胡阿香,彭建堂,索梦颖. 2023. 湘南芙蓉锡矿床首次发现斧石:一个重要的含B矿物及其指示意义. 岩石学报,39(06):1730-1742, doi:10.18654/1000-0569/2023.06.09

湘南芙蓉锡矿床首次发现斧石:一个重要的含B矿物及其指示意义*

胡阿香[1,2] 彭建堂[3**] 索梦颖[4]

HU AXiang[1,2], PENG JianTang[3**] and SUO MengYing[4]

1. 湖南城市学院土木工程学院,益阳 413000
2. 城市地下基础设施结构安全与防灾湖南省工程研究中心,益阳 413000
3. 中国科学院地球化学研究所,矿床地球化学国家重点实验室,贵阳 550081
4. 中南大学地球科学与信息物理学院,长沙 410083
1. *College of Civil Engineering, Hunan City University, Yiyang* 413000, *China*
2. *Hunan Engineering Research Center of Structural Safety and Disaster Prevention for Urban Underground Infrastructure, Yiyang* 413000, *China*
3. *State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang* 550081, *China*
4. *School of Geosciences and Info-Physics Engineering, Central South University, Changsha* 410083, *China*

2022-09-30 收稿, 2023-01-11 改回.

Hu AX, Peng JT and Suo MY. 2023. The first discovery of axinite in the Furong tin deposit, southern Hunan: An important boron-bearing mineral and its implications for tin mineralization. *Acta Petrologica Sinica*, 39(6): 1730-1742, doi: 10.18654/1000-0569/2023.06.09

Abstract Most of the Sn mineralization worldwide is commonly associated with highly-fractionated granites, especially with those granites rich in volatile components such as F, Cl, Li and B. However, previous researches paid little attention to the volatile B. The giant Furong tin deposit, located in the middle part of Nanling Region, is of great significance in China. Axinite was found in skarn in this deposit for the first time, which provides an ideal opportunity to explore the role of volatile B during the formation of tin deposit. By means of detailed mineralogical, petrological and geochemical studies, the petrographic characteristics, crystal structures and chemical compositions of axinites from Furong were depicted, followed by a discussion on the relationship between the volatile B and granite emplacement, as well as tin mineralization in this area. The axinite from Furong deposit is lilac brown in color, massive in texture, hard, colorless and light yellow under microscope, with self-shaped wedge shape, high protrusion and low interference color, and intergrown with vesuvianite, fluorite, garnet and sphene. It was revealed that the axinite belongs to axinite-(Fe), with a general chemical formula of $Ca_{2.22}(Fe_{0.52}, Mn_{0.41}, Mg_{0.13})_{1.06}Al_{2.11}B_{0.72}Si_{3.98}O_{15.5}$. There are various B-rich minerals including axinite, tourmaline and ludwigite in the Furong deposit, indicating that the Qitianling granitic pluton is rich in boron. The enrichment of the volatile B in granite can reduce the magma viscosity, and increase the degree of magma differentiation, which helps the enrichment of incompatible elements like Sn in the residual melt during the magma evolution. Boron is also closely related to tin mineralization, since the B enrichment can facilitate the extraction of Sn from source rocks, improving the Sn concentrations in the primary magma. Like F and Cl, boron can form a complex with Sn, which is beneficial to the long-distance migration for tin; and they can be enriched in residual melt during magma evolution because of similar geochemical behaviors of B and Sn during the fractional crystallization, and these magmas are considered to be the sources of the mineralizing fluid responsible for tin mineralization. In addition, with the continuous discovery of B-bearing minerals in the Furong tin deposit, it indicates that there is a good potential for the prospecting of associated boron ores in the studied area.

Key words Axinite; Mineralogical characteristics; Implication for tin mineralization; Furong tin deposit; Southern Hunan

* 本文受国家自然科学基金项目(42102073、41972090)和国家重点研发计划项目(2018YFC0603500)联合资助.

第一作者简介: 胡阿香, 女, 1987年生, 博士, 讲师, 主要从事矿物学和矿床地球化学研究, E-mail: axhu2010@163.com

** **通讯作者**: 彭建堂, 男, 1968年生, 博士, 研究员, 主要从事矿床地球化学研究, E-mail: jtpeng@126.com

摘 要 世界上绝大部分锡矿床均与富 F、Cl、Li、B 等挥发份的高分异花岗岩有关，前人对 F、Cl、Li 等组份在花岗质岩浆演化及锡成矿过程中的作用已有较为深入的认识，但对挥发份 B 关注较少。南岭中段的芙蓉超大型锡矿床是我国重要锡矿产地，我们首次在该矿床发现了硼硅酸盐矿物中罕见的斧石，为研究挥发份 B 对锡成矿的作用提供了机会。通过详细的岩石学、矿物学和地球化学研究，揭示了斧石的产出特征、晶体结构和化学成分特征，进而探讨了挥发份 B 与该区花岗岩成岩成矿的关系。芙蓉锡矿床新发现的斧石为丁香褐色、块状构造、硬度较大，显微镜下呈无色、浅黄色等，主要为自形尖劈状的楔形、长条状等自形结构、正高突起、干涉色较低，与符山石、萤石、石榴子石、榍石等矿物共生。电子探针分析表明，芙蓉矿床的斧石属铁斧石，其平均化学式为 $Ca_{2.22}(Fe_{0.52},Mn_{0.41},Mg_{0.13})_{1.06}Al_{2.11}B_{0.72}Si_{3.98}O_{15.5}$。结合前人研究成果，芙蓉矿床斧石、电气石、硼镁铁矿等富 B 矿物的广泛产出，指示了骑田岭花岗岩富含挥发份 B；硅酸盐熔体中挥发份 B 的存在，能降低岩浆粘度，增加岩浆的结晶分异程度，延长岩浆寿命，进而有利于 Sn 等不相容元素在岩浆演化过程中向残余熔体富集。B 与锡成矿的关系密切，岩浆中的 B 能提高源区 Sn 的萃取效率，增加原始岩浆中 Sn 的含量；B 能形成锡的络合物，有利于锡的长距离运移；B 与 Sn 具有相似的地球化学行为，在岩浆演化过程中，富集于残余熔体中，进一步演化后富集于成矿流体中。此外，在芙蓉锡矿床，随着含 B 矿物的不断被发现，表明该矿床可能具有寻找伴生硼矿的潜力。

关键词 斧石；矿物学特征；指示意义；芙蓉锡矿床；湘南

中图法分类号 P578.93；P618.44

锡，作为稀有金属，在地壳中的丰度很低，其上地壳的丰度仅 1.7×10^{-6}（Rudnick and Gao，2003），但我国锡矿资源丰富，其产量和储量均稳居世界首位（陈骏等，2000；陈郑辉等，2015；Mao *et al.*，2019；蒋少涌等，2020；袁顺达等，2020）。我国锡矿资源主要集中分布于华南地区，该地区虽面积不足世界陆地总面积的 1%，但却集中了全球 22% 的锡矿资源（陈骏等，2000；袁顺达，2017；隋清霖等，2020；Mao *et al.*，2021）。

据统计，全球 95% 以上的锡矿床与花岗岩有着直接或间接的关系（Lehmann，1990；陈骏等，2000；Yuan *et al.*，2008；Kamilli *et al.*，2017；Zhao *et al.*，2018；隋清霖等，2020；袁顺达和赵盼捞，2021）；特别是那些富 Li、F、B 的高分异花岗岩与锡矿关系密切，通常被认为是锡成矿的物质提供者（朱金初等，2002；Yuan *et al.*，2008；王汝成等，2008；隋清霖等，2020；Zhao *et al.*，2022a）。目前人们对富 Li、F 花岗岩与锡矿的关系已进行了较多研究（Thomas *et al.*，2000；王联魁等，2000；朱金初等，2002；张德会等，2004；袁顺达，2017），但对富 B 花岗岩研究较少，挥发份 B 与花岗岩成岩、成矿的关系仍不清楚。

斧石为三斜晶系的硼硅酸盐矿物，尽管在矽卡岩和其它接触变质岩中均可产出（Grew，1996；Andreozzi *et al.*，2000；Frost *et al.*，2007；Sun *et al.*，2020），但由于其产出数量较少，目前国内外有关斧石的研究并不多；且前人工作主要侧重于斧石的成分、结构及分类等方面的研究（Sanero and Gottardi，1968；Lumpkin and Ribbe，1979；Pringle and Kawachi，1980；Andreozzi *et al.*，2000，2004；Filip *et al.*，2006，2008；Matsubara *et al.*，2011），较少涉及其与成矿的关系。湖南芙蓉锡矿床位于南岭中段骑田岭岩体的南缘（图 1），前人已对其矿床地质特征（许以明等，2000；黄革非等，2001；王登红等，2003；蔡锦辉等，2004）、花岗岩成因（王联魁等，1982；朱金初等，2003；Zhao *et al.*，2005；邓希光等，2005；Chen *et al.*，2021）、成岩成矿时代（毛景文等，2004；李华芹等，2006；彭建堂等，2007；朱金初等，2009；袁顺达等，2010；Yuan *et al.*，2011；王志强等，2014；Chen *et al.*，2021，2022a；Xing *et al.*，2022；Zhang *et al.*，2022）、成矿流体（李兆丽等，2006；毕献武等，2008；双燕等，2009；单强等，2011，2014；王志强等，2014；Deng *et al.*，2022；Chen *et al.*，2023）和矿床成因（蒋少涌等，2006；Li *et al.*，2007；Chen *et al.*，2022b）等方面进行了详细的研究，但针对该区花岗岩及岩浆期后热液体系中挥发份的研究较少，尤其是挥发份 B 在锡成矿过程中所起的作用，目前仍不清楚。最近我们首次在芙蓉矿区发现了斧石，该矿区斧石、电气石等富 B 矿物的广泛存在，表明与该锡矿有关的骑田岭花岗岩富含挥发份 B，这为研究挥发份 B 与花岗岩成岩、成矿关系提供了理想的场所。因此，本文试图通过对该区新发现的斧石进行系统的矿相学、矿物晶体结构和化学成分研究，进而探讨挥发份 B 在成岩、成矿过程中的作用，以便揭示富 B 花岗岩与锡矿的关系。

