

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2018.04.004

海南省万宁东部砂质海岸侵蚀特征分析

田会波^{1,2}, 印萍², 阳凡林¹

1. 山东科技大学测绘科学与工程学院, 青岛 266590

2. 青岛海洋地质研究所, 青岛 266071

摘要: 2011—2014 年于万宁东部海岸建立了海岸动态监测系统, 包括 120 个岸线监测站位和 30 个岸滩剖面监测站位, 收集了 4 年间岸线和岸滩的实时变化信息。以这些实测资料为基础, 结合收集的海岸资料和实地调查, 对万宁东部海岸的侵蚀规律与特征进行了探讨。在季节变化中, 海岸呈现夏秋侵蚀冬春淤积的规律; 在年际变化中, 海岸总体呈侵蚀趋势, 但相邻年份间又呈现侵蚀和淤积相间的现象。万宁部分海岸受前滨采砂影响严重, 加上频繁的台风天气, 致使侵蚀加剧, 在两年时间内后滨侵蚀发育 8 m 高的软质陡崖, 造成难以恢复的地形改变。

关键词: 砂质海岸; 前滨采砂; 侵蚀规律; 万宁

中图分类号: P737.1 **文献标识码:** A

An analysis of erosional characteristics of the sandy coast in the eastern part of Wanning, Hainan

TIAN Huibo^{1,2}, YIN Ping², YANG Fanlin¹

1. Shandong University of Science and Technology, College of Geomatics, Qingdao 266590, China

2. Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China

Abstract: A Coastal dynamic monitoring system was established on the eastern coast of Wanning Between 2011 and 2014. This system including 120 shoreline monitoring stations and 30 beach monitoring stations, and 4 years of shoreline and beach profile information monitoring data were collected. Based on the field measured data assistant with coastal information from field survey, the coastal erosion processes on eastern coast of Wanning were studied in this paper. The erosion of the coastline shows a seasonal pattern in which erosion dominates the summer and autumn and deposition the winter and spring. The coastline is generally in a receding trend in inter-annual variation, and there was also a seasonal change pattern in inter-annual variation. In addition to natural factors, foreshore sand mining is one of the principal causes of coastal erosion in the study area. Areas subjected to sand mining and typhoons exhibit a considerably receded shoreline characterized by abrupt, erosion-susceptible cliffs up to 8 m in height.

Key words: sandy coast; foreshore sand mining; erosion regularity; Wanning

海岸侵蚀已经成为全球普遍存在的一种自然灾害。据统计,世界上的砂质海岸约有 70% 处于侵蚀状态,侵蚀速率一般在 1 m/a 以上^[1,2]。我国海岸侵蚀自 20 世纪 50 年代末期日渐明显,70 年代以后,由于人类不合理的开发活动,海岸侵蚀加剧,目前约有 70% 的砂质岸线和大部分的淤泥质岸线都在遭受侵蚀^[3]。海岸侵蚀会引发一系列的灾难性后果,如海岸农田被淹没,村庄、道路被冲毁,机场、码头设施被破坏,沿岸人民的生产和生活受到威胁。因此,研究海岸侵蚀的特征和规律对于海岸的开发保护具

有重要的现实意义。

早在 20 世纪初,人们便开始对海岸侵蚀现象有所研究。限于早期的研究手段,海岸研究方法主要以静态描述为主^[4-7]。随着海岸科学理论的发展,许多科研人员尝试从动力学角度来解释海岸侵蚀现象,并取得了一定研究成果^[8-11]。而今,海岸侵蚀问题已成为当今地球科学的研究重点,研究方法得到了极大的丰富,研究内容也转移到了海岸侵蚀的机制和防护方面^[12-18]。这些研究工作加强了人们对海岸侵蚀的认识,为海岸的防护工作提供了有力的理

资助项目: 海陆相互作用和海岸带地质灾害研究(GZH201100203)

作者简介: 田会波(1985—),男,博士,主要从事海岸侵蚀与海洋测绘方面研究, E-mail: tianhuiibo@126.com

通讯作者: 印萍(1971—),女,博士,研究员,从事海洋地质研究, E-mail: pingyin@fio.org.cn

收稿日期: 2016-03-20; **改回日期:** 2016-10-10. 文凤英编辑

论依据。

万宁东部海岸作为世界海岸系统的一部分,不可避免地也处于海岸侵蚀的威胁之中,当地不恰当的人类活动和恶劣的台风天气加剧了海岸侵蚀速率,对沿岸人民的生产和生活造成威胁^[19,20]。万宁海岸具有世界其他海岸的共性,其独特的地理位置和海洋环境特征对万宁东部海岸过程和规律的研究,既可为海岸防护和开发提供理论依据,又可为全球海岸研究补充一个重要区域,为海陆相互作用的研究提供素材。

1 研究区概况

研究区位于海南省万宁市东部老爷海至大花角海滩,监测海岸由 4 个海滩组成,从北往南依次为多德湾、春园湾、保定湾和东澳湾(图 1)。其中,南部的东澳湾和保定湾岸线相对平直,为沙丘-沙坝型海岸,海滩宽度为 50~120m;北部的春园湾和多德湾为岬湾型海岸,海滩宽度为 20~50m。海岸带除基岩岬角外,主要为第四纪晚期形成的松散砂质堆积,海滩后侧为高 5~20m 的风成沙丘,由多期沙丘叠

加而成,目前已大多为防风林覆盖。海岸内侧为较低的沙丘带和古潟湖区,多数被开垦为海水养殖区。

海南省位处华南褶皱系南段,具有不同地质时期的沉积地层,中间经历了海西、印支、燕山等多期构造运动,形成了现在独特的地质条件,孕育了丰富的矿产资源。海南省万宁东部海岸界于朝阳-东平断裂带和长安断裂带之间,位于尖峰-吊罗构造带东侧,海岸带主要出露第四系和寒武系。研究区第四纪地层基本呈带状与海岸线平行,从第四纪初期至全新世,经历了台地-浅滨海-台地外缘-滨海的变迁过程^[21]。

万宁市属于热带海洋性季风气候。根据万宁气象站 1981—2010 年气温资料统计,本区域年平均气温为 25.0℃;年平均降水量为 2103.0mm。根据万宁气象站 1981—2010 年风资料和 1985—1986 年乌场风速观测资料统计,年平均风速为 2.2m/s,盛行风向主要为偏南风 and 偏北风,夏季以吹偏南风为主,冬季以吹偏北风为主。根据研究区乌场站各向波浪平均波高、平均周期和最大波高以及各向出现频率统计,常浪向为 SE,强浪向为 ESE、SE、SSE(图 2),年平均波高为 0.9m,年平均周期为 4.6s。



