

刘胜璟, 高建华, 徐笑梅, 等. 浙闽沿岸泥质区沉积物粒度组分对长江入海输沙量减少的响应[J]. 海洋学报, 2021, 43(3): 105–115, doi:10.12284/hyxb2021025

Liu Shengjing, Gao Jianhua, Xu Xiaomei, et al. Response of sediment grain size composition of the Zhe-Min coastal mud to the sediment load reduction of the Changjiang River entering the sea[J]. Haiyang Xuebao, 2021, 43(3): 105–115, doi:10.12284/hyxb2021025

## 浙闽沿岸泥质区沉积物粒度组分 对长江入海输沙量减少的响应

刘胜璟<sup>1,2</sup>, 高建华<sup>1,2\*</sup>, 徐笑梅<sup>1,2</sup>, 石勇<sup>1,2</sup>, 舒卓<sup>1,2</sup>, 吴昊<sup>1,2</sup>, 元冰瑜<sup>1,2</sup>, 贾建军<sup>3</sup>

(1. 南京大学 地理与海洋科学学院, 江苏 南京 210023; 2. 海岸与海岛开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210023; 3. 华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062)

**摘要:** 自 1950 年以来, 长江入海输沙量呈阶段性减少趋势; 作为长江远端泥, 长江入海输沙量的“减沙”效应在浙闽沿岸泥质区是否有相应的沉积信号? 若有, 该如何进行提取和解译? 为探讨以上问题, 在浙闽沿岸泥质区采集柱状样 5 根, 进行了高分辨率 (2 mm) 的粒度测试, 并通过端元分析手段分离出 4 个端元。结合研究区物源及水动力的空间差异, 发现各端元有其特定的指示意义: EM1 组分 (众数粒径约为 2  $\mu\text{m}$ ) 为长江来源的极细颗粒物; EM2 组分 (众数粒径约为 10  $\mu\text{m}$ ) 主要为长江及浙闽沿岸中小河流的细颗粒物, 但以长江为主; EM3 组分 (众数粒径约为 80  $\mu\text{m}$ ) 主要为台湾暖流带来的较粗颗粒物; EM4 组分 (众数粒径约为 200  $\mu\text{m}$ ) 为长江运输的粗颗粒物。进一步分析发现, EM1 组分对长江入海输沙量的阶段性减少有良好的响应关系: 由浙闽泥质区北部至南部响应强度依次降低; 在响应时间上存在滞后现象, 且从北到南滞后时间增加, 由北部的 4~6 年增加至南部的 10~14 年。总体来看, 细颗粒组分更能反映长江流域变化信息, 且泥质区的不同位置对流域变化信息的响应强度差异显著。

**关键词:** 浙闽泥质区; 粒度; 端元分析; 长江入海输沙量

中图分类号: P736.2

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2021)03-0105-11

### 1 引言

东海陆架是沉积物供给丰富的宽广陆架<sup>[1]</sup>, 发育了多个全新世泥质沉积体系, 这些沉积体的形成和演化, 与陆源物质输入、全球气候和海洋动力环境变化密切相关<sup>[2]</sup>。细颗粒沉积物是流域气候和环境等信息变化的良好载体<sup>[3]</sup>; 而泥质区稳定的沉积环境, 有利于细颗粒沉积物的保存<sup>[4]</sup>, 因而是反演流域变化的理想区域<sup>[5]</sup>。

自 1950 年以来, 受长江流域水库修建影响 (尤以

2003 年三峡大坝的截流最为突出), 长江入海输沙量大幅减少<sup>[6]</sup>。与此相适应, 长江入海沉积物组分及来源也逐渐发生变化: 2003 年以前, 黏土、粉砂及砂组分均主要来源于长江上游; 而 2003 年以后, 黏土组分仍然来源于上游, 但粉砂、砂组分已经主要由中下游河道侵蚀的沉积物提供<sup>[7]</sup>。浙闽沿岸泥区作为长江远端泥<sup>[8]</sup>, 是长江入海细颗粒沉积物重要的汇, 其沉积物分布特征对上述流域变化有哪些响应以及如何对这些信息进行提取和解译则成为值得探讨的科学问题。对该问题的研究, 不但有助于分析河口陆架沉积

收稿日期: 2019-12-09; 修订日期: 2020-01-27。

基金项目: 国家自然科学基金 (41776048, 41876092)。

作者简介: 刘胜璟 (1995—), 男, 江苏省连云港市人, 研究方向为海洋沉积学。E-mail: shjing\_liu@163.com

\* 通信作者: 高建华 (1973—), 教授, 主要从事海洋沉积动力学研究。E-mail: jhgao@nju.edu.cn

体系对流域变化的响应机理,也有助于深入探讨流域人类活动对河口-海岸-陆架沉积环境的影响及未来可能的变化。

粒度数据记录了大量的沉积信息,对其深入分析是了解沉积环境变化的有效手段<sup>[9]</sup>。沉积物粒度端元模型作为分析粒度数据的重要方法,能够分解出对应不同物源和水动力环境的端元频率分布曲线和相对含量变化<sup>[10]</sup>,结合区域沉积动力环境,可深入探讨各端元所代表的动力组分的物理意义,进而分析流域和气候等环境演变信息<sup>[11-12]</sup>。

以往应用端元模型所做的研究工作,多集中于对表层样进行分析,探讨不同沉积物端元在海洋动力作用下的输运范围和控制因素<sup>[13-14]</sup>;或局限于对单根柱状沉积物进行端元分析,研究长时间尺度的古环境变化,如东亚季风和海面变化等<sup>[15-16]</sup>。而在百年时间尺度上,尤其是器测时期以来,系统分析同一沉积体的不同部位对流域变化在响应时间和响应强度等方面的差异的研究还十分薄弱。

基于以上认识,本文应用 Paterson 和 Heslop<sup>[17]</sup>改进的端元分析模型对浙闽沿岸 5 根柱状样的高分辨率粒度数据进行分解,深度分析各柱状样粒度参数变化及其所蕴含的环境变化信息,进而对长江入海输沙量减少对浙闽沿岸泥质区造成的影响进行分析,并对二者间的响应机理进行探讨。

## 2 研究区域概况

浙闽沿岸泥质区分布在长江入海口以南,水深 60 m 以浅的浙江-福建沿岸地带,自长江口向南绵延 800 余千米,最宽处可达 100 km;其在 20~30 m 等深线处沉积厚度最大,向海延伸可到达水深 90 m 处<sup>[18]</sup>。源于洪季的细粒物质除就近沉积于长江水下三角洲外,在冬季受强烈北风影响,再悬浮作用加剧,部分沉积物被浙闽沿岸流夹带南下,为浙闽沿岸泥质区提供主要物质来源<sup>[19]</sup>;此外,浙闽沿岸及台湾西部的一些中小河流也是该区沉积物的重要来源<sup>[8]</sup>。

浙闽沿岸流系主要由浙闽沿岸流和台湾暖流组成。浙闽沿岸流分布在长江口以南的浙闽沿岸,冬季偏北风期间,浙闽沿岸流为一支较强的南向流,主要分布在 50 m 等深线的向岸一侧;夏季偏南风期间,浙闽沿岸流流速很小,甚至消失<sup>[20]</sup>。台湾暖流在浙闽沿岸流的东侧海域向北流,冬季东北风较强,台湾暖流只能影响到台湾海峡东南部;夏季,台湾暖流稳步向北推进,其表层水可向北伸至 30°N 附近,且位置稳定,年际变化不大<sup>[21]</sup>。此外,黑潮分支对该区域有一

