



北部湾大风江河口沙嘴动态变化过程

陈 益, 戴志军, 庞文鸿, 梁喜幸, 罗杰骏, 熊 媛

Dynamic variation of sand spit in the Dafeng River estuary, Beibu Gulf

CHEN Yi, DAI Zhijun, PANG Wenhong, LIANG Xixing, LUO Jiejun, and XIONG Yuan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2023102101>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

南海北部湾表层悬浮体分布规律

Surficial distribution of suspended sediment in Beibu Gulf of the South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(2): 10–18

茅尾海钦江河口光滩时空变化过程研究

Spatial-temporal variations of bare flats in the Qinjiang River estuary, Maowei Sea

海洋地质与第四纪地质. 2023, 43(3): 107–118

北部湾盆地涠西南凹陷灰岩潜山储层特征及分布规律

Characteristics of limestone buried-hills and their distribution in the Weixinan Depression of the Beibu Gulf Basin

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(1): 94–103

黄河口湿地时空变化过程及其主控因素

Tempo-spatial variation of wetlands at the Yellow River Mouth and its control factors

海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(1): 68–80

涌潮沉积揭示长江河口湾全新世最高海面

The sea-level highstand of the Changjiang River estuary in the Holocene revealed from tidal bore deposits

海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(3): 160–169

辽河口浅海湿地表层沉积物中正构烷烃的组成、分布及来源

Composition, distribution and origination of *n*-alkanes in surface sediments from shallow sea wetlands in the Liaohe River estuary

海洋地质与第四纪地质. 2025, 45(1): 18–28



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

陈益, 戴志军, 庞文鸿, 等. 北部湾大风江河口沙嘴动态变化过程 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2025, 45(2): 43-54.

CHEN Yi, DAI Zhijun, PANG Wenhong, et al. Dynamic variation of sand spit in the Dafeng River estuary, Beibu Gulf[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2025, 45(2): 43-54.

北部湾大风江河口沙嘴动态变化过程

陈益¹, 戴志军¹, 庞文鸿², 梁喜幸^{1,2}, 罗杰骏¹, 熊媛¹

1. 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200241

2. 广西北部湾海洋环境变化与灾害研究重点实验室, 钦州 535011

摘要: 沙嘴的快速变化过程直接关联河口地貌变迁, 影响陆海交汇带水沙交换, 因而沙嘴地貌的移动及驱动机制成为河口研究重点关注的内容之一。然而, 受限于监测资料获取的困难, 一直有较少工作涉及中—强潮河口沙嘴动力地貌演变。以北部湾大风江河口沙嘴为研究对象, 基于 1990—2021 年卫星遥感影像、2022 年 11 月实地采集的沙嘴表层沉积物以及区域水文资料, 分析中—强潮环境的大风江河口沙嘴演变特征及变化过程。结果表明: ①大风江河口沙嘴持续向西北延伸, 其中沙嘴宽度与面积呈洪季变大、枯季变小的季相变化特征; ②沙嘴沉积物主要来源为洪季的径流来沙, 沙嘴海侧顶部沉积物平均粒径最粗, 并向陆侧与中部、尾部逐渐变细。沉积物主要由海侧顶部向沙嘴中部及尾部方向输移, 使沙嘴持续向西北延伸。③波浪是控制大风江沙嘴长期形态演变的主要因素, 中—强潮环境下潮流作用是沉积物向岸输送、沙嘴持续向西北延伸的原因, 径流量的洪枯季显著差异是沙嘴宽度与面积洪季变大、枯季变小的主控因素。

关键词: 沉积物; 遥感影像; 河口沙嘴; 大风江河口; 北部湾

中图分类号: P736

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2023102101

Dynamic variation of sand spit in the Dafeng River estuary, Beibu Gulf

CHEN Yi¹, DAI Zhijun¹, PANG Wenhong², LIANG Xixing^{1,2}, LUO Jiejun¹, XIONG Yuan¹

1. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200241, China

2. Guangxi Key Laboratory of Marine Environmental Change and Disaster in Beibu Gulf, Qingzhou 535011, China

Abstract: The rapid change process of sand spit is directly related to the estuarine geomorphological migration with potential impacts on water and sediment exchange between land and sea. The movement and the driving mechanism of sand spit landform have received especial concerns. However, limited information is related to sand spit morphodynamics due to difficulties in obtaining monitoring data. Based on multi-satellite remote sensing images from 1990 to 2023, surface sediments collected in November 2022, and regional hydrological data, the evolution of the sand spit in Dafeng River estuary in Beibu Gulf, Guangxi, SW China over a medium-strong tidal environment were analyzed. Results show that ① the sand spit in the estuary exhibited continuous extension to the northwest, and the width and area of the spit featured seasonal variation with increased width in flood season and decreases in dry season; ② The main sediment source of the sand spit was from riverine material in flood season. The average grain size of sediments on top the spit seaside was the coarsest and then gradually became finer from sea to land, and to the middle and tail parts of the spit. The sediments were transported mainly from the top of the sediments seaside towards the middle and tail of the spit, so that the spit continued to extend northwestward; ③ Runoff from sand is the source of sediment in the spit, waves are the main factor controlling the long-term morphological evolution of the sand spit in the estuary. Tidal actions in mild-strong tidal environment are the driver to the sediment transport shoreward and the continuous northwestward extension of the sand spit. The significant difference in seasonal runoff was the main factor on the variations in width and area of the sand spit: greater in flood season and smaller in dry season.

Key words: sediment; remote sensing images; sand spit; Dafeng River estuary; Beibu Gulf

河口沙嘴是世界沿岸普遍存在的一种地貌形态。沙嘴通过降低波浪对海岸的影响, 有效保护沿

岸湿地和港口免受台风与风暴潮等灾害的破坏。同时, 沙嘴也是海鸟及大型底栖动物的居留场所,

资助项目: 国家自然科学基金重点基金“北部湾红树林滩涂响应陆海水沙变化的沉积动力过程”(41930537)

作者简介: 陈益 (1986—), 男, 博士研究生, 主要从事河口海岸动力沉积地貌过程研究, E-mail: 52263904009@stu.ecnu.edu.cn

通讯作者: 戴志军 (1973—), 男, 教授, 主要从事河海相互作用及生物动力地貌过程研究, E-mail: zjdai@sklec.ecnu.edu.cn

收稿日期: 2023-10-21; 改回日期: 2024-02-19. 张现荣编辑

具有重要的生态和经济价值^[1-4]。沙嘴大小形状各异,其扩张和移动极有可能会影响航道顺畅,沙嘴的延伸易造成河口堵塞,加剧内陆洪水灾难^[5]。此外,沙嘴的形成和发育与河口动态变化密切相关^[6],但沙嘴受径流、潮流及波浪等动力影响,极可能发生快速调整,进而影响河口轮廓与水沙环境改变。因此,河口沙嘴动力地貌的形成与驱动机制成为河口研究的核心内容之一。开展相关研究不仅可增进河口沙嘴形成与演变机制的认识,而且能为河口海岸安全与航道维护提供部分理论支持。

国内外对沙嘴地貌形态的提取技术经历了从地形图矢量化到遥感影像提取的快速发展过程。过去研究采用河口地形图、海图进行矢量化提取沙嘴范围与演变分析^[7],但底图的获取难度大,数据精度低,且矢量工作量导致生产效率低下。随着遥感影像的普遍应用,采用长时序卫星遥感影像,与基于遥感影像的图像处理、分类、提取技术实现快速提取长序沙嘴地貌变化过程^[8-11]。目前,随着高分影像的应用,对沙嘴地貌提取的效率与精度越来越高,基于多源高分辨率卫星数据实现对沙嘴高精度提取,更有利于沙嘴对水沙变化快速响应过程的研究^[12]。波浪被认为是控制沙嘴形态演变的主要因素,沙嘴面积增益变化是波高调节与泥沙输运的共同结果^[13],沙嘴的形成与持续演变依赖于沿岸和跨岸沉积物输运之间持续相互作用^[14]。此外,季节性洋流作用引起的沿岸沉积物输运也是导致沙嘴演化与输运的重要机制^[15];河口洪水、地震、海啸等自然灾害会对沙嘴产生重大的破坏,使沙嘴受到严重侵蚀^[16-17],强烈的人类活动会导致泥沙供应减少或泥沙输送受阻,从而造成沙嘴的退化^[18]。

简而言之,当前对沙嘴地貌的研究主要基于长时序遥感影像提取,较缺乏短期季节性变化的研究,且对于沙嘴演变影响因素分析较少涉及中—强潮河口环境,特别是中国北部湾中—强潮海岸的沙嘴变迁分析极为缺乏。基于此,本文以大风江河口沙嘴为研究区域,利用沙嘴30年卫星遥感影像、实测表层沉积物以及区域水文、潮汐及波浪等资料,研究该河口在不同动力影响下形成的沙嘴地貌变化过程,为科学治理与保护大风江河口沙嘴提供理论依据。

