

张一辉,徐利强,吴礼彬,等.南海琼东陆架海洋沉积物粒度分形特征及其影响因素[J].地球科学与环境学报,2018,40(6):739-745.
ZHANG Yi-hui, XU Li-qiang, WU Li-bin, et al. Fractal Characteristics of Marine Sediments from the East Continental Shelf of Hainan Island, South China Sea and Their Influence Factors[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2018, 40(6): 739-745.

南海琼东陆架海洋沉积物粒度 分形特征及其影响因素

张一辉¹, 徐利强^{1*}, 吴礼彬², 周鑫²

(1. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009;
2. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 安徽 合肥 230026)

摘要:通过对2013年南海西部综合航次于南海琼东陆架海域采集的3根沉积柱(C1、C2、C4)样品进行粒度分析,对粒度的分形特征及其影响因素进行探讨。使用矩法计算出沿离岸方向3根沉积柱样的平均粒径分别为 5.33Φ 、 6.14Φ 、 6.26Φ ,粒度总体上较细;标准偏差平均值分别为 2.59Φ 、 2.19Φ 、 1.82Φ ,表示分选性逐渐变好;偏度平均值分别为 0.40 、 -0.02 、 0.48 ,其变化规律不明显;峰度平均值分别为 1.75 、 2.27 、 2.70 ,其值逐渐增大。利用幂指数法,在累积体积百分比 $5\%\sim 95\%$ 范围的无标度区间内计算得到沉积物样品的粒度分维值,总体范围为 $2.24\sim 2.54$,平均值分别为 2.52 、 2.45 和 2.30 ,处于较高水平;随着离岸距离的增加,样品粒度分维值逐渐降低,但分选性变好;粒度分维值与标准偏差存在显著正相关关系,说明分选性对粒度的分形特征产生影响。根据C-M图,沉积柱样的流体为牵引流,颗粒的主体搬运方式由沉积柱C1的滚动逐渐转变为沉积柱C4的悬移;对比发现,以滚动组分为主的颗粒粒度分维值较大,以悬移组分为主的颗粒粒度分维值较小,说明分形程度受搬运方式和水动力条件的影响。

关键词:海洋沉积物;分形;粒度;第四纪;分选性;碎屑物质;南海

中图分类号:P736.21 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-6561(2018)06-0739-07

Fractal Characteristics of Marine Sediments from the East Continental Shelf of Hainan Island, South China Sea and Their Influence Factors

ZHANG Yi-hui¹, XU Li-qiang^{1*}, WU Li-bin², ZHOU Xin²

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China; 2. School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China)

Abstract: Grain size compositions of samples from three sediment cores (namely C1, C2, C4) collected from the east continental shelf of Hainan Island, South China Sea during an integrated investigation to western South China Sea in 2013 were analyzed, and the fractal characteristics and influence factors were discussed. Based on moment method, it is obtained that the mean grain sizes of samples from three sediment cores along the offshore direction are 5.33Φ , 6.14Φ and 6.26Φ , and the grain sizes are generally fine; the average values of standard deviation are 2.59Φ , 2.19Φ and 1.82Φ , indicating that the sorting is gradually improved; the average values of skewness are 0.40 , -0.02 and 0.48 , and the change law is not obvious; the average values of kurtosis are 1.75 , 2.27 and 2.70 , and the values are gradually increased. Using the power index method, the fractal dimension values of sediment samples are calculated in the scale-free interval of cumulative volume percentage $5\%\sim 95\%$, the overall range is $2.24\sim 2.54$, and the average values are 2.52 , 2.45 and 2.30 , which are at a high level; with the increase of offshore distance, the fractal dimension values of samples gradually decrease, but the sorting is improved; the fractal dimension values and standard deviation have a significant positive correlation, indicating that the sorting affects the fractal characteristics of grain size. According to the C-M diagram, the fluid of the sediment cores is traction flow, and the main transport mode of particles changes from rolling of sediment core C1 to suspension of sediment core C4. Comparison shows that the fractal dimension values of particles dominated by rolling are larger, and the fractal dimension values of particles dominated by suspension are smaller, indicating that the fractal degree is affected by the transport mode and hydrodynamic conditions.

