文章编号:1000-0550(2012)01-0148-10

近百年来长江口外泥质区高分辨率的沉积记录 及影响因素探讨

王 昕¹²³ 石学法² 刘升发² 王国庆⁴ 乔淑卿² 朱爱美² 高晶晶²

(1.中国科学院海洋研究所 海洋地质与环境重点实验室 山东青岛 266071;
2.海洋沉积与环境地质国家海洋局重点实验室 国家海洋局第一海洋研究所 山东青岛 266061;
3.中国科学院研究生院 北京 100049; 4.中国地质大学 地球科学学院 武汉 430074)

摘 要 通过对长江口外泥质区 ZM11 柱样的粒度和常微量元素分析,结合²¹⁰ Pb 年代测定,探讨了研究区近百年来 的沉积历史及影响因素。研究表明 ZM11 柱样1950 年以来平均沉积速率约为2.5 cm/a; 受长江深水航道建设以及水 下三角洲前缘侵蚀的影响,近十年来 ZM11 柱样沉积速率仍然保持3 cm/a 以上; 46 cm 处 0.3 cm 厚的细砂层记录了 1998 年特大洪水事件,1998—1999 年前后 ZM11 柱样沉积厚度高达 20 cm。ZM11 柱样沉积物物质成分较为均一,以 粉砂为主; 近百年来粒度变化与大通站泥沙粒径变化趋势不尽相同,可能主要受水下三角洲沉积环境控制。元素分 析结果表明 ZM11 柱样沉积物物源比较稳定,基本来自长江物质输入,影响岩芯沉积物元素含量变化的因素主要有沉 积物粒度组成、长江碎屑物质输入、生物作用以及人类活动。

关键词 粒度 元素 长江 输沙 人类活动

第一作者简介 王昕 女 1982 年出生 博士研究生 海洋沉积学 E-mail: wangxin@fio.org.cn 通讯作者 石学法 E-mail: xfshi@fio.org.cn 中图分类号 P512.2 文献标识码 A

0 引言

河口三角洲是陆地和海洋间物质能量交换最强 烈的地带,这里发生着复杂的物理、化学、生物、地质 作用,是进行陆海相互作用研究的理想区域,已经成 为当今海洋地质科学的前沿领域之一^[1,2]。长江流 域面积达1.80×10⁶km²,径流和输沙分别位居世界 第五位和第四位,年均径流量9280亿m³,多年平均 输沙约4.0亿t/a(1951—2008年),在其入海口处形 成了规模巨大的三角洲沉积体系^[3,4]。长江口泥质 区位于长江水下三角洲前缘斜坡的下端^[5,7],其物源 主要是长江入海泥沙^[3,5,8,9],是长江泥沙的堆积中心 之一,沉积速率较高可达5.4 cm/a^[10,11],且沉积的连 续性较好。因此,通过对长江口三角洲泥质区沉积记 录的研究,可以较连续的揭示三角洲沉积作用过程和 人类活动对河口三角洲的影响。

本文通过对长江口泥质区 ZM11 柱样高密度的 粒度和常微量元素分析 探讨了泥质区近百年来高分 辨率的粒度和地球化学沉积记录与长江流域输水、输 沙以及人类活动(大坝建设、水土保持、工业发展等) 的关系。

1 材料和方法

研究所用 ZM11 柱样为国家海洋局第一海洋研 究所 2007 年执行"我国近海海洋综合调查与评价专 项课题"过程中在长江口外泥质区获取的重力柱状 样,水深 25 m,柱长 3.08 m,站位分布如图 1 所示。 对柱状样进行磁化率测试后从中间剖开,进行颜色反 射率测定和详细描述后,以 2 cm 等间隔取样,共分析 了 154 个粒度和常量元素样品及 26 个²¹⁰ Pb 样品。

岩芯的沉积速率测定采用²¹⁰ Pb 法和¹³⁷ CS 法 ,测 试工作在中国科学院地理与湖泊研究所进行 ,分析仪 器为美国 EG & G Ortec 公司生产的由高纯锗井型探 测器(Ortec HPCe GWL) 与 Ortec 919 型谱控制器和 IBM 微机构成的 16k 道多道分析器所组成的 γ 谱分 析系统。

粒度室内分析流程如下: 取适量样品置于烧杯 中,加入15 ml 浓度为3%的双氧水浸泡24 h,去除有

收稿日期: 2010-11-04; 收修改稿日期: 2011-01-10



图 1 ZM11 站位分布图 Fig. 1 Location of Core ZM11

机质; 然后加入 5 ml 3 mol/l 的盐酸浸泡 24 h 去除沉 积物中的碳酸盐; 其后将样品进行反复的离心、洗盐 直至溶液呈中性为止。处理好后的样品经超声波振 荡分散后,再上机测试。粒度分析所用仪器为英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer 2000 型激光粒度仪, 测量范围为 0.02 ~ 2 000 μm, 重复测量的相对误差 小于 3%。粒度分析在国家海洋局海洋沉积与环境 地质重点实验室测试中心完成。

