

江汉盆地周缘主要河流沉积物碎屑磷灰石的微量元素特征及其物源判别指标分析

苏建超¹⁾, 李长安¹⁾, 吴中海²⁾, 林旭^{3)*}, 李亚伟¹⁾, 郭汝军¹⁾

1) 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 湖北武汉 430074;

2) 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;

3) 三峡大学土木与建筑学院, 湖北宜昌 443002

摘要: 江汉盆地堆积的沉积物记录了长江演化的地质信息, 一直是长江演化研究的热点, 但目前的物源示踪方法存在诸多争议, 因此寻找新的物源示踪指标是研究的重点。磷灰石是河流沉积物中常见的副矿物, 其微量元素主要受原岩组成的影响而具有良好的稳定性, 在不同构造单元差异明显, 是开展河流物源示踪研究的理想指示矿物。基于此, 本文利用激光剥蚀电感耦合等离子质谱(LA-ICP-MS)对江汉盆地周缘主要地表河流沉积物进行碎屑磷灰石原位微量元素分析, 并结合 Kolmogorov-Smirnov 统计方法的多维判别(MDS)图解寻找区分长江上游与中游物源的新指标, 并检验了特征元素指标在物源判别中的有效性。结果表明碎屑磷灰石的 Sr/Y 比值及 Nd-Sm、Sm-Eu、Eu-Gd、La/Yb-La/Sm 的微量元素双变量图解能有效区分长江上游和中游(汉江、湘江、沅江)的物源, 可作为区分长江上游与中游物源的重要特征指标。综合研究认为: 河流沉积物碎屑磷灰石的微量元素比值和稀土元素分布特征在贯通大河的物源示踪研究中具有重大潜力。

关键词: 江汉盆地; 河流沉积物; 碎屑磷灰石; 微量元素; 物源判别指标

中图分类号: P595; P588.21 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2021.033101

Detrital Apatite Trace Element Characteristics of Main Rivers around Jiangnan Basin and an Analysis of Their Provenance Discriminant Indicators

SU Jian-chao¹⁾, LI Chang-an¹⁾, WU Zhong-hai²⁾, LIN Xu^{3)*}, LI Ya-wei¹⁾, GUO Ru-jun¹⁾

1) School of Earth Sciences, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074;

2) Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081;

3) College of Civil Engineering and Architecture, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002

Abstract: Sediments deposited in the Jiangnan Basin record important information about the formation and evolution of the Yangtze River, and hence the provenance tracer of detrital materials in the basin has always been a hot topic, but the timing of the cutting through the Yangtze River is still inconclusive. Apatite is a common accessory mineral in fluvial sediments, and trace elements of apatite are mainly affected by their source rocks and significant differences in the trace elements of apatite existent in different regions, so it can be used as a good indicator of source minerals. On such a basis, the authors used the laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS) in combination with the multi-dimensional identification (MDS) of statistical method to systematically analyze new indicator so as to distinguish the provenance of the upper and middle reaches of the Yangtze River; the MDS diagram also verifies the rationality of the characteristic elements indicators. The results indicate that the Sr/Y ratio of detrital apatite can be used to distinguish the provenance of Hanjiang River, Yuanjiang River, Xiangjiang River and main stream of the Yangtze River in the study area. The bivariate diagrams of trace

本文由国家自然科学基金项目(编号: 41671011; 41877292; 41972212)资助。

收稿日期: 2021-01-07; 改回日期: 2021-03-24; 网络首发日期: 2021-03-31。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 苏建超, 男, 1992年生。博士研究生。第四纪地质学专业。通讯地址: 430074, 武汉市洪山区鲁磨路388号。

E-mail: 714726710@qq.com。

*通讯作者: 林旭, 男, 1984年生。博士, 副教授。主要从事大河物源示踪研究。E-mail: hanwujilife@163.com。

elements of Nd-Sm, Sm-Eu, Eu-Gd and La/Yb-La/Sm can effectively distinguish the provenance of the upper and middle reaches of the Yangtze River. On the whole, the trace element ratio diagram and distribution characteristics of REE have great potential in the study of provenance tracer in large rivers.

Key words: Jiangnan Basin; modern sediments; detrital apatite; trace element; provenance discriminant indicators

河流是陆源碎屑物质从源区搬运至沉积区的主要通道,是构造造山带与沉积盆地物质联系和循环的纽带(李长安等, 2000; 杨守业, 2006; 林旭等, 2017),对河流沉积物的物源示踪研究是讨论贯通大河演化和盆-山耦合关系的重要方法(Clark et al., 2004; Clift et al., 2008; Zheng et al., 2013; Wissink et al., 2016; 林旭等, 2020)。长江发源于青藏高原,长 6300 km,流域面积 180 万 km²,连接了世界上海拔最高的高原(青藏高原)和流域最广的大洋(太平洋),是东亚第一大河,一直是河流沉积物物源示踪研究的热点与争议地区(李长安, 1998; 何梦颖等, 2013; Zheng et al., 2020; Jiang et al., 2020)。江汉盆地位于长江中游,是长江切穿三峡后东流的第一个大型卸载盆地,随着造山带不断隆升剥蚀,盆地周缘发育广泛的水系将碎屑物质搬运至盆地内沉积,记录了长江演化的重要地质信息(Shen et al., 2012; Zheng et al., 2013; Wang et al., 2018; 林旭和刘静, 2019)。因而,江汉盆地周缘主要河流沉积物的物源示踪研究对分析沉积物的剥蚀搬运、江汉盆地地貌演化及长江的形成演化过程均具有重要意义。

前人采用多种方法对江汉盆地及其周缘河流沉积物开展物源示踪研究,例如锆石 U-Pb(向芳等, 2006; 王节涛等, 2009; Yang et al., 2019)、白云母 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄谱对比(Sun et al., 2020a)、钾长石 Pb 同位素分析(Zhang et al., 2016)、重矿物组合(康春国等, 2014; Wei et al., 2020a)、Nd 同位素比值分析(Yang et al., 2002; Shao et al., 2012)、环境磁学(Zhang et al., 2008)、石英 ESR 法物源示踪(Wei et al., 2020b)等。由于注入江汉盆地的河流水系庞杂,流域广泛,岩性与构造情况复杂,以及研究手段的局限性,关于理想的物源示踪方法依然存在诸多争议,因此探索新的河流物源示踪方法并寻找有效的特征指标是研究的重点问题。

磷灰石作为碎屑沉积岩中常见的重矿物广泛分布于河流沉积物中,富集 Sr、Y 和稀土元素(REE)等不相容元素,其微量元素主要受原岩组成的影响,不同物源区的磷灰石微量元素差异明显,因而是良好的物源指示矿物(Taylor et al., 1985; Fleet et al., 1995; Belousova et al., 2002; Chakrapani et al., 2005; Foster et al., 2007)。近年来利用碎屑磷灰石地球化学的方法开展物源判别的研究已逐渐成为热点并且已经成功运用在:三江造山带、长江上游地区、渤

海湾盆地、波河(Pan et al., 2016; Malusa et al., 2017; Deng et al., 2018; O'Sullivan et al., 2020; 刘海金等, 2021; 林旭等, 2021),但针对江汉盆地周缘河流的相关研究尚未开展。基于此,本文有代表性地选取了长江干流宜昌和一级支流:汉江、沅江、湘江的现代碎屑沉积物,其中宜昌的样品代表长江上游水系的物源信息,而汉江、沅江、湘江的样品代表长江中游水系的物源信息,对样品的磷灰石微量元素数据进行分析,寻找能区分长江上游与中游物源的特征元素组合,以期为长江上游与中游水系的连接提供物源判别的新指标,为磷灰石的物源示踪研究在江汉盆地的运用提供科学依据。

1 地质背景

江汉盆地位于湖北省中南部(图 1),地处长江中游和汉江下游,地理坐标在 29°26'—30°23'N, 111°30'—114°32'E 之间,面积约 30 000 km²。江汉盆地四面环山,盆地北面由桐柏山和大别山构成其北部边界,西南方向分布有武陵山和雪峰山,东南方向分布有幕府山,盆地中部地势平坦,主要为

