

杨超, 朱龙海, 张晓东. 基于大量卫星图像研究莱州湾东北部界河海滩近 40 年的海岸线演变[J]. 海洋学报, 2024, 46(12): 13–25, doi:10.12284/hyxb2024125

Yang Chao, Zhu Longhai, Zhang Xiaodong. A study on the shoreline change of the Jiehe Beach in the northeastern Laizhou Bay over the past 40 years based on a large number of satellite images[J]. Haiyang Xuebao, 2024, 46(12): 13–25, doi:10.12284/hyxb2024125

基于大量卫星图像研究莱州湾东北部 界河海滩近 40 年的海岸线演变

杨超¹, 朱龙海^{1,2}, 张晓东^{1,2*}

(1. 中国海洋大学 海洋地球科学学院, 山东 青岛 266100; 2. 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 山东 青岛 266100)

摘要: 近几十年来, 位于莱州湾东北部的界河两侧海滩 (以下简称“界河海滩”) 在河流入海泥沙减少背景下发生严重侵蚀, 再加上裕龙岛 (一个大型离岸人工岛) 等沿海工程建设的影响, 界河海滩的海岸线演变异常复杂。本文使用 1984–2024 年的 1 186 幅卫星图像, 采用聚焦剖面方法和亚像素海岸线识别技术研究界河海滩的海岸线演变, 评估河流输沙和沿海工程的影响。结果显示界河海滩早期 (1984–2004 年) 的演变主要受界河河口的封闭和打开、沙嘴的沿岸运移以及沙坝的向岸运移控制, 总体上发生侵蚀; 界河海滩后期 (2004–2024 年) 的演变主要受裕龙岛等沿海工程建造影响, 总体上发生淤进。在沿海开发日益加剧的今天, 合理布局沿海工程有望减缓海滩侵蚀。

关键词: 遥感; 山东半岛; 海岸线; 河口封闭; 离岸人工岛

中图分类号: P737.1

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2024)12-0013-13

1 引言

海滩位于海陆交互地带, 具有旅游、娱乐、生态保护等多重价值^[1-3]。全球海滩普遍遭受侵蚀, 已经成为严重的全球性环境问题^[4-7]。河流输沙是海滩泥沙的重要来源, 河流输沙量减少常导致河口周边海滩发生侵蚀^[8-11]。沿海工程通过改变水动力环境和泥沙输运也会影响海滩演变^[12-15]。离岸人工岛作为新兴工程, 其对邻近海滩的影响已经引起了广泛关注^[3, 10, 16]。

研究者普遍采用现场调查、经验模型和数值模拟方法研究海滩演变。研究结果揭示离岸人工岛主要导致其波影区海滩淤积、邻近海滩侵蚀^[17-19]。然而, 由于长期连续的海滩现场调查数据稀缺, 且数值模拟结果存在不确定性, 这些方法的局限性不容忽视, 尤其是对于新型离岸人工岛的研究^[20-23]。

卫星遥感技术, 以其能够便捷获取长期连续地表信息的优势, 在海滩演变研究中发挥了重要作用^[24-27]。尽管如此, 由于卫星图像的空间分辨率较低, 易受海滩剖面形态和水位波动等因素影响, 遥感解译的海岸线位置精度仍有待提高^[3, 10, 28-29]。为了克服这些限制, 研究者开始采用亚像素识别技术, 并基于大量卫星图像开展研究, 遥感解译的海岸线位置精度达 4.7~14.1 m, 显著提高了研究结果的准确性和时间分辨率^[2-3, 10, 30-31]。

Zhang 等^[10]提出了一种聚焦剖面的方法, 并开发了计算机辅助海岸线位置识别软件(CASPRS)^[32]。该软件结合亚像素识别技术和自动与人工识别方法, 有效提高了海岸线位置识别的准确性和效率, 研究结果的时间分辨率大幅提升。使用上述方法和软件, Zhang 等^[3, 11]、吴闯等^[33]、张晓东等^[34]、Hu 等^[21]研究了

收稿日期: 2024-07-29; 修订日期: 2024-10-28。

基金项目: 国家自然科学基金(42276172)。

作者简介: 杨超(2000—), 男, 河南省信阳市人, 主要从事海滩演变研究。E-mail: 954397289@qq.com

* 通信作者: 张晓东, 副教授, 主要从事海滩演变研究。E-mail: zxd@ouc.edu.cn

我国多个海滩的海岸线演变,揭示了自然因素和人类活动的影响,遥感解译的海岸线位置精度为4.7~14.1 m;大量卫星图像(年均卫星图像使用量10~60幅)的使用不仅显著提高了研究结果的时间分辨率,还提升了遥感解译的海岸线变化速率的精度(在灵山湾北部海滩为0.55 m/a)。本文基于界河海滩1984–2024年的1 186幅卫星图像,使用聚焦剖面方法开展研究,旨在深入理解海滩对河流入海泥沙减少以及大型沿海工程建造的影响,为海滩保护和沿海工程环境影响评价提供科学依据。

2 研究区概况

界河海滩位于山东半岛北部,长20 km,东北为砮姆岛高角,西南至诸流河口(图1)。海滩表层沉积物的砂砾含量48%~94%,平均77%,中值粒径0.517~1.206 mm,分选系数0.32~2.39^[35–37]。在海滩中部入海的界河属山溪雨源河流,长45 km,流域面积576.8 km²。已有研究表明,20世纪50–60年代,山东半岛众多水库和引水工程的建设截留了大量原本流入海洋的河水和泥沙^[38–39]。界河的输沙量变化对山东半岛入海河流具有显著的代表性。据报道^[40],界河的年均输沙量在1958–1965年高达 $17.2 \times 10^4 \text{ m}^3$;然而,这一数值在1966–1970年急剧下降至 $4.1 \times 10^4 \text{ m}^3$,在1983–1984年进一步降至 $0.05 \times 10^4 \text{ m}^3$,几乎接近于0。

研究区地处北温带东亚季风区,冬季干燥寒冷,

夏季高温多雨。研究区的潮汐属不正规半日潮,平均潮差0.92 m,最大潮差2.87 m^[41]。龙口湾外海域(图1b)的波浪主要来自NE和NNE方向,最大波高7.2 m;界河东北海滩受砮姆岛遮蔽,其毗邻海域的波浪主要来自SW和WSW方向,最大波高为2.9 m^[41]。

研究区内海岸工程数量较多。裕龙岛是一个超大型离岸人工岛,建于2011年,用海面积40 km²,沿岸长度9.5 km,离岸最近距离100 m、最远距离8 000 m,在界河口附近的离岸距离为400 m(图1)。已有研究表明,裕龙岛的建设导致其周边大部分海域的潮流、波浪减弱,纳潮量减小,界河海滩邻近海域淤积、表层沉积物的黏土组分增加^[42–45]。王超等^[46]的研究表明,裕龙岛西南部的跨水道工程(图1)大幅减弱了水道水沙交换,水道内冲淤环境由原来的微侵转变为部分淤积。

春雨码头是一个兼具旅游功能的一级渔港,建于2011年,用海面积0.8 km²,沿岸长度750 m,围海堤坝最远向海延伸1 200 m。此外,研究区还有3个丁坝,均跨越了潮间带,从高潮线起向海延伸200~300 m。伊善堂等^[37]的研究表明,裕龙岛和春雨码头等沿海工程的建造对界河海滩岸线的影响较大,导致界河口附近岸线由蚀退转为淤进,春雨码头附近岸线加速蚀退。

3 数据和方法

3.1 卫星图像来源和预处理

本文从谷歌地球引擎(<https://code.earthengine.google.com>)下载了研究区1984–2024年云量小于80%的所有Landsat TM、ETM+、OLI和Sentinel-2 MSI图像,人工删除受云雾等影响不清晰的图像后剩余1 186幅,其中Landsat图像871幅,Sentinel-2图像315幅(图2)。卫星图像采用标准假彩色合成方案,采用该方案合成的图像有利于识别水边线。在合成图像中,植被为红色,海滩为灰白色,水为深蓝色(图1,图3)。

