

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*

刘树文¹ 杨朋涛¹ 王宗起² 罗平³ 王永庆³ 罗国辉³ 王伟¹ 郭博然¹

LIU ShuWen¹, YANG PengTao¹, WANG ZongQi², LUO Ping³, WANG YongQing³, LUO GuoHui³, WANG Wei¹ and GUO BoRan¹

1. 北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京 100871

2. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037

3. 赣东北地质大队, 上饶 334008

1. Key Laboratory of Orogen and Crust Evolution, Ministry of Education, Peking University, Beijing 100871, China

2. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

3. Northeastern Jiangxi Geological Surveying Team, Bureau of Geology and Mineral Exploration, Shangrao 334008, China

2012-09-10 收稿, 2012-12-28 改回.

Liu SW, Yang PT, Wang ZQ, Luo P, Wang YQ, Luo GH, Wang W and Guo BR. 2013. LA-ICPMS zircon U-Pb ages and geochemistry of Neoproterozoic low-grade metavolcanic rocks in Wuyuan-Dexing area of northeastern Jiangxi Province. *Acta Petrologica Sinica*, 29(2): 581–593

Abstract Low-grade metamorphosed volcanic rocks consist mainly of metamorphic basalt, dacite and rhyolite in the Wuyuan to Dexing region of the northeastern Jiangxi Province. Whole-rock geochemical analyses reveal that the metabasalt has chemical features of the tholeiite, and the basaltic magma originated from low-degreed partial melting of a spinel lherzolite in disturbed depleted mantle. However, the dacitic magma was derived from a partial melting of a meta-greywacke, and the rhyolite was produced by the fractionation of the dacitic magma. LA-ICP-MS zircon U-Pb isotope dating indicates low-grade meta-dacite from the Wuyuan area was formed at 861 ± 8 Ma, and meta-rhyolite and tuffaceous slate from the Dexing area at 860 ± 3 Ma and 860 ± 6 Ma, respectively, which indicate that these metamorphic volcanic rocks erupted at Neoproterozoic Tonian era. Meanwhile, these samples also preserved some signatures of Neoproterozoic (2.8–2.5 Ga), Middle-Late Paleoproterozoic (2.0–1.7 Ga) and Mesoproterozoic (~1.0 Ga) inherited and/or captured zircon ages. Integrated the whole-rock geochemistry, petrogenesis and zircon ages, we suggest that these metamorphic volcanic rocks formed under an Early Neoproterozoic tectonic background of back-arc basin in Andes-type actively continental margin.

Key words Low-grade metamorphosed volcanic rocks; Whole-rock petrochemistry; LA-ICP-MS zircon U-Pb isotope ages; Petrogenesis; Tectonic background; Northeast Jiangxi Province

摘要 赣东北婺源-德兴地区新元古代地层中浅变质火山岩主要由变质玄武岩、英安岩和流纹岩组成。全岩地球化学分析表明浅变质玄武岩具有拉斑玄武岩的地球化学特征,起源于尖晶石辉橄岩低度部分熔融,英安岩岩浆起源于壳源杂砂岩部分熔融,流纹岩可能为英安质岩浆结晶分异的产物。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素定年揭示婺源浅变质英安岩形成于 861 ± 8 Ma, 德兴张村西浅变质流纹岩形成于 860 ± 3 Ma, 铜厂铜矿矿区凝灰质板岩形成于 860 ± 6 Ma, 均为早新元古代 Tonian 期。同时这些定年样品中保存了 2.8–2.5 Ga、2.0–1.7 Ga 和 ~1.0 Ga 的继承或捕获锆石记录。结合浅变质玄武岩和英安质火山岩的地球化学特征和成因,这套岩石最有可能形成于新元古代早期安第斯型活动大陆边缘弧后盆地构造背景。

关键词 浅变质火山; 岩石地球化学; LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄; 岩石成因; 构造背景; 赣东北地区

中图法分类号 P588.14; P597.3

* 本文受国家地调局项目(201111020)资助。

第一作者简介: 刘树文,男,1958年生,博士,教授,岩石学和地球化学专业, E-mail: swliu@pku.edu.cn

近东西向展布江南造山带是华南最重要的造山带之一,它分割华南大陆为西北部的扬子地块和东南部的华夏地块(郭令智等, 1980; Zhou and Zhu, 1993; Charvet *et al.*, 1996)。由于近年来 Rodinia 超大陆拼合与裂解研究,使这个活动带的性质与时代备受研究者的关注。一些学者认为这个活动带形成于约 1.3~1.0Ga,即全球范围的格林维尔造山期,由此得出一个重要的认识是华南大陆位于 Rodinia 超大陆的内部,然后超大陆于~0.9Ga 裂解,形成一系列裂谷盆地(Li, 1999; Li *et al.*, 2003a; Greentree *et al.*, 2006; Ye *et al.*, 2007)。另一些学者根据新获得的高精度锆石年代学数据和地质关系,认为江南造山带并非形成于格林维尔造山期,而是形成于 850Ma 到 800Ma,因此江南造山带并非位于 Rodinia 超大陆的内部,而是位于边缘(Wang *et al.*, 2006, 2007, 2008; 高林志等, 2008, 2010)。引起这些争论的关键问题是江南造山带的基底与盖层的时代和造山带内变质基底岩石组合的构造属性。Wang *et al.* (2006, 2007, 2008)认为江南造山带的陆-陆碰撞造山事件发生在 860~800Ma,比先前确定的 1000~800Ma 的造山活动期(Li *et al.*, 2003a, b; Wang *et al.*, 2004)明显缩小。近年来对位于江西北部的双桥山群和河上镇群变质火山岩已经做了一些锆石 U-Pb 同位素定年研究,例如对位于江西西北部的双桥山群细碧角斑岩的锆石 SHRIMP 年龄为 840Ma(董树文等, 2010)、斑脱岩定年获得了 840~829Ma 的锆石 SHRIMP U-Pb 同位素年龄(高林志等, 2008, 2010),江西-安徽-浙江交界地区与变质沉积岩互层产出的火山灰和石英角斑岩的锆石 U-Pb 年龄为~880Ma 的成岩年龄(高林志等, 2008, 2012; Wang *et al.*, 2008)。然而对婺源-德兴等地区的江南造山带内部的珍珠山群和万年群浅变质火山岩和火山碎屑岩可靠的地质年代学资料和地球化学资料很少,仅有珍珠山火山岩为 849±6Ma 一个可靠的年龄报导(Li *et al.*, 2010),严重地影响了对江南造山带东部时代和性质的认识。同时赣东北地区又是我国重要的有色金属、贵金属基地,例如德兴铜矿、金山金矿等都直接产于这些浅变质岩系的变质板岩、片岩内部,变质火山岩系的时代和性质不仅对江南造山带东段的形成与演化研究具有重要意义,而且对研究有色金属的矿质来源具有重要的参考价值。

本文对采自赣东北婺源到德兴地区双桥山群变质火山岩和火山碎屑岩进行了锆石 LA-ICPMS U-Pb 同位素定年和全岩地球化学的初步分析,旨在确定这一地区江南造山带内部变质火山岩和火山碎屑岩的时代、岩石成因和构造属性,进一步限定赣东北地区这一活动带的性质和时代。

1 区域地质特征

江南造山带将华南大陆分为西北部的扬子地块和东南部的华夏地块。前人研究将江南造山带东段内的赣东北-皖南地区分为九岭褶皱变形区、彰公山构造混杂岩带、江山-绍

兴对接带三个主要构造单元,构造单元之间以大型断裂带和韧性剪切带相接(邓国辉等, 2003, 2005;图 1),其中九岭褶皱变形区包括星子杂岩和双桥山群。星子杂岩主要由绿片岩相到角闪岩相变质的片岩、长英质片麻岩、细碧-角斑岩和透镜状大理岩组成,新近的锆石 U-Pb 同位素年代学研究表明其形成时代为 830~850Ma,形成于岛弧构造背景(董树文等, 2010)。双桥山群是一套浅变质的巨厚复理石建造夹有细碧岩-角斑岩,底部为凝灰岩和火山沉积砾岩,被认为是弧后盆地产物(邓国辉等, 2003, 2005)。彰公山构造混杂岩带含有五个构造单元,分别为屯溪构造单元、乐平构造单元、万年构造单元、赣东北蛇绿混杂岩带和怀玉山构造单元。其中屯溪构造单元的歙县岩片主要由弧后构造背景下形成的一套玄武质火成岩和安山质岩石构成,屯溪岩片主要由弧后盆地沉积复理石建造构成,夹有火山熔岩和火山碎屑岩。其中歙县岩片的铁镁质火成岩的 Sm-Nd 等时线年龄为 1024±30Ma(周新民等, 1989;赵建新等, 1995)。乐平单元主要由浅变质的细碎屑沉积岩为主,夹有变质凝灰岩、细碧岩和角斑岩,形成于活动大陆边缘构造背景(邓国辉等, 2003, 2005)。万年构造单元主要由滨海浅海相的细碎屑岩组成,夹有少量的火山熔岩、沉凝灰岩和凝灰质碎屑岩。赣东北蛇绿混杂岩带表现为无序的构造混杂岩,主要由泥质硅质岩、细碧岩和超基性岩块构成。其中玄武质岩石表现 MORB 型和岛弧型地球化学特征,形成于 0.97~1.0Ga(李献华等, 1994, 2012)。怀玉山构造单元主要由细碧角斑岩系、火山碎屑沉积岩夹泥质岩和硅质岩组成,SHRIMP 锆石 U-Pb 同位素定年揭示其形成时代为 912~857Ma(王剑, 2000)。彰公山构造混杂岩带南缘边界为绍兴-江山对接带,对接带内含有由绿片岩相到角闪岩相变质、复杂的岩石组合构成,可能代表了扬子板块与华夏板块的碰撞缝合带(邓国辉等, 2005)。

