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

张恒,李廷栋,高林志,耿树方,丁孝忠,刘燕学,寇彩化 中国地质科学院地质研究所,北京,100037

内容提要:本文首次测得江西弋阳中元古界铁沙街组石英角斑岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 1154 ± 5 Ma。测 定发现铁沙街组石英角斑岩和流纹岩高 SiO₂(73.53% ~ 81.11%),低 CaO(0.06% ~ 0.11%)、Na₂O(0.05% ~ 2.77%),K₂O 为 2.16% ~ 6.43%和 Al₂O₃为 11.06% ~ 13.96%;在 Zr/TiO₂—Nb/Y 微量元素分类图解上绝大多 数样品落于碱性流纹岩区域;在 SiO₂—FeO/MgO 图解中绝大多数样品位于钙碱性岩石系列区域;稀土总量(Σ REE) 为 182.48×10⁻⁶ ~ 818.82×10⁻⁶,轻稀土较富集,铕明显负异常(δ Eu = 0.20 ~ 0.45);在原始地幔标准化图解中, 表现出亏损大离子亲石元素(Ba、Sr、Ti、P)和富集高场强元素(Nb、Ta、La、Ce、Zr、Hf、Sm)。铁沙街组石英角斑岩和流 纹岩的锆石的 $\varepsilon_{\rm Hf}(t)$ 值分别为 -6.1~5.3和 -2.3~4.8,两阶段 Hf 模式年龄分别为 1653~2380 Ma 和 1675~ 2132 Ma。锆石 Hf 同位素特征显示铁沙街组石英角斑岩、流纹岩的成因主要为岩石圈拆沉,深部地幔物质上涌,并由 此造成的古元古代晚期下地壳物质的部分熔融。综上认为,铁沙街组石英角斑岩和流纹岩形成于中元古界后造山 阶段的板内环境,可能与华夏陆块板内裂谷减薄开裂阶段的地幔物质上涌有关。

关键词:中元古界铁沙街组;石英角斑岩;流纹岩; SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄;锆石 Hf 同位素;元素地球化学;华夏 陆块;赣东北

华南地区包括扬子、华夏两个古陆块(乔秀夫 等,1981;李廷栋,1982,2006;水涛等,1986;周新民 等,1992;Charvet et al., 1996;Charvet, 2013;杨明桂 等,1997,2012;Li Xianhua et al.,2002;董传万等, 2007;陆慧娟,2007;王自强等,2012),作为这两个古 陆块拼接带的江南造山带及其两侧地层出露多样, 岩石组合复杂,为广大地质学者所关注。众多学者 通过最新的高精度测年方法以及地球化学研究,认 为整个江南造山带及其紧邻地层的时代 < 1000 Ma,属江南造山带构造体系(Li Xianhua, 1999; Li Xianhua et al., 2008, 2009; 王剑等, 2003; 王孝磊等, 2004; Zhou Jibin et al., 2007; Wang Xiaolei et al., 2007,2008; 高林志等,2008,2010a,2010b,2011, 2012, 2013a, 2013b, 2014; Zhou Jincheng et al., 2009; 王敏等, 2011; 周效华等, 2012; 张传恒等, 2014)。铁沙街组为该构造体系东南缘之间的一套 低绿片岩相浅变质岩系,通常被认为有别于区内其 它地层单元且为区内最老的地层。其紧邻江山一绍 兴断裂带和江南造山带,是解析扬子陆块和华夏陆 块俯冲、碰撞过程的一个重要地质单元,因而对铁沙 街组地层年代的厘定、构造环境的研究直接关系到 对华夏陆块和扬子陆块俯冲碰撞以及江南造山带演 化过程的认识,是查明华南地区前寒武纪构造演化 的重要组成部分,具有重要的意义。本文将给出铁 沙街组锆石 SHRIMP U-Pb 年龄、地球化学、锆石 Hf 同位素特征,进而探讨了铁沙街组在华南地区的大 地构造区划意义。

1 地质背景

赣东北铁沙街组仅出露于江山一绍兴断裂带以 南地区,为该带与扬子地台东南缘之间的一套浅变 质岩系。沿浙赣铁路线南,从叠山镇,弋阳铁沙街、 上张,西至贵溪市流口镇,呈EW条带状展布(图 1)。其南侧发育周潭组、洪山组和万源组等前寒武

注:本文为中国地质调查局项目(编号 121201011120131 和 1212011120117)和全国油气基础地质研究与编图项目(编号 2011ZX05043-005)的成果。

收稿日期:2014-01-15;改回日期:2014-12-22;责任编辑:黄敏。

作者简介:张恒,男,1985年生。博士研究生。研究方向为前寒武纪沉积和大地构造学。Email: heng0520@126.com。通讯作者:高林志, 男,1955年生。研究员。主要从事生物地层、层序地层、灾变事件地层研究。Email: gaolzh@ cags.ac.cn。



图 1 赣东北中元古界铁沙街组区域地质简图及采样位置 Fig. 1 Simplified geological map and sampling position of the Mesoproterozoic Tieshajie Formation in northeastern Jiangxi

纪地层;北侧发育江南造山带重要组成部分双溪坞 群和田里片岩。程海等(1991)认为铁沙街组不是 地层单元,而是一个混杂岩块,主要由一套中浅变质 片麻岩、片岩及板岩组成,夹大量以火山岩为主的岩 块。在构造位置上属于赣东北一皖南晚元古代沟弧 盆体系,为海沟或弧前沉积物及混杂岩系(徐备, 1990)。铁沙街组最早报道的细碧岩 Rb-Sr 等时线 年龄值为1159 Ma,石英角斑岩单颗粒锆石 U-Pb 年 龄为1201 ~ 1091 Ma(程海等,1991),流纹岩单颗 粒锆石 U-Pb 年龄为1196.1 ± 6.2 Ma,基本确定地 层属于中元古代晚期杂岩体系。程海等(1991)通 过变流纹岩样品的地球化学分析,刘树文等(2012) 依据赣东北地区浅变质玄武岩组合的地球化学特征 及成因,认为该套岩石组合形成于新元古代早期安 第斯活动大陆边缘弧后盆地构造背景。贺菊瑞等 (2008)则认为铁沙街组火山岩系形成于中元古代 蓟县纪扬子板块南缘或者华夏板块北缘的边缘裂陷 槽岛弧环境。从前人的研究得出铁沙街组为中元古 代地层,但对于铁沙街组构造环境存有争议,既有学 者认为其为沟弧盆体系混杂岩块,也有学者认为其 为裂陷槽岛弧环境。

2 岩相学及采样层位

铁沙街组是一套富含火山物质的复理石式变质 杂岩系,1:5万港口幅地质图[●]将铁沙街组分为上、 下两个亚组,二者在变质构造、构造环境、岩石组合



图 2 江西弋阳铁沙街组石英角斑岩的野外露头(a)及镜下特征(b) Fig. 2 Photos of the outcrop(a) and microscope(b) of quartz keratophyre from the Tieshajie Formation in Yiyang, Jiangxi

等方面存在较大差异。上亚组变质程度相对较深, 属中级变质相,并普遍发生混合岩化现象,以其下部 的斜长角闪岩类和长英质变粒岩类为特征,属海相 火山一沉积变质杂岩系。下亚组变质较浅,属低级 变质相,属海相火山岩系。下亚组三分标志明显,下 段是一套以浅变质泥砂质沉积岩为主,上部为夹中 厚层状大理岩的海相类复理石建造;中段为一套典 型细碧一石英角斑岩建造,也是一个重要的控矿层 位;上段为一套浅变质沉积岩系,部分层含炭,原岩 应为一套海相复理石泥砂质建造。

锆石同位素测试样品 10-22-10 采自铁沙街组 下亚组中段的石英角斑岩。采样位置: N28°15′ 43.3″、E117°24′50.5″。对岩石样品进行镜下观察, 其主要由斑晶、基质组成。斑晶主要由石英构成,大 小一般 0.2 ~ 0.5 mm,零散定向分布。石英半自 形一它形粒状,具波状、带状消光等,有的呈熔蚀状。 长石近半自形板状,被石英、绢云母等交代呈假像。 基质由长英质、新生矿物构成。长英质矿物主要呈 霏细一微晶状,粒径一般 < 0.1 mm,定向明显。新 生矿物为绢云母,鳞片状,片径 < 0.2 mm,首尾相接 定向分布,集合体多呈条纹状聚集分布。岩内见少 量被褐铁矿、石英等充填的裂纹及微裂隙。石英约 占 30%,长石约占 2% ~ 5%,长英质的基质约占 60%(图2)。

