

长江口泥质区垂向沉积结构及其环境指示意义

张瑞^{1,2}, 汪亚平^{1,2*}, 高建华^{1,2}, 潘少明^{1,2}, 张志林³

(1. 南京大学海岸与海岛开发教育部重点实验室, 江苏南京 210093; 2. 南京大学地理与海洋科学学院海岸海洋科学系, 江苏南京 210093; 3. 水利部长江水利委员会长江口水文水资源勘测局, 上海 200136)

摘要:2006年4月在长江口泥质区获取了沉积物柱状样,进行了粒度分析及粒度分形计算,并从中提取沉积物环境变化敏感的粒度组分,结果表明,柱样的垂向沉积结构可分为两个部分:上部0~12 cm是动力环境改造频繁的活动层,沉积物混合程度较高;自12 cm以下沉积物有粗细旋回变化的特征,可能与长江入海泥沙的季节变化有关。本区沉积物主要含两个敏感粒度组分,标准偏差峰值为6.0~7.2 μm 的细组分与长江来源的悬沙粒径大致相当,而标准偏差峰值为40.7~57.5 μm 的粗组分则可能与风暴潮、波浪和潮流输沙、长江流域及河口区的水利工程的影响有关。沉积物粒度在0.9~20.3 μm 标度范围内的统计自相似程度很高,具有分形特征,粒度分维数的波动与沉积物粒度参数变化相吻合,表明沉积物粒度分维数具有一定的环境指示意义。

关键词:粒度;沉积环境;分形;敏感组分;长江口

中图分类号:P736

文献标识码:A

文章编号:0253-4193(2008)02-0080-12

1 引言

长江是我国第一大河流,全长6 300 km,总流域面积达 $1.94 \times 10^6 \text{ km}^2$,悬沙输运量巨大,以大通水文站为例,多年(1923—2004年共62 a数据)平均径流量为9 156亿 m^3 ,多年(1951—2004年共53 a数据)平均输沙量为0.417 5 Gt^[1]。长江大量入海泥沙受到长江冲淡水的影响和台湾暖流的阻隔,基本滞留在 $123^\circ 15' \text{E}$ 以西的内陆架,并主要向东南方向运移、沉积^[2-9]。已有研究表明,长江入海泥沙在河口区沉积动力、地球化学、生物地球化学的作用下大约有40%沉积在 30°N 以北海域,形成长江水下三角洲前缘的泥质沉积区^[2-3,10-13]。该泥质区面积约为 10^{10} m^2 ,主要由黏土质粉砂组成^[3-4,9,14-16]。由于沉积物来源充沛,该区的沉积速率很高,最高可为5.4~6.3 cm/a ^[3,17-20],成为长江入海沉积物的

堆积中心^[3-4,14-15]。为了揭示长江口泥质区近期的环境演变过程,2006年4月在此区域采集了五个柱状样,分析其垂向沉积结构、粒度参数特征及其分形特征,并提取粒度环境敏感组分,探讨上述参数的环境指示意义。

2 材料和方法

2.1 材料

在对短柱状岩心的研究中,沉积层序的扰动对沉积环境、沉积物测年有较大影响。在南槽口外的 31°N 附近区域,人类活动(如河口深水航道工程、船舶航行、疏浚和抛泥等)的影响相对较小,对沉积层序的扰动也相对较小。因此,在2006年4月使用自制重力取样设备在长江口泥质区的 31°N 附近进行沉积物岩心采样(站位见图1,表1),对柱样的采样长度均在1.3 m以上。

收稿日期:2007-06-26;修订日期:2007-07-29。

基金项目:国家重点基础研究发展规划资助项目(2002CB412401);国家自然科学基金资助项目(40106009;40576040)。

作者简介:张瑞(1982—),男,山东省济南市人,博士研究生,从事海洋地质学研究。E-mail: rzhang_838@163.com

* 通讯作者:汪亚平, E-mail: ypwang@nju.edu.cn

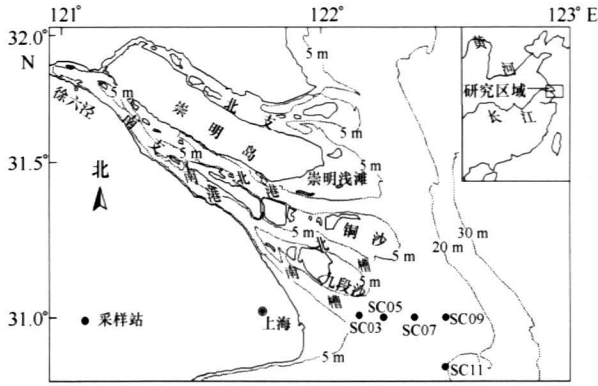


图1 研究区和采样站位

表1 长江口柱状岩心取样站位

站位	北纬	东经	水深/m	柱长/cm
SC03	31°6.066 000'	122°10.260 290'	8.8	130
SC05	31°0.014 730'	122°16.040 120'	10.0	137
SC07	31°0.088 560'	122°23.059 900'	14.0	140
SC09	31°0.012 460'	122°30.046 930'	14.0	160
SC11	30°50.461 720'	122°30.103 420'	17.0	145

在室内对柱状样进行了详细描述,并以2 cm间隔分样。使用英国 Malvern 公司的 Mastersizer 2000 型激光粒度仪进行粒度测量(仪器的测量范围为0.02~2 000 μm ,重复测量的误差小于3%),获得样品的粒度分布数据后,采用矩法公式计算粒度参数^[21]。

2.2 数据处理方法

本文用分形方法来研究沉积物的粒度特征。分形理论由 Mandelbrot^[22]首次提出,并用它来研究自然界中没有特征长度但又有自相似性的图形和现象。目前分形理论在第四纪研究、海洋地质、地质构造等学科中得到了广泛的应用^[23-32]。在分形集中若某一个集合关于标度具有自相似性,且在该标度下的个数为 N ,按照分形的定义则有

$$N = \left[\frac{1}{r} \right] = r^{-D}, \quad (1)$$

式中, D 为分维数; r 为标度。分维数可以是整数,也可以是分数。在双对数坐标上,如在该标度下的个数与标度成直线关系,说明研究对象具有线性分形特征,直线的斜率就是其分维数,而在该标度下的个数与标度成直线关系的部分就称为无标度区,这一性质称为无标度性。

现取 $m_{<}$ 为沉积物粒径小于某一标度(平均粒

径)的颗粒的质量总和, m_0 为样品质量总和,并取标度(平均粒径)为横坐标、粒径小于某一粒度的颗粒的质量总和与样品的质量总和之比为纵坐标并作双对数坐标图。这样,只要在粒径小于某一粒度的颗粒的质量总和与样品的质量总和之比值跟标度的双对数坐标图上有直线段,便可求得双对数坐标图上直线段的拟合直线的斜率 b 。已有的研究表明^[27-28],沉积物的粒度组成是一种没有特征长度的结构图形,其分形是基于一种统计自相似性的粒度分布。经推导,分维数与斜率之间有如下关系^[27-28]:

$$D = 3 - b, \quad (2)$$

将斜率代入上式,可求得沉积物的粒度分维数。拟合直线的相关系数的大小代表沉积物粒度统计自相似程度的高低,相关系数越大,统计自相似程度越高。有研究表明,粒度的分维数代表沉积物粒度组成的复杂程度,并且分维数与分选系数有较好的正相关关系;分维数越大,代表沉积物的粒度组成越复杂,自相似程度越高,分选性越差;分维数变小,表示沉积物自相似程度低、分选性好^[27,32]。

