



闽江口琅岐岛潮滩沉积物粒度时空变化特征研究

李海琪, 王爱军, 叶翔, 梁灏深, 张望泽, 吴水兰, 李云海

Spatio-temporal variations in grain size of surficial sediment on tidal flat of Langqi Island in Minjiang River estuary

LI Haiqi, WANG Aijun, YE Xiang, LIANG Haoshen, ZHANG Wangze, WU Shuilan, and LI Yunhai

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2023082302>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

鸭绿江口沉积粒度特征及其对沉积环境演化的指示

CHARACTERISTICS OF SEDIMENT GRAIN SIZE AT YALU RIVER ESTUARY AND IMPLICATIONS FOR DEPOSITIONAL ENVIRONMENT

海洋地质与第四纪地质. 2017, 37(3): 58-66

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): 87-95

潮滩环境沉积物吸附多环芳烃的粒径因素影响

Adsorption of PAHs by the sediments from the Yangcheng tidal flat: the influence of particle size

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(3): 54-61

长江三角洲北翼后缘晚第四纪以来的沉积粒度特征及环境演化

Sediment grain size distribution patterns of the late Quaternary on the back side of northern Yangtze River Delta and their environmental implications

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(4): 34-45

海南岛东南浅海表层沉积物粒度特征及沉积环境

Grain size distribution of surface sediments in the area off southeast Hainan Island and its implications for environmental interpretation

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(2): 64-74

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): 160-169



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

李海琪, 王爱军, 叶翔, 等. 闽江口琅岐岛潮滩沉积物粒度时空变化特征研究[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2023, 43(6): 14-24.

LI Haiqi, WANG Aijun, YE Xiang, et al. Spatio-temporal variations in grain size of surficial sediment on tidal flat of Langqi Island in Minjiang River estuary[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2023, 43(6): 14-24.

闽江口琅岐岛潮滩沉积物粒度时空变化特征研究

李海琪^{1,2}, 王爱军^{2,3,4}, 叶翔^{2,3}, 梁灏深², 张望泽^{2,5}, 吴水兰^{2,6}, 李云海^{2,3}

1. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 200090
2. 自然资源部第三海洋研究所海洋与海岸地质研究室, 厦门 361005
3. 福建省海洋物理与地质过程重点实验室, 厦门 361005
4. 自然资源部海峡西岸海岛海岸带生态系统野外科学观测研究站, 厦门 361005
5. 福州大学先进制造学院, 泉州 362251
6. 南京信息工程大学海洋科学学院, 南京 210044

摘要: 潮滩位于陆地与海洋相互作用的敏感地带, 其沉积环境变化与海岸带生态系统演化、海岸带开发利用等密切相关。为了清晰认识河口潮滩时空变化特征, 选取闽江口琅岐岛东侧潮滩作为研究区域, 通过采集和分析不同季节表层沉积物粒度组成, 探讨琅岐岛潮滩沉积物粒度的时空变化特征, 为深刻理解河口潮滩沉积过程对环境变化响应提供科学依据。研究结果表明, 琅岐岛潮滩沉积物组成总体以粉砂为主, 砂和黏土含量呈现较大的时空差异; 时间上, 琅岐岛潮滩表层沉积物平均粒径为 2.2~7.4 Φ , 呈现出显著的季节性差异, 夏季节沉积物平均粒径 Φ 值大, 冬季节沉积物平均粒径 Φ 值小, 春季和秋季位于过渡期间。空间上, 由西向东, 随着离岸距离的增加, 沉积物平均粒径 Φ 值总体呈现出先减小后增大的趋势; 由北向南, 表层沉积物粗颗粒组分的分布范围逐渐增大。闽江口琅岐岛潮滩沉积物分布格局与国内外其他河口、海湾及开放型潮滩沉积物分布格局一致, 是物源、水动力和地貌综合作用的结果, 但研究区水动力强度、植被覆盖和沉积物供应季节差异显著, 引起潮滩沉积物组成的季节变化十分显著, 沉积物粒度组成对环境变化响应非常敏感。

关键词: 粒度参数; 季节变化; 潮滩; 琅岐岛; 闽江口

中图分类号: P737.1

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2023082302

Spatio-temporal variations in grain size of surficial sediment on tidal flat of Langqi Island in Minjiang River estuary

LI Haiqi^{1,2}, WANG Aijun^{2,3,4}, YE Xiang^{2,3}, LIANG Haoshen², ZHANG Wangze^{2,5}, WU Shuilan^{2,6}, LI Yunhai^{2,3}

1. College of Marine Sciences Shanghai Ocean University, Shanghai 200090, China
2. Laboratory of Coastal and Marine Geology, Third Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Xiamen 361005, China
3. Fujian Provincial Key Laboratory of Marine Physical and Geological Processes, Xiamen 361005, China
4. Observation and Research Station of Island and Coastal Ecosystem in the Western Taiwan Strait, Ministry of Natural Resources, Xiamen 36100, China
5. School of Advanced Manufacturing, Fuzhou University, Quanzhou 362251, China
6. School of Marine Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

Abstract: Tidal flats are located in sensitive areas of interaction between land and ocean, and their sedimentary environment changes are closely related to the evolution of coastal ecosystems and coastal development and utilization. In order to clearly understand the spatio-temporal variations of estuarine tidal flats, we selected the tidal flat of Langqi Island in the Minjiang River estuary as the study area, studied surficial sediment composition in different seasons, and discussed the spatio-temporal variations in sediment grain size distribution, providing a scientific basis for a deep understanding of the sedimentary process of the estuarine tidal flats in response to environmental changes. Results indicate that the surficial sediment composition of inter-tidal flat on Langqi Island is dominated by silt, with significant differences of sand and clay contents.

资助项目: 国家自然科学基金项目“闽江河口-毗邻海岸的地貌沉积互馈过程及环境演变”(U22A20585), “中小型山溪性河口水下三角洲沉积体系演化及其对人类活动与极端事件的响应”(41776099); 自然资源部第三海洋研究所科研业务费专项资金资助项目(海三科 2019017, 海三科 2019018)

作者简介: 李海琪(2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事海洋沉积动力学研究, E-mail: haiqi_li0315@163.com

通讯作者: 王爱军(1977—), 男, 研究员, 主要从事海洋沉积动力学研究, E-mail: wangaijun@tio.org.cn

收稿日期: 2023-08-31; **改回日期:** 2023-10-09. 张现荣编辑

The mean grain-size ranges from 2.2 Φ to 7.4 Φ , and shows a significant seasonal variations, with the average mean grain-size in summer being smaller than in winter. From west to east, the mean grain-size increases first and then decreases seaward, and the distribution area of coarse grain component in gradually increases from north to south. The distribution pattern of sediment on the inter-tidal flat of Langqi Island at the Minjiang River estuary is consistent with that of other estuaries, bays, and open tidal flats in the world, reflecting the result of the among sediment sources, hydrodynamics, and local geomorphology. However, due to significant differences in hydrodynamics, vegetation coverage and sediment supply in the study area, which cause significant seasonal changes in the sediment composition, the sediment grain-size compisition of the tidal flat in the Minjiang River estuary are very sensitive to environmental changes.

