

# 长江水系沉积物碎屑石榴石化学组成及物源示踪

王中波<sup>1,2</sup>, 杨守业<sup>3</sup>, 梅 西<sup>1,2</sup>, 陆 凯<sup>1,2</sup>

1. 青岛海洋地质研究所 自然资源部海洋油气资源与环境地质重点实验室, 山东 青岛 266071;
2. 青岛海洋科学与技术国家实验室 海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 山东 青岛 266071;
3. 同济大学 海洋地质国家重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 长江流域主要干流和支流碎屑沉积物中的单颗粒石榴石化学组成分析显示,石榴石元素组成以 SiO<sub>2</sub>、FeO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MnO、CaO、MgO、TiO<sub>2</sub> 为主,石榴石组合主要是镁铝榴石、铁铝榴石、钙铝榴石和锰铝榴石,其平均物质的量分数分别是 65.4%、13.8%、9.4% 和 11.5%。利用石榴石 G-P-AS 物源分析方法,可以识别出长江流域的特征石榴石组合。长江水系沉积物中碎屑石榴石呈低 Mg、高 Mn 特征,其源岩以中低级变质岩为主,长江流域出露的片岩、千枚岩和大理岩以及低温接触变质岩控制了沉积物石榴石的组成。金沙江是长江入海粗粒沉积物的主要来源,石榴石组合呈现为典型的低 Mg、高 Mn 特征,与整个长江干流石榴石组成一致,但由于未受到中下游近源沉积物影响,其石榴石组合可以作为长江特征物源端元,用以中国东部海域沉积物物源示踪。

**关键词:** 长江水系; 沉积物; 碎屑石榴石; 化学组成; 物源示踪

中图分类号: P587

文献标志码: A

## Detrital Garnet Chemistry of the Changjiang (Yangtze River) Sediments and Their Provenance Implication

WANG Zhongbo<sup>1,2</sup>, YANG Shouye<sup>3</sup>, MEI Xi<sup>1,2</sup>, LU Kai<sup>1,2</sup>

1. Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resources and Environmental Geology, Ministry of Natural Resources, Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, Shandong, China;
2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, Shandong, China;
3. State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** This study presents the compositions of major oxides including SiO<sub>2</sub>, FeO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO, CaO, MgO and TiO<sub>2</sub> in the detrital garnet grains separated from the sediments

of the Changjiang River and its major tributaries. The main garnet assemblage consists of almandine, grossularite, Grossular and spessartine, with the mean contents of 65.4%, 13.8%, 9.4% and 11.5%, respectively. The typical garnet assemblage of Changjiang sediments on the G-P-AS triangular diagram is characterized by low Mg and high Mn contents, which suggests they are mainly sourced from intermediate- and low-grade metasedimentary rocks. These garnet compositions are primarily determined by the widely distributed schist, phyllite, marble and the low-temperature and low-pressure contact metamorphic rocks in the Changjiang catchment. Our data also suggests that the Jinshajiang River as the largest tributary in the upper drainage is the major supply of fine sands to the Changjiang mainstream. Similar to the average composition of the whole Changjiang sediments, the garnets of Jinshajiang are characterized by low Mg and high Mn contents, but much different to those of the middle and lower reaches. Therefore, the garnet assemblage of the Jinshajiang can indicate the contribution of Changjiang fine sand in the sediments provenance study of East China marginal seas.

**Key words:** Changjiang rivers; sediments; detrital garnet; geochemical composition; provenance identification

长江是中国最大的河流,也是世界上第四大河流,长度约 6 300 km,流域近  $1.8 \times 10^6$  km<sup>2</sup>,从上而下分别流经羌塘地块、松潘—甘孜地块、金沙江缝合带、四川盆地、扬子地块和江汉盆地等地质单元,携带不同构造单元的碎屑物质入海,是我国东部海域第四纪沉积物的主要来源。过去 20 多年,长江入海沉积物的组成特征被广泛研究,包括碎屑矿物<sup>[1-2]</sup>、黏土矿物<sup>[3-4]</sup>、地球化学组成<sup>[5-6]</sup>等,进而揭示长江源

收稿日期: 2017-11-06

基金项目: 国家自然科学基金(41730531,41376049,41206053);中国地质调查局海洋地质调查项目(GZH201400201,DD20160137);上海市优秀学科带头人计划(14XD1403600);刘宝瑞地学青年科学基金(DMSM201724)

第一作者: 王中波(1979—),男,高级工程师,理学博士,主要研究方向为海洋沉积。E-mail: my\_zhongbo@163.com

通信作者: 杨守业(1971—),男,教授,博士生导师,理学博士,主要研究方向为地球化学。E-mail: syyang@tongji.edu.cn

沉积物对河口及海洋沉积的贡献,但由于长江流域的源岩类型和沉积动力过程的复杂性以及沉积物的多旋回性,运用碎屑矿物和全岩样地球化学组成开展河流物源示踪判别存在很大不确定性<sup>[7-9]</sup>。

