

Doi: 10.11840/j.issn.1001-6392.2022.01.007

2010—2020 年青岛海滩剖面稳定性 及影响因素分析

梁伟强, 王永红, 王凯伟

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

摘 要: 海滩的稳定性及其演变是砂质海滩研究的重要内容。在全球砂质海滩普遍遭受侵蚀的背景下, 分析部分稳定海滩的特征和原因可以为海滩维护和科学管理提供重要参考。本文基于近 11 年 (2010—2020 年) 青岛第一、第三和石老人海水浴场共 8 条典型剖面的实地监测高程数据, 对海滩滩肩宽度和单宽体积进行计算对比, 研究表明, 除石老人海水浴场一个剖面变化较大外, 其他剖面的滩肩宽度只变化了 0~14 m, 是 11 年前的 0%~23.3%; 单宽体积变化了 8.5~46.5 m³, 是 11 年前的 1.0%~9.4%; 海滩剖面垂向扰动范围一般在 30~60 cm 范围内。海滩存在局部小尺度淤积或侵蚀, 剖面形态总体较为稳定。海平面变化、台风和风暴潮等自然因素是海岸轻微侵蚀或调整的重要影响因素, 但对海滩的优化管理 (包括定期监测海滩、适度展开养护、制定完善的管理政策和加强执行力度等人为因素) 可以应对这些海滩变化, 并且已成为近年来该研究海滩保持稳定的关键因素。

关键词: 岬湾海滩; 海滩稳定性; 剖面形态; 人类活动; 海滩管理

中图分类号: P737.17

文献标识码: A

文章编号: 1001-6932(2022)01-0061-12

Analysis of beach profile stability in Qingdao from 2010 to 2020 and the influencing factors

LIANG Weiqiang, WANG Yonghong, WANG Kaiwei

(Key Laboratory of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, Ministry of Education, College of Marine Geosciences,
Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: The stability and evolution of sandy beaches are important contents in the beach studies. Under the background of widespread erosion of sandy beaches at home and abroad, analysis of the characteristics and causes of some stable beaches can provide important reference for beach maintenance and scientific management. Based on the elevation data of 8 typical profiles of Qingdao No.1, No.3 and Shilaoren bathing beaches in recent 11 years (2010—2020), this study calculated and compared the width of the beach berm and the unit width volume of beaches. In the 11 years, only one profile in the Shilaoren bathing beach have relative obvious width change of beach berm, the widths of other profiles has only changed by 0~14 m (0%~23.3%). The volume of unit width has only changed by 8.5~46.5 m³ (1.0%~9.4%), and the vertical disturbance range of the beach profile is generally within the range of 30~60 cm. Thus, there is only a local small-scale sedimentation or erosion on the beach, and the beach profile morphology has been stable. The slight erosion and adjustment of beaches are mainly affected by natural factors such as sea level changes, typhoons and storm surges. However, the optimal management of the beach, including regular beach monitoring, moderate maintenance, appropriate management policy and implementation, etc., is important to maintain the stability of the beach.

Keywords: embayed beach; beach stability; profile morphology; human activities; beach management

收稿日期: 2021-05-10; 修订日期: 2021-07-21

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFC0402602); 国家自然科学基金 (41376054; 41176039; 41410304022)

作者简介: 梁伟强 (1997—), 硕士研究生, 主要从事海岸动力地貌研究。电子邮箱: 1596761796@qq.com

通讯作者: 王永红, 教授, 博士生导师。电子邮箱: yonghongw@ouc.edu.cn

砂质海岸是极为重要的旅游资源,具有重要的经济价值,其蚀淤演化和动力机制一直是海岸带研究的热点问题^[1-4]。一般来说,海滩蚀淤动态会受到自然因素和人类活动的双重影响,在两者的共同作用下,全球海滩的侵蚀问题日益严重^[5-8]。自然因素主要包括海平面变化、风暴潮加剧、波浪潮汐、构造下沉、岸堤稳定性下降、河流入海口改道等,其中,海平面变化是最主要的影响因素。Jochen 等根据全球范围内海平面变化情况,运用数学模型评估了海平面上升对沙滩侵蚀的影响,认为到 21 世纪中期,全球海滩因海平面上升造成的侵蚀范围将达到 6 000~17 000 km²^[9]。但与自然因素相比,人类活动会对海滩侵蚀产生更大的影响,例如夏东兴等通过对福建海滩近 40 年的平均蚀退速率研究发现,海滩最大蚀退速度为 4~5 m/a,认为人为影响对海滩侵蚀所产生的加剧作用约占 70%左右,大幅超过了海平面上升为主的自然因素影响^[10]。人类活动对海滩侵蚀的影响主要包括人为引起河流输沙减少、海岸工程、围海养殖、挖沙采矿和破坏固沙植被等。

在河流输沙减少方面,河北省滦河在上游水利工程影响下入海输沙急剧减少,2012—2014 年年平均输沙量仅为 4.86×10⁴ t/a,是 1990—1999 年的 1.55%。此外,滦河口外因治理航道淤积建立的拦沙堤进一步减少了来自滦河口的沿岸漂沙,导致河口外的打网岗岛海滩在 2012—2014 年发生持续侵蚀,海滩下蚀速率大于 10~15 cm/a^[11]。海南南渡江自 1969—2007 年上游水库和拦水坝陆续建成后入海输沙量剧减 73%,致使海口湾西海滩 1995—2010 年年均蚀退 23~36 m^[12]。

在海岸工程方面, Mireille 等利用卫星图像研究了墨西哥坎昆海滩 1969—2016 年的侵蚀状态,发现当地滨海观景平台、游乐设施、入海堤坝码头等海岸工程严重破坏了沉积物沿岸输移,2016 年海滩最大蚀退幅度达 130 m^[13]; 1985—2018 年广西银滩在两侧渔港、入海码头和后滨大型观景平台影响下泥沙沿岸输移被严重阻断,岸线最大侵蚀可达 80 m^[4]; 在滨海码头、入海堤坝的影响下阿拉斯加北部海滩侵蚀速率最大超过 18 m/a^[14]。2009 年以前由于营口港港口建设等人类活动影响,月亮湾沙滩出现了明显的侵蚀问题^[15]。

在围海养殖方面,李兵等于 2007 年 3—10 月

对福建 70 个砂质海滩调查发现,超过半数海滩在围海养殖、毁林占滩养殖、近滨采沙的影响下侵蚀严重^[16]。

在挖沙采矿方面,威海地区的沙滩由于挖沙总体年均侵蚀 1.5 m、损失面积达 2×10⁵ m²^[17],在 2010—2011 年约有 90%的沙滩在前滨采砂及入海河流采砂的影响下遭受不同程度侵蚀^[18];烟台蓬莱的登州海滩自 1985 年便存在采砂船挖沙现象,导致蓬莱西庄至栾家口海滩从基本稳定转为强烈侵蚀,岸线后退速率高达 15 m/a^[10];海南万宁海滩年均蚀退 10~20 m,开采钛锆砂矿、前滨采砂、水产养殖、砍伐固沙防护林是当地海滩侵蚀的主因。

在破坏固沙防护植被方面,李团结等通过分析雷州半岛海滩侵蚀特征认为,大肆破坏沿岸灌木和草本植物、砍伐红树林并建设大量养虾池是其侵蚀率高达 43.35%的重要原因^[19];宫立新曾通过卫星遥感和剖面监测研究了山东半岛东部 67 个海滩 1980—2011 年的侵蚀特征,发现海岸防护植被破坏和大量码头堤坝等海岸工程是近年来海滩侵蚀速率加快的重要原因^[20]。