沉积物的粒度数据广泛应用于对物质运动方式的判定和沉积环境类型的识别,然而在现代和地质历史时期的沉积物往往都是多种物源或沉积动力过程的混合,用全样的粒度参数显然只能近似地作为沉积环境的代用指标^[33]。近年来随着对沉积物粒度数据的深入研究,如何从多峰态的频率分布曲线中分离出单一粒度组分的特征(如众数值分布范围和含量等),进而探讨各组所指示的沉积学意义,已成为古环境研究的关键。对于定量提取不同沉积动力成因所产生的粒度组分,进而反演沉积环境变化已经在阿拉伯海和南海得到了成功的应用^[33-35]。本文采用粒级-标准偏差的算法^[34-35]来提取这五个柱状样的敏感粒度组分。

3 结果

3.1 岩性

在长江口泥质区获取的柱状样都以黄灰色、灰黑色黏土质粉砂为主,局部有薄层细砂夹层。SC03站柱样长度为1.3 m;0~10 cm为黄灰色黏土,质地较软;10~24 cm为黄灰色黏土,质地稍硬;24~54 cm为黄灰色黏土,夹灰黑色粉砂;54~78 cm为黄灰色黏土;78~102 cm为黄灰色黏土,夹灰黑色粉砂;102~120 cm为黄灰色黏土;120~130 cm为黄灰色淤泥。SC05站柱状样0~8 cm为黄灰色黏

土;8~10 cm 为灰黑色粉砂;10~105 cm 为黄灰色黏土,其中 62~64 cm 为灰黑色粉砂;105~126 cm 为黄灰色黏土,有灰黑色粉砂夹层;126~137 cm 为黄灰色黏土和灰黑色黏土夹层。SC07 站柱状样 0~10 cm 为黄灰色黏土夹灰黑色粉砂层;10~60 cm 为黄灰色黏土夹灰黑色黏土,其中 16~17 和 45~46 cm 处有灰黑色粉砂薄层出现;60~90 cm 为黄灰色黏土夹灰黑色粉砂,并有臭味;90~140 cm 以黄灰色黏土为主,其中 93~94 cm 有灰黑色粉砂层。SC09 站柱样长 1.6 m,整体以黄灰色黏土为主,夹灰黑色黏土或粉砂,其中 8~11,18~22,38~46,54~56 cm 为较明显的灰黑色黏土;28~29,12~16,50~52,83~84,132~136 cm 为灰黑色粉砂,其余部分表现为 1 mm 的灰黑色粉砂和黄灰色黏土的交互层;另有 140~160 cm,间隔 5 cm 分样。SC11 站柱状样主要为黄灰色黏土和灰黑色黏土互层,其中 4~5 cm 为粉砂夹层,在 56 和 70~74 cm 处有粉砂结核,在 80~82 cm 有贝壳和粉砂夹层,在 120 cm 处有贝壳碎屑,在 130 cm 处有粉砂夹层。

3.2 粒度参数

根据粒度分析结果绘制粒度参数的垂向分布(图 2-6),结果表明,沉积物组分以粉砂为主,其

次是黏土,砂的含量很少,不含砾石。从图中可以看出,各种指标的垂向变化可以大致分为两个部分:上部为 0~12 cm 部分,下部从 12 cm 到柱样底部。从表 2 可以看出,柱样上部的各种粒度参数均与下部的参数有差异,分选系数、偏态和峰态尤其显著。总体上看,上部的沉积物颗粒要比下部的细,并且 SC03 和 SC09 站的沉积物颗粒比 SC05,SC07 和 SC11 站的粗,这可能与 SC03 和 SC09 站位于水动力较强的水道主槽内有关;在分选程度上,上部较下部分选差;在偏态上,上部为极正偏,下部为正偏,且 SC03 和 SC09 站的下部局部为负偏;在峰态上,SC09 站整个柱样的峰态上下基本一致,峰态宽,而 SC03,SC05,SC07 和 SC11 站的上部峰态较下部的宽。

从图 2-6 可以看出,这五个柱样的粒度参数在垂向分布上有一定的波动变化,在一定层位上呈现显著的粒度粗化(图中的浅灰色区域)和细化特征(图中的深灰色区域),其相应的分选系数、偏态、峰态、沉积物组分也与其他层位有显著差异。总体上可以分为两段:上段为柱样表层至 12 cm 深度,在这个范围内不管沉积物变细还是变粗,其他的粒度参数数值都异常增大,分选变差,沉积物分布为极正偏,

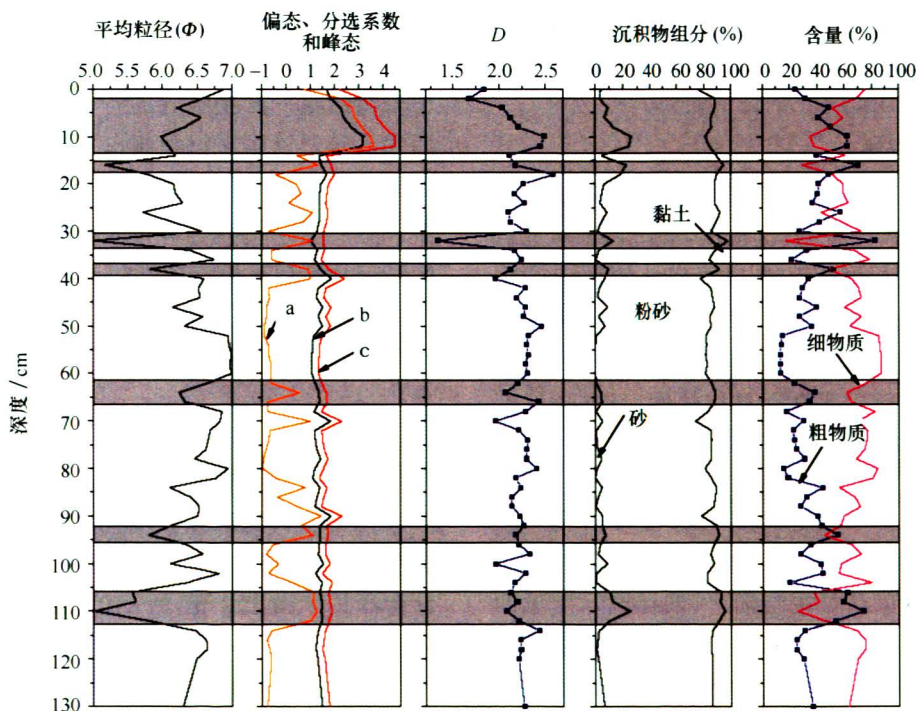


图 2 SC03 站沉积物粒度参数及其分选系数、沉积物组分和粗细物质含量的垂向变化
a. 偏态, b. 分选系数, c. 峰态。粗物质指大于 $17 \mu\text{m}$ 的颗粒物,细物质为小于 $17 \mu\text{m}$ 的颗粒物