2 样品特征和分析方法

2.1 样品特征

本次研究供选择了 8 个代表性的浅变质火山岩样品进行了全岩岩石化学分析,采样地点和岩石类型列于表 1。样品选择的原则是岩石薄片内不含气孔-杏仁体、不含各类后期脉体、粘土质和其它细碎屑沉积物的样品。一个浅变质玄武岩样品(Wy34-1)、一个变质流纹岩样品(Wy32-1)和一个变质英安岩样品(Wy31-1)取自邓国辉等(2005)定义的万年构造单元的万年群上部。其余五个变质英安岩样品(Wy09-1、Wy09-2、Wy09-3、Wy10-1 和 Wy12-1)取自乐平构造单元,相当于邓国辉等(2005)描述的珍珠山群中部岩段。

变质玄武岩(Wy34-1)为紫红色,斑状细粒结构,显微镜下可见斜长石斑晶,最大长轴可达 0.5mm,基质为细晶质长石和铁镁矿物,保存有变余间粒-间隐结构特征。斜长石略有定向排列,但仍可见其构成格架的变余构造特征。

变质英安岩(Wy09-2)为中-厚层状,灰绿色,变余斑状细

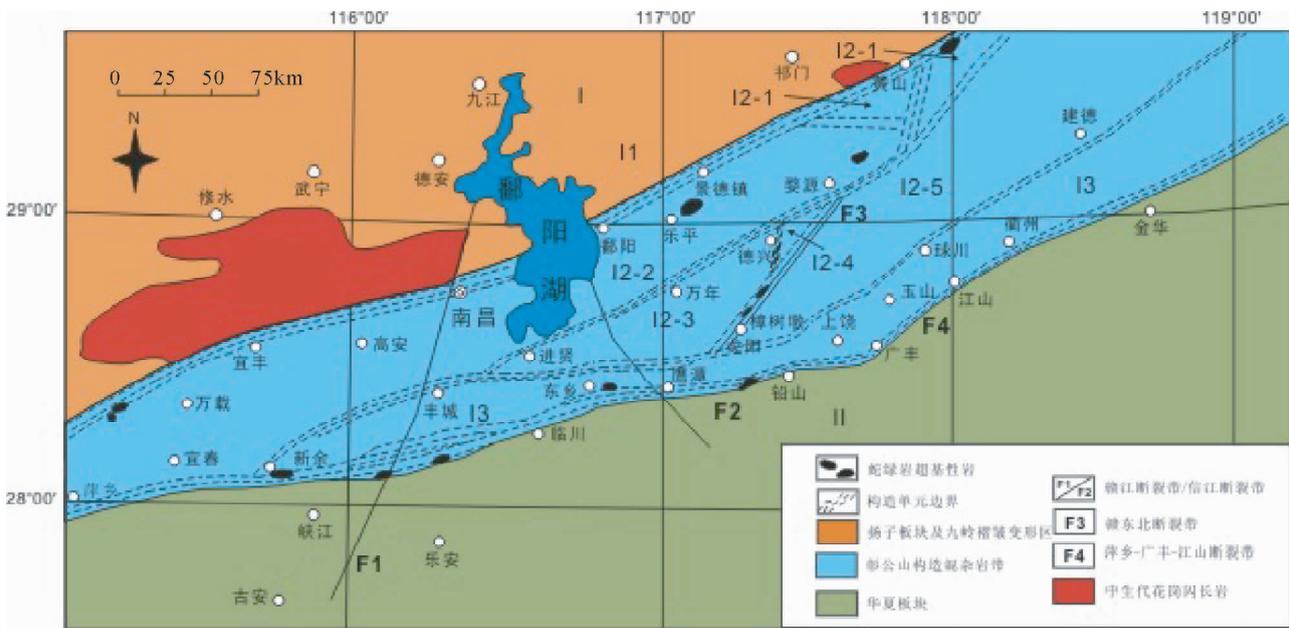


图 1 赣东北地区新元古代构造分区图(据邓国辉等,2005;高林志等,2008 修改)

I-扬子板块;II-华夏板块. II 九岭变形褶皱区;I2 彰公山构造混杂岩带;I3 绍兴-江山对接带;I2-1 屯溪构造单元, I2-2 乐平构造单元;I2-3 万年构造单元;I2-4 赣东北蛇绿混杂岩带;I2-5 怀玉山构造单元

Fig. 1 A Neoproterozoic tectonic classification diagram of northeastern Jiangxi Province (revised after Deng *et al.*, 2005; Gao *et al.*, 2008)

I-Yangtze plate; II-Cathaysian plate. II-Jiuling fold region; I2-Zhanggongshan tectonic mélange zone; I3-Shaoxin-Jiangshan collisional zone; I2-1-Tunxi tectonic unit, I2-2-Leping tectonic unit; I2-3-Wannian tectonic unit; I2-4-Northeast Jiangxi ophiolitic mélange zone; I2-5-Huayishan tectonic unit

表 1 分析样品采集地点和岩性

Table 1 Locations and lithology of chemically and chronologically analyzed samples

样品号	纬度	经度	岩性	采样地点
WY09-1	29°22'22"	117°47'16"	变质英安岩	婺源清华镇
WY09-2	29°22'22"	117°47'16"	变质英安岩	婺源清华镇
WY09-3	29°22'22"	117°47'16"	变质英安岩	婺源清华镇
WY10-1	29°21'50"	117°47'27"	变质英安岩	婺源镇北
WY12-1	29°11'36"	117°52'59"	变质英安岩	婺源梅林
WY31-1	29°01'17"	117°42'34"	变质英安岩	德兴铜厂矿区
WY31-2	29°01'17"	117°42'34"	变质凝灰质沉积岩	德兴铜厂矿区
WY32-1	28°48'25"	117°30'29"	变质流纹岩	德兴张村西
WY34-1	28°51'07"	117°30'58"	变质玄武岩	德兴白塔南
WY39-1	29°01'09"	117°43'44"	凝灰质板岩	德兴铜厂矿区

粒结构,块状到板理状构造。变余斑晶主要为斜长石,可见石英,粒度在 0.3 ~ 0.5mm 左右。斑晶和基质有明显的帘石化和绿泥石化。

变质流纹岩(Wy32-1)为灰白色薄层流纹构造,斑状结构。其中斑晶主要为石英,并有斜长石和钾长石斑晶,斑晶

粒度通常在 0.3 ~ 0.5mm,最大可达 1mm 左右,基质为细晶质结构,显微镜下石英和长石等斑晶矿物有弱的定向排列。

变余凝灰质板岩(Wy39-1),灰绿色,变余火山凝灰结构,可见斜长石和石英表现为不规则粒状,石英表现了熔蚀结构,斜长石多保存了沿着解理面崩碎的结构特征,粒度在 0.3 ~ 0.7mm 并可见变质细碎屑沉积混入物表现有层理分布。一些细碎屑沉积物已经浅变质形成绢云母、绿泥石和绿帘石。

2.2 分析方法和步骤

2.2.1 全岩岩石化学分析

全岩常量元素分析在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室完成。其中常量元素分析使用扫描型波长色散 X 射线荧光光谱仪(XRF, Thermo Arl Advant XP+)进行,分析采用国际标样 GSP22、JG22 和国标 GBW 02103,工作条件为 50mA 和 50kV,分析精度在 0.5% 以内,详细的分析方法和步骤见 Liu *et al.* (2002, 2004, 2005, 2012)和 Yang *et al.* (2012)。全岩微量元素和稀土元素分析在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成,测试仪器为德国 Finnigan 公司的 HR-ICP-MS (ELEMENT-1),采用国际标样 GSR-1 和 GSR-9,详细分析方法和过程见(Zhang *et al.*, 2011, 2012;

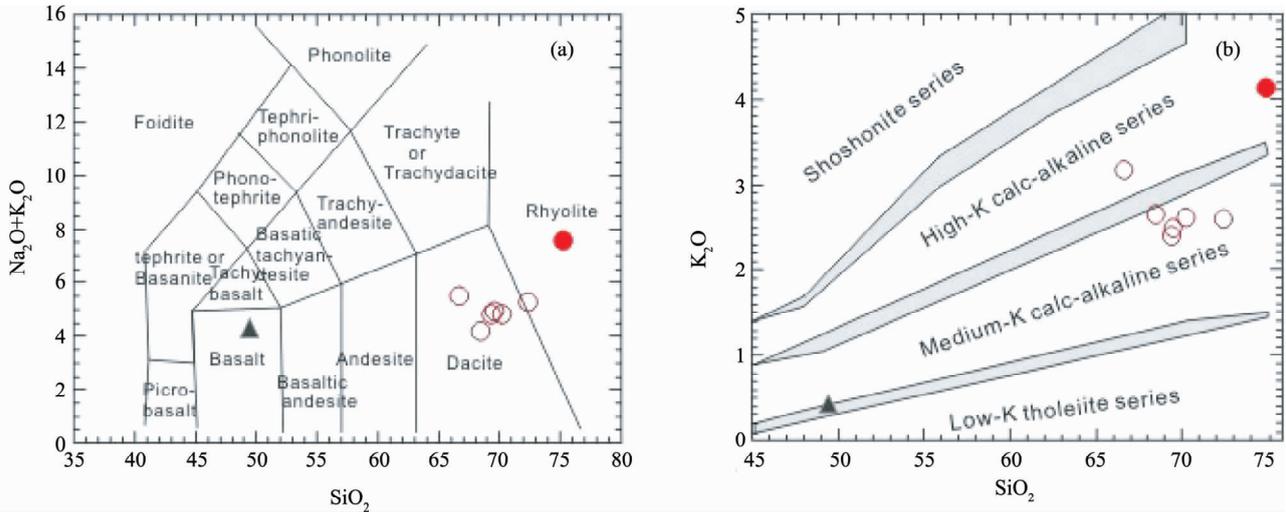


图2 浅变质火山岩化学成分分类(a, 据 Le Maitre, 2002; b, 据 Rollinson, 1993)

图中实三角为变质玄武岩, 空心圆为变质英安岩, 实心圆为变质流纹岩. 后图岩性符号同此图

Fig. 2 Chemical classifications of the low-grade metamorphic volcanic rocks (a, after Le Maitre, 2002; b, after Rollinson, 1993)

