

# 赣中早白垩世橄榄玄粗岩 ( Shoshonite ) 系列火山岩的厘定及成因研究

吴俊奇<sup>1</sup>, 谭桂丽<sup>2</sup>, 章邦桐<sup>1</sup>, 凌洪飞<sup>1</sup>, 陈培荣<sup>1</sup>

1. 南京大学 地球科学与工程学院, 内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 南京 210093;  
2. 南京地质矿产研究所, 南京 210016

**摘要:** 对赣中地区打鼓顶组第四岩性段中基性火山岩的岩石-地球化学特征系统研究表明, 这一岩性段的火山岩具有高碱、富钾、低钛、贫铁以及富集轻稀土和大离子亲石元素等特征, 据此厘定其为橄榄玄粗岩-安粗岩组合, 属典型的大陆板内橄榄玄粗岩系列火山岩。这套火山岩的全岩Rb-Sr等时年龄为  $(138 \pm 8.8)$  Ma,  $I_{Sr}$  偏高, 中等的  $\epsilon_{Nd}(t)$ , 富放射性成因铅。盛源盆地及邻区橄榄玄粗岩系列火山岩的  $\Delta 7/4Pb$  值为 14~19.6 (平均值为 16),  $\Delta 8/4Pb$  值为 70.5~97 (平均值为 89.2),  $\Delta Sr$  值为 121.5~161.8 (平均值为 136.3), 显示存在典型的Dupal同位素异常。根据Sr-Nd, Sr-Pb, Nd-Pb, Pb-Pb同位素相关性分析, 判明赣中地区橄榄玄粗岩是由亏损地幔端元 (DM) 和岩石圈富集地幔端元 (LEM) 在源区混合形成的。按Nd, Sr双变量二元混合方程式计算, 得出源区物质中亏损地幔端元 (DM) 和岩石圈富集地幔端元 (LEM) 所占份额分别为37% (平均值) 和63% (平均值)。赣中地区早白垩世橄榄玄粗岩系火山岩的形成反映了华南板块内部在燕山晚期发生的一起重要的伸展构造事件。

**关键词:** 橄榄玄粗岩; 岩石-地球化学特征; Sr-Nd-Pb同位素; 岩石圈富集地幔; 赣中

中图分类号: P642.252

文献标识码: A

文章编号: 1006-7493 (2011) 04-0479-13

## Identification and Genesis of the Early Cretaceous Shoshonitic Volcanic Rock Series in Central Jiangxi Province

WU Jun-qi<sup>1</sup>, TAN Gui-li<sup>2</sup>, ZHANG Bang-tong<sup>1</sup>, LING Hong-fei<sup>1</sup>, CHEN Pei-rong<sup>1</sup>

1. School of Earth Sciences and Engineering, State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 2. Nanjing Institute of Geology and Mineral Resources, Nanjing 210016, China

**Abstract:** The forth unit of the Daguding Group in central Jiangxi Province consists of intermediate to basic volcanic rocks in the Shengyuan basin and adjacent areas. Our systematic study of petrology and geochemistry of this unit identifies that these rocks belong to typical interplate shoshonitic volcanic rock series, which are characterized by high contents of total alkali and  $K_2O$ , low contents of  $TiO_2$  and iron, and an enrichment of the LREE and LILE elements. The Rb-Sr isochron age of the shoshonite series is  $(138 \pm 8.8)$  Ma, with distinctively high initial Sr isotopic ratios; intermediate initial Nd isotopic ratios and enriched radiogenic Pb. In addition, the shoshonite series shows a remarkable Dupal anomaly ( $\Delta 7/4Pb=14\sim 19.6$  with an average value of 16;  $\Delta 8/4Pb=70.5\sim 97$  with an average value of 89.2;  $\Delta Sr=121.5\sim 161.8$  with an average value of 136.3). The correlations of Sr-Nd, Sr-Pb, Nd-Pb and Pb-Pb isotopes imply a mixing source of the depleted mantle (DM) endmember and the lithosphere enriched mantle (LEM) endmember. According to the two-component (Sr-Nd) mixing equation, the source of the shoshonite series is composed of about 37% DM

收稿日期: 2011-10-08; 修回日期: 2011-11-25

基金项目: 中国核工业地质局十五科研项目 (2006YG026) 资助

作者简介: 吴俊奇, 男, 1955年生, 副教授, 核能地质专业; E-mail: wujunqi@nju.edu.cn

endmember and 63% LEM endmember. The existence of the early Cretaceous shoshonitic volcanic rock series in central Jiangxi Province suggests an important episode of extension in South China during the late Yanshanian period.

**Key words:** shoshonite, petrology and geochemistry, Sr-Nd-Pb isotopes, lithosphere enriched mantle, central Jiangxi Province

**First author:** Wu Junqi, Associate Professor; E-mail: wujunqi@nju.edu.cn

橄榄玄粗岩系列 (Shoshonite Series) 岩石是一套产于特定地质构造环境、具有独特的岩石学和地球化学特征, 并且与Cu, Au等金属成矿作用关系密切的富钾中(基)性火山岩系。经过近30多年的研究, 橄榄玄粗岩系列火山岩已被国际岩石学界确认为一套与钙碱性系列及碱性系列并列的独立火山岩组合 (Morrison, 1980; Condie, 1975; Liegeois et al., 1998; Sun and Stern., 2001; Peccerillo, 2001), 随着板块构造与成矿作用研究的深入, 橄榄玄粗岩系列火山岩已引起国内外学者的广泛关注。

赣中盛源盆地是赣杭铀成矿带中一个重要的产铀火山盆地。盆地周边广泛分布着鹅湖岭组、打鼓顶组晚侏罗世一早白垩世火山岩系地层, 其中打鼓顶组第四岩性段为中(基)性熔岩。前人根据SiO<sub>2</sub>含量将这套中(基)性火山岩定名为安山岩 (张万良, 1999a)。这套中(基)性火山岩的岩石化学以高钾, 钾钠比值大于1为特征, 而且与打鼓顶组第二岩性段的流纹质火山岩并不构成连

续的演化系列。章邦桐等 (2001) 对赣南会昌地区中基性火山岩的系统矿物岩石学及地球化学研究, 确认了会昌地区典型橄榄玄粗岩系列火山岩的存在。那么, 赣中地区的这套中(基)性火山岩是否可与赣南会昌地区的类似岩石相对比? 其形成时代及岩浆源区组成等问题均有待于深入探索。为此, 本文运用岩石学、岩石化学及同位素技术手段, 论证赣中盛源盆地—余江地区中基性火山岩为典型的橄榄玄粗岩系, 并对其成因进行探讨。这对研究该地区铀成矿作用及深部构造演化具有重要意义。

### 1 区域地质背景及岩石学特征

#### 1.1 区域地质背景

研究区位于扬子板块和华南板块拼接部位, 赣东北—信江裂陷伸展构造西部, 是我国著名的赣—杭构造火山岩带内一个重要产铀火山盆地 (图1)。该盆地出露总面积约416 km<sup>2</sup>, 地貌上呈向北开口的马蹄形, 盆地由基底和盖层构成, 基底为

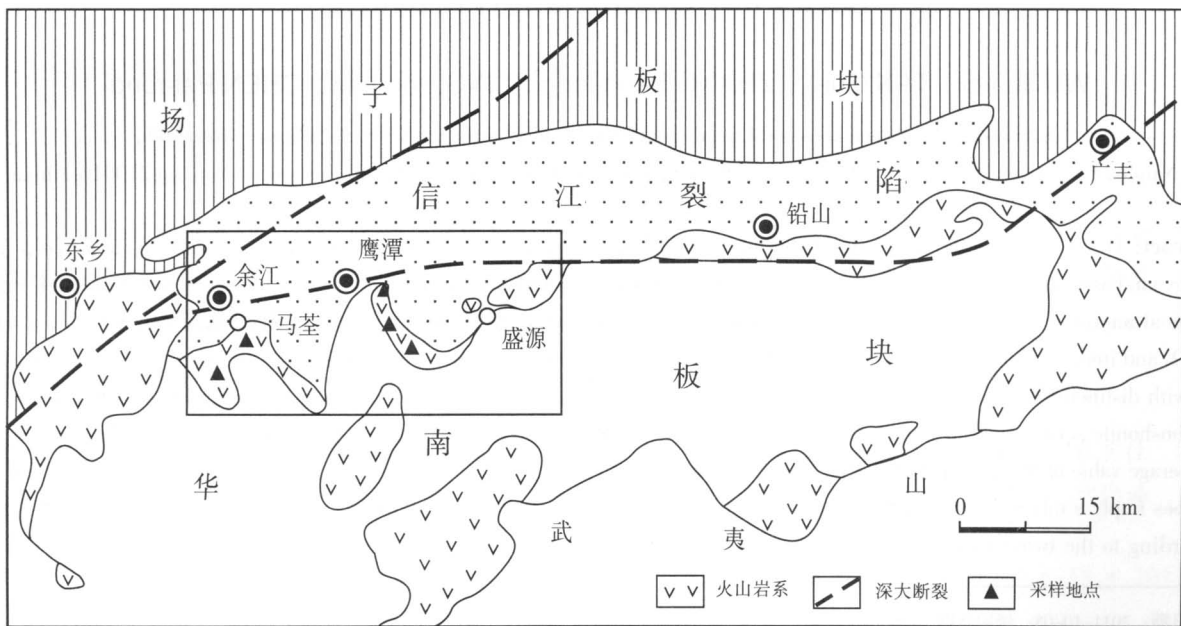


图1 研究区地质构造略图 (据张万良, 1999b修改)

