

文章编号: 1000-0550(2009) 04-0704-10

# 长江河口水下三角洲<sup>210</sup>Pb分布特征及其沉积速率<sup>①</sup>

张 瑞<sup>1,2</sup> 潘少明<sup>1,2</sup> 汪亚平<sup>1,2</sup> 高建华<sup>1,2</sup>

(1 南京大学海岸与海岛开发教育部重点实验室 南京 210093 2 南京大学海岸海洋科学系 南京 210093)

**摘 要** 通过对长江水下三角洲采集的十个沉积物柱状样中的放射性核素<sup>210</sup>Pb分析得知,长江水下三角洲表层<sup>210</sup>Pb放射性比度在 2.15~4.22 dpm·g<sup>-1</sup>之间,<sup>210</sup>Pb沉降通量在 1.50~11.21 dpm·cm<sup>-2</sup>yr<sup>-1</sup>之间,过剩<sup>210</sup>Pb总量在 >48.29~>361.68 dpm·cm<sup>-2</sup>之间;<sup>210</sup>Pb沉降通量以及过剩<sup>210</sup>Pb总量均高于理论值,这表明在沉积物中存在<sup>210</sup>Pb的净输入和聚集。由<sup>210</sup>Pb放射性比度剖面所反映的沉积速率可知长江水下三角洲泥质沉积区沉积速率介于 1.36~4.11 cm·yr<sup>-1</sup>之间;总体上呈现近岸沉积速率较低,沿 31°N 纬线向 20 m 等深线沉积速率升高的趋势,从 122°15'E 到 122°30'E 范围为长江水下三角洲的泥质沉积物堆积中心,其平均沉积速率为 3.51 cm·yr<sup>-1</sup>。

**关键词** 沉积速率 沉积通量 过剩<sup>210</sup>Pb总量 长江口 水下三角洲

**第一作者简介** 张瑞 男 1982年出生 博士研究生 海洋地质 E-mail: rzhang-838@163.com

**通讯作者** 潘少明 E-mail: spar@nju.edu.cn

**中图分类号** P512.2 P597 **文献标识码** A

## 0 引言

河口三角洲是流域侵蚀和环境污染物质输移入海后沉积的重要储存体,记载了流域环境变化的历史。确定沉积速率对揭示区域和全球环境变化、提取沉积记录的环境信息、了解整个流域侵蚀与入海泥沙沉积的关系等均具有重要意义。沉积速率是河口海岸沉积研究的一个重要方面,是指单位时间内沉积物形成的厚度。它能综合体现沉积过程的特征,是确定沉积环境的定量指标。长期平均的河口海岸区域的沉积速率反映了河口海岸地质历史的形成和发育,而短期的平均沉积速率可以反映本区域现代沉积动力以及水体与沉积物的交换过程<sup>[1]</sup>。入海沉积物的搬运和堆积可以使浅海物理环境发生显著变化,同时其搬运过程也是海岸环境演变的重要机制,这些变化既有自然因素,又有人为因素<sup>[2]</sup>。沉积物中赋存的放射性核素<sup>210</sup>Pb,它的半衰期为 22.3 年,是百年尺度内测定沉积速率的极好核素。<sup>210</sup>Pb测年法自 20 世纪 60 年代开始,已被广泛应用于海洋、湖泊、海岸、河口沉积速率的研究<sup>[3~9]</sup>,取得了很好的进展。通过沉积柱样中<sup>210</sup>Pb的测定,计算沉积速率,可以反演现代沉积过程,还可以得到沉积环境变化的信息。前人对于长江水下三角洲的现代沉积速率采用了多种方法进行

研究,包括河流输沙法<sup>[10,11]</sup>,历史海图对比法<sup>[12~15]</sup>,放射性同位素测量方法<sup>[15~18]</sup>。由于近二十年来长江入海泥沙量显著减少,水下三角洲的整体堆积速率已明显趋缓,已出现局部侵蚀现象<sup>[11,19]</sup>,因此关于长江入海泥沙通量变异引起的河口三角洲海岸侵蚀和地貌演化问题亟待研究。本文试图通过 2006 年 4 月在长江水下三角洲采集的十个沉积物柱状样的<sup>210</sup>Pb测定,分析长江水下三角洲泥质沉积区的<sup>210</sup>Pb的分布特征,为研究长江入海泥沙通量变异引起的河口三角洲海岸侵蚀和地貌演化问题提供基础数据。

## 1 研究区概况

长江是中国第一大河,全长 6 300 km,总流域面积达 1.94 × 10<sup>6</sup> km<sup>2</sup>,悬沙输运量巨大,以大通水文站为例,多年(1923~2004 年间共 62 年数据)平均径流量为 9.156 × 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>,多年(1951~2004 年间共 53 年数据)平均输沙量为 4.175 × 10<sup>8</sup> t<sup>[20]</sup>。长江巨量入海泥沙受到长江冲淡水的影响和台湾暖流的阻隔作用,基本滞留在 123°15'E 以西的内陆架,并主要向东南方向运移、沉积<sup>[16,21~24]</sup>。已有研究表明,长江入海泥沙在河口区由于沉积动力、地球化学、生物地球化学的作用下,大约有 40% 的泥沙沉积在 30°N 以北海域,形成长江水下三角洲前缘的泥质沉积区<sup>[16,21,25]</sup>。

①国家重点基础研究发展规划项目(编号:2002CB412401)和国家自然科学基金项目(批准号:40106009)联合资助。

收稿日期:2008-07-21;收修修改稿日期:2008-11-12

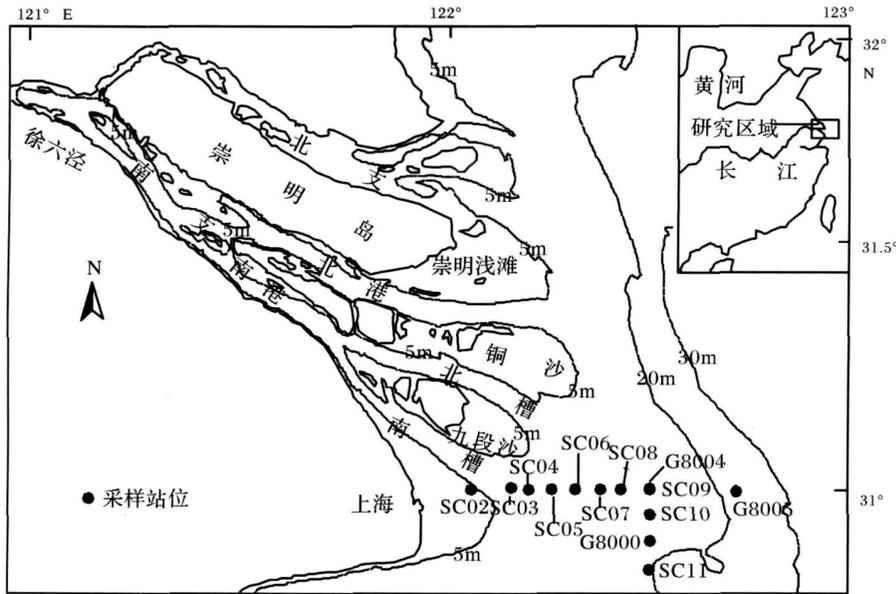


图 1 长江水下三角洲沉积物柱状取样站位图  
(G8000, G8004和 G8005站根据文献 [16, 17, 34]整理)

