

# $\delta\text{Eu}_N$ - $\Sigma\text{REEs}$ 图解定量区分长江和黄河沉积物

蒋富清<sup>①\*</sup>, 周晓静<sup>①②</sup>, 李安春<sup>①</sup>, 李铁刚<sup>①</sup>

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

② 中国科学院研究生院, 北京 100049

\* E-mail: [fqjiang@ms.qdio.ac.cn](mailto:fqjiang@ms.qdio.ac.cn)

收稿日期: 2008-03-10; 接受日期: 2008-07-21

国家自然科学基金(批准号: 40506016, 40576032)和国家自然科学基金重点项目(批准号: 90411014)资助

**摘要** 对取自长江下游河道和黄河的沉积物样品进行了稀土元素分析, 并搜集了文献资料中长江和黄河沉积物样品的稀土元素数据, 发现在  $\delta\text{Eu}_N$ - $\Sigma\text{REEs}$  关系图中长江和黄河沉积物之间有一条明显的分界线, 回归分析表明该分界线是一个 3 次多项式方程, 在该界线的上方是长江沉积物, 下方是黄河沉积物. 为了考察该分界线的合理性及其应用价值, 在长江口和黄河口分别取样进行稀土元素分析, 并搜集了来源于长江 255 孔和源于黄河的 YA01 孔沉积物的稀土元素数据. 在  $\delta\text{Eu}_N$ - $\Sigma\text{REEs}$  关系图中, 长江口和 255 孔沉积物绝大部分分布在长江沉积物的区域, 而黄河口和 YA01 孔沉积物绝大部分分布在黄河沉积物的区域. 因此, 通过  $\delta\text{Eu}_N$ - $\Sigma\text{REEs}$  关系图和回归曲线方程, 可以直观、定量地区分长江和黄河沉积物, 并可用于中国东部边缘海沉积物源的定量识别.  $\delta\text{Eu}_N$ - $\Sigma\text{REEs}$  是长江和黄河沉积物的源区气候条件和物质组成差异的综合体现, 在沉积物由源区进入河流, 再由河流进入海洋的过程中,  $\delta\text{Eu}_N$ - $\Sigma\text{REEs}$  关系基本保持不变, 使得其最初的物源和气候信息得以保存, 并继承下来.

## 关键词

物源  
长江  
黄河  
 $\delta\text{Eu}_N$ - $\Sigma\text{REEs}$  图解

长江和黄河是中国最大的两条入海河流, 大量的陆源物质由这两条河流输入到中国东部海域<sup>[1]</sup>. 作为长江和黄河沉积物的“汇”, 中国东部海域的沉积物汇集了这两大河流形成、演化和沉积物扩散的信息. 然而, 末次冰期是否存在入海河流、长江和黄河沉积物的运输途径和扩散范围如何确定等一系列问题尚待解决. 其中问题的关键一环就是缺少一种简单、可靠的方法来准确区分长江和黄河沉积物. 许多学者使用碎屑矿物<sup>[2]</sup>、黏土矿物<sup>[3-5]</sup>、碳酸盐组成及差异<sup>[6]</sup>、元素地球化学<sup>[7-13]</sup>、同位素地球化学<sup>[14-17]</sup>和有机地球化学<sup>[18]</sup>等方法对两条河流沉积物的差异进行了对比研究, 试图获得判识长江和黄河沉积物的示踪指标, 但是由于沉积物在搬运和沉降过程中发生了各种复杂的物理和化学变化, 因此在对中国边缘海沉积物

进行物源判识的研究中, 这些指标往往存在一定的局限性. 尽管有学者通过特征矿物及组合<sup>[19,20]</sup>、元素地球化学及主元素组合分析<sup>[21-23]</sup>、同位素地球化学<sup>[24]</sup>等多种方法来识别中国东部海域沉积物的来源, 然而这些示踪指标多是定性的, 很难被用于直观、定量地区分中国东部边缘海的物源属性.

稀土元素(REEs)在表生环境中的化学性质非常稳定, 其组成及分布模式受风化作用、搬运过程、以及沉积和成岩作用的影响很小, 因而常被用作物源示踪剂<sup>[25,26]</sup>. 由于源区物质组成和环境气候的差异, 长江和黄河沉积物的稀土元素特征存在差异, 与黄河沉积物相比, 长江沉积物的稀土元素总量( $\Sigma\text{REEs}$ )高, 含量变化大,  $(\text{La}/\text{Lu})_N$ ,  $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 和 $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 的值较高<sup>[12]</sup>. 这些差异从一个整体的概念而言是正确的,

但是对于个体来说, 这种判别方法并不适用. 以  $\Sigma\text{REEs}$  为例, 有些长江沉积物的  $\Sigma\text{REEs}$  明显比黄河沉积物的低. 因此, 这种差异仅仅是定性的描述, 很难被应用于直观、定量地区分某一沉积物来源于长江还是黄河物质; 因此, 中国东部海域沉积物稀土元素的研究还停留在特征、分布和控制因素的探讨上<sup>[27-32]</sup>, 缺少对陆源物质归属的进一步研究.

本文对长江下游河道沉积物, 黄河源头至黄河入海口沉积物稀土元素进行了系统分析; 结合搜集和整理的长江与黄河沉积物的 REEs 文献数据, 发现球粒陨石标准化后的 Eu 异常 ( $\delta\text{Eu}_N$ ) 和  $\Sigma\text{REEs}$  的相关图解可以直观、定量地区分长江和黄河沉积物, 并通过长江口和黄河口海域沉积物稀土元素的分析, 以及已知物质来源的冲绳海槽 255 孔和南黄海北部 YA01 孔部分样品的 REEs 文献数据, 证明该方法是一种可靠的定量判别中国东部边缘海陆源物质来源的方法, 并对其机制进行了探讨.

## 1 材料和方法

本文的研究样品取自长江下游河道、长江口、黄河和黄河口, 样品分布如图 1 所示. 其中长江沉积物取自长江下游从芜湖到上海之间的河道, 共取得 13 个样品, 主要由中细砂、粉砂和粉砂质黏土组成(表 1); 碎屑矿物以轻矿物为主(87.4%), 主要由石英、斜长石和钾长石组成; 重矿物主要由片状矿物白云母、黑云母、绿泥石和绿色云母组成, 其次为白云石和普通角闪石<sup>1)</sup>. 黄河沉积物从黄河源头贵德直至黄河口垦利, 包括河道、河两岸、河流阶地和河漫滩沉积物样品, 共计取样 38 个; 主要由中砂、细砂、粉砂和黏土质粉砂组成(表 1); 碎屑矿物以轻矿物为主(96.3%), 主要包括斜长石、石英、方解石和钾长石, 重矿物的含量相对较低, 主要以片状矿物白云母、黑云母和绿泥石为主, 其次为普通角闪石和绿帘石<sup>1)</sup>. 此外, 在长江口取沉积物样品 16 个, 黄河口取沉积物样 22 个. 对这些样品都进行了稀土元素分析.

