赣东北蛇绿岩和张村岩群的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及对江南造山带构造演化的讨论

李源[1)],颉颃强[1)],宋志瑞[2)]

1)中国地质科学院地质研究所,北京离子探针中心,北京,100037;

2)江西省地质调查研究院,南昌,330030

内容提要: 本文对赣东北樟树墩蛇绿混杂岩中基性—超基性岩的地球化学分析表明,其中辉长岩具有 MORB 的地球化学特征,蛇纹岩强烈亏损各微量元素。辉长岩的锆石 SHRIMP O 同位素分析结果给出了非常均一的 O 同位素组成(5.12‰ ± 0.62‰,2σ),与地幔锆石的 O 同位素组成(5.3‰ ± 0.3‰)接近。这些地球化学特征和其形成于大洋环境吻合。锆石 SHRIMP U-Pb 定年给出了辉长岩的形成年龄为 1009 ± 5 Ma(MSWD = 1.15)。在作为赣东北蛇绿岩的围岩张村岩群中,选取凝灰岩样品进行的锆石 SHRIMP U-Pb 定年给出了 833 ± 10 Ma(MSWD = 1.5)的形成年龄,表明蛇绿岩就位时代晚于 833 Ma。结合前人的研究,本文指出赣东北蛇绿岩形成于中元古代末—新元古代初的大洋中脊环境,不同于皖南伏川蛇绿岩所代表的弧后小洋盆环境。这些新资料为华南区域大地构造演化研究提供了新的约束。

关键词: 蛇绿岩;张村岩群;锆石 SHRIMP U-Pb 定年;樟树墩;赣东北; 江南造山带

江南造山带的构造演化是华南大地构造的重要地质问题,其中零星分布于江南造山带的蛇绿岩残片对限定江南造山带的构造演化具有重要的地质意义。赣东北从樟树墩到西湾地区零星分布一些基性—超基性岩,并伴生高压低温的蓝片岩,普遍认为其代表一套和俯冲碰撞有关的蛇绿混杂岩(Zhou Guoqing, 1989; Li Xianhua et al., 1997),但对其形成时代和地质意义一直存在争议。根据野外延伸和岩性对比,很多研究者认为赣东北这套蛇绿岩残片和皖南伏川等地的蛇绿岩残片相连,代表扬子板块和华夏板块之间的构造缝合线(白文吉等,1986;邢凤鸣等,1992;赵建新等,1995; Li Xianhua et al., 1997)。早期对赣东北和皖南这套基性—超基性岩的 Sm-Nd 同位素等时线年龄都给出了 930 ~ 1024 Ma 的年龄(邢凤鸣等,1992;徐备,1989;周新民,1989;赵建新等,1995),并且李献华等(1994)对赣东北西湾地区构造混杂岩中的斜长花岗岩进行的锆石 SHRIMP U-Pb 定年也给出了 968 ± 23 Ma 的年龄。这个年龄和早期认为的晋宁运动/武陵运动的年龄类似,被认为代表该期碰撞造山作用的物质标志。但最近几年大量的高精度年代学结果表明,华南地区代表晋宁运动/武陵运动的构造事件发生在新元古代中期(约 820 Ma)(高林志等,2008,2010,2011, 王自强等,2012;李利阳等,2016)。而一直认为和赣东北蛇绿岩带相连的皖南蛇绿岩最新的年代学分析也给出了约 830 Ma 的锆石年龄(丁炳华等,2008;Zhang Shaobing et al., 2012;Zhang Chuanlin et al., 2013;Yin Changqing et al., 2013),也带来赣东北蛇绿岩是否形成于新元古代中期的疑惑。此外早期一些研究者在赣东北蛇绿岩带的夹层硅质岩中发现了晚古生代放射虫(赵崇贺等,1995;何科昭等,2000),并测得其中火山岩和辉长岩的 ^{40}Ar-^{39}Ar 年龄为 435 ~ 487 Ma 和 232 ~ 266 Ma,从而认为它们与晚古生代硅质岩组成了晚古生代蛇绿岩套(赵崇贺等,1997)。由于对赣东北蛇绿岩形成年龄和就位时代的认识存在巨大分歧,从而导致对区域的大地构造背景与演化历史也有各种不同的认识,要限定区域的构造演化必须首先限定蛇绿岩残片及其围岩的形成时代。本文对樟树墩蛇绿混杂岩的基性岩以及作为其围岩的张村岩群凝灰质千枚岩进行了锆

注:本文为国家自然科学基金资助项目(编号: 41203042、41472168)和国家重大科技仪器专项(编号: 2011YQ05006909)的成果。
收稿日期:2016-11-06;改回日期:2017-06-27;责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2017.04.002

作者简介:李源,男,1994 年生。硕士研究生,地球化学专业。通讯地址: 100037,北京市西城区百万庄大街 26 号。Email: liyuan1627@163.com。通讯作者:颉颃强,男,1979 年生。副研究员。主要从事前寒武纪地质和地质年代学研究。Email: rock@bjshrimp.cn。

石 SHRIMP U-Pb 年龄,并结合锆石 O 同位素分析和元素地球化学分析,探讨蛇绿岩的形成年龄、形成环境和就位时代,从而对华夏与扬子板块大地构造演化提供制约。

1 地质背景及样品特征

赣东北地区位于江南造山带东北段,广泛发育的新元古代早中期(860 ~ 825 Ma)地层主要岩性为浅变质的粉砂岩、泥质碎屑岩和凝灰岩等,为一套火山物质较少的细碎屑沉积。这套岩石在江西境内被称为双桥山群,其层序与安徽的溪口岩群、湖南的冷家溪群可以对比,为同一时代同一构造环境下的沉积产物(杨明桂等,2012)。但在怀玉山地区,原划为双桥山群的岩石单元构造复杂、层序不清、含较多火山物质,与位于其西北的典型双桥山群地层有明显的差别。凌联海(1996)建立"张村群"以区别这套岩石和典型的双桥山群岩石,并将其分为下部的韩源组和上部的榔树底组。后续研究表明榔树底组为新元古代中晚期的盖层,而且韩源组的层序复杂,不是典型的地层单位,但"张村群"和双桥山群的不同得到了比较广泛的认同,后期多以张村岩组或张村岩群来称呼这套岩石单元(杨明桂等,2012;刘亚光等,2015),其主体为砂泥质火山碎屑岩及细碧—石英角斑岩系列。

张村岩群中除了局部保存一定层序的岩石地层之外,还常发育一些基性—超基性岩侵入岩,其主要岩性有二辉橄榄岩、方辉橄榄岩、纯橄岩、异剥钙榴岩、橄榄二辉岩、辉长岩等。这些基性—超基性岩的出露面积较小,往往成群出现,各岩相产状混乱,排列无序,并且普遍遭受到强烈的构造破坏,其与围岩张村岩群岩石也为构造接触。早期的构造地质、地球化学和岩石学工作表明这些基性—超基性岩为构造侵入于张村岩群沉积岩的洋壳残片,统称为赣东北蛇绿岩。这些蛇绿岩残片呈带状分布,沿 NE 方向延伸,南起江西弋阳樟树墩,北至德兴市,全长 100 多千米,在平面上表现为一个向东凸起的弧形。

本文分别采集了蛇绿岩以及张村岩群岩石进行研究(图 1)。蛇绿岩样品采自弋阳县樟树墩蛇绿岩采场 3 号采坑,坐标为 E117°26′23.76″/N28°32′27.44″。在该采坑出露橄榄岩(JX1127)和辉长岩(JX1126,定年样品),辉长岩以一条约 2 m 宽的岩脉状出露在橄榄岩之中(图 2a),但两者接触界线为断裂,无法判断其为原始的侵入关系还是后期构造错动的结果。

橄榄岩已经发生强烈蛇纹石化和滑石化,仅在蛇纹石和滑石中残存很少量的橄榄石颗粒,大量蚀变过程中形成的磁铁矿分布其中。辉长岩中现存矿物主体为斜长石(40% ~ 50%),角闪石(30% ~ 35%),辉石(5% ~10%),磁铁矿(约 5%)和少量石英(<5%)和绿帘石(<5%)。岩石发生明显蚀变,辉石大都角闪石化,辉石以很小的残留体局部保存其中,但局部仍可见其保存较自形的原始形状,长石相对蚀变较弱,总体较自形。原始结构应该为辉长结构或辉长辉绿结构(图 2c)。

张村岩群样品采自德兴市新营镇西南 300 m,坐标为 N28°54′54.47″/E117°37′47.00″,该点主体为一套凝灰质千枚岩(图 2b),夹少量较厚层(约 1m)的粉砂岩和含碳板岩。岩石有明显变形,片理和层理的产状大体一致,定年样品为其中的含凝灰质千枚岩(JX1119)。岩石中主体(>80%)矿物粒度微细,主体为绢云母、黄铁矿、角闪石、绿泥石等,部分绢云母中可见非常细粒的长石残留,此外含少量粒度相对较大的磁铁矿、角闪石和石英等矿物(图 2d)。这种矿物组合支持岩石含一定量火山物质的野外判断。

2 分析方法

2.1 锆石 U-Pb 年龄测试

锆石 SHRIMP U-Pb 定年在中国地质科学院地质研究所北京离子探针中心 SHRIMP Ⅱ 仪器上完成。通过水淘和磁选方法选出无磁性重矿物后在双目镜下手工挑选出锆石。分选出来的锆石与标准锆石 TEM 一起制靶并进行透、反射光和阴极发光(CL)成像,选择没有裂隙、包裹体且结构单一的位置定年。详细的分析原理及流程参见相关文献(刘敦一和简平,2004;Williams, 1998)。一次离子流 O_2^- 强度为 2.5 nA,束斑大小为 25 ~ 30 μm。标准锆石 M257(U = 840 × 10^{-6})和 TEM(年龄 = 416.8 Ma,Black et al., 2004)分别用于待测样品的 U、Th 含量和 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄校正。根据实测 ^{204}Pb 校正普通 Pb。每个分析点均采取 5 次扫描,单点误差为 1σ,而样品加权平均年龄误差为 2σ。数据处理使用 SQUID1.02 和 ISOPLOT 2.49 程序(Ludwig, 2001a, b)。本文中,所有年龄都为 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄。