图 1 研究区位置图

Fig.1 The location of study area

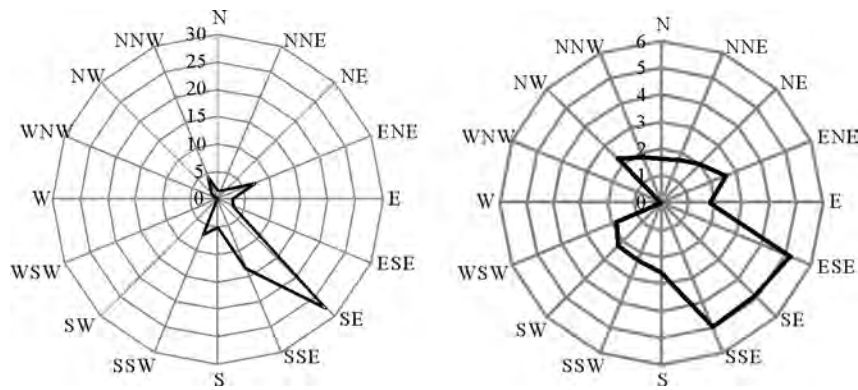


图 2 波向频率和最大波高玫瑰图

Fig.2 Rose diagrams of wave direction frequency and maximum wave height

海南岛位于南海西北部,41%进入南海的热带气旋会对海南岛产生影响,其引发的结果就是不同程度的风暴潮。据统计,海南岛沿岸增水 30cm 以上的风暴潮每年有 3.8 次,增水 50cm 以上的每年两次,增水 100cm 以上每两年就会有一次^[22]。南海的台风生成后,一般会沿西北方向前进,在海南岛登录的位置一般集中在东南岸段的文昌、万宁、陵水和三亚一带。海南岛的台风中,在文昌至万宁间沿海登陆的次数最多^[23]。万宁海岸是风暴潮发生最频繁和最严重的地段^[24]。统计万宁气象站 1981—2015 年期间登陆或影响万宁地区的台风有 52 个,年平均 1.5 个。

自 20 世纪 50 年代以来,万宁海岸频繁受到强台风和人为活动的双重破坏,由于万宁海滩钛砂矿储量丰富,采矿场遍布海岸,导致大量防护林被砍伐,再加上强台风的袭击,大量泥沙被带往陆地,导致海岸受到侵蚀,陆上风沙肆虐^[25]。近年来,采矿厂的行为受到遏制,但是采砂行为却屡见不鲜,不少海岸因采砂而发生严重侵蚀,春园湾岸段的后滨沙丘因此而塌陷。

2 研究方法

为了获取海岸的实时变化信息,2011—2014 年,在万宁东部海岸进行了重复性动态监测,监测内容包括海岸线动态变化监测和海滩剖面动态变化监测,监测的频率为每年 2~4 次,监测时间一般选在 1 月、4 月、8 月和 11 月左右,分别对应 1 年内的 4 个季节。

2.1 岸线监测方法

海岸线的动态监测是测量海岸线在海滩横向位置上的相对变化。起点选在高潮线以上不受波浪作

用影响的部分,一般设置在沙丘草丛或后侧防护林中,起点位置埋设水泥桩,终点标志选取比较明显的地貌特征,以标志性地貌相距起点的变化量反映海岸线的相对变化。

研究区岸线监测所选取的主要标志物包括陡坎、植被线和滩肩顶(图 3)。陡坎可分为沙丘陡坎和高潮线陡坎,沙丘陡坎是指海岸向陆一侧防护林附近的沙丘边缘,沙丘陡坎一般不受日常风浪的影响,可作为判断海岸长期变化的依据;高潮线陡坎是由大潮侵蚀沙滩所成,反映了岸线的季节性变化规

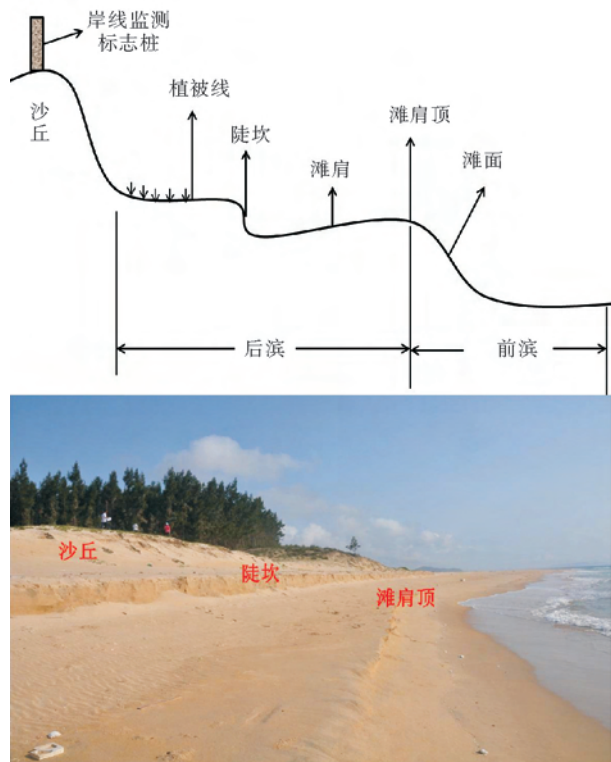


图 3 岸线监测标志物示意图

Fig.3 Markers for shoreline monitoring

律。植被线一般在高潮线陡坎的附近,也可作为反映岸线季节变化的依据。滩肩顶是由日常波浪冲刷所成,反映了海岸的短时变化。

岸线测量标志物最终确定为两种:沙丘陡坎和平均高潮线。其中,沙丘陡坎的数据可作为岸线最终蚀积的标准,平均高潮线数据可反映岸线的季节变化特征。根据研究区大地基准面的特征,2.8m 高程为理论大潮高潮线的位置,因此平均高潮线的变化数据可通过高潮线陡坎的位置变化测量获得,也可通过岸滩剖面图上 2.8m 高程位置的变化信息获得。

岸线监测点共有 120 个,观测点的间隔距离约 200~400m,侵蚀特征明显的岸段观测点加密。

2.2 岸滩剖面监测方法

研究区海岸共布设 30 条监测剖面(图 1),其中东澳湾 12 条,保定湾 10 条,春园湾 5 条,多德湾 3 条。岸滩剖面测量采用 RTK-GPS 测量技术,选在低潮期进行测量,测量起点一般为防护林的边界线,方向垂直岸线,终点为低潮线附近,数据平均采样间隔为 0.5m。

3 侵蚀特征分析

2011—2014 年对研究区海滩进行了重复性观测,观测时间一般集中在 5 月份和 11 月份。通过对观测数据的对比分析,总结了海岸的季节和年际变化规律。

3.1 海滩季节性变化规律

以 2012 年 11 月至 2013 年 11 月整年的数据为例分析研究区岸线的季节变化规律,结果如图 4 所示,图中显示了一年冬春季(11 月至次年 5 月)和夏秋季(5 月至 11 月)沙丘陡坎和平均高潮线的位置变化信息,红色负值表示向岸侵蚀量,蓝色正值表示向海淤积量。

2013 年 5 月份的岸线相较于 2012 年 11 月整体呈向海淤积趋势(春园湾除外)。沙丘陡坎数据显示,岸滩向海淤积恢复的距离一般在 0~1m 范围内,最大不超过 1.6m;平均高潮线以向海淤积为主,向海迁移量约 5m。

