

DOI: 10. 16562/j. cnki. 0256-1492. 2017. 03. 019

# 粒度端元法在东海内陆架古环境重建中的应用

赵松<sup>1,3</sup>, 常凤鸣<sup>1,2</sup>, 李铁刚<sup>2,4</sup>, 徐烨<sup>1,3</sup>

(1. 中国科学院海洋研究所 海洋地质与环境重点实验室, 青岛 266071;

2. 青岛海洋科学与技术国家实验室 海洋地质过程与环境功能实验室, 青岛 266061;

3. 中国科学院大学, 北京 100049;

4. 国家海洋局第一海洋研究所 海洋沉积与环境地质国家海洋局重点实验室, 青岛 266061)

**摘要:** 为了解不同粒度端元法在东海内陆架古环境重建中的差异性和适用性, 本文利用 6 种粒度端元法(非负矩阵分解、特征向量旋转、分层贝叶斯算法、粒级-标准偏差、理论函数拟合以及粒级主成分因子分析)对东海内陆架北部 DC1 孔的沉积物进行了粒度端元分离, 并对其结果进行了对比和评价, 结合沉积学资料评估了不同粒度端元在东海内陆架古环境重建中的差异性和适用性。结果表明, 上述 6 种方法均分离出 2 个具有沉积学意义的粒度端元(粗粒端元和细粒端元)。除粒级主成分因子分析外, 其他 5 种方法的端元众值粒级大小和端元在钻孔中的含量变化具有很好的一致性, 其粗粒端元指示了海侵砂沉积, 细粒端元指示了河流细粉砂沉积; 而粒级主成分因子分析得到的粗粒和细粒端元可能分别指示了风暴潮沉积和浪流搬运的再悬浮沉积。不同方法得到的粒度端元虽然在粒级分布、端元含量变化等方面有不同程度的差异, 但上述 6 种端元法在东海内陆架古环境重建中都具有良好的适用性, 其端元含量的变化均可有效指示末次盛冰期以来海平面波动引起的沉积环境的阶段性变化。

**关键词:** 粒度端元法; 东海内陆架; 古环境重建

**中图分类号:** P736.22

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0256-1492(2017)03-0187-10

沉积物的粒度特征一般可以指示碎屑颗粒物沉积时的水动力强弱以及判别颗粒物的来源, 其中沉积物粒度的各种图解方法(如粒度参数图解法<sup>[1]</sup>、偏度和峰度散点图<sup>[2]</sup>、标准偏差和偏度散点图<sup>[3,4]</sup>、概率值累积曲线<sup>[5,6]</sup>、C-M 图解法<sup>[7,8]</sup>等)已经被广泛用作沉积环境分析的工具, 但图解方法往往存在主观性或不准确性等问题。为了解决上述问题, 国内外很多学者提出了粒度端元法<sup>[9-15]</sup>, 粒度端元法就是利用不同的数学算法将沉积物的粒度成分划分为一定数量的组分。该方法的理论依据是, 认为沉积物的粒度成分是一定数量的粒度组分按不同比例混合的结果, 且假设特定的粒度端元具有固定的粒级频率分布、对应一定的沉积物物源或搬运方式。如果已知一系列沉积物样品的粒度端元的数量及粒度端元的频率分布, 那么每个沉积物样品的原

始粒级频率分布就可以描述为已知的粒度端元的线性组合。沉积物粒度端元法有效地提高了对沉积物来源和搬运方式的识别, 极大地促进了沉积物粒度分析在古环境重建中的应用。

近年来粒度端元法取得了迅速的发展, 如 Dietze 等基于特征向量旋转开发了一套粒度端元模型算法(特征向量旋转算法)<sup>[11]</sup>; Paterson 等利用非负矩阵分解建立了一套非参数端元的分析方法(非负矩阵分解算法), 并且开发了一套参数端元的分析方法<sup>[9]</sup>; Yu 等通过分层贝叶斯模型开发了一套端元模型分析(分层贝叶斯算法)<sup>[12]</sup>; Zheng 等应用主成分因子分析研究了冲绳海槽的沉积物物源和搬运机制<sup>[15]</sup>等。尽管各种粒度端元法得到了广泛应用, 但对于不同方法在古沉积环境重建结果中的适用性和差异性却很少有对比分析, 无法判断每种粒度端元法在古环境重建方面的效果。本文应用目前常用的 6 种粒度端元法(非负矩阵分解、特征向量旋转、分层贝叶斯算法、粒级-标准偏差法、理论函数拟合法以及粒级主成分因子分析)从东海内陆架的一个钻孔沉积物中分离出不同的粒度端元, 同时对比、评估了每种方法得到的粒度端元, 结合沉积学资料讨论了各粒度端元在东海内陆架古环境演变中的沉积学含义及适用性。

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(41476041, 41230959); “全球变化与海气相互作用”专项项目(GASI-GEOGE-04, GGASI-GEOGE-06-02); 中国科学院战略性先导科技专项课题(XDA10010305)

**作者简介:** 赵松(1992—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为古海洋与古环境, E-mail: zhaosong8501555@163.com

**通讯作者:** 李铁刚(1965—), 男, 研究员, 主要从事古海洋与古环境研究, E-mail: tgli@qdio.ac.cn

**收稿日期:** 2016-10-14; **改回日期:** 2017-01-06. 蔡秋蓉编辑

# 1 材料与方法

## 1.1 研究区域与材料

研究区域位于东海内陆架,该地区及周边的海洋环流主要有东海沿岸流(ESCCC)、黄海沿岸流(YSCC)、台湾暖流(TWC)等(图1),其中冬季东海沿岸流携带的大量的长江物质在东海内陆架地区发生堆积,并形成东海内陆架泥质区<sup>[16,17]</sup>。研究材料选自位于东海内陆架北部、浙江省舟山群岛以东的DC1钻孔(图1,29°40′11″N,122°30′48″E,水深28 m),该钻孔底部深度为26.9 m,其中6.8 m到顶部由于取心失败而缺失。该孔位于东海内陆架泥质区,岩性从下到上可划分为6部分(图2):25.4~24.6 m为硬黏土层,零星分布被氧化的黄褐色底栖有孔虫壳体;24.6~22.2 m主要由极细砂组成,广泛发育水平层理和粗细相间的韵律层理,偶见砂质团块;22.2~19.4 m为极细砂,局部发育水平层理和韵律层理,该层顶部40 cm含有大量的贝壳碎屑,分选较差;19.4~15.0 m主要为粉砂质黏土;15.0