从上述研究来看,海滩侵蚀已成为当今海滩面临的主要威胁,而人类干扰已越来越成为影响海滩稳定性的关键因素。如果海滩侵蚀严重,则需要较大规模的软硬工程进行修复,不但投入较大,还会产生诸多问题,例如抛沙养殖易在复杂水动力条件下导致沉积物流失^[21],还可能会导致生态异常或污染,硬工程可能会带来泥沙输运改变以及影响景观等问题。因此通过分析海滩稳定的自然和人类活动因素,可以找出维护海滩稳定的最优方案,减少维护海滩的花费,从而实现海滩的可持续利用。

山东半岛东部有 4 个区域的海滩处于平衡状态^[20],分别是青岛市区海滩、威海荣成东段海滩、威海荣成东北部海滩以及烟台福山区海滩,累计长度仅为 14.1 km。其中关于青岛市区海滩的研究较为成熟,已有诸多学者对海滩的波浪特征^[22],沉积物输移与浪潮环境^[23-24]、粒度的季节变化及海滩剖面演变^[25-28]、磁性矿物以及重金属污染^[29-30]等进行了研究,为海滩稳定性分析提供了基础资料。本文利用 2010—2020 年青州市第一、第三和石老人海水浴场海滩剖面的实地监测数据进行研究,分析海滩剖面的稳定性并进一步探讨人类活动和自然因素对海滩形态稳定性的影响,以期为海滩的

科学管理及可持续发展提供理论依据和建议。

1 研究区域概况

砂质海岸分为开阔型、半遮蔽型和岬湾型, 其中岬湾型海岸在自然界中分布十分普遍^[31-33]。本文研究区是典型的岬湾型海岸, 位于山东半岛东南部温带季风区, 附近无大型河流输入。风向以 SE、N、NNW 为主, 频率可达 12%、11% 和 11%。波浪多见季节性风浪, 以冬季 WNW-NNW 向最为常见, 夏季涌浪频率高达 88%, 以 SE 向最为常见。平均波

高值夏高春低, 秋冬介于中间, 分别为 3.1 m、1.4 m、2.1 m 和 1.9 m^[34]。潮汐为正规半日潮, 最大潮差 4.75 m, 平均 2.78 m^[35]。受西黄海沿岸流影响, 涨潮海流沿顺时针流向, 落潮时相反, 主流向基本与岸线平行^[27]。第一海水浴场海滩呈近直线型, 长约 0.62 km, 海滩平均坡度为 2.66%, 东西两侧发育基岩岬角地貌^[36]。海滩水下沿岸沙坝发育明显, 长度约 500 m。第三海水浴场海滩呈弧形发育, 南北总长近 1 km, 平均坡度为 3.61% (图 1)。石老人海滩整体走向约 NE-SW, 长约 2.15 km, 平均宽度 210 m, 面积约 $4.5 \times 10^5 \text{ m}^2$, 平均坡度约 2.4%。



图 1 研究海滩位置及剖面分布

资料来源: 中国海湾志 (第四分册)

2 研究方法

2.1 剖面布设与测量

2010—2020 年在第一、第三海水浴场 (简称一浴、三浴) 和石老人海滩沿垂直岸线方向均匀布设 8 条剖面 (一浴 3 条、三浴 2 条、石老人 3 条) (图 1), 采用 LeikaTC-208 全站仪在大潮低潮时沿固定起点、固定方向对第一海水浴场、第三海水浴场 5 条剖面累计进行 6 次测量, 对石老人海水浴场 3 个剖面累计进行 12 次测量 (表 1), 测量时间一般于当月初一或十五大潮低潮时, 此时可测量长度最大, 提前掌握测量日期的潮汐、天气状况, 避开阴雨天以提高全站仪的稳定性和精确度。在数据采

集和处理过程中, 为了严格控制数据精确性, 平均每 5~10 m 布设一个测量点位, 对地形变化显著的区域 (如滩肩、沿岸沙坝) 适当密集布点测量, 每个测量点位用棱镜卡杆将棱镜高度严格控制在距离海滩表面 1.8 m 的高度并重复测量两次, 剖面向海一端通常测至低潮处水边线。为便于形态演化的直观对比, 本文剖面高程全部统一为相对高程, 以剖面测量起点为相对高程和离岸距离的起算零点。

2.2 海滩稳定性分析方法

本文主要从海滩类型判别、海滩地貌变化 (滩肩宽度变化、单宽体积变化、垂向扰动深度) 两个角度来分析三个研究海滩的稳定性特征。

2.2.1 海滩类型判别 Guza 等采用破碎定标参数表征海滩对入射波的反射性, 以判别海滩的水动

表 1 监测剖面基本概况

海滩	剖面	剖面起点	坡度/%	走向/°	平均长度/m	监测时间
第一海水浴场	PM1	120°20'24.59"E, 36°03'29.09"N	2.84	186.9	254.8	2010年04月28日、2010年10月22日、 2016年06月02日、2017年03月25日、 2019年11月03日、2020年10月03日
	PM2	120°20'32.17"E, 36°03'25.43"N	2.46	200.1	266.8	
	PM3	120°20'38.39"E, 36°03'20.52"N	2.67	206.2	234.9	
第三海水浴场	PM4	120°21'55.82"E, 36°03'0.93"N	3.25	87.4	184.2	
	PM5	120°21'56.84"E, 36°03'6.66"N	3.96	107.2	146.4	
石老人海水浴场	PM6	120°27'42.49"E, 36°05'27.50"N	2.60	142.3	291.2	
	PM7	120°28'03.80"E, 36°05'35.65"N	2.50	153.6	220.6	
	PM8	120°28'14.65"E, 36°05'39.07"N	2.10	156.1	200.0	

力特征, 区分海滩的耗散性和反射性^[37-38], 将三个海滩的基本参数代入公式(2)—公式(5), 并将其联立代入公式(1)即可求得 ε , 王文介等根据对华南沿海沙滩的研究提出 $\varepsilon < 2.5$ 时为反射型, $2.5 < \varepsilon < 33$ 为过渡型, $\varepsilon > 33$ 为耗散型^[39]。其判别公式为:

$$\varepsilon = \frac{a_b \omega^2}{g \tan^2 \beta} \quad (1)$$

式中, a_b 为碎波振幅; ω 为入射波弧度频率; g 为重力加速度; β 为海滩坡度。

$$a_b = \frac{H_b}{2} \quad (2)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (3)$$

式(2)和式(3)中, H_b 为浅水区破波波高, 可按照 Komar 等提出的半经验公式^[40]计算:

$$H_b = \frac{0.563H_0}{\left(\frac{H_0}{L_0}\right)^{0.2}} \quad (4)$$

$$L_0 \cong 1.56\bar{T}^2 \quad (5)$$

式(4)和式(5)中, H_0 为深水波高; L_0 为深水波长; \bar{T} 为平均波周期。

2.2.2 海滩地貌变化 从 2010—2020 年剖面的垂向变化、滩肩宽度变化、单宽体积变化三个角度进行系统分析, 以此反映海滩剖面的稳定性。其中, 第一海水浴场 PM3 不发育滩肩, 石老人海水浴场 PM8 在监测前期未发育滩肩, 监测后期可见一定规模的滩肩发育; 计算海滩剖面滩肩宽度时将其定义为测量起点向海延伸至滩肩顶位置的横向距离。计算剖面的单宽体积时将第一海水浴场 PM1—

