

岩浆到热液演化的包裹体记录 ——以骑田岭花岗岩体为例*

单强¹ 廖思平² 卢焕章^{1,3} 李建康⁴ 杨武斌^{1,5} 罗勇^{1,5}

SHAN Qiang¹, LIAO SiPing², LU HuanZhang^{1,3}, LI JiangKang⁴, YANG WuBin^{1,5} and LUO Yong^{1,5}

1. 中国科学院广州地球化学研究所, 中国科学院矿物学与成矿学重点实验室, 广州 510640

2. 江西省地质调查研究院, 南昌 330030

3. 加拿大魁北克大学, Chicoutimi, P. Q. G7H2B1

4. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037

5. 中国科学院研究生院, 北京 100049

1. Key Laboratory of Mineralogy and Metallogeny, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2. Jiangxi Provincial Institute of Geological Survey, Nanchang 330030, China

3. University of Quebec, Chicoutimi, P. Q. G7H7B1, Canada

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

5. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

2010-11-10 收稿, 2011-03-29 改回.

Shan Q, Liao SP, Lu HZ, Li JK, Yang WB and Luo Y. 2011. Fluid inclusion records from the magmatic to hydrothermal stage: A case study of Qitianling granite pluton. *Acta Petrologica Sinica*, 27(5):1511–1520

Abstract Qitianling granite is a complex massif with multi-stage intrusions during the Early Yanshanian Period. Petrochemical data show that it belongs to alkali-rich and highly evolved A-type granite formed in tension setting within a plate. The centimetre- and metre-sized pegmatoid cystidium and miarolitic quartz widely occurred in the second stage medium-fine grain biotite granite, implying that it is resulted from differentiation of the oversaturated-volatile magma. In addition, the coexist of melt-fluid inclusions and fluid inclusions in quartz indicated that the pegmatoid cystidium and miarolitic quartz were produced in the transition stage from granite magmatic melt to hydrothermal solution. The data of micro-thermometry showed that the trapped temperatures of melt-fluid inclusions are over 530°C, the homogenization temperatures of fluid inclusions are between 172°C and 454°C, indicating the temperature of fluids in hydrothermal stage, and the homogenization temperatures of fluid inclusions in sphalerite are between 285°C and 417°C, indicating the temperature and salinity of ore-forming fluid. Their evolution process from middle-fine grain biotite granite to pegmatoid cystidium to miarolitic quartz implied that magmatic and hydrothermal system underwent an evolution process: from volatile-rich fluid to melt and high salinity fluid to high salinity fluid to low salinity fluid and finally formed magmatic hydrothermal fluid in the CaCl₂-NaCl-H₂O-CO₂ system. Based on the data of petrography and Raman spectrum of fluid inclusions, the existence of feldspar, calcite, rutile and metallic oxides in the fluid and crystal-rich melt-fluid inclusions implies that the captured fluids have a competent ore-forming potentiality.

Key words Melt inclusion; Melt-fluid inclusion; Magmatic-hydrothermal transition; Immiscibility; Qitianling

摘要 骑田岭花岗岩是燕山期花岗岩早期多阶段侵入复式岩体, 岩石化学的研究表明它是富碱的、高分异的 A 型花岗岩, 形成于板内拉张的构造环境。在其第二阶段中细粒黑云母花岗岩内广泛发育着厘米级至米级似伟晶岩囊状体和石英晶洞, 它们是富挥发份岩浆固结的产物, 代表岩石形成过程经历了明显的岩浆-热液过渡阶段。包裹体显微岩相学研究在骑田岭黑云母花岗岩的石英中发现熔体-流体包裹体和流体包裹体共存, 这一结果进一步证实骑田岭中细粒黑云母花岗岩中的似伟晶岩囊状体和石英晶洞是花岗岩质熔体在岩浆-热液过渡阶段的产物。显微测温结果显示, 熔体-流体包裹体的捕获温度大于

* 本文受国土资源部公益性行业科研专项经费项目(201011046)资助。

第一作者简介: 单强, 1967 年生, 副研究员, 地球化学专业, E-mail: qshan@gig.ac.cn

530℃,说明岩浆热液过渡阶段的温度不低于该温度;闪锌矿中流体包裹体的均一温度在 285~417℃之间,盐度为 11.7% NaCl_{eqv},代表了成矿流体的温度和盐度;流体包裹体的均一温度为 172~454℃,代表热液阶段流体的温度。从中细粒黑云母花岗岩到似伟晶岩囊状体再到石英晶洞,岩浆-热液体系经历了富挥发份熔体→熔体+高盐度流体→高盐度流体→低盐度流体的完整演化过程,形成了 CaCl₂-NaCl-H₂O-CO₂ 体系的岩浆热液流体。包裹体岩相学及激光拉曼探针分析结果显示,在流体包裹体和多晶熔体-流体包裹体中含有长石、方解石、金红石及金属氧化物等子矿物,暗示其所捕获的流体具有较强的成矿能力。

关键词 熔体包裹体;熔体-流体包裹体;岩浆-热液过渡;不混溶作用;骑田岭

中图法分类号 P588.121

1 引言

在地质和自然界的过程中,存在很多流体不混溶作用。Roedder *et al.* (1970)在研究月岩样品时首先发现了流体的不混溶现象。此后经过 20 年的研究,他阐述了岩浆演化过程中的不混溶作用,包括基性与酸性岩浆之间,硅酸盐熔体与硫化物之间,硅酸盐熔体与含有不同盐度的热液之间以及硅酸盐熔体与 CO₂ 之间的不混溶性(Roedder, 1992)。在岩浆冷却和结晶过程中,常常不可避免地发生岩浆的不混溶作用(熔体和流体的不混溶),由于挥发份相与硅酸盐母岩浆之间具有明显不同的密度和粘度,因此它在流体不混溶过程中发挥了重要作用。挥发份对于岩浆体系的物理化学性质影响很大,它的出溶将会影响金属元素在熔体和流体之间分配(Yang and Bodnar, 1995)。岩浆体系内流体的不混溶及其流体的分离是岩浆热液形成的重要机制之一。通过对不混溶现象的研究,可以更好的认识其在岩浆-热液过渡阶段挥发份的作用,了解其对元素富集成矿的影响,具有重要的理论和实际应用价值。

从岩浆阶段到热液阶段,岩浆-热液体系经历了熔体→晶体+熔体→晶体+熔体+挥发份→流体的复杂演化过程。高活动性和高溶解力的挥发份相使岩石发生蚀变和改造作用,改变了岩石的结构和化学成分,从而使得确定岩浆-热液过渡阶段的岩浆、含挥发份岩浆和流体的性质十分困难。但是被捕获并保存在造岩矿物中的熔体包裹体,特别是熔体-流体包裹体为此项研究开展创造了有利条件,这些包裹体是原始岩浆和岩浆演化过程中熔体和流体的原始样品,最直接和最接近真实地记录了岩浆演化过程中的物理化学信息,为认识不同类型的流体(例如硅酸盐熔体、硫化物熔体、水和二氧化碳流体和气体、水盐流体及它们之间的混合)不混溶作用提供了独特的研究窗口(Roedder, 1992; Kamenetsky *et al.*, 2004; 卢焕章, 1990, 1996; Audetat and Pettke, 2003; Audetat *et al.*, 2008; Chang and Meinert, 2004)。近年来,随着激光剥蚀等离子质谱(LA-ICP-MS)(Audetat *et al.*, 1998; Heinrich *et al.*, 1999; Ulrich *et al.*, 1999, 2001)、质子诱发 X 射线(PIXE)(Heinrich *et al.*, 1992; Ryan and Jamieson, 1993; Ryan *et al.*, 2001)以及同步辐射 X 射线荧光(SXRF)(Huang *et al.*, 2001; Nagaseki *et al.*, 2006, 2008)等现代微区微束分析技术的进步并成功应用于单个流体包裹体成分

