

DOI: 10.13332/j.1000-1522.20170168

广东湛江高桥红树林湿地沉积柱粒度特征

朱耀军¹ 赵 峰² 郭菊兰¹ 武高洁¹ 林广旋³

(1 中国林业科学研究院湿地研究所,国家林业局湿地研究中心 2 中国林业科学研究院资源信息研究所
3 广东湛江国家级红树林自然保护区管理局)

摘要:红树林是一种特殊的生物海岸类型,具有多种生态系统服务功能。以广东湛江高桥红树林湿地为研究区,在英罗湾的湾内和湾口的两片红树林集中分布区,沿水动力梯度,垂直于海岸布设两条样线进行柱状取样,并采用矩值法计算平均粒径、分选系数、偏度和峰度等粒度参数,分析了沉积物在水平和垂直方向上的粒度特征,旨在了解研究区红树林湿地生境演变过程。结果表明:1)沉积物以粉粒和砂粒组分为主,随着红树林发育成熟度和沉积过程,红树林内带和表层样点均呈细化趋势。2)粒度分布曲线可以看出,红树林外带更多受水动力条件的影响,样点沉积过程相似,内带的沉积因水动力条件和生物过程的影响而复杂,但白骨壤纯林的沉积环境相对稳定。3)粒度参数受水动力条件和生物地貌过程影响,空间异质性显著。水平方向上,湾内样线自内带向外表现为平均粒径变小(质地粗化)趋势,湾外样线平均粒径变化趋势性不明显,但有红海榄群落分布的中间带样点的粒度更细;沉积物分选性属于较差到差,频率曲线呈负偏到很正偏,峰度呈平坦到尖锐的分布。垂直方向上,自表层向下平均粒径减小、分选性变差、偏态值增加、峰态增加,反映出林下环境的沉积过程。4)相关性分析表明,粒度参数与不同粒级体积含量相关,平均粒径和峰度参数与黏粒、粉粒含量正相关而与砂粒含量负相关,分选系数和偏度与细颗粒物含量显著负相关。粒度参数之间的相关性表现为平均粒径与峰度正相关,而与分选系数和偏度负相关,分选系数与峰度负相关,偏度与峰度负相关。研究区沉积物的形成过程有多种作用共同参与,红树林的存在改变了海岸的水动力条件而影响沉积过程,研究结果对于了解百年尺度上红树林湿地的生物地貌形成过程具有一定意义。

关键词:红树林;湿地;沉积物;粒度

中图分类号:S714.2 文献标志码:A 文章编号:1000-1522(2017)11-0009-09
ZHU Yao-jun¹; ZHAO Feng²; GUO Ju-lan¹; WU Gao-jie¹; LIN Guang-xuan³. **Grain size characteristics of core sedimentation from the Gaoqiao mangrove area in Zhanjiang, Guangdong Province of southern China.** *Journal of Beijing Forestry University* (2017)**39**(11) 9-17 [Ch, 44 ref.]

1 Research Institute of Wetland, Wetland Research Centre of State Forestry Administration, Chinese Academy of Forestry, Beijing, 100091, P. R. China;
2 Research Institute of Forest Resource Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing, 100091, P. R. China;
3 Administration Bureau of Zhanjiang Mangrove National Nature Reserve, Zhanjiang, Guangdong, 524033, P. R. China.

Mangrove coast is a special type of biological coast and it provides a variety of ecosystem services. To understand the evolution of the habitat of mangrove wetland, sediment cores along a hydrodynamic gradient in the inner and outer gulf of Yingluo Bay, the grain size characteristics (average grain size, sorting coefficient, skewness and kurtosis) of the sediments in the horizontal and vertical directions were analyzed using the moment method. The results showed that the sediments were mainly composed of silt and sand components, the surface samples of mangrove zone showed a trend of refinement with the

收稿日期: 2017-05-18 修回日期: 2017-06-24
基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(CAFYBB2014QB018)、国家自然科学基金项目(41306079,31100413)。
第一作者: 朱耀军,副研究员。主要研究方向:湿地生态学、景观生态学。Email: zhuyaojun@caf.ac.cn 地址:100091 北京市海淀区东小府1号中国林业科学研究院湿地研究所。
责任作者: 赵峰,副研究员。主要研究方向:林业资源监测。Email: zhaofeng@caf.ac.cn 地址:100091 北京市海淀区东小府1号中国林业科学研究院资源信息研究所。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

maturation and deposition process of mangrove forests. The grain size distribution curve showed that the outer mangrove was more affected by hydrodynamic conditions than inner mangrove. The deposition processes of inner zone and outer zone were similar. The inner deposition was complicated by the influence of hydrodynamic conditions and biological processes. However, the sedimentary environment of the pure stand of *Avicennia marina* was relatively stable. Grain size parameters were affected by the hydrodynamic conditions and biogeography processes, and spatial heterogeneity was significant. In horizontal direction, the average particle size of the inner sample line of the bay turned to be small (texture coarsening) from inside to outside. The average particle size of the outer samples showed no obvious trends but become finer in intermediate zone distributed with *Rhizophora stylosa* trees. The sediment segregation was poor to worse, the frequency curve was negative biased to positive bias, and the peak presented from flat to sharp distribution. In vertical direction, the average particle size decreased from the surface to deeper layer, the separation became worse, the skewness increased, and the peak state increased too, reflecting the deposition process of the forest understory environment. The correlation analysis showed that the grain size parameters of the sediments were related to different volume levels, the average grain size and kurtosis parameters were positively correlated with the content of clay and grains, and negatively correlated with the sand content, the separation coefficient and skewness were negatively correlated with the fine particulate matter content. The average grain size was positively correlated with the kurtosis, but negatively correlated with the sorting coefficient and the skewness. The separation coefficient was negatively correlated with the kurtosis, and the skewness was negatively correlated with the kurtosis. A variety of roles were involved in the formation of sediment, and mangrove forests changed the hydrodynamic conditions of the coast, which affected the deposition process in turn. The results are significant to understand the biomechanical processes of mangrove wetlands on a century scale.