Solid triangle-metabasalt; space circle-metadacite; solid circle-metarhyolite. lithological symbols in following figures are same as these of this figure

Wang *et al.*, 2012a, b)。

2.2.2 锆石 U-Pb 同位素定年分析

本文共对三个有代表性的样品进行了 LC-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素年代学分析, 包括一个采自婺源清华镇北的浅变质英安岩 (Wy09-3, 乐平构造单元)、一个采自万年构造单元张村西浅变质流纹岩和一个采自万年构造单元铜厂铜矿采场的变质凝灰质板岩 (Wy39-1, 原岩为凝灰质沉积岩)。使用通行的锆石分离、制靶和抛光技术, 然后对抛光后的锆石拍摄的阴极发光图像 (即 CL 图像)。锆石阴极发光照相在北京大学 SEM 实验室扫描电镜下进行。锆石 U-Pb 同位素分析在中国地质大学 (北京) 国家重点实验室 LA-ICP-MS 实验室进行, 国际标样 Harvard91500 和 NIST610 用来作为分析的外部标样和计算 U-Th-Pb 同位素和其它微量元素含量的标样。 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 比值使用 GLITTER 软件计算 (van Achterbergh *et al.*, 2001), 普通铅 Pb 使用 Andersen (2002) 方法校正。年龄计算和谐和线图绘制使用 Isoplot (ver 3.0; Ludwig, 2003) 进行。详细的锆石 U-Pb 同位素年代学分析方法和步骤见 Liu *et al.* (2011a, b) 和 Wang *et al.* (2011, 2013)。

3 分析结果

总共 8 个样品的全岩岩石化学、微量元素和稀土元素分析结果和相关参数被列入表 2, 3 个样品的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素分析结果和计算的表现年龄值列入表 3。

3.1 常量元素

取自德兴白塔南的轻微变质玄武岩样品 (Wy34-1) SiO_2

含量 49.39%, 表现低 Al_2O_3 (12.20%) 和高 MgO (4.56%)、 FeO^{T} (16.2%)、 CaO (7.2%) 和 TiO_2 (2.68%), $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 较低 (4.30%), 其中 Na_2O 明显高于 K_2O (表 2), 在 TAS 分类图上落在玄武岩区 (图 2a)。该玄武岩样品的 $\text{FeO}^{\text{T}}/\text{MgO} = 3.55$, 为拉斑玄武岩。6 个英安岩样品 SiO_2 含量在 66.66% ~ 72.39% 之间变化, Al_2O_3 在 12.84% 到 15.95% 之间变化。其 $\text{Mg}^{\#} (= 100 \times \text{MgO}/\text{MgO} + \text{FeO}^{\text{T}} \text{ 分子比})$ 值变化在 30.93 ~ 42.64 之间。全碱含量 $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 为 4.19% ~ 5.51%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值从 0.58 到 1.04。在 TAS 图上除样品 W12-1 落入英安岩与流纹岩分界线右侧外, 其余 5 个样品落入了英安岩范围 (图 2a), 在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图中, 除样品 Wy31-1 落入高 K 钙碱性岩石系列外, 其余样品均落入了中 K 钙碱性岩石系列 (图 2b), 表现了钙碱性岩石系列的地球化学特征。采自张村西的浅变质流纹岩样品 (Wy32-1) 表现了高的 SiO_2 含量 75.27%, 低 Al_2O_3 (11.21%) 和 MgO (0.10%)、 CaO (0.42%) 和 TiO_2 (0.28%) 和很低的 $\text{Mg}^{\#}$ (4.87), 但高的 $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 总量 (7.56%), $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值为 0.83 (表 2), 在 TAS 分类图上落在流纹岩区 (图 2a), 在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图中落入了高 K 钙碱性岩石系列 (图 2b)。CIPW 计算结果 (未列出) 中所有样品均出现石英标准分子, 变质英安岩和流纹岩均出现刚玉分子, 而变质玄武岩的刚玉分子为 0, 说明这些岩石为亚铝 (变质玄武岩) 到过铝 (变质英安岩和流纹岩) 岩石系列。

3.2 微量和稀土元素

变质玄武岩样品 (Wy34-1) 表现最低的 REE 总量 (112.4×10^{-6}) 和轻微的轻重稀土分馏特征, 在球粒陨石标准化的稀土图谱上表现为缓右斜式稀土配分模式, 基本没有 Eu 异常 (表 2、图 3a)。6 个浅变质英安岩样品的 REE 总量 $153.8 \times$

表2 全岩常量元素、微量和稀土元素分析数据和主要参数(主量元素:wt%;稀土和微量元素: $\times 10^{-6}$)Table 2 Analyzed whole-rock data for metamorphosed volcanic rocks and major parameters (Major elements: wt%; Trace elements: $\times 10^{-6}$)

Sample	WY09-1	WY09-2	WY09-3	WY10-1	WY12-1	WY31-1	WY32-2	WY34-1
SiO ₂	70.19	69.51	66.66	69.37	72.39	68.45	75.27	49.39
TiO ₂	0.72	0.70	0.78	0.69	0.66	0.76	0.28	2.68
Al ₂ O ₃	13.97	14.35	15.95	13.74	12.84	15.33	11.21	12.20
FeO ^T	5.14	5.21	5.35	5.50	4.14	4.70	3.48	16.21
MgO	1.48	1.59	1.59	1.57	1.04	1.96	0.10	4.56
CaO	0.22	0.25	0.40	0.42	0.78	0.11	0.42	7.20
MnO	0.06	0.08	0.08	0.09	0.06	0.02	0.08	0.26
Na ₂ O	2.23	2.47	2.33	2.42	2.71	1.54	3.43	3.86
K ₂ O	2.62	2.49	3.18	2.41	2.60	2.65	4.13	0.44
P ₂ O ₅	0.12	0.13	0.13	0.13	0.10	0.11	0.03	0.34
LOI	2.41	2.39	2.75	2.77	1.97	3.63	0.96	1.73
Total	99.39	99.35	99.40	99.31	99.47	99.48	99.71	99.52
Mg [#]	33.92	35.23	34.63	33.72	30.93	42.64	4.87	31.90
La	31	34	33	30	42	29	56	12.4
Ce	62	69	68	60	82	60	112	30
Pr	7.34	8.20	7.86	6.98	9.62	7.42	15.0	4.43
Nd	29	33	32	28	38	31	63	23
Sm	5.46	6.71	6.41	5.74	7.34	6.19	15.1	6.55
Eu	1.32	1.42	1.39	1.35	1.5	1.52	3.10	2.35
Gd	4.92	5.73	5.78	5.11	6.67	5.34	14.0	7.65
Tb	0.829	1.11	1.05	0.938	1.31	1.01	2.86	1.56
Dy	4.75	6.18	5.67	5.37	7.46	5.67	16.4	9.79
Ho	0.93	1.12	1.05	1.05	1.41	1.09	3.16	1.93
Er	2.87	3.31	3.43	3.07	4.43	3.29	9.37	5.61
Tm	0.454	0.517	0.499	0.488	0.693	0.483	1.47	0.882
Yb	2.98	3.31	3.5	3.06	4.32	3.36	9.40	5.33
Lu	0.452	0.557	0.564	0.474	0.679	0.497	1.50	0.837
TREE	154	174	170	152	208	156	322	112
δ Eu	0.76	0.68	0.69	0.75	0.64	0.79	0.64	1.01
(La/Yb) _N	6.92	6.84	6.37	6.56	6.59	5.87	4.02	1.57
Rb	104	99	123	87	163	108	119	13.1
Sr	104	104	110	95	105	75	64	231
Ba	388	354	403	315	409	458	952	260
Th	10.3	10.7	12.9	9.18	15.6	9.21	13.6	1.78
U	2.12	2.32	2.70	2.00	3.46	2.45	2.12	0.442
Nb	10.8	12.5	13.6	9.68	12.7	10.4	35.4	5.89
Ta	0.78	1	1.02	0.711	0.951	0.727	2.19	0.367
Zr	227	230	252	185	225	211	597	220
Hf	6.06	6.85	7.54	5.11	6.99	5.93	16.1	6.03
Y	23.8	29	28	27	39	28	77	49
Ga	16.4	18.6	20.3	16.5	16.4	17.6	21	20.7
Cr	60	55	58	46	50	50	2.39	8.08
Co	13.4	15.5	15.8	14	10.2	4.04	2.01	38
Ni	26	27	27	23.3	18.6	22.9	4.11	16.2
Rb/Sr	1.00	0.95	1.12	0.91	1.55	1.44	1.86	0.06
Ba/Sr	3.73	3.4	3.66	3.32	3.9	6.11	14.9	1.13

注: LOI-烧失量; Mg[#] = 100 × (MgO/MgO + FeO^T 分子比); FeO^T-将分析的 Fe 全换算成 FeO; δ Eu = Eu_N / (Sm_N × Gd_N)^{1/2}; 下角标 N 标志为球粒陨石标准化后值

