

戚洪帅, 冯威, 刘根, 等. 人工岛影响下养护海滩演变特征研究——以海口湾为例[J]. 海洋学报, 2024, 46(2): 79–92, doi:10.12284/hyxb2024017

Qi Hongshuai, Feng Wei, Liu Gen, et al. Study on the evolution of nourished beaches under the influence of artificial islands: taking Haikou Bay as an example[J]. Haiyang Xuebao, 2024, 46(2): 79–92, doi:10.12284/hyxb2024017

# 人工岛影响下养护海滩演变特征研究

## ——以海口湾为例

戚洪帅<sup>1,2,5</sup>, 冯威<sup>1,2</sup>, 刘根<sup>2,3,4,5\*</sup>, 何其江<sup>4</sup>, 蔡锋<sup>1,2</sup>, 何岩雨<sup>2</sup>,  
刘建辉<sup>2</sup>, 曹超<sup>1,2,5</sup>, 赵绍华<sup>2,5</sup>, 赵刚<sup>3</sup>

(1. 福州大学先进制造学院, 福建泉州 362200; 2. 自然资源部第三海洋研究所, 福建厦门 361005; 3. 自然资源部华东海岸带野外科学观测研究站, 江苏南京 210001; 4. 海南省海洋地质资源与环境重点实验室, 海南海口 570206; 5. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东珠海 519000)

**摘要:** 海滩养护作为一种广泛应用的软式海岸防护手段, 可以有效缓解人工岛建设引起的海滩侵蚀问题。本文以海口湾人工岛波影区两侧养护海滩为例, 基于补沙后两月一次的剖面地形和岸线监测数据, 利用经验正交函数、数字岸线分析系统等方法, 分析了海滩蚀淤变化特征及其控制因素。经验正交函数分析结果表明, 前两个特征值方差占比超过 90%, 可以反应海滩的主要时空变化。第一空间模态的极值区域位于滩肩外缘线至平均海平面之间, 且波影区两侧养护海滩与波影区天然海滩演变模式存在显著差异, 时间模态显示养护海滩在补沙后 4 个月变化最为显著, 之后剖面变化减弱; 第二空间模态显示台风对海滩剖面造成了一定影响, 导致波影区海滩滩肩上的低洼位置由于泥沙淤积被填平。研究发现, 海口湾养护海滩在人工岛影响下的演变特征可分为两个阶段, 第一阶段是人工补沙的海滩剖面向平衡状态不断调整, 平衡时间为 4 个月, 该阶段以横向输沙为主; 第二阶段是受人工岛的影响, 形成由人工岛东西两侧向波影区运移的沿岸输沙, 该阶段以纵向输沙为主。当前海口湾养护海滩岸线仍未达到平衡状态, 未来人工岛后方波影区两侧海滩仍将不断蚀退, 而波影区海滩将向海淤积约 690 m, 直至达到平衡稳定状态。本研究可为相似类型的海滩演变分析及保护修复提供一定的参考。

**关键词:** 海滩养护; 经验正交函数; 海滩剖面; 沉积物运移

中图分类号: P737.1

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2024)02-0079-14

## 1 引言

海滩是宝贵的自然资源, 拥有海岸防护、旅游休闲和生态服务等重要功能。近年来, 沿海城市通过采

用建设人工岛的方式来解决土地资源紧张的问题<sup>[1-4]</sup>, 但是人工岛建设对周边的海洋动力条件、泥沙输移与岸滩环境造成显著影响, 尤其是邻近岸滩的持续侵蚀。由此, 人们不得不采取必要的工程措施来应对人

收稿日期: 2023-12-14; 修订日期: 2024-01-21。

**基金项目:** 自然资源部第三海洋研究所基本科研业务费专项资金项目(海三科 2023011); 自然资源部华东海岸带野外科学观测研究站开放基金(ORSECCZ2022203); 海南省海洋地质资源与环境重点实验室开放基金(22-HNHYDZZYHJKF024)。

**作者简介:** 戚洪帅(1980—), 男, 山东省日照市人, 研究员, 主要从事海洋生态修复和海滩养护技术等相关领域研究。E-mail: qihongshuai@tio.org.cn

\* **通信作者:** 刘根(1988—), 男, 湖北省十堰市人, 助理研究员, 主要从事海滩动力地貌过程和海岸沉积物管理方面的研究与应用。E-mail: liugen@tio.org.cn

工岛建设引起的岸滩侵蚀问题<sup>[5-8]</sup>。传统的海岸防护措施有丁坝、离岸堤、护岸等“硬式工程”,虽能直接起到防冲促淤、保护海岸的作用,但若用到人工岛导致的海岸侵蚀灾害防护上,则可能会对海岸动力环境再次造成不良影响。再加上一些人工岛所在的区域属于生活和旅游岸线资源,若采用传统的“硬式工程”措施,对于开展水上运动和景观会造成较大影响,因此不建议采用上述工程措施<sup>[9-12]</sup>。海滩养护是通过人工措施将异地沙源运至补沙岸段人为增加海滩泥沙有效补给的沙质海岸防护手段,又因其能够有效增加海滩范围、减小海滩侵蚀的不利影响,在不改变海滩自然属性的情况下能有效改善海滩景观,已经成为了抵御海岸侵蚀的最佳方法<sup>[13-14]</sup>,广泛应用于海岸防护和海滩保护<sup>[15-19]</sup>。世界上最早的海滩养护工程始于20世纪初的美国东海岸,其后欧美发达国家对海滩养护进行了全面而细致的研究,并广泛应用成为了海岸防护的有效措施<sup>[4, 20-21]</sup>。与其他国家相比,虽然我国的海滩养护起步较晚,但近10年来发展尤为迅速,许多滨海旅游城市相继实施了海滩养护修复工程<sup>[22-24]</sup>。海滩养护技术作为一种经济有效的海岸侵蚀应对措施,可以有效解决人工岛后方邻近沙滩侵蚀问题。

许多学者主要研究了人工岛对潮流、波浪及泥沙冲淤的影响预测<sup>[25-27]</sup>及人工岛邻近海岸海滩形态以及岸线的监测等<sup>[28-31]</sup>,比如陈可锋等<sup>[6]</sup>预测分析了人工岛建设完成后其潮流场和泥沙场变化情况和海床局部冲刷情况,并提出了海床护底防冲的相关措施;许婷等<sup>[26]</sup>采用数学模型分析了人工岛建设对工程海域潮流场及海床冲淤影响情况,得出人工岛群主要对

其附近海域造成了一定影响,流速有增有减,但变化幅度较小等结论,但对于人工岛影响下养护海滩的演化特征很少进行过深入研究。

本文以海口湾养护海滩为研究对象,依据补沙后两月一次的剖面地形和岸线监测数据,利用经验正交函数、数字岸线分析系统等方法,研究了人工岛影响下养护海滩的演化过程及特征,并分析了海滩演化的控制因素,以期对未来相似条件下海滩养护工程方案设计以及海滩保护修复提供参考。

## 2 研究区概况

海口湾位于海南岛北部、琼州海峡中段南侧,东起白沙角,西至后海,与广东省的雷州半岛隔海相望,是一个向北敞开的弧形海湾,其东部主要为南渡江三角洲;海湾东西长约14 km,南北宽约6 km,岸线长约20.5 km,口门宽约12.5 km,全湾总面积42 km<sup>2</sup>左右。海口湾东半部主要为开发利用的人工海岸,海滩已基本消失<sup>[30]</sup>。研究区位于海口湾西半部海岸,东起海南西海岸高尔夫俱乐部,西至五源河口,海滩长约3.4 km。研究区受北部湾潮波以及琼州海峡东口传入的南海潮波影响,潮汐类型为不正规全日潮,潮流主要为往复流形式,优势流向为东西向。波浪以风浪为主,常浪向为ENE,频率为30%,次常浪向为NE向,频率为23%。研究海域年平均波高( $H_{1/10}$ )为0.5 m,波高小于0.6 m的年均频率约为60%,小于1.5 m的频率达96%;年平均波周期为3 s,夏半年波周期略小于冬半年<sup>[32]</sup>。

