

东海内陆架沉积物敏感粒级构成及其地质意义*

田元¹ 范德江¹ 张喜林² 陈彬² 王亮³ 逢悦¹

(1. 中国海洋大学海洋地球科学学院 青岛 266100; 2. 国土资源部青岛海洋地质研究所 青岛 266071;
3. 国家海洋局第三海洋研究所 厦门 361005)

摘要 沉积物粒级包含了大量的沉积环境信息, 在古环境恢复和重建中被广泛应用。基于采自东海内陆架的三根沉积物岩芯, 作者利用激光粒度分析方法研究了沉积物的粒度组成, 确定了敏感性粒级, 探讨了搬运机制及其环境意义。研究表明: 东海内陆架现代沉积物含有大致相同的三个敏感性粒级, 分别是粒级 1($<12\mu\text{m}$)、粒级 2($12\text{—}225\mu\text{m}$)和粒级 3($>225\mu\text{m}$)。从北到南敏感粒级具有逐渐细化的趋势, 该趋势与长江入海沉积物向南搬运过程中发生的沉积分异作用有关。粒级 1 和粒级 2 分别由均匀悬浮次总体和递变悬浮次总体构成, 而粒级 3 则由生物过程产生。结合该区的海洋动力特征, 作者认为, 粒级 2 可较好地用来指示冬季海洋动力强度, 并具有揭示东亚冬季风强度的潜在意义。

关键词 东海内陆架; 沉积物; 敏感性粒级; 搬运机制; 替代性指标

中图分类号 P736.21+3

doi: 10.11693/hyhz20150500140

粒度是沉积物的基本属性, 它是沉积物分类和命名的依据, 如海洋沉积物 Shepard 分类方法和 Folk 的分类方法, 它们都是依据沉积物粒级组成进行了分类(Shepard, 1954; Folk *et al.*, 1970)。粒度也是进行沉积环境恢复和重建的重要指标, 其中粒级参数、粒级分布和统计学图表在沉积相和古环境研究中被广泛应用(Krumbein, 1934; Folk *et al.*, 1957; Passega, 1957; Visher, 1969; Clark, 1976; Syvitski, 1991; Prins *et al.*, 2000; Davis *et al.*, 2002)。近年来出现了敏感粒级的概念, 它特指在岩芯中变化强烈的粒级组分, 并借助粒度-标准偏差法、主成分因子分析法、拟合函数法和端元粒度模型提取敏感性粒级(孙东怀等, 2001; 陈国成等, 2007; 张存勇等, 2009; Weltje, 1997; Boulay *et al.*, 2003)。学者们试图利用敏感性粒级组成作为特定地质作用的指标(肖尚斌等, 2005a; Liu *et al.*, 2010b; Fan *et al.*, 2011; Huang *et al.*, 2011; Hu *et al.*, 2012), 如肖尚斌等(2005a)通过敏感粒度组分并反演了 8ka 来的东亚季风变化, 向荣等(2006)依据岩芯中敏感性粒级组分重建了末次冰期以来东亚冬季风的

变化; 然而, 李云海等(2010)对闽浙沿岸泥质区南部沉积中心的沉积物冬、夏季表层样的分析, 认为冬季和夏季敏感粒级相同, 且该区域的表层样敏感粒级和柱状样敏感粒级相似。迄今为止, 不同学者对敏感性粒级的构成以及替代性作用的认识不一致, 缺乏对敏感性粒级组分成因机制的了解。

东海内陆架泥质区高海平面以来沉积环境稳定, 是在东亚季风、长江输入、海洋动力环境等因素共同影响下沉积作用的结果; 该区沉积体厚度大、连续性好, 成为研究古环境信息的重要载体。前人利用沉积物岩芯沉积学记录开展了较多的冰后期以来古环境、古气候方面的研究, 取得了重要的成果(肖尚斌等, 2005b; 向荣等, 2006; 刘升发等, 2010; Wang *et al.*, 2005; Liu *et al.*, 2010a; Liu *et al.*, 2010b), 其中个别学者涉及到敏感性粒级的古气候恢复研究(向荣等, 2006)。前人的研究多集中在单个岩芯的敏感粒级提取与解析, 对内陆架不同区域的对比研究较少见, 对东海内陆架泥质区从北到南不同沉积位置的敏感粒级组成的差异不清楚, 对敏感性粒级的形成机制未

* 国家自然科学基金项目, 41376055 号; 国家重大基础研究发展计划(973)项目, 2010CB951202 号。田元, 硕士研究生, E-mail: yuantian@ouc.edu.cn

通讯作者: 范德江, 教授, 博士生导师, E-mail: djfan@ouc.edu.cn

收稿日期: 2015-05-12, 收修改稿日期: 2015-08-24

进行深入分析。为此, 本文通过对东海内陆架泥质区 3 根岩芯(图 1)敏感性粒级的对比研究, 阐明该区的敏感性粒级构成, 探讨敏感性粒级的形成机制, 为更好地利用敏感性粒级进行古环境和古气候研究提供依据。

