

## 长江与黄河沉积物稀土元素随粒度变化对比研究

宫传东<sup>1</sup>,戴慧敏<sup>2</sup>,杨作升<sup>3</sup>(1. 沈阳有色冶金设计研究院,辽宁 沈阳 110179;2. 沈阳地质矿产研究所,辽宁 沈阳 110032;  
3. 中国海洋大学海洋地球科学学院,山东 青岛 266003)

**摘 要**:依据 Stoke 定律将长江小于 63  $\mu\text{m}$  的沉积物分成 4 个粒级,将黄河小于 63  $\mu\text{m}$  的沉积物分成 6 个粒级.采用 ICP-MS 法分别测试了分粒级沉积物的 REE 含量.结果显示,相同粒级中长江沉积物的  $\Sigma\text{REE}$  均高于黄河沉积物.长江沉积物 REE 的丰度遵循元素的“粒度控制律”,即随粒度变细  $\Sigma\text{REE}$  含量依次增高,黄河沉积物  $\Sigma\text{REE}$  呈“高一低一高”的不对称马鞍型分布,北美页岩标准化分布曲线均呈右倾状,轻重稀土分馏明显,相对富集 LREE,具弱 Ce 亏损,明显的 Eu 正异常.长江与黄河沉积物 REE 组成特征差异与两条河流域的风化作用及沉积物的矿物组成密切相关,黄河  $\Sigma\text{REE}$  的马鞍型分布是细粒级中黏土矿物吸附及粗粒级中相对高含量的重矿物富集作用的结果,而长江沉积物随粒级增大  $\Sigma\text{REE}$  的衰减趋势主要是随粒级增大逐步增加的石英和长石含量的稀释作用所造成.

**关键词**:长江,黄河,稀土元素,富集,稀释作用

## COMPARISON OF REE VARIATIONS WITH GRAIN SIZES IN SEDIMENTS BETWEEN THE YANGTZE RIVER AND THE YELLOW RIVER

GONG Chuan-dong, DAI Hui-min, YANG Zuo-sheng

(1. Shenyang Mining Development Co. Ltd., Shenyang 110179, China; 2. Shenyang Institute of Geology and Mineral Resources, Shenyang 110033, China;  
3. College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266003, Shandong Province, China)

**Abstract**: According to the Stoke's Law, the grain sizes of sediments from the Yangtze River and the Yellow River are classified into four and six grades, separately. The REE contents in the sediments of various sizes are tested with ICP-MS. The results show differences between the two rivers. For the same grain size, the content of REE in the samples from Yangtze River is higher than that from Yellow River. The contents of REE from the Yangtze River reduce with the increasing of grain sizes of sediments. However, with the increasing of grain sizes, the REE contents in samples from the Yellow River present an unsymmetrical high-low-high distribution pattern. The North America Shale-normalized patterns show that the fractionation patterns are similar for different grain-sized sediments, and also for the two rivers. The differences of REE contents between the Yangtze River and the Yellow River are closely related to the weathering and mineral compositions in the sediments of the two river basins. The reducing trend of REE contents with grain size increasing for the Yangtze River is resulted from the dilution of quartz and feldspar contents which increase with the grain size. The REE distribution pattern of sediments from Yellow River is the result of the absorption of clay minerals in fine-grained sediment and the enrichment of heavy minerals in coarse-grained sediment.

**Key words**: Yangtze River; Yellow River; rare earth element (REE); enrichment; dilution

## 0 引言

东海陆架泥质沉积区是东海陆架的现代沉积中心,是物质的“汇”,而长江与黄河分别以年输沙量

$5 \times 10^8 \text{ t}$  和  $11 \times 10^8 \text{ t}$  的巨量泥沙进入我国边缘海,对我国陆架海沉积作用贡献巨大.长江、黄河沉积物的研究对于了解河流入海物质的扩散特点、陆架海物质组成

收稿日期 2012-03-12 修回日期 2012-05-22 编辑 李兰英.

基金项目 国家自然科学基金重大研究计划项目(批准号 90211022)资助.

作者简介 宫传东(1978—),男,工程师,从事矿物学研究工作,通信地址 辽宁省沈阳市浑南新区世纪路 13 号, E-mail//gchdhm@163.com

特征、来源及上陆壳的平均成分等均具有重要意义,已有众多学者用不同方法对长江和黄河沉积物进行了分析比较<sup>[1-7]</sup>,以期获得区分两者的有效指标。由于两河物源区物质成分的差异和所处气候带不同造成的后期风化的不同,其沉积物在化学元素和矿物组成等方面存在较大的差别。在研究长江与黄河沉积物 REE 地球化学特征时认为二者的 REE 组成特征不同,长江沉积物 REE 含量高于黄河样品,元素含量变化也大于黄河样品,但两者的球粒陨石标准化曲线都呈明显的右倾状<sup>[8]</sup>再次对黄河沉积物 REE 组成进行分析认为,在小于 63  $\mu\text{m}$  的细粒级组分与全岩样品相比 REE 组成变化较小,然而 REE 在不同粒级中的含量变化规律不明显<sup>[9]</sup>。进一步开展长江与黄河沉积物小于 63  $\mu\text{m}$  的细粒级部分 REE 的地球化学特征分析和比较,探讨它们的控制因素对利用 REE 组成特征来示踪长江与黄河沉积物的物质来源及其对边缘海沉积的贡献有重要的意义。

