

余建奎, 任宗海, 战超, 等. 1980 年以来山东文登张家埠港冲淤演变分析[J]. 海洋地质前沿, 2023, 39(11): 13-25.

YU Jiankui, REN Zonghai, ZHAN Chao, et al. Erosion-siltation in the channels in Zhangjiabu Harbour, Wendeng, Shandong[J]. Marine Geology Frontiers, 2023, 39(11): 13-25.

1980 年以来山东文登张家埠港冲淤演变分析

余建奎^{1,2}, 任宗海^{1,3}, 战超¹, 张雨晨¹, 耿文倩¹, 王庆^{1*}

(1 鲁东大学海岸研究所, 烟台 264025; 2 中国农业科学院农田灌溉研究所, 新乡 453002;

3 南京师范大学海洋科学与工程学院, 南京 210023)

摘要: 山东文登张家埠港位于山东半岛南部的靖海湾, 属于潮汐汉道-溺谷型海湾, 研究其冲淤演变特征, 对于认识这类海湾的动力地貌演变以及人类活动对海湾的影响具有一定参考价值。本文基于 1980、1997、2009 和 2021 年 4 年份的海图水深资料, 采用 GIS 技术进行等深线叠加分析和数字化定量冲淤计算, 分析 1980 年以来张家埠港航道地区的等深线变化、平面冲淤变化及固定剖面的地形变化。结果表明: 1980—2021 年, 张家埠港整体处于淤积态势, 平均淤积厚度为 1.08 m; 0 m 等深线整体向航道中心淤进, 5 m 等深线淤积变浅面积减少了 67.01%; 航道在塘子咀至长会口咀岸段西侧的淤积厚度远大于东侧。自 1980 年以来, 张家埠港两侧养殖池的修建改变了当地的潮流状况, 导致航道内由淤积转为侵蚀状态, 长会口外的拦门沙被迫下移, 张家埠港的地貌发生了深刻变化。

关键词: 张家埠港; 潮汐汉道-溺谷型海湾; 冲淤变化

中图分类号: P736.2; P737.1

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2022.206

0 引言

溺谷海岸发育于古地质时代海滨的河谷地区, 因海侵作用淹没河道而形成^[1]。其特点为越向海深度越大, 岸线曲折, 多港湾、岛屿和半岛; 溺谷口往往因有沙嘴横阻, 仅留狭窄的人海通道^[2]。在中国, 溺谷常见于广东、广西等地的海滨, 例如粤西雷州半岛东北侧的湛江湾^[3]、广州溺谷湾^[4]、广西钦州湾^[5]以及铁山港、防城港、珍珠港等港口^[6]; 在黄渤海沿岸也分布着溺谷型海湾^[7], 山东半岛南岸分布着 3 个潮汐汉道-溺谷型海湾, 其中以张家埠港最为典型^[8]。

山东文登张家埠港位于荣成市与文登市交界

处的靖海湾内, 西南开口, 口门东起靖海角(36°50'45"N、122°02'10"E), 经凤凰尾、牛心岛, 西到二岛子(36°53'47"N、122°02'10"E)^[9]。靖海湾以长会口为界, 北窄南宽, 长会口以北是内湾, 呈长条状伸入内陆^[3]。张家埠港大部分位于靖海湾内湾, 小部分位于外湾, 掩护条件好, 又有水下深槽作天然航道, 但因口门外拦门沙存在, 导致航运受限。张家埠港口门位于靖海湾外湾湾顶, 因波能辐散使得口门外泥沙堆积严重, 拦门沙地区水深最浅处仅有 1.8 m, 但是近年来养殖池的修建导致张家埠港口门外的拦门沙由淤积转为侵蚀状态。张先锋^[10]认为潮汐汉道-溺谷型海湾口门外拦门沙受落潮流、口门外波浪及沿岸海流的共同作用。长期以来湾口拦门沙的形成机理、发育过程、冲淤特性及演变规律引起海岸地貌学者、水利和港口航道工程师的高度关注^[11]。目前, 有关拦门沙的研究主要集中在长江流域和重要通航河口拦门浅滩的形成过程、发育模式、冲淤变化与机理的探讨^[12-17], 但对于潮汐汉道-溺谷型海湾湾口拦门沙形态演变、冲淤特性的研究较少。

自 20 世纪 90 年代, 相关学者就张家埠港地区

收稿日期: 2022-07-18

资助项目: NSFC-山东联合基金(U1706220); 国家自然科学基金(41901006); 山东省自然科学基金(ZR2019BD005); 山东高校青创科技团队项目(2020KJH002)

作者简介: 余建奎(1998—), 男, 在读硕士, 主要从事河口海岸方面的研究工作。E-mail: yujiankui223@163.com

* 通讯作者: 王庆(1968—), 男, 博士, 教授, 主要从事河口海岸学方面的研究工作。E-mail: schingwang@126.com

的沉积动力环境和冲淤演变规律等开展了系列研究。赵中堂^[18]统计了张家埠港地区的气象资料,指出该海域四季分明、雨热同期,属于海洋性气候;隋倩倩^[19]通过研究张家埠新港建成前后海域冲淤状况,发现工程建设对 1.5 km 以外的海域影响较小;刘潇等^[20]认为张家埠新港的建设会导致工程东西两侧海域流速减小、南侧海域流速增大,对潮位的影响仅局限于工程附近的有限区域;同时,利用靖海湾附近海域的 10 个站位进行调查,发现靖海湾具有明显的潮周期变化^[21];张先锋^[10]通过计算分析靖海湾地区的泥沙运移趋势,发现张家埠港地区建成大面积围海养殖后,水动力较弱,沿岸输沙量较小;张卓等^[22]利用悬浮泥沙的实测资料,得出在长会口一带、张家埠新港防波堤及好当家渔港防波堤附近区域,悬沙净输运方向与落潮流方向一致的结论;王德利^[23]认为张家埠港航道冲淤主要发生在地形变化较大的位置,并且在风浪的影响下航道的

回淤强度明显增加。由中国海湾志^[9]可知,由于长会口地区修建的渔港码头,远远地伸到水槽中,破坏了潮流的动力系统,导致张家埠港港内滩地淤高,致使内侧码头前沿有着明显的淤积。张家埠港作为典型的潮汐汉道—溺谷型海湾,研究其冲淤演变过程,分析口门外拦门沙和潮汐汉道的冲淤特性及演变规律,有助于更好的探究潮汐汉道—溺谷型海湾在人类活动影响下的冲淤演变过程。

1 研究区概况

张家埠港位于黄海靖海湾北部的湾汊内(图 1),属于构造原生湾,呈半封闭形状,口窄湾阔,口门狭窄处存在一潮汐水道,湾内以潮汐作用为主,涨落潮流作用显著。张家埠港口门外,由于涨落潮流的辐散消能,形成指状拦门沙,拦门沙的堆积对船舶通航有一定的影响^[24]。

