约 3 m/s。西太阳沙为离岸约 12 km 的孤立沙洲,周边诸水道相互串连,动力环境复杂,海床物质活动性强,西太阳沙海域的滩槽演变动态极为活跃^[2]。深入认识阳光岛海域海床冲淤变化和水文泥沙运移规律对于人工岛岛壁、码头桩基以及岛上 LNG 大型储罐等工业设施的安全防护具有重要作用^[3-4]。

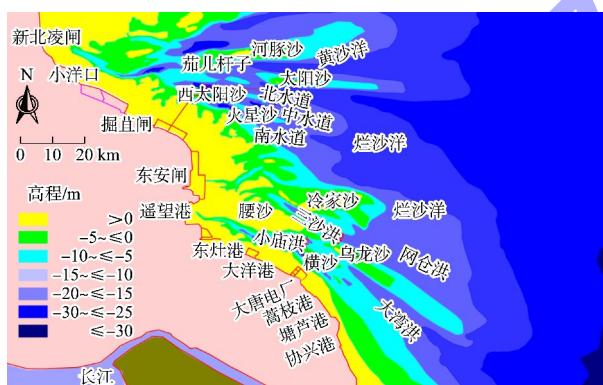


图 1 阳光岛周围海域形势

Fig. 1 Maritime situation around Yangguang Island

自西太阳沙人工岛建岛以来，每年都会定期开展水下地形监测、气象水文观测、潮流泥沙测验等，积累了大量的数据资料，为阳光岛海域的冲淤变化、水沙动力条件、岸滩稳定性分析等提供了良好的数据支撑^[5-6]。随着人工岛和依托其建设的码头配套设施的逐步建成，水下地貌发生了一定的变化。本文通过分析2006—2023年的水下地形监测成果，综合水文泥沙观测资料，分析阳光岛海域冲淤变化及其对LNG码头区工程设施的

影响，并针对拟建 A2 码头工程的桩基防护提供对策建议，旨在为管理决策提供有效依据。

1 海域自然条件概况

气象资料采用国家海洋局洋口港海洋环境监测站 2009—2019 年数据，站址位于如东县阳光岛中石油重件码头，气象观测场位于海事办公楼顶 (121°25.388'E, 32°30.853'N)，距地面 11.5 m，四面开阔，周边环境对气象观测没有影响。阳光岛年平均气温 15.6 °C，月平均最低气温 3.8 °C (1 月)，月平均最高气温 27.5 °C (8 月)。年降水量为 623.0 mm，年最大降水量 996.2 mm (2010 年)，年最小降水量 336.9 mm (2014 年)。年平均相对湿度 79.3%。根据观测资料，该地区常风向为 SE 向，强风向为 NNE 向，累年平均风速为 6.4 m/s，最大风速为 26.5 m/s^[7]。

水文资料采用洋口港站 2010—2019 年数据。阳光岛海域属规则的半日潮，最高高潮位 8.41 m，最低低潮位-0.03 m，平均高潮位 6.36 m，平均低潮位 1.74 m，平均潮差 4.62 m，最大潮差 7.81 m。根据 2013—2019 年观测资料统计，常浪向为 E 向，次常浪向为 ESE 向，强浪向为 E 向，波高大于或等于 1 m 出现的频率为 1.76%，次强浪向为 ENE 向，波高大于或等于 1 m 出现的频率为 1.65%^[8]。2016-11-24—12-13 在拟建 A2 码头海域进行全潮流观测，潮流性质为规则半日潮流，海流表现为往复流，大部分垂线涨潮主流向在 W—NW 附近，落潮主流向在 E—SE 附近^[9]。海流流速较大，大潮期间，实测最大涨潮流速为 127 cm/s，流向为 281°，实测最大落潮流速为 173 cm/s，流向为 112°。

2021 年 11 月在人工岛东侧和东南侧进行了 5 条断面、40 个点沉积物取样^[10]。取样点沉积物资料统计分析显示, 人工岛东侧海域沉积物中值粒径 D_{50} 为 0.03~0.15 mm, 沉积物类型大多为粉砂质砂和砂质粉砂; 人工岛南侧和东南海域沉积物中值粒径 D_{50} 为 0.15~0.19 mm, 沉积物类型大多为砂。根据拟建 A2 码头海域的地质勘察资料, 各土层分布较有规律, 成层性相对较好, 上部土