Key words: grain-size parameter; seasonal variation; tidal flat; Langqi Island; Minjiang River estuary

潮滩形成于海洋与陆地交汇的位置, 是海陆相互作用强烈的敏感地带, 也是人类活动频繁的区域。淤泥质潮滩主要由粉砂和黏土这两类细颗粒沉积物组成, 中国的沿岸淤泥质潮滩占大陆海岸线总长的 1/4 左右, 主要分布在长江等河口地区、渤海湾及江苏等开敞海岸、以及长江口-杭州湾以南的港湾内^[1-2]。由于独特的地理位置, 潮滩拥有极高的生物多样性, 由陆地和海洋衍生的营养物质支持, 是世界上生产力最高的生态系统之一^[3]。作为海岸带和陆地之间的缓冲区, 潮滩不仅起着消浪、护岸的功能^[4], 还为人类提供生存空间和丰富的自然资源^[5]。同时, 潮滩的沉积物组成能指示古气候、古沉积环境及其演化, 是海洋环境演化研究的良好载体^[6]。我国自 80 年代起, 开展了大量淤泥质潮滩的相关调查研究, 学者们根据我国淤泥质潮滩的物质组成及沉积地貌特征, 重新划分了沉积物的粒度分级、对我国淤泥质潮滩进行了分类、总结了我国大陆海岸的淤泥质潮滩的分布区域、面积和类型、沉积动力环境及沉积地貌, 结合构造体系、河流输沙特征、海洋动力、植被作用及人类活动, 探讨了淤泥质海岸的发育特征及制约因素^[1,7-10]。

潮滩沉积物粒度特征的研究是潮滩研究的重点之一, 其粒度特征及空间分布含有丰富的沉积环境信息^[10]。潮滩沉积物粒度分布具有时间和空间上的变化, 其沉积过程受到近岸水动力条件的影响, 在年周期中近岸水动力具有季节性变化^[11], 入海河流的枯洪季变化, 潮汐作用的周期变化, 台风等极端动力事件的影响, 使潮滩沉积物的粒度组成和分布具有时空变化特征。河口地区作为陆海相互作用过程最为剧烈的地区, 河口潮滩显著发育^[7,12-13]。然而, 随着流域人类活动强度不断加剧, 河流入海泥沙锐减, 河口系统状态发生转换^[14], 河口潮滩淤长速度放缓, 甚至在潮间带下部开始出现一定程度的侵蚀^[15]。中国河口潮滩发育广泛, 但研究多集中在大型河口潮滩^[16-17], 对中小型河口潮滩研究关注相对较少。为探究中小型河口潮滩演化过程对流域人类活动的响应, 首先需要清晰地了解河口潮滩

的时空变化特征。闽江是中国东南沿海典型的中小型山溪性河流, 径流量大, 泥沙供应丰富^[18], 闽江口多发育分汉河床, 且沉积动力条件复杂, 同时受海洋水动力以及河流水动力的影响, 河口潮滩沉积物粒度呈现出复杂的时空变化特征。因此, 本文选择位于闽江河口的琅岐岛东部潮滩作为研究对象, 通过采集和分析不同季节表层沉积物的粒度组成, 以探究河口潮滩表层沉积物粒度组成的季节变化特征, 以期为深入认识河口潮滩演化过程及预测未来演化趋势提供科学依据。

1 研究区域概况

闽江口属于强潮型河口, 平均潮差大于 4 m, 潮汐类型为正规半日潮, 潮波性质接近驻波, 平均涨潮小于平均落潮流流速, 落潮流是塑造河口的主要动力^[19]。闽江河口东临东海, 海面开阔, 又常受台风影响, 因此波浪作用显著^[20]。闽江全长 2872 km, 其中干流全长近 577 km, 流域面积为 60992 km², 多年平均径流量为 605.5×10⁸ m³, 多年平均输沙量为 750×10⁴ t, 具有明显的季节性变化, 4—9 月为洪季, 径流量和输沙量分别占全年的 76% 和 92%^[19-20]。琅岐岛位于福州市马尾区琅岐镇, 经纬度范围为 26.06°~26.12°N、119.54°~119.65°E。琅岐岛东侧潮滩发育典型, 潮滩盐沼植被主要有互花米草 (*Spartina alterniflora*) 和海三棱藨草 (*Scirpus mariqueter*), 互花米草主要分布在靠岸一侧的潮间带上部; 海三棱藨草覆盖范围较广, 占据了潮间带中部, 一般春季中期开始发芽, 夏季生长最旺盛, 秋季逐渐消亡, 从秋季末期到第二年春季早期均无植被覆盖; 光滩主要分布在潮间带下部靠海一侧。

2 研究方法

本研究在琅岐岛东北侧潮滩沿岸设置了 5 条断面, 由北向南依次为断面 L0、L1、L2、L3 及 L4, 在断面上由岸向海以一定间隔设置采样站位 (图 1b),

于2022年5、8、12月初期及次年2月4个时期采样,分别代表春、夏、秋、冬4个季节,采样厚度为表层1 cm。

采集的表层沉积物带回实验室后,经充分混合后,取0.3 g混合样品于试管中,加入5 mL浓度为15%的 H_2O_2 溶液去除有机质,静置24 h后倒出上清液,加入5 mL浓度为1 mol/L的HCl溶液,以去除碳酸钙物质,静置24 h后倒出上清液,加入蒸馏水清洗直至中性。最后加入5 mL浓度为0.5%的 $(NaPO_3)_6$ 溶液于试管中使样品充分分散,待样品与试剂充分混合后利用英国Mastersizer 2000型激光粒度分析仪对沉积物样品进行粒度分析。利用仪器自带软件以 $1/4 \Phi$ 间隔导出粒度分析数据,采用图解法计算沉积物各粒度参数^[21]:

平均粒径:

$$M_z = \frac{\Phi_{16} + \Phi_{50} + \Phi_{84}}{3} \quad (1)$$

分选系数:

$$\sigma_{\Phi} = \frac{\Phi_{84} - \Phi_{16}}{4} + \frac{\Phi_{95} - \Phi_5}{6.6} \quad (2)$$

偏态:

$$Sk_i = \frac{\Phi_{16} + \Phi_{84} - 2\Phi_{50}}{2(\Phi_{84} - \Phi_{16})} + \frac{\Phi_5 + \Phi_{95} - 2\Phi_{50}}{2(\Phi_{95} - \Phi_5)} \quad (3)$$

峰态:

$$K_g = \frac{\Phi_{95} - \Phi_5}{2.44(\Phi_{75} - \Phi_{25})} \quad (4)$$

3 结果分析

3.1 沉积物粒度组分及分布特征

不同季节表层沉积物粒度分析结果显示,琅岐岛潮滩表层沉积物粒度组分总体上主要为粉砂、黏土和砂,组分含量具有显著的时空差异(图2)。

表层沉积物砂组分含量为0~100%,其中春季砂含量最高区域为研究区中部及中南部,靠陆及靠海一侧砂含量均较低;夏季整体砂含量都很低;秋季研究区中部及靠海一侧砂含量增加;冬季整个潮间带砂含量均明显增加。

表层沉积物粉砂组分含量变化范围为0~90%,其空间分布与砂含量相反,其中春季与秋季分布格局较为相似,即:潮间带中部及中南部含量较低,靠陆及靠海一侧、以及中北部地区粉砂含量较高;夏季整个研究区表层沉积物粉砂含量显著增高;冬季潮间带中部及中南部粉砂含量较低,靠陆一侧粉砂含量一般>60%,而靠海一侧粉砂含量一般为30%~50%。

表层沉积物中黏土组分含量变化范围为0~36%,其空间分布与粉砂含量一致,与砂含量相反。春季、秋季及冬季黏土组分含量低值区分布格局基本相似,均位于潮间带中部,其中冬季黏土含量低值区分布范围最大,靠陆一侧都出现黏土含量最高值区;夏季表层沉积物黏土组分含量分布与其他季节相反,最低值出现在研究区西北及中南部区域。