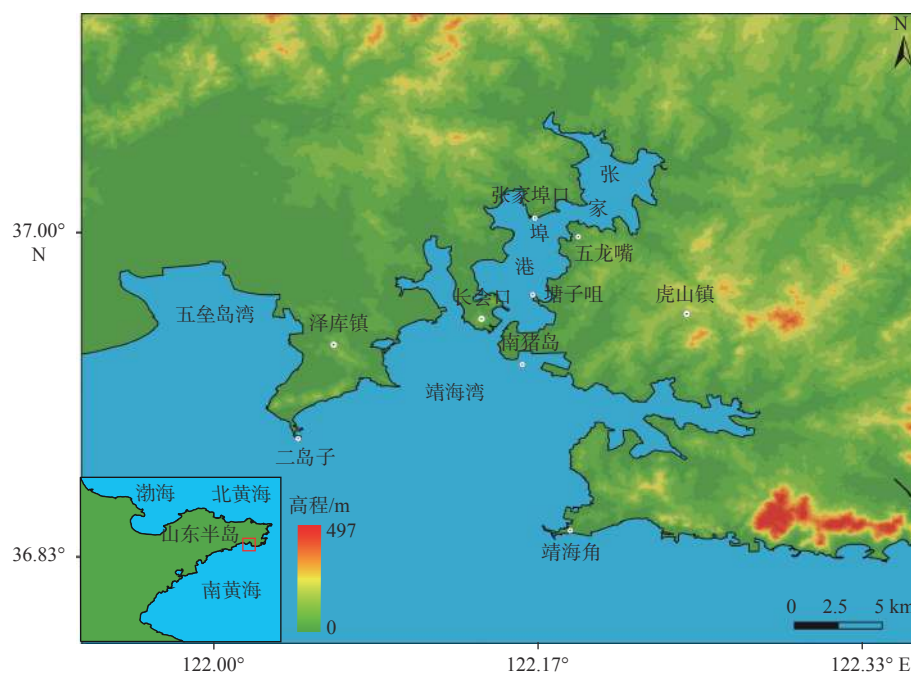


图 1 张家埠港地理位置示意图

Fig.1 Geographic map of Zhangjiabu Harbour

张家埠港地处东亚季风区,冬季盛行北至西北风,夏季盛行偏南风;多年平均风速为 3.8 m/s,历年最大风速为 21.3 m/s,多年平均风力 ≥ 8 级的大风日为 19.1 d。多年平均气压为 1 017 hPa,冬季气压高,夏季气压低。多年平均降水量为 780.6 mm,全年中降水量主要集中在下半年,平均年降水日为 86.2 d,平均降水强度的年变化趋势与降水量相似。年平均相对湿度为 76%,夏季的相对湿度最大,冬

季最小。多年平均雾日为 31.1 d,以平流雾为主。主要的灾害性天气有寒潮大风、蒙古气旋大风以及台风^[9]。

张家埠港地区的波浪状况在长会口和张家山咀以南,波高较小,外海传来的波浪因破碎使之能量减少,波高变小,北向来的波浪,由于风区短,波高甚小;在长会咀和张家山咀以北,仅狭长深槽处水深较大,不会形成大浪,外海南向传来的波浪,在

经过口门拦门沙时发生破碎, 无大浪传入, 北向风由于风区短, 只能形成很小的浪, 其他风向由于大陆阻挡, 不能产生波浪。张家埠港海域潮汐类型属于正规半日潮, 潮流运动形式以往复流为主^[24-25]。一个太阴日内有 2 次比较规则的高(低)潮, 2 次高潮或 2 次低潮的潮高相差不大, 平均涨潮历时大于平均落潮历时。张家埠港地区潮差特征参数为: 平均潮差 253 cm、最大潮差 394 cm、最小潮差 106 cm、平均涨潮历时 6 h 25 min、平均落潮历时 6 h 1 min。通过实测海流分析^[10], 张家埠港地区海流的特征为大潮期和小潮期相差不大, 落潮流速稍大于涨潮流速, 由表层至底层流速逐渐减小。

张家埠港地区的沉积物来源主要为河流输沙和海岸侵蚀来沙。河流输沙主要为青龙河和蔡官庄河注入张家埠港地区, 其中, 青龙河长度为 31 km, 输沙量为 $(7.07 \sim 11.79) \times 10^4$ t/a, 蔡官庄河的长度为 13.1 km, 输沙量为 $(1.09 \sim 1.82) \times 10^4$ t/a。海岸侵蚀来沙主要为波浪和海流长期侵蚀湾口两侧基岩海岸产生一部分泥沙进入海湾, 但这部分泥沙来源不多^[9]。沉积物输运趋势为河流输沙进入海湾后随潮流运动, 较粗沉积物在河口附近滩地沉积; 较细沉积物随潮流运移, 一部分在湾内各小湾沉积形成宽

平的潮滩, 另一部分则继续随潮流运动。由于张家埠港地区落潮流大于涨潮流, 部分泥沙被落潮流带到口门外, 口门外水道突然展宽, 流速迅速减慢, 沉积物大部分落淤, 形成拦门沙。

张家埠港作为文登市唯一的商业港口, 在近几十年里一直受到人类活动的改造。1980 年 7 月, 张家埠口码头修建长 220 m 重力式码头, 长会口地区在 1981 年和 1982 年期间两次扩建, 修建了长 480 m 的码头; 1988 年又修建长 180 m 的渔用码头; 1990 年在长会口咀和张家山咀之间建设沙嘴渔港, 岸壁码头 220 m, 码头内侧防波堤 180 m; 2020 年在张家埠口前沿进行了清淤工程。

2 数据与方法

本文收集了张家埠港及附近海域 1980—2021 年具有代表性的 6 幅 4 个时间点的海图资料(表 1), 1980 年的代表张家埠港地区建设围海养殖初期, 1997 和 2009 年的为建设围海养殖发展期, 2021 年的为张家埠港现存稳定状态(图 2)。6 幅海图资料均来自中国人民解放军司令部航海保证部, 测量基准面统一为理论最低潮面。

表 1 张家埠港和靖海湾及附近海域不同时期测量海图

Table 1 Charts of surveys in Zhangjiabu Harbour, Jinghai Bay and the adjacency in different years

序号	区域	测量年份	比例尺	测量基准面
1	靖海湾及附近	1980	1:30 000	理论最低潮面
2	靖海湾及附近	1997	1:30 000	理论最低潮面
3	张家埠港	1997	1:10 000	理论最低潮面
4	靖海湾及附近	2009	1:30 000	理论最低潮面
5	张家埠港	2009	1:10 000	理论最低潮面
6	张家埠港	2021	1:10 000	理论最低潮面

将 1980—2009 年张家埠港和靖海湾及附近海域的 5 张纸质海图运用布尔沙-沃尔夫模型 7 参数公式(1)进行转换:

$$\begin{cases} X_2 = X_0 + (1 + m)X_1 + \varepsilon_Z Y_1 - \varepsilon_Y Z_1 \\ Y_2 = Y_0 + (1 + m)Y_1 - \varepsilon_Z X_1 + \varepsilon_X Z_1 \\ Z_2 = Z_0 + (1 + m)Z_1 + \varepsilon_Y X_1 - \varepsilon_X Y_1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: X_0 、 Y_0 、 Z_0 分别为 3 个平移参数;

X_1 、 Y_1 、 Z_1 分别对应 GPS 的 WGS-84 坐标系中的 3 个参数;

X_2 、 Y_2 、 Z_2 分别对应变换后坐标系中 3 个参数;

ε_X 、 ε_Y 、 ε_Z 分别为 3 个旋转参数;

m 为尺度参数。

通过 2 个坐标系中 3 个以上的共同点, 利用最小二乘法即可拟合出 7 个未知参数^[26-29]。转换后的海图资料统一运用 ArcGIS 10.2 软件、WGS84 经纬度坐标进行配准, 并选用 UTMZone 50 投影, 把纸质海图中的水深点、岸线和等深线进行数字化, 并统一用地理数据库进行数据管理。由于海岸线的精度受海图的用途和比例尺的影响^[30], 导致海图资料中的海岸线时效性和准确性参差不齐。本文为验证 4 期海图资料中海岸线的精度, 选取 4 景对应年份的遥感影像数据进行目视解译得到人工解译的海岸线, 通过计算平均偏移量^[31]和相对误差^[32]验证海岸线精度(表 2)。验证结果显示, 海岸

