

西南印度洋中脊沉积物粒度特征及不同前处理方法对粒度特征的影响

吕文哲^{1,2,3,4,5}, 易亮^{6,7*}, 付腾飞^{3,4,5}, 杨继超⁸, 陈广泉^{3,4,5},
林震⁸, 徐兴永^{3,4,5}, 于洪军⁸

(1. 华东师范大学 河口海岸科学研究所, 上海 200062; 2. 河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062;
3. 国家海洋局 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 4. 海洋沉积与环境地质国家海洋局重点实验室, 山东 青岛 266061;
5. 青岛海洋科学与技术国家实验室 海洋地质过程与环境功能实验室, 山东 青岛 266061;
6. 同济大学 海洋与地球科学学院, 上海 200092; 7. 海洋地质国家重点实验室, 上海 200092;
8. 国家深海基地管理中心, 山东 青岛 266237)

摘要:通过采用多种前处理方法,对西南印度洋中脊沉积物粒度进行了测定、分析和对比研究。其中,未去除碳酸盐的样品平均粒径介于 7.18~8.35 Φ ;分选较差;偏度表现为极负偏,且负偏程度随着分选变差逐渐变大;峰度表现为平坦。粒度频率曲线呈较显著的多峰分布。去除碳酸盐之后,样品平均粒径介于 5.95~6.64 Φ ;分选变好;偏度由极负偏变为极正偏;峰度由正态向平坦方向变化;黏土质量分数明显减少,粉砂质量分数显著增加。粒度频率分布曲线、粒度象特征及粒度结构也都发生了明显的改变。这些变化指示了沉积物的搬运处于静水悬浮和递变悬浮的过渡阶段,而是否去除碳酸盐将对粒度分析结果产生显著影响。此外,有机质和生物硅的存在也对沉积物粒度测试结果造成了影响,使细粒组分明显增加,但并不影响粒度分布的基本形态。

关键词:西南印度洋中脊;沉积物;粒度;前处理方法

中图分类号: P736

文献标识码: A

文章编号: 1671-6647(2017)04-0512-12

doi: 10.3969/j.issn.1671-6647.2017.04.008

在高压、低温的深海环境中,沉积物保存较为连续且受到后期干扰较少,蕴含着丰富的环境变化信息^[1-2]。依其成因,深海沉积物可分为陆源碎屑和生物成因两大组分^[3]。前者可以提取丰富的深海环境变化信息,后者蕴含了深海生产力波动的信号。相比于其它大洋,西南印度洋中脊有很多独特的特征,呈“入”形分布,西与大西洋中脊和南美洲—南极洲中脊交于布维三联点(Bouvet Triple Junction),东与中印度洋中脊和东南印度洋中脊交于罗德里格斯三联点(Rodrigues Triple Junction),属慢速扩张中脊^[4]。此外,McCave 等认为西南印度洋包含有 4 层不同来源的水团,包括南极底层水,北印度洋深、中层水以及季风控制的表层海洋环流^[5]。Faugères 等提出深海沉积物聚集模式主要由深海底层流所控制^[6]。因此,通过西南印度洋中脊沉积物的相关研究,有望获得古环境和生产力的信息,进而反演区域特殊的地质环境过程。

粒度是进行沉积学分析的常用指标,其变化往往与沉积环境、介质动力等有关,并已广泛应用于风尘、湖泊、河流和海洋沉积等研究^[7-13]。孙东怀等^[14]通过对中国黄土粒度分布特征的研究,揭示了黏粒组分的气候学意义。孙千里等^[15]和何华春等^[16]分别通过岱海和洪泽湖沉积物粒度特征反演了湖泊水位和区域气候的干湿变化。Zhou 等^[17]基于北黄海泥质区沉积物的粒度特征认为其变化与黄河流域内降水有关。张晋

收稿日期: 2016-07-30

资助项目:国家自然科学基金项目——莱州湾南部晚新生代海-陆相沉积的磁性地层学研究(41402153)和滨海地区地下水对潮汐作用的影响机制研究(41406072)

作者简介:吕文哲(1992-),男,山东滨州人,硕士研究生,主要从事海洋地质方面研究. E-mail: lvwenzhe@fio.org.cn

*** 通讯作者:**易亮(1982-),男,江西赣州人,博士,副研究员,主要从事海洋沉积与年代学方面研究. E-mail: yi.liang82@gmail.com

(陈靖 编辑)

等^[18]勾画了南海南部表层沉积物的空间分布特征,指出物源、水动力条件、地形等是控制这一空间特征的主要因素。因此,沉积物粒度分析可以区分不同沉积类型,判断沉积物的物源信息以及沉积时的水动力条件,进而重建古气候和古环境。

自 20 世纪 60 年代,深海钻探计划的实施广泛促进了海洋沉积学的发展,在全球范围内获得了大量深海沉积物样品,取得了丰富的成果。然而,西南印度洋的调查研究仍较少,西南印度洋中脊则更为匮乏,研究程度亟待提高^[19]。此外,已有的研究多集中于沉积物地球化学、矿物学特征等方面,很少涉及沉积物粒度这一基本特征^[20-24]。

针对这一研究现状,本文对取自西南印度洋中脊的沉积物进行详细的粒度分析,总结不同前处理方法获得的粒级分布、粒度象特征、粒度结构等,提取其中蕴含的物源、水动力条件等环境信息,以期为深入研究该地区沉积环境的演化提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 材 料

研究所用 S008GC02 孔柱状沉积物样品由中国大洋协会于 2015-02 第 35 航次在西南印度洋通过重力取样器获得。钻孔位于西南印度洋中脊($50^{\circ}54'E$, $33^{\circ}59'S$)(图 1),水深 4 430 m。该柱状沉积物样长 240 cm,以浅棕色黏土质沉积物为主;以 10 cm 为间隔进行取样,共获取 24 个样品用于本项研究。

