

湘南宝山铅锌多金属矿区花岗闪长斑岩及其暗色包体成因: 锆石 U-Pb 年代学、岩石地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素制约*

谢银财^{1,2} 陆建军^{1**} 马东升¹ 章荣清¹ 高剑峰³ 姚远⁴

XIE YinCai^{1,2}, LU JianJun^{1**}, MA DongSheng¹, ZHANG RongQing¹, GAO JianFeng³ and YAO Yuan⁴

1. 内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 南京大学地球科学与工程学院, 南京 210093
2. 中国地质科学院岩溶地质研究所 国土资源部、广西壮族自治区岩溶动力学重点实验室, 桂林 541004
3. 加拿大地质调查局, 渥太华 K1A 0E8
4. 南京地质矿产研究所, 南京 210016

1. State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China

2. Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Karst Dynamics Laboratory, MLR & GZAR, Guilin 541004, China

3. Geological Survey of Canada, Ottawa, ON, K1A 0E8, Canada

4. Nanjing Institute of Geology and Mineral Resources, Nanjing 210016, China

2013-08-02 收稿, 2013-10-23 改回.

Xie YC, Lu JJ, Ma DS, Zhang RQ, Gao JF and Yao Y. 2013. Origin of granodiorite porphyry and mafic microgranular enclave in the Baoshan Pb-Zn polymetallic deposit, southern Hunan Province: Zircon U-Pb chronological, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic constraints. *Acta Petrologica Sinica*, 29(12):4186–4214

Abstract Zircon U-Pb chronology, Hf isotope, whole rock geochemistry and Sr-Nd isotopes are reported for the granodiorite porphyry and the mafic microgranular enclave (MME) from the Baoshan Pb-Zn polymetallic deposit, southern Hunan Province. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating yields crystallization ages of 156 ~ 158 Ma and 155.2 ± 1.4 Ma for the granodiorite porphyry and MME, respectively, indicating they are coeval. The Baoshan granodiorite porphyry is metaluminous. This porphyry is enriched in LILEs such as K, Rb and U, depleted in Nb, Ti and P, and has an average Nb/Ta ratio of 11.3. It has initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios of 0.7095 ~ 0.7115, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ values of -7.3 to -5.0, $t_{2\text{DM}}(\text{Nd})$ ages of 1.35 Ga to 1.54 Ga, and zircon $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values of -14.0 to -9.0. The MME is characterized by microgranular texture, oval-like shape, sharp contact with the host rock and darkly chilled margin, and contains needle-like apatite. It has low SiO_2 (55.46% ~ 57.30%) but high K_2O (5.86% ~ 6.90%). This MME is enriched in LILEs such as Rb, Ba, Th and U, depleted in Nb, Ta and Ti, and has initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios of 0.7062 ~ 0.7063, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ values of -2.1 ~ -1.9, zircon $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values of -12.1 ~ -4.7, and relative high Nb/Ta ratio (average of 15.3). The MME has higher compatible elements, such as Fe, Mg, V and Cr, than the granodiorite. The elemental and isotopic geochemistry suggests that the Baoshan granodiorite porphyry might have been formed by mixing of mafic and felsic member magmas. The mafic member is hydrous and K-rich mafic magma which might be derived from enriched lithospheric mantle source that had been metasomatized by subducting-sediment-derived melts. The felsic member was generated by partial melting of lower crust induced by the underplating of the hydrous and K-rich mafic magma. The MME might be derived from the mafic magma with minor addition of the felsic magma. The modeling using Sr-Nd isotopes shows that the mixture of 20% ~ 30% mafic magma and 70% ~ 80% felsic magma can generate the Baoshan granodiorite porphyry. Inherited zircon with age of 892 ± 20 Ma has the $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ and $t_{\text{DM}}(\text{Hf})$ values of +6.0 and 1.21 Ga, respectively, which is compatible with those of the Neoproterozoic arc magmatic rocks in the eastern Jiangnan Orogenic Belt. Therefore, the Neoproterozoic

* 本文受国家重点基础研究发展计划项目(2012CB416705)、国家自然科学基金重点基金(41230315)和中国地质调查局项目(1212011085407)联合资助。

第一作者简介: 谢银财, 男, 1986年生, 硕士, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: xieyincail216@163.com, xieyc@karst.ac.cn

** 通讯作者: 陆建军, 男, 1962年生, 博士, 教授, 从事矿床学研究, E-mail: lujj@nju.edu.cn

arc magma might have been involved in the formation of the Baoshan granodiorite porphyry, and the Neoproterozoic arc magma belt and continent-arc collision belt between the Yangtze Block and Cathaysia Block might extend southward from Pingxiang to Chenzhou-Linwu faults. In Early Yanshanian (190 ~ 150Ma), the Nanling Range has undergone lithosphere extensional and thinning due to the subduction of the Paleo-Pacific Plate. The mantle-derived mafic magma underplating into the old lower crust resulted in partial melting of the crust. With the mixing of crust-derived and mantle-derived magmas, extensive granites were generated.

Key words Granodiorite porphyry; MME; Magma mixing; Baoshan Pb-Zn polymetallic deposit; Southern Hunan Province

摘要 本文对湘南宝山铅锌多金属矿区花岗岩闪长斑岩及其暗色包体进行了系统的锆石 U-Pb 年代学、岩石地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素研究,探讨其岩石成因和构造意义。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年表明,宝山花岗岩闪长斑岩成岩年龄为 156 ~ 158Ma,暗色包体的形成年龄为 155.2 ± 1.4 Ma,与寄主岩的成岩年龄一致。宝山花岗岩闪长斑岩为准铝质花岗岩,富集 K、Rb、U 等大离子亲石元素,亏损 Nb、Ti、P 等元素, Nb/Ta 平均比值为 11.3, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值为 0.7095 ~ 0.7115, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 -7.3 ~ -5.0, $t_{\text{DM}}(\text{Nd})$ 值为 1.35 ~ 1.54Ga, 锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -14.0 ~ -9.0。暗色包体呈细粒结构,具浑圆的外形,与寄主花岗岩闪长斑岩接触界线清晰,具暗色的冷凝边,常见针状磷灰石。暗色包体具较低的 SiO_2 含量(55.46% ~ 57.30%),较高的 K_2O 含量(5.86% ~ 6.90%),富集 Rb、Ba、Th、U 等大离子亲石元素,亏损 Nb、Ta、Ti 等元素, Nb/Ta 平均比值为 15.3, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值为 0.7062 ~ 0.7063, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 -2.1 ~ -1.9, 锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -12.1 ~ -4.7。与寄主花岗岩闪长斑岩相比,暗色包体含有较高的 Fe、Mg、V、Cr 等相容元素。主微量元素和同位素特征表明,宝山花岗岩闪长斑岩是由来自经俯冲沉积物熔体交代过的富集岩石圈地幔且富水富钾的底侵基性岩浆与由其引起的下地壳部分熔融形成的长英质岩浆发生混合形成,暗色包体则是来自该底侵基性岩浆与少量长英质岩浆发生混合形成。Sr-Nd 同位素模拟表明,宝山花岗岩闪长质岩浆由大约 20% ~ 30% 的富集地幔物质和 70% ~ 80% 的地壳物质组成。 892 ± 20 Ma 继承锆石核的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 +6.0, $t_{\text{DM}}(\text{Hf})$ 年龄为 1.21Ga,与江南造山带东段新元古代岛弧岩浆的 Hf 同位素特征一致,推断在花岗岩闪长斑岩的源岩部分熔融过程中有新元古代岛弧岩浆岩物质的加入,新元古代岛弧岩浆带及扬子与华夏陆块陆陆碰撞带从萍乡向南延伸部分可能与郴州-临武断裂相接。在燕山早期(190 ~ 150Ma),受古太平洋板块俯冲作用影响,南岭地区处于岩石圈伸展-减薄的构造环境,由于地幔玄武质岩浆底侵至古老地壳源区,诱发地壳发生部分熔融作用,伴随着壳幔岩浆混合作用,形成了该区众多花岗质岩石。

关键词 花岗岩闪长斑岩;暗色包体;地球化学;岩浆混合作用;湘南宝山铅锌多金属矿

中图分类号 P588.121; P597.3

对华南花岗岩的研究始于 20 世纪初,至今已近百年的历史。华南地区广泛分布着晋宁期、加里东期、印支期和燕山期不同时代与类型的花岗岩(周新民,2003;华仁民等,2003;王德滋,2004;孙涛,2006;洪大卫等,2007),这些花岗岩中以燕山期花岗岩出露面积最大(孙涛,2006)。华南地区又是我国重要的有色、稀有和贵金属矿产资源产地,拥有许多大型、超大型矿床。长期以来,我国地质工作者对华南花岗岩与成矿作用关系开展了卓有成效的研究工作,发现华南地区的成矿作用与中生代岩浆活动,尤其是与燕山期花岗岩有着密切的成因关系(中国科学院贵阳地球化学研究所,1979;南京大学地质系,1981;陈毓川等,1989;陈毓川和王登红,2012;地矿部南岭项目花岗岩专题组,1989;翟裕生,1999;华仁民和毛景文,1999;华仁民等,2003,2005,2010;魏道芳等,2006;裴荣富等,1999,2008;毛景文等,1995,1999,2004,2007,2008,2009,2011;胡瑞忠等,2010)。前人对该区与铜铅锌矿化有关的燕山期花岗岩类的成因已经进行了长时间深入研究,认为该类岩浆可能是古太平洋俯冲板块熔融产生的岩浆与地壳岩浆混合(毛景文等,2007,2008;郭春丽等,2010;Zhou *et al.*, 2012),也可能是地壳部分熔融的产物(Wang *et al.*, 2006;王强等,2004;姚军明等,2005;全铁军等,2012)或残留岛弧部分熔融形成(Liu *et al.*, 2012)或者中下地壳与地幔来源岩浆的混合作用(Wang *et al.*, 2003; Hou *et*

al., 2011;朱训等,1983;彭头平等,2004;朱碧等,2008;蒋少涌等,2008a;郭春丽等,2011)。

宝山铅锌多金属矿区处于南岭中段和湘南矿集区的中西部。近年来,宝山矿区取得了危机矿山找矿的重大突破,新探获(333)资源金属量铅 34 万吨、锌 38 万吨、铜 8.7 万吨和银 717 吨(湖南省有色地质勘查局一总队,2010^①)。前人对宝山铅锌多金属矿的成矿构造(印建平,1998;唐朝永,2005)、围岩蚀变与矿化分带(杨国高和陈振强,1998)、金银的赋存状态(张顺英,1988;丁海潮,1994;伍超群等,1995;伍超群,2001;张刚生,1996)、主要矿物标型特征(朱谷昌,1988)、矿带中萤石包裹体 H-O 同位素(童潜明等,1995)、硫化物的 S-Pb 同位素特征(童潜明等,1995;姚军明等,2006)、成矿年龄(姚军明等,2006;路远发等,2006)及找矿方向(王和平,2005;张金河,2007)等方面开展了初步研究工作。这些研究工作为全面了解宝山矿区的成矿机制奠定了基础。但是与成矿密切相关的花岗闪长斑岩的成岩年龄和成因机制方面还存在很大争议,限制了对宝山铅锌多金属矿床成矿机制的深入认识。在成岩年龄方面,前人对宝山花岗岩闪长斑

① 湖南省有色地质勘查局一总队. 2010. 湖南省桂阳县宝山铅锌银矿接替资源勘查报告, 1-119

岩分别运用单颗粒锆石 U-Pb 稀释法 (Wang *et al.*, 2002, 2003)、SHRIMP 锆石 U-Pb 定年法 (路远发等, 2006) 和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年法 (全铁军等, 2012) 进行了年代学研究, 获得的成岩年龄在 158 ~ 181 Ma 之间, 年龄显示出较大的变化范围和不确定性。在宝山花岗闪长斑岩的物源方面, 王岳军等 (2001) 依据岩石地球化学特征, 认为其源区可能是受到早期俯冲组改造的富集岩石圈地幔, 或是源于软流圈的岩浆与中下地壳混合作用的产物; Wang *et al.* (2003) 利用岩石地球化学和 Sr-Nd 同位素, 认为其源自 25% ~ 30% 中下地壳与 70% ~ 75% 亏损地幔来源的玄武质岩浆的混合; 全铁军等 (2012) 根据岩石地球化学和锆石 Hf 同位素, 认为其物源来自中下元古界基底地层的熔融。宝山花岗闪长斑岩形成的构造环境也存在两种观点: 一种观点认为其形成与中生代岩石圈的伸展-减薄作用有关 (Wang *et al.*, 2002, 2003; 王岳军等, 2001; 路远发等, 2006), 另一种观点认为其形成与燕山早期挤压构造体制下地壳发生增厚熔融有关 (全铁军等, 2012)。作者在宝山花岗闪长斑岩中新发现了暗色包体, 其形成年龄、物源以及与寄主岩体的关系还未见研究报道。

本文利用 LA-ICP-MS 定年技术对宝山暗色包体及花岗闪长斑岩进行了详细的微区原位单点定年, 并结合岩石地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素探讨其成因和构造意义, 为研究南岭地区燕山早期构造-岩浆演化提供了新证据。

1 地质背景

湘南地区位于扬子陆块与华夏陆块的结合部, 处于南岭中段。该区广泛分布的花岗岩类岩石大致沿着资兴-郴州-临武深大断裂展布 (图 1a, b), 构成了一条重要的岩浆活动带。该岩浆活动带也是湘南与花岗质岩浆有关的金属矿床的密集分布区, 主要包括与花岗闪长质小岩体相关的铜、铅、锌、铋、金等多金属矿床, 以及与花岗岩体相关的钨、锡、稀土、铌、钽等多金属矿床。湘南构造-岩浆-成矿带是南岭地区一条重要的多金属成矿带, 长期以来, 受到地质人员的高度关注。

区域地层除志留系缺失外, 从震旦系到第四系均有出露 (湖南省地质矿产局, 1988)。震旦系主要为砂岩、石英砂岩和板岩; 寒武系主要为一套浅变质碎屑岩; 奥陶系主要为具类复理石建造的泥、砂质沉积岩; 泥盆系至石炭系主要由碳酸盐类岩石组成; 二叠系主要为页岩和砂岩; 三叠系出露较少, 主要为碳酸盐岩和页岩; 侏罗系至白垩系则为断陷盆地河湖相沉积。在研究区的西部有零星的侏罗纪玄武岩出露 (图 1b), 包括约 175 Ma 喷发的宁远碱性玄武岩和约 150 Ma 喷发的道县虎子岩高 Mg 低 Ti 玄武岩 (Li *et al.*, 2004; Jiang *et al.*, 2009), 是该区存在燕山早期幔源岩浆活动的重要证据。

宝山铅锌多金属矿区位于湖南省南部桂阳县城西约 1.5 km, 处于南岭东西向构造带的中段, 郴州-临武断裂以西

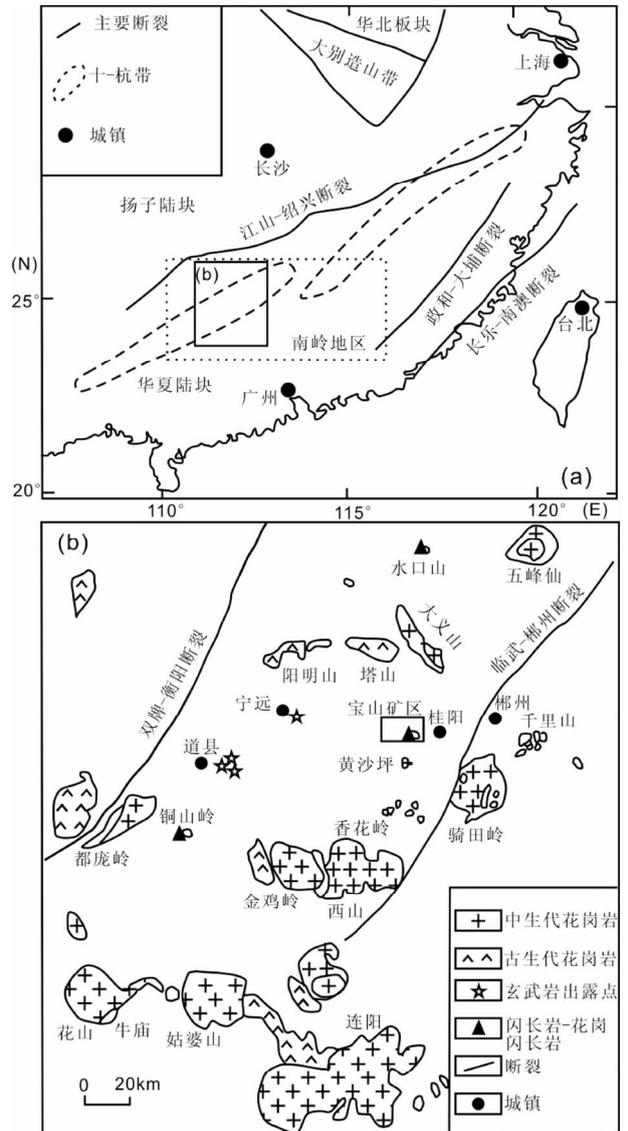


图 1 华南构造简图 (a) 和南岭中西部地质简图 (b) (据 Zhao *et al.*, 2012 修改)

Fig. 1 Sketch maps of tectonic units in South China (a) and the middle and west part of the Nanling Range (b) (modified after Zhao *et al.*, 2012)

(图 1a, b), 主要由中部铜钼矿区、东部铅锌银矿区、北部财神庙铅锌银矿区和西部铅锌银矿区组成 (图 2)。

矿区出露地层以石炭系碳酸盐岩为主, 自新而老依次为石炭系壶天群白云岩、梓门桥组白云岩、测水组砂页岩、石碇子组灰岩、孟公坳组白云质灰岩、泥盆系锡矿山组白云质灰岩 (图 2)。梓门桥组白云岩、测水组砂页岩和石碇子组灰岩是主要的赋矿层位。矿区内构造复杂, 发育一系列轴迹为 NE-NEE 向的倒转背斜和向斜构成的褶皱构造以及由 NE-NEE 压剪性断裂和 NNW 向张剪性断裂构成的断裂构造 (图 2)。