分析,促使地学工作者对岩浆-热液过渡阶段及其密切相关的斑岩型矿床、矽卡岩型矿床和低温热液矿床的成矿机理的认识发生了质的飞跃。张德会等(2001)基于流体包裹体和熔体包裹体原位无损成分分析技术,并结合挥发份和成矿元素在共存相间分配的实验和质量平衡计算模拟研究了岩浆热液出溶和演化对斑岩成矿系统金属超常富集的制约;冷成彪等(2009)总结了金属元素气相迁移的证据,并对 CO₂ 在成矿过程中的作用进行了探讨,提出蒸汽在岩浆-热液体系中对金属元素迁移搬运的具有重要影响的观点。由此可见,岩浆-热液过渡阶段的研究对于揭示岩浆及相关流体的成矿潜力与机制具有重要启示意义。

南岭位于华南地区中部,是我国乃至全球最重要的钨锡矿集中分布区。在 20 世纪已经探明了柿竹园钨锡钼秘矿、瑶岗仙钨矿、新田岭钨矿、西华山钨矿等一批大型矿床,在本世纪陆续又有一系列重大发现,如探明的芙蓉超大型锡矿、牛岭钨矿等大中型矿床,形成湘南最大的钨锡矿集区,而且进一步找矿的潜力仍然十分巨大。为什么南岭地区会有这样多钨锡金属巨量堆积?以南岭为核心的大规模花岗岩侵位和大爆发成矿的内在成因联系、大规模成矿作用的时限和地球动力学背景以及地球物理资料反映出类似于地幔柱活动等一直是颇受到关注的关键性科学问题(毛景文等, 2004, 2007; 贾大成等, 2004; 魏绍六等, 2002)。

湘南地区骑田岭花岗岩岩体是南岭地区燕山期花岗岩早期多阶段侵入复式岩体。骑田岭花岗岩岩体的芙蓉超单元出露面积大于 520km²。由于在骑田岭岩体内部及内外接触带已发现了为数众多的 W、Sn、Mo、Bi 等有色金属和稀有金属矿床和矿点,其中不少已达大型或超大型规模,特别是岩体南缘芙蓉超大型锡矿床等的发现使得骑田岭岩体更加引人注目(王登红等, 2003; 邓希光等, 2005; 柏道远等, 2007; 郑基俭等, 2001; 蒋少涌等, 2006)。前人已经在岩石学、矿物学、岩石地球化学和同位素地球化学及年代学方面对骑田岭花岗岩体和芙蓉超大型锡矿床进行了详细和全面的研究,积累了丰富的研究资料(朱金初等, 2008, 2009; 王汝成等, 2008; 李鸿莉等, 2007; 双燕等, 2009; 李晓敏等, 2010; 彭建堂等, 2007)。对于骑田岭花岗岩和芙蓉锡矿的流体包裹体地球化学方面,已有学者从流体包裹体的类型、温度、盐度、成分和 He 同位素等方面进行了研究(毕献武等, 2008; 汪雄武等, 2004; 李桃叶等, 2005),大多认为成矿流体是来自于花岗岩结晶过程中分异出来的岩浆热液,然而对于成矿流体性质

和形成机制还存在不同认识(双燕等,2006;李兆丽等,2006)。

本文以南岭花岗岩的典型代表——骑田岭花岗岩体和芙蓉超大型锡矿床为例,通过研究骑田岭花岗岩和芙蓉超大型锡矿床中的熔体包裹体、熔体-流体包裹体和流体包裹体,从流体不混溶作用角度探讨骑田岭岩体岩浆-热液过渡阶段的演化过程、流体的性质,以及对成矿的贡献。

2 骑田岭花岗岩体岩石学特征

骑田岭花岗岩体位于湖南南部宜章、郴县和桂阳三县,平面上整个岩体呈近等轴状,总面积约 520km²,是一个多阶段侵入的复式岩体,第一阶段为粗粒斑状角闪黑云母花岗岩,第二阶段为中细粒黑云母花岗岩,第三阶段为晚期细粒黑云母花岗岩,主要呈岩瘤、岩脉侵入到第一阶段和第二阶段岩体中(图 1)。

骑田岭岩体的成矿作用的主要特点为“南锡北钨”。芙蓉锡矿和新田岭钨矿分别产在骑田岭第二阶段中细粒黑云母花岗岩体内及第一阶段角闪黑云母花岗岩岩体与灰岩的接触带(图 1)。

2.1 岩石学特征

第一阶段的角闪黑云母花岗岩呈灰白色,似斑状结构,

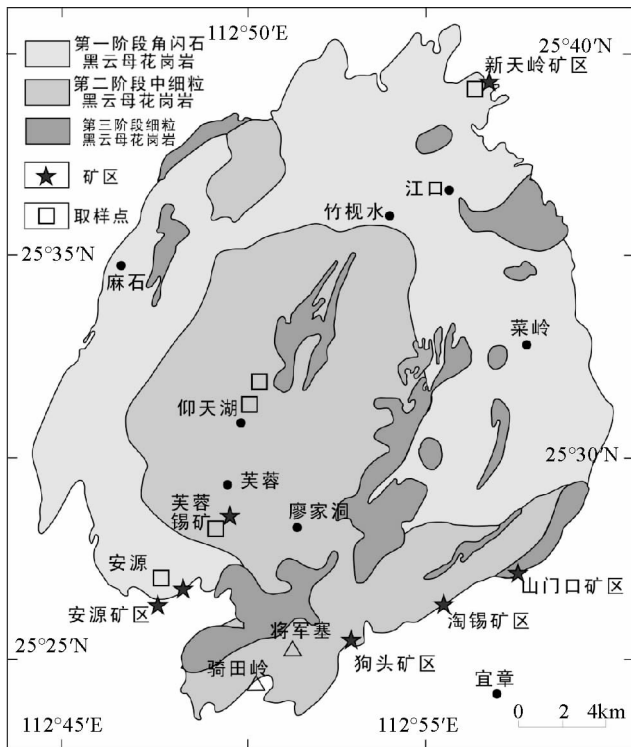


图 1 骑田岭地区地质简图(据朱金初等,2003)

Fig. 1 General geologic setting map of Qitianling area (modified after Zhu *et al.*, 2003)

块状构造。斑晶含量在 30% 左右,主要由石英、钾长石、斜长石($An = 18\% \sim 38\%$)、黑云母(铁云母)和角闪石(铁镁闪石)组成。基质主要为中粒,少量为细粒,由钾长石、斜长石、石英、黑云母和角闪石组成。

第二阶段黑云母花岗岩呈灰黄、肉红色,主要为似斑状结构,也见有花岗等粒结构。斑晶含量在 25% ~ 30% 之间,主要矿物为:钾长石(微斜长石)、斜长石($An = 22\% \sim 33\%$)、石英和黑云母(铁云母)。基质主要以中粒为主,有部分粗粒和细粒结构,矿物成分与斑晶相同。钠长石($An = 1\% \sim 4\%$)和铁叶云母出现在与锡矿化有关的中细粒黑云母花岗岩之中。

第三阶段为细粒黑云母花岗岩,呈浅肉红色至灰白色,细粒(有时含斑晶),见斑状结构,主要由钾长石、斜长石、石英和黑云母组成。主要分布在岩基的中部和南部。

2.2 岩石化学特征

本文着重对与芙蓉锡矿密切相关的第二阶段中细粒黑云母花岗岩进行了研究,其主、微量元素分析结果表明,骑田岭第二阶段黑云母花岗岩具有高硅($SiO_2 = 67\% \sim 76\%$)、富碱($Na_2O + K_2O = 7.54\% \sim 8.23\%$)、高钾($K_2O = 4.36\% \sim 5.25\%$)和高 K_2O/Na_2O 比(1.5 ~ 2.2, 平均 1.7),以及较高 FeO^T/MgO 比值(5.2 ~ 10.7, 平均 7.2)为特征。 $A/CNK = 0.99 \sim 1.11$, 平均值为 1, 具有过铝质的特征。稀土元素分布模式呈轻稀土相对富集, Eu 亏损的典型海鸥式,微量元素地球化学特征是富集 Rb、Th、U 和 Pb 等元素而亏损 Ba、Nb、Ta、Sr 和 Eu 等元素。这些特点表明骑田岭黑云母花岗岩是富碱的、高分异的 A 型花岗岩,形成于板内拉张的构造环境(洪大卫等,1995;赵振华等,2000;包志伟和赵振华,2003)。