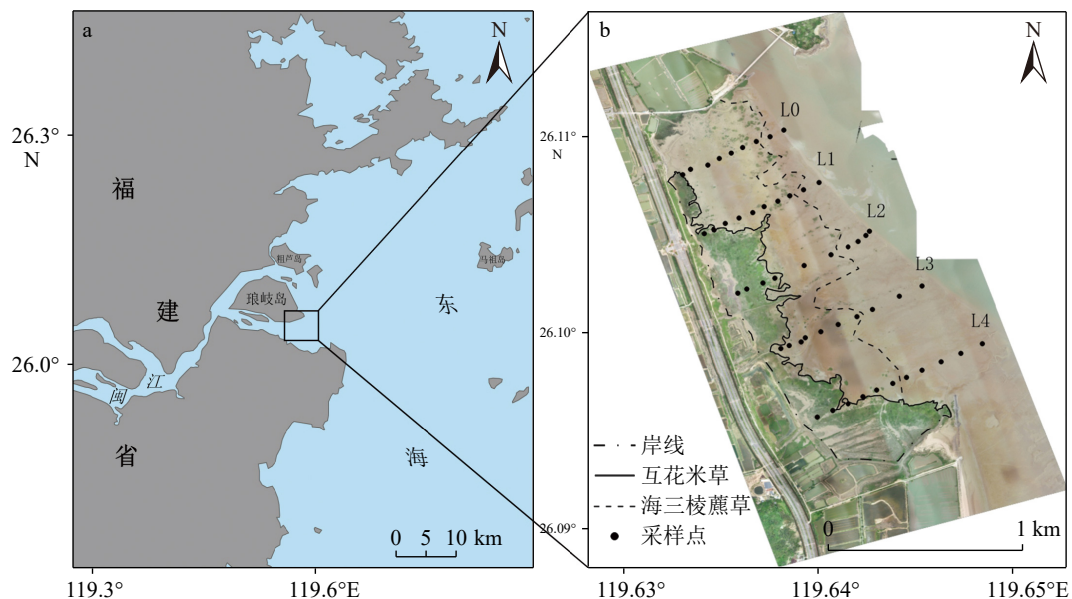


图1 研究区位置及采样站位分布

Fig.1 Sketch map of the study area and sampling sites

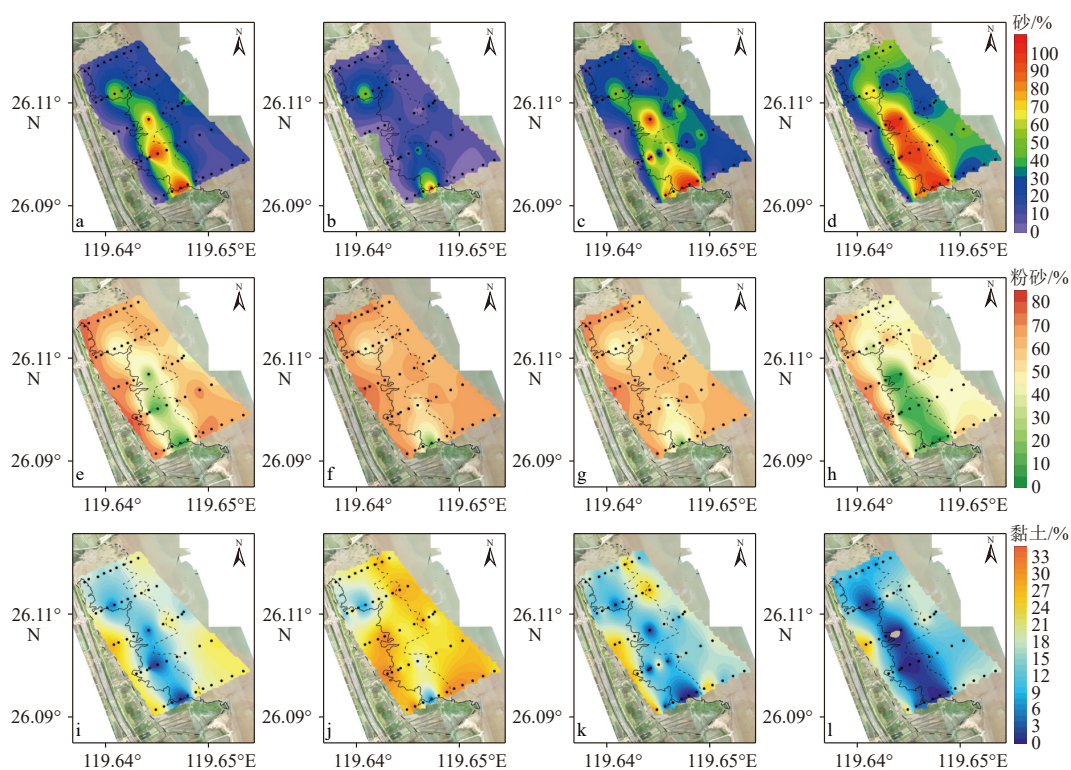


图 2 琅岐岛潮滩不同季节沉积物粒度组分平均含量平面分布图

图中分别为 2022 年 5 月、8 月、12 月及次年 2 月(从左至右)的砂(a-d)、粉砂(e-h)、黏土(i-l)含量平面分布。

Fig.2 Seasonal variations of surficial sediment composition on tidal flat in Langqi Island

a-d: The sand distribution in May, August, December of 2022, and February of 2023; e-h: silt distribution in May, August, December of 2022, and February of 2023; i-l: clay distribution in May, August, December of 2022, and February of 2023.

3.2 沉积物粒度参数及分布特征

粒度参数能综合反映沉积物粒度特征及沉积环境条件^[22]。琅岐岛潮滩各粒度参数的四季平面分布如图 3 所示。琅岐岛潮滩表层沉积物平均粒径(M_z)为 $2.2 \sim 7.4 \Phi$, 在季节上, 春季表层沉积物 M_z 为 $2.56 \sim 7.03 \Phi$, 平均值为 5.56Φ ; 夏季表层沉积物 M_z 为 $2.65 \sim 7.38 \Phi$, 平均值为 6.40Φ ; 秋季表层沉积物 M_z 为 $2.16 \sim 7.21 \Phi$, 平均值为 5.27Φ ; 冬季表层沉积物 M_z 为 $2.16 \sim 7.21 \Phi$, 平均值为 4.73Φ 。空间上, $M_z < 4.0 \Phi$ 的粗颗粒沉积物主要分布在潮滩中部及南部, $M_z > 4.0 \Phi$ 的细颗粒沉积物则主要分布在靠岸和靠海一侧及潮滩北部。

分选系数(σ)变化范围为 $0.4 \sim 3.1$, 在空间分布上总体表现为靠陆一侧沉积物分选较差、靠海一侧沉积物分选差、中部沉积物随季节变化由分选较好向分选较差改变。在季节上, 研究区在冬季靠海一侧沉积物分选差, 靠岸一侧沉积物分选较差, 中部沉积物分选较好; 春季靠岸一侧沉积物分选较差, 向海一侧沉积物分选差; 夏季整个潮间带沉积物总体分选程度较差; 秋季潮间带中下部沉积物分选程度

较好, 其余区域沉积物分选较差。

偏态值(Sk)范围为 $-0.1 \sim 0.7$, 主要为近对称、正偏和极正偏 3 种分布类型。在空间上, 沉积物偏态总体上表现出如下变化特征: 潮滩中部区域沉积物由正偏和极正偏向近对称变化, 靠陆和靠海两侧区域及北部地区沉积物则由近对称向正偏和极正偏变化。在季节上, 研究区偏态在春季表现为中部沉积物为正偏和很正偏分布, 靠海一侧沉积物出现近对称分布; 夏季沉积物正偏分布范围减小, 靠海一侧沉积物近对称分布范围扩大; 秋季潮滩中部沉积物变为近对称分布, 其余区域为正偏和极正偏分布; 冬季潮滩中部沉积物近对称分布范围扩大。

峰度值(K)变化范围为 $0.7 \sim 2.1$, 大部分区域以宽峰为主, 春季研究区西北部区域出现窄峰及很窄峰分布, 其余区域均为宽峰分布; 夏季潮滩中部及中下部沉积物出现窄峰和很窄峰分布区域; 秋季和冬季靠岸一侧沉积物均出现窄峰分布, 并且冬季窄峰分布范围更大。

