

新水沙环境下青草沙水库外侧滩地形态调整特征及保护措施

李溢汶, 杜锐, 吴彩娥

(上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200434)

摘要:采用青草沙水库周边 2014—2019 年实测水下地形数据, 定量分析了各堤段滩地形态调整特征, 基于 MIKE21 数值模型对护滩措施的效果进行了模拟。结果表明: 2014 年后青草沙水库外侧滩地基本未出现明显的淤积外延发展, 且局部沙体逐渐萎缩, 其中北堤中段外侧滩地头部大幅度冲刷, 最大距离近 900 m (−5 m 及 −10 m 等深线), 沙体形态呈扁平化调整, 须适时进行保护; 新桥通道进、出口落潮主流略有偏转, 向水库大堤侧靠近, 影响滩地的冲淤过程; 在青草沙外侧滩地头部沙体实施潜堤护滩措施后, 北堤中段外沙体滩面流速整体明显减小, 且对周边区域的水动力过程影响较小。

关键词:滩地冲淤; 护滩措施; 长江口; 南北港分汊口; 青草沙水库

中图分类号:TV147 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2023)04-0073-06

Morphological adjustment characteristics and protection measures of outer beaches around Qingcaosha Reservoir under new flow and sediment conditions//LI Yiwen, DU Rui, WU Caie (*Shanghai Investigation, Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200434, China*)

Abstract: The measured topographic data from 2014 to 2019 were used to quantitatively analyze the morphological adjustment of the shoals around the Qingcaosha Reservoir. The effects of corresponding protection measures for the shoals were explored based on the numerical model MIKE21. The results show that the outer beaches around the Qingcaosha Reservoir stopped sedimentation, and some parts of the beaches shrank after 2014. The head of shoals had been significantly scoured in the middle part of the north dikes, and the maximum scouring distance was nearly 900 m (−5 m and −10 m depth contours). The shoals' shape was flattened, which must be protected in time. The ebb tide mainstream at the inlet and outlet of the Xinqiao channel deflected to the reservoir dikes, which affected the scouring evolution process of the shoals. After the implementation of submerged bank protection at the head of the Qingcaosha Reservoir, the velocity decreased significantly in shoal area outside the middle part of the north dikes, and the protection measures had little impact on the surrounding hydrodynamic processes.

Key words: beach scouring and silting; beach protection measures; Yangtze River estuary; branching of south and north channel; Qingcaosha Reservoir

长江口属于大径流、中等潮差河口, 是较为典型的潮汐河口, 徐六泾下游河床平面呈三级分汊、四口入海的复杂河势格局^[1-2]。受径、潮流相对强度不同以及泥沙组成在空间上存在较大差异等因素的影响, 历史上长江口段河势调整较为剧烈, 1861—1958 年间白茆沙南北水道主支汊发生了 3 次交替移位^[3], 长江口南北港分流通道则呈现出不定期“上提下移”的演变规律^[4]。1998 年以来, 长江口地区通过实施一系列涉水工程基本稳定了长江口宏观河

势格局, 但三峡工程运行后上游来沙量大幅减小仍可能影响河势稳定性^[5-6]。青草沙水库工程是南北港分汊口及下游河道河势控制的关键, 同时也具备淡水资源利用、生态环境保护等重要功能, 环库大堤涉及长江口多条主支汊通道, 受到河口分汊河道复杂的主支汊水沙分配过程影响^[7], 水库周边滩槽冲淤变化较频繁。因此, 研究近年来水库外侧滩地的冲淤特征对维护工程安全等方面具有指导作用。

目前针对青草沙水库的研究大多集中在库内的

基金项目:国家重点研发计划政府间国际科技创新合作项目(2022YFE0117500);上海市科学技术委员会科技创新行动计划项目(21DZ1201700)