2.3 岩浆到热液过渡的岩相学证据

岩浆-热液过渡阶段在高演化花岗岩中表现得最为明显,因为高演化花岗岩晶体间的流体最为丰富,会形成不同于在地壳深部或具有高热流地区的岩浆缓慢冷却形成的平衡的结构构造,特别是似伟晶岩壳和晶洞构造,反映出该类岩浆富含挥发分并且是在一个相对封闭环境中结晶冷凝的。

在骑田岭中细粒黑云母花岗岩中常常发育着厘米级至米级似伟晶岩囊状体(图 2a)和含石英晶洞的囊状体(图 2b)。这种似伟晶岩囊状体从外向内可以大致分为暗色矿物带、钾长石带和石英核 3 个相带。似伟晶岩囊状体具细晶岩边,细晶岩边与中细粒黑云母花岗岩间为暗色矿物(黑云母)晕圈。含石英晶洞囊状体的伟晶岩周边为黑云母富集的晕圈,具有强烈的分带性,环带边缘为细粒文象花岗岩,向内为粗粒文象伟晶岩、粗粒钾长石、粗粒石英,中心为晶洞,充填着黏土矿物及萤石。伟晶岩囊状体是熔体结晶晚期逃逸出的残留熔体和出溶超临界流体发生化学淬灭的结果。在岩浆演化的晚期阶段,结晶分异或熔体不混溶作用形成的挥发分过饱和熔体或超临界流体在封闭的体系内缓慢结晶可

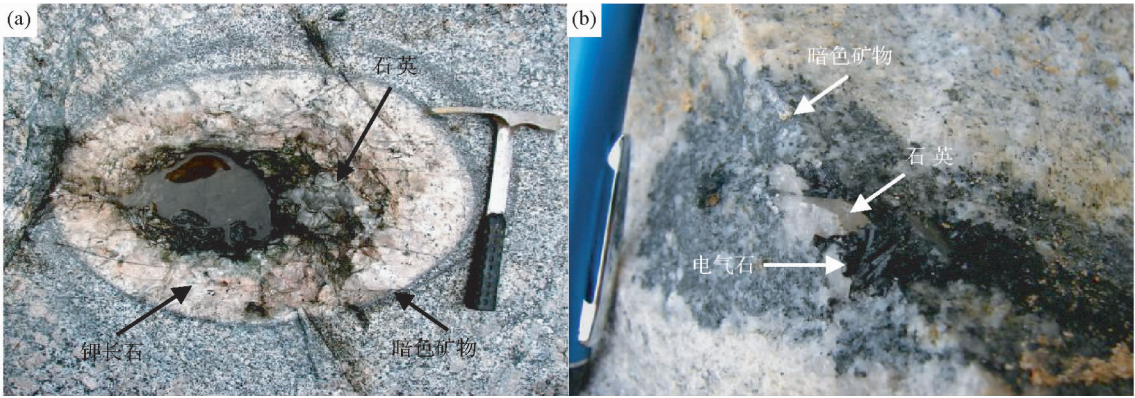


图2 骑田岭中细粒黑云母花岗岩中的似伟晶岩(a)和石英晶洞(b)

Fig.2 Pegmatitoides (a) and miarolitic quartzs (b) in Qitianling biotite granite with medium-fine grain

以形成晶洞构造。

伟晶岩和晶洞出现是岩浆体系进入到岩浆-热液过渡阶段的岩相学标志(Bakker and Elburg, 2006)。在骑田岭花岗岩体的中细粒黑云母花岗岩岩相带内分布着数量众多的似伟晶岩囊状体和石英晶洞,它们的形成与岩浆-热液阶段有关,说明骑田岭花岗岩熔体经历了明显的岩浆-热液过渡阶段的演化。

3 骑田岭花岗岩体包裹体研究

3.1 包裹体显微岩相学特征

骑田岭第二阶段中细粒黑云母花岗岩、似伟晶岩和石英晶洞中的石英中包裹体岩相学研究显示,在黑云母花岗岩的石英晶体中存在3类包裹体:熔体包裹体、熔体-流体包裹体和流体包裹体。在似伟晶岩和石英晶洞的石英晶体中也存在3类包裹体:第一类是熔体包裹体,见于石英晶体的核部;第二类是熔体-高盐度流体包裹体,见于似伟晶岩的石英晶体的根部和中部;第三类是流体包裹体,根据其相态组成及比例可分为含盐类矿物的流体包裹体、中低盐度的流体包裹体和气体包裹体其中含盐类矿物包裹体常与熔体-流体包裹体和气体包裹体及流体包裹体共生,多见于石英晶体的根部和中部,而典型的流体包裹体则多与气体包裹体共生,分布在石英晶体的头部。在花岗岩的锆石中常见到熔体包裹体,有时也见熔体-流体包裹体。

熔体包裹体 该类包裹体产在骑田岭中细粒黑云母花岗岩的石英斑晶、似伟晶岩和晶洞石英中。熔体包裹体可以分为2类:第一类多呈近椭圆形,不规则状,孤立分布。大小为 $10 \sim 50 \mu\text{m}$,主要以出现玻璃质+硅酸盐晶体+气相为特征,气相多呈筛孔状充填于包裹体的固体和流体间,在包裹体边缘部常常见有脱玻化的硅酸盐矿物(图3a)。另一类由硅酸盐晶体+气相组成,气相所占比例比较小,通常小于20%。

熔体-流体包裹体 该类包裹体多见于中细粒黑云母花岗岩内似伟晶岩和石英晶洞的石英中,根据组成也可以将其分

为2类:熔体+高盐度流体的熔体-流体包裹体和熔体+中低盐度的熔体-流体包裹体。第一类熔体-流体包裹体多呈不规则状,孤立分布,大小为 $15 \sim 50 \mu\text{m}$,以出现硅酸盐矿物+盐类子矿物+流体+气体为特征,气体比例变化较大,而且常见多个子矿物晶体充填在包裹体中(图3b)。第二类为硅酸盐熔体-流体包裹体,以出现熔体(玻璃质+硅酸盐矿物)+流体+气体为特征。另外,在锆石中还见到含子晶体的熔体-流体包裹体。

流体包裹体 该类包裹体主要以中低盐度两相包裹体为主,多呈椭圆、不规则状,孤立或者沿着裂隙分布,大小为 $3 \sim 20 \mu\text{m}$,气相小于30%。其次为气体包裹体,呈孤立或成线状(带状)分布,大小为 $2 \sim 15 \mu\text{m}$,气相大于90%,并见有两相纯 CO_2 气体包裹体和 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 气体包裹体(图3c)。还有一类为含子矿物包裹体,多呈不规则状孤立或线状分布,大小 $5 \sim 20 \mu\text{m}$,子矿物多为盐类矿物,以 NaCl 子矿物最为常见,其中石盐颗粒较大,呈晶形完好的立方体(图3d)。

3.2 包裹体显微测温研究

流体和熔体-流体包裹体的显微测温是在中国科学院矿物学与成矿学重点实验室的包裹体实验室完成,使用的仪器是英国 Linkam THMS 600 冷热台,流体包裹体测试过程中升温速率为 $0.5 \sim 5^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$,盐水溶液包裹体的初熔温度和冰点附近升温速率为 $0.2 \sim 0.5^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$,盐水包裹体和含子晶包裹体盐度的计算参见《流体包裹体》一书(卢焕章等, 2004)。