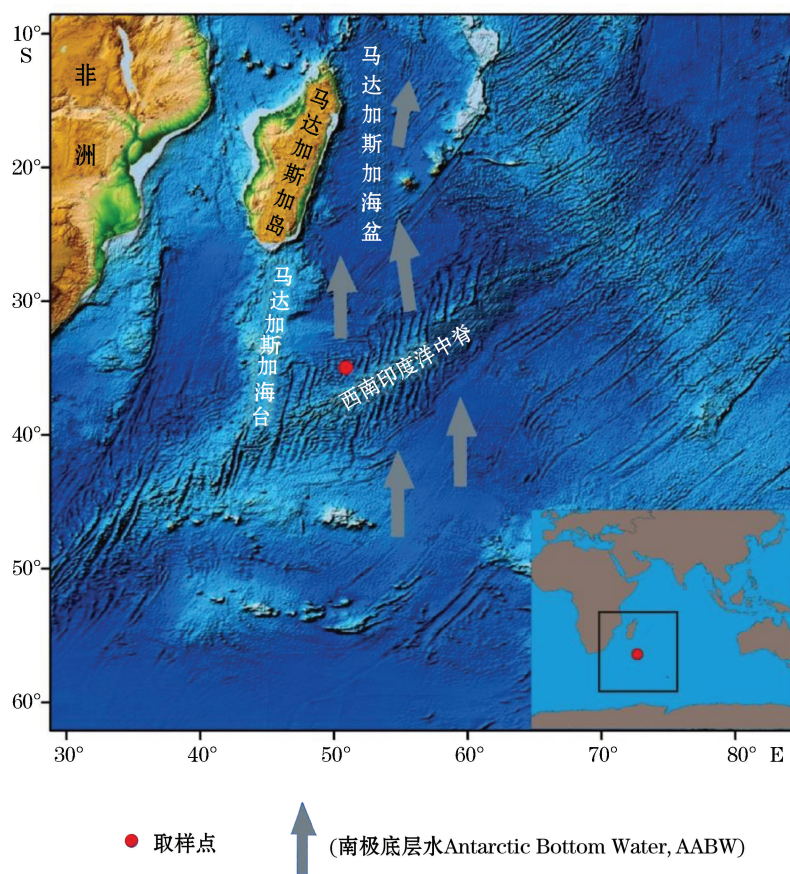


图 1 研究区地理位置^[5]

Fig.1 Geographical location of the study area^[5]

1.2 粒度测试

样品的前处理和上机测试均在海洋沉积与环境地质国家海洋局重点实验室测试中心完成。所用仪器为英国 MALVERN 公司生产的 MASTERSIZER-2000 型激光粒度仪,该仪器的测量范围为 $0.02 \sim 2\,000\ \mu\text{m}$,重复测量误差小于 3%。每份沉积物样品中取约 0.5 g 放入烧杯中,分别采取以下 2 种前处理方法:

前处理 A(原始粒级):烧杯注满蒸馏水,静置 24 h;

前处理 B(去除碳酸盐):烧杯中加入 5~10 ml 质量分数为 10% 的 HCl,静置 12 h。

反应后的悬浮液在离心机中以 4 000 r/min 的转速离心清洗 15 min,用超声波清洗机振荡后测量。

1.3 粒度参数计算

常用的粒度参数有平均粒径、分选系数、偏度、峰度等。粒度参数的计算方法有多种,本文采用 McManus^[25] 提出的矩值法进行计算。

平均粒径

$$M_z = \frac{\sum f m_\phi}{100}; \quad (1)$$

分选系数

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum f (m_\phi - M_z)^2}{100}}; \quad (2)$$

偏度

$$S_k = \frac{\sum f (m_\phi - M_z)^3}{100\sigma^3}; \quad (3)$$

峰度

$$K_u = \frac{\sum f (m_\phi - M_z)^4}{100\sigma^4}. \quad (4)$$

式(1)~式(4)中: f 为各粒级的质量分数, $\sum f = 100$; m_ϕ 表示粒径。

2 结果与讨论

2.1 粒级组成

根据谢帕德三角图(图 2),前处理 A 所获结果可命名为黏土质粉砂和粉砂质黏土;前处理 B 大部分为粉砂,少量为黏土质粉砂。如图 3 所示,前处理 A 获得的平均粒径介于 $7.18 \sim 8.35\ \Phi$,随深度的变化较小;分选较差;多表现为极负偏;峰度平坦。前处理 B 获得的平均粒径介于 $5.95 \sim 6.64\ \Phi$,整体大于前处理 A;多表现为极正偏。

各组样品黏土、粉砂、砂的质量分数如图 4 所示。其中,前处理 A 大部分样品的黏土和粉砂质量分数相差不大,介于 40%~60%,砂的质量分数几乎都小于 10%;前处理 B 的样品粉砂质量分数占有绝对优势,黏土质量分数大多占 10%~20%,砂的含量可以忽略不计。

根据粒度参数 C (质量分数为 1% 的粒径值)和 M (质量分数为 50% 的粒径值)作沉积物粒度象 $C-M$ 图(图 2)。前者代表样品中最粗颗粒的粒径,可以反映搬运介质能量的上限,即最大水动能;后者反映搬运介质的平均动能^[28]。

不同前处理的 2 组样品在 $C-M$ 图上表现出明显的分异性:前处理 B 的样品在 $C-M$ 图上分布相对集中,

并据此可知搬运方式处于静水悬浮和递变悬浮的过渡阶段。此外,最大水动能(C 值)较小,可能指示了该区域的物质来源相对单一。这一特征与该区域常年受到南极底层水的影响有关^[5]。

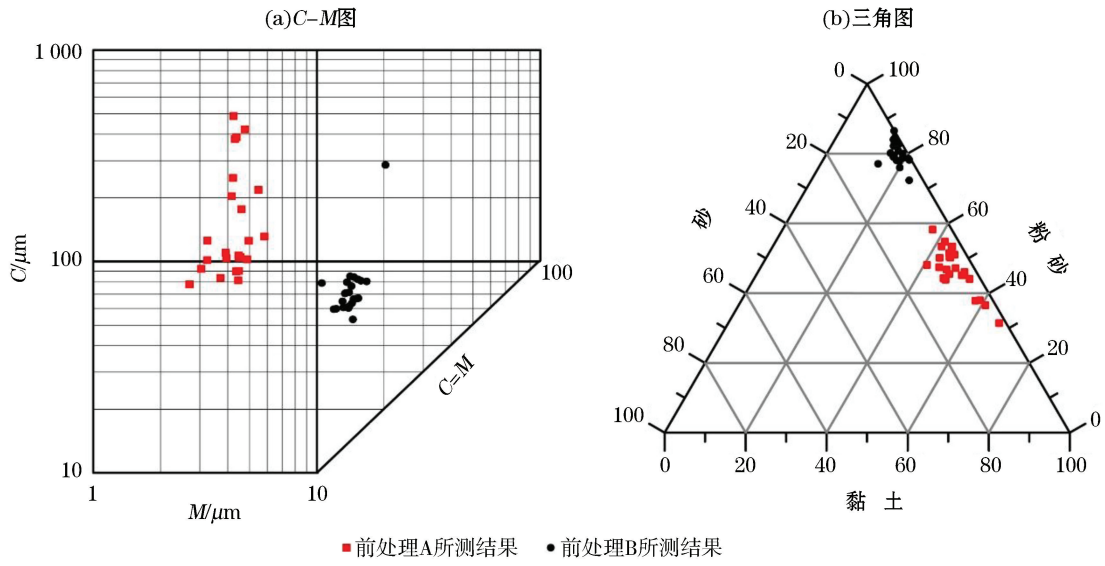


图 2 沉积物粒度象 C-M 图及三角图投点示意图
Fig.2 The grain-size C-M diagram and ternary diagram of the sediments