定的入侵作用,主要体现为其从台湾东北部入侵至浙江外海中部 50 m 等深线处,转而沿 50 m 等深线流向东北<sup>[22]</sup>(图 1)。

## 3 材料与方法

### 3.1 样品采集

2018 年 5 月,在浙闽沿岸泥区用箱式采样器共采集 5 根柱状样,采样位置如图 1 所示,各柱状样信息见表 1。

### 3.2 实验室分析

#### 3.2.1 粒度测试

以 2 mm 为间隔进行高分辨率分样,共获得 1 012 个粒度样品。实验步骤如下:将 1 g 左右烘干全样放入洗净烧杯中,加入 10 mL 0.05 mol/L 六偏磷酸钠分散剂浸泡 24 h,期间搅拌 1~2 次,经超声震荡后,待上机测试。测量仪器为英国 Malvern2000 型激光粒度仪,仪器测量范围为 0.02~2 000 μm,粒级分辨率为 0.01,重复测量的相对误差小于 3%。粒度参数采用矩法计算。实验于南京大学海岸与海岛开发教育部重点实验室完成。

#### 3.2.2 <sup>210</sup>Pb 测年分析

将沉积物样品放在烘箱中,在 60°C 下烘干。将烘干样品研磨至 100 目,进行低本底 α 能谱仪(美国 EG&G 公司)测量,采用常量初始浓度(Constant Initial Concentration, CIC)模式<sup>[25]</sup>建立沉积物岩芯年代序列,最后根据式(1)和式(2)计算沉积物某层的沉积年代  $t$  和沉积速率  $R$ :

$$t = \lambda^{-1} \ln(A_0/A), \quad (1)$$

$$R = Z/t, \quad (2)$$

式中,  $A_0$  是沉积物柱状样中 <sup>210</sup>Pb 的总累计输入量(单位: Bq/cm<sup>2</sup>);  $A$  为一定质量深度  $Z$  以下各层沉积物中 <sup>210</sup>Pb 的累计总量(单位: Bq/cm<sup>2</sup>);  $Z$  为质量深度;  $R$  为沉积速率(单位: cm/a);  $\lambda$  为 <sup>210</sup>Pb 衰变常数(0.031 14 a<sup>-1</sup>);  $t$  为某层沉积物的沉积年代(单位: a)。样品的预处理和测试分析均在南京大学海岸与海岛开发教育部重点实验室完成。

#### 3.2.3 粒度端元分析

Weltje<sup>[10]</sup>对粒度数据分析方法进行了总结并提出了动力组分的概念,认为海洋沉积物的粒度分布是由不同物源或者不同的输运机制和路径所决定的,而上述每一过程都会优选出具有某一特征的粒级组合(即动力组分)。由此,沉积物的粒度数据  $X$  可表示为多个动力组分  $B$  的组合:

$$X = MB, \quad (3)$$

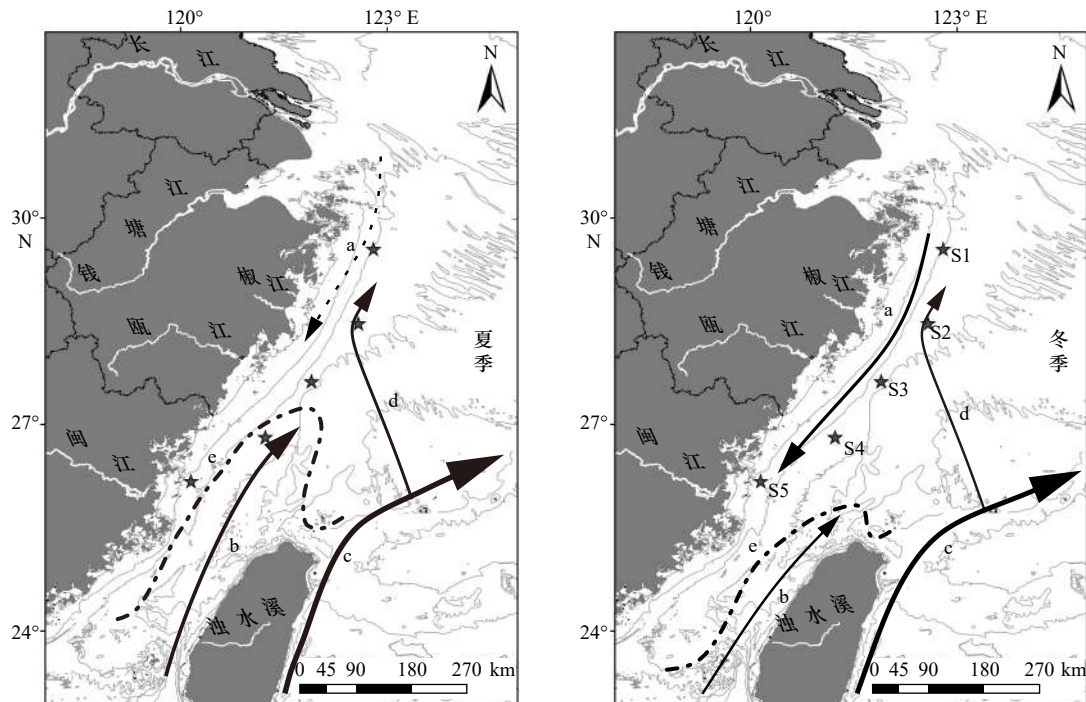


图1 研究区流系及采样点分布图(★为采样位置)

Fig. 1 Current systems and sampling distribution of the study area (★ represents the sampling position)

改绘自文献 [23-24]; a: 浙闽沿岸流; b: 台湾暖流; c: 黑潮; d: 黑潮入侵分支; e: 台湾物质可能的影响区域

Modified from references [23-24]; a: Zhe-Min Coastal Current; b: Taiwan Warm Current; c: Kuroshio; d: the branch of Kuroshio intrusion; e: possible area of impact of Taiwanese material

表1 柱状样信息

Table 1 The information of sample columns

柱状样编号	纬度	经度	水深/m	长度/cm
S1	29.55°N	122.80°E	58	38
S2	28.47°N	122.58°E	65	43
S3	27.63°N	121.90°E	65	36
S4	26.82°N	121.23°E	65	41
S5	26.18°N	120.15°E	28	46

式中,  $X$  为沉积物粒度矩阵;  $M$  为相对含量矩阵;  $B$  为动力组分矩阵;  $X$ 、 $M$  和  $B$  均为一维矩阵, 其矩阵元素之和都是 100%。由于样品是由动力组分混合而成, 每个样品中各动力组分相对含量的总和也是 100%, 因此式 (3) 中沉积物粒度矩阵、相对含量矩阵和动力组分矩阵都是成分数据。

基于此原理, 本文在 MATLAB 环境下运用 Pater-son 和 Heslop<sup>[17]</sup> 提供的 Anlysize-masters 程序对粒度数据进行端元分析。该程序提供了非参数化和参数化两种拟合方法, 而参数化方法中又包含 Lognormal、Weibull、Gen.Weibull、SGG 四种拟合类型。李帅等<sup>[26]</sup> 在对比非参数化方法与参数化方法时发现, 非参数化

方法的端元标准偏差均值远大于参数化方法, 且端元本身均呈现多峰分布形态, 未能表达出沉积物不同物源在搬运过程中不断分选后的粒度组合形态; 另外, 鉴于 Gen.Weibull 分布函数在形状上有更大的灵活性并能更好地控制偏度, 在分析大量数据时更为迅速, 故本文选择参数化方法中 Gen.Weibull 分布函数进行端元分解。

## 4 结果

### 4.1 沉积物粒度

各柱状样均呈褐黄色, 以黏土质粉砂组分为主, 砂质粉砂次之。柱样中存在一些砂质粉砂夹层, 颜色较深, 一般为灰黄色和灰色, 以柱状样 S4 出现频率最高, S1 和 S5 次之, S2 和 S3 较低。柱状样 S1 和 S5 存在少量贝壳碎屑, S1 主要分布在中部和底部, 数量相对较多; S5 主要分布在顶部和底部, 数量较少。