3.3 各粒度参数间的相关性分析

沉积物粒度参数之间的相关性分析结果显示

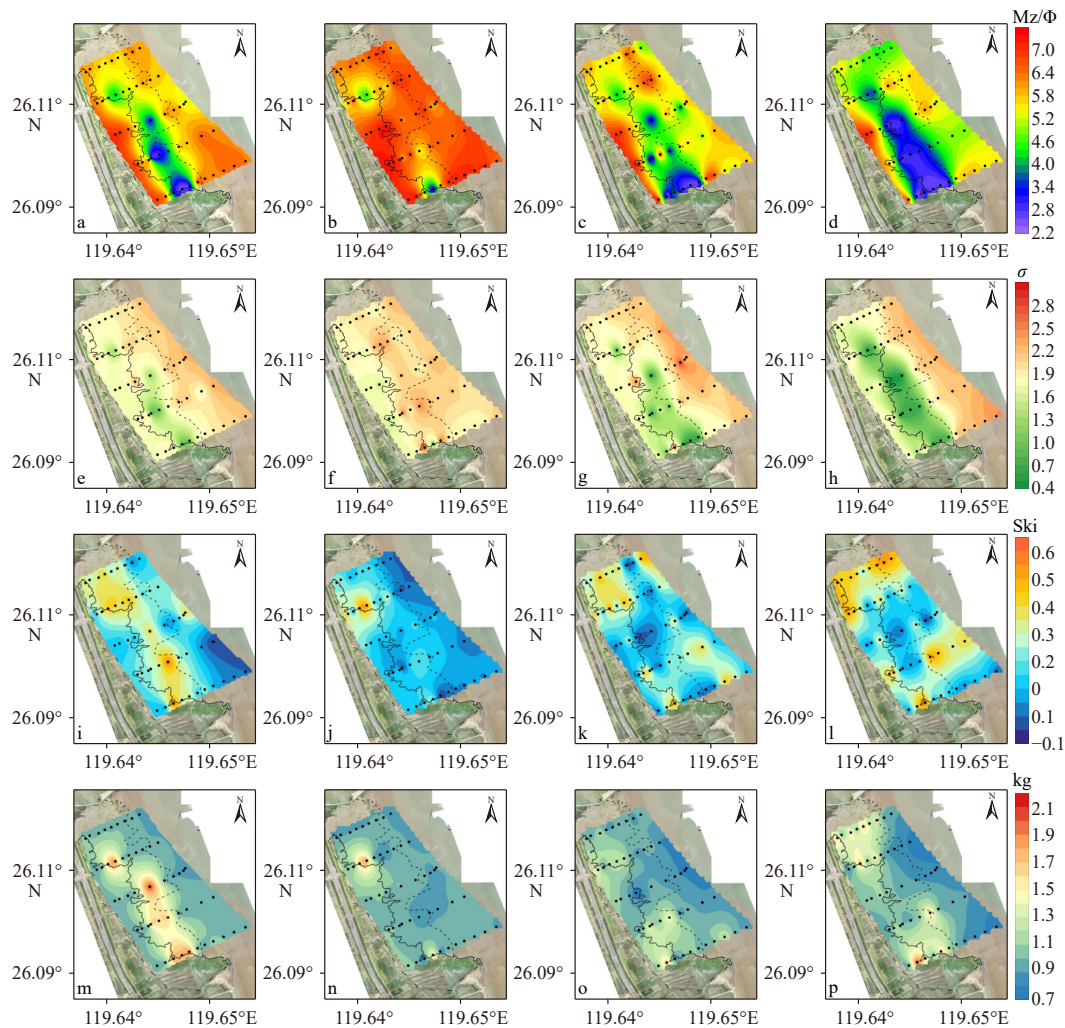


图3 琅岐岛潮滩不同季节表层沉积物粒度参数平均值的平面分布

图中分别为2022年5月、8月、12月及次年2月(从左至右)的平均粒径(a-d)、分选系数(e-h)、偏态(i-l)、峰度(m-p)的平面分布。

Fig.3 Seasonal variations and the distributions of surficial sediment grain-size parameters in tidal flat of Langqi Island

The distributions of mean grain-size(a-d), sorting coefficients(e-h), skewness (i-l) and kurtosis(m-p) in May, August, December of 2022, and February of 2023 (from left to right, respectively).

(图4),随着沉积物平均粒径减小,沉积物粒度分选逐渐变差,当平均粒径小于 5Φ 时,随着平均粒径的继续减小,分选程度又逐渐变好(图4a);沉积物偏态先由近对称分布逐渐变为极正偏分布,当平均粒径小于 4Φ 时,随着平均粒径的继续减小,偏态又逐渐向近对称分布变化(图4b);峰态由窄峰变化到宽峰,并且当平均粒径小于 5Φ 时,峰态类型始终为宽峰分布(图4c)。

当沉积物分选系数 <1.5 时,随着分选程度的变差,沉积物偏态类型由近对称分布逐渐向极正偏分布变化(图4d),沉积物峰态类型也由宽峰类型向很窄峰类型变化(图4e);当沉积物分选系数 >1.5 时,随着分选程度的继续变差,沉积物偏态类型由极正偏分布逐渐向近对称分布变化(图4d),沉积物峰态类型也由很窄峰类型向宽峰类型变化(图4e)。偏

态值与峰态值的相关性表明,随着沉积物由近对称向极正偏变化时,沉积物峰态类型也由宽峰类型向很窄峰类型变化(图4f)。

4 讨论

早期的研究结果发现,潮滩沉积物分布具有明显的时空差异,即潮滩沉积物在空间上的分布具有分带性,如王颖^[23]在渤海湾西岸潮滩、Evans^[24]在英国Wash湾潮滩、Reineck^[25]在欧洲北海潮滩均发现潮滩沉积物粒径由岸向海逐渐变粗;时间上具有显著的不同周期变化特征,如任美镔等在江苏王港发现潮滩沉积物具有典型的大-小潮周期^[26],Uncles^[27]在英国典型河口发现潮滩沉积物具有显著的季节变化。国内外诸多学者针对潮滩沉积物时空分布