PM3 计算范围分别界定为 230 m、250 m 和 220 m, 第三海水浴场 PM4—PM5 计算范围分别界定为 180 m 和 140 m, 石老人海水浴场 PM6—PM8 计算范围分别界定为 280 m、220 m 和 200 m。计算单宽体积时统一界定宽度为 1 m, 下限为相对高程-6 m。

3 结果

3.1 海滩类型判别

三个海滩的平均坡度分别约为 1.49°、2.06°、1.37°, 其正切值 $\tan \beta$ 分别为 0.026、0.036 和 0.024, 将三个海滩的基本参数(表 2)代入海滩类型判别的各项公式中并联立即可求得 ε , 结果表明三个海滩的 ε 值分别为 106.9、55.7 和 125.5, 均大于 33, 说明三个海滩地貌类型均为典型的耗散型。耗散型海滩一般滩面平整宽广, 坡度常为 2°左右, 此类海滩入射波的能量耗散在宽广低缓的滩面上, 入射波浪多以崩破的方式破碎, 受风暴浪等强动力因素影响较小。同时, ε 值越大代表耗散作用越明显, 第一海水浴场和石老人海水浴场海滩 ε 值接近, 约在 100~120 范围内, 明显大于第三海水浴场海滩, 说明第一海水浴场和石老人海水浴场对强动力因素的响应变化更小。

3.2 养滩前后的剖面形态变化

在监测的 11 年间通过现场调查、资料查阅以及对海滩管理处咨询, 发现三个海滩在 2017 年前都没有大规模的补沙行为, 只有第三海水浴场在 2017 年 6 月开展了补沙修复, 同年 7 月第一海水

表 2 研究海滩的水文地貌参数

海滩	平均波高/m	平均波周期/s	$\tan\beta$	ε	类型
第一海水浴场	0.7	4.8	0.026	106.9	耗散型
第三海水浴场	0.7	4.8	0.036	55.7	耗散型
石老人海水浴场	0.7	4.8	0.024	125.5	耗散型

浴场也进行了补沙，石老人浴场小规模维护频繁，例如 2014 年夏季对不稳定区域进行了内部平沙，因此将剖面变化分为两个阶段。

3.2.1 滩肩宽度变化过程 第一海水浴场海滩：PM1 滩肩宽度介于 40~50 m，第一阶段 2010—2017 年滩肩宽度减小了 4.5 m，2017 年补沙后到 2019 年共增长了 6 m，到 2020 年净增长 1.5 m，变化量约为 2010 年的 3.1%（图 2a，图 3A），PM2 滩肩宽度在 34~39 m 内变化（图 2a，图 3B），第一

阶段 2010—2017 年滩肩宽度减小 4 m，2017 年补沙后到 2019 年变化了 1 m，至 2020 年净减少 4 m，变化量为 2010 年的 12.8%；PM3 不发育滩肩（图 3C）。总之，发育滩肩的两个剖面在补沙之前的第一阶段缩减明显，补沙后普遍存在明显的增长，养滩成效较为明显。

第三海水浴场海滩：2010—2020 年 PM4 滩肩宽度在 31~40 m 波动，第一阶段 2010—2017 年滩肩宽度增加 4.6 m，2017 年补沙后到 2019 年增长了 3 m，到 2020 年净增长 7.6 m，增长量为 2010 年的 23.3%（图 2a，图 3D），PM5 在 28~31 m 波动，第一阶段 2010—2017 年滩肩宽度减小 3 m，2017 年补沙后至 2019 年增长了 3 m，至 2020 年净增长 0 m（图 2a，图 3E）。两个剖面滩肩宽度总体上稳中增长，以补沙后的增长最为明显。

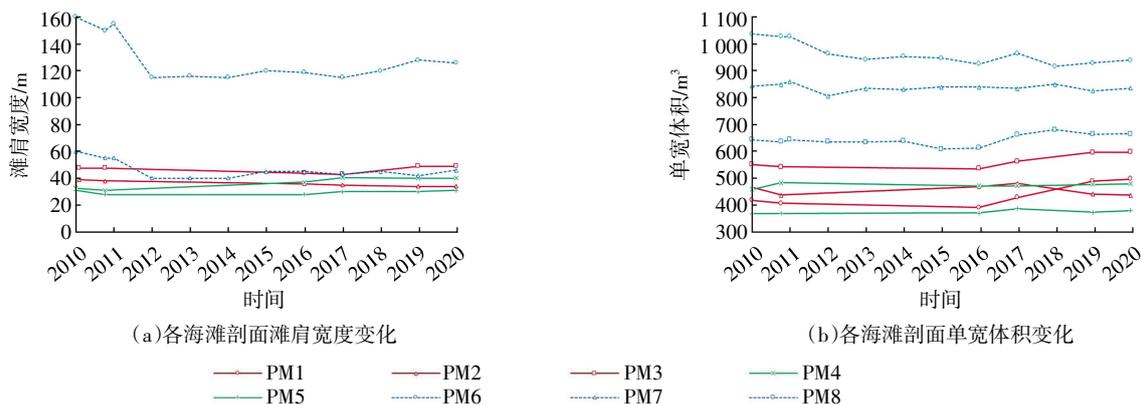


图 2 各海滩剖面滩肩宽度 (a) 和单宽体积 (b) 演化趋势

石老人海水浴场海滩：PM6 和 PM7 滩肩宽度演化趋势一致，前者滩肩宽度为 115~160 m，最大浮动尺度约 40 m，后者介于 42~60 m，最大变化尺度约为 18 m，两个剖面滩肩宽度在 2011—2012 年期间出现了十分明显的减小，在 2012 年后缓慢增长（图 2a，图 3F—图 3G）。至 2020 年 PM6 滩肩宽度净缩减约 34 m，而 PM7 滩肩宽度减小约为 14 m，变化量分别约为 2010 年的 21.3%和 23.3%。

总的来说，在 2010—2020 年间除石老人海滩 PM6 剖面的滩肩宽度明显减小，PM7 剖面表现出较小的减小趋势以外，其余海滩剖面在整体上变化并不显著，并且在 2017 年补沙之后滩肩宽度显著增加。2011—2012 年是石老人海水浴场海滩剖面滩肩宽度缩减明显的时期，2012 年以后各海滩剖面滩肩宽度十分稳定，甚至存在缓慢增长的趋势。

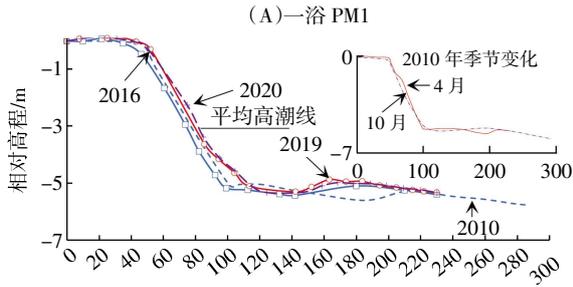
3.2.2 单宽体积变化过程 第一海水浴场海滩 PM1 和 PM3 在第一阶段 2016 年以前较为稳定，2017 年经历人工补沙后单宽体积明显上升，11 年间净增长量分别为 46.5 m³ 和 79.4 m³，变化量约为 2010 年的 18.9%和 8.4%（图 2b）。PM2 后期略微下降，最大幅度为 44.3 m³，净损失 28.9 m³。第三海水浴场海滩 PM4 和 PM5 在第一阶段 2017 年人工补沙前单宽体积上升微弱，这与滩肩宽度变化的特点一致，2017 年人工补沙后两个剖面单宽体积存在一定增长，11 年间净增长量分别为 21.3 m³ 和 10.7 m³，变化量约为 2010 年的 4.6%和 2.9%。石老人海水浴场海滩 PM6、PM7 和 PM8 单宽体积依次减小，PM6、PM7 单宽体积在 2011—2012 年同步减小，这一趋势与滩肩宽度变化相一致。11 年来 PM6 略微下调，PM7 较为稳定，PM8 则有