1 地质背景

1.1 骑田岭岩体

骑田岭岩体分布于华南腹地的南岭地区，在大地构造上位于华夏板块的西侧（图 1），是湘南地区出露面积最大的花岗质岩体。该岩体大体呈等轴状，侵位于晚古生代-中生代的碳酸盐岩和碎屑岩中，总出露面积约为 $520km^2$（图 2a）。骑田岭岩体为三阶段侵入的复式岩体（朱金初等，2009），按侵入时间从早到晚，该岩体的岩性为中-粗粒角闪黑云母花岗岩、中粒黑云母花岗岩和细粒花岗岩（图 2a）；大部分学者认为前两种岩性的花岗岩与该区锡矿关系密切（朱金初等，2003，2009；李华芹等，2006；赵葵东等，2006；李鸿莉等，2007；Yuan *et al.*，2011；Deng *et al.*，2022），但最新研究发现，晚期侵入的细粒花岗岩可能与锡成矿关系更为直接（Chen *et al.*，2021，2022a）。该岩体的化学成分具有 SiO_2、Al_2O_3、Na_2O+K_2O、FeO 含量较高、分异指数较大、富含挥发份（F、Cl）等特点（柏道远等，2005；邓希光等，2005；李鸿莉等，2007；单强

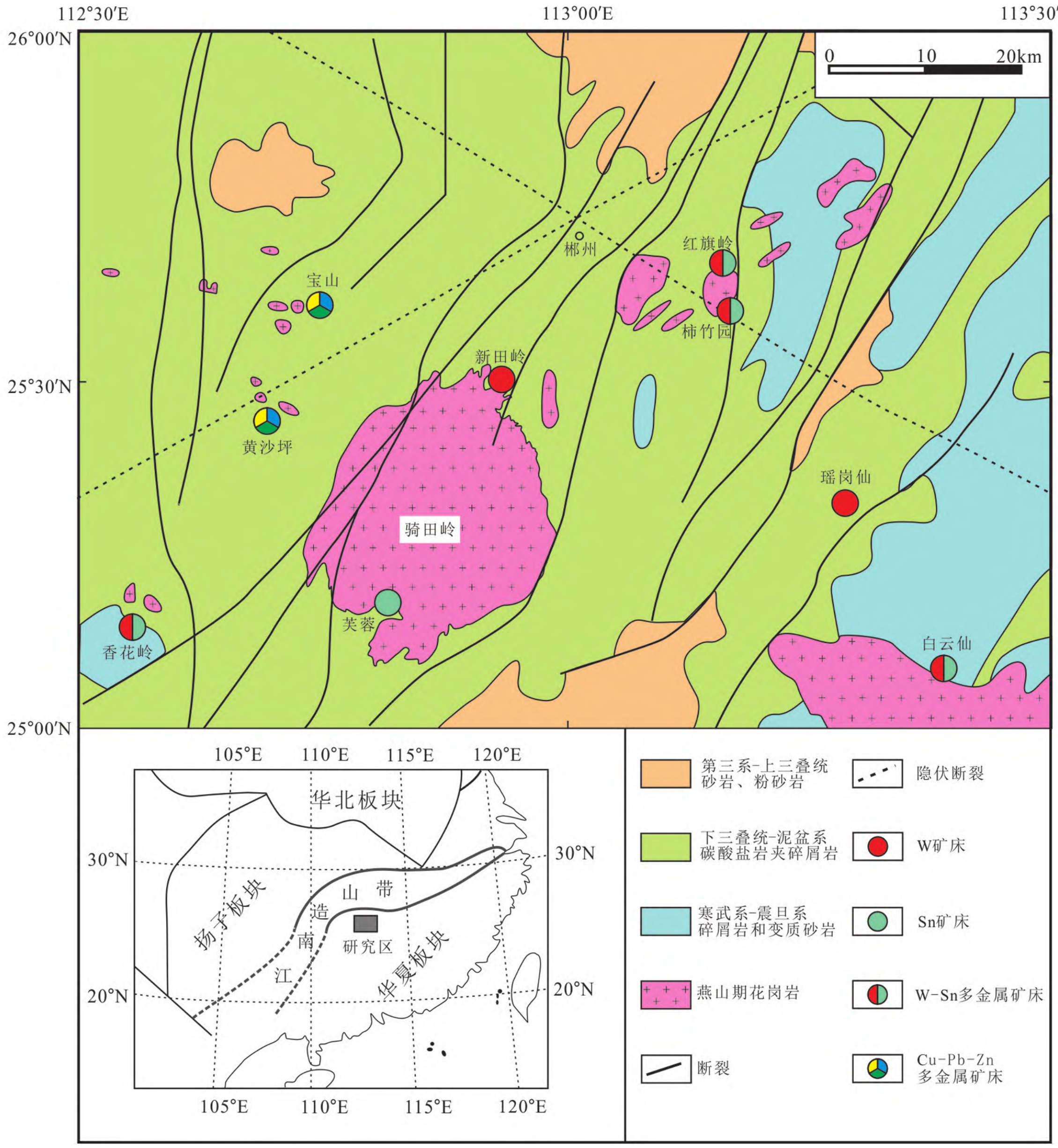

图1 湘南地区地质简图和矿产分布图(据 Yuan *et al.*, 2011 修改)

Fig. 1 Simplified geological map of southern Hunan, showing the distribution of ore deposits (modified after Yuan *et al.*, 2011)

等,2011)。前人对骑田岭花岗岩进行了较多的年代学研究,发现该岩体的成岩年龄为146~163Ma,主要集中在150~160Ma(刘义茂等,2002;朱金初等,2002,2009;毛景文等,2004;赵葵东等,2006;单强等,2014;王志强等,2014;Chen *et al.*,2021)。

1.2 芙蓉锡矿床

芙蓉锡矿床,在构造上处于NE向炎陵-郴州-蓝山构造带与NW向郴州-邵阳构造带的交汇部位,为南岭中段W-Sn多金属成矿带的重要组成部分。除芙蓉锡矿床外,南岭中段成矿带还发育有一系列世界级的钨锡矿床,典型矿床有柿竹园钨锡多金属矿床、瑶岗仙钨矿床、红旗岭钨锡多金属矿床和香花岭钨锡多金属矿床(图1)。芙蓉矿区位于骑田岭岩体南缘(图2a),距郴州市约40km;该矿床发现于20世纪90年代,其锡资源量超过60万t(魏绍六等,2002),是南岭W-Sn成矿省中规模最大的锡矿床之一,为一世界级的超大型锡矿床。

芙蓉矿区出露的地层主要为晚古生界-中生界的石炭系和二叠系,另有少量三叠系,岩性主要为碳酸盐岩、钙质页岩、白云岩、砂岩和灰岩等,其中碳酸盐岩为其主要的赋矿围岩。该矿区构造活动强烈,发育一系列NE-NNE向断裂,其次发育有EW、NS向断裂(图2b),且NE向断裂为该区最主要的控矿构造。

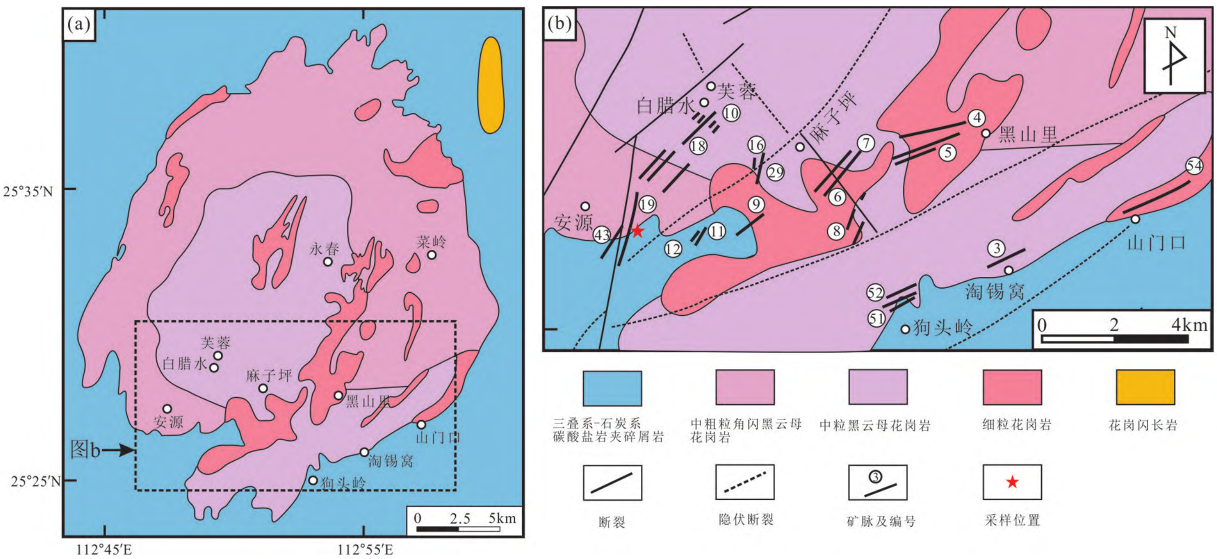

图 2 骑田岭岩体地质图（a，据 Xie *et al.*，2010 修改）和芙蓉锡矿床地质简图（b，据毛景文等，2004；彭建堂等，2007 修改）

Fig. 2 Geological map of the Qitianling pluton（a，modified after Xie *et al.*，2010）and simplified geological map of the Furong tin deposit（b，modified after Mao *et al.*，2004；Peng *et al.*，2007）

芙蓉矿区的锡矿化主要产于骑田岭岩体内部或岩体与碳酸盐岩、砂岩的接触带，目前该区已发现有 50 多条矿脉（图 2b），大体可分为白腊水-安源、黑山里-麻子坪和山门口-淘锡窝-狗头岭等三个 NE 向锡矿带（黄革非等，2001）。白腊水-安源锡矿带为该区最主要的锡矿产地，该带锡矿主要赋存于岩体中及内外接触带，现已发现锡矿脉 20 多条，锡资源量预计在 40 万 t 以上（黄革非等，2001），为该矿提供了约 73% 的锡矿资源量，特别是白腊水矿区的 19 号矿体，锡矿储量巨大，其资源量约占整个矿床的 32%（彭建堂等，2007）。19 号矿脉产于二叠系碳酸盐岩和花岗岩的接触带，该矿脉长可达 1600m，宽约 50～150m，为芙蓉矿区规模最大的矿脉；该矿脉 Sn 资源量达到 27 万 t，矿石中 SnO_2 品位较高，最高可达 21%（平均品位为 0.79%）（蔡锦辉等，2004；毛景文等，2004）。该矿的矿化类型主要为矽卡岩型、蚀变花岗岩型、构造蚀变带型和云英岩型；矿体主要呈似层状、扁豆状、不规则状等产出；矿石矿物主要有锡石、磁铁矿、黄铁矿及少量的黄铜矿、方铅矿和闪锌矿等；脉石矿物主要为石榴子石、符山石、云母、石英、透辉石、电气石、萤石和方解石等；矿石类型主要有锡石矿石、磁铁矿-锡石矿石、透辉石-透闪石-锡石矿石等。前人对芙蓉锡矿床进行了精细的成矿年代学研究，包括云母和角闪石的 Ar-Ar 定年（毛景文等，2004；彭建堂等，2007；Chen *et al.*，2022a）、锡石和符山石的 U-Pb 定年（Yuan *et al.*，2011；王志强等，2014；Chen *et al.*，2022a；Xing *et al.*，2022），所获得的年龄均表明该矿形成于 150～160Ma。