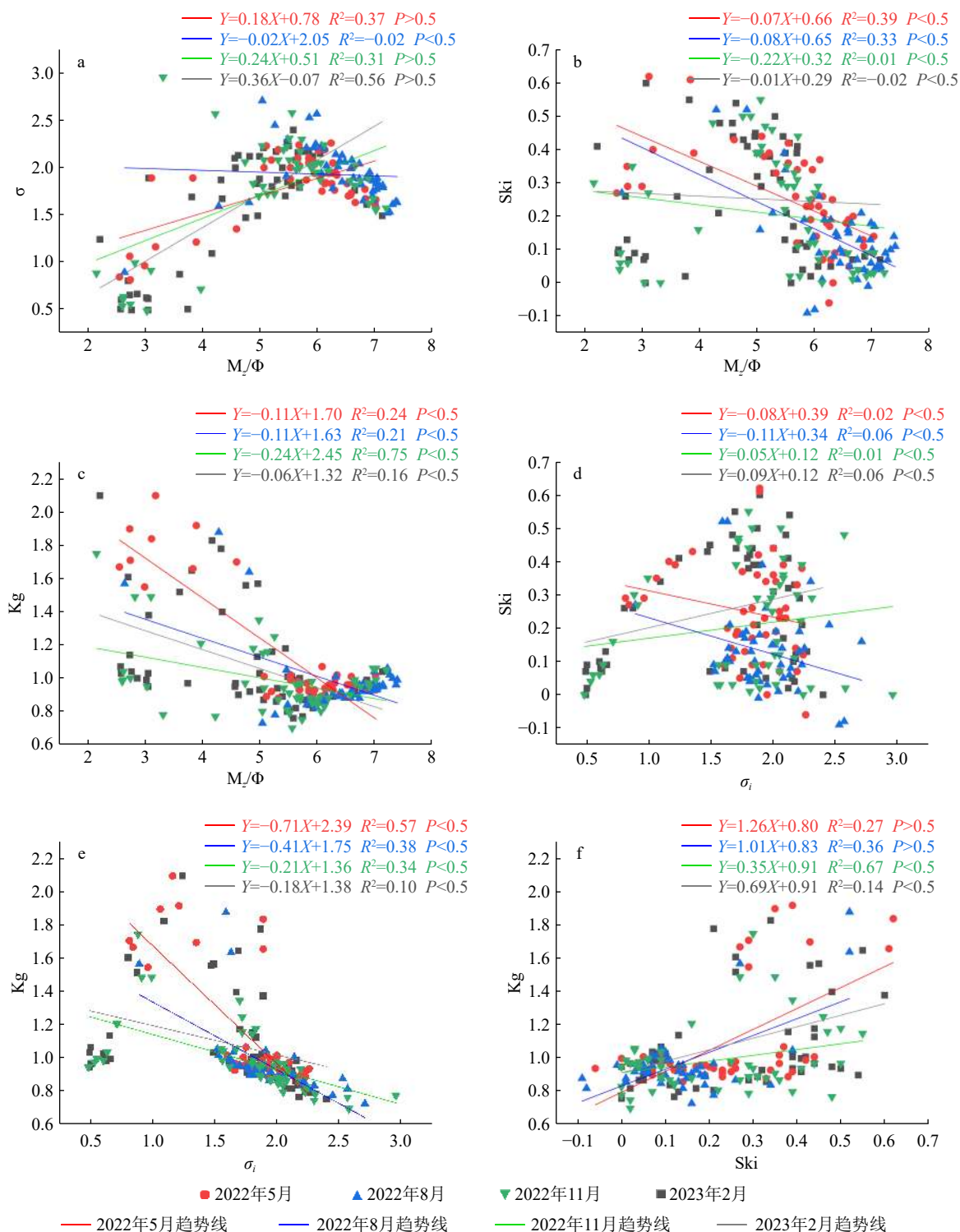


图 4 不同季节表层沉积物各粒度参数平均值之间的相关分析

a: 粒径与分选系数; b: 粒径与偏态; c: 粒径与峰度; d: 分选系数与偏态; e: 分选系数与峰度; f: 偏态与峰度。

Fig.4 Correlation analysis in mean values among grain-size parameters in different seasons

a: mean grain-size vs. sorting coefficient; b: mean grain-size vs. skewness; c: mean grain-size vs. kurtosis; d: sorting coefficients vs. skewness; e: sorting coefficients vs. kurtosis; f: skewness vs. kurtosis.

格局的动力学机制开展了一系列研究^[2,12,28-31]。一般来说,潮滩沉积过程受物源、动力及地貌等要素的控制,各要素的差异塑造了类型多样、变化复杂的潮滩沉积地貌^[28]。下面将从这3个要素出发探讨琅岐岛潮滩表层沉积物的季节分布。

4.1 沉积物来源

河口潮滩的沉积物主要来源于河流输沙。大量的河流入海泥沙进入河口后,在水动力的作用下发育了广泛的潮滩^[7,29]。闽江入海泥沙主要分布在河口地区^[32],并且在水动力的作用下向海岸方向搬运^[18,32],为琅岐岛潮滩发育提供了充足的物源。由于河流输沙具有显著的季节变化特征,中国河流泥沙入海主要集中在夏季,冬季入海泥沙通量非常小^[19]。闽江流域年径流和输沙量具有明显的季节性变化,洪季的径流量和输沙量都远大于枯季,统计结果显示^[20],洪季期间(4—9月)和枯季(10月至翌年3月)流域径流量占全年总径流量分别为75.6%和24.4%,多年平均入海泥沙通量占全年总入海泥沙通量的比重分别为92%和8%(图5b),虽然后期因水库调控而使季节差异略有减小^[33],但径流量和输沙量的季节差异依然显著(图5)。琅岐岛潮滩表层沉积物粒度分析结果显示(表1),春季和夏季闽江流域处于洪季时期河口潮滩捕获了大量的河流入海沉积物,潮滩为淤积状态,潮滩表层沉积物以粉砂和黏土为主,平均粒径较小。秋季和冬季,河流入海泥沙很少,河口潮滩很少能捕获来自河流的泥沙,

潮滩表层沉积物在水动力的作用下不断发生改造,最终细颗粒沉积物被搬运带走,潮滩发生侵蚀,表层沉积物以砂和粉砂为主。潮滩冲淤观测结果也验证了该结果^[34]。

然而,随着流域土地利用变化及水库修建等,河流入海泥沙通量显著减小^[35],并进而导致河口潮滩冲淤格局发生变化^[36-39],如三峡大坝蓄水后长江口潮滩淤长速率显著下降^[40-42],甚至部分潮滩开始出现冲刷并且强度逐渐增强^[15,43-44]。闽江流域水库众多,拦截了大量的河流泥沙,尤其是水口水库建成后,闽江河流入海泥沙通量已经减少至水库建设以前的三分之一^[45],引起了河口水下三角洲不同程度的侵蚀^[46],河口沉积物组成发生变化^[18]。因此,随着闽江入海泥沙通量的减少,闽江河口潮滩的淤长将会显著减缓,并且季节性的侵蚀强度将会加剧,并引起整个潮滩发生侵蚀。

4.2 沉积动力环境影响

在泥沙来源基本相同的情况下,潮滩沉积物的分布主要由沉积动力环境决定^[47]。影响潮滩沉积的动力过程主要包括潮汐、波浪、跨岸/沿岸流、风致环流、潮不对称、潮沟过程等^[30],尤其是在极浅水环境下,潮流、波浪和风是影响潮滩沉积物分布的主要动力因素^[48-49],台风等极端事件也会对潮滩沉积过程产生重要影响^[50-53]。闽江口作为中国东南沿海的强潮、强浪海区,其沉积动力环境强,潮流和波浪作用对沉积物的改造作用显著^[18,32,47]。观测结果

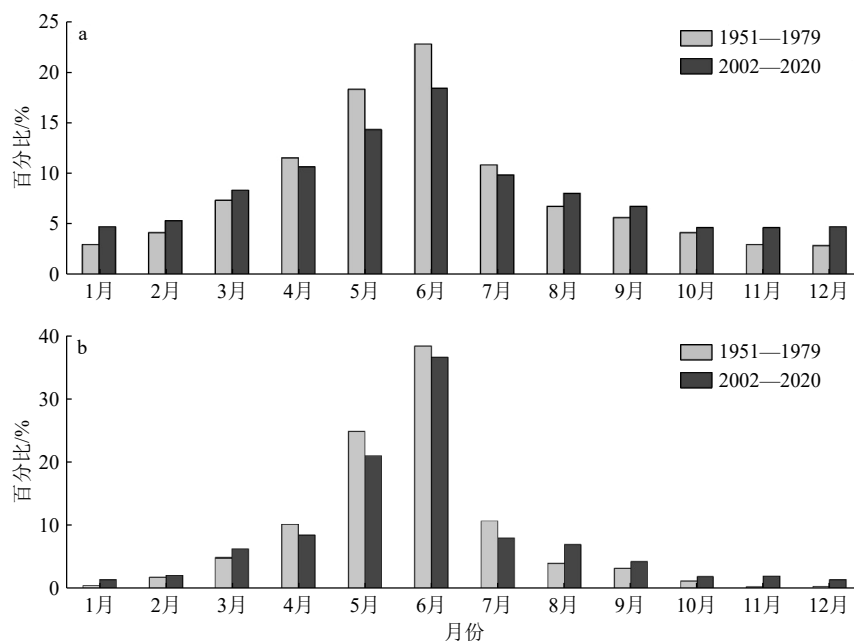


图5 不同时段闽江入海径流量(a)和泥沙通量(b)多年月平均百分比^[33]

Fig.5 Monthly-averaged percentages of freshwater and sediment fluxes discharged from the Minjiang River^[33]

表 1 琅岐岛潮滩不同季节表层沉积物粒度特征统计值
Table 1 Statistical value of surficial sediment composition and grain-size parameters on tidal flat of Langqi Island in different seasons

时间	砂/%	粉砂/%	黏土/%	Mz/Φ	σ	Ski	Kg
2022年5月	44.58	45.04	10.38	4.73	1.62	0.25	1.09
2022年8月	25.77	58.10	16.13	5.56	1.80	0.25	1.11
2022年12月	13.02	62.65	24.33	6.40	1.92	0.13	0.97
2023年2月	33.64	51.46	14.89	5.27	1.76	0.20	0.99

显示,琅岐岛潮间带中上部地区冬季近底部流速较夏季大,冬季期间波浪作用较夏季强,冬季沉积物在波浪的作用下易发生再悬浮,并被在潮流的作用下向海净输运,而夏季波浪作用弱,水体中的悬沙易发生落淤,在潮流的作用下向岸净输运^[34]。琅岐岛潮滩不同季节表层沉积物粒度分析统计结果也显示(表 1),夏季表层沉积物砂含量低,粉砂和黏土含量高,平均粒径小;冬季砂含量增加,粉砂和黏土含量减少,平均粒径大,表明琅岐岛潮滩在波浪和潮流作用影响下发生季节性侵蚀-淤积变化,进而影响了潮滩表层沉积物的组成与分布。

