



茅尾海钦江河口光滩时空变化过程研究

梁喜幸, 王日明, 戴志军, 王 杰, 黄 鹄, 黎树式

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

LIANG Xixing, WANG Riming, DAI Zhijun, WANG Jie, HUANG Hu, and LI Shushi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2022091201>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

浙闽中小河流水体氢氧同位素组成特征及时空变化

Stable isotopes of Hydrogen and Oxygen in small rivers of Zhejiang and Fujian Provinces and their temporal and spatial variations

海洋地质与第四纪地质. 2018, 38(1): 160

全球变化下九龙江河流-河口系统营养盐循环过程、通量与效应

Nutrient cycling processes, fluxes and effects in the Jiulong river-estuary system under global change

海洋地质与第四纪地质. 2018, 38(1): 23

中国东部陆架海锋面的时空变化及其对细颗粒沉积物输运和沉积的影响

Temporal and spatial variations of oceanic fronts and their impact on transportation and deposition of fine-grained sediments in the East China Shelf Seas

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(3): 25

椒江河口春季悬沙输运特征及通量机制研究

Suspended transportation and flux mechanism of sediment in the Jiaojiang Estuary in spring

海洋地质与第四纪地质. 2018, 38(1): 41

闽江河口表层沉积物重矿物特征与物源示踪

Heavy mineral composition in surface sediments of the Minjiang River estuary and its implications for provenance

海洋地质与第四纪地质. 2018, 38(1): 87

南渡江河口水体氢氧同位素特征及对台风“海鸥”的响应

Water H-O isotopic characteristics of Nandu River estuary and their response to typhoon "Kalmaegi"

海洋地质与第四纪地质. 2018, 38(1): 170



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

梁喜幸, 王日明, 戴志军, 等. 茅尾海钦江河口光滩时空变化过程研究 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2023, 43(3): 107-118.

LIANG Xixing, WANG Riming, DAI Zhijun, et al. Spatial-temporal variations of bare flats in the Qinjiang River estuary, Maowei Sea [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2023, 43(3): 107-118.

茅尾海钦江河口光滩时空变化过程研究

梁喜幸^{1,2,3}, 王日明^{2,3}, 戴志军¹, 王杰¹, 黄鹄³, 黎树式²

1. 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200241
2. 北部湾大学钦州市环境生态修复重点实验室, 钦州 535011
3. 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: 河口潮滩一般由生长于中高潮滩的植被和植被前缘光滩(裸滩)构成, 光滩的时空变化直接关联潮滩冲淤及植被演替状态。本文基于 Landsat 5 TM 及 Sentinel-2 MSI 等多期遥感影像, 利用随机森林分类算法与数字岸线分析系统探讨茅尾海钦江河口光滩在 1986—2021 年期间的变化过程。结果表明: ①近 40 年钦江河口光滩面积总体呈现明显损失的状态, 可分为 1986—2002 年冲淤平衡、2002—2007 年快速淤积、2007—2014 年急剧降低和 2014—2021 年缓慢淤涨 4 个阶段; ②光滩淤积的区域主要分布于钦江沙井河口口门及内侧河槽与潮汐通道边缘, 侵蚀出现在钦江沙井河口及钦江沙冲河口航道及潮沟区域; ③茅尾海清淤工程是引起钦江河口光滩自 2008 年到 2014 年面积减少的直接因素, 潮间带植被扩张和 2015 年之后大范围生蚝养殖引起的水动力减弱导致光滩向海淤涨。当前海平面上升未对光滩造成明显影响, 但入海泥沙的变化一定程度上影响光滩冲淤演变。本研究可为区域河口潮滩资源的可持续高效利用提供部分理论与技术支撑。

关键词: 光滩; 时空分布; 冲淤特征; 钦江河口

中图分类号: P736 文献标识码: A DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2022091201

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

LIANG Xixing^{1,2,3}, WANG Riming^{2,3}, DAI Zhijun¹, WANG Jie¹, HUANG Hu³, LI Shushi²

1. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200241, China
2. Qinzhou Key Laboratory for Eco-Restoration of Environment, Beibu Gulf University, Qinzhou 535011, China
3. Guangxi Key Laboratory of Marine Environmental Change and Disaster in Beihu Gulf, Qinzhou 535011, China

Abstract: Estuarine tidal flats generally consist of vegetated wetlands in upper-middle intertidal zones and fringed bare flats in middle-lower intertidal zones. Spatial-temporal variations of bare flats directly regulate geomorphic erosions-accretions and vegetation successions of the whole tidal flats. Based on multi-satellite remote sensing imageries from Landsat 5/8 TM/OLI and Sentinel-2 MSI collections, random forest classification algorithm and Digital Shoreline Analysis System were used to examine the variations and characteristics of bare intertidal flats in the Qinjiang River estuary (QRE), Maowei Sea (MWS) of Beibu Gulf in 1986—2021. Results indicate that, (1) the overall area of bare flats in the QRE has shown obvious losses during the past four decades, which can be divided into four stages: maintained equilibrium of erosion-accumulation between 1986—2002, accumulated rapidly between 2002—2007, declined sharply between 2007—2014 and slowly deposited between 2014—2021. (2) Tidal flat accretions distributed mainly in the secondary Shajing outlet (SJO) and its inner channel of the QRE along the edges of tidal channels, while erosions occurred in the secondary SJO, Shachong outlet (SCO) and inner tidal channels. (3) Dredging projects in the MWS were the direct driven force that triggered the losses of bare intertidal flats in the QRE from 2008 to 2014, and the expansions of intertidal vegetation and weakened hydrodynamics followed by extensive oyster cultivations after 2015 caused seaward progradation of the bare flats. In addition, the modern sea-level rise has not significantly affected the dynamics of bare flats, and the losses were partly due to the reduced riverine suspended sediment load into the MWS. This study provided theoretical and technical supports for the sustainable and efficient utilizations of estuarine tidal flats.

资助项目: 国家自然科学基金重点基金“北部湾红树林潮滩响应陆海水沙变化的沉积动力过程”(41930537); 广西重点研发计划“北部湾河口滩涂资源可持续高效利用与受损预警研究”(AB21076016); 广西高校青年教师基础科研能力提升项目“基于 Python 潮汐数据采集的潮滩动态变化过程模拟”(2020KY10021)

作者简介: 梁喜幸(1988—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为河口海岸动力沉积地貌过程, E-mail: 52213904010@stu.ecnu.edu.cn

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

收稿日期: 2022-09-10; **改回日期:** 2022-10-08. 张现荣编辑

Key words: bare intertidal flats; spatial-temporal distribution; erosions and accretion; Qinjiang River estuary

河口潮滩位于陆海毗连的沉积动力敏感地带,具有缓冲风暴潮侵袭沿海城市、提供生物栖息地、维持物种多样性以及存贮碳等重要功能。潮滩的进退表征三角洲对流域和海洋动力的耦合强弱与泥沙供给多寡的响应,是三角洲地貌冲淤的指示器^[1]。然而,因流域建坝和水土保持工程的修建导致河流入海泥沙急剧减少、河口局部围垦、航槽开挖以及相对海平面上升,世界沿海大部分河口潮滩都面临侵蚀与沉溺的风险。近20年来受高强度人类活动及复杂的海洋应力交互影响,全球已有超过50%的滨海湿地消亡^[2],进而严重危及沿海生态系统及沿岸居民生活环境安全^[3]。因此,河口潮滩地貌变化,特别是近期河口潮滩时空变化格局已引起众多学者关注^[4-5]。