区内岩浆岩十分发育, 地表出露大小岩体 26 个, 沿 NNW 向断裂带分布 (印建平, 1998), 岩石类型以花岗闪长

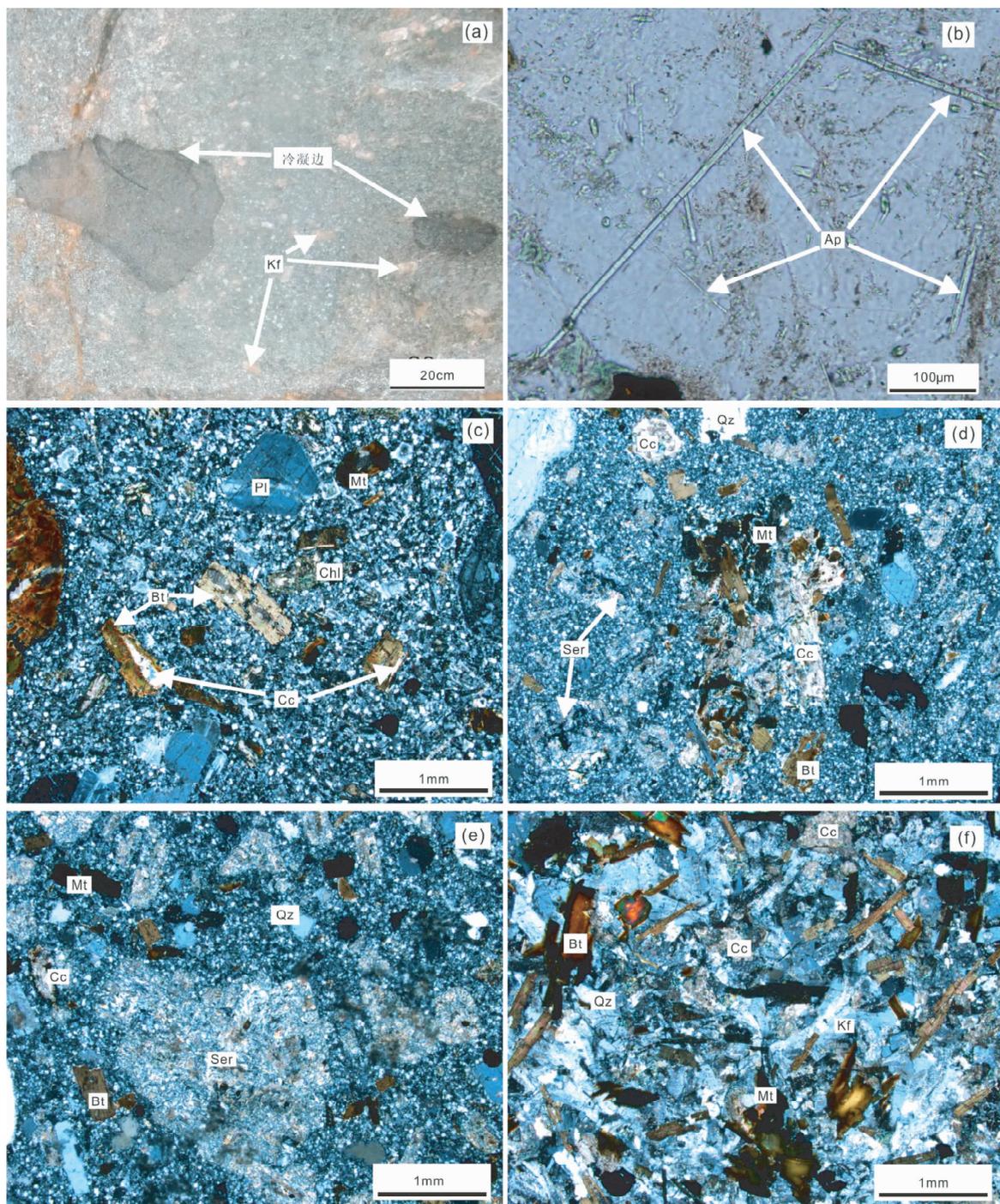


图3 宝山花岗闪长斑岩及其暗色包体照片

(a)-花岗闪长斑岩中的暗色包体及钾长石(Kf)斑晶,暗色包体发育冷凝边;(b)-暗色包体中针状磷灰石(Ap),单偏光;(c)-弱蚀变花岗闪长斑岩,斑状结构,基质为细粒花岗结构,黑云母(Bt)发生绿泥石(Chl)化,在解理面或者晶体边缘部位发生磁铁矿(Mt)化,黑云母裂隙被碳酸盐(Cc)充填,斜长石(Pl)发育韵律环带及卡钠复合双晶,正交偏光;(d)-强烈蚀变花岗闪长斑岩,黑云母发生碳酸盐化,部分颗粒被磁铁矿取代,长石发生强烈的绢云母(Ser)化和碳酸盐化,正交偏光;(e)-强烈蚀变花岗闪长斑岩,长石颗粒发生强烈的碳酸盐化和绢云母化,黑云母发生强烈碳酸盐化,正交偏光;(f)-暗色包体,细粒结构,部分斜长石发生碳酸盐化蚀变,黑云母颗粒边缘被磁铁矿取代,正交偏光

Fig.3 Photos of the Baoshan granodiorite porphyry and MME

斑岩中呈柱状产出的磷灰石。

2 样品及分析方法

2.1 采样位置

花岗闪长斑岩样品主要采自宝山西部矿区 KZ16903、KZ16601、KZ15805、KZ15801 钻孔及西部和北部矿区的坑道-70 中段。两个暗色包体样品在西部矿区坑道-70 中段采集。样品经过岩相学观察与鉴定, 尽量选出较为新鲜的样品进行全岩地球化学分析。用来挑选锆石的花岗闪长斑岩 16903-70 样品采自宝山中部矿区的 16903 坑钻 389m 深处, 11BS-69 样品采自宝山西部矿区-70 中段 416 线。用来挑选锆石的暗色包体 11BS-67 样品与其寄主岩 11BS-69 样品采自同一位置。

2.2 LA-ICP-MS 锆石定年

锆石按照常规重力和磁选方法分选, 最后在双目镜下挑选出晶形完好、具代表性的锆石颗粒, 用环氧树脂固定于样品靶上后研磨抛光。对于制成样品靶的锆石样品在显微镜下进行透射光和反射光观察和照相, 分析锆晶晶形、包裹体、裂缝等特征, 然后在西北大学大陆动力学国家重点实验室进行阴极发光图像拍摄。锆石 U-Pb 定年测试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 LA-ICP-MS 实验室完成。LA-ICP-MS 所配备的 193nm ArF 准分子激光剥蚀系统由德国 Lamda Physik 公司制造, 型号为 GeoLasPro, ICP-MS 由日本东京安捷伦公司制造, 型号为 Agilent 7700x。激光剥蚀所用束斑直径为 44 μm , 频率为 4Hz, 共剥蚀 50s, 能量密度为 10~15J/cm², 剥蚀物气溶胶由氦气送入 ICP-MS 完成测试。测试过程中以标准锆石 91500 为外标, 校正仪器质量歧视与元素分馏; 以标准锆石 GJ-1 与 Plešovice 为盲样, 监控 U-Pb 定年数据质量; 以 NIST SRM 610 为外标, 以⁹¹Zr 为内标, 标定锆石中 U 和 Th 元素含量 (Liu *et al.*, 2010a; Hu *et al.*, 2011)。原始的测试数据经过 ICPMSDataCal 软件离线处理完成 (Liu *et al.*, 2010a, b)。加权平均年龄及谐和图绘制采用 Isoplot 3.2 程序完成。

2.3 锆石 Hf 同位素分析

锆石 Hf 同位素分析利用南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室的激光剥蚀多接收等离子质谱 (LA-MC-ICP-MS) 完成测试, 其中激光剥蚀器型号为 New Wave 公司生产的 UP193FX 型固体激光剥蚀系统, MC-ICP-MS 型号为 Thermo Fisher 公司生产的 Neptune Plus。实验过程中采用 He 作为剥蚀物质载气, 将剥蚀物质从激光探针传送到 MC-ICP-MS 之前与 Ar 混合, 形成混合气。根据锆石大小, 剥蚀直径采用 35 μm , 少数采用 25 μm , 激光脉冲频率为 8Hz, 信号采集次数 200 次, 采集时间 1min 左右。仪器的测试条件及

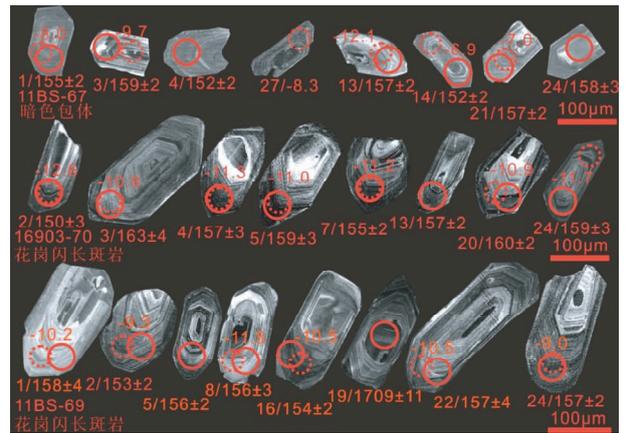


图4 宝山花岗闪长斑岩及其暗色包体代表性锆石 CL 图像

图中实线圈代表锆石 U-Pb 分析点位, 虚线圈代表 Hf 分析点位

Fig. 4 Cathodoluminescence (CL) images of representative zircons from the Baoshan granodiorite porphyry and MME

详细分析流程可参见 Wu *et al.* (2006a) 和侯可军等 (2007)。分析点与 U-Pb 定年分析点为同一位置或其附近或在其完整晶形对应的另一侧, 部分未进行定年分析的锆石选择环带清晰的边缘, 以避免核部影响 (图 4)。在本次测试中, 锆石 Mud Tank 被用作参考标准, 测试的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 加权平均比值为 0.282499 ± 12 (2 σ , n = 12), 这与 Woodhead and Herget (2005) 报道的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf = 0.282504 ± 44 (2 σ , n = 158) 在误差范围内一致。¹⁷⁶Lu 的衰变常数采用 1.865 × 10⁻¹¹ a⁻¹ (Scherer *et al.*, 2001), $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值的计算采用文献 (Bouvier *et al.*, 2008) 推荐的球粒陨石 Hf 同位素值: ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf = 0.0332, ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf = 0.282772。Hf 模式年龄采用现代亏损地幔的 (¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf)_{DM} 比值 0.28325 和 (¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf)_{DM} 比值 0.0384 (Griffin *et al.*, 2000)、平均地壳的 (¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf)_c 比值 0.015 (Amelin *et al.*, 1999) 进行计算。相关计算公式为:

$$\epsilon_{\text{Hf}}(t) = 10000 \times \left\{ \left[\left(\frac{{}^{176}\text{Hf}}{{}^{177}\text{Hf}} \right)_{\text{s}} - \left(\frac{{}^{176}\text{Lu}}{{}^{177}\text{Hf}} \right)_{\text{s}} \times \left(e^{\lambda t} - 1 \right) \right] / \left[\left(\frac{{}^{176}\text{Hf}}{{}^{177}\text{Hf}} \right)_{\text{CHUR},0} - \left(\frac{{}^{176}\text{Lu}}{{}^{177}\text{Hf}} \right)_{\text{CHUR}} \times \left(e^{\lambda t} - 1 \right) \right] - 1 \right\};$$

$$t_{(\text{DM})} = 1/\lambda \times \ln \left\{ 1 + \left[\left(\frac{{}^{176}\text{Hf}}{{}^{177}\text{Hf}} \right)_{\text{s}} - \left(\frac{{}^{176}\text{Hf}}{{}^{177}\text{Hf}} \right)_{\text{DM}} \right] / \left[\left(\frac{{}^{176}\text{Lu}}{{}^{177}\text{Hf}} \right)_{\text{s}} - \left(\frac{{}^{176}\text{Lu}}{{}^{177}\text{Hf}} \right)_{\text{DM}} \right] \right\};$$

$$t_{(\text{DM})}^{\text{c}} = 1/\lambda \times \ln \left\{ 1 + \left[\left(\frac{{}^{176}\text{Hf}}{{}^{177}\text{Hf}} \right)_{\text{s},t} - \left(\frac{{}^{176}\text{Hf}}{{}^{177}\text{Hf}} \right)_{\text{DM},t} \right] / \left[\left(\frac{{}^{176}\text{Lu}}{{}^{177}\text{Hf}} \right)_{\text{c}} - \left(\frac{{}^{176}\text{Lu}}{{}^{177}\text{Hf}} \right)_{\text{DM}} \right] \right\} + t_0.$$

2.4 主微量元素分析

样品的主量元素含量由核工业 230 研究所分析测试中心分析, 元素的分析精度优于 5%。在分析过程中, SiO₂ 采用硅氟酸钾滴定法, K₂O 与 Na₂O 采用火焰光度法, P₂O₅ 采用磷钼钒光度法, Al₂O₃ 使用醋酸锌滴定法和 ICP-OES 法, 总 Fe 含量利用 ICP-OES 和 EDTA 滴定法, FeO 采用重铬酸钾

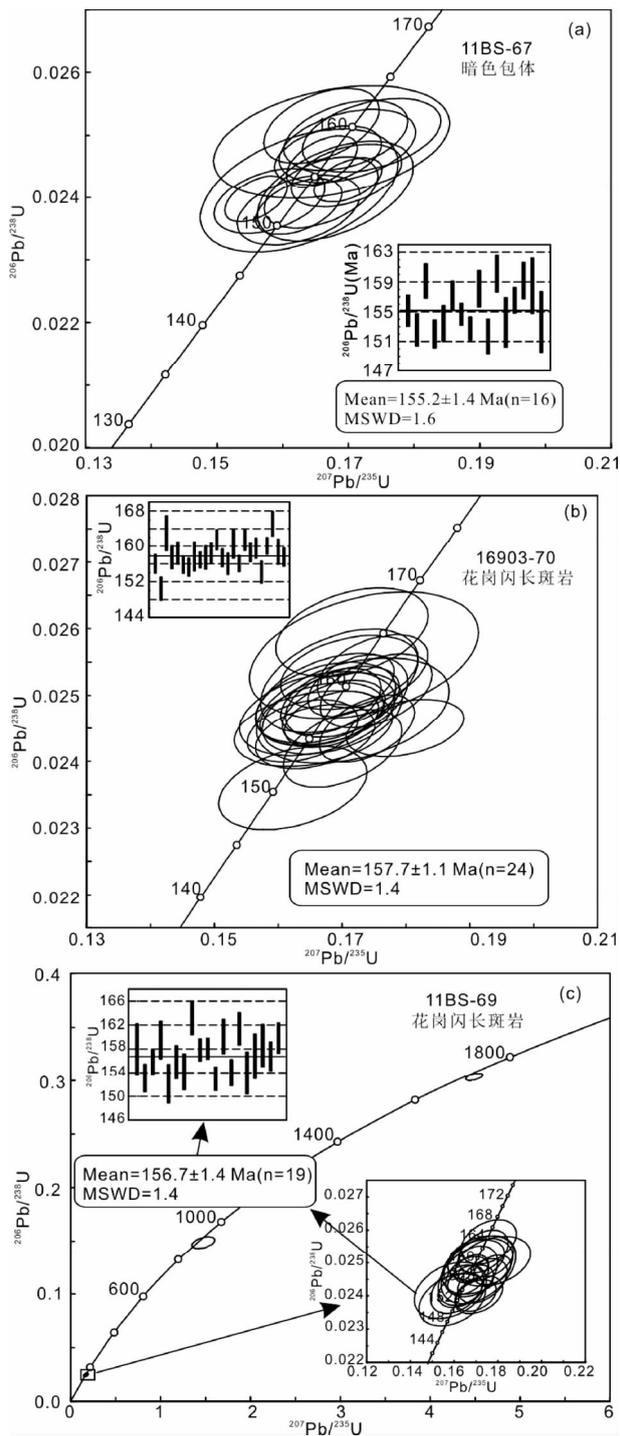


图5 宝山花岗闪长斑岩及其暗色包体锆石 U-Pb 谐和图

Fig. 5 Zircon U-Pb concordia diagrams of the Baoshan granodiorite porphyry and MME

滴定法, MnO 和 TiO₂ 采用 ICP-OES 法, CaO 和 MgO 采用 EDTA 滴定法和 ICP-OES 法。

样品的微量元素分析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, 分析仪器为 ELAN-DRC-e

ICP-MS, 大部分元素的相对误差优于 $\pm 5\%$ 。样品分析过程如下: 称 200 目 50 mg 岩石粉末样品于 Teflon 杯中, 加入亚沸蒸馏提纯的 HF (38%) 和 HNO₃ (68%) 各 1 mL, 盖上盖放入钢套中, 放进烘箱中于 190°C 分解 36h, 取出冷却后, 于电热板上低温蒸至近干, 加入 1 mL HNO₃ 再蒸干, 重复上步骤一次。加 1 mL 500 ng/mL 的 Rh 内标溶液、0.5 mL 的 HNO₃ 和 5 mL H₂O, 盖紧盖后置于烘箱中在 135 ~ 140°C 溶解残渣 5 ~ 6h, 从烘箱中取出, 取 0.4 mL 溶液稀释成 8 ~ 10 mL, 转移到试管中, 用 ICP-MS 测定。具体分析过程可参见 Qi *et al.* (2000)。

2.5 Sr-Nd 同位素分析

样品的 Sr-Nd 同位素分析测试在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室完成。将粉末样品烘干后称取约 100 mg, 完全溶解于 HF + HNO₃ 混合酸中, 采用 Bio-Rad 50WX8 阳离子交换树脂法将 Sr 和 Nd 分离提纯出来。分离产物采用 Thermo Finnigan 公司的 Triton TI 热电质谱仪 (TIMS) 进行 Sr 和 Nd 同位素比值测定, 详细的实验流程参见濮巍等 (2004, 2005)。Sr 和 Nd 测定过程中质量分馏效应分别采用 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.1194$ 和 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 进行校正。在实验过程中标样 NIST SRM 987 的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 测定值为 $0.710259 \pm 4 (2\sigma)$, 这与 Weis *et al.* (2006) 报道的值 $0.710252 \pm 13 (2\sigma)$ 在误差范围内一致; 标样 JNDi-1 的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 测定值为 $0.512116 \pm 4 (2\sigma)$, 这与 Tanaka *et al.* (2000) 报道的值 $0.512115 \pm 7 (2\sigma)$ 在误差范围内一致。

3 结果

3.1 年代学

宝山花岗闪长斑岩样品中锆石晶型完整, 偶见裂纹, 以长柱状为主, 少量短柱状, 一般长 150 ~ 300 μm , 宽 50 ~ 100 μm , 长宽比为 2 : 1 到 3 : 1 之间。锆石透明度较高, 大多数为无色, 少部分为浅黄色。暗色包体样品中锆石晶型完整, 为长柱状或短柱状, 颗粒较小, 一般长 100 ~ 150 μm , 宽 20 ~ 50 μm , 长宽比为 2 : 1 到 3 : 1 之间。锆石透明度相对较差, 透明至半透明, 多数为浅黄色, 少数为无色。CL 图像显示 (图 4), 锆石均发育有很好的振荡环带, 为典型的岩浆锆石。花岗闪长斑岩中锆石的 Th/U 比值变化在 0.27 ~ 0.93 之间, 暗色包体中锆石的 Th/U 比值变化在 0.15 ~ 0.81 之间, 均属于岩浆成因锆石范围 (Hoskin and Ireland, 2000; 吴元保和郑永飞, 2004)。3 个样品的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年数据见表 1, U-Pb 谐和图见图 5。

暗色包体样品 11BS-67 共测定了 16 个单颗粒锆石的 16 个点。16 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值集中分布于 152.0 ~ 160.1 Ma 之间, 投影点均落在谐和线上, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $155.2 \pm 1.4 \text{ Ma} (n = 16, \text{MSWD} = 1.6)$ (图 5a), 可代表该暗色包体的成岩年龄。

表 1 宝山花岗闪长斑岩及其暗色包体锆石 LA-ICP-MS U-Pb 分析数据

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating data of the Baoshan granodiorite porphyry and MME