影响沉积物组成的因素包括母岩组成、源区风化、搬运过程中的机械磨蚀和化学溶蚀、沉积成岩作用等<sup>[10-11]</sup>。随着微区测试技术的发展,某些稳定的碎屑单矿物的化学组成可以减少或排除沉积物搬运过程中水动力分选、风化、埋藏成岩等作用对物源研究的影响,是理想的物源和环境演变示踪指标<sup>[12-14]</sup>。目前,应用于物源示踪研究的单矿物主要是石榴石<sup>[12, 15-19]</sup>、锆石<sup>[14, 20-22]</sup>和 Ti-Fe 氧化物(铬尖晶石等)<sup>[23-25]</sup>等。

其中,石榴石形态和组成相对稳定,化学组成基本不受风化、搬运作用的影响,分布相对广泛,具有

相对固定的组合,不同源岩具有不同的特征组合,鉴于其自身的特殊性和稳定性而更多地应用在物源研究中<sup>[12, 15, 18-19, 26-28]</sup>。

本文研究长江流域主要干流和支流碎屑沉积物中的单颗粒石榴石微区分析和化学组成,利用石榴石组合物源分析方法开展源汇研究,识别长江流域的特征石榴石组合,为中国东部边缘海晚第四纪沉积物物源示踪和环境演变研究提供相关依据和参考。

## 1 样品来源及分析方法

样品分别在 2003 年 4 月和 2004 年 8 月取自金沙江石鼓镇(JSJ)、雅砻江攀枝花(YLJ)、大渡河乐山(DDH)、岷江乐山(MJ)、汉江武汉(HJ)、乌江涪陵(WJ)和长江铜陵(CJ)地区的河漫滩沉积物(图 1)。

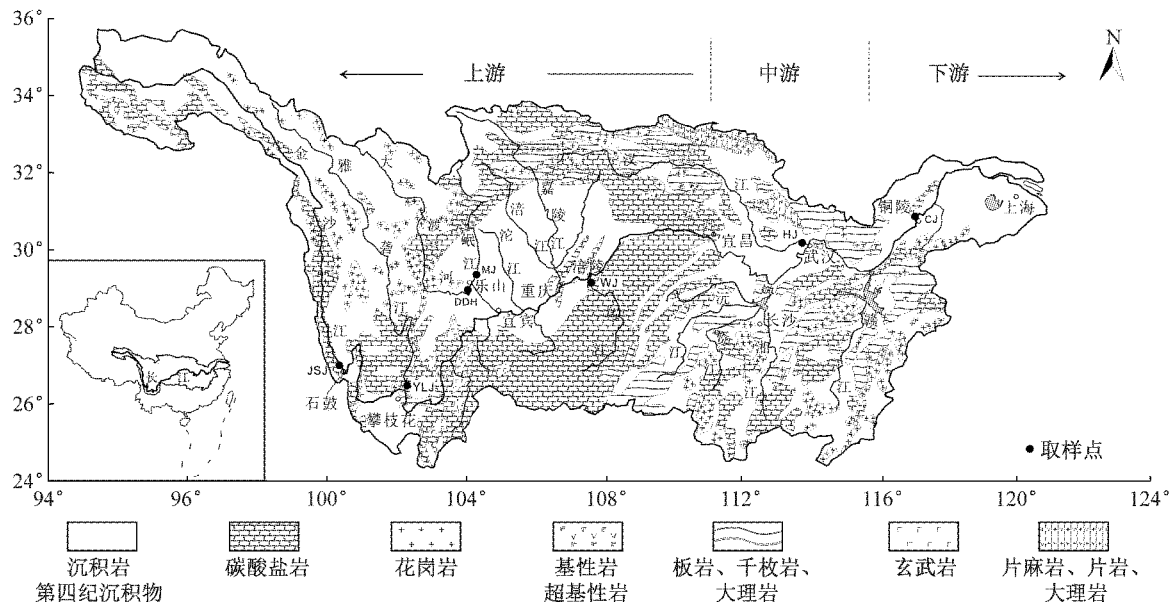


图 1 长江流域岩石类型及采样位置(据文献[2]修改)

Fig.1 Rock types in the Changjiang catchment with the sample locations (modified after reference [2])

对采集的沉积物样品进行过筛水洗,提取 63~125  $\mu\text{m}$  粒径间的样品进行 50 $^{\circ}\text{C}$  恒温烘干;再利用三溴甲烷重液(比重 2.89)进行轻、重矿物分离,对获取的重矿物进行体视显微镜镜下鉴定,对每个样品随机挑选碎屑石榴石颗粒 1 000 颗以上;对挑选的石榴石颗粒,在广州中国科学院地球化学研究所进行制靶,然后在中国地质大学(武汉)电子探针室采用日本电子株式会社(JEOL)生产的 JXA-733 型号电子探针仪进行化学成分测试及微区分析,实验电压设定为 15 kV,电流为 20 nA,束斑直径为 3 或 5  $\mu\text{m}$ 。峰期的计数时间为 20 s,前后背景值的计数时间分

别为 10 s。实验室标样使用的是美国 SPI 公司标准矿物标样,X 射线强度使用 ZAF(原子序数-吸收-荧光)校正法进行校正。测试颗粒随机选取,每个样品测试 80 个颗粒<sup>[29]</sup>,每个颗粒选取无包裹体区域进行打点测量,每个颗粒打点测试一次,测试精度为 0.1%。

