

doi:10.3799/dqkx.2014.041

# 峨眉山玄武岩作为长江上游特征 源岩对三峡贯通的指示

杨建<sup>1</sup>, 李长安<sup>1,2\*</sup>, N'dji dit Jacques Dembele<sup>1</sup>, 江华军<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国家重点实验室, 湖北武汉 430074

**摘要:** 峨眉山玄武岩作为长江上游攀西地区广泛分布的岩类, 具有形成环境独特、出露面积大、岩石易鉴定的特点, 可作为长江三峡贯通物源示踪研究的指示标志。通过对长江中上游阶地和江汉平原周老孔第四纪岩心沉积物中的玄武岩砾石和岩屑(1~2 mm)进行研究发现, 峨眉山玄武岩砾石在长江上游很常见, 在三峡以下很少; 玄武岩岩屑在长江上游沉积物中非常普遍, 而且在周老孔岩心沉积物中的很多层位都有出现。对玄武岩岩屑基质中的斜长石做了微量元素微区原位分析(LA-ICP-MS), 分析表明, 在周老孔中含峨眉山玄武岩岩屑的岩心层位最大深度为156 m, 该层位古地磁年龄约为1.7 Ma, 此时长江已经形成且三峡已经贯通。

**关键词:** 峨眉山玄武岩; 江汉平原; 第四纪; 沉积物; 微量元素; 物源示踪; 长江演化。

**中图分类号:** P575.1

**文章编号:** 1000-2383(2014)04-0431-12

**收稿日期:** 2013-08-16

## Emeishan Basalts as Provenance Indicators: Implications for Formation of the Three Gorges

Yang Jian<sup>1</sup>, Li Chang'an<sup>1,2\*</sup>, N'dji dit Jacques Dembele<sup>1</sup>, Jiang Huajun<sup>1</sup>

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

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

**Abstract:** The Emeishan basalts are typical rocks of the Yangtze River basin because of their unique origin, the broad distribution and simplicity of identification, which can be used as an indicator of tracing the source of the upstream Yangtze sediments after cutting of the Three Gorges. The gravel and debris (between 1–2 mm) of basalts in the sediments of the middle and upper reaches of the Yangtze terraces (above Fuling City) and the Quaternary sediments of the Zhoulao core in the Jianghan Plain are mainly studied in the article. The gravels of the lithic basalts are abundant in the floodplain sediments and the terrace deposits along the upper reach of the river (upstream of Fuling City), and are rare along the downstream of the Three Gorges. The basalt debris are very common on the terraces of the upper reach of the Yangtze River, and are also evaluated by the loose sediments of the Zhoulao core. These lithic debris were identified as the Emeishan basalts by LA-ICP-MS and appear at the core depth of 156 m (up). This line of change (156 m depth) dated of about 1.7 Ma attests a provenance change. Meanwhile, a wide drainage basin similar as today's dimension of the Yangtze River had formed and the Three Gorges had formed around 1.7 Ma.

**Key words:** Emeishan basalts; Jianghan Plain; Quaternary; sediments; trace elements; source tracing; evolution of the Yangtze River.

近年来, 贯通大河(发源于内陆的入海河流)的形成与演化过程越来越多地引起了国际地学界的兴趣。长江作为我国第一大河和世界第三大河, 其形成

时代一直为地学界所关注。三峡贯通被认为是研究长江形成的关键问题之一, 但目前对贯通时间仍然存在着不同的看法(杨达源, 1988; Clark *et al.*,

**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); 中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室开放基金(No. GPMR200908)。

**作者简介:** 杨建(1978—), 男, 博士, 主要从事第四纪地质学、环境地质学研究。E-mail: yangjianzai@tom.com

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

2004; 范代读等, 2004; 向芳等, 2006; 马永法等, 2007; 张玉芬等, 2008; 康春国等, 2009; Richardson *et al.*, 2010; Zheng *et al.*, 2013). 早期长江三峡贯通研究的证据主要来自于河流地貌、河流沉积学和区域地质演化的分析(陈华慧和马祖陆, 1987; 杨达源, 1988), 21 世纪以来, 依据国际共识的“从源到汇”物质追踪的研究思路, 直接从相关的沉积物入手, 对沉积物的岩性、重矿物组合、沉积环境、地球化学特征等方面进行系统分析(Clark *et al.*, 2004; 范代读等, 2004; 向芳等, 2006; 杨守业, 2006; 张玉芬等, 2008; 康春国等, 2009).

基于流域的特征岩石(或矿物)作为示踪标志的物源示踪分析是一种常用且有效的方法, 近年来运用该方法进行长江沉积物及大陆边缘海沉积物物源研究取得了较好的成果. 孙白云(1990)、吕全荣(1992)、王腊春等(1997)、王中波等(2006)根据沉积物矿物组成和重矿物组合特征来分析长江沉积物的物源特征, 认为可以选择楣石、石英、角闪石、绿帘石、红柱石和磷灰石等作为示踪指示剂来进行长江形成演化的研究. 随着离子探针质谱法(SHRIMP)和激光剥蚀等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)等分析技术的应用, 单颗粒矿物微区测年在长江物源研究中发展也比较迅速, Wang *et al.* (2010)、范代读等(2004)、孙习林和李长安(2010)分别通过锆石、独居石、白云母探讨了长江的物源特征及三峡贯通问题.

峨眉山玄武岩出露于四川、云南、贵州三省的广大区域, 分布面积约  $25 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 其主喷发期是阳新世(中二叠世)晚期—乐平世(晚二叠世), 它是中国唯一被国际学术界认可的大火成岩省(张云湘等, 1988; 张鸿翔等, 2001). 峨眉山玄武岩主要岩石类型为斜斑玄武岩, 其次为辉斑玄武岩和无斑玄武岩(张云湘等, 1988; 张鸿翔等, 2001). 峨眉山玄武岩这种大陆溢流相玄武岩的地球化学元素特征在长江流域非常典型, 其 LREE 中等富集, LIL 元素富集, Nb、Ta 相对亏损(张云湘等, 1988; 张鸿翔等, 2001; 宋谢炎等, 2002; Xiao *et al.*, 2003).

笔者认为峨眉山玄武岩形成环境特殊、出露面积大、岩石特征易区分, 是三峡贯通最有价值的示踪标志之一. 本文通过对长江中上游阶地沉积物以及江汉平原钻孔岩心沉积物中的玄武岩砾石和岩屑(1~2 mm)进行取样和鉴定, 对鉴定出的玄武岩屑基质中斜长石微晶进行微量元素微区原位分析(LA-ICP-MS), 并且同峨眉山玄武岩源岩进行对比, 进而讨论长江三峡的贯通时代.

## 1 样品的采集与处理

### 1.1 样品的采集

笔者采取“从源到汇”物质追踪的思路, 从宜宾

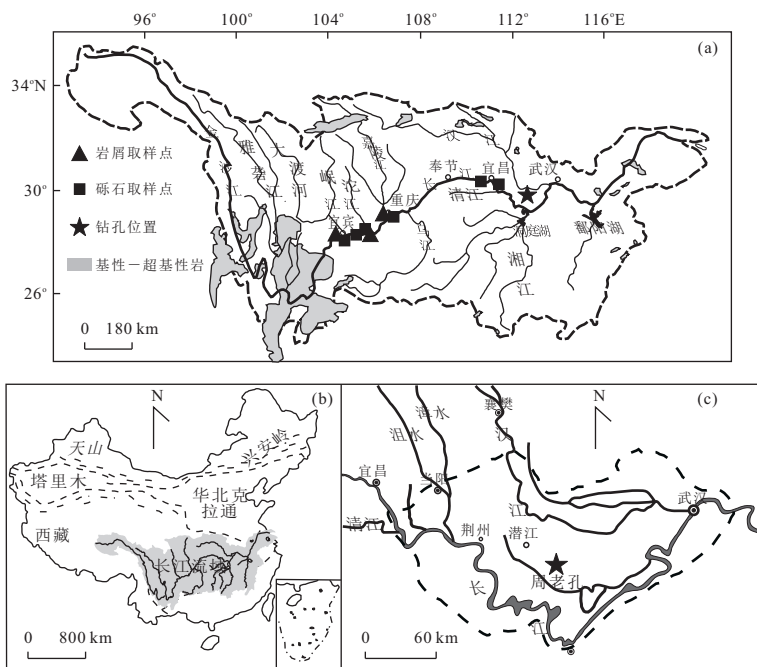


图 1 取样位置及基性—超基性岩浆岩分布(底图据中国地质科学院地质研究所, 1:5 000 000 中国地质图, 2002)