作者简介:李溢汶(1994—),男,工程师,硕士,主要从事河口海岸动力学研究。E-mail:lyw@whu.edu.cn

水环境及水生态安全方面,如易欣鑫等^[8]阐明了青草沙水库内鱼类组成变化过程及鱼类群落结构特征差异性,朱宜平等^[9]通过采集青草沙水库代表区域表层沉积物样品评价了库内不同区间的潜在生态风险。由于青草沙水库还具备河势控制等重要功能,部分学者也基于实测数据分析及数值模拟计算开展了水库工程对周边河势滩势的影响研究,如陈伟伦等^[10]采用 MIKE21 软件计算并初步分析了青草沙水库工程对周边水域河床的冲淤影响,盛皓等^[11]的研究表明青草沙水库前沿河槽断面形态呈逐渐窄深化的演变趋势,李文正^[12]根据等深线变化分析了青草沙水库对维持南北港分流口段河势格局稳定的重要性。长江上游来沙减少的趋势仍将长期持续,将对长江口滩槽冲淤格局产生影响^[13],加之上游扁担沙尾部向东南淤积延伸,影响新桥通道平面形态及水动力过程^[14],亟需加强新水沙环境下青草沙水库周边区域滩槽格局的稳定性研究并适时采取保护措施以保障水库持续发挥各项功能。

本文以青草沙水库周边 2014—2019 年实测水下地形数据为基础,分析新水沙环境下青草沙水库不同堤段外侧滩地的平面及断面形态调整特征,初步探索保护措施,并构建长江口平面二维水动力数学模型对保护措施的效果及影响进行计算分析。

1 研究区概况和数据来源

青草沙水库位于长江口南支、南港及北港河道之间,由多段围堤组成(图 1),属于长江口第二级分汉的重要部分,南北港分汉口区域是历史上长江口河势最为动荡的区域之一^[15]。青草沙水库工程实施以前,南北港分流通道呈现周期性上提下移的演变特点,即原有的北港分流通道逐渐逆时针偏转,引起分流不畅,进而淤积、萎缩、消亡,同时南支下段主流在南门港附近冲蚀扁担沙滩面形成新的北港分流通道,而后在水流的作用下该通道南侧冲刷、北侧淤积,逐渐逆时针偏转,出现过中央沙北水道、南门通道、新桥通道等不同的北港分流通道^[16]。一方面,下扁担沙仍处于自然演变中,其沙尾冲淤变化频繁且仍有沙体切割的发展趋势^[17],可能影响青草沙水库的安全运行,进而影响南北港分汉口及下游河道滩槽格局的稳定;另一方面,2000 年以后大通水文站年输沙量减少尤为显著,对长江口河道的冲淤形势产生长期影响^[18]。基于此,研究新环境下青草沙水库外侧滩地的演变特点,探索必要的保护措施对河势稳定、水源地安全、滩涂保护等具有重要意义。

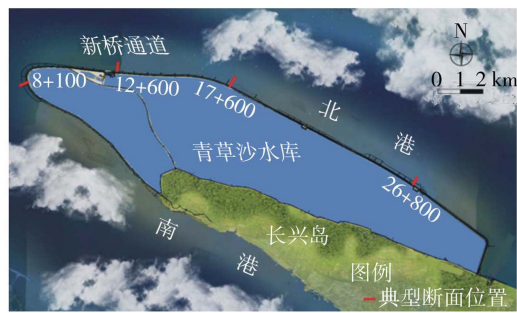


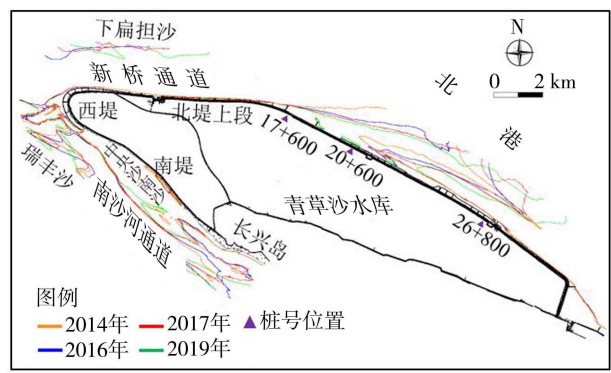
图 1 研究区域示意图

地形数据来自青草沙水库建成后 2014—2019 年大堤外侧水下地形动态跟踪测量成果,滩涂地形比例尺为 1 : 5 000,断面纵比例 1 : 100,横比例 1 : 100,高程采用吴淞高程系统。采用 Bentley 三维软件对水下地形数据进行 DEM 建模后提取对应的等深线数据进行分析。

