



长江下游与浙江主要河流枯水期悬浮物稀土元素组成研究

贾贤明, 陈 坚, 汪柯宇, 冯启营, 李云海, 李茂森

On the composition of rare earth elements of suspended substance in lower reach of the Yangtze River and main rivers in Zhejiang Province in dry season

JIA Xianming, CHEN Jian, WANG Keyu, FENG Qiyong, LI Yunhai, and LI Maosen

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2023052902>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

南黄海表层沉积物稀土元素分布特征及其物源指示意义

Distribution of rare earth elements in surface sediments of the South Yellow Sea and its implication to sediment provenances

海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(6): 93-103

南黄海中部MIS6期以来沉积物稀土元素组成及其物源指示意义

Rare earth element composition and provenance implication of sediments in the Central South Yellow Sea since MIS6

海洋地质与第四纪地质. 2023, 43(2): 92-105

冲绳海槽岩心沉积物稀土元素特征及物源指示

Characteristics of rare earth elements in the sediment cores from the Okinawa Trough and their implications for sediment provenance

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(1): 69-82

孟加拉湾南部表层沉积物稀土元素组成及其物源指示意义

Rare earth element composition of the surface sediments from the south Bay of Bengal and its implications for provenance

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(2): 80-89

印度洋东经90° 海岭现代沉积物稀土元素组成及其物源示踪意义

Rare earth element composition of the surface sediments from the Ninetyeast Ridge and its implications for provenance

海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(2): 92-100

长江与黄河黏土粒级沉积物地球化学特征及其物源指示意义

Geochemical characteristics of clay-sized sediments of the Yangtze and Yellow Rivers and their implications for provenance

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(3): 109-118



关注微信公众号，获得更多资讯信息

贾贤明, 陈坚, 汪柯宇, 等. 长江下游与浙江主要河流枯水期悬浮物稀土元素组成研究[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2024, 44(4): 88-98.
JIA Xianming, CHEN Jian, WANG Keyu, et al. On the composition of rare earth elements of suspended substance in lower reach of the Yangtze River and main rivers in Zhejiang Province in dry season[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2024, 44(4): 88-98.

长江下游与浙江主要河流枯水期悬浮物稀土元素组成研究

贾贤明¹, 陈坚^{2,3}, 汪柯宇⁴, 冯启营⁴, 李云海^{2,3}, 李茂森⁵

1. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306
2. 自然资源部第三海洋研究所, 厦门 361005
3. 福建省海洋物理与地质过程重点实验室, 厦门 361005
4. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100
5. 福州大学先进制造学院, 晋江 362200

摘要: 基于 2021 年 10 月至 11 月在长江下游及钱塘江、椒江和瓯江等浙江主要河流枯水期采集的 64 个悬浮物样品, 分析研究了其粒度分布和稀土元素 (REE) 组成, 讨论了各河悬浮物 REE 组成差异以及物源端元特征。结果显示, 枯水期长江下游、钱塘江、椒江和瓯江悬浮物 REE 含量均值分别为 209.52、173.64、211.86 和 228.70 mg/kg; 北美页岩 (NASC) 标准化配分曲线明显向右倾, 并有明显的 Ce 负异常特征。与前人所测数据相比, 钱塘江和瓯江悬浮物 REE 含量明显较高; 长江悬浮物 REE 和前人长江悬浮物/沉积物表现总体一致。从 $(La/Yb)_{NASC}$ — $(La/Gd)_{NASC}$ 图看, 长江、钱塘江、椒江、瓯江之间有一定差别, 可成为它们物源端元的判别指标; 相对于历史沉积物数据, 长江悬浮物 REE 比值分布范围较为集中, 以悬浮物为对象研究河流物源端元比沉积物有更好的效果。

关键词: 悬浮物; 稀土元素; 物源; 长江; 浙江河流

中图分类号: P736

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2023052902

On the composition of rare earth elements of suspended substance in lower reach of the Yangtze River and main rivers in Zhejiang Province in dry season

JIA Xianming¹, CHEN Jian^{2,3}, WANG Keyu⁴, FENG Qiyang⁴, LI Yunhai^{2,3}, LI Maosen⁵

1. College of Marine Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China
2. Third Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Xiamen 361005, China
3. Fujian Provincial Key Laboratory of Marine Physical and Geological Processes, Xiamen 361005, China
4. College of Earth Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China
5. College of Advanced Manufacturing, Fuzhou University, Jinjiang 362200, China

Abstract: Sixty-four samples of suspended substance were collected in October–November, 2021 from the lower reaches of Yangtze River and major rivers in Zhejiang Province in dry season, from which the differences of distribution characteristics of rare earth elements (REEs) and provenance indication of the suspended substance were discussed. Results show that the average REE contents in the suspended substance from the lower reaches of the Yangtze River, Qiantang River, Jiaojiang River, and Oujiang River in dry season were about 209.52, 173.64, 211.86, and 228.70 mg/kg, respectively, and the contents of REEs of the Qiantang River and the Oujiang River were obviously higher than previous data. The normalized partition curve against the value of North American Shale Composition (NASC) was gentle in general and slightly incline to the right, with obvious MREE enrichment, which is consistent in overall with the previous studies of the Yangtze River and major rivers in Zhejiang Province. The diagrams of $(La/Yb)_{NASC}$ vs $(La/Gd)_{NASC}$, the index of $(La/Yb)_{NASC}$, and $(La/Gd)_{NASC}$ were used to distinguish provenance of the Yangtze River from rivers in Zhejiang Province. The distribution scope of $(La/Yb)_{NASC}$ and $(La/Gd)_{NASC}$ of suspended substance of this study is more concentrated than those of the historical data, which mean that suspended substance could be used for river provenance study.

Key words: suspended substance; rare earth elements; provenance; the Yangtze River; Rivers of Zhejiang Province

资助项目: 自然资源部第三海洋研究所基本科研业务费项目“细颗粒泥沙形貌与矿物特征分析与物源研究: 以闽浙沿岸入海颗粒为例”(201930); 国家科技基础资源调查专项项目“中国海岛志编研”(2019FY202100)

作者简介: 贾贤明 (1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事海洋沉积学研究, E-mail: 18255373916@163.com

通讯作者: 陈坚 (1971—), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事海洋沉积学与沉积动力学研究, E-mail: chenjian@tio.org.cn

收稿日期: 2023-05-29; 改回日期: 2023-09-19. 张现荣编辑

河流是连接大陆和海洋的纽带, 每年向海洋输送约 $(15\sim 20)\times 10^9\text{t}$ 泥沙, 在地球表生过程、海洋沉积和生物地球化学循环中起着关键作用^[1-2]。新生代喜马拉雅山-青藏高原持续隆升以来, 亚洲几条大河每年向海洋输送的沉积物可达全球总量 13%^[3-4], 其直接改变了亚洲边缘海的沉积速率和沉积格局, 记录了构造隆升、季风演化和化学风化的历史, 并可能对新生代的海洋化学产生重大影响^[4-6]。

研究河流入海物质端元特征是阐明河流对海洋沉积贡献的重要方面。矿物学、地球化学方法示踪入海泥沙来源并揭示古环境古气候演化过程是沉积学的常用方法, 并获得了很多成果^[7-8]。稀土元素(REE)在地质体中倾向成组出现^[9], 元素之间有良好的共存特性, 常被用来追踪沉积物来源^[10-11]。稀土元素地球化学研究揭示了长江沉积物具有不同于黄河的特点, 一些稀土元素标准化后元素比值可较好地示踪长江入海颗粒物质的平均组成^[12-17]。稀土元素的粒级效应^[13,16]和矿物控制效应显著, 黏土矿物富集轻稀土元素(LREE), 磷酸盐矿物和 Fe-Mn 氧化物富集中稀土元素(MREE), 锆石、石榴石等富集重稀土元素(HREE)^[11,18]。研究认为悬浮物比河漫滩沉积物示踪流域风化源岩更具代表性, 河流下游近河口细粒级沉积物的酸不溶组分可代表长江入海颗粒物的平均 REE 组成^[18]。也有研究显示泥沙入海后粒度组分发生变化, 影响通过 REE 参数判断河流沉积物的来源^[15], 能否利用 REE 组成变化有效示踪不同支流沉积物源尚待进一步探讨^[19]。