2013 年 11 月与 5 月的岸线对比则反映了海岸的侵蚀状态,除春园湾外,陡坎的蚀退距离在 2m 左右,平均高潮线普遍向陆迁移 5~10m。

岸线的对比数据反映了研究区海岸夏秋季侵蚀、冬春季淤积的特点,而且,侵蚀量大于淤积量,这反映了研究区海岸在自然条件下处于泥沙供应不足的状态,海岸存在着侵蚀风险。

2012 年 11 月至 2013 年 11 月的岸滩剖面图印证了岸线数据的分析(图 5):2013 年 5 月的春季剖面相较于 2012 年 11 月的冬季剖面呈淤积趋势,岸滩中下部堆积,多发育滩肩;2013 年 11 月的秋季剖面相较于 5 月的春季剖面则呈现明显的侵蚀状态,岸滩中下部蚀低,滩肩被破坏,海滩泥沙亏损。

通过以上岸线和岸滩剖面资料的对比分析,发现研究区的季节剖面特征与 Shepard^[26]在美国西海

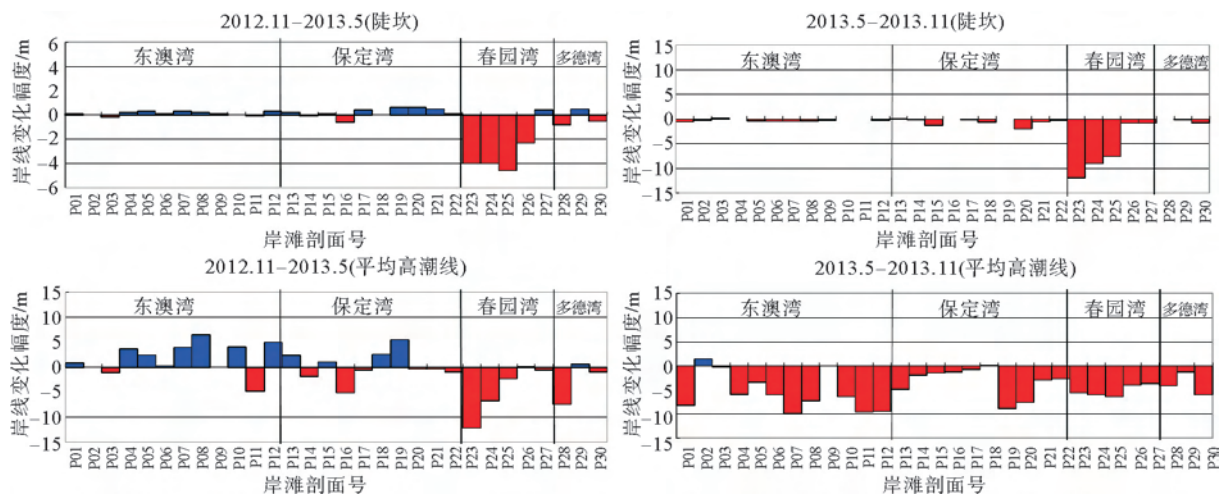


图 4 研究区岸线相对变化(2012.11-2013.5-2013.11)

Fig.4 The relative change amount of coastline(2012.11-2013.5-2013.11)

岸观测的剖面季节特征正好相反。夏季,研究区多台风等强风浪天气,岸滩多处于侵蚀状态,剖面特征与“冬季剖面”相符;冬季,研究区盛行长周期的涌浪,剖面发生恢复和重建,前滨多发育滩肩,剖面特征与“夏季剖面”相符。

总之,整个研究区呈现夏侵冬淤的季节特征,但是,泥沙的侵蚀量大于淤积量,岸滩地形蚀低明显,反映海岸带在自然环境下的侵蚀和后退趋势。

3.2 海滩年际变化规律

3.2.1 冬春季岸滩年际变化规律

将 2011—2014 年间 5 月份的春季岸线数据进行对比,可总结出岸滩的冬春季变化规律。

冬春季岸滩剖面属于淤积后的剖面,4 年的剖面形态如图 6 所示。整体上来说,剖面呈现逐年侵蚀的趋势,滩肩逐年向陆迁移(P16 剖面),2014 年的剖面较之前几年明显蚀低,整体蚀低量约 1m。

2011—2014 年的平均高潮线数据也反映了岸滩的侵蚀趋势(图 7),平均高潮线为 3 年间以向陆迁移为主,迁移距离一般为 5~10m,反映了研究区海滩泥沙供应不足,海岸承受着侵蚀威胁。

3.2.2 夏秋季岸滩年际变化规律

2011—2014 年的 11 月份海滩数据反映了海岸的夏秋季变化特征,这个季节的海滩属于侵蚀后的状态,滩面变化幅度较大。

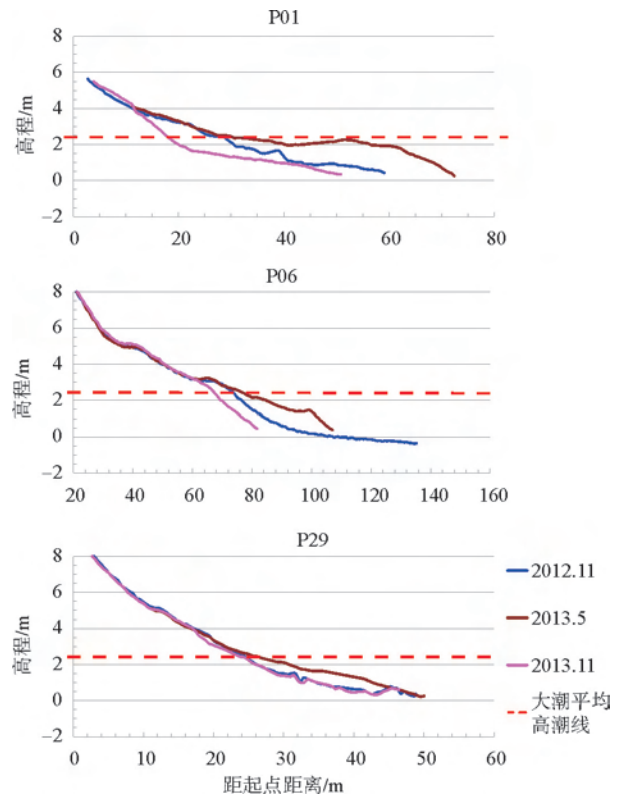


图 5 研究区岸滩剖面图(2012.11—2013.11)

Fig.5 The beach profile of study area(2012.11—2013.11)

依据研究区的海滩季节变化规律,夏秋季的岸滩剖面属于侵蚀剖面,但是,在剖面图中我们可以看出:2011 年和 2013 年的岸滩呈现侵蚀型剖面特征,岸滩中下部蚀低,滩面坡度较大,不发育滩肩;2012

