

三峡大坝建坝前后长江水下三角洲及邻近 陆架沉积速率变化^{*}

程 鹏¹, 刘晶晶¹, 张 鑫¹, 范德江^{1,2**}

(1. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 山东 青岛 266100;

2. 中国海洋大学海底科学与探测技术教育部重点实验室, 山东 青岛 266100)

摘 要: 沉积速率是沉积物供给和沉积作用的综合结果,也是表征沉积环境状态的重要指标。本文基于长江水下三角洲及邻近海域收集及补充的 254 个放射性²¹⁰Pb 数据,对数据进行同化处理并使用统一的方法重新估算了沉积速率,分析三峡大坝建成前后研究区沉积速率的变化,探讨了长江入海泥沙减少及性质的变异对河口三角洲冲淤的影响。结果显示,2006 年之后长江水下三角洲及邻近陆架沉积速率明显降低,其中水下三角洲沉积速率由最高 5.4 cm/a 降低到整体不足 2 cm/a,而内陆架降幅较小由 1~2 cm/a 降低到不足 1 cm/a,水下三角洲还出现了局部无沉积的站位。2006 年之后沉积体表层混合作用增强,混合层厚度从 4~10 cm 增加到 5~30 cm。沉积速率改变主要受制于长江入海沉积物的通量的巨减以及沉积物颗粒的粗化,而沉积速率的改变促进了底栖生物发育从而导致混合作用增强。

关键词: 三峡大坝; 沉积速率; ²¹⁰Pb; 混合层; 生物扰动

中图法分类号: P736.21

文献标志码: A

文章编号: 1672-5174(2023)04-077-11

DOI: 10.16441/j.cnki.hdxh.20220139

引用格式: 程鹏, 刘晶晶, 张鑫, 等. 三峡大坝建坝前后长江水下三角洲及邻近陆架沉积速率变化[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2023, 53(4): 77-87.

Cheng Peng, Liu Jingjing, Zhang Xin, et al. Changes of sedimentation rates in the Yangtze River subaqueous delta and its adjacent inner continental shelf before and after the construction of the Three Gorges Dam[J]. Periodical of Ocean University of China, 2023, 53(4): 77-87.

长江是中国乃至亚洲最长的河流之一,其以高径流量(900 km³/a)高输沙量(4.7×10⁸ t/a)为典型特征^[1]。但是近一个世纪长江受人类活动的胁迫加剧,流域重大水利工程兴建数量呈直线升高的趋势,此后记录到长江入海泥沙供给锐减了近 70%,特别是 2003 年流域上游三峡大坝的运营造成了长江入海输沙量断崖式下跌。长江入海泥沙量锐减到 1.4×10⁸ t 以下,引起中下游河道冲刷侵蚀,以及河口三角洲海洋动力相对增强、沉积作用减弱^[2],其结果导致河口三角洲乃至内陆架沉积状态的系统改变^[3]。

沉积体中放射性²¹⁰Pb 同位素是表征现代沉积体由沉积到侵蚀状态变化的有效手段并得到广泛应用。前人也已经在长江口以及内陆架海域开展了大量的基于²¹⁰Pb 的沉积速率测定,获得了不同时段大量的沉积速率成果数据^[4-9]。毫无疑问,长江水下三角洲以及内陆架不同时段获得的²¹⁰Pb 剖面以及据此估算的沉积速率蕴含了该区沉积状态的变化信息,是了解三峡大坝

建成前后沉积-侵蚀状态改变的良好指标。

三峡大坝于 2003 年开始蓄水,水位从 2003 年的 135 m、到 2006 年 156 m、2009 年 175 m,实现了设计蓄水目标,迄今已顺利运行了 19 年。前人研究发现,三峡截流以后对于下游河道乃至河口地区的影响具有明显滞后性^[10-11],中下游河道及三角洲沉积体的沉积特征变化及河口三角洲沉积体由沉积向侵蚀的转变都是从 2006 年才开始急剧变化的。本文的研究将围绕长江水下三角洲及邻近陆架,以 2006 年为界划分两个阶段。系统收集两个阶段的²¹⁰Pb 数据,并补充新的²¹⁰Pb 数据,在数据同化、校正处理的基础上,通过过剩²¹⁰Pb (²¹⁰Pb_{ex})剖面形态分析、沉积速率估算以及生物扰动状态的变化查明三峡大坝建成前后该海域沉积状态的改变,探讨沉积状态改变与重大人类活动之间的联系。

1 研究区概况

长江水下三角洲和东海内陆架属于沉积连续体,

* 基金项目:国家自然科学基金项目(42176077)资助

Supported by the National Natural Science Foundation of China(42176077)

收稿日期:2022-03-17; 修订日期:2022-04-22

作者简介:程 鹏(1995—),男,硕士,研究方向为海洋沉积学。E-mail: chengpeng1436@163.com

** 通讯作者:E-mail: djfan@ouc.edu.cn

沉积体厚度可达 40~60 m。其中,长江水下三角洲沉积体厚度可达到 40 m,可以划分为三角洲前缘、前三角洲、过渡带等亚环境,沉积物主要为粉砂、粘土质粉砂,沉积速率高达 5.4 cm/a^[4,12]。东海内陆架沉积体呈带状北东向平行于浙闽沿岸发育,沉积体最厚可达 60 m,由北向南变薄,沉积物主要为粉砂质粘土^[13],沉积速率由北向南逐渐降低,由大于 1 cm/a 变为不足 1 cm/a。研究区现代沉积环境以近海流系发育为特色,计有长江冲淡水、浙闽沿岸流、台湾暖流等^[14]。这些流系受到东亚季风的影响,夏秋季节台湾暖流增强沿岸流会向北流动,冬春季节台湾暖流减弱沿岸流会沿岸南下。

长江水下三角洲和东海内陆架泥质沉积体是末次冰期高海面以来逐渐沉积而成的,沉积物主要来自长江^[12],并具有典型的季风控制下的“夏储冬输”的特点^[14]。夏季,长江入海水沙量巨大,入海沉积物主要沉积于水下三角洲;冬季,长江入海水沙减少,夏季沉积于三角洲之上的沉积物在冬季强劲风浪作用之下再悬浮,并被南向的浙闽沿岸流搬运到内陆架而沉积。长江入海沉积物在三角洲、内陆架两处分别占比 70%和 30%^[12]。

2 数据来源和处理方法

2.1 ²¹⁰Pb 数据来源

本文对长江水下三角洲及其邻近内陆架已发表的²¹⁰Pb 数据进行收集整理,并严格按照论文中所记录的沉积物岩心实际采取时间以 2006 年为界划分前后两个阶段,并新增了部分未发表的²¹⁰Pb 数据,三根岩心具体信息见表 1。岩心间隔 2~3 cm 取样进行²¹⁰Pb 年代测定,分析测试在中国科学院南京地理与湖泊研究所完成,方法同文献^[9]。本文岩心的²¹⁰Pb 剖面如图 1 所示。为探究 2006 年前后长江水下三角洲及东海内陆架²¹⁰Pb 剖面及初始活度变化特征,将收集的²¹⁰Pb 数据划分 2006 年前后两部分(见图 2),收集数据部分信息见表 2。

