

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2020081702

中强潮海滩剖面冲淤过程研究——以北海银滩为例

黄祖明¹, 戴志军¹, 黎树式², 黄鹤², 冯炳斌³

1. 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062
2. 广西北部湾海岸科学与工程实验室, 钦州 535011
3. 南宁师范大学, 南宁 530000

摘要: 揭示中、强潮砂质海滩在波浪和潮汐作用下的剖面冲淤变化过程是理解海岸演变及沿海防护工程设计与旅游资源规划的核心内容。以北部湾北海银滩为例, 基于 GIS-RTK 获取区域 2014 年 7 月—2018 年 2 月逐月剖面高程实测数据, 结合水文资料分析银滩剖面在外在驱动作用下的变化特征及冲淤机制。结果表明: ① 银滩内滨区域处于净侵蚀状态, 低潮带及其以浅区破波带以弱淤积为主, 冲流带展现持续、恒定净淤积特征。② 一年中有 263 天波浪可引起银滩-3.41 m 水深以浅的泥沙频繁扰动, 由此造成内滨剖面快速变化, 波高 0.3~0.5 m 的波浪引起的泥沙扰动水深控制冲流带、破波带和低潮带的淤积过程。③ 潮位波动导致波浪作用下海床泥沙活动的范围出现差异, 由此引起海滩由陆向海出现“强淤积-弱淤积-弱侵蚀”特征。④ 造成区域较大增水的台风可大幅度提高各级别波浪扰动范围, 对银滩整体剖面造成侵蚀。

关键词: 海滩剖面; 波浪扰动范围; 冲淤过程; 北海银滩

中图分类号: P737.1

文献标识码: A

Erosion and accretion of a meso-macro-tidal beach profile—A case from the Yintan Beach of Beihai

HUANG Zuming¹, DAI Zhijun¹, LI Shushi², HUANG Hu², FENG Bingbin³

1. State Key Lab of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China
2. The Key Laboratory of Coastal Science and Engineering, Beibu Gulf, Qinzhou 535011, China
3. Nanning Normal University, Nanning 530000, China

Abstract: Changes in the erosional and depositional regime on a meso-macro tidal coast, under the actions of wave and tide, are significant for understanding coastal evolution, and making coastal engineering design and tourism resource development plan. In this study, the variation in beach profiles and associated driven factors are investigated, based on the hydrological data and measured monthly profile elevations, from July 2014 to February 2018 on the Yintan beach of Beibu Gulf. The results can be summarized as follows: (1) The inshore area of the Yintan Beach remained in a state of net erosion, while the low-tide zone and its shallow surf zone were in weak siltation, and the swash zone in continuous and constant net siltation. (2) In a year there are 263 days, during which wave can make the sediment frequently disturbed in the shallow area less than 3.41 m, which can induce rapid changes in inshore zone, and the eddy water depths induced by the wave 0.3 m to 0.5 m in height control the depositional processes in the swash, surf and low-tide zones. (3) Fluctuation of tide level may cause the spatial differences in sediment movement on seabed and results in the distribution pattern of "strong siltation - weak siltation - weak erosion" from land to sea. (4) The typhoon may greatly cause storm surge elevation, increase the wave disturbance range, and bring about strong erosion of the whole beach.

Key words: Beach profile; wave disturbance range; scouring and silting process; Yintan Beach of Beihai

砂质海岸是我国海岸带的重要组成部分, 具有丰富的旅游资源、滨海砂矿、水产养殖与盐业资源以及港口资源^[1]。近年来, 全球气候变暖引起砂质海岸地貌如沙坝、沙丘和陆架沙脊等响应海平面升降而发生不同的演化和变异^[2]。海滩作为砂质海岸

的重要组成部分, 已出现强烈的侵蚀后退迹象, 国内亦不例外。当前我国近 70% 的砂质海岸遭受持续侵蚀^[1], 海岸侵蚀速率多集中于 1~3 m/a, 少数地区大于 5 m/a^[3], 这已引起诸多学者关注^[4-7], 因此, 开展海滩动力地貌的演变过程研究并对其进行保护与合理

资助项目: 国家自然科学基金重点基金(41930537); 国家自然科学基金(41666003, 41866001)

作者简介: 黄祖明(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事河口海岸动力地貌研究, E-mail: zmhuang129@163.com

通讯作者: 戴志军(1973—), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: zjdai@sklec.ecnu.edu.cn

收稿日期: 2020-08-17; 改回日期: 2020-12-01。 文凤英编辑

开发刻不容缓。

海滩剖面时空演变表征海岸动力地貌的主要变化。国外不少学者通过结合动力、地形测量及地貌分区等,并运用统计技术对海滩剖面响应波浪、台风灾害及沿海工程等的影响进行分析^[8-11]。如 Medina 等采用主成分分析(PCA)确定了西班牙桑坦德海滩剖面及其沉积物数据变化中时间特征向量的季节依赖性^[12]。Uda 等通过建立等高线变化模型对下新川海岸的历史波浪及剖面变化进行数值模拟,发现现场观测的岸滩泥沙输移与剖面的变化一致^[13]。Diez 等利用聚类算法(KMA)及经验正交函数 EOF 识别出美国太平洋西北部耗散型海滩剖面经受波浪和水位季节性影响出现周期性波动现象^[14]。国内海滩剖面研究集中于侵蚀成因及侵蚀强度评估,包括采取定性和半定量技术研究横向剖面高程变化^[15-18],并且主要以研究弱潮环境的海滩居多。其中,戴志军等运用显著性检验和交叉谱等方法发现寮嘴口岬间海滩短期变化过程主要受控于风应力、波浪及台风等动力的作用^[19]。陈子燊等分析台风作用下粤西水东湾海滩剖面地形动力与侵蚀机制,认为剖面位置与形态和入射波要素共同作用下的最大增水是岸滩剖面侵蚀幅度决定性因素之一^[20]。龚昊等通过对比木兰湾在“威马逊”及“海鸥”台风前后的剖面特征变化,揭示了海滩在台风作用下具有显著空间差异和复杂响应^[21]。当前海滩响应外在驱动作用的研究已积累不少成果^[19, 22-24],但较少探讨中、强潮环境的海滩剖面过程,特别是地处中国西南区域的北部湾。

广西北部湾沿岸作为中国砂质海岸的重要分布区域,该地区海滩资源丰富,但随着海平面上升、

高强度人类活动引起水沙输运动力失衡从而导致北海银滩发生侵蚀后退,且近 30 年来的侵蚀速率高达 10.40 m/a ^[25]。到目前为止,银滩动力地貌变化过程研究主要聚焦在剖面形态响应^[18]、沉积物粒度变化^[26]以及沙坝-沙槽移动趋势^[27]等方面。如黄鹤等^[18]和黎树式等^[28]均利用 EOF 方法并着手于沉积物特征变化,反映波浪、潮汐及台风对银滩剖面不同位置的控制影响。刘涛等通过银滩滩面高程动态变化探讨了最有可能造成剖面下蚀的台风路径^[29]。然而,将中、强潮海滩长时间尺度剖面变化与泥沙扰动临界水深及其波浪影响范围等联系,以分析其动力地貌过程的工作尚缺乏。基于此,本文以 2014—2017 年每月最低潮期间海滩剖面实测高程变化为基础,着重分析银滩剖面受波潮联合作用下泥沙扰动水深及范围,进而揭示银滩剖面动力地貌冲淤机制,为海岸工程建设与抵御环境灾害提供科学依据。

1 研究区概况

银滩位于北部湾北部地区(图 1),属于湛江组和北海组地层,沉积物多为细砂组分^[30-31]。该区域位于北回归线以南,具有亚热带向热带过渡性质的海洋性季风特点,降雨量主要分布于 5—10 月,低值区为 11 月至次年 4 月^[32]。银滩潮波主要呈驻波性质,是由南海传来的入射潮波以及北部湾反射潮波干涉而成^[18]。海岸潮汐为正规全日潮,潮差较大,多年平均潮差为 2.46 m,极值情况下最大潮差为 5.36 m,属典型中强潮型砂滩^[27, 30]。海区年平均波高约 0.9 m,冬季以北向浪为主,平均波高 0.8 m,最大波高 2.5 m;夏季主要是西南向浪,最大波高可