## 1 样品与分析方法

### 1.1 实验样品

黄河样品采自黄河利津水文站底质沉积物,长江样品采自长江口附近的表层沉积物,采样位置见图 1。

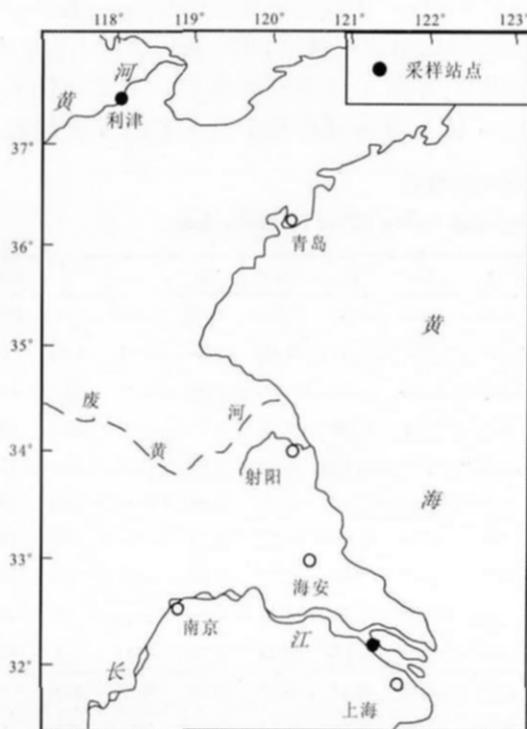


图 1 采样位置

Fig. 1 Sampling locations in the Yangtze River and the Yellow River

### 1.2 预处理及分析方法

**样品预处理** 将样品加蒸馏水稀释后,先用过氧化氢(15%)去除有机质,再加入浓度为 0.5 mol/dm<sup>3</sup>、体积约 10 mL 的分散剂([NaPO<sub>3</sub>]<sub>6</sub>)浸泡 12 h,以便使样品充分分散。依据 Stoke 沉降原理分别提取小于 2、2~4、4~8、8~16、16~32 及 32~63  $\mu\text{m}$  六个粒级的沉积物足够量,为了保证各粒级的纯度,对提取的各粒级沉积物反复采用 Stoke 沉降法提取直至符合粒度要求,采用激光粒度分析法对分级结果进行验证和评价。表 1 为分级粒度及体积含量(其中 YR4 重复 3 次测量进行仪器重复性监控)。

表 1 长江与黄河样品不同分级粒度和体积含量

Table 1 Granularity and volume content of samples from Yangtze River and Yellow River

样品名称	32~63 $\mu\text{m}$	16~32 $\mu\text{m}$	8~16 $\mu\text{m}$	4~8 $\mu\text{m}$	<4 $\mu\text{m}$
Chj4	8.716	55.62	34.924	0.736	0
YR4	0.181	1.976	21.202	50.554	26.09
YR4	0.093	1.153	19.135	51.251	28.37
YR4	0.124	1.736	20.365	51.068	26.71

含量单位: %。

**稀土元素含量分析流程**:为使样品溶解更彻底,样品预处理采用微波消解法,即准确称取各粒级样品 0.1000±0.0001 g 于聚四氟乙烯密闭溶样罐中,取 1 mL 硝酸(1:1)与 3 mL 氢氟酸混均后滴加于溶样罐中,并加盖密闭进行微波消解,冷却后转移到自动控温电热板上(160℃)继续消解 48 h,待消解完全后,冷却至室温,开启密闭盖,蒸至近干,加 1 mL 高氯酸,蒸至白烟冒尽,冷却后加 2 mL 硝酸,于自动控温电热板上加热使盐类溶解,蒸至近干,加 1.5 mL 硝酸,加盖密闭并于自动控温电热板上(160℃)加热溶解 12 h,冷却至室温后摇匀,于自动控温电热板上(80℃)保温 10 h,冷却后用硝酸溶液稀释样品。REE 含量测试采用 ICP-MS 法,由核工业北京地质研究院地质测试中心完成。