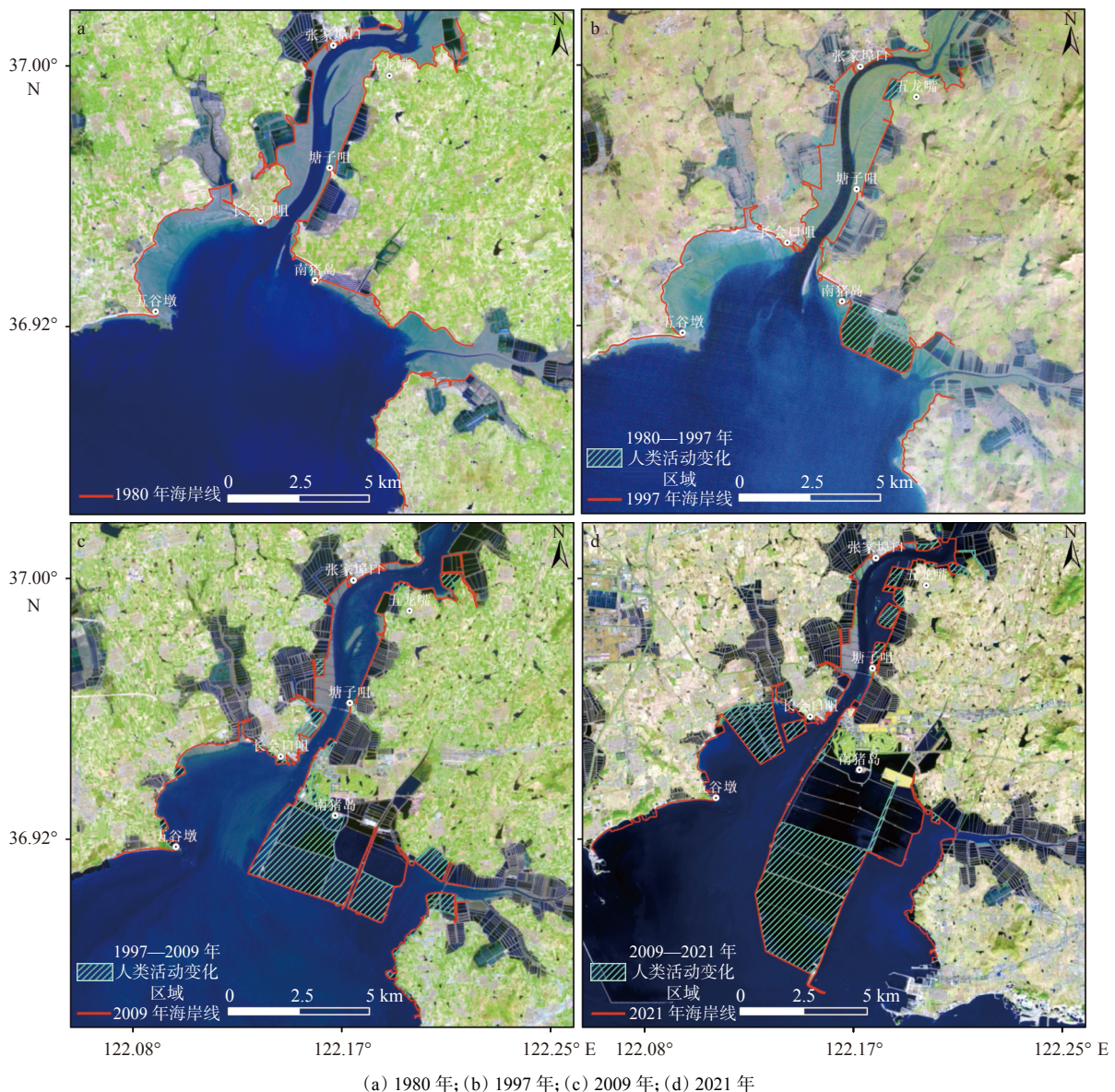


图 2 1980—2021 年张家埠港围海养殖面积变化

Fig.2 Changes in area of the mariculture in Zhangjiabu Harbour from 1980 to 2021

线平均偏移量均 $<5\text{ m}$, 由于本文使用的遥感影像最高分辨率为 30 m , 因此误差在 30 m 以内均可接受; 验证计算海岸线的相对误差(最大误差与研究区总面积的比值), 结果显示相对误差 $\leq 1.05\%$, 满足研究精度要求。

本文的等深线均采用纸质海图中的等深线数

表 2 遥感影像精度验证

Table 2 Verification on the accuracy of remote-sensing image

年份	影像来源	拍摄时间	平均偏移量/m	相对误差/%
1980	Landsat3 MSS	1980-08-17	4.67	1.05
1997	Landsat5 TM	1997-12-30	3.34	0.87
2009	Landsat5 TM	2009-05-05	1.43	0.45
2021	Landsat8 OLI	2021-11-14	0.34	0.18

据, 包含岸线、 0 m 、 2 m 和 5 m 等深线, 利用2021年数字海图作为底图绘制等深线变化图。将研究区内数字化的离散水深点运用克里金(KRIGING)插值的方法进行网格化^[33], 从而建立张家埠港地区各个年份的数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)。运用 ArcGIS 10.2 软件将相邻年份的研究区数字高程模型进行相减, 绘制 1980—1997、1997—2009、2009—2021 及 1980—2021 年 4 张航道平面冲淤图。张家埠港属受 NNE 或 NE 向断裂控制的潮汐汉道-溺谷型海湾^[9], 本文选取张家埠口、五龙嘴、塘子咀、南猪岛和长会口咀 5 个具有代表性的地貌单元, 设置 6 条与航道相切的剖面进行航道冲淤的动态演变分析(图 3)。6 条剖面均以西侧 0 m

等深线为起点, 以东侧 0 m 等深线为终点, 在 ORIGIN 软件上绘制出对应的断面地形变化图。

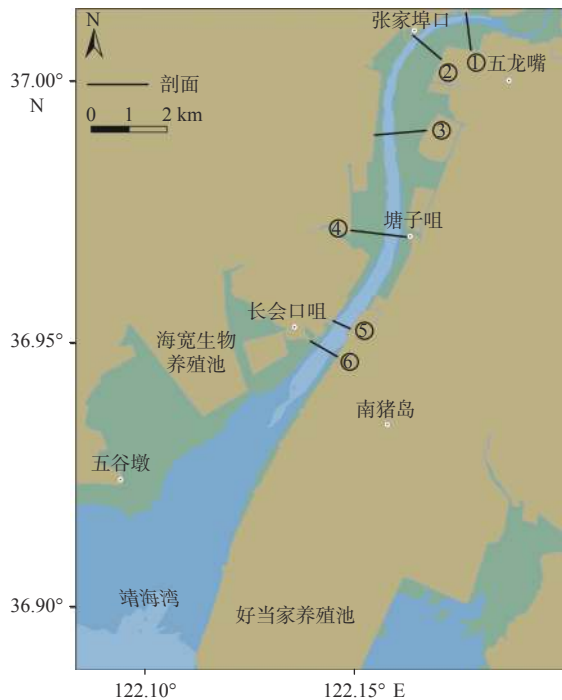


图 3 张家埠港地形剖面位置示意图

Fig.3 Geographic background of Zhangjiabu Harbour

3 分析结果

3.1 等深线变化特征

等深线的年际变化是港口航道地形变化特征的重要标志, 等深线变迁可反映港口航道的冲淤演变规律以及海床在垂直于岸线方向上的变化^[11]。本文重点分析了张家埠港 1980—2021 年期间海岸线和 0、2、5 m 等深线的演变规律(图 4)。

1980—1997 年期间, 张家埠港航道内整体呈淤积的态势, 以 0 m 和 5 m 等深线的变化最为明显。张家埠港海岸线变化较小, 主要是人为因素向海延伸, 长会口附近建设多个渔用码头, 南猪岛以东地区建成了 2 个 630 hm² 的养殖池, 五龙嘴地区也向海扩建了渔用码头。0 m 等深线变化趋势较为显著, 航道两侧均呈现向海淤积的状态, 航道西侧最大向海淤积 3 591.77 m, 平均向航道内推进 1 036.46 m, 平均推进速度为 57.58 m/a; 航道东侧最大向海淤积 2 354.07 m, 平均向航道内推进 854.41 m, 平均推进速度为 47.47 m/a。2 m 等深线呈向航道中心淤积的特征, 航道北侧平均向海淤积 788.63 m, 航道