收稿日期:2018-05-24;修回日期:2018-07-14

投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目:国家自然科学基金项目(41402148,41376124);中央高校基本科研业务费专项资金项目(JZ2017HGTB0201)

作者简介:张一辉(1994-),男,蒙古族,天津市人,理学硕士研究生,E-mail:458083466@qq.com。

* 通讯作者:徐利强(1984-),男,河北魏县人,副研究员,工学博士,E-mail:xlq@hfut.edu.cn。

6.26 Φ , respectively, and the grain sizes of samples are generally fine; the mean standard deviations are 2.59 Φ , 2.19 Φ and 1.82 Φ , respectively, showing that the sorting gets better along the offshore direction; the mean skewness values are 0.40, -0.02 and 0.48, showing unobvious changes; the mean kurtosis values are 1.75, 2.27 and 2.70, and increase gradually. The fractal dimensions of samples range from 2.24 to 2.54 by the power index method in a scale-free interval with the cumulative volume percent of 5%-95%, and their mean values are 2.52, 2.45 and 2.30, respectively, indicating a higher level; with the increase of offshore distance, the fractal dimensions of samples decrease gradually, but the sorting becomes better; the fractal dimension is positively and significantly correlated with standard deviation, showing the sorting impacts on the fractal characteristics of grain size. Based on *C-M* plot, it is found that the fluid at the samples from sediment cores is traction flow, and the main transportation form of particles changes gradually from the rolling at sediment core C1 to suspension at sediment core C4; the comparison results show that the fractal dimension of rolling component is greater than that of suspension component, implying that the fractal is both affected by the transportation form of grains and hydrodynamic conditions.

Key words: marine sediment; fractal; grain size; Quaternary; sorting; detritus; South China Sea

0 引言

分形现象广泛存在于自然界中,用于表示局部和整体的相似程度,即自相似性^[1]。自 Mandelbrot 在 20 世纪 60 年代提出分形理论以来,分形理论已广泛应用于多个研究领域。研究表明,碎屑物质(如冰碛物、断层泥、湖泊沉积物等)也存在一定的分形特征^[2-4]。分维值是描述分形特征的参数,不同碎屑物质的粒度分维值存在明显的差异性。分析沉积物的粒度组成与分形特征,对于深入理解沉积环境具有重要意义。

海洋沉积物是研究海洋沉积环境及其变化的重要研究对象^[5-6]。在海洋沉积物的各项分析指标中,粒度是一种基本属性,是对沉积物进行分类和命名的依据^[7-8],也是反映海水动力环境的重要指标。

南海是西太平洋地区最大的边缘海,对区域乃至全球环境变化十分敏感^[5],是进行环境演变研究的理想区域。目前,在南海仅见东部 69 沉积柱样粒度分形特征的公开报道^[9],对该地区其他海域沉积物的粒度分形特征研究还十分匮乏。南海琼东海域沉积物的粒度分形特征及其影响因素尚不明确。本文拟通过分析采自南海琼东陆架海域的 3 根沉积柱样,结合粒度测试和分析,重点对不同点位样品的粒度分形特征进行探讨,并对其影响因素进行讨论,为进一步探讨粒度分维值随时间序列的变化及其环境意义分析奠定基础。

1 样品采集与分析方法

1.1 样品采集

本研究所使用的样品采自南海琼东陆架海域的 3 根沉积柱(C1、C2、C4),柱样取自垂直于海岸线的断面上^[10],采样点水深沿离岸方向逐渐增加,3 根沉积柱位置如图 1 所示,采样信息见表 1。采样时间为 2013 年 8 月,考察船为中国科学院南海海洋研究所“实验 3 号”综合科学考察船,采样工具为箱式采样器。待采样器出水后,将长度为 60 cm、直径为 7 cm 的 PVC 管垂直插入,取出密封。沉积柱样在 -18 °C 环境下冷冻保存。沉积柱 C1、C2 按 1 cm 间隔分样,沉积柱 C4 按 0.8 cm 间隔分样。

表 1 采样信息

Tab. 1 Sampling Information

沉积柱 编号	采样点坐标	离岸距离/ km	水深/m	沉积柱 长度/cm
C1	(19.10°N, 110.70°E)	13	47	28
C2	(18.81°N, 111.19°E)	69	110	25
C4	(18.47°N, 111.33°E)	109	200	24

1.2 分析方法

在对样品进行粒度分析前,需对样品进行预处理。取少量自然风干的沉积物样品,加入过量 H_2O_2 去除有机质杂质,直至无气泡冒出后,离心去除上清液;然后加入过量 HCl 去除碳酸盐,再次离心去除上清液后,加入 $(NaPO_3)_6$ 作为分散剂,最后使用激光粒度仪进行粒度分析^[11]。分析单位为合

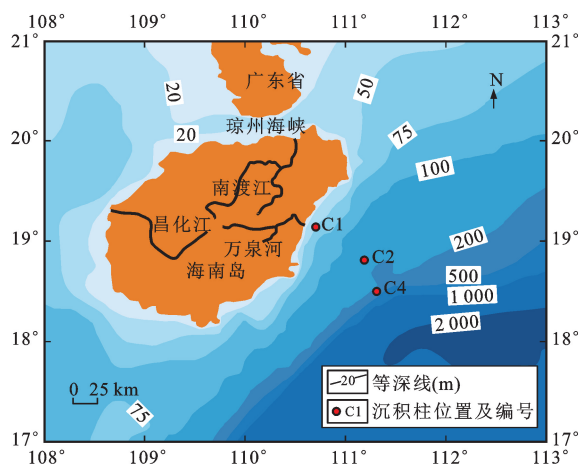


图1 南海琼东陆架海洋沉积物采样位置

Fig. 1 Sampling Location of Marine Sediments from the East Continental Shelf of Hainan Island, South China Sea