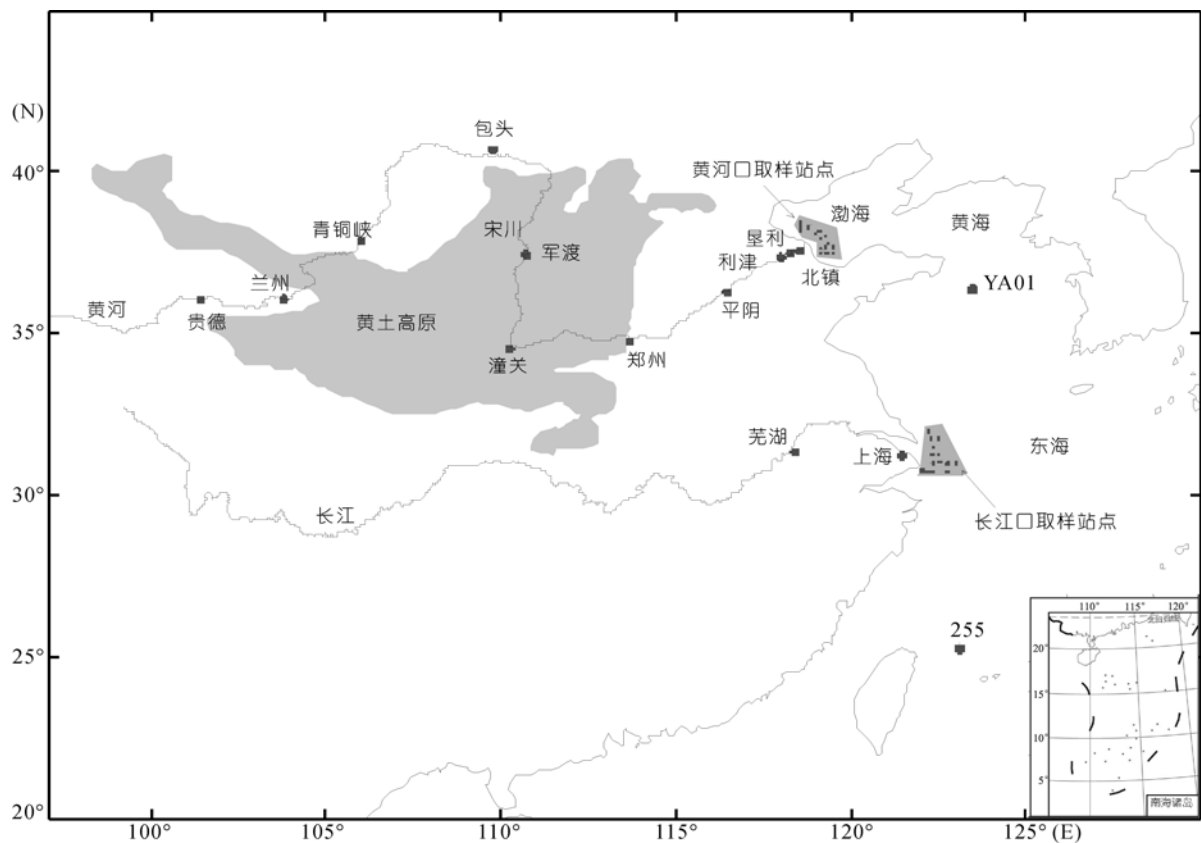


图 1 沉积物样品分布示意图

1) 陈丽蓉. 中国海沉积矿床学. 北京: 海洋出版社, 2008. 出版中

表 1 长江和黄河沉积物类型、稀土元素含量和 $\Sigma\text{REEs}$ 与 $\delta\text{Eu}_N$ 计算结果<sup>a)</sup>

样品	站号	位置	沉积物类型	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	$\Sigma\text{REEs}$	$\delta\text{Eu}_N$
长江样品	CJR1	1	细砂	42.9	87.3	9.98	37.6	7.52	1.41	6.24	0.90	4.68	1.05	2.94	0.39	2.47	0.38	205.7	0.63
	CJR2	2	中砂	32.5	65.6	8.36	29.7	5.59	1.19	5.37	0.70	3.93	0.78	2.12	0.30	1.98	0.28	158.4	0.67
	CJR3	3	细砂	35.7	70.0	9.15	33.1	5.99	1.25	5.43	0.62	3.89	0.77	2.11	0.29	1.99	0.29	170.6	0.67
	CJR4	4	细砂	27.4	55.8	6.24	24.2	4.83	1.08	4.13	0.65	3.20	0.72	1.95	0.26	1.61	0.24	132.3	0.74
	CJR5	5	粉砂质黏土	43.8	89.0	10.26	38.9	7.55	1.55	6.73	0.99	5.12	1.18	3.10	0.43	2.57	0.40	211.6	0.66
	CJR6	6	粉砂质黏土	43.6	90.1	10.49	38.7	7.36	1.52	6.64	0.94	5.10	1.14	3.08	0.40	2.60	0.42	212.1	0.66
	CJR7	7	细砂	45.7	93.5	11.02	41.8	8.01	1.40	6.33	0.90	4.61	0.97	2.73	0.36	2.35	0.35	220.0	0.60
	CJR8	8	中砂	34.0	68.1	7.49	27.9	4.96	1.00	4.09	0.61	3.11	0.67	1.82	0.24	1.45	0.23	155.6	0.68
	CJR9	9	粉砂	46.5	92.5	11.47	40.3	7.13	1.44	7.01	0.89	5.14	1.07	2.93	0.40	2.45	0.42	219.7	0.62
	CJR10	10	细砂	37.8	76.3	8.73	32.6	6.32	1.27	5.45	0.79	4.17	0.92	2.58	0.33	2.09	0.34	179.7	0.66
	CJR11	11	细砂	33.5	66.6	7.66	28.9	5.55	1.11	4.44	0.63	3.35	0.73	1.93	0.25	1.46	0.24	156.3	0.68
	CJR12	12	中砂	40.0	76.6	8.48	31.7	6.04	1.22	5.65	0.73	2.73	0.64	1.93	0.26	1.59	0.24	177.9	0.64
	CJR13	13	中砂	37.1	69.3	7.62	29.8	5.38	1.15	5.42	0.70	2.92	0.61	1.74	0.24	1.52	0.23	163.7	0.65
黄河样品	HHR1	14	细砂	27.2	51.8	5.83	23.1	4.66	0.93	4.27	0.62	3.14	0.70	2.03	0.31	1.95	0.30	126.8	0.63
	HHR2	15	中粗砂	30.0	66.1	7.17	27.8	4.95	0.95	4.99	0.71	3.92	0.87	2.45	0.34	2.29	0.34	152.9	0.58
	HHR3	16	黏土质粉砂	30.5	58.7	6.56	26.0	5.33	0.96	4.63	0.69	2.93	0.65	1.77	0.26	1.67	0.25	140.8	0.59
	HHR4	17	粉砂	36.3	68.3	7.54	29.0	5.43	1.07	5.19	0.73	3.43	0.73	2.09	0.33	2.00	0.30	162.4	0.62
	HHR5	18	细砂	32.6	62.7	6.86	27.5	5.53	1.12	5.06	0.77	3.60	0.82	2.35	0.36	2.24	0.34	151.9	0.65
	HHR6	19	细砂	25.6	47.2	5.45	21.0	4.20	0.92	3.84	0.59	3.05	0.61	1.84	0.29	1.84	0.28	116.7	0.70
	HHR7	20	中砂	34.5	64.5	7.19	27.5	5.18	0.86	4.48	0.64	2.87	0.61	1.86	0.27	1.73	0.27	152.4	0.55
	HHR8	21	中粗砂	16.6	35.2	3.81	14.0	2.60	0.78	2.35	0.33	1.77	0.39	1.17	0.16	1.08	0.17	80.4	0.96
	HHR9	22	粉砂	27.5	59.1	6.57	25.3	4.57	0.90	4.50	0.68	3.75	0.86	2.40	0.34	2.25	0.34	139.1	0.61
	HHR10	23	黏土质粉砂	31.3	67.6	7.45	29.0	5.27	1.02	5.23	0.77	4.25	0.92	2.60	0.37	2.47	0.36	158.6	0.59
	HHR11	24	细砂	33.3	62.2	6.99	27.3	5.32	1.11	5.09	0.74	3.78	0.78	2.28	0.37	2.23	0.34	151.9	0.65
	HHR12	25	细砂	34.4	64.7	7.17	28.3	5.42	1.02	4.87	0.74	3.38	0.72	2.13	0.32	1.96	0.30	155.5	0.61
	HHR13	26	中砂	25.1	45.1	5.19	20.5	3.98	1.04	3.40	0.45	2.15	0.47	1.38	0.22	1.34	0.20	110.5	0.86
	HHR14	27	中砂	21.3	40.4	4.60	17.9	3.78	1.02	3.23	0.49	2.38	0.52	1.51	0.24	1.49	0.23	99.1	0.89
	HHR15	28	中砂	19.1	34.8	3.98	15.1	3.06	0.96	2.56	0.38	1.70	0.39	1.15	0.18	1.07	0.16	84.6	1.05
	HHR16	29	黏土质粉砂	34.9	66.8	7.39	29.3	5.73	1.15	5.19	0.79	3.87	0.83	2.50	0.36	2.16	0.35	161.4	0.64
	HHR17	30	黏土质粉砂	34.9	67.1	7.65	29.3	5.86	1.16	5.33	0.81	3.88	0.85	2.50	0.38	2.37	0.36	162.5	0.64
	HHR18	31	细砂	38.7	73.4	8.34	32.4	6.13	1.19	5.66	0.86	4.19	0.85	2.50	0.36	2.35	0.36	177.3	0.62
	HHR19	32	细砂	33.6	63.2	7.10	28.6	5.38	1.07	5.02	0.75	3.57	0.79	2.23	0.35	2.24	0.34	154.3	0.63
	HHR20	33	细砂	23.4	43.7	4.94	20.0	4.00	0.96	3.66	0.57	2.83	0.63	1.76	0.27	1.73	0.26	108.6	0.77
	HHR21	34	细砂	36.8	71.1	7.94	30.9	6.17	1.12	5.38	0.80	3.75	0.80	2.43	0.36	2.13	0.32	170.0	0.59
	HHR22	35	细砂	31.4	68.0	7.54	28.9	5.12	0.96	5.00	0.72	3.78	0.85	2.30	0.32	2.21	0.32	157.5	0.58
	HHR23	36	细砂	20.6	40.4	4.29	17.0	3.47	0.91	3.13	0.46	2.14	0.47	1.40	0.22	1.29	0.20	95.9	0.84
	HHR24	37	粉砂	28.4	54.1	6.23	23.9	4.77	1.02	4.28	0.65	3.07	0.71	2.07	0.30	1.88	0.28	131.7	0.69
	HHR25	38	细砂	32.7	61.6	7.23	27.9	5.37	1.09	4.93	0.73	3.59	0.74	2.17	0.34	2.07	0.32	150.8	0.65
	HHR26	39	粉砂	34.1	65.9	7.65	29.7	5.87	1.16	5.39	0.79	3.90	0.85	2.55	0.39	2.37	0.36	161.0	0.63
	HHR27	40	黏土质粉砂	30.4	57.8	6.47	25.6	5.04	1.03	4.59	0.69	3.16	0.72	2.15	0.32	1.93	0.31	140.2	0.65

