

# 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\*

张晓东<sup>1,2</sup> 姚雨涵<sup>1</sup> 朱龙海<sup>1,2</sup> 胡日军<sup>1,2</sup> 吴闯<sup>1</sup>

(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 中国海洋大学 山东青岛 266100)

**摘要** 受自然变化和人类活动影响,全球海滩普遍侵蚀。研究基于大量卫星图像评估海滩演变的方法,对于缺乏实测资料的海滩的侵蚀防护具有重要意义。使用 1984~2021 年的 993 幅卫星图像,采用聚焦剖面的亚像素海岸线识别方法识别水边线和干湿线位置,进一步得出平均高、低潮线,沟槽中线和沙坝坝顶位置,利用多指标重建汇泉湾海滩地形地貌的时空演变。使用固定地物对 Sentinel 卫星图像进行了地理精校正,基于海滩实测结果评估了海滩岸线位置误差。结果显示,平均高潮线、沟槽中线和沙坝坝顶的系统误差和随机误差以及平均低潮线的随机误差均较小,但平均低潮线的系统误差偏大。研究结果还揭示青岛汇泉湾海滩近 40 年的地形和地貌演变主要受人类活动影响。海滩平均高潮线在 2003 年海滩整治和补沙后由稳定转为蚀退,在 2017 年海滩补沙后淤进减缓;沙坝和沟槽的演变则与 2002 年海滩东南部码头拆除有关。建议重视研究区沙坝和沟槽近期变化,定期监测以进一步掌握其演变规律,并向沙坝和沟槽补细砂维护汇泉湾海滩。

**关键词** 海滩演变; 卫星图像; 海滩剖面; 水边线; 干湿线; 沙坝和沟槽

中图分类号 P737.1 doi: 10.11693/hyhz20211100286

海滩是滨海湿地的核心地带,具有重要的社会、经济和生态价值(李广雪等, 2013; Zhang *et al.*, 2021)。受自然变化和人类活动影响,海滩的位置和形态都是不断变化的(陈子燊等, 2010; Jackson *et al.*, 2020)。全球 20%~31%海岸线为砂质岸线,24%~70%砂质岸线的侵蚀速率超 0.5 m/a (Luijendijk *et al.*, 2018)。Vousdoukas 等(2020)预测,全球半数海滩到本世纪末将濒临消失。尽管该观点尚有较大争议,但海滩侵蚀引起了全球关注和担忧则是不争事实(Zhang *et al.*, 2021)。

我国砂砾质岸线在 1940~1960 年代占比 23%~24% (侯西勇等, 2016),与全球比例相当;在 1990 年代,约 70%砂质岸线遭受侵蚀(夏东兴等, 1993);近年来,随着沿海开发加剧,海岸线侵蚀和人工化问题日益突出(蔡锋等, 2008; 陈子燊等, 2010);至 2014 年,我国砂砾质岸线占比降至 9.8% (侯西勇等, 2016),大

量海滩不得不进行人工养护(庄振业等, 2011; Liu *et al.*, 2020)。

全面准确评估海滩的时空演变是海滩侵蚀防护的前提。卫星图像长期、连续、覆盖范围广且有大量免费资源,在全球变化加剧背景下,使用卫星图像研究海滩时空演变不仅对海滩侵蚀防护具有重要意义,还是沿海工程环境影响评价的重要内容,并为海滩整治修复提供科技支撑(李汉英等, 2019; Liu *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2021)。近年来,大量研究通过解译卫星图像评估海滩的时空演变,揭示了海平面上升、河流输沙减少、潮汐和波浪、海滩养护和沿海工程对海滩演变的影响(Luijendijk *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2019; 李汉英等, 2019; Vousdoukas *et al.*, 2020)。但是,高分卫星图像价格贵、历史短、空间覆盖小,难以较高时间分辨率研究海滩的长期演变;长期、连续、免费的卫星图像空间分辨率较低,用来研究宽度和变

\* 山东省自然科学基金, ZR2019MD037 号; 国家自然科学基金, 41776059 号。张晓东, 副教授, E-mail: zxd@ouc.edu.cn  
收稿日期: 2021-11-22, 收修改稿日期: 2022-01-07

化速率均较小、剖面形态复杂、易受水位波动影响的海滩的时空演变面临巨大挑战(Zhang *et al.*, 2021)。

Zhang 等(2021)采用亚像素识别技术(Pardo-Pascual *et al.*, 2012, 2018; Vos *et al.*, 2019)改进了聚焦剖面的计算机辅助海岸线位置识别软件(computer-aided shoreline position recognition software, CASPRS), 基于 880 幅 Landsat 图像, 采用多指标研究海阳万米海滩的时空演变, 研究结果更加准确、可靠和全面, 并使基于卫星图像分析海滩剖面的历史形态成为可能。本文综合使用 993 幅 Landsat 和 Sentinel 图像研究青岛汇泉湾海滩 1984~2021 年的时空演变, 探讨其影响因素, 并使用实测数据进行误差评估, 旨在进一步深化基于大量卫星图像的海滩演变研究, 为汇泉湾海滩保护提供建议, 并为其他区域海滩演变研究提供参考。

## 1 研究区概况

汇泉湾毗邻青岛市中心城区, 是半封闭海湾, 水清浪小、沙细坡缓, 湾顶为著名的青岛第一海水浴场

(图 1)。“绿树掩红楼, 碧海泛金沙”, 汇泉湾还被贺中等(2013)誉为青岛最秀丽的风景。根据最新卫星图像, 汇泉湾海滩长 1.1 km, 最大宽度超 200 m。海滩被一沟槽分为中高潮滩和低潮滩两部分(图 1)。该沟槽在海滩西北部较宽, 使得西北部的低潮滩呈典型的“沙坝—沟槽”地貌特征; 沟槽向东缩窄, 与海岸线交汇于一排水沟。中高潮滩较陡( $2.42^{\circ}\sim 5.62^{\circ}$ ), 向东南逐渐变缓; 低潮滩较缓( $0.32^{\circ}\sim 0.88^{\circ}$ ), 向东南逐渐变陡(庄丽华等, 2008)。

影响汇泉湾海滩的水动力因素主要是波浪和潮流(常瑞芳等, 1986, 1992; 李春柱等, 1992; 卞霄等, 2017)。根据小麦岛站多年实测资料, 研究区波浪主要为东南向, 以涌浪为主; 东南向波浪  $H_{1/10}$  (十分之一大波波高)和  $H_{1/100}$  (百分之一大波波高)的极大值分别为 5.1 和 6.8 m(郭景松等, 2018)、平均值分别为 0.79 和 0.96 m。波致沿岸流在汇泉湾内为顺时针环流, 潮致余流和波致沿岸流的方向基本一致(图 1。郭景松等, 2018)。研究区的潮汐属正规半日潮, 平均潮差 2.8 m(中国海湾志编纂委员会, 1993)。

