

doi:10.3799/dqkx.2012.S1.005

# 江汉平原沉积物中含钛普通辉石对长江演化的示踪

杨建<sup>1</sup>, 李长安<sup>1,2\*</sup>, 张玉芬<sup>3</sup>, 康春国<sup>1</sup>, 邵磊<sup>1</sup>

1. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学生物地质与环境地质教育部重点实验室, 湖北武汉 430074

3. 中国地质大学地球物理与空间信息学院, 湖北武汉 430074

**摘要:** 江汉平原是长江穿过三峡地区后的第一个大型卸载盆地, 其沉积物是采用“从源到汇”物质追踪思路进行三峡贯通和长江演化示踪研究的理想载体, 含钛普通辉石是长江上游(攀西地区)广泛分布的特征矿物, 可以作为长江三峡贯通研究的示踪矿物。通过对位于盆地沉积中心的周老孔岩心沉积物及长江和汉江现代沉积物中重矿物(粒径为0.063~0.125 mm)中的辉石进行提取、丰度统计和矿物化学成分分析, 一方面, 发现长江和汉江现代沉积物中辉石的物源完全不同, 其中长江的辉石主要来自攀西地区; 另一方面, 周老孔岩心从深度104 m处开始出现含钛普通辉石, 并且由此处向上辉石含量明显增加、辉石的类型组成明显变化, 表明在岩心深度104 m(古地磁年龄1.1 Ma左右)位置处长江三峡已经贯通。而深度45 m处及其上部的辉石类型组成与现代长江相似, 表明在古地磁年龄0.4 Ma左右长江已经基本发育成现代的模式。

**关键词:** 江汉平原; 第四纪; 沉积物; 含钛普通辉石; 长江演化; 地球物理。

**中图分类号:** P575.1

**文章编号:** 1000-2383(2012)S1-0043-07

**收稿日期:** 2011-10-27

## Ti-Augite in Sediments of the Jianghan Plain as Tracing Mineral: Implication for the Evolution of the Yangtze River

YANG Jian<sup>1</sup>, LI Chang-an<sup>1,2\*</sup>, ZHANG Yu-fen<sup>3</sup>, KANG Chun-guo<sup>1</sup>, SHAO Lei<sup>1</sup>

1. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology of Ministry of Educations, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. Institute of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

**Abstract:** The Jianghan plain is the first large-scale offloading basin of the Yangtze River after the formation of the Three Gorges. Its sediment deposits should reflect that the Yangtze River used to flow through. Ti-augite, a characteristic rock of Panxi area, where the formational conditions is unique in the Yangtze River basin, can be used as a tracing mineral to analyze the formation of the Three Gorges. The analysis of the percentage content and the electron microprobe analysis of the pyroxenes in Zhoulao core fine sediments between 0.063 mm and 0.125 mm show that the content of pyroxenes increases after 104 meters and Ti-augites appear. This line of change (104 m) dated of about 1.1 Ma attest a change of sediment provenance. So we conclude that the Three Gorges was formed around the time 1.1 Ma. From that time, materials from upper Three Georges has deposited in the Jianghan basin as a result of the forming of the Yangtze River. The characteristics of the pyroxenes composing the first 45 meters dated around (0.45 Ma) and those of the current Yangtze River are alike, meaning that during that period the Yangtze River already develops to its current pattern.

**Key words:** Jianghan plain; Quaternary; sediments; Ti-augite; evolution of the Yangtze River; geophysics.

长江三峡的贯通是长江形成的关键问题之一, 峡贯通的时间存在很大分歧(杨达源, 1988; 李长安, 20世纪初就引起国内外著名学者的关注, 有关三和张玉芬, 1997; Clark *et al.*, 2004; 范代读等,

**基金项目:** 国家自然科学基金(Nos. 40971008, 40771213); 中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室开放基金(No. SKLLQG0908)。

**作者简介:** 杨建(1978-), 男, 博士研究生, 主要从事地貌学与第四纪地质学方面的研究。E-mail: yangjianzai@tom.com

\* **通讯作者:** 李长安, E-mail: chanli@cug.edu.cn

2004;向芳等,2006;Richardson *et al.*, 2010). 前人对长江三峡贯通的研究大多采用地貌学和沉积学方法,由于三峡地区地貌完整性不易保存以及沉积学方法在解释物源方面的局限性,导致了对三峡贯通问题的多解性. 目前,国际共识的“从源到汇”物质追踪思路进行河流的示踪研究,即采用电子探针、质谱分析、阴极发光等先进技术,开展现代沉积物物性特征研究,在“源”中找到特征性的矿物组合或地球化学成分,然后在“汇”中进行物源研究. 江汉盆地是长江切开三峡后第一个接受沉积的大型卸载盆地,其巨厚的连续沉积,是基于物源示踪研究长江演化的理想信息载体(李长安和张玉芬,1997). 笔者利用长江上游与中下游在地壳形成演化及表壳岩系组成等方面的明显差异(康春国等,2009;杨建等,2009),选择特征矿物进行长江演化的物源示踪研究.

