

杭州湾地区 SE3 孔全新世沉积物 敏感粒度端元分析方法研究*

周学谦¹ 林春明¹ 王 军² 张 霞¹ 李绪龙¹ 赵雨潇¹

1 南京大学地球科学与工程学院, 关键地球物质循环与成矿全国重点实验室, 江苏南京 210023

2 中国石油长庆油田公司第五采油厂, 陕西榆林 719000

摘 要 本研究以杭州湾地区 SE3 孔全新世沉积物为研究对象, 采用基本端元模型算法、非参数估计分解算法和粒级-标准偏差法对粒度数据进行分析, 旨在探讨研究区沉积物粒度端元的组成特征、垂向演化规律及其与物源和沉积环境演化的耦合关系。结果表明 3 种粒度端元分析方法具有良好的结果一致性, 但基本端元模型算法效果更好。研究层段共识别出 5 个粒度端元: EM1 (黏土和粉砂)、EM2 (粗粉砂和极粗粉砂)、EM3 (极细砂和细砂)、EM4 (细砂和中砂) 和 EM5 (中砂和粗砂)。各粒度端元的垂向展布规律受控于海平面、沉积环境和动力过程演变。粗粒的 EM5 和 EM4 端元为推移质, 主要由钱塘江提供, 分布在河床、河漫滩和古河口湾沉积单元内; 且随着海平面上升, 代表近源的 EM5 端元含量逐渐减少, 而代表相对远源的 EM4 端元含量逐渐升高。细粒的粒度端元 EM2 和 EM1 端元为悬移质, 主要来自长江, 分布在近岸浅海和现代河口湾沉积单元内; 此时海平面较高, 来自长江的沉积物可通过沿岸流和潮流搬运至钱塘江下切河谷内。EM3 为推移质, 分选好、粒度曲线呈正态分布, 主要分布在现代河口湾沉积单元内, 可能代表潮汐流和风暴潮搬运和筛选的沉积物。该研究揭示了沉积物敏感粒度端元分析在重建河口区海平面变化、环境演变以及源汇过程中的科学价值。

关键词 全新世 杭州湾 粒度端元 源汇过程 环境演变

第一作者简介 周学谦, 男, 1998 年生, 硕士研究生, 从事沉积学方向研究。

通讯作者简介 张霞, 女, 1985 年生, 副教授, 硕士研究生导师, 从事沉积学教学与科研。E-mail: zhangxia@nju.edu.cn。

中图分类号: P53 文献标志码: A

Sensitive grain-size end-member analysis for the Holocene sediments of core SE3 in Hangzhou Bay area

ZHOU Xueqian¹ LIN Chunming¹ WANG Jun² ZHANG Xia¹ LI Xulong¹ ZHAO Yuxiao¹

1 School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China

2 The Fifth Oil Production Plant, PetroChina Changqing Oilfield Company, Shaanxi Yulin 719000, China

Abstract This research uses the basic end-member modeling algorithm, non-parametric estimation decomposition algorithm, and grain size-standard deviation method to evaluate the grain-size data of the Holocene sediments from core SE3 in the Hangzhou Bay area, in order to investigate the vertical

* 国家自然科学基金项目 (编号: 42172105, 42172107 和 41772097) 资助。[Financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 42172105, 42172107, 41772097)]

收稿日期: 2024-03-31 改回日期: 2025-04-01

distribution pattern of different grain-size end-members and their coupling relationship with environmental evolution. Results show that the basic end-member modeling algorithm acts as the best method in decomposing grain-size end-member in comparison with the other two methods. Five grain-size end-members were identified in the study area by the basic end-member modeling algorithm: EM1 (clay and silt), EM2 (coarse silt and very coarse silt), EM3 (very coarse silt, very fine sand and fine sand), EM4 (fine sand and medium sand) and EM5 (medium sand and coarse sand). Their vertical distribution patterns are controlled by the evolution of sea level, depositional environment, and dynamic process. The coarse-grained end-members EM5 and EM4, representing bed load, are primarily supplied by the Qiantang River and distributed in the amalgamated fluvial channel, floodplain, and paleo-estuarine deposits. As sea levels rising, the content of proximal EM5 decreases upwards, while the content of relatively distal EM4 increases. The fine-grained end-members EM2 and EM1, representing suspended load, are distributed in the offshore shallow marine and present-day estuary stratigraphic units; they are mainly derived from the Changjiang by a combination of alongshore and tidal currents in a high sea-level setting. EM3, representing bed load with a normal distribution of grain size, is primarily distributed in the present-day estuary deposits, and probably represents the sediment transported and sorted by tidal currents and storm surges. This study sheds a new light in reconstructing the evolution history of sea level, environment, and source-to-sink processes in estuarine areas by using sensitive grain-size end-member algorithm analysis.

Key words Holocene, Hangzhou Bay, grain-size end-member, source-to-sink processes, environmental evolution

About the first author ZHOU Xueqian, born in 1998, a master candidate of Nanjing University, is engaged in sedimentology.

About the corresponding author ZHANG Xia, born in 1985, an associate professor of Nanjing University, is engaged in sedimentology. E-mail: zhangxia@nju.edu.cn.

0 引言

沉积物（岩）是气候变化、构造演化和人类活动等领域的重要研究对象，其物理、化学和矿物学特征可用于重建古环境和解析沉积过程。粒度作为沉积物（岩）最基本的物理性质，能够有效指示沉积动力条件，并在物源识别、沉积环境判别及水动力过程分析等方面发挥关键作用（Folk, 1980）。

粒度数据的分析方法在沉积学研究中得到了长足的发展，研究者们提出了多种基于统计学原理和数学建模的分析方法，以更好地揭示沉积物的物理特性和沉积环境。Folk 和 Ward（1957）建立了粒度参数计算公式，并利用粒度分布曲线解释沉积物的搬运和沉积特征；Mason 和 Folk（1958）引入标准偏差、偏态和峰态，以区分不同沉积环境和沉积世代；Visher（1965）通过粒度概率累积曲线探讨了河流沉积物结构特征与颗粒搬运机制的关系；

Sahu（1964）和 Klován（1966）进一步发展了基于粒度数据的沉积环境判别模型，为沉积环境重建提供了重要方法论支持。沉积物粒度数据已被广泛应用于全球海洋与陆架沉积研究，在揭示物源、季风演化、洋流变化及古环境重建等方面发挥了重要作用。例如，沉积物粒度数据已经被广泛应用于北太平洋（Rea and Hovan, 1995）、阿拉伯海（Prins *et al.*, 2000）、非洲西南岸（Stuut *et al.*, 2002；Pichevin *et al.*, 2005）、北大西洋（Gröger *et al.*, 2003）、南海（Boulay *et al.*, 2003）、东海（肖尚斌和李安春, 2005）等海区的沉积物溯源，以及季风和海流演化等等方面的研究（王可等, 2008）。这些方法为理解沉积物的源汇过程、搬运机制及其与环境演化的关系提供了重要的理论和技术支持。

传统粒度分析方法假设沉积物粒度由单一沉积过程控制，依据对数或线性坐标对粒度组分进行简

单分类。然而,在实际的沉积体系中,沉积物粒度特征受到多重物源供给、搬运过程中的混合作用以及水动力条件的复杂调控,导致不同粒级颗粒的混合与扩散,使得传统的统计参数方法难以精确解析沉积过程。Weltje (1997) 首次在沉积物研究中使用了粒度端元法,该方法通过数学统计分解,将沉积物粒度数据分解为若干端元组分,每个端元在粒级频率分布上相对稳定,对应于特定的物源类型或沉积搬运机制,从而提供了更具物理意义的沉积解释(王可等, 2008; 赵松等, 2017)。

在此基础上,研究者们进一步发展了多种粒度端元分析方法,以优化端元提取的准确性和适用性。例如非参数估计分解算法(Paterson and Heslop, 2015)通过非负矩阵分解方法进行端元计算,能够有效降低端元数量的不确定性;基本端元模型算法(Zhang *et al.*, 2020)则基于遗传算法优化计算过程,能够更精确地识别单峰端元,避免多源混合影响端元提取结果。

近年来,基于粒度端元法的研究在近海和陆架沉积环境研究中取得了广泛应用,并在物源示踪、沉积环境重建和气候变解析等方面展现出广泛应用价值。张晓东等(2015)利用粒度端元法解析南黄海表层沉积物的粒度组成,探讨了端元组分与物源及水动力环境的关系,结果表明端元法能够更准确地识别区域沉积动力过程;赵松等(2017)对比分析了不同端元方法在东海内陆架沉积物研究中的适用性,提取的 2 个端元有效指示了末次盛冰期以来海平面波动对沉积环境的影响;林镇坤等(2019)在南流江河口沉积物中识别出 5 个端元,并揭示了各端元所代表的不同水动力环境;王婷等(2022)在渤海湾西岸沉积物研究中,将粒度端元特征与气候和海平面变化联系起来,发现不同端元分别指示了不同物源输入及古气候事件;郝榕荣等(2023)基于威海湾沉积物的端元分析,利用多种方法提取了敏感粒度端元,成功反映了东亚季风变化事件。