续(表 1)

样品	站号	位置	沉积物类型	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	$\Sigma$ REEs	$\delta$ Eu <sub>N</sub>
	HHR28	41	黏土质粉砂	35.1	76.3	8.30	32.0	5.63	1.11	5.74	0.82	4.25	0.95	2.69	0.38	2.50	0.38	176.1	0.59
	HHR29	42	细砂	24.4	50.1	5.54	21.0	3.68	0.85	3.39	0.49	2.35	0.52	1.50	0.21	1.39	0.21	115.7	0.74
	HHR30	43	黏土质粉砂	31.7	68.3	7.51	28.8	5.23	0.99	5.10	0.73	3.94	0.88	2.43	0.34	2.25	0.33	158.6	0.59
黄河样品	HHR31	44	细砂	35.8	77.2	8.58	32.9	5.65	1.01	5.70	0.82	4.29	0.96	2.69	0.38	2.56	0.38	178.9	0.54
	HHR32	45	细砂	33.2	63.5	7.12	28.7	5.62	1.14	5.15	0.77	3.67	0.78	2.27	0.35	2.21	0.34	154.7	0.65
	HHR33	46	细砂	27.3	58.5	6.51	25.2	4.54	0.90	4.43	0.64	3.36	0.78	2.10	0.30	1.99	0.31	136.9	0.61
	HHR34	47	细砂	40.7	77.1	8.65	34.0	6.42	1.13	5.84	0.83	4.13	0.83	2.36	0.36	2.29	0.36	185.0	0.57
	HHR35	48	细砂	32.7	62.1	7.08	26.8	5.17	1.11	4.72	0.69	3.44	0.75	2.22	0.34	2.13	0.34	149.6	0.69
	HHR36	49	细砂	33.8	63.7	7.16	27.9	5.30	1.05	4.78	0.68	3.20	0.68	2.04	0.32	1.99	0.30	152.9	0.64
	HHR37	50	细砂	32.2	59.7	6.73	26.7	5.11	1.08	4.62	0.71	3.36	0.71	2.15	0.33	2.11	0.31	145.7	0.68
	HHR38	51	细砂	25.8	48.8	5.60	21.5	4.23	0.95	3.63	0.55	2.39	0.54	1.63	0.26	1.56	0.25	117.7	0.74

a) 1-13-长江下游河道, 14-贵德河北, 15-贵德河北阶地, 16-贵德河南, 17-贵德河南阶地, 18-兰州河南, 19-青铜峡河东, 20-青铜峡河西, 21-包头昭君坟河东, 22-包头昭君坟河西, 23-包头昭君坟河西阶地, 24-陕西宋川, 25-山西军渡, 26-山西军渡阶地, 27-潼关港口河北, 28-潼关港口河南, 29-潼关港口桥北, 30-潼关港口桥南, 31-潼关港口桥北阶地, 32-潼关港口桥南阶地, 33-郑州花园口河北, 34-郑州花园口河北漫滩, 35-郑州花园口河南, 36-平阴桥中, 37-平阴桥北, 38-平阴桥北阶地, 39-平阴桥南, 40-平阴桥南阶地, 41-北镇河水中, 42-北镇河中, 43-北镇阶地, 44-北镇桥北, 45-北镇桥南, 46-北镇桥南河漫滩, 47-利津河中, 48-利津河东, 49-利津河西, 50-垦利河北, 51-垦利河南. 稀土元素含量和 $\Sigma$ REEs单位均为 $\mu\text{g/g}$

稀土元素分析步骤如下: 首先取全样沉积物样品烘干后研磨至小于  $63 \mu\text{m}$ , 把待测样品置于  $105^\circ\text{C}$  烘箱中烘干, 称取  $0.04 \text{ g}$  样品放入 Teflon 罐中, 并加  $0.5 \text{ mL}$  硝酸和  $2 \text{ mL}$  氢氟酸, 然后放在密闭容器中, 用电热板加热  $24 \text{ h}(150^\circ\text{C})$ , 然后调节电热板温度到  $120^\circ\text{C}$ , 加  $0.3 \text{ mL}$  高氯酸, 开口蒸干. 蒸干后的样品加  $1 \text{ mL}$  硝酸和  $1 \text{ mL}$  纯水, 加热回溶  $12 \text{ h}$ , 最后转移到  $50 \text{ mL}$  样品瓶中, 加纯水定容到  $40 \text{ g}$ , 用美国 PE 公司生产的 Elan DRC II 等离子质谱(ICP-MS)进行 REE 测试. 样品在中国科学院海洋研究所海洋地质与环境重点实验室分析测试. 为监控测试精度与准确度, 进行了重复样和标样的分析, 标样选用 GBW07314, GBW07315, GBW07316, BCR-2 和 BHVO-2, 样品分析的标准偏差小于  $5\%$ .