Fig. 1 Tectonic map of central Jiangxi Province (modified after Zhang WanLiang, 1999b)

中上元古界—下寒武统浅变质岩系和加里东期花岗岩，盖层为上侏罗统火山岩系和白垩系红层，盆地中部被巨厚的白垩系红层所覆盖，上侏罗统火山岩沿盆地周边展布，主要分布于童家、东川、蔡家、坝口、金源、散坑、蚂坞一带。火山岩与陆源碎屑岩相间出现，总厚度约1350 m，岩层产状向盆地中心倾斜，倾角较缓，一般为 $20^{\circ}$ ~ $30^{\circ}$ 。根据火山喷发旋回、岩性岩相组合特点，将其划分为鹅湖岭组和打鼓顶组。本文所研究的中（基）性熔岩产出在打鼓顶组第四岩性段，分布稳定并与铀成矿关系密切。

### 1.2 矿物岩石学特征

分布在赣中盛源地区打鼓顶组第四岩性段的中（基）性火山岩呈灰黑色，风化后呈灰绿色或黄绿色，斑状结构，块状构造，局部具有气孔，杏仁构造。斑晶矿物主要为黑云母、长石，基质为隐晶质结构。镜下鉴定长石斑晶大部分表面不洁净，不显双晶，发育交代净边结构和环带构造。黑云母斑晶呈深褐色，解理发育，多色性不明显，粒径一般为1~6 mm。电子探针揭示基质中斜长石微晶呈长柱状杂乱分布，并发现斜长石（An）微晶周围具有钾长石（Kf）环边，这为研究区橄辉玄武岩系列火山岩的存在提供了可靠的矿物岩石学证据（谭桂丽，2008）。副矿物可见磁铁矿、磷灰石。

## 2 样品和分析方法

橄辉玄武岩样品采自赣中盛源盆地—余江地区，样品的主量元素由南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室采用ICP-AES方法分析测定；稀土元素和微量元素由南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室采用Finnigan Element 2型ICP-MS测定，相对标准偏差小于5%；样品的Rb, Sr, Nd, Sm含量以及同位素的化学分离与质谱测定均在南京大学现代分析中心同位素质谱实验室完成，所用的质谱仪型号为VG354；Sr同位素比值测定采 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr}=0.1194$ 进行质量分馏校正，对Sr同位素标样NDS987测定的结果为 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.71022 \pm 4 (2\sigma)$ ；Nd同位素比值测定采用 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.7219$ 进行标准化，Nd同位素标样BCR-1的测定值为 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.512662 \pm$

$8 (2\sigma)$ ，Sr和Nd的全实验流程本底分别为 $1 \times 10^{-9}$ ~ $2 \times 10^{-9}$ g和 $5 \times 10^{-11}$ ~ $7 \times 10^{-11}$ g；所测样品的Pb同位素组成在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室同位素质谱实验室分析测定，样品中的Pb同位素在氢溴酸体系中采用阴离子交换法分离提纯Pb后，用热电离质谱法用Finnigan Triton (TI) 质谱计测定。

## 3 主量、微量元素分析结果及地球化学特征

### 3.1 主量元素

火山岩的化学成分特征是确定火山岩所属岩系及分类定名的重要依据，赣中地区火山岩的SiO<sub>2</sub>含量变化在55.08%~62.86%之间。表1列出了研究区中基性火山岩的岩石化学分析数据和CIPW标准矿物及有关岩石化学参数，其岩石化学特点可归纳为以下几点。

1) SiO<sub>2</sub>含量中等：SiO<sub>2</sub>含量变化范围为55.08%~62.86%，平均值为56.05%（橄辉玄武岩）和60.22%（安粗岩）。

2) 富碱：橄辉玄武岩的全碱（K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O）含量为5.71%~8.42%，平均值为6.87%，安粗岩的全碱（K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O）含量为6.83%~8.07%，平均值为7.50%。里特曼指数（σ）分别为2.42~4.85，平均值3.29（橄辉玄武岩）和2.83~3.25，平均值3.09（安粗岩），表明赣中中基性火山岩属（弱）碱性系列。根据国际地科联推荐的火山岩岩石分类方案（TAS图），本区中基性火山岩投影点主要落在玄武粗安岩—粗安岩—粗面岩范围（图2）。

3) 高K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O比值：赣中盛源盆地橄辉玄武岩的K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O变化范围在0.64~1.04之间，平均值为0.83；安粗岩为0.91~1.32，平均值为1.27。在ΔQ-K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O图上岩石的投影点均位于橄辉玄武岩系内，反映出赣中地区火山岩的成份属钾质类型（图3）。在K<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub>岩系划分图上，岩石的投影点均落在橄辉玄武岩和安粗岩区内（图4）。

4) 贫钛、低铁：赣中地区火山岩具有贫钛、低铁特征。橄辉玄武岩和安粗岩的TiO<sub>2</sub>含量平均值分别为1.08%和0.92%。其含量均小于1.3%；橄辉玄武岩和安粗岩全铁含量平均值分别为6.63%和

表1 赣中地区橄榄玄粗岩系火山岩岩石化学成分(%)，CIPW标准矿物及岩石化学参数  
Table 1 Chemical compositions (%), CIPW norms, and petrochemical parameters  
of shoshonitic volcanic rocks from central Jiangxi Province

样号 岩性	SY05	6501*	SK02*	SY05, 6501*, SK02* 平均值	黄石公园 平均值	SY01	SY03	MQ09	MQ10	SY01—03 平均值	黄石公园 平均值
	橄榄玄粗岩					安粗岩					
SiO <sub>2</sub>	56.44	55.08	56.62	56.05	54.62	57.27	61.98	62.86	58.77	60.22	59.10
TiO <sub>2</sub>	1.13	1.07	1.05	1.08	0.82	1.09	0.94	0.61	1.04	0.92	0.61
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.30	16.19	16.36	16.95	18.11	17.54	17.12	15.19	17.65	16.88	17.79
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.76	2.38	1.98	2.37	3.92	3.68	4.67	3.75	4.19	4.07	3.85
FeO	3.48	4.86	4.43	4.26	3.22	2.01	1.82	0.95	2.25	1.76	1.07
MnO	0.08	0.11	0.08	0.09	0.11	0.07	0.04	0.10	0.15	0.09	0.05
MgO	2.03	3.84	2.16	2.83	3.74	1.34	1.19	0.68	0.93	1.04	1.62
CaO	2.78	5.63	5.09	4.50	5.68	2.64	1.47	3.52	5.32	3.24	3.58
Na <sub>2</sub> O	5.12	2.95	3.18	3.75	3.48	3.72	3.65	2.88	2.94	3.30	4.48
K <sub>2</sub> O	3.30	2.76	3.30	3.12	3.75	3.39	4.33	5.19	3.89	4.20	5.57
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.33	0.31	0.37	0.34	0.47	0.33	0.23	0.22	0.31	0.27	0.37
LOI	3.89	0.00	0.00	0.00	2.09	6.63	2.40	4.10	2.25	3.85	1.90
Total	99.64				100.01	99.71	99.84	100.05	99.69	99.92	99.98
Q	5.10	9.10	10.05	7.82	2.96	16.34	19.69	19.11	14.40	17.15	3.01
Or	20.37	17.14	20.51	19.34	22.66	21.55	26.30	32.01	23.62	25.89	33.60
Ab	45.25	26.23	28.30	33.28	29.68	33.86	31.74	25.44	25.56	29.13	38.70
An	12.15	23.94	21.69	21.09	23.46	11.77	5.95	13.77	24.12	14.93	12.23
Di	0.00	2.67	1.19	0.00	1.78	0.00	0.00	2.43	0.76	0.00	2.73
Hy	7.78	14.42	11.07	11.86	11.97	5.36	4.72	1.97	4.37	4.49	3.84
Ol	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
σ	4.85	2.42	2.81	3.29	4.19	3.14	3.25	3.14	2.83	3.09	6.07
DI	25.47	26.24	31.01	27.16	25.62	37.89	45.99	51.12	38.02	43.04	36.61
ALK	8.42	5.71	6.48	6.87	7.18	7.11	7.98	8.07	6.83	7.50	10.05
K/N	0.64	0.94	1.04	0.83	1.09	0.91	1.19	1.80	1.32	1.27	1.24
ΔQ	5.10	9.10	10.05	7.82	2.96	16.34	19.69	19.11	14.40	17.15	3.01
F	36.32	42.30	40.24	39.71	38.09	38.63	39.63	33.10	43.69	38.83	28.01
M	12.37	23.20	17.16	17.59	21.11	9.74	7.84	5.20	6.75	7.45	9.99
A	51.31	34.50	42.60	42.70	40.80	51.63	52.53	61.70	49.56	53.72	62.00