一定增长，净增长量分别为 -97.2 m^3 、 -8.5 m^3 和 21.5 m^3 ，变化量约为2010年剖面体积的9.4%、1.0%和3.3%。

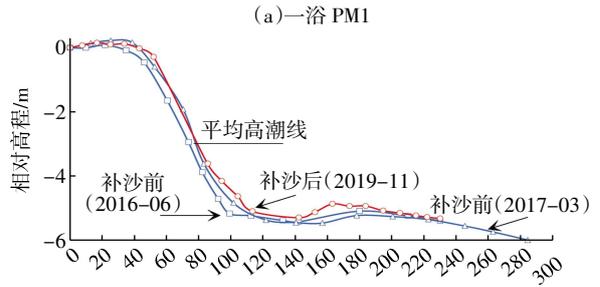
总的来说，2010—2020年除石老人海水浴场海滩PM6明显减小以外，石老人海水浴场海滩PM7和第一海水浴场PM2减小十分微弱，其余剖面整体上较为稳定或存在淤积，这说明在自然因素

和人为因素的共同作用下三处海滩整体稳定性较好。剖面形态虽然进行了长时间的动态调整，但总沙量变化不大。

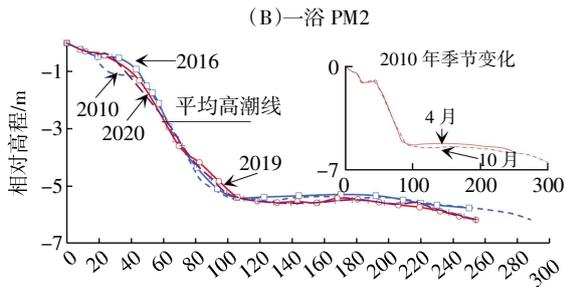
3.2.3 垂向变化过程 从垂向变化来看，在自然和人为因素的双重影响下，2010—2020年第一海水浴场PM1变化介于 $0.2\sim 0.5\text{ m}$ ，滩面和水下沙坝变化明显（图3A），2016年以前PM1滩肩规模较



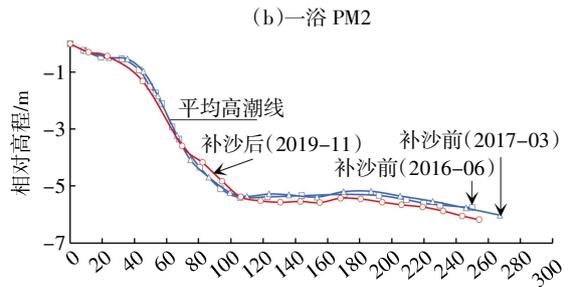
(A)一浴 PM1



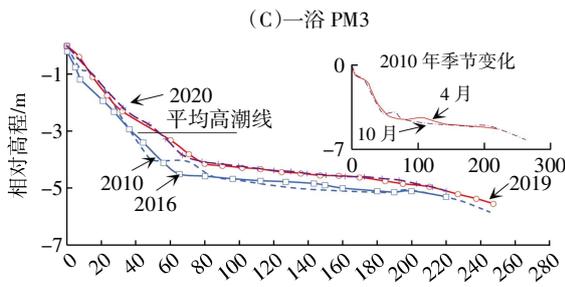
(a)一浴 PM1



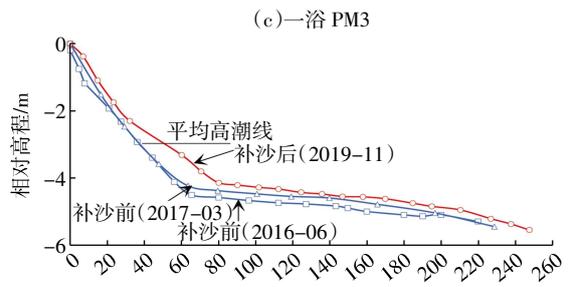
(B)一浴 PM2



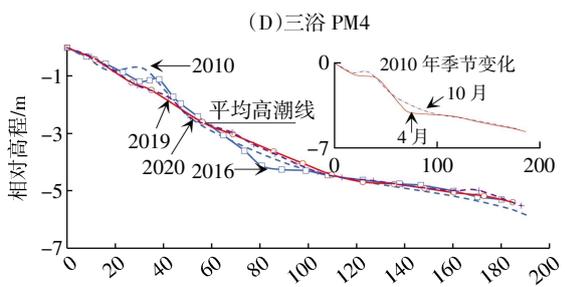
(b)一浴 PM2



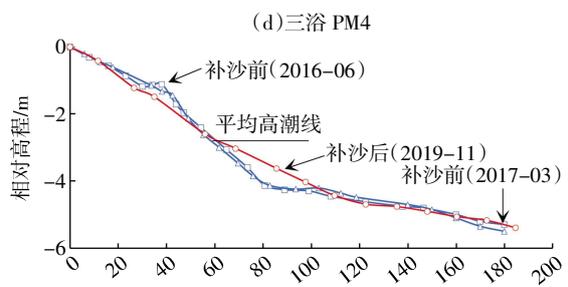
(C)一浴 PM3



(c)一浴 PM3



(D)三浴 PM4



(d)三浴 PM4

(待续)

(续图)

