

doi: 10.12029/gc20201110002

欧阳军勇,张树明,张鑫,刘龙,夏寅初,吴志春,万康. 2023. 江西相山铀矿田两类流纹英安岩的岩浆演化特征——来自长石和黑云母化学成分证据[J]. 中国地质, 50(5): 1495–1512.

Ouyang Junyong, Zhang Shuming, Zhang Xin, Liu Long, Xia Yinchu, Wu Zhichun, Wan Kang. 2023. Magmatic evolution characteristics of two types of rhyolite dacite in Xiangshan uranium ore field—Evidence from chemical composition of feldspar and biotite [J]. Geology in China, 50(5): 1495–1512(in Chinese with English abstract).

# 江西相山铀矿田两类流纹英安岩的岩浆演化特征 ——来自长石和黑云母化学成分证据

欧阳军勇<sup>1,2</sup>, 张树明<sup>1,3</sup>, 张鑫<sup>1,3</sup>, 刘龙<sup>1,4</sup>, 夏寅初<sup>1</sup>, 吴志春<sup>1,3</sup>, 万康<sup>1</sup>

(1. 东华理工大学核资源与环境国家重点实验室, 江西南昌 330013; 2. 湖南继善高科技, 湖南长沙 410006; 3. 东华理工大学放射性地质与勘探技术国防重点学科实验室, 江西南昌 330013; 4. 赣东学院, 江西抚州 344000)

**摘要:**【研究目的】长石、黑云母等岩浆分异作用形成的矿物可以作为寄主岩石岩浆演化的指示剂。相山流纹英安岩与流纹英安斑岩两者在形成时代、成因归属、物质来源和地幔物质参与等方面存在争议。【研究方法】本文借助电子探针技术对相山两类流纹英安岩中的长石、黑云母进行定量分析,对两者间的成分、物质来源、形成温度、氧逸度和岩石性质等特征进行分析研究,在此基础上探讨两类流纹英安岩的岩浆演化特征。【研究结果】研究表明:相山打鼓顶组流纹英安岩可区分为两类,一类是喷溢相的流纹英安岩( $K_1d^a$ ),另一类是侵入相的流纹英安斑岩( $K_1d^b$ )。流纹英安岩的长石类型较流纹英安斑岩多,其中流纹英安岩的长石类型包括钠长石、钾长石、钾-透长石、更长石、中长石;流纹英安斑岩长石类型主要有钠长石、钾长石和钾-透长石。流纹英安岩与流纹英安斑岩的黑云母形成温度基本相同( $750\pm 20^\circ\text{C}$ ),均具有高氧逸度,同属钙碱性岩;岩浆物质来源相同,均有幔源物质加入。【结论】流纹英安岩与流纹英安斑岩的化学成分基本相同、长石类型相似、物质来源相同、结晶温度相同、氧逸度一致、岩石性质相同,说明两者具有同源性。

**关键词:**长石;黑云母;岩浆演化;流纹英安岩;流纹英安斑岩;相山铀矿田;矿产勘查工程;江西

**创新点:**本研究利用电子探针技术对相山两类流纹英安岩进行矿物特征研究;通过对岩石中的长石、黑云母定量分析,对两者间的成分、物质来源、形成温度、氧逸度和岩石性质等特征研究,解决相山流纹英安岩与流纹英安斑岩两者在成因归属、物质来源和地幔物质参与等方面的争议。

中图分类号: P578.968; P578.959; P595 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2023)05-1495-18

## Magmatic evolution characteristics of two types of rhyolite dacite in Xiangshan uranium ore field—Evidence from chemical composition of feldspar and biotite

OUYANG Junyong<sup>1,2</sup>, ZHANG Shuming<sup>1,3</sup>, ZHANG Xin<sup>1,3</sup>, LIU Long<sup>1,4</sup>,  
XIA Yinchu<sup>1</sup>, WU Zhichun<sup>1,3</sup>, WAN Kang<sup>1</sup>

收稿日期: 2020-11-10; 改回日期: 2021-01-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(41862006, 41802247)和江西省研究生创新专项基金项目(YC2020-B159)联合资助。

作者简介: 欧阳军勇, 男, 1993 年生, 硕士生, 地质学专业; E-mail: 3423328173@qq.com。

通讯作者: 张树明, 男, 1965 年生, 教授, 主要从事铀矿地质研究和基础地质教学工作; E-mail: shmzhang@ecut.edu.cn。

(1. State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang, 330013, Jiangxi, China; 2. Hunan Geosun Hi-technology Co., Ltd., Changsha 410006, Hunan, China; 3. Key Laboratory of Radioactive Geology and Exploration Technology Fundamental Science for National Defense, East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China; 4. Gandong University, Fuzhou 344000, Jiangxi, China)

**Abstract:** This paper is the result of mineral exploration engineering.

**[Objective]** Minerals formed by magmatic differentiation, such as feldspar and biotite, can be used as indicators of magmatic evolution of host rocks. There are disputes between rhyodacite and rhyodacite porphyry from Xiangshan, in the aspects of formation age, origin, material source and mantle material participation. **[Methods]** In this paper, the electron probe technology is used to quantitatively analyze the feldspar and biotite in two types of rhyodacites in Xiangshan, and the composition, material source, formation temperature, oxygen fugacity and rock properties of the two types of rhyodacites are analyzed and studied. **[Results]** The results show that the rhyodacite of Xiangshan Daguding Formation can be divided into two types, one is the effusive rhyodacite ( $K_1d^{2a}$ ) and the other is the intrusive rhyodacite porphyry ( $K_1d^{2b}$ ). The types of feldspar from rhyodacite are more than those of rhyodacite porphyry. The feldspar types of rhyodacite include albite, potassium feldspar, potassium sanidine, feldspar and andesine. The main feldspar types of rhyodacite porphyry are albite, potassium feldspar and potassium-sanidine. The biotite formation temperature of rhyodacite and rhyodacite porphyry is basically the same ( $750\pm 20^\circ\text{C}$ ). Rhyodacite and rhyodacite porphyry both have high oxygen fugacity and belong to calc-alkaline rocks, indicating the same magma material source with part from mantle material. **[Conclusions]** The chemical composition is basically the same, together with the same feldspar type, the same material source, the same crystallization temperature, the same oxygen fugacity, and the same rock properties, indicating that the two have homology.

**Key words:** feldspar; biotite; magmatic evolution; rhyolite dacite; rhyodacitic porphyry; Xiangshan uranium orefield; mineral exploration engineering; Jiangxi Province

**Highlights:** (1) This study is used to study the mineral characteristics of two types of rhyodacite in Xiangshan, the electron probe technology is used to quantitatively analyze the feldspar and biotite in two types of rhyodacites in Xiangshan, and the composition, material source, formation temperature, oxygen fugacity and rock properties of the two types of rhyodacites are analyzed and studied, solve the disputes between Xiangshan rhyolite and rhyolite porphyry in the origin, material source and mantle material participation.

**About the first author:** OUYANG Junyong, male, born in 1993, master candidate, majors in geology; E-mail: 3423328173@qq.com.

**About the corresponding author:** ZHANG Shuming, male, born in 1965, professor, mainly engaged in research of uranium geology and teaching of basic geology; E-mail: shmzhang@ecut.edu.cn.

**Fund support:** Supported by projects of National Natural Science Foundation of China (No.41862006, No.41802247) and Postgraduate Student Innovation Special Fund Project in Jiangxi Province (No.YC2020-B159).

## 1 引 言

按照含矿主岩区分,相山已发现铀矿床主要分为火山熔岩脉型(含矿主岩为碎斑熔岩和流纹英安岩)、斑岩型(含矿主岩为花岗斑岩)和爆发角砾岩筒型(含矿主岩为火山角砾岩)三种类型。其中火山熔岩型铀矿床主要分布在相山矿田西部(如邹家山、居隆庵矿床等),个别分布在相山矿田北部(云际矿床);斑岩型铀矿床较集中地分布在相山矿田北部地区,如横涧、沙洲矿床等;爆发角砾岩筒型铀矿床仅在相山北部唯一发现(巴泉铀矿床),现已开

采完毕(张树明等,2012)。

“流纹英安岩”作为矿化主岩这一认识的突破,使相山矿田铀矿勘探进入新的历史阶段,铀矿储量大幅增加(吴仁贵,1999;吴仁贵等,2003;张树明等,2005;Yang et al.,2010;杨水源等,2012)。相山流纹英安岩按其岩相与岩性不同,可进一步分为流纹英安岩和流纹英安斑岩,两者在形成时代上和成因归属上具有不同的观点(吴仁贵,1999;吴仁贵等,2003;张树明等,2005;杨水源等,2010;Yang et al.,2010;陈正乐等,2013)。部分学者将流纹英安斑岩归属于第二旋回晚期(吴仁贵,1999;吴仁贵

等,2003;张树明等,2005;张万良和李子颖,2007;杨水源等,2010;Yang et al., 2010),也有学者认为流纹英安斑岩应属第一旋回晚期产物(陈正乐等,2013)。相山流纹英安岩与流纹英安斑岩在成岩年龄、成岩期次、物质来源等方面,前人存在不同的认识;杨水源等(2010)采用SHRIMP、LA-ICP-MS和LA-MC-ICP-MS对两种流纹英安岩进行了高精度锆石U-Pb同位素年代学和Hf同位素特征研究,结果表明:流纹英安岩和流纹英安斑岩分属早期溢出相和火山期后浅成—超浅成侵入岩,两者均为元古代变质岩部分熔融,源区无明显地幔物质加入;郭福生等(2016)对两者间的全岩主量、微量元素分析、Pb-Sr-Nd同位素分析,认为岩浆主要来自中元古代基底变质岩的部分熔融,但是有明显的幔源基性岩浆参与,根据二元混合模式计算得出幔源组分约占22.82%;贾伟和王正其(2017)对两类流纹英安岩的元素和同位素地球化学特征研究,认为两者岩浆过程中均主要受到部分熔融作用的制约,其原岩均可能为成熟度较高的上地壳物质,而且流纹英安岩和流纹英安斑岩具有相似的地球化学组成与特征、相似Sr-Nd同位素组成、高度相似的岩浆过程,说明两者是同期同源产物,而并非来源于不同期次岩浆过程。

显然,前人对相山流纹英安岩与流纹英安斑岩在成岩年龄、成岩期次、物质来源等方面仍然存在一定的分歧,尤其是岩浆物质来源、岩浆演化过程等方面缺少矿物学方面的证据。研究表明,花岗质岩石组成矿物的化学特性可以有效反映岩浆形成的物理化学性质及岩浆演化特征(赵沔等,2015),尤其长石和黑云母矿物可以作为寄主岩石岩浆演化的指示剂(Guidotti, 1984; Hewitt and Wones, 1984; 吕志成等,2003;张遵忠等,2005;王崴平等,2012)。因此,本文选择相山流纹英安岩和流纹英安斑岩中的长石、黑云母矿物作为研究对象,对其开展系统的电子探针测试,分析总结析长石、黑云母矿物化学组成在流纹英安岩和流纹英安斑岩中的异同点,在此基础上探讨流纹英安岩和流纹英安斑岩岩浆物质来源、岩浆性质及岩浆演化特征。

## 2 区域地质概况

相山火山盆地位于江西省抚州市乐安县与崇仁县交界处,大地构造位置位于扬子板块、华夏板

块和湘桂赣地块拼合处(图1),处于赣杭火山岩型多金属铀成矿带西南段和大王山—于山花岗岩型多金属铀成矿带交汇部位,是一个典型的火山岩型铀多金属成矿盆地。相山是一个火山塌陷盆地,火山平面呈椭圆形(图2),东西长约26.5 km,南北宽约15 km,面积约309 km<sup>2</sup>(张万良和李子颖,2007;陈雷等,2013;郭福生等,2017,2018)。

相山地层主要呈“两层”结构,下部地层为新元古代青白口系基底变质岩,主要出露在相山盆地北部、南部及西部一带;上部地层是一套早白垩世酸性火山岩系,并被晚白垩世龟峰群不整合覆盖。青白口系主要包括神山组、库里组和上施组,是一套次深海相向滨海相过渡的沉积变质岩系,主要包括绢云母石英片岩、石英岩、碳质千枚岩、石英大理岩、变砂岩、绢云母千枚岩等。早白垩世酸性火山岩包含打鼓顶组与鹅湖岭组,代表相山火山两次喷发旋回;打鼓顶组和鹅湖岭组均可划分两段,代表火山旋回过程火山间歇—喷发沉积—间歇的喷发过程。打鼓顶组一段主要由底砾岩、含砾砂岩、砂岩、粉砂岩、泥岩和熔结凝灰岩组成,在粉砂岩与泥岩内见钙质和铁锰质结核;二段主要由流纹英安岩、流纹英安斑岩组成,流纹英安岩发育流纹构造,有明显赤铁矿条带,局部可见流纹英安质角砾岩。鹅湖岭组一段主要由凝灰质砂岩、粉砂岩、晶屑玻屑凝灰岩、熔结凝灰岩组成;二段主要是碎斑熔岩,具有三个亚相,分别为边缘相含变质角砾碎斑熔岩、过渡亚相碎斑熔岩、中心相含花岗质碎斑熔岩,其中边缘亚相中变质岩角砾与中心亚相中花岗质碎屑团块具有一定的定向性(郭福生等,2017;王利玲等,2020)。