1 研究区概况

东海西靠中国大陆, 东临琉球群岛, 北接黄海, 南以台湾海峡与南海相连, 面积约 $70 \times 10^4 \text{ km}^2$, 平均水深为 130m。东海大陆架是世界上最为宽广的陆架之一, 平均坡度仅为 $4'17''$, 平均水深 78m。50—60m 等深线将其分为内陆架和外陆架两部分, 内陆架海底地形底质相对复杂, 外陆架相对平缓。

沿着东海内陆架发育著名的泥质沉积带, 它发育在水深 50m 左右的近海海域, 紧靠浙江、福建海岸(秦蕴珊等, 1982; 郭志刚等, 2003; Saito *et al.*, 1995)(图 1)。泥质区向外则是相对粗颗粒的被改造残留沉积物(Liu *et al.*, 2007)。长江输入东海的巨量沉积物以及该区的海洋动力环境共同塑造了东海内陆架现代沉积作用。由河流带来的巨量泥沙输送入海并沉积于河口以及内陆架等海域, 形成厚度不一的陆源碎屑沉积层(秦蕴珊, 1987; 李家彪, 2008)。内陆架区域沉积动力环境主要受控闽浙沿岸流和台湾暖流(郭志刚等, 2000)。其中闽浙沿岸流随季节变化, 夏季因东南季风盛行流向北, 冬季由于偏北季风盛行而向南运移(秦蕴珊, 1987); 而台湾暖流在东海中内陆架终年存在, 沿 50—100m 等深线向北流动(Su *et al.*, 1987)。冬季闽浙沿岸流将再悬浮的长江口门及附近的沉积物向南输运, 又由于台湾暖流的“顶托”作用阻挡了其携带的物质向东海中外陆架输送, 使得沉积物沉积在 123°E 以西的闽浙沿岸, 形成东海内陆架泥质沉积区(杨作升等, 1992; 郭志刚等, 1999), 是东海现代陆架的沉积中心, 是长江入海物质的“汇”(Yang *et al.*, 1994; Saito *et al.*, 1995)。

2 采样与研究方法

2.1 研究站位和样品采集

沉积物岩芯 D1、D2、D3 由“东方红 2 号”科学考察船分别在 2006 年、2009 年、2011 年的三个航次中利用重力取样器取得。其中, 岩芯 D1(122.6167°E , 31.0167°N)位于长江口泥质区, 水深 20.4m, 岩芯长度为 226cm。岩芯 D2(122.4529°E , 29.2088°N)、D3(121.8690°E , 27.7997°N)位于闽浙沿岸泥质沉积区,

水深分别为 40m、53.8m, 岩芯长度均为 180cm。岩芯站位见图 1。所采集的沉积物岩芯于室内进行分样, 从中间剖分, 按照 0.25cm 的间隔分样, 并把样品装入塑料样品袋中, 室温保存。

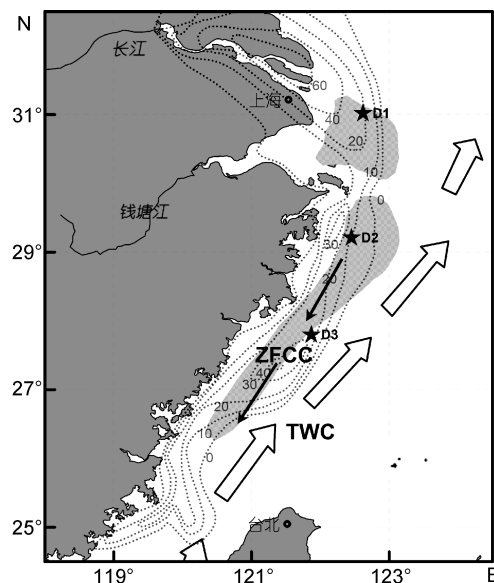


图 1 研究区及采样站位分布图。底图据 Su 等(1987)和 Liu 等(2006)重绘

Fig.1 Map of sampling sites. The base map was modified from Su(1987) and Liu *et al.*(2006)
虚线为沉积厚度(单位: m); 阴影区为泥质沉积体; ZFCC 为闽浙沿岸流, TWC 为台湾暖流

2.2 粒度分析方法

采用激光粒度分析仪进行沉积物的粒度分析。实验步骤如下: 取 0.5—1g 左右的样品放入 100mL 的干净烧杯中, 加入 5mL 浓度为 30% 的 H_2O_2 , 静置 24h 以去除有机质; 加入 3mL 分散剂(0.5mol/L 六偏磷酸钠)超声 30min 确保足够分散并待上机测试。实验仪器为英国 Malvern 公司的 Mastersizer 2000 型激光粒度分析仪, 该仪器测量范围为 $0.02\text{--}2000\mu\text{m}$, 粒度分辨率为 0.01Φ , 重复测量的相对误差 $<3\%$ 。实验在中国海洋大学海底科学与探测教育部重点实验室完成。粒度分级采用伍登-温德华- Φ 值标准, 粒度数据以 0.25Φ 的采集间隔导出, 粒度参数采用 McManus 矩法公式(McManus, 1988)计算。

3 结果与讨论

3.1 岩芯的粒度特征

岩芯的粒度具体统计结果见表 1。三根岩芯沉积物组成均以粘土和粉砂为主, 其中砂平均含量均小

于 3%, 粉砂平均含量在 67%—71%之间, 粘土平均含量在 27%—31%之间。各岩芯平均粒度参数中, 中值粒径 Md 7.1—8.9 μm , 平均粒径 Mz 6.5—10.9 μm ; 分选 δ 均较差; 偏态 Sk 仅 D2 为负偏态, 其余为正偏