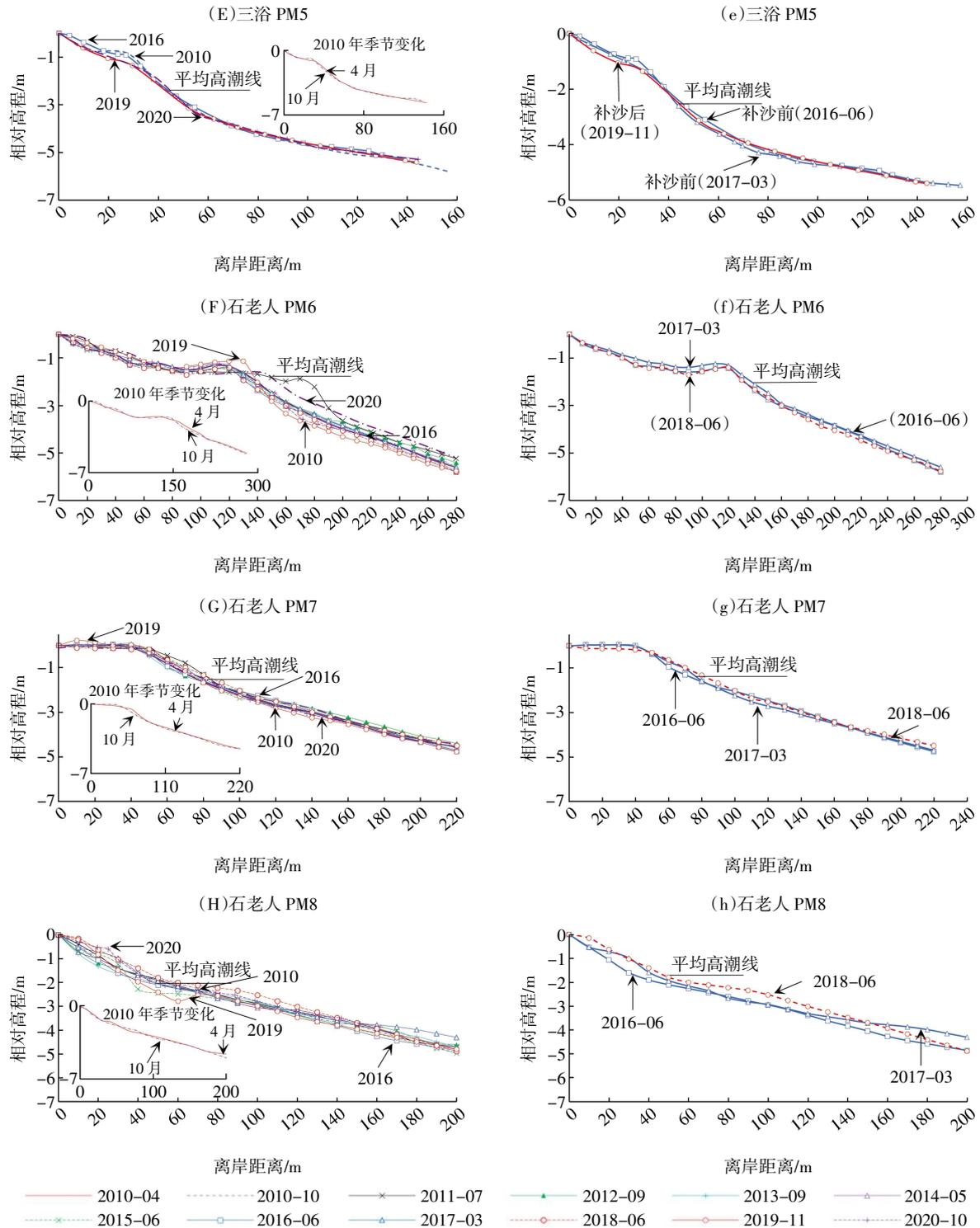


图3 各海滩剖面重复监测形态及季节变化

小，后滨坡度较大，2016—2017 年滩面上部区域地形变化较小，只有滩面下部相对高程存在 20 cm 左右的变化，在补沙 2 年后剖面地形的相对高程整体存在明显的增高，离岸 30~80 m 的滩面顶部

区域相对高程比补沙之前高约 0.8 m 左右，可见 2017 年人工抛沙对 PM1 地形的稳定增长产生了显著的积极作用 (图 3a)；PM2 只有滩肩淤积明显，变化介于 0.2~0.6 m，离岸 70 m 向海一侧较为稳定

(图 3B)。PM3 相对高程稳定增长, 局部微弱减小或升高(图 3C), 变化 0.2~1.2 m, 滩面处增长幅度最大可达 1.2 m。在 2017 年人为补沙影响下, PM3 滩肩到滩面上部区域的地形高程也存在明显增长, 但滩面下部变化较小, 在离岸 140~230 m 范围内甚至出现了相对高程下降的现象, 从 2017 年至补沙两年后 PM3 相对高程整体上比之前高, 沿岸沙坝区域的相对高程最大变化可达 0.7 m (图 3c)。总之, 三个剖面总体处于稳定或缓慢增长状态。

第三海水浴场 PM4 最大变化约 0.9 m, 以滩肩顶至滩面最为明显(图 3D)。前期滩肩发育, 离岸 20~100 m 落差较大, 此后沉积物以平均高潮线附近为界限向陆海两侧输移并最终导致海滩趋于平缓。PM4 总沙量在补沙后出现微弱增加, 滩肩区域存在调整, 而离岸 20~100 m 处的滩面区域的相对高程与补沙之前相比最大升高可达 0.6 m (图 3d)。PM5 地形调整微弱, 变化一般不超过 0.3 m (图 3E), 平均高潮线以下至滩面区域范围内的相对高程仍出现了一定的增长, 剖面形态基本回到了 2016 年的水平(图 3e)。总体来说 PM4 存在较明显的形态差异, 而 PM5 则比较稳定。

石老人海滩 PM6 变化显著, 2011—2012 年离岸 170 m 附近滩肩变化可达 1.5 m (图 3F)。PM7 稳定性较高, 垂向浮动基本不超过 0.3 m (图 3G)。PM8 只有在离岸 20~70 m 范围内变化较大, 这可能与人类扰动较为频繁有关, 表现出一定的淤积趋势, 淤积深度最大可达 0.5m 左右(图 3H)。总体来说从 PM6 到 PM8 剖面的垂向变化逐渐由下蚀转变为上淤。石老人海水浴场海滩未经历补沙, 因此各剖面形态未出现人类影响导致的明显变化(图 3f—图 3h)。

在海平面上升导致砂质海滩普遍遭受侵蚀的背景下, 2017 年补沙后各海滩剖面整体较为稳定, 个别剖面相对高程与补沙之前相比甚至出现明显升高, 说明人工维护对海滩稳定性起到了巩固效果, 养滩成效较为理想。

3.2.4 季节性变化 2010 年 4 月、10 月监测结果显示第一、第三海水浴场剖面形态存在一定的季节变化, 石老人海水浴场剖面季节变化不明显。第一海水浴场各剖面平均高潮线以上滩肩区域变化不明显, 变化明显的区域主要集中于滩面到水下沙坝附近, 局部存在较为明显的下蚀或上淤(图 3A—

图 3C), 例如第一海水浴场 PM3 在离岸 100 m 附近可见较明显的下蚀, 幅度可达 0.5 m, PM2 从离岸 100 m 附近开始至水边线范围内的滩面区域也存在约 0.2 m 的下蚀, 但从整体来说各剖面的形态变化并不强烈, 总的来说处于稳定状态; 第三海水浴场只有 PM4 出现了明显的滩肩后移、滩面顶部上淤(图 3D), PM5 的形态变化相对较小(图 3E); 石老人海水浴场三个剖面均未发生明显的季节变化(图 3F—图 3H)。因此整体来说季节性变化对剖面稳定性的研究影响不大。

4 讨论

4.1 海滩短期侵蚀调整的原因分析

从图 2 和图 3 可以看出个别海滩剖面在 2011—2012 年存在短期侵蚀调整。海滩侵蚀往往由海平面变化、风暴潮、人类干扰或其他自然因素导致。海平面变化是海滩侵蚀的重要影响因素^[7-8], 1980—2018 年黄海海平面年均上升速率为 3.2 mm/a (图 4), 2010—2011 年年均上升速率小于 10 mm/a, 2011—2012 年达 53 mm/a, 2012—2019 年年均上升速率仅为 5 mm/a。自然情况下海平面急剧上升会导致海滩侵蚀, 从实际情况来看 2011 年之后第一海水浴场 PM1、PM3 滩肩区域后退较为明显, 石老人海水浴场海滩 PM6 滩肩宽度和单宽体积缩小明显(图 2), 至 2016 年总体一直保持在较稳定的水平, 由图 5 可见石老人海水浴场海滩 PM6 在 2010 年时滩肩以下区域的实测高程相对较高, 而经历 2011—2012 年海平面急剧升高后滩面范围内发生了显著下蚀, 自 2012 年至今始终保持在相对稳定的形态, 这说明海平面急剧上升对海滩的开敞区域造成了明显影响。石老人海水浴场海滩 PM7 平均高潮线附近区域也存在一定下蚀, 但变化幅度均未超过 1 m, 而经历人工养滩的第一、第三海水浴场其他剖面变化较小。