南海明珠人工岛位于海口湾西侧(图1),于2010年开工建设,2016年竣工,围海面积约为4.6 km<sup>2</sup>。人



图1 研究区域地理位置

Fig. 1 Location map of the study area

工岛外缘轮廓呈圆形,直径约为2.4 km,离岸距离约为2 km,人工岛南部围填于双滩浅滩之上,造陆面积约为2.2 km<sup>2</sup>,北部为环抱式防波堤及游艇港池,港池内最大水深约为16 m<sup>[32]</sup>。南海明珠人工岛建设后,海口湾海滩发生了显著变化,波影区海滩产生了明显淤积,而波影区两侧海滩发生了显著侵蚀,局部岸段沙滩变窄、消失,后方海堤坍塌。为了修复受损海岸,2022年4月,在海口湾侵蚀严重的五源河口东岸段和假日海滩岸段进行了人工补沙,整个补沙工程于6月底全部完工。其中,五源河口东岸段补沙长度约为1 000 m,补沙量为 $51.82 \times 10^4$  m<sup>3</sup>,补沙宽度为120 m;假日海滩岸段补沙长度为1 741 m,补沙量为 $79.8 \times 10^4$  m<sup>3</sup>,补沙宽度为100 m。

### 3 资料与方法

#### 3.1 野外调查

为了研究海口湾海滩地形地貌变化过程,在沿岸布设了14条固定监测剖面(图1),其中P1-P5剖面位于假日海滩补沙岸段,P6-P9剖面位于人工岛波影区天然海滩,P10-P14剖面位于五源河口东补沙岸段。海滩养护工程完工后,分别于2022年7月30日、2022年9月14日、2022年11月1日、2022年12月8日、2023年2月20日和2023年4月12日对上述剖面地形进行了监测。海滩剖面地形采用STONEX S9 II PRO型RTK(Real-time Kinematic)测量,该仪器的平面和垂直精度均为 $\pm 2$  cm。测量范围为海滩后滨至当日低潮线,调查通常在大潮低潮时进行。

此外,还对海口湾海滩岸线进行了测量,测量位置为平均大潮高潮线,其野外识别特征为垃圾聚集带或滩面干湿分界线或侵蚀陡坎。岸线测量分别于2022年9月14日、2022年12月8日、2023年2月20日和2023年4月12日进行,共获取4期数据。岸线位置测量也采用上述RTK仪器,测量点间距设置为1 m。

#### 3.2 数据分析

##### 3.2.1 海滩参数

为了研究海滩的时序变化特征,本文定义了滩肩宽度(Wb)、前滨坡度( $\alpha$ )和剖面单宽体积(Vb)等3个参数。其中,滩肩宽度定义为剖面上岸线位置(平均大潮高潮线,高程为1.5 m)至剖面起点之间的水平距离,潮间带滩面坡度( $\alpha$ )定义为平均大潮高潮线(高程为1.5 m)至平均低潮线(高程为-1 m)之间的线性坡度,剖面单宽体积定义为平均低潮线与剖面形态所形成的闭合区域面积(图2)。

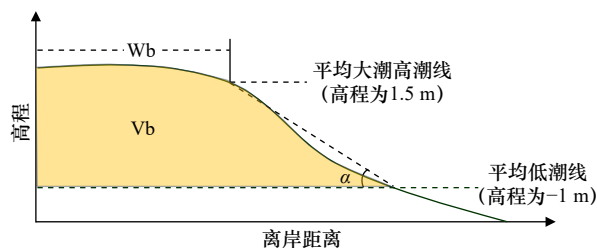


图2 海滩剖面参数示意图

Fig. 2 Schematic map of beach profile parameters

##### 3.2.2 数字岸线分析系统

为了分析海滩岸线的精细变化速率,采用美国地质调查局(USGS)开发的数字岸线分析系统(Digital Shoreline Analysis System, DSAS)<sup>[33]</sup>。在本研究中,断面间距设置为10 m,在研究区海岸共生成401个断面。采用线性回归方法(Linear Regression Rate, LRR)<sup>[34]</sup>对上述4期数据进行变化速率分析,该方法是对多期岸线与断面的多个交点进行线性拟合,该拟合线的坡度即代表该段时期内的岸线变化速率。

##### 3.2.3 经验正交函数

经验正交函数分析(Empirical Orthogonal Function Analysis, EOF)是一种用于分析矩阵数据中结构特征并提取主要数据特征量的方法。在海滩剖面形态的时空变化分析中,可以运用经验正交函数方法<sup>[34-36]</sup>。EOF方法本质上是对空间上的因子进行分析,它是一种典型场函数,没有固定的展开形式。在本研究中,我们采用了EOF对研究岸段14条剖面的6期数据进行了分析。为了使地形数据统一且精确,我们对各期测得的剖面长度进行了统一处理,采用1 m间隔进行线性插值<sup>[37]</sup>,从而获得了相应的海滩剖面高程变化数据。

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

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

式中, $\delta_{nm}$ 为克罗内克 $\delta$ ,当 $n \neq m$ 时,即 $e_n$ 相互独立或不相关, $\delta_{nm} = 0$ 。为了使第一函数占据的数据大部分变化,随后的特征函数占剩余变化的绝大部分,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,  $\lambda_n$ 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:

$$c_n(t) = \sum_{i=1}^{nx} h(x_i, t) e_n(x_i). \quad (5)$$

## 4 结果

### 4.1 海滩剖面形态变化

人工岛西侧补沙剖面处于侵蚀状态, 表现为滩肩向陆缩进, 剖面滩肩外缘线在 2022 年 9–11 月期间蚀退明显, 其中 P12 剖面滩肩向陆最大蚀退量约为 35 m (图 3); 西侧剖面坡度整体上先变缓后稳定, 单宽沙

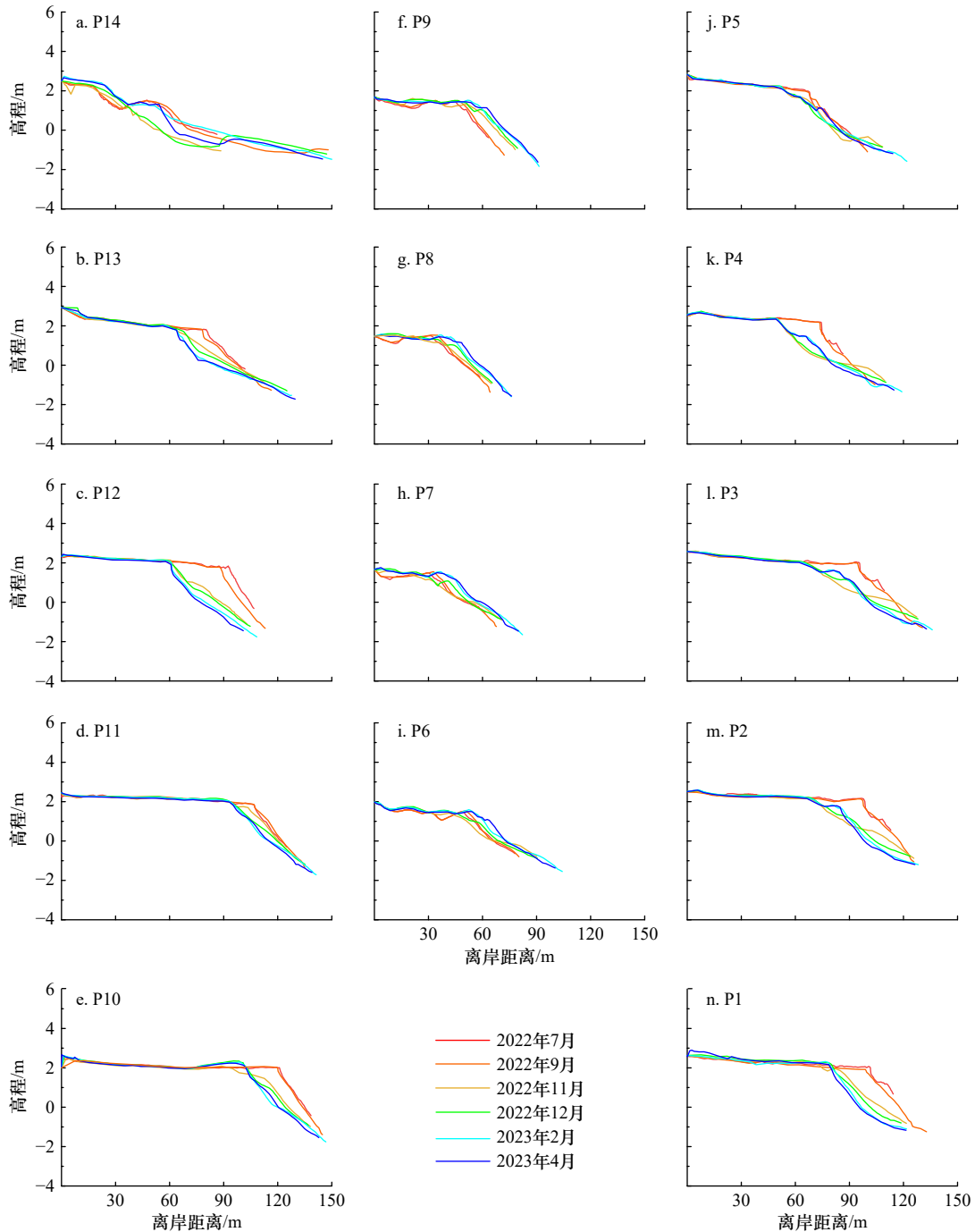


图 3 研究区监测期内剖面形态演化

Fig. 3 Evolution of profile morphology during the monitoring period in the study area

a, b, c, d, e 为西侧补沙剖面; f, g, h, i 为未补沙剖面; j, k, l, m, n 为东侧补沙剖面

a, b, c, d, e are western nourished profiles; f, g, h, i are central natural profiles; j, k, l, m, n are eastern nourished profiles