表3 锆石 U-Th-Pb 同位素分析数据和计算的年龄值

Table 3 Analytical data of zircon U-Pb isotopes and calculated age values

测点号	校正后的同位素比值					校正后年龄值(Ma)						谐和度
	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	ρ	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	
珍珠山群浅变质英安岩												
WY09-3-01	0.09482	3.48091	0.26617	0.9	0.57	1525	49	1523	32	1525	26	0.26%
WY09-3-02	0.06768	1.3329	0.14278	0.9	0.70	859	51	860	23	860	15	0.00%
WY09-3-03	0.06779	1.34052	0.14336	0.9	1.14	862	82	863	32	864	16	-0.12%
WY09-3-04	0.1357	5.24605	0.28038	0.9	0.94	2173	115	1860	52	1593	29	36.4%
WY09-3-05	0.09835	2.9055	0.21425	0.9	0.39	1593	102	1383	38	1251	21	27.3%
WY09-3-06	0.06768	1.33281	0.14278	0.9	0.58	859	55	860	24	860	15	0.00%
WY09-3-07	0.12002	4.38993	0.26518	0.9	0.85	1957	40	1710	31	1516	24	29.1%
万年群浅变质流纹岩												
WY32-1-01	0.0677	1.33416	0.14289	0.9	1.11	859	55	861	24	861	15	0.00%
WY32-1-02	0.16948	11.3550	0.48575	0.9	0.54	2553	27	2553	28	2552	37	0.04%
WY32-1-03	0.06777	1.33635	0.14297	0.9	0.99	862	54	862	24	861	15	0.12%
WY32-1-04	0.10523	4.42409	0.30481	0.9	0.89	1718	33	1717	26	1715	26	0.17%
WY32-1-05	0.06788	1.33888	0.14301	0.9	0.71	865	46	863	21	862	14	0.12%
WY32-1-06	0.06767	1.33018	0.14253	0.9	0.92	858	37	859	18	859	14	0.00%
WY32-1-07	0.06748	1.32765	0.14265	0.9	0.54	853	85	858	33	860	17	-0.23%
WY32-1-08	0.11265	5.14526	0.33114	0.9	1.52	1843	31	1844	26	1844	28	-0.05%
WY32-1-09	0.10641	4.53387	0.3089	0.9	0.89	1739	46	1737	34	1735	30	0.23%
WY32-1-10	0.12783	6.69321	0.37963	0.9	1.11	2068	32	2072	28	2075	31	-0.34%
WY32-1-11	0.17026	11.4749	0.48863	0.9	1.39	2560	29	2563	29	2565	38	-0.19%
WY32-1-12	0.06963	1.46492	0.15253	0.9	0.61	917	68	916	29	915	16	0.11%
WY32-1-13	0.07699	1.71091	0.16112	0.9	0.25	1121	45	1013	24	963	16	5.19%
WY32-1-14	0.16968	11.3736	0.48599	0.9	0.83	2554	30	2554	30	2553	38	0.04%
WY32-1-15	0.06857	1.34429	0.14214	0.9	0.76	886	46	865	21	857	14	0.93%
WY32-1-16	0.17565	11.7717	0.48588	0.9	0.70	2612	29	2586	29	2553	37	2.31%
WY32-1-17	0.06883	1.35288	0.1425	0.9	0.71	894	44	869	21	859	14	1.16%
WY32-1-18	0.07123	1.39703	0.1422	0.9	0.45	964	47	888	22	857	15	3.62%
WY32-1-19	0.06758	1.32567	0.14221	0.9	0.29	856	155	857	56	857	23	0.00%
WY32-1-20	0.06791	1.34189	0.14326	0.9	1.10	866	100	864	39	863	19	0.12%
WY32-1-21	0.06775	1.33601	0.14296	0.9	0.52	861	51	861	23	861	15	0.00%
WY32-1-22	0.0678	1.33584	0.14284	0.9	1.67	862	70	861	29	861	16	0.00%
WY32-1-23	0.12135	5.22413	0.31213	0.9	0.79	1976	38	1857	31	1751	28	12.8%
WY32-1-24	0.0677	1.3362	0.1431	0.9	1.01	859	51	862	23	862	15	0.00%
WY32-1-25	0.06766	1.33209	0.14274	0.9	0.51	858	43	860	20	860	14	0.00%
WY32-1-26	0.06984	1.47502	0.15313	0.9	1.02	924	56	920	26	918	16	0.22%
WY32-1-27	0.17769	12.2687	0.50059	0.9	0.45	2631	33	2625	32	2616	40	0.57%
WY32-1-28	0.17877	12.4080	0.50323	0.9	0.93	2641	61	2636	60	2628	74	0.49%
WY32-1-29	0.10743	4.50708	0.30417	0.9	0.61	1756	44	1732	33	1712	28	2.57%
WY32-1-30	0.16882	11.2860	0.48468	0.9	0.96	2546	34	2547	33	2548	39	-0.08%
WY32-1-31	0.0677	1.33096	0.14253	0.9	0.13	859	72	859	29	859	16	0.00%
WY32-1-32	0.06785	1.33913	0.14309	0.9	1.49	864	161	863	58	862	23	0.12%

续表 3

Continued Table 3

测点号	校正后的同位素比值					校正后年龄值(Ma)						谐和度
	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	ρ	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	
WY32-1-33	0.06773	1.33671	0.14309	0.9	0.99	860	69	862	28	862	16	0.00%
WY32-1-34	0.16281	10.3132	0.45925	0.9	0.93	2485	39	2463	36	2436	40	2.01%
WY32-1-35	0.12819	6.7	0.37894	0.9	0.90	2073	43	2073	36	2071	35	0.10%
WY32-1-36	0.06794	1.33915	0.14291	0.9	0.84	867	84	863	33	861	17	0.23%
WY32-1-37	0.12489	6.38183	0.37048	0.9	0.39	2027	73	2030	54	2032	42	-0.25%
WY32-1-38	0.06784	1.33481	0.14265	0.9	1.08	864	97	861	37	860	18	0.12%
WY32-1-39	0.06163	1.21367	0.14278	0.9	0.75	661	89	807	32	860	17	-6.16%
WY32-1-40	0.07338	1.76962	0.17484	0.9	1.04	1024	107	1034	47	1039	24	-1.44%
凝灰质板岩												
WY39-1-01	0.06839	1.46737	0.15559	0.9	0.68	880	59	917	27	932	17	-1.61%
WY39-1-02	0.06602	1.29702	0.14246	0.9	0.54	807	41	844	19	859	14	-1.75%
WY39-1-03	0.06668	1.31297	0.14254	0.9	1.47	832	47	851	21	859	15	-0.93%
WY39-1-04	0.06411	1.26079	0.14261	0.9	0.99	745	39	828	18	859	14	-3.61%
WY39-1-05	0.07113	1.40917	0.14365	0.9	0.86	961	39	893	20	865	14	3.24%
WY39-1-06	0.07004	1.50386	0.15569	0.9	0.61	930	73	932	32	933	18	-0.11%
WY39-1-07	0.06729	1.32406	0.14269	0.9	0.55	847	47	856	22	860	15	-0.47%
WY39-1-08	0.06877	1.47604	0.15563	0.9	0.75	892	40	921	20	932	15	-1.18%
WY39-1-09	0.06729	1.32337	0.14261	0.9	1.02	847	33	856	17	859	14	-0.35%
WY39-1-10	0.06593	1.41526	0.15565	0.9	0.76	804	56	895	25	933	17	-4.07%
WY39-1-11	0.06955	1.49134	0.15549	0.9	0.95	915	35	927	18	932	15	-0.54%
WY39-1-12	0.06737	1.32893	0.14303	0.9	0.69	849	98	858	38	862	18	-0.46%
WY39-1-13	0.06357	1.25114	0.1427	0.9	0.66	727	52	824	22	860	15	-4.19%
WY39-1-14	0.06754	1.3274	0.14251	0.9	0.74	854	41	858	19	859	14	-0.12%
WY39-1-15	0.06595	1.29657	0.14255	0.9	0.56	805	44	844	20	859	14	-1.75%
WY39-1-16	0.1955	14.5691	0.54037	0.9	0.71	2789	19	2788	23	2785	38	0.14%
WY39-1-17	0.0676	1.32835	0.14249	0.9	0.87	856	50	858	23	859	15	-0.12%
WY39-1-18	0.0666	1.49241	0.16249	0.9	0.43	825	95	927	39	971	20	-4.53%
WY39-1-19	0.06818	1.36216	0.14486	0.9	0.64	874	34	873	17	872	14	0.11%
WY39-1-20	0.0689	1.53166	0.16118	0.9	1.01	896	33	943	18	963	15	-2.08%
WY39-1-21	0.07051	1.3867	0.14261	0.9	0.67	943	47	883	22	859	15	2.79%
WY39-1-22	0.06628	1.30322	0.14256	0.9	1.11	815	46	847	21	859	15	-1.40%
WY39-1-23	0.06767	1.32918	0.14241	0.9	0.96	858	45	859	21	858	14	0.12%
WY39-1-24	0.06552	1.28907	0.14265	0.9	0.63	791	37	841	18	860	14	-2.21%
WY39-1-25	0.06775	1.33186	0.14254	0.9	0.59	861	42	860	20	859	14	0.12%
WY39-1-26	0.06948	1.48967	0.15546	0.9	0.82	913	66	926	29	931	17	-0.54%
WY39-1-27	0.0653	1.28861	0.14308	0.9	1.22	784	41	841	19	862	14	-2.44%
WY39-1-28	0.06845	1.34616	0.14259	0.9	0.87	882	42	866	20	859	14	0.81%
WY39-1-29	0.06738	1.32301	0.14238	0.9	0.60	850	41	856	19	858	14	-0.23%
WY39-1-30	0.06854	1.34906	0.14271	0.9	0.55	885	42	867	20	860	14	0.81%
WY39-1-31	0.07083	1.52089	0.15569	0.9	0.90	953	31	939	17	933	15	0.64%

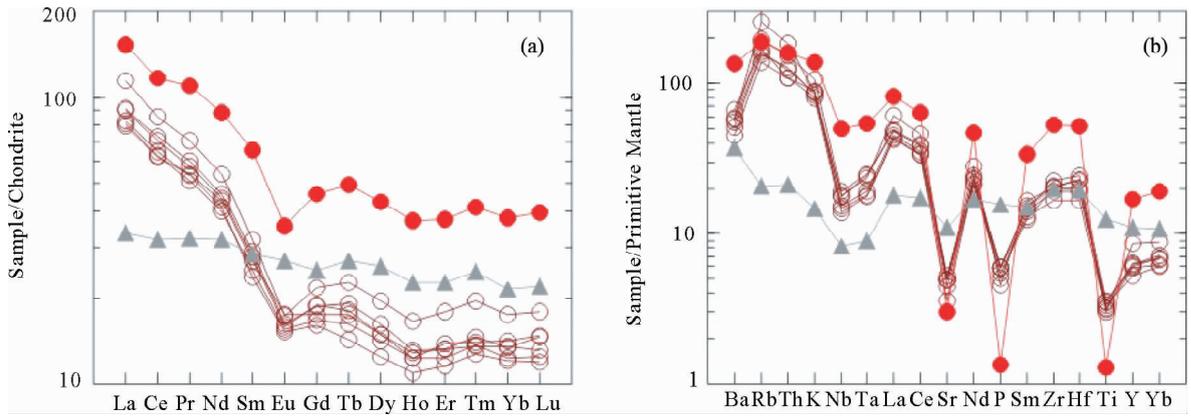


图3 球粒陨石标准化稀土图谱(a)和原始地幔标准化蛛网图(b)(球粒陨石和原始地幔值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 3 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive-normalized spidergrams (b) (the values of the chondrite and primitive mantle are after Sun and McDonough, 1989)