相山在长期地质演化过程中,历经扬子期—加里东期、海西期—印支期、燕山期—喜马拉雅山期三个主要构造演化阶段,形成了NE向和NW向断裂、NEE向褶皱、EW向推覆构造、火山塌陷等。区域性大构造及其次生构造与火山塌陷构造共同构成相山铀矿区的成矿环境,其成矿构造主要为近NS向,矿脉多为细脉状,控矿构造主要为NE向和NW向。

## 3 采样位置及岩相学

### 3.1 采样位置

本文主要选取相山打鼓顶组二段的流纹英安



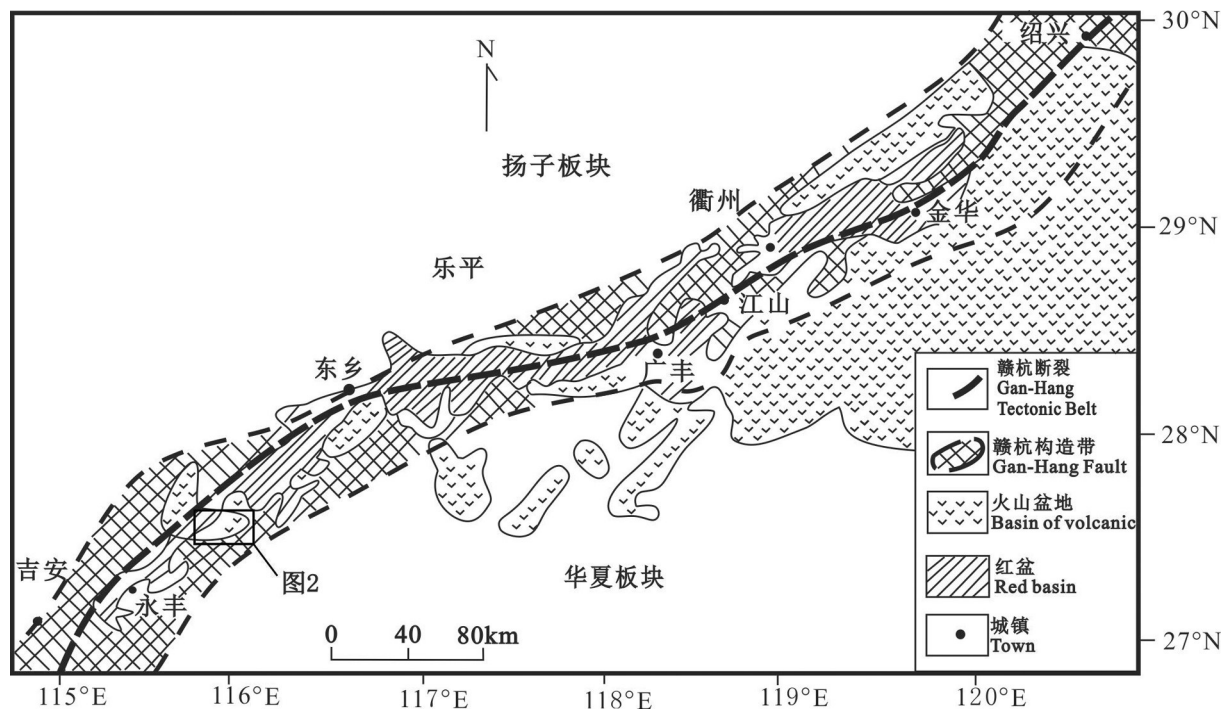


图1 赣杭构造带简图(据余心起等,2006修改)

Fig.1 Simplified geology of the Gan-Hang Volcanic Belt (modified from Yu Xinqi et al., 2006)

岩(条带状流纹英安岩)与流纹英安斑岩(块状流纹英安岩)中的长石与黑云母作为研究对象;其采样地点包括如意亭、堆头、邹家山矿床(图2,表1)。

### 3.2 岩相学

相山打鼓顶组流纹英安岩可区分为两类(图3),一类是流动状的喷溢相流纹英安岩( $K_1d^a$ ),流纹特征明显;另一类是盖于其上部流纹英安斑岩( $K_1d^b$ ),呈块状,无流纹,含有大量熔岩块,深部勘探可见流纹英安斑岩呈数百米长的岩枝状插入碎斑熔岩中(图4)。

流纹英安岩( $K_1d^a$ )前人也曾称为条带状流纹英安岩,主要位于盆地北部与西部周边,呈带状分布(图2)。流纹英安岩在成岩后,可能受到了一次规模较大的构造变形(图5),这次构造变形使流纹英安岩出现了以下的变形现象:①膝折式的褶皱和断裂,流纹英安岩的产状由平缓( $10^\circ\sim 15^\circ$ )突然变陡( $40^\circ\sim 60^\circ$ ),空间上成有规律的褶折,类似膝折,但规模及幅度远远超出折膝的尺度;局部地方可见顺层逆冲特征(图5),形变强烈部位有流纹英安斑岩穿插。②东西走向向南缓倾的流纹英安岩在局部地段转向了近北北西—南北走向,产状陡立,如:如意

亭公路、堆下公路旁均可见。流纹英安岩为浅灰红色(图6b),具有斑状结构,流纹构造,流纹构造由紫红色与灰白色条带相间组成,紫红色条带主要是铁质沿层面浸染生成(图6a)。岩石斑晶占全岩总量的18%,主要成分是斜长石,钾长石,石英和黑云母,部分卷入岩石碎屑(图6b);基质多为隐晶质结构。斜长石呈板状,半自形,发育聚片双晶(图6c、d)、卡钠复合双晶,环带现象不明显,粒径0.22~1.98 mm。钾长石,他形,具有卡氏双晶,裂纹发育,遭受较强烈的碳酸盐化,粒径为0.36~1.70 mm。黑云母在镜下较破碎,蚀变严重,有绿泥石化,但整体形状完好(图6e、f)。石英,棱角状,个别发育裂纹,粒径为0.17~1.14 mm。基质为石英长石质隐晶质结构,局部过渡为显微嵌晶结构。副矿物有少量磷灰石、锆石和绿帘石等矿物。

流纹英安斑岩( $K_1d^b$ )前人曾称为块状流纹英安岩或块熔岩,块熔岩中熔岩块成角砾状产出,但角砾不仅仅是熔岩块,块熔岩中角砾是由3套物质组成,一套是下部流纹状英安岩的角砾,另一套是砂岩的大小不等的岩块,还有一套是熔结凝灰岩的碎块。在空间分布上,下部,即靠近流纹状英安岩,



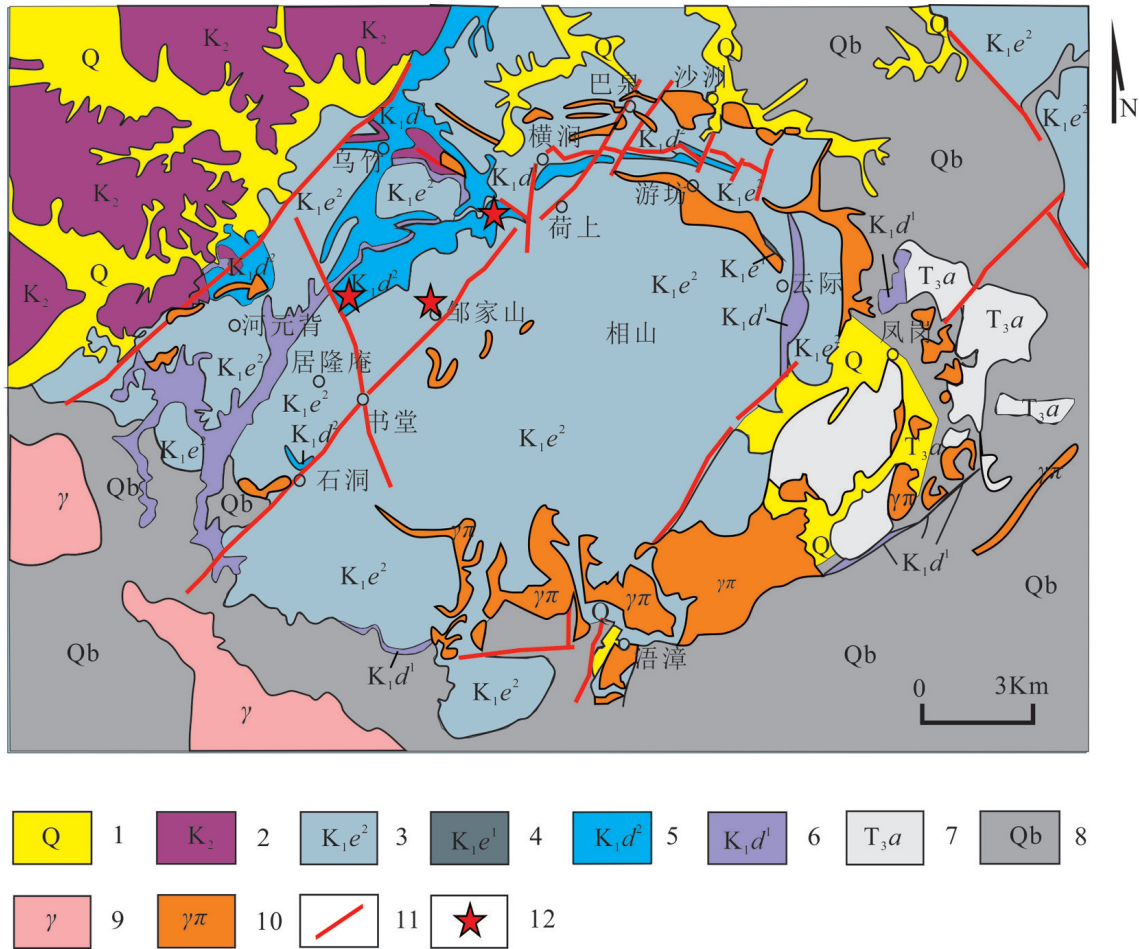


图2 相山地质简图(据刘龙等, 2020 修改)

1—第四系黏土; 2—上白垩统砂岩、砂砾岩; 3—鹅湖岭组二段碎斑熔岩; 4—鹅湖岭组一段砂砾岩、晶屑凝灰岩; 5—打鼓顶组二段流纹英安岩; 6—打鼓顶组一段熔结凝灰岩、砂岩; 7—上三叠统石英砂岩、页岩; 8—青白口系片岩、千枚岩; 9—加里东期花岗岩; 10—花岗岩斑岩; 11—断裂; 12—取样位置

Fig.2 Geological schematic diagram of Xiangshan (modified from Liu Long et al., 2020)

1—Quaternary clay; 2—Upper Cretaceous sandstone and glutenite; 3—Porphyry lava of the second section of Ehuling Formation; 4—Glutenite and crystalline tuff in the first section of Ehuling Formation; 5—Rhyolite dacite of the second section of Daguding Formation; 6—Fused tuff and sandstone of the first section of Daguding Formation; 7—Upper Triassic quartz sandstone and shale; 8—Schist and phyllite of Qingbaikou; 9—Caledonian granites; 10—Granite porphyry; 11—Fracture; 12—Sampling position

以流纹英安岩为主;上部,即靠近上部砂岩(K<sub>1d1</sub>),以砂岩为主,上部局部地段还可见熔结凝灰岩的角砾。流纹英安斑岩与流纹英安岩呈侵入接触(图3,图4,图7a)。流纹英安斑岩为灰红褐色,不具有紫红色条带(图7b),但有红色“团块”。岩石具有斑状结构(图7b),斑晶含量10%~32%,其大小在0.15~3.6 mm,主要成分为斜长石、钾长石、石英及黑云母等。斑晶占全岩总量的25%,钾长石占斑晶36%,斜长石占34%,黑云母占16%,石英占14%。钾长石,他形,卡氏双晶,裂纹发育,其边缘被熔蚀圆化并见基质嵌入现象。斜长石,半自形,环带现象也不明

显,但有明显的聚片双晶现象(图7c、b),发育卡钠复合双晶,发生水云母化、碳酸盐化,粒径为0.29~1.17 mm。黑云母常见绿石化,破碎严重(图7e),部分形成铁染(图7e、f)。石英,棱角状,裂纹发育,周边被熔蚀港湾状,其粒径为0.13~1.16 mm。基质为显微嵌晶结构,由长石微晶和不规则的石英颗粒彼此镶嵌而成,长石泥化较为强烈。副矿物为少量磷灰石、锆石和绿帘石等。

#### 4 分析方法与分析结果

长石和黑云母在东华理工大学核资源与环境

表1 相山两类流纹英安岩采样位置  
Table 1 Sampling locations of two types of rhyolitic dacite in Xiangshan