测点号	²³² Th	²³⁸ U	Th/U	年龄 (Ma)							
	(×10 ⁻⁶)			²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	σ	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	σ
11BS-67(暗色包体)											
1	418	2014	0.21	211.2	77.8	159.2	4.8	155.1	2.1	167.0	5.6
2	645	2495	0.26	79.7	85.2	148.9	4.9	152.6	2.2	147.8	5.4
3	610	843	0.72	146.4	90.7	159.1	5.4	159.2	2.3	150.5	5.0
4	944	2626	0.36	146.4	64.8	152.9	3.8	152.0	1.9	148.3	4.4
6	759	3545	0.21	194.5	88.9	155.8	5.0	153.4	2.4	156.6	6.2
9	413	1606	0.26	127.9	72.2	156.7	4.7	157.2	2.0	147.1	4.5
10	709	4845	0.15	205.6	51.8	159.4	3.0	154.7	1.5	184.6	4.3
11	704	2889	0.24	42.7	57.4	147.2	2.8	152.8	1.5	165.2	4.0
13	202	355	0.57	172.3	127.8	159.3	6.0	158.1	2.4	170.2	5.5
14	485	1438	0.34	150.1	92.6	152.8	5.4	151.6	2.3	154.8	6.2
19	459	1138	0.40	100.1	88.9	155.9	5.1	160.1	2.5	175.6	6.4
20	849	3088	0.27	253.8	116.7	157.7	6.8	153.5	3.3	173.5	10.6
21	535	2189	0.24	124.2	44.4	155.9	3.1	156.5	1.7	173.3	3.9
22	204	903	0.23	198.2	98.1	162.5	6.0	159.2	2.4	190.2	11.0
24	883	1094	0.81	131.6	170.3	157.2	10.3	158.5	3.7	150.0	8.1
25	549	2707	0.20	283.4	157.4	152.9	8.7	153.6	4.1	190.7	15.6
16903-70(花岗闪长斑岩)											
1	439	1150	0.38	250.1	74.1	162.8	4.2	156.0	2.1	154.5	5.1
2	466	1129	0.41	164.9	124.1	152.7	6.7	150.4	2.6	149.0	6.6
3	202	498	0.40	131.6	155.5	162.4	10.2	163.0	3.9	151.2	8.4
4	245	763	0.32	153.8	107.4	158.1	6.3	157.5	2.6	164.7	8.1
5	234	560	0.42	142.7	105.5	157.2	6.3	158.5	2.5	150.6	6.1
6	217	410	0.53	142.7	87.0	154.0	5.0	155.8	2.0	158.8	4.9
7	320	858	0.37	150.1	94.4	155.8	5.4	155.3	2.0	156.3	5.2
8	381	1145	0.33	220.4	144.4	160.9	8.6	157.7	3.3	153.3	9.4
9	298	905	0.33	166.8	73.1	158.0	4.2	156.9	1.8	152.3	4.8
10	263	537	0.49	146.4	115.7	156.0	7.0	157.4	2.6	149.2	5.5
11	284	746	0.38	187.1	117.6	159.4	5.1	158.5	2.2	162.3	5.5
12	356	1183	0.30	187.1	79.6	163.6	4.9	161.5	2.3	167.1	6.0
13	220	750	0.29	200.1	94.4	156.6	5.6	157.4	2.0	162.6	6.0
15	263	532	0.49	166.8	120.4	155.5	7.1	156.0	2.4	154.7	6.3
16	457	1288	0.36	166.8	124.1	159.0	7.1	160.5	3.2	157.2	7.6
17	407	1075	0.38	316.7	77.8	167.9	5.2	156.1	1.8	162.9	5.3
18	340	978	0.35	131.6	98.1	160.4	6.2	161.3	2.3	158.0	6.7
19	197	589	0.33	150.1	80.5	157.9	4.5	158.6	2.1	158.6	5.3
20	299	842	0.36	231.6	79.6	164.1	5.0	159.6	2.3	149.0	5.3
21	1839	3717	0.49	233.4	54.6	159.5	5.3	154.1	2.4	155.0	5.1
22	1594	1712	0.93	146.4	59.3	160.6	3.8	160.1	1.9	147.0	3.5
23	672	1962	0.34	105.6	100.0	160.8	6.8	165.1	2.8	175.5	8.1
24	728	1292	0.56	146.4	114.8	158.0	6.8	158.8	2.9	148.0	6.7
25	574	854	0.67	153.8	76.8	158.3	4.6	157.5	2.0	162.0	4.5
11BS-69(花岗闪长斑岩)											
1	100.8	180	0.56	211.2	166.6	160.4	9.8	157.9	4.3	146.6	7.5
2	182	637	0.29	257.5	101.8	160.5	6.3	153.1	2.3	159.5	7.0
4	139	508	0.27	969.4	131.9	920.0	33.8	892.1	20.1	960.6	42.7
5	298	987	0.30	150.1	100.0	157.3	6.1	155.8	2.0	153.7	5.5
6	247	412	0.60	250.1	167.6	166.2	9.7	159.5	3.2	155.8	6.7
7	502	847	0.59	87.1	151.8	149.9	8.8	152.1	3.3	147.3	6.9
8	149	217	0.69	227.8	101.8	162.0	6.4	155.7	2.8	154.8	5.8
9	319	955	0.33	122.3	133.3	152.0	7.0	154.1	3.0	152.2	8.2
10	146	357	0.41	190.8	112.0	164.4	7.2	163.2	2.8	152.6	6.8
12	252	559	0.45	283.4	77.8	165.8	4.9	157.8	1.9	158.3	4.5
13	193	518	0.37	131.6	76.8	157.5	4.5	158.0	1.8	145.5	3.8
14	383	1061	0.36	264.9	88.9	159.4	5.3	153.0	2.0	153.0	5.3
15	189	288	0.66	216.7	137.9	161.2	8.6	160.1	2.9	150.5	5.6
16	171	642	0.27	200.1	98.1	153.2	5.8	154.0	2.2	154.1	5.7
19	201	402	0.50	1729.3	32.3	1729.2	11.7	1709.0	11.2	1813.0	31.0
20	252	457	0.55	231.6	110.2	162.3	6.5	161.4	2.7	159.2	6.6
21	170	407	0.42	131.6	162.9	149.2	9.5	153.9	3.5	148.0	7.0
22	139	247	0.56	216.7	135.2	156.2	7.8	156.8	3.8	162.6	6.8
23	158	458	0.35	172.3	151.8	160.0	9.3	158.5	3.5	147.5	9.8
24	239	802	0.30	105.6	85.2	155.9	5.7	156.7	2.4	156.2	5.8
25	361	822	0.44	176.0	120.4	159.5	7.4	159.8	2.5	161.7	7.2

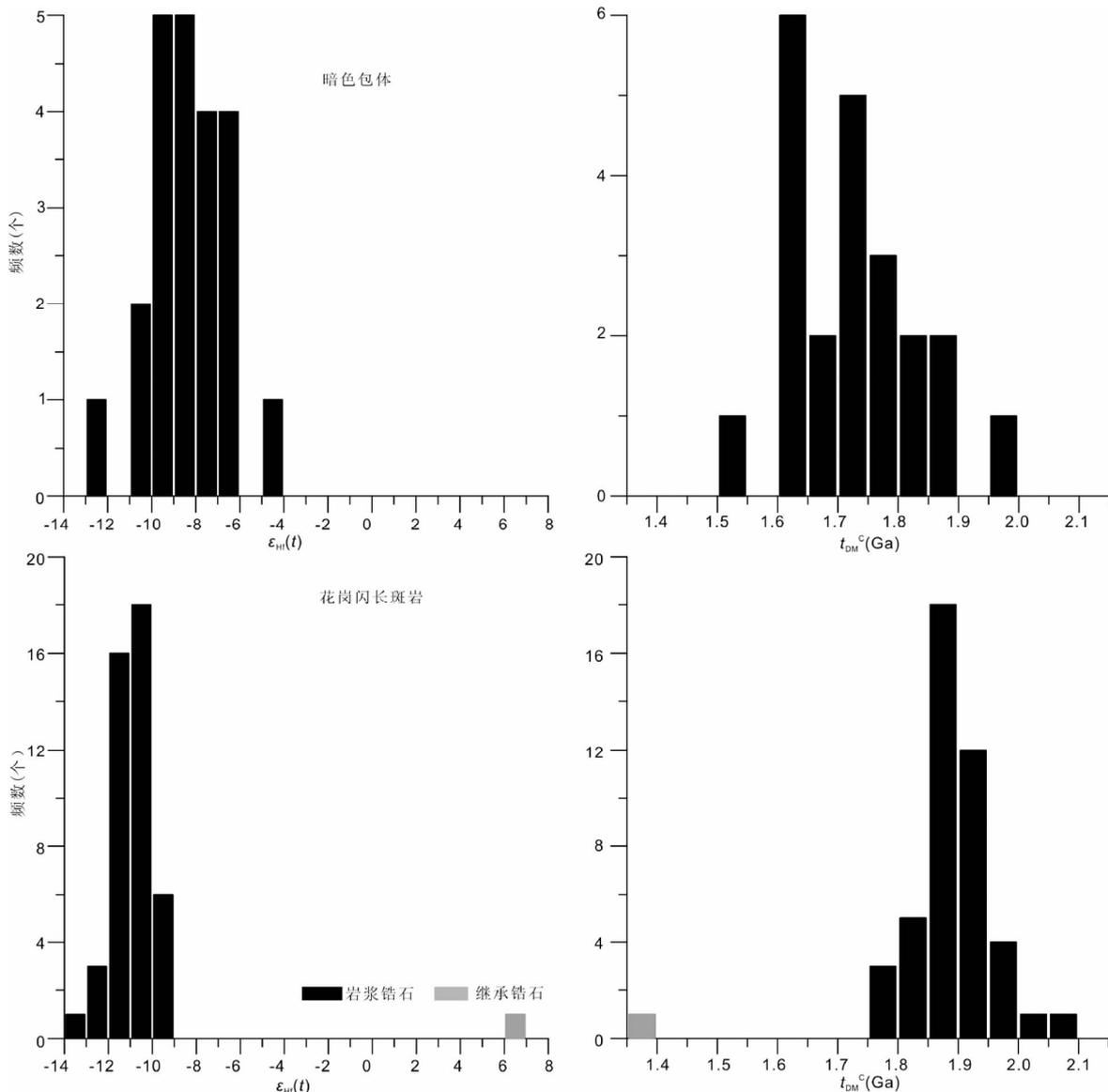


图6 宝山花岗闪长斑岩及其暗色包体锆石 Hf 同位素组成和模式年龄统计直方图

Fig. 6 Histograms of $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ and two-staged Hf model ages of zircons for the Baoshan granodiorite porphyry and MME

花岗闪长斑岩样品 16903-70 共测定了 24 个单颗粒锆石的 24 个点。24 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄数据均集中分布于 150.4 ~ 165.1 Ma 之间, 投影点均落在谐和线上, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $157.7 \pm 1.1 \text{ Ma}$ ($n=24$, $\text{MSWD}=1.4$) (图 5b), 可代表该样品的成岩年龄。

花岗闪长斑岩样品 11BS-69 共测定了 21 个单颗粒锆石的 21 个点。其中 19 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值集中分布于 152.1 ~ 163.2 Ma 之间, 投影点均落在谐和线上, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $156.7 \pm 1.4 \text{ Ma}$ ($n=19$, $\text{MSWD}=1.4$) (图 5c), 代表岩浆结晶时间; 其余 2 个点测定了锆石核部年龄, 均落在谐和线上 (图 5c), 其中测点 4 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $892 \pm 20 \text{ Ma}$ ($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 $969 \pm 132 \text{ Ma}$), 测点 19 的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 $1729 \pm 32 \text{ Ma}$ ($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $1709 \pm 11 \text{ Ma}$)。

3.2 锆石 Hf 同位素

暗色包体及其寄主花岗闪长斑岩的锆石 Hf 同位素分析结果列于表 2。除继承锆石用测点的年龄计算外, 其余锆石 Hf 同位素值计算所用的年龄为该样品的加权平均年龄。暗色包体锆石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i$ 比值变化在 0.282334 ~ 0.282542 之间, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化在 -12.1 ~ -4.7 之间, 两阶段模式年龄 t_{DM}^{c} (Hf) 值变化在 1.50 ~ 1.96 Ga 之间 (图 6)。花岗闪长斑岩锆石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i$ 比值变化在 0.282279 ~ 0.282420 之间, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化在 -14.0 ~ -9.0 之间, 两阶段模式年龄 t_{DM}^{c} (Hf) 值在 1.77 ~ 2.08 Ga 之间变化 (图 6)。花岗闪长斑岩中 892 Ma 的继承锆石核计算获得 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i$ 比值为 0.282385,

表 2 宝山花岗岩闪长斑岩及其暗色包体的锆石的 Hf 同位组成

Table 2 Zircon Hf isotopic compositions for the Baoshan granodiorite porphyry and MME

测点号	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	2σ	t (Ma)	t_{DM} (Ga)	t_{DM}^{C} (Ga)	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$
11BS-67(暗色包体)											
1	0.282452	0.000016	0.001079	0.000015	0.026697	0.000367	155.2	1.14	1.71	0.282449	-8.0
2	0.282412	0.000016	0.000941	0.000006	0.025020	0.000101	155.2	1.19	1.80	0.282409	-9.4
3	0.282412	0.000023	0.002210	0.000014	0.054046	0.000461	155.2	1.23	1.80	0.282406	-9.6
6	0.282480	0.000017	0.001427	0.000016	0.035859	0.000830	155.2	1.11	1.65	0.282476	-7.1
10	0.282438	0.000017	0.002238	0.000012	0.055715	0.000288	155.2	1.19	1.75	0.282432	-8.6
11	0.282434	0.000022	0.001337	0.000013	0.033103	0.000580	155.2	1.17	1.75	0.282431	-8.7
13	0.282339	0.000030	0.001881	0.000018	0.049357	0.000515	155.2	1.32	1.96	0.282334	-12.1
14	0.282486	0.000018	0.001505	0.000028	0.039732	0.000896	155.2	1.10	1.64	0.282482	-6.9
19	0.282416	0.000018	0.001479	0.000057	0.038244	0.001565	155.2	1.20	1.79	0.282412	-9.4
21	0.282482	0.000025	0.001617	0.000011	0.037422	0.000342	155.2	1.11	1.64	0.282478	-7.0
22	0.282372	0.000020	0.000905	0.000026	0.023075	0.000654	155.2	1.24	1.88	0.282370	-10.8
26	0.282453	0.000014	0.001149	0.000027	0.027794	0.000577	155.2	1.14	1.71	0.282449	-8.0
27	0.282447	0.000015	0.001678	0.000031	0.041565	0.001034	155.2	1.16	1.72	0.282442	-8.3
28	0.282379	0.000015	0.001803	0.000121	0.046974	0.003436	155.2	1.26	1.88	0.282373	-10.7
29	0.282403	0.000014	0.001008	0.000026	0.024538	0.000651	155.2	1.20	1.82	0.282400	-9.8
30	0.282468	0.000053	0.001595	0.000010	0.043392	0.000717	155.2	1.13	1.68	0.282464	-7.5
31	0.282488	0.000029	0.001303	0.000026	0.031765	0.000589	155.2	1.09	1.63	0.282484	-6.8
32	0.282465	0.000024	0.001124	0.000006	0.026946	0.000093	155.2	1.12	1.68	0.282462	-7.6
33	0.282489	0.000025	0.001462	0.000041	0.036003	0.000969	155.2	1.10	1.63	0.282484	-6.8
34	0.282418	0.000028	0.000899	0.000003	0.022336	0.000120	155.2	1.18	1.78	0.282415	-9.2
35	0.282485	0.000021	0.000960	0.000012	0.022278	0.000304	155.2	1.09	1.63	0.282482	-6.9
36	0.282545	0.000023	0.001197	0.000023	0.029843	0.000601	155.2	1.01	1.50	0.282542	-4.7
16903-70(花岗岩长斑岩)											
1	0.282376	0.000018	0.001685	0.000018	0.047086	0.000659	157.7	1.26	1.88	0.282371	-10.7
2	0.282323	0.000027	0.001837	0.000066	0.043662	0.001550	157.7	1.34	2.00	0.282318	-12.6
3	0.282373	0.000015	0.000827	0.000004	0.022998	0.000295	157.7	1.24	1.88	0.282370	-10.8
4	0.282358	0.000014	0.000968	0.000006	0.023340	0.000073	157.7	1.26	1.92	0.282355	-11.3
5	0.282365	0.000015	0.000790	0.000003	0.020486	0.000205	157.7	1.25	1.90	0.282363	-11.0
6	0.282371	0.000014	0.000997	0.000014	0.027893	0.000632	157.7	1.25	1.89	0.282368	-10.8
7	0.282362	0.000014	0.001341	0.000019	0.031645	0.000391	157.7	1.27	1.91	0.282358	-11.2
8	0.282345	0.000015	0.000812	0.000001	0.020024	0.000113	157.7	1.28	1.94	0.282343	-11.7
9	0.282375	0.000015	0.001198	0.000008	0.030242	0.000159	157.7	1.25	1.88	0.282372	-10.7
10	0.282350	0.000016	0.001428	0.000043	0.038819	0.000888	157.7	1.29	1.94	0.282346	-11.6
11	0.282384	0.000015	0.001364	0.000019	0.032648	0.000364	157.7	1.24	1.86	0.282380	-10.4
12	0.282340	0.000022	0.001749	0.000049	0.041526	0.001062	157.7	1.32	1.96	0.282335	-12.0
15	0.282374	0.000017	0.001255	0.000041	0.030393	0.000947	157.7	1.25	1.88	0.282370	-10.8
17	0.282373	0.000015	0.001106	0.000006	0.029934	0.000193	157.7	1.25	1.88	0.282370	-10.8
18	0.282284	0.000019	0.001413	0.000036	0.036004	0.000801	157.7	1.38	2.08	0.282279	-14.0
19	0.282365	0.000015	0.001406	0.000016	0.040687	0.000578	157.7	1.27	1.90	0.282361	-11.1
20	0.282368	0.000016	0.001066	0.000029	0.029133	0.000663	157.7	1.25	1.89	0.282365	-10.9
21	0.282388	0.000016	0.001427	0.000018	0.039010	0.000792	157.7	1.24	1.85	0.282384	-10.3
22	0.282379	0.000018	0.002754	0.000040	0.072607	0.001576	157.7	1.30	1.88	0.282371	-10.7
23	0.282340	0.000025	0.001314	0.000020	0.033772	0.000560	157.7	1.30	1.96	0.282337	-12.0
24	0.282346	0.000015	0.001157	0.000022	0.029335	0.000648	157.7	1.29	1.94	0.282343	-11.7
25	0.282379	0.000019	0.001594	0.000035	0.043927	0.001079	157.7	1.26	1.87	0.282374	-10.6
11BS-69(花岗岩长斑岩)											
1	0.282389	0.000017	0.000601	0.000004	0.015148	0.000046	156.7	1.21	1.84	0.282388	-10.2
2	0.282414	0.000018	0.000865	0.000010	0.023897	0.000250	156.7	1.18	1.79	0.282412	-9.3
4	0.282408	0.000031	0.001351	0.000047	0.032673	0.001166	892.1	1.21	1.39	0.282385	+6.0
6	0.282362	0.000018	0.001328	0.000031	0.034500	0.000759	156.7	1.27	1.91	0.282358	-11.2
7	0.282316	0.000022	0.001346	0.000052	0.033871	0.001307	156.7	1.34	2.01	0.282313	-12.8