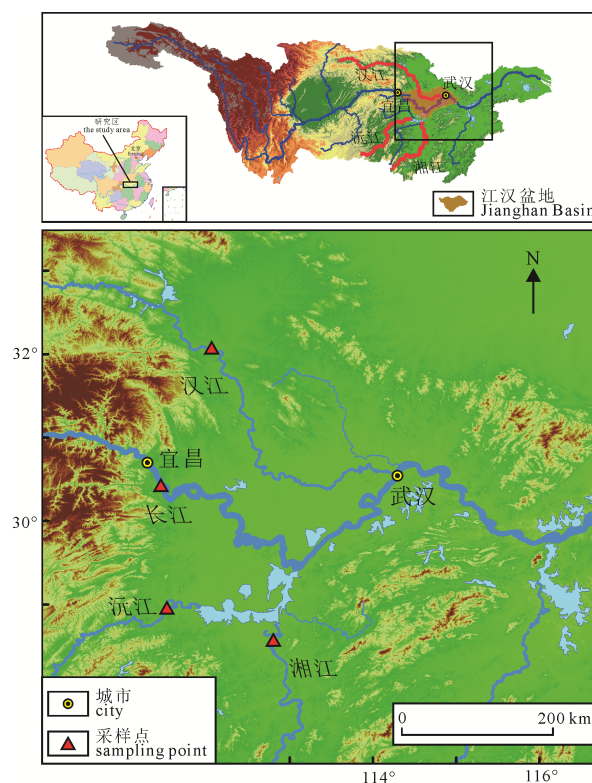


图 1 江汉盆地周缘河流分布及采样点位置
Fig. 1 Location of the adjacent rivers and sampling sites around Jiangnan Basin

平原地貌(Liu et al., 2005; 林旭和刘静, 2019)。晚三叠纪以来, 扬子板块与华北板块的碰撞拼合奠定了上扬子板块江汉盆地周缘的古地理格局, 自白垩纪开始, 江汉盆地受 NW 和 NE 向断裂控制, 持续断陷至今(Liu et al., 2013)。

江汉盆地周缘水系发育广泛, 长江切穿三峡后, 自西向东横贯江汉盆地, 长江干流及其中游水系汇入盆地形成一个典型的向心状河流系统, 中游水系主要包括北边的汉江水系和南边的洞庭湖水系, 从长江上游及汉江、沅江、湘江等支流搬运而来的大量沉积物在盆地持续堆积, 这些沉积物为研究长江演化及物源示踪提供了重要的物质基础。长江上游主要流经羌塘地块、松潘甘孜褶皱带、扬子地块; 汉江是长江最大支流, 全长 1577 km, 流域面积 $1.59 \times 10^5 \text{ km}^2$, 起源于秦岭南麓, 其流域主体在秦岭一大别造山带, 其输沙量为 $3.7 \times 10^6 \text{ t}$; 沅江和湘江同属洞庭湖水系, 其流域主体在华夏地块和扬子地块东部。沅江干流全长 1033 km, 流域面积 $8.9 \times 10^4 \text{ km}^2$, 其输沙量为 $1.31 \times 10^6 \text{ t}$; 湘江干流全长 844 km, 流域面积 $9.4 \times 10^4 \text{ km}^2$, 输沙量为 $4.95 \times 10^6 \text{ t}$ 。

2 样品采集与分析方法

2.1 样品采集

本文选取了江汉盆地周缘流域广泛, 输沙量较大的长江干流及长江中游支流汉江、沅江、湘江的河漫滩沉积物进行研究, 江汉平原周缘河流分布和采样点位置如上(图 1)。为了保证所取样品的代表性, 所有样品均取自相同时段及微地貌位置: 既相对开阔平直的河段, 在靠近现代河床新鲜出露的河漫滩顶部向下 5~15 cm 处均匀取样, 每个样品重 3~5 kg, 并进行双份采集。

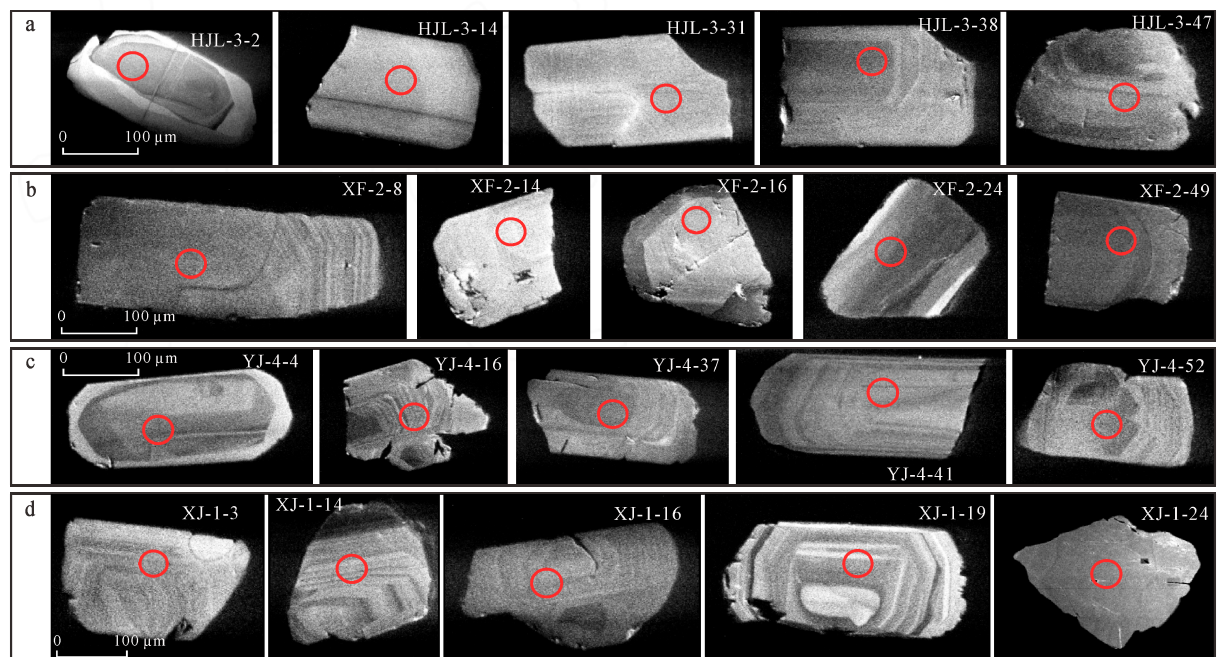
本次研究通过 LA-ICP-MS 测得江汉平原周缘几条河流及长江干流共 4 件碎屑沉积物样品共计 202 颗碎屑磷灰石, 具体采样点数据详见表 1。

2.2 样品分析

对采集的河流碎屑砂样进行重砂分析、磁性分选, 提取出所需磷灰石, 并在双目显微镜下进行提纯, 剔除其杂质矿物。每个样品随机分选出单颗磷灰石, 制成环氧树脂靶, 经过表面抛光处理后拍摄其透射光、反射光照片和阴极发光图像, 见图 2。

表 1 样品采集点信息
Table 1 Collected sampling point information

样品号	河流	地点	纬度(N)	经度(E)	颗粒数
HJL-3	长江	宜昌市宜都县	30°15'17"	111°41'20"	60
XF-2	汉江	襄阳市樊城区	32°05'43"	111°58'18"	60
YJ-4	沅江	常德市武陵区	28°59'38"	111°38'27"	57
XJ-1	湘江	郴州市宜章县	28°38'30"	112°50'29"	25



a—长江; b—汉江; c—沅江; d—湘江。

a—main stream of the Yangtze River; b—Hanjiang River; c—Yuanjiang River; d—Xiangjiang River.