样号	采样地点	地理坐标		岩石性质
		纬度N	经度E	
XS19-02		27°35'30.3"	115°54'28.6"	流纹英安岩
XS19-03		27°35'27.0"	115°54'28.3"	流纹英安岩
XS19-05	如意亭	27°35'08.0"	115°54'29.2"	流纹英安岩
XS19-06		27°35'05.6"	115°54'31.1"	流纹英安斑岩
XS19-07		27°35'03.7"	115°54'31.1"	流纹英安斑岩
XS19-11	堆头	27°34'58.0"	115°52'47.1"	流纹英安岩
XS19-13		27°34'53.4"	115°52'46.4"	流纹英安岩
XS19-15		27°34'09.6"	115°54'02.2"	流纹英安斑岩
XS19-16	邹家山	27°34'09.6"	115°54'02.2"	流纹英安岩
XS19-17		27°34'09.6"	115°54'02.2"	流纹英安斑岩

国家重点实验室中使用4道波普仪的仪器型号为JXA-8230型电子探针完成,工作条件为:加速电压为15 kV,加速电流为20 nA,束斑直径为1~2 μm,检出限0.01%。所有测试数据均进行了ZAF校正处理,元素特征峰的测量时间为10 s,背景测量时间为5 s。电子探针数据由GeoKit软件分别对长石和黑云母的端元分子数和阳离子数进行计算。

4.1 长石

本次测试长石共59个点,分析结果见表2。由表可知,流纹英安岩中的长石主要成分为:SiO<sub>2</sub>含量60.08%~73.70%,平均68.73%;Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量14.60%~25.14%,平均18.07%;Na<sub>2</sub>O含量0.01%~11.81%,平均4.284%;K<sub>2</sub>O含量0.04%~16.72%,平均8.444%;CaO含量0.01%~8.16%,平均0.62%。流纹英安斑

岩中的长石主要成分为:SiO<sub>2</sub>含量64.44%~71.61%,平均68.073%;Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量14.84%~20.67%,平均18.19%;Na<sub>2</sub>O含量0.22%~11.23%,平均3.90%;K<sub>2</sub>O含量0.03%~16.79%,平均9.83%;CaO含量0.01%~1.73%,平均0.47%。

以上结果显示,流纹英安岩长石中Na<sub>2</sub>O、CaO比流纹英安斑岩稍高,K<sub>2</sub>O较低,其余成分大致相当。从表2可以看出,流纹英安岩长石An含量变化在An<sub>0.02</sub>~An<sub>43.55</sub>,流纹英安斑岩长石An含量变化在An<sub>0.04</sub>~An<sub>9.3</sub>,其总体而言,流纹英安岩较流纹英安斑岩中长石成分变化范围更广。

在长石分类图解(图8)中,流纹英安斑岩(块状流纹英安岩)主要位于钠长石、钾长石和部分钾-透长石范围内;而流纹英安岩(条带状流纹英安岩)分布于钠长石、钾长石、钾-透长石、更长石、中长石范围内,流纹英安岩中长石种类较流纹英安斑岩长石种类更多。流纹英安岩的长石类型偏向于Ab端元,流纹英安斑岩的长石类型偏向于Or端元。长石成分关系图解中(图9),流纹英安岩长石的成分散点分布更分散,流纹英安斑岩长石成分散点分布更收敛。

4.2 黑云母

测试两类流纹英安岩中黑云母共18个点,分析结果见表3,云母的Fe<sup>2+</sup>和Fe<sup>3+</sup>值采用林文蔚和彭丽君(1994)的计算方法获得,矿物结构式以22个氧原子计算获得黑云母的阳离子数以及相关参数。

由表3可知,流纹英安岩中黑云母的主要化学成分为:SiO<sub>2</sub>含量26.20%~39.77%,平均38.07%;

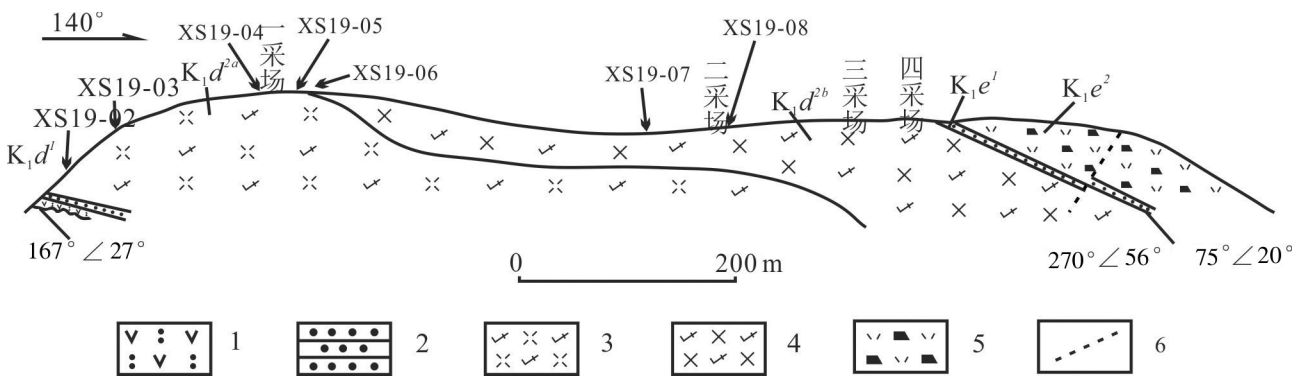


图3 如意亭实测剖面示意图(据吴仁贵,1999修改)

1—凝灰岩;2—砂岩、粉砂岩;3—流纹英安岩;4—流纹英安斑岩;5—碎斑熔岩;6—断层

Fig.3 Diagram of Ruyiting section(modified from Wu Rengui, 1999)

1—Tuff; 2—Sandstone, siltstone; 3—Rhyolitic dacite; 4—Rhyodacitic porphyry; 5—Porphyroclastic lava; 6—Fault

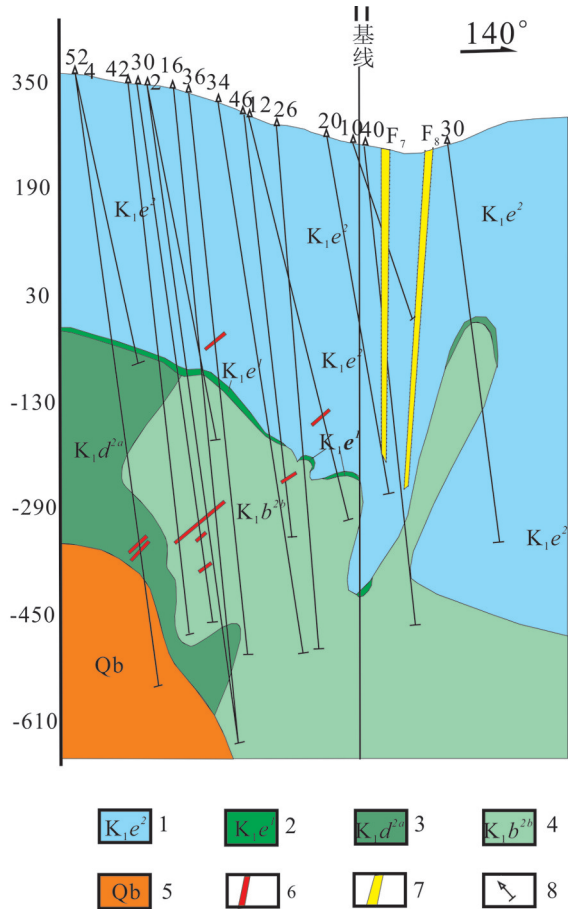


图4 邹家山矿床55线剖面图(据江西核工业地质局261队内部资料)

1—碎斑熔岩;2—砂岩、晶屑玻璃凝灰岩;3—流纹英安斑岩;4—流纹英安岩;5—基底变质岩;6—矿脉;7—断层;8—钻孔

Fig.4 Section of line 55 of Zoujiashan deposit (according to internal data of Team 261, Jiangxi Geological Bureau of Nuclear Industry)

1—Porphyroclastic lava; 2—Sandstone, crystal glass tuff; 3—Rhyodacitic porphyry; 4—Rhyolite dacite; 5—Basement metamorphic rock; 6—Mineral ore; 7—Fault; 8—Drill hole

TiO<sub>2</sub> 含量 4.45%~6.11%, 平均 5.10%; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量 12.79%~15.51%, 平均 14.31%; FeO 含量 14.36%~17.31%, 平均 15.62%; MgO 含量 10.94%~13.54%, 平均 12.63%; K<sub>2</sub>O 含量 8.23%~9.20%, 平均 8.83%; F 含量在 2.35%~4.13%, 平均 3.36%。流纹英安斑岩中黑云母的主要化学成分为: SiO<sub>2</sub> 含量 235.64%~37.73%, 平均 36.89%; TiO<sub>2</sub> 含量 24.33%~5.01%, 平均 4.77%; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量 12.57%~14.50%, 平均 13.72%; FeO 含量 15.44%~18.02%, 平均 16.33%; MgO 含量 11.99%~13.09%, 平均 12.48%; K<sub>2</sub>O 含量 7.31%~

8.45%, 平均 8.00%; F 含量 2.74%~4.72%, 平均 3.50%。流纹英安岩中黑云母的 SiO<sub>2</sub>、TiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、K<sub>2</sub>O 含量较流纹英安斑岩的仅稍高, 而 FeO 的含量则较流纹英安斑岩只稍低, MgO、F 大致相当; 结果表明: 流纹英安岩和流纹英安斑岩黑云母成分没有太大区别。

由黑云母成分对 Fe<sup>2+</sup>/(Fe<sup>2+</sup>+Mg) 关系图(图 10) 可知, 流纹英安岩和流纹英安斑岩中黑云母中 SiO<sub>2</sub>、TiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、FeO、MgO、MnO、K<sub>2</sub>O、Na<sub>2</sub>O 对 Fe<sup>2+</sup>/(Fe<sup>2+</sup>+Mg) 的变化趋势基本相同。两类流纹英安岩黑云母成分进行投图, 作 Mg-(Al<sup>VI</sup>+Fe<sup>3+</sup>+Ti)-(Fe<sup>2+</sup>+Mn) 分类图解(图 11), 可以看出, 流纹英安岩和流纹英安斑岩的黑云母成分主要落入镁质黑云母范围内, 属于镁质黑云母。

## 5 讨论

### 5.1 长石成分特征与意义

岩浆混合作用是中、酸性岩石的主要形成过程之一, 一般而言, 混合岩浆大多经受多期后期混合作用, 使得从元素和同位素地球化学角度来重建岩浆演化过程, 难以实现。然而, 混合作用过程中形成的一些矿物(角闪石、辉石、黑云母和斜长石等)的矿物结构, 保存了岩浆演化过程中的历史痕迹, 完全可以示踪整个混合岩浆演化过程(谢磊等, 2004)。

依据本次电子探针测试分析数据(表 2)与长石测点位置(图 12)可知, 两类流纹英安岩均含有碱性长石与斜长石, 在电子探针图中(图 12c、d), 碱性长石斑晶呈暗色, 斜长石斑晶呈灰白色, 且两者均环带构造现象不明显。流纹英安斑岩中(图 12c、a), 碱性长石 Or 变化平稳, 核部、边部没有大的变化, 整体呈酸性, 且由核部向边部酸性程度降低, 基性程度增加。流纹英安岩中(图 12d、b), 碱性长石 Or 变化也较平稳, 核部、边部没有较大的变化, 整体呈酸性, 由核部向边部酸性程度降低, 基性程度增加; 而在斜长石中 Ab 由核部向边部逐渐增加, 整体呈酸性, 且由核部向边部酸性程度增加, 基性程度降低; 斜长石从中心到边缘有基性到酸性的变化。而且就整体而言, 两类流纹英安岩中均有斜长石比碱性长石酸性程度高。

### 5.2 黑云母成分特征及意义

黑云母等岩浆分异作用形成的矿物, 可以作为



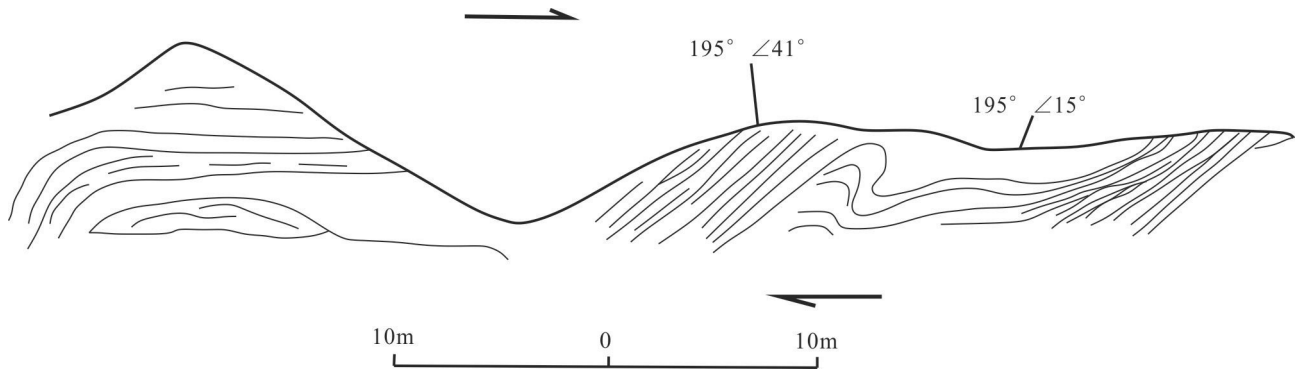


图5 流纹英安岩变形特征素描图(地点:如意亭剖面沟谷处)  
Fig.5 Deformation characteristics of rhyolite dacite (Location: Ruyiting section gully)