## 2 结果与讨论

### 2.1 长江与黄河沉积物的定量判别

长江和黄河沉积物稀土元素分析结果如表 1 所示. 长江下游河道沉积物的  $\Sigma$ REEs 变化范围在  $132.3\sim 220.1 \mu\text{g/g}$  之间, 平均为  $181.8 \mu\text{g/g}$ ; 黄河沉积物  $\Sigma$ REEs 的变化范围  $80.4\sim 185 \mu\text{g/g}$ , 平均为  $142.8 \mu\text{g/g}$ , 最低值在包头昭君坟河东, 最高值在黄河的利

津段, 同一个站点不同站位的样品, 以及从上游到下游沉积物的稀土元素总量变化没有明显的规律性. 可以看出长江下游沉积物的平均  $\Sigma$ REEs 高于黄河沉积物, 而变化范围小于黄河沉积物. 球粒陨石标准化后的 Eu 异常  $\delta$ Eu<sub>N</sub> 在长江下游沉积物中的变化范围在  $0.60\sim 0.74$  之间, 平均为  $0.66$ , 为中等程度的负 Eu 异常; 黄河沉积物的  $\delta$ Eu<sub>N</sub> 平均为  $0.67$ , 接近于长江沉积物,  $\delta$ Eu<sub>N</sub> 介于  $0.54\sim 1.05$  之间, 变化范围明显大于长江下游沉积物; 除了潼关港口河道南部和包头昭君坟河东的两个样品 Eu 无异常外, 其他样品均为中等或弱的负 Eu 异常. 经球粒陨石标准化后, 长江下游和黄河典型沉积物的稀土元素配分模式如图 2 所示, 二者没有明显的区别, 均为轻稀土元素富集、重稀土元素亏损的右倾模式.

此外, 我们搜集了近年来文献中有关长江(20 个样品)和黄河沉积物(33 个样品)的 REEs 数据, 采样地点和样品分析方法详见杨守业和李从先等<sup>[12]</sup>, 以及杨守业等<sup>[33-35]</sup>.

根据本文实测和文献数据, 长江下游和黄河沉积物的  $\delta$ Eu<sub>N</sub> 和  $\Sigma$ REEs 关系如图 3 所示. 可以看出, 在  $\delta$ Eu<sub>N</sub>- $\Sigma$ REEs 关系图中, 除了长江的个别站外, 几乎所有的长江和黄河沉积物都分布在各自不同的区域.

在两条河流沉积物之间可以绘制出一条曲线, 通过正交多项式回归分析可以得出一条三次回归曲线(图3), 该曲线方程(1)如下:

$$y = 1514.7 \times (-x^3 + 2.93x^2 - 2.88x + 1.02), \quad (1)$$

其中,  $y$  为稀土元素总量  $\Sigma\text{REEs}$ ,  $x$  为球粒陨石标准化后的 Eu 异常  $\delta\text{Eu}_N$ . 通过方程(1), 就可以定量区分长江和黄河沉积物. 具体方法如下: 如果已知某一沉积物的  $\Sigma\text{REEs}(y_1)$  和  $\delta\text{Eu}_N(x_1)$  值, 将  $x_1$  代入该曲线上述方程, 可以得出一个  $y$  值, 当  $y_1 - y > 0$  时, 说明  $y_1$  在该

曲线的上方, 沉积物来源于长江; 而当  $y_1 - y < 0$  时, 说明  $y_1$  在该曲线的下方, 沉积物来源于黄河.

### 2.2 $\delta\text{Eu}_N$ - $\Sigma\text{REEs}$ 图解法应用

为了考察该方法是否适用于中国东部边缘海陆源物质归属的判别, 需要用中国东部海域沉积物的 REE 数据来进行验证. 在样品和数据选择时考虑到两个方面的因素, 其一是已知物质来源; 其二是沉积物仅有陆源物质或主要由陆源物质组成, 其他组分(如火山物质和生源碎屑)含量低, 其原因是在海洋中自生沉积的碳酸盐生物壳体普遍存在, 而海洋沉积的自生碳酸钙 REEs 含量较低 [28,36], 会稀释沉积物的 REEs, 而沉积物中新鲜的火山物质稀土元素含量较低, 风化后的海底火山物质稀土元素含量较高, 这些因素都会影响沉积物的稀土元素组成, 不能如实反映原始陆源物质的信息.

按照上述两条原则, 在长江口和黄河口分别选择了 16 个和 22 个沉积物进行稀土元素分析(表 2). 此外, 我们还选择了冲绳海槽南部的 255 孔 [37] 和南黄湖北部的 YA01 孔 [38] 的稀土元素数据进行验证该方法的应用价值. 根据冲绳海槽矿物分布特征研究, 255 孔在长江沉积物影响的海域 [20,39], 因此其中的陆源物质主要来源于长江. 该孔沉积物在 450 cm 以上主要由陆源碎屑物质组成, 生物贝壳和有孔虫的丰度非常低, 除了 350~355 cm 富含火山灰外, 其他层位几乎不含火山物质 [40], 而 450 cm 以下, 生物壳和有孔虫的含量明显增加, 因此我们只选择了 450 cm 以上 23 个层位沉积物稀土元素的数据,  $\delta\text{Eu}_N$  和  $\Sigma\text{REEs}$  的计算结果如表 3 所示. YA01 孔沉积物主要源于黄河 [38], 该孔 18.5 m 以上是滨岸沼泽和涡旋泥, 生物壳含量很低, 而 18.5 m 向下, 沉积物中生物壳的含量明显增加, 考虑到生物壳对 REEs 的稀释作用, 只选择了 18.5 m 以上 29 个样品的 REEs 数据,  $\delta\text{Eu}_N$  和  $\Sigma\text{REEs}$  的计算结果见表 3. 将上述样品的 REEs 数据投在  $\delta\text{Eu}_N$ - $\Sigma\text{REEs}$  图中, 并将方程(1)对应的曲线投在该图上(图 4), 结果显示, 长江口和 255 孔沉积物 39 个样品中, 仅有 255 孔的 3 个样品落在了黄河区域, 而其他 36 个样品均落在了长江区域. 黄河口和 YA01 孔 51 个样品中, 仅有 YA01 孔的 3 个样品落在了长江沉积区, 其他 48 个站的样品均落在了黄河沉积区.