续表 2

Continued Table 2

测点号	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	2σ	t (Ma)	t_{DM} (Ga)	$t_{\text{DM}}\text{C}$ (Ga)	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$
8	0.282352	0.000021	0.000761	0.000018	0.020233	0.000333	156.7	1.27	1.93	0.282350	-11.5
9	0.282366	0.000020	0.001054	0.000011	0.024629	0.000242	156.7	1.26	1.90	0.282363	-11.0
10	0.282357	0.000027	0.000828	0.000001	0.019565	0.000080	156.7	1.26	1.92	0.282355	-11.3
12	0.282388	0.000018	0.001248	0.000007	0.032019	0.000162	156.7	1.23	1.85	0.282384	-10.3
13	0.282352	0.000020	0.001102	0.000016	0.028882	0.000505	156.7	1.28	1.93	0.282348	-11.6
14	0.282342	0.000020	0.001429	0.000056	0.036592	0.001346	156.7	1.30	1.95	0.282338	-11.9
15	0.282388	0.000025	0.001622	0.000066	0.042694	0.001449	156.7	1.24	1.85	0.282383	-10.3
16	0.282379	0.000019	0.000719	0.000005	0.019934	0.000307	156.7	1.23	1.87	0.282377	-10.5
20	0.282370	0.000020	0.000853	0.000005	0.022429	0.000162	156.7	1.24	1.89	0.282368	-10.9
21	0.282348	0.000022	0.000947	0.000005	0.027778	0.000328	156.7	1.28	1.94	0.282345	-11.7
22	0.282381	0.000020	0.000637	0.000006	0.017328	0.000281	156.7	1.22	1.86	0.282379	-10.5
23	0.282394	0.000017	0.000612	0.000008	0.015617	0.000324	156.7	1.20	1.83	0.282392	-10.0
24	0.282423	0.000022	0.001009	0.000005	0.026023	0.000205	156.7	1.17	1.77	0.282420	-9.0
25	0.282393	0.000018	0.000750	0.000003	0.017804	0.000062	156.7	1.21	1.84	0.282391	-10.0
26	0.282347	0.000018	0.000987	0.000003	0.025789	0.000268	156.7	1.28	1.94	0.282344	-11.7
27	0.282415	0.000018	0.001020	0.000003	0.026256	0.000124	156.7	1.19	1.79	0.282412	-9.3
28	0.282409	0.000021	0.001107	0.000032	0.028230	0.000703	156.7	1.20	1.80	0.282406	-9.5
29	0.282405	0.000016	0.000809	0.000001	0.020365	0.000167	156.7	1.19	1.81	0.282402	-9.7

注: Hf 分析点号与 U-Pb 定年测试点编号一致

$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 +6.0, 一阶段模式年龄 $t_{\text{DM}}(\text{Hf})$ 值为 1.21 Ga, 两阶段模式年龄 $t_{\text{DM}}^{\text{C}}(\text{Hf})$ 值为 1.39 Ga (图 6)。

3.3 热液蚀变影响

宝山花岗闪长斑岩及其暗色包体的主量及微量元素分析结果见表 3。宝山花岗闪长斑岩的 LOI 值变化在 2.04% ~ 8.38% 之间, 暗色包体的 LOI 值变化在 6.55% ~ 8.70% 之间, 反映了岩石遭受了不同程度的蚀变作用, 这和样品发生不同程度蚀变的岩相学特征是一致的。热液蚀变作用会影响岩石样品的主量元素和微量元素含量变化, 但一般认为稀土元素和过渡元素在热液蚀变过程中不具迁移性, 他们的含量在热液蚀变过程中变化微弱 (Smith and Smith, 1976; Humphris and Thompson, 1978; Sturchio *et al.*, 1986; Rollinson, 1993; Hawkesworth *et al.*, 1997; Jiang *et al.*, 2005; 朱碧等, 2008)。

宝山花岗闪长斑岩的 SiO_2 、 K_2O 、 Al_2O_3 、 CaO 、 FeO^{T} 、 MgO 、 TiO_2 、 P_2O_5 、 Sr 和 Ba 含量随着 LOI 值的增加没有明显变化 (图 7), 说明他们的含量没有因蚀变作用而变化。但 Na_2O 、 Rb 、 Y 、 Th 、 Nb 和 Ta 含量随着 LOI 值增加变化较为复杂, 当 LOI 值小于 4.00 时, 他们的含量变化恒定 (图 7), 但当 LOI 值增加到 8.38 时, 他们的含量变化非常显著 (图 7), 说明强烈的蚀变作用可以导致这些元素含量的明显变化, 暗示了这些元素在热液蚀变过程中具有较强的活动性。因此, 具有低 LOI 值 (<4.00) 的宝山花岗闪长斑岩的 Na_2O 、 Rb 、 Th 、 Y 、 Nb 和 Ta 含量可以代表新鲜样品的含量。因此, 在下文仅利用宝山花岗闪长斑岩样品中含量没有发生变化的元素, 如

SiO_2 、 K_2O 、 Al_2O_3 、 CaO 、 FeO^{T} 、 MgO 、 TiO_2 、 P_2O_5 、 Sr 、 Ba 、 REE 、过渡元素和具低 LOI 值 (<4.00) 样品的 Na_2O 、 Rb 、 Th 、 Y 、 Nb 和 Ta 元素进行岩石成因方面的讨论。

宝山暗色包体的 SiO_2 、 K_2O 、 Na_2O 、 Al_2O_3 、 CaO 、 TiO_2 、 P_2O_5 、 Rb 、 Th 、 Ba 、 Y 、 Nb 和 Ta 含量随着 LOI 值增加没有明显变化 (图 7), 说明这些元素可能基本保持了原有样品的含量。如前所述, 不同蚀变程度的寄主花岗闪长斑岩的 FeO^{T} 和 MgO 含量没有发生明显变化, 说明这两个元素在蚀变作用过程中保持了稳定, 因此, 处于同一蚀变环境中的暗色包体的 FeO^{T} 和 MgO 含量也可能保持了新鲜样品的信息, 而 FeO^{T} 和 MgO 含量随着 LOI 值增加明显变化可能主要还是因样品基性程度不同所致, 这点与暗色包体样品具有高的 FeO^{T} 、 MgO 、 TiO_2 和 P_2O_5 含量时具低 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 (-1.9) 相一致。因此, 在下文仅利用宝山暗色包体样品中含量没有发生变化的元素, 如 SiO_2 、 K_2O 、 Na_2O 、 Al_2O_3 、 CaO 、 FeO^{T} 、 MgO 、 TiO_2 、 P_2O_5 、 Rb 、 Ba 、 Th 、 Nb 、 Ta 、 REE 和过渡元素进行岩石成因的讨论。

在 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ -LOI 图解和 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ -LOI 图解 (图 7、表 4) 中, 宝山花岗闪长斑岩样品和暗色包体样品的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值和 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值均与 LOI 值无相关性。由于 LOI 值可以作为岩石蚀变强度大小的一个标志, 上述现象说明随着蚀变作用的增强, 岩石的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值和 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值变化均较为恒定, 表明样品的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值和 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 受蚀变作用的影响不大, 可以用来讨论岩石成因。

3.4 主微量元素特征

3.4.1 寄主花岗闪长斑岩

宝山花岗闪长斑岩的 SiO_2 含量为 61.19% ~ 68.80%, 具

表 3 宝山花岗闪长斑岩及其暗色包体的主量元素 (wt%) 及微量元素 ($\times 10^{-6}$) 组成Table 3 Major elements (wt%) and trace elements ($\times 10^{-6}$) compositions for the Baoshan granodiorite porphyry and MME

岩性 样品号	花岗闪长斑岩									
	BSH-1 *	BSH-2 *	BSH-3 *	BSH-4 *	BSH-5 *	BSH-6 *	BSH-7 *	16903-70	16903-71	16903-73
SiO ₂	66.58	65.4	68.01	64.46	68.80	64.50	63.28	62.83	63.63	62.57
TiO ₂	0.37	0.41	0.36	0.45	0.43	0.48	0.44	0.44	0.50	0.53
Al ₂ O ₃	14.39	14.61	13.67	14.68	13.73	15.12	15.19	14.84	14.82	14.52
Fe ₂ O ₃	0.38	0.75	0.71	0.66	0.70	1.05	0.56	1.86	2.08	1.86
FeO	1.93	2.25	1.83	2.63	1.97	2.73	2.10	1.64	1.90	1.60
FeO ^T	2.27	2.93	2.47	3.22	2.60	3.68	2.60	3.31	3.77	3.27
MnO	0.13	0.05	0.11	0.04	0.08	0.06	0.10	0.14	0.13	0.09
MgO	1.14	2.23	1.29	2.76	1.55	3.06	2.21	1.83	1.96	1.84
CaO	4.65	3.75	3.68	2.89	2.33	3.57	5.96	4.28	4.14	4.29
Na ₂ O	2.62	2.81	2.75	2.82	2.83	2.99	2.22	2.76	3.00	2.45
K ₂ O	4.20	4.42	4.61	4.22	4.81	4.39	4.44	4.64	3.90	5.31
P ₂ O ₅	0.18	0.14	0.17	0.15	0.15	0.16	0.15	0.22	0.22	0.20
LOI	3.25	3.18	2.52	3.72	2.40	2.04	3.78	3.56	3.09	3.80
Total	99.82	100.00	99.71	99.64	99.78	100.15	100.48	99.02	99.37	99.06
A/CNK	0.83	0.90	0.84	1.01	0.97	0.93	0.79	0.85	0.89	0.82
Sc	7.78	9.18	7.71	5.99	7.79	10.4	2.67	12.4	14.0	13.8
V								75.7	84.8	88.0
Ni	7.19	2.58	2.88	3.78	14.3	3.39	3.06	6.29	5.54	7.42
Cr								15.5	14.6	17.6
Co	6.98	5.47	4.75	7.69	5.42	8.20	6.62	5.55	8.09	8.41
Be								3.09	3.32	3.23
Li								13.1	15.0	16.0
Cs								7.10	18.7	25.1
Rb	165	183	201	189	207	186	173	147	146	188
Ba	563	682	591	520	639	753	493	739	489	540
Th	14.0	14.7	16.2	15.4	15.4	17.9	16.2	17.6	14.8	20.0
U	4.98	3.25	2.90	4.48	3.28	4.63	3.29	4.35	4.16	6.23
Nb	16.0	16.3	16.7	17.3	16.9	18.7	16.4	11.8	12.7	13.8
Ta	1.33	1.45	1.56	1.45	1.47	1.49	1.35	1.14	1.20	1.35
Pb								11.8	14.5	18.4
Sr	115	79.8	129	65.1	107	74.8	79.7	310	301	278
Zr	107	111	108	107	105	134	113	151	167	169
Hf	3.88	3.47	3.98	3.97	4.01	4.84	4.01	4.18	4.51	4.50
Y	24.4	23.8	24.4	22.9	18.7	21.8	13.3	24.0	21.8	23.9
Ga								17.9	18.3	18.1
W								4.23	4.85	15.3
Sn								3.96	3.62	10.7
La	32.3	27.1	32.1	28.7	29.4	35.6	25.8	42.6	36.9	40.5
Ce	60.8	53.0	62.5	61.1	57.0	66.1	58.5	78.7	68.4	74.9
Pr	6.71	6.72	7.03	7.05	6.37	8.01	6.65	8.49	7.47	8.12
Nd	25.2	24.8	26.6	25.8	24.1	28.6	24.3	31.6	28.4	30.8
Sm	5.27	5.11	5.12	5.19	4.50	5.46	4.83	5.55	5.04	5.66
Eu	1.22	1.28	1.15	1.15	0.94	1.22	1.17	1.29	1.18	1.15
Gd	4.56	4.67	4.61	4.54	3.81	4.51	4.27	5.28	4.73	5.12
Tb	0.68	0.69	0.63	0.66	0.50	0.65	0.62	0.783	0.681	0.758
Dy	4.18	4.26	4.34	3.98	3.35	3.83	3.72	4.24	3.61	4.09
Ho	0.85	0.87	0.83	0.81	0.61	0.79	0.74	0.81	0.73	0.79
Er	2.44	2.68	2.57	2.46	2.03	2.42	2.23	2.42	2.20	2.36
Tm	0.40	0.40	0.40	0.38	0.34	0.37	0.33	0.38	0.34	0.39
Yb	2.58	2.94	2.72	2.64	2.16	2.62	2.28	2.25	2.23	2.36
Lu	0.37	0.45	0.40	0.40	0.33	0.40	0.34	0.33	0.32	0.34
Nb/Ta	12.0	11.2	10.7	11.9	11.5	12.6	12.2	10.4	10.6	10.2
ΣREE	147.6	135.0	151.0	144.9	135.4	160.6	135.8	184.7	162.2	177.4
(La/Yb) _N	9.0	6.6	8.5	7.8	9.8	9.8	8.1	13.6	11.9	12.3
Eu/Eu*	0.76	0.80	0.72	0.72	0.69	0.75	0.79	0.73	0.74	0.66
T _{Zr} (°C)	721	731	726	740	740	746	712	746	760	750

续表 3
Continued Table 3

岩性 样品号	花岗闪长斑岩							暗色包体	
	16601-01	15805-02	15801-03	11BS-39	11BS-46	11BS-69	11BS-72	11BS-66	11BS-67
SiO ₂	61.19	65.65	67.50	65.94	66.89	68.04	66.82	57.30	55.46
TiO ₂	0.46	0.35	0.34	0.42	0.40	0.36	0.42	0.58	0.61
Al ₂ O ₃	13.33	13.17	13.27	13.99	14.44	13.34	14.06	13.48	13.48
Fe ₂ O ₃	1.82	1.31	1.20	1.23	1.05	1.48	1.44	1.45	2.06
FeO	1.48	1.34	1.577	1.96	1.64	1.55	2.15	2.46	3.38
FeO ^T	3.12	2.52	2.66	3.07	2.59	2.88	3.45	3.76	5.23
MnO	0.05	0.16	0.06	0.09	0.07	0.10	0.07	0.24	0.24
MgO	2.36	1.35	2.30	1.73	1.12	1.79	1.78	2.61	3.98
CaO	3.43	3.25	1.51	1.99	3.48	1.9	1.73	6.12	5.39
Na ₂ O	1.37	0.32	0.67	0.71	0.40	0.41	1.15	1.23	0.90
K ₂ O	4.94	4.61	4.57	4.42	3.50	4.72	4.55	6.90	5.86
P ₂ O ₅	0.22	0.18	0.16	0.19	0.15	0.14	0.16	0.30	0.34
LOI	8.38	7.45	6.47	7.01	6.92	6.43	5.73	6.55	8.70
Total	99.03	99.14	99.63	99.67	100.07	100.26	100.06	99.21	100.39
A/CNK	0.96	1.15	1.51	1.46	1.34	1.44	1.41	0.65	0.76
Sc	11.1	5.97	4.78	9.24	7.99	4.54	9.48	17.7	17.9
V	72.5	38.8	30.4	66.1	58.4	29.9	62.5	116	127
Ni	12.1	5.27	3.81	4.05	4.90	2.57	2.69	14.0	19.7
Cr	36.4	17.7	9.3	11.1	11.5	8.6	10.3	76.6	94.9
Co	11.5	5.60	3.15	7.42	5.34	3.74	4.83	12.0	11.7
Be	2.86	3.48	4.87	2.22	2.38	4.19	2.91	3.64	4.27
Li	24.2	28.1	34.1	31.2	34.1	33.2	36.3	20.8	32.2
Cs	9.0	26.0	42.5	24.5	10.5	44.2	30.4	25.7	36.7
Rb	179	247	281	168	133	305	194	334	310
Ba	1400	853	803	678	498	875	686	2030	2010
Th	19.1	22.8	27.0	14.6	13.2	25.1	13.1	14.9	13.9
U	6.37	9.32	8.74	5.00	4.25	8.38	3.07	4.65	3.77
Nb	27.5	32.8	36.2	14.6	13.9	34.6	14.4	24.9	24.1
Ta	1.97	2.66	2.79	1.20	1.23	2.71	1.33	1.60	1.60
Pb	28.5	34.5	17.6	35.3	28.1	16.8	22.5	16.0	12.5
Sr	360	131	98.8	125	78.5	130	142	614	485
Zr	187	198	205	135	123	205	132	184	195
Hf	4.69	5.03	5.38	3.85	3.49	5.41	4.01	4.83	5.06
Y	15.5	18.5	16.9	18.9	20.8	16.0	18.7	19.4	21.0
Ga	17.0	17.8	19.1	16.3	16.3	18.5	16.5	17.9	18.7
W	2.84	3.81	5.74	2.12	13.6	4.51	1.92	3.30	2.17
Sn	4.29	4.56	4.66	3.01	2.99	4.55	2.03	9.25	9.06
La	48.0	56.6	68.2	33.5	25.8	59.3	27.5	54.1	51.9
Ce	94.7	104	125	65.1	51.4	108	57.0	104	104
Pr	10.5	10.9	12.7	7.05	5.60	11.1	6.32	11.6	12.0
Nd	39.3	39.7	44.4	27.1	22.3	39.4	24.6	45.0	47.2
Sm	5.40	5.85	6.29	4.48	4.08	5.70	4.41	5.78	6.09
Eu	1.17	1.09	1.05	0.99	0.92	0.99	1.01	1.39	1.40
Gd	4.53	5.09	5.03	4.04	3.87	4.82	4.04	5.28	5.72
Tb	0.609	0.689	0.695	0.604	0.58	0.625	0.604	0.675	0.728
Dy	2.91	3.21	3.02	3.10	3.35	2.86	3.33	3.25	3.59
Ho	0.542	0.576	0.540	0.622	0.673	0.532	0.654	0.638	0.737
Er	1.62	1.71	1.71	1.91	2.14	1.63	2.04	2.03	2.24
Tm	0.256	0.268	0.253	0.319	0.356	0.237	0.347	0.322	0.359
Yb	1.54	1.60	1.60	2.09	2.29	1.56	2.29	1.96	2.23
Lu	0.227	0.252	0.236	0.318	0.351	0.237	0.346	0.293	0.313
Nb/Ta	14.0	12.3	13.0	12.2	11.3	12.8	10.8	15.6	15.1
∑REE	211.3	231.5	270.7	151.2	123.7	237.0	134.5	236.3	238.5
(La/Yb) _N	22.4	25.4	30.6	11.5	8.1	27.3	8.6	19.8	16.7
Eu/Eu*	0.72	0.61	0.57	0.71	0.71	0.58	0.73	0.77	0.73
T _{Zr} (°C)	783	815	843	801	787	840	795	713	740

注: (1) FeO^T 指全铁含量; (2) A/CNK = Al₂O₃ / (CaO + Na₂O + K₂O) 摩尔比; (3) Eu/Eu* = Eu_N / (Sm_N × Gd_N) 0.5; (4) 标准化值据 Sun and McDonough, 1989; (5) T_{Zr}(°C): 锆石饱和温度; (6) 标注“*”的样品引自 Wang *et al.*, 2003

