

# 赣东北蛇绿岩形成时代及构造环境

## ——樟树墩辉长岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素和地球化学约束

王存智, 邢光福, 余明刚, 黄志忠, 洪文涛, 赵希林, 周效华, 段 政, 鞠冬梅

(中国地质调查局 南京地质调查中心, 江苏 南京 210016)

**摘 要:** 赣东北蛇绿岩是华南最重要的前寒武纪蛇绿岩之一, 本文对其中的樟树墩辉长岩进行了年代学、岩石地球化学及锆石 Hf 同位素研究。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果显示樟树墩辉长岩结晶年龄为  $1\,061 \pm 44$  Ma, 代表了洋盆扩张的年龄, 也即赣东北蛇绿岩的形成年龄。单颗粒锆石原位 Hf 同位素分析得到樟树墩辉长岩  $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = 6.22 \sim 9.94$ , 平均值为 8.10, 略低于结晶时亏损地幔值; 单阶段亏损地幔 Hf 模式年龄  $t_{\text{DM1}}$  为  $1.21 \sim 1.41$  Ga, 平均为 1.28 Ga, 明显大于成岩年龄 1 061 Ma。地球化学及锆石 Hf 同位素结果显示赣东北蛇绿岩地幔具有 E-MORB 的特点, 表明这些辉长岩起源于未发生大规模熔融的初始地幔, 推测赣东北蛇绿岩可能形成于古洋盆初始裂解阶段的洋脊环境, 赣东北蛇绿岩为 MOR 型蛇绿岩。

**关键词:** 辉长岩; E-MORB; 年代学; 樟树墩; 赣东北蛇绿岩

中图分类号: P588.12<sup>+</sup>4

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2015)03-0309-13

## Timing and tectonic setting of the ophiolite in northeast Jiangxi: Constraints from zircon U-Pb age, Hf isotope and geochemistry of the Zhangshudun gabbro

WANG Cun-zhi, XING Guang-fu, YU Ming-gang, HUANG Zhi-zhong, HONG Wen-tao, ZHAO Xi-lin, ZHOU Xiao-hua, DUAN Zheng and JU Dong-mei  
(Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** The ophiolite in northeast Jiangxi is one of the most important Precambrian ophiolites in South China. Zircon U-Pb age and Hf isotope of a gabbro collected from Zhangshudun in the northeast Jiangxi ophiolite were studied for the purpose of constraining the timing and tectonic setting of the northeast Jiangxi ophiolite. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating yielded a weighted mean  $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$  age of  $1\,061 \pm 44$  Ma for the Zhangshudun gabbro, indicating that the northeast Jiangxi ophiolite formed in late Mesoproterozoic. Zircon from the Zhangshudun gabbro exhibits a narrow range of initial Hf isotope ratios [ $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = 6.22 \sim 9.94$ ], with corresponding  $t_{\text{DM1}}$  of  $1.21 \sim 1.41$  Ga. The  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  values are obviously lower than the value of depleted mantle reservoir (1 061 Ma) and the  $t_{\text{DM1}}$  values are obviously older than the timing of zircon growth. Geochemistry and zircon Hf isotopic characteristics show that these gabbros are similar to gabbros of the typical E-MORB. These features, combined with previous research results, suggest that these rocks were mostly derived from low degree partial melting primitive mantle. It is held that the northeast Jiangxi ophiolite was formed in an initial mid-ocean ridge setting at the beginning stage of the oceanic basin spreading, and the northeast Jiangxi ophiolite is mainly MOR type ophiolite.

**Key words:** gabbro; E-MORB; geochronology; Zhangshudun; the northeast Jiangxi ophiolite

收稿日期: 2014-12-20; 修订日期: 2015-04-03

基金项目: 中国地质调查局资助项目(121201113065200, 1212011120117, 12120114039001)

作者简介: 王存智(1983-), 男, 硕士, 助理研究员, 构造地质学研究方向, E-mail: 32107407@qq.com。

蛇绿岩是大陆造山带中残存的古大洋岩石圈残片,记录了大洋岩石圈的岩浆演化、变质作用、构造过程,提供了有关古洋盆形成、发展和消亡等方面的重要信息(Coleman, 1977; Nicolas, 1989)。因此,前寒武纪的蛇绿岩可以为研究地球早期的洋壳演化历史提供重要信息(张招崇等, 2001),然而,迄今为止,前寒武纪蛇绿岩发现的较少,赣东北蛇绿岩即是其中发现的少数几处之一。

赣东北断裂带是扬子东南缘一条重要的地体构造边界,即江南东段九岭地体和怀玉地体的分界线(汪新等, 1989; Shu *et al.*, 1994, 2006, 2011)。沿该断裂带广泛分布中新元古代基性-超基性岩块,构成 NNE 向展布的赣东北蛇绿岩带,是华南目前公认的少数前寒武纪蛇绿岩之一(Zhang *et al.*, 2008),蕴含了有关江南造山带乃至华南前寒武纪大地构造演化的重要信息,一直以来都是华南前寒武纪研究的热点而备受关注。

前人对赣东北蛇绿岩做过大量的工作,包括地质学、地球化学、同位素及年代学等方面的工作(白文吉等, 1986; 徐备等, 1989; Zhou and Zhao, 1991; 邢凤鸣等, 1992; Zou *et al.*, 1992; Shu *et al.*, 1994; 李献华等, 1994; 赵建新等, 1995; 赵崇贺等, 1996; 何科昭等, 1996, 2000; Li *et al.*, 1997, 2003, 2008; 李献华, 2000; 王博等, 2001; 吴浩若, 2003; 吴新华等, 2004; Gao *et al.*, 2009)。对于其形成时代有过较多的争论,目前不少学者均以蛇绿岩带内的斜长花岗岩的年龄( $\sim 970$  Ma, 李献华等, 1994),作为蛇绿岩的形成年龄。但对于最能代表洋盆扩张产物的辉长岩的高精度锆石 U-Pb 定年及岩石学研究尚比较薄弱。本文报道了赣东北蛇绿岩带内的樟树墩辉长岩的岩石地球化学特征、锆石原位 U-Pb 年龄及 Hf 同位素组成,为赣东北洋盆早期形成时限及其地幔性质提供了精确的年代学和地球化学制约,同时探讨了赣东北蛇绿岩的构造环境。

## 1 区域地质概况与样品

赣东北蛇绿岩带南起弋阳樟树墩,北至德兴中村,全长约 80 km,呈 NNE 方向展布(图 1b)。它们由一系列基性-超基性岩块组成,包括樟树墩、西湾、饶二和茅桥等超基性岩块,构造侵位在张村岩群浅变质火山-沉积岩中(徐备等, 1989; Chen *et al.*,

1991; Li *et al.*, 1997)。赣东北蛇绿岩的原始层序已经被构造肢解,岩性复杂,主要岩石类型为变质橄榄岩、堆积橄榄岩、辉石岩、辉长岩、闪长岩、斜长花岗岩、玄武岩和硅质岩(Zhou, 1989)。其中以樟树墩地区所出露的岩石类型最为全面和典型,蛇绿岩带内的这些岩石单元都经历了低绿片岩相变质,并发生了强烈的构造变形。

樟树墩蛇绿岩出露面积约  $0.162 \text{ km}^2$ ,沿 NE 方向延伸(白文吉等, 1986)。在樟树墩蛇纹石矿采场,蛇绿岩出露较好。南东侧底部主要由强烈蛇纹石化的方辉橄榄岩组成,构造变形强烈,包裹球状异剥钙榴岩,局部见直闪石矿物集合体;其中还见有多处辉长岩发育。北西侧上覆深灰色浅变质浊积岩系,其中夹有多层火山岩,总体表现为向南东逆冲的叠瓦构造(图 1c)。

本次研究所采集的样品位于采场中部(小房子附近)蛇纹石化的方辉橄榄岩中一个约  $1 \text{ m}^2$  大小的辉长岩岩脉(图 2a)。该辉长岩呈灰白色,块状构造,粗粒结构,主要由辉石和斜长石组成。矿物颗粒自形良好,粒径多在  $0.2 \sim 0.5 \text{ mm}$  间,其中斜长石多为柱状,而辉石以板柱状及粒状居多。岩石整体蚀变较强,斜长石几乎全部泥化及绿帘石、黝帘石化,仅局部残留新鲜颗粒,部分蚀变颗粒仍可见聚片双晶结构保留。辉石以单斜辉石为主,次为斜方辉石,普遍有绿泥石化及绿帘石化,边部往往绢云母化强烈,在蚀变颗粒内部常可见新鲜或弱蚀变者呈岛状残留,未见堆晶结构。