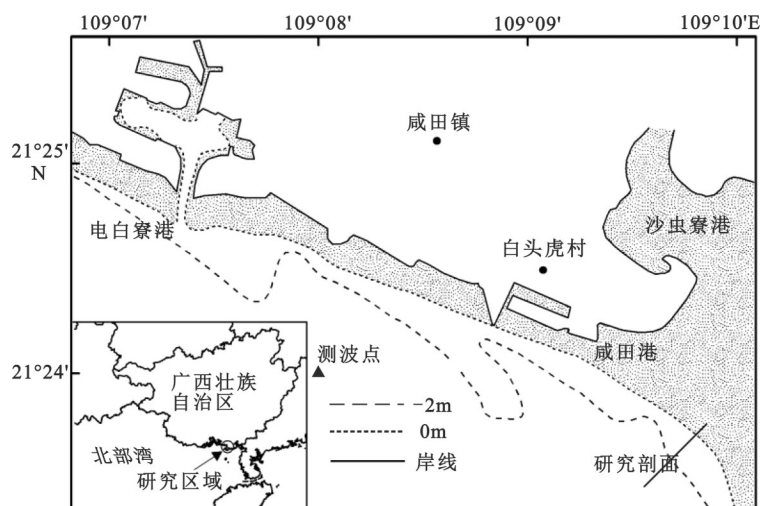


图 1 研究区域和剖面设置

Fig.1 Map of the study area and location of the profile

达 4.8 m。此外,银滩受北部湾半封闭地理格局影响导致近岸波能较低,且消散型岸滩类型使得波浪在低潮带破碎^[18]。

2 资料与方法

2.1 资料收集

本文使用 GPS-RTK 对银滩剖面进行高程测量获得数据,每月最低潮时自后滨起向海采样至涉水最深处进行测量,每点平均间隔 20 m,时间跨度为 2014 年 7 月至 2018 年 2 月,同时将所测剖面高程订正到当地平均海平面。此外,研究收集相同时间跨度的每日预报潮位数据,资料来自潮汐表。最后,本文在国家海洋信息中心获取北海银滩波浪实测数据(图 1)以分析近岸海床泥沙的活动特性,考虑到广西沿岸波浪强度最高的月份为 6—8 月(图 2a),故仅仅考虑 7—8 月波浪变化对海床泥沙活动的影响。

2.2 研究方法

2.2.1 剖面分带及体积计算

根据银滩当地多年平均高潮线、平均海平面(0 m)及平均低潮线等把研究剖面划分为后滨(>1.5 m)、前滨(-1.65~1.5 m)及内滨(<-1.65 m)三大区域^[18],再结合地貌横向变化状态进一步将前滨下部(-1.65~0 m)分为冲流带和破波带^[28]。从低潮线向海伸展的水下斜坡部分为内滨区域,低潮带处于大、小潮低潮线间。为便于分析低潮带剖面变化情况,本文将低潮带从范围较大的内滨带中单独分离(图 2b)。

结合剖面各分带冲淤变化特征,计算其自 2014 年 7 月到 2017 年 12 月剖面地形的逐月及半年平均高程、单宽体积,同时进行各分带单宽体积与潮汐作用的相关性分析。其中,年际高程变化与半年高程变化分别据 2014—2017 年 4 年中的 12 月实测剖面高程和 6 至 11 月及 12 月至次年 5 月的剖面平均高程所绘,相继分析银滩季节性水动力作用下的地貌演变。此外,银滩后滨区域沉积物主要受控于风力作用^[18],波浪直接性触及该范围几率较小,据此实测剖面测量范围的选取涵盖该分带较少,故对平均高潮线以上后滨区域不作分析。

2.2.2 Silvester 及佐藤公式

为探讨银滩泥沙活动能力,通过结合内滨区域泥沙粒径大小计算一年中波浪最强的 7、8 月份内各级波浪下泥沙起动临界水深、各级波浪对不同剖面位置作用范围,并将其与 4 年剖面变化比较来分析波浪对银滩剖面的影响。将北海银滩实测波浪资料统计分级,首先利用处理好的平均周期、水深进行迭代求出对应的浅水波长,再运用 Silvester (1974)^[33] 公式对各级波浪状态下的最大涡动水深进行计算:

$$\text{sh}(2\pi h_3/L) = H_{1/3}128D_{50}^{1/2} \quad (1)$$

式中, h_3 为最大涡动水深(m), $H_{1/3}$ 为有效波高(cm), L 为对应处的波长(m), D_{50} 为泥沙中值粒径(取 2.48 mm)。涡动水深是指在波浪作用下,泥沙可被掀动,若无其他搬运力存在则在原地沉降,与泥沙临界水深具有相同意义^[34]。该公式参数较少、容易获取,并且反映了不同波浪级别作用下银滩泥沙被掀动继而进入推移、悬浮运动的临界状态的范

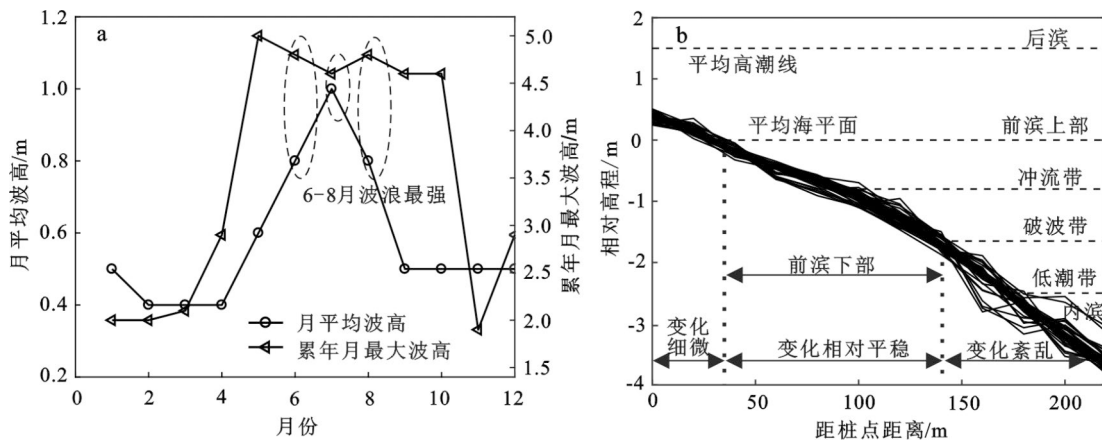


图 2 广西沿岸水文要素变化

a. 广西沿岸波浪强度, b. 银滩剖面实测高程变化及分带。

Fig.2 Hydrological elements changes along the coast of Guangxi

a. Wave intensity along Guangxi Coast, b. Measured elevation change and zoning of Yintan profile.

围性影响,对泥沙活动与海岸动力地貌的响应有一定实际意义^[35]。

波浪作用下海底泥沙发生的推移临界水深可用佐藤公式^[36]计算。表面推移临界水深公式:

$$H_0/L_0 = 1.35(D_{50}/L_0)^{1/3}(H_0/H)\text{sh}(kh_1) \quad (2)$$

全面推移临界水深公式:

$$H_0/L_0 = 2.4(D_{50}/L_0)^{1/3}(H_0/H)\text{sh}(kh_2) \quad (3)$$

式中, H_0 为深水波高 (m), L_0 为深水波长 (m), h_1 、 h_2 为表面、全面推移临界水深, H 、 L 为 h_1 、 h_2 处的波高和波长, k 为波数。

同时,把各年份平均剖面的实测水深点同样进行波长迭代,再运用公式(1)求出每个水深点对应的波浪最大涡动水深,最后拟合成线即为不同级别波浪对各水深泥沙的起动范围。

3 结果分析

3.1 波浪作用下的泥沙活动能力

近岸海床泥沙在波能冲击下,其受水流作用力大于泥沙颗粒所受的水流拖曳力、升力、惯性力及水底摩擦力的合力,便发生紧贴床面的滑动、跳跃及悬浮运动,从而影响剖面地貌的变化。据此,利用 Silvester 及佐藤公式计算银滩 7—8 月最强波浪月份的海床泥沙活动特性。从表 1 来看,波高 1.3 m 的波浪级别可以影响北海银滩大致 -8 m 水深以浅的泥沙水域,当有大风经过时,最高影响范围可达