肥工业大学分析测试中心,所使用的激光粒度仪型号为 Malvern Mastersizer 2000,粒度测量范围为 $0.02 \sim 2\,000.00\ \mu\text{m}$,测试相对误差小于 1% 。粒级以 Krumbein 粒度(φ)计,计算公式为 $\varphi = -\log_2 D$,其中, D 为粒级。

经 H_2O_2 和 HCl 处理过的样品可能含有少量的生物硅,但由于样品采自陆架区(水深小于 $200\ \text{m}$),生物硅含量一般很低^[12]。体式显微镜下观察也显示放射虫、海绵骨针等硅质生物含量很低。因此,生物硅不会对碎屑物质的粒度组成产生显著影响,处理后的样品粒度能够反映陆源碎屑物质的粒度。

2 结果分析与讨论

2.1 粒度组成

根据尤登—温德华氏(Udden-Wentworth)粒级标准,样品颗粒按粒径大小分为黏土($<4\ \mu\text{m}$)、粉砂($4 \sim 63\ \mu\text{m}$)、砂($63 \sim 2\,000\ \mu\text{m}$)和砾($>2\,000\ \mu\text{m}$)等4个粒级。3根沉积柱均不含砾,其粒度组成如图2所示。按照福克的沉积物分类方法,沉积柱C1主要为砂质泥,沉积柱C2全部为砂质粉砂,沉积柱C4主要为粉砂。

由图2可知:随着离岸距离增加,沉积柱样中黏土与砂的比值下降,粉砂比例上升,黏土含量相对稳定;由沉积柱C1过渡到沉积柱C4,样品点的分布范围逐渐集中,这在一定程度上反映水动力条件逐渐减弱,且变得更为稳定。

2.2 粒度参数特征

本文使用矩法^[13]计算各沉积柱样的粒度参数。计算公式为

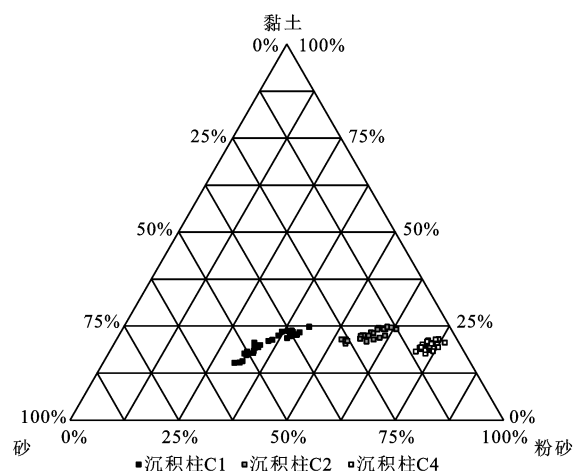


图2 沉积柱C1、C2和C4样品粒度组成

Fig. 2 Grain Size Compositions of Samples from Sediment Cores C1, C2 and C4

$$M_z = \sum_{i=1}^n f_i M_{ip}$$

$$S_d = \sqrt{\sum_{i=1}^n (f_i (M_{ip} - M_z)^2)}$$

$$S_k = \frac{\sum_{i=1}^n (f_i (M_{ip} - M_z)^3)}{S_d^3}$$

$$K_u = \frac{\sum_{i=1}^n (f_i (M_{ip} - M_z)^4)}{S_d^4}$$

式中: M_z 为平均粒径; S_d 为标准偏差; M_{ip} 为粒级; f_i 为粒径频段 i 对应的频率^[14]; S_k 为偏度; K_u 为峰度。

根据计算结果,沉积柱C1、C2和C4样品平均粒径分别为 $(5.33 \pm 0.31)\Phi$ 、 $(6.14 \pm 0.20)\Phi$ 和 $(6.26 \pm 0.11)\Phi$,颗粒整体上比较细,且随着离岸距离的增加,平均粒径逐渐减小(图3)。标准偏差与样品的分选性有关,其值越大,分选性越差^[14]。沉积柱C1和C2样品的标准偏差平均值分别为 $(2.59 \pm 0.09)\Phi$ 和 $(2.19 \pm 0.12)\Phi$,沉积柱C4样品的标准偏差平均值为 $(1.82 \pm 0.05)\Phi$,其样品的分选性较沉积柱C1和C2来说要好,3根沉积柱样的标准偏差随水深增加而降低,这与粒度组成中样品点分布逐渐集中的趋势一致。3根沉积柱样的偏度范围分别为 $0.03 \sim 0.77$ 、 $-0.15 \sim 0.17$ 和 $0.37 \sim 0.59$,平均值分别为 0.40 、 -0.02 和 0.48 ,沉积柱C2样品粒度分布的对称性要优于沉积柱C1和C4。峰度平均值分别为 1.75 ± 0.29 、 2.27 ± 0.11 和 2.70 ± 0.07 ,其值逐渐增大,沉积柱C1峰态较沉积柱C2与C4要宽^[13]。与南海北部表层海洋沉积物^[15]相比,琼东陆架表层($0 \sim 5\ \text{cm}$)海洋沉积物总体上粒度偏小,分选