上述研究成果不仅凸显了粒度端元法在沉积环境识别与重建方面的优势,也为源-汇系统中沉积物的来源、输送和沉积过程提供了新的视角和证据。在源-汇系统中,河流持续输送陆源物质至海洋,不仅在沉积物向海输送中发挥核心作用,同时也是地球化学循环的重要组成部分。因此,河流入

海沉积过程的研究对于理解全球变化与地球表层过程具有重要意义。近十几年来,中国大陆边缘沉积研究不断深入,并通过多项国际合作深化对河流入海沉积物的源-汇过程的理解。例如自然资源部的《全球变化与海气相互作用》专项(2010—2020)之《“源-汇”过程与陆海相互作用》项目,聚焦河流入海沉积体系的演变(石学法等, 2021)。

在全球河口系统研究中,东亚地区占据重要地位,该区域河流向海输送的沉积物通量约占全球总量的 70% (Milliman and Farnsworth, 2011)。江浙沿海平原属于典型的东亚平原河网区,水系发育、以长江与钱塘江为主要入海河流,每年向东海输送大量沉积物,形成复杂的多源沉积体系,记录了丰富的地质与古环境信息(林春明, 1997)。其中,钱塘江河口湾为强潮型河口,其下切河谷不仅接收亚洲大陆和东海陆架的物质供应,同时也是典型的边缘海源-汇系统,完整记录了全新世以来海平面变化、海陆相互作用及沉积环境演化过程。由于下切河谷对海陆相互作用、全球气候及海平面变化高度敏感,能够响应万年尺度的沉积旋回与海平面波动,并较完整地保存这些变化的地质记录(Green, 2009)。因此,对钱塘江河口区沉积物的研究有助于解析陆架区古环境演变及高泥沙通量条件下的边缘海源-汇过程,同时也为未来海平面与气候变化的预测提供科学依据。

钱塘江河口区水动力条件复杂、物源多样,前人对杭州湾地区的研究主要集中在海侵事件研究(汪品先等, 1981; 严钦尚和邵虚生, 1987)、下切河谷沉积体系演变与气候演化(李从先等, 1993; 林春明等, 2005, 2022; 张霞等, 2013; Zhang *et al.*, 2021a; 夏长发等, 2022)和浅层生物气研究(曲长伟等, 2013; 林春明和张霞, 2018)。以往的研究计算了长江和钱塘江对杭州湾全新世沉积物的贡献比例(Zhang *et al.*, 2021b),表明约 8000 年前,钱塘江提供了该地区所有的沉积物,随后长江沉积物开始向杭州湾地区输入。在杭州湾现代沉积物的研究中,大多数研究者认为长江沉积物主要通过涨潮流、沿岸流等动力方式输送至杭州湾(吴华林等, 2006; 王颖, 2012; 王昆山等, 2013; 刘朝等, 2016)。然而,这些研究未深入讨论沉积物粒度特征,针对粒度端元的源汇过程分析仍相对薄弱,限制了对沉积物来源、搬运模式

及沉积动力机制的深入理解。

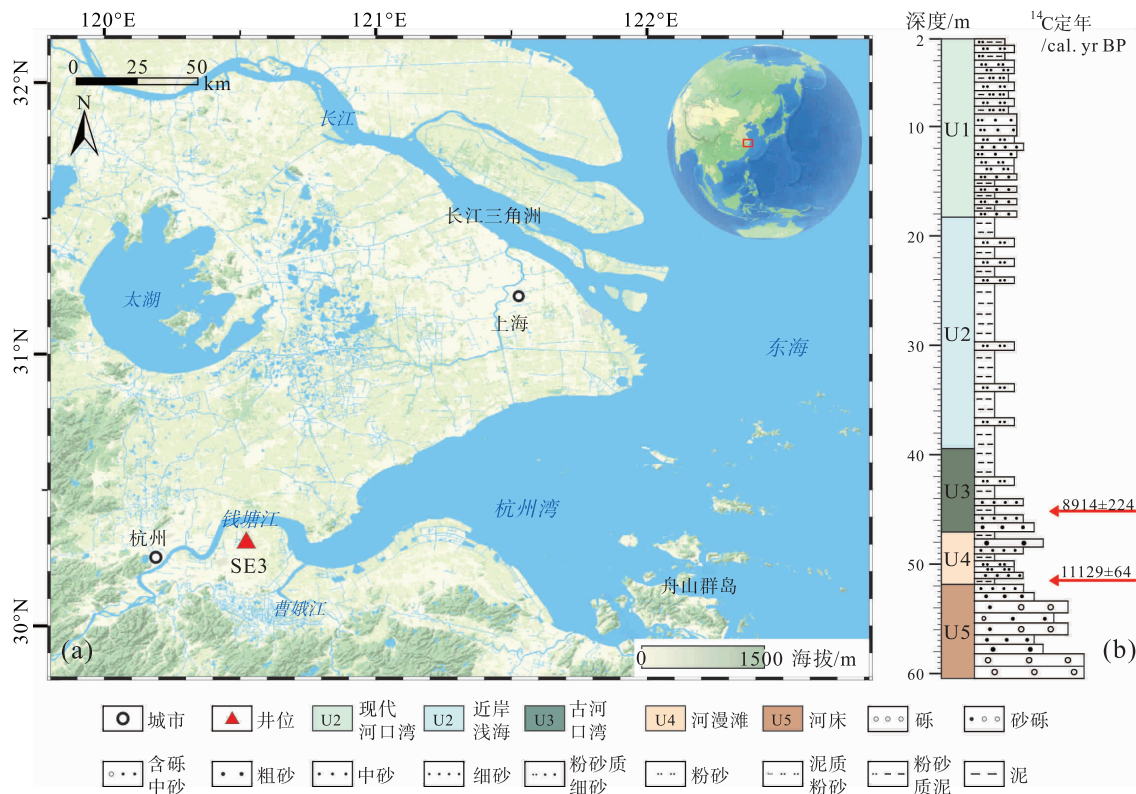
本研究以杭州湾地区 SE3 孔晚第四纪沉积物为研究对象,采用基本端元模型算法 (Basic end-member modeling algorithm, BasEMMA)、非参数估计分解算法 (AnalySize) 以及粒级-标准偏差法,旨在解析研究区粒度端元的组成特征及其垂向变化规律,并探讨其与物源变化及环境转换之间的耦合关系,以深化对河口及近岸沉积动力学过程的认识。

1 区域地质背景

钱塘江的源头发自安徽省休宁县西南部,其干流穿越安徽省和浙江省,自杭州湾汇入东海,河流全长 605 km,流域面积约 $4.88 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图 1-a; 许建平和杨义菊, 2007)。杭州湾内潮汐为半日潮,潮区界在芦茨埠,从芦茨埠至湾口全长 270 km,其中芦茨埠至闸口的河口段长约 90 km,河道顺直,自西南流向东北 (张桂甲和李从先, 1995)。经闸口后,河口转折向东,闸口至湾口的长度约 180 km。河口湾宽度由内向外逐渐扩大,

在杭州处宽约 1 km,澈浦处宽约 21 km,南汇嘴至镇海的湾口在平均潮位下宽达 100 km (张霞等, 2013; 林春明和张霞, 2018)。钱塘江河口处于陆海过渡段,流域水清沙少,海域水浊沙丰 (陈吉余等, 1989)。杭州湾内沉积物不仅由钱塘江干流和曹娥江、甬江支流的供给,湾口外的泥砂及长江物质也随潮流作用在此沉积 (陈吉余, 2007)。

末次盛冰期以来钱塘江下切河谷充填物的沉积演化经历了 3 个主要阶段 (图 1-b; 张霞等, 2013; Zhang *et al.*, 2014; 李鑫等, 2022)。第一阶段为海侵早期,海平面快速上升,河流的侵蚀与搬运能力减弱,下切河谷开始充填,自下而上依次发育河床 (U5)、河漫滩 (U4) 和古河口湾 (U3) 3 个沉积单元。其中河床沉积单元主要为砾、砂沉积; 河漫滩沉积单元以砂质泥和细砂沉积为主; 古河口湾沉积单元则表现为泥质与砂质泥互层。第二阶段为海侵鼎盛期,海水进一步侵入,海平面达到相对高位,河口环境逐渐向海相沉积过渡,沉积物粒度逐步变细,近岸浅海沉积单元 (U2) 逐渐占据主导地位,以泥夹粉砂条带沉积为特征。第三阶段为



a—杭州湾地理位置图; b—SE3 孔沉积柱状图 (据 Zhang *et al.*, 2021b; 有修改)

图 1 杭州湾地理位置示意图及 SE3 孔沉积柱状图

Fig. 1 Geographic location of Hangzhou Bay and sedimentary column of core SE3

高海平面时期,海平面上升速率放缓,并趋于稳定,沉积物供应速率超过海平面上升速率,导致海岸线向海推进,形成现代河口湾沉积单元,以细砂及砂质泥互层沉积为特征。前人在稀土和微量元素等方面的研究表明钱塘江下切河谷沉积物主要由长江和钱塘江提供,长江细粒物质在古河口湾沉积时期随沿岸流进入杭州湾 (Zhang *et al.*, 2015; 张霞等, 2018)。可见,钱塘江下切河谷全新世充填物各沉积单元反映了不同时期的沉积过程,对其粒度特征进行详细研究,有助于揭示海平面调控下河口区各沉积单元对沉积环境和源汇系统演化的响应。