柱状样 S1-S5 的平均粒径分别介于  $5.32 \Phi \sim 6.91 \Phi$ ,  $6.57 \Phi \sim 7.38 \Phi$ ,  $6.77 \Phi \sim 7.41 \Phi$ ,  $5.99 \Phi \sim 6.92 \Phi$  和  $6.54 \Phi \sim 7.46 \Phi$  之间 (图 2)。各柱状样粒径平均值则是 S1 最小 ( $6.41 \Phi$ ), S4 次之 ( $6.57 \Phi$ ), S2、S3 和 S5 相当 (分别为  $7.15 \Phi$ 、 $7.23 \Phi$  和  $7.19 \Phi$ )。在垂向分布上, 各柱状样基本呈现出上部较粗, 随深度增加而变

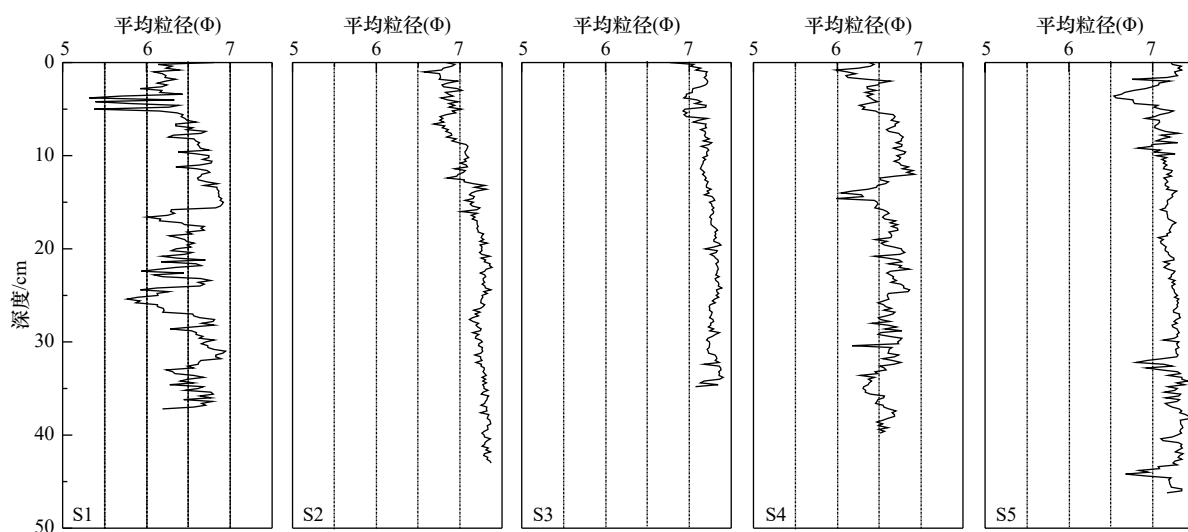


图2 各柱状样平均粒径垂向变化

Fig. 2 The mean grain size of each sample column

细的趋势,尤以 S1、S2 和 S4 上半部最为明显;此外, S1 和 S4 总体存在较多突变且突变范围大,而 S3 和 S5 总体颗粒较细且趋势稳定,存在少量突变。

#### 4.2 $^{210}\text{Pb}$ 测年

各柱状样不同深度层位对应的 $^{210}\text{Pb}$ 总活度与过剩 $^{210}\text{Pb}$ 值如图3所示:柱状样 S2 和 S3 在采样深度内到达本底值,分别为 1.12 dpm/g 和 1.15 dpm/g (1 Bq/g = 60 dpm/g);对于未测到本底值的柱状样,采用前人对该区域的测量结果,以 1.09 dpm/g 作为本底值<sup>[27]</sup>。经计算,得到 S1-S5 各柱状样沉积速率分别为 0.63 cm/a、0.36 cm/a、0.29 cm/a、0.94 cm/a 和 1.25 cm/a。

#### 4.3 端元分析结果

在假设端元数为 2、3、4、5、6 的情况下,对所有粒度数据进行拟合(表2)。通过对比分析发现,在端元数为 4 时, $R^2$  即达到 0.99 以上,说明 4 个端元即可满足绝大部分粒级的拟合要求;随端元数量增加,EM  $R^2$  却显著上升,即各端元独立性下降,根据端元分析法在满足拟合程度要求时,端元数量应该尽量少的原则<sup>[14]</sup>,本文选取 4 个端元对该研究区域粒度数据进行分解,所得分解结果如图4所示。

EM1-EM4 组分众数粒径依次变粗。其中 EM1 组分的众数粒径约为 2  $\mu\text{m}$ ,分布范围为 0.2~80  $\mu\text{m}$ ,以黏土组分为主。EM2 组分的众数粒径约为 10  $\mu\text{m}$ ,分布范围为 1~100  $\mu\text{m}$ ,以粉砂组分为主。EM3 组分的众数粒径约为 80  $\mu\text{m}$ ,分布范围为 6~200  $\mu\text{m}$ ,以极细砂组分为主。EM4 组分的众数粒径约为 200  $\mu\text{m}$ ,分布范围为 20~300  $\mu\text{m}$ ,以细砂组分为主。

#### 4.4 各端元组分的分布特征

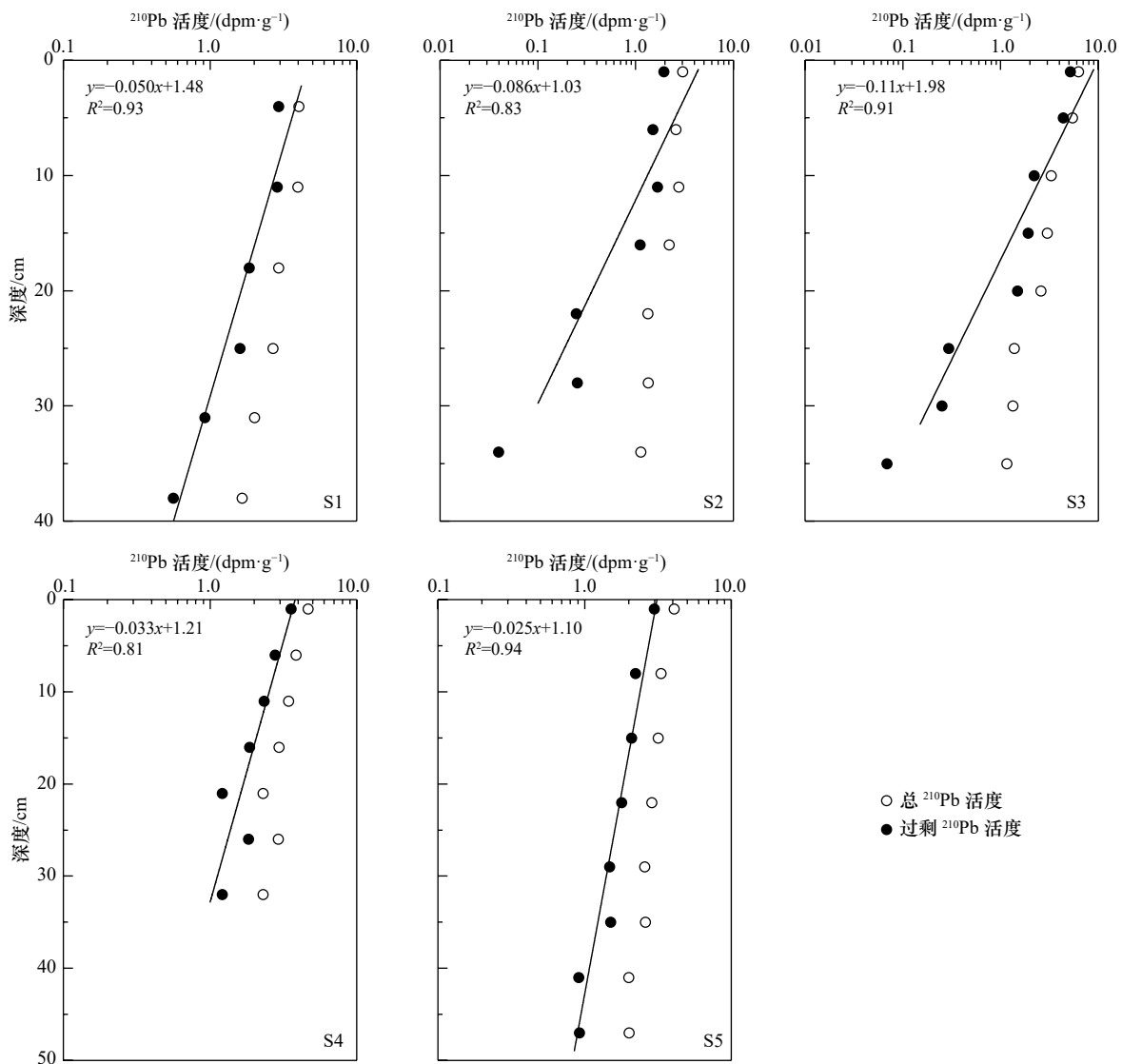
EM1 组分含量由柱状样 S1 到 S5 依次减少,即在空间上呈现自北向南逐渐降低趋势(图5);各柱状样的 EM1 组分含量在时间上呈下降趋势,其中柱状样 S1 下降幅度最大,表层较底部下降约为 20%,柱状样 S2 和 S5 次之, S4 下降幅度最小。各柱状样 EM2 组分含量基本稳定, S1 和 S4 相对含量较少,为 50% 左右; S2、S3 和 S5 含量较多,均在 60% 以上。EM3 组分则是 S4 含量明显高于其他柱状样含量,其平均含量大于 25%,而其他柱状样含量均在 10% 以下。另外,柱状样 S1 和 S3 含量基本稳定, S2 随时间推移略呈上升趋势, S4 和 S5 总体趋势稳定但存在较多突变。对于 EM4 组分, S1 平均含量(20% 以上)明显高于其他柱状样含量,且存在较多突变,其他柱状样含量接近为 0。