1 研究区域概况

广西北部湾河口分布有大风江、铁山港、钦州湾、防城港、珍珠港等中—强潮河口,其中大风江

河口位于北部湾顶端(图1a),地处钦州湾与廉州湾之间,属于溺谷海湾塑造形成的河口。口门东起合浦西场大木城(21°37'04"N、108°54'34"E),西至钦州犀牛角大王山(21°37'42"N、108°51'50"E)。河口两侧海岸由第四纪北海组松散沙砾黏土、湛江组黏土、粉砂质黏土,花岗岩或志留纪轻度变质岩构成。河口处形成东西向规模较大的拦门沙体,呈E-W向横亘于湾口-2~-3 m水深处^[19-20]。该区域位于北热带季风气候区,年平均气温为22.3℃,常年降水量为1700~2100 mm。区域每年8月为累积降雨量最高,该月前后易形成洪涝事件,洪季为每年6—9月,10月至次年5月为枯季。沿岸多年平均风速约为3.2 m/s,每年9月至次年3月受偏北气流的冬季风影响,风向多为N-NE风;4—8月,在海洋暖湿气团控制下,盛行偏南气流(夏季风),风向多为SW-SSE风^[21-22]。

沙嘴位于大风江河口西岸约2 km处(图1b),处于大风江河口涨落潮交汇区,呈SE-NW走向(图1c),沙嘴东北侧与陆缘潮滩相接,西南侧向海延伸。沙嘴对河口西岸红树林起到天然保护作用,但沙嘴的移动对口门航运有较大障碍。

2 材料与方法

2.1 数据采集

为提取沙嘴演变信息,使用GEE平台^[23-24]提取1990—2020年每隔5年的Landsat-5 TM、Landsat-7 ETM+、Landsat-8 OLI整年沙嘴去云影像共130景,对整年影像集合进行融合处理,提取每隔5年沙嘴出露水面最大范围的影像共7幅(图2a);选取2018—2021年枯季期与洪季期共8幅Sentinel-2卫星影像(图2b),所选取影像成像时间均在大潮期间低潮位后,对应的潮位数据参考北海港潮位站预报值。

河口沙嘴表层沉积物是潮流、波浪及径流等动力的影响因素,通过沙嘴沉积物粒径分析来获取物质的输运信息^[25-26]。本研究为覆盖沙嘴顶部、中部、尾部区域,对沙嘴沿岸布设12个采样点,陆海两侧各6个(图1c),于2022年11月12日进行表层沉积物采集,共采集表层1~5 cm的12个沉积物样品。此外,本文还搜集了大风江坡垠坪水文站1965—2014年逐月水文流量数据(数据来源于钦州市水文局)、涠洲岛海洋观测站1973—1995年逐月波浪数据^[27]与北海潮位站2021年1—10月逐日潮

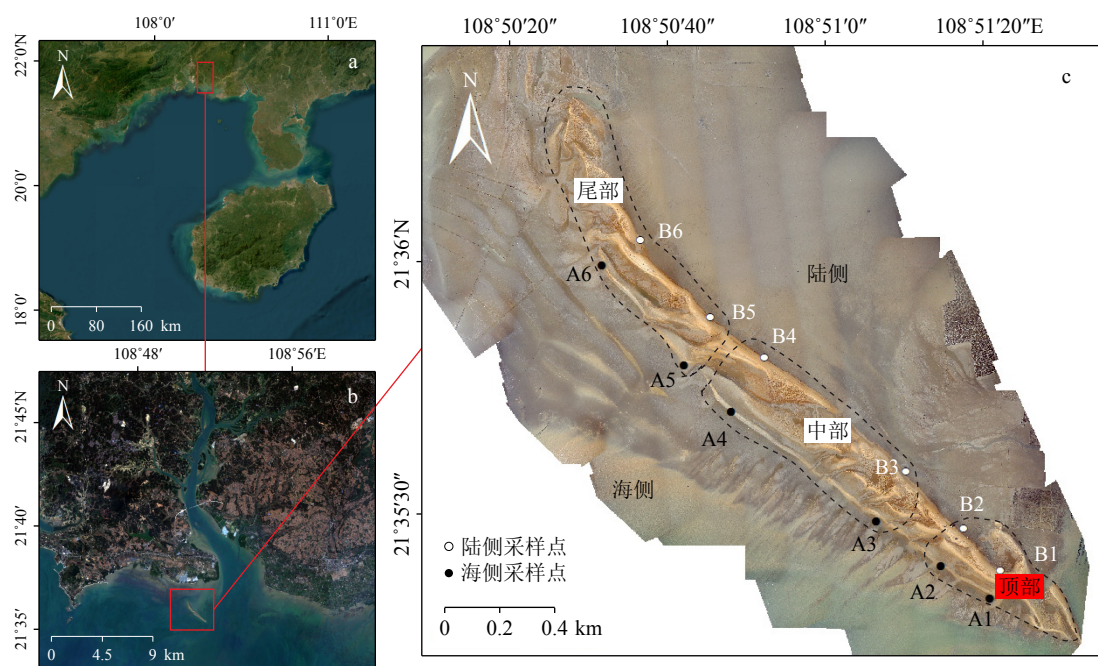


图 1 研究区域与沉积物采样点设置

a: 广西北部湾区域, b: 大风江河口区域, c: 沙嘴及沉积物采样点设置。

Fig.1 Study area and sediment sampling deployment

a: The region of Beibu Gulf, b: the region of Dafeng River estuary, c: spit geomorphology and sediment sampling site distribution.

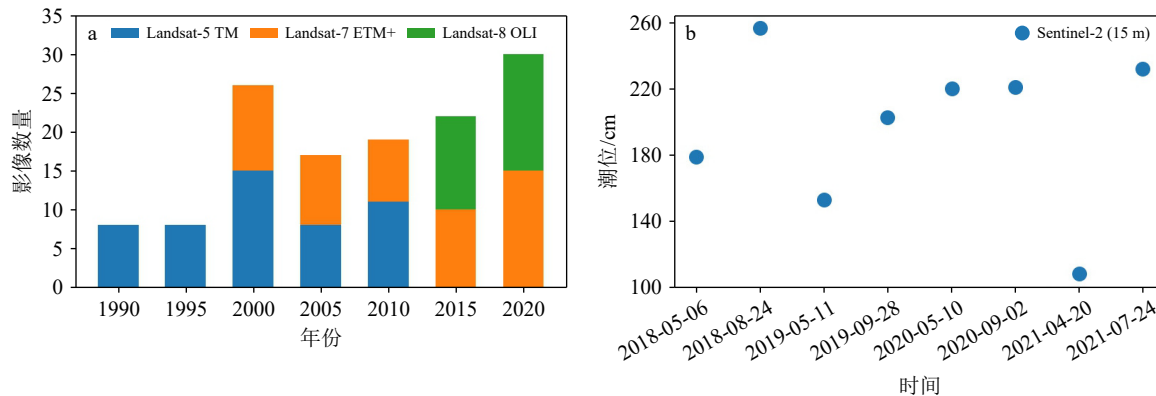


图 2 沙嘴范围提取采用的遥感影像集统计

a: 1990—2000 年沙嘴提取使用 Landsat 遥感影像集统计, b: 2017—2023 年枯季、洪季沙嘴提取使用 Sentinel-2 遥感影像日期及对应潮位。

Fig.2 Statistics of remote sensing image sets used for spit range extraction

a: Spit extraction using Landsat remote sensing image ensemble statistics from 1990 to 2000, b: sentinel-2 remote sensing image dates and corresponding tide levels were used for sand spit extraction during the 2017—2023 dry and wet season.

