

李辉, 韩宗珠, 闫天浩, 等. 稀土元素配分曲线的相似性度量算法及其在黄海沉积物物源判别中的应用[J]. 海洋地质前沿, 2023, 39(12): 88-97.

LI Hui, HAN Zongzhu, YAN Tianhao, et al. Similarity measurement algorithm of REE distribution curve and its application for provenance discrimination of sediments in the Yellow Sea[J]. Marine Geology Frontiers, 2023, 39(12): 88-97.

稀土元素配分曲线的相似性度量算法及其在 黄海沉积物物源判别中的应用

李辉¹, 韩宗珠^{1,2*}, 闫天浩¹, 赵可心¹, 杨叶飘¹

(1 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100; 2 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 青岛 266100)

摘要: 稀土元素配分曲线常被用于判别沉积物物源, 相同物源沉积物的稀土元素配分曲线往往具有相似的形态特征。然而, 当前稀土元素配分曲线相似性判别仍然采用人眼目视判别, 主观性较强且无法实现定量判别, 因此需要一种统一的度量手段实现稀土元素配分曲线的定量相似度计算, 进而在此基础上开展聚类、分类等统计分析操作, 充分挖掘稀土元素数据中的物源信息。本研究提出一种稀土元素配分曲线相似性度量算法, 该算法不受稀土元素绝对丰度的影响, 能够有效甄别稀土元素配分曲线之间形态上的差异。该算法的聚类结果显示, 黄河和长江是南黄海中部泥质区的主要物质来源, 黄河黏土粒级物质可以由沿岸流运输至黄海 33°N 处, 长江黏土粒级物质被黄海暖流携带北上最远至黄海 36°N 附近, 西朝鲜海洋锋面将朝鲜半岛河流的影响范围限制在了其东侧; 东南黄海泥质区除了接收朝鲜半岛河流的供给外, 其南部还接收了中国河流的细粒物质供应。

关键词: 稀土元素; 稀土元素配分曲线; 物源; 相似性度量; 聚类

中图分类号: P736.4

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2022.253

0 引言

稀土元素(Rare Earth Element, REE)是一组特殊的微量元素, 具有独特的地球化学特征, 在表生环境中化学稳定性良好。由于所有稀土元素均形成稳定的三价阳离子、且离子半径相近, 因此, 此类元素具有非常相似的物理和化学特征, 在任何地质体中都倾向于成组出现^[1]。稀土元素由于在风化和成岩过程中溶解度较低而成为研究物源的首选示踪剂^[2]。沉积物中稀土元素组分和配分模式主要受控于源岩, 同时沉积物粒度、重矿物^[3-4]以及大量的

不稳定组分对稀土元素的浓度和分馏模式也有一定影响。稀土元素的浓度受到“粒度控制”的影响, 与沉积物的类型密切相关, 一般会随着粒度变细而增高, 但也有例外^[2]。王金土^[5]指出 REE 主要赋存于<2 μm 的黏土粒级沉积物中。GUO 等^[6]认为河流沉积物中细颗粒的黏土粒级组分是其所在流域的均一化风化产物, 能够代表源区平均物质组成。黏土粒级沉积物(<2 μm)的强吸附性使其富集多种元素, 通过研究黏土粒级沉积物中的稀土元素, 可最大限度地提取物源信息^[7-8]。YANG 等^[9]研究了重矿物对 REE 含量及其配分模式的影响, 认为重矿物对河流沉积物中总稀土含量的贡献不足 20%, 黏土矿物依然是 REE 的主要载体, 沉积物中的 REE 主要赋存于黏土矿物中, 黏土矿物对 REE 含量的控制作用可能比重矿物更为重要。

在沉积的过程中, 环境特征如生物碎屑、自生矿物和其他成岩不稳定组分, 可能被添加到沉积物中, 导致与物源区碎屑成分基本无关的成分变化。

收稿日期: 2022-09-06

资助项目: 国家自然科学基金(41376053)

作者简介: 李辉(1998—), 男, 在读硕士, 主要从事海洋地质与地球化学方面的研究工作。E-mail: lihui674@foxmail.com

* 通讯作者: 韩宗珠(1964—), 男, 博士, 教授, 主要从事岩石学和地球化学方面的研究工作。E-mail: hanzongzhu@ouc.edu.cn

这使得利用沉积物的整体化学成分来揭开物源并不是一件简单的事情。为了更好地了解河流沉积物的原始组分, SONG 和 CHOI^[10] 使用 1N 盐酸(HCl)将沉积物中稀土元素在化学上分为 2 个组分: 沉积物原始组成的残余馏分和对物理化学环境变化敏感的浸出馏分^[2]。残余馏分的元素浓度定义为总馏分和浸出馏分(活性馏分)之间的差值。

稀土元素标准化配分曲线是表示稀土元素配分模式的一种有效方式, 综合反映了稀土元素地球化学特征。在过去的研究中, 稀土元素配分曲线被用作沉积物物源和环境的判别手段^[4, 11-13]。球粒陨石是地球的原始物质, 不存在轻稀土元素和重稀土元素之间的分馏, 球粒陨石标准化能够反映样品相对地球原始物质的分异程度。由于上陆壳(UCC)沉积物的稀土元素含量与一般的陆源碎屑沉积物非常接近, 上陆壳标准化能够反映沉积过程中混合、均化的影响和分异程度, 上陆壳标准化曲线比球粒陨石标准化曲线更能反映沉积物稀土元素组成特征的细微差异^[14]。通过对比样品间稀土元素配分曲线形态相似性可以判断其是否同源^[2, 15-18], 但在以往的研究中, 稀土元素配分曲线的相似性对比往往采用目视判别的方式, 缺少一种统一的度量手段。当样品量较多时, 难以快速有效地开展样品之间稀土元素配分曲线形态相似性的判别工作, 更无法实现基于稀土元素配分曲线形态相似度的聚类分析。

