

黄晨霞, 张行南, 徐双全, 等. 杭州湾北沿上海段水下地形冲淤变化特征[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(2): 379-389. HUANG C X, ZHANG X N, XU S Q, et al. Characteristic analysis of underwater topographic erosion and deposition in the Shanghai Section of the north Hangzhou Bay[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(2): 379-389. (in Chinese)

杭州湾北沿上海段水下地形冲淤变化特征

黄晨霞^{1,2}, 张行南^{1,2}, 徐双全³, 李万春³

(1. 河海大学水文水资源学院, 南京 210098; 2. 河海大学水安全与水科学协同创新中心, 南京 210098;
3. 上海市水务局, 上海 200050)

摘要: 基于 2005—2020 年上海市滩涂实测地形、气象数据及开发建设资料, 以杭州湾北沿上海段为研究区, 定性与定量、整体与局部相结合, 分析其水下地形冲淤变化特征, 探寻演变原因及影响。结果表明: 杭州湾北沿上海段近 16 年整体呈强度渐弱的冲刷态势, 共冲刷 1.482 亿 m³, 年均冲刷深度为 2.886 cm, 金山深槽虽受强潮及圈围工程的影响兼具冲刷及强淤积, 但整体表现为冲淤均衡略显冲刷, 冲刷强度仅为研究区域冲刷的 12.1%; 上游来水来沙的减少使得杭州湾北沿维持冲刷态势, 潮流挟沙补充作用随涨潮潮差增大而增强, 冲刷强度减弱, 圈围区域岸线稳定, 贴岸冲刷较强, 地形变化较为剧烈。

关键词: 动力地貌; 冲淤演变; 剖面形态; 来水来沙; 圈围工程; 金山深槽; 潮流

中图分类号: TV148.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2023.0039

河口作为河流的末端, 是河流流入海洋、湖泊或其他河流的重要连接处, 河口地貌具有高度动态性。研究河口地貌演变常用的技术方法有现场实测、物理模型、遥感影像以及数值模拟等^[1]。近年来, 由于水库大坝拦沙, 沉积物输送大幅下降, 密西西比河^[2]、Tagus^[3]、湄公河^[4]等河口均受到不同程度的侵蚀, 河口三角洲湿地面积减少; 但长江^[2]、黄河^[5]及红河^[4]等河口三角洲得益于潮汐效应和土地复垦工程, 总体处于动态平衡大格局中, 仍有新的湿地出现。河口三角洲建设开发在一定程度上与其地形冲淤演变互相影响, 在人类活动和水动力条件改变的共同作用下, 沉积物动力输运受到影响, 水下三角洲形态改变。

杭州湾为钱塘江入海形成的一个喇叭形海湾, 杭州湾北沿上海段位于湾顶到湾口的中后段北侧, 同时受到长江口及钱塘江口的影响, 水动力因素复杂, 地貌形态多变^[6-7]。历史上杭州湾呈现北冲南淤的状态, 圈围工程使得杭州湾北沿岸线全线外移, 1997 年前杭州湾北沿东侧淤涨, 中部冲刷, 西侧基

本保持稳定, 1997—2004 年 0 m 等深线以上岸滩进入侵蚀状态, 侵蚀带由东向西推进, 同时也向岸北侵; 金山深槽位于杭州湾北沿上海段西侧, 1989—2014 年金山深槽呈现冲刷—淤积交替的周期性变化, 冲刷加剧^[8-12]。

现有研究缺乏较为完整且精度较高的地形数据系列, 且近些年来, 随着杭州湾北沿开发建设的推进, 对沿岸既需要整体岸滩分析也需要结合重点区域的详细研究。本研究基于 2005—2020 年上海市滩涂实测地形、气象数据及开发建设资料, 对其冲淤及地形特征演变过程进行分析, 以期为岸滩、港槽资源利用及开发建设提供自然地理环境变化的基础资料。

1 研究区域资料及方法

1.1 研究区域

研究区为杭州湾北侧最下游段区域, 上游为上海与浙江交界, 下游为芦潮港, 沿岸涉及浦东新区、奉贤区及金山区, 具有明显的港口及深槽特征。杭

收稿日期: 2022-07-15 修回日期: 2023-02-09 网络出版时间: 2023-04-13
网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20230412.1038.014.html>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC0409000)

作者简介: 黄晨霞(1998—), 女, 安徽安庆人, 主要从事水文水资源及河口冲淤、泥沙研究。E-mail: 1924506372@qq.com

通信作者: 张行南(1960—), 男, 江苏连云港人, 教授, 博士, 主要从事水文水资源研究。E-mail: zxn@hhu.edu.cn

州湾北沿上海段首尾设有 2 个潮汐站,分别是金山嘴站和芦潮港站,1 个潮流站即杭州湾口站。研究

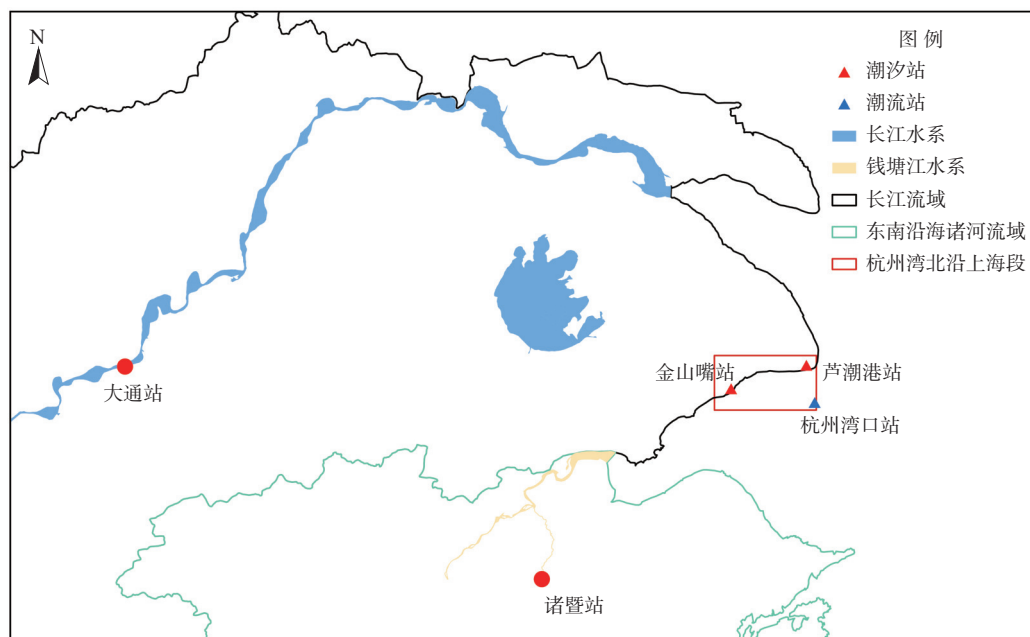


图 1 研究区区域及各站点位置图

Fig. 1 Research area and multiple site locations

1.2 数据来源

本研究采用的地形数据为 2005—2020 年上海滩涂地形实测 CAD 数据及部分实测外海等深线、等深点数据,采用 RTK 或全站仪进行潮间带地形测量,采用测线法进行水下地形测量,采用同济大学测量系提供的导航测深软件进行数字化测图,靠近长江口内区域采用 1:10 000 比例尺,靠近外海采用 1:25 000 比例尺,CAD 实测区域至杭州湾北沿近岸,可准确反映杭州湾北沿地形情况;水沙数据为《中国泥沙公报》所统计的大通站和诸暨站的 2005—2020 年实测水沙特征值;潮位数据为《中华人民共和国水文年鉴》所统计的 2006—2018 杭州湾金山嘴站及芦潮港站数据,杭州湾口潮流站潮流及悬浮泥沙质量浓度数据来源为国家科技资源共享服务平台——国家海洋科学数据中心(<http://mds.nmdis.org.cn/>)。

