

# 山东青岛灵山湾南部海滩的时空演变及其影响因素<sup>\*</sup>

吴 闯<sup>1,2</sup> 张晓东<sup>1,2</sup> 许淑梅<sup>1,2</sup> 胡日军<sup>1,2</sup> 姜胜辉<sup>1,2</sup> 杨作升<sup>1,2</sup>

1 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 中国海洋大学, 山东青岛 266100

2 中国海洋大学海洋地球科学学院, 山东青岛 266100

**摘 要** 全面准确评估海滩的时空演变, 是海滩侵蚀防护的前提; 基于卫星图像资源全面准确评估海滩的时空演变, 对于缺乏长期连续实测数据的海滩的侵蚀防护具有重要意义。本研究基于谷歌地球引擎合成并下载灵南海滩(灵山湾南部海滩) 1984—2021 年的 880 幅卫星图像, 聚焦海滩剖面提取干湿线和水边线在剖面上的位置; 结合模拟潮位分析海滩剖面形态, 计算海滩坡度和平均高、低潮线等, 采用多指标研究灵南海滩的时空演变; 结合历史资料分析影响灵南海滩演变的主要因素, 并利用海滩实测数据评估利用卫星图像提取的海滩岸线的误差。结果表明, 大量卫星图像的应用提高了研究结果的时间分辨率、精度和可靠性。在 1984—2021 年间, 灵南海滩部分岸段发生了阶段性快速侵蚀, 侵蚀速率为 5.2~60 m/a, 总侵蚀量达 30~78 m, 持续时间为 0.5~11 年, 该快速侵蚀主要是挖沙、养殖场改建和废弃等人为因素造成的, 风暴潮起次要的辅助作用。除上述快速侵蚀时段外, 灵南海滩普遍发生慢速侵蚀, 侵蚀速率一般小于 2 m/a, 这是相对海平面上升和河流入海泥沙锐减等的结果。

**关键词** 海滩演变 卫星图像 海滩剖面 水边线 干湿线

**第一作者简介** 吴闯, 男, 1997 年生, 中国海洋大学海洋地球科学学院硕士生, 从事海岸演变研究。

E-mail: 15517813797@163.com。

**通讯作者简介** 张晓东, 男, 1971 年生, 中国海洋大学海洋地球科学学院副教授, 硕士生导师, 主要从事河口海岸演变和海洋沉积物输运研究。E-mail: zxd@ouc.edu.cn。

中图分类号: P737.13 文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



## Spatial and temporal evolution of Lingnan Beach in Qingdao of Shandong Province and its influencing factors

Wu Chuang<sup>1,2</sup> Zhang Xiao-Dong<sup>1,2</sup> Xu Shu-Mei<sup>1,2</sup> Hu Ri-Jun<sup>1,2</sup> Jiang Sheng-Hui<sup>1,2</sup> Yang Zuo-Sheng<sup>1,2</sup>

1 Key Lab of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, MOE, Ocean University of China, Shandong Qingdao 266100, China

2 College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Shandong Qingdao 266100, China

**Abstract** Comprehensively and accurately assessing the spatial and temporal evolution of beaches is the premise of beach erosion protection. Comprehensively and accurately assessing the spatial and temporal evolution of beaches based on satellite imagery is of great significance to the erosion protection of beaches which lack long-term continuous measured data. In this paper, 880 satellite images of Lingnan Beach from 1984 to 2021 were synthesized and downloaded from Google Earth Engine; the dry/wet line and waterline

<sup>\*</sup> 山东省自然科学基金项目(编号: ZR2019MD037) 和国家自然科学基金项目(编号: 41776059) 联合资助。[Co-funded by the Shandong Provincial Natural Science Foundation, China (No. ZR2019MD037) and the National Natural Science Foundation of China (No. 41776059)]

收稿日期: 2021-07-06 改回日期: 2021-08-16

positions on transects were extracted using a method focusing on beach transects. Combined with simulated tidal heights, the beach profile morphology was analyzed. The beach slope, mean high and low tide lines were calculated, and the spatial and temporal evolution of Lingnan Beach was studied by using above multiple indicators. Combined with historical data, the main factors affecting the evolution of Lingnan Beach were analyzed, and the errors of the satellite-derived beach shorelines were evaluated using the measured data of the beach. The results show that the application of a large number of satellite images improves the temporal resolution, accuracy and reliability of the results. In 1984–2021, part of Lingnan Beach have experienced periodic rapid erosion with a rate of 5.2~60 m/a and a total amount of 30~78 m, lasting for about 0.5~11 years. The rapid erosion was mainly caused by human factors such as dredging sand, reconstruction and abandonment of aquaculture farms, while storm surges played a secondary role. Apart from rapid erosion periods, there was widespread slow erosion at Lingnan Beach, and the erosion rate was mostly less than 2 m/a, resulting from the relative sea level rise and the significant reduction of river discharged sediments into the sea.

**Key words** beach evolution, satellite image, beach profile, waterline, dry/wet line

**About the first author** Wu Chuang, born in 1997, is a master degree candidate of the College of Marine Geosciences, Ocean University of China. He is mainly engaged in coastal evolution. E-mail: 15517813797@163.com.

**About the corresponding author** Zhang Xiao-Dong, born in 1971, is an associate professor of the College of Marine Geosciences, Ocean University of China. He is mainly engaged in estuarine and coastal evolution, and marine sediment transport. E-mail: zxd@ouc.edu.cn.

## 1 概述

海滩是陆地和海洋之间的过渡地带,具有重要的社会、经济和生态价值(李广雪等, 2013; Ranasinghe, 2016; Voudoukas *et al.*, 2020)。海滩不断调整其位置和形态以适应变化的天气、气候、海洋动力、海平面、陆源输入、地壳升降和人类活动等(Bruun, 1988; 陈子燊, 2000; 蔡锋等, 2005; Jackson and Nordstrom, 2020)。近几十年来,在相对海平面持续快速上升以及河流入海泥沙锐减背景下,全球海滩普遍发生侵蚀(Luijendijk *et al.*, 2018; Voudoukas *et al.*, 2020); 在中国,高强度的沿海开发导致海滩侵蚀问题更加突出(蔡锋等, 2008; 陈子燊等, 2010; 侯西勇等, 2016; Zhang *et al.*, 2021)。

全面准确评估海滩的时空演变,是海滩侵蚀防护的前提。海滩实地测量数据可涵盖整个海滩,数据精度也高,是研究海滩时空演变的基本手段;但实测海滩费时费力,长期、连续的实测数据仅局限在为数不多的几个海滩(Turner *et al.*, 2016; 黄祖明等, 2021)。卫星图像时空范围广且有大量免费资源。使用卫星图像评估海滩的时空演变,对于缺

乏长期连续实测数据的海滩的侵蚀防护具有重要意义(Zhang *et al.*, 2021)。

已有基于卫星图像的研究普遍选用几幅至几十幅卫星图像,先在图像上识别海滩岸线,然后使用DSAS软件(Thieler *et al.*, 2009)或其他软件获取海滩岸线在研究剖面上的位置变化,岸线提取过程相对繁琐以致于采用的卫星图像数量有限。使用卫星图像研究海滩演变,研究结果的精度除受制于卫星图像的分辨率外,还受海滩剖面形态和历史水位等诸多因素的制约,使用数量有限的卫星图像研究宽度和变化速率均相对较小的海滩的时空演变在准确性方面存在不足(Pardo-Pascual *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2021)。

Zhang等(2018, 2019, 2020)和张晓东等(2021)采用聚焦剖面方法直接提取海岸线在研究剖面上的位置,并开发了聚焦剖面的计算机辅助海岸线位置识别软件(CASPRS)。聚焦剖面避免了在卫星图像上解译和校正所有海岸线,有利于对大量卫星图像的处理;计算机辅助识别极大地放宽了卫星图像的筛选标准并确保了识别结果的正确性,研究结果的时间分辨率、精度和可靠性大幅提高