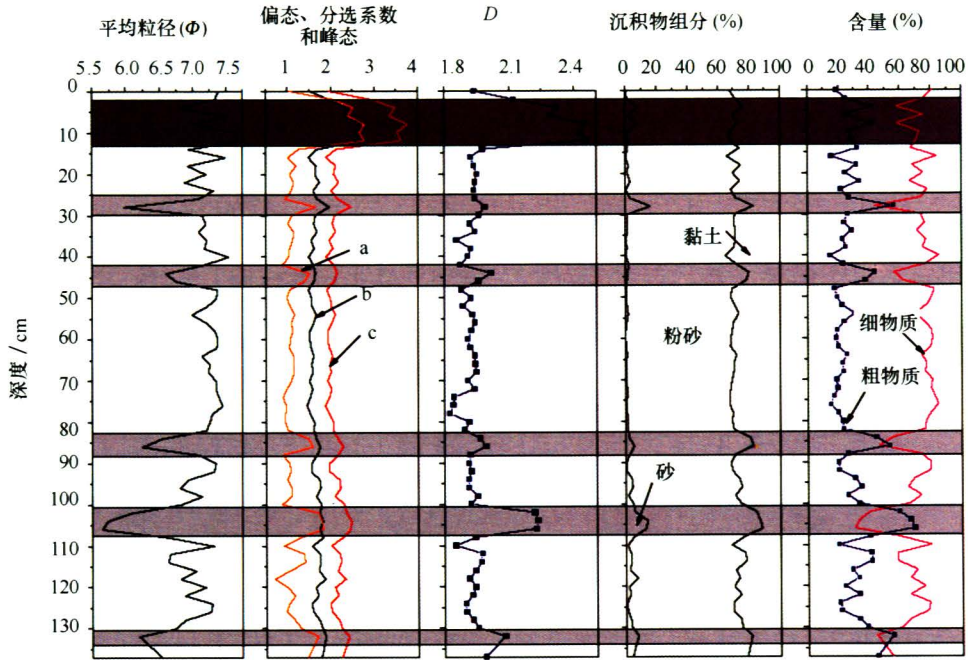


图3 SC05站沉积物粒度参数及其分维数、沉积物组分和粗细物质含量的垂向变化
a. 偏态, b. 分选系数, c. 峰态。粗物质指大于 14 μm 的颗粒物, 细物质指小于 14 μm 的颗粒物

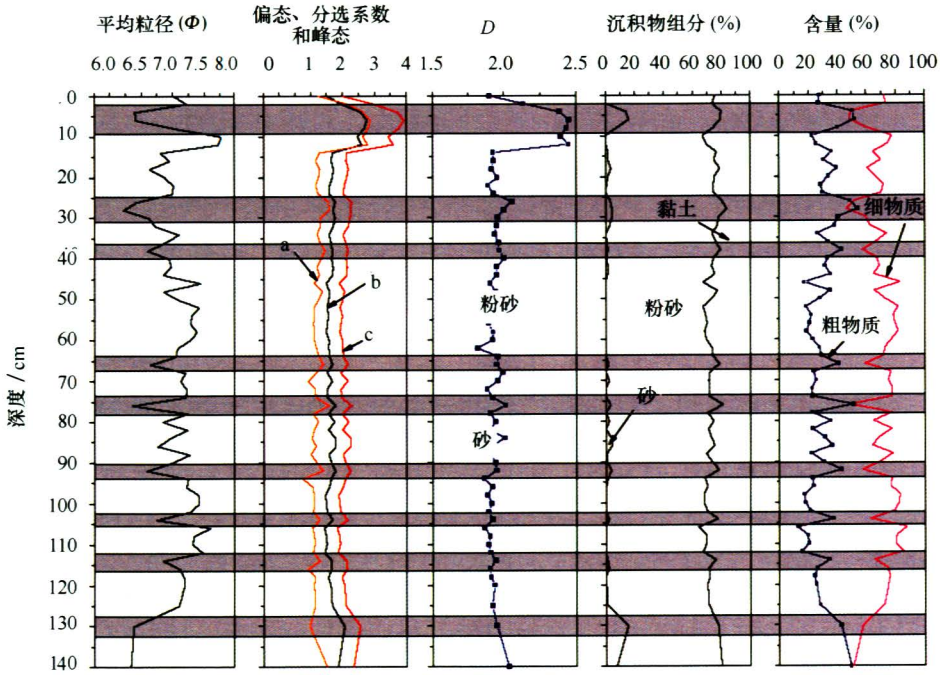


图4 SC07站沉积物粒度参数及其分维数、沉积物组分和粗细物质含量的垂向变化
a. 偏态, b. 分选系数, c. 峰态。粗物质指大于 14 μm 的颗粒物, 细物质为小于 14 μm 的颗粒物

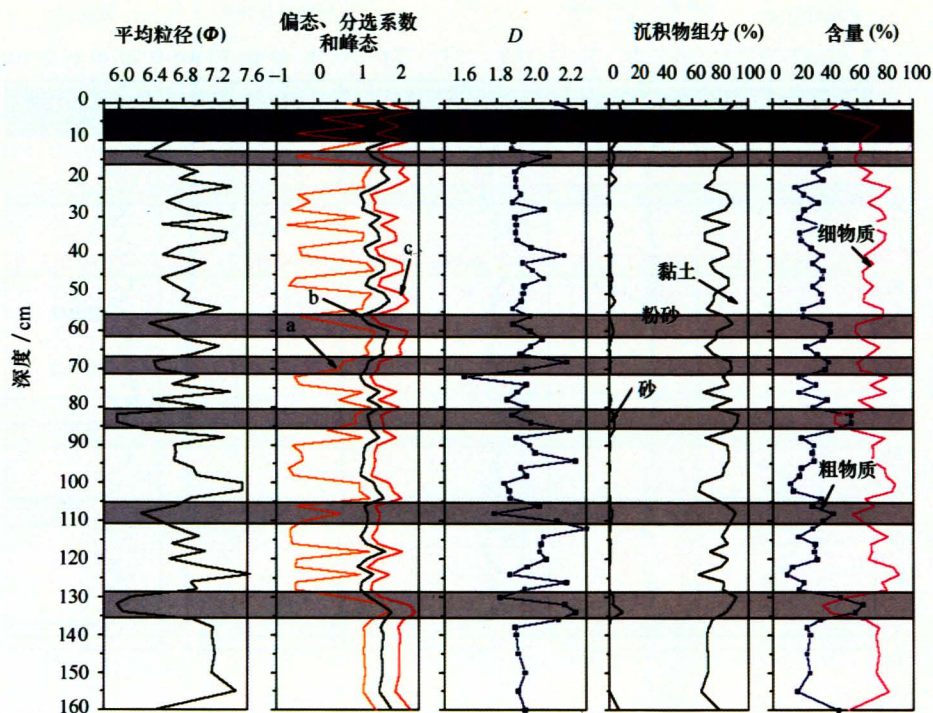


图5 SC09站沉积物粒度参数及其分维数、沉积物组分和粗细物质含量的垂向变化
a. 偏态, b. 分选系数, c. 峰态。粗物质指大于 $14\ \mu\text{m}$ 的颗粒物, 细物质指小于 $14\ \mu\text{m}$ 的颗粒物