4.3 植被影响

潮滩表面生长的盐沼植被会改变潮滩沉积物输运与沉积过程及地貌演化^[31,54-58]。盐沼植被的存在,改变了潮滩的水流结构、悬沙沉降及表层沉积物分布^[54,57,59]。盐沼植被能通过植被茎叶减缓潮滩

水流,具有显著的弱流与消浪作用,营造了一个低能的动力环境,从而加快黏性泥沙絮凝,有利于植被区域泥沙沉降^[54,58]。植被的茎、叶和果实也具有捕获泥沙的能力,尤其是叶、茎和果实结合处能截留较多的沉积物^[60],发达的根系使潮滩表层沉积物结构更稳定、结实,不易被水流扰动再悬浮^[61]。

研究区潮间带上部生长有大量互花米草,潮间带中部生长有海三棱藨草(图 1b 中黑色曲线部分为植被生长区域)。根据植被类型和覆盖程度将研究区分为互花米草盐沼、海三棱藨草盐沼和光滩三个区域,对不同区域沉积物粒度组成及粒度参数进行统计分析(表 2),互花米草盐沼四季具有生长,覆盖区域内粉砂含量较高,黏土含量在秋季最高,其余季节相对较低,但含量均高于 10%;海三棱藨草盐沼的生长具有季节性,采样期间的现场观察发现,研究区的海三棱藨草在春季开始发芽生长,夏季生长最为茂盛,秋季枯萎消失,冬季为无植被覆盖,结合粒度组成和粒度参数数据,夏季生长区域内粉砂和黏土的含量高,冬季植被消失,粉砂和黏土含量降低,砂含量增加。光滩直接受潮流自然影响,粉砂和黏土含量在夏季高,冬季低,砂含量的变化则相反。总体来看,研究区内互花米草盐沼区域内以沉积物细化为主,海三棱藨草盐沼和光滩具有明显的季节性沉积物粗细变化。

综上所述,闽江口琅岐岛潮滩沉积物时空分布及变化特征与国内外河口、海湾及开放型潮滩沉积物分布格局一致,也是物源、动力和地貌综合作用

表 2 琅岐岛潮滩不同区域的粒度组成及粒度参数

Table 2 Surficial sediment composition and grain-size parameters in different zones of tidal flat of Langqi Island

沉积区域	时间	砂/%	粉砂/%	黏土/%	Mz/Φ	σ	Ski	Kg	植被生长状况
互花米草区	2022年5月	35.44	51.92	12.63	4.71	4.98	1.54	0.31	茂密
	2022年8月	13.86	66.28	19.86	5.89	6.11	1.81	0.22	
	2022年12月	7.97	66.90	25.13	6.47	6.63	1.81	0.16	
	2023年2月	25.26	56.69	18.05	5.45	5.64	1.83	0.19	
海三棱藨草区	2022年5月	58.61	35.50	5.88	3.83	4.10	1.30	0.29	发芽
	2022年8月	35.41	51.34	13.25	4.86	5.10	1.67	0.29	茂密
	2022年12月	17.62	60.27	22.11	6.02	6.14	1.93	0.15	无植被
	2023年2月	44.44	44.11	11.44	4.57	4.80	1.52	0.23	无植被
光滩	2022年5月	29.25	55.03	15.72	5.33	5.52	2.16	0.17	无植被覆盖
	2022年8月	17.14	64.27	18.59	5.73	5.97	2.04	0.19	
	2022年12月	9.29	63.55	27.16	6.59	6.66	1.99	0.08	
	2023年2月	22.69	59.21	18.10	5.56	5.74	2.09	0.17	

的结果,但因其动力强、植被覆盖变化大,沉积物供应季节差异显著,潮滩沉积物组成的季节变化更为显著,对环境变化响应更为敏感。

5 结论与展望

5.1 结论

(1)闽江口琅岐岛潮滩表层沉积物组分整体以粉砂为主,黏土和砂含量呈现显著的季节变化,沉积物平均粒径为 $2.2\sim 7.4\Phi$,其中夏季砂含量最低,粉砂和黏土含量最高,沉积物平均粒径小,分选程度差,以正偏和极正偏分布为主,峰态类型以宽峰为主;冬季砂含量最高,粉砂和黏土含量最低,沉积物平均粒径大,潮间带上部和潮间带下部沉积物分选程度差,潮间带中部沉积物分选程度较好,以近对称和正偏为主,峰态类型以宽峰为主。

(2)空间上,由岸向海沉积物砂含量总体表现为先增加、后减少的变化特征,而粉砂和黏土含量呈现相反的趋势,平均粒径总体呈现由岸向海先增加、后减小的分布格局;由北向南,沉积物砂含量总体增加,粉砂和黏土含量总体减小,平均粒径总体减小。

(3)沉积物供应的季节变化引起河口潮滩冲淤格局发生变化,在潮流和波浪作用的综合作用下,潮滩夏季发生淤积,冬季发生侵蚀,控制了河口潮滩沉积物粒度组成的季节变化过程,而不同类型植被覆盖程度的不同,也在一定程度上影响了河口潮滩沉积物的粒度组成的季节变化。

5.2 不足与展望

本文虽然对闽江口琅岐岛表层沉积物的时空分布进行了系统研究,也对影响沉积物分布的控制因素进行了分析,但尚属定性分析,在定量分析方面有所欠缺;另外,闽江口地区经常遭受台风和洪水的影响,这些极端事件会显著影响河口潮滩沉积过程^[52-53],但本文采样期间并未遇到极端事件发生,因此,本文研究缺少极端事件的影响分析。下一步,将从沉积动力学的观测和模拟方面着手,系统分析控制闽江口潮滩沉积物分布的动力学机制,进一步探讨极端事件对河口潮滩沉积过程的影响。

此外,人类活动也是影响潮滩沉积过程的主要因素,以往的研究多集中在潮滩围填海^[62]、植被引种产生的影响^[54-55,57]等,自2022年起,中国沿海各省市都开始了清除互花米草的行动,原本覆盖潮间

带上部的互花米草被清除后,将会显著改变潮滩地貌,进而引起潮滩沉积过程发生变化。闽江口潮滩互花米草清除行动已经于2023年9月开始,我们将会在本文研究基础上,继续开展持续研究,探讨互花米草清除对潮滩沉积过程的影响。

致谢: 黄书仁、黄思添、余永泽、陈海煌、刘三善参与了野外采样工作,黄书仁参与了实验室样品分析,谨致谢忱!

参考文献 (References)

- [1] 任美镔. 中国淤泥质潮滩沉积研究的若干问题[J]. 热带海洋, 1985(2): 6-14,99. [REN Meie. A Study on sedimentation of tidal mud flats of China[J]. Journal of Tropical Oceanography, 1985(2): 6-14,99.]
- [2] 时钟, 陈吉余, 虞志英. 中国淤泥质潮滩沉积研究的进展[J]. 地球科学进展, 1996, 11(6): 555-562. [SHI Zhong, CHEN Jiyu, YU Zhiying. Sedimentation on the intertidal mudflat in China: an overview[J]. Advance in Earth Sciences, 1996, 11(6): 555-562.]
- [3] Murray N J, Clemens R S, Phinn S R, et al. Tracking the rapid loss of tidal wetlands in the Yellow Sea[J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2014, 12(5): 267-272.
- [4] Murray N J, Phinn S R, Clemens R S, et al. Continental scale mapping of tidal flats across East Asia using the Landsat archive[J]. Remote Sensing, 2012, 4(11): 3417-3426.
- [5] 任美镔. 中国滩涂开发利用的现状与对策[J]. 中国科学院院刊, 1996(6): 440-443. [REN Meie. Current situation and countermeasures of beach development and utilization in China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 1996(6): 440-443.]
- [6] 许炯心, 李炳元, 杨小平, 等. 中国地貌与第四纪研究的近今进展与未来展望[J]. 地理学报, 2009, 64(11): 1375-1393. [XU Jiongxin, Li Bingyuan, Yang Xiaoping, et al. Recent progress in geomorphology and quaternary geology in China and some perspectives[J]. Acta Geographica Sinica, 2009, 64(11): 1375-1393.]
- [7] 王颖, 朱大奎. 中国的潮滩[J]. 第四纪研究, 1990, 10(4): 291-300. [WANG Ying, ZHU Dakui. Tidal flats of China[J]. Quaternary Sciences, 1990, 10(4): 291-300.]
- [8] 杨世伦. 中国淤泥质海岸的发育特点[J]. 华东师范大学学报:自然科学版, 1990(4): 85-91. [YANG Shilun. The developmental characteristics of muddy coasts in China[J]. Journal of East China Normal University: Natural Science, 1990(4): 85-91.]
- [9] 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.]
- [10] 李东义, 徐勇航, 王爱军, 等. 福建安海湾表层沉积物粒度特征及其现代沉积过程分析[J]. 沉积学报, 2015, 33(4): 724-734. [LI Dongyi, XU Yonghang, WANG Aijun, et al. Analysis of surface sediment grain size characteristics and modern sedimentary process in Fujian