-26.12 m 水深区域。其中,波高为 0.7 m 的波浪频率为 3.846%,其使 -3.85 m 水深以浅的泥沙产生涡动, -0.740 m 以浅的海底泥沙发生全面推移, -1.246 m 以浅发生表面推移。波高 0.8 m 及以上的波浪频率较低,均不超 5%,泥沙运动可以视为随机过程。

波高在 0.3~0.6 m 的波浪出现频率总和高达 72%,这对北海银滩近海岸线以及剖面冲淤有显著影响,该范围级别内的波高使得 -3.411 m 水深以浅的泥沙频繁扰动,即内滨带剖面包络线紊乱程度最高,较其他分带侵蚀最为严重。同时,该级别内波浪亦使 -0.627 m 水深以浅的冲流带内推移质运动,从而较大程度地促进区域局部淤积。此外,泥沙活动临界水深与银滩地貌水深分带相近,波高 0.5、0.6 m 的波浪掀沙临界水深为 -2.56、-3.41 m,其对应的低潮带及内滨带的临界区域恰处于 -2.5 m 上下波动,而冲流带及破波带的分带与泥沙临界水深差值不超过 20%。

3.2 银滩剖面月际变化特征

从 2014 年 7 月直到 2016 年 7 月,剖面各分带包络线变动幅度随桩点距离增加而增大(图 3a—d),其中前滨上部区域接近后滨带基本没有变化。冲流带在 2014 年主要以侵蚀为主,9、10 月份变化明显,蚀退深度最大超过 0.3 m,随后从 2015 年 1 月开始发生缓慢、持续的淤积调整直到 4 月结束(图 3a—b)。直至 2018 年 2 月,剖面冲流带区域在相邻 1—3 月中出现间隔性的侵蚀或淤积状态,单

表 1 北海银滩 7、8 月各级波浪作用的泥沙活动临界水深

Table 1 Critical water depth of sediment activity at various levels of waves in July and August in the Yintan Beach

H/m	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
T/s	1.759	2.223	2.345	2.587	2.652	2.957	3.043	3.130
$P/\%$	30.128	10.256	19.231	12.821	3.846	1.282	1.923	0.641
h_1/m	0.420	0.656	0.838	1.067	1.246	1.534	1.738	1.946
h_2/m	0.244	0.381	0.491	0.627	0.740	0.909	1.038	1.170
h_3/m	1.080	2.045	2.563	3.411	3.847	5.064	5.632	6.210
H/m	1.1	1.2	1.3	2.5	3	3.2	3.4	3.8
T/s	3.130	3.217	3.348	4.261	4.522	4.522	4.696	5.478
$P/\%$	1.923	2.564	1.282	0.641	0.641	0.641	0.641	1.282
h_1/m	2.104	2.314	2.558	5.204	6.213	6.485	6.971	8.405
h_2/m	1.277	1.412	1.566	3.329	4.035	4.253	4.579	5.443
h_3/m	6.439	7.022	7.818	15.288	17.898	18.21	19.76	26.12

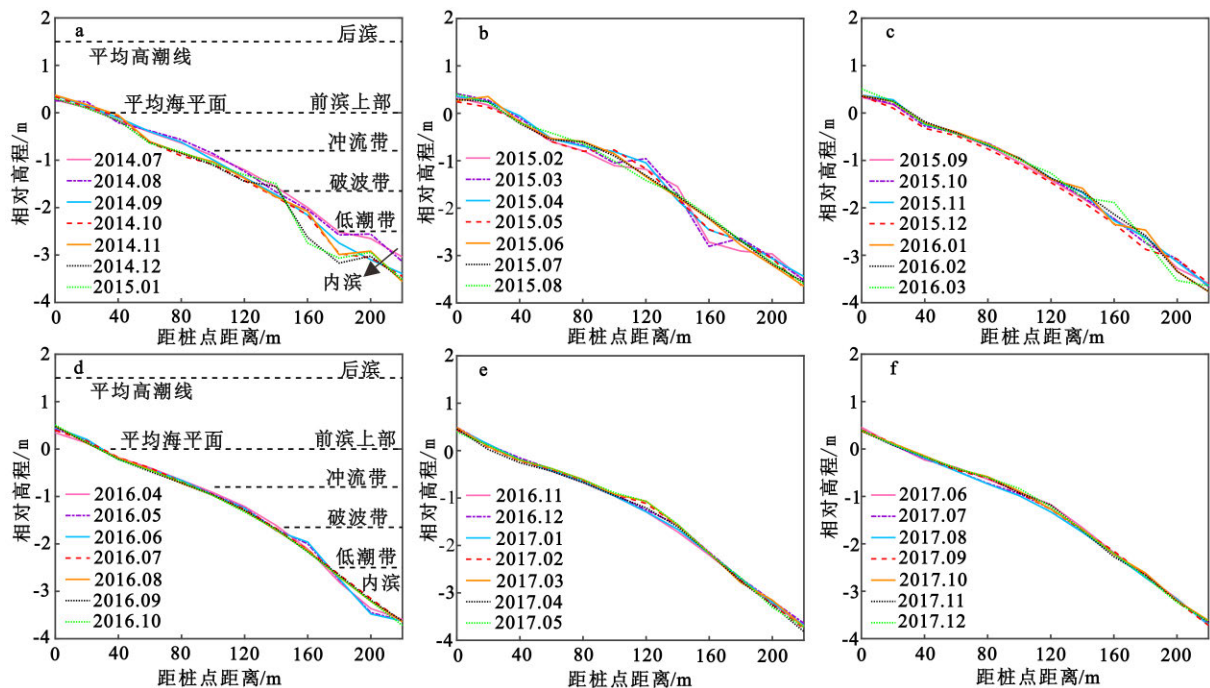


图3 银滩实测月际高程变化

Fig.3 Measured monthly elevation changes in of the Yintan Beach

宽体积基本集中于200~210 m³,月际最大单宽体积变化不超过5 m³。4年以来冲流带单宽体积显著上升,总体泥沙运动结果为淤积现象,淤积速率达到0.14 m³/月,其相关性检验置信度超过99.99% (图4b)。

距桩点100~140 m的破波带区域4年内多次出现4—6个月的持续淤积或侵蚀现象,在2015年夏季前的月变化程度较大,如其于2014年9、10月出现明显冲刷槽和2015年3月淤积调整出现滩肩等(图3a—b),直到2017年该区域包络线较平顺(图3b—e),之后其冲淤变化相对其他分带变化稍大(图3e—f)。破波带在常年受波浪破碎作用影响下,月单宽体积变化幅度大,与时间的拟合曲线为正相关,但斜率较低(图4c)。同样地,低潮带在前两年变化较大,2014年7—12月发生持续侵蚀使得斜率变大,随后进行了半年的持续淤积调整后达到相对稳定(图3a—f)。剖面内滨带距桩点180 m起无规律地出现多个凹凸点,呈锯齿状,说明该处泥沙动力作用较大,凹点发生冲刷,凸点可能经过长时间动力冲刷作用后而作出淤积响应,逐渐发育成内滨滩肩或沙丘等(图3a—d)。研究期间内滨带单宽体积下降速率最大,达到-0.2 m³/月,有99.99%的置信度认为因泥沙输移引起明显侵蚀(图4e)。

3.3 银滩年际变化

从剖面年平均高程变化来看(图5a),冲流带距

桩点30~50 m在2015年发生最大深度0.16 m侵蚀现象,从2016年起该范围呈现淤积调整结果。冲流带后半段(距桩点50~100 m)在研究期间内处于明显持续淤积状态,淤积深度最大达到0.24 m。破波带100~120 m在2014—2015年期间变化甚小,冲淤深度不足0.1 m,剖面120~140 m在2015年冲刷明显致滩肩消失而整个破波带2016、2017年相较于2015年出现强淤积现象。低潮带在研究期间内经历淤积-侵蚀-再淤积的冲淤过程,剖面斜率逐渐变缓,尤其在2015年缓和度最大提升了0.03。内滨带距桩点200 m前的明显凹槽4年来持续淤积而完全消失,相反,200 m后的内滨区域处于持续侵蚀状态。

