doi:10.3969/j.issn.1003-2029.2024.02.006

# 华南岬湾海滩冲淤演变特征及其机制分析 ——以南澳岛前江湾为例

杨名名,张一帆,李杏筠,周 圆

(广东省海洋发展规划研究中心, 广东 广州 510220)

**摘 要:** 岬湾海滩在华南地区普遍分布,众多海滩面临侵蚀退化问题,对其海滩冲淤演变特征 及机制的研究具有重要的现实意义。本文以粤东重要的旅游海岛南澳岛南部的前江湾为研究区, 利用滩面调查、遥感影像数据与历史海图和实测水深数据,研究 1970—2022 年海滩冲淤特征, 并从水动力、沿岸输沙、稳定岸线形态等方面,探讨人类活动对海滩冲淤演变的影响机制。结 果表明:前江湾海滩蚀淤演变在东南沿岸码头防波堤海岸工程建设前后呈现不同的空间变化特 征,切线岸段前期侵蚀、后期侵蚀加剧,弧形岸段前期淤积、后期侵蚀;人类海岸工程造成的 岬角位置变化和沿岸输沙受阻是影响海滩蚀淤演变的主要机制,导致岬湾岸线平面形态变为不 稳定状态,区域沉积物的亏损也加剧了海岸失衡;自东向西的沿岸输沙的不均衡对其海岸线演 变的空间特征起控制作用。

关键词:华南;岬湾海滩;冲淤演变;沿岸输沙;抛物线模型;南澳岛 中图分类号:P753 文献标识码:A 文章编号:1003-2029 (2024) 02-0043-15

海滩是海岸带延展分布的砂、砂砾或卵石等松 散沉积物的堆积体<sup>[1]</sup>,是砂质海岸的重要组成部分。 在当地优势波浪长期作用下,一般在岬角下游或两 岬之间形成岬湾海滩<sup>[2]</sup>,约占全球岸线的50%<sup>[3]</sup>。岬 湾海滩通常保留了稳定的海滩和清洁的浴场,常被 用作港口和旅游开发,是人类活动最频繁的地区之 一。二十世纪六七十年代,国内大规模的围垦造地 和港口建设创造出大量人工海岸地貌,部分海岸工 程直接改变了岬湾海岸的形态,影响海滩动力地貌 平衡,甚至引起侵蚀灾害<sup>[4]</sup>。岬湾海岸侵蚀及稳定 问题一直受到特别关注,也是海岸保护和港湾开发 建设必须考虑的重要问题。

岬湾海滩占华南海岸 20%以上<sup>15</sup>,在华南地区 普遍分布,尤其是粤东地区的岬湾海岸特点十分显 著<sup>16</sup>。李春初<sup>17</sup>较早对华南岬湾相间的港湾海岸地貌 特征进行了系统研究,对华南现代海岸的成因和地 貌特点形成初步认识。随着海滩动力地貌及海滩演变、 静态平衡等理论和应用的发展<sup>[8-9]</sup>,对华南岬湾海滩 演变及稳定的研究逐渐出现。学者借助螺线模型、 抛物线模型等手段,对华南典型岬湾海滩的长期演 变趋势及稳定性进行了预测分析<sup>[10-13]</sup>,研究了华南 个别岬湾海滩的侵蚀因素<sup>[14]</sup>和季节性变化特征<sup>[15]</sup>, 有学者开始关注防波堤等海岸工程建设对岬湾岸滩 冲淤演变的影响<sup>[12,14]</sup>。华南海岸演变大多受到不同 程度的人为干扰,近年来随着经济的快速发展,人 类活动已成为海岸侵蚀加剧的主要原因<sup>[6,15]</sup>,其中, 粤东海岸侵蚀比例高达 29.5%<sup>[16]</sup>。

当前,华南岬湾海滩冲淤演变的相关研究主要 集中在海滩侵蚀、稳定及其影响因素的研究,且逐 渐偏向人类活动的影响。近期国内海岸科学家开始

收稿日期: 2023-08-03

基金项目: 广东省海洋渔业科技与产业发展专项项目(A201500D05)

作者简介:杨名名(1988—),男,硕士,工程师,主要从事河口海岸动力、泥沙输运过程研究。E-mail: 295945849@qq.com 通讯作者:张一帆(1986—),男,硕士,高级工程师,主要从事海洋环境演变、海岸带规划研究。E-mail: 108787472@qq.com

关注海岸工程对华南岬湾海岸的影响,然而由于历 史地貌、沉积和水文调查研究资料匮乏,以及早期 遥感影像分辨率较低<sup>14</sup>,学者主要基于近期调查资 料和历史水深、遥感影像数据开展了华南海岸大尺 度地区或大型海湾的短期年际[17-18]或季节变化[19]和 中长期演变研究[12,14,20-21],其中长期演变研究表明, 靖海湾的岸滩稳定性在防波堤工程建成前后发生显 著转变,目前海岸地貌调整接近稳定的"堆积型动 态平衡"[12],企望湾以中部基岩岬角为界的东、西侧 海滩呈现不同的冲淤空间变化特征,由防波堤建设 造成的岬角位置变化导致海岸失稳<sup>[4]</sup>, 1976—2021 年间南澳岛海岸线发生巨大变化,人为因素和自然 因素对海岛不同区域岸线演变的影响差异明显[20], 大埕湾长期缓慢侵蚀的主要原因是大量堤围、水利工 程和不适宜的采砂引起沿岸泥沙补给减少,其岸滩 呈现内凹蚀退的演变趋向四。可见,人类活动尤其 是不合理的海岸工程对华南岬湾海滩长期演变平衡 存在显著影响,甚至导致局部岸段蚀淤趋势逆转[12.14], 与自然因素叠加后的影响机制复杂,且受制于海岸 走向、波向和海湾平面形态、尺度等局地要素。因 此, 华南岬湾海滩的长期冲淤演变难以简单类推且 可能存在其特殊性,同时,在人类活动(海岸工程 等)影响日益显著的背景下,华南岬湾海滩长期演 变的影响机制研究需综合考虑自然和人为因素,开 展泥沙来源、水动力和海岸地形多方面综合分析。 本文以粤东重要的旅游海岛南澳岛南岸的前江湾为 研究区,利用南澳岛前江湾较详尽的滩面现状调 查、高分辨率的遥感影像数据与历史海图和实测水 深数据,研究1970-2022年海滩冲淤演变特征, 并从水动力、沿岸输沙、稳定岸线形态等方面,重 点分析探讨人类活动对海滩冲淤演变的影响机制, 为华南地区重点开发岬湾海滩的保护与利用提供一 个案例参考,对海岸带防灾减灾和风险管理有重要 的实际意义。