2.2 地球化学分析测试

对蛇绿岩样品分别进行了主量元素、微量及稀土元素测试分析。分析样品被磨碎至 200 目,分析在中国地质科学院国家地质测试中心完成,CO_2 由

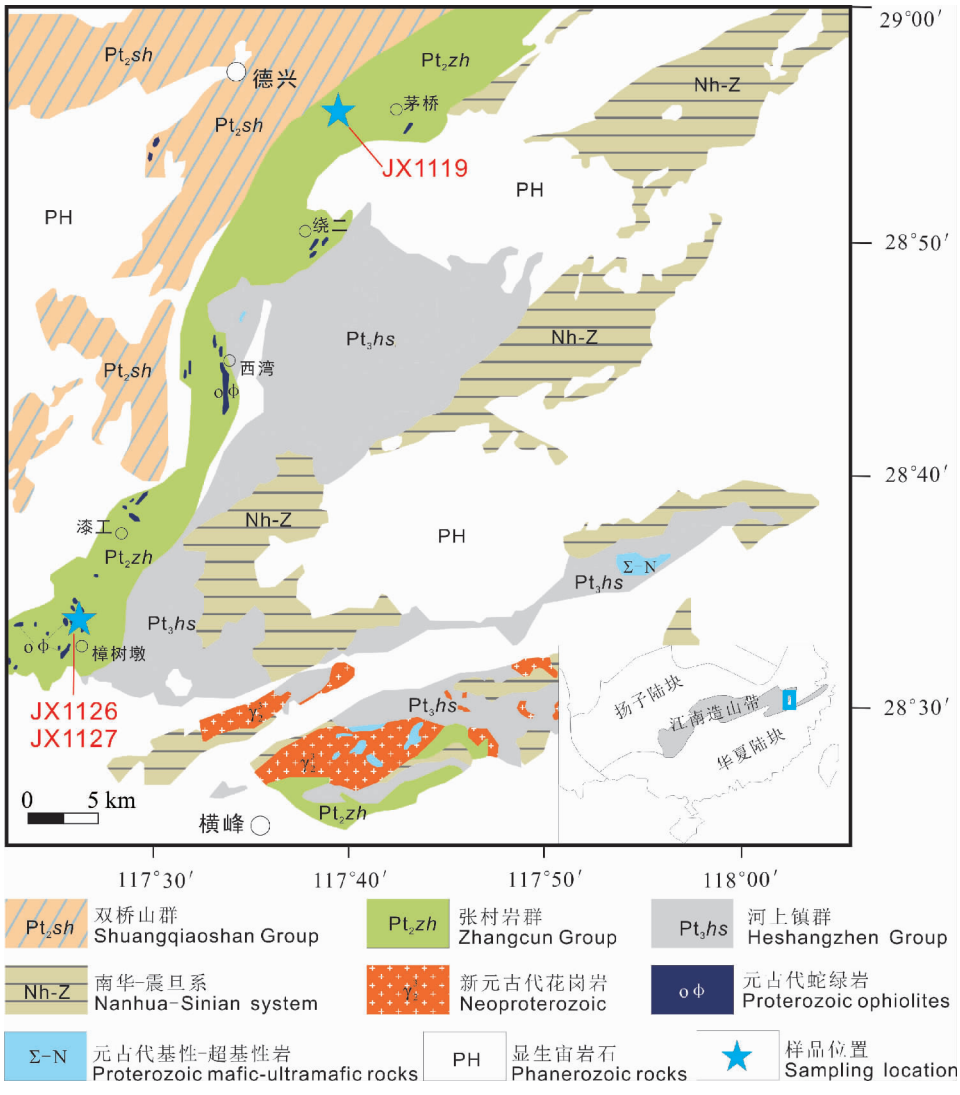

图 1 赣东北地区地质图及采样位置

(据 Gao Jun et al., 2009; Wang Xiaolei et al., 2012, 修改)

Fig. 1 Geological map and sampling locations of the northeastern Jiangxi Province

(modified after Gao Jun et al., 2009; Wang Xiaolei et al., 2012)

湿化学法测定,将试样与盐酸反应产生二氧化碳气体。H_2O^+ 由重量法测定,检测下限 < 0.5%。FeO 采用重铬酸钾滴定法进行测定,其它主量元素分析用 X 荧光光谱仪(3080E) 测定,分析的相对标准偏差小于 2% ~ 8%,微量元素 Nb、Zr、Rb、Sr、Ba、Ga、Pb、V 分析用 X 荧光光谱仪(RIX2100)测定,一般样品分析的相对标准偏差小于 5%,稀土元素和其它微量元素分析用 ICP-MS(Excell) 测定,一般样品分析的相对标准偏差小于 10%。

2.3 锆石氧同位素分析测试

锆石 O 同位素分析是在北京离子探针中心的 SHRIMP IIe-MC 上进行的,详细的仪器分析原理和分析流程参见相关文献(Lckert et al., 2008)。将定年完成的锆石靶进行重新抛光,抛去 SHRIMP U-Pb 定年留下的分析坑,在原分析点位进行 O 同位素分析。分析过程中,一次 Cs^+ 离子束的强度约为 3nA,产生的二次 $^{16}O^-$ 数量约为 1.5×10^9 cps。束斑直径约为 30μm。所有数据进行电感二次离子发射(EISIE)校正。采用 TEMORA2 锆石校正仪器质量分馏(IMF)($\delta^{18}O_{V-SMOW}$ = 8.20‰; Black et al., 2004)。开始分析样品前分析标样 3 次,之后每 3 个样品分析 1 个标样。分析过程中,31 个标准锆石 TEMORA2 分析点的加权标准偏差为 0.31‰。在分析数据表中,给出了单点的分析误差,但在计算加权平均结果是采用的精度为加权二倍标准差。

3 分析结果

3.1 元素地球化学特征

对样品的主量元素、稀土元素和微量元素分析结果见表 1 所示。从表中可知,辉长岩(JX1126)和橄榄岩(JX1127)都具有低 SiO_2(分别为 47.34% 和 36.08%),低 $K_2O + Na_2O$(分别为2.78% 和 0.15%),低 TiO_2(分别为 0.98% 和 0.03%)的特征,是蛇绿岩中基性—超基性岩常见的地球化学组成。张村岩群凝灰岩样品具有较高 SiO_2 含量,为 60.23%,较高的 Al_2O_3 为 14.96%,中等的 $K_2O + Na_2O$,为 5.73%,为中酸性火山岩的地球化学组成。

蛇绿岩中两个样品都显示较低的稀土总量,辉长岩样品(JX1126)的 $\sum REE = 39.3 \times 10^{-6}$,橄榄岩样品更只有 3.7×10^{-6}。由于含量太低,导致测试

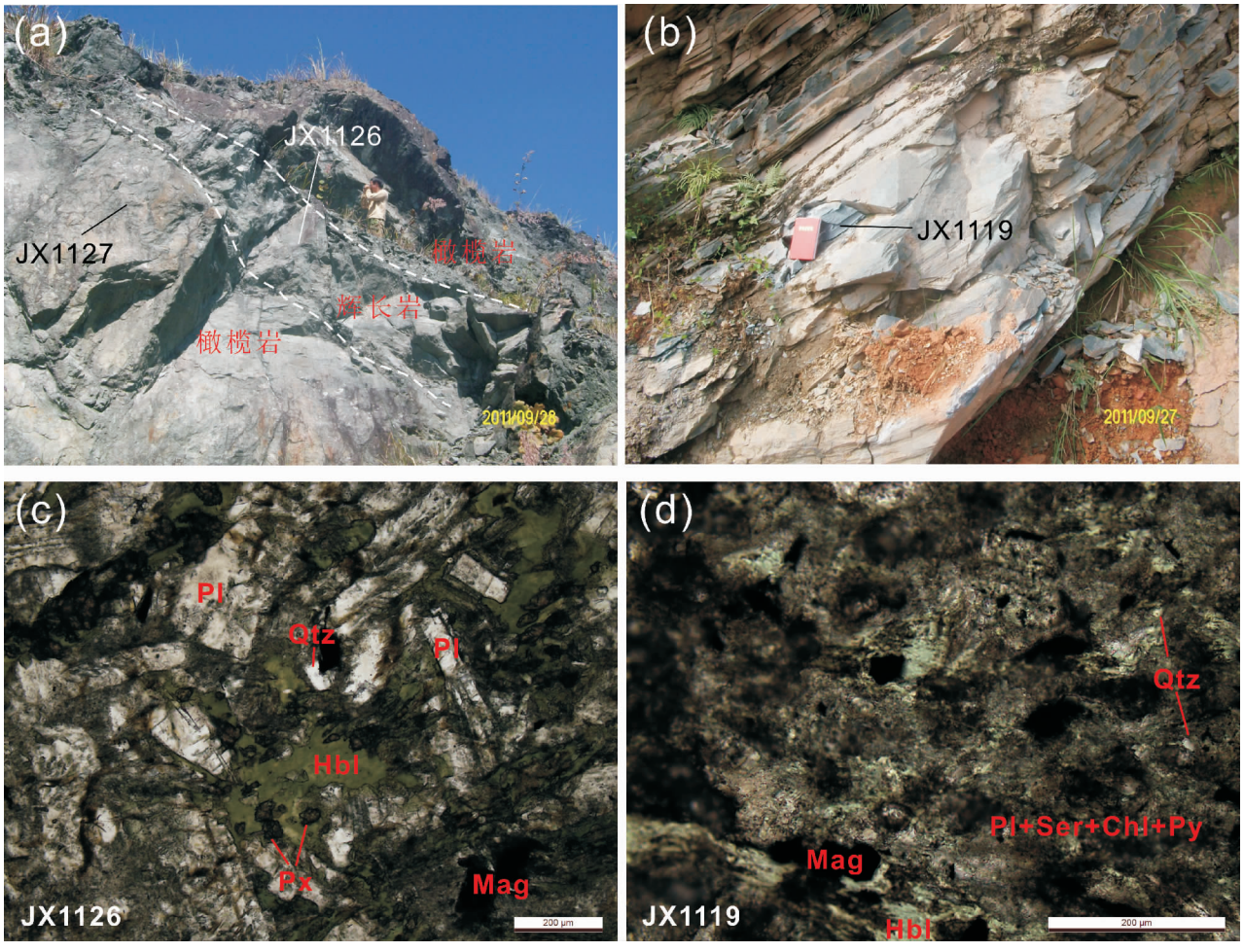

图 2 樟树墩蛇绿岩和张村岩群凝灰质千枚岩的野外及显微照片

Fig. 2 Field photographs and microscope of the Zhangshudun ophiolite and tuffaceous phyllite of the Zhangcun Group

(a)樟树墩蛇绿岩采坑及辉长岩(JX1126)和橄榄岩(JX1127);(b)张村岩群凝灰质千枚岩(JX1119);(c)樟树墩蛇绿岩中辉长岩的显微特征;(d)张村岩群凝灰质千枚岩的显微特征。Qtz—石英;Pl—斜长石;Px—辉石;Hbl—普通角闪石; Mag—磁铁矿;Chl—绿泥石;Ser—绢云母;Py—黄铁矿

(a) the Zhangshudun ophiolite pit and gabbro (JX1126) and peridotite (JX1127); (b) tuffaceous phyllite (JX1119) of the Zhangcun Group; (c) microscope of the gabbro of the Zhangshudun ophiolite; (d) microscope of the tuffaceous phyllite of the Zhangcun Group. Qtz—quartz; Pl—plagioclase; Px—pyroxene; Hbl—hornblende; Mag—magnetite; Chl—chlorite; Ser—sericite; Py—pyrite

误差较大,但在球粒陨石标准化的稀土元素配分图(图 3a)中还是可以看出,两者都具有平坦型的稀土配分模式,辉长岩的$(La/Yb)_N$ 为 0.6,显示轻稀土相对重稀土确为亏损,橄榄岩的稀土配分模式也相对平坦,$(La/Yb)_N = 2.1$,可能与 Yb 含量较低导致分析误差较大有关。两者都有轻微的 Eu 负异常,Eu/Eu^* 分别为 0.79 和 0.53 $\left(Eu/Eu^* = \frac{Eu_N}{\sqrt{Sm_N \times Ga_N}}\right)$,或许存在少量的长石结晶分异。张村岩群凝灰质千枚岩显示相对较高的稀土总量 $\sum REE = 138.5 \times 10^{-6}$,轻重稀土分异较强,$(La/Yb)_N = 7.4$,几乎无铕异常,$Eu/Eu^* = 0.99$。

在原始地幔标准化微量元素蛛网图(图 3b)上,蛇绿岩样品的活泼元素(Rb、Ba)相对富集,而其它大离子亲石元素(如 Th)相对稀土没有明显的富集,而且 Nb、Ta 等高场强元素也没有明显亏损,也是典型的蛇绿岩单元的地球化学特征。张村岩群样品相对富集 Rb、Ba、Th、U 大离子亲石元素,亏损 Nb、Ta 等高场强元素。

3.2 锆石 U-Pb 定年

樟树墩蛇绿岩中的辉长岩样品(JX1126)的锆石呈板状和不完整粒状,粒度多数为 100 ~ 200 μm。在阴极发光(CL)图像(图 4)中,锆石结构存在两种基本类型:部分锆石结构均一,不发育环带;

表 1 樟树墩蛇绿岩和张村岩群凝灰质千枚岩的主量元素(%)、稀土元素和微量元素($\times10^{-6}$)分析结果

Table 1 Contents of major (%), rare earth and trace elements ($\times10^{-6}$) in the Zhangshudun ophiolite and tuffaceous phyllite of the Zhangcun Group