$10^{-6} \sim 207.7 \times 10^{-6}$, 明显的轻重稀土分馏特征, $(La/Yb)_N = 5.87 \sim 6.92$, 在球粒陨石标准化的稀土图谱上表现为明显右斜式稀土配分模式, 但是轻稀土强烈分馏, 重稀土分馏不明显, 明显的负 Eu 异常 ($\delta Eu = 0.64 \sim 0.79$) (表 2、图 3a)。流纹岩样品 (Wy32-2) 有最高的稀土总量 (322.1×10^{-6}), 其稀土配分模式与变质英安岩相似, 但 $(La/Yb)_N$ 较低 (4.02), 明显的负 Eu 异常 (表 2、图 3a)。

在原始地幔标准化的蜘蛛网状图上, 浅变质玄武岩表现了较平坦的配分特征, 具有明显的 Nb、Ta 和 Sr 的负异常和弱的 Ti 负异常 (图 3b), 缺少大离子亲石元素的富集。而浅变质英安岩和流纹岩表现了明显的 Rb、Th、K、轻稀土元素和高场强元素 Zr 和 Hf 的明显富集, 但是明显的 Nb、Ta、Sr、P 和 Ti 负异常, 表现了明显的壳源岩浆的微量元素地球化学特征 (图 3b)。

3.3 锆石 U-Pb 年龄

采自婺源清华镇北部的浅变质英安岩 (Wy09-3) 的锆石表现为细小的短柱状和等轴状, 为自形的短柱状晶形, 个别锆石为板状或长柱状, 晶形粒度在 $50 \sim 100 \mu m$, 长度/宽度在 1:1 到 1:3 之间变化。锆石 CL 图像反映出这些锆石发育良好的岩浆振荡环带, 为典型岩浆锆石 (Hoskin and Schaltegger, 2003; Wu and Zheng, 2004; 图 4a, b)。本文该样品中 7 颗锆石的 7 个点进行了 LA-ICP-MS U-Pb 定年分析, 显示 $^{206}Pb/^{238}U$ 表观年龄可大致分为两组, 第一组包括 4 个分析点 (分析点 #1、#4、#5 和 #7), 表现了 Th/U 比值为 0.57 ~ 0.94, 其中分析点 #4、#5 和 #7 表现为明显不谐和, 落在了谐和线之下 (表 3, 图 4a), 而分析点 #1 落在了谐和线上, 其 $^{207}Pb/^{206}Pb$ 表观年龄为 $1525 \pm 49 Ma$, 代表了该捕获锆石的源岩形成时代。第二组由三个分析点 (#2、#3 和 #6) 构成, 其 Th/U 比值为 0.57 ~ 1.14, 结合锆石发育良好的振荡环带, 揭示其为岩浆成因的锆石。这三个点的 $^{206}Pb/^{238}U$ 表观年龄从

$860 \pm 15 Ma$ 到 $864 \pm 16 Ma$, 被投在谐和线上, 表现了良好的成分一致性 (图 4a, b), 产生一个权重 $^{206}Pb/^{238}U$ 平均年龄 $861 \pm 17 Ma$ (MSWD = 0.022), 构成了一个谐和年龄 $861 \pm 8 Ma$ (MSWD = 0.001, 图 4b), 代表了该样品的岩浆结晶年龄。

采自德兴张村西的浅变质流纹岩 (W32-1) 的锆石表现为柱状自形晶, 个别锆石为短柱状, 粒度在 $80 \sim 150 \mu m$, 长度/宽度在 1:2 到 1:4 之间变化。锆石 CL 图像反映出这些锆石发育良好的岩浆振荡环带, 为典型岩浆锆石 (Hoskin and Schaltegger, 2003; Wu and Zheng, 2004; 图 4c, d)。本文共对该样品 40 颗锆石 40 个点进行了 LA-ICP-MS U-Pb 定年分析, 除了 23 号点表现为明显不谐和外, 其余 39 个点在谐和线图中构成了 5 个组 (图 4c), 其中最老的年龄组包括 8 个分析点 (#2、#11、#14、#16、#27、#28、#30 和 #34, 表 3), 其 Th/U 比值为 0.44 ~ 1.39, $^{207}Pb/^{206}Pb$ 表观年龄 $2485 \pm 39 Ma$ 到 $2641 \pm 61 Ma$ (表 3、图 4c), 其 $^{207}Pb/^{206}Pb$ 权重平均年龄为 $2569 \pm 37 Ma$ (MSWD = 1.8), 代表了该样品的一期捕获锆石的源岩形成时代, 揭示研究区内存在晚太古代岩浆事件。第二组由三个分析点 (#10、#35 和 #37) 构成, 其 Th/U 比值为 0.39 ~ 1.11, 锆石发育良好的振荡环带, 揭示其岩浆成因的锆石。这三个点的 $^{206}Pb/^{238}U$ 表观年龄从 $2027 \pm 73 Ma$ 到 $2073 \pm 43 Ma$, 三个点均投在谐和线上 (图 4c, d), 产生一个 $^{207}Pb/^{206}Pb$ 权重平均年龄 $2065 \pm 47 Ma$ (MSWD = 0.16), 代表了该样品的一期捕获锆石的源岩形成时代。第三组分析包括四个分析点 (#4、#9、#29 和 #8), 其 Th/U 比值为 0.61 ~ 0.89, $^{207}Pb/^{206}Pb$ 表观年龄 $1718 \pm 33 Ma$ 到 $1843 \pm 31 Ma$ (表 3、图 4c), 其中 #4、#9 和 #29, 构成一个 $^{207}Pb/^{206}Pb$ 权重平均年龄 $1733 \pm 45 Ma$, 是锆石源区存在古元古代晚期的岩浆事件记录。此外两个分析点 (#13 和 #40) 给出 $^{207}Pb/^{206}Pb$ 表观年龄分别为 $1121 \pm 45 Ma$ 和 1024 ± 107 , 指示了格林威尔期的热事件。其余的 22 个分析点构成了本样品最大的众数组, 其 Th/U 比值为 0.29 ~ 1.49, CL 图像表明这些锆石具有明显的振

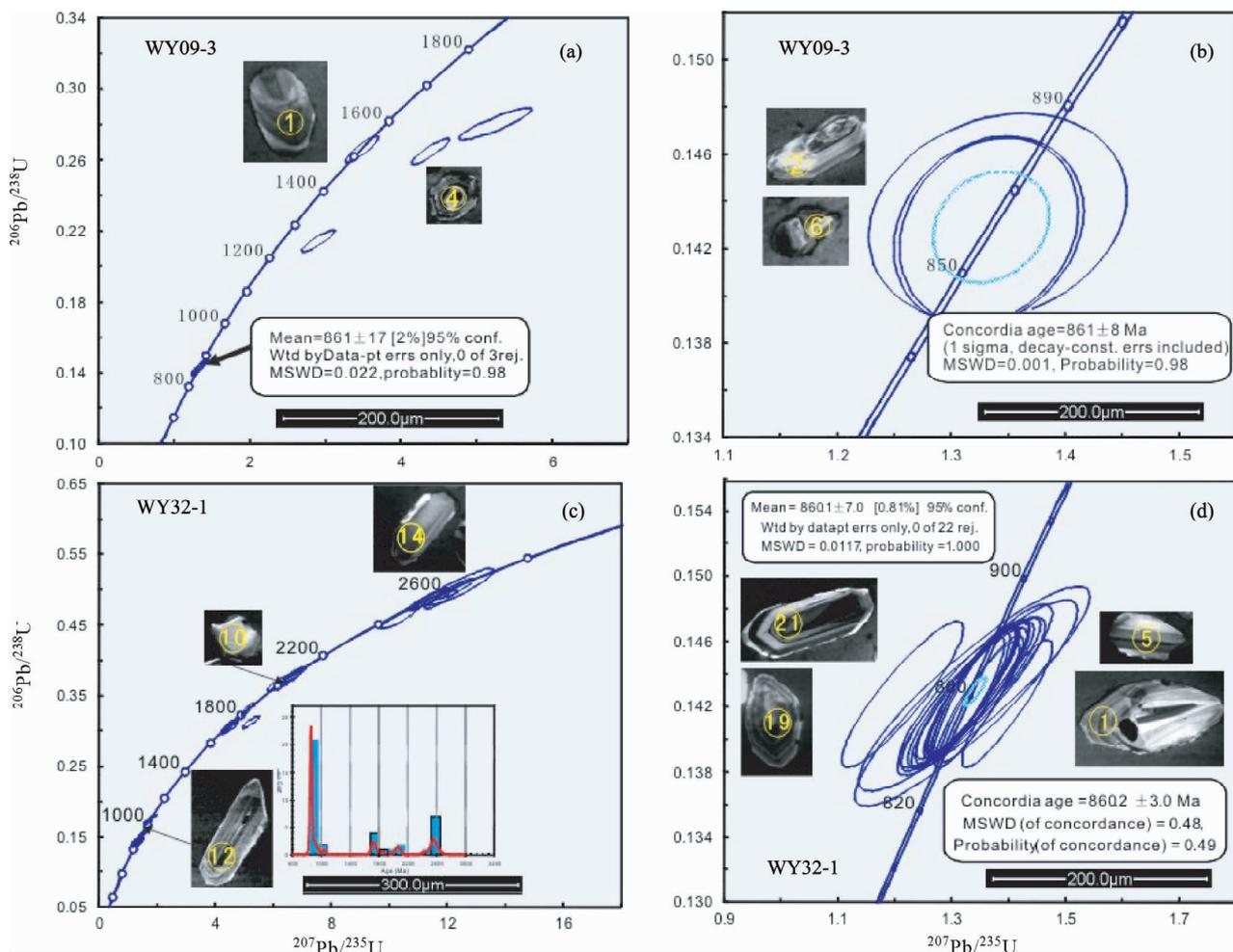


图4 珍珠山群浅变质英安岩锆石 U-Pb 谐和线图 (a、b) 和万年群浅变质流纹岩锆石 U-Pb 谐和线图 (c、d)