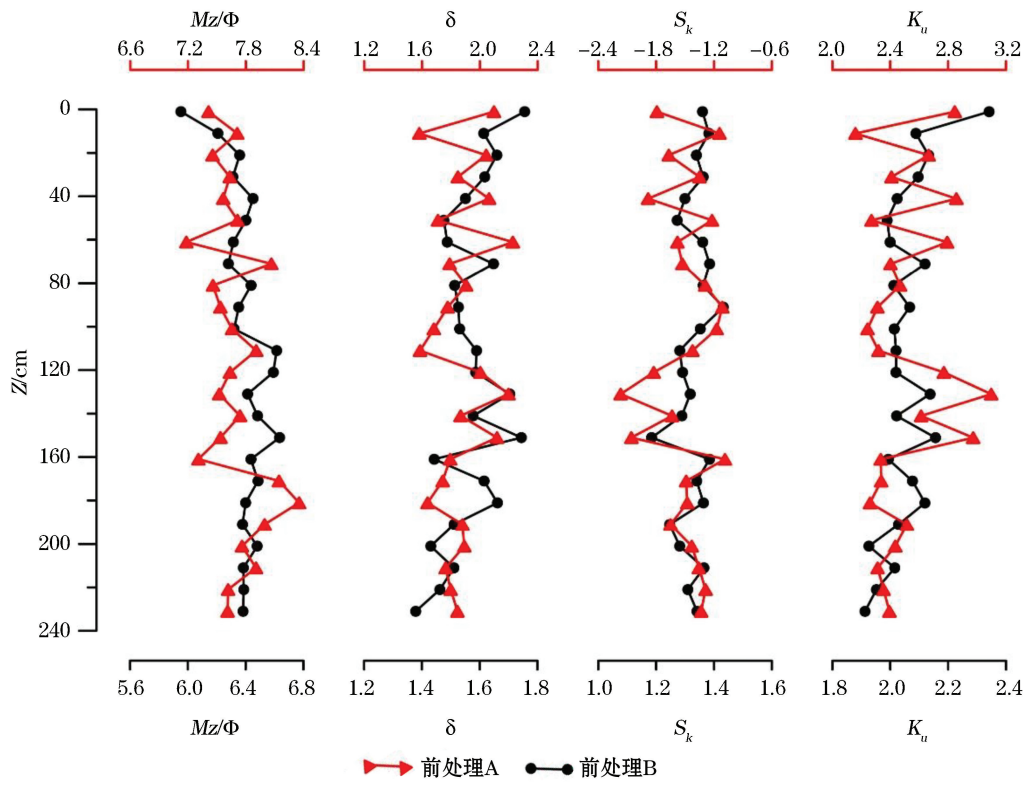


图 3 沉积物粒度参数曲线
Fig.3 The grain-size parameter curves of the sediments

图 4 为 2 种前处理方法后获得的沉积物粒度各粒级质量分数。2 种前处理方法相对比发现在 $<4\ \mu\text{m}$ 与 $4\sim 8\ \mu\text{m}$ 组分中,同一组分去除碳酸盐之后的质量分数明显小于未去除碳酸盐的,而 $8\sim 16\ \mu\text{m}$, $16\sim 32\ \mu\text{m}$, $32\sim 63\ \mu\text{m}$ 与 $>64\ \mu\text{m}$ 的组分则相反。 $32\sim 63\ \mu\text{m}$ 组分中 2 种前处理方法获得的质量分数随深度的变化没有明显的相关关系, $<4\ \mu\text{m}$, $4\sim 8\ \mu\text{m}$ 以及 $>64\ \mu\text{m}$ 的组分中变化趋势大致相同。针对同一种前处理方法, $8\sim 16\ \mu\text{m}$, $16\sim 32\ \mu\text{m}$ 两个组分随深度的变化具有显著的相关性。这说明大部分碳酸盐矿物以 $<8\ \mu\text{m}$ 的形式存在,或者是前处理过程中超声波振荡将大颗粒的碳酸盐矿物击碎,从而导致细粒部分的增加。

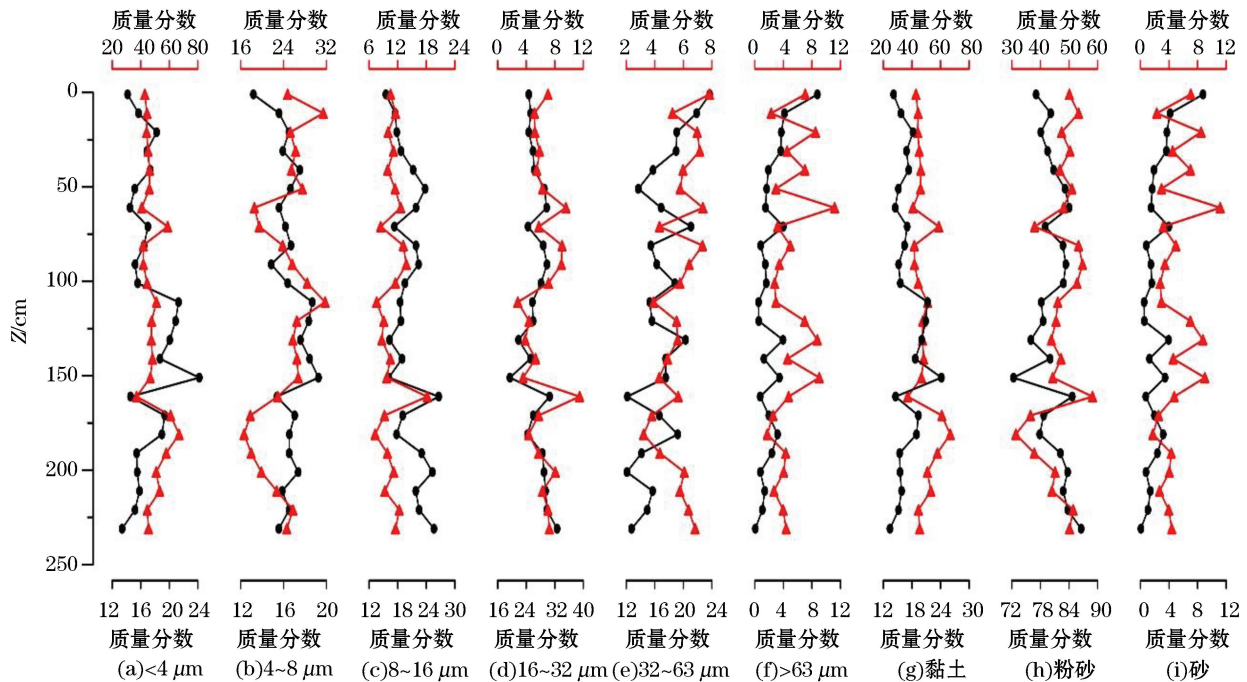


图 4 沉积物粒度各粒级质量分数(%)