常量元素分析精确称量 0.05 g 样品 ,加 1.5 mL HNO₃ 和 1.5 mL HF 在 190 ~ 200 °C 分解 48 h ,冷却 后蒸干 ,加入 1 ml HNO₃ 蒸至湿盐状 ,加入 3 ml 体积 分数为 50% 的 HNO₃ 和 1 mlRh(500 × 10⁻⁹) 内标溶 液 在 150°C 的烘箱中保持 24 h ,冷却后定容至 50 g , 从中取出 10 g 再次定容至 20 g ,待进行微量元素测 试 ,其余样品进行常量元素测试。常微量元素测试所 用仪器分别为美国 Thermo Fisher Scientific 公司生产 的 iCAP6300 型 ICP—AES 和 ICP—MS ,随机选取 10% 平行样进行测试 ,并采用 GSD—9 国际标准样进 行校正 相对误差小于 0.5%。分析工作在国家海洋 局海洋沉积与环境地质实验室测试中心进行。

2 结果与讨论

2.1 年代框架的建立

ZM11 柱样²¹⁰ Pb 和¹³⁷ Cs 测试结果如图 2。一般 将岩芯中初次出现¹³⁷ Cs 的层位对应于 1954 年前 后,¹³⁷Cs的最大蓄积峰对应于1964年左右(60年代 初大量的核试验)^[12,13]。根据前人研究,长江口沉积 物还存在 1959 年次级蓄积峰^[14]。因此如果将 ZM11 柱样 49 cm、25 cm 和 9 cm 分别对应干 1954 年、1959 年和 1964 年的话,可以计算出 1954—1959 年间的平 均沉积速率为约 4.8 cm/a, 1959—1964 年为约 3.2 cm/a 而 1964 年至今的平均沉积速率仅为 0.21 cm/ a(图 2d)。冬季长江悬沙在长江冲淡水和浙闽沿岸 流的携带下向浙闽东海内陆架泥质区输运[15,16],长 江口外泥质区刚好位于长江物质向南输运的必经之 路上。并且 ,122.5°~123°E 是长江冲淡水和陆架海 水交汇的锋面所在,絮凝作用强烈[17],长江悬沙向东 扩散很少越过该界限 基本被限制在该界限以西的长 江口外泥质区。根据沈焕庭[18]研究成果,1953— 1993年间长江入海泥沙大约有40%左右在杭州湾及

其近海沉积,包括了 ZM11 柱样所处的长江口外泥质 区。1993 年以来,长江口外泥质区总体上也表现为 淤积,尽管 2000—2004 年该区表现一定的侵蚀^[19], 但该阶段的侵蚀不足以使该区 1964 年以来平均沉积 速率为 0.21 cm/a。另外,众所周知 20 世纪 50—60 年代是长江输沙的高值期 0.21 cm/a 的沉积速率与 这一事实相悖,因此本文舍弃¹³⁷ Cs 数据而采用²¹⁰ Pb 年龄模式。

²¹⁰Pb 垂直分布表明 0 ~ 9 cm 的表层沉积物略有 混合 9 ~ 139 cm 为²¹⁰Pb 衰减层(图 2a b) 利用该段 计算所得平均沉积速率为 2.5 cm/a 相关性为0.87, 与前人在长江水下三角洲地区的测试结果较为吻 合^[20~22]。因而本文采用²¹⁰Pb 测试结果建立 ZM11 柱 样的年代地层。按照平均沉积速率大致推算得 140 cm 深度处大致对应于 1950 年左右。 2.2 ZM11 岩性和沉积物粒度分布特征

ZM11 柱样整个岩芯的岩性较为均一,以黄褐色 黏土质粉砂为主。根据粒度分析结果,本柱样自下而 上分为3段(图3)。

Ⅲ段:308~140 cm(1950年之前),沉积物质软, 强粘性,含水量中等28.1%~32.0%左右,大量粉砂 夹层,偶见贝壳碎片和虫柱样,平均粒径总体上自下 而上呈增高趋势,由接近底部的7.5 φ增加到150 cm 处6 φ,而后略有减小;黏土含量呈现降低趋势,平均 含量由30%以上降到20%左右;粉砂含量变化趋势 不明显在75%~67%之间波动,砂含量略微增加平 均由1%增加到4%,分选逐渐变差。

II 段: 140~46 cm(1950—1998 年),沉积物质 软,含水量中等,31.0%~34.1%,强粘性,见少量贝 壳和零星虫柱样构造,偶见粉砂夹层,砂的平均含量



表1 ZM11 柱样沉积物元素含量与长江、黄河沉积物元素含量比较

(单位:常量元素为%;微量元素为 μg/g)

Table 1 Elements in Core ZM11 sediments , and sediments from Changjiang and Huanghe

(Unit: % for major elements and $\mu g/g$ for trace elements)								
	Al_2O_3	$\mathrm{Fe}_2\mathrm{O}_3$	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	CaO	Sr	Ba
长江	11.6	5.5	2.2	2.9	1.5	3.1	134.5	461.2
黄河	9.9	3.4	2	1.8	2.3	3.9	186.6	663.2
ZM11	$12.2 \sim 17.0$	$5.0 \sim 7.0$	2.4~3.3	2.4~3.1	$1.8 \sim 2.4$	3.8~4.7	134 ~168	$388 \sim 482$
	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	V	
长江	15.1	78	47.6	40.9	50.5	116.2	140.5	
黄河	10.98	64.77	17.8	26.71	29.49	60.33	108.9	
ZM11	$14.1 \sim 20.0$	70.7~95.8	$22.2 \sim 43.7$	35~50.4	3.8~49.3	73.1~126.8	91.3~134.9	