Fig 1 Location of the study area showing sediment-core sampling stations at the subaqueous delta of Changjiang Estuary (The station of G8000, G8004 and G8005 are derived from [16], [17] and [34] in the references)

## 2 材料与方法

### 2.1 沉积物样品采集

2006年 4月,使用重力取样器在长江水下三角洲进行沉积物柱样采集,沉积物柱样的长度介于 100 ~ 160 cm 之间(站位见图 1,表 1)。

表 1 长江水下三角洲沉积物柱状样站位信息

Table 1 The information of sediment-core sampling stations at the subaqueous delta of Changjiang Estuary

站位	北纬	东经	水深 /m	柱长 /cm
SC02	31° 00. 15'	122° 04. 03'	6. 2	100
SC03	31° 06. 07'	122° 10. 26'	8. 8	130
SC04	31° 00. 01'	122° 12. 02'	9. 2	140
SC05	31° 00. 01'	122° 16. 04'	10	142
SC06	31° 00. 02'	122° 20. 15'	10. 2	130
SC07	31° 00. 09'	122° 23. 06'	10. 4	140
SC08	31° 00. 04'	122° 26. 02'	12. 3	145
SC09	31° 00. 01'	122° 30. 05'	15. 5	160
SC10	30° 56. 07'	122° 29. 98'	16. 7	104
SC11	30° 50. 46'	122° 30. 10'	17	145

### 2.2 沉积物粒度测量和<sup>210</sup>Pb测定

在实验室内对柱状样进行了详细描述,并对其以 2 cm 间隔分样,使用英国 Malvern 公司生产的 Master

sizer 2000型激光粒度仪进行粒度测量(仪器的测量范围为 0. 02~ 2000 μm,重复测量的误差 < 3%),获得样品的粒度分布数据后,采用矩法公式<sup>[26]</sup>计算粒度参数。取 8g左右的样品以 60℃的温度烘干,并计算沉积物含水量和干密度<sup>[27]</sup>。将已烘干的样品研磨细搅匀后,利用 Po-α法对其进行<sup>210</sup>Pb分析,实验分析方法详见文献<sup>[28]</sup>,仪器为低本底的 α谱仪(576A Alpha Spectrometer 美国 EG&G 公司生产)。本文中的<sup>210</sup>Pb测定在南京大学海岸与海岛开发教育部重点实验室的<sup>210</sup>Pb实验室完成,该实验室多次参加国际原子能机构主持的海洋沉积物国际比对及国外同类实验室的比对,<sup>210</sup>Pb分析精度达到国际同类实验室水平<sup>[29-32]</sup>。

### 2.3 沉积速率和沉积通量的计算

本文利用 CFS 模型<sup>[33]</sup>来计算柱状样的沉积速率、<sup>210</sup>Pb 沉降通量。根据前人研究结果<sup>[34]</sup>,本研究区域的<sup>210</sup>Pb 本底值为 1. 4 dpm · g<sup>-1</sup>。柱状样的过剩<sup>210</sup>Pb 总量为:

$$I = \frac{F}{\lambda} \tag{1}$$

式中 I 为过剩<sup>210</sup>Pb 总量 (dpm · cm<sup>-2</sup>); F 为<sup>210</sup>Pb 沉降通量 (dpm · cm<sup>-2</sup> · yr<sup>-1</sup>); λ 为<sup>210</sup>Pb 的衰变

常数,  $\lambda = 0.0311 \text{ yr}^{-1}$ 。

### 3 结果与分析

#### 3.1 沉积物粒度信息

所获取的柱状样均以黄灰色、灰黑色粘土质粉砂为主,局部有薄层细砂夹层和贝壳碎屑,并且岩性垂向变化较小。表 2 表示了沉积物柱状样沉积物组分的平均值,沉积物组分以粉砂为主,其次是粘土,砂的含量极少,并且不含砾石;其中粘土平均含量在 13.83% ~ 27.39% 之间,粉砂平均含量在 70.17% ~ 80.35% 之间。沉积物中  $< 16 \mu\text{m}$  的颗粒平均含量占 65.07%,  $< 32 \mu\text{m}$  的颗粒平均含量占 84.59%,并且  $> 63 \mu\text{m}$  的粗颗粒含量很少。十个柱样的平均粒径变化不大,为  $7.67 \sim 12.79 \mu\text{m}$ ,沉积物以粉砂和粘土质粉砂为主; SC02 柱样的粘土含量较小,平均粘土含量为 19.38%,整个剖面中粘土含量介于 8% ~ 29% 之间; SC06 和 SC09 柱样剖面中粘土含量波动较大,介于 6% ~ 36% 之间,尤其是 SC09 柱样中粉砂以夹层形式出现;其余的柱样剖面中的粘土含量大致介于 12% ~ 35% 之间,波动不大。

#### 3.2 沉积物含水量和干密度

图 2 表示了典型柱状样 (SC02 和 SC07 柱样) 的沉积物干密度和含水量的垂向分布。第一种类型为

表 2 沉积物柱状样中沉积物组分含量

Table 2 The compositions of sediment within sediment cores

站位	沉积物组分 %			$< 16 \mu\text{m}$	$< 32 \mu\text{m}$	$< 63 \mu\text{m}$
	粘土	粉砂	砂			
SC02	19.38	71.12	9.51	50.91	71.62	90.49
SC03	13.83	80.17	5.99	57.91	78.91	94.01
SC04	26.57	70.86	2.57	69.63	87.52	97.43
SC05	27.39	70.17	2.44	69.98	87.83	97.56
SC06	17.63	80.35	2.02	67.97	88.46	97.98
SC07	26.57	71.42	2.01	69.93	88.49	97.99
SC08	25.67	71.81	2.52	68.85	87.53	97.48
SC09	20.12	78.53	1.35	68.61	89.31	98.65
SC10	24.16	72.45	3.38	65.18	85.08	96.62
SC11	23.39	71.63	4.99	61.68	81.14	95.01

SC02 柱样情形,沉积物含水量随着深度增加而下降,由于压实效应沉积物干密度随深度增加而增加;第二种类型为 SC07 柱样情形,在一定深度内沉积物含水量变化较小,并不随着深度增加而下降,并且沉积物干密度也没有随着深度增加而增加,这可能是由于该区域沉积物堆积速率较快,在取样深度范围内压实效应不显著。分析得知,所获得的十个沉积物柱状样的含水量平均值为 58%,根据计算得到该区域沉积物干密度的平均值为  $1.07 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