相似性度量是模式匹配、相似查询、分类和聚类的基础, 是图像、语音信号处理等方面的基础研究之一。欧式距离作为最经典的相似性度量方法, 计算方法简单直接、易于理解, 在聚类和分类等数据挖掘过程中得到了广泛的应用^[19]。前人借助欧式距离进行了表层样稀土元素数据的聚类分析^[20-21], 但是欧氏距离缺乏分段趋势信息, 不具备形态识别能力, 不能有效地区分稀土元素数据之间配分模式的差异, 很大程度上反映的是样品之间稀土元素绝对丰度的差异。然而在解释沉积物稀土元素标准化配分模式时要注重配分曲线的几何形态, 而不是其绝对丰度^[15], 因此需要设计一种充分考虑配分曲线几何形态的相似性度量算法。

本文受时间序列相似性度量算法^[19, 22-33]的启发, 充分考虑稀土元素配分曲线的几何形态特征, 提出了一种稀土元素配分曲线形态相似性度量的算法, 并将其应用到黄海陆架沉积物表层样黏土颗粒($< 2 \mu\text{m}$)全样全馏分、残余馏分、活性馏分稀土元素数据聚类中, 通过聚类结果分析了潜在物源区

物质在黄海的影响范围, 并讨论了沉积物不同粒级和组分中稀土元素对于物源判别的影响。

1 稀土元素配分曲线相似性度量算法

前人在时间序列的相似性度量方面开展了大量的研究工作^[19, 22-33], 虽然不同学者提出了不同的相似性度量方法, 但其本质多为将时间序列拆分为各个独立单元, 在各个单元上进行相似度的分析。

本文认为稀土元素配分曲线的单元拆分有 2 种方式: ①将相邻 2 个稀土元素之间构成的线段视作一个单元; ②将相邻 2 条线段的角点视作一个单元。单元拆分完成后需要对单元进行特征的描述。前人对时间序列单元特征的描述主要采用 2 种方式: ①通过人工定义几种变化趋势, 将每一个单元的变化趋势符号化, 将时间序列转化为离散化的趋势序列^[24, 30]; ②计算每个单元的斜率、倾角(线段)^[25-26]或角点处弯曲度^[23](例如图 1 中 α_1)等对单元进行特征描述。相邻研究区域的稀土元素配分曲线对应单元的差异一般较小, 离散化的描述方式分辨率有限, 难以满足实际应用需求。由于存在角点处弯曲度相同但相邻 3 种稀土元素变化趋势不同的情况, 使用角点处弯曲度描述稀土元素配分曲线单元具有一定的不确定性。因此, 本文将相邻 2 个稀土元素构成的线段视作一个单元, 使用倾角对单元进行描述。

1.1 稀土元素配分曲线的分段倾角

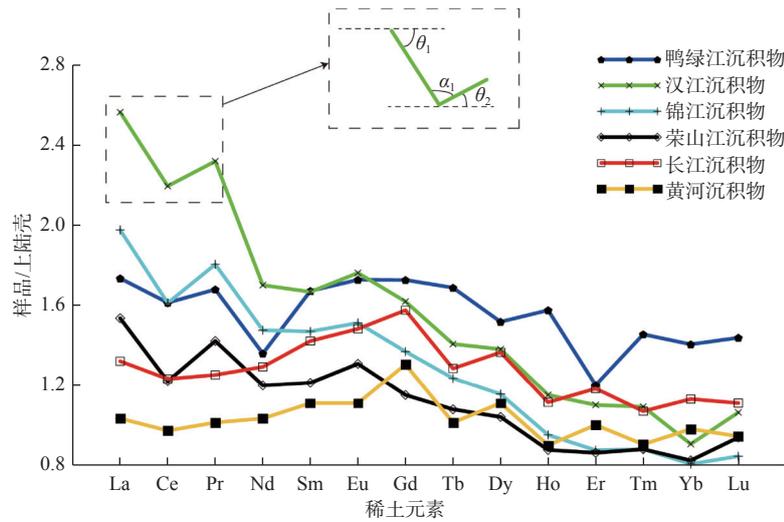
定义 1 分段倾角指的是稀土元素配分曲线中相邻 2 点构成的线段与稀土元素轴(X轴)正向的夹角角度。规定夹角在第 1 象限角度为正值, 在第 4 象限为负值。

根据定义 1, 图 1 中, $\theta_1 < 0$, $\theta_2 > 0$ 。式(1)给出了稀土元素配分曲线分段角度的计算方法, 其中 ΔREE 为相邻稀土元素含量之间的差值, 0.2 为人工指定的参数, n 为配分曲线中稀土元素的数量。

$$\theta_i = \arctan \frac{\Delta\text{REE}}{0.2}, i \in [1, n-1], \theta_i \in (-90^\circ, 90^\circ) \quad (1)$$

1.2 稀土元素配分曲线的相似度

定义 2 对于 2 条稀土元素配分曲线 u 、 v , 通过式(1)计算其不同分段的倾角 θ_i 和 θ'_i , 则对应分段间



黄河长江数据引自文献 [9], 其他河流数据引自文献 [34], UCC 数据引自文献 [35]

图 1 河流沉积物稀土元素配分曲线

Fig.1 The REE distribution curves of river sediments

的相似度的定义为:

$$sim_i = 1 - \frac{|\theta_i - \theta'_i|}{180^\circ}, i \in [1, n - 1] \quad (2)$$

理论上, $sim_i \in (0, 1]$ 。

通过局部单元计算整体相似度的方法有很多, 例如可以计算各段相似度的平均数或加权平均数, 但是相邻研究区域内稀土元素配分曲线之间的差异往往较小, 均值不利于体现配分曲线内部的微小差异。通过试验对比, 本文采取了累乘的方式将各段相似度进行整合。