表 1 岩心站位信息表
Table 1 Information of core station

站位 Station	经度/°N Longitude	纬度/°E Latitude	水深/m Depth	长度/cm Length	日期 Date
SF-1	122.6	31.2	24.6	49.0	2020
SF-2	122.7	30.5	35.0	33.0	2020
A8-3	122.8	30.2	35.5	39.0	2019

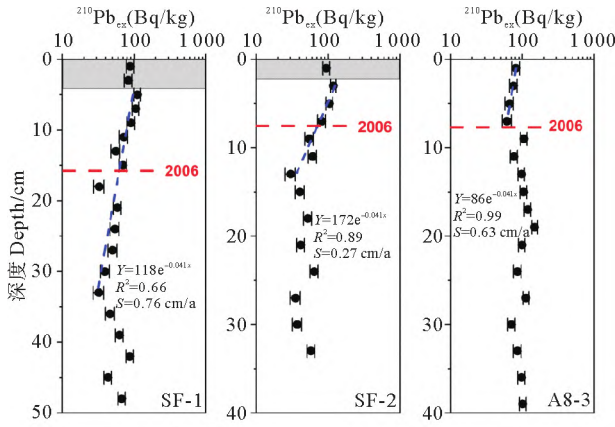


图 1 岩心²¹⁰Pb 剖面特征
Fig.1 Characteristics of ²¹⁰Pb profiles in the cores

2.2 ²¹⁰Pb 数据处理和沉积速率计算

文中对收集的过剩²¹⁰Pb(²¹⁰Pb_{ex})数据处理包括数据化处理、单位同化、混合层判断和沉积速率重新计算等步骤。

数据化处理 前人发表的数据大多数为²¹⁰Pb_{ex}剖面图像数据,为此,通过图像数据化方法进行精细的数据化,得到各个站位的²¹⁰Pb_{ex}活度数据和对应的岩心深度数据。数据化处理时包含了对数据的精选,只选择数据分析测试质量高、²¹⁰Pb_{ex}剖面数据正常的站点。

单位同化 不同的学者²¹⁰Pb 活度单位不同,既有 Bq/g,也有 dpm/g 和 Bq/kg,本次研究统一处理成 Bq/kg,且统一活度坐标为对数单位。因测试仪器不同导致²¹⁰Pb 活度值差别较大,但计算显示不影响岩心²¹⁰Pb 剖面垂向变化趋势、沉积速率计算与混合层判断,不影响本文结果分析。

混合层判断 长江口及邻近陆架沉积环境背景下,大多数²¹⁰Pb_{ex}剖面的顶部 5~10 cm 发育一层相对均匀或者是活度异常的层位,这可能是表层易受到强烈物理或者生物混合作用的结果,抑或是与两者综合作用有关。²¹⁰Pb_{ex}剖面形态,以均一段、近乎均一段、倒置等来判断混合层的厚度,混合层的存在,影响了沉积速率的估算,沉积速率的估算时混合层不列入计算。

沉积速率估算 岩心的沉积速率估算受到多种因素的干扰,计算方式也差别较大。岩心是否进行压实校正、岩心的拟合方式及岩心表层混合层是否去除等都对计算结果产生影响。为最大限度的减少误差,首先会对收集数据进行同化处理,并去除表层混合层的影响。其次,依据长江口和内陆架的沉积物来源、沉积作用特征,所有²¹⁰Pb 剖面均采用恒定的初始浓度(CIC)模式计算沉积速率,以利于减少误差和进行沉积速率数据对比。最后,对有明显分段的²¹⁰Pb 剖面要分段计算各段的沉积速率,以便获得沉积体不同时间段的沉积速率信息。

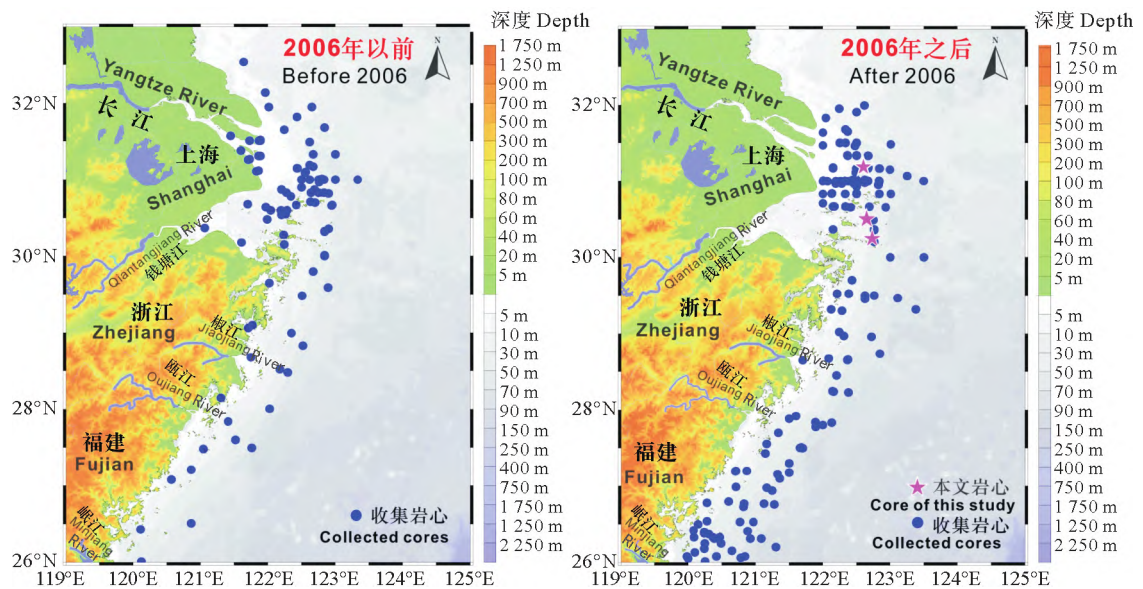


图 2 2006 年前后岩心站位空间分布

Fig.2 Selected cores in the Yangtze River estuary and its adjacent areas sampled before and after 2006

