

山东半岛南北岸砂质海滩剖面时空变化过程分析

岳保静^{1,2}, 窦衍光^{1,2}, 廖 晶^{1,2}, 高茂生^{1,2}, 邵家旺¹, 叶永玉¹

(1. 国土资源部油气资源和环境地质重点实验室, 青岛海洋地质研究所, 山东 青岛 266071; 2. 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋地质过程与环境功能实验室, 山东 青岛 266071)

摘要: 以山东半岛南北岸(烟台和日照)两个砂质海岸实测地形剖面为研究对象, 应用经验正交函数(EOF)提取海滩 2012 年 11 月至 2015 年 11 月夏、冬两季剖面监测数据中的前 4 个模态的空间特征函数和时间特征函数, 分析烟台和日照两个岸段砂质海滩剖面的时空演变特征, 并对这两段海岸的地貌和沉积特征差异进行对比, 探讨了山东半岛南北岸段砂质海岸动力环境的差异及影响因素。结果表明, 第一特征函数是海滩剖面变化的最主要模式, 两个岸段剖面的第一特征函数都以低潮线剖面的最大波动为主要特征, 与波浪、潮汐共同影响有关; 第二特征函数则是以高潮带至上冲流作用上限之间的剖面波动为主要特征, 主要受风浪季节性周期变化控制; 第三、四特征函数推测与偶然因素有关。

关键词: 海滩剖面; 时空变化; 经验正交函数; 海滩地貌

中图分类号: P736.21 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2018)03-0053-10

DOI: 10.11759/HYKX20170411002

天然沙滩是海陆相互作用的动力敏感地带, 多种因素共同决定了海岸的时空演化规律。海滩变化过程受到海岸风、浪、潮、波等动力因子和海滩地形相互作用的影响, 海滩剖面通过其物质组成、坡度和地貌形态结构的时空变化做出响应^[1]。

经验正交函数分析(EOF)能有效地提取数据中的主要空间模态及其时间变化信息, 自从 Winant 等^[2]证明了经验正交函数分析可作为砂质海滩剖面变化分析的一种精确手段, EOF 分析逐渐被广泛用来分析海滩剖面的时空变化特征; Miller 和 Dean^[3-4]利用全世界不同海滩的海岸带数据, 用 EOF 方法分析了不同类型海滩的剖面变化特征。

山东半岛砂质海岸资源丰富, 海滩的地貌动力特征可以充分反映海滩的现状与海岸环境演变过程, 为海岸工程开发(如滨海公路、浴场修建)和旅游开发提供依据^[5], 对保护山东半岛的沙滩资源和环境具有重要意义。近年来, 众多学者对我国砂质海岸地形地貌特征进行了研究^[1, 6-9], 其中陈子燊^[1]、戴志军^[6]等以 EOF 分析为主要方法对广东省砂质岸滩的时空变化进行了一系列研究, 充分显示 EOF 分析在我国广东的砂质海岸研究中同样适用; 前人在山东半岛海岸带也开展了许多工作^[10-15], 但大都为定性研究, 对岸滩侵蚀淤积中长期尺度的变化认识不足, 对人类活动影响下砂质海滩滩面冲蚀的演化特征及影响因素的认识有待深入。EOF 分析技术能够有效提取、

定量表达数据中的主要型式及其时空演变, 以及不同型式之间是如何联系的, 更有益于理解这些主控因素是如何影响海岸地貌演化的, 进而不断丰富对于海岸地貌演化的过程与机制的研究。

本文选取山东半岛砂质海岸两条监测剖面为研究对象, 应用经验正交函数(EOF)来提取 4 年来(2012—2015 年)岸滩剖面的主要模态的空间和时间信息, 分析海滩剖面的地形的时空变化特征。EOF 分析方法收敛快, 各特征函数间相互正交, 可代表研究区独立的海滩变化过程, 能以少数特征形式来代表原始数据场的主要特征, 客观的描述海滩地形变化与主要时间结构, 为不同海滩剖面变化过程对比提供了一个定量的数学工具^[9]。应用 EOF 分析烟台和日照两个岸段砂质海滩剖面的时空演变特征, 可以有效地对比山东半岛南北岸段海滩剖面地形变化的时域特征, 为预测海岸环境变化和改善海岸资源的规划

收稿日期: 2017-04-11; 修回日期: 2017-06-30

基金项目: 国家自然科学基金(41406080); 海洋地质保障工程(DD20160144, GZH201200505)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41406080; Governmental Public Research Funds of China, No.DD20160144, No.GZH201200505]

作者简介: 岳保静(1981-), 女, 山东烟台人, 助理研究员, 硕士, 从事海洋地质研究, 电话: 0532-85731632, E-mail: selinayue1022@hotmail.com; 窦衍光(1979-), 通信作者, 男, 山东潍坊人, 副研究员, 博士, 从事海洋地质研究, 电话: 0532-85731050, E-mail: douyanguang@gmail.com

管理提供重要的依据。

1 研究区概况

本文分别选取山东半岛砂质海岸烟台岸段和日照岸段的两条监测剖面为研究对象(图 1a), 其中烟台岸段位于烟台市东北双岛湾内(图 1b), 岸线走向 NNW-SSE, 双岛湾湾口朝北, 湾内宽阔, 为一潟湖海湾, 海滩由中细砂组成。双岛湾三面山岭环绕, 山

间有多条河流入湾。双岛湾内堤坝纵横, 大约三分之二的面积被围建盐田和养虾池。海区为正规半日潮, 以潮高零点为基准, 平均高潮位 3.59 m, 平均低潮位 2.00 m, 平均潮差 1.66 m。波浪对海湾影响不大, 湾内无大浪, 仅在冬季会出现强浪。全年平均波高为 0.40 m, 年平均周期 2.6 s^[16-17]。冬季浪高大, 夏季浪高小, 破波带波高秋季 0.54 m, 夏季 0.27 m^[10]。常风向为 NNW 和 NW, 强风向为 NNW 和 SW, 常浪向为

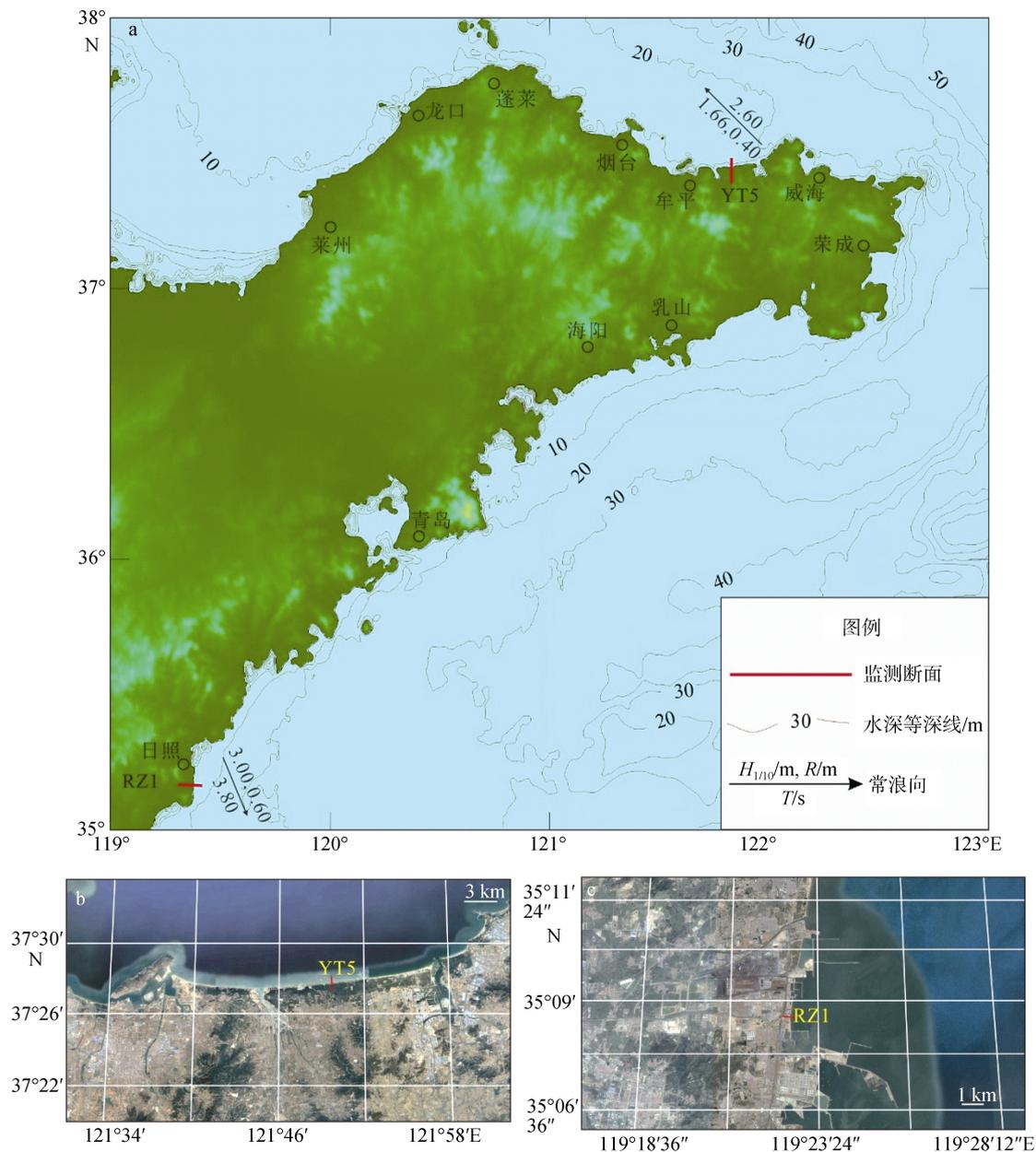


图 1 沙滩的地理位置和形状

Fig. 1 The geographical location and shape of the beach

a. 山东半岛; b. 烟台沙滩; c. 日照沙滩

a. Shandong Peninsula; b. Yantai beach; c. Rizhao beach

NNW 和 NW, 强浪向为 NNW。秋冬以 NNW 和 NW 向风为主, 湾口附近风浪较强, 春夏偏 S 风, 湾口附近以外海传来的涌浪为主, 较微弱。

日照岸段位于日照市南部岚山海水浴场(图 1c), 岸线走向 E-W, 为沙坝潟湖堆积夷平岸, 海滩由中粗砂、中细砂组成。海区为正规半日潮, 以潮高零点为基准, 平均高潮位 4.29 m, 平均低潮位 1.14 m, 平均潮差 3.00 m。全年平均波高为 0.6 m, 年平均周期 3.8 s。常浪向 SSE, 强浪 NE 向, 其中春、夏季节常浪向多为 E 向, 秋冬季节多为 N 向, 最大波高出现在春季和秋季, 分别为 2.8 m 和 2.5 m, 夏季和冬季波高较小, 分别为 1.1 m 和 1.8 m。常风浪 N 向, 次常风浪 S 向, 涌浪以 E 向为主, 受季风影响, 每年 4—9 月, 以 SE 向风浪为主, 10 月至来年 3 月, 以 NE 向风浪为主^[14, 16, 18]。

2 数据和方法

2.1 数据组成及其来源

本次研究选取山东半岛南北岸 2 条测线为研究对象, 其中烟台测线位于山东半岛北部, 日照测线位于山东半岛南部, 2012 年 11 月开始第一次测量, 2013—2015 年分别于冬夏两季监测一次, 共完成 7 次海滩地形测量。海滩地形测量时, 以固定于后滨岸线处的监测桩为起点, 沿垂直岸线方向向海延伸, 岸滩剖面测量使用美国 Trimble 5800 RTK GPS(仪器的标称精度为 5 mm+0.5 μm), 采用 GPS RTK 方式进行测量, 高程基准为 1985 国家高程基准。根据潮汐预报资料, 选择晴好天气, 当日最低潮前 1~2 h 由陆向海方向开始测量, 剖面测量范围为后滨至低潮线。测量仪器直接接收山东 CORS 信号, 精度达到厘米级, 在剖面测量的前后, 对同一固定点进行重复测量, 进一步保证测量精度控制在 3 cm 以内。

2.2 研究方法海滩剖面变化的经验正交函数分解

本文的研究方法主要是基于用经验正交函数分析海滩剖面演化特征。经验正交函数(EOF)是分析场序列的常用方法, 其基本原理是把包含 m 个空间点(变量)的场随时间变化进行分解, 优点在于典型场由要素场本身的相关特征所确定, 能较好的反映要素场的基本结构特征^[9]。

海滩剖面高程的经验正交函数表示为:

$$h_{xt} = \sum C_{nt} e_{nx} (\lambda_n n_x n_t)^{1/2} \quad (1)$$

式中, h_{xt} 代表剖面高程数据矩阵, C_{nt} 代表时间特征函数, e_{nx} 代表空间特征函数, λ_n 代表特征值, n_x 代表每条剖面高程数据点数, n_t 代表剖面数。其具体计算步骤是: 首先对个剖面高程点均值化, 计算空间协方差矩阵, 然后由雅可比旋转方法得到该实对称矩阵的特征值和特征向量, 将特征值由大到小排序, 由最大的几个特征值提取占海滩剖面数据总方差 90% 的空间特征函数和对应的时间特征函数, 其余的特征函数则视为随机变化不予讨论^[1, 6]。

3 结果

参考夏东兴等^[19]对一般砂质岸线的划分方法, 依照岸线、平均高潮水位、平均低潮水位将海岸划分为后滨、前滨、内滨。根据实测数据得到烟台、日照岸段 2012—2015 年夏、冬实测剖面, 见图 2。山东半岛北岸烟台岸段海滩后滨陡峭, 坡度较大, 前滨狭窄, 宽度约 10~20 m, 滩肩发育较差, 宽度约 10 m, 滩脊不发育, 滩肩与前滨接壤处发育滩肩陡坎, 内滨低潮海滩发育水下岸坡, 地形起伏较大; 山东半岛南岸日照岸段地形相对宽缓, 坡度较小, 前滨宽度约 30~50 m, 滩肩、滩脊发育良好, 水下沙坝发育, 低潮海滩平缓向海倾斜。

应用经验正交函数提取剖面高程数据主要模态的空间特征和时间特征信息, 分析海滩剖面的时空变化特征, 空间特征函数代表海滩地形变化, 时间特征函数代表剖面地形变化的周期性或准周期性, 空间特征函数的振幅极值表示最大变化的区域, 而节点指示泥沙交换地带, 可将毗邻区域的淤积和侵蚀划分开, 因此剖面变化在节点两侧呈现反相。表 1 为各剖面特征值和其贡献率, 结果显示前 4 个特征函数的累计率达 95% 以上, 可以反映出剖面变化的一般规律。

3.1 山东半岛北部烟台 YT5 剖面演化特征

第一空间特征函数贡献率占总方差的 58.3%, 由图 3 看出离岸 0~5 m 振幅为正值, 离岸 5 m 处出现节点, 对应滩肩的位置, 5~10 m 振幅为负值, 波动剧烈, 10 m 处出现振幅负值极值, 离岸 0~10 m 对应实测剖面后滨, 表明后滨以侵蚀为主, 滩肩呈上淤下冲的特征; 离岸 12 m 处出现节点, 12~20 m 振幅为正值, 15 m 处出现振幅正值极值, 说明前滨淤积, 离岸 30~50 m 振幅为负值, 振幅的负值极值出现在离岸 40 m 处, 表明内滨水上部分呈冲刷状态, 52~90 m 振幅为正值, 对应水下部分淤长; 第一时间特征函数呈周期性变化, 同年 5 月幅值高于 11 月, 说明此岸

段夏淤冬冲, 夏季容易形成沿岸沙坝, 冬季沙坝则明显受到侵蚀, 季节性变化明显。

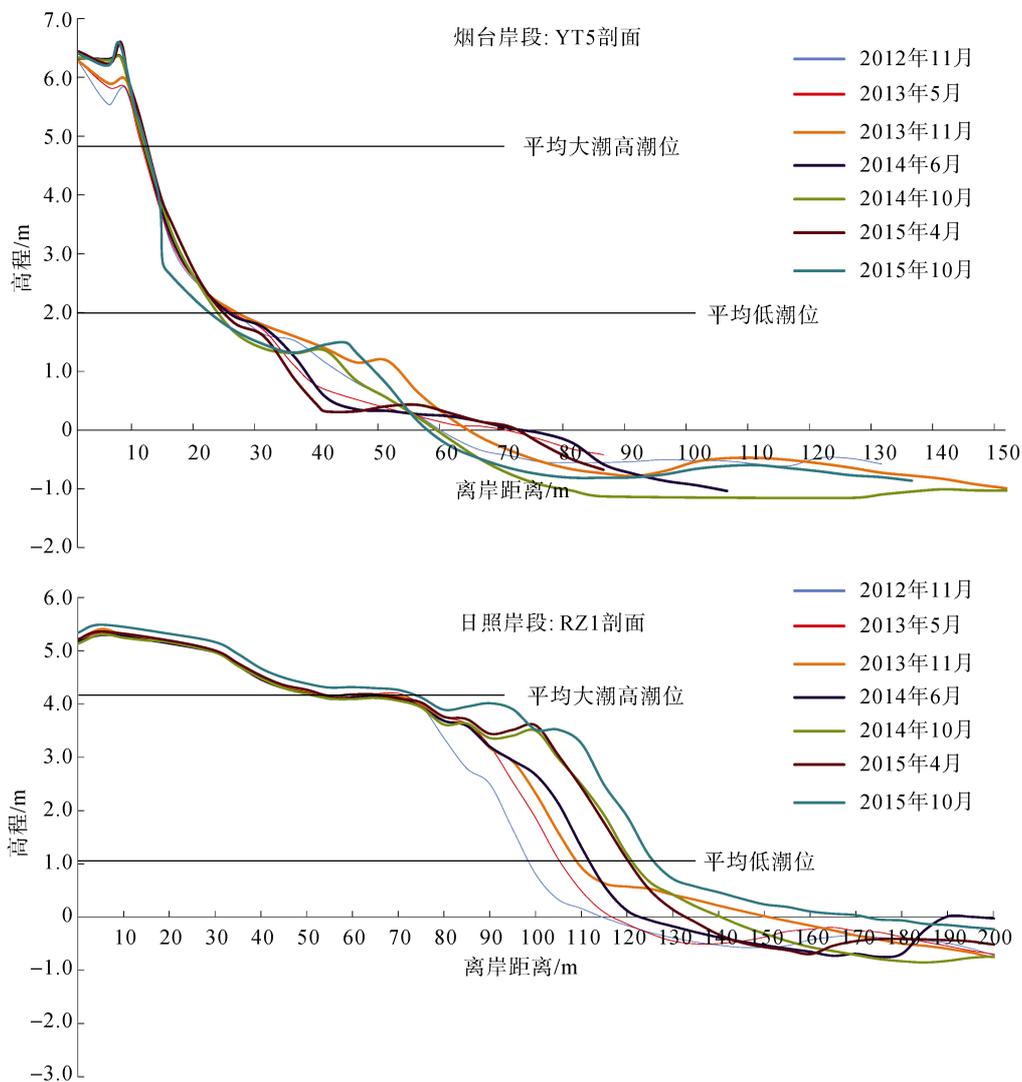


图2 烟台剖面 and 日照剖面在4年监测周期内的7次监测结果

Fig. 2 Representation of the seven biannual bathymetries taken in the Yantai profile and the Rizhao profile during the 4-year monitoring period

表1 剖面特征值 λ 和其贡献率

Tab. 1 Contribution of the main mode to the beach profile

| 剖面 | λ | | | | 贡献率/% | | | |
|-----|-----------|------|------|------|-------|-------|-------|------|
| | EOF1 | EOF2 | EOF3 | EOF4 | EOF1 | EOF2 | EOF3 | EOF4 |
| YT5 | 0.70 | 0.22 | 0.12 | 0.10 | 58.53 | 18.55 | 9.96 | 8.03 |
| RZ1 | 0.93 | 0.82 | 0.25 | 0.08 | 42.79 | 37.76 | 11.63 | 3.53 |

第二空间特征函数贡献率占总方差的 18.55%, 由图 3 看出, 离岸 0~10 m 振幅为负值, 表明后滨侵蚀严重, 10~20 m 振幅为负值, 接近 0, 表明前滨轻微侵蚀, 离岸 20~90 m 振幅为正值, 其中 20~50 m 振幅呈逐渐上升趋势, 并在 50 m 处出现振幅正值极值,

50~65 m 幅值逐渐减小, 而后基本平稳, 表明内滨呈现淤积, 水上部分淤积量最大。第二时间特征函数没有表现出规律的周期变化特征。

第三空间特征函数贡献率占总方差的 9.96%, 由图 3 看出, 离岸 12 m 波动剧烈, 其中离岸 0~10 m

振幅为负值, 5 m 处为振幅负值极值, 10 m 处出现节点, 12 m 处出现振幅正值极值, 对应实测剖面后滨的变化, 后滨以侵蚀为主, 滩肩形成向上增长; 第三时间特征函数没有表现出规律的周期变化特征。

第四空间特征函数贡献率占总方差的 8.03%, 由图 3 看出, 剖面变化剧烈, 后滨侵蚀, 推测与风暴潮、人为因素等多重偶然因素影响有关; 第四时间特征函数没有表现出规律的周期变化特征。

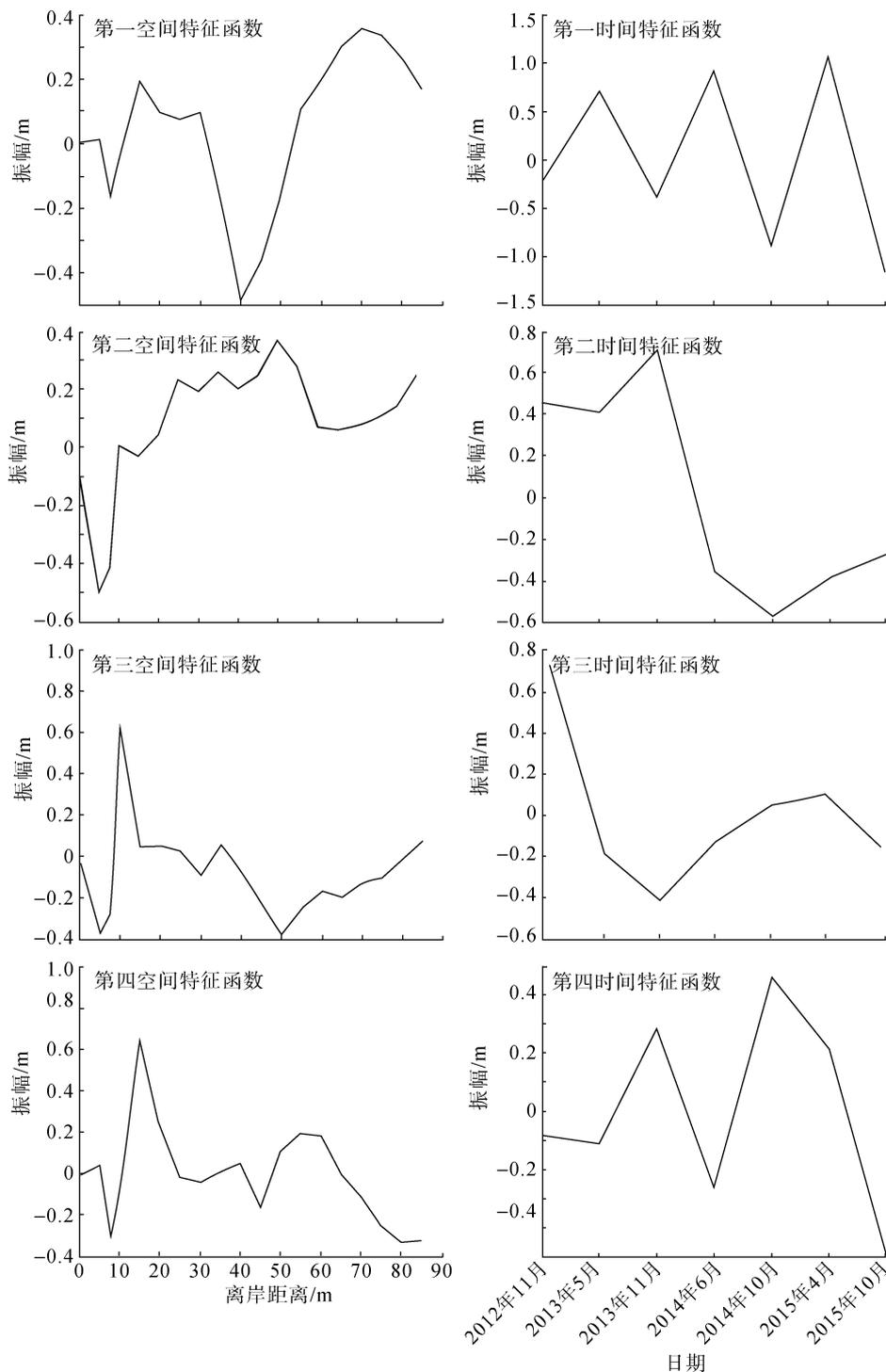


图 3 烟台沙滩 YT5 剖面前 4 个空间特征函数和时间特征函数
 Fig. 3 First four spatial eigenfunctions of YT5 profile in Yantai beach profile

3.2 山东半岛南部日照 RZ1 剖面演化特征

第一空间特征函数贡献率占总方差的 42.79%，由图 4 看出，离岸 0~25 m 振幅由负值转为正值，小幅震荡，表明后滨侵蚀淤积交替出现，后滨后部侵蚀，到滩肩处逐渐变为淤积，离岸 20~48 m 幅值逐渐增大，在 48 m 处出现振幅正值极值，表明前滨呈淤

积状态，48~80 m 振幅为正值，幅值逐渐减小，表明内滨水上部分淤积程度逐渐减小，离岸 90~140 m 出现振幅负值，振幅的负值极值出现在 110 m，对应内滨水下部分呈冲刷状态，离岸 140~200 m 为振幅正值，出现淤积。第一时间特征函数没有表现出规律的周期变化特征。

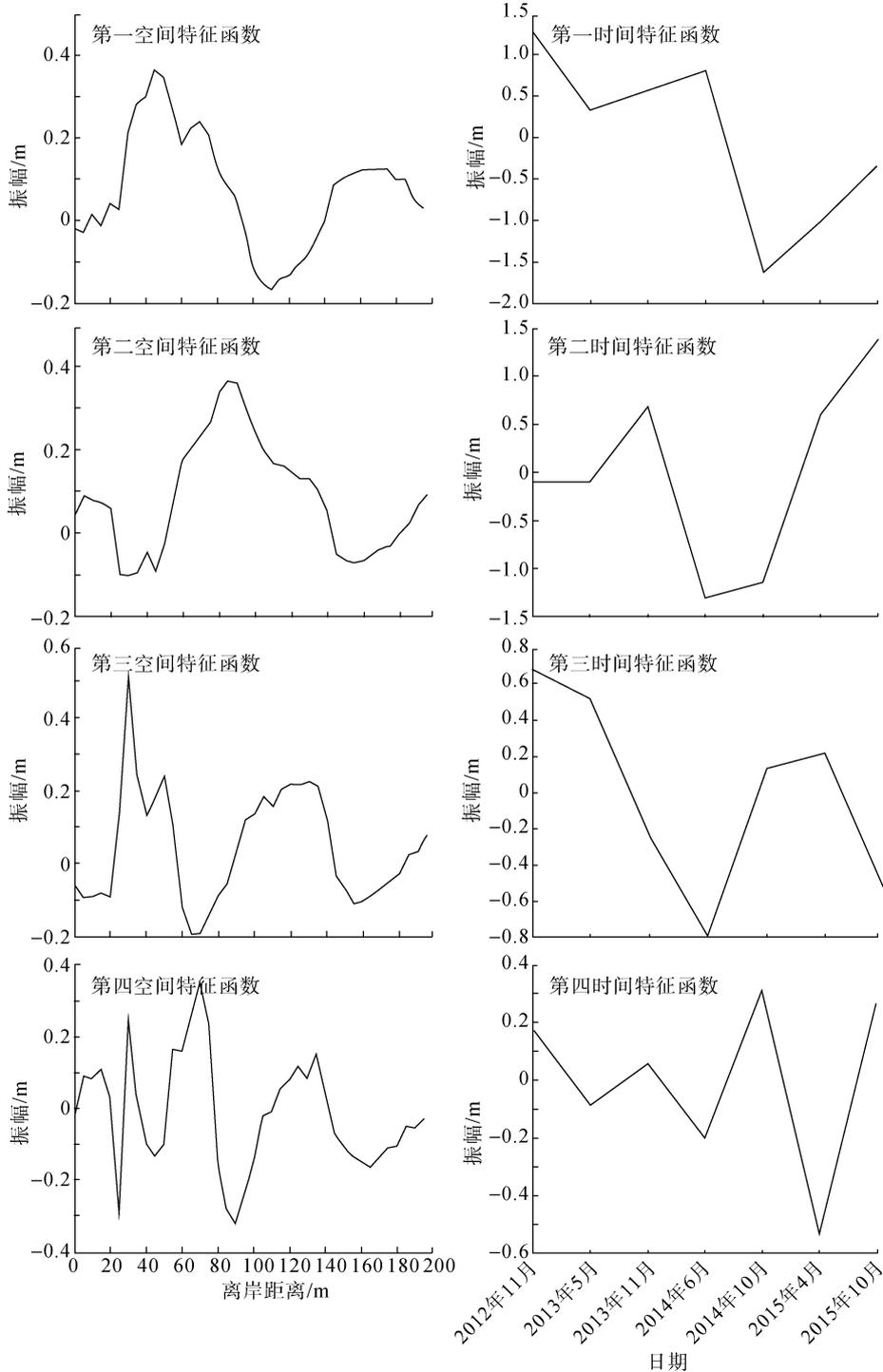


图 4 日照沙滩 RZ1 剖面前 4 个空间特征函数和时间特征函数

Fig. 4 First four spatial eigenfunctions of RZ1 profile in Rizhao beach profile

第二空间特征函数贡献率占总方差的 37.76%，由图 4 看出，离岸 0~20 m 振幅为正值，20 m 处出现节点，20~22 m 处振幅为负值，表明后滨由淤积转为侵蚀，离岸 20~48 m 振幅为正值，对应实测剖面前滨位置，呈侵蚀状态，50 m 处出现节点，50~80 m 处幅值增大，对应内滨水上部分淤积，在 90 m 处出现振幅正值极值，之后幅值减小，在 140 m 和 180 m 处出现节点，140~180 m 处振幅为负值，对应内滨水下部分呈淤积冲刷交替出现。第二时间特征函数周期性变化，同年 5 月的振幅值低，11 月高，夏季低，冬季高，冬季靠近高潮线的部位淤积，形成滩肩，夏季滩肩受到侵蚀消失，季节性变化显著。

第三空间特征函数贡献率占总方差的 11.63%，由图 4 看出，离岸 0~20 m 振幅为负值，表明后滨侵蚀，20~24 m 处振幅为正值，对应滩肩淤积，24~48 m 为振幅正值，对应前滨呈淤积状态，48~180 m 大幅震荡，指示内滨水上部分冲刷及水下部分淤积的状态；第三时间特征函数没有表现出规律的周期变化特征。

第四空间特征函数贡献率占总方差的 3.53%，由图 4 看出，剖面波动显著，侵蚀淤积交替，推测与风暴潮、人为因素等多重偶然因素影响有关；第四时

间特征函数没有表现出规律的周期变化特征。

4 讨论

海洋动力条件对于海岸地貌类型起着重要控制作用，波浪和潮汐及其相对强弱是其中的主要影响因素，砂质海滩的剖面形态、滩面沙粒粒径和演变趋势主要取决于波浪和潮汐强弱及彼此消长。崔金瑞和夏东兴^[15]引入浪潮作用指数(K)用以判别潮汐、波浪对海岸地貌控制作用的相对强弱，提出： $K>1$ 时发育浪控型海岸， $K<1$ 时发育潮控型海岸， K 接近 1 时发育过渡型海岸地貌；Kormar 和 Gaughan^[20]根据波浪-沉积物参数(Dean 参数(Ω))可对海滩类型进行划分： $\Omega<2$ 时为反射型海滩， $2 < \Omega < 5$ 时为过渡型海滩， $\Omega>5$ 时为消散型海滩。岳保静等^[21]根据研究区的水文资料，对烟台岸段和日照岸段的 K 和 Ω 进行计算，结果见表 2，两个剖面都是潮控型海岸，潮汐对沙滩的影响大于波浪作用。烟台剖面为消散型，入射波浪的能量耗散在宽广低缓的滩面上，波浪多以崩破的方式破碎；日照剖面为过渡性，潮差较大，高潮时波浪作用于陡斜的滩面上，低潮时波浪在低潮阶地上消散。

表 2 烟台、日照剖面判别参数及海滩类型^[21]

Tab. 2 Sandy beach determination parameters and beach types in Yantai and Rizhao beach profile^[24]

| 剖面 | 地理位置 | K | Ω | 海滩类型 |
|-----|----------------|------|----------|------|
| YT5 | 烟台牟平北养马岛-双岛湾海滩 | 0.60 | 5.20 | 消散型 |
| RZ1 | 日照市岚山海水浴场 | 0.50 | 4.31 | 过渡型 |

两个剖面的第一特征函数都以低潮线剖面的最大波动为主要特征，主要反映了低潮带水下砂坝随时间的进退过程而导致剖面的变化振动，其地貌学意义为水下泥沙通过脊-沟体系向岸搬运；两个剖面的第二特征函数则是以高潮带至上冲流作用上限之间的剖面波动为主要特征，代表了滩肩形成和向上增长的堆积过程，是海滩剖面水上部分最主要的过程，其与水下的脊-沟体系的动态变化显示出较为明显的反相关关系。海滩滩脊是风暴季节或特大高潮时由大浪激浪流堆积的沿岸脊状地貌，水下沙坝则是波浪因破碎而卸载堆积形成，实测剖面上第一、二特征函数反映地貌学意义为滩肩的构建消亡的变化过程及滩肩与水下地形之间的转换，这一结果于 Clarke^[22]、于吉涛^[7]的研究结果一致，高潮位以上滩肩地形的发展是和低潮位以下沙坝体系的动态密切相关的，若沙坝体系向岸迁移而且连接到滩面后，

滩面坡度减小，海滩剖面为恢复粒级与波能之间的平衡关系，通过冲流过程，特别是高潮时的冲流作用把滩面泥沙向上搬运和堆积，此时波浪强度的波动又易使上冲泥沙越过滩肩、脊堆积在滩肩顶部上，滩肩向上增长，并可能形成向岸倾斜的滩面连接面。随着滩肩增长，滩面坡度增大，剖面将重新趋向平衡。

两个剖面第一、二特征函数的贡献值超过 75%，说明剖面的形态特征主要受到这两个特征函数的影响。由 YT5 剖面 and RZ1 剖面的第一特征函数(图 3、图 4)看出，YT5 剖面后滨明显侵蚀，因此烟台岸段后滨陡峭，滩肩发育较差；而 RZ1 剖面后滨侵蚀淤积交替且幅值较小，后滨相对宽缓，滩肩、滩脊发育。烟台和日照剖面形态的差异主要是由于两个岸段都是主要受潮汐控制，而日照地区潮差大于烟台地区。

烟台剖面第一特征函数(图 3)的季节变化指示该剖面夏淤冬冲，夏季沿岸沙坝形成，冬季沙坝受到

侵蚀的变化特征, RZ1 剖面第二特征函数(图 4)的季节变化指示该剖面夏冲冬淤, 冬季靠近高潮线的部位淤积, 形成滩肩, 夏季受到侵蚀消失的变化特征, 这与周良勇等^[10]对山东半岛东、北部沙滩研究时的认识一致。季节性变化推测与风力作用和海区波浪有关, 烟台岸段夏季受离岸风影响, 将近岸侧细颗粒物搬运至后滨向海侧沉积, 冬季近岸侧接受向岸风搬运的细颗粒物, 在后滨近陆侧形成风成堆积; 日照岸段夏季为向岸风, 携带滩肩沉积物在近岸侧堆积, 冬季受离岸风影响, 海岸细颗粒物向海搬运; 另外, 风作用于海面产生的风浪对沙滩影响显著, 不同波浪破碎作用对海滩地貌的发育产生不同影响, 南岸波浪破碎较北岸小, 波能以上冲流为主; 北岸波浪以破碎为主, 波能多反射。

烟台剖面第四空间特征函数贡献率占总方差的 8.03%, 日照剖面的第四空间特征函数贡献率占总方差的 3.53%, 说明风暴潮、人为因素等多重偶然因素影响对于烟台剖面的影响大于日照剖面。山东半岛年均有 1.1 次台风, 3.2 次寒潮过境, 特别是秋冬季节的寒潮大风要比夏季频繁, 持续时间长, 在山东半岛北部尤为显著^[23]; 日照岚山海区每年 7~9 月常受北太平洋热带气旋影响, 强热带风暴形成的海浪具有波高达, 周期长的特点, 这种波浪能量极大, 会造成海岸急速后退^[24]。李广雪等^[23]指出, 烟台岸段后滨搭建的养殖区和厂房, 破坏了浪潮的平衡状态, 阻挡了泥沙供应, 导致海滩的侵蚀速率明显大于自然岸段, 且造成的侵蚀难以恢复; 庄振业等^[14]研究表明, 日照地区人为挖沙严重, 使得海滩剖面变陡; 沿海岸岸工程建设增多, 破坏了岸滩的自然侵蚀淤积。这些因素虽然不是主要因素, 但在多种因素的叠加影响下, 对海滩的破坏不容忽视。烟台岸段剖面对偶然性因素的相应很显著, 要引起重视, 否则后滨遭受侵蚀严重, 沙滩退化, 会对旅游业造成重大影响。

5 结论

本文通过对山东半岛南北不同岸段海滩剖面数据进行研究, 通过 EOF 分析, 提取占矩阵总方差 95% 以上的前 4 个空间特征函数研究海滩剖面空间变化, 发现: 山东半岛北部烟台岸段第一特征函数占总方差的 58.53%, 山东半岛北部日照岸段第一特征函数占总方差的 42.79%, 可见第一特征函数是海滩剖面变化的最主要模式, 两个岸段的第一特征函数都以低潮线剖面的最大波动为主要特征, 主要反

映了低潮带或碎波带水下砂坝随时间的进退过程而导致剖面的变化振动; 山东半岛北部烟台岸段第二特征函数占总方差的 18.55%, 南部日照岸段第二特征函数占总方差的 37.76%, 主要以高潮带至上冲流作用上限之间的剖面波动为主要特征, 代表了滩肩形成和向上增长的堆积过程; 两个剖面第三特征函数占总方差的 10% 左右, 烟台岸段和日照岸段的第四特征函数分别占总方差的 8% 和 3.5%。研究认为, 波浪、潮汐是影响山东半岛砂质海滩发育演变, 潮汐是最主要因素, 风浪季节性周期变化是海滩演变的次要因素, 沉积物输入以及人为影响等也会对岸滩形态及变化产生一定影响。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Winant C D, Inman D L, Nordstrom C E. Description of seasonal beach changes using empirical eigenfunctions[J]. Journal of Geophysical Research, 1975, 80(15): 1979-1986.
- [3] Miller J K, Dean R G. Shoreline variability via empirical orthogonal function analysis: Part I temporal and spatial characteristics[J]. Coastal Engineering, 2007, 54: 111-131.
- [4] Miller J K, Dean R G. Shoreline variability via empirical orthogonal function analysis: Part II relationship to nearshore conditions[J]. Coastal Engineering, 2007, 54: 133-150.
- [5] Muñoz-Perez J J, Medina R. Comparison of long- Medium- and short-term variations of beach profiles with and without submerged geological control[J]. Coastal Engineering, 2010, 57: 241-251.
- [6] 戴志军, 陈子燊, 张清凌. 波控岬间海滩剖面短期变化过程分析[J]. 热带地理, 2001, 21(3): 266-269.
Dai Zhijun, Chen Zishen, Zhang Qingling. Analysis on temporal variation process of a wave - dominated beach profile between headlands[J]. Tropical Geography, 2001, 21(3): 266-269.
- [7] 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.
- [8] 蔡锋, 苏贤泽, 曹惠美, 等. 华南砂质海滩的动力地

- 貌分析[J]. 海洋学报, 2005, 27(2): 106-114.
Cai Feng, Su Xianze, Cao Huimei, et al. Analysis on morphodynamics of sandy beaches in South China[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2005, 27(2): 106-114.
- [9] 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, 174-186.
- [10] 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.
Zhou Liangyong, Xue Chunting, Liu Jian, et al. Beach morphodynamics and impact factors on the beaches in the Northern and Eastern of Shandong Peninsula[J]. Advances in Marine Science, 2013, 31(1): 83-94.
- [11] 毕世普, 张勇, 别君. 胶东半岛南部海滩地形剖面监测分析[J]. 海洋科学, 2015, 39(3): 1-6.
Bi Shipu, Zhang Yong, Bie Jun. Monitoring and analysis of beach topographic profiles in the southern Jiaodong Peninsula[J]. Marine Sciences, 2015, 39(3): 1-6.
- [12] 杨继超, 宫立新, 李广雪, 等. 山东威海滨海沙滩动力地貌特征[J]. 中国海洋大学学报, 2012, 42(12): 97-106.
Yang Jichao, Gong Lixin, Li Guangxue, et al. Status and causes of beach erosion in Weihai, Shandong Province[J]. Periodical of Ocean University of China, 2012, 42(12): 97-106.
- [13] 于晓晓, 谷东起, 闫文文, 等. 山东半岛东部南北岸典型砂质海岸沉积、地貌的横向差异及成因分析——以海阳万米沙滩岸段和威海国际海水浴场岸段为例[J]. 海岸工程, 2016, 35(1): 33-46.
Yu Xiaoxiao, Gu Dongqi, Yan Wenwen, et al. Lateral different in sediments and geomorphology of the northern and aouyhwen typical sandy coasts in the Eastern Shandong Peninsula and their genesis- taking the coasts of the Haiyang and their Wanmi beach and the Weihai International beach as the example[J]. Coastal Engineering, 2016, 35(1): 33-46.
- [14] 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[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2000, 20(3): 15-21.
Zhuang Zhenye, Yin Ping, Wu Jianzheng, et al. Coastal erosion and its influence on southern Shandong sandy coast[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2000, 20(3): 15-21.
- [15] 崔金瑞, 夏东兴. 山东半岛海岸地貌和波浪、潮汐特征的关系[J]. 黄渤海海洋, 1992, 10(3): 20-25.
Cui Jinrui, Xia Dongxing. The relationship between coastal morphology and the characteristics of waves and tides of Shandong peninsula[J]. Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Sea, 1992, 10(3): 20-25.
- [16] 陈吉余, 夏东兴, 虞志英, 等. 中国海岸侵蚀概要[M]. 北京: 海洋出版社, 2010.
Chen Jiyu, Xia Dongxing, Yu Zhiying, et al. The Compendium of Coastal Erosion in China [M]. Beijing: China Ocean Press, 2010.
- [17] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志第 3 分册(山东半岛北部和东部海湾)[M]. 北京: 海洋出版社, 1991.
Compliation Commuttee of "Record of Bays in China" (CCRBC). Records of Bays in China (Volume 3: Bays in the North and East Shandong Peninsula)[M]. Beijing: China Ocean press, 1991.
- [18] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志第 4 分册(山东半岛南部和江苏省海湾)[M]. 北京: 海洋出版社, 1993.
Compliation Commuttee of "Record of Bays in China" (CCRBC). Records of Bays in China (Volume 4: Bays in the South Shandong Peninsula and Jiangsu Province)[M]. Beijing: China Ocean Press, 1993.
- [19] 夏东兴. 海岸带地貌环境及其演化[M]. 北京: 海洋出版社, 2009.
Xia Dongxing. Geomorphie environment and evolution of coastal zone[M]. Beijing: China Ocean Press, 2009.
- [20] Kormar p, Gaughan M K. Airy wave theory and breaker height prediction. Proceedings of the 13th conference on coastal engineering[J]. American Society of Civil Engineers, 1972, 1(13): 405-418.
- [21] 岳保静, 廖晶, 高茂生, 等. 山东半岛砂质海岸动力地貌特征演化[J]. 海洋科学, 2017, 41(4): 1-10.
Yue Baojing, Liao Jing, Gao Maosheng, et al. Evolutionary features of the morphodynamics of sandy beaches in the Shandong Peninsula[J]. Marine Sciences, 2017, 41(4): 1-10.
- [22] Clarke D J, Eliot I G, Frew J R. Variation in subaerial beach sediment volume on a small sandy beach over a monthly lunar tidal cycle[J]. Marine Geology, 1984, 58: 319-344.
- [23] 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.
Li Guangxue, Gong Lixin, Yang Jichao, et al. Beach erosion along the coast of Shandong Province and protection countermeasures[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2013, 33(5): 35-46.
- [24] 胡彦开, 吴碧君. 岚山海区波浪特征及其对海岸的影响[J]. 海岸工程, 1998, 17(4): 17-21.
Hu Yankai, Wu bijun. The natures and effect on coastal lines of wave of Lanshan coast[J]. Coastal Engineering, 1998, 17(4): 17-21.

Spatial and temporal variabilities of northern and southern sandy-coast beach profiles on the Eastern Shandong Peninsula

YUE Bao-jing^{1,2}, DOU Yan-guang^{1,2}, LIAO Jing^{1,2}, GAO Mao-sheng^{1,2},
SHAO Jia-wang¹, YE Yong-yu¹

(1. Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resources and Environmental Geology Ministry of Land and Resources, Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China; 2. Laboratory for Marine Geology, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266061, China)

Received: Apr. 11, 2017

Key words: beach profile; spatial and temporal variability; empirical orthogonal function; beach morphodynamics

Abstract: In this study, we investigated two sandy coastal landform monitoring sections (Yantai and Rizhao) in the south and north of the Shandong Peninsula. We used an empirical orthogonal function to extract the spatial and temporal mode functions of the first four modes from biannual monitoring data ranging from Dec. 2012 to Dec. 2015. We analyzed the evolutionary features of the two sandy coastal sections and then compared the geomorphic features and sedimentary characteristics of the south and north coasts. In this paper, we discuss the differences and impact factors in the dynamic environments on the northern and southern sandy coasts of the Shandong Peninsula. The results reveal that the first spatial eigenfunctions indicate the changes in the main model of the beach section, and that the change from beach shoulder to broken belt is gradually enhanced, which is related to wave and tide action. The second spatial eigenfunctions indicate the main fluctuation characteristics from the high tidal zone to the upper limit of the upper bound, which is controlled by the seasonal changes of stormy waves. We speculate that the third and fourth spatial eigenfunctions are related to accidental factors.

(本文编辑: 刘珊珊)