态; 峰态 Ku 均为宽峰态。

从平均粒径垂向变化图(图 2)上可以看出, 3 根岩芯的平均粒径主要分布在 6—8 μm 之间, 值得注意的是, 各岩芯均有明显峰值出现。

表 1 岩芯粒度参数
Tab.1 Grain size distribution in the sediments from the cores

岩芯编号	砂(%)	粉砂(%)	粘土(%)	中值粒径 Md(μm)	平均粒径 Mz(μm)	分选系数 δ	偏态 Sk	峰态 Ku
D1	2.25	70.19	27.56	8.92	7.83	1.59	1.07	2.05
D2	2.21	67.17	30.62	8.73	10.88	1.32	-0.73	1.86
D3	0.45	68.82	30.73	7.06	6.52	1.49	0.96	1.94

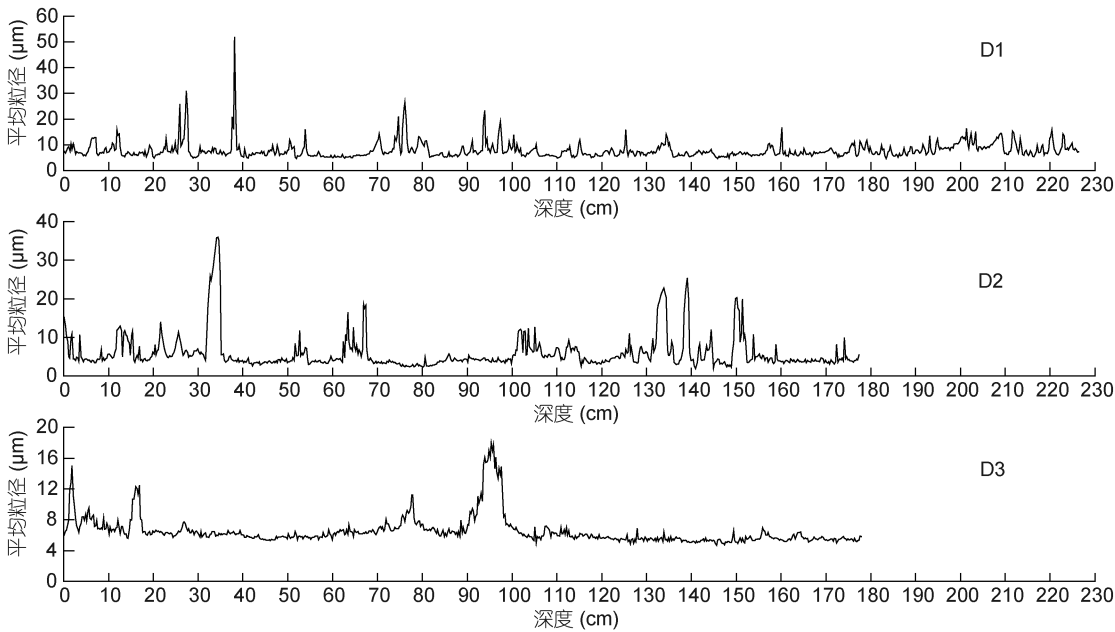


图 2 平均粒径垂向分布图
Fig.2 The vertical profiles of the mean grain-size distribution

3.2 敏感粒级提取

采用粒径-标准偏差法(Boulay *et al*, 2003)对粒度分析结果进行敏感粒级的提取, 各个岩芯的粒径-标准偏差曲线如图 3 所示。根据图 3 确定各个岩芯的敏感粒级, 岩芯 D1、D2、D3 粒径-标准偏差曲线基本一致, 它们可识别出 3 个敏感粒级区间, 分别称之为敏感粒级 1、敏感粒级 2 和敏感粒级 3(表 2), 其中敏感粒级 2 在所有 3 个岩芯中标准偏差值最大, 表明其在岩芯中的波动强烈, 具有最好的环境变化指示作用。从长江口向南, 敏感粒级区间逐渐向细颗粒方向偏移的趋势, 以敏感粒级 2、3 的界线的偏移更加明显, 岩芯 D1、D2、D3 的该界线分别为 272.62、229.25、114.63 μm 。敏感粒级 1、2 的界线亦有偏移, 但是偏移幅度很小。这种偏移现象与长江入海沉积物向南搬

运过程中发生的沉积分异作用有关。

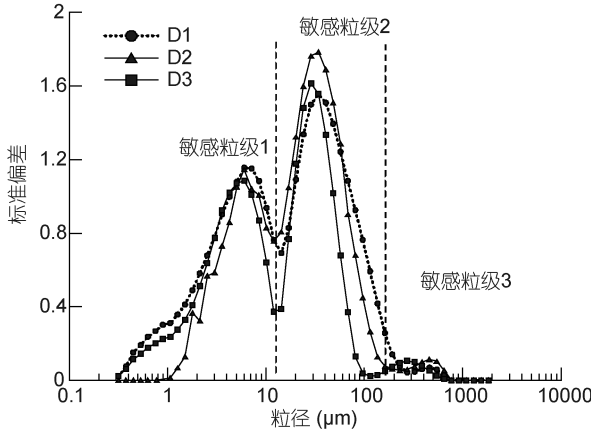


图 3 粒径-标准偏差曲线图
Fig.3 The standard deviation vs. grain-size of the cores

表 2 岩芯敏感粒级(单位 μm)
Tab.2 The sensitive grain-size groups

岩芯编号	峰 1	峰 2	敏感粒级 1	敏感粒级 2	敏感粒级 3
D1	6.02	34.10	<14.33	14.33—272.63	>272.63
D2	6.02	34.10	<12.05	12.05—229.25	>229.25
D3	6.02	28.66	<12.05	12.05—114.63	>114.63