量呈逐渐减小的趋势(图4)。中部未补沙剖面总体上处于淤积状态,表现为滩肩向海淤进,其中P8剖面滩肩向陆最大淤积量约17m,中部剖面坡度先变缓后变陡,并2022年11月后趋于稳定状态(图4)。人

工岛东侧补沙剖面与西侧补沙剖面滩肩变化趋势基本相同,其中P1剖面滩肩向陆最大蚀退量约25m,东侧剖面坡度先变缓后稳定,单宽沙量先减小后趋于稳定(图4)。

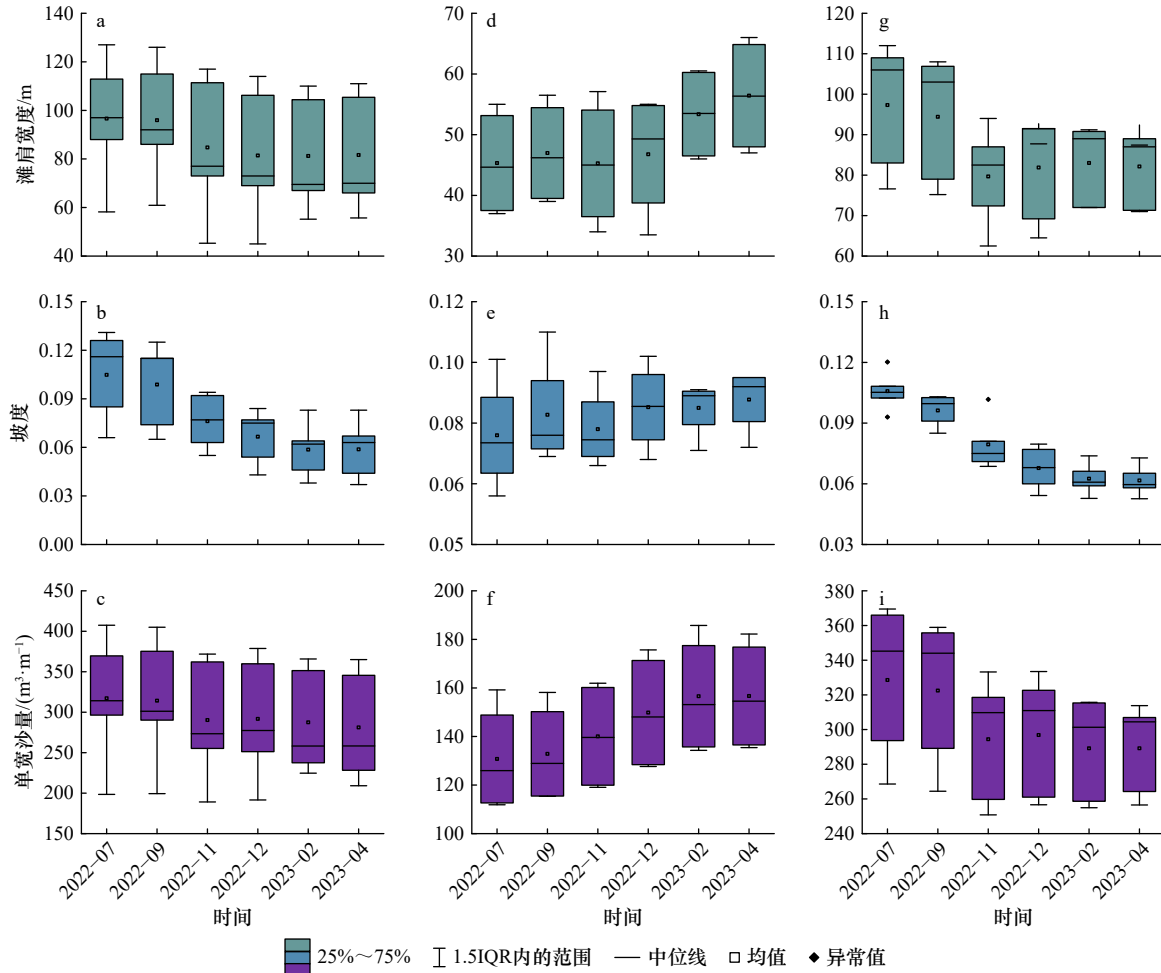


图4 研究区监测期内剖面滩肩宽度、滩面坡度和单宽体积变化

Fig. 4 Changes in beach berm width, beachface slope, and volume density over the monitoring period in the study area

a、b、c为西侧补沙剖面;d、e、f为中部未补沙剖面;g、h、i为东侧补沙剖面

a, b, and c for western nourished profiles; d, e, and f for central natural profiles; g, h, and i for eastern nourished profiles

整体上人工岛东西两侧补沙剖面先侵蚀然后趋于稳定,中部未补沙的剖面以淤积为主,大体上呈现两端侵蚀、中间淤积的特征。

#### 4.2 海滩剖面时空变化特征

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1)。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,指示节点两侧泥沙向海或者向陆运动,可以将毗邻海滩区域的淤积和侵蚀状态分开,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。

##### 4.2.1 第一模态

第一模态特征值占总方差的71%~98%,代表

海滩剖面侵蚀变化的主要趋势。本文选择9条典型剖面(东侧剖面:P1、P3、P4;中部剖面:P6、P7、P8;西侧剖面:P10、P12、P13)分析其第一模态。从空间模态上看,第一空间模态共同性体现在振幅值波动剧烈的区域在滩肩外缘线至平均海平面附近(图5),指示剖面为较快速的月际蚀淤过程变化最显著地带,另外,研究区不同区域空间特征有所差异。东西两侧剖面为“平缓-上凸”模式,振幅值以正值为主,指示该岸段处于侵蚀状态,剖面后滨区域的振幅值基本稳定在零值附近,表示剖面在该区域较为稳定,正值极值所处位置在滩肩外缘线至平均大潮高潮线之间,指示剖面该区域变化较为剧烈,即剖面在此处

表 1 各剖面主要模态特征值及所占方差结果

Table 1 Variation in beach profile eigenvalues and associated variances explained by different modes by EOF

剖面	特征值		所占方差		累计方差
	第一模态	第二模态	第一模态	第二模态	
P1	16.51	0.19	0.97	0.01	0.98
P2	10.61	0.85	0.91	0.07	0.98
P3	6.69	0.78	0.90	0.08	0.98
P4	7.97	0.29	0.96	0.03	0.99
P5	1.09	0.19	0.72	0.13	0.94
P6	1.51	0.44	0.71	0.20	0.91
P7	1.86	0.42	0.76	0.17	0.93
P8	1.83	0.20	0.84	0.09	0.93
P9	2.19	0.12	0.90	0.05	0.95
P10	10.46	0.36	0.95	0.03	0.98
P11	2.82	0.10	0.94	0.04	0.98
P12	22.60	0.30	0.98	0.01	0.99
P13	6.17	0.37	0.92	0.05	0.97
P14	8.68	1.27	0.81	0.12	0.93

侵蚀最为严重。中部剖面空间模态距平值有正有负，在剖面的不同区域相比振幅值变化较大，但总体表

现为较弱程度的淤积，比如 P8 剖面在前滨(18~33 m)区域内振幅值距平值为负值，表现为较弱程度的淤积，其余区域内空间模态距平值为正值，指示在该区域内存在泥沙侵蚀现象，在滩肩外缘线至平均海平面附近(48 m)处达到正极大值，说明此处侵蚀最为明显(图 5)。