3.2 研究剖面设置和水边线位置识别

在界河海滩共设置26条研究剖面J1–J26,沿岸长度12 km(图1)。剖面长500~600 m、间隔100~1 700 m。界河河口两侧的剖面较密,其中J9正对界河河口,J1–J8位于河口东北、被裕龙岛遮蔽,J10–J15位于河口西南、直面外海。J16–J17、J21–J22、J23–J24、J24–J25分别位于丁坝1–3和春雨码头两侧,J18–J20剖面附近发育沙坝和沙嘴,J26位于研究区最西南端。水边线指海滩和海水之间的瞬时分界线^[10,47],是研究海岸线演变最常用的指标。水边线在研究剖面上的位置使用软件CASPRS采用亚像素识别方法得出(图3)。

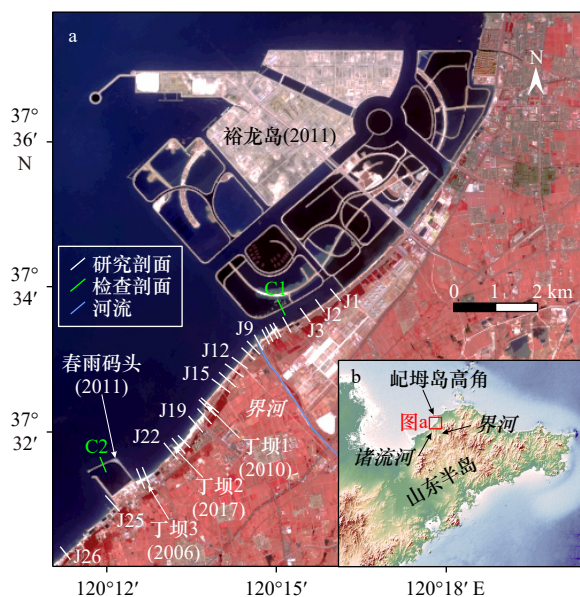


图1 界河海滩及其周边主要沿海工程(a), 界河海滩在山东半岛的位置(b)

Fig. 1 Jiehe Beach and its surrounding major coastal projects (a), the location of Jiehe Beach in Shandong Peninsula (b)

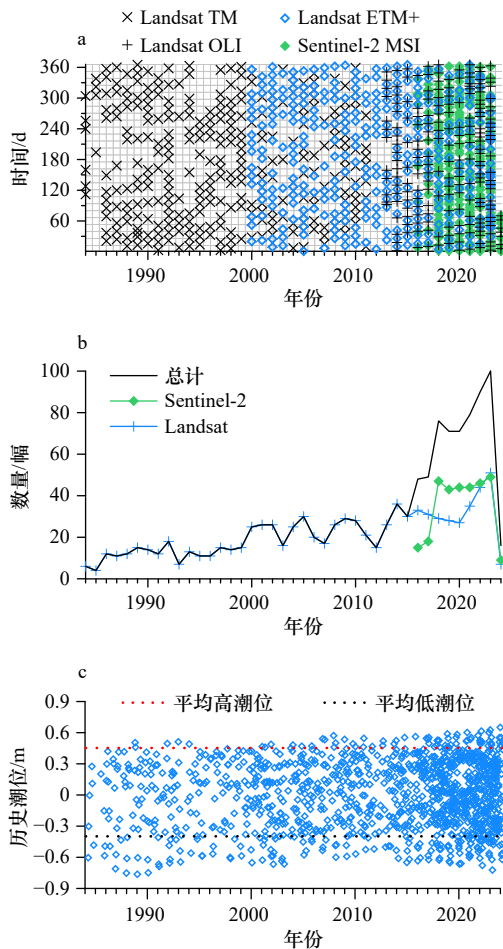


图2 1984—2024年界河海滩 Landsat 和 Sentinel-2 卫星图像的时间和类型(a)、每年数量(b)和拍摄时的瞬时水位(c)

Fig. 2 Date and type (a), annual number (b) and instantaneous water level at the shooting time (c) of Landsat and Sentinel-2 satellite images of Jiehe Beach from 1984 to 2024

传统海岸线识别方法以像素为识别单元,亚像素海岸线方法则根据海岸线周围多个像素更为精确地确定海岸线位置,CASPRS早期版本的自动识别分辨率为1 m^[10],目前的版本已提升至0.01 m。

3.3 海岸线位置的校正和误差评估

已有研究表明,尽管 Sentinel-2 图像的分辨率比 Landsat 图像高,但其地理位置误差反而较大^[3,34]。参考文献^[3,34],本文使用 CASPRS 识别了两条线状固定地物(裕龙岛和春雨码头堤坝的中心线,其位置不受水位波动的影响)在检查剖面 C1 和 C2 上的位置(图1),利用其变化对 Sentinel-2 图像进行地理位置校正。

水边线是最为常用的指示海岸线变化的遥感解译指标,但是水边线易受潮位波动影响,因此有必要进行潮位校正。本文对水边线位置进行了潮位校正,校正所用历史潮位使用潮汐模拟软件 NAO.99Jb^[48] 得出。由于 NAO.99Jb 模型没有考虑潮汐的季节性变化,

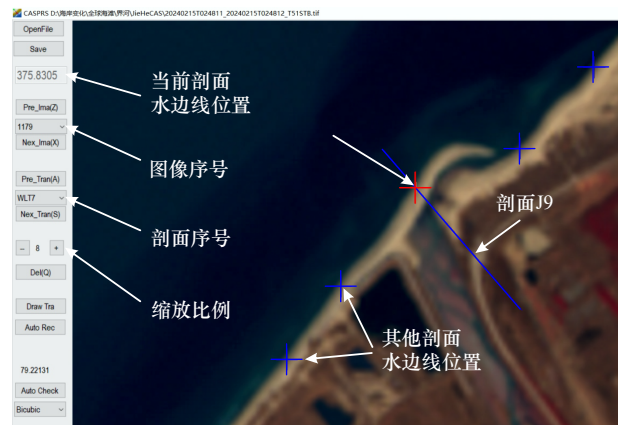


图3 计算机辅助海岸线位置识别软件(CASPRS)的操作界面

Fig. 3 Operating interface of the computer-aided shoreline position recognition software (CASPRS)

本文参考龙口港的海平面季节改正值对模拟结果进行了校正^[10]。参考文献^[3,34],潮位校正中所使用的海滩坡度根据遥感解译的水边线位置和模拟潮位之间的拟合关系得出。上述地理校正后的水边线位置利用模拟水位和海滩坡度进一步校正至平均海平面,潮位校正后的水边线位置即为平均潮位线位置,本文主要利用平均潮位线位置指标研究海岸线变化。相对于通过遥感解译直接得出的水边线位置,平均潮位线位置消除了水位波动的影响,对海滩岸线变化有更好的指示作用。另外,平均潮位线位于海滩中部,其变化对岸上以及离岸工程均有较好的指示作用。

固定地物在研究剖面上的位置在实际上应保持不变,遥感解译的位置变化主要来源于遥感解译误差,参考文献^[3,34],本文采用固定地物位置序列的标准偏差对该误差进行评估。与固定地物不同,海岸线位置会发生变化,该变化在误差评估时应进行扣除。参考 Zhang 等^[3,34],本文使用海岸线位置年均值代替标准偏差计算公式中的总平均值以去除海岸线长期变化的影响,采用公式(1)评估海岸线位置误差。

$$E = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_y)^2}, \quad (1)$$

式中, E 是海岸线位置误差, n 是数据总数, i 是数据序号, y 是年份, x_i 是第 i 个海岸线位置, \bar{x}_y 是第 y 年海岸线位置的平均值。

4 结果

4.1 误差评估结果

两条线状固定地物在 Landsat 和 Sentinel-2 图像上的平均位置之差分别为 5.0 和 3.7 m(图4),说明 Landsat 和 Sentinel-2 图像之间的地理位置偏差较小,