1 区域概况与数据来源

## 1.1 地理和外营力概况

南澳岛位于粤东韩江口外,构造上属长乐-南 澳北东向深断裂带的一部分<sup>[2]</sup>,属基岩岛,岛体由

花岗岩和火成岩组成,岛上山丘峰峦耸立,大部分 为低山丘陵,受风雨侵蚀,南部表层泥沙流失,岩 石裸露,周围多陡岸和港湾[16,23]。受地质构造的影 响,主岛近似呈东西向排列,形似葫芦状,东、西 部主要为山丘,中部为狭小的冲积平原,总体为低 山剥蚀丘陵-剥蚀地貌<sup>[24]</sup>。该岛面积为 110.89 km<sup>2</sup>, 东西长 21.5 km, 南北宽 2.0~10.4 km。海岛岸线长 约84.3 km, 主要包括基岩岸线、人工岸线和砂质 岸线,其中,砂质岸线长约13km<sup>[17]</sup>,海滩资源丰 富,主要海滩有12段,集中分布在海岛东部和南 部(图1)。海岛周围多岬湾分布,湾内往往形成螺 线形海滩(如前江湾、云澳湾)或弧形海滩(如烟 墩湾、竹栖肚湾、青澳湾)[2]。海岛南部的前江湾面 向南海,属溺谷湾,呈半月形,湾口朝西南,两端 分布向海突出的岬角地形,岬间分布螺线形海滩. 形成典型的岬湾海滩地貌<sup>[26-27]</sup>。前江湾水深约 3~8 m, 底部较平坦,沙泥底,湾顶分布长约790m的沙 滩,西侧为切线段沙滩,东侧为弧形段沙滩,其余 为岩岸,东、南部沿岸多礁,主要有东妈印礁、铁 线礁、虾尾礁[27]。



图 1 南澳岛前江湾砂质海岸地形及调查采样位置示意图 (水深线基准面为当地理论最低潮面;底图为谷歌地球, 拍摄于 2022 年 12 月)

南澳岛是全国 14 个海岛县中唯一的 4A 级旅游 区,也是国家和美海岛示范创建的海岛之一,岛上 海滩旅游发展迅猛,开发程度较高。近 40 年来的 港口码头、围填养殖场等建设导致南澳岛岸线形状 变化明显,主要集中在北部的后江湾和南部的前江 湾<sup>[26]</sup>。南澳岛南岸是华南沿岸的主要侵蚀海岸之 一<sup>[28]</sup>, 位于南岸的前江湾受人类活动的影响尤为显 著,其岸线演变相对岛上其他海湾较为显著<sup>[20]</sup>,近 年来其海滩侵蚀加剧, 20 世纪 70 年代湾内砂质岸 线长约 1 270 m, 海滩宽约 74 m, 而目前砂质岸线 长约 790 m, 宽约 27 m, 已威胁到海滩使用和海堤 安全。前江湾背靠南澳县城和环岛公路, 地理位置 优越, 交通便捷, 拥有宝贵的沙滩旅游资源, 沙滩 的自然环境与配套设施较好,已建设沙滩公园,是 岛民们经常纳凉、休闲、看海、踏浪的地方,也是 游客入岛后见到的第一个较大的沙滩。为了给旅游 和交通提供更便捷的服务和设施, 1988-2003年, 在前江湾海岸带东南侧主要开展了虾公尾沿岸填海 造地、前江码头、前江渔港码头等海岸工程建设。 1988—1990年,完成前江港码头防波堤和前江渔港 码头防波堤建设,前江码头丁坝防波堤向西南突出 于海延伸至虾尾礁,长约190m,宽约50m,前江 渔港丁坝防波堤向西延伸,长约130m,设计勾头 向 NW 延伸, 长约 69 m, 宽约 30 m; 1990-2003 年,在湾顶筑造了长1200m的海堤,在东南侧已 有丁坝和堤围的基础上开展了虾公尾沿岸围填海 工程及前江码头、渔港码头建设工程,所形成的人 工岸线分别向海推进约 200 m 和 400 m, 新形成陆 域面积约 50 492 m<sup>2</sup> 和 54 446 m<sup>2</sup>, 前江码头主要为 5 000 总载重吨 (Dead Weight Tonnage, DWT) 通 用码头, 北接 500 DWT 渔港码头, 均为重力式结 构[29-30]; 2004—2005年, 完成前江码头改扩建, 即 在通用码头和渔港码头之间扩建1000 DWT 码头, 如图 2 所示。以上海岸工程的建设直接导致砂质岸 线长度减少约480m, 弧形砂质岸线变为夷直的码 头人工岸线,人工岸线长度增长较剧烈<sup>[20]</sup>,前江码 头岸线向海突出,形成新的人工岬角。由于背靠南 澳县城,前江湾可避强劲的 NE 风,同时,前江码 头人工岬角可削弱 SE 向强浪, 前江渔港码头勾头岬 角可遮蔽 SSW—SW 向浪,海湾东南部成为外来渔



图 2 前江湾海岸带历史遥感影像变化对比

(图(a)和(b)底图为美国地质调查局(United States Geological Survey, USGS) KeyHole 历史影像<sup>[31]</sup>,分别拍摄于 1974 年 11 月和 1980 年 7 月;图(c)和(d)底图为法国国家空间研究中心(Centre National d'Etudes Spatiales, CNES) SPOT (Satellite Pour l' Observation de la Terre)历史影像<sup>[32]</sup>,分别拍摄于 2003 年 12 月和 2005 年 7 月) 船的主要锚泊地,东岸建设了酒店设施和帆船运动 基地等。2013—2014 年和 2016—2017 年相继开展 了前江湾海域海岸带整治修复、海滩补砂等治理修 复工程,海域海岸带整治修复项目位于前江湾周边 海岸带区域,主要包括海岸带空间整理工程、海岸 环境整治工程、海岸景观建设工程和海堤加固工程, 完成沙滩滩面违建设施清理拆除,以及基岩岸污 水、垃圾和废弃物的清理,完成长约 1.4 km 的观海 廊道建设和 80 m 海堤加固,沿岸建造广场平台与 台阶、观海栈道、亲海平台、人行道、石栏杆、绿化 景观、休憩廊道等设施,补砂工程主要位于切线段, 于滩肩前缘直接补砂面积约 4 000 m<sup>2</sup> 以拓宽干滩宽 度,在一定程度上改善了海岸环境,提高了区域的 防灾能力,但并未能长期有效缓解海岸侵蚀问题。

该海域位于华南强浪区,海岸主要为波控海 岸,且受热带气旋伴随的大浪、暴雨和大风灾害影 响较频繁,近年来影响南澳岛的热带气旋的频率约 为 2.4 个/年[33]。根据中国气象局 1949—2020 年热 带气旋最佳路径集数据和灾情资料,影响且引起严 重风暴潮灾害的主要有 1969 年 7 月登陆的超强台 风"Viola"、1993年9月登陆的强台风"Abe"、 2001年7月登陆的台风"尤特"、2013年9月登陆 的超强台风"天兔",以及 2016 年 10 月登陆的台 风"海马"。根据云澳站 2006—2018 年波浪资料统 计,全年风浪多出现在 NE-E 向,其中 ENE 向风 浪频率最大(59.82%),其次是NE向(16.54%); 全年涌浪多出现在 ESE—SSW 向, 其中, SSE 向涌 浪频率最大(37.77%),其次是S向(22.60%)和 SE 向 (22.06%); 多年平均波高为 0.8 m, 历年最 大波高在 2.9~6.1 m 之间, 2013 年 9 月 22 日 14 时 观测到最大波高 6.1 m, 是受台风"天兔"的影响<sup>[34]</sup>。 由云澳站 2006 年 4 月至 2007 年 11 月的测波资料 统计得出,该海域主要受涌浪影响,涌浪频率达 74.8%。常波向为 SE,频率为 25.2%,其次是ENE、 ESE、S、SSE和SSW,频率依次为13.8%、13.4%、 13.0%、11.7%和10.9%, SW和WSW向浪的频率 较低,依次为1.9%和0.6%,观测期间无WNW-NNW 向浪出现;强波向为 NE、ENE 和SE,平均波 高 H<sub>1/10</sub> 分别为 1.4 m、1.4 m 和 1.2 m; 波浪主要集 中在 SE 向的 0.25~0.50 m 之间,出现频率为15.6%; SW—WSW 向浪的频率较低且强度较低。