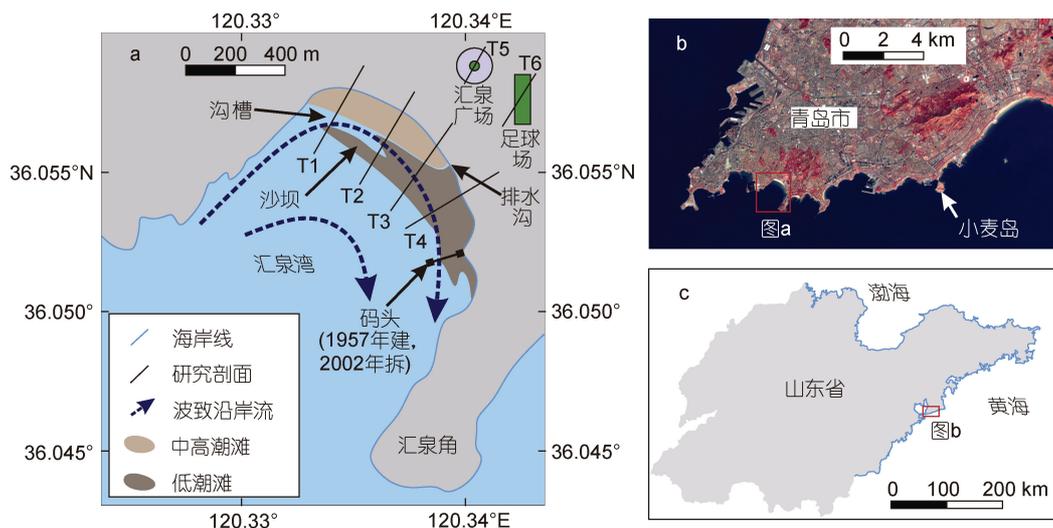


图 1 汇泉湾海滩的地貌和研究剖面(a)及其在青岛市(b)和山东省(c)的位置

Fig.1 Geomorphology and transects (a), and the geographic location of the Huiquan Beach in Qingdao City (b), Shandong Province (c)  
注: 海岸线和海滩地貌描绘自最新的 Sentinel 图像; 波致沿岸流流向据郭景松等(2018); 图 b 底图为 2020~2021 年无云 Sentinel 图像的中值图像; T1, T2, T3, T4 表示研究剖面序号

中高潮滩多为中、粗砂, 低潮滩多为细砂(图 2), 西侧粗、东侧细(常瑞芳等, 1986; 王伟伟等, 2007; 蔡杏兰等, 2017), 平均粒径在  $-1.53 \phi \sim 3.06 \phi$  (王永红等, 2012)。关于汇泉湾海滩沉积物的输运方向目前尚有分歧。在顺岸方向, 董贺平(2004)和王永红等(2012)认为海滩沉积物从两侧向中部输运, 但王伟伟等

(2007)认为其输运方向为自西北向东南。在垂岸方向, 董贺平(2004)认为沟槽上部沉积物向陆输运、下部沉积物向海输运, 但王伟伟等(2007)认为沉积物在高潮线附近向海输运, 在沙坝外侧向陆输运。

在 1957 年, 海滩东南部建造了一个长 135 m 的码头, 已有研究认为该码头对汇泉湾海滩产生了不

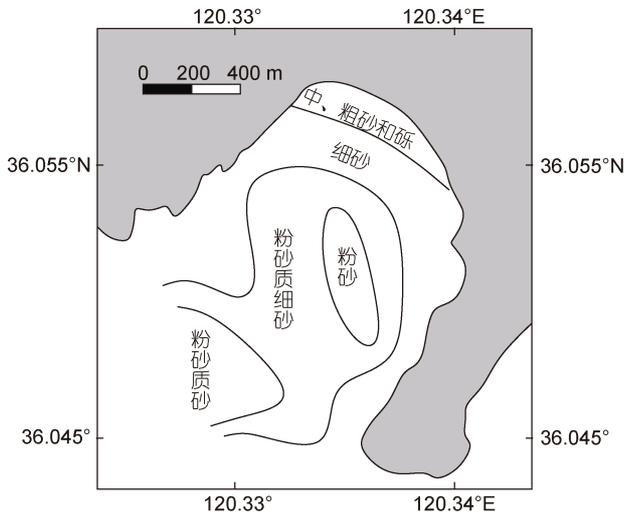


图2 汇泉湾沉积物类型分布

Fig.2 Distribution sediment types in the Huiquan Beach  
注: 据常瑞芳等(1986)和王伟伟等(2007)

利影响(常瑞芳等, 1986; 李春柱等, 1992; 常德馥等, 1998), 该码头在 2002 年被拆除(图 1)。汇泉湾海滩小规模的养护时有发生, 但有文献记录的大规模整治和补沙主要发生在 2003 和 2017 年。在 2003 年的整治中, 滩肩上的大量建筑被拆除, 并在滩肩补沙 12 000 m<sup>3</sup>; 整治后, 干滩由 40 m 扩至 70 m (庄振业等, 2011)。2017 年, 再次在滩肩补沙 20 000 m<sup>3</sup>, 滩肩旧沙被推至潮水线以下(据半岛都市报, [http://news.bandao.cn/news\\_html/201707/20170701/news\\_20170701\\_2742486.shtml](http://news.bandao.cn/news_html/201707/20170701/news_20170701_2742486.shtml))。

## 2 数据和方法

### 2.1 卫星图像来源和预处理

卫星图像, 包括 Landsat TM、ETM+和 OLI 图像(分辨率 30 m)以及 Sentinel MSI 图像(分辨率 10 m), 下载自谷歌地球引擎(<https://code.earthengine.google.com>), 下载程序为 GEEdownloader (<https://github.com/oucxd/CASPRS>), 下载标准为云量小于 80%。人工剔除不清楚图像后剩余 607 幅 Landsat 和 386 幅 Sentinel 图像(图 3)。卫星图像未进行辐射定标和大气校正, 这是因为其对海滩岸线识别影响不大。图像合成采用标准假彩色方法, 合成图像既贴近自然图像(有利于目视解译)又包含更丰富信息。在合成图像上, 干沙滩为白色, 湿沙滩为褐色, 水体为蓝色(图 4)。

### 2.2 历史潮位计算和评估

历史潮位使用潮汐模拟软件 Nao.99Jb (Matsumoto *et al.*, 2000)计算。卫星图像拍摄时的瞬时水位采用线

性插值得出, 卫星图像拍摄前的大潮高潮位使用拍摄前 25 h 的最高潮位。参照 Zhang 等(2018), 上述模拟潮位采用青岛港海平面季节改正值进行了校正。本

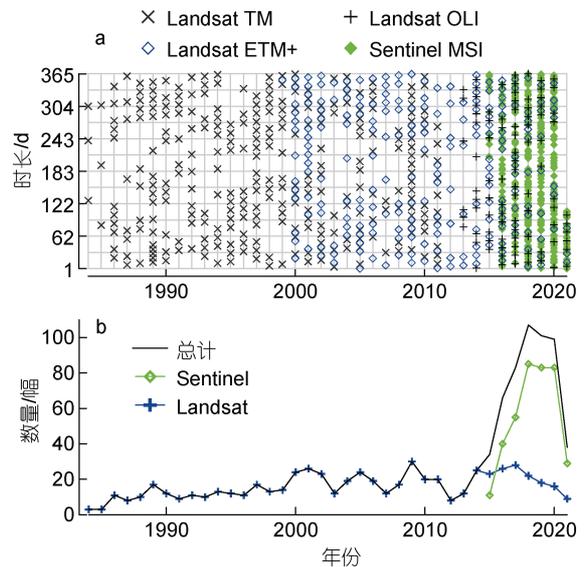


图3 汇泉湾海滩 1984–2021 年 Landsat 和 Sentinel 图像的时间、类型(a)和每年数量(b)

Fig.3 The shooting time, image types (a), and total number (b) in each year of the Landsat and Sentinel images of Huiquan Beach from 1984 to 2021

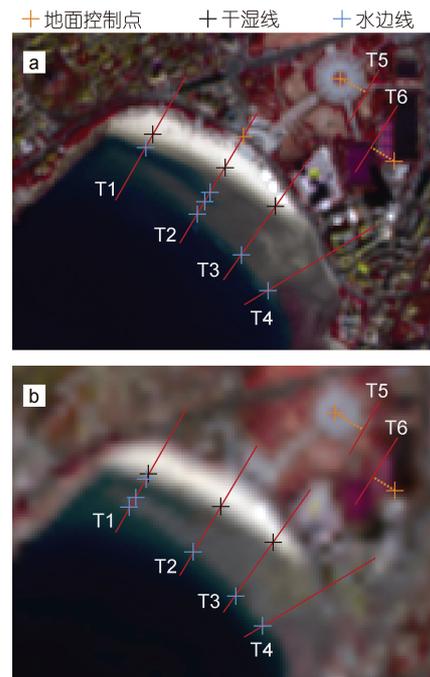


图4 固定地物、干湿线和水边线在汇泉湾海滩 Sentinel (a) 和 Landsat (b) 图像研究剖面上的位置

Fig.4 The positions of the fixed ground feature, dry/wet line, and water line on the Sentinel (a) and Landsat (b) images of the Huiquan Beach