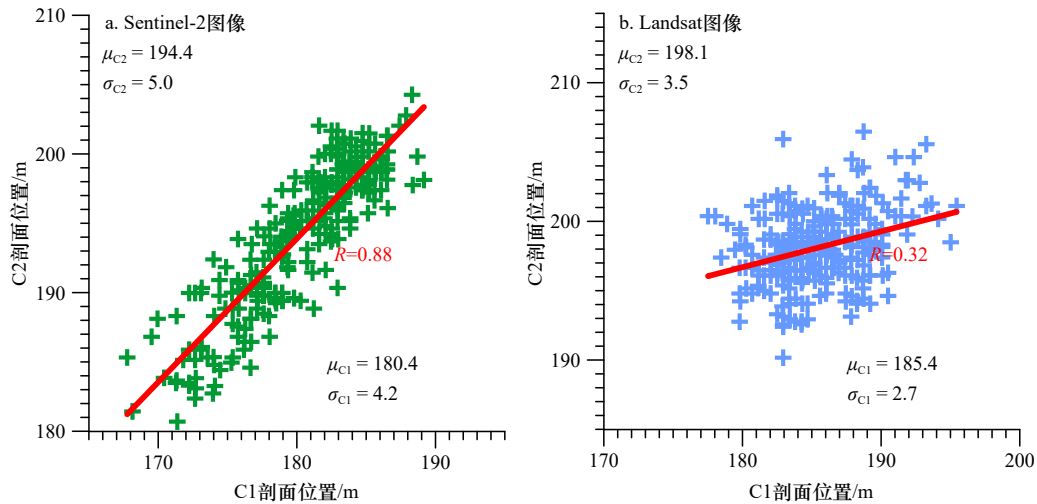


图 4 线状固定地物在检查剖面 C1 和 C2 上的位置的相关性

Fig. 4 Correlation between the positions of linear fixed objects on check transect C1 and C2

a. Sentinel 图像, b. Landsat 图像。μ-平均值, σ-标准偏差, 单位均为 m
a. Sentinel image, b. Landsat image. μ-average, σ-standard deviation, all units are m

二者可综合使用。两条线状固定地物在空间分辨率为 10 m 的 Sentinel-2 图像上的位置波动为 4.2 和 5.0 m, 反而大于其在空间分辨率为 30 m 的 Landsat 图像上的位置波动(2.7 和 3.5 m); 另外, 两条线状固定地物在 Sentinel 图像上的剖面位置序列呈现较强的相关性, 相关系数为 0.88, 明显高于其在 Landsat 图像上的相关系数(0.32)(图 4)。上述结果说明 Sentinel-2 图像的地理位置精度有进一步提升的空间。如前所述, 本文以固定地物在 Sentinel 图像上的位置变化对 Sentinel-2 图像进行了地理校正。

表 1 给出了未校正的水边线、地理校正后的水边线、平均潮位线(地理、潮位校正后的水边线)的误差。校正前的水边线位置误差为 4.8~11.9 m, 在界河河口附近的 J8-J9 剖面较大, 地理、潮位校正后的水边线位置也有同样规律。进一步分析表明, J8-J9 剖

续表 1

剖面	未校正的海岸线 (水边线)	地理校正后的 海岸线	地理、潮位校正后的海岸线 (平均潮位线)
J8*	9.5	9.3	9.0
J9*	11.9	11.9	11.9
J10	5.7	5.4	5.1
J11	5.4	5.3	4.9
J12	6.3	6.1	5.8
J13	5.3	5.1	4.8
J14	5.2	5.0	4.7
J15	5.8	5.5	5.3
J16	5.4	5.3	5.2
J17	5.9	5.9	5.7
J18	5.3	5.2	5.1
J19	6.1	6.0	5.7
J20	5.9	5.7	5.3
J21	6.1	5.9	5.5
J22	5.8	5.7	5.3
J23	5.4	5.2	4.9
J24	7.0	6.7	6.2
J25	5.5	5.2	5.0
J26	5.0	4.8	4.6
平均	6.0	5.8	5.5

注: * J8和J9剖面的较大位置误差主要是界河河口沙坝剧烈变化所致。

面的较大位置误差主要是界河河口沙坝的剧烈变化所致, 因此在计算平均误差时排除了这两个剖面。地理校正后, 水边线位置的平均误差从 6.0 m 降为 5.8 m,

表 1 海岸线位置的随机误差 (单位: m)
Table 1 Random error of satellite-derived
shoreline position (unit: m)

剖面	未校正的海岸线 (水边线)	地理校正后的 海岸线	地理、潮位校正后的海岸线 (平均潮位线)
J1	5.4	5.2	4.8
J2	5.4	5.0	4.7
J3	4.8	4.4	4.2
J4	5.0	4.8	4.5
J5	4.9	4.7	4.6
J6	4.8	4.6	4.4
J7	6.1	5.9	5.6

潮位校正后进一步降至 5.5 m。和 Zhang 等^[3,11]、吴闯等^[33]、张晓东等^[34] 以及 Hu 等^[21] 的结果相比, 界河海滩的海岸线位置误差相对较小, 校正后的降幅也不大, 这可能是因为界河海滩坡度较陡、潮位的垂向随机波动在平面上产生的位移较小的缘故^[3]。

4.2 海岸线在研究剖面上的位置变化

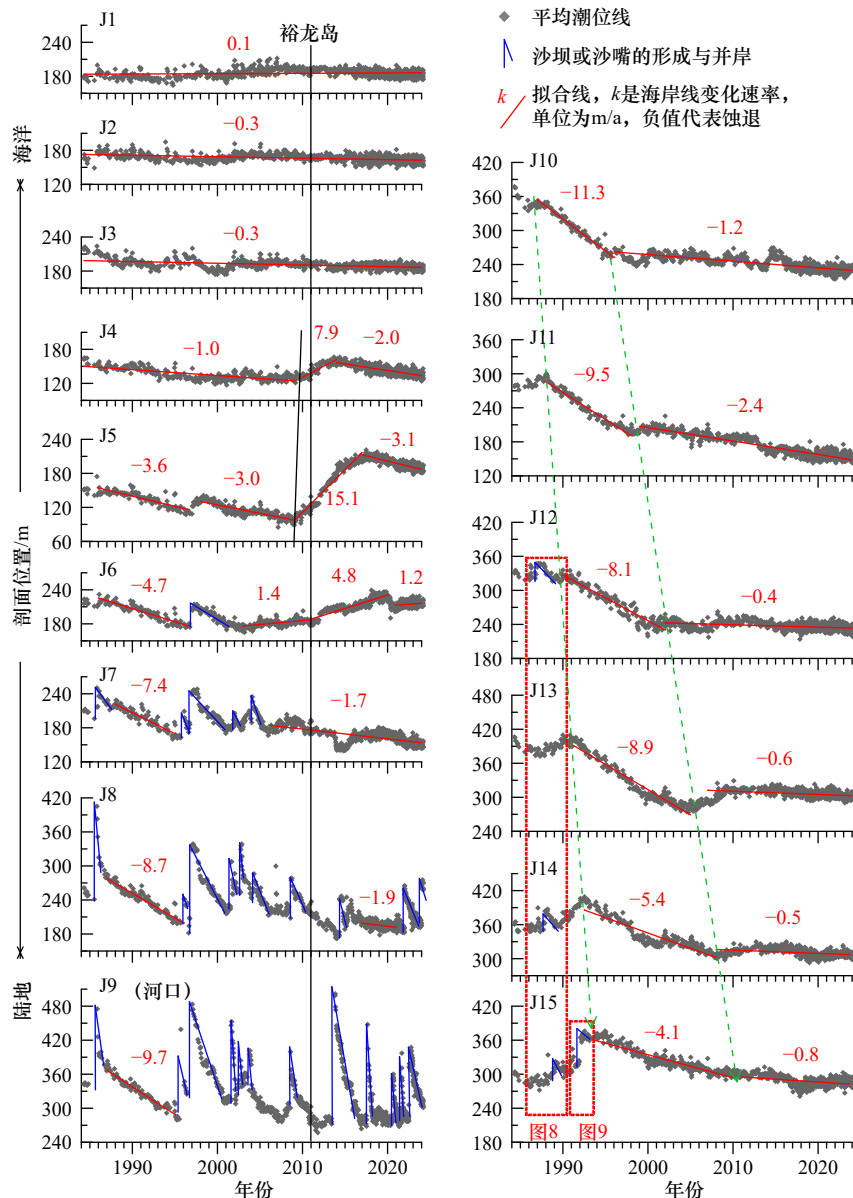
图 5 展示了 1984–2024 年界河海滩平均潮位线在研究剖面 J1–J26 上的位置变化。总体上, 平均潮位线位置呈阶段式、线性变化特征, 变化速率差异较大, 为 $-19.0 \sim 28.7$ m/a, 说明该海滩的海岸线变化较为复杂。

J1–J3 剖面的海岸线基本稳定; J4–J5 早期蚀退、中期淤进、后期恢复至蚀退; J6 早期蚀退、后期淤进; J7 早期快速蚀退、后期缓慢蚀退; J8–J9 频繁出现脉冲式向海突进现象, 随后快速后退, 总体上轻微蚀退; J10–J15 呈现三段式变化, 早期 J10–J11 基本稳定, J12–J15