Fig.4 Grain size compositions(%)

通过 2 种前处理方法获得的粒度组成及粒度参数具有明显的不同。相比前处理 A,前处理 B 获得的粒度参数随深度的变化相对平缓,波动幅度小;平均粒径变大,分选变好,偏度由极负偏变为极正偏,峰度则由正态向平坦方向变化;黏土含量显著减少,粉砂含量相应增加;所测结果在 C-M 图与谢帕德三角图(图 3)中投点更为集中。由此反映出碳酸盐的存在使得粒度参数和粒度组成发生了明显改变,无法反映真实的水动力条件。

2.2 粒度象特征

根据文献[26-27],选取粒度参数: A 为 $<4\ \mu\text{m}$ 组分的质量分数; L 为 $<31\ \mu\text{m}$ 组分的质量分数; F 为 $<125\ \mu\text{m}$ 组分的质量分数。分别以 A 对 M 、 L 对 M 、 F 对 M 作 $A-M$ 、 $L-M$ 、 $F-M$ 图,可以很好地反映沉积物组分的变化,通过对这些图的分析,来判断沉积物可能的搬运模式和形成环境^[6]。

由图 5 可知,两种前处理方法中,随 M 的增大 F 变化较小。前处理 A 中,随 M 的增大, A 急剧减小,呈较好的负相关关系;而 L 的减小趋势不明显。 $4\sim 31\ \mu\text{m}$ 的组分质量分数随 M 的增大缓慢增加,但细粒物质的质量分数始终较高。前处理 B 中, A 和 L 随 M 增大缓慢减小, M 的增加主要由 $4\sim 31\ \mu\text{m}$ 组分控制。由此反映出该地区沉积环境的平均水动能较大,控制沉积物粒度的为中粗粒组分。

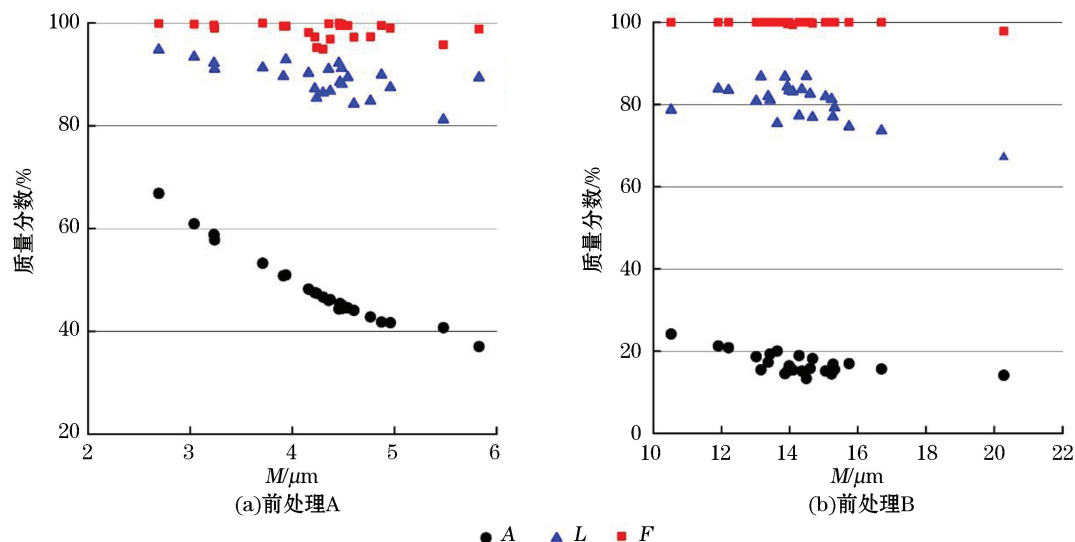


图5 S008GC02 孔沉积物粒度象 A-M、L-M、F-M 综合图

Fig.5 The A-M, L-M, and F-M diagrams of the sediments in Borehole S008GC02

2.3 粒度结构

沉积物的粒度参数可以较为直观地反映沉积物的特征^[7]。由图6可知,前处理A获得的样品偏度与分选系数之间存在负相关关系。前处理B获得的样品偏度与分选系数之间则不存在明显的相关关系,随着分选系数的变化,偏度变化较小。前处理A在平均粒径和分选系数散点图中投点分散,而前处理B则投点相对集中。

去除碳酸盐的沉积物平均粒径变大、分选变好,分选系数的分异度小,所指示的水动力条件较强,水动力过程波动幅度小,水动能环境较稳定。全部表现为正偏,偏度与分选系数之间没有明显的相关关系。