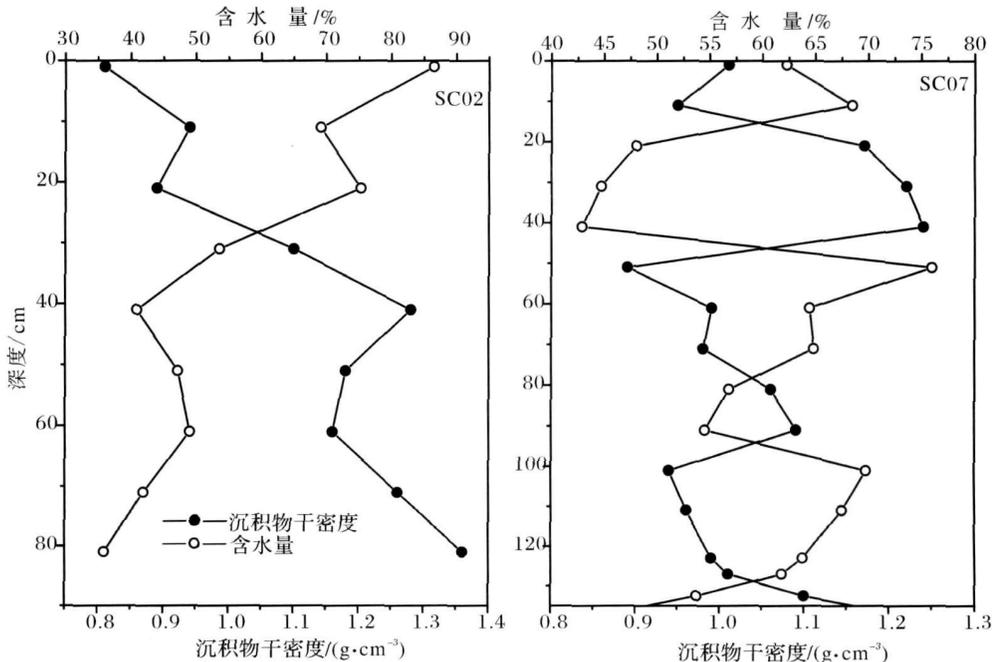


图 2 典型柱状样的沉积物干密度和含水量的垂向分布

Fig 2 The representative profiles of dry bulk density and water content

### 3.3 长江水下三角洲<sup>210</sup>Pb放射性比度的垂向分布

图 3 为长江水下三角洲沉积物柱状样的过剩<sup>210</sup>Pb放射性比度垂向分布。从图中可知, 所获得的沉积物柱状的<sup>210</sup>Pb放射性比度垂向分布可分为三种类型: 第一种为正常分布类型, 大多数柱样如 SC02 SC04 SC05 SC09 SC10 SC11的过剩<sup>210</sup>Pb放射性比度随深度呈指数衰减; 第二种为柱状样 SC08的过剩<sup>210</sup>Pb放射性比度垂向分布情形, 自表层至深度 15cm 放射性比度随深度增加而增加, 因此这个范围为表层混合层, 但从混合层向下至柱样底部, 过剩<sup>210</sup>Pb放射性比度随深度增加而衰减; 第三种为异常分布类型, 柱状样 SC03

和 SC06的过剩<sup>210</sup>Pb放射性比度垂向分布与上述两种类型都不同。在柱状样 SC03 中, 过剩<sup>210</sup>Pb放射性比度剖面呈不规则分布, 并且在深度 31~ 71 cm 之间和 85 cm 以下出现过剩<sup>210</sup>Pb放射性比度倒置分布, 即放射性比度随深度增加而升高, 只有表层至 25 cm 范围内的过剩<sup>210</sup>Pb放射性比度随深度增加而衰减, 因此未能获得柱状样 SC03 的沉积速率。同样在 SC06 柱样中, 放射性比度随深度变化波动很大, 虽然总的趋势是放射性比度随深度而衰减, 但是经过计算得知过剩<sup>210</sup>Pb放射性比度与深度的线性关系不明显, 因此 SC06 柱样的沉积速率也没有能够求得。

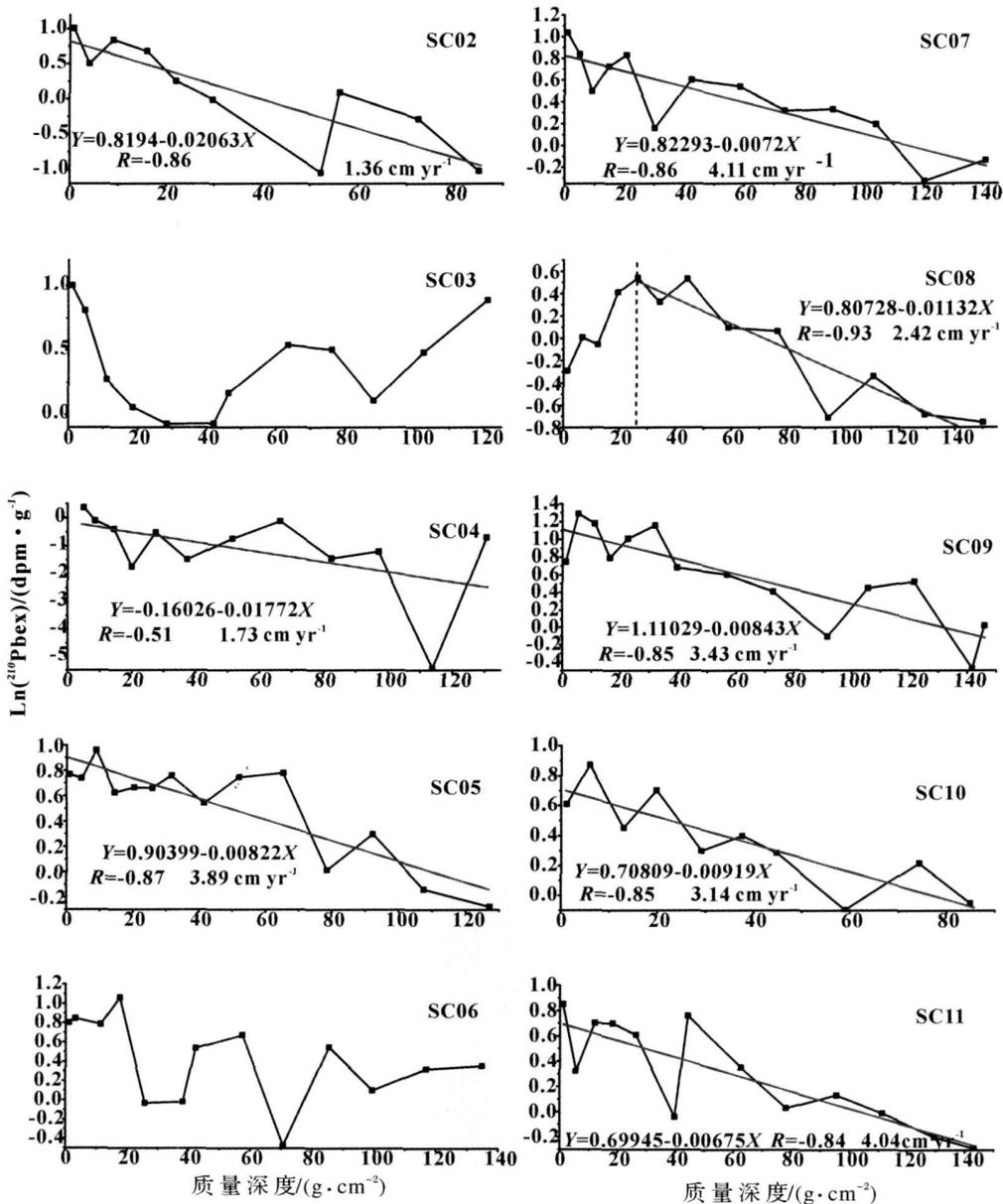


图 3 柱状样的过剩<sup>210</sup>Pb放射性比度剖面

Fig 3 The profile of the excess <sup>210</sup>Pb plotting against mass depth of sediment cores