3.3 敏感性粒级形成机制分析

东海内陆架沉积物以陆源碎屑占据绝对优势,沉积物粒级构成受到牵引流搬运和沉积作用的总体控制。为此,可以利用沉积物粒度分布形式揭示沉积物的搬运特征,进而探讨敏感粒级的形成机制。

3.3.1 搬运特征分析 沉积物粒度的概率累积曲线能直观地展现沉积物搬运特征(Visher, 1969; Glaister *et al.*, 1974; 郑浚茂等, 1980; 袁静等, 2011)。三根岩芯的概率累积曲线表现形式一致,包括三种情况:一段式、两段式、三段式(图 4)。一段式主要出现于岩芯中的平均粒径较细的常态沉积物中,以悬浮式搬运为主;两段式主要出现于岩芯中较粗夹层的沉积物中,分为两个搬运次总体,即跳跃次总体和悬浮次总体,截点在 $5-6\Phi$ 之间;三段式见于岩芯的个别层位之中,除了悬浮搬运次总体外,粗粒段出现典型的推移载荷,推移次总体和悬浮次总体的截点在 4Φ 附近。

为进一步揭示该区沉积物的机械搬运形式,对该处岩芯沉积物粒度的 C-M 图式进行分析(图 5)。在粒度的 C-M 图中, C 值与样品中最粗颗粒的粒径相当,代表了水动力搅动开始搬运沉积物的最大能量; M 值代表了水动力的平均能量。典型的牵引流型 C-M 图包含 N-O-P-Q-R-S 等线段,代表滚动、递变悬浮、均匀悬浮等沉积物搬运形式(Passega, 1977)。因为本区三根岩芯长度都在 250cm 以下,据该区的沉积速率估算它们的形成时间都在最近 250 年以内,而这期间该处沉积环境基本稳定(Yang *et al.*, 1994; 郭志刚等, 2000, 2003; 肖尚斌等, 2005a), 所以以岩芯不同层位样品集合形成 C-M 图解(图 4)。三个岩芯的 C-M 图具有基本相同的形式,各个岩芯样品的散点落在 3 个区域,即图中的 L-1、L-2、L-3。L-1 的 C、M 值呈现同步变化,形态大致平行于 $C=M$ 线,为递变悬浮搬运次总体。L-2 样品点较集中, C 值变化部明显,因为它紧邻 L-1, 且 M 值比 L-1 小,分析认为属于均匀悬浮搬运次总体。相比于 L-1、L-2, L-3 样品点较分散,特点是 M 值变化不大,并且 M 值位于均匀悬浮次总体

的 M 值范围之内,分析认为该次总体属于细颗粒沉积物中所含的少量的粗颗粒,它们属于生物碎屑,以悬浮或者推移方式进行搬运。需要注意的是 D1、D2、D3 三个岩芯递变悬浮次总体、均匀悬浮次总体的分界分别在 14、12 和 $12\mu\text{m}$, 与敏感粒级 1、2 的分界一致;三个岩芯的均匀悬浮次总体和生物碎屑的分界分别在 200、200 和 $100\mu\text{m}$ 左右,也与敏感粒级 2、3 的分界基本一致。

3.3.2 敏感性粒级的成因 根据前文分析可知,研究区沉积物组成为三个敏感粒级,粒级 1($0-12\mu\text{m}$ 或 $0-14\mu\text{m}$)、粒级 2($12-200\mu\text{m}$ 或 $14-100\mu\text{m}$)和粒级 3(大于 $200\mu\text{m}$ 或大于 $100\mu\text{m}$),接下来对这三个敏感粒级的成因进行讨论。

敏感粒级 1: 它构成了本区沉积物的主体部分,粒级区间与概率累积曲线上的悬浮载荷相对应(图 6)。该粒级是本区沉积物中最细的组成部分,概率累积曲线图指示其为悬浮载荷, C-M 图进一步证实该沉积物属于均匀悬浮载荷,它可以随着水体进行长距离搬运,海洋动力弱的海况下有利于该粒级沉积物的沉积。夏季段,浙闽沿岸流衰退,风浪能量弱,有利于该粒级沉积物的沉积和保存;冬季时段,虽然沿岸流和风浪作用强烈,但是由于絮凝作用、生物过程以及海洋锋面过程等的存在,也能促使该粒级的沉积物发生沉积。