2 样品的采集与分析

本次研究所使用的样品（PD-5、PD-6-1 和 PD-6-2），均采自芙蓉锡矿床中的安源-白腊水锡矿带的 19 号矿体。具体采样位置如图 2b 所示。

斧石的粉晶 X 射线衍射分析（XRD）实验在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成；使用的仪器为 D/Max-2200 型 X 射线衍射仪，Cu Kα 辐射电压 40kV，电流 20mA，最大功率为 2.2kw，扫描角度范围 2°～60°，步长 0.04°，分辨率为 0.028°（2θ）。电子探针分析（EPMA）在中南大学地球科学与信息物理学院电子探针显微分析实验室完成；使用的仪器为岛津 EPMA-1720H 型，加速电压为 15.0kV，电流 20nA，束斑直径为 5μm，检出限为 0.01%，分析精度为 0.03%；值得说明地是，本次 B 含量测试使用的是电气石标样。

3 斧石的矿物学特征

3.1 手标本及镜下特征

芙蓉矿区的斧石，在手标本中为丁香褐色，呈针簇状、放射状或致密块状集合体产出，玻璃光泽，贝壳状断口，可见一组解理，硬度较大，常与紫色萤石、红褐色石榴子石等矿物共生（图 3）。

偏光显微镜下，斧石为尖劈状的楔形（图 4a）或长条状（图 4b-f），常呈无色、浅黄色或淡蓝色，具有微弱的多色性（图 4a），一组解理发育，可见双晶；正高突起，干涉色较低，斜消光（图 4）。镜下可见斧石与符山石（图 4c-f）、石榴子石（图 4c，d）、萤石（图 4e，f）、石英、电气石、榍石等矿物共生，局部可见斧石蚀变为绿泥石的现象（图 4b）。斧石与锡石均形成于矽卡岩期，为共生关系，但遗憾的是，在手标本和镜下均未找到两者的直接接触关系。

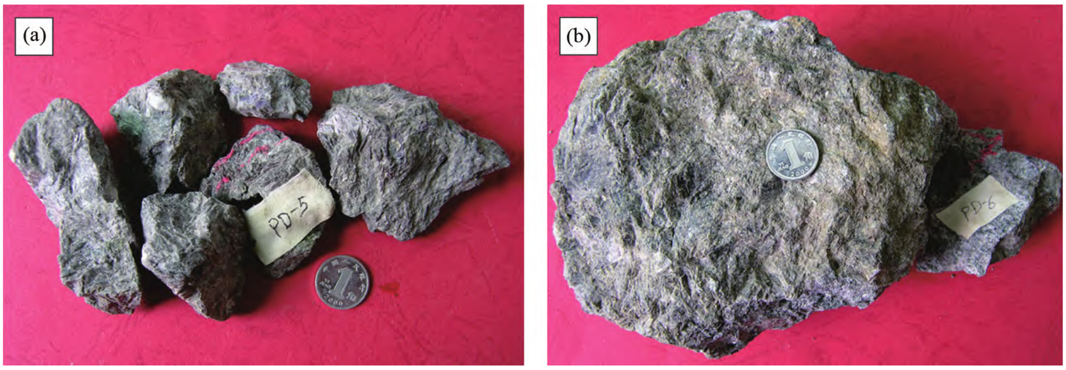

图3 芙蓉锡矿床斧石的手标本照片

Fig.3 Specimen photos of axinite collected from the Furong tin deposit

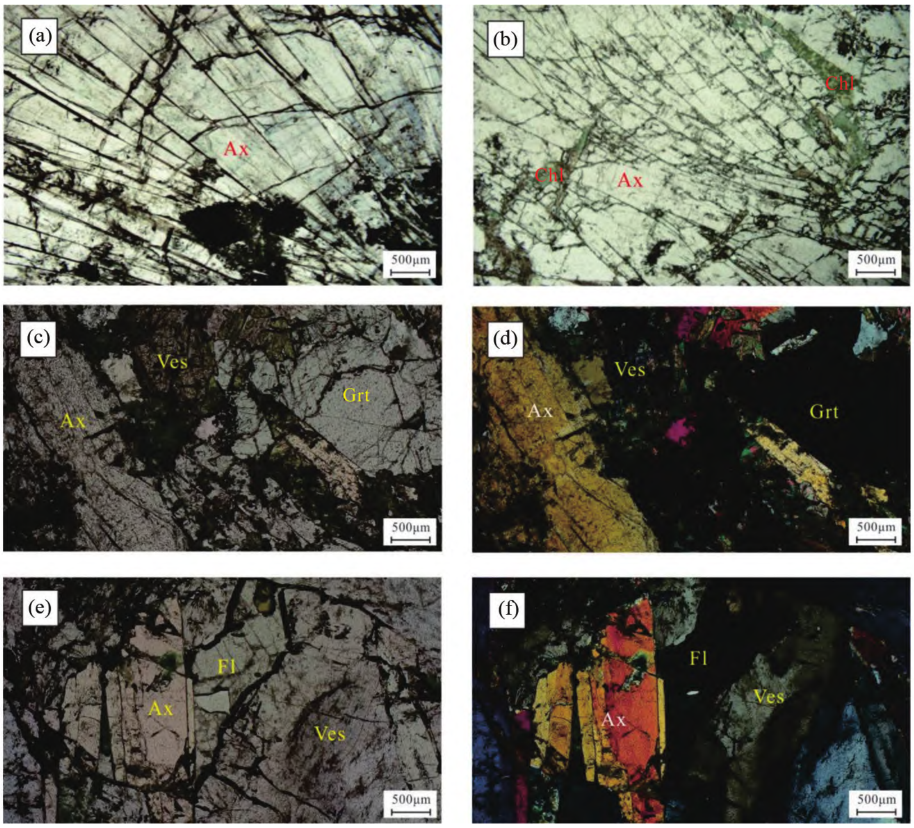

图4 芙蓉锡矿床斧石的镜下照片

(a)尖劈状楔形斧石;(b)长条状斧石,少量蚀变为绿泥石;(c、d)斧石与石榴子石、符山石共生;(e、f)斧石与符山石、萤石、金云母和石英共生.(a-c、e)为单偏光下;(d、f)为正交偏光下. Ax-斧石;Chl-绿泥石;Grt-石榴子石;Ves-符山石;Fl-萤石

Fig.4 Micrographs of axinite collected from the Furong tin deposit

(a) axinite with wedge shape; (b) axinite with long strip, locally chloritization; (c, d) axinite coexisting with garnet and vesuvianite; (e, f) axinite intergrown with vesuvianite, fluorite, phlogopite and quartz. (a-c, e) under plane-polarized light; (d, f) under cross-polarized light. Ax-axinite; Chl-chlorite; Grt-garnet; Ves-vesuvianite; Fl-fluorite

3.2 粉晶X射线衍射分析(XRD)

本次研究对采自芙蓉矿区斧石样品(PD-5)进行了X射线衍射分析,其XRD谱图如图5a所示。不难看出,该斧石样品具有明显 d = 6.249nm、3.445nm、3.127nm、2.875nm、2.791nm 等特征峰值,与铁斧石矿物的标准衍射谱图(图5b; Dalnegorsk, Russia 1408, https://www.mindat.org/min-1459.html)较吻合,可初步确定其为铁斧石。

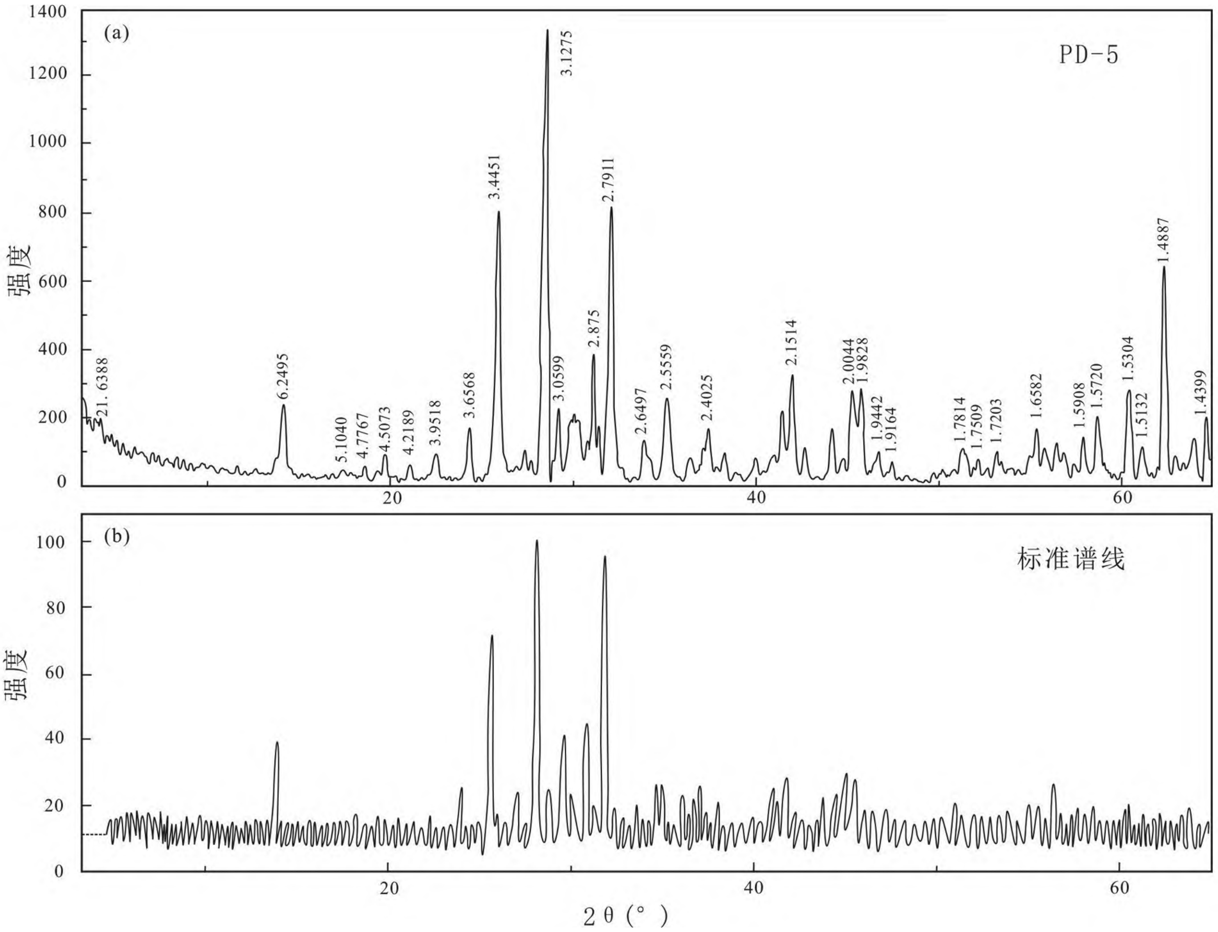

图 5 芙蓉锡矿床斧石的 X 射线衍射图谱

(a)样品 PD-5 的斧石；(b)铁斧石标准谱线，来自 https://www.mindat.org/min-1459.html

Fig. 5 X-ray diffraction spectrum of axinite from the Furong tin deposit

(a) axinite from Sample PD-5; (b) standard spectral line of axinite-Fe, come from https://www.mindat.org/min-1459.html