2 材料与方法

2.1 样品采集与粒度分析

SE3 孔实施于钱塘江南岸杭州市萧山区义蓬镇仓北村 (地理坐标为 120°30'20"E, 30°18'29"N; 图 1-a), 钻孔深度为 64 m, 取心率超过 90%。在整个钻探深度范围内,按照 0.8 m 的间隔采集沉积样品,局部地层采样间隔调整为 2 m,共获得 74 个样品。

粒度分析前,对样品进行预处理以去除非硅质矿物成分和避免团聚效应。预处理流程如下: (1) 取约 5 g 样品放入烧杯中,加入适量浓度为 0.4 mol/L 的过氧化氢溶液去除有机质,然后加入适量浓度为 0.1 mol/L 的盐酸除去碳酸盐组分,静置浸泡,直至不产生气泡; (2) 除去上层反应液,向烧杯中加入蒸馏水,静置 24 h,等待样品全部沉降,上层呈透明状; (3) 除去上层清液后,加入 0.5 mol/L 六偏磷酸钠溶液,静置 24 h,确保颗粒充分分散,以降低絮凝效应。

粒度测试在南京大学内生金属矿床成矿机制国家重点实验室完成,使用 Mastersizer 3000 激光粒度分析仪进行测量。每个样品重复测量 3 次,以确保数据的准确性和重复性。最终获得粒径范围为 0.01~3500 μm 的沉积物颗粒体积百分含量。

2.2 粒度端元提取方法

本研究选择基本端元模型算法 (Zhang *et al.*, 2020)、非参数估计分解算法 (Paterson and Heslop, 2015) 和粒级-标准偏差法 (Huang *et al.*, 2011) 对 SE3 孔沉积物粒度数据进行分析。

基本端元模型算法 (Zhang *et al.*, 2020) 采用

遗传算法对粒度数据进行分解。该算法模拟生物进化过程,通过选择、交叉和突变等操作对随机生成的初始数据进行迭代优化,从而获得最优分解方案,能够有效避免局部最优解,适用于具有复杂搬运和沉积过程的环境。

Paterson 和 Heslop (2015) 受到高光谱图像分析技术 (Chen and Guillaume, 2012) 的启发,在 MATLAB 环境下开发了非参数估计分解算法 (AnalySize)。该方法采用分层交替最小二乘法,并结合非负矩阵分解,以最小化端元与原始数据之间的误差。相较于传统的端元建模方法,该算法引入了丰度和端元最小距离软约束,能够在端元数量较少的情况下提高分解精度。

粒级-标准偏差法主要通过计算不同粒级含量的标准偏差来确定端元数量 (Boulay *et al.*, 2003)。其基本原理是:端元在时间尺度上的波动较大,因而粒度分布曲线的峰值可以指示端元特征。公式 (1) 中, S 为某一粒级的标准偏差值, S_i 为第 i 个样品中该粒级的体积百分比, $\bar{S}$ 为该粒级在所有样品中的平均体积百分比, n 为样本总数。本研究共计算了 100 个粒度分级的标准偏差曲线,以确定最优端元数量。

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}{n}} \quad (1)$$

端元数量对基本端元模型算法和非参数估计分解算法的准确性有重要影响,因此需要结合多种评价指标进行优化。基本端元模型算法的分解效果可通过残差和决定系数进行评估。残差是指模型计算结果与实际测量数据之间的差异,残差值越小,表示模型的拟合程度越高。决定系数 (R^2) 是评估模型拟合效果的重要指标,值越接近 1,表示模型对原始数据的拟合度越好。本研究按照软件开发者的建议设定运算参数,遗传算法的解集大小为 300,最大计算迭代次数为 30,计算了端元数量在 2~9 之间时的 3 项评估指标的变化情况。

在基本端元模型分析中,当端元个数设定为 5 时,计算得到的残差为 16.59,决定系数的中位数为 0.902 (图 2)。这些结果表明,此时分离出的各端元具有较好的独立性,且模型重构数据与原始数据吻合度较高。当端元数量增加时,残差逐渐减小,表明模型拟合精度提高,但决定系数趋于稳定,提示继续拟合的收益逐渐减弱,进一步增加端元数

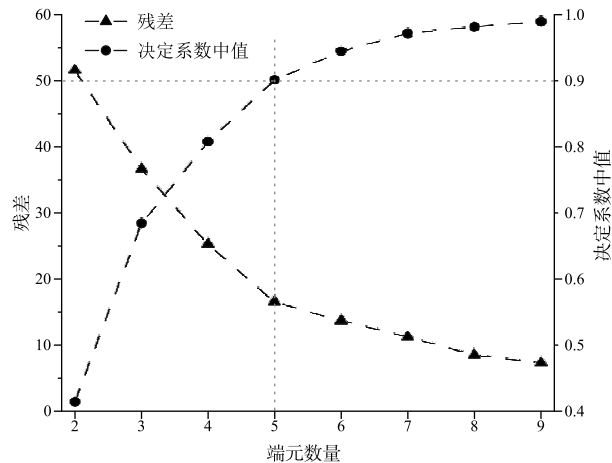


图 2 基本端元模型算法得到的残差和决定系数中值

Fig. 2 Residual and median-determination coefficient obtained by basic end-member modeling algorithm (BasEMMA)

量可能导致模型过于复杂。因此，基本端元模型算法在杭州湾 SE3 孔沉积物中的最佳端元数量为 5。

在非参数估计分解算法分析中，端元提取效果的主要评估指标包括决定系数和角度偏差。决定系数用于衡量端元重构结果与原始数据之间的线性相关性，决定系数越高，拟合效果越好。然而，如果决定系数过高，可能意味着端元数量过多，从而导致模型过拟合，这并不符合最佳端元提取的原则（图 3）。角度偏差反映了端元重构曲线与原始粒度分布曲线之间的夹角，角度偏差越小，说明模型重构结果越接近实际粒度分布，拟合质量越优。当端元个数设定为 5 时，计算得到的角度偏差中位数为 6.2° ，均值为 10.3° ，数据集与粒度数据的决定系数为 0.956（图 3）。当端元数量进一步增加时，决定系数保持稳定，表明非参数估计分解算法选择 5 个端元进行拟合时，模型效果最佳。

3 结论与讨论

3.1 粒度端元提取方法对比

本研究采用基本端元模型算法（BasEMMA）、非参数估计分解算法（AnalySize）和粒度-标准偏差法进行粒度端元提取分析。结果显示，这 3 种方法均分离出了 5 个粒度端元，按照峰值粒径从小到大依次编号为 EM1 至 EM5。然而，不同方法提取的端元结果存在一定差异，特别是粒度-标准偏差法所得端元曲线形态与另外 2 种方法存在明显区

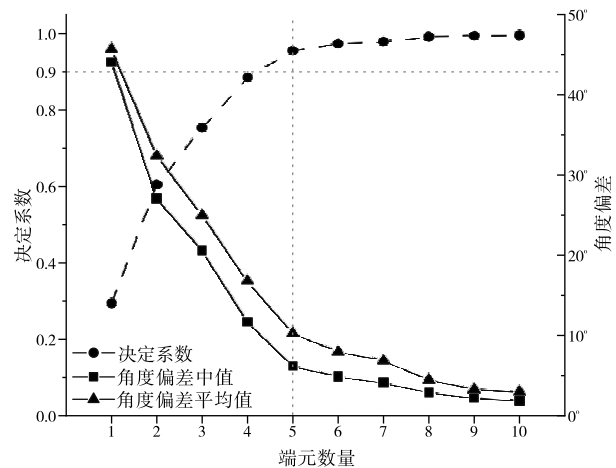


图 3 非参数估计分解算法获得的端元决定系数、角度偏差的平均值和中值

Fig. 3 Average and median of terminal element determination coefficients and angle deviations obtained by non parametric estimation decomposition algorithm

别，这反映了不同端元分析方法在端元提取能力上的差异。

为了确定最适合于杭州湾地区的端元分析方法，本研究根据福克-沃德图解法（Folk and Ward, 1957; Blott and Pye, 2001），计算了 5 个端元的端元峰值、平均粒径（ M_z ）、分选系数（ σ_1 ）、偏度（ Sk_1 ）、峰态（ K_c ）等粒度参数特征（表 1；表 2）。端元峰值代表该端元的众数粒级，平均粒径是沉积物粒度分布的平均值。分选系数反映了粒度分布的宽窄，值越小，粒径分布越集中，沉积物的分选越好；值越大，粒径分布越广，分选越差。偏度表示粒度分布的对称性，接近 0 表示粒度分布较为对称；正值表示粒度分布细偏，即细粒含量增加；负值表示粗偏，即粗粒含量增加。峰态反映粒度分布的尖锐度或平坦度。峰态值大于 1 表示粒度分布比正态分布更尖锐，小于 1 表示比正态分布更平坦。