1.3 研究方法

基于 ArcGIS 三维分析的正方形网格型数字高程模型(digital elevation model, DEM)构建。提取 2005—2020 年滩涂地形实测 CAD 数据中的等深线及等深点数据,结合部分外海等深点、等深线数据,创建不规则三角网(triangle network, TIN),生成杭州湾北沿 2005—2020 年 DEM,精度为 20 m。

栅格数据符号化。利用 ArcGIS 分级符号生成

2005、2008、2011、2014、2017 及 2020 年地形分色图,2005—2020 年及逐 3 年冲淤变化图。

栅格数据地形分析。利用 ArcGIS 表面体积、重叠剖面 and 等值线提取等工具计算或提取地形特征,统计分析冲淤地形演变特征。

基于张瑞瑾公式的潮流挟沙分析。计算水流挟沙力的张瑞瑾公式为

$$S_* = K \left[\frac{U^3}{(gRw)} \right]^m \quad (1)$$

式中: K 、 m 为参数; g 为重力加速度, m/s^2 ; U 为平均流速, m/s ; w 为床沙平均沉速, m/s ; R 为水力半径, m ; $U^3/(gRw)$ 反映了紊动作用与重力作用的相对大小,结合悬沙含量和涨落潮流速变化,分析潮流挟沙。

2 整体及重点区域冲淤地形演变特征

2.1 地形变化

选取 2005、2008、2011、2014、2017 及 2020 年地形数据,使用统一地形分级标准绘制地形图(图 2)进行对比分析。从 2005 年至 2020 年,杭州湾北沿 0 m 以上区域面积缩减,整体呈冲刷态势,尤其是杭州湾北沿东部,芦潮港前深水区域(粉白色块)面积扩大,高程降低。金山岸段和奉贤岸段地形呈现冲刷—淤积的周期性变化,金山嘴近岸及金山深槽主槽(白色色块)为研究区地形最低处,高程在 -50 m 左右。

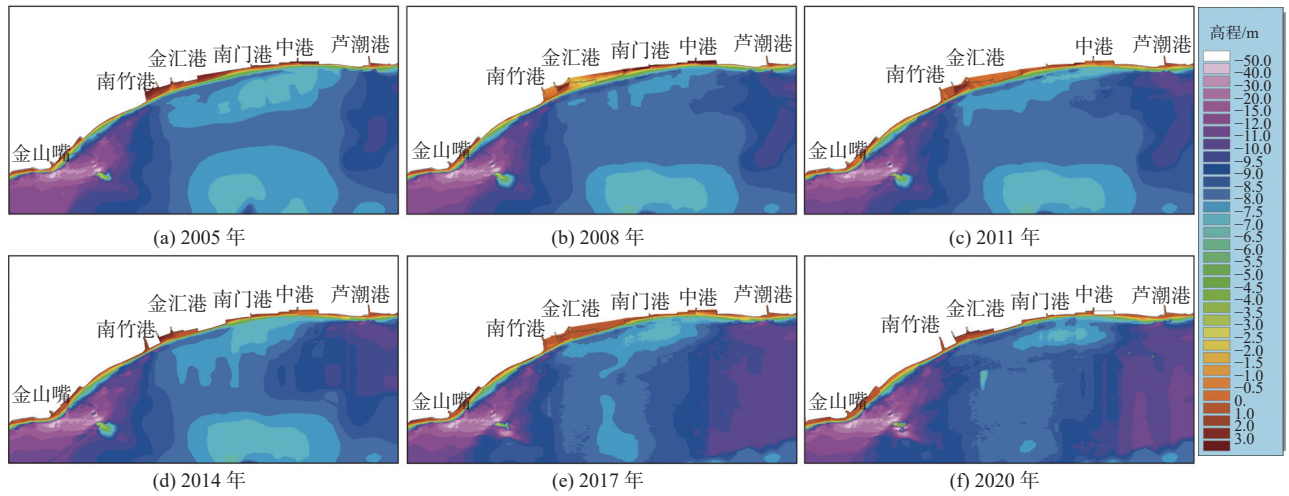


图2 杭州湾北沿2005、2018、2011、2014、2017和2020年地形图

Fig. 2 Topography along the north Hangzhou Bay of 2005, 2018, 2011, 2014, 2017 and 2020

2.2 近岸冲淤变化

依据地形图所选年份绘制不同时期冲淤变化图(图3),红黄色代表淤积,蓝绿色代表冲刷。由图3(a)可以看出,2020年与2005相比,研究区冲淤变化较为剧烈的区域为东西两侧,即金山和浦东岸

段,淤积和冲刷在不同时期交替出现。金山岸段近岸冲淤分布散乱且强度较大(红蓝色占比较多),芦潮港港前贴岸淤积,近岸冲刷。冲刷强度较高的时期为2005—2008年[图3(b)],淤积强度较高的时期为2008—2011年[图3(c)]。

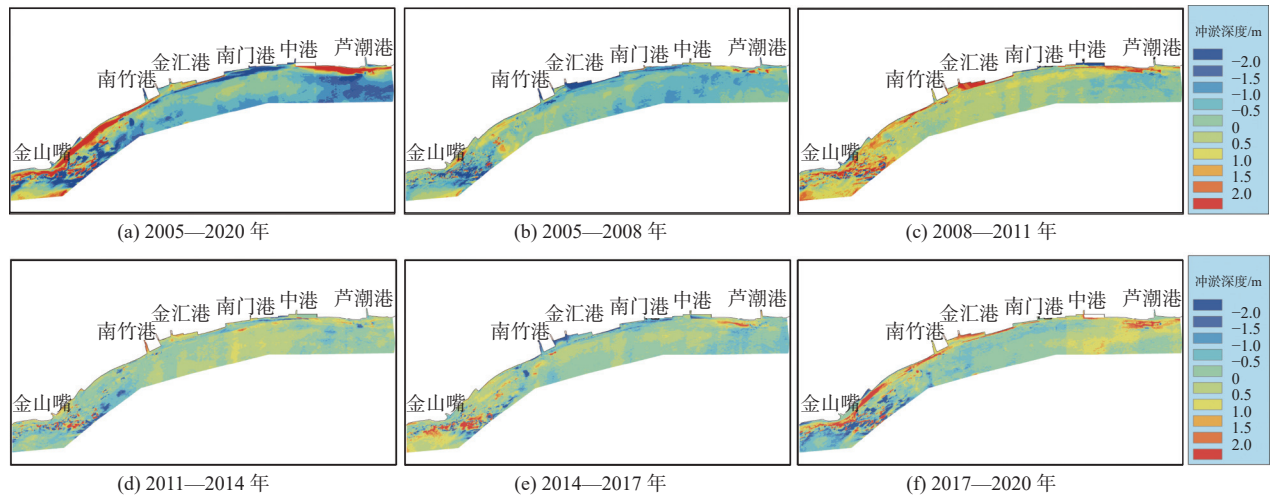


图3 杭州湾北沿不同时期冲淤变化图

Fig. 3 Distribution of erosion and deposition along the north Hangzhou Bay in different periods