出现脉冲式突进现象, 中期快速蚀退, 后期微弱蚀退; J16–J17 前期出现脉冲式突进现象, 整体发生淤进, 后期基本稳定; J18–J19 前期以淤进为主, 后期以蚀退为主; J20–J21 前期以蚀退为主, 后期以淤进为主; J22 微弱蚀退; J23–J24 以淤进为主; J25–J26 以蚀退为主。

4.3 河口打开和封闭过程

图 5 所示 J8–J9 剖面平均潮位线位置的频繁突进和后退是界河河口的打开和封闭所致。本文以 J9 剖面海岸线位置变化最剧烈的 2013–2016 年为例, 选择 6 幅关键卫星图像进行展示 (图 6)。在 2013/06/08 的卫星图像上, 界河河口处于封闭状态 (图 6a); 在 2013/08/11, 河口被洪水完全冲开 (图 6b); 在 2013/11/15 初步形成环形河口沙坝 (图 6c); 在 2014/03/07, 环形河口沙坝封闭河口 (图 6d); 在 2014/06/27, 环形河口沙坝逐渐向岸运移 (图 6e); 在 2016/01/08, 原来的环形



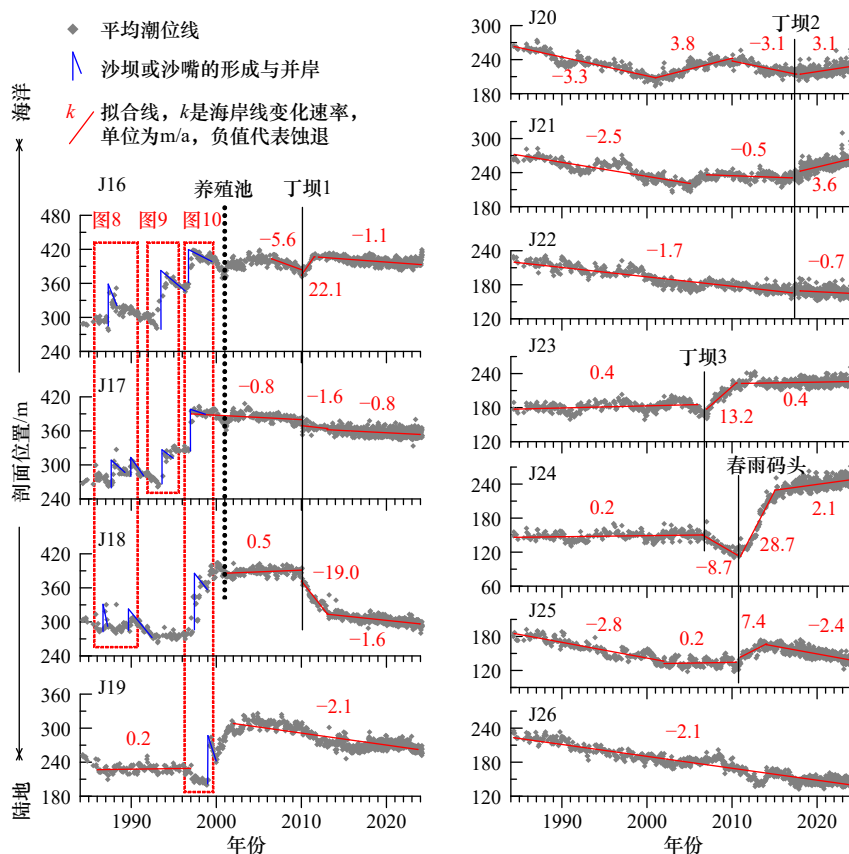


图5 1984–2024年界河海滩平均潮位线在研究剖面J1–J26上的位置变化

Fig. 5 Position change of the mean water line of Jiehe Beach on study transects J1–J26 from 1984 to 2024

河口沙坝与周边岸线基本平行(图6f)。

4.4 沿岸沙坝和沙嘴的演变

图5所示J12–J18剖面平均潮位线位置在1986–1990年的突进和后退是沿岸沙坝的向岸运移和并岸所致(图7)。在1984/04/21的卫星图像上,近岸破碎波指示J12–J18剖面附近发育两条近岸沙坝(图7a);在1986/12/07,潮位相对较低(−0.71 m),离岸较近的沙坝出露,其局部与海滩连接(图7b);在1987/01/24,离岸较近的沙坝向岸运移(图7c);在1987/11/24,沙坝并岸,该区域的海岸线明显向海突出(图7d)。

图5所示J15–J19剖面平均潮位线位置在1991–1999年的突进和后退是两个沙嘴的形成和发育所致(图8,图9)。第一个沙嘴在1990/10/31尚未形成(图8a);在1992/02/07,沙嘴在J15剖面附近形成(图8b);在1993/01/08,沙嘴向西南方向运移至J16剖面附近(图8c);在1993/11/24,沙嘴前锋在J17剖面处并岸,在滩面形成微型潟湖(图8d)。

与第一个沙嘴类似,第二个沙嘴在1996/05/08尚未形成(图9a);在1997/01/03,沙嘴在J17和J18剖面之间形成(图9b);在1998/05/14,沙嘴向西南方向运移至J18和J19剖面之间(图9c);在1999/12/27,沙嘴

前J19剖面附近并岸(图9d)。

4.5 沿海工程建造前后的海岸线变化

图10和表2展示了沿海工程建造前后的海岸线变化。在界河河口西南沿岸,丁坝1和3的建造导致其东北和西南侧海岸线分别发生淤进和蚀退;丁坝2和春雨码头的建造导致其邻近海岸线发生淤进,对东北侧海岸线的促淤作用较强。在界河河口东北沿岸,裕龙岛的建造导致其遮蔽的海滩(J4–J6)淤进,而受裕龙岛遮蔽作用更强但离界河河口较远的海滩(J1–J3)基本稳定。

界河海滩的沿海工程主要在2006年后建造,本文以2004年为界,把界河海滩的海岸线变化分为早(1984–2004年)、晚(2004–2024年)两个时期,每个时期均为20 a(图11)。在前20 a,界河海滩主要受界河入海泥沙减少影响,河口两侧海岸线(J3–J14)显著蚀退,其中西南侧海岸线(J10–J14)的蚀退距离较大,最大为114 m。邻近的J15–J19剖面海岸线受沙坝和沙嘴并岸影响显著淤进,最大淤进距离为117 m(图11a)。在后20 a,主要受沿海工程建造影响,裕龙岛、春雨码头以及丁坝1–3附近的海岸线显著淤进,春雨码头东北侧(J24)的淤进距离最大,为99 m(图11b)。