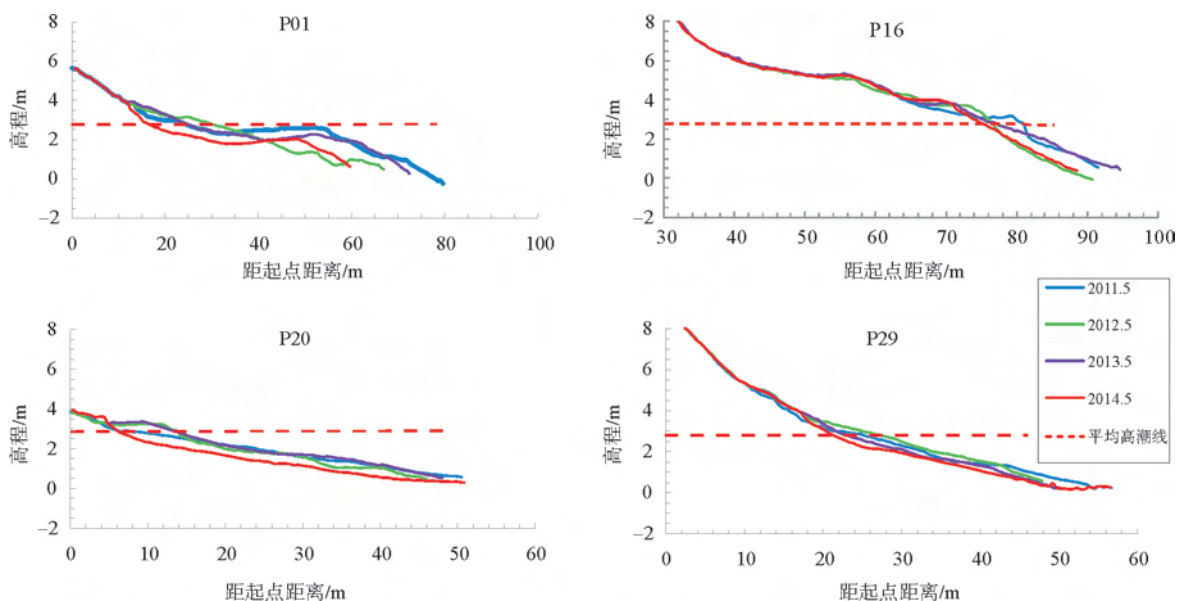


图 6 春季岸滩剖面图

Fig.6 The beach profile in spring

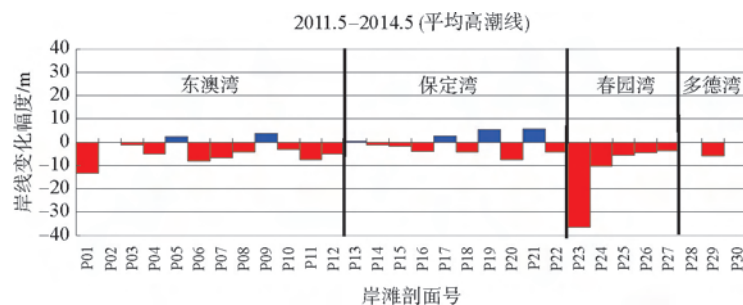


图 7 春季岸线变化图

Fig.7 The shoreline change in spring

年和 2014 年的岸滩呈现淤积型剖面特征,滩面堆积,前滨发育滩肩(图 8)。这说明,在 4 年的时间跨度上,夏秋季的岸滩剖面表现出了侵蚀相间的季节变化特征:2011 年和 2013 年岸滩侵蚀,2012 年和 2014 年岸滩淤积。

平均高潮线数据对这一现象进行了印证(图 9):2011—2012 年,平均高潮线向陆迁移 10m 左右;2012—2013 年,平均高潮线向海迁移 10m 左右;2013—2014 年,平均高潮线又向陆迁移 5m 左右,说明海岸经历了“淤积-侵蚀-淤积”的过程。

经过调查发现,2011 年和 2013 年研究区海岸曾遭受台风天气影响,海岸侵蚀严重,泥沙损失量较大,而 2012 年和 2014 年研究区未遭受极端天气影响,海岸系统启动自我恢复机制,海滩呈现淤积特征。

通过以上对春季和秋季两个季节监测资料的年际变化对比,可以总结出两个规律:首先,在年际变

化中,研究区海岸总体上呈现侵蚀趋势,平均高潮线的侵蚀速率约为 2.5m/a,说明海岸长期处于泥沙流失状态。其次,在年际演变过程中,海岸存在侵蚀相间的变化规律:在有台风影响的年份,岸滩侵蚀严重,在无台风的年份,岸滩又相对呈现淤积现象。

3.3 台风对海岸的影响

在海岸周期性监测期间,研究区共经历 4 次台风,分别是 2011 年的 8 号热带风暴“洛坦”、17 号强台风“纳沙”、19 号强台风“尼格”和 2013 年的 30 号强台风“海燕”。

2011 年的 3 次台风事件集中在 8—10 月之间,8 月份和 10 月份的岸滩剖面数据充分反映了这 3 次台风对海岸的影响。通过对比台风前后的观测数据发现,台风过后的 10 月份岸线整体发生侵蚀,与 8 月相比较,平均高潮线普遍出现 5m 的后退,部分岸段后退达 15m(图 10)。