锆石 Hf 同位素测试样品 10-22-7 采自铁沙街 组下亚组中段的流纹岩。采样位置: N28°15.47′、 E117°24.36′。样品特征见高林志等(2013b)。

3 分析方法

3.1 锆石 U-Pb 年代学

锆石的分离在河北廊坊区域地质调查所实验室 进行, 锆石的阴极发光图像在北京离子探针中心 HITACHI S-3000N 扫描电镜上完成, 锆石 U-Pb 年龄 测定在西澳大利亚佩斯理工大学的 SHRIMP-II 上进 行, 详细的分析流程参考 Lance(Lance et al., 2003a, 2003b)。年龄测定时仪器质量分辨率约为 5000 (1%峰高),一次离子流 O²⁻强度为4 nA。一次离 子流束斑直径为 30 µm 左右,每个数据点测定由 5 次扫描构成。测定质量峰为⁹⁰Zr¹⁶O₂⁺、²⁰⁴Pb⁺,背景 值为²⁰⁶Pb⁺、²⁰⁷Pb⁺、²⁰⁸Pb⁺、²³⁸U⁺、(²³²Th¹⁶O)⁺和 (²³⁸U¹⁶O)⁺。分别采用标准锆石 TEM 和 M257 进行 元素间的分馏校正及 U 含量标定;其中 TEM 具有 U-Pb 谐和年龄,其²⁰⁶ Pb/²³⁸ U 年龄为 416.8 ± 1.1 Ma,但U、Th及Pb含量不均一; M257的²⁰⁶ Pb/²³⁸ U 年龄为840 Ma。原始数据的处理和锆石 U-Pb 谐和 图的绘制采用 Ludwig 博士编写的 Squid 和 Isoplot 程序(Ludwig,2002)。普通铅校正根据实测的²⁰⁴Pb 进行,普通铅的组成根据 Stacey 给出的模式计算得 到(Stacey et al., 1975)。表1年龄的误差为1σ绝 对误差,同位素比值的误差为1 σ 相对误差;文中所 使用²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄加权平均值为 95% 的置信度误 差。

3.2 全岩地球化学

地球化学分析样品被破碎至 200 目,其流程在 河北廊坊区域地质调查所实验室完成。主量元素采 用碱熔法制备样品,使用 X 射线荧光光谱议(XRF-1500)完成分析测试,分析精度高于 5%。微量、稀 土元素的分析采用酸溶法将样品稀释定容后,使用 等离子体质谱仪(ICP-MS)Element II测试完成。主 元素分析误差为 1%~5%,含量大于 20 μg/g 的微 量元素的分析误差为 5%~10%,含量小于 20 μg/g 的微量元素的分析相对误差为 1%~5%。

3.3 锆石 Hf 同位素

锆石进行 U-Pb 年龄测定后,再在原位用 LA-MC-ICP MS 进行 Lu-Hf 同位素分析,测试在中国地 质科学院矿产资源研究所国土资源部成矿作用与资 源评价重点实验室 Neptune 多接收等离子质谱和 Newwave UP213 紫外激光剥蚀系统(LA-MC-ICP-MS)上进行。实验过程中采用 He 作为剥蚀物质载 气,剥蚀直径为 55 μm,测定时使用锆石国际标样 GJ1 作为参考物质,分析点与 U-Pb 定年分析点为同 一位置。相关仪器运行条件及详细分析流程见侯可 军(2007),Elhlou 等(2006)。分析过程中锆石标准 GJ1 的 n (¹⁷⁶ Hf)/n (¹⁷⁷ Hf)测试加权平均值为 0.282008 ± 0.000025 (2σ , n = 26) (侯可军等, 2009)。

4 分析结果

4.1 锆石 U-Pb 年代学

铁沙街组石英角斑岩样品(10-22-10)锆石

的阴极发光图像 Cathodoluminescence(CL)特征:所 采锆石虽形态不尽相同,但是 CL 图像显示出典型 的岩浆生长振荡环带和韵律结构,均属于岩浆结晶 的产物(图3)。靶台上锆石样品在锆石的 CL 图像 显示下,对照可见光下的特征进行选样,排除裂隙发 育和较多包裹体的颗粒的锆石。全部样品的锆石晶 型完好,为浅黄色一无色透明钝圆形或柱状的晶体。 锆石粒度多在 100~200 μm 之间。锆石的 U、Th 含 量及 Th/U 比值:大量的研究表明,岩浆锆石的 U、 Th 含量较高,Th/U 比值较大(一般大于 0.5)。所 有锆石分析点均位于明显的岩浆环带部位。



图 3 江西弋阳铁沙街组石英角斑岩样品的锆石 CL 图像 Fig. 3 Cathodoluminescence images of zircons of quartz keratophyre from the Tieshajie Formation in Yiyang, Jiangxi

锆石 U-Pb 年龄:铁沙街组石英角斑岩样品(10-22-10)共测试了 13 个数据点,其中 U 含量变化范围 为 102 × 10⁻⁶ ~ 277 × 10⁻⁶; Th 含量变化范围为 68 × 10⁻⁶ ~ 284 × 10⁻⁶; Th/U 值变化范围为 0.53 ~ 1.06(表1)。13 个数据点均位于谐和线上,1 个数 据点(5.1)与主群不一致,时代较年轻,可能受到后 期热事件影响。其余 12 个数据点的²⁰⁶ Pb/²³⁸ U 年龄 为 1150 ± 12 Ma, 对应的 MSWD = 0.72 (图 4)。 ²⁰⁶ Pb/²³⁸ U年龄应代表了铁沙街组石英角斑岩的形 成时代。

高林志等(2013b)对铁沙街组四个流纹岩样品 进行了高精度的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄测定(1132 ±8 Ma,1140 ±7 Ma,1143 ±9 Ma 和1172 ±10 Ma), 结合本文铁沙街组石英角斑岩样品锆石 SHRIMP 年 龄(1150 ±12 Ma),铁沙街组的地层年代得到了进 一步厘定。





4.2 主量元素

石英角斑岩的主量元素成分列于表 2 中,SiO₂ 含量介于 75.30% ~ 81.11%,属酸性岩大类。由 于它是海相火山岩,经后期变质,斜长石已钠长石 化,暗色矿物已绿泥石化,属石英角斑岩大类。将火 山岩的标准矿物组成投影于 Zr/TiO₂—Nb/Y 图解 中(图5),恢复火山岩的原岩为流纹岩。按海相火 山岩命名法(曾广策等,1997),该火山岩被命名为 流纹质石英角斑岩,因只是一种岩石,可简称为石英 角斑岩。

69



图 5 江西弋阳铁沙街组石英角斑岩和流纹岩 Zr/TiO₂— Nb/Y 图解(底图据 Winchester et al., 1977)

Fig. 5 Zr/TiO_2 —Nb /Y diagram of quartz keratophyre and rhyolite from the Tieshajie Formation in Yiyang, Jiangxi (after Winchester et al., 1977)

石英角斑岩的 SiO₂ 含量为 75.30% ~ 81.11%, Al₂O₃ 含量为 11.06% ~ 13.52%, K₂O 含

表1 赣东北铁沙街组石英角斑岩锆石 SHRIMP U—Th—Pb 同位素测定结果 Table 1 SHRIMP U—Th—Pb isotopic compositions of quartz keratophyre for zircons from the Mesoproterozoic Tieshaiie Formation in northeastern Jiangxi