为进一步定量分析杭州湾北沿冲淤变化情况,对不同时期杭州湾北沿冲淤总量、冲淤深度及年均

冲淤幅度情况进行计算(表1),并将逐年冲淤深度变化绘制成柱状图(图4)。

表1 不同时期杭州湾北沿滩涂冲淤强度

Tab. 1 Silting and scouring intensity along the north Hangzhou Bay in different periods

时期	2005—2020	2005—2008	2008—2011	2011—2014	2014—2017	2017—2020
冲淤总量/亿m ³	-1.482	-1.663	0.964	-0.378	-1.036	-0.055
冲淤深度/m	-0.433	-0.481	0.278	-0.108	-0.115	-0.016
年均冲淤幅度/cm	-2.886	-16.034	9.252	-3.590	-3.824	-0.524

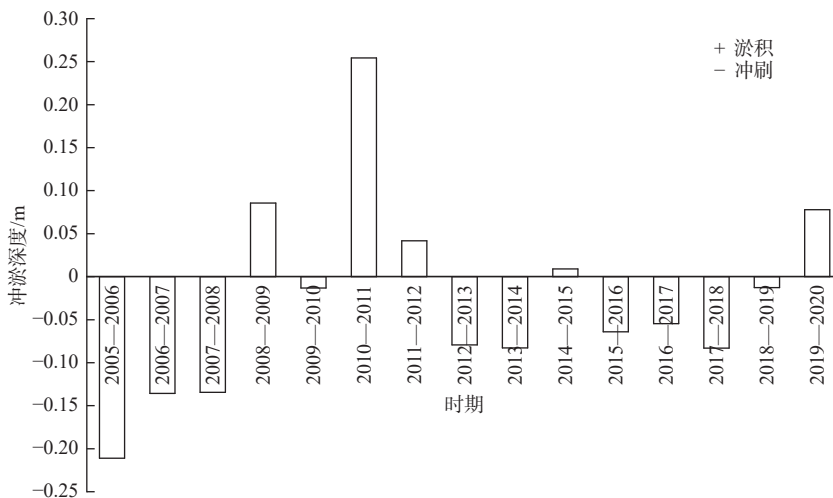


图 4 杭州湾北沿 2005—2020 年逐年冲淤深度变化

Fig. 4 Annual variation of silting depth along the north Hangzhou Bay from 2005 to 2020

根据表 1, 杭州湾北沿近岸区域自 2005 年至 2020 年 16 年共冲刷了 1.482 亿 m^3 , 平均每年冲刷 2.886 cm , 在表 1 的 5 个不同时期中, 除 2008—2011 年外, 均表现为冲刷, 冲刷强度逐时期呈减弱态势。结合图 4 所展现的杭州湾北沿逐年冲淤深度变化, 2005—2006 年为冲刷强度最大的时段, 冲刷深度达到 0.211 m , 2010—2011 年为淤积强度最大的时段, 淤积深度达 0.254 m 。

2.3 基于等深线的金山深槽冲淤变化

金山深槽冲淤兼具强冲刷、强淤积特点, 是杭州湾北沿上海段高程最低的区域, 等深线能较好地描述地形随时间的演变过程, 利用 -20 m 和 -10 m 等深线进行对比分析。金山深槽 -10 m 等深线

[图 5(a)] 变化较为复杂, 整体呈扩张趋势, 远岸局部收缩, -20 m 等深线 [图 5(b)] 集中于金山深槽中心处, 呈逐年向南扩张趋势。-20 ~ -10 m 高程范围为金山沿岸占比最多的区域, 金山深槽区域高程基本在 -10 m 以下, 其面积增加或减少随年份交替出现, 小于 -20 m 区域面积呈增长趋势, 自 2005 年至 2020 年, 由 14.088 km^2 增加到 16.527 km^2 , 深水面积的扩大意味着金山深槽中心区域受到冲刷。2010—2011 年, 金山深槽 -10 m 以下高程范围面积由 76.741 km^2 锐减至 71.649 km^2 , -20 m 以下高程范围面积也由 17.14 km^2 锐减至 14.521 km^2 , 与 2011 年杭州湾北沿出现强淤积的特殊情况相对应。

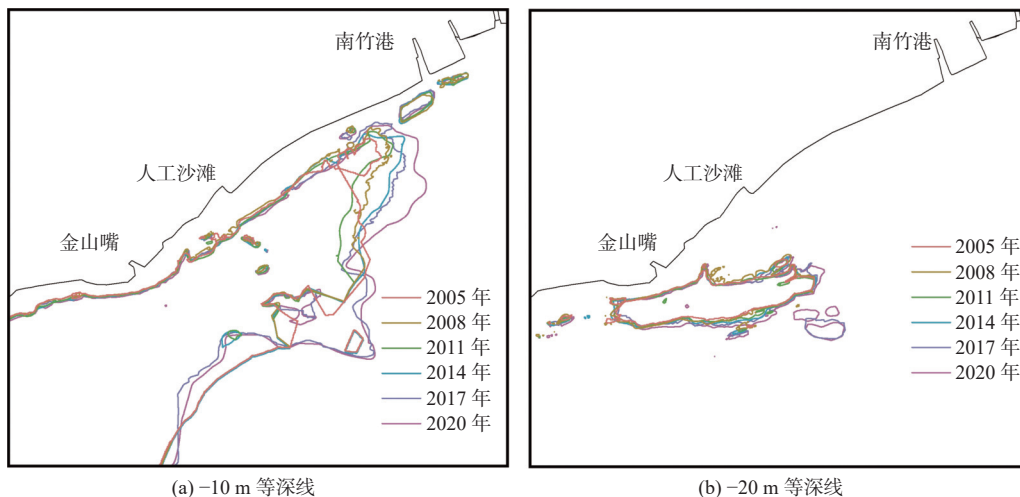


图 5 金山深槽等深线变化

Fig. 5 The contour variation diagram of Jinshan deep trough

为定量分析金山深槽冲淤变化情况, 对不同时期金山深槽冲淤量、冲淤深度及年均冲淤幅度情况进行计算, 统计结果见表 2。

由表 2 可得金山深槽近年来整体呈现弱冲刷态

势, 冲刷和淤积交替出现, 强度逐渐减弱, 和杭州湾北沿上海段整体冲淤演变一致。根据金山深槽逐年冲刷统计结果, 金山深槽最大淤积时段为 2010—2011 年, 淤积深度 0.688 m ; 最大冲刷时段为 2017—

2018年,冲刷深度0.514 m;2005—2020年年均冲刷0.349 cm,仅为杭州湾北沿整体冲刷的12.1%。因此,金山深槽虽然兼具强冲刷和强淤积,但仅表

现为维持一个相对比较稳定的周期性变化,其对杭州湾北沿整体冲淤演变贡献率较低。

表2 不同时期金山深槽冲淤强度

Tab. 2 Silting and scouring intensity on the Jinshan deep trough in different periods