河口潮滩在三角洲城市和沿海经济发展中扮演极为重要的角色。已有成果相继指出,河口潮滩利用方式改变,如潮滩变为稻田^[6-7]、潮滩圈围成陆变为工业用地^[8]、潮滩变为鱼塘^[9]等,不同潮滩利用改变了潮滩性质,造成潮滩永久性的损失。潮滩物质供给主要来自流域入海泥沙,因此较多研究已指出,当前大坝、森林恢复引起的入海泥沙减少,也在较大程度导致潮滩出现侵蚀、淤积减缓或由淤转冲的格局^[10]。值得提及的是,河口潮滩一般由覆盖植被的盐沼或红树林以及其外没有覆盖植被的光滩构成^[11],由此形成相对完整的潮滩沉积地貌系统和湿地生态系统。国内外已有不少学者针对盐沼或红树林覆盖的潮滩以及其外缘的光滩演化过程及机制展开研究^[12],但关于北部湾北部河口潮滩光滩的分析成果几乎没有报道。光滩作为潮滩的有机构成,不仅是潮滩植被扩展的重要空间,更是众多候鸟或底栖动物活动的场所^[13-14],其时空变化状态直接关联潮滩冲淤进退与植被的变化过程。基于此,本文以茅尾海北部钦江河口前沿光滩作为研究对象,通过长时间遥感影像解译和实地踏勘等探讨区域光滩空间分布及变化状态,给茅尾海潮滩资源可持续高效利用及红树林保护与培育提供部分理论与技术支撑。

1 研究区域概况

钦江发源于广西壮族自治区(图1a)灵山县罗阳山,流经灵山县、浦北县和钦州市区,干流全长179 km^[15],海拔高度约为-13~846 m,主流坡度为

0.36‰^[16](图1b)。钦江于尖山镇黎头咀分两支分别在沙冲村和沙井港附近注入茅尾海(以下称钦江沙冲河口和钦江沙井河口)(图1c)。钦江河口区域涨潮潮差最大为2.21 m,平均潮差0.97 m,落潮潮差最大为2.20 m,平均潮差1.01 m,属不正规混合全日潮型^[17]。受径流与潮流共同作用,在钦江河口区域共形成约3 000 hm²的潮滩,其中光滩约占潮滩面积的60%。潮滩沉积物主要以砂质沉积物为主^[18],分布有红树植物11科16种^[19]。在此根据钦江入海河口的分布将钦江河口潮滩分为3个区域,分别为钦江沙冲河口、钦江河口中部潮滩和钦江沙井河口(图1d),由此分析其光滩的时空变化特征。

2 数据与方法

2.1 数据来源

本研究数据包括潮位、遥感影像及钦江入海水沙三套数据。其中潮位数据为钦州潮位站1986—2021年的逐小时潮高数据(1985国家高程基准),来自国家海洋局南海分局,潮位站位于钦州市钦州港港口附近(图1c),距离钦江河口约16 km。遥感影像数据分别来自美国地质勘探局(United States Geological Survey, USGS)和欧空局(European Space Agency, ESA),通过GEE(Google Earth Engine)平台获取。由于卫星过境时当地潮位通常为中到高潮位潮情,难以捕捉到最低潮位时的卫星影像,同时就光滩而言,一般人类活动对光滩进行改造都聚集于光滩上部,即中潮位以上的光滩。基于此,本文从300余景影像中选取了13景(1986—2021年)研究区中无云且其中包含两组潮位相近的影像数据,进而将潮位相近的影像分为中潮平均低潮位组和平均中潮位组,影像数据涵盖Landsat 5 TM、Landsat8 OLI和Sentinel-2 MSI卫星遥感影像(表1)。此外,钦江流量及泥沙数据采用的是钦江陆屋水文站1971—2021年的实测年平均数据,该水文站距离钦江河口约60 km(图1b)。

2.2 研究方法

2.2.1 研究区域界定

研究区域范围通过在ArcGIS软件中以美国环境系统研究所公司(Environmental Systems Research Institute, Inc., ESRI)提供的World Imagery数据集为

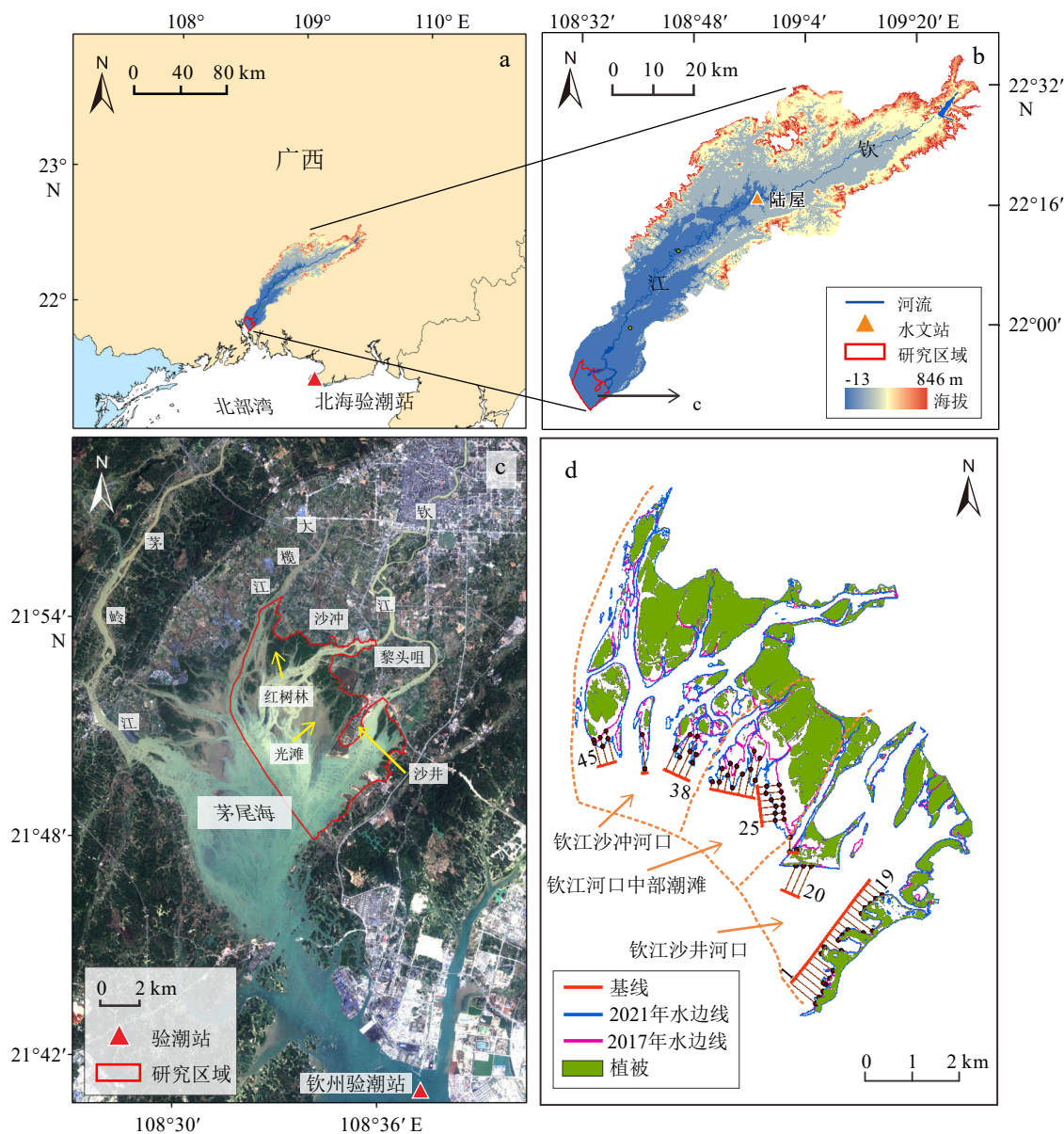


图 1 研究区域图

a. 钦江流域在广西的位置, b. 钦江流域海拔高程和陆屋水文站位置, c. 钦江河口河道支流、光滩和植被空间分布与钦州潮位站和研究区(红色实线包络)位置, d. 4 个子区域的用于数字岸线分析的基线、法线和岸线。

Fig.1 Study area

a: Location of the Qinjiang River Basin in Guangxi, b: elevation and location of Luwu hydrological station within the Qinjiang River Basin, c: spatial distribution of upstream river distributaries, bare flats and mangroves forests and location of Qinzhou tidal gauging station and study area (solid red line enclosed) in the Qinjiang River estuary, d: the baselines, normal lines and shorelines for digital shoreline analyses in four subregions.