显微测温结果表明,骑田岭中细粒黑云母花岗岩晶洞石英中流体包裹体的均一温度范围为 $225 \sim 269^\circ\text{C}$,平均为 247°C ,冰点范围为 $-4.6 \sim -8.7^\circ\text{C}$,盐度为 $7.31\% \sim 12.51\% \text{ NaCleqv}$ 。黑云母花岗岩石英斑晶中流体包裹体的初溶温度为 -52.5°C ,表明其流体属于 $\text{CaCl}_2-\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}$ 体;该类流体包裹体均一温度范围为 $172 \sim 454^\circ\text{C}$,大多数集中在 $400 \sim 454^\circ\text{C}$ 之间(图4),盐度为 $5.41\% \sim 14.87\% \text{ NaCleqv}$;晶洞石英中含子晶体三相包裹体中盐类矿物消失的温度为

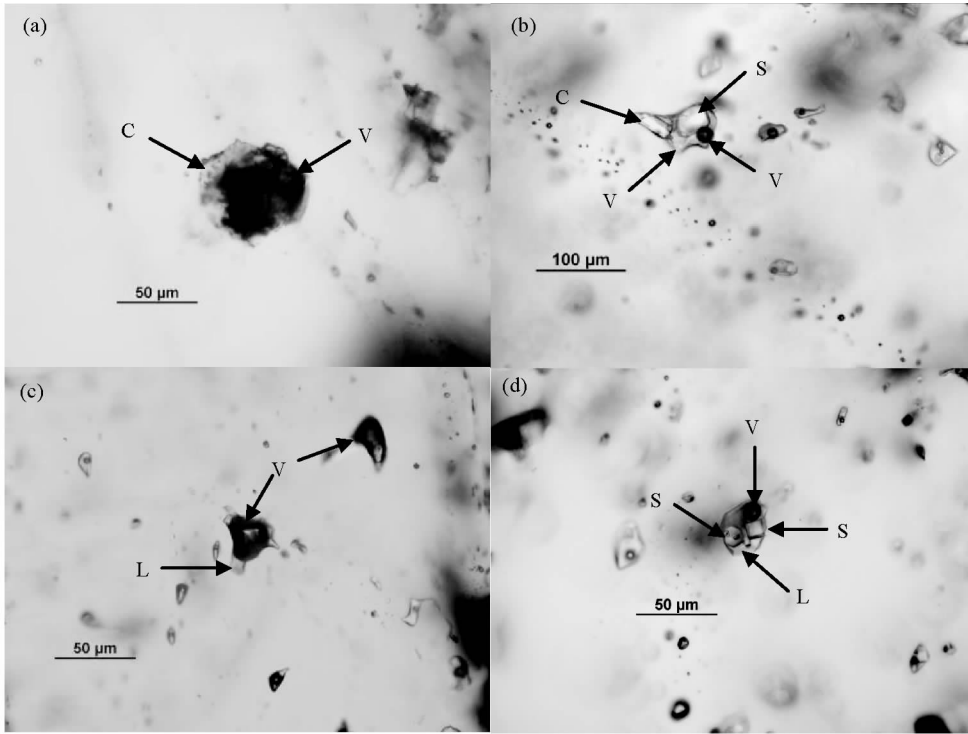


图3 骑田岭黑云母花岗岩石英中的不同类型包裹体

(a)-石英斑晶中的熔体包裹体；(b)-晶洞石英中的熔体-流体包裹体；(c)-石英中的中低盐度流体包裹体和气体包裹体；(d)-晶洞石英中的含子矿物流体包裹体。C-结晶矿物相；S-盐类矿物；L-液相；V-气相

Fig. 3 Different type fluid inclusions in quartz from Qitianling biotite granite

(a)-melt inclusion in quartz phenocryst; (b)-melt-fluid inclusion in miarolitic quartz; (c)-fluid inclusions with medium-low salinity and vapor-rich inclusions; (d)-high salinity inclusion in miarolitic quartz. C-crystal; S-salt; L-liquid; V-vapor

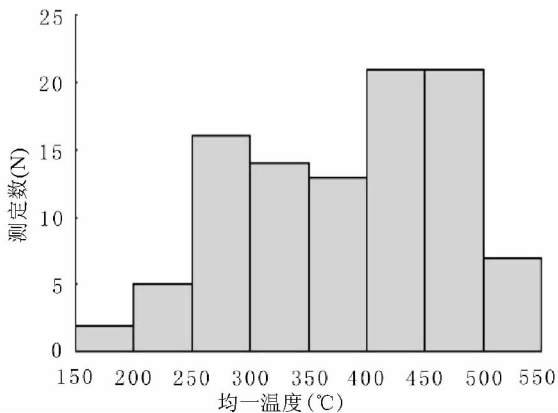


图4 骑田岭黑云母花岗岩石英的流体包裹体均一温度统计图

Fig. 4 Histogram of homogenization temperatures for the fluid inclusions from Qitianling biotite granite

310 ~ 482°C, 其盐度为 36.9% ~ 57.78% NaCleqv; 而多子晶三相包裹体中盐类矿物消失的温度为 501 ~ 530°C, 其盐度为 60.13% ~ 63.70% NaCleqv; 而气体包裹体均一成气相的温度 483 ~ 530°C, 与含多子晶体矿物包裹体的温度区间基本一

致。另外,我们还对芙蓉锡矿矽卡岩矿石中闪锌矿的流体包裹体进行了均一温度和盐度的测定,其结果为 285 ~ 417°C, 盐度为 11.7% NaCleqv, 代表了成矿流体的温度和盐度; 在闪锌矿中还见到有含子矿物的熔体-流体包裹体, 其气泡消失温度为 480°C, 十分接近含盐类子矿物包裹体均一温度的上限。反映出芙蓉锡矿成矿作用的温度区间跨度较大。

由于熔体-流体包裹体是在一定的温度和压力下形成, 常压下进行的测温均以包裹体破裂而泄漏失败而告终, 未获得均一温度, 即在 530°C 尚未均一, 显示熔体-流体包裹体的捕获温度至少大于 530°C。

3.3 包裹体的激光拉曼分析

包裹体的激光拉曼分析旨在研究熔体-流体包裹体中子矿物和气相成分, 进而探讨岩浆演化过程中流体体系的性质。分析测试在中国科学院广州地球化学研究所完成, 采用英国 Renishaw 公司生产的 RM-2000 型显微激光拉曼光谱仪, 激光光源为 514.5nm Ar 激光器, 激光束斑大小 2μm, 光谱分辨率 2cm⁻¹。