基本端元模型法与非参数估计分解算法提取的敏感粒级端元具有相似的峰值和平均粒径，但在分选系数、偏度和峰态方面存在差异。在基本端元模型法的计算结果中，EM2 和 EM3 端元的分选系数分别为 0.80 和 0.61，表明这 2 个端元的分选性较好。相比之下，非参数估计分解算法仅对 EM2 端元给出了小于 1 的分选系数，说明该方法提取细粒端元的能力可能具有局限性。偏度和峰态对粗细组分含量变化很敏感，它们与沉积物的搬运过程和水

表 1 基本端元模型算法得到的 5 个敏感端元参数特征
Table 1 Parameters of five sensitive end-members obtained by basic end-member modeling algorithm

端元分类	峰值 / μm	平均粒径 / μm	分选系数 (σ_1)	偏度 (Sk_1)	峰态 (K_G)
EM1	9.27	6.54	1.59	0.25	1.25
EM2	37.74	33.77	0.80	0.17	1.10
EM3	92.23	92.58	0.61	0.07	0.98
EM4	225.4	107.1	1.86	0.66	2.27
EM5	484.9	448.2	1.24	0.33	2.92

表 2 非参数估计分解算法得到的 5 个敏感端元参数特征
Table 2 Parameters of five sensitive end-members obtained by nonparametric estimation decomposition algorithm

端元分类	峰值 / μm	平均粒径 / μm	分选系数 (σ_1)	偏度 (Sk_1)	峰态 (K_G)
EM1	9.27	6.72	1.58	0.24	1.25
EM2	37.74	35.79	0.71	0.10	0.99
EM3	104.8	89.55	1.00	0.34	2.02
EM4	225.4	176.1	1.11	0.44	2.17
EM5	484.9	425.6	1.20	0.37	2.71

动力特征有直接关联。基本端元模型法所提取的端元显示出较大的偏度和峰态变化, 粒度分布的不对称性和峰型差异较为显著。相比之下, 非参数估计分解算法所得到的端元在偏度和峰态上的变化不如基本端元模型法的结果明显。

总体而言, 基本端元模型法对物源和沉积动力过程的识别能力更为敏感和细致, 端元之间的区分度更明显。这种差异源于 2 种算法的计算特点。基本端元模型算法假设沉积物粒度数据由若干个不同的粒度组分线性叠加而成, 每个粒度组分代表特定的沉积物来源或成因, 因此提取的端元具有较强的物理意义和可解释性 (Zhang *et al.*, 2020)。非参数估计分解算法不考虑沉积物粒度数据的物理背景, 而是通过最大化方差或信息量等准则来寻找最优的端元数目和组合 (Paterson and Heslop, 2015), 因此可能无法真实地反映沉积物的来源和成因。在使用数据集对算法进行评估时, 基本端元模型算法提取出的端元与真实情况非常接近, 而非参数估计分解算法提取的端元呈现双峰形态, 表明其仍然是混合端元 (Zhang *et al.*, 2020)。相比之下, 基本端元模型算法的计算结果更能代表特定的物源和水动力过程。杭州湾 SE3 孔的沉积物粒度

范围广, 运输和混合过程复杂, 不同物源的粒度特征差异明显, 因此采用基本端元模型法提取出的 5 个端元可能更符合真实的沉积过程。

粒级-标准偏差法通过计算粒度分布的标准偏差曲线来识别端元峰值, 该方法适用于沉积环境变化剧烈、端元数量较少的场景。将粒级-标准偏差法的曲线与其他 2 种方法的结果进行对比, 观察到粒级-标准偏差法曲线上的 4 个主要峰值分别位于 9.27 μm 、37.74 μm 、211.04 μm 、484.9 μm , 以及 0.36 μm 和 1848.69 μm 处的 2 个次要峰值 (图 4)。然而, 在本研究中, 该方法未能在 92.23 μm 处识别出 EM3 端元 (图 4; 图 5)。

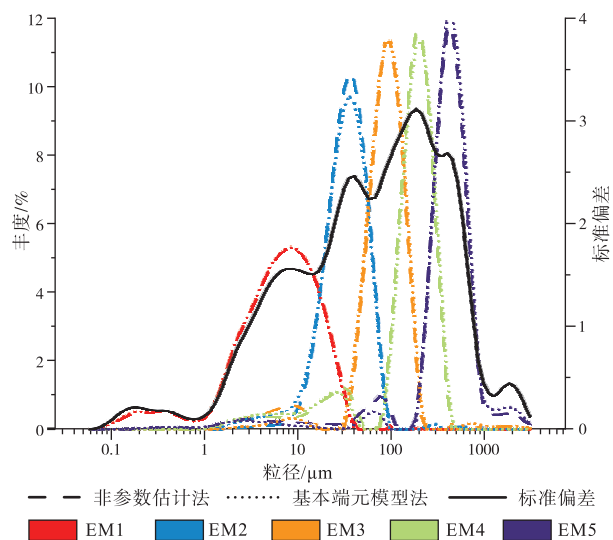


图 4 基本端元模型算法、非参数估计分解算法和粒级-标准偏差法粒度端元图

Fig. 4 Diagrams showing grain-size distribution pattern of each end-member obtained by basic end-member model algorithm, non-parameter estimation decomposition algorithm, and grain size-standard deviation method

这种端元缺失现象与端元的绝对含量有关, 低含量的端元可能会被高含量的端元遮盖。为了解释 EM3 端元的缺失, 本研究使用粒级-标准偏差法对 SE3 孔的 5 个沉积单元分别进行端元提取, 结果表明 EM3 端元主要集中在现代河口湾沉积单元, 峰值为 98.11 μm 。而 EM4 端元分布较广, 出现在古河口湾、河漫滩和河床 3 个沉积单元, 且总含量更高 (图 5)。由于 EM3 端元的沉积物含量和时空分布范围小于 EM4, 因此在粒级-标准偏差法的曲线上, EM3 和 EM4 端元被合并成一个单峰, 峰值为 211.04 μm , 在粒度曲线上表现为 EM3 端元未

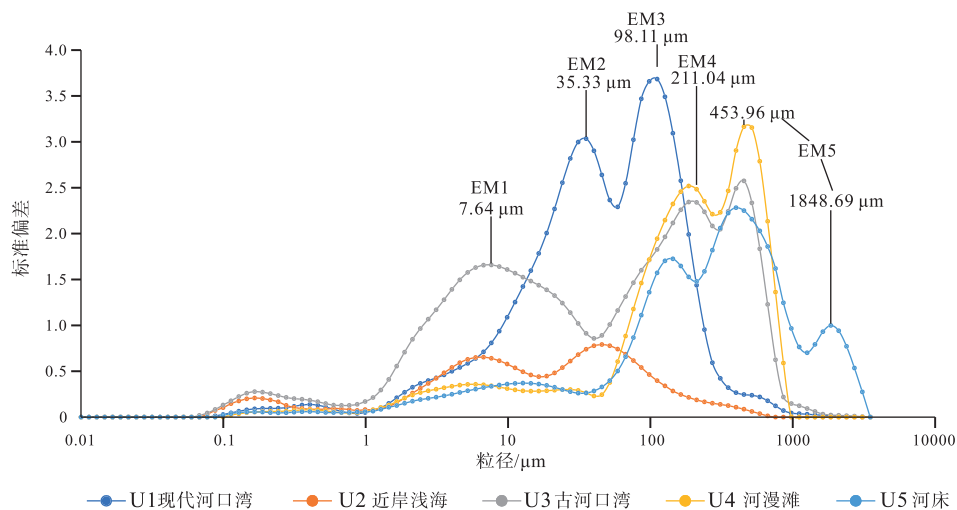


图 5 各沉积单元的粒径-标准偏差分布曲线

Fig. 5 Plot showing distribution pattern of standard deviation obtained by grain size-standard deviation method for different stratigraphic unit in study area

能被独立识别。

综合分析表明,基本端元模型算法的端元分选性较好,在杭州湾 SE3 孔沉积物端元提取中表现最佳,能够提供更清晰的端元分布模式,为后续沉积动力和环境分析提供可靠依据。因此,本研究采用基本端元模型算法的结果进行后续分析。非参数估计分解算法在端元拟合精度方面表现较好,但对于特定粒度范围的端元拟合可能存在重叠。粒级-标准偏差法的端元提取受端元含量分布的影响较大,可能遗漏部分细粒端元。因此,在使用粒级-标准偏差法进行端元提取时,建议在不同沉积单元内部单独分析,以减少相邻端元之间的干扰,从而提高端元识别的准确性。

3.2 敏感粒度端元的垂向分布特征

整体来看,基本端元模型算法提取的 5 个端元特征明显,各端元的粒度范围呈递增趋势。而且,5 个粒度端元的垂向展布规律明显,与沉积环境、物源供给和粒度端元的变化具有明显的相关性(图 7)。

EM1 端元的粒度分布范围较广,为 0 ~ 35.33 μm (图 6; 图 7; 表 1),以粗粉砂及更细的组分为主,极粗粉砂仅占 1%。其峰值和平均粒径较小,偏度呈轻微正偏,峰态较尖锐,分选系数较大,分选差(图 6; 表 1)。EM1 端元在河漫滩和河床沉积单元的含量较低,且变化幅度不大,平均含