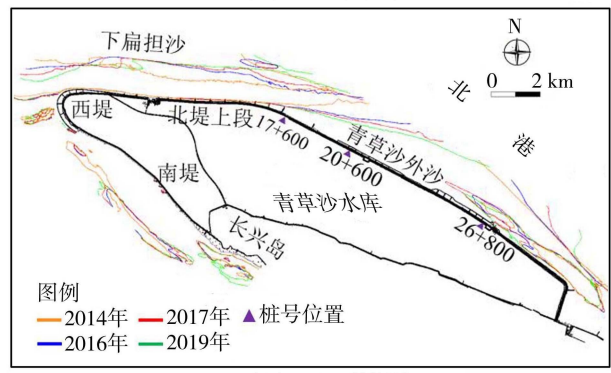
2 青草沙水库外侧滩地形态调整过程

2.1 等深线调整

青草沙水库外侧滩地分布在南北港分汉口、南港及北港区域,主要受到周边滩涂演变以及复杂水动力条件的影响。根据 2014—2019 年青草沙水库北港河道等深线变化(图 2)分析可知:在北堤附近区域,随着下扁担沙尾部沙体的调整,新桥通道进口 -10 m 等深线河槽有所束窄,河道平面形态略有逆



(a) -5 m 等深线



(b) -10 m 等深线

图 2 2014—2019 年青草沙水库外侧等深线调整过程

顺时针偏移,出口-10 m 等深线河槽放宽,平面形态顺时针偏移,引起了落潮主流向水库大堤逼近,一方面导致北堤上段深槽接近大堤堤脚滩地宽度较窄,且-5 m 和-10 m 等深线贴近、间距多不足 25 m,在丁坝群等保滩措施的守护下才趋于稳定;另一方面,受水流顶冲,青草沙外侧滩地头部持续冲退,-5 m 及-10 m 等深线最大退幅均接近 900 m,主要出现在桩号 17+600 至 20+600 外侧,2017 年后冲退幅度才有所减小。近堤侧涨潮沟区域(桩号 26+800 外侧)大幅淤积萎缩,可能是外侧滩地头部冲刷下来的泥沙一部分淤积在潮沟头部,外侧滩地尾部持续淤积下延。在西堤及南堤附近区域,南沙头通道进口-5 m 等深线冲刷连通、-10 m 等深线持续冲退,这可能与上下游扁担沙尾部沙体的下移有关。近瑞丰沙滩面有冲刷形成新通道的迹象,中央沙南沙-5 m 等深线在 2017 年后出现串沟发育迹象,长兴岛南侧涨潮沟-5 m 等深线变化频繁、-10 m 等深线潮沟总体有所展宽。总的来说,受到下扁担沙尾部冲淤调整、流域来沙减少以及复杂涨潮、落潮动力过程的长期影响,青草沙水库外侧滩地冲淤变化频繁,局部滩地平面形态萎缩,呈现扁平化调整态势,在北堤外侧区域尤其明显,不利于区域滩槽格局的稳定。此外,2019 年新桥通道出口段-10 m 等深线河槽出现了较明显的展宽,不同于 2014—2017 年间的变化过程,可能与上游来沙持续维持在低水平有关。