Key words mangrove; wetland; sediment; grain size

红树林生长于热带、亚热带低能海岸的潮间带,提供包括防风消浪、稳固海岸、促淤造陆、环境净化、生物多样性保育、物质循环等多种生态系统服务^[1-2]。世界红树林面积曾达20万 km²,在人口、环境、资源多重压力下,20世纪50年代以来以1%~2%的速度减少^[3]。2013年我国现有红树林湿地约3.45万 hm²(不含港澳台地区),其中有林地2.53万 hm²^[4],天然红树林面积不到20世纪50年代的一半以及曾经分布面积的十分之一^[5]。

红树林是一种具有高生产力、高归还率的特殊生物海岸类型^[6],是真正意义上的生态过渡带,除具有陆地与海洋生态系统的特征外,还具有独特生态特性。红树林受陆海生态系统的交互作用,林下土壤由于沉积或冲积作用形成,地下剖面不典型,很多学者将其称为沉积物。沉积物记载着环境历史,蕴含着沉积物物源、海平面变化、水动力条件、搬运距离等诸多环境信息,常被用于反演沉积环境^[7-8]。粒度特征作为沉积环境的重要参数之一,在海洋沉积环境分析中应用广泛,常被用于分析物源特征^[9]、沉积历史^[10-11]、输运过程^[12]、水动力条件^[8,13-14]及分选程度^[15-16]等方面的研究。

随着人类对红树林生态系统服务功能认识的提

升,红树林湿地保护和恢复工程不断开展,其中宜林地的选择对于红树林生态恢复至关重要^[17-18]。沉积物作为红树林湿地的重要环境因素,在海洋、陆地以及人类活动的综合影响下,其物质来源丰富、粒度差异较大^[19-20],对其粒度特征进行深入分析有助于不同区域红树林生态恢复和生态保护的工程实践。有学者从粒度分布^[19-22]、粒径分形^[23-25]、沉积环境^[26-27]、输运特征^[28]等方面,对我国红树林湿地的宜林潮滩类型、粒度与理化性质的关系、粒径分布的影响因素等方面进行了研究,研究更多从沉积物机械组成等特征开展,与其他海岸湿地类型的研究相比,红树林湿地沉积过程和空间梯度差异的研究相对缺乏。本研究选择我国典型红树林分布区,在不同空间梯度上进行沉积柱取样,通过粒度参数量化水平和垂直方向上的沉积物粒度分布特征,对了解研究区红树林湿地生境演变、群落演替和生物地貌过程具有一定的科学意义,也为我国红树林湿地保护和科学恢复提供数据支持。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

高桥红树林地处广东湛江国家级红树林自然保

护区,位于两广界河——洗米河在北部湾入口处的英罗湾内,此外高桥河、卖棹河、江背河等河流也流入湾内。英罗湾内红树林有林地约 750 hm²,主要树种包括桐花树 (*Aegiceras corniculatum*)、木榄 (*Bruguiera gymnorhiza*)、秋茄 (*Kandelia obvolata*)、红海榄 (*Rhizophora stylosa*)、白骨壤 (*Avicennia marina*)、海漆 (*Excoecaria agallocha*) 和无瓣海桑 (*Sonneratia apetala*) 等,海岸带还分布有黄槿 (*Hibiscus tiliaceus*) 等半红树及伴生植物^[29]。研究区属南亚热带季风型海洋性气候,年均气温 23 ℃ 左右,极端最高气温 38 ℃,极端最低温 15 ℃。年均降水量 1 700 ~ 1 800 mm,主要集中在 5—9 月。潮汐属于不正规日潮为主的混合潮型,大潮汛期为全日潮,月平均 22 d,小潮为半日潮,月平均为 8 d,平均潮差 2.53 m,最大潮差 6.25 m。海水平均温 23.5 ℃。

1.2 材料与方法

1.2.1 取 样

取样时间为 2011 年 7 月,在陆地—海洋方向上布设两条样线,其中 A 样线位于湾内,B 样线位于湾口处(图 1),在每条样线上根据与海堤的距离设 3 个样点并基于 GPS 定位,分别代表内带(近陆侧)、中带和外带(近海侧)。采用自制重力采样器,材质为透明 PVC 管,内径 4.0 cm,长度 1.2 m,钻头为尼龙材质。每个样点随机采集 3 个沉积柱,在野外分别以 10 cm 间隔分样装入密封袋实验室风干备用。A 样线位于研究区北部,A1、A2、A3 样点分别距离北部海堤分别为 300、900 和 1 700 m,其中 A1、A2 样点由桐花树和木榄群落组成,A3 样点群落组成为白骨壤和桐花树。B 样线位于研究区南部,B1、B2、B3 样点分别距离北部海堤 70、340 和 1 320 m,B1、B3 样点以白骨壤纯林为主,B2 样点以红海榄为主与白骨壤混交类型。

1.2.2 测试分析

沉积物样品的粒度分析在湖泊与环境国家重点实验室完成处理和分析。粒度分析采用 Mastersizer 2000 型激光粒度分析仪(测量范围 0.02 ~ 2 000 μm,各粒级组分平行分析误差小于 5%),测定沉积物粒径的体积百分比。沉积物的密度基于采样器中单位体积样品的干质量进行计算。

1.2.3 数据处理

本研究选择平均粒径 (M_z)、分选系数 (σ_1)、偏度 (S_{K1}) 和峰度 (K_G) 4 个粒度参数,采用矩值法计算^[13,30-31]。粒级标准采用尤登-温德华氏等比制 φ 值粒径标准。参照国际制土壤粒度分级标准,即砂粒 (Sand) > 20 μm、粉粒 (Silt) 2 ~ 20 μm、黏粒 (Clay) < 2 μm 进行分析。按照 Udden-Wentworth 粒级标准分

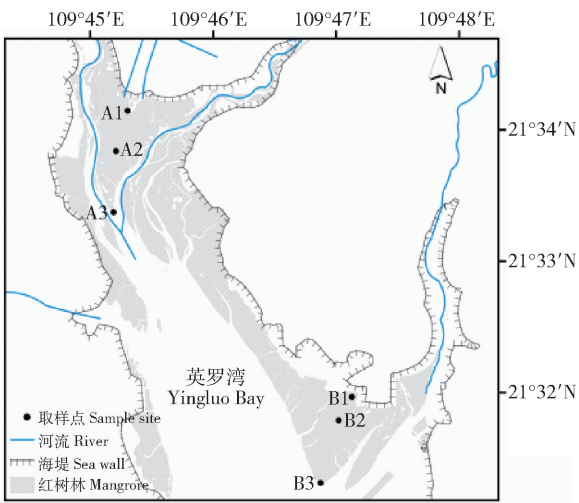


图 1 研究区及采样点示意图

Fig. 1 Location of sampling sites in study area

为黏粒 (Clay, 缩写为 C, 下同) 0.02 ~ 3.9 μm, 细粉 (fine silt, FSI) 3.9 ~ 7.8 μm, 中粉 (medium silt, MSI) 7.8 ~ 15.6 μm, 粗粉 (coarse silt, CSI) 15.6 ~ 31.2 μm, 极粗粉 (very coarse silt, VCS) 31.2 ~ 62.5 μm, 极细砂 (very fine sand, VFS) 62.5 ~ 125 μm, 细砂 (fine sand, FS) 125 ~ 250 μm, 中砂 (medium sand, MS) 250 ~ 500 μm, 粗砂 (coarse sand, CS) 500 μm ~ 1 mm 进行深入比较。频率分布曲线基于 Mastersizer 2000 软件生成,粒度分析结果用 Sigmaplot 10.0 软件作图,用 SPSS 18.0 进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 粒径分布