文还收集了小麦岛站 2011 年 10 月的实测潮位并对模拟潮位进行了误差评估。

### 2.3 干湿线和水边线提取

本文改进了 CASPRS 软件, 改进后的软件(详见 <https://github.com/oucxd/CASPRS>。参见 Zhang *et al.*, 2021; 张晓东等, 2021)可采用多种插值方法对图像进行最高 30 倍的放大, 并综合使用自动和交互两种方式确定海滩岸线在剖面上的亚像素位置。自动识别分辨率为 1 m, 交互识别分辨率取决于图像放大倍数, 放大 10 倍时为 1 m。

本文识别了干湿线和水边线在 T1 至 T4 剖面上的位置(图 1)。干湿线是海水在上次高潮时留下的痕迹线, 水边线是海滩和海水之间的瞬时分界线(Boak *et al.*, 2005; Zhang *et al.*, 2021)。干湿线在 T1 至 T3 剖面清晰, 但在 T4 剖面难识别; 水边线在 T1 至 T4 剖面都清晰。由于沙坝的影响, T1 和 T2 剖面在潮位较低时存在三条水边线: 海滩水边线、沙坝内侧和外侧水边线(图 4, 5)。

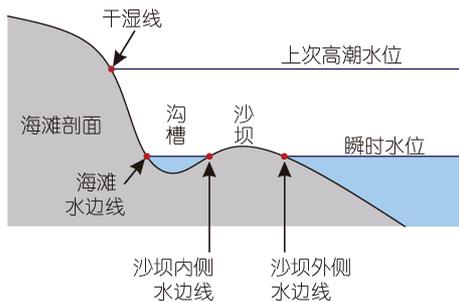


图 5 干湿线和水边线(包括海滩水边线、沙坝内侧和外侧水边线)示意图

Fig.5 Sketch of the dry/wet line and waterline (including beach waterline, inner waterline of bar, and outer waterline of bar)

### 2.4 海滩剖面形态和坡度反演

干湿线和水边线分别随上次高潮位和瞬时水位在海滩上移动, 根据其对应关系可反演海滩历史剖面形态(Zhang *et al.*, 2021)。本文选择海滩较为稳定的 3 个时段反演海滩剖面形态, 使用分段、分组回归分析方法计算海滩坡度(Zhang *et al.*, 2021), 并与 RTK(real-time kinematic, 实时差分定位系统)实测结果对比。RTK 测量采用 WGS-84 坐标系(和卫星图像一致)在 T1 至 T3 剖面实施, 测量时间为 2021 年 4 月 26 日低潮时, 位置和高度误差均小于 0.03 m。

根据海滩剖面形态, T1 至 T3 剖面中高潮滩坡度采用水位高于  $-0.5$  m 的数据计算; 由于海堤的限制, T4 剖面处高潮滩未发育, 其坡度未计算。T1 和 T2 剖面

沙坝外侧坡度采用沙坝外侧水边线数据计算, 沙坝内侧坡度由于沙坝内侧水边线数据较少未计算; T3 和 T4 剖面低潮滩坡度采用水位低于  $-0.5$  m 的数据计算。

### 2.5 平均高、低潮线, 沟槽中线和沙坝坝顶位置计算

汇泉湾海滩干湿线与平均高潮线的位置基本相当且波动较小, 本文直接选用干湿线的年均值研究平均高潮线的变化。平均低潮线采用上述计算低潮滩坡度的数据通过分段水位校正得出(Zhang *et al.*, 2021)。沟槽两侧的剖面形态基本对称, 沟槽中线位置采用沙坝内侧水边线和同期海滩水边线位置的平均值。与沟槽不同, 沙坝内侧坡度约为外侧坡度的 2.2 倍, 在计算坝顶位置时对沙坝内、外侧水边线位置进行了加权处理。

### 2.6 误差评估

南海路中线和两个点状地物(汇泉广场中心和中能足球场西南角)在剖面 T5 和 T6 上的位置被用来评估卫星图像的位置误差(图 1, 4)。两个点状地物在 Sentinel 和 Landsat 图像上均清晰, 但宽度为 11 m 的南海路仅在 Sentinel 图像上可辨(图 6)。

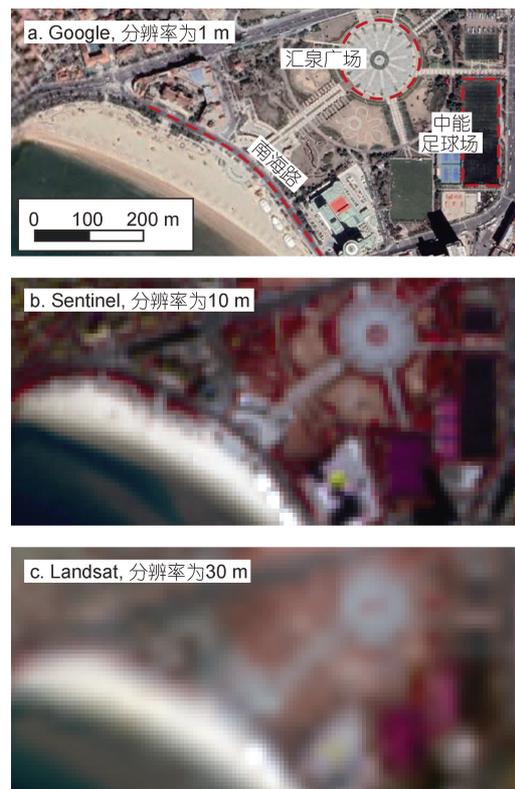


图 6 Google Earth (a)、Sentinel (b)和 Landsat (c)图像上的汇泉广场、中能足球场和南海路

Fig.6 The Huiquan Square, Zhongneng Football Stadium, and Nanhai Road on Google Earth (a), Sentinel (b), and Landsat (c) images

本文直接使用标准偏差评估上述 3 个固定地物位置的随机误差, 但采用公式(1) (Zhang *et al.*, 2021) 评估海滩岸线位置的随机误差。公式(1)采用年均值替换标准偏差计算公式中的总平均值, 目的是消除海滩岸线长期变化的影响(Zhang *et al.*, 2021)。

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

其中,  $E$  是海滩岸线位置的随机误差;  $n$  是数据总数;  $i$  是数据序号;  $y$  是年数;  $x_i$  是第  $i$  个海滩岸线位置;  $\bar{x}_y$  是第  $y$  年的平均值。

本文还利用 RTK 实测结果评估平均高、低潮线, 沟槽中线和沙坝坝顶位置的系统误差, 与实测值比较的是上述 4 个指标最近一个月的平均值。

### 3 结果

#### 3.1 潮位模拟结果及其误差

模拟和实测潮位吻合较好, 平均绝对误差为 0.14 m, 相关系数达 0.99 (图 7a, 7b)。分组统计显示, 模拟潮位在实测潮位低于 -1 m 时偏高约 0.1 m, 在实测潮位高于 0.5 m 时偏低约 0.1 m (图 7c)。