图 2 单颗粒磷灰石的 CL 图像

Fig. 2 CL images of single particle apatite

其中红圈为镜下束斑,大部分晶体呈次滚圆粒状和枣核状;少部分为次棱角方块状,粒径在0.15~0.30 mm之间,少数磷灰石晶体内有小包裹体,选择合适点位并避开裂隙与包裹体以提高分析精度。

其中样品的处理和磷灰石矿物颗粒挑选在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室进行。沉积物样品经冷冻干燥后,在玛瑙研钵中研磨至200目后烘箱烘干,称取0.05 g样品置于Teflon溶样罐中,加适量高纯水润湿样品,作流程空白后每个溶样罐中加入1.50 mL高纯HNO₃和1.50 mL高纯HF,置于烘箱中195℃下溶样48 h以上,冷却后置于电热板上蒸至湿盐状,先加入1 mL HNO₃蒸干除去残余的HF,再加入3 mL 50%的HNO₃和0.5 mL内标溶液,置于烘箱150℃下继续溶样8 h以上,保证对样品的完全提取,最后将溶液转入聚乙烯料瓶中加入2% HNO₃,稀释至100 g后进行上机测试。

微量元素含量测试在武汉上谱分析科技有限责任公司完成,仪器为LA-ICP-MS,激光剥蚀系统为GeoLas HD,等离子体质谱仪型号为Agilent 7900,激光能量80 mJ,频率5 Hz,激光束斑直径44 μm。具体分析条件及流程详见文献Liu et al.(2008)。碎屑磷灰石微量元素测定时通过玻璃标准物质BHVO-2G, BCR-2G和BIR-1G进行多外标无内标校正,每个时间分辨分析数据包括大约20~30 s空白信号和50 s样品信号。所测微量元素的线性较好,分析误差基本都5%,相同样品测试结果一致,结果准确可信,各测试样品数据取3次测定平均值。分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正以及元素含量计算)采用软件ICPMS Data Cal(Hu et al., 2015)完成。分析得到的地化数据利用Kolmogorov-Smirnov(K-S)统计方法(Vermeesch et al., 2016)的多维判别图(MDS)辅助判断,通过对比4条河流的特征元素的远近距离关系来评估各条河流之间的相关性。

3 数据结果

3.1 微量元素

研究区的4条河流碎屑磷灰石微量元素主要由Sr、Ga、Zr、Th、U、Y等元素组成,其中Sr含量最为丰富,其次为Y,其他微量元素含量极少缺乏参考价值,因而不统计。综合4条河流的Sr、Y数据:长江干流的碎屑磷灰石的Sr元素平均含量为1023.9×10⁻⁶,分布范围为55.7×10⁻⁶~4060.6×10⁻⁶,Y元素平均含量为546.1×10⁻⁶,分布范围为

35.0×10⁻⁶~2218.4×10⁻⁶;汉江的碎屑磷灰石Sr元素平均含量为497.5×10⁻⁶,分布范围为77.0×10⁻⁶~3767.6×10⁻⁶,Y元素的平均含量为1127.5×10⁻⁶,分布范围为34.5×10⁻⁶~4625.5×10⁻⁶;沅江的碎屑磷灰石Sr元素平均含量为742.8×10⁻⁶,分布范围为29.1×10⁻⁶~6200.4×10⁻⁶,Y元素的平均含量为1448.9×10⁻⁶,其分布范围为0.7×10⁻⁶~3717.5×10⁻⁶;湘江的碎屑磷灰石Sr元素平均含量为550.3×10⁻⁶,分布范围为30.3×10⁻⁶~3135.2×10⁻⁶,Y元素的平均含量为1208.9×10⁻⁶,分布范围为6.7×10⁻⁶~4475.1×10⁻⁶。做出4条河流Sr、Y含量柱状图如图3,分析数据得知只有长江干流的碎屑沉积物的Sr含量高于Y, Sr/Y大于1;其他三条河流碎屑沉积物则相反, Sr含量低于Y, Sr/Y小于1。

3.2 稀土元素

实验测得数据计算可知4条河流的ΣREE:长江干流样品的平均值为2225.5×10⁻⁶,其分布范围为105.2×10⁻⁶~9767.6×10⁻⁶;汉江的平均值为2347.8×10⁻⁶,其分布范围为202.0×10⁻⁶~5224.1×10⁻⁶;沅江的平均值为3752.2×10⁻⁶,其分布范围为1028.1×10⁻⁶~9145.6×10⁻⁶;湘江的平均值为2529.1×10⁻⁶,其分布范围为27.0×10⁻⁶~8246.7×10⁻⁶。4条河流具体的稀土元素数据见表2。

根据其物理化学性质稀土元素又分为轻稀土(LREE: La~Eu)和重稀土(HREE: Gd~Lu)元素,4条河流LREE/HREE的平均值分别是:长江干流样品(5.54)、汉江(3.86)、沅江(2.66)、湘江(2.14)。

分析数据得知4条河流基本都呈现了不同程度的Eu负异常,而无明显的Ce异常。将数据进行球粒陨石标准化处理,计算出四条河流的δEu的值分别为:长江为0.52,汉江为0.47,沅江为0.23,湘江为0.16。

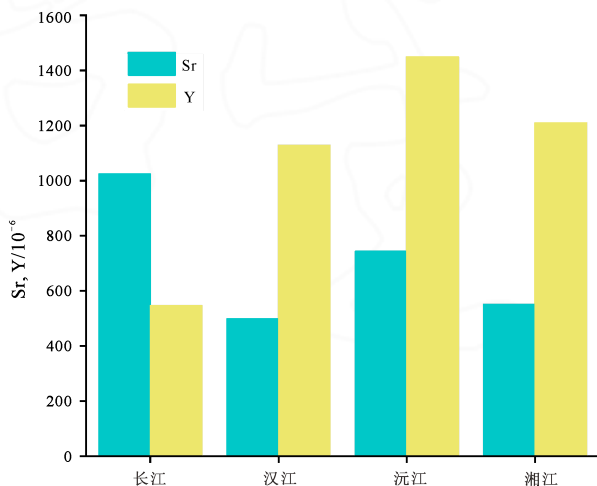


图3 河流碎屑沉积物的Sr、Y平均含量
Fig. 3 Average Sr and Y element content in detrital fluvial sediments

表 2 江汉盆地地表河流稀土元素数据统计表
Table 2 Statistical table of trace elements in detrital rivers around the Jiangnan Basin

	长江干流			汉江			沅江			湘江		
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
La	2 890.65	0.09	369.58	2 480.11	5.59	401.06	3 484.40	2.23	374.15	1 299.77	0.17	215.94
Ce	5 796.86	0.40	857.43	4 754.27	19.50	996.50	5 390.14	16.83	1 018.14	3 616.67	0.45	669.67
Pr	637.22	0.11	109.88	459.20	4.03	136.11	515.47	3.24	153.02	467.10	0.10	103.02
Nd	2 666.47	1.63	504.26	1 962.49	25.42	634.65	2 243.10	21.74	775.13	1 924.84	0.90	505.96
Sm	493.27	1.61	124.00	498.98	10.80	164.58	1 176.00	9.81	257.56	551.07	0.41	179.31
Eu	93.24	0.13	20.39	126.22	2.83	26.46	318.98	2.31	23.38	40.74	0.24	11.39
Gd	541.02	4.31	126.59	639.70	8.49	189.18	1 065.09	16.10	311.81	689.27	1.02	224.10
Tb	76.21	0.69	18.78	130.70	1.01	29.27	172.02	2.56	47.91	134.80	0.17	38.98
Dy	400.34	4.51	100.91	862.41	5.69	167.81	1 112.05	18.67	302.69	817.71	0.84	238.21
Ho	78.47	0.90	19.09	163.92	1.14	32.20	180.52	1.61	52.58	143.94	0.22	41.34
Er	216.45	2.34	49.14	454.91	2.94	85.53	432.05	1.95	141.09	411.84	0.61	110.39
Tm	28.68	0.25	6.00	66.64	0.38	11.07	46.48	0.12	17.79	57.39	0.16	13.99
Yb	186.25	1.26	39.01	437.05	2.80	63.01	309.20	0.36	113.93	376.24	1.43	86.77
Lu	22.70	0.10	5.06	72.83	0.27	8.90	40.75	0.04	14.63	53.46	0.30	12.25
ΣREE	14 127.84	18.32	2 225.51	13 109.43	90.88	2 347.77	16 486.27	97.58	3 752.16	10 584.84	7.01	2 529.08
LREE	12 577.72	3.98	1 884.98	10 281.28	68.17	1 864.44	13 128.10	56.16	2 728.02	7 900.18	2.27	1 724.37
HREE	1 550.13	14.34	340.53	2 828.15	22.71	483.33	3 358.17	41.42	1 024.13	2 684.66	4.74	804.71
LREE/ HREE	8.11	0.28	5.54	3.64	3.00	3.86	3.91	1.36	2.66	2.94	0.48	2.14
La _N /Yb _N	1.14	0.01	0.69	0.42	0.15	0.47	0.83	0.45	0.24	0.25	0.01	0.18
δEu	0.84	0.20	0.52	1.03	1.39	0.47	1.34	0.82	0.23	0.30	1.51	0.16
δCe	0.97	0.68	0.93	1.01	0.81	0.95	0.98	0.84	0.91	1.04	0.74	0.88