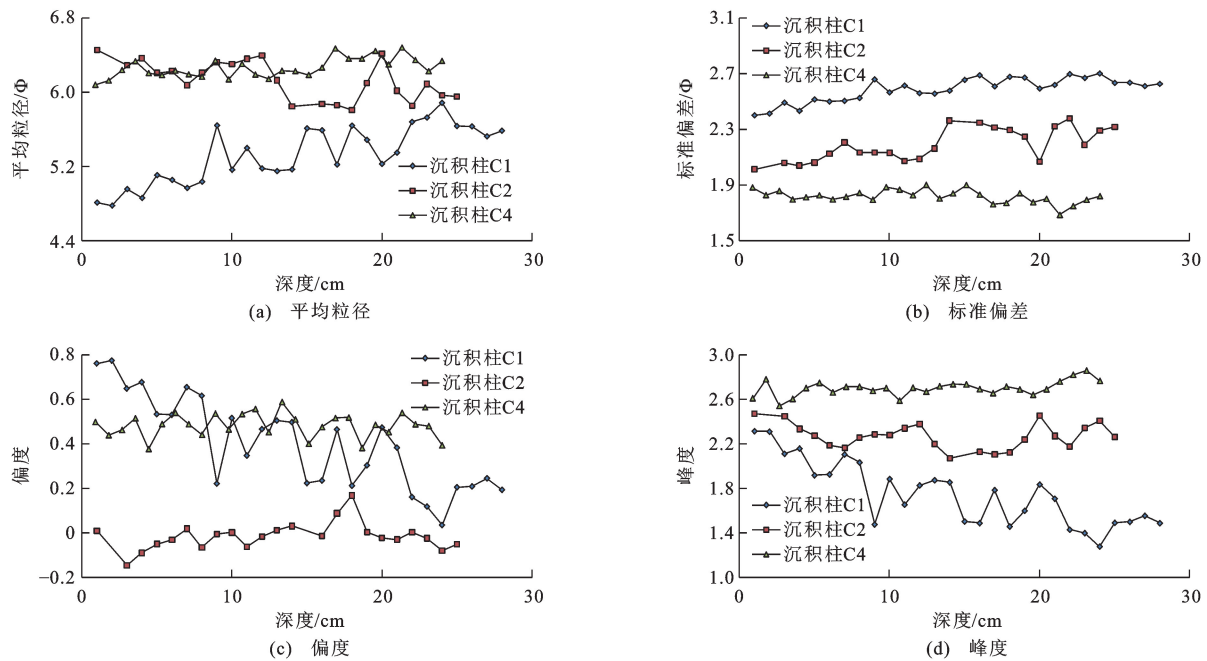


图3 样品粒度的平均粒径、标准偏差、偏度和峰度随深度的变化

Fig. 3 Changes of Mean Grain Size, Standard Deviation, Skewness and Kurtosis of Samples with Depth

性较差;南海北部海洋沉积物偏度变化范围较大,且平均值高于琼东陆架表层海洋沉积物;琼东陆架表层海洋沉积物峰度与南海北部样品较为接近。

从空间变化角度来看,随着离岸距离和水深的增加,样品的平均粒径逐渐变小,标准偏差逐渐减小,分选性变好,峰态逐渐变窄,偏度变化规律不明显。

2.3 分形特征

本文使用幂指数法来计算粒度分维值。计算步骤为:①绘制 $m(r)/m$ 和 r 的散点图(双对数坐标系),其中 r 范围为 5%~95% 的无标度区间;②拟合得到线性回归方程的斜率 b ;③利用公式 $D=3-b$,计算得到粒度分维值 $D^{[16-17]}$ 。式中, $m(r)/m$ 为直径小于 r 的颗粒累积质量与样品总质量的比值,假设颗粒的密度不变,此处可用累积体积百分比代替。各沉积柱代表性样品的 $\lg(m(r)/m)-\lg r$ 图解如图 4 所示,二者在统计意义上显著正相关(判定系数高于 0.9),说明样品粒度具有分形特征。