## 2 分析方法

所采集的样品在薄片鉴定基础上,选择其中最新鲜者用于地球化学分析,并挑选足够多的样品进行锆石分析。全岩主量和微量元素分析在南京地质矿产研究所实验室完成,主量元素用原子荧光光谱仪(AFS-2202a)分析,对于其中 Fe 的含量由 XRF 法测得  $\text{TFe}_2\text{O}_3$  含量,然后用滴定法测得 FeO 含量,最后计算得到  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  含量,计算公式为:  $\text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{TFe}_2\text{O}_3 - \text{FeO} \times 1.113$ ;微量元素采用电感耦合等离子体质谱仪(ELMENT2)分析,分析精度相对误差符合 DZ/T0130-2006 行业标准。

锆石分选在廊坊市宇能岩石矿物分选技术服务有限公司完成。样品破碎后手工淘洗分离出重砂,经磁选和电磁选后,在双目镜下挑出锆石。选取代

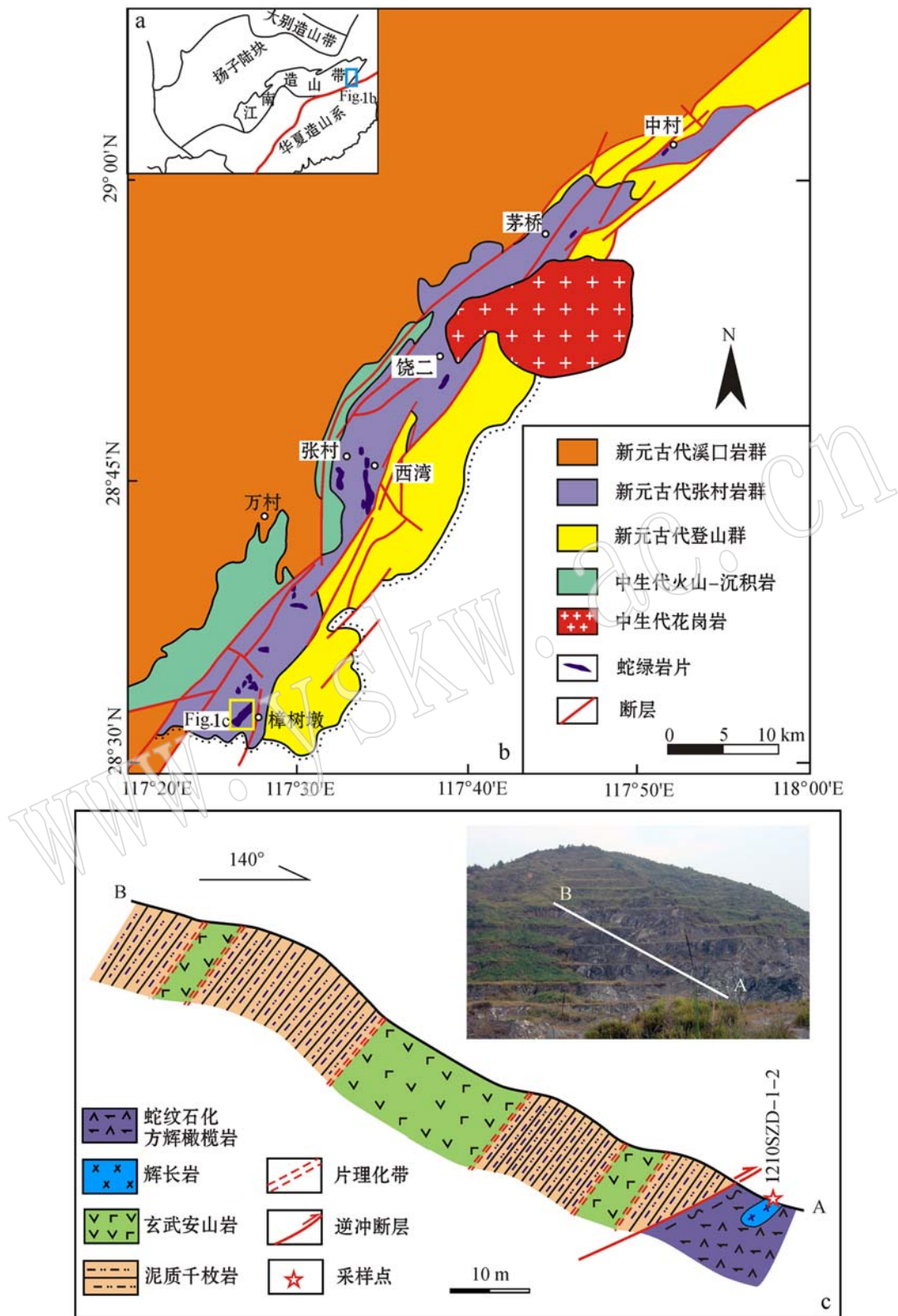


图1 赣东北蛇绿岩带地质简图

Fig. 1 Geological sketch map of the northeast Jiangxi ophiolite

a—研究区大地构造位置; b—区域地质概况(据 Li *et al.*, 2008 修改); c—樟树墩蛇绿岩信手剖面

a—schematic tectonic map of South China showing the location of the northeast Jiangxi ophiolite; b—geological map of the northeast Jiangxi ophiolite (after Li *et al.*, 2008); c—section of the Zhangshudun ophiolites

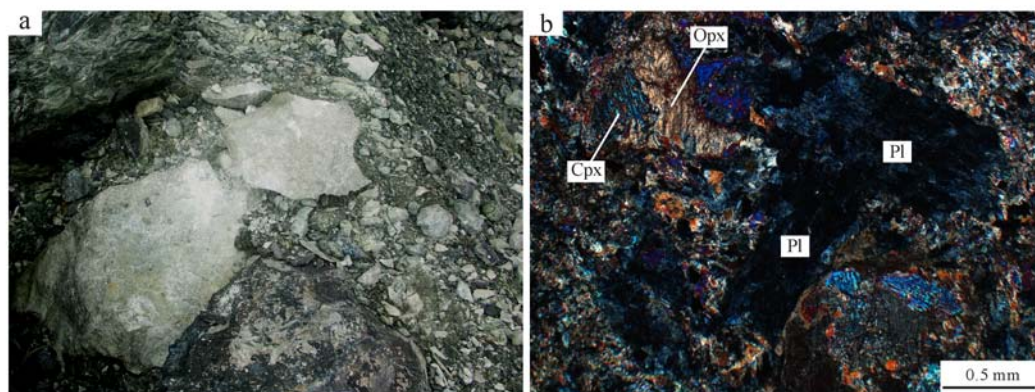


图 2 樟树墩蛇绿岩中的辉长岩岩块野外照片(a)和显微照片(b)

Fig. 2 Field photograph (a) and microstructure (b) of the gabbro in the Zhangshudun ophiolite

Pl—斜长石; Cpx—单斜辉石; Opx—斜方辉石

Pl—plagioclase; Cpx—clinopyroxene; Opx—orthopyroxene

表性颗粒在北京铅年领航科技有限公司制靶,并采用阴极发光(CL)照相对锆石内部结构进行研究。

锆石原位 U-Pb 同位素年龄及 Hf 同位素分析在中国地质调查局天津地质调查中心(天津地质矿产研究所)完成,分析所用仪器为 Finnigan Neptune 型 MC-ICP-MS 及与之配套的 Newwave UP 193 激光剥蚀系统。锆石 U-Pb 定年激光剥蚀束斑直径为 35  $\mu\text{m}$ ,激光剥蚀样品的深度为 20~40  $\mu\text{m}$ ,能量密度为 13~14 J/cm<sup>2</sup>,频率为 8~10 Hz。锆石年龄计算采用国际标准锆石 91500 作为外标。元素含量采用人工合成硅酸盐玻璃 NIST SR610 作为外标,<sup>29</sup>Si 作为内标元素进行校正。数据处理采用 ICPMSDataCal 4.3 程序(Liu *et al.*, 2008, 2010),并采用软件对测试数据进行普通铅校正(Andersen, 2002),年龄计算及谐和图绘制采用 ISOPLLOT(3.0)(Ludwig, 2003)软件完成。对已进行过 U-Pb 同位素分析的锆石进行 Lu-Hf 同位素分析,激光剥蚀的束斑直径为 50  $\mu\text{m}$ ,能量密度为 10~11 J/cm<sup>2</sup>,频率为 8~10 Hz。在实验过程中,标准锆石 GJ-1 的<sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf 加权平均值均与已报道值相一致(Elhlou *et al.*, 2006; 侯可军等, 2007)。详细的分析方法和流程见侯可军等(2009)和耿建珍等(2011)的文献。