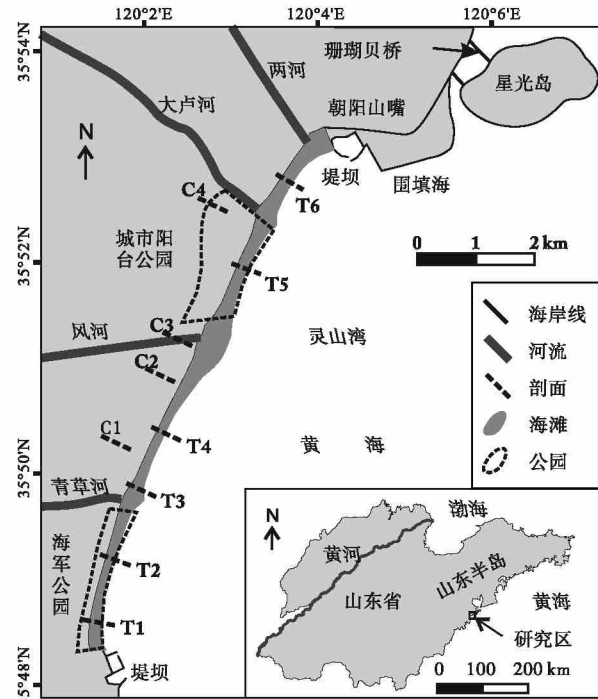
(张晓东等, 2021)。Zhang 等 (2021) 进一步使用亚像素海岸线识别技术 (Pardo-Pascual *et al.*, 2012, 2018; Vos *et al.*, 2019) 改进了 CASPRS 软件, 并基于 880 幅 Landsat 图像综合使用多种海滩岸线指标研究了海阳海滩的时空演变, 研究结果揭示了河流输沙减少、岸上工程和离岸工程等对海滩演变的影响和机制。

本研究综合使用 692 幅 Landsat 和 188 幅 Sentinel 图像, 共 880 幅卫星图像, 研究青岛灵山湾南部海滩 (简称“灵南海滩”) 在 1984—2021 年的演变, 基于海滩实测结果评估利用卫星图像得出的海滩岸线的误差, 目的在于深化和推进聚焦剖面、使用海量卫星图像评估海滩时空演变的研究, 认识灵南海滩对自然变化和人类活动的响应。

## 2 研究区概况

灵山湾位于山东半岛东南沿岸、青岛市黄岛区境内。灵山湾沿岸发育多级地貌, 高程 50 m 以上为低山丘陵, 随高程降低依次发育剥蚀面、基座阶地、冲积—洪积平原、海积平原、潮间浅滩和浪蚀平台 (崔承琦和李家丰, 1987)。研究海滩位于灵山湾南部。灵南海滩长约 10 km, 向陆微凹, 两侧有岬角保护 (图 1)。滩面沉积物为细砂和中砂 (平均粒径  $1.2 \sim 2.6 \Phi$ ), 分选好至较好 (分选系数  $0.38 \sim 0.83$ ) (徐方建等, 2014), 是青岛市质量较好的海滩 (王永红等, 2017)。根据海滩地貌特征, 崔承琦和李家丰 (1987) 认为灵南海滩的泥沙存在向南和向北 2 个输运方向, 优势方向为自北向南。徐方建等 (2014) 和赵永芳等 (2016) 基于海滩沉积物粒度的研究结果佐证了上述观点。

风河又名王戈庄河, 是本区最大的入海河流, 长 35 km, 流域面积  $303 \text{ km}^2$ , 1976—1982 年的年均输沙量为  $9 \times 10^4 \text{ t}$ ; 本区其他河流还有两河、大卢河 (又名隐珠河) 和青草河等 (崔承琦和李家丰, 1987)。在早期 (1980s 前), 大量河流入海泥沙的沿岸输运导致灵南海滩向海淤进, 淤进速率可达  $10 \sim 15 \text{ m/a}$  以上 (崔承琦和李家丰, 1987)。但近几十年来, 由于大量水坝的建设, 山东半岛河流入海泥沙几近断绝, 加之海滩采沙和相对海平面上升的影响, 山东半岛滨海沙滩普遍侵蚀 (庄振业等, 1989)。由于建坝, 包括修建于 1957—1967 年的铁山大坝以及后期陆续在河道上修建的众多拦河



底图描绘自 2021/3/12 的 Sentinel 图像, 潮位相对于平均海平面为  $-2.03 \text{ m}$ , 朝阳山嘴的形态描绘自早期的 Landsat 图像

图 1 山东青岛灵南海滩及研究剖面位置

Fig. 1 Location of Lingnan Beach in Qingdao and study transects in Shandong Province

坝, 本区最大河流——风河近年来的入海泥沙量基本为零, 风河河口段反而因为海相来沙发生淤积 (匡翠萍等, 2019)。杨鸣等 (2005) 的研究结果表明, 灵南海滩在 2000 年前后的平均侵蚀速率约为  $7 \text{ m/a}$ 。

本区潮汐属正规半日潮, 平均高、低潮位分别为  $1.38$ 、 $-1.40 \text{ m}$ 。近岸潮流为顺岸往复流, 涨潮流向 SW、落潮流向 NE。本区常浪向为 S 向, 频率为 48%; 强浪向为 SE 向, 最大波高  $7.6 \text{ m}$ 。9216 号台风 (Polly) 导致青岛沿岸在 1992/8/31—9/1 日出现风暴潮, 致使胶南 (灵南海滩当时属胶南) 部分岸线后退  $12 \sim 14 \text{ m}$  (王文海等, 1994; 张晓慧等, 2006)。

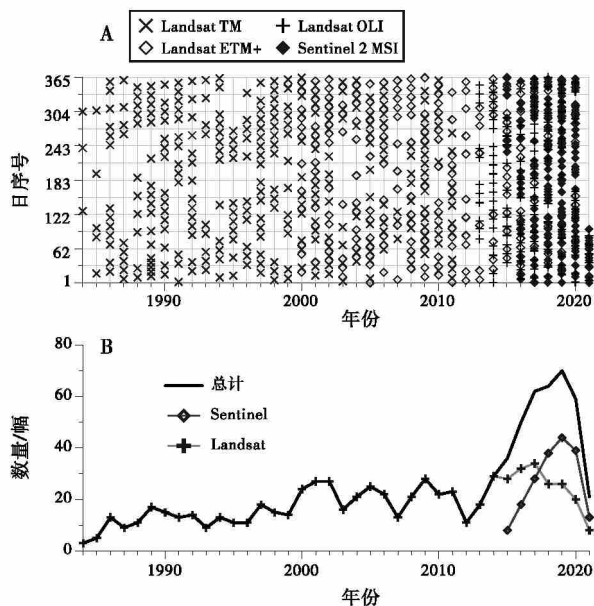
灵南海滩北邻 1984 年成立的国家级青岛经济技术开发区。在 2014 年, 经国务院批复, 青岛经济技术开发区的范围扩大至黄岛区全境, 灵南海滩目前在开发区境内。近 10 年来, 灵南海滩周边发展迅速。城市阳台和海军公园建于 2012 年, 海滩北侧和南侧的堤坝分别建于 2013 和 2016 年, 海滩北侧岬角——朝阳山嘴周边海域在 2014 年被圈围, 海滩北

侧的大型离岸人工岛——星光岛建于 2014 年。

### 3 研究资料与方法

#### 3.1 卫星图像来源和预处理

本研究使用谷歌地球引擎 (GoogleEarth-Engine, <https://earthengine.google.com/>) 云平台下载灵南海滩 1984—2021 年云量小于 80% 的所有 Landsat 和 Sentinel 图像。人工删除 50% 海滩岸线不可见的图像, 剩余 880 幅图像 (图 2)。Landsat 和 Sentinel 图像的分辨率分别为 30 m 和 10 m。为方便后续处理, Landsat 图像的分辨率采用双三次插值方法提升至 10 m。卫星图像利用近红外、红和绿波段合成, 合成图像根据每个波段数值的频率分布进行了增强。在合成图像上, 植被为红色, 湿沙滩为褐色, 水体为蓝色, 干沙滩、浪花和云为灰白色 (图 3)。



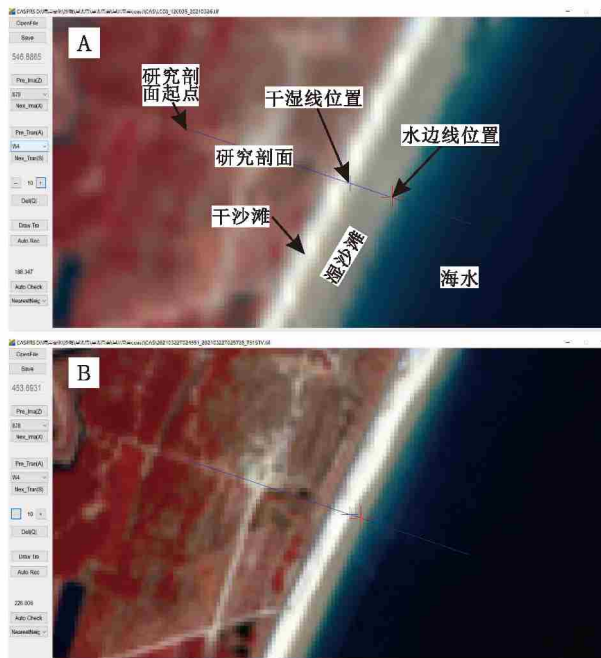
A—卫星图像的时间和类型; B—卫星图像每年的数量

图 2 山东青岛灵南海滩 1984—2021 年的 Landsat 和 Sentinel 图像信息

Fig. 2 Information of the Landsat and Sentinel images of Lingnan Beach in Qingdao of Shandong Province from 1984 to 2021