量为 13%,在古河口湾沉积单元内,含量自下而上逐渐升高,在与近岸浅海交界处达到最大值,为 96%。在近岸浅海沉积单元内,EM1 含量发生几次大幅度的降低和升高,整体呈现向上减少的趋势,在现代河口湾交界部位时含量最低,并在现代河口湾内部基本保持不变,平均为 7% (图 7)。

EM2 端元的粒度范围为 2.75 ~ 86.35 μm ,以粗粉砂和极粗粉砂为主,粗粉砂含量为 40%,极粗粉砂 46%。EM2 的端元峰值和平均粒径表明沉积物较粗,偏度和峰态接近正态分布,分选系数较小,粒度分布集中(图 6; 表 1)。EM2 端元在河床和河漫滩沉积单元含量极少,古河口湾沉积单元的中部存在 1 个较弱的峰,随后含量降低。在近岸浅海沉积单元内,EM2 和 EM1 的含量变化具有明显的对称性,曲线形态圆滑。进入现代河口湾沉积单元后,EM2 的含量逐渐增加,在 2.13 m 深度处达到峰值 98%,随后再次降低。

EM3 端元的粒度范围为 31.10 ~ 211.04 μm ,以极细砂和细砂为主,极细砂含量为 54%,细砂含量为 23%。EM3 的峰值和平均粒径更大,分选系数很小,偏度和峰态非常接近正态分布,粒度分布均匀且集中(图 6; 表 1)。EM3 端元在河漫滩和河床沉积单元的波动明显,但进入古河口湾和近岸浅海沉积单元后,EM3 含量迅速减少,平均含量仅 6%。在现代河口湾沉积单元内,EM3 含量迅速增加,在 14.63 m 处达到最高值 69%,于 6.65 m

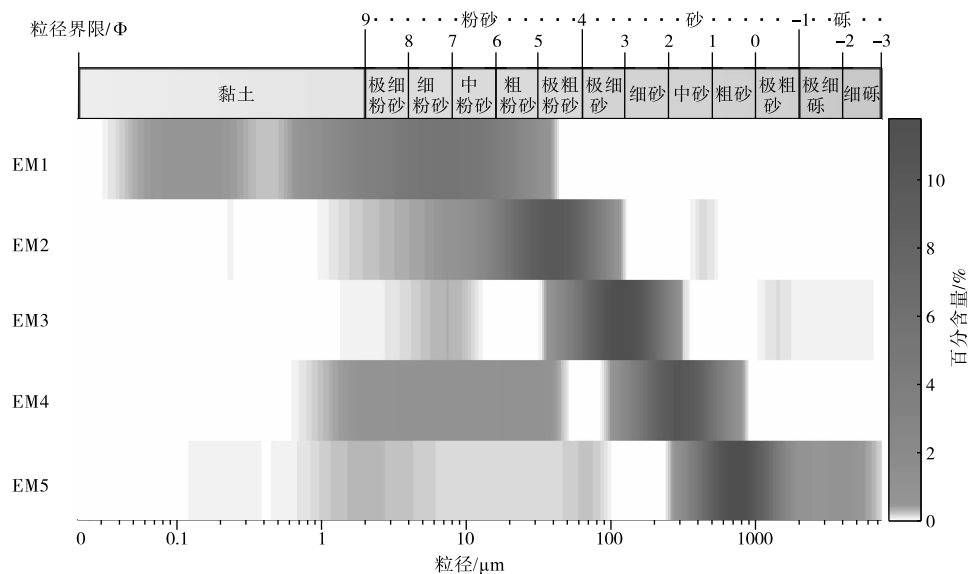
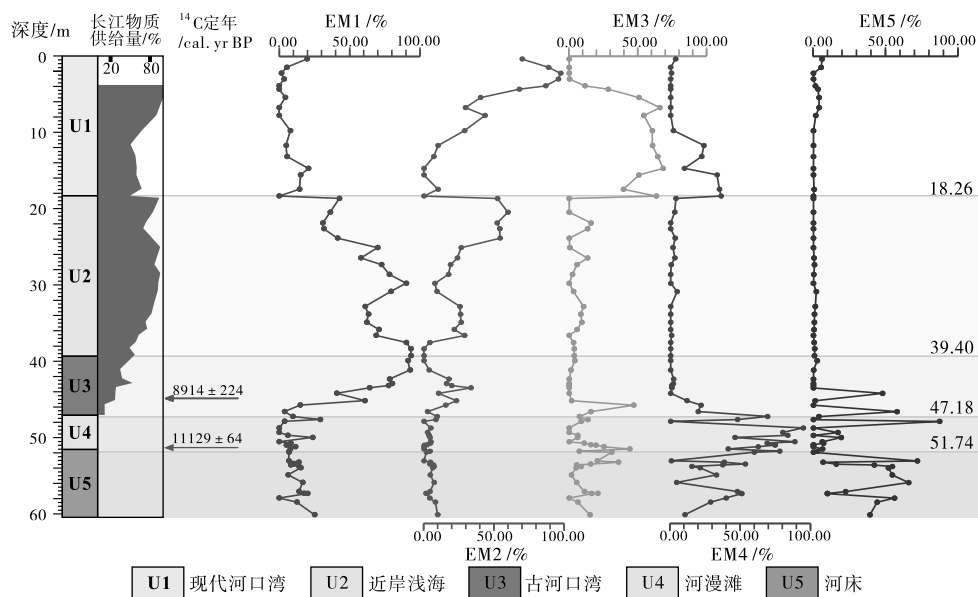


图 6 基本端元模型算法得到的敏感端元粒度分布热图

Fig. 6 Heat map showing grain-size distribution pattern of each sensitive end-member obtained by basic end-member modeling algorithm

图 7 长江物质供给量与粒度端元含量随深度变化曲线 (长江物质供给量数据来自 Zhang *et al.*, 2025)Fig. 7 Vertical variation patterns for Changjiang sediment contribution (Zhang *et al.*, 2025) and contents of each grain-size end-member in study area

深度后迅速减小, 2.13 m 后含量降低为 0。近岸浅海沉积单元的顶部和现代河口湾内, EM2 和 EM3 的含量变化表现出此消彼长的对称性(图 7)。

EM4 端元的粒度范围为 0~45.61 μm 和 76~453.95 μm , 以细砂和中砂为主, 细砂占 52%, 中砂占 19.57%。该端元峰值较大, 但平均粒径相对较小, 分选系数很大, 同时具有较高的偏度和峰态

值, 沉积物粒度分布很广, 但不均匀(图 6; 表 1)。EM4 在河漫滩和河床沉积单元的含量最高, 波动幅度最大, 在河床沉积单元的中部达到峰值 95%, 沉积环境变为古河口湾和近岸浅海后, EM4 的平均含量仅有 7%, 直至现代河口湾和近岸浅海沉积单元的交界处, EM4 的含量突然升高, 而在现代河口湾沉积单元中部, 含量再次减少, 甚至消失。

EM5 端元的粒度范围为 $0 \sim 76 \mu\text{m}$ 和 $185.75 \sim 3080 \mu\text{m}$ ，中砂占 48%，粗砂占 34%。该端元峰值和平均粒径都非常大，分选系数和偏度低于 EM4，峰态较高，表明中砂和粗砂的分布比 EM4 更集中（图 6；表 1）。EM5 的整体变化规律与 EM4 相似，同样在河漫滩和河床沉积单元的变化最强烈，但两者的含量呈现此消彼长的关系。自古河口湾沉积单元中部开始，EM5 含量急剧减少，变化微弱，平均含量仅 3%。

3.3 敏感粒度端元对源汇系统的响应

粒度端元的特征受物源类型、运输过程和水动力条件的共同控制，每个粒度端元的粒度范围及其分布特征通常代表着特定物源的输入、物质运输途径及沉积环境的演变过程（Weltje, 1997；陈沈良等, 2004）。在研究区不同沉积单元中，粒度端元的组合表现出显著差异。通过深入分析粒度端元与物源、沉积动力（如潮汐流、风暴潮等）的关系，能够揭示物源与沉积环境演化的复杂交互作用，从而为全新世以来杭州湾地区沉积环境的演化提供更全面的理解。

近岸浅海和现代河口湾沉积单元内部 EM1 和 EM2 端元含量与长江沉积物的供给比例呈正相关，表明这 2 种端元与长江沉积物的供给关系紧密（图 8）。现代长江三角洲沉积物的粒度特征与 EM1 和 EM2 的粒度特征基本一致，主要由黏土、黏土质粉砂和粉砂组成，其中约 75% 的粒径小于 $50 \mu\text{m}$ ，悬浮物的粒径通常介于 $4 \sim 20 \mu\text{m}$ 之间（李军等, 2003；Yang *et al.*, 2008；张静, 2012；Rao *et al.*, 2015；陈嘉诺等, 2024）。长江三角洲沉积物在东亚季风驱动的沿岸流作用下向南搬运，堆积形成东海泥质条带（Zhang *et al.*, 2020）。该搬运过程也得到了粒度参数的验证，舟山海域泥质沉积物和长江口外沉积物具有相似的粒度特征，表现出了明显的亲源性（周连成等, 2009）。随后，东海泥质条带的沉积物可通过涨潮流和沿岸流被带入杭州湾。