时期	2005—2020	2005—2008	2008—2011	2011—2014	2014—2017	2017—2020
冲淤总量/亿m ³	-0.050	-0.310	0.739	-0.367	0.014	-0.209
冲淤幅度/m	-0.052	-0.290	0.689	-0.341	0.094	-0.199
年均冲淤幅度/cm	-0.349	-9.662	22.963	-11.350	3.123	-6.625

2.4 金山深槽典型断面剖面形态变化

设置1号、2号、3号典型断面见图6(a),图6(b)至图6(d)分别为3个断面6个年份的剖面形态变化图,主要反映金山研究区深水断面形态特征及深坑发育情况。金山城市沙滩是在金山岸段-3.0~-5.0 m滩面上,采用人工抛沙与“围水沉泥”

技术,于2007年建设的粉砂淤泥质海岸人造沙滩^[13]。1号断面为杭州湾北沿西侧的金山嘴深水区,3号断面为金山城市沙滩至金山深槽主槽中心断面,2号断面介于1号和3号断面之间,2号、3号断面起点均位于金山城市沙滩带上。

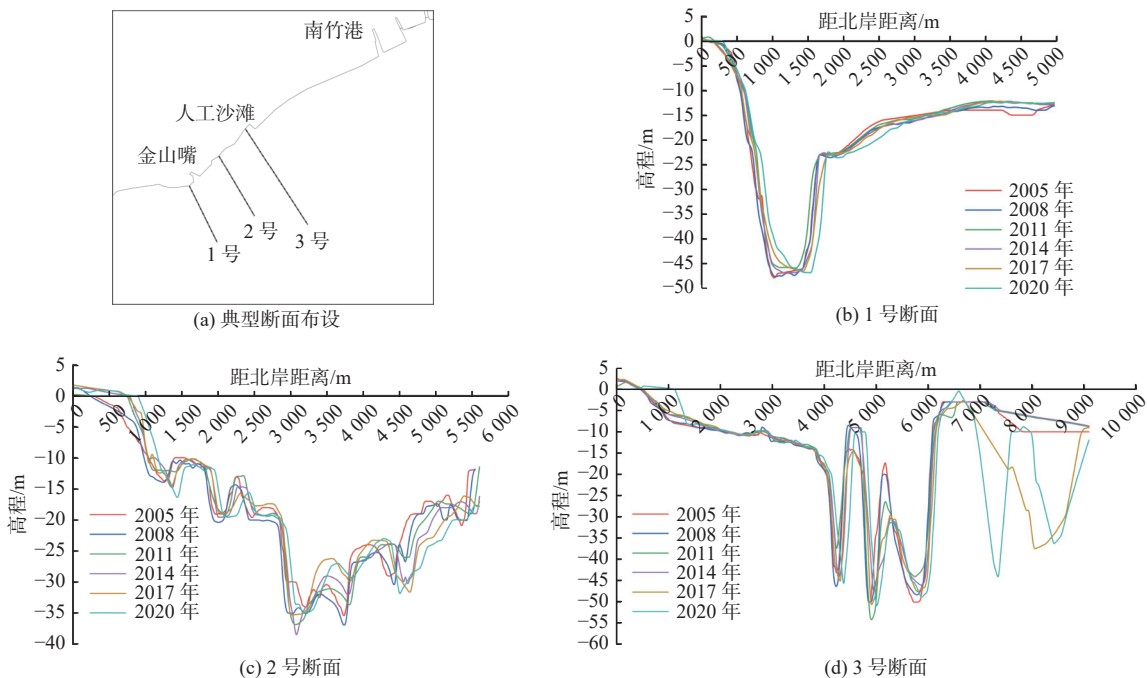


图6 金山深槽典型断面位置及剖面形态变化图

Fig. 6 The typical section position and the change of profile morphology of Jinshan deep trough

1号断面[图6(b)]整体形态保持稳定,断面分布无明显的小型冲刷坑,金山嘴深水区底部高程在-47 m附近波动,逐渐向远岸方向偏移,深水区体积缩减,2005—2020年金山嘴贴岸坡度在37.97%~52.14%波动,整体逐渐变缓;远岸方向高程随离岸距离增加而升高,坡度逐年变陡,金山嘴深水区域并未建设圈围工程,岸线也多为自然岸线,因此在来水来沙和潮流作用下随距离增加维持着贴岸弱淤积、远岸弱冲刷的微小变化。

2号断面[图6(c)]剖面形态呈多冲刷坑的V

形深坑,随着金山城市沙滩的建设和投入使用,贴岸部分高程上升,近岸坡度变陡,远岸坡度变缓。3号断面[图6(d)]近岸形态比较稳定,2020年1.2 km处断面坡度突然变陡,离岸3.8~6.2 km处存在锯齿形深坑,4.5 km和5.2 km处为深坑第二个锯齿的起点和终点,锯齿形深坑底部高程在-36.76~-54.27 m波动,各锯齿均向远岸侧微移。离岸6.8 km处断面剖面形态由小冲刷坑逐渐淤积至较为平滑后,发育出V形深坑,根据2017年剖面图可看出深坑离岸较近侧有两处小淤积,坑底高程为-37.46 m,2020年

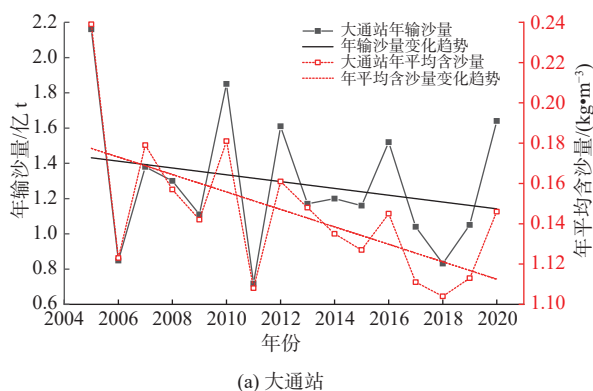
剖面显示 V 形深坑已发育成 W 形深坑,坑底高程分别为-44.04 m 及-36.21 m。

2 号和 3 号断面起点位于金山城市沙滩带上,在围海造陆工程影响下,相较于金山嘴深水区(1 号断面),其水下滩坡地形变化较为剧烈,冲刷坑多且深,坡度较陡。3 号断面离岸 6.8 km 处因小金山及大金山阻水拦沙而逐渐发育的深坑与金山深槽-20 m 等深线面积扩大相对应,深槽中心区域冲刷。

3 冲淤地形演变驱动分析

微观上,决定河口海岸动力地貌形态及其变化的直接因素是泥沙运动,更确切地说是泥沙输运及其梯度^[14-18]。根据泥沙的来源及其运移规律,推动地形冲淤演变的 3 个可能的主要因素为泥沙供给、潮流挟沙以及人类活动^[19-23]。

钱塘江河口与长江河口相毗邻,杭州湾的北岸即为长江三角洲的南缘。由于杭州湾北沿特殊的地理位置,同时受到陆地因素作用和海洋因素作用,杭州湾北沿底物质来源有上游来沙和口外的海域来沙^[24],两者协同作用向杭州湾北沿进行泥沙输运。口外海域泥沙主要由长江输运泥沙沉积形成,因此,