利用上述方法,计算得到 3 根沉积柱样的粒度分维值随深度的变化如图 5 所示。沉积柱 C1、C2 和 C4 样品的粒度分维值范围分别为 2.51~2.54、2.39~2.50 和 2.24~2.34,平均值分别为 2.52、2.45 和 2.30。3 根沉积柱样的粒度分维值存在显著差异,其值随着离岸距离增加而逐渐减小,说明不同沉积环境下沉积物粒度的分形特征存在差异。

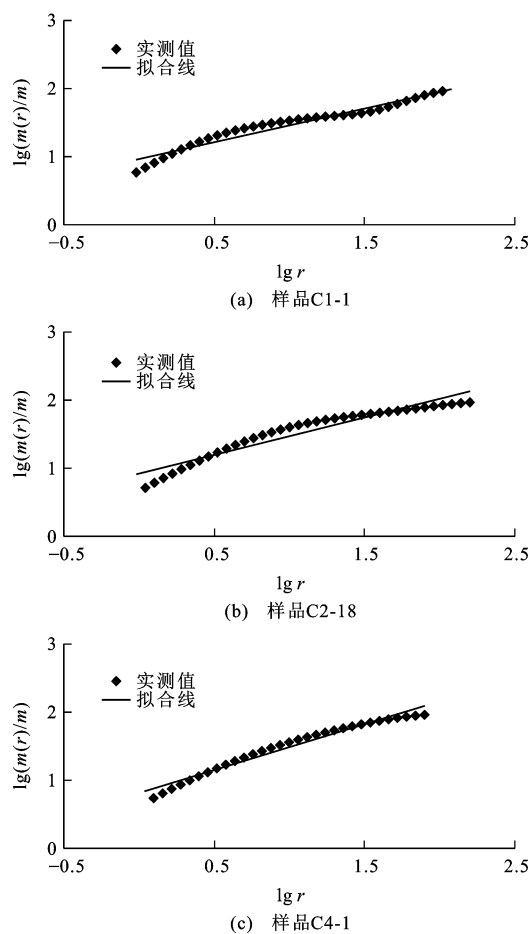
对比其他区域,在相同的无标度区间内(累积体

积百分比 5%~95%),沉积柱 C4 样品分维值与东海内陆架泥质区 EC2005 孔粒度分维值(范围为 2.10~2.48,平均值为 2.30^[17])和黄海硬黏土的粒度分维值(范围为 2.16~2.52,平均值为 2.31^[18])较为接近。相比其他类型的沉积物,沉积柱 C1 样品的粒度分维值处于较高水平,这可能与其较差的分选性有关。

研究表明,沉积物的分选性会对粒度分维值产生影响^[19]。沉积柱 C1、C2、C4 样品的粒度分维值与标准偏差间的相关性分析如图 6 所示。由图 6 可知,沉积柱 C1 样品的粒度分维值与标准偏差的线性关系相对较差,而沉积柱 C2 与 C4 样品的粒度分维值与标准偏差间存在明显的线性关系,尽管沉积柱 C1 样品的粒度分维值与标准偏差相关性略差,但在统计学上仍具显著性。近海海洋沉积物的这种特征与砂岩、湖泊沉积物和风成沉积物具有一致性^[20-22]。沉积柱 C1 样品的平均粒径较大,因水动力相对较强,沉积物的分选性较差,致使沉积体系相对复杂,粒度分维值偏大。随着离岸距离和水深的增加,水动力减弱,沉积物的分选性变好(图 3),沉积体系变得相对简单,粒度分维值逐渐变小。

2.4 沉积环境对粒度分维值的影响

由于 3 根沉积柱的采样点水深存在变化,各采样点沉积环境也可能存在差别,本文对沉积环境和粒度分维值之间的关系也进行了探讨。沉积物粒度 C-M 图是研究沉积环境的理想工具之一^[23],沉积柱