Fig.1 Location of sampling site and the distribution of basic-ultra basic rocks

沿长江追踪到三峡以下依次采集样品,样品主要分2种:一种是砾石,取直径大于2 cm的砾石;另一种样品是岩屑(直径为1~2 mm),主要考虑到从峨眉山玄武岩产地到三峡以下的江汉平原的长距离搬运,岩屑存在的可能性较砾石更大;砾石野外鉴定选取的最小直径约为2 cm,碎屑沉积物中的岩屑镜下鉴定选取的最小直径约为1 mm。地表样品的取样位置见图1a。周老镇钻孔位于江汉平原中心(112°59'E, 30°02'N),其取心率在85%以上,岩心较为完整,全长300 m,为一套粘土、粉砂、细砂、粗砂、砂砾石互层沉积岩相,垂向上岩性变化极为复杂(马永法等, 2007)。取样时选取所有的砾石层和主要的含砾粗砂层,在岩心中系统取得了28个岩屑样品。钻孔的位置见图1c,岩心取样的深度、相关岩心岩性描述(马永法等, 2007)及磁极性柱(张玉芬等, 2008)见图2。

## 1.2 样品的处理和分析

对于砾石样品,在室内制成探针片,然后在偏光显微镜下鉴定并拍照;对于岩屑样品,每个样品先选取约1 kg沉积物,筛选出1~2 mm的粒级组分,烘干,然后在放大镜下挑选约100个颗粒,用环氧树脂将颗粒固定后磨成探针片,每个样品最少制成2个探针片,每个探针片有20~30个岩屑颗粒,最后在偏光显微镜下鉴定并拍照。

## 2 样品的鉴定

### 2.1 玄武岩砾石的鉴定

笔者通过野外考察和采集样品的分析鉴定发现,长江三峡以上的阶地和河漫滩沉积物中的玄武岩砾石的存在非常普遍。本文限于篇幅仅列举不同河段的部分特征(图3),其中:图3a取自宜宾市柏溪镇剖面 $T_1$ 阶地,28°42'11.5"N, 104°31'52.2"E,高程270 m;图3b取自沱江 $T_2$ 阶地,28°54'21.6"N, 105°24'29.5"E,高程255 m;图3c取自江津现代河床,29°3'47.8"N, 106°6'20.3"E,高程178 m。从照片中可以清楚地看到这些玄武岩砾石为灰黑色致密块状,可见长石斑晶和气孔构造,长石斑晶呈放射状的;在偏光显微镜下,呈典型的拉斑玄武结构(间粒-间晶结构),斑晶主要是斜长石、普通辉石、普通角闪石、磁铁矿,可见斜长石的聚片双晶,斜长石斑晶多为中长石,基质斜长石微晶呈长条状,有绿泥石、石英充填的杏仁状构造。推测这些玄武岩砾石为典型的峨眉山玄武岩。

三峡以下宜昌地区的阶地和砾石层沉积物中拉

斑玄武岩砾石则非常少见,笔者做过大量的野外工作,但是仅仅发现了2个拉斑玄武岩砾石,其一是江陵荆江现代河床(30°13.944'N, 112°17.112'E),其大小为3.0 cm×1.5 cm(图3d);二是机场路剖面(30°25'26.5"N, 111°27'20.6"E)的样品,剖面位于宜昌三峡机场路加油站,高程110 m,砾石大小为2.0 cm×1.5 cm(图3e),该剖面为中更新统地层,推测年龄为0.87~0.75 Ma。向芳等(2006)在宜昌地区的阶地沉积物中进行了寻找玄武岩砾石的工作,但其研究确认的峨眉山玄武岩的取样位置为现代河床。

同时,笔者在三峡以下江汉盆地沉积中心的周老镇钻孔岩心沉积物中进行砾石的研究。在钻孔中选取所有含有砾石的层位(共28个层位),每个样品取10~15 cm的岩心,将其中的砾石筛出,然后进行鉴定,然而笔者在其中没有发现玄武岩砾石。

### 2.2 玄武岩岩屑的鉴定

#### 2.2.1 长江沿岸阶地和砾石层沉积物中的玄武岩岩屑

在长江(三峡以上)沿岸的阶地沉积物中都发现有玄武岩岩屑,文章列举不同河段的部分特征,其中:①图3f及图3g玄武岩岩屑分别取自宜宾市柏溪镇剖面 $T_1$ 、 $T_2$ 阶地,28°42'11.5"N, 104°31'52.2"E,剖面位于宜宾市柏溪镇,金沙江与岷江汇合口上游北岸,可见自上而下共有五级阶地剖面, $T_1$ 阶地高程270 m, $T_2$ 阶地高程280 m,其中取得的岩屑样品30%以上都是玄武岩,但是 $T_3$ ~ $T_5$ 阶地砾石发生了较重风化;②图3h玄武岩岩屑取自南溪镇剖面 $T_3$ 阶地,28°51'5.6"N, 104°58'49.7"E,剖面位于宜宾到泸州市之间,长江北岸,高程265 m,出露剖面厚度约14~15 m,其中取得岩屑样品有约10%确定为玄武岩;③图3i玄武岩岩屑取自纳西剖面 $T_3$ 阶地,28°46'10.7"N, 105°21'43.4"E,位于泸州市纳西区,长江南岸,高程266 m,其中取得岩屑样品有约5%确定为玄武岩;④图3j玄武岩岩屑取自李家沱剖面 $T_3$ 阶地,29°28'1.8"N, 106°31'16.1"E,位于重庆市巴南区李家沱长岗山(嘉陵江汇入之前),长江南岸,高程186 m,其中取得岩屑样品有2个确定为玄武岩;⑤图3k玄武岩岩屑取自寨子堡剖面 $T_3$ 阶地,30°49'57.1"N, 108°26'09.4"E,剖面位于万县密溪镇寨子堡,长江北岸,剖面高程177 m,其中取得岩屑样品有约10%为玄武岩。同时,以上样品中发现有很多疑似玄武岩的岩屑有明显的拉斑玄武结构,但它们都发生了风化,其斑晶和副矿物无法准确鉴定,本文没有列出其照片。