激光拉曼分析结果表明, 熔体-流体包裹体中的结晶相矿物主要为钠长石; 该项分析还显示, 多子晶熔体-流体包裹

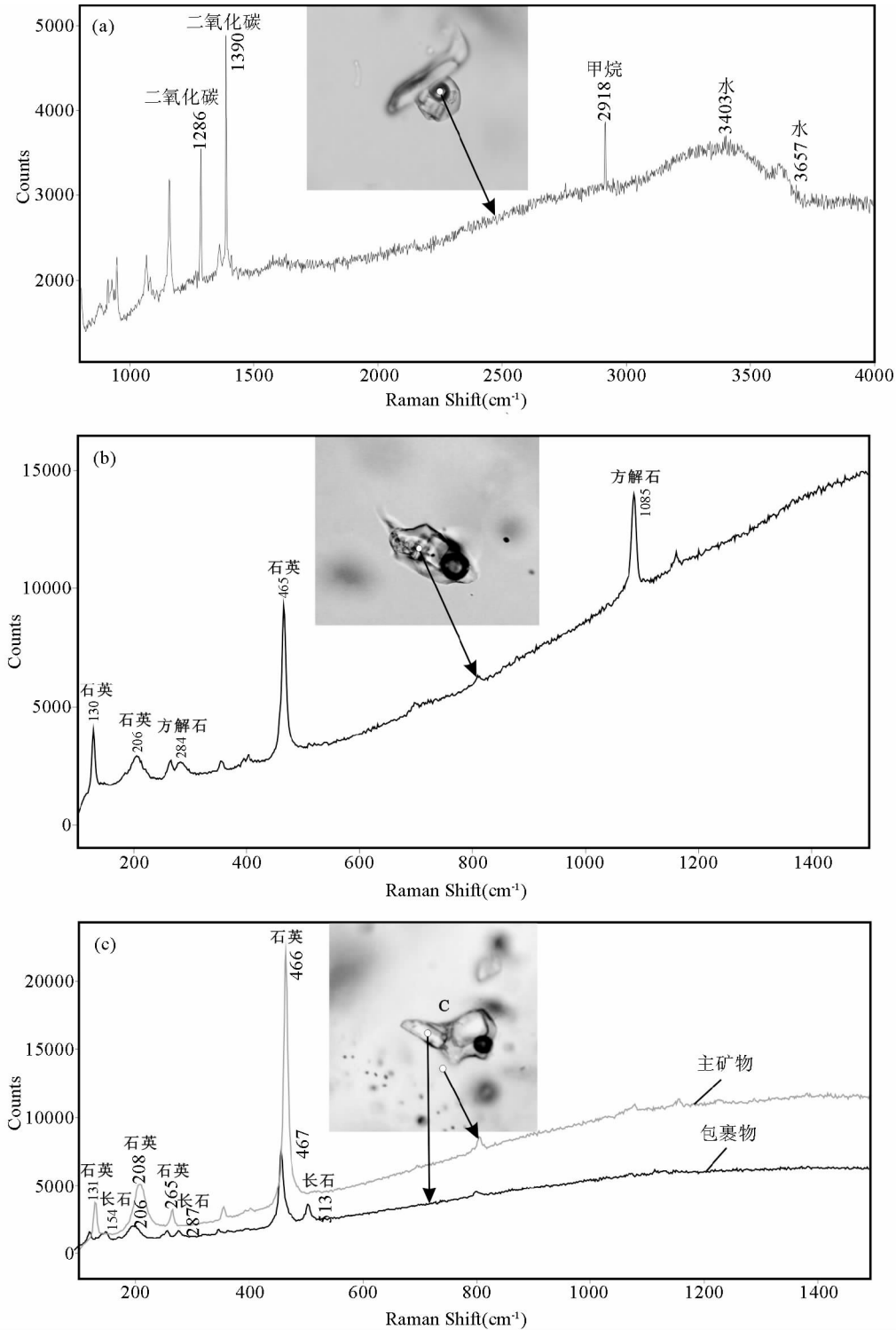


图5 骑田岭黑云母花岗岩石英中流体包裹体和熔体-流体包裹体的激光拉曼分析图谱

Fig. 5 Laser-Raman spectrum of fluid and melt-fluid inclusions in quartz from Qitianling biotite granite

体气体成分中除了有水蒸气($3450 \sim 3500\text{cm}^{-1}$)的特征峰外,还见到有 CO_2 (1286cm^{-1} 、 1390cm^{-1}) 和 CH_4 (2918cm^{-1}) 的特征峰(图 5a)。多子晶流体包裹体和熔体-流体包裹体中子矿物比较多而复杂,子矿物中不但含有方解石(284cm^{-1} 、

1085cm^{-1}) (图 5b)、长石(154cm^{-1} 、 287cm^{-1} 、 513cm^{-1}) (图 5c)和金红石(446cm^{-1} 、 610cm^{-1}),还有部分未知矿物。值得注意的是在含盐类矿物的流体包裹体和多晶熔体-流体包裹体中常会见到有黑色不透明矿物,其拉曼峰为 666cm^{-1} ,

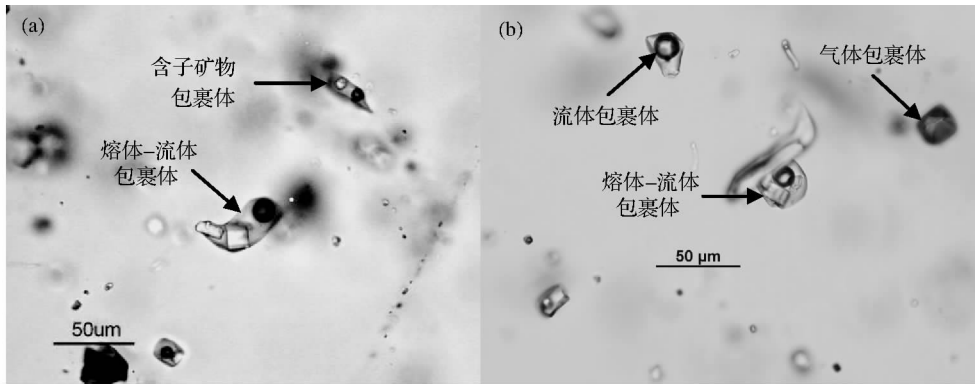


图6 骑田岭黑云母花岗岩晶洞石英中的熔体-流体包裹体和流体包裹体共生关系

(a)-石英晶体根部熔体-流体包裹体与含子矿物包裹体共生;(b)-石英晶体中部熔体-流体包裹体与流体包裹体和气体包裹体共生

Fig.6 Paragenetic relationship of melt-fluid inclusions and fluid inclusions in miarolitic quartz from Qitianling biotite granite

(a)-Paragenetic melt-fluid inclusions and high salinity inclusions in root part of quartz crystal; (b)-Paragenetic melt-fluid inclusions and fluid inclusions and vapor-rich inclusions in middle part of quartz crystal

可能为金属氧化物。此外,激光拉曼分析结果显示,在流体包裹体中还存在纯 CO_2 气体包裹体。

包裹体显微冷冻测温及激光拉曼探针分析结果显示,骑田岭黑云母花岗岩经过岩浆-热液过渡阶段所形成的流体的体系为 $\text{NaCl-CaCl}_2\text{-H}_2\text{O-CH}_4$,在流体包裹体和多晶熔体-流体包裹体中含有长石、方解石、金红石及金属氧化物等矿物,说明其成矿流体具有较强的成矿能力。

4 讨论与结论

酸性岩浆的造岩矿物中一般存在熔融包裹体和气液包裹体2类包裹体,有时也会有第三类包裹体熔体-流体包裹体,它是前两者的过渡类型,这类包裹体的存在证明了如下一个事实:岩浆的演化是一个不间断的连续过程,早期岩浆的演化历史与晚期岩浆热液过程之间并没有截然的界线,而且岩浆中流体与硅酸盐熔体的分离作用过程可在很高温下进行,而且流体从岩浆中分离的过程本身大多会导致成矿作用的发生。熔融包裹体与气液包裹体共存是反映熔体热液共存体系的标志,而熔体流体包裹体则是岩浆热液过渡型矿床的直接标志

通常认为岩浆分异出岩浆热液,而热液形成各种各样的矿床,但过去缺少直接的依据。这种熔体-流体包裹体就是岩浆分异出热液过程的直接证据。岩浆是一个黏稠的硅酸盐熔融体,一般含水很少,且在一定温度,压力下是混溶的。热液则是一个以水为主的体系,两个体系截然不同。因此,要从岩浆分异出流体必然存在一个硅酸盐熔融体与流体这种不同体系共存的过程,即一个不混溶的过程。若能发现这个过程,即可证明热液是从岩浆分异产生出来的。熔体-流体包裹体正是这样一个过程的遗迹“化石”,通过对它的研究可以得知岩浆分异出热液的条件、岩浆热液的特点以及其与成矿作用的关系,具有重要的理论与实际意义。