## 5 讨论

#### 5.1 不同端元组分对沉积动力环境的指示意义

端元组分的变化受物源和水动力共同影响<sup>[28]</sup>。从沉积物来源来看,本研究区的物质来源以长江为主,沿岸中小河流也有一定程度贡献<sup>[14]</sup>,且向南贡献逐渐显著<sup>[8]</sup>。就水动力条件而言,除陆架环流(浙闽沿岸流和台湾暖流等)之外,极端事件(风暴、洪水等)也对本地区有一定影响。以下对各端元组分的指示意义进行详述。

EM1 组分以黏土组分为主,在空间上由北往南呈减少趋势,与长江物质入海后向南输运且含量逐渐减少的趋势一致。洪季,长江入海沉积物堆积在长江水

图3 各柱状样 $^{210}\text{Pb}$ 活度的垂向分布Fig. 3 Vertical distributions of  $^{210}\text{Pb}$  radioactivity in each sediment core

下三角洲; 冬季波浪作用下再悬浮显著, 细颗粒沉积物随浙闽沿岸流向南输运, 为浙闽泥质区及沿岸潮滩提供物质来源<sup>[29-30]</sup>。在百年时间尺度上, 长江入海沉积物在长江水下三角洲、浙闽泥质区北部、南部的分配比例为 3 : 5 : 2<sup>[8]</sup>, 即长江来源物质对浙闽泥质区的贡献由北到南依次减少。此外, 各柱状样 EM1 含量均随年代呈下降趋势, 与长江近年来输沙量逐渐减少的趋势一致(将在下文深入分析)。因而, EM1 组分可很好地指示长江来源的极细颗粒物。

EM2 组分以粉砂组分为主, 其在各柱状样中含量基本稳定。以往研究表明, 随浙闽沿岸流南向输运的长江沉积物主要为小于 18  $\mu\text{m}$  的均匀悬浮体<sup>[31]</sup>, 与本文中 EM1 和 EM2 组分的频率分布契合。值得注意的是, 柱状样 S2、S3 和 S5 中 EM2 组分含量较高, 且其

位置分别靠近椒江、甌江和闽江, 这可能是沿岸中小河流的贡献所致。总体而言, EM2 组分反映了以长江来源为主, 但也包含浙闽沿岸中小河流的贡献。此外, 柱状样 S2 和 S5 随时间推移略呈递减趋势(图 5), 可能与椒江和闽江近年来入海输沙量的显著减少有关<sup>[8, 14]</sup>。

EM3 主要为极细砂组分, 除柱状样 S4 含量较高外, 其他柱状样含量均小于 10%。柱状样 S4 所处位置受台湾暖流控制显著<sup>[23-24]</sup>, 但从现有研究来看, 有关台湾暖流是否能够将台湾河流物质输运到柱状样 S4 所在位置还存在较大的争议。Li 等<sup>[32]</sup> 研究认为, 东海陆架 50 m 以深区域均为残留沉积; 另外, Liu 等<sup>[33]</sup> 通过台湾海峡的浅剖研究也提出, 台湾河流来源的物质大部分沉积在台湾海峡, 只有少部分绕过台湾

表 2 端元拟合结果

Table 2 The results of end member unmixing

No. of EM <sub>s</sub>	EM R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>	Theta
2	1.742×10 <sup>-6</sup>	0.956	9.650
3	9.311×10 <sup>-3</sup>	0.979	6.723
4	0.020 5	0.996	3.044
5	0.182	0.998	1.896
6	0.108	0.999	1.342

注: No. of EM<sub>s</sub>为拟合端元数量; EM R<sup>2</sup>为所有拟合端元之间线性平方相关性的最大值; R<sup>2</sup>为测量数据集和拟合的端元数据集之间的线性平方相关性; Theta为测量数据集和拟合端元数据集之间的角度距离。

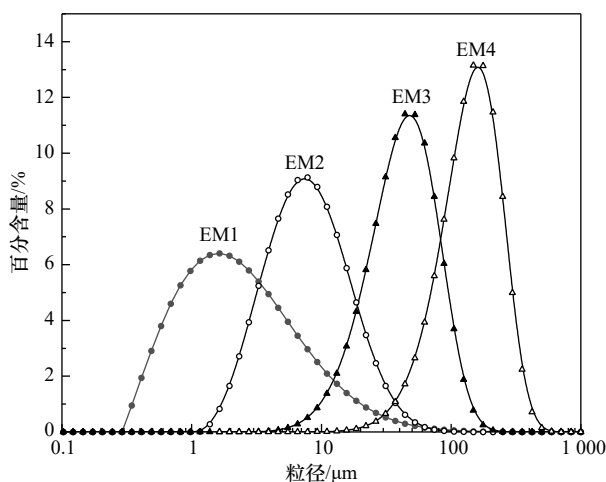


图 4 各端元频率分布

Fig. 4 Frequency distribution of each end member

北部向外海输运。因此,按照上述观点推论,柱状样 S4 处的物质更可能为残留沉积。

但是, Xu 等<sup>[23]</sup>在对东海沉积物来源进行辨析后却提出,东海南部区域的粗粒级组分(粉砂及砂)更可能来源于台湾河流(于夏季经台湾暖流输运而成)。综合该地区的沉积动力环境特点来看,台湾暖流流速在夏季较大,平均流速为 22.5 cm/s<sup>[34]</sup>,最大流速可达 33 cm/s<sup>[20]</sup>,且以次表层流为主<sup>[35]</sup>,因此台湾暖流对海底沉积物可能具有较强的搬运作用。阮美娜等<sup>[36]</sup>对夏季台湾海峡悬浮颗粒输运的观测结果为上述推断提供了直接的证据,而海峡内的大量沙波地形及风暴后海峡内地形的短期变化<sup>[37]</sup>也间接证明了台湾暖流的较强输运能力。此外,柱状样 S4 位于泥质区边缘(水深 65 m),沉积速率较高(0.94 cm/a),这进一步说明,该地区的沉积物并非残留沉积。综上所述,本文认为,柱状样 S4 处的 EM3 组分更可能为夏季经台湾暖流输运而来的台湾中小河流的粗颗粒物。