长江支流沉积物的 REE 组成变化大于干流, REE 组成明显受源岩控制^[17,20]。研究表明, 由于修建三峡大坝等 5 万多座大坝, 输入东海泥沙显著减少^[21]。而三峡沉积物研究显示, 来自周边山地的近源沉积物的输入在不同季节有较大变化, 中下游支流成为长江入海泥沙的主要来源, 上游大坝工程的进一步建设将导致上游泥沙的贡献继续减小^[22-23]。

长江流域沉积物中 REE 组成受源岩、风化机制、粒度、矿物、吸附/解吸行为等因素的控制^[24-25], 具有粒度、矿物分异效应和季节差异, 加上大坝建设等人类活动强烈影响, 河流入海泥沙 REE 端元值的准确定量仍是一个非常复杂的科学问题。本文以长江干流下游九江-上海河段, 以及钱塘江、椒江和甌江等 3 条主要河流中下游的悬浮物为研究对象, 基于细颗粒的悬浮物可长距离搬运的特性, 分析研究其稀土元素的组成和可能的端元特征, 为研究长江及沿岸中小河流对东海内陆架沉积的影响提供依据。

1 研究区概况

长江发源于青藏高原, 延绵 6300 km, 流域面积 $180\times 10^4\text{ km}^2$, 支流水系庞大, 流域面积超过 $1\,000\text{ km}^2$ 的有 428 条。中、上游大的支流有雅砻江、岷江、嘉陵江和汉江等, 自青藏高原向东流经横断山脉、云贵高原、四川盆地、江南丘陵和长江下游平原等注入东海, 中游地段以湘江和赣江为主的湖南和江西河流, 分别经洞庭湖和鄱阳湖汇入长江, 自九江湖口向下游基本再无大河流注入。长江流域属于北半球亚热带季风气候区, 平均年降水量 $1\,067\text{ mm}$ ^[26], 受地形等影响时空分布不均。

浙江地处中国东部长江三角洲南翼, 地势由西南向东北倾斜, 山地多呈 NE、SW 走向。河流主要有钱塘江、甌江、椒江、甬江、苕溪、运河、飞云江、鳌江 8 大水系^[27-28]。一般中上游河段深切、比降大、水流湍急; 下游河段地势较低, 河谷较宽蜿蜒曲折, 水流减慢, 河口受潮流的影响较大, 具有明显的季节山溪性特征。流域属亚热带季风性湿润气候, 年均降水量 $1\,100\sim 2\,000\text{ mm}$, 受台风和暴雨等影响大。长江和浙江主要河流基本水文特征见表 1。

长江流域和浙江岩性存在较大差别, 长江流域内主要构造单元有三江褶皱系、松潘-甘孜褶皱系、秦岭-大别褶皱系、华南褶皱系和扬子准地台等, 地层从上太古界深变质岩到全新世河湖相沉积均有出露, 同时还有太古宙至新生代的火成岩^[29], 中下游地区除发育中生代中酸性火成岩和第四纪河湖相沉积物外, 还广泛分布古生代碳酸盐岩^[30]。浙江河流流域位于华南褶皱区, 以江山-绍兴深断裂为界, 大地构造分为浙西北、浙东南两个区。浙西北岩性以第四系冲洪积物为主, 其次是侏罗系中酸性火山岩, 零星分布志留系沉积岩; 浙东南岩性以燕山期中酸性火山岩为主, 零星分布第四系冲洪积物和志留系沉积岩^[31]。

表 1 长江和浙江主要河流基本水文特征^[27-28]
Table 1 Hydrological parameters of the Yangtze and main rivers in Zhejiang Province

河流	河口位置	长度/km	流域面积/ 10^3 km^2	径流量/ (km^3/a)	输沙量/ (Mt/a)
长江	东海	6300	1705.4	898.3	35100
钱塘江	杭州湾	688	24.3	21.8	275
椒江	台州湾	206	5.71	6.7	840
甌江	温州湾	388	18.0	14.4	232

2 样品采集与实验方法

本研究于2021年10月至11月采集河流悬浮物样品64站(图1),其中长江下游39站,浙江河流中下游25站(钱塘江10站、椒江8站、瓯江7站)。采样点布置在河流开阔、水流平稳处,一般距离江岸5~10 m,采集水面以下20 cm左右的水样。悬浮物样品在现场使用直径180 mm、孔径0.45 μm 的醋酸纤维滤膜经真空抽滤获得;根据泥沙浓度,过滤水样体积大致为100~300 L;过滤后滤膜上的泥沙样品用超纯水和预先处理过的毛刷收集到酸洗过的聚乙烯塑料瓶中,放至冷藏箱保存带回实验室,样品经自然风干后开展粒度 and 稀土元素组成分析。

粒度测定方法:充分混合样品,取约0.6 g干样置于试管中,加入适量浓度为30%的 H_2O_2 去除有机质,12 h后加入1:10的稀盐酸2 mL去除碳酸

盐。待反应完成后,洗酸2~3次(加入去离子水,摇晃后静置6 h左右,待上部澄清后倒掉上层清液,如此反复2~3次),最后加入浓度为0.5 mol/L的 $(\text{NaPO}_3)_6$,混合均匀经24 h完全分散后上机测试。采用Mastersizer 2000激光粒度仪,测试样品时遮光度10%~20%。测试在自然资源部第三海洋研究所海洋与海岸地质研究室完成,用矩法^[32]和图解法计算粒度参数。

稀土元素测定方法:样品研磨至200目,充分混合后准确称取0.04 g置于Teflon容器,加入电子级混合酸($\text{HF}+\text{HNO}_3+\text{HClO}_4$)消解,而后用高纯水定容至40 mL,使用Thermos Fisher公司X-Series II型ICP-MS分析,测试在自然资源部第三海洋研究所分析测试中心进行。测定时加入国家标准沉积物参比物质(GBW 07316)3个和平行样10%进行质量控制,标样测试值与标准值偏差(除Eu和Tm外)总体上在 $\pm 10\%$ 以内(表2),平行样偏差小于2%,结果可靠。