质多为松散—稍密状粉砂与软塑状淤泥质粉质黏土, 工程地质性质较差—差。中部以中密状砂层为主, 工程地质性质一般。下部为密实状粉砂, 层位较稳定, 承载力高, 土层工程性质良好, 为良好的桩基持力层。

2 海域滩槽演变动态分析

通过跟踪不同时期相同深度的等深线变化, 能够有效识别海床的冲淤变化规律^[11-13]。本文基于 2003—2021 年的水下地形数据绘制了-15 m 等深线长期变化, 见图 2。通过分析-15 m 等深线的长期变化, 发现随着人工岛和依托其建设的码头配套设施的逐步建成, 人工岛东北侧的大洪埂子逐年往西移动, 造成其与西太阳沙之间的中水道也在逐年南移。北侧 LNG 码头前沿及港池近年来呈淤积状态, -15 m 等深线不断北移, 栈桥中部水深受大洪埂子-5 m 等深线西移影响, 水深淤浅。

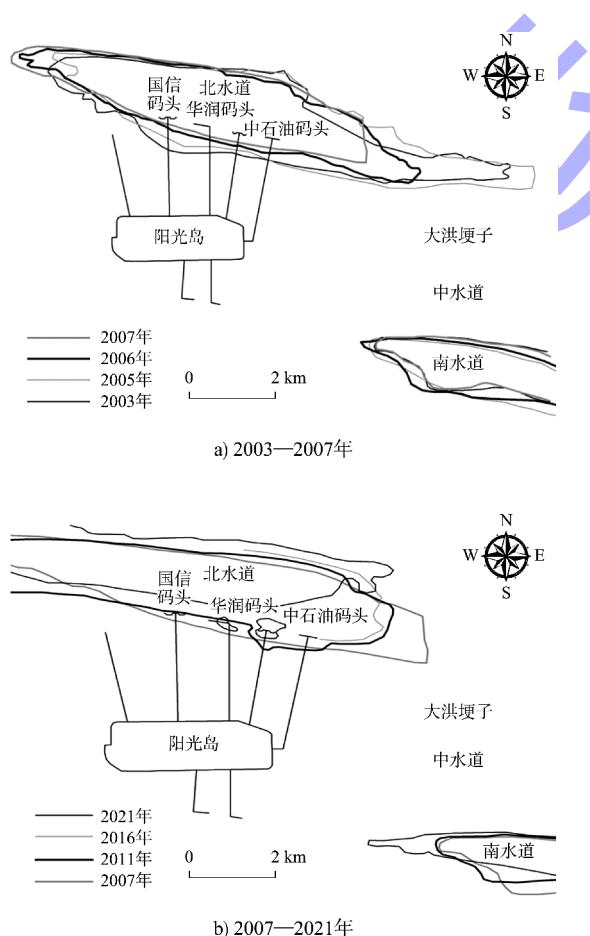


图 2 2003—2021 年-15 m 等深线变化

Fig. 2 The -15 m contour line change from 2007 to 2021

人工岛未建前, 2003—2007 年, -15 m 等深线头部 (东侧) 4 a 间向西移动 4 km, 平均移动速度约 1.0 km/a, 尾部向西延伸 1 km, 平均约 250 m/a; -15 m 南侧等深线向北移动 400 m, 移动速度为 100 m/a; 北水道轴线方向仍然为西北—东南向。2007 年后, -15 m 等深线头部 (西侧) 仍持续向西移动 1 km, 主轴方向也发生一定偏转, 由西北—东南向偏转为东—西向。中石油 A1 LNG 码头和华润 B1 LNG 码头东、西两侧-15 m 等深线继续向北移动, 码头西侧 14 a 间持续向北移动 500 m, 东侧等深线向北移动 380 m, 移动速度分别为 35、27 m/a。由于码头建设发生局部冲刷, 两码头之间水域-15 m 等深线相比 2007 年略有后退。