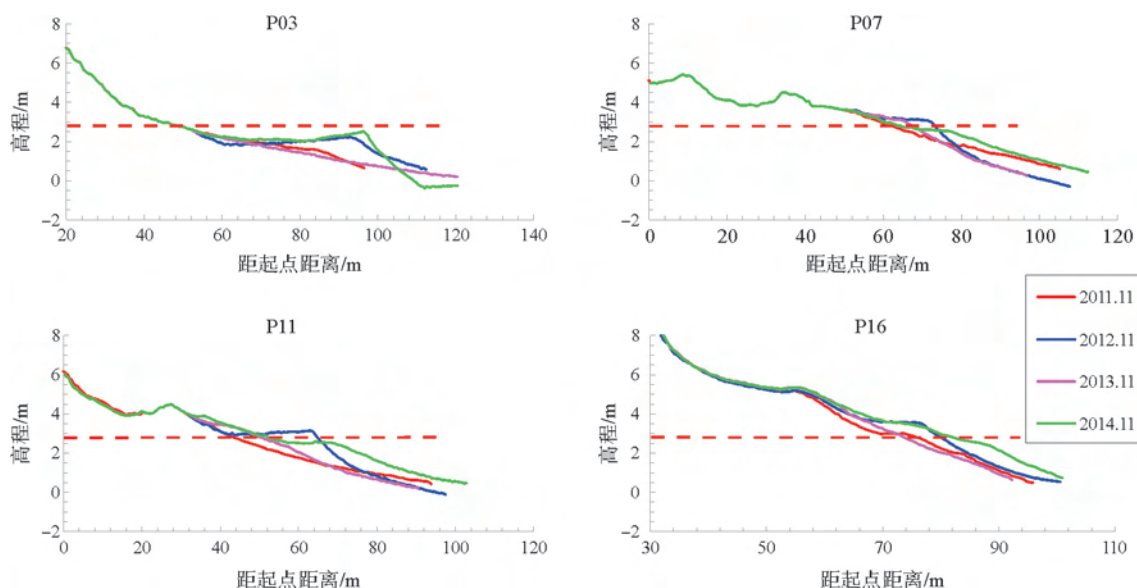


图 8 秋季岸滩剖面图

Fig.8 The beach profiles in autumn

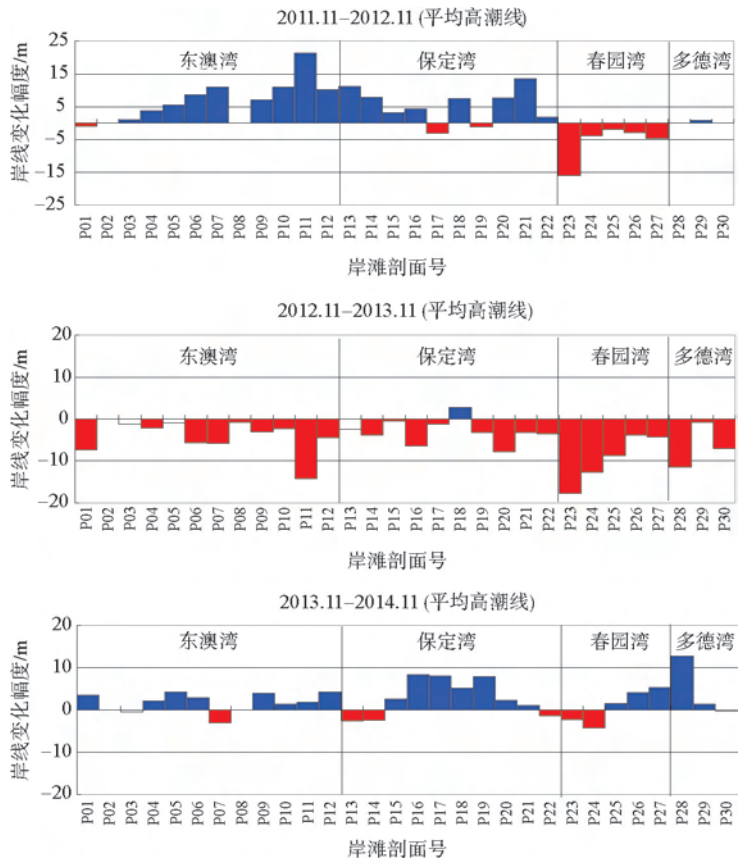


图 9 秋季岸线变化图
Fig.9 The shoreline change in autumn



图 10 2011 年台风作用下的岸线变动
Fig.10 The shoreline change under the influence of Typhoon in 2011

2013 年 11 月 5—23 日,受台风“海燕”的影响,春园湾和保定湾北部出现了严重的侵蚀现象,原有的后滨沙丘陡坎侵蚀后退,后退距离约 2m,春园湾南部蚀退近 5m(图 11)。春园湾部分岸段在后滨沙丘位置出现新的侵蚀陡坎,高约 2.5m,防护林侵蚀掉落或处于即将掉落的边缘。

不同的岸段对台风的响应不同,图 12 显示了东澳湾岸段和春园湾岸段在台风作用下的剖面变化过程。P04 剖面位于东澳湾的中部偏南,海滩平坦开

阔,后滨有起伏的沙丘;P25 号剖面位于春园湾中部,海滩狭窄陡峭,高潮时无干滩。2011 年 8—10 月期间,这两处海岸都受到 3 次台风天气的影响,P04 剖面的前滨滩肩被破坏,前滨地形蚀低约 0.5m,平均高潮线后退 2.5m;P25 剖面的沙丘直接受到强风浪的影响,滩面整体蚀低 1.5m,平均高潮线后退 7.5m,海岸后侧防护林直接受到风暴潮的威胁。2011 年 10 月至 2012 年 1 月研究区没有台风经过,大部分海岸线都处于恢复和重建阶段,如



图 11 台风作用下的陡坎变化信息
Fig.11 The erosion scarps change after typhoon

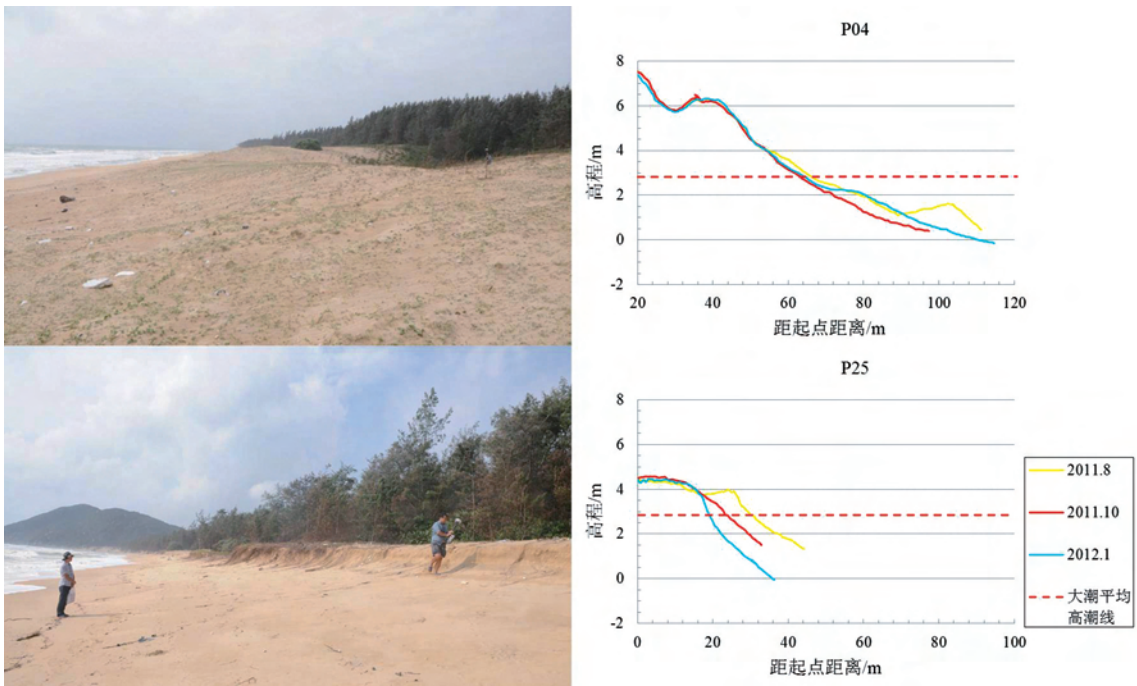


图 12 不同岸段对台风的响应
Fig.12 The profiles of different beaches after Typhoon

P04 剖面,2012 年 1 月的海滩前滨位置堆砂,平均高潮线向海推进,海滩处于淤积过程,前滨滩肩会重新塑造。少部分岸段仍处于侵蚀状态,如 P25 剖面,沙丘位置持续侵蚀,海滩越发陡峭。