表 2 收集²¹⁰Pb 数据信息表

Table 2 Information of selected ²¹⁰Pb data

岩心数 Number of cores	取样时间 Sampling time	采样方法 Sampling method	仪器 Instrument	分析方法 Analytical method	数据来源 Sources
3	2019—2020	箱式 Box	γ	²¹⁰ Pb	本文
3	1980—1981	箱式 Box	α	²¹⁰ Pb/ ¹³⁷ Cs	[4]
10	1980—1982	箱式 Box	α	²¹⁰ Pb/ ¹³⁷ Cs	[15]
21	1990—1995	重力柱 Box	α	²¹⁰ Pb/ ¹³⁷ Css	[16]
10	1991—1999	重力柱 Box	α/γ	²¹⁰ Pb	[17]
12	1995—2003	重力柱 Box	γ	²¹⁰ Pb	[18]
10	1996—1999	重力柱 Box	γ	²¹⁰ Pb/ ¹³⁷ Cs	[5]
6	2003—2004	箱式/重力柱 Box/Gravity	α	²¹⁰ Pb	[12]
2	2003—2005	重力柱 Gravity	α	²¹⁰ Pb	[14]
16	2004—2008	重力柱 Gravity	α	²¹⁰ Pb	[7]
26	2004—2010	箱式/重力柱 Box/Gravity	γ	²¹⁰ Pb	[8]
8	2006	重力柱 Gravity	α	²¹⁰ Pb	[19]
1	2006	重力柱 Gravity	γ	²¹⁰ Pb/ ¹³⁷ Cs	[20]
7	2007	重力柱 Gravity	γ	²¹⁰ Pb	[6]
18	2007—2010	箱式/重力柱 Box/Gravity	γ	²¹⁰ Pb/ ¹³⁷ Cs	[21]
24	2009	重力柱 Gravity	α	²¹⁰ Pb	[22]
8	2012—2015	箱式 Box	γ	²¹⁰ Pb/ ¹³⁷ Cs	[23]
2	2013	重力柱 Gravity	α	²¹⁰ Pb/ ¹³⁷ Cs	[24]
21	2013—2015	重力柱 Gravity	α	²¹⁰ Pb	[25]
25	2013—2015	重力柱 Gravity	α	²¹⁰ Pb	[26]
16	2015—2016	箱式/重力柱 Box/Gravity	γ	²¹⁰ Pb	[9]