	²⁰⁶ Pb _c (%)	含量及比值				同位素比值							同位素年龄(Ma)			
测点		$ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $		$\frac{n({}^{207}\text{Pb}^{*})}{n({}^{206}\text{Pb}^{*})}$		$\frac{n(^{207} \text{Pb}^{*})}{n(^{235} \text{U})}$		$\frac{n(^{206} \text{Pb}^{*})}{n(^{238} \text{U})}$		误差 相关	$\frac{n(^{206}\text{Pb}^{*})}{n(^{238}\text{U})}$	$\frac{n(^{207} \text{Pb}^{*})}{n(^{206} \text{Ph}^{*})}$	不谐 和度			
					测值	(%)	测值	(%)	测值	(%)	系数	-(-)		(%)		
1.1	0.38	160	110	27.0	0.71	0.0820	1.3	2.233	2.4	0.1975	2.0	. 834	$1,162 \pm 24$	$1,125 \pm 54$	- 3	
2.1	0.04	170	87	27.6	0.53	0.0802	1.4	2.098	2.4	0.1897	1.9	. 818	$1,120 \pm 22$	$1,189 \pm 35$	6	
3.1	0.77	102	68	17.1	0.68	0.0869	1.7	2.335	2.7	0.1949	2.1	. 781	$1,148 \pm 25$	$1,106 \pm 110$	- 3	
4.1	0.08	233	220	38.5	0.97	0.0848	1.2	2.262	2.3	0.1934	1.9	. 846	$1,140 \pm 23$	$1,194 \pm 31$	5	
5.1	0.54	168	130	25.0	0.80	0.0876	1.3	2.116	2.4	0.1752	2.0	. 829	$1,041 \pm 21$	$1,076 \pm 56$	5	
6.1	0.39	155	117	25.8	0.78	0.0854	1.2	2.299	2.3	0.1952	1.9	. 847	$1,149 \pm 23$	$1,118 \pm 42$	- 2	
7.1	_	141	97	24.0	0.71	0.0820	1.4	2.244	2.5	0.1984	2.0	. 814	$1,167 \pm 24$	$1,252 \pm 46$	7	
8.1	0.52	123	68	20.6	0.57	0.0845	1.5	2.265	2.5	0.1943	2.0	. 809	$1,145 \pm 23$	$1,197 \pm 55$	5	
9.1	0.06	209	153	35.4	0.76	0.08227	1.1	2.250	2.2	0.1983	1.9	. 863	$1,166 \pm 22$	$1,147 \pm 35$	- 1	
10.1	0.59	153	110	25.8	0.74	0.0842	1.2	2.293	2.3	0.1975	1.9	. 841	$1,162 \pm 23$	$1,097 \pm 61$	- 5	
11.1		190	184	32.7	1.00	0.08444	1.1	2.349	2.2	0.2018	1.9	. 870	$1,185 \pm 24$	$1,213 \pm 22$	3	
12.1	0.27	277	284	47.0	1.06	0.08297	0.96	2.267	2.1	0.1982	1.8	. 887	$1,165 \pm 23$	$1,140 \pm 33$	- 2	
13.1	0.11	153	129	26.1	0.87	0.0846	1.2	2.321	2.3	0.1989	1.9	. 849	$1,169 \pm 23$	$1,201 \pm 34$	3	

注:样品10-22-10。

量为 2.16% ~ 5.27%, Na₂O 含量较低, 为 0.05% ~ 0.08%,可能因地层时代较老,且位于断裂带上, 受多期次构造活动影响,蚀变作用明显。TiO,含量 为 0.19% ~ 0.21%, MnO 含量为 0.01% ~ 0.028%, K, O 含量 2.16% ~ 5.27%, MgO 平均含 量为 0.29% ~ 0.54%, CaO 含量较低, 为 0.06% ~ 0.09%, P205 平均含量为 0.013% ~ 0.053%, K₂O + Na₂O = 2.21% ~ 5.35%,属钙碱性系列。 与石英角斑岩相比,流纹岩的 SiO₂ 含量(73.53%) ~ 76.59%)、P₂O₅(0.010% ~ 0.031%)含量略有 降低, Al₂O₃ (12.44% ~ 13.96%)、Na₂O (0.05% ~ 2.77%)、TiO₂ (0.17% ~ 0.33%)和 MnO (0.024% ~ 0.034%) 含量均略有升高, K₂O (3.58% ~ 6.43%)含量升高较多, MgO(0.25% ~ 0.46%)和CaO(0.06% ~ 0.11%)含量相近,全碱 含量(Na₂0 + K₂0)升高为 3.63% ~ 6.75%, 属高 钾钙碱性系列。结合岩石学特征,石英角斑岩普遍 高 SiO₂ 含量与岩石受后期热液蚀变生成的次生石 英有关,因此不适合采用 TAS 分类图解,应该采用 Zr/TiO₂—Nb/Y 微量元素分类图解,在此图解中石 英角斑岩和流纹岩样品均落于碱性流纹岩区域(图 5)。在 FeO—FeO/MgO 图解中,石英角斑岩和流纹 岩样品均落于钙碱性岩石系列区域(图6)。

4.3 稀土及微量元素

石英角斑岩、流纹岩的稀土、微量元素分析结果 见表3。在REE配分模式图上(图7a),两种样品总 体表现出相似的特征,石英角斑岩稀土元素总量偏 低,ΣREE = 182.48 × 10⁻⁶ ~ 718.07 × 10⁻⁶,平均



图 6 江西弋阳铁沙街组石英角斑岩和流纹岩 FeO—FeO/ MgO 图解(底图据 Miyoshi et al., 1977)

Fig. 6 FeO—FeO/MgO diagram of quartz keratophyre and rhyolite from the Tieshajie Formation in Yiyang, Jiangxi (after Miyoshi et al., 1977)

400.65×10⁻⁶; LREE = 181.83×10⁻⁶~640.72× 10⁻⁶, HREE = 29.36×10⁻⁶~89.31×10⁻⁶, LREE/ HREE = 3.01~8.28, (La/Yb) N = 3.58~11.03, 曲 线呈右倾型, 轻稀土较富集; 8Eu = 0.30~0.37, 8Ce = 0.60~0.99, 显示铕明显负异常, 表明岩浆经历了 一定程度的分离结晶作用。流纹岩稀土元素总量偏 高, SREE = 265.78×10⁻⁶~818.82×10⁻⁶, 平均 448.72×10⁻⁶; LREE = 185.57×10⁻⁶~746.62× 10⁻⁶, HREE = 39.88×10⁻⁶~80.39×10⁻⁶, LREE /

表 2 江西弋阳铁沙街组常量元素在各样品中的含量(%)

Table 2 Content (%)	of macro elements in	various rocks of the	Tieshajie Formation in	Yiyang, Jiangxi
· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·			.7	

			石英角	斑岩	流纹岩								
	18-12	18-13	18-14	18-15	18-16	19-1	19-2	18-1	18-2	18-3	18-4	18-5	18-6
SiO_2	78.52	81.11	79.04	78.06	78.74	75.30	78.63	76.04	75.84	73.53	76.26	74.99	76.59
$\mathrm{Al}_2\mathrm{O}_3$	11.94	11.06	11.41	12.50	11.80	13.52	11.66	13.16	12.71	12.44	13.67	13.96	12.69
TiO_2	0.19	0.19	0.19	0.21	0.20	0.21	0.19	0.17	0.21	0.33	0.29	0.20	0.25
$\mathrm{Fe}_2\mathrm{O}_3$	1.78	1.48	2.00	1.55	2.17	1.27	1.88	0.90	1.53	1.75	1.40	1.31	1.92
FeO	0.77	0.49	0.81	0.84	0.70	1.13	0.93	0.49	0.81	1.77	0.91	0.77	1.12
CaO	0.07	0.07	0.07	0.07	0.09	0.06	0.06	0.06	0.06	0.11	0.08	0.06	0.06
MgO	0.52	0.29	0.41	0.41	0.36	0.54	0.44	0.25	0.36	0.30	0.46	0.41	0.44
K20	3.39	2.16	3.87	3.49	2.81	5.27	3.93	6.43	6.27	4.81	3.58	6.02	4.52
Na_2O	0.06	0.05	0.08	0.07	0.08	0.08	0.05	0.32	0.12	2.77	0.05	0.08	0.06
MnO	0.020	0.019	0.020	0.024	0.028	0.011	0.010	0.024	0.029	0.034	0.028	0.024	0.028
P_2O_5	0.053	0.031	0.032	0.035	0.050	0.013	0.036	0.010	0.010	0.031	0.027	0.013	0.021
烧失	2.56	2.93	1.95	2.63	2.85	2.525	2.063	2.02	1.91	1.86	3.11	2.07	2.16
总量	99.85	99.89	99.87	99.87	99.86	99.90	99.88	99.88	99.88	99.73	99.86	99.90	99.86