在骑田岭黑云母花岗岩石英斑晶中常见有熔体包裹体和流体包裹体,偶见熔体-流体包裹体。但在晶洞石英晶体的根部和中部则分布着大量的熔体-流体包裹体,这类包裹体往往与含子盐子矿物的流体包裹体和气体包裹体共存的(图6a),它们是一个包裹体组合,呈线状和带状分布。但在石英晶体的头部则主要是液体包裹体,偶见气体包裹体和含子矿物的包裹体。晶洞石英晶体中不同类型包裹体空间上的分布也反映了熔体-流体的演化规律。

多晶熔体-流体包裹体常与气体包裹体和含子矿物包裹体空间上密切共生(图6b),并且气体包裹体中常伴生有细小的晶体,显微测温结果表明,含多晶子矿物包裹体的盐度在 $60.13\% \sim 63.70\% \text{ NaCl}_{\text{eq}}$ 之间,均一温度为 $501 \sim 530^\circ\text{C}$,而且气体包裹体均一温度在 $483 \sim 530^\circ\text{C}$,两者均一温度很接近,表明它们形成于一个不混溶体系,而不同的包裹体则是主矿物捕获了不同性质流体所致。尽管不同类型包裹体的物质组成(相态组成和相态比例)不尽相同,但它们捕获的温压条件大致相似,其中的气体包裹体的捕获温度应是该温度状态的最低记录(牛贺才和林传仙,1995;牛贺才等,1997)。拉曼探针分析显示含多晶子矿物包裹体的气体成分主要为 CO_2 和 H_2O ,含少量 CH_4 ,气体包裹体的气相成分多为 CO_2 。以上研究结果显示它们是由原始盐水溶液在减压或 CO_2 存在条件下发生了不混溶作用,并分离成两相:一相为高密度和高盐度的卤水,另一相为低密度和低盐度的水溶液。闪锌矿中流体包裹体的均一温度在 $285 \sim 417^\circ\text{C}$ 之间,盐度为 $11.7\% \text{ NaCl}_{\text{eq}}$,代表了成矿流体的温度和盐度。

包裹体岩相学研究显示,从花岗岩到似伟晶岩,主矿物石英原生包裹体组合为熔体包裹体和熔体-流体包裹体+含多晶矿物的流体包裹体+气相包裹体,而石英晶洞中石英晶体不同位置的包裹体组合也不尽相同:根部和中部为熔体-流体包裹体+含子盐子矿物的流体包裹体+气体包裹体,则上部的包裹体组合则为气体包裹体+含子矿物的流体包裹

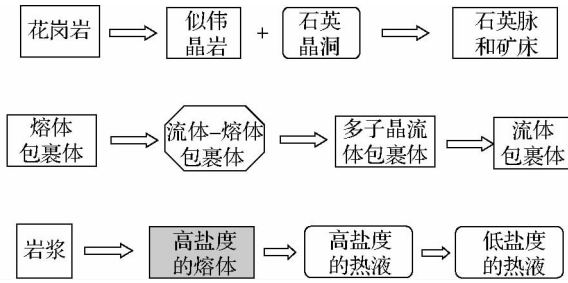


图7 岩浆-流体的演化过程

Fig. 7 Evolutional process of magma-fluid

体 + 流体包裹体。这种包裹体组合的变化反映了从花岗岩到似伟晶岩再到石英晶洞的演化是从岩浆熔体演化到高盐度的熔体→高盐度的热液→低盐度的热液的完整过程(图7)。

似伟晶岩和石英晶洞及熔体-流体包裹体的广泛存在充分显示, 骑田岭花岗岩经历了从岩浆熔体→高盐度的熔体→高盐度的热液→低盐度的热液的完整过程。而岩浆体系的演化过程会出现两种不混溶的熔体: 硅酸盐熔体和非硅酸盐熔体, 这种不混溶现象是酸性岩浆演化的自然产物, 也正是这种不混溶特征决定着岩浆与成矿作用的潜力与机制。

致谢 湖南省地质矿产局湘南地质勘察院、柿竹园有色金属有限责任公司、新天岭钨矿等单位和相关人员以及中国地质科学院矿产资源研究所王永磊博士在野外工作上给予了大力支持和协助; 中山大学海洋学院翟伟博士和中国科学院广州地球化学研究所谭大勇博士分别在包裹体测温和激光拉曼分析工作中给予了热忱帮助, 两位匿名审稿人提出的宝贵修改意见, 在此一并表示诚挚的谢意!

References

Audetat A, Gunther D and Heinrich CA. 1998. Formation of a magmatic hydrothermal ore deposit: Insights with LA-ICP-MS analysis of fluid inclusions. *Science*, 279(5359): 2091–2094

Audetat A and Pettke T. 2003. The magmatic-hydrothermal evolution of two barren granites: A melt and fluid inclusion study of the Rito del Medio and Canada Pinabete plutons in Northern New Mexico (USA). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(1): 97–121

Audetat A, Pettke T, Heinrich CA and Bodnar RJ. 2008. The composition of magmatic-hydrothermal fluids in barren and mineralized intrusions. *Economic Geology*, 103(5): 877–908

Bakker RJ and Elburg MA. 2006. A magmatic-hydrothermal transition in Arkaroola (northern Flinders Ranges, South Australia): From diopside-titanite pegmatites to hematite-quartz growth. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 152(5): 541–569

Bai DY, Jia BH, Ma TQ, Wang XH, Zhang XY and Chen BH. 2007. Relationship of petro-geochemical characteristics to metallogenetic capacity differences between Indosinian and Early Yanshanian granites in southeastern Hunan. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 26(5): 387–398 (in Chinese with English abstract)

Bao ZW and Zhao ZH. 2003. Geochemistry and tectonic setting of the Fugang aluminous A-type granite, Guangdong Province, China: A preliminary study. *Geology-Geochemistry*, 31(1): 52–61 (in

Chinese with English abstract)

Bi XW, Li HL, Shang Y, Hu XY, Hu RZ and Peng JT. 2008. Geochemical characteristics of fluid inclusions from Qitianling A-type granite, Hunan Province, China: Tracing the source ore forming fluid of the Furong superlarge Tin deposit. *Geological Journal of China Universities*, 14(4): 539–548 (in Chinese with English abstract)

Chang Z and Meinert LD. 2004. The magmatic-hydrothermal transition: Evidence from quartz phenocryst textures and endoskarn abundance in Cu-Zn skarns. *Chemical Geology*, 210: 149–171

Deng XG, Li XH, Liu YM, Huang GF and Hou MS. 2005. Geochemical characteristics of Qitianling granites and their implications for mineralization. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 24(2): 93–102 (in Chinese with English abstract)

Heinrich CA, Ryan CG, Mernagh TP and Eadington PJ. 1992. Segregation of ore metals between magmatic brine and vapor, a fluid inclusion study using PIXE microanalysis. *Economic Geology*, 87(6): 1566–1583

Heinrich CA, Guenther D, Audetat A, Ulrich T and Frischknecht R. 1999. Metal fractionation between magmatic brine and vapor, determined by microanalysis of fluid inclusions. *Geology*, 27(8): 755–758

Hong DW, Wang SG, Han BF and Jin MY. 1995. Tectonic setting classification of alkali granite and its identification marker. *Science in China (Series B)*, 25(4): 418–426 (in Chinese)

Huang YY, Li KF, He W, Li GC and Lin KX. 2001. Single fluid inclusion study by SRXRF microprobe. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A*, 467: 1315–1317

Jia DH, Hu RZ, Li DY and Lu Y. 2004. Ore-controlling activity of the mantle plume for the large metallogenic centralized region in southeastern Hunan Province, China. *Geology and Prospecting*, 40(2): 32–35 (in Chinese with English abstract)

Jiang SY, Zhao KD, Jiang YH, Ling HF and Ni P. 2006. New type of tin mineralization related to granite in South China: Evidence from mineral chemistry, element and isotope geochemistry. *Acta Petrologica Sinica*, 22(10): 2509–2516 (in Chinese with English abstract)