银滩剖面各分带在不同季节下动态变化特征亦有区别。冲流带在2014—2015年的冬春季节发生明显侵蚀,2015年夏秋季进行了大幅度淤积调整,随后研究期间内水深变化在0.05 m内摆动,冲淤过程为冬春淤积、夏秋侵蚀。破波带始终呈现出冲淤交替性,夏秋冲刷,冬春淤积,变化幅度最大不超过7%。低潮带在2014—2015年冬春季侵蚀面积超过20%,在研究期间结束后表现出无季节性规律的净淤积。银滩内滨带变化幅度最大,两季节间剖面水深变化基本集中于0.05~0.25 m,其中研究剖面内超过80%以上的内滨带(距桩点175 m后)在2016年5月前变为持续侵蚀,进行半年淤积调整后在2017年冲淤达到稳定(图5b)。

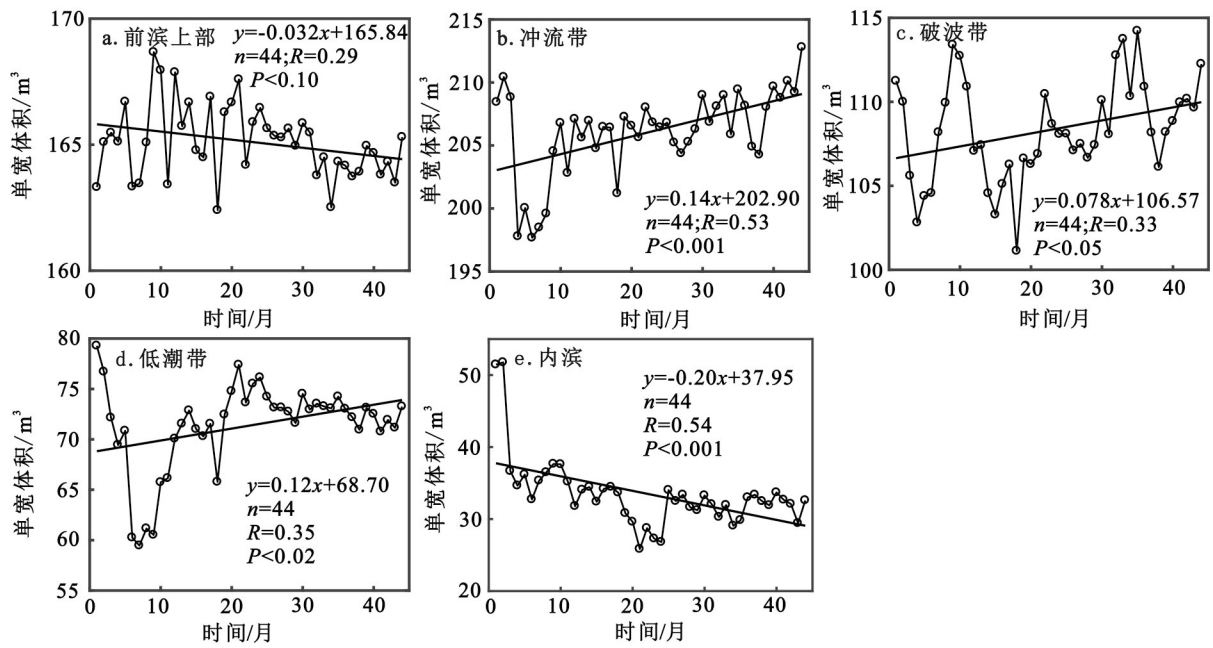


图 4 银滩剖面不同部位单宽体积变化特征

Fig.4 The characteristic of volume change per-meter for different parts of the Yintan profile

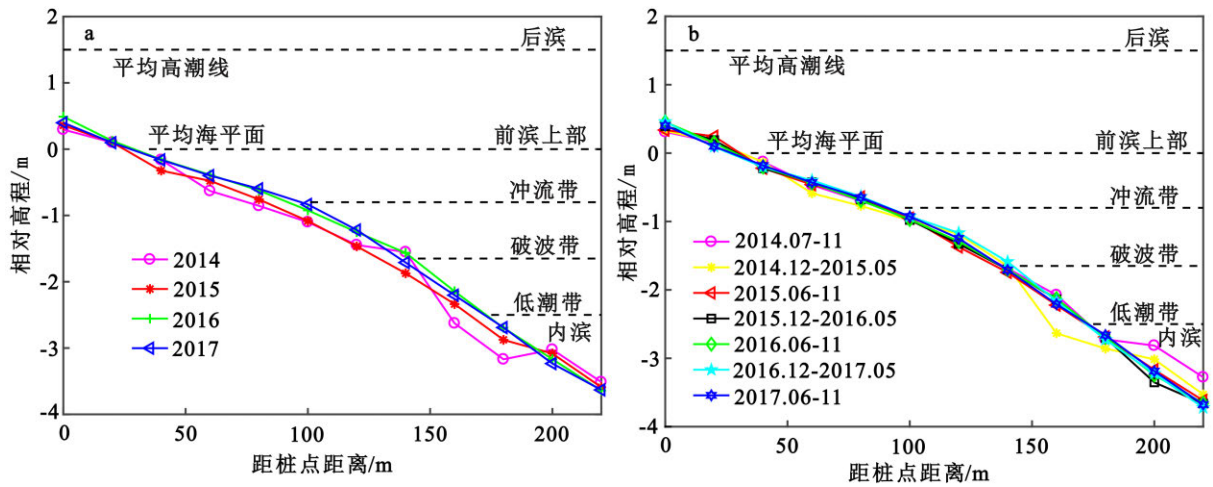


图 5 银滩实测高程变化

a. 年际变化, b. 季节平均高程变化。

Fig.5 Measured elevation changes in the Yintan Beach

a. Yearly change, b. Average seasonal elevation change.

总体而言, 与 2014—2016 年相比, 2017 年剖面包络线变化较小且大部分发生在冲流带以下, 没有出现局部位置超过 0.2 m 的冲刷或淤积现象。剖面各分带最终年净变化包络线反映的冲淤现象与相对应的单宽体积变化总趋势基本一致。冲流带、破波带及低潮带呈现较明显淤积, 其逆向侵蚀在空间上主要位于破波带及以下区域, 时间大部分集中在夏秋季, 内滨区域常年处于持续侵蚀状态, 从 2016 年 6 月才开始出现淤积调整。

4 讨论

4.1 波浪对剖面床沙起动范围的影响

银滩沉积过程主要受控于以波浪和潮汐耦合的长期作用, 其中潮间带主要以波浪作用驱动所致, 潮下带受波浪和潮流联合驱动作用影响^[8]。银滩剖面各分带冲淤变化的差异性与波浪对底质床

沙不同的起动范围直接相关,当涡动水深线低于剖面包络线,涡动水深线上的泥沙受该级别波浪作用会发生起动现象。由表1得知,波高0.7 m时北海银滩的涡动水深-3.8 m已经超过采集的数据,因此在分析中主要讨论频率总和超过70%出现的波浪级别所作用的最大涡动水深影响区域。

波高0.3 m的波浪级别出现频率最高,为30.128%。其泥沙涡动范围2014—2017年从距桩点96.374 m扩增至109.667 m,最大涡动临界水深-0.980 m与表1的近似度达到90.7%,剖面受影响面积为S1,单宽体积为28.48 m³。超出此范围波高为0.3 m的波能不足,无法使得更深海底泥沙起悬,从此交点开始,涡动水深拟合曲线逐渐趋于水平线。波高0.4~0.6 m的波浪在研究期间内未出现超过0.025 m差值的涡动临界水深,对剖面的水平影响范围差值在2~10 m内波动,无持续增长或减少现象。其中,波高为0.4 m的波浪影响剖面区域为S1和S2的总和,而无法作用于S3,2016年范围最大,为0~149.9 m,单宽体积影响范围79.7 m³。以此类推,H=0.6 m波浪作用则是整个研究剖面(图6中S1—S4)。研究区域内,各波浪级别对剖面距桩