图 7 江西弋阳铁沙街组石英角斑岩和流纹岩稀土元素球粒陨石标准化图解 (a)和微量元素 N-MORB 标准化图解(b)(标准化数据来自 Sun et al.,1989) Fig. 7 Chondrite-normalized rare earth element (a) and N-MORB normalized trace element (b) plots of quartz keratophyre and rhyolite from the Tieshajie Formation in Yiyang, Jiangxi (after Sun et al., 1989)

HREE = 2.31 ~ 10.64, (La/Yb)N = 3.49 ~ 22.30,曲 线呈右倾型,轻稀土较富集;δEu = 0.20 ~ 0.45, δCe = 0.44 ~ 1.17,显示铕明显负异常,表明岩浆经历 了一定程度的分离结晶作用。从石英角斑岩、流纹 岩原始地幔标准化微量元素蛛网图可以看出(图 7b),两种样品总体表现出相似的特征,所有样品均 表现出亏损大离子亲石元素 Ba、Sr、Ti、P 和富集高

场强元素 Nb、Ta、La、Ce、Zr、Hf、Sm 的特征。总体上 两种岩石样品微量和稀土元素也表现出类似于 A 型花岗岩的高 Zr 和低 Sr、Ba 的特征。

4.4 锆石 Hf 同位素

铁沙街组石英角斑岩和流纹岩的锆石 Hf 同位 素分析结果见表 4。铁沙街组石英角斑岩中 13 颗 锆石和流纹岩中 15 颗锆石的 n(¹⁷⁶Hf)/n(¹⁷⁷Hf)初



图 8 江南造山带地层年龄标定(据高林志等,2014 修改)

Fig. 8 Geochronological zircon U-Pb dating of the Jiangnan Orogenic Belt (according to Gao Linzhi et al., 2014 revised)

表3 江西弋阳铁沙街组微量元素、稀土元素在各样品中的含量(×10⁻⁶)

Table 3 Content($\times 10^{-6}$) of rare earth elements and trace elements in quartz keratophyre

and rhyolite from the Tieshajie Formation in Yiyang, Jiangxi

石英角斑岩									流纹岩					
	18-12	18-13	18-14	18-1	18-2	18-3	18-4	18-5	18-6					
Y	131.8	76.16	129.9	100.8	107.8	38.05	85.33	83.52	46.66	84.00	62.66	128.0	73.46	
La	122.0	81.42	56.41	76.87	143.6	43.85	50.45	242.9	66.31	93.06	105.0	59.87	49.52	
Се	255.4	140.8	89.36	134.3	293.9	53.89	84.82	240.2	141.2	205.0	237.5	52.10	114.2	
Pr	30.93	19.01	11.29	16.82	35.14	10.28	9.63	49.22	16.65	24.42	22.25	13.00	10.36	
Nd	123.0	75.08	40.99	63.71	139.2	37.22	30.83	181.7	61.77	95.49	80.54	49.28	36.46	
Sm	23.92	13.31	8.64	12.12	26.05	7.22	5.33	30.81	11.08	19.17	13.81	10.54	7.25	
Eu	2.51	1.55	1.23	1.43	2.74	0.67	0.78	1.82	0.70	2.72	1.75	0.78	0.82	
Gd	21.87	12.01	12.35	12.78	21.62	5.94	8.56	23.26	9.13	17.03	12.24	13.23	8.73	
Tb	4.01	2.31	2.89	2.64	3.76	1.25	2.23	3.58	1.75	2.89	2.03	3.56	1.94	
Dy	25.84	15.26	21.43	18.33	23.18	8.12	16.08	19.54	11.72	17.35	12.33	26.35	13.87	
Но	5.18	2.99	4.43	3.64	4.26	1.60	3.22	3.49	2.25	3.24	2.46	5.30	2.81	
Er	15.29	8.82	12.91	10.64	12.10	5.17	9.77	9.90	6.78	9.18	7.42	15.45	8.55	
Tm	2.33	1.35	2.07	1.68	1.77	0.89	1.55	1.46	1.09	1.36	1.18	2.38	1.44	
Yb	12.85	7.29	11.29	9.00	9.35	5.50	8.34	7.81	6.17	7.25	7.04	12.30	8.29	
Lu	1.94	1.01	1.60	1.26	1.31	0.89	1.01	1.15	1.00	1.18	1.18	1.82	1.57	
ΣREE	647.09	382.21	276.89	365.24	718.07	182.48	232.59	816.82	337.59	499.38	506.78	265.96	265.78	
LREE/HREE	6.25	6.49	3.01	5.09	8.28	5.22	3.58	10.64	7.46	7.39	10.04	2.31	4.63	
LaN/YbN	6.81	8.01	3.58	6.13	11.03	5.71	4.34	22.30	7.71	9.20	10.70	3.49	4.29	
δEu	0.33	0.37	0.36	0.35	0.34	0.30	0.35	0.20	0.21	0.45	0.40	0.20	0.32	
Li	21.39	26.46	20.83	35.29	109.4	24.86	26.73	24.84	27.60	8.43	82.56	67.07	146.9	
Be	3.31	2.85	4.01	3.84	3.74	5.10	4.74	3.73	5.59	2.58	6.70	4.68	5.62	
Sc	6.26	5.73	6.12	6.42	6.23	1.5	1.7	5.78	5.74	6.66	6.53	5.92	6.35	
V	113.1	104.7	119.0	111.4	135.9	5.3	5.5	114.9	117.7	122.7	126.0	124.0	135.0	
Cr	22.0	20.3	22.5	21.5	25.9	1.6	2.1	20.9	21.9	22.2	22.7	22.6	24.2	
Co	0.5	0.3	0.2	0.4	0.3	0.6	0.2	0.4	0.6	0.9	1.7	0.4	1.8	
Ni	1.5	0.7	0.4	0.5	0.6	1.0	1.1	0.6	0.6	0.7	0.8	0.5	1.1	
Cu	8.7	6.5	8.0	7.1	6.9	1.9	2.8	6.1	7.7	7.1	8.8	7.7	6.9	
Zn	47.2	28.8	43.7	47.9	94.8	47.5	48.7	36.3	47.8	26.8	43.5	44.3	67.4	
Ga	31.77	22.50	26.86	32.45	30.92	37.94	28.63	24.98	33.80	23.53	33.66	27.63	29.52	
Rb	107.9	70.3	114.6	112.0	97.8	164.7	99.5	178.7	213.4	146.5	176.6	241.8	251.3	
Sr	7.5	9.1	21.4	19.0	5.4	43.9	20.0	12.1	9.6	35.2	29.5	7.3	11.7	
Zr	527.6	515.5	510.0	584.8	550.1	418.0	562.2	369.9	412.3	761.0	670.0	420.0	527.8	
Nb	72.24	88.90	79.80	96.46	94.22	54.78	93.42	101.6	103.4	81.69	67.19	109.0	79.17	
Cs	2.72	1.95	3.24	2.52	2.67	2.73	2.53	4.65	3.67	2.50	3.31	9.41	6.42	
Ba	573.0	366.7	415.1	421.5	419.2	366.8	368.0	497.5	515.6	1188	444.1	401.3	523.5	
Hf	16.92	16.54	16.15	18.99	18.49	14.60	18.88	12.91	14.40	19.33	18.86	14.58	15.20	
Ta	5.84	4.99	4.85	6.64	5.97	5.96	5.97	5.04	7.49	3.93	4.90	7.20	5.68	
Pb	23.85	13.71	19.72	12.21	117.7	4.3	19.0	7.19	8.07	8.39	11.09	9.32	6.45	
Bi	0.27	0.20	0.12	0.06	0.26	0.04	0.19	0.03	0.03	0.02	0.04	0.14	0.09	
Th	12.49	9.94	8.42	9.45	16.06	17.20	14.61	19.83	24.39	14.30	17.97	22.92	19.63	
U	2.36	2.29	2.55	2.47	3.19	3.52	1.94	1.99	2.86	1.80	2.76	3.78	5.05	