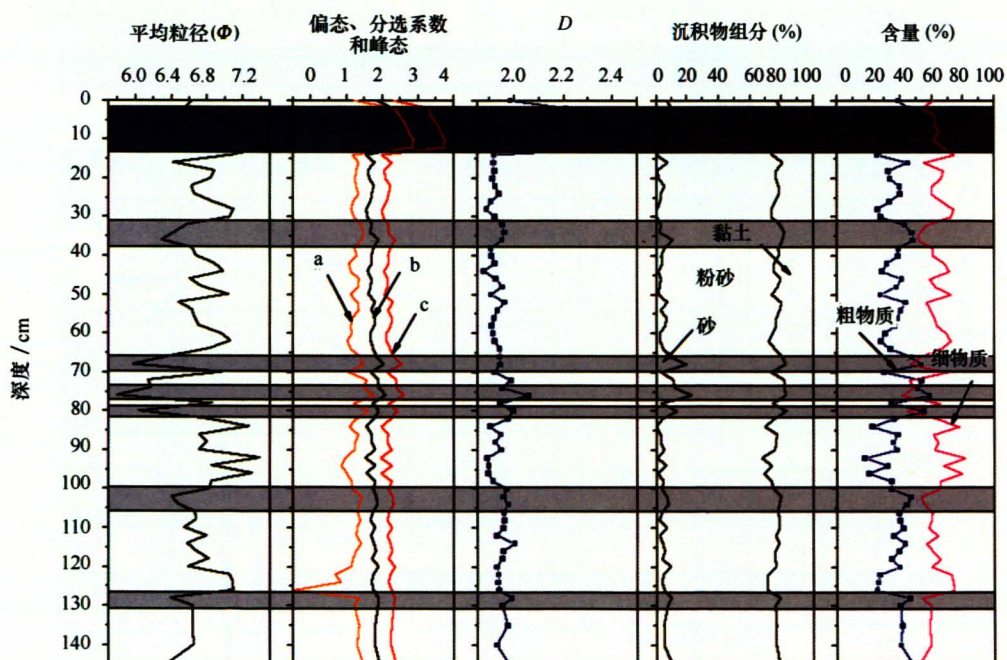


图6 SC11站沉积物粒度参数及其分维数、沉积物组分和粗细物质含量的垂向变化
a. 偏态, b. 分选系数, c. 峰态。粗物质指大于 $14\ \mu\text{m}$ 的颗粒物, 细物质指小于 $14\ \mu\text{m}$ 的颗粒物

表 2 柱状样粒度参数统计

站位	粒度参数	0~12 cm				12 cm 至底部			
		平均粒径(Φ)	分选系数	偏态	峰态	平均粒径(Φ)	分选系数	偏态	峰态
SC03	最大值	6.896	3.195	3.604	4.505	6.994	1.893	1.443	2.416
	最小值	5.984	1.683	0.749	2.191	5.018	1.032	-0.929	1.318
	平均值	6.375	2.458	2.696	3.691	6.343	1.345	-0.044	1.675
SC05	最大值	7.683	2.718	2.779	3.764	7.537	1.958	1.809	2.464
	最小值	6.812	1.531	1.042	1.958	5.646	1.437	0.694	1.868
	平均值	7.341	2.308	2.322	2.218	6.993	1.639	1.149	2.102
SC07	最大值	7.778	2.761	2.869	3.923	7.597	2.055	1.574	2.548
	最小值	6.397	1.527	1.233	1.985	6.221	1.423	0.743	1.823
	平均值	7.084	2.365	2.443	3.335	7.009	1.622	1.190	2.071
SC09	最大值	7.179	1.786	1.732	2.388	7.641	1.831	1.718	2.420
	最小值	5.991	1.174	-0.512	1.450	5.962	0.979	-0.728	1.232
	平均值	6.471	1.446	0.660	1.828	6.823	1.379	0.482	1.741
SC11	最大值	7.483	2.744	2.872	3.759	7.397	2.093	1.776	2.625
	最小值	6.541	1.835	1.206	2.313	5.797	1.522	-0.447	1.963
	平均值	7.020	2.409	2.449	3.383	6.702	1.744	1.228	2.220

峰态变宽,不同的是 SC05,SC09 和 SC11 站在这个范围内(图 3,5,6 中深灰色区域)平均粒径呈变细的趋势,而 SC03 和 SC07 站的 0~12 cm(图 2,4 中浅灰色区域)颗粒变粗;下段为 12 cm 至柱样底部,此范围内所有柱样都有几次明显的粒度粗化过程,在相同层位其他粒度参数也发生变化,尤其在 SC07,SC09 和 SC11 站粗细变化的波动更为频繁。

3.3 粒度分维数

粒度分析结果表明,SC05 和 SC07 站的沉积物粒度主要集中在 0.4~81.3 μm ,其中小于 57.5 μm 的组分占 99% 以上(图 7)。SC11 站的沉积物粒度主要分布于 0.4~96.7 μm ,小于 81 μm 的样品占 99% 以上。SC03 和 SC09 站的沉积物粒度分布范围较宽,主要集中在 1.5~200 μm ,其中小于 115 μm 的样品占 98%。从沉积物分形参数(见表 3)和沉积物颗粒质量累计百分含量与粒度关系图(图 7)可以看出,SC05,SC07 和 SC11 站在 0.9~5.1 μm ,SC03 站在 5.1~20.3 μm ,对于 SC09 站的部分层位在 0.9~5.1 μm 和部分层位在 4.8~20.3 μm ,累计

百分含量与粒径呈线性关系,落在这些范围外的颗粒分布明显偏离直线,并且相关系数达到 0.99,说明在这些标度范围内沉积物粒度的统计自相似程度很高,并且具有分形特征^[31]。