样品	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	TiO_2	MnO	P_2O_5	H_2O^+	CO_2	烧失	Y
JX1126	47.34	13.64	3.59	7.6	9.65	10.7	0.51	2.27	0.98	0.15	0.08	3	0.27	2.73	22.2
JX1127	36.08	1.21	6.95	3.11	0.02	38.71	0.01	0.14	0.03	0.09	0.01	11.56	0.81	11.75	2.53
JX1119	60.23	14.96	1.03	5.28	3.81	2.02	1.07	4.66	1.04	0.12	0.18	2.68	2.7	4.49	21.9
样品	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Cs
JX1126	3.11	7.94	1.25	6.12	2.22	0.71	3.44	0.71	4.76	1.14	3.5	0.5	3.4	0.53	3.72
JX1127	0.53	0.81	0.13	0.56	0.25	0.05	0.33	0.07	0.41	0.09	0.24	0.05	0.18	0.05	0.36
JX1119	27.7	56.6	6.47	23.9	5.11	1.56	4.32	0.77	4.66	0.98	2.94	0.39	2.7	0.41	3.91
样品	Rb	Ba	Sr	Th	U	Sc	Nb	Ta	Zr	Hf	Pb	Cr	Ni	V	Cu
JX1126	15.3	136	198	0.3	0.08	49.7	2.57	0.17	50.6	1.58	0.55	163	104	390	114
JX1127	0.47	6.33	6.82	0.12	0.05	8.98	0.14	0.05	2.31	0.06	0.34	10120	3354	44.1	2.26
JX1119	32.6	498	499	4.37	1.18	15	10.2	0.53	191	4.66	12.4	50.9	19.3	120	21.4

部分锆石具有良好的晶形,并显示出明显的板状环带。这些结构是锆石在高温环境下结晶的产物,是辉长岩中锆石典型特征。所测锆石的 Th 和 U 含量总体较低,这和全岩中的 Th、U 含量较低比较吻合,但也有个别锆石具有较大的变化,Th、U 含量变化范围分别为 10×10^{-6} ~ 1145×10^{-6} 和 14×10^{-6} ~ 320×10^{-6}。锆石的 Th/U 比值较大,在 0.28 ~ 23.91 之间(表 2),绝大多数大于 0.4,为岩浆锆石的典型 Th/U 比值范围。

对 JX1126 样品的锆石共测试了 17 个数据点(表 2),数据点均位于谐和线上或谐和线附近(图 5a)。17 个数据点的分析结果给出了比较接近的 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄(994 ~ 1050 Ma,表 2,图 5),其加权平均年龄为 1009 ± 5 Ma(MSWD = 1.13),该年龄代表该辉长岩的结晶时代,应可以代表樟树墩蛇绿岩所代表的洋壳形成的时代。

张村岩群含凝灰质千枚岩(JX1119)样品中的锆石晶形良好,粒度多为 100 ~ 200 μm。在阴极发光(CL)图像(图 4)中,锆石均显示出典型的振荡环带(颗粒 3、5、7、8 和 10)或板状环带(颗粒 1 和颗粒 14),是典型的岩浆结晶的产物。所测锆石的 Th 和 U 变化范围分别为 26×10^{-6} ~ 245×10^{-6},

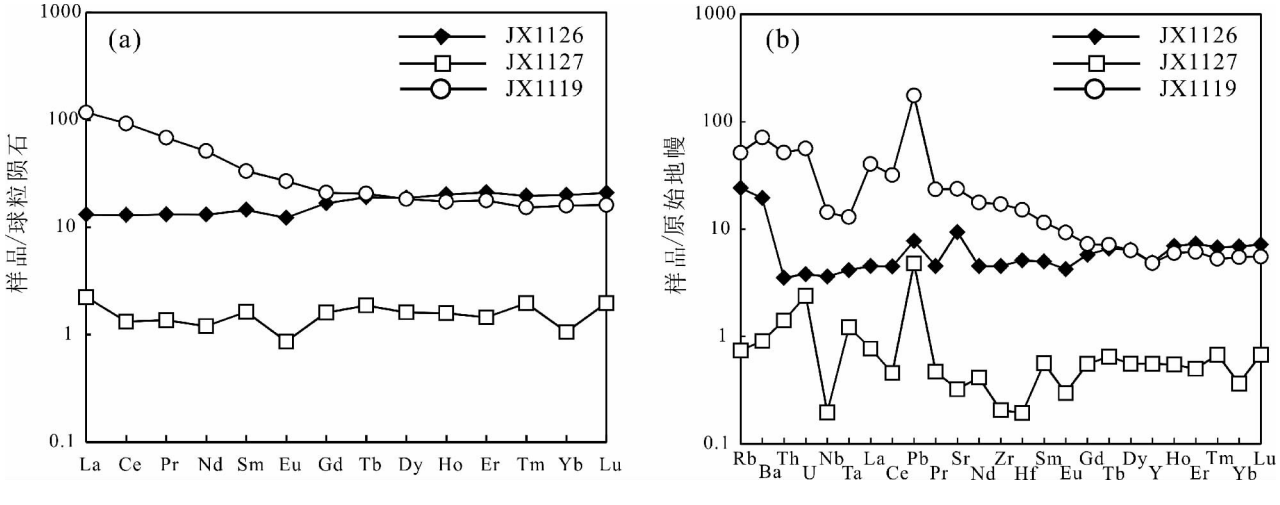

图 3 樟树墩蛇绿岩中基性—超基性岩和张村岩群凝灰质千枚岩球粒陨石标准化的稀土元素分配模式图(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)(标准化数据据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 3 Chondrite-normalized REE distribution patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element spider diagram (b) for the mafic—ultramafic rocks in the Zhangshudun ophiolite and tuffaceous phyllite of the Zhangcun Group (normalization values after Sun and McDonough, 1989)

表 2 樟树墩蛇绿岩中辉长岩(JX1126)和张村岩群凝灰质千枚岩(JX1119)的锆石 SHRIMP U – Pb 年龄测试结果

Table 2 SHRIMP U – Pb Zircon data of the gabbro (JX1126) in the Zhangshudun ophiolite and tuffaceous phyllite (JX1119) in the Zhangcun Group

测点号	$^{206}Pb_c$ (%)	元素含量 ($\times10^{-6}$)		Th/U	同位素比值							同位素年龄(Ma)				
					$\frac{n(^{207}Pb^*)}{n(^{206}*Pb)}$		$\frac{n(^{207}Pb^*)}{n(^{235}U)}$		$\frac{n(^{206}Pb^*)}{n(^{238}U)}$		误差相关系数	$\frac{n(^{206}Pb)}{n(^{238}U)}$		$\frac{n(^{207}Pb)}{n(^{206}Pb)}$		不谐和度 (%)
		U	Th		测值	±%	测值	±%	测值	±%		测值	±1σ	测值	±1σ	
樟树墩蛇绿岩中的辉长岩(JX1126)																
1.1	5.77	18	12	0.69	0.059	20	1.35	20	0.1667	2.3	0.118	994	21	560	430	-78
2.1	2.59	18	12	0.69	0.0732	12	1.71	12	0.1696	2.0	0.160	1,010	19	1,021	250	1
3.1	1.33	37	11	0.30	0.0704	6.9	1.65	7.1	0.1698	1.3	0.184	1,011	12	940	140	-8
4.1	2.27	23	15	0.68	0.0716	11	1.75	11	0.1769	1.9	0.174	1,050	18	976	220	-8
5.1	0.61	49	1145	23.91	0.0737	4.5	1.695	4.6	0.1667	1.1	0.237	994	10	1,035	91	4
6.1	1.19	74	31	0.43	0.0707	2.0	1.650	2.2	0.1693	0.89	0.408	1,008.4	8.3	948	41	-6
7.1	0.39	320	226	0.73	0.0719	1.5	1.665	1.6	0.1680	0.50	0.312	1,001.0	4.6	983	31	-2
8.1	2.58	42	11	0.28	0.073	21	1.75	21	0.1742	2.0	0.096	1,035	20	1,008	430	-3
9.1	1.08	81	52	0.67	0.0750	3.3	1.745	3.4	0.1688	0.97	0.284	1,005.6	9.0	1,068	66	6
10.1	0.72	156	97	0.64	0.0735	2.1	1.730	2.3	0.1706	0.94	0.406	1,015.4	8.8	1,029	43	1
11.1	1.30	81	62	0.79	0.0711	4.2	1.692	4.5	0.1727	1.5	0.338	1,027	14	959	86	-7
12.1	4.63	26	18	0.73	0.059	23	1.38	23	0.1689	2.4	0.106	1,006	23	582	500	-73
13.1	8.65	14	10	0.77	0.086	46	2.10	46	0.1781	5.1	0.110	1,056	50	1,332	890	21
14.1	1.05	120	82	0.71	0.0705	5.3	1.653	5.5	0.1701	1.4	0.249	1,013	13	942	110	-8
15.1	2.32	50	18	0.38	0.0706	7.9	1.67	8.0	0.1719	1.3	0.167	1,022	13	946	160	-8
16.1	1.28	81	42	0.54	0.0699	8.0	1.65	8.1	0.1714	1.1	0.141	1,020	11	927	160	-10
17.1	1.17	79	66	0.87	0.0721	5.2	1.675	5.3	0.1686	1.0	0.193	1,004.5	9.6	988	110	-2
张村岩群凝灰质千枚岩(JX1119)																
1.1	0.54	78	41	0.54	0.0691	2.6	1.531	3.5	0.1608	2.2	0.647	961	20	901	54	-7
2.1	0.71	82	43	0.54	0.0653	3.6	1.333	4.2	0.1481	2.2	0.519	890	18	783	76	-14
3.1	0.56	90	71	0.81	0.0683	2.3	1.369	3.2	0.1453	2.3	0.718	875	19	878	47	0
4.1	0.73	104	100	0.99	0.0701	5.4	1.301	5.9	0.1346	2.4	0.403	814	18	913	110	13
5.1	1.12	61	40	0.67	0.0663	6.7	1.217	7.2	0.1331	2.6	0.366	805	20	817	140	1
6.1	0.94	48	29	0.63	0.0683	7.3	1.35	7.8	0.1438	2.7	0.341	866	22	876	150	1
7.1	1.53	64	45	0.73	0.0629	9.0	1.19	9.5	0.1367	3.1	0.32	826	24	706	190	-17
8.1	0.42	126	52	0.43	0.1245	1.2	6.37	2..5	0.3714	2.2	0.873	2036	38	2021	22	-1
9.1	2.85	50	34	0.70	0.0605	14	1.32	14	0.1589	2.8	0.199	951	24	620	290	-53
10.1	0.20	168	110	0.68	0.0695	3.2	1.367	3.9	0.1427	2.2	0.565	860	18	913	65	6
11.1	0.16	416	245	0.61	0.07144	1.1	1.579	2.3	0.1604	2.1	0.881	959	18	970	23	1
12.1	0.53	198	207	1.08	0.0663	3.2	1.263	3.9	0.1382	2.1	0.556	834	17	815	67	-2
13.1	1.09	130	97	0.77	0.0619	5.5	1.207	6.0	0.1413	2.3	0.387	852	18	672	120	-27
14.1	1.89	278	188	0.70	0.0679	4.2	1.258	4.7	0.1345	2.2	0.458	813	16	864	87	6
15.1	1.99	56	37	0.68	0.0616	12	1.15	12	0.1357	2.7	0.22	820	21	660	260	-24
16.1	0.40	203	176	0.89	0.0680	2.1	1.320	3.1	0.1408	2.2	0.715	849	17	868	44	2
17.1	0.51	129	171	1.37	0.0704	3.1	1.304	3.8	0.1342	2.3	0.593	812	17	941	63	14
18.1	0.75	126	127	1.05	0.0692	4.0	1.297	4.6	0.1360	2.3	0.488	822	17	904	83	9
19.1	2.46	59	42	0.74	0.0660	13	1.23	13	0.1350	2.6	0.204	817	20	806	260	-1
20.1	8.39	41	26	0.65	0.077	44	1.41	44	0.1329	4.4	0.100	804	34	1119	880	28