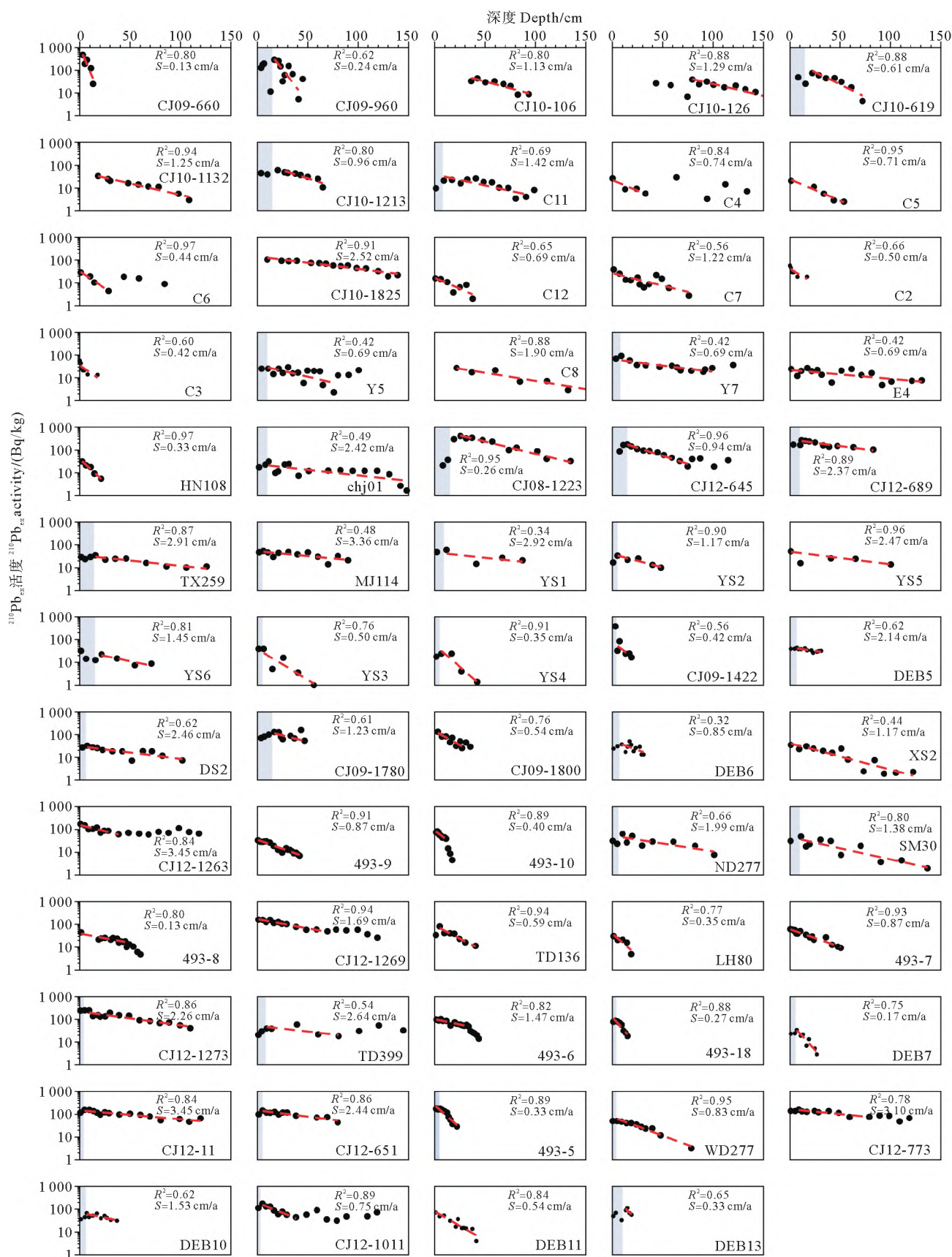
3 研究结果

3.1 建坝前后²¹⁰Pb_{ex} 剖面变化

将所有经同化处理后的岩心²¹⁰Pb_{ex} 剖面数据精选后重新绘图,2006 年前后的²¹⁰Pb_{ex} 剖面分别如图 3 和

图 4 所示,图中²¹⁰Pb_{ex} 剖面依据岩心的纬度坐标由北向南排布。

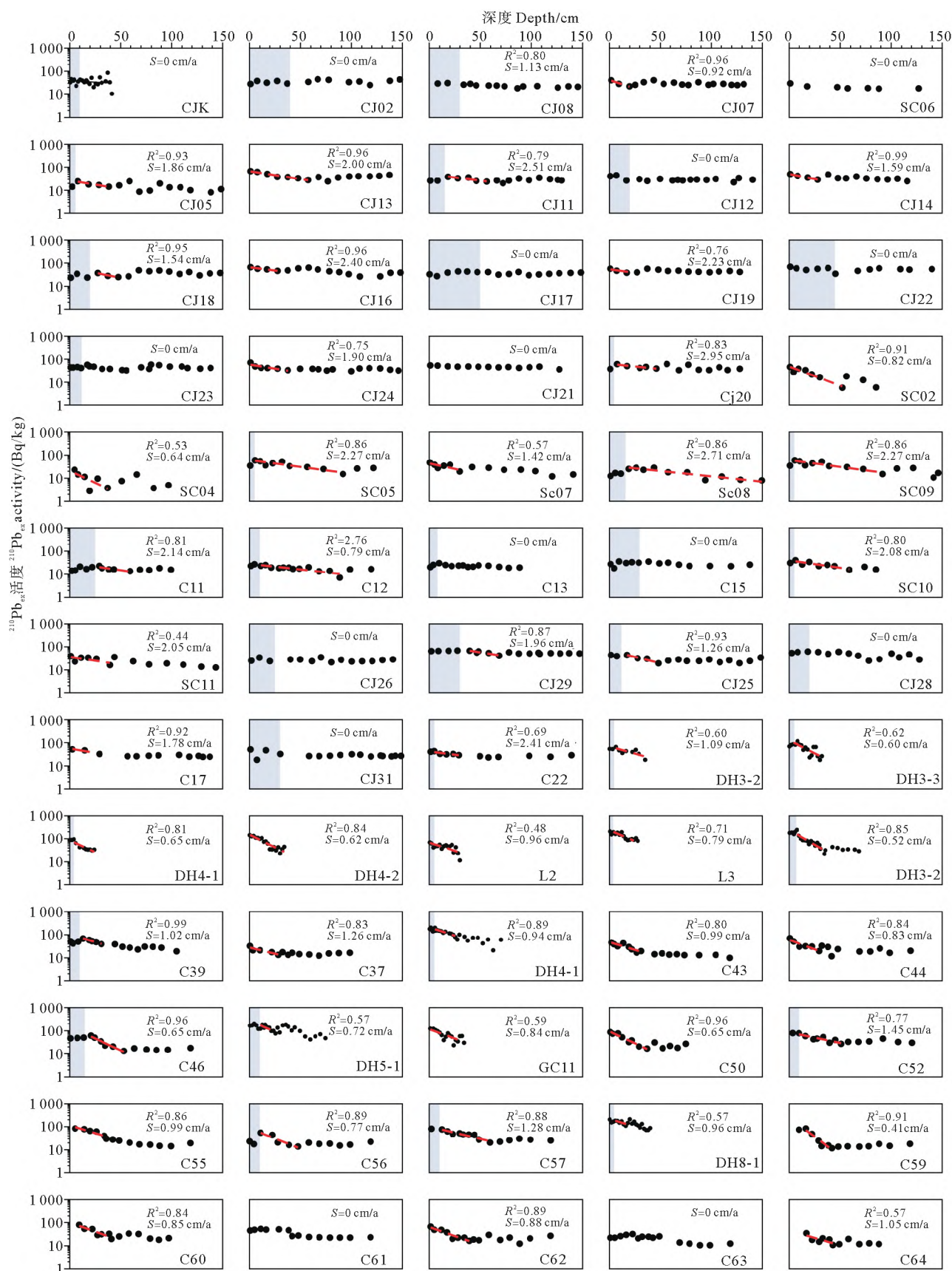
2006 年之前,长江水下三角洲及邻近东海内陆架沉积体中的²¹⁰Pb_{ex} 剖面总体上表现为常态衰变剖面,剖面中包含混合段、衰变段、背景段等,如若不考虑岩心



(蓝色阴影代表表层混合层的深度大小,红色虚线为拟合曲线,其他参数分别为岩心站位、沉积速率及相关系数 R^2 。Blue shading represents the surface mixed layer, red dashed line is the fitting curve, other parameters are core stations, sedimentation rate and correlation coefficient R^2 , respectively.)

图3 2006年以前 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 剖面特征图

Fig.3 Characteristics of $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ profiles sampled before 2006

图 4 2006 年之后 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 剖面特征图Fig.4 Characteristics of $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ profiles sampled after 2006

混合段则剖面组合形式为一段式或者两段式构成(见图3)。一段式: $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 剖面仅发育衰变段,未见背景段,如CJ10-1132、C5、C8等站位;部分一段式剖面的顶部发育混合层,如CJ10-619、Y7、TX259、YS6等站位。一段式 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 剖面见于研究区南部,主要分布于浙闽沿岸泥质区,反映沉积环境和沉积物供给较为稳定的连续沉积状态。两段式: $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 剖面由衰变段和本底段构成,如E4、chj01、CJ12-645、CH12-1269等站位,部分两段式剖面的顶部发育混合层,如chj01、CJ12-645等站位。二段式剖面形式不仅见于长江水下三角洲,浙闽沿岸泥质区及内陆架区域的站位也有分布,与一段式指示的沉积作用相同,反映了相对稳定的沉积环境和较稳定沉积物供给的连续沉积状态,该时期沉积物岩心的表层 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 活度变化集中于80~150 Bq/kg,南部岩心的表层活度相对要更高。

2006年之后,长江水下三角洲以及东海内陆架沉积体中 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 剖面发生了显著的改变,岩心剖面虽然都发育混合层、衰变段、背景段,但是组合形式发生了改变(见图4),除了出现一段式、两段式外,也出现了近似一条直线的均一段式剖面。一段式由衰变段构成,出现于C12、SC10、DH4-2、GC11等站位;两段式由衰变段和背景段构成,见于CJ07、CJ14、SC07、C43等站位。均一段式剖面 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 活度值为70~100 Bq/kg,明显低于该区岩心的初始 ^{210}Pb 值,应属于背景段,主要出现在CJ17、CJ22、C15、C61等站位,站位分布大多分布在长江河口地区,纬度分布则主要见于28°N以北。2006年之后的沉积物岩心表层 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 活度变化主要集中于40~110 Bq/kg,空间分布依然是南部岩心的表层 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 活度高于北部。

除了一段式以及两段式剖面,2006年前后也都出现了部分多段式剖面,即剖面形态经过多次变化,2006年前如TD399和439-6等站位,2006年之后如SC04和CJ05等站位,这往往代表沉积岩心所受物理或生物混合的周期性重复,或者是与研究区的沉积速率突变等有关^[27]。近似一条直线的一段式 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 剖面则比较特殊,这种剖面整段波动极小或者只有本底值,表明近百年沉积体被完全扰动混合或者没有沉积物堆积;背景一段式剖面分布于河口地区,它整段剖面的低 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 值揭示了该站位没有近期沉积,表明此种剖面代表岩心遭受了长期的冲刷侵蚀而处于侵蚀状态,在浙闽沿岸泥质区及内陆架稳定沉积环境则未见此种剖面。

3.2 建坝前后混合层的改变

柱状岩心表层混合层受控于其水动力变化以及生物扰动作用,是表征沉积环境状态的重要指标^[9],它可以依据 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 活度剖面识别。图3和图4中用蓝色阴影厚度代表了岩心表层混合层的深度大小。

2006年以前的64个岩心 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 剖面有约三分之一剖面发育表层混合层,混合层厚度介于5~20 cm之间,平均厚度为9 cm,沉积岩心表层混合层厚度及空间分布密度呈由北向南逐渐减少的趋势。含有表层混合层的岩心主要分布于长江河口水下三角洲地区,而内陆架含有混合层的岩心则很少。河口水下三角洲的岩心 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 剖面混合层深度能达到10~20 cm,而内陆架的岩心混合层厚度一般不超过5 cm(见图5)。