### 3 结果

#### 3.1 地球化学特征

辉长岩样品的主量、微量分析数据见表 1。本文中岩石主量元素成分的作图和讨论采用的是去烧失量(L.O.I.)标准化的结果。它们的主量元素组成基

本一致,具有较低的 SiO<sub>2</sub>(44.43%~46.90%) 和 K<sub>2</sub>O(0.12%~0.20%),中等的 TiO<sub>2</sub>(1.23%~1.46%)、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(14.10%~14.98%)和 MgO(6.99%~8.09%)、较高的 CaO(11.39%~15.79%)、Na<sub>2</sub>O(2.34%~2.38%)、Mg<sup>#</sup>(58.62~61.48)和烧失量(2.31%~3.08%)。在不活动岩石分类图解 Nb/Y-Zr/TiO<sub>2</sub>(图 3a)中,样品落在亚碱性玄武岩区域,在 SiO<sub>2</sub>-FeO<sup>T</sup>/MgO 图解中落入拉斑玄武岩系列区域(图 3b)。

所有样品的稀土总量( $\Sigma\text{REE}$ )为  $50.05 \times 10^{-6}$ ~ $59.97 \times 10^{-6}$ ,在球粒陨石标准化图解上显示出弱的轻稀土富集及弱的正 Eu 异常,为一条近似平直曲线(图 4a),具有与 E-MORB 类似的特征。在原始地幔标准化图解上,除了明显的 Ta 和 Sr 正异常,其余高场强元素(HFSE)总体富集程度与 E-MORB 相当,明显不同于 N-MORB 和 OIB(图 4b)。

#### 3.2 锆石 U-Pb 年龄

辉长岩样品 1210ZSD-1-2 中锆石多为无色透明,晶体颗粒不完整,无磨圆。锆石阴极发光图像(CL)中,锆石主要具板状无环带结构,与高温基性岩石中锆石特征类似(Wu and Zheng, 2004)(图 5),少量锆石具有较宽的弱震荡环带及变质增生边,均属岩浆结晶的产物。

对样品中的 18 颗锆石进行了 U-Th-Pb 同位素测定,测得的同位素比值及年龄结果分别见表 2 和图 6。18 个锆石分析点中 6、8、9、14 和 15 号点明显向右偏离谐和线,显示有铅丢失。其余 13 个点的 Th/U 比值为 0.37~1.19(表 2),基本都大于 0.4,符合岩浆型锆石的特征(Wu and Zheng, 2004),且均



表 1 赣东北樟树墩辉长岩主量( $w_B/\%$ )、微量和  
稀土元素( $w_B/10^{-6}$ )组成Table 1 Major ( $w_B/\%$ ), trace and rare earth ( $w_B/10^{-6}$ )  
elements compositions of the gabbros in Zhangshudun of  
northeast Jiangxi Province

样品号	1210ZSD- 1-2A	1210ZSD- 1-2B	1210ZSD- 1-2C	1210ZSD- 1-2D
SiO <sub>2</sub>	44.95	44.43	46.90	44.58
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.52	14.98	14.62	14.10
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.13	3.42	2.13	2.71
FeO	7.35	7.95	9.48	8.19
CaO	15.79	15.06	11.39	15.52
MgO	7.58	6.99	7.70	8.09
Na <sub>2</sub> O	2.34	2.37	2.37	2.38
K <sub>2</sub> O	0.12	0.12	0.20	0.14
TiO <sub>2</sub>	1.23	1.43	1.46	1.24
MnO	0.16	0.17	0.18	0.17
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.13	0.15	0.15	0.13
L.O.I	2.31	2.65	3.08	2.49
TOTAL	99.61	99.72	99.66	99.74
Li	4.12	4.58	16.60	8.05
Be	0.37	0.30	0.29	0.29
Rb	1.58	1.01	1.63	1.16
Sr	389.00	252.00	224.00	267.00
Y	25.00	29.20	27.80	25.30
Nb	10.60	8.57	9.35	6.84
Mo	0.20	0.19	0.46	0.20
Cs	0.12	0.04	0.15	0.11
Ba	23.30	14.20	64.50	27.10
La	5.31	6.54	5.50	5.24
Ce	15.00	18.00	16.10	14.10
Pr	1.88	2.25	2.14	1.81
Nd	8.75	10.30	9.96	8.41
Sm	2.76	3.13	3.09	2.72
Ta	0.98	0.97	1.23	0.74
Pb	4.27	4.31	4.18	3.96
Th	2.95	0.60	0.52	0.37
U	0.10	0.11	0.10	0.09
Sc	43.80	44.60	45.60	47.50
V	302.00	342.00	346.00	326.00
Cr	230.00	171.00	176.00	223.00
Co	42.10	42.90	47.30	45.90
Ni	92.70	79.50	84.90	88.50
Ga	16.40	18.90	16.70	15.70
Tb	0.73	0.80	0.74	0.69
Dy	4.59	5.19	4.94	4.65
Ho	1.00	1.05	1.00	0.96
Er	2.85	3.09	2.96	2.87
Tm	0.41	0.44	0.40	0.42
Yb	2.68	2.74	2.82	2.66
Lu	0.39	0.41	0.41	0.39
Eu	1.18	1.42	1.16	1.14
Gd	4.03	4.61	4.30	3.99
Zr	77.70	97.40	94.00	80.70
Hf	1.90	2.30	2.40	2.10

具有协和的 $^{207}\text{Pb}/^{236}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄。13 个分析点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄加权平均值为 $1\,061 \pm 44$  Ma ( $\text{MSWD}=0.022$ ,  $n=13$ )(图 6)。

### 3.3 锆石 Lu-Hf 同位素组成

在 U-Th-Pb 同位素分析的基础上, 利用 LA-MC-ICP-MS 对其中的 10 颗锆石进行了 Lu-Hf 同位素分析, 结果列于表 3。10 个分析点的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值为 $0.282\,344 \sim 0.282\,494$ , 以各单颗粒锆石结晶年龄计算出锆石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  初始值为 $0.282\,448 \sim 0.282\,794$ , 对应的 $\epsilon\text{Hf}(t)=6.22 \sim 9.94$ (图 7), 平均值为 8.10; 计算得到锆石单阶段亏损地幔 Hf 模式年龄  $t_{\text{DMI}}$  为 1.21~1.41 Ga, 平均为 1.28 Ga。

## 4 讨论

### 4.1 辉长岩构造环境

对于蛇绿岩的形成环境, 有人提出只有少数蛇绿岩是大洋中脊扩张的产物(MOR), 多数蛇绿岩形成于板块俯冲消减带之上(SSZ)的构造环境(Pearce *et al.*, 1984)。而侵位于地幔橄榄岩中的辉长(绿)岩与典型蛇绿岩剖面中的堆晶岩不同, 一般认为前者为地幔岩的同源熔出物(鲍佩声等, 1999), 它们是以岩脉(墙)的形成被抽出而固结(Nicolas, 1986)。如前所述, 樟树墩辉长岩仅显示较低程度的结晶分异, 因此应用玄武岩类的构造环境判别图来确定辉长岩的构造环境是可行的。在  $2\text{Nb}-\text{Zr}/4-\text{Y}$ (图 8a)和  $\text{Th}/\text{Yb}-\text{TiO}_2/\text{Yb}$ (图 8b)构造环境判别图解中, 辉长岩均位于富集型洋中脊玄武岩(E-MORB)区域内, 这与其地球化学性质表现为 E-MORB 的特征(图 3a)也较为一致。