* 注:黄河、长江元素含量来杨守业和李从先,1999;



图 3 ZM11 柱样²¹⁰Pb 测年、岩性与粒度参数的变化 Fig. 3 Lithology, chronology and grain-size parameter variations of the Core ZM11

达到整根岩芯的最大值,基本在5%以上,最大可达 24.4%,大致由90 cm向上砂平均含量呈现一个波动 减少的趋势,顶部降到5%以下,粉砂含量变化趋势 与之相反,呈现波动增加趋势,大致由93 cm处的~ 61%增加为50 cm处的~78%,沉积物粒度平均粒径 波动幅度较大,分选较差(图3)。

Ⅰ段:46~0 cm(1998—2007 年),沉积物半流
 动一质软,强粘性,含水量较高(36.2%~42.6%),
 自下而上逐渐增加,底部有0.3 cm 厚细粉砂夹层。

总体上砂含量较之前明显减少,总体低于5%,最低达1%左右 黏土和粉砂含量相对之前增加,分选系数较50 cm 以下明显降低。46 cm 处粉砂含量由77.4%降至43 cm 处的70.3%,而黏土含量在45 cm 处突然大幅增加,由18.5%骤增到43 cm 处的28.6%。分选系数也由1.8以上降为40 cm 处的1.6,且之后保持1.6~1.8范围内。

ZM11 岩芯常微量元素分布特征
 ZM11 柱样常微量元素含量变化如表 1,长江、黄

河沉积物中常微量元素含量一并在表中列出。CaO、 Na₂O 元素含量跟黄河沉积物的元素含量较为接近, 其他元素均与长江沉积物的元素含量^[23]较为接近。

对所分析的 19 种常微量元素进行了 R 型因子 分析 结果表明前3个因子累计方差贡献为86.14% (表2) 基本上能够代表整个岩芯沉积物中元素含量 的变化。第一因子 F₁ 的方差贡献为 63.796%,是影 响岩芯沉积物元素变化的主要因素。由因子载荷矩 阵(表 2) 可知,因子 F_1 的正载荷主要为 Al_2O_3 、 Fe_2 O_3 , $K_2 O$, MgO, MnO, TiO_2 , $P_2 O_5$, Ba, Cu, Zn, Co, Cr, Ni、V,负载荷为SiO₂。SiO₂趋于赋存在粗粒沉积物 中 ,Al₂O₃、Fe₂O₃、MgO、Cu、Zn、Co、Cr、Ni、V 等主要赋 存于细粒陆源碎屑和黏土矿物中 具有明显的亲黏土 性^[24] 因此可以认为因子 F₁ 代表粒度和陆源输入的 共同影响。主因子 F_2 的方差贡献为 16.190% ,仅约 为因子 F_1 贡献的 1/4。因子 F_2 的正载荷主要是 SiO₂、CaO、Na₂O和 Sr 元素,其中 Sr 的因子载荷达 0.95以上,是因子 F, 的主要特征元素。据其他学者 研究^[24 25], Ca和 Sr除了受陆源物质影响之外,还可 能会受到生物沉积的影响。因此,因子 F2 可能代表 粒度和沉积过程中生物作用对元素分布的影响。因

表 2 ZM11 柱样沉积物元素含量的因子载荷矩阵 (经过方差极大旋转)

Table 2	Factor	loading	matrix	of	element	contents
of core	ZM11 se	ediments	s(after	vai	imax ro	tation)

公因子	F_1	F_2	F ₃
SiO_2	-0.600	0.692	-0.162
Al_2O_3	0.936	-0.266	-0.119
CaO	0.271	0.812	0.049
$\mathrm{Fe}_2\mathrm{O}_3$	0.945	-0.294	-0.086
K2 0	0.913	-0.173	-0.200
MgO	0.974	0.052	0.035
MnO	0.816	0.071	0.408
Na ₂ O	0.454	0.687	0.213
P_2O_5	0.754	0.270	-0.315
TiO_2	0.866	0.189	-0.314
Ba	0.894	0.236	-0.247
Со	0.918	0.048	0.046
Cr	0.958	-0.036	-0.098
Cu	0.847	0.091	0.254
Ni	0.882	-0.279	-0.019
Pb	0.499	0.003	0.616
Sr	0.174	0.956	-0.136
V	0.926	-0.282	-0.187
Zn	0.869	0.154	0.314
方差贡献/%	63.796	16.190	6.156

子 *F*₃ 的正载荷主要为 Pb ,对 Mn、Zn、Cu 有一定的影响 ,无明显的负载荷。Pb 在沉积过程中可能受到陆 源物质和人为污染的双重影响 ,因子分析的结果也表 明 Pb 还受因子 *F*₁ 的较大影响。因此 ,可以认为 ,因 子 *F*₃ 很可能主要代表人为污染的影响。由此可见 , 影响岩芯沉积物元素含量变化的因素主要包括沉积 物粒度、长江碎屑物质输入、生物作用以及人为污染。 其中粒度和陆源物质供应是主要的影响因素 ,几乎控 制着所有元素含量的变化。