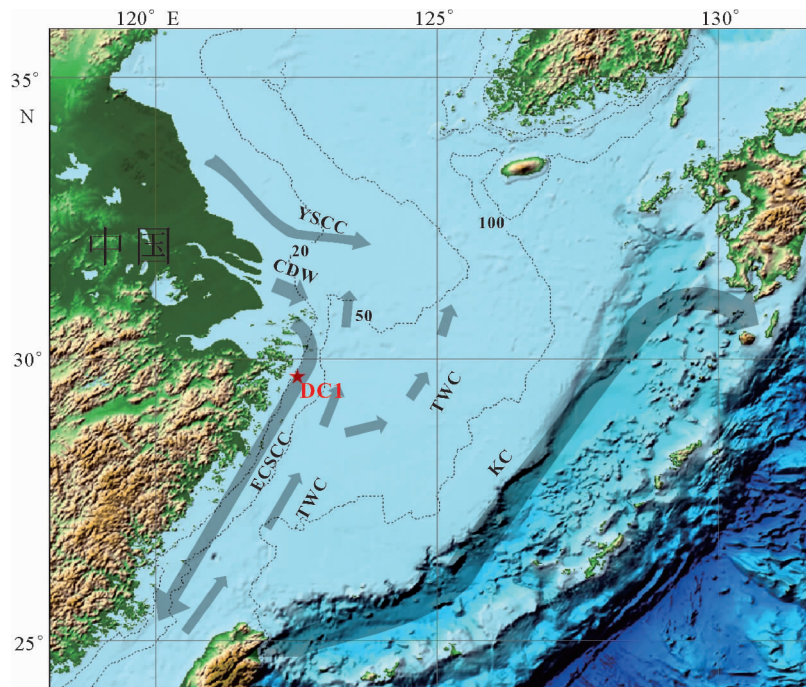
~11.2 m主要是黏土质粉砂;11.2~6.8 m主要为粉砂质黏土。

## 1.2 粒度预处理与测试

对DC1钻孔6.97~25.35 m段的131个沉积物样品进行了粒度处理与测试,首先将烘干后的样品混合均匀,先后加入15%的过氧化氢溶液、1 mol/L的HCl溶液,然后加入六偏磷酸钠分散剂并进行超声波分散,最后在中国科学院海洋地质与环境重点实验室的Cilas-1190型激光粒度仪上完成上机测试。仪器测试相对误差小于2%,测试范围为0.01~2 500 μm,一共获得81个粒级(0.01~600 μm)的体积百分比数据。

## 1.3 粒度端元法

本文选择了非负矩阵分解、特征向量旋转、分层贝叶斯算法、粒级-标准偏差法、理论函数拟合法以及粒级主成分因子分析6种粒度端元法,其中特征向量旋转、非负矩阵分解以及分层贝叶斯3种算法<sup>[9,11,12]</sup>分别在MATLAB环境下运行完成;粒级-标准偏差法通过计算每个粒级含量的标准偏差<sup>[14]</sup>,



YSCC: 黄海沿岸流; CDW: 长江冲淡水; ESCCC: 东海沿岸流; TWC: 台湾暖流; KC: 黑潮  
YSCC: Yellow Sea Coastal Current; CDW: Changjiang Diluted Water;  
ESCCC: East China Sea Coastal Current; TWC: Taiwan Warm Current; KC: Kuroshio Current