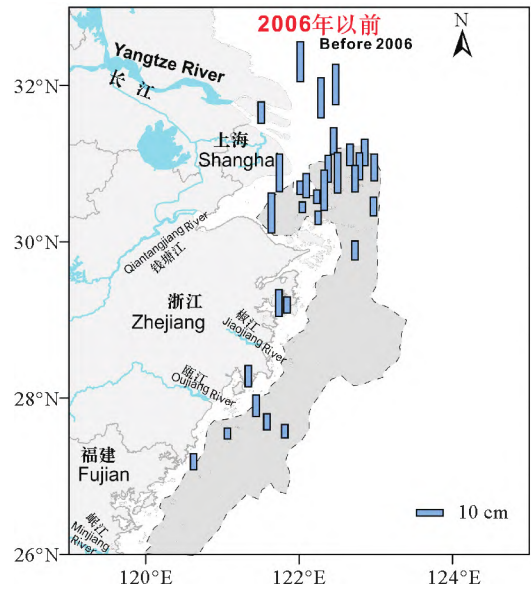


图5 2006年以前混合层空间分布特征

Fig.5 Spatial distribution of mixed layers before 2006

2006年之后,长江河口水下三角洲以及东海内陆架沉积岩心的 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 剖面表层混合层发生了显著的改变,表层混合层不仅深度变大,混合层的分布范围以及数量也都明显增加了。2006年之后的65个 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 剖面有近三分之二的剖面存在表层混合层,混合层厚度介于5~50 cm之间,平均厚度能达到18 cm,沉积岩心表层混合层的厚度及空间分布密度同样呈由北向南逐渐衰减的趋势。2006年之后三角洲混合层深度最大甚至能达到50 cm(CJ17站)。内陆架泥质区相比于河口三角洲沉积物供给大幅减少且沉积环境更为稳定,表层混合层平均深度约8 cm,最大能达到20 cm(C15和CJ31站),详细如图6所示。2006年之后 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 剖面有多个站位的沉积速率已为0,结果显示扰动较强的站位与沉积速率为0的站位分布一致均处于三角洲前缘地区,沉积减缓与扰动增强说明2006年之后河口三角洲地区沉积环境发生了较大的改变。

3.3 建坝前后河口及内陆架沉积速率的改变

沉积速率是沉积物供给和沉积作用的综合结果,亦是表征沉积环境状态的重要指标^[4,9]。我们将收集的岩心重新计算沉积速率并绘制沉积速率空间分布等

值线图。

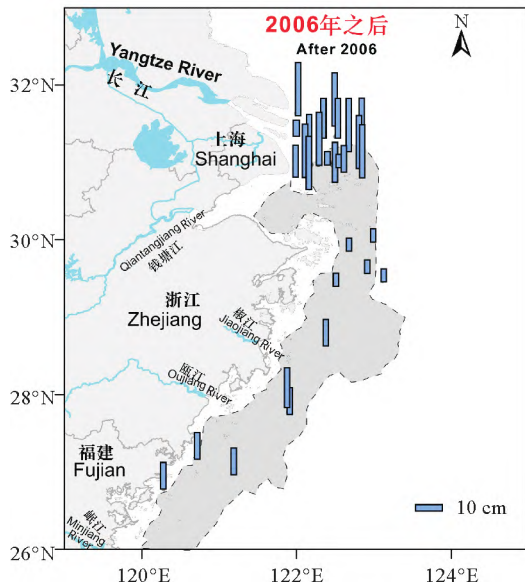


图 6 2006 年之后混合层空间分布特征

Fig.6 Spatial distribution of mixed layers after 2006

2006 年以前,已有的研究主要聚焦于长江水下三角洲地区,相应的浙闽沿岸泥质区的研究成果较少。图 7(a)显示 2006 年以前沉积速率呈河口水下三角洲高内陆架低的空间分布格局,沉积速率的高值区主要是河口水下三角洲的泥质沉积中心,最高可达 5.4 cm/a。2006 年以前三峡大坝建设的影响还未给近海沉积带来明显的影响,长江水下三角洲沉积体能得到大量陆源沉积物补充,岩心的沉积速率较大,大部分区域平均沉积速率大小约为 2~3 cm/a,极少的区域沉积速率超过 3 cm/a。远距离输送沉积到偏南部浙闽沿岸泥质带的沉积物有限,平均沉积速率介于 1~3 cm/a。而内陆架的沉积速率则相对较低,岩心沉积速率不足 2 cm/a。图 3 的 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 剖面图显示长江水下三角洲地区岩心的表层比活度要更高,而基本趋势是越往内陆架及更南部地区则表层 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 比活度越低。

2006 年之后沉积岩心的沉积速率发生了较大变化,但沉积速率的空间分布格局依然是河口三角洲高内陆架低(见图 7(b))。沉积速率的高值区出现在河口三角洲前缘,沉积速率最高值为 2.95 cm/a(CJ20 站位)。2006 年之后三峡建坝造成的入海泥沙锐减的影响已经较为显著,研究区沉积体的沉积速率降幅明显,河口三角洲地区沉积速率普遍小于 2 cm/a。浙闽沿岸泥质带的沉积体受到的影响较小,平均沉积速率降幅较小但整体已不足 2 cm/a,而内陆架沉积体的沉积速率大小甚至已经不足 1 cm/a。图 4 的 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 剖面图显示表层活度整体降幅较大,表层 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 比活度整体分布趋势依然是河口三角洲高内陆架低。

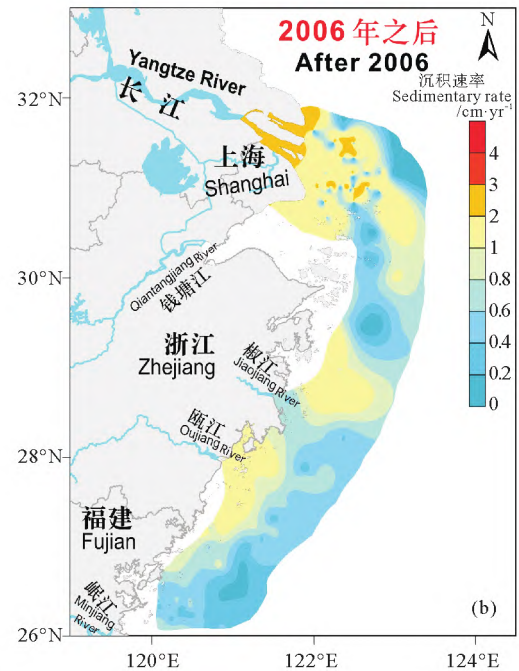
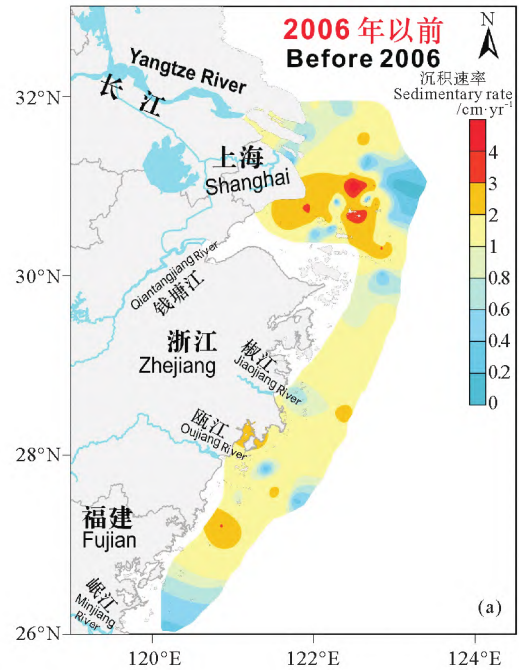