从时间模态上看，研究区不同区域的剖面呈现不同演变模式，东西两侧剖面整体上呈递减趋势，表明剖面有侵蚀的趋势，中部剖面则相反。另外，第一时间模态还有明显的阶段性变化特征，在 2022 年 9-11 月振幅波动较大，之后振幅波动明显减弱(图 6)。西侧剖面时间模态振幅值从正值向负值呈现递减趋势，指示剖面表现为侵蚀特征；中部剖面时间模态振幅值从负值向正值呈现递增趋势，指示剖面发生淤积；东侧剖面总体上呈减小趋势，指示剖面发生侵蚀，其中 P3 与 P4 剖面时间模态振幅值先减小后处于稳定，指示剖面先发生侵蚀后趋于稳定状态。

#### 4.2.2 第二模态

对于第一个模态方差不足 90% 的 P6、P7、P8 剖面，提取其第二模态，其特征值占总方差的 9%~20%，是海滩剖面变化的次要模式。第二空间模态整体振幅有正有负(图 7)。P6、P7、P8 剖面振幅极值区间对应位置为滩肩前缘及滩肩中部低洼的位置。从第二时间模态上看(图 8)，振幅波动幅度较小且未表现出

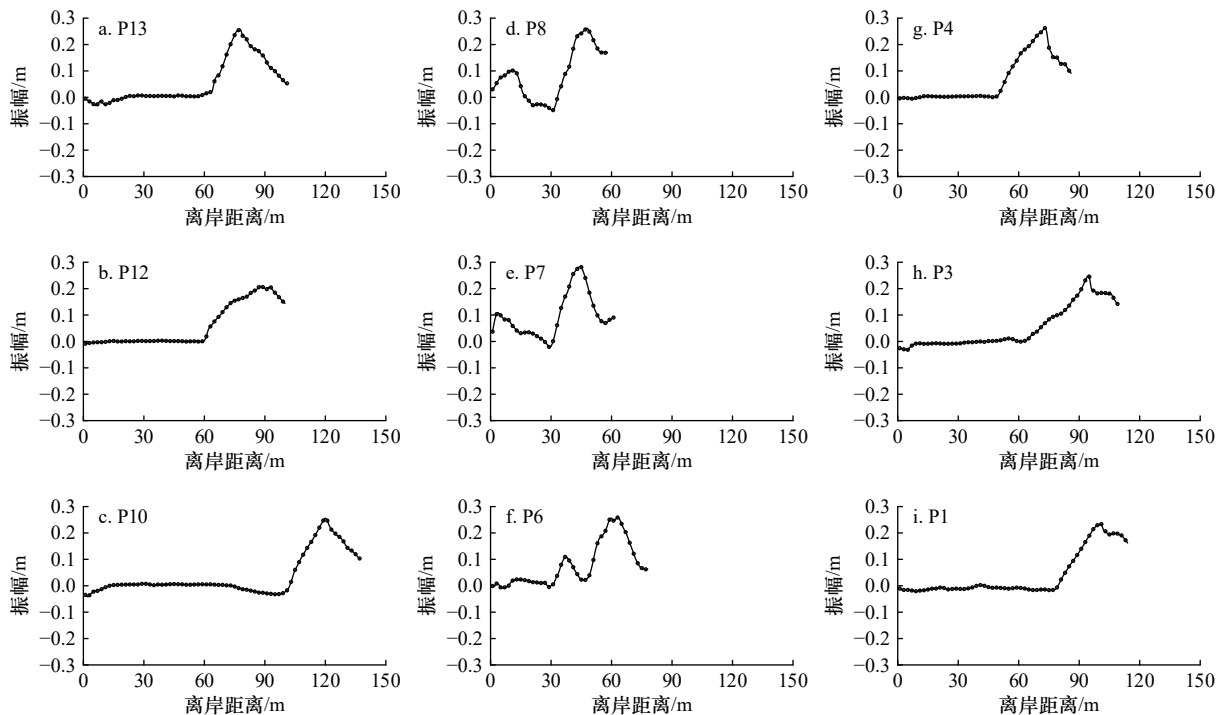


图 5 典型剖面第一空间模态

Fig. 5 The first spatial modes of the typical beach profiles

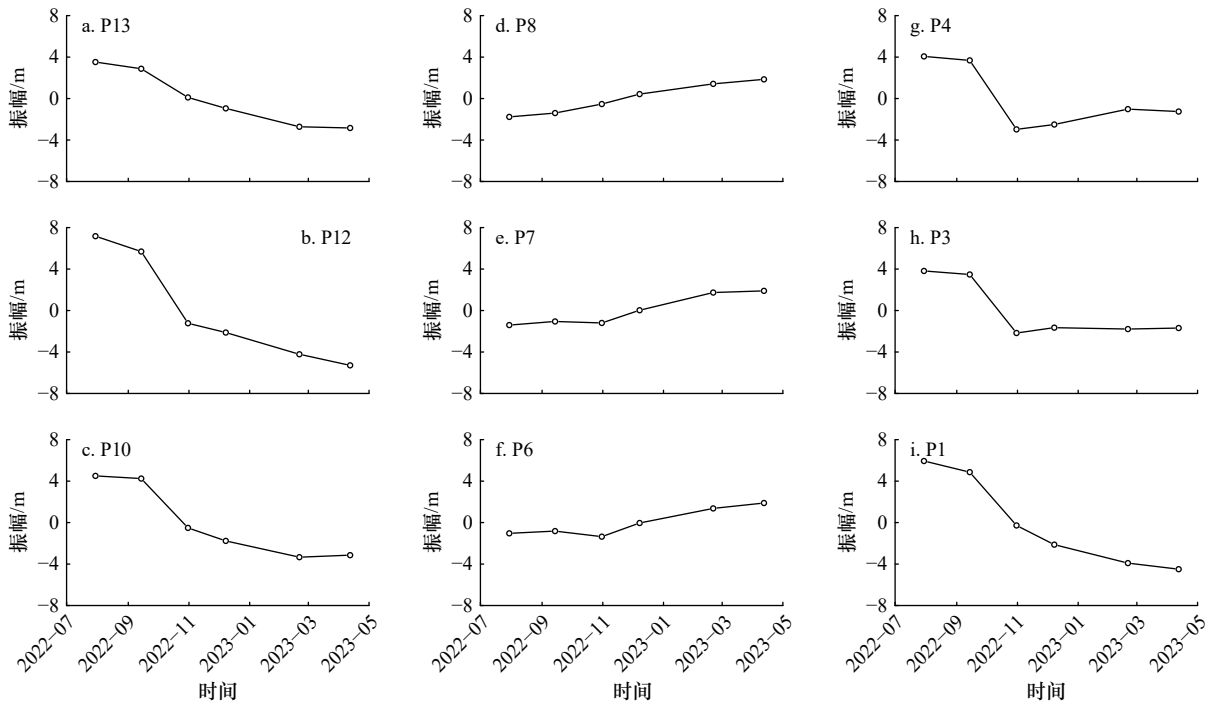


图6 典型剖面第一时间模式

Fig. 6 The first temporal modes of the typical beach profiles

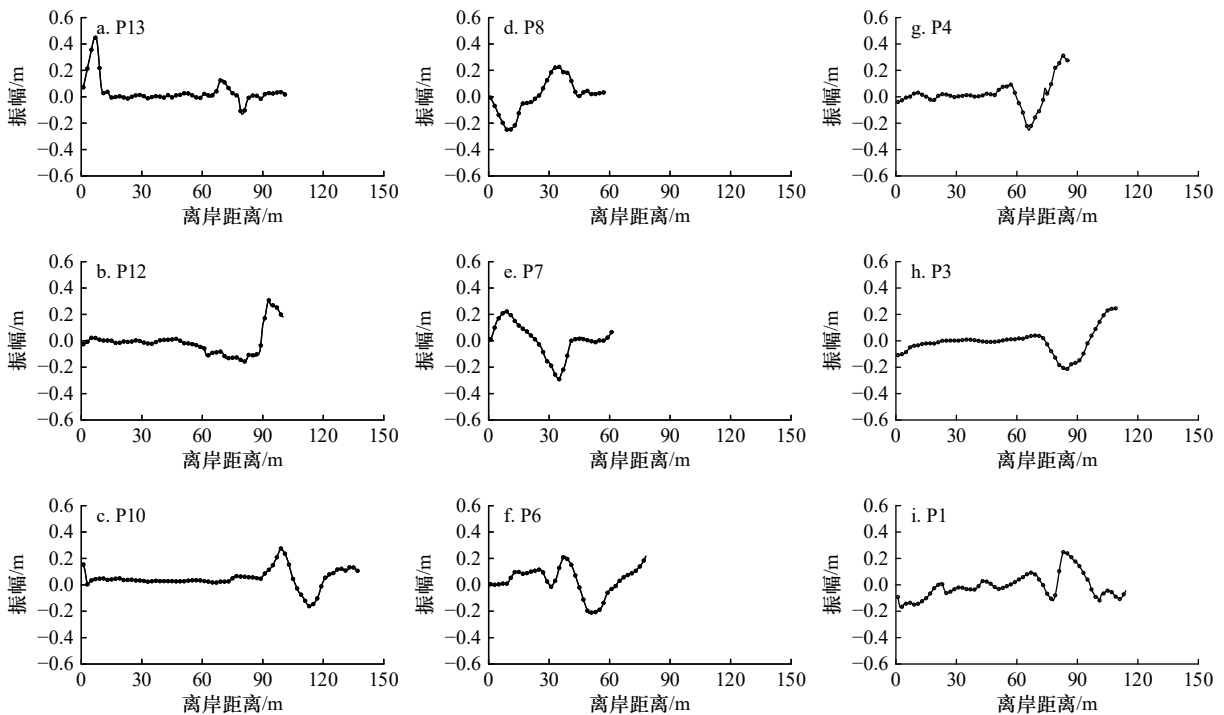


图7 典型剖面第二空间模式

Fig. 7 The second spatial modes of the typical beach profiles

明显的阶段性演化规律,时间系数增大和减小趋势交替出现表示此模式的时间过程是交替性的淤积和侵蚀。

### 4.3 岸线

海口湾岸线 DSAS 分析结果表明岸线变化速率

在 $-46.64 \sim 83.39$  m/a 之间,总的岸线平均变化速率为 $-6.40$  m/a,表明海口湾海滩整体上处于侵蚀状态。发生侵蚀的岸段有 2 590 m,主要位于五源河口东补沙岸段和假日海滩补沙岸段;发生淤积的岸段有 1 420 m,主要位于人工岛后方波影区。有 45.3%的岸