图1 DC1孔站位及东海环流示意图

Fig. 1 Location of core DC1 and current pattern in the East China Sea

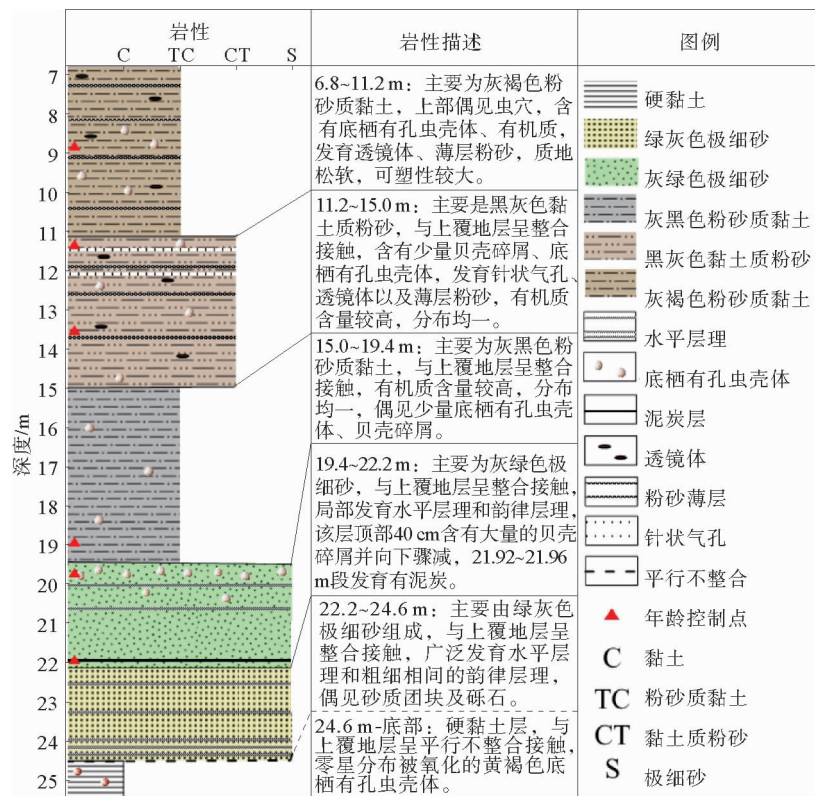


图 2 DC1 钻孔的岩心柱状图

Fig. 2 Lithology of core DC1

得到两个标准偏差最大值的粒度;理论函数拟合法利用 Paterson 等 2015 年的参数端元算法<sup>[9]</sup>,在 MATLAB 环境下导入粒度数据,选择 3 个参数端元和倾斜广义高斯分布,实现对样品的理论函数拟合;粒度主成分因子分析<sup>[18]</sup>是把 81 个粒度范围(0.01~600 μm)的粒度矩阵作为分析矩阵,在 SPSS 环境下导入粒度矩阵完成因子分析。

### 1.4 年代模式

DC1 钻孔年代模式的建立基于 6 个<sup>14</sup>C 测年数据(表 1),其中 3 个测年材料是底栖有孔虫混合种

壳体,2 个测年材料是软体动物壳体,其余 1 个测年材料为泥炭。年代测试分别由美国 Beta 放射性碳测年实验室(the Beta Analytic Radiocarbon Dating Laboratory)和伍兹霍尔海洋科学加速器质谱中心(NOSAMS)完成。通过 Calib7.1 软件<sup>[19]</sup>中的 MARINE13 和 INTCAL13 数据集<sup>[20]</sup>把测年数据校正为日历年龄,然后通过线性内插或外插建立整个钻孔的年代模式。钻孔底部到 24.6 m 为硬黏土层,该黏土层在长江三角洲及其附近地区广泛发育并具有很好的横向对比性,也被称为第一硬黏土层,其年龄为晚更新世末次盛冰期(LGM)<sup>[21]</sup>。

表 1 DC1 钻孔的 AMS<sup>14</sup>C 测年结果

Table 1 Accelerator mass spectrometry(AMS)<sup>14</sup>C dating for core DC1

深度/m	<sup>14</sup> C 年龄/aBP	日历年龄/ (2σ 年龄范围) (aBP)	测试材料
8.81~8.86	1 000±30	584(526~641)	底栖有孔虫混合壳
11.15~11.20	2 050±20	1 618(1 544~1 691)	底栖有孔虫混合壳
13.50~13.56	2 640±30	2 326(2 246~2 439)	底栖有孔虫混合壳
18.90~18.96	7 130±30	7 602(7 544~7 668)	软体动物壳体
19.70~19.76	7 720±30	8 190(8 092~8 297)	软体动物壳体
21.92~21.96	10 250±100	11 992(11 602~12 416)	泥炭

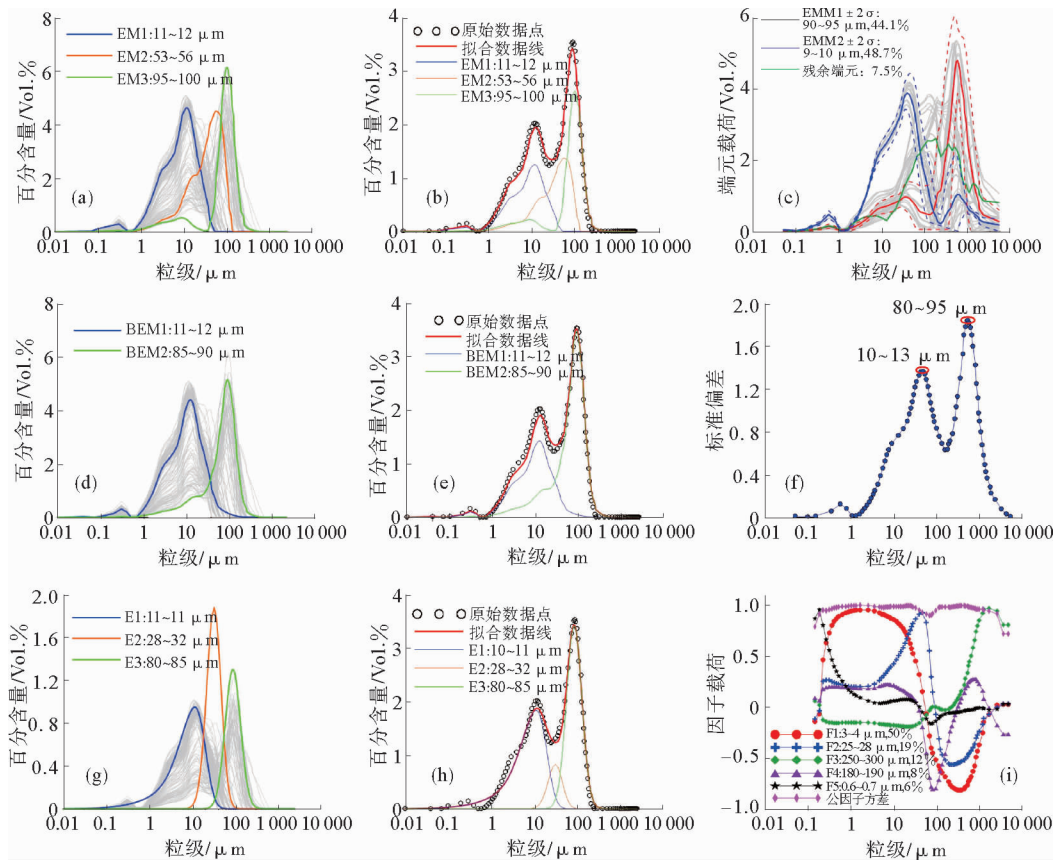
## 2 结果与讨论

### 2.1 粒度端元的分离结果

通过非负矩阵分解算法,得到了3个粒度端元(EM1、EM2、EM3),3个端元解释总方差的97.3%,其中EM1的众值粒度为11~12 μm,EM3的众值粒度为95~100 μm(图3a、3b)。特征向量旋转算法利用5个最稳定的权重转换(1=0、0.5、1、1.5、2)和它们各自的最小端元数(分别为3、3、3、4、4)和最大端元数(都为5),得到13个相似模型来评估EM模型的不确定性。模拟发现有两个端元在这13个模型中都存在,因此,得到两个稳健的端元(图3c),其中端元一(EMM1)的众值粒度为90~95 μm,解释总方差的44.1%;端元二(EMM2)的众值粒度为9~10 μm,解释总方差的48.7%。利用分