始比值分别为 0. 281870 ~ 0. 282193 和 0. 281983 ~ 0. 282188; $\varepsilon_{\rm HI}(t)$ 值分别为 -6.1 ~ 5.3 和 -2.3 ~ 4.8,大多数锆石的 $\varepsilon_{\rm HI}(t)$ 值为正,流纹岩锆石的 $\varepsilon_{\rm HI}(t)$ 值久百一个为负;两阶段 Hf 模式年龄($t_{\rm DM2}$)分别为 1653 ~ 2380 Ma 和 1675 ~ 2132 Ma,石英角 斑岩两阶段 Hf 模式年龄多数大于流纹岩两阶段 Hf

模式年龄。

5 讨论

5.1 地层时代

铁沙街组最早报道的细碧岩 Rb-Sr 等时线年龄 值为1159 Ma,石英角斑岩单颗粒锆石 U-Pb 年龄为



图 9 江西弋阳铁沙街组石英角斑岩和流纹岩 SiO₂—FeO/(FeO + MgO)和 SiO₂—TFeO/(TFeO + MgO)构造环境判别图 解(底图据 Maniar et al., 1989)

IAG + CAG + CCG—岛弧型 + 陆弧型 + 大陆碰撞型; POG—后造山型; RRG + CEUG—裂谷型 + 大陆隆起型 Fig. 9 SiO₂—FeO/(FeO + MgO) and SiO₂—TFeO/(TFeO + MgO) diagram of quartz keratophyre and rhyolite from the Tieshajie Formation in Yiyang, Jiangxi (after Maniar et al., 1989)IAG + CAG + CCG—island-arc granite + Continental-arc granite + Continental-collision granite; POG—post-orogenic type granite; RRG + CEUG-rift related granite + continental epeirogenic uplift granite

1201~1091 Ma(程海等,1991),变流纹岩单颗粒锆 石 U-Pb 年龄为 1196.1±6.2 Ma,确定地层时代为 中元古代晚期。但是由于受当时仪器及技术条件的 限制,这些地层年代数据存有较大的误差,高林志等 (2013b)以及本文测定了四组流纹岩和一组石英角 斑岩的 SHRIMP U-Pb 锆石年龄,精确地限定了铁沙 街组的地层时代,进而为完善江山一绍兴断裂带两 侧前寒武纪地层的年代厘定和推演江南造山带的演 化过程具有重要的意义。

铁沙街组位于江南造山带的南缘,而纵观作为 扬子陆块和华夏陆块拼接带的江南造山带的地层, 除铁沙街组至今已经获得时代的地层均 < 1000 Ma (图 8),可以推断铁沙街组并不是扬子陆块和华夏 陆块俯冲碰撞时期的产物,而应是来自于俯冲碰撞 前的华夏陆块。

5.2 构造背景

铁沙街组石英角斑岩和流纹岩属钙碱性岩石系 列(图5~6)。石英角斑岩和变流纹岩均显示铕明 显负异常(图7a),显著低于地壳平均组分的δEu值 (0.96),表明岩浆经历了一定程度的分离结晶作 用。总体上两种酸性岩样品微量和稀土元素也表现 出类似于A型花岗岩的高Zr和低Sr、Ba的特征。A 型流纹岩常与同期玄武岩形成双峰式火山岩组合, 且玄武岩大多为弱碱一碱性(于津海等,1997,1998; 邱检生等,1999,2000;Li Xianhua et al.,2002;Li Wuxian et al.,2005;White et al.,2006)。一般认为 A 型流纹岩为 A 型花岗岩喷出相的产物,为下地壳 麻粒岩相或古老基底变质岩相部分熔融的产物(于 津海等,1997,1998;Li Xianhua et al.,2002;Li Wuxian et al.,2005),相伴生的玄武岩为幔源岩浆 与下地壳物质相互作用的产物(邱检生等,1999,2000),二者并非同源岩浆演化而成。

实验研究表明,A型花岗岩可能是在低压下形成的(Anderson et al., 1989; Patiño Douce et al., 1997; Breiter, 2012),即其更易产出于地壳浅部,形成于地壳减薄环境,出现在碰撞后和板内构造环境,为减薄的地壳部分熔融的产物(张旗等, 2012)。

使用主量元素判别图解进行构造环境的判别, 在 SiO₂—FeO/(FeO + MgO)和 SiO₂—TFeO/(TFeO + MgO)图解中,石英角斑岩和流纹岩大部分样点落 于后造山花岗岩岩石类型区(图9)。使用微量元素 Rb—(Yb + Ta)、Rb—(Y + Nb)、Ta—Yb和 Nb—Y 花岗岩构造环境判别图解,石英角斑岩和流纹岩均 落于板内花岗岩岩石类型区(图10)。

5.3 物质来源及地球动力学背景

锆石化学性质稳定,封闭温度高,Lu/Hf比值低,不受部分熔融作用的影响,使得锆石 Hf 同位素 组成可以记录岩浆源区不同性质的原岩特征,成为 讨论岩浆甚至是探讨地壳演化以及壳幔相互作用过 程的重要工具。

表4 江西弋阳铁沙街组石英角斑岩、流纹岩的锆石 Hf 同位素分析结果

Table 4 Zircon Hf isotopic compositions of the quartz keratophyre and rhyolite from the Mesoproterozoic

.....

. .

resnajie formation in northeast jiangxi												
占旦	$t(\mathbf{M}_{\mathbf{a}})$	<u>n(176 Yb)</u>	<u>n(176 Lu)</u>	n(¹⁷⁶ Hf)	/n(¹⁷⁷ Hf)	<u>n(176 Hf)</u>	$\mathbf{s}_{m}(t)$	t _{DM} (Ma)	t (Ma)	fr		
品与	i(ma)	$n(^{177}{ m Hf})$	$n(^{177}{ m Hf})$	测值	$2\sigma_{\rm m}$	<i>n</i> (¹⁷⁷ Hf)	$e_{\rm Hf}(v)$	^{<i>v</i>} _{DM} (ma)	^{<i>v</i>} _{DM2} (ma)	¹ Lu∕Hf		
10-22-10(石英角斑岩)												
10-22-10-01	1162	0.068715	0.002003	0.282237	0.000017	0.282193	5.3	1472	1653	-0.94		
10-22-10-02	1120	0.024842	0.000850	0.282087	0.000027	0.282069	-0.1	1635	1961	-0.97		
10-22-10-03	1148	0.051276	0.001690	0.282110	0.000021	0.282074	0.7	1640	1934	-0.95		
10-22-10-04	1140	0.062451	0.002084	0.282161	0.000020	0.282116	2.0	1584	1842	-0.94		
10-22-10-05	1041	0.113964	0.002809	0.282169	0.000029	0.282114	-0.3	1605	1913	-0.92		
10-22-10-06	1149	0.150243	0.004127	0.282041	0.000036	0.281952	-3.6	1859	2208	-0.88		
10-22-10-07	1167	0.070694	0.002251	0.282120	0.000023	0.282070	1.0	1651	1929	-0.93		
10-22-10-08	1145	0.034868	0.001156	0.282143	0.000014	0.282118	2.2	1570	1835	-0.97		
10-22-10-09	1166	0.042200	0.001449	0.282053	0.000027	0.282021	-0.7	1710	2040	-0.96		
10-22-10-10	1162	0.076614	0.002220	0.282140	0.000034	0.282091	1.6	1621	1885	-0.93		
10-22-10-11	1185	0.126756	0.003348	0.282116	0.000028	0.282041	0.4	1707	1983	-0.90		
10-22-10-12	1165	0.065633	0.002025	0.281915	0.000158	0.281870	-6.1	1933	2380	-0.94		
10-22-10-13	1169	0.052235	0.001791	0.282191	0.000019	0.282151	3.9	1529	1744	-0.95		
	1	I	10-22-7(流纹	岩)(<i>t</i> 数据测	则试分析据高材	木志等,20131	o)		1	1		
10-22-7-01	1149	0.032750	0.001092	0.282211	0.000014	0.282188	4.8	1472	1675	-0.97		
10-22-7-02	1156	0.042281	0.001372	0.282149	0.000016	0.282119	2.5	1572	1826	-0.96		
10-22-7-03	1135	0.021400	0.000715	0.282205	0.000014	0.282190	4.5	1467	1680	-0.98		
10-22-7-04	1151	0.023320	0.000807	0.282173	0.000013	0.282156	3.7	1514	1746	-0.98		
10-22-7-05	1153	0.031988	0.001081	0.282185	0.000015	0.282162	3.9	1509	1731	-0.97		
10-22-7-06	1151	0.037795	0.001165	0.282176	0.000018	0.282151	3.5	1524	1756	-0.96		
10-22-7-07	1150	0.031806	0.000987	0.282199	0.000013	0.282177	4.4	1486	1698	-0.97		
10-22-7-08	1168	0.025616	0.000874	0.282153	0.000016	0.282134	3.3	1545	1784	-0.97		
10-22-7-09	1150	0.030006	0.001015	0.282153	0.000015	0.282131	2.8	1550	1802	-0.97		
10-22-7-10	1171	0.025701	0.000875	0.282154	0.000014	0.282135	3.4	1543	1780	-0.97		
10-22-7-11	1165	0.022674	0.000784	0.282186	0.000021	0.282169	4.5	1496	1707	-0.98		
10-22-7-12	1172	0.040455	0.001257	0.282199	0.000015	0.282172	4.7	1496	1696	-0.96		
10-22-7-13	1176	0.026337	0.000902	0.282184	0.000016	0.282164	4.6	1502	1710	-0.97		
10-22-7-14	1159	0.061692	0.001572	0.282017	0.000062	0.281983	-2.3	1766	2132	-0.95		
10-22-7-15	1181	0.021071	0.000736	0.282182	0.000018	0.282166	4.7	1499	1704	-0.98		