2003 年以后实测地形对比显示, 在人工岛建设前 (2003—2007 年), 北、中、南 3 水道整体“水道-沙洲”系统的宏观格局基本稳定, 但也表现出一些趋势性的演变特征: 北、中水道西延趋势明显, 中水道和南水道有南压趋势。随着北、中水道的西延, 北水道南侧-5 m 以深区域有向北迁移淤涨趋势, 西太阳沙东北侧总体处于冲刷环境, 西北侧主要表现为淤积环境。人工岛建设后的历年地形监测资料显示, 北水道仍然维持西延、北移的演变趋势; 中水道头部向西延伸减缓, 有不断南压、拓宽的趋势。虽然人工岛及配套工程建设对周边海域地形产生较大影响, 但并未改变烂沙洋各水道整体演变趋势。

3 LNG 码头区冲淤变化分析

2006—2010 年间的码头区海床冲淤变化见图 3a), 码头区海床基本呈稳定微淤状态, 但海床整体冲淤幅度较小, 受 A1 码头建设的影响, A1 及拟建 A2 码头前沿产生冲刷, 但该时段内 A1 码头刚建成, 其影响幅度和范围均相对有限, 码头前沿最大冲刷深度为 2~3 m。

2010—2018 年间的码头区海床冲淤变化见图 3b), 此阶段为西太阳沙人工岛北侧岸坡淤长和 A1、B1 码头建设所共同影响的时期^[14]。地形对比表现为冲淤幅度均较大, A1、B1 码头南北两

侧 100 m 范围的局部冲刷相对显著, A1 码头南北两侧局部最大冲刷深度约 5 m, 而 B1 码头由于为新建工程, 码头西侧局部冲刷较严重, 局部最大冲刷深度近 10 m。A1、B1 码头之间的掩护区域淤积显著, A1 码头东侧出现弱流区, A1 和 B1 码头中间掩护区域以及 A1 码头东侧区域均产生淤积条带, 海床局部淤高 4~5 m。除此之外, 受海床整体淤长影响, 其他区域海床抬高幅度为 2~3 m。

2018—2023 年间的码头区海床冲淤变化见图 3c), 西太阳沙人工岛北侧岸坡的淤长影响明显增大。北水道深槽加剧西缩北摆, -15 m 深槽与码头局部冲刷坑分离, 海床自然淤长提供的泥沙超过因码头桩基绕流紊乱所携带的泥沙, 码头局部冲刷坑内不冲反淤, A1 码头南北两侧冲刷坑内最大淤积幅度可达 5 m, B1 码头西侧冲刷坑内的淤积超过 10 m, 在 2016—2018 年间发育规模较大的局部冲刷坑迅速淤积减小, A1 码头停泊水域曾因水深不满足而提出疏浚需求。