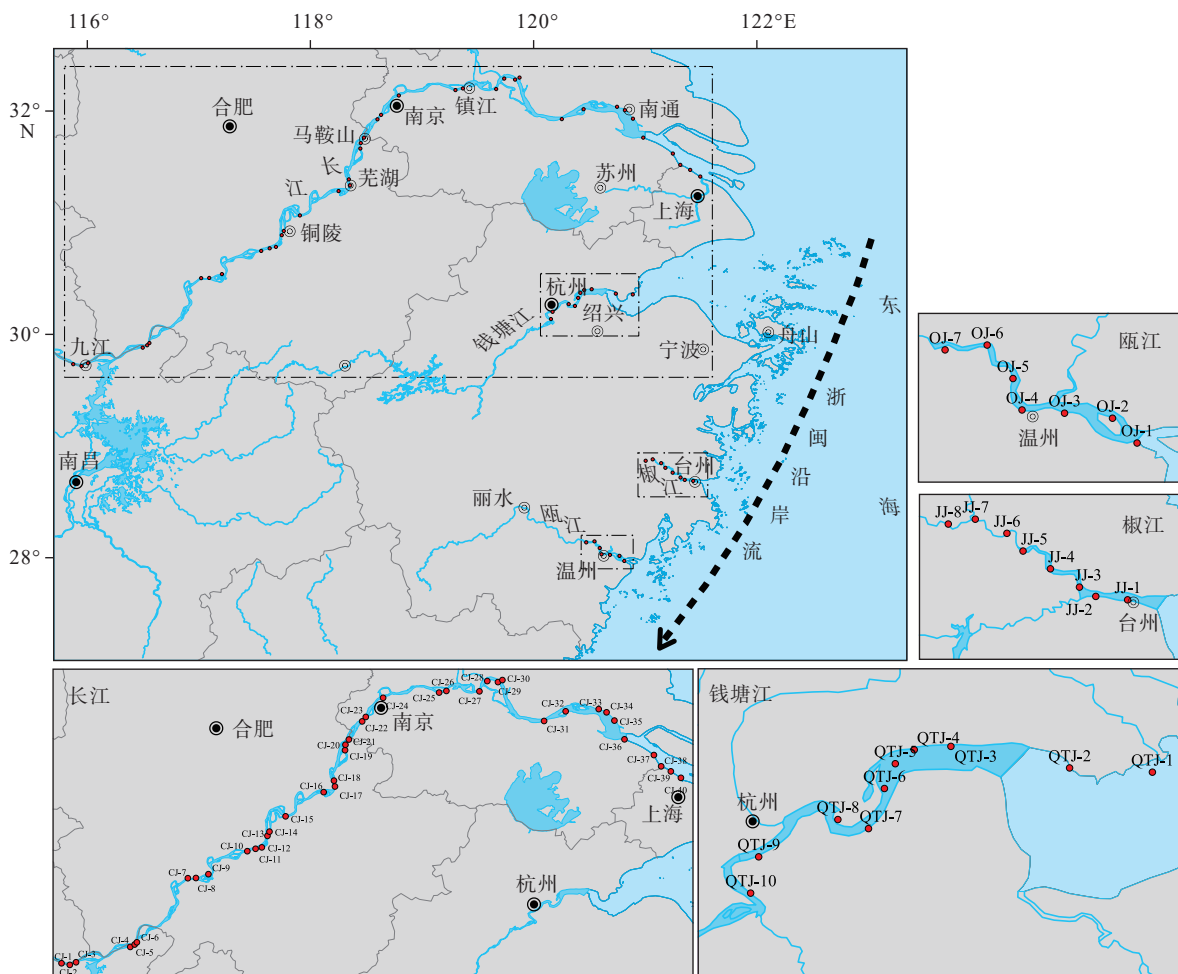


图1 研究区和悬浮物样品采样位置示意图

Fig.1 Schematic diagram of the study area and sampling locations

表 2 标样 (GBW 07316) 测试值与推荐值的偏差														%	
Table 2 Deviation between test value and recommended value of the reference (GBW 07316)															
标样	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	
A	-4.36	-2.73	-3.71	-4.66	-3.26	12.11	4.10	0.90	7.10	-2.45	6.16	-6.58	5.83	-7.88	
B	-2.54	-0.03	-0.14	-2.94	-0.94	14.33	4.80	1.26	6.75	-1.52	7.70	-6.46	8.36	-5.80	
C	0.29	0.01	0.93	-4.57	-2.31	14.27	9.77	7.02	3.70	-5.48	3.04	-11.09	-3.26	-7.35	

3 结果与分析

3.1 悬浮物粒度

研究区各站悬浮物粒度组成以粉砂和黏土组为主,砂级组分少(图 2,表 3)。椒江和瓯江几乎全为粉砂和黏土,粒度细,分选较差、正偏、峰态很宽;钱塘江和长江分选很差、正偏、峰态宽,个别站位砂级组分含量较高,占比达 40% 以上,可能是采样不当或潮流波浪掀沙造成。

3.2 悬浮物 REE 含量组成

研究区河流悬浮物样品的稀土元素组成特征见表 4 和图 3。长江、钱塘江、椒江和瓯江悬浮物 ΣREE 含量变化范围分别为 176.92~239.53、142.28~187.35、199.14~242.06 和 212.99~280.60 mg/kg,平均分别为 209.52、173.64、211.86 和 238.70 mg/kg,变化系数范围 5.75%~11.38%。 δEu 均为负 (0.53~0.60), δCe 长江为 0.94,其余为 1.0~1.05;和前人^[33]所测钱塘江和瓯江 ΣREE 含量 (151.61 和 199.94 mg/kg) 相比,本研究测量的含量较高;与前人^[34]所测长江悬浮物 ΣREE 含量 (127.6~362.1 mg/kg) 相比,本研究含量在此范围之内,但分布范围小很多。

悬浮物轻重稀土比值 LREE/HREE ,长江、椒江和瓯江悬浮物在 12 左右,钱塘江则在 11 左右,略大于上地壳(UCC)均值(9.54),轻重稀土分异明显。自北向南, δCe 有增大趋势,浙江 3 条河 δEu 异常增高,可能与流域地质背景有关。

除钱塘江和椒江外,河流悬浮物稀土元素含量大小顺序为 $\text{Ce}>\text{La}>\text{Nd}>\text{Pr}>\text{Sm}$, $\text{Gd}>\text{Dy}>\text{Yb}$, $\text{Er}>\text{Eu}>\text{Tb}>\text{Ho}>\text{Tm}>\text{Lu}$,与密西西比河、亚马逊河、黄河、珠江等世界性河流相似^[35-37]。钱塘江和椒江元素含量表现不同之处在于,椒江 $\text{Ho}>\text{Tb}$,钱塘江 $\text{Sm}>\text{Gd}$ 、 $\text{Lu}>\text{Tm}$ 。总体上,元素含量分布与 UCC 基本一致,反映悬浮物稀土元素分布受流域内的元素地壳丰度控制^[38]。

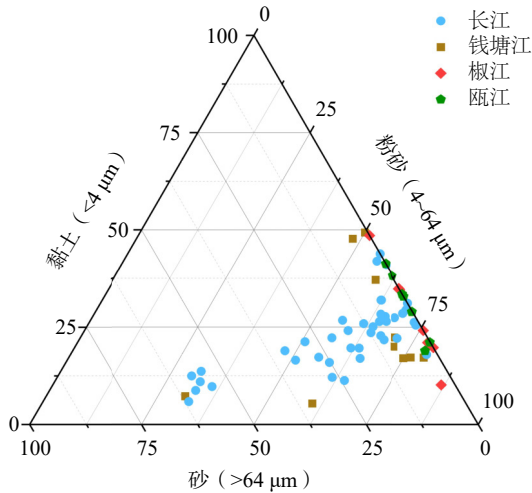


图 2 研究区河流悬浮物粒度组成三角图
Fig.2 Particle size composition of suspended sediments of the study rivers

表 3 研究区悬浮物粒径特征
Table 3 Particle size characteristics of suspended matter in the study rivers

河流	中值粒径/ ϕ			分选系数 平均值	偏态 平均值	峰态 平均值
	平均值	最大值	最小值			
长江	6.00	7.65	2.95	2.10	0.51	2.58
钱塘江	5.85	7.83	2.29	2.18	0.48	2.58
椒江	7.13	7.98	5.85	1.52	0.65	3.05
瓯江	7.35	7.84	6.64	1.40	0.56	2.92

3.3 悬浮物 REE 配分模式和特征参数

一般来说,稀土元素组成可反映源区的地球化学特征,不同的源区有不同的稀土元素配分模式。轻稀土元素(LREE)多富集在陆源碎屑物中,重稀土元素(HREE)和中稀土元素(MREE)在火山碎屑物和生源碎屑物中富集程度低^[38]。稀土配分模式研究主要通过球粒陨石、上地壳(UCC)或北美页岩(NASC)等 REE 的平均值标准化后进行,可以反映样品相对于地球原始物质的分异程度和沉积过程中的元素混合、均化影响和分异程度^[39-45]。源区为