3.3 斧石的化学组成

利用电子探针对 3 件斧石样品(PD-5、PD-6-1 和 PD-6-2)共 53 个点进行了原位成分分析，测试结果如表 1 所示。根据分析结果不难发现，该区斧石化学成分变化较大，其 SiO_2 变化范围为 35.96% ~40.18%(平均 38.57%)，Al_2O_3 为 16.20% ~ 18.85%(平均 17.29%)，CaO 为 19.54% ~ 20.78%(平均 20.09%)，MgO 为 0.05% ~ 1.37%(平均 0.87%)，FeO^T 为 4.6% ~ 7.35%(平均 6.06%)，B_2O_3 为 2.61% ~5.36%(平均 4.06%)，MnO 为 4.06% ~5.28%(平均 4.69%)。

本次电子探针分析未能获得 H_2O 的含量，因此，在计算单位原子数时，有必要将 H_2O 含量从斧石分子式中剔除，故需根据 O = 15.5(Matsubara *et al.*, 2011)来计算其它阳离子的含量。根据 EMPA 测试数据，可计算得到斧石样品 PD-5、PD-6-1 和 PD-6-2 共 53 个点的分子式单位原子数(apfu)(表 1)。其中：3.81 < Si < 4.09 (3.98，平均值，下同)，1.96 < Al < 2.36 (2.11)，2.15 < Ca < 2.31 (2.22)，0.41 < Fe < 0.65 (0.52)，0.35 < Mn < 0.46 (0.41)，0.01 < Mg < 0.20 (0.13)，0.48 < B < 0.92 (0.72)。

在剔除 H_2O 和 O = 15.5 的条件下，计算得到 3 个斧石样品(PD-5、PD-6-1 和 PD-6-2)的平均化学式分别为：$Ca_{2.22}(Fe_{0.54}, Mn_{0.41}, Mg_{0.11})_{1.06}Al_{2.09}B_{0.76}Si_{3.98}O_{15.5}$，$Ca_{2.24}(Fe_{0.50}, Mn_{0.43}, Mg_{0.15})_{1.08}Al_{2.16}B_{0.65}Si_{3.98}O_{15.5}$，$Ca_{2.20}(Fe_{0.53}, Mn_{0.37}, Mg_{0.17})_{1.07}Al_{2.05}B_{0.77}Si_{4.00}O_{15.5}$；芙蓉矿区斧石平均化学式可表示为 $Ca_{2.22}(Fe_{0.52}, Mn_{0.41}, Mg_{0.13})_{1.06}Al_{2.11}B_{0.72}Si_{3.98}O_{15.5}$。

值得一提地是，前人已有的研究表明，铁斧石中 $Fe^{3+} << Fe^{2+}$(甚至没有 Fe^{3+})(Andreozzi *et al.*, 2004)，因此我们对表 1 中数据进行处理时，将 FeO^T 中的 Fe 全部视为 +2 价的亚 Fe。与斧石标准化学式 $Ca_2(Fe, Mn, Mg)_{\Sigma 1}Al_2BSi_4O_{15.5}$(Andreozzi *et al.*, 2004)比较，不难发现，芙蓉矿区斧石的 Fe、Mn、Mg、Si 含量与其理论值相近，但同时表现出相对富 Ca、贫 B 的特征。

表 1 芙蓉锡矿床斧石的化学成分(wt%)

Table 1 Chemical compositions of axinites from the Furong tin deposit (wt%)

样品号	PD-5												
测点号	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-9	-10	-11	-12	-13
SiO_2	37.12	39.24	39.81	39.40	39.43	39.98	39.81	39.03	38.99	39.30	38.79	38.50	37.57
B_2O_3	5.01	4.36	5.28	4.42	4.56	4.90	5.12	4.06	5.00	4.83	4.81	4.63	4.57
Al_2O_3	17.19	17.07	17.15	16.54	17.04	16.95	17.39	16.84	17.06	16.36	17.09	16.62	17.12
FeO^T	6.10	6.06	6.22	7.23	5.96	6.28	6.37	6.64	6.25	6.53	6.51	5.61	5.32
MgO	0.91	0.98	1.08	0.05	0.99	0.74	0.82	0.69	0.83	0.52	0.85	0.92	0.74
MnO	4.15	4.38	4.16	5.28	4.27	4.94	4.69	4.70	4.48	4.90	4.43	4.70	5.05
CaO	20.15	20.12	20.13	19.75	20.22	20.13	20.29	20.08	20.20	20.32	20.09	20.28	20.78
Total	90.63	92.22	93.83	92.67	92.47	93.92	94.48	92.05	92.80	92.76	92.57	91.26	91.14
O = 15.5 条件下计算的原子数													
Si	3.86	4.01	3.97	4.04	4.01	4.01	3.96	4.02	3.95	4.00	3.95	3.97	3.90
B	0.90	0.77	0.91	0.78	0.80	0.85	0.88	0.72	0.87	0.85	0.85	0.83	0.82
Al	2.10	2.06	2.02	2.00	2.04	2.00	2.04	2.05	2.04	1.96	2.05	2.02	2.09
Fe	0.53	0.52	0.52	0.62	0.51	0.53	0.53	0.57	0.53	0.56	0.55	0.48	0.46
Mg	0.14	0.15	0.16	0.01	0.15	0.11	0.12	0.11	0.13	0.08	0.13	0.14	0.11
Mn	0.37	0.38	0.35	0.46	0.37	0.42	0.39	0.41	0.38	0.42	0.38	0.41	0.44
Ca	2.24	2.20	2.15	2.17	2.20	2.16	2.16	2.22	2.19	2.22	2.19	2.24	2.31
样品号	PD-5											PD-6-1	
测点号	-14	-15	-16	-17	-18	-19	-20	-21	-22	-23	-24	-1	-2
SiO_2	39.95	38.76	37.06	38.09	38.88	38.73	37.26	38.90	38.04	38.55	38.96	38.27	38.06
B_2O_3	4.33	4.36	3.53	3.66	4.61	3.64	3.17	3.81	3.64	2.79	3.80	4.15	3.70
Al_2O_3	17.23	17.11	17.70	17.54	17.19	17.74	17.72	18.17	18.77	17.62	16.75	17.02	16.78
FeO^T	5.84	5.64	6.15	6.26	6.61	6.63	6.12	6.71	6.32	7.35	6.82	6.32	6.19
MgO	1.00	0.89	0.43	0.52	0.58	0.62	0.75	0.29	0.69	0.08	0.61	0.83	0.91
MnO	4.86	4.94	5.03	4.86	4.94	4.63	4.92	5.09	4.63	5.21	4.68	4.89	4.48
CaO	20.40	20.52	20.34	20.24	20.12	19.93	19.92	20.31	19.91	19.91	20.04	19.98	20.00
Total	93.60	92.22	90.24	91.16	92.91	91.91	89.85	93.29	91.99	91.50	91.66	91.44	90.12
O = 15.5 条件下计算的原子数													
Si	4.02	3.97	3.92	3.98	3.96	4.00	3.96	3.97	3.92	4.05	4.04	3.97	4.01
B	0.75	0.77	0.64	0.66	0.81	0.65	0.58	0.67	0.65	0.51	0.68	0.74	0.67
Al	2.04	2.07	2.21	2.16	2.06	2.16	2.22	2.18	2.28	2.18	2.05	2.08	2.08
Fe	0.49	0.48	0.54	0.55	0.56	0.57	0.54	0.57	0.55	0.65	0.59	0.55	0.55
Mg	0.15	0.14	0.07	0.08	0.09	0.09	0.12	0.04	0.11	0.01	0.09	0.13	0.14
Mn	0.41	0.43	0.45	0.43	0.43	0.41	0.44	0.44	0.40	0.46	0.41	0.43	0.40
Ca	2.20	2.25	2.31	2.26	2.19	2.21	2.27	2.22	2.20	2.24	2.23	2.22	2.26
样品号	PD-6-1												
测点号	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-9	-10	-11	-12	-13	-14	-15
SiO_2	37.79	38.06	38.06	36.57	39.06	39.07	37.32	38.06	39.25	37.84	38.25	38.45	39.26
B_2O_3	3.98	3.99	3.63	3.08	4.09	3.31	3.03	2.61	3.65	4.97	3.46	2.63	3.47
Al_2O_3	16.58	16.37	16.76	17.89	17.89	17.65	17.75	17.01	16.57	18.70	17.21	17.22	17.17
FeO^T	5.94	5.83	5.99	5.74	5.78	5.90	5.23	5.81	5.80	5.58	6.15	5.58	5.90
MgO	0.83	0.84	1.00	1.08	1.12	1.05	0.90	0.86	0.99	1.05	0.89	0.87	0.95
MnO	4.84	4.59	4.50	4.62	4.43	4.46	4.70	4.65	4.82	5.11	5.09	5.15	5.23
CaO	19.99	19.97	19.54	20.02	20.16	19.99	20.02	19.81	19.53	20.20	20.14	19.92	20.55
Total	89.95	89.63	89.48	88.98	92.52	91.42	88.94	88.81	90.60	93.44	91.18	89.81	92.53
O = 15.5 条件下计算的原子数													
Si	3.99	4.02	4.03	3.92	3.98	4.05	3.99	4.09	4.09	3.81	4.00	4.09	4.04
B	0.72	0.73	0.66	0.57	0.72	0.59	0.56	0.48	0.66	0.87	0.62	0.48	0.62
Al	2.06	2.04	2.09	2.26	2.15	2.16	2.24	2.15	2.04	2.22	2.12	2.16	2.08
Fe	0.52	0.52	0.53	0.51	0.49	0.51	0.47	0.52	0.51	0.47	0.54	0.50	0.51
Mg	0.13	0.13	0.16	0.17	0.17	0.16	0.14	0.14	0.15	0.16	0.14	0.14	0.15
Mn	0.43	0.41	0.40	0.42	0.38	0.39	0.43	0.42	0.43	0.44	0.45	0.46	0.46
Ca	2.26	2.26	2.22	2.30	2.20	2.22	2.29	2.28	2.18	2.18	2.26	2.27	2.27