该海域潮汐类型为不正规半日潮,多年平均潮 差为 1.27 m<sup>[34]</sup>,属弱潮海域。近岸潮流最大流速为 0.79 m/s,平均流速为 0.27 m/s,余流最大流速为 0.16 m/s,平均流速为 0.09 m/s<sup>[35]</sup>,潮流作用较弱。 由于岛上无大型河流作用的影响,沉积物来源主要 为湾内沉积物和少量地表径流输沙,几乎不受来自 上游海岸或河流的沉积物影响,沉积物相对匮乏。

# 1.2 数据来源

本文采用数据主要包括实测海滩剖面、沉积物 和海图水深、实测水深、遥感影像数据,按照数据 成果类型划分为海滩剖面、沉积物、岸线和水深4 类,海滩剖面为2015年现场测量高程数据,沉积 物为 2015 年现场采集和历史文献资料收集数据, 岸线为1970-2022 年遥感影像提取岸线数据,水 深数据为 2010 年和 2016 年的海图水深及 2021 年 的实测水深,如表1所示。2015年10月,对南澳 岛前江湾海滩进行海滩剖面地形测量和表层沉积物 样品采集,站位分布如图1所示。海滩剖面调查范 围包括潮上带和潮间带,从后滨堤脚固定起点测至 当日最低潮位时的涉水最深处。根据多年大潮平均 高潮位时海陆分界痕迹线及地形环境特征,由海滩 上较明显的贝壳碎屑痕迹线界定砂质岸线,在岸线 和剖面线上沿程每隔一定距离进行定位和取样, 勺 取采集高潮线和剖面地貌特征点的表层沉积物,并 于剖面地形变化较大区域加密测点。采用中海达V90 RTK - GPS (Real - Time Kinematic difference Global Positioning System)进行经纬度及高程测量,海滩 剖面控制点高程设置为0m,平面坐标系设置为 WGS84 大地坐标系,测点达到固定解后记录数据, 平面定位精度优于 0.2 m, 高程精度优于 10 cm。在 室内应用筛分法和激光粒度分析法的综合法,对沉 积物样品进行粒度分析,筛分法用于粒径大于 0.063 mm的沉积物,而激光粒度分析法用于粒径小 于 0.063 mm 的沉积物,实验程序遵循《海洋调查 规范: 第8部分 海洋地质地球物理调查》(GB/T 12763.8-2007)39,分析获得各组分质量百分比,采 用 Folk-Ward 公式<sup>[37]</sup>计算中值粒径  $M_Z$ 、分选系数 $\sigma_i$ 、 偏态 Ski 和峰态 Kgi 等粒度参数,并采用 Folk 分类 方法<sup>[38]</sup>进行沉积物分类。同时,收集了1970—2022

47

年不同历史年代的遥感影像数据和水深数据以分析 岸线变迁与水下地形变化。遥感影像数据来源于美 国地质调查局KH(KeyHole)卫星影像<sup>[31]</sup>、法国国 家空间研究中心 SPOT 卫星影像<sup>[32]</sup>和谷歌地球影像。 水深数据来源于海图和实测资料收集,其中,2021 年实测水深范围覆盖前江湾 5 m 水深以内海域,以 上水深数据的基准面均为当地理论最低潮面。

表1 不同数据来源分类

数据类型	获取途径	来源	测量时间			
剖面高程	实测	现场测量的海滩剖面站点 15个	2015年10月			
沉积物粒度	实测	现场采集的沉积物样品 6个	2015年10月			
	资料收集	文献[35]	2008年1月			
岸线	影像提取	USGS 1970—1980 年 0.6~9 m 分辨率 KH 卫星影像[3]	1970年、1974年、1980年			
		CNES 1986—2015 年 5 m 分辨率 SPOT 卫星影像 <sup>[32]</sup>	2003年、2005年			
		谷歌地球 2010—2022 年 0.6 m 分辨率历史遥感影像	2010年、2013年、2016年、2019年、2022年			
水深	海图提取	中国海事局编号为 81101、比例尺为 1:60 000 的海图	2010年、2016年			
	资料收集	南澳岛前江湾海岸带修复项目地形测量资料	2021 年			

# 2 研究方法

#### 2.1 海岸线提取与变化速率计算

本文根据研究区岸线特征和野外调查经验进行 人工目视解译提取海岸线,该方法应用较为广泛且 有较成熟的研究成果<sup>[14,39]</sup>,其精度优于自动解译水 边线潮位校正方法<sup>[14]</sup>。由海域潮汐特征和海滩剖面 地形特征可知,研究海滩的海岸线在短周期内较稳 定,受涨落潮差影响较小,海滩长约 790 m,干滩 面宽约 30 m,所采用遥感影像分辨率在 0.6~9 m, 可用于评估长周期的岸线变迁。因此,本文采用目 视解译,以光谱反射率不同的亮白干沙区域与灰暗 潮间带的分界线作为解译标志提取不同时期的高潮 海岸线。在 ArcGIS 平台下对原始的 KH 和 SPOT 历 史遥感影像进行校正配准后提取海岸线。

本文采用了美国地质调查局推荐的数字岸线分 析系统(Digital Shoreline Analysis System, DSAS)在 ArcGIS 平台下自西向东生成了 76 条断面(断面间 距 10 m),其中,西侧切线段海滩标记为 T01~T26, 中部过渡段海滩标记为 T27~T45,东侧弧形段海滩 标记为 T46~T76。对于每一条断面多条岸线长周期 蚀淤变化速率计算,采用了终点变化速率(End Point Rate, EPR)和线性回归变化速率(Linear Regression Rate, LRR)方法;对于两条岸线长周期变 化速率计算,采用了 EPR 方法,具体计算过程详 见文献[40]。

#### 2.2 沿岸输沙计算

砂质海岸的长期岸滩演变主要是由沿岸输沙引起,而沿岸输沙主要是由于波浪斜向入射造成的<sup>[41]</sup>。 本文采用《海港水文规范》(JTS142—2—2013)<sup>[42]</sup>的 波能流法公式计算波浪作用下的沿岸输沙,该方 法将沿岸输沙率与作用在海岸上的波功率联系起 来,考虑了沉积物粒径和波陡的影响,考虑因素较 全面,有较多的实验室资料和现场资料作为依据, 应用较为普遍,例如华南岬湾海滩沿岸输沙计 算<sup>[17,21]</sup>。沿岸输沙率计算公式如下。

$$Q = 0.64 \times 10^{-2} K \delta_0 H_b^2 C_b n_b \sin 2\alpha_b \tag{1}$$

$$K = \left(3\ 500\frac{D_{50}}{D_{-2}^{4}+2}\right)^{(11-100\delta_{0})/10}$$
(2)

$$n_b = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{\frac{4\pi d_b}{L_b}}{\sinh \frac{4\pi d_b}{L_b}} \right)$$
(3)