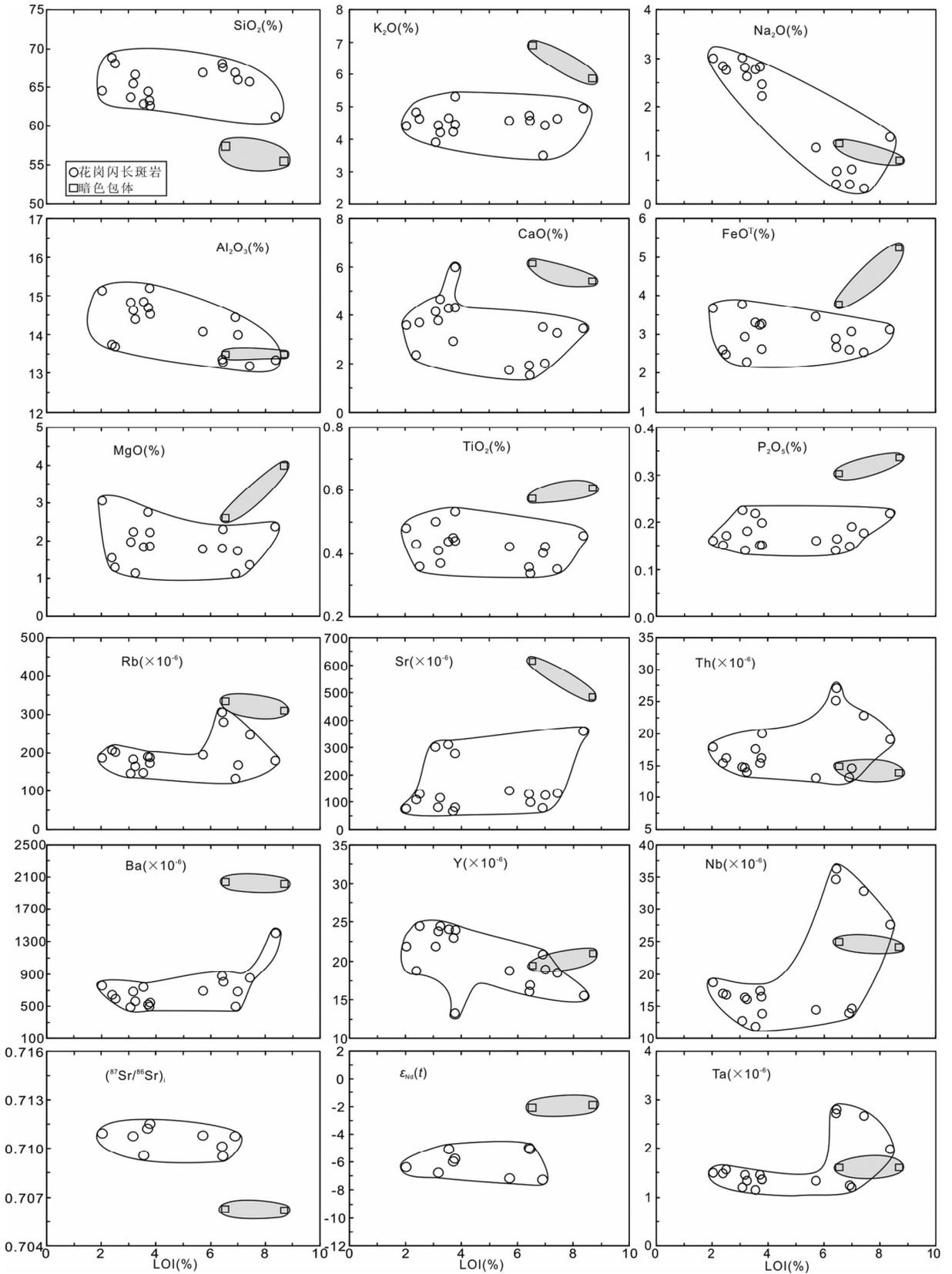


图7 宝山花岗闪长斑岩及其暗色包体的烧失量(LOI值)与主量元素(%),部分微量元素($\times 10^{-6}$)和Sr-Nd同位素组成图解

Fig. 7 LOI versus whole-rock major elements (%), selected trace elements ($\times 10^{-6}$), and Sr-Nd isotopic compositions for the Baoshan granodiorite porphyry and MME

表4 宝山花岗闪长斑岩及其暗色包体的 Sr-Nd 同位素组成

Table 4 Sr and Nd isotopic compositions for the Baoshan granodiorite porphyry and MME

岩性	花岗闪长斑岩									暗色包体	
	样品号	16903-70	15801-03	11BS-46	11BS-69	11BS-72	BS-2	BS-4	BS-6	BS-7	11BS-66
$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	1.3721	8.2298	4.9025	6.7888	3.9532	6.6357	8.4008	7.1953	6.281	1.574	1.8495
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0.712592	0.727839	0.721666	0.725249	0.719605	0.725834	0.730297	0.727253	0.725769	0.709769	0.710295
2σ	2	5	2	6	3	14	15	13	12	4	3
$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	0.7095	0.7095	0.7107	0.7101	0.7108	0.7107	0.7112	0.7109	0.7115	0.7063	0.7062
$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	0.1061	0.0856	0.1105	0.0874	0.1083	0.1245	0.1215	0.1153	0.1201	0.0776	0.078
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	0.512286	0.512264	0.512177	0.512269	0.512179	0.512213	0.512253	0.512227	0.512263	0.512408	0.512421
2σ	5	4	3	4	3	12	9	9	9	2	1
$\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$	-5.1	-5.1	-7.3	-5.0	-7.2	-6.8	-6.0	-6.4	-5.8	-2.1	-1.9
$t_{2\text{DM}}(\text{Ga})$	1.36	1.36	1.54	1.35	1.53	1.50	1.44	1.47	1.42	1.12	1.10
数据来源	本文					Wang <i>et al.</i> , 2003				本文	

注:引自 Wang *et al.* (2003) 的 Sr-Nd 同位素数据的相关计算值均采用本文 3 个定年样品的平均年龄 157Ma 计算

低 LOI 值的 10 个样品中,除一个样品的 A/CNK 值为 1.01 外,其他 9 个样品的 A/CNK 值为 0.79 ~ 0.97 (表 3),属于准铝质花岗岩, K_2O 含量为 3.50% ~ 5.31%,具高钾特征 (图 8a; 表 3)。CaO、MgO、 FeO^T 、 Al_2O_3 、 TiO_2 、 P_2O_5 与 SiO_2 都呈负相关关系 (图 8c-h), K_2O 、 Na_2O 与 SiO_2 的线性关系不明显 (图 8a, b)。

宝山花岗闪长斑岩的 ΣREE 值为 $124 \times 10^{-6} \sim 271 \times 10^{-6}$, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值为 6.6 ~ 30.6, Eu/Eu^* 值在 0.57 ~ 0.80 之间。在稀土元素球粒陨石标准化配分曲线图中,以轻重稀土分异强烈、富集轻稀土、亏损重稀土、重稀土较为平坦、微弱的 Eu 负异常为特征 (图 9a)。在微量元素蛛网图上,富集 K、Rb、Ba、Th 等大离子亲石元素,亏损 Nb、Ta、Ti 等元素 (图 9b)。Nb/Ta 比值为 10.2 ~ 12.6,平均值为 11.3,类似地壳 Nb/Ta 比值 11 (Taylor and McLennan, 1985)。

3.4.2 暗色包体

宝山暗色包体的 SiO_2 含量变化较小,为 55.46% ~ 57.30%, A/CNK 值为 0.65 ~ 0.76 (表 3),属于准铝质岩石, K_2O 含量为 5.86% ~ 6.90%,具高钾特征 (图 8a、表 3)。 ΣREE 值为 $236 \times 10^{-6} \sim 239 \times 10^{-6}$, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值为 16.7 ~ 19.8, Eu/Eu^* 值为 0.73 ~ 0.77。在稀土元素球粒陨石标准化配分曲线图中,以轻重稀土分异强烈、富集轻稀土、亏损重稀土、重稀土较为平坦、微弱的 Eu 负异常为特征 (图 9a)。在微量元素蛛网图上,富集 K、Rb、Ba、Th 等大离子亲石元素,亏损 Nb、Ta、Ti 等元素 (图 9b)。Nb/Ta 比值为 15.1 ~ 15.6,平均值为 15.3,较接近原始地幔比值 17.4 (Sun and McDonough, 1989)。

3.5 全岩 Sr-Nd 同位素

样品的初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值和 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值采用三个定年样品

的平均年龄 157Ma 计算,结果列于表 4。宝山花岗闪长斑岩的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值在 0.7095 ~ 0.7115 之间, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值在 -7.3 ~ -5.0 之间;暗色包体的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值在 0.7062 ~ 0.7063 之间, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值在 -2.1 ~ -1.9 之间;利用两阶段模式 (Liew and Hofmann, 1988) 计算出的花岗闪长斑岩的两阶段 Nd 同位素模式年龄 $t_{2\text{DM}}$ 值在 1.35 ~ 1.54Ga 之间,暗色包体的两阶段 Nd 模式年龄 $t_{2\text{DM}}$ 值在 1.10 ~ 1.12Ga 之间。

4 讨论

4.1 成岩年龄

前人曾对宝山矿区花岗闪长斑岩开展过同位素定年工作。Wang *et al.* (2003) 利用单颗粒锆石 U-Pb 稀释法测得花岗闪长斑岩年龄为 $173.3 \pm 1.9\text{Ma}$ ($n = 4$, $\text{MSWD} = 0.051$)。路远发等 (2006) 利用锆石 SHRIMP U-Pb 定年法获得的年龄为 $158 \pm 2\text{Ma}$ ($n = 12$, $\text{MSWD} = 0.26$); 全铁军等 (2012) 利用锆石 LA-ICP-MS 定年法测得年龄为 $165.3 \pm 3.3\text{Ma}$ ($n = 17$, $\text{MSWD} = 6.0$) 和 $180.5 \pm 2.0\text{Ma}$ ($n = 15$, $\text{MSWD} = 1.02$)。

从前人研究可以看出,这些年龄具有较大的变化范围和不确定性,导致无法对成岩年龄进行准确限定。本文对最新发现的暗色包体及两件寄主花岗闪长斑岩样品开展了锆石 LA-ICP-MS 定年工作,分别获得暗色包体的年龄为 $155.2 \pm 1.4\text{Ma}$,花岗闪长斑岩的年龄为 $157.7 \pm 1.1\text{Ma}$ 、 $156.7 \pm 1.4\text{Ma}$,两者在误差范围内一致。宝山暗色包体年龄的首次精确厘定,为准确限定宝山矿区花岗闪长斑岩的成岩年龄提供了重要的年代学依据,本次测年与路远发等 (2006) 所获得的宝山矿区花岗闪长斑岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄数据一致,表明 156 ~ 158Ma 是宝山花岗闪长斑岩的成岩年龄。另外,路远发等 (2006) 报道宝山矿床的辉钨矿 Re-Os 等时线年

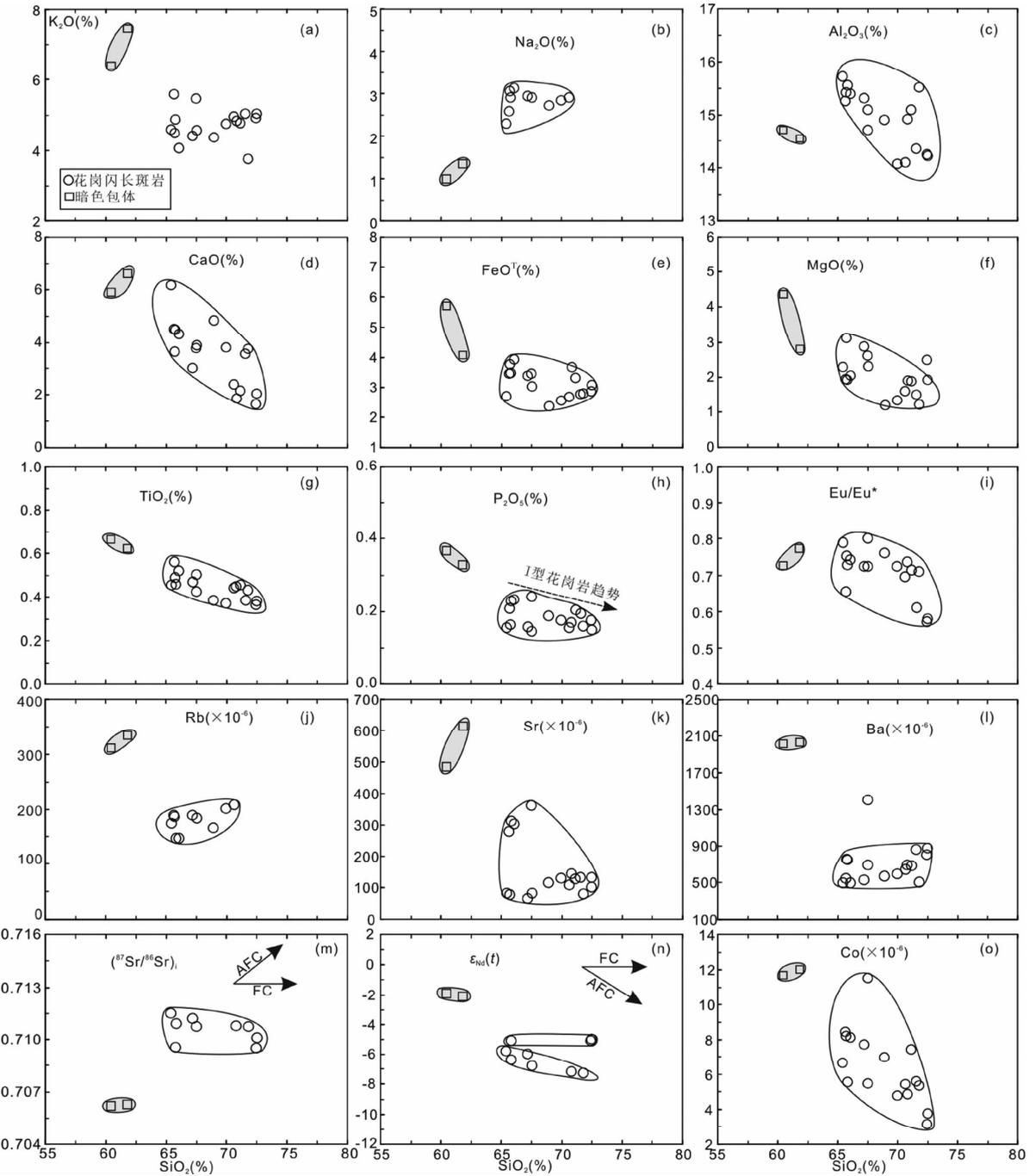


图 8 宝山花岗岩长斑岩及其暗色包体的 SiO_2 与主量元素 (%)、微量元素 ($\times 10^{-6}$) 和 Sr-Nd 同位素组成图解

图中 I 型花岗岩趋势线据 Chappell, 1999

Fig. 8 SiO_2 contents versus whole-rock major elements (%), selected trace elements ($\times 10^{-6}$), and Sr-Nd isotopic compositions for the Baoshan granodiorite porphyry and MME

龄为 $160 \pm 2\text{Ma}$ (模式年龄为 $158 \pm 1\text{Ma}$), 与花岗岩长斑岩的成岩年龄 ($156 \sim 158\text{Ma}$) 在误差范围内一致, 也表明宝山花岗岩长斑岩的形成年龄为 $\sim 157\text{Ma}$ 。

4.2 宝山岩体成因

花岗岩中的暗色包体蕴涵着丰富的岩浆起源与成因演

化等信息, 因而受到地质学家的广泛关注, 但对暗色包体的成因, 一直存在不同的认识, 主要有源岩残留体 (Chappell and White, 1991; White *et al.*, 1999)、围岩捕虏体 (Maas *et al.*, 1997; 彭卓伦等, 2011)、同源岩浆早阶段的析离体 (Dahlquist, 2002; Donaire *et al.*, 2005; 陈卫锋等, 2007) 以及注入长英质岩浆中的镁铁质岩浆固结而成 (Vernon, 1984;

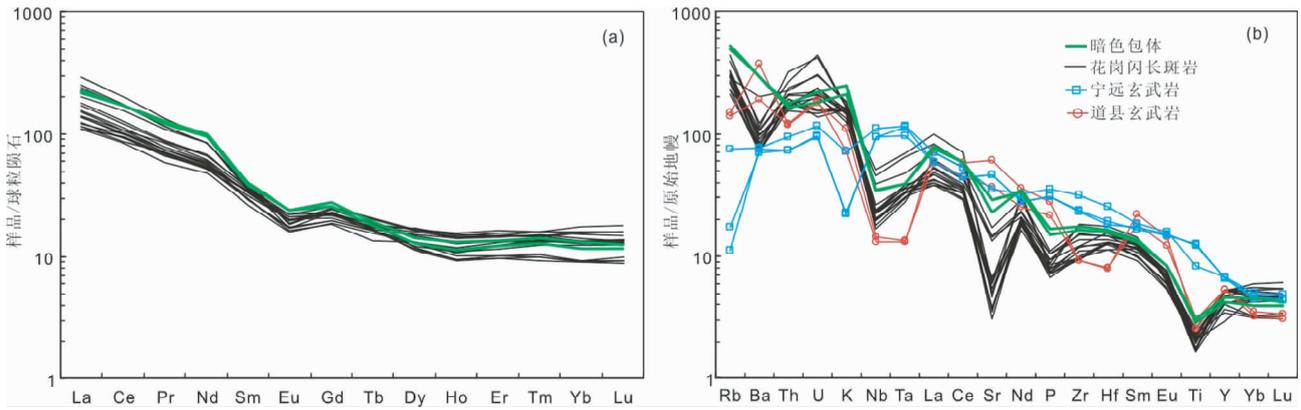


图9 宝山花岗闪长斑岩及其暗色包体的球粒陨石标准化稀土元素配分曲线图(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b) (球粒陨石和原始地幔标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

图中宁远、道县玄武岩数据引自 Li *et al.*, 2004

Fig. 9 Chondrite-normalized REE distribution patterns (a) and primitive mantle-normalized trace elements patterns (b) of the Baoshan granodiorite porphyry and MME (chondrite and primitive mantle values after Sun and McDonough, 1989)

Didier and Barbarin, 1991; Neves and Vauchez, 1995; Perugini *et al.*, 2003; Barbarin, 2005; Jiang *et al.*, 2009; Zhao *et al.*, 2010, 2012; 徐夕生等, 2004; 朱金初等, 2006a) 等观点。