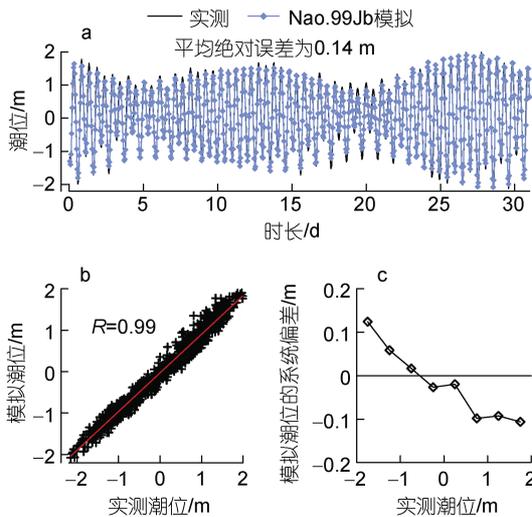


图 7 2011 年 10 月的 Nao.99Jb (Matsumoto *et al.*, 2000) 模拟潮位和小麦岛站实测潮位(a)及其交汇图(b), 模拟潮位的系统偏差(c)

Fig. 7 The simulated tidal heights using Nao.99Jb (Matsumoto *et al.*, 2000) and the measured tidal heights at Xiaomaidao station in October, 2011 (a), their scatter plot (b) and the systematic error of the simulated tidal height (c)  
注:  $R$  表示相关系数

利用模拟潮位得出的汇泉湾 Landsat 和 Sentinel 图像拍摄前的大潮高潮位平均为 1.28 m, 比青岛的平

均高潮位低 0.09 m (图 8a)。该偏差与上述模拟潮位在实测潮位高于 0.5 m 时偏低约 0.1 m 一致。汇泉湾卫星图像拍摄时的瞬时水位为 -2.56~1.62 m, 平均为 -0.45 m, 偏低(图 8a)。根据 1984~2021 年模拟潮位得出的青岛多年日内逐时平均潮位显示, 其在日内存周期变化: 5 时和 17 时最高, 为 0.38 m; 11 时和 23 时最低, 为 -0.38 m; Landsat 和 Sentinel 图像拍摄时 (9.5~11 时) 为 -0.38~-0.21 m, 偏低(图 8b)。上述是汇泉湾 Landsat 和 Sentinel 图像拍摄时瞬时水位偏低的原因。

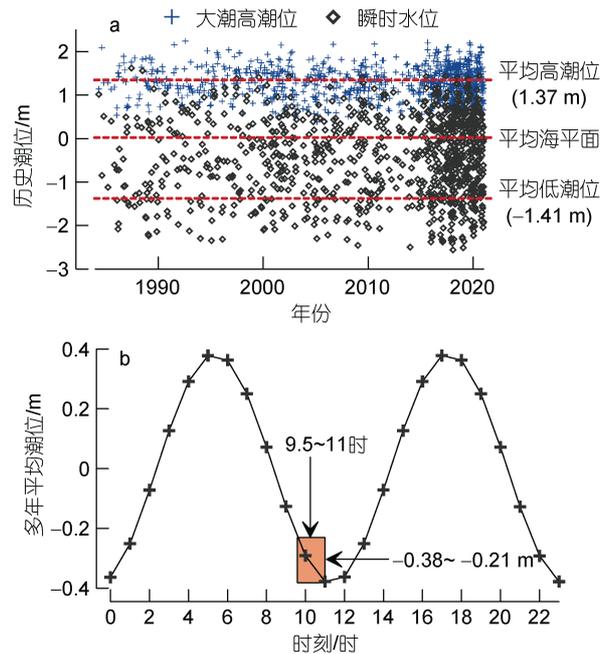


图 8 汇泉湾 Landsat 和 Sentinel 图像拍摄时的瞬时水位和拍摄前的大潮高潮位(a)以及多年(1984~2021 年)日内逐时平均潮位(b)

Fig. 8 The high water levels before Landsat and Sentinel images were taken and instantaneous water levels when the satellite images were being taken (a), and the hourly mean daily water levels from 1984 to 2021 (b)  
注: 平均高、低潮位源自中国海湾志编纂委员会(1993)

#### 3.2 误差评估

汇泉广场和足球场在 Landsat 和 Sentinel 图像上的位置波动和偏差均较小(表 1), 说明 Landsat 和 Sentinel 图像库可综合使用。汇泉广场和足球场在 Sentinel 图像上的位置波动大于其在分辨率较大的 Landsat 图像上的位置波动。进一步分析表明, 汇泉广场和足球场在 Sentinel 图像上的位置呈较强的正相关关系(图 9a), 但在 Landsat 图像上的位置基本不相关(图 9b); 南海路在 Sentinel 图像上的位置也与汇泉

表 1 Sentinel 和 Landsat 图像的位置误差(单位: m)  
Tab.1 The position errors of Sentinel and Landsat images (unit: m)

区域名称	RTK 测量平均位置	Sentinel 平均位置	Landsat 平均位置	Sentinel 位置 标准偏差	Landsat 位置 标准偏差	校正后的 Sentinel 位置标准偏差
南海路中线	73.8	73.5	/	5.1	/	/
汇泉广场中心	89.5	90.7	92.5	4.6	3.4	2.1
足球场左下角	/	78.2	75.3	5.6	5.0	3.1

注: “/”表示没有数据

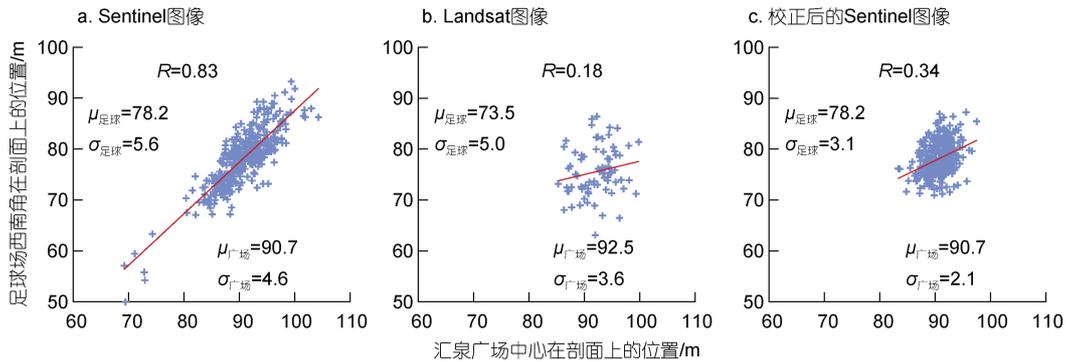


图 9 Sentinel (a)、Landsat (b) 和校正后的 Sentinel (c) 图像的位置误差  
Fig.9 The position errors of Sentinel (a), Landsat (b), and corrected Sentinel (c) images  
注:  $\mu$  表示平均值;  $\sigma$  表示标准偏差

广场和足球场在 Sentinel 图像上的位置呈较强的正相关关系, 相关系数分别为 0.84 和 0.92。上述说明 Sentinel 图像的位置精度有进一步提升的空间。本文使用南海路在 Sentinel 图像上的位置校正广场和足球场在 Sentinel 图像上的位置, 校正后位置波动降至 2.1~3.1 m, 优于 Landsat 图像结果(图 9b, 9c)。同样, 本文使用离汇泉湾海滩较近的南海路在 Sentinel 图像上的位置校正了海滩干湿线和水边线在 Sentinel 图像上的位置。

本文还评估了海滩岸线的误差。就卫星图像而言, Sentinel 图像的随机误差较小; 就指标而言, 平均高潮线的随机误差最小, 沟槽中线和平均低潮线的随机误差居中, 沙坝坝顶的随机误差最大(表 2)。平均高潮线、沟槽中线和沙坝坝顶的系统误差分别为 -3.9、7.8 和 4.9 m, 较小; 平均低潮线的系统误差为 63 m, 较大。