在杭州湾滩涂地形的研究中,有必要对长江口的泥沙来源特征进行分析研究。

3.1 上游泥沙供给

长江上游径流作用相对较强,长江口以粗颗粒泥沙沉积为主,口门及口外海滨以细颗粒泥沙沉积为主,钱塘江上游泥沙大部分堆积在激浦以上的河段内,形成钱塘江河口沙坎,一般情况下,上游来水来沙对杭州湾北沿的直接输沙作用相对较小。

选取大通站和诸暨站分别作为长江和钱塘江的代表站,分析 2005—2020 年的上游来沙特征。据《中国泥沙公报》所提供的实测水沙数据,两站逐年年输沙量、年平均含沙量及其变化趋势见图 7(a)、图 7(b)。近 16 年大通站及诸暨站实测年平均含沙量均呈下降趋势,长江、钱塘江入海悬浮泥沙含量下降,泥沙供给量减少。在上游来沙供给量下降及人类活动共同作用下,区域内平均含沙量明显下降^[25-27],维持冲刷态势,但多年泥沙沉降的“累积”作用使得长江口口外泥沙源较为稳定,在逐年增强的潮流挟沙共同作用下,冲刷强度下降,并未出现大区域高强度冲刷,仅呈弱冲刷的平衡状态。

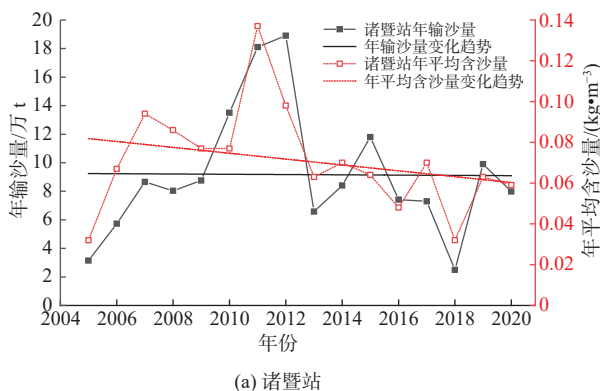


图 7 大通站、诸暨站 2005—2020 年输沙变化图

Fig. 7 Sediment discharge of Datong Station and Zhuji Station from 2005 to 2020

2011 年 4 月,长江中下游流域发生了自 1959 至 1961 年的旱灾后 50 年来最严重的一次旱灾,大通站流量骤减,输沙量及年平均含沙量骤降,同年 6 月,钱塘江中游发生 1955 年以来最高水位洪水,诸暨站输沙量较 2010 年增加 4.6 万 t,且年平均含沙量急剧上升为 2010 年的两倍,钱塘江来水来沙越过钱塘江河口沙坎,杭州湾北沿 2010—2011 年出现强淤积的特殊情况。

3.2 口外海域泥沙供给

杭州湾作为强潮型河口,北沿由涨潮流控制,南沿受落潮流控制,由此形成了特殊的泥沙输运移路线——“北进南出”,杭州湾北沿的口外海域来沙

一部分是长江入海的悬浮泥沙随涨潮流直接进入杭州湾,一部分则是长江口外水下三角洲堆积泥沙被掀动后随潮进入杭州湾^[28]。长江口外泥沙伴随涨潮流由芦潮港向金山嘴进行输运(图 8),补充泥沙。

根据杭州湾口站 2020 年不同时期数据绘制悬浮泥沙(TSS)质量浓度及涨落潮流速变化图[图 9(a)]和表(表 3)。杭州湾口站 TSS 在 2020 年年内变化比较剧烈,其涨潮流流速均大于落潮流流速,张瑞瑾公式中,流速 U 越大,水体的紊动作用 $U^2/(gR)$ 越大,重力作用 w/U 越小,水流挟沙力越大,因此潮流挟沙补充以涨潮流为主。TSS 及落潮流流速整体上与涨潮流流速呈正相关趋势[图 9(b)],当涨落潮流

速下降较多时(8月30日—9月12日),悬浮泥沙质量浓度随之下降,且在9月13日流速上升时仍保持下降,强烈涨潮流伴生强烈落潮流,涨潮流流速过

大时(8月30日 0.9 m/s),落潮流流速为 0.86 m/s,涨落潮流挟沙力相近,补充效果较差,此时悬浮泥沙质量浓度仅为 14.54 g/m³。

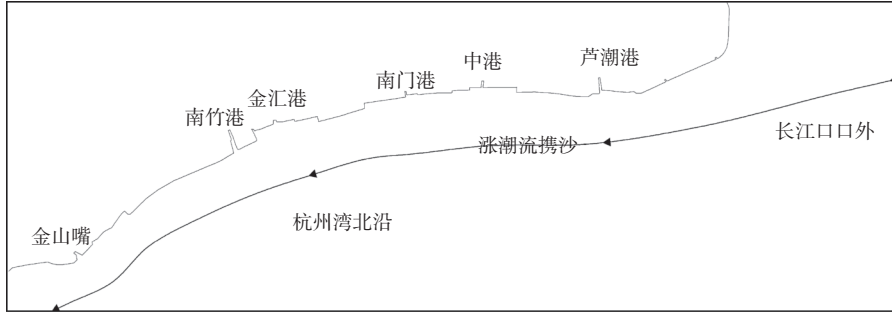


图8 长江口口外泥沙补充

Fig. 8 Replenishment of sediment outside Yangtze Estuary

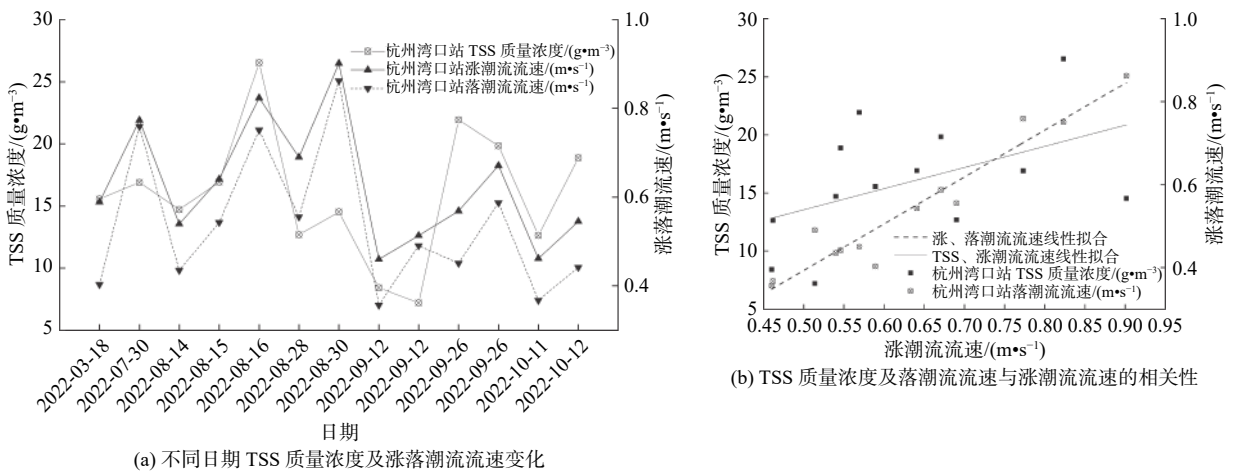


图9 杭州湾口站悬浮泥沙质量浓度、涨落潮流速变化及特征

Fig. 9 Variation and characteristics of suspended sediment mass concentration and fluctuating tidal current velocity at Hangzhou Bay station