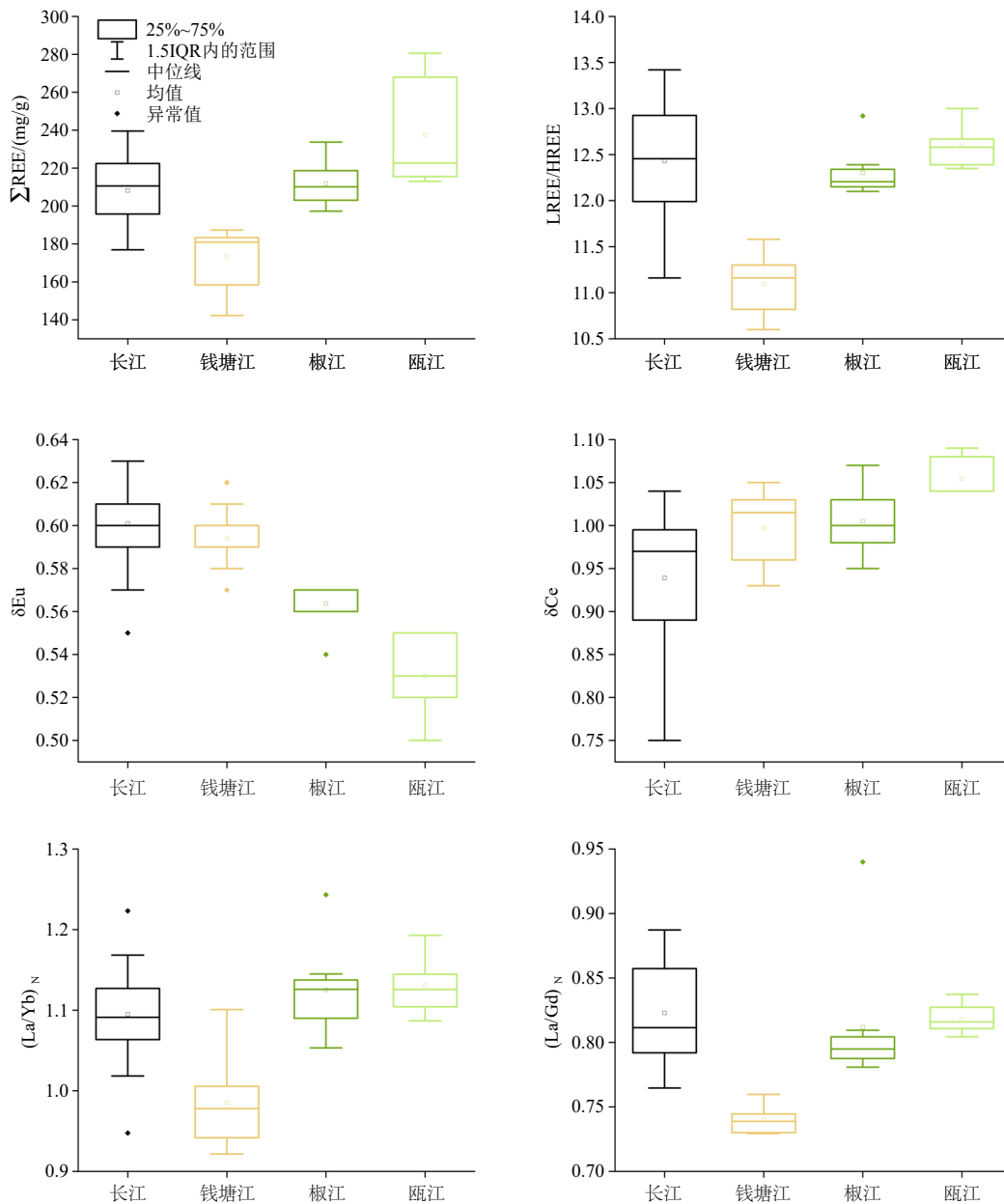


图3 研究区河流悬浮物稀土元素特征参数

Fig.3 Characteristic parameters of REE of suspended sediments in the study rivers

陆源风化产物的沉积物, 稀土球粒陨石标准化配分模式多为负 Eu 异常, 轻重稀土分异明显, 呈左高后低的 V 型曲线; 上地壳标准化配分模式则表现出轻重稀土分异弱, 呈较平坦的近直线型分布^[39-45]。

采用 Taylor 和 McLennan^[37] 的球粒陨石平均含量, 对研究区悬浮物 14 种稀土元素 (La—Lu) 标准化后绘制 REE 蛛网图 (图 4), 可以看出, 研究区各河流悬浮物表现出明显的 δEu 负异常, 各站变化趋势大致相同, 呈现轻稀土富集的右倾 V 字型特征, 表现出典型的陆源风化产物特征。相对于长江悬浮物, 浙江三条河流悬浮物的 REE 各站变化小, 表现出很高的同源性。

4 讨论

4.1 与历史数据的比较分析

前人对长江沉积物或悬浮物 REE 组成的研究比较多, 将前人在长江下游 (包括湘江和赣江) 沉积物/悬浮物的 9 组数据^[12,16,20,34,46-48] 分别计算平均值, 与本次长江悬浮物数据平均值用北美页岩 (NASC) 含量^[49] 标准化后进行比较 (图 5), 可以看出, 数据总体特征比较一致, 除湘江沉积物以外, 配分曲线呈现右倾、元素 Dy 台阶状降低、重稀土部分缓波状

表 4 研究区河流悬浮物稀土元素主要参数特征

Table 4 Main characteristics of REE of suspended substance in study rivers

河流	指标	$\sum\text{REE}/(\text{mg}/\text{kg})$	$\text{LREE}/(\text{mg}/\text{kg})$	$\text{HREE}/(\text{mg}/\text{kg})$	LREE/HREE	$(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$	$(\text{La}/\text{Gd})_{\text{N}}$	δCe	δEu
长江	平均值	209.52	193.71	15.81	12.33	1.10	0.82	0.94	0.6
	标准偏差	19.22	17.74	2.22	0.91	0.05	0.04	0.08	0.02
	变化系数/%	9.17	9.16	14.07	7.35	2.76	4.31	8.34	2.79
钱塘江	平均值	173.64	159.23	14.36	11.09	0.98	0.74	1	0.59
	标准偏差	15.59	14.32	1.31	0.33	0.05	0.01	0.04	0.02
	变化系数/%	8.98	8.99	9.15	2.94	5.43	1.42	4.47	2.61
椒江	平均值	211.86	195.94	15.93	12.3	0.07	0.81	1.01	0.56
	标准偏差	12.14	11.39	0.81	0.27	0.42	0.05	0.04	0.01
	变化系数/%	5.73	5.81	5.08	2.17	4.99	6.48	3.77	2.14
瓯江	平均值	228.7	220.23	17.47	12.59	1.13	0.82	1.05	0.53
	标准偏差	27.05	25.3	1.76	0.21	0.03	0.01	0.02	0.02
	变化系数/%	11.38	11.49	10.07	1.7	2.98	1.35	2.1	3.57