2.2 典型断面调整

以受径潮流作用较显著的西堤、北堤上段、北堤中段和北堤下段 4 处典型断面为例分析新水沙环境

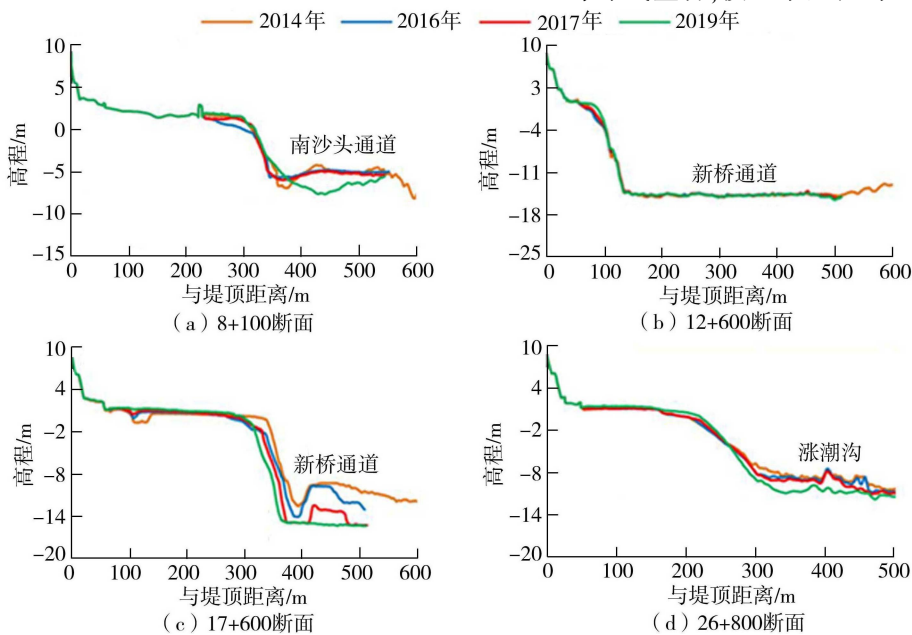


图 3 青草沙水库不同堤段典型断面形态调整过程

b. 12+600 断面(图 3(b))位于北堤上段,紧邻新桥通道,断面形态岸坡陡峭、深槽近岸,2014—2019 年间总体冲淤变幅较小。一方面,2014 年以前下扁担沙尾部下移^[17]迫使新桥通道主流南压,强劲的落潮主流冲刷断面,增大过水面积,造成了当前滩地坡度较陡的不利局面;另一方面水库北堤上段通过及时实施丁坝群保滩工程对堤前约 100 m 范围的滩地形成了守护带,抑制了主流的进一步冲蚀,促进了坝田间的淤积,-5 m 以浅区域略有淤高,幅度约 1 m。

c. 17+600 断面(图 3(c))位于北堤中段、新桥通道出口,受落潮主流顶冲的影响,断面形态调整呈边滩冲退、深槽发展的态势,2014—2019 年间深槽最大冲深约 5.68 m,边滩整体冲退约 30 m,且尚未出现明显的减缓迹象,堤前 300 m 范围内边滩在保滩丁坝的掩护下较为稳定。

d. 26+800 断面(图 3(d))位于北堤下段、下游排水闸附近,该断面相对远离北港主槽,主要受涨潮流的影响,断面形态呈现深槽冲刷的调整态势,-5 m 以下区域冲刷宽度约 248 m,冲深约 2~3 m,-5 m 以浅区域略有淤高,相对稳定。

3 青草沙水库外侧滩地保护措施及效果

3.1 模型网格及验证

基于丹麦水力研究所研发的 MIKE21 软件构建长江口平面二维水动力模型用以初步模拟分析增加青草沙水库北堤外侧青草沙外侧滩地护滩措施的效果及影响。

模型上游边界选取大通水文站,外海边界取到-50 m 等深线左右;模型东西长约 560 km,南北宽约

320 km, 计算范围如图 4 所示。模型计算时间为 2016 年 7 月, 大通边界采用流量过程, 外海边界采用潮汐预报模型计算结果, 部分水动力验证成果见图 5 和图 6, 徐六泾和六淤为潮位站。