点的水平影响距离除H=0.3 m持续增长外其余无明显规律,而单宽体积的影响经历同样的增长-下降-增长的过程,幅度较小,不超过5 m³(表2)。

海滩以其物质组成建立响应动力过程的形态,而各种动力过程亦试图找到其各自作用范围,海滩剖面正是在这些复杂过程中在较长时段相对平衡下叠加的结果^[37]。本文发现不同级别的波浪亦可能以泥沙作为媒介对剖面范围进行分带,同时波浪作用与剖面地形主要变化具有同步性。波高0.6 m及以上的波浪级别影响距桩点平均大于167 m水域范围,即对应的内滨带(研究剖面距桩点175 m起)与大于0.6 m的波浪级别接触越快,泥沙扰动程度最高,造成长时间持续侵蚀,剖面包络线波动最大(图5b)。破波带和低潮带分带区域分别与波高0.4和0.5 m的波浪级别对泥沙扰动范围大致相同(图6中S2、S3),即距桩点96~171 m水域范围遭受此级别波浪作用冲刷侵蚀。此外,波浪可能携带内滨带悬移质向岸输移而沉降在该中间区域会导致淤积,剖面对此波浪作用也会作出淤积调整,因此从图3中观察到该区域(距桩点100~175 m)剖面地形经历侵蚀和淤积的年份间歇性转换,且低潮带接近内

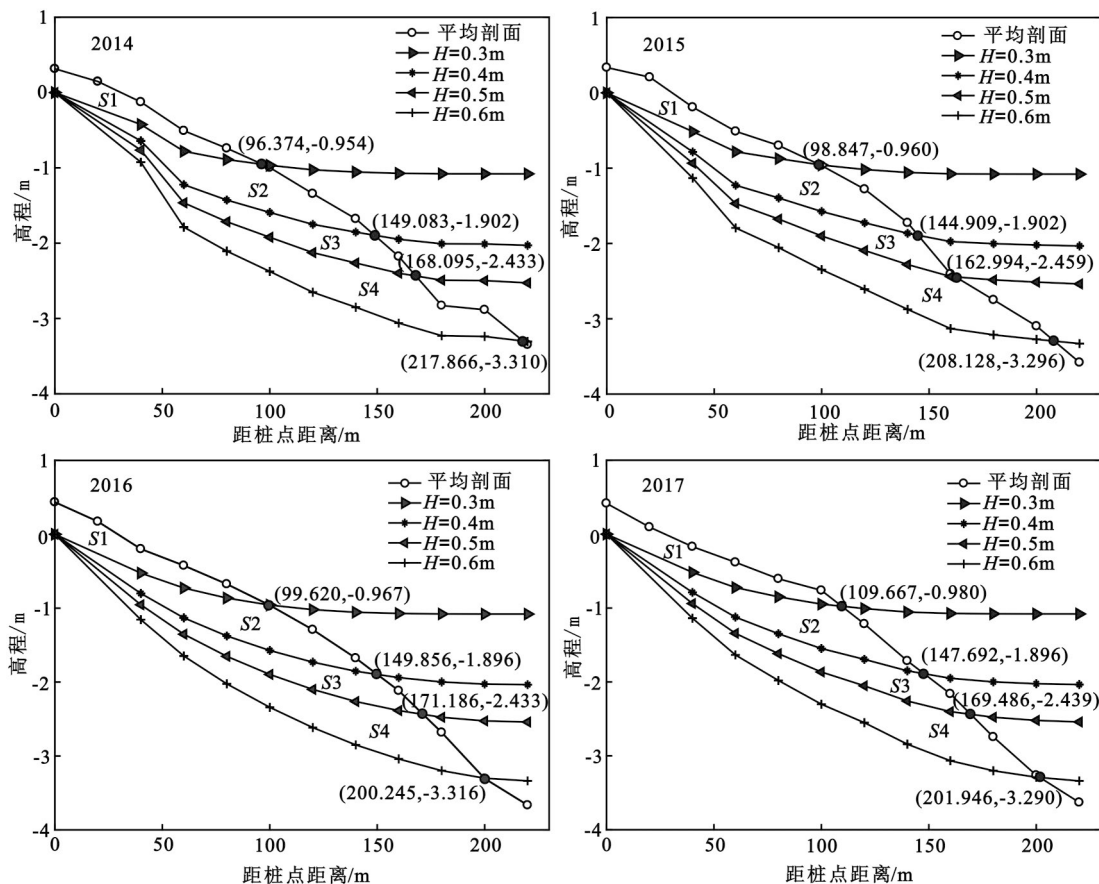


图6 银滩剖面不同级别波浪涡动水深范围

Fig.6 The eddy water depth ranges for different levels of waves

表 2 北海银滩高频波浪对研究剖面单宽体积影响
Table 2 The influence of high-frequency waves on the single-width volume of the study profile on the Yintan Beach

波高/m	2014年	2015年	2016年	2017年
$H=0.3$	24.48	27.97	29.41	28.47
$H=0.4$	73.57	78.36	79.70	79.17
$H=0.5$	114.20	116.92	121.40	119.42
$H=0.6$	193.94	193.91	196.39	194.30

滨区域从而淤积程度大于破波带。冲流带(距桩点 35~100 m)地貌分带现象主要受控于波高 0.3 m 级别的波浪使底部泥沙扰动(图 6 中 S1), 其波浪平均作用范围的终点为 101 m。尽管波高 0.3 m 以上的波浪级别对冲流带造成扰动影响, 但其因频率较低、接触较慢而可能通过进、退流等间接地对此范围造成反馈作用, 最终呈现剖面最明显的淤积。综上, 研究发现不同波浪级别所致的床沙扰动范围与各分带的范围相近, 且两者的水域平均差值变化范围仅在 5% 以内, 说明不同级别波浪主控的剖面床沙的空间响应可能对其分带造成了较大程度的影响, 因此表现出不同的冲淤结果。

4.2 波潮联合作用下剖面地形变化过程

潮汐作用是近海沉积的重要动力因素, 与泥沙运移途径有着密切关系。其中, 潮差是潮汐作用强弱的主要标志之一, 潮差越大, 潮汐作用越强^[34]。

广西沿海潮汐规律的形成受水下地形分布影响较大, 潮波传播方向与水下地形水深梯度变化趋势较为一致^[38]。在研究范围内, 除前滨上部($P < 0.5$)和破波带($P < 0.2$)以外, 银滩平均潮差大小和剖面不同位置的单宽体积相关性均通过 90% 的显著性检验(图 7), 且其正负相关趋势与所有动力作用下随时间变化相同(图 4)。此外, 不同级别波浪下泥沙扰动范围内的单宽体积与不同位置的单宽体积变化具有较强正相关(图 8 线①和线②), 波高 0.6 m 的扰动体积对前滨及以上部位接触慢、影响小, 因此剖面累积体积受影响比例较小(图 8 线③)。综上, 可以认为潮汐作用是影响剖面底质床沙活动的重要动力, 而前滨主要受控于波浪作用, 低潮带及以深受潮汐与波浪的联合作用, 这与以前研究工作结果相一致^[18]。

北海银滩隶属于中强潮海滩, 洪枯季落潮流速都大于涨潮流速、涨潮历时长于落潮, 该海域一般涨潮流速强于落潮流速, 因此有利于泥沙淤积^[39]。地处北部湾北部的银滩潮流性质与潮汐相反, 为不正规日潮流^[40], 往复流具有右旋性沿岸线由西南向转至东北向^[41], 湾口指向湾顶的潮流作用与银滩岸线角度较大可能在 90° 以内, 有利于泥沙向湾内输移。此外, 底质泥沙在破波位置原地起悬后(-3.4 m 至破波带)发生双向转换, 涨潮时波浪以“进流为主, 退流为辅”的方式自海向陆携带内滨区域中波浪破碎后的悬浮物向岸运动, 沉积在低潮带及以上区域。又因潮汐上涨, 波浪在海滩上破碎的部位亦向