#### 3.2 水边线和干湿线位置的提取

水边线是海滩和海水之间的瞬时分界线, 干湿线则是上次高潮时海水在海滩上留下的痕迹线 (Boak and Turner, 2006; Pagán *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2021)。本研究设置 6 条剖面 T1~T6 (图 1)



A—2021/3/26 日的 Landsat 图像; B—2021/3/22 日的 Sentinel 图像

图 3 计算机辅助海岸线位置识别软件 (CASPRS) 界面以及干湿线和水边线在山东青岛灵南海滩剖面上的位置

Fig. 3 Operation interface of computer-aided shoreline position recognition software (CASPRS) and positions of dry/wet line and waterline on study transect in Lingnan Beach in Qingdao of Shandong Province

并使用 CASPRS 软件提取水边线和干湿线在剖面上的位置 (图 3)。CASPRS 软件以亚像素的分辨率通过自动和交互 2 种方式识别海滩岸线在研究剖面上的位置, 自动识别的分辨率为 1 m, 交互识别的分辨率取决于图像的放大倍数。CASPRS 软件可对图像进行 1~30 倍的缩放, 在放大倍数为 10 时, 交互识别的分辨率为 1 m。先用该软件自动提取水边线和干湿线在研究剖面上的位置, 然后逐一检查和更正。

#### 3.3 海滩剖面形态反演和坡度计算

水边线在海滩剖面上的位置受瞬时潮位控制。当潮位较高时, 海滩出露较少, 水边线位置靠近剖面起点, 潮位较低时相反。干湿线在剖面上的位置主要受历史高潮水位的影响, 变化规律与水边线一致。本研究采用潮汐模拟模型 NAO.99b (Matsumoto *et al.*, 2000) 计算本区的历史潮位, 计算结果为逐时潮位。Zhang 等 (2018) 研究表明, NAO.99b 模拟结果不包含潮位季节变化信息, 因此, 参照 Zhang 等 (2018) 的方法, 本研究采用青岛港潮高

的季节改正值(国家信息中心, 2019)对模拟潮位进行校正。卫星图像拍摄时(精确到秒)的瞬时潮位根据逐时模拟潮位采用线性插值方法得出, 卫星图像拍摄前的大潮高潮位采用模拟潮位在卫星图像拍摄前 25 h 内的最大值。本研究还收集了 2011/10/1—31 日丁家咀码头(灵南海滩东北 6 km)的实测潮位, 并对模拟潮位进行了误差评估。

本研究参照 Zhang 等(2021), 根据干湿线与上次高潮位、水边线与瞬时潮位之间的关系反演海滩剖面形态, 根据剖面形态对海滩进行分段, 然后利用分组回归分析方法计算海滩坡度。研究者还使用实时动态测量设备(RTK)在 2021/4/27—28 日大潮低潮前后 2 h 内测量了 T1~T6 剖面的高程, RTK 水平和垂直测量误差均小于 0.03 m。受测量时机的影响, 6 条剖面的最低测量位置的潮位为 -2.15~-1.63 m, 最高测量位置为岸上工程坡脚处。本研究利用 RTK 实测结果计算了海滩坡度, 并与卫星反演结果进行对比。

### 3.4 平均高潮线和低潮线的计算方法

虽然干湿线位置受上次高潮位影响, 但其变化幅度相对较小, 再加上本研究采用的卫星图像较多, 因此, 本研究直接使用干湿线指标指代海滩的高潮线, 并用其平均值或拟合值指示平均高潮线。受潮位波动的影响, 水边线位置的变幅较大, 本研究使用分段潮位校正方法计算低潮线的位置, 进而使用其平均值或拟合值指示平均低潮线(Zhang *et al.*, 2021)。参照 Zhang 等(2021)并根据灵南海滩的剖面形态, 本研究选用历史潮位在 -1.4~0.5 m 的水边线位置, 根据公式(1)计算低潮线的位置:

$$P_{\text{低潮线}} = P_{\text{水边线}} - (\text{平均低潮位} - \text{瞬时潮位}) \div \tan(\text{坡度}) \quad (1)$$

其中  $P_{\text{低潮线}}$  和  $P_{\text{水边线}}$  分别为低潮线和水边线在剖面上的位置, 本区的平均低潮位是 -1.4 m, 坡度的单位是度。

### 3.5 误差评估方法

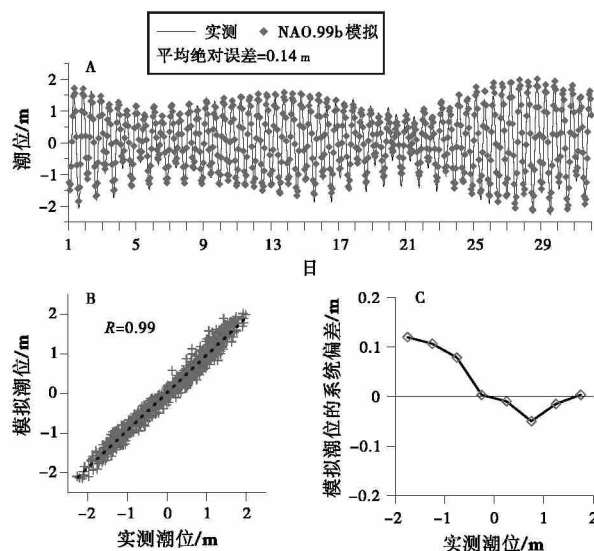
在海滩岸线识别过程中, 发现 Sentinel 图像存在明显的系统偏移。为评估该系统偏移并消除其影响, 本研究选择平行于海滩岸线的 4 个线状地物(道路中心和水塘边缘), 平行于研究剖面设置了 4 条校准剖面 C1~C4, 利用 CASPRS 软件识别 2015

年后上述 4 个线状地物在校准剖面上的位置, 进而比较和校准 Landsat 和 Sentinel 图像的系统偏移。本研究利用 RTK 实测结果评估根据卫星图像得出的高、低潮线的系统误差, 与 RTK 实测值比较的是上述 2 个指标最近 1 年(2020/4/29—2021/4/28)的平均值。最近 1 年高、低潮线的标准偏差被用来评估其随机误差。

## 4 结果

### 4.1 卫星图像中的历史潮位

本区的模拟和实测潮位基本一致, 平均绝对误差为 0.14 m, 相关系数为 0.99, 但在实测潮位低于 -0.5 m 时模拟潮位偏高约 0.1 m(图 4)。利用模拟潮位得出的灵南海滩卫星图像拍摄前的大潮高潮位在 0.51~2.35 m, 其均值与本区平均高潮位一致; 卫星图像拍摄时的瞬时潮位在 -2.47~1.80 m, 均值(-0.36 m)显著低于平均海平面(图 5-A)。

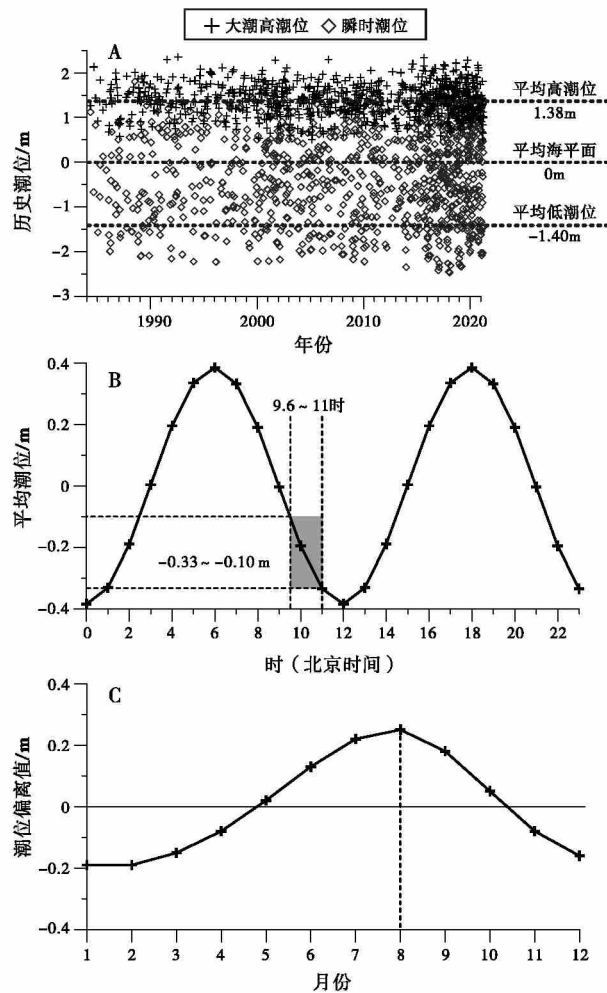


A—2011/10/1—31 日青岛丁家咀码头(35°55'N, 120°8'E)的实测潮位和 NAO.99b(Matsumoto *et al.*, 2000)模拟潮位; B—上述实测潮位和模拟潮位的交汇图; C—模拟潮位的系统偏差