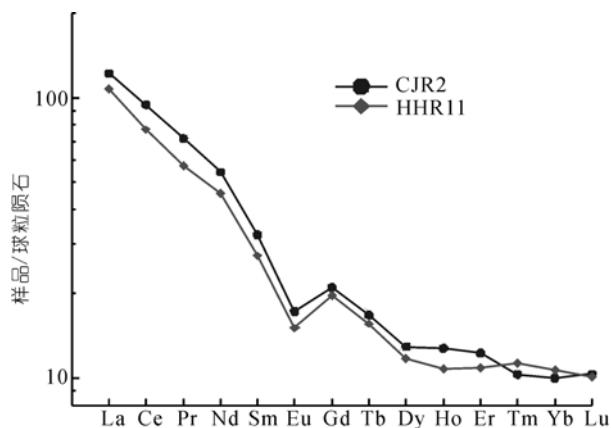


图 2 长江和黄河物质典型沉积物的稀土元素配分模式  
CJR2 为长江下游河道沉积物, HHR11 为黄河沉积物

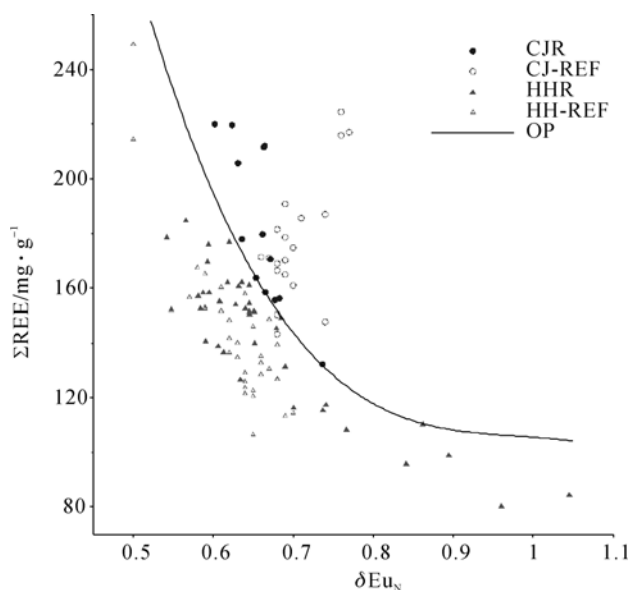


图 3 长江和黄河沉积物的  $\delta\text{Eu}_N$ - $\Sigma\text{REEs}$  相关图解  
CJR: 长江下游河道沉积物, 本文实测; CJ-REF: 长江沉积物, 引自文献 [12], [33] 和 [35]; HHR: 黄河沉积物, 本文实测; HH-REF: 黄河沉积物, 引自文献 [12], [34] 和 [35]; OP: 回归曲线, 对应方程为三次多项式

表 2 长江口和黄河口沉积物的稀土元素含量( $\mu\text{g/g}$ )、 $\Sigma\text{REEs}(\mu\text{g/g})$ 和 $\delta\text{Eu}_N$

站号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	$\Sigma\text{REEs}$	$\delta\text{Eu}_N$
长江口																
B6	41.32	78.42	8.77	34.29	6.42	1.35	6.49	0.89	4.16	0.87	2.50	0.36	2.42	0.35	188.60	0.64
B7	39.43	79.92	9.05	34.29	6.69	1.35	5.93	0.80	4.44	0.99	2.78	0.36	2.31	0.37	188.69	0.65
D1	40.43	81.70	9.25	35.35	6.93	1.33	5.60	0.88	4.65	1.03	2.88	0.39	2.44	0.38	193.23	0.65
D2	41.11	83.66	9.54	35.84	6.96	1.30	5.74	0.89	4.52	0.98	2.69	0.35	2.12	0.33	196.03	0.63
E2	39.60	79.46	9.00	33.65	6.55	1.27	5.50	0.86	4.44	0.98	2.64	0.36	2.22	0.34	186.86	0.65
F2	41.41	83.51	9.52	35.62	6.95	1.32	5.94	0.93	4.97	1.13	3.04	0.41	2.63	0.40	197.79	0.63
F3	42.82	85.55	9.70	36.81	7.08	1.28	5.94	0.95	4.61	0.98	2.81	0.37	2.26	0.33	201.47	0.60
G1	38.26	77.79	8.81	33.11	6.45	1.30	5.58	0.78	4.27	0.97	2.70	0.37	2.17	0.37	182.90	0.66
G2	41.25	84.27	9.27	34.89	6.72	1.33	5.85	0.85	4.54	1.03	2.72	0.39	2.36	0.35	195.81	0.65
G3	41.61	85.43	9.49	36.22	7.18	1.35	6.05	0.94	4.81	1.09	2.98	0.39	2.46	0.38	200.37	0.63
G4	40.32	82.12	9.24	34.85	6.88	1.35	6.04	0.91	4.73	1.04	2.98	0.40	2.44	0.38	193.66	0.64
G5	41.03	85.34	9.58	36.09	7.04	1.37	6.18	0.92	4.93	1.11	3.00	0.41	2.59	0.40	199.99	0.64
H1	33.54	69.82	8.19	31.38	6.28	1.29	5.06	0.74	3.90	0.85	2.28	0.29	1.86	0.28	165.73	0.70
H2	42.92	87.34	9.75	36.23	7.27	1.43	6.14	0.86	4.92	1.11	3.07	0.42	2.58	0.39	204.43	0.65
H3	41.21	84.45	9.52	35.67	7.03	1.39	5.96	0.91	4.93	1.12	3.04	0.39	2.49	0.41	198.52	0.66
H4	39.02	80.09	8.82	33.27	6.47	1.28	5.60	0.80	4.45	1.01	2.94	0.37	2.26	0.36	186.72	0.65
黄河口																
2-1	28.83	58.26	7.34	26.28	4.97	1.04	4.93	0.48	3.60	0.69	2.15	0.33	2.05	0.29	141.25	0.64
2-2	30.53	59.94	7.52	26.99	5.21	0.98	4.69	0.66	3.77	0.83	2.11	0.33	1.99	0.27	145.83	0.60
2-3	31.52	64.35	8.09	29.99	5.41	1.15	5.33	0.72	4.20	0.90	2.54	0.33	2.24	0.34	157.12	0.66
2-4	33.76	68.58	8.41	30.58	5.71	1.14	5.35	0.66	4.31	0.89	2.24	0.37	2.16	0.37	164.52	0.63
3-2	38.84	76.41	9.78	34.98	6.48	1.18	6.34	0.74	4.63	0.91	2.62	0.35	2.60	0.38	186.23	0.56
3-4	33.44	68.56	8.67	30.99	5.69	1.14	5.58	0.72	4.46	0.94	2.59	0.37	2.31	0.34	165.81	0.62
4-1	33.22	67.05	8.19	30.27	5.51	1.20	5.72	0.80	4.33	0.86	2.36	0.36	2.41	0.35	162.64	0.65
4-2	36.95	72.55	9.22	33.76	5.94	1.20	5.96	0.75	4.48	0.97	2.74	0.38	2.48	0.35	177.75	0.62
4-3	31.71	63.24	8.24	29.12	5.69	1.16	5.38	0.68	4.16	0.90	2.45	0.37	2.21	0.32	155.63	0.64
4-4	29.42	59.19	7.54	27.30	4.96	1.01	4.26	0.58	3.71	0.75	1.98	0.38	2.12	0.30	143.48	0.67
5-1	37.83	76.94	9.93	34.08	6.20	1.26	6.36	0.89	4.95	1.01	2.86	0.41	2.37	0.39	185.47	0.61
5-4	30.10	60.20	7.57	27.08	4.94	1.08	4.75	0.76	4.15	0.81	2.27	0.31	2.03	0.36	146.39	0.68
6-2	33.53	67.16	8.42	29.85	5.66	1.19	5.63	0.72	4.50	0.88	2.45	0.43	2.08	0.36	162.85	0.64
7-1	37.21	73.60	9.75	34.81	6.30	1.21	6.15	0.79	4.40	0.92	2.57	0.35	2.46	0.37	180.88	0.60
7-5	39.85	77.82	9.87	36.08	6.72	1.28	6.29	0.71	4.87	0.97	2.63	0.41	2.54	0.40	190.44	0.60
8-2	32.17	64.92	8.13	28.26	5.00	1.10	5.45	0.71	4.13	0.85	2.38	0.35	2.18	0.31	155.93	0.64
8-3	31.89	63.35	8.00	27.45	4.97	1.02	4.50	0.59	3.36	0.71	1.93	0.29	1.91	0.30	150.26	0.66
8-5	33.29	66.06	8.27	30.84	5.37	1.01	5.14	0.66	4.11	0.86	2.51	0.38	2.15	0.37	161.01	0.59
9-2	35.29	70.19	8.63	30.97	5.97	1.09	5.83	0.81	4.50	0.89	2.53	0.39	2.42	0.38	169.88	0.57
9-3	32.97	65.30	8.20	30.16	5.62	1.19	5.43	0.73	4.17	0.90	2.38	0.35	2.33	0.35	160.07	0.66
9-4	35.90	71.50	9.23	33.39	5.80	1.12	5.88	0.77	4.56	0.97	2.71	0.43	2.47	0.38	175.10	0.58
9-5	36.35	72.99	9.10	32.36	6.09	1.04	5.77	0.79	4.50	0.93	2.55	0.37	2.28	0.37	175.48	0.54