位实测数据(数据来源于国家海洋局南海信息中心)。

2.2 研究方法

2.2.1 沉积物粒度分析

沉积物的粒度特征是判断区域环境和水动力的良好标志之一, 沉积物输运移动方向与粒度参数(平均粒径、分选系数、偏态、峰态等)相联系^[28]。本文对采集的表层沉积物经由实验室对样品进行

提取、清洗、烘干等预处理后, 采用美国 Coulter 公司的 LS-2000 激光粒度分析仪进行粒度分析, 计算沉积物平均粒径(M_z)、分选系数或标准差(σ_1)、偏度(S_{K1})、峰态或尖度(K_G)等粒径参数, 根据沉积物分类标准对沉积物粒径进行划分^[29]。

2.2.2 影像处理与沙嘴空间信息提取

本研究使用 ENVI 与 ArcMap 基于近红外波段提取与真彩色影像目视解译方法提取不同时期的

沙嘴范围信息。沙嘴为砂质地貌,其暴露在水上时间长短不同导致沉积物含水量不同,在遥感影像上则表现为不同的灰度色阶和彩色特征^[30],在影像上沙嘴色调突然变亮处可以被确认为沙嘴岸线的位置。沙嘴地貌形态对地表反射率有较大影响,短波红外波段区间的地表反射率对沙嘴高程变化较为敏感^[31],通过 ENVI 提取影像短波红外波段来分析沙嘴范围。采用 ArcMap 空间分析工具分别计算沙嘴的质心点坐标、面积、长度、宽度,通过邻域分析点距离计算沙嘴质心的移动距离,最后对数据结果进行统计分析。

质心是表示图像多边形的集合中心相对应的点,可以表示地理空间分布相对位置^[32],本研究基于 ArcMap 计算沙嘴质心,检测沙嘴的空间位移,从而定量分析沙嘴的空间分布与不同时间沙嘴的形态差异。计算质心的位置:将多边形分割为多个三角形,获得每个三角形的质心 C_i 与面积 A_i ,计算公式^[23]如下:

$$C_x = \sum_{i=1}^n C_{ix} A_i / \sum_{i=1}^n A_i \quad (1)$$

$$C_y = \sum_{i=1}^n C_{iy} A_i / \sum_{i=1}^n A_i \quad (2)$$

假设平面多边形 Z 被分割为 i 个简单图形 $Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_i$, 每个简单图形质心点为 C_i , 面积为 A_i , 那么这个平面多边形的质心坐标为 (C_x, C_y) 。

由于 Landsat 影像分辨率为 30 m, Sentinel-2 影像分辨率为 10 m, 两者在分辨率上相差 3 倍, 沙嘴范围较小, 基于二者提取的范围会存在一定误差, 本研究只通过同一系列影像进行相对面积、长度、

宽度的变化分析, 不使用两者进行相互比较。

2.2.3 沙嘴宽度、面积与水文流量相关性分析

由于缺乏分析沙嘴洪枯季的影像同期水文径流数据, 本研究采用大风江坡朗坪水文站历史流量数据(1965—2014 年)来计算历史平均值, 与沙嘴洪枯季宽度、面积数据进行相关性分析, 即通过分析沙嘴洪枯季宽度、面积采用的影像日期, 统计该日期前 3 个月的历史同期平均流量, 以此作为沙嘴宽度、面积对应的水文流量信息, 进行相关性分析。

3 结果分析

3.1 沙嘴沉积特征

根据沙嘴沉积物样品三角分布(图 3)显示, 沙嘴为砂质地貌。沙嘴表层沉积物主要由细砂、中砂及粗砂组成(表 1), 其中海侧砂质含量为 99.67%, 陆侧砂质含量为 98.33%。海侧分布主要以粗砂为主, 陆侧主要以细砂为主: 海侧顶部粗砂含量最高, 达 70.06%, 由顶部向尾部逐步降低至 18.27%, 中砂含量分布较为均匀, 为 23.58%~43.08%, 细砂含量分布与粗砂含量分布相反, 顶部最低, 仅为 1.04%, 向尾部逐步升高, 中部最高 50.48%, 尾部分别为 38.42% 与 46.97%; 陆侧细砂含量分布为两端较低、中间高, 顶部为 46.76%, 尾部为 61.3%, 中部最高为 89.8%, 中砂含量与粗砂含量均较低, 中砂含量顶部最高, 为 32.74%, 最低为中部 4.58%, 粗砂含量顶部与尾部相近, 分别为 19.67% 与 21.86%, 中部最低为 4.1%

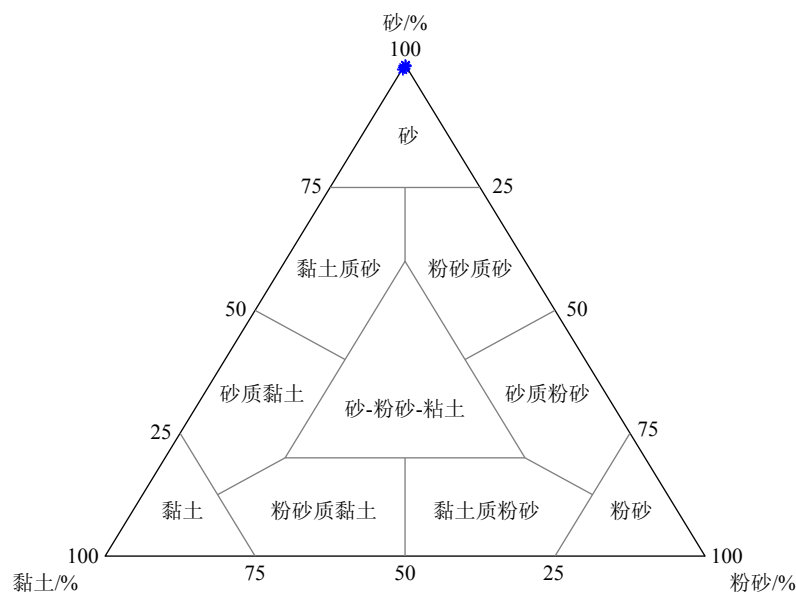


图 3 沙嘴沉积物样品三角分布

Fig.3 Ternary plot of particle sizes distribution of sediment samples from the spit

表 1 粒径分级标准		
Table 1 Grain size classification standards		
等级	等级	平均粒径/ μm
砾石	细砾石	8 000~4 000
	粗砂	2 000~500
砂	中砂	500~250
	细砂	250~62.5
粉砂	粗粉砂	62.5~16
	细粉砂	16~3.9
黏土	黏土	3.9~0.24

(表 2, 图 4)。

进一步分析沙嘴沉积物粒度参数发现(表 3), 海侧平均粒径明显粗于陆侧, 两侧平均粒径分布形态基本与两侧粗砂含量分布一致, 呈现顶部区域平均粒径最粗, 海侧由顶部向尾部逐步变细, 陆侧平均粒径分布较平均, 呈两端稍粗中部细的形态(图 5a)。海侧沉积物总体平均粒径为 391.14 μm , 顶部区域最粗, 为 607.97 μm , 向中部与尾部区域逐渐变细, 中部到尾部变化趋势较小, 由 283.92 μm 变

表 2 沙嘴沉积物组分						
Table 2 Sediment size composition of the sand spit %						
采样点编号	细砂		中砂		粗砂	
	海侧	陆侧	海侧	陆侧	海侧	陆侧
1	1.042	46.76	28.871	32.74	70.056	19.671
2	12.978	80.948	33.86	13.197	52.584	5.176
3	38.535	89.8	23.576	4.582	37.44	4.098
4	50.476	79.26	24.607	9.414	24.627	7.816
5	38.416	78.855	43.076	11.034	18.268	7.558
6	46.968	61.298	33.398	15.933	19.245	21.861

为 289.96 μm 。陆侧平均粒径 217.49 μm , 变化趋势较小, 两端稍粗, 中间细, 最粗为顶部的 280.48 μm , 最细为中部的 163.09 μm 。同时, 两侧平均分选系数较为接近, 陆侧分选系数区间为 0.7~1.1, 平均 0.91, 海侧分选系数区间为 0.54~1.1, 平均 0.84, 总体分选中等。顶部的分选性优于尾部, 陆侧顶部的分选系数最低为 0.7, 海侧顶部的分选系数为 0.54, 分选性较好(图 5b)。沙嘴海陆两侧偏态系数分别为 0.47 与 0.3, 陆侧偏态程度高于海侧。顶部与尾部偏态值较为接近, 为 0.33~0.45, 中部陆侧偏态系数较高, 达到 0.64, 海侧较低, 为 0.13。此外, 沙嘴海陆两侧峰态系数分别为 1.47 与 1.12, 峰态呈尖锐状, 均为自顶部与尾部向中部峰态值增大。

3.2 沙嘴地貌长期变化特征

沙嘴在 1990—2020 年间面积总体增长约 21%, 长度增长约 15%, 宽度减少约 3%, 质心向西北移动约 467 m。但同时沙嘴出现阶段性的变化: 在 1990—1995 年, 沙嘴总体向西北方向延伸, 面积与长度持续增长。期间沙嘴质心向西北方向移动 102 m, 面积增长约 0.016 8 km^2 , 长度增长约 110 m, 平均宽度减少约 6 m(图 6a、图 7)。在 1995—2000 年, 沙嘴出现收缩回退, 长度、宽度、面积均大幅减少。这一阶段, 面积减少约 0.187 km^2 , 长度减少约 545 m, 平均宽度分别减少约 55 m(图 6b、图 7), 沙嘴质心向东南方向移动约 292 m。在 2000—2005 年, 沙嘴逐步恢复, 长度增长约 132 m, 平均宽度增长约 54 m, 面积增长约 0.118 km^2 , 质心向西北移动约 145 m(图 6c、图 7)。2005—2020 年沙嘴持续延伸, 其中 2005—2010 年, 长度增长约 334 m, 平均增长约 16 m, 面积增长约 0.103 km^2 , 质心持续向西北移动约 127 m(图 6d、图 7)。2010—2015 年, 沙嘴长度不断向尾部方向延伸(增长约 144 m), 宽度缩窄(减少