研究区 6 个样点的沉积物质地以粉粒、砂粒组为主(图 2),黏粒、粉粒和砂粒的体积含量分别为 13% ± 4%、39% ± 12% 和 48% ± 16%,土壤密度为 0.87 ~ 1.80 g/cm³。粒度的垂向分析(图 3)表明,A 样线各样点的沉积柱随着深度增加,砂粒含量增加,黏粒、粉粒含量减少。B 样线上 B1、B3 样点砂粒含量先减少后增加,在 30 cm 深度出现拐点。研究区 6 个样点各层次沉积物的粒度频率曲线呈单峰、双峰、

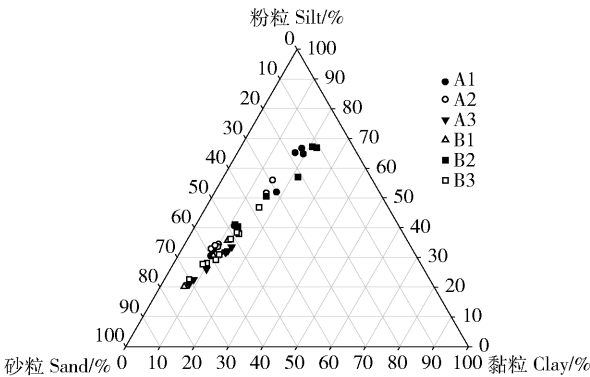
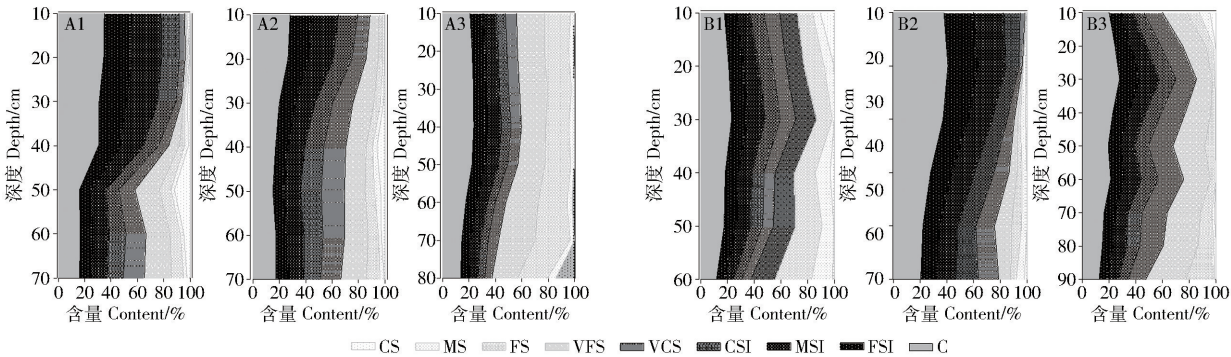


图 2 沉积柱粒度组成

Fig. 2 Grain size composition of the core sediment groups

多峰态(图 4),不同样点之间存在差异。在垂直方向上,除了 A3、B3、B1 样点各层次的粒度频率曲线具有较高的相似性之外,其他样点的垂向差异大,但

总体表现出自表层向下波峰数增加、最大峰值右移的趋势,即随着深度增加,沉积物粒度体积分量的众数增多且对应的粒径增大。



CS 为粗砂,MS 为中砂,FS 为细砂,VFS 为极细砂,VCS 为极粗粉,CSI 为粗粉,MSI 为中粉,FSI 为细粉,C 为黏粒。下同。CS refers to coarse sand, MS refers to medium sand, FS refers to fine sand, VFS refers to very fine sand, VCS refers to very coarse silt, CSI refers to coarse silt, MSI refers to medium silt, FSI refers to fine silt, C refers to clay. The same as below.

图 3 沉积柱粒径组成累积面积图

Fig. 3 Cumulative area ratio of grain size composition in core sediments

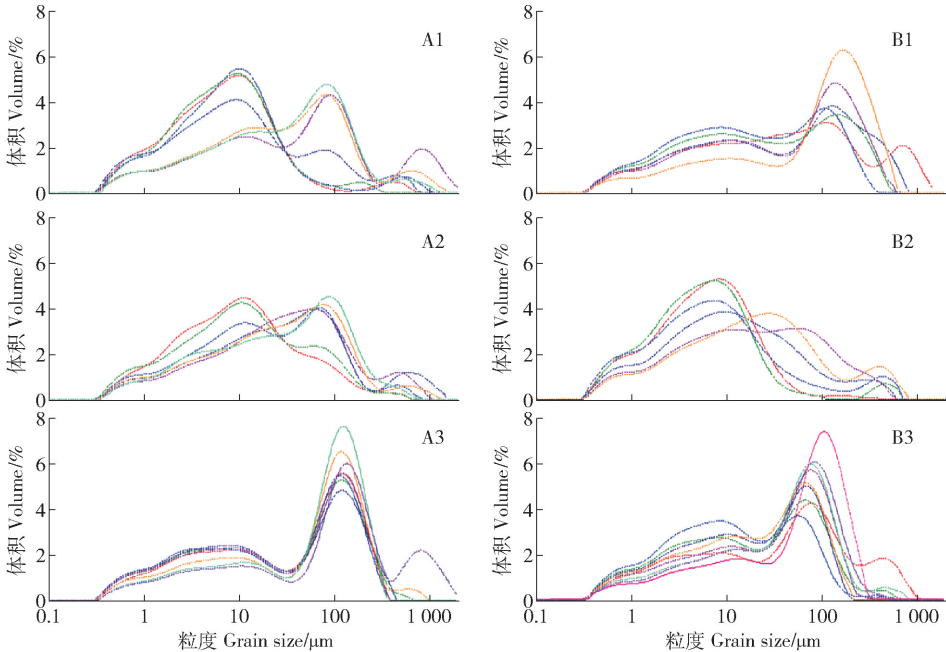


图 4 沉积柱样品粒径分布的体积百分比

Fig. 4 Grain size versus percentage volume of the sediment cores

2.2 粒度参数空间特征

2.2.1 粒度参数水平特征

水平方向上,各样点粒度参数存在差异($P < 0.05$)(表 1)。沉积物的平均粒径在 $4.12 \sim 7.67\varphi$ 之间,平均值为 $(5.77 \pm 0.89)\varphi$ 。A 样线沿着陆—海方向上样点平均粒径的均值逐渐减小,即质地变粗,与表层沉积物的表现一致。而 B 样线陆—海方向上的变化趋势性不明显,但 B2 样点的粒度更细,其平均粒径与其他样点差异显著,外带样点表层沉积物较内带细。各样点分选系数介于 $1.71 \sim 3.00$,均值为 2.45 ± 0.32 ,属于较差—差级