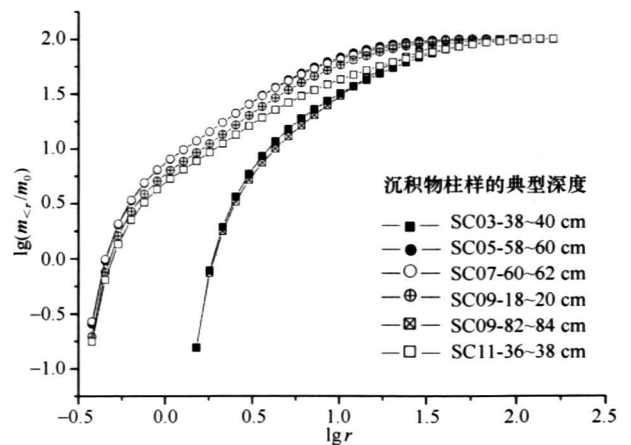


图 7 沉积物颗粒质量累计百分含量与粒径的关系

经过计算,这五个柱样粒度分维数垂向分布如图 2-6,可以看出粒度分维数分布也分为上下两个

表 3 典型层位的沉积物粒度分形参数

	SC03	SC05	SC07	SC09	SC11
深度/cm					
	38~40	58~60	60~62	18~20	82~84
<i>b</i>	0.881 4	1.073 4	1.0788	1.102 4	1.151 9
<i>R</i>	0.994 7	0.998 9	0.999 3	0.999 8	0.997 4
<i>D</i>	2.118 6	1.926 6	1.921 2	1.897 6	1.848 1
<i>SD</i>	0.021 9	0.014	0.010 5	0.006 0	0.019 9
范围/ μm	5.10~20.3	0.90~6.0	0.90~5.1	0.90~5.1	4.80~20.3

注: *R* 为相关系数, *SD* 为标准偏差。

部分,对这两个部分的粒度分维数统计的结果如表 4 所示。在 0~12 cm 厚度内 SC05, SC07 和 SC11 站的粒度分维数平均值比 SC03 和 SC09 站的大;从 12 cm 到最底部,粒度分维数较低,呈明显的波动变化,在这一范围内 SC03 和 SC09 站的分维数却比 SC05, SC07 和 SC11 站的大,并且比它在 0~12 cm 的分维数也要大。

表 4 沉积物粒度分维数

站位	0~12 cm		12 cm 至底部	
	<i>D</i>	<i>SD</i>	<i>D</i>	<i>SD</i>
SC03	2.116	0.015	2.205	0.029
SC05	2.344	0.017	1.945	0.018
SC07	2.374	0.021	1.915	0.013
SC09	1.983	0.034	1.985	0.033
SC11	2.316	0.019	1.939	0.010

3.4 沉积物粒度敏感组分提取

利用粒级-标准偏差算法得到的标准偏差是随粒级组分变化的。对获取的柱状样作沉积物粒度敏感组分分析,结果表明,沉积物中主要含两个敏感组分,即较大的标准偏差值所对应的粒度即为对沉积环境变化敏感的粒度众数(图 8)。柱状样 SC05, SC07, SC09, SC11 的两个粒度组分分界线约在 14.4 μm ,而 SC03 站的两个粒度组分分界线约在 17.1 μm 。在细组分中标准偏差峰值变化约为 6.0 或 7.2 μm ;在粗组分中标准偏差峰值比较复杂,在 SC05 和 SC09 站出现在 34.2 μm 处,而在 SC07, SC03 和 SC11 站分别出现在 40.7, 48.4 和 57.5 μm 处。

根据铅-210 测年结果分析获得了上述各站位的沉积速率(表 5),其中 SC03 站铅-210 测年失败。提取相同年代沉积物的粒度敏感组分,分析相同年代的沉积物粒度的标准偏差随粒级组分的变化(图 9)。从不同沉积年代看,沉积物主要含粗细两

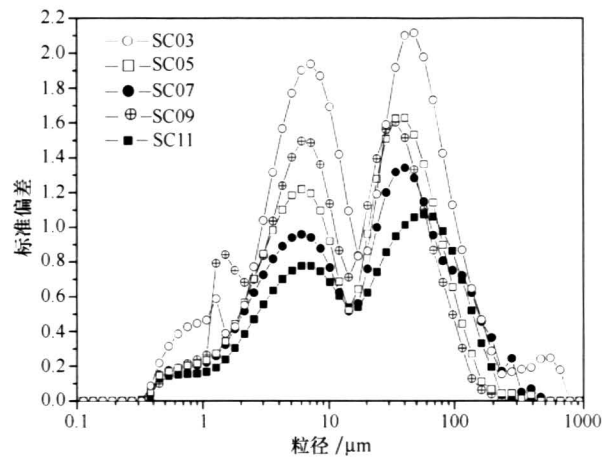


图 8 标准偏差随粒级组分的变化

表 5 长江口柱状样的沉积速率

	SC03	SC05	SC07	SC09	SC11
沉积速率/ $\text{cm} \cdot \text{a}^{-1}$	—	4.02	4.03	3.45	4.11

注: — 为无结果。

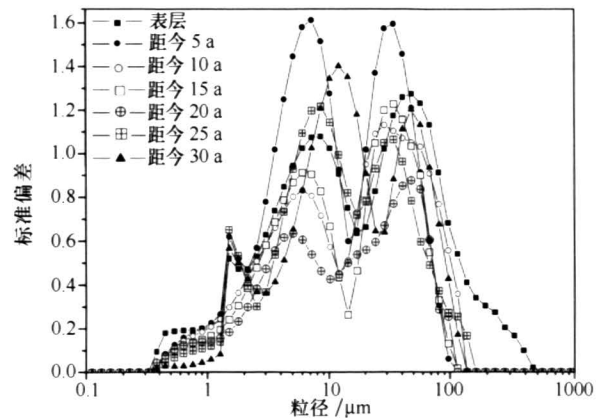


图 9 相同年代的沉积物粒度标准偏差随粒级组分的变化

个组分,细组分峰值主要分布在 5.1~8.5 μm ,而距今 30 a 的沉积物中细组分峰值在 12.1 μm ,并且在表层和距今 5, 25, 30 a 的沉积层位中,在粒度

1.5 μm 处还有一个粒度更细的标准偏差峰值;粗组分峰值主要分布在28.8~48.4 μm 。从细组分峰值随时间的变化看,在距今30 a到距今20 a细组分峰值有向细端偏移的趋势,而从距今20 a到距今5 a细组分峰值几乎一致,只有表层的细组分峰值稍微变大,但是这种变化在粗组分峰值中并不明显。

4 沉积物粒度包含的环境信息

沉积物粒度是衡量沉积介质能量和沉积盆地的一种尺度,一般来讲,在具有相同物质来源的区域,在高能环境下较易堆积粗粒沉积物,而在低能环境下较易堆积细粒沉积物^[36]。沉积物粒度分布特征与沉积时的动力环境有密切关系,因此可用沉积物粒度参数作为沉积环境反演的指标。平均粒径代表沉积物粒度的集中趋势,其变化与其他粒度参数产生的变化有一定的对应特征。