层贝叶斯端元算法,输出结果直接得到两个粒度端元,端元一(BEM1)与端元二(BEM2)的众值粒度分别为11~12 μm、85~90 μm(图3d、3e)。

基于粒度-标准偏差法得到两个环境敏感的粒度端元,分别是10~13 μm敏感端元、80~95 μm敏感端元(图3f)。利用倾斜广义高斯分布对原始数据进行拟合,得到3个分布端元(E1、E2、E3),解释总方差的96.1%,其中E1的众值粒度为10~11 μm,E3的众值粒度为80~85 μm(图3g、3h)。通过粒度主成分因子分析得到5个粒度公因子,解释了总方差的95%左右(图3i)。第一个公因子(F1)解释了总方差的50%,其在3~4 μm处有较宽的正相关众值粒度,在106 μm处有负相关谷值粒度;第三个公因子(F3)解释了总方差的12%,其在250~300 μm处有正相关众值粒度,在1~25 μm之间有平坦的负相关谷值粒度。可见,上述6种方法一致地分离出两个粒度端元,一个端元的众值粒度在3



(a)非负矩阵分解算法及(b)其对21.7~21.76 m层位粒度的拟合;(c)特征向量旋转算法;(d)分层贝叶斯算法及(e)其对21.7~21.76 m层位粒度的拟合;(f)粒度-标准偏差;(g)理论函数拟合及(h)其对21.7~21.76 m层位粒度的拟合;(i)粒度主成分因子分析  
(a) and (b) nonnegative matrix factorization; (c) eigenvector rotation; (d) and (e) hierarchical Bayesian; (f) grain-size class vs. standard deviation; (g) and (h) fitting with theoretical function; (i) factor analysis

图3 不同粒度端元法的端元粒度分布

Fig. 3 End-member grain-size distributions from different methods.

~13 μm 之间,另外一个端元的众值粒级在 80~300 μm 之间。

### 2.2 粒度端元的对比和评估

粒度端元的分离结果表明 DC1 孔沉积物有两个具有沉积学含义的粒度端元(细粒端元、粗粒端元),非负矩阵分解、特征向量旋转以及分层贝叶斯算法得到两个对应单一物源或搬运机制的多峰粒度端元,细粒端元(EM1、EMM2、BEM1)的众值粒级分别为 11~12、9~10、11~12 μm,粗粒端元(EM3、EMM1、BEM2)的众值粒级分别为 95~100、90~95、85~90 μm(图 3a、3b、3c、3d、3e);粒级-标准偏差得到的细粒端元的众值粒级为 10~13 μm,粗粒端元的众值粒级为 80~95 μm,指示这两个粒级范围在 DC1 孔变化最明显,对研究区环境演化最敏感(图 3f);同样,理论函数拟合法得到两个对应单一物源或搬运机制的单峰粒度端元,细粒端元(E1)的众值粒级为 10~11 μm,粗粒端元(E3)的众值粒级为 80~85 μm(图 3g、3h)。尽管上述 5 种方法的数学算法各不相同,但是不同方法得到的每种粒度端元的频率分布和众值粒级非常相近。另外,粒级主成分因子分析得到的细粒端元(F1)的众值粒级为 3~4 μm,粗粒端元(F3)的众值粒级为 250~300 μm(图 3i),明显比上述 5 种方法的细(粗)粒端元要细(粗)。

10~13 μm 敏感端元、E1、EM1、EMM2 与 BEM1 这 5 种细粒端元在钻孔中的变化具有很高的显著相关性(表 2,图 4),它们各自与其他方法的相关系数平均值分别为 0.98、0.98、0.97、0.97 和 0.94;同样,80~95 μm 敏感端元、E3、EM3、EMM1 与 BEM2 这 5 种粗粒端元 also 具有很高的显著相关性(表 2,图 4),它们各自与其他方法的相关系数平均值分别为 0.96、0.98、0.97、0.97 和 0.98;上述相

关性结果表明 5 种细(粗)粒端元在 DC1 孔具有相近的沉积学含义。

粒级主成分因子分析的细粒端元(F1)与其他方法的细粒端元也具有显著相关性,但是相关系数较小(表 2,图 4);其粗粒端元(F3)虽然与非负矩阵分解和分层贝叶斯算法的粗粒端元(EM3、BEM2)的相关性显著,但是与粒级-标准偏差、理论函数拟合和特征向量旋转的粗粒端元(80~95 μm 敏感端元、E3、EMM1)的相关性不显著,而且相关系数都非常小(表 2,图 4);可见,粒级主成分因子分析的细(粗)粒端元与其他 5 种细(粗)粒端元在 DC1 孔具有不同的沉积学含义。除此之外,E2、F2、F4、F5、EM2 以及残余端元这些粒度端元在 DC1 钻孔中解释的方差很小以及其沉积学含义不明确,本文未对其进行讨论。

为了更好地评估不同粒度端元方法分离出的端元结果的差异性,本文定义了粒度端元的相似系数  $\alpha$ :

$$\alpha_A = |m_A - \bar{m}| / [\beta(n \times \bar{r}_A)]$$

其中: $m_A$ :方法端元的众值粒级的中间值; $\bar{m}$ :所有方法端元的众值粒级的中间值的平均值; $\beta$ :所有方法端元的众值粒级的中间值的标准偏差; $n$ :与 A 方法通过 99%显著相关的方法的数量; $\bar{r}_A$ :与 A 方法显著的  $n$  个相关系数的平均值。