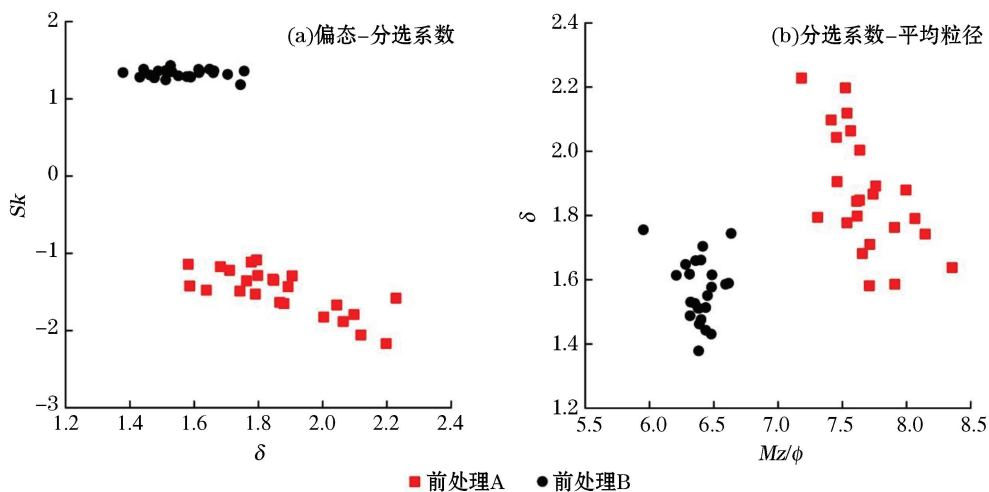


图6 沉积物粒度结构散点图

Fig.6 The grain-size structural scatter diagram of the sediments

2.4 粒度分布

由图7可知,经前处理A获得的粒度频率曲线呈显著的多峰分布,主峰位置在 $2.52 \sim 4.38 \mu\text{m}$,并随深度存在一定的波动。

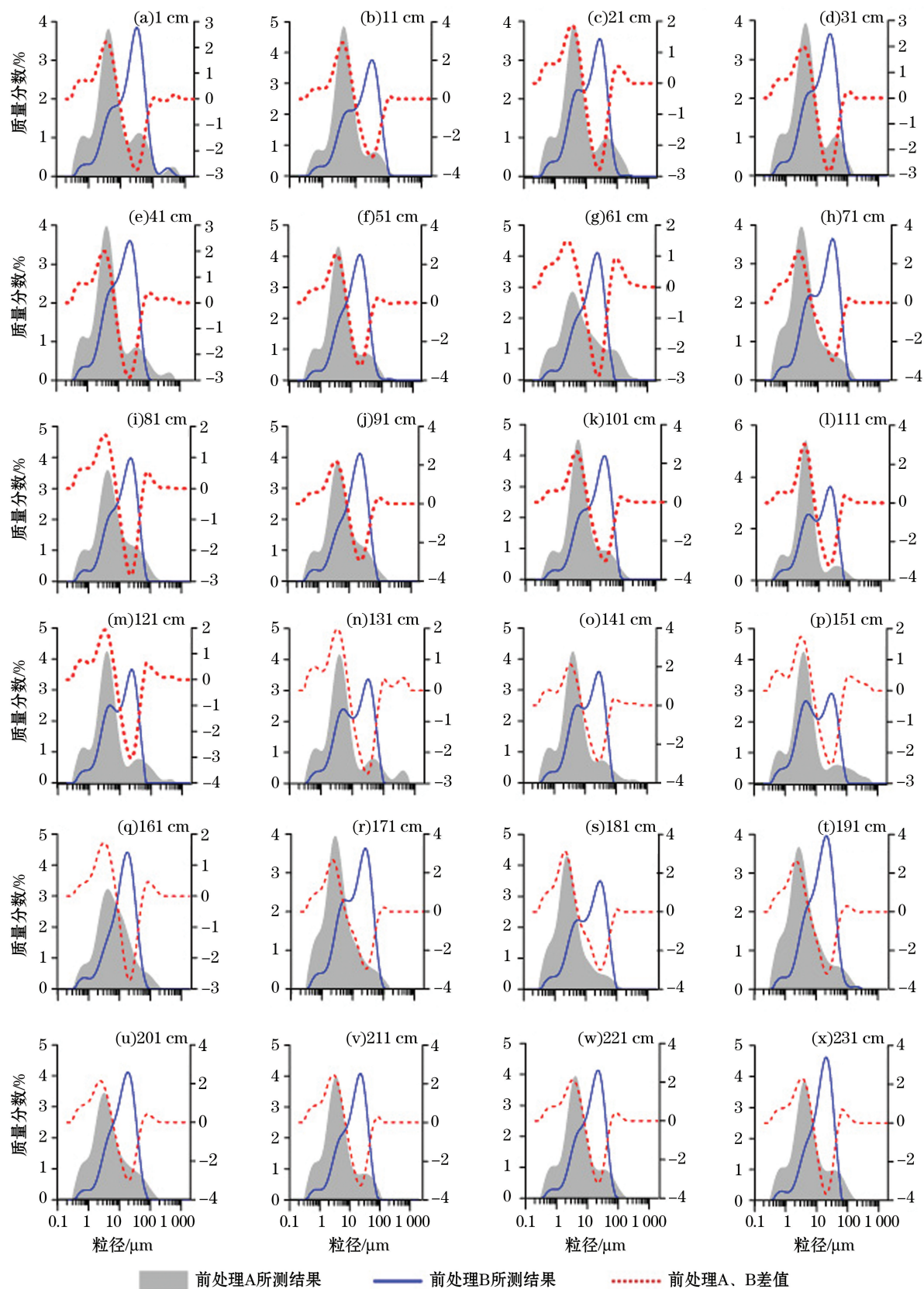


图 7 沉积物粒度频率分布曲线

Fig.7 The grain-size frequency distribution curves of the sediments

经前处理 B 获得的粒度频率分布曲线虽仍为多峰特征,但主峰位置明显向右侧移动,峰值所处的粒径明显变大。其中间层位呈双峰分布,次峰峰值随深度增加而逐渐增加。两者的差值曲线大致呈峰-谷的变化趋势,峰谷之间的斜率较大。在谷值之后,普遍出现一个次峰值,随后差值曲线缓慢趋于 0。由此反映出该地区沉积物的物质来源相对单一、稳定,在中间层位发生了扰动,水动力条件或者物质来源发生改变,之后又逐渐恢复单一稳定的状态。

2.5 碳酸盐的影响

碳酸盐的存在对沉积物粒度特征产生了明显的影响^[28],本文结果也支持了这一观点。去除碳酸盐之后,沉积物的平均粒径变大,分选变好,偏度由极负偏变为极正偏,峰度则由正态向平坦变化。去除碳酸盐的样品中,黏土含量明显减少,粉砂含量相应增加。根据 C-M 图所反映出的沉积物的搬运方式也发生了改变,搬运方式为静水悬浮和递变悬浮。相比于未去除碳酸盐的样品,去除碳酸盐之后的 C 值可以更好地指示区域底层水的变化特征。此外,去除碳酸盐之后,粒度象特征、粒度结构和粒度分布都发生了明显的改变。

上述测量结果的差异,反映出碳酸盐对该地区沉积物粒度测量的影响。总之,我们认为大部分碳酸盐矿物以 $<8\ \mu\text{m}$ 的形式存在,前处理过程中去除碳酸盐将导致细粒级组分减少,中粗粒级组分所占比重相应增大。另有一部分碳酸盐矿物以 $>64\ \mu\text{m}$ 的粗粒级形式或者以胶结作用的形式存在,前处理过程中的超声波振荡将其击碎^[9, 31]。碳酸盐矿物的存在,使得西南印度洋中脊地区沉积物粒度参数发生了改变,而要准确获得沉积物的粒度分析结果、探讨该地区的环境演化,去除碳酸盐的影响是必须的。