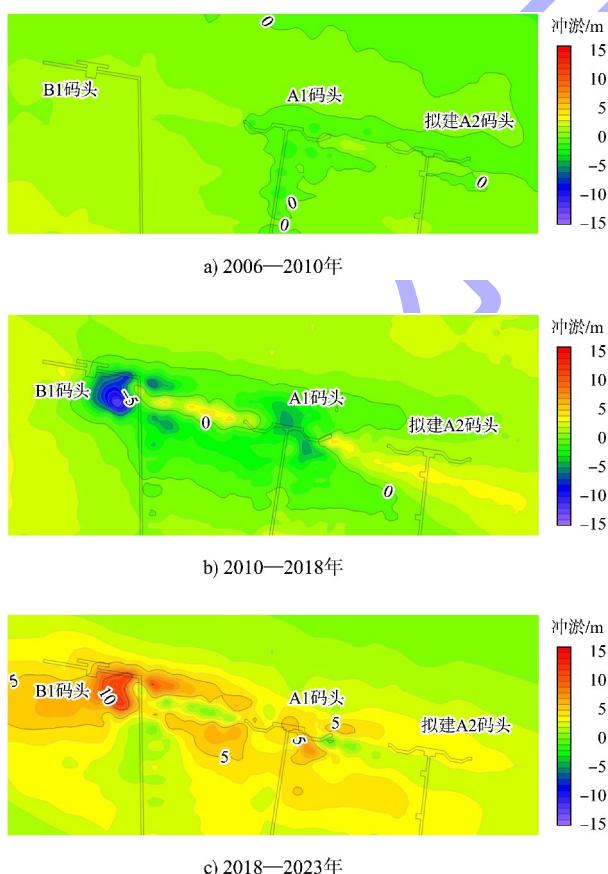


图 3 码头区海床冲淤变化

Fig. 3 Seabed erosion and deposition of the terminal area

4 冲淤对码头结构的影响及防护措施

4.1 码头工程建设与海床演变的关系

工程区域位于辐射沙洲, 海域冲淤变化对工程建设非常敏感^[15-16]。自人工岛建成之后, 西太阳沙面积逐年缩小, 并向南发展, 沙脊脊背高程逐渐减小; 东南、西南侧岛壁外受海流冲刷的影响, 形成冲沟; 已建 A1、B1 码头桩基周边均出现一定程度的冲淤变化, 影响结构稳定安全。针对码头海床稳定性进行系统检测, 对比分析 A1、B1 码头及引桥 2013—2019 年总计 6 次水下地形测量成果, 地形对比见图 4。测量结果显示, A1 码头建设过程桩基底部即出现南北两侧的冲刷坑区域, 北侧冲刷坑最大冲深 8 m, 南侧冲刷坑最大冲深 7 m。

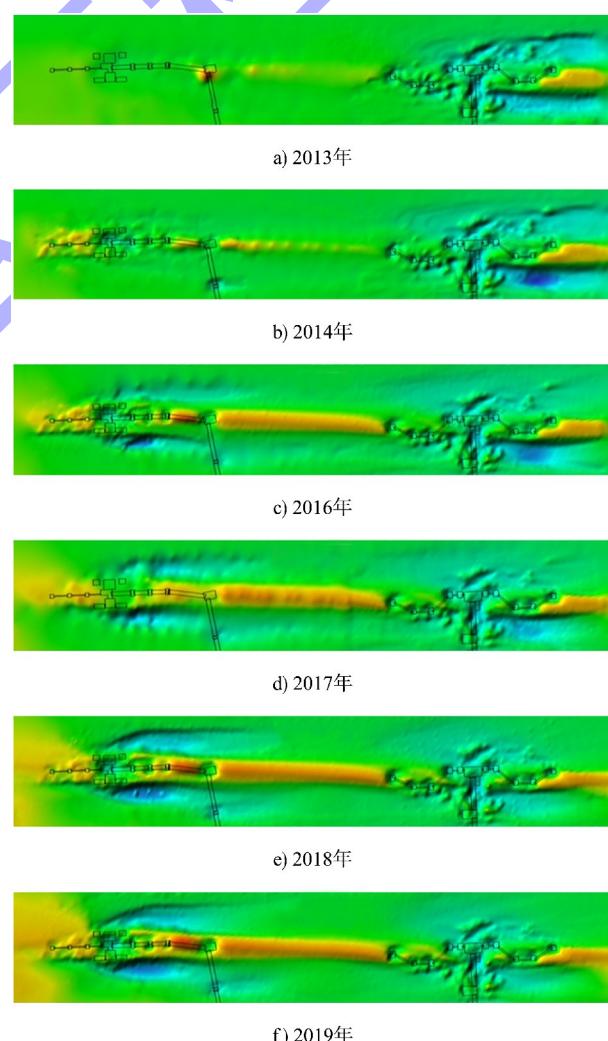


图 4 2013—2019 年多波束水下地形监测结果

Fig. 4 Multibeam submarine topography monitoring results from 2013 to 2019

4.2 桩基冲刷防护对策建议

根据上述研究结果可知, 拟建 A2 码头工程实施后码头及栈桥所在区域的冲刷是不可避免的。码头桩基冲刷防护是保证码头结构安全、提高长期使用稳定性关键措施, 合理选择防护结构的实施时机对于码头工程来说十分重要, 根据防护实施时机, 防冲护底可分为先期、后期防护方案。先期防护方案是应对地基冲刷问题时常采用的方法, 需要预先制定防护方案, 在桩基施工完成后, 进行抛石护底防护, 施工不受上部结构的影响, 施工条件较好, 其缺点是前期投资较高。后期防护方案是桩基设计时预留长度, 施工过程中和完工后定期监测码头区的冲刷情况, 待冲刷接近设计预留冲深时, 再开展针对性防护, 从而可将防护结构做到原泥面以下, 不对流场变化造成影响, 缺点是护底抛填受已有水工建筑物影响, 施工条件较差。