定义 3 对于 2 条稀土元素配分曲线 u, v , 其整体的相似度的定义为:

$$sim_{u,v} = \prod_{i=1}^{n-1} sim_i \quad (3)$$

理论上, $sim_{u,v} \in (0, 1]$, $1 - sim_{u,v}$ 为稀土元素配分曲线 u, v 间的距离。

2 稀土元素数据相似性(距离)度量实验

以图 1 中的河流沉积物上陆壳标准化稀土元素数据为例, 使用本文算法对其进行相似度计算, 结果如表 1 所示。表 2 为各河流稀土元素数据间的欧式距离。从图 1 可以显著看出, 长江和黄河沉积物稀土元素配分曲线形态相似, 汉江、锦江、荣山江稀土元素配分曲线形态相似, 鸭绿江与其他河流稀土元素配分曲线形态差异较大, 这与本文提出的相似性度量算法结果一致。而由于黄河和荣山江稀土元素数据之间绝对丰度差值较小, 欧式距离计

算结果中两者距离最短(最为相似)(表 2)。欧氏距离很大程度上体现的是不同稀土元素数据间绝对丰度的差异, 但是在解释沉积物的稀土元素标准化配分模式时, 要注重配分曲线的几何形态, 而不是其绝对丰度^[15], 将欧式距离作为标准化稀土元素数据聚类分析的距离度量方法并不合理。本文提出的相似性度量算法充分考虑了稀土元素配分曲线在几何形态上的相似性(差异), 不受其绝对丰度的影响, 更加适合作为标准化稀土元素数据聚类分析中的相似性(距离)度量方法。

表 1 各河流沉积物稀土元素配分曲线的相似度
Table 1 The similarity of curves in REE distribution of sediments among different rivers

	长江	黄河	鸭绿江	汉江	锦江	荣山江
长江	1.0	0.667 4	0.076 8	0.109 5	0.131 3	0.136 8
黄河	0.667 4	1.0	0.060 2	0.090 6	0.131 3	0.116 0
鸭绿江	0.076 8	0.060 2	1.0	0.101 4	0.174 2	0.154 5
汉江	0.109 5	0.090 6	0.101 4	1.0	0.524 1	0.475 9
锦江	0.131 3	0.116 2	0.174 2	0.524 1	1.0	0.611 5
荣山江	0.136 8	0.116 0	0.154 5	0.475 9	0.611 5	1.0

表 2 各河流沉积物稀土元素数据的欧式距离
Table 2 The Euclidean distance of REE data of sediments among different rivers

	长江	黄河	鸭绿江	汉江	锦江	荣山江
长江	0	0.937 5	1.176 0	2.001 6	1.158 1	0.898 0
黄河	0.937 5	0	2.044 3	2.682 0	1.590 2	0.797 5
鸭绿江	1.176 0	2.044 3	0	1.543 0	1.476 9	1.769 5
汉江	2.001 6	2.682 0	1.543 0	0	1.201 3	2.032 1
锦江	1.158 1	1.590 2	1.769 5	1.201 3	0	0.882 9
荣山江	0.898 0	0.797 5	1.769 5	2.032 1	0.882 9	0

3 黄海表层样稀土元素数据聚类实验

3.1 数据来源

3.1.1 黄海表层沉积物黏土粒级稀土元素数据

55 个表层沉积物样品(图 2)于 2014 年 11 月国家自然科学基金委渤、黄海公共航次中由“东方

红 2 号”科学考察船使用箱式取样器取得。将提取的黏土粒级沉积物($< 2 \mu\text{m}$)进行元素地球化学分析,用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定样品中 14 种稀土元素含量,稀土元素的误差 $< 5\%$,重复样品的标准差为 $\pm 2\%$ 。测试在青岛海洋地质研究所测试中心完成。将测试出的稀土元素数据使用 UCC 数据^[35]进行标准化处理,其配分曲线如图 3 所示。

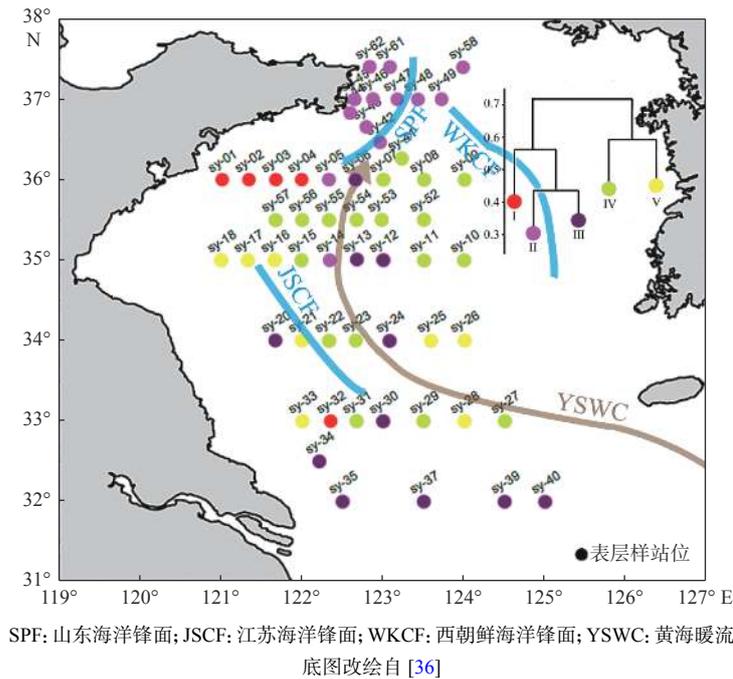


图 2 南黄海表层样黏土粒级稀土元素配分曲线层次聚类结果

Fig.2 Hierarchical clustering results of REE distribution curves of clay particles in the surface sediments from the South Yellow Sea