南侧平均向海淤积 407.78 m。5 m 等深线淤积变浅的趋势较为显著, 1980 年 5 m 等深线自张家埠港延伸至长会口咀, 而 1997 年仅长会口咀、塘子咀和张家埠口附近存在部分 5 m 等深线圈。

1997—2009 年, 张家埠港航道内整体呈冲淤相间的态势。张家埠港海岸线向海淤积区域主要出现在南猪岛和长会口咀。在南猪岛地区, 好当家集团有限公司向海扩建了 1 723.37 hm² 的养殖池, 长会口咀将原码头进行扩建, 最大向海延伸 967.51 m。0 m 等深线除南猪岛地区修建大量养殖池被迫向海移动外, 其余地区处于冲淤相间的状态。2 m 等深线整体呈冲淤相间的状态, 塘子咀-张家埠口东岸淤积变浅, 西岸向岸侵蚀加深。5 m 等深线基本保持不变, 仅塘子咀附近的 5 m 等深线圈呈侵蚀加深状态。

2009—2021 年, 张家埠港航道内呈冲淤相间分布的状态。海岸线在南猪岛以及五谷墩和长会口咀之间的岸段增长较多, 好当家围海养殖在南猪岛地区又扩建了 1 639.52 hm² 的养殖池, 海宽生物公司在五谷墩和长会口咀之间新建了 395.93 hm² 的养殖池。0 m 等深线在大部分地区处于冲淤平衡的状态, 仅长会口咀和南猪岛连线的南侧向航道中心淤积, 航道西岸平均淤积 382.44 m, 东岸平均淤积 68.13 m。2 m 等深线整体处于冲淤相间的状态, 仅航道南侧略微侵蚀加深, 平均侵蚀距离 727.56 m。5 m 等深线整体处于侵蚀加深的状态, 塘子咀和长会口咀由原先的独立等深线圈侵蚀加深并连成一个整体。

总体而言, 1980—2021 年, 海岸线在人类活动的改造下不断向航道中心推进, 南猪岛地区的好当家围海养殖最远向海推进 10 663.63 m, 五谷墩与长会口咀之间的海宽生物养殖池最远向海推进 3 065.31 m。0 m 等深线总体呈向海淤积的态势, 航道西岸平均向海淤积 978.56 m, 平均淤积速率为 23.79 m/a; 航道东岸平均向海淤积 592.89 m, 平均淤积速率为 14.46 m/a, 张家埠港航道西岸淤积速率显著大于东岸。2 m 等深线整体处于冲淤相间的态势, 仅航道北侧存在淤积变浅的区域, 塘子咀-张家埠口西岸存在侵蚀变深的区域。5 m 等深线整体呈淤积变浅、向航道中心淤积的态势, 由 1980 年张家埠口-长会口咀的连续闭合等深线圈(总面积 2.91 km²), 淤积变浅为 2021 年的塘子咀-长会口咀闭合等深线圈以及张家埠口闭合等深线圈(总面积 0.96 km²), 41 年间 5 m 等深线圈面积减少 67.01%。

埠港航道西岸泥沙大量淤积,最大淤积厚度达到 6.73 m; 航道东岸处于侵蚀的状态,最大侵蚀厚度为 2.25 m; 在长会口咀东侧潮汐汊道处显著侵蚀,最大侵蚀厚度达到 2.70 m; 长会口口门外拦门沙处存在显著的淤积中心,最大淤积厚度为 3.31 m; 在五谷墩和好当家围海养殖之间的南侧出现新的淤

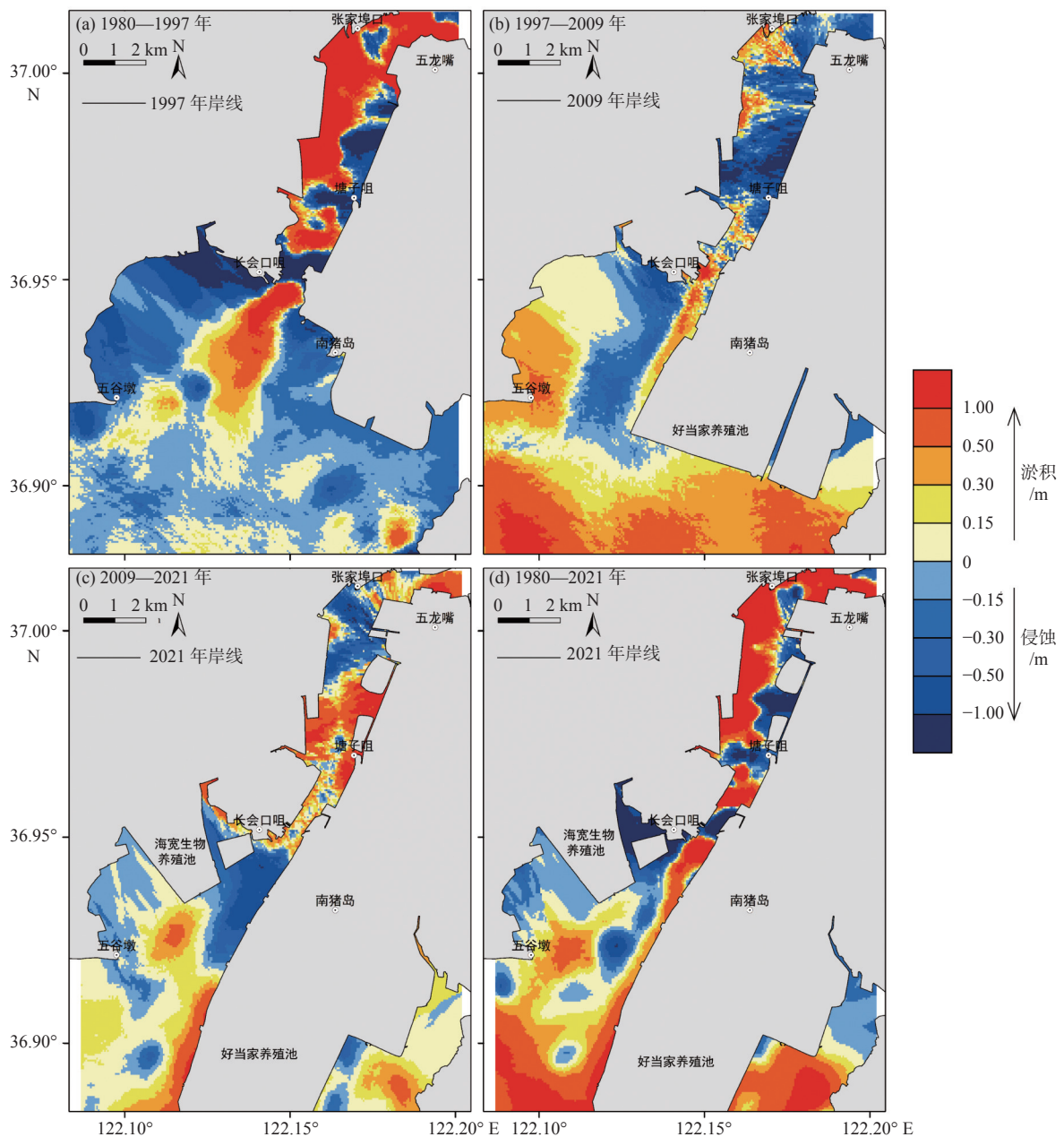


图 5 张家埠港航道平面冲淤图

Fig.5 Erosion-siltation in the Zhangjiabu Harbour

积中心,最大淤积厚度为 1.62 m。

1980—1997 年,张家埠港海域以淤积为主,平均淤积厚度 1.12 m。在张家埠口前有一小块侵蚀区域,且侵蚀幅度不大,最大侵蚀厚度为 1.05 m;五龙嘴-塘子咀航道东岸出现了侵蚀的现象,最大侵蚀厚度为 2.26 m;张家埠口-塘子咀西岸处于淤积的状态,最大淤积厚度为 6.47 m,并且越靠近西岸的地区,淤积厚度越厚。长会口咀前的潮汐汊道出现了一个侵蚀中心,最大侵蚀深度为 3.25 m,并且越靠近航道东岸,侵蚀深度越大。长会口口门外的拦门沙为显著的淤积中心,区域最大淤积厚度为 3.04 m,