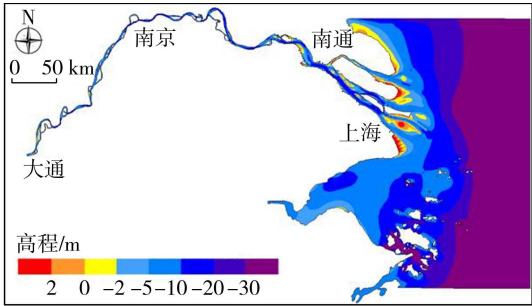


图 4 模型计算范围

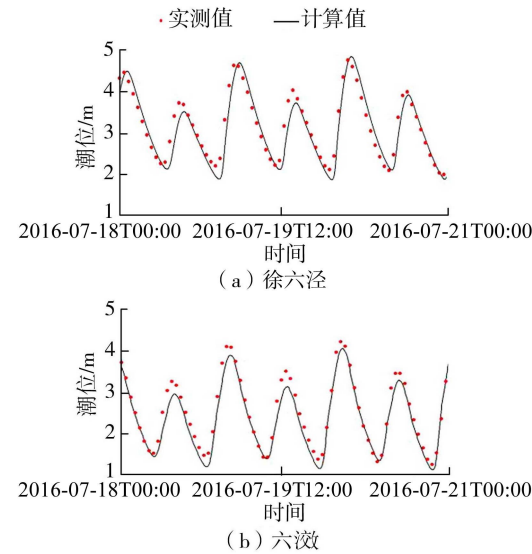


图 5 模型潮位验证

3.2 护滩保护措施及效果

青草沙水库自运行以来已根据大堤外侧水下地形的动态监测成果陆续实施了丁坝群、顺坝等保滩工程, 保障了大堤主体的稳定、对堤前水下滩地的保护起到了积极作用。然而, 上游来沙大幅减少以及下扁担沙演变的不确定性仍可能对库外滩地造成不利影响, 威胁水库的安全运行, 同时考虑到对保护长江口滩涂资源及稳定滩槽格局等方面的要求, 有必要对北港河道进口的青草沙外侧滩地进行保护, 初步设想沿沙体多年来相对稳定的-5 m 等深线以浅区域进行护滩潜堤布置, 如图 7 所示, 护滩潜堤总长 6.5 km, 高程 2.0 m, 采用构建的模型模拟工程实施后护滩效果以及对周边水动力过程可能造成的影响。

护滩潜堤实施前后的模拟效果见图 8。分析可知, 护滩潜堤实施后青草沙外侧滩地区域的流速明显减小, 北港主槽流速略有增大。其中涨急时刻, 青草沙外侧滩地护滩潜堤对北港以及横沙通道上溯的潮水有挑流以及阻水作用, 青草沙外侧滩地部分滩