底图, 采用目视解译的方法, 沿钦江河口沿岸堤坝及潮滩前缘附近海域进行勾绘获得(图 1c)。由于该区域潮间带内生长的植被几乎都是红树林, 在此将红树林向海边缘到多年平均最低潮位的非植被潮滩定义为光滩(裸滩)。考虑到卫星过境时潮位波动, 较难获得研究区域相同潮位的不同时间卫星成像, 同时当地成熟红树林边缘基本位于中高潮位附近位置。因此, 本文选取同时处于中潮平均低潮

位及平均中潮位的二组卫星影像以探讨光滩不同部位的面积变化过程(表 1)。卫星过境获取的影像基本处于平均中潮位附近, 因而以平均中潮位组影像数据为基础, 获取研究区内不同时期的植被及红树林植被边缘到平均中潮位附近之间的光滩面积。为便于分析, 在此将红树林植被边缘到平均中潮位附近之间的光滩定义为高于中潮位的光滩, 这部分光滩的变化和红树林进退直接相关。因此本

表1 遥感影像信息及对应潮位
Table 1 Satellite remote sensing imageries and corresponding tide levels

序号	成像日期	卫星	分辨率/m	潮位/m	影像分组
1	1988-06-06	Landsat 5 TM	30	1.62	
2	2008-05-12	Landsat 5 TM	30	1.63	中潮平均低潮位
3	2020-04-15	Sentinel-2 MSI	10	1.60	
4	1986-08-04	Landsat 5 TM	30	3.01	
5	1992-10-23	Landsat 5 TM	30	2.88	
6	1997-08-02	Landsat 5 TM	30	2.98	
7	1999-09-25	Landsat 5 TM	30	2.92	
8	2002-11-04	Landsat 5 TM	30	2.97	平均中潮位
9	2007-07-29	Landsat 5 TM	30	2.79	
10	2011-05-29	Landsat 5 TM	30	2.74	
11	2014-06-14	Landsat 8 OLI	30	2.97	
12	2017-04-01	Sentinel-2 MSI	10	2.98	
13	2021-07-24	Sentinel-2 MSI	10	3.03	

文将着重分析其时空变化与影响因素。

2.2.2 影像处理

基于 GEE 平台, 利用遥感影像数据的红、绿、蓝、近红外和短波红外波段的反射率, 分别计算归一化水体指数 (Normalized Difference Water Index, NDWI)、改进归一化水体指数 (Modified Normalized Difference Water Index, MNDWI)、归一化植被指数 (Nominalized Difference Vegetation Index, NDVI) 和增强型植被指数 (Enhanced Vegetation Index, EVI) (表 2)。随后, 以 NDWI、MNDWI、NDVI 和 EVI 作为随机森林分类算法的输入数据, 将每一景影像的地物分为水体、植被和光滩三类, 提取相应范围并生成矢量数据导出。每景影像分类结果的 Kappa 系数和 Overall 系数均高于 85% 和 89%。

2.2.3 光滩和植被信息提取

将在 GEE 平台导出的光滩、植被及水体范围矢量数据基于 ArcGIS 软件进行去噪、掩膜、叠加等处理, 分别计算和统计各景影像中光滩和植被面积, 分析光滩历年变化趋势以及植被覆盖程度对光滩的可能影响。同时, 本文沿钦江河口潮滩前缘共布设 8 条基线, 生成 45 条基线法线, 法线间隔为 100 m (图 1d)。随后根据各景影像的水体范围提取出各时期潮滩的水边线, 进而利用 ArcGIS 数字岸线分析系统 (Digital Shoreline Analysis System, DSAS) 中的岸线移动 (Net Shoreline Movement, NSM) 和终点变化速率 (End Point Rate, EPR) 工具来量化 45 条

表 2 用于分类的光谱指数及计算公式

Table 2 Spectral indices used for classification and the calculation formula

指数名称	计算公式
归一化水体指数 (NDWI) ^[20]	$\frac{(\rho_{\text{green}} - \rho_{\text{nir}})}{(\rho_{\text{green}} + \rho_{\text{nir}})}$
改进归一化水体指数 (MNDWI) ^[21]	$\frac{(\rho_{\text{green}} - \rho_{\text{swir}})}{(\rho_{\text{green}} + \rho_{\text{swir}})}$
归一化植被指数 (NDVI) ^[22]	$\frac{(\rho_{\text{nir}} - \rho_{\text{red}})}{(\rho_{\text{nir}} + \rho_{\text{red}})}$
增强型植被指数 (EVI) ^[23]	$\frac{2.5 \times (\rho_{\text{nir}} - \rho_{\text{red}})}{(\rho_{\text{nir}} + 6 \times \rho_{\text{red}} - 7.5 \times \rho_{\text{blue}} + 1)}$

注: ρ_{nir} 为近红外波段, ρ_{red} 为红波段, ρ_{green} 为绿波段, ρ_{swir} 为短波红外波段, ρ_{blue} 为蓝波段。

基线法线的变化过程, 以分析光滩的时空变化趋势。

2.2.4 不同分辨率影像及潮位下提取光滩面积差异分析

本研究中使用的遥感影像数据分辨率有 30 m 和 10 m 两种, 影像分辨率越高, 地物信息提取越准确, 光滩面积计算越精确。为分析基于两种分辨率的卫星影像数据提取的光滩、植被等地物的面积差异, 采用两景时间、潮位相近的 Landsat 8 OLI 和 Sentinel-2 MSI 影像数据, 分别提取相同区域的光滩、植被面积进行比较, 进而分析使用不同分辨率卫星影像数据分析研究区域光滩时空变化过程的可靠性。为避免由于潮位差异对提取光滩面积的影响, 验证区域选择在远离水边线以上区域 (图 2)。结果显示, 两组影像在两个检验区域提取的光滩面

积分别相差约 4.4% 和 6.0%(表 3)。由不同分辨率差异造成的解译偏差在误差范围内, 对于分析近 40 a 光滩时空的变化趋势, 数据结果相对可靠。

3 结果

3.1 光滩总体面积变化特征

1988—2020 年光滩展现明显时空变化差异。其中 1988—2008 年, 钦江河口光滩整体向海淤积, 淤涨部分集中于钦江沙井河口口门及内侧河槽与潮汐通道边缘, 淤涨面积为 288 hm², 年平均淤积 14.4 hm², 平均向海推展 32.5 m。侵蚀部分集中于钦江沙冲河口河道和潮沟边缘, 侵蚀面积为 170 hm², 年平均侵蚀 8.5 hm²(图 3a)。2008—2020 年, 钦江河口光滩出现大面积损失, 损失面积高达 1 146 hm², 年平均损失为 95.5 hm²。该时期损失的光滩主要分布于钦江沙井河口及钦江沙冲河口航道、潮沟区域。零星淤涨的仅 54 hm², 且主要出现在沙井河口南部。同时口门光滩每年向陆退却的速率约为 104.5 m/a(图 3b), 特别是光滩向陆与红树林毗连的上部几乎都出现损失, 这将在下一节细述。整体上, 1988—2020 年, 钦江河口光滩共有 1 077 hm² 面