- an Anhai gulf[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2015, 33(4): 724-734.]
- [11] 徐晓晖, 陈坚, 赖志坤. GIS 支持下近年来闽江口海底地形地貌演变[J]. *台湾海峡*, 2009, 28(4): 577-585. [XU Xiaohui, CHEN Jian, LAI Zhikun. Seabed morphological evolution in Minjiang estuary in recent one hundred years based on GIS tools[J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2009, 28(4): 577-585.]
- [12] Eisma D. *Intertidal Deposits: River Mouths, Tidal Flats, and Coastal Lagoons*[M]. Boca Raton: CRC Press, 1998.
- [13] 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.
- [14] 汪亚平, 贾建军, 杨阳, 等. 长江三角洲蓝图重绘的基础科学问题: 进展与未来研究[J]. *海洋科学*, 2019, 43(10): 2-12. [WANG Yaping, JIA Jianjun, YANG Yang, et al. Fundamental scientific issues for the Changjiang River delta associated with the new blueprint of future development: overview and prospect[J]. *Marine Sciences*, 2019, 43(10): 2-12.]
- [15] Yang S L, Luo X X, Temmerman S, et al. Role of delta-front erosion in sustaining salt marshes under sea-level rise and fluvial sediment decline[J]. *Limnology and Oceanography*, 2020, 65(9): 1990-2009.
- [16] Dai Z J. *Changjiang Riverine and Estuarine Hydro-morphodynamic Processes: In the Context of Anthropocene Era*[M]. Singapore: Springer, 2021.
- [17] Xie W M, Sun J W, Guo L C, et al. Distinctive sedimentary processes on two contrasting tidal flats of the Yellow River Delta[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2023, 10: 1259081.
- [18] 谢津剑, 王爱军, 叶翔, 等. 闽江河口水下三角洲及周边海域现代沉积环境演化及其对人类活动的响应[J/OL]. *沉积学报*, 2022: 1-23. [XIE Jinjian, WANG Aijun, YE Xiang, et al. Contemporary sedimentary environment evolution and its response to human activities in the Minjiang subaqueous delta and surrounding waters[J/OL]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2022: 1-23.]
- [19] 中国海湾志编纂委员会. *中国海湾志: 第十四分册* [M]. 北京: 海洋出版社, 1998. [State Oceanic Administration. *China embayment* (No. 14: Important river estuaries)[M]. Beijing: China Ocean Press, 1998: 626-691.]
- [20] 李东义, 陈坚, 王爱军, 等. 闽江河口沉积动力学研究进展[J]. *海洋通报*, 2008, 27(2): 111-116. [LI Dongyi, CHEN Jian, WANG Aijun, et al. Recent progress in sediment transport research in Minjiang Estuary[J]. *Marine Science Bulletin*, 2008, 27(2): 111-116.]
- [21] 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.
- [22] 卢连战, 史正涛. 沉积物粒度参数内涵及计算方法的解析[J]. *环境科学与管理*, 2010, 35(6): 54-60. [LU Lianzhan, SHI Zhengtao. Analysis for sediment grain size parameters of connotations and calculation method[J]. *Environmental Science and Management*, 2010, 35(6): 54-60.]
- [23] 王颖. 渤海湾西部贝壳堤与古海岸线问题[J]. *南京大学学报: 自然科学版*, 1964(3): 424-440, 462-464. [WANG Ying. The shell coast ridges and the old coastlines of the west coast of the Pohai bay[J]. *Journal of Nanjing University: Natural Sciences*, 1964(3): 424-440, 462-464.]
- [24] Evans G. Intertidal flat sediments and their environments of deposition in the Wash[J]. *Quarterly Journal of the Geological Society*, 1965, 121(1-4): 209-240.
- [25] Reineck H E. *German North Sea tidal flats*[M]//Ginsburg R N. *Tidal Deposits*. Berlin, Heidelberg: Springer, 1975: 5-12.
- [26] 任美镠, 张忍顺, 杨巨海. 江苏王港地区淤泥质潮滩的沉积作用[J]. *海洋通报*, 1984(1): 40-54. [REN Meie, ZHANG Renshun, YANG Junhai. Sedimentation on tidal mud flat in Wanggang area, Jiangsu province, China[J]. *Marine Science Bulletin*, 1984(1): 40-54.]
- [27] Uncles R J, Stephens J A, Harris C. Seasonal variability of subtidal and intertidal sediment distributions in a muddy, macrotidal estuary: the Humber-Ouse, UK[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1998, 139(1): 211-219.
- [28] Gao S. *Geomorphology and sedimentology of tidal flats*[M]//Coastal Wetlands. 2nd ed. Singapore: Elsevier, 2019: 359-381.
- [29] Gao S, Collins M B. Holocene sedimentary systems on continental shelves[J]. *Marine Geology*, 2014, 352: 268-294.
- [30] Le Hir P, Roberts W, Cazaillet O, et al. Characterization of intertidal flat hydrodynamics[J]. *Continental Shelf Research*, 2000, 20(12-13): 1433-1459.
- [31] Fan D D, Wang Y, Liu M. Classifications, sedimentary features and facies associations of tidal flats[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2013, 2(1): 66-80.
- [32] 王爱军, 叶翔, 赖志坤, 等. 闽江口及周边海域沉积物输运及资源效应[J]. *海洋与湖沼*, 2020, 51(5): 1013-1024. [WANG Aijun, YE Xiang, LAI Zhikun, et al. Sediment transport in Minjiang River Estuary and adjacent shelf area and associated resource effect[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2020, 51(5): 1013-1024.]
- [33] 王爱军, 叶翔, 徐晓晖, 等. 亚热带中小型山溪性河流—宽陆架系统“源—汇”过程——以闽江—东海陆架系统为例[J]. *沉积学报*, 2022, 40(6): 1615-1634. [WANG Aijun, YE Xiang, XU Xiaohui, et al. "Source-to-sink" Processes of a subtropical mid-small mountainous river-wide continental shelf system: a case study from the Minjiang river-east China sea system[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2022, 40(6): 1615-1634.]
- [34] 王爱军, 李海琪, 叶翔. 河口潮滩季节性冲淤变化格局及其控制机制——以闽江口琅岐岛潮滩为例[J]. *海洋地质与第四纪地质*. [WANG Aijun, LI Haiqi, YE Xiang. Seasonal variations of erosion-accretion pattern of estuaries tidal flat and associated mechanisms: A case study of tidal flat in Minding estuary[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*.]
- [35] Yang S L, Milliman J D, Li P, et al. 50, 000 dams later: Erosion of the Yangtze River and its delta[J]. *Global and Planetary Change*, 2011, 75(1-2): 14-20.
- [36] 杨世伦, 朱骏, 李鹏. 长江口前沿潮滩对来沙锐减和海面上升的响应[J]. *海洋科学进展*, 2005, 23(2): 152-158. [YANG Shilun, ZHU Jun, LI Peng. Response of tidal bank on the Changjiang river mouth foreland to drastic decline in riverine sediment supply and sea level rise[J]. *Advances in Marine Science*, 2005, 23(2): 152-158.]
- [37] 时连强, 夏小明. 我国淤泥质海岸侵蚀研究现状与展望[J]. *海洋学研究*, 2008, 26(4): 72-78. [SHI Lianqiang, XIA Xiaoming. Erosion