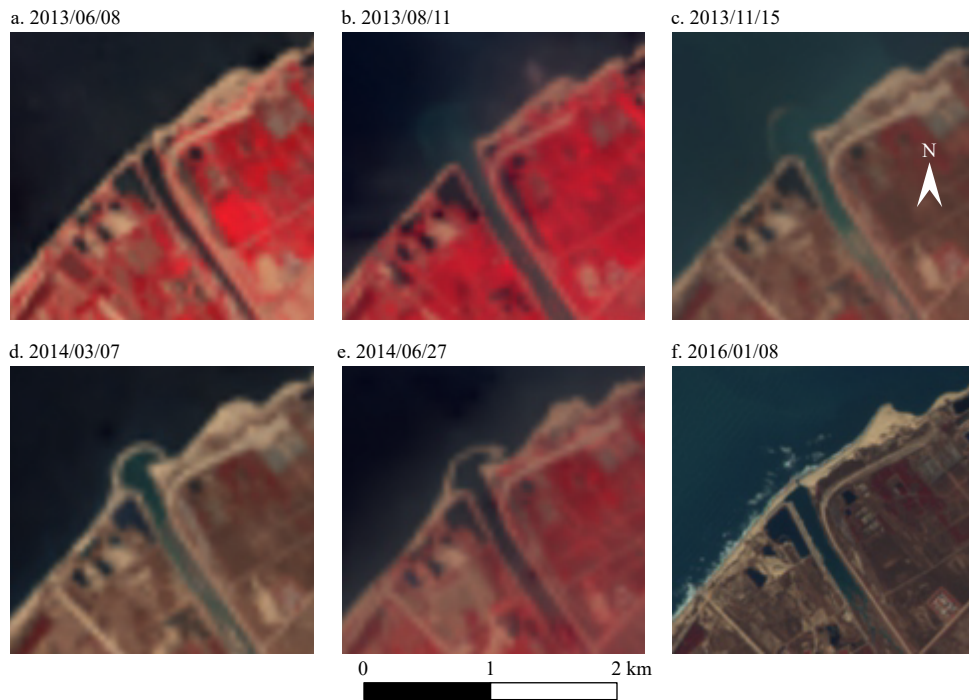


图6 界河河口在2013–2016年的打开和封闭过程

Fig. 6 Open and close process of Jiehe Estuary from 2013 to 2016

- a. 2013/06/08(河口封闭); b. 2013/08/11(河口打开); c. 2013/11/15(环形河口沙坝初步形成); d. 2014/03/07(环形河口沙坝形成); e. 2014/06/27(环形沙坝向岸转移); f. 2016/01/08(河口沙坝与周边岸线平齐)
- a. 2013/06/08 (closure of the estuary); b. 2013/08/11 (opening of the estuary); c. 2013/11/15 (initial formation of the circular estuary sandbar); d. 2014/03/07 (formation of the circular estuary sandbar); e. 2014/06/27 (transport of the circular sandbar towards the shore); f. 2016/01/08 (alignment of the estuary sandbar with the surrounding shoreline)

5 讨论

5.1 界河海滩的泥沙来源

界河入海泥沙是界河海滩最为主要的泥沙来源^[37], 这从图1所示界河河口附近海岸线明显向海突出可以看出。水库和引水工程对界河径流的拦截, 导致界河河口长期处于封闭状态、仅在夏季洪水发生时才会打开(图5 J9, 图6a和b)。洪水期向海输送的泥沙首先在河口附近沉积, 形成河口沙坝(图6c和d); 在随后的1~4 a内, 河口沙坝在波浪和潮流作用下快速向陆运移, 最终和周边岸线平行甚至封闭河口(图6e和f)。近40 a来, 界河河口共打开12次(图5 J9)。其中, 1996年、2013年和2022年河口打开后分别保持了4 a、3 a和2 a, 其余均为1 a。这也意味着界河河口打开的年份不足50%。一个直接的后果是河口附近的海岸线发生侵蚀(图5 J7–J15)。上述结果与安永宁等^[42]根据CERC公式计算得出的界河河口附近海滩的冲淤变化一致, 但与伊善堂等^[37]使用4期卫星图像得出的结果相反, 这可能与根据少量卫星图像得出的海岸线变化速率的可靠性不足有关^[3]。

近岸泥沙在水动力作用下的向岸输运是界河海滩泥沙的另外一个来源。图7展示了沿岸沙坝的向岸运移和并岸过程, 沙坝并岸后的海岸线向海淤进(图5 J12–J18)。沿岸沙坝的并岸不仅为海滩提供泥沙来源、促进海滩淤进, 还会导致入射波浪在离岸较远处破碎(图7a–c), 降低作用在海滩上的波能、缓解海滩侵蚀^[11]。研究区的近岸沙坝主要出现在界河河口西南沿岸, 界河河口东北未见。另外, 这些近岸沙坝主要出现在早期, 1990年后也未见。如下所述, 界河入海泥沙主要在早期向西南方向输送, 这说明这些沿岸沙坝本质上是界河向海输送的泥沙。

5.2 界河海滩的泥沙输运

近岸泥沙除在水动力作用下垂岸输运外, 还存在沿岸运移。历史卫星图像在界河西南海滩捕捉到了两次近岸泥沙以沙嘴形式向西南方向运移的过程(图8和9)。剖面J12–J19附近海滩频繁出现沿岸沙坝和沙嘴与该区毗邻界河河口、易于接受界河入海泥沙有关。沿岸沙嘴主要向西南方向运移与该区波浪主要来自NE和NNE方向有关。界河河口东北方向的海滩未见沿岸沙坝和沙嘴, 这应与岬岛高角对

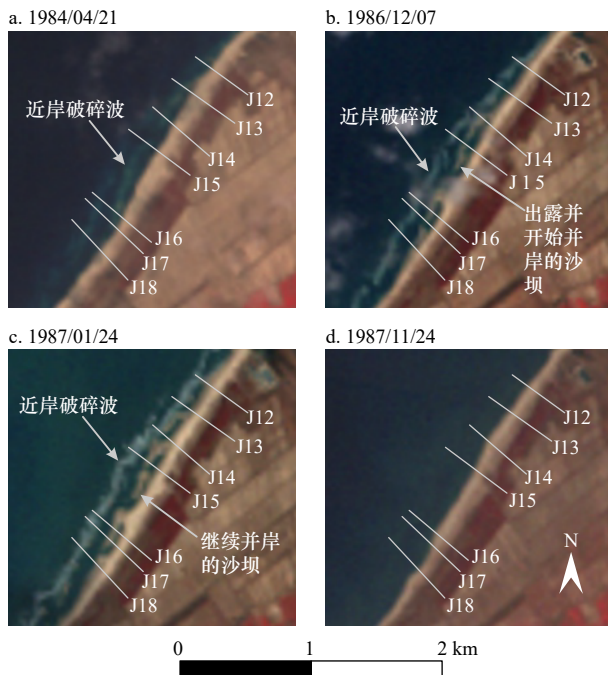


图 7 剖面 J12-J18 附近沿岸沙坝在 1984-1987 年的向岸运输和并岸过程

Fig. 7 Onshore migration and merging process of the coastal sandbars near transect J12-J18 from 1984 to 1987

- a. 1984/04/21 (nearshore breaking waves indicate the location and shape of two underwater sandbars);
 b. 1986/12/07 (the sandbar near the shore is exposed when the tide level is low, and partially connected to the beach);
 c. 1987/01/24 (sandbar moving to shore); d. 1987/11/24 (the shoreline after the sandbars merged was obviously protruding to the sea)

波浪的遮蔽作用有关。

除上述卫星图像记录到的沿岸沙嘴外,海岸线变化速率的空间差异也能指示近岸泥沙的沿岸运输规律。界河河口在 1987-1995 年处于封闭状态,海岸线蚀退速率为 -9.7 m/a (图 5 J9); J10-J15 剖面的海岸线在 1987 年后也开始快速蚀退,蚀退的开始和结束时间向西南逐渐延后,蚀退速率也逐渐减缓(图 5 J10-J15)。这说明该区的泥沙运输方向为从东北到西南(从 J9 到 J15)。当界河河口(J9)封闭、泥沙减少时,该区海滩依次发生蚀退。导致泥沙在界河河口西南海滩(J9-J15)向西南运输的动力应为冬季 NE 和 NNE 向波浪,其在时间上相对河口的夏季输沙有所滞后,夏季沉积的泥沙在冬季发生再悬浮,导致该区海岸线蚀退结束时间逐渐延后。

界河河口泥沙也在水动力作用下向东北方向运输。最为直接的证据是位于河口东北侧(J8)的海岸

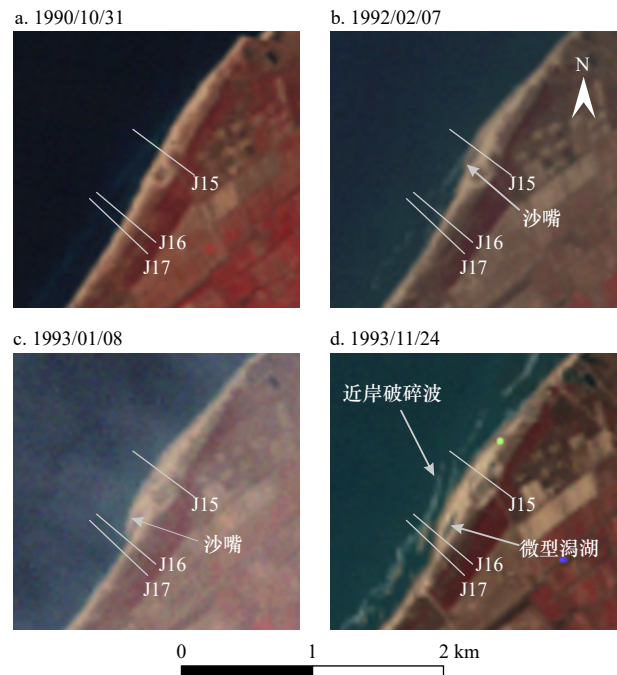


图 8 剖面 J15-J17 附近的沿岸沙嘴在 1990-1993 年的形成和并岸过程

Fig. 8 Formation and merging process of the coastal spit near the transect J15-J17 from 1990 to 1993