当然, 我们也可以将某一沉积物的 $\delta\text{Eu}_N$ 值代入到方程(1), 根据计算出来的 $y$ 值(理论值)与实测的稀土元素总量差值, 来定量判断沉积物的来源. 将长江口、黄河口、255孔和YA01孔沉积物的 $\delta\text{Eu}_N$ 值代入到方程(1), 计算结果如表3所示. 长江口沉积物的

$y_{1-y}$ 值均大于零, 说明沉积物来源于长江; 255孔的 $y_{1-y}$ 值多数大于零, 说明大部分沉积物为长江源的, 而3个 $y_{1-y}$ 值小于零的层位, 很可能是由于含有钙质生物壳的稀释作用或是实验本身的误差造成的. 黄河口沉积物的值均小于零, 说明沉积物来源于黄河;

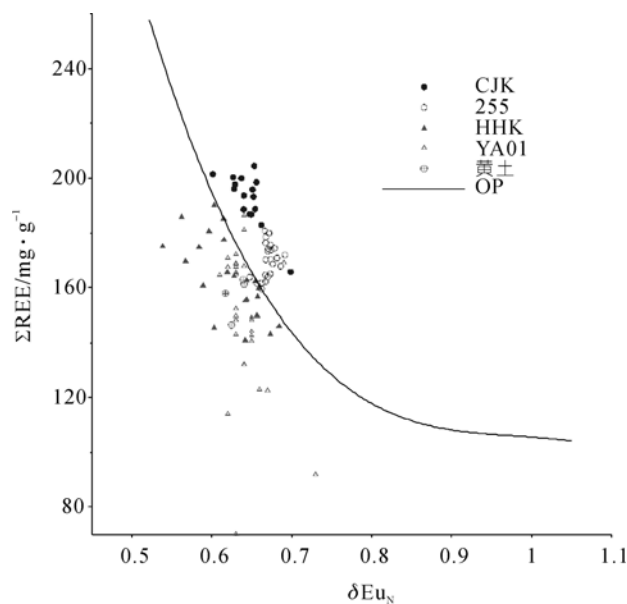


图4 长江口(CJK)、黄河口(HHK)、冲绳海槽南部255孔、南黄海北部YA01孔沉积物和黄土 $\delta Eu_N$ - $\Sigma REEs$ 图解

YA01孔中大部分沉积物的 $y_1-y$ 值小于零,仅有3个层次大于零,说明沉积物主要来源于黄河,几个异常值很可能是由于实验误差造成的。

### 2.3 机制探讨

稀土元素的含量主要与源区物质组成和气候条件等密切相关<sup>[41]</sup>。长江沉积物的来源复杂,长江流域区中酸性岩浆广泛分布,与酸性岩有关的REEs矿产分布较广,因而长江沉积物的REEs含量较高;长江流域地处温暖潮湿的气候带,化学风化作用较强,河流中胶体含量高而吸附较多的REEs;源区物质组成和气候因素决定了长江沉积物中REEs较富集。黄河位于古老的华北地台上,其沉积物主要来自中游广泛分布的黄土<sup>[42]</sup>。黄河流域以蒸发盐和碳酸盐类风化为,土壤呈碱性,这些盐类在沉积岩中属于REEs含量偏低的类型<sup>[12]</sup>。黄河地处北方干旱寒冷气候带,物理风化占主导地位,其沉积物的REEs特征

表3 长江口、255孔、黄河口和YA01孔沉积物的稀土元素理论计算结果<sup>a)</sup>

长江口	y	$y_1-y$	255孔 深度/cm	$\delta Eu_N$	$\Sigma REEs$ / $\mu g \cdot g^{-1}$	y	$y_1-y$	黄河口	y	$y_1-y$	YA01孔 /cm	$\delta Eu_N$	$\Sigma REEs$ / $\mu g \cdot g^{-1}$	y	$y_1-y$
B6	173.86	15	5~10	0.66	159.56	162.54	-3	2-1	173.86	-33	YH-2	0.64	186.41	173.86	13
B7	168.59	20	20~25	0.69	167.85	151.90	16	2-2	198.12	-52	YH-7	0.63	165.65	179.45	-14
D1	168.59	25	40~45	0.67	162.21	160.22	2	2-3	163.61	-6	YH-15	0.63	148.41	179.45	-31
D2	179.45	17	55~60	0.66	161.79	162.25	0	2-4	179.45	-15	YH-26	0.63	152.35	179.45	-27
E2	168.59	18	75~80	0.67	178.55	160.09	18	3-2	227.86	-42	YH-27	0.63	149.61	179.45	-30
F2	179.45	18	95~100	0.67	164.11	158.68	5	3-4	185.34	-20	YH-31	0.63	168.58	179.45	-11
F3	198.12	3	115~120	0.67	164.99	157.62	7	4-1	168.59	-6	YH-36	0.62	170.94	185.34	-14
G1	163.61	19	135~140	0.67	170.2	160.10	10	4-2	185.34	-8	YH-39	0.63	164.87	179.45	-15
G2	168.59	27	155~160	0.69	172.01	149.76	22	4-3	173.86	-18	YH-41	0.61	164.65	191.57	-27
G3	179.45	21	175~180	0.68	170.79	153.79	17	4-4	158.91	-15	YH-43	0.63	172.32	179.45	-7
G4	173.86	20	195~200	0.67	180.72	160.63	20	5-1	191.57	-6	YH-47	0.62	165.66	185.34	-20
G5	173.86	26	215~220	0.67	174.16	158.66	15	5-4	154.50	-8	YH-49	0.63	143.21	179.45	-36
H1	146.47	19	235~240	0.67	175.53	157.35	18	6-2	173.86	-11	YH-51	0.63	167.59	179.45	-12
H2	168.59	36	255~260	0.67	176.37	160.20	16	7-1	198.12	-17	YH-52	0.69	169.1	150.36	19
H3	163.61	35	275~280	0.67	173.39	158.92	14	7-5	198.12	-8	YH-5	0.62	114.2	185.34	-71
H4	168.59	18	295~300	0.65	163.85	169.98	-6	8-2	173.86	-18	YH-58	0.64	132.07	173.86	-42
			315~320	0.68	168.67	156.13	13	8-3	163.61	-13	YH-61	0.66	123.1	163.61	-41
			335~340	0.67	164.63	160.31	4	8-5	205.02	-44	YH-68	0.65	149.24	168.59	-19
			355~360	0.66	161.51	165.30	-4	9-2	219.88	-50	YH-71	0.67	122.52	158.91	-36
			375~380	0.67	170.29	157.38	13	9-3	163.61	-4	YNH-6	0.63	70.15	179.45	-109
			395~400	0.68	174.37	155.13	19	9-4	212.27	-37	YH-75	0.65	142.84	168.59	-26
			415~420	0.67	173.78	157.01	17	9-5	244.96	-69	YH-77	0.64	181.22	173.86	7
			435~440	0.67	179.91	158.21	22				YH-79	0.65	140.8	168.59	-28
											YH-82	0.65	144.28	168.59	-24
											YH-89	0.62	167.55	185.34	-18
											YH-90	0.65	148.3	168.59	-20
											YH091	0.73	91.94	136.29	-44
											YH-103	0.63	168.86	179.45	-11
											YH-107	0.64	167.86	173.86	-6