敏感粒级 2: 其含量仅次于敏感粒级 1, 且在岩芯中波动最明显,粒级区间与概率累积曲线上的推移载荷(两段式)以及悬移载荷(一段式)相对应(图 6)。虽然概率累积曲线指示该粒级既有推移载荷又有悬移载荷,但是从 C-M 图显示该粒级属于递变悬浮搬运次总体,说明这部分沉积物在水柱中的含量是变化的,并且存在与底质沉积物交换的可能。该粒级沉积物概率累积曲线斜率大、分选好,反映水动力能量较大。该海域冬季时期受到来自西伯利亚冷空气的影响,风浪大,同时冬季浙闽沿岸流强劲,可以认为该部分沉积物主要为冬季沿岸流搬运并沉积而成的。敏感粒级 2 既出现于平均粒径较粗的层位中,也出现于

平均粒径较细的常态层位之中, 可以认为该粒级为该区正常海况环境下的沉积产物, 这与肖尚斌等(2005a)认为大于 $45\mu\text{m}$ 的粗粒组分为风暴流携带的沉积物的认识有所不同。

敏感粒级 3: 它是本区最粗的沉积物, 出现在平均粒径较细的沉积物之中, 粒级区间与概率累积图

中的推移载荷相对应(图 6)。它在概率累积曲线上表现为典型的推移载荷, 但是在 C-M 图上则表现为近平行于 C 轴的较宽的带状区域, 与牵引流的推移载荷段明显不同。联系到该海域具有高的初级生产力(王亮, 2014), 硅藻、甲藻以及底栖生物发育, 在分样中也见到保存程度不一的生物碎片, 为此认为该敏感