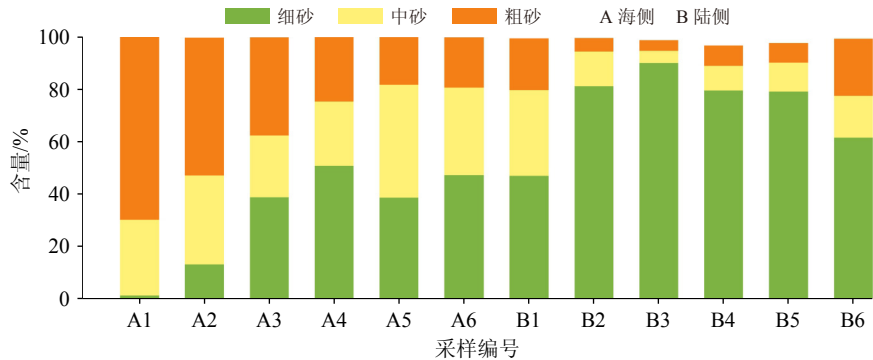


图 4 沙嘴沉积物组分变化

Fig.4 Changes in sediment size composition of the sand spit

表 3 沙嘴平均粒径、分选系数、偏态、峰态

Table 3 The particle size parameters of average size, sorting coefficient, skewness, and kurtosis of the sand spit

采样点编号	平均粒径/ μm		分选系数		偏态		峰态	
	海侧	陆侧	海侧	陆侧	海侧	陆侧	海侧	陆侧
1	607.9734	280.4785	0.544503	0.923458	0.34374	0.453595	0.780876	1.385656
2	498.4276	187.6972	0.806415	0.704203	0.472333	0.334179	1.053235	1.170949
3	360.508	163.092	1.092031	0.741816	0.127668	0.443639	1.401985	1.361979
4	283.9223	207.8505	0.969367	1.065781	0.321818	0.641114	1.226198	1.793195
5	306.0457	205.969	0.773283	0.951842	0.220212	0.549042	1.106709	1.629662
6	289.9574	259.8288	0.858083	1.057971	0.33533	0.41259	1.174146	1.500453

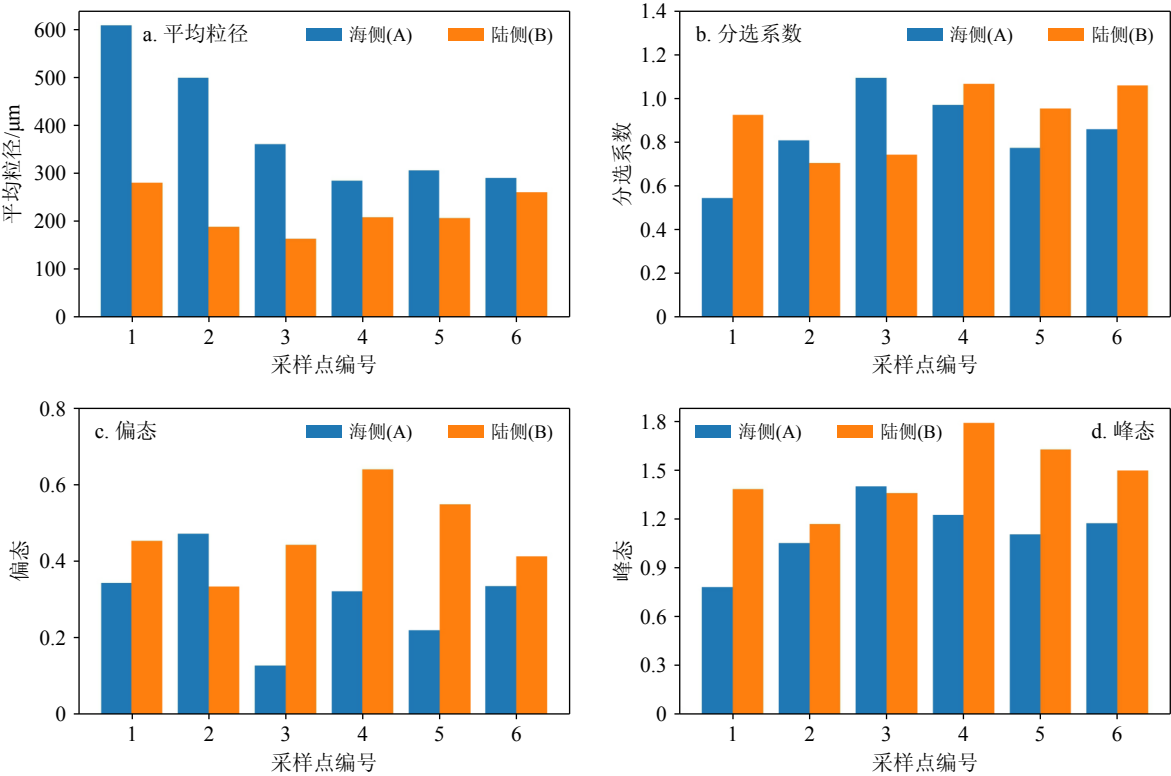


图 5 沙嘴平均粒径 (M_z)、分选系数 (σ_1)、偏态 (S_{K1})、峰态 (K_G)

Fig.5 The particle size parameters of average size M_z (a), sorting coefficient σ_1 (b), skewness S_{K1} (c), and kurtosis K_G (d) of the sand spit

约 22 m), 面积略微缩小(图 6e、图 7)。2015—2020 年, 长度增长约 240 m, 平均宽度增长约 5 m, 面积增长约 0.082 km², 质心持续向西北移动 230 m (图 6f、图 7)。通过以上变化特征可知, 除 1995—2000 年沙嘴出现面积、长度、宽度大幅缩减外, 其余时段沙嘴长度与面积均在增长, 宽度总体变化不大, 质心持续向西北移动, 其中 2015—2000 年期间变化幅度最大。

3.3 沙嘴地貌季相变化特征

沙嘴在展现年际变化的同时, 也具有季节性的

振荡特征。2018—2021 年洪枯季的影像反演表明, 枯季与洪季不同时期下, 沙嘴的变化体现为面积与宽度洪季增长、枯季减小。具体而言, 2018 年洪季面积增长约 0.046 8 km², 平均宽度增长约 20 m; 2019 年洪季面积增长约 0.0919 km², 宽度增长约 43 m; 2020 年洪季面积增长约 0.0815 km², 宽度增长约 37 m; 2021 年洪季面积增长约 0.083 6 km², 宽度增长约 35m。2019 年枯季面积减少约 0.069 2 km², 宽度减少约 34 m; 2020 年枯季面积减少约 0.111 8 km², 宽度减少约 58 m; 2021 年枯季面积减少约 0.100 6 km², 宽度减少约 39 m(图 8)。