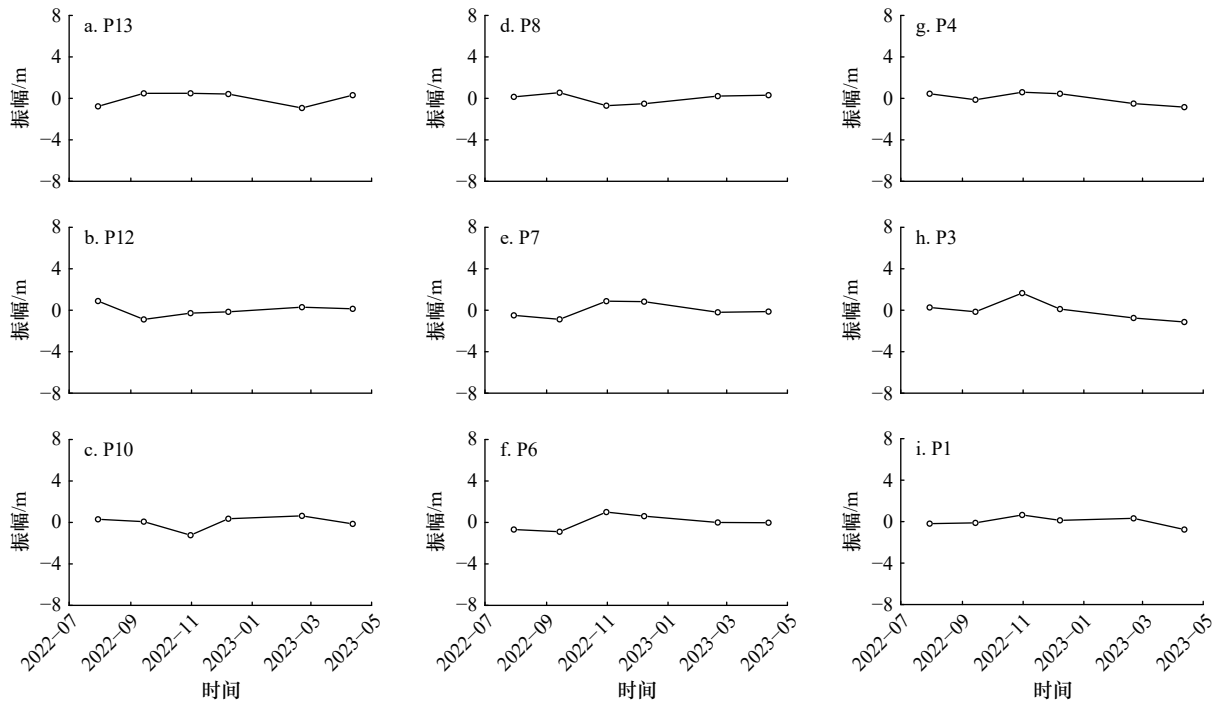


图 8 典型剖面第二时间模式

Fig. 8 The second temporal modes of the typical beach profiles

段 (2 590 m) 侵蚀速率大于 15.0 m/a, 19.3% 的岸段 (1 420 m) 侵蚀速率在 0~15.0 m/a 之间; 有 8.4% 的岸段 (337 m) 淤积速率在 0~15.0 m/a 之间; 27% 的

岸段 (1 080 m) 淤积速率大于 15.0 m/a。总体上, 海口湾海滩岸线整体上呈现两端侵蚀、中间淤积的特征 (图 9)。

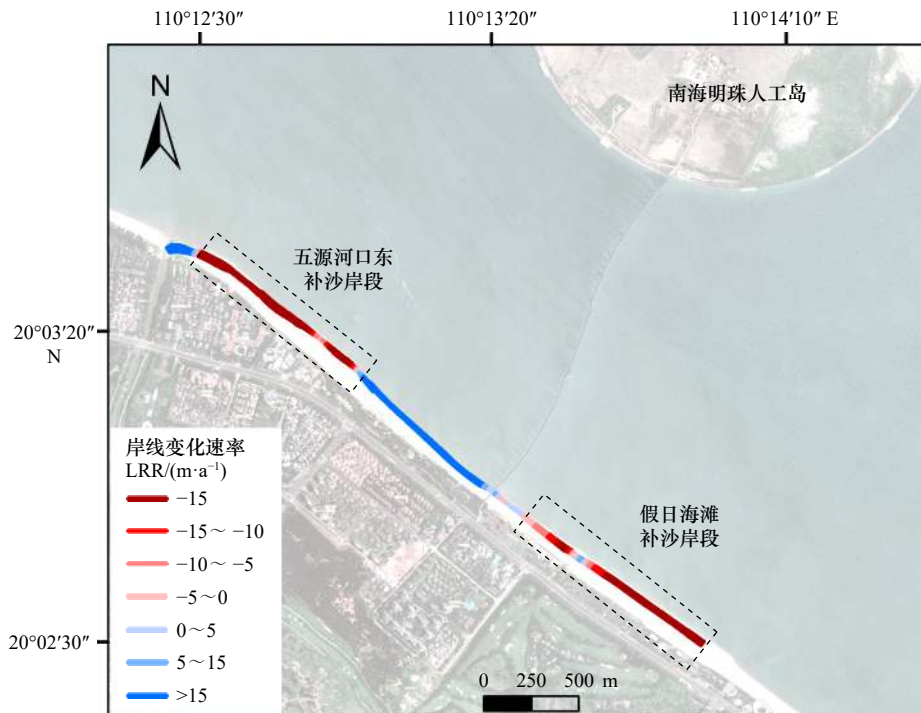


图 9 海口湾海滩监测期内岸线变化速率空间分布

Fig. 9 Spatial variation in Shoreline changes rates during the monitoring period at Haikou Bay Beach

红色代表侵蚀, 蓝色代表淤积

Note that the red indicates erosion and blue indicates accretion

## 5 讨论

### 5.1 海口湾海滩地形变化及其控制因素

#### 5.1.1 输沙对养护海滩地形演化的影响

在海滩养护初期(2022年7-11月),第一时间模态在研究区岸段的東西側剖面与中部剖面表现出明显差异性,东西侧剖面以持续递減为主要特征,中部剖面则与之相反。第一空间模态在东西侧剖面与中部剖面同样也表现出明显差异性:东西侧剖面

空间上以“平缓-突变”演变模式为主要特征;中部剖面在空间上振幅波动较为剧烈,波动周期较长。研究区东西两侧海滩补沙完成后存在剖面平衡调整期即养护海滩的重塑期<sup>[38]</sup>,与补沙前天然海滩剖面已处于平衡状态不同的是,海口湾养护海滩期间,平面和剖面形态发生了较大的改变,整个滩肩快速变窄,坡度变缓,泥沙以横向运移为主,沉积物向海搬运(图10a)。养护海滩的横向输沙在该阶段海滩演化中起主导作用。