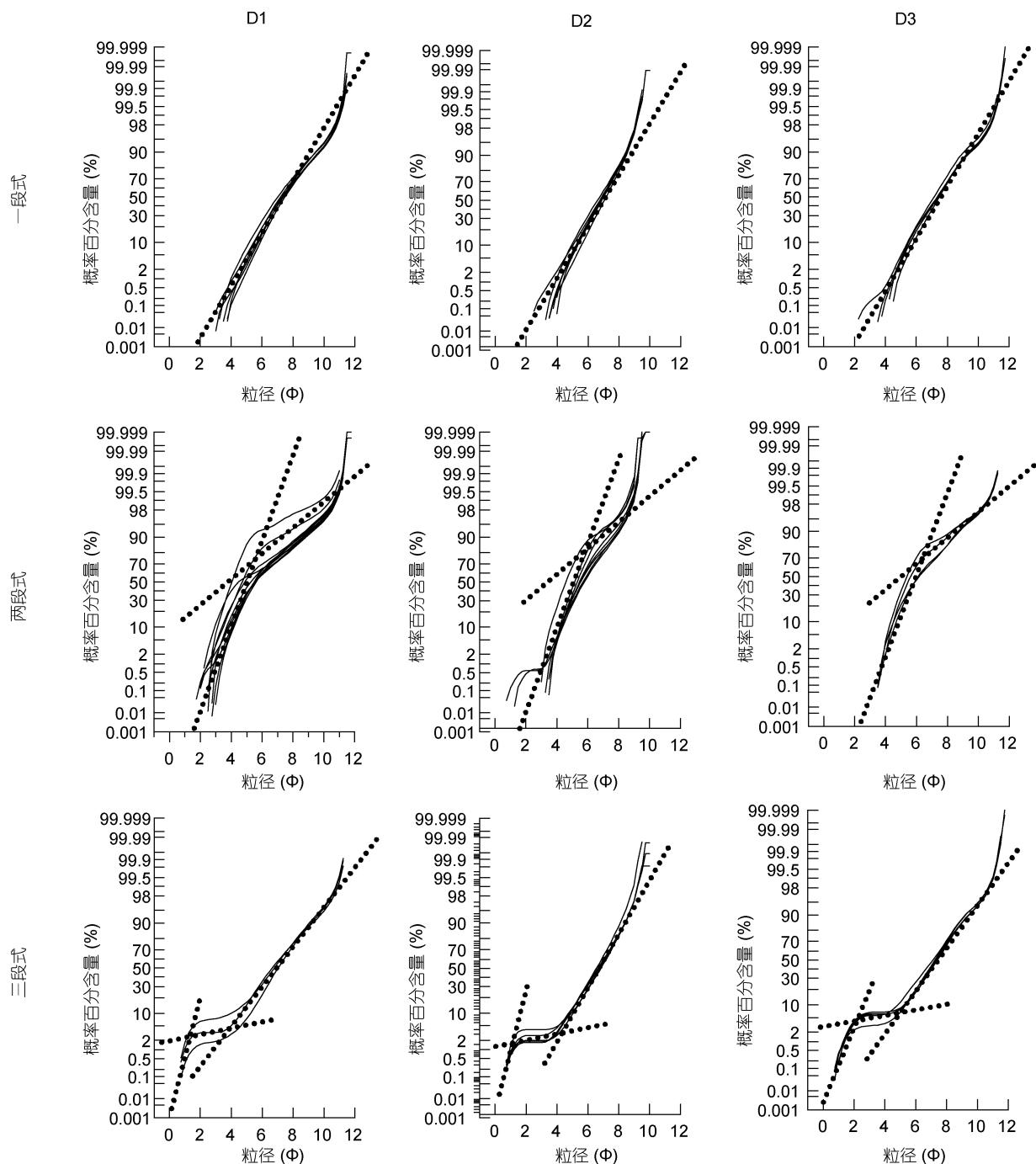


图 4 三根岩芯沉积物粒度概率累积曲线图

Fig.4 The probability cumulative curves of sediment grain sizes of the cores

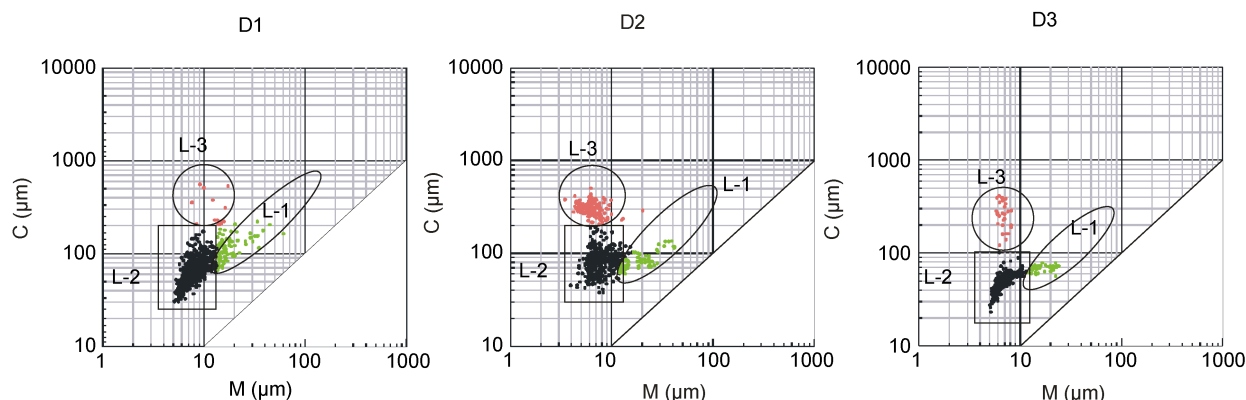


图5 三根岩芯沉积物粒度 C-M 图

Fig.5 C-M diagrams of grain sizes of the cores

椭圆形框为 L-1 区; 矩形框为 L-2 区; 圆形框为 L-3 区。绿点为递变悬浮; 黑色为均匀悬浮; 红色点为生物碎屑

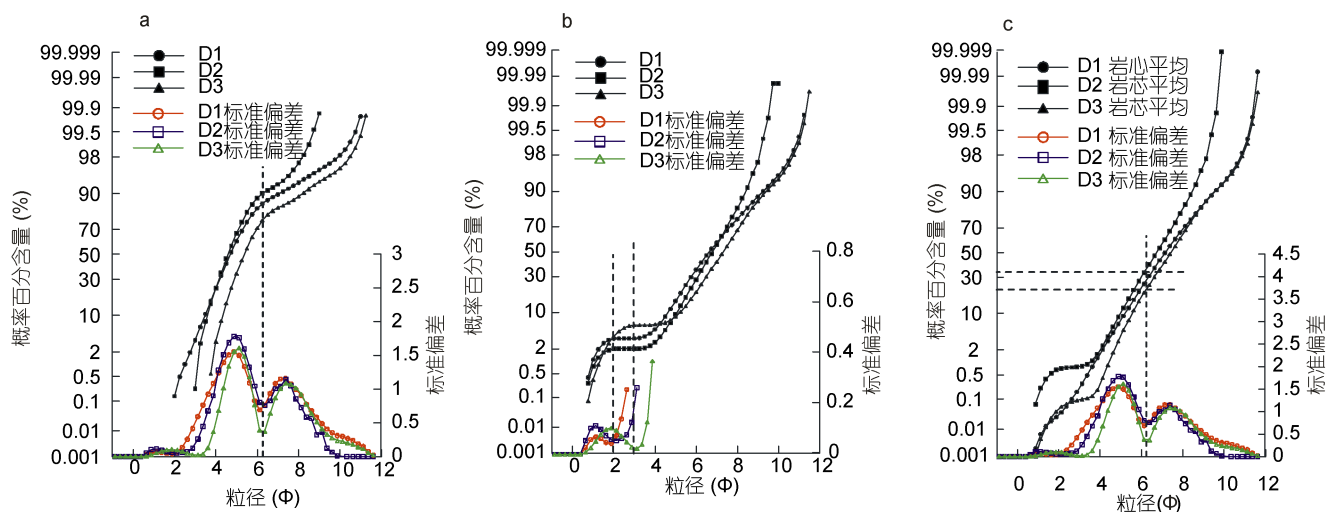


图6 概率累积曲线与粒径-标准偏差曲线对比图

Fig.6 Comparison between probability cumulative curve and standard deviation-grain size

a. 两段式的对比; b. 三段式的对比; c. 岩芯平均的概率累积曲线的对比

粒级主要属于生物成因。由于是生物来源, 它可以直接来自该处底栖、浮游生物的硬体, 或者来自周边再悬浮生物碎片, 它们与该处的水动力条件不一致。

4 结论

东海内陆架现代沉积物发育大致相同的三个敏感性粒级, 分别是敏感粒级 1 ($<12\mu\text{m}$)、敏感粒级 2 ($12\text{—}225\mu\text{m}$) 和敏感粒级 3 ($>225\mu\text{m}$)。从北到南敏感粒级区间具有逐渐向细颗粒方向偏移的趋势, 以敏感性粒级 2、3 的界线的偏移较明显, 敏感性粒级 1、2 的界线偏移幅度很小。这种偏移现象与长江入海沉积物向南搬运过程中发生的沉积分异作用有关。