\* 数据引自张万良(1999a), Q, 石英; Or, 钾长石; Ab, 钠长石; An, 钙长石; Di, 透辉石; Hy, 紫苏辉石; Ol, 橄榄石; σ, 里特曼指数 [  $\sigma = (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})^2 / (\text{SiO}_2 - 43)$  ]; DI, 分异指数 (DI=q+or+ab+ne+lc+kp); ALK = K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O; K/N = n (K<sub>2</sub>O) / n (Na<sub>2</sub>O); ΔQ=q-lc-ne-kal-ol; F=f/(f+m+a) × 100; M=m/(f+m+a) × 100; A=a/(f+m+a) × 100; f=FeO+0.9Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; a=K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O; m=MgO。

5.83%, 在AFM图上位于钙碱性系列范围, 并呈平坦演化趋势(图5)。

### 3.2 稀土元素

表2列出了赣中地区橄榄玄粗岩系岩石的稀土元素测定结果, 其主要特征为: (1) 稀土元素总量较高, 橄榄玄粗岩稀土总量为  $234.98 \times 10^{-6}$ , 安粗岩的稀土总量变化范围为  $200.86 \times 10^{-6} \sim 241.97 \times 10^{-6}$ , 平均值为  $215.2 \times 10^{-6}$ ; (2) 轻重稀土元素的分馏程度显著, 轻稀土明显富集, 轻重稀土

比值橄榄玄粗岩为10.83, 安粗岩为8.85~10.19, 平均值为9.69, 在球粒陨石标准化曲线图(图6)上表现为明显的右倾平缓型; (3) 铈亏损不明显, 橄榄玄粗岩  $\delta\text{Eu}=1.17$ , 为正铈异常, 安粗岩  $\delta\text{Eu}=0.77 \sim 1.06$ , 为弱负异常和正铈异常, 在  $\delta\text{Eu}-\text{DI}$ 图(图7)上  $\delta\text{Eu}$ 与分异指数不呈线性相关, 这表明原始岩浆的分离结晶作用不明显。

### 3.3 微量元素

赣中地区橄榄玄粗岩的稀土元素分析数据及



表2 赣中地区橄榄玄粗岩系列火山岩稀土元素、微量元素 ( $\times 10^{-6}$ ) 及其参数表

Table 2 Rare earth element trace element contents and parameters of the volcanic rocks from central Jiangxi Province

样号	SY05	SY01	SY03	MQ09	MQ10
Rb	78	104	117	166	116
Ba	2478	987	2252	893	930
Th	10.76	10.40	11.27	13.66	10.46
U	1.83	2.09	1.74	2.86	2.12
Pb	13.86	10.87	18.97	20.06	17.77
Nb	15.19	14.09	13.51	11.74	12.00
Ta	0.90	0.85	0.78	0.80	0.68
Sr	348	226	231	222	568
Zr	217	189	236	209	181
Hf	6.06	5.45	6.64	5.99	4.95
Y	22.57	22.73	30.75	23.60	26.68
La	50.94	46.08	52.88	44.90	43.78
Ce	93.40	85.10	93.30	83.80	83.00
Pr	11.31	10.06	11.93	9.54	10.03
Nd	48.40	41.90	49.80	36.50	39.30
Sm	8.08	7.35	8.48	6.57	7.06
Eu	2.98	2.31	2.86	1.60	1.89
Gd	7.25	6.58	7.69	5.96	7.07
Tb	0.95	0.90	1.09	0.80	0.97
Dy	4.96	4.98	5.79	4.60	5.29
Ho	0.96	0.94	1.18	0.86	1.01
Er	2.66	2.66	3.45	2.64	3.06
Tm	0.37	0.37	0.45	0.37	0.43
Yb	2.37	2.30	2.65	2.32	2.68
Lu	0.35	0.33	0.42	0.40	0.40
TREE	234.98	211.93	241.97	200.86	205.97
LREE	215.11	192.80	219.25	182.91	185.06
HREE	19.87	19.13	22.72	17.95	20.91
L/H	10.83	10.08	9.65	10.19	8.85
$\delta_{Eu}$	1.17	1.00	1.06	0.77	0.81
La/Sm	6.30	6.27	6.24	6.83	6.20
Ce/Yb	39.41	37.00	35.21	36.12	30.97
Ta/Yb	0.38	0.37	0.29	0.34	0.25
Th/Yb	4.54	4.52	4.25	5.89	3.90
Nb/Y	0.67	0.62	0.44	0.50	0.45
Rb/Y	3.46	4.58	3.80	7.04	4.36

有关参数计算见表2, 岩石样品的原始地幔标准化微量元素蛛网图示于图8。赣中地区橄榄玄粗岩系火山岩的微量元素分布模式的共同特点如下。

1) 亲石元素 (K, Rb, Ba) 和放射性元素 (Th, U) 高度富集, 分别为原始地幔中该元素丰度的数百倍。

2) 高场强元素 (Nb, Ta, Zr, Hf, Y, Ti) 明显富集, 分别为原始地幔中该元素丰度的数十倍。

3) Sr元素含量变化范围很大, 反映出该元素在本区橄榄玄粗质岩浆中的不均匀分布特点。

4) Ta/Yb-Ce/Yb和Ta/Yb-Th/Yb图解 (图9)

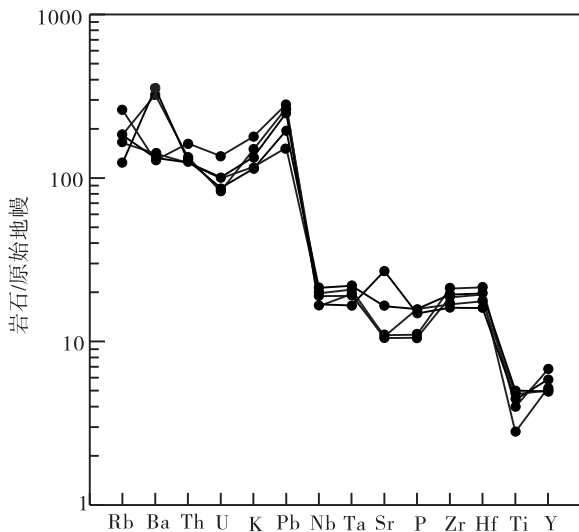


图8 赣中地区火山岩微量元素原始地幔标准化曲线图  
(标准化所用原始地幔数据据McDonough et al., 1992)

Fig. 8 Primordial mantle-normalized trace element patterns of volcanic rocks from central Jiangxi Province

中，赣中盛源盆地火山岩均落入橄榄玄粗岩系列范围，这为说明其属橄榄玄粗岩系列提供了有力的地球化学佐证。

综上所述，赣中盛源地区中基性火山岩具富碱、高钾、贫钛、低铁等特征，岩石基质中斜长石微晶周围具有钾长石环边，基质中存在大量钾长石微晶，以及富集轻稀土元素和大离子亲石元素等矿物-岩石地球化学特征，确切厘定赣中盛源地区的中-基性火山岩为橄榄玄粗岩-安粗岩组合。