台湾西海岸分布着众多山溪性河流,每年向台湾海峡输送约 80 Mt 沉积物,且该地区易受台风等极端事件的影响,实际入海水沙通量可能更高<sup>[38]</sup>。在台湾暖流的作用下,台湾来源的粗颗粒可输运至台湾海峡东北部<sup>[23]</sup>(图 1)。而柱状样 S4 正好位于此区域内,因此该组分主要来源于台湾中小河流。其他 4 根柱状样 EM3 组分的含量较低,部分层位有一些突变峰值,可能与台风等极端事件有关<sup>[39]</sup>。

EM4 主要为细砂组分,该组分在河口地区(S1 柱状样)含量最高,其他柱状样含量极低。长江入海的细颗粒沉积物在冬季随浙闽沿岸流向南输运,粗颗粒沉积物却很难被输运,因而 EM4 可较好地指示长江来源的粗颗粒物。另外, S1 柱状样中的 EM4 组分在垂向上有波动,可能与洪水事件相关,因长江洪水期间的径流作用较强<sup>[40]</sup>,可将一部分粗颗粒输运到此地,造成沉积物中粗颗粒比重上升。

总体上, EM1 和 EM2 组分主要来源于长江,但也包含了一部分沿岸中小河流的贡献,是浙闽泥质区的主要物质来源,这与前人研究结果一致<sup>[19,31]</sup>。EM3 和 EM4 组分则主要与高能事件相关,受柱状样所在区域动力环境的影响, S4 柱状样中的 EM3 组分波动可能与风暴有关,而 S1 柱状样的 EM4 组分波动则主要受洪水事件影响。

## 5.2 EM1 组分对长江入海输沙量减少的响应

自 1950 年以来,一方面,没有证据表明浙闽沿岸水动力存在较大的阶段性变化;另一方面,长江流域的人类活动强度不断加剧,尤其是水库的不断修建,使长江入海输沙量呈阶段性减少趋势<sup>[7]</sup>。作为长江入海沉积物主要的“汇”,长江入海沉积物数量和组分来源的变化势必对浙闽沿岸泥质区的沉积物粒度及组分造成影响<sup>[41]</sup>,进而留下相应的沉积记录。

由图 6 可见,各端元组分中, EM1 组分的变化趋势与长江入海输沙量的阶段性减少存在显著的相关性。长江入海输沙量分 4 个阶段呈阶梯状减少: 1956–1969 年(阶段 I), 1970–1985 年(阶段 II), 1986–2002 年(阶段 III)和 2003 年以后(阶段 IV)<sup>[7]</sup>;而在曲线变化形态上,各柱状样 EM1 组分的变化也出现相应的减少阶段,分别与长江入海输沙量的变化相对应。柱状样 S1、S2 和 S3 的 4 个减少阶段分别为: 柱状样 S1 为 1960–1974 年、1975–1989 年、1990–2008 年和 2009 年以后;柱状样 S2 为 1961–1975 年、1976–1995 年、1996–2008 年和 2009 年以后;柱状样 S3 为 1964–1978 年、1979–1998 年、1999–2013 年和 2014 年以后。柱状样

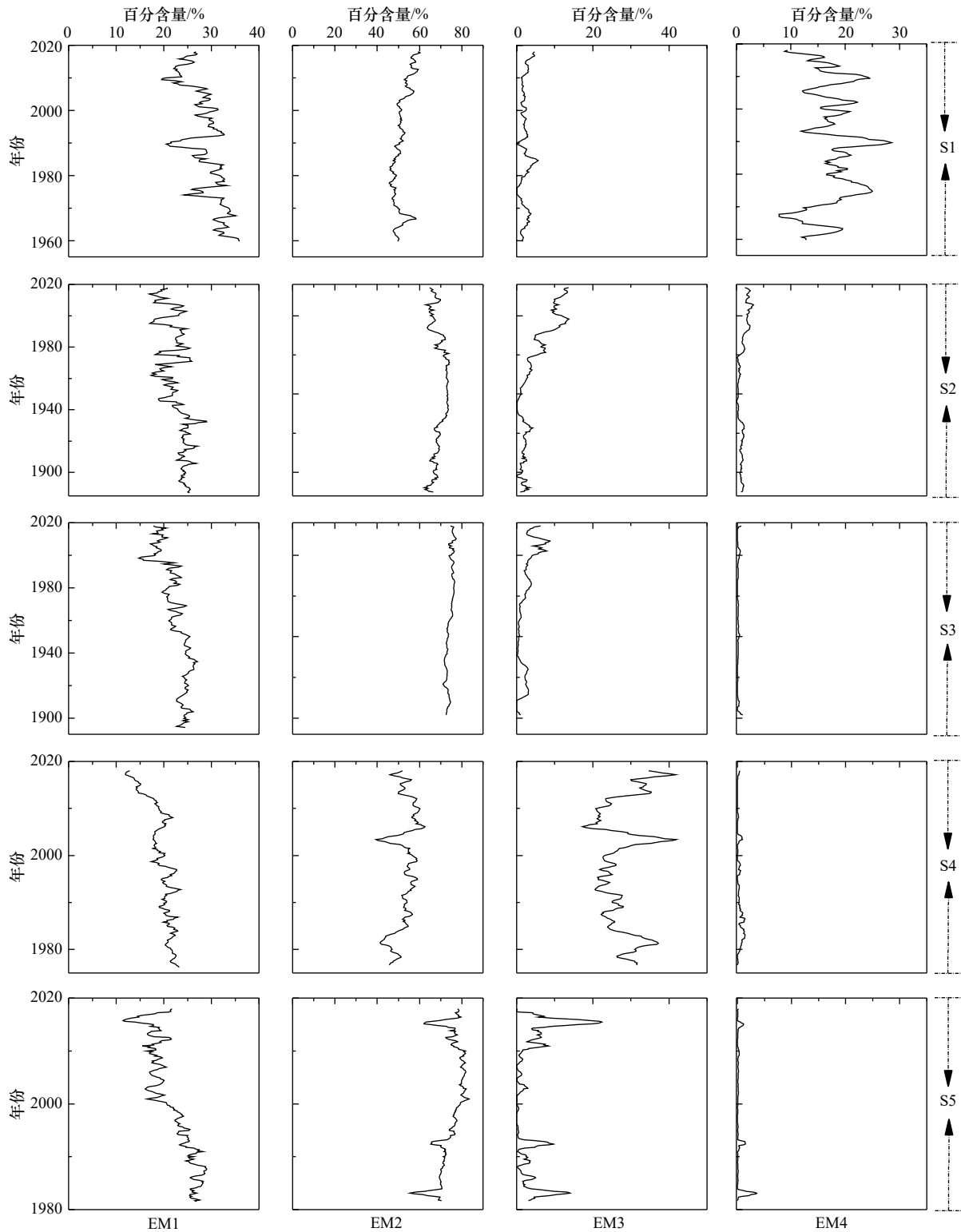


图5 各柱状样不同端元含量  
Fig. 5 Different end member content in each sediment core

S4 由于年代尺度限制, 可识别出 3 个减少阶段, 即 1981-1999 年、2000-2014 年和 2015 年以后, 分别与长江入海输沙量减少的后 3 个阶段对应。而柱状样 S5 水深为 28 m, 与其他柱状样水深相差太大, 故不予