### 3.3 干湿线和水边线

干湿线和水边线在 T1 至 T4 剖面上的位置见图 10。干湿线位置数据获取率为 84%, 海滩水边线位置数据获取率为 80%, 略低于干湿线, 这主要是 T1 和 T2 剖面处沙坝的影响所致。沙坝内、外侧水边线位置数据较少, 数据获取率为 6.7%和 16%, 这主要是由于坝顶高程较低以及沟槽深度较小所致。

表 2 平均高、低潮线, 沟槽中线和沙坝坝顶在 Sentinel 和 Landsat 图像上的随机误差(单位: m)

Tab.2 Random errors of mean high- and low-water, trough center, and bar crest on Sentinel and Landsat images (unit: m)

剖面	卫星图像	平均高潮线	平均低潮线	沟槽中线	沙坝坝顶
T1	Sentinel	4.1	/	5.0	8.0
	Landsat	4.7	/	11.1	15.0
T2	Sentinel	3.3	/	7.2	5.8
	Landsat	4.3	/	9.0	14.4
T3	Sentinel	4.1	8.5	/	/
	Landsat	4.9	10.9	/	/
T4	Sentinel	/	8.3	/	/
	Landsat	/	9.8	/	/
平均	Sentinel	3.9	8.4	6.1	6.9
	Landsat	4.6	10.3	10.0	14.7

注: “/”表示没有数据

### 3.4 海滩剖面形态和坡度

卫星反演和实测的海滩剖面形态和坡度见图 11。卫星反演的中高潮滩坡度从西北到东南逐渐变小, 与庄丽华等(2008)和本文实测结果一致; 在时间上经历了“陡-缓-陡”的变化过程。卫星反演的低潮滩或沙坝外侧坡度在 2018 年前从西北到东南逐渐增加, 与庄丽华等(2008)的实测结果一致; 在 2019 年后, T1 剖面较缓、T2 至 T4 剖面稍陡, 与本文实测结果一致。在时间上, 低潮滩或沙坝外侧坡度逐渐变大, 仅在 T4 剖面后期有所减小。

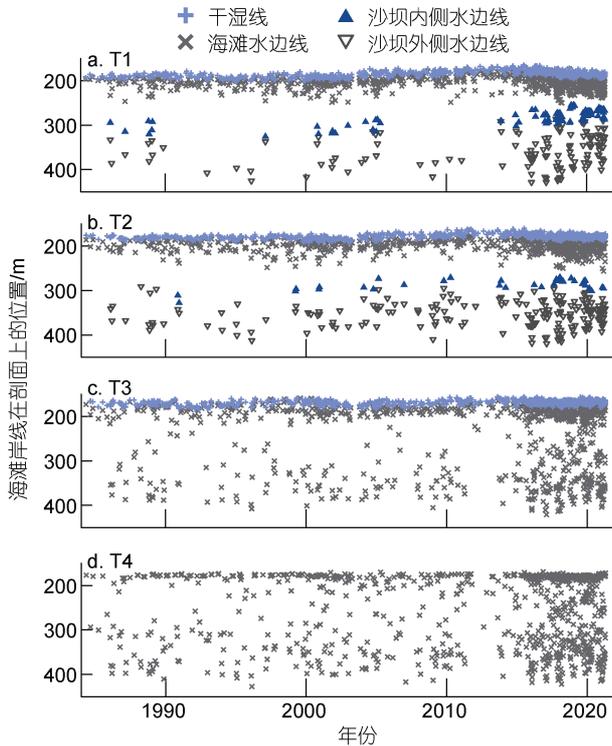


图 10 干湿线和水边线在汇泉湾海滩 T1 (a)、T2 (b)、T3 (c) 和 T4 (d) 剖面上的位置变化

Fig. 10 The position changes of dry/wet line and waterline on transects T1 (a), T2 (b), T3 (c), and T4 (d) in the Huiquan Beach

### 3.5 平均高、低潮线, 沟槽中线和沙坝坝顶

在时间上, 平均高潮线的变化可分为 4 个阶段 (图 12): 1984~2002 年稳定, 2003~2012 年侵蚀, 2013~2017 年淤进, 2018 年后淤进减缓。在空间上, 平均高潮线在海滩西北部变化较大, 向东南逐渐减小。

由于沙坝和沟槽高程较低且早期 Landsat 图像较少, 卫星反演的沟槽中线和沙坝坝顶数据在 2003 年前较少, 难以评估其变化趋势。在 2003 年后, T1 剖面沟槽中线和沙坝坝顶向岸移动, 坝顶移动较快 (图 13a)。在 2003~2019 年, T2 剖面沙坝坝顶缓慢向岸移动、沟槽中线则向海移动; 在 2019 年后, T2 剖面沟槽中线和沙坝坝顶均快速向海移动 (图 13b)。T3 和 T4 剖面平均低潮线较稳定, T3 微淤, T4 微侵 (图 13c, 13d)。

## 4 讨论

### 4.1 海滩岸线的位置误差及其主要影响因素

本文得出的平均高潮线的随机误差为 3.9~4.6 m, 优于 Pardo-Pascual 等 (2018)、Vos 等 (2019) 和 Zhang 等 (2021) 分别得出的 4.9~6.5、7.3~12.7 和 7.8 m, 并与固定地物的误差相当 (表 1), 说明本文平均高潮线具有较高的位置精度。平均低潮线的随机误差为

8.4~10.3 m, 较大, 这与研究区低潮滩坡度较小有关。根据 Zhang 等 (2021) 在海阳海滩得出的公式以及汇泉湾海滩低潮滩的坡度计算, 随机误差为 11.4~12.9 m, 本文结果更优。相对于汇泉湾约 200 m 的滩面宽度, 平均高潮线、平均低潮线、沟槽中线和沙坝坝顶位置的随机误差分别为 2.0%~2.3%、4.2%~5.2%、3.1%~5.0% 和 3.5%~7.4%, 相对较小。

同样相对于汇泉湾约 200 m 的滩面宽度, 平均高潮线、沟槽中线和沙坝坝顶位置的系统误差分别为 2.0%、3.9% 和 2.5%, 较小, 但平均低潮线的系统误差为 31.5%, 较大。平均低潮线系统误差偏大的原因主要有: (1) 低于 -1 m 的模拟潮位偏高约 0.1 m (图 7c), 这将产生 8 m 的正偏差; (2) 电磁波对海水具有穿透性, 卫星图像解译的水边线比实际水边线靠海。图 14 为汇泉湾海滩的无人机航拍图像, 其时沙坝坝顶被 0.3 m 的海水覆盖, 但沙坝仍可见。上述 0.3 m 的上覆海水将导致水边线位置产生 24 m 的正偏差。根据上述分析, 平均低潮线的系统误差可通过更为精确的水位校正 (Zhang *et al.*, 2018) 以及选择高程较低的滩面实测位置进行对比等方法进一步减小。

尽管卫星图像得出的水边线位置在低潮时系统性偏大, 但其仍可用于研究海滩的长期变化, 因为系统误差对海岸线变化速率的计算影响有限 (Luijendijk *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2021)。另外, 利用水边线位置得出的低潮滩坡度与实测结果基本一致 (图 11), 说明在使用分段、分组回归分析方法计算低潮滩坡度时, 系统误差的影响也有限。

### 4.2 影响汇泉湾海滩演变的主要因素

汇泉湾海滩平均高潮线在 2003 年由稳定转为蚀退以及在 2017 年淤进减缓应主要归因为 2003 和 2017 年的滩肩补沙。补沙后, 新沙中的细粒组分在波浪和潮流淘洗下易散失, 进而导致海滩蚀退 (雷刚等, 2013; 邱若峰等, 2014; Liu *et al.*, 2021)。滩肩补沙一般会导致干滩向海推进, 但汇泉湾海滩 2003 年的补沙并未使干滩向海推进, 这可能与补沙方式和补沙量有关。2003 年汇泉湾海滩主要在滩肩上部补沙, 且相比于其他海滩 100~440 m<sup>3</sup>/m 的单宽补沙量 (雷刚等, 2013; 邱若峰等, 2014; Liu *et al.*, 2021), 15~25 m<sup>3</sup>/m 的单宽补沙量较小, 尽管汇泉湾海滩干滩宽度在补沙后大幅增加, 但其主要是干滩原有建筑物被拆除所致 (图 15)。