积损失, 新增面积为 103 hm², 即 32 年间光滩以平均每年 33.6 hm² 的速度消失(图 3c)。

3.2 平均中潮位以上的光滩面积变化特征

1986—2021 年间, 平均中潮位以上的光滩(以下称中潮位光滩)面积总体呈减少趋势(图 4)。其中 1986—2002 年间, 该位置的面积以小幅波动为主, 基本维持冲淤平衡状态(图 5a-d)。2002—2007 年中潮位光滩淤积明显, 淤积区域主要位于钦江口潮滩中部前缘、钦江沙冲河口河道及潮汐通道之间, 总体淤积面积为 373 hm², 年平均淤涨速率为 74.6 hm²/a(图 5e)。2007—2014 年期间, 中潮位光滩以 91.5 hm²/a 的速率急剧损失, 损失面积达 641 hm²(图 5f、g), 钦江河口中部潮滩前缘是损失的主要区域。2014—2021 年, 中潮位光滩主要以 11.2 hm²/a 的速率缓慢淤涨为主, 淤涨面积为 79 hm², 淤涨区域集中于钦江河口中中部潮滩前缘(图 5h、i)。总体而言, 在钦江河口中中部潮滩前缘和钦江沙冲河口口门处新增约 90 hm² 光滩的情况下(图 5j), 近 40 年来中潮位以上光滩面积仍减少 370 hm²(图 4)。

3.3 平均中潮位以上的光滩水边线变化特征

1986—2021 年光滩区域历年水边线变化过程

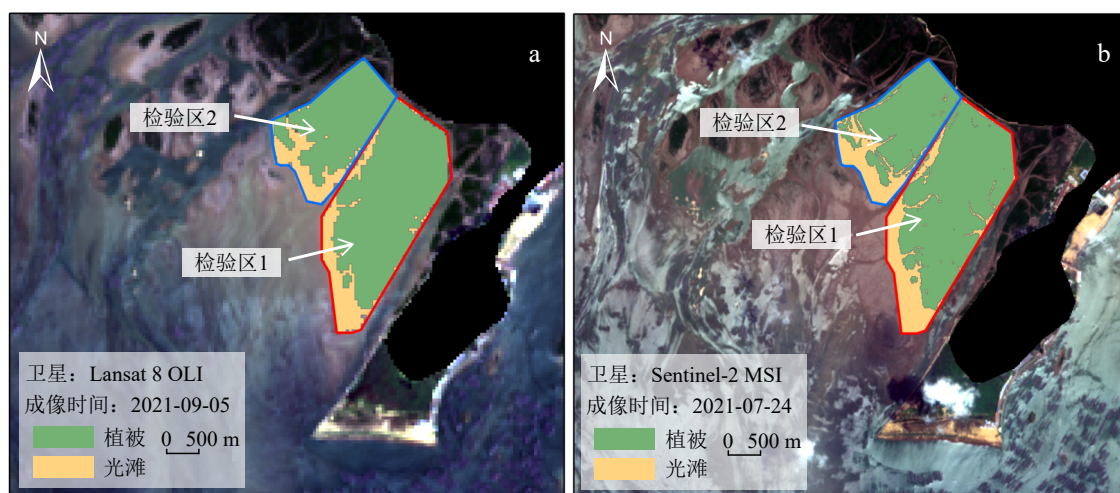


图 2 基于不同分辨率影像提取的光滩和植被信息

Fig.2 Bare flats and mangroves forests information extracted from different resolution images

表 3 检验区地物面积提取结果

Table 3 Extraction results of ground object area in the inspection area

卫星型号	成像时间	检验区1				检验区2			
		检验区面积/hm ²	植被/hm ²	光滩/hm ²	光滩面积差值占比/%	检验区面积/hm ²	植被/hm ²	光滩/hm ²	光滩面积差值/%
Sentinel-2 MSI	2021/07/24	171.8	133.5	38.3	4.4	94.6	68.2	26.4	6.0
Landsat 8 OLI	2021/09/05		135.2	36.6	4.6		69.8	24.8	6.4

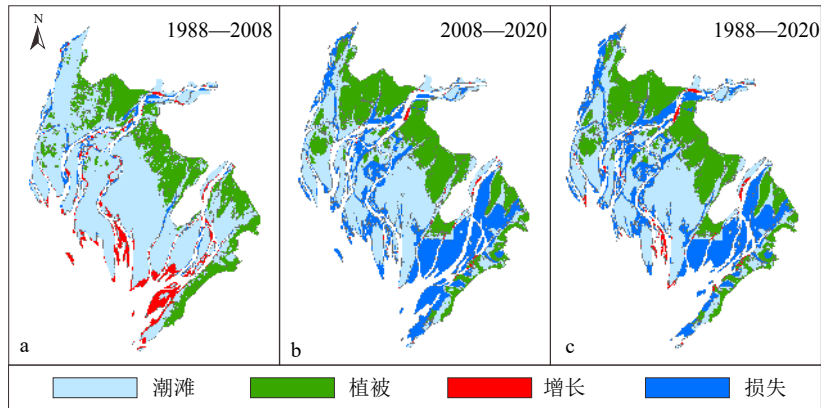


图3 光滩变化过程

Fig.3 Spatial variations in bare flats during different periods.

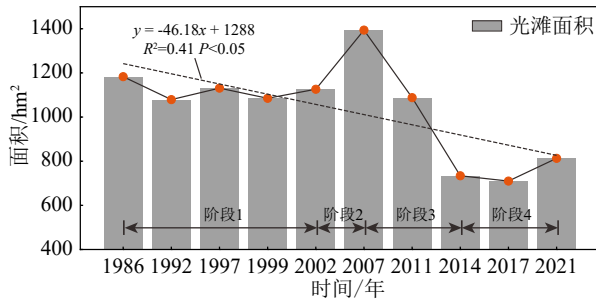


图4 平均中潮位以上的光滩面积变化过程

Fig.4 Variations in the area of bare flats above the mean middle tide level

与其面积变化过程保持一致。其中1986—2002年，平均中潮位以上光滩水边线处于小幅波动变化过程，基本保持进退平衡状态(图6a-d)。2002—2007年期间，此范围光滩平均向海推进98 m，平均推进速率为20.8 m/a，最大向海推进距离达500 m，且主要发生在钦江河口中部潮滩前缘和潮汐通道之间(图6e)。在2007—2014期间，钦江河口中部潮滩前缘区域连续向岸蚀退，平均向岸后退161 m，平均后退速度为23 m/a(图6e、f、g)。2014—2021年平均中潮位以上光滩平均向海淤涨143 m，平均淤涨

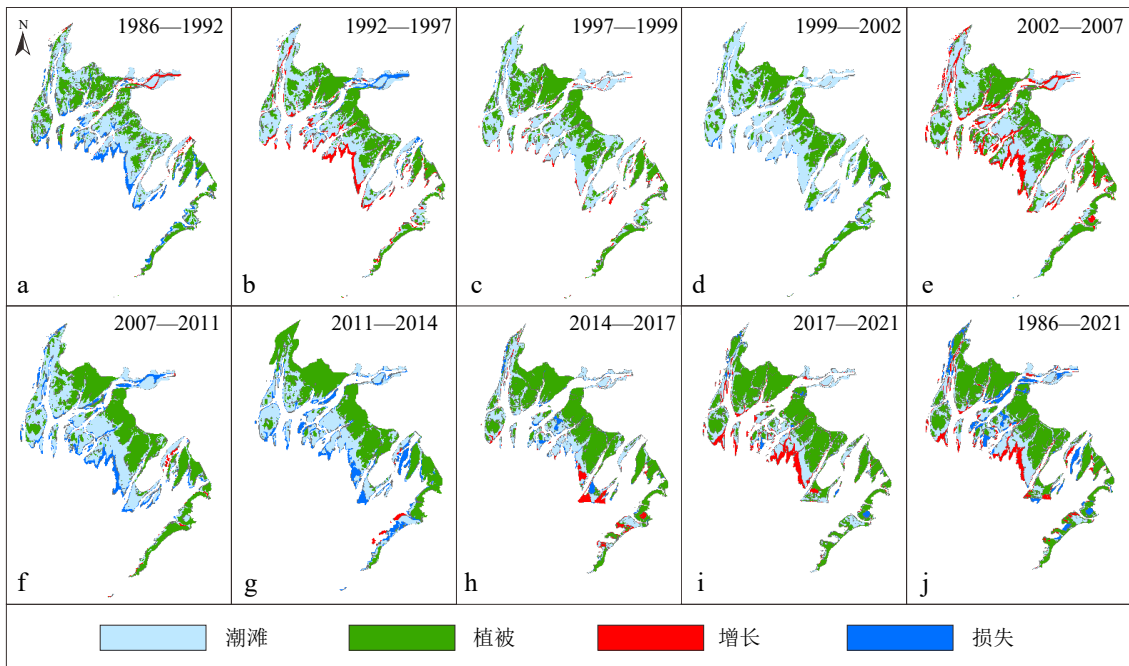


图5 平均中潮位以上光滩变化特征

a-d. 光滩面积基本维持冲淤平衡状态, e. 光滩快速淤涨, f-g. 光滩面积持续减少, h-i. 光滩面积呈现缓慢增长趋势, j. 光滩整体变化格局。

Fig.5 Gains and losses of bare flats above the mean middle tide level from 1986 to 2021

a-d: Overall stability in 1986-2002, e: quick accretion in high progradation rate in 2002-2007, f-g: quick erosion in 2001-2014, h-i: slow progradation in 2014-2021, j: the overall pattern.