讨论。值得注意的是, 各柱状样 EM1 组分在与长江入海输沙量阶段性降低的对应上, 均存在响应时间上的滞后效应, 由柱状样 S1-S4 滞后时间分别为: 4~6 年、5~10 年、8~13 年和 11~14 年, 呈现出由

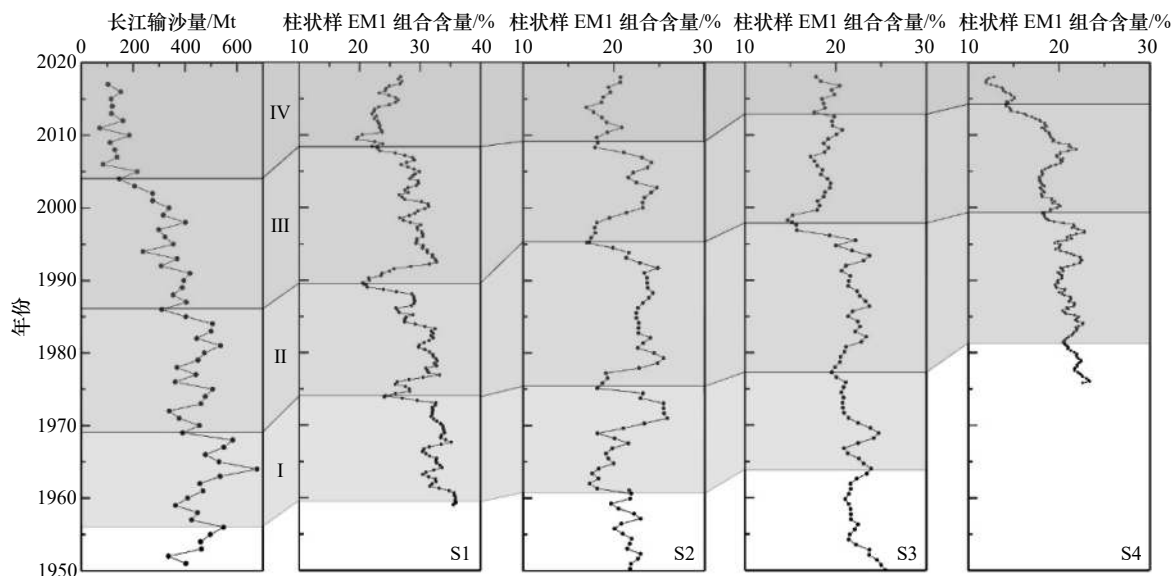


图 6 长江入海输沙量与 EM1 组分的变化关系

Fig. 6 The relationship between EM1 composition and the reduction of sediment entering into the sea from the Changjiang River

北到南滞后时间增加趋势;在柱状样之间的对比上,对应效果由北到南显著性降低,即响应强度由北到南依次降低。

前已述及,粗颗粒(EM3 和 EM4 组分)主要为高能沉积事件所致,细颗粒(EM1 和 EM2 组分)则通常对物源和水动力的变化较为敏感,前人经常将细颗粒作为气候等信息变化的敏感指标<sup>[42-44]</sup>。而 EM1 组分作为本研究中的最细粒组分,对物源的变化响应无疑更为敏感。另外,长江入海细颗粒物在随浙闽沿岸流南向输运过程中,较粗颗粒(EM2 组分)沉降较快,极细粒(EM1 组分)则在更远处沉积<sup>[12]</sup>,且极细粒物质容易发生跨锋面输运<sup>[45]</sup>,故更容易突破台湾暖流的屏蔽作用,以往关于台湾海峡黏土矿物的物源研究亦有所证明<sup>[23]</sup>。此外,在物质来源方面,EM2 组分有来自中小河流的物源供应,EM1 组分则主要来源于长江极细粒物质。

因此,本研究的各端元组分中,EM1 组分有着更大面积的空间分布和较为单纯的物质来源,故更能反映长江入海输沙量减少等流域变化信息。另外,在时间尺度上,沉积物在输运过程中存在显著的滞留现象,因而由北向南各柱状样存在不同程度的滞后(由北到南滞后时间增加)。在空间尺度上,长江物质供应量自北向南逐渐减少;且浙闽泥质区南部又受到沿岸中小河流影响,物源供应和动力环境更为复杂,对流域变化信号有一定的干扰作用。因此,南部地区柱状样 EM1 组分仅能在变化趋势上体现与长江入海输沙量减少的响应,二者之间的相关性要显著小于北部地区的柱状样。

综上,浙闽沿岸泥质区不同位置及不同组分对长江入海输沙量减少的响应存在显著差异。因此,今后通过沉积记录解译流域信息时,需充分考虑以上因素,以获得更加准确的流域变化信息。

## 6 结论

本文运用端元模型对浙闽沿岸泥质区 5 根柱状样的高分辨率粒度数据进行分解,得到指示沉积动力环境的 4 个端元:EM1 组分为长江来源的极细粒物质;EM2 组分主要为长江及中小河流的细颗粒物,以长江为主;EM3 组分主要为台湾暖流带来的较粗颗粒物;EM4 组分主要为长江洪季输运而来的粗颗粒物。其中,EM1 和 EM2 组分主要来源于长江,于冬季经浙闽沿岸流南向输运而成;EM3 与 EM4 组分则主要指示高能事件沉积。

长江入海沉积物通量的“减沙”效应在浙闽沿岸泥质区有显著的沉积学信号,体现为 EM1 组分对其有较好的响应关系,能够对应于长江入海输沙量减少的 4 个阶段,且由北到南响应强度依次降低;在响应时间上由北到南滞后时间增加,由浙闽北部 4~6 年增加至浙闽南部 10~14 年。本文为细颗粒反演流域变化信息提供了基础;在以后的反演工作中,需结合时间尺度与空间尺度,充分考虑到研究区响应特点,制定合理的研究计划。