Kamenetsky VS, Naumov VB, Davidson P, Achterberghd EV and Ryan CG. 2004. Immiscibility between silicate magmas and aqueous fluids: A melt inclusion pursuit into the magmatic-hydrothermal transition in the Omsukchan Granite (NE Russia). *Chemical Geology*, 210: 73–90

Leng CB, Zhang XC, Wang SX, Qin CJ, Wu KW and Ren T. 2009. Advances of researches on the evolution of ore-forming fluids and the vapor transport of metals in magmatic-hydrothermal systems. *Geological Review*, 55(1): 100–112 (in Chinese with English abstract)

Li HL, Bi XW, Hu RZ, Peng JT, Shuang Y, Li ZL, Li XM and Yuan SD. 2007. Mineral chemistry of biotite in the Qitianling granite associated with the Furong tin deposit: Tracing tin mineralization signatures. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2605–2614 (in Chinese with English abstract)

Li TY and Liu JQ. 2005. Characteristics and composition of fluid inclusions in Furong tin orefield, Qitianling area, South Hunan Province. *Geology and Mineral Resources of South China*, (3): 44–49 (in Chinese with English abstract)

Li XM, Hu RZ, Bi XW and Peng JT. 2010. Geochemistry and tin metallogenetic potential for Qitianling granite mass in southern Hunan. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 40(1): 80–92 (in Chinese with English abstract)

Li ZL, Hu RZ, Peng JT, Bi XW and Li XM. 2006. Helium isotope composition of fluid inclusions and the origin of ore-forming fluids of Furong tin orefield in Hunan Province, China. *Earth Science*, 31(1): 129–135 (in Chinese with English abstract)

Lu HZ. 1990. On fluid-melt inclusions. *Geochimica*, 3: 225–229 (in Chinese with English abstract)

Lu HZ. 1996. Magmatic, fluid-magmatic and fluid inclusions studies on granites, South China. *Journal of Guilin Institute of Technology*, 16

- (1); 1-13 (in Chinese with English abstract)
- Lu HZ, Fan HR, Ni P, Ou GX, Shen K and Zhang WH. 2004. Fluid Inclusion. Beijing: Science Press (in Chinese)
- Mao JW, Li XF, Lehmann B, Chen W, Lan XM and Wei SL. 2004. ^{40}Ar - ^{39}Ar dating of tin ores and related granite in Furong tin orefield, Hunan Province, and its geodynamic significance. Mineral Deposits, 23(2): 164-175 (in Chinese with English abstract)
- Mao JW, Xie GQ, Guo CL and Chen YC. 2007. Large-scale tungsten-tin mineralization in the Nanling region, South China: Metallogenic ages and corresponding geodynamic processes. Acta Petrologica Sinica, 23(10): 2329-2338 (in Chinese with English abstract)
- Nagaseki H, Hayashi K and Iida A. 2006. Quantitative analysis of fluid inclusions by synchrotron X-ray fluorescence: Calibration of Cu and Zn in synthetic quartz inclusions. European Journal of Mineralogy, 18(3): 309-318
- Nagaseki H and Hayashi K. 2008. Experimental study of the behavior of copper and zinc in a boiling hydrothermal system. Geology, 36(1): 27-30
- Niu HC and Lin CX. 1995. Study on the fluid-melt inclusions in fluorite. Geological Review, 1: 28-33 (in Chinese with English abstract)
- Niu HC, Shan Q and Chen PR. 1997. Study of fluid properties on magmatic-hydrothermal stage: A case study of Mianning REE Deposit, Sichuan. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 33: 21-27 (in Chinese with English abstract)
- Peng JT, Hu RZ, Bi XW, Dai TM, Li ZL, Li XM, Shuang Y, Yuan SD and Liu SR. 2007. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ isotopic dating of tin mineralization in Furong deposit of Hunan Province and its geological significance. Mineral Deposits, 26(3): 237-248 (in Chinese with English abstract)
- Roedder E and Weiblen PA. 1970. Silicate immiscibility in lunar magmas, evidenced by melt inclusion in lunar rocks. Science, 167: 641-644
- Roedder E. 1992. Fluid inclusion evidence for immiscibility in magmatic differentiation. Acta Geochimica et Cosmochimica, 56: 5-10
- Ryan CG and Jamieson DN. 1993. Dynamic analysis: Online quantitative PIXE microanalysis and its use in overlap resolved elemental mapping. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B, 77(1-4): 203-214
- Ryan CG, Jamieson DN, Griffin WL, Cripps G and Szymanski R. 2001. The new CSIRO-GEMOC nuclear microprobe: First results, performance and recent applications. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, B, 181(1-4): 12-19
- Shuang Y, Bi XW, Hu RZ, Peng JT, Li ZL, Li XM, Yuan SD and Qi YQ. 2006. REE geochemistry of hydrothermal calcite from tin polymetallic deposit and its indication of source of hydrothermal ore-forming fluid. Journal of Mineralogy and Petrology, 26(2): 57-65 (in Chinese with English abstract)
- Shuang Y, Bi XW, Hu RZ, Peng JT, Zhu CS and Li DH. 2009. Mineral chemistry of the skarn-type ores from Furong tin polymetallic deposit in South Hunan Province, China. Acta Mineralogica Sinica, 29(3): 363-372 (in Chinese with English abstract)
- Ulrich T, Gunther D and Heinrich CA. 1999. Gold concentrations of magmatic brines and the metal budget of porphyry copper deposits. Nature, 399(6737): 676-679
- Ulrich T, Gunther D and Heinrich CA. 2001. The evolution of a porphyry Cu-Au deposit, based on LA-ICP-MS analysis of fluid inclusions: Bajo de la Alumbrera, Argentina. Economic Geology, 96(8): 1743-1774
- Wang DH, Chen YH, Li HQ, Chen ZH, Yu JJ, Lu YF and Li JY. 2003. Geological and geochemical features of the Furong tin deposit in Hunan and their significance for mineral prospecting. Regional Geology of China, 22(1): 50-56 (in Chinese with English abstract)
- Wang RC, Zhu JC, Zhang WL, Xie L, Yu AP and Che XD. 2008. Ore-forming mineralogy of W-Sn granites in the Nanling range: Concept and case study. Geological Journal of China Universities, 14(4): 485-495 (in Chinese with English abstract)
- Wang XW, Wang XD, Liu JQ and Chang HL. 2004. Relationship of Qitianling granite to Sn mineralization in Hunan Province. Geological Science and Technology Information, 23(2): 1-12 (in Chinese with English abstract)
- Wei SL, Zeng QW, Xu YM, Lan XM, Kang WQ and Liao XY. 2002. Characteristics and ore prospects of tin deposits in the Qitianling area, Hunan. Geology in China, 29(1): 67-75 (in Chinese with English abstract)
- Yang K and Bodnar RJ. 1995. Magmatic-hydrothermal evolution in the "bottoms" of porphyry copper systems: Evidence from silicate melt and aqueous fluid inclusions in granitoid intrusions in the Gyeongsang Basin, South Korea. International Geology Review, 36: 608-628
- Zhang DH, Zhang WH and Xu GJ. 2001. Exsolution and evolution of magmatic hydrothermal fluids and their constraints on the porphyry ore-forming system. Earth Science Frontiers, 8(3): 193-202 (in Chinese with English abstract)
- Zhao ZH, Bao ZW and Zhang BY. 2000. The genesis of the super-large tungsten polymetallic ore deposit of Shizhuyuan in crust-mantle interaction setting. Science in China (Series D), 30(B12): 161-168 (in Chinese)
- Zheng JJ and Jia BH. 2001. Geological characteristics and related tin polymetallic mineralization of the Qitianling granite complex in southern Hunan Province. Geology and Mineral Resources of South China, (4): 50-57 (in Chinese with English abstract)
- Zhu JC, Huang GF, Zhang PH, Li FC and Yao B. 2003. On the emplacement age and material sources for the granites of Cailing superunit, Qitianling pluton, South Hunan Province. Geological Review, 49(3): 245-252 (in Chinese with English abstract)
- Zhu JC, Chen J, Wang RC, Lu JJ and Xie L. 2008. Early Yanshanian NE trending Sn/W-bearing A-type granites in the western-middle part of the Nanling Mts region. Geological Journal of China Universities, 14(4): 474-484 (in Chinese with English abstract)
- Zhu JC, Wang RC, Zhang PH, Xie CF, Zhang WL, Zhao KD, Xie L, Yang C, Che XD, Yu AP and Wang LB. 2009. Zircon U-Pb geochronological framework of Qitianling granite batholith, middle part of Nanling Range, South China. Science in China (Series D), 39(8): 1112-1127 (in Chinese)