续表 1

Continued Table 1

样品号	PD-6-1				PD-6-2									
测点号	-16	-17	-18	-19	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-9	-10
SiO_2	37.61	35.96	37.68	37.88	38.86	37.46	38.78	39.49	38.53	39.58	39.23	39.71	40.18	39.84
B_2O_3	4.71	3.31	3.28	3.29	4.30	3.51	3.11	5.25	4.54	4.61	4.31	4.40	4.58	5.36
Al_2O_3	17.15	18.74	18.85	18.65	16.61	16.20	17.91	16.90	17.51	17.01	17.17	17.60	16.68	16.81
FeO^T	5.67	4.78	4.64	4.82	6.51	6.23	5.95	6.45	5.90	6.60	6.50	5.51	5.73	6.43
MgO	0.94	1.13	1.21	1.14	0.96	1.09	1.16	1.01	1.21	0.91	1.31	1.37	1.19	0.86
MnO	5.18	4.97	4.90	5.13	4.35	4.40	4.33	4.34	4.26	4.36	4.06	4.46	4.07	4.41
CaO	20.15	20.00	19.94	19.89	20.03	19.96	19.91	20.18	19.91	19.94	20.23	20.28	20.15	20.31
Total	91.41	88.89	90.49	90.80	91.62	88.85	91.14	93.62	91.86	93.01	92.81	93.32	92.58	94.02
O = 15.5 条件下计算的原子数														
Si	3.89	3.85	3.94	3.95	4.01	4.02	4.04	3.96	3.94	4.01	3.99	4.00	4.06	3.97
B	0.84	0.61	0.59	0.59	0.77	0.65	0.56	0.91	0.80	0.81	0.76	0.76	0.80	0.92
Al	2.09	2.36	2.32	2.29	2.02	2.05	2.20	2.00	2.11	2.03	2.06	2.09	1.99	1.98
Fe	0.49	0.43	0.41	0.42	0.56	0.56	0.52	0.54	0.51	0.56	0.55	0.46	0.48	0.54
Mg	0.14	0.18	0.19	0.18	0.15	0.17	0.18	0.15	0.18	0.14	0.20	0.20	0.18	0.13
Mn	0.45	0.45	0.43	0.45	0.38	0.40	0.38	0.37	0.37	0.37	0.35	0.38	0.35	0.37
Ca	2.23	2.29	2.23	2.22	2.21	2.29	2.22	2.17	2.18	2.16	2.20	2.19	2.18	2.17

4 讨论

4.1 斧石的分类

根据电子探针分析结果(表 1),不难发现,芙蓉矿区斧石 Ca > 1.5 且 Fe > Mn;在 Mg-Mn-Fe 三角图解中(图 6),53 个样品点中仅 3 个点落入锰斧石范围,其余样品点均分布于铁斧石区域,因此该区斧石应主要为铁斧石,这与前面的 X 射线衍射分析结果相吻合。前人的研究表明,新疆、云南、广西等地产出的斧石亦均为铁斧石(钱一雄,1990;黄仕华,2001;Sun *et al.*,2020);但与新疆亚曼苏铁矿床中的斧石相比(Sun *et al.*,2020),本次新发现斧石铁含量明显偏低(图 6)。

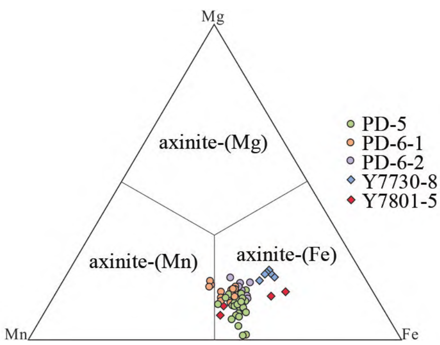

图 6　芙蓉锡矿床斧石 Mg-Fe-Mn 三角图解

样品 Y7730-8 和 Y7801-5 亚曼苏铁矿床斧石数据来自 Sun *et al.*, 2020

Fig. 6　Composition of axinite from Furong tin deposit in the Mg-Fe-Mn diagram

Data of Sample Y7730-8 and Sample Y7801-5 from the Yamansu deposit from Sun *et al.*, 2020

芙蓉矿区新发现的斧石明显富 Fe,可能与骑田岭岩体相对富 Fe 有关。前人研究表明,骑田岭岩体 FeO^T 含量较高(1.40% ~7.04%,平均为 4.02%,邓希光等,2005),明显高于邻近的千里山岩体(0.48% ~2.68%);骑田岭岩体中角闪石黑云母花岗岩中的黑云母为铁黑云母,黑云母花岗岩中的黑云母为铁叶云母(李鸿莉等,2007),该区花岗岩中这些富铁的黑云母也证实该岩体的确富 Fe。值得一提地是,我们在芙蓉矿区 19 号矿体中发现了较多的电气石,这些电气石颜色深,大多为黑色和黑褐色,在镜下显示出蓝色、深蓝色,且多色性很强(深蓝色-蓝色-蓝绿色-无色),这些特征均指示该区的这些电气石铁含量很高,应为铁电气石。总之,芙蓉矿区这些富 Fe 的斧石和电气石,均与骑田岭岩体相对富 Fe 特征相吻合,表明骑田岭岩体应为芙蓉锡矿的成矿母岩。

4.2 挥发份 B 对花岗质岩浆演化的影响

芙蓉矿区广泛存在的电气石(Yang *et al.*,2015;Chen *et al.*,2023)、本次新发现的斧石以及最近该区发现的数种含硼矿物(李小赛等,2021)均表明,芙蓉锡矿床中富 B 矿物分布广泛。根据前人对成矿流体的研究(李鸿莉等,2007;毕献武等,2008;双燕等,2009;袁顺达,2017),结合矿区电气石和磷灰石的微量元素特征(Yang *et al.*,2015;Chen *et al.*,2023),不难发现该区成矿流体来自岩浆热液;该矿区电气石和骑田岭花岗岩中电气石均富 B、且具有相近的 B 同位素比值,同时花岗岩和矿区的电气石 B 含量远高于围岩地层中的 B 含量(Xu *et al.*,2021;Chen *et al.*,2023),均说明挥发份 B 亦来自花岗质岩浆。

已有的研究发现,挥发份 B 在熔体中的溶解度通常较低(Pollard *et al.*,1987),但在部分含电气石的花岗岩中 B_2O_3 含量可高达 1%(Pichavant and Manning,1984);实验研究发

现,碱金属含量高的岩浆热液,其 B_2O_3 含量更高(Smirnov *et al.*,2005)。大量理论和实验研究表明,挥发份物质 B 在花岗岩的成岩过程中主要有以下两方面的作用:(1)能有效地降低岩浆的粘度。前人实验表明,在花岗质岩浆中加入 1% B_2O_3,岩浆粘度至少可降低 1 个数量级(Dingwell *et al.*,1992);且岩浆的温度越高,粘度降低的幅度越大。(2)岩浆中挥发份 B 的加入,能增大岩浆结晶分异的温度范围,从而促使岩浆分异更加强烈彻底(Lehmann, 1990; Gomes and Neiva,2002;陈骏等,2014;崔晓琳等,2022)。此外,B 的存在亦可增加岩浆体系中水的溶解度,使得该岩浆体系中的含水流体相富硅和碱金属(主要为钠)而贫铝(Pollard *et al.*,1987),从而会直接影响岩浆体系的演化过程。

尽管骑田岭岩体中 SiO_2 含量(64.83% ~76.59%,平均 69.7%,邓希光等,2005;李鸿莉等,2007)明显低于华南改造型花岗岩(平均 72.82%,刘昌实和朱金初,1989),但由于岩浆中 B 等挥发份含量较高,故该岩体的分异指数 D.I. 较高,其晚期花岗岩 D.I. 值可高达 93 ~94(李鸿莉等,2007)。前人的研究表明,骑田岭花岗质岩浆来自黑云母脱水为主的地壳物质重融,其温度可超过 800℃(Yuan *et al.*,2019;Zhao *et al.*,2022b;Chen *et al.*,2023),如此高温的岩浆体系,挥发份 B 能大幅降低其岩浆粘度,且延长岩浆结晶分异的时间;骑田岭岩体是一复式岩体,其侵位时间前后相差 17Myr(朱金初等,2009),也很可能与此有关。

4.3 挥发份 B 与锡成矿的关系

Sn 是亲石元素,具有中等不相容性,主要富集于地壳中(Lehmann,1990;陈骏等,2000;Yuan *et al.*,2019)。因此,壳源物质(尤其是变沉积岩)的部分熔融对形成有经济价值的锡矿至关重要(Lehmann,1990)。已有的研究显示,我国南岭地区是世界上最大的 W、Sn 成矿省,其成矿物质主要来自新元古代-早古生代变质沉积岩(魏震洋等,2009;陈骏等,2014),且南岭地区侏罗纪形成的金属物质 Sn 在以黑云母脱水为主的地壳物质高温(800 ± 20℃)部分熔融过程中富集(Wolf *et al.*,2018;Huang *et al.*,2019;Yuan *et al.*,2019;Chen *et al.*,2023)。成矿元素 Sn 是亲石元素,具有较强的亲熔体性和亲流体性(Zajacz *et al.*,2008;袁顺达和赵盼捞,2021),在地壳部分熔融过程中,Sn 会优先从变沉积岩进入岩浆中形成原始的富 Sn 熔体,而在随后的熔体演化分异过程中,Sn 又会倾向于富集在共存的岩浆期后热液流体相中,最后富集成矿(Yuan *et al.*, 2019; Deng *et al.*, 2022; Zhao *et al.*, 2022a)。