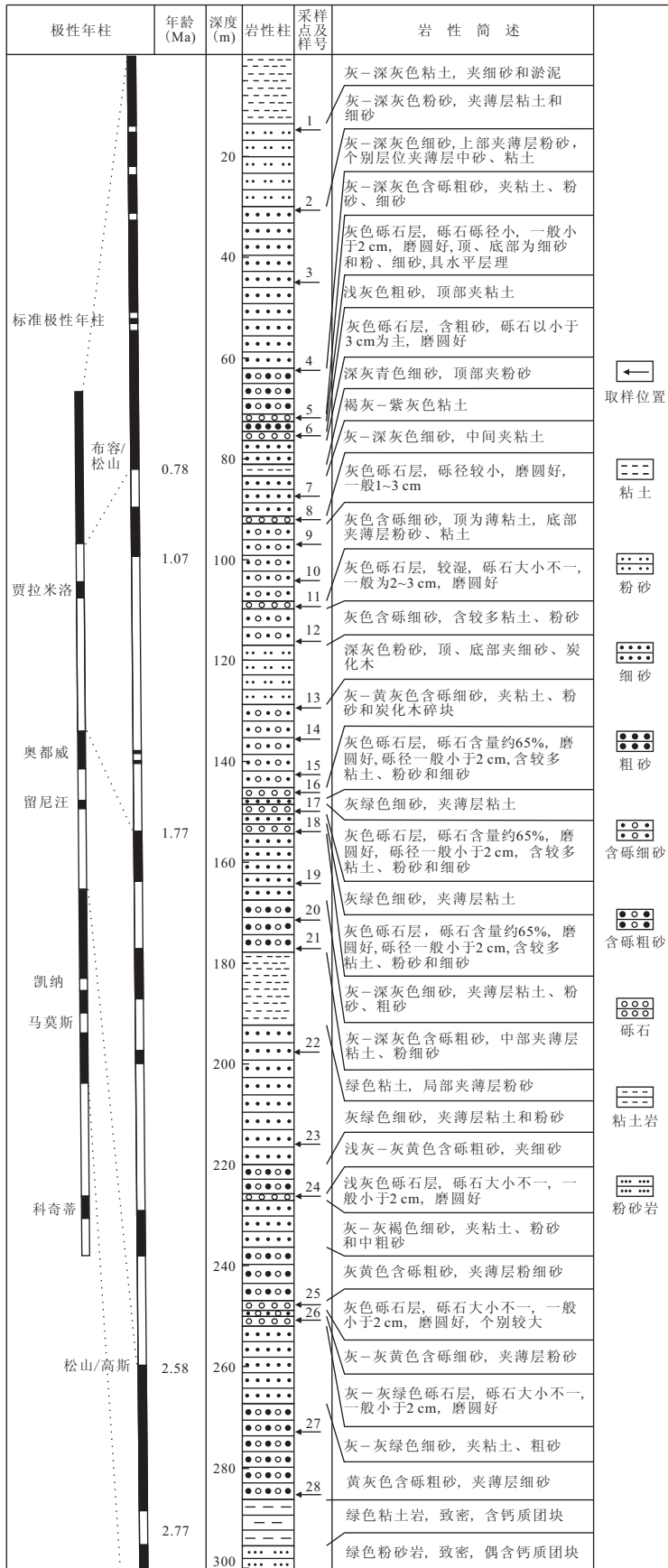


图 2 江汉平原周老孔岩心中 1~2 mm 岩屑取样位置

Fig.2 Location of sampling site of basalt debris (1-2 mm) from the Zhou Lao core



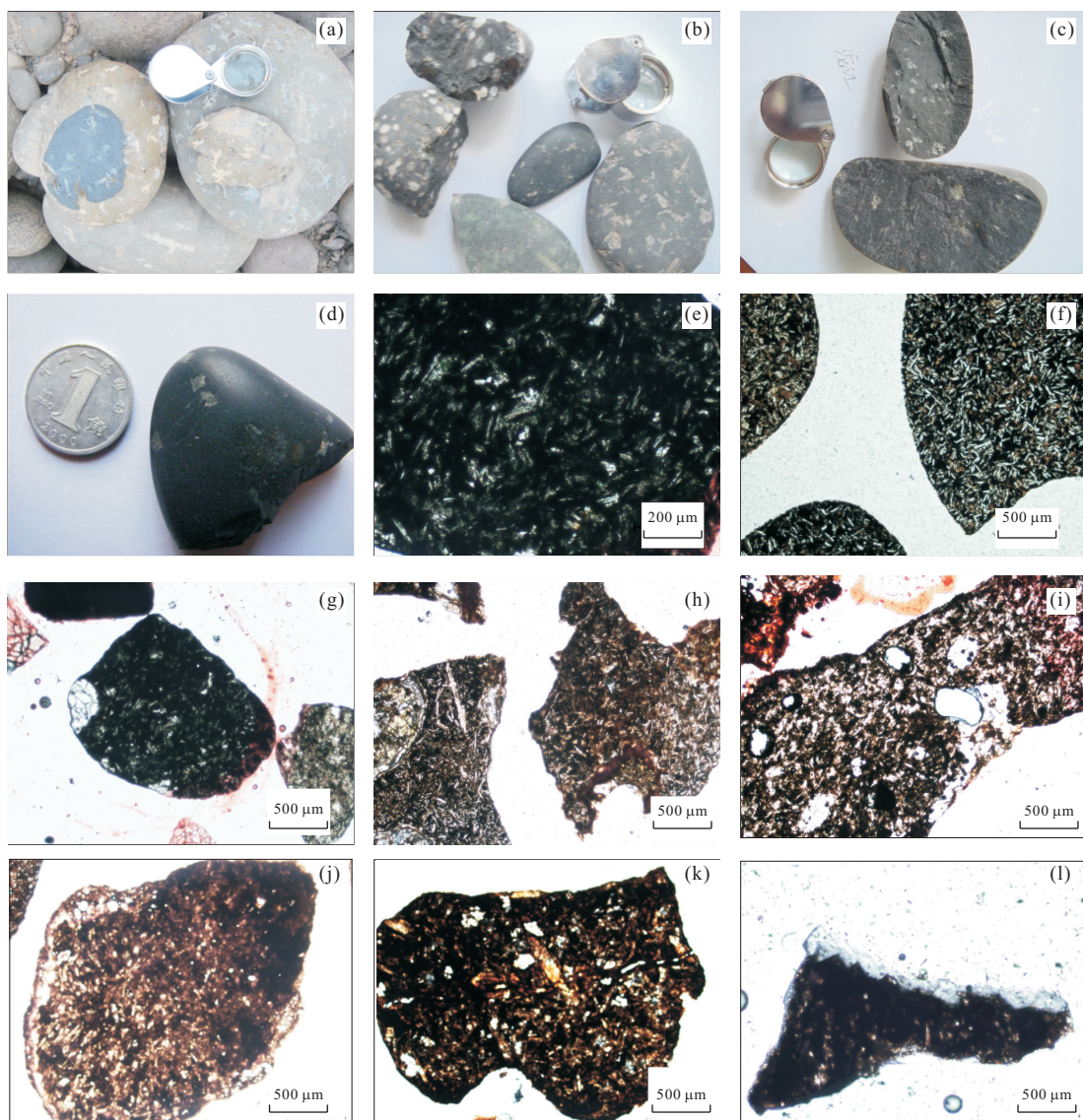


图 3 玄武岩照片

Fig.3 Pictures of rocks and minerals

a.宜宾市柏溪镇剖面 T<sub>1</sub> 阶地玄武岩砾石; b.沱江 T<sub>2</sub> 阶地玄武岩砾石; c.江津现代河床玄武岩砾石; d.江陵现代河床玄武岩砾石; e.宜昌机场路剖面玄武岩岩屑(正交偏光); f.宜宾柏溪镇剖面 T<sub>1</sub> 玄武岩岩屑(正交偏光); g.宜宾柏溪镇剖面 T<sub>2</sub> 玄武岩岩屑(正交偏光); h.南溪镇剖面玄武岩岩屑(正交偏光); i.纳西剖面玄武岩岩屑(正交偏光); j.李家沱剖面玄武岩岩屑(正交偏光); k.万县寨子堡剖面玄武岩岩屑(正交偏光); l.周老孔深度 109 m 玄武岩岩屑(正交偏光)

**2.2.2 江汉平原钻孔沉积物中的玄武岩岩屑** 通过对取自周老孔的 28 个岩屑样品的系统分析鉴定发现,在 GSH-18 号(深度 156 m)以上的样品中均存在有玄武岩岩屑.其中 GSH-1 号样(深度 15 m)、GSH-3 号样(深度 45 m)、GSH-9 号样(深度 96 m)、GSH-10 号样(深度 104 m)、GSH-11 号样(深度 109 m)、GSH-12 号样(深度 116 m)、GSH-15 号样(深度 143 m)、GSH-16 号样(深度 148 m)、GSH-18 号样(深度 156 m)中都发现有玄武岩岩屑.它们都具有明显的拉斑玄武结构,斑晶(少见)为斜长石,基

质为长条状斜长石微晶及隐晶—玻璃质,可见磁铁矿副矿物和石英充填的杏仁.同时在深度 156 m 以上样品中发现有很多疑似玄武岩的岩屑,但这些岩屑风化程度比较深,有明显的拉斑玄武结构,但其斑晶和副矿物却无法准确鉴定.而在深度 156 m 以下的样品中,并未找到玄武岩岩屑.