淤积厚度呈由中心向周围逐渐减小的趋势。在南猪岛附近的围海养殖海域轻微侵蚀,下蚀现象不显著,最大侵蚀厚度仅 0.25 m。

1997—2009 年,由于围海养殖以及码头建设导致岸线不断向航道内推进,张家埠港海域以轻微侵蚀状态为主,平均侵蚀厚度 0.28 m。五龙嘴至塘子咀存在大量的侵蚀区域,侵蚀最大的地区处于塘子咀附近的航道东岸,侵蚀厚度为 1.83 m;仅张家埠口南侧存在小部分淤积区域,最大淤积厚度为 1.10 m。在塘子咀至长会口咀之间的潮汐汊道,整体处于冲淤相间的状态;长会口口门外的拦门沙呈淤积状态,

淤积面积扩展至新修建的好当家养殖池南侧,最大淤积厚度为 1.82 m。

2009—2021 年,张家埠港海域处于冲淤相间状态,区域平均淤积厚度为 0.24 m。在张家埠口-塘子咀航段呈现出先侵蚀后淤积的状态,其中,最大侵蚀深度为 1.65 m,最大淤积厚度为 2.14 m。塘子咀北侧新修建的 2 个养殖池之间形成了一个淤积中心,最大淤积厚度达 1.60 m。在塘子咀至长会口咀之间的航道,呈现航道中心侵蚀两侧淤积的状态,航道中心最大侵蚀深度为 0.52 m,航道两侧最大淤积厚度为 1.96 m。长会口口门外原先淤积的拦门沙处出现一个侵蚀中心,侵蚀范围延续至五谷墩东侧,侵蚀厚度最大为 1.04 m。在五谷墩南侧,泥沙开始在好当家围海养殖旁淤积,最大淤积厚度为 1.12 m。

3.3 剖面水深变化

本文选取潮汐汊道-溺谷型海湾具有代表性的地形剖面 6 条,地形剖面的变化在一定程度上反映海湾在人类影响下的演变过程、张家埠港冲淤变化

情况及垂向上的演变特征(图 6)。1980—2021 年,剖面 1 东岸淤积厚度大于西岸,剖面 2 处于冲淤相间的状态,剖面 3 淤积程度较大且西岸淤积厚度大于东岸,剖面 4 西岸淤积、东岸冲淤相间,剖面 5 的侵蚀深度不断加深,剖面 6 在 2009 年前不断淤积,2009 年后侵蚀变深。剖面最深处位于长会口咀东侧潮汐汊道处的剖面 5,深度为 7.85 m;剖面最浅处在张家埠港北侧的剖面 1,深度 2.50 m。

剖面 1 位于张家埠口的东侧,是青龙河的入海口;剖面 2 位于张家埠口处。剖面 1 的东侧处于不断淤积的状态,1980—2021 年平均向航道内推进 215.75 m;西侧处于冲淤相间的状态,1980—2021 年平均向岸推进 39.08 m;最深点出现在 1980 年,为 -3.73 m,最浅点出现在 1997 年,为 -2.50 m。剖面 2 呈现南北两侧同时淤积的现象,1980—2021 年,西侧剖面平均向海推进 49.03 m,东侧剖面平均向海推进 34.04 m;最深点出现在 1997 年,为 -6.90 m,最浅点出现在 1980 年,为 -6.27 m。剖面 1 的特征为航道中心不断向北移动,南侧淤积量大于北侧,说明青龙河的泥沙多在南侧落淤;剖面 2 的特征为航

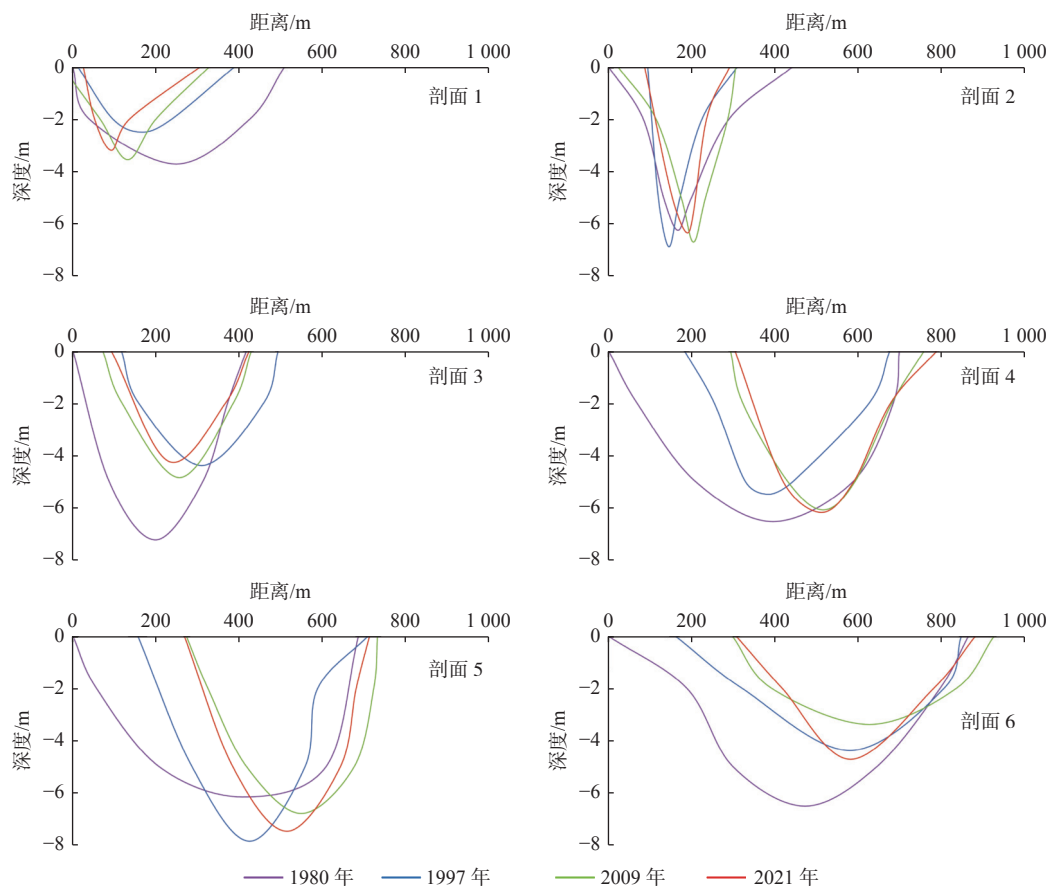


图 6 1980—2021 年张家埠港航道剖面地形变化

Fig.6 Topographic changes in the channel profile of Zhangjiabu Harbour from 1980 to 2021