另外, 樟树墩辉长岩中锆石 Hf 同位素具有均一、亏损的 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值( $6.22 \sim 9.94$ ), 与前人利用全岩 Nd 同位素(+5.5, 赵建新等, 1995)获得的信息较为一致, 这表明岩浆在上升过程中, 没有经历明显的地壳物质混染或者岩浆混合作用(Griffin *et al.*, 2002)。赵建新等(1995)推测可能是位于远离大陆的弧后盆地环境。其略低于亏损地幔演化线的 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值反映了其下伏地幔具有弱亏损的性质(图 7), 这与辉长岩稀土元素特征也一致。

这些同位素及地球化学特征表明, 这些辉长岩要么是来自于一个未发生大规模熔融的初始地幔, 或者是来源于被富集组分交代过的亏损软流圈地幔。而基于下列几条原因, 笔者认为这些辉长岩并

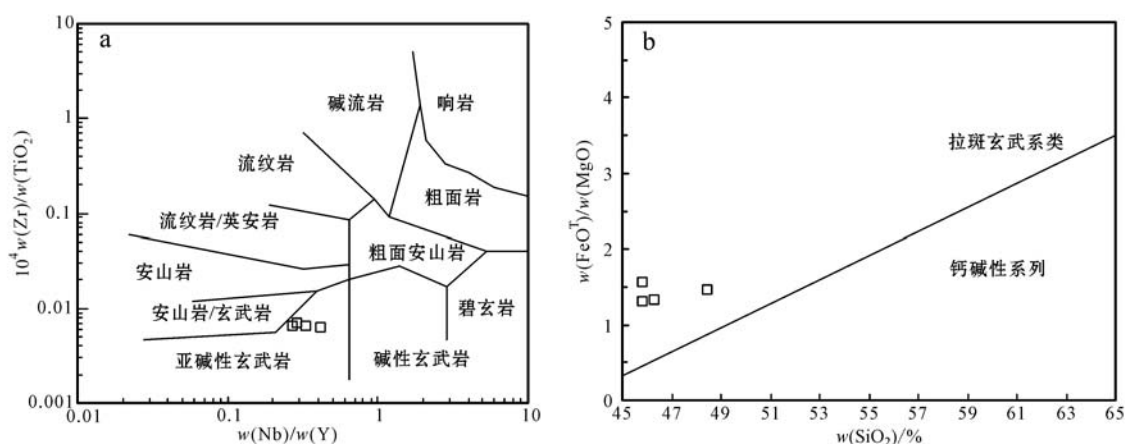


图 3 赣东北樟树墩辉长岩  $Zr/TiO_2 - Nb/Y$  (a, 据 Winchester and Floyd, 1977) 和  $FeO^T/MgO - SiO_2$  (b, 据 Miyashiro, 1975) 分类图解

Fig. 3  $Zr/TiO_2$  versus  $Nb/Y$  diagram (a, after Winchester and Floyd, 1977) and  $FeO^T/MgO$  versus  $SiO_2$  diagram (b, after Miyashiro, 1975) for the gabbro in Zhangshudun of northeast Jiangxi Province

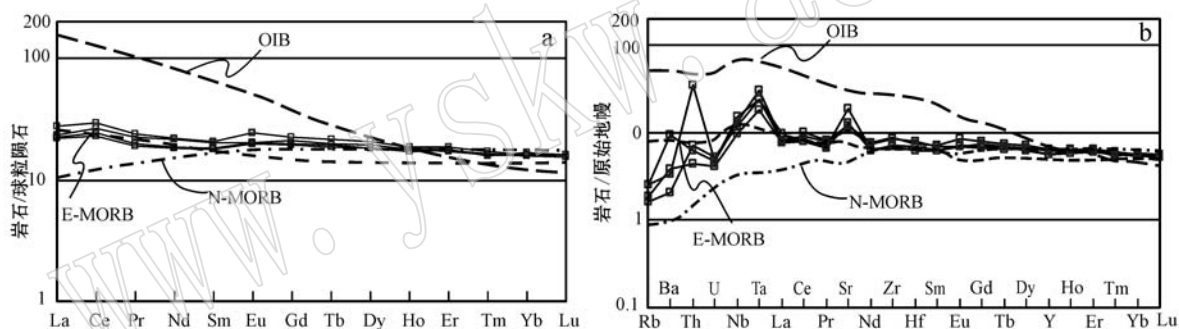


图 4 赣东北樟树墩辉长岩稀土元素配分模式图(a)和微量元素蛛网图(b)(球粒陨石和原始地幔的值据 McDonough and Sun, 1995; N-MORB、E-MORB 和 OIB 的值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized spider diagram (b) of the gabbro in Zhangshudun of northeast Jiangxi Province (normalization values after McDonough and Sun, 1995; element concentrations in N-MORB, E-MORB and OIB after Sun and McDonough, 1989)

非来源于被富集组分交代过的亏损软流圈地幔: ①樟树墩辉长岩的  $Mg^\#$  (58.6 ~ 61.5) 与初始的 MORB 及岛弧玄武岩浆接近; ②其相对富集的 Nb-Ta, Sr 与岛弧玄武岩特征明显不同, 表明不存在由板块俯冲所导致的流体交代富集作用; ③赣东北地区与俯冲作用密切相关的埃达克岩, 其年龄为 ~970 Ma (Li *et al.*, 1997; Gao *et al.*, 2009), 明显小于本文所研究的辉长岩样品; ④部分锆石  $^{207}Pb/^{206}Pb$  年龄为 ~2 000 Ma, 尽管有铅丢失, 但是明显老于辉长岩成岩年龄 1 061 Ma, 可能为早期大陆裂解的捕获锆石。

因此, 笔者倾向于认为这些辉长岩起源于未发

生大规模熔融的初始地幔, 意味着赣东北蛇绿岩可能形成于初始扩张阶段的洋脊环境, 即赣东北蛇绿岩为 MOR 型蛇绿岩。

#### 4.2 赣东北蛇绿岩的时代

利用洋盆相硅质岩中放射虫时代来确定洋盆发育时代是一种常用的准确、有效的方法。前人曾根据赣东北蛇绿岩中的硅质岩的放射虫化石的鉴定认为其形成于古生代 (赵崇贺等, 1995; 何科昭等, 1996, 2000; 杨晓松等, 1997; 吴浩若, 2003)。然而王玉净等 (2006) 通过对前人发现的蛇绿岩中硅质岩和板岩的微体古生物进行验证, 未能再次找到古生代放射虫化石。并且其后对这些含晚古生代放射虫

表 2 辉长岩(1210ZSD-1-2)LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 同位素分析结果  
Table 2 LA-ICP-MS zircons U-Th-Pb data of the gabbro (sample 1210ZSD-1-2)

分析点	$\tau_B/10^{-6}$		同位素比值						同位素年龄/Ma			
	Pb	U	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$
1	14	78	0.38	0.073 9	1.734 0	0.020 5	0.000 8	0.001 0	1.038	22	1 013	6
2	22	106	0.90	0.075 2	1.761 8	0.028 0	0.000 9	0.001 6	1.074	25	1 011	10
3	42	220	0.60	0.074 9	1.757 7	0.009 8	0.000 4	0.000 9	1.067	11	1 013	6
4	30	155	0.50	0.075 1	1.761 1	0.012 7	0.000 5	0.001 0	1.071	12	1 013	6
5	22	109	0.76	0.075 2	1.756 7	0.016 1	0.000 6	0.001 0	1.074	17	1 009	6
6	80	462	0.26	0.100 9	2.204 7	0.012 1	0.000 5	0.000 9	1.640	9	949	5
7	74	355	0.83	0.074 3	1.748 3	0.010 4	0.000 4	0.001 0	1.050	10	1 015	6
8	27	112	1.17	0.112 9	2.745 0	0.036 6	0.001 4	0.000 9	1.847	22	1 047	5
9	37	150	0.91	0.128 4	3.205 4	0.043 9	0.001 5	0.001 0	2.076	20	1 073	6
10	60	249	1.94	0.073 9	1.751 4	0.021 3	0.000 9	0.000 9	1.038	26	1 023	5
11	23	126	0.37	0.075 3	1.765 8	0.014 2	0.000 6	0.000 9	1.076	15	1 013	5
12	35	170	0.93	0.075 0	1.769 1	0.014 0	0.000 6	0.000 9	1.069	15	1 018	5
13	39	199	0.69	0.074 3	1.739 0	0.010 0	0.000 4	0.000 8	1.051	11	1 010	5
14	17	66	1.25	0.128 5	3.307 4	0.051 0	0.001 9	0.001 0	2.078	26	1 103	6
15	67	297	0.01	0.123 1	3.806 5	0.026 7	0.000 8	0.001 1	2.002	12	1 304	6
16	10	57	0.37	0.074 5	1.755 2	0.033 2	0.001 4	0.000 9	1.056	37	1 017	5
17	18	97	0.70	0.075 2	1.766 3	0.023 2	0.001 0	0.000 9	1.075	26	1 014	5
18	23	112	1.19	0.074 6	1.748 5	0.018 2	0.000 8	0.000 9	1.058	21	1 012	5