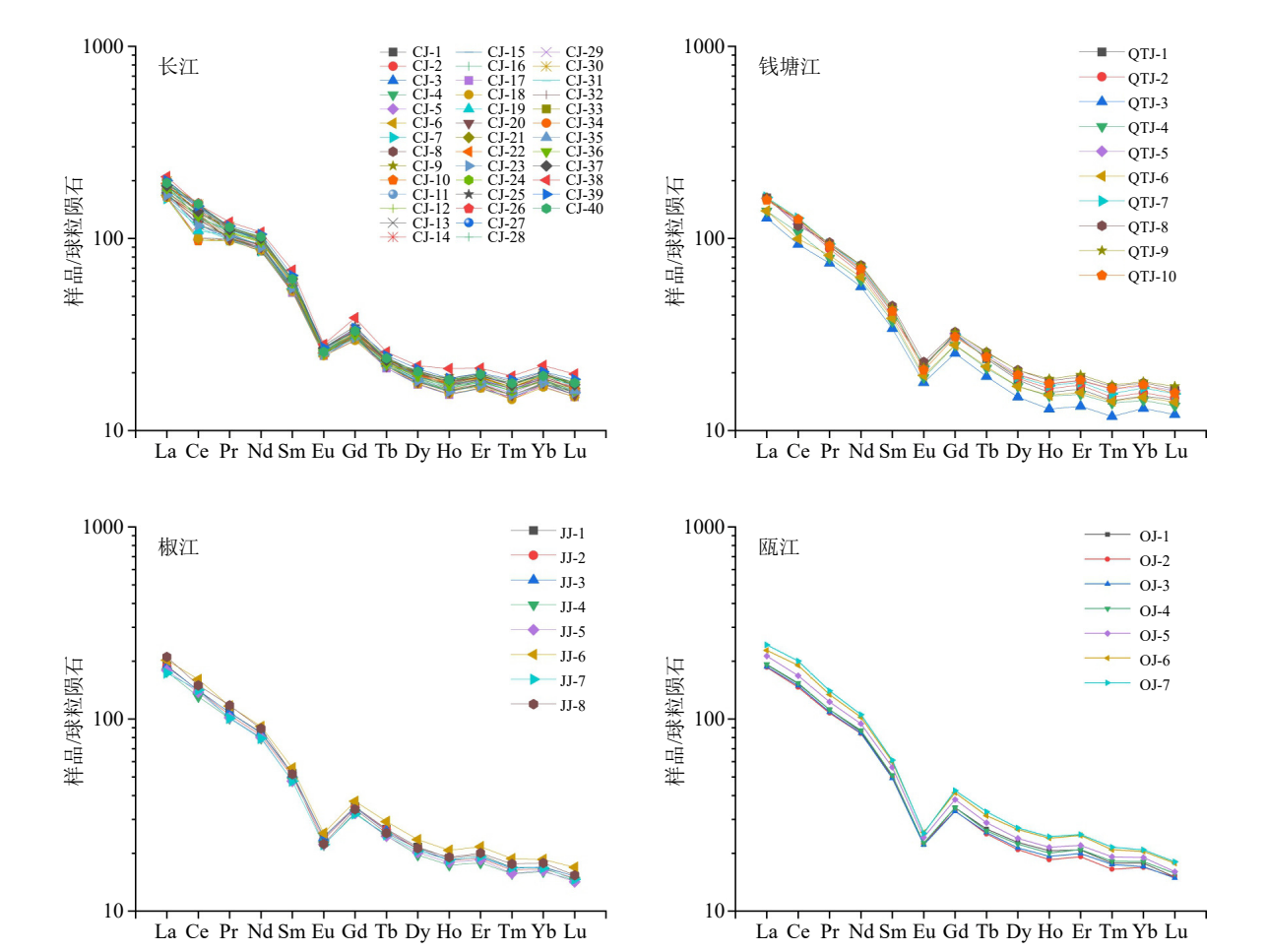


图 4 研究河流悬浮物稀土元素配分模式

Fig.4 Chondrite-normalized patterns of rare earth elements in suspended sediments of the study rivers

水平分布的特征,表现出轻稀土和中稀土较富集的特征。元素Nd表现出富集特征,与1984年Haski对NASC更新后元素Nd的含量(27×10^{-6})较小有关;元素Ce差别较大,包括本次研究在内,有4组数据呈现明显的Ce负异常,2组为略正异常,4组表现不明显;赣江和湘江有明显的Eu负异常,其他数据表现不明显。此外,本次研究的长江悬浮物配分曲线与长江下游0707(2007年7月)数据相似度很高,并在Yb出现明显的升高。

前人对钱塘江等浙江河流沉积物及悬浮物稀土组成的研究较少,将前人的5组数据^[15, 33, 44]分别取平均值后,用NASC含量标准化做蛛网图(图6)与本次研究的浙江河流比较,可以看出配分曲线总体表现比较一致,呈明显的右倾形状,Dy出现较明显的台阶状下降,重稀土部分呈缓波状水平分布。主要的差异表现在:2组历史数据(瓯江-A和钱塘江-A悬浮物)出现很强的Ce正异常,与其他数据有较大的差别;其他历史数据与本次研究3条河流配分曲线有较相似的分布,尤其是瓯江-B,均有较强的Eu负异常和Gd正异常。

4.2 长江与浙江主要河流的比较

为了区分长江与浙江主要河流稀土元素组成,同样对两者REE用NASC标准化做蛛网图(图7),可以看出长江与钱塘江、椒江和瓯江之间稀土元素配分曲线总体比较一致,但存在一些差别:长江有

明显的Ce负异常,浙江河流不明显,这与长江La的值更大一些有关,且Sm和Nd含量明显高出浙江河流;浙江河流Gd比较富集、Eu有明显的负异常,而长江不明显;4条河的Yb均比相邻的Tm和Lu比值大,但长江增大的幅度要超过浙江河流;浙江3条河之间,含量最高的瓯江与含量最低的钱塘江之间,从左向右元素含量的差别有收窄的趋势,尤其La、Gd和Yb表现得很明显,用来区分长江和浙江河流。

4.3 稀土元素比值及意义

如前所述,沉积物在迁移、搬运、堆积等过程中稀土元素组分之间变化较小,其比值常被用作物源示踪指标^[36]。参考前人的研究,本文用 $(La/Yb)_{NASC}$ 、 $(La/Gd)_{NASC}$ 探讨研究区河流悬浮物的物源端元特征,这两个参数可分别表示轻/重、轻/中稀土的含量比值。

从 $(La/Yb)_{NASC}-(La/Gd)_{NASC}$ 图(图8)可以看出,本研究的长江悬浮物数据与前人数据有较好的可比性,尤其与湘江和赣江沉积物,及长江下游0404、0507和0707悬浮物,及长江下游(大通、徐六泾)沉积物等的的数据比较接近。

本研究的4条河流在 $(La/Yb)_{NASC}-(La/Gd)_{NASC}$ 图上有一些重叠,但还是可以区分开来。钱塘江具有最低的 $(La/Gd)_{NASC}$ 值,与其他3条河大致在 $(La/Gd)_{NASC}=0.99$ 处可区分开;椒江、瓯江和长江分

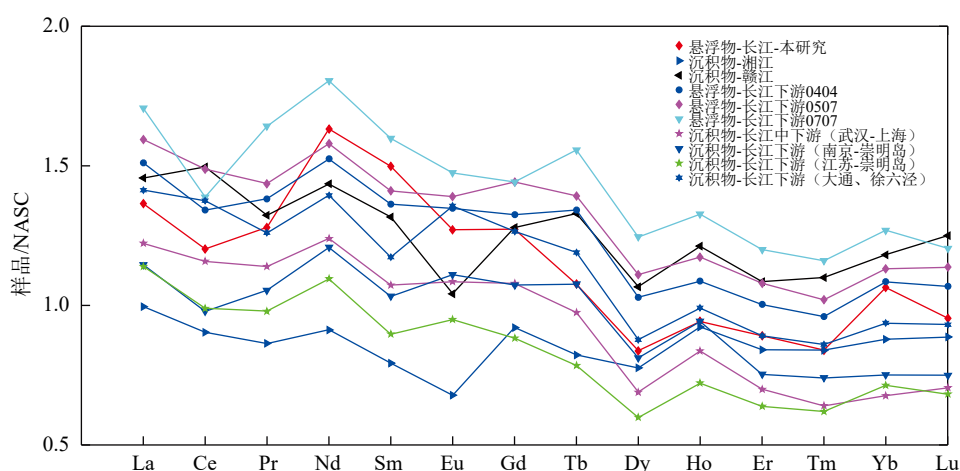


图5 长江悬浮体REE标准化配分模式与前人研究对比

数据来源:长江下游(南京-崇明岛)、长江下游(大通、徐六泾)、长江下游(江苏-崇明岛)和长江中下游(武汉-上海)数据分别来自文献^[13,15,17,47],长江下游0404、长江下游0507、长江下游0707数据来自文献^[35];湘江和赣江沉积物数据来自文献^[21,48]。

Fig.5 NASC-normalized REE patterns of suspended substance of Changjiang River and the comparison to those from previous studies

Data source: data of the lower reaches of Changjiang River: Datong, Xuliujing, Nanjing-Chongming Island, Jiangsu-Chongming Island, and the mid-lower reaches of Changjiang River: Wuhan-Shanghai are from references ^[13,15,17,47]. Data of the lower reaches of Changjiang River: 0404, 0507, 0707 are from reference ^[35]. Data of the Xiangjiang River and the Ganjiang River are from references ^[21,48].