式中,Q为单位时间沿岸泥沙输沙率; $\delta_0$ 为深 水波陡, $\delta_0 = H_0/L_0$ , $H_0$ 为深水波高, $L_0$ 为深水波 长; $H_b$ 为破碎波高; $C_b$ 为破碎波速, $C_b = L_b/T$ ; $L_b$ 为破碎波长;T为波周期; $\alpha_b$ 为波浪破碎时波峰线 与等深线的夹角;K为输入系数,与 $\delta_0$ 、 $D_{50}$ 有关;  $D_{50}$ 为沉积物中值粒径; $n_b$ 为波浪动力系数,与 $d_b$ 、 $L_b$ 有关; $d_b$ 为破波水深。在以上公式中所有波高均用 均方根波高,可取平均波高的1.13倍,周期可采用 平均周期。该公式忽略了绕射效应的影响,即 $H_b = K_r$  $K_sH_0$ , $K_r$ 为折射系数, $K_s$ 为浅水变形系数,以上系 数可由斯奈尔定律、《海港水文规范》(JTS 145—22013)附录查表求得[41-42]。

# 2.3 岬湾海滩稳定岸线形态模型

由于受岬角的影响,进入岬间海湾的波浪发生 绕射,成为引起沿岸泥沙输运一个较为重要的因 素,而以往沿岸输沙及建立在沿岸输沙基础上的岸 线演变模式计算往往未考虑波浪绕射作用,对更大 的空间尺度和时间尺度(如10年以上)岸线演变 的预测会产生较大的误差<sup>[41]</sup>,海滩研究人员通过对 大量原型海湾的观测归纳和实验室的研究总结出岬 间海湾平衡形态规律,为研究更大时空尺度岬湾海 滩演变提供了有效的方法。其中,基于此的抛物线 模型对于岬湾海滩的动态平衡和不稳定状态的判 定较为准确<sup>[9,13,43]</sup>,可指导分析造成侵蚀或淤积的根 源<sup>[44]</sup>,探讨海岸工程对沙滩的影响等<sup>[45]</sup>,获得了海 岸研究和工程界的广泛认同和采用<sup>[13]</sup>。该抛物线模 型的二阶多项式方程形式如下<sup>[9]</sup>。

$$\frac{R_n}{R_0} = C_0 + C_1 \cdot \left(\frac{\beta}{\theta}\right) + C_2 \cdot \left(\frac{\beta}{\theta}\right)^2 \tag{4}$$

式中, *R*<sub>n</sub> 为海滩上任意一点到极点的距离,即极半径; *R*<sub>0</sub> 为上下两岬角的距离,即控制线长度; β 为控制线与优势波峰线之间的夹角; θ 为极半径与优势波峰线的夹角,即极角; *C*<sub>0</sub>、*C*<sub>1</sub>、*C*<sub>2</sub>为β的函数,由 27 个原型和实验模型海湾经回归分析所得, 其模型示意图如图 3 所示。KLEIN A H F 等<sup>[43]</sup>开发 了以抛物线模型为基础的可视化软件 MEPBAY,该 模型软件已在大量实际天然海滩和人工沙滩的工 程案例中得到成功应用<sup>[11-14,43-45]</sup>。相关应用研究案 例表明该模型中上岬角控制点选取应考虑岛礁及 水下礁坪,可应用于有离岸岛情况下的海湾<sup>[13]</sup>。本



图 3 抛物线模型示意图(改自文献[43])

文研究的前江湾和抛物线模型理论原型岬湾海滩 环境类似,因此,可以模拟预测其海滩的长周期 演变。

# 3 海滩沉积与冲淤演变特征

#### 3.1 海滩沉积特征分析

前江湾自西向东依次为斜坡式海堤人工岸线、 砂质海滩自然岸线和直立式码头人工岸线,海滩走 向接近 WNW—ESE,长约 795 m,后方的路堤护 岸、台阶、观海平台和观景亭等构筑物占据部分后 滨空间,海滩缺乏沙丘、防护林等自然防护体系, 如图 4 所示。海滩剖面朝向 SSW,宽度约 26.8 m, 呈上凹形,平均坡度约 8.6°,后滨滩肩、滩坎发育 不明显,由陆向海坡度先减缓后变陡,前滨滩面较 陡,尤其低潮带前缘明显变陡,如图 5 所示。

粒度是沉积物的基本属性,沉积物粒度的空间 分布是由各种海岸动力、沉积过程综合作用的结 果,可反映沉积物输移模式和沉积动力环境演变。 平均粒径反映了沉积介质的平均动能,分选系数反 映了沉积介质载荷的筛选能力,偏态反映了颗粒频 率分布的不对称程度和尖锐程度<sup>[35]</sup>, MCLAREN P<sup>[46]</sup> 基于粒度参数(平均粒径、分选系数、偏态)建立 了一维粒度趋势模型, GAOS等<sup>[47]</sup>在其基础上开发 了二维粒度趋势分析模型,沉积物在运移方向上趋 于分选变好、粒径变细且更加负偏和分选变好、粒 径变粗且更加正偏2种类型粒度趋势<sup>48</sup>。本研究区海 滩剖面潮间带沉积物以浅黄色细砂为主,中值粒径 由陆向海先减小后增大,最大值出现在潮上带,约 0.35 mm, 最小值出现在潮间带中潮带, 约 0.20 mm, 剖面的平均中值粒径约 0.26 mm, 潮上带和潮间带 低潮带沉积物类型为含砾砂,其他为砂,说明潮上 带和潮间带前缘沉积动力环境相对较强,粒径较粗 的剖面位置相对较陡, 粒径与坡度沿剖面变化趋势 基本一致; 偏态均为正偏, 说明沉积物以粗粒成分 为主; 峰态除潮上带为中等外, 其他均为窄, 说明 潮间带整体所处环境的改造作用较明显, 而潮上带 受波浪环境的改造作用较弱;分选除潮间带中潮带 为中等外,其他均为较差,说明剖面所处动力作用 波动程度较大。海滩东、西两侧沉积物中值粒径接



图 4 前江湾海岸类型分布(拍摄于 2015 年 11 月)



近,约 0.23 mm,东侧粗粒成分比例较大,分选相 对较好,见表 2。海湾中部相对两侧岸段具有较粗 的沉积物粒径和较强的波浪作用,与中部岸段垂直

的 SSW 向波浪是塑造海滩平面形态的主要动力。

# 3.2 岸线变迁分析

采用 EPR 和 LRR 方法分别计算了 1970—2022 年前江湾海岸线的长期演变情况。EPR 方法的结果 表明,44 条断面发生侵蚀(占 57.89%),32 条断 面发生淤积(占 42.11%)。西侧切线岸段(T01~ T26 断面)发生侵蚀,平均侵蚀速率为 0.39 m/a, 最大侵蚀速率为 0.46 m/a;东侧弧形岸段(T46~ T76 断面)发生淤积,平均淤积速率为 0.15 m/a, 最大淤积速率为 0.24 m/a,见图 6(a)。LRR 方法的 结果表明,40 条断面发生侵蚀(占 52.63%),36条

样品位置	中值粒径	粒度参数			粒组百分含量/%				沉积物类型
	Mz/mm	偏态 Sk <sub>i</sub>	峰态 Kgi	分选系数 $\sigma_i$	砾	砂	粉砂	黏土	- (Folk 分类)
砂质岸线西端	0.230	0.242	1.268	1.034	0.000	93.795	5.357	0.309	砂
剖面潮上带	0.354	0.126	1.037	1.534	0.866	91.769	7.127	0.231	含砾砂
剖面潮间带高潮带	0.248	0.180	1.272	1.239	0.000	92.368	7.198	0.434	砂
剖面潮间带中潮带	0.203	0.147	1.117	0.869	0.000	96.030	2.750	1.210	砂
剖面潮间带低潮带	0.243	0.216	1.379	1.296	0.258	91.457	6.180	0.382	含砾砂
砂质岸线东端	0.229	0.175	1.285	0.922	0.000	95.547	1.915	0.224	砂