4 讨论

江汉盆地周缘水系分布复杂, 沉积物在盆地内堆积并保存良好, 这种多物源的沉积区是研究河流碎屑物质搬运和盆地沉积关系的良好场所, 寻找合适的特征指标就成为开展河流沉积物物源示踪研究的关键因素。长江水系流经不同构造单元, 其经历不同的构造事件和气候影响, 各种碎屑矿物所携带的物源信号也就各不相同(Zheng et al., 2013; Zhang et al., 2016; Sun et al., 2020b, 2021)。已有研究表明碎屑磷灰石微量元素及其比值的双变量图解常被用来判断源岩的类型及化学风化状态, 为物源示踪研究提供了重要证据(Cao et al., 2012, 邓宾等, 2017; 林旭等, 2021); 磷灰石的稀土元素因其在表生环境中的稳定性, 也被广泛应用于沉积物物源判别、流域化学风化和构造环境演化等方面的研究(刘海金等, 2021)。宜昌位于长江上游和中游的分界点, 因此代表长江上游物源信息, 而汉江、沅江、湘江作为长江中游的主要支流, 其沉积物可代表长江中游的物源信号。基于此, 本文主要针对 4 条河流沉积物的磷灰石微量元素比值、二维判别图、稀土元素等方面展开分析, 寻找能区分长江上游与中游物源的特征指标, 并利用 MDS 检验各河流样品间特征指标的差异性。

4.1 微量元素比值及其二维图解

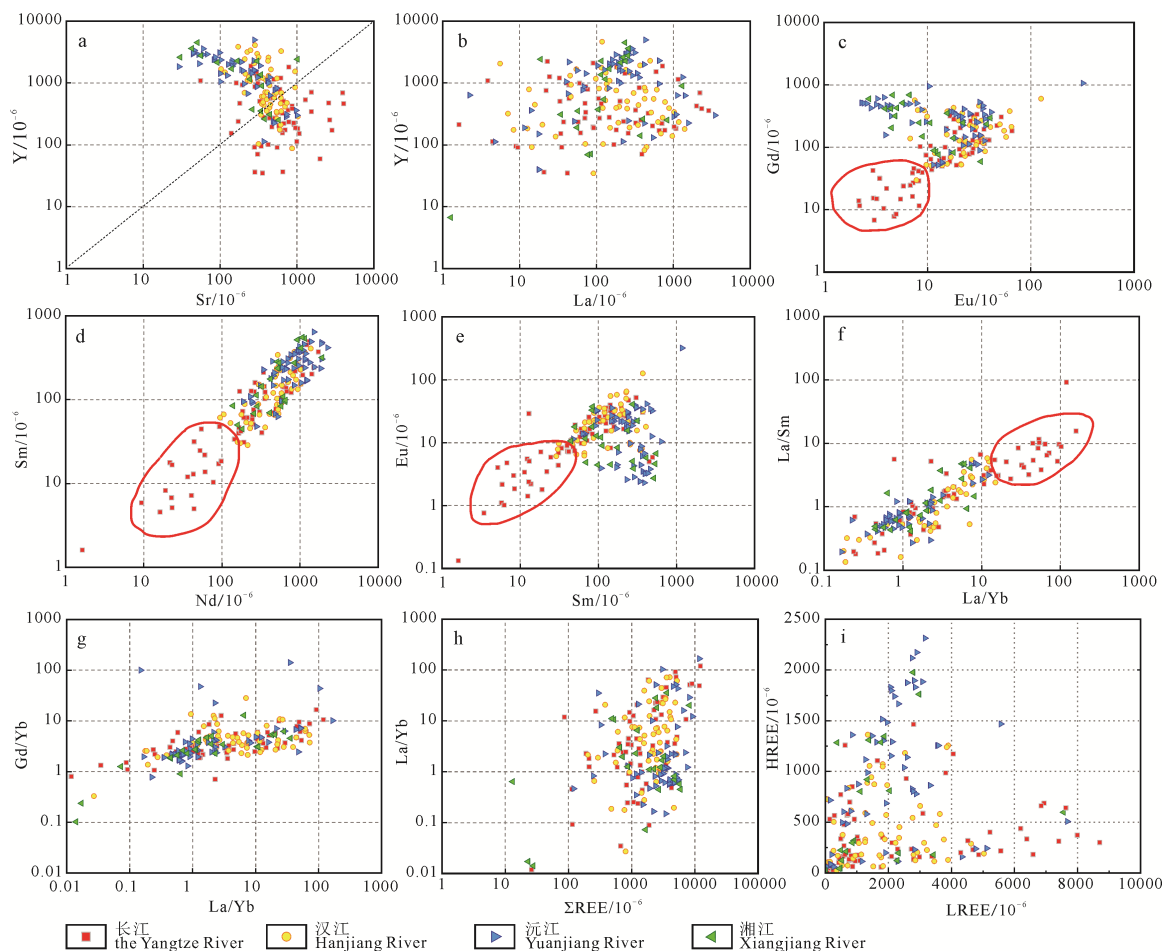
磷灰石中富集 Sr 和 Y 等不相容元素, 其微量元素含量变化由全岩 SiO₂ 含量和所在熔体中的分配系数所控制, 说明母岩的分异程度是磷灰石化学组成的主要控制因素。在母岩分化过程中, Y 元素会逐渐富集而 Sr 元素会逐渐降低, 因此 Sr/Y 比值在不同岩石的磷灰石中差异较大(Piccoli et al., 2002)。研究区河流的碎屑磷灰石微量元素主要以 Sr、Y 含量较为丰富, 分析数据可知, 在江汉盆地周缘的 4 条河流中, 汉江、沅江、湘江沉积物的 Sr 和 Y 的平均含量与比值差异较小而与长江干流的数据明显不同: 汉江、沅江、湘江沉积物的碎屑磷灰石中 Sr 元素的平均含量则明显低于 Y 元素, 各自 Sr/Y 值分别为: 0.44、0.51、0.46。而长江干流沉积物的碎屑磷灰石中 Sr 元素的平均含量明显高于 Y 元素, 其 Sr/Y 值为 1.88。4 条河流的 Sr、Y 平均含量柱状图如图 3。河流沉积物的磷灰石中 Sr、Y 元素变化趋势在二维散点图中也有直观体现(图 4a): 长江的点基本分布在右下方, 而汉江、沅江和湘江的散点多分布在左上方区域区别开来。Sr/Y 可以将长江上游与中游的沉积物物源区分开来, 因此 Sr/Y 是否大于 1 可以作为判别长江上游与中游沉积物的重要特征指标。