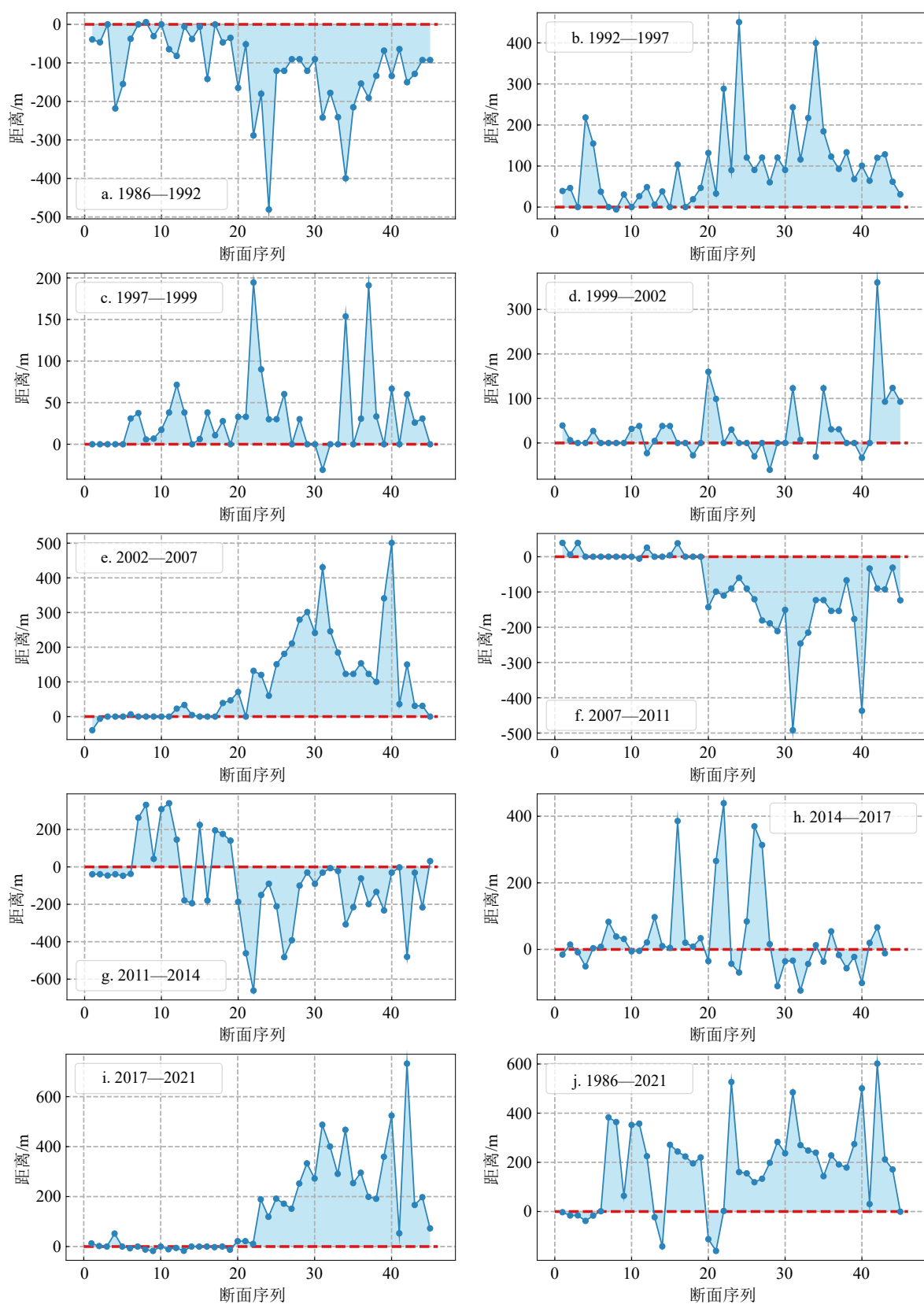


图 6 平均中潮位以上光滩水边线移动过程

a-d. 水边线基本维持进退平衡状态, e. 快速向海推进, f-g. 连续向岸蚀退, h-i. 缓慢向海淤进, j. 整体变化格局。

Fig.6 Spatial migrations of bare flats' edges above the mean middle tide level

a-d: Stability period of the edges in 1986-2002, e: rapid seaward advancement in 2002-2007, f-g: landward erosion in 2001-2014, h-i: slow seaward advancement in 2014-2021, j: the overall patterns.

速率为 31.7 m/a(图 6i), 淤涨区域主要集中于钦江口潮滩中部和钦江沙冲河口前缘, 该区域淤涨最远距离近 700 m。总体而言, 1986—2021 年平均中潮位以上光滩平均向海推进 176 m, 平均推进速率为 5.0 m/a(图 6j), 且冲淤变化的活跃地带主要集中于钦江口中部潮滩和钦江沙冲河口区域。

4 讨论

4.1 河流入海水沙的影响

河流入海水沙物质的多寡在河口潮滩发育和地貌塑造过程中扮演着重要的角色^[24-25]。钦江河口位于茅尾海北部, 钦江入海泥沙是区域潮滩物质的主要来源之一^[26]。据钦江陆屋水文站历年水沙数据, 自 1971 年以来, 钦江年平均流量和输沙量总体呈波动下降趋势(图 7a)。其中年平均输沙量在 1971—1982 年间出现较大波动, 而后 1982—2021 年呈持续波动下降趋势, 下降速率约为 0.67×10^4 t/a(图 7a)。将钦江年平均输沙量与平均中潮位以上光滩面积进行相关性分析后发现, 除了 2007 年和 2021 年外, 两者呈显著的正相关性(图 7b)。钦江年平均输沙量越高, 钦江河口平均中潮位以上光滩面积越大, 造成 2007 年的光滩面积出现远高于拟合值的原因可能是卫星成像时的实际潮位与潮位站提供的测量数据相差过大。但由于缺乏更多相关数据, 要探明其中的具体影响因素, 需要进一步研究。另外, 造成 2021 年光滩面积远低于拟合值的原因则可能是茅尾海清淤工程的影响, 将在下文进行

阐述。此外, 由于径流挟带泥沙自上而下注入茅尾海时, 河面突然展宽, 加上地形与红树林植被的作用, 流速降低, 其挟带的泥沙在平均中潮位以上光滩更容易沉积。相较而言河道、潮汐通道和平均中潮位以下光滩的沉积效果更不显著(图 5i), 因此, 钦江入海水沙是钦江河口光滩向海延伸的动力条件和物质基础, 且一定程度上决定冲淤变化在何处发生。但由于钦江输沙量减少是一个相对缓慢的过程, 光滩面积响应上游泥沙的减少同样是逐渐变小的态势, 但当前光滩面积在 2007—2014 年呈现急剧下降, 因此, 输沙量的减少不是区域光滩急剧减少的主要原因。