注:Pb_c 代表普通铅,$^{206}Pb_c$(%)代表普通铅占总铅的比例,Pb^* 代表放射成因,采用实测的^{204}Pb 进行普通铅校正。

41×10^{-6} ~ 416×10^{-6},其 Th/U 比值为 0.43 ~ 1.37 之间(表 2),均大于 0.4,表明所测这些锆石均为岩浆成因。

对 JX1119 样品的锆石共测试了 20 个数据点(表 2,图 5b),其中 5 个数据点(1.1, 2.1, 8.1, 9.1 和 11.1)给出了较老的年龄(890 ~ 2021 Ma)。其它锆石给出了比较一致的$^{206}Pb/^{238}U$年龄(805 ~ 875 Ma),它们的加权平均年龄为 833 ± 10 Ma

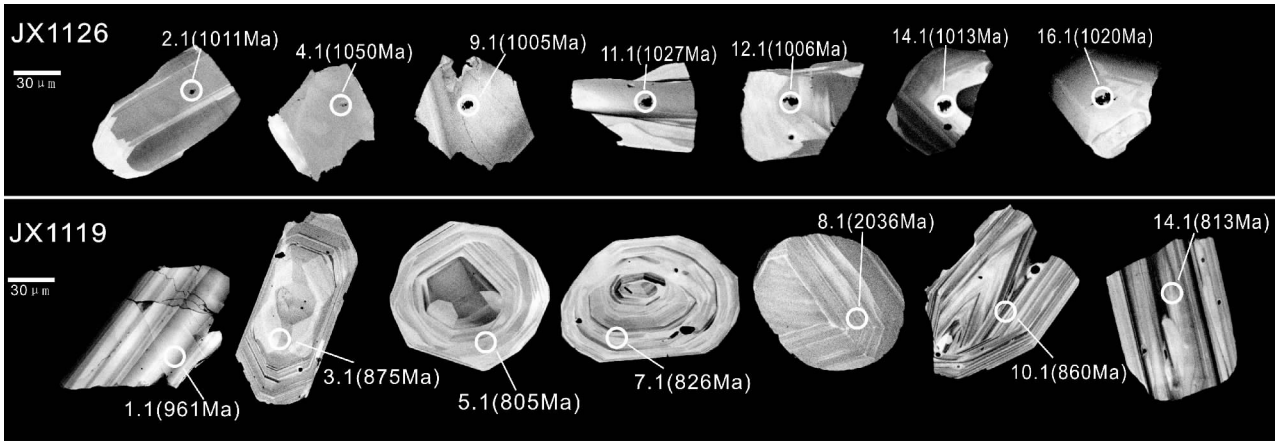

图 4 樟树墩辉长岩(JX1126)和张村岩群含凝灰质千枚岩(JX1119)的锆石 CL 图像

Fig. 4 CL images of zircons from the Zhangshudun gabbro (JX1126) and tuffaceous phyllite of the Zhangcun Group

(MSWD = 1.5)(图 5c)。由于岩性是火山碎屑岩,而锆石结构都显示为岩浆成因,对这个年龄的地质意义有两种解释。第一:所有的锆石都是碎屑锆石,多数年龄比较集中代表其源区岩石比较单一,如果这样的话,该凝灰质千枚岩的形成时代应该小于 833 Ma;第二,较老的为碎屑锆石,而较年轻的比较集中的一组来自同沉积期的火山灰,这种情况下,年轻一组锆石的年龄(833 ± 10 Ma)就代表岩石的沉积年龄。笔者倾向于第二种解释,主要基于以下几点原因:① 年轻一组的锆石中,多数晶形保存完好,与大多数有一定程度磨圆的碎屑锆石(如颗粒 8.1)有所不同;② 锆石的年龄非常集中,来自同一期岩浆作用的可能性要高于碎屑成因;③ 岩石发生了明显的变形,该地区的变质变形作用时代约为 820 Ma(高林志等,2010,2011,2015),这也和 833 Ma 代表岩石形成年龄更吻合。

3.3　锆石 O 同位素

对樟树墩蛇绿岩中的辉长岩样品 JX1126 做了 22 颗锆石的原位 O 同位素测定(表 3),其中 1.1 ~ 17.1 的分析位置和 SHRIMP U-Pb 定年位置重合,18.1 ~ 23.1 的结构也与其它锆石类似。分析表明辉长岩中锆石有较一致的 O 同位素组成,$\delta^{18}O_{V-SMOW}$ = 3.67‰ ~ 5.97‰,去掉 3 个统计离群点(13.1、15.1 和 22.1),其它点的加权平均值 $\delta^{18}O_{V-SMOW}$ = 5.12‰ ± 0.62‰(2σ),这与地幔锆石 $\delta^{18}O_{V-SMOW}$ 平均值(5.3‰ ± 0.3‰)(Valley et al., 1998)在误差范围内一致,表明其来自地幔源区,基本没有受到地壳的混染。

4　地质意义

4.1　赣东北蛇绿岩的形成和就位时代

赣东北蛇绿岩的形成时代一直存在明显争议,这些争议主要是由于古生物、年代学和区域对比上的不协调。

在古生物证据方面,虽然赣东北蛇绿岩带的围岩中有晚古生代放射虫的报道(赵崇贺等,1995;何科昭等,2000),但这些古生物工作在后续的研究中无法得到重复(王博和舒良树,2001;王玉净等,2006)。而由于区域上存在较年轻的构造热事件(胡艳华等,2011;高林志等,2014a;汪建国等,2014;Xu Xianbing et al., 2015),所以较年轻的 Ar-Ar 年

表 3 樟树墩蛇绿岩中辉长岩(JX1126)的锆石 SHRIMP 氧同位素分析结果

Table 3 SHRIMP zircon oxygen isotope data of the gabbro (JX1126) in the Zhangshudun ophiolite

测点号	$\delta^{18}O_{V-SMOW}$(‰)		测点号	$\delta^{18}O_{V-SMOW}$(‰)	
	测值	±σ		测值	±σ
1.1	5.55	0.11	13.1	3.67	0.09
2.1	5.32	0.17	14.1	5.12	0.12
3.1	4.62	0.11	15.1	5.97	0.11
4.1	4.61	0.13	16.1	5.36	0.09
6.1	5.07	0.11	17.1	4.53	0.15
7.1	4.83	0.09	18.1	4.93	0.12
8.1	5.69	0.09	19.1	5.54	0.09
9.1	5.13	0.09	20.1	5.28	0.13
10.1	4.76	0.07	21.1	5.26	0.11
11.1	5.01	0.09	22.1	3.75	0.11
12.1	4.90	0.15	23.1	5.52	0.13

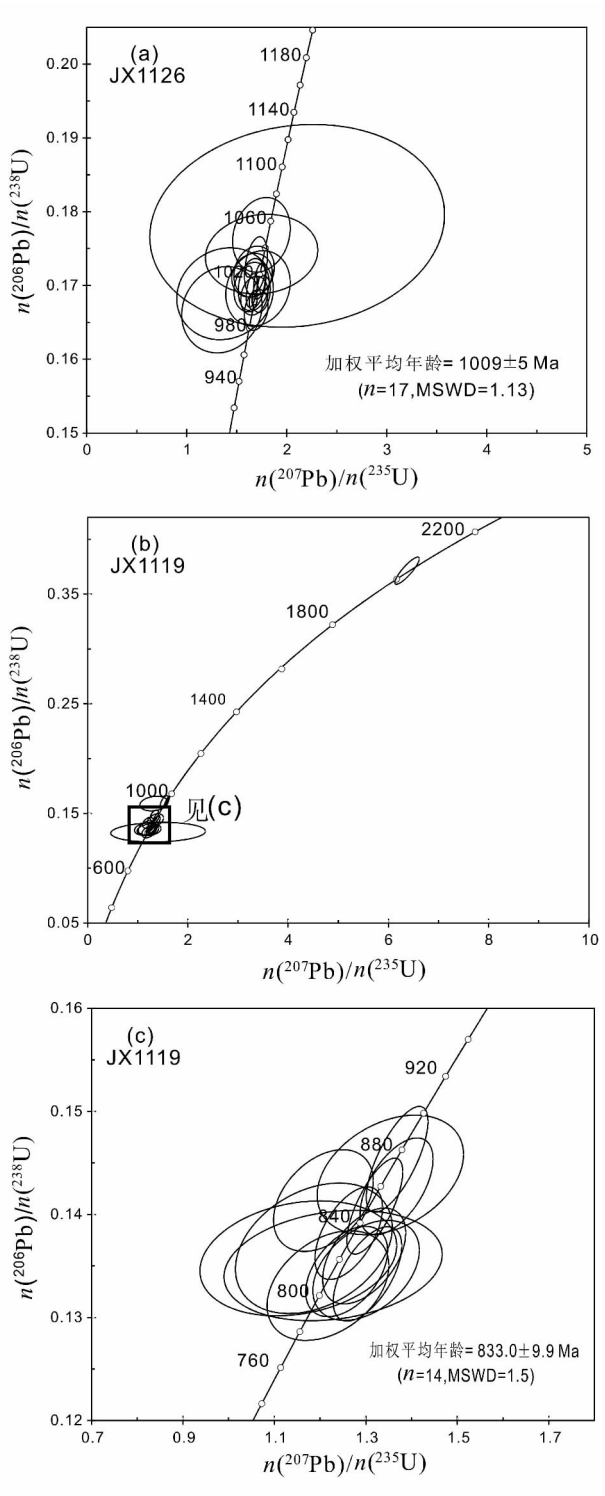

图 5 样品 JX1126 和 JX1119 锆石 U-Pb 谐和图

Fig. 5 U-Pb Concordia diagrams of zircons from Sample JX1126 and JX1119

龄(赵崇贺等,1997)对蛇绿岩形成和就位年龄的制约性有限。

早期对赣东北蛇绿岩和皖南蛇绿岩的 Sm-Nd 同位素等时线定年都给出了 930 ~ 1024 Ma 的年龄(邢凤鸣等,1992;徐备,1989;周新民等,1989;赵建新等,1995),但由于 Sm-Nd 年龄的误差较大,可靠性不高。而且近几年多位研究者对原认为和赣东北蛇绿岩为同一条蛇绿岩带的皖南伏川蛇绿岩中方辉橄榄岩和辉长岩进行锆石 U-Pb 定年,给出的年龄都介于 819 ~ 848 Ma 之间(丁炳华等,2008;Zhang Shaobing et al., 2012;Zhang Chuanlin et al., 2013;Yin Changqing et al., 2013)。

但不同于皖南地区的是,赣东北蛇绿岩及相关岩石有很多大于 850 Ma 的年龄信息。李献华等(1994)对赣东北的西湾地区蛇绿混杂岩中的硬玉蓝闪石化钠长花岗岩进行 SHRIMP U-Pb 定年,给出了 968 ± 23 Ma 的原岩形成年龄,认为其代表洋壳的形成年龄。后续研究表明该花岗岩具有富锶低钇的地球化学特征,作者认为其代表洋壳俯冲的时代(Li Wuxian and Li Xianhua, 2003)。但详细的岩石学工作指出该高锶低钇花岗岩是玄武质岩浆结晶分异的结果,而不是来自俯冲板片的部分熔融,其仍然代表洋壳形成时代(Gao Jun et al., 2009)。此外,在西湾地区蛇绿混杂岩带中还发现 880 Ma 的过铝质花岗岩(Li Wuxian et al., 2008)。