- a. 1990/10/31 (沙嘴未形成); b. 1992/02/07 (沙嘴开始形成);
 c. 1993/01/08 (沙嘴向西南方向运移); d. 1993/11/24 (沙嘴前锋在 J17 剖面处并岸,在滩面形成微型潟湖)
 a. 1990/10/31 (the sand spit not formed); b. 1992/02/07 (the sand spit began to form); c. 1993/01/08 (the sand spit migrated to the southwest);
 d. 1993/11/24 (the front of sand spit merged at the J17 section and formed a micro-lagoon on the beach)

线变化在时间上几乎与位于河口(J9)一致,同时出现快速淤进和蚀退现象,更靠东北的 J6 和 J7 剖面偶尔也出现类似现象。同时,界河河口在 1987-1995 年的蚀退甚至能够影响更靠东北的 J5,海岸线蚀退向东北方向逐渐减缓。泥沙在界河河口东北海滩(J5-J9)向东北方向运输的动力应为夏季来自 SW 和 WSW 方向的波浪,其在时间上与河口的夏季输沙基本同步,这可能是该区海岸线蚀退开始和结束时间基本同步的原因。安永宁等^[42]根据 CERC 公式计算得出的界河河口周边海滩在裕龙岛建造前的泥沙运输方向和本研究一致。

沿海工程建造前后其周边海岸线变化速率的差异也指示了界河海滩的泥沙运输方向(图 10)。如 4.5 节所述,剖面 J16-J25 附近沿海工程的建造导致其东北侧海岸线变化速率增量大于西南侧,这指示了沿岸泥沙在该区域由东北向西南方向运输。界河河口东北海滩(J4-J6 剖面)在裕龙岛建设后发生淤进,这与安永宁等^[42]的预测结果一致,其可能是界河入海泥

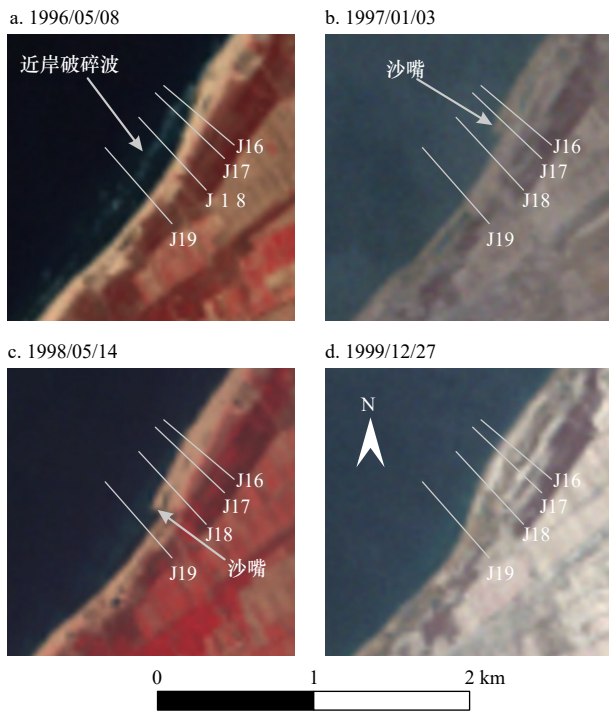


图9 剖面J16-J19附近的沿岸沙嘴在1996-1999年的形成和并岸过程

Fig. 9 Formation and merging process of the coastal spit near the transect J16-J19 from 1996 to 1999

- a. 1996/05/08 (沙嘴未形成); b. 1997/01/03 (沙嘴开始形成);
 - c. 1998/05/14 (沙嘴向西南方向迁移); d. 1999/12/27 (沙嘴在J19剖面附近并岸)
- a. 1996/05/08 (sand spits not formed); b. 1997/01/03 (sand spits began to form); c. 1998/05/14 (sand spits migration to the southwest); d. 1999/12/27 (sand spits merged near the J19 section)

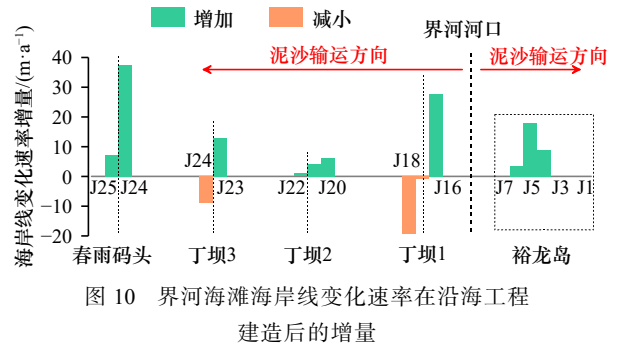


图10 界河海滩海岸线变化速率在沿海工程建造后的增量

Fig. 10 Increment of the shoreline change rate of Jiehe Beach after the construction of coastal engineering projects

沙在西南向波浪作用下向东北方向运输的结果。安永宁等^[42]预测界河河口西南海滩(剖面J10-J15)在裕龙岛建造后将转为淤积,但我们的结果显示该区域持续侵蚀,这可能是裕龙岛对波浪的反射、折射和绕射等所致,而安永宁等^[42]未考虑这些因素。

6 结论

本文基于1186幅卫星图像,利用聚焦剖面方法和亚像素海岸线提取技术研究了界河海滩在1984-2024年的海岸线演变,主要结论如下:

(1)遥感解译的界河海滩水边线位置的随机误差平均为6.0 m,地理校正后降为5.8 m,潮汐校正后进一步降至5.5 m,与目前最先进的遥感解译结果相当。大量卫星图像以及亚像素海岸线提取技术的综合使用克服了卫星图像分辨率不足的缺陷,研究结果

表2 沿海工程建设前后邻近海滩的海岸线变化速率

Table 2 Shoreline change rates at the adjacent beaches of the coastal projects before and after their construction

剖面	沿海工程	建设时间	建设前海岸线变化速率/(m·a ⁻¹)	建设后海岸线变化速率/(m·a ⁻¹)	海岸线变化速率增量/(m·a ⁻¹)	影响时长/a
J4	裕龙岛	2011	-1.0	7.9	8.9	3
J5	裕龙岛	2011	-3.0	15.1	18.1	6
J6	裕龙岛	2011	1.4	4.8	3.4	9
J16	丁坝1	2010	-5.6	22.1	27.7	2
J17	丁坝1	2010	-0.8	-1.6	-0.8	3
J18	丁坝1	2010	0.5	-19.0	-19.5	3
J20	丁坝2	2017	-3.1	3.1	6.2	6
J21	丁坝2	2017	-0.5	3.6	4.1	6
J22	丁坝2	2017	-1.7	-0.7	1.0	6
J23	丁坝3	2006	0.4	13.2	12.8	5
J24	丁坝3	2006	0.2	-8.7	-8.9	5
J24	春雨码头	2011	-8.7	28.7	37.4	4
J25	春雨码头	2011	0.2	7.4	7.2	4

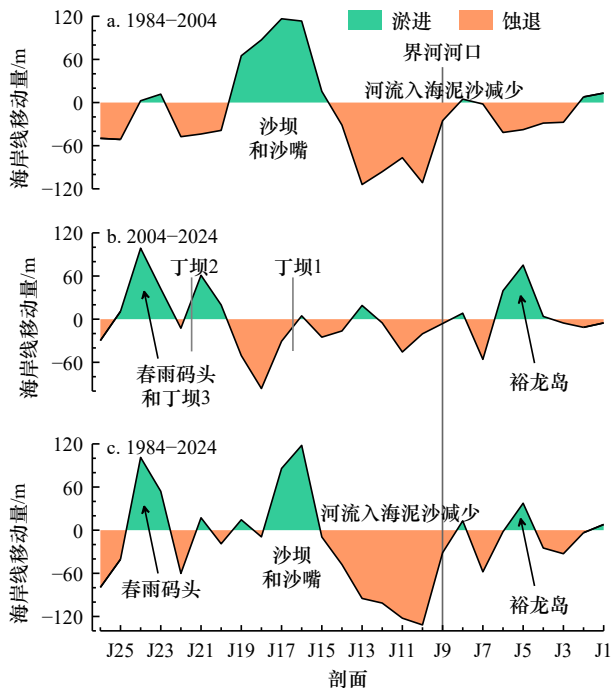


图 11 界河海滩平均潮位线在不同历史时期的移动量

Fig. 11 Cumulative movement of the mean water line of Jiehe Beach in different historical periods

a. 1984-2004 年; b. 2004-2024 年; c. 1984-2024 年
a. 1984-2004; b. 2004-2024; c. 1984-2024