本区域沉积物物源以长江径流携带的泥沙为主,夏季台湾暖流势力强大,加之强劲的东南风的影响,浙江沿岸流向北^[37],杭州湾、浙闽沿岸泥质沉积区的物质会被水流携带到本区域沉积下来,这是本区域的另一个泥沙来源。在夏季途经本区域的台风频繁,强大的台风对海水产生巨大的扰动,可将外海或近海的表层沉积物再悬浮并随水流运移至本区域沉积下来。因此,长江口泥质区的沉积物物源具有多样化的特征。根据长江大通站的观测结果,泥沙通量具有明显的夏汛冬枯的特点,主要集中在汛期6个月,占全年输送量的87.2%。夏半年(5—10月)泥沙来量大大超过冬半年(11—4月),并且主要集中在7,8,9三个月,其中7月最大,可达年输沙总量的21.9%,2月输沙量最小,仅为年输沙总量的0.6%^[12]。因此,长江入海泥沙有显著的季节性变化,这表明影响长江口泥质区的沉积作用的主要因素也具有强烈的季节性变化。

夏季长江入海水沙通量大,水动力环境较强,粗颗粒物质可以被水流携带到更远的地方,在河口环流、潮流等水动力因素下被输送到本区域沉积下来,而更细的物质则可输送到外海,也就是说,夏季是长江口泥质区物质粗化的重要阶段。图2-6的浅灰色区域是沉积物粒度变粗的区域。有资料显示,长江入海悬移质泥沙粒径夏半年(5—10月)的多年平均中值粒径为18.75 μm ,而冬半年(11—4月)的悬沙中值粒径为13.58 μm ^[38],由此可知长江入海悬沙夏季要比冬季的粗,柱样中沉积物粗化与洪季入

海泥沙粒径粗细有一定的关系;由于并非每个沉积事件都能被保留下来,故柱样中所保留的变粗层位未能代表所有的粗化沉积事件。每一次粒度粗化都会引起沉积物分选变差,偏态正偏(偏于陆相沉积),峰态展宽,粗物质增加,而粒度分维数变大,并且沉积地球化学指标如总有机碳、总氮的含量也随着沉积物粒度粗化而下降^[47]。

冬季正好相反,长江入海水沙通量较小,悬移质粒径在枯季小于洪季^[38]。从图2-6可看出,随着沉积物粒径变细,沉积物中细组分增加,偏态、分选系数变小,峰态展宽,粒度分维数变小,可见柱样中的沉积物细化主要与枯季长江较细的沉积物输入有关。有研究表明,在东海内陆架区潮流引起沉积物强烈的再悬浮,对细颗粒物质有显著的再悬浮和搬运作用^[39-40],并且在潮流、风浪等动力作用下在长江水下三角洲前缘31°N,123°E附近,表层沉积物经常发生再悬浮,且以冬季的再悬浮作用最为显著^[2,41],同时风暴潮等极端天气事件也会使沉积物再悬浮^[42]。这些再悬浮物质中有部分细颗粒物质会在潮流作用下被带至本研究区域而沉积下来,表层沉积物中细颗粒物质增多,并偏于海相沉积(呈负偏),但冬季风浪作用频繁,可能使浅海区域的沉积物发生再悬浮、再搬运,从而使长江口泥质区物源具有多样性,并造成沉积结构的复杂化。

本研究区域平均潮差在2.50 m左右,潮汐性质为非正规半日潮,潮流性质为非正规浅海半日潮流,以旋转流为主,落潮流流速大于涨潮流流速,实测最大落潮流速可超过2.40 m/s^[13],可对表层沉积物产生较大的扰动,使沉积物再悬浮、再搬运、再沉积,从而造成一定厚度的活动层。从图2-6中可以看出,在这五个图的上部0~12 cm的厚度内,尽管平均粒径的变化不一致,但其他粒度参数却无一例外地异常增大。沉积物偏态为极正偏,说明沉积物粒度集中在粗颗粒部分,部分细颗粒物质被外力淘洗而带走;由于外界物源的加入,新物质未经改造或者水动力环境对其改造不甚明显,新旧两种物质直接混合沉积下来,沉积物分选变差,峰态展宽,粒度分维数变大;从地球化学指标看,总有机碳、总氮含量从表层到12 cm层是逐渐下降的,一方面既与沉积物粒度有关,粗物质的总有机碳、总氮含量低,还可能与复杂的动力环境有关:在这一深度范围内沉积物深受近底层水流的作用、改造并与外界进行频繁的物质交换,使有机质迅速分

解,总有机碳、总氮含量低。因此,可认为 0~12 cm 层是此区域的活动层。

本文研究区正处于长江口近口锋的影响范围内,该锋在 122°00'与 122°30'E 之间摆动,内界为长江最大浑浊带的外缘,作为两个水体的界面,该锋具有一定的屏障效应,可以使大量泥沙在锋区附近停积,对长江口水下三角洲的沉积作用产生重要影响^[43]。本文五个柱样的平均粒径为 6.768 ϕ ,以粉砂为主;从沉积物水平分布看,SC03 到 SC11 站沉积物粒径总体上是变细的,说明长江入海泥沙运移过程中发生了粗细分选沉降,也表明河口锋对长江口泥质区沉积过程的屏障效应的影响。

通过对沉积物敏感组分的提取可知,这五个柱状样主要含粗细两个粒度敏感组分。对于细组分,标准偏差峰值基本出现在 5~8 μm ,说明本区域细组分来源具有一致性;对于粗组分,标准偏差峰值的差异增大,说明粗组分来源复杂。有研究表明,长江口悬沙组成物质较细,中值粒径通常在 5 ϕ —10 ϕ ,黏土含量较高,粉砂中以细粉砂为主^[13],因此本区域的细组分绝大部分应为长江来源,而粗组分来源较为复杂。长江河口区河段和口门附近的浅滩地区的表层沉积物物质粗,部分河段沉积物中值粒径为 2 ϕ —3 ϕ ,因此在强水动力环境下大量粗颗粒物质会被携带入海而沉积,同时在本区域东部有残留沉积分布,沉积物粒度粗,中值粒径为 2 ϕ —3 ϕ ^[13],因此在水动力条件强时一部分物质被水团或海流携带至本区域沉积下来,并且以粗物质贡献为主;对于黄海沿岸流,悬浮体主要由小于 16 μm 的细粉砂和小于 4 μm 的黏土颗粒组成^[44],并且由于受到长江冲淡水流的顶托,其南界被限制在 32°00'N 附近^[45],故黄海沿岸流对本区域的贡献微乎其微。

从图 8 可以看出,SC03 和 SC11 站的粗组分标准偏差峰值所对应的粒级较大,尤其 SC03 站的标准偏差最大,表明 SC03 站的沉积环境复杂。SC03 站位于南槽口外,紧靠着南汇边滩,既是长江入海输沙、涨潮流向陆输沙的地点,也是长江泥沙输入杭州湾的必经之地,同时又处于深槽与边滩泥沙交换的地带,长江携带的粗颗粒最先在此沉积,因此 SC03 站的沉积动力环境复杂,表层沉积物活动性大,沉积物含量变化也大。SC11 站位于本区域东南

缘,处于杭州湾与外海的潮流通道上,较强的流速加大了表层沉积物的不稳定性,并且也会从外海携带粗物质沉积于此地,因此造成了 SC11 站的粗组分标准偏差峰值所对应的粒级偏大。