## 2 长江沉积物单颗粒石榴石化学组成

长江沉积物石榴石电子探针分析结果如表 1 所示,其元素总量介于 98.7%~99.6%之间,标准偏差和变异系数在 1 左右,表明测试结果合理可靠。

表 1 长江流域沉积物石榴石主要元素组成(质量分数)

取样位置	SiO <sub>2</sub>			FeO			Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			MnO		
	AVR	STD	CV	AVR	STD	CV	AVR	STD	CV	AVR	STD	CV
JSJ	37.2	0.5	1	30.6	3.4	11	20.8	0.3	1	3.4	4.6	133
YLJ	35.8	0.4	1	25.0	7.7	31	20.3	0.5	2	13.7	8.1	59
DDH	37.1	0.4	1	31.7	3.2	10	20.8	0.3	1	4.4	3.6	82
MJ	36.2	0.3	1	31.5	4.7	15	20.9	0.2	1	5.0	4.6	93
WJ	37.4	0.5	1	29.9	5.1	17	20.8	0.4	2	4.6	6.0	131
HJ	37.0	0.5	1	27.8	6.8	24	20.6	0.5	2	6.2	4.8	78
CJ	37.2	1.0	3	28.2	5.6	20	20.5	1.7	8	5.3	5.1	95

取样位置	CaO			MgO			TiO <sub>2</sub>			AVR	STD	CV
	AVR	STD	CV	AVR	STD	CV	AVR	STD	CV	总计	总计	总计
JSJ	4.9	2.8	58	2.5	1.3	53	0.1	0.1	52	99.5	0.2	0
YLJ	3.1	2.5	80	1.1	1.2	105	0.1	0.1	75	99.3	0.1	0
DDH	2.8	2.3	82	2.8	1.3	47	0.1	0.1	99	99.6	0.2	0
MJ	3.8	2.4	64	1.9	0.7	37	0.1	0	62	99.2	0.1	0
WJ	3.8	2.9	77	3.1	2.0	65	0.1	0.1	67	99.5	0.3	0
HJ	5.1	4.8	95	2.4	1.7	69	0.1	0.1	82	99.2	0.2	0
CJ	4.8	4.7	98	2.8	1.9	68	0.1	0.1	107	98.9	3.7	4

石榴石主要由 SiO<sub>2</sub>、FeO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MnO、CaO、MgO、TiO<sub>2</sub>、Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 以及极少量 K<sub>2</sub>O 和 Na<sub>2</sub>O 组成。长江水系沉积物石榴石的组成中 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、K<sub>2</sub>O 和 Na<sub>2</sub>O 质量分数基本都低于 0.1%，不予讨论。其主量元素 SiO<sub>2</sub>、FeO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MnO、CaO、MgO、TiO<sub>2</sub> 的平均质量分数 (AVR) 分别是 36.8%、29.2%、20.7%、6.1%、4.0%、2.4%、0.1% (表 1)，各样品元素标准偏差 (STD) 和变异系数 (CV) 分析显示，除

Si、Fe 和 Al 元素之外，其他元素在不同样品中标准偏差和变异系数较高，但在不同样品中的变化不大。根据元素含量按照氧原子的配位数计算出各种石榴石在沉积物中的含量，主要是镁铝榴石 (Pyr)、铁铝榴石 (Alm)、钙铝榴石 (Gro) 和锰铝榴石 (Spe)，其平均摩尔分数分别是 65.4%、13.8%、9.4% 和 11.4% (表 2)。总体来看，长江沉积物以铁铝榴石和锰铝榴石为主，而镁铝榴石和钙铝榴石相对较低 (表 2、图 2)。

表 2 长江流域沉积物碎屑石榴石组合(物质的量分数)

取样位置	铁铝榴石			锰铝榴石			镁铝榴石			钙铝榴石		
	AVR	STD	CV	AVR	STD	CV	AVR	STD	CV	AVR	STD	CV
JSJ	68.4	7.6	11	7.8	10.5	134	9.9	5.2	52	13.9	8.0	58
YLJ	55.9	17.5	31	30.9	18.1	59	4.4	4.5	103	8.8	6.9	78
DDH	71.1	7.3	10	9.9	8.2	82	11.1	5.1	46	7.9	6.4	81
MJ	70.5	10.8	15	11.2	10.5	93	7.6	2.8	37	10.7	6.7	63
WJ	66.8	11.8	18	10.4	13.5	130	12.1	7.5	63	10.7	8.2	77
HJ	62.0	15.6	25	14.0	10.9	78	9.6	6.6	68	14.4	13.5	94
CJ	63.1	12.7	20	12.2	11.6	95	11.2	7.5	67	13.5	12.4	91

在长江流域沉积物样品中 (图 3)，除雅砻江攀枝花地区 (YLJ) 石榴石贫 Fe 富 Mn 外，FeO 和 MnO 的质量分数分别是 25.0% 和 13.7%，而其流域质量分数平均值是 29.2% 和 6.1%；其他地区的样品组成特征基本一致，即 SiO<sub>2</sub> 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量相近，整体低 Mg 而相对富 Mn。

### 3 讨论

#### 3.1 标型碎屑石榴石特征

石榴石常为自形晶体，化学式是 X<sub>3</sub>Y<sub>2</sub>[SiO<sub>4</sub>]<sub>3</sub>，

(X 代表 Mg<sup>2+</sup>、Fe<sup>2+</sup>、Mn<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup>；Y 代表 Al<sup>3+</sup>、Fe<sup>3+</sup>、Cr<sup>3+</sup>、Ti<sup>4+</sup>、Mn<sup>4+</sup>)，主要为 2 个组 6 种石榴石。铝榴石组包括镁铝榴石、铁铝榴石和锰铝榴石；钙铬铁榴石组包括钙铬榴石、钙铝榴石和钙铁榴石。由于 Cr、Ti 等元素在石榴石中所占比例不大，又由于 Al<sup>3+</sup> 基本占据了 +3 价的位置，所以碎屑沉积物中的石榴石组合主要是镁铝榴石、铁铝榴石、钙铝榴石和锰铝榴石。

已有研究表明，石榴石在碎屑沉积中分布相对广泛，具有相对固定的组合，不同源岩具有不同的特征组合 (表 3) [12, 15, 19, 26-28]。

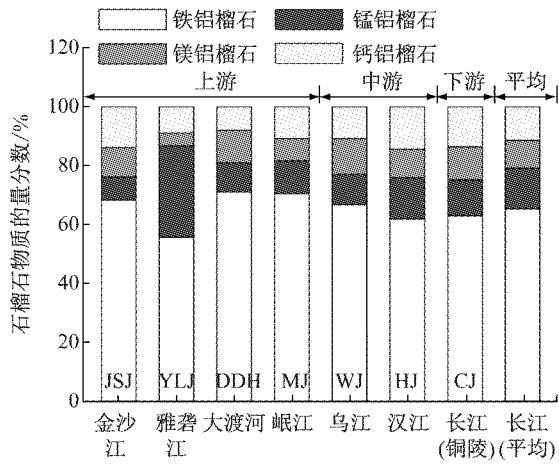


图 2 长江水系沉积物碎屑石榴石组合

Fig.2 Garnet assemblages of the Changjiang sediments

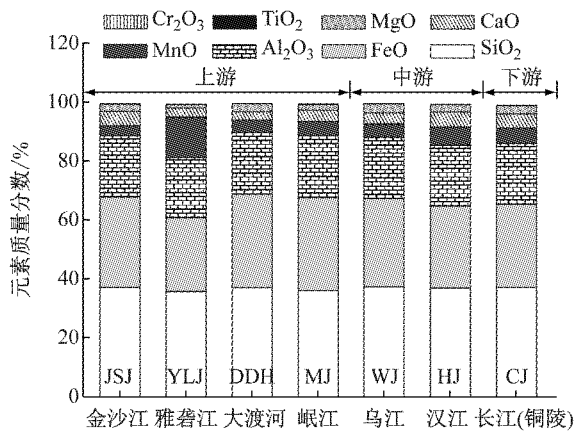


图 3 长江水系沉积物碎屑石榴石化学组成

Fig.3 Geochemical compositions of garnet grains in the Changjiang sediments

表 3 不同石榴石组合的源岩组成

Tab.3 Major source rocks of different detrital garnet assemblages

石榴石分区	组成	源岩组成
A	高 Mg 低 Ca	源自中-高级区域变质岩, 典型母岩是麻粒岩相片麻岩和紫苏花岗岩.
B	低 Mg	中-低级变质岩, 以闪岩相变质岩为主, 片麻岩也有出现.
C	高 Mg 高 Ca	基性片麻岩.
其他	富 Fe <sup>3+</sup> 、Ca 富 Mn 贫 Mg	通常伴随矽卡岩出现, 多以极低级变质岩为主. 主要来自低温低压变质岩, 如接触变质岩、低级变质岩相的变质泥岩、矽卡岩和花岗伟晶岩.

注: 以上数据采用 63~125 μm 石榴石, 该粒级石榴石组合物源示踪水动力影响最少<sup>[15, 19, 30]</sup>.

3.2 长江水系沉积物碎屑石榴石物源特征

长江水系沉积物碎屑石榴石化学组成分析表明, 石榴石组合中锰铝榴石和铁铝榴石富集(表 2、图 3、图 4).

石榴石组合中钙铝榴石(G)、镁铝榴石(P)、铁铝榴石和锰铝榴石(AS)3 个端元(G-P-AS 三角图解)可以很好示踪其物源组成<sup>[12, 15, 26-28, 31-32]</sup>. 长江流域沉积物石榴石的 G-P-AS 三角图解分析显示(图 4 和图 5), 长江支流沉积物石榴石组合几乎全部落入三角图解的 B 区域, 石榴石组成以低 Mg、高 Fe 特征为主, Ca 含量变化较大. 乌江涪陵样品的 Mg 含量最高, 且相对高 Mg(图 4e). 长江铜陵干流样品少数石榴石显示出高 Mg、高 Mn、低 Fe 特征(图 4g). 根据石榴石的源岩组成(表 3), 推断长江沉积物石榴石的

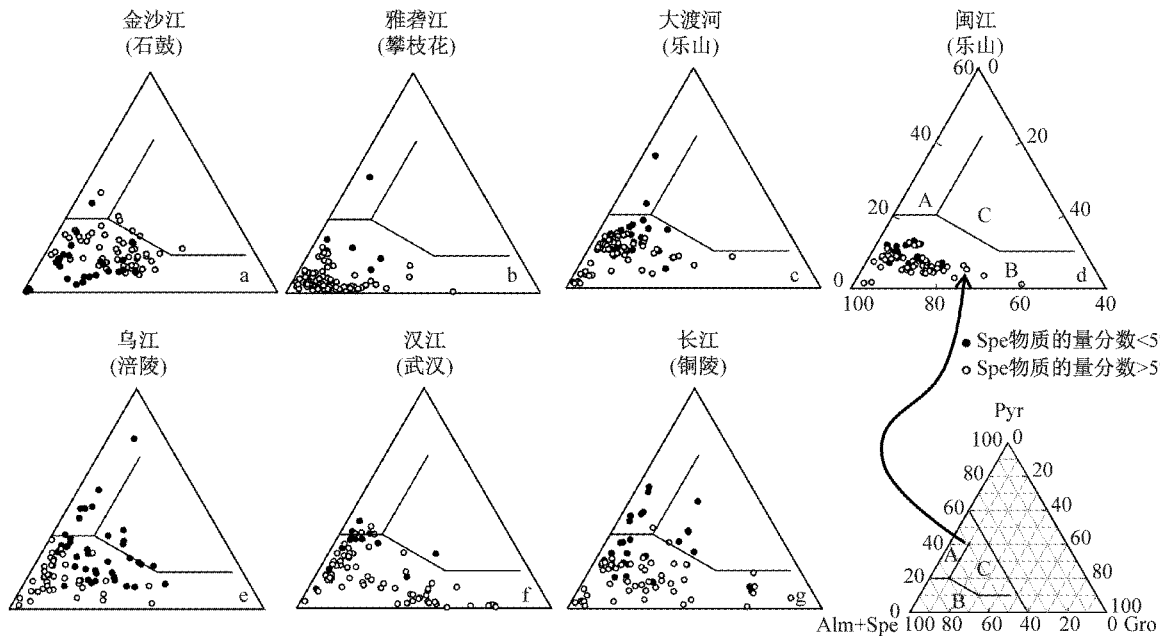


图 4 长江流域沉积物石榴石 AS-P-G 三角图解

Fig.4 Garnet populations in river sediments of Changjiang

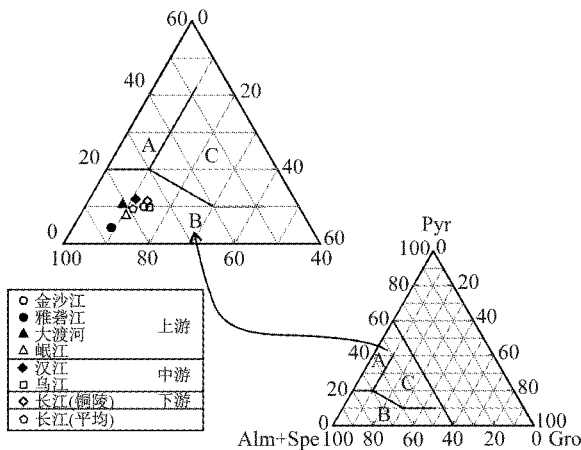


图 5 长江流域及支流石榴石化学组成

Fig.5 Garnet geochemical composition of Changjiang and its tributaries sediments

源岩应以中-低级变质岩为主。

长江流域源岩复杂(图 1),岩石类型从太古代变质岩、古生代碳酸盐岩和碎屑岩、中生代岩浆岩和碎屑岩及第四纪松散沉积物都有分布,且在不同的流域,岩石类型差异明显<sup>[3, 7, 33]</sup>。

长江源区接触变质岩零星分布,主要以热接触变质的角岩及钙铝榴石砂卡岩为主<sup>[34]</sup>,长江流域青藏川滇地区,主要是陇南山地—龙门山—乌蒙山以西的高山、高原地区,以浅变质砂岩、板岩、千枚岩及部分片岩出露,且稳定性差,易被侵蚀冲刷,是金沙江、嘉陵江携带的主要物质,也是长江泥沙的主要来源<sup>[1, 11, 35]</sup>,控制着流域碎屑石榴石组成为低 Mg、低 Ca 特征。

雅砻江、大渡河、岷江、乌江等分布古生代碳酸盐、中生代红色碎屑沉积岩和花岗岩以及中生代峨眉玄武岩<sup>[1-2, 36]</sup>。乌江流域属于扬子板块,大面积分布着二叠系—石炭系碳酸盐岩以及侏罗系—志留系等砂岩夹碳酸盐岩,中晚元古宇地层主要是陆源碎屑岩,流域西南边缘出露元古代火山岩,大陆溢流拉斑玄武岩及辉绿岩组合<sup>[37-38]</sup>以及东部区域分布的浅变质岩和局部超基性岩。乌江流域是长江流域碳酸盐岩分布最广的支流,分布面积达到  $6.9 \times 10^4$  km<sup>2</sup>,占流域面积 80%<sup>[39]</sup>,其岩溶覆盖率超过 80%<sup>[40]</sup>,受其影响石榴石出现部分高 Ca、高 Mn 特征。雅砻江攀枝花样品高 Fe、高 Mn,石榴石可能是受到攀枝花钒钛磁铁矿区内辉长岩外接触带富含石榴石的大理岩或砂卡岩的影响<sup>[41-43]</sup>。岷江和大渡河流域分布大面积高绿片麻岩相和低角闪岩相岩石,沉积物中多典型的泥质区域变质矿物如蓝晶石等<sup>[1]</sup>,因而岷江和大渡河流域沉积物中的石榴石呈

现出浅变质岩的低 Mg、低 Ca 特征。

中下游支流汉江流域沉积物组成主要源自上游流域秦岭造山带表壳岩系<sup>[40]</sup>。秦岭造山带地表地质主要由 3 套构造岩石地层单位构成,分别是分散残块夹持在秦岭带内的晚太古代—早元古代变质结晶杂岩系基底和出露广泛的早中元古代火山—沉积浅变质岩系、晚元古代—中三叠纪广泛发育的不同类型蛇绿岩和花岗岩、中生代内断陷和造山带前后陆盆地沉积及构造岩浆<sup>[44]</sup>。其中,以古生代变质岩系分布最广,主要分布在南秦岭地区<sup>[45]</sup>,即支流的上游,以低级变质的片岩、板岩及变质灰岩为主<sup>[46]</sup>,沉积物石榴石受其影响,组成以低 Mg、低 Ca 为主,还有少部分颗粒受变质灰岩影响而高 Ca。长江下游干流铜陵沉积物由于流域众支流物质的加入,形成混合沉积,但总体为低 Mg、高 Mn 特征。由于长江流域碳酸盐岩主要分布在宜昌上游(图 1),其高 Mg、低 Ca 的石榴石颗粒可能主要来自乌江。

综上所述,长江流域主体在年轻的扬子地块上,其中元古代广泛形成浅变质岩系<sup>[47-49]</sup>,沉积物中碎屑石榴石的源岩以中低级变质岩为主,如流域出露的片岩、千枚岩和大理岩以及低温接触变质岩控制了流域沉积物石榴石的组成,呈低 Mg、高 Mn 特征(图 5)。

### 3.3 金沙江沉积物碎屑石榴石组成特征

长江是我国最大的河流,河流流域面积广大,从上游到下游河流入海口,不同支流携带的复杂的支流物质汇入,在河口形成混合性较强的沉积物,会在一定程度上减弱其物源特征,因此,为更好地识别长江河流端元的物源特点,选取长江水系代表性最强、对入海物质贡献最大的支流进行分析。

已有研究表明,上游是长江流域粗碎屑沉积物的主要来源,主要来自金沙江流域内的源岩<sup>[5, 35, 44, 49-50]</sup>。金沙江沉积物石榴石组合呈现为典型的低 Mg、高 Mn 特征(图 6),与整个长江干流石榴石组成基本一致(图 5),锰铝榴石摩尔分数最低为 7.8%(表 2),不受中下游地区长距离的近源沉积物影响,因此金沙江可以作为长江物源端元的特征河流,其石榴石组合代表着长江流域沉积物的标型石榴石组成。

## 4 结论

(1) 长江水系沉积物石榴石的元素组成以 SiO<sub>2</sub>、FeO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MnO、CaO、MgO、TiO<sub>2</sub> 为主,石

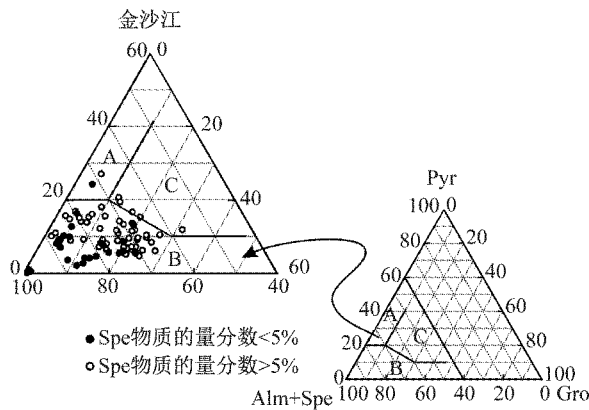


图 6 金沙江流域沉积物石榴石组成

Fig.6 Garnet assemblages of Jinshajiang river sediments

石榴石组合主要是镁铝榴石、铁铝榴石、钙铝榴石和锰铝榴石,其物质的量分数平均值分别是 65.4%、13.8%、9.4%和 11.47%。

(2) 长江水系沉积物中碎屑石榴石呈低 Mg、高 Mn 特征,其源岩以中低级变质岩为主,长江流域出露的片岩、千枚岩和大理岩以及低温接触变质岩控制了沉积物石榴石的组成。

(3) 金沙江是长江入海粗粒沉积物的主要来源,石榴石组合呈现为典型的低 Mg、高 Mn 特征,与整个长江干流石榴石组成基本一致,其石榴石组合可以作为长江特征物源端元,用以海域沉积物物源示踪。

#### 参考文献:

- [1] 王中波,杨守业,李萍,等. 长江水系沉积物碎屑矿物组成及其示踪意义[J]. 沉积学报,2006, 24(4):570.  
WANG Zhongbo, YANG Shouye, LI Ping, *et al.* Detrital mineral compositions of the Changjiang River sediments and their tracing implications[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2006, 24(4):570.
- [2] YANG S Y, WANG Z B, GUO Y, *et al.* Heavy mineral compositions of the Changjiang (Yangtze River) sediments and their provenance-tracing implication[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, 35(1):56.
- [3] HE M Y, ZHENG H B, HUANG X T, *et al.* Yangtze River sediments from source to sink traced with clay mineralogy[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 69: 60.
- [4] WANG Q, YANG S Y. Clay mineralogy indicates the Holocene climate in the Changjiang (Yangtze River) catchment, China [J]. *Applied Clay Science*, 2013, 74: 28.
- [5] YANG S Y, JIANG S Y, LING H F, *et al.* Sr-Nd isotopic compositions of the Changjiang sediments: Implications for tracing sediment sources[J]. *Sciences China (Series D: Earth Sciences)*, 2007, 50(10):1556.
- [6] 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.
- [7] 贾军涛,郑洪波,杨守业. 长江流域岩体的时空分布与碎屑锆石物源示踪[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010, 38(9):1375.  
JIA Juntao, ZHENG Hongbo, YANG Shouye. Rock types in Yangtze drainage and their implication for zircon U-Pb provenance study of Yangtze sediments[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2010, 38(9): 1375.
- [8] 杨守业,韦刚建,石学法. 地球化学方法示踪东亚大陆边缘源汇沉积过程与环境演变[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2015, 34(5): 902.  
YANG Shouye, WEI Gangjian, SHI Xuefa. Geochemical approaches of tracing source-to-sink sediment processes and environmental changes at the East Asian continental margin [J]. *Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry*, 2015, 34(5): 902.
- [9] VEZZOLI G, GARZANTI E, LIMONTA M, *et al.* Erosion patterns in the Changjiang (Yangtze River) catchment revealed by bulk-sample versus single-mineral provenance budgets[J]. *Geomorphology*, 2016, 261:177.
- [10] MORTON A C, HALLSWORTH C R. Processes controlling the composition of heavy mineral assemblages in sandstone [J]. *Sedimentary Geology*, 1999, 124: 3.
- [11] WELTJE G J, EYNATTEN H. Quantitative provenance analysis of sediments: Review and outlook[J]. *Sedimentary Geology*, 2004, 171: 1.
- [12] SABEEN H M, RAMANUJAM N, MORTON A C. The provenance of garnet: Constraints provided by studies of coastal sediments from southern India [J]. *Sedimentary Geology*, 2002, 152: 279.
- [13] GARZANTI E, ANDÒ S, FRANCE-LANORD C, *et al.* Mineralogical and chemical variability of fluvial sediments 1. Bedload sand (Ganga - Brahmaputra, Bangladesh) [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, 299: 368.
- [14] DENG K, YANG S Y, LI C, *et al.* Detrital zircon geochronology of river sands from Taiwan: Implication for sedimentary provenance and its source link with the east China mainland[J]. *Earth Science Reviews*, 2017, 164: 34.
- [15] MORTON A C, HALLSWORTH C R, CHALTON B. Garnet compositions in Scottish and Norwegian basement terrains: A framework for interpretation of North Sea sandstone province [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2004, 21:393.
- [16] HALLSWORTH C, CHISHOLM J I. Provenance of late Carboniferous sandstones in the Pennine Basin (UK) from combined heavy mineral, garnet geochemistry and palaeocurrent studies [J]. *Sedimentary Geology*, 2008, 203: 196.
- [17] 王中波,杨守业,王红霞,等. 南黄海表层沉积物石榴石化学组成及其物源示踪[C]//金翔龙,秦蕴珊,朱日祥,等. 中国地质地球物理研究进展. 北京:海洋出版社,2009:587-595.  
WANG Zhongbo, YANG Shouye, WANG Hongxia, *et al.* The garnet compositions of the surface sediments in the South Yellow Sea and their tracing implications[C]// JIN Xianglong, QIN Yunshan, ZHU Rixiang, *et al.* The Geology and

- Geophysics Progresses of China. Beijing: Ocean Press, 2009: 587-595.
- [18] MORTON A, MEINHOLD G, HOWARD J P, *et al.* A heavy mineral study of sandstones from the eastern Murzuq Basin, Libya: Constraints on provenance and stratigraphic correlation [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2011, 61: 308.
- [19] KRIPPNER A, MEINHOLD G, MORTON A C, *et al.* Evolution of garnet discrimination diagrams using geochemical data derived from various host rocks [J]. *Sedimentary Geology*, 2014, 306: 36.
- [20] SIRCOMBEA K N. Quantitative comparison of large sets of geochronological data using multivariate analysis: A provenance study example from Australia [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64(9): 1593.
- [21] 王扬扬, 范代读. 长江流域岩体锆石 U-Pb 年龄与 Hf 同位素特征及沉积物源示踪意义 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2013, 33(5): 97.  
WANG Yangyang, FAN Daidu. U-Pb ages and Hf isotopic composition of crystalline zircons from igneous rocks of the Changjiang drainage basin and their implications for provenance [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2013, 33(5): 97.
- [22] HE M Y, ZHENG H B, BOOKHAGEN B, *et al.* Controls on erosion intensity in the Yangtze River basin tracked by U-Pb zircon dating [J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 136: 121.
- [23] 杨守业, 李从先, 朱金初, 等. 长江与黄河沉积物中磁铁矿成分标型意义 [J]. *地球化学*, 2000, 29(5): 480.  
YANG Shouye, LI Congxian, ZHU Jinchu, *et al.* Provenance indicator of chemical fingerprint of magnetite from the Yangtze River and the Yellow River sediments [J]. *Geochimica*, 2000, 29(5): 480.
- [24] 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 [J]. *地球化学*, 2007, 36(2): 176.  
WANG Zhongbo, YANG Shouye, WANG Rucheng, *et al.* Magnetite compositions of Changjiang River sediments and their tracing implications [J]. *Geochimica*, 36(2): 176.
- [25] BERNSTEIN S, FREI D, MCLIMANS R K, *et al.* Application of CCSEM to heavy mineral deposits: Source of high-Ti ilmenite sand deposits of South Kerala beaches, SW India [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2008, 96: 25.
- [26] COPJAKOVA R, SULOVSKY P, PATERSON B A. Major and trace elements in pyrope- almandine garnets as sediment provenance indicators of the Lower Carboniferous Culm sediments, Drahaný Uplands, Bohemian Massif [J]. *Lithos*, 2005, 82: 51.
- [27] MANGE M A, MORTON A C. Geochemistry of heavy minerals [J]. *Developments in Sedimentary*, 2007, 55: 345.
- [28] SUGGATE S M, HALL R. Using detrital garnet compositions to determine provenance: A new compositional database and procedure [C]//Scott R A, Morton A C, Richardson N. *Sediment Provenance Studies in Hydrocarbon Exploration and Production*. London: Geological Society of London, Special Publication, 2013, 386(1): 373-393.
- [29] ANDERSEN T. Detrital zircons as tracers of sedimentary provenance: Limiting conditions from statistics and numerical simulation. *Chemical Geology* [J], 2005, 216: 249.
- [30] MORTON A C. A new approach to provenance studies: Electron microprobe analysis of detrital garnets from Middle Jurassic sandstones of the northern North Sea [J]. *Sedimentology*, 1985, 32: 553.
- [31] 李双建, 石永红, 王清晨. 碎屑重矿物分析对库车坳陷白垩—第三纪物源变化的指示 [J]. *沉积学报*, 2006, 24(1): 28.  
LI Shuangjia, SHI Yonghong, WANG Qingchen. The analysis of detrital heavy minerals in Cretaceous—Tertiary sandstones, Kuqa Depression and their implications for provenance [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2006, 24(1): 28.
- [32] KRIPPNER A, MEINHOLD G, MORTON A C, *et al.* Heavy minerals and garnet geochemistry of stream sediments and bedrocks from the Almklovdalen area, Western Gneiss Region, SW Norway: Implications for provenance analysis [J]. *Sedimentary Geology*, 2016, 336: 96.
- [33] QU C H, ZHENG J X, YANG S J, *et al.* Element composition and influencing factors of suspended matter in lower reaches of Huanghe, Changjiang and Zhujiang rivers [J]. *Science Bulletin*, 1985, 30(8): 1078.
- [34] 汤朝阳, 朱应华, 白云山. 长江源区变质岩带及研究意义 [J]. *资源环境与工程*, 2006, 20(4): 354.  
TANG Chaoyang, ZHU Yinghua, BAI Yunshan. Metamorphic belt of Yangtze River source area and its geological significance [J]. *Resources Environment & Engineering*, 2006, 20(4): 354.
- [35] LUO C, ZHENG H B, TADA R, *et al.* Tracing Sr isotopic composition in space and time across the Yangtze River basin [J]. *Chemical Geology*, 2014, 388: 59.
- [36] 中国科学院长春地理研究所. 长江水体环境背景值研究图集 [M]. 北京: 科学出版社, 1998.  
Changchun Institute of Geography, CAS. Atlas of study on background value of aquatic environment of the Changjiang river valley [M]. Beijing: Science Press, 1998.
- [37] HAN G L, TANG Y, XU Z F. Fluvial geochemistry of rivers draining karst terrain in Southwest China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2010, 38: 65.
- [38] 张君, 李长安, 孙习林. 乌江流域中—新生代以来构造运动的碎屑磷灰石裂变径迹证据 [J]. *地质论评*, 2013, 59(3): 537.  
ZHANG Jun, LI Chang'an, SUN Xilin. The detrital apatite fission-track evidence for tectonic processes since Mesozoic-Cenozoic in Wujiang River catchments [J]. *Geological Review*, 2013, 59(3): 537.
- [39] 吴应科, 卢东华, 梁永平. 长江流域岩溶区资源的开发利用 [J]. *中国岩溶*, 1989, 8(2): 107.  
WU Yingke, LU Donghua, LIANG Yongping. Development and utilization of natural resources in Karst areas of the Yangtze River basin [J]. *Carsologica Sinica*, 1989, 8(2): 107.
- [40] 张连凯, 覃小群, 刘朋雨, 等. 硫酸参与的长江流域岩石化学风化与大气 CO<sub>2</sub> 消耗 [J]. *地质学报*, 2016, 90(8): 1933.  
ZHANG Liangkai, TAN Xiaoqun, LIU Pengyu, *et al.* Chemical denudation rate and atmospheric CO<sub>2</sub> consumption by H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> and H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> in the Yangtze River catchment [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2016, 90(8): 1933.
- [41] 马玉孝, 刘家铎, 王洪峰. 攀枝花地质 [M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2001.