图 4 山东青岛灵南海滩潮位数据分析

Fig. 4 Data analysis of tidal height of Lingnan Beach in Qingdao of Shandong Province

根据 1984—2021 年模拟潮位统计, 灵南海滩日内逐时平均潮位在 6 和 18 时最大、0 和 12 时最小, 潮位差 0.77 m(图 5-B)。灵南海滩 Landsat 和 Sentinel 图像的拍摄时间为北京时间上午 9 时 36 分至 11 时, 此时的日内逐时平均潮位偏低, 为



A—卫星图像拍摄前的大潮高潮位和拍摄时的瞬时潮位; B—1984—2021 年日内逐时平均潮位; C—青岛港潮位的季节性波动

图5 山东青岛灵南海滩历史潮位及其季节和日内波动

Fig. 5 Historical water levels and the seasonal and daily tidal height deviations of Lingnan Beach in Qingdao of Shandong Province

-0.33~-0.10 m (图 5-B)。由于 Landsat 和 Sentinel 卫星在同一地点的拍摄时间相对固定, 叠加本区潮位日内的周期变化, 造成本区卫星图像拍摄时的瞬时潮位出现系统性偏差, 类似现象在山东半岛的海阳海滩也存在 (Zhang *et al.*, 2021)。青岛港的潮位还存在季节性变化, 根据国家信息中心 (2019) 发布的潮汐表可知, 青岛港的平均潮位在 1—2 月份最低, 为 -0.19 m, 在 8 月份最高, 为 0.25 m (图 5-C)。如前所述, 本研究在计算模拟潮位时考虑了该因素的影响。

#### 4.2 干湿线和水边线的位置

图 6 为干湿线和水边线在灵南海滩 T1~T6 剖

面上的位置。水边线位置的波动范围较大, 在 150~300 m, 干湿线位置的波动范围较小, 不到 30 m, 干湿线位于水边线靠岸一侧。在时间变化方面, 干湿线位置呈阶段性向岸蚀退的趋势, 靠岸侧水边线位置的变化与干湿线位置的变化一致, 但靠海侧水边线位置的变化趋势不明显。在所有 880 幅卫星图像上, 水边线和干湿线位置的平均提取率分别为 91% 和 71%。

#### 4.3 海滩剖面形态和坡度

根据干湿线和水边线位置的时间变化 (图 6), 选择变化较小的时段, 结合模拟潮位, 本研究分别绘制了 T1~T6 剖面早期 (T1~T5 剖面为 1984—1995 年, T6 剖面为 1984—1991 年) 和晚期 (2010—2021 年) 的形态, 并选取晚期的剖面形态与 RTK 实测结果进行了对比 (图 7)。

灵南海滩早期的剖面形态呈两段式, 分界线的潮位在 T1~T4 和 T5~T6 剖面分别为 0.5 m 和 1 m。上段较陡, 坡度在  $3.4^{\circ} \sim 17^{\circ}$ ; 下段较缓, 坡度在  $0.8^{\circ} \sim 1.1^{\circ}$ 。在晚期, 原上下段分界线的潮位未变, 上段坡度也基本不变; 下段的形态在中部 T3~T4 剖面变化较小, 但在南北两侧的 T1~T2 和 T5~T6 剖面却发生了明显分化。T1~T2 和 T5~T6 剖面下段分别在 -1.7 m 和 -1.5 m 潮位处发生转折, 本研究进一步将其分为中段和下段。在晚期, T1~T2 和 T5~T6 剖面中段侵蚀显著, 但坡度仅在 T5 剖面变化较大; 下段的侵蚀上大下小, 坡度明显变缓至  $0.3^{\circ} \sim 0.4^{\circ}$ 。

#### 4.4 平均高潮线和低潮线的演变

灵南海滩平均高、低潮线在 1984—2021 年发生了阶段性、基本同步的变化 (图 8)。T1、T2 和 T6 剖面的平均高潮线分别在 1997—2006、2004 和 1992—1997 年发生快速侵蚀, 侵蚀速率为 7.2 m/a、约 60 m/a 和 11.9 m/a, 总侵蚀量为 66 m、30 m 和 71 m, 持续时间分别为 9.2 年、0.5 年和 6.0 年; 平均低潮线快速侵蚀的起始时间与平均高潮线一致, 但侵蚀速率和总侵蚀量略小, 侵蚀结束时间滞后 1~3 年。在其他时期, 平均高潮线、低潮线的侵蚀速率分别在 -0.3~1.3 m/a 和 -0.7~2.0 m/a, 平均低潮线侵蚀速率的变幅较大。

#### 4.5 误差评估结果

上述 4 个用于校准的线状地物在 Landsat 和



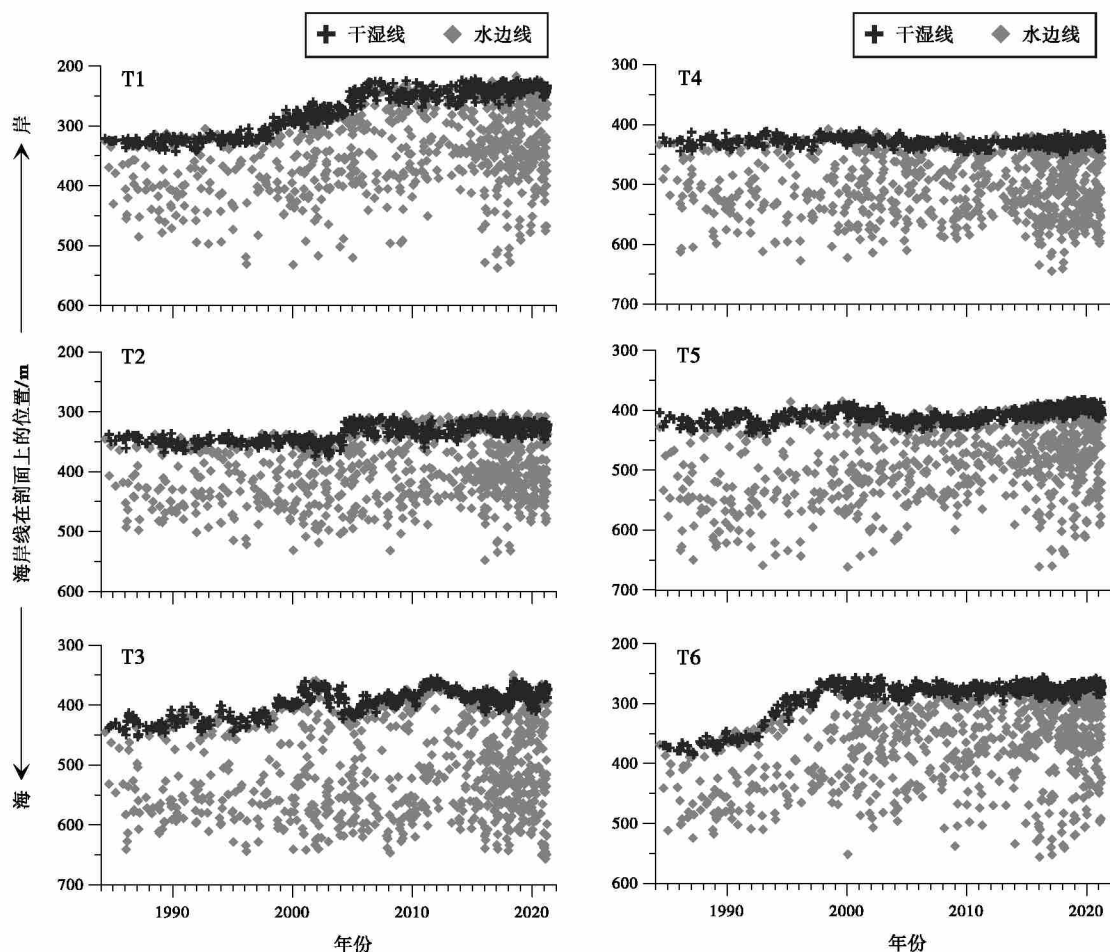


图 6 山东青岛灵南海滩 T1~T6 剖面干湿线和水边线位置

Fig. 6 Dry/wet line and waterline positions on transects T1~T6 of Lingnan Beach in Qingdao of Shandong Province