粒度端元的相似系数( $\alpha$ )指示了某种方法得到的一个粒度端元结果与其他方法得到的结果的相似程度, $\alpha$  值越小,表明利用该方法获得的粒度端元与其他方法获得的粒度端元越相似,也就指示该方法与其他方法的差异性越小。值得注意的是,较大的  $\alpha$  值并不表示通过该方法得到的粒度端元不可靠,而是表示该方法与其他方法的差异性较大(相似度较低),其代表的沉积学含义或环境参数可能与其他方法不同。本文通过上述 6 种端元方法,分别得到每种

表 2 6 种粒度端元法的粗粒、细粒端元间的线性相关系数

Table 2 Correlation coefficients between coarse(fine)-grained end members of the six methods

端元方法名称	非负矩阵分解	特征向量旋转	分层贝叶斯	粒级-标准偏差	理论函数拟合	主成分因子分析
非负矩阵分解		<b>0.98</b>	<b>0.93</b>	<b>0.99</b>	<b>0.99</b>	<b>0.82</b>
特征向量旋转	<b>0.98</b>		<b>0.94</b>	<b>0.98</b>	<b>0.99</b>	<b>0.88</b>
分层贝叶斯	<b>0.99</b>	<b>0.99</b>		<b>0.96</b>	<b>0.93</b>	<b>0.80</b>
粒级-标准偏差	<b>0.93</b>	<b>0.95</b>	<b>0.96</b>		<b>0.99</b>	<b>0.81</b>
理论函数拟合	<b>0.96</b>	<b>0.97</b>	<b>0.98</b>	<b>0.99</b>		<b>0.85</b>
主成分因子分析	<b>0.25</b>	0.18	<b>0.23</b>	0.04	0.10	

注:粗体表示通过 99%显著性检验,左下侧数值为粗粒端元,右上侧数值为细粒端元

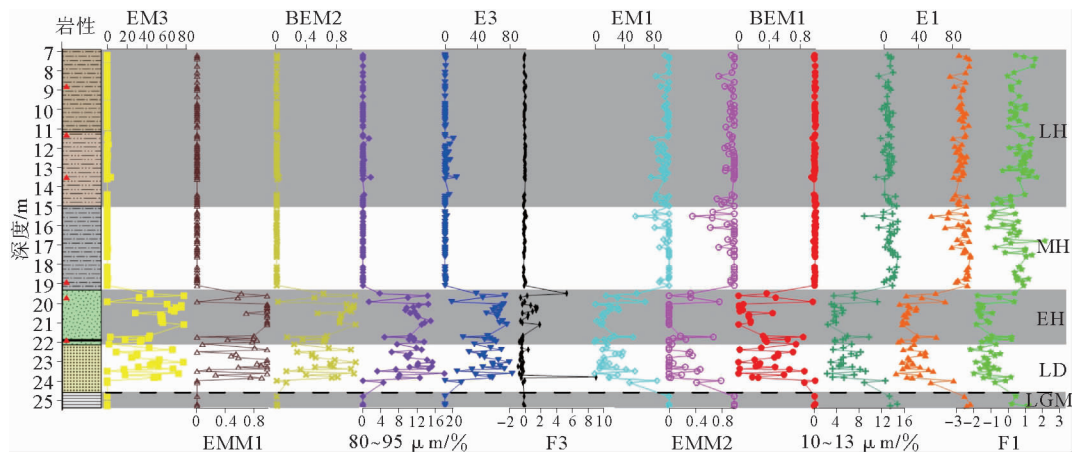


图4 DC1孔岩性(图例参照图2),6种粒度端元法的粗粒(EM3、EMM1、BEM2、80~95 μm敏感端元、E3与F3)、细粒(EM1、EMM2、BEM1、10~13 μm敏感端元、E1与F1)端元随钻孔深度的变化 (LGM:末次盛冰期;LD:末次冰消期;EH:早全新世;MH:中全新世;LH:晚全新世。虚线指示不整合接触关系)

Fig. 4 Lithology of DC1(for legend see Figure 2), and vertical variations of coarse-grained and fine-grained end members of the six methods ( LGM: Last Glacial Maximum; EH: early Holocene; MH: middle Holocene; LH: late Holocene. Dash line means unconformity(i. e. hiatus))

方法粗粒端元与细粒端元的相似系数  $\alpha$ (表3)。粗粒端元中非负矩阵分解得到的相似系数最小,主成分因子分析得到的相似系数最大;细粒端元中特征向量旋转得到的相似系数最小,主成分因子分析得到的相似系数最大;可见在该研究区域非负矩阵分解的粗粒端元与特征向量旋转的细粒端元与其他方法的相似度最高,主成分因子分析得到的粗粒与细粒端元与其他方法的相似度最低。因此,采用粒度端元法重建DC1孔区域的沉积环境演化时,粗粒端元应优先选择非负矩阵分解方法,细粒端元优先使用特征向量旋转方法,然而主成分因子分析的粒度端元与其他方法差别较大,原因可能是其代表的沉积学含义(或环境参数)与其他方法不同。今后,随着粒度端元方法的类型越来越多,粒度端元的相似系数  $\alpha$  可以用来评估不同方法得到的端元相似性,完全地可应用于其他环境下(湖泊、河流等)沉积物的粒度分析之中。

表3 6种粒度端元法粗粒、细粒端元的相似系数

Table 3 Similarity coefficients of coarse(fine)-grained end members of the six methods

端元方法名称	粗粒端元相似系数 $\alpha$	细粒端元相似系数 $\alpha$
非负矩阵分解	0.07	0.13
特征向量旋转	0.10	0.01
分层贝叶斯	0.11	0.13
粒级-标准偏差	0.11	0.12
理论函数拟合	0.13	0.06
主成分因子分析	4.24	0.48