表 2 海滩沉积物粒度特征

断面发生淤积(占47.37%)。西侧切线岸段(T01~ T26 断面)发生侵蚀,平均侵蚀速率为 0.29 m/a, 最大侵蚀速率为 0.43 m/a; 东侧弧形岸段 (T46~T76 断面)发生淤积,平均淤积速率为0.23 m/a,最大 淤积速率为0.31 m/a,见图6(b)。而过渡段以弱侵 蚀为主,平均侵蚀速率在 0.03~0.14 m/a。综上,两

种方法均揭示了前江湾近 50 年来在沿岸自西向东 方向上的"侵蚀--淤积"的空间变化特征,其岸线 变化趋势基本一致, 蚀淤量级接近, 但蚀淤岸段的 转换位置存在差异,与其不同拟合方法有关啊。本 文采用不同方法的计算结果与其他岬湾的研究结果 类似14,说明两种方法能够科学有效地计算岸线在



(a) EPR 方法

图 6 EPR 方法和 LRR 方法计算的 1970—2022 年前江湾海岸线蚀淤结果

时间和空间上的变化速率。

以下利用 EPR 方法计算分析不同时段海岸线 的蚀淤变化。1970—1980年,前江湾沿岸填海造 地、前江码头、前江渔港码头等海岸工程未建设, 发生淤积的岸段集中在东侧弧形岸段(T42~T76 断面),平均淤积速率为0.30 m/a,东端 T76 断面 出现最高淤积(0.62 m/a)。西侧其他 41 条断面发 生侵蚀, 切线岸段(T01~T26 断面)平均侵蚀速率 为 1.05 m/a, 观景亭西侧 T18 断面出现最高侵蚀 (1.60 m/a)。过渡岸段发生弱侵蚀,岸线位置相对 较稳定。这一时期与1970-2022年趋势对比,差异 主要表现为侵蚀和淤积速率显著增大,最大的侵蚀 和淤积位置均向东偏移,如图7(a)和图7(b)所示。

1980-2003年,发生淤积的岸段有切线岸段东部 (T14~T26 断面)、过渡岸段(T27~T45 断面)、弧形 岸段(T46~T76断面),平均淤积速率为0.44 m/a, 弧形岸段中部 T58 断面出现最高淤积(0.79 m/a)。 切线岸段西部其他 13 条断面发生侵蚀,平均侵蚀 速率为 0.07 m/a, 西端 T01 断面出现最高侵蚀 (0.17 m/a)。这一时期与 1970-2022 年趋势对比, 差异主要表现为侵蚀范围和速率显著减小,淤积范 围和速率显著增大, 切线岸段东部岸段和过渡岸段 均由侵蚀转为淤积,平均淤积速率为0.21 m/a,如 图 7(c)和图 7(d)所示。

2003-2013年, 整个岸段 76条断面均发生侵 蚀,平均侵蚀速率为1.09 m/a,沿岸自西向东侵蚀 速率差异不大,切线岸段侵蚀速率相对较大,观景 厅西侧 T19 断面出现最高侵蚀(1.29 m/a)。这一时 期与1970-2022年趋势对比,差异主要表现为整体 处于侵蚀状态,弧形岸段由淤积转为侵蚀,平均侵 蚀速率为 0.74 m/a, 另外, 与 1980-2003 年相比, 弧 形岸段开始发生显著侵蚀,如图 7(e)和图 7(f)所示。

2013-2022年,除断面 14 发生淤积(0.02 m/a) 外,其他75条断面均发生侵蚀,平均侵蚀速率为 0.24 m/a,沿岸自西向东侵蚀速率差异较大,弧形岸段 侵蚀速率相对较大,弧形岸段东侧 T69 和 T70 断面出 现最高侵蚀(0.59 m/a)。这一时期与 2003—2013 年 蚀淤趋势基本一致,但是整体侵蚀速率减缓,弧形岸 段侵蚀程度强于切线岸段,如图 7(g)和图 7(h)所示。

综上,不同时段海岸线的演变情况表明,前江 湾海滩岸线对东南沿岸前江码头等海岸工程的响应 时间自东向西滞后,在海岸工程建设初期(1988— 2003年), 向海突出的前江码头的控制"岬角"作 用对海滩的庇护等影响较明显,后期建设的前江渔



g)2013—2022 平



(左侧为海岸线蚀淤速率等值线;右侧为海岸线变化速率柱状图,正值表示淤积,负值表示侵蚀)

港码头勾头防波堤的影响尚未显著,而前江码头和 渔港码头防波堤建设完成(2003年)后,弧形岸段 蚀淤趋势发生逆转(淤积-侵蚀),如图 8(a)所示。 同时,对 2013—2019 年岸线的演变过程分析表明, 2013—2016年,补砂工程短期内促使岸线向海显著 推进,海滩岸线迅速做出调整,整体表现为以淤积 为主;而 2016—2019年,整体又处于侵蚀状态, 岸线迅速动态调整至原来位置,如图 8(b)所示。

# 3.3 水下地形演变分析

根据前江湾近十年来等深线变化分析,其水下 地形演变主要呈现以下特点。

2010—2016年,弧形段0m等深线蚀退明显, 最大蚀退约140m,水下岸坡较陡,而切线段和过 渡段0m等深线淤进较明显,最大淤进约120m, 与补砂位置基本一致,如图 9(a)所示;2m 等深线整体蚀退,弧形段最大蚀退约 200m,大于其他岸段,如图 9(b)所示;5m 等深线延伸至海湾上、下岬角,弧形段淤进约 300m,切线段蚀退约 110m,如图 9(c)所示;10m 等深线分布于湾外,走向与外海优势波峰线基本平行,整体表现为蚀退趋势,其变化基本不受湾内输沙影响,如图 9(d)所示。

2016—2021 年, 弧形段 0 m 等深线淤进约 30 m, 水下岸坡有所变缓, 而切线段和过渡段 0 m 等深线蚀退明显, 退至 2010 年的位置; 切线段和 弧形段 2 m 等深线蚀退约 100 m, 过渡段 2 m 等深 线淤进约 60 m, 与补砂位置基本一致; 5 m 等深线 整体蚀退, 蚀退距离自东向西逐渐减小, 弧形段蚀 退距离普遍在 130 m 以上。

Ν

A

60





图 9 前江湾海域 0 m、2 m、5 m 和 10 m 等深线变化

(水深基准为当地理论最低潮面; 2021 年实测水深范围未覆盖 10 m 等深线而缺失)