Sentinel 图像上的平均位置之差为 0.6~2.3 m, 说明从谷歌地球引擎下载的 Landsat 和 Sentinel 图像的地理位置基本一致、2 个图像库可对比。4 个线状地物在 Sentinel 图像上的位置存在较强的正相关关系, 相关系数为 0.64~0.75, 而其在 Landsat 图像上的位置的相关性普遍较差, 说明 Sentinel 图像存在系统性位置偏差而 Landsat 图像的系统性位置偏差较小。本研究采用上述 4 个线状地物相对其平均位置的偏离值的均值作为校正量, 对干湿线和水边线在 Sentinel 图像上的位置进行了校正。4.2 节至 4.4 节中的数据均为校正后的结果。

平均高、低潮线在 Sentinel 和 Landsat 图像上的系统和随机误差见表 1。总体上, 平均高潮线的误差较小, 平均低潮线的误差较大。平均高、低潮线在 Sentinel 图像上的误差普遍小于其在 Landsat 图像上的误差, 但平均低潮线的系统误差例外。

## 5 讨论

### 5.1 海滩岸线的位置误差及其影响因素

灵南海滩平均高潮线的系统误差为 3.7~8.2 m (表 1), 与 Pardo-Pascual 等 (2018) 得出的 3.1~5.5 m 基本相当; 平均高潮线的随机误差为 6.0~7.5 m (表 1), 与 Pardo-Pascual 等 (2018) 得出的 4.9~6.5 m 和 Zhang 等 (2021) 得出的 7.8 m 也基本相当。然而 Vos 等 (2019) 得出的海滩岸线的系统误差仅为 0.5~2.0 m, 但其随机误差较大, 为 7.3~12.7 m。Vos 等 (2019) 采用神经网络识别海滩岸线, 在原理上, 使用无偏数据集训练神经网络可以使系统误差为 0。但是, 由于潮位误差和海水的透光性等诸多因素的影响, 利用海滩剖面形态和瞬时潮位得出的水边线与卫星图像上的水边线并不是同一条线, 而且前者在卫星图像上的解译特征

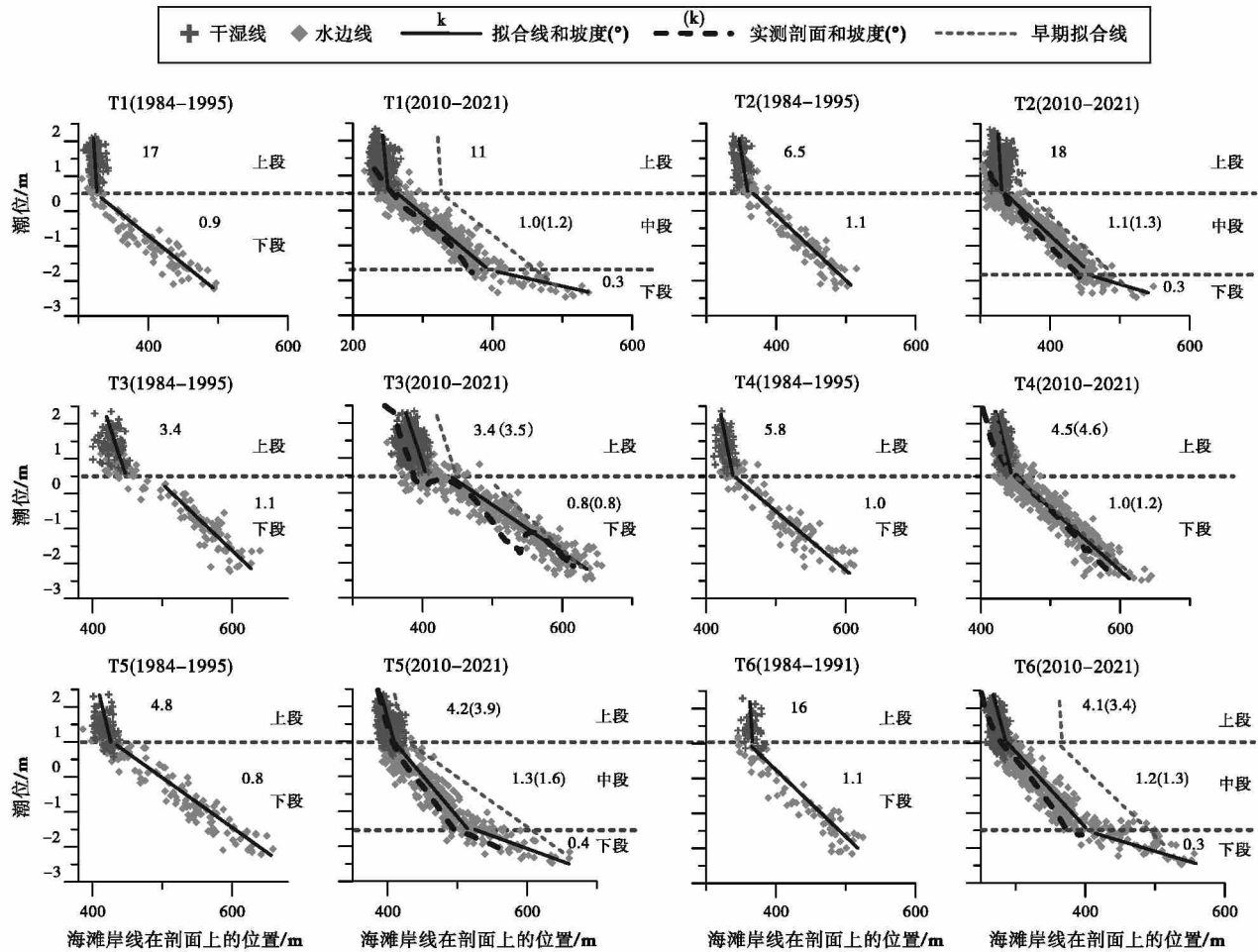


图 7 山东青岛灵南海滩 T1~T6 剖面形态和坡度

Fig. 7 Shape and slope of transects T1~T6 of Lingnan Beach in Qingdao of Shandong Province

相对不够明确,这可能是 Vos 等 (2019) 识别结果的随机误差偏大的原因。

灵南海滩平均低潮线的随机误差为 14.8 ~ 19.8 m (表 1), 显著高于 Pardo-Pascual 等 (2018) 和 Vos 等 (2019) 的上述结果,这主要是由于灵南海滩在 -1.4 ~ 0.5 m 区间 (计算平均低潮线的潮位区间) 的坡度较小所致。灵南海滩在 -1.4 ~ 0.5 m 区间的坡度为 0.8° ~ 1.3° (图 7), 相当于 1:72 ~ 1:44, 显著小于 Pardo-Pascual 等 (2018) 和 Vos 等 (2019) 所研究海滩 1:23 ~ 1:5 的坡度。海滩坡度越小,由于潮位误差和海滩剖面的不规则形态引起的海滩岸线误差越大 (Zhang *et al.*, 2021)。根据 Zhang 等 (2021) 在山东半岛海阳海滩得出的计算公式以及 T1~T6 剖面在 -1.4 ~ 0.5 m 区间的坡度,灵南海滩随机误差的计算结果为 11.4 ~ 14.1 m, 比本研究结果略小。区别于海阳海滩,灵南海滩的剖

面形态起伏较大,例如在 T3 剖面发育有潮间带沙坝 (图 7), 以致 T3 剖面的平均低潮线波动较大 (图 8), 其随机误差也偏大 (表 1)。

灵南海滩平均低潮线的系统误差为 11.4 ~ 22.7 m (表 1), 相对较大。本研究的模拟潮位在实测潮位低于 -0.5 m 时偏高约 0.1 m, 这会导致通过潮位校正得出的灵南海滩平均低潮线偏大 4 ~ 7 m。由于海水的透光性,卫星反演的低潮线相对实测的平均低潮线更靠海,进一步加大了平均低潮线的系统误差。另外,本研究依据单次海滩测量进行误差评估,评估结果还受海滩剖面季节变化的影响。

海滩岸线的系统误差对计算海滩变化速率影响较小 (Luijendijk *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2021), 但对反演剖面形态影响较大,利用卫星反演得出的海滩坡度相对实测结果普遍偏小 (图 7)。上述系统