别,A3 和 B1 样柱差异不显著,而与其他样点的差异显著;A 样线表层样点的分选性由陆向海变差,B 样线表层样点以 B2 分选性最好。

各样点偏度参数为 $-0.12 \sim 0.59$,均值 0.19 ± 0.18 ,属于负偏→很正偏的区间变化。其中 A3、B3 样点偏高,而 A1、A2、B2 样点偏度系数较低;A 样线表层样点偏度以 A3 最大,A2 最小且呈负偏态,B 样线由陆向海表层样点偏度增加。峰度参数范围 $0.70 \sim 1.28$,均值 0.91 ± 0.14 ,属于平坦→尖锐的变化,差异显著性检验将样点分为两组,即 A1、A2、B2 峰度值显著高于 A3、B1、B3 样点,两组内的差异

均不显著;各样点表层沉积物粒度频率曲线近对称,点呈平坦峰态,以 B2 点的峰度值最大。A 样线表层样点的峰值由陆向海渐小,B 样线各样

表 1 样柱粒度参数均值(标准差)
Tab.1 Average(SE) of grain size parameters in the core sediments

样点 Sample point	粒度频率曲线形态 Curve form of grain size distribution	平均粒径 Average grain size (M_z)	分选系数 Sorting coefficient(σ_1)	偏度 Skewness (S_{K1})	峰度 Kurtosis (K_G)
A1	单峰、双峰 Single peak, double peak 多峰 Multiple peak	6.34 φ (1.05 φ) ^{ab}	2.29(0.44) ^b	0.08(0.11) ^{cd}	1.05(0.10) ^a
A2	单峰、双峰 Single peak, double peak 多峰 Multiple peak	5.86 φ (0.56 φ) ^b	2.39(0.15) ^b	0.10(0.09) ^{cd}	0.97(0.09) ^a
A3	双峰 Double peak	5.11 φ (0.51 φ) ^c	2.70(0.15) ^a	0.37(0.14) ^a	0.78(0.10) ^b
B1	双峰 Double peak	5.10 φ (0.58 φ) ^{bc}	2.74(0.18) ^a	0.21(0.18) ^{bc}	0.81(0.07) ^b
B2	双峰、多峰 Double peak, multiple peak	6.83 φ (0.79 φ) ^a	2.22(0.39) ^b	0.01(0.08) ^d	1.05(0.13) ^a
B3	双峰 Double peak	5.60 φ (0.57 φ) ^{bc}	2.38(0.19) ^b	0.29(0.16) ^{ab}	0.85(0.06) ^b

注:不同字母间表示差异显著($P < 0.05$)。 φ 为尤登-温德华氏等比例粒级。下同。Notes: different letters indicate significant difference from each other at $P < 0.05$ level. φ is Udden-Wentworth (U-W) equal proportional size fraction. The same as below.

2.2.2 粒度参数垂向特征

沉积柱粒度参数的垂向变化反映沉积环境的历史。各样点沉积柱的粒度参数自表层向下呈平均粒径减小、分选性变差、偏态值增加、峰态增加的趋势,但各样柱之间存在差异(图 5)。平均粒径分析表明,A 样线 0~50 cm 深度内,自内带向外平均粒径减小,其中 A1、A2 样点在 0~50 cm 深度内粒径减小,50 cm 以下相对稳定,A3 样点 0~50 cm 深度垂向变幅小,50 cm 以下迅速减小;B 样线各样点层次水平变化与表层一致,表现为 B2>B3>B1,垂向上随着深度增加呈先升后降变化。各样柱分选性均属于较差到差的变化,其中 A 样线各样柱 0~40 cm 分选系数值随深度增大,各层次自内带向外带分选性变差,40 cm 以下各样点分选系数减小;B 样线 0~20 cm 深度以 B2 样点的分选最好、B1 最差,20 cm 以下深度 B3 的分选程度最好,B2 样点与 A 样线各样点相似,自表层向下分选性变差,而 B1、B3 样点

自表层向下分选系数变小。
各样柱偏态属于负偏→很正偏的区间变化。A 样线表层样点偏度以 A3 最大,A2 最小且呈负偏态,A1、A2 样点各层次频率曲线为近对称到正偏,A3 各层为很正偏;B 样线由陆向海表层样点偏度增加,B 样线 B2 样点为负偏到近对称。A1、A2 样柱自表层向下呈现近对称→正偏变化,A3 样柱则呈很正偏→正偏→很正偏变化。B 样线上个一样点的偏度变化规律相对一致,自表层向下先减小后增加,拐点处在 20~30 cm 处,除 B2 样柱为近对称外,B1 自表层向下呈近对称→很正偏变化,B3 呈正偏→近对称→很正偏的变化。各样柱峰态分析表明,A1 样柱自表层向下峰度值先增加后减小,呈中等→尖锐→中等变化,A2 呈中等→平坦→中等变化,A3 样柱呈平坦→中等变化,B1、B3 样柱波动小,呈平坦→中等较小变化,B2 样点呈中等→尖锐→中等变化,在 30 cm 深度处 A1、A2、B3 样柱峰值同时出现变化。

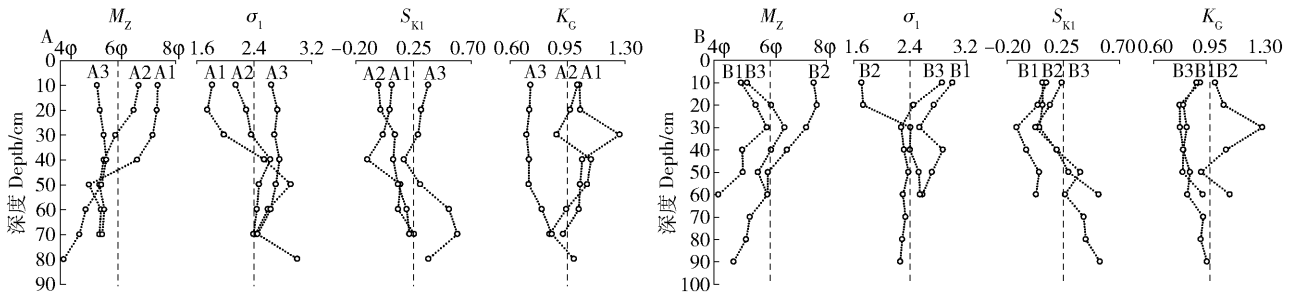


图 5 A、B 样柱粒度参数垂向变化
Fig.5 Vertical variations in grain size parameter of the core sediment A and B plots