为去除粒度变化对元素含量的影响 將 ZM11 柱 样微量元素含量进行了归一化处理(图4)。

常微量元素垂向整体变化趋势不明显(图4),与 粒度参数变化趋势相似(图3)相邻层位的含量变化 较为剧烈 波动幅度较大。308~140 cm ,SiO2、CaO、 Fe₂O₃、MnO、TiO₂、Cu、Pb、Ni、Sr、Ba 平均含量(归一 化后)分别为4.0、0.3、0.4、0.0065、0.06、2.3、1.6、 2.8、10、30,无明显变化趋势,MgO(0.18~0.19)、Na, O(0.12~0.15) Zn(5.5~6.5) Cr(5.4~5.7) Co (1~1.15)、V(7.6~7.9) 呈现微弱的增加趋势,但增 幅较小 总体上所有常微量元素的含量变化不剧烈, 还是落在长江物源的元素特征范围。140~46 cm, SiO_2 , $CaO_3Fe_2O_3$, $MnO_3Na_2O_3P_2O_5$, TiO_2 , $Pb_3Ni_3Cr_3$ Sr、Ba等元素平均含量与下段相当,亦无明显变化, MgO、Cu、Zn、Co等元素呈现微弱增加趋势,变幅分别 为 0.19~0.195、2~2.35、6.5~7.5、1.15~1.2。 其 中,大致在70~50 cm 处 Pb(~2.5)、Zn(7.5~8)、 Co(1.2~1.25)、Cu(2.4~2.6)含量基本达到整个岩 芯的最高值。大约 46 cm 开始,除了 MnO 之外的其 他所有常量元素以及微量元素中的 Sr、Ba 均出现减 小趋势,在大致35 cm 处出现最低值,向上又表现为 减小趋势,微量元素中的 Pb、Zn、Co、Cu 仍表现为较 高水平,分别为2~3、7.3~7.6、1.15~1.25、2.4~ 2.6.

2.4 ZM11 岩芯粒度和常微量元素影响因素探讨

因子分析结果(表 2)表明沉积物中 CaO、Na₂O 含量除了受到粒度影响外 还受沉积过程中的生物作 用影响 ,ZM11 柱样中 CaO、Na₂O 元素含量偏高(表 1) 接近黄河来源的沉积物元素含量 ,主要受到生物 作用影响 ,其他元素均与长江沉积物的元素含量^[23] 较为接近 因此断定 ZM11 柱样沉积物主要来自长江 物质输入。



Fig. 4 Vertical distribution of trace elements in Core ZM11 (after normalized by Al: trace elements × 10⁴ / Al)

影响长江口沉积物粒度的主要有物源、来水来沙 和水动力环境。长江口泥质区的沉积物主要是长江 入海物质^[15],元素分析结果表明 ZM11 柱样沉积物 主要来自长江入海物质沉积,其物源没有发生大的变 化,因此对于 ZM11 柱样物源对粒度的影响基本可以 忽略。泥质区受径流、潮汐、波浪等各种水动力条件 影响,水动力条件的年际、年内甚至更短时间尺度的 波动可能使得沉积物粒度相应地发生明显波动,在近 百年来这种较长时间尺度上总体保持稳定,对沉积物 粒度的变化趋势似乎贡献不大;因此长时间尺度的沉 积物粒度的变化可能更大程度上是对泥质区来水来 沙的反映。

²¹⁰Pb 测试结果表明 ZM11 柱样 1950 年以来平均 沉积速率为 2.5 cm/a,本文粒度和常微量元素分析 间距为 2 cm,两者的波动可以反映该区沉积环境的 年际变化 在沉积较为连续的时间段里甚至可以反映 年内环境的复杂波动。由图 3 可以看出整个 ZM11 柱样沉积物粒度变幅较大,变幅最大可达 2φ(5.5φ ~7.5φ),尤其是 200 cm 以上层位(图 3),表明泥质 区的各种动力条件,如径流、潮流、波浪等,年际、年内 的变化较为复杂。

140 cm 以下层位(1950 年之前),平均粒径自下 而上由 7.5φ 增加到 6φ,砂含量由 1% 增加到 4%,分 选逐渐变差(图 3)。1870 年以来长江泥沙入海主要 河道逐渐的南偏^[21]引起的泥质区来沙情况变化可能 是导致 1950 年前沉积物粒度变粗的主要原因,长江 主泓由北向南的摆动偏转为泥质区带来了更多粗粒 级的泥沙沉积。同时期微量元素 Zn、Co、Cr、V 含量 略微的增加(归一化后),可能是对 20 世纪初到 20 世纪中 50 年间整个长江流域输沙逐渐增加^[26]的反 映。长江流域火成岩分布广泛,尤其在中上游及下游 地区,Fe、Cu、Pb、Zn、Nb、Mo、Be、REE 等矿床广泛发 育,大多数过渡金属元素(如铁族元素 Fe、Mn、Ti、V、 Cr、Co、Ni 及亲铜元素 Cu、Pb、Zn 等)组成具有相对 较高的背景值^[23],流域侵蚀的增强使更多具有高元 素背景值的长江物质被侵蚀输入到河口地区。