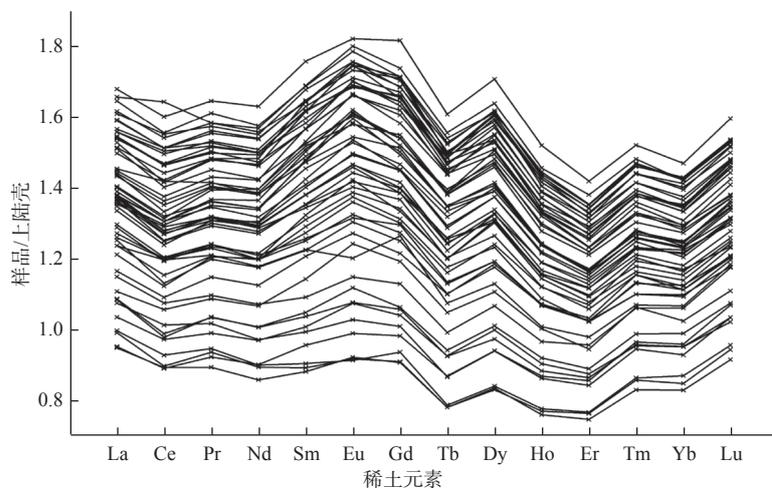


图 3 南黄海表层样黏土粒级稀土元素配分曲线

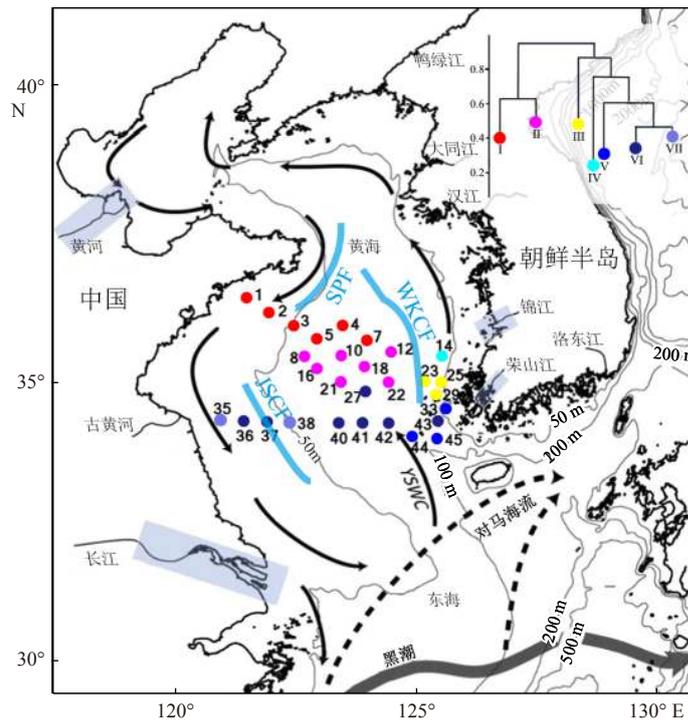
Fig.3 The REE distribution curves of clay particles in the surface sediments from the South Yellow Sea

3.1.2 黄海表层沉积物不同化学组分稀土元素数据

为了更好地了解河流沉积物的原始组分, LIM 等^[2]参考前人两步浸出实验^[10]测定了黄海 29 个

表层沉积物(图 4)的浸出馏分、残余馏分和总馏分稀土元素数据^[2]。

使用 20 mL 1 mol/L 盐酸(HCl)在室温下浸出



底图改绘自文献 [2]

图 4 黄海表层样全样全馏分稀土元素配分曲线层次聚类结果

Fig.4 Hierarchical clustering results of REE distribution curves of total fraction of surface bulk sediments from the Yellow Sea

处理粉末状沉积物全样(约 0.2 g)24 h, 经过离心机离心后, 使用 ICP-MS 分析上清液(溶液)中浸出馏分的稀土元素浓度。残余馏分的元素浓度定义为总馏分和浸出馏分之间的差值。浸出馏分预计包含吸附部分、非晶态铁锰氧化物、碳酸盐矿物、结晶铁氧化物、自生和碎屑磷灰石、一些风化的碎屑/黏土相以及可能部分溶解的硫化物组分^[37], 这些成分对物理化学环境变化敏感。残余馏分主要包含了沉积物的原始组成(耐盐碱硅酸盐、不溶于 HCl 的铝硅酸盐以及一些重矿物)。黄海表层沉积物中 $\sum\text{REE}$ 的浓度在全馏分为 101.8~212.8 $\mu\text{g/g}$, 浸出馏分为 32.5~86.3 $\mu\text{g/g}$, 残余馏分为 68.3~164.3 $\mu\text{g/g}$ ^[2]。将 LIM 等^[2] 测试出的稀土元素数据使用 UCC 数据^[35] 进行标准化处理。

3.2 实验方法

聚类分析是将数据集的相似性样本归为若干类的方法。层次聚类是聚类分析算法的一种, 其基本步骤如下:

- (1) 将每个样本看成 1 类, 此时共有 n 类。
- (2) 计算类与类之间的距离, 合并距离最近的 2 个类。
- (3) 重复步骤(2), 直至所有样本归为 1 类。

使用本文提出的相似性度量算法计算样本之间的距离, 使用最长距离法计算类与类之间的距离。聚类程序基于 SciPy 库编写。

3.3 结果与讨论

南黄海主要接收中国大陆和朝鲜半岛入海河流携带的陆源物质沉积, 其沉积过程受控于黄海暖流和黄海沿岸流形成的环流体系^[8, 36-41], 在气旋及反气旋环流系统控制下形成了多个泥质沉积体。此外, 南黄海的海洋锋面也是控制南黄海不同来源沉积物分布格局及源-汇过程的重要因素。