表3 沉积物柱状样<sup>210</sup>Pb分析结果Table 3 The analytical result of <sup>210</sup>Pb within sediment cores

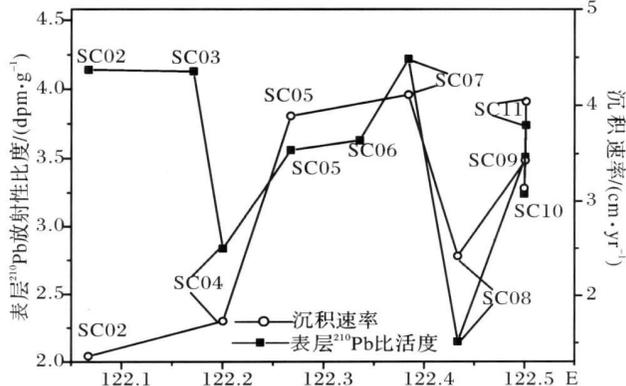
站位	沉积通量 / ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$ )	<sup>210</sup> Pb沉降通量 / ( $\text{dpm} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$ )	平均沉积速率 / ( $\text{cm} \cdot \text{yr}^{-1}$ )	表层 <sup>210</sup> Pb放射性比度 / ( $\text{dpm} \cdot \text{g}^{-1}$ )	过剩 <sup>210</sup> Pb总量 / ( $\text{dpm} \cdot \text{cm}^{-2}$ )
SC02	1.51	3.43	1.36	4.14	> 110.49
SC03	-	-	-	4.13	-
SC04	1.76	1.50	1.73	2.84	> 48.29
SC05	3.79	9.36	3.89	3.56	> 301.77
SC06	-	-	-	3.63	-
SC07	4.33	9.85	4.11	4.22	> 317.70
SC08	2.75	6.17	2.42	2.15	> 198.93
SC09	3.69	11.21	3.43	3.51	> 361.68
SC10	3.39	6.88	3.14	3.24	> 221.90
SC11	4.61	9.29	4.04	3.74	> 299.52

### 3.4 长江水下三角洲的沉积速率

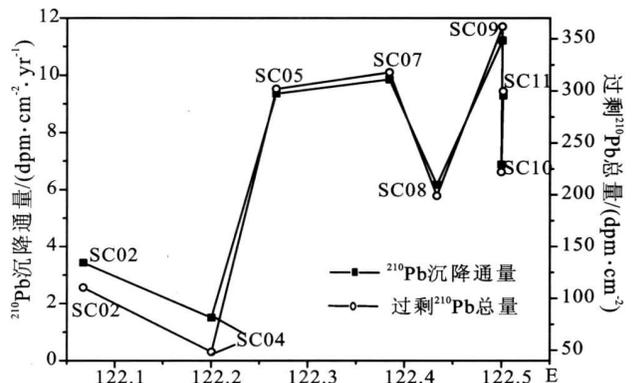
应用 CFS模型计算得知长江水下三角洲的平均沉积速率介于  $1.36 \sim 4.11 \text{ cm} \cdot \text{yr}^{-1}$  之间(表3和图4),其总体变化趋势是近岸沉积速率低,沿  $31^\circ\text{N}$  纬线向 20 m 等深线沉积速率升高,从 SC02 站到 SC04 站再到 SC05 站沉积速率表现出明显的上升过程,从  $122^\circ 15' \text{E}$  到  $122^\circ 30' \text{E}$  的区域是长江水下三角洲的泥质沉积物堆积中心,其平均沉积速率为  $3.51 \text{ cm} \cdot \text{yr}^{-1}$ 。

### 3.5 长江水下三角洲表层<sup>210</sup>Pb放射性比度、<sup>210</sup>Pb沉降通量和过剩<sup>210</sup>Pb总量的分布

长江水下三角洲表层<sup>210</sup>Pb放射性比度介于  $2.15 \sim 4.22 \text{ dpm} \cdot \text{g}^{-1}$  之间,平均值为  $3.52 \text{ dpm} \cdot \text{g}^{-1}$ ; <sup>210</sup>Pb沉降通量和过剩<sup>210</sup>Pb总量分别介于  $1.50 \sim 11.21 \text{ dpm} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$  和  $> 48.29 \sim > 361.68 \text{ dpm} \cdot \text{cm}^{-2}$  之间,平均值分别为  $7.21 \text{ dpm} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$  和  $> 232.54 \text{ dpm} \cdot \text{cm}^{-2}$  (表3)。<sup>210</sup>Pb沉降通量和过剩<sup>210</sup>Pb总量的总体变化趋势与沉积速率基本一致(图4和图5)。

图4 柱状样的表层<sup>210</sup>Pb放射性比度和平均沉积速率Fig 4 The surface activities of <sup>210</sup>Pb and the

sediment rates of the sediment cores

图5 柱状样的<sup>210</sup>Pb沉降通量和过剩<sup>210</sup>Pb总量Fig 5 The <sup>210</sup>Pb fluxes and excess <sup>210</sup>Pb inventories of sediment cores

近岸<sup>210</sup>Pb沉降通量和过剩<sup>210</sup>Pb总量较低,沿  $31^\circ\text{N}$  纬线向 20 m 等深线<sup>210</sup>Pb沉降通量和过剩<sup>210</sup>Pb总量升高。

## 4 讨论

### 4.1 沉积物粒度与<sup>210</sup>Pb的关系

通过岩性和粒度分析可知,柱样中沉积物以细颗粒为主,粘土含量较高,平均含量为 22.48% (表2),平均粒径为  $9.04 \mu\text{m}$ ,并且剖面中沉积物组分变化不大<sup>[35]</sup>。由于<sup>210</sup>Pb主要吸附于细颗粒物质,因此有机质含量越高、沉积物颗粒越细、粘土组分含量越高,<sup>210</sup>Pb的放射性比度越高<sup>[36]</sup>。但是通过平均粒径和总的<sup>210</sup>Pb放射性比度相关分析得知,只有 SC02和 SC05柱样的沉积物平均粒径与总的<sup>210</sup>Pb放射性比度具有良好的相关性(相关系数分别为 0.78和 0.75),而其他的柱样不具有这种特征(图6)。