46 cm 以上层位的沉积物呈半流动状,含水量较 下层沉积物的含水量要高 2.1% ~11.6%,底部有 0.3 cm厚细粉砂夹层,表明底部发生侵蚀,该处发生 一次事件沉积,上部 46 cm 为近年来形成的相对连续 的沉积。沉积物粒度和常微量元素的含量也均在 45 ~46 cm 处开始发生较大变化,平均粒径 Mz 由 45 cm 处的 6.3 ϕ 增加到 7.2 ϕ ,分选变好,由 1.72 降至1.6, 粉砂含量由 77.4% 降至 43 cm 处的 70.3%, 而黏土 含量由 18.5% 骤增到 43 cm 处的 28.6%。推测 ZM11 岩芯 46~45 cm 附近一系列的突变可能受到了 1998年1月开工的长江深水航道的建设和同年长江 流域大洪水的共同影响。航道开挖产生的大量泥沙 在长江冲淡水和沿岸流的作用下被带到10m等深线 以外的地区进行沉积 较粗颗粒首先在靠近航道的水 下浅水区沉积 而分选较好的、较细颗粒沉积被带到 更远的泥质区沉积 同年发生的长江特大洪水使这一 过程快速加剧 短时间内在泥质区形成较厚沉积。因 子分析的结果(表2)表明 Pb 跟人类活动影响比较密 切 长江三角洲地区 Pb 等重金属元素在地层中的富 集主要归因于 1978 年改革开放以来经济快速发展引 起的工业污染^[27 28], 2000 年前后针对 Pb 污染问题 实施了一系列环保政策^[29,30],1998年国务院办公厅 颁布了关于限期停止生产销售使用车用含铅汽油的 通知^[29 31],1999年电子行业也实行无铅一环保运动 (http://www.pcbtech.net/view/hot/0203I02007/730. html) ,由图 4 可以看出大致 75~27 cm 间 Pb 元素含 量为整个 ZM11 岩芯的最高值,平均为 2.4,随后在 27 cm处急剧降为 1.2 因此认为 27~29 cm 处 Pb 含 量的急剧降低跟 2000 年前后环保政策的实施有关, 将 27~29 cm 处大致对应于 1999 年或者 2000 年的 话,1998—1999年前后ZM11柱样保存下来的沉积厚 度达 20 cm 厚, 1998-2000 年间沉积速率高达 9.5 cm/a 27 cm 以上为 2000 年以来沉积 ,沉积速率 为约3.9 cm/a 1998 年之前的沉积速率为约2.0 cm/ a(图2e)。

研究表明长江入海输沙(大通站)由 2000 年前 的 3.52×10⁶ ta⁻¹降为 2001—2008 年的 2.61×10⁶ t a^{-1[32]} 2003 年建成的三峡大坝每年截留 1.72×10⁶t 泥沙 输入到整个长江水下三角洲地区的泥沙在逐年 减少^[33~36] ,但是 ZM11 柱样 2000 年以来的沉积速率 仍然保持在 3 cm/a 以上。推测 ZM11 柱样 2000 年以 来沉积的泥沙主要来自于长江深水航道开挖和 10~ 15 m 等深线附近及其以浅的水下三角洲前缘的侵 蚀。2000 年长江深水航道一期工程使航道由 7 m 增 加为 8.5 m ,宽度增至 300 m 2004 年以及 2006 年的 二期和三期建设 ,又分别使航道加深到 10 m 和 12.5 m ,宽度增加为 350~400 m ,如此巨大的工程量产生 的泥沙完全有可能使 ZM11 柱样 2000 年以来仍然维 持较高沉积速率。此外 ,对近 10 年来长江水下三角 洲冲淤变化的研究表明 2000~2007 年 5 m 等深线以

浅区域表现为堆积 而 10m 等深线附近表现为侵蚀, 在长江入海泥沙量急剧减小的情况下10m 等深线以 深的地区没有表现为明显的侵蚀^[19,37]。因此我们可 以推断 2000 年后骤减的长江入海泥沙可能主要堆 积在 5 m 等深线以浅的水下三角洲前缘,由于缺乏足 够的泥沙供应 10 m 等深线附近表现为侵蚀 侵蚀泥 沙被带到更深的水下三角洲地区,导致 ZM11 柱样 2000年以来沉积速率没有显著的降低。对长江水下 三角洲表层沉积物的研究表明^[37,38],三角洲前缘的 沉积物相对较粗,为细砂、粉砂质砂,ZM11所在的前 三角洲地区则以粉砂质黏土为主,粒度分析表明 2000 年以来 ZM11 柱样沉积物粒度出现粗化 认为是 水下三角洲前缘侵蚀的反映,可能对由于三峡大坝建 设引起的入海输沙量减少、下游河床侵蚀导致的泥沙 粒径变粗反映不敏感。1987年以来随着长江入海输 沙的急剧下降 通过大通站的悬沙粒径呈明显变粗趋 势^[39] 而 ZM11 柱样 46 cm 以下(1998 年以前) 段沉 积物粒度自下而上却没有明显变粗趋势,由此可见 ZM11 柱样沉积物粒度变化与长江入海泥沙(大通 站) 粒度变化并不一致 更多受到水下三角洲沉积环 境自身复杂性的影响,如水动力条件的多变、水下不 同部位的侵蚀与堆积情况等。