2003 年后汇泉湾沙坝和沟槽在 T1 剖面向岸移动可能与海滩东南部码头的拆除有关。鉴于该码头已存在 45 a, 汇泉湾海滩应已适应码头存在时的水沙环境,

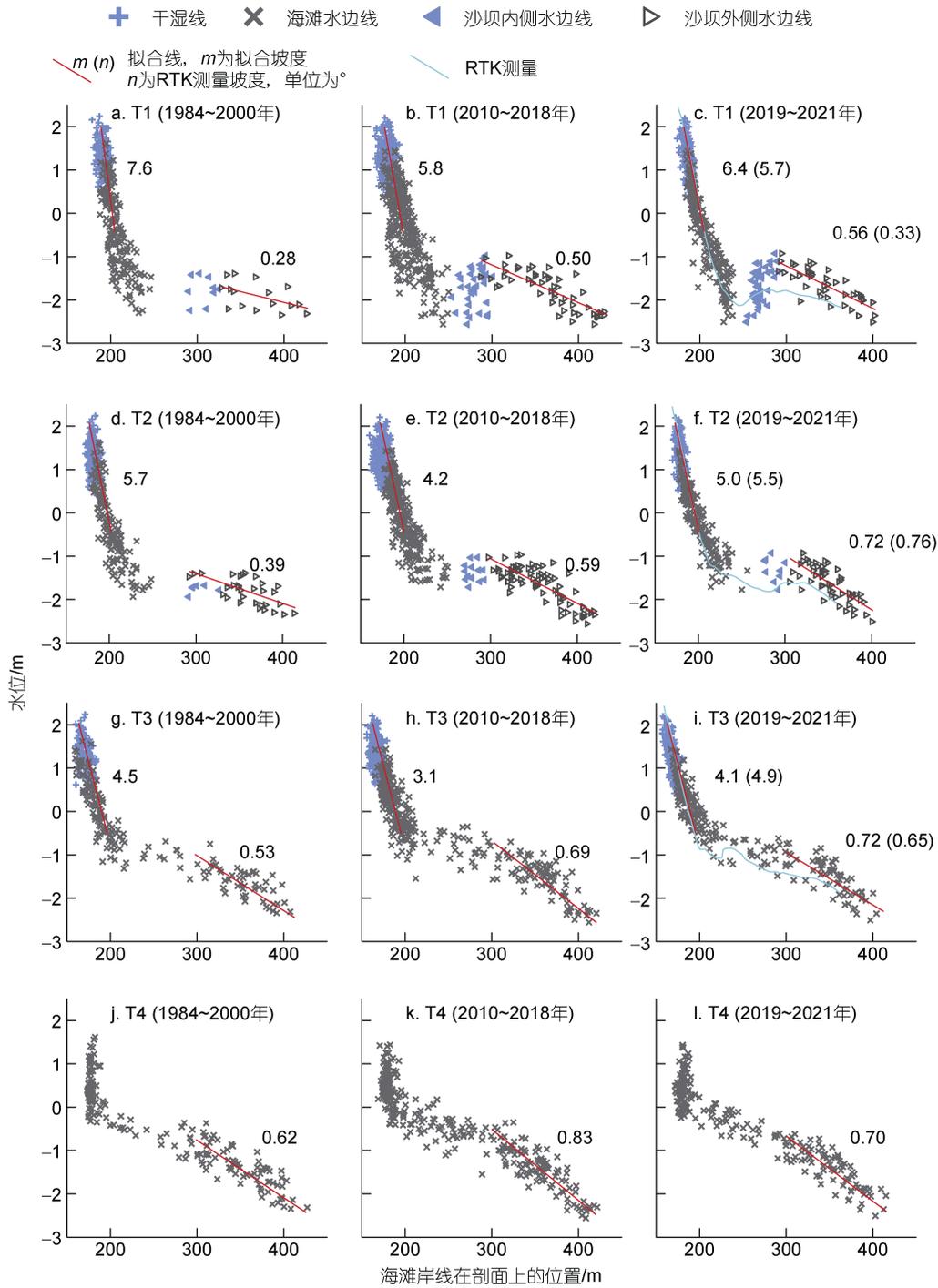


图 11 汇泉湾海滩剖面 T1 (a~c)、T2 (d~f)、T3 (g~i)和 T4 (j~l)在不同时期的形态和坡度  
 Fig.11 Profile shapes and slopes in the Huiquan Beach in different period since 1984

基本稳定(图 12, 13)。拆除垂直海岸的码头会导致周边水动力增强, 增强的潮流和波致沿岸流顺时针从西北侧进入汇泉湾, 导致原来稳定的沙坝和沟槽向岸移动。增强的海流也会对平均高潮线的演变产生一定影响, 和滩肩补沙的影响叠加, 导致平均高潮线在 2003 年后蚀退。沿岸工程, 特别是存在较久的沿岸工

程, 其拆除和建造一样, 也会改变水沙环境, 进而影响周边海滩的演变。因此, 拆除沿岸工程同样需要科学论证和评估。

平均高潮线在 2013 年后由蚀转淤, 淤进速率从西北到东南逐渐减小, 这可能是潮流和波致沿岸流携带汇泉湾沙坝泥沙向中高潮滩运输的结果, 其原

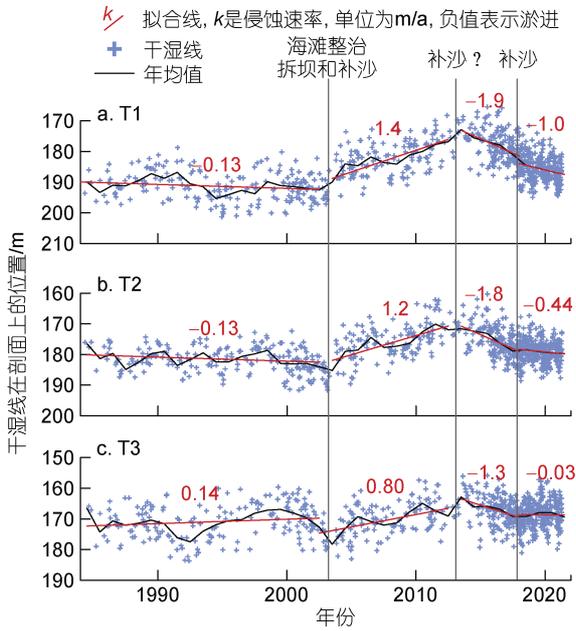


图 12 汇泉湾海滩平均高潮线在 T1 (a)、T2 (b)和 T3 (c) 剖面的演变

Fig.12 The position changes of mean high-tide line on transects T1 (a), T2 (b), and T3 (c) in the Huiquan Beach  
注：“补沙？”表示怀疑是补沙，但未查到具体报道