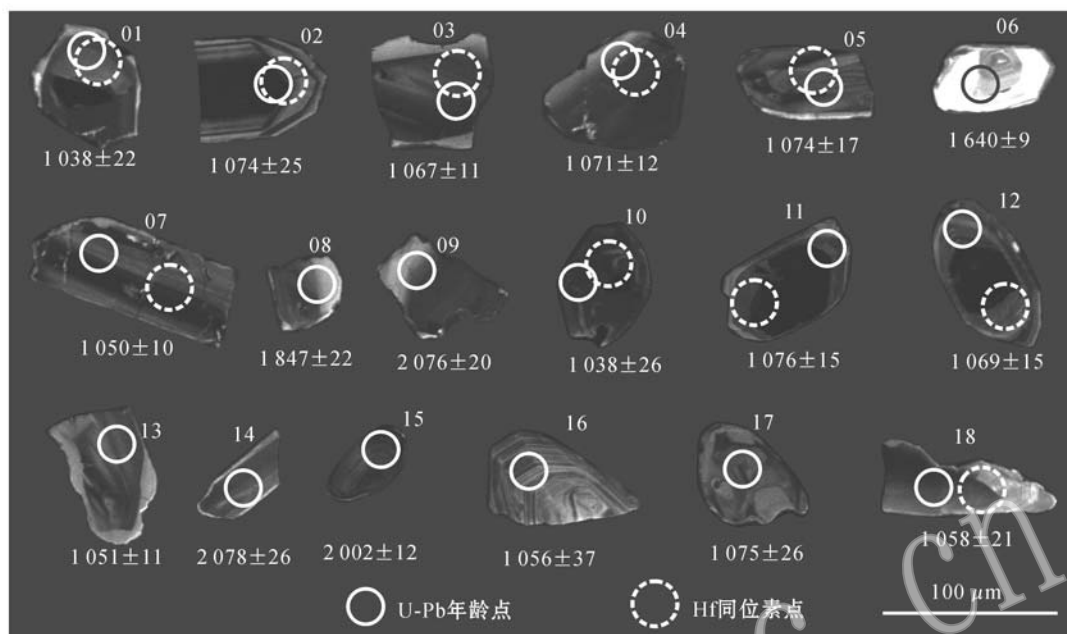


图 5 辉长岩(1210ZSD-1-2)锆石阴极发光(CL)图像及 U-Pb 年龄和 Hf 同位素分析点

Fig. 5 CL images of zircons from the gabbro (sample 1210ZSD-1-2)

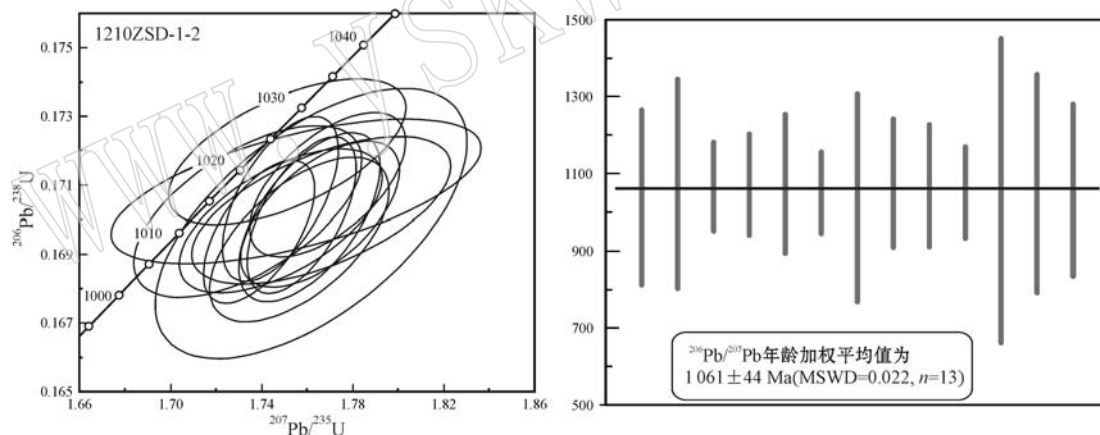


图 6 辉长岩(1210ZSD-1-2)中锆石 U-Pb 谐和图和年龄加权平均值

Fig. 6 Concordia curves of zircons U-Pb data for the gabbro (sample 1210ZSD-1-2)

硅质岩进行地球化学分析,发现这些硅质岩形成于与大陆地壳物质输入密切相关的大陆边缘环境,而与大洋盆地、洋中脊环境无关,不属于赣东北蛇绿岩套的一部分(李献华, 2000; 王博等, 2001; 吴新华等, 2004)。因此,赣东北蛇绿岩形成于古生代的推论可能仍需更多的证据支持。

当前,利用同位素定年方法对蛇绿岩直接测年仍然是确定其形成时代的最有效方法(马中平等, 2004)。赣东北蛇绿岩受强烈的构造肢解作用,缺少完整的蛇绿岩层序,但蛇绿岩套的各组成单元,如超

基性岩、辉长岩、斜长花岗岩及玄武岩等,以残块赋存于混杂岩带内,均可作为测年的对象。徐备等(1989)和 Zhou 等(1991)分别报道赣东北蛇绿岩全岩 Sm-Nd 等时年龄为 930 Ma 和 1 154 Ma; 邢凤鸣等(1992)获得赣东北樟树墩辉长岩 Sm-Nd 同位素年龄为 1 034 Ma; 李献华等(1994)对西湾大洋斜长花岗岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为  $968 \pm 23$  Ma,并对 Zhou 等(1991)测的 Sm-Nd 数据重新评估计算,获得 955 Ma 的年龄。Gao 等(2009)同样获得西湾斜长花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为  $970 \pm 21$  Ma。



表 3 辉长岩(1210ZSD-1-2)锆石 Hf 同位素组成

Table 3 Zircon Hf isotopic compositions of the gabbro (sample 1210ZSD-1-2)

分析点	年龄/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	1 $\sigma$	$(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$	$\epsilon\text{Hf}(0)$	$\epsilon\text{Hf}(t)$	1 $\sigma$	$t_{\text{DM}}/\text{Ga}$	$t_{\text{DM}}^{\text{C}}/\text{Ga}$
1	1 038	0.282 407	0.000 015	0.002 6	0.089 4	0.282 657	-12.90	8.28	0.52	1.25	1.37
2	1 074	0.282 417	0.000 019	0.004 1	0.140 4	0.282 634	-12.57	8.29	0.68	1.29	1.39
3	1 067	0.282 451	0.000 008	0.003 3	0.149 0	0.282 585	-11.36	9.94	0.39	1.21	1.28
4	1 071	0.282 430	0.000 007	0.003 7	0.167 9	0.282 555	-12.11	8.98	0.34	1.25	1.35
5	1 074	0.282 344	0.000 010	0.002 5	0.086 3	0.282 794	-15.13	6.88	0.71	1.33	1.48
7	1 050	0.282 345	0.000 020	0.002 2	0.105 8	0.282 502	-15.09	6.61	0.31	1.32	1.48
10	1 038	0.282 494	0.000 016	0.010 0	0.351 0	0.282 499	-9.83	6.22	0.77	1.41	1.50
11	1 076	0.282 415	0.000 022	0.004 0	0.130 6	0.282 733	-12.62	8.29	0.89	1.29	1.39
12	1 069	0.282 409	0.000 025	0.003 0	0.096 6	0.282 448	-12.82	8.68	0.75	1.26	1.36
18	1 058	0.282 411	0.000 018	0.002 7	0.080 4	0.282 759	-12.75	8.79	1.75	1.24	1.35