宝山暗色包体年龄 (155.2 ± 1.4 Ma) 与寄主花岗闪长斑岩年龄 (156 ~ 158 Ma) 在误差范围内一致, 并且暗色包体中没有继承锆石的发现, 因此可以排除源岩残留或围岩捕虏体成因。暗色包体与寄主岩石的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值与 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值具有显著差异 (图 7、图 8m-n、图 10), 因此可排除暗色包体是同源岩浆早阶段析离体的可能。据 Swanson (1977) 和 Wyllie *et al.* (1962) 有关晶体成核生长理论、磷灰石形貌与结晶温度关系的实验可知, 含针状磷灰石和冷凝边结构的岩石包体是温度较高的岩浆与另一较冷岩浆不均一混合时过冷结晶的产物。暗色包体具浑圆的外形, 与寄主花岗闪长斑岩的接触界线清晰, 可见暗色的细粒冷凝边结构, 针状磷灰石特别发育, 长宽比可达 100 以上, 与寄主岩石正常结晶的短柱状磷灰石明显不同。这些证据说明暗色包体是注入长英质岩浆中的镁铁质岩浆固结而成, 为岩浆混合作用提供了直接证据。

4.2.1 暗色包体成因

宝山暗色包体的锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-12.1 \sim -4.7$, 具有很大的变化范围, 这种特征是封闭体系岩浆演化无法解释的, 而可能与岩浆演化过程中伴随的岩浆混合或围岩混染有关。在 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ - SiO_2 图解和 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ - SiO_2 图解中样品投影点呈近水平变化 (图 8n, m), 说明岩浆在演化过程中的同化混染作用并不明显。研究表明, 锆石具有一致的 U-Pb 年龄却有着变化很大的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值, 往往和起源于不同源区岩浆的混合作用有关 (Griffin *et al.*, 2002; Kemp *et al.*, 2007; Yang *et al.*, 2007)。因此, 岩浆混合作用很可能是宝山暗色包体形成的主要机制。在 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ - $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 图解中, 宝山暗色包体的值处在道县高 Mg 玄武岩与南岭前寒武纪地壳值之间,

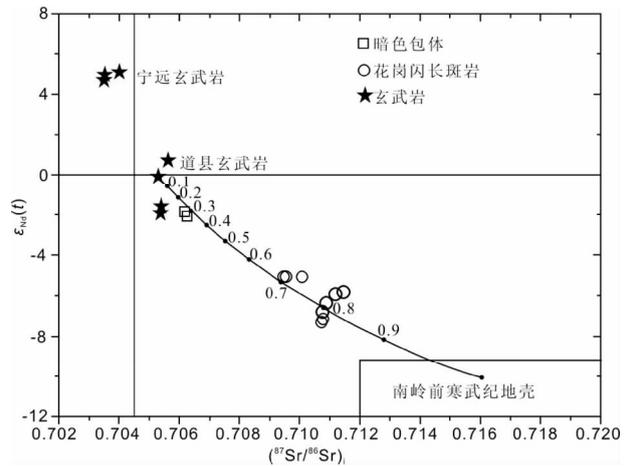


图 10 宝山花岗闪长斑岩及暗色包体的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ - $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 图解

图中宁远玄武岩数据引自 Li *et al.*, 2004; 道县玄武岩数据引自 Li *et al.*, 2004 和 Jiang *et al.*, 2009

Fig. 10 Sr-Nd isotopic diagram of the Baoshan granodiorite porphyry and MME

十分接近道县高 Mg 玄武岩的值 (图 10)。研究表明道县高 Mg 玄武岩可能起源于富集岩石圈地幔的部分熔融 (Li *et al.*, 2004)。因此, Sr-Nd 同位素特征显示宝山暗色包体很可能是来自富集岩石圈地幔的幔源岩浆与下地壳部分熔融形成的壳源熔体混合形成。宝山暗色包体的 V、Cr 等过渡元素和 Fe、Mg、P、Ti 等元素含量明显偏高 (表 3), Nb/Ta 比值接近原始地幔比值, 说明其岩浆源区可能主要来自地幔; 宝山暗色包体富集 K、Rb、Ba、Th 和 U 元素, 亏损 Nb、Ta、Ti 等元素, 与道县高 Mg 玄武岩的微量元素特征类似 (图 9b); 宝山暗色包体锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值相较寄主花岗闪长斑岩明显偏高, 部

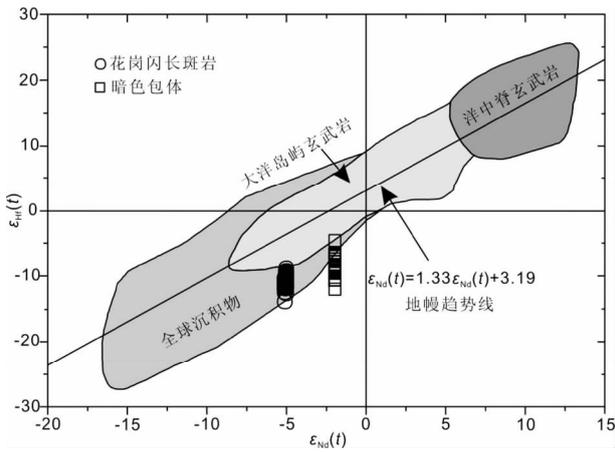


图 11 宝山花岗闪长斑岩及其暗色包体的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ - $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图解 (据 Vervoort *et al.*, 1999)

Fig. 11 Bulk-rock $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ versus zircon $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ diagram for the Baoshan granodiorite porphyry and MME (after Vervoort *et al.*, 1999)

分低值与寄主花岗闪长斑岩的值重合(图 6、图 11)。因此,这种微量元素和 Sr-Nd-Hf 同位素特征显示宝山暗色包体的物质来源可能只混入了较少的地壳物质,而以富集岩石圈地幔组分为主。许多研究表明,来自富集岩石圈地幔的岩浆通常具有轻重稀土分异强烈、富集大离子亲石元素和轻稀土元素、亏损高场强元素等地球化学特征(Fowler and Henney, 1996; Fowler *et al.*, 2001; Li *et al.*, 2004; Wang *et al.*, 2005, 2006; He *et al.*, 2010; He and Xu, 2012),这与宝山暗色包体的地球化学特征相一致。

宝山暗色包体具极高的 K_2O 含量,远高于寄主岩石,说明暗色包体的富集地幔源区本身可能富钾(如存在金云母或

富钾角闪石相)或者有外部富钾源加入。宝山暗色包体 K_2O 、 CaO 与 SiO_2 呈正相关性(图 8a, d), MgO 、 FeO^{T} 、 TiO_2 、 Al_2O_3 与 SiO_2 含量呈负相关性(图 8c, e-g),排除了暗色包体地幔源区存在金云母或者钾质角闪石相的可能性,说明地幔源区可能有外部富钾源加入。如前所述,宝山暗色包体来源于富集地幔,是注入长英质岩浆中的镁铁质岩浆固结而成,暗示岩浆源区较深,因此,这个富钾源区不可能直接来自上地壳的沉积物质,而可能是俯冲作用带入地壳深处的富钾沉积物。宝山暗色包体高钾,暗示了暗色包体的富集岩石圈地幔源区可能受到了与俯冲作用相关的富钾和大离子亲石元素的交代作用。前人研究表明在原始地幔蛛网图上具有 Nb-Ta 和 Ti 负异常特征的岩浆岩成因常与俯冲作用有关(Gill, 1981; Thirlwall *et al.*, 1994)。宝山暗色包体亏损 Nb、Ta、Ti 等元素并且在原始地幔标准化蛛网图中呈现明显的 Nb-Ta 和 Ti 负异常(图 9b),表明该富集岩石圈地幔源区可能受到了来源于俯冲板片的含水熔体的交代作用。宝山暗色包体 Hf-Nd 同位素解耦(图 11)也说明该富集地幔源区可能受到了与俯冲有关的沉积物来源熔体的交代(Jiang *et al.*, 2011)并且可能还有榴辉岩或者麻粒岩等古老地壳物质加入。

4.2.2 花岗闪长斑岩成因

宝山花岗闪长斑岩具有 I 型花岗岩的特征:(1)在矿物组成上,不含过铝质矿物,主要镁铁质矿物为黑云母,虽然本次研究工作的样品没有观察到角闪石,但前人报道有角闪石的存在(Wang *et al.*, 2002, 2003; 王岳军等, 2001; 全铁军等, 2012);(2) A/CNK 值主要为 0.79~0.97(表 3),属于准铝质花岗岩;(3) P_2O_5 含量随 SiO_2 的增加而降低(图 8h),具有 I 型花岗岩趋势(Chappell, 1999);(4)样品的 Th、Y 含量高(表 3),且 Th、Y 与 Rb 之间呈正相关(图 12a, b),具有 I 型花岗岩趋势(Chappell, 1999);(5)球粒陨石标准化稀土配分曲线

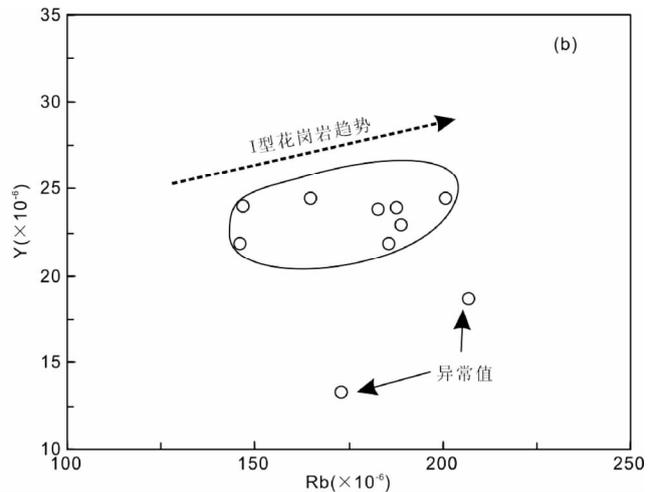
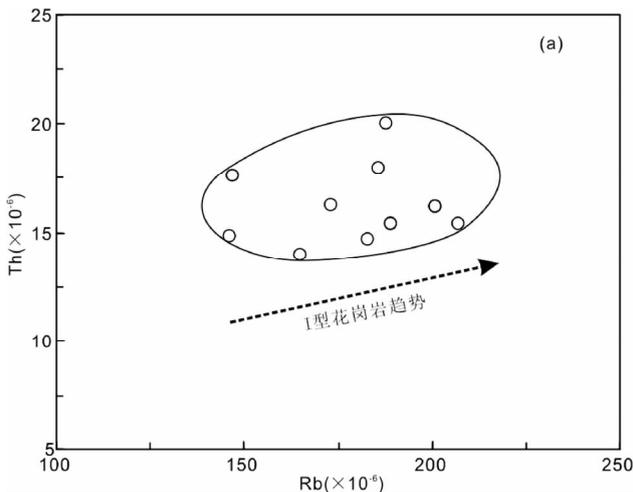


图 12 宝山花岗闪长斑岩的 Th-Rb(a) 和 Y-Rb(b) 图解
图中 I 型花岗岩趋势线据 Chappell, 1999

Fig. 12 Rb-Th (a) and Rb-Y (b) diagrams of the Baoshan granodiorite porphyry

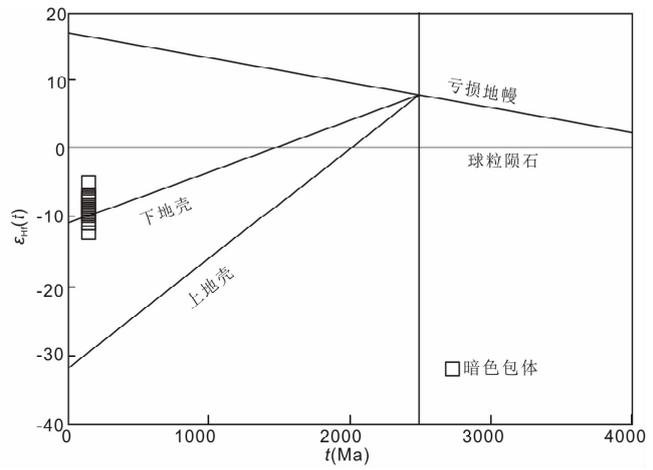
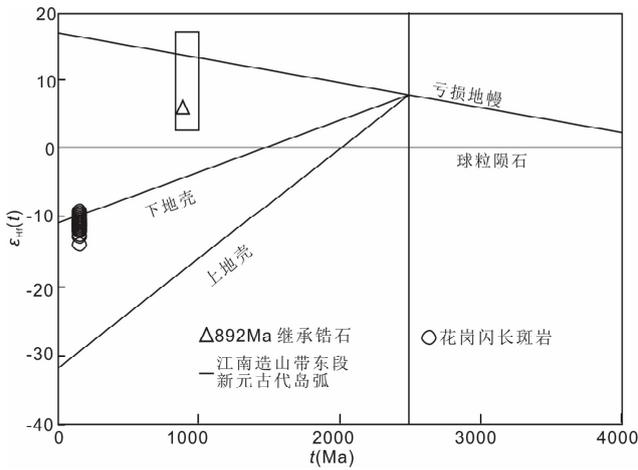


图 13 宝山花岗闪长斑岩及其暗色包体的锆石 Hf 同位素演化图解

图中江南造山带东段新元古代岛弧数据引自 Li *et al.*, 2009; 陈志洪等, 2009a, b; Wu *et al.*, 2006b

Fig. 13 Hf isotopic diagram of the Baoshan granodiorite porphyry and MME

呈明显的右倾形,轻重稀土分异明显,富集轻稀土(图 9a),显著富集 K、Rb、Th、U 等元素,亏损 Sr、Nb、P、Ti 等元素(图 9b),这些特征与南岭地区典型的 I 型花岗岩类似(于津海等, 2005)。

湘南零星分布有约 175Ma 左右喷发的宁远碱性玄武岩,约 150Ma 喷发的道县高 Mg 拉斑玄武岩(Li *et al.*, 2004),是该区存在燕山早期幔源岩浆活动的重要证据。宝山花岗闪长斑岩的($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 值和 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值与该区燕山早期玄武岩完全不同(图 10),排除了宝山花岗闪长斑岩起源于该玄武岩岩浆的结晶分异作用的可能。在 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ -($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 图解(图 10)中,宝山花岗闪长斑岩的值介于道县高 Mg 玄武岩与南岭前寒武纪地壳值之间;在 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ -SiO₂ 图解(图 8n)中,宝山花岗闪长斑岩的投影点与 AFC 趋势线一致,说明宝山花岗闪长斑岩可能与来自于富集岩石圈地幔的幔源基性岩浆受下地壳组分混染或与幔源基性岩浆和壳源的岩浆混合有关。宝山花岗闪长斑岩的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值普遍低于宝山暗色包体的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(图 6、图 13), $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(-7.3 ~ -5.0)与宝山暗色包体的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(-2.1 ~ -1.9)截然不同,两者化学成分变化不连续,说明宝山花岗闪长斑岩可能并非由中基性岩浆演化而来。为进一步评估幔源岩浆与壳源岩浆的混合比例,本文模拟计算了同位素两端元组分混合线。道县高 Mg 玄武岩作为一个幔源组分($\text{Sr} = 1207 \times 10^{-6}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.705298$, $\text{Nd} = 56 \times 10^{-6}$, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -0.1$, 数据来自 Jiang *et al.*, 2009),前寒武纪地壳作为一个壳源组分($\text{Sr} = 320 \times 10^{-6}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.716$, $\text{Nd} = 27 \times 10^{-6}$, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -10$; Sr、Nd 含量取平均上地壳值(Rudnick and Gao, 2003))。模拟表明,幔源岩浆要形成宝山花岗闪长斑岩这样的花岗质岩浆需要混染 70% ~ 80% 的地壳物质(图 10)。这样的过程显然是不合理的。因此,宝山花岗闪长斑岩不是幔源岩浆经地壳物质小规模混染形成,而很可能是幔源岩浆与大量下地

壳熔体混合的结果。

宝山花岗闪长斑岩富集轻稀土、亏损重稀土、重稀土较为平坦,这种稀土配分模式与华南典型陆壳改造型花岗岩所具有的“海鸥型”曲线(徐克勤等, 1989)显著不同,而类似于 Wang *et al.* (2003) 和郭春丽等(2010)报道的南岭地区具有壳幔混合成因的花岗闪长质岩石,也暗示了其具有壳幔混合成因。近年研究表明,具 I 型花岗岩特征的准铝或弱过铝质花岗岩,可能由底侵的基性岩浆加热熔融地壳物质所致,花岗岩形成过程中有幔源岩浆的加入(Kemp *et al.*, 2005a, b, 2007; Wang *et al.*, 2007; Zhu *et al.*, 2009; He *et al.*, 2010; 罗兰等, 2010)。宝山花岗闪长斑岩具 I 型花岗岩特征,属于准铝质花岗岩,进一步暗示了宝山花岗闪长斑岩可能是幔源岩浆与大量下地壳熔体混合的结果。宝山花岗闪长斑岩富集 K、Rb、U 等大离子亲石元素,亏损 Nb、Ti、P 等元素,平均 Nb/Ta 比值(11.3)类似地壳值 11(Taylor and McLennan, 1985);其二阶段 Nd 模式年龄(1.35 ~ 1.54Ga)低于华夏陆块变质基底岩石的年龄(1.8 ~ 2.2Ga; 陈江峰等, 1999),也都说明宝山花岗闪长斑岩的物源有幔源物质的加入。这与其他研究者提出的南岭地区中酸性侵入岩形成过程中存在着幔源与壳源岩浆混合作用的认识是一致的(Wang *et al.*, 2003; Jiang *et al.*, 2006, 2009; Zhao *et al.*, 2010, 2012; 付建明等, 2004a, b, 2006; 柏道远等, 2005; 于津海等, 2005; 朱金初等, 2006a, b, 2008; 蒋少涌等, 2008b; 章荣清等, 2010)。

宝山花岗闪长斑岩 Eu/Eu^* 与 SiO₂ 含量呈弱的负相关(图 8i),在球粒陨石标准化稀土元素配分模式图中 Eu 负异常并不明显(图 9a), Rb、Sr 和 Na₂O 含量随着 SiO₂ 含量增大没有明显变化(图 8b, j, k),说明岩浆演化过程中斜长石分离结晶不显著。K₂O 和 Ba 含量随着 SiO₂ 含量增大没有明显变化(图 8a, l),说明钾长石在岩浆演化过程中没有发生分离结晶。MgO、FeO^T、CaO、Al₂O₃ 及 Co 与 SiO₂ 含量呈负相关

性(图 8c-f, o),说明岩浆演化过程中可能发生了黑云母、角闪石等镁铁质矿物的分离结晶;宝山花岗闪长斑岩富集轻稀土、亏损重稀土、重稀土较为平坦(图 9a),说明岩浆演化过程中可能存在角闪石的分离结晶。这与宝山岩体中存在角闪石斑晶(Wang *et al.*, 2003; 全铁军等, 2012)的事实相一致。