在长江流域修建的各种水利设施也是对长江入海泥沙粒径产生影响的重要因素。自从 20 世纪 60 年代以来长江入海水沙通量显著减少,90 年代的人海泥沙比 60 年代减少了 38%,据估计未来 100 a 内入海泥沙要比过去的 50 a 减少 50%,并且导致入海泥沙减少的一个重要因素就是水利设施的修建^[46]。近 50 a 由于受大型水利工程的影响,长江下游入海泥沙粒径明显变细,由粗粉砂单峰型变为黏土—中粉砂组合的双峰型。总的输沙量在减少,而黏性泥沙的输沙量却在显著增加^①。这些入海泥沙的减少及颗粒细化使在长江泥质沉积区沉积的物质也相应变细,因此这也是图 9 中距今 30~20 a 的细组分峰值随时间向细端偏移的一个原因。由于沿程冲刷恢复,河道冲刷补偿会对大通水文站的含沙量和输沙量有补充作用,因此近 10 a 来长江大通水文站含沙量和输沙量下降趋势已减缓^②,近十几年来的细组分峰值在 6 ϕ —8 ϕ 内波动,然而粗物质来源复杂,其标准偏差峰值的变化不明显,标准偏差峰值大多在 2 ϕ —3 ϕ 内变化。

长江口泥质区柱状样总体的粒度无标度区为 0.9~20.3 μm (小于 4 μm 的为黏土),主要是黏土和细粉砂,占样品总量的 84% 以上,表明长江口泥质沉积区粒度分维数具有一定的环境指示意义,可以成为古环境的一个重建佐证,但是对于近海沉积物粒度的分维数的解译还需要进一步探讨。从图 2—6 可知,SC03 站的粒度分维数与其他不同,在 32~34,64~66,94~96 和 104~112 cm 的层位上粒度变粗,但是粒度分维数却变小,这可能是因为 SC03 站靠近口门,受长江入海径流的影响,沉积物充分分选而沉积下来,分选性好,则粒度分维数变小。由于 SC09 站柱样处于所获柱样的最东端,并且从图 5 中可以看出沉积过程中物质粗细旋回变化频繁,沉积动力环境复杂,SC09 站更有机会获得随潮流向陆运移的外海粗物质,并且其粗组分标准偏差峰值在 14 μm 附近,说明了强大的沉积动力环境对 SC09 站的影响,可能会使部分颗粒粗的层位的粒度无标度区间相应变大,从而与其他层位不同。

① 林承坤等. 长江入海水沙通量的研究. 2005.

② 张瑞等. 近 50 a 来长江入河口区含沙量和输沙量的变化趋势. 2007.

5 结论

通过对长江口泥质沉积区采集的五个柱状样的沉积物粒度及其分维数、敏感组分的分析,可以得到以下结论:

(1)柱状沉积物垂向结构可以分为两个部分,上部0~12 cm的沉积物平均粒径有一定的粗化或细化趋势,其他粒度参数及其分维数均异常增大,可以认为这个厚度是现代动力环境改造频繁的活动层;下部从12 cm到最底部沉积物出现夹层性质的粒度粗化现象,其他指标也相应发生显著变化;从沉积物水平分布上来看,从SC03站到SC11站沉积物粒径总体上是变细的,说明长江入海泥沙在运移过程中发生了粗细分选沉降,同时也表明了河口锋对长江

口泥质区沉积过程的屏障效应的影响;

(2)本区域的沉积物主要有两个敏感粒度组分,较细组分主要与长江来源的细颗粒物有关;粗粒组分表现出多源特征,表明除长江入海物质外,外海输入的物质也有一定的贡献,还可能与河口复杂的动力环境有关;

(3)经过分析发现长江口泥质沉积区沉积物在粒径为0.9~20.3 μm 的标度具有分形特征,粒度分维数的波动与沉积物粒度参数变化相吻合,具有一定的环境指示意义,但是对近海沉积物粒度分维数的解译还需要进一步探讨。

吴祥柏、丁艳峰、刘运令参加了野外工作及室内分析测试,一并致谢。

参考文献:

- [1] 汪亚平,潘少明,WANG Harry,等. 长江口水沙入海通量的观测与分析[J]. 地理学报,2006,61(1):35—46.
- [2] MILLIMAN J D, SHEN Huan-ting, YANG Zuo-sheng, et al. Transport and deposition of river sediment in the Changjiang estuary and adjacent continental shelf[J]. Continental Shelf Research, 1985, 4(1/2): 37—45.
- [3] DEMASTER D J, MCKEE B A, NITTRouer C A, et al. Rates of sediment accumulation and particle reworking based on radiochemical measurements from continental shelf deposits in the East China Sea[J]. Continental Shelf Research, 1985, 4(1/2): 143—158.
- [4] 金翔龙. 东海海洋地质[M]. 北京:海洋出版社,1992:196—215.
- [5] 秦蕴珊,赵一阳,陈丽蓉. 东海地质[M]. 北京:科学出版社,1987:35—37.
- [6] 杨作升. 黄河、长江、珠江沉积物中粘土的矿物组合、化学特征及其与物源区气候环境的关系[J]. 海洋与湖沼,1988,19(4):336—346.
- [7] 郭志刚,杨作升,曲艳慧,等. 东海陆架泥质区沉积地球化学比较研究[J]. 沉积学报,2000,18(2):284—289.
- [8] 郭志刚,杨作升,陈致林,等. 东海陆架泥质区沉积有机物的物源分析[J]. 地球化学,2001,30(5):416—424.
- [9] GUO Zhi-gang, YANG Zuo-sheng, FAN De-jiang, et al. Seasonal variability of sedimentation in the Changjiang Estuary mud area[J]. Journal of Geographical Sciences, 2003, 13(3): 348—354.
- [10] 林义安,唐仁友,李炎,等. 长江口生源元素的生物地球化学特征与絮凝沉降的关系[J]. 海洋学报,1995,17(5):65—72.
- [11] 曹沛奎,严肃庄. 长江口悬沙峰及其对物质输移的影响[J]. 华东师范大学学报(自然科学版),1996,(1):85—94.
- [12] 沈焕庭,李九发,朱慧芳,等. 长江河口悬沙输移特性[J]. 泥沙研究,1986,(1):1—13.
- [13] 沈焕庭,潘定安. 长江河口最大浑浊带[M]. 北京:海洋出版社,2001:15—38.
- [14] 郭志刚,杨作升,曲艳慧,等. 东海中陆架泥质区及其周边表层沉积物碳的分布与固碳能力的研究[J]. 海洋与湖沼,1999,30(4):421—426.
- [15] 胡敦欣,韩舞鹰,章申. 长江、珠江口及邻近海域陆海相互作用[M]. 北京:海洋出版社,2001:26—66.
- [16] 郭志刚,杨作升,范德江,等. 长江口泥质区的季节性沉积效应[J]. 地理学报,2003,58(4):591—597.
- [17] 段凌云,王张华,李茂田,等. 长江口沉积物 ^{210}Pb 分布及沉积环境解释[J]. 沉积学报,2005,23(3):514—522.
- [18] MCKEE B A, NITTRouer C A, DEMASTER D J. Concepts of sediment deposition and accumulation applied to the continental shelf near the mouth of the Yangtze River[J]. Geology, 1983, 11: 631—633.
- [19] HUH C A, SU C C. Sedimentation dynamics in the East China Sea elucidated from ^{210}Pb , ^{137}Cs and $^{239, 240}\text{Pu}$ [J]. Marine Geology, 1999, 160: 183—196.
- [20] 夏小明,杨辉,李炎,等. 长江口—杭州湾毗连海区的现代沉积速率[J]. 沉积学报,2004,22(1):130—135.
- [21] MCMANUS J. Grain size determination and interpretation[M]//TUCKER M, ed. Techniques in Sedimentology. Oxford: Black-well, 1988: 63—85.
- [22] MANDELBRROT B B. How long is the coast of Britain statistical self-similarity and fractional dimension[J]. Science, 1967, 156(3755): 636—638.
- [23] ANDREAS K, ELLEN P, THOMAS U. The use of fine sediment fractal dimensions and color to determine sediment sources in a small watershed[J]. Catena, 2003, 53(2003): 165—179.
- [24] ORFORD J D, WHALLEY W B. The use of the fractal dimension to quantify the morphology of irregular shaped particles[J]. Sedimen-