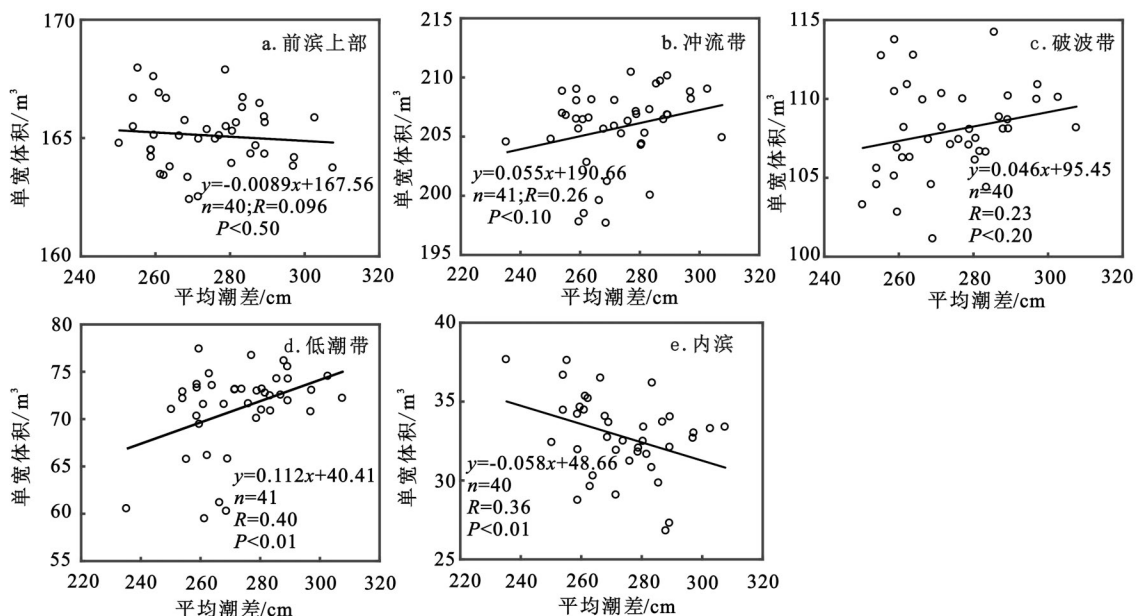


图 7 银滩平均潮差与剖面不同部位单宽体积相关性

Fig.7 Correlation between single-width volume and average tidal range in different parts of the profile

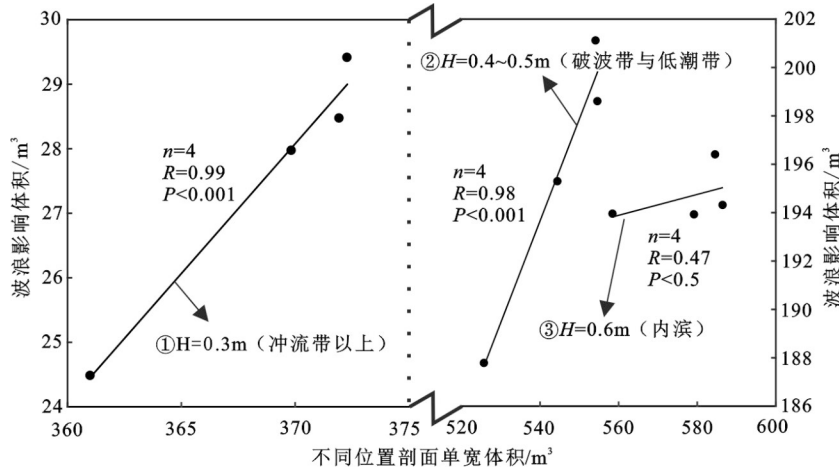


图8 不同级别波浪下剖面单宽扰动体积与不同部位单宽体积相关性

Fig.8 Correlation between the single-width disturbance volume at different wave levels and the single-width volume at different parts

岸移动,银滩波浪破碎范围从内滨下部—破波带提至低潮带—冲流带附近^[42]。同时,波高0.3~0.6 m的波浪对近岸剖面泥沙扰动范围亦随潮差增大而改变,2014—2017年的平均潮差总体上略微上升,其对应的波浪范围也总体向陆迁移,高频波从218 m的范围缩小到201 m(图6)。相反,水位下降时波浪以“退流为主,进流为辅”,波浪破碎、泥沙扰动范围向海平移,此时泥沙亦主要做离岸运动,回落到破波带—低潮带。

其次,北海银滩的相对潮差参数RTR>7,属于消散型沙滩,滩面平缓,平均潮差增大时会掩盖波浪的驱动作用,说明波浪破碎后的余流能量消耗严重,回流基本无法再回到内滨区域,因此,剖面低潮带及以上区域呈净淤积状态^[18, 43-44]。再者,破波带及低潮带由于波浪作用范围的向岸迁移会同时受到冲刷作用,出现侵蚀同时亦有内滨区域泥沙颗粒的沉降补充,致使其淤积速率比冲流带低。银滩平均高潮线附近是波浪形成冲流的极限,较粗的泥沙往往最先沉降,但剖面后滨区域(包括前滨上部)的淤积现象较低潮间带区域来说不明显,且据现场观测银滩波浪基本无法直接到达后滨区域,泥沙无法继续爬高,因此影响低潮间带以上的泥沙淤积作用。据此,2014—2017年银滩剖面内滨区域-3.5~-2.5 m处于净侵蚀状态,水深-0.8~0 m的冲流带处于净淤积的状态,而破波带及接近破波处的低潮带处于侵蚀-淤积-再侵蚀-再淤积的过程。

4.3 台风对银滩剖面地貌变化的影响

夏秋季是热带气旋等极端气候事件常发生的时期,其中台风路径和风暴增水等对银滩冲淤造成显著影响。研究期间广西沿海引起风暴潮较大增

水的台风为1409号“威马逊”、1415号“海鸥”及1621号“莎莉嘉”。前两个台风分别发生在2014年7月和9月,增水极值分别高达286和161 cm^[45],其均源于西太平洋经过海南岛北部进入北部湾,该路径最有可能造成银滩强烈的海滩侵蚀^[29]。例如,“海鸥”台风引起最大增水时,水位短时间内相继提升,插值得知波浪扰动水深范围向陆迁移近90 m,主控银滩各分带地貌的波浪级别亦可能随之改变。波高小于0.7 m的高频波浪可能仅控制低潮带以上的银滩剖面(图9),造成较明显侵蚀,尤其是冲流带区域大面积冲刷而出现发展为滩槽趋势。研究剖面内

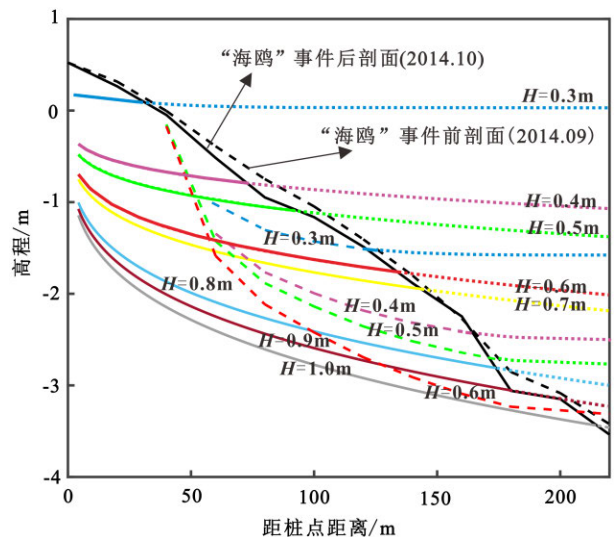


图9 1415号“海鸥”台风前后波浪扰动范围
虚线:台风前,实线:台风后,以最大增水161 cm为例。

Fig.9 The eddy water depth range before and after Typhoon Kalmaegi

Dotted line: before typhoon, solid line: after typhoon, example: storm surge of 161 cm.