在 2011 年海平面显著升高的同时年平均波高变化不大(约 1.1 m), 但 2011—2012 年台风过境青岛 5 次(表 3)^[28], 远高于当地年均次数(1.1 次)^[41], 且相比其他年份台风强度较大, 路径距离更近, 引起波况短时激变和增水作用, 极易导致开敞区域剖面单宽体积和后滨宽度剧烈减小。例如 2011 年 6 月 26 日超强台风“米雷”导致青岛近海

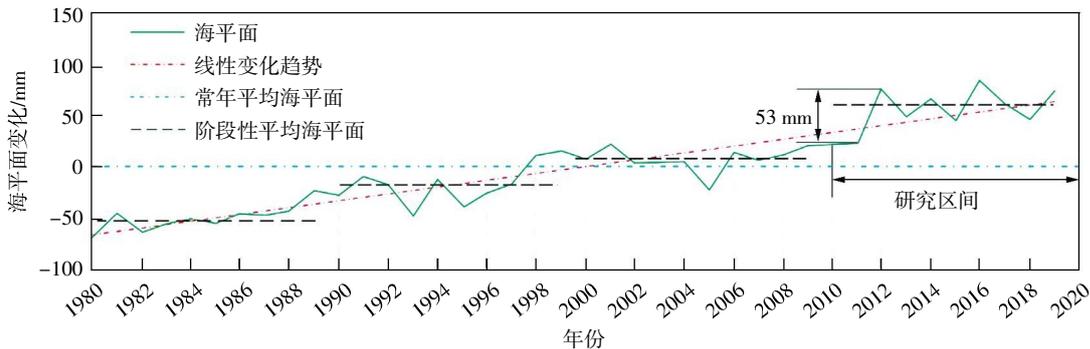


图4 1980—2019年黄海海平面变化趋势

(资料来源:《2019年中国海平面公报》)

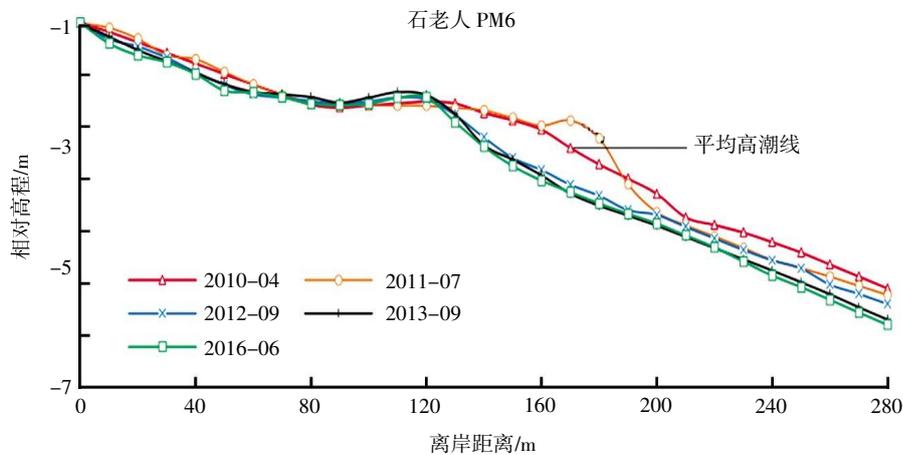


图5 2011年海平面急剧上升后形态变化显著的剖面

表3 2011—2012年期间影响青岛海域的台风^[28]

台风名称	过境日期	最大风力/级	最大风速/(m·s ⁻¹)
布拉万	2012-08-28	13	38
达维	2012-08-02	13	40
卡努	2012-07-18	9	23
梅花	2011-08-08	11	30
圆规	2010-09-01	12	38

出现9~10级大风,浪高最大可达2.5 m;2011年8月7日台风“梅花”以25 km/h的速度过境青岛,部分海域浪高最高可达3~4 m。

4.2 2010—2020年海滩稳定性影响因素分析

海滩剖面数据显示虽然11年来各海滩在前期存在短期的剖面侵蚀或调整过程,但从长期角度来讲各海滩剖面总沙量变化不大,整体处于较稳定的平衡状态。海滩稳定性控制因素一般包括自然因素(海岸地貌、海滩地形)和人为因素两个方面。

4.2.1 自然因素 (1) 海岸地貌对于海滩稳定

的影响。第一、第三海水浴场海滩为双岬角海滩,在岬角影响下湾内波浪强度降低,利于遮蔽岸段沉积物保持平衡。因此这两个海滩虽在海平面和台风作用下略有调整,但变化不大。而石老人海水浴场海滩PM7和PM8受一侧岬角遮蔽总体相对稳定,而PM6没有岬角遮蔽,剖面形态变化较大。与之类似,非洲摩洛哥阿加迪尔湾半遮蔽型海滩在2014年1—3月间8次风暴潮作用下的海滩形态演变也存在空间差异^[42],岬角遮蔽的北部岸段侵蚀程度相对较低,整体稳定性较好,而南部岸段受遮蔽作用较弱。因此,海岸地貌对海滩的稳定性存在一定影响,但通常并不是决定海滩稳定与否的唯一因素。在稳定的水动力作用下,不同海岸地貌对应的海滩一般最终都会趋于稳定状态。

(2) 耗散地形缓冲动力作用。耗散型海滩($\varepsilon > 33$)一般滩面宽广、后滨宽阔,坡度约为 2° 。入射波的能量耗散在宽缓的滩面上,多以崩破方式破碎,减弱了风暴浪潮对海滩的作用强度。第一海水浴场、石老人海水浴场剖面滩肩宽度变化幅度

整体上小于第三海水浴场,前者坡度介于2%~3%,长度普遍大于200 m,后者介于3%~4%,长度约146.4~184.2 m。各海滩 ε 值均大于33(表2),属于典型的耗散型海滩,同时, ε 值越大代表耗散作用越强,第一海水浴场和石老人海滩 ε 值接近且明显大于第三海水浴场海滩(表2),说明前两者对强动力因素的响应变化更小,自然状态下的稳定性更强,解释了第一海水浴场、石老人海水浴场剖面滩肩宽度变化幅度小于第三海水浴场的原因。同时,2010—2012年青岛近海年平均波高在1.1~1.2 m之间,2012年以后略有下降,但总体仍保持在1.0 m以上^[27],期间年均潮差未见明显变化,总体保持在2.78 m附近。因此,2010—2020年青岛海域的波浪和潮汐特征变化较小,使得三个耗散型海滩更加稳定,一般不会发生显著侵蚀。

4.2.2 人为因素 研究区域的海滩虽然因海平面上升和频繁的台风而造成短期的轻微侵蚀调整,但是通过有效管理人类活动,优化海滩维护方式,可以维持海滩稳定。这些管理包括:

(1) 及时监测海滩剖面变化并修复。当浴场管理部门发现海滩有一定的侵蚀后退,应及时进行海滩的修复和养护。各海滩的人工维护主要包括内部沉积物调整和抛撒外源沙。2001年以前第一海水浴场存在较多堤坝和入海码头,海滩侵蚀现象明显,2001年开始逐渐被合理拆除。早期监测结果显示自然条件下第一海水浴场沉积物自西向东输移,因此在这一阶段一般将东部沉积物向西侧进行内部均衡调整,这种方法无需购买外源沙,通过较低成本即可获得显著的修复效果,2010年、2012年、2015年多次进行“东沙西送”,这是海滩多年一直保持稳定的原因之一。