大量研究显示,花岗岩能否形成具有经济价值的锡矿,与部分熔融的温度条件、岩浆中初始 Sn 含量、以及岩浆演化过程中 Sn 的迁移形式等因素密切相关(Yuan *et al.*,2019;Zhao *et al.*,2022c);而岩浆中 Li、F、B 等挥发份的含量能有效地制约这些影响因素(隋清霖等,2020),因此挥发份在锡成矿过程中的作用不容忽视。但由于岩浆-热液体系中 B 的含量通常远低于 Li、F 等挥发份,因而其对成矿作用的影响往往被忽视(Thomas *et al.*,2003;Smirnov *et al.*,2005)。

在骑田岭岩体和芙蓉锡矿床形成的整个过程中,挥发份 B 可能起着至关重要的作用,具体表现在以下几方面:(1)在源岩发生部分熔融形成含 Sn 岩浆的过程中,岩浆中高含量 B 能有效降低黑云母等含锡矿物的固相线温度,从而提高源岩中 Sn 的萃取率。(2)正如前所言,B 的存在亦可提高岩浆中水的溶解度(Pollard *et al.*,1987),岩浆体系中 H_2O 含量的增加无疑会提高整个硅酸盐熔体中 Sn 的含量,进而提高熔体出溶时所释放的成矿流体规模和成矿金属量,这对芙蓉超大型锡矿床的形成至关重要。(3)在 B 等挥发份含量较高的岩浆演化过程中,岩浆分异程度越高,残留熔体相中 Sn 越富集,其在岩浆中的含量可达到地壳丰度的 10 倍以上(陈骏等,2000;崔晓琳等,2022)。(4)在酸性岩浆体系中,B 与 Sn 均是不相容元素,在岩浆发生出溶时均倾向富集于流体相中(Hervig *et al.*,2002;袁顺达和赵盼捞,2021),且流体中 B 的存在有利于 Sn 的进一步富集(陈骏等,2000;Hervig *et al.*,2002;Thomas *et al.*,2003;Zhao *et al.*,2022b)。最新实验结果表明,在未加入 Li、F、B 等挥发份岩浆的人工合成包裹体中,Sn 在流体-熔体中的分配系数($D^{fluid/melt}$)为 5.4 左右(袁顺达和赵盼捞,2021;Zhao *et al.*,2022a),而在富 Li、F、B 等挥发份体系中流体-熔体的分配系数明显增高,最高可达 42(Zajacz *et al.*,2008)。(5)在热液运移过程中,挥发份 B 还可能与 Sn 形成某些络合物(如 $Sn(BF_4)_2$)(Thomas *et al.*,2003),这为成矿流体中 Sn 长距离搬运和富集提供了重要保障。总之,在芙蓉矿床锡成矿过程中,不论是对花岗质岩浆中 Sn 的富集,还是岩浆-热液体系中 Sn 的富集及搬运,挥发份 B 均扮演着至关重要的作用。

4.4 对矿床寻找 B 矿的指示意义

B 与 Sn 的地球化学行为相似,两者均具有亲石性,并具有显著的亲流体性,在岩浆-热液作用过程中,两者均通过部分熔融作用,从源岩进入岩浆,在随后的岩浆分异过程中又从岩浆转移到热液流体中,最后发生沉淀富集,因此,锡矿床形成过程中很可能有伴生硼矿的形成。

李小赛等(2021)在芙蓉矿区亦发现了数种含硼矿物,其中工业价值较高的硼镁铁矿,其 B_2O_3 品位达到了 9.5%,远超我国硼矿的最低工业品位(5%)。本次研究在矽卡岩中首次发现了 B 含量较高的斧石,且其与电气石等富 B 矿物共生,因而在芙蓉矿区寻找硼矿的潜力较大。

值得注意的是,在南岭乃至华南地区,存在较多与高分异花岗岩有关的 Sn 矿床,如柿竹园钨锡多金属矿床、红旗岭钨锡多金属矿床、香花岭钨锡多金属矿床等,鉴于 B 与 Sn 往往同时富集于晚期的岩浆热液体系中,因此,有必要加强该区域锡矿带或锡矿床中的硼矿找矿工作。

5 结论

（1）首次在芙蓉锡矿区矽卡岩中发现了斧石。成分上，其主要为铁斧石，具有富 Ca、贫 B 特征。

（2）挥发份 B 在骑田岭岩体成岩、成矿过程中起着至关重要的作用。B 有利于提高源区 Sn 的萃取效率，提高原始岩浆中 Sn 含量；能降低岩浆的粘度、促进岩浆的结晶分异演化，促使 Sn 向晚期残余熔体中不断富集。

（3）挥发份 B 有利于 Sn 在成矿流体中的富集及运移，B 能形成 Sn 的络合物，促进含锡流体的长距离迁移。

（4）在岩浆-热液体系中 B 与 Sn 地球化学行为类似，芙蓉锡矿区及华南类似的锡矿床中具有寻找伴生硼矿的潜力。

致谢 中南大学刘建平副教授在电子探针分析中给予了热情的帮助，两位匿名评审专家提出了宝贵的修改意见，在此一并致以诚挚的谢意！

References

Andreozzi GB, Ottolini L, Lucchesi S, Graziani G and Russo U. 2000. Crystal chemistry of the axinite-group minerals: A multi-analytical approach. American Mineralogist, 85(5-6): 698-706

Andreozzi GB, Lucchesi S, Graziani G and Russo U. 2004. Site distribution of Fe^{2+} and Fe^{3+} in the axinite mineral group: New crystal-chemical formula. American Mineralogist, 89(11-12): 1763-1771

Bai DY, Chen JC, Ma TQ and Wang XH. 2005. Geochemical characteristics and tectonic setting of Qitianling A-type granitic pluton in Southeast Hunan. Acta Petrologica et Mineralogica, 24(4): 255-272 (in Chinese with English abstract)

Bi XW, Li HL, Shuang 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 of ore forming fluid of the Furong superlarge tin deposit. Geological Journal of China Universities, 14(4): 539-548 (in Chinese with English abstract)

Cai JH, Wei CS, Sun MH, Wei SL and Huang GF. 2004. Ore-forming characteristics and prospecting significance of the Bailashui tin deposit in the Furong orefield. Geology and Prospecting, 40(5): 27-32 (in Chinese with English abstract)

Chen J, Wang RC, Zhou JP and Ji JF. 2000. Geochemistry of Tin. Nanjing: Nanjing University Press, 116-154 (in Chinese)

Chen J, Wang RC, Zhu JC, Lu JJ and Ma DS. 2014. Multiple-aged granitoids and related tungsten-tin mineralization in the Nanling Range, South China. Science China (Earth Sciences), 56(12): 2045-2055

Chen SC, Yu JJ and Bi MF. 2021. Extraction of fractionated interstitial melt from a crystal mush system generating the Late Jurassic high-silica granites from the Qitianling composite pluton, South China: Implications for greisen-type tin mineralization. Lithos, 382-383: 105952

Chen SC, Yu JJ, Bi MF, Li HM and Lehmann B. 2022a. Cassiterite U-Pb, mica ^{40}Ar-^{39}Ar dating and cassiterite trace-element composition of the Furong tin deposit in the Nanling Range, South China. Ore Geology Reviews, 143: 104775

Chen SC, Yu JJ, Bi MF and Lehmann B. 2022b. Tin-bearing minerals at the Furong tin deposit, South China: Implications for tin mineralization. Geochemistry, 82(1): 125856

Chen SC, Yu JJ, Bi MF and Lehmann B. 2023. Fluid-rock interaction and fluid mixing in the large Furong tin deposit, South China: New insights from tourmaline and apatite chemistry and in situ B-Nd-Sr isotope composition. American Mineralogist, 108(2): 338-353

Chen ZH, Wang DH, Sheng JF, Ying LJ, Liang T, Wang CH, Liu LJ and Wang YL. 2015. The metallogenic regularity of tin deposits in China. Acta Geologica Sinica, 89(6): 1026-1037 (in Chinese with English abstract)

Cui XL, Zhang QW, Wu HY, Song ZJ, Zhang HJ and Dai LG. 2022. Formation of the Late Cretaceous-Paleogene Sn-rich granites in the Tengchong block: The magma origin and differentiation conditions. Acta Petrologica Sinica, 38(1): 253-266 (in Chinese with English abstract)

Deng GX, Jiang DS, Zhang RQ, Huang J, Zhang XC and Huang F. 2022. Barium isotopes reveal the role of deep magmatic fluids in magmatic-hydrothermal evolution and tin enrichment in granites. Earth and Planetary Science Letters, 594: 117724

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)

Dingwell DB, Knoche R, Webb SL and Pichavant M. 1992. The effect of B_2O_3 on the viscosity of haplogranitic liquids. American Mineralogist, 77(5-6): 457-461

Filip J, Kolitsch U, Novák M and Schneeweiss O. 2006. The crystal structure of near-end-member ferroaxinite from an iron-contaminated pegmatite at Malesov, Czech Republic. The Canadian Mineralogist, 44(5): 1159-1170

Filip J, Dachs E, Tucek J, Novák M and Bezdicka P. 2008. Low-temperature calorimetric and magnetic data for natural end-members of the axinite group. American Mineralogist, 93(4): 548-557

Frost RL, Bouzaid JM, Martens WN and Reddy BJ. 2007. Raman spectroscopy of the borosilicate mineral ferroaxinite. Journal of Raman Spectroscopy, 38(2): 135-141

Gomes MEP and Neiva AMR. 2002. Petrogenesis of tin-bearing granites from Ervedosa, northern Portugal: The importance of magmatic processes. Geochemistry, 62(1): 47-72

Grew ES. 1996. Borosilicates (exclusive of tourmaline) and boron in rock-forming minerals in metamorphic environments. In: Grew ES and Anovitz LM (eds.). Boron: Mineralogy, Petrology and Geochemistry. America Reviews in Mineralogy, 33: 387-502

Hervig RL, Moore GM, Williams LB, Peacock SM, Holloway JR and Roggensack K. 2002. Isotopic and elemental partitioning of boron between hydrous fluid and silicate melt. American Mineralogist, 87(5-6): 769-774

Huang FF, Scaillet B, Wang RC, Erdmann S, Chen Y, Faure M, Liu HS, Xie L, Wang B and Zhu JC. 2019. Experimental constraints on intensive crystallization parameters and fractionation in A-type granites: A case study on the Qitianling pluton, South China. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 124(10): 10132-10152