EM5 和 EM4 端元含量与钱塘江供给呈正相关，表明与钱塘江物质供给变化具有较强相关性，指示其可能为主要的物源。EM5 和 EM4 的粒径分布范围较广，与现代长江和钱塘江河流沉积物的粒度分布模式相近，为典型的河流沉积（Wang *et al.*,

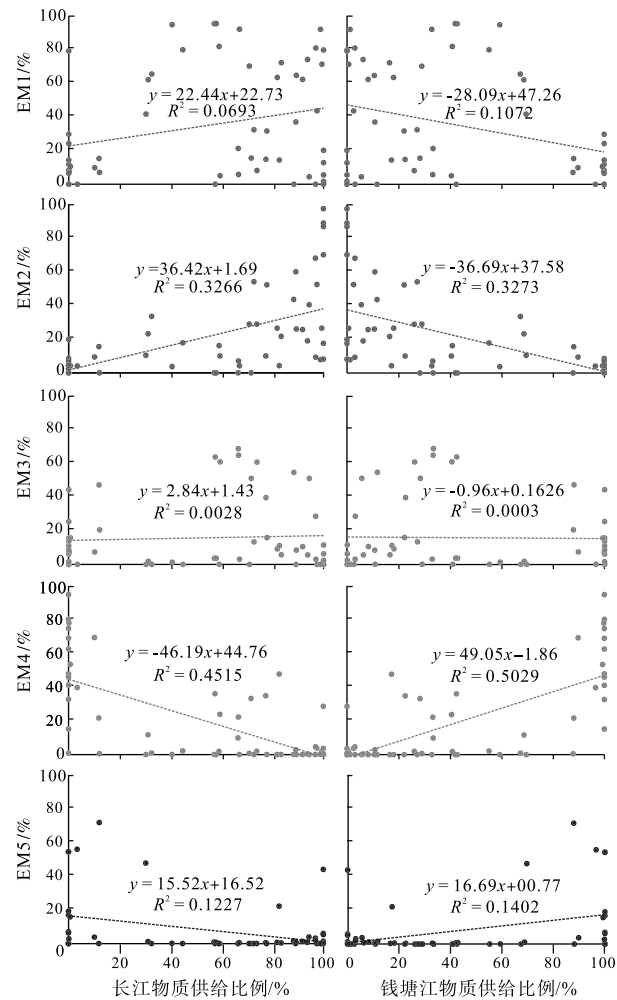


图 8 长江、钱塘江物质供给分布与各粒度端元含量变化的相关性图（长江、钱塘江物质供给量数据来自 Zhang *et al.*, 2025）

Fig. 8 Diagram showing correlations between the relative sediment contribution of Changjiang and Qiantang River (data from Zhang *et al.*, 2025) and contents of each grain-size end-member

2022)。且在河床和河漫滩沉积单元内，EM5 的变化趋势与 EM4 正好相反，EM5 主要分布在水动力条件相对较强的河床沉积单元，而在水动力条件较弱的河漫滩环境，EM5 平均含量仅有 11%。二者的含量变化趋势记录了河漫滩和河床单元沉积时期的钱塘江水动力变化历史。

EM3 端元的分选性、垂向分布及粒度特征表明，它可能主要来自潮汐流和风暴潮的搬运和筛选过程。潮汐流和风暴潮能够将细粒沉积物搬运并进行筛选，这一过程通常经历多次再悬浮和搬运作用，显著提升沉积物的分选性，这也是 EM3 端元

粒度分布呈现正态分布和良好分选性的原因。潮汐流和风暴潮沉积物具有独特的粒度特征,前人对长江和杭州湾风暴潮沉积的研究表明,风暴潮沉积能显著增大河口地区的沉积物粒径,EM3 的粒度特征与风暴沉积物具有高度相似性。如 1999 年夏季台风期间,强烈的潮流对长江三角洲裸露滩涂沉积物进行改造,使得沉积物峰值粒径为 4.5ϕ 的粗粒沉积物含量增加 (Fan *et al.*, 2006)。2002 年的暴风雨也导致长江三角洲芦潮港的表层沉积物平均粒径从 $22\mu\text{m}$ 增加到了 $146\mu\text{m}$ (Yang *et al.*, 2008)。现代杭州湾潮滩沉积物在夏秋季节会受到台风大浪的推移,峰值粒度为 $140.1\mu\text{m}$ 的沉积物含量有所增加 (陈沈良等, 2004)。1962 年的 7 号台风风暴潮使圆陀角 YY 岩心在 90~100 cm 处出现了粉砂质砂夹层,沉积物粒度显著粗化,但随着围垦和护岸工程的建设,后来形成的风暴潮沉积物粒度比 90~100 cm 处要细 (张静, 2012)。根据上述研究,风暴沉积物的粒径略小于 EM4,但与 EM3 的粒径范围非常相似。考虑到 EM3 端元主要分布在现代河口湾的靠海段,极易受风暴和潮流改造,因此其垂向含量突变应当与风暴潮、潮汐流等强水动力沉积事件存在关联。

综上所述,SE3 孔沉积物 5 个粒度端元的垂向展布特征能有效地指示物源供给变化,并且对沉积环境和海平面变化具有灵敏的响应。在海侵初期,即河床、河漫滩和古河口湾单元沉积时期,沉积物主要由钱塘江提供 (林春明等, 2022),且代表粗粒沉积的 EM5 和 EM4 端元含量随海平面上升逐渐降低,相对细粒的 EM3 和 EM1 端元含量逐渐升高。在海侵鼎盛期,在沿岸流、潮流和波浪的共同作用下,近岸浅海单元内主要由来自长江的 EM1 和 EM2 组成。在海平面相对稳定时期,沉积物堆积速率大于海平面上升速率,海岸线向海移动,EM1、EM2 端元含量骤降,代表风暴和潮流沉积的 EM3、EM4 端元在同一深度迅速增加 (图 8; 林春明等, 1999; Lin *et al.*, 2005; Zhang *et al.*, 2014)。该研究为相似河口区源-汇过程研究提供了新思路 and 科学参考。

4 结论

1) 基本端元模型算法、非参数估计分解算法和粒级-标准偏差法在杭州湾地区均能提取出 5 个

粒度端元,但基本端元模型算法在杭州湾地区的适用性和准确度最高。粒级-标准偏差法容易将相邻的 2 个端元混合,对物源复杂的沉积物端元识别能力最差。非参数估计分解算法提取单峰的能力较差,更适合与物源和搬运过程单一的沉积物。

2) 5 个粒度端元在不同沉积单元的分布有明显差异,现代河口湾主要为 EM2 和 EM3 端元,近岸浅海为 EM1 和 EM2 端元,古河口湾主要为 EM1 和 EM4 端元,河漫滩和河床主要为 EM4 和 EM5 端元。

3) 5 个粒度端元的垂向分布模式能够很好地响应杭州湾地区全新世以来的海平面和环境演化历史,较好地揭示了研究区的水动力条件变化过程及其对沉积物分布的控制作用。该研究展示了粒度端元法揭示河口区源汇过程的巨大潜力。

参考文献 (References)

- 陈吉余. 2007. 中国河口海岸研究与实践. 北京: 高等教育出版社, 1-1015. [Chen J Y. 2007. Research and Practice on China's Estuaries and Coasts. Beijing: Higher Education Press, 1-1015]
- 陈吉余, 王宝灿, 虞志英. 1989. 中国海岸发育过程和演变规律. 上海: 上海科学技术出版社, 1-556. [Chen J Y, Wang B C, Yu Z Y. 1989. Developments and Evolution of China's Coast. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1-556]
- 陈嘉诺, 孙高远, 温永祥, 李思琦, 王鑫宇, 刘凯, 蒋仁, 周效华. 2024. 长江三角洲 QDQ2 钻孔晚更新世以来沉积物粒度特征及其古环境意义. 华东地质, 45(4): 466-477. [Chen J N, Sun G Y, Wen Y X, Li S Q, Wang X Y, Liu K, Jiang R, Zhou X H. 2024. Grain sizes characteristics of sediments from QDQ2 borehole in the Yangtze River Delta since the Late Pleistocene and their paleoenvironmental significance. East China Geology, 45(4): 466-477]
- 陈沈良, 杨世伦, 吴瑞明. 2004. 杭州湾北岸潮滩沉积物粒度的时间变化及其沉积动力学意义. 海洋科学进展, 22(3): 299-305. [Chen S L, Yang S L, Wu R M. 2004. Temporal changes in tidal flat sediment grain size along the north bank of the Hangzhou Bay and their implication of sedimentation dynamics. Advances in Marine Science, 22(3): 299-305]
- 郝榕荣, 杨怡红, 朱龙海, 朱颖涛, 袁晓东. 2023. 环境敏感因子在威海湾沉积环境中的应用比较. 沉积学报, 41(3): 763-777. [Hao R R, Yang Y H, Zhu L H, Zhu Y T, Yuan X D. 2023. Application of environmentally sensitive factors in bay sedimentary environments. Acta Sedimentologica Sinica, 41(3): 763-777]
- 李从先, 陈刚, 钟和贤, 刘宝柱. 1993. 冰后期钱塘江口沉积层序和环境演变. 第四纪研究, 13(1): 16-24. [Li C X, Chen G, Zhong H X, Liu B Z. 1993. Sedimentary sequence and environmental evolution of Qiantang estuary during postglacial period. Quaternary Sciences, 13(1): 16-24]