2.6 生物硅和有机质的影响

为了进一步研究生物硅和有机质对粒度测量的影响,我们选取 4 个层位的样品进行对比。由图 8 知,是否去除生物硅或有机质,对沉积物粒度分布形态影响不大,只是改变了各组分的相对含量。相比于未去除生物硅或有机质的沉积物粒度,去除之后的沉积物粒度频率曲线峰值向右移动、细颗粒级组分含量减少。这说明有部分生物硅或有机质可能以细粒级的形式存在,或者是前处理过程中 H_2O_2 或 NaOH 的加入以及超声振荡破坏了有机质或生物硅的絮凝作用,导致细粒级组分的增加。

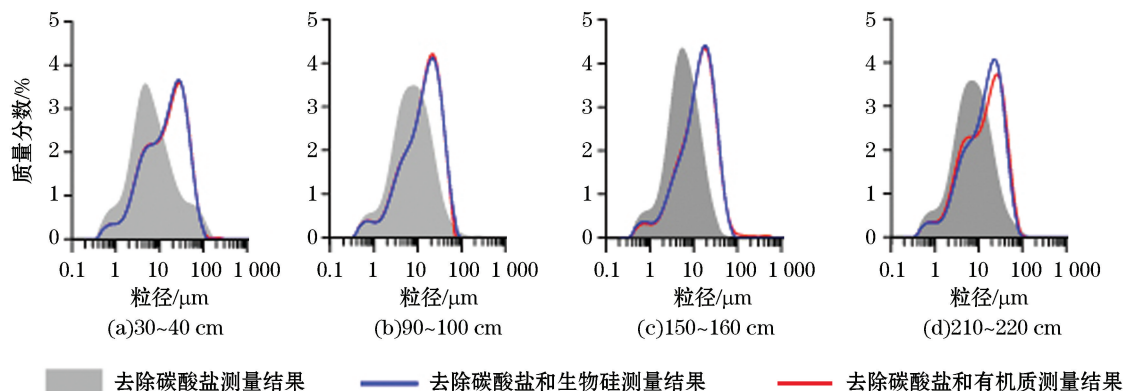


图 8 选取 4 个层位的不同前处理粒度频率曲线图

Fig.8 The grain-size frequency distribution curves of the sediments choose from Borehole S008GC02

去除生物硅和去除有机质的样品粒度频率曲线具有高度一致性(图 8),可能指示了沉积物中生物硅和有机质的含量基本相当。海洋沉积物中有机质的絮凝作用可以促使不易沉降的陆源矿物碎屑和生物骨屑聚集在一起^[29]。图 9 中 GC-MS 的测量结果表明,沉积物中有机质主要为烷烃、烯烃、酯类、酚类以及醇类,由于水体中的羟基、羧基、酚基、氨基等组分可以和多价金属离子、悬浮泥沙颗粒形成有机絮凝团块^[30],我们因此推测,在西南印度洋中脊沉积物中,有机质和生物硅以絮凝体的形式存在,而粒度测量的前处理过程中,无

论是去除有机质,还是生物硅,都可以破坏这种絮凝体,再加上超声波的振荡作用,使得陆源碎屑和其他物质分离。但由于生物硅或有机质组分对粒度特征的影响相对较小,并不足以引起粒度频率曲线的改变。

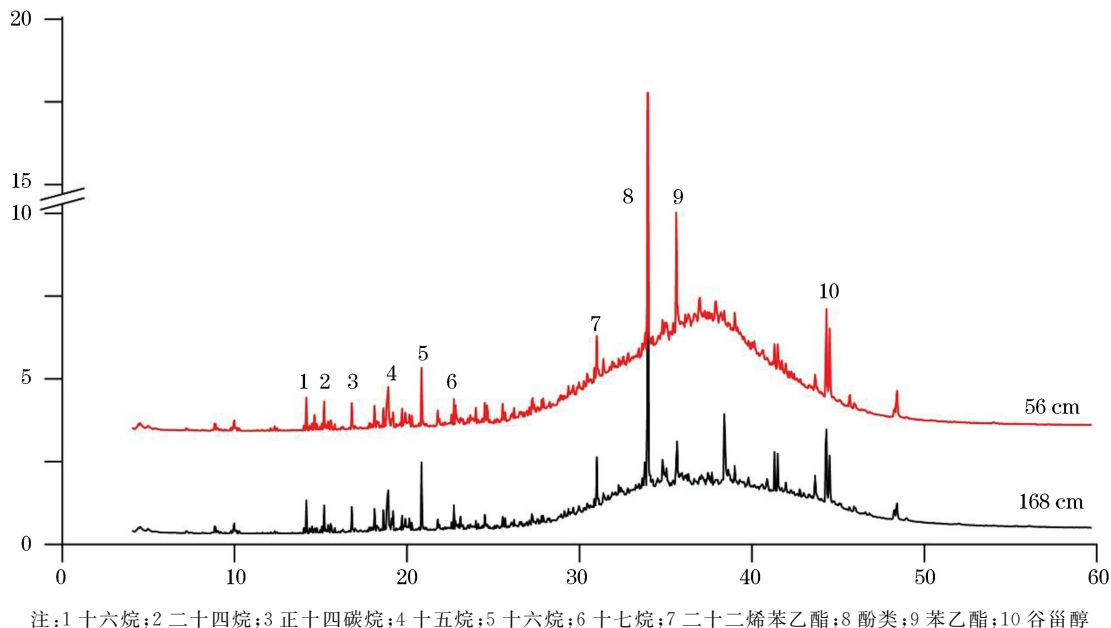


图9 沉积物 GC-MS 测量结果

Fig.9 The results of GC-MS of the sediments

3 结 论

本文采用不同的前处理方法,对西南印度洋中脊沉积物粒度进行测定和分析,通过对比分析实验结果,获得了以下认识:

1)西南印度洋中脊 S008GC02 孔沉积物平均粒径介于 $5.95 \sim 6.64 \Phi$;大部分为粉砂,少量为黏土质粉砂;分选较差;偏度多数表现为极正偏,少数样品表现为正偏,分选系数与偏度之间没有明显的相关关系;峰度表现为平坦。粒度频率分布曲线呈双峰分布。粒度特征反映研究区最大水动能较小,变化范围较小,物质来源相对单一,可能与南极底层水的影响有关。沉积物的搬运方式处于静水悬浮和递变悬浮的过渡阶段。水动力环境相对稳定,平均水动能较大。