铁沙街组石英角斑岩样品 10-22-10 的 ε_{Hf}(t)值 为-6.1 ~ 5.3,平均为 0.5。二阶段 Hf 模式年龄 介于 1653 ~ 2380 Ma,平均为 1761 Ma;铁沙街组流 纹岩样品 10-22-7 的 ε_{Hf}(t)值较高,为 - 2.3 ~ 4.8, 平均为 3.5。二阶段 Hf 模式年龄介于 1675 ~ 2132 Ma,平均为 1947 Ma。Hf 同位素特征显示铁沙街组 石英角斑岩和流纹岩主要来自于古元古代晚期地幔 物质,同时加入了部分下地壳的组分。流纹岩 ε_н (*t*)值较高,说明地幔组分对其成岩贡献更大。

铁沙街组石英角斑岩和流纹岩部分 ε_{Hf}(t)值为 负值,显示部分物质来自于下地壳(图 11)。结合铁 沙街组构造环境,在华夏陆块减薄开裂阶段,岩石圈



图 10 江西弋阳铁沙街组石英角斑岩和流纹岩 Y—Nb 和 Y + Nb—Rb 构造环境判别图解(底图据 Pearce et al., 1984) VAG—火山弧型; Syn-COLG—同碰撞型; WPG—板内型; ORG—洋脊型

Fig. 10 Y—Nb and Y + Nb—Rb diagram of quartz keratophyre and rhyolite from the

Tieshajie Formation in Yiyang, Jiangxi (after Pearce et al., 1984)

VAG-volcanic-arc granite; Syn-COLG-syn-collision granite; WPG-within plate grantie; ORG-ocean-ridge granite







拆沉,深部地幔上涌和伴随的拉张作用导致了基底 岩石发生部分熔融,形成了铁沙街组。在侵入过程 中,铁沙街组石英角斑岩带入了更多的下地壳物质, 而作为直接喷出的产物,铁沙街组流纹岩则只熔入 了极少的下地壳物质。铁沙街组锆石 Hf 同位素组 成也从另一面方面佐证了铁沙街组的构造背景。

综合以上分析,江西弋阳铁沙街组石英角斑岩 和流纹岩形成于江南造山带之前的后造山阶段的板 内环境,可能产生在板内裂谷减薄开裂阶段,主要来 源于地幔物质的上涌,同时在上涌过程中熔融了部 分下地壳组分。作为华夏陆块和扬子陆块拼接碰撞 带的江南造山带出露的地层普遍 < 1000 Ma,因此, 笔者推断铁沙街组形成于华夏陆块内部减薄开裂阶 段,铁沙街组来自于华夏陆块。

6 结论

(1) 江山—绍兴断裂带铁沙街组石英角斑岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为1154 ± 5 Ma,结合已经 获得的铁沙街组流纹岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄,进 一步厘定了铁沙街组的地层时代为中元古代晚期。

(2)铁沙街组石英角斑岩、流纹岩为钙碱性岩 石系列,铕明显负异常,亏损大离子亲石元素和富集 高场强元素,表现出类似于 A 型花岗岩的特征。

(3) 锆石 Hf 同位素特征显示铁沙街组石英角 斑岩、流纹岩的成因主要为岩石圈拆沉,深部地幔物 质上涌,并由此造成的古元古代晚期下地壳物质的 部分熔融。

(4) 江西弋阳铁沙街组石英角斑岩和流纹岩形成于江南造山带之前的后造山阶段的板内环境,产生于板内裂谷环境地壳减薄开裂阶段,物质来自华夏陆块。

致谢:国家科技基础条件平台北京离子探针中 心的孙会一硕士、杨淳高工和李宁工程师在装收样 品、仪器调试、仪器监控和数据处理方面提供了帮助。中国地质大学(北京)王自强教授、中国地质科 学院地质所史兴俊博士在成文过程中给予了有益的 建议。两位审稿人对本文提出了富有建设性的意 见。黄敏编辑对本文的修改校正付出了辛勤的工 作。作者在此一并表示感谢。

注释 / Note

● 江西省地质矿产局调研大队. 1993. 港口幅1:5 万区域地质调查 报告.

参考文献 / References

- 程海,胡世玲,唐朝辉.1991.赣东北铁沙街变质混杂岩块的同位素年 代.中国区域地质,(2):151~154.
- 董传万,杨永峰,闫强,竺国强.2007.浙江花岗岩地貌特征与形成过程. 地质论评,53:132~137.
- 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. 2010a. 黔东 地区下江群凝灰岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地层意义. 中国 地质,37(4):1071~1082.
- 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. 2010b. 黔东南一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,戴传固,丁孝忠,王敏,刘燕学,王雪华,陈建书.2011.侵入梵 净山群白岗岩锆石 U-Pb 年龄及白岗岩底砾岩对下江群沉积的 制约.中国地质,38(6):1111~118.
- 高林志,黄志忠,丁孝忠,刘燕学,庞健峰,张传恒.2012. 赣西北新元 古代修水组和马涧桥组 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄. 地质通报,31 (7):26~33.
- 高林志,陆济璞,丁孝忠,丁孝忠,王汉荣,刘燕学,李江.2013a. 桂北 地区新元古代地层凝灰岩锆石 U-Pb 年龄及地质意义. 中国地 质,40(5):1443~1452.
- 高林志,刘燕学,丁孝忠,宋志瑞,黄志忠,张传恒,张恒,史志刚. 2013b. 江山—绍兴断裂带铁沙街组流纹岩 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. 2014. 江山—绍兴断裂带陈蔡岩群片麻岩锆石 U-Pb 年龄及地质 意义. 地质通报,33(5):641~648.
- 贺菊瑞,王爱国,芮行健,曾勇,李春海.2008.江西弋阳铁砂街中元古 代海底火山喷流成矿作用.资源调查与环境,29(4):261~269.
- 侯可军. 2007. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应 用. 岩石学报,23(10):2595~2604.
- 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. 矿床地质,28(4):481~492.
- 李廷栋. 1982. 中国构造运动期序和构造发展阶段. 中国区域地质, 1:13~25.
- 李廷栋. 2006. 中国岩石圈构造单元. 中国地质, 33(4):700~710.
- 刘树文,杨朋涛,王宗起,罗平,王永庆,罗国辉,王伟,郭博然.2012. 赣东北婺源一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.
- 陆慧娟,华仁民,毛光周,龙光明.2007.赣东北地区岩浆岩同位素年

代学研究及地质演化. 地质论评,53(2):207~216.