样品 C1-1、C2-18、C4-1 拟合线判定系数分别为 0.94、0.92、0.98

图4 代表性样品 $\lg(m(r)/m)$ - $\lg r$ 图解

Fig. 4 Diagrams of $\lg(m(r)/m)$ - $\lg r$ of Representative Samples

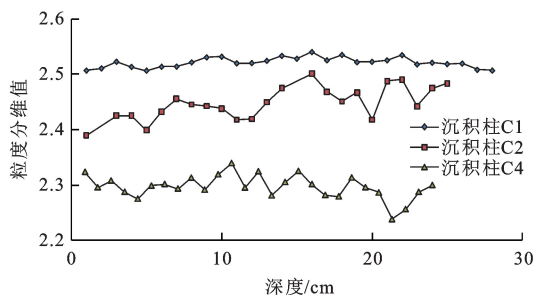
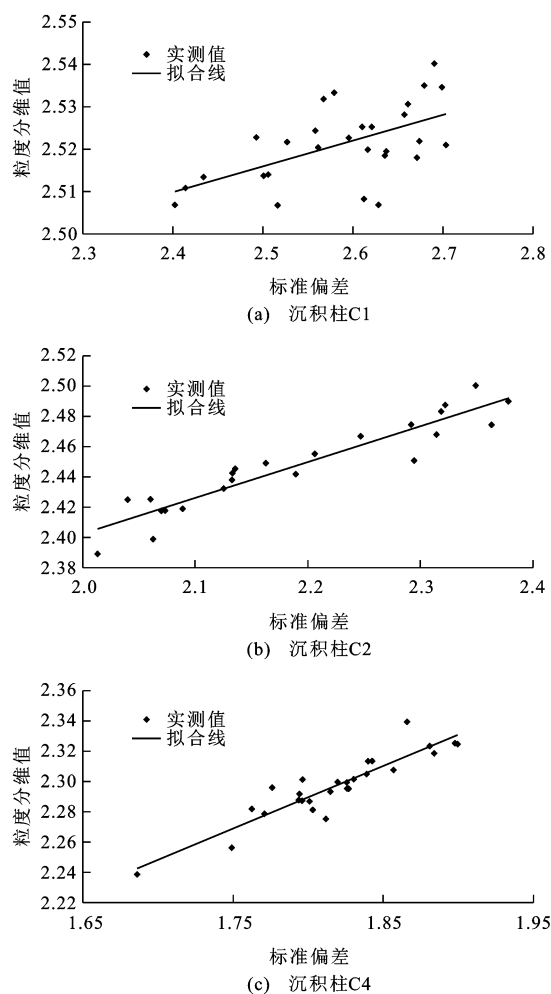


图5 沉积柱 C1、C2 和 C4 样品粒度分维值随深度的变化

Fig. 5 Changes of Fractal Dimensions of Samples from Sediment Cores C1, C2 and C4 with Depth

C1、C2、C4 样品粒度 $C-M$ 图如图 7 所示。

3 根沉积柱的沉积物样品分布在 $C-M$ 图(图 7)中的不同位置,这意味着 3 个采样点位的沉积环境存在明显差别。沉积柱 C1 样品的 M 值变化幅度很大,而 C 值维持在相对稳定的水平。与之不同的是,沉积柱 C4 样品的 M 值变化幅度较小,但 C 值变化幅度很大,沉积柱 C2 处于沉积柱 C1 和 C4 的



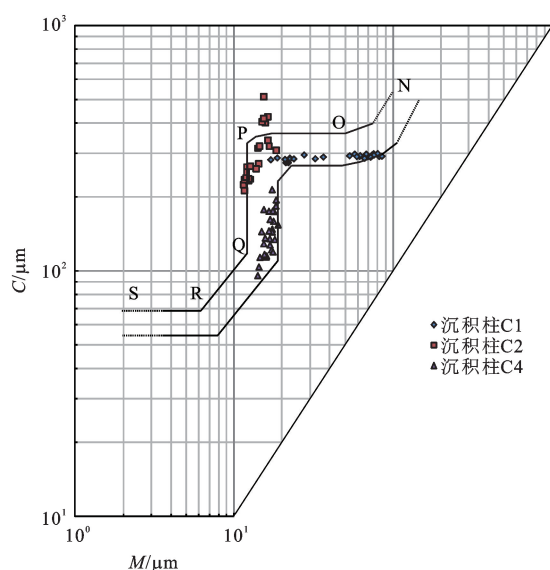
沉积柱 C1、C2、C4 拟合线判定系数分别为 0.32、0.84、0.89

图6 粒度分维值与标准偏差的相关关系

Fig. 6 Correlation Relationships Between Fractal Dimension and Standard Deviation

过渡区域。从 3 根沉积柱样 $C-M$ 图来看,沉积柱 C1 属于牵引流沉积中的 OP 段,沉积物碎屑的搬运方式以滚动为主;沉积柱 C4 属于牵引流沉积中的 PQ 段,搬运以悬移为主;沉积柱 C2 样品的搬运方式是从滚动(沉积柱 C1)向悬移(沉积柱 C4)方式转变的过渡环节。这从侧面反映了沿离岸方向水动力逐步减弱^[24]。

通过对 3 根沉积柱样的粒度分维值进行对比可知:以滚动搬运方式为主的沉积柱 C1 样品的粒度分维值最大;而以悬移搬运方式为主的沉积柱 C4 粒度分维值最小;采样点位于沉积柱 C1 和 C4 之间的沉积柱 C2 搬运方式介于二者之间,其样品的粒度分维值也处于中等水平。因此,碎屑物质的搬运方式也会对沉积物的粒度分维值产生影响。在琼东陆架海域,滚动组分的粒度分维值要明显高于悬移组分,跃移组分的粒度分维值处于二者之间。