2)是否去除碳酸盐,对西南印度洋中脊沉积物粒度的分析结果产生了较大影响。去除碳酸盐的沉积物平均粒径变大,分选变好,偏度由极负偏变为极正偏,峰度则由正态向平坦方向变化。黏土质量分数显著减少,粉砂质量分数相应增加。粒度象特征、粒度结构和粒度分布也都发生了明显的改变,所指示的水动力条件改变。该地区沉积物中大部分碳酸盐矿物以 $<8 \mu\text{m}$ 的形式存在,另有一部分以 $>64 \mu\text{m}$ 的砂粒级形式或者以胶结作用的形式存在。因此,在西南印度洋中脊沉积物粒度测量的前处理过程中去除碳酸盐是必要的,可以更准确地反映该地区的水动力条件。

3)在西南印度洋沉积物中,有机质和生物硅以絮凝体的形式存在,对沉积物粒度测量结果产生了一定影响,使细粒组分明显增加,但不会影响粒度分布的基本形态。

致谢:国家海洋局第一海洋研究所李朝新和朱影在粒度测试中提供了帮助,韩彬在有机地球化学实验中提供了帮助。

参考文献(References):

- [1] GUO Z Y. Early Pleistocene climate change recorded by deep-sea sediments of site U1313 in the North Atlantic[D]. Nanjing: Nanjing University, 2012. 郭志永.北大西洋 U1313 站深海沉积物记录的早更新世气候变化[D]. 南京: 南京大学, 2012.
- [2] HUANG M, LIU J H, SHI X F, et al. Geochemical characteristics and material sources of rare earth elements in sediments from the CC Area in the Eastern Pacific Ocean[J]. *Advances In Marine Science*, 2014, 32(2): 175-187. 黄牧, 刘季花, 石学法, 等. 东太平洋 CC 区沉积物稀土元素特征及物源[J]. *海洋科学进展*, 2014, 32(2): 175-187.
- [3] XIE X, ZHENG H B, CHEN G C, et al. Pretreatment method of grain size measurement of marine sediments in paleoenvironment research[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2007, 2(5): 684-692. 谢昕, 郑洪波, 陈国成, 等. 古环境研究中深海沉积物粒度测试的预处理方法[J]. *沉积学报*, 2007, 2(5): 684-692.
- [4] DICK H B, LIN J, SCHOUTEN H. An ultraslow-spreading class of ocean ridge[J]. *Nature*, 2003, 426: 405-412.
- [5] MCCAVE I N, KIEFER T, THORNALLEY D J R, et al. Deep flow in the Madagascar-Mascarene Basin over the last 150000 years: Philosophical transactions of the royal society of London A[J]. *Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2005, 363(1826): 81-99.
- [6] FAUGÈRES J C, MÉZERAIS M L, STOW D A. Contourite drift types and their distribution in the North and South Atlantic Ocean basins[J]. *Sedimentary Geology*, 1993, 82(1): 189-203.
- [7] Shanbei Branch of Chengdu Institute of Geology. The grain size analysis of sediments and its application[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1976: 44-54, 66-106. 成都地质学院陕北队. 沉积岩(物)粒度分析及其应用[M]. 北京: 地质出版社, 1976: 44-54, 66-106.
- [8] FOLKR L, WAWRWDW C. Brazos River bar: A study in the significance of grain size parameters[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1957, 27(1): 3-26.
- [9] LU H Y, MIAO X D, SUN Y B. Pretreatment methods and their influences on grain-size measurement of Aeolian "red clay" in north China[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2002, 32(6): 665-671. 鹿化煜, 苗晓东, 孙有斌. 前处理步骤与方法对风成红粘土粒度测量的影响[J]. *海洋与湖沼*, 2002, 32(6): 665-671.
- [10] ZHANG X J, LAN X H, ZHAO G T, et al. The grain size characteristics of the surface sediments in the middle west South Yellow Sea [J]. *Marine Geology Letters*, 2007, 23(7): 8-13. 张宪军, 蓝先洪, 赵广涛, 等. 南黄海中西部表层沉积物粒度特征分析[J]. *海洋地质动态*, 2007, 23(7): 8-13.
- [11] CHEN J A, WANG J, XU J Y. Sediment particle sizes and dry-humid transformation of the regional climate in Erhailake[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2008, 18(3): 341-345. 陈敬安, 万国江, 徐经意. 洱海沉积物粒度记录与气候干湿变迁[J]. *沉积学报*, 2008, 18(3): 341-345.
- [12] DU D, LIU H W, ZHANG Y Q, et al. Characteristics of grain size distributions of surface sediments in the Beidaihe Sea Area[J]. *Advances in Marine Science*, 2014, 32(2): 155-161. 杜东, 刘宏伟, 张云青, 等. 北戴河附近海域表层沉积物粒度分布特征[J]. *海洋科学进展*, 2014, 32(2): 155-161.
- [13] ZHOU L C, LI J, GAO J H, et al. Comparison of core sediment grain-size characteristics between Yangtze river estuary and Zhoushan islands and its significance to sediment source analysis[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2009, 29(5): 21-27. 周连成, 李军, 高建华, 等. 长江口与舟山海域柱状沉积物粒度特征对比及其物源指示意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2009, 29(5): 21-27.
- [14] SUN D H, LU H Y, DAVID R, et al. Bimode grain-size distribution of Chinese Loess and its paleoclimate implication[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2000, 1(3): 327-335. 孙东怀, 鹿化煜, David Rea, 等. 中国黄土粒度的双峰分布及其古气候意义[J]. *沉积学报*, 2000, 1(3): 327-335.
- [15] SUN Q L, ZHOU J, XIAO J L. Grain-size characteristics of Lake Daihai sediments and its paleoenvironment significance[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2001, 21(1): 93-95. 孙千里, 周杰, 肖举乐. 岱海沉积物粒度特征及其古环境意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2001, 21(1): 93-95.
- [16] HE H C, DING H Y, ZHANG Z K, et al. Grain-size characteristics and their environmental significance of Hongze Lake sediments[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2005, 25(5): 590-596. 何华春, 丁海燕, 张振克, 等. 淮河中下游洪泽湖湖泊沉积物粒度特征及其沉积环境意义[J]. *地理科学*, 2005, 25(5): 590-596.
- [17] ZHOU X, SUN L, HUANG W, et al. Precipitation in the Yellow River drainage basin and East Asian monsoon strength on a decadal time scale[J]. *Quaternary Research*, 2012(78): 486-491.
- [18] ZHANG J, LI A C, WAN S M, et al. Grain size distribution of surface sediments in the southern South China Sea and influencing factors[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2016, 36(2): 1-10. 张晋, 李安春, 万世明, 等. 南海南部表层沉积物粒度分布特征及其影响因素[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2016, 36(2): 1-10.