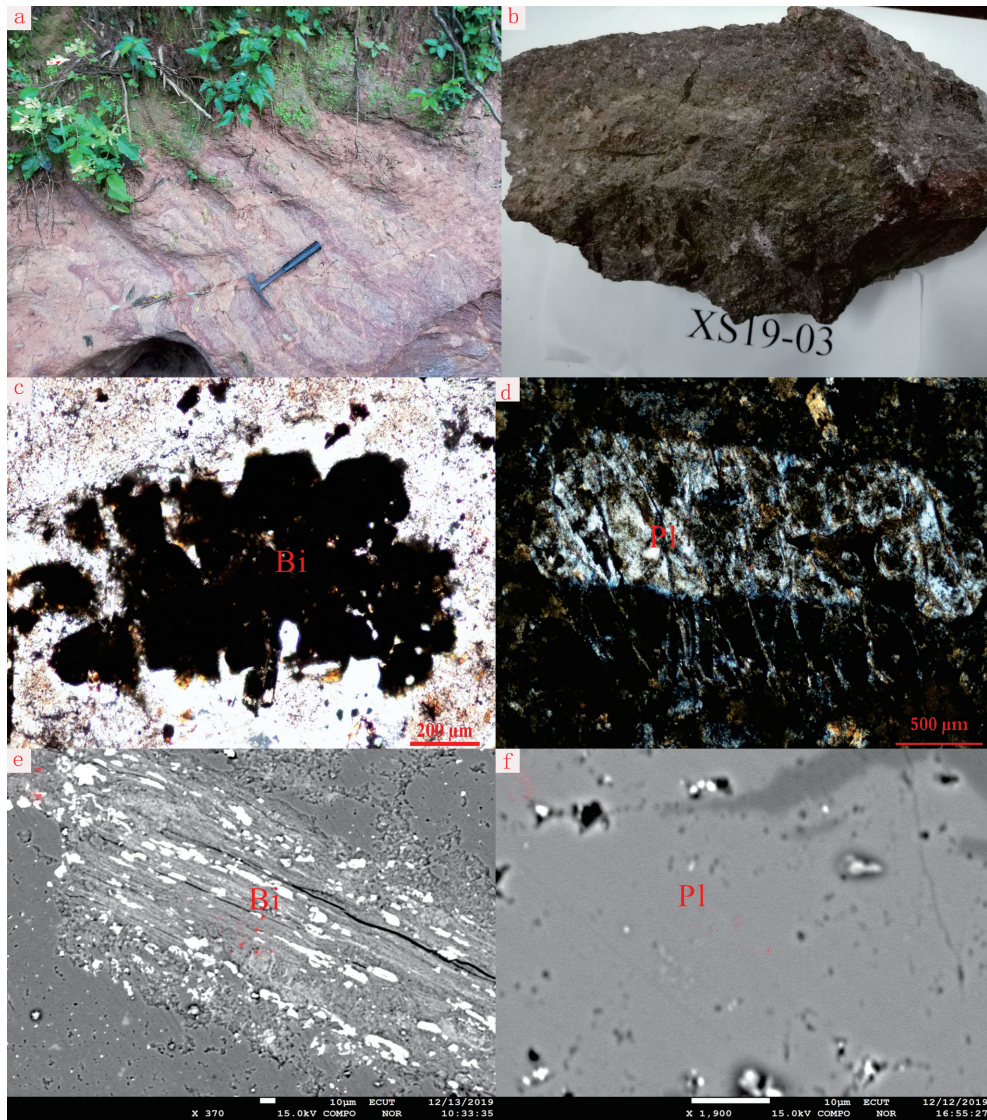


图6 相山流纹英安岩地质照片  
a—野外特征(堆头);b—XS19-03手标本照片;c,d—偏光显微镜照片;e,f—电子探针照片;Pl—斜长石;Bi—黑云母  
Fig.6 Geological photographs of the rhyolite dacite in Xiangshan  
a—Field characteristics photograph (Duitou); b—XS19-03 Hand specimen photograph; c, d— Polarizing microscope photograph; e, f— Electron probe photograph; Pl—Plagioclase; Bi—Biotite



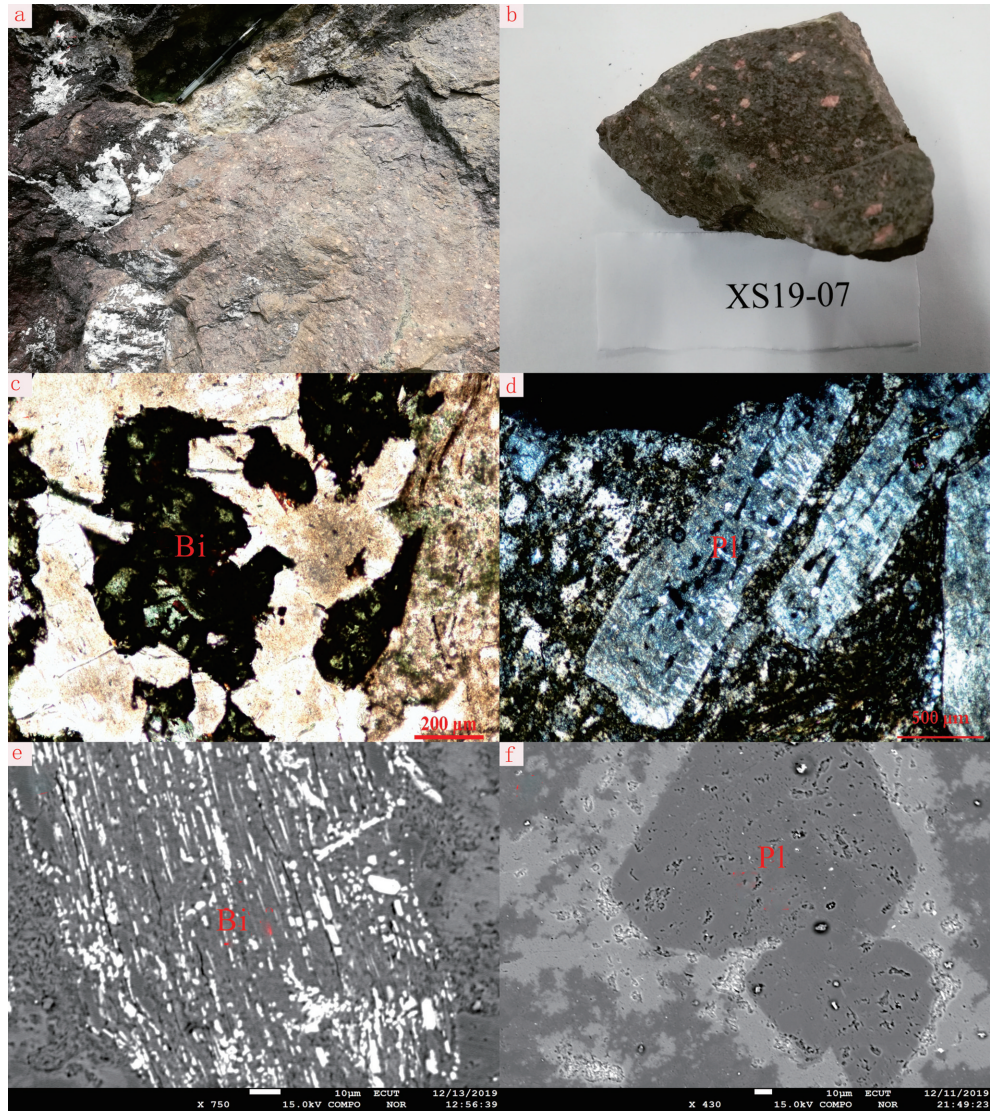


图7相山流纹英安斑岩地质照片

a—野外照片(如意亭);b—XS19-07手标本照片;c,d—偏光显微照片;e,f—电子探针照片;Pl—斜长石;Bi—黑云母

Fig.7 Geologic photographs of the rhyolite porphyry in Xiangshan

a—Field characteristics photograph (Ruyiting); b—XS19-07 hand specimen photograph; c,d—Polarizing microscope photograph; e,f—Electron probe photograph; Pl—Plagioclase; Bi—Biotite

寄主岩石岩浆演化的指示剂。傅金宝(1981)通过整理中国一些斑岩铜矿床中黑云母数据,得出岩浆黑云母具有高Ti,低Al的特点, $TiO_2$ 含量 $>3\%$ , $Al_2O_3$ 含量 $<15\%$ ;热液新生黑云母具有低Ti、高Al的特点, $TiO_2$ 含量 $<3\%$ , $Al_2O_3$ 含量 $>15\%$ ;热液交代黑云母介于两者之间,表明交代过程中元素具有继承性。反映在 $Al_2O_3/TiO_2$ 比值上,岩浆黑云母比值 $<3.5$ ,热液黑云母比值 $\geq 7$ ,热液交代黑云母比值居于两者之间。两类流纹英安岩中黑云母的 $Al_2O_3/TiO_2$ 比值均小于3.5(表3),属于岩浆黑云母,能代表流

纹英安岩和流纹英安斑岩的岩浆性质。

黑云母成分的变化是其寄主岩浆物理化学条件的综合体现(Guidotti, 1984; Hewitt et al. and Wones, 1984; 吕志成等, 2003; 张遵忠等, 2005; 王崑平等, 2012)。岩浆黑云母的镁质率 $[M=Mg/(Mg+Mn+Fe^{2+})]$ 可以作为判断寄主岩石形成环境的一个依据, $M \geq 0.45$ 为深源系列花岗岩(有地幔物质加入), $M$ 为浅源系列花岗岩(地壳熔融产物)(杨文金等, 1988; 陈国安和周珣若, 1996)。相山流纹英安岩的 $M$ 在0.727~0.861,平均值为0.790;流纹英安斑岩的

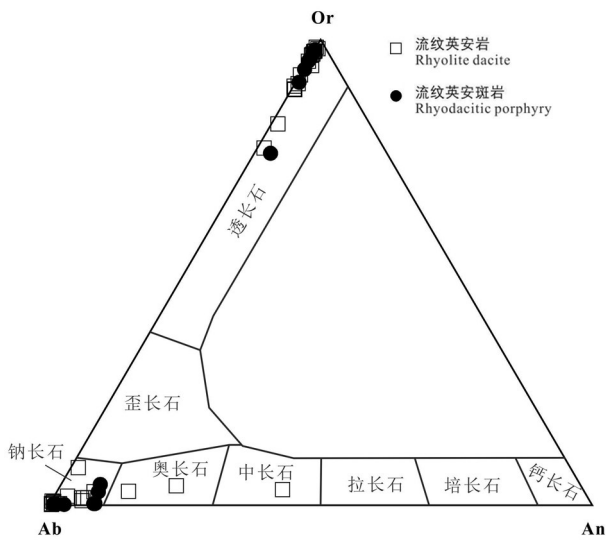


图 8 相山两类流纹英安岩中斜长石 Ab-An-Or 三元图解 (底图据 Deer et al., 1992)

Fig.8 Ab-An-Or ternary diagram of plagioclase in two types of rhyolite dacite in Xiangshan (after Deer et al., 1992)

M在0.735~0.803,平均值为0.767。流纹英安岩和流纹英安斑岩中岩浆黑云母的M最小值大于0.45,属于深源系列花岗岩黑云母特征(杨文金等,1986)。深源系列花岗岩含有深源物质,因此,流纹英安岩和流纹英安斑岩的形成均有一定的地幔物质加入。黑云母主量元素特征在一定程度上可以指示岩浆源区性质,根据 $MgO-TFeO/(TFeO+MgO)$ 图解(图13a),可以看出流纹英安岩和流纹英安斑岩两者的形成,均有地幔物质加入,均是壳幔混合来源。

黑云母中Ti含量对温度和氧逸度非常敏感,因此Ti的含量可以有效地估算火成岩和变质岩中黑云母形成温度(Robert, 1976; Pation Douce, 1993)。Henry(2005)根据美国缅因州西部和马萨诸塞州中南部黑云母化学成分,得出Ti含量、温度和 $Mg/(Mg+Fe)$ 值存在非线性关系,可以利用Ti含量计算黑云母形成温度。由 $Mg/(Mg+Fe)-Ti$ 图解(13b)可见,流纹英安岩和流纹英安斑岩中岩浆黑云母形