a) y 是将样品实测的 $\delta Eu_N$ 作为已知量 $x_1$ 代入方程(1)得出的理论计算值, $y_1$ 为实测的稀土元素总量

基本继承了黄土 REEs 组成特点, 相对长江沉积物来说, 黄河沉积物的稀土元素含量较低. Eu 是一个变价元素, 一般情况下以  $\text{Eu}^{3+}$  价存在, 这时的性质与其他 REEs $^{3+}$  类似, 共同迁移, 但是当环境温度较高(大于  $200^\circ\text{C}$ ), 低氧化还原电位(还原条件)时, 部分  $\text{Eu}^{3+}$  可还原成  $\text{Eu}^{2+}$ , 出现了 Eu 异常<sup>[43,44]</sup>. 因此在表生沉积环境下, 沉积物在迁移和沉积过程中 Eu 异常的变化很小, 沉积区沉积物的 Eu 异常主要继承了源区的特征, 使得源区物源和气候信息不受损失.

尽管长江沉积物的 REEs 含量总体上高于黄河, 但对于某一具体的样品来说, 由于沉积物矿物<sup>[45]</sup>和粒度效应<sup>[46]</sup>, 使得 REEs 含量发生变化, 无法根据 REEs 总量的高低来判别某一沉积物究竟来源于长江还是黄河. 根据本文搜集的长江和黄河沉积物的 REE 文献数据<sup>[12,33-35]</sup>, 长江沉积物的  $\delta\text{Eu}_N$  在 0.66~0.77 之间, 平均为 0.70; 黄河沉积物的  $\delta\text{Eu}_N$  在 0.5~0.7 之间, 平均为 0.63, 二者的  $\delta\text{Eu}_N$  差异不大,  $\delta\text{Eu}_N$  变化范围部分重合, 这与本文实测的结果类似. 因此, 单从 Eu 异常不足以作为区分两条河流沉积物的依据. 然而, 在  $\delta\text{Eu}_N$ - $\Sigma\text{REEs}$  关系图中, 长江和黄河沉积物的差异与沉积物的矿物组合无关, 与沉积物的粒度无关, 与取样的位置无关, 只与源区有关, 是源区物质组成和气候环境变化的综合体现.

由于长江沉积物的来源比较复杂, 很难用某一种物质来代表源区物质; 而黄河在流经黄土高原时, 携带了大量的黄土物质, 因此黄河中下游的沉积物主要来源于黄土. 根据黄土的稀土元素分析结果<sup>[47]</sup>, 在  $\delta\text{Eu}_N$ - $\Sigma\text{REEs}$  关系图中, 黄土与黄河沉积物分布在

同一区域(图 4), 表明与黄河沉积物相似的物质属性. 上述分析结果表明, 沉积物从陆地到河流, 由河流到海洋经历了一系列沉积环境的变化, 在这一系列过程中, 沉积物的许多化学性质发生了变化, 但是长江沉积物由源区进入长江然后东流入海的一系列沉积物在  $\delta\text{Eu}_N$ - $\Sigma\text{REEs}$  图解中都分布在同一区域, 黄河沉积物由黄土进入黄河直至入海的一系列沉积物在  $\delta\text{Eu}_N$ - $\Sigma\text{REEs}$  图解中分布在与长江不同的另一区域, 在沉积物的迁移和沉积过程中, 二者的关系基本保持不变, 从而保留了源区物质组成和气候环境的信息, 因而  $\delta\text{Eu}_N$ - $\Sigma\text{REEs}$  图解法可作为区分长江与黄河沉积物的有效方法, 并且可以用于中国东部海域陆源沉积物来源的定量判别.

### 3 结论

(1) 在稀土元素数据经过球粒陨石标准化后的 Eu 异常( $\delta\text{Eu}_N$ )和稀土元素总量( $\Sigma\text{REEs}$ )的关系图解中, 长江和黄河来源的沉积物分布在不同的区域, 该图解可用于直观、定量地区分长江和黄河沉积物.

(2) 通过长江源区、长江沉积物、长江口和冲绳海槽沉积物的 REEs 研究, 以及黄土、黄河沉积物、黄河口和南黄海沉积物的 REEs 研究, 证明  $\delta\text{Eu}_N$ - $\Sigma\text{REEs}$  关系图可用于直观、定量地判识中国东部边缘海陆源物质的归属.

(3) 长江与黄河沉积物在  $\delta\text{Eu}_N$ - $\Sigma\text{REEs}$  关系图中的差异主要是源区物质组成和源区气候条件造成的, 在沉积物由源区进入河流直至入海的过程中,  $\delta\text{Eu}_N$ - $\Sigma\text{REEs}$  关系基本保持不变, 使得其物源和气候信息得以保存.

**致谢** 审稿人提出修改意见和建议; 中国科学院海洋研究所陈丽蓉研究员和南京大学地理与海洋科学学院高抒教授为本文提出了宝贵的意见和建议; 国土资源部海洋地质研究所李绍全研究员和李双林研究员提供了 YA01 孔部分资料; 殷学博博士分析测试了样品并提出了宝贵的建议; 孟庆勇博士、张宝录实验师帮助研磨了样品, 在此一并致以衷心的感谢.