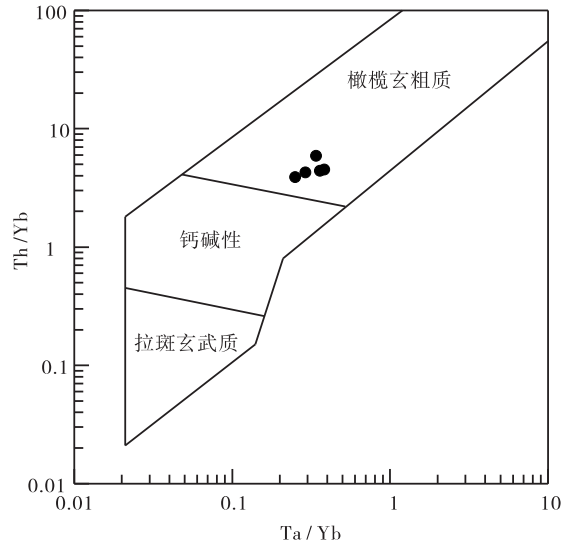
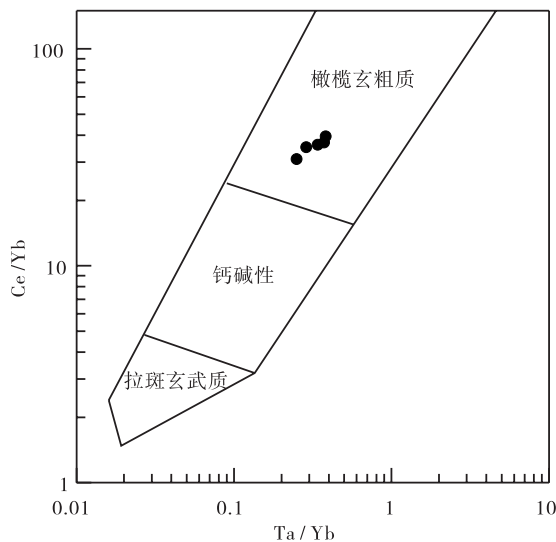


图9 赣中地区橄榄玄粗岩系列火山岩Ta/Yb-Th/Yb和Ta/Yb-Ce/Yb图

Fig. 9 Ta/Yb-Th/Yb and Ta/Yb-Ce/Yb diagrams of the volcanic rocks from central Jiangxi Province (After Adams et al., 2005)

## 4 Sr-Nd-Pb同位素组成

放射性成因Sr, Nd, Pb同位素由于其原子质量数较大，在一般的地质作用及岩浆分异作用过程中的地球化学性质比较稳定，因而现已成为研究、识别岩浆源区（地壳及各种地幔端元）演化特征的有力示踪工具。因此，笔者拟通过对赣中地区橄榄玄粗岩Sr-Nd-Pb同位素组成的研究，从同位素示踪角度探讨赣中地区橄榄玄粗岩的成因及赣中晚中生代地幔源区特征。

### 4.1 Rb-Sr同位素年代学

赣中地区橄榄玄粗岩系列火山岩全岩样品Rb, Sr的含量及其同位素分析结果列于表3。它们在Rb-Sr等时线图上具有很好的线性相关（图10），其拟合的线性方程为： $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}) = 0.0019626 \times (^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}) + 0.71111$ 。采用York方法计算的全岩等时线年龄为 $(138 \pm 8.8) \text{ Ma}$ ， $I_{\text{Sr}}=0.71111$ ，MSWD=5.96。低的MSWD值、较小的年龄值误差，说明该年龄值可信度高。表明本区橄榄玄粗岩形成于早白垩世，为赣中地区断陷红盆形成时限提供了重要的年代学证据。

### 4.2 Sr同位素地球化学特征

从上述等时线计算结果得知，赣中地区橄榄玄粗岩的初始锶同位素组成 $I_{\text{Sr}}$ 值为0.71111。这明显高于江苏溧水高钾安山岩（ $I_{\text{Sr}}=0.7059\sim 0.7062$ ，李超文等，2004）、山东诸城橄榄玄粗岩

表3 赣中地区橄榄玄粗岩系列火山岩Rb-Sr同位素分析结果

Table 3 Rb-Sr isotope compositions of the shoshonite series in central Jiangxi Province

样号	岩性	Rb ( $\times 10^{-6}$ )	Sr ( $\times 10^{-6}$ )	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \pm 2\sigma$	$I_{\text{Sr}}(t)$	$\Delta \text{Sr}$	1/Sr	Rb/Sr
SY01	橄榄玄粗岩	99.87	219.8	1.334	$0.713634 \pm 15$	0.71102	136.3	0.00455	0.454
SY03	安粗岩	110.6	225.4	1.446	$0.713938 \pm 12$	0.71110	139.4	0.00444	0.490
SY05	橄榄玄粗岩	68.73	356.5	0.5674	$0.712256 \pm 10$	0.71114	122.6	0.00281	0.193
MQ9	安粗岩	179.2	206.1	2.563	$0.716183 \pm 13$	0.711116	161.8	0.00485	0.869
MQ10	安粗岩	102.5	589.4	0.5107	$0.712145 \pm 14$	0.71114	121.5	0.00170	0.174

注: Sr同位素初始值的计算根据  $t=138 \text{ Ma}$ ;  $I_{\text{Sr}} = [ (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}) - 0.7 ] \times 10^4$ 。

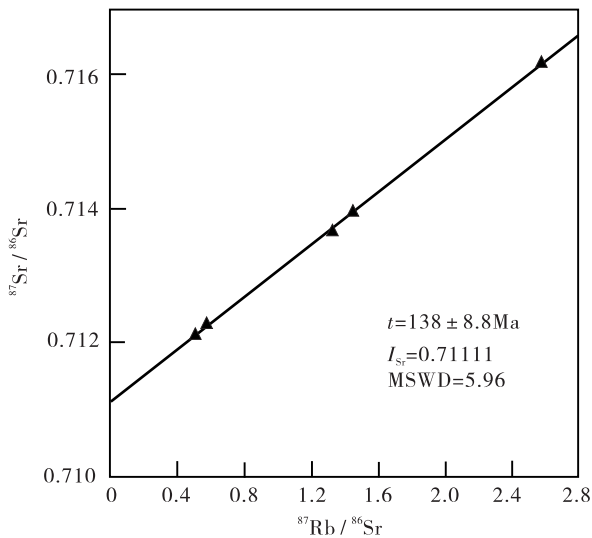
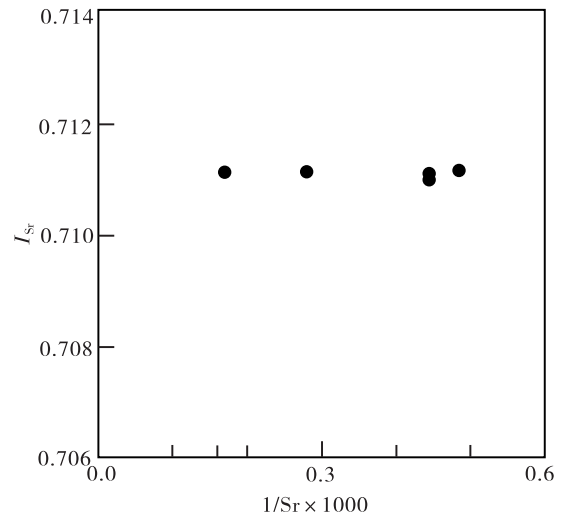


图10 赣中地区橄榄玄粗岩系的全岩Rb-Sr等时线

Fig. 10 Rb-Sr isochron of the central Jiangxi shoshonite series

( $I_{\text{Sr}}=0.7084$ , 邱检生等, 1996)、安徽庐枞橄榄玄粗岩 ( $I_{\text{Sr}}=0.705999\sim 0.707752$ , 谢智等, 2007) 和东非卢旺达Sabinyo安粗岩 ( $I_{\text{Sr}}=0.7073\sim 0.7099$ , Rogers and James., 1998)。橄榄玄粗岩 $I_{\text{Sr}}$ 值偏高的现象, 可能由两种原因引起: 一是原始岩浆在通过地壳岩石上升侵位过程中受到地壳物质的混染; 另一是存在富集型地幔源区。我们认为赣中橄榄玄粗岩的高 $I_{\text{Sr}}$ 值是由存在富集型地幔源区引起的, 其依据如下。

1) 岩浆岩样品的锶同位素初始比值与1/Sr呈正相关的特征是判断原始岩浆遭受地壳混染的重要证据之一 (Briqueu and Lancelor., 1979; Francis et al., 1980)。赣中地区橄榄玄粗岩在( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )-1/Sr图解上, 不呈正相关分布, 而呈近水平的离散分布(图11)。这说明赣中地区橄榄玄粗岩形成过程中, 其原始岩浆未受到地壳物质的直接混染。