在岩浆演化过程中,角闪石发生了分离结晶,而斜长石分离结晶不明显,这种情况的出现需要岩浆具有较高的水含量,从而使角闪石能够稳定存在,并抑制斜长石结晶(Richards *et al.*, 2001; Annen *et al.*, 2006)。Burnham (1979)曾估计角闪石只有在水含量大于 3% 的情况下才能从硅酸盐熔体中结晶,而早期近液相线角闪石斑晶的结晶分离,则需要岩浆中水含量大于 4% (Naney, 1983; Rutherford and Devine, 1988)。上述证据说明宝山花岗闪长斑岩是由富水富钾的岩浆演化形成。根据 Watson and Harrison (1983) 提出的公式计算出的宝山花岗闪长斑岩的锆石饱和温度为 712 ~ 760°C (表 3)。本次工作中发现有新元古代、中元古代继承锆石核的存在,说明源区以及岩浆上升侵入过程中,岩浆熔体中 Zr 是饱和的。前人许多研究也表明湘南地区的中酸性岩体中也存在新元古代至新太古代继承锆石核(Wei *et al.*, 2007; Jiang *et al.*, 2009; 付建明等, 2004a, b; 马铁球等, 2005; 赵葵东等, 2006; 朱金初等, 2009)。因此,计算出的锆石饱和温度反映了岩浆形成的上限温度(Miller *et al.*, 2003)。

岩石学研究表明地壳低温($\leq 800^\circ\text{C}$)部分熔融产生岩浆时,需要源区有一定量水的加入(Best and Christiansen, 2001; Clemens and Watkins, 2001)。岩浆源区中的水可以来自于黑云母、白云母和钙质角闪石等含水矿物的脱水反应(Vielzeuf and Montel, 1994; Best and Christiansen, 2001),但只有白云母可在低于 800°C 的条件下发生脱水反应,并且白云母需达到一定的数量才能产生大规模的岩浆(Clemens and Vielzeuf, 1987; Patiño Douce and Harris, 1998)。宝山花岗闪长斑岩具有 I 型花岗岩的地球化学特征, Al_2O_3 含量小于 16%, 表明源岩不可能是富含白云母的泥质岩。因此,岩浆中的水可能主要来自俯冲带湿地幔部分熔融形成的幔源基性岩浆,这与形成宝山花岗闪长斑岩的混合岩浆的基性端元(暗色包体)是受到俯冲沉积物熔体交代的富集地幔相一致。

锆石 Hf 同位素能够为鉴别岩浆源区和具体的岩浆过程提供确定性的证据(吴福元等, 2007)。Li *et al.* (2009)通过对双溪坞火山岩研究,认为他们是新元古代典型的岛弧岩浆产物,获得双溪坞火山岩年龄为 890 ~ 970Ma, 锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值在 +11.0 ~ +15.3 之间, $t_{\text{DM}}(\text{Hf})$ 值在 0.72 ~ 1.40Ga 之间。Wu *et al.* (2006b)通过对扬子陆块东南缘新元古代花岗闪长岩的研究,认为花岗闪长岩中 $882 \pm 16\text{Ma}$ 的锆石继承于弧源火成岩,其 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化范围在 +2.89 ~ +11.08 之间, $t_{\text{DM}}(\text{Hf})$ 的变化范围为 0.99 ~ 1.32Ga。陈志洪等(2009a)系统地报道了江山-绍兴拼合带平水地区的高 Mg 闪长岩、富 Nb 玄武玢岩、斜长花岗岩的地球化学特征、锆石年代学和高 Mg

闪长岩和斜长花岗岩的 Hf 同位素组成,其中高 Mg 闪长岩和斜长花岗岩的锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值范围分别为 +8.6 ~ +13.2 和 +11.0 ~ +16.2, $t_{\text{DM}}(\text{Hf})$ 值分别变化于 0.94 ~ 1.14Ga 和 0.81 ~ 1.01Ga, 认为扬子与华夏两大陆块之间存在 930 ~ 900Ma 残余洋壳(脊)的俯冲消减作用,生成了新元古代早期江绍拼合带平水段的特殊岛弧岩浆活动。陈志洪等(2009b)对浙江平水群角斑质岩石进行了研究,获得年龄为 904 ~ 906Ma, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值在 +8.6 ~ +15.4 之间, $t_{\text{DM}}(\text{Hf})$ 值变化范围为 0.84 ~ 1.11Ga, 提出华南在新元古代早期(约 1000 ~ 900Ma)局部可能存在年轻岛弧地壳生长事件。宝山花岗闪长斑岩中存在 $892 \pm 20\text{Ma}$ 的继承锆石核,其 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 +6.0, $t_{\text{DM}}(\text{Hf})$ 为 1.21Ga, 与江南造山带东段新元古代岛弧岩浆的 Hf 同位素特征(图 13)一致,说明其岩浆源区或上升通道可能存在新元古代岛弧物质。

综合对宝山花岗闪长斑岩的研究可见,花岗闪长斑岩的岩浆由俯冲形成的湿富集地幔部分熔融形成的基性岩浆侵入下地壳,诱发古老壳源物质(包含有新元古代岛弧物质)的部分熔融,富水富钾基性岩浆与古老下地壳发生部分熔融形成的长英质岩浆混合,最终产生宝山高钾的花岗闪长质岩浆。

4.3 构造意义

近年来,对南岭地区岩浆岩研究表明,燕山早期(190 ~ 150Ma)是一个非常重要的岩浆活动期,大量岩浆岩产于伸展的构造背景下:(1)燕山早期玄武岩岩浆活动,规模较小但分布较为广泛。如湘南 174 ~ 177Ma 的宁远-新田碱性玄武岩(Li *et al.*, 2004; 赵振华等, 1998)、宜章约 180Ma 的长城岭拉斑玄武岩(赵振华等, 1998)和约 150Ma 喷发的道县虎子岩高 Mg 低 Ti 玄武岩(Li *et al.*, 2004)、赣中吉安 168Ma 的安塘碱性玄武岩(王岳军等, 2004)、闽西南永定盆地 175Ma 的潘坑拉斑玄武岩(Zhou *et al.*, 2005)。(2)158 ~ 179Ma 的双峰式火山-侵入杂岩(陈培荣等, 1999, 2002),分布在南岭东段赣南寻乌县的白面石和菖蒲、龙南县的东坑盆地和临江盆地以及闽西南永定县潘坑盆地中。(3)燕山早期 A 型花岗岩。如赣南 189Ma 的柯树北 A 型花岗岩(Li and Li, 2007)、176Ma 的寨背 A₂ 型花岗岩(陈培荣等, 1998)、178Ma 的陂头 A₂ 型花岗岩(范春方和陈培荣, 2000)、广东 158Ma 的南昆山 A₁ 型花岗岩(Li *et al.*, 2007)、十-杭带南带湘南-桂北段成岩年龄为 151 ~ 163Ma 的 A 型花岗岩带(包括千里山、骑田岭、西山、金鸡岭、花山和姑婆山等岩体)(蒋少涌等, 2008b, 朱金初等, 2008, 2011)。(4)158 ~ 165Ma 的桂东南裂谷型钾玄质侵入岩(李献华等, 1999)及桂东南、赣南约 160Ma 的具有 OIB 特征的正长岩(Li *et al.*, 2003, 2004)。此外,众多学者对十-杭带南带花岗岩研究后,认为该带是中生代岩石圈伸展和壳幔相互作用的结果(Gilder *et al.*, 1996; Chen and Jahn, 1998; Hong *et al.*, 1998; Jiang *et al.*, 2009; Zhao *et al.*, 2010, 2012; 陈江峰等, 1999; 洪大卫等, 2002; 柏道远等, 2005; 付建

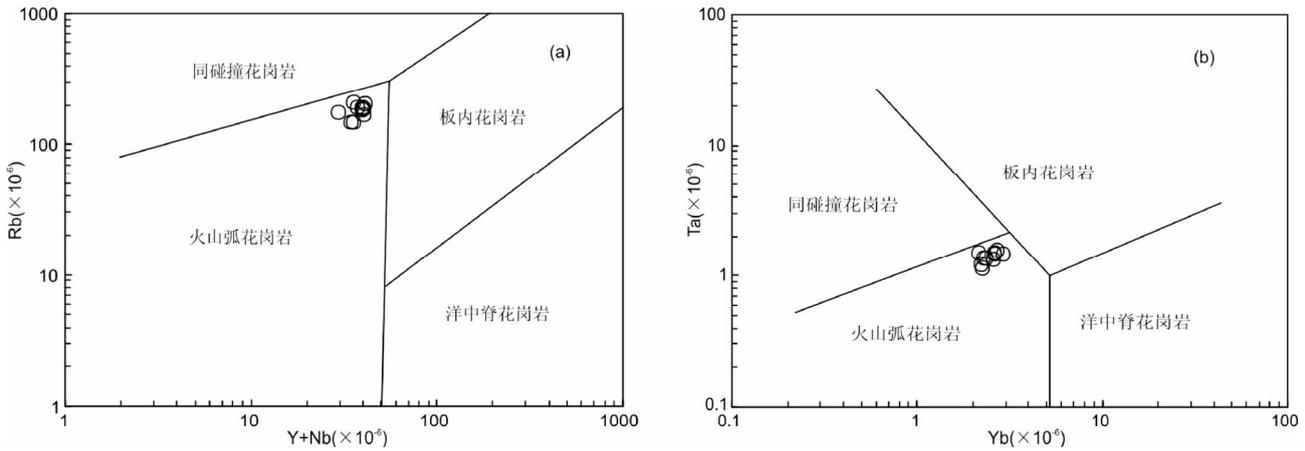


图 14 宝山花岗闪长斑岩的 Rb-(Y + Nb) (a) 和 Ta-Yb (b) 图解 (据 Pearce *et al.*, 1984)

Fig. 14 Rb-(Y + Nb) (a) and Ta-Yb (b) diagrams for the Baoshan granodiorite porphyry (after Pearce *et al.*, 1984)

明等, 2006; 朱金初等, 2008; 蒋少涌等, 2008b; 郭春丽等, 2010)。宝山矿区地处南岭中段湘南矿集区的中西部, 位于十-杭带南带上。宝山花岗闪长斑岩成岩年龄 (156 ~ 158Ma) 处在南岭燕山早期发生大规模花岗质岩浆活动时间 (165 ~ 150Ma) 内 (李献华等, 2007), 与南岭岩石圈伸展构造时间 (190 ~ 150Ma) 相吻合。因此, 宝山花岗闪长斑岩与南岭地区其他燕山早期花岗岩类岩石一样, 均形成于岩石圈伸展的构造背景。

宝山花岗闪长斑岩属于高钾钙碱性花岗岩 (Wang *et al.*, 2003; 全铁军等, 2012), 而高钾钙碱性岩浆的形成与俯冲作用有关 (Jiang *et al.*, 2009, 2010, 2011, 2013; Zhou *et al.*, 2012; Jia *et al.*, 2012; Guo *et al.*, 2013), 暗示了宝山花岗闪长斑岩的形成可能与俯冲作用有关。Pearce *et al.* (1984) 发现与岛弧有密切关系的花岗岩类具有低的 Rb 和 Y + Nb 含量以及 Ta 和 Yb 含量。在 Rb-(Y + Nb) 和 Ta-Yb 图解中, 宝山花岗闪长斑岩样品的投影点均位于火山弧花岗岩范围内 (图 14), 表明宝山岩体形成于俯冲背景下。如前所述, 宝山暗色包体的富集岩石圈地幔源区可能受到了来源于俯冲板片的含水熔体的交代作用, 而宝山花岗闪长斑岩的形成也与俯冲形成的湿富集地幔部分熔融形成的基性岩浆底侵有关。研究表明, 在 ~ 180Ma 古太平洋板块已俯冲到中国大陆底部, 区域构造体制即为伸展 (Jahn *et al.*, 1990; Zhou and Li, 2000; Zhou *et al.*, 2006; Li *et al.*, 2006; Li and Li, 2007; Jiang *et al.*, 2009; Zhao *et al.*, 2012; 张岳桥等, 2007, 2009, 2012; 徐先兵等, 2009)。因此, 宝山花岗闪长斑岩的形成应该与古太平洋板块俯冲有关的伸展-减薄的构造环境有关, 而不是全铁军等 (2012) 认为的形成于燕山早期挤压构造体制下地壳发生增厚熔融。由于古太平洋板块俯冲作用, 南岭地区在 190 ~ 150Ma 时期属于古太平洋板块俯冲引起的伸展-减薄构造带的一部分, 随着地幔上涌, 部分熔融产生玄武质岩浆, 这些高温岩浆底侵至老地壳源区, 诱发地壳发生深融作用, 部分熔融产生长英质岩浆, 并发生复杂的壳幔混合作用, 产生花

岗质岩浆 (如本文宝山花岗质岩浆)。

江南造山带是扬子和华夏陆块在新元古代的弧陆碰撞结合带 (Wu *et al.*, 2006b; Zheng *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2008; Li *et al.*, 2009), 江山-绍兴断裂是两陆块结合的边界 (Zhang *et al.*, 2005), 这条边界从萍乡向南延伸的位置存在较大分歧: 一些研究者认为其南延部分与郴州-临武断裂相接 (Hong *et al.*, 1998; Wang *et al.*, 2003, 2008; 黄标等, 1993; 朱炳泉等, 1995; 洪大卫等, 2002; 杨明桂等, 2009); 饶家荣等 (1993) 提出从万载进入湖南后, 经浏阳、长沙、雪峰隆起带南缘, 以桃江-城步断裂带为界; 陈心才 (1996) 提出从宜春进入湖南后, 经衡阳、永州至广西的北部湾; 饶家荣等 (2012) 提出两大陆块的北西边界大致从南昌, 经湖南大围山、沅山、城步至广西河池一线, 而其南东边界大致经萍乡、衡东、双牌进入广西的桂林、柳州一线。宝山花岗闪长斑岩中 $892 \pm 20\text{Ma}$ 的继承锆石核年龄与江南造山带东段岛弧岩浆的年龄 (882 ~ 970Ma) 一致, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 (+6.0) 和 $t_{\text{DM}}(\text{HF})$ 值 (1.21Ga) 均处于江南造山带东段新元古代岛弧岩浆岩 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 (+2.89 ~ +16.2) 和 $t_{\text{DM}}(\text{HF})$ 值 (0.72 ~ 1.40Ga) (Wu *et al.*, 2006b; Li *et al.*, 2009; 陈志洪等, 2009a, b) 范围内。上述特征表明宝山地区可能存在类似于江南造山带东段的新元古代岛弧岩浆活动, 扬子与华夏陆块弧陆碰撞带可能延伸到了宝山地区, 暗示新元古代岛弧岩浆带及扬子与华夏陆块弧陆碰撞带的南延部分可能与郴州-临武断裂相接。

5 结论

(1) LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年表明, 宝山矿区花岗闪长斑岩的成岩年龄为 156 ~ 158Ma, 与暗色包体的年龄 $155.2 \pm 1.4\text{Ma}$ 一致。

(2) 岩石地球化学、Sr-Nd-Hf 同位素研究表明, 宝山花岗闪长斑岩为准铝质花岗岩, 由来自经俯冲沉积物熔体交代过

的富集岩石圈地幔且富水富钾的底侵的基性岩浆与由其引起的下地壳部分熔融形成的长英质岩浆发生混合形成。892 ± 20Ma 的继承锆石核的存在, 表明宝山花岗闪长质岩浆形成过程中有新元古代岛弧岩浆岩加入。

(3) 岩石地球化学、Sr-Nd-Hf 同位素研究表明, 暗色包体是由来自于经俯冲沉积物熔体交代过的富水富钾的富集岩石圈地幔的基性岩浆和少量下地壳部分熔融形成的长英质岩浆发生混合形成。

(4) 宝山花岗闪长斑岩中 892 ± 20Ma 继承锆石核的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 +6.0, $t_{\text{DM}}(\text{Hf})$ 年龄为 1.21Ga, 与江南造山带东段新元古代岛弧岩浆的 Hf 同位素特征一致, 暗示了宝山地区可能存在类似于江南造山带东段的新元古代岛弧岩浆活动, 表明新元古代岛弧岩浆带及扬子与华夏陆块弧陆碰撞带从萍乡向南延伸部分可能与郴州-临武断裂相接。

References

Amelin Y, Lee DC, Halliday AN *et al.* 1999. Nature of the Earth's earliest crust from hafnium isotopes in single detrital zircons. *Nature*, 399(6733): 252–255

Annen C, Blundy JD and Sparks RSJ. 2006. The genesis of intermediate and silicic magmas in deep crustal hot zones. *Journal of Petrology*, 47(3): 505–539

Bai DY, Chen JC, Ma TQ *et al.* 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)

Barbarin B. 2005. Mafic magmatic enclaves and mafic rocks associated with some granitoids of the central Sierra Nevada batholith, California; Nature, origin, and relations with the hosts. *Lithos*, 80(1–4): 155–177

Best MG and Christiansen EH. 2001. *Igneous Petrology*. Oxford: Blackwell Science, 1–480

Bouvier A, Vervoort JD and Patchett PJ. 2008. The Lu-Hf and Sm-Nd isotopic composition of CHUR; Constraints from unequilibrated chondrites and implications for the bulk composition of terrestrial planets. *Earth and Planetary Science Letters*, 273(1–2): 48–57

Bureau of Geology and Mineral Resources of Hunan Province. 1988. *Region Geology of Hunan Province*. Beijing: Geological Publishing House, 1–719 (in Chinese with English abstract)

Burnham CW. 1979. Magmas and hydrothermal fluids. In: Barnes HL (ed.). *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. 2nd Edition. New York: John Wiley & Sons, 71–136

Chappell BW and White AJR. 1991. Restite enclaves and the restite model. In: Didier J and Barbarin B (eds.). *Enclaves and Granite Petrology*. Elsevier; Amsterdam, 375–381

Chappell BW. 1999. Aluminium saturation in I- and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites. *Lithos*, 46(3): 535–551

Chen JF and Jahn BM. 1998. Crustal evolution of southeastern China: Nd and Sr isotopic evidence. *Tectonophysics*, 284(1–2): 101–133

Chen JF, Guo XS, Tang JF *et al.* 1999. Nd isotopic model ages: Implications of the growth of the continental crust of southeastern China. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 35(6): 649–658 (in Chinese with English abstract)

Chen PR, Zhang BT, Kong XG *et al.* 1998. Geochemical characteristics and tectonic implication of Zhaipei A-type granitic intrusives in South Jiangxi Province. *Acta Petrologica Sinica*, 14(3): 289–298 (in Chinese with English abstract)

Chen PR, Kong XG, Wang YX *et al.* 1999. Rb-Sr isotopic dating and

significance of early Yanshanian bimodal volcanic-intrusive complex from South Jiangxi Province. *Geological Journal of China Universities*, 5(4): 378–383 (in Chinese with English abstract)

Chen PR, Hua RM, Zhang BT *et al.* 2002. Early Yanshanian post-orogenic granitoids in the Nanling region; Petrological constraints and geodynamic settings. *Science in China (Series D)*, 45(8): 755–768

Chen WF, Chen PR, Huang HY *et al.* 2007. Chronological and geochemical studies of granite and enclave in Baimashan pluton, Hunan, South China. *Science in China (Series D)*, 50(11): 1606–1627

Chen XC. 1996. A preliminary study on tectonics of South China. In: *New Development of Hunan Geoscience*. Changsha: Hunan Science and Technology Press, 155–158 (in Chinese)

Chen YC, Pei RF, Zhang HL *et al.* 1989. *Geology of Non-ferrous and Raremetal Deposits Related with Mesozoic Granitoids in the Nanling Area*. Beijing: Geological Publishing House, 1–508 (in Chinese)

Chen YC and Wang TH. 2012. Four main topics concerning the metallogeny related to Mesozoic magmatism in South China. *Geotectonica et Metallogenia*, 36(3): 315–321 (in Chinese with English abstract)