沉积学研究认为, 长江和黄河是塑造南黄海陆架最主要的陆源物源区。全新世中期由于黄海暖流的形成, 长江物质被黄海暖流携带北上参与到中部泥质区的沉积过程中, 长江沉积物对黄海沉积物向北的影响一般认为到达南黄海中部泥质区, 而朝鲜半岛河流对黄海的影响范围在 124°E 以东区域, 主要是 124°30'E 以东区域^[42]。LIM 等^[43] 研究认为黄河物质由鲁北沿岸流携带经由山东半岛北侧, 绕过成山头后在山东半岛东侧及南侧区域扩散沉积, 形成了南黄海北部和西部的黄河优势物源区。PARK 等^[44] 对南黄海中部近代黏土矿物的研究表明, 物质来源与黄河沉积物关系更为密切。由沿岸流携

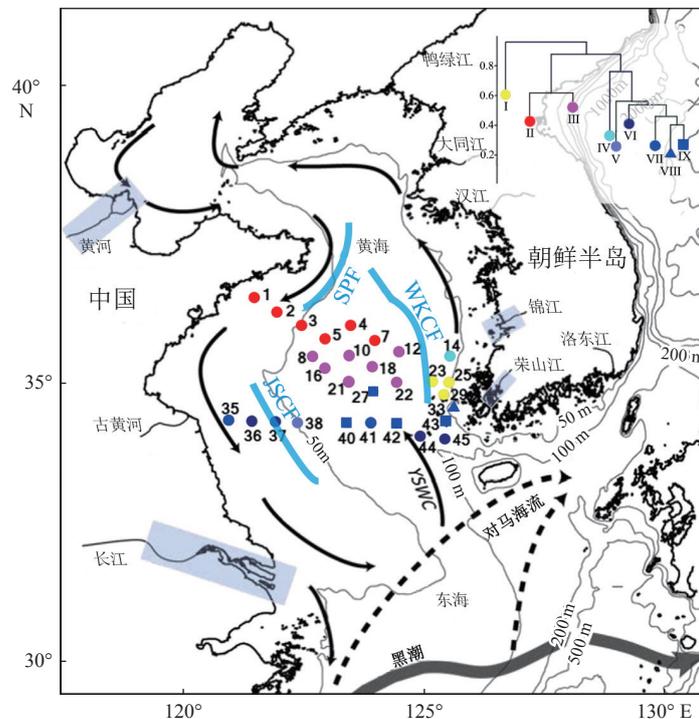
带而来的黄河入海泥沙进入到南黄海中部, 泥沙量非常巨大, 是南黄海中部泥质区的主要物质来源^[45]。蓝先洪等^[46-48]通过南黄海沉积物稀土元素及黏土矿物组成特征的研究认为其物质来源受黄河、长江沉积物的影响, 南黄海中部泥质区北部以黄河物质为主, 中部和南部为多源混合沉积区, 黄河的影响可能要大于长江。范德江等^[49]研究认为黄河物质主要分布在 32°N 以北区域, 以南区域则主要为长江沉积物。边昌伟^[50]对中国东部海域陆源沉积物的输运过程进行了模拟, 结果表明现代黄河陆源物质可以由沿岸流输运至黄海 34°N 处。一些学者认为黄海东部的沉积物主要来自韩国的河流^[51-53]。LIM 等^[54]根据各种沉积学资料(沉积物收支和悬浮物质的季节和空间分布等)提出了东南黄海泥质区多源理论, 认为中国河流成因的细粒沉积物被运送到东海的北部形成济州岛西南部的泥质沉积, 随后一些黏土沉积物被黄海暖流重新加工并输送到韩国沿海地区。该理论对韩国入海河流的泥沙量不足以支持东南黄海泥质区的沉积量做出了解释。

结合前人研究成果, 本文认为图 3 聚类结果中类别 I、II 表示黄河物源沉积, 类别 II 可能掺杂了

沿岸和岛屿剥蚀的物质、近岸入海河流携带的泥沙, 导致稀土元素配分模式产生了变化。类别 III 表示长江物源沉积, 其分布范围指示了长江黏土粒级物质可能被黄海暖流携带北上最远至 36°N 附近。类别 IV、V 表示长江黄河混合物源沉积, 其中类别 IV 中黄河物质占比更大, 这可能指示了黄河黏土粒级物质会继续向南输运到 33°N 附近。

如图 4、5 所示, 由于残余馏分占据了全馏分中的绝大部分, 浸出馏分对于全馏分稀土元素配分模式的影响较小, 使用全馏分和残余馏分稀土元素数据聚类得到的结果在多处站位上未出现明显变化, 大致可以分为 3 类: 黄河物源沉积(图 4 中类别 I, 图 5 中类别 II)、长江优势混源沉积(图 4 中类别 V-VII, 图 5 中类别 V-IX)、黄河优势混源沉积(图 4 中类别 II, 图 5 中类别 III)、朝鲜半岛河流物源沉积(图 4 中类别 III、IV, 图 5 中类别 I、IV)。分类结果显示, 黄河物质影响区域至少可以到达黄海 34.5°N 附近, 与边昌伟^[50]模拟结果接近。朝鲜半岛入海河流物质的影响范围被西朝鲜海洋锋面限制在了东侧。

站位 29、44、45 的残余馏分和全馏分聚类结果略有差异, 在残余馏分聚类结果中更加接近中国大



底图改绘自文献 [2]