- 李军,高抒,曾志刚,贾建军. 2003. 长江口悬浮体粒度特征及其季节性差异. 海洋与湖泊,34(5): 499–510. [Li J, Gao S, Zeng Z G, Jia J J. 2003. Particle-size characteristics and seasonal variability of suspended particulate matters in the Changjiang river estuary. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 34(5): 499–510]
- 李鑫,张霞,林春明,邓程文,李绪龙,冯旭东,夏长发,黄舒雅,赵雪培. 2022. 钱塘江下切河谷 SE2 孔全新世沉积物黏土矿物特征及其意义. 古地理学报,24(2): 332–343. [Li X, Zhang X, Lin C M, Deng C W, Li X L, Feng X D, Xia C F, Huang S Y, Zhao X P. 2022. Characteristics and its significance of clay minerals in the Holocene deposits of core SE2 in Qiantang River incised valley. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 24(2): 332–343]
- 林春明. 1997. 杭州湾地区 15000a 以来层序地层学初步研究. 地质论评,43(3): 273–280. [Lin C M. 1997. Sequence stratigraphic study on the Hangzhou bay since 15000 a BP. *Geological Review*, 43(3): 273–280]
- 林春明,张霞. 2018. 江浙沿海平原晚第四纪地层沉积与天然气地质学. 北京: 科学出版社,1–238. [Lin C M, Zhang X. 2018. Late Quaternary Stratigraphy, Sedimentology and Natural Gas Geology in the Jiangsu-Zhejiang Coastal Plain. Beijing: Science Press, 1–238]
- 林春明,黄志城,朱嗣昭,李从先,蒋维三. 1999. 杭州湾沿岸平原晚第四纪沉积特征和沉积过程. 地质学报,73(2): 120–130. [Lin C M, Huang Z C, Zhu S Z, Li C X, Jiang W S. 1999. Late Quaternary sedimentary characteristics and processes in the Hangzhou Bay coastal plain. *Acta Geologica Sinica*, 73(2): 120–130]
- 林春明,李广月,卓弘春,李从先,于建国. 2005. 杭州湾地区晚第四纪下切河谷充填物沉积相与浅层生物气勘探. 古地理学报,7(1): 12–24. [Lin C M, Li G Y, Zhuo H C, Li C X, Yu J G. 2005. Sedimentary facies of incised valley fillings of the Late Quaternary in Hangzhou Bay area and shallow biogenic gas exploration. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 7(1): 12–24]
- 林春明,张霞,黄舒雅. 2022. 晚第四纪下切河谷体系研究综述. 地质论评,68(2): 627–647. [Lin C M, Zhang X, Huang S Y. 2022. Review of Late Quaternary incised valley system. *Geological Review*, 68(2): 627–647]
- 林镇坤,王爱军,叶翔. 2019. 南流江河口水下三角洲表层沉积物端元分析及其沉积动力环境意义. 沉积学报,37(1): 124–134. [Lin Z K, Wang A J, Ye X. 2019. End-member analysis for surficial sediment of Nanlijiang River subaqueous delta and associated sediment dynamic environmental significance. *Acta Sedimentologica Sinica*, 37(1): 124–134]
- 刘朝,师育新,戴雪荣,席雅娟. 2016. 钱塘江河口区不同河段表层沉积物粒度特征及其对水动力的响应. 华东师范大学学报(自然科学版), (6): 182–191. [Liu Z, Shi Y X, Dai X R, Xi Y J. 2016. Grain size characteristics of the surface sediments from the Qiantang River estuary and their implication for sedimentary hydrodynamics. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, (6): 182–191]
- 曲长伟,张霞,林春明,陈顺勇,李艳丽,潘峰,姚玉来. 2013. 杭州湾地区晚第四纪浅层生物气藏盖层物性封闭特征. 地球科学进展,28(2): 209–220. [Qu C W, Zhang X, Lin C M, Chen S Y, Li Y L, Pan F, Yao Y L. 2013. Characteristics of capillary sealing mechanism of late Quaternary shallow biogenic gas in the Hangzhou Bay area. *Advances in Earth Science*, 28(2): 209–220]
- 石学法,乔淑卿,杨守业,李景瑞,万世明,邹建军,熊志方,胡利民,姚政权,董林森,王昆山,刘升发,刘焱光. 2021. 亚洲大陆边缘沉积学研究进展(2011—2020). 矿物岩石地球化学通报,40(2): 319–336. [Shi X F, Qiao S Q, Yang S Y, Li J R, Wan S M, Zou J J, Xiong Z F, Hu L M, Yao Z Q, Dong L S, Wang K S, Liu S F, Liu Y G. 2021. Progress in sedimentology research of the Asian continental margin (2011–2020). *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 40(2): 319–336]
- 汪品先,闵秋宝,卞云华,成鑫荣. 1981. 中国东部第四纪海侵地层的初步研究. 地质学报,55(1): 1–13. [Wang P X, Min Q B, Bian Y H, Cheng X R. 1981. Strata of quaternary transgressions in East China: a preliminary study. *Acta Geologica Sinica*, 55(1): 1–13]
- 王可,郑洪波,Maarten Prins,郑妍. 2008. 东海内陆架泥质沉积反映的古环境演化. 海洋地质与第四纪地质,28(4): 1–10. [Wang K, Zheng H B, Maarten P, Zheng Y. 2008. High-resolution paleoenvironmental record of the mud sediments of the East China Sea inner shelf. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 28(4): 1–10]
- 王昆山,金秉福,石学法,姜晓黎. 2013. 杭州湾表层沉积物碎屑矿物分布及物质来源. 海洋科学进展,31(1): 95–104. [Wang K S, Jin B F, Shi X F, Jiang X L. 2013. Distribution and provenance of the surface sediment of the Hangzhou Bay deduced from detrital minerals. *Advances in Marine Science*, 31(1): 95–104]
- 王婷,邹春辉,毛龙江,周玉龙,莫多闻. 2022. 渤海湾西岸 CZ01 钻孔沉积物粒度端元分析及其气候—海平面变化响应. 古地理学报,24(6): 1224–1237. [Wang T, Zou C H, Mao L J, Zhou Y L, Mo D W. 2022. Sediment grain size end-member analysis and its response to climate and sea-level changes in CZ01 borehole on west coast of Bohai Bay. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 24(6): 1224–1237]
- 王颖. 2012. 中国区域海洋学: 海洋地貌学. 北京: 海洋出版社. [Wang Y. 2012. Regional Oceanography of China Seas: Marine Geomorphology. Beijing: China Ocean Press]
- 吴华林,沈旋庭,严以新,王永红. 2006. 长江口入海泥沙通量初步研究. 泥沙研究,31(6): 75–81. [Wu H L, Shen H T, Yan Y X, Wang Y H. 2006. Preliminary study on sediment flux into the sea from Changjiang Estuary. *Journal of Sediment Research*, 31(6): 75–81]
- 夏长发,张霞,林春明,黄舒雅,江凯禧,周学谦. 2022. 钱塘江下切河谷 SE4 孔晚第四纪沉积环境与古气候演化. 古地理学报,24(3): 433–448. [Xia C F, Zhang X, Lin C M, Huang S Y, Jiang K X, Zhou X Q. 2022. Sedimentary environment and palaeoclimate evolution of the late Quaternary from core SE4 in Qiantang River incised valley. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 24(3): 433–448]
- 肖尚斌,李安春. 2005. 东海内陆架泥区沉积物的环境敏感粒度组分. 沉积学报,23(1): 122–129. [Xiao S B, Li A C. 2005. Study on