C 为颗粒含量 1% 处对应的粒径; M 为颗粒含量 50% 处对应的粒径(粒度中值)

图 7 沉积柱 C1、C2 和 C4 样品粒度 C-M 图
Fig. 7 C-M Plot of Samples from Sediment Cores C1, C2 and C4

总体而言,沉积柱样的水动力与粒度参数和分维值之间存在一定的关联。以沉积柱 C1 为例,其水动力较大,搬运能力较强,碎屑物质的运动方式以滚动为主,较强的水动力导致沉积物的砂含量高,平均粒径较大,但分选性较差,沉积体系相对复杂,进一步使得碎屑物质的粒度分维值偏高。因此,在今后的研究中可应用粒度分维值分析,并结合年代学研究,重建古环境演变过程。

3 结 语

(1)南海琼东陆架海域不同海水深处的沉积柱 C1、C2 和 C4 样品的粒度在累积体积百分比 5%~95% 的无标度区间内均具有明显的分形特征,粒度分维值总体为 2.24~2.54;随着离岸距离的增加,样品的分选性变好,粒度分维值逐渐降低。

(2)粒度分维值与标准偏差在统计意义上显著正相关,分选性会对粒度的分形特征产生影响。

(3)C-M 图分析表明,颗粒的主体搬运方式由沉积柱 C1 的滚动逐渐转变为沉积柱 C4 的悬移,水动力逐渐减弱。以滚动为主要搬运方式的颗粒粒度分维值较大,以悬移为主要搬运方式的颗粒粒度分维值相对较小,这说明分形程度也受搬运方式和水动力条件的影响。

本研究得到 2013 年度国家自然科学基金委员会南海西部综合航次的支持,样品采集过程中得到

中国科学技术大学刘晓东教授和中国科学院南海海洋研究所向荣研究员的大力帮助,合肥工业大学李振生副研究员参与本文讨论,在此一并表示感谢!

参考文献:

References:

- [1] 贾荷花,李传统.分形理论在颗粒物研究中的应用[J].南京师范大学学报:工程技术版,2010,10(2):39-44.
JIA He-hua, LI Chuan-tong. Applications of Fractal Theory in the Studies of Particulate Matters[J]. Journal of Nanjing Normal University: Engineering and Technology Edition, 2010, 10(2): 39-44.
- [2] LEB HOOKER R, IVERSON N R. Grain-size Distribution in Deforming Subglacial Till: Role of Grain Fracture[J]. Geology, 1995, 23(1): 57.
- [3] 胡 玲,胡道功,何登发,等.准噶尔盆地南缘霍尔果斯和吐谷鲁断裂带断层泥分形特征与断裂活动关系[J].地学前缘,2004,11(4):519-525.
HU Ling, HU Dao-gong, HE Deng-fa, et al. Correlation Between the Fractal Dimension of Fault Gouges and Fault Activity in the Huo'erguosi and Tugulu Faults Zones Along Southern Edge of Junggar Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11(4): 519-525.
- [4] BRYKSINA N A, LAST W M. Fractal Analysis of the Gray-scale Intensity Data of Finely Laminated Sediments from Bainbridge Crater Lake, Galapagos [J]. Mathematical Geology, 2005, 37(4): 327-336.
- [5] 余承玲,张建魁,邱恩波.全球气候变化研究证据[J].广东微量元素科学,2009,16(4):32-35.
YU Cheng-ling, ZHANG Jian-kui, QIU En-bo. Research Evidence of Global Climate Change [J]. Guangdong Trace Elements Science, 2009, 16(4): 32-35.
- [6] 王金莲.海洋沉积物粒度分析方法和测试结果的对比研究[D].北京:中国地质大学,2011.
WANG Jin-lian. Comparison of Grain Size Analysis Methods and Results of Marine Sediments [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2011.
- [7] SHEPARD F P. Nomenclature Based on Sand-silt-clay Ratios [J]. Journal of Sedimentary Research, 1954, 24(3): 151-158.
- [8] FOLK R L, ANDREWS P B, LEWIS D W. Detrital Sedimentary Rock Classification and Nomenclature for Use in New Zealand [J]. New Zealand Journal of Geology and Geophysics, 1970, 13(4): 937-968.
- [9] 章伟艳,张富元,章伟德,等.南海东部 69 柱粒度分维指标与气候代用指标的分形比较及其意义[J].沉积学报,2005,23(4):696-701.