- tology, 1983, 30:655—668.
- [25] GONZALEZ E A, HILL P S. A method of estimating the flocculation time of monodispersed sediment suspensions[J]. *Deep-Sea Research (I)*, 1998, 45: 1931—1954.
- [26] GUO Guang-meng. Re-scaled analysis of stable carbon isotopes, Hongzuisi section, Loess Plateau of China[J]. *Quaternary International*, 2003, 108:63—66.
- [27] 侯春梅,刘小伟,李明,等. 甘肃黄土的粒度分维特征及意义[J]. *地质科学*, 2005, 40(4): 539—546.
- [28] 柏春广,王建. 一种新的粒度指标:沉积物粒度分维值及其环境意义[J]. *沉积学报*, 2003, 21(2): 234—239.
- [29] 朱诚,于世永,刘晓宁. 分形方法在庐山第四纪沉积环境研究中的应用[J]. *地理研究*, 1996, 15(3): 64—69.
- [30] 易顺民,孙云志. 泥石流的分形特征及其意义[J]. *地理科学*, 1997, 17(1): 24—31.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] PRINS M A, POSTMA G, WELTIJE G J. Controls on terrigenous sediment supply to the Arabian Sea during the late Quaternary: the Makran continental slope[J]. *Marine Geology*, 2000, 169: 351—371.
- [34] BOULAY S, COLIN C, TRENTESAUX A, et al. Mineralogy and sedimentology of Pleistocene sediment in the South China Sea (ODP Site 1144)[J]. *Proceedings of Ocean Program: Scientific Results*, 2003, 184: 1—21.
- [35] SUN You-bin, GAO Shu, LI Jun. Preliminary analysis of grain-size populations with environmentally sensitive terrigenous components in marginal sea setting[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(2): 184—187.
- [36] 赖内克,辛格. 陆源碎屑沉积环境[M]. 陈昌明,李继亮译. 北京:石油工业出版社,1979: 111—128.
- [37] 苏纪兰. 中国近海的环流动力机制研究[J]. *海洋学报*, 2001, 23(4): 1—16.
- [38] 吴月英,彭立功. 长江入海悬移质泥沙粒度与流量、含沙量的关系[J]. *泥沙研究*, 2005, 1: 26—32.
- [39] STERNBERG R W, LARSEN L H, MIAO Y T. Tidally driven sediment transport on the East China Sea continental shelf[J]. *Continental Shelf Research*, 1985, 4(1): 105—120.
- [40] 王宝永. 东海沿岸现代沉积的动力特征[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1983, 3(1): 37—46.
- [41] 谷国传. 长江口外水域悬沙分布特征[J]. *东海海洋*, 1986, 4(1): 12—20.
- [42] GRABER H C, BEARDSLEY R C, GRANT W D. Storm-generated surface waves and sediment resuspension in the East China and Yellow Seas[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1989, 19: 1039—1059.
- [43] 胡方西,胡辉,谷国传. 长江口锋面研究[M]. 上海:华东师范大学出版社,2002: 110—130.
- [44] 郑铁民,赵一阳,李凡,等. 南黄海夏季海水中悬浮体的研究[J]. *海洋学报*, 1990, 12(6): 749—757.
- [45] 恽才兴. 长江河口近期演变基本规律[M]. 北京:海洋出版社,2004: 251—273.
- [46] YANG Shi-lun, ZHAO Qing-ying, 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: 56—71.
- [47] GAO Jian-hua, WANG Ya-ping, PAN Shao-ming, et al. Distribution of organic carbon in sediments and its influences on adjacent sea area in turbidity maximum of Changjiang Estuary[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2008 (in press).

The vertical sedimentary structure and its implications for environmental evolutions in the Changjiang Estuary in China

ZHANG Rui^{1,2}, WANG Ya-ping^{1,2}, GAO Jian-hua^{1,2}, PAN Shao-ming^{1,2}, ZHANG Zhi-lin³

(1. Key Laboratory of Education of Ministry for Coastal and Island Development, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 2. Department of Coastal Ocean Science, School of Geographical and Marine Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 3. Changjiang River Estuary Inversity Bureau of Hydrology and Water Conservancy, Changjiang Water Resource Commission, Ministry of Water Resources, Shanghai 200136, China)

Abstract: The sediment grain-size and its fractal dimension of five cores collected in the Changjiang Estuary are analyzed, and then the environmental susceptible populations of grain-size are extracted. It is shown that the sediment cores can be divided into two parts according to the vertical sedimentary structure. The top part (i. e. , 0~12 cm) is the active layer which has been reconstructed frequently by dynamic environ-

ments. The lower part from top of 12 cm to bottom, is characterized by coarse-fine sediment cycles. In addition, sediment is mainly composed of two susceptible populations of grain-size with 6.0~7.2 and 40.7~57.5 μm respectively, in which the former (i. e. , 6.0~7.2 μm) is similar to grain-size of suspended sediment from the Changjiang River and the latter (i. e. , 40.7~57.5 μm) is associated with the effects of storm surges, waves and tides, dams and irrigation of river basin. The seasonal variations of suspended matter (e. g. , sediment supply quantity and grain size) from the Changjiang River may play an important role which contributes to the grain-size distribution in this area. The sediment has fractal features at 0.9~20.3 μm interval that is consistent with the changes of sediment grain-size index. Consequently, the fractal dimension of sediment grain-size can be an important potential index containing information on the environmental evolution.

Key words: grain size; sedimentary environment; fractal dimension; grain-size susceptible populations; Changjiang Estuary in China