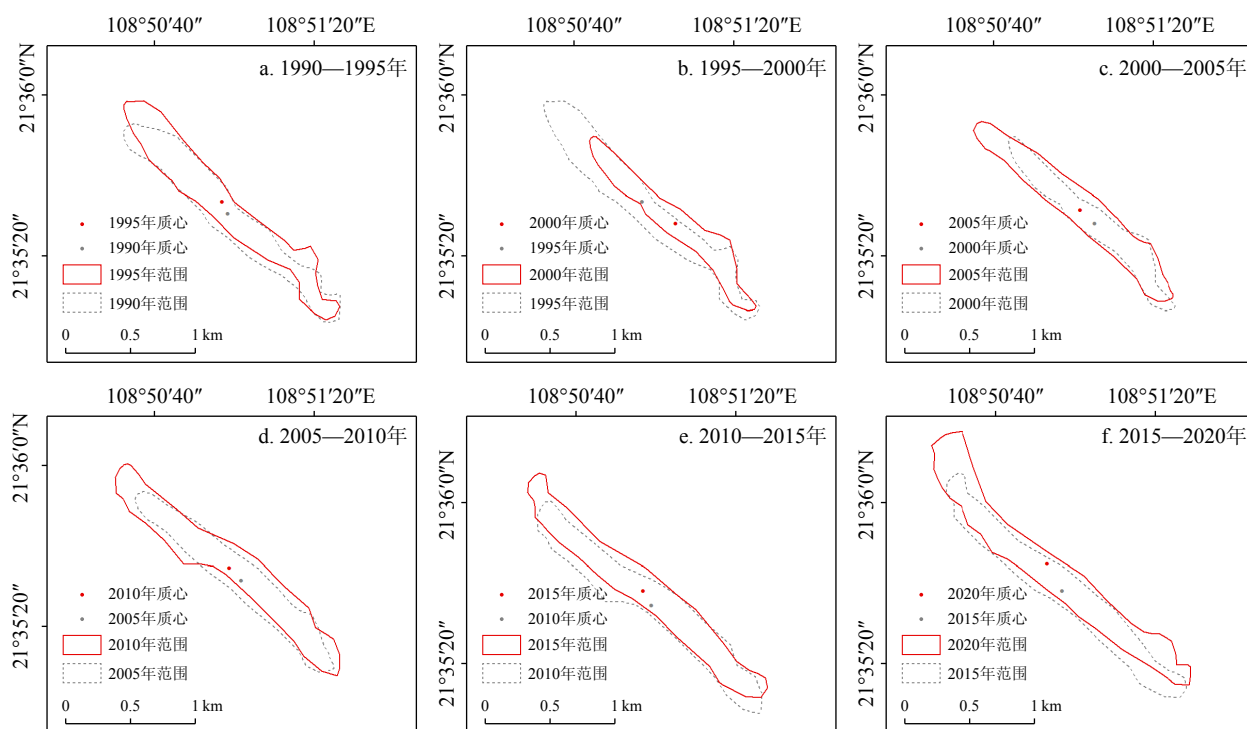


图 6 1990—2020 年期间沙嘴形态变化

Fig.6 Morphological changes of the sand spit during 1990 to 2020

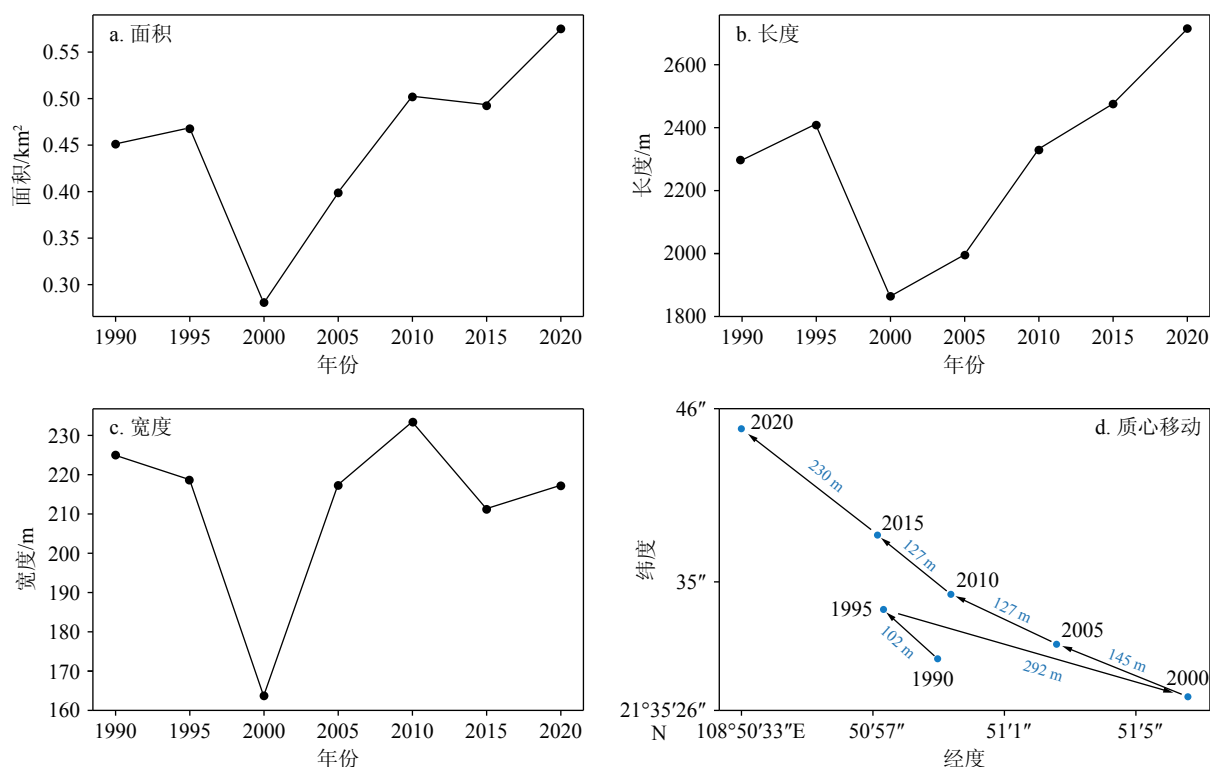


图 7 1990—2020 年期间沙嘴面积、长度、宽度变化与质心移动

Fig.7 Changes in spout area, length, width, and centroid movement from 1990 to 2020

2018—2021 年沙嘴地貌逐年的季相变化特征均呈现洪季相比枯季面积与宽度增长, 枯季相对于上一年的洪季, 面积与宽度减少。根据遥感影像短

波红外波段反映(图 9), 每年洪季, 沙嘴顶部与中部至尾部区域的反射率相对于其他区域较高, 枯季沙嘴近反射率分布较均匀。

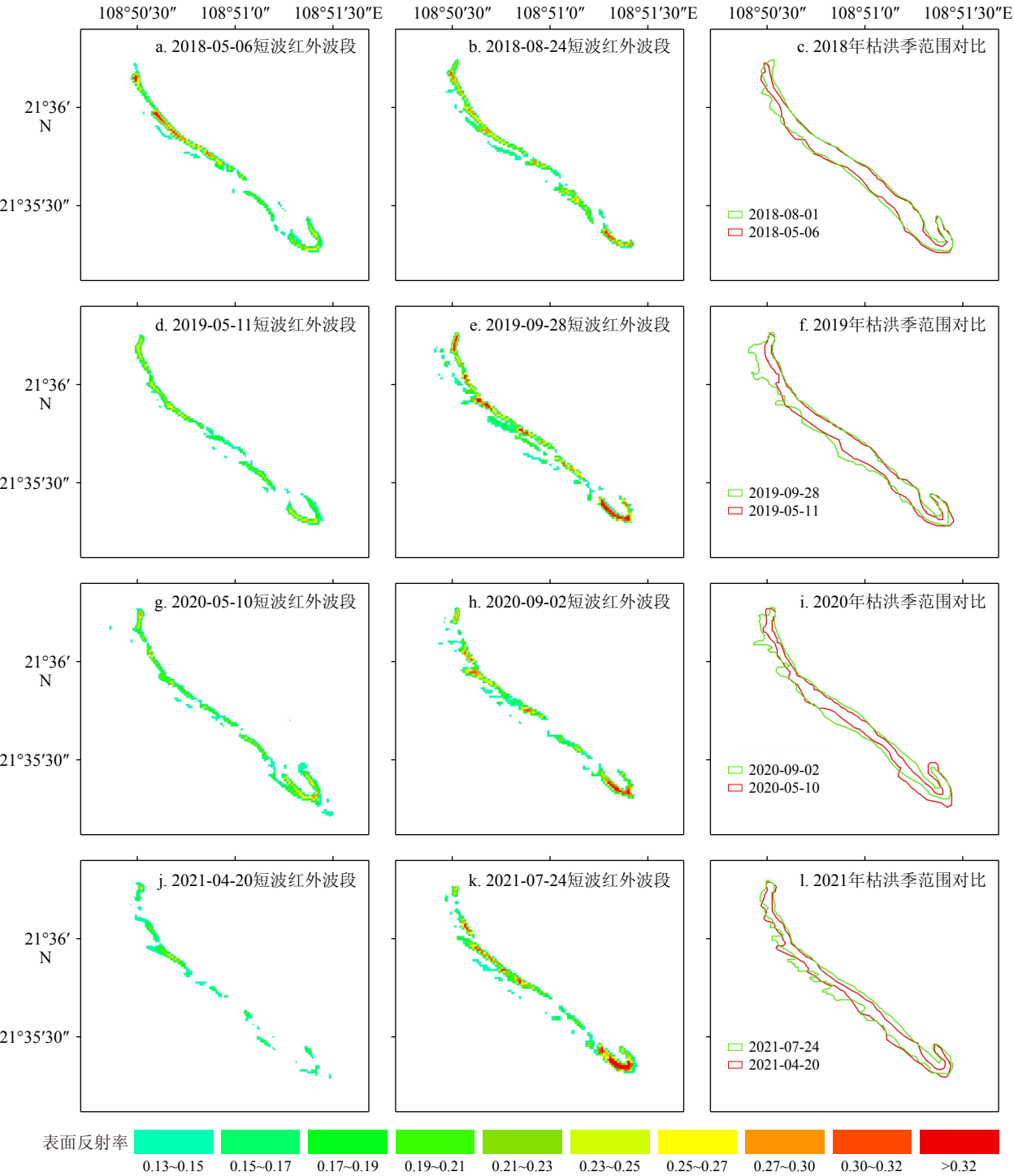


图 8 2018—2021 年洪季、枯季沙嘴形态变化
Fig.8 Changes in morphology of the sand spit in flood season and dry season from 2018 to 2021