微量元素及其比值的二维图也可以对沉积物物源进一步判别, δEu_{UCC}-(Gd/Yb)_{UCC}, (La/Yb)_{UCC}-

(Gd/Yb)_{UCC} 等稀土元素比值作为区分不同河流沉积物的有效指标,已成功应用于亚洲大和与边缘海域(Xu et al., 2009; Li et al., 2013)。汇总表 2 的稀土元素数据,本文绘制了常见的微量元素及前人研究过的微量元素比值判别图(图 4),从中挑选出能明显区分出河流间特征区域的特征指标开展讨论。分析判别图可知:整体上看,长江的分布范围最广,其中 Eu-Gd、Nd-Sm、Sm-Eu、La/Yb-La/Sm 的二维散点图中(图 4c, d, e, f)有部分磷灰石落在集中区以外,形成了明显的长江上游的特征区域,从而与其他三条河流区分开来;汉江的分布趋势与长江类似但范围略小,而沅江则与湘江有相近的分布趋势。在 Eu-Gd、Nd-Sm 中长江和汉江分布趋势相同,沅江和湘江则与前者分布趋势区别明显,两者呈现出近似垂直的分布方向。其他元素的二元散点图中大部分颗粒重叠在一起,没有出现明显特征河流。由图可知 Eu-Gd、Nd-Sm、Sm-Eu、La/Yb-La/Sm 的微量元素二维图解形成了明显的长江特征区域,代表了长江上游的物源响应,因此这些元素是区分长江上游与中游沉积物源的重要特征元素。

4.2 REE 特征

稀土元素由于其相似的化学元素组成及稳定的化学性质被广泛应用于沉积物物源判别、构造环境变化等方面的研究(汤倩等, 2007; 赵振华, 2010)。前人研究表明 REE 的含量主要受沉积物来源和化学风化的影响,其中源岩的物质组成是控制沉积物中稀土元素组成最主要的因素(Yang et al., 2002; Munksgaard et al., 2003; 何梦颖等, 2011)。此外,岩石在风化过程中稀土元素也可以被碳酸盐、铁锰氧化物和有机物颗粒吸附(Taylor and McLennann, 1985; Sholkovitz, 1994),从 La 到 Lu, 稀土元素结合能力逐渐增强,络合物稳定性相应增加,从而在自然界的迁移能力也相应增强。其中 HREE 元素更容易在溶液中形成重碳酸盐和有机络合物而优先被迁移, LREE 则一般被黏土矿物表面吸附,从而造成 LREE 相对富集 HREE 亏损,因此随着风化程度的加强, LREE 与 HREE 将发生分异, $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 比值将增加(张宏飞和高山, 2012; 杨文光等, 2012; 李景瑞等, 2016)。



a-Sr vs Y; b-La vs Y; c-Eu vs Gd; d-Nd vs Sm; e-Sm vs Eu; f-La/Yb vs La/Sm; g-La/Yb vs Gd/Yb; h- ΣREE vs La/Yb; i-LREE vs HREE.

图 4 长江干流、汉江、沅江、湘江的磷灰石微量元素二维散点图

Fig. 4 Correlation plots of trace elements for the river sediments of apatite from the main stream of the Yangtze River, Hanjiang River, Yuanjiang River, and Xiangjiang River

对 4 条河流沉积物的稀土元素数据进行球粒陨石标准化处理后可以得到沉积物的 ΣREE 、 LREE 及 HREE , 分析得知 4 条河流基本都呈 LREE 富集而 HREE 缺失。其中长江干流、汉江基本呈重度 LREE 富集而 HREE 缺失, 而沅江、湘江呈轻微 LREE 富集而 HREE 缺失(图 4i)。从物源上分析, 长江干流、汉江沉积物的重度 LREE 富集, 说明沉积物可能发源于流域内广泛的富集 LREE 的花岗岩, 而沅江、湘江都属于洞庭湖水系, 它们呈轻微 LREE 富集和 HREE 缺失可能是因为沉积物主要发源于沉积岩如碳酸盐岩或黄土。从风化程度上分析, LREE/HREE 的值往往能代表稀土元素轻稀土与重稀土之间的分异程度, 4 条河流的 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$

分别为: 长江为 5.54, 汉江为 3.86、沅江为 2.66、湘江为 2.14, 可以看出携带着长江上游物源信息的宜昌样品的 LREE 较 HREE 富集最为明显, 与中游沉积物有较明显的区分, 元素分馏更加显著, 风化程度更强, 可能处于强氧化的化学风化环境。

稀土元素蛛网图形态特征对沉积物的物源判别具有重要指示意义(Murray, 1994)。做出沉积物的稀土元素蛛网图如图 5 所示, 在 REE 球粒陨石标准化蛛网图中, 4 条河流的沉积物大体上呈现 LREE 富集, HREE 亏损的右倾曲线。

稀土元素中铕(Eu)和铈(Ce)因具有特殊电子价态从而在稀土元素地化研究中具有指示意义, 其异常的大小常用 δEu 和 δCe 来度量, 反映 REE 分异特征。 Eu 异常的产生通常和斜长石的分离结晶有关, 例如在岩浆结晶早期的结晶斜长石中含较高的 Eu^{2+} , 而出现“正 Eu 异常”; Ce 异常与氧化还原环境有关, 在化学风化强度大的强氧化条件下, Ce^{3+} 失去一个电子氧化成 Ce^{4+} , 从而与 REE^{3+} 整体脱离, Ce^{4+} 容易发生水解而滞留原地, 在沉积物形成“正 Ce 异常”, 而在还原环境下, 含 Ce 沉积物被还原成 Ce^{3+} 被释放到水体中, 在沉积物中出现“负 Ce 异常”(Alibo and Nozaki, 1999)。由图 5 得知 4 条河流的沉积物都呈现了不同程度的 Eu 负异常, 而无明显的 Ce 异常。对 4 条河流沉积物的稀土元素进行球粒陨石标准化处理可得到其标准值, 长江干流、汉江、沅江、湘江的 δEu 分别为: 0.52、0.47、0.23、0.16, 其中沅江和湘江的 δEu 最小, 而长江干流的 δEu 的值最大从而区分与其他河流。4 条河流的稀土元素蛛网图的形态差异反应了它们不同的物源和氧化还原环境。

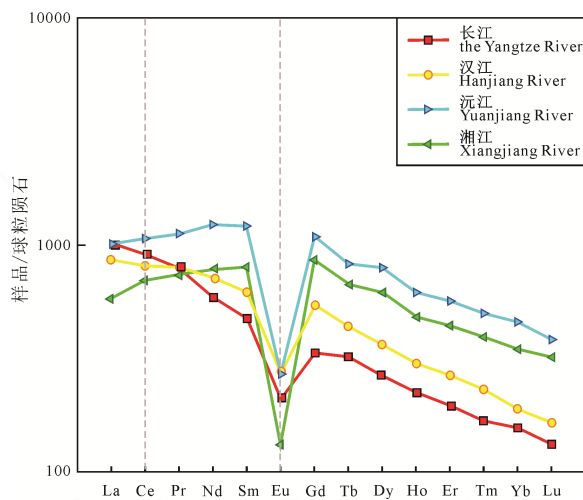


图 5 江汉盆地地表河流磷灰石稀土元素分布型式图
(球粒陨石标准化数据引自 Taylor and McLennan, 1985)
Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns for apatite
form the surrounding rivers of Jiangnan Basin
(data of chondrite-normalized data after
Taylor and McLennan, 1985)