表3 2020年杭州湾口站不同日期悬浮泥沙质量浓度及涨落潮流速变化

Tab. 3 Variation of suspended sediment mass concentration and tidal current velocity in different days at Hangzhou Bay station in 2020

日期	3月18日	7月30日	8月14日	8月15日	8月16日	8月28日	8月30日	9月12日	9月13日	9月26日	9月27日	10月11日	10月12日
TSS质量浓度/(g·m ⁻³)	15.57	16.91	14.72	16.93	26.54	12.71	14.54	8.42	7.21	21.93	19.84	12.65	18.88
涨潮流速/(m·s ⁻¹)	0.59	0.77	0.54	0.64	0.82	0.69	0.90	0.46	0.51	0.57	0.67	0.46	0.55
落潮流速/(m·s ⁻¹)	0.40	0.76	0.44	0.54	0.75	0.56	0.86	0.36	0.49	0.45	0.59	0.37	0.44

杭州湾口悬浮泥沙质量浓度 2005 年为 81.80 g/m³, 2006 年为 69.00 g/m³, 而 2020 年仅为 15.76 g/m³(10 月数据), 不同年份同时期杭州湾北沿悬浮泥沙质量浓度呈下降趋势。泥沙沉速的一般计算公式为

$$w = \sqrt{4gD(\gamma_s - \gamma)/3\gamma C_D} \quad (2)$$

式中: $(\gamma_s - \gamma)/\gamma$ 为泥沙有效容重系数; C_D 为水体的阻力系数; D 为泥沙粒径, m; g 为重力加速度, m/s²。涨潮流杭州湾北沿悬浮泥沙粒径 D 较小, 细颗粒泥沙在低含沙量水体中絮凝沉降作用较差, 水体阻力系数 C_D 较大, 沉速 w 较小, 泥沙沉降较少, 整体呈现冲刷态势。但随着悬浮泥沙质量浓度的下降, 依据“制紊假说”, 低含沙量水体制紊作用较小, 挟沙能力较强, 在增强的潮流挟沙下, 冲刷强度有所减弱。

杭州湾北沿水下地形冲淤演变与泥沙运移沉降息息相关。在泥沙运移过程中, 涨潮流占主导地位, 泥沙由口外向湾内输运, 涨潮流流速的增加, 使得更多的口外泥沙进入湾内, 但强烈涨潮流会伴生较为强烈的落潮流, 保留在湾口内的泥沙有所减少; 在泥沙沉降过程中, 细颗粒泥沙在低含沙量水体中沉速较小; 低含沙量水体水流挟沙能力较强。

金山嘴站高潮位在 4.0 m 左右, 低潮位在 0 m 以下, 芦潮港站高潮位在 3.5 m 左右, 低潮位在 0 m 以上, 相较于芦潮港站, 金山嘴站高潮位较高, 低潮位较低, 涨潮潮差相较芦潮港站大 1 m 左右(图 10), 金山深槽区域深蓝色色块(强冲刷)在不同时期均出现且分布较多。杭州湾北沿年平均涨潮潮差逐年增大,

涨、落潮年平均潮差相近,涨、落潮年平均历时年间变化不大,但涨潮年平均历时较落潮年平均历时缩短 1 h,涨潮流速较大,以涨潮流作用为主导。潮差增大使得潮流动力增强^[29],泥沙补充效果较好,冲刷强度减弱。金山深槽区域受杭州湾喇叭口地形的影响,潮流作用更为强烈,河床沉积物在强潮流带动下进行“再悬浮”,对冲刷区进行一定的补充,故金山深槽强冲刷区块附近常伴随有强淤积区块,冲刷强度有所抵消,冲刷深度仅为杭州湾北沿整体冲刷的 12.1%。

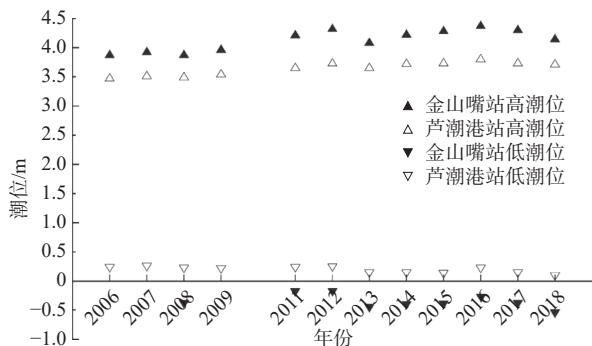


图 10 潮汐站高低潮潮位

Fig. 10 Variation of the high and low tidal levels at the tidal level station

注: 2006、2007 年杭州湾河势演变,滩地淤积,造成滩滩外移,使得低潮时段露滩,金山嘴站观测不全,低潮数据缺失。

3.3 围海造陆工程影响

杭州湾北沿由于地形和海潮的原因形成了较多的冲坑、深槽,深水资源较为丰富,港口码头较多,近年来,为进行岸线整治推进的围海造陆工程,在一定程度上保护了岸线,扩大了岸滩资源的利用率。杭州湾北沿 2005 年至 2020 年一线海塘对比及圈围工程情况见图 11。

杭州湾北岸围海造陆工程的推进造成圈围区域深水贴岸使得水下岸滩受冲刷,相较于 2005 年一线海塘情况,2020 年杭州湾北沿一线海塘向远岸推进,除个别港口外,整个岸段更为平直,贴岸区域水下岸滩冲刷加剧,坡度变陡,水下滩面变窄。金山城市沙滩附近的断面形态相较于未进行工程建设的金山嘴断面水下滩坡地形变化较为剧烈,贴岸坡度较陡,冲坑较多,金山深槽中心刷深主要受到大小金山的阻水拦沙影响。人工岸线和专用岸段的建设在一定程度上维护了岸线,但岸段较为平直且深水贴岸,水流流速增大,其冲刷能力增强,长期冲刷可能会引起地基失稳、崩岸等问题^[30-31],带来安全风险,需持续观察并进一步研究。

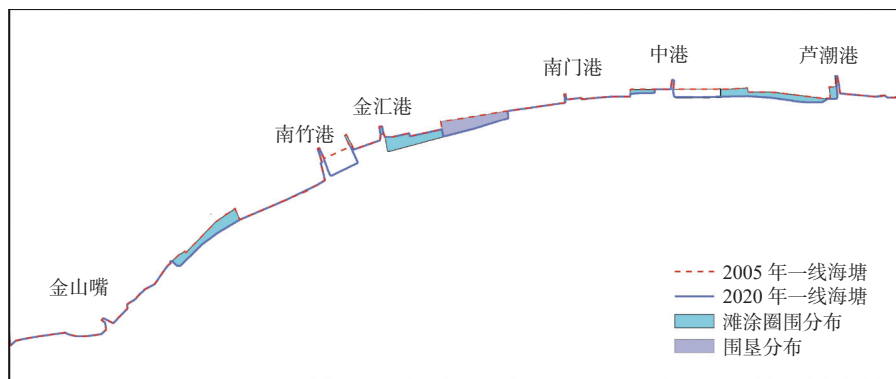


图 11 杭州湾北沿一线海塘及圈围工程

Fig. 11 Seawall and enclosure project along the north Hangzhou Bay

4 结论与展望

基于 2005—2020 年上海市滩涂实测地形、气象及开发建设资料,制作不同时期杭州湾北沿上海段地形图和冲淤图,计算统计冲淤强度,对金山深槽绘制等深线变化图以及断面形态变化图,统计等深线包络面积及冲淤强度,定性定量描述杭州湾北沿上海段局部及整体冲淤及地形演变特征,结合水沙、潮流和圈围工程分析其演变过程,主要结论如下:

杭州湾北沿上海段 2005—2020 年呈冲刷态势,年均冲刷幅度为 2.886 cm,冲刷强度从 16.034 cm/a 降至 0.524 cm/a,从时间序列上来看冲刷强度逐年

减弱,从地理位置来看冲刷强度从西向东逐渐加强;研究区地形冲淤变化受到上游来沙、潮流以及围海造陆工程的共同影响,三者协同作用下的杭州湾北沿上海段维持弱侵蚀状态;金山嘴深水区及金山深槽有向远岸移动趋势,贴岸坡度变缓,呈淤积态势,远岸方向冲刷加剧,其岸滩变陡且地形变化剧烈。金山深槽年均冲刷为杭州湾北沿整体冲刷的 12.1%,对研究区整体冲淤演变贡献率较低,其地形及冲淤主要影响因素为围海造陆工程,在金山城市沙滩所在的 2 号、3 号断面,冲刷坑多且深,坡度较陡,3 号断面还受到岛礁的“阻拦”影响。

杭州湾北沿上海段冲刷强度呈减弱态势,部分区域的专用岸段及人工岸段使得岸线年际变化较为稳定,是目前各影响因素协同作用所形成的平衡状态,这种平衡将持续较长时间。但上游来沙的持续缩减及长江口圈围工程影响下的长江口口外泥沙沉积量是否会减少,长期冲刷是否会带来地基失稳、崩岸等风险,以及水下地形特征演变和岸滩、港槽开发建设的互反馈关系等问题,需持续观察和进一步研究。

参考文献:

- [1] 吴增斌. 潮控河道水沙净输运机制研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2022. DOI: [10.27149/d.cnki.ghdsu.2022.003053](https://doi.org/10.27149/d.cnki.ghdsu.2022.003053)
- [2] YANG H F, YANG S L, LI B C, et al. Different fates of the Yangtze and Mississippi deltaic wetlands under similar riverine sediment decline and sea-level rise[J]. *Geomorphology*, 2021, 381: 107646. DOI: [10.1016/j.geomorph.2021.107646](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107646).
- [3] FORTUNATO A B, FREIRE P, MENGUAL B, et al. Sediment dynamics and morphological evolution in the Tagus Estuary inlet[J]. *Marine Geology*, 2021, 440: 106590. DOI: [10.1016/j.margeo.2021.106590](https://doi.org/10.1016/j.margeo.2021.106590).
- [4] NGUYEN D V, FAN D, BUI V V, et al. Sediment budget and morphological change in the Red River Delta under increasing human interferences[J]. *Marine Geology*, 2021, 431: 106379. DOI: [10.1016/j.margeo.2020.106379](https://doi.org/10.1016/j.margeo.2020.106379).
- [5] 韩香举. 现行黄河口滨海区冲淤演变及其动力机制[D]. 上海: 华东师范大学, 2021. DOI: [10.27149/d.cnki.ghdsu.2021.000996](https://doi.org/10.27149/d.cnki.ghdsu.2021.000996)
- [6] 魏荣灏, 张坤军, 张杰. PPK技术在强潮河口水下地形测量中的应用[J]. *人民长江*, 2021, 52(S1): 137-139. DOI: [10.16232/j.cnki.1001-4179.2021.S1.032](https://doi.org/10.16232/j.cnki.1001-4179.2021.S1.032).
- [7] XIE D, PAN C, WU X, et al. The variations of sediment transport patterns in the outer Changjiang Estuary and Hangzhou Bay over the last 30 years[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2017, 122(4): 2999-3020. DOI: [10.1002/2016JC012264](https://doi.org/10.1002/2016JC012264).
- [8] 胡成飞, 潘存鸿, 吴修广, 等. 1959—2019年杭州湾南岸滩涂演变规律及机制[J]. *水科学进展*, 2021, 32(2): 230-241. DOI: [10.14042/j.cnki.32.1309.2021.02.008](https://doi.org/10.14042/j.cnki.32.1309.2021.02.008).
- [9] 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. DOI: [10.3969/j.issn.1001-909X.2020.03.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-909X.2020.03.010).
- [10] 何小燕, 冯凌旋, 严婧, 等. 近期杭州湾北岸金山岸段滩势演变机制及趋势分析[J]. *海洋地质前沿*, 2018, 34(4): 1-7. DOI: [10.16028/j.1009-2722.2018.04001](https://doi.org/10.16028/j.1009-2722.2018.04001).
- [11] 张伯虎, 辜伟芳. 杭州湾南岸电厂取水口海区泥沙冲淤分析[J]. *人民长江*, 2018, 49(18): 28-32. DOI: [10.16232/j.cnki.1001-4179.2018.18.007](https://doi.org/10.16232/j.cnki.1001-4179.2018.18.007).
- [12] 刘毅飞, 陈沈良, 蔡廷禄, 等. 杭州湾金山深槽冲淤演变及其趋势预测[J]. *海洋通报*, 2017, 36(3): 284-292. DOI: [10.11840/j.issn.1001-6392.2017.03.006](https://doi.org/10.11840/j.issn.1001-6392.2017.03.006).
- [13] 冯智泉, 庄振业, 冯秀丽, 等. 粉砂淤泥质海岸人造沙滩效果: 以上海金山城市沙滩为例[J]. *海洋地质前沿*, 2020, 36(2): 19-25. DOI: [10.16028/j.1009-2722.2019.058](https://doi.org/10.16028/j.1009-2722.2019.058).
- [14] 曾凡兴, 黄钦洲, 章卫胜, 等. 岛群峡道港口工程开发动力地貌响应研究: 以虾峙渔港工程为例[J]. *水运工程*, 2022(7): 73-80. DOI: [10.16233/j.cnki.issn1002-4972.20220628.009](https://doi.org/10.16233/j.cnki.issn1002-4972.20220628.009).
- [15] 左婧, 高源, 徐丛亮. 基于DEM技术的黄河口拦门沙分析[J]. *人民黄河*, 2022, 44(1): 33-36. DOI: [10.3969/j.issn.1000-1379.2022.01.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1379.2022.01.007).
- [16] 杨晓阳, 胡海华, 张治昊, 等. 黄河下游滩槽冲淤演变与水沙过程的响应关系[J]. *泥沙研究*, 2020, 45(1): 16-20. DOI: [10.16239/j.cnki.0468-155x.2020.01.003](https://doi.org/10.16239/j.cnki.0468-155x.2020.01.003).
- [17] MANON B, EDWARD J A, FRÉDÉRIC B. Multi-decadal variations in delta shorelines and their relationship to river sediment supply: An assessment and review[J]. *Earth-Science Reviews*, 2019, 193: 199-219. DOI: [10.1016/j.earscirev.2019.04.018](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.04.018).
- [18] 季荣耀, 陆永军, 詹小磊, 等. 伶仃洋茅洲河口动力地貌演变过程[J]. *水科学进展*, 2019, 30(6): 781-788. DOI: [10.14042/j.cnki.32.1309.2019.06.002](https://doi.org/10.14042/j.cnki.32.1309.2019.06.002).
- [19] 简宏康, 汤立群, 郭传胜, 等. 长江口拦门沙冲淤演变及其机理研究综述[J]. *泥沙研究*, 2021, 46(2): 74-80. DOI: [10.16239/j.cnki.0468-155x.2021.02.012](https://doi.org/10.16239/j.cnki.0468-155x.2021.02.012).
- [20] 吴帅虎, 程和琴, 郑树伟, 等. 近期长江口北槽河段河槽演变对人类活动的响应[J]. *长江流域资源与环境*, 2020, 29(6): 1401-1412. DOI: [10.11870/cj-lyzyyhj202006014](https://doi.org/10.11870/cj-lyzyyhj202006014).
- [21] 葛灿, 潘存鸿, 张沈阳. 杭州湾枯季水沙若干特征分析[J]. *海洋工程*, 2021, 39(2): 70-79. DOI: [10.16483/j.issn.1005-9865.2021.02.008](https://doi.org/10.16483/j.issn.1005-9865.2021.02.008).
- [22] 刘杰, 程海峰, 韩露, 等. 流域水沙变化和人类活动