与表层沉积物平均粒径、粘土含量进行相关性分

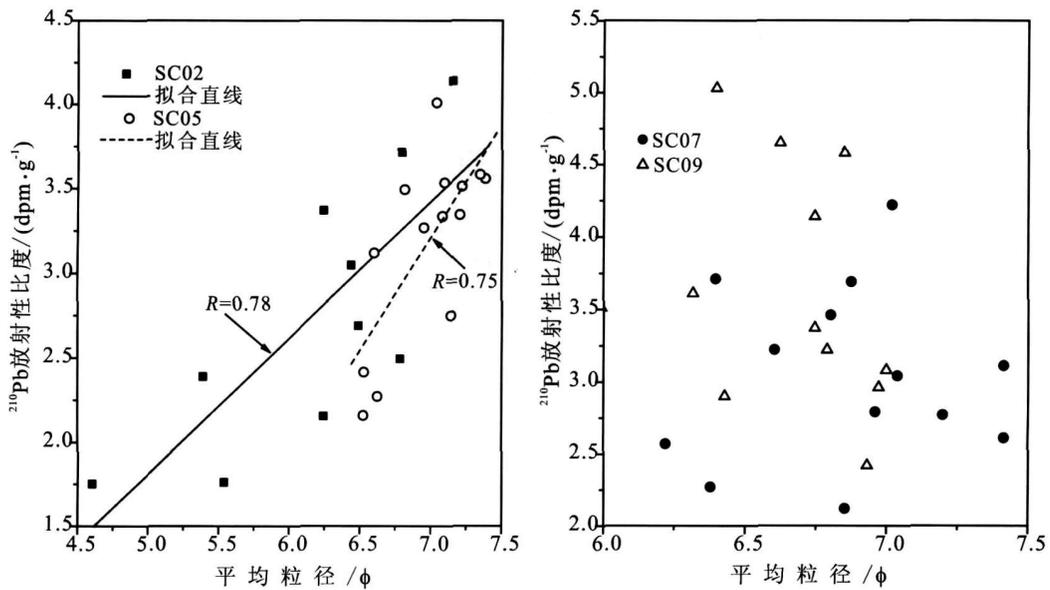


图 6 典型柱状样的<sup>210</sup>Pb放射性比度和平均粒径之间的关系

Fig 6 The representative plot of <sup>210</sup>Pb activities against mean grain size

析发现,表层<sup>210</sup>Pb放射性比度与表层沉积物平均粒径、平均粘土含量之间也没有相关性(图略)。此区域沉积物主要来源是长江入海泥沙,并且以细颗粒为主,在一定深度范围内沉积物组分变化不大;同时在径流和潮流等水动力作用下沉积物改造频繁,以致在一定厚度内沉积物发生混合作用。因此这些情况使得柱状样剖面中和表层沉积物中的<sup>210</sup>Pb放射性比度与沉积物平均粒径、粘土含量之间的相关性缺失。

#### 4.2 沉积物柱样<sup>210</sup>Pb放射性比度剖面不同类型分析

从图 3 可以看出, SC03 站的过剩<sup>210</sup>Pb放射性比度的垂向分布异常。这可能是由于 SC03 站位处于南槽口门处,在径流和潮流等较强水动力环境下,沉积环境不稳定,沉积物扰动频繁,这样造成过剩<sup>210</sup>Pb放射性比度剖面异常,因此未获得相应的沉积速率信息。同时,在一定深度范围内,柱样中的<sup>210</sup>Pb放射性比度倒置分布。通过对柱样 SC03 的观察分析得知,并没有发现生物洞穴存在,说明 SC03 站位没有受到底栖动物的扰动,并且河口地区沉积物堆积速率较大,使底质处于强烈的扰动变化之中,一定程度上限制了某些底栖动物的生存与发展<sup>[37]</sup>,因此 SC03 柱样中<sup>210</sup>Pb放射性比度倒置分布并非是由于底栖动物所造成的。因此可以推测形成这种情况的原因主要是由于该站位附近地区发生从上向下的侵蚀作用,而这些被侵蚀的沉积物又依次覆盖在此站位上<sup>[34]</sup>,从而

造成<sup>210</sup>Pb放射性比度倒置分布。

SC06 柱样中过剩<sup>210</sup>Pb放射性比度随深度波动很大,在某些层位出现<sup>210</sup>Pb低放射性比度事件,这可能由于 SC06 站位邻近长江口南槽入海口处,多次的航道整治和疏浚将其他地区年代老的沉积物侵蚀,这些年代老的沉积物被搬运到 SC06 站沉积下来,因此造成了 SC06 柱样中低放射性比度事件;同时较强的水动力环境也使得沉积物改造频繁,一定厚度内沉积物发生混合作用,这样使得<sup>210</sup>Pb放射性比度剖面中出现低放射性比度现象。可能由于沉积物堆积速率过快和取样深度的限制,SC06 柱样未能获得该站位的沉积速率信息。

SC08 柱样中自表层至 15 cm 范围为表层混合层,<sup>210</sup>Pb放射性比度倒置分布,在混合层以下放射性比度剖面为正常分布。通过对柱样 SC08 的观察分析得知,没有发现底栖生物洞穴存在,因此混合层中<sup>210</sup>Pb放射性比度倒置分布可能是由于 SC08 站位附近区域出现从上向下的侵蚀过程,而这些侵蚀物又依次覆盖在 SC08 柱样原始表层的上部,从而形成了 SC08 站位表层的<sup>210</sup>Pb放射性比度倒置分布。

SC02 SC04 SC05 SC07 SC09 SC10 SC11 柱样中的<sup>210</sup>Pb放射性比度剖面属于正常分布类型。

#### 4.3 长江水下三角洲现代沉积速率

长江口最大浑浊带主要分布在横沙至口外海滨 10 m 等深线之间约 50 km 的地段,即拦门沙及其附

近地区,因此本文中的大部分站位受其影响,最大浑浊带内是径流向海输沙和潮流向陆输沙的泥沙集聚区,并且大量的细颗粒在絮凝等作用下集聚在水体下层<sup>[25]</sup>。同时影响本研究区的另一个大型水动力因子是长江口近口锋,长江口近口锋是长江口河水与羽状流水的界面,活动于 122°E~122°30'(E)之间,内界为最大浑浊带的外缘,近口锋具有一定的屏障效应,导致大量细颗粒在锋区附近沉积,从而造成了长江水下三角洲沉积物堆积的高速率区<sup>[38]</sup>,本文中大多数站位都处于这个沉积物堆积的高速率区。