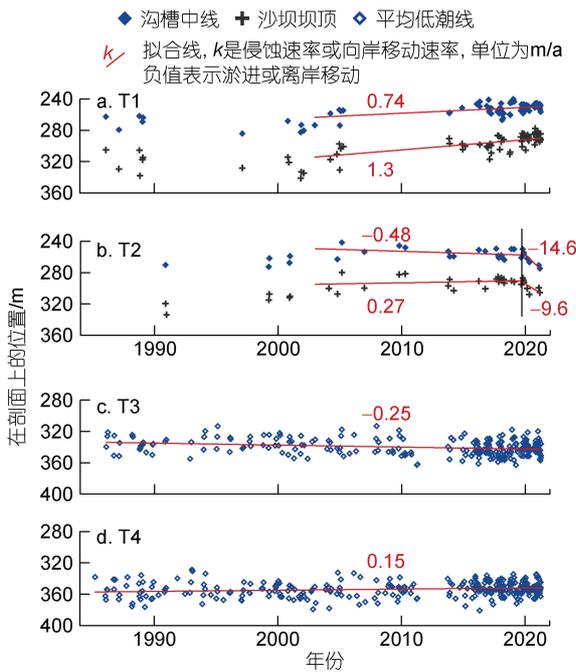


图 13 汇泉湾海滩沟槽中线和沙坝坝顶在 T1 (a)、T2 (b) 剖面的演变，平均低潮线在 T3 (c)、T4 (d)剖面的演变

Fig.13 The position changes of trough center and bar crest on transects T1 to T2, and the mean low-water line on transects T3 to T4 in Huiquan Beach

理类似于人工塑造沙坝向海滩补沙(Hanson *et al.*, 2002; 吴建等, 2011)。另外, 自 2019 年起, 汇泉湾沙

坝和沟槽在 T2 剖面快速向海移动(图 13b), 这可能也是潮流和波致沿岸流增强的结果。

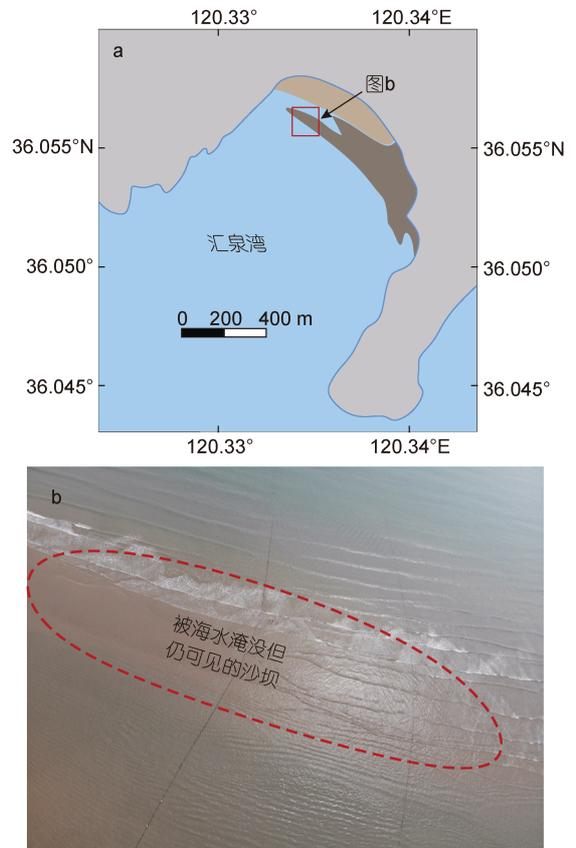


图 14 汇泉湾(a)被海水淹没但仍可见的沙坝(b)  
Fig.14 The submerged sandbar in the Huiquan Beach



图 15 2003 年汇泉湾海滩整治前(a)后(b)的 Google Earth 卫星图像

Fig.15 The Google Earth satellite images before (a) and after (c) the beach remediation in 2003

在整个研究期间, T3 至 T4 剖面平均低潮线基本稳定, 说明码头拆除未显著影响海滩东南部的演变; 进一步根据海滩西北部变化较大而东南部基本稳定可以推测, 顺时针从西北部进入海湾的潮流和波致沿岸流是影响汇泉湾海滩演变的主控水动力因素, 海滩沉积物的主要输运方向为自西北向东南。海滩沉积物的垂岸输运则表现为高、低潮线的变化, 在不同时段存在不同趋势(图 12, 13)。

鉴于目前的滩肩补沙方式对海滩高潮线演变不利的影响, 本文建议重视汇泉湾海滩沙坝和沟槽近期的演变, 定期监测以进一步掌握其变化规律, 利用该时机在海滩西南部沙坝和沟槽附近补充与当地沉积类型匹配的细砂沉积物以改善低潮滩凹陷的形态, 改善的低潮滩形态还将通过减缓沿岸流保护中高潮滩, 该举措还可避免滩面粗化进而增加汇泉湾海滩的魅力。

## 5 结论

本文基于 993 幅卫星图像, 利用 CASPRS 软件识别干湿线和水边线位置, 进一步计算平均高、低潮线, 沟槽中线和沙坝坝顶等多个指标, 综合研究汇泉湾海滩地形地貌在 1984~2021 年的时空演变。大量卫星图像和亚像素海岸线提取技术的使用克服了卫星图像分辨率不足的缺陷, 研究结果更全面、详细、可靠。

汇泉湾海滩干湿线在卫星图像上的识别特征明显, 系统和随机误差分别为 $-3.9\text{ m}$ 和 $3.9\sim 4.6\text{ m}$ , 相对较小且对平均高潮线有较好的指示意义。基于卫星图像得出的平均低潮线的随机误差为 $8.4\sim 10.3\text{ m}$ , 相对较小, 但系统误差达 $63\text{ m}$ , 相对较大。平均低潮线较大的系统误差主要是汇泉湾低潮时的模拟潮位偏高以及汇泉湾海水较清以致卫星图像解译的水边线位置靠海等因素所致。本文创新地使用同期的海滩水边线和沙坝内、外侧水边线, 结合沟槽和沙坝形态计算沟槽中线和沙坝坝顶位置, 系统误差分别为 $7.8$ 和 $4.9\text{ m}$ , 随机误差分别为 $6.1\sim 10.0$ 和 $6.9\sim 14.7\text{ m}$ , 相对较小; 该方法可用来研究常被海水淹没难以实测的沟槽和沙坝的历史演变。

青岛汇泉湾海滩在 1984~2021 年的演变主要受人类活动的影响。2003 和 2017 年的滩肩补沙对平均高潮线的稳定或淤进产生了不利影响, 2002 年拆除海滩东南部码头对汇泉湾海滩沙坝和沟槽的演变也产生了不利影响。最后, 本文建议在汇泉湾海滩西南部沙坝和沟槽处补细砂以更好地维护海滩。

致谢 感谢审稿专家提出了宝贵的意见和建议, 感谢檀夏伟、王佳星、许占瑞、王潘、郭鹏和张家宝同学的贡献, 也感谢中国海洋大学本科生研究发展计划(OUC-SRDP)的支持。