- environmentally sensitive grain size population in inner shelf of the East China Sea. *Acta Sedimentologica Sinica*, 23(1): 122–129]
- 许建平, 杨义菊. 2007. 钱塘江与杭州湾河海界线的划分. *海洋学研究*, 25(1): 44–54. [Xu J P, Yang Y J. 2007. The division of boundary between Qiantangjiang River and Hangzhouwan Bay. *Journal of Marine Sciences*, 25(1): 44–54]
- 严钦尚, 邵虚生. 1987. 杭州湾北岸全新世海侵后期的岸线变化. *中国科学 B 辑*, 17(11): 1225–1235. [Yan Q S, Shao X S. 1987. The shoreline changes along the north coast of Hangzhou Bay during the late Holocene transgression. *Science in China Series B*, 17(11): 1225–1235]
- 张桂甲, 李从先. 1995. 钱塘江下切河谷充填及其层序地层学特征. *海洋地质与第四纪地质*, 15(4): 57–68. [Zhang G J, Li C X. 1995. The infilling of the incised Qiantang River paleovalley and its sequence stratigraphic characteristics. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 15(4): 57–68]
- 张静. 2012. 长江口北支圆陀角附近潮滩岩心沉积物粒度、元素地球化学特征及其环境意义. 南京大学硕士学位论文. [Zhang J. 2012. Grain Size, geochemical element characters and its environmental significance recorded by the core sediments in the Tidal Flat at Yuantuojiao Point, Estuary of the North Branch of the Yangtze River. Masteral dissertation of Nanjing University]
- 张霞, 林春明, 高抒, Robert W. Dalrymple, 曲长伟, 殷勇, 李艳丽, 周健. 2013. 钱塘江下切河谷充填物沉积序列和分布模式. *古地理学报*, 15(6): 839–852. [Zhang X, Lin C M, Gao S, Dalrymple R W, Qu C W, Yin Y, Li Y L, Zhou J. 2013. Sedimentary sequence and distribution pattern of filling in Qiantang River incised valley. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 15(6): 839–852]
- 张霞, 林春明, 杨守业, 高抒, Robert W. Dalrymple. 2018. 晚第四纪钱塘江下切河谷充填物物源特征. *古地理学报*, 20(5): 877–892. [Zhang X, Lin C M, Yang S Y, Gao S, Dalrymple R W. 2018. Provenance for the late quaternary Qiantang River incised-valley fill. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 20(5): 877–892]
- 张晓东, 季阳, 杨作升, 王中波, 刘东生, 贾培蒙. 2015. 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. *中国科学: 地球科学*, 45(10): 1515–1523. [Zhang X D, Ji Y, Yang Z S, Wang Z B, Liu D S, Jia P M. 2015. End member inversion of surface sediment grain size in the South Yellow Sea and its implications for dynamic sedimentary environments. *Science China: Earth Sciences*, 45(10): 1515–1523]
- 赵松, 常凤鸣, 李铁刚, 徐烨. 2017. 粒度端元法在东海内陆架古环境重建中的应用. *海洋地质与第四纪地质*, 37(3): 187–196. [Zhao S, Chang F M, Li T G, Xu Y. 2017. The application of grain-size end member algorithm to paleoenvironmental reconstruction on inner shelf of East China Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 37(3): 187–196]
- 周连成, 李军, 高建华, 白凤龙, 赵京涛. 2009. 长江口与舟山海域柱状沉积物粒度特征对比及其物源指示意义. *海洋地质与第四纪地质*, 29(5): 21–27. [Zhou L C, Li J, Gao J H, Bai F L, Zhao J T. 2009. Comparison of core sediment grain-size characteristics between Yangtze River estuary and Zhoushan islands and its significance to sediment source analysis. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 29(5): 21–27]
- Blott S J, Pye K. 2001. GRADISTAT: A grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26(11): 1237–1248.
- Boulay S, Colin C, Trentesaux A, Pluquet F, Bertaux J, Blamart D, Buehring C, Wang P. 2003. Mineralogy and sedimentology of Pleistocene sediment in the South China Sea (ODP Site 1144), Proceedings of the ocean drilling program, scientific results. 184(211): 1–21.
- Chen W S, Guillaume M. 2012. HALS-based NMF with flexible constraints for hyperspectral unmixing. *EURASIP Journal on Advances Signal Processing*, 54(1): 1–14.
- Fan D D, Guo Y X, Wang P, Shi J Z. 2006. Cross-shore variations in morphodynamic processes of an open-coast mudflat in the Changjiang Delta, China: with an emphasis on storm impacts. *Continental Shelf Research*, 26(4): 517–538.
- Folk R L. 1980. Petrology of sedimentary rocks. Austin: Hemphill Publishing Company, 1–184.
- Folk R L, Ward W C. 1957. Brazos River bar [Texas]; a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Research*, 27(1): 3–26.
- Green A N. 2009. Palaeo-drainage, incised valley fills and transgressive systems tract sedimentation of the northern KwaZulu-Natal continental shelf, South Africa, SW Indian Ocean. *Marine Geology*, 263(1–4): 46–63.
- Gröger M, Henrich R, Bickert T. 2003. Glacial-interglacial variability in lower North Atlantic deep water: Inference from silt grain-size analysis and carbonate preservation in the western equatorial Atlantic. *Marine Geology*, 201(4): 321–332.
- Huang J, Li A C, Wan S M. 2011. Sensitive grain-size records of Holocene East Asian summer monsoon in sediments of northern South China Sea slope. *Quaternary Research*, 75(3): 734–744.
- Klovan J E. 1966. The use of factor analysis in determining depositional environments from grain-size distributions. *SEPM Journal of Sedimentary Research*, 36(1): 115–125.
- Lin C M, Zhuo H C, Gao S. 2005. Sedimentary facies and evolution in the Qiantang River incised valley, Eastern China. *Marine Geology*, 219(4): 235–259.
- Mason C C, Folk R L. 1958. Differentiation of beach, dune, and aeolian flat environments by size analysis, Mustang Island, Texas. *SEPM Journal of Sedimentary Research*, 28(2): 211–226.
- Milliman J D, Farnsworth K L. 2011. River Discharge to the Coastal Ocean: A Global Synthesis. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1–382.
- Paterson G A, Heslop D. 2015. New methods for unmixing sediment grain size data. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 16(12): 4494–4506.
- Picchevin L, Cremer M, Giraudeau J, Bertrand P. 2005. A 190 ky record of

- lithogenic grain-size on the Namibian slope: forging a tight link between past wind-strength and coastal upwelling dynamics. *Marine Geology*, 218(1): 81–96.
- Prins M A, Postma G, Cleveringa J, Cramp A, Kenyon N H. 2000. Controls on terrigenous sediment supply to the Arabian Sea during the late Quaternary: The Indus Fan. *Marine Geology*, 169(3): 327–349.
- Rao W B, Mao C P, Wang Y G, Su J B, Balsam W, Ji J F. 2015. Geochemical constraints on the provenance of surface sediments of radial sand ridges off the Jiangsu coastal zone, East China. *Marine Geology*, 359(1): 35–49.
- Rea D K, Hovan S A. 1995. Grain size distribution and depositional processes of the mineral component of abyssal sediments: lessons from the North Pacific. *Paleoceanography*, 10(2): 251–258.
- Sahu B K. 1964. Depositional mechanisms from the size analysis of clastic sediments. *SEPM Journal of Sedimentary Research*, 34(1): 73–83.
- Stuut J W, Prins M A, Schneider R R, Weltje G J, Fred Jansen J H, Postma G. 2002. A 300-kyr record of aridity and wind strength in southwestern Africa: inferences from grain-size distributions of sediments on Walvis Ridge, SE Atlantic. *Marine Geology*, 180(1): 221–233.
- Visher G S. 1965. Fluvial processes as interpreted from ancient and recent fluvial deposits. In: *Primary Sedimentary Structures and Their Hydrodynamic Interpretation*. SEPM Special Publication, 12: 116–132.
- Wang S S, Pan C H, Xie D F, Xu M W, Yan Y H, Li X W. 2022. Grain size characteristics of surface sediment and its response to the dynamic sedimentary environment in Qiantang Estuary, China. *International Journal of Sediment Research*, 37(4): 457–468.
- Weltje G J. 1997. End-member modeling of compositional data: numerical-statistical algorithms for solving the explicit mixing problem. *Mathematical Geology*, 29: 503–549.
- Yang S L, Li H, Ysebaert T, Bouma T J, Zhang W X, Wang Y Y, Li P, Li M, Ding P X. 2008. Spatial and temporal variations in sediment grain size in tidal wetlands, Yangtze Delta: on the role of physical and biotic controls. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 77(4): 657–671.
- Zhang X, Lin C M, Dalrymple R W, Gao S, Li Y L. 2014. Facies architecture and depositional model of a macrotidal incised-valley succession (Qiantang River estuary, Eastern China), and differences from other macrotidal systems. *Geological Society of America Bulletin*, 126(3–4): 499–522.
- Zhang X, Dalrymple R W, Yang S Y, Lin C M, Wang P. 2015. Provenance of Holocene sediments in the outer part of the Paleo-Qiantang River estuary, China. *Marine Geology*, 366: 1–15.
- Zhang X, Li X L, Garzanti E, Lin C M, Deng K. 2021a. Sedimentary geochemistry response to climate change on a millennial timescale in the Qiantang River incised-valley system, Eastern China. *Chemical Geology*, 586: 120587.
- Zhang X, Lin C M, Dalrymple R W, Yang S Y. 2021b. Source-to-sink analysis for the mud and sand in the late-Quaternary Qiantang River incised-valley fill and its implications for delta-shelf-estuary dispersal systems globally. *Sedimentology*, 68: 3228–3252.
- Zhang X, Zhou X Q, Tan G Y, Huang S Y, Shan X, Lin C M, Zhang X T. 2025. Sea-level and climatic evolution in the postglacial Qiantang River incised-valley system: insights from grain-size end-member modeling and geochemical characteristics. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 661: 112707.
- Zhang X D, Wang H M, Xu S M, Yang Z S. 2020. A basic end-member model algorithm for grain-size data of marine sediments. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 236: 106656.

(责任编辑 李新坡)