附中文参考文献

- 柏道远, 贾宝华, 马铁球, 王先辉, 张晓阳, 陈必河. 2007. 湘东南印支期与燕山早期花岗岩成矿能力差异与岩石地球化学特征关系探讨. 岩石矿物学杂志, 26(5): 387-398
- 包志伟, 赵振华. 2003. 佛冈铝质 A 型花岗岩的地球化学及其形成环境初探. 地质地球化学, 31(1): 52-61
- 毕献武, 李鸿莉, 双燕, 胡晓燕, 胡瑞忠, 彭建堂. 2008. 骑田岭 A 型花岗岩流体包裹体地球化学特征——对芙蓉超大型锡矿成矿流体来源的指示. 高校地质学报, 14(4): 539-548
- 邓希光, 李献华, 刘义茂, 黄革非, 侯茂松. 2005. 骑田岭花岗岩体的地球化学特征及其对成矿的制约. 岩石矿物学杂志, 24(2): 93-102
- 洪大卫, 王式洸, 韩宝福, 靳满元. 1995. 碱性花岗岩的构造环境分类及其鉴别标志. 中国科学(B辑), 25(4): 418-426
- 贾大成, 胡瑞忠, 李东阳, 卢焱. 2004. 湘东南地幔柱对大规模成矿的控矿作用. 地质与勘探, 40(2): 32-35
- 蒋少涌, 赵葵东, 姜耀辉, 凌洪飞, 倪培. 2006. 华南与花岗岩有关的一种新类型的锡成矿作用: 矿物化学、元素和同位素地球化学证据. 岩石学报, 22(10): 2509-2516
- 冷成彪, 张兴春, 王守旭, 秦朝建, 吴孔文, 任涛. 2009. 岩浆-热液体系成矿流体演化及其金属元素气相迁移研究进展. 地质论评, 55(1): 100-112

- 李鸿莉, 毕献武, 胡瑞忠, 彭建堂, 双燕, 李兆丽, 李晓敏, 袁顺达. 2007. 芙蓉锡矿田骑田岭花岗岩黑云母矿物化学组成及其对锡成矿的指示意义. 岩石学报, 23(10): 2605-2614
- 李桃叶, 刘家齐. 2005. 湘南骑田岭芙蓉锡矿田流体包裹体特征和成分. 华南地质与矿产, (3): 44-49
- 李晓敏, 胡瑞忠, 毕献武, 彭建堂. 2010. 湘南骑田岭花岗岩岩体地球化学特征及锡成矿潜力. 吉林大学学报(地球科学版), 40(1): 80-92
- 李兆丽, 胡瑞忠, 彭建堂, 毕献武, 李晓敏. 2006. 湖南芙蓉锡矿田流体包裹体的 He 同位素组成及成矿流体来源示踪. 地球科学, 31(1): 129-135
- 卢焕章. 1990. 流体熔融包裹体. 地球化学, 3: 225-229
- 卢焕章. 1996. 华南花岗岩的岩浆与岩浆-流体包裹体及其意义. 桂林工学院学报, 16(1): 1-13
- 卢焕章, 范宏瑞, 倪培, 欧光习, 沈昆, 张文淮. 2004. 流体包裹体. 北京: 科学出版社
- 毛景文, 李晓峰, Lehmann B, 陈文, 蓝晓明, 魏绍六. 2004. 湖南芙蓉锡矿床锡矿石和有关花岗岩的⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄及其地质动力学意义. 矿床地质, 23(2): 164-175
- 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 陈毓川. 2007. 南岭地区大规模钨锡多金属成矿作用成矿时限及地球动力学背景. 岩石学报, 23(10): 2329-2338
- 牛贺才, 林传仙. 1995. 萤石中流体-熔融包裹体研究. 地质论评, 41(1): 28-33
- 牛贺才, 单强, 陈培荣. 1997. 岩浆-热液过渡阶段流体性质的研究——以四川冕宁矿床为例. 南京大学学报(自然科学版), 33: 21-27
- 彭建堂, 胡瑞忠, 毕献武, 戴樟谟, 李兆丽, 李晓敏, 双燕, 袁顺达, 刘世荣. 2007. 湖南芙蓉锡矿床⁴⁰Ar/³⁹Ar 同位素年龄及地质意义. 矿床地质, 26(3): 237-248
- 双燕, 毕献武, 胡瑞忠, 彭建堂, 李兆丽, 李晓敏, 袁顺达, 齐有强. 2006. 芙蓉锡矿方解石稀土元素地球化学特征及其对成矿流体来源的指示. 矿物岩石, 26(2): 57-65
- 双燕, 毕献武, 胡瑞忠, 彭建堂, 朱长生, 李大华. 2009. 湘南芙蓉锡多金属矿床夕卡岩矿石的矿物化学特征. 矿物学报, 29(3): 363-372
- 汪雄武, 王晓地, 刘家齐, 常海亮. 2004. 湖南骑田岭花岗岩与锡成矿的关系. 地质科技情报, 23(2): 1-12
- 王登红, 陈毓川, 李华芹, 陈正宏, 余金杰, 路远发, 李寄嶠. 2003. 湖南芙蓉锡矿的地质地球化学特征及找矿意义. 地质通报, 22(1): 50-56
- 王汝成, 朱金初, 张文兰, 谢磊, 于阿朋, 车旭东. 2008. 南岭地区钨锡花岗岩的成矿矿物学: 概念与实例. 高校地质学报, 14(4): 485-495
- 魏绍六, 曾钦旺, 许以明, 蓝晓明, 康卫清, 廖兴钰. 2002. 湖南骑田岭地区锡矿床特征及找矿前景. 中国地质, 29(1): 67-75
- 张德会, 张文淮, 许国建. 2001. 岩浆热液出溶和演化对斑岩成矿系统金属成矿的制约. 地学前缘, 8(3): 193-202
- 赵振华, 包志伟, 张伯友, 熊小林. 2000. 柿竹园超大型钨多金属矿床形成的壳幔相互作用背景. 中国科学(D辑), 30(B12): 161-168
- 郑基俭, 贾宝华. 2001. 骑田岭岩体的基本特征及其与锡多金属成矿作用关系. 华南地质与矿产, (4): 50-57
- 朱金初, 黄革非, 张佩华, 李福春, 饶冰. 2003. 湘南骑田岭岩体菜岭超单元花岗岩侵位年龄和物质来源研究. 地质论评, 49(3): 245-252
- 朱金初, 陈俊, 王汝成, 陆建军, 谢磊. 2008. 南岭中西段燕山早期北东向含锡钨 A 型花岗岩带. 高校地质学报, 14(4): 474-484
- 朱金初, 王汝成, 张佩华, 谢才富, 张文兰, 赵葵东, 谢磊, 杨策, 车旭东, 于阿朋, 王禄彬. 2009. 南岭中段骑田岭花岗岩基的锆石 U-Pb 年代学格架. 中国科学(D辑), 39(8): 1112-1127