2.3 粒度与粒度参数间的关系

粒度参数之间的相关性分析(表 2、图 6)表明,平均粒径与峰度正相关,而与分选系数和偏度负相

关,分选系数与峰度负相关,偏度与峰度负相关。对沉积物各粒径等级进行细分,各粒级沉积物体积含量与粒度参数相关性分析结果表明:平均粒径与粒

径 0.02 ~ 31.2 μm 的细颗粒物含量正相关,与粒径 31.2 ~ 125 μm 的粗颗粒物含量负相关;分选系数与粒径 0.02 ~ 31.2 μm 的细颗粒物含量负相关,与粒径 31.2 ~ 125 μm 的粗颗粒物含量正相关。偏度与

粒径 0.02 ~ 31.2 μm 的细颗粒含量负相关,与粒径 62.5 ~ 250 μm 的较粗颗粒含量正相关。峰度与粒径 0.02 ~ 15.6 μm 的细颗粒物含量正相关,与粒径 62.5 ~ 250 μm 的较粗颗粒含量负相关。

表 2 沉积物各粒径含量与粒度参数相关性分析

Tab.2 Correlation analysis between grain size parameters and the volume content of different grain size sediment												
项目 Item	FSI	MSI	CSI	VCS	VFS	FS	MS	CS	M_z	σ_1	S_{kl}	K_C
C	0.965 **	0.869 **	0.310 *	-0.542 **	-0.846 **	-0.652 **	-0.389 *	-0.336 *	0.948 **	-0.655 **	-0.665 **	0.353 *
FSI		0.961 **	0.466 **	-0.506 **	-0.910 **	-0.732 **	-0.393 **	-0.292	0.971 **	-0.742 **	-0.711 **	0.489 **
MSI			0.648 **	-0.368 *	-0.902 **	-0.812 **	-0.433 **	-0.251	0.951 **	-0.770 **	-0.744 **	0.598 **
CSI				0.353 *	-0.555 **	-0.824 **	-0.359 *	-0.108	0.569 **	-0.452 **	-0.702 **	0.530 **
VCS					0.505 **	-0.17	-0.22	0.004	-0.320 *	0.184	0.117	-0.18
VFS						0.700 **	0.088	0.058	-0.850 **	0.528 **	0.822 **	-0.597 **
FS							0.539 **	0.095	-0.822 **	0.601 **	0.786 **	-0.554 **
MS								0.256	-0.518 **	0.555 **	0.215	-0.09
CS									-0.386 *	0.514 **	-0.02	0.29
M_z										-0.768 **	-0.736 **	0.460 **
σ_1											0.238	-0.388 *
S_{kl}												-0.491 **

注: **表示在 0.01 水平上显著相关, * 表示在 0.05 水平上显著相关。Notes: ** means correlation is significant at $P < 0.01$ level, * means correlation is significant at $P < 0.05$ level.

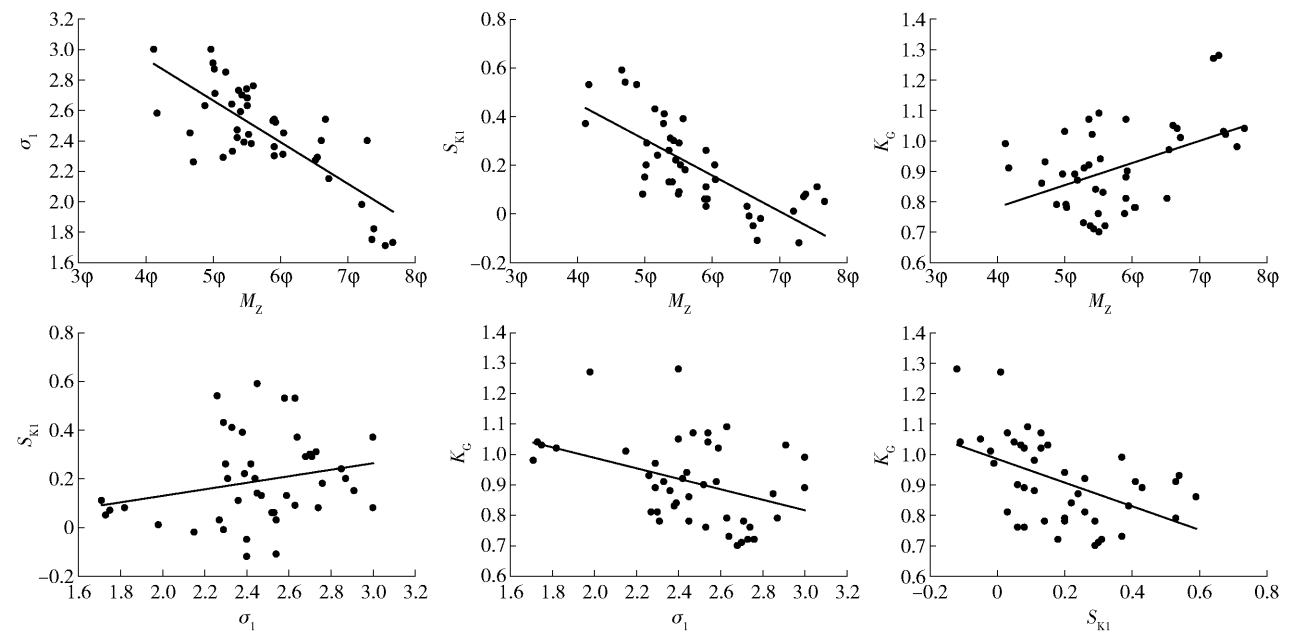


图 6 柱状沉积物粒度参数之间的关系

Fig. 6 Relationships among the core sediment grain size parameters

3 讨论与结论

3.1 粒径分布的影响因素

生物与环境之间的相互作用影响地形地貌过程,同时也被地形地貌过程所影响^[32-33]。红树林湿地的生物地貌过程反映陆海系统之间的相互作用,是海岸带生态系统对全球变化和人类活动的响应和

反馈。红树林属于热带海岸生物地貌类型,除了具有高生产力、高归还率外,其通过阻滞水流、降低流速来捕捉细颗粒物质促进淤积过程^[34-35],构成红树林生物地貌功能的物质基础^[6,36]。除了水动力、地形因素外,红树林树体大小、形状、根系特点、分布格局以及其他生物过程都对沉积有影响,长有支柱根等复杂根系的红树林有更强的捕沙促淤能力^[6,34]。