本次对樟树墩蛇绿岩中的辉长岩进行的直接定年给出了 1009 ± 5 Ma 的年龄,锆石具有基性侵入岩典型的板状环带和较高的 Th/U 比以及地幔锆石的 O 同位素组成,无疑代表辉长岩的结晶年龄,这个年龄直接限定了其所代表的洋壳的形成时代。近一两年,多位研究者也对赣东北蛇绿岩进行了锆石定年,王存智等(2015)对樟树墩蛇绿岩中辉长岩的定年给出了 1061 ± 44 Ma 的加权平均年龄,但作者计算加权平均年龄时采用的是 $^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄,考虑到样品的 U 含量较低,1.0 Ga 左右的年龄采用 $^{206}Pb/^{238}U$ 的年龄更为精确,对作者的原始数据进行重新计算,得到的结果为 1014 ± 3 Ma(MSWD = 0.42),该年龄和本文获得的年龄误差范围内完全一致。Zhang Chuanlin 等(2015)也对赣东北蛇绿岩不同单元进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年,樟树墩混杂带的辉绿岩和辉长岩分别给出了 1014.8 ± 3.8 Ma 和 1038 ± 9.8Ma 的年龄,茅桥混杂带的橄榄辉石岩给出了 1060 ± 30 Ma 的年龄。Wang Xinshui 等(2015)对樟树墩蛇绿岩中两个辉长岩进行的锆石 SIMS U-Pb 定年给出了 995 ± 22 Ma 和 993 ± 12 Ma 的形成年龄。结合之前在西湾地区玄武质岩浆结晶分异形成的高锶低钇花岗岩的年龄,

表明赣东北地区蛇绿混杂岩主体的形成时代为中元古代末—新元古代初。

在变质程度较低的地区,精确限定蛇绿岩的就位时代存在一定的困难,但可以通过蛇绿岩的围岩和上覆的盖层加以限定。张村岩群作为赣东北蛇绿岩的围岩,与蛇绿岩残片构造接触,其本身也遭受到明显变形和改造,无疑形成于蛇绿岩就位之前。本文对作为蛇绿岩围岩的张村岩群凝灰质千枚岩进行的锆石 SHRIMP 定年给出了 833 ± 10 Ma 的形成年龄,表明蛇绿岩就位时代晚于 833 Ma。之前不同研究者对张村岩群和与之大体同物异名的万年岩群中长英质火山岩和凝灰质岩石的锆石 LA-ICP-MS 定年给出了约 860 Ma 和 844 Ma 的形成年龄(刘树文等,2013;韩瑶等,2015),可能暗示张村岩群的火山岩具有不同的形成时代。区域上不整合覆盖在这些变质变形地层之上的为一套基本未变形的地层。近年来,对这套盖层的定年也取得了较大的进展。赣西北地区的马涧桥组火山凝灰碎屑岩给出了 769 ± 8 Ma 的形成年龄(高林志等,2012),浙西北河上镇群上墅组的凝灰岩获得了 767 ± 5 Ma 的形成年龄(高林志等,2008),虹赤村组流纹岩的年龄为 807 ± 11Ma(王剑,2000)。江西东北部的登山群碎屑锆石表明其形成时代晚于 810 Ma(Yao Jinlong et al., 2015)。这表明蛇绿岩就位所代表的区域构造事件时代介于 833 ~ 807 Ma 之间。高林志等(2013a,2015)根据区域对比以及湖南、贵州等地该不整合面上下部地层的年代学研究,指出江南造山带大范围的区域构造事件时代约为 820 Ma,笔者等认为这个年龄可以大体代表赣东北蛇绿岩的就位时代。

4.2　大地构造意义

4.2.1　构造线的连接问题

在皖南歙县的伏川地区也出露一套蛇绿混杂岩,由于其距离赣东北蛇绿混杂岩带不远,而且都是北东走向,所以一般认为两者可以相连,构成同一大洋的残片(邢凤鸣等,1992;赵建新等,1995)。但最近对皖南伏川蛇绿岩的锆石定年工作表明其形成时代约为 830 Ma(丁炳华等,2008;Zhang Shaobing et al., 2012; Zhang Chuanlin et al., 2013; Yin Changqing et al., 2013),明显小于赣东北蛇绿岩的年龄。此外,两地蛇绿混杂岩带中大量岩石 Nd 同位素分析显示两者存在明显的区别,赣东北蛇绿岩具有相当均一的高 $\varepsilon_{Nd}(T)$ 值(+5.5 ± 1.2),表明来源于未受明显陆壳混染的亏损地幔,而皖南蛇绿岩的 $\varepsilon_{Nd}(T)$ 值低,变化较大(+4.5 ~ −1.0),同位素和元素含量及比值存在相关性,表明其受到明显的陆壳混染(赵建新等,1995)。而且两地蛇绿混杂岩的围岩也有一定的区别,皖南歙县伏川蛇绿混杂岩的围岩主要为溪口岩群(或称上溪岩群),以薄层细砂—粉砂质复理石和黑色板岩为主,夹硅质岩或硅质板岩,沉积构造单调(徐备,1990),这些特征和赣北地区的双桥山群比较类似。而赣东北蛇绿混杂岩的围岩被称为张村岩群,相对来说含有较多的火山物质,变质变形较强。这些差别可能暗示赣东北蛇绿混杂岩和皖南蛇绿混杂岩可能形成于不同的构造环境。

在赣北庐山地区双桥山群地层中发育一套具枕状构造的细碧—角斑岩组合,与之共生的英安岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年给出了约 840 Ma 的形成年龄,这套岩石组合具有弧后小洋盆岩石的地球化学特征(董树文等,2010)。在赣皖交界处的鄣公山北坡鄣源地区也发育一套基性岩,其中枕状玄武岩的锆石 SHRIMP U-Pb 定年为 832 ± 19 Ma(周效华等,2014),地球化学特征表明其形成于陆缘小洋盆的扩张脊(张彦杰等,2011)。这些作者都认为这些基性岩所代表的洋壳和皖南歙县蛇绿岩相连,代表在陆壳基底发育的弧后小洋盆。根据围岩岩性、形成年龄以及变化的 Nd 同位素组成等特征,本文支持这一观点。而与之不同的是赣东北蛇绿岩形成年龄约 1000 Ma,具有稳定的强亏损 Nd 同位素,指示其基本没有受到陆壳的影响(赵建新等,1995)。本文的主微量元素结果和锆石 O 同位素特征也指示研究样品来自基本未受陆壳影响的亏损地幔。同时考虑如果此时已经存在和蛇绿岩同期(约 1.0 Ga)的俯冲作用并形成岛弧,具有正地形的岛弧岩石往往在碰撞造山过程中容易得以保存,而江南造山带不发育约 1.0 Ga 岩石。综合这些信息,笔者等认为赣东北蛇绿岩的主体形成环境为大洋中脊,和皖南伏川蛇绿岩所代表的弧后盆地不同。

4.2.2　区域地质演化史

在江南造山带东段,中元古代的岩石出露非常有限。目前仅有铁砂街组(高林志等,2013c;张恒等,2015)给出了 1.13 ~ 1.17 Ga 的形成年龄,铁砂街组具有大陆裂谷特征的岩石组合和地球化学特征(程海等,1991)。田里片岩的形成年代还存在争议(Li Zhengxiang et al., 2007;高林志等,未发表资料)。

江南造山带东段新元古代早期(870 ~ 1000

Ma)的岩石除和蛇绿混杂岩共生的花岗质岩石外,主要为发育在造山带最东端的双溪坞群,其形成年龄为 877 ~ 954 Ma,地球化学特征和岩石组合都表明其形成于岛弧环境(陈志洪等,2009;Li Xianhua et al., 2009;高林志等,2014b;张恒,2015;陈辉等,2016),并且伴有约 910 Ma 钙碱性花岗岩(Ye Meifang et al., 2007)。

新元古代中期(820 ~ 860 Ma),江南造山带东段存在大量不同岩性的岩石单元。其中浙江浦江地区的平水群、浙西江山地区"章村组"和赣东北地区的张村岩群(局部地区称为万年岩群)中发育较大规模的火山岩。大量锆石年代学表明其形成时代为 821 ~ 871 Ma,地球化学特征表明其中火山岩具有火山弧特征(高林志等,2013b;刘树文等,2013;韩瑶等,2015;张恒,2015;Yao Jinlong et al., 2014;本文)。而在江南造山带的北部,则发育一套比较稳定的沉积,在赣东北被称为双桥山群,在皖南被称为溪口岩群,其形成时代为 830 Ma 左右,沉积环境具弧后盆地沉积的特征(高林志等,2008;Wang Xiaolei, 2008;Xu Xianbing et al., 2014)。在这套组合的中部自东向西发育一套形成时代与之大体相当的洋壳残片,自东向西以皖南伏川蛇绿岩、赣皖交界处鄱源基性岩和赣北庐山地区枕状玄武岩和细碧角斑岩为代表,具有弧后小洋盆的地球化学特征(丁炳华等,2008;Zhang Shaobing et al., 2012;Zhang Chuanlin et al., 2013;Yin Changqing et al., 2013;董树文等,2010;张彦杰等,2011;周效华等,2014)。此外,双桥山群在空间上有一定的变化,靠近扬子陆缘(西北侧)的双桥山群含火山物质很少,而靠近岛弧一侧(东南侧)的双桥山群则含有一定量的火山物质(邓国辉等,2003)。所以江南造山带东段新元古代中期(820 ~ 860 Ma)的岩石构成很好的南侧岛弧和北侧弧后盆地沉积及弧后洋壳残片组合。在 820 Ma 左右,区域上发生构造运动,导致在整个江南造山带发育大规模不整合,并伴随约 830 Ma 的 S 型同造山花岗岩(李献华等,2002;吴荣新等,2005;薛怀民等,2010)和约 810 Ma 的后造山 A 型花岗岩(薛怀民等,2010)。

根据上述讨论,我们认为区域演化历史如下:在 1.15 Ga 左右,区域上发生大陆裂解,形成以铁砂街组为代表的大陆裂谷沉积;继而裂解作用继续发育,形成宽阔的大洋,在 1.0 Ga 左右,发育以赣东北蛇绿岩为代表的大洋中脊岩石组合;在 950 ~ 900 Ma 左右,洋壳发生俯冲,形成以双溪坞群为代表的岛弧建造;850 ~ 830 Ma 岛弧继续发育,形成以赣东北张村岩群、浙江浦江地区的平水群、浙西江山地区"章村组"为代表的岛弧岩石,同时弧后发生扩张,形成弧后洋壳(以皖南伏川蛇绿岩、赣皖交界处鄱源基性岩和赣北庐山地区枕状玄武岩和细碧角斑岩为代表)以及弧后盆地沉积(以赣东北双桥山群和皖南溪口岩群为代表)。在 820 Ma 左右,大洋以及弧后盆地发生闭合,形成大规模的区域不整合和同造山 S 型花岗岩和后造山 A 型花岗岩。

5 结论

(1)野外地质特征、微量元素地球化学特征显示樟树墩蛇绿混杂带的基性—超基性岩具有大洋中脊岩石的特征,辉长岩中锆石 O 同位素特征反映其来自地幔源区,基本没有受到地壳的混染,是扬子板块东南侧的洋盆残片。

(2)樟树墩蛇绿混杂岩中的辉长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 1009 ± 5 Ma(MSWD = 1.15),代表赣东北蛇绿岩的形成时代。作为其围岩的张村岩群凝灰质千枚岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 833 ± 10 Ma(MSWD = 1.5),表明其就位时间晚于 833 Ma,结合区域地质特征,指出其就位时代约为 820 Ma。

(3)结合新的年代学成果和早期的同位素地球化学、区域地质学工作,我们认为樟树墩蛇绿岩所代表的洋壳为大洋中脊,不同于皖南伏川蛇绿岩所代表的弧后小洋盆,江南造山带东段的地质演化历史需要重新厘定。

致谢:SHRIMP 锆石分析过程中得到了张玉海研究员、刘建辉、龙涛、车晓超的帮助,锆石样品靶由杨淳、甘伟林制作,CL 图像由李宁、周丽芹完成。锆石标准由 Ian Williams 和 Lance Black 提供,研究过程中得到了刘敦一研究员、万渝生研究员、高林志研究员的指导和帮助,以及审稿专家和编辑提出的宝贵意见和建议,在此深表谢意!