图11 赣中地区橄榄玄粗岩系 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -1/Sr图解Fig. 11  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -1/Sr diagrams of volcanic rocks from central Jiangxi Province

2) 赣中地区橄榄玄粗岩的Sr含量为 $206.1 \times 10^{-6} \sim 589.4 \times 10^{-6}$ , 平均为 $319.4 \times 10^{-6}$ , 明显低于溧水龙王山组高钾安山岩 ( $784 \times 10^{-6} \sim 1248 \times 10^{-6}$ , 李超文等, 2004)、山东诸城橄榄玄粗岩 ( $750.6 \times 10^{-6} \sim 798.4 \times 10^{-6}$ , 邱检生等, 1996)。赣中地区橄榄玄粗岩的Rb/Sr为0.174~0.869, 平均为0.436, 明显高于MORB (0.029, Rollison, 1993), OIB (0.0275, Rollison, 1993) 和溧水龙王山组高钾安山岩 (0.018~0.092, 李超文等, 2004)。由此可见, 赣中地区橄榄玄粗岩的高 $I_{\text{Sr}}$ 值可能与原始岩浆锶含量偏低和Rb/Sr比值高有关。

3)  $\Delta \text{Sr}$ 值 $>50$  ( $\Delta \text{Sr} = [ (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}) - 0.7 ] \times 10^4$ ) 是判明Dupal同位素异常的重要条件之一 (Dupre and Allegre., 1983; Hart, 1984)。赣中地区橄榄玄粗岩的 $\Delta \text{Sr}$ 值为121.5~161.8均大于50, 这为阐明区内存在富集地幔源区提供了又一重要佐证。



### 4.3 Nd同位素地球化学特征

#### 4.3.1 Nd初始值特征

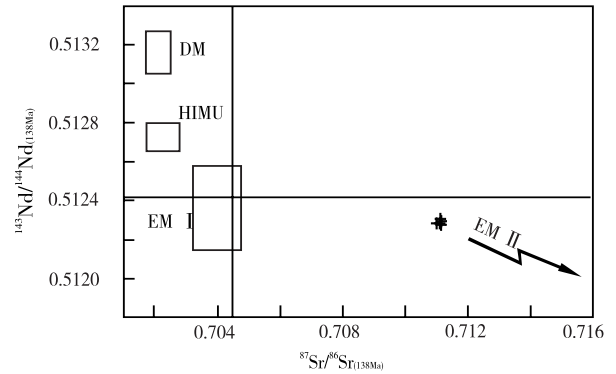
赣中地区橄榄玄粗岩的Sm-Nd同位素分析结果列于表4。由表4可知，赣中地区橄榄玄粗岩代表岩石形成时源区的Nd初始值为0.512280~0.512302。它们与庐枞橄榄安粗岩系列火山岩（0.512278~0.5121599，谢智等，2007）基本一致，但赣中地区橄榄玄粗岩的Sr初始值（0.711111）却比庐枞橄榄安粗岩（0.705999~0.707752）高很多。这样一种Sr初始值与Nd初始值不匹配的情况，显示研究区橄榄玄粗岩具有比较复杂的幔源特征。

#### 4.3.2 Nd-Sr相关特征

应用 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}-^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 关系图解可判明中基性岩地幔源区的主要特征。为了阐明赣中地区橄榄玄粗岩的地幔端元组成，本文将各地幔端元的Nd，Sr同位素组成换算成 $t=138\text{Ma}$ 的初始值，并将其投影点分布范围示于图12。在 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}-^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 相关图解（图12）上可以看出：赣中地区橄榄玄粗岩投影分布范围偏向EM II型地幔端元，这反映出赣中地区橄榄玄粗岩源区中EM II型富集地幔组分的贡献十分明显。

#### 4.3.3 Nd同位素模式年龄特征及地质意义

根据岩石样品中Nd同位素组成计算得出的Nd同位素模式年龄（ $t_{\text{DM}}$ ），一般可以提供有关壳-幔分异时间（或古地壳形成时间）的信息。虽然赣中地区橄榄玄粗岩形成过程中未遭受地壳直接污染，但其EM II富集地幔组分很可能是俯冲作用将古地壳物质带入地幔深部，发生交代熔融后，再循环进入岩石圈地幔而形成的。因此，研究赣中地区橄榄玄粗岩Nd同位素模式年龄特征对阐明富



DM: 亏损地幔同位素组成范围(Song and Frey., 1989);  
HIMU: 高 $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ 型地幔组成范围(Gerlach et al., 1988; Vidal et al., 1984); EM I: 富集 I 型地幔组成范围 (Cliff et al., 1991; Tu et al., 1991); EM II: 富集 II 型地幔组成范围 (McCulluoch et al., 1984; Hoernle et al., 1991)

图12 赣中地区橄榄玄粗岩 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}-^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 图解  
Fig. 12  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}-^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  diagrams of the central Jiangxi shoshonite series

集地幔组分的成因有一定的地质意义。相对于亏损地幔计算得出的赣中地区橄榄玄粗岩的Nd模式年龄值（ $t_{\text{DM}}$ ）为1058~1106 Ma，变化范围较小，平均值为1085 Ma，该Nd模式年龄值（ $t_{\text{DM}}$ ）可以代表赣中地区古地壳存留时间。赣中橄榄玄粗岩位于华南板块内部，属板内橄榄玄粗岩，形成于伸展构造环境中，很可能是大陆岩石圈地幔与软流圈地幔的混合产物。徐义刚（1999）指出，大陆岩石圈地幔是上地幔中唯一能够长期（>1 Ga）且大尺度（>1 km）保存富集（地幔）组分的地质单元。因此，赣中地区橄榄玄粗岩源区中富集地幔组分的成因可能与中元古陆壳形成的大陆岩石圈富集地幔有关。

赣中地区橄榄玄粗岩的Sm/Nd比值为0.166~0.183（表4），变化范围较小，平均值为0.177，与地壳岩石的平均值0.195（Taylor and

表4 赣中地区橄榄玄粗岩系列Sm-Nd同位素组成  
Table 4 Sm-Nd isotope compositions of the central Jiangxi shoshonite series

样号	岩性	Sm ( $\times 10^{-6}$ )	Nd ( $\times 10^{-6}$ )	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} \pm 2\sigma$	$\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$	$I_{\text{Nd}}(t)$	$t_{\text{DM}}$	Sm/Nd
SY01	橄榄玄粗岩	7.198	39.87	0.1075	0.512381 $\pm$ 8	-3.44	0.512284	1106	0.181
SY03	安粗岩	8.257	46.91	0.1028	0.512378 $\pm$ 9	-3.42	0.512285	1063	0.176
SY05	橄榄玄粗岩	8.142	49.03	0.1014	0.512372 $\pm$ 6	-3.51	0.512280	1058	0.166
MQ9	安粗岩	6.608	37.26	0.1076	0.512389 $\pm$ 9	-3.29	0.512293	1095	0.177
MQ10	安粗岩	6.981	38.05	0.1081	0.512400 $\pm$ 6	-3.08	0.512302	1085	0.183

Nd同位素初始值的计算根据 $t=138\text{Ma}$ ；计算 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 及 $t_{\text{DM}}$ 时采用的参数值为： $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}}=1967$ ， $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{CHUR}}=0.512638$ ， $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}}=0.2136$ ， $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}}=0.513151$

Mclennan., 1985) 十分接近。这也间接印证了赣中地区橄榄玄粗岩地幔源区与华南板块元古宙基底可能存在一定的成因联系。

4.4 Pb同位素地球化学特征

赣中地区橄榄玄粗岩的全岩铅同位素组成列于表5。由于赣中地区橄榄玄粗岩属早白垩世火山岩, 因而根据其铀、钍、铅含量及年龄值(138Ma)进行了放射成因铅的校正, 得出样品的初始铅同位素组成(表5), 将其投影到相关图解上, 并计算出相应的参数值( $\Delta 7/4Pb$ ,  $\Delta 8/4Pb$ ), 得出以下地球化学特征。

1) 赣中地区橄榄玄粗岩在  $(^{206}Pb/^{204}Pb)_i - (^{207}Pb/^{204}Pb)_i$  图解上的投影点都位于等时线 ( $t=138 Ma$ ) 右侧(图13A), 显出异常铅特征, 表明它们富集了放射性成因铅。

2) 在  $(^{206}Pb/^{204}Pb)_i - (^{207}Pb/^{204}Pb)_i$  和  $(^{206}Pb/^{204}Pb)_i - (^{208}Pb/^{204}Pb)_i$  相关图(图13A, 13B)上, 赣中地区橄榄玄粗岩投影点都位于北半球铅参考