从 SC02 到 SC11 站,除去 SC10 和 SC11 两个柱样外,其他八个柱样基本都处于 31°N 纬线上,而 SC09、SC10 和 SC11 站都处于同一个经线(122°5'E)上,并且最东段的三个站位 SC09、SC10 和 SC11 站接近水下三角洲泥质区的前缘。总体趋势上,从岸向 20 m 等深线沉积速率逐渐升高,并且从 122°15'E 到 122°30'E 的区域为长江水下三角洲的泥质沉积物堆积中心,其中 SC07 站位沉积速率最高,为 4.11 cm·yr<sup>-1</sup>,而处于东南端的 SC11 站位的沉积速率为 4.02 cm·yr<sup>-1</sup>(表 3 和图 4),这反映了长江入海泥沙大量沉积于此区域,并且向东南方向扩散<sup>[21]</sup>。DeMaster D J 等<sup>[6]</sup>研究表明,长江水下三角洲 G8004 站测得沉积速率为 5.4 cm·yr<sup>-1</sup>,G8000 站为 3.5 cm·yr<sup>-1</sup>,并且 G8005 站为 3.1 cm·yr<sup>-1</sup>,三个站位的平均沉积速率为 4.0 cm·yr<sup>-1</sup>。段凌云等<sup>[18]</sup>、Wei T Y<sup>[15]</sup> 研究结果显示,长江水下三角洲的泥质沉积中心的沉积速率介于 2.0~6.3 cm·yr<sup>-1</sup>之间,平均沉积速率为 3.5 cm·yr<sup>-1</sup>。Yang S L 等<sup>[11]</sup> 研究表明,近二十年来长江水下三角洲整体的沉积速率明显变小,沉积速率从 1958~1978 年的 5.5 cm·yr<sup>-1</sup> 减小到 1978~1998 年的 1.1 cm·yr<sup>-1</sup>,在百年尺度上,长江水下三角洲整体的沉积速率为 3.3 cm·yr<sup>-1</sup>。与上述前人研究结果相比较可以看出,本文结果与前人研究结果相一致,长江水下三角洲泥质沉积区平均沉积速率介于 1.36~4.11 cm·yr<sup>-1</sup> 之间;总体上近岸沉积速率较低,沿 31°N 纬线向 20 m 等深线沉积速率升高,长江水下三角洲的泥质沉积物堆积中心平均沉积速率为 3.51 cm·yr<sup>-1</sup>。

#### 4.4 长江水下三角洲<sup>210</sup>Pb 的地球化学分布特征

##### 4.4.1 <sup>210</sup>Pb 沉降通量和过剩<sup>210</sup>Pb 总量分布特征

有研究表明<sup>[34]</sup>,东海陆架的<sup>210</sup>Pb 大气沉降通量为 1.93 dpm·cm<sup>-2</sup>·yr<sup>-1</sup>,如果这些<sup>210</sup>Pb 全部转移并沉积到沉积物中,则理论上过剩<sup>210</sup>Pb 总量将为

62.25 dpm·cm<sup>-2</sup>。通过长江水下三角洲与东海陆架对比可以看出(表 4),长江水下三角洲对沉积物捕集能力较强,大量的入海泥沙被捕集并且堆积在水下三角洲。根据本文研究,长江水下三角洲的<sup>210</sup>Pb 沉降通量平均值为 3.23 dpm·cm<sup>-2</sup>·yr<sup>-1</sup>,高于东海陆架的<sup>210</sup>Pb 大气沉降通量,这说明了<sup>210</sup>Pb 在该区域具有幅聚性<sup>[34]</sup>,因此该区域的<sup>210</sup>Pb 不仅来自大气沉降,还有大量从别处输入的<sup>210</sup>Pb。由于过剩<sup>210</sup>Pb 总量正比于<sup>210</sup>Pb 沉降通量,因此两者变化是相一致的,长江水下三角洲的过剩<sup>210</sup>Pb 总量高于理论值,这表明了水体中<sup>210</sup>Pb 存在着传输和移动,在沉积物中存在<sup>210</sup>Pb 的净输入和聚集的现象<sup>[40]</sup>。

表 4 长江水下三角洲过剩<sup>210</sup>Pb 总量与东海陆架的对比  
Table 4 Comparison of the excess<sup>210</sup>Pb inventories in the subaqueous delta with East China Sea shelf

研究区域	过剩 <sup>210</sup> Pb 总量 / (dpm·cm <sup>-2</sup> )			参考文献
	最大值	最小值	平均值	
长江水下三角洲	361.68	48.29	232.54	本文
东海陆架	257	38	147.5	文献 [39]

##### 4.4.2 表层<sup>210</sup>Pb 放射性比度分布特征

长江水下三角洲的表层<sup>210</sup>Pb 放射性比度范围在 2.15~4.22 dpm·g<sup>-1</sup> 之间,平均值为 3.51 dpm·g<sup>-1</sup>,与前人结果<sup>[16,34]</sup> 相比,两者结果相一致。各站位的表层<sup>210</sup>Pb 放射性比度相差不大,而从图 4 中可以发现 SC04 站和 SC08 站的表层<sup>210</sup>Pb 放射性比度比其它站位的明显偏低。SC04 站位处于南槽口外,水动力环境较强,表层沉积物易发生再悬浮,通过现场水样分析发现,SC04 站位的底层悬沙浓度明显比其它站位的高,因此大量吸附着<sup>210</sup>Pb 的再悬浮细颗粒集聚在水体中而不能沉降到表层沉积物中,使得 SC04 站的表层<sup>210</sup>Pb 放射性比度低;另一种原因可能是由于 SC04 站位所在区域正在发生侵蚀过程,使得原先被埋藏的<sup>210</sup>Pb 低放射性比度的沉积物出露成为表层沉积物,因此造成 SC04 站的表层<sup>210</sup>Pb 放射性比度较低。在十个站位中 SC08 站位的表层<sup>210</sup>Pb 放射性比度最低,仅为 2.15 dpm·g<sup>-1</sup>,这可能由于 SC08 柱样表层<sup>210</sup>Pb 放射性比度剖面倒置分布而造成的。对于整个研究区域而言,水动力环境较强,沉积物既受到长江口最大浑浊带的影响又受到近口锋的影响,因此在这一区域水体中含有高浓度的细颗粒物,这些细颗粒物可以吸附可溶态的<sup>210</sup>Pb 通过絮凝等作用沉降,使得其它站位的表层<sup>210</sup>Pb 放射性比度较高。

## 5 结论

通过对长江水下三角洲采集的十个沉积物柱状样中的放射性核素<sup>210</sup>Pb分析,可以得到以下结论:

(1) 长江水下三角洲泥质沉积区沉积速率介于 1.36~4.11 cm·yr<sup>-1</sup>之间。总体上呈现出近岸沉积速率较低,仅为 1.36 cm·yr<sup>-1</sup>,沿 31°N 纬线向 20 m 等深线沉积速率升高的趋势,最大值为 4.11 cm·yr<sup>-1</sup>。从 122°15'E 到 122°30'E 的区域是长江水下三角洲的泥质沉积物堆积中心,其平均沉积速率为 3.51 cm·yr<sup>-1</sup>。