滨带受波高 0.8~1.0 m 波浪扰动亦造成明显冲刷,距桩点 180~200 m 剖面向下蚀退而变平坦,估计在无法测量的剖面区域可能存在更大程度的侵蚀现象。然而,“莎莉嘉”台风对银滩剖面造成的冲淤影响相对较弱(图 3d),可能是其路经海南岛时能量消耗较大的原因,且登陆北部湾后主要往西北方向移动并在 3 小时内减弱为热带低压,风速较低,同时发现其引起减水转为增水现象发生在北部湾之前^[45]。

银滩对于季节性差异造成银滩剖面显著波动

的自我调整较好,就破波带及以浅区域而言,银滩夏秋季侵蚀、冬春季淤积,同年内夏秋季与冬春季剖面变化各分带深度差值不超过 0.1 m(图 5b)。低潮带除 2014—2015 年冬春季剖面蚀退以外,调整规律与其以浅区分带一致。2016 年夏秋季起,内滨带也因常年受到冲刷而最终持续淤高 0.3 m。因此,不同季节下银滩剖面最终响应波浪、潮汐、潮流以及风暴增水作用的冲淤结果均以泥沙作为介质,低潮带以浅淤积,内滨带侵蚀(图 10)。

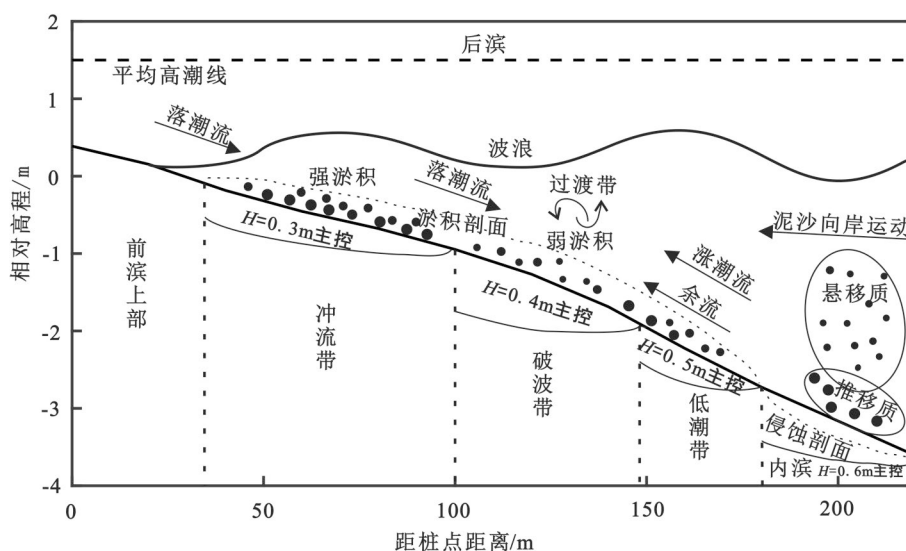


图 10 波浪及潮汐作用下银滩剖面变化模式图

Fig.10 Profile change of Yintan beach under the coupling actions of the wave and tide

5 结论

(1)在研究期间内,除前滨上部外,银滩剖面其他分带前 3 年夏初前冲淤幅度较大,此后变化稳定。冲流带在首个冬半年以侵蚀为主,继而进行缓慢淤积调整。破波带发生淤积与侵蚀交替且出现弱的淤积现象。低潮带主要展现淤积趋势,相反,内滨区域处于持续侵蚀状态。

(2)银滩波高 0.3~0.6 m 的波浪发生频率总和超过 70%,其中波高 0.6 m 的波浪扰动内滨带造成净侵蚀现象,冲流带、破波带及低潮带的净淤积分别受控于波高 0.3~0.5 m 的波浪。

(3)潮汐涨落引起波浪进、退流作用在海床泥沙活动的范围出现差异,同时往复潮流向湾内输沙,导致银滩由海向陆淤积现象逐渐明显。

(4)潮汐水位的年内变化引起夏秋季银滩波浪扰动范围向陆迁移,低潮带以上冲淤变化较快。冬春季节波浪扰动范围扩大,引起内部变化快速。此

外,台风将大幅度使得各波浪级别的扰动范围向左迁移,造成银滩大范围侵蚀。

参考文献 (References)

- [1] 王广禄,陶常飞. 砂质海岸资源开发及保护浅析[J]. 海岸工程, 2012, 31(3): 65-71. [WANG Guanglu, TAO Changfei. A preliminary study on utilization and protection of sandy coast [J]. Coastal Engineering, 2012, 31(3): 65-71.]
- [2] 庄振业,林振宏,刘志杰,等. 海平面变化及其海岸响应[J]. 海洋地质动态, 2003, 19(7): 1-12. [ZHUANG Zhenye, LIN Zhenhong, LIU Zhijie, et al. Sea level changes and coastal responses [J]. Marine Geology Letters, 2003, 19(7): 1-12.]
- [3] 丰爱平,夏东兴. 海岸侵蚀灾情分级[J]. 海岸工程, 2003, 22(2): 60-66. [FENG Aiping, XIA Dongxing. Grading of coastal erosion disaster situation [J]. Coastal Engineering, 2003, 22(2): 60-66.]
- [4] Le Cozannet G, Garcin M, Yates M, et al. Approaches to evaluate the recent impacts of sea-level rise on shoreline changes [J]. Earth-Science Reviews, 2014, 138: 47-60.
- [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. [CAI

- Feng, SU Xianze, LIU Jianhui, et al. Coastal erosion under the background of global climate change and its countermeasures in China [J]. *Progress in Natural Science*, 2008, 18 (10): 1093-1103.]
- [6] 王广禄, 蔡锋, 苏贤泽, 等. 泉州市砂质海岸侵蚀特征及原因分析[J]. *台湾海峡*, 2008, 27 (4): 547-554. [WANG Guanglu, CAI Feng, SU Xianze, et al. Characters of sand beach erosion in Quanzhou and its causes [J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2008, 27 (4): 547-554.]
- [7] 吉学宽, 林振良, 闫有喜, 等. 海岸侵蚀、防护与修复研究综述[J]. *广西科学*, 2019, 26 (6): 604-613. [JI Xuekuan, LIN Zhenliang, YAN Youxi, et al. Review on the research of coastal erosion, protection and res-toration [J]. *Guangxi Sciences*, 2019, 26 (6): 604-613.]
- [8] 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.
- [9] Dean R C, Maurmeyer E M. Models for beach profile response [M]//Komar P D. *Handbook of Coastal Processes and Erosion*. Boca Raton, Florida: CRC Press, 1983: 151-165.
- [10] Larson M. Equilibrium profile of a beach with varying grain size[J]. *Proceedings of Coastal Sediments'91*, ASCE, 1991, 905-919. Silvester R. *Coastal Engineering*, Vol. II. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 1974: 338.
- [11] Dai Z J, Liu J T, Fu G, et al. A thirteen-year record of bathymetric changes in the North Passage, Changjiang (Yangtze) estuary [J]. *Geomorphology*, 2013, 187: 101-107.
- [12] Medina R, Losada M, Losada I, et al. Temporal and spatial relationship between sediment grain size and beach profile [J]. *Marine Geology*, 1994, 118 (3-4): 195-206.
- [13] Uda T, Katoh K I, Kuchi-Ishi T, et al. Effect of wave history to beach profile changes due to longshore sand transport [J]. *Proceedings of Civil Engineering in the Ocean*, 2000, 16: 541-546.
- [14] Díez J, Cohn N, Kaminsky G M, et al. Spatial and temporal variability of dissipative dry beach Profiles in the Pacific Northwest, U. S. A. [J]. *Journal of Coastal Research*, 2018, 34 (3): 510-523.
- [15] 岳保静, 窦衍光, 廖晶, 等. 山东半岛南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.]
- [16] 高抒. 废黄河口海岸侵蚀与对策[J]. *海岸工程*, 1989, 8 (1): 37-42. [GAO Shu. Erosion of old Yellow River delta in northern Jiangsu and coast protection [J]. *Coastal Engineering*, 1989, 8 (1): 37-42.]
- [17] 戴志军, 陈子燊, 李春初. 岬间海滩剖面短期变化的动力作用分析[J]. *海洋科学*, 2001, 25 (11): 38-41. [DAI Zhijun, CHEN Zishen, LI Chunchu. Analysis of dynamical actions on the process of beach profile between headlands over a short time [J]. *Marine Sciences*, 2001, 25 (11): 38-41.]
- [18] 黄鹤, 戴志军, 施伟勇, 等. 强潮环境下的海滩剖面沉积特征: 以春季广西北海银滩为例[J]. *热带海洋学报*, 2011, 30 (4): 71-76. [HUANG Hu, DAI Zhijun, SHI Weiyong, et al. Deposition characteristics of beach profile in strong-tidal environment: A case study of Yintan, Guangxi during spring [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2011, 30 (4): 71-76.]
- [19] 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. An analysis on temporal variation process of a wave-dominated beach profile between headlands [J]. *Tropical Geography*, 2001, 21 (3): 266-269.]
- [20] 陈子燊, 王扬圣, 李志强. 台风作用下海滩剖面地形动力与侵蚀机制分析[C]//第十三届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集. 南京: 中国海洋工程学会, 2007: 337-342. [CHEN Zishen, WANG Yangsheng, LI Zhiqiang. Analysis on the dynamics and erosion mechanism of beach profile under typhoon [C]//Proceedings of the 13th China Marine (Coastal) Engineering Symposium. Nanjing: China Society of Ocean Engineering, 2007: 337-342.]
- [21] 龚昊, 陈沈良, 钟小青, 等. 海南岛东北部海滩侵蚀与恢复对连续台风的复杂响应[J]. *海洋学报*, 2017, 39 (5): 68-77. [GONG Hao, CHEN Shenliang, ZHONG Xiaojing, et al. Complicated responses of beach erosion and restoration to consecutive typhoons along northeastern Hainan Island, China [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2017, 39 (5): 68-77.]
- [22] 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.]
- [23] 曹佳, 茅志昌, 沈焕庭. 杭州湾北岸滩冲淤演变浅析[J]. *海洋学研究*, 2009, 27 (4): 1-9. [CAO Jia, MAO Zhichang, SHEN Huanting. A brief analysis of scour and silting of the tidal flats at the north bank of the Hangzhouwan Bay [J]. *Journal of Marine Sciences*, 2009, 27 (4): 1-9.]
- [24] Adams P N, Keough K M, Olabarrieta M. Beach Morphodynamics influenced by an ebb - tidal delta on the north Florida Atlantic coast [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2016, 41 (7): 936-950.
- [25] 黄鹤, 戴志军, 盛凯. 广西北海银滩侵蚀及其与海平面上升的关系[J]. *台湾海峡*, 2011, 30 (2): 275-279. [HUANG Hu, DAI Zhijun, SHENG Kai. Coastal erosion and associated response to the sea-level rise of Yintan, Beihai, Guangxi province [J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2011, 30 (2): 275-279.]
- [26] 张亮, 崔振昂, 滕德强. 广西北海海岸带典型监测剖面的蚀淤特征[J]. *河南科学*, 2019, 37 (11): 1833-1840. [ZHANG Liang, CUI Zhenang, TENG Deqiang. Characteristics of erosion and of typical monitoring sections of the coastal zone in Beihai, Guangxi Province [J]. *Henan Sciences*, 2019, 37 (11): 1833-1840.]
- [27] 王增军, 韦江玲, 王丹, 等. 1985—2018年广西北海银滩海岸带地形变化研究[J]. *测绘通报*, 2019 (S1): 158-162. [WANG Zengjun, WEI Jiangling, WANG Dan, et al. The study on coastal landforms and topography in 1985—2018 of the Yintan Beihai in Guangxi [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2019 (S1): 158-162.]
- [28] 黎树式, 戴志军, 葛振鹏, 等. 强潮海滩响应厄马逊台风作用动力沉积过程研究: 以北海银滩为例[J]. *海洋工程*, 2017, 35 (3): 89-98. [LI Shushi, DAI Zhijun, GE Zhenpeng, et al. Sediment dynamic processes of macro-tidal beach in response to Typhoon Rammasun action: A case study of Yintan, Beihai [J]. *The Ocean Engineering*,