Fig. 4 Zircon U-Pb isotope concordia diagrams for a low-grade metamorphic dacite from Zhenzhushan Group (a, b) and a rhyolite from Wannian Goup (c, d)

荡环带(图4d), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表观年龄从 853 ~ 924Ma, 只有一个分析给出较低的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表观年龄 661Ma, 这些分析产生一个 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $860 \pm 7\text{Ma}$ (MSWD = 0.011), 谐和年龄为 $860 \pm 3\text{Ma}$ (MSWD = 0.48) (图4d、表3), 代表了该样品岩浆结晶年龄。

采自德兴铜矿铜厂矿区的凝灰质板岩(W39-1)的锆石表现为柱状自形晶, 个别锆石为等轴状到短柱状, 粒度通常在 120 ~ 200 μm , 长度/宽度在 1 : 1 到 1 : 2 之间变化。锆石 CL 图像反映出这些锆石发育良好的振荡环带, 为典型岩浆锆石(Wu and Zheng, 2004; Hoskin and Schaltegger, 2003; 图5a)。本文共对该样品 31 颗锆石 31 个点进行了 LA-ICP-MS U-Pb 定年分析, 其中 16 号点给出了最老的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表观年龄为 $2789 \pm 19\text{Ma}$ 。其余 30 个分析点构成了两个年龄众数组, 其中 21 个分析构成了本样品最大的年龄众数组, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表观年龄从 727 ~ 880Ma(表3、图5a-c)。这个组锆石具有明显的振荡环带, 其 Th/U 比值为 0.54 ~ 1.47, 指示了它们的岩浆成因。这一组分析, 产生了一个 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 权

重平均年龄 $860 \pm 6\text{Ma}$ (MSWD = 0.049)。其余 9 个分析 Th/U 比值为 0.43 ~ 1.01, 这些锆石有明显振荡环带, 也是岩浆成因锆石。这 9 个分析产生一个 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 权重平均年龄 $939 \pm 11\text{Ma}$ (MSWD = 0.79)。该样品 31 个点的锆石年代学分析有新太古代早期的年龄记录, 新元古代形成了 $860 \pm 6\text{Ma}$ 和 $939 \pm 11\text{Ma}$ 两个年龄峰值, 记录了新元古代早期两个重要阶段的岩浆作用事件。

4 讨论

4.1 浅变质火山岩的岩石成因

一个浅变质英安岩样品(Wy31-1)和一个浅变质流纹岩样品(Wy32-1)表现了高钾钙碱性岩石系列的地球化学特征(图2b), 由于浅变质流纹岩样品(Wy32-1)有更高的 K_2O 和 Na_2O 含量表现了 A 型花岗岩的碱质特征, 而浅变质英安岩样品(Wy31-1)有较低的 Na_2O 浓度, 而表现了 S 型花岗岩的碱质特征。除了浅变质流纹岩(Wy32-1)以外, 所有其它浅

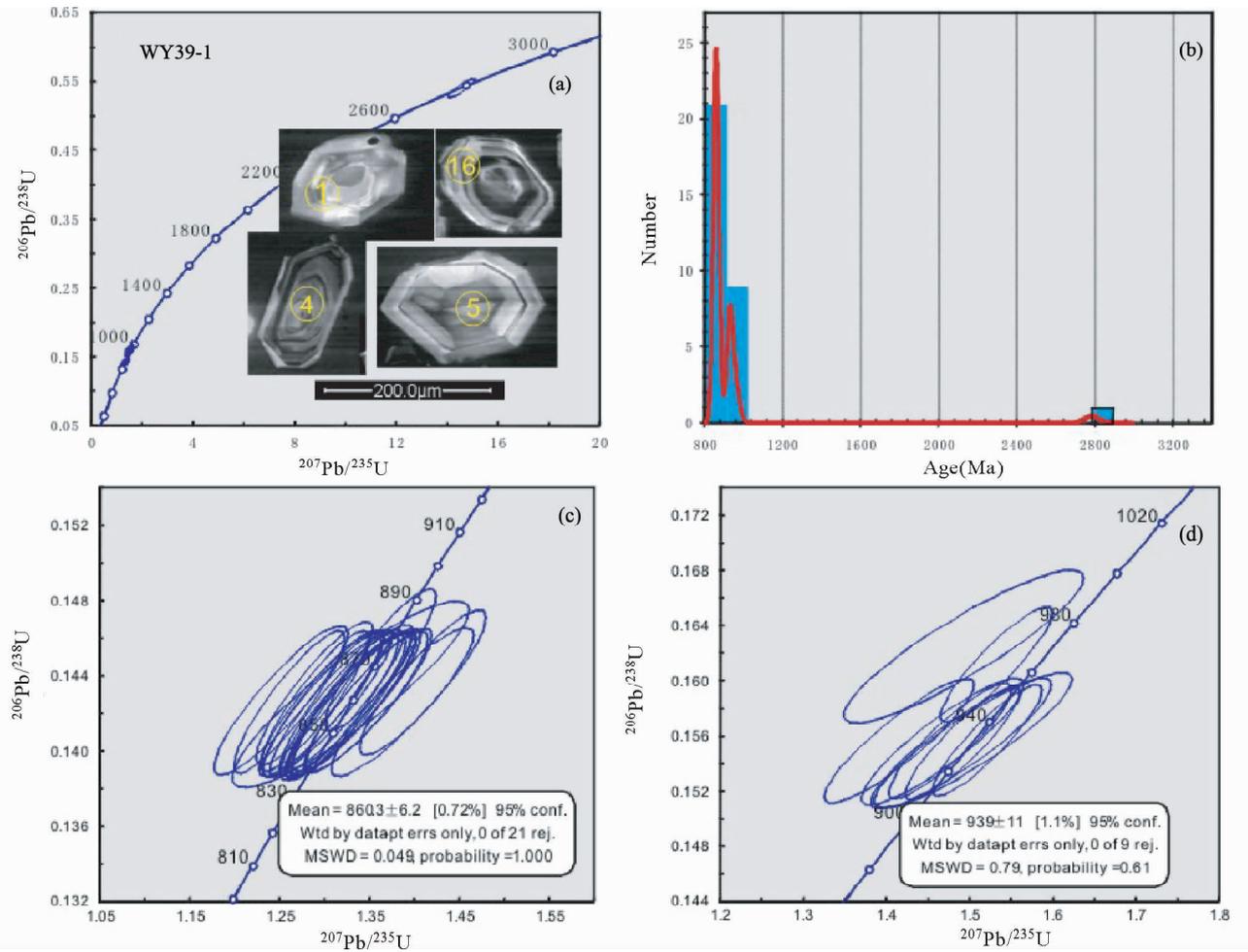


图5 凝灰质板岩的锆石 U-Pb 年龄图

Fig. 5 Zircon U-Pb isotope dating diagrams of a tuffaceous slate from Wannian Group

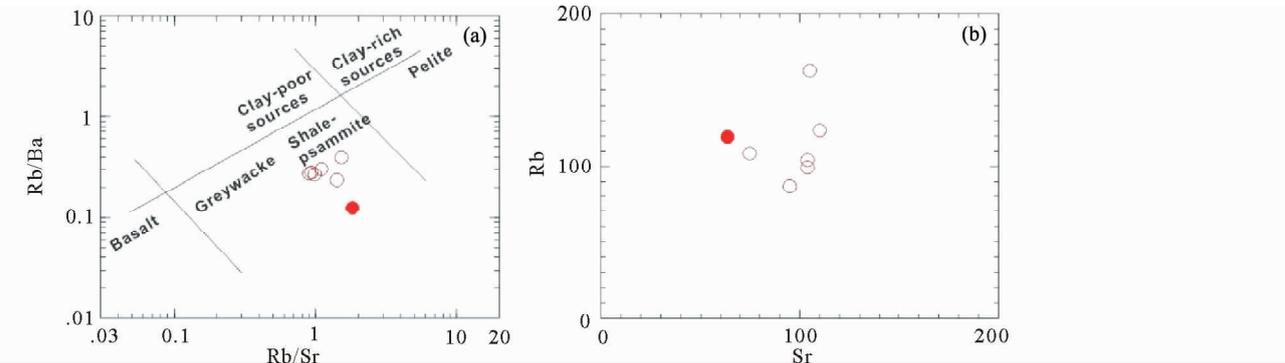


图6 岩石成因鉴别图(a, 底图引自 Sylvester, 1998)

Fig. 6 Discrimination diagrams for petrogenesis (a, after Sylvester, 1998)

变质英安岩样品均表现了强铝过饱和, Al_2O_3/TiO_2 比值在 20 左右, 样品 Wy32-1 达 40, 反映了高铝钛的地球化学特征(表 2), 这些地球化学特征表现了壳源岩浆的亲缘性。在 Rb/Ba 对 Rb/Sr 相关图上落在了杂砂岩部分熔融区(图 6a, Sylvester, 1998), 在 Rb-Sr 相关图上样品 Wy32-1 和 Wy31-1

表现了相对较低的 Sr 浓度, 其它浅变质英安岩样品表现了接近平行 Rb 轴分布, 而 Sr 变化很小(图 6b、表 2), 结合这些样品具有低的相容元素 Cr、Ni 和 Co 的浓度, 大离子亲石元素 Rb、Th、K 和轻稀土元素 La、Ce 等和高场强元素 Zr 和 Hf 等高度富集, Nb、Ta、Sr、P 和 Ti 元素强烈亏损, 反映了主体的