### 2.3 粒度端元的沉积学解释

依据DC1孔岩性和AMS<sup>14</sup>C测年数据,该钻孔沉积序列大体可划分为3个阶段(图4、5):末次盛冰期(LGM,25.4~24.6 m,~19.0 kaBP)、末次冰消期-早全新世(LD-EH,24.6~19.4 m,~13.3~8.0 kaBP)与中晚全新世(MH-LH,19.4~7.0 m,8.0~0.5 kaBP),各段分别代表了末次盛冰期低海平面时期、末次冰消期和早全新世海平面快速上升时期与中全新世之后的高海平面时期。

如上所述,5种方法的粗粒端元(EM3、EMM1、BEM2、80~95 μm敏感端元以及E3)具有相近的沉积学含义,该端元粒级较粗,在LGM阶段含量为零,在LD-EH阶段含量较高,波动剧烈,在MH-LH阶段含量非常低,多数为零(图4)。LGM阶段,东海内陆架暴露出地表,遭受风化和剥蚀,沉积发生间断,DC1孔最底层相应地发育为硬黏土,该层分布有黄褐色底栖有孔虫壳体,与上覆地层呈不整合接触,该阶段粗粒端元含量为零(图2、4);在LD-EH阶段,全球海平面发生快速的上升,研究区处于滨海、潮间-潮下带沉积环境,水动力比较强,该地区沉积较粗的极细砂,分选较差,正偏性增大,峰态变尖锐,该层与上覆地层呈整合接触,广泛地发育水平、交错层理,从而该阶段粗粒端元含量较高,并变化剧烈(图2、4、5);在MH-LH阶段,海平面达到现今高度,水动力减弱,该地区相应地沉积较细的粉砂质黏土和黏土质粉砂,分选较好,正偏性减小,峰态变平坦,该阶段粗粒端元基本消失(图2、4、5)。可见,这

些粗粒端元的变化特征与岩性资料有很好的一致性,且对 LGM 以来的海平面变化非常敏感。在 LD-EH 阶段粗粒端元在极细砂沉积中含量很高,反映了一种高能的沉积环境。因此,这些粗粒端元很可能指示了海侵砂沉积,反映了末次冰消期和早全新世海侵时期的滨海、潮间-潮下带沉积环境。主成分因子分析的粗粒端元(F3)的众值粒级(250~300  $\mu\text{m}$ )比其他方法的粗粒端元的众值粒级要大,F3 含量变化在 LGM、MH-LH 阶段与其他端元一致,但在 LD-EH 阶段有明显的差异,其变化频率较小(图 4)。砂质团块(粒级 $\geq 250\sim 300\ \mu\text{m}$ )在现代风暴潮沉积环境下更容易形成,在 24.6~19.4 m 段(即 LD-EH)也零星地分布,其出现的频率与 F3 的变化频率相近,因此,F3 可能指示了滨海、潮间-潮下带沉积环境下的风暴潮沉积。

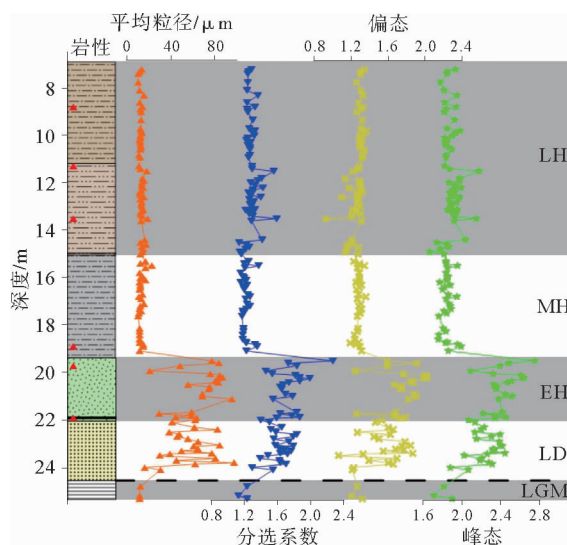


图 5 DC1 孔的岩性(图例参照图 2)以及粒度参数随钻孔深度的变化

Fig. 5 Lithology of DC1(for legend see Figure 2), and vertical variations of grain-size parameters

前文粒度端元的对比表明,5 种方法的细粒端元(EM1、EMM2、BEM1、10~13  $\mu\text{m}$  敏感端元以及 E1)也具有相近的沉积学含义,该端元粒级较细,在 LGM 阶段含量较高,在 LD-EH 阶段含量较低,波动剧烈,在 MH-LH 阶段含量显著升高,波动较小(图 4)。在末次盛冰期低海平面时期,研究区处于风化剥蚀状态,DC1 孔相应地发育硬黏土层,细粒端元含量高(LGM 阶段);末次盛冰期结束以后,LD-EH 阶段东海海平面快速上升,岸线迅速向陆推进,研究区此时处于滨海、潮间-潮下带沉积环境,水动力较强,沉积物较粗,细粒端元含量相应地较低;

中全新世海平面达到现今高度,研究区的细粒物质主要是冬季东海沿岸流搬运而来的长江物质<sup>[16-17]</sup>,现代长江口悬浮颗粒平均粒径为 3~20  $\mu\text{m}$ ,粒级频率分布多为正偏<sup>[22-24]</sup>,这与 DC1 孔沉积物在 MH-LH 阶段的平均粒径和偏态一致(图 5)。资料显示现代东海沿岸悬浮颗粒的粒度频率分布的众值位于 10  $\mu\text{m}$  附近<sup>[25]</sup>,与细粒端元众值粒级吻合(图 3)。末次冰消期以来海平面快速上升,当达到一定的高度时,其沉积环境与现代基本一致,东海沿岸流控制研究区的泥沙沉积(MH-LH 阶段),所以细粒端元指示了中全新世之后的高海平面时期东海沿岸流输送而来的长江细粉砂沉积(河流细粉砂沉积)<sup>[26]</sup>。