(2) 通过分析得知,长江水下三角洲表层<sup>210</sup>Pb 放射性比度介于 2.15~4.22 dpm·g<sup>-1</sup>之间,<sup>210</sup>Pb 沉降通量介于 1.50~11.21 dpm·cm<sup>-2</sup>·yr<sup>-1</sup>之间,过剩<sup>210</sup>Pb 总量介于 >48.29~>361.68 dpm·cm<sup>-2</sup>之间。<sup>210</sup>Pb 沉降通量以及过剩<sup>210</sup>Pb 总量均高于理论值,这表明了在沉积物中存在<sup>210</sup>Pb 的净输入和聚集。

致谢 范峰、吴祥柏、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 (References)

- 王永红,沈焕庭. 河口海岸环境沉积速率研究方法 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2002, 22(2): 115-120 [Wang Yonghong, Shen Huanting. The study methods of sedimentation rates in the estuarine and coastal environments [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2002, 22(2): 115-120]
- 高抒. 全球变化中的浅海沉积作用与物理环境演化——以渤、黄、东海区域为例 [J]. 地学前缘, 2002, 9(2): 329-335 [Gao Shu. Shallow marine sedimentation and physical environment evolution as a part of global change: an example from the Bohai, Yellow and East China Sea regions [J]. Earth Science Frontiers, 2002, 9(2): 329-335].
- 潘少明,王雪瑜,Smith J N. 海南岛洋浦港现代沉积速率 [J]. 沉积学报, 1994, 12(2): 86-93 [Pan Shaoming, Wang Xueyu, Smith J N. Recent sedimentation rates in Yangpu Harbour on Hainan Island [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1994, 12(2): 86-93]
- 万国江. <sup>137</sup>Cs 及 <sup>210</sup>Pb 方法湖泊沉积计年研究新进展 [J]. 地球科学进展, 1995, 10(2): 188-192 [Wan Guojiang. Progresses on <sup>137</sup>Cs and <sup>210</sup>Pb dating of lake sediments [J]. Advance in Earth Sciences, 1995, 10(2): 188-192]
- 万国江, Santschi P H, Sturm M, 等. 放射性核素和纹理工计年对比研究瑞士格莱芬湖近代沉积速率 [J]. 地球化学, 1986, 3: 259-270 [Wan Guojiang, Santschi P H, Sturm M, et al. A comparative study on recent sedimentation rates of Lake Griefen, Switzerland using varve counting and radionuclide dating [J]. Geochimica, 1986, 3: 259-270]
- 程致远,梁卓成,林瑞芬,等. 云南滇池现代沉积物<sup>210</sup>Pb 法的 CF 模式年龄研究 [J]. 地球化学, 1990, 4: 327-332 [Chen Zhiyuan, Li

- ang Zhuocheng, Lin Ruifen, et al. A geochronological study of <sup>210</sup>Pb CF model for the recent sediments of Dianchi Lake, Yunnan Province [J]. Geochimica, 1990, 4: 327-332]
- 林瑞芬, 闵育顺, 卫克勤, 等. 珠江口沉积柱样<sup>210</sup>Pb 法年龄测定结果及其环境地球化学意义 [J]. 地球化学, 1998, 27(5): 401-411 [Lin Ruifen, Min Yushun, Wei Keqin, et al. <sup>210</sup>Pb-dating of sediment cores from the Pearl River mouth and its environmental geochemistry implication [J]. Geochimica, 1998, 27(5): 401-411]
- 刘国卿, 彭先芝, 张干, 等. 南岭山地湖泊多环芳烃的大气沉降历史记录 [J]. 地球化学, 2007, 36(4): 357-362 [Liu Guoqing, Peng Xianzhi, Zhang Gan, et al. Sedimentary records of atmospheric deposition of polycyclic aromatic hydrocarbons in a reservoir in Nanling Mountains, South China [J]. Geochimica, 2007, 36(4): 357-362]
- Chen Zhongyuan, Saito Y, Kanai Y, Wei Taoyuan, et al. Low concentration of heavy metals in the Yangtze estuarine sediments, China: a diating setting [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2004, 60: 91-100
- 陈吉余, 虞志英, 恽才兴. 长江三角洲的地貌发育: 长江河口动力过程和地貌演变 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1988: 1-18 [Chen Jiyu, Yu Zhiying, Yun Caixing. Process of Dynamics Geomorphology of the Changjiang Estuary [M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1988: 1-18]
- Yang Shilin, Zhao Qingying, 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
- 李从先, 王平, 范代读, 等. 潮汐沉积率与沉积间断 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 1999, 19(2): 1-18 [Li Congxian, Wang Ping, Fan Daidu, et al. Sedimentation rate and sedimentary break in tidal deposits [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 1999, 19(2): 1-18]
- 李从先. 三角洲沉积速率及其地质意义 [J]. 海洋科学, 1981, 3: 30-33 [Li Congxian. Sedimentation rate and its geology significance [J]. Marine Science, 1981, 3: 30-33]
- 陈吉余. 长江口拦门沙及其水下三角洲的动力沉积、演变和深水航道治理 [C]// 长江口深水航道治理与港口建设专辑, 1995: 1-22 [Chen Jiyu. The dynamic sedimentation, development and deep waterway regulation of sand bar and submerge delta in Changjiang River Mouth [C]// Special Issue of the Deep Waterway Regulation and Ports Construction in Changjiang Estuary, 1995: 1-22]
- Wei Taoyuan, Chen Zhongyuan, Duan Lingyun, et al. Sedimentation rates in relation to sedimentary processes of the Yangtze Estuary, China [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2007, 71: 37-46
- 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
- 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 [Xia Xiaoming, Yang Hui, Li Yan, et al. Modern sedimentation rates in the contiguous sea area of Changjiang Estuary and Hangzhou Bay [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22(1): 130-135]