综上,除了2016年补砂工程短期内缓解岸滩 侵蚀和冲刷强度外,近十年来海湾整体表现为近岸 水下地形冲刷,与3.2节岸线演变分析结果一致。

讨 论 4

海平面上升、风暴潮加剧、泥沙来源减少,以 及无序的海岸工程等自然和人为因素主要通过增强 海洋动力、减少沿岸泥沙和降低海岸稳定性3个原 因来加剧海岸侵蚀[28]。从大的时空尺度的岸线演变 来看,前江湾弧形岸段在 2003 年前后发生了趋势 逆转(淤积-侵蚀)。1990-2003年, 该海湾东南 侧建设了虾公尾沿岸围填海、前江码头、渔港码头 主要海岸工程,以上海岸工程改变了前江湾岬湾海 滩的平面形态,影响了海滩的蚀淤演变,且该工程 对越靠近东侧的岸线影响越大,如图7(h)所示。基 于此,本文从水动力、沿岸输沙和稳定岸线形态方 面来探讨以上海岸工程对研究区岬湾海滩冲淤演变 第2期

的影响机制。

# 4.1 水动力和沿岸输沙分析

研究区属于强浪弱潮海岸,常浪条件下,潮流 输沙功能不强,一般的台风暴潮对沙滩的毁坏作用 可通过常浪自然作用恢复,其引起的海滩冲淤变化 通常是可逆的,由2.2节岸线演变分析可知,2013 年9月的超强台风"天兔"引起的巨浪对海滩地形 的破坏在常浪循环作用下可得到恢复。现代海平面 上升及其引起的岸线缓慢蚀退这一全球现象<sup>[21]</sup>对该 研究区岸滩蚀淤趋势逆转的作用有限。波浪是前江 湾砂质海岸演变的主要驱动力,长期岸滩演变主要 是由沿岸输沙所造成的,因此,重点分析近岸波浪 的沿岸输沙及沿岸输沙影响海岸侵蚀的作用机制, 并作为岬湾海岸稳定岸线形态分析的基础。

研究区岬湾海滩呈半封闭,WNW—ESE 走向, 湾口为 SW 向,受东南侧岬角影响,北向和东向波 浪对海滩作用有限,故选取了 ESE—SE—SW 向波 浪进行波浪动力分析和沿岸输沙计算。沿岸输沙主要 是由波浪斜向入射引起,当波浪(S、SW、WSW) 较大时,使前江湾大片滩地处于破波带范围,泥沙

被掀起, 波浪破碎产生的沿岸流成为沿岸输沙的主 要动力。鉴于岸线倾斜角、等深线、沉积物粒度等 在弧形段和切线段存在差异,分别计算了不同岸段 的沿岸输沙,按照2.2节的波能流法分别计算各波 向每级波浪的沿岸输沙率及统计期内的总输沙率和 净输沙率。计算结果表明, 前江湾切线岸段向WNW 向输沙率为 13.18 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/a, ESE 向输沙率为 2.76 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/a, 净输沙率为 10.42×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/a, 方向偏WNW; 弧形岸段向 WNW 向输沙率为 10.84×104 m³/a, ESE向 输沙率为 1.71×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/a,净输沙率为 9.13×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/a, 方向偏 WNW, 见表 3 和表 4。可见, 前江湾沿岸 存在一股自东向西的沿岸运移的泥沙流,与相对封 闭的青澳湾的沿岸输沙量四相比,其沿岸输沙量较 大。弧形岸段向西的净输沙率小于切线岸段,造成 切线岸段泥沙来源补给不足而蚀退。海湾东南向海 突出的码头防波堤直接阻断了西向的沿岸输沙,造 成弧形岸段泥沙来源锐减,其岸线开始自调整响 应,呈现蚀退。可见,沿岸输沙的沿程变化及其引 起的侵蚀与上述岸线和等深线变化的分析结果是一 致的。

表 3 前江湾切线岸段沿岸输沙

单位: m<sup>3</sup>·a<sup>-1</sup>

波高/m	ESE 向沿岸输沙	SE 向沿岸输沙	SSE 向沿岸输沙	S 向沿岸输沙	SSW 向沿岸输沙	SW向沿岸输沙	WSW 向沿岸输沙	W向沿岸输沙
0.5	+8 015	+15 672	+3 328	+1 370	-2 410	-344	-111	-118
1.5	+45 186	+40 346	+6 205	+8 822	-11 635	-8 069	-2 963	-1 566
2.5	0	0	+1 248	+1 068	-416	0	0	0
>2.5	0	0	+570	0	0	0	0	0
合计	+53 200	+56 018	+11 351	+11 260	-14 461	-8 414	-3 074	-1 685

注: "+"表示沿岸输沙方向为 WNW 向; "-"表示沿岸输沙方向为 ESE 向。

```
表 4 前江湾弧形岸段沿岸输沙
```

单位: m<sup>3</sup>·a<sup>-1</sup>

波高/m	ESE 向沿岸输沙	SE 向沿岸输沙	SSE 向沿岸输沙	S 向沿岸输沙	SSW 向沿岸输沙	SW 向沿岸输沙	WSW 向沿岸输沙	₩ 向沿岸输沙
0.5	+3 332	+2 139	+9 464	+5 129	-2 311	-47	-46	-58
1.5	+20 075	+6 555	+17 494	+33 725	-10 708	-1 311	-1 316	-821
2.5	0	0	+4 074	+4 109	-509	0	0	0
>2.5	0	0	+2 284	0	0	0	0	0
合计	+23 407	+8 694	+33 316	+42 963	-13 528	-1 358	-1 363	-879

注: "+"表示沿岸输沙方向为 WNW 向; "-"表示沿岸输沙方向为 ESE 向。

南澳岛南部海域沉积物自西南向东北方向运 移<sup>[35]</sup>,使得泥沙运移在前江湾西南受阻落淤,前江 湾南部海域海底沉积物中砾石组分和砂组分含量较 高、平均粒径较粗,与海滩沉积物类型与组分粒度 特征相似,表明前江湾海滩物质主要来源于湾内海 床沉积物。沿岸输沙不均衡引起的海岸侵蚀造成其 滩面侵蚀缩窄,坡度变陡,沉积物粒径趋向变粗以 适应其沉积动力环境。海滩地形、沉积物调查表 明,研究区滩面坡度高达 8.6°,而海滩表层含砾砂 和砂质沉积物中值粒径为 0.20~0.35 mm,属中砂和 细砂,滩面坡度与沉积物粒度显得不相协调,KING CAM<sup>49</sup>利用来自条件十分不同的27个海滩的数据 分析表明海滩坡度与粒度最相关,与波能之间相关 系数同样高达99%,与潮差、泥沙分选无明显相 关,由此得出滩面坡度经验方程(式(5)),该线性 方程可以解释坡度变率的71.82%,坡度除了与粒 度正相关外,还与波能负相关。前江码头防波堤等 海岸工程降低了海湾的开敞性,使海滩位于受庇护 位置,进入湾内的波长和波能有所衰减,将导致海 滩坡度增大。

$$Z = 407.71 + 4.20U - 0.71V \tag{5}$$

式中, U是以 $\phi$ 单位表示的泥沙粒度; V是波能的对数; Z是海滩坡度。

#### 4.2 岬湾海滩稳定岸线形态分析

借助 MEPBAY 软件[43]预测评估了海岸工程建设 前后前江湾长期的稳定岸线平面形态。在前江码 头、渔港码头主要海岸工程建设前,前江湾基本处 于自然演变和自然调节状态。虾尾礁附近大片礁石 突出海面,对海滩起到了岬角的保护作用,如图 10(a) 所示。选取虾尾礁外缘 A 点为上岬角控制点,海滩 下游界限 D 点为下岬角控制点, DE 为下游岸线的切 线,则 AD 为控制线,决定最终海湾形状的唯一变量 为优势波峰线与控制线的夹角 (β)<sup>99</sup>,其合理取值范 围为 20°~80°<sup>[44]</sup>,此处 β = 46°。拟合得到静态平衡 岸线为 DA'(蓝色),预测的切线段岸线较实际岸线 略向陆偏离,预测的弧形段岸线较实际岸线向海偏 离。因为来自 SE 向的强浪经虾尾礁绕射后, 向岸 线方向的波浪提前破碎,波峰线发生变形,到达湾顶 弧形岸线处的波向线与岸线呈钝角相交, 泥沙由切 线段向弧形段输移,弧形段发生堆积,而切线段发 生侵蚀,同时切线段受强的入射波的直接冲刷和侵 蚀, 弧形段的折射作用使波能辐散而促进淤积。在 未到达静态平衡岸线前,弧形岸段将持续堆积,切 线岸段将持续侵蚀,与岸线变迁的实际结果一致。