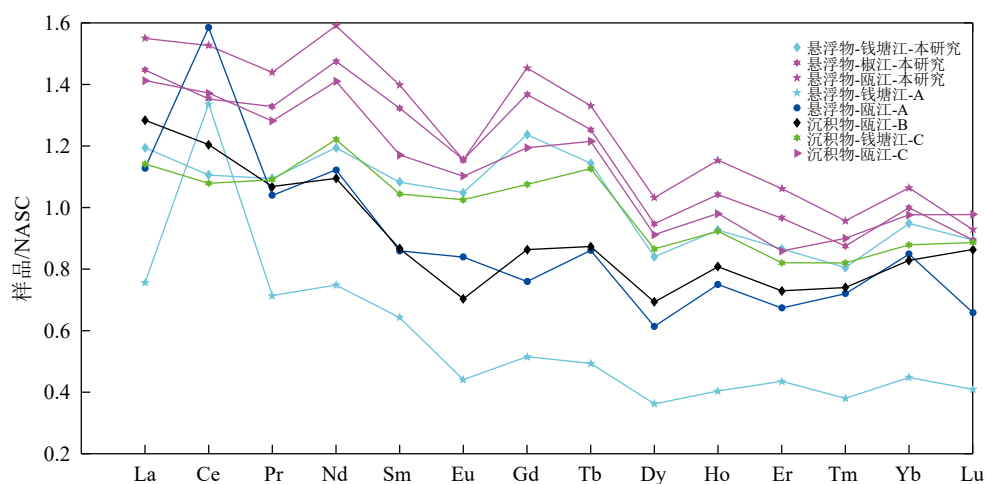


图 6 浙江河流悬浮体 REE 配分模式与前人研究对比

数据来源: 钱塘江-A 和瓯江-A 悬浮物数据来自文献 [34], 瓯江-B 沉积物数据来自文献 [45], 钱塘江-C 和瓯江-C 沉积物数据来自文献 [49]。

Fig.6 Comparison of NASC-normalized patterns of REE in this study and previous studies

Data source: data of the Qiantangjiang-A and Oujiang-A are from reference [34]; Data of the Oujiang-B are from reference [45]; Data of Qiantangjiang-C and Oujiang-C are from reference [49].

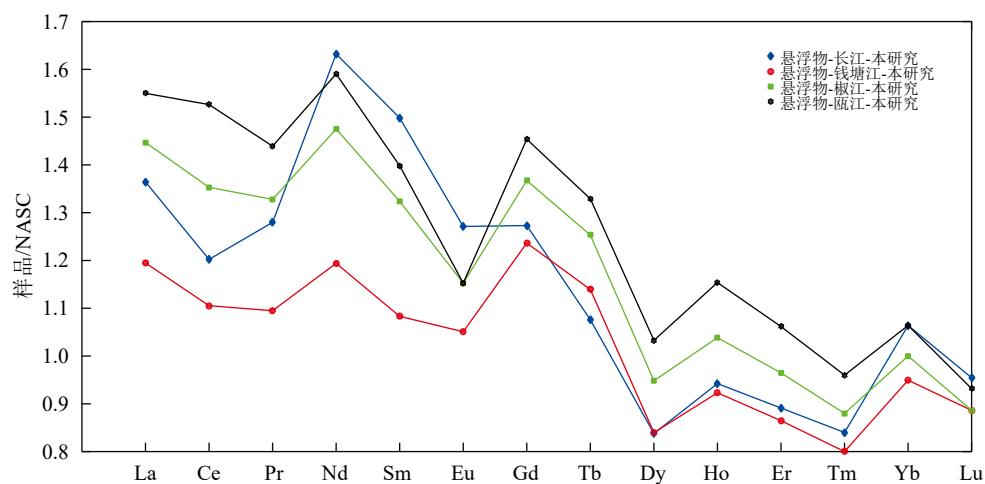


图 7 长江与浙江河流悬浮体 REE 配分模式比较

Fig.7 Comparison of NASC-normalized patterns of REE between the Changjiang River and main rivers in Zhejiang Province

布的延伸方向略有倾斜, 椒江、瓯江的 $(La/Gd)_{NASC}$ 值分布在长江的范围内, 但 $(La/Yb)_{NASC}$ 略大一些, 与长江大致可以在 $(La/Yb)_{NASC}=1.35$ 附近区分开; 椒江和瓯江的 $(La/Yb)_{NASC}$ 比较接近, 但 $(La/Gd)_{NASC}$ 有一些差别, 大致可以在 1.05 附近分开。因此, $(La/Yb)_{NASC}$ 和 $(La/Gd)_{NASC}$ 可用于区分长江、钱塘江、椒江和瓯江端元的指标。

相对而言, 和浙江河流相比, 长江悬浮物在 $(La/Yb)_{NASC}-(La/Gd)_{NASC}$ 图上分布范围明显要大一些, 与长江流域面积大、沿程接纳的支流多有关。但与前人数据比较, 本研究中长江悬浮物 $(La/Yb)_{NASC}$ 、 $(La/Gd)_{NASC}$ 值分布相对更集中(表 5)。如前人数据 $(La/Gd)_{NASC}$ 大致为 0.94~1.41, $(La/Yb)_{NASC}$ 为

0.70~2.37; 本次研究的长江悬浮物 $(La/Gd)_{NASC}$ 和 $(La/Yb)_{NASC}$ 值分别为 0.99~1.16、1.06~1.46, 数据分布更为集中。此处用 $[(La/Gd)_{NASC} \text{ 分布范围} \times (La/Yb)_{NASC} \text{ 分布范围}]$ 来代表分布指数, 可以更好地表述每个数据集的分布范围大小(表 5), 可见本次研究的长江悬浮物采样范围大、站位多, 但数据仍有较好的集中度。因此, 认为用河流悬浮物来研究端元特征会比河漫滩或河床的沉积物更好。