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a "&" is in Chinese with English abstract; the literature whose publishing year following by a "#" is in Chinese without English abstract)

白文吉, 甘启高, 杨经绥, 邢凤鸣, 徐祥. 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. 岩石矿物学杂志, 5(4): 289 ~ 299.

程海, 胡世玲, 唐朝辉. 赣东北铁砂街变质混杂岩块的同位素年代. 1991. 中国区域地质, (2): 151 ~ 154.

陈辉, 倪培, 陈仁义, 吕志成, 庞振山, 王国光, 袁慧香. 2016. 浙

西北平水铜矿细碧角斑岩成岩年龄及其地质意义. 中国地质, 42(2): 410 ~ 418.
陈志洪, 邢光福, 郭坤一, 董永观, 陈荣, 曾勇, 李龙明, 贺振宇, 赵玲. 2009. 浙江平水群角斑岩的成因:锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素制约. 科学通报, 54(5): 610 ~ 617.
邓国辉, 楼法生, 黄传冠. 2003. 赣东北珍珠山群的建立及意义. 地质通报, 22(1): 32 ~ 42.
丁炳华, 史仁灯, 支霞臣, 郑磊, 陈雷. 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. 岩石矿物学杂志, 27(5): 375 ~ 388.
董树文, 薛怀民, 项新葵, 马立成. 2010. 赣北庐山地区新元古代细碧—角斑岩系枕状熔岩的发现及其地质意义. 中国地质, 37(4): 1021 ~ 1033.
高林志, 杨明桂, 丁孝忠, 刘燕学, 刘训, 凌联海, 张传恒. 2008. 华南双桥山群和河上镇群凝灰岩中的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄——对江南新元古代造山带演化的制约. 地质通报, 27(10): 1744 ~ 1751.
高林志, 戴传固, 刘燕学, 王敏, 王雪华, 陈建书, 丁孝忠, 张传恒, 曹茜, 刘建辉. 2010. 黔东南—桂北地区四堡群凝灰岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地层学意义. 地质通报, 29(9): 1259 ~ 1267.
高林志, 陈峻, 丁孝忠, 刘耀荣, 张传恒, 张恒, 刘燕学, 庞维华, 张玉海. 2011. 湘东北岳阳地区冷家溪群和板溪群凝灰岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄——对武陵运动的制约. 地质通报, 29(7): 1001 ~ 1008.
高林志, 黄志忠, 丁孝忠, 刘燕学, 庞建峰, 张传恒. 2012. 赣西北新元古代修水组和马洞桥组 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄. 地质通报, 31(7): 1086 ~ 1093.
高林志, 丁孝忠, 刘燕学, 邢裕盛, 张传恒, 史晓颖, 周洪瑞, 王自强. 2013a. 中国中—新元古代地层年表的新标定. 地层学杂志, 4: 625 ~ 626.
高林志, 丁孝忠, 刘燕学, 黄志忠, 张传恒, 许兴苗, 邬祥林, 宋志瑞, 张恒. 2013b. 浙江浦江县蒙山地区陈塘坞组在地层柱中的位置——来自 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄的制约. 地质通报, 32(7): 988 ~ 995.
高林志, 刘燕学, 丁孝忠, 宋志瑞, 黄志忠, 张传恒, 张恒, 史志刚. 2013c. 江山—绍兴断裂带铁沙街组变流纹岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 测年及其意义. 地质通报, 32(7): 996 ~ 1005.
高林志, 丁孝忠, 刘燕学, 张传恒, 张恒, 黄志忠, 许兴苗, 周宗尧. 2014a. 江山—绍兴断裂带陈蔡岩群片麻岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 地质通报, 33(5): 641 ~ 648.
高林志, 张恒, 丁孝忠, 刘燕学, 张传恒, 黄志忠, 许兴苗, 周宗尧. 2014b. 江山—绍兴断裂带构造格局的新元古代 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄证据. 地质通报, 33(6): 763 ~ 775.
高林志, 尹崇玉, 丁孝忠, 王泽九, 张恒. 2015. 华南地区新元古代年代地层标定及地层对比. 地球学报, 36(5): 533 ~ 545.
韩瑶, 张传恒, 刘子荟, 游国庆, 李利阳. 2015. 浙江浦江新元古界平水群沉积特征、碎屑锆石年龄及构造古地理格局探讨. 地质论评, 61(6): 1270 ~ 1280.
何科昭, 赵崇贺, 郜道乾, 聂泽同, 乐昌硕, 周正国, 叶木丹. 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. 现代地质, 10(3): 303 ~ 307.
何科昭, 聂泽同, 赵崇贺, 叶木丹, 周正国, 乐昌硕, 郜道乾. 2000. 赣东北晚古生代放射虫化石综述. 现代地质, 14(1): 1 ~ 7.
胡艳华, 顾明光, 徐岩, 余盛强, 王加恩, 贺跃. 2011. 浙江诸暨地区陈蔡群加里东期变质年龄的确认及其地质意义. 地质通报, 30(11): 1661 ~ 1670.
李利阳,张传恒,贾龙龙. 2016. 江南造山带西段四堡群的沉积地质特征和构造属性探讨. 地质论评, 62(5):1115 ~ 1124.
李献华, 周国庆, 赵建新. 赣东北蛇绿岩的离子探针锆石 U - Pb 年龄及其构造意义. 1994. 地球化学, 23(2): 125 ~ 131.
李献华, 李正祥, 周汉文, 刘颖. 2002. 皖南新元古代花岗岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学、元素地球化学和 Nd 同位素研究. 地质论评, 48(S1): 8 ~ 16.
凌联海. 1996. 赣东北蓟县纪张村群及其韩源组和榔树底组的建立. 江西地质科技, (2): 76 ~ 79.
刘敦一, 简平. 2004. 大别山双河硬玉石英岩的超高压变质和退变质事件——SHRIMP 测年的证据. 地质学报, 78(2): 211 ~ 217.
刘树文, 杨朋涛, 王宗起, 罗平, 王永庆, 罗国辉, 王伟, 郭博然. 2013. 赣东北婺源—德兴地区新元古代浅变质火山岩的地球化学和锆石 U-Pb 年龄. 岩石学报, 29(2):581 ~ 593.
刘亚光, 吴富江, 覃兆松, 宋志瑞, 马振兴. 2015. 江西省岩石地层划分方案简介. 江西地质, (1): 50 ~ 55.
王博, 舒良树. 2001. 对赣东北晚古生代放射虫的初步认识. 地质论评, 47(4): 337 ~ 344.
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. 2015. 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. 岩石矿物学杂志, 34(3): 309 ~ 321.
王剑. 2000. 华南新元古代裂谷盆地沉积演化——兼论与 Rodinia 解体的关系. 北京:地质出版社: 1 ~ 146.
汪建国, 余盛强, 胡艳华, 赵旭东, 吴鸣, 顾明光. 2014. 江山—绍兴结合带榴闪岩的发现及岩石学、年代学特征. 中国地质, 41(4): 1356 ~ 1363.
王玉净, 杨群, 尹磊明, 舒良树, 楼法生, 王博. 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. 高校地质学报, 12(1): 98 ~ 105.
王自强,高林志,丁孝忠,黄志忠. 2012. 江南造山带"变质基底形成的构造环境及演化特征. 地质论评,58(3):401 ~ 413.
吴荣新, 郑永飞, 吴元保. 2005. 皖南新元古代花岗闪长岩体锆石 U-Pb 定年以及元素和氧同位素地球化学研究. 岩石学报, 21(3): 587 ~ 606.
邢凤鸣, 徐祥, 陈江峰, 周泰禧, Foland K A. 1992. 赣东北元古代蛇绿岩 Sm-Nd 同位素年龄及地质意义. 岩石矿物学杂志, 11(2): 120 ~ 124.
徐备. 1989. 华南元古代地质研究进展述评. 地质科技情报, 8(1): 1 ~ 8.
徐备. 1990. 论赣东北—皖南晚元古代沟弧盆体系. 地质学报, 64(1): 33 ~ 42.
薛怀民, 马芳, 宋永勤, 谢亚平. 2010. 江南造山带东段新元古代花岗岩组合的年代学和地球化学:对扬子与华夏地块拼合时间与过程的约束. 岩石学报, 26(11): 3215 ~ 3244.
杨明桂, 刘亚光, 黄志忠, 吴富江, 宋志瑞. 2012. 江西中新元古代地层的划分及其与邻区对比. 中国地质, 39(1): 43 ~ 53.
余心起. 2000. 皖南兰田残留向斜不是构造窗. 地质论评, 46(4): 337 ~ 346.
张恒, 李廷栋, 高林志, 耿树方, 丁孝忠, 刘燕学, 寇彩化. 2015. 赣东北中元古界铁沙街组石英角斑岩和流纹岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄、Hf 同位素及地球化学特征. 地质论评, 61(1): 65 ~ 78.
张恒. 2015. 江南造山带东段南缘晚前寒武纪地层年代学与构造属性研究. 导师:李廷栋,高林志. 北京:中国地质科学院博士学位论文:1 ~ 126.
张彦杰, 周效华, 廖圣兵, 余明刚, 蒋仁, 姜杨. 2011. 江南造山带北缘郭源基性岩地质—地球化学特征及成因机制. 高校地质学

报, 17(3): 393 ~405.

赵崇贺, 何科昭, 莫宣学, 邰道乾, 林培英, 毕先梅, 郑伯让, 叶德隆, 冯庆来, 叶枌. 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. 科学通报, 40(23): 2161 ~2163.

赵崇贺, 何科昭, 邰道乾, 乐昌硕, 聂泽同. 1997. 赣东北地区重要火成岩的$^{40}Ar/^{39}Ar$年龄. 地球科学, 22(3): 257 ~260.

赵建新, 李献华, 周国庆, 邢凤鸣. 1995. 皖南和赣东北蛇绿岩成因及其构造意义:元素和 Sm-Nd 同位素制约. 地球化学, 24(4): 311 ~326.

周效华, 高天山, 马雪, 张彦杰, 廖圣兵, 余明刚, 陈丹丹, 朱延辉. 2014. 江南造山带东段鄂源枕状玄武岩的年代学与构造属性研究. 资源调查与环境, 35(4): 235 ~244.

周新民, 邹海波, 杨杰东, 王银喜. 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. 科学通报, 16: 1243 ~1245.

Bai Wenji, Gan Qigao, Yang Jingsui, Xing Fongming, Xu Xiang. 1986&. Discover of well-reserved ophiolite and its basical characters in Southeastern margin of the Jiangnan ancient continent. Acta Petrologica et Mineralogica, 5(4): 289 ~299.

Black L P, Kamo S L, Allen C M, et al. 2004. Improved $^{206}Pb/^{238}U$ microprobe geochronology by the monitoring of a trace-element-related matrix effect; SHRIMP, ID-TIMS, ELA-ICP-MS and oxygen isotope documentation for a series of zircon standards. Chemical Geology, 205: 115 ~140.

Cheng Hai, Hu Shiling, Tang Chaohui. 1991&. New precognitionon the isotopic geochronology of the "Tieshajie Group" in the southern part of Northeastern Jiangxi. Regional Geology of China, 2: 151 ~154.

Chen Hui, Ni Pei, Chen Renyi, Lu Zhicheng, Pang Zhenshan, Wang Guoguang, Yuan Huixiang. 2016&. Chronology and geological significance of spillite—keratophyre in Pingshui Formation, northwest Zhejiang Province. Geology in China, 43(2): 410 ~418.

Chen Zhihong, Xing Guangfu, Guo Kunyi, Dong Yongguan, Chen Rong, Zeng Rong, Li Longming, He Zhenyu, Zhao Ling. 2009&. Petrogenesis of keratophyes in the Pingshui Group, Zhejiang: Constraints from zircon U-Pb ages and Hf isotopes. Chinese Science Bulletin, 54(5): 610 ~617.

Deng Guohui, Lou Fasheng, Huang Chuanguan. 2003&. Establishment of the Zhenzhushan Group in northeast Jiangxi an its significance. Geological Bulletin of China, 22(1): 32 ~42.