在前江码头等海岸工程建成后,向海突出延伸 的码头构成新的人工岬角,起到更强的遮蔽作用, 促使海湾进入自然调节和人工控制相互作用的阶 段。在该阶段,以前江码头顶端 B 点为上岬角控制 点,如图 10(b)所示,其他 2 个控制点不变,此时 β = 59°,拟合得到静态平衡岸线为 DB'(绿色), 较实际岸线向海偏离,理论上岸线将堆积到 DB'后 才能达到静态平衡,但事实上处于侵蚀后退状态。 说明该静态平衡岸线预测结果不能准确判断海岸的 平衡状态,推测主要有两方面的原因。一方面,因 码头内侧分布的向海突出的防波堤等构筑物进一步 改变来自码头岬角波浪的绕射效果,波峰线发生偏 转。为对比分析,将上岬角控制点选在前江渔港码 头向NW 延伸的勾头防波堤头部 C 点,如图 10(b) 所示,其他2个控制点依旧不变,拟合得到静态平 衡岸线为 DC'(红色),较实际岸线向陆地偏离, 岸线将蚀退,与岸线变迁的实际趋势相一致,相关 岸线稳定评估研究以同样的上岬角控制点预测得到 类似趋势的静态平衡岸线障。由于经码头绕射后的 波浪在防波堤再次发生折射和绕射,波浪提前破 碎,波峰线发生变形,波向线与湾顶岸线呈锐角相 交, 泥沙由弧形段向切线段运移, 引起弧形段侵 蚀。2.2 节海岸线演变对前江码头和前江渔港码头 防波堤工程的响应时间的滞后也验证了该推论。另 一方面,海滩系统整体泥沙净亏损。从沿岸输沙计 算结果和岸滩演变结果来看,由于沿岸输沙的不均





(图(a)底图为美国地质调查局 KH 历史影像,拍摄于 1970年7月<sup>[31]</sup>;
 图(b)底图为谷歌地球,拍摄于 2022年12月;蓝点线DA'、绿点线 DB'和红点线 DC'分别对应控制点 A 点、B 点和 C 点的静态平衡岸线)

衡而遭受侵蚀,自东向西的沿岸输沙因码头防波堤 海岸工程而受阻,造成沿岸泥沙流失,同时,水深 0m线向海岸线靠拢意味着海滩前滨宽度变小而加 剧海滩坡度,等深线的向岸迁移和水下岸坡变陡都 显示出区域沉积物存在明显的减少,从而导致海岸 沉积物不仅表现为冲淤再分配,而且表现为整体性 的侵蚀。

综上,前江湾的弧形岸段蚀淤趋势的逆转的主 要原因是东南沿岸码头防波堤海岸工程阻断了沿岸 输沙和降低了岬湾海岸稳定性,人类建造海岸工程 引起的岬角变化和沉积物亏损使得海岸失衡,导致 该岬湾海滩平面形态处于不稳定状态,沿岸流控制 着泥沙自东向西搬运,岸线整体侵蚀后退,试图重 塑其岬湾海滩新的平衡岸线平面形态。

5 结 论

本文以粤东重要的旅游海岛南澳岛南部的前江

湾为研究区,基于滩面调查、遥感影像与历史海图 和实测水深数据,开展了1970—2022年岬湾海滩 的长期冲淤演变特征研究,从水动力、沿岸输沙、 稳定岸线形态等方面探讨了人类活动对海滩冲淤演 变的影响机制,主要得出如下结论。

(1)在东南沿岸码头防波堤海岸工程建设前后前江湾海岸线演变呈现不同的空间变化特征,切线岸段前期侵蚀、后期侵蚀加剧,弧形岸段前期淤积、后期侵蚀,蚀淤趋势发生逆转。

(2)前江湾海岸线对海岸工程的响应时间自东向西滞后,海岸工程影响岸滩演变的主要原因是造成了岬角位置的变化和阻挡了自东向西的沿岸输沙,导致该岬湾海滩处于不稳定状态,区域沉积物的亏损加剧了海岸失衡。

(3)前江湾自东向西的沿岸输沙的不均衡控制 着切线岸段和弧形岸段海岸线演变的空间特征,海 岸线整体侵蚀后退以重塑岬湾海滩新的平衡岸线平 面形态。

## 参考文献:

- [1] KOMAR P D. Beach processes and sedimentation[M]. 2nd ed. New Jersey: Prentice Hall, 1998.
- [2] INMAN D L, NORDSTROM C E. On the tectonic and morphologic classification of coasts[J]. Journal of Geology, 1971, 79(1): 1–21.
- SHORT A D, MASSELINK G. Embayed and structurally controlled beaches[M]//Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics. New York: Wiley, 1999: 230–250.
- [4] 王文介,杨雪舞.华南沿海海滩状态和演变[J].热带海洋,1996,15(4):9-16.
- [5] DAIZJ, LIUJT, LEIYP, et al. Patterns of sediment transport pathways on a headland bay beach-Nanwan Beach, South China: A case study[J]. Journal of Coastal Research, 2010,26(6): 1096–1103.
- [6] 孙杰, 詹文欢, 姚衍桃, 等. 广东省海岸侵蚀现状及影响因素分析[J]. 海洋学报, 2015, 37(7): 142-152.
- [7] 李春初. 华南港湾海岸的地貌特征[J]. 地理学报, 1986, 41(4): 311-320.
- [8] WRIGHT L D, SHORT A D. Morphodynamic variability of surf zones and beaches: A synthesis[J]. Marine Geology, 1984, 56: 93-118.
- [9] HSU J R C, EVANS C. Parabolic bay shapes and applications[C]//Thomas Telford. ICE Proceedings. London: ICE Publishing, 1989: 557-570.
- [10] 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.
- [11] 于吉涛,陈子燊.华南岬间砂质海岸稳定性研究[J].海洋工程,2010,28(2):110-116.
- [12] 谢华亮,韩志远,左书华,等.抛物线模型在粤东靖海湾稳定性分析中的应用[J].水道港口,2018,39(3):269-274.
- [13] 程武风,陈沈良,胡进.海南万宁岬湾海岸海滩稳定性研究[J].海洋工程,2017,35(1):121-128.
- [14] 朱萝云,刘婷婷,凡仁福,等. 1986—2019年粤东企望湾砂质海岸线演变过程与驱动机制研究[J]. 海洋学报, 2022, 44

(7): 82–94.