图 5 黄海表层样全样残余馏分稀土元素配分曲线层次聚类结果

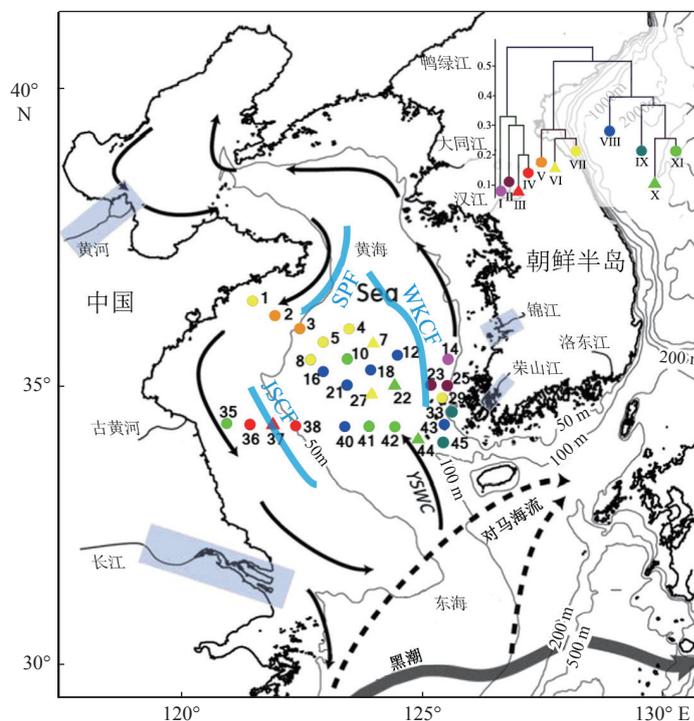
Fig.5 Hierarchical clustering results of REE distribution curves of residual fraction of surface bulk sediments from the Yellow Sea

陆附近站位,表明这些站位的稀土元素受物理化学环境条件影响相对较大,残余馏分聚类结果比全馏分聚类结果更能体现出这些站位受到了中国河流入海物质的影响。这一聚类结果印证了 LIM 等^[54]提出的东南黄海泥质区多源理论。

黏土矿物控制的沉积物地球化学特征比重矿物控制的沉积物地球化学特征更重要^[9, 34, 55],并且黏土粒级物质($< 2 \mu\text{m}$)是源区向陆架海长距离输送的最活跃组分^[41, 56-58]。对比图 3 和图 4 的聚类结果,黏土粒级物质($< 2 \mu\text{m}$)对物源变化更加敏感^[16],对于长江、黄河物质影响范围的判断更加精

确,在物源研究中具有显著优势。

如图 6 所示,浸出馏分的聚类结果与图 4 残余馏分聚类结果没有明显的相关性,浸出馏分会干扰全馏分稀土元素对物源的判断。此外,浸出馏分稀土元素聚类结果中各类别间的分布关系更加复杂,这可能指示了海洋物理化学环境条件的复杂性。类别 I—IV 分布在山东海洋锋面和西朝鲜海洋锋面附近,与其他类别有着较大聚类距离,这可能指示了海洋锋面对海洋物理化学环境条件的影响。类别 V—VII 与类别 VIII—XI 相比,整体分布纬度较高,这可能指示了温度对于海洋物理化学环境条件的影响。



底图改绘自文献 [2]

图 6 黄海表层样全样浸出馏分稀土元素配分曲线层次聚类结果

Fig.6 Hierarchical clustering results of REE distribution curves of the leached fraction of surface bulk sediments from the Yellow Sea

4 结论

(1)本文提出了一种稀土元素配分曲线相似性度量算法,该算法充分考虑了稀土元素配分曲线几何形态的相似性(差异),与传统欧氏距离相比,其更加适合作为标准化稀土元素数据聚类分析的相似性(距离)度量方法。

(2)上陆壳标准化稀土元素数据聚类结果显示,南黄海中部主要接收来自黄河和长江的物质,朝鲜半岛河流入海物质被西朝鲜海洋锋面限制在了锋

面东侧,黄河的影响范围最大。

(3)沉积物黏土粒级物质($< 2 \mu\text{m}$)对于物源变化更加敏感,在源区向陆架海长距离输送过程中最为活跃。现代黄河黏土粒级物质可以由沿岸流输运至黄海 33°N 处,长江黏土粒级物质被黄海暖流携带北上最远至黄海 36°N 附近。

(4)东南黄海泥质区不仅接收来自朝鲜半岛入海河流物质,其南部还接收了中国河流成因的细颗粒物。

(5)沉积物浸出馏分受到物理化学环境变化的影响,会干扰物源判断,但是南黄海沉积物浸出馏

分在全馏分中的占比较少, 对沉积物稀土元素配分模式影响有限, 全馏分和残余馏分上陆壳标准化稀土元素数据聚类结果在多数站位上差异较小。

参考文献:

- [1] 张宏飞, 高山. 地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 2012: 130.
- [2] LIM D, JUNG H S, CHOI J Y. REE partitioning in riverine sediments around the Yellow Sea and its importance in shelf sediment provenance[J]. *Marine Geology*, 2014, 357: 12-24.
- [3] JUNG H S, LIM D, CHOI J Y, et al. Rare earth element compositions of core sediments from the shelf of the South Sea, Korea: their controls and origins[J]. *Continental Shelf Research*, 2012, 48: 75-86.
- [4] LIM D, CHOI J Y, SHIN H H, et al. Multielement geochemistry of offshore sediments in the southeastern Yellow Sea and implications for sediment origin and dispersal[J]. *Quaternary International*, 2013, 298: 196-206.
- [5] 王金土. 黄海表层沉积物稀土元素地球化学[J]. *地球化学*, 1990, 19(1): 44-53.
- [6] GUO Y L, YANG S Y, SU N, et al. Revisiting the effects of hydrodynamic sorting and sedimentary recycling on chemical weathering indices[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2018, 227: 48-63.
- [7] XU Z K, LI T G, CHANG F M, et al. Clay-sized sediment provenance change in the northern Okinawa Trough since 22 kyr BP and its paleoenvironmental implication[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2014, 399: 236-245.
- [8] HU B Q, YANG Z S, QIAO S Q, et al. Holocene shifts in riverine fine-grained sediment supply to the East China Sea Distal Mud in response to climate change[J]. *The Holocene*, 2014, 24(10): 1253-1268.
- [9] YANG S Y, JUNG H S, CHOI M S, et al. The rare earth element compositions of the Changjiang (Yangtze) and Huanghe (Yellow) River sediments[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 201(2): 407-419.
- [10] SONG Y, CHOI M S. REE geochemistry of fine-grained sediments from major rivers around the Yellow Sea[J]. *Chemical Geology*, 2009, 266(3/4): 328-342.
- [11] JUNG H, KIM J, LIM D, et al. REE fractionation and quantification of sediment source in the Yellow Sea mud deposits, East Asian marginal sea[J]. *Continental Shelf Research*, 2021, 217: 104374.
- [12] ZHU Y T, BAO R, ZHU L H, et al. Investigating the provenances and transport mechanisms of surface sediments in the offshore muddy area of Shandong Peninsula: insights from REE analyses[J]. *Journal of Marine Systems*, 2022, 226: 103671.
- [13] LIU Y, CHENG Y, LIU J W, et al. Provenance discrimination of surface sediments using rare earth elements in the Yalu River estuary, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(4): 3507-3517.
- [14] 张晓波, 张勇, 孔祥淮, 等. 山东半岛南部近岸海域表层沉积物稀土元素的物源指示[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2014, 34(3): 57-66.
- [15] 严杰, 高建华, 李军, 等. 鸭绿江河口外海域柱状沉积物稀土元素的分布特征及物源指示[J]. *海洋通报*, 2013, 32(6): 601-609.
- [16] AI L N, HAN Z Z, WU X, et al. Geochemical and grain-sized implications for provenance variations of the central Yellow Sea muddy area since the Middle Holocene[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2020, 19(3): 577-588.
- [17] SONG S, FENG X L, LI G G, et al. Change in sediment provenance near the current estuary of Yellow River since the Holocene transgression[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2018, 17(3): 535-544.
- [18] XU F J, LI A C, LI T G, et al. Rare earth element geochemistry in the inner shelf of the East China Sea and its implication to sediment provenances[J]. *Journal of Rare Earths(English Edition)*, 2011, 29(7): 702-709.
- [19] 李中, 刘洋洋, 张铁峰. 基于形态相似距离的时间序列相似度计算[J]. *计算机工程与设计*, 2016, 37(3): 679-683.
- [20] 张瑞, 聂明龙, 嵯喜准. 稀土元素聚类分析方法在物源示踪方面的应用[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2017, 36(1): 28-31.
- [21] 张霄宇, 张富元, 高爱根, 等. 稀土元素在长江口及邻近陆架表层沉积物中的分布及物源示踪研究[J]. *中国稀土学报*, 2009, 27(2): 282-288.
- [22] 丁永伟, 杨小虎, 陈根才, 等. 基于弧度距离的时间序列相似度度量[J]. *电子与信息学报*, 2011, 33(1): 122-128.
- [23] 张雪丽, 牛强. 基于角点弯曲度的时间序列相似性搜索算法[J]. *计算机工程*, 2011, 37(15): 37-39.
- [24] 肖瑞, 刘国华. 基于趋势的时间序列相似性度量和聚类研究[J]. *计算机应用研究*, 2014, 31(9): 2600-2605.
- [25] 张建业, 潘泉, 张鹏, 等. 基于斜率表示的时间序列相似性度量方法[J]. *模式识别与人工智能*, 2007, 20(2): 271-274.
- [26] 梁建海, 张建业, 杨峰, 等. 基于斜率偏离的时间序列相似性搜索方法研究[J]. *计算机应用研究*, 2010, 27(1): 54-55.
- [27] 董晓莉, 顾成奎, 王正欧. 基于形态的时间序列相似性度量研究[J]. *电子与信息学报*, 2007, 29(5): 1228-1231.
- [28] 王瑞, 贾瑞玉. 基于形态模式的时间序列相似性度量算法[J]. *计算机应用与软件*, 2017, 34(9): 253-256.
- [29] 门连生, 卫婧菲, 李中. 基于形态相似距离的时间序列相似性度量[J]. *计算机工程与应用*, 2015, 51(4): 120-122.
- [30] 王钊, 汤子健. 基于涨落模式的时间序列相似性度量研究[J]. *计算机应用研究*, 2017, 34(3): 697-701.
- [31] 张鹏, 李学仁, 张建业, 等. 时间序列的夹角距离及相似性搜索[J]. *模式识别与人工智能*, 2008, 21(6): 763-767.
- [32] 王达, 荣冈. 时间序列的模式距离[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2004, 38(7): 2-5.
- [33] 张海涛, 李志华, 孙雅, 等. 新的时间序列相似性度量方法[J]. *计算机工程与设计*, 2014, 35(4): 1279-1284.
- [34] YANG S, LI C, LEE C B, et al. REE geochemistry of suspended sediments from the rivers around the Yellow Sea and provenance indicators[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003,