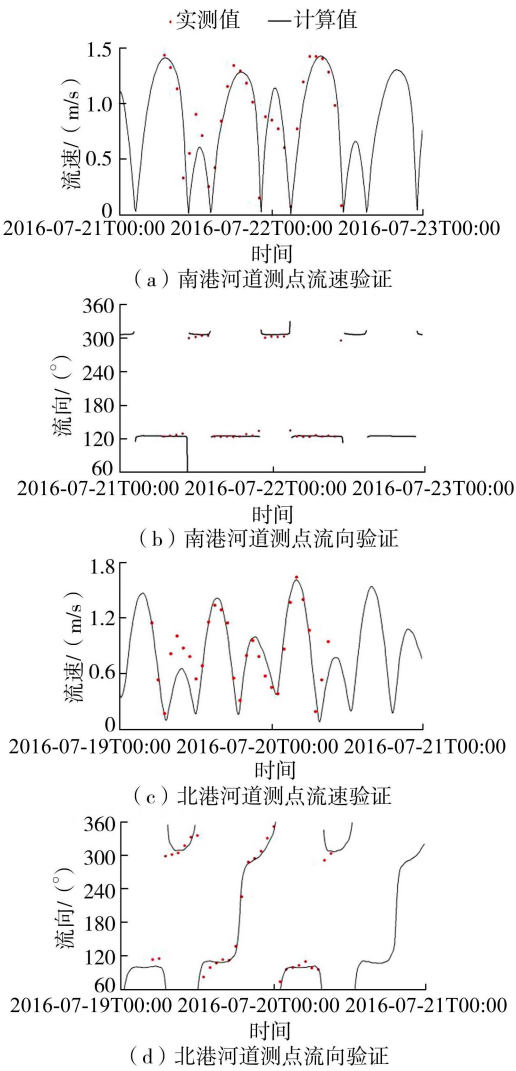


图 6 模型流速流向验证

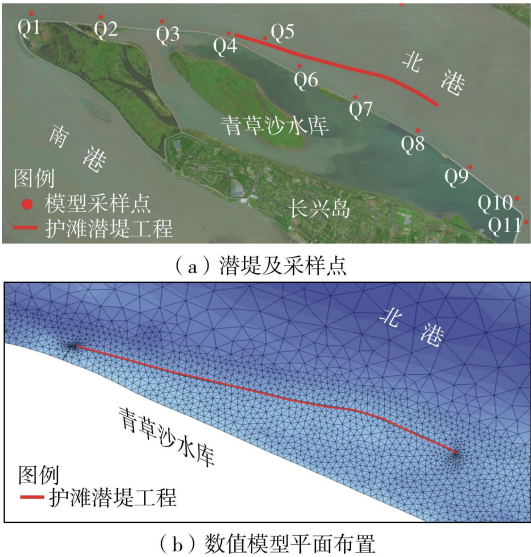


图 7 青草沙外沙保护措施及数值模型平面布置

面流速有所减小, 幅度约 0.1 ~ 0.6 m/s, 且靠近潜堤减幅更明显; 落急时刻, 青草沙外侧滩地护滩潜堤对北港落潮主流有一定的导流作用, 主流归顺槽内, 外侧滩地滩面流速明显减小、最大减幅约 1.04 m/s, 外

侧北港主槽流速增大约 0.1~0.2 m/s。进一步通过近堤处采样点(图 7)分析可知,青草沙水库周边高潮位基本未受影响,变幅在 0.01 m 之内,低潮位靠近北堤中下段,降低约 0.05 m(表 1),水位变化对青草沙水库取水、排水以及堤防安全基本不存在明显影响。总的来说,护滩潜堤实施后对青草沙外侧滩地能起到较好的守护效果,且对周边区域的水动力影响基本可控,但需注意水库下游排水闸附近(桩号 26+800)可能产生的淤积,可考虑通过调整水库调度规则,如加大排水量等方式,缓解可能产生的闸下淤积。

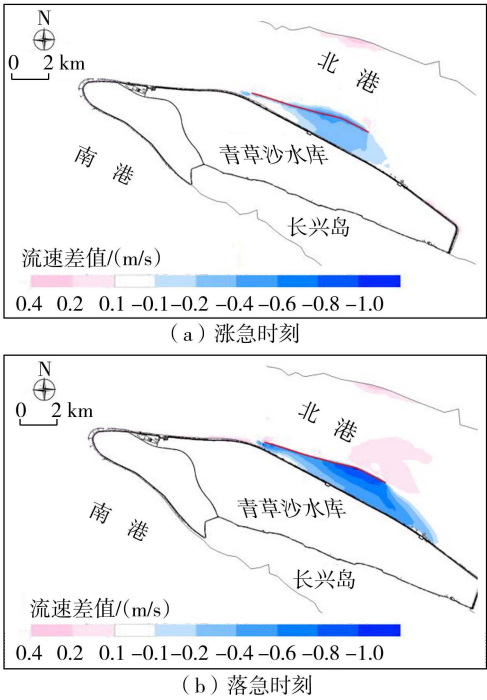


图 8 护滩潜堤实施前后青草沙水库周边河道流速差值分布

表 1 护滩潜堤实施前后青草沙水库周边潮位变化

采样点	单位:m			
	实施前 高潮位	实施后高潮 位变化值	实施前 低潮位	实施后低潮 位变化值
Q1	3.55	0.00	1.31	0.02
Q2	3.53	-0.01	1.26	0.02
Q3	3.52	-0.01	1.31	0.01
Q4	3.48	0.00	1.31	-0.01
Q5	3.48	-0.01	1.28	0.00
Q6	3.47	-0.01	1.26	-0.04
Q7	3.45	0.00	1.27	-0.05
Q8	3.42	0.01	1.27	-0.04
Q9	3.43	-0.01	1.28	0.01
Q10	3.42	-0.01	1.29	0.00
Q11	3.44	0.00	1.31	0.00