- ZHANG Wei-yan, ZHANG Fu-yuan, ZHANG Wei-de, et al. Time Series Fractal Comparison and Its Significance of the Grain-size Fractal Dimensions and Climatic Proxy from Core 69 in the Eastern South China Sea[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2005, 23(4): 696-701.
- [10] WU L B, FU P Q, XU L Q, et al. Changes in the Source of Sedimentary Organic Matter in the Marginal Sea Sediments of Eastern Hainan Island in Response to Human Activities During the Past 200 Years[J]. *Quaternary International*, 2016, 440(1): 150-159.
- [11] 国家海洋局 908 专项办公室. 海洋底质调查技术规程[M]. 北京: 海洋出版社, 2006.
- 908 Project Office of State Oceanic Administration. Technical Regulations for Marine Substrate Investigation[M]. Beijing: China Ocean Press, 2006.
- [12] ZHANG L L, CHEN M H, XIANG R, et al. Distribution of Biogenic Silica Content in Surface Sediments from the Southern South China Sea and Its Environmental Significance[J]. *Marine Science Bulletin*, 2009, 11: 43-52.
- [13] 贾建军, 高 抒, 薛允传. 图解法与矩法沉积物粒度参数的对比[J]. *海洋与湖沼*, 2002, 33(6): 577-582.
- JIA Jian-jun, GAO Shu, XUE Yun-chuan. Grain-size Parameters Derived from Graphic and Moment Methods: A Comparative Study[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2002, 33(6): 577-582.
- [14] LU H Y, VANDENBERGHE J, AN Z S. Aeolian Origin and Palaeoclimatic Implications of the 'Red Clay' (North China) as Evidenced by Grain-size Distribution[J]. *Journal of Quaternary Science*, 2001, 16(1): 89-97.
- [15] 李泽文, 栾振东, 阎 军, 等. 南海北部外陆架表层沉积物粒度参数特征及物源分析[J]. *海洋科学*, 2011, 35(12): 92-100.
- LI Ze-wen, LUAN Zhen-dong, YAN Jun, et al. Characterization of Grain Size Parameters and the Provenance Analysis of the Surface Sediment in the Outer Shelf of the Northern South China Sea[J]. *Marine Sciences*, 2011, 35(12): 92-100.
- [16] ZHANG R, WANG Y P, GAO J H, et al. Sediment Texture and Grain-size Implications: The Changjiang Subaqueous Delta[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2009, 28(4): 38-49.
- [17] 徐方建, 李安春, 李铁刚, 等. 东海内陆架 EC2005 孔沉积物粒度分形特征[J]. *地质学报*, 2011, 85(6): 1038-1044.
- XU Fang-jian, LI An-chun, LI Tie-gang, et al. Grain-size Fractal Features of the Core EC2005 Sediments in the Inner Shelf of East China Sea[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(6): 1038-1044.
- [18] 赵 梅. 黄海中部海岸末次冰盛期第 1 硬质黏土层的粒度分维特征及其环境意义[J]. *海洋地质动态*, 2008, 24(10): 8-13.
- ZHAO Mei. Particle Size Fractal Dimension of the First Hard Clay Layer in the Last Ice-peak of the Central Yellow Sea and Its Environmental Significance[J]. *Marine Geology Letters*, 2008, 24(10): 8-13.
- [19] 唐建华, 何 青, 刘玮祎, 等. 长江口南槽沉积物粒度的分形特性分析[J]. *泥沙研究*, 2007(3): 50-56.
- TANG Jian-hua, HE Qing, LIU Wei-yi, et al. Fractal Characteristics of Grain Size Distribution in the South Passage of the Changjiang Estuary[J]. *Journal of Sediment Research*, 2007(3): 50-56.
- [20] 金 强, 曾 怡. 储集性砂岩粒度组成的分形结构[J]. *石油大学学报: 自然科学版*, 1995, 19(3): 12-16.
- JIN Qiang, ZENG Yi. Fractal Structure of Granularity Configuration of Reservoir Sandstones[J]. *Journal of the University of Petroleum, China: Edition of Natural Sciences*, 1995, 19(3): 12-16.
- [21] 徐利强, 徐 芳, 周涛发. 巢湖沉积物粒度特征及其沉积学意义[J]. *地理科学*, 2015, 35(10): 1318-1324.
- XU Li-qiang, XU Fang, ZHOU Tao-fa. Grain-size Features of Lacustrine Sediments from Chaohu Lake and Its Sedimentary Implications[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2015, 35(10): 1318-1324.
- [22] 徐利强. 新疆巴里坤鸣沙山风成沉积物粒度特征[J]. *中国沙漠*, 2017, 37(5): 836-842.
- XU Li-qiang. Grain Size Features for Aeolian Sediments from Balikun Mingshashan Desert, Xinjiang, China[J]. *Journal of Desert Research*, 2017, 37(5): 836-842.
- [23] XIAO S B, LI R, CHEN M H. Detecting Sedimentary Cycles Using Autocorrelation of Grain Size[J]. *Scientific Reports*, 2013, 3: 1653.
- [24] PASSEGA R. Grain Size Representation by CM Patterns as a Geologic Tool[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1964, 34(4): 830-847.