- 48(11): 1135-1139.
- [35] TAYLOR S R, MCLENNAN S M. The continental crust: its composition and evolution[M]. London: Blackwell Scientific Publication, 1985.
- [36] 郭炳火, 徐建平, 速记兰, 等. 中国近海环流[M]. 北京: 海洋出版社, 2005: 174-181.
- [37] CRONAN D S, HODKINSON R A. Geochemistry of hydrothermal sediments from ODP Sites 834 and 835 in the Lau Basin, southwest Pacific[J]. *Marine Geology*, 1997, 141(1/4): 237-268.
- [38] LIM D I, JUNG H S, CHOI J Y, et al. Geochemical compositions of river and shelf sediments in the Yellow Sea: grain-size normalization and sediment provenance[J]. *Continental Shelf Research*, 2006, 26(1): 15-24.
- [39] YANG Z S, LIU J P. A unique Yellow River-derived distal subaqueous delta in the Yellow Sea[J]. *Marine Geology*, 2007, 240(1/4): 169-176.
- [40] LIU J, SAITO Y, KONG X, et al. Sedimentary record of environmental evolution off the Yangtze River estuary, East China Sea, during the last ~13, 000 years, with special reference to the influence of the Yellow River on the Yangtze River delta during the last 600 years[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2010, 29(17/18): 2424-2438.
- [41] LI J, HU B, WEI H, et al. Provenance variations in the Holocene deposits from the southern Yellow Sea: clay mineralogy evidence[J]. *Continental Shelf Research*, 2014, 90: 41-51.
- [42] 蓝先洪, 张宪军, 赵广涛, 等. 南黄海NT1孔沉积物稀土元素组成与物源判别[J]. *地球化学*, 2009, 38(2): 123-132.
- [43] LIM D, XU Z, CHOI J, et al. Holocene changes in detrital sediment supply to the eastern part of the central Yellow Sea and their forcing mechanisms[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 105: 18-31.
- [44] PARK S, LEE H, HAN H, et al. Evolution of late Quaternary mud deposits and recent sediment budget in the southeastern Yellow Sea[J]. *Marine Geology*, 2000, 170(3/4): 271-288.
- [45] 秦蕴珊, 李凡. 黄河入海泥沙对渤海和黄海沉积作用的影响[J]. *海洋科学集刊*, 1986, 27: 125-135.
- [46] 蓝先洪, 王红霞, 李日辉, 等. 南黄海沉积物常量元素组成及物源分析[J]. *地学前缘*, 2007, 14(4): 197-203.
- [47] 蓝先洪, 张宪军, 刘新波, 等. 南黄海表层沉积物黏土矿物分布及物源[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2011, 31(3): 11-16.
- [48] 蓝先洪, 申顺喜. 南黄海中部沉积岩心的稀土元素地球化学特征[J]. *海洋通报*, 2002, 21(5): 46-53.
- [49] 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(自然科学版)*, 2002, 32(5): 748-756.
- [50] 边昌伟. 中国近岸泥沙在渤海、黄海和东海的输运[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
- [51] CHOUGH S K, KIM J W, LEE S H, et al. High-resolution acoustic characteristics of epicontinental sea deposits, central-eastern Yellow Sea[J]. *Marine geology*, 2002, 188(3/4): 317-331.
- [52] LEE H J, CHU Y S. Origin of inner-shelf mud deposit in the southeastern Yellow Sea; Huksan Mud Belt[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2001, 71(1): 144-154.
- [53] YANG S Y, JUNG H S, LIM D I, et al. A review on the provenance discrimination of sediments in the Yellow Sea[J]. *Earth-Science Reviews*, 2003, 63(1/2): 93-120.
- [54] LIM D I, CHOI J Y, JUNG H S, et al. Recent sediment accumulation and origin of shelf mud deposits in the Yellow and East China Seas[J]. *Progress in Oceanography*, 2007, 73(2): 145-159.
- [55] XU Z K, LIM D, CHOI J Y, et al. Rare earth elements in bottom sediments of major rivers around the Yellow Sea: implications for sediment provenance[J]. *Geo-Marine Letters*, 2009, 29(5): 291-300.
- [56] WAN S M, LI A C, CLIFT P D, et al. Increased contribution of terrigenous supply from Taiwan to the northern South China Sea since 3 Ma[J]. *Marine Geology*, 2010, 278(1/4): 115-121.
- [57] WANG J, LI A, XU K, et al. Clay mineral and grain size studies of sediment provenances and paleoenvironment evolution in the middle Okinawa Trough since 17 ka[J]. *Marine Geology*, 2015, 366: 49-61.
- [58] ZHAO Y F, ZOU X Q, 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.

Similarity measurement algorithm of REE distribution curve and its application for provenance discrimination of sediments in the Yellow Sea

LI Hui¹, HAN Zongzhu^{1,2*}, YAN Tianhao¹, ZHAO Kexin¹, YANG Yepiao¹

(1 College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

2 Key Laboratory of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, Ministry of Education, Qingdao 266100, China)

Abstract: Rare earth element (REE) distribution curves are often used to specify sediments provenance. The REE distribution curves of sediments from the same source are often similar in shape. However, currently, the similarity discrimination of REE distribution curves still relies on visual discrimination by the human eye, which is highly subjective and cannot achieve quantitative discrimination. Therefore, a unified measurement method is needed to realize the quantitative calculation of the similarity of REE distribution, based on which statistical analyses such as clustering and classification were carried out and the information of provenance in REE perspectives was fully explored. An algorithm for measuring the similarity was proposed, and it is independent of the absolute abundance of REE and can effectively map the differences in the shape of REE distribution curves. The clustering results based on this algorithm show that the Yellow River and the Yangtze River are the main provenances of the muddy area in the central part of the South Yellow Sea. The Yellow River clay fractions can be transported to 33 °N of the Yellow Sea by alongshore current, while the Yangtze River clay fractions be carried northward by the Yellow Sea Warm Current as far as to 36 °N of the Yellow Sea. The West Korea Coastwise Front limits the influence of the rivers in the Korean Peninsula to its east. In addition to receiving the supply from the rivers in the Korean Peninsula, the southeast Yellow Sea mud also receives the supply of fine-grained sediments from Chinese rivers.

Key words: rare earth element; REE distribution curve; provenance; similarity measurement; clustering