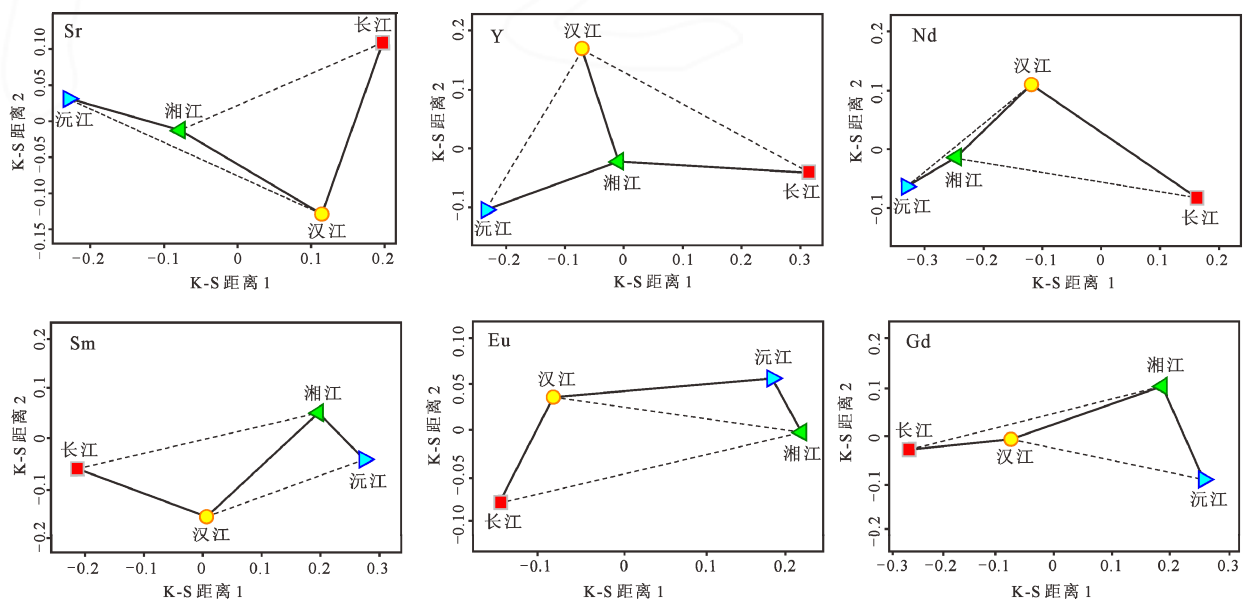


图 6 研究区河流间 Sr、Y、Nd、Sm、Eu、Gd 元素的 K-S 距离 MDS 图
Fig. 6 MDS plot showing the K-S distances of Sr, Y, Nd, Sm, Eu, Gd in four rivers

4.3 MDS 检验

为了系统检验判别江汉盆地周缘长江干流、汉江、沅江、湘江的物源的特征指标,针对前文筛选的能够区分河流沉积物物源的 Sr、Y、Nd、Sm、Eu、Gd 等 6 个元素利用多维标度(MDS)图解(图 6)来评估不同河流间分布的相似性。

若河流之间实际距离相隔较近,说明该元素在 4 条河流中的差异性较小,反之则说明差异性较大。如图 6 所示,在 Sr、Y、Gd 元素的 MDS 图中四条河流的点位分散,区分明显,在 Nd、Sm、Eu 元素的 MDS 图中,沅江和湘江较其他河流距离相对较近,说明它们有一定的相关性。总体来说,研究区 4 条河流在 6 个特征元素的 MDS 图中均未出现明显重叠区,长江与其他三条河流均有较明显的差异,证明这些元素的 MDS 图解能有效区分出不同物源的河流信息,因此这些元素可以作为判别江汉盆地周缘地表河流的特征元素指标。

5 结论

通过分析江汉盆地周缘长江上游与中游水系的碎屑磷灰石微量元素比值、双变量图解、稀土元素分布特征,寻找能区分长江上游与中游物源的特征元素组合,结合 MDS 检验各河流样品间特征元素的差异性,得出以下结论:

(1)碎屑磷灰石的主要微量元素 Sr、Y 对研究区的河流有较好的区分度,且 Sr/Y 的数值可作为区分长江上游与中游沉积物的重要依据。

(2)微量特征二维图显示,在 Nd-Sm、Sm-Eu、Eu-Gd、La/Yb-La/Sm 图解中长江上游具有明显的特征区域从而区别于中游水系,这些元素是判别长江中游与上游物源的重要指标。

(3)分析稀土元素数据可知,长江的 LREE 较 HREE 富集最明显, $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 值最高,反应了其风化程度,而且长江的 δEu 的值最大,从而区别与汉江、沅江、湘江。因此,碎屑磷灰石 LREE-HREE 比值、稀土元素蛛网图形态分布、Eu 异常的大小对区分长江上游及中游沉积物物源具有重要指示意义。

(4)对 4 条河流的 Sr、Y、Nd、Sm、Eu、Gd 元素进行 MDS 检验,结果显示长江与其他河流距离较大且差异明显,验证了这些元素作为江汉盆地周缘地表河流物源判别的特征元素的有效性。

Acknowledgements:

This study was supported by National Natural Science Foundation of China (Nos. 41671011, 41877292 and 41972212).

参考文献:

- 邓宾,曾璐,周庆,姜磊,DAVID C. 2017. 碎屑岩磷灰石单矿物多法定年进展与应用[J]. 地质科技情报, 36(01): 77-86.
- 何梦颖,郑洪波,黄湘通,贾军涛,李玲. 2011. 长江流域沉积物黏土矿物组合特征及物源指示意义[J]. 沉积学报, 29(3): 544-551.
- 何梦颖,郑洪波,贾军涛. 2013. 长江现代沉积物碎屑锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素组成与物源示踪研究[J]. 第四纪研究, 33(4): 656-670.
- 康春国,李长安,王节涛,邵磊. 2009. 江汉平原沉积物重矿物特征及其对三峡贯通的指示[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 34(3): 419-427.
- 李长安. 1998. 桐柏一大别山掀斜隆升对长江中游环境的影响[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 4(6): 562-566.
- 李长安,殷鸿福,俞立中,陈中原. 2000. 流域环境系统演化概念模型: 山-河-湖-海互动及对全球变化的敏感响应: 以长江为例[J]. 长江流域资源与环境, 9(3): 358-363.
- 李景瑞,刘升发,冯秀丽,孙兴全,石学法. 2016. 孟加拉湾中部表层沉积物稀土元素特征及其物源指示意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 36(4): 41-50.
- 林旭,刘静,彭保发,李长安,吴泉源. 2017. 青藏高原周围河流基岩和碎屑矿物低温年代学研究进展[J]. 地震地质, 39(6): 1091-1110.
- 林旭,刘静. 2019. 江汉和洞庭盆地与周缘造山带盆地耦合研究进展[J]. 地震地质, 41(2): 499-520.
- 林旭,赵希涛,吴中海,李长安,刘海金,李兆宁. 2020. 渤海湾周缘主要河流钾长石物源示踪指标研究[J]. 地质科技通报, 39(6): 10-18.
- 林旭,刘静,吴中海,李长安,刘海金. 2021. 渤海湾盆地河流沉积物扩散研究: 碎屑锆石 U-Pb 年龄和磷灰石原位地球化学元素双重约束[J]. 地质力学学报, 27(2): 304-316.
- 刘海金,龚志军,林旭. 2021. 渤海主要汇入河流碎屑磷灰石地球化学特征及成因分析[J]. 海洋地质与第四纪地质, 41(4): 74-86.
- 汤倩,孙晓明,梁金龙,徐莉,翟伟,梁业恒. 2007. CCSD HP-UHP 变质岩中磷灰石稀土元素(REE)地球化学及其示踪意义[J]. 岩石学报, 23(12): 3255-3266.
- 王节涛,李长安,杨勇,王秋良. 2009. 江汉平原周老孔中碎屑锆石 LA-ICP-MS 定年及物源示踪[J]. 第四纪研究, 29(2): 343-351.
- 向芳,朱利东,王成善,杨文光. 2006. 宜昌地区第四纪沉积物中玄武岩砾石特征及其与长江三峡贯通的关系[J]. 地球科学与环境学报, 28(2): 6-10.
- 杨守业,李从先, JUNG H S, CHOI M S. 2003. 黄河沉积物中 REE 制约与示踪意义再认识[J]. 自然科学进展, 13(1): 365-371.
- 杨守业. 2006. 亚洲主要河流的沉积地球化学示踪研究进展[J]. 地球科学进展, 21(6): 648-655.
- 杨文光,谢昕,郑洪波,朱利东. 2012. 南海北部陆坡高速堆积体沉积物稀土元素特征及其物源意义[J]. 矿物岩石, 11(1): 74-81.
- 中华人民共和国水利部. 2019. 中国河流泥沙公报[M]. 北京: 中国水利水电出版社: 1-21.
- 张宏飞,高山. 2012. 地球化学[M]. 北京: 地质出版社: 130-136.
- 赵振华. 2010. 副矿物微量元素地球化学特征在成岩成矿作用研究中的应用[J]. 地学前缘, 17(1): 267-286.