### 3 样品的测试与分析

为了确定周老孔中发现的玄武岩岩屑的源岩是

表 1 玄武岩岩屑的微量元素 ( $10^{-6}$ ) 分析结果Table 1 Analysis results of trace element ( $10^{-6}$ ) of basalt debris

样号	GSH-11-1	GSH-11-3	GSH-12-1	GSH-12-2	GSH-15-1	GSH-15-3	GSH-16-1	GSH-16-3	GSH-18-1	GSH-18-3	YB-T <sub>2</sub> -1-2
V	197.06	110.17	32.97	37.22	35.15	21.46	207.78	212.26	164.93	48.99	410.76
Cr	110.68	75.07	53.38	55.96	19.33	6.14	11.52	350.57	139.68	20.35	122.10
Co	13.45	11.71	1.34	0.72	7.40	6.26	27.29	26.88	6.06	10.53	12.10
Ni	100.92	33.13	4.95	8.44	8.04	7.41	51.70	59.61	15.75	22.73	56.08
Rb	54.62	65.39	6.71	5.87	9.34	8.42	4.69	14.75	76.76	197.02	167.85
Sr	165.22	235.48	42.29	47.43	16.53	14.31	153.60	67.58	32.50	59.09	235.14
Y	28.44	15.92	1.91	1.79	2.62	2.56	80.26	8.75	16.33	39.81	49.86
Zr	44.89	51.86	7.52	9.26	20.13	17.13	649.61	111.44	212.77	239.41	846.64
Nb	3.15	10.79	0.53	0.54	3.33	2.43	84.66	20.80	18.23	3.74	37.68
Sb	7.07	1.28	0.50	0.39	19.70	15.37	21.77	66.40	1.70	0.00	0.24
Cs	5.65	5.57	0.64	0.51	3.84	2.19	2.17	8.81	0.18	0.79	0.89
Ba	470.99	265.76	60.69	82.84	31.20	30.43	223.10	165.26	584.55	1 736.34	2 104.99
La	23.75	32.08	1.34	2.17	2.10	2.68	79.30	14.82	24.41	38.12	18.96
Ce	39.89	38.87	1.44	2.55	2.66	4.04	184.43	36.26	46.33	86.31	32.94
Pr	5.35	5.21	0.36	0.31	0.34	0.17	23.67	4.13	5.61	10.80	4.59
Nd	24.64	18.27	1.21	1.35	1.49	2.18	104.75	26.77	21.79	46.65	20.83
Sm	5.71	4.52	0.12	0.18	0.51	0.33	23.20	5.78	4.58	7.43	6.87
Eu	1.53	1.26	0.01	0.11	0.02	0.03	4.67	0.49	0.64	1.83	4.78
Gd	6.26	4.49	0.27	0.37	0.13	0.09	19.81	4.80	3.39	8.95	9.10
Tb	0.98	0.53	0.04	0.05	0.00	0.00	2.76	0.31	0.41	1.13	1.54
Dy	4.75	3.36	0.24	0.37	0.16	0.13	15.35	0.56	2.63	7.56	9.85
Ho	1.03	0.62	0.05	0.05	0.08	0.06	2.66	0.57	0.53	1.39	2.28
Er	2.60	1.40	0.08	0.15	0.32	0.20	7.20	0.44	1.46	3.95	5.39
Tm	0.32	0.20	0.02	0.03	0.01	0.03	0.88	0.03	0.13	0.44	0.87
Yb	2.55	1.66	0.11	0.13	0.20	0.11	4.96	0.00	1.45	2.96	5.27
Lu	0.33	0.19	0.03	0.02	0.00	0.06	0.94	0.00	0.19	0.25	0.83
Hf	0.96	1.57	0.12	0.12	0.68	0.36	16.97	5.80	5.02	3.67	16.95
Ta	0.25	0.60	0.06	0.05	0.12	0.05	3.96	0.57	1.08	0.28	2.77
Pb	54.10	48.66	7.78	7.96	1.79	1.24	18.32	29.16	4.61	6.83	19.04
Th	6.15	10.27	0.54	0.38	0.57	0.40	18.34	0.84	4.14	7.61	12.49
U	4.80	2.32	1.71	1.97	1.55	1.01	3.29	0.69	1.05	1.24	3.51
Th/Ta	24.71	17.01	8.48	6.96	4.90	8.82	4.63	1.46	3.84	27.11	4.51
Th/Nb	1.95	0.95	1.03	0.70	0.17	0.17	0.22	0.04	0.23	2.04	0.33
La/Sm	4.16	7.10	11.57	12.19	4.11	8.17	3.42	2.56	5.33	5.13	2.76
Eu/Tb	1.57	2.35	0.25	2.45	—	—	1.69	1.60	1.55	1.63	3.10
La/Ce	0.60	0.83	0.93	0.85	0.79	0.66	0.43	0.41	0.53	0.44	0.58
Ce/Nd	1.62	2.13	1.20	1.89	1.78	1.85	1.76	1.35	2.13	1.85	1.58

样号	YB-T <sub>2</sub> -1-3	YB-T <sub>2</sub> -2-1	YB-T <sub>2</sub> -2-3	YB-T <sub>2</sub> -3-1	YB-T <sub>2</sub> -3-2	YB-T <sub>1</sub> -1-1	YB-T <sub>1</sub> -1-3	YB-T <sub>1</sub> -2-1	YB-T <sub>1</sub> -2-2	YB-T <sub>1</sub> -3-1	YB-T <sub>1</sub> -3-2
V	293.52	119.42	186.69	454.72	471.88	730.29	254.77	316.95	268.98	459.05	508.84
Cr	110.07	101.13	59.88	82.48	218.88	132.47	36.59	21.12	14.91	74.46	8.15
Co	8.54	7.52	12.50	27.81	42.55	54.63	40.04	53.34	35.20	35.94	37.52
Ni	56.47	12.38	24.19	51.52	68.91	106.52	66.96	79.03	50.98	44.68	48.85
Rb	162.70	73.79	57.79	96.76	69.85	6.82	13.80	16.11	17.40	52.60	94.00
Sr	216.70	417.27	354.57	257.36	222.31	291.52	785.74	578.06	671.99	547.99	446.47
Y	15.45	28.01	22.82	37.97	30.70	47.34	50.53	53.76	23.05	41.28	69.42
Zr	157.41	424.66	301.32	472.66	398.50	458.85	554.57	448.10	191.64	430.57	858.71
Nb	22.63	28.64	16.71	60.45	54.20	37.19	42.63	49.25	16.46	42.96	123.36
Sb	0.12	0.22	0.06	0.41	0.28	7.09	1.51	0.00	2.69	0.00	8.50
Cs	0.30	0.49	0.67	0.87	0.86	0.50	0.59	1.89	1.04	1.10	0.49
Ba	2 966.57	1 671.12	1 240.66	1 274.96	973.18	220.07	442.56	469.67	405.99	265.42	1 269.14
La	19.65	19.34	14.16	38.71	37.56	51.61	77.70	52.68	15.42	32.52	77.50
Ce	30.55	34.58	24.43	52.24	48.21	119.23	165.98	120.51	38.06	88.68	208.73
Pr	5.60	5.74	4.75	13.04	12.48	15.94	20.65	16.09	4.94	12.58	29.10