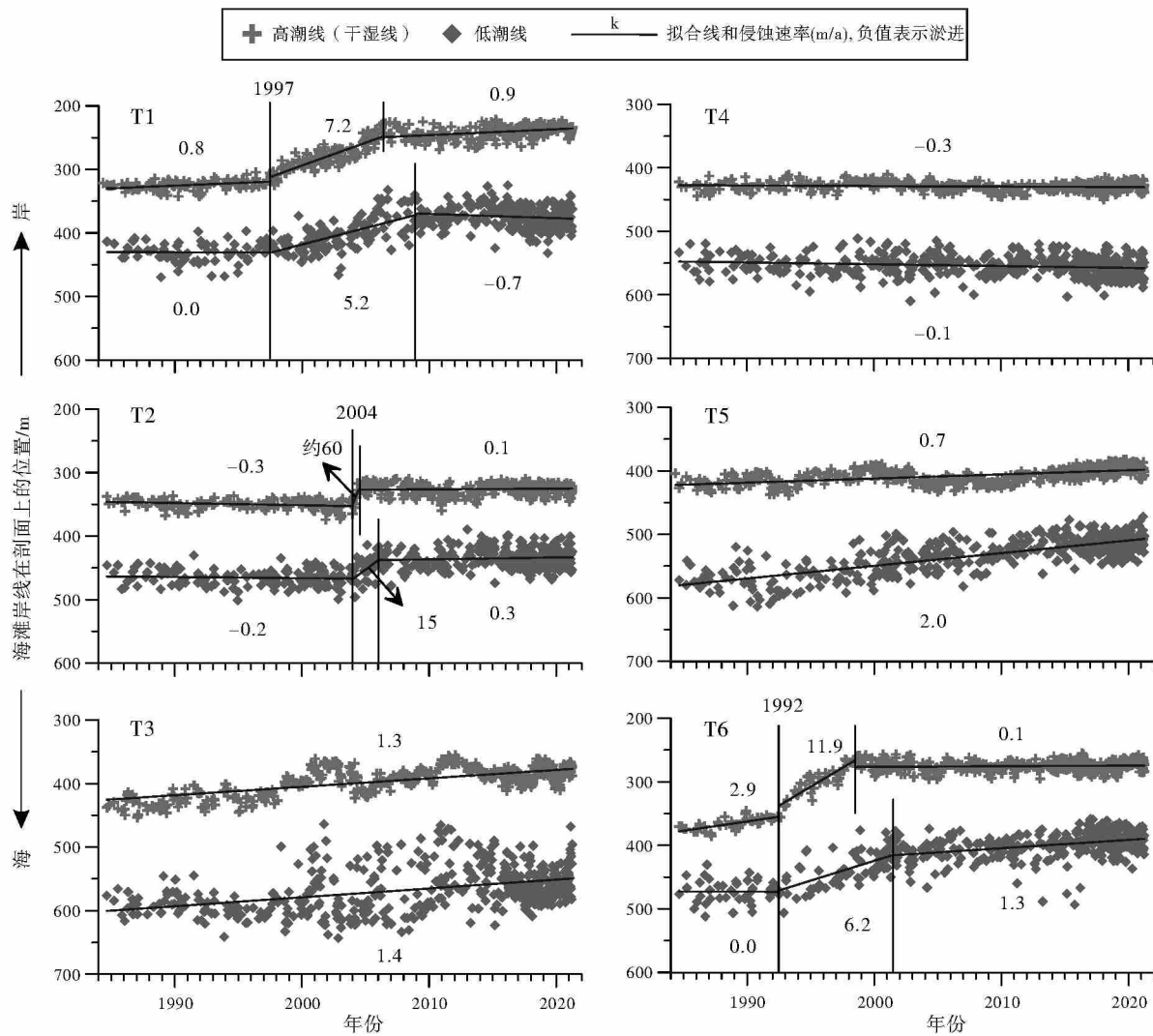


图 8 山东青岛灵南海滩平均高、低潮线在 T1~T6 剖面的演变

Fig. 8 Position changes of mean high- and low-water lines on transects T1~T6 of Lingnan Beach in Qingdao of Shandong Province

表 1 山东青岛灵南海滩平均高、低潮线在 Sentinel 和 Landsat 图像上的系统和随机误差 (m)

Table 1 Systematic and random errors (m) of mean high- and low-water lines on Sentinel and Landsat images of Lingnan Beach in Qingdao of Shandong Province

海滩岸线指标	图像类型	误差类型	剖面编号						平均值
			T1	T2	T3	T4	T5	T6	
平均高潮线	Sentinel	系统	5.0	8.7	7.2	6.5	-4.9	-0.1	3.7
		随机	5.6	4.9	8.1	5.7	6.1	5.8	6.0
	Landsat	系统	7.2	17.6	6.1	14.1	0.9	3.3	8.2
		随机	7.9	4.8	9.8	5.5	9.5	7.4	7.5
平均低潮线	Sentinel	系统	22.5	18.8	27.2	17.8	23.5	26.7	22.7
		随机	14.7	10.6	24.3	11.9	13.4	14.3	14.8
	Landsat	系统	7.9	6.8	15.3	9.3	10.1	19.1	11.4
		随机	17.9	17.9	32.6	18.8	17.7	13.6	19.8

误差仍需通过更多次的海滩剖面重复测量进一步评估,并根据评估结果对卫星反演结果进行校正。海滩岸线的随机误差由于其内在的随机性不能被校正,但可通过大量卫星图像的应用减弱其影响。因此,研究宽度和变化速率均相对较小、研究结果对误差较为敏感的海滩的演变,采用的卫星图像越多越好。

## 5.2 影响灵南海滩演变的因素

如上所述,灵南海滩的 T1、T2 和 T6 剖面在历史上发生了阶段性的快速侵蚀(图 8)。T1 剖面平均高潮线在 1997—2006 年的快速侵蚀与海滩上部挖沙有关。海滩上部挖沙留下的沙坑与海滩有沙埂间隔,在正常海况下,海滩岸线尚能维持,但在风暴潮来临之际,狭窄的沙埂易被摧毁,造成海滩

岸线显著后退(王文海等, 1994)。根据 T2 剖面附近养殖场改建前后的卫星图像可知, T2 剖面平均高潮线在 2004 年的快速后退应与其周边养殖场的改建有关, 改建后养殖场的宽度比原来显著减小。根据 1992—1997 年的卫星图像可知, T6 剖面平均高潮线在 1992—1997 年的快速侵蚀与其周边养殖场靠海侧堤坝的破坏有关: 在 1992/6/30, 养殖场外侧海滩的干滩已经消失, 经过 9216 号台风(1992/8/31—9/1), 在 1992/9/18 养殖场外侧海滩的堤坝出现决口, 决口持续扩大直至 1998 年才恢复。另外, 9216 号台风后的海滩决口并不大, 但一直到 5 年后才恢复说明该养殖场当时已废弃。

沙埂和堤坝损坏后, 平均高潮线随即开始快速侵蚀, 平均低潮线的侵蚀相对滞后。T1、T2 和 T6 剖面下段(−1.7~−1.5 m 以下)的侵蚀相对中段较小(图 7), 这可能与海滩滩面泥沙在冲流带(swash zone)的上冲有关。冲流带位于瞬时水位附近, 是潮汐和波浪等引起的上下冲流联合作用的地带(Masselink and Puleo, 2006; Puleo and Torres-Freyermuth, 2016; 黎树式等, 2017), 其在海滩剖面上的位置目前尚无严格界定。本研究根据本区潮位的频率分布, 选择潮位分布频率大于最大频率 50% 的区间作为冲流带在海滩剖面上的位置(图 9)。根据该方法, 灵南海滩冲流带的下界位于 −1.5 m 左右, 与 T1~T2 和 T5~T6 剖面的侵蚀情况基本一致(图 7)。平均高潮线的快速侵蚀给冲流带的上冲泥沙提供了容纳空间, 进而造成冲流带的侵蚀以及平均低潮线的快速侵蚀。

尽管已有研究揭示了台风对山东半岛海岸有较强的破坏作用(王文海等, 1994; 高伟等, 2020), 而且本研究也显示 9216 号台风导致灵南海滩在 T6

剖面附近溃岸, 但是, 9216 号台风在 T6 剖面处直接产生的海滩侵蚀量相对较小, 在灵南海滩其他剖面处也未造成明显的海滩侵蚀, 且其他时期的风暴潮(张晓慧等, 2006)也未对灵南海滩的侵蚀产生明显影响(图 6, 图 8), 这说明导致灵南海滩快速侵蚀的主要原因是沿岸挖沙、养殖场的废弃, 风暴潮仅起次要的辅助作用。