**致谢:** 南京大学地理与海洋科学学院葛荣存在绘图方面提供了帮助,王成龙在样品采集工作中给予了帮助,审稿专家为本文提出了宝贵的修改意见,在此一并致谢!

## 参考文献:

- [1] 高抒. 海岸与陆架沉积: 动力过程、全球变化影响和地层记录[J]. *第四纪研究*, 2010, 30(5): 856–863.  
Gao Shu. Coastal and shelf sedimentation in association with dynamic processes, global change impacts, and stratigraphic records: an overview of the scientific problems[J]. *Quaternary Sciences*, 2010, 30(5): 856–863.
- [2] 石学法, 刘升发, 乔淑卿, 等. 东海闽浙沿岸泥质区沉积特征与古环境记录[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2010, 30(4): 19–30.  
Shi Xuefa, Liu Shengfa, Qiao Shuqing, et al. Depositional features and palaeoenvironmental records of the mud deposits in Min-Zhe coastal mud area, East China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2010, 30(4): 19–30.
- [3] 徐方建, 李安春, 万世明, 等. 东海内陆架泥质区中全新世环境敏感粒度组分的地质意义[J]. *海洋学报*, 2009, 31(3): 95–102.  
Xu Fangjian, Li Anchun, Wan Shiming, et al. The geological significance of environmental sensitive grain-size populations in the mud wedge of the East China Sea during the mid-Holocene[J]. *Haiyang Xuebao*, 2009, 31(3): 95–102.
- [4] 乔璐璐, 史经昊, 高飞, 等. 我国陆架泥质区沉积动力数值模拟研究进展[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2014, 34(3): 155–166.  
Qiao Lulu, Shi Jinghao, Gao Fei, et al. Numerical simulation of sediment dynamic processes for mud areas on the East China Sea continental shelves: A review[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2014, 34(3): 155–166.
- [5] 刘升发, 石学法, 刘焱光, 等. 中全新世以来东亚冬季风的东海内陆架泥质沉积记录[J]. *科学通报*, 2010, 55(21): 2306–2314.  
Liu Shengfa, Shi Xuefa, Liu Yan'guang, et al. Records of the East Asian winter monsoon from the mud area on the inner shelf of the East China Sea since the mid-Holocene[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(21): 2306–2314.
- [6] Gao Jianhua, Jia Jianjun, Kettner A J, et al. Reservoir-induced changes to fluvial fluxes and their downstream impacts on sedimentary processes: the Changjiang (Yangtze) River, China[J]. *Quaternary International*, 2018, 493: 187–197.
- [7] Gao J H, Jia J J, Wang Y P, et al. Variations in quantity, composition and grain size of Changjiang sediment discharging into the sea in response to human activities[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2015, 19(2): 645–655.
- [8] Jia Jianjun, Gao Jianhua, Cai Tinglu, 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.
- [9] 杨阳, 高抒, 周亮, 等. 海南新村港潟湖表层沉积物粒度特征及其沉积环境[J]. *海洋学报*, 2016, 38(1): 94–105.  
Yang Yang, Gao Shu, Zhou Liang, et al. Grain size distribution of surface sediments and sedimentary environment in the lagoon of Xincun, Hainan Island[J]. *Haiyang Xuebao*, 2016, 38(1): 94–105.
- [10] Weltje G J. End-member modeling of compositional data: numerical-statistical algorithms for solving the explicit mixing problem[J]. *Mathematical Geology*, 1997, 29(4): 503–549.
- [11] Weltje G J, Prins M A. Muddled or mixed? Inferring palaeoclimate from size distributions of deep-sea clastics[J]. *Sedimentary Geology*, 2003, 162(1/2): 39–62.
- [12] 张晓东, 许淑梅, 翟世奎, 等. 东海内陆架沉积气候信息的端元分析模型反演[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2006, 26(2): 25–32.  
Zhang Xiaodong, Xu Shumei, Zhai Shikui, et al. The inversion of climate information from the sediment of inner shelf of East China Sea using end-member model[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2006, 26(2): 25–32.
- [13] 张晓东, 翟世奎, 许淑梅. 端元分析模型在长江口邻近海域沉积物粒度数据反演方面的应用[J]. *海洋学报*, 2006, 28(4): 159–166.  
Zhang Xiaodong, Zhai Shikui, Xu Shumei. The application of grain-size end-member modeling to the shelf near the estuary of Changjiang River in China[J]. *Haiyang Xuebao*, 2006, 28(4): 159–166.
- [14] 薛成凤, 贾建军, 高抒, 等. 中小河流对长江水下三角洲远端泥沉积的贡献: 以椒江和瓯江为例[J]. *海洋学报*, 2018, 40(5): 75–89.  
Xue Chengfeng, Jia Jianjun, Gao Shu, et al. The contribution of middle and small rivers to the distal mud of subaqueous Changjiang Delta: Results from Jiaojiang River and Oujiang River[J]. *Haiyang Xuebao*, 2018, 40(5): 75–89.
- [15] 王可, 郑洪波, Prins M, 等. 东海内陆架泥质沉积反映的古环境演化[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2008, 28(4): 1–10.  
Wang Ke, Zheng Hongbo, Prins M, et al. High-resolution paleoenvironmental record of the mud sediments of the East China Sea inner shelf[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2008, 28(4): 1–10.
- [16] 赵松, 常凤鸣, 李铁刚, 等. 粒度端元法在东海内陆架古环境重建中的应用[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2017, 37(3): 187–196.  
Zhao Song, Chang Fengming, Li Tiegang, et al. The application of grain-size end member algorithm to paleoenvironmental reconstruction on inner shelf of East China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2017, 37(3): 187–196.
- [17] Paterson G A, Heslop D. New methods for unmixing sediment grain size data[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2015, 16(12): 4494–4506.
- [18] 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.
- [19] Liu J P, Xu K H, Li A C, et al. Flux and fate of Yangtze river sediment delivered to the East China Sea[J]. *Geomorphology*, 2007, 85(3/4): 208–224.
- [20] Guan Bingxian, Fang Guohong. Winter counter-wind currents off the southeastern China coast: a review[J]. *Journal of Oceanography*, 2006, 62(1): 1–24.
- [21] Yuan Dongliang, Zhu Jianrong, Li Chunyan, et al. Cross-shelf circulation in the Yellow and East China Seas indicated by MODIS satellite observations[J]. *Journal of Marine Systems*, 2008, 70(1/2): 134–149.