更全面、详细、可靠,对于沿海工程的环境影响评价具有重要的参考价值。

参考文献:

- [1] Turner I L, Harley M D, Almar R, et al. Satellite optical imagery in coastal engineering[J]. *Coastal Engineering*, 2021, 167: 103919.
- [2] Vitousek S, Vos K, Splinter K D, et al. A model integrating satellite-derived shoreline observations for predicting fine-scale shoreline response to waves and sea-level rise across large coastal regions[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2023, 128(7): e2022JF006936.
- [3] Zhang Xiaodong, Wu Chuang, Hu Rijun, et al. Can satellite-derived beach images resolve the responses to human activities?[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2024, 129(2): e2023JF007339.
- [4] Luijendijk A, Hagenaars G, Ranasinghe R, et al. The state of the world's beaches[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 6641.
- [5] Murray N J, Phinn S R, Dewitt M, et al. The global distribution and trajectory of tidal flats[J]. *Nature*, 2019, 565(7738): 222-225.
- [6] Voudoukas M I, Ranasinghe R, Mentaschi L, et al. Sandy coastlines under threat of erosion[J]. *Nature Climate Change*, 2020, 10(3): 260-263.
- [7] Cai Feng, Cao Chao, Qi Hongshuai, et al. Rapid migration of China's mainland coastal erosion vulnerability due to anthropogenic changes[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 319: 115632.
- [8] Moussaid J, Fora A A, Zourarah B, et al. Using automatic computation to analyze the rate of shoreline change on the Kenitra coast, Morocco[J]. *Ocean Engineering*, 2015, 102: 71-77.
- [9] Valderrama-Landeros L, Flores-De-Santiago F. Assessing coastal erosion and accretion trends along two contrasting subtropical rivers based on remote sensing data[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2019, 169: 58-67.
- [10] Zhang Xiaodong, Tan Xiawei, Hu Rijun, et al. Using a transect-focused approach to interpret satellite images and analyze shoreline evolution in Haiyang Beach, China[J]. *Marine Geology*, 2021, 438: 106526.
- [11] Zhang Xiaodong, Wu Chuang, Zhang Yongchang, et al. Using free satellite imagery to study the long-term evolution of intertidal bar systems[J]. *Coastal Engineering*, 2022, 174: 104123.
- [12] Cai Feng, Su Xianze, Liu Jianhui, et al. Coastal erosion in China under the condition of global climate change and measures for its prevention[J]. *Progress in Natural Science*, 2009, 19(4): 415-426.

(2)受水库和引水工程影响,界河河口常年处于封闭状态,在过去 40 a 内仅打开 12 次。原来封闭的河口在洪水作用下打开后,在河口附近形成河口沙坝,在随后的 1~4 a 内河口沙坝逐渐向岸运移直至与周边岸线平齐。

(3)界河海滩的海岸线变化受人海泥沙减少、沙坝沙嘴并岸以及沿海工程建设等多种因素的影响,前两项的影响主要发生在前 20 a,沿海工程的影响主要发生在后 20 a。界河入海泥沙减少是界河海滩普遍侵蚀的主要原因,沙坝沙嘴并岸则导致局部海滩淤进,沿海工程建设促进物源侧(界河河口)海岸线的淤进。按照受影响海岸线的移动距离,上述因素按影响大小排列依次为:界河入海泥沙减少、沙坝沙嘴并岸、春雨码头、裕龙岛以及 3 个丁坝。

总体上,河流入海泥沙减少主要导致海岸线侵蚀,对海滩的影响是负面的、关键的;海滩泥沙沿岸输运造成源区海岸线侵蚀、汇区海岸线淤进,对海滩的影响是中性的;沿海工程主要导致海岸线淤进,对海滩的影响主要是正面的,对因河流入海泥沙减少引起的海滩侵蚀在客观上起到了补偿作用。建议保持入海河流必要的生态流量,避免河口周边海岸线的严重侵蚀;并充分利用沿海开发过程中所必不可少的沿海工程,通过合理布局和设计,保护和修复数量和面积均在逐渐减少的海滩。

- [13] Rangel-Buitrago N, Williams A T, Anfuso G. Hard protection structures as a principal coastal erosion management strategy along the Caribbean coast of Colombia. A chronicle of pitfalls[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2018, 156: 58–75.
- [14] Tak W J, Jun K W, Kim S D, et al. Using drone and LiDAR to assess coastal erosion and shoreline change due to the construction of coastal structures[J]. *Journal of Coastal Research*, 2020, 95(sp1): 674–678.
- [15] Sujivakand J, Samarasekara R S M, Siriwardana H P A M, et al. Unmanned aerial vehicles (UAVs) for coastal protection assessment: a study of detached breakwater and groins at Marawila Beach, Sri Lanka[J]. *Regional Studies in Marine Science*, 2024, 69: 103282.
- [16] 黎奕宏. 我国三类典型海岸工程对相邻海滩的影响研究 [D]. 厦门: 国家海洋局第三海洋研究所, 2018.
Li Yihong. Study on the influence of three types of typical coastal structures to the adjacent beach in China[D]. Xiamen: Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, 2018.
- [17] 何岩雨, 朱君, 戚洪帅, 等. 人工岛影响下的海滩修复对策研究——以海口西海岸为例 [J]. *应用海洋学学报*, 2021, 40(1): 2–11.
He Yanyu, Zhu Jun, Qi Hongshuai, et al. Beach restoration strategy influenced by artificial island: a case study on the west coast of Haikou[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2021, 40(1): 2–11.
- [18] 张达恒, 时连龚, 龚照辉, 等. 冬季波浪与人工岛联合作用下日月湾海滩冲淤演变特征 [J]. *热带海洋学报*, 2022, 41(4): 71–81.
Zhang Daheng, Shi Lianqiang, Gong Zhaohui, et al. Evolution characteristics of beach erosion and accretion at the Riyue Bay under the combined impacts of winter waves and artificial island[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2022, 41(4): 71–81.
- [19] 戚洪帅, 冯威, 刘根, 等. 人工岛影响下养护海滩演变特征研究——以海口湾为例 [J]. *海洋学报*, 2024, 46(2): 79–92.
Qi Hongshuai, Feng Wei, Liu Gen, et al. Study on the evolution of nourished beaches under the influence of artificial islands: taking Haikou Bay as an example[J]. *Haiyang Xuebao*, 2024, 46(2): 79–92.
- [20] Liu Gen, Qi Hongshuai, Cai Feng, et al. Initial morphological responses of coastal beaches to a mega offshore artificial island[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2022, 47(6): 1355–1370.
- [21] Hu Rijun, Fan Yingjie, Zhang Xiaodong. Satellite-derived shoreline changes of an urban beach and their relationship to coastal engineering[J]. *Remote Sensing*, 2024, 16(13): 2469.
- [22] Li Songzhe, Lv Biao, Yang Yunping, et al. Effects of offshore artificial islands on beach stability of sandy shores: case study of Hongtang Bay, Hainan Province[J]. *Frontiers of Earth Science*, 2022, 16(4): 876–889.
- [23] Qu Kaicheng, Chen Kefeng, Wang Nairui, et al. Geomorphological processes following the construction of an offshore artificial island in the radial sand ridges of the South Yellow Sea[J]. *Coastal Engineering*, 2024, 192: 104545.
- [24] Pradeep J, Shaji E, Chandran C S S, et al. Assessment of coastal variations due to climate change using remote sensing and machine learning techniques: a case study from west coast of India[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2022, 275: 107968.
- [25] Fogarin S, Zanetti M, Dal Barco M K, et al. Combining remote sensing analysis with machine learning to evaluate short-term coastal evolution trend in the shoreline of Venice[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 859: 160293.
- [26] Mbezi J, Mango J, Lubida A, et al. Exploring shoreline changes and their implications in coastal communities using GIS and remote sensing techniques: the case of eastern beaches of Unguja island, Tanzania[J]. *Regional Studies in Marine Science*, 2024, 75: 103566.
- [27] Palanisamy P, Sivakumar V, Velusamy P, et al. Spatio-temporal analysis of shoreline changes and future forecast using remote sensing, GIS and kalman filter model: a case study of Rio de Janeiro, Brazil[J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 2024, 133: 104701.
- [28] Hagenaaers G, De Vries S, Luijendijk A P, et al. On the accuracy of automated shoreline detection derived from satellite imagery: a case study of the sand motor mega-scale nourishment[J]. *Coastal Engineering*, 2018, 133: 113–125.
- [29] Pardo-Pascual J E, Almonacid-Caballer J, Ruiz L A, et al. Automatic extraction of shorelines from Landsat TM and ETM+ multi-temporal images with subpixel precision[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 123: 1–11.
- [30] Pardo-Pascual J E, Sánchez-García E, Almonacid-Caballer J, et al. Assessing the accuracy of automatically extracted shorelines on microtidal beaches from Landsat 7, Landsat 8 and Sentinel-2 imagery[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(2): 326.
- [31] Vos K, Harley M D, Splinter K D, et al. Sub-annual to multi-decadal shoreline variability from publicly available satellite imagery[J]. *Coastal Engineering*, 2019, 150: 160–174.
- [32] Zhang Xiaodong. Computer-aided shoreline position recognition software[EB/OL]. (2023-11-26) [2024-05-01]. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.23731110>.
- [33] 吴闯, 张晓东, 许淑梅, 等. 山东青岛灵山湾南部海滩的时空演变及其影响因素 [J]. *古地理学报*, 2022, 24(1): 152–163.
Wu Chuang, Zhang Xiaodong, Xu Shumei, et al. Spatial and temporal evolution of Lingnan Beach in Qingdao of Shandong Province and its influencing factors[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2022, 24(1): 152–163.
- [34] 张晓东, 姚雨涵, 朱龙海, 等. 基于大量卫星图像研究青岛汇泉湾海滩近40年的地形地貌演变 [J]. *海洋与湖沼*, 2022, 53(3): 578–589.
Zhang Xiaodong, Yao Yuhan, Zhu Longhai, et al. Topographic and geomorphological evolution of Huiquan Beach of Qingdao in past 40 years using massive satellite images[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2022, 53(3): 578–589.
- [35] 董卫卫. 莱州湾东岸冲淤演变分析与防护 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008.
Dong Weiwei. The erosion and deposition evolution development and the protection in the east coast of Laizhou[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2008.
- [36] 周广镇. 莱州湾东岸近岸海域规划用海实施后冲淤演变预测 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.