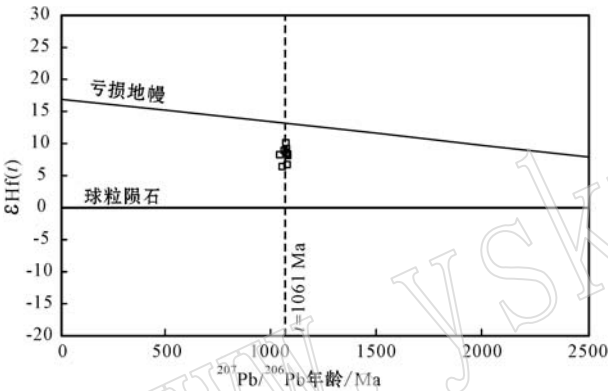


图 7 辉长岩(1210ZSD-1-2)中锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄- $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值图解

Fig. 7 Plot of  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  age versus  $\epsilon\text{Hf}(t)$  of zircons from the gabbro (sample 1210ZSD-1-2)

上述约 1 000 Ma 的年龄被解释为赣东北蛇绿岩的形成年龄。Li 等(2008)在西湾获得的 880 Ma 的浅色花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及 Shu 等(1994)获得的西湾蓝片岩 866 Ma 的 K-Ar 年龄被认为是蛇绿岩的侵位年龄。

蛇绿岩中的辉长岩是洋壳扩张的产物,其形成年龄即代表了扩张事件的时间,也代表了蛇绿岩的形成时代。本文所研究的赣东北蛇绿岩带内的樟树墩辉长岩(1210ZSD-1-2)所含锆石均为岩浆锆石,LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年得到的结晶年龄为 $1\,061 \pm 44$  Ma,与前人获得的 Sm-Nd 同位素年龄在误差范围内年龄一致(徐备等, 1989; Zhou and Zhao, 1991; 邢凤鸣等, 1992),代表了洋盆初始扩张的时代,也即赣东北蛇绿岩的形成年龄。

### 4.3 与皖南蛇绿岩的对比

在江南造山带东段,在赣东北蛇绿岩 NE,与其处于同一构造线的皖南伏川地区也存在一条蛇绿岩(白文吉等, 1986),同样也得到众多学者的关注。尽管有部分学者认为皖南蛇绿岩不属于严格的蛇绿岩范畴(张旗等, 2001; 张旗, 2014),但大多数研究者赞同其为华南最重要的前寒武纪蛇绿岩之一(白文吉等, 1986; 邢凤鸣, 1990; 赵建新等, 1995; 丁炳华等, 2008)。早期定年显示皖南蛇绿岩形成年龄约为 1.0 Ga(周新民等, 1989; Chen *et al.*, 1991),被认为与赣东北蛇绿岩的形成时代基本一致,而最近的研究显示皖南蛇绿岩形成于 840~820 Ma(Zhang *et al.*, 2012, 2013)。依据皖南蛇绿岩相对较低且不均一的  $\epsilon\text{Nd}(t)$  值(+4.3~-0.2),周新民等(1989)认为皖南起源于弱亏损地幔,形成于具有陆壳性质的大陆边缘区的弧后盆地或陆壳上的小洋盆内。

如前所述,赣东北蛇绿岩形成年龄为~1 060 Ma,形成于初始扩张阶段的洋脊环境。另外,在赣东北蛇绿岩中,还存在~970 Ma 的埃达克岩(Li *et al.*, 1997; Gao *et al.*, 2009),同时广泛发育同时期岛弧特征的火山岩(赵建新等, 1995),指示~970 Ma 年龄应是大规模洋壳俯冲的年龄,表明赣东北蛇绿岩在形成之后还经历了一个 SSZ 环境的演化过程。

因此,赣东北蛇绿岩和皖南蛇绿岩并非同一条蛇绿岩。赣东北蛇绿岩代表了古大洋扩张早期(~1 060 Ma)的产物并经历了造山初期(~970 Ma)的洋壳俯冲过程;皖南蛇绿岩则形成于造山后期(840~820 Ma)的弧后阶段,后者属 SSZ 型蛇绿岩,而前者

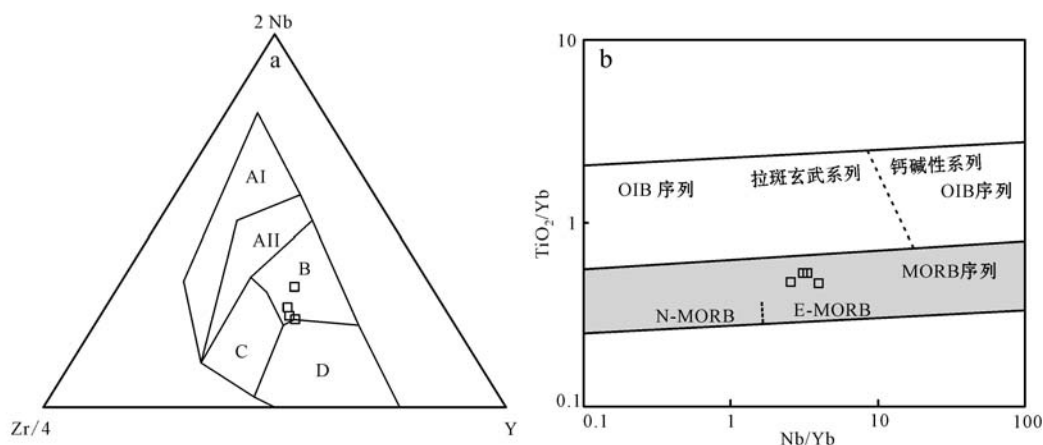


图 8 赣东北樟树墩辉长岩  $2\text{Nb}-\text{Zr}/4-\text{Y}$  (a, 据 Meschede, 1986) 和  $\text{TiO}_2/\text{Yb}-\text{Nb}/\text{Yb}$  构造环境判别图解 (b, 据 Pearce and Paete, 1995)

Fig. 8  $2\text{Nb}-\text{Zr}/4-\text{Y}$  (a, after Meschede, 1986) and  $\text{TiO}_2/\text{Yb}$  versus  $\text{Nb}/\text{Yb}$  (b, after Pearce and Paete, 1995)

tectonic setting discrimination diagrams for the gabbro in Zhangshudun of northeast Jiangxi Province

a: AI + AII—板内碱性玄武岩; AII + C—板内拉斑玄武岩; B—富集型洋中脊玄武岩; C—正常洋中脊玄武岩; C + D—火山弧玄武岩;

b: N-MORB—正常洋中脊玄武岩; E-MORB—富集型洋中脊玄武岩; OIB—洋岛玄武岩

a: AI + AII—intraplate tholeiites (WPA); AII + C—intraplate alkali basalts (WPT); B—enriched mid-ocean ridge basalts (E-MORB);

D—normal mid-ocean ridge basalts (N-MORB); C + D—volcanic arc basalts (VAB); b: N-MORB—normal mid-ocean ridge basalts;

E-MORB—enriched mid-ocean ridge basalts; OIB—ocean island basalts

是 MOR 型蛇绿岩并经历了后期的 SSZ 过程, 是从大洋扩张到俯冲造山过程中不同阶段的产物, 代表了江南造山带在新元古代的形成过程。

## 5 结论

(1) 赣东北蛇绿岩带樟树墩辉长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为  $1\,061 \pm 44\text{ Ma}$ , 代表了赣东北蛇绿岩的形成时代;

(2) 樟树墩辉长岩地球化学及锆石 Hf 同位素特征呈现出 EMORB 特点, 表明赣东北蛇绿岩可能起源于未发生大规模熔融的初始地幔;

(3) 赣东北蛇绿岩可能形成于初始扩张阶段的洋脊环境, 即赣东北蛇绿岩为 MOR 型蛇绿岩, 代表了古大洋扩张早期 ( $\sim 1\,060\text{ Ma}$ ) 的产物, 后期 ( $\sim 970\text{ Ma}$ ) 经历了洋壳俯冲 (SSZ) 过程。

## References

Andersen T. 2002. Correction of common Pb in U-Pb analyses that do not report  $^{204}\text{Pb}$ [J]. *Chemical Geology*, 192(1~2): 59~79.  
Bai Wenji, Gan Qigao, Xing Fengming, *et al.* 1986. Discovery of well-

reserved ophiolite and its basical characters in southeastern margin of the Jiangnan ancient continent[J]. *Acta Petrologica et Mineralogical*, 5(4): 289~299(in Chinese with English abstract).

Bao Peisheng, Wang Xibin, Peng Genyong, *et al.* 1999. Chromite Deposit in China[M]. Beijing: Science Press, 54~97(in Chinese).