**矿物成分分析流程**:将提取的各个粒级样品滴入蒸馏水制备载玻片,自然风干后采用 X 射线衍射法测试矿物成分。该测试由沈阳地质调查中心实验室完成。

**重矿物分析**:将样品均匀分散于载玻片上,分别在体视镜下选取 5 处不重复部位进行统计(300 颗),计算出重矿物的颗粒数百分数,最后求得 5 次的平均值作为重矿物颗粒百分含量。

## 2 长江、黄河不同粒级 REE 组成特征及分布模式

### 2.1 长江、黄河不同粒级 REE 组成特征

长江、黄河沉积物不同粒级 REE 含量见表 2。由表 2 可知,在小于 2 μm 的黏土粒级中,长江沉积物中无论是 LREE 还是 HREE 含量都高于黄河沉积物。在 16~32 μm 和 32~63 μm 的粉砂粒级中,长江沉积物 LREE 含量均高于黄河沉积物,HREE 含量均低于黄河沉积物。相同粒级比较,长江沉积物 ΣREE 含量均明显高于黄河沉积物。经数理统计分析可以看出,长江沉积物不同粒级中 REE 含量的标准偏差(σ<sub>Chj</sub>)小于黄河沉积物,变异系数(C<sub>vChj</sub>)也小于黄河沉积物,说明长江沉积物不同粒级间 REE 含量的变化小于黄河沉积物。随着样品的粒度由粗至细,长江沉积物 ΣREE 增高,从属于“元素的粒度控制律”<sup>[10]</sup>。黄河沉积物在小于 4 μm 范围内 ΣREE 相对高,4~16 μm 相对较低,而在 16~63 μm 范围内 ΣREE 呈现上扬的趋势,即随粒度增大 ΣREE 呈高—低—高的不对称马鞍型分布(见图 2)。

2.2 长江与黄河不同粒级沉积物 REE 分馏特征

从表 3 可以看到,黄河沉积物中不同粒级间的 (La/Lu)<sub>N</sub> 和 (La/Yb)<sub>N</sub> 值非常接近。但是随着粒级变粗,它们呈现依次减小的趋势,说明黄河沉积物粒度越细,轻重稀土分馏越明显。而长江沉积物中 (La/Lu)<sub>N</sub> 及 (La/Yb)<sub>N</sub> 值不同粒级间变化相对较大。随着粒级变大先增加后减小,随粒级增加轻重稀土分馏越明显,但在最粗粒级又相对分馏弱。相同粒级中长江沉积物 (La/Lu)<sub>N</sub> 及 (La/Yb)<sub>N</sub> 值分别相应地比黄河沉积物中的高,这表明球粒陨石标准化后同一粒级中长江沉积

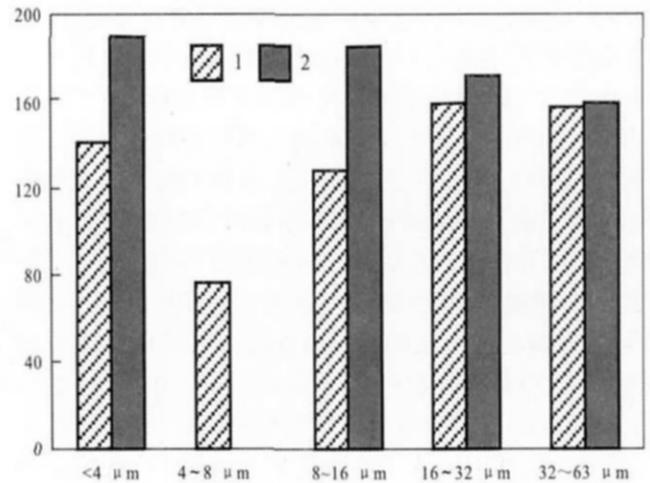


图 2 长江、黄河沉积物 ΣREE 随粒级变化情况

Fig. 2 Variation of ΣREE with grain sizes of the sediments from the Yangtze River and Yellow River

1—黄河样品(sample from Yellow River); 2—长江样品(sample from Yangtze River)

物比黄河沉积物中的轻重稀土分馏更显著,二者各个粒级的 (La/Lu)<sub>N</sub> 及 (La/Yb)<sub>N</sub> 值都高于 UCC 和黄土高原黄土,但是黄河沉积物各个粒级的 (La/Lu)<sub>N</sub> 及 (La/Yb)<sub>N</sub> 值更接近于黄土高原黄土。黄河沉积物 (La/Sm)<sub>N</sub> 值随粒级增大先减小后增大,长江沉积物 (La/Sm)<sub>N</sub> 值随粒级增大逐渐减小。长江沉积物各个粒级中 (La/Sm)<sub>N</sub> 值都高于黄河的相应粒级沉积物,说明长江 LREE 在不同粒级中的分馏比黄河中的明显,与之不同的是, (Gd/Yb)<sub>N</sub> 值在黄河沉积物中各个粒级非常接近,8~

表 2 长江、黄河沉积物不同粒级 REE 含量

Table 2 REE contents in sediments from Yangtze River and Yellow River by grain sizes