敏感粒级 1 和 2 分别由均匀悬浮次总体、递变悬浮次总体构成, 代表不同水动力环境下的搬运沉积

的结果。而敏感粒级 3 则由生物过程产生, 难以反映水动力条件。结合该区的海洋动力特征, 敏感粒级 2 可较好地指示冬季海洋动力的强弱, 并进而揭示东亚冬季风强度的潜在意义。

参 考 文 献

- 王 亮, 2014. 东海典型泥质区高分辨沉积记录及其对气候环境变化的响应. 青岛: 中国海洋大学博士学位论文, 101—105
- 向 荣, 杨作升, Saito Y 等, 2006. 济州岛西南泥质区近 2300a 来环境敏感粒度组分记录的东亚冬季风变化. 中国科学 D 辑 地球科学, 36(7): 654—662
- 刘升发, 石学法, 刘焱光等, 2010. 中全新世以来东亚冬季风的东海内陆架泥质沉积记录. 科学通报, 55(14): 1387—1396
- 孙东怀, 安芷生, 苏瑞侠等, 2001. 古环境中沉积物粒度组分

- 分离的数学方法及其应用. 自然科学进展, 11(3): 269—276
- 李云海, 陈 坚, 黄财宾等, 2010. 浙闽沿岸南部泥质沉积中心表层沉积物粒度特征及其季节性差异. 沉积学报, 28(1): 150—157
- 李家彪, 2008. 东海区域地质. 北京: 海洋出版社, 304—390
- 杨作升, 郭志刚, 王兆祥等, 1992. 黄东海陆架悬浮体向其东部深海区输送的宏观格局. 海洋学报, 14(2): 81—90
- 肖尚斌, 李安春, 陈木宏等, 2005a. 近 8ka 东亚冬季风变化的东海内陆架泥质沉积记录. 地球科学——中国地质大学学报, 30(5): 573—581
- 肖尚斌, 李安春, 2005b. 东海内陆架泥区沉积物的环境敏感粒度组分. 沉积学报, 23(1): 122—129
- 张存勇, 冯秀丽, 2009. 连云港近岸海域沉积物粒度空间分布特征及其分析. 海洋学报, 31(4): 120—127
- 陈国成, 郑洪波, 李建如等, 2007. 南海西部陆源沉积粒度组成的控制动力及其反映的东亚季风演化. 科学通报, 52(23): 2768—2776
- 郑浚茂, 王德发, 孙永传, 1980. 黄骅拗陷几种砂体的粒度分布特征及其水动力条件的初步分析. 石油实验地质, 2(2): 9—20
- 秦蕴珊, 郑铁民, 1982. 东海大陆架沉积物分布特征的初步探讨. 见: 秦蕴珊主编. 黄东海地质. 北京: 科学出版社, 31—51
- 秦蕴珊, 赵一阳, 陈丽蓉等, 1987. 东海地质. 北京: 科学出版社, 29—34
- 袁 静, 杨学君, 路智勇等, 2011. 东营凹陷盐 22 块沙四上亚段砂砾岩粒度概率累积曲线特征. 沉积学报, 29(5): 815—824
- 郭志刚, 杨作升, 1999. 东海陆架北部泥质区沉积动力过程的季节性变化. 青岛海洋大学学报, 29(3): 507—513
- 郭志刚, 杨作升, 曲艳慧等, 2000. 东海陆架泥质区沉积地球化学比较研究. 沉积学报, 18(2): 284—289
- 郭志刚, 杨作升, 范德江等, 2003. 长江口泥质区的季节性沉积效应. 地理学报, 58(4): 591—597
- Boulay S, Colin C, Trentesaux A *et al*, 2003. Mineralogy and sedimentology of Pleistocene sediment in the South China Sea (ODP site 1144). In: Prell W L, Wang P, Blum P *et al* eds. Proceedings of the Ocean Drilling Program. Scientific Results. 184: 1—21
- Clark M W, 1976. Some methods for statistical analysis of multimodal distributions and their application to grain-size data. Journal of the International Association for Mathematical Geology, 8(3): 267—282
- Davis J C, Sampson R J, 1975. Statistics and data analysis in geology. The Journal of Geology, 83(1): 141—142
- Fan D J, Qi H Y, Sun X X *et al*, 2011. Annual lamination and its sedimentary implications in the Yangtze River delta inferred from high-resolution biogenic silica and sensitive grain-size records. Continental Shelf Research, 31(2): 129—137
- Folk R L, Andrews P B, Lewis D W, 1970. Detrital sedimentary rock classification and nomenclature for use in New Zealand. New Zealand Journal of Geology and Geophysics, 13(4): 937—968
- Folk R L, Ward W C, 1957. Brazos River bar: A study in the significance of grain size parameters. Journal of Sedimentary Research, 27(1): 3—26
- Glaister R P, Nelson H W, 1974. Grain-size distributions, an aid in facies identification. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 22(3): 203—240
- Hu B Q, Yang Z S, Zhao M X *et al*, 2012. Grain size records reveal variability of the East Asian Winter Monsoon since the Middle Holocene in the Central Yellow Sea mud area, China. Science China Earth Sciences, 55(10): 1656—1668
- Huang J, Li A C, Wan S M, 2011. Sensitive grain-size records of Holocene East Asian summer monsoon in sediments of northern South China Sea slope. Quaternary Research, 75(3): 734—744
- Krumbein W C, 1934. Size frequency distributions of sediments. Journal of Sedimentary Research, 4(2): 65—77
- Liu J, Saito Y, Kong X H *et al*, 2010a. Sedimentary record of environmental evolution off the Yangtze River estuary, East China Sea, during the last ~13, 000 years, with special reference to the influence of the Yellow River on the Yangtze River delta during the last 600 years. Quaternary Science Reviews, 29(1718): 2424—2438
- Liu J P, Li A C, Xu K H *et al*, 2006. Sedimentary features of the Yangtze River-derived along-shelf clinoform deposit in the East China Sea. Continental Shelf Research, 26(17—18): 2141—2156
- Liu J P, Xu K H, Li A C *et al*, 2007. Flux and fate of Yangtze River sediment delivered to the East China Sea. Geomorphology, 85(3—4): 208—224
- Liu S F, Shi X F, Liu Y G *et al*, 2010b. Records of the East Asian winter monsoon from the mud area on the inner shelf of the East China Sea since the mid-Holocene. Chinese Science Bulletin, 55(21): 2306—2314
- McManus J, 1988. Grain size determination and interpretation. Techniques in Sedimentology, 408: 63—85
- Passega R, 1957. Texture as characteristic of clastic deposition. AAPG Bulletin, 41(9): 1952—1984
- Passega R, 1977. Significance of CM diagrams of sediments deposited by suspensions. Sedimentology, 24(5): 723—733
- Prins M A, Postma G, Weltje G J, 2000. Controls on terrigenous sediment supply to the Arabian Sea during the late Quaternary: The Makran continental slope. Marine Geology, 169(3—4): 351—371
- Saito Y, Yang Z S, 1995. Historical change of the Huanghe (Yellow River) and its impact on the sediment budget of the East China Sea. In: Tsunogai S, Iseki K, Koike I *et al* eds. Proceedings of International Symposium on Global Fluxes of Carbon and its Related Substances in the Coastal Sea-Ocean Atmosphere System. Sapporo, Japan: Hokkaido University Press, 7—12
- Shepard F P, 1954. Nomenclature based on sand-silt-clay ratios. Journal of Sedimentary Research, 24(3): 151—158
- Su J L, Pan Y Q, 1987. On the shelf circulation north of Taiwan. Acta Oceanologica Sinica, 6(S1): 1—20
- Syvitski J P M, 1991. Factor analysis of size frequency distributions: Significance of factor solutions based on simulation experiments. In: Syvitski J ed. Principles,