3 结论

(1) ZM11 柱样 1950 年以来平均沉积速率为 2.5 cm/a,受长江特大洪水和长江深水航道开挖共同 影响 ZM11 柱样 1998—1999 年沉积厚度达 20 cm,长 江深水航道二期和三期开挖产生的大量泥沙使 ZM11 柱样近十年以来平均沉积速率仍保持 3 cm/a 以上。

(2) ZM11 柱样沉积物粒度对长江入海泥沙(大通站) 粒径的变化反映不敏感,1950 年以前受长江主河道逐渐南偏的影响自下而上逐渐变粗,2000 年以来接受了10 m 等深线附近及其以浅长江三角洲前缘的大量泥沙沉积,沉积物粒度也出现明显粗化。

(3) 元素分析结果表明 ZM11 柱样沉积物主要 来源于长江泥沙,物源稳定。因子分析结果表明,影 响岩芯沉积物元素含量变化的因素可以分为:沉积物 粒度、陆源物质输入、生物作用以及人为污染影响。 其中粒度和陆源物质供应是主要的影响因素,几乎控 制着所有元素含量的变化。1950 年之前微量元素 Zn、Co、Cr、V 含量略微的增加,是对 20 世纪初到 20 世纪 50 年间整个长江流域输沙逐渐增加的反映。 2000 年前后 Pb 含量的急剧降低,主要受到此时一系 列无铅环保运动的影响。

致谢 上海石油局第一海洋调查大队"勘 407" 船全体船员协助进行了海上取样工作,审稿人提出了 宝贵的意见,作者在此谨表谢忱。

参考文献(References)

- Hori K , Saito Y , Zhao Q H , et al. Sedimentary facies and Holocene progradation rates of the Changjiang (Yangtze) delta , China [J]. Geomorphology , 2001 , 41: 233-248
- 2 赵华云,戴仕宝,杨世伦,等.流域人类活动对三角洲演变影响研究进展[J].海洋科学,2007,31 (12): 83-87 [Zhao Huayun, Dai Shibao, Yang Shilun, et al. Progress in studing on the delta evolution influenced by the human activity [J]. Marine Sciences, 2007,31 (12): 83-87]
- 3 Milliman J D , Meade R H. World-wide delivery of river sediment to the oceans [J]. The Journal of Geology , 1983 , 91(1): 1-21
- 4 Yang Z S , Wang H J , Saito Y , et al. Dam impacts on the Changjiang (Yangtze) River sediment discharge to the sea: The past 55 years and after the Three Gorges Dam [J]. Water Resources Research ,2006 ,42 (4): W04407
- 5 Milliman J D , Sheng H T , Yang Z S. Transport and deposition of river sediment in the Changjiang estuary and adjacent continental shelf [J]. Continental Shelf Research , 1985 , 4 (1-2): 37-45
- 6 贺松林,孙介民.长江河口最大浑浊带的悬沙输移特征[J].海洋 与湖沼,1996,27(1):60-67 [He Songlin, Sun Jiemin. Characteristics of suspended sediment transport in the turbidity maximum of the Changjiang River Estuary [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1996,27 (1):60-67]
- 7 Xie Q C , Zhang L F , Zhou F G , et al. Features and transportation of suspended matter over the continental shelf off the Changjiang Estuary [C] // Renmei'e, ed. Proceeding of International Symposium on the Sedimentation on the Continental Shelf, with Special Reference to the East China Sea. Beijing: China Ocean Press, 1983: 400-412
- 8 杨作升.黄河、长江、珠江沉积物中黏土的矿物组合、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 [Yang Zhuosheng. Mineralogical assemblages and chemical characteristics of clays from sediments of the Yellow, Yangtze, Zhujiang river and their relationship to the climate environment in their sediment sources areas[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1988, 19(4): 336-346]
- 9 郭志刚,陈致林.东海陆架泥质区沉积有机质的物源分析[J].地 球化学,2001,30(5):416-424[Guo Zhigang, Chen Zhilin. Source of sedimentary organic matter in the mud areas of the East China Sea shelf[J]. Geochimica,2001,30(05):416-424]
- 10 秦蕴珊,郑铁民.东海大陆架沉积物分布特征的初步探讨[C]// 中国科学院海洋研究所海洋地质研究室编.黄东海地质.北京: 科学出版社,1982: 31-51 [Qin Yunshan, Zheng Tiemin. Preliminary study on sediment distribution in the inner shelf of the East China Sea[C]// Department of the Marine Geology of Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences. Geology of the Yellow Sea and the

East China Sea. Beijing: Science Press, 1982: 31-51]