Ding Binghua, Shi Rendeng, Zhi Xiachen, Zheng Lei, Chen Lei. 2008&. Neoproterozoic (~850Ma) subduction in the Jiangnan orogen: Evidence from the SHRIMP U-Pb dating of the SSZ-type ophiolite in southern Anhui Province. Acta Petrologica et Mineraloica, 27(5): 375 ~388.

Dong Shuwen, Xue Huaimin, Xiang Xinkui, Ma Licheng. 2010&. The discovery of Neoproterozoic pillow lava in spilite—ceratophyre of Lushan area, northern Jiangxi province, and its geological significance. Geology in China, 37(4): 1021 ~1033.

Gao Jun, Klemd R, Long Lingli, Xiong Xianming, Qian Qing. 2009. Adakitic signature formed by fractional crystallization: An interpretation for the Neo-Proterozoic meta-plagiogranites of the NE Jiangxi ophiolitic mélange belt, South China. Lithos, 110(1 ~4): 277 ~293.

Gao Linzhi, Yang Minggui, Ding Xiaozhong, Liu Yanxue, Liu Xun, Ling Lianhai, Zhang Chuanheng. 2008&. SHRIMP U-Pb zircon dating of tuff in the Shuangqiaoshan and Heshangzhen groups in South China——constraints on the evolution of the Jiangnan Neoproterozoic orogenic belt. Geological Bulletin of China, 27 (10): 1744 ~1751.

Gao Linzhi, Dai Chuangu, Liu Yanxue, Wang Min, Wang Xuehua, Chen Jianshu, Ding Xiaozhong, Zhang Chuanheng, Cao Qian, Liu Jianhui. 2010&. Zircon SHRIMP U-Pb dating of tuff bed of the Sibao Group and implication for its stratigraphic significance. Geological Bulletin of China, 29(9): 1259 ~1268.

Gao Linzhi, Chen Jun, Ding Xiaozhong, Liu Yaorong, Zhang Chuanheng, Zhang Heng, Liu Yanxue, Pang Weihua, Zhang Yuhai. 2011&. Zircon SHRIMP U-Pb dating of tuff bed of the Lengjiaxi and Banxi Groups——constraints on the Wuling Movement. Geological Bulletin of China, 29(7): 1001 ~1008.

Gao Linzhi, Ding Xiaozhong, Liu Yanxue, Xing Yusheng, Zhang Chuanheng, Shi Xiaoying, Zhou Hongrui, Wang Ziqiang. 2013a#. A new calibration of Meso- and Neo-proterozoic strata chronology in China. Journal of Stratigraphy, (4): 625 ~626.

Gao Linzhi, Ding Xiaozhong, Liu Yanxue, Huang Zhizhong, Zhang Chuanheng, Xu Xingmiao, Wu Xianglin, Song Zhirui, Zhang Heng. 2013b&. The revision of the Chentangwu Formation in Neoproterozoic stratigraphic column: Constraints on zircon U-Pb dating of tuff from the Mengshan section in Pujiang County, Zhejiang Province. Geological Bulletin of China, 32(7): 988 ~995.

Gao Linzhi, Liu Yanxue, Ding Xiaozhong, Song Zhirui, Huang Zhizhong, Zhang Chuanheng, Shi Zhigang. 2013c&. Geochronographic dating of the Tieshajie Formation in the Jiangshan—Shaoxing fault zone and its implications. Geological Bulletin of China, 32(7): 996 ~1005.

Gao Linzhi, Ding Xiaozhong, Liu Yanxue, Zhang Chuanheng, Zhang Heng, Huang Zhizhong, Xu Xingmiao, Zhou Zongyao. 2014a&. SHRIMP zircon U-Pb dating of Neoproterozoic Chencai Complex in Jiangshan—Shaoxing fault zone and its implications. Geological Bulletin of China, 33(5): 641 ~648.

Gao Linzhi, Zhang Heng, Ding Xiaozhong, Liu Yanxue, Zhang Chuanheng, Huang Zhizhong, Xu Xingmiao, Zhou Zongyao. 2014b&. SHRIMP zircon U-Pb dating of the Jiangshan—Shaoxing faulted zone in Zhejiang and Jiangxi. Geological Bulletin of China, 33(6): 763 ~775.

Gao Linzhi, Yin Chongyu, Ding Xiaozhong, Wang Zejiu, Zhang Heng. 2015&. Rating data of the Neoproterozoic chronostratigraphy and stratigraphic correlation in South China. Acta Geoscientica Sinica, 36(5): 533 ~545.

Han Yao, Zhang Chuanheng, Liu Zihui, You Guoqing, Li Liyang. 2015&. Study on sedimentary characteristics, detrital zircon ages and tectono-paleogeographic setting of Neoproterozoic Pingshui group in Pujiang area, Zhejiang province. Geological Review, 61(6): 1270 ~1280.

He Kezhao, Zhao Chonghe, Tai Daoqian, Nie Zetong, Le Changshuo, Zhou Zhengguo. 1996&. Discovery of late Palaeozoic radiolarian silicolite in many places in northeastern Jiangxi ophiolitic mélange belt. Geoscience, 10(3): 303 ~307.

He Kezhao, Nie Zetong, Zhao Chonghe, Ye Mudan, Zhou Zhengguo, Le Changshuo, Tai Daoqian. 2000&. Discovering fossils on the late Paleozoic radiolarian in northeast Jiangxi Province. Geoscience, 14 (1): 1 ~7.

Hu Yanhua, Gu Mingguang, Xu Yan, Yu Shengqiang, Wang Jjiaen, He Yue. 2011&. The confirmation of the age of Caledonian Chencai Group in Zhuji area of Zhejiang Province and its geological significance. Geological Bulletin of China, 30(11): 1661 ~1670.

Ickert R B, Hiess J, Williams I S, Holden P, Ireland T R, Lanc P,

Schram N, Foster J J, Clement S W. 2008. Determining high precision, in situ, oxygen isotope ratios with a SHRIMP II: Analyses of MPI-DING silicate-glass reference materials and zircon from contrasting granites. Chemical Geology, 257(1): 114 ~ 128.

Li Liyang, Zhang Chuanheng, Jia Longlong. 2016&. A Discussion on Sedimentary Characteristics and Structural Properties of the Sibao Group in the West Segment of the Jiangnan Orogenic Belt. Geological Review, 62(5):1115 ~ 1124.

Li Wuxian, Li Xianhua. 2003. Adakitic Granites within the NE Jiangxi Ophiolites, South China——Geochemical and Nd Isotopic Evidence. Precambrian Research, 122(1): 29 ~ 44.

Li Wuxian, Li Xianhua, Li Zhengxiang, Lou Fasheng. 2008. Obduction-type granites within the NE Jiangxi Ophiolite: Implications for the final amalgamation between the Yangtze and Cathaysia Blocks. Gondwana Research, 13(3): 288 ~ 301.

Li Wuxian, Li Xianhua, Li Zhengxiang. 2010. Ca. 850Ma bimodal volcanic rocks in Northeastern Jiangxi Province, South China: initial extension during the breakup of Rodinia? American Journal of Science, 310(9): 951 ~ 983.

Li Xianhua, Zhou Guoqing, Zhao Jianxin, Fanning C M, Compston W. 1994&. SHRIMP ion microprobe zircon U-Pb age of the NE Jiangxi Ophiolite and its tectonic implications. Geochimica, 23(2): 125 ~ 131.

Li Xinhua, Zhao Jianxin, Mcculloch M T, Zhou Guoqing, Xing Fengming. 1997. Geochemical and Sm-Nd isotopic study of Neoproterozoic ophiolites from southeastern China: petrogenesis and tectonic implications. Precambrian Research, 81(1 ~ 2):129 ~ 144.

Li Xianhua, Li Zhengxiang, Zhou Hanwen, Liu Ying. 2002&. SHRIMP U-Pb zircon geochronological, geochemical and Nd Isotopic study of the Neoproterozoic granitoids in Southern Anhui. Geological Review, 48(S1): 8 ~ 16.

Li Zhengxiang, Wartho J A, Occhipinti S, Zhang Chuanlin, Li Xianhua, Wang Jiang, Bao Chaomin. 2007. Early history of the eastern Sibao Orogen (South China) during the assembly of Rodinia: New mica $^{40}Ar/^{39}Ar$ dating and SHRIMP U-Pb detrital zircon provenance constraints. Precambrian Research, 159(1): 79 ~ 94.

Ling Lianhai. 1996 #. The establishment of the Zhangcun Group, Hanyuan Formation and Langshudi Formation at Jixian Period in Northeastern Jiangxi. Geological Science and Technology of Jiangxi, (2): 76 ~ 79.

Liu Dunyi and Jian Ping. 2004&. 243Ma UHP and 228Ma retrograde events of the Shuanghe jadeite quartzite, eastern Dabie Mountains: SHRIMP dating, mineral inclusions and zircon REE patterns. Acta Geologica Sinica, 78(2): 211 ~ 217.

Liu Shuwen, Yang Pengtao, Wang Zongqi, Luo Ping, Wang Yongqin, Luo Guohui, Wang Wei, Guo Boran. 2013&. Zircon U-Pb age and geochemistry of Neoproterozoic low-grade metavolcanic rocks in Wuyuan—Dexing area of Northeastern Jianxi Province. Acta Petrologica Sinica, 29(2): 581 ~ 593.

Liu Yaguang, Wu Fujiang, Tan Zhaoguang, Song Zhirui, Ma Zhenxing. 2015 #. A brief introduction to the division scheme of lithostratigraphy in Jiangxi Province. Geology in Jiangxi, (1): 50 ~ 55.

Ludwig K R. 2001a . SQUID 1. 02, A User´s Manual. Berkeley Geochronology Center Special Publication, Berkeley, 1 ~ 17.

Ludwig K R. 2001b. User´s Manual for Isoplot/Ex rev. 2. 49: A geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication, Berkeley, 1 ~ 55.

Sun S S, Mcdonough W F. 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts; Implications for Mantle Composition and Processes. Geological Society London Special Publications, 42(1): 313 ~ 345.

Valley J W, Kinny P D, Schulze D J, Spicuzza M J. 1998. Zircon megacrysts from kimberlite: oxygen isotope variability among mantle melts. Contributions to Mineralogy and Petrology, 133(1):1 ~ 11.

Wang Bo and Shu Liangshu. 2001&. Notes on Late Paleozoic radiolarians from northeastern Jiangxi Province. Geological Review, 47(4): 337 ~ 344.

Wang Cunzhi, Xing Guangfu, Yu Minggang, Huang ZhiZhong, Hong Wentao, Zhao Xilin, Zhou Xiaohua, Duan Zheng, Ju Dongmei. 2015&. Timing and tectonic setting of the NE Jiangxi ophiolite: Constraints from zircon U-Pb age, Hf isotope and geochemistry of the Zhangshudun gabbro. Acta Petrologica et Mineralgica, 34(3): 309 ~ 321.

Wang Jianguo, Yu Shengqiang, Hu Yuanhua, Zhao Xudong, Wu Ming, Gu Guangming. 2014&. The discovery, petrology and geochronology of the retrograde eclogite in Jianshan—Shaoxing suture zone. Geology in China, 41(4): 1356 ~ 1363.

Wang Xinshui, Gao Jun, Klemd R, Jiang Tuo, Zhai Qingguo, Xiao Xuchang, Liang Xinquan. 2015. Early Neoproterozoic multiple arc-back—arc system formation during subduction—accretion processes between the Yangtze and Cathaysia blocks: New constraints from the supra-subduction zone NE Jiangxi ophiolite (South China). Lithos, 236 ~ 237: 90 ~ 105.

Wang Xiaolei, Zhao Guochun, Zhou Jincheng, Liu Yongsheng, Hu Jian. 2008. Geochronology and Hf isotopes of zircon from volcanic rocks of the Shuangqiaoshan Group, South China: Implications for the Neoproterozoic tectonic evolution of the eastern Jiangnan orogen. Gondwana Research, 14(3): 355 ~ 367.