## 参 考 文 献

- 王永红, 孙静, 庄振业, 2012. 青岛旅游海滩沉积物粒度的季节性变化特征和输运[J]. 中国海洋大学学报, 42(12): 70-76.
- 王伟伟, 庄丽华, 阎军, 等, 2007. 青岛市汇泉湾海水浴场表层沉积物粒度特征及输运趋势[J]. 中国石油大学学报, 31(3): 13-17.
- 中国海湾志编纂委员会, 1993. 中国海湾志(第四分册): 山东半岛南部和江苏省海湾[M]. 北京: 海洋出版社: 176.
- 卞霄, 孙娟娟, 韦龙明, 等, 2017. 潮汐作用下的青岛汇泉湾海滩地貌演化分析[J]. 地质论评, 63(S1): 311-312.
- 庄丽华, 阎军, 范奉鑫, 等, 2008. 青岛汇泉湾海滩剖面变化特征[J]. 海洋科学, 32(9): 46-51.
- 庄振业, 曹立华, 李兵, 等, 2011. 我国海滩养护现状[J]. 海洋地质与第四纪地质, 31(3): 133-139.
- 李广雪, 宫立新, 杨继超, 等, 2013. 山东滨海沙滩侵蚀状态与保护对策[J]. 海洋地质与第四纪地质, 33(5): 35-46.
- 李汉英, 张红玉, 王霞, 等, 2019. 海洋工程对砂质海岸演变的影响——以海南万宁日月湾人工岛为例[J]. 海洋环境科学, 38(4): 575-581.
- 李春柱, 徐宏明, 侯国本, 1992. 青岛汇泉湾浴场部分海滩侵蚀及治理的初步探讨[J]. 海岸工程, 11(1): 26-31.
- 吴建, 拾兵, 2011. 近岸补沙养护海滩研究综述[J]. 海洋科学, 35(8): 108-112.
- 邱若峰, 庄振业, 赵友鹏, 等, 2014. 海滩养护的能效和寿命——以北戴河海滩养护工程为例[J]. 海洋地质前沿, 30(3): 26-33.
- 张晓东, 谢睿, 范代读, 等, 2021. 长江入海泥沙锐减下河口最大无人沙岛的持续淤涨[J]. 中国科学: 地球科学, 51(11): 1990-2000.
- 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[J]. 海洋科学进展, 28(2): 250-256.
- 侯西勇, 毋亭, 侯婉, 等, 2016. 20 世纪 40 年代初以来中国大陆海岸线变化特征[J]. 中国科学: 地球科学, 46(8): 1065-1075.
- 贺中, 袁冰, 王旭生, 等, 2013. 近在咫尺的浪漫——相约青岛美丽海疆行[J]. 青岛画报(10): 26-35.
- 夏东兴, 王文海, 武桂秋, 等, 1993. 中国海岸侵蚀述要[J]. 地理学报, 48(5): 468-475.
- 郭景松, 吴伦宇, 乔方利, 等, 2018. 汇泉湾水动力环境观测和数值模拟研究[J]. 海洋与湖沼, 49(4): 714-724.
- 常瑞芳, 刘镭, 范元炳, 1992. 波浪对青岛汇泉湾潮间沙坝的塑造作用[J]. 青岛海洋大学学报, 22(4): 61-70.
- 常瑞芳, 范元炳, 1986. 青岛汇泉湾浴场的环境研究及其改造利用的初步设想[J]. 海岸工程, 5(1): 16-24.
- 常德毓, 赵炳来, 1998. 汇泉湾改造的几点建议[J]. 海岸工程, 17(1): 56-58.
- 董贺平, 2004. 青岛海滩沉积构造及其底形特征[J]. 海洋地质动态, 20(12): 5-8.
- 雷刚, 刘根, 蔡锋, 2013. 厦门岛会展中心海滩养护及其对我

- 国海岸防护的启示[J]. 应用海洋学学报, 32(3): 305-315.
- 蔡杏兰, 卞霄, 韦龙明, 等, 2017. 北海冠头岭与青岛汇泉湾海滩沉积特征对比[J]. 地质论评, 63(S1): 313-314.
- 蔡锋, 苏贤泽, 刘建辉, 等, 2008. 全球气候变化背景下我国海岸侵蚀问题及防范对策[J]. 自然科学进展, 18(10): 1093-1103.
- BOAK E H, TURNER I L, 2005. Shoreline definition and detection: a review [J]. *Journal of Coastal Research*, 214: 688-703.
- HANSON H, BRAMPTON A, CAPOBIANCO M, *et al*, 2002. Beach nourishment projects, practices, and objectives—a European overview [J]. *Coastal Engineering*, 47(2): 81-111.
- JACKSON N L, NORDSTROM K F, 2020. Trends in research on beaches and dunes on sandy shores, 1969—2019 [J]. *Geomorphology*, 366: 106737.
- LIU G, CAI F, QI H S, *et al*, 2020. A summary of beach nourishment in China: The past decade of practices [J]. *Shore & Beach*, 88(3): 65-73.
- LIU G, QI H S, CAI F, *et al*, 2021. Morphodynamic evolution of post-nourishment beach scarps in low-energy and microtidal environment [J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(3): 303.
- LUIJENDIJK A, HAGENAARS G, RANASINGHE R, *et al*, 2018. The state of the world's beaches [J]. *Scientific Reports*, 8(1): 6641.
- MATSUMOTO K, TAKANEZAWA T, OOE M, 2000. 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*, 56(5): 567-581.
- PARDO-PASCUAL J E, ALMONACID-CABALLER J, RUIZ L A, *et al*, 2012. Automatic extraction of shorelines from Landsat TM and ETM+ multi-temporal images with subpixel precision [J]. *Remote Sensing of Environment*, 123: 1-11.
- PARDO-PASCUAL J E, SÁNCHEZ-GARCÍA E, ALMONACID-CABALLER J, *et al*, 2018. Assessing the accuracy of automatically extracted shorelines on microtidal beaches from Landsat 7, Landsat 8 and Sentinel-2 imagery [J]. *Remote Sensing*, 10(2): 326.
- VOS K, HARLEY M D, SPLINTER K D, *et al*, 2019. Sub-annual to multi-decadal shoreline variability from publicly available satellite imagery [J]. *Coastal Engineering*, 150: 160-174.
- VOUSDOKAS M I, RANASINGHE R, MENTASCHI L, *et al*, 2020. Sandy coastlines under threat of erosion [J]. *Nature Climate Change*, 10(3): 260-263.
- ZHANG R, CHEN L H, LIU S S, *et al*, 2019. Shoreline evolution in an embayed beach adjacent to tidal inlet: the impact of anthropogenic activities [J]. *Geomorphology*, 346: 106856.
- ZHANG X D, TAN X W, HU R J, *et al*, 2021. Using a transect-focused approach to interpret satellite images and analyze shoreline evolution in Haiyang Beach, China [J]. *Marine Geology*, 438: 106526.
- ZHANG X D, YANG Z S, ZHANG Y X, *et al*, 2018. Spatial and temporal shoreline changes of the southern Yellow River (Huanghe) Delta in 1976—2016[J]. *Marine Geology*, 395: 188-197.

## TOPOGRAPHIC AND GEOMORPHOLOGICAL EVOLUTION OF HUIQUAN BEACH OF QINGDAO IN PAST 40 YEARS USING MASSIVE SATELLITE IMAGES

ZHANG Xiao-Dong<sup>1,2</sup>, YAO Yu-Han<sup>1</sup>, ZHU Long-Hai<sup>1,2</sup>, HU Ri-Jun<sup>1,2</sup>, WU Chuang<sup>1</sup>

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

**Abstract** Under the influence of natural change and human activities, beach erosion is common all over the world. Studying the evolution of beaches using satellite images is important for the beach protection. In this case study on the Huiquan Beach, Qingdao, 993 local satellite images taken in 1984 to 2021 were used to determine the positions of waterline and dry/wet line along several transects using subpixel shoreline recognition technology. The mean high- and low-water lines, trough center, and bar crest positions were obtained, from which the spatial and temporal topographic and geomorphological evolution of Huiquan Beach was elucidated using above-mentioned multiple indicators. The Sentinel satellite images were further geographically corrected using fixed ground features, and the error of beach shoreline position was evaluated by using field measurement data. The systematic and random errors of the mean high-water line, trough center, and sand bar crest, and the random error of the mean low-water line are relatively small, while the systematic error of the mean low-water line is relatively large. In addition, the topographic and geomorphological evolution of the beach in past 40 years is mainly affected by human activities. The mean high-water line changed from stable to erosional after the beach remediation in 2003, and the silting of the mean high-water line slowed down after the beach remediation in 2017. Meanwhile, the evolution of the bar and trough is related to the demolition of an old dock (built in 1957) southeast to the beach in 2002. We suggest to focus on the recent changes of the bar and trough by regular monitoring to understand the variation rules, and replenish fine sands onto the bar and trough for better remediation of the Huiquan Beach.

**Key words** beach evolution; satellite image; beach profile; waterline; dry/wet line; bar and trough