续表 1

样号	YB-T <sub>2</sub> -1-3	YB-T <sub>2</sub> -2-1	YB-T <sub>2</sub> -2-3	YB-T <sub>2</sub> -3-1	YB-T <sub>2</sub> -3-2	YB-T <sub>1</sub> -1-1	YB-T <sub>1</sub> -1-3	YB-T <sub>1</sub> -2-1	YB-T <sub>1</sub> -2-2	YB-T <sub>1</sub> -3-1	YB-T <sub>1</sub> -3-2
Nd	23.91	25.40	21.15	52.72	50.29	62.88	82.34	69.89	24.87	52.49	116.62
Sm	5.01	5.94	4.95	13.59	12.27	13.90	15.07	14.16	5.64	13.28	25.00
Eu	1.33	1.59	1.42	3.62	3.06	3.64	3.84	4.55	2.59	3.02	6.75
Gd	4.55	5.77	4.84	9.99	9.32	11.43	12.00	12.09	4.69	11.45	18.82
Tb	0.67	0.85	0.81	1.63	1.33	1.94	1.79	2.28	0.87	1.71	2.91
Dy	3.25	5.47	4.14	8.45	6.88	8.90	9.81	11.90	5.32	8.06	14.20
Ho	0.69	1.14	0.82	1.54	1.19	1.80	1.72	2.08	0.80	1.54	2.68
Er	1.61	2.96	2.16	3.90	3.07	4.30	5.27	5.42	2.24	4.51	6.97
Tm	0.21	0.37	0.30	0.57	0.46	0.52	0.67	0.76	0.33	0.56	0.81
Yb	1.26	2.53	1.94	3.94	2.89	5.03	3.79	5.16	2.74	3.73	5.93
Lu	0.17	0.34	0.29	0.52	0.32	0.73	0.62	0.51	0.31	0.38	0.92
Hf	3.24	8.69	6.32	10.80	9.52	9.76	14.27	11.92	5.70	11.41	24.03
Ta	1.50	1.95	1.22	4.14	3.70	2.67	3.46	3.34	1.35	2.98	8.95
Pb	9.79	10.77	16.98	17.24	16.09	4.76	5.77	5.29	3.61	7.97	17.99
Th	2.44	7.42	4.49	15.23	12.56	7.36	9.02	8.69	3.60	10.56	19.37
U	0.55	1.82	1.07	1.88	1.29	1.68	2.22	2.41	0.63	2.24	4.69
Th/Ta	1.63	3.80	3.67	3.68	3.40	2.76	2.61	2.60	2.66	3.54	2.16
Th/Nb	0.11	0.26	0.27	0.25	0.23	0.20	0.21	0.18	0.22	0.25	0.16
La/Sm	3.92	3.26	2.86	2.85	3.06	3.71	5.16	3.72	2.74	2.45	3.10
Eu/Tb	1.97	1.88	1.77	2.22	2.30	1.88	2.15	1.99	2.99	1.77	2.32
La/Ce	0.64	0.56	0.58	0.74	0.78	0.43	0.47	0.44	0.41	0.37	0.37
Ce/Nd	1.28	1.36	1.15	0.99	0.96	1.90	2.02	1.72	1.53	1.69	1.79

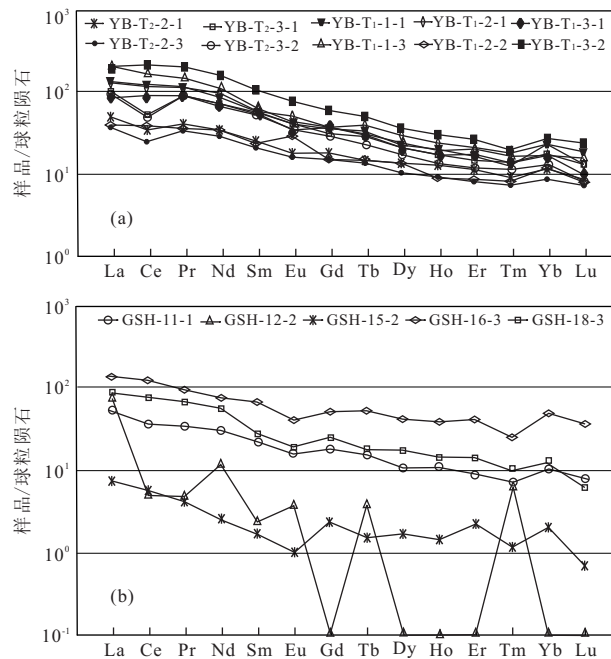


图 4 玄武岩岩屑的稀土元素分配模式

Fig.4 Rare earth element allocation model of debris of basalt

否为峨眉山玄武岩, 本文对上述鉴定的岩心位置较深(>100 m)的玄武岩岩屑基质中的斜长石做了微量元素微区原位分析(LA-ICP-MS), 考虑玄武岩岩屑在运移过程中会遭受物理、化学风化, 笔者选择宜宾柏溪镇剖面 T<sub>1</sub>和 T<sub>2</sub>阶地中的玄武岩岩屑作为间

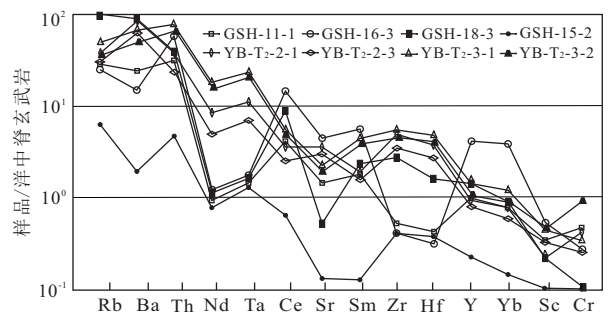


图 5 玄武岩岩屑的微量元素分布模式

Fig.5 Trace element distribution pattern of debris of basalt

接对比对象, 探讨玄武岩岩屑遭受风化后其微量和稀土元素的变化。

### 3.1 玄武岩岩屑基质的微区原位分析测试

微区元素含量分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)利用 LA-ICP-MS 完成, 激光剥蚀系统为 GeoLas 2005, ICP-MS 为 Agilent 7500a, 激光剥蚀过程中采用氦气作载气、氩气为补偿气以调节灵敏度, 二者在进入 ICP 之前通过一个 T 型接头混合, 在等离子体中心气流(Ar+He)中加入了少量氮气, 以提高仪器灵敏度、降低检出限和改善分析精密度(Hu *et al.*, 2008), 每个时间分辨分析数据包括大约 20~30 s 的空白信号和 50s 的样品信号, 详细的仪器操作条件同

**表 2 宜宾 T<sub>1</sub> 和 T<sub>2</sub> 阶地的样品微量元素比值的相对偏差(%)、标准偏差分析**  
 Table 2 Deviations in trace element ratio between the basalt debris of the T<sub>1</sub> and T<sub>2</sub> terraces in Yibin City