样品编号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	ΣREE
YR1(<4 μm)	27.25	53.45	6	22.1	3.925	0.88	3.615	0.475	2.95	0.62	1.89	0.275	1.89	0.265	15.35	140.95
YR1(4~8 μm)	14.8	28.9	3.22	11.8	2.07	0.47	1.92	0.28	1.59	0.36	1.08	0.16	1.08	0.15	8.57	76.45
YR1(8~16 μm)	23.9	48.5	5.71	20.9	3.82	0.86	3.46	0.48	2.67	0.59	1.72	0.25	1.64	0.25	13.9	128.6
YR1(16~32 μm)	29.9	59.3	6.69	26.3	5.02	1.08	4.23	0.58	3.38	0.73	2.08	0.3	2.07	0.3	16.8	158.8
YR1(32~63 μm)	30	57.2	6.8	25.6	4.9	1.03	4.28	0.62	3.42	0.75	2.2	0.32	2.09	0.31	17.7	157.2
Chj(<4 μm)	40.5	69.9	8.2	29.9	5.6	1.17	4.83	0.64	3.76	0.81	2.4	0.36	2.44	0.36	19.4	190.3
Chj(8~16 μm)	38.3	68.7	8.22	30.4	5.17	1.08	4.62	0.62	3.61	0.78	2.34	0.33	2.21	0.31	19	185.7
Chj(16~32 μm)	34.9	62.6	7.74	29.5	5.38	1.19	4.68	0.6	3.39	0.7	2.04	0.3	1.87	0.27	16.9	172.1
Chj(32~63 μm)	31.2	59.3	7.21	27.1	5.07	1.05	4.36	0.59	3.02	0.66	1.83	0.26	1.69	0.24	15.6	159.2
黄土高原黄土	33	66.9	6.74	28.2	5.74	1.14	4.87	0.84	4.62	0.95	2.68	0.43	2.74	0.43	25	159.2
C <sub>v</sub> YR	0.26	0.25	0.27	0.28	0.32	0.3	0.3	0.28	0.28	0.26	0.25	0.25	0.24	0.25	0.26	—
C <sub>v</sub> Chj	0.11	0.08	0.06	0.05	0.04	0.06	0.04	0.04	0.09	0.09	0.12	0.14	0.16	0.18	0.1	—
σ <sub>YR</sub>	6.63	12.7	1.53	6.08	1.26	0.26	1.06	0.14	0.79	0.16	0.45	0.07	0.43	0.06	3.8	—
σ <sub>Chj</sub>	4.07	5.03	0.48	1.46	0.24	0.07	0.2	0.02	0.32	0.07	0.27	0.04	0.34	0.05	1.79	—

黄土高原黄土数据来自文献[11],σ 为标准偏差,C<sub>v</sub>为变异系数,含量单位:10<sup>-6</sup>(质量分数)。

表 3 长江、黄河沉积物不同粒级沉积物 REE 分馏比较

Table 3 Comparison of REE fractionations in the sediments between Yangtze River and Yellow River by grain sizes

样品号	(La/Lu) <sub>N</sub>	(La/Yb) <sub>N</sub>	(La/Sm) <sub>N</sub>	(Gd/Yb) <sub>N</sub>	δEu	δCe
YR1(<4 μm)	10.92	9.9	4.09	1.67	0.7	2.38
YR1(8~16 μm)	9.92	9.84	3.94	1.71	0.71	0.95
YR1(16~32 μm)	10.49	9.74	3.75	1.65	0.7	2.36
YR1(32~63 μm)	10.22	9.68	3.85	1.65	0.67	2.46
CHj(<4 μm)	11.75	11.19	4.55	1.6	0.67	2.38
CH(8~16 μm)	12.83	11.53	4.66	1.67	0.66	0.87
CH(16~32 μm)	13.68	12.58	4.08	2.02	0.71	2.85
CHj(32~63 μm)	13.5	12.45	3.87	2.08	0.67	3.12
黄土高原黄土	7.96	8.11	3.61	1.43	0.64	1.02
UCC	9.73	8.3	4.19	1.39	0.65	1.05

16 μm 粉砂粒级的最高, 长江沉积物中黏土粒级相对低, 粉砂粒级的较高, 说明长江沉积物 HREE 在粉砂粒级分馏更明显, 也明显强于黄河沉积物。

从图 3 可以看到, 长江、黄河沉积物各个粒级的 REE 北美页岩标准化分布曲线均为右倾斜型, 不同粒级间曲线形状相似, 存在弱的 Ce 亏损, 明显的 Eu 正异常, 长江沉积物 Eu 正异常尤为明显。黄河沉积物不同粒级的 REE 北美页岩标准化曲线比较相似, 而长江沉积物不同粒级的分布模式 LREE 部分近似平行, HREE 部分曲线形状存在细小差别, 表明长江沉积物不同粒级间轻、重分馏程度不同, 黄河沉积物的分馏程度较接近, 黄河沉积物 REE 的配分模式与黄土高原黄土和黄河全岩样相比, 小于 2、16~32 和 32~63 μm 三个粒级的北美页岩标准化曲线更接近于黄河全岩样及