4.2 植被的影响

钦江河口潮滩主要由植被和光滩构成, 植被以桐花树和无瓣海桑等红树植物为主^[19]。红树林与光滩之间存在着相互促进的关系, 红树林的扩张将逐渐填补光滩的空间使光滩面积变小, 而其沉沙促淤的作用又促进光滩的发育、扩张, 光滩的发育将为红树林提供更多生长空间^[27-28]。钦江河口潮滩也呈现出光滩与植被相互促进的趋势。在提取 1986—2021 年期间钦江河口潮滩上植被的面积后发现, 其面积呈逐年上升的趋势, 由 1986 年的 769 hm^2 增长到 2021 年的 1 170 hm^2 , 共增长了 401 hm^2 , 年平均增速为 12.56 hm^2 (图 8)。逐年扩张和不断向海推移的植被不断填补潮间带的光滩斑块, 使光滩上部面积不断下降, 相比 1986 年共减少了 370 hm^2 (图 8)。然而根据 1986—2021 年平均中潮位以上的光滩水边线变化趋势, 近 40 年来该区域光滩平均向海推

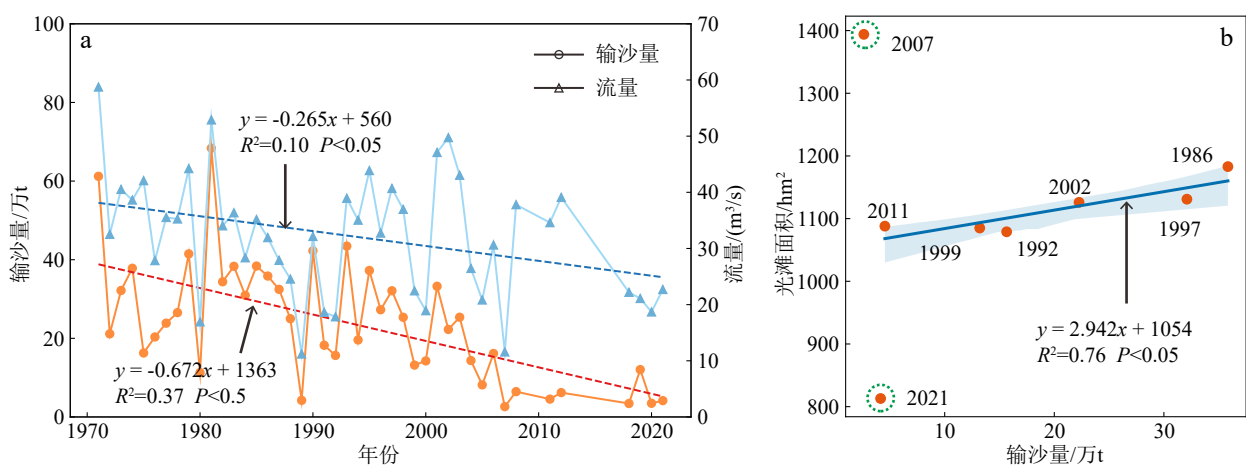


图 7 钦江陆屋水文站 1971—2021 年实测平均流量及输沙量变化趋势 (a) 以及钦江输沙量与平均中潮位以上光滩面积的关系 (b)

Fig.7 Changes in riverine annual water discharge and suspended sediment load (SSL) discharged from the Qinjiang River at Luwu Station in 1971—2021 (a), and the relationship between bare flats area above the mean mid-tidal level and riverine SSL (b)

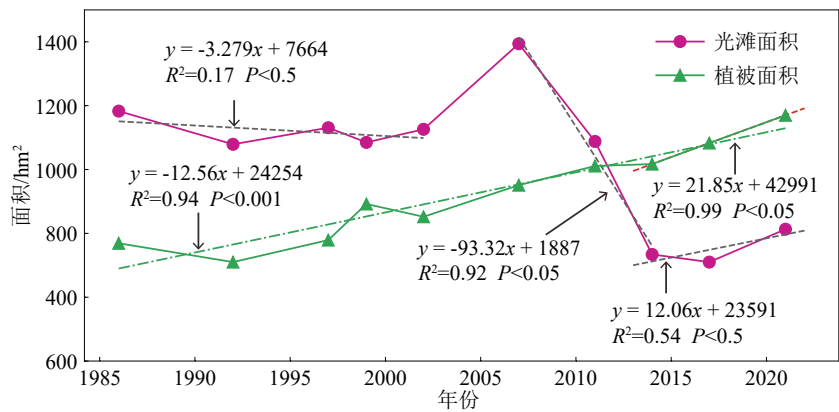


图 8 1986—2021 年光滩与植被面积变化过程

Fig.8 Coupled changes in bare flats and vegetation area from 1986 to 2021

进了 176 m, 最远超过 600 m(图 6j), 意味着平均中潮位以上的光滩面积虽受植被扩张的影响而不断减少, 但其前缘仍不断向海淤涨。植被的促淤沉沙作用可能是其不断向海淤涨的影响因子之一。

4.3 海平面上升的影响

研究表明, 由于全球气候变暖, 海平面逐年上升, 造成潮滩淤积速率减缓, 海岸带侵蚀加剧^[29-30]。钦江河口位于茅尾海的北部, 是北部湾最北端的海域。根据《2020 年中国海平面公报》, 1980—2020 年北部湾海平面以平均每年 0.2 cm 的速度上升, 40 年来海平面上升约 10 cm(图 9)。然而在此期间, 钦江河口平均中潮位以上的光滩前缘平均向海推进 176 m, 面积增加了 263 hm²(图 5i、6i)。意味着, 海平面的上升对钦江河口光滩的发育未造成明显影响。1986—2021 年期间, 钦江河口红树林的不断扩张和向海推进, 为悬浮泥沙的沉积营造了有利条件, 进一步促进光滩的淤积和发育, 一定程度

上减小区域受海平面上升所带来的影响。

4.4 茅尾海清淤工程的影响

钦江河口光滩面积自 1986—2020 年总体出现大规模损失, 其中 1986—2007 年光滩面积增加(图 6a、7), 而后处于递减状态(图 6b、7)。即光滩面积约在 2008 年出现明显转折, 造成光滩出现该变化的主要因素可能是人类活动(图 10a-f)。2010 年钦州市出台《茅尾海综合整治规划》, 该规划中指出, 为改善茅尾海水动力条件、加大航道水深及船舶通航能力, 将分三期对茅尾海航道及浅滩进行清淤、整治。清淤深度到 -2.47 m(1985 国家高程基准), 清淤量约 1.3 亿 m³, 其中沙量 340 万 m³, 淤泥 12 360 万 m³, 泥岩 200 万 m³^[31], 该海区清淤而搬运的 1.3 亿 m³ 泥沙大部分来自茅尾海北部的河口潮滩。清淤工程的实施直接作用于光滩, 使光滩面积急剧下降, 此现象与前人研究结果相符。该研究认为, 在清淤工程的实施下, 茅尾海潮滩在 2013 年后

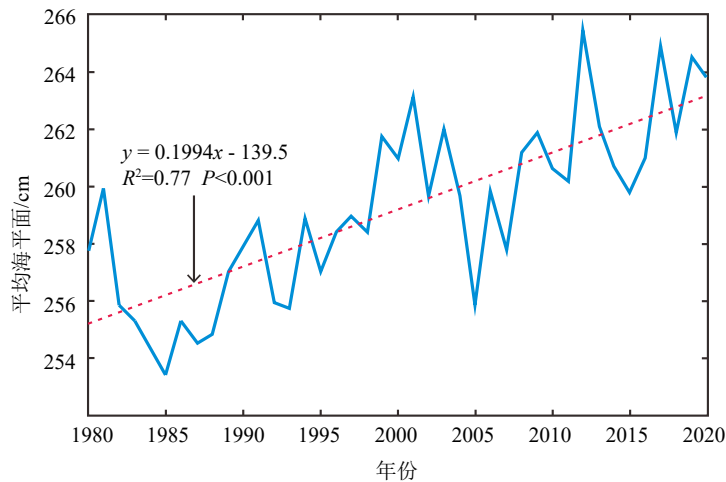


图 9 北部湾 1980 至 2020 年平均海平面变化趋势

Fig.9 Sea level change along the Beibu Gulf from 1980 to 2020



图 10 人类活动对钦江河口光滩的影响

a-c. 茅尾海清淤工程的实施, d-f. 利用清淤而来的泥沙对沙井港部分区域进行吹填, g-i. 钦江河口大范围的生蚝养殖。

Fig.10 Influence of human activities on the bare flats in the Qinjiang River estuary

a-c: Implementation of dredging project in the Maowei Sea; d-f: parts of the adjacent Shajing harbor were filled with dredged sediments; g-i: extensive oyster cultivations in the estuary.