- 11 金翔龙. 东海海洋地质[M]. 北京: 海洋出版社,1992[Jin Xianglong. Marine Geology of the East China Sea[M]. Beijing: Ocean Press,1992]
- 12 Ritchie J C , McHenry J R. A comparison of three methods for measuring recent rates of sediment accumulation [J]. Journal of the America Water Resources Association , 1985 , 21(1): 99–104
- 13 Walling D E , He Q. Use of fallout $^{137}\rm{Cs}$ in investigations of overbank sediment deposition on river floodplain [J]. Catena , 1997 , 29 (3) : 263–282
- 14 Schaffiner L C , Diaz R J , Olsen R C , et al. Faunal characteristics and sediment accumulation processes in the James River estuary , Virginia [J]. Estuarine , Coastal and Shelf Science , 1987 , 25: 211-226
- 15 杨作升,郭志刚,王兆祥,等. 黄东海陆架悬浮体及其向东部深 海区输送的宏观格局[J]. 海洋学报,1992,14(2): 81-90 [Yang Zuosheng, Guo Zhigang, Wang Zhaoxiang, et al. Suspended sediments on the Yellow and East China Sea Shelf and Macro-pattern of their being transported to the Eastern Deeper Sea [J]. Acta Oceanologica Sinnica, 1992,14(2): 81-90]
- 16 孙效功,方明,黄伟.黄东海陆架区悬浮体输运的时空变化规律 [J].海洋与湖沼,2000,31:581-587[Sun Xiaogong, Fang Ming, Huang Wei. Spatial and temporal variations in suspended particulate matter transport on the Yellow and East China Sea Shelf[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2000,31(6):81-587]
- 17 潘定安,胡方西,周月琴,等. 长江河口夏季的盐淡水混合[M] //陈吉余,沈焕庭,恽才兴,等编. 长江河口动力过程和地貌演 变. 上海: 上海技术出版社,1988 [Pan Ding'an,Hu Fangxi,Zhou Yueqin, et al. Mixing of salt water with fresh water on the Changjiang estuary in summer[M]//Chen Jiyu, Shen Huanting,Yun Caixing, et al. Processes of Dynamics and Geomorphology of the Changjiang Estuary. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers,1988]
- 18 沈焕庭,等. 长江河口物质通量[M]. 北京: 海洋出版社,2001
 [Shen Huanting, et al. Material Flux of the Changjiang Estuary [M].
 Beijing: China Ocean Press,2001]
- 19 Yang S L , Milliman J D , Li P , et al. 50 000 dams later: Erosion of the Yangtze River and its delta [J]. Global and Planetary Changes , 2010 , 75: 14-20
- 20 段凌云,王张华,李茂田,et al. 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 [Duan Lingyun, Wang Zhanghua, Li Maotian, et al. ²¹⁰ Pb distribution of the Changjiang Estuarine sediment and the implications to sedimentary environment [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2005, 23(3): 514-522]
- 21 杨作升,陈晓辉.百年来长江口泥质区高分辨率沉积粒度变化及 影响因素探讨[J].第四纪研究,2007,27(5):690-699[Yang Zuosheng, Chen Xiaohui. Centurial high resolution records of sediment grain-size variation in the mud area off the Changjiang Estuary and its influencial factors[J]. Quaternary Science, 2007,27(5): 690-699]
- 22 张瑞,潘少明,汪亚平, et al. 长江河口水下三角洲²¹⁰ Pb 分布特 征及其沉积速率[J]. 沉积学报,2009,27(4):704-713 [Zhang

Rui , Pan Shaoming , Wang Yaping , *et al.* Sedimentation rates and characteristics of radionuclide ²¹⁰Pb at the subaqueous delta in Changjiang Estuary [J]. Acta Sedimentologica Sinica , 2009 , 27(4): 704-713]