黄土高原黄土 REE 的北美页岩标准化曲线。

### 3 长江与黄河沉积物不同粒级 REE 组成控制因素

黄河沉积物主要来自黄土高原黄土, 黄河流域以蒸发盐和碳酸盐类风化为主, 土壤呈碱性, pH 为 7.5~8。长江流域强的化学风化作用使土壤呈弱酸性, pH 为 5~6<sup>[12]</sup>, pH 低使河流中胶体含量较高而吸附较多的 REE, 尤其是 LREE。pH 较高的河流中 ΣREE 较低, 因而在相同粒级内长江沉积物的 ΣREE 含量高于黄河沉积物。前人研究认为 REE 主要在黏土矿物中富集, 它们或赋存于黏土矿物晶格中, 或被黏土矿物所吸附<sup>[13]</sup>, 这也较好地解释了无论长江还是黄河沉积物 REE 在黏土粒级沉积物中均具有较高的含量。对长江、黄河各个粒级沉积物进行了 X 射线衍射分析及体视镜下观察, 分析结果见表 4 和图 4、5。黄河沉积物在 4~8 μm 和 8~16 μm 粒级中除黏土矿物外, 石英和长石含量骤增。由于石英和长石对稀土元素含量具有直接的稀释作用, 使得 ΣREE 在这两个粒级内表现出低值, 与其他粒级相比, 在 8~16 μm 粒级中, 长石含量最高, 而较高含量的长石也可能是导致 Eu 的正异常的直接原因。在 16~32 和 32~63 μm 粒级范围内, 除了出现上述矿物外还出现了碳酸盐, 这一结果与范德江等<sup>[14]</sup>的结论相一致。ΣREE 在这两个粒级中也较高, 在地球化学上, 表生风化过程中 REE 被释放后能与碳酸盐形成络合物而迁移, 而且稀土碳酸盐络合物是难溶的<sup>[15-16]</sup>。长江沉积物随粒度增大黏土矿物逐渐减少, 石英和长石含量递增, 在大于 4 μm 的沉积物中出现了碳酸盐, 但是碳酸盐含量较低, 并且随粒度变化不

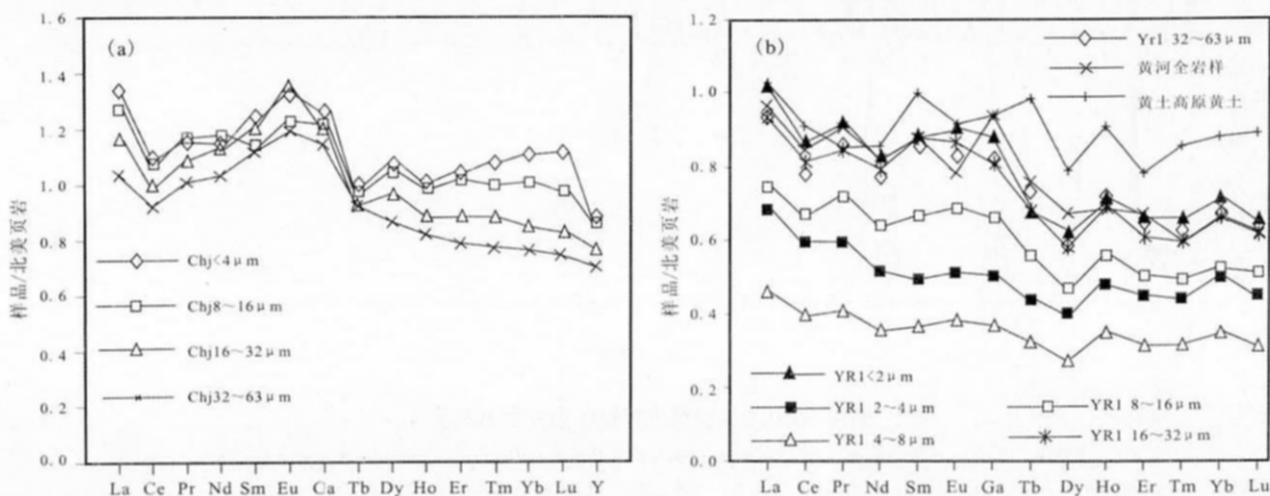


图 3 长江(a)、黄河(b)不同粒级沉积物 REE 北美页岩标准化分布模式

Fig. 3 North American shale-normalized patterns of REE in different grain-sized sediments from the Yangtze River (a) and Yellow River (b)

表 4 长江与黄河沉积物不同粒级样品的矿物组成成分及含量

Table 4 Mineral components and contents in the sediment samples from Yangtze River and Yellow River by grain sizes