后期管理部门开始进行小规模抛沙养滩以快速还原地貌,例如2017年7月对第一海水浴场 $3.2 \times 10^4 \text{ m}^2$ 的海滩进行喂养,同年6月对第三海水浴场也进行了补沙,补沙总面积约 $80\,000 \text{ m}^2$,抛沙量 $20\,000 \text{ m}^3$ 。本次补沙后第一海水浴场明显上淤,第三海水浴场海滩也较为稳定(图3),说明少量人工补沙能显著缓解海滩侵蚀、提高海滩稳定性。石老人海水浴场没有进行人工抛沙,但日常维护十分频繁,例如2014年夏季石老人海滩进行了封闭改造,对海滩地貌不稳定的区域进行小范围维护,因此石老人海水浴场海滩退化并不明显。

(2) 建立海滩管理制度,禁止损害海滩行为。自20世纪开始,日本、美国、荷兰等国家陆续制定海滩管理政策。青岛市海滩管理政策完善程度处于国内前列,在我国早期海滩管理体系不健全时率先进行实践。1995年《青岛市海岸带规划管理规定》提出对不合理堤坝、入海码头进行改建拆除,截至目前各海滩附近几乎没有破坏海岸整体自然地貌、影响泥沙供应输移的不合理工程。2013年《青岛市海水浴场管理办法》规范了海水浴场的科学管理和用途规划,明确了各级部门的海滩管理职责,禁止违规建设、非法采石挖沙、非法养殖等行为,提出维护海滩稳定性的规划。2019年《青岛市海岸带保护与利用管理条例》指出要严格控制改变自然地貌的开发活动,严格控制占用岸线长度、海岸建筑规模;在海岸带范围内禁止采挖砾石、海砂;除必需设施外不得新建、扩建建筑物,对影响海滩完整性并导致侵蚀的不合理建筑应及时改造或清除;同时该条例还指出要及时修复受到破坏的海滩。基于上述法规条例,当地部门有序进行海滩保护工作,执行力度较大,这也是近年来海滩保持稳定的重要原因。

4.3 海滩管理与维护的建议

从青岛海滩2010—2020年基本保持稳定的结果来看,在人为活动是海滩侵蚀主要因素的背景下,优化的管理整体上已起到维持海滩稳定的主导作用,对常见的导致海滩侵蚀的人类活动(例如不合理海岸工程、挖沙等)进行了限制,如果这些人类活动没有得到限制,则会产生严重的后果。例如海南万宁沙滩在自然条件下处于平衡但近年来侵蚀明显,海平面上升引起的侵蚀(0.09 m/a)远小于实际蚀退($10\sim 20 \text{ m/a}$),滨海旅游、前滨采砂、水产养殖、砍伐固沙防护林以及开采砂矿是海滩侵蚀的主因^[43-44]。1985年以来银滩岸线加剧后退80 m,2016—2018年下蚀 $20\sim 30 \text{ cm}$ ^[4],大量堤坝码头与观景平台等不合理工程阻断了泥沙输移,促进了银滩侵蚀。

因此,人类活动较海平面上升可能会导致更为严重的海滩侵蚀。庄振业等认为对于人类活动频繁的海滩,海平面变化的影响仅占10%^[45]。目前许多地区开始制定海滩管理政策,例如2019年的《日照市海岸带保护与利用管理条例》和《烟台市海岸带保护条例》,禁止海滩违规养殖及矿砂违法开采,

限期拆除改变沙滩自然属性的建筑物, 解决了不合理海岸工程对海滩的负面影响。2020 年《广西壮族自治区北海银滩保护条例》提出保护海滩完整性, 禁止新建、扩建永久性建筑物、禁止损毁沙滩。虽然这些管理政策出台时间较青岛市晚, 但是结合青岛海滩的研究结果, 在政策执行后海滩会得到一定的恢复。

综上所述, 如果有效管理人类活动, 针对自然因素对海滩进行调整则可以做到有效的海滩维护。需要在以下几个方面加强海滩管理:

(1) 定期监测海滩形态。及时掌握海滩变化趋势, 获得海滩变化的基础数据, 为海滩规划保护以及政策制定提供基础, 并可预警沙滩侵蚀, 通过较小成本即可有效巩固海滩稳定性。

(2) 科学规划海岸工程。海岸工程选址应避免影响泥沙输移, 定期监测现有建筑对海滩产生的影响, 科学规划人工岬湾、丁坝、防波堤等防护建筑, 按照实地情况提高适用性, 既要防止海滩侵蚀又不能影响海滩保沙促淤的需求。

(3) 科学制定海滩管理政策, 加强监管力度。兼顾海滩开发与保护, 严禁违法采砂、破坏沙丘和防护林, 科学规划水产养殖和矿砂开采, 并通过公共宣传促使公众意识到保护海滩的重要性。对于破坏海滩稳定性的行为、非法工程应严厉处罚, 而对于必要的海岸工程, 则需要预测附近海岸的动态变化, 预设补偿资金用于对侵蚀岸段的修复。

(4) 及时进行海滩修复。在海滩的早期侵蚀阶段就对其进行小规模修复, 可及时维持海滩稳定。虽然目前国内外在海滩养护方面都取得了明显的效果^[14, 46], 但是如果能够在海滩没有遭受明显的侵蚀时就对海滩进行科学优化管理, 则可以避免大型修复工程及其带来的问题。关注海滩的变化动态, 及时发现问题并进行小规模的整治修复, 成本低, 花费少, 可以更好地保护海滩资源以及海滩生态平衡。

5 结论

依据第一、第三和石老人海水浴场海滩2010—2020年的监测数据, 分析了砂质海滩的长期时空演化及稳定性特征, 得到以下结论:

(1) 海滩在 2011 年发生短期侵蚀, 原因主要

是海平面急剧上升和高频率、高强度台风引起的大浪和风暴潮。后面长期来看三个海滩除石老人 PM6 侵蚀明显外其他剖面较稳定。2010—2020 年间第一、第三和石老人海水浴场滩肩宽度变化分别为 1.5~4 m、0~7.6 m 和 14~34 m, 单宽体积变化分别为 46.5~79.4 m³、10.7~21.3 m³ 和 8.5~97.2 m³, 滩肩宽度、垂向高度存在小幅波动, 但总体处于稳定状态。

(2) 海滩稳定原因分为自然因素和人为因素。虽然自然因素包括岬湾地貌及耗散型地形对海滩稳定有一定作用, 但不是主要因素, 而人类对于海滩的优化管理, 包括定期监测、制定政策法规、控制不合理建筑、挖沙采矿及非法养殖等维护管理等, 已成为影响海滩稳定性的关键因素。

(3) 在海滩没有遭受明显的侵蚀时就对海滩进行科学优化管理, 可以避免大型的修复工程及其带来的问题。关注海滩变化动态, 及时发现问题并进行小规模整治修复, 成本低、花费少, 可以更好地保护海滩资源及生态平衡。

致谢: 海滩剖面实地监测由王兴、郑谦、袁忠鹏、唐怀能、黄畅、彭锦、Abiola John Wright、郑桂青等人完成, 在此表示诚挚谢意。

参 考 文 献

- [1] KOMAR P D. Coastal erosion—underlying factors and human impacts[J]. *Shore & Beach*, 2000, 68(1): 3–16.
- [2] 李广雪, 宫立新, 杨继超, 等. 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*, 2013, 33(5): 35–46.
- [3] BURVINGT O, MASSELINK G, RUSSELL P, et al. Classification of beach response to extreme storms[J]. *Geomorphology*, 2017, 295: 722–737.
- [4] 刘涛, 王增军, 张建兵. 广西北海银滩侵蚀动力研究[J]. *海洋学报*, 2020, 42(7): 147–154.
- [5] 蔡锋, 苏贤泽, 刘建辉, 等. 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*, 2008, 18(10): 1093–1103.
- [6] LASHTEH M A, NESHAEI, GHANBARPOUR F. The effect of sea level rise on beach morphology of Caspian Sea coast[J]. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 2017, 11(4): 369–379.
- [7] ABESSOLO G O, ALMAR R, JOUANNO J, et al. Beach adaptation to intraseasonal sea level changes[J]. *Environmental Research Communications*, 2020, 2(5): 051003.
- [8] PATTRAKORN N, SOMPRATANA R, KEIKO U. Impact of sea level rise on tourism carrying capacity in thailand[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2020, 8(2): 104.