图 7 2006 年前后沉积速率空间分布特征

Fig.7 Spatial distribution of sedimentary rates before and after 2006

2006 年之后出现了部分沉积速率为 0 的岩心(CJK、CJ17、C15 等站位),主要分布于河口三角洲前缘地区,与 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 剖面表层混合层厚度较大的岩心分布一致。这些剖面分两种,仅个别剖面是 ^{210}Pb 剖面被完全扰动,大部分剖面则是 ^{210}Pb 比活度很低接近沉积背景值。排除前者的影响,接近背景值的 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 垂向剖面呈现近似一条直线的均一段式表明其受到了较强的侵蚀作用。

4 讨论

4.1 长江入海沉积物减少和性质变异对水下三角洲及邻近海域冲淤的影响

长江水下三角洲冲淤受控于河流、海洋动力和海平面变化这三大因素,在几十年的短暂时间段内,海平面和海洋动力环境的变化可以忽略,河流成为制约三角洲淤积的主导因素。长江流域超级大坝(蓄水量 $>10^8 \text{ m}^3$)建设截至2020年底已达272座,整个流域水库的总库容也已高达 345.3 km^3 。近20年间仅大通站记录到的长江来沙已然骤减超过70%,加上流域水土保持项目、采水采沙及梯型水库工程都对流域水沙输运产生重要的影响。长江流域重大水利工程建设又以三峡大坝的影响最大,截至2020年底三峡水库

沉积物总淤积量已达 $19.768 \times 10^8 \text{ t}$,近似每年淤积 $1.124 \times 10^8 \text{ t}^{[3]}$ 。

相较于1950—2006年,2006—2020年长江流域除了入海年径流量变化不大以外其余参数都发生了很大变化,分别为流域平均水库容积增加了199.3%、入海年平均泥沙量减少了70.2%以及入海平均悬沙中值粒径增大了45.2%。长江入海的悬沙中值粒径能够反映陆源入海沉积物的基本特征,2006年之后长江入海悬沙中值粒径是在急剧粗化的。1950—2006年长江入海悬沙中值粒径多年均值为 $8.91 \mu\text{m}$,而2006—2020年入海悬沙中值粒径多年均值为 $12.94 \mu\text{m}$ (见图8),悬沙粒径最高甚至达到了约 $20 \mu\text{m}$ 。沉积物粗化适合短途搬运和沉积,更有利于水下三角洲以及内陆架的北部等处发生沉积。

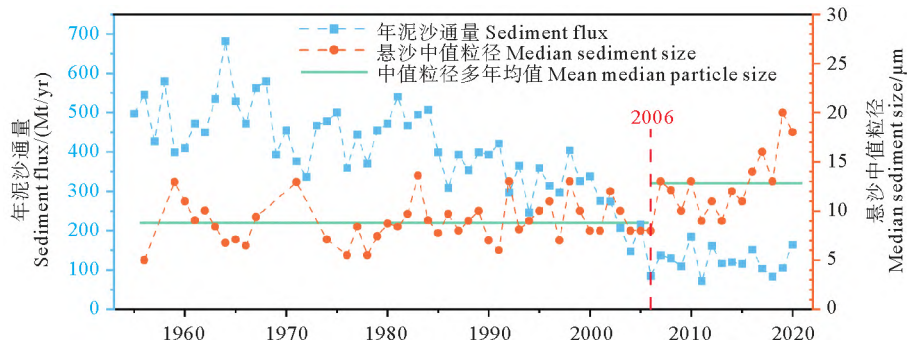


图8 长江历年泥沙通量及入海悬沙粒径变化特征

Fig.8 The annual sediment discharges and their grain sizes of the Yangtze River during latest decades

由于三峡建坝影响的滞后性,三峡建坝后的2006年才记录到长江入海泥沙急剧减少的趋势。相比于1950—2006年流域入海泥沙随流域拦河建筑的缓慢降低,2006年之后长江入海的泥沙通量呈现断崖式下跌,而人类活动对长江入海径流量影响较小。据前人研究,维持长江水下三角洲的冲淤平衡的入海泥沙量为 $2.7 \times 10^8 \text{ t}$,当入海泥沙少于 $2.7 \times 10^8 \text{ t}$ 即进入侵蚀状态^[28]。而2006—2020年长江年平均入海泥沙仅 $1.27 \times 10^8 \text{ t}$,这远远小于三角洲沉积平衡的泥沙量,相应造成的结果也就与我们得到的水下三角洲从2006以后沉积速率明显降低一致。前人研究表明,长江入海沉积物只有约30%沉积在河口水下三角洲上,剩下的部分随着浙闽沿岸流被搬运到浙闽沿岸并发生沉积^[12]。长江入海沉积物的减少不仅影响河口三角洲也影响到进入浙闽沿岸的沉积物,导致该处沉积速率出现了降低的现象。除非地形发生实质性的巨变,否则稳定沉积环境的浙闽沿岸的悬沙年输入量是相对恒定的。同时浙闽沿岸接受了来自长江水下三角洲侵蚀区侵蚀物质的补充,部分侵蚀物质南向输抵消了长江入海沉积物

减少的影响^[28],也表现在该处沉积速率减少幅度较小,与上文中 ^{210}Pb 剖面计算的结果一致。

4.2 底栖生物扰动状态的改变影响混合层

生物扰动构造是沉积体的基本特征之一,也是表征海洋底质沉积环境状况的重要指标。底栖生物对沉积环境变化极其敏感,当沉积环境变化生物会迅速的做出适应性调整,这种调整导致底质生物扰动状态会随着沉积环境变化而发生改变^[29]。底栖生物扰动状态与沉积物的沉积速率密切相关,低沉积速率地区更适宜底栖生物的筑穴生存,而高沉积速率地区几乎不发育生物扰动构造^[30]。

2006年以前巨量流域入海沉积物供给研究区沉积速率高。已有的研究成果表明该时期研究区生物扰动强度有明显的分带性,其中前三角洲及过渡带的生物扰动构造发育,而沉积速率较高的三角洲前缘地区几乎不发育生物扰动构造^[31]。为了更好的表征2006年之后底栖生物扰动状态的改变,我们将搜集的部分岩心结合本文岩心计算底栖生物扰动强度。基于沉积物岩心CT扫描重构后切片图像确立岩心的生物扰动