- 乔秀夫, 耿树方. 1981. 华南晚前寒武纪古板块构造. 中国及其邻区 大地构造论文集. 北京: 地质出版社, 77~91.
- 邱检生,王德滋.1999. 福建永泰云山晚中生代双峰式火山岩的地球 化学及岩石成因. 岩石矿物学杂志,18(2);97~107.
- 邱检生,王德滋.2000.福建永泰云山碱性流纹岩的厘定及其地质意义.地质论评,46(5):520~529.
- 水涛,徐步台,梁如华. 1986. 江山—绍兴古陆对接带. 科学通报, (6):444~448.
- 王剑,李献华, Duan T Z, 刘敦一, 宋彪, 李忠雄, 高永华. 2003. 沧水铺 火山岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及"南华系"底界新证据. 科学 通报, 48(16): 1726~173.
- 王敏,戴传固,王雪华,陈建书,马会珍.2011.贵州梵净山白云母花岗 岩锆石年代、铪同位素及对华南地壳生长的制约. 地学前缘,18 (5):213~223.
- 王孝磊,周金城,邱检生,高剑峰.2004. 湘东北新元古代强过铝花岗 岩的成因:年代学和地球化学证据. 地质论评,50(1):65~76.
- 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.
- 徐备.1990.论赣东北一皖南晚元古代沟弧盆体系. 地质学报,1:33 ~42.
- 杨明桂,梅勇文.1997. 钦一杭古板块结合带与成矿带的主要特征. 华南地质与矿产,(3):52~59.
- 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.
- 于津海,王德滋,王赐银.1997.山西吕梁群早元古代双峰式火山岩地 球化学特征及成因.岩石学报,13(1):59~70.
- 于津海,王德滋.1998.一个古元古代A型流纹岩.地球化学,27(6): 549~558.
- 曾广策,肖玉永,邱家骧,朱云海.1997.对细碧一石英角斑岩系种属 划分和命名的建议.地质科技情报,16(12):19~23.
- 张传恒,高林志,史晓颖,韩瑶,刘耀明.2014. 梵净山群火山岩锆石 SHRIMP 年龄及其年代地层学意义. 地学前缘,21(2):139~143.
- 张旗,冉皞,李承东. 2012. A 型花岗岩的实质是什么? 岩石矿物学杂志,31(4):621~626.
- 周新民,朱云鹤.1992.江绍断裂带的岩浆混合作用及其两侧的前寒 武纪地质.中国科学(B辑),(3):296~303.
- 周效华,张彦杰,廖圣兵,余明刚,陈志洪,赵希林,姜杨,蒋仁.2012. 皖赣相邻地区双桥山群火山岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及 其地质意义. 高校地质学报,18(4):609~622.
- Anderson J L, Bender E E. 1989. Nature and origin of Proterozoic A-type granitic magmatism in the southwestern United States of America. Lithos ,23 :19 ~ 52.
- Breiter K. 2012. Nearly contemporaneous evolution of the A- and S-type fractionated granites in the Kruinory/Erzgebirge Mts., Central Europe. Lithos, 151(15):105~121.
- Charvet J, Shu Liangshu, Shi Yangshen, Guo Lingzhi, Faure M. 1996. The building of south China: collision of Yangtze and Cathaysia blocks, problems and tentative answers. J. SE Asian Earth Sci., 13 (3 ~ 5):223 ~ 235.
- Elhlou S, Belousova E, Griffin W L, Pearson N J. 2006. Trace element and isotopic composition of GJ-red zircon standard by laser ablation. Geochim. Cosmochim. Acta, (Suppl.), A158.
- Charvet J. 2013. The Neoproterozoic—Early Paleozoic tectonic evolution of the South China Block: An overview. Journal of Asian Earth Sciences,74:198 ~ 209.
- Lance P B, Sandra L K, Charlotte M A, John N A, Donald W D, Russell J

K, Chris F. 2003a. TEMORA 1: a new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology. Chemical Geology, $200(1 \sim 2)$: 155 ~ 170.

- Lance P B, Sandra L K, Ian S W, Roland M, Donald W D, Russell J K, Chris F. 2003b. The Application of SHRIMP to Phanerozoic geochronology; a critical appraisal of four zircon standards. Chemical Geology, 200(1~2):171~188.
- Ludwig K R. 2002. SQUID 1. 02, a user ´s manual. Berkeley Geochronology Center Special Publication No. 2. 2455 Ridge Road, Berkeley, CA 94709, USA.
- Li Xianghua. 1999. U-Pb zircon ages of granites from the southern margin of the Yangtze Block: timing of Neoproterozoic Jinning: Orogeny in SE China and implications for Rodinia Assembly. Precambrian Research,97:43 ~58.
- Li Xianhua, Li Zhengxiang, Zhou Hanwen, Liu Ying, Kinny P D. 2002. U-Pb zircon geochronology, geochemistry and Nd isotopic study of Neoproterozoic bimodal volcanic rocks in the Kangdian Rift of South China: Implications for the initial rifting of Rodinia. Precambrian Research, 113:135~154.
- Li Xianhua, Li Wuxian, Li Zhengxiang, Liu Ying. 2008. 850 ~ 790 Ma bimodal volcanic and intrusive rocks in northern Zhejiang, South China: a major episode of continental rift magmatism during the breakup of Rodinia. Lithos, 102(1 ~ 2):341 ~ 357.
- Li Xianhua, Li Wuxian, Li Zhengxian, Lo Qinghua, Wang Jian, Ye Meifang, Yang Yueheng. 2009. Amalgamation between the Yangtze and Cathaysia Blocks in South China: constraints from SHRIMP U-Pb zircon ages, geochemistry and Nd—Hf isotopes of the Shuangxiwu volcanic rocks. Precambrian Research, 174:117~128.
- Li Wuxian, Li Xianhua, Li Zhengxiang. 2005. Neoproterozoic bimodal magmatism in the Cathaysia Block of South China and its tectonic significance. Precambrian Research, 136:51~66.
- Miyoshi T, Sakai H, Chiba H. 1984. Experimental study of sulphur isotope fractionation factors between sulphate and sulphide in high temperature melts. Geochemical Journal, 18: 75 ~ 84.
- Maniar P D, Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. Geol. Soc. Am. Bull, 101:635 ~643.

Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. 1984. Trace element

discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. Journal of Petrology, 25:956 ~983.

- Patiño Douce A E. 1997. Generation of metaluminous A-type granites by low-pressure melting of calc-alkaline granitoids. Geology, 25:743 ~ 746.
- Stacey J S, Kramers J D. 1975. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by two-stage model, Earth Planet. Sci. Lett. ,26:207 ~ 221.
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes// Saunders A D, Norry M J. Magmatism in the Ocean Basin. Geological Society Special Publication,42:313 ~ 345.
- Wang Xiaolei, Zhou Jincheng, Griffin W L, Wang Rucheng, Qiu Jiansheng, O'Reilly S Y, Xu Xisheng, Liu Xiaoming, Zhang Guilin. 2007. Detrital zircon geochronology of Precambrian basement sequences in the Jiangnan orogen: dating the assembly of the Yangtze and Cathysia blocks. Precambrian Research, 159:117 ~ 131.
- 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, 18(14):355 ~ 367.
- Winchester J A, Floyd P A. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. Chemical Geology, 20:325 ~ 343.
- White J C, Benker S C, Ren M, Urbanczyk K M, Corrick D W. 2006. Petrogenesis and tectonic setting of the peralkaline Pine Canyoncaldera, Trans-Pecos Texas, USA. Lithos,91:74~94.
- Zhou Jibin, Li Xianhua, Ge Wenchun, Li Zhengxiang. 2007. Age and origin of middle Neoproterozoic mafic magmatism in southern Yangtze Block and relevance to the break-up of Rodinia. Gondwana Research, 12(1~2):184~197.
- Zhou Jincheng, Wang Xiaolei, Qiu Jiansheng. 2009. Geochronology of Neoproterozoic mafic rocks and sandstones from northeastern Guizhou, South China: coeval arc magmatism and sedimentation. Precambrian Research, 170:27 ~ 42.