- [22] 于非, 臧家业, 郭炳火, 等. 黑潮水入侵东海陆架及陆架环流的若干现象[J]. *海洋科学进展*, 2002, 20(3): 21–28.  
Yu Fei, Zang Jiaye, Guo Binghuo, et al. Some phenomena of the Kuroshio intrusion into shelf area and the shelf circulation of the East China Sea[J]. *Advances in Marine Science*, 2002, 20(3): 21–28.
- [23] Xu Kehui, Milliman J D, Li Anchun, et al. Yangtze- and Taiwan-derived sediments on the inner shelf of East China Sea[J]. *Continental Shelf Research*, 2009, 29(18): 2240–2256.
- [24] 刘世东, 乔璐璐, 李广雪, 等. 东海内陆架悬浮体运输、通量及季节变化[J]. *海洋与湖沼*, 2018, 49(1): 24–39.  
Liu Shidong, Qiao Lulu, Li Guangxue, et al. Transport and flux of suspended sediment and its seasonal variation over the inner shelf of the East China Sea[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2018, 49(1): 24–39.
- [25] Goldberg E D, Koide M. Rates of sediment accumulation in the Indian Ocean[M]//*Earth Science and Meteoritics*. Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 1963: 90–102.
- [26] 李帅, 杨胜利, 梁敏豪, 等. 青藏高原东部黄土粒度分布的端元模型研究[J]. *地球与环境*, 2018, 46(4): 331–338.  
Li Shuai, Yang Shengli, Liang Minhao, et al. The end member model analysis on grain size of loess in the Eastern Tibetan Plateau[J]. *Earth and Environment*, 2018, 46(4): 331–338.
- [27] Gao Jianhua, Jia Jianjun, Sheng Hui, et al. Variations in the transport, distribution, and budget of  $^{210}\text{Pb}$  in sediment over the estuarine and inner shelf areas of the East China Sea due to Changjiang catchment changes[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2017, 122(1): 235–247.
- [28] 张晓东, 季阳, 杨作升, 等. 南黄海表层沉积物粒度端元反演及其对沉积动力环境的指示意义[J]. *中国科学: 地球科学*, 2016, 59(2): 258–267.  
Zhang Xiaodong, Ji Yang, Yang Zuosheng, et al. End member inversion of surface sediment grain size in the South Yellow Sea and its implications for dynamic sedimentary environments[J]. *Science China Earth Sciences*, 2016, 59(2): 258–267.
- [29] 杨作升, 郭志刚, 王兆祥, 等. 黄海陆架悬浮体向其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. Basic pattern of transport of suspended matter from the Yellow Sea and East China Sea to the eastern deep seas[J]. *Haiyang Xuebao*, 1992, 14(2): 81–90.
- [30] 郭志刚, 杨作升, 张东奇, 等. 冬、夏季东海北部悬浮体分布及海流对悬浮体运输的阻隔作用[J]. *海洋学报*, 2002, 24(5): 71–80.  
Guo Zhigang, Yang Zuosheng, Zhang Dongqi, et al. Seasonal distribution of suspended matter in the northern East China Sea and barrier effect of current circulation on its transport[J]. *Haiyang Xuebao*, 2002, 24(5): 71–80.
- [31] 范德江, 杨作升, 孙效功, 等. 东海陆架北部长江、黄河沉积物影响范围的定量估算[J]. *青岛海洋大学学报*, 2002, 32(5): 748–756.  
Fan Dejiang, Yang Zuosheng, Sun Xiaogong, et al. Quantitative evaluation of sediment provenance on the north area of the East China Sea Shelf[J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 2002, 32(5): 748–756.
- [32] Li Congxian, Chen Gang, Yao Ming, et al. The influences of suspended load on the sedimentation in the coastal zones and continental shelves of China[J]. *Marine Geology*, 1991, 96(3/4): 341–352.
- [33] Liu J P, Liu C S, Xu K H, et al. Flux and fate of small mountainous rivers derived sediments into the Taiwan Strait[J]. *Marine Geology*, 2008, 256(1/4): 65–76.
- [34] 李家彪. 东海区域地质[M]. 北京: 海洋出版社, 2008.  
Li Jiabiao. Regional Geology of the East China Sea[M]. Beijing: China Ocean Press, 2008.
- [35] 曾定勇, 倪晓波, 黄大吉. 冬季浙闽沿岸流与台湾暖流在浙南海域的时空变化[J]. *中国科学: 地球科学*, 2012, 42(7): 1123–1134.  
Zeng Dingyong, Ni Xiaobo, Huang Daji. Temporal and spatial variability of the ZheMin Coastal Current and the Taiwan Warm Current in winter in the southern Zhejiang coastal sea[J]. *Science Sinica Terrae*, 2012, 42(7): 1123–1134.
- [36] 阮美娜, 李炎, 陈一宁, 等. 夏季台湾海峡的悬浮颗粒通道: 现场粒度端元分析的证据[J]. *科学通报*, 2012, 57(36): 3522–3532.  
Ruan Meina, Li Yan, Chen Yining, et al. Summer pathways for suspended particles across the Taiwan Strait: evidence from the end-member analysis of in-situ particle size[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(36): 3522–3532.
- [37] Milliman J D, Lin S W, Kao S J, et al. Short-term changes in seafloor character due to flood-derived hyperpycnal discharge: typhoon Mindulle, Taiwan, July 2004[J]. *Geology*, 2007, 35(9): 779–782.
- [38] Kao S J, Milliman J D. Water and sediment discharge from small mountainous rivers, Taiwan: the roles of lithology, episodic events, and human activities[J]. *The Journal of Geology*, 2008, 116(5): 431–448.
- [39] Tian Yuan, Fan Dejiang, Zhang Xilin, et al. Event deposits of intense typhoons in the muddy wedge of the East China Sea over the past 150 years[J]. *Marine Geology*, 2019, 410: 109–121.
- [40] 李长安, 张玉芬, 袁胜元, 等. 江汉平原洪水沉积物的粒度特征及环境意义——以2005年汉江大洪水为例[J]. *第四纪研究*, 2009, 29(2): 276–281.  
Li Chang'an, Zhang Yufen, Yuan Shengyuan, et al. Grain size characteristics and environmental significance of Hanjiang 2005 flood sediments[J]. *Quaternary Sciences*, 2009, 29(2): 276–281.
- [41] Gao Juanhua, Shi Yong, Sheng Hui, 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.
- [42] 万世明, 李安春, Stuu J B W, 等. 南海北部ODP1146站粒度揭示的近20 Ma以来东亚季风演化[J]. *中国科学D辑: 地球科学*, 2007, 37(6): 761–770.

- Wan Shiming, Li Anchun, Stuut J B W, et al. The evolution of East Asian monsoon since nearly 20 Ma revealed from granularity of ODP1146 station in the north of the South China Sea[J]. *Science in China Series D: Earth Science*, 2007, 37(6): 761–770.
- [43] 肖尚斌, 李安春. 东海内陆架泥区沉积物的环境敏感粒度组分[J]. *沉积学报*, 2005, 23(1): 122–129.  
Xiao Shangbin, Li Anchun. A study on environmentally sensitive grain-size population in inner shelf of the East China Sea[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2005, 23(1): 122–129.
- [44] 郑洪波, 陈国成, 谢昕, 等. 南海晚第四纪陆源沉积: 粒度组成、动力控制及反映的东亚季风演化[J]. *第四纪研究*, 2008, 28(3): 414–424.  
Zheng Hongbo, Chen Guocheng, Xie Xin, et al. Grain size distribution and dynamic control of late quaternary terrigenous sediments in the South China Sea and their implication for East Asian monsoon evolution[J]. *Quaternary Sciences*, 2008, 28(3): 414–424.
- [45] 石勇, 高建华, 刘强, 等. 陆架环流作用下的北黄海中北部细颗粒物运输[J]. *海洋学报*, 2019, 41(4): 53–63.  
Shi Yong, Gao Jianhua, Liu Qiang, et al. Fine sediment transport in north-central of Yellow Sea: the role of continental shelf circulation[J]. *Haiyang Xuebao*, 2019, 41(4): 53–63.

## Response of sediment grain size composition of the Zhe-Min coastal mud to the sediment load reduction of the Changjiang River entering the sea

Liu Shengjing<sup>1,2</sup>, Gao Jianhua<sup>1,2</sup>, Xu Xiaomei<sup>1,2</sup>, Shi Yong<sup>1,2</sup>, Shu Zhuo<sup>1,2</sup>,  
Wu Hao<sup>1,2</sup>, Yuan Bingyu<sup>1,2</sup>, Jia Jianjun<sup>3</sup>

(1. School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. Key Laboratory of Coast and Island Development of the Ministry of Education, Nanjing 210023, China; 3. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

**Abstract:** Since 1950, the sediment load of the Changjiang River entering the sea has been stepwise decreasing. As the distal mud of the Changjiang River, whether the signal of “sediment load reduction” was recorded in the Zhe-Min coastal mud? If so, how to extract and interpret these sedimentary information? In order to discussing this scientific problem, 5 sediment cores were collected in the Zhe-Min coastal mud; in addition, high resolution grain size analysis (2 mm) was conducted, and four end members were obtained through end-member (EM) model decomposing. Combined with the analysis of the spatial discrepancy in provenance and hydrodynamics of the study area, the specific indicative significance of each EM was revealed: EM1 (with the modal grain size about 2  $\mu\text{m}$ ) is originated from extremely fine-grained sediment of the Changjiang River; EM2's (with the modal grain size about 10  $\mu\text{m}$ ) origin is predominated by the Changjiang River, and small part is contributed by the middle and small sized rivers of Zhe-Min coast; EM3 (with the modal grain size about 80  $\mu\text{m}$ ) mainly consists of coarse-grain sediment might be provided by Taiwan Warm Current; EM4 (with the modal grain size about 200  $\mu\text{m}$ ) is also characterized by coarse-grain sediment, and may be contributed by the Changjiang River. Further analysis indicated that, the EM1 variation was in agreement with the sediment stepwise reduction of the Changjiang River; however, the response intensity gradually decreased from the north to the south. In addition, the hysteresis existed in response time, and the retardation time increased from 4–6 years in the north to 10–14 years in the south. In general, fine-grained sediment could better reflect the Changjiang River catchment change information, and response intensity exhibited significant difference in different areas of the Zhe-Min coastal mud.

**Key words:** the Zhe-Min coastal mud; sediment grain size; end-member (EM) analysis; sediment entering into the sea from the Changjiang River