- [15] 夏东兴,王文海,武桂秋,等.中国海岸侵蚀述要[J].地理学报,1993,48(5):468-476.
- [16] 詹文欢,姚衍桃,孙杰.广东省海洋环境资源基本现状[M].北京:海洋出版社,2013.
- [17] 李平,杜军,张志卫,等.粤东南澳岛青澳海滩侵蚀退化风险评价及其安全调控[J].海洋科学进展,2020,38(1):171-181.
- [18] 何泽良, 帅力. 广东台山岬湾砂质海岸侵蚀影响因素[J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(2): 31-36.
- [19] 刘星璐,徐昇,罗小峰,等.大鹏湾岬湾型海滩季节性变化特征及原因分析:以官湖海滩为例[J].海洋工程,2022,40
  (4):44-52.
- [20] 甯子豪,蒋昌波,隆院男,等.1976—2021年南澳岛海岸线时空演变及驱动因素分析[J].海洋学研究,2023,41(2): 71-82.
- [21] 蔡锋. 华南沙质海滩动力地貌过程[D]. 青岛:中国海洋大学, 2005.
- [22] 丘元禧,冯国荣,吴起俊,等.广东省南澳岛的几个地质问题[J].中山大学学报(自然科学版),1985,2:88-98.
- [23] 周巨锁,邓松,杨琴,等.中国海域海岛地名志:广东卷.第一册[M].北京:海洋出版社,2020.
- [24] 杨冰洁,余凤玲,郑卓,等.南澳岛青澳湾沉积物粒度与烧失量指示的全新世沉积环境变化[J].海洋地质与第四纪地质, 2015, 35(6): 41-51.
- [25] 王文介. 中国南海海岸地貌沉积研究[M]. 广州: 广东经济出版社, 2007.
- [26] 黄良民, 沈萍萍, 刘春杉, 等. 广东省近海海洋综合调查与评价总报告[M]. 北京: 海洋出版社, 2017.
- [27] 广东省地名委员会办公室. 广东省海域地名志[M]. 广州: 广东省地图出版社, 1989.
- [28] 季子修. 中国海岸侵蚀特点及侵蚀加剧原因分析[J]. 自然灾害学报, 1996, 5(2): 65-75.
- [29] 李强, 陈现荣. 南澳前江码头大型方块的陆上出运[J]. 珠江水运, 1999, 7: 44-45.
- [30] 陆明生, 郭定林, 胡英杰. 南澳前江码头工程安全设计[J]. 水运工程, 2006, 4: 38-40.
- [31] United States Geological Survey (USGS). A collection of declassified military intelligence photographs from the KH-7 surveillance and KH-9 mapping satellite systems in digital format[DS/OL]. (2018-08-13)[2023-08-03]. https://earthexplorer.usgs.gov/.
- [32] Centre National d'Etudes Spatiales (CNES). SPOT images acquired by CNES's Spot World Heritage Programme[DS/OL]. (2023-08-03)[2024-04-12]. https://regards.cnes.fr/user/swh/modules/60.
- [33] 杨凤群,林苗青,翁永安.近 30a 影响南澳岛的热带气旋气候特征分析[J]. 气象水文海洋仪器, 2012, 29(2): 26-29.
- [34] 王平,黄财京,聂宇华,等.南海区海洋站海洋水文志: 1980-2018年[M].北京:海洋出版社, 2021.
- [35] 陈翰,陈忠,颜文,等.汕头近岸海域表层沉积物粒度特征及其输运趋势[J].沉积学报, 2014, 32(2): 314-324.
- [36] 国家海洋标准计量中心.海洋调查规范: 第8部分海洋地质地球物理调查: GB/T 12763.8—2007[S].北京: 中国标准出版 社, 2007: 6-9.
- [37] FOLK R L, WARD W C. Brazos River bar: A study in the significance of grain size parameters[J]. Journal of Sedimentary Research, 1957, 27(1): 3–26.
- [38] FOLK R L, ANDREWS P B, LEWIS D W. Detrital sedimentary rock classification and nomenclature for use in New Zealand[J]. New Zealand Journal of Geology and Geophysics, 1970, 13(4): 937–968.
- [39] DEL RIO L, GRACIA F J, BENAVENTE J. Shoreline change patterns in sandy coasts: A case study in SW Spain[J]. Geomorphology, 2013, (196): 252–266.
- [40] 丁小松,单秀娟,陈云龙,等.基于数字化海岸分析系统(DSAS)的海岸线变迁速率研究:以黄河三角洲和莱州湾海岸线为例[J].海洋通报,2018,37(5):565-575.
- [41] 李志龙. 华南岬间海湾沙质海岸平衡形态与侵蚀机制[D]. 广州:中山大学, 2006.
- [42] 中华人民共和国交通运输部. 海港水文规范: JTS 145-2-2013[S]. 北京:人民交通出版社, 2013: 141-147.
- [43] KLEIN A H F, VARGAS A, RAABE A L A, et al. Visual assessment of bayed beach stability with computer software[J]. Computer Geosciences, 2003, 29(10): 1249–1257.
- [44] 徐信辉, 庄振业, 曹立华, 等. 岬湾海滩静态平衡模式及其应用[J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(10): 1-11.
- [45] 童宵岭,时连强,夏小明,等.岬湾海滩沉积动力地貌研究[J].海洋地质前沿,2011,27(10):14-21.

- [46] MCLAREN P. An interpretation of trends in grain size measures[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1981, 51(2): 611–624.
- [47] GAO S, COLLINS M. Net sediment transport patterns inferred from grain-size trends, based upon definition of "transport vectors"[J]. Sedimentary Geology, 1992, 81(1/2): 47–60.
- [48] 褚智慧,王永红,庄振业,等.北戴河中海滩人工养护前后沉积物粒度变化特征[J].海洋地质前沿,2013,29(2): 62-70.
- [49] KING C A M. Beaches and coasts[M]. 2nd ed. London: Edward Arnold, 1972.

# Analysis on the Evolution and Mechanism of Headland-Bay Beaches in South China —A Case from Qianjiang Bay in the Nan'ao Island

# YANG Mingming, ZHANG Yifan, LI Xingyun, ZHOU Yuan

(Guangdong Center for Marine Development Research, Guangzhou 510220, China)

**Abstract:** In South China where headland-bay beaches are commonly developed along the coast and many beaches are currently facing erosion problems, the study of the erosion and accretion evolution characteristics and mechanisms of headland bay beaches has important practical significance. This study took Qianjiang Bay in the south of Nan'ao Island, an important tourist island in Guangdong Province, as the research area. On the basis of beach surveys, remote sensing image data, historical charts and measured water depth data, this study conducted research on the beach erosion and accretion characteristics from 1970 to 2022. This study also explored the impact of human activities on the beach evolution from the aspects of the hydrodynamics, the longshore sediment transport, and the equilibrium embayment planform. The results showed that, the beach evolution of Qianjiang Bay showed different spatial characteristics before and after the construction of the pier breakwaters along the southeast coast. The tangent bank section was eroded in the early stage and the erosion was intensified in the later stage, the arc bank section was silted in the early stage and eroded in the later stage. The change in the position of the headland and the obstruction of the longshore sediment transport caused by the human coastal projects were the main mechanisms affecting the beach evolution, causing the unstable planform of the headland-bay beach coastline. The loss of regional sediments also aggravated the coastal imbalance. The longshore sediment transport from east to west controlled the spatial characteristics of the coastline evolution.

Key words: South China; headland-bay beach; evolution; longshore sediment transport; parabolic shape model; Nan'ao Island