Chen Jiangfeng, Foland K A, Xing Fengming, *et al.* 1991. Magmatism along the southeastern margin of the Yangtze block: Precambrian collision of the Yangtze and Cathaysia blocks of China[J]. *Geology*, 19: 815~818.

Coleman R G. 1977. Ophiolites: Ancient Oceanic Lithosphere[M]. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 31~34.

Ding Binghua, Shi Rendeng, Zhi Xiacheng, *et al.* 2008. Neoproterozoic (850 Ma) subduction in the Jiangnan orogen: evidence from the SHRIMP U-Pb dating of the ssz-type ophiolite in southern Anhui Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27: 375~388(in Chinese with English abstract).

Elhlou S, Belousova E, Griffin W L, *et al.* 2006. Trace element and isotopic composition of GJ-red zircon standard by laser ablation[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(18): A158.

Gao Jun, Reiner Klemm, Long Lingli, *et al.* 2009. Adakitic signature formed by fractional crystallization: An interpretation for the Neoproterozoic meta-plagiogranites of the NE Jiangxi ophiolitic mélange

- belt, South China[J]. *Lithos*, 110: 277~293.
- Geng Jianzhen, Li Huaikun, Zhang Jian, *et al.* 2011. Zircon Hf isotope analysis by means of LA-MC-ICP-MS[J]. *Geological Bulletin of China*, 30(10): 1 508~1 513(in Chinese with English abstract).
- Griffin W L, Wang X, Jackson S E, *et al.* 2002. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: in-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complex[J]. *Lithos*, 61(3~4): 237~269.
- He Kezhao, Nie Zetong, Zhao Chonghe, *et al.* 2000. Discovering fossils on the late Paleozoic radiolarian in northeast Jiangxi Province [J]. *Geoscience*, 14(1): 17(in Chinese with English abstract).
- He Kezhao, Zhao Chonghe, Tai Daoqian, *et al.* 1996. Discovery of late Palaeozoic radiolarian silicite in many places in northeastern Jiangxi ophiolitic mélange belt[J]. *Geoscience*, 10(3): 303~307(in Chinese with English abstract).
- Hou Kejun, Li Yanhe, Tian Yourong, *et al.* 2009. In situ U-Pb zircon dating using laser ablation-multi ion counting-ICP-MS[J]. *Mineral Deposits*, 28: 481~492(in Chinese with English abstract).
- Hou Kejun, Li Yanhe, Zou Tianren, *et al.* 2007. Laser ablation-MC-ICP-MS technique for Hf isotope microanalysis of zircon and its geological applications[J]. *Acta Petrological Sinica*, 23(10): 2 595~2 604(in Chinese with English abstract).
- Li Xianhua. 2000. Geochemistry of the Late Paleozoic radiolarian cherts with in the NE Jiangxi ophiolite mélange and its tectonic significance [J]. *Science in China (D)*, 43(6): 617~624.
- Li Xianhua, Zhou Guoqing, Zhao Jianxin, *et al.* 1994. SHRIMP ion probe zircon age of the NE Jiangxi ophiolite and its tectonic implications[J]. *Geochimica*, 23: 125~131(in Chinese with English abstract).
- Li Xianhua, 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.
- Li Wuxian and Li Xianhua. 2003. Adakitic granites within the NE Jiangxi ophiolites, South China: geochemical and Nd isotopic evidence[J]. *Precambrian Research*, 122: 29~44.
- Li Wuxian, Li Xianhua, Li Zhengxiang, *et al.* 2008. Obduction-type granites within the NE Jiangxi Ophiolite: Implications for the final amalgamation between the Yangtze and Cathaysia Blocks [J]. *Gondwana Research*, 13(3): 288~301.
- Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Gao Shan, *et al.* 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. *Chemical Geology*, 257: 34~43.
- Liu Yongsheng, Gao Shan, Hu Zhaochu, *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[J]. *Journal of Petrology*, 51: 537~571.
- Ludwig K R. 2003. Isoplot/EX Version 2. 49: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication, 1a: 1~56.
- Ma Zhongping, Xia Linqi, Xia Zuchun, *et al.* 2004. Method of ophiolite geochronology study and the related problems[J]. *Northwestern Geology*, 37(3): 103~108(in Chinese with English abstract).
- McDonough W F and Sun S S. 1995. The composition of the Earth[J]. *Chemical Geology*, 120: 223~253.
- Meschede M. 1986. A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram[J]. *Chem. Geol.*, 56: 207~218.
- Miyashiro A. 1975. Classification, characteristics, and origin of ophiolites[J]. *The Journal of Geology*, 83(2): 249~281.
- Nicolas A. 1986. A melt extraction model based on structural studies in mantle peridotite[J]. *Journal of Petrology*, 27: 999~1 022.
- Nicolas A. 1989. Structure of Ophiolites and Dynamics of Oceanic Lithosphere[M]. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, the Netherlands, 367.
- Pearce J A, Lippard S J and Roberts S. 1984. Characteristics and tectonic significance of supra-subduction zone ophiolites [A]. Kokelaar B P and Howells M F. Marginal basin geology[C]. Geological Society of London Special Publication 16: London, Blackwell Scientific Publications, 77~94.
- Pearce J A and Peate D W. 1995. Tectonic implications of the composition of volcanic ARC magmas [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 23(1): 251~285.
- Shu Liangshu, Faure Michel, Jiang Shaoyong, *et al.* 2006. SHRIMP zircon U-Pb age, litho- and biostratigraphic analyses of the Huaiyu Domain in South China: Evidence for a Neoproterozoic orogen, not Late Paleozoic-Early Mesozoic collision[J]. *Episodes*, 29: 244~252.
- Shu Liangshu, Faure Michel, Yu Jinhai, *et al.* 2011. Geochronological and geochemical features of the Cathaysia block (South China): New evidence for the Neoproterozoic breakup of Rodinia[J]. *Precambrian Res*, 187: 263~276.
- Shu Liangshu, Zhou Guoqing, Shi Yangshen, *et al.* 1994. Study on the