4 讨论

4.1 沙嘴沉积物汇源与输移分析

沙嘴沉积物来源主要为径流来沙。钦州境内大风江河全长 105 km, 多年平均径流量 21.2 亿 m³,

汛期径流量约占 80%, 枯水期径流量占 20%, 多年平均输沙量 36 万 t, 为江口来沙的主要来源^[3]。根据沙嘴沉积物粒径分布发现, 沙嘴海侧沉积物平均粒径明显粗于陆侧, 顶部区域最粗, 在海侧由顶部向中部、尾部逐渐变细。结合遥感影像(图 1b)分析可知, 径流来沙出河口后顺水流通道向西南方向漂移。因洪季大风江河口主要为西南偏南浪, 平均

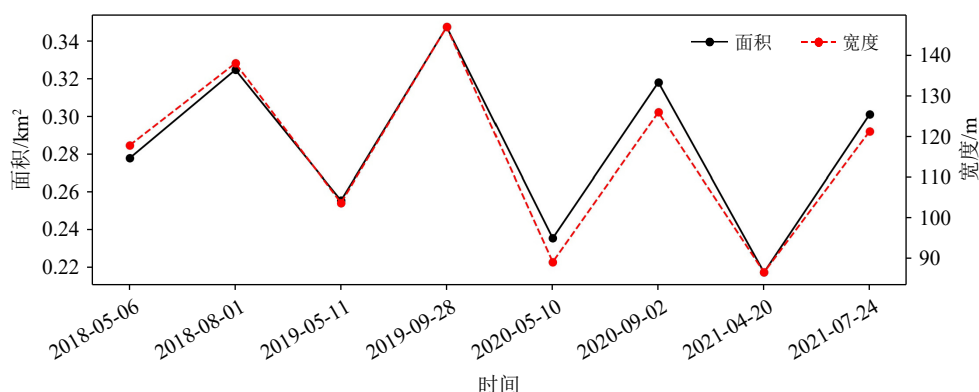


图 9 2018—2021 年洪季、枯季沙嘴面积与宽度变化统计

Fig.9 Statistics on the area and width of the sand spit in flood season and dry season from 2018 to 2021

波高 0.775 m, 最大波高 5 m。高能涌浪导致径流携带大量泥沙堆积和沙嘴延伸^[13], 并塑造沙嘴的基本形态。沙嘴海测呈肋骨状冲越纹, 陆侧为一条沙脊线(图 1c), 通过粒径分布与波浪方向可知, 波浪在沙嘴向海侧破碎, 受越冲作用影响, 沉积物由南向北搬运、越冲, 逐渐形成陆侧脊线和海侧冲越纹的地貌形态。此外, 涨落潮优势不对称对区域物质的输送也有直接作用^[34]。沙嘴在 1990—2020 年间面积总体增长约 21%, 长度增长约 15%, 质心向西北移动约 467 m, 沉积物不断向西北方向(向岸)输送。这可能是大风江河口作为涨潮优势河口湾, 涨潮优势下的潮流作用促使沙嘴不断向岸移动^[35]。沙嘴平均粒径自顶部向尾部由粗变细, 沙嘴不断向尾部延伸, 沉积物向岸输送, 与涨潮优势结果相一致。

4.2 洪枯季动力差异分析

沙嘴宽度与面积呈现枯季变窄、洪季变宽的特征。由于沙嘴沉积物的主要来源为径流来沙, 入河口的径流量季节性变化对沙嘴洪枯季变化具有直接影响。将 2018—2021 年沙嘴洪枯季宽度、面积(图 9)与坡朗坪历史平均流量进行相关性分析后发现, 沙嘴宽度、面积的变化与径流量呈正相关(图 10)。这意味着沙嘴洪枯季宽度与面积变化的主要动力机制是径流动力的季节性差异, 即洪季径流量大, 为沙嘴带来大量泥沙, 沙嘴变宽, 枯季径流量小, 泥沙量锐减, 沙嘴萎缩。波浪也呈现洪枯季显著差异(表 4), 洪季平均波高 0.775 m, 波向以西南浪为主, 枯季平均波高为 0.475 m(图 11a), 浪向主要为东北浪(图 11b), 洪枯季平均波高相差 0.3 m, 主要波向相反。由于洪枯季差异, 洪季波浪对沙嘴影响较大, 枯季影响减小。但大风江河口为中—强潮河口, 具有涨潮优势特性, 如表 5 所示, 其洪枯季的平均潮差与最大潮差相差较小, 枯季平均潮差较洪季

低 0.02 m, 最大潮差高 0.01 m, 潮流作用的影响强度相差不大, 沉积物向岸作用不变。基于洪枯季波浪动力差异与相对稳定的潮流动力环境, 由于枯季径流动力弱来沙量减少, 水流对沙嘴冲刷导致的损失大于收入, 沙嘴发生侵蚀, 宽度缩窄, 面积减少。因此, 枯季期径流量减少与涨潮优势的共同作用是导致枯季沙嘴萎缩的主要原因。

4.3 人类活动影响

人类活动也是影响沙嘴演变的因素之一。根据沙嘴地貌长期变化特征可知, 在 1995 年至 2000 年期间, 沙嘴存在面积、长度大幅减少过程。本文通过选取 1995—2000 年每年各一幅适合潮位(表 6)的 Landsat-5 遥感影像进行目视解译分析(图 12), 沙嘴在 1995、1996 年其尾部沉积清晰可见(图 12a、图 13b), 1997 年后沙嘴尾部轮廓保持较为完好前提下, 出现了明显可见的凹坑(图 12c), 1998 年沙嘴尾部海侧可见明显沉积, 向陆侧依然保持凹坑的特征(图 12d), 1999—2000 年特征较为一致, 尾部沉积较少(图 12e、f)。1998、2000 年的潮位较高(表 5), 但沙嘴轮廓清晰可见, 未见海水淹没沙嘴尾部区域。通过中国台风网查询 1996—2000 年影响北部湾地区的台风信息, 有 1996 年 9 月 9615 号台风(台风名称: SALLY)、1997 年 8 月 9713 号台风(台风名称: ZITA)影响北部湾地区, 但其经过北部湾地区时台风级别较低(均为强热带风暴), 影响较小, 且从沙嘴尾部凹坑的轮廓分析, 台风为沙嘴尾部沉积物明显减少的主要因素可能性较低。根据实地考察得知, 由于河口区域因建房或工业建筑砂石材料所需, 2000 年以前出现附近企业及居民的采砂行为, 2000 年后当地政府出台保护措施, 制止在沙嘴采砂。基于遥感影像 1997—1998 年沙嘴尾部凹坑轮廓分析, 本研究推测, 沙嘴在 2000 年以前

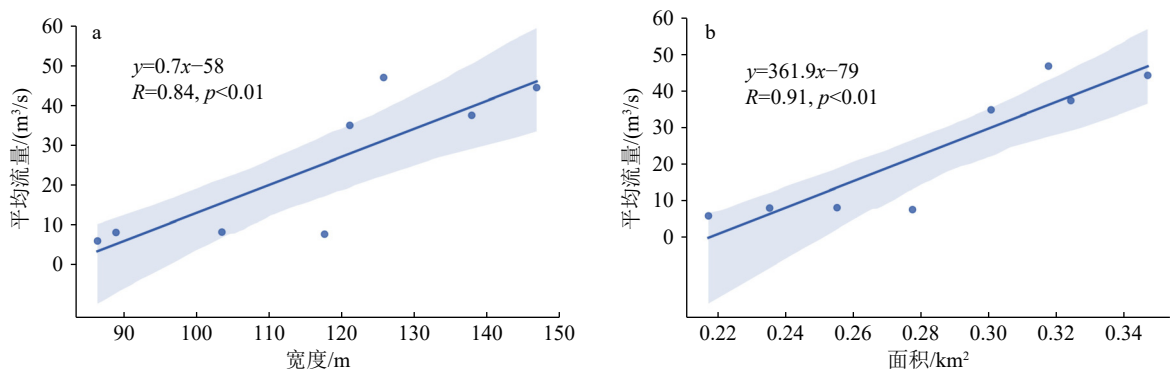


图 10 2018—2021 年沙嘴洪季、枯季宽度、面积变化与大凤江坡朗坪水文站历史同期平均流量相关关系

Fig.10 Variation in the width of the sand spit changes in flood season and dry season from 2018 to 2021, and its correlation with the historical average flow at Polangping Hydrometric Station