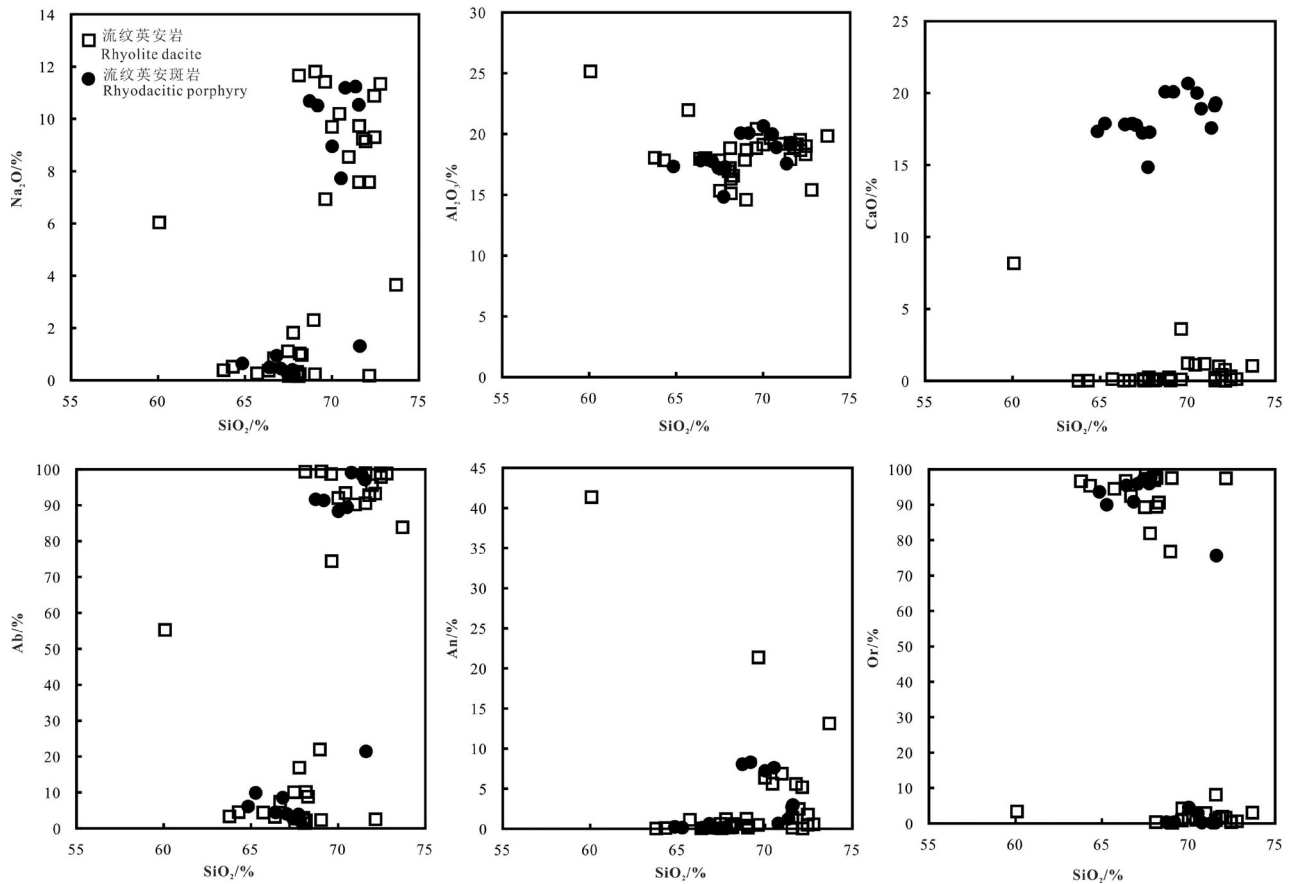


图 9 斜长石中 Na<sub>2</sub>O、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO、An、Ab、Or 对 SiO<sub>2</sub> 的关系图解

Fig.9 Relationship diagrams of Na<sub>2</sub>O, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, An, Ab, Or vs SiO<sub>2</sub> in plagioclase



表2 相山两类流纹英安岩长石电子探针测试数据(%)

Table 2 Electron probe test data of feldspar of two types of rhyolite dacite in Xiangshan (%)

岩性	样品号	测点号	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	BaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Total	An	Ab	Or	
流纹英安岩	XS19-02	1	64.30	0.04	17.84	0.02	-	0.02	0.01	0.27	0.51	16.34	99.35	0.07	4.55	95.38	
		2	68.11	0.03	18.84	-	-	-	0.06	-	11.66	0.07	98.77	0.28	99.33	0.39	
		5	69.61	0.05	18.85	0.77	0.01	0.19	0.10	0.08	11.41	0.15	101.21	0.46	98.68	0.86	
		6	63.78	0.02	18.05	0.02	0.01	-	0.01	0.45	0.38	16.70	99.41	0.01	3.34	96.64	
		7	73.70	0.01	19.84	0.04	0.03	0.01	1.03	-	3.65	0.20	98.49	13.13	83.83	3.04	
		8	66.29	-	17.71	-	-	-	-	0.27	0.24	16.72	101.24	0.01	2.13	97.87	
		9	67.33	-	15.55	-	-	-	-	0.42	0.36	15.34	98.99	0.01	3.43	96.57	
		10	66.01	0.05	16.15	-	-	0.01	-	0.30	0.33	16.19	99.04	0.01	3.03	96.97	
		12	69.05	-	18.69	0.02	0.01	0.01	0.08	0.01	11.81	0.04	99.71	0.39	99.42	0.19	
		13	72.79	0.04	15.40	0.04	0.01	0.01	0.12	-	11.33	0.11	99.83	0.55	98.83	0.62	
		14	66.70	0.01	17.70	0.06	-	0.01	-	0.01	0.01	16.47	101.61	0.01	0.05	99.95	
		15	72.15	-	18.67	0.04	0.01	-	0.01	0.25	0.17	10.01	101.29	0.02	2.55	97.44	
		16	66.37	0.07	17.97	0.04	-	-	-	0.01	0.31	0.37	16.64	101.75	0.04	3.23	96.74
		17	71.58	0.02	17.93	0.41	0.01	0.04	0.02	-	9.72	0.14	99.87	0.11	98.95	0.94	
	18	67.22	-	17.63	-	-	0.01	-	0.36	0.33	16.08	101.65	0.01	3.00	97.00		
	19	67.78	0.01	17.15	0.13	-	0.02	0.23	0.19	1.82	13.36	100.69	1.19	16.91	81.90		
	20	68.95	0.01	17.86	0.20	-	0.12	0.23	0.04	2.30	12.20	101.92	1.24	22.00	76.77		
	21	72.46	-	19.00	0.06	-	0.01	0.30	-	9.30	0.06	101.19	1.76	97.86	0.38		
	22	68.15	0.01	15.12	0.22	0.01	-	0.07	0.08	1.02	13.60	98.28	0.40	10.17	89.43		
	23	68.28	-	16.56	0.19	0.02	-	0.11	0.12	0.96	15.01	101.25	0.57	8.84	90.60		
	25	68.20	-	15.25	0.05	0.03	-	-	0.14	0.33	14.62	98.60	0.01	3.30	96.70		
	26	69.63	0.02	20.42	0.11	0.02	-	3.60	0.02	6.92	0.60	101.34	21.35	74.42	4.23		
31	60.08	0.01	25.14	0.26	-	-	8.16	0.05	6.03	0.56	100.33	41.34	55.27	3.38			
34	65.71	0.04	21.97	1.95	0.01	0.64	0.12	0.12	0.26	8.38	99.19	1.10	4.42	94.48			
54	69.03	0.05	14.60	0.76	0.02	-	0.02	0.08	0.23	14.30	99.07	0.11	2.35	97.53			
55	68.15	-	16.30	0.25	0.04	-	0.04	0.27	0.23	15.25	100.52	0.20	2.25	97.56			
56	68.01	0.05	16.94	0.15	-	-	0.03	0.21	0.31	15.68	101.41	0.14	2.95	96.91			
57	67.53	0.05	15.34	0.23	-	-	0.01	0.08	0.16	15.40	98.78	0.04	1.58	98.37			
59	70.01	-	19.12	0.19	0.02	0.01	1.21	-	9.69	0.26	100.56	6.35	92.00	1.65			
60	70.44	0.04	19.67	0.09	0.01	0.01	1.11	0.01	10.19	0.17	101.73	5.60	93.38	1.03			
62	71.94	0.01	19.15	0.09	0.02	0.01	0.43	0.06	9.13	0.29	101.11	2.46	95.58	1.96			
63	71.78	-	18.90	0.06	0.02	0.01	1.00	-	9.24	0.25	101.29	5.57	92.81	1.62			
64	72.13	0.02	19.52	0.23	-	-	0.76	-	7.58	0.20	100.45	5.18	93.21	1.61			
65	70.97	-	19.19	0.22	-	0.02	1.18	-	8.54	0.42	100.55	6.86	90.21	2.93			
66	67.47	-	17.84	0.10	0.01	0.02	0.12	0.19	1.11	14.86	101.72	0.59	10.11	89.30			
67	71.57	-	19.28	0.44	-	0.18	0.21	0.02	7.58	1.03	100.30	1.35	90.54	8.11			
72	72.44	0.03	18.32	0.08	-	-	0.10	0.01	10.88	0.11	101.98	0.49	98.86	0.65			
80	68.09	0.10	17.19	0.37	0.01	-	0.09	0.19	0.16	15.79	101.98	0.48	1.46	98.06			
83	66.68	0.03	18.02	0.03	-	-	0.02	0.45	0.84	15.75	101.82	0.11	7.46	92.43			
36	71.61	-	19.30	0.26	0.01	0.04	0.33	0.17	1.31	7.00	100.01	2.97	21.42	75.62			
37	67.74	-	14.84	0.14	0.02	-	0.03	0.20	0.40	14.85	98.20	0.15	3.90	95.96			
39	68.72	0.01	20.08	0.03	0.01	0.02	1.70	-	10.68	0.06	101.30	8.04	91.61	0.36			
40	69.18	0.02	20.07	0.02	0.02	0.01	1.73	-	10.51	0.06	101.62	8.29	91.35	0.36			
41	66.42	0.05	17.81	0.02	0.02	-	0.01	0.15	0.49	15.97	100.93	0.06	4.47	95.47			
42	67.07	0.02	17.75	0.01	-	-	0.01	0.26	0.44	16.03	101.60	0.07	4.03	95.91			
43	65.84	-	17.81	0.04	-	-	-	0.25	0.23	16.79	100.96	0.01	2.01	97.99			
46	70.02	-	20.67	0.17	0.01	0.05	1.32	0.05	8.95	0.69	101.91	7.21	88.31	4.49			
48	66.83	0.01	17.88	0.09	0.02	0.01	0.12	0.24	0.94	15.18	101.32	0.62	8.54	90.84			
50	67.82	0.02	17.28	0.24	0.01	-	0.01	0.08	0.23	16.10	101.79	0.05	2.10	97.85			
51	66.32	0.01	16.54	0.05	0.03	-	-	0.36	0.39	15.33	99.02	0.01	3.76	96.24			
52	67.42	0.07	17.22	0.42	-	-	0.01	0.12	0.29	15.93	101.48	0.04	2.69	97.27			
74	71.55	-	19.12	0.06	0.02	0.01	0.53	-	10.54	0.04	101.97	2.69	97.09	0.22			
75	64.44	0.02	18.01	0.01	0.01	0.01	-	0.16	0.22	16.77	99.63	0.01	1.94	98.06			
76	70.77	-	18.91	0.03	0.01	0.01	0.14	0.02	11.19	0.04	101.11	0.66	99.08	0.26			
77	70.53	-	20.00	0.20	-	0.06	1.19	0.02	7.72	0.39	100.10	7.61	89.44	2.95			
78	71.35	-	17.57	0.04	0.01	-	0.25	0.09	11.23	0.03	100.62	1.22	98.59	0.20			
79	64.85	0.02	17.33	0.40	0.01	0.13	0.04	0.37	0.64	14.90	98.69	0.22	6.13	93.64			
85	65.28	0.01	17.88	0.04	-	0.01	0.03	0.34	1.12	15.49	100.17	0.12	9.87	90.00			
86	67.72	0.04	17.73	0.03	0.01	-	-	0.37	0.55	15.04	101.50	0.01	5.29	94.71			

表 3 相山两类流纹英安岩岩浆黑云母电子探针测试结果(%)及计算结果

Table 3 Electron probe test and calculation results of biotite of two types of rhyolite dacite in Xiangshan (%)