- on muddy coasts in China: an overview[J]. *Journal of Marine Sciences*, 2008, 26(4): 72-78.]
- [38] 张雨晨, 余建奎, 任宗海, 等. 入海泥沙减少对黄河三角洲潮滩粒度特征的影响: 物理模型实验 [J]. *海洋地质前沿*, 2022, 38(6): 34-46. [ZHANG Yuchen, YU Jiankui, REN Zonghai, et al. Influence of reduced sediment supply on the particle size distribution on tidal flats of the Yellow River Delta: a physical experimental study[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2022, 38(6): 34-46.]
- [39] 伊锋. 黄河入海泥沙减少对潮滩地貌冲淤影响的物理模型研究 [D]. 鲁东大学硕士学位论文, 2020. [YI Feng. Study on physical model of tidal flat development response to the reduction of the Yellow River sediment into sea[D]. Master Dissertation of Ludong University, 2020.]
- [40] Yang S L, Zhao Q Y, Belkin I M. Temporal variation in the sediment load of the Yangtze river and the influences of human activities[J]. *Journal of Hydrology*, 2002, 263(1-4): 56-71.
- [41] 张云峰. 现代人类活动影响下长江口启东嘴潮滩沉积特征与物质来源变化 [D]. 南京大学博士学位论文, 2015. [ZHANG Yunfeng. Sedimentary characteristics and sediment source of tidal flat under the influence of human activities at Qidong Foreland, the Yangtze Estuary[D]. Doctor Dissertation of Nanjing University, 2015.]
- [42] Dai Z J, Mei X F, Darby S E, et al. Fluvial sediment transfer in the Changjiang (Yangtze) river-estuary depositional system[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 566: 719-734.
- [43] 朱博渊, 刘凌峰, 李江夏, 等. 径流变化下长江口多分汊系统冲淤分布差异及动力机制 [J]. *水科学进展*, 2023, 34(4): 585-598. [ZHU Boyuan, LIU Lingfeng, LI Jiangxia, et al. Erosion-deposition change pattern and hydrodynamic mechanism for the multilevel bifurcating system of Yangtze River Estuary under runoff variation[J]. *Advances in Water Science*, 2023, 34(4): 585-598.]
- [44] Luan H L, Ding P X, Yang S L, et al. Accretion-erosion conversion in the subaqueous Yangtze Delta in response to fluvial sediment decline[J]. *Geomorphology*, 2021, 382: 107680.
- [45] Wang A J, Ye X, Lin Z K, et al. Response of sedimentation processes in the Minjiang River subaqueous delta to anthropogenic activities in the river basin[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2020, 232: 106484.
- [46] 陈坚, 余兴光, 李东义, 等. 闽江口近百年来海底地貌演变与成因 [J]. *海洋工程*, 2010, 28(2): 82-89. [CHEN Jian, YU Xingguang, LI Dongyi, et al. Characteristics of underwater morphology evolution of the Minjiang Estuary in recent 100 years and its reasons[J]. *The Ocean Engineering*, 2010, 28(2): 82-89.]
- [47] 陈祥锋, 马淑燕, 刘苍宇. 闽江口动力沉积特征的探讨 [J]. *海洋通报*, 1998(6): 40-47. [CHEN Xiangfeng, MA Shuyan, LIU Cangzi. Dynamic deposition characteristics of the Minjiang estuary[J]. *Marine Science Bulletin*, 1998(6): 40-47.]
- [48] Shi B W, Cooper J R, Pratolongo P D, et al. Erosion and accretion on a mudflat: The importance of very shallow-water effects[J]. *Journal of Geophysical Research:Oceans*, 2017, 122(12): 9476-9499.
- [49] Shi B W, Yang S L, Wang Y P, et al. Role of wind in erosion-accretion cycles on an estuarine mudflat[J]. *Journal of Geophysical Research:Oceans*, 2017, 122(1): 193-206.
- [50] 王爱军, 叶翔, 陈坚. 台风作用下的港湾型潮滩沉积过程: 以 2008 年“凤凰”台风对福建省罗源湾的影响为例 [J]. *海洋学报*, 2009, 31(6): 77-86. [WANG Aijun, YE Xiang, CHEN Jian. Effects of typhoon on sedimentary processes of embayment tidal flat: A case study from the "Fenghuang" typhoon in 2008[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2009, 31(6): 77-86.]
- [51] 王爱军, 叶翔. 福建省东北部沿海罗源湾互花米草盐沼环境下粘性沉积物的侵蚀-沉降过程 [J]. *第四纪研究*, 2013, 33(3): 582-593. [WANG Aijun, YE Xiang. Erosion and deposition processes of cohesive sediment in *Spartina alterniflora* marsh, Luoyuan bay in the north of Fujian coast, China[J]. *Quaternary Sciences*, 2013, 33(3): 582-593.]
- [52] De Vet P L M, Van Prooijen B C, Colosimo I, et al. Variations in storm-induced bed level dynamics across intertidal flats[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 12877.
- [53] Liu X Y, Xing F, Shi B W, et al. Erosion and accretion patterns on intertidal mudflats of the Yangtze River Estuary in response to storm conditions[J]. *Anthropocene Coasts*, 2023, 6(1): 6.
- [54] 杨世伦, 陈吉余. 试论植物在潮滩发育演变中的作用 [J]. *海洋与湖沼*, 1994, 25(6): 631-635. [YANG Shilun, CHEN Jiyu. The role of vegetation in mud coast processes[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1994, 25(6): 631-635.]
- [55] 王爱军, 高抒, 贾建军. 互花米草对江苏潮滩沉积和地貌演化的影响 [J]. *海洋学报*, 2006, 28(1): 92-99. [WANG Aijun, GAO Shu, JIA Jianjun. Impact of *Spartina alterniflora* on sedimentary and morphological evolution of tidal salt marshes of Jiangsu, China[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2006, 28(1): 92-99.]
- [56] Wang A J. Hydrodynamics and associated sediment transport over coastal wetlands in Quanzhou Bay, China[J]. *China Ocean Engineering*, 2011, 25(1): 59-72.
- [57] 周曾, 陈雷, 林伟波, 等. 盐沼潮滩生物动力地貌演变研究进展 [J]. *水科学进展*, 2021, 32(3): 470-484. [ZHOU Zeng, CHEN Lei, LIN Weibo, et al. Advances in biogeomorphology of tidal flat-saltmarsh systems[J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(3): 470-484.]
- [58] 龚政, 陈欣迪, 周曾, 等. 生物作用对海岸带泥沙运动的影响 [J]. *科学通报*, 2021, 66(1): 53-62. [GONG Zheng, CHEN Xindi, ZHOU Zeng, et al. The roles of biological factors in coastal sediment transport: A review[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2021, 66(1): 53-62.]
- [59] Zhang H Y, Zhou Y, Sun T, et al. Advances in biophysical feedbacks and the resulting stable states in tidal flat systems[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2023, 68(5): 457-468.
- [60] Li H, Yang S L. Trapping effect of tidal marsh vegetation on suspended sediment, Yangtze Delta[J]. *Journal of Coastal Research*, 2009, 25(4): 915-924,930.
- [61] 沈永明, 张忍顺, 王艳红. 互花米草盐沼潮沟地貌特征 [J]. *地理研究*, 2003, 22(4): 520-527. [SHEN Yongming, ZHANG Renshun, WANG Yanhong. The tidal creek character in salt marsh of *Spartina alterniflora* Loisel on strong tide coast[J]. *Geographical Research*, 2003, 22(4): 520-527.]
- [62] Wang Y P, Gao S, Jia J J, et al. Sediment transport over an accretional intertidal flat with influences of reclamation, Jiangsu coast, China[J]. *Marine Geology*, 2012, 291-294: 147-161.