以上分析可知,宽阔平坦的岸滩,受风暴潮的侵蚀作用较小,绵长的海滩是强风浪的缓冲带,海岸后侧的沙丘成为波浪作用的屏障,沙丘后侧的防护林几乎不受风暴潮影响。海滩前滨的滩肩会被风暴潮破坏,台风过后,又会发生重建,海滩容易恢复。狭窄陡峭的岸滩,受风暴潮侵蚀作用巨大,强风浪会直接作用到海岸沙丘,滩面蚀低,泥沙被带往深海,造成海岸泥沙永久损失。台风过后,由于滩面过于狭窄陡峭,波浪会持续向沙丘索取泥沙,在未完成相对平衡的岸滩以前,岸线会持续后退。

3.4 前滨采砂对海岸的影响

通过以上对岸线和岸滩剖面的资料分析,发现春园湾岸段出现了明显的反常现象,全年无分季节,海岸持续侵蚀后退,而且侵蚀量非常巨大。经过现场调查发现,春园湾南部岸段自 2012 年开始出现前滨采砂现象,致使海滩在短期内损失大量泥沙,岸线侵蚀后退。

P23 号剖面位于春园湾南部岸段。春园湾为岬湾型海岸,海岸线形态为螺旋形,在未受采砂影响前整个海湾处于相对平衡的状态。在野外监测期间,最早是在 2012 年 5 月发现春园湾南部有采砂行为,我们以此为分界时间,将 P23 号剖面分为两个时间段进行分析(图 13)。

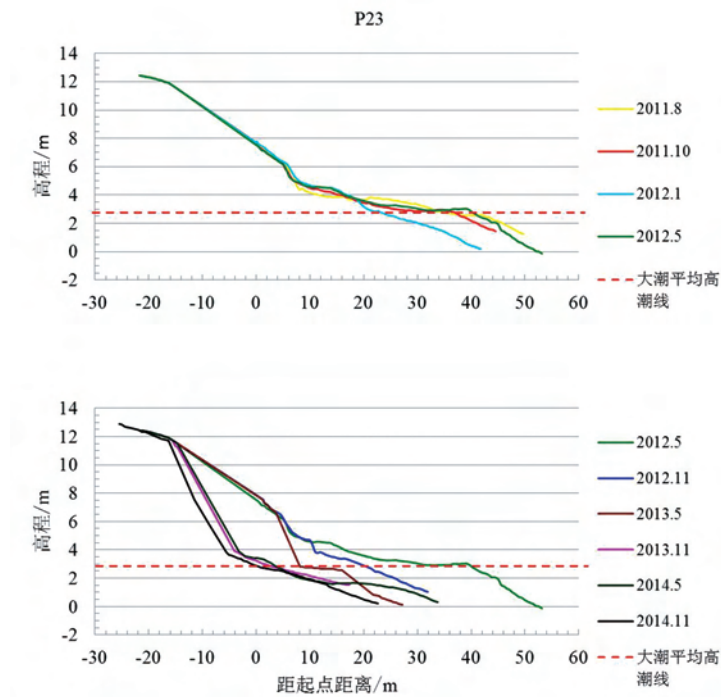


图 13 P23 号剖面图

Fig.13 The beach profile of P23

第 1 阶段为 2011 年 8 月至 2012 年 5 月。从剖面图可以看出,此阶段的海滩处于相对平衡状态,2011 年 8—10 月的台风天气未对海滩造成很大影响;2012 年 1 月,前滨海滩明显蚀低,滩肩被破坏;到 5 月,海滩完成恢复和重建,前滨重新发育滩肩,2011 年 5 月与 2012 年 5 月的海滩剖面形态基本相似。

第 2 阶段为 2012 年 5 月至 2014 年 11 月。从剖面图可看出,受挖砂影响,前滨海滩泥沙大量消失,滩肩被破坏,2012 年 11 月的岸滩首次于海岸沙丘位置出现明显的侵蚀陡坎,前滨一水泥井的出露高度相较 5 月份增加了 0.6m,平均高潮线位置后退 17m;至 2013 年 5 月,沙丘陡坎蚀退,海滩前滨持续蚀低,平均高潮线再后退 12m;至 2013 年 11 月,海岸沙丘发生大规模塌陷,形成近 8m 高的陡崖,海滩前滨泥沙堆积,平均高潮线再退 6m;至 2014 年 11 月,海岸侵蚀速率下降,一年间平均高潮线位置仅后退 3m,海岸沙丘持续蚀落。2012 年 5 月至 2014 年 11 月近两年半的时间,海岸后退距离达 38m,平均 15.2m/a,其中,2012 年 5 月至 2013 年 5 月一年间岸线后退 29m。海滩前滨蚀低约 3m,海滩后滨沙丘侵蚀形成近 8m 高的陡崖。

采砂部位主要集中于高潮线附近,根据 P23 号海滩剖面图,采用曲线拟合的方法计算得出 2012 年

5 月至 2014 年 11 月单宽范围内泥沙的损失量为 294m^3 。春园湾共布设 5 条监测剖面,可依次求出其余 4 条剖面的单宽侵蚀量。5 条剖面等间距布设,岸线总长度为 2000m,可假定每条剖面代表 400m 岸线的侵蚀状况。最后经过统计,可得到春园湾两年半的泥沙侵蚀总量为 28.04万 m^3 。

P23 号剖面形态的变化过程详细地解释了前滨采砂对海岸侵蚀的影响:由于前滨损失大量泥沙,海岸沙量平衡系统被打破,海洋方向没有沙源补给,海滩只能不断地向海岸后侧沙丘索取,其结果就是,海岸沙丘在较短的时间内形成侵蚀陡崖,蚀落的泥沙不断填补海滩的泥沙空缺,在未达到平衡状态前,沙丘陡崖会不断侵蚀后退。而由于海滩处于无防护状态,风暴潮会加速泥沙的流失,因此,若不采取补救措施,此处海岸会在较长一段时间内处于严重侵蚀状态。

3.5 沿岸输沙特征

在正常的自然条件下,沙质海岸的侵蚀现象主要是由泥沙的沿岸运移所引起的,沿岸输沙主要发生在破波带内,是由波浪斜向入射造成的。沿岸输沙率的计算方法主要分为波能流法和沿岸流法,其中,波能流法应用较为广泛。本文采用 CERC 公式计算各岸段的输沙率,公式如下:

$$Q = k(Ecn)_b \cos \alpha_b \sin \alpha_b$$

式中, Q 为体积输沙率; k 为沿岸输沙系数; $(Ecn)_b$ 为波能流, 由 E_b , c_b 和 n_b 计算得出, E_b 为波能密度, c_b 为破波波速, n_b 为波能传递系数; α_b 为破波入射角。 k 和 E_b 可分别用以下公式计算得出:

$$k = \frac{0.77}{(\rho_s - \rho)g(1 - \epsilon)}$$
$$E_b = \frac{1}{8}\rho g H_b^2$$