面积显著缩小^[32]。然而,2017—2021年光滩面积出现明显向海淤积,这很可能和茅尾海清淤工程完成后的海区纳潮量与近岸水深变化有关:即因清淤范围内的水深加深,茅尾海纳潮量得到显著提升,其中区域大潮纳潮量分别提升6.1%、13.0%和21.7%,而平均纳潮量分别提升3.1%、9.8%和18.1%^[33]。纳潮量的增加和水深的加深使潮流流速降低,利于泥沙沉积,进而导致清淤后的钦江河口潮滩光滩不减反增(图5i)。

4.5 茅尾海近岸海水养殖影响

茅尾海海水养殖主要以生蚝养殖为主,是目前国内最大的天然生蚝产卵和养殖区,面积约2340 hm²,主要集中于茅尾海中部偏北区域、南部偏中区域和近东岸区域^[34-36]。研究表明,大范围的生蚝养殖将造成水动力减弱,延长水循环周期,促使悬浮泥沙沉积,进而造成滩涂淤积^[37]。据钦州市近年来生蚝天然采苗器投放量的监测数据显示,2011年采苗器投放量为2500万串,是2009和2010年的3倍,

2015年采苗串投放增至5000万串,2016年爆发增长至9000万串,2017与2018年分别为9200万串和9300万串,2019年为1.3亿串^[38]。其中,钦江河口分布着较大面积的生蚝养殖区(图10g、h、i)。通过分析钦江河口光滩上部的变化趋势发现,2014—2021年期间,光滩面积呈缓慢上升趋势(图8),钦江河口中潮滩前缘不断向海淤进(图5h、i),与茅尾海生蚝养殖的增长趋势呈正相关的关系。因此,除清淤工程完成后可能导致区域光滩产生淤积效应外,大范围的生蚝养殖为钦江河口光滩面积不断增长的主要驱动因素。

此外,考虑到不同影像的潮位差异可能造成解译偏差,本研究通过采用RTK实测的方式,计算出研究区平均中潮位潮滩坡度约0.45%。而本研究使用的影像对应潮位最大相差0.29 m,由此造成的水边线提取距离偏差约为64 m,在相应的影像中占2个像元。文中关于两组相近潮位影像解译得到的光滩淤积和侵蚀速率远超过2个像元,因此,文中解译的潮滩冲淤结果可信。

5 结论

(1) 1988—2020年钦江河口光滩总体减少1 077 hm²,减少区域主要集中于钦江沙井河口和钦江沙冲河口航道、潮沟区域。1986—2021年钦江河口平均中潮位以上光滩减少370 hm²,期间经历了1986—2002年冲淤平衡、2002—2007年快速淤积、2007—2014年急剧下降和2014—2021年缓慢淤涨4个阶段。近40年来,该区域平均中潮位以上光滩以5 m/a的速度平均向海推进176 m,淤涨范围主要集中于钦江河口中部潮滩。

(2) 钦江入海输沙量的变化是钦江河口平均中潮位光滩面积增减的主控要素,近年来入海泥沙的减少引起该河口光滩面积减少。区域潮间带植被面积的增长有利于滩面泥沙沉降而促使钦江河口光滩面积向海扩展。

(3) 茅尾海清淤工程的实施是钦江河口光滩突然减少的直接因素。2015年后呈爆发式增长的生蚝养殖减缓潮流流速,促使钦江河口中部潮滩以上光滩面积在2014—2021年期间出现缓慢上升。此外,近40年来,海平面的上升未对区域光滩造成明显影响。

参考文献 (References)

- [1] Swales A, Bentley S J, Lovelock C E. Mangrove-forest evolution in a sediment-rich estuarine system: opportunists or agents of geomorphic change? [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2015, 40(12): 1672-1687.
- [2] Davidson N C. How much wetland has the world lost? Long-term and recent trends in global wetland area [J]. *Marine and Freshwater Research*, 2014, 65(10): 934-941.
- [3] 徐彩瑶, 濮励杰, 朱明. 沿海滩涂围垦对生态环境的影响研究进展 [J]. *生态学报*, 2018, 38(3): 1148-1162. [XU Caiyao, PU Lijie, ZHU Ming. Effect of reclamation activity on coastal ecological environment: progress and perspectives [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(3): 1148-1162.]
- [4] Murray N J, Phinn S R, Dewitt M, et al. The global distribution and trajectory of tidal flats [J]. *Nature*, 2019, 565(7738): 222-225.
- [5] 黄梅花, 卢远, 童新华, 等. 基于Landsat影像的茅尾海河口地貌演变研究 [J]. *海洋测绘*, 2020, 40(6): 57-60, 65. [HUANG Meihua, LU Yuan, TONG Xinhua, et al. Study on the landform evolution of Mao-wei Sea estuary based on Landsat image [J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2020, 40(6): 57-60, 65.]
- [6] Zhu D K, Martini I P, Brookfield M E. Morphology and Land-Use of the coastal zone of the north Jiangsu plain Jiangsu Province, eastern China [J]. *Journal of Coastal Research*, 1998, 14(2): 591-599.
- [7] 张蛟, 崔士友, 胡帅栋, 等. 水稻种植对沿海滩涂土壤有机碳及碳库管理指数的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2020(3): 107-112. [ZHANG Jiao, CUI Shiyu, HU Shuaidong, et al. Effects of rice cultivation on soil organic carbon and carbon pool management index in coastal areas [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2020(3): 107-112.]
- [8] 李霄宇, 程亮, 沙红良, 等. 天津市滨海新区滩涂开发利用特征的遥感分析 [J]. *海洋通报*, 2021, 40(4): 379-386. [LI Xiaoyu, CHENG Liang, SHA Hongliang, et al. Remote sensing analysis of tidal flat utilization characteristic of Tianjin Binhai New Area [J]. *Marine Science Bulletin*, 2021, 40(4): 379-386.]
- [9] Choi Y R. Profitable tidal flats, governable fishing communities: Assembling tidal flat fisheries in post-crisis South Korea [J]. *Political Geography*, 2019, 72: 20-30.
- [10] 樊咏阳, 陈正兵, 张志林, 等. 长江口水下三角洲演变规律及河势控制初探 [J]. *海洋工程*, 2020, 38(4): 91-99. [FAN Yongyang, CHEN Zhengbing, ZHANG Zhilin, et al. The evolution law of underwater delta in the estuary area of the Yangtze River and preliminary study on river regime control [J]. *The Ocean Engineering*, 2020, 38(4): 91-99.]
- [11] 张乔民, 隋淑珍, 张叶春, 等. 红树林宜林海洋环境指标研究 [J]. *生态学报*, 2001, 21(9): 1427-1437. [ZHANG Qiaomin, SUI Shuzhen, ZHANG Yechun, et al. Marine environmental indexes related to mangrove growth [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(9): 1427-1437.]
- [12] 邢超锋, 何青, 王宪业, 等. 崇明东滩地貌演变对生态治理工程的响应研究 [J]. *泥沙研究*, 2016(4): 41-48. [XING Chaofeng, HE Qing, WANG Xianye, et al. Study on the response of morphological evolution of Eastern Chongming Shoal to ecological management project [J]. *Journal of Sediment Research*, 2016(4): 41-48.]
- [13] Murray N J, Ma Z J, Fuller R A. Tidal flats of the Yellow Sea: A review of ecosystem status and anthropogenic threats [J]. *Austral Ecology*, 2015, 40(4): 472-481.
- [14] 熊李虎, 陈俐骁, 黄世昌. 乐清湾水鸟群落变化及对滩涂围垦的响应 [J]. *浙江水利科技*, 2019, 47(5): 5-10. [XIONG Lihu, CHEN Lixiao, HUANG Shichang. Variation of waterfowl community in Yueqing bay and its response to beach reclamation [J]. *Zhejiang Hydrotechnics*, 2019, 47(5): 5-10.]
- [15] 黎树式, 黄鹤. 近50年钦江水沙变化研究 [J]. *广西科学*, 2018, 25(4): 409-417. [LI Shushi, HUANG Hu. Variations of runoff and sediment in Qinjiang River in the past 50 years [J]. *Guangxi Sciences*, 2018, 25(4): 409-417.]
- [16] Chen L H, Wang Y, Touati B et al. Temporal characteristics detection and attribution analysis of hydrological time-series variation in the seagoing river of southern China under environmental change [J]. *Acta Geophysica*, 2018, 66(5): 1151-1170.
- [17] 董德信, 李谊纯, 陈宪云, 等. 海洋工程对钦州湾岸线地形及泥沙冲淤的影响 [J]. *广西科学*, 2015, 22(3): 266-273. [DONG Dexin, LI Yichun, CHEN Xianyun, et al. Impacts of ocean engineering on shoreline, topography and deposition-erosion environment in Qinzhou Gulf [J]. *Guangxi Sciences*, 2015, 22(3): 266-273.]
- [18] 赵薛强, 林桂兰. 海湾综合整治与资源环境优化研究进展 [J]. *海洋环境科学*, 2011, 30(5): 752-756. [ZHAO Xueqiang, LIN Guilian.