样品编号	黏土	石英	钾长石	斜长石	方解石	白云石	角闪石	黄铁矿	赤铁矿
YR1(<4 μm)	72.5	20.9		6.6	-	-	-	-	-
YR1(4~8 μm)	49.8	32.2	3.4	14.6	-	-	-	-	-
YR1(8~16 μm)	32	36.1	10.8	21.1	-	-	-	-	-
YR1(16~32 μm)	22.4	47	5.4	22.4		0.6	2.2	-	-
YR1(32~63 μm)	20.5	46.1	6.2	22.5	1.1	1	2.6	-	-
Chj(<4 μm)	65.9	30.85	-	-	-	-	-	-	0.5
Chj(8~16 μm)	36.65	40.9	0.2	13.7	1			0.2	4.4
Chj(16~32 μm)	27	49.6	3.6	13.5	0.6	0.5		0.3	4.9
Chj(32~63 μm)	23.7	52.1	2.3	18.8	0.4	0.6	2.1	-	-

含量单位: %.

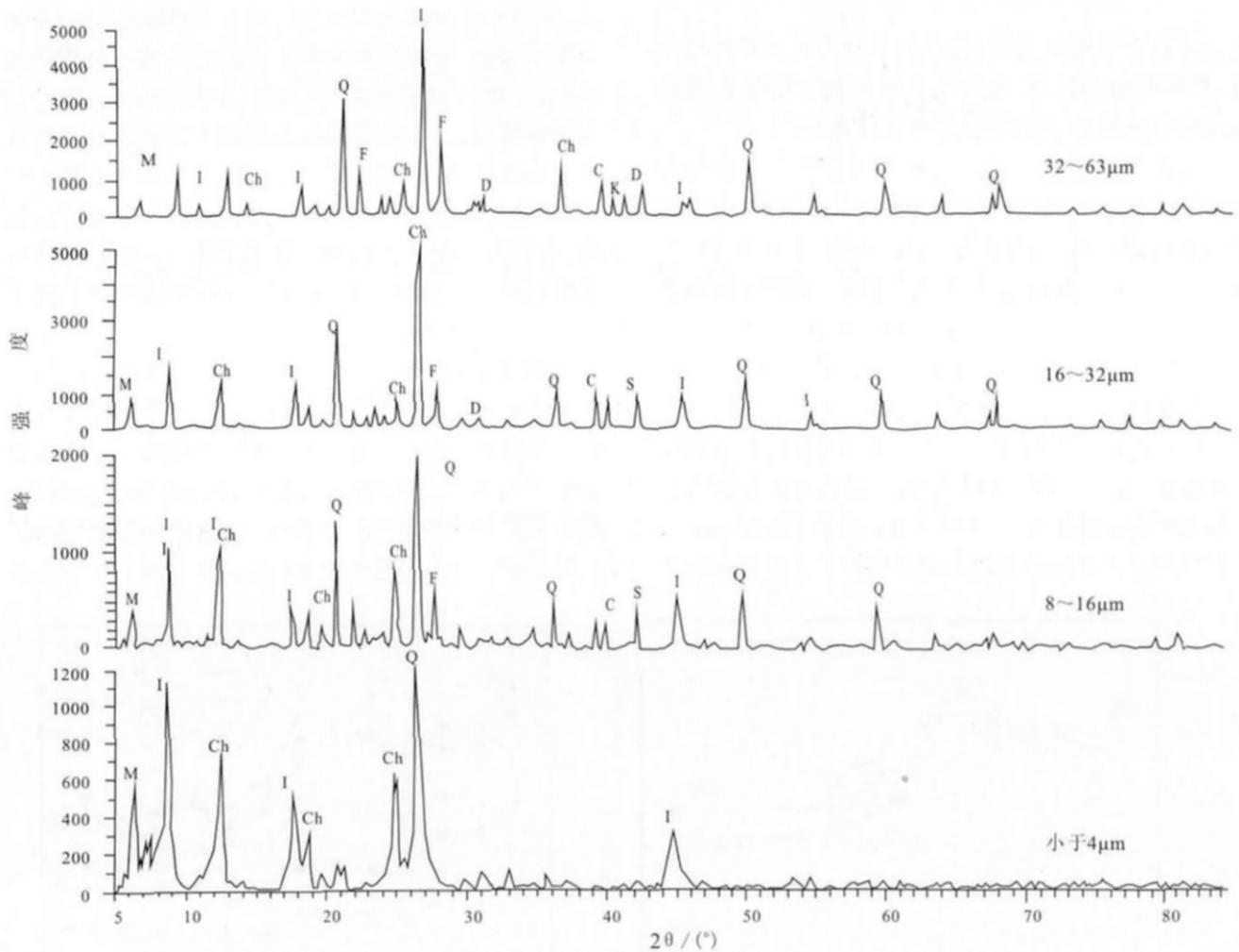


图 4 长江不同粒级沉积物 X 射线衍射图谱

Fig. 4 X-rays diffraction of different grain-sized sediments of samples from the Yangtze River