- Zhou Guangzhen. Evolution prediction of erosion and deposition in the east coast of Laizhou Bay after the implementation of the coastal planning[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012.
- [37] 伊善堂, 尹东晓, 朱龙海, 等. 招远砂质海岸岸滩演化特征 [J]. 海洋地质前沿, 2017, 33(9): 47–52.
Yi Shantang, Yin Dongxiao, Zhu Longhai, et al. Evolutionary features of the Zhaoyuan sandy beach[J]. Marine Geology Frontiers, 2017, 33(9): 47–52.
- [38] 庄振业, 陈卫民, 许卫东, 等. 山东半岛若干平直砂岸近期强烈蚀退及其后果 [J]. 青岛海洋大学学报, 1989, 19(1): 90–98.
Zhuang Zhenye, Chen Weimin, Xu Weidong, et al. Retrogression of straight sandy beaches in the Shandong peninsula and its results[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 1989, 19(1): 90–98.
- [39] 王庆, 杨华, 仲少云, 等. 山东莱州浅滩的沉积动态与地貌演变 [J]. 地理学报, 2003, 58(5): 749–756.
Wang Qing, Yang Hua, Zhong Shaoyun, et al. Sedimentary dynamics and geomorphic evolution of the Laizhou shoal[J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(5): 749–756.
- [40] 常瑞芳, 庄振业, 吴建政. 山东半岛西北海岸的蚀退与防护 [J]. 青岛海洋大学学报, 1993, 23(3): 60–68.
Chang Ruifang, Zhuang Zhenye, Wu Jianzheng. Retrogression and protection of the north-west coast of the Shandong peninsula[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 1993, 23(3): 60–68.
- [41] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志 (第三分册): 山东半岛北部和东部海湾 [M]. 北京: 海洋出版社, 1991.
Editorial Board of China Bay Survey. Survey of China Bays (Vol. 3): Northern and Eastern Gulf of Shandong Peninsula[M]. Beijing: China Ocean Press, 1991.
- [42] 安永宁, 吴建政, 朱龙海, 等. 龙口湾冲淤特性对人工岛群建设的响应 [J]. 海洋地质动态, 2010, 26(10): 24–30.
An Yongning, Wu Jianzheng, Zhu Longhai, et al. Response of erosion-deposition pattern to artificial islands construction in Longkou Bay[J]. Marine Geology Letters, 2010, 26(10): 24–30.
- [43] 任鹏, 孙志高, 王传远, 等. 人工岛建设对龙口湾表层沉积物粒度及黏土矿物组成特征的影响 [J]. 海洋科学进展, 2016, 34(4): 578–587.
Ren Peng, Sun Zhigao, Wang Chuanyuan, et al. Impacts of construction of artificial islands on the flow-sediment regulation scheme on grain and clay compositions in the Longkou Bay[J]. Advances in Marine Science, 2016, 34(4): 578–587.
- [44] 刘波, 胡日军, 李毅, 等. 夏季潮流作用下龙口湾海域悬浮泥沙时空变化特征及其输运机制 [J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(3): 20–30.
Liu Bo, Hu Rijun, Li Yi, et al. Spatio-temporal variation characteristics and transport mechanism of suspended sediments in Longkou Bay under the influence of summer tidal current[J]. Marine Geology Frontiers, 2020, 36(3): 20–30.
- [45] 费成鹏, 胡日军, 雒敏义, 等. 龙口湾水动力特征及其对人工岛群建设的响应 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(1): 81–95.
Fei Chengpeng, Hu Rijun, Luo Minyi, et al. Hydrodynamic characteristics of Longkou Bay and its response to artificial island groups[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2022, 42(1): 81–95.
- [46] 王超, 姜胜辉, 王世臣, 等. 山东裕龙岛跨河道工程对沉积动力环境影响研究 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2024, 44(1): 191–202.
Wang Chao, Jiang Shenghui, Wang Shichen, et al. Study on the impact of cross-river engineering on sedimentary dynamic environment in Yulong Island, Shandong[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2024, 44(1): 191–202.
- [47] Boak E H, Turner I L. Shoreline definition and detection: a review[J]. Journal of Coastal Research, 2005, 21(4): 688–703.
- [48] Matsumoto K, Takanezawa T, Ooe M. Ocean tide models developed by assimilating TOPEX/POSEIDON altimeter data into hydrodynamical model: a global model and a regional model around Japan[J]. Journal of oceanography, 2000, 56(5): 567–581.

A study on the shoreline change of the Jiehe Beach in the northeastern Laizhou Bay over the past 40 years based on a large number of satellite images

Yang Chao¹, Zhu Longhai^{1,2}, Zhang Xiaodong^{1,2}

(1. College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Key Lab of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, Ministry of Education, Qingdao 266100, China)

Abstract: In recent decades, the beaches on both sides of the Jiehe River (hereinafter referred to as Jiehe Beach) in the northeastern part of Laizhou Bay have suffered severe erosion due to reduced riverine sediment input to the sea. Additionally, the construction of coastal engineering projects such as Yulong Island (a large artificial offshore island) has made the evolution of the Jiehe Beach shoreline exceptionally complex. This paper utilizes 1 186 satellite

images from 1984 to 2024, employing a transect-focused method and sub-pixel shoreline recognition technology to study the evolution of the Jiehe Beach shoreline and assess the impacts of river sediment discharge and coastal engineering. The results show that the early evolution (1984–2004) of Jiehe Beach was primarily controlled by the closure and opening of the Jiehe River estuary, the alongshore movement of sand spits, and the onshore movement of sandbars, with overall erosion occurring. The later evolution (2004–2024) of Jiehe Beach was mainly influenced by the construction of coastal engineering projects such as Yulong Island, with overall accretion occurring. In today's era of intensifying coastal development, the rational layout of coastal engineering is expected to mitigate beach erosion.

Key words: remote sensing; Shandong Peninsula; shoreline; estuary closure; artificial offshore island