- Methods, and Application of Particle Size Analysis. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 249—263
- Visher G S, 1969. Grain size distributions and depositional processes. *Journal of Sedimentary Research*, 39(3): 1074—1106
- Wang Y J, Cheng H, Edwards R L *et al*, 2005. The Holocene Asian monsoon: Links to solar changes and North Atlantic climate. *Science*, 308(5723): 854—857
- Weltje G J, 1997. End-member modeling of compositional data: Numerical-statistical algorithms for solving the explicit mixing problem. *Mathematical Geology*, 29(4): 503—549
- Yang Z S, Saito Y, Guo Z G *et al*, 1994. Distal mud area as a material sink in the East China Sea. In: Tsunogai S, Iseki K, Koike I *et al* eds. *Proceedings of International Symposium on Global Fluxes of Carbon and Its Related Substances in the Coastal Sea-ocean Atmosphere System*. Sapporo, Japan: Hokkido University Press, 1—6

SENSITIVE GRAIN SIZE COMPONENTS AND THEIR GEOLOGICAL IMPLICATION IN THE INNER SHELF OF THE EAST CHINA SEA

TIAN Yuan¹, FAN De-Jiang¹, ZHANG Xi-Lin², CHEN Bin², WANG Liang³, PANG Yue¹

(1. *College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China*; 2. *Qingdao Institute of Marine Geology, Ministry of Land and Resources, Qingdao 266071, China*; 3. *Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Xiamen 361005, China*)

Abstract Sediment grain size contains rich information about sedimentary environment and thereby is often used as a proxy to reconstruct the paleo-environment. We performed grain size analysis on three cores taken in the inner shelf of the East China Sea. Sensitive grain size components were analyzed, and their geological implication discussed. Three sensitive grain size components were recognized at <12 μ m (Component 1), 12—225 μ m (Component 2), and >225 μ m (Component 3), respectively. The overall grain size showed a fining-up trend from north to the south on the inner shelf. Component 1 and 2 were believed as being formed in homogenous suspension and graded suspension transportation, respectively, and Component 3 was very likely resulted from biological processes. Depending on characteristics of the regional ocean current system, Component 2 is more suitable as a proxy to indicate the winter ocean hydrodynamic strength, and thus the intensity of Winter East Asian Monsoon.

Key words inner shelf of East China Sea; sensitive grain-size component; transportation mechanism; environmental proxy