线(NHRL)上方, 反映其源区具有铀、钍明显富集的特征。

3) 赣中地区橄榄玄粗岩的  $\Delta 7/4Pb$  值为14.0~19.6(平均值为16),  $\Delta 8/4Pb$  值为70.5~97.0(平均值为89.2, 表5),  $\Delta Sr$  值为121.5~161.8(平均值为136.3, 表3)。按判定Dupal异常存在的边界条件:  $\Delta 7/4Pb > 3$ ,  $\Delta 8/4Pb > 10$  和  $\Delta Sr > 50$  (Hart, 1984), 赣中地区橄榄玄粗岩满足存在Dupal异常的上述条件。由此可见, 赣中地区早白垩世地幔源区存在十分典型的Dupal同位素异常。

4.5 Pb-Sr同位素联合示踪

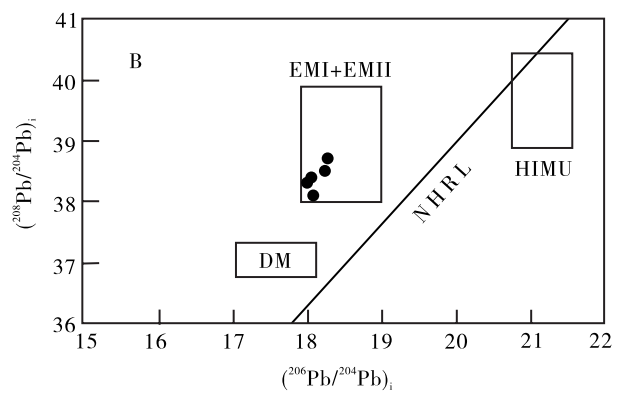
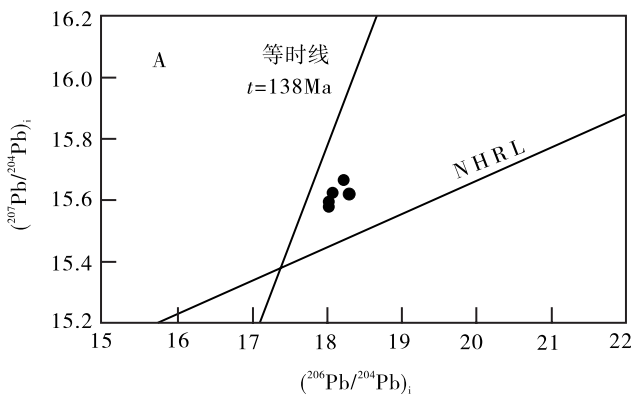
联合应用铅、锶同位素体系的地球化学特征, 可以较确切的辨识赣中橄榄玄粗岩的地幔源区特征, 能明显地区分出EM I型和EM II型富集地幔端元。在 $^{87}Sr/^{86}Sr - ^{206}Pb/^{204}Pb$ 相关图上, 赣中地区橄榄玄粗岩同位素组成的投影点都位于亏损地幔端元(DM)和EM II型富集地幔端元之间(图14)。这暗示EM II富集地幔端元对赣中地区橄榄

表5 赣中地区橄榄玄粗岩系列Pb同位素组成及有关参数

Table 5 Pb isotopic compositions and related parameters of the central Jiangxi shoshonite series

样号	岩性	$^{206}Pb/^{204}Pb$	$^{207}Pb/^{204}Pb$	$^{208}Pb/^{204}Pb$	U ( $\times 10^{-6}$ )	Th ( $\times 10^{-6}$ )	Pb ( $\times 10^{-6}$ )	$(^{206}Pb/^{204}Pb)_i$	$(^{207}Pb/^{204}Pb)_i$	$(^{208}Pb/^{204}Pb)_i$	$\Delta 7/4Pb$	$\Delta 8/4Pb$
SY01	橄榄玄粗岩	18.3375	15.6328	38.6126	2.09	10.40	10.87	18.07	15.62	38.18	17.00	70.50
SY03	安粗岩	18.1269	15.5959	38.6011	1.74	11.27	18.97	18.00	15.59	38.33	14.70	94.40
SY05	橄榄玄粗岩	18.2190	15.5953	38.7541	1.83	10.76	13.68	18.04	15.59	38.40	14.00	97.00
MQ9	安粗岩	18.4296	15.6733	38.8509	2.86	13.66	20.05	18.23	15.66	38.54	19.60	87.30
MQ10	安粗岩	18.4383	15.6283	38.9539	2.12	10.46	17.77	18.27	15.62	38.69	14.80	96.80

$\Delta 7/4Pb = [ (^{207}Pb/^{204}Pb)_{\text{样品}} - 0.1084 (^{206}Pb/^{204}Pb)_{\text{样品}} - 13.491 ] \times 100$ ;  $\Delta 8/4Pb = [ (^{208}Pb/^{204}Pb)_{\text{样品}} - 1.209 (^{206}Pb/^{204}Pb)_{\text{样品}} - 15.627 ] \times 100$ ; 铅同位素比值校正时采用的年龄值为138 M。



NHRL: 北半球参照线, 其余图例说明同图12

图13 赣中地区橄榄玄粗岩  $(^{207}Pb/^{204}Pb)_i - (^{206}Pb/^{204}Pb)_i$  (A) 和  $(^{208}Pb/^{204}Pb)_i - (^{206}Pb/^{204}Pb)_i$  (B) 关系图解

Fig.13  $(^{207}Pb/^{204}Pb)_i - (^{206}Pb/^{204}Pb)_i$  (A) and  $(^{208}Pb/^{204}Pb)_i - (^{206}Pb/^{204}Pb)_i$  (B) diagram of the central Jiangxi shoshonite series

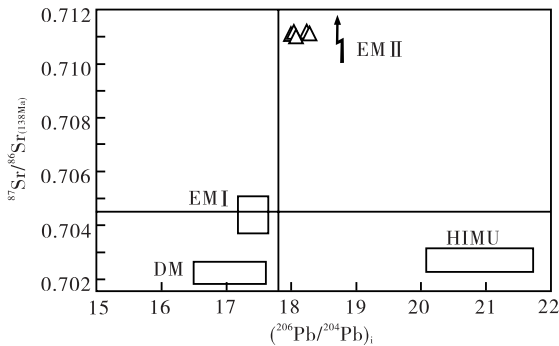


图14 赣中地区橄辉玄粗岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} - (^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ 关系图解

Fig.14  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} - (^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$  diagram of the central Jiangxi shoshonite series

玄粗岩有较多贡献。

## 5 关于赣中晚中生代岩石圈富集地幔（LEM）成因的讨论

### 5.1 赣中晚中生代地幔源区混合的Sr, Nd, Pb同位素地球化学证据

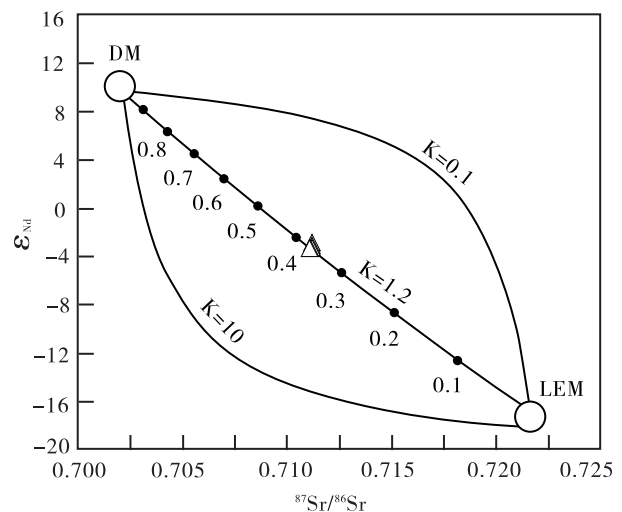
前述研究表明，赣中地区橄辉玄粗岩一方面具有偏高的 $I_{\text{Sr}}$ 值（0.71102~0.71116），另一方面其 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值中等（-3.08~3.51，平均值为-3.35）。根据它们在 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} - 1/\text{Sr}$ 图解（图11）上的投影点不呈线性正相关关系的特点，从而可排除其受地壳物质直接混染的可能性。在 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} - ^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} - ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 相关图上（图12，图14），赣中地区橄辉玄粗岩投影点都位于亏损地幔端元与EM II型富集地幔端元之间。这意味着赣中地区橄辉玄粗岩可能是由亏损地幔端元DM和EM II型富集地幔端元源区混合形成的。