- [9] JOCHEN H, ROBERT J N, RICHARD S J T, et al. A global analysis of erosion of sandy beaches and sea-level rise: An application of DIVA[J]. *Global and Planetary Change*, 2013, 111: 150–158.
- [10] 夏东兴, 王文海, 武桂秋, 等. 中国海岸侵蚀述要[J]. *地理学报*, 1993(5): 468–476.
- [11] 程林, 王伟伟, 付元宾, 等. 不同类型海岛的海滩稳定性分析——以大连长兴岛和唐山打网岗岛为例[J]. *海洋科学进展*, 2015, 33(3): 313–323.
- [12] 周晗宇, 陈沈良, 钟小菁, 等. 海口湾西海岸海滩沉积物与海滩稳定性分析[J]. *热带海洋学报*, 2013, 32(1): 26–34.
- [13] MIREILLE E C, ANGELICA F D, RODOLFO S, et al. Beach erosion and loss of protection environmental services in Cancun, Mexico[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2018, 156: 183–197.
- [14] VALVERDE H R, TREMBANIS A C, PIKLEY O H. Summary of beach nourishment episodes on the U.S. east coast barrier islands[J]. *Journal of Coastal Research*, 1999, 15(4): 1100–1118.
- [15] 张明慧, 孙昭晨, 梁秀秀, 等. 砂质海岸整治修复效果模糊综合评价研究——以营口月亮湾为例[J]. *海洋通报*, 2019, 38(6): 698–706.
- [16] 李兵, 蔡锋, 曹立华, 等. 福建砂质海岸侵蚀原因和防护对策研究[J]. *台湾海峡*, 2009, 28(2): 156–162.
- [17] 王文海, 吴桑云. 山东省的海岸侵蚀灾害[J]. *海岸工程*, 1996, 5(1): 12–17.
- [18] 杨继超, 李广雪, 宫立新, 等. 山东威海滨海沙滩侵蚀现状和原因分析[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2012, 42(12): 97–106.
- [19] 李团结, 刘春杉, 李涛, 等. 雷州半岛海岸侵蚀及其原因研究[J]. *热带地理*, 2011, 31(3): 243–250.
- [20] 宫立新. 山东半岛东部海滩侵蚀现状与保护研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- [21] 庄振业, 曹立华, 李兵, 等. 我国海滩养护现状[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2011, 31(3): 133–139.
- [22] 郭景松, 吴伦宇, 乔方利, 等. 汇泉湾水动力环境观测和数值模拟研究[J]. *海洋与湖沼*, 2018, 49(4): 714–724.
- [23] 于洪军, 徐兴永, 李萍, 等. 青岛市浮山湾、汇泉湾、崂山湾海滩与海底沉积环境分析[J]. *海岸工程*, 2003, 12(3): 12–18.
- [24] 陈正新, 董贺平, 赵德志, 等. 青岛前海沉积物运移特征[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2006, 26(5): 45–53.
- [25] 王永红, 孙静, 庄振业. 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(自然科学版)*, 2012, 42(12): 70–76.
- [26] 蒋杨权, 王然, 韦龙明, 等. 青岛汇泉湾海滩粒度变化原因分析及保护建议[J]. *南方国土资源*, 2013(10): 38–40.
- [27] 冯哲, 王永红, 易李达玲. 岬湾海滩剖面中长期变化特征及其控制因素——以青岛石老人海滩为例[J]. *海洋科学*, 2016, 40(7): 100–109.
- [28] 梁伟强, 王永红. 半遮蔽型海滩剖面长期时空演化过程的经验正交函数分析[J]. *海洋与湖沼*, 2021, 52(4): 834–845.
- [29] 马莹. 青岛海滩表面磁性特征分析及其指示意义[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- [30] WANG Y H, HUANG Q H, LEMCKERT C, et al. Laboratory and field magnetic evaluation of the heavy metal contamination on Shilaoren Beach, China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, 117(1/2): 291–301.
- [31] SHENOI S S C, MURTY C S, VEERAYYA M. Monsoon-induced seasonal variability of sheltered versus exposed beaches along the west coast of India[J]. *Marine Geology*, 1987, 76: 117–130.
- [32] LARSON M, KRAUS N C. Prediction of cross-shore sediment transport at different spatial and temporal scales[J]. *Marine Geology*, 1995, 126(1/4): 111–127.
- [33] 李志龙, 陈子燊, 戴志军. 粤东汕尾岬间海滩体积短期变化分析[J]. *中山大学学报: 自然科学版*, 2004, 43(2): 112–116.
- [34] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志(第四分册)[M]. 北京: 海洋出版社, 1993.
- [35] 于乾. 青岛近海环境动力的集成分析与数据库建立[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- [36] 孙静. 青岛市海滩沉积地貌及质量评价[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
- [37] GUZA R T, BOWEN A J. The resonant instabilities of long waves obliquely incident on a beach[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1975, 80(33): 4529–4534.
- [38] GUZA R T, INMAN D L. Edge waves and beach cusps[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1975, 80(21): 2997–3012.
- [39] 王文介, 杨雪舞. 华南沿海海滩状态和演变[J]. *热带海洋*, 1996, 15(4): 9–16.
- [40] KOMAR P D, GAUHAN M K. Airy wave theory and breaker height prediction[C]//Proceedings of the 13th Coastal Engineering Conference, 1972: 405–418.
- [41] 周良勇, 薛春汀, 刘健, 等. 山东半岛东、北部海滩动力地貌特征及影响因素[J]. *海洋科学进展*, 2013, 31(1): 83–94.
- [42] AOUCHE I, DAOUDI L, ANTHONY E J, et al. The impact of storms in the morphodynamic evolution of a human-impacted semi-sheltered beach (Agadir Bay, Morocco)[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2016, 115: 32–47.
- [43] 田会波, 印萍, 贾永刚. 万宁东部海岸侵蚀现状及原因分析[J]. *海洋环境科学*, 2016, 35(5): 718–724.
- [44] 田会波, 印萍, 阳凡林. 海南省万宁东部砂质海岸侵蚀特征分析[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2018, 38(4): 44–55.
- [45] 庄振业, 印萍, 吴建政, 等. 鲁南沙质海岸的侵蚀量及其影响因素. *海洋地质与第四纪地质*, 2000, 20(3): 15–21.
- [46] 刘修锦, 王永红, 杨燕雄, 等. 海滩养护后剖面变化过程研究——以北戴河西海滩和中海滩为例[J]. *海洋地质前沿*, 2013, 29(2): 53–61.

(本文编辑: 崔尚公)