利益相关方可根据各自码头工程特点, 统筹投资节约及施工便利等因素, 合理选用先期、后期防护或者两者相结合的防护方式。根据已建 A1 码头的冲刷情况, 综合项目投资及施工便利性等因素, 拟建 A2 码头工程采用先期防护及预留冲刷深度的后期防护相结合的防护方式, 码头区域(含工作平台及靠船墩)采用先期防护的方式, 底部铺设袋装碎石, 表层抛填块石护面, 护坦区采用充填袋结构, 同时基桩按 4 m 冲深预留; 码头其他区域及栈桥区域采用后期防护的方式, 基桩按 6 m 冲深预留, 冲刷深度接近预留深度时采取防护措施; 近人工岛区采用先期防护的方式, 底部铺设袋装碎石, 表层抛填块石护面, 护坦区采用充填袋结构, 基桩按 3 m 冲深预留。通过采取有效的防护措施, 可以减缓桩基的冲刷速度, 延长桩基的使用年限, 从而降低维护成本和损坏风险。

5 结论

1) 通过分析 2006—2023 年的水下地形长时序成果, 主要分析了阳光岛海域滩槽演变的长期动态变化、LNG 码头区的冲淤情况以及对码头桩基的影响, 并针对冲淤结果和工程特点提出了码头桩基的防护措施。

2) 随着人工岛和依托其建设的码头配套设施

的逐步建成, 人工岛东北侧的大洪埂子逐年往西移动; 北水道仍然维持西延、北移的演变趋势; 中水道头部向西延伸减缓, 有不断南压、拓宽的趋势。北侧 LNG 码头前沿及港池近年来呈淤积状态, -15 m 等深线不断北移。

3) LNG 码头区在不同阶段呈现出不同的冲淤模式, 初期主要是微淤状态; 随着时间的推移, 特别是 2010 年后, 受码头建设的影响, 局部区域出现了显著的冲刷, 尤其是在 A1、B1 码头周围; 至 2018 年, 码头区逐步转变为淤积状态, 人工岛北侧岸坡的淤长影响明显增大, 需要定期疏浚以维持设计水深。

4) 拟建 A2 码头工程采用先期及后期防护(预留冲刷深度)相结合的方式, 码头区域(含工作平台及靠船墩)采用先期防护的方式, 码头其他区域及栈桥区域采用后期防护的方式, 近人工岛区采用先期防护的方式。随着 A2 码头工程的推进, 需持续关注阳光岛海域的冲淤变化情况, 同时 A2 码头桩基冲刷防护的效果也将得到检验, 未来将强化水文现场试验、数值模拟等水文分析工作。

参考文献:

- [1] 王丽, 莫秋荣. 江苏 LNG 项目接收站配套码头及栈桥桩基冲刷防护设计[J]. 中国港湾建设, 2014(8): 27-29. WANG L, MO Q R. Anti-scour protection of pile foundation of wharf and trestle bridge associated with Jiangsu LNG receiving station[J]. China harbour engineering, 2014(8): 27-29.
- [2] 陆培东. 南黄海辐射状沙脊浅水人工岛的工程稳定性研究[C]//中国海洋工程学会. 第十四届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集. 北京: 海洋出版社, 2009: 772-777. LU P D. Study on engineering stability of shallow-water artificial islands in radial sand ridges of the South Yellow Sea[C]//Chinese Ocean Engineering Society. Proceedings of the 14th China Ocean (Coastal) Engineering Academic Symposium (volume I). Beijing: Ocean Press, 2009: 772-777.
- [3] 陆凡, 沈良朵. 舟山复杂海域条件下新建码头工程水动力及泥沙冲淤变化研究[J]. 水运工程, 2022(8): 24-31. LU F, SHEN L D. Hydrodynamics and sediment erosion and silt change of new wharf project in complex sea area