Huang GF, Zeng QW, Wei SL, Xu YM, Hou MS and Kang WQ. 2001. Geological characteristics and ore-controlling factors of the Furong orefield, Qitianling, Hunan. Geology in China, 28(10): 30-34 (in Chinese with English abstract)

Huang SH. 2001. Axinite deposit in the Yidun area, western Sichuan. Regional Geology of China, 20(2): 216-220 (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)

Jiang SY, Zhao KD, Jiang H, Su HM, Xiong SF, Xiong YQ, Xu YM, Zhang W and Zhu LY. 2020. Spatiotemporal distribution, geological characteristics and metallogenic mechanism of tungsten and tin deposits in China: An overview. Chinese Science Bulletin, 65(33):

3730 – 3745 (in Chinese with English abstract)

Kamilli RJ, Kimball BE and Carlin JF Jr. 2017. Tin. In: Schulz KJ, DeYoung JH Jr, Seal RR II and Bradley DC (eds.). Critical Mineral Resources of the United States: Economic and Environmental Geology and Prospects for Future Supply. U. S. Geological Survey Professional Paper 1802, S1 – S53

Lehmann B. 1990. Metallogeny of Tin. Berlin: Springer, 1 – 211

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 HQ, Lu YF, Wang DH, Chen YC, Yang HM, Guo J, Xie CF, Mei YP and Ma LY. 2006. Dating of the rock-forming and ore-forming ages and their geological significances in the Furong ore-field, Qitian Mountain, Hunan. Geological Review, 52(1): 113 – 121 (in Chinese with English abstract)

Li XS, Li HM, Li LX and Shen HF. 2021. New discovery and significance of boron mineralization in Furong tin ore deposit, southern Hunan area. Mineral Deposits, 40(6): 1351 – 1356 (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 (Journal of China University of Geosciences), 31(1): 129 – 135 (in Chinese with English abstract)

Li ZL, Hu RZ, Yang JS, Peng JT, Li XM and Bi XW. 2007. He, Pb and S isotopic constraints on the relationship between the A-type Qitianling granite and the Furong tin deposit, Hunan Province, China. Lithos, 197(1 – 2): 161 – 173

Liu CS and Zhu JC. 1989. Petrochemical features of four genetic types of granitoids in southeast China. Acta Petrologica Sinica, 5(2): 38 – 48 (in Chinese with English abstract)

Liu YM, Xu JF, Dai TM, Li XH, Deng XG and Wang Q. 2003. $^{40}Ar/^{39}Ar$ isotopic ages of Qitianling granite and their geologic implications. Science in China (Series D), 46(Suppl. 1): 50 – 59

Lumpkin GR and Ribbe PH. 1979. Chemistry and physical properties of axinites. American Mineralogist, 64(5 – 6): 635 – 645

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, Ouyang HG, Song SW, Santosh M, Yuan SD, Zhou ZH, Zheng W, Liu H, Liu P, Cheng YB and Chen MH. 2019. Geology and metallogeny of tungsten and tin deposits in China. Economic Geology (Special Publications), 22: 411 – 482

Mao JW, Liu P, Goldfarb RJ, Goryachev NA, Pirajno F, Zheng W, Zhou MF, Zhao C, Xie GQ, Yuan SD and Liu M. 2021. Cretaceous large-scale metal accumulation triggered by post-subductional large-scale extension, East Asia. Ore Geology Reviews, 136: 104270

Matsubara S, Miyawaki R and Shigeika M. 2011. Axinite-(Mg) from Kashio, Nagano Prefecture, Japan. Bulletin of the National Museum of Nature & Science (Series C): Geology & Paleontology, 37: 1 – 4

Peng JT, Hu RZ, Bi XW, Dai TM, Li ZL, Li XM, Shuang Y, Yuan SD and Liu SR. 2007. $^{40}Ar/^{39}Ar$ 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)

Pichavant M and Manning D. 1984. Petrogenesis of tourmaline granites and topaz granites: The contribution of experimental data. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 35(1 – 3): 31 – 50

Pollard PJ, Pichavant M and Charoy B. 1987. Contrasting evolution of fluorine- and boron-rich tin systems. Mineralium Deposita, 22(4): 315 – 321

Pringle IJ and Kawachi Y. 1980. Axinite mineral group in low-grade regionally metamorphosed rocks in southern New Zealand. American Mineralogist, 65(11 – 12): 1119 – 1129

Qian YX. 1990. A study on micromorphology, chemical composition and formation condition of axinite in Gejiu. Mineralogy and Petrology, 10(3): 1 – 5 (in Chinese with English abstract)

Rudnick RL and Gao S. 2003. Composition of the continental crust. In: Rudnick RL (ed.). Treatise on Geochemistry. Oxford: Pergamon, 3: 1 – 64

Sanero E and Gottardi G. 1968. Nomenclature and crystal-chemistry of axinites. American Mineralogist, 53(7 – 8): 1407 – 1411

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 (in Chinese with English abstract)

Shan Q, Zeng QS, Li JK, Lu HZ, Hou MS, Yu XY and Wu CJ. 2014. Diagenetic and metallogenic sources of Furong tin deposit, Qitianling: Constraints from Lu-Hf for zircon and He-Ar isotope for fluid inclusions. Acta Geologica Sinica, 88(4): 704 – 715 (in Chinese with English abstract)

Shuang Y, Bi XW, Hu RZ, Peng JT, Su WC and Zhu CS. 2009. Study on the ore-forming fluid geochemistry of the Furong tin polymetallic deposit, Hunan Province, China. Acta Petrologica Sinica, 25(10): 2588 – 2600 (in Chinese with English abstract)

Smirnov SZ, Thomas VG, Demin SP and Drebushchak VA. 2005. Experimental study of boron solubility and speciation in the Na_2O-B_2O_3-SiO_2-H_2O system. Chemical Geology, 223(1 – 3): 16 – 34

Sui QL, Zhu HL, Sun SJ, Chen DH, Zhao XJ and Wang ZF. 2020. The geochemical behavior of tin and Late Cretaceous tin mineralization in South China. Acta Petrologica Sinica, 36(1): 23 – 34 (in Chinese with English abstract)

Sun ZY, Wang JB, Wang YW and Long LL. 2020. Geochemical characteristics of mineral assemblages from the Yamansu iron deposit, NW China, and their metallogenic implications. Minerals, 10(1): 39

Thomas R, Webster JD and Heinrich W. 2000. Melt inclusions in pegmatite quartz: Complete miscibility between silicate melts and hydrous fluids at low pressure. Contributions to Mineralogy and Petrology, 139(4): 394 – 401

Thomas R, Förster HJ and Heinrich W. 2003. The behaviour of boron in a peraluminous granite-pegmatite system and associated hydrothermal solutions: A melt and fluid-inclusion study. Contributions to Mineralogy and Petrology, 144(4): 457 – 472

Wang DH, Chen YC, 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. Geological Bulletin of China, 22(1): 50 – 56 (in Chinese with English abstract)

Wang LK, Zhu WF and Zhang SL. 1982. On the evolution of two petrogenetic and mineralized series of granites in South China. Geochimica, 11(4): 329 – 339 (in Chinese with English abstract)

Wang LK, Wang HF and Huang ZL. 2000. Geochemical indicators of trace element in Li-F granite liquid segregation. Acta Petrologica Sinica, 16(2): 145 – 152 (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 studies. Geological Journal of China University, 14(4): 485 – 495 (in Chinese with English abstract)

Wang ZQ, Chen B and Ma XH. 2014. In situ LA-ICP-MS U-Pb age and geochemical data of cassiterite of the Furong tin deposit, the Nanling Range: Implications for the origin and evolution of the ore-forming fluid. Chinese Science Bulletin, 59(25): 2505 – 2519 (in Chinese)

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)

Wei ZY, Yu JH, Wang LJ and Shu LS. 2009. Geochemical features and tectonic significances of Neoproterozoic metasedimentary rocks from Nanling Range. Geochimica, 38(1): 1 – 19 (in Chinese with English abstract)

Wolf M, Romer RL, Franz L and López-Moro FJ. 2018. Tin in granitic melts: The role of melting temperature and protolith composition. Lithos, 310 - 311: 20 - 30

Xie L, Wang RC, Chen J and Zhu JC. 2010. Mineralogical evidence for magmatic and hydrothermal processes in the Qitianling oxidized tin-bearing granite (Hunan, South China): EMP and (MC)-LA-ICPMS investigations of three types of titanite. Chemical Geology, 276(1 - 2): 53 - 68

Xing LZ, Peng JT, Lv YJ, Tang YW and Gao JF. 2022. Vesuvianite: A potential U-Pb geochronometer for skarn mineralization: A case study of tungsten and tin deposits in South China. Chemical Geology, 607: 121017

Xu R, Romer RL and Glodny J. 2021. External fluids cause alteration and metal redistribution in the granite-hosted Tangziwa Sn-Cu deposit, Gejiu district, China. Lithos, 382 - 383: 105937

Xu YM, Hou MS, Liao XY and Ao ZW. 2000. Deposit types and prospect for prospecting of Sn deposits in Furong ore field, Chenzhou. Hunan Geology, 19(2): 95 - 100 (in Chinese with English abstract)

Yang SY, Jiang SY, Zhao KD, Dai BZ and Yang T. 2015. Tourmaline as a recorder of magmatic-hydrothermal evolution: An in situ major and trace element analysis of tourmaline from the Qitianling batholith, South China. Contributions to Mineralogy and Petrology, 170(5): 42

Yuan SD, Peng JT, Hu RZ, Li HM, Shen NP and Zhang DL. 2008. A precise U-Pb age on cassiterite from the Xianghualing tin-polymetallic deposit (Hunan, South China). Mineralium Deposita, 43(4): 375 - 382

Yuan SD, Li HM, Hao S, Geng JZ and Zhang DL. 2010. In situ LA-MC-ICP-MS U-Pb dating of cassiterite in the giant Furong tin deposit in southern Hunan and their significance. Mineral Deposits, 29 (Suppl. 1): 543 - 544 (in Chinese)

Yuan SD, Peng JT, Hao S, Li HM, Geng JZ and Zhang DL. 2011. In situ LA-MC-ICP-MS and ID-TIMS U-Pb geochronology of cassiterite in the giant Furong tin deposit, Hunan Province, South China: New constraints on the timing of tin-polymetallic mineralization. Ore Geology Reviews, 43(1): 235 - 242

Yuan SD. 2017. Several crucial scientific issues related to the W-Sn metallogenesis in the Nanling Range and their implications for regional exploration: A review. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 36(5): 736 - 749 (in Chinese with English abstract)