References:

- ALIBO D S, NOZAKI Y. 1999. Rare earth elements in seawater: particle association, shale-normalization, and Ce oxidation - A study along the slopes of Sagami and Nankai Troughs near Japan[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 63(3-4): 363-372.
- BELOUSOVA E A, GRIFFIN W L, O'REILLY S Y, FISHER N I. 2002. Apatite as an indicator mineral for mineral exploration:

- trace-element compositions and their relationship to host rock type[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 76(1): 45-69.
- CAO Ming-jian, LI Guang-ming, QIN Ke-zhang, SEITMURATOVA E Y, LIU Yong-sheng. 2012. Major and trace element characteristics of apatites in granitoids from Central Kazakhstan: implications for petrogenesis and mineralization[J]. *Resource Geology*, 62(1): 63-83.
- CHAKRAPANI G J. 2005. Major and trace element geochemistry in upper Ganga river in the Himalayas, India[J]. *Environmental Geology*, 48(2): 189-201.
- CLARK M K, SCHOENBOHM L M, ROYDEN L H, WHIPPLE, K X, BURCHFIEL B C, ZHANG X, TANG W, WANG E, CHEN L. 2004. Surface uplift, tectonics, and erosion of eastern Tibet from large-scale drainage patterns[J]. *Tectonics*, 23(1): 6.1-6.20.
- CLIFT P D, LONG H V, HINTON R, ELLAM R M, HANNIGAN R, TAN M T, BLUSZTAJN J, DUC N A. 2008. Evolving east Asian river systems reconstructed by trace element and Pb and Nd isotope variations in modern and ancient Red River-Song Hong sediments[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 9(4): 1-29.
- DENG Bin, CHEW D, JIANG Lei, MARK C, COGNE N, WANG Zi-jian, LIU Shu-gen. 2018. Heavy mineral analysis and detrital U-Pb ages of the intracontinental Paleo-Yangtze basin: Implications for a transcontinental source-to-sink system during Late Cretaceous time[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 130(11-12): 2087-2109.
- DENG Bin, ZENG Lu, ZHOU Qing, JIANG Lei, DAVID C. 2017. A review of detrital apatite single-grain LA-ICPMS multi-dating[J]. *Geological Science and Technology Information*, 36(1): 77-86(in Chinese with English abstract).
- FLEET M E, PAN Y. 1995. Site preference of rare earth elements in fluorapatite[J]. *American Mineralogist*, 80: 329-335.
- FOSTER G L, CARTER A. 2007. Insights into the patterns and locations of erosion in the Himalaya: A combined fission-track and in situ Sm-Nd isotopic study of detrital apatite[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 257(3-4): 407-418.
- HE Meng-ying, ZHENG Hong-bo, HUANG Xiang-tong, JIA Jun-tao, LI Ling. 2011. Clay mineral assemblages in the Yangtze drainage and provenance implications[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 29(3): 544-551(in Chinese with English abstract).
- HE Meng-ying, ZHENG Hong-bo, JIA Jun-tao. 2013. Detrital zircon U-Pb dating and Hf isotope of modern sediments in the Yangtze River: Implications for the Sediment Provenance[J]. *Quaternary Sciences*, 33(4): 656-670(in Chinese with English abstract).
- HU Zhao-chu, ZHANG Wen, LIU Yong-Sheng, GAO Shan, LI Ming, ZONG Ke-qing, CHEN Hai-hong, HU Shen-hong. 2015. "Wave" signal smoothing and mercury removing device for laser ablation quadrupole and multiple collector ICP-MS analysis: application to lead isotope analysis[J]. *Analytical Chemistry*, 87: 1152-1157.
- JIANG Hua-jun, LI Chang-an, KANG Chun-guo, ZHANG Yu-fen, WEI Chuan-yi, ZHAO Ju-xing, LI Ya-wei. 2020. Provenance discrimination of upper Yangtze River basin sediments: New insights from heavy mineral signatures and detrital magnetite geochemistry[J]. *Quaternary International*, 568: 79-89.
- KANG Chun-guo, LI Chang-an, WANG Jie-tao, SHAO Lei. 2009. Heavy minerals characteristics of sediments in Jiangnan plain and its indication to the forming of the Three Gorges[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 34(3): 419-427(in Chinese with English abstract).
- LI Chang-an, YIN Hong-fu, YU Li-zhong, CHEN Zhong-yuan. 2000. Concept model on the fluvial environment system: mountain-river-lake-sea interaction and sensitive responding to global change[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 9(3): 358-363(in Chinese with English abstract).
- LI Chang-an. 1998. Effect of tilted uplift of Tongbai-Dabie mountains on middle Yangtze river environment[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 4(6): 562-566(in Chinese with English abstract).
- LI Chuan-shun, SHI Xue-fa, KAO Shuh-ji, LIU Yan-guang, LYU Hua-hua, ZOU Jian-jun, LIU Sheng-fa, QIAO Shu-qing. 2013. Rare earth elements in fine-grained sediments of major rivers from the high-standing island of Taiwan[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 69(1): 39-47.
- LI Jing-rui, LIU Sheng-fa, FENG Xiu-li, SUN Xing-quan, SHI Xue-fa. 2016. Rare earth element geochemistry of surface sediments in mid-bengal bay and implications for provenance[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 36(4): 41-50(in Chinese with English abstract).
- LIN Xu, LIU Jing, PENG Bao-fa, LI Chang-an, WU Quan-yuan. 2017. A review of Low-temperature thermochronology on bedrock and detritus from rivers around the Tibetan plateau[J]. *Seismology and Geology*, 39(6): 1091-1110(in Chinese with English abstract).
- LIN Xu, LIU Jing, WU Zhong-hai, LI Chang-an, LIU Hai-jin. 2021. The studying of fluvial sediments spreading in Bohai Bay Basin --double constraints from detrital zircon U-Pb age and in situ geochemical element of apatite grains[J]. *Journal of Geomechanics*, 27(2): 304-316(in Chinese with English abstract).
- LIN Xu, LIU Jing. 2019. A review of mountain-basin coupling of Jiangnan and Dongting basin with their surrounding mountains[J]. *Seismology and Geology*, 41(2): 499-520(in Chinese with English abstract).
- LIN Xu, ZHAO Xi-tao, WU Zhong-hai, LI Chang-an, LIU Hai-jin, LI Zhao-ning. 2020. Source tracing elements of K-feldspars of main river around Bohai bay basin[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 39(6): 10-18(in Chinese with English abstract).
- LIU Hai-jin, GONG Zhi-jun, LIN Xu. 2021. Study on geochemical characteristics of detrital apatite source in Bohai Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 41(4): 74-86(in Chinese with English abstract).
- LIU Shao-feng, STEEL R, ZHANG Guo-wei. 2005. Mesozoic sedimentary basin development and tectonic implication, northern Yangtze Block, eastern China: record of continent-continent collision[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 25(1): 9-27.
- LIU Shao-feng, ZHANG Guo-wei. 2013. Mesozoic basin development and its indication of collisional orogeny in the Dabie orogen[J]. *Chinese Science Bulletin*, 58(8): 827-852.
- LIU Yong-sheng, HU Zhao-chu, GAO Shan, GÜNTHER D, XU Juan., GAO Chang-gui, CHEN Hai-hong. 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. *Chemical Geology*, 257: 34-43.
- MALUSÀ M G, WANG Jian-gang, GARZANTI E, LIU Zhi-chao, VILLA I M, WITTMANN M. 2017. Trace-element and Nd-isotope systematics in detrital apatite of the Po river catchment: Implications for provenance discrimination and the lag-time approach to detrital thermochronology[J]. *Lithos*, 290-291(6): 48-59.
- Ministry of Water Resources the People's Republic of China. 2019. China river sediment Bulletin[M]. Beijing: China Waterpower Press: 1-21(in Chinese).
- MUNKSGAARD N C, LIM K, PARRY D L. 2003. Rare earth elements as provenance indicators in North Australian estuarine and coastal marine sediments[J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 57(3): 399-409.
- MURRAY R W. 1994. Chemical criteria to identify the depositional environment of chert: general principles and applications[J]. *Sedimentary Geology*, 90(3-4): 213-232.