公因子 F1 与上述 5 种方法的细粒端元类似,在 LGM 阶段取值较大,在 LD-EH 阶段取值较小、变化剧烈,在 MH-LH 阶段取值较大。由于 F1 的众值粒级比其他方法的细粒端元要小,F1 在 MH-LH 阶段具有明显的差异,其变化频率较大(图 4)。河口-海岸-内陆架地区沉积物再悬浮作用很强,潮流和波浪是影响该地区沉积物再悬浮的主要因素。在研究区域,潮流速度可以超过 100  $\text{cm/s}$ <sup>[27]</sup>,强烈的偏北冬季风平均风速可达 5~10  $\text{m/s}$ <sup>[28]</sup>,模拟结果显示浪流(风浪和潮流)产生的底剪切力完全可以使东海内陆架 3~4  $\mu\text{m}$  沉积物再悬浮<sup>[29]</sup>。风速快,波浪能量高,导致的底剪切应力就强;风速慢,波浪能量低,产生的底剪切应力就弱。东海的潮流流速很快(40~120  $\text{cm/s}$ ),然而东海的环流流速较慢(小于 20  $\text{cm/s}$ )<sup>[29]</sup>,因此,与潮流相比研究区的东海沿岸流产生的底剪切应力可以忽略。除此之外,4  $\mu\text{m}$  左右粒级与东海陆架雾浊层的众值粒级(约 6  $\mu\text{m}$ )<sup>[30]</sup>和冲绳海槽雾浊层主成分的众值粒级(约 4.6  $\mu\text{m}$ )<sup>[15]</sup>大小相近。因此,粒级主成分因子分析的细粒端元(F1)可能指示了中全新世之后的高海平面时期浪流搬运的再悬浮沉积。

### 3 结论

本文介绍了 6 种粒度端元法,并将其应用于东海内陆架北部 DC1 孔的沉积物粒度分析中,通过分离、对比和评估沉积物的粒度端元,初步得到以下结论:

(1) 6 种粒度端元法均分离出两个具有沉积学含义的粒度端元(粗粒端元、细粒端元),非负矩阵分解、特征向量旋转、分层贝叶斯算法、粒级-标准偏差以及理论函数拟合这 5 种方法得到的端元众值粒级基本一致,而且端元在钻孔中的变化具有很高的显

著相关性。与上述5种方法相比, 粒度主成分因子分析得到的端元特征具有明显的不同, 并且该方法得到的端元在钻孔中的变化与其他方法具有较低的线性相关性。

(2) 非负矩阵分解的粗粒端元与特征向量旋转的细粒端元与其他方法的相似度最高, 在东海内陆架古环境重建中粗粒端元应优先选择非负矩阵分解方法, 细粒端元优先选择特征向量旋转方法。主成分因子分析的粒度端元与其他方法的相似度最低, 具有明显不同的沉积环境指示意义。尽管不同粒度端元法有不同程度的差异, 上述6种端元法在东海内陆架古环境重建中都具有很好的适用性。

(3) 结合DC1孔的岩性和测年资料, 非负矩阵分解、特征向量旋转、分层贝叶斯算法、粒度-标准偏差以及理论函数拟合这5种方法的粗粒端元指示了末次冰消期-早全新世的海侵砂沉积, 细粒端元指示了中晚全新世的河流细粉砂沉积。粒度主成分因子分析的粗粒端元可能指示末次冰消期-早全新世的风暴潮沉积, 细粒端元可能指示中晚全新世浪流搬运的再悬浮沉积。

### 参考文献 (References)

- [1] Folk R L, Ward W C. Brazos river bar [Texas]; a study in the significance of grain size parameter[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1957, 27(1): 3-26.
- [2] Mason C C, Folk R L. Differentiation of beach, dune, and Aeolian flat environments by size analysis, Mustang Island, Texas[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1958, 28(2): 211-226.
- [3] Friedman G M. Distinction between dune, beach, and river sands from their textural characteristics[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1961, 31(4): 514-529.
- [4] Friedman G M. Dynamic processes and statistical parameters compared for size frequency distribution of beach and river sands[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1967, 37(2): 327-354.
- [5] Visher G S. Fluvial processes as interpreted from ancient and recent fluvial deposits[C]//Primary Sedimentary Structures and Their Hydrodynamic Interpretation. Tulsa, USA: SEPM, 1965: 116-132.
- [6] Visher G S. Grain size distributions and depositional processes [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1969, 39(3): 1074-1106.
- [7] Passega R. Texture as characteristic of clastic deposition[J]. *AAPG Bulletin*, 1957, 41(9): 1952-1984.
- [8] Passega R. Grain size representation by CM patterns as a geologic tool[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1964, 34(4): 830-847.
- [9] Paterson G A, Heslop D. New methods for unmixing sediment grain size data[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2015, 16(12): 4494-4506. doi: 10.1002/2015GC006070.
- [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] Dietze E, Hartmann K, Diekmann B, et al. An end-member algorithm for deciphering modern detrital processes from lake sediments of Lake Donggi Cona, NE Tibetan Plateau, China [J]. *Sedimentary Geology*, 2012, 243-244: 169-180.
- [12] Yu S Y, Colman S M, Li L X. BEMMA: a hierarchical Bayesian end-member modeling analysis of sediment grain-size distributions[J]. *Mathematical Geosciences*, 2016, 48(6): 723-741.
- [13] Sun D H, Bloemendal J, Rea D K, et al. Grain-size distribution function of polymodal sediments in hydraulic and Aeolian environments, and numerical partitioning of the sedimentary components[J]. *Sedimentary Geology*, 2002, 152(3-4): 263-277.
- [14] Boulay S, Colin C, Trentesaux A, et al. Mineralogy and Sedimentology of Pleistocene Sediment in the South China Sea (ODP Site 1144)[C]//Prell W L, Wang P, Blum P, et al. Proceedings of the Ocean Drilling Program Scientific Results. College Station, TX: Ocean Drilling Program, 2003.
- [15] Zheng X F, Li A C, Wan S M, et al. ITCZ and ENSO pacing on East Asian winter monsoon variation during the Holocene: sedimentological evidence from the Okinawa Trough [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2014, 119(7): 4410-4429.
- [16] Xu K H, Li A C, Liu J P, et al. Provenance, structure, and formation of the mud wedge along inner continental shelf of the East China Sea: a synthesis of the Yangtze dispersal system[J]. *Marine Geology*, 2012, 291-294: 176-191.
- [17] 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.
- [18] Hartmann K, Wünnemann B. Hydrological changes and Holocene climate variations in NW China, inferred from lake sediments of Juyan palaeolake by factor analyses[J]. *Quaternary International*, 2009, 194(1-2): 28-44.
- [19] Stuiver M, Reimer P J. Extended <sup>14</sup>C data base and revised CALIB 3.0 <sup>14</sup>C age calibration program[J]. *Radiocarbon*, 1993, 35(1): 215-230.
- [20] Reimer P J, Bard E, Bayliss A, et al. Intcal13 and marine13 radiocarbon age calibration curves 0-50,000 YEARS CAL BP [J]. *Radiocarbon*, 2013, 55(4): 1869-1887.
- [21] Qin J G, Wu G X, Zheng H B, et al. The palynology of the First Hard Clay Layer (late Pleistocene) from the Yangtze delta, China[J]. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 2008, 149(1-2): 63-72.
- [22] 胡刚, 刘健, 时连强. 2008年洪水期长江口滨外区悬浮泥沙特征[J]. *海洋地质前沿*, 2011, 27(9): 6-10. [HU Gang, LIU Jian, SHI Lianqiang. The characteristics of suspended