比值	样品号																平均相对偏差(%)	标准偏差
	YB-T <sub>1</sub> -1-1	YB-T <sub>1</sub> -1-3	YB-T <sub>1</sub> -2-1	YB-T <sub>1</sub> -2-2	YB-T <sub>1</sub> -3-1	YB-T <sub>1</sub> -3-2	YB-T <sub>1</sub> -3-3	YB-T <sub>2</sub> -1-2	YB-T <sub>2</sub> -1-3	YB-T <sub>2</sub> -2-1	YB-T <sub>2</sub> -2-3	YB-T <sub>2</sub> -3-1	YB-T <sub>2</sub> -3-2					
Th/Ta	10.54	15.43	15.78	13.76	14.79	29.83	46.21	47.20	23.11	19.07	19.30	10.06	22.09	0.81				
La/Yb	1.75	96.01	2.26	46.06	16.53	24.98	65.59	49.52	26.88	30.12	5.85	24.53	32.51	4.59				
Zr/Nb	5.35	11.08	22.31	0.57	14.41	40.56	91.89	40.62	26.63	53.98	33.23	37.21	31.49	4.83				
La/Nb	53.76	101.97	18.53	3.79	16.12	30.39	44.23	3.80	25.16	6.12	29.03	23.20	29.68	0.37				
Rb/Nb	91.00	84.11	83.94	48.11	39.89	62.59	118.69	252.84	26.50	69.75	21.42	36.73	77.96	2.09				
Th/Nb	10.72	4.45	20.38	1.17	10.99	29.15	49.61	51.35	16.90	21.41	13.71	4.60	19.54	0.06				
Th/La	50.33	59.53	42.53	18.54	13.21	12.92	129.52	56.73	33.63	10.64	37.07	16.52	40.10	0.15				
La/Ta	55.43	80.35	26.48	8.64	12.49	30.46	45.02	5.32	20.49	7.12	24.88	18.48	27.93	4.58				
La/Sm	12.58	56.33	12.78	17.06	25.75	6.00	16.38	18.82	1.29	13.24	13.62	7.18	16.75	0.74				
Ce/Sm	29.81	66.66	28.76	2.20	1.06	26.35	27.49	7.80	11.91	25.28	41.82	40.54	25.81	2.17				
Ce/Eu	42.36	87.44	14.95	36.20	27.31	34.21	70.09	0.15	5.53	25.42	37.35	31.52	34.38	10.03				
U/Ce	57.32	59.36	39.36	49.56	23.35	31.79	223.63	45.73	59.45	33.07	9.23	18.91	54.23	0.03				
Eu/Tb	14.48	1.88	9.14	36.32	19.56	5.58	41.44	10.24	14.30	19.55	1.13	4.68	14.86	0.44				
La/Ce	18.32	11.66	17.50	23.56	30.80	29.93	8.61	21.38	5.54	9.36	39.85	47.03	21.96	0.14				
Ce/Nd	26.62	34.61	15.14	2.19	12.81	19.51	5.59	14.68	9.08	22.89	33.84	35.98	19.41	0.35				
Ba/Nb	83.31	70.73	73.11	30.44	82.58	70.99	57.55	269.58	64.56	109.36	40.52	49.37	83.51	37.99				
Ba/Th	84.94	75.31	72.78	43.28	87.35	67.00	15.13	512.19	13.45	38.98	57.84	60.99	94.10	329.90				
Ba/La	90.94	87.90	81.05	44.03	82.65	65.19	135.95	220.86	83.64	86.26	30.01	44.94	87.78	49.18				
Ba/Ce	93.35	90.39	85.95	61.54	89.21	78.08	130.35	250.09	74.21	83.10	12.02	27.23	89.63	30.72				
Ba/Cs	78.66	63.96	88.01	81.12	88.30	25.63	14.19	379.66	66.00	10.92	29.05	45.46	80.91	2 682.77				



表 3 长江流域某些玄武岩源岩的微量元素比值

Table 3 The trace element ratio of basalt in the Yangtze River basin

比值	云南宾川峨眉山玄武岩 <sup>1</sup>			武当山群 <sup>2</sup>	康县碧口群	YB-T <sub>1</sub>	YB-T <sub>2</sub>
	低钛 LT1 区(9 样)	低钛 LT2 区(8 样)	高钛 HT 区(8 样)	基性岩(23 样)	玄武岩 <sup>3</sup> (5 样)	(6 样)	(6 样)
Th/Ta	3.20~5.02(4.24)	1.56~3.56(2.19)	1.66~2.32(1.90)	1.03~3.65(1.73)	1.03~1.44(1.24)	2.16~2.76(2.72)	3.68~4.51(3.81)
Th/Nb	0.19~0.48(0.26)	0.085~0.210(0.120)	0.10~0.17(0.12)	0.054~0.151(0.115)	0.068~0.091(0.080)	1.56~2.25(0.20)	0.11~0.33(0.24)
La/Sm	3.11~4.14(3.37)	2.11~3.02(2.64)	3.20~4.76(4.10)	1.11~3.60(2.64)	1.35~3.93(2.18)	2.45~5.17(3.48)	2.75~3.92(3.12)
Eu/Tb	1.69~1.98(1.87)	1.57~2.12(1.77)	1.96~2.40(2.15)	1.83~3.14(2.10)	1.52~2.49(1.89)	1.76~2.99(2.18)	1.77~3.10(2.21)
La/Ce	0.47~0.49(0.48)	0.43~0.47(0.46)	0.41~0.47(0.45)	0.34~0.69(0.51)	0.33~0.45(0.37)	0.37~0.47(0.41)	0.56~0.80(0.65)
Ce/Nd	1.62~1.89(1.67)	1.34~1.59(1.50)	1.63~1.91(1.78)	1.17~2.01(1.51)	1.25~1.84(1.47)	1.53~2.02(1.77)	0.96~1.58(1.22)

注:括号内为平均值;上标“1”数据引用自 Xiao *et al.*(2003);上标“2”数据引用自张成立等(1999);上标“3”数据引用自闫全人等(2004)。

Liu *et al.*(2008).以 USGS 参考玻璃(如 BCR-2G, BIR-1G 和 BHVO-2G)为校正标准,采用多外标、无内标法(Liu *et al.*, 2008)或多外标、内标法(Liu *et al.*, 2010)对元素含量进行定量计算(具体分析采用何种方法会因个人处理数据方式不同而有变化).这些 USGS 玻璃中元素含量的推荐值据 GeoReM 数据库(<http://georem.mpch-mainz.gwdg.de/>).对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、元素含量计算)采用软件 ICPMSDataCal(Liu *et al.*, 2008; Liu *et al.*, 2010)完成。

### 3.2 玄武岩岩屑基质的微量元素特征分析

元素的测量精度均优于 5%,数据精确可靠.每个测试的岩屑颗粒打 3 个点,选用其中 2 个偏差小的数据进行分析(表 1).笔者对 10 号样(深度 104 m)进行测试,发现微晶斜长石已经蚀变为石英,本文不予讨论。

本文首先将钻孔样品的 REE 值经里德球粒陨石标准化后的配分曲线同宜宾 T<sub>1</sub>及 T<sub>2</sub>阶地样品进行对比(图 4).从图 4a 和表 1 看出,宜宾 T<sub>2</sub>阶地样品的稀土元素数值比宜宾 T<sub>1</sub>阶地样品略微偏小,但它们的 REE 配分曲线的形状基本相同,只有 T<sub>2</sub>阶地样品的 Ce 有明显的亏损.这说明玄武岩岩屑在河流搬运过程中会遭受物理、化学风化,其稀土元素的含量会同比减少,尤其是 HREE 会流失.由图 4b 可以看出,GSH-11 号样(深度 109 m)、GSH-16 号样(深度 148 m)、GSH-18 号样(深度 156 m)同宜宾 T<sub>1</sub>和 T<sub>2</sub>阶地样品的稀土元素分配模式具有相同的形态,均为向右倾斜的曲线,轻稀土元素相对富集,稀土元素整体分异不太明显,Eu 没有明显异常;GSH-15 号样品(深度 143 m)则与它们不同,稀土元素明显偏低,而 GSH-12 号样(深度 116 m)显示非玄武岩的特征。

微量元素 Sr、Rb、Ba、Th、Ta、Nb、Ce、Zr、Hf、

Sm、Y、Yb、Sc、Cr 可以反映玄武岩类型与构造环境之间的关系(Pearce and Cann, 1973),本文将钻孔中的玄武岩岩屑的部分微量元素值经洋中脊玄武岩(MORB)标准化以后的蜘蛛网图同宜宾 T<sub>2</sub>阶地的玄武岩岩屑进行对比(图 5).从图 5 中可以发现,GSH-11 号样(深度 109 m)和 GSH-18 号样(深度 156 m)的微量元素和宜宾 T<sub>2</sub>阶地样品相比大部分一致;而 GSH-15 号样(深度 143 m)、GSH-16 号样(深度 148 m)显示出不同特征。