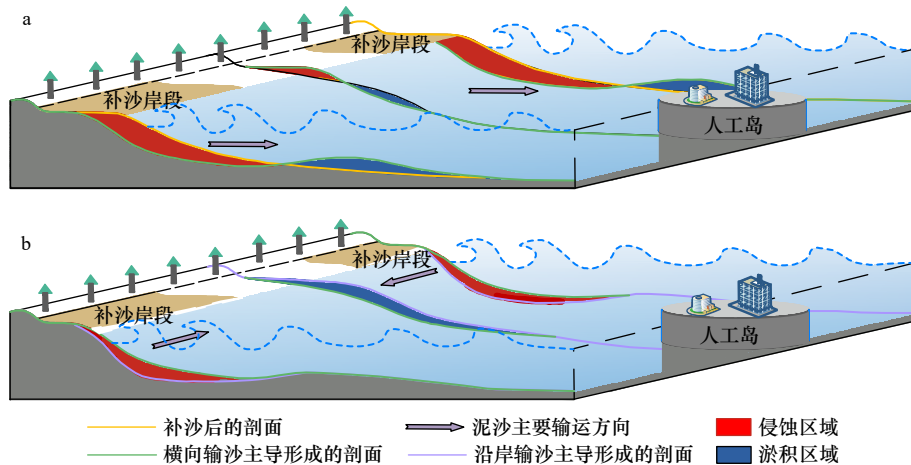


图10 人工岛影响下养护海滩演变模式

Fig. 10 Evolution model of nourished beaches under the influence of artificial islands

a. 第一阶段: 横向输沙主导下的岸滩演变; b. 第二阶段: 沿岸输沙主导下的岸滩演变

a. Phase I: beach evolution dominated by cross-shore sand transport; b. Phase II: beach evolution dominated by longshore sand transport

在2022年11月后,时间模态显示东西侧剖面呈递減趋势但趋势变缓,空间上主要表现为剖面坡度变化幅度减弱,剖面形态趋于稳定;中部剖面时间模态以递増为主要特征,空间上主要表现为滩面宽度逐渐增大。何岩雨等<sup>[39]</sup>使用STWAVE模型模拟波浪场结果显示,在NE主波向波浪入射条件下,岛后方波高显著衰减,岛两侧波高相对较大,形成两侧往中间的波能衰减梯度。石萍等<sup>[40]</sup>选择海浪模式SWAN对人工岛建设后波浪动力进行了计算,结果表明,在人工岛后方形成波影区,主波向波浪波高均有所衰减。人工岛的建设导致波浪场改变<sup>[41]</sup>,东西两侧岸滩附近泥沙具有向人工岛波影区运移的趋势,实际是泥沙纵向运移形成波影区的淤积和两侧岸段侵蚀。与第一阶段相同,波影区未补沙剖面仍有向海淤积的趋势,而在波影区附近的补沙剖面由侵蚀转为淤积,滩肩宽度较上一阶段有增大的趋势,单宽沙量也有相同的变化趋势,这表示海口湾泥沙确实存在由东西两端指向人工岛波影区的沿岸运输方向(图10b),也是海口湾海滩侵蚀集中在东西两侧的主要原因。根据以上分析,

可认为在该阶段沿岸输沙在养护海滩演变过程中起主导作用。

#### 5.1.2 台风对海滩剖面的影响

EOF分析结果显示仅人工岛后方波影区海滩剖面的第二空间模态占比较大,这些剖面的第二空间模态极值对应于滩肩前缘和滩肩中部低洼的位置,比如P6和P8剖面负极值所在区间对应于滩肩中部低洼的位置,显示在该区域有淤积现象。此外,研究区剖面形态演化图也显示,2022年11月相较于2022年9月,波影区海滩剖面滩肩上的一些低洼处由于泥沙淤积变得平整(图3),这极可能是受到台风等极端天气影响。海口湾夏秋季为台风多发期,在2022年9-11月期间,台风“奥鹿”和台风“纳沙”先后从海南省南部海域掠过,受其影响,研究区域引起波浪、水位陡然增大,造成部分剖面滩肩中部低洼的位置被泥沙填平<sup>[42]</sup>。

### 5.2 人工岛影响下养护海滩演变特征

海口湾养护海滩在补沙后的演变过程存在阶段性,在补沙后初期即养护工程竣工至2022年11月为

养滩剖面自平衡过程,受所处环境的水动力影响,补沙剖面会向平衡状态不断调整。在此期间沉积物以横向运动为主,表现为干滩宽度、单宽沙量快速减小,前滨坡度不断变缓。从空间模态上看,剖面振幅波动剧烈,滩肩向陆蚀退明显。从时间模态上看,振幅骤减,表明剖面处于侵蚀状态。养护海滩剖面向平衡状态调整的适应期即平衡时间为4个月。在2022年11月之后,养护海滩逐步稳定,横向输沙作用较小,海滩平面和剖面形态变化相对于重塑期变化明显减小。在此期间,受南海明珠人工岛的影响,存在由东西两侧向人工岛波影区的沿岸输沙,导致东西两侧养护海滩缓慢变窄,而人工岛后方波影区海滩剖面(包含补沙剖面)滩肩外缘线均向海淤进,干滩宽度、单宽沙量逐渐增大。石萍等<sup>[40]</sup>认为人工岛建设后会造成长海岸海滩的变形,使假日海滩有所扩张,形成向海突出的舌状岸线,而其两侧会出现海岸侵蚀;何岩雨等<sup>[39]</sup>和肖哲宇<sup>[32]</sup>在研究了人工岛建设对海口湾海滩的影响时,均得出了“岛后方淤积、两侧侵蚀”为显著特征的结论。与上述研究结果类似,经人工补沙的海口湾海滩地貌形态变化明显受到了人工岛建设的影响并呈现了相同的变化特征。

综上,人工岛影响下养护海滩的演化过程呈现出养护海滩自适应调整与人工岛影响的双重特征,可分为两个阶段:在第一阶段,由于人工补沙的剖面较陡,在自然动力作用下,海滩剖面快速向平衡状态调整,表现为滩肩蚀退、前滨坡度变缓、单宽沙量减少,横向输沙在该阶段起主导作用;在第二阶段,由于人工岛的影响,存在由人工岛东西两侧向波影区运移的沿岸输沙,导致平衡后的养护海滩滩肩宽度和单宽沙量缓慢减少,而前滨坡度保持不变,纵向输沙在该阶段起主导作用(图10)。

### 5.3 人工岛对海滩的长期影响

本文的监测数据显示,人工岛后方波影区两侧养护海滩岸线仍在蚀退,而波影区海滩岸线逐渐向海淤进,因此当前海口湾养护海滩岸线仍未达到平衡状态。本文中,南海明珠人工岛的尺度较大,沿岸长度达到2.4 km,离岸距离近2 km,其对海岸影响的范围和程度是人们关注的核心问题。关于南海明珠人工岛对海岸影响的范围,Liu等<sup>[31]</sup>基于现场观测数据对此进行了深入研究,结果表明有超过6 200 m的海滩受其影响,并且随着时间的推移,海口湾的沿岸地形地貌也将不断变化,最终受人工岛影响的岸线长度也将远超6 200 m。此外,Sulis等<sup>[43]</sup>提出了一个预测离岸障碍物对海岸影响范围的经验公式,即  $L_d/L_B =$

$2.95(L_B/X_S) - 0.83$ ,其中  $L_d$  为受影响海岸的长度,  $L_B$  为离岸障碍物的沿岸长度,  $X_S$  为离岸障碍物到海岸之间的距离。从该公式可知,当  $L_B$  和  $X_S$  均较大时,  $L_d$  也将较大。此外,在离岸距离( $X_S$ )保持不变的情况下,若人工岛的尺度减小,则其对海滩影响的长度( $L_d$ )也随之减小。

关于人工岛对海岸影响的程度,最受关注的问题是岛后是否会形成连岛坝(tombolo)或突出体(salient)。前人研究认为  $L_B$  和  $X_S$  是离岸障碍物后方岸滩响应最主要的因素<sup>[44-46]</sup>。当  $L_B/X_S$  之比较大时,离岸障碍物后方的海岸会形成连岛沙坝;当  $L_B/X_S$  之比足够小的时候,离岸障碍物对海滩几乎无影响。Black和Andrews<sup>[47]</sup>提出了量化离岸堤后方海滩向海淤积幅度( $X$ )的公式,即  $X/L_B = 0.40(L_B/X_S)$ 。根据此公式,计算得到本文南海明珠人工岛后方波影区海滩将向海淤积约690 m。显然,人工岛后方将会形成一个巨大的突出体,而不会形成连岛沙坝。因此,大型人工岛影响下的海滩演变将是一个长期、缓慢的过程。未来,人工岛后方波影区两侧海滩仍将不断蚀退,而波影区海滩仍将向海淤进,直至达到平衡稳定状态。考虑到补沙后监测时间较短,为及时掌握养护海滩的地形地貌变化及泥沙运移速率,以及人工岛对海滩的长期影响,有必要继续进行定期的海滩地形变化监测。