除在上述 3 个时段发生快速侵蚀外, 灵南海滩普遍发生慢速侵蚀(图 8), 这是相对海平面上升和河流入海泥沙锐减等的必然结果。河口附近的 T3 剖面的平均高、低潮线以及北部的 T5~T6 剖面的平均低潮线侵蚀速率相对较大, 在 1.3~2.0 m/a。T3 剖面位于河口附近, 该处海滩的侵蚀应与河流入海泥沙减少有关。T5~T6 剖面平均低潮线的侵蚀除与周边河流入海泥沙减少有关外, 还与前述的本区泥沙优势输运方向为自北向南有关。截至目前, T5~T6 剖面平均高、低潮线的长期慢速侵蚀趋势未发生明显改变(图 8), 本区北部 2013—2014 年的围填海工程(包括星光岛)对灵南海滩长期演变的影响尚不明确。

## 6 结论和建议

本研究基于 880 幅卫星图像, 利用 CASPRS 软件识别干湿线和水边线在研究剖面上的位置; 结合模拟潮位分析海滩剖面形态并计算海滩坡度, 利用干湿线得出海滩平均高潮线, 通过潮位校正得出平均低潮线, 采用多种指标综合研究灵南海滩在 1984—2021 年的时空演变; 结合历史资料分析影响因素, 还利用海滩实测数据对研究结果进行误差评估。大量卫星图像的应用提高了研究结果的时间分辨率、精度和可靠性。

在灵南海滩, 卫星提取的平均高潮线的系统误差为 3.7~8.2 m, 随机误差为 6.0~7.5 m, 与目前最精确的研究结果相当; 平均低潮线的系统误差为 11.4~22.7 m, 随机误差为 14.8~19.8 m, 相对较大。灵南海滩中下部较缓的剖面形态是其平均低潮线误差较大的主要原因。除海滩坡度外, 海滩剖面不规则的形态、模拟潮位的误差、海水的透光性以及海滩剖面的季节变化等也会影响海滩岸线的误差。

灵南海滩的部分岸段发生了阶段性快速侵蚀。该快速侵蚀发生在研究区北部的 T1、T2 剖面以及

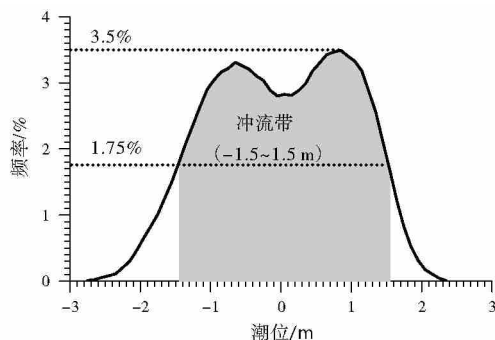


图 9 山东青岛灵南海滩历史潮位的频率分布和冲流带

Fig. 9 The frequency distribution of historical tidal heights and the swash zone of Lingnan Beach in Qingdao of Shandong Province

南部的 T6 剖面, 发生时间分别为 1997—2006 年、2004 年和 1992—1997 年; 平均高潮线的侵蚀速率为 7.2~60 m/a, 总侵蚀量为 30~71 m, 持续时间为 0.5~9.2 年; 平均低潮线的开始侵蚀时间与平均高潮线一致, 总侵蚀量大致相当, 但结束时间滞后 1~3 年, 侵蚀速率稍小。该快速侵蚀主要是海滩挖沙、养殖场改建和废弃等人为因素造成的, 风暴潮起次要的辅助作用。为避免海滩的快速侵蚀, 海滩挖沙应杜绝, 距海滩较近的养殖场“退养还滩”后, 应对养殖场进行回填。在其他时段, 灵南海滩普遍发生缓慢侵蚀, 侵蚀速率一般小于 2 m/a, 这是相对海平面上升和河流入海泥沙锐减等的结果。

致谢 感谢审稿专家提出了宝贵的意见和建议, 感谢中国海洋大学本科研究发展计划 (OUC-SRDP) 的支持, 还感谢檀夏伟、王佳星、张家宝、李胤辉和张亚荣同学对本研究的贡献。与本研究有关的野外调查照片和典型卫星图像请参见 OSID, 这些图片以及 CASPRS 软件也可以通过 <https://github.com/oucxd/CASPRS> 访问和下载。

### 参考文献 (References)

- 蔡锋, 苏贤泽, 曹惠美, 夏东兴. 2005. 华南砂质海滩的动力地貌分析. 海洋学报, 27(2): 106-114. [Cai F, Su X Z, Cao H M, Xia D X. 2005. Analysis on morphodynamics of sandy beaches in South China. Acta Oceanologica Sinica, 27(2): 106-114]
- 蔡锋, 苏贤泽, 刘建辉, 李兵, 雷刚. 2008. 全球气候变化背景下中国海岸侵蚀问题及防范对策. 自然科学进展, 18(10): 1093-1103. [Cai F, Su X Z, Liu J H, Li B, Lei G. 2008. Problems and countermeasures of China's coastal erosion under the background of global climate change. Progress in Natural Science, 18(10): 1093-1103]
- 陈子燊. 2000. 海滩剖面时空变化过程分析. 海洋通报, 19(2): 42-48. [Chen Z S. 2000. Analysis on spatial and temporal process of beach profile variations. Marine Science Bulletin, 19(2): 42-48]
- 陈子燊, 于吉涛, 罗智丰. 2010. 近岸过程与海岸侵蚀机制研究进展. 海洋科学进展, 28(2): 250-256. [Chen Z S, Yu J T, Luo Z F. 2010. Progresses on study of nearshore processes and coastal erosion mechanisms. Advances in Marine Science, 28(2): 250-256]
- 崔承琦, 李家丰. 1987. 灵山湾及其附近沿岸地貌层序与海岸特征. 海洋湖沼通报, (3): 47-51. [Cui C Q, Li J F. 1987. The coastal geomorphological steps and types of Lingshan Bay and its neighbour regions of Shandong Province. Transactions of Oceanology and Limnology, (3): 47-51]
- 高伟, 李萍, 高珊, 田梓文, 李兵, 刘杰, 徐元芹. 2020. 台风“利奇马”对山东省海阳市海滩演化过程的影响. 海洋学报, 42(11): 88-99. [Gao W, Li P, Gao S, Tian Z W, Li B, Liu J, Xu Y Q. 2020. Response process of the Haiyang Beach evolution to Typhoon Lekima in Shandong Province. Acta Oceanologica Sinica, 42(11): 88-99]
- 国家信息中心. 2019. 潮汐表第 1 册: 鸭绿江口至长江口. 北京: 海洋出版社, 534. [National Marine Data and Information Service. 2019. Tide Tables Vol.1: From the Yalu River Mouth to the Changjiang River Mouth. Beijing: China Ocean Press, 534]
- 侯西勇, 毋亭, 侯婉, 陈晴, 王远东, 于良巨. 2016. 20 世纪 40 年代以来中国大陆海岸线变化特征. 中国科学: 地球科学, 46: 1065-1075. doi: 10.1360/N072015-00268. [Hou X Y, Wu T, Hou W, Chen Q, Wang Y D, Yu L J. 2016. Characteristics of coastline changes in mainland China since the early 1940s. Science China Earth Sciences, 59: 1791-1802. doi: 10.1007/s11430-016-5317-5]
- 黄祖明, 戴志军, 黎树式, 黄鹄, 冯炳斌. 2021. 中强潮海滩剖面冲淤过程研究: 以北海银滩为例. 海洋地质与第四纪地质, 41(4): 36-47. [Huang Z M, Dai Z J, Li S S, Huang H, Feng B B. 2021. Erosion and accretion of a meso-macro-tidal beach profile: a case from the Yintan Beach of Beihai. Marine Geology & Quaternary Geology, 41(4): 36-47]
- 匡翠萍, 赵钊, 顾杰, 汤俐. 2019. 狭长小型河口冲淤特征与演变机制. 同济大学学报(自然科学版), 47(10): 1437-1445. [Kuang C P, Zhao F, Gu J, Tang L. 2019. Scouring and silting characteristics and bed evolution mechanism in narrow Small Estuary. Journal of the Tongji University(Natural Science), 47(10): 1437-1445]
- 李广雪, 宫立新, 杨继超, 丁咚, 李兵, 曹立华, 王永红, 刘玲. 2013. 山东滨海沙滩侵蚀状态与保护对策. 海洋地质与第四纪地质, 33(5): 35-46. [Li G X, Gong L X, Yang J C, Ding D, Li B, Cao L H, Wang Y H, Liu L. 2013. Erosion state and protection countermeasures of coastal sand beach in Shandong Province. Marine Geology & Quaternary Geology, 33(5): 35-46]
- 黎树式, 戴志军, 葛振鹏, 庞文鸿, 魏稳, 梅雪霏, 黄鹄. 2017. 强潮海滩响应威马逊台风作用动力沉积过程研究: 以北海银滩为例. 海洋工程, 35(3): 89-98. [Li S S, Dai Z J, Ge Z P, Pang W H, Wei W, Mei X F, Huang H. 2017. Sediment dynamic processes of macro-tidal beach in response to Typhoon Rammasun action: a case study of Yintan, Beihai. The Ocean Engineering, 35(3): 89-98]
- 王文海, 吴桑云, 陈雪英. 1994. 山东省 9216 号强热带气旋风暴期间的海岸侵蚀灾害. 海洋地质与第四纪地质, 14(4): 71-78. [Wang W H, Wu S Y, Chen X Y. 1994. Erosional disasters caused by storm surge during No. 9216 strong tropical cyclone along Shandong coast. Marine Geology & Quaternary Geology, 14(4): 71-78]
- 王永红, 孙静, 褚智慧. 2017. 海滩质量评价体系建立和应用: 以山东半岛南部海滩为例. 海洋通报, 36(3): 260-267. [Wang Y H, Sun J, Chu Z H. 2017. Building and application of quality evaluation system a beach: a case the South Shandong Province. Marine Science Bulletin, 36(3): 260-267]
- 徐方建, 赵永芳, 李传顺, 孙根云, 张康, 田旭, 王心怿. 2014. 青岛市灵山湾海水浴场沉积物分布特征与影响因素. 海洋通报, 33(2): 157-162. [Xu F J, Zhao Y F, Li C S, Sun G Y, Zhang K,