岩性(样品数) 样品号(XS19-)	流纹英安岩(14)										流纹英安斑岩(3)						
	2					3					5		13	6	7	17	
SiO <sub>2</sub>	37.40	38.54	37.60	36.89	37.70	39.77	36.80	38.43	39.61	39.70	36.61	38.21	39.49	36.20	35.65	37.29	37.73
TiO <sub>2</sub>	4.91	5.11	4.86	5.65	4.46	4.87	6.11	5.29	5.16	4.95	5.27	5.23	5.03	4.45	5.01	4.33	4.96
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.51	13.81	14.50	13.98	14.56	15.02	13.64	14.34	14.70	15.28	12.79	14.17	14.17	13.84	14.50	14.11	12.57
FeO	16.03	15.51	15.68	16.03	15.23	15.15	16.53	15.12	14.86	15.05	16.39	15.47	14.36	17.31	18.02	15.44	15.52
MnO	0.21	0.15	0.13	0.13	0.15	0.15	0.15	0.17	0.16	0.11	0.14	0.14	0.16	0.17	0.14	0.18	0.24
MgO	11.72	10.94	12.59	13.54	12.23	12.93	13.49	12.57	12.57	12.62	13.33	12.55	12.94	12.84	13.09	12.35	11.99
CaO	0.11	0.05	0.07	0.03	0.14	0.12	0.04	0.05	0.07	0.10	0.07	0.07	0.08	0.12	0.07	0.10	0.12
Na <sub>2</sub> O	0.37	0.38	0.39	0.43	0.30	0.42	0.40	0.32	0.37	0.38	0.44	0.34	0.39	0.39	0.49	0.34	0.43
K <sub>2</sub> O	8.23	9.10	9.08	9.20	8.64	8.76	9.14	9.13	9.03	8.56	8.79	8.85	8.80	8.24	8.25	8.45	7.31
F	2.35	2.40	3.16	3.90	2.68	3.31	4.13	3.51	3.63	3.41	3.98	3.44	3.44	3.68	4.72	2.74	3.03
Cl	0.13	0.14	0.14	0.16	0.13	0.11	0.10	0.18	0.16	0.12	0.12	0.17	0.14	0.21	0.11	0.16	0.15
Si	5.48	5.70	5.46	5.29	5.56	5.58	5.26	5.51	5.58	5.57	5.37	5.50	5.62	5.34	5.14	5.55	5.67
Al <sup>IV</sup>	2.52	2.30	2.48	2.36	2.44	2.43	2.30	2.42	2.43	2.43	2.21	2.41	2.38	2.41	2.46	2.45	2.23
Al <sup>VI</sup>	0.16	0.11	0.00	0.00	0.09	0.06	0.00	0.00	0.01	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00
Ti	0.54	0.57	0.53	0.61	0.50	0.51	0.66	0.57	0.55	0.52	0.58	0.57	0.54	0.49	0.54	0.49	0.56
Fe <sup>3+</sup>	1.10	1.14	1.08	1.09	1.10	1.24	1.13	1.22	1.31	1.31	1.11	1.22	1.28	1.09	1.18	1.09	1.32
Fe <sup>2+</sup>	0.87	0.78	0.83	0.84	0.77	0.54	0.85	0.59	0.44	0.46	0.90	0.65	0.43	1.04	1.00	0.83	0.63
Mn	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03
Mg	2.56	2.41	2.73	2.90	2.69	2.70	2.88	2.68	2.64	2.64	2.92	2.70	2.74	2.82	2.82	2.74	2.69
Ca	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02
Na	0.10	0.11	0.11	0.12	0.09	0.11	0.11	0.09	0.10	0.10	0.12	0.09	0.11	0.11	0.14	0.10	0.13
K	1.54	1.72	1.68	1.69	1.63	1.57	1.67	1.67	1.62	1.53	1.65	1.63	1.60	1.55	1.52	1.60	1.40
MF	1.13	1.11	1.17	1.20	1.17	1.20	1.18	1.19	1.20	1.20	1.18	1.18	1.23	1.13	1.13	1.17	1.15
Al <sup>VI</sup> +Fe <sup>3+</sup> +Ti	1.79	1.82	1.61	1.70	1.69	1.81	1.78	1.79	1.87	1.93	1.69	1.78	1.82	1.59	1.72	1.60	1.88
Fe <sup>2+</sup> +Mn	0.89	0.80	0.84	0.85	0.79	0.56	0.87	0.61	0.46	0.47	0.92	0.66	0.45	1.06	1.01	0.86	0.66
Fe <sup>2+</sup> /(Fe <sup>2+</sup> +Mg)	0.25	0.24	0.23	0.22	0.22	0.17	0.23	0.18	0.14	0.15	0.24	0.19	0.13	0.27	0.26	0.23	0.19
Mg/(Mg+Fe <sup>2+</sup> +Mn)	0.74	0.75	0.76	0.77	0.77	0.83	0.77	0.82	0.85	0.85	0.76	0.80	0.86	0.73	0.74	0.76	0.80
Al <sup>IV</sup> /Al <sup>VI</sup>	16.25	21.10	-	-	28.06	43.59	-	-	193.44	24.91	-	-	-	-	-	97.02	-
Mg/(Mg+Fe)	0.57	0.56	0.59	0.60	0.59	0.60	0.59	0.60	0.60	0.60	0.59	0.59	0.62	0.57	0.56	0.59	0.58
<sup>56</sup> FeO/( <sup>56</sup> FeO+MgO)	0.58	0.59	0.56	0.54	0.56	0.54	0.55	0.55	0.54	0.54	0.55	0.55	0.53	0.57	0.58	0.56	0.56
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /TiO <sub>2</sub>	3.16	2.71	2.99	2.48	3.26	3.08	2.23	2.71	2.85	3.09	2.43	2.71	2.82	3.11	2.90	3.26	2.53

成温度大约(750±20)°C。

氧逸度(Wones and Eugster, 1965)研究表明,黑云母 $X_{Mg}$ ( $X_{Mg} = Mg/(Mg+Fe)$ )随岩浆和流体中氧逸度或硫逸度增加而增加;随岩浆系统氧逸度增加,熔体中 $Fe^{3+}/Fe^{2+}$ 值增加,更少的 $Fe^{2+}$ 与 $Mg^{2+}$ 竞争进入镁铁质矿物的晶体结构中。Wones(1989)通过实验提出的 $Fe^{3+}-Fe^{2+}-Mg^{2+}$ 图解可以估计氧逸度缓冲剂,氧逸度缓冲剂包括磁铁矿-钛铁矿缓冲剂( $Fe_3O_4-Fe_2O_3$ , HM)、镍-氧化镍缓冲剂( $Ni-NiO$ , NNO)和铁橄榄石-石英-磁铁矿缓冲剂( $Fe_2SiO_4-SiO_2-Fe_3O_4$ ,

QFM),可以估算氧逸度。 $Fe^{3+}-Fe^{2+}-Mg^{2+}$ 图解(图13c)可以看出,流纹英安岩和流纹英安斑岩岩浆黑云母成分投图落入HM界限范围内,流纹英安岩和流纹英安斑岩中岩浆黑云母结晶时氧逸度均高。岩石性质由黑云母 $FeO-Al_2O_3-MgO$ 图解(图13d)知,流纹英安岩和流纹英安斑岩中岩浆黑云母投点均在钙碱性花岗岩内,均属于钙碱性岩石系列。

### 5.3 两类流纹英安岩壳幔混合过程

流纹英安岩和流纹英安斑岩中斜长石与黑云母矿物特征反映岩浆物质来源和岩浆房性质。正

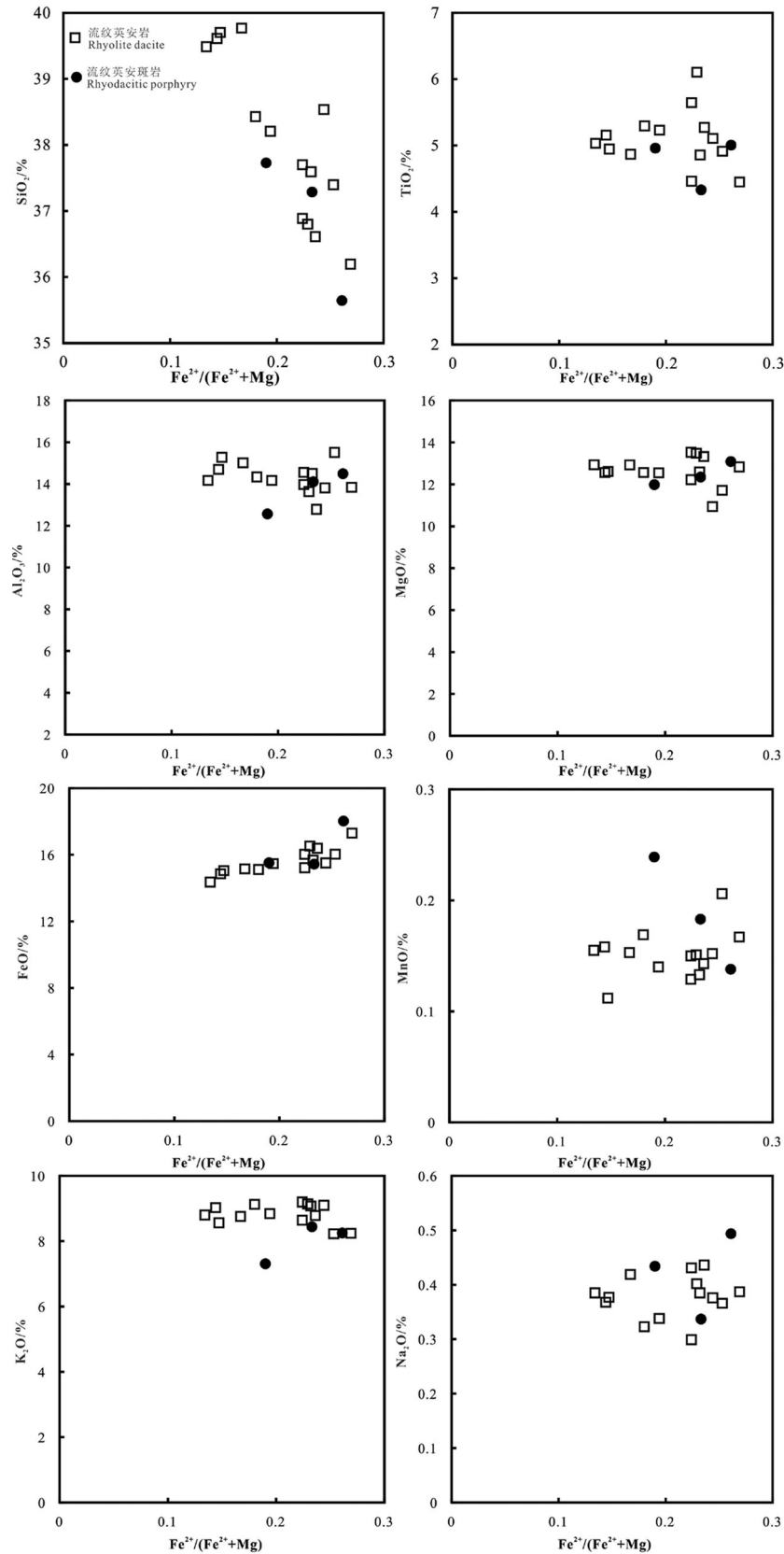


图 10 岩浆黑云母中 SiO<sub>2</sub>、TiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、FeO、MgO、MnO、K<sub>2</sub>O、Na<sub>2</sub>O 对 Fe<sup>2+</sup>/(Fe<sup>2+</sup>+Mg)关系图  
 Fig.10 Relationship of SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO, MgO, MnO, K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O vs. Fe<sup>2+</sup>/(Fe<sup>2+</sup>+Mg) in magmatic biotite



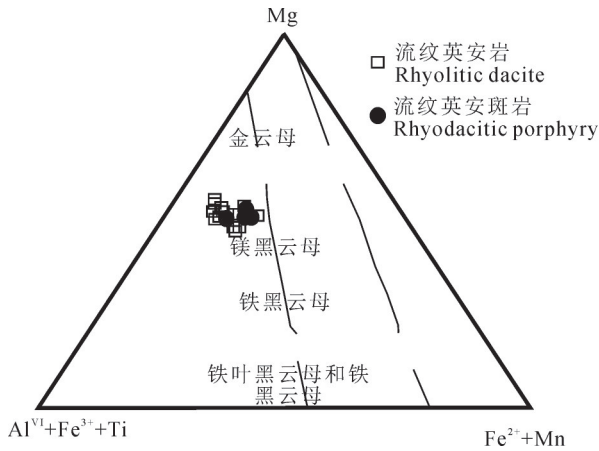


图 11 相山两类流纹英安岩中黑云母的成分分类图(底图据 Foster, 1960)

Fig.11 Classified figures of the composition of biotite in two types of rhyolite dacite in Xiangshan (basemap after Foster, 1960)

常环带斜长石会出现有中心到边缘由基性到酸性的变化,这是由于岩浆温度下降,后来晶出的Ab含量较高的斜长石包裹在早结晶的斜长石表面,从而边缘酸性较核部强(谢磊等,2004)。流纹英安斑岩与流纹英安岩两者斜长石有中心到边缘由基性到酸性的变化,且环带现象均不明显,表明岩浆房在斜长石结晶时,几乎未被扰动,是在一种平衡环境中结晶析出。流纹英安岩和流纹英安斑岩中黑云母均为镁黑云母,其中二者成分变化不大,且均有地幔物质加入,结晶温度与氧逸度相同,岩性均为钙碱性,说明两类流纹英安岩在同源岩浆房中发育,岩浆发育过程中加入了地幔物质混合。