- 23 杨守业,李从先. 长江与黄河沉积物元素组成及地质背景[J]. 海洋地质与第四纪地质,1999,19(2): 19-26[Yang Shouye, Li Congxian. Characteristic element compositions of the Yangtze and the Yellow River sediments and their geological background [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 1999,19(2): 19-26]
- 24 赵一阳, 鄢明才. 中国浅海沉积物地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1994 [Zhao Yiyang and Yan Mingcai. Geochemistry of Sediments in Chinese Shallow Sea[M]. Beijing: Science Press, 1994]
- 25 Zhang J. Heavy metal compositions of suspended sediments in the Changjiang (Yangtze River) estuary: Significance of riverine transport to the ocean [J]. Continental Shelf Research , 1999 , 19(12): 1521– 1543
- 26 Yang S L , Shi Z , Zhao H Y , et al. Research Note: Effects of human activities on the Yangtze River suspended sediment flux into the estuary in the last century [J]. Hydrology and Earth System Sciences , 2004 , 8(6): 1210–1216
- 27 Lin S , Hsieh I. Influence of the Yangtze River and grain size on the spatial variations of heavy metals and organic carbon in the East China Sea continental shelf sediments [J]. Chemical Geology , 2002 , 182 (2-4): 377-394
- 28 陈松,廖文卓,潘皆再. 长江口重金属元素的固液界面过程— I. 沉积相中 Pb, Cu 和 Cd 的行为和沉积机理[J]. 海洋学报, 1984,6(2):114-120 [Chen Song, Liao Wenzhuo, Pan Jiezai. Processes occurring between the solid-liquid interface in Yangtze Estuary—— I. migration and depositional mechanisms of Pb, Cu and Cd in different sedimentary facies[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1984 *f* (2):114-120]
- 29 Hao Y C , Guo Z G , Yang Z S , et al. Tracking historical lead pollution in the coastal area adjacent to the Yangtze River Estuary using lead isotopic compositions [J]. Environmental Pollution , 2008 , 156 (3): 1325-1331
- 30 张宇. 电子产品无铅化技术研究[D]. 天津大学, 2005 [Zhang Yu, Lead-Free Technology on Electronic Product [D]. Tianjin University, 2005]
- 31 王婉,刘咸德,赵立蔚,等.用同位素方法评估天津市汽油无铅 化进程[J].中国环境科学,2003,23(6):627-630[Wang Wan, Liu Xiande, Zhao Liwei, et al. Assessment of the phase-out of leaded gasoline in Tianjin, China using isotope technique[J]. China Environmental Science, 2003,23(6):627-630]
- 32 Hu B Q , Yang Z S , Wang H J. Sedimentation in the Three Gorges Dam and the future trend of Changjiang (Yangtze River) sediment flux to the sea[J]. Hydrology and Earth System Sciences ,2009 ,13: 2253-2264
- 33 Wang H J , Yang Z S , Wang Y , et al. Reconstruction of sediment flux from the Changjiang (Yangtze River) to the sea since the 1860s[J]. Journal of Hydrology , 2008 , 349: 318-332
- 34 Xu K H , Milliman J D , Yang Z S , et al. Yangtze sediment decline

partly from Three Gorges Dam [J]. Eos , 2006. 87(19): 185-190

- 35 Zhang Q , Xu C Y , Becker S , et al. Sediment and runoff changes in the Yangtze River basin during past 50 years [J]. Journal of Hydrology , 2006 , 331(3-4) : 511-523
- 36 Yang S L , Zhao Q Y , 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(1-4): 56-71
- 37 李鹏,杨世伦,戴仕宝,等.近10年来长江口水下三角洲的冲淤 变化——兼论三峡工程蓄水的影响[J].地理学报,2007,62
 (7):707-716[Li Peng,Yang Shilun, Dai Shibao, *et al*. Accretion/ erosion of the subaqueous delta at the Yangtze estuary in recent 10

years [J]. Acta Geographica Sinica , 2007 , 62 (7): 707-716]

- 38 Chen Z Y , Saito Y , Kanai Y , et al. Late Quaternary evolution of the sub-aqueous Yangtze Delta , China: sedimentation , stratigraphy , palynology , and deformation [J]. Marine Geology , 2000 , 162: 423-441
- 39 何坚,潘少明,沙红良,等.长江大通站床沙粒径变化及其对流 域工程建设的响应分析[J].南京大学学报:自然科学版,2010, 46(3):349-357 [He Jian, Pan Shaoming, Sha Hongliang, et al. The analysis on the grain size variation of bed materials at Datong hydrological station and its response to the project constructions along the Yangtze River [J]. Journal of Nanjing University: Natural Sciences, 2010,46(3): 349-357]

High Resolution Sedimentary Record Within a Hundred Years on the Mud Area Near the Changjiang Estuary and Discussion of Its Impacting Factors

WANG Xin^{1 2 3} SHI Xue-fa² LIU Sheng-fa² WANG Guo-qing⁴

QIAO Shu-qing² ZHU Ai-mei² GAO Jing-jing²

(1. Key Laboratory of Marine Geology and Environment , Institute of Oceanology , Chinese Academy Sciences , Qingdao , Shandong 266071;

2. Key Laboratory of State Oceanic Administration for Marine Sedimentology & Environmental Geology,

First Institute of Oceanography , State Oceanic Administration , Qingdao , Shandong 266061;

3. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039;

4. Faculty of Earth Science, China University of Geosciences, Wuhan 430074)

Abstract: Based on the major and trace elements and grain-size analysis as well as the ²¹⁰Pb isotope data, the sedimentary history within a hundred year of the Core ZM11 was reconstructed and the impacting factors were discussed. It was shown that the sedimentation rate is about 2.5 cm/a starting from 1950. Because the sediment was dredged during the construction of the Twin Jetty-Groyne Complex in the North Passage of the South Channel and was eroded from delta front, the sedimentation rate of the Core ZM11 within the last ten years was above 3 cm/a, while the Changjiang sediment was declining during the same period. The thickness of sediment deposited during 1998-1999 was about 20 cm, possibly induced by the 1998 major flood event that is recognized by the 0.3 cm fine-sand layer at ~ 46 cm depth. The variation of the sediment grain size in Core ZM11, presumably controlled by the complexity of subaqueous delta, is not consistent with the sediment grain size variations of the Datong gauging station. The geochemical element analysis results showed that sediment of Core ZM11 mainly come from the Changjiang River. Grain size *µ*errigenous material input *µ*biological sedimentation and human activity are the major factors that resulted the element content variations of the Core ZM11.

Key words: grain size; element; Changjiang; suspended material supply; human activity