- Review on integrated renovation and environment optimization of resource in bay [J]. *Marine Environmental Science*, 2011, 30(5): 752-756.]
- [19] 王日明, 梁喜幸, 周晓妍, 等. 钦江河口潮滩红树林群落空间分布[J]. 遥感学报, 2022, 26(6): 1143-1154. [WANG Riming, LIANG Xixing, ZHOU Xiaoyan, et al. Spatial distribution pattern of mangrove community in tidal flats of the Qinjiang estuary [J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2022, 26(6): 1143-1154.]
- [20] Mcfeeters S K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, 17(7): 1425-1432.
- [21] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J]. 遥感学报, 2005, 9(5): 589-595. [XU Hanqiu. A study on information extraction of water body with the modified normalized difference water index (MNDWI) [J]. *Journal of remote sensing*[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2005, 9(5): 589-595.]
- [22] Rouse J W Jr, Haas R H, Schell J A, et al. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS [J]. *Proceedings, 3rd Earth Resource Technology Satellite (ERTS) Symposium*, 1974, 1: 48-62.
- [23] Huete A, Didan K, Miura T, et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the modis vegetation indices [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83(1-2): 195-213.
- [24] Chen J Y, Li D J, Chen B L, et al. The processes of dynamic sedimentation in the Changjiang Estuary [J]. *Journal of Sea Research*, 1999, 41(1-2): 129-140.
- [25] Dai Z J, Fagherazzi S, Mei X F, et al. Linking the infilling of the North Branch in the Changjiang (Yangtze) estuary to anthropogenic activities from 1958 to 2013 [J]. *Marine Geology*, 2016, 379: 1-12.
- [26] 莫剑, 卢远, 王丹媛, 等. 广西钦江流域水沙年际变化规律分析[J]. 水利水电技术, 2020, 51(1): 130-138. [MO Jian, LU Yuan, WANG Danyuan, et al. Analysis of interannual water-sediment variation law of Qinjiang River Basin in Guangxi [J]. *Water Resources and Hydro-power Engineering*, 2020, 51(1): 130-138.]
- [27] Chen Y N, Li Y, Thompson C E L, et al. Differential sediment trapping abilities of mangrove and saltmarsh vegetation in a subtropical estuary [J]. *Geomorphology*, 2018, 318: 270-282.
- [28] 王日明, 黄鹤. 南流江口洲滩景观过程研究[J]. 海洋科学, 2020, 44(12): 84-92. [WANG Riming, HUANG Hu. Research on the landscape process of the Nanliu estuary [J]. *Marine Sciences*, 2020, 44(12): 84-92.]
- [29] 杨桂山, 施雅风, 季子修. 江苏淤泥质潮滩对海平面变化的形态响应[J]. 地理学报, 2002, 57(1): 76-84. [YANG Guishan, SHI Yafeng, Ji Zixiu. The morphological response of typical mud flat to sea level change in Jiangsu coastal plain [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2002, 57(1): 76-84.]
- [30] Wu M Y, Harris P, Eberli G, et al. Sea-level, storms, and sedimentation – Controls on the architecture of the Andros tidal flats (Great Bahama Bank) [J]. *Sedimentary Geology*, 2021, 420: 105932.
- [31] 杨蕙. 海湾环境整治效果评价指标体系及评价方法的研究[D]. 国家海洋局第三海洋研究所硕士学位论文, 2017. [YANG Hui. Study on evaluation index system and evaluation method of comprehensive renovation[D]. Master Dissertation of Third Institute of Oceanography, MNR, 2017.]
- [32] 杨钰文, 卢远, 黄萍. 基于遥感的北部湾茅尾海岸滩时空变化研究[J]. 海洋技术学报, 2020, 39(4): 1-8. [YANG Yuwen, LU Yuan, HUANG Ping. Study on the spatial-temporal changes of Maowei shoreline and tidal flat based on remote sensing [J]. *Journal of Ocean Technology*, 2020, 39(4): 1-8.]
- [33] 夏长水, 陈振华, 韦重霄, 等. 广西钦州茅尾海综合整治水力影响研究[J]. 海岸工程, 2020, 39(3): 157-168. [XIA Changshui, CHEN Zhenhua, WEI Chongxiao, et al. Study on hydrodynamic influence induced by comprehensive regulation of the Maowei Sea in Qinzhou, Guangxi province [J]. *Coastal Engineering*, 2020, 39(3): 157-168.]
- [34] Gu Y G, Huang H H, Liu Y, et al. Non-metric multidimensional scaling and human risks of heavy metal concentrations in wild marine organisms from the Maowei Sea, the Beibu Gulf, South China Sea [J]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2018, 59: 119-124.
- [35] Yang B, Lan R Z, Lu D L, et al. Phosphorus biogeochemical cycling in intertidal surface sediments from the Maowei Sea in the northern Beibu Gulf [J]. *Regional Studies in Marine Science*, 2019, 28: 100624.
- [36] 钟方杰, 黄伟德, 李选积, 等. 广西钦州大蚝苗种产业发展现状与对策分析[J]. 水产养殖, 2020, 41(5): 79-80. [ZHONG Fangjie, HUANG Weide, LI Xuanji, et al. Analysis on the development current situation and countermeasures of the Oyster seedling industry in Qinzhou, Guangxi [J]. *Journal of Aquaculture*, 2020, 41(5): 79-80.]
- [37] 杨留柱, 杨莉玲, 潘洪州, 等. 人类活动影响下的钦州湾近期滩槽冲淤演变特征[J]. 热带海洋学报, 2019, 38(6): 41-50. [YANG Liuzhu, YANG Liling, PAN Hongzhou, et al. Characteristics of recent evolution in Qinzhou Bay influenced by human activities [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2019, 38(6): 41-50.]
- [38] 陈主器. 广西钦州大蚝苗种产业发展的问题与对策[J]. 养殖与饲料, 2021, 20(11): 166-167. [CHEN Zhuqi. The development problems and countermeasures of Oyster seedling industry in Qinzhou, Guangxi [J]. *Animals Breeding and Feed*, 2021, 20(11): 166-167.]