- O'SULLIVAN G, CHEW D, KENNY G, HENRICH S I, MULLIGAN D. 2019. The trace element composition of apatite and its application to detrital provenance studies[J/OL]. *Earth-Science Reviews*[2019-11-25]. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev>.
- PAN Li-chuan, HU Rui-zhong, WANG Xi-song, BI Xian-wu, ZHU Jing-jing, LI Chu-si. 2016. Apatite trace element and halogen compositions as petrogenetic-metallogenic indicators: Examples from four granite plutons in the Sanjiang region SW China[J]. *Lithos*, 254-255: 118-130.
- PICCOLI P M, CANDELA P A. 2002. Apatite in igneous systems[J]. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 48(1): 255-292.
- SHAO Lei, LI Chang-an, YUAN Sheng-yuan, KANG Chun-guo, WANG Jie-tao, LI Ting. 2012. Neodymium isotopic variations of the late Cenozoic sediments in the Jiangnan Basin: Implications for sediment source and evolution of the Yangtze River[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 45: 57-64.
- SHEN Chuan-bo, MEI Lian-fu, PENG Lei, CHEN You-zhi, YANG Zhao, HONG Guang-fu. 2012. LA-ICP-MS U-Pb zircon age constraints on the provenance of Cretaceous sediments in the Yichang area of the Jiangnan Basin, central China[J]. *Cretaceous Research*, 34: 172-183.
- SHOLKOVITZ E R, LANDING W M, LEWIS B L. 1994. Ocean particle chemistry: The fractionation of rare earth elements between suspended particles and seawater[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(6): 1567-1579.
- SUN Xi-lin, KUIPER K F, TIAN Yun-tao, LI Chang-an, ZHANG Zeng-jie, WIJBRANS J R. 2020a. Comparison of detrital zircon U-Pb and muscovite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages in the Yangtze sediment: Implications for provenance studies[J]. *Minerals*, 10(7): 1-15.
- SUN Xi-lin, KUIPER K F, TIAN Yun-tao, LI Chang-an, ZHANG Zeng-jie, GEMIGNANI L, GUO Ru-jun, DE BREIJ V H L, WIJBRANS J R. 2020b. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ mica dating of late Cenozoic sediments in SE Tibet: implications for sediment recycling and drainage evolution[J]. *Journal of the Geological Society*, 177(4): 843-854.
- SUN Xi-lin, TIAN Yun-tao, KUIPER K F, LI Chang-an, ZHANG Zeng-jie, WIJBRANS J R. 2021. No Yangtze River prior to the late Miocene: Evidence from detrital muscovite and K-feldspar $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology[J]. *Geophysical Research Letters*, 48, e2020GL089903.
- TANG Qian, SUN Xiao-ming, LIANG Jin-long, XU Li, ZHAI Ye-heng. 2007. Rare earth elements(REE) geochemistry of apatite in HP-UHP metamorphic rocks from Chinese continental scientific drilling(CCS) project and their implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(12): 3255-3266(in Chinese with English abstract).
- TAYLOR S R, MCLENNAN S M. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*[M]. New York: Oxford University Press: 307-312.
- VERMEESCH P, RESENTINI A, GARZANTI E. 2016. An R package for statistical provenance analysis[J]. *Sedimentary Geology*, 336: 14-25.
- WANG Jie-tao, LI Chang-an, YANG Yong, WANG Qiu-liang. 2009. The LA-ICPMS U-Pb detrital zircon geochronology and provenance study of sedimentary core in the Zhoula town, the Jiangnan plain, China[J]. *Quaternary Sciences*, 29(2): 343-351(in Chinese with English abstract).
- WANG Ping, ZHENG Hong-bo, LIU Shao-feng, HOKE G D. 2018. Late cretaceous drainage reorganization of the middle Yangtze river[J]. *Lithosphere*, 10(3): 392-405.
- WEI Chuan-yi, PIERRE V, ZHANG Yu-fen, BAHAIN J J, LIU Chun-ru, KANG Chun-guo, YIN Gong-ming, SUN Xi-lin, LI Chang-an. 2020a. Chronology and provenance of the Yichang gravel layer deposits in the Jiangnan Basin, middle Yangtze river valley, China: Implications for the timing of channelization of the Three Gorges Valley[J]. *Quaternary International*, 550(3): 39-54.
- WEI Chuan-yi, YIN Gong-ming, LI Ya-wei, LIU Chun-ru, LI Wen-peng, GUO Ru-jun. 2020b. Quartz electron spin resonance signal intensity of Al and Ti-Li centers as a provenance indicator: An example from the Yangtze River Basin[J]. *Quaternary International*, 562(1): 76-84.
- WISSINK G K, HOKE G D, GARZIONE C N, ZENG JINGLIU. 2016. Temporal and spatial patterns of sediment routing across the southeast margin of the Tibetan Plateau: Insights from detrital zircon[J]. *Tectonics*, 35(11-12): 2538-2563.
- XIANG Fang, ZHU Li-dong, WANG Cheng-shan, YANG Wen-guang. 2006. Character of basaltic gravels in quaternary sediments in Yichang area and its relationship with formation of Yangtze Three Gorges[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 28(2): 6-10(in Chinese with English abstract).
- XU Zhao-kai, LIM D, CHOI J, YANG Shou-ye, JUNG H. 2009. Rare earth elements in bottom sediments of major rivers around the Yellow Sea: implications for sediment provenance[J]. *Geo-Marine Letters*, 29(5): 291-300.
- YANG Chao-qun, SHEN Chuan-bo, ZATTIN M, YU Wu, SHI Shao-xian, MEI Lian-fu. 2019. Provenances of Cenozoic sediments in the Jiangnan Basin and implications for the formation of the Three Gorges[J]. *International Geology Review*, 61(1): 1980-1999.
- YANG Shou-ye, JUNG H S, CHOI M S, LI Cong-xian. 2002. The rare earth element compositions of the Changjiang (Yangtze) and Huanghe (Yellow) river sediments[J]. *Earth Planetary Science Letters*, 201(2): 407-419.
- YANG Shou-ye, LI Cong-xian, JUNG H S, CHOI M S. 2003. Recognize the controlling and tracing implication of REE of Yellow River sediments[J]. *Progress in Nature Science*, 13(1): 365-371(in Chinese).
- YANG Shou-ye. 2006. Advances in sedimentary geochemistry and tracing applications of Asian River[J]. *Advances in Earth Science*, 21(6): 648-655(in Chinese with English abstract).
- YANG Wen-guang, XIE Xin, ZHENG Hong-bo, ZHU Li-dong. 2012. Rare earth element characteristic of sediment from high-deposition-rate sediment in the North slope of South China sea and its provenance significance[J]. *Mineral Petrol.*, 11(1): 74-81(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Hong-fei, GAO Shan. 2012. *Geochemistry*[M]. Beijing: Geological Publishing House: 130-136.
- ZHANG Yu-fen, LI Chang-an, WANG Qiu-liang, CHEN Liang, MA Yong-fa, KANG Chun-guo. 2008. Magnetism parameters characteristics of drilling deposits in Jiangnan Plain and indication for forming of the Yangtze River Three Gorges[J]. *Chinese Science Bulletin*, 53(4): 584-590.
- ZHANG Zeng-jie, TYRRELL S, LI Chang-an, DALY J S, SUN Xi-lin, BLOWICK A, LIN Xu. 2016. Provenance of detrital K-feldspar in Jiangnan Basin sheds new light on the Pliocene-Pleistocene evolution of the Yangtze River[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 128(3): 1339-1351.
- ZHAO Zhen-hua. 2010. Trace element geochemistry of accessory minerals and its applications in petrogenesis and metallogenesis[J]. *Earth Science Frontiers*, 17(1): 267-286(in Chinese with English abstract).
- ZHENG Hong-bo, CLIFT P D, WANG Ping, TADA R, JIA Jun-tao, HE Meng-ying, JOURDAN F. 2013. Pre-Miocene birth of the Yangtze River[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(19): 7556-7561.
- ZHENG Hong-bo, CLIFT P D, HE Meng-ying, BIAN Zi-xuan, LIU Gao-zheng, LIU Xiao-chun, XIA Lei, YANG Qiong, JOURDAN F. 2020. Formation of the First Bend in the late Eocene gave birth to the modern Yangtze River, China[J]. *Geology*, 49(1): doi: 10.1130/G48149.1.