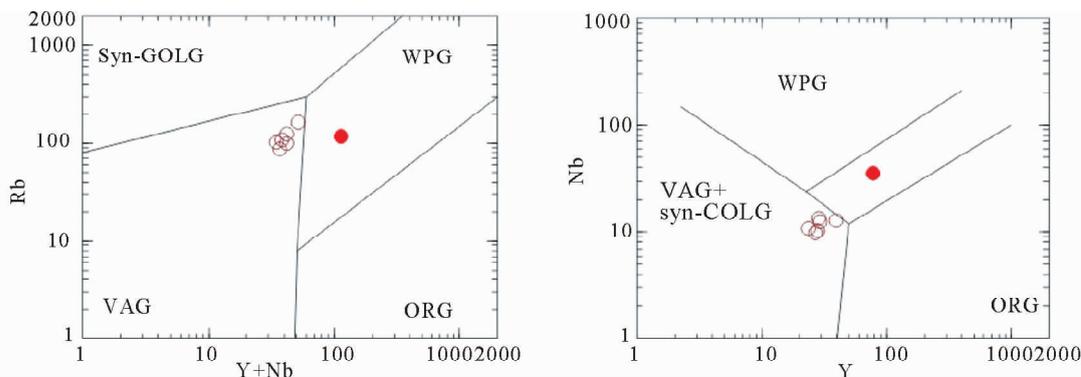


图7 浅变质英安岩和流纹岩构造环境鉴别图(据 Pearce *et al.*, 1984)

Fig. 7 Tectonic discrimination diagrams (after Pearce *et al.*, 1984)

英安质岩浆形成于表壳岩的部分熔融,部分熔融的残留相中存在斜长石和磷灰石。在球粒陨石标准化的稀土配分图上轻重稀土明显分馏,轻稀土强烈分馏,重稀土较为平坦和明显负 Eu 异常,反映部分熔融残留相中斜长石和角闪石,说明部分熔融的源区含有一定量的铁镁质火山岩或凝灰岩成分,即可能为杂砂岩的部分熔融。这一特征与大部分岩石具有相对偏高的 $Mg^{\#}$ ($100MgO/MgO + FeO^T$ 分子比)特征一致(表2)。而样品 Wy31-1 和 Wy32-1 的稀土总量高,与其它浅变质英安岩样品具有相似的稀土配分模式,但 Rb 含量相对较低,可能是英安质岩浆经斜长石和黑云母等矿物分异形成。由于一些捕获锆石的存在,表明在岩浆侵位和上升喷发过程中可能存在上部地壳物质的混染。

分析样品中唯一一个浅变质玄武岩样品(Wy34-1),表现了较低斜率的右斜式稀土配分模式(图3a)和 Nb、Ta、Ti 和 Sr 的负异常,La/Yb 比值为 2.34, Th/Ta 比值为 4.85, La/Sm 比值为 1.89, Gd/Yb 比值为 1.42, 略高于原始地幔值和亏损地幔,指示了该玄武质岩浆原始地幔或亏损地幔的亲缘性,并在上升过程中受到了上部地壳物质的混染。Sm/Yb 比值为 1.23, Sm 浓度为 6.55, 落在了尖晶石辉橄岩低度部分熔融的范围(表2; Wang *et al.*, 2007)。由此我们认为该玄武质岩浆最有可能形成于被扰动的亏损地幔低度部分熔融。

4.2 浅变质火山岩形成时代

取自乐平构造单元珍珠山群浅变质英安岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素定年结果表明其形成年龄为 861 ± 8 Ma, 取自万年构造单元的万年群上部地层中的浅变质流纹岩(Wy32-1)给出了 860 ± 3 Ma 的成岩年龄, 而变质玄武岩(Wy34-1)与浅变质英安岩、流纹岩互层产出。采自德兴铜矿铜厂矿区凝灰质板岩(Wy39-1, 万年群)记录了新元古代 860 ± 6 Ma 和 939 ± 11 Ma 两个年龄峰值, 记录了新元古代早期两个重要阶段的岩浆作用事件。不难看出万年群和珍珠山群的形成年龄在误差范围内一致。万年群和珍珠山群变质火山岩都形成于 860 Ma 左右, 为早新元古代的 Tonian 期。

这些定年样品同时记录了新太古宙、早元古代中晚期、中元古代格林威尔期继承锆石或碎屑锆石年龄, 反映了该地区早前寒武纪老地壳和格林威尔期陆壳物质的存在。

从这些定年结果不难看出, 婺源到德兴的新元古代浅变质火山岩的形成时代早于浙-皖-赣交界地区在双桥山群横涌组 and 安乐林组的形成时代 831 ~ 829 Ma 和河上镇群上墅组 767 Ma (高林志等, 2008), 也老于庐山星子杂岩中细碧角斑岩的形成时代(840 Ma, 董树文等, 2010), 与江南造山带西段的四堡群、冷家溪群最大沉积年龄 (~ 860 Ma) 相近, 比赣北-皖南双桥山群变质火山岩和火山凝灰岩略晚 (~ 880 Ma) (Wang *et al.*, 2006, 2007, 2008)。本文新报道的赣东北新元古代浅变质火山岩年龄, 结合先前报导的江南造山带西段和东北段的新元古代浅变质火山岩的时代, 不难看出江南造山带赣东北段浅变质火山-沉积岩系形成于早新元古代的 Tonian 期。

4.3 浅变质火山岩构造背景

采自万年群的浅变质玄武岩在原始地幔标准化蜘蛛网状图上 Nb、Ta 和 Ti 的亏损, 岩石成因方面反映的被扰动亏损地幔的部分熔融, 在 Th-Ta-Hf/3 和 Th-Nb/16-Hf/3 构造鉴别图上落在了岛弧玄武岩区(图略)。

6 个变质英安岩形成于变质杂砂岩的部分熔融, 部分熔融的残留相中保存了斜长石和角闪石, 反映了高温中压的构造背景。在 Pearce *et al.* (1984) Rb-Y + Nb(图7a) 和 Nb-Y 构造鉴别图(图7b)上, 6 个浅变质英安岩落在火山弧花岗岩和火山弧加同碰撞花岗岩区, 而浅变质流纹岩落在了板内花岗岩区, 加上这些英安质岩石强烈铝过饱和的地球化学特征, 反映了火山弧到大陆内部过渡的构造背景, 最有可能形成于安第斯型活动大陆边缘弧后盆地构造背景。

5 结论

综上所述地球化学和地质年代学分析, 得出对婺源到德

兴地区浅变质火山岩的初步认识如下:

(1) 赣东北婺源到德兴地区新元古代地层中浅变质火山岩主要由变质玄武岩、英安岩和流纹岩组成。其中玄武岩岩浆具有拉斑玄武岩的地球化学特征,起源于尖晶石辉橄岩低度部分熔融,英安岩岩浆起源于壳源杂砂岩部分熔融,流纹岩可能为英安岩岩浆结晶分异的产物;

(2) 婺源浅变质英安岩形成于 $861 \pm 8\text{Ma}$, 德兴张村西浅变质流纹岩形成于 $860 \pm 3\text{Ma}$, 铜厂铜矿矿区凝灰质板岩形成于 $860 \pm 6\text{Ma}$, 均为早新元古代 Tonian 期火山喷发的产物;