其中, ρ_s 为泥沙密度, 取 2650kg/m^3 ; ρ 为海水密度, 取 1025kg/m^3 ; g 为重力加速度, 取 9.8 N/kg ; ϵ 为泥沙孔隙率, 取 0.4 ; H_b 为破波波高。

由于地形原因, 研究区只受 NE—SSW 方向的

波浪影响, 根据 1985—1986 年的波浪观测结果, 得出这 8 个方向波浪的平均波高、平均周期和出现频率(表 1)。

根据沿岸输沙率公式和波浪资料计算出各剖面位置输沙率的结果如图 14 所示。输沙方向定义为自南向北为正, 自北向南为负, 净输沙率为单一方向实际输沙率, 总输沙率为各向输沙率之和。

研究区海岸整体呈现自南向北的泥沙运移现象。东澳湾(P1—P12 号剖面)中南部岸段输沙率达 $80\sim 100\text{万 m}^3/\text{a}$, 北端和南端输沙率较小, 为 $10\sim 20\text{万 m}^3/\text{a}$, 反映该海湾中南部侵蚀, 北部淤积; 保定湾(P13—P22 号剖面)自南向北输沙率逐渐减少, 反映海湾南部侵蚀, 中北部淤积; 春园湾(P23—P27

表 1 乌场站波浪各波高、周期与出现频率

Table 1 The wave height, period and occurrence frequency at Wuchang station

波向	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW
平均波高/m	0.9	1.0	0.8	0.9	1.0	0.8	0.8	0.8
平均周期/s	4.3	4.3	4.3	4.6	5.5	4.9	3.8	3.8
频率/%	2.4	7.4	2.7	3.2	27.8	13.5	5.1	6.8

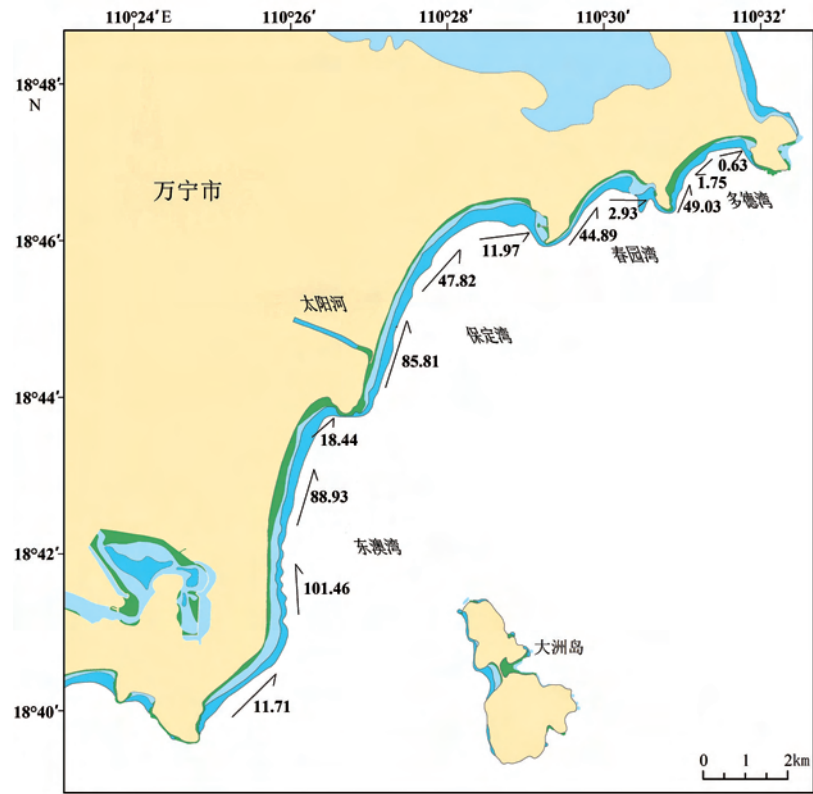


图 14 万宁海岸沿岸输沙率(单位: $10^4\text{ m}^3/\text{a}$)

Fig.14 The longshore sediment transport rate of the Wanning coast (unit: $10^4\text{ m}^3/\text{a}$)

号剖面)南部输沙率达 44.89 万 m^3/a ,北部仅为 2.93 万 m^3/a ,说明海湾南部侵蚀,中部堆积,北部基本不变;多德湾(P28—P30 号剖面)南部输沙率较大,易侵蚀,中北部输沙率较小,海岸变化不大。

根据实际的观测调查,海岸的侵蚀淤积状况与沿岸的理论输沙结果并不相符,4 个海湾整体上都处于侵蚀状态,只是程度不同。

东澳湾南部侵蚀,北部稳定。此处海岸岸滩宽阔,抗风暴能力强,频繁的台风天气抵消了大部分的沿岸泥沙运移量,又由于缺少足够的泥沙补给源,致使南部侵蚀较为严重,北部相对稳定。

保定湾两端侵蚀,中间淤积,北部较南部侵蚀严重。海湾南端为太阳河入口处,太阳河是万宁市内最大的一条河流,河流来沙是此处海岸的主要泥沙补给源,由于修建水库和人工改道等原因,河流输沙量日益减少,泥沙处于供不应求的状态,致使海岸一直处于侵蚀状态。中部海湾受沿岸输沙影响,呈淤积趋势。北部海湾岸滩狭窄,海滩稳定性较差,受台风影响严重,据 2013 年 11 月观测,台风“海燕”过后,北部海湾普遍蚀退 1~2m,中部海湾影响不大。因此,保定湾的侵蚀现状是沿岸流、台风和入海河流等因素共同作用的结果。

春园湾整体侵蚀,据前文所述,是由人工采砂所致。

多德湾南部侵蚀,中北部较为稳定。多德湾呈弧形岬湾状态,由于两端岬角的遮挡,受台风的影响不大,南部的侵蚀状态主要是由于自南向北绕过岬角的沿岸流所致。

4 结论

(1)万宁东部海岸外来泥沙补给源不足,沿岸泥沙只能在海洋动力的作用下作纵向和横向的输运。在自然条件下,海岸带长期处于动态平衡的状态,但是由于前滨采砂等人类活动破坏了海岸平衡系统,大部分海岸遭受侵蚀,而台风等极端天气加速了海岸侵蚀的进程,部分海岸处于崩塌的危险状态。

(2)通过对岸线和岸滩剖面监测资料的对比分析,发现研究区海岸呈现夏秋侵蚀冬春淤积的季节变化规律。夏秋季,在台风所引起的强风浪的作用下,岸滩侵蚀后退;冬春季,在长周期的涌浪作用下,岸滩发生恢复和重建,海滩向海淤积。在年际变化过程中,海岸总体上呈现侵蚀趋势。但是,在以年为单位的长周期演化过程中,海岸又存在着侵蚀相间的变化规律:若某一年份岸滩侵蚀严重,海岸带泥沙