研究区内带和外带样点的沉积物粒度差别大,各样点质地均呈现由陆向海逐渐粗化、自底层向上呈细化的趋势。红树林生态演替是红树林群落与沉积物相互作用的反映^[23,36-37],和很多河口三角洲红树林向海扩展^[38]相似,该区域近几十年来红树林不断向海洋/湾口方向呈自然扩展趋势^[29]。研究区红树林处于海湾内,B 样线靠近湾口,受水动力条件的影响大,A3、B3 样点在高程更低的红树林外带,细颗粒更容易被带走,百年时间尺度上的沉积速率更高^[39],更多受潮汐和风浪作用的直接影响,沉积柱垂直方向上的粒径频率分布曲线变化小,说明近百年来沉积的历史环境差异小,而内带样点的沉积受潮汐、潮沟分布和红树林群落组成等多重因素的影响,沉积柱垂直方向上粒径频率分布曲线变化差异大。

红树林沉积物是原位沉积、外来沉积、水动力条件及红树林生态系统共同作用的结果^[19]。沉积物来源、水动力及其作用下的搬运方式影响粒度组成^[40]。研究区属不正规全日潮为主的混合潮型,是华南海岸最大潮差海区,沉积物来源包括河流、海域的颗粒物沉降、搬运以及原地枯枝落叶的分解沉积。沉积物粒度除了受潮流影响外,风浪尤其暴风浪也影响其粒度特征,细颗粒组分主要来自水体中悬浮物质沉降、凋落物降解,而粗颗粒则来自潮流和风浪影响下的物质推移。研究区所在区域的风暴潮频发,自 1949 年至 2010 年影响北部湾北部的热带风暴平均每年为 4.77 个,2013 年连续受到 4 个强台风侵袭^[41],可能影响颗粒物的垂向沉积^[27],此外在红树林湿地存在多种化学反应和生物作用^[35,43],沉积物中的溶解态/颗粒态物质的转换对粒度组成的影响需要进一步评估。

频率分布曲线直观显示各粒级沉积物含量及相对贡献,指示搬运方式或来源^[40,42]。一般情况下,单峰态表明沉积物来源或水动力条件单一,双峰、多峰态表明受两种及以上作用共同参与。水动力条件包括潮流、风浪、浪流共同作用等情形,研究区各样点沉积物的频率分布曲线呈现单峰、双峰、多峰等多种类型,说明在沉积过程中有多种作用参与,可能与研究区不正规日潮为主的混合潮型有关,我国其他地区红树林沉积物频率分布曲线也多呈多峰分布^[19,21]。A3、B3、B1 样点沉积物频率分布曲线的垂向变化小,说明沉积环境相对稳定,影响沉积物粒度的因素相似,A3、B3 处在红树林的外缘,更多受潮流水动力条件的影响,B1 样点为白骨壤纯林,其沉积环境相对一致。A1、A2、B2 样点的频率分布曲线和粒度特征的垂向变化一定程度上反映了红树林生

态演替和促淤造陆过程,随着不断沉积或高程增加,潮汐淹没的频率降低、淹没时间缩短,沉积环境趋于稳定,沉积物更多表现为就近运输,呈现曲线峰数减少、曲线众数区间减小,表层粒度逐渐细化。

3.2 粒度参数影响因素

粒度参数之间的相关性可以指示区域沉积环境及沉积动力要素的差异^[13]。研究区沉积物平均粒径与峰度正相关,而与分选系数和偏度负相关,分选系数与峰度负相关,偏度与峰度负相关。研究区靠近陆地的红树林发育程度好,沉积环境相对稳定,随着沉积增加和红树林发育,林内水动力作用变弱,利于悬浮颗粒物沉降,平均粒径增加(粒度变细),分选程度逐渐变差,与洛阳江河口的研究相似^[26]。分析表明,沉积物的粒级组成影响其粒度参数,平均粒径和峰度参数与黏粒、粉粒含量正相关而与砂粒负相关,分选系数和偏度与黏粒、粉粒含量显著负相关。

平均粒径和分选系数与沉积物来源关系密切,平均粒径代表粒度分布的集中趋势,分选系数表示颗粒均匀度和分选程度,与水动力条件关系密切,反映搬运介质的平均动能。一般情况下,细颗粒主要来自较弱水动力条件下水体中悬浮物质的沉降,粗颗粒则来自更低潮滩向高潮滩的跃移搬运^[40],也有研究表明,地形等因素影响沉积物的粒度特征^[44]。从平均粒径看,A 样线自内带向外带方向上质地呈粗化趋势,而 B 样线上内带比外带样点的质地更粗,有红海榄分布的中带 B2 样点沉积物质地最细,群落类型和沉积物粒度特征间的关系有待于进一步验证。研究区 6 个沉积柱各层次的分选性为较差到差的程度。在水平方向上,A 样线表层沉积物由内带向外带分选性变差,B 样线表层沉积以中带分选性最好,内带最差;两条样线垂直方向上存在层次变化,A1、A2、B2 样点自表层向下分选变差,B1、B3 样点自表层向下、A3 样点自 40 cm 以下分选性变好外,看似与总体上细颗粒越多分选性越好相矛盾,但拐点以下的变幅较小,3 个样点的频率分布曲线具有相似性,粒径含量的众数偏大即含砂量高。

偏度与峰态反映沉积环境,其中偏度表示频率曲线对称的参数,反映粒度分布的不对称程度,峰度用来衡量粒度频率曲线尖锐程度,对沉积环境的反映更敏感。一般情况下,河成沉积物因悬浮物被大量带向下游,沉积物以粗粒为主,故多属正偏态;海滩沉积物由于潮汐、波浪高能量作用,多数呈近对称或微弱负偏态。本研究中各样点粒度频率曲线从负偏到很正偏的变化,垂直方向上随着粒度组分变化而出现层次变化,沉积过程有多种作用参与。频率

分布曲线可以分为两组,A3、B1、B3 样点呈中等的正偏态,垂向各层次的曲线相似,沉积环境相对稳定,而 A1、A2、B2 样点的垂向上频率曲线相对平坦,但受沉积过程的影响峰值变化大。

4 结 论

研究区红树林湿地沉积物机械组成以粉粒和砂粒组分为主,呈现自底层向上逐渐细化的趋势,沉积物粒度特征受粒级组成的影响,空间异质性显著。红树林通过改变水动力条件影响海岸的沉积过程,百年时间尺度上红树林外带的沉积环境相对一致,而内带沉积过程因受水动力条件和植被类型的共同影响而相对复杂,沉积物的形成过程中有多种作用共同参与。