(3) 结合浅变质玄武岩和英安质火山岩的地球化学特征和成因,这套岩石最有可能形成于安第斯型活动大陆边缘弧后盆地构造背景。

References

- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb . *Chemical Geology*, 192(1-2): 59-79
- Charvet J, Shu LS, Shi YS, Guo LZ and Faure M. 1996. The building of South China: Collision of Yangtze and Cathaysia blocks, problems and tentative answers. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 13(3-5): 223-235
- Deng GH, Lou FS and Huang CG. 2003. Establishment of the Zhenzhushan Group in northeast Jiangxi and its significance. *Geological Bulletin of China*, 22(1): 32-42 (in Chinese with English abstract)
- Deng GH, Liu CG and Feng Y. 2005. Tectonic features and evolution of the Proterozoic orogenic belt between northeastern Jiangxi and southern Anhui. *Acta Geoscientia Sinica*, 26(1): 9-16 (in Chinese with English abstract)
- Dong SW, Xue HM, Xiang XK and Ma LC. 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 (in Chinese with English abstract)
- Gao LZ, Yang MG, Ding XZ, Liu YX, Liu X, Ling LX and Zhang CH. 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 (in Chinese with English abstract)
- Gao LZ, Dai CG, Liu YX, Wang M, Wang XH, Chen JS, Ding XZ, Zhang CH, Cao Q and Liu JH. 2010. Zircon SHRIMP U-Pb dating of tuff bed of the Sibao Group in southeastern Guizhou-northern Guangxi area, China and its stratigraphic implication. *Geological Bulletin of China*, 29(9): 1259-1267 (in Chinese with English abstract)
- Gao LZ, Liu YX, Ding XZ, Zhang CH, Wang ZQ, Chen J and Liu YR. 2012. SHRIMP dating of Cangshuipu Group in the middle part of the Jiangnan Orogen and its implications for tectonic evolutions. *Geology in China*, 39(1): 12-20 (in Chinese with English abstract)
- Greentree MR, Li ZX, Li XH and Wu HC. 2006. Late Mesoproterozoic to earliest Neoproterozoic basin record of the Sibao orogenesis in western South China and relationship to the assembly of Rodinia. *Precambrian Research*, 151(1-2): 79-100
- Guo LZ, Shi YS and Ma RS. 1980. The geotectonic framework and crustal evolution of South China. In: *Scientific Paper on Geology for International Exchange*. Beijing: Geological Publishing House, 109-116 (in Chinese)
- Hoskin PWO and Schaltegger U. 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. In: Hanchar JM and Hoskin PWO (eds.). *Zircon. Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, Mineralogical Society of America, Washington DC, 53(1): 27-62
- Le Maitre RW. 2002. *Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms*. 2nd Edition. Cambridge: Cambridge University Press, 1-236
- Li XH, Zhou GG, Zhao JX, Fanning CM and Compston W. 1994. SHRIMP ion microprobe zircon U-Pb age of the NE Jiangxi ophiolite and its tectonic implications. *Geochimica*, 23(2): 125-131 (in Chinese with English abstract)
- Li XH. 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(1-2): 43-57
- Li XH, Li ZX, Ge WC, Zhou HW, Li WX, Liu Y and Wingate MTD. 2003a. Neoproterozoic granitoids in South China: Crustal melting above a mantle plume at ca. 825Ma? *Precambrian Research*, 122(1-4): 45-83
- Li XH, Li WX and He B. 2012. Building of the south China block and its relevance to assembly and breakup of Rodinia supercontinent. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 31(6): 543-559 (in Chinese with English abstract)
- Li ZX, Li XH, Kinny PD, Wang J, Zhang S and Zhou H. 2003b. Geochronology of Neoproterozoic syn-rift magmatism in the Yangtze Craton, South China and correlations with other continents; Evidence for a mantle superplume that broke up Rodinia. *Precambrian Research*, 122(1-4): 85-109
- Li ZX, Li XH, Wartho JA, Clark C, Li WX, Zhang CL and Bao C. 2010. Magmatic and metamorphic events during the Early Paleozoic Wuyi-Yunkai orogeny, southeastern South China: New age constraints and pressure-temperature conditions. *Geological Society of America Bulletin*, 122(5-6): 772-793
- Liu SW, Pan YM, Li JH, Li QG and Zhang J. 2002. Geological and isotopic geochemical constraints on the evolution of the Fuping Complex, North China Craton. *Precambrian Research*, 117(1-2): 41-56
- Liu SW, Pan YM, Xie QL, Zhang J and Li QG. 2004. Archean geodynamics in the Central Zone, North China Craton: Constraints from geochemistry of two contrasting series of granitoids in the Fuping and Wutai complexes. *Precambrian Research*, 130(1-4): 229-249
- Liu SW, Pan YM, Xie QL, Zhang J, Li QG and Yang B. 2005. Geochemistry of the Paleoproterozoic Nanying granitic gneisses in the Fuping complex: Implications for the tectonic evolution of the Central zone, North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(5): 643-658
- Liu SW, Li QG, Tian W, Wang ZQ, Yang PT, Wang W, Bai X and Guo RR. 2011a. Petrogenesis of Indosinian granitoids in middle-segment of South Qinling tectonic belt: Constraints from Sr-Nd isotopic systematics. *Acta Geologica Sinica*, 85(3): 610-628
- Liu SW, Santosh M, Wang W, Bai X and Yang PT. 2011b. Zircon U-Pb chronology of the Jianping Complex: Implications for the Precambrian crustal evolution history of the northern margin of North China Craton. *Gondwana Research*, 20(1): 48-63
- Liu SW, Zhang J, Li QG, Zhang LF, Wang W and Yang PT. 2012. Geochemistry and U-Pb zircon ages of metamorphic volcanic rocks of the Paleoproterozoic Liliang Complex and constraints on the evolution of the Trans-North China Orogen, North China Craton. *Precambrian Research*, 222-223: 173-190
- Ludwig KR. 2003. *Isoplot 3.0: A geochronological toolkit for Microsoft Excel*. Berkeley Geochronology Center, Special Publication, (4): 1-70
- Pearce JA, Harris NBW and Tindle AG. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25(4): 956-983
- Rollinson HR. 1993. *Using Geochemical Data, Evolution, Presentation, Interpretation*. London: Longman Scientific & Technical, 1-284
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle compositions and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313-345

- Sylvester PJ. 1998. Post-collisional strongly peraluminous granites. *Lithos*, 45(1-4): 29-44
- van Achtebergh E, Ryan C, Jackson S and Griffin W. 2001. Appendix 3 Data reduction software for LA-ICP-MS in "Laser-Ablation-ICPMS in the Earth Sciences". In: Sylvester P (ed.). *Mineralogical Association of Canada Short Course*, 29: 239-243
- Wang J. 2000. Neoproterozoic Rifting History of South China: Significance Rodinia Breakup. Beijing: Geological Publication House, 108-119 (in Chinese)
- Wang W, Liu SW, Bai X, Yang PT, Li QG and Zhang LF. 2011. Geochemistry and zircon U-Pb-Hf isotopic systematics of the Neoproterozoic Yixian-Fuxin greenstone belt, northern margin of the North China Craton: Implications for petrogenesis and tectonic setting. *Gondwana Research*, 20(1): 64-81
- Wang W, Liu SW, Wilde SA, Li QG, Zhang J, Bai X, Yang PT and Guo RR. 2012a. Petrogenesis and geochronology of Precambrian granitoid gneisses in western Liaoning Province: Constraints on Neoproterozoic to Early Paleoproterozoic crustal evolution of the North China Craton. *Precambrian Research*, 222-223: 290-311
- Wang W, Liu SW, Feng YG, Li QG, Wu FH, Wang ZQ, Wang RT and Yang PT. 2012b. Chronology, petrogenesis and tectonic setting of the Neoproterozoic Tongchang dioritic pluton at the northwestern margin of the Yangtze Block: Constraints from geochemistry and zircon U-Pb-Hf isotopic systematics. *Gondwana Research*, 22(2): 699-716
- Wang W, Liu SW, Santosh M, Bai X, Li QG, Yang PT and Guo RR. 2013. Zircon U-Pb-Hf isotopes and whole-rock geochemistry of granitoid gneisses in the Jianping gneissic terrane, western Liaoning Province: Constraints on the Neoproterozoic crustal evolution of the North China Craton. *Precambrian Research*, 224: 184-221
- Wang XL, Zhou JC, Qiu JS and Gao JF. 2004. Geochemistry of the Meso-to Neoproterozoic basic-acid rocks from Hunan Province, South China: Implications for the evolution of the western Jiangnan orogen. *Precambrian Research*, 135(1-2): 79-103
- Wang XL, Zhou JC, Qiu JS, Zhang WL, Liu XM and Zhang GL. 2006. LA-ICP-MS U-Pb zircon geochronology of the Neoproterozoic igneous rocks from Northern Guangxi, South China: Implications for tectonic evolution. *Precambrian Research*, 145(1-2): 111-130
- Wang XL, Zhou JC, Griffin WL, Wang RC, Qiu JS, O'Reilly SY, Xu XS, Liu XM and Zhang GL. 2007. Detrital zircon geochronology of Precambrian basement sequences in the Jiangnan orogen: Dating the assembly of the Yangtze and Cathaysia Blocks. *Precambrian Research*, 159(1-2): 117-131
- Wang XL, Zhao GC, Zhou JC, Liu YS and Hu J. 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
- Wu YB and Zheng YF. 2004. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age. *Chinese Science Bulletin*, 49(15): 1554-1569
- Yang PT, Liu SW, Li QG, Wang ZQ, Wang RT and Wang W. 2012. Geochemistry and zircon U-Pb-Hf isotopic systematics of the Ningshan granitoid batholith, middle segment of the south Qinling belt, Central China: Constraints on petrogenesis and geodynamic processes. *Journal of Asian Earth Sciences*, 61: 166-186
- Ye MF, Li XH, Li WX, Liu Y and Li ZX. 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
- Zhang F, Liu SW, Li QG, Sun YL, Wang ZQ, Yan QR and Yan Z. 2011. Re-Os and U-Pb geochronology of the erlihe Pb-Zn deposit, Qinling orogenic belt, central China, and constraints on its deposit genesis. *Acta Geologica Sinica*, 85(3): 673-682
- Zhang F, Liu SW, Chen X, Li QG, Dai JZ, Yang K, Wu FH and Chen YZ. 2012. Xiba granitic pluton in the Qinling Orogenic Belt, Central China: Its petrogenesis and tectonic implications. *Acta Geologica Sinica*, 86(5): 1128-1142
- Zhao JX, Li XH, McCulloch MT, Zhou GQ and Xing FM. 1995. Petrogenesis of ophiolites from South Anhui and Northeast Jiangxi, and their tectonic implications: Chemical and Sm-Nd isotopic constraints. *Geochimica*, 24(4): 311-324 (in Chinese with English abstract)
- Zhou XM, Zou HB, Yang JD and Wang YX. 1989. Sm-Nd isochron age and its geological significance for ophiolite from Fuchuan of the She County of Anhui Province. *Chinese Science Bulletin*, (16): 1243-1245 (in Chinese)
- Zhou XM and Zhu YH. 1993. Late Proterozoic collisional orogen and geosuture in southeastern China: Petrological evidence. *Chinese Journal of Geochemistry*, 12(3): 239-251

附中文参考文献

- 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
- 邓国辉, 刘春根, 冯晔. 2005. 赣东北-皖南元古代造山带构造格架及演化. *地球学报*, 26(1): 9-16
- 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-角闪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, 刘燕学, 丁孝忠, 张传恒, 王自强, 陈俊, 刘耀荣. 2012. 江南古陆中段沧水铺群锆石 U-Pb 年龄和构造演化意义. *中国地质*, 39(1): 12-20
- 郭令智, 施央申, 马瑞士. 1980. 华南大地构造格架与地壳演化. 见: *国际交流地质学学术论文集(构造地质, 地质力学)*. 北京: 地质出版社, 109-116
- 李献华, 周国庆, 赵建新, Fanning CM, Compston W. 1994. 赣东北蛇绿岩的离子探针锆石 U-Pb 年龄及其构造意义. *地球化学*, 23(2): 125-131
- 李献华, 李武显, 何斌. 2012. 华南陆块的形成与 Rodinia 超大陆的聚合与裂解. *矿物岩石地球化学通报*, 31(6): 543-559
- 王剑. 2000. 华南新元古代裂谷盆地演化——兼论与 Rodinia 解体的关系. 北京: 地质出版社, 108-119
- 赵建新, 李献华, McCulloch MT, 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): 311-324
- 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