M—蒙脱石(montmorillonite); I—伊利石(illite); Ch—绿泥石(chlorite); K—高岭石(kaolinite); F—长石(feldspar); Q—石英(quartz); C—方解石(calcite); D—白云石(dolomite); S—菱铁矿(siderite)

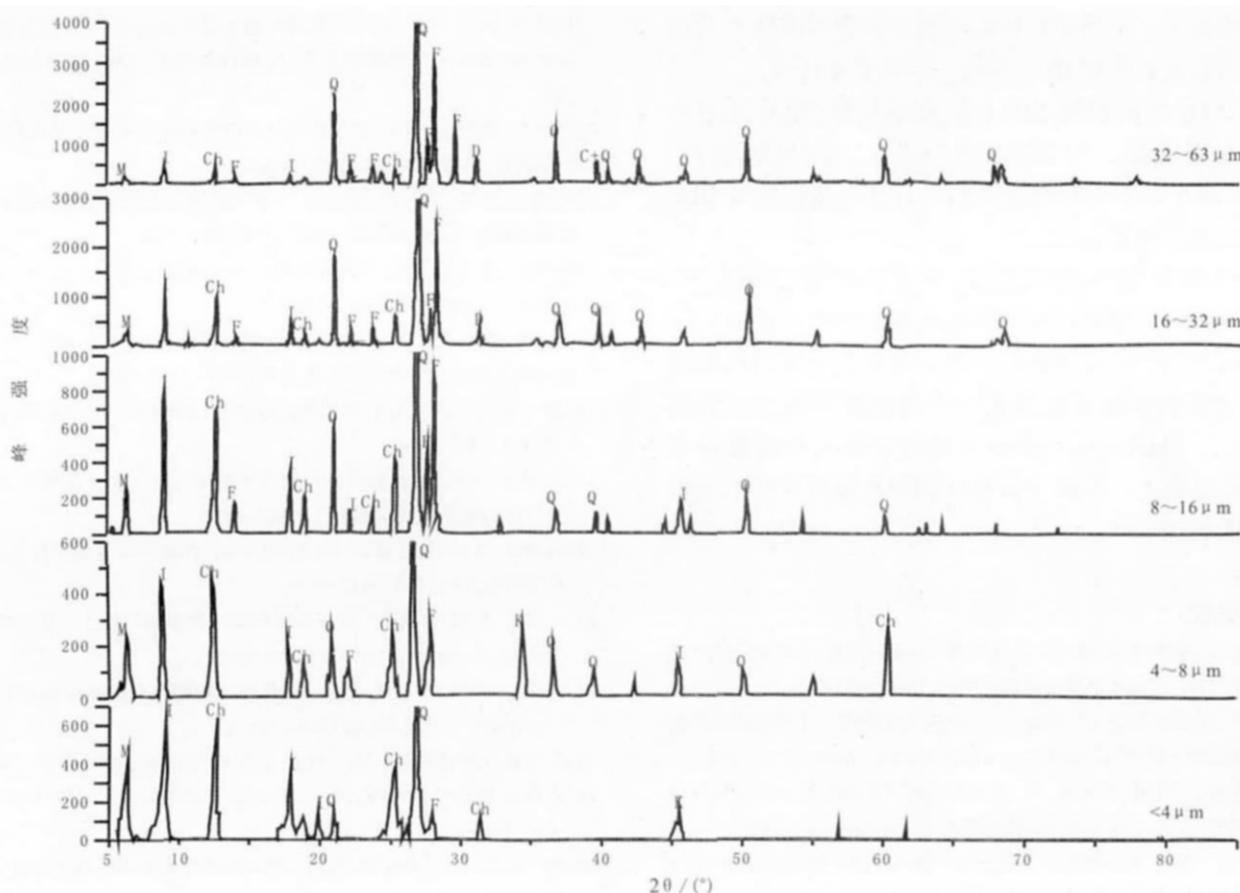


图 5 黄河不同粒级沉积物 X 射线衍射图谱

Fig. 5 X-rays diffraction of different grain-sized sediments of samples from the Yellow River

M—蒙脱石 (montmorillonite); I—伊利石 (illite); Ch—绿泥石 (chlorite); K—高岭石 (kaolinite); F—长石 (feldspar); Q—石英 (quartz); C—方解石 (calcite); D—白云石 (dolomite)

大, 表明长江沉积物中碳酸盐对稀土元素含量的变化并没有太大的影响。

另外, 重矿物也是稀土的重要载体, 之所以有时砂中出现稀土的异常高值, 就与砂中存在较多的重矿物有关<sup>[17]</sup>。经镜下观测, 黄河沉积物重矿物含量随粒度增大依次增大, 其较粗粒级中较高的稀土含量可能与其相对较高含量的重矿物也有着直接的关系。而长江沉积物重矿物含量在各个粒级中含量均甚少(见表 5)。