## 6 结论

(1)相山打鼓顶组流纹英安岩可区分为两类,一

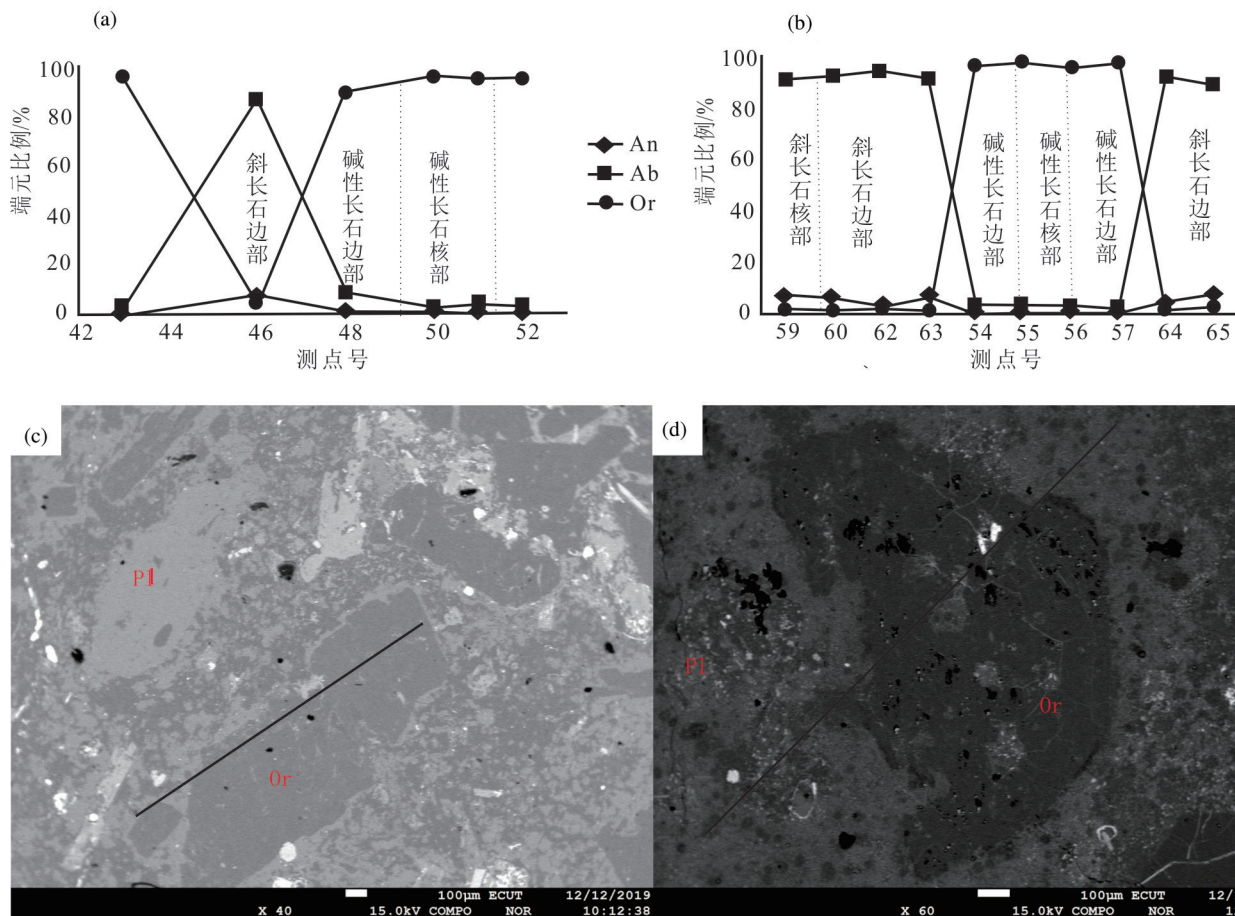


图 12 相山两类流纹英安岩长石电子探针图像

a, c—流纹英安斑岩 XS19-07; b, d—流纹英安岩 XS19-11; Pl—斜长石; Or—黑云母

Fig.12 Electron probe EPMA image of feldspars two types of rhyolite dacite in Xiangshan  
a, c—Rhyodacitic porphyry XS19-07; b, d—Rhyolite dacite XS19-11; Pl—Plagioclase; Or—Biotite

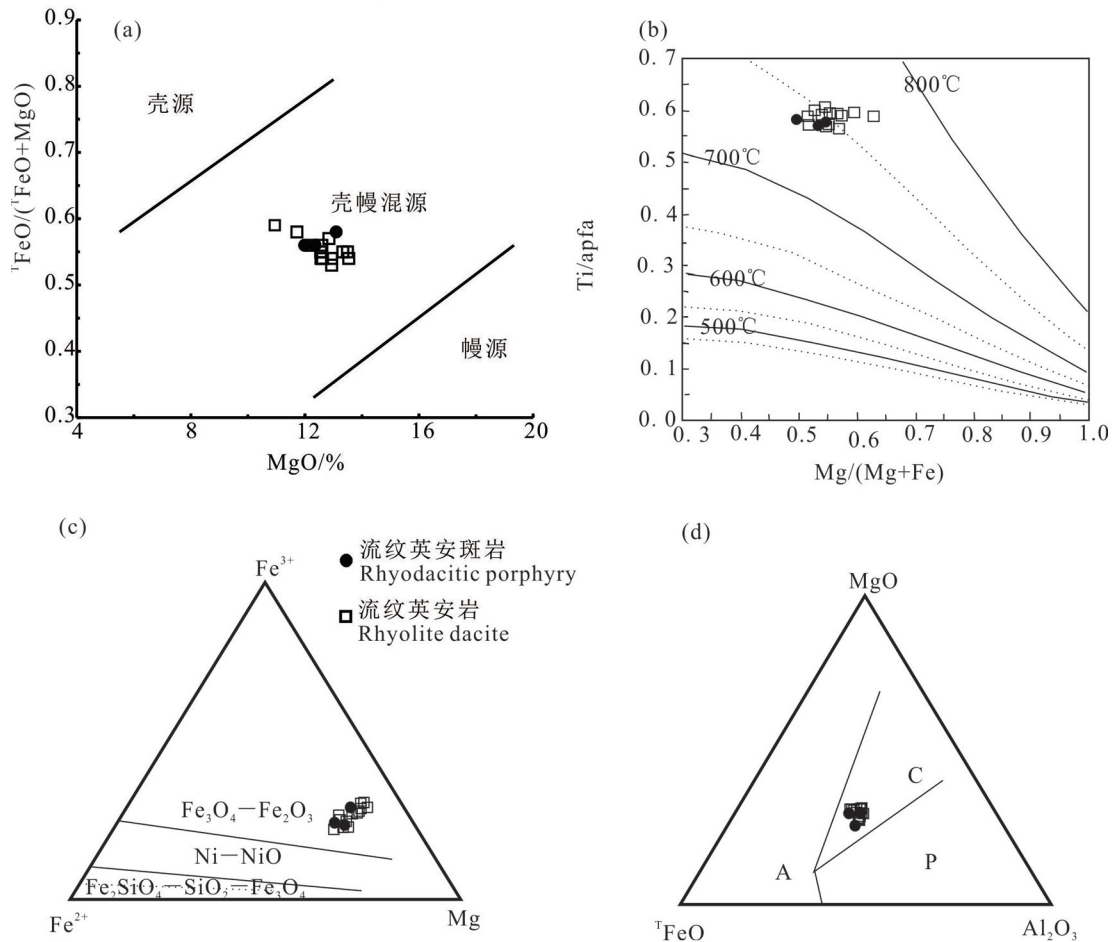


图13 两类流纹英安岩黑云母判别图

a— $MgO-1FeO/(1FeO+MgO)$ 图解(底图据周作侠,1986);b—黑云母结晶温度  $Mg/(Mg+Fe)-Ti$  图解(底图据 Henry,2005);c—黑云母  $Fe^{3+}-Fe^{2+}-Mg^{2+}$ 图解(底图据 Wones, 1989);d—黑云母  $1FeO-Al_2O_3-MgO$  图解(底图据 Abdel-Rahman, 1994);A—碱性花岗岩;C—钙碱性花岗岩;P—过铝花岗岩

Fig.13 Discriminating diagram of biotite of two types in rhyolite dacite

a— $MgO-1FeO/(1FeO+MgO)$  diagram (after Zhou Zuoxia, 1986); b—黑云母结晶温度  $Mg/(Mg+Fe)-Ti$  diagram (after Henry, 2005); c— $Fe^{3+}-Fe^{2+}-Mg^{2+}$  diagram (after Wones, 1989); d— $1FeO-Al_2O_3-MgO$  diagram (after Abdel-Rahman, 1994); A—Alkaline granite; C—Calc-alkaline granite; P—Peraluminous granite

类是喷溢相的流纹英安岩( $K_1d^a$ ),另一类是侵入相的流纹英安斑岩( $K_1d^b$ )。流纹英安岩的长石类型较流纹英安斑岩多,其中流纹英安岩的长石类型包括钠长石、钾长石、钾-透长石、更长石、中长石,流纹英安斑岩主要有钠长石、钾长石和钾-透长石。

(2)流纹英安岩与流纹英安斑岩黑云母的成分分类图解中,两者属于镁质黑云母。相山流纹英安岩的M在0.727~0.861,平均值为0.790;流纹英安斑岩的M在0.735~0.803,平均值为0.767。两者黑云母的M大于0.45,属于深源系列花岗岩黑云母特征,有地幔物质加入。在岩浆黑云母的 $MgO-1FeO/$

( $1FeO+MgO$ )图解中,流纹英安岩与流纹英安斑岩黑云母成分投点,均落入壳幔混合区域范围内,说明两者均有地幔物质加入,属于壳幔混合来源。

(3)流纹英安岩与流纹英安斑岩黑云母形成温度基本相同,形成温度在 $750\pm 20^\circ C$ ;在 $Fe^{3+}-Fe^{2+}-Mg^{2+}$ 图解中黑云母成分投图皆落入HM( $Fe_3O_4-Fe_2O_3$ )界限范围内,说明两者均具有高氧逸度;在 $FeO-Al_2O_3-MgO$ 图解中黑云母成分投点均在钙碱性花岗岩内,说明两者同属钙碱性岩。

(4)流纹英安岩与流纹英安斑岩的化学成分基本相同、长石类型相似、物质来源相同、结晶温度相同、

氧逸度一致、岩石性质相同,说明两者具有同源性。

## References

- Abdel-Rahman A F M. 1994. Nature of biotites from alkaline, calc-alkaline, and peraluminous magmas[J]. *Journal of Petrology*, 35(2): 525–541
- Chen Guo'an, Zhou Junruo. 1996. The mineralogical characteristics of biotite in type I and type A granites in Zhangzhou area, Fujian, China[J]. *Mineralogy and Petrology*, 16(2): 25–30(in Chinese with English abstract).
- Chen Lei, Zhao Yuanyi, Wang Zongqi, Liu Yan, Cao Jie, Ding Li. 2013. Geochemistry and Sr–Nd Isotopes of rhyodacite and granite porphyry in Shannan ore district of Xiangshan ore field, Jiangxi Province[J]. *Geology and Exploration*, 49(6): 999–1016(in Chinese with English abstract)
- Chen Zhengle, Wang Yong, Zhou Yonggui, Han Fengbin, Wang Pingan, Gong Hongliang, Shao Fei, Tang Xiangsheng, Xu Jinshan. 2013. SHRIMP U–Pb dating of zircons from volcanic–intrusive complexes in the Xiangshan uranium orefield, Jiangxi Province, and its geological implications[J]. *Geology in China*, 40(1): 217–231(in Chinese with English abstract).
- Deer W A, Howie R A, Zussman J. 1992. *An Introduction to the Rock-forming Minerals* (2<sup>nd</sup> editions) [M]. London: Longman Scientific & Technical, 696.
- Foster M D. 1960. Interpretation of the composition of trioctahedral micas[J]. *US Geological Survey, Professional Paper 354B*: 11–49.
- Fu Jinbao, 1981, Chemical composition characteristics of biotite in porphyry copper deposits [J]. *Geology and Exploration*, (9): 16–19 (in Chinese with English abstract)
- Guidotti C V.1984. Micas in metamorphic rocks[J]. *Micas Reviews in Mineralogy*, 13(1): 357–467
- Guo Fusheng, Yang Qingkun, Meng Xiangjin, Xie Caifu, Shi Guo, Chen Liuqin, Jiang Zhenpin, Zeng Tao, Luo Nenghui. 2016. Geochemical characteristics and petrogenesis of acid volcanic–intrusive complex in Xiangshan, Jiangxi [J]. *Acta Geologica Sinica*, 90(4): 769–784(in Chinese with English abstract).
- Guo Fusheng, Lin Ziyu, Li Guangrong, Deng Juzhi, Xie Caifu, Yang Haiyan, Wu Zhichun, Zhou Wanpeng, Jiang Yongbiao, Li Hongxing, Fang Genxian. 2017. Study on the geological structure of Xiangshan uranium–bearing volcanic basin: Evidences from magnetotelluric sounding and 3D geological modeling[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 60(4): 1491–1510 (in Chinese with English abstract)
- Guo Fusheng, Wu Zhichun, Li Xiang, Zhang Wanliang, Zeng Wenle, Lin Ziyu, Xie Caifu. 2018. The 3D geological modeling of Xiangshan volcanic basin in Jiangxi Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 37(Z1): 421–434(in Chinese with English abstract)(in Chinese with English abstract)
- Henry D J. 2005. The Ti–saturation surface for low–to–medium pressure metapelitic biotites: Implications for geothermometry and Ti–substitution mechanisms[J]. *American Mineralogist*, 90(2/3): 316–328
- Hewitt D A, Wones D R. 1984. Experimental phase relations of the micas[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 201–256.
- Jia Wei, Wang Zhengqi. 2017. Geochemical characteristics of rhyodacite and rhyodacitic porphyry in Xiangshan volcanic basin in the Late Jurassic and their significance[J]. *Journal of East China University of Technology(Natural Science)*, 40(3): 213–224.(in Chinese with English abstract)
- Lin Wenwei, Peng Lijun. 1994. The estimation of Fe<sup>3+</sup> and Fe<sup>2+</sup> contents in amphibole and biotite from EMPA data[J]. *Journal of Jilin University of Earth Sciences*, 24(2):155–162(in Chinese with English abstract).
- Liu Long, Zhang Shuming, Ruan Xiaoyu, Zhangxin, Ouyang Junyong, Xia Yinchu, Wu Zhichun. 2020. Geochronology, geochemistry and the geological significance of Wuzhang granite porphyry in the southern Xiangshan orefield[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 36(6): 1769–1786(in Chinese with English abstract).
- Lü Zhicheng, Duan Guozheng, Dong Guanghua. 2003. Mineral chemistry of biotite from granites associated with different mineralization in three stages of Yanshanina period in the southern–middle parts of the Da Hinggan Ling Mountains and its petrogenetic and metallogenic significance[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 23(2): 177–184(in Chinese with English abstract).
- Patino Douce A E. 1993. Titanium substitution in biotite: An empirical model with applications to thermometry, O<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O barometers, and consequence for biotite stability[J]. *Chemical Geology*, 108(1/4): 132–162
- Robert J L. 1976. Titanium solubility in synthetic phlogopite solid solutions[J]. *Chemical Geology*, 17(3): 213–227.
- Wang Liling, Zhang Shuming, Xu Xun, Zhangxin, Ruan Xiaoyu, Lan Dechu, Wu Zhichun, Qi Jiawei. 2020. LA–ICP–MS zircon U–Pb dating LA and genetic types of uranium–bearing granite porphyry in northern Xiangshan orefield, Jiangxi Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 39(1): 62–79(in Chinese with English abstract).
- Wang Weiping, Tang Juxing, Ying Lijuan. 2012. Mineral Chemical Characteristics of Biotites from Hornfels in the Jiana(Gyama) polymetallic copper deposit of Tibet and their geological significance[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 33(4): 444–458(in Chinese with English abstract)
- Wones D R, Eugster H P. 1965. Stability of biotite–experiment theory and application[J]. *American Mineralogist*, 50(9): 1228–1273
- Wones D R. 1989. Significance of the assemblage titanite+ magnetite+ quartz in granitic rocks[J]. *American Mineralogist*, 74(7/8): 744–749
- Wu Rengui. 1999. The features of volcanic formation in Ruyiting profile of Xiangshan[J]. *Journal of East China Geological Institute*, 22(3): 201–208(in Chinese with English abstract).
- Wu Rengui, Yu Dagan, Zhang Shuming. 2003. Identification of