状况,利用计算机断层扫描的三维重构技术对沉积物岩心的生物扰动构造进行重构并计算其生物扰动强度^[32],再进行数字图像处理实现生物扰动强度的定量表征。研究区的生物扰动构造主要是以网状和根系的虫孔构造呈现(挖掘、觅食、逃逸),其次也含有生物遗迹等扰动构造类型^[32]。研究区生物种类主要有多毛类、软体动物、甲壳类、棘皮动物等四大类,其中多毛类是研究区最主要的造迹生物,自近岸至外海逐渐降低^[32-33]。高强度的生物活动会增加表层混合的强度,进一步增加表层沉积物与底部沉积物的交换与混合,故混合层的空间分布趋势应与生物扰动强度的分布趋势相近。研究区浅表层的生物扰动强度空间分布见图9所示。

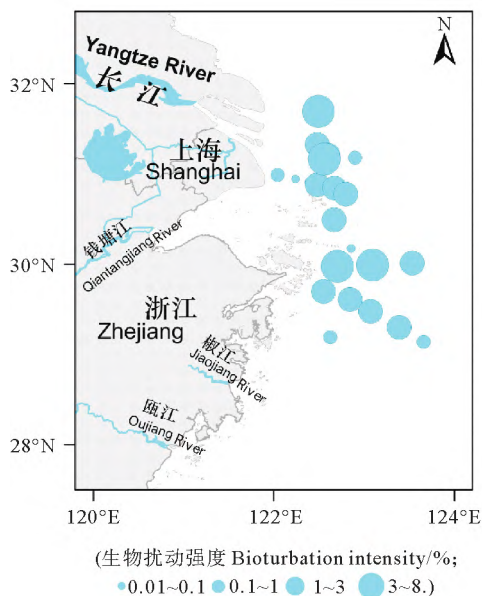


图9 底质生物扰动强度空间分布特征

Fig.9 Spatial distribution of bioturbation intensity

结果显示 2006 年之后研究区生物扰动强度呈前三角洲高周边地区低的空间分布特征,这与上文 2006 年之后表层混合层的分布模式几乎一致,表明前三角洲的沉积环境更适宜生物生存。这与上文 2006 年之后表层混合层的分布模式几乎一致,表明前三角洲的沉积环境更适宜生物生存。2006 年之后入海沉积物断崖式下跌,河口前三角洲与过渡带地区沉积物供给减少沉积速率大幅降低,造成了河口前三角洲与过渡带的生物扰动构造增加,扰动层厚度增大;而三角洲前缘地区扰动构造由不发育到极度发育,扰动层厚度大幅增大,推测该区域大概率遭受了侵蚀作用,沉积环境更适宜底栖生物生存其扰动作用增强。

5 结论

本文基于大量同化处理后的放射性²¹⁰Pb 成果数据,探讨了三峡建坝前后长江水下三角洲及邻近陆架沉积体沉积速率变化特征,并就长江入海输沙的减少、沉积物性质变异及底栖生物扰动状态改变分析影响沉积速率的因素,得到以下结论:

(1)2006 年之前,长江水下三角洲及内陆架平均沉积速率介于 2 cm/a 到 5.4 cm/a,从水下三角洲到内陆架沉积速率逐渐减少。该阶段混合层厚度较薄,其中水下三角洲为 5~20 cm,内陆架不足 5 cm。

(2)2006 年之后,长江水下三角洲及内陆架沉积速率显著降低整体不足 2 cm/a,空间上仍然从水下三角洲到内陆架沉积速率逐渐减少;同时,在水下三角洲上出现了无沉积的零星状分布的站点。该阶段混合层发育程度增强、厚度增大,其中水下三角洲为 5~50 cm,内陆架为 5~20 cm。

(3)长江水下三角洲和内陆架沉积速率改变主要原因是流域内的重大人类活动引起长江入海泥沙颗粒粒径增大、通量巨减,沉积速率的改变促进了底栖生物发育使得表层混合作用增强。

参考文献:

- [1] Milliman J D, Farnsworth K L. River Discharge to the Coastal Ocean: Human Activities and Their Impacts[M]. New York: Cambridge University Press, 2011: 115-164.
- [2] Xu B, Bianchi T S, Allison M A, et al. Using multi-radiotracer techniques to better understand sedimentary dynamics of reworked muds in the Changjiang River estuary and inner shelf of East China Sea[J]. Marine Geology, 2015, 370: 76-86.
- [3] Yang H F, Yang S L, Xu K H, et al. Human impacts on sediment in the Yangtze River: A review and new perspectives[J]. Global and Planetary Change, 2018, 162: 8-17.
- [4] Demaster D J, McKee B A, Nittrover 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.
- [5] Su C C, Huh C A. ²¹⁰Pb, ¹³⁷Cs and ^{239,240}Pu in East China Sea sediments: sources, pathways and budgets of sediments and radionuclides[J]. Marine Geology, 2002, 183(1-4): 163-178.
- [6] 刘升发, 石学法, 刘焱光, 等. 东海内陆架泥质区沉积速率[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(6): 1-7.
- [7] Liu Shengfa, Shi Xuefa, Liu Yanguang, et al. Sedimentation rate of mud area in the East China Sea inner continental shelf[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2009, 29(6): 1-7.
- [7] 王昕, 石学法, 王国庆, 等. 长江口及邻近海域现代沉积速率及其对长江入海泥沙去向的指示意义[J]. 地球科学, 2013, 22(4): 763-775.
- Wang Xin, Shi Xuefa, Wang Guoqing, et al. Sedimentation rates and Its indication to distribution of Yangtze sediment supply around the Yangtze (Changjiang) River Estuary and Its adjacent area,