- 对长江口河槽演变的影响[J]. *水利水电工程学报*, 2021(2): 1-9. DOI: 10.12170/20200313001.
- [23] 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. DOI: 10.3880/j.issn.1006-7647.2018.04.008.
- [24] 叶涛焱, 李莉, 王咏雪, 等. 潮滩减少对杭州湾悬沙特征的影响[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2019, 52(4): 392-403. DOI: 10.11784/tdxbz.201804092.
- [25] 吴雪枫, 何青, 郭磊城, 等. 杭州湾北岸多年水沙特性变化及原因探讨[J]. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(4): 839-848. DOI: 10.11870/cjlyzyyhj202104007.
- [26] 谢东风, 吴修广, 程文龙, 等. 近30年芦潮港断面含沙量变化及其影响分析[J]. *浙江水利科技*, 2016, 44(2): 8-11. DOI: 10.13641/j.cnki.33-1162/tv.2016.02.003.
- [27] 叶涛焱. 杭州湾多时空尺度悬沙动力变化特征及与潮滩变化的互馈机理[D]. 杭州: 浙江大学, 2019. DOI: 10.27461/d.cnki.gzjdx.2019.000192
- [28] 樊鑫, 程芳晋, 俞志明, 等. 长江口及其邻近海域表层沉积物粒径及生源要素分布特征[J]. *海洋科学*, 2017, 41(7): 105-112. DOI: 10.11759/hyxx20170109001.
- [29] 刘菁, 左利钦, 徐群, 等. 山溪性强潮河口分叉河道演变机制: 以瓯江江心屿河段为例[J]. *水科学进展*, 2022, 33(2): 274-285. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2022.02.011.
- [30] 栾华龙, 刘同宦, 高华峰, 等. 新水沙情势下长江中下游干流岸线保护研究: 以扬中市2017年江堤崩岸治理为例[J]. *人民长江*, 2019, 50(8): 14-19. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2019.08.003.
- [31] 邓宇, 赖修蔚, 郭亮. 长江中下游崩岸监测及分析研究[J]. *人民长江*, 2018, 49(15): 13-17. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2018.15.003.

Characteristic analysis of underwater topographic erosion and deposition in the Shanghai Section of the north Hangzhou Bay

HUANG Chenxia^{1,2}, ZHANG Xingnan^{1,2}, XU Shuangquan³, LI Wanchun³

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. National Cooperative Innovation Center for Water Safety and Hydro Science, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Shanghai Water Affairs Bureau, Shanghai 200050, China)

Abstract: Special underwater topography formed in the estuary area makes it abundant for available resources. The Shanghai section of northern Hangzhou Bay is located on the north side of the middle and rear sections from the top to the mouth of the bay. It is affected by the Yangtze River and Qiantang River runoff and ocean. Thus, it is of great guiding significance for the construction, development, and maintenance of the northern edge of Hangzhou Bay to study the evolution law and change the reason for the underwater topography erosion and deposition. Despite previous analysis, there is a lack of accurate and continuous topographic data. With the advancement of development and construction in recent years, overall analysis and detailed research in key areas are needed.

The annual square grid digital elevation model in the north edge of Hangzhou Bay from 2005 to 2020 was generated based on the measured CAD topography data combined with the isobath data of some offshore isobaths according to the analysis requirements of underwater topography scouring and silting in the north edge of Hangzhou Bay. Then for further research, the focal areas were selected with local evolution and used the contour line and the morphological change of the typical section profile to describe the evolution process of terrain over time. To analyze the influence of hydrological and hydrodynamic factors and human activities on the evolution of erosion and deposition along the northern edge of Hangzhou Bay, hydrological and hydrodynamic factors such as water and sediment, tidal current data, and the reclamation were studied.

The results show that the northern part of Hangzhou Bay along the Shanghai section showed a weak erosion trend, with a total erosion of 148.2 million m³ and an average annual erosion depth of 2.886 cm in recent 16 years. The Jinshan deep trough is the lowest area, and the terrain elevation dropped in front of Luchao Port. The study area suddenly deposited heavily in 2011. The highest scour happened between 2005 and 2008, and 2008 to 2011 was the highest siltation period. Although the Jinshan deep trough was affected by strong tide and encirclement projects, it

contained strong erosion and strong deposition, but the overall performance was a slight erosion with a balanced erosion and deposition, and the erosion intensity was only 12.1% of that in the study area. There were many deep scour pits and steep slopes in Section # 2 and Section #3.

The decrease of incoming water and sediment upstream made the north edge of Hangzhou Bay maintain the scouring situation. The supplement effect of tidal current-carrying sediment increased with the tide difference, and the scouring intensity was weakened. It is the equilibrium state formed by the synergy of various influencing factors that will last for a long time. Reclamation engineering is the main influencing factor of topography and erosion-deposition in the Jinshan deep trough. Some areas were blocked by reefs. The shoreline of the surrounding area was stable, but the nearshore scouring was strong, and the topographic change was more intense. Whether long-term scouring will bring risks such as foundation instability and bank collapse, the evolution of scouring and silting terrain characteristics, and the feedback relationship between beach and port development and construction need to be continuously observed and further studied.

Key words: dynamic landform; erosion and deposition evolution; profile shape; water and sand; enclosure engineering; Jinshan deep trough; tidal current

第三十一届“世界水日”，第三十六届“中国水周”来临之际,由河北省水利科学研究院南水北调与水利科技(中英文)编辑部发起的乐水志愿者团队，走进黄壁庄水库水源地平山县平山镇胜佛村完全小学，开展了节水宣传进校园活动，将节水理念带进校园，进一步增强了广大师生节约用水的社会责任感和水资源保护意识。



乐水志愿者在胜佛村完全小学开展“世界水日”主题讲座