- rhyolite dacite porphyry and its relation to uranium mineralization at Xiangshan uranium ore-field[J]. *Uranium Geology*, 19(2): 81–87(in Chinese with English abstract).
- Xie Lei, Wang Dezi, Wang Rucheng, Qiu Jiansheng, Chen Xiaoming. 2004. Complex zoning texture in plagioclases from the quartz diorite enclave in the Putuo granitic complex, Zhejiang Province: record of magma mixing[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(6): 1397–1408(in Chinese with English abstract)
- Yang S Y, Jiang S Y, Jiang Y H, Zhao K D, Fan H H. 2010. Zircon U–Pb geochronology, Hf isotopic composition and geological implications of the rhyodacite and rhyodacitic porphyry in the Xiangshan uranium ore field, Jiangxi Province, China[J]. *Science China: Earth Sciences*, 53(10): 1411–1426.
- Yang Shuiyuan, Jiang Shaoyong, Jiang Yaohui, Zhao Kuidong, Fan Honghai. 2010. Zircon U–Pb geochronology and Hf isotopic composition of rhyolite dacite and rhyolite dacite porphyry and their geological significance in Xiangshan, Jiangxi Province [J]. *Scientia Sinica(Terrae)*, 40(8): 953–969(in Chinese with English abstract).
- Yang Shuiyuan, Jiang Shaoyong, Zhao Kuidong, Jiang Yaohui, Fan Honghai. 2012. Zircon U–Pb geochronology, geochemistry and Sr–Nd–Hf isotopic compositions of the rhyolite porphyry from the Zoujiaoshan deposit in Xiangshan uranium ore field, Jiangxi Province, SE China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(12): 3915–3928 (in Chinese with English abstract)
- Yang Wenjin, Wang Liankui, Zhang Shaoli, Xu Wenxin. 1986. Micas of the two series of granites in south China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 6(4): 298–307(in Chinese with English abstract)
- Yang Wenjin, Wang Liankui, Zhang Shaoli, Xu Wenxin. 1988. On the origin and evolution of granites in south China in terms of trace elements in micas [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 8(2): 127–135(in Chinese with English abstract).
- Yu Xinqi, Wu Ganguo, Shu Liangshu, Yan Tiezeng, Zhang Da, Di Yongjun. 2006. The Cretaceous tectonism of the Gan–Hang tectonic belt, southeastern China[J]. *Earth Science Frontiers*, 13(3): 31–43(in Chinese with English abstract).
- Zhang Wanliang, Li Ziyang. 2007. Single– zircon U– Pb age of rhyodacite from Xiangshan area and its geological implications[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 26(1): 21– 26(in Chinese with English abstract)
- Zhang Shuming, Yu Dagong, Wu Rengui, Zhang Lifan. 2005. Shoshonitic rock and uranium mineralization in Xiangshan uranium ore–field in Jiangxi [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 29(4): 105–114(in Chinese with English abstract)
- Zhang Shuming, Cao Shousun, Zeng Wenle, Rao Zehuang, Xie Guofa, Fang Xin, Zhang Ying, Wang Lei, Zhang Xin. 2012. Fluid inclusion characteristics of typical uranium deposits in Xiangshan orefield, Jiangxi Province[J]. *Mineral Deposits*, 31(1): 65– 82(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zunzhong, Gu Lianxing, Wu Changzhi, San Jinzhu, Tang Xiaoqian, Xi Aihua, Wang Shuo. 2005. Weiya Complex, Eastern Tianshan: Single–sourced or diverse–sourced?—Evidence from biotite[J]. *Geochimica*, 34(4): 328– 338(in Chinese with English abstract).
- Zhao Mian, Yang Shuiyuan, Zuo Renguang, Zhao Kuidong, Jiang Yaohui, Ling Hongfei, Chen Peirong. 2015. Magmatic evolution characteristics of Xiangshan volcanic–intrusive complex in Gan–Hang Belt: Study on the mineral chemistry of plagioclase and biotite [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(3): 759– 768(in Chinese with English abstract).
- Zhou Zuoxia. 1986. The origin of intrusive mass in Fengshandong, Hubei Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2(1): 59– 70(in Chinese with English abstract)

## 附中文参考文献

- 陈国安, 周珣若. 1996. 漳州地区白垩至纪 I 型和 A 型花岗岩中黑云母的矿物学特征[J]. *矿物岩石*, 16(2): 25–30
- 陈雷, 赵元艺, 王宗起, 刘妍, 曹洁, 定立. 2013. 江西相山铀矿田山南矿区流纹英安岩和花岗斑岩的地球化学与 Sr、Nd 同位素特征[J]. *地质与勘探*, 49(6): 999–1016
- 陈正乐, 王永, 周永贵, 韩凤彬, 王平安, 宫红良, 邵飞, 唐湘生, 徐金山. 2013. 江西相山火山–侵入杂岩体锆石 SHRIMP 定年及其地质意义[J]. *中国地质*, 40(1): 217–231
- 傅金宝. 1981. 斑岩铜矿中黑云母的化学组成特征[J]. *地质与勘探*, (9): 16–19
- 郭福生, 杨庆坤, 孟祥金, 谢财富, 时国, 陈留勤, 蒋振频, 曾涛, 罗能辉. 2016. 江西相山酸性火山–侵入杂岩体地球化学特征与岩石成因[J]. *地质学报*, 90(4): 769–784
- 郭福生, 林子瑜, 黎广荣, 邓居智, 谢财富, 杨海燕, 吴志春, 周万蓬, 姜勇彪, 李红星, 方根显. 2017. 江西相山火山盆地地质结构研究: 来自大地电磁测深及三维地质建模的证据[J]. *地球物理学报*, 60(4): 1491–1510
- 郭福生, 吴志春, 李祥, 张万良, 曾文乐, 林子瑜, 谢财富. 2018. 江西相山火山盆地三维地质建模的实践与思考[J]. *地质通报*, 37(Z1): 421–434.
- 贾伟, 王正其. 2017. 相山流纹英安岩和流纹英安斑岩地球化学特征及意义[J]. *东华理工大学学报(自然科学版)*, 40(3): 213–224.
- 林文蔚, 彭丽君. 1994. 由电子探针分析数据估算角闪石、黑云母中的  $Fe^{3+}$ 、 $Fe^{2+}$  [J]. *长春地质学院学报*, 24(2): 155–162.
- 刘龙, 张树明, 阮小语, 张鑫, 欧阳军勇, 夏寅初, 吴志春. 2020. 相山矿田南部涪潭花岗斑岩体年代学、地球化学及地质意义[J]. *岩石学报*, 36(6): 1769–1786.
- 吕志成, 段国正, 董广华. 2003. 大兴安岭中南段燕山期三类不同成矿花岗岩中黑云母的化学成分特征及其成岩成矿意义[J]. *矿物学报*, 23(2): 177–184.
- 王利玲, 张树明, 许迅, 张鑫, 阮小语, 蓝德初, 吴志春, 戚佳伟. 2020. 江西相山矿田北部产铀花岗斑岩 LA–ICP–MS 锆石 U–Pb 定年及成因类型[J]. *地质通报*, 39(1): 62–79.

- 王崑平,唐菊兴,应立娟. 2012. 西藏甲玛铜多金属矿床角岩中黑云母矿物化学特征及地质意义[J]. 地球学报, 33(4): 444-458.
- 吴仁贵. 1999. 相山地区如意亭剖面火山建造特征[J]. 华东地质学院学报, 22(3): 201-208.
- 吴仁贵,余达淦,张树明. 2003. 相山铀矿田流纹英安斑岩的厘定及与铀矿化的关系[J]. 铀矿地质, 19(2): 81-87.
- 谢磊,王德滋,王汝成,邱检生,陈小明. 2004. 浙江普陀花岗杂岩体中的石英闪长质包体:斜长石内部复杂环带研究与岩浆混合史记录[J]. 岩石学报, 20(6): 96-107.
- 杨水源,蒋少涌,姜耀辉,赵葵东,范洪海. 2010. 江西相山流纹英安岩和流纹英安斑岩锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素组成及其地质意义[J]. 中国科学: 地球科学, 40(8): 953-969.
- 杨水源,蒋少涌,赵葵东,姜耀辉,范洪海. 2012. 江西相山铀矿田邹家山矿床中流纹斑岩的锆石 U-Pb 年代学、岩石地球化学与 Sr-Nd-Hf 同位素组成[J]. 岩石学报, 28(12): 3915-3928.
- 杨文金,王联魁,张绍立,徐文新. 1986. 华南两个不同成因系列花岗岩的云母标型特征[J]. 矿物学报, 6(4): 298-307.
- 杨文金,王联魁,张绍立,徐文新. 1988. 从云母微量元素特征探讨华南花岗岩的成因和演化[J]. 矿物学报, 8(2): 127-135.
- 余心起,吴淦国,舒良树,颜铁增,张达,狄永军. 2006. 白垩纪时期赣杭构造带的伸展作用[J]. 地学前缘, 13(3): 31-43.
- 张万良,李子颖. 2007. 相山一流纹英安岩 || 单颗粒锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 26(1): 21-26.
- 张树明,余达淦,吴仁贵,张丽芬. 2005. 相山铀矿田钾玄质岩石与铀成矿[J]. 大地构造与成矿学, 29(4): 105-114.
- 张树明,曹寿孙,曾文乐,饶泽煌,谢国发,方欣,张莹,王蕾,张鑫. 2012. 江西相山矿田典型铀矿床流体包裹体特征及意义[J]. 矿床地质, 31(1): 65-82.
- 张遵忠,顾连兴,吴昌志,三金柱,汤晓茜,郝爱华,王硕. 2005. 东天山尾亚杂岩体:同源还是异源?——来自黑云母的证据[J]. 地球化学, 34(4):328-338.
- 赵沔,杨水源,左仁广,赵葵东,姜耀辉,凌洪飞,陈培荣. 2015. 赣杭构造带相山火山侵入杂岩的岩浆演化特征——来自斜长石和黑云母的化学成分研究[J]. 岩石学报, 31(3): 759-768.
- 周作侠. 1986. 湖北丰山洞岩体成因探讨[J]. 岩石学报, 2(1): 59-70.