5 结论

(1) 长江、钱塘江、椒江和瓯江悬浮物 ΣREE 含量分别为 176.92~239.53、142.28~187.35、199.14~

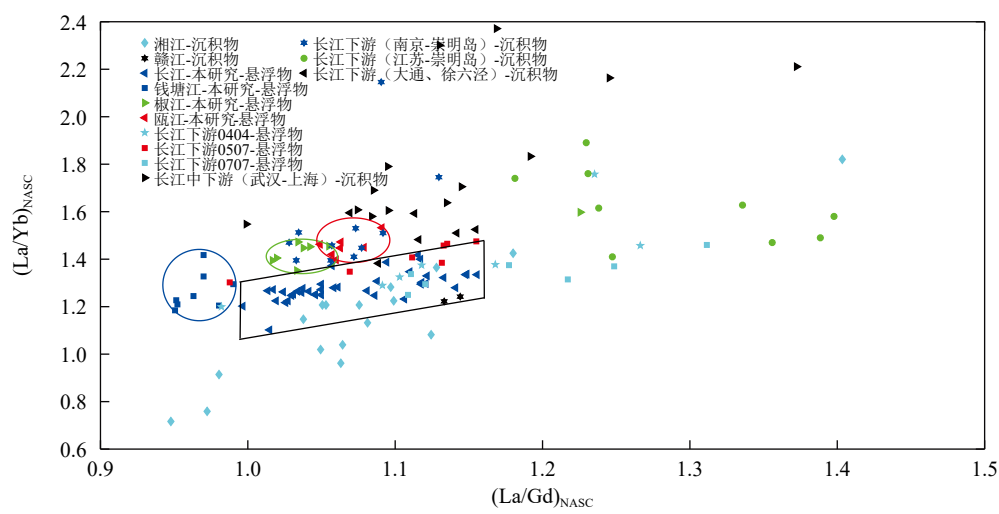


图 8 NASC 标准化典型元素比值图

数据来源: UCC 数据来自文献 [38], 长江下游(南京-崇明岛)、长江下游(大通、徐六泾)、长江下游(江苏-崇明岛)和长江中下游(武汉-上海)数据分别来自文献 [13, 15,17,47], 长江下游 0404、长江下游 0507、长江下游 0707 数据来自文献 [35]; 湘江悬浮物数据来自文献 [50], 湘江和赣江沉积物数据来自文献 [21,48]。

Fig.8 The NASC-normalized typical parameters of REEs

Data sources: UCC data are from reference [38]; the lower reaches of Changjiang River: Datong, Xuliujing, Nanjing-Chongming, and Jiangsu–Chongming Island; and the mid-lower reaches of Changjiang River: Wuhan–Shanghai are from references [13, 15,17,47]; lower reached of Changjiang River: 0404, 0507, 0707 are from reference [35]; suspended substance of the Xiangjiang River are from reference [50]; sediments of Xiangjiang River and Ganjiang River are from references [21,48].

表 5 长江各数据集稀土元素分布指数

Table 5 Distribution range of REE in different data sets of the Yangtze River

数据集	分布指数	站位数
悬浮物-本研究	0.050	39
悬浮物-0404	0.271	17
悬浮物-0507	0.104	24
悬浮物-0707	0.234	25
湘江沉积物	0.503	16
沉积物（武汉-上海）	0.308	13
沉积物（崇明岛-江苏）	0.104	10
沉积物（大通、徐六泾）	0.018	6

注：分布指数 = (La/Gd)_{NASC}分布范围 × (La/Yb)_{NASC}分布范围。数据来源同图8。

242.06 和 212.99~280.60 mg/kg。钱塘江和瓯江的 REE 含量高于前人数据。

(2)球粒陨石标准化配分曲线以右倾“V”字型为主,整体表现出轻稀土相对富集、重稀土相对亏损、明显 Eu 负异常、弱 Ce 正异常的特征。NASC 标准化后配分曲线总体向右倾,和前人研究的长江沉积物/悬浮物表现总体一致。(La/Yb)_{NASC} 比值和

(La/Gd)_{NASC} 比值可以较好地地区分长江、钱塘江、椒江和瓯江来源的悬浮物。
(3)与河流沉积物相比,悬浮物 REE 数据分布范围更为集中,更适合于研究河流端元特征。

参考文献 (References)

[1] Milliman J D, Meade R H. World-wide delivery of river sediment to the oceans[J]. [The Journal of Geology](#), 1983, 91(1): 1-21.

[2] Walling D E, Fang D. Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers[J]. [Global and Planetary Change](#), 2003, 39(1-2): 111-126.

[3] Syvitski J P M, Kettner A. Sediment flux and the Anthropocene[J]. [Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences](#), 2011, 369(1938): 957-975.

[4] Raymo M E, Ruddiman W F. Tectonic forcing of late Cenozoic climate[J]. [Nature](#), 1992, 359(6391): 117-122.

[5] Galy V, France-Lanord C, Beyssac O, et al. Efficient organic carbon burial in the Bengal fan sustained by the Himalayan erosional system[J]. [Nature](#), 2007, 450(7168): 407-410.

[6] Chakrapani G J, Saini R K, Yadav S K. Chemical weathering rates in the Alaknanda–Bhagirathi River basins in Himalayas, India[J]. [Journal of Asian Earth Sciences](#), 2009, 34(3): 347-362.

[7] Liu S F, Mi B B, Fang X S, et al. A preliminary study of a sediment core drilled from the mud area on the inner shelf of the East China Sea:

- Implications for paleoclimatic changes during the fast transgression period (13-8 kaBP)[J]. *Quaternary International*, 2017, 441: 35-50.
- [8] Liu X T, Li A C, Dong J, et al. Provenance discrimination of sediments in the Zhejiang-Fujian mud belt, East China Sea: Implications for the development of the mud depocenter[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 151: 1-15.
- [9] 张宏飞, 高山. 地球化学 [M]. 北京: 地质出版社, 2012: 1-410. [ZHANG Hongfei, GAO Shan. *Geochemistry*[M]. Beijing: Geology Press, 2012: 1-410.]
- [10] Yang B Y, Hu B, Bao Z Y, et al. REE geochemical characteristics and depositional environment of the black shale-hosted Baiguoyuan Ag-V deposit in Xingshan, Hubei Province, China[J]. *Journal of Rare Earths*, 2011, 29(5): 499-506.
- [11] 杨守业, 李从先. REE 示踪沉积物物源研究进展 [J]. *地球科学进展*, 1999, 14(2): 164-167. [YANG Shouye, LI Congxian. Research progress in REE tracer for sediment source[J]. *Advances in Earth Science*, 1999, 14(2): 164-167.]
- [12] 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.
- [13] 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 [J]. *科学通报*, 2003, 48(11): 1233-1236. [YANG S Y, LI C X, 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.]
- [14] 杨守业, 李从先. 长江与黄河沉积物元素组成及地质背景 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1999, 19(2): 19-26. [YANG Shouye, LI Congxian. Characteristic element compositions of the Yangtze and the yellow river sediments and their geological background[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1999, 19(2): 19-26.]
- [15] Zhou X J, Li A C, Jiang F Q, et al. A preliminary study on fingerprinting approach in marine sediment dynamics with the rare earth elements[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2010, 29(4): 62-77.
- [16] 乔淑卿, 杨作升. 长江和黄河入海沉积物不同粒级组分中稀土元素的比较 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2007, 27(6): 9-16. [QIAO Shuqing, YANG Zuosheng. Comparison of rare earth element compositions in different grain-size fractions of sediments from the Yangtze and yellow rivers and the sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2007, 27(6): 9-16.]
- [17] Wu W H, Zheng H B, Xu S J, et al. Trace element geochemistry of riverbed and suspended sediments in the upper Yangtze River[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2013, 124: 67-78.
- [18] 杨守业, 王中波. 长江主要支流与干流沉积物的 REE 组成 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2011, 30(1): 31-39. [YANG Shouye, WANG Zhongbo. Rare Earth element compositions of the sediments from the major tributaries and the main stream of the Changjiang River[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2011, 30(1): 31-39.]
- [19] 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 [J]. *第四纪研究*, 2007, 27(3): 339-346. [YANG Shouye, WEI Gangjian, XIA Xiaoping, et al. Provenance study of the late Cenozoic sediments in the Changjiang Delta: REE and Nd isotopic constraints[J]. *Quaternary Sciences*, 2007, 27(3): 339-346.]
- [20] Mao L J, Mo D W, Yang J H, et al. Rare earth elements geochemistry in surface floodplain sediments from the Xiangjiang River, middle reach of Changjiang River, China[J]. *Quaternary International*, 2014, 336: 80-88.
- [21] Nilsson C, Reidy C A, Dynesius M, et al. Fragmentation and flow regulation of the world's large river systems[J]. *Science*, 2005, 308(5720): 405-408.
- [22] Wang S, Rao W B, Qian J, et al. Sr-Nd isotope and REE compositions of surface sediments from the three Gorges Reservoir: Implications for source identification and apportionment[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 598: 126279.
- [23] Zhao Y F, Zou X Q, Gao J H, et al. Clay mineralogy and source-to-sink transport processes of Changjiang River sediments in the estuarine and inner shelf areas of the East China Sea[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 152: 91-102.
- [24] McLennan S M. Rare earth elements in sedimentary rocks: influence of provenance and sedimentary processes[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 1989, 21(1): 169-200.
- [25] Cullers R L, Barrett T, Carlson R, et al. Rare-earth element and mineralogic changes in Holocene soil and stream sediment: A case study in the Wet Mountains, Colorado, U. S. A.[J]. *Chemical Geology*, 1987, 63(3-4): 275-297.
- [26] 郭晶晶, 夏学齐, 杨忠芳, 等. 长江流域典型区域土壤碳库变化及其影响因素 [J]. *地学前缘*, 2015, 22(6): 241-250. [GUO Jingjing, XIA Xueqi, YANG Zhongfang, et al. Changes of soil carbon pool in typical areas of Changjiang drainage basin and its influencing factors[J]. *Earth Science Frontiers*, 2015, 22(6): 241-250.]
- [27] 中华人民共和国水利部. 中国水文年报 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2022. [Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. *Annual Hydrological Report of China*[M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2022.]
- [28] 中华人民共和国水利部. 中国河流泥沙公报 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2021. [Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. *China River Sediment Bulletin*[M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2021.]
- [29] 长江水利委员会. 长江流域地图集 [M]. 北京: 中国地图出版社, 1999. [Yangtze River Water Resources Commission. *Atlas of the Yangtze River Basin*[M]. Beijing: China Map Press, 1999.]
- [30] 马丽芳. 中国地质图集 [M]. 北京: 地质出版社, 2002. [MA Lifang. *Geological Atlas of China*[M]. Beijing: Geological Press, 2002.]
- [31] 浙江省地质矿产局. 浙江省区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社, 1989. [Zhejiang Bureau of Geology and Minerals. *Regional Geological Records of Zhejiang Province*[M]. Beijing: Geological Press, 1989.]
- [32] McManus J. Grain size determination and interpretation[M]//Tucker M E. *Techniques in Sedimentology*. Oxford: Wiley Blackwell, 1988.
- [33] 何荣. 从流域到东海近岸重金属输送的初步研究 [D]. 华东师范大学硕士学位论文, 2011. [HE Rong. Preliminary study on the transport of heavy metals from river basin to the coastal shelf of East China Sea[D]. Master Dissertation of East China Normal University, 2011.]
- [34] 丁梯平, 高建飞, 石国钰, 等. 长江水中悬浮物含量与矿物和化学组