由于玄武岩岩屑在搬运及储存过程中会遭受物理、化学风化,其中某些微量元素的含量会发生改变,故钻孔样品的 REE 配分曲线和微量元素蜘蛛网图同宜宾阶地样品以及峨眉山玄武岩源岩存在一定的偏差,因此本文进行了这些样品微量元素比值的比较.笔者选取宜宾 T<sub>1</sub>和 T<sub>2</sub>阶地样品(各 3 个样,每样 2 个点的数值)的数据进行偏差分析(表 2),从而探讨不同时间沉积的玄武岩岩屑可以用哪些微量元素的比值代表其源区的特征.笔者选取 Th/Ta、La/Yb、Zr/Nb、La/Nb、Rb/Nb、Th/Nb 等这些常用于分析玄武岩岩石类型的参数和 Th/La、La/Ta、La/Sm、Ce/Sm、Ce/Eu、Ba/Ce、U/Ce、Ba/Cs、Eu/Tb、La/Ce、Ce/Nd 等这些可以有效地指示拉斑玄武岩源区岩石的微量元素丰度特征的比值(郑海飞等, 1998)进行偏差分析.从表 2 可以看出,宜宾 T<sub>1</sub>和 T<sub>2</sub>阶地样品的 Th/Ta、Th/Nb、La/Sm、Eu/Tb、La/Ce 和 Ce/Nd 的标准偏差都小于 1,相对偏差小于 25%.表 3 列出了宜宾 T<sub>1</sub>和 T<sub>2</sub>阶地样品和峨眉山玄武岩、碧口群玄武岩(嘉陵江上游)、武当山群玄武岩(汉江上游)的 Th/Ta、Th/Nb、La/Sm、Eu/Tb、La/Ce 和 Ce/Nd 这 6 组微量元素的比值,将它们同钻孔中的玄武岩岩屑比较.可以看出,宜宾 T<sub>1</sub>和 T<sub>2</sub>阶地的样品的比值基本都落在峨眉山玄武岩的低钛玄武岩区内,而与碧口群玄武岩、武当山群玄武岩不同.从 REE 配分曲线和微量元素蜘蛛网图分析推

断,河流沉积物中玄武岩岩屑在运移过程中遭受物理、化学风化后微量元素含量会发生变化,但是这 6 个比值仍然可以有效地指示玄武岩源区的微量元素特征。将表 1 中钻孔样品的微量元素的比值和表 3 对比可以发现,GSH-15 号样(深度 143 m)、GSH-16 号样(深度 148 m)和 GSH-18 号样(深度 156 m)的比值基本都在宜宾  $T_1$  和  $T_2$  阶地的样品和峨眉山玄武岩的比值范围内,而与碧口群玄武岩、武当山群玄武岩不同;GSH-11 号样(深度 109 m)、GSH-12 号样(深度 116 m)的大部分值同宜宾  $T_1$  和  $T_2$  阶地的样品和峨眉山玄武岩相近。

综合以上分析可以得出结论:GSH-16 号样(深度 148 m)和 GSH-18 号样(深度 156 m)同宜宾  $T_1$  和  $T_2$  阶地样品一样是来自攀西地区的峨眉山玄武岩岩屑。GSH-11 号样(深度 109 m)、GSH-12 号样(深度 116 m)、GSH-15 号样(深度 143 m)遭受程度较深的风化,不能确定是否来自攀西地区。

## 4 探讨与结论

当前的长江形成演化研究主要是根据“从源到汇”物质追踪的思路进行,许多学者用沉积物的地球化学数据突变(杨守业,2006;Wang *et al.*, 2010;孙习林和李长安,2010)、磁化率变化(张玉芬等,2008)、重矿物组合特征(孙白云,1990;康春国等,2009)等类似的统计方法来研究长江的物源变化,该方法是从“面”(整体)着手,研究沉积物整体的物性突变,它存在多解性的问题。相对而言,本文用特征性的岩石(或矿物)作为指示剂进行物源示踪研究是从“点”(个体)进行研究,关注沉积物个体的运移,两者相互验证相互补充。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,其巨厚且连续的沉积,是研究三峡贯通的理想信息载体,从这一信息载体入手,利用长江上游与中下游在表壳岩系组成、沉积物物性等方面的差异进行三峡贯通的物源示踪分析,这是当前国际上河流形成演化研究的一种重要方法(向芳等,2006;马永法等,2007;张玉芬等,2008;康春国等,2009;Wang *et al.*, 2010),比利用长江中下游另一个“沉积汇”——河口三角洲沉积物进行研究更为便捷、可靠。

笔者发现,在三峡以上(主要是宜宾到江津段)的砾石层和现代河床普遍存在峨眉山玄武岩砾石,而在三峡以下很难寻找到峨眉山玄武岩砾石。笔者只找到了 2 个拉斑玄武岩砾石,而且其所在层位的

年龄很新;而向芳等(2006)也只在现代河床上找到了可以确认的峨眉山玄武岩砾石。笔者推断长江的水动力条件很难将大量的峨眉山玄武岩砾石带到三峡以下来,这可能与河流运移能力的局限性等客观条件有关,所以要想通过寻找峨眉山玄武岩砾石来研究三峡贯通问题非常困难。

从理论上讲,只要确定一个来源于上游的特征性岩石或矿物就能证明三峡已经贯通。当然,研究者应该注意岩心取样的连续性,加大取样的密度,也可以在其他钻孔或者阶地和砾石层的沉积物中进行研究,从而尽量排除误差。笔者在江汉平原周老孔岩心沉积物中找到了一些玄武岩岩屑,但是其出现不够连续,数量也不多,而且许多样品都受不同程度的风化影响,偏光镜鉴定只能推测其可能是玄武岩,其斑晶和基质的矿物没法准确鉴定。由于汉江上游神龙架地区出露以神龙架群为主的基性岩浆岩(中—晚元古代早期火山岩,主要由粗面玄武岩、玄武质火山角砾岩、玄武质凝灰岩、玄武安山岩组成)以及丹江口水库以上的变基性岩墙群(主要是武当山群,主要岩性是变玄武岩或钠化玄武岩,普遍黝帘石化、绿泥石化)(湖北省区域地质志,1991),它们虽然与峨眉山玄武岩(主要是斜斑玄武岩、辉斑玄武岩)明显不同,但那些受风化影响没法准确鉴定的疑似玄武岩都在没有地球化学分析前不能确定为峨眉山玄武岩。这里需要补充说明的是,神龙架群基性岩浆岩的稀土元素含量较低( $\Sigma\text{REE}$  约为  $20 \times 10^{-6} \sim 30 \times 10^{-6}$ ),稀土分异特征明显(湖北省区域地质志,1991),它与样品数据及峨眉山玄武岩明显不同,所以在文章中受篇幅所限没有详细比较。下一步笔者将加大岩心取样的数量和密度,进一步研究更细颗粒的玄武岩质岩屑,并研究其他阶地和砾石层沉积物中的玄武岩质岩屑,此外,还将多做三峡以上河段的高阶地沉积物方面的研究用以对比,从而尽量排除误差来确定三峡贯通的时间。

本文通过分析和探讨可以得出以下结论:峨眉山玄武岩作为长江上游地区的特征性岩石可以作为三峡贯通的示踪指示剂;河流沉积物中玄武岩岩屑运移过程中遭风化后微量元素含量会发生变化,但是  $\text{Th}/\text{Ta}$ 、 $\text{Th}/\text{Nb}$ 、 $\text{La}/\text{Sm}$ 、 $\text{Eu}/\text{Tb}$ 、 $\text{La}/\text{Ce}$ 、 $\text{Ce}/\text{Nd}$  这 6 个比值仍然可以有效地指示玄武岩源区的元素特征;通过对周老孔第四纪岩心沉积物中玄武岩岩屑(1~2 mm)的鉴定,发现从钻孔岩心深度 156 m 开始(向上)出现玄武岩岩屑(经鉴定分析为峨眉山玄武岩),表明在该层位(古地磁年龄 1.7 Ma 左右)

(张玉芬等, 2008)长江三峡已经贯通。

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,一并感谢康春国、董文钦、许应石、张君在相关工作中的帮助。