Wang Xiaolei, Shu Liangshu, Xing Guangfu, Zhou Jincheng, Tang Ming, Shu Xujie, Qi Liang, Hu Yanhua. 2012. Post-orogenic extension in the eastern part of the Jiangnan orogen: Evidence from ca, 800 ~ 760 Ma volcanic rocks. Precambrian Research, 222 ~ 223: 404 ~ 423.

Wang Yujing, Yang Qun, Yin Leiming, Shu Liangshu, Lou Fasheng, Wang Bo. 2006&. The putative " Radiolarian Cherts " from ophiolitic and metamorphic complexes in northeast Jiangxi: A Re-examination. Geological Journal of China Universities, 12 (1): 98 ~ 105.

Wang Ziqiang, Gao Linzhi, Ding Xiaozhong, Huang Zhizhong. 2012&. Tectonic Environment of the Metamorphosed Basement in the Jiangnan Orogen and Its Evolutional Features. Geological Review, 58(3):401 ~ 413.

Williams IS. 1989. U—Th—Pb Geochronology by Ion Microprobe. In: McKibben MA, Shanks WC III and Ridley WI(eds.). Applications of Microanalytical Techniques to Understanding Mineralizing Processes. Reviews in Economic Geology, Society of Economic Geologists, 7: 1 ~ 35.

Wu Rongxing, Zhong Yongfei, Wu Yuanbao. 2005&. Zircon U-Pb age, element and oxygen isotope geochemisty of Neoproterozoic granodiorites in South Anhui. Acta Petrologica Sinica, 21(3): 587 ~ 606.

Xing Fengming, Xu Xiang, Chen Jiangfeng, Zhou Taixi, Foland K A. 1992&. Sm-Nd isotopic age of Proterozoic ophiolites in northeastern Jiangxi and its geological significance. Acta Petrologica et

Mineralogica, 11(2): 120 ~ 124.

Xu Bei. 1989&. Development of researches on the proterozoic in South China. Geological Science and Technology Information, 8(1): 1 ~ 8.

Xu Bei. 1990&. Trench—arc—basin system of the northeastern Jiangxi and south Anhui province in late Proterozoic. Acta Geologica Sinica, 64(1): 33 ~ 42.

Xu Xianbing, Xue Dejie, Li Yuan, Hu Peng, Chen Nengsong. 2014. Neoproterozoic sequences along the Dexing—Huangshan fault zone in the eastern Jiangnan orogen, South China: Geochronological and geochemical constrains. Gondwana Research, 25(1): 368 ~ 382.

Xu Xianbing, Li Yuan, Tang Shuai, Xue Dejie, Zhang Zejun. 2015. Neoproterozoic to Early Paleozoic polyorogenic deformation in the southeastern margin of the Yangtze Block: Constraints from structural analysis and 40Ar/39Ar geochronology. Journal of Asian Earth Sciences, 98: 141 ~ 151.

Xue Huaimin, Ma Fang, Song Yongqin, Xie Yaping. 2010&. Geochronology and geochemisty of the neoproterozoic granitoid association from eastern segment of the jiangnan orogeny, China: constraints on the timing and process of amalgamation between the Yangtze and Cathaysia blocks. Acta Petrologica Sinica, 26 (11): 3215 ~ 3244.

Yang Minggui, Liu Yaguang, Huang Zhizhong, Wu Fujiang, Song Zhirui. 2012&. Subdivision of Meso—Neoproterozoic strata in Jiangxi and a correlation with the neighboring areas. Geology in China, 39(1): 43 ~ 53.

Yao Jinlong, Shu Liangshu, Santosh M. 2014. Neoproterozoic arc-related mafic—ultramafic rocks and syn-collision granite from the western segment of the Jiangnan Orogen, South China: Constraints on the Neoproterozoic assembly of the Yangtze and Cathaysia Blocks. Precambrian Research, 243(4): 39 ~ 62.

Yao Jinlong, Shu Liangshu, Santosh M, Li Jinyi. 2015. Neoproterozoic arc-related andesite and orogeny-related unconformity in the eastern Jiangnan orogenic belt: Constraints on the assembly of the Yangtze and Cathaysia blocks in South China. Precambrian Research, 262: 84 ~ 100.

Ye Meifang, Li Xianhua, Li Wuxian, Liu Ying, Li Zhengxiang. 2007. SHRIMP zircon U-Pb geochronological and whole-rock geochemical evidence for an early Neoproterozoic Sibaoan magmatic arc along the southeastern margin of the Yangtze Block. Gondwana Research, 12 (1 ~ 2): 144 ~ 156.

Yin Changqing, Lin Shoufa, Davis D W, Xing Guangfu, Davis W J, Cheng Guanghua, Xiao Wenjiao, Li Longming. 2013. Tectonic evolution of the southeastern margin of the Yangtze Block: Constraints from SHRIMP U-Pb and LA-ICP-MS Hf isotopic studies of zircon from the eastern Jiangnan Orogenic Belt and implications for the tectonic interpretation of South China. Precambrian Research, 236(5): 145 ~ 156.

Yu Xinqi. 2000&. Lantian Relict Synclinal Basin in South Anhui, not a tectonic window. Geological Review, 46(4):337 ~ 346.

Zhang Chuanlin, Santosh M, Zou Haibo, Li Huaikun, Huang Wencheng. 2013. The Fuchuan ophiolite in Jiangnan Orogen: Geochemistry, zircon U-Pb geochronology, Hf isotope and implications for the Neoproterozoic assembly of South China. Lithos, 179(10): 263 ~ 274.

Zhang Chuanlin, Zou Haibo, Zhu Qingbo, Chen Xiangyan. 2015. Late Mesoproterozoic to early Neoproterozoic ridge subduction along southern margin of the Jiangnan Orogen: New evidence from the Northeastern Jiangxi Ophiolite (NJO), South China. Precambrian Research, 268: 1 ~ 15.

Zhang Heng, Li Tingdong, Gao Linzhi, Geng Shufeng, Ding Xiaozhong, Liu Yanxue, Kou Caihua. 2015&. Zircon SHRIMP U-Pb dating, geochemical, zircon Hf isotopic features of the Mesoproterozoic Tieshajie Formation in Northereastern Jiangxi. Geological Review, 61(1): 66 ~ 78.

Zhang Heng. 2015&. Chronology and structural properties of late Precambrian stratigraphic in the southern margin of the eastern Jiangnan orogenic belt. Beijing: Dissertation submitted to Chinese Academy of Geological Sciences for doctoral degree, 1 ~ 118.

Zhang Shaobing, Wu Rongxin, Zheng Yongfei. 2012. Neoproterozoic continental accretion in South China: Geochemical evidence from the Fuchuan ophiolite in the Jiangnan orogen. Precambrian Research, 220 ~ 221(8): 45 ~ 64.

Zhang Yanjie, Zhou Xiaohua, Liao Shengbing, Yu Minggang, Jiang Ren, Jiang Yang. 2011&. Geological and geochemical characteristics and petrogenesis of the mafic rock from Zhangyuan, Northern Jiangnan orogeny. Geological Journal of China Universities, 17(3): 393 ~ 405.

Zhao Chonghe, He Kezhao, Mo Xuanxue. 1995#. Discovery of late Palaeozoic radiolarian-bearing chert in ophiolitic complexes of the rift zone, northeast Jiangxi, and the significance. Chinese Science Bulletin, 40(23): 2161 ~ 2163.

Zhao Chonghe, He Kezhao, Tai Daoqian, Le Changshuo, Nie Zetong. 1997&. $^{40}Ar/^{39}Ar$ Ages of major igneous in northeastern Jiangxi province. Geoscience, 22(3): 257 ~ 260.

Zhao Jianxin, Li Xianhua, Zhou Guoqing, Xing Fengming. 1995&. Petrogenesis of Ophiolites from south Anhui and northeast Jiangxi, and their tectonic implications: chemical and Sm-Nd isotopic constraints. Geochimica, 24(4): 311 ~ 326.

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. Journal of Asian Earth Sciences, 3(1 ~ 4):237 ~ 247.

Zhou Xiaohua, Gao Tianshan, Ma Xue, Zhang Yanjie, Liao Shengbing, Yu Minggang, Chen Dandan, Zhu Yanhui. 2014&. Study on geochrononogy and structural properties of pillow basalts in Zhangyuan region, eastern section of the Jiangnan orogeny. Resources Survey and Environment, 35(4): 235 ~ 244.

Zhou Xinmin, Zou Haibo, Yang Jiedong, Wang Yinxi. Sm-Nd isochron age of the Fuchuan Ophiolite Suite in Xixian, Anhui Province and its geological significance. Chinese Science Bulletin, 16: 1243 ~ 1245.

SHRIMP U-Pb Zircon Ages of the Northeastern Jiangxi Ophiolites and the Zhangcun Group and a Discussion on the Tectonic Evolution of the Jiangnan Orogen

LI Yuan[1)], XIE Hangqiang[1)], SONG Zhirui[2)]

1) *Beijing SHRIMP Center, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing*, 100037;

2) *Geological Survey of Jiangxi Province, Nanchang*, 330030

Objectives: The fragmentary ophiolite fragments distributed in the Jiangnan (south Yangtze) orogenic belt have important geological significance for constraining the tectonic evolution of the Jiangnan orogen. Combined with petrological study and SHRIMP U-Pb zircon ages of the northeastern Jiangxi ophiolites and the Zhangcun Group, we briefly discuss the tectonic evolution of the Jiangnan orogen.

Methods: Based on the field work, through the microscope observation, the whole rock chemical analysis, the the O isotopic analysis and SHRIMP U-Pb zircon dating of the Zhangshudun ophiolite and tuffaceous phyllite of of the Zhangcun Group.

Results: The geochemical analyses of mafic—ultramafic rocks in the Zhangshudun ophiolite show that the gabbro yields the MORB-like geochemical composition and the serpentinite is strongly depleted in the trace elements. The SHRIMP O isotope analyses of zircons in gabbro yield homogeneous O isotope ($5.12‰ \pm 0.62‰$, 2σ), similar to the O isotope of zircons in mantle ($5.3‰ \pm 0.3‰$). These geochemical characters support that these rocks represent remnants of ancient oceanic crust and upper mantle. SHRIMP U-Pb zircon analyses yields the formation age of 1009 ± 5 Ma (MSWD = 1.15) for the gabbro in the Zhangshudun ophiolite. As the surrounding rocks of the Northeastern Jiangxi ophiolite, the formation age of the Zhangcun Group is constrained by the SHRIMP U-Pb zircon dating of a tuffaceous phyllite which yields the formation age of 833 ± 10 Ma (MSWD = 1.5). This age suggests the emplacement of Northeastern Jiangxi ophiolite is later than 833 Ma.

Conclusions: Combined with the early research, we suggest that the Northeastern Jiangxi ophiolite formed at the mid-ocean ridge environment in late-Mesoproterozoic to early-Neoproterozoic, different from the mid-Neoproterozoic back-arc basin represented by the Fuchuan ophiolite in the south Anhui province. These new data provide new constrains for tectonic evolution of South China.

Keywords: Ophiolite; Zhangcun Group; SHRIMP U-Pb zircon dating; Zhangshudun; Northeastern Jiangxi; Jiangnan (south Yangtze) orogenic belt

Acknowledgements: This study was supported by the Natural Science Foundation of China (No. 41203042, 41472168) and the major instrument of the National science and technology project (No. 2011YQ05006909).

First author: LI Yuan, male, master student. Email: liyuan1627@163.com

Corresponding author: XIE Hangqiang, male, associate professor, mainly working on SHRIMP U-Pb zircon dating and Precambrian geology of the North China Craton. Email: rock@bjshrimp.cn

Manuscript received on: 2016-11-06; Accepted on: 2017-06-27; Edited by: ZHANG Yuxu.

Doi: 10.16509/j.georeview.2017.04.002