成因矿物学的研究表明,矿物的晶体结构、形态、物理性质及化学组成等具有特定的环境标型意义,基于流域特征矿物的物源示踪已成为河流形成演化研究的一种重要方法. 近年来,运用特征矿物进行河流沉积物及大陆边缘海沉积物物源示踪的研究进展较快,一些学者已将特征矿物作为示踪标志用于长江的形成演化研究中. 陈丽蓉等(1980)通过对长江口、东海大陆架表层沉积物矿物组成的研究,认为白云石是长江沉积物的特征矿物;孙白云(1990)研究了长江三角洲沉积物中的碎屑矿物组成,认为

楣石和白云石是其特征矿物;王中波等(2006)研究了长江干流及支流沉积物的碎屑矿物组成,认为红柱石和磷灰石是金沙江沉积物的特征矿物组合;雷文大等(2009)通过源岩分析认为攀枝花型钒钛磁铁矿可以作为三峡贯通的物源示踪矿物. 然而,随着单颗粒矿物微区测年技术的发展,其迅速被应用到长江物源研究中,如锆石(Wang *et al.*, 2010)、独居石(范代读等,2004)等. 笔者通过对长江流域表层岩石组成的调查发现,广泛分布于长江上游攀西地区峨眉山玄武岩和其他基性岩和超基性侵入岩中的含钛普通辉石,在长江流域具有唯一性,它们是由长江中下游沉积物示踪三峡贯通的典型特征矿物. 笔者通过对江汉平原晚新生代以来沉积物中含钛普通辉石的系统分析,结合川江沉积物中含钛普通辉石的分布特点,对长江三峡的贯通时间进行了探讨.

## 1 样品采集和实验

### 1.1 样品的采集

样品分 2 部分. 一部分样品是基于源—汇示踪,采集于长江中游的沉积汇——江汉平原监利县周老镇 ZL 孔(112°59'E, 30°02'N)的岩心,钻孔位置见图 1. 周老镇钻孔位于江汉盆地晚新生代沉积中心,是江汉平原的代表性钻孔. 岩心全长超过 300 m,取心率在 85% 以上,主要为一套粘土、粉砂、细砂、粗砂、

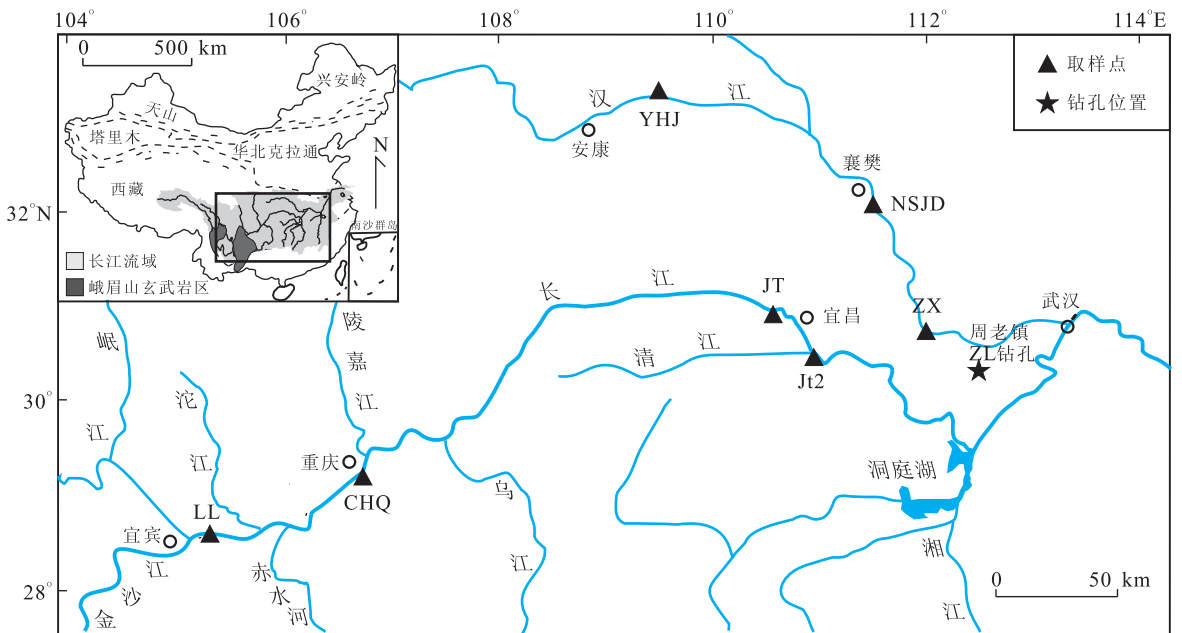


图 1 取样位置

Fig. 1 Location of sampling site

表 1 周老镇钻孔岩心(0.063~0.125 mm 粒级)各样品重矿物中普通辉石的电子探针统计结果

Table 1 Electron microprobe analysis of augite of samples (in 0.063~0.125 mm size fraction) in Zhoula core

岩心深度(m)	15	30	45	61	87	96	104	120	127	143	165	197	229	285
探针片数(个)	1	1	1	1	2	2	3	2	1	1	1	1	1	1
鉴定颗粒数(颗)	135	112	91	86	279	312	500	143	184	132	144	103	154	97
探针实验数(颗)	15	11	7	8	24	16	36	9	8	14	15	10	10	10
含钛普通辉石(颗)	3	1	0	0	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0

砂砾互层的沉积物(马永法等,2007)。由上向下选取颜色粒度相似的灰绿色、灰色的河漫滩相细砂层进行取样,共取得分析样品 22 个,取样深度见表 1。

另一部分样品是为了与江汉平原钻孔沉积物比较,取自现代长江的河漫滩沉积物(三峡以上 2 个,三峡以下 2 个);考虑到江汉平原沉积物的主要物源为长江上游与汉江,为区分和排除汉江沉积物的影响,同时还采集 3 个有代表性的汉江沉积物样品,取样位置见图 1。

## 1.2 样品实验分析

样品实验分析的流程是:首先进行样品处理;然后在双目镜下挑选普通辉石,并制成探针片,在偏光镜下对普通辉石做进一步的鉴定;最后通过电子探针进行成分组成分析,确定含钛普通辉石。具体分析步骤如下。

**1.2.1 样品处理** 首先将每个样品烘干,称取 1 kg 样品,在清水中浸泡 48 h。为了保证上游物质能够搬运至江汉盆地,将浸泡后的样品过套筛(选用 120 目、240 目的筛网),并适当加压,水析分离出 0.063~0.125 mm 粒级的样品,将其烘干后用电子天平称重,得到粒级重量。然后,用缩分法取 10 g 样品,利用三溴甲烷(比重 2.89 g/cm<sup>3</sup>)进行轻重矿物分离,分离出来的样品用酒精反复冲洗,60 ℃ 恒温下烘干后再称重,可得重矿物部分的含量。最后,进行磁选,选取电磁性部分。

**1.2.2 双目镜下选取普通辉石** 将上述分离出来的重矿物部分在双目镜下采用条带法随机选取 10 个视域,根据砂矿物鉴定手册(中国地质科学院地矿所,1977)进行矿物鉴定,每个重矿物样品鉴定颗粒数均在 600 粒以上(个别矿物磨切片在偏光显微镜下确认)。然后将每个样品挑选出不少于 100 颗普通辉石制成探针片。

在双目镜下可见普通辉石呈近八边形,颜色多为墨绿色、褐绿色,还有浅绿色、灰绿色、蔷薇色等;玻璃光泽,粒状、短柱状,切口不平整;磨圆度为次圆到次棱角状,解理少见。

**1.2.3 偏光镜下含钛普通辉石鉴定** 用偏光显微

镜对探针片上的普通辉石进行鉴定,标记可能的含钛普通辉石,同时选取并标记部分其他种类的普通辉石。偏光显微镜下普通辉石普遍发育 1 组解理,少数有 2 组近垂直解理,正高突起,呈浅绿色到近无色,多色性不明显,消光角较大( $Ng' \wedge C = 35^\circ \sim 42^\circ$ ),正交偏光下为一级橙到二级低部干涉色,其中,带淡玫瑰红色色调可能为含钛普通辉石。

**1.2.4 含钛普通辉石的电子探针鉴定** 为了保证含钛普通辉石鉴定的准确性,对探针片中鉴定并标记的含钛普通辉石及其他普通辉石用电子探针进行矿物地球化学成分测试。电子探针实验在中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室完成。采用仪器为日本技术 JEOL 株式会社生产的电子探针显微分析系统 JXA-8100,加速电压 1~30 kV,束流范围  $10^{-12} \sim 10^{-6}$  m。

## 2 结果及其分析

### 2.1 资料整理

将实验数据分别进行以下处理:首先,用双目镜鉴定各种重矿物的颗粒百分含量,根据砂矿物鉴定手册(中国地质科学院地矿所,1977)提供的矿物比重,计算出从 10 g 样品分离出的 0.063~0.125 mm 粒级的重矿物样品中辉石的质量丰度(图 2)。

然后,将电子探针数据进行统计分析,周老镇钻

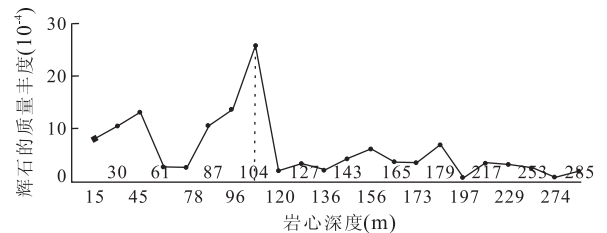


图 2 周老镇钻孔岩心(0.063~0.125 mm 粒级)各样品中辉石的重量含量随深度变化趋势

Fig. 2 Pyroxenes contents of samples (in 0.063 ~ 0.125 mm size fraction) varying with depth in Zhoula core

表 2 周老镇钻孔岩心、长江现代沉积物(0.063~0.125 mm 粒级)以及攀西地区部分岩体中含钛普通辉石的电子探针数据(%)  
Table 2 Electron microprobe analysis of pyroxenes of amples (in 0.063~0.125 mm size fraction) in Zhoulao core, the sediments of Yangtze River and Ti-augite of rocks from the Panxi rift (%)

取样位置描述	探针点号	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	MnO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	FeO*	SiO <sub>2</sub>	Total
岩心深度 15 m	g1-3-1	0.337	—	0.341	15.355	20.041	0.194	2.562	1.302	8.400	51.110	99.642
岩心深度 15 m	g1-4-2	0.268	0.008	0.390	15.210	21.960	0.093	3.750	1.404	6.027	50.381	99.491
岩心深度 15 m	g1-6	0.321	—	0.232	14.887	19.297	0.259	2.257	1.050	9.830	51.811	99.944
岩心深度 30 m	g2-7	0.332	0.015	0.233	11.954	23.354	0.235	1.104	1.080	9.202	51.997	99.506
岩心深度 87 m	Z6-2	0.333	0.016	3.770	14.514	20.689	0.074	3.079	0.912	4.658	46.030	94.075
岩心深度 104 m	z8-a-1	0.456	0.010	0.018	14.818	20.466	0.288	3.244	1.247	8.475	51.244	100.266
岩心深度 104 m	2002-8-6	0.385	0.031	1.703	14.855	20.932	0.082	3.572	1.079	4.889	47.165	94.693
罗龙(长江现代沉积物)	LL-1	0.494	—	—	13.860	20.846	0.267	3.315	1.560	8.525	51.354	100.221
罗龙(长江现代沉积物)	LL-4	0.243	0.005	0.101	14.629	20.995	0.174	4.471	1.595	7.857	49.799	99.869
罗龙(长江现代沉积物)	LL-6	0.483	0.005	0.131	14.315	21.274	0.237	3.221	1.148	7.338	50.247	98.399
罗龙(长江现代沉积物)	LL-7	0.493	—	0.474	15.158	22.286	0.104	2.185	1.921	6.321	50.671	99.613
重庆(长江现代沉积物)	chq-5	0.640	—	0.009	14.950	21.798	0.196	3.699	1.302	6.697	50.012	99.303
重庆(长江现代沉积物)	chq-6	0.447	0.001	—	14.188	20.256	0.249	3.221	1.511	8.807	50.994	99.674
重庆(长江现代沉积物)	chq-9	0.501	—	0.007	14.336	23.206	0.116	4.036	1.326	5.426	50.488	99.442
重庆(长江现代沉积物)	chq-10	0.444	—	0.060	14.559	21.207	0.173	3.507	1.435	7.295	50.865	99.545
宜昌(长江现代沉积物)	JT-2	0.606	0.017	0.057	14.519	21.180	0.159	3.525	1.629	7.430	50.587	99.709
宜昌(长江现代沉积物)	JT-5	0.409	0.004	—	14.840	21.596	0.178	3.270	1.031	7.991	50.457	99.776
宜昌(长江现代沉积物)	JT-8	0.638	—	—	14.613	21.316	0.196	3.656	1.584	7.563	50.333	99.899
宜昌(长江现代沉积物)	JT-9	0.473	0.024	—	14.992	21.064	0.265	2.389	1.145	8.007	51.765	100.124
峨眉山玄武岩 <sup>①</sup>	M4-2	0.330	—	0.080	10.590	19.940	0.300	2.630	1.550	16.200	48.200	99.830
峨眉山玄武岩 <sup>①</sup>	R12-4	0.440	—	0.170	15.780	20.030	0.150	4.560	1.180	7.220	51.310	100.840
峨眉山玄武岩 <sup>①</sup>	D12-2-2	0.310	—	0.660	14.180	20.630	0.130	2.900	0.970	5.900	50.670	99.690
峨眉山玄武岩 <sup>①</sup>	Z17-1-1	0.400	—	0.160	15.870	18.200	0.210	3.250	1.080	9.610	51.950	100.750
攀枝花岩体 <sup>②</sup>	LG020	0.570	—	—	14.160	21.580	0.400	2.710	1.020	8.430	50.860	99.750
罗茨鸡街岩体 <sup>③</sup>	g-43-1	0.750	0.020	0.050	14.270	24.040	0.060	3.620	1.290	5.290	50.710	100.110

注: \* 数据表示全铁; “—” 数据表示微量 (<0.010); <sup>①</sup> 数据引用自黄开年(1988); <sup>②</sup> 数据引用自万睿等(1986); <sup>③</sup> 数据引用自吴静等(1994)。

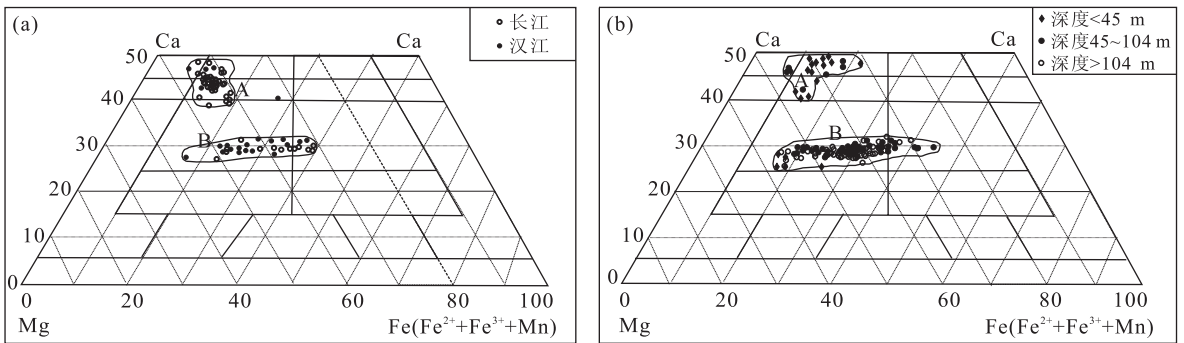


图 3 长江上游和汉江现代沉积物(a)以及周老孔岩心中(b)辉石的 Mg-Ca-Fe(Fe<sup>2+</sup> + Fe<sup>3+</sup> + Mn)分析(单位: %)

Fig. 3 Mg-Ca-Fe(Fe<sup>2+</sup> + Fe<sup>3+</sup> + Mn) diagram of the pyroxenes of the floodplain sediments of the Yangtze River, Hanjiang River (a) and samples in Zhoulao core (b)

孔沉积物的辉石中获得有效数据 193 个, 现代沉积物数据 90 个(表 1)。将周老镇钻孔沉积物样品制作的探针片中鉴定的辉石的颗粒数、疑似含钛普通辉石的颗粒数及最终探针结果进行统计(表 2)。

最后, 对长江和汉江现代沉积物及周老镇钻孔岩心沉积物中辉石的电子探针数据分别投影于 Mg-Ca-Fe(Fe<sup>2+</sup> + Fe<sup>3+</sup> + Mn)图进行分类(图 3a, 3b)。

将在周老镇钻孔沉积物中发现的含钛普通辉石的矿物化学成分同长江现代沉积物及攀西地区岩体中的含钛普通辉石的化学成分进行对比(表 2)。

## 2.2 实验结果的分析及其对长江演化的指示

### 2.2.1 长江与汉江辉石组成的比较及其物源意义

从现代沉积物中辉石的矿物地球化学数据投影(图 3a)可以看出, 长江与汉江明显不同, 主要表现

在:长江沉积物中的辉石主要由透辉石和普通辉石组成,主要投影在A区,其次在B区;汉江沉积物中的辉石基本投影在B区,个别在A区. A区的辉石分布在透辉石、次透辉石、普通辉石和顽透辉石4区的结点附近,主要为Ca和Mg含量较高的普通辉石和顽透辉石,也称为透辉石质普通辉石. 根据成因矿物学(薛君治等,1986),结合1309个单斜辉石的投影(Deer *et al.*, 1983)可知,A区的辉石主要源于岩浆岩,其寄主岩石应该是碱性和强碱性岩;结合长江流域源岩的空间分布状况(杨建等,2009)可以看出,其主要产自基性、超基性岩浆岩. B区的辉石分布在普通辉石区,相对Ca和Mg较低,主要源于变质岩的普通辉石.

长江和汉江的现代沉积物中辉石种类组合明显不同,表明长江和汉江的物源完全不同. 根据长江流域源岩的空间分布状况(杨建等,2009;康春国等,2009)可以看出,三峡以西长江上游流域的基性、超基性岩分布面积、类型、特征等明显不同于江汉平原周边地区(主要是汉江流域). 长江上游的基性、超基性岩主要分布在攀西地区,而且根据黄开年(1988)的研究,峨眉山玄武岩中的辉石基本都投影在A区. 由此推断,长江现代沉积物中的普通辉石主要来自三峡以上攀西地区的峨眉山玄武岩和其他超基性—基性侵入岩.

根据现代沉积物中辉石的矿物地球化学数据并结合投影图3可以发现,长江沉积物各个样品的辉石组成基本相同,汉江各个样品的基本不同,且同长江对比也不同;长江沉积物有大量的含钛普通辉石,汉江沉积物没有这种含钛普通辉石,且这种含钛普通辉石同攀西地区岩体中的含钛普通辉石具有相似特征(表2). 这与上文推断一致,同时也说明长江沉积物受汉江影响很小.

**2.2.2 江汉平原辉石组成及其变化特征对三峡贯通的指示** 从江汉平原周老镇钻孔沉积物中辉石的质量丰度(图2)可以看出,辉石的丰度在深度104 m发生突变,而且104 m以上明显大于104 m以下. 从周老镇钻孔沉积物中辉石的矿物地球化学数据投影(图3b)可以看出,深度45 m、45~104 m与104 m及更深处的辉石组成区别较大;深度45 m以上主要投影在A区;104 m以下辉石都投影在B区;而深度45~104 m主要投影在B区,小部分在A区. 同时发现,从深度104 m往更深处开始出现含钛普通辉石.

周老镇钻孔辉石的质量丰度和类型组成在

104 m处的变化是物源区变化引起的. 根据河北廊坊诚信地质公司的鉴定,周老镇钻孔中的辉石主要是普通辉石(杨建等,2009),普通辉石主要产自基性、超基性岩浆岩(尤其是辉长岩、辉绿岩、玄武岩). 从江汉平原沉积物的源区来看,长江上游(三峡以上)的基性和超基性岩主要分布在攀西地区,该地区的峨眉山玄武岩和其他超基性—基性侵入岩出露于四川、云南、贵州三省的广大区域,面积约 $25 \times 10^4 \text{ km}^2$ (张云湘等,1988);此外,嘉陵江流域也有数百平方公里的超基性—基性岩浆岩分布. 在三峡以下(近源区)能提供普通辉石的超基性—基性岩浆岩主要来自黄陵地区和汉江流域,黄陵地区的基性岩体是由辉绿岩和辉绿玢岩组成的基性岩墙群,出露面积很小(仅数十平方公里),其主要组分是角闪石及少量透辉石(马大铨等,2002);汉江上游有基性岩、超基性岩出露,但汉江泥沙对江汉平原沉积的贡献相对较小(杨建等,2009). 周老镇钻孔沉积物中的锆石研究证明峨眉山大火成岩省是江汉平原沉积物的重要供给区(Wang *et al.*, 2010). 所以,104 m以上辉石丰度的显著变化是长江切穿三峡后远源物质进入江汉平原引起的. 通过岩性分析,结合上文中现代沉积物中辉石的特征可以看出,远源的辉石组成(主要来自金沙江流域)同近源基本不同,故当远源的物质进入江汉平原后,周老镇钻孔沉积物中的辉石种类组合发生明显变化. 根据周老镇钻孔古地磁年龄(张玉芬等,2008),认为104 m深度处的年龄大约在1.1 Ma左右.

而深度45 m上下辉石的种类组合没有明显变化,但组成成分的比例发生了变化,这与河床形态及水动力条件有关. 在长江刚切穿三峡时,不利于远源的物质搬运到江汉平原,所以这时钻孔沉积物以近源物质为主,包含部分远源物质;而在深度45 m以上,长江的河床形态及水动力条件发育到现代长江相似的程度,这时江汉平原的沉积物物源以远源物质为主. 同时,笔者发现深度45 m以上的沉积物中的辉石类型组合和组成成分的比例同长江现代沉积物非常相似,进一步说明此时长江已经基本发育到现代的规模. 根据周老镇钻孔古地磁年龄(张玉芬等,2008),认为45 m深度的年龄大约在0.4 Ma左右.

**2.2.3 含钛普通辉石作为示踪矿物对三峡贯通的指示** 从周老镇钻孔辉石的矿物地球化学数据结合投影(图3a)可以发现,钻孔深度104 m处开始出现含钛普通辉石,这种含钛普通辉石的矿物元素地球化学成分基本上都是: $\text{SiO}_2$ 约50%~52%, $\text{MgO}$ 约

14%~16%, CaO 约 20%~23%, TiO<sub>2</sub> 约 1%~2%。对比长江上游现代沉积物及攀西地区岩体中的含钛普通辉石的电子探针数据(表 2)可以发现,它们的地球化学成分基本相同,推测是同一类辉石。

研究表明,峨眉山玄武岩是晚二叠世形成的与板内裂谷有关的大陆溢流玄武岩(张云湘等,1988),在长江中上游流域非常典型,而峨眉山玄武岩与其他攀西地区的超基性—基性侵入岩中的辉石主要是含钛普通辉石,是攀西裂谷带火成岩的特征组分(万睿等,1986;张云湘等,1988;黄开年,1988;吴静等,1994)。所以,含钛普通辉石是攀西地区的特征矿物,可作为长江三峡贯通和长江演化的示踪矿物;推测在周老镇钻孔中发现的含钛普通辉石是来自上游的物质,这种含钛普通辉石的首次出现(深度 104 m)代表上游物质已经到达江汉平原,也标志着长江三峡的贯通。

### 3 结论

笔者通过系统的观察、实验和分析认为:(1)长江和汉江现代沉积物中辉石的物源完全不同,长江中的辉石主要来自攀西地区;(2)周老镇钻孔深度 104 m 上下辉石的质量丰度、组成类型的变化、和含钛普通辉石的首次出现都是由于三峡以上的物质进入江汉平原引起的,这时(104 m 深度的古地磁年龄大约在 1.1 Ma 左右)三峡已经贯通;(3)钻孔深度 45 m 以上的辉石类型组成同现代长江相似,说明这时(45 m 深度的古地磁年龄大约在 0.4 Ma 左右)长江已经基本发育到现代的规模。

致谢:感谢王人镜老师在矿物鉴定和实验测试工作中的指导和帮助,同学 Jacques、江华军、董文钦、许应石在相关工作中给予了很大的帮助,在此一并表示感谢。

### References

Chen, L. R., Luan, Z. F., Zhen, T. M., et al., 1980. Mineral assemblages and their distribution patterns in the sediments of the gulf of Bohai Sea. *Oceanologia ET Limnologia Sinica*, 11(1): 46—64 (in Chinese with English abstract).

Chinese Academy of Geological Sciences, 1977. Identification manual of sand mineral. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).

Clark, M. K., Schoenbohm, L. M., Royden, L. H., et al.,

2004. Surface uplift, tectonics, and erosion of eastern Tibet from large-scale drainage patterns. *Tectonics*, 23, TC1006:1—20. doi:10.1029/2002TC001402

Deer, W. A., Howie, R. A., Zussman, J., 1983. Rock-forming minerals (Volume 2) single-chain silicates. Translated by Xie, Y. P.. China University of Geosciences Press, Wuhan (in Chinese).

Fan, D. D., Li, C. X., Yokoyama, K., et al., 2004. Monazite age spectra in the Late Cenozoic of the Changjiang delta and its implication on the Changjiang run-through time. *Science in China (Ser. D)*, 34(11): 1015—1022 (in Chinese with English abstract).

Huang, K. N., 1988. A study on the pyroxenes in the Emeishan basalts. *Chinese Journal of Geology*, 23(1): 43—56 (in Chinese with English abstract).

Kang, C. G., Li, C. A., Wang, J. T., 2009. Heavy mineral characteristics of sediments in Jiangnan plain and its indication to the forming of the Three Gorges. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 34(3): 419—427 (in Chinese with English abstract).

Lei, W. D., Li, C. A., Zhang, Y. F., et al., 2009. Research concept of formation of Yangtze Three Gorges based on diagnostic minerals tracing. *Yangtze River*, 40(9): 55—58 (in Chinese with English abstract).

Li, C. A., Zhang, Y. F., 1997. Geoscientific factors analysis on the through cutting of main drainages and the formation of flood damage in China. *Exploration of Nature*, 16(1): 61—65 (in Chinese with English abstract).

Ma, D. Q., Du, S. H., Xiao, Z. F., 2002. The origin of Huangling granite batholith. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 21(2): 151—162 (in Chinese with English abstract).

Ma, Y. F., Li, C. A., Wang, Q. L., et al., 2007. Statistics of gravels from a bore in Zhoulaotown, Jiangnan plain and its relationship with cut-through of the Yangtze Three Gorges, China. *Geological Science and Technology Information*, 26(2): 40—44 (in Chinese with English abstract).

Richardson, N. J., Densmore, A. L., Seward, D., et al., 2010. Did incision of the Three Gorges begin in the Eocene. *Geology*, 38(6): 551—554. doi:10.1130/G30527.1

Sun, B. Y., 1990. Detrital mineral assemblages in the Huanghe, Changjiang and Zhujiang delta sediments. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 10(3): 23—34 (in Chinese with English abstract).

Wan, R., Pan, Z. L., Shu, J. F., 1986. Mineralogical study of pyroxenes in Panzhihua intrusion. *Earth Science*, 11(6): 593—601 (in Chinese with English abstract).

- Wang, J. T., Li, C. A., Yang, Y., et al., 2010. Detrital zircon geochronology and provenance of core sediments in Zhoulaotown, Jiangnan plain, China. *Journal of Earth Science*, 21(3): 257—271. doi:10.1007/s12583-010-0090-4
- Wang, Z. B., Yang, S. Y., Li, Y. A., et al., 2006. Heuristic segmentation method for point analysis of hydrological time series. *Acta Sedimentologica Sinica*, 24(4): 570—578 (in Chinese with English abstract).
- Wu, J., Yan, Y. B., Huang, Z. L., 1994. A brief introduction of compositions and evolution of olivine, pyroxene and hornblende of ultrabasic alkaline rocks in Luoci region, Central Yunnan. *Yunnan Geology*, 13(1): 106—119 (in Chinese with English abstract).
- Xiang, F., Wang, C. S., Li, G. Z., et al., 2006. Character of heavy minerals in Quaternary sediments in Yichang area and its relationship with cut-through of the Yangtze Three Gorges, China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 33(2): 117—121 (in Chinese with English abstract).
- Xue, J. Z., Bai, X. R., Cheng, W., 1986. Genetic mineralogy. China University of Geosciences Press, Wuhan (in Chinese).
- Yang, D. Y., 1988. The origin and evolution of the Three Gorges of the Yangtze River. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 24(3): 466—473 (in Chinese with English abstract).
- Yang, J., Li, C. A., Kang, C. G., et al., 2009. Augite content in Jiangnan plain sediment and its implication for source tracing. *Quaternary Sciences*, 29(5): 1004—1010 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. F., Li, C. A., Wang, Q. L., et al., 2008. Magnetism parameters characteristics of drilling deposits in Jiangnan plain and indication for forming of the Yangtze River Three Gorges. *Chinese Science Bulletin*, 53(5): 577—582 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. X., Luo, Y. N., Yang, C. X., 1988. Panxi rift. Geological Publ. House, Beijing (in Chinese).
- 范代读, 李从先, Yokoyama, K., 等, 2004. 长江三角洲晚新生代地层独居石年龄谱与长江贯通时间研究. *中国科学(D辑)*, 34(11): 1015—1022.
- 黄开年, 1988. 峨眉山玄武岩的辉石研究. *地质科学*, 23(1): 43—56.
- 康春国, 李长安, 王节涛, 等, 2009. 江汉平原沉积物重矿物特征及其对三峡贯通的指示. *地球科学——中国地质大学学报*, 34(3): 419—427.
- 雷文大, 李长安, 张玉芬, 等, 2009. 基于特征矿物示踪的长江三峡贯通研究构想. *人民长江*, 40(9): 55—58.
- 李长安, 张玉芬, 1997. 中国主要水系贯通和洪灾形成的地质因素分析. *大自然探索*, 16(1): 61—65.
- 马大铨, 杜绍华, 肖志发, 2002. 黄陵花岗岩基的成因. *岩石矿物学杂志*, 21(6): 151—162.
- 马永法, 李长安, 王秋良, 等, 2007. 江汉平原周老镇钻孔砾石统计及其与长江三峡贯通的关系. *地质科技情报*, 26(2): 40—44.
- 孙白云, 1990. 黄河、长江和珠江三角洲沉积物中碎屑矿物的组合特征. *海洋地质与第四纪地质*, 10(3): 23—34.
- 万睿, 潘兆鲁, 束今赋, 1986. 攀枝花岩体辉石的矿物学研究. *地球科学*, 11(6): 593—601.
- 王中波, 杨守业, 李平, 等, 2006. 长江水系沉积物碎屑矿物组成及其示踪意义. *沉积学报*, 24(4): 570—578.
- 吴静, 颜以彬, 黄智, 1994. 滇中罗茨地区超基性碱性岩带中橄榄石、辉石和角闪石的成份及演化浅析. *云南地质*, 13(1): 106—119.
- 向芳, 王成善, 李国忠, 等, 2006. 宜昌地区第四纪沉积物重矿物特征及其与三峡贯通的关系. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 33(2): 117—121.
- 薛君治, 白学让, 陈武, 1986. 成因矿物学. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 杨达源, 1988. 长江三峡的起源与演变. *南京大学学报(自然科学版)*, 24(3): 466—473.
- 杨建, 李长安, 康春国, 等, 2009. 江汉平原沉积物中普通辉石的特征及物源示踪意义. *第四纪研究*, 29(5): 1004—1010.
- 张玉芬, 李长安, 王秋良, 等, 2008. 江汉平原沉积物磁学特征及对长江三峡贯通的指示. *科学通报*, 53(5): 577—582.
- 张云湘, 骆耀南, 杨崇喜, 1988. 攀西裂谷. 北京: 地质出版社. 中国地质科学院地矿所, 1977. 砂矿物鉴定手册. 北京: 地质出版社.

## 附中文参考文献

- 陈丽蓉, 栾作峰, 郑铁民, 等, 1980. 渤海沉积物中的矿物组合特征. *海洋与湖沼*, 11(1): 46—64.
- Deer, W. A., Howie, R. A., Zussman, J., 1983. 造岩矿物(二卷 A)单链硅酸盐. 谢宇平译. 武汉: 中国地质大学出版社.