道中心几乎维持不变, 两侧淤积量基本相同, 张家埠口地区由于船只活动频繁而经常进行人工清淤作业。

剖面 3 位于张家埠口和塘子咀的中部, 剖面 4 位于塘子咀处。剖面 3 在 1980—1997 年间, 航道西侧淤积明显, 平均淤进 99.33 m; 航道东侧向陆侵蚀显著, 平均向陆蚀退 53.30 m。剖面 3 在 1997—2021 年间, 航道西侧处于冲淤相间的状态, 平均向岸蚀退 33.30 m; 航道东侧处于淤积状态, 平均向航道中心淤进 79.98 m。剖面 4 在 1980—2009 年, 航道西侧处于淤积的状态, 平均向航道中心淤进 222.31 m; 航道东侧处于冲淤相间的状态, 平均向岸蚀退 45.33 m。2009—2021 年, 剖面 4 处于冲淤平衡的状态, 东西两岸平均蚀退 35.11 m。剖面 3 在 1980 年最深点达到 -7.25 m, 2021 年最深点为 -4.24 m, 淤积的原因为剖面 3 处于航道最宽处, 潮流流速小, 泥沙在此处容易落淤。剖面 4 在 1980 年最深点为 -6.55 m, 1997 年最深点为 -5.50 m, 2021 年最深点为 -6.20 m, 1997—2021 年间塘子咀修建的渔用码头和养殖池使岸线淤进、泥沙落淤量减少是导致剖面 4 先淤后蚀的主要原因。

剖面 5 位于长会口旁的潮汐汉道, 由于航道变窄流速加快, 下蚀现象更加明显。1980—1997 年, 剖面 5 最深处下蚀 1.69 m, 年平均侵蚀速率为 9.94 cm/a; 航道西侧平均向航道中心淤进 121.22 m, 航道东侧平均向航道中心淤进 29.02 m。1997—2021 年, 剖面 5 处于冲淤相间的状态, 航道西侧不断向航道中心淤积, 航道东侧不断向岸侵蚀后退, 西侧平均推进 99.71 m, 东侧平均侵蚀后退 67.82 m。剖面 5 西岸淤进的主要原因为养殖池的修建, 1997 年后潮汐通道停止下蚀的原因为长会口口门外养殖池的修建改变了当地的水动力环境, 导致潮汐通道下蚀作用减弱。

剖面 6 位于长会口口门外拦门沙处, 航道在此处重新展宽, 流速下降, 沉积物在此落淤。剖面 6 在 1980—2009 年间, 航道西侧不断向中心淤进, 平均淤进距离为 198.89 m; 航道东侧处于侵蚀后退的状态, 平均向岸侵蚀后退 101.72 m; 航道中心深度在此期间淤积 3.13 m。2009—2021 年, 航道西侧处于冲淤相间的状态, 平均侵蚀后退 3.51 m; 航道东侧处于向航道中心淤积推进的状态, 平均推进 48.25 m; 航道中心深度向下侵蚀 1.34 m。剖面 6 在 2009 年前淤积、2009 年后侵蚀, 原因为好当家和海宽生物养殖池的修建导致长会口外航道变窄, 原先

的拦门沙被动成为潮汐通道, 由原先的淤积状态变成侵蚀状态, 而新的拦门沙则在五谷墩南侧形成。

4 讨论

4.1 水动力泥沙环境对潮汐汉道-溺谷型海湾的影响

张家埠港属于典型的潮汐汉道-溺谷型海湾, 其长会口口门最窄处宽仅 610 m, 口门内纳潮面积为 38.0 km², 潮汐汉道最大水深 8 m, 口门东岸发育指向湾内的沙咀^[7]。长会口至张家埠口处分布着略有淤涨的淤泥质海岸^[10], 张家埠港航道内水动力条件弱, 在相对宽广的地方容易沉积粒径较小的沉积物, 沉积物以粉砂为主, 在长会口北侧相对宽阔的地区分布着少量的泥质沉积物, 不同沉积物的结构组成所反映的水动力强度和河口沉积环境也不同^[35]。

张家埠港平均潮差 2.53 m, 根据 DIVES 按潮差划分海岸类型, 研究区属于强潮海岸^[6]。长会口口门外拦门沙是波浪作用于海滩、两侧海滩均衡作用的结果^[8]。因此, 潮流和波浪是塑造张家埠港的主要动力。其中, 波浪对潮汐汉道-溺谷型海湾口门内影响较小, 特别是张家埠港口门外发育了较为成熟的拦门沙^[8], 波浪几乎全被阻于湾外, 而且射流和落潮三角洲形成的岬角效应完全改变了波浪折射型式, 并在口门两侧形成反向泥沙流^[36-37]。在张家埠港地区, 波浪的影响仅限于长会口口门外拦门沙, 波浪作用在口门外产生的反向泥沙流形成一个淤积厚度自北向南逐渐减少的淤积中心(图 5a)。随着口门外东侧岸线的收窄, 影响长会口口门外拦门沙的波能逐渐受阻, 导致 1997 年后波浪对拦门沙东侧的影响减弱, 形成冲淤相间的态势(图 6); 随着 2009 年口门外西侧岸线的收窄, 2009 年后波浪对拦门沙西侧的影响减弱, 由原先的淤积态势转为冲淤相间的状态(图 6)。口门内的落潮流冲刷槽是潮汐汉道-溺谷型海湾最基本的地貌单元^[7], 影响溺谷型潮汐汉道发育的主要水动力条件是潮流^[3]。张家埠港地区平均涨潮流历时大于平均落潮流历时, 平均落潮流速大于平均涨潮流速, 有利于航道内泥沙向外海输送以及维持潮汐汉道的水深, 这个特性与另一潮汐汉道-溺谷型海湾湛江湾高度相似^[3]。涨落潮流的动力主轴(最大流速带)对应着潮汐汉道的深槽部分^[7], 1980—1997 年, 张家埠港长会口

口门地区岸线没有改变,潮流动力主轴保持不变,潮汐汉道处的剖面 5(图 6)维持侵蚀状态且航道最深处维持不变;1997—2021 年,由于东西两侧岸线向航道中心推进,改变了长会口地区的潮流现状,潮流动力主轴向东侧偏移,导致位于潮汐汉道的剖面 5(图 6)航道最深处向东偏移且水深淤积变浅,不再维持原有的侵蚀趋势。

潮汐汉道是潮汐汉道-溺谷型海湾典型的地貌单元,泥沙是影响潮汐汉道稳定的重要因素^[3]。张家埠港地区泥沙来源主要为青龙河来沙以及海岸与海底侵蚀来沙。青龙河长度为 31 km,流域面积达 235.8 km²,年均输沙量为 $(7.07 \sim 11.79) \times 10^4$ t/a。刘潇等^[20]发现张家埠港航道地区的悬浮泥沙浓度明显大于靖海湾外海地区,航道内部潮流的流速 < 20 m/s^[10],易于泥沙落淤。本研究发现,位于青龙河入海口处的剖面 1 在 1980—1997 年间处于淤积变浅的态势,张家埠口的上游也处于淤积变浅的状态(图 5a)。1997—2021 年,由于航道东侧岸线向中心淤进,泥沙落淤量减小,剖面 1 处于冲淤相间的状态。

由于张家埠港地区泥沙运动呈落潮优势沙^[21],悬浮泥沙净输运方向与落潮流一致^[22],潮流对泥沙的搬运主要是由航道内向长会口口门外输送^[38],使得张家埠港地区的落潮三角洲较为发育。落潮三角洲作为潮汐汉道-溺谷型海湾的主要沉积地貌单元,是一个适应于射流流场及波浪入射形式的半圆沙体^[39],在张家埠港地区的表现形式为长会口口门外的拦门沙。本文研究发现,1980—2009 年,张家埠港地区的落潮三角洲呈淤积变浅的态势,随着口门外两侧岸线的推进,航道宽度变窄,潮流流速增大,落潮三角洲由原先的淤积转为侵蚀(图 6)。但是落潮三角洲并未消失,而是在航道重新展宽的五谷墩南侧形成(图 5d),长会口口门外的老落潮三角洲由于泥沙不落淤而逐渐侵蚀(图 6),最终会变成潮汐汉道的一部分。