### 5.2 赣中橄辉玄粗岩的地幔源区组成

据研究，洋中脊玄武岩的Sr-Nd同位素组成比较均一，一般可用洋脊玄武岩（MORB）代表亏损地幔端元（DM）的组成（Faure and Mensing, 2005）。鉴于赣中地区橄辉玄粗岩位于江西中部，产出于晚侏罗世盛源陆相火山沉积盆地打鼓顶组上部，属板内橄辉玄粗岩，形成于伸展构造环境中，结合其具有Dupal同位素异常及未受地壳直接混染等特点，由此我们认为，赣中地区橄辉玄粗岩系列火山岩的成分很可能与EM II型富集地幔相当，属于大陆板块内部的岩石圈富集地幔（LEM）与亏损地幔（DM）的混合产物。

池际尚和路凤香（1996）指出，金伯利岩是目前所知来源深度大，富含挥发组分的钾质超基性岩，一般直接来源于深部岩石圈地幔，因而其组成也可以代表一定的岩石圈地幔组成。根据西澳大利亚地区金伯利岩和钾煌斑岩类的Nd, Sr同位素组成，McCulloch推断岩石圈富集地幔（LEM）端元的锶、钕同位素组成为： $I_{\text{Sr}} = 0.7230$ ,  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = -16$ （McCulloch et al., 1984）。考虑到金伯利岩一般直接源自上地幔，可代表所在地区岩石圈富集地幔端元的组成，结合赣中地区橄辉玄粗岩具有Dupal异常（南半球异常带）特征的事实，本文选用McCulloch提出的岩石圈富集地幔端元（LEM）的Sr, Nd同位素组成来讨论和计算赣中地区地幔源区混合的组成（McCulloch et al., 1984）。

为了探讨DM和LEM端元组分对赣中地区橄辉玄粗岩的贡献程度，本文根据亏损地幔端元和岩石圈富集地幔端元（LEM）的Sr, Nd同位素组成，按Langmuir等（1978）提出的双变量二元混合方程式计算，并拟合作出K值为0.1, 1.2, 10的混合曲线示于图15。从图15可见，赣中地区橄辉玄粗岩样品的投影点分布在K=1.2的混合曲线上。计算结果表明，LEM富集地幔组分所占质量分数



混合曲线上数字代表亏损地幔端元（DM）所占重量分数；K=（Sr/Nd）DM/（Sr/Nd）EM混合曲线计算时采用的端元同位素参数分别为： $\text{Sr}_{\text{DM}} = 470 \times 10^{-6}$ ； $\text{Sr}_{\text{EM II}} = 230 \times 10^{-6}$ ； $\text{Nd}_{\text{DM}} = 14 \times 10^{-6}$ ； $\text{Nd}_{\text{EM}} = 12.7 \times 10^{-6}$ ； $(\varepsilon_{\text{Nd}})_{\text{DM}} = 9.78$ ； $(\varepsilon_{\text{Nd}})_{\text{LEM}} = -16$ ； $[(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i]_{\text{DM}} = 0.7023$ ； $[(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i]_{\text{LEM}} = 0.7232$

图15 赣中地区橄辉玄粗岩 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) - ^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 图解  
Fig. 15  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) - ^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  diagram of the central Jiangxi shoshonite series

( $f_{LEM}$ )为64%~62% (平均值为63%) ; 亏损地幔端元所占质量分数( $f_{DM}$ )为36%~38% (平均值为37%)。这表明赣中地区橄榄玄粗岩的岩浆源中LEM型富集地幔端元所占比例接近2/3, 反映出赣中地区晚中生代地幔具有LEM富集地幔特征。

### 5.3 赣中晚中生代岩石圈富集地幔(LEM)成因及构造意义

前述研究表明, 赣中地区早白垩世橄榄玄粗岩可能系亏损地幔端元(DM)和岩石圈富集地幔端元(LEM)的源区混合产物, 其中岩石圈富集地幔端元(LEM)组分的贡献占2/3左右。本文从大地构造动力学背景及赣中橄榄玄粗岩Sr, Nd, Pb同位素的时空分布和演化特征等方面, 探讨本地区古陆基底的性质及其对岩石圈富集地幔形成的制约关系, 认为赣中地区晚中生代地幔源区的LEM端元组分可能源自冈瓦纳古陆, 其依据如下:

1) 近年来的研究表明, 在新元古代发生的裂解事件导致中元古Rodinian超大陆分裂解体为劳亚古陆和东、西冈瓦纳古陆, 而华南古陆块则位于东冈瓦纳古陆(包括东南极、印度、及澳大利亚等)一侧(Hoffman, 1991; Li et al., 1997; 王剑, 2000)。本文前述的反映古地壳存留年龄的赣中地区橄榄玄粗岩的Nd模式年龄 $t_{DM}$ 为1085 Ma(平均值), 也间接地印证了这一点。Lin等(1985)曾提出了华南板块在古生代晚期向北漂移的古地磁证据。据Ingle等(2002)研究, 东冈瓦纳古陆可能一直存留到中生代。这都暗示华南板块在中生代时期与冈瓦纳古陆有着密切的关系。

2) 赣中地区现今的地理位置位于北半球一侧, 从大地构造角度分析, 赣中地区地处华南板块内部, 在中侏罗世时期受南亚板块的挤压俯冲影响较大。张理刚(1995)根据我国中生代花岗岩类岩石中中长石铅同位素组成特征, 将我国东部岩石圈划分为华北、华南、东北三大板块, 并指出华南地区具有不同于我国华北、东北地区和美洲的Pb同位素化学结构。

3) 对Pb, Sr同位素示踪研究得出赣中地区橄榄玄粗岩存在十分典型的Dupal异常的事实, 也为赣中地区晚中生代地幔源区的LEM端元组分可能源自冈瓦纳古陆提供了一定的同位素地球化学佐证。

## 6 结论

1) 根据赣中地区中基性火山岩富碱、高钾、贫钛、低铁, 以及富集轻稀土元素和大离子亲石元素等矿物、地球化学特征, 确切厘定赣中盛源盆地的中基性火山岩为橄榄玄粗岩-安粗岩组合, 属典型的大陆板内橄榄玄粗岩系列火山岩。

2) 赣中地区橄榄玄粗岩系火山岩全岩Rb-Sr等时线年龄为(138±8.8) Ma, 据此确定其形成于早白垩世, 这为赣中地区断陷红盆形成时限提供了重要的年代学证据, 反映了华南板块内在燕山晚期发生的一起重要的伸展构造事件。

3) 根据Sr, Nd, Pb同位素相关特征, 赣中地区橄榄玄粗岩的Pb同位素组成显示出富集放射性铅(异常铅)特征, 在( $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ )<sub>i</sub>-( $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ )<sub>i</sub>和( $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ )<sub>i</sub>-( $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ )<sub>i</sub>图解上均位于NHRL(北半球参考线)上方, 具南半球特有的Dupal异常性质。具偏高 $I_{Sr}$ , 中等 $\epsilon_{Nd}(t)$ 特征的赣中地区橄榄玄粗岩成因, 可用二端元(DM+LEM)混合模型来解释。根据Nd-Sr同位素组成, 按Nd, Sr双变量二元混合方程式计算, 得出源区物质中亏损地幔端元(DM)和岩石圈富集地幔端元(LEM)所占份额分别为37%(平均值)和63%(平均值)。

4) 赣中地区橄榄玄粗岩系的厘定指示华南板块内部在晚中生代发生了一起重要的伸展裂解构造事件, 结合橄榄玄粗岩存在明显的Dupal同位素异常等特征, 推测赣中地区晚中生代岩石圈富集地幔端元组分可能源自冈瓦纳古陆基底。

**致谢:** 本文作者在野外工作期间得到核工业265大队李忠清和周庆德高级工程师的热情支持和帮助, 于此深表谢意。

### 参考文献:

- 池际尚, 路凤香. 1996. 华北地台金伯利岩及古生代岩石圈地幔特征[M]. 北京: 科学出版社: 161-263.
- 李超文, 郭锋, 李晓勇. 2004. 溧水盆地晚中生代基性火山岩成因与深部动力学过程探讨[J]. 地球化学, 33(4): 361-369.
- 邱检生, 王德滋, 周金城. 1996. 山东中生代橄榄安粗岩系火山岩的地质、地球化学特征及岩石成因[J]. 地球科学, 21(5): 546-551.
- 谭桂丽, 吴俊奇, 凌洪飞, 等. 2008. 盛源盆地及邻区橄榄玄粗岩系列火山岩的矿物学证据及成因探讨[J]. 铀矿地质, 24(4): 208-213.
- 王剑. 2000. 华南新元古代裂谷盆地演化: 兼论与Rodinia解体的关系[M]. 北京: 地质出版社: 121-131.