- high-pressure metamorphic blueschist and its Late Proterozoic age in the eastern Jiangnan belt[J]. *Chinese Science Bulletin*, 39: 1 200 ~1 204.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalt: implications for mantle composition and processes [A]. Sanders A D and Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basins* [C]. Geological Society, London, Special Publications, 42: 313 ~ 345.
- Wang Bo and Shu Liangshu. 2001. Notes on Late Paleozoic radiolarians from northeastern Jiangxi Province[J]. *Geological Review*, 47(4): 337 ~ 344 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yujing, Yang Qun, Yin Leiming, *et al.* 2006. The putative "Radiolarian Cherts" from ophiolitic and metamorphic complexes in northeast Jiangxi: A Re-examination[J]. *Geological Journal of China Universities*, 12(1): 98 ~ 105 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xin and Ma Ruishi. 1989. Confirmation of Huaiyu mountain ophiolitic mélange and tectonic suture line[J]. *Journal of Nanjing University (Earth Sciences)*, 1, 2: 72 ~ 81 (in Chinese with English abstract).
- Winchester J and Floyd P. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements[J]. *Chemical Geology*, 20: 325 ~ 343.
- Wu Haoru. 2003. Tectonopaleogeographic analysis of the geologic problems related to ophiolitic belt in northeast Jiangxi Province[J]. *Journal of Palaeogeography*, 5(3): 328 ~ 342 (in Chinese with English abstract).
- Wu Xinhua, Lou F S, Wang Y J, *et al.* 2004. Geochemical characteristics of siliceous rocks of different ages in northeastern Jiangxi and their geological significance[J]. *Geological Journal of China Universities*, 10(2): 209 ~ 216 (in Chinese with English abstract).
- Wu Yuanbao and Zheng Yongfei. 2004. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age[J]. *Chinese Science Bulletin*, 49: 1 554 ~ 1 569.
- Xing Fengming. 1990. Geochemical indication of formation environment of Fuchuan ophiolites in southern Anhui Province[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 9: 1 ~ 30 (in Chinese with English abstract).
- Xing Fengming, Xu Xiang, Chen Jiangfeng, *et al.* 1992. Sm-Nd isotopic age of proterozoic ophiolites in northeastern Jiangxi and its geological significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 11(2): 120 ~ 124 (in Chinese with English abstract).
- Xu Bei and Qiao Guangsheng. 1989. Sm-Nd isotopic age of the late Proterozoic ophiolite suite in NE Jiangxi province and its primary tectonic environment[J]. *Journal of Nanjing University (Earth Sciences)*, 1: 108 ~ 114 (in Chinese with English abstract).
- Yang Xiaosong, Xue Chongsheng, Zhang Kexin, *et al.* 1997. Palaeontological fossils from the low grade metamorphic rocks in northeastern Jiangxi Province and geotectonic significance[J]. *Chinese Science Bulletin*, 42(4): 409 ~ 412 (in Chinese).
- Zhang Chuanlin, Santosh M, Zou Haibo, *et al.* 2013. The Fuchuan ophiolite in Jiangnan Orogen: Geochemistry, zircon U-Pb geochronology, Hf isotope and implications for the Neoproterozoic assembly of South China[J]. *Lithos*, 179: 263 ~ 274.
- Zhang Qi. 2014. Classifications of mafic-ultramafic rocks and their tectonic significance[J]. *Chinese Journal of Geology*, 49(3): 982 ~ 1 017 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Wang Yan and Liu Dunyi. 2008. A brief review of ophiolites in China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32: 308 ~ 324.
- Zhang Qi and Zhou Guoqing. 2001. *Ophiolites of China* [M]. Science Press, 30 ~ 31 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Shaobing, Wu Rongxin and Zheng Yongfei. 2012. Neoproterozoic continental accretion in South China: Geochemical evidence from the Fuchuan ophiolite in the Jiangnan orogen[J]. *Precambrian Research*, 220 ~ 221: 45 ~ 64.
- Zhang Zhaochong, Zhou Meifu, Robinson Paul T, *et al.* 2001. SHRIMP dating of the Aoyougou ophiolite in the west sector of the north Qilian Mountains and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 17(2): 222 ~ 226 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Chonghe, He Kezhao, Mo Xuanxue, *et al.* 1995. Discovery of late Palaeozoic radiolarian-bearing chert in ophiolitic complexes of the rift zone, northeast Jiangxi, and the significance[J]. *Chinese Science Bulletin*, 40(23): 2 161 ~ 2 163 (in Chinese).
- Zhao Jianxin, Li Xianhua, McCulloch M T, *et al.* 1995. Petrogenesis of ophiolites from South Abhui and Northeast Jiangxi, and their tectonic implications: chemical and Sm-Nd isotopic constraints[J]. *Geochimica*, 24: 311 ~ 326 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Guoqing. 1989. The discovery and significance of the northeastern Jiangxi Province ophiolite (NEJXO), its metamorphic peridotite and associated high-temperature high-pressure metamorphic rocks[J]. *Journal of Southeast Asian Earth Science*, 3: 237 ~ 247.
- Zhou Guoqing and Zhao Jianxin. 1991. Sm-Nd isotopic systematics of the NE Jiangxi ophiolite (NEJXO), SE Margin of the Yangtze cra-



- ton, South China[J]. Chinese Science Bulletin, 36: 1 374~1 379.
- Zhou Xinmin, Zou Haibo, Yang Jiedong, *et al.* 1990. Sm-Nd isochronous age of Fuchuan Ophiolite Suite in Shexian County, Anhui Province and its geological significance[J]. Chinese Science Bulletin, 35: 208~212.
- Zou Haibo, Zhou Xinmin and Zhou Guoqing. 1992. Two types of ophiolites: one associated with lenticular chromite and the other without [J]. Geology and Exploration, 28(4): 30~46.
- ### 附中文参考文献
- 白文吉, 甘启高, 邢凤鸣, 等. 1986. 江南古陆东南缘蛇绿岩完整层序剖面的发现和基本特征[J]. 岩石矿物学杂志, 5(4): 289~299.
- 鲍佩声, 王希斌, 彭根永, 等. 1999. 中国铬铁矿床[M]. 北京: 科学出版社, 54~97.
- 丁炳华, 史仁灯, 支霞臣, 等. 2008. 江南造山带存在新元古代(~850 Ma)俯冲作用——来自皖南 SSZ 型蛇绿岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄证据[J]. 岩石矿物学杂志, 27(5): 375~388.
- 耿建珍, 李怀坤, 张健, 等. 2011. 锆石 Hf 同位素组成的 LA-MC-ICP-MS 测定[J]. 地质通报, 30(10): 1 508~1 513.
- 何科昭, 聂泽同, 赵崇贺, 等. 2000. 赣东北晚古生代放射虫化石综述[J]. 现代地质(中国地质大学研究生院学报), 14(1): 1~7.
- 何科昭, 赵崇贺, 邵道乾, 等. 1996. 赣东北蛇绿混杂岩带中多处发现含晚古生代放射虫硅质岩[J]. 现代地质(中国地质大学研究生院学报), 10(3): 303~307.
- 侯可军, 李延河, 田有荣. 2009. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术[J]. 矿床地质, 28: 481~492.
- 侯可军, 李延河, 邹天人, 等. 2007. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用[J]. 岩石学报, 23(10): 2 595~2 604.
- 李献华. 2000. 赣东北蛇绿混杂岩带中硅质岩的地球化学特征及构造意义[J]. 中国科学(D 辑), 30(3): 284~290.
- 李献华, 周国庆, 赵建新. 1994. 赣东北蛇绿岩的离子探针锆石 U-Pb 年龄及其构造意义[J]. 地球化学, 23(2): 125~131.
- 马中平, 夏林圻, 夏祖春, 等. 2004. 蛇绿岩年代学研究方法及应注意的问题[J]. 西北地质, 37(3): 103~108.
- 王博, 舒良树. 2001. 对赣东北晚古生代放射虫的初步认识[J]. 地质论评, 47(4): 337~344.
- 王玉净, 杨群, 尹磊明, 等. 2006. 赣东北蛇绿混杂岩带和变质岩系中“放射虫硅质岩”的再研究[J]. 高校地质学报, 12(1): 98~105.
- 汪新, 马瑞士. 1989. 怀玉山蛇绿混杂岩及古陆碰撞缝合线的确定[J]. 南京大学学报(地球科学版), 1~2: 72~81.
- 吴浩若. 2003. 赣东北蛇绿岩带相关地质问题的构造古地理分析[J]. 古地理学报, 5(3): 328~342.
- 吴新华, 楼法生, 王玉净, 等. 2004. 赣东北地区不同时代硅质岩的地球化学特征及其地质意义[J]. 高校地质学报, 10(2): 209~216.
- 邢凤鸣. 1990. 皖南伏川蛇绿岩形成环境的地球化学标志[J]. 岩石矿物学杂志, 9(1): 1~12.
- 邢凤鸣, 徐祥, 陈江峰, 等. 1992. 赣东北元古代蛇绿岩 Sm-Nd 同位素年龄及地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 11(2): 120~124.
- 徐备, 乔广生. 1989. 赣东北晚元古代蛇绿岩套的 Sm-Nd 同位素年龄及原始构造环境[J]. 南京大学学报(地球科学), (3): 108~113.
- 杨晓松, 薛重生, 张克信, 等. 1997. 赣东北浅变质岩系中微体古生物化石及其大地构造意义[J]. 科学通报, 42(4): 409~412.
- 张旗. 2014. 镁铁-超镁铁岩的分类及其构造意义[J]. 地质科学, 49(3): 982~1 017.
- 张旗, 周国庆. 2001. 中国蛇绿岩[M]. 北京: 科学出版社, 30~31.
- 张招崇, 周美付, Robinson Paul T, 等. 2001. 北祁连山西段熬油沟蛇绿岩 SHRIMP 分析结果及其地质意义[J]. 岩石学报, 17(2): 222~226.
- 赵崇贺, 何科昭, 莫宣学. 1995. 赣东北深断裂带蛇绿混杂岩中含晚古生代放射虫硅质岩的发现及其意义[J]. 科学通报, 40(23): 2 161~2 163.
- 赵建新, 李献华, McCulloch M T, 等. 1995. 皖南和赣东北蛇绿岩成因及其大地构造意义元素和 Sm-Nd 同位素制约[J]. 地球化学, 24(4): 311~326.
- 周新民, 邹海波, 杨杰东, 等. 1989. 安徽歙县伏川蛇绿岩套的 Sm-Nd 等时线年龄及其地质意义[J]. 科学通报, 16: 1 243~1 245.