参 考 文 献

- [1] COSTANZA R R, D'ARGE R, GROOT R D, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital I [J]. *Nature*, 1997, 387:253-260.
- [2] CHMURA G L, ANISFELD S C, CAHOON D R, et al. Global carbon sequestration in tidal, saline wetland soil [J/OL]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, 17(4): 1111 [2017-05-11]. <https://www.researchgate.net/publication/228736624>.
- [3] DUKE N C, MEYNECKE J O, DITTMANN S, et al. A world without mangrove [J]. *Nature*, 2007, 317: 41-42.
- [4] 但新球, 廖宝文, 吴照柏, 等. 中国红树林湿地资源、保护现状和主要威胁[J]. *生态环境学报*, 2016, 25(7): 1237-1243.
DAN X Q, LIAO B W, WU Z B, et al. Resources, conservation status and main threats of mangrove wetlands in China [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(7): 1237-1243.
- [5] 王文卿, 王瑁. 中国红树林[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 67.
WANG W Q, WANG M. *The mangroves of China* [M]. Beijing: Science Press, 2007: 67.
- [6] 张乔民, 施祺, 余克服, 等. 华南热带海岸生物地貌过程[J]. *第四纪研究*, 2006, 26(3): 449-455.
ZHANG Q M, SHI Q, YU K F, et al. Biogeomorphologic process of tropical biological coasts of south China [J]. *Quaternary Sciences*, 2006, 26(3): 449-455.
- [7] 周蒂. 利用沉积物粒度数据反演沉积水动力参数[J]. *地质科学*, 1999, 34(1): 49-58.
ZHOU D. The estimation of sedimentary hydrodynamic parameters from sediment grain-size data [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 1999, 34(1): 49-58.
- [8] 金秉福, 林振宏, 季福武. 海洋沉积环境和物源的元素地球化学记录释读[J]. *海洋科学进展*, 2003, 21(1): 99-106.
JIN B F, LIN Z H, JI F W. Interpretation of element geochemical records of marine sedimentary environment and provenance [J]. *Advance in Marine Science*, 2003, 21(1): 99-106.
- [9] 陈木宏, 郑范, 陆均, 等. 南海西南陆坡区沉积物粒级指标的物源特征及古环境意义[J]. *科学通报*, 2005, 50(7): 684-690.
CHEN M H, ZHENG F, LU J, et al. The source characteristics and pale environmental significance of sediment gradient index in southwestern South China Sea slope region [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(7): 684-690.
- [10] LIM D I, JUNG H S, CHOI J Y, et al. Geochemical compositions of river and shelf sediments in the Yellow Sea: Grain-size normalization and sediment provenance [J]. *Continental Shelf Research*, 2006, 26(1): 15-24.
- [11] 王恒波, 许江. 北仑河口柱状沉积物粒度特征[J]. *台湾海峡*, 2010, 29(4): 555-565.
WANG H B, XU J. Characteristics of grain size of core sediment in Beilun Estuary [J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2010, 29(4): 555-565.
- [12] ANTHONY E J, HÉQUETTE A. The grain size characterization of coastal sand from the Somme Estuary to Belgium: sediment sorting processes and mixing in a tidal and storm dominated setting [J]. *Sedimentary Geology*, 2007, 202(3): 369-382.
- [13] 杨世伦. 长江口沉积物粒度参数的统计规律及其沉积动力学解释[J]. *泥沙研究*, 1994(3): 23-31.
YANG S L. Statistic features for grain size parameters of the Yangtze River Estuary and their hydrodynamic explanation [J]. *Journal of Sediment Research*, 1994(3): 23-31.
- [14] 王敏京, 徐军, 冉娟, 等. 海南岛西南部砂质岸滩沉积特征[J]. *海洋通报*, 2011, 30(1): 60-64.
WANG M J, XU J, RAN J, et al. Sediment characteristics of southwest beach of Hainan Island [J]. *Marine Science Bulletin*, 2011, 30(1): 60-64.
- [15] FLEMMING B W, ZIEGLER K. High-resolution grain size distribution patterns and textural trends in the backbarrier tidal flats of Spiekeroog Island (southern North Sea) [J]. *Senckenbergiana Maritima*, 1995, 26(1): 1-24.
- [16] ROUX J P L, ROJAS E M. Sediment transport patterns determined from grain size parameters: overview and state of the art [J]. *Sedimentary Geology*, 2007, 202(3): 473-488.
- [17] 廖宝文, 郑松发, 陈玉军, 等. 红树林湿地恢复技术的研究进展[J]. *生态科学*, 2005, 24(1): 61-65.
LIAO B W, ZHENG S F, CHEN Y J, et al. Advance in researches on rehabilitation technique of mangrove wetlands [J]. *Ecologic Science*, 2005, 24(1): 61-65.
- [18] 彭逸生, 周炎武, 陈桂珠. 红树林湿地恢复研究进展[J]. *生态学报*, 2008, 28(2): 786-797.
PENG Y S, ZHOU Y W, CHEN G Z. The restoration of mangrove wetland: a review [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(2): 786-797.
- [19] 隋淑珍, 张乔民. 华南沿海红树林海岸沉积物特征分析[J]. *热带海洋学报*, 1999, 18(4): 17-23.
SUI S Z, ZHANG Q M. Characteristics of sediments along mangrove coast of South China [J]. *Tropic Oceanology*, 1999, 18(4): 17-23.
- [20] 刘金铃, 李柳强, 林慧娜, 等. 中国主要红树林区沉积物粒度分布特征[J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2008, 47(6): 891-893.
LIU J L, LI L Q, LIN H N, et al. Characters of gain size of sediments from mangrove wetlands of China [J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2008, 47(6): 891-893.
- [21] 邢永泽, 周浩郎, 阎冰, 等. 广西沿海不同演替阶段红树群落沉积物粒度分布特征[J]. *海洋科学*, 2014, 38(9): 53-58.
XING Y Z, ZHOU H L, YAN B, et al. Characteristics of sediment grain size distribution of mangrove communities at different successional stages along the coast of Guangxi [J]. *Marine Sciences*, 2014, 38(9): 53-58.
- [22] 朱耀军, 郭菊兰, 武高洁, 等. 湛江高桥红树林沉积物理化性

质与金属元素的空间分布[J]. 北京林业大学学报, 2014, 36(2):1-9.

ZHU Y J, GUO J L, WU G J, et al. Spatial distribution of physicochemical properties and metal concentration in mangrove sediments from Gaoqiao in Zhanjiang, Guangdong of southern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2014, 36(2):1-9.