综上所述, 黄河沉积物  $\Sigma$ REE 随粒度增大呈现的高—低—高不对称马鞍型分布受沉积物中长石、石英的稀释、黏土矿物的吸附及含有的碳酸盐和重矿物的富集多种因素所控制。长江沉积物  $\Sigma$ REE 随粒度增大呈现的衰减趋势可能是细 0 粒级部分黏土矿物的吸附

及随粒度增大而增大的长石和石英含量对 REE 稀释作用的结果。

#### 4 讨论与结论

对比长江、黄河不同粒级沉积物 REE 的组成特征, 发现两条河流不同粒级沉积物 REE 分布和含量有下列特点:

(1) 相同粒级沉积物中长江沉积物  $\Sigma$ REE 的含量普遍高于黄河沉积物, 这与长江、黄河的物质来源、流域背景及风化条件密切相关。

(2) 随着粒级由细至粗, 黄河沉积物呈现高—低—高的不对称马鞍型分布, 这种结果主要与黏土矿物对 REE 的吸附及流域碎屑沉积物中不同粒级的矿物成

表 5 长江与黄河沉积物不同粒级样品重矿物含量

Table 5 Heavy mineral contents in the sediment samples from Yangtze River and Yellow River by grain size

样品编号	YR1(<4 μm)	YR1(4~8 μm)	YR1(8~16 μm)	YR1(16~32 μm)	YR1(32~63 μm)	Chj(<4 μm)	Chj(4~16 μm)	Chj(16~32 μm)	Chj(32~63 μm)
重矿物/%	-	<1.0	3.2	5.8	9.6	-	<1.0	2.0	2.1

分密切相关,黄河沉积物粗粒级中含有的碳酸盐及相对较高的重矿物对 REE 具有一定的富集作用。

(3)长江沉积物  $\Sigma$ REE 呈衰减趋势,粗粒级中重矿物含量甚微,对  $\Sigma$ REE 影响不大,随粒级增大, $\Sigma$ REE 减小是由于相对较高的长石和石英含量对 REE 起了主要的稀释作用。

(4)经北美页岩标准化后,同一粒级长江沉积物中轻、重稀土分馏明显强于黄河,轻稀土分馏也明显强于黄河沉积物,占主导地位的物理风化是使黄河沉积物 REE 分馏较弱的主要因素;黄河沉积物各个粒级的  $(La/Lu)_N$ 、 $(La/Yb)_N$ 、 $(La/Sm)_N$  及  $(Gd/Yb)_N$  值更接近于黄土高原黄土,反映了黄河沉积物在物质来源上对黄土的继承性。

#### 参考文献:

- [1]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[J].海洋地质与第四纪地质,2001,21(4):7—12.
- [2]毛登,郭志刚,范德江,等.长江、黄河河口沉积物中生物标志化合物组成的初步研究[J].青岛海洋大学学报,2001,31(5):747—754.
- [3]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[J].海洋地质与第四纪地质,2006,26(3):15—19.
- [4]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[J].海洋地质与第四纪地质,1990,10(3):23—34.
- [5]杨作升.黄河、长江、珠江沉积物中黏土的矿物组合、化学风化特征及其与物源区气候环境的关系[J].海洋与湖沼,1988,19(4):336—346.
- [6]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[J].科学通报,1992,37(23):1202—1204.
- [7]张朝生,章申,王立军,等.长江与黄河沉积物金属元素地球化学特征及其比较[J].地理学报,1998,53(4):314—321.
- [8]杨守业,李从先.长江与黄河沉积物 REE 地球化学及示踪作用[J].地球化学,1999,28(4):374—380.
- [9]杨守业,李从先, JUNG Hoi-Soo, 等.黄河沉积物中 REE 制约与示踪意义再认识[J].自然科学进展,2003,13(4):365—371.
- [10]赵一阳.中国海大陆架沉积物地球化学的若干模式[J].地质科学,1983(4):307—314.
- [11]吴明清,文启忠,潘景瑜,等.黄河中游地区马兰黄土的稀土元素[J].科学通报,1991,36(16):1380—1385.
- [12]陈静生,李远辉,乐嘉祥,等.我国河流的物理与化学侵蚀作用[J].科学通报,1984(15):932—936.
- [13]王贤觉,陈蔚,雷剑泉,等.东海大陆架海底沉积物稀土元素地球化学研究[J].地球化学,1982(1):56—65.
- [14]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[J].自然科学进展,2002,12(1):60—64.
- [15]牟保磊.元素地球化学[M].北京:北京大学出版社,1999:134—148.
- [16]刘英俊,曹励明,李兆麟,等.元素地球化学[M].北京:科学出版社,1986:209—214.
- [17]赵一阳,王金士,秦朝阳.中国大陆架海底沉积物中的稀土元素[J].沉积学报,1990,8(1):37—43.