Chen ZH, Guo KY, Dong YG *et al.* 2009a. Possible early Neoproterozoic magmatism associated with slab window in the Pingshui segment of the Jiangshan-Shaoxing suture zone; Evidence from zircon LA-ICP-MS U-Pb geochronology and geochemistry. *Science in China (Series D)*, 52(7): 925–939

Chen ZH, Xing GF, Guo KY *et al.* 2009b. Petrogenesis of keratophyes in the Pingshui Group, Zhejiang; Constraints from zircon U-Pb ages and Hf isotopes. *Chinese Science Bulletin*, 54(9): 1570–1578

Clemens JD and Vielzeuf D. 1987. Constraints on melting and magma production in the crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 86(2–4): 287–306

Clemens JD and Watkins JM. 2001. The fluid regime of high-temperature metamorphism during granitoid magma genesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 140(5): 600–606

Dahlquist JA. 2002. Mafic microgranular enclaves: Early segregation from metaluminous magma (Sierra de Chepes), Pampean Ranges, NW Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*, 15(6): 643–655

Department of Geology, Nanjing University. 1981. *Granites of Different Ages in South China and Their Metallogenic Relations*. Beijing: Science Press, 1–395 (in Chinese)

Didier J and Barbarin B. 1991. *Enclaves and Granite Petrology, Developments in Petrology*. Amsterdam: Elsevier, 1–625

Ding HC. 1994. Study on occurrence of associated gold of single copper ore in Baoshan Pb-Zn-Ag deposit, Guiyang County, Hunan. *Mining Geology*, 15(1): 47–52 (in Chinese)

Donaire T, Pascual E, Pin C *et al.* 2005. Microgranular enclaves as evidence of rapid cooling in granitoid rocks; The case of the Los Pedroches granodiorite, Iberian Massif, Spain. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 149(3): 247–265

Fan CF and Chen PR. 2000. Geochemical characteristics and tectonic implication of Beitou A-type granitic intrusive in South Jiangxi Province. *Geochimica*, 29(4): 358–366 (in Chinese with English abstract)

Fowler MB and Henney PJ. 1996. Mixed Caledonian appinite magmas: Implications for lamprophyre fractionation and high Ba-Sr granite genesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 126(1–2): 199–215

Fowler MB, Henney PJ, Darbyshire DPF *et al.* 2001. Petrogenesis of high Ba-Sr granites; The Rogart pluton, Sutherland. *Journal of the Geological Society*, 158(3): 521–534

Fu JM, Ma CQ, Xie CF *et al.* 2004a. Zircon SHRIMP dating of the Cailing granite on the eastern margin of the Qitianling granite, Hunan, South China, and its significance. *Geology in China*, 33(1): 96–100 (in Chinese with English abstract)

Fu JM, Ma CQ, Xie CF *et al.* 2004b. SHRIMP U-Pb zircon dating of the Jiuyishan composite granite in Hunan and its geological significance.

- Geotectonica et Metallogenia, 28(4): 370–378 (in Chinese with English abstract)
- Fu JM, Xie CF, Peng SB *et al.* 2006. Geochemistry and crust-mantle magmatic mixing of the Qitianling granites and their dark microgranular enclaves in Hunan Province. *Acta Geoscientia Sinica*, 27(6): 557–569 (in Chinese with English abstract)
- Gilder SA, Gill J, Coe RS *et al.* 1996. Isotopic and paleomagnetic constraints on the Mesozoic tectonic evolution of south China. *Journal of Geophysical Research*, 101(B7): 16137–16154
- Gill JB. 1981. *Orogenic Andesites and Plate Tectonics*. Berlin: Springer-Verlag, 1–358
- Granitoid Research Group of Nanling Project, MGMR. 1989. *Geology of Granitoids of Nanling Region and Their Petrogenesis and Mineralization*. Beijing: Geological Publishing House, 1–471 (in Chinese)
- Griffin WL, Pearson NJ, Belousova E *et al.* 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle; LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(1): 133–147
- Griffin WL, Wang X, Jackson SE *et al.* 2002. Zircon chemistry and magma mixing, SE China; In-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes. *Lithos*, 61(3–4): 237–269
- Guiyang Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences. 1979. *Geochemistry of Granitoids in South China*. Beijing: Science Press, 1–421 (in Chinese)
- Guo CL, Mao JW and Chen YC. 2010. SHRIMP zircon U-Pb dating, geochemistry, Sr-Nd-Hf isotopic analysis of the Yingqian intrusion in Jiangxi Province, South China and its geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 26(3): 919–937 (in Chinese with English abstract)
- Guo CL, Chen YC, Li CB *et al.* 2011. Zircon SHRIMP U-Pb dating, geochemistry, Sr-Nd isotopic analysis of the Late Jurassic granitoids in the Jiulongnao W-Sn-Pb-Zn ore-concentrated areas in Jiangxi Province and their geological significance. *Acta Geologica Sinica*, 85(7): 1188–1205 (in Chinese with English abstract)
- Guo WM, Lu JJ, Jiang SY *et al.* 2013. Chronology, Hf isotopes, geochemistry, and petrogenesis of the magmatic rocks in the Shizishan ore field of Tongling, Anhui Province. *Science China (Earth Sciences)*, 56(6): 993–1013
- Hawkesworth CJ, Turner SP, McDermott F *et al.* 1997. U-Th isotopes in arc magmas; Implications for element transfer from subducted crust. *Science*, 276(5312): 551–555
- He ZY, Xu XS and Niu YL. 2010. Petrogenesis and tectonic significance of a Mesozoic granite-syenite-gabbro association from inland South China. *Lithos*, 119(3–4): 621–641
- He ZY and Xu XS. 2012. Petrogenesis of the Late Yanshanian mantle-derived intrusions in southeastern China; Response to the geodynamics of paleo-Pacific plate subduction. *Chemical Geology*, 328: 208–221
- Hong DW, Xie XL and Zhang JS. 1998. Isotope geochemistry of granitoids in South China and their metallogeny. *Resource Geology*, 48(4): 251–263
- Hong DW, Xie XL and Zhang JS. 2002. Geological significance of the Hangzhou-Zhuguangshan-Huashan high $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ granite belt. *Regional Geology of China*, 21(6): 348–354 (in Chinese with English abstract)
- Hong DW, Wang T and Tong Y. 2007. An outline about granitoids in China. *Geological Review*, 53(Suppl. 1): 9–16 (in Chinese with English abstract)
- Hoskin PWO and Ireland RT. 2000. Rare earth element chemistry of zircon and its use as a provenance indicator. *Geology*, 28(7): 627–630
- Hou KJ, Li YH, Zou TR *et al.* 2007. Laser ablation-MC-ICP-MS technique for Hf isotope microanalysis of zircon and its geological applications. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2595–2604 (in Chinese with English abstract)
- Hou ZQ, Zhang HR, Pan XF *et al.* 2011. Porphyry Cu (-Mo-Au) deposits related to melting of thickened mafic lower crust; Examples from the eastern Tethyan metallogenic domain. *Ore Geology Reviews*, 39(1–2): 21–45
- Hu RZ, Mao JW, Fan WM *et al.* 2010. Some scientific questions on the intra-continental metallogeny in the South China continent. *Earth Science Frontiers*, 17(2): 13–26 (in Chinese with English abstract)
- Hu ZC, Liu YS, Chen L *et al.* 2011. Contrasting matrix induced elemental fractionation in NIST SRM and rock glasses during laser ablation ICP-MS analysis at high spatial resolution. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 26(2): 425–430
- Hua RM and Mao JW. 1999. A preliminary discussion on the Mesozoic metallogenic explosion in East China. *Mineral Deposits*, 18(4): 300–308 (in Chinese with English abstract)
- Hua RM, Chen PR, Zhang WL *et al.* 2003. Metallogenic systems related to Mesozoic and Cenozoic granitoids in South China. *Science in China (Series D)*, 46(8): 816–829
- Hua RM, Chen PR, Zhang WL *et al.* 2005. Metallogenesis and their geodynamic settings related to Mesozoic granitoids in the Nanling Range. *Geological Journal of China Universities*, 11(3): 291–304 (in Chinese with English abstract)
- Hua RM, Li GL, Zhang WL *et al.* 2010. A tentative discussion on differences between large-scale tungsten and tin mineralizations in South China. *Mineral Deposits*, 29(1): 9–23 (in Chinese with English abstract)
- Huang B, Xu KQ, Sun MZ *et al.* 1993. Features and collisional mountain building environment of metasomatic transformation type granitic rocks in middle Wuyi Mountains. *Acta Petrologica Sinica*, 9(4): 388–400 (in Chinese with English abstract)
- Humphris SE and Thompson G. 1978. Trace element mobility during hydrothermal alteration of oceanic basalts. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 42(1): 127–136
- Jahn BM, Zhou XH and Li JL. 1990. Formation and tectonic evolution of southeastern China and Taiwan; Isotopic and geochemical constraints. *Tectonophysics*, 183(1–4): 145–160
- Jia RY, Jiang YH, Liu Z *et al.* 2012. Petrogenesis and tectonic implications of Early Silurian high-K calc-alkaline granites and their potassic microgranular enclaves, western Kunlun orogen, NW Tibetan Plateau. *International Geology Review*, 55(8): 958–975
- Jiang SY, Wang RC, Xu XS *et al.* 2005. Mobility of high field strength elements (HFSE) in magmatic-, metamorphic-, and submarine-hydrothermal systems. *Physics and Chemistry of the Earth*, 30(17–18): 1020–1029
- Jiang SY, Li L, Zhu B *et al.* 2008a. Geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic compositions of granodiorite from the Wushan copper deposit, Jiangxi Province and their implications for petrogenesis. *Acta Petrologica Sinica*, 24(8): 1679–1690 (in Chinese with English abstract)
- Jiang SY, Zhao KD, Jiang YH *et al.* 2008b. Characteristics and genesis of Mesozoic A-type granites and associated mineral deposits in the southern Hunan and northern Guangxi Provinces along the Shi-Hang Belt, South China. *Geological Journal of China Universities*, 14(4): 496–509 (in Chinese with English abstract)
- Jiang YH, Jiang SY, Zhao KD *et al.* 2006. Petrogenesis of Late Jurassic Qianlishan granites and mafic dykes, Southeast China; Implications for a back-arc extension setting. *Geological Magazine*, 143(4): 457–474
- Jiang YH, Jiang SY, Dai BZ *et al.* 2009. Middle to Late Jurassic felsic and mafic magmatism in southern Hunan Province, southeast China; Implications for a continental arc to rifting. *Lithos*, 107(3–4): 185–204
- Jiang YH, Jin GD, Liao SY *et al.* 2010. Geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic constraints on the origin of Late Triassic granitoids from the Qinling orogen, Central China; Implications for a continental arc to continent-continent collision. *Lithos*, 117(1–4): 183–197
- Jiang YH, Zhao P, Zhou Q *et al.* 2011. Petrogenesis and tectonic implications of Early Cretaceous S- and A-type granites in the northwest of the Gan-Hang rift, SE China. *Lithos*, 121(1–4): 55–73
- Jiang YH, Jia RY, Liu Z *et al.* 2013. Origin of Middle Triassic high-K

- calc-alkaline granitoids and their potassic microgranular enclaves from the western Kunlun orogen, Northwest China: A record of the closure of Paleo-Tethys. *Lithos*, 156–159: 13–30
- Kemp AIS, Whitehouse MJ, Hawkesworth CJ *et al.* 2005a. A zircon U-Pb study of metaluminous (I-type) granites of the Lachlan Fold Belt, southeastern Australia: Implications for the high/low temperature classification and magma differentiation processes. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 150(2): 230–249
- Kemp AIS, Wormald RJ, Whitehouse MJ *et al.* 2005b. Hf isotopes in zircon reveal contrasting sources and crystallization histories for alkaline to peralkaline granites of Temora, southeastern Australia. *Geology*, 33(10): 797–800
- Kemp AIS, Hawkesworth CJ, Foster GL *et al.* 2007. Magmatic and crustal differentiation history of granitic rocks from Hf-O isotopes in zircon. *Science*, 315(5814): 980–983
- Li XH, Zhou HW, Liu Y *et al.* 2000. Shoshonitic intrusive suite in SE Guangxi; Petrology and geochemistry. *Chinese Science Bulletin*, 45(7): 653–659
- Li XH, Chen ZG, Liu DY *et al.* 2003. Jurassic gabbro-granite-syenite suites from southern Jiangxi Province, SE China: Age, origin, and tectonic significance. *International Geology Review*, 45(10): 898–921
- Li XH, Chung SL, Zhou HW *et al.* 2004. Jurassic intraplate magmatism in southern Hunan-eastern Guangxi; $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating, geochemistry, Sr-Nd isotopes and implications for the tectonic evolution of SE China. Geological Society, London, Special Publications, 226: 193–215
- Li XH, Li ZX, Li WX *et al.* 2006. Initiation of the Indosinian orogeny in South China: Evidence for a Permian magmatic arc on Hainan Island. *The Journal of Geology*, 114(3): 341–353
- Li XH, Li ZX, Li WX *et al.* 2007. U-Pb zircon, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic constraints on age and origin of Jurassic I- and A-type granites from central Guangdong, SE China: A major igneous event in response to foundering of a subducted flat-slab? *Lithos*, 96(1–2): 186–204
- Li XH, Li WX and Li ZX. 2007. On the genetic classification and tectonic implications of the Early Yanshanian granitoids in the Nanling Range, South China. *Chinese Science Bulletin*, 52(14): 1873–1885
- Li XH, Li WX, Li ZX *et al.* 2009. Amalgamation between the Yangtze and Cathaysia Blocks in South China: Constraints from SHRIMP U-Pb zircon ages, geochemistry and Nd-Hf isotopes of the Shuangxiwu volcanic rocks. *Precambrian Research*, 174(1–2): 117–128
- Li ZX and Li XH. 2007. Formation of the 1300 km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: A flat-slab subduction model. *Geology*, 35(2): 179–182
- Liew TC and Hofmann AW. 1988. Precambrian crustal components, plutonic associations, plate environment of the Hercynian fold belt of central Europe: Indications from a Nd and Sr isotopic study. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 98(2): 129–138
- Liu X, Fan HR, Santosh M *et al.* 2012. Remelting of Neoproterozoic relict volcanic arcs in the Middle Jurassic: Implication for the formation of the Dexing porphyry copper deposit, southeastern China. *Lithos*, 150: 85–100
- Liu YS, Hu ZC, Zong KQ *et al.* 2010a. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS. *Chinese Science Bulletin*, 55(15): 1535–1546
- Liu YS, Gao S, Hu ZC *et al.* 2010b. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1–2): 537–571
- Lu YF, Ma LY, Qu WJ *et al.* 2006. U-Pb and Re-Os isotope geochronology of Baoshan Cu-Mo polymetallic ore deposit in Hunan province. *Acta Petrologica Sinica*, 22(10): 2483–2492 (in Chinese with English abstract)
- Luo L, Jiang SY, Yang SY *et al.* 2010. Petrochemistry, zircon U-Pb dating and Hf isotopic composition of the granitic pluton in the Pengshan Sn-polymetallic orefield, Jiangxi Province. *Acta Petrologica Sinica*, 26(9): 2818–2834 (in Chinese with English abstract)
- Ma TQ, Bai DY, Kuang J *et al.* 2005. Zircon SHRIMP dating of the Xitian granite pluton, Chaling, southeastern Hunan, and its geological significance. *Geological Bulletin of China*, 24(5): 415–419 (in Chinese with English abstract)
- Maas R, Nicholls IA and Legg C. 1997. Igneous and metamorphic enclaves in the S-type Deddick granodiorite, Lachlan Fold Belt, SE Australia: Petrographic, geochemical and Nd-Sr isotopic evidence for crustal melting and magma mixing. *Journal of Petrology*, 38(7): 815–841
- Mao JW, Li HY and Pei RF. 1995. Nd-Sr isotopic and petrogenetic studies of the Qianlishan granite stock, Hunan Province. *Mineral Deposits*, 14(3): 235–242 (in Chinese with English abstract)
- Mao JW, Hua RM and Li XB. 1999. A preliminary study of large-scale metallogenesis and large clusters of mineral deposits. *Mineral Deposits*, 18(4): 291–299 (in Chinese with English abstract)
- Mao JW, Xie GQ, Li XF *et al.* 2004. Mesozoic large scale mineralization and multiple lithospheric extension in South China. *Earth Science Frontiers*, 11(1): 45–55 (in Chinese with English abstract)
- Mao JW, Xie GQ, Guo CL *et al.* 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)
- Mao JW, Xie GQ, Guo CL *et al.* 2008. Spatial-temporal distribution of Mesozoic ore deposits in South China and their metallogenic settings. *Geological Journal of China Universities*, 14(4): 510–526 (in Chinese with English abstract)
- Mao JW, Xie GQ, Cheng YB *et al.* 2009. Mineral deposit models of Mesozoic ore deposits in South China. *Geological Review*, 55(3): 347–354 (in Chinese with English abstract)
- Mao JW, Chen MH, Yuan SD *et al.* 2011. Geological characteristics of the Qinhang (or Shihang) metallogenic belt in South China and spatial-temporal distribution regularity of mineral deposits. *Acta Geologica Sinica*, 85(5): 636–658 (in Chinese with English abstract)
- Miller CF, McDowell SM and Mapes RW. 2003. Hot and cold granites? Implications of zircon saturation temperatures and preservation of inheritance. *Geology*, 31(6): 529–532
- Naney MT. 1983. Phase equilibria of rock-forming ferromagnesian silicates in granitic systems. *American Journal of Science*, 283(10): 993–1033
- Neves SP and Vauchez A. 1995. Successive mixing and mingling of magmas in a plutonic complex of Northeast Brazil. *Lithos*, 34(4): 275–299
- Patño Douce AE and Harris N. 1998. Experimental constraints on Himalayan anatexis. *Journal of Petrology*, 39(4): 689–710
- Pearce JA, Harris NBW and Tindle AG. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25(4): 956–983
- Pei RF, Qiu XP, Yin BC *et al.* 1999. The explosive anomaly of ore-forming processes and superaccumulation of metals. *Mineral Deposits*, 18(4): 333–340 (in Chinese with English abstract)
- Pei RF, Wang YL, Li L *et al.* 2008. South China great granite province and its metallogenic series of tungsten-tin poly-metals. *China Tungsten Industry*, 23(1): 10–13 (in Chinese with English abstract)
- Peng TP, Xi XW, Wang YJ *et al.* 2004. Geochemical characteristics of the Early Mesozoic granodiorites and their tectonic implications. *Geotectonica et Metallogenia*, 28(3): 287–296 (in Chinese with English abstract)
- Peng ZL, Rodney G, Zhuang WM *et al.* 2011. Genesis of mafic microgranular enclaves in granites in SE China. *Earth Science Frontiers*, 18(1): 82–88 (in Chinese with English abstract)
- Perugini D, Poli G, Christofides G *et al.* 2003. Magma mixing in the Sithonia Plutonic Complex, Greece: Evidence from mafic microgranular enclaves. *Mineralogy and Petrology*, 78(3–4): 173