



沉积物供给影响下厦门岛东南部海滩响应差异性研究

朱晓晶, 戚洪帅, 雷刚, 蔡锋, 赵绍华, 刘根, 陈橙

The study of the difference of beach response under sediment supply in southeast of Xiamen Island

ZHU Xiaojing, QI Hongshuai, LEI Gang, CAI Feng, ZHAO Shaohua, LIU Gen, and CHEN Cheng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2022012901>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

新西兰Hikurangi俯冲带沉积物成岩作用示踪研究：来自孔隙流体Sr同位素证据

A tracing study of sediment diagenesis in the Hikurangi subduction zone, New Zealand: Evidence from Sr isotope of pore fluid
海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 115

南海南部浅表层柱状沉积物孔隙水地球化学特征对甲烷渗漏活动的指示

Pore water geochemistry of shallow surface sediments in the southern South China Sea and its implications for methane seepage activities
海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 112

基于ERT技术的含水合物沉积物可视化探测模拟实验

An experimental study on visual detection of hydrate-bearing sediments based on ERT
海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 206

莱州湾表层沉积物重金属分布特征、污染评价与来源分析

Spatial distribution of heavy metals in the surface sediments of Laizhou Bay and their sources and pollution assessment
海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 67

海洋沉积物中金属依赖型甲烷厌氧氧化作用研究进展及展望

Research progress and prospects of metal-dependent anaerobic methane oxidation in marine sediments
海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 58

江苏中部海岸晚第四纪沉积物的粒度与磁化率特征及其古环境意义

Characteristics of grain size and magnetic susceptibility of the Late Quaternary sediments from core 07SR01 in the middle Jiangsu coast and their paleoenvironmental significances
海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 210



关注微信公众号，获得更多资讯信息

朱晓晶, 戚洪帅, 雷刚, 等. 沉积物供给影响下厦门岛东南部海滩响应差异性研究 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(4): 96-108.
ZHU Xiaojing, QI Hongshuai, LEI Gang, et al. The study of the difference of beach response under sediment supply in southeast of Xiamen Island[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2022, 42(4): 96-108.

沉积物供给影响下厦门岛东南部海滩响应差异性研究

朱晓晶^{1,2}, 戚洪帅^{1,3}, 雷刚^{1,3}, 蔡锋^{1,3}, 赵绍华^{1,3}, 刘根^{1,3}, 陈橙²

1. 自然资源部第三海洋研究所, 厦门 361005
2. 福州大学土木工程学院, 福州 350108
3. 自然资源部海洋生态保护与修复重点实验室, 厦门 361005

摘要:以厦门岛东南部海滩为例, 基于 10 条剖面连续 6 年野外实测地形数据, 利用经验正交函数分析方法 (EOF) 提取海滩变化的主要模态, 分析海滩中长期蚀淤变化特征及其控制因素。EOF 提取方差总占比超过 90% 的前三种模态反映研究区海滩时空演变特征: 沙源条件对海滩蚀淤过程起主导作用为第一模态, 受上游沙源条件及沿岸输沙方向影响, 海滩剖面在纵向上存在差异性, 研究区北侧剖面持续淤积, 南侧剖面则呈现侵蚀状态; 第二模态为波浪季节性变化导致海滩滩肩在冬季变窄和夏季变宽之间旋回; 人类活动影响滩面形态变化为第三模态, 人类活动对岸滩形态及其变化产生一定影响, 其中人工构筑物对研究区海滩影响较大。从多年海滩变化来看, 沙源条件控制海滩响应差异性, 沉积物供给充足的海滩形态变化幅度及系统可调节范围比沉积物匮乏海滩大, 泥沙供给贫乏的海滩地形变化幅度虽小, 其系统缓冲能力及自适应能力却弱。

关键词:沉积物供给; 经验正交函数; 海滩剖面; 中长期演变; 厦门岛东南部海滩

中图分类号: P736 文献标识码: A DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2022012901

The study of the difference of beach response under sediment supply in southeast of Xiamen Island

ZHU Xiaojing^{1,2}, QI Hongshuai^{1,3}, LEI Gang^{1,3}, CAI Feng^{1,3}, ZHAO Shaohua^{1,3}, LIU Gen^{1,3}, CHEN Cheng²

1. Third Institute of Oceanography, MNR, Xiamen 361005, China
2. School of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China
3. Fujian Provincial Key Laboratory of Marine Ecological Conservation and Restoration, Xiamen 361005, China

Abstract: The morphological evolution of a beach in the southeastern part of Xiamen Island, Fujian, China was analyzed as an example to show the responses of the beach to different sediment supplies. Based on the topographic data from 10 beach profiles monitored for six consecutive years, the method of Empirical Orthogonal Function (EOF) analysis was applied to help identify the morphological evolution and the associated driving factors. More than 90% of the total variance of the first three empirical orthogonal functions was used to reflect the basic evolution of the beach. The first mode represents the remarkable erosion or deposition trend of beach profiles on a long time scale, indicating that sediment source plays a dominate role in long-term beach evolution. Beach profiles in the northern part of the study area show continuous seaward accretion, while those in the southern part show retreat. The second mode represents the seasonal transition in beach berm between summer and winter, which is associated with the seasonal variation in wave climate. The third mode represents the morphological changes of intertidal zone, which indicates the impacts of human activities, especially artificial structures along the coast. This study highlights the dominant role of sediment source in medium- to long-term morphological evolution of beaches. Beaches with sufficient sediment supply show a larger range of morphological adjustment and stronger adaptability than those with limited sediment supply.

Key words: sediment supply; empirical orthogonal function; beach profile; medium- to long-term evolution; beach in the southeast of Xiamen Island

海滩是海陆相互作用敏感地带的重要地貌单元^[1-2], 海滩系统的物质组成和地形地貌的时空变化

过程是波浪、潮汐和沿岸流等多种海岸动力相互作用的结果^[3-4]。海滩稳定性主要取决于泥沙供给和

资助项目: 国家自然科学基金重点项目 (41930538) 和面上项目 (42076058)

作者简介: 朱晓晶 (1997—), 女, 硕士研究生, 水利工程专业, E-mail: 18390865634@163.com

通讯作者: 雷刚 (1969—), 男, 正高级工程师, 主要从事海岸地形地貌、海滩养护与修复工程研究, E-mail: leigang@tio.org.cn

收稿日期: 2022-01-29; 改回日期: 2022-03-24. 文凤英编辑

海岸动力之间的均衡情况^[5]。随着人类社会、经济的高度发展,人为活动造成的负面环境影响日益扩大,例如沿岸入海泥沙锐减,全球气候变暖引发的海平面上升和风暴浪潮频发以及人们对海岸的不合理开发等^[6-7],破坏了海岸泥沙动力平衡。海滩具有重要的生态、经济和社会价值^[8],掌握其演变规律有助于对海滩的合理开发与防护。海滩剖面时空变化过程是理解海滩演变的关键所在,前人在广东海滩进行了月日短周期或季节性的中期变化方面的研究^[9-10],而对沉积物供给影响下海滩长周期演变特征研究较少。泥沙是塑造海滩的物质基础,在入海泥沙逐渐减少的大背景下^[11],研究沉积物供给影响下海滩演变过程尤为重要。

经验正交函数(EOF)分析技术是被大家广泛使用且能有效地提取海滩演变数据中主要模态和时空演变信息的一种多元统计分析技术^[12-13],不少学者利用经验正交函数分析方法提取海滩演变数据中主要模态和时空演变信息。Gabriela Medellin 等构建临时丁坝造成岸线扰动,结合经验正交分析方法分析海滩在丁坝搭建及拆除后海滩形态及岸线恢复速度与过程^[14];Aubrey 对美国加利福尼亚州拉荷亚的海滩剖面进行 EOF 分析发现剖面上具有两个指示泥沙输移方向的关键点,这两个关键点显示低波能情况下泥沙会在离岸和向岸两个方向上输移,而非此前传统认知的海滩在低波能环境下持续向岸输移^[15];Hoang 等使用 EOF 方法分析 2011 年日本仙台海啸发生前后约 7 年内海岸剖面的演化过程,第一模态为沉积物的沿岸输移,第二模态在海啸发生后贡献率增大 4 倍,此后随着海滩形态逐渐恢复,解释极端天气对以浪控为主的剖面的影响^[16]。陈子燊等通过粤西水东弧形海湾海滩长时段重复测量的地形剖面,利用 EOF 方法得出了海滩地形主要由水下沙坝运移、滩肩进退和后滨侵蚀 3 个空间过程构成^[17];曹惠美等应用经验正交函数分析了厦门香山-长尾礁海滩在人工养护 5 年海滩剖面的时空变化特征,养护后海滩形态达到预期效果^[18];岳保静等应用 EOF 方法分析山东半岛南北岸两个砂质海滩剖面时空演变特征,得出潮汐是影响山东半岛砂质海滩发育演变的最主要因素,风浪季节性周期变化为次要因素^[19];朱士兵等通过经验正交方法和台风前后沉积物粒度参数对比分析,得出台风作用过程中滩面地形的调整过程^[20]。

为了探讨沉积物供给变化影响下海滩的响应特征,本文以厦门岛东南段海滩作为研究对象,利用 2016—2021 年野外实测数据,结合 EOF 方法分

析 10 条剖面以获得海滩变化特征,探讨海滩地貌对沉积物供给的响应特征,认识海滩的中长期演变趋势和影响因素。

1 研究区概况

研究区位于厦门岛东南部,北起石胥头岬角,南至溪头角,长约 4 km(图 1)。位于厦门港湾内,受大、小金门地形影响,外海波浪在向近岸传播的过程中,波高逐渐衰减。湾口常浪向为 SSE 向,次浪向为 SE 向,强浪向为 E 和 NE 向。春、夏两季常浪向为 SSE 向,冬季常浪向为 NE 向。厦门东南部岸段年均有效波高约 0.15~0.35 m,平均浪周期为 2.4~3.6 s,最大周期可达 20 s^[21-22]。厦门海域属强潮区,潮汐类型为正规半日潮,平均潮差 3.99 m,最大潮差 6.42 m。涨潮流向 ENE,落潮流向 WSW,涨落潮流向基本平行海岸,落潮流速小于涨潮流速。厦门岛位于副热带季风区,风向和风速的季节变化十分明显,冬半年盛行 NE-ENE 向风,夏半年主要以 E 和 SSE 向风为主,年最多风向 NE,频率为 15%。研究区岸线较平直,走向为 NE 向,向岸入射波浪能量相对较强,发育低潮阶地型强潮海滩,滩面沉积物以粗砂为主,滩面坡度较大。厦门海滩的物质来源主要是陆域侵蚀剥蚀和近海泥沙向岸输移。20 世纪 90 年代厦门岛填海造地及海岸工程建设大规模开展,无序采砂引起近岸泥沙大量减少,海堤固化岸线使得侵蚀来沙基本全无,导致研究区海滩长期处于泥沙亏损状态^[23]。为了修复受损海滩,厦门市 2012 年在会展中心岸段填砂 45 万 m³ 进行海滩养护^[24],2019 年前后又对部分岸段海滩应急性补沙养护,在研究区南侧侵蚀热点区域补沙 2 000 m³。

2 资料与方法

2.1 数据获取

为了研究厦门岛东南部海滩地形地貌长期变化过程,2016—2021 年对该岸段 10 条固定剖面进行了定期监测(表 1),观测时间为 2016-05-09,2016-09-22,2017-01-14,2017-09-19,2018-03-13,2018-12-08,2019-05-22,2019-12-19,2020-05-15,2020-08-15,2021-01-16,2021-04-21。采用 GPS-RTK(Global Position System-Real-time Kinematic),结合 CORS(Continuously Operating Reference Stations)对沙滩特征剖面形态开展重复观测,观测范围为后滨至低潮

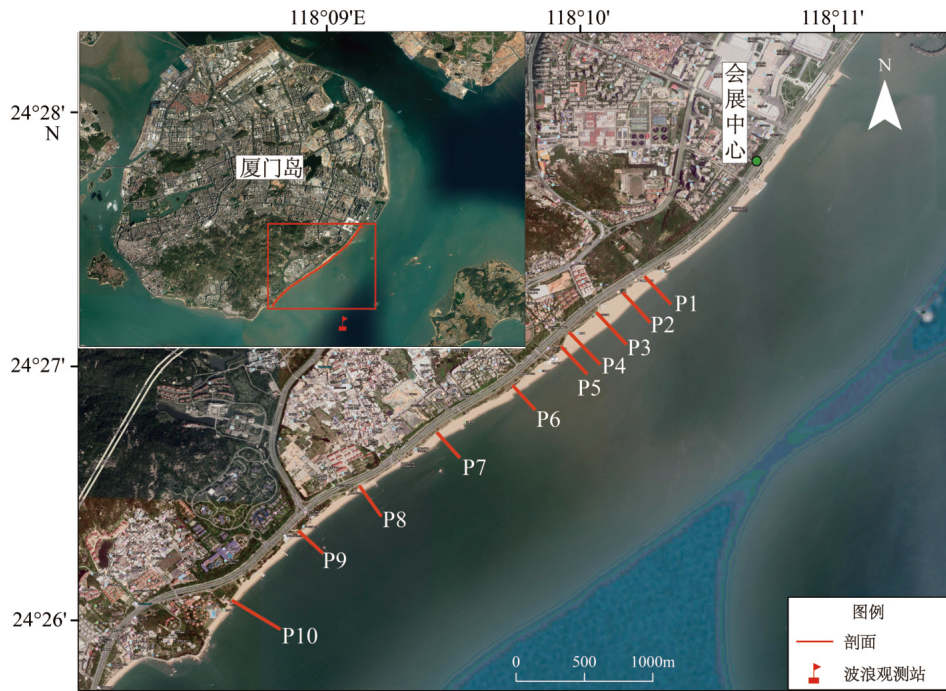


图1 研究区域图

Fig.1 Location of the study area

表1 剖面基本信息

Table 1 Basic information of the beach profiles

| 剖面名称 | 桩点经纬度 | 方位角 |
|------|-------------------------------|---------|
| P1 | 24°27'21.31"N, 118°10'15.16"E | 139°00' |
| P2 | 24°27'17.43"N, 118°10'10.03"E | 139°11' |
| P3 | 24°27'12.87"N, 118°10'03.71"E | 139°09' |
| P4 | 24°27'08.12"N, 118°09'57.30"E | 139°09' |
| P5 | 24°27'04.71"N, 118°09'55.42"E | 139°08' |
| P6 | 24°26'56.35"N, 118°09'43.21"E | 139°43' |
| P7 | 24°26'45.10"N, 118°09'25.43"E | 140°16' |
| P8 | 24°26'32.16"N, 118°09'07.47"E | 146°31' |
| P9 | 24°26'22.08"N, 118°08'52.25"E | 134°34' |
| P10 | 24°26'04.91"N, 118°08'37.30"E | 123°10' |

线。2016—2019年使用RTK型号为华测X900型, 2020—2021年RTK型号为STONEX S9 II PRO, 其水平和高程精度分别为 ± 8 mm和 ± 15 mm。波浪资料采用2008年10月10日至2009年10月19日的观测数据, 采用海床基进行周年观测, 仪器采用Nortek的“浪龙”(acoustic wave and current, AWAC), 观测点位置为 $24^{\circ}25'22''$ N、 $118^{\circ}10'32''$ E(图1)。

2.2 经验正交函数

经验正交函数方法可以用来分析海滩剖面随时间或者空间的变化^[25-26], 通过提取主要的空间模态用以解释原始数据的主要特征。将特征值排序并累计, 其对应模态的贡献率累计达到90%, 即可以用来揭示原始数据的主要特征。对研究岸段10条剖面共12期地形数据应用剖面正交函数进行

分析, 将剖面各期测量数据统一长度, 然后剖面以2 m间隔进行线性插值, 从而得到对应的海滩剖面高程变化。对矩阵进行距平化预处理, 然后计算其空间协方差矩阵, 其原理如下:

海滩剖面高程的经验正交函数表示为:

$$h(x, t) = \sum_{n=1}^N c_n(t) e_n(x) \quad (1)$$

式中, h 表示时间 t 内的海滩剖面高程, x 表示离岸距离, e_n 为空间特征函数或空间模态, c_n 为对应的时间特征函数或时间模态, 且 e_n 满足相互之间线性无关, 即

$$\sum_x e_n(x) e_m(x) = \delta_{mn} \quad (2)$$

式中, δ_{mn} 为克罗内克 δ , 当 $n \neq m$ 时, 即 e_n 相互独立或不相关, $\delta_{mn}=0$ 。采用拉格朗日乘数法计算出正交特征函数:

$$A e_n(x) = \lambda_n e_n(x) \quad (3)$$

$$A = \frac{1}{N_x N_t} (H H^T) \quad (4)$$

式中, λ_n 为 $e_n(x)$ 特征值, 矩阵 A 采用交叉矩阵计算; N_x 为空间样本数, N_t 为时间样本数, H 由 $h(x, t)$ 的单独要素组成, H^T 是 H 的转置矩阵。

当空间特征函数 $e_n(x)$ 被确定后, 时间特征函数求解过程与其类似, 公式如下:

$$C_n(t) = \sum_{i=1}^{n_x} h(x_i, t) e_n(x_i) \quad (5)$$

3 结果

3.1 岸段整体变化特征

厦门岛东南部海滩类型为低潮阶地型^[27], 后滨发育较为完全滩肩, 上部滩面较陡, 坡折点发育明显, 下部剖面为较平缓的低潮阶地, 其中 P6、P9、P10 后滨滩肩发育较差, 较窄且坡度较大(图 2)。

P1—P5 剖面处于淤积状态, 表现为滩肩向海淤进、坡度整体变缓、滩面明显淤积, P2 滩肩年际向海最大淤进量约为 30.3 m, 年变化量最大约 6.6 m (2018 年)。P4—P5 淤积程度明显小于 P1—P3。P6—P10 则处于侵蚀状态, 整体剖面滩肩向陆缩进, 坡度变陡滩面高程下降, P8 剖面滩肩年际向陆最大蚀退量约 5.0 m, 年变化量最大约 3.6 m (2017 年)。

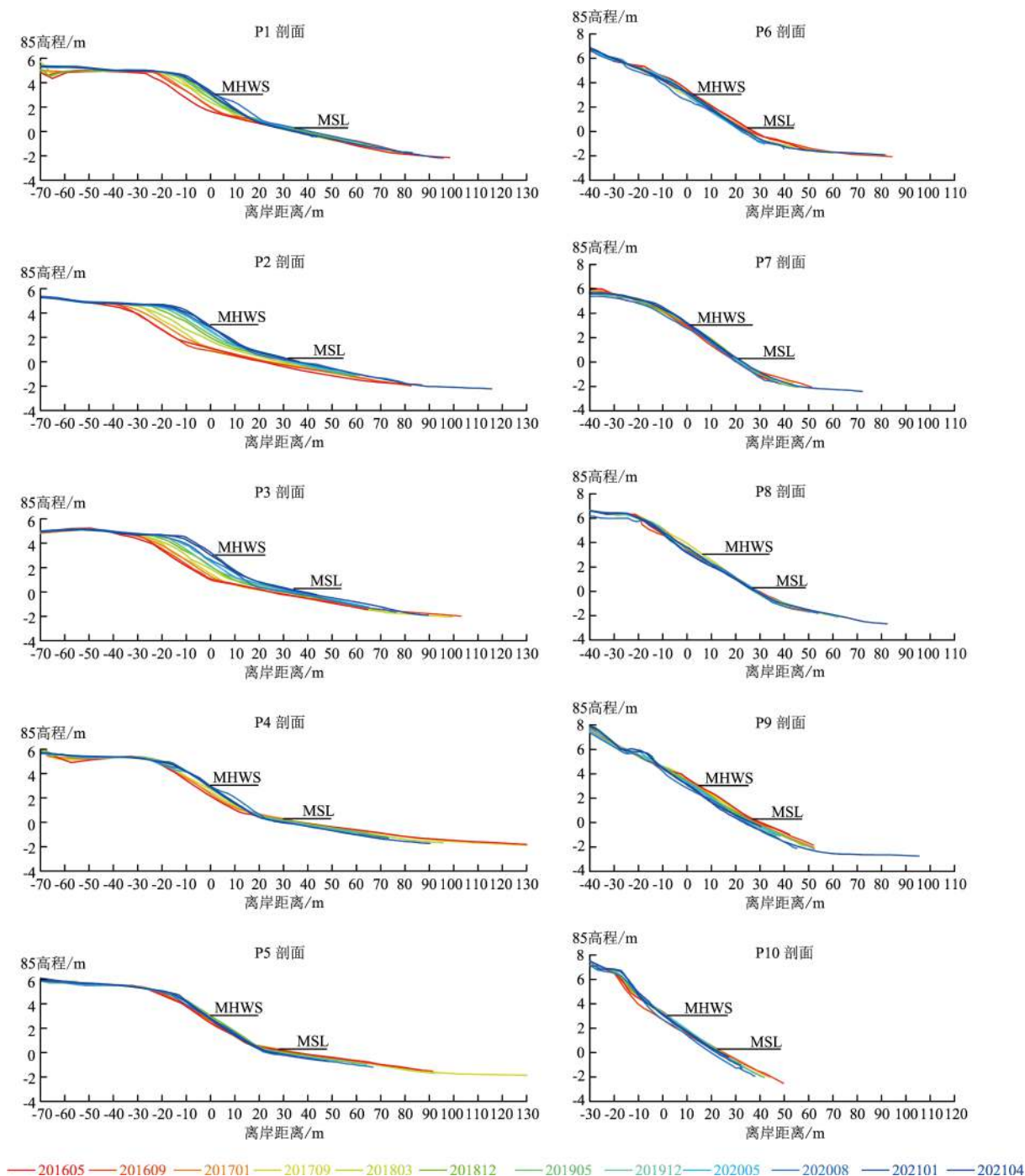


图 2 研究区 2016—2021 年各剖面形态演化

Fig.2 Morphological changes of the beach profiles in the study area from 2016 to 2021

3.2 剖面形态演化特征

采用经验正交函数分析方法对岸段 10 个剖面进行分析,提取 2 个主要空间模态,对前两个模态贡献率占比不足 90%,补充其第三时空模态,并将岸段各剖面分解出的时空模态特征值及其所占方差汇总(表 2)。以最新一期测量数据(即 2021 年 4 月)所对应平均大潮高潮线作为离岸距离零点,向海为正,向陆为负。空间特征函数节点指示的是相对稳定地带,在节点处呈现正负反向,指示该处两侧泥沙向海或者向陆运动,可以将毗邻区域的淤积和侵蚀分开,对应剖面在节点处变化呈现反相趋势,而极值对应变化幅度最大地带。

3.2.1 第一模态

第一模态特征值占总方差的 51%~94%,是海滩剖面变化的最主要模式,代表海滩剖面侵蚀淤积演化的主要趋势。第一空间模态共同性体现在振幅值波动剧烈区域即滩肩外缘线至平均海平面,指示上部剖面为长期蚀淤过程变化的最显著地带(图 3)。不同剖面的空间特征有所差异,主要体现为 P1—P5 剖面主要以“平缓-下凹-平缓”模式,振幅值以负值为主,指示该岸段处于淤积状态。P6 开始转变,P6 和 P8 与另外 3 个剖面节点位置、极值的绝对值大小基本相同,呈镜像对称具有相似性,空间特征模式为“平缓-突增/递减-平缓”。P6 和 P8 分别在 -4 m 和 0 m 处出现节点(零点),从节点向海振幅值由负增大至正极值,指示剖面上淤下侵特征。另外 3 个剖面则是从节点向海振幅值由正值减小

至负值,指示剖面上侵下淤特征。从时间模态上看,研究区北侧剖面和南侧剖面呈现不同演变模式(图 4),北侧剖面时间模态型式具有一致性,呈现从正值向负值递减趋势,指示北侧剖面逐年淤积;P5 变化幅度逐渐减小,P6 开始发生改变,南侧剖面(P6—P10)时间模态呈现为整体变化幅度小、有明显阶段性变化特征,即 2019 年前变化幅度小,2019 年后振幅波动幅度变大。第一模态表明研究区北侧与南侧剖面演变模式存在明显差异。

3.2.2 第二模态和第三模态

第二模态特征值占总方差的 4%~37%,是海滩剖面变化的次要模式。空间模态整体振幅有正有负(图 5)。大部分剖面在 -20~10 m 逐渐减小至负极值,而 10~40 m 逐渐增大,P6、P10 则是先增大至正极值后逐渐减小,即上部剖面与下部剖面空间模态呈反相关系。第二时间模态各剖面呈现较为显著的周期性变化(图 6),以 3—8 月为夏季、9 月至次年 2 月为冬季,整体上时间振幅表现为冬大夏小,具有明显的夏淤冬蚀特征。对于前两个模态累计方差不足 90%的 P5、P7、P8、P9、P10 剖面,提取其第三模态,其特征值占总方差的 6%~18%。空间模态 -50~-20 m 范围振幅变化相对平稳,指示了相对稳定的后滨环境;自 -20 m 向海波动变大,大部分剖面在 -20~0 m 区间出现振幅极值,从 0 m 向海又恢复平稳状态;振幅极值区间对应滩肩外缘线至平均大潮高潮线之间,指示该处剖面变化较大。其对应的时态模态无明显周期变化规律(图 7)。

表 2 各剖面主要模态特征值及所占方差结果
Table 2 Beach profile variation explained by modes

| 区域 | 剖面 | 特征值 | | | 所占方差/% | | | 累计方差/% |
|------|-----|-------|------|------|--------|------|------|--------|
| | | 第一模态 | 第二模态 | 第三模态 | 第一模态 | 第二模态 | 第三模态 | |
| 淤积区域 | P1 | 13.03 | 2.12 | - | 84 | 14 | - | 98 |
| | P2 | 13.40 | 0.55 | - | 94 | 4 | - | 98 |
| | P3 | 4.82 | 0.34 | - | 87 | 6 | - | 93 |
| | P4 | 11.17 | 1.03 | - | 88 | 8 | - | 96 |
| | P5 | 0.55 | 0.39 | 0.05 | 51 | 36 | 5 | 92 |
| 侵蚀区域 | P6 | 3.58 | 0.20 | - | 88 | 5 | - | 93 |
| | P7 | 0.66 | 0.27 | 0.10 | 55 | 22 | 18 | 95 |
| | P8 | 1.56 | 0.30 | 0.18 | 73 | 14 | 8 | 95 |
| | P9 | 3.70 | 1.46 | 0.33 | 64 | 25 | 6 | 95 |
| | P10 | 0.84 | 0.60 | 0.10 | 51 | 37 | 6 | 94 |

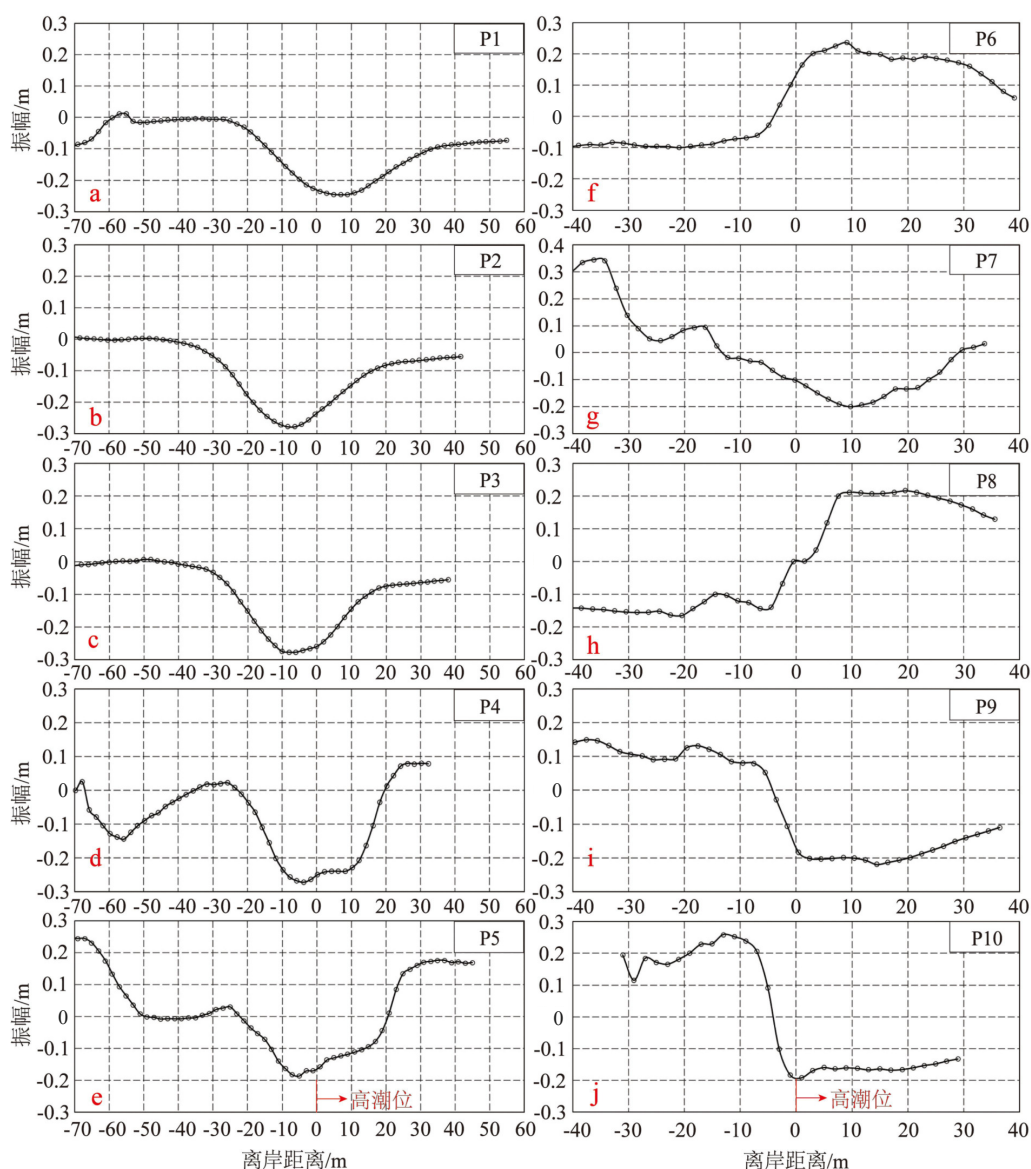


图 3 第一空间模态变化图

Fig.3 The first spatial eigenfunctions of the studied beach profiles

4 讨论

4.1 厦门岛东南岸段海滩剖面变化及控制因素

4.1.1 物源供给对海滩时空演变差异性影响

第一模态在研究区岸段的北侧(P1—P5)与南侧(P6—P10)剖面表现出明显差异性, 北侧时间上以持续递减且振幅波动剧烈演变模式为特征; 南侧时间上以“平缓-突变”且振幅变化小演变模式为最主要特征。这主要受沉积物供给的控制^[28], 沉积物在波浪作用下的沿岸输移是海滩岸线及剖面蚀淤的主要因素, 一般情况下会维持长期的动态平衡状态^[29]。研究区位于厦门岛东南岸段, 北侧由于小金

门岛、大担岛、二担岛等岛屿散点状的半屏障作用, 波浪主要是当地风生浪, 波向和厦门湾常风向 NE 向一致, 而往南岸段开敞程度较大, 南侧东南向浪频率更高。受近海浪况影响, 在北侧岸段沿岸泥沙输移方向自东北往西南, 南侧岸段变成自南向北弱输沙模式^[30]。研究区位于会展人工沙滩南边, 以石胥头小型岩石岬角作为会展海滩与研究区海滩分界点。会展海滩在修建后 4 年内砂量损失约 6 万 m³, 其中竣工后 6 个月内的留存砂量损失近 3 万 m³, 这是由于沿岸输沙作用将沙源快速补给至研究区, 且之后会展海滩留存砂量体积也呈现逐渐减小趋势为下游持续供沙^[31](图 8)。会展中心海滩养护前为泥滩, 沙源供给不足导致会展及研究区海滩长期处于侵蚀状态。而会展海滩修建后, 沿岸输

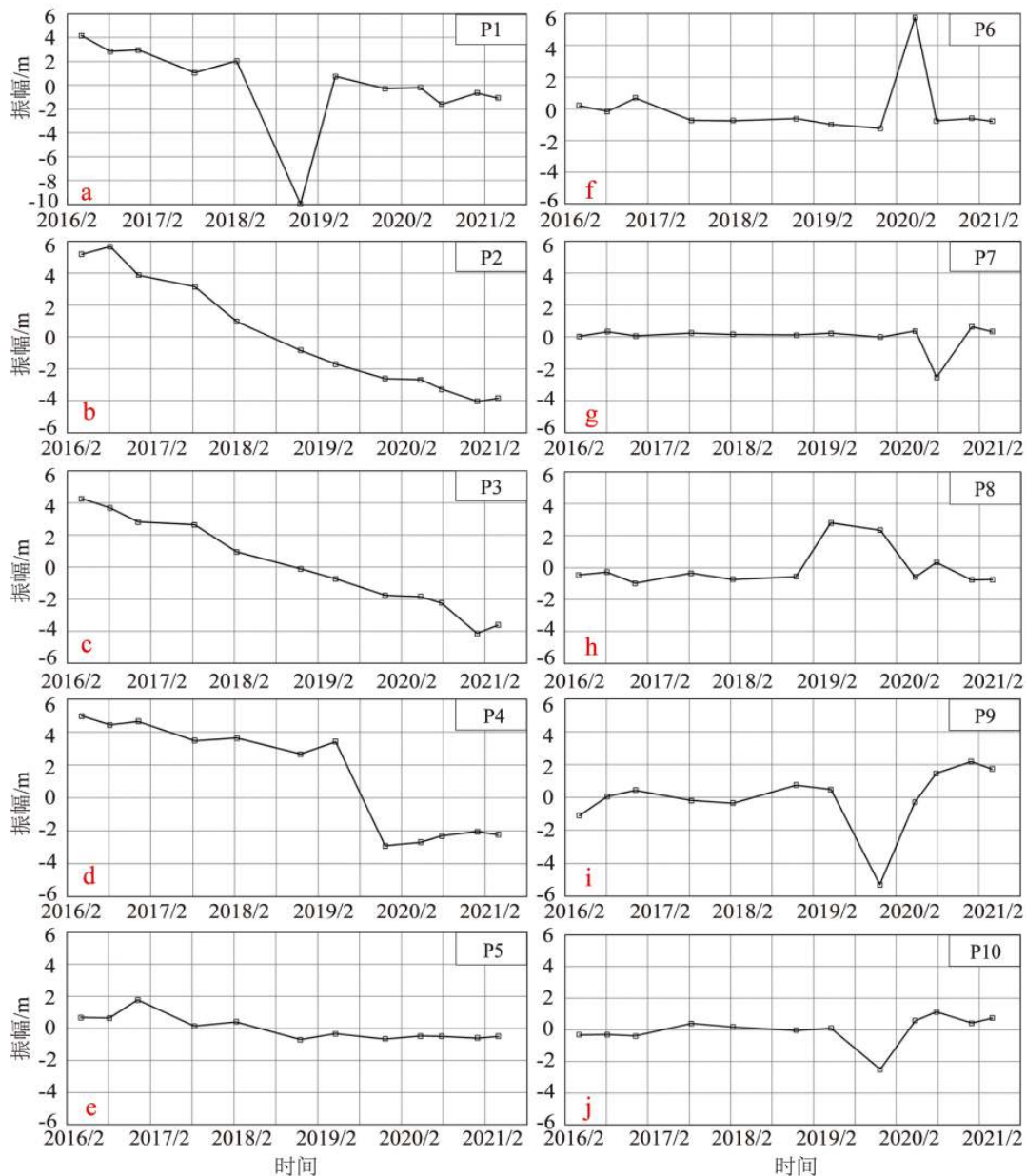


图4 第一时间模态变化图

Fig.4 The first temporal eigenfunctions of the studied beach profiles

沙作用下沉积物易绕过岬角持续地向下游研究区提供沙源。经验正交函数分析结果也显示北侧剖面时间模态呈现出振幅持续减小规律,指示北侧剖面持续淤积(图4)。但沉积物供给范围有限,P4往南剖面淤积程度逐渐减小,加上研究区南侧沿岸输沙方向自南往北出现反向趋势,南端无其他临近沙源补充,因此南侧剖面整体呈侵蚀状态。在2019年前后对南侧岸段抛填2000 m³砂量后,剖面形态在一定时间内保持稳定甚至部分剖面略有淤积,但在2020年下半年又恢复侵蚀状态。由此说明沿岸输沙作用下沉积物供给条件对厦门岛东南部海滩中长期形态变化过程起主导作用。

4.1.2 波浪作用下海滩剖面季节性变化

厦门岛东南部剖面侵蚀淤积程度和过程不同,但整体仍表现出典型季节性变化特征。第二特征函数的空间模态表现为滩面变化活跃,地形变化在上部剖面与下部剖面呈现反相趋势,时间模态表现为岸段剖面夏淤冬蚀。因此,第二模态可以解释动力条件季节性变化导致的海滩滩肩宽度周期性变化。华南沿海区域风浪受季风气候影响明显^[32-33],据观测波浪数据显示研究区夏季常浪向为SSE向(图9), $H_{1/10}$ 波高平均值0.47 m,冬季盛行东北季风且风速大,冬季常浪向为NE向, $H_{1/10}$ 波高平均值为0.61 m。由于近岸波浪作用小,加上强潮影响,

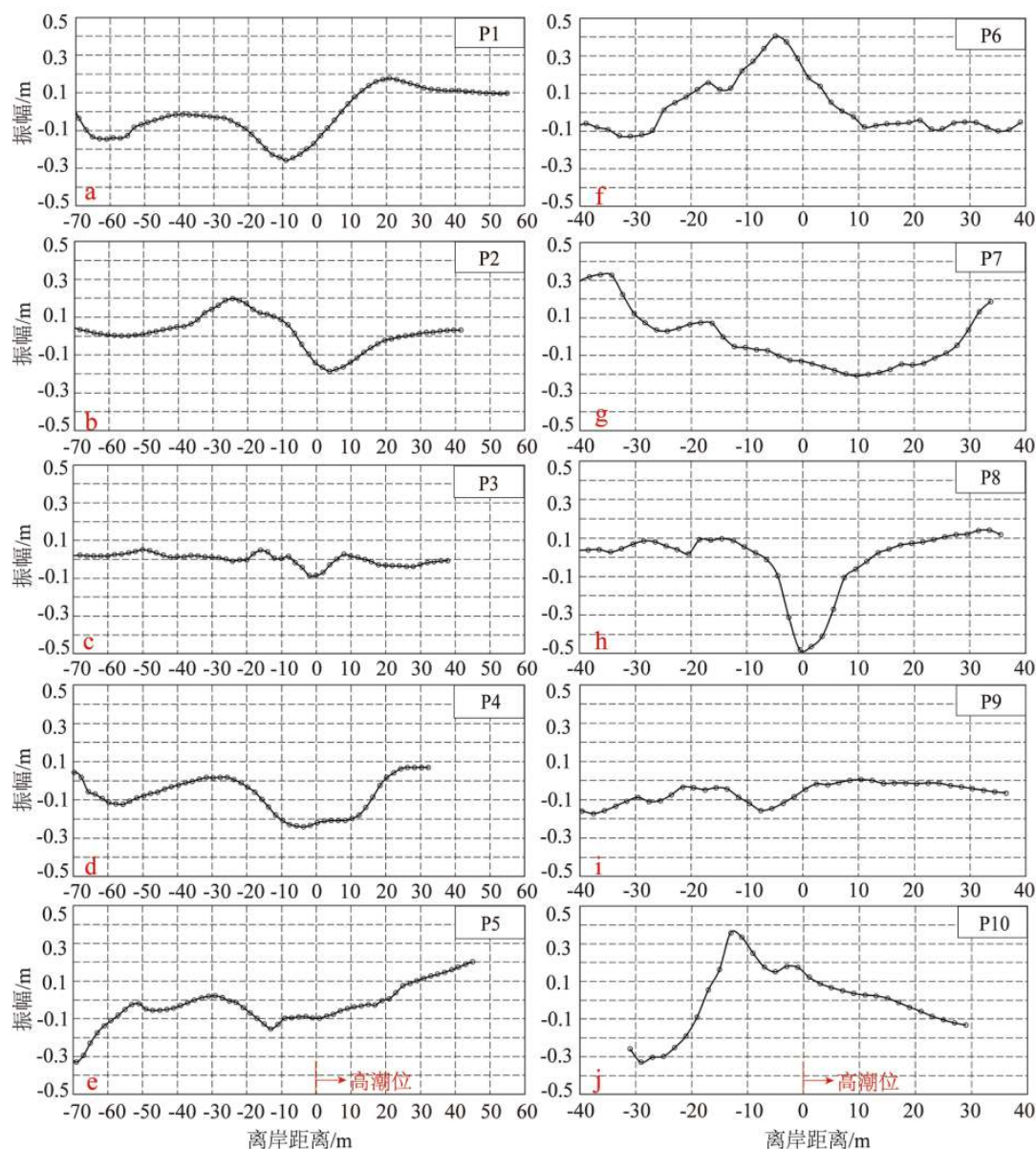


图 5 第二空间模态变化图

Fig.5 The second spatial eigenfunctions of the studied beach profiles

厦门岛东南岸段海滩发育为低潮阶地型强潮海滩^[27], 季风作用下海滩季节性变化并非典型冬季与夏季剖面的转化模式^[34], 海滩剖面仅仅表现出滩肩冬季变窄、夏季变宽。

4.1.3 人类活动的影响

人类活动对岸滩形态及其变化产生一定影响, 其中人工构筑物对海滩影响较大。第三模态在研究区南侧占比较重, 空间上以潮间带波动剧烈为主要特征, 时间上无明显规律, 仅表现为振幅突变并且在一定时间内恢复。这一变化是受人工构筑物影响, P6 剖面北部椰风寨游乐园占滩现象及研究区南侧管涵密集分布(图 1), 影响其沿岸输沙甚至构成侵蚀热点, 是影响海滩形态演变的原因之一。不

合理的城市排水设计, 暴雨水流直接排至沙滩, 地下排洪管涵污水井外溢, 沙滩冲刷形成冲沟, 引起滩面侵蚀, 甚至失去海滩系统原本适应能力而产生不可逆转的结果。从时间模态来看, 在偶发因素影响下海滩形态发生急剧变化并在一定时间内有所调整, 人类活动对海滩地形地貌影响较为显著。

4.2 沉积物供给影响下的海滩响应差异性特征

沙源条件控制了海滩剖面间差异性变化。通过经验正交分析, 海滩剖面时空演变模式在纵向上存在显著的差异性, 上游会展沙滩持续供沙为研究区部分岸段提供了充足沙源, 研究区北侧呈现持续淤积, 滩肩发育完全, 但影响范围有限, P4 往南剖面

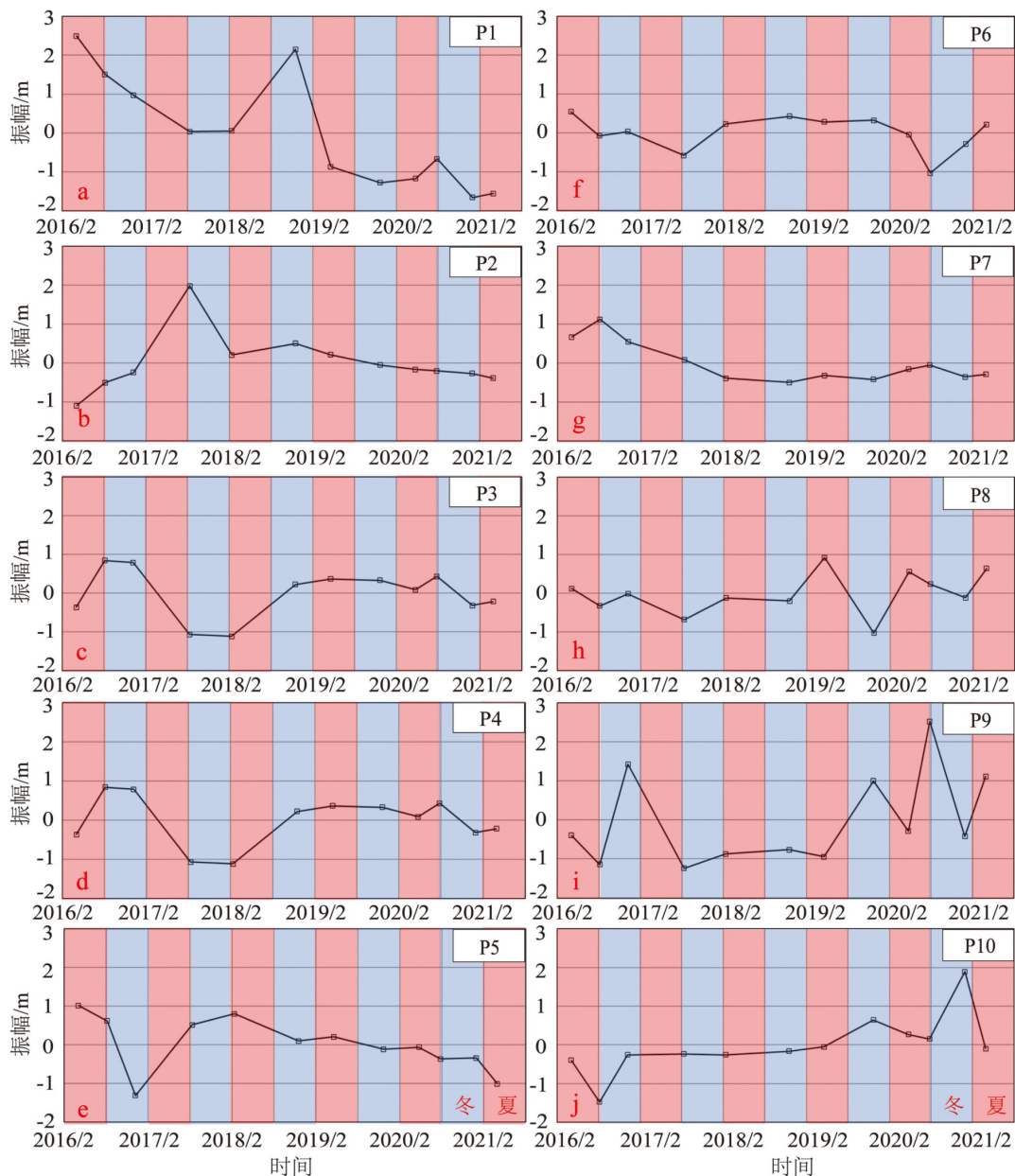


图6 第二时间模态变化图

Fig.6 The second temporal eigenfunctions of the studied beach profiles

淤积程度明显小于P1—P3。由于上游沙源供给不足, P5剖面往南从淤积过渡至侵蚀状态, 南侧剖面呈现滩面侵蚀、滩肩向海蚀退状态。从时间模态规律上看, 北侧剖面波动幅度明显大于南侧剖面; 而南侧岸段临时补沙后, 剖面振幅波动整体变大, 海滩形态也随着沙源变化产生适应性的演化, 体现海滩对沙源供给条件的响应特征。当外界条件改变时, 海滩系统具有调整能力, 在一定时空范围使物质运动达到新的平衡, 海滩形态随着产生适应性的演化^[35], 部分学者也将这种自适应能力称为海滩弹力^[15]。泥沙作为塑造海滩的关键物质基础, 对岸滩稳定起着重要作用^[36], 沉积物供给丰富的海滩变化

幅度比泥沙供给匮乏的海滩大(图4), 能提供海滩充足缓冲沙量抵抗外界扰动, 海滩抗侵蚀能力也强于沉积物供给不足海滩。Miselis和McNinch在研究北卡罗莱纳州10年时间尺度下海岸线变化与近岸沉积物体积关系中也发现, 沉积物贫乏的海滩对应岸线变化率比沉积物富足的海滩更小^[37]。海滩在沙源充足下变化幅度大, 体现其可调节幅度较大, 恢复平衡状态速度快, 自适应能力更高^[38]。沉积物匮乏的海滩对外界响应虽然较小, 但其并非处于稳定状态, 而是一种临界平衡状态, 易损性更强。叠加风暴潮等极端天气的影响, 沙源供给不足的海滩缓冲能力弱, 在正常水动力作用下恢复平衡

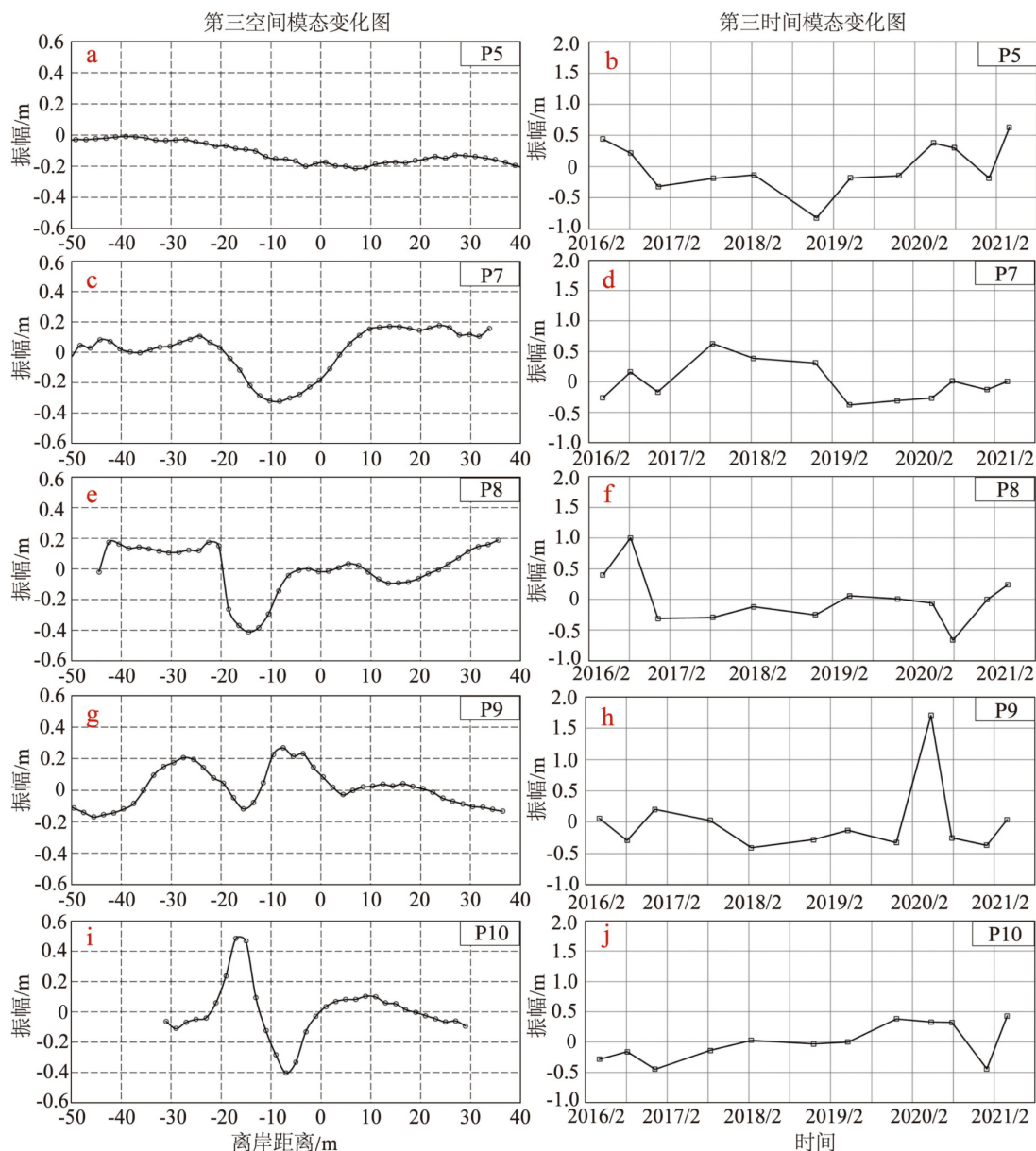


图 7 第三时空模态变化图

Fig.7 The third spatial and temporal eigenfunctions of the studied beach profiles

的重塑过程漫长而缓慢,甚至加剧侵蚀程度失去系统自身调节能力。沉积物供给条件影响海滩响应差异性,对中长期海滩形态变化起着决定性作用,沙源供给充足有利于提高海滩系统抗侵蚀能力及自适应能力。

5 结论

(1) 厦门岛东南部海滩自北往南从淤积逐渐转为侵蚀状态; 海滩剖面时空变化呈现 3 种主要模态, 第一模态以海滩南北两侧演变模式显著差异性为主要特征, 北侧时间振幅持续递减且波动剧烈, 南侧时间模态则先平缓后突变且变化小; 第二模态

具有季节性变化规律; 第三模态在研究区南侧占比比较重, 空间上以潮间带波动剧烈为主要特征。

(2) 研究区北段沉积物供给充足, 剖面持续淤积, 而南侧由于沙源供给不足呈现侵蚀状态, 这说明沉积物供给是海滩中长期演变的主要控制因素; 动力条件的季节性变化导致海滩肩部夏季变宽冬季变窄, 也是海滩变化的主要因素之一; 而沿岸构筑物修建和补沙等人类活动也会影响海滩剖面的时空演变。

(3) 沉积物供给影响下海滩剖面存在明显差异性, 沉积物供给充足的海滩形态变化幅度更大, 海滩通过剖面自我调整体现出更强的缓冲能力; 而自然供沙不足的海滩在基本能维持平衡的条件

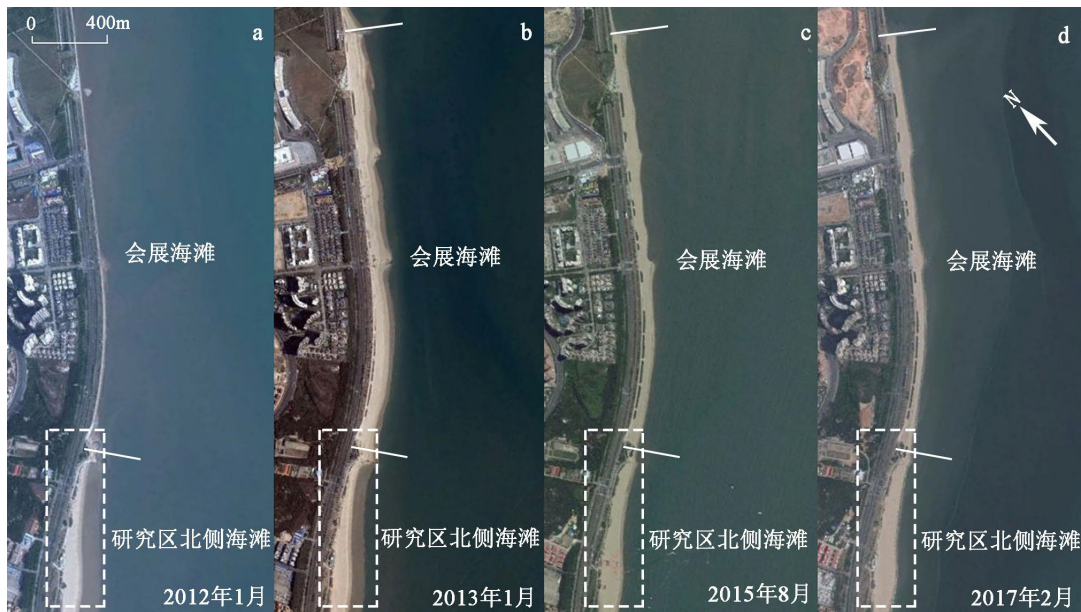


图8 研究区北侧海滩在会展海滩养护前后的变化^[31]
a为会展海滩修复前,b-d为会展海滩修复后。

Fig.8 Changes of the north of study area before and after the Huizhan Beach nourishment^[31]
a. Prior to Huizhan Beach nourishment, b-d. after the completion of Huizhan Beach nourishment project.

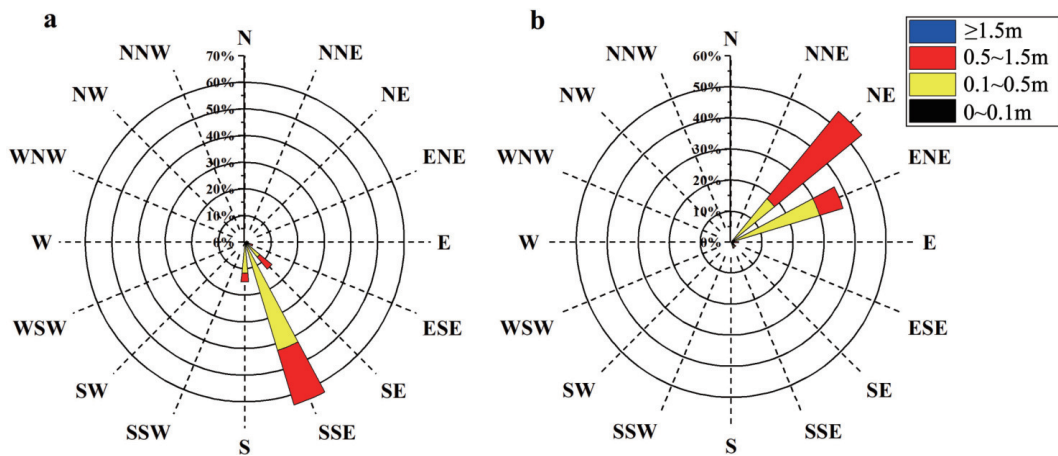


图9 测波点夏季、冬季波浪玫瑰图
a. 夏季, b. 冬季。

Fig.9 Wave rose diagram in summer and winter
a. Summer, b. winter.

下, 海滩地形变化幅度较小, 其缓冲能力和自适应能力弱。

参考文献 (References)

[1] Rosen P S. *Beach processes and sedimentation*. Paul D. Komar [J]. *The Journal of Geology*, 1978, 86(1): 155.
[2] 陈子燊. 海滩剖面形态与地形动态研究的进展[J]. *海洋通报*, 1997, 16(1): 86-91. [CHEN Zishen. Progress in studies on the shapes and dynamics of beach profiles [J]. *Marine Science Bulletin*, 1997, 16(1):

86-91.]
[3] Sunamura T, Horikawa K. Two dimensional beach transformation due to waves[C]//*Proceedings of the 14th International Conference on Coastal Engineering*. Copenhagen, Denmark: ASCE, 1974: 920-938.
[4] 陈子燊, 于吉涛, 罗智丰. 近岸过程与海岸侵蚀机制研究进展[J]. *海洋科学进展*, 2010, 28(2): 250-256. [CHEN Zishen, YU Jitao, LUO Zhifeng. Progresses on study of nearshore processes and coastal erosion mechanisms [J]. *Advances in Marine Science*, 2010, 28(2): 250-256.]
[5] 约翰R. 克拉克. 海岸带管理手册[M]. 吴克勤, 杨德全, 盖明举, 译. 北京: 海洋出版社, 2000: 22-45. [Clark J R. *Coastal Zone Manage-*

- ment Handbook[M]. WU Keqin, YANG Dequan, GAI Mingju, trans. Beijing: China Ocean Press, 2000: 22-45.]
- [6] 李平, 杜军, 张志卫, 等. 粤东南澳岛青澳海滩侵蚀退化风险评价及其安全调控[J]. *海洋科学进展*, 2020, 38(1): 171-181. [LI Ping, DU Jun, ZHANG Zhiwei, et al. Erosion risk assessment and safety regulatory of Qing'ao Beach in the Nan'ao Island, Guangdong province [J]. *Advances in Marine Science*, 2020, 38(1): 171-181.]
- [7] 黎奕宏, 雷刚, 蔡锋, 等. 我国硬式护岸、渔港工程和人工岛等3类典型海岸工程对相邻海滩的影响研究[J]. *应用海洋学学报*, 2019, 38(1): 118-125. [LI Yihong, LEI Gang, CAI Feng, et al. Study on the influence of hard revetment, harbor engineering and artificial island on the adjacent beach in China [J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2019, 38(1): 118-125.]
- [8] Guevara-Riba A, Sahuquillo A, Rubio R, et al. Assessment of metal mobility in dredged harbour sediments from Barcelona, Spain [J]. *Science of the Total Environment*, 2004, 321(1-3): 241-255.
- [9] 于吉涛, 丁圆婷, 程璜鑫, 等. 波控中等潮差海滩剖面时空变化过程研究[J]. *海洋通报*, 2015, 34(5): 540-546. [YU Jitao, DING Yuanting, CHENG Huangxin, et al. Spatial and temporal variability of the wave-dominated, meso-tidal beach profile [J]. *Marine Science Bulletin*, 2015, 34(5): 540-546.]
- [10] 李志龙, 陈子燊, 戴志军. 粤东汕尾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. [LI Zhilong, CHEN Zishen, DAI Zhijun. Analysis of beach volume variations over a month for a beach between Headlands in Shanwei, eastern Guangdong [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2004, 43(2): 112-116.]
- [11] 戴仕宝, 杨世伦, 郜昂, 等. 近50年来中国主要河流入海泥沙变化[J]. *泥沙研究*, 2007(2): 49-58. [DAI Shibao, YANG Shilun, GAO Ang, et al. Trend of sediment flux of main rivers in China in the past 50 years [J]. *Journal of Sediment Research*, 2007(2): 49-58.]
- [12] Wijnberg K M, Terwindt J H J. Extracting decadal morphological behaviour from high-resolution, long-term bathymetric surveys along the Holland coast using eigenfunction analysis [J]. *Marine Geology*, 1995, 126(1-4): 301-330.
- [13] Bosma K F, Dalrymple R A. Beach profile analysis around Indian River Inlet, Delaware, U. S. A. [C]//Proceedings of the 25th International Conference on Coastal Engineering. Orlando, Florida: ASCE, 1996: 2829-2842.
- [14] Medellín G, Torres-Freyermuth A, Tomasicchio G R, et al. Field and numerical study of resistance and resilience on a Sea Breeze Dominated Beach in Yucatan (Mexico) [J]. *Water*, 2018, 10(12): 1806.
- [15] Aubrey D G. Seasonal patterns of onshore/offshore sediment movement [J]. *Journal of Geophysical Research:Oceans*, 1979, 84(C10): 6347-6354.
- [16] Hoang V C, Tanaka H, Mitobe Y. Morphological recovery of beach severely damaged by the 2011 great east Japan tsunami [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2019, 226: 106274.
- [17] 陈子燊. 海滩剖面时空变化过程分析[J]. *海洋通报*, 2000, 19(2): 42-48. [CHEN Zishen. Analysis on spatial and temporal processes of beach profile variations [J]. *Marine Science Bulletin*, 2000, 19(2): 42-48.]
- [18] 曹惠美, 蔡锋, 郑勇玲. 人工养护后厦门香山-长尾礁海滩的演变特征[J]. *应用海洋学学报*, 2015, 34(1): 24-33. [CAO Huimei, CAI Feng, ZHENG Yongling. Evolution characteristics of nourished beach from Xiangshan to Changweijiao in Xiamen [J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2015, 34(1): 24-33.]
- [19] 岳保静, 窦衍光, 廖晶, 等. 山东半岛北岸砂质海滩剖面时空变化过程分析[J]. *海洋科学*, 2018, 42(3): 53-62. [YUE Baojing, DOU Yanguang, LIAO Jing, et al. Spatial and temporal variabilities of northern and southern sandy-coast beach profiles on the eastern Shandong Peninsula [J]. *Marine Sciences*, 2018, 42(3): 53-62.]
- [20] 朱士兵, 胡丹妮, 张会领, 等. 海口湾中间岸段海滩剖面短期时空变化及沉积动态分析[J]. *热带海洋学报*, 2019, 38(5): 77-85. [ZHU Shibing, HU Danni, ZHANG Huiling, et al. Analysis of short-term temporal and spatial changes and sedimentary dynamics at the Middle section of Haikou Bay Beach [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2019, 38(5): 77-85.]
- [21] 张学宏, 俞慕耕, 江伟, 等. 台湾周边海区的海浪特点[J]. *海洋预报*, 2000, 17(1): 75-83. [ZHANG Xuehong, YU Mugeng, JIANG Wei, et al. Characteristics of waves in the sea area around Taiwan [J]. *Marine Forecasts*, 2000, 17(1): 75-83.]
- [22] 张国友, 张绪东, 俞慕耕. 台湾海区的风浪特点及分布规律[J]. *海洋通报*, 2002, 21(1): 23-30. [ZHANG Guoyou, ZHANG Xudong, YU Mugeng. Characteristics and distribution pattern of wind and wave in sea area of Taiwan [J]. *Marine Science Bulletin*, 2002, 21(1): 23-30.]
- [23] 石谦, 蔡爱智. 厦门岛黄厝沙滩蚀退的原因与防护工程[J]. *台湾海峡*, 2008, 27(1): 92-98. [SHI Qian, CAI Aizhi. Erosion factors and prevention engineering on Huangcuo beach of Xiamen Island [J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2008, 27(1): 92-98.]
- [24] 雷刚, 刘根, 蔡锋. 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*, 2013, 32(3): 305-315. [LEI Gang, LIU Gen, CAI Feng. Enlightenment to China's coastal protection from the coast beach nourishment at Huizhan Zhongxin of Xiamen Island [J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2013, 32(3): 305-315.]
- [25] 夏非, 张永战, 吴蔚. EOF分析在海岸地貌与沉积学研究中的应用进展[J]. *地理科学进展*, 2009, 28(2): 174-186. [XIA Fei, ZHANG Yongzhan, WU Wei. Progress in applications of the EOF analysis in the research of coastal geomorphology and sedimentology [J]. *Progress in Geography*, 2009, 28(2): 174-186.]
- [26] Lemke L, Miller J K. EOF analysis of shoreline and beach slope variability at a feeder beach constructed within a groin field at Long Branch, New Jersey [J]. *Coastal Engineering*, 2017, 121: 14-25.
- [27] 戚洪帅, 蔡锋, 雷刚, 等. 华南海滩风暴响应特征研究[J]. *自然科学进展*, 2009, 19(9): 975-985. [QI Hongshuai, CAI Feng, LEI Gang, et al. Study on storm response characteristics of beaches in South China [J]. *Progress in Natural Science*, 2009, 19(9): 975-985.]
- [28] 陈吉余. 中国海岸侵蚀概要[M]. 北京: 海洋出版社, 2010: 3-9. [CHEN Jiyu. Overview of Coastal Erosion in China[M]. Beijing: China Ocean Press, 2010: 3-9.]
- [29] 王永红. 海岸动力地貌学: 海岸动力地貌学[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 103-112. [WANG Yonghong. Coastal Dynamic Geomorphology[M]. Beijing: Science Press, 2012: 103-112.]
- [30] 陈坚, 蔡锋. 厦门岛东南部海岸演变与泥沙输移[J]. *台湾海峡*, 2001,

- 20(2): 135-141. [CHEN Jian, CAI Feng. Coast evolution and sand transportation in East-southern Xiamen Island [J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2001, 20(2): 135-141.]
- [31] Liu G, Cai F, Qi H S, et al. Morphodynamic evolution and adaptability of nourished beaches [J]. *Journal of Coastal Research*, 2019, 35(4): 737-750.
- [32] 蔡锋, 戚洪帅, 夏东兴. 华南海滩动力地貌过程[M]. 北京: 海洋出版社, 2008: 36-37. [CAI Feng, QI Hongshuai, XIA Dongxing. *The Dynamic Geomorphological Process of the Beach in South China*[M]. Beijing: China Ocean Press, 2008: 36-37.]
- [33] 朱君, 蔡锋, 戚洪帅, 等. 基于数值模拟的厦门湾波浪特征研究[J]. *应用海洋学报*, 2017, 36(3): 341-348. [ZHU Jun, CAI Feng, QI Hongshuai, et al. A study on characteristics of Xiamen waves based on numerical simulation [J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2017, 36(3): 341-348.]
- [34] 郑承忠, 翁宇斌, 杨顺良. 厦门岛东南岸沙滩近期剖面变化研究[J]. *热带海洋学报*, 2005, 24(4): 73-80. [ZHENG Chengzhong, WENG Yubin, YANG Shunliang. A study on recent changes of beach profiles along southeast shore of Xiamen Island, Fujian province, China [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2005, 24(4): 73-80.]
- [35] Abessolo G O, Almar R, Jouanno J, et al. Beach adaptation to intraseasonal sea level changes [J]. *Environmental Research Communications*, 2020, 2(5): 051003.
- [36] 陈沈良, 张国安, 谷国传. 黄河三角洲海岸强侵蚀机理及治理对策[J]. *水利学报*, 2004(7): 1-6,13. [CHEN Shenliang, ZHANG Guoan, GU Guochuan. Mechanism of heavy coastal erosion on Yellow River delta and its countermeasures [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004(7): 1-6,13.]
- [37] Miselis J L, Mcninch J E. Calculating shoreline erosion potential using nearshore stratigraphy and sediment volume: outer Banks, North Carolina [J]. *Journal of Geophysical Research:Earth Surface*, 2006, 111(F2): F02019.
- [38] Burvingt O, Masselink G, Russell P, et al. Classification of beach response to extreme storms [J]. *Geomorphology*, 2017, 295: 722-737.