### 参考文献

- 1 Milliman J D, Meade R H. World-wide delivery of river sediments to the ocean. *J Geol*, 1983, 91: 1—21
- 2 孙白云. 黄河、长江和珠江三角洲沉积物中碎屑矿物的组合特征. *海洋地质与第四纪地质*, 1990, 10(3): 23—34
- 3 Eisma D, Ji Z, Chen S, et al. Clay mineral composition of recent sediments along the China coast. *Nederlands Institute voof Onderzoek der Zee*, 1995. 1—13
- 4 范德江, 杨作升, 毛登, 等. 长江与黄河沉积物中黏土矿物及地化成分的组成. *海洋地质与第四纪地质*, 2001, 4(1): 7—12
- 5 杨作升. 黄河、长江、珠江沉积物中黏土的矿物组成、化学风化特征及其与物源区气候环境的关系. *海洋与湖沼*, 1988, 19(4):



578—588

- 6 范德江, 杨作升, 王文正. 长江、黄河沉积物中碳酸盐组成及差异. 自然科学进展, 2002, 12(1): 60—64
- 7 何良彪, 刘秦玉. 黄河与长江沉积物中黏土矿物的化学特征. 科学通报, 1997, 42(7): 730—734
- 8 蓝先洪. 黄河、长江和珠江三角洲近代沉积物的沉积化学特征. 台湾海峡, 1995, 14(1): 44—50
- 9 王中波, 杨守业, 王汝成, 等. 长江河流沉积物磁铁矿化学组成及其物源示踪. 地球化学, 2007, 36(2): 176—184
- 10 杨守业, Jung Hoi S, 李从先, 等. 黄河、长江与韩国 Keum、Yeongsan 江沉积物常量元素地球化学特征. 地球化学, 2004, 33(1): 99—105
- 11 杨守业, 李从先. 长江与黄河沉积物元素组成及地质背景. 海洋地质与第四纪地质, 1999, 19(2): 19—26
- 12 杨守业, 李从先. 长江与黄河沉积物 REE 地球化学及示踪作用. 地球化学, 1999, 28(4): 374—380
- 13 赵一阳, 鄢明才. 黄河、长江、中国浅海沉积物化学元素丰度比较. 科学通报, 1992, 37(13): 1202—1204
- 14 孟宪伟, 杜德文, 陈志华, 等. 长江, 黄河流域泛滥平原细粒沉积物  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  空间变异的制约因素及其物源指示意义. 地球化学, 2000, 29(6): 562—570
- 15 乔淑卿, 杨作升, 李云海, 等. 长江和黄河河口沉积物中石英氧同位素的对比. 海洋地质与第四纪地质, 2006, 26(3): 15—19
- 16 杨守业, 蒋少涌, 凌洪飞, 等. 长江河流沉积物 Sr-Nd 同位素组成与物源示踪. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2007, 37(5): 682—690
- 17 杨守业, 韦刚健, 夏小平, 等. 长江口晚新生代沉积物的物源研究: REE 和 Nd 同位素制约. 第四纪研究, 2007, 27(3): 339—346
- 18 朱纯, 潘建明, 卢冰, 等. 长江、老黄河口及东海陆架沉积有机质物源指标及有机碳的沉积环境. 海洋学研究, 2005, 23(3): 36—46
- 19 林振宏, 吕亚男. 冲绳海槽中部表层沉积物的重矿物分布和来源. 青岛海洋大学学报, 1996, 26(3): 361—368
- 20 陈丽蓉, 徐文强, 申顺喜, 等. 冲绳海槽的矿物组合、物质来源及原始岩浆性质的初步探讨. 海洋与湖沼, 1986, 17(1): 3—12
- 21 高学民, 林振宏, 刘兰, 等. 冲绳海槽中部表层沉积物的地球化学特征和物源判识. 海洋学报, 2000, 22(3): 61—66
- 22 蒋富清, 李安春. 冲绳海槽南部表层沉积物地球化学特征及其物源和环境指示意义. 沉积学报, 2002, 20(4): 680—686
- 23 孟宪伟, 王永吉, 吕成功. 冲绳海槽中段沉积地球化学分区及其物源指示意义. 海洋地质与第四纪地质, 1997, 17(3): 37—43
- 24 孟宪伟, 杜德文, 吴金龙. 冲绳海槽中段表层沉积物物质来源的定量分离: Sr-Nd 同位素方法. 海洋与湖沼, 2001, 32(3): 319—326
- 25 McLennan S M. Rare earth elements in sedimentary rocks: influence of provenance and sedimentary processes. In: Lipin B R, McKay G A, eds. Geochemistry and Mineralogy of Rare Earth Elements. Rev Mineral, 1989, 21: 169—200
- 26 Murray R W, Buchholtzen B M R, Brumsack H J, et al. Rare earth elements in Japan Sea sediments and diagenetic behavior of Ce/Ce\*: results from ODP Leg 127. Geochim Cosmochim Acta, 1991, 55(9): 2453—2466[[doi](#)]
- 27 蓝先洪, 王红霞, 张志珣, 等. 南黄海表层沉积物稀土元素分布与物源关系. 中国稀土学报, 2006, 24(6): 745—749
- 28 刘娜, 孟宪伟. 冲绳海槽中段表层沉积物中稀土元素组成及其物源指示意义. 海洋地质与第四纪地质, 2004, 24(4): 37—43
- 29 吴明清. 冲绳海槽沉积物稀土和微量元素某些地球化学特征. 海洋学报, 1991, 13(1): 75—81
- 30 吴明清, 王贤觉. 东海沉积物的稀土和微量元素. 地球化学, 1991, 1: 40—46
- 31 翟世奎, 陈志华, 徐善民, 等. 冲绳海槽北部稀土元素沉积地球化学研究. 海洋地质与第四纪地质, 1996, 16(2): 47—56
- 32 赵一阳, 王金土, 秦朝阳, 等. 中国大陆架海底沉积物中的稀土元素. 沉积学报, 1990, 8(1): 37—43
- 33 杨守业, 李从先, 赵泉鸿, 等. 长江口冰后期沉积物的元素组成特征. 同济大学学报, 2000, 28(5): 532—536
- 34 杨守业, 李从先, Jung H S, 等. 黄河沉积物中 REE 制约与示踪意义再认识. 自然科学进展, 2003, 13(4): 365—371
- 35 杨守业, 李从先, Lee C B, 等. 黄海周边河流的稀土元素地球化学及沉积物物源示踪. 科学通报, 2003, 48(11): 1233—1236
- 36 王中刚, 于学元, 赵振华. 稀土元素地球化学. 北京: 科学出版社, 1989. 313—316
- 37 李巍然. 冲绳海槽沉积物地球化学特征及其环境变化意义. 博士学位论文. 青岛: 青岛海洋大学, 1998. 42—156
- 38 李双林, 李绍全. 黄海 YA01 孔沉积物稀土元素组成与源区示踪. 海洋地质与第四纪地质, 2001, (3): 51—56
- 39 陈丽蓉. 渤海、黄海、东海沉积物中矿物组合的研究. 海洋科学, 1989, 2: 1—8
- 40 翦知湓, 陈荣华, 李保华. 冲绳海槽南部 20 ka 来深水底栖有孔虫的古海洋学记录. 中国科学 D 辑: 地球科学, 1996, 25(5): 467—473
- 41 黄成敏, 王承善. 风化成土过程中稀土元素地球化学特征. 稀土, 2002, 23(5): 46—49
- 42 Yang S Y, Jung H S, Choi M S. The rare earth element compositions of the Changjiang (Yangtze) and Huanghe (Yellow) river sediments. Earth Planet Sci Lett, 2002, 201: 407—419[[doi](#)]
- 43 MacRae N D, Nesbitt H W, Kronberg B I. Development of a positive Eu anomaly during diagenesis. Earth Planet Sci Lett, 1992, 109: 585—591[[doi](#)]
- 44 李俊, 弓振斌, 李云春, 等. 近岸和河口地区稀土元素地球化学研究进展. 地球科学进展, 2005, 20(1): 64—73
- 45 Cullers R L, Barrett T, Carlson R, et al. REE and mineralogical changes in Holocene soil and stream sediment: a case study in the wet mountains, Colorado, U.S.A. Chem Geol, 1987, 63: 275—297[[doi](#)]
- 46 Rollinson H R. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, and Interpretation. New York: Longman Scientific and Technical, 1993. 352
- 47 陈骏, 王洪涛, 鹿化煜. 山西洛川黄土沉积物中稀土元素及其他微量元素的化学淋滤研究. 地质学报, 1996, 70(1): 61—72