- 2017, 35 (3): 89-98.]
- [29] 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. [LIU Tao, WANG Zengjun, ZHANG Jianbing. The dynamic of the Yintan Beach erosion in the Beihai, Guangxi [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2020, 42 (7): 147-154.]
- [30] 罗章仁, 应秩甫. 华南港湾[M]. 广州: 中山大学出版社, 1992. [LUO Zhangren, YING Zhifu. The Harbours in South China[M]. Guangzhou: Sun Yat-sen University Press, 1992.]
- [31] 李树华, 陈文广. 北部湾潮汐计算结果的初步分析[J]. 广西科学院学报, 1987, 3 (1): 26-30. [LI Shuhua, CHEN Wenguang. Preliminary analysis of tidal wave calculation results in Beibu Gulf [J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 1987, 3 (1): 26-30.]
- [32] 黎树式, 黄鹤, 戴志军. 近60年来广西北部湾气候变化及其适应研究[J]. 海洋开发与管理, 2017, 34 (4): 50-55. [LI Shushi, HUANG Hu, DAI Zhijun. Climate change and its adaptation in Beibu Gulf of Guangxi in recent 60 years [J]. Ocean Development and Management, 2017, 34 (4): 50-55.]
- [33] Silvester R. Coastal Engineering, Vol. II[M]. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 1974: 338.
- [34] 戴志军, 李春初. 华南弧形海岸动力地貌过程[M]. 上海: 华东师范大学出版社, 2008. [DAI Zhijun, LI Chunchu. Dynamic Geomorphologic Process of South China Arc-Shaped Coast[M]. Shanghai: East China Normal University Press, 2008.]
- [35] 戴志军, 陈子燊, 欧素英. 海南岛南渡江三角洲海岸演变的波浪作用分析[J]. 台湾海峡, 2000, 19 (4): 413-418. [DAI Zhijun, CHEN Zishen, OU Suying. Analysis of wave actions on coast evolution in Nanduijiang River Delta, Hainan Island [J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2000, 19 (4): 413-418.]
- [36] 侯和雄, 萧荣祥. 海洋与港湾水力学[M]. 大学图书供应社(台湾), 1984, 38: 173-176. [HOU Hexiong, XIAO Rongxiang. Ocean and Harbor Hydraulics[M]. University Library (Taiwan), 1984, 38: 173-176.]
- [37] 陈子燊, 李春初. 弧形海岸中间过渡带海滩剖面的地貌动态分析[J]. 海洋科学, 1990 (2): 6-12. [CHEN Zishen, LI Chunchu. Analysis on geomorphological dynamics of beach profile of intermediate transitional zone in arc-shaped shore [J]. Marine Sciences, 1990 (2): 6-12.]
- [38] 杨晓坤, 李大刚, 赵志冲. 广西沿海潮汐特征分析[J]. 港口科技, 2018 (3): 27-33. [YANG Xiaokun, LI Dagang, ZHAO Zhichong. Analysis on tidal characteristic of Guangxi coast [J]. Science & Technology of Ports, 2018 (3): 27-33.]
- [39] 董德信, 李谊纯, 陈宪云, 等. 钦州湾潮流季节变化特征[J]. 广西科学, 2014, 21 (4): 351-356. [DONG Dexin, LI Yichun, CHEN Xianyun, et al. Characteristics of current seasonal changes in Qinzhou Bay [J]. Guangxi Sciences, 2014, 21 (4): 351-356.]
- [40] 李树华. 北部湾潮汐潮流数值计算[J]. 海洋通报, 1985, 4 (6): 6-9. [LI Shuhua. Numerical calculation of tidal current in Beibu Gulf [J]. Marine Science Bulletin, 1985, 4 (6): 6-9.]
- [41] 曹德明, 方国洪. 北部湾潮汐和潮流的数值模拟[J]. 海洋与湖沼, 1990, 21 (2): 105-113. [CAO Deming, FANG Guohong. A numerical model of the tides and tidal currents in Beibu Bay [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1990, 21 (2): 105-113.]
- [42] 戴志军, 陈建勇, 李春初, 等. 季节性波浪动力作用下南湾弧形岸滩泥沙横向输运特征[J]. 海洋工程, 2007, 25 (4): 39-45. [DAI Zhijun, CHEN Jianyong, LI Chunchu, et al. Characteristics of transverse sediment transport along Nanwan arc-shaped beach in response to seasonal wave dynamics [J]. The Ocean Engineering, 2007, 25 (4): 39-45.]
- [43] Short A D. The role of wave height, period, slope, tide range and embaymentisation in beach classifications: a review [J]. Revista Chilena de Historia Natural, 1996, 69: 589-604.
- [44] Short A D, Aagaard T. Single and multi-bar beach change models [J]. Journal of Coastal Research, 2003, 15: 141-157.
- [45] 黄子眉, 李小维, 姜绍材, 等. 广西沿海风暴增水特征分析[J]. 海洋预报, 2019, 36 (6): 29-36. [HUANG Zimei, LI Xiaowei, JIANG Shaocai, et al. The characteristics of storm surge along the coast of Guangxi [J]. Marine Forecasts, 2019, 36 (6): 29-36.]