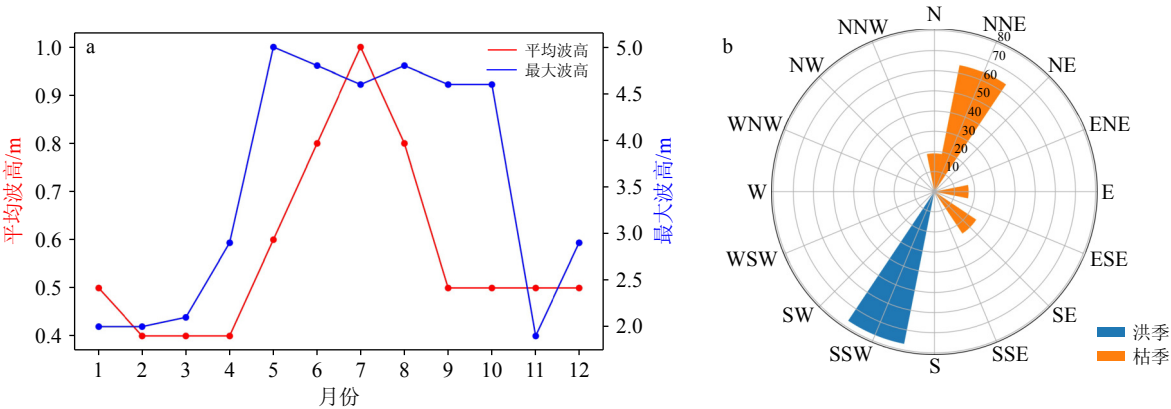


图 11 涠洲岛海洋站历史波浪月统计

a: 月平均波高与最大波高统计, b: 洪枯季波向频率统计。

Fig.11 Statistics of historical monthly wave height recorded in the Ocean Observation Station in Weizhou Island

a: Monthly average and maximum wave height, b: wave direction frequency during flood and dry seasons.

表 4 涠洲岛海洋站洪枯季平均波高与波向统计

Table 4 Statistics of average wave height and wave direction in flood and dry season at Ocean Observation Station in Weizhou Island

洪/枯 季	平均波高/m	主要波向
洪季	0.775	SSW
枯季	0.475	NNE

表 5 北海潮位站 2021 年洪枯季最大潮差与平均潮差统计

Table 5 Statistics of the maximum tidal range and average tidal range observed at Tide Gauge Station in Beihai in flood and dry seasons in 2021

洪/枯 季	最大潮差/m	平均潮差/m
洪季	5.11	3.18
枯季	5.12	3.16

表 6 沙嘴 1995 至 2000 年影像详细信息及对应潮位

Table 6 Specifications of the satellite images and corresponding tide levels of the sand spit from 1995 to 2000

年份	卫星	影像日期	对应潮位
1995	Landsat-5	1995-05-25 11:30	150
1996	Landsat-5	1996-05-27 11:30	90
1997	Landsat-5	1997-05-14 11:30	122
1998	Landsat-5	1998-08-21 11:30	236
1999	Landsat-5	1999-06-02 11:30	183
2000	Landsat-5	2000-05-06 11:30	253

面积与长度大幅减少可能为人类采砂行为所致,这一人类活动延缓了沙嘴持续向西北方向的输移过程。此外,附近村民在沙嘴区挖取沙虫及设置蚝排,也存在影响沙嘴地貌演变的可能,此后可针对这一人类活动影响做进一步深入研究。

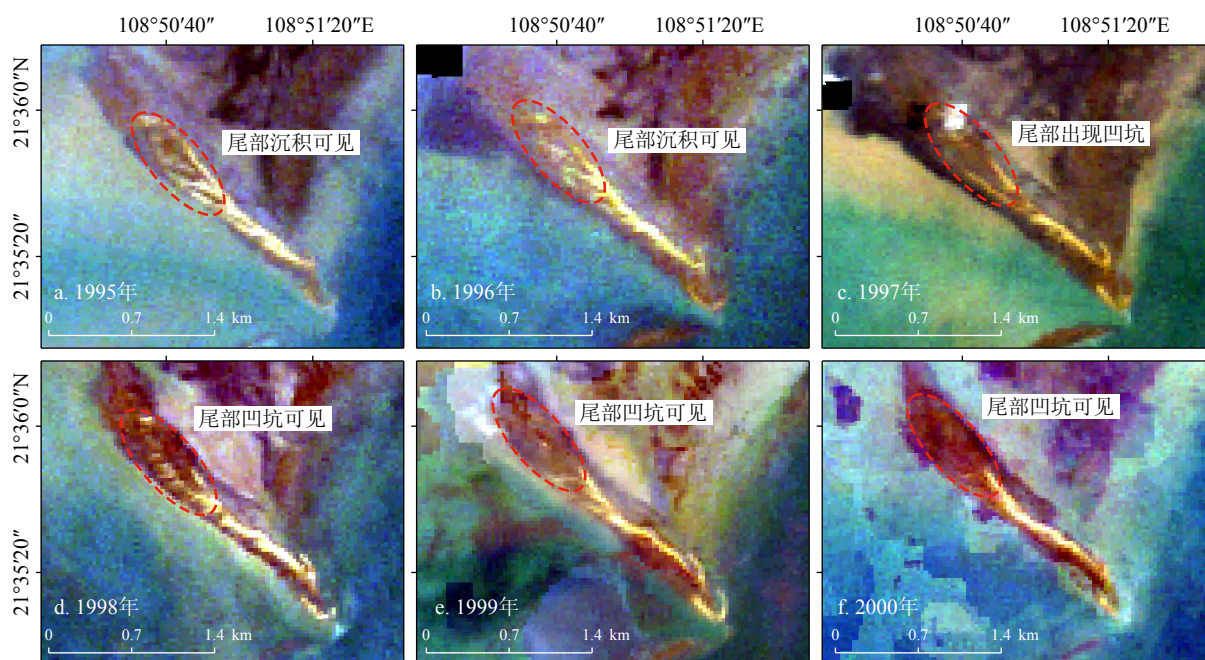


图 12 沙嘴 1995 至 2000 年遥感影像图

Fig.12 Remote sensing images from 1995 to 2000 of the sand spit

5 结论

(1) 大风江河口沙嘴持续向西北延伸, 面积与宽度呈洪枯季变化, 即洪季面积扩大、宽度变宽, 枯季面积缩小、宽度变窄。

(2) 沙嘴沉积物主要来源为洪季径流来沙, 在沙嘴顶部进行沉积, 并向西北方向输送。沙嘴海测沉积物平均粒径明显高于陆侧, 受波浪破碎与冲越作用影响, 沉积物由海测向陆侧搬运与翻越, 形成沙嘴海测冲越纹、陆侧沙脊线的地貌形态。潮流作用使沉积物由沙嘴顶部向中部及尾部输移, 径流来沙为沙嘴提供沉积物, 波浪是控制沙嘴长期形态演变的主要因素。

(3) 大风江径流与波浪动力呈洪枯季差异变化特征, 径流是沙嘴洪枯季宽度、面积变化的主控因素, 波浪在洪季对沙嘴影响较大, 枯季影响减弱。此外, 2000 年沙嘴面积大幅减少可能与同一时期人类的采砂行为有关, 对沙嘴持续延伸造成了负面影响。

参考文献 (References)