谢智, 李全忠, 陈江峰, 等. 2007. 庐枞早白垩世火山岩的地球化学特征及其源区意义[J]. 高校地质学报, 13(12): 235-249.

徐义刚. 1999. 拉张环境中的大陆玄武岩岩浆作用: 性质及动力学过程[M]/郑永飞. 化学地球动力学. 北京: 科学出版社: 119-167.

张理刚. 1995. 东亚岩石圈块体地质-上地幔、基底和花岗岩同位素地球化学及其动力学[M]. 北京: 科学出版社: 188-225.

张万良. 1999a. 盛源盆地中的安山岩[J]. 铀矿地质, 15(1): 35-38.

张万良. 1999b. 论马基盆地的找矿方向[J]. 华东地质学院学报, 22(1): 17-22.

章邦桐, 陈培荣, 杨东升, 等. 2001. 赣南中生代橄辉玄武岩系列厘定的地质证据[J]. 地质学报, 75(2): 213-220.

## References:

Adams M G, Lentz D R, Shaw C S, et al. 2005. Eocene shoshonitic mafic dykes intruding the Monashee Complex, British Columbia: a petrogenetic relationship with the Kamloops Group volcanic sequence [J]? *Can. J. Earth sci.*, 42:11-24.

Briqueu L and Lancelot J R. 1979. Rb-Sr systematics and crustal contamination models for calc-alkaline igneous rocks [J]. *Earth Planet. Sci. Letters*, 43: 381-396.

Chi JiShang and Lu Fengxiang. 1996. North China Platform Kimberlite and Mantle Characteristics of the Paleozoic Rocks [M]. Beijing: Science Press: 161-263. (in Chinese)

Cliff R A, Baker P E and Mateer N J. 1991. Geochemistry of inaccessible Island volcanics [J]. *Chemical Geology*, 92: 251-260.

Condie K C. 1975. Plate Tectonics and Crustal Evolution [M]. Oxford: Pergamon Press: 148.

Dupre B and Allegre C J. 1983. Pb-Sr isotope variation in Indian Ocean basalts and mixing phenomena [J]. *Nature*, 303: 142-146.

Francis P W, Thorpe R S, Moorbath S, et al. 1980. Strontium isotope evidence for crustal contamination of calc-alkaline volcanic rocks from Cerro Galan, northwest Argentina [J]. *Earth Planet. Sci. Letters*, 48: 257-267.

Faure G and Mensing T M. 2005. Isotopes Principles and Applications [M]. 2nd. ed. New York: John Wiley & Sons: 321-343.

Gerlach D, Cliff R A, Davies, et al. 1988. Magma sources of the Cape Verdes archipelago: isotopic and trace element constraints [J]. *Geochem. Cosmochim. Acta*, 52: 2979-2992.

Hoffman P F. 1991. Did the break out of Laurentia turn Gondwanaland inside-out [J]? *Science*, 252: 1409-1412.

Hart S R. 1984. A large-scale isotope anomaly in the southern Hemisphere mantle [J]. *Nature*, 309: 753-757.

Hoernle K, Tilton G and Schmincke H U. 1991. Sr-Nd-Pb isotopic evolution of Gran Canaria: evidence for shallow enriched mantle beneath the Canary islands [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 106: 44-56.

Irvine T N and Baragar W R. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks [J]. *Can. Earth sci.*, 8: 533-548.

Ingle S, Weis D and Frey F A. 2002. Indian continental crust recovered from Elan Bank, Kerguelen Plateau (ODPLeg 183, Site 1137) [J]. *Journal of Petrology*, 43(7): 241-257.

Liegeois J P, Naves J, Hetrogen J, et al. 1998. Contrasting origin of post-collisional high-K, calc-alkaline and shoshonitic versus alkaline and peralkaline granitoids: The use of sliding normalization [J]. *Lithos*, 45: 1-28.

Le Bas M J, LeMaitre R W and Streckelsen A. 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram [J]. *Petrology*, 27(6): 745-750.

Langmuir C H, Vocke R D, Hanson G N, et al. 1978. A general mixing equation with applications to Icelandic basalts [J]. *Earth Planet. Sci. Letters*, 37: 380-392.

Li Z X, Zhao Jianxin, McCulloch M T, et al. 1997. Geochemical and Sm-Nd isotopic study of Neoproterozoic ophiolites from southeastern China: petrogenesis and tectonic implications [J]. *Precambrian Research*, 81: 129-144.

Lin J L, Fuller M and Zhang W Y. 1985. Panerozoic polar wander paths for south China blocks [J]. *Nature*, 313: 285-287.

Li Chaowen, Guofeng and Li Xiaoyong. 2004. Petrogenesis and geodynamic implications of late Mesozoic mafic volcanic rocks from the Lishui basin of the lower Tangtze region [J]. *Geochemica*, 33(4): 361-369. (in Chinese with English abstract)

McCulloch M T, Jaques A L, Nelson D R, et al. 1984. Nd and Sr isotopes in kimberlites and lamproites from western Australia: an enriched mantle origin [J]. *Nature*, 310: 198-202.

Morrison G W. 1980. Characteristics and tectonic setting of the shoshonite rock association [J]. *Lithos*, 13: 97-108.

Peccerillo A. 2001. Geochemistry and petrogenesis of quaternary magmatic in Central-southern Italy [J]. *Geochemistry International*, 39(6): 521-535.

Qiu Jiasheng, Wang Dezi and Zhou Jincheng. 1996. Geology, geochemistry and genesis of the Mesozoic shoshonitic volcanic rocks in Shangdong province [J]. *Earth Science*, 2(5): 546-551. (in Chinese with English abstract)

Rogers N W and James D. 1998. The generation of potassic lavas from the Eastern Virunga province, Rwanda [J]. *J. of petrology*, 38(6): 1223-1247.

Rollison H R. 1993. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation [M]. New York: Longman Scientific & Technical Limited: 113-154.

Song Y and Frey F A. 1989. Geochemistry of peridotite xenoliths in basalt from Hannuoba, Eastern China: implications for subcontinental mantle heterogeneity [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 53: 97-113.

Sun C H and Stern R J. 2001. Genesis of Mariana shoshonite [M]. *Geophys. Res.*, 106(B1): 589-608.

Taylor S R and McLennan S M. 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution [M]. Oxford: Blackwell: 67-96.

Tan Guili, Wu Junqi, Ling Hongfei, et al. 2008. Mineral petrology and petrogenesis of shoshonite rock series from Shengyuan basin and its adjacent area of middle Jiangxi [J]. *Uranium Geology*, 24(4): 208-213. (in Chinese with English abstract)

Tu Kan, Flower M F J and Carlson R W. 1991. Sr, Nd and Pb isotopic compositions of Hainan basalts (south China): implications for a subcontinental lithosphere Dupal source [J]. *Geology*, 19: 567-569. (in Chinese with English abstract)

Vidal P, Chauvel C and Brousse R. 1984. Large mantle heterogeneity beneath French Polynesia [J]. *Nature*, 307 (9): 536-538.

Wang Jian. 2000. Neoproterozoic Rifting History of South China: Significance to Rodinia Breakup [M]. Beijing: Geology Press: 121-131. (in Chinese)

Xie Zhi, Li Quanzhong, Chen Jiangfeng, et al. 2007. The geochemical characteristics of the early-cretaceous volcanics in Luzhong region and their source significances [J]. *Geological Journal of China Universities*, 13(12): 235-249.

Xu Yigang. 1999. The Continental Basaltic Magmatism in Extensional Environment [M]/ Zheng Y E, Chemical Geodynamics. Beijing: Science Press: 119-167. (in Chinese)

Zhang Ligang. 1995. Geology of the east Asia lithosphere block: isotope geochemistry and dynamics of upper mantle, basement and granites [J]. Beijing: Science Press: 188-225. (in Chinese with English abstract)

Zhang Wanliang. 1999a. Petrological Characteristics of andesites in Shengyuan basin [J]. *Uranium Geology*, 15(1): 35-38. (in Chinese with English abstract)

Zhang Wanliang. 1999b. Discussion on prospecting directions of Maquan basin [J]. *Journal of East China Geological Institute*, 22(1): 17-22. (in Chinese with English abstract)

Zhang Bangtong, Chen Peirong, Yang Dongsheng, et al. 2001. Geological evidence for determination of Mesozoic shoshonite rock series from Southern Jiangxi province [J]. *Acta Geologic Sinica*, 75(2): 213-220. (in Chinese with English abstract)