- of Zhoushan[J]. Port & waterway engineering, 2022(8): 24-31.
- [4] 张吕华, 李凯, 夏剑, 等. 码头后方冲淤演化对桩基础影响分析与研究[J]. 中国水运, 2022(18): 105-107.
ZHANG L H, LI K, XIA J, et al. Analysis and research on the influence of scouring and silting evolution behind wharf on pile foundation [J]. China water transport, 2022(18): 105-107.
- [5] 赵丽. 上海市内河开敞航道冲淤情况及成因分析[J]. 港工技术, 2023, 60(3): 1-4.
ZHAO L. Situation and causes of scouring and silting in open waterways of inland rivers of Shanghai [J]. Port engineering technology, 2023, 60(3): 1-4.
- [6] 高志峰, 冒刘燕, 李梦琦, 等. 通扬运河与泰东河交叉河口航道冲淤数值模拟及工程方案优化[J]. 水运工程, 2023(8): 63-69.
GAO Z F, MAO L Y, LI M Q, et al. Erosion and deposition numerical simulation and engineering scheme optimization of cross estuary of Tongyang Canal and Taidong River[J]. Port & waterway engineering, 2023(8): 63-69.
- [7] 董宇, 孙振勇, 秦蕾蕾, 等. 向家坝水利枢纽近坝段通航水域近年冲淤特性分析[J]. 水运工程, 2023(8): 85-89, 175.
DONG Y, SUN Z Y, QIN L L, et al. Erosion and deposition characteristics of navigable waters near Xiangjiaba Hydro-project in recent years [J]. Port & waterway engineering, 2023(8): 85-89, 175.
- [8] 罗意, 来向华, 季有俊, 等. 大鱼山填海工程对海床冲淤变化影响分析[J]. 水运工程, 2023(11): 1-7.
LUO Y, LAI X H, JI Y J, et al. Influence of Dayushan reclamation project on sea-bed erosion and siltation [J]. Port & waterway engineering, 2023(11): 1-7.
- [9] 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.
- [10] 康远泰, 卢陈, 高时友, 等. 2002—2020 年深圳湾河床冲淤特性及驱动机制[J]. 水科学进展, 2024, 35(6): 947-959.
KANG Y T, LU C, GAO S Y, et al. Riverbed erosion-deposition dynamics and driving mechanisms in Shenzhen Bay, 2002 – 2020 [J]. Advances in water science, 2024, 35(6): 947-959.
- [11] 冯凌旋, 季永兴, 章馨谣, 等. 杭州湾北岸金山咀—龙泉港岸段近岸滩槽冲淤演变分析[J]. 海洋学研究, 2020, 38(3): 92-98.
FENG L X, JI Y X, ZHANG X Y, et al. Analysis of erosion and deposition evolution of inshore shoals and channels along the Jinshanzi to Longquangang segment in the northern Hangzhou Bay [J]. Journal of marine sciences, 2020, 38(3): 92-98.
- [12] 龚凯军, 张芮, 李寿千. 沿江引排水航道冲淤规律分析[J]. 珠江水运, 2024(4): 63-67.
GONG K J, ZHANG R, LI S Q. Analysis of scouring and silting law of water diversion and drainage channel along the Yangtze River[J]. Pearl River water transport, 2024(4): 63-67.
- [13] 冯伟琳, 张行南, 徐双全, 等. 长江口横沙浅滩冲淤演变特征分析[J]. 海洋工程, 2024, 42(2): 192-206.
FENG Y L, ZHANG X N, XU S Q, et al. Analysis of the characteristics of erosion and accumulation evolution of the Hengsha Shoal in the Yangtze River Estuary [J]. The ocean engineering, 2024, 42(2): 192-206.
- [14] 李立杰, 张一鸣, 李薇, 等. 高桩码头区域波流耦合泥沙冲淤模拟及动力特性分析: 以宁波穿山港为例[J]. 海洋工程, 2024, 42(6): 95-107.
LI L J, ZHANG Y M, LI W, et al. Simulation and dynamic characteristics analysis of wave-current coupled sediment scouring and silting in high-pile wharf zones: a case study of Ningbo Chuanshan Port [J]. The ocean engineering, 2024, 42(6): 95-107.
- [15] 李富春, 全宗良, 黄广灵, 等. 滨海电厂新建码头港池及取排水口对海域冲淤演变影响分析[J]. 中国港湾建设, 2024, 44(3): 17-25.
LI F C, TONG Z L, HUANG G L, et al. Influence of new wharf basin and water intake-outlet of a coastal power plant on the evolution of sediment erosion and deposition in sea area [J]. China harbour engineering, 2024, 44(3): 17-25.
- [16] 吴创收, 田鹏, 姜伟芳. 近 30 年吕四海域地貌冲淤规律及机制分析[J]. 海洋湖沼通报, 2024, 46(4): 37-41.
WU C S, TIAN P, GU W F. Analysis of the law and mechanism of the erosion and deposition of the Lvsai area in recent 30 years [J]. Transactions of oceanology and limnology, 2024, 46(4): 37-41.