- 成及其地质环境意义[J]. *地质学报*, 2013, 87(5): 634-660. [DING Tiping, GAO Jianfei, SHI Guoyu, et al. The contents and mineral and chemical compositions of suspended particulate materials in the Yangtze river, and their geological and environmental implications[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2013, 87(5): 634-660.]
- [35] Goldstein S J, Jacobsen S B. Rare earth elements in river waters[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1988, 89(1): 35-47.
- [36] 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. [YANG Shouye, LI Congxian. REE geochemistry and tracing application in the Yangtze River and the Yellow River sediments[J]. *Geochimica*, 1999, 28(4): 374-380.]
- [37] Taylor S R, McLennan S M. The Continental Crust: its Composition and Evolution. An Examination of the Geochemical Record Preserved in Sedimentary Rocks[M]. Oxford: Blackwell Scientific Pub, 1985.
- [38] 高志友. 南海表层沉积物地球化学特征及物源指示[D]. 成都理工大学博士学位论文, 2005. [GAO Zhiyou. The geochemical characteristics and provenance of the surface sediment in south China sea[D]. Doctor Dissertation of Chengdu University of Technology, 2005.]
- [39] Caggianelli A, Fiore S, Mongelli G, et al. REE distribution in the clay fraction of pelites from the southern Apennines, Italy[J]. *Chemical Geology*, 1992, 99(4): 253-263.
- [40] Henderson P. Rare Earth Element Geochemistry[M]. Amsterdam: Elsevier, 1984.
- [41] 沙旭光. 东海舟山群岛海域泥质沉积特征和物源分析[D]. 吉林大学硕士学位论文, 2006. [SHA Xuguang. Sedimentary characteristics and provenance of the mud sediments in the Zhoushan area of the East China Sea[D]. Master Dissertation of Jilin University, 2006.]
- [42] 毛龙江, 郭爱鹏, 杜吉净, 等. 湖南澧水下游表层沉积物稀土元素特征[J]. *地球科学与环境学报*, 2019, 41(3): 352-361. [MAO Longjiang, GUO Aipeng, DU Jijing, et al. REE characteristics of the surface sediments in the lower reaches of Lishui river, Hunan, China[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2019, 41(3): 352-361.]
- [43] 李波, 孙桂华, 钟和贤, 等. 福建近岸海域表层沉积物稀土元素地球化学特征及其物源指示意义[J]. *海洋地质前沿*, 2017, 33(8): 47-56. [LI Bo, SUN Guihua, ZHONG Hexian, et al. Rare earth element characteristics of surface sediments in the Fujian coastal area and their implications for provenance[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2017, 33(8): 47-56.]
- [44] 宁泽, 韩宗珠, 毕世普, 等. 浙闽近岸海域表层沉积物稀土元素的物源指示[J]. *海洋地质前沿*, 2018, 34(8): 34-44. [NING Ze, HAN Zongzhu, BI Shipu, et al. Rare earth geochemistry of coastal surficial sediments off Zhejiang and Fujian provinces and its implications for provenance[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2018, 34(8): 34-44.]
- [45] 迟清华, 鄢明才. 应用地球化学元素丰度数据手册[M]. 北京: 地质出版社, 2007. [CHI Qinghua, YAN Mingcai. Handbook of Elemental Abundance for Applied Geochemistry[M]. Beijing: Geology Press, 2007.]
- [46] 宫传东, 戴慧敏, 杨作升, 等. 长江沉积物稀土元素的粒度效应研究[J]. *地质学刊*, 2012, 36(4): 349-354. [GONG Chuandong, DAI Huimin, YANG Zuosheng, et al. Study of granularity effects of rare earth elements in the sediments of Yangtze River[J]. *Journal of Geology*, 2012, 36(4): 349-354.]
- [47] 刘茂涵, 戴慧敏, 张卫民, 等. 鄱阳湖流域赣江北支水体和沉积物中稀土元素的含量和分异特征[J]. *现代地质*, 2022, 36(2): 389-405. [LIU Maohan, DAI Huimin, ZHANG Weimin, et al. REE Concentration and fractionation in waters and sediments from the northern Branch of Ganjiang river, Poyang lake catchment[J]. *Geoscience*, 2022, 36(2): 389-405.]
- [48] Jiang F Q, Zhou X J, Li A C, et al. Quantitatively distinguishing sediments from the Yangtze River and the Yellow River using δEu_N - ΣREEs plot[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2009, 52(2): 232-241.
- [49] 龚玲兰, 奚小双, 孔华, 等. 湘江悬浮物的稀土元素地球化学研究[J]. *沉积学报*, 2009, 27(3): 529-536. [GONG Linglan, XI Xiaoshuang, KONG Hua, et al. Geochemistry of rare earth elements in the suspended particulate matters of Xiangjiang river[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(3): 529-536.]
- [50] 陈道公, 支霞臣, 杨海涛. 地球化学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2018: 207. [CHEN Daogong, ZHI Xiachen, YANG Haitao. Geochemistry[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2018: 207.]