- China[J]. *Earth Science*, 2013, 22(4): 763-775.
- [8] Qiao S, Shi X, Wang G, et al. Sediment accumulation and budget in the Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea[J]. *Marine Geology*, 2017, 390: 270-281.
- [9] Sun X, Fan D, Liao H, et al. Variation in sedimentary ^{210}Pb over the last 60 years in the Yangtze River Estuary: New insight to the sedimentary processes[J]. *Marine Geology*, 2020, 427: 106240.
- [10] 黎兵, 严学新, 何中发, 等. 长江口水下地形演变对三峡水库蓄水的响应[J]. *科学通报*, 2015(18): 1735-1744.
Li Bin, Yan Xuexin, He Zhongfa, et al. Impacts of the Three Gorges Dam on the bathymetric evolution of the Yangtze River Estuary[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2015, 60: 1735-1744.
- [11] 于睿, 裴艳东, 高建华, 等. 长江水下三角洲邻近海域 ^{210}Pb 分布特征及沉积动力学指示意义[J]. *海洋通报*, 2017, 36(3): 8.
Yu Rui, Pei Yandong, Gao Jianhua, et al. Distribution of ^{210}Pb in the sediments of subaqueous Changjiang (Yangtze) Delta and its implications for the sediment dynamics[J]. *Marine Science Bulletin*, 2017, 36(3): 8.
- [12] Liu J P, Li A C, Xu K H, et al. Sedimentary features of the Yangtze River-derived along-shelf clinoform deposit in the East China Sea[J]. *Continental Shelf Research*, 2006, 26(17-18): 2141-2156.
- [13] 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.
Guo Zhigang, Yang Zuosheng, Fan Dejiang, et al. Seasonal sedimentary effect on the Changjiang estuary mud area[J]. *Acta Geographica sinica*, 2003, 58(4): 591-597.
- [14] 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 of the Changjiang (Yangtze river) estuary and Its influential factors[J]. *Quaternary Sciences*, 2007, 27(5): 690-699.
- [15] 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(1-2): 183-196.
- [16] 夏小明, 谢钦春, 李炎, 等. 东海沿岸海底沉积物中的 ^{137}Cs , ^{210}Pb 分布及其沉积环境解释[J]. *东海海洋*, 1999, 17(1), 20-27.
Xia Xiaoming, Xie Qinchun, Li Yan, et al. ^{137}Cs and ^{210}Pb profiles of the seabed cores along the East China Sea coast and their implications to sedimentary environment[J]. *Donghai Marine Science*, 1999, 17(1), 20-27.
- [17] 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] Wei T, Chen Z, Duan L, et al. Sedimentation rates in relation to sedimentary processes of the Yangtze Estuary, China[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2007, 71(1-2): 37-46.
- [19] 张瑞, 潘少明, 汪亚平, 等. 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(4): 704-713.
Zhang Rui, Pan Shaoming, Wang Yaping, et al. Sedimentation rates and characteristics of radionuclide ^{210}Pb at the subaqueous delta in Changjiang estuary[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009(4): 704-713.
- [20] Liu M, Fan D J. Geochemical records in the subaqueous Yangtze River delta and their responses to human activities in the past 60 years[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(6): 552-561.
- [21] Huh C A, Chen W, Hsu F H, et al. Modern (<100 years) sedimentation in the Taiwan Strait: Rates and source-to-sink pathways elucidated from radionuclides and particle size distribution[J]. *Continental Shelf Research*, 2011, 31(1): 47-63.
- [22] 谢文静. 长江口现代水下三角洲沉积物的 ^{210}Pb 垂向剖面特征及其沉积动力影响因素[D]. 南京: 南京大学, 2013.
Xie Wenjing. Characteristics and Sediment Dynamical Factors of ^{210}Pb Vertical Profiles of Surficial Sediments Over the Changjiang Subaqueous Delta[D]. Nanjing: Nanjing University, 2013.
- [23] Zhang K, Li A, Zhang J, et al. Recent sedimentary records in the East China Sea inner shelf and their response to environmental change and human activities[J]. *Journal of Oceanology and Limnology*, 2018, 36(5): 1537-1555.
- [24] Zhao Y, Zou X, Liu Q, et al. Clay mineralogy indicates the muddy sediment provenance in the estuarine-inner shelf of the East China Sea[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 152: 69-79.
- [25] Jia J, Gao J, Cai T, et al. Sediment accumulation and retention of the Changjiang (Yangtze River) subaqueous delta and its distal muds over the last century[J]. *Marine Geology*, 2018, 401: 2-16.
- [26] Gao J H, Shi Y, Sheng H, et al. Rapid response of the Changjiang (Yangtze) River and East China Sea source-to-sink conveying system to human induced catchment perturbations[J]. *Marine Geology*, 2019, 414: 1-17.
- [27] 范德江, 杨作升, 郭志刚. 中国陆架 ^{210}Pb 测年应用现状与思考[J]. *地球科学进展*, 2000, 15(3): 297-302.
Fan Dejiang, Yang Zuosheng, Guo Zhigang. Review of ^{210}Pb dating in the continental shelf of China[J]. *Advances in Earth Science*, 2000, 15(3): 297-302.
- [28] Deng B, Wu H, Yang S, et al. Longshore suspended sediment transport and its implications for submarine erosion off the Yangtze River Estuary[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2017, 190: 1-10.
- [29] Cutter Jr GR, Diaz RJ. Biological alteration of physically structured flood deposits on the Eel margin, northern California[J]. *Continental Shelf Research*, 2000, 20: 235-253.
- [30] Bentley Sr S J, Swales A, Pyenson B, et al. Sedimentation, bioturbation, and sedimentary fabric evolution on a modern mesotidal mudflat: A multi-tracer study of processes, rates, and scales[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2014, 141: 58-68.
- [31] 范德江, 徐琳, 齐红艳. 长江水下三角洲浅表沉积层中的生物扰动构造[J]. *海洋与湖沼*, 2008, 39(6): 577-584.
Fan Dejiang, Xu Lin, Qi Hongyan. Bioturbation in surficial sediments of subaqueous Changjiang (Yangtze) River delta[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2008, 39(6): 577-584.
- [32] 米智, 范德江, 刘晓航, 等. 基于计算机断层扫描技术重构三维生物扰动构造——以长江口现代沉积为例[J]. *海洋与湖沼*, 2021, 52(6): 11.
Mi Zhi, Fan Dejiang, Liu Xiaohang, et al. Three-dimensional reconstruction of bioturbation structure of modern sediments in Changjiang River estuary using computer tomography[J].

Oceanologia et Limnologia Sinica, 2021, 52(6): 11.

- [33] 刘录三. 黄东海大型底栖动物生物多样性现状及变化研究[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2002: 24-44.

Liu Lusan. Study on the Biodiversity of macrobenthos in the Yellow Sea and the East China Sea[D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2002: 24-44.

Changes of Sedimentation Rates in the Yangtze River Subaqueous Delta and Its Adjacent Inner Continental Shelf Before and After the Construction of the Three Gorges Dam

Cheng Peng¹, Liu Jingjing¹, Zhang Xin¹, Fan Dejiang^{1,2}

(1. College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. The Key Laboratory of Submarine Geosciences Technology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: Sedimentation rate is the combined result of sediment supply and deposition processes, and is also an important indicator to characterize the state of the depositional environment. Based on 254 radioactive ^{210}Pb data collected and supplemented from the Yangtze River subaqueous delta and its adjacent areas, this paper assimilated the data and recalculation the sedimentation rate using a unified method to analyze the changes of sedimentation rate in the study area before and after the construction of the Three Gorges Dam, and to explore the influence of the reduction of sediment discharge and grain size change of the Yangtze River subaqueous delta and its adjacent areas. The results show that the sedimentation rate of the Yangtze River subaqueous delta and the adjacent continental shelf decreased significantly after 2006, in which the sedimentation rate of the subaqueous delta decreased from a maximum of 5.4 cm/a to less than 2 cm/a overall, while that of the inner continental shelf decreased less from 1~2 cm/a to less than 1 cm/a, and the subaqueous delta also showed some non-sedimentation station. The surface mixing layer of the sediment increased after 2006, and the thickness of the surface mixed layer increased from 4~10 cm to 5~30 cm. The change of sedimentation rate is mainly governed by the huge decrease of sediment flux of the Yangtze River into the sea and the coarsening of sediment particles, while the change of sedimentation rate promotes the development of benthic organisms which leads to the increase of mixing processes.

Key words: three Gorges Dam; sedimentation rate; ^{210}Pb ; mixed layer; bioturbation

责任编辑 徐 环