- deposits in the offshore area of the Changjiang estuary during flood season[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2011, 27(9): 6-10. ]
- [23] 李军,高抒,曾志刚,等. 长江口悬浮体粒度特征及其季节性差异[J]. *海洋与湖沼*, 2003, 34(5): 499-510. [LI Jun, GAO Shu, ZENG Zhigang, et al. Particle-size characteristics and seasonal variability of suspended particulate matters in the Changjiang river estuary[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2003, 34(5): 499-510. ]
- [24] 李军,高抒,贾建军,等. 1998年11月长江河口悬浮体粒度特征的空间分布[J]. *海洋通报*, 2003, 22(6): 21-29. [LI Jun, GAO Shu, JIA Jianjun, et al. Spatial variation of the suspended particulate matter grain-size in the Yangtze Estuary[J]. *Marine Science Bulletin*, 2003, 22(6): 21-29. ]
- [25] 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. ]
- [26] 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 and Quaternary Geology*, 2008, 28(4): 1-10. ]
- [27] 胡日军,吴建政,朱龙海,等. 东海舟山群岛海域表层沉积物运移特性[J]. *中国海洋大学学报*, 2009, 39(3): 495-500, 442. [HU Rijun, WU Jianzheng, ZHU Longhai, et al. Characteristic of surface sediment transport in Zhoushan Archipelago sea area, East China Sea[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2009, 39(3): 495-500, 442. ]
- [28] Bian C W, Jiang W S, Greatbatch R J. An exploratory model study of sediment transport sources and deposits in the Bohai Sea, Yellow Sea, and East China Sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, 118(11): 5908-5923.
- [29] Bian C W, Jiang W S, Greatbatch R J, et al. The Suspended Sediment Concentration Distribution in the Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2013, 12(3): 345-354.
- [30] Hoshika A, Tanimoto T, Mishima Y, et al. Variation of turbidity and particle transport in the bottom layer of the East China Sea[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2003, 50(2): 443-455.

## THE APPLICATION OF GRAIN-SIZE END MEMBER ALGORITHM TO PALEOENVIRONMENTAL RECONSTRUCTION ON INNER SHELF OF EAST CHINA SEA

ZHAO Song<sup>1, 3</sup>, CHANG Fengming<sup>1, 2</sup>, LI Tiegang<sup>2, 4</sup>, XU Ye<sup>1, 3</sup>

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

2. Laboratory for Marine Geology, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266061;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049;

4. Key Laboratory of Marine Sedimentology and Environmental Geology, First Institute of Oceanography,  
State Oceanic Administration, Qingdao 266061)

**Abstract:** In order to assess the difference and applicability of different end-member algorithms in paleoenvironmental reconstruction for the inner shelf of the East China Sea (ECS), six common methods, including nonnegative matrix factorization, eigenvector rotation, hierarchical Bayesian algorithm, grain-size class vs. standard deviation, fitting with theoretical function, and factor analysis, are used to extract the grain-size end members of sediments in core DC1 from the ECS inner shelf. Based on comparison and evaluation of different end members extracted from the above six approaches, their deviations and availabilities are discussed. Two sedimentologically meaningful end members (coarse-grained and fine-grained end members) are deduced by all the six methods. Particle size of mode for the end members from five of the six modeling, except that from factor analysis, are consistent with each other, and the content variations of those end members exhibit fairly uniform downcore pattern along the core DC1. The coarse-grained end members for the five modeling represent transgressive sand deposit, and the fine-grained end members represent fluvial fine-silty deposit. However, the coarse-grained end member from factor analysis indicates storm deposits, and the fine one indicates re-suspended deposits induced by current-wave. Although there are some differences in the particle size distribution and content variation in different end members, the six grain-size end-member approaches have good availabilities for the past environment reconstruction on the ECS inner shelf. The variations in end members are effective to indicate the phase change in hydrodynamic environment caused by the sea-level fluctuation since the last glacial maximum.

**Key words:** grain-size end-member algorithm; the East China Sea inner shelf; paleoenvironmental reconstruction