4 结 论

a. 在复杂涨落潮动力过程的作用下,青草沙水库外侧滩地冲淤变化频繁,北堤中段青草沙外侧滩地头部持续冲退、沙尾淤积下延、沙体形态呈扁平化调整,须适时对青草沙外侧滩地滩涂采取适当的人

工保护,堤外 300 m 范围潮沟有所冲深;北堤上段及西堤外侧滩地退无可退,岸坡较陡,在一系列保滩工程的守护下基本维持稳定;南堤外侧中央沙南沙基本稳定,近期出现串沟发育迹象。

b. 基于构建的模型对保护前后青草沙水库周边的水动力过程进行了模拟,结果表明,通过潜堤保护后,青草沙外侧滩地滩面的水动力过程整体减弱,沙体将得到一定保护,北港主槽流速略有增大,对周边区域的水动力过程影响总体可控,但需关注水库下游排水闸附近可能产生的淤积。

参考文献:

[1] 赵德招,刘杰,张俊勇,等. 长江口河势近 15 年变化特征及其对河口治理的启示[J]. 长江科学院院报,2014, 31(7):1-6. (ZHAO Dezhaoh, LIU Jie, ZHANG Junyong, et al. Characteristics of river regime variation of Yangtze River estuary in the past 15 years and their enlightenment on estuary regulation [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2014, 31 (7) : 1-6. (in Chinese))

[2] DAI Zhijun, LIU J T, FU Gui, et al. A thirteen-year record of bathymetric changes in the North Passage, Changjiang (Yangtze) estuary[J]. Geomorphology, 2013, 187:101-107.

[3] 王俊. 长江口河道演变规律与治理研究[M]. 北京:中国水利水电出版社,2013.

[4] 吴焱,闫红飞,戴文鸿. 长江口北港分流通道近期演变及治理措施[J]. 人民长江,2016,47(24):12-16. (WU Yan, YAN Hongfei, DAI Wenhong. Recent evolution and regulation of distributary channel of Beigang in Yangtze River estuary[J]. Yangtze River, 2016, 47 (24) : 12-16. (in Chinese))

[5] 韩玉芳,窦希萍. 长江口综合治理历程及思考[J]. 海洋工程,2020,38(4):11-18. (HAN Yufang, DOU Xiping. The process and prospect of comprehensive control of Yangtze estuary [J]. The Ocean Engineering, 2020, 38 (4) : 11-18. (in Chinese))

[6] YANG S L, ZHANG J, ZHU J, et al. Impact of dams on Yangtze River sediment supply to the sea and delta intertidal wetland response [J]. Journal of Geophysical Research:Earth Surface, 2005, 110(F3):F03006.

[7] 王长金,胡鹏,李薇,等. 河流分汉成因与演变机制研究综述[J]. 水利水电科技进展,2022,42(3):112-120. (WANG Changjin, HU Peng, LI Wei, et al. A review on formation and evolution mechanism of river bifurcation [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42 (3) : 112-120. (in Chinese))