- 18 段凌云, 王张华, 李茂田, 等. 长江口沉积物<sup>210</sup>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.*. <sup>210</sup>Pb distribution of the Changjiang Estuarine sediment and the implications to sedimentary environment [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2005, 23(3): 514-522]
- 19 恽才兴. 长江河口近期演变基本规律[M]. 北京: 海洋出版社, 2004: 201-273 [Yun Caixing. Recent Developments of the Changjiang Estuary[M]. Beijing: Ocean Press, 2004: 201-273]
- 20 汪亚平, 潘少明, Wang H V, 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 [Wang Yaping, Pan Shaoming, Wang H V, *et al.*. Measurements and analysis of water discharges and suspended sediment fluxes in Changjiang Estuary[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(1): 35-46]
- 21 Milliman J D, Shen Huanqing, Yang Zuosheng, *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
- 22 金翔龙. 东海海洋地质[M]. 北京: 海洋出版社, 1992: 196-215 [Jin Xianglong. Marine Geology of the East China Sea[M]. Beijing: Ocean Press, 1992: 196-215]
- 23 秦蕴珊, 赵一阳, 陈丽蓉, 等. 东海地质[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 35-37 [Qin Yunshan, Zhao Yiyang, Chen Lirong, *et al.*. Geology of the East China Sea[M]. Beijing: Science Press, 1987: 35-37]
- 24 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 [Guo Zhigang, Yang Zuosheng, Chen Zhilin, *et al.*. Source of sedimentary organic matter in the mud areas of the East China Sea Shelf [J]. *Geochemica*, 2001, 30(5): 416-424]
- 25 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 [Shen Huanqing, Pan Ding'an. Turbidity Maximum in the Changjiang Estuary[M]. Beijing: Ocean Press, 2001: 15-38]
- 26 McManus J. Grain size determination and interpretation[C]// *Tucker ed. Techniques in Sedimentology*. Blackwell Oxford, 1988: 63-85
- 27 贾 Jianjun, Gao Shu, Xue Yunchuan. Sediment dynamic process of the Yuehu inlet system, Shandong Peninsular, China[J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2003, 53: 783-801
- 28 Flynn W W. The determination of low level of polonium-210 in environmental materials[J]. *Analytica Chimica Acta*, 1968, 43: 221-227
- 29 Tanner P A, Pan S M, Mao S Y, *et al.*.  $\gamma$ -ray spectrometric and  $\alpha$ -counting method comparison for the determination of Pb-210 in estuarine sediments[J]. *Applied Spectroscopy*, 2000, 54(10): 1417-1548
- 30 Ellis K M, Pan S M. Quality assurance at the Nanjing University <sup>210</sup>Pb laboratory [M]. Wang Ying, Schafer C T. *Island Environment and Coast Development Nanjing*. Nanjing University Press, 1992: 257-265
- 31 IAEA. Report on the intercomparison on IAEA-134 radionuclides in marine cockle flesh[R]. Monaco: IAEA/AL/062, 1993: 1-45
- 32 IAEA. Report on the intercomparison on IAEA-135 radionuclides in Irish sea sediment[R]. Monaco: IAEA/AL/063, 1993: 1-58
- 33 Robbins J A. Geochemical and geophysical applications of radioactive lead[C]// Nriagu J O ed. *The biogeochemistry of lead in the environment*. Amsterdam: Elsevier/North-Holland Biomedical Press, 1978: 285-375
- 34 钱江初, D M aster D J Nitrouer C A, 等. 长江口邻近陆架<sup>210</sup>Pb的地球化学特征[J]. 沉积学报, 1985, 3(4): 31-44 [Qian Jiangchu, D M aster D J Nitrouer C A, *et al.*. Geochemistry features of <sup>210</sup>Pb in the estuary of the Changjiang River and its adjacent shelf [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1985, 3(4): 285-375]
- 35 张瑞, 汪亚平, 高建华, 等. 长江口泥质区垂向沉积结构及其环境指示意义[J]. 海洋学报, 2008, 30(2): 81-91 [Zhang Rui, Wang Yaping, Gao Jianhua, *et al.*. The vertical sedimentary structure and its implications for environmental evolutions in Changjiang Estuary in China [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2008, 30(2): 81-91]
- 36 Nitrouer C A, Stenberg R W, Carpenter R, *et al.*. The use of Pb-210 geochronology as a sedimentological tool: application to the Washington continental shelf [J]. *Marine Geology*, 1979, 31: 297-316
- 37 叶属峰, 纪焕红, 曹恋, 等. 河口大型工程对长江河口底栖动物种类组成及生物量的影响研究[J]. 海洋通报, 2004, 23(4): 32-37 [Ye Shufeng, Ji Huanhong, Cao Lian, *et al.*. Studies on the impacts of large-scale estuarine engineering on species composition and biomass of benthos in the Yangtze River Estuary [J]. *Marine Science Bulletin*, 2004, 23(4): 32-37]
- 38 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: 110-128 [Hu Fangxi, Hu Hui, Gu Guochuan. *Studies of Fronts in the Changjiang Estuary* [M]. Shanghai: East China Normal University Press, 2002: 110-128]
- 39 Kazumasa O, Eiji M, Masatoshi Y, *et al.*. Sediment accumulation rates and budgets of depositing particles of the East China Sea [J]. *Deep-Sea Research II*, 2003, 50: 513-528
- 40 潘少明, 施晓东, Smith J N. 海南岛三亚港现代沉积速率的研究[J]. 海洋与湖沼, 1995, 26(2): 132-137 [Pan Shaoming, Shi Xiaodong, Smith J N. Determination of recent sedimentation rates in Sanya Harbour, Hainan Island [J]. *Oceanologica et Limnologia Sinica*, 1995, 26(2): 132-137]

## Sedimentation Rates and Characteristics of Radionuclide <sup>210</sup>Pb at the Subaqueous Delta in Changjiang Estuary

ZHANG Rui<sup>1,2</sup> PAN Shao-ming<sup>1,2</sup> WANG Ya-ping<sup>1,2</sup> GAO Jian-hua<sup>1,2</sup>

(1. MOE Key Laboratory of Coast and Island Development, Nanjing University, Nanjing 210093;

2. Department of Coastal Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210093)

**Abstract** The 10 sediment cores were collected from subaqueous delta of Changjiang estuary in April 2006 using the gravity coring equipment. The length of the cores varied from 100 to 160 cm. Following visual inspection for geological parameters and photography of the cores, they were subsampled at 2 cm intervals for the entire length of the cores. Profiles of <sup>210</sup>Pb measured in 10 sediment cores were analyzed to elucidate the sediment rates as well as the characteristics of <sup>210</sup>Pb. <sup>210</sup>Pb (via <sup>210</sup>Po) was determined by  $\alpha$ -spectrometry. Distribution of sedimentation rates reveals that during the last 100 years, the derived sedimentation rates vary from 1.36 to 4.11 cm · yr<sup>-1</sup>, and generally increase seaward the 20 m isobaths. In addition, the region from 122°15'E to 122°30'E, i.e. from cores SC05 to SC11, is considered as the mud depocenter in Changjiang estuary, with the mean sediment rates of 3.51 cm · yr<sup>-1</sup>. This pattern could coincide with the dispersal of Changjiang River-derived sediments with influence by the current and tidal systems. The <sup>210</sup>Pb activities of the surficial sediment vary from 2.15 to 4.22 dpm · g<sup>-1</sup>, and <sup>210</sup>Pb deposition fluxes from 1.50 to 11.21 dpm · cm<sup>-2</sup> · yr<sup>-1</sup>, as well as excess <sup>210</sup>Pb inventories between > 48.29 and > 361.68 dpm · cm<sup>-2</sup>, respectively. The excess <sup>210</sup>Pb inventories appear to be higher than the theoretical inventory at the subaqueous delta of Changjiang estuary. It is indicated that besides the atmospheric <sup>210</sup>Pb fallout, the fluvial inputs could play an important role, whilst the much riverine sediment discharges may be scavenged and deposited at the subaqueous delta of Changjiang estuary.

**Key words** sedimentation rate, sediment flux, excess <sup>210</sup>Pb inventory, Changjiang estuary, subaqueous delta