Zircon SHRIMP U-Pb Dating, Geochemical, Zircon Hf Isotopic Features of the Mesoproterozoic Tieshajie Formation in Northeastern Jiangxi

ZHANG Heng, LI Tingdong, GAO Linzhi, GENG Shufang, DING Xiaozhong, LIU Yanxue, KOU Caihua Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037

Abstract: Zircon SHRIMP U-Pb dating of quartz keratophyre is first time to report from the Tieshajie Formaion (1154 ± 5 Ma), Mesoproterozoic. The quartz keratophyre and rhyolite from the Tieshajie Formaion, with high SiO₂ (73.53% ~ 81.11%), low CaO (0.06% ~ 0.11%), low Na₂O (0.05% ~ 2.77%), Al₂O₃ (11.06% ~ 13. 96%), and K₂O (2.16% ~ 6.43%). The quartz keratophyre and rhyolite belongs to alkali rhyolite rock series showed in the classification diagram of Zr/TiO₂—Nb/Y and calc-alkaline rock series showed in the SiO₂— FeO/ MgO diagram. The rocks have higher REE contents (182.48 × 10⁻⁶ ~ 818.82 × 10⁻⁶) with relative enrichment of LREE and negative Eu anomaly (δ Eu = 0.20 ~ 0.45). The primitive mantle normalized trace element patterns are characterized by the depletion of the LILE (Ba, Sr, Ti, P) and enrichment of the HFSE (Nb, Ta, La, Ce, Zr, Hf, Sm). The $\varepsilon_{\rm Hf}(t)$ values and two-staged Hf model ages of the quartz keratophyre and rhyolite from the Tieshajie

Formaion are $-6.1 \sim 5.3$ and $-2.3 \sim 4.8$, $1653 \sim 2380$ Ma and $1675 \sim 2132$ Ma. Zircon Hf isotopes characteristic shows that, the quartz keratophyre and rhyolite from the Tieshajie Formaion are products from the lithosphere delamination and mantle material upwelling, and partial melting of late paleoproterozoic crust materials. Synthetical analyze, the Tieshajie Formaion formed in a continental intraplate setting, postorogenic stage. It may be formed in cracking stage of intraplate rift of the Cathaysia, and products of mantle material upwelling.

Keywords: the Mesoproterozoic Tieshajie Formation; quartz keratophyre; rhyolite; SHRIMP zircon U-Pb dating; zircon Hf isotopes; element geochemistry; the Cathaysia; northeast of Jiangxi Province

高振家,陈克强,高林志. 主编. 2014. 中国岩石地层名称辞典(上、下册). 成都: 电子科技大学出版社. 上册 626 页,下册 680 页,另有 8 个附录和后记。定价 600 元。

本辞典是以大量的原始资料和最新研究成果为基础编 纂而成的地质工具书,是一部突出实用性和科学性的辞典。 本辞典客观地反映了每个岩石地层单位的特征、研究现状和 存在的不同认识等实际材料,便于专家、学者和地学界同仁 及学生进一步深入研究。本辞典特别补充收集了中国科学 院、石油、煤炭、冶金、海洋等部门的一批重要地层学研究成 果,内容进一步丰富。本辞典共录入13329辞条,资料截至 2012年上半年,分为"选用"和"不选用"两种条目类型,并将 参考文献列入词条之中,便于读者查找和核对。本辞典充分 反映了地层单位的多重性划分和对比,在2115个"采用地层 单位"中标注了4203个同物异名的地层单位。辞典突出了 典籍的实用性和科学性,彰显了岩石地层数据库的兼容性和 电子版的共享性:该辞典补充了大量的最新前寒武纪地层中 锆石 U-Pb 测年成果,对中国中一新元古代地层表进行重新 标定,增加了华南陆块变质基底年代地层学的最新的关键性 数据,修正和提高岩组在地层表中的精度;另外,中国是一个 多造山带的国家,古生代造山带的数量和规模为世所罕见, 中一新生代造山带规模宏大为世所瞩目,无任何一个国家可 与之比拟,典籍对造山带岩石地层单元进行了规范和厘定。 本辞典对中国地层学和区域地质调查及找矿具有重要的科 学意义和广泛的实用价值,可供从事地质生产、研究及教学 人员阅读、使用和参考。

沈其韩院士为本书作序,序中指出:"自地层学诞生起的 200多年来,它始终是地质科学领域奠基性的基础学科。伴随着工业革命,19世纪初由英国人W.史密斯奠定的基本原 理和方法首次纳入科学系统以来,地层学是地质科学中最活 跃的一个分支学科,对现代地质学的建立和发展产生了深刻 的影响。它经历了由实践到理论,从理论再回到实践的螺旋 式发展的进程。随着板块构造学说理论的提出和发展,地质 科学经历着一场深刻的变革。灾变论思想的复兴和地质事 件原则的建立,对地层学等的传统理论认识和方法提出了严 峻的挑战。充分体现当代国际地层学先进思想的《国际地层 指南》及《国际地层指南》修订版在 20 世纪后期见诸于世, 催生了"全息综合地层学"和"全球地层学"概念的提出,地 层学的研究涉猎触角和方法延伸和渗透至与大地构造学相 关的不同层面和领域。地层学正经历着一场深刻的变革。

"随着当前迅猛信息革命的全球化进程不断加快,呼唤 着地层学辞典更加科学典籍化和信息便捷化,以适应国民经 济的不断发展的需求。国民经济的发展和支撑始终是地层 学发展的不竭动力。我国近40年的经济支撑、充盈的财力 为地质工作提供了强有力的支持,使我国地层学研究实现了 跨越式发展,我国相继在20世纪与21世纪之交,公布了《中 国地层指南及中国层指南说明书》,阐述了地层多重划分概 念。2001年又出版了《中国地层指南及中国层指南说明书 (修订版)》;以适应地层学研究的更为综合性和信息化的要 求。这是一个在我国地层学研究上里程碑式的理论总结和 标识。在反映和代表一个国家地层学研究先进水平的理论 地层学研究方面,我国取得了长足进展,不少断代已经走在 了世界地层学的前沿,例如我国古生代若干界线层型---金 钉子的建立和正在待建的金钉子。我国在重要生命演化过 渡链条环节和演化序列的一系列发现,为地层学的高分辨率 的划分和研究提供了强有力的支撑和生物基础,这种趋势正 在拓展和延伸,使我国地层学研究提高到一个新阶段。

"岩石地层学研究是在各种比例尺地质图件的编制和 地质普查勘探须臾不可或缺的地层学的一个重要分支,也是 地质科学在应用方面的基础。经过近一个世纪各方面专家 学者的潜心研究,所累积的资料浩如烟海,但规范和标准参 差不齐,总结和提高使其更具科学典籍规范和标准化,提高 权威性,使其纳入科学发展的轨道是当前亟待解决的迫切任 务。"

沈先生指出,近年来,我国岩石地层典籍化研究大致历 经了三个阶段:① 1991~2000年,由原地质矿产部和全国地 层委员会分别主持,众多专家学者经过较长期的研究、对比、 修改、补充、完善编著而成了具有现代地层学特点的地层学 工具书——《全国地层多重划分对比研究》和《中国地层 典》;② 2001~2007年,由全国地层委员会主持深化研究并 编写《中国岩石地层大全》;③ 2008~2011年,由科技部资 助,国土资源部主管,中国地质科学院主持,编写完成了本 书——《中国岩石地层名称辞典》(上、下册)。

沈先生认为,本辞典汇聚全国岩石地层研究的各方面 高层专家学者,共厘定和完成岩石地层单位1万3千多条, 总字数达220万字。时间短,资料浩繁,实属不易。

沈先生指出,本辞典集我国当前岩石地层研究之大成, 内容丰富而翔实,是一本全面、系统的典籍化工具书。