- Tian X, Wang X Y. 2014. Characteristics of sediment distribution and influencing factors at the Lingshanwan bathing beach of Qingdao. *Marine Science Bulletin*, 33(2): 157–162]
- 杨鸣, 夏东兴, 谷东起, 薛佐, 丰爱平. 2005. 全球变化影响下青岛海岸带地理环境的演变. *海洋科学进展*, 23(3): 45–52. [Yang M, Xia D X, Gu D Q, Xue Z, Feng A P. 2005. Geographic environmental evolution in the Qingdao coastal area under the influence of global change. *Advances in Marine Science*, 23(3): 45–52]
- 张晓东, 谢睿, 范代读, 杨作升, 王虹敏, 吴闯, 姚雨涵. 2021. 长江入海泥沙锐减下河口最大无人沙岛的持续淤涨. *中国科学: 地球科学*, 51(11): 1990–2000. doi: 10.1360/SSTe-2020-0298. [Zhang X D, Xie R, Fan D D, Yang Z S, Wang H M, Wu C, Yao Y H. 2021. Sustained growth of the largest uninhabited alluvial island in the Changjiang Estuary under the drastic reduction of river discharged sediment. *Science China Earth Sciences*, 64(10): 1687–1697. <https://doi.org/10.1007/s11430-020-9746-3>]
- 张晓慧, 盛春雁, 邵滋和. 2006. 青岛沿海风暴潮分析. *海洋预报*, 23(S): 42–46. [Zhang X H, Sheng C Y, Shao Z H. 2006. Analysis of storm surge at coastal area of Qingdao. *Marine Forecasts* 23(S): 42–46]
- 赵永芳, 徐方建, 刘清容, 李安春, 王心悻, 吴锦祥, 刘航宇, 陈铭, 李丽君. 2016. 青岛市灵山湾海水浴场表层沉积物粒度冬季变化特征及其原因. *海洋科学*, 40(3): 108–117. [Zhao Y F, Xu F J, Liu Q R, Li A C, Wang X Y, Wu J X, Liu H Y, Chen M, Li L J. 2016. Variation in characteristics of surface sediment particle size and influencing factors in winter at the Lingshanwan Beach, Qingdao. *Marine Sciences* 40(3): 108–117]
- 庄振业, 陈卫民, 许卫东. 1989. 山东半岛若干平直砂岸近期强烈蚀退及其后果. *青岛海洋大学学报*, 19(1): 90–98. [Zhuang Z Y, Chen W M, Xu W D. 1989. Retrogression of straight sandy beaches in the Shandong peninsula and its results. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 19(1): 90–98]
- Boak E H, Turner I L. 2005. Shoreline definition and detection: a review. *Journal of Coastal Research*, 214: 688–703.
- Bruun P. 1988. The Bruun rule of erosion by sea-level rise: a discussion of large-scale two-and three-dimensional usages. *Journal of Coastal Research*, 4: 627–648.
- Jackson N L, Nordstrom K F. 2020. Trends in research on beaches and dunes on sandy shores, 1969–2019. *Geomorphology*, 366: 106737.
- Luijendijk A, Hagenaars G, Ranasinghe R, Baart F, Donchyts G, Aarninkhof S. 2018. The State of the World's Beaches. *Scientific Reports*, 8: 6641.
- Masselink G, Puleo J. 2006. Swash-zone morphodynamics. *Continental Shelf Research* 26(5): 661–680.
- Matsumoto K, Takanezawa T, Ooe M. 2000. Ocean tide model developed by assimilating TOPEX/POSEIDON altimetry data into hydrodynamical model: a global and a regional model around Japan. *Journal of Oceanography*, 56: 567–581.
- Pardo-Pascual J E, Almonacid-Caballer J, Ruiz L A, Palomar-Vázquez J. 2012. Automatic extraction of shorelines from Landsat TM and ETM+ multi-temporal images with subpixel precision. *Remote Sensing of Environment*, 123(6): 1–11.
- Pardo-Pascual J E, Sánchez-García E, Almonacid-Caballer J, Palomar-Vázquez J M, Santos E P, Fernández-Sarría A, Balaguer-Beser Á. 2018. Assessing the accuracy of automatically extracted shorelines on microtidal beaches from Landsat 7, Landsat 8 and Sentinel-2 imagery. *Remote Sensing*, 10: 326.
- Pagán J, Aragonés L, Tenza-Abril A, Pallarés P. 2016. The influence of anthropic actions on the evolution of an urban beach: case study of Marineta Cassiana beach, Spain. *Science of the Total Environment*, 559: 242–255.
- Puleo J A, Torres-Freyermuth A. 2016. The second international workshop on swash-zone processes. *Coastal Engineering*, 115: 1–7.
- Ranasinghe R. 2016. Assessing climate change impacts on open sandy coasts: a review. *Earth-Science Reviews*, 160: 320–332.
- Thieler E R, Himmelstoss E A, Zichichi J L, Ergun A. 2009. Digital Shoreline Analysis System( DSAS) version 4.0: an ArcGIS extension for calculating shoreline change. US Geological Survey Open File Report 2008–1278.
- Turner I L, Harley M D, Short A D, Simmons J A, Bracs M A, Phillips M S, Splinter K D. 2016. A multi-decade dataset of monthly beach profile surveys and inshore wave forcing at Narrabeen, Australia. *Sci. Data* 3, 160024.
- Vos K, Harley M D, Splinter K D, Simmons J A, Turner I L. 2019. Sub-annual to multi-decadal shoreline variability from publicly available satellite imagery. *Coastal Engineering*, 150(AUG): 160–174.
- Vousdoukas M I, Ranasing He R, Mentaschi L, Plomaritis T A, Athanassiou P, Luijendijk A, Feyen L. 2020. Sandy coastlines under threat of erosion. *Nature Climate Change*, 10(3): 260–263.
- Zhang X D, Yang Z S, Zhang Y X, Ji Y, Wang H M, Lü K, Lu Z Y. 2018. Spatial and temporal shoreline changes of the southern Yellow River (Huanghe) Delta in 1976–2016. *Marine Geology*, 395: 188–197.
- Zhang X D, Lu K, Yin P, Zhu L H. 2019. Current and future mudflat losses in the southern Huanghe Delta due to coastal hard structures and shoreline retreat. *Coastal Engineering*, 152: 103530.
- Zhang X D, Fan D D, Yang Z S, Xu S M, Chi W Q, Wang H M. 2020. Sustained growth of river mouth bars in the vulnerable Changjiang Delta. *Journal of Hydrology*, 590: 125450.
- Zhang X D, Tan X W, Hu R J, Zhu L H, Wu C, Yang Z S. 2021. Using a transect-focused approach to interpret satellite images and analyze shoreline evolution in Haiyang Beach, China. *Marine Geology*, 438: 106526.

(责任编辑 李新坡; 英文审校 龚承林)