4.2 人类活动对潮汐汉道-溺谷型海湾冲淤的影响

潮汐汉道-溺谷型海湾有较理想的水下深槽^[8],海湾内水深浪静,建港条件优越^[3],开发利用价值大^[4]。张家埠港开发利用历史久远,清末已形成货物集散的商业港口^[40];20 世纪 80 年代后,张家埠港水道两岸的工程建设日益增加,影响到航道、港池的正常使用^[41]。

本研究发现,张家埠港航道在 1980—1997 年间,航道西侧呈淤积态势,长会口旁的潮汐通道成为航道的侵蚀中心(图 5a)。原因在于国营、集体企业在航道西岸文登一侧修建船厂、码头、虾池^[41],导致航道纳潮量减小、流速减缓,发生明显的淤积;长会口修筑的渔业码头使口门收窄,潮流流速增大,导致潮汐通道的侵蚀深度加大。1997—2021 年,张家埠港长会口口门内处于冲淤相间的状态,口门外由于海宽生物和好当家养殖池的修建(图 5c)导致航道收窄,潮汐通道由原先的长会口东侧扩展至长会口-五谷墩,拦门沙也随之下移,在五谷墩-好当家养殖池南侧航道重新展宽处落淤。在南猪岛地区新建的好当家围海养殖,围海面积逐年增大(图 2),在长会口口门外的拦门沙,逐渐由淤积转为侵蚀。张先锋^[10]对靖海湾地区的沉积动力环境进行研究,发现好当家养殖池与海宽生物养殖池的建成使长会口至好当家围海养殖地区变成半封闭状态,导致长会口以南航道变窄,流速增大,泥沙落淤效应减弱,原先口门外的拦门沙淤积量逐年减少,最终出现侵蚀的状态。在五谷墩-好当家养殖池南侧,航道重新展宽,潮流流速减缓,泥沙在此处落淤,形成了新的拦门沙淤积中心。

本文通过统计 1980、1997、2009 和 2021 年的围海养殖面积、剖面 1~6 最大水深的平均值以及剖面 1~6 航道过水断面积的平均值,并分别进行线性拟合(图 7)。张家埠港的围海养殖面积可代表人类活动对航道的影 响,根据潮汐汉道-溺谷型海湾地貌单元设置的 6 个地形剖面的最大水深以及航道过水断面积可代表张家埠港的地形变化。张家埠港的围海养殖面积与航道最大水深呈正比(图 7),说明人类活动越频繁,航道侵蚀深度越大。1980—1997 年,张家埠港航道内处于淤积的状态(图 5a);1997—2021 年,由于人类活动的加剧、围海养殖面积的快速增加,导致航道内处于侵蚀或冲淤相间的状态(图 5b、c)。张家埠港围海养殖面积与航道过水断面积呈反比(图 7),说明人类活动越频繁,航道过水断面积越小,单位时间、单位湾口断面积上通过的潮能越大^[7]。由于潮能的逐渐增大,张家埠港航道由 1980—1997 年的淤积态势,转变为 1997—2021 年冲淤相间的态势(图 5)。如果人类活动不加以管理和控制,养殖池面积继续向航道中心扩张,会导致张家埠港的航道宽度变窄,侵蚀深度加大,单位时间、单位湾口断面积上通过的潮能增大,通航条件恶化,最终演变成为长而窄的溺谷型潮汐通道。

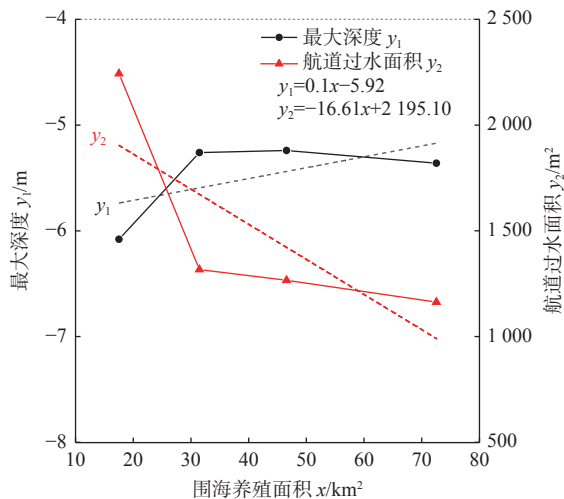


图 7 1980—2021 年张家埠港航道围海养殖面积与航道最大深度/过水断面线性拟合

Fig.7 Linear fitting between the cultivation area and the maximum depth/over-water sectional area of Zhangjiabu Harbour from 1980 to 2021

5 结论

本文基于海图数据及建立的 DEM 高程模型, 分析了 1980—2021 年以山东文登张家埠港为代表的潮汐汊道-溺谷型海湾的冲淤演变特征, 得出以下结论:

(1) 1980—2021 年, 0 m 等深线整体向航道中心淤进, 西岸淤进速率大于东岸, 2 m 等深线呈冲淤相间的态势, 5 m 等深线淤积变浅, 面积减少了 67.01%。其中, 1980—1997 年张家埠港航道的总体趋势是淤高变浅, 等深线向航道中心推移, 0 m 等深线向航道中心推进速度为 17.33 m/a, 5 m 等深线由航道整体中心分布淤高变化为航道局部分布。而 1997—2021 年张家埠港航道内整体处于冲淤相间的状态, 0 m 等深线基本维持现状, 2 m 等深线整体向航道东侧移动 71.85 m, 5 m 等深线的范围有所扩大。

(2) 1980—2021 年, 张家埠港航道的淤积厚度为 1.08 m, 航道西侧的淤积厚度大于东侧, 口门外拦门沙逐渐向南移动。不同年份出现不同冲淤特性: 1980—1997 年, 张家埠港航道平面冲淤特征以淤积为主, 但存在局部冲刷侵蚀的现象, 平均淤积厚度 1.12 m; 1997—2021 年, 张家埠港航道处于冲淤相间的状态, 平均侵蚀厚度 -0.02 m, 长会口口门外拦门沙由淤积变为侵蚀。

(3) 1980—2021 年, 张家埠港航道在不同岸段

的垂向演变特征不同。张家埠口上游呈东岸淤积、西岸冲淤相间的状态; 张家埠口岸段呈冲淤相间的状态; 塘子咀至长会口咀岸段呈西岸淤积、东岸侵蚀的状态; 长会口旁的潮汐汊道处 1997 年前下蚀, 1997 年后冲淤相间; 长会口外拦门沙 2009 年前淤积, 2009 年后下蚀。

(4) 张家埠港航道的冲淤演变主要受制于潮流作用的影响。1980 年以来, 由于航道两岸以及口门外养殖池的修建, 航道过水断面面积减小, 潮流动力增强, 泥沙落淤率减小, 导致航道内部尤其是长会口外拦门沙地区的侵蚀。如果不对围海养殖进行约束, 张家埠港的通航条件会逐渐恶化, 并演化为长而窄的溺谷型潮汐通道。

参考文献:

- [1] 黄亚锋, 艾廷华, 刘耀林, 等. 顾及地理特征保持的溺谷海岸线化简算法[J]. 测绘学报, 2013, 42(4): 595-601.
- [2] 伍光, 王乃昂, 胡双熙, 等. 自然地理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [3] 张乔民, 宋朝景, 赵焕庭. 湛江湾溺谷型潮汐水道的发育[J]. 热带海洋, 1985, 1: 48-57.
- [4] 曾昭璇. 广州溺谷湾地貌发育[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 1979, 2: 59-68.
- [5] 莫永杰. 钦州湾溺谷湾地貌、沉积与物质运移[J]. 海洋通报, 1993, 12(5): 56-61.
- [6] 莫永杰. 广西溺谷湾海岸地貌特征[J]. 海洋通报, 1990, 9(6): 57-60.
- [7] 张忍顺, 李坤平. 黄渤海沿岸海湾-溺谷型潮汐汊道的地貌结构[J]. 黄渤海海洋, 1994, 4: 1-10.
- [8] 崔金瑞, 王文海. 山东半岛南岸潮汐汊道式海湾海洋环境特征及开发功能探讨[J]. 海岸工程, 1991, 10(2): 44-49.
- [9] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志[M]. 北京: 海洋出版社, 1997: 327-327.
- [10] 张先锋. 靖海湾沉积动力环境研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- [11] 卢超, 李伯根, 李峰. 浙江象山港口门浅滩冲淤动态趋势探讨[J]. 海洋通报, 2015, 34(6): 663-674.
- [12] FANOS A M, KHAFAGY A A, DEAN R G. Protective works on the Nile Delta coast[J]. Journal of Coastal Research, 1995, 11(2): 516-528.
- [13] 陈吉余, 恽才兴, 徐海根, 等. 两千年来长江河口发育的模式[J]. 海洋学报(中文版), 1979, 1(1): 103-111.
- [14] 李伯根, 王才洪, 周鸿权, 等. 近 70 a 来椒江河口河床冲淤调整机理[J]. 海洋学报, 2009, 31(5): 89-100.
- [15] 虞志英, 楼飞. 长江口南汇嘴近岸海床近期演变分析: 兼论长江流域来沙量变化的影响[J]. 海洋学报, 2004, 26(3): 47-53.
- [16] 潘定安, 谢裕龙, 沈焕庭. 闽江口川石水道的水文泥沙特性及其内拦门沙成因分析[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 1991, 1: 87-96.

- [17] 胡红兵, 胡光道, 程和琴. 长江口冲积岛浅滩演变的可视化分析[J]. *地理与地理信息科学*, 2007, 23(4): 85-88.
- [18] 赵中堂. 张家埠港附近海域水温与气候特征[J]. *海岸工程*, 1990, 3: 66-71.
- [19] 隋倩倩. 张家埠新港建成后的冲淤变化及平衡时的极限冲刷深度预测[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
- [20] 刘潇, 冯秀丽, 刘杰, 等. 威海张家埠新港建设对附近海域潮流影响预测分析[J]. *海岸工程*, 2013, 32(1): 10-18.
- [21] 刘潇, 冯秀丽, 刘杰, 等. 山东半岛靖海湾及其附近海域悬浮泥沙分布与变化[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2012, 32(6): 9-15.
- [22] 张卓, 吴建政, 朱龙海, 等. 文登南部近岸海域悬沙输运特征[J]. *海洋地质前沿*, 2017, 33(9): 13-17.
- [23] 王德利. 淤泥质海岸深水航道回淤强度数值研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- [24] 夏东兴, 刘振夏. 中国海湾的成因类型[J]. *海洋与湖沼*, 1990, 2: 185-191.
- [25] 刘杰, 冯秀丽, 刘潇, 等. 山东半岛东部靖海湾及邻近海域表层沉积物分布和输运特征分析[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2013, 43(5): 77-81.
- [26] STEED J B. A practical approach to transformation between commonly used reference systems[J]. *Australian Surveyor*, 1990, 35(3): 248-264.
- [27] 张伟, 陈绿杰, 张银格, 等. 基于 VBA 平台的七参数法坐标系转换程序设计[J]. *中国科技纵横*, 2013, 13(18): 61-62.
- [28] 张宏. 布尔莎-沃尔夫转换模型的几何证明[J]. *测绘与空间地理信息*, 2006, 29(2): 46-47.
- [29] ZÁVOTI J, KALMÁR J. A comparison of different solutions of the Bursa-Wolf model and of the 3D, 7-parameter datum transformation[J]. *Acta Geodaetica et Geophysica*, 2016, 51(2): 245-256.
- [30] 杜佳威. 海岸线自动化简方法研究[D]. 郑州: 战略支援部队信息工程大学, 2018.
- [31] 盛辉, 张驰, 万剑华. 基于多时相遥感数据的海岸线自动提取方法[J]. *海洋科学*, 2021, 45(5): 16-22.
- [32] KONG D, MIAO C, BORTHWICK A G L, et al. Evolution of the Yellow River Delta and its relationship with runoff and sediment load from 1983 to 2011[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 520: 157-167.
- [33] 巩明, 李伯根, 周鸿权. 乐清湾大乌港水道冲淤变化分析[J]. *海洋通报*, 2011, 30(2): 206-213.
- [34] 杨洋, 陈沈良, 徐丛亮. 黄河口滨海区冲淤演变与潮流不对称[J]. *海洋学报*, 2021, 43(6): 13-25.
- [35] PEJRUP M. The triangular diagram used for classification of estuarine sediments: a new approach[M]. Dordrecht : Tide-influenced Sedimentary Environments and Facies, 1988: 289-300.
- [36] HUBBARD D K. Morphology and hydrodynamics of the Merrimack River ebb-tidal delta[M]//Geology and Engineering. New York: Academic Press, 1975: 253-266.
- [37] INMAN D L, DOLAN R. The Outer Banks of North Carolina: budget of sediment and inlet dynamics along a migrating barrier system[J]. *Journal of Coastal Research*, 1989, 5(2): 193-237.
- [38] LUETTICH JR R A, CARR S D, REYNOLDS-FLEMING J V, et al. Semi-diurnal seiche in a shallow, micro-tidal lagoonal estuary[J]. *Continental Shelf Research*, 2002, 22(11/13): 1669-1681.
- [39] HAYES M O. Morphology of sand accumulation in estuaries: an introduction to the symposium[M]//Geology and Engineering. New York: Academic Press, 1975: 3-22.
- [40] 车吉心, 梁自絮, 任孚先. 齐鲁文化大辞典[M]. 济南: 山东教育出版社, 1989.
- [41] 山东省海岸工程学会. 关于维护张家埠潜水道的座谈会纪要[J]. *海岸工程*, 1989, 3: 75-76.

Erosion-siltation in the channels in Zhangjiabu Harbour, Wendeng, Shandong

YU Jiankui^{1,2}, REN Zonghai^{1,3}, ZHAN Chao¹, ZHANG Yuchen¹, GENG Wenqian¹, WANG Qing^{1*}

(1 Coastal Institute, Ludong University, Yantai 264025, China; 2 Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, China; 3 School of Marine Science and Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: The Zhangjiabu Harbour is located in Jinghai Bay in the southern part of Shandong Peninsula, and is a tidal canal-drowned valley bay. Anatomizing the erosion-siltation characteristics is valuable for clarifying the dynamic geomorphological evolution of the harbour and the impact of human activities on the study area. Based on the bathymetric data of charts in 1980, 1997, 2009 and 2021, isobath overlay analysis, and digital quantitative erosion and siltation calculation were conducted in GIS technology. The changes of isobath, erosion and siltation, and topography profiles in the harbour since 1980 were analyzed. Results show that the harbour is currently in siltation status with an average deposition thickness of 1.08 m during 1980-2021. The 0 m isobath silted into the center of the harbour and the shallowed area by siltation at 5 m isobath was reduced by 67.01%. The deposition thickness on the west side of the harbour is much larger than that on the east side from Tangzi Spit to Changhuikou Spit. Since 1980, the construction for aquaculture on both sides of the harbour has changed the local tidal-current movement conditions, which had caused a change from siltation to erosion within the harbour and the ebb delta outside the Changhuikou Spit was pushed back, and finally, the geographical situation of Zhangjiabu Harbour has changed profoundly.

Key words: Zhangjiabu Harbour; tidal canal-drowned valley bay; erosion-siltation variation