[23] 梁士楚. 广西英罗湾红树植物群落的研究[J]. 植物生态学报, 1996, 20(4): 310-321.

LIANG S C. Studies on the mangrove communities in Yingluo Bay of Guangxi [J]. Acta Phytocologica Sinica, 1996, 20(4): 310-321.

[24] 刘美龄, 叶勇, 曹长青, 等. 海南东寨港红树林土壤粒径分布的分形特征及其影响因素[J]. 生态学杂志, 2008, 27(9): 1557-1561.

LIU M L, YE Y, CAO C Q, et al. Fractal characteristics and related affecting factors of particle size distribution in mangrove soil in Dongzhai Harbor of Hainan [J]. Chinese Journal of Ecology, 2008, 27(9): 1557-1561.

[25] 梁文, 李智, 范航清, 等. 防城港湾红树林表层沉积物粒度分形特征及与环境因子的相关性[J]. 应用海洋学学报, 2013, 32(2): 184-192.

LIANG W, LI Z, FAN H Q, et al. Fractal characteristics and correlation with environmental factor on the surface sediments in mangrove areas of Fangchenggang Bay [J]. Journal of Applied Oceanography, 2013, 32(2): 184-192.

[26] 黄财宾, 陈建宁, 王爱军. 福建洛阳江河口湿地沉积物粒度特征及其沉积环境意义[J]. 台湾海峡, 2009, 28(3): 410-416.

HUANG C B, CHEN J N, WANG A J. Grain size characteristics and the significance of sedimentary environments of the sediments on Luoyangjiang Estuary wetlands, Fujian Province [J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2009, 28(3): 410-416.

[27] 许艳, 王拓夫. 湛江红树林保护区现代沉积物粒度特征及其对风暴事件的响应[J]. 台湾海峡, 2011, 30(2): 269-274.

XU Y, WANG T F. Characteristics of sediment particle size and their response to storm surge in the Zhanjiang Mangrove Nature Reserve [J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2011, 30(2): 269-274.

[28] TU Q, YANG S, ZHOU Q, et al. Sediment transport and carbon sequestration characteristics along mangrove fringed coasts [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2015, 34(2):21-26.

[29] 朱耀军, 郭菊兰, 武高洁, 等. 近 20 年来英罗湾红树林景观过程及周边土地利用/覆盖变化[J]. 北京林业大学学报, 2013, 35(2): 22-29.

ZHU Y J, GUO J L, WU G J, et al. Mangrove landscape changing process and land use coverage change of its surrounding areas in Yingluo Bay, southern China during the past 20 years [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2013, 35(2): 22-29.

[30] 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.

[31] 李志亮, 杜小如. 沉积物粒度参数求解方法的对比[J]. 长江科学院院报, 2008, 25(4): 16-19.

LI Z L, DU X R. Comparison of methods solving sediment particle size paramters [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2008, 25(4): 16-19.

[32] SWANSON F J. Landform effects on ecosystem patterns and processes [J]. BioScience, 1988, 38(2):92-98.

[33] URBAN M A. Conceptualizing anthropogenic change in fluvial systems: drainage development on the upper Embarras River, Illinois [J]. Professional Geographer, 2000, 54(2): 204-217.

[34] FUMKAWA Y, WOJANSKI E, MUEUER H. Currents and sediment transport in mangrove forests [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1997, 44(3): 301-310.

[35] ALONGI D M. The energetics of mangrove forests [M]. Dordrecht: Springer, 2009: 60-61.

[36] 张乔民, 张叶春. 华南红树林海岸生物地貌过程研究[J]. 第四纪研究, 1997, 17(4): 344-353.

ZHANG Q M, ZHANG Y C. Study on biogeomorphologic process of mangrove coasts in south China [J]. Quaternary Sciences, 1997, 17(4): 344-353.

[37] 范航清, 尹毅, 黄向东, 等. 广西沙生红树植物-土壤互作用及群落演替的研究[J]. 广西科学院学报, 1993, 9(2): 2-6.

FAN H Q, YIN Y, HUANG X D, et al. Interaction of sandy mangrove plant soil and sucession of community in Guangxi [J]. Journal of the Guangxi Academy of Sciences, 1993, 9(2): 2-6.

[38] YANG J, GAO J, CHEUNG A, et al. Vegetation and sediment characteristics in expanding mangrove forest in New Zealand [J]. Estuarine Coastal & Shelf Science, 2013, 134(12):11-18.

[39] 朱耀军, 赵峰, 郭菊兰, 等. 湛江高桥红树林湿地有机碳分布及埋藏特征[J]. 生态学报, 2016, 36(23):7841-7849.

ZHU Y J, ZHAO F, GUO J L, et al. Below ground organic carbon distribution and burial characteristics of the Gaoqiao mangrove area in Zhanjiang, Guangdong, Southern china [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(23):7841-7849.

[40] 陈沈良, 杨世伦, 吴瑞明. 杭州湾北岸潮滩沉积物粒度的时间变化及其沉积动力学意义[J]. 海洋科学进展, 2004, 22(3): 299-305.

CHEN S L, YANG S L, WU R M. Temporal changes in tidal flat sediment grain size along the north bank of the Hangzhou Bay and their implication of sedimentation dynamics [J]. Advances in Marine Science, 2004, 22(3): 299-305.

[41] 陈波. 北部湾台风风暴潮研究现状与展望[J]. 广西科学, 2014, 21(4): 325-330.

CHEN B. Research status and prospect of storm surge in Beibu Gulf [J]. Guangxi Science, 2014, 21(4): 325-330.

[42] 彭晓彤, 周怀阳, 叶瑛, 等. 珠江河口沉积物粒度特征及其对底层水动力环境的指示[J]. 沉积学报, 2004, 22(3): 487-493.

PENG X T, ZHOU H Y, YE Y, et al. Characteristics of sediment grain size and their implications for bottom hydrodynamic environment in the Pearl River Estuary [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22(3): 487-493.

[43] PÜ N, MEHLIG U, NORDHAUS I, et al. Mangrove crab *Ucides cordatus* removal does not affect sediment parameters and stipule production in a one year experiment in Northern Brazil [J/OL]. PLoS ONE, 2016, 11(12): e0167375 [2017-02-11]. doi: 10.1371/journal.pone.0167375.

[44] KUMAR G, RAMANATHAN A L. Assessment of marine environment by study of textural characteristics of the surface sediments of a tropical mangrove ecosystem Gulf of Kachchh, Gujarat, India: a GIS approach [J]. Indian Journal of Geo Marine Sciences, 2016, 45(11):1593-1597.

(责任编辑 范娟
责任编委 于飞海)