Yuan SD, Williams-Jones AE, Romer RL, Zhao PL and Mao JW. 2019. Protolith-related thermal controls on the decoupling of Sn and W in Sn-W metallogenic Provinces: Insights from the Nanling Region, China. Economic Geology, 114(5): 1005 - 1012

Yuan SD, Zhao PL and Liu M. 2020. Some problems involving in petrogenesis and metallogenesis of granite-related tin deposits. Mineral Deposits, 39(4): 607 - 618 (in Chinese with English abstract)

Yuan SD and Zhao PL. 2021. New synthetic fluid inclusion method to investigate partition behavior of ore metals between melt and fluid phases. Scientia Sinica (Terrae), 51(2): 241 - 249 (in Chinese)

Zajacz Z, Halter WE, Pettke T and Guillong M. 2008. Determination of fluid/melt partition coefficients by LA-ICPMS analysis of co-existing fluid and silicate melt inclusions: Controls on element partitioning. Geochimica et Cosmochimica Acta, 72(8): 2169 - 2197

Zhang DH, Zhang WH and Xu JG. 2004. The ore fluid geochemistry of F-rich silicate melt-hydrous fluid system and its metallogeny: The current status and problems. Earth Science Frontiers, 11(2): 479 - 490 (in Chinese with English abstract)

Zhang Y, Song SL, Hollings P, Li DF, Shao YJ, Chen HY, Zhao LJ, Kamo S, Jin TT, Yuan LL, Liu QQ and Chen SC. 2022. In-situ U-Pb geochronology of vesuvianite in skarn deposits. Chemical Geology, 612: 121136

Zhao KD, Jiang SY, Jiang YH and Wang RC. 2005. Mineral chemistry of the Qitianling granitoid and the Furong tin ore deposit in Hunan Province, South China: Implication for the genesis of granite and related tin mineralization. European Journal of Mineralogy, 17(4): 635 - 648

Zhao KD, Jiang SY, Jiang YH and Liu DY. 2006. SHRIMP U-Pb dating of the Furong unit of Qitianling granite from Southeast Hunan Province and their geological implications. Acta Petrologica Sinica, 22(10): 2611 - 2616 (in Chinese with English abstract)

Zhao PL, Yuan SD, Mao JW, Yuan YB, Zhao HJ, Zhang DL and Shuang Y. 2018. Constraints on the timing and genetic link of the large-scale accumulation of proximal W-Sn-Mo-Bi and distal Pb-Zn-Ag mineralization of the world-class Dongpo orefield, Nanling Range, South China. Ore Geology Reviews, 95: 1140 - 1160

Zhao PL, Zajacz Z, Tsay A and Yuan SD. 2022a. Magmatic-hydrothermal tin deposits form in response to efficient tin extraction upon magma degassing. Geochimica et Cosmochimica Acta, 316: 331 - 346

Zhao PL, Chu X, Williams-Jones AE, Mao JW and Yuan SD. 2022b. The role of phyllosilicate partial melting in segregating tungsten and tin deposits in W-Sn metallogenic provinces. Geology, 50(1): 121 - 125

Zhao PL, Yuan SD, Williams-Jones AE, Romer RL, Yan C, Song SW and Mao JW. 2022c. Temporal separation of W and Sn mineralization by temperature-controlled incongruent melting of a single protolith: Evidence from the Wangxianling area, Nanling Region, South China. Economic Geology, 117(3): 667 - 682

Zhu JC, Rao B, Xiong XL, Li FC and Zhang PH. 2002. Comparison and genetic interpretation of Li-F rich, rare-metal bearing granitic rocks. Geochimica, 31(2): 141 - 152 (in Chinese with English abstract)

Zhu JC, Huang GF, Zhang PH, Li FC and Rao 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, 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), 52(9): 1279 - 1294

附中文参考文献

柏道远，陈建超，马铁球，王先辉. 2005. 湘东南骑田岭岩体 A 型花岗岩的地球化学特征及其构造环境. 岩石矿物学杂志，24(4)：255 - 272

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

蔡锦辉，韦昌山，孙明慧，魏绍六，黄革非. 2004. 芙蓉矿田白腊水锡矿矿化特征及找矿意义. 地质与勘探，40(5)：27 - 32

陈骏，王汝成，周建平，季俊峰. 2000. 锡的地球化学. 南京：南京大学出版社，116 - 154

陈骏，王汝成，朱金初，陆建军，马东升. 2014. 南岭多时代花岗岩的钨锡成矿作用. 中国科学(地球科学)，44(1)：111 - 121

陈郑辉，王登红，盛继福，应立娟，梁婷，王成辉，刘丽君，王永磊. 2015. 中国锡矿成矿规律概要. 地质学报，89(6)：1026 - 1037

崔晓琳，张琦玮，吴华英，宋志杰，张慧娟，戴荔果. 2022. 腾冲地块晚白垩世-古近纪富锡花岗岩成因：岩浆源区及分异演化条件. 岩石学报，38(1)：253 - 266

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

黄革非，曾钦旺，魏绍六，许以明，侯茂松，康卫清. 2001. 湖南骑田岭芙蓉矿田锡矿地质特征及控矿因素初步分析. 中国地质，

28(10): 30 – 34
黄仕华. 2001. 川西义敦地区的斧石矿及其矿床地质特征. 中国区域地质, 20(2): 216 – 220
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
蒋少涌, 赵葵东, 姜海, 苏慧敏, 熊索菲, 熊伊曲, 徐耀明, 章伟, 朱律运. 2020. 中国钨锡矿床时空分布规律、地质特征与成矿机制研究进展. 科学通报, 65(33): 3730 – 3745
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
李华芹, 路远发, 王登红, 陈毓川, 杨红梅, 郭敬, 谢才富, 梅玉萍, 马丽艳. 2006. 湖南骑田岭芙蓉矿田成岩成矿时代的厘定及其地质意义. 地质论评, 52(1): 113 – 121
李小赛, 李厚民, 李立兴, 沈宏飞. 2021. 湘南地区芙蓉锡矿床中硼矿化的发现及意义. 矿床地质, 40(6): 1351 – 1356
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(中国地质大学学报), 31(1): 129 – 135
刘昌实, 朱金初. 1989. 华南四种成因类型花岗岩类岩石化学特征对比. 岩石学报, 5(2): 38 – 48
刘义茂, 许继峰, 戴橦模, 李献华, 邓希光, 王强. 2002. 骑田岭花岗岩^{40}Ar/^{39}Ar 同位素年龄及其地质意义. 中国科学(D辑), 32(增1): 41 – 48
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^{40}Ar-^{39}Ar 年龄及其地球动力学意义. 矿床地质, 23(2): 164 – 175
彭建堂, 胡瑞忠, 毕献武, 戴橦谟, 李兆丽, 李晓敏, 双燕, 袁顺达, 刘世荣. 2007. 湖南芙蓉锡矿床^{40}Ar/^{39}Ar 同位素年龄及地质意义. 矿床地质, 26(3): 237 – 248
钱一雄. 1990. 斧石晶体的微形貌特征、化学成分及形成条件. 矿物岩石, 10(3): 1 – 5
单强, 廖思平, 卢焕章, 李建康, 杨武斌, 罗勇. 2011. 岩浆到热液演化的包裹体记录: 以骑田岭花岗岩体为例. 岩石学报, 27(5): 1511 – 1520
单强, 曾乔松, 李建康, 卢焕章, 侯茂洲, 于学元, 吴传军. 2014. 骑田岭芙蓉锡矿的成岩和成矿物质来源: 锆石 Lu-Hf 同位素和矿物包裹体 He-Ar 同位素证据. 地质学报, 88(4): 704 – 715
双燕, 毕献武, 胡瑞忠, 彭建堂, 苏文超, 朱长生. 2009. 湖南芙蓉锡多金属矿床成矿流体地球化学. 岩石学报, 25(10): 2588 – 2600
隋清霖, 祝红丽, 孙赛军, 陈登辉, 赵晓健, 王钊飞. 2020. 锡的地球化学性质与华南晚白垩世锡矿成因. 岩石学报, 36(1): 23 – 34
王登红, 陈毓川, 李华芹, 陈正宏, 余金杰, 路远发, 李寄嵎. 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
王联魁, 朱为方, 张绍立. 1982. 华南花岗岩两个成岩成矿系列的演化. 地球化学, 11(4): 329 – 339
王联魁, 王慧芬, 黄智龙. 2000. Li-F 花岗岩液态分离的微量元素地球化学标志. 岩石学报, 16(2): 145 – 152
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
王志强, 陈斌, 马星华. 2014. 南岭芙蓉锡矿田锡石原位 LA-ICP-MS U-Pb 年代学及地球化学研究: 对成矿流体来源和演化的意义. 科学通报, 59(25): 2505 – 2519
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
魏震洋, 于津海, 王丽娟, 舒良树. 2009. 南岭地区新元古代变质沉积岩的地球化学特征及构造意义. 地球化学, 38(1): 1 – 19
许以明, 侯茂松, 廖兴钰, 敖宗伟. 2000. 郴州芙蓉矿田锡矿类型及找矿远景. 湖南地质, 19(2): 95 – 100
袁顺达, 李惠民, 郝爽, 耿建珍, 张东亮. 2010. 湘南芙蓉超大型锡矿锡石原位 LA-MC-ICP-MS U-Pb 测年及其意义. 矿床地质, 29(增1): 543 – 544
袁顺达. 2017. 南岭钨锡成矿作用几个关键科学问题及其对区域找矿勘查的启示. 矿物岩石地球化学通报, 36(5): 736 – 749
袁顺达, 赵盼捞, 刘敏. 2020. 与花岗岩有关锡矿成岩成矿作用研究若干问题讨论. 矿床地质, 39(4): 607 – 618
袁顺达, 赵盼捞. 2021. 基于新的合成流体包裹体方法对成矿金属在熔体-流体相间分配行为的实验研究. 中国科学(地球科学), 51(2): 241 – 249
张德会, 张文淮, 许国建. 2004. 富 F 熔体溶-液体系流体地球化学及其成矿效应: 研究现状及存在问题. 地学前缘, 11(2): 479 – 490
赵葵东, 蒋少涌, 姜耀辉, 刘敦一. 2006. 湘南骑田岭岩体芙蓉超单元的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义. 岩石学报, 22(10): 2611 – 2616
朱金初, 饶冰, 熊小林, 李福春, 张佩华. 2002. 富锂氟含稀有矿化花岗质岩石的对比和成因思考. 地球化学, 31(2): 141 – 152
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, 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