- [1] Leonardi N, Canestrelli A, Sun T, et al. Effect of tides on mouth bar morphology and hydrodynamics[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, 118(9): 4169-4183.
- [2] Dinis P A, Huvi J, Cascalho J, et al. Sand-spits systems from Benguela region (SW Angola). An analysis of sediment sources and dispersal from textural and compositional data[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2016, 117: 171-182.
- [3] Saengsupavanich C. Morphological evolution of sand spits in Thailand[J]. *Marine Geodesy*, 2021, 44(5): 432-453.
- [4] Pradhan U, Mishra P, Mohanty P K, et al. Formation, growth and variability of sand spit at Rushikulya River Mouth, South Odisha Coast, India[J]. *Procedia Engineering*, 2015, 116: 963-970.
- [5] Bastos L, Bio A, Pinho J L S, et al. Dynamics of the Douro estuary sand spit before and after breakwater construction[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2012, 109: 53-69.
- [6] 刘宝银, 王岩峰, 高俊国. 近期黄河口沙嘴演变遥感信息的拓扑模型研究[J]. *海洋学报*, 2000, 22(2): 41-47. [LIU Baoyin, WANG Yanfeng, GAO Junguo. Remote sensing information topological pattern research on recent evolution of sand spit of the Huanghe River's mouth[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2000, 22(2): 41-47.]
- [7] 郭建强, 茅志昌. 长江口瑞丰沙嘴演变分析[J]. *海洋湖沼通报*, 2008(1): 17-24. [GUO Jianqiang, MAO Zhichang. Analysis on the revolution of Ruifengshan spit in Yangtze Estuary[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2008(1): 17-24.]
- [8] Teodoro A C, Pais-Barbosa J, Gonçalves H, et al. Extraction of Cabedelo sand spit area (Douro estuary) from satellite images through image processing techniques[J]. *Journal of Coastal Research*, 2011(S64): 1740-1744.
- [9] Hoang V C. Long-term evolution of morphology at Loc an estuary, Vung Tau, Vietnam[J]. *Marine Geodesy*, 2020, 43(2): 163-188.
- [10] Bergsma E W J, Sadio M, Sakho I, et al. Sand-spit evolution and inlet dynamics derived from space-borne optical imagery: is the Senegal-River inlet closing?[J]. *Journal of Coastal Research*, 2020, 95(sp1): 372-376.
- [11] Zhang H G, Li D L, Wang J, et al. Long time-series remote sensing

- analysis of the periodic cycle evolution of the inlets and ebb-tidal delta of Xincun Lagoon, Hainan Island, China[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2020, 165: 67-85.
- [12] 李鹏, 陈沈良, 刘清兰, 等. 黄河尾间沙洲及河口形态对水沙变化的响应[J]. *泥沙研究*, 2022, 47(2): 57-64. [LI Peng, CHEN Shenliang, LIU Qinglan, et al. Responses of the processes in the Yellow River lowermost channel sandbars and estuary to the variation of water and sediment[J]. *Journal of Sediment Research*, 2022, 47(2): 57-64.]
- [13] Allard J, Bertin X, Chaumillon E, et al. Sand spit rhythmic development: a potential record of wave climate variations? Arçay Spit, western coast of France[J]. *Marine Geology*, 2008, 253(3-4): 107-131.
- [14] Dan S, Walstra D J R, Stive M J F, et al. Processes controlling the development of a river mouth spit[J]. *Marine Geology*, 2011, 280(1-4): 116-129.
- [15] Duc Anh N Q, Tanaka H, Tam H S, et al. Comprehensive study of the sand spit evolution at tidal inlets in the central coast of Vietnam[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2020, 8(9): 722.
- [16] Hoan L X, Hanson H, Larson M, et al. A mathematical model of spit growth and barrier elongation: Application to Fire Island Inlet (USA) and Badreveln Spit (Sweden)[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2011, 93(4): 468-477.
- [17] Hiep N T, Tanaka H, Tinh N X. Morphology recovery of the Abukuma River mouth after the 2011 Tohoku tsunami under the interaction between sand spit and sand terrace[J]. *Coastal Engineering Journal*, 2021, 63(4): 467-484.
- [18] Chi S H, Zhang C, Wang P, et al. Morphological evolution of paired sand spits at the Fudu river mouth: Wave effects and anthropogenic factors[J]. *Marine Geology*, 2023, 456: 106991.
- [19] 莫永杰. 广西溺谷湾海岸地貌特征[J]. *海洋通报*, 1990, 9(6): 57-60. [MO Yongjie. Geomorphic features of drowned valley bays of Guangxi coast[J]. *Marine Science Bulletin*, 1990, 9(6): 57-60.]
- [20] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志[M]. 北京: 海洋出版社, 1993, 12. [China Gulf Chronicles Compilation Committee. *Chinese Gulf Chronicles*[M]. Beijing: Ocean Press, 1993, 12.]
- [21] 王日明, 戴志军, 黄鹤, 等. 北部湾大风江与南流江河口红树林空间分布格局研究[J]. *海洋学报*, 2020, 42(12): 54-61. [WANG Riming, DAI Zhijun, HUANG Hu, et al. Spatial patterns of the mangrove along the riverine estuaries, Nanlijiang River and Dafengjiang River of the Beibu Gulf[J]. *Haiyang Xuebao*, 2020, 42(12): 54-61.]
- [22] 黎树式, 戴志军. 南流江现代水文-地貌过程[M]. 北京: 海洋出版社, 2018. [LI Shushi, DAI Zhijun. *Modern hydrological-geomorphological processes of the Nanliu River*[M]. Beijing: Ocean Press, 2018.]
- [23] Long C Q, Dai Z J, Wang R M, et al. Dynamic changes in mangroves of the largest delta in northern Beibu Gulf, China: reasons and causes[J]. *Forest Ecology and Management*, 2022, 504: 119855.
- [24] Gorelick N, Hancher M, Dixon M, et al. Google earth engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 202: 18-27.
- [25] 高抒. 沉积物粒径趋势分析: 原理与应用条件[J]. *沉积学报*, 2009, 27(5): 826-836. [GAO Shu. Grain size trend analysis: principle and applicability[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(5): 826-836.]
- [26] 赵建春, 戴志军, 李九发, 等. 强潮海湾近岸表层沉积物时空分布特征及水动力响应: 以杭州湾北岸为例[J]. *沉积学报*, 2008, 26(6): 1043-1051. [ZHAO Jianchun, DAI Zijun, LI Jiufa, et al. Study on the characteristics of temporal and spatial changes in properties of surface sediment on near-shore seabed of strong-tide bay: a case from the north bank of Hangzhou Bay in Shanghai[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2008, 26(6): 1043-1051.]
- [27] 黄子眉, 张春华, 申友利, 等. 涠洲岛海域风侯和波侯特征分析[J]. *海洋预报*, 2021, 38(2): 62-68. [HUANG Zimei, ZHANG Chunhua, SHEN Youli, et al. Analysis of the climatic characteristics of wind and wave in Weizhou Island sea area[J]. *Marine Forecasts*, 2021, 38(2): 62-68.]
- [28] 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.]
- [29] Lane E W. Report of the subcommittee on sediment terminology[J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 1947, 28(6): 936-938.
- [30] 李晓敏, 张杰, 马毅, 等. 罗斗沙岛动态变化的遥感监测[J]. *海洋学研究*, 2013, 31(2): 52-58. [LI Xiaomin, ZHANG Jie, MA Yi, et al. Monitoring the dynamic change of Luodousha Island using remote sensing technology[J]. *Journal of Marine Sciences*, 2013, 31(2): 52-58.]
- [31] 陶旭, 张东. 潮滩滩面高程的高光谱遥感反演研究[J]. *海洋科学进展*, 2013, 31(4): 498-507. [TAO Xu, ZHANG Dong. Inversion of tidal flat elevation based on Hyperspectral remote sensing[J]. *Advances in Marine Science*, 2013, 31(4): 498-507.]
- [32] 刘吉平, 董春月, 刘家福, 等. 三江平原孤立湿地空间分布及其影响因素[J]. *生态学报*, 2016, 36(11): 3280-3291. [LIU Jiping, DONG Chunyue, LIU Jiafu, et al. Analysis of isolated wetland spatial distribution and factors influencing it in the Sanjiang Plain, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(11): 3280-3291.]
- [33] 何安尤, 周解, 朱瑜, 等. 大风江渔业自然资源调查[C]//广西水产研究所论文集. 南宁: 广西壮族自治区科学技术协会, 2006: 159-167. [HE Anyou, ZHOU Jie, ZHU Yu, et al. Dafeng River fishery natural resources survey[C]. Nanning: Guangxi Association for Science and Technology, 2006: 159-167.]
- [34] 杨洋, 陈沈良, 徐丛亮. 黄河口滨海区冲淤演变与潮流不对称[J]. *海洋学报*, 2021, 43(6): 13-25. [YANG Yang, CHEN Shenliang, XU Congliang. Morphodynamics and tidal flow asymmetry of the Huanghe River Estuary[J]. *Haiyang Xuebao*, 2021, 43(6): 13-25.]
- [35] 庞文鸿. 中强潮海滩沉积动力过程研究: 以北海银滩为例[D]. 华东师范大学博士学位论文, 2021. [PANG Wenhong. *Sediment dynamic processes in meso-macro tidal beaches: a case study of Yintan beach in Beihai city*[D]. Doctoral Dissertation of East China Normal University, 2021.]