[8] 易欣鑫,蔡之惊,秦智杰,等. 上海青草沙水库鱼类群落结构的年际变化[J]. 上海海洋大学学报, 2021, 30

- (4):664-674. (YI Xinxin, CAI Zhijing, QIN Zhijie, et al. Analysis of interannual variations for the fish community structure in Shanghai Qingcaosha Reservoir [J]. Journal of Shanghai Ocean University,2021,30(4): 664-674. (in Chinese))
- [9] 朱宜平,李小飞,梁霞.上海青草沙水库表层沉积物重金属含量水平及其生态风险评价[J].华东师范大学学报(自然科学版),2021(2):54-62. (ZHU Yiping, LI Xiaofei, LIANG Xia. Content and ecological risk assessment of heavy metals in the surface sediments of Qingcaosha Reservoir in Shanghai [J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 2021(2): 54-62. (in Chinese))
- [10] 陈伟伦,王伟.青草沙水库工程对河床冲淤演变的影响[J].水利水电科技进展,2018,38(4):44-50. (CHEN Weilun, WANG Wei. Influence of Qingcaosha Reservoir Project on riverbed erosion and deposition [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38(4):44-50. (in Chinese)).
- [11] 盛皓,戴志军,梅雪菲,等.长江口青草沙水库前沿河床演变与失稳风险研究[J].海洋工程,2017,35(2):105-114. (SHENG Hao, DAI Zhijun, MEI Xuefei, et al. Research on evolution and instability risk of the frontal river bed along the Qingcaosha Reservoir, Changjiang Estuary [J]. The Ocean Engineering, 2017, 35(2): 105-114. (in Chinese))
- [12] 李文正.新形势下长江口南北港分汊口河段河势变化及治理策略[J].水运工程,2013(11):115-118. (LI Wenzheng. Riverbed evolution characteristics and regulation strategy of inlet river of south channel and North Channel, Yangtze estuary [J]. Port & Waterway Engineering, 2013(11):115-118. (in Chinese))
- [13] 徐骏,刘羽婷,唐敏炯,等.长江口滩涂变化及其原因分析[J].人民长江,2019,50(12):1-6. (XU Jun, LIU Yuting, TANG Minjong, et al. Tidal flat variation in Yangtze River Estuary and cause analysis [J]. Yangtze River, 2019, 50(12): 1-6. (in Chinese))
- [14] 华凯,程和琴,颜阁,等.近期长江口南支扁担沙洲演变特性[J].泥沙研究,2020,45(6):33-39. (HUA Kai, CHENG Heqin, YAN Ge, et al. Recent processes of Biandan sand shoal in the South Branch of the Yangtze Estuary [J]. Journal of Sediment Research, 2020, 45(6): 33-39. (in Chinese))
- [15] 恽才兴.长江河口近期演变基本规律[M].北京:海洋出版社,2004.
- [16] 吴焱.长江口南北港分流口河段近期河势变化及对区域重大整治工程的影响[J].水运工程,2017(7):136-140 (WU Yan. Evolution of ditributary reach of South and North channels in the Yangtze Estuary and influence on surrounding regulation projects [J]. Port & Waterway Engineering, 2017(7):136-140. (in Chinese))
- [17] 何钰滢,戴志军,楼亚颖,等.长江口扁担沙动力地貌变化过程研究[J].海洋学报,2020,42(5):104-116. (HE Yuying, DAI Zhijun, LOU Yaying, et al. Morphodynamic evolution of the Biandan Shoal in the Changjiang River estuary [J]. Haiyang Xuebao, 2020, 42(5): 104-116. (in Chinese)).
- [18] 窦希萍,缴健,储麐,等.长江口水沙变化与趋势预测[J].海洋工程,2020,38(4):2-10. (DOU Xiping, JIAO Jian, CHU Ao, et al. Review of hydro-sediment change and tendency in Yangtze estuary [J]. The Ocean Engineering, 2020, 38(4): 2-10. (in Chinese))

(收稿日期:2022-07-07 编辑:俞云利)

(上接第 66 页)

- [25] WANG Linlin, TANG Chaosheng, SHI Bin, et al. Nucleation and propagation mechanisms of soil desiccation cracks [J]. Engineering Geology, 2018, 238: 27-35.
- [26] 吴珺华,袁俊平,杨松,等.膨胀土湿胀干缩特性试验[J].水利水电科技进展,2012,32(3):28-31. (WU Junhua, YUAN Junping, YANG Song, et al. Experimental study on swell-shrink performance of expansive soil [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(3): 28-31. (in Chinese))
- [27] 陈杰,朱学英,付梁,等.水泥稳定土干缩性能及其尺寸效应[J].水利水电科技进展,2022,42(2):114-118. (CHEN Jie, ZHU Xueying, FU Liang, et al. Dry shrinkage performance and size effect of cement stabilized soil [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(2): 114-118. (in Chinese))
- [28] 张勇敢,刘斯宏,鲁洋,等.袋装膨胀土强度变形特性及其碾压质量控制与检测[J].河海大学学报(自然科学版),2022,50(5):118-123. (ZHANG Yonggan, LIU Sihong, LU Yang, et al. Strength and deformation characteristics, compaction quality control and inspection of soilbags filled with expansive soil [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(5): 118-123. (in Chinese))

(收稿日期:2022-06-30 编辑:俞云利)