大量损失,在其接下来的年份,海岸全年会以淤积恢复为主。

(3)前滨采砂是春园湾海岸侵蚀的主要原因,在台风的耦合作用下,海岸在两年多的时间内后退 38m,侵蚀速率 15.2m/a,前滨蚀低约 3m,后滨沙丘侵蚀形成近 8m 高的陡崖。

(4)根据沿岸动力条件和 CERC 输沙率计算公式得出研究区海岸的泥沙运移情况:4 个海湾泥沙输运方向均为自南向北,南部输沙率大,中北部较低,理应呈现南部岸段侵蚀,中北部淤积或不变的海岸状态,但由于研究区海岸环境复杂,泥沙补给源较少,再加上前滨采砂等不正当的人类活动破坏了海岸平衡系统,大量泥沙流失,而夏秋季频繁的台风容易抵消泥沙的沿岸运移效果,海岸平衡系统不易恢复,因此整个海岸都处于侵蚀的威胁之下。

参考文献 (References)

- [1] Komar P D. Beach Processes and Sedimentation(2nd edition) [M]. New Jersey: Prentice Hall, 1998.
- [2] 任美镔.海平面研究的最近进展[J].南京大学学报:自然科学, 2000,36(3):269-279. [REN Meie. Recent advances in sea level research[J]. Journal of Nanjing University (Natural Science), 2000,36(3):269-279.]
- [3] Li Z, Lei H Y. Distribution and existing problems of sandy coast in China[J]. Marine Geology Letters, 2006, 22(6): 1-4.
- [4] Russell R J. Geomorphology of the rhone delta[J]. Annals of the Association of American Geographers, 1942, 32: 149-254.
- [5] Davies J L. Wave refraction and the evolution of shoreline curve[J]. Geographical Studies, 1958, 5(2): 1-14.
- [6] Shepard F P, Inman D. Nearshore water circulation related to Bottom topography an wave refraction[J]. Transaction of the American Geophysical Union, 1950, 31: 196-212.
- [7] Dolan R. Beach changes on the Outer Banks of North Carolina [J]. Annals of the Association of American Geographers, 1966, 56: 690-711.
- [8] Bowen A J. Rip currents 1: theoretical investigations[J]. Journal of Geophysical Research, 1969, 74: 5467-5478.
- [9] Noda E K. Wave induced nearshore circulation[J]. Journal of Geophysical Research, 1974, 79: 4097-4106.
- [10] Wright L D, Thom B G. Coastal depositional landforms: a morphodynamic approach[J]. Physical Geography, 1977, 1: 413-459.
- [11] Wright L D, Short A D, Green M O. Short-term changes in the morphodynamic states of beaches and surf zones: an example predictive model[J]. Marine Geology, 1985, 62: 339-364.
- [12] Davidson-Arnott R G D. Conceptual model of the effects of sea level rise on sandy coasts [J]. Journal of Coastal Research, 2005, 21(6): 1166-1172.

- [13] Adamob F, Capua C D, Filianoti P, et al. A coastal erosion model to predict shoreline changes[J]. *Measurement*, 2014, 47: 734-740.
- [14] Fitton J M, Hansom J D, Rennie A F. A national coastal erosion susceptibility model for Scotland[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2016, 132: 80-89.
- [15] Splinter K D, Carley J T, Golshani A, et al. A relationship to describe the cumulative impact of storm clusters on beach erosion[J]. *Coastal Engineering*, 2014, 83: 49-55.
- [16] Karunarathna H, Horrillo-Caraballo J M, Ranasinghe R, et al. An analysis of the cross-shore beach morphodynamics of a sandy and a composite gravel beach[J]. *Marine Geology*, 2012, 299-302(1): 33-42.
- [17] 陈沈良, 张国安, 陈小英, 等. 黄河三角洲飞雁滩海岸的侵蚀及机理[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2005, 25(3): 9-14. [CHEN Shenliang, ZHANG Guoan, CHEN Xiaoying, et al. Coastal erosion feature and mechanism at Feiyantan in the Yellow river delta [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2005, 25(3): 9-14.]
- [18] 丰爱平, 夏东兴, 谷东起, 等. 莱州湾南岸海岸侵蚀过程与原因研究[J]. *海洋科学进展*, 2006, 24(1): 83-90. [FENG Aiping, XIA Dongxing, GU Dongqi, et al. Study on process and cause of the coastal erosion along the south coast of the Laizhou Bay[J]. *Advances in Marine Science*, 2006, 24(1): 83-90.]
- [19] 刘兴建, 葛晨东, 陈平平. 人类活动对海南省小海泻湖沉积环境的影响[J]. *环境化学*, 2007, 26(3): 384-387. [LIU Xingjian, GE Chendong, CHEN Pingping. Anthropogenic impact on the sedimentary environment of Xiaohai lagoon, Hainan Island[J]. *Environmental Chemistry*, 2007, 26(3): 384-387.]
- [20] 田向平, 李春初. 海南小海泻湖环境的破坏和治理[J]. *海洋环境科学*, 2007, 26(1): 91-94. [TIAN Xiangping, LI Chunchu. The environmental disruption and transformation of Xiaohai lagoon in Hainan[J]. *Marine Environmental Science*, 2007, 26(1): 91-94.]
- [21] 符启基, 岑辽. 浅论海南万宁东海岸锆钛砂矿集区的资源潜力[J]. *资源环境与工程*, 2008, 22(1): 6-8. [FU Qiji, CEN Liao. Discussion on resources potential in concentration area of Zr-Ti placer in east coast of Wanning, Hainan Province[J]. *Resources Environment & Engineering*, 2008, 22(1): 6-8.]
- [22] 石海莹, 李孟植. 2005 年海南岛沿岸风暴潮特征分析[J]. *海洋预报*, 2008, 25(3): 33-39. [SHI Haiying, LI Mengzhi. Characteristic analysis of Hainan Island storm surge along in 2005 [J]. *Marine Forecasts*, 2008, 25(3): 33-39.]
- [23] 陈光兴. 海南岛的台风与风暴潮[J]. *水文*, 1992(5): 52-55. [CHEN Guangxing. Typhoon and storm surge in Hainan Island [J]. *Hydrology*, 1992(5): 33-39.]
- [24] 王红心, 陆惠祥, 余晓军, 等. 海南岛沿岸风暴潮特征分析[J]. *海洋预报*, 1998, 15(2): 34-41. [WANG Hongxin, LU Huixiang, YU Xiaojun, et al. Analysed storm surges characteristic's along the coast of Hainan Island [J]. *Marine Forecasts*, 1998, 15(2): 34-41.]
- [25] 吴正, 黄山. 海南岛海岸风沙及其治理对策[J]. *华南师范大学学报: 自然科学版*, 1992, 2: 103-107. [WU Zheng, HUANG Shan. Coastal wind-drift sand in Hainan island, China, and its harnessing measures[J]. *Journal of South China Normal University(Natural Science Edition)*, 1992, 2: 103-107.
- [26] Shepard F P. Beach cycles in Southern California[J]. *U.S. Army Corps of Engineers Beach Erosion Board Techn. memo*, 1950, 20: 26.