- [19] HUANG W, TAO C H, DENG X M, et al. Discussion and the scientific significance of IODP drilling to study in the 49°39'E vent field in Southwest Indian Ridge[J]. Journal of Marine Sciences, 2009, 27(2): 97-103. 黄威, 陶春辉, 邓显明, 等. 西南印度洋脊 49°39'E 热液活动区 IODP 钻探计划的科学意义[J]. 海洋学研究, 2009, 27(2): 97-103.
- [20] CHEN Y Y, YU B S, SU X, et al. Mineralogical and geochemical characteristics of the calcareous sediments in Southwest Indian Ridge[J]. Geological Science and Technology Information, 2013, 32(2): 107-113. 陈圆圆, 于炳松, 苏新, 等. 西南印度洋中脊钙质沉积物地球化学及矿物学特征[J]. 地质科技情报, 2013, 32(2): 107-113.
- [21] HUANG D S, ZHANG X Y, ZHANG G Y, et al. Geochemical characteristics of sediments in Southwest Indian Ridge 48.6°~51.7°E[J]. Geological Science and Technology Information, 2016, 35(1): 22-29. 黄大松, 张霄宇, 张国堙, 等. 西南印度洋中脊 48.6°~51.7°E 沉积物地球化学特征[J]. 地质科技情报, 2016, 35(1): 22-29.
- [22] SUN X X, YANG Z S, FAN D J, et al. Suspended zinc sulfide particles in the Southwest Indian Ridge area and their relationship with hydrothermal activity[J]. China Science Bull, 2014, 59: 913-923. 孙晓霞, 杨作升, 范德江, 等. 西南印度洋中脊区悬浮硫化锌颗粒及热液活动的关系[J]. 科学通报, 2014, 59(9): 825-832.
- [23] LEI J J, CHU F Y, YU X G, et al. Composition and genesis implications of hydrocarbons in 49.6°E hydrothermal area, Southwest Indian Ocean Ridge[J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(1): 281-290. 雷吉江, 初凤友, 于晓果, 等. 西南印度洋中脊热液区烃类有机物组成及其成因意义[J]. 地学前缘, 2015, 22(1): 281-290.
- [24] ZHANG T, LIN J, GAO J Y. Interactions between hotspots and the Southwest Indian Ridge during the last 90 Ma: Implications on the formation of oceanic plateaus and intra-plate seamounts[J]. Science China: Earth Science, 2011, 41(6): 760-772. 张涛, 林间, 高金耀. 90Ma 以来热点与西南印度洋中脊的交互作用: 海台与板内海山的形成[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(6): 760-772.
- [25] MCMANUS J. Grain size determination and interpretation[J]. Techniques in Sedimentology, 1988(408): 63-85.
- [26] PASSEGA R. Texture as characteristic of clastic deposition[J]. Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists, 1957, 41(9): 1952-1984.
- [27] PASSEGA R. Grain size representation by C-M pattern as a geologic tool[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1964, 34(4): 830-847.
- [28] ZHONG X J, CHEN S L, CHEN Y P, et al. Biodetritus distribution and its effect on sediment size characteristics on Gaolong Bay Beach[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2012, 30(5): 891-899. 钟小菁, 陈沈良, 陈燕萍, 等. 海南高隆湾海滩生物碎屑分布及其对沉积物粒度特征的影响[J]. 沉积学报, 2012, 30(5): 891-899.
- [29] LEI K, YANG Z S, GUO Z G. Sedimentation with aggregation of suspended sediment in a mud area of the Northern East China Sea[J]. Marine geology & Quaternary geology, 2001, 32(3): 288-295. 雷坤, 杨作升, 郭志刚. 东海陆架北部泥质区悬浮体絮凝沉积作用[J]. 海洋与湖沼, 2001, 32(3): 288-295.
- [30] XIA F X, CHEN L, CHEN B L, et al. Abnormality of organic heavy metals in suspended particles in the maximum turbidity zone of the Changjiang Estuary[J]. Journal of East Normal University(Natural Science), 1996, 1: 52-56. 夏福兴, 陈敏, 陈邦林, 等. 长江口最大浑浊带悬浮颗粒中有机重金属的异常[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 1996, 1: 52-56.
- [31] YI L, YU H J, XU X Y, et al. Influences of carbonate contents on the grain-size measurements of borehole sediments from Southern Shore of Laizhou Bay[J]. Advances in Marine Science, 2010, 28(3): 325-331. 易亮, 于洪军, 徐兴永, 等. 碳酸盐含量对莱州湾南岸钻孔沉积物粒度测试结果的影响[J]. 海洋科学进展, 2010, 28(3): 325-331.

Grain-size Characteristics and Environmental Significance of Abyssal Sediments From the Southwest Indian Ridge

LÜ Wen-zhe^{1,2,3,4,5}, YI Liang^{6,7}, FU Teng-fei^{3,4,5}, YANG Ji-chao⁸, CHEN Guang-quan^{3,4,5},
LIN Zhen⁸, XU Xing-yong^{3,4,5}, YU Hong-jun⁸

(1. *Institute of Estuarine and Coastal Sciences, East China Normal University, Shanghai 200062, China;*

2. *State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, Shanghai 200062, China;*

3. *The First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China;*

4. *Key Laboratory of Marine Sedimentology and Environmental Geology, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China;*

5. *Laboratory for Marine Geology, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266061, China;*

6. *School of Ocean and Earth Science, Tongji University, Shanghai 200092, China;*

7. *State Key Laboratory of Marine Geology, Shanghai 200092, China;*

8. *National Deep Sea Center, Qingdao 266237, China)*

Abstract: Abyssal sediments collected from the Southwest Indian Ridge were analyzed in this study. The results showed that the average grain sizes range from 7.183 Φ to 8.354 Φ , poorly sorted, fine skewed and platykurtic, and their distributions have one or three modal without carbonates. The average grain sizes decrease to 5.952 Φ to 6.635 Φ , better sorted, symmetrical and platykurtic after removing carbonates in the sediments. These features indicate that a transition condition from static to graded suspension of sedimentary hydromatics. It is thus concluded that a significant impact on the results of particle size analysis exists when removing from the sediments. In addition, the presence of organic matter and biogenic silica also leads to a significant increase in the sediment grain size, but do not change the basic morphology of the grain-size distributions.

Key words: Southwest Indian Ridge; sediments; grain size; pretreatment

Received: July 30, 2016