## References

- Chen, H. H., Ma, Z. L., 1987. Lower Pleistocene Series in Jiangnan Plain. *Earth Science—Journal of Wuhan College of Geology*, 12(2): 129—135 (in Chinese with English abstract).
- 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(1): 1—20. doi: 10.1029/2002TC001402
- Fan, D. D., Li, C. X., Yokoyama, K., et al., 2004. Monazite Age Spectra in the Late Cenozoic Strata of the Changjiang Delta and Its Implication on the Changjiang Run-Through Time. *Science in China (Ser. D)*, 34(11): 1015—1022 (in Chinese).
- Hu, Z. C., Gao, S., Liu, Y. S., et al., 2008. Signal Enhancement in Laser Ablation ICP-MS by Addition of Nitrogen in the Central Channel Gas. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 23(8): 1093—1101. doi: 10.1039/B804760J
- Hubei Bureau of Geology and Mineral Resources, 1991. Regional Geology of Hubei Province. Geological Publishing House, Beijing, 343—400 (in Chinese).
- Kang, C. G., Li, C. A., Wang, J. T., et al., 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).
- Liu, Y. S., Gao, S., Hu, Z. C., et al., 2010. Continental and Oceanic Crust Recycling-Induced Melt-Peridotite Interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb Dating, Hf Isotopes and Trace Elements in Zircons of Mantle Xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1—2): 537—571. doi: 10.1093/petrology/egp082
- Liu, Y. S., Hu, Z. C., Gao, S., et al., 2008. In Situ Analysis of Major and Trace Elements of Anhydrous Minerals by LA-ICP-MS without Applying an Internal Standard. *Chemical Geology*, 257(1—2): 34—43. doi: 10.1016/j.chemgeo.2008.08.004
- Lü, Q. R., 1992. Mineral Characteristics of Fine-Grain Sediment and Its Sedimentary Differentiation in Changjiang Estuary. *Shanghai Geology*, 43(3): 18—25, 40 (in Chinese with English abstract).
- Ma, Y. F., Li, C. A., Wang, Q. L., et al., 2007. Statistics of Gravels from a Bore in Zhoulao Town, 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).
- Pearce, J. A., Cann, J. R., 1973. Tectonic Setting of Basic Volcanic Rocks Investigated Using Trace Element Analyses. *Earth and Planetary Science Letters*, 19(2): 290—300. doi: 10.1016/0012-821X(73)90129-5
- 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
- Song, X. Y., Hou, Z. Q., Wang, Y. L., et al., 2002. The Mantle Plume Features of Emeishan Basalts. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 22(4): 27—32 (in Chinese with English abstract).
- Sun, B. Y., 1990. Detrital Mineral Assemblages in the Huanghe, Changjiang and Zhujiang River Delta Sediments. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 10(3): 23—34 (in Chinese with English abstract).
- Sun, X. L., Li, C. A., 2010. <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar Age Tracing of Detrital Muscovites and Its Application in Yangtze River Running-Through Time. *Geological Science and Technology Information*, 29(6): 121—127 (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 Zhoulao Town, Jiangnan Plain, China. *Journal of Earth Science*, 21(3): 257—271. doi: 10.1007/S12583-010-0090-4
- Wang, L. C., Chen, X. L., Chu, T. Q., 1997. A Contrast Analysis on the Loads Character of the Changjiang River and the Yellow River. *Geographical Research*, 16(4): 71—79 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z. B., Yang, S. Y., Li, P., et al., 2006. Detrital Mineral Compositions of the Changjiang River Sediments and Their Tracing Implications. *Acta Sedimentologica Sinica*, 24(4): 570—578 (in Chinese with English abstract).
- Xiang, F., Zhu, L. D., Wang, C. S., et al., 2006. Character of Basaltic Gravels in Quaternary Sediments in Yichang Area and Its Relationship with Formation of Yangtze Three Gorges. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 28(2): 6—10, 24 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, L., Xu, Y. G., Chuang, S. L., et al., 2003. Chemostratigraphic Correlation of Upper Permian Lava Succession from Yunnan Province, China; Extent of the Emeishan Large Igneous Province. *International Geology Review*,

45;753-766.doi:10.2747/0020-6814.45.8.753

Yan, Q. R., Hanson, A. D., Wang, Z. Q., et al., 2004. Geochemistry and Tectonic Setting of the Bikou Volcanic Terrane on the Northern Margin of the Yangtze Plate. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 23(1): 1-11 (in Chinese with English abstract).

Yang, D. Y., 1988. The Origin and Evolution of the Three Gorges of the Changjiang Yangtze River. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences Edition)*, 24(3): 466-474 (in Chinese with English abstract).

Yang, S. Y., 2006. Advances in Sedimentary Geochemistry and Tracing Applications of Asian Rivers. *Advances in Earth Science*, 21(6): 648-655 (in Chinese with English abstract).

Zhang, C. L., Zhou, D. W., Liu, Y. Y., 1999. Geochemistry of Basic Dykes in Wudangshan Block and Their Tectonic Significance. *Geochimica*, 28(2): 126-135 (in Chinese with English abstract).

Zhang, H. X., Xu, Z. F., Ma, Y. J., et al., 2001. Geochemical Features and Origin of Continental Flood Basalts. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 26(3): 261-268 (in Chinese with English abstract).

Zhang, Y. F., Li, C. A., Wang, Q. L., et al., 2008. Magnetism Parameters Characteristics of Drilling Deposits in Jianghan Plain and Indication for Forming of the Yangtze River Three Gorges. *Chinese Science Bulletin*, 53(5): 577-582 (in Chinese).

Zhang, Y. X., Luo, Y. N., Yang, C. X., 1988. Panxi Rift. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese)

Zheng, H. B., Jia, D., Chen, J., et al., 2013. Did Incision of the Three Gorges Begin in the Eocene? COMMENT. *Geology*, 39(5): 244-245. doi:10.1130/G31944C.1

Zheng, H. F., Xie, H. S., Guo, J., 1998. Reliability of Trace Element Ratios in the Study of the Composition of Magma Source Region: Experimental Study on Basalt Melting. *Acta Mineralogica Sinica*, 18(4): 541-545 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

陈华慧, 马祖陆, 1987. 江汉平原下更新统. 地球科学——武汉地质学院学报, 12(2): 129-135.

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.

湖北省地质矿产局, 1991. 湖北省区域地质志. 北京: 地质出版社, 343-400.

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.

吕全荣, 1992. 长江口细颗粒沉积物的矿物特征和沉积分异. 上海地质, 43(3): 18-25, 40.

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.

宋谢炎, 侯增谦, 汪云亮, 等, 2002. 峨眉山玄武岩的地幔柱成因. 矿物岩石, 22(4): 27-32.

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.

孙习林, 李长安, 2010. 碎屑白云母<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar示踪及在长江贯通研究中的应用探讨. 地质科技情报, 29(6): 121-127.

王腊春, 陈晓玲, 储同庆, 1997. 黄河、长江泥沙特性对比分析. 地理研究, 16(4): 71-79.

王中波, 杨守业, 李萍, 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.

向芳, 朱利东, 王成善, 等, 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. 地球科学与环境学报, 28(2): 6-10, 24.

闫全人, Hanson, A. D., 王宗起, 等, 2004. 扬子板块北缘碧口群火山岩的地球化学特征及其构造环境. 岩石矿物学杂志, 23(1): 1-11.

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): 466-474.

杨守业, 2006. 亚洲主要河流的沉积地球化学示踪研究进展. 地球科学进展, 21(6): 648-655.

张成立, 周鼎武, 刘颖宇, 1999. 武当山地块基性岩墙群地球化学研究及其大地构造意义. 地球化学, 28(2): 126-135.

张鸿翔, 徐志方, 马英军, 等, 2001. 大陆溢流玄武岩的地球化学特征及起源. 地球科学——中国地质大学学报, 26(3): 261-268.

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.

郑海飞, 谢鸿森, 郭捷, 1998. 微量元素比值研究岩浆源区成分的可靠性: 玄武岩熔融实验研究. 矿物学报, 18(4): 541-545.