## 6 结论

本文通过对海口湾养护海滩进行为期1年月际尺度的地形监测,利用EOF、DSAS等方法,分析了海滩的蚀淤变化特征及其控制因素,探讨了海口湾养护海滩的演变过程。得出以下主要结论:

(1)海口湾海滩人工补沙后,人工岛东西两侧的养护海滩呈现出侵蚀状态,而人工岛波影区未补沙海滩表现为淤积状态。海滩剖面时空变化呈现两种主要模态:第一空间模态的极值区域位于滩肩外缘线至平均海平面之间,且东西两侧补沙海滩与中部未补沙海滩演变模式存在显著差异,时间模态显示养护海滩在补沙后4个月变化最为显著,之后剖面地形变化显著减弱;第二空间模态显示台风对海滩剖面造成了一定影响,导致波影区海滩滩肩上的低洼位置由于泥沙淤积被填平。

(2)海口湾养护海滩的演化过程呈现出养护海滩自适应调整与人工岛影响的双重特征,可分为两个阶段:第一阶段是在补沙后4个月内,受所处环境的水动力影响,人工补沙形成的较陡剖面向平衡剖面不断调整,导致补沙剖面侵蚀严重,该阶段以横向输沙为

主;第二阶段主要受人工岛的影响,形成由人工岛东西两侧向波影区运移的沿岸输沙,该阶段以纵向输沙为主。在此基础上,总结了人工岛影响下养护海滩的演化模式。

(3)当前,海口湾养护海滩岸线仍未达到平衡状态。根据前人经验公式预测,未来南海明珠人工岛后

方波影区海滩将向海淤积约690 m,对海岸的影响范围超过6 200 m。在离岸距离保持不变的情况下,若人工岛的尺度减小,则其对海滩影响的长度也随之减小。未来,人工岛后方波影区两侧海滩仍将不断蚀退,而波影区海滩仍将向海淤进,直至达到平衡稳定状态。

## 参考文献:

- [1] Ma Zhijun, Melville D S, Liu Jianguo, et al. Rethinking China's new great wall[J]. *Science*, 2014, 346(6212): 912-914.
- [2] Pranzini E, Wetzel L, Williams A T. Aspects of coastal erosion and protection in Europe[J]. *Journal of Coastal Conservation*, 2015, 19(4): 445-459.
- [3] 林峰竹,王慧,张建立,等.中国沿海海岸侵蚀与海平面上升探析[J].*海洋开发与管理*, 2015, 32(6): 16-21.  
Lin Fengzhu, Wang Hui, Zhang Jianli, et al. Exploring coastal erosion and sea level rise along the coast of China[J]. *Ocean Development and Management*, 2015, 32(6): 16-21.
- [4] Luijendijk A, Hagenaars G, Ranasinghe R, et al. The state of the world's beaches[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 6641.
- [5] 安永宁. 离岸人工岛群建设对龙口湾冲淤特征的影响研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.  
An Yongning. Study on impacts of offshore artificial islands cluster's construction on scouring-deposition features in Longkou Bay[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010.
- [6] 陈可锋,陆培东,王艳红,等.江苏如东人工岛建设对周边水动力及泥沙冲淤的影响[J].*中国港湾建设*, 2008(1): 8-12.  
Chen Kefeng, Lu Peidong, Wang Yanhong, et al. Influence of construction of artificial island in Rudong, Jiangsu, upon hydrodynamics, erosion and siltation in surrounding water areas[J]. *China Harbour Engineering*, 2008(1): 8-12.
- [7] 岳娜娜,吴建政,朱龙海,等.离岸人工岛对砂质海岸的影响[J].*海洋地质动态*, 2008, 24(4): 18-22.  
Yue Nana, Wu Jianzheng, Zhu Longhai, et al. Impact of the Man-made Island project to the vicinity of area on the sandy coast[J]. *Marine Geology Letters*, 2008, 24(4): 18-22.
- [8] 郭磊,杨树森.江苏如东人工岛工程对周边海域水动力的影响[J].*水道港口*, 2009, 30(5): 342-346.  
Guo Lei, Yang Shusen. Influence of artificial island construction on hydrodynamics in waters around Rudong[J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 2009, 30(5): 342-346.
- [9] 陈程浩,吕意华,李伟巍,等.三亚红塘湾珊瑚礁生态状况研究[J].*海洋湖沼通报*, 2020(4): 138-146.  
Chen Chenghao, Lü Yihua, Li Weiwei, et al. A study on the ecological status of coral reef in Hongtang Bay, Sanya[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2020(4): 138-146.
- [10] 宋南奇,黄杰,李滨勇,等.人工岛机场填海工程对生态环境影响的综合评价[J].*中国环境科学*, 2020, 40(8): 3703-3712.  
Song Nanqi, Huang Jie, Li Binyong, et al. Comprehensive evaluation of the impact of artificial island airport reclamation construction on marine eco-environment[J]. *China Environmental Science*, 2020, 40(8): 3703-3712.
- [11] 张晗.人工岛建设对海洋生态环境的影响分析——以白沙湾为例[D].大连:大连海事大学, 2023.  
Zhang Han. Artificial islands impacts on the marine ecological environment analysis——in Baishawan as an example[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2023.
- [12] 赵桂侠,张晨,张赫,等.人工岛布置方式对周围海域水动力及水交换影响研究[J].*水力发电学报*, 2017, 36(2): 18-28.  
Zhao Guixia, Zhang Chen, Zhang He, et al. Effect of artificial island layout on hydrodynamics and water exchange in the coastal waters[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2017, 36(2): 18-28.
- [13] Dean R G. *Beach Nourishment: Theory and Practice*[M]. Singapore: World Scientific, 2002.
- [14] Coburn A S. *Beach nourishment in the United States*[M]. Pitfalls of Shoreline Stabilization: Selected Case Studies. Dordrecht: Springer Netherlands, 2012: 105-119.
- [15] Hamm L, Capobianco M, Dette H H, et al. A summary of European experience with shore nourishment[J]. *Coastal Engineering*, 2002, 47(2): 237-264.
- [16] Valverde H R, Trembanis A C, Pilkey 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.
- [17] Browder A E, Dean R G. Monitoring and comparison to predictive models of the Perdido Key beach nourishment project, Florida, USA[J]. *Coastal Engineering*, 2000, 39(2/4): 173-191.
- [18] 季小梅,张永战,朱大奎.人工海滩研究进展[J].*海洋地质动态*, 2006, 22(7): 21-25.  
Ji Xiaomei, Zhang Yongzhan, Zhu Dakui. Research development of artificial beach[J]. *Marine Geology Letters*, 2006, 22(7): 21-25.
- [19] 王广禄,蔡锋,曹惠美,等.厦门香山至长尾礁沙滩修复实践及理论探讨[J].*海洋工程*, 2009, 27(3): 66-75.

- Wang Guanglu, Cai Feng, Cao Huimei, et al. Study on the practice and theory of beach replenishment of Xiangshan~Changweijiao Beach in Xiamen[J]. *The Ocean Engineering*, 2009, 27(3): 66–75.
- [20] Campbell T J, Benedet L. Beach nourishment magnitudes and trends in the U. S.[J]. *Journal of Coastal Research*, 2006(S39): 57–64.
- [21] Koike K. Artificial beach construction on the shores of Tokyo Bay, Japan[J]. *Journal of Coastal Research*, 1990(S6): 45–54.
- [22] 戚洪帅, 刘根, 蔡锋, 等. 海滩修复养护技术发展趋势与前景 [J]. *应用海洋学学报*, 2021, 40(1): 111–125.
- Qi Hongshuai, Liu Gen, Cai Feng, et al. Development trend and prospect of beach nourishment technology[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2021, 40(1): 111–125.
- [23] 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.
- Zhuang Zhenye, Cao Lihua, Li Bing, et al. An overview of beach nourishment in China[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2011, 31(3): 133–139.
- [24] 蔡锋, 刘根. 我国海滩养护修复的发展与技术创新 [J]. *应用海洋学学报*, 2019, 38(4): 452–463.
- Cai Feng, Liu Gen. Beach nourishment development and technological innovations in China: an overview[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2019, 38(4): 452–463.
- [25] 季荣耀, 徐群, 莫思平, 等. 港珠澳大桥人工岛对水沙动力环境的影响 [J]. *水科学进展*, 2012, 23(6): 829–836.
- Ji Rongyao, Xu Qun, Mo Siping, et al. Effects on the hydrodynamics and sediment environment by artificial islands of the Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge[J]. *Advances in Water Science*, 2012, 23(6): 829–836.
- [26] 许婷, 刘国亭, 温春鹏. 波流共同作用下大型离岸人工岛群工程海床冲淤预测 [J]. *海岸工程*, 2015, 34(4): 11–22.
- Xu Ting, Liu Guoting, Wen Chunpeng. Prediction of seabed scouring and silting around large offshore artificial islands under wave-tide Co-action[J]. *Coastal Engineering*, 2015, 34(4): 11–22.
- [27] 匡翠萍, 江林锋, 马悦, 等. 人工岛与海岸整治工程下波流动力响应特征 [J]. *同济大学学报 (自然科学版)*, 2019, 47(1): 38–46.
- Kuang Cuiping, Jiang Linfeng, Ma Yue, et al. Wave-current coupled hydrodynamic responses to artificial island and beach nourishment projects[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2019, 47(1): 38–46.
- [28] 张丽, 乾东岳. 人工岛建设对铺前湾岸线的影响研究 [J]. *中国水运 (下半月)*, 2017, 17(1): 234–237.
- Zhang Li, Qian Dongyue. Study on the impact of artificial island construction on the shoreline of pave the bay[J]. *China Water Transport*, 2017, 17(1): 234–237.
- [29] 李汉英, 张红玉, 王霞, 等. 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*, 2019, 38(4): 575–581.
- Li Hanying, Zhang Hongyu, Wang Xia, et al. Influence on the sandy coast evolution of the ocean engineering——a case study of artificial Riyue Island, Wanning city, Hainan Island[J]. *Marine Environmental Science*, 2019, 38(4): 575–581.
- [30] 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.
- Zhou Hanyu, Chen Shenliang, Zhong Xiaojing, et al. Sedimentary characteristics and stability analysis of the beach in west coast of Haikou Bay[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2013, 32(1): 26–34.
- [31] Liu Gen, Qi Hongshuai, Cai Feng, et al. Initial morphological responses of coastal beaches to a mega offshore artificial island[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2022, 47(6): 1355–1370.
- [32] 肖哲宇. 人工岛影响下海岸演变及循环养护技术研究 [D]. 厦门: 自然资源部第三海洋研究所, 2023.
- Xiao Zheyu. Research on sediment recycling nourishment technology and coastal evolution under the influence of Artificial Island[D]. Xiamen: Third Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, 2023.
- [33] Himmelstoss E, Henderson R E, Kratzmann M G, et al. Digital shoreline analysis system (DSAS) version 5.0 user guide[R]. Woods Hole: US Geological Survey, 2018.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] R. G. 迪安. 海滩养护: 理论与实践 [M]. 蔡锋, 曹惠美, 刘建辉, 译. 北京: 海洋出版社, 2010.
- R. G. Dean. Beach Nourishment: Theory and Practice[M]. Cai Feng, Cao Huimei, Liu Jianhui, trans. Beijing: China Ocean Press, 2010.
- [39] 何岩雨, 朱君, 戚洪帅, 等. 人工岛影响下的海滩修复对策研究——以海口西海岸为例 [J]. *应用海洋学学报*, 2021, 40(1): 2–11.
- He Yanyu, Zhu Jun, Qi Hongshuai, et al. Beach restoration strategy influenced by artificial island: a case study on the west coast of

- Haikou[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2021, 40(1): 2–11.
- [40] 石萍, 曹玲珑, 莫文渊, 等. 人工岛建设对海口湾西海岸岸滩稳定性影响[J]. *热带海洋学报*, 2015, 34(5): 57–63.  
Shi Ping, Cao Linglong, Mo Wenyuan, et al. Influence of man-made island construction on the stability of the beach in the west coast of Haikou Bay[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2015, 34(5): 57–63.
- [41] 李松喆. 人工岛对沙质海岸动力泥沙环境及岸滩冲淤演变的影响研究[J]. *海洋工程*, 2021, 39(4): 144–153.  
Li Songzhe. Study on the influence of artificial island on dynamic sediment environment and beach erosion and deposition evolution of sandy coast[J]. *The Ocean Engineering*, 2021, 39(4): 144–153.
- [42] 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.  
Liang Weiqiang, Wang Yonghong. Empirical orthogonal function analysis of the long-term spatiotemporal evolution of a semi-sheltered beach[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2021, 52(4): 834–845.
- [43] Sulis A, Balzano A, Cabras C, et al. On the applicability of empirical formulas for natural salients to Sardinia (Italy) beaches[J]. *Geomorphology*, 2017, 286: 1–13.
- [44] Nir Y. Offshore artificial structures and their influence on the Israel and Sinai Mediterranean beaches[J]. *Coastal Engineering Proceedings*, 1982, 1(18): 110.
- [45] Dally W R, Pope J. Detached breakwaters for shore protection[R]. Vicksburg, MS: U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, 1986.
- [46] Hsu J R C, Silvester R. Accretion behind single offshore breakwater[J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 1990, 116(3): 362–380.
- [47] Black K P, Andrews C J. Sandy shoreline response to offshore obstacles part 1: salient and tombolo geometry and shape[J]. *Journal of Coastal Research*, 2001(S29): 82–93.

## Study on the evolution of nourished beaches under the influence of artificial islands: taking Haikou Bay as an example

Qi Hongshuai<sup>1,2,5</sup>, Feng Wei<sup>1,2</sup>, Liu Gen<sup>2,3,4,5</sup>, He Qijiang<sup>4</sup>, Cai Feng<sup>1,2</sup>, He Yanyu<sup>2</sup>,  
Liu Jianhui<sup>2</sup>, Cao Chao<sup>1,2,5</sup>, Zhao Shaohua<sup>2,5</sup>, Zhao Gang<sup>3</sup>

(1. School of Advanced Manufacturing, Fuzhou University, Quanzhou 362200, China; 2. Third Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Xiamen 361005, China; 3. Observation and Research Station of East China Coastal Zone, Ministry of Natural Resources, Nanjing 210001, China; 4. Hainan Key Laboratory of Marine Geological Resources and Environment, Haikou 570206, China; 5. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519000, China)

**Abstract:** Beach nourishment, as a widely-adopted soft solution to coastal erosion, can effectively alleviate the beach erosion induced by the construction of artificial islands. This paper takes the nourished beaches on both sides of the wave shadow zone of an artificial island in Haikou Bay as an example. Based on the bimonthly surveys of beach profiles and shorelines since nourishment, the characteristics of beach erosion and accretion and the associated driving factors were analyzed by using empirical orthogonal function (EOF) and digital shoreline analysis system methods. The EOF results showed that the first two eigenvalues accounted for more than 90% of the total variance, which could reflect the main spatio-temporal changes of the beaches. The area with conspicuous changes, corresponding to the first spatial mode, was located between the outer edge of the beach berm to the mean sea level, in which there were significant differences between the nourished beaches on both sides of the wave shadow zone and the natural beach in the wave shadow zone. The temporal mode showed that the most significant changes of the nourished beaches occurred in the initial four months after nourishment, followed by mild profile changes. The second spatial mode demonstrated the impact of typhoons on the beaches, resulting in the accumulation and leveling of some low-lying sites on the beach berms in the wave shadow zone. This study found that the evolution of nourished beaches under the influence of an artificial island in Haikou Bay could be divided into two stages. The first stage was the adaptation period, during which the artificially designed beach profile adjusted to the equilibri-

um state for adapting to the local hydrodynamics. The equilibrium time of nourished profiles was approximately 4 months, during which beach changes were dominated by cross-shore sediment transport. The second stage was dominated by the longshore sediment transport induced by the artificial island, resulting in sediment transport from the eastern and western sides of the artificial island to the wave shadow zone. At that time, the nourished beach shoreline in Haikou Bay had not reached the equilibrium state. The beaches on both sides of the wave shadow zone would continue to retreat in the future, while the shoreline in the wave shadow zone would advance into the sea for about 690 m until it reaches the equilibrium. This study would be helpful for the analysis of the beach evolution and beach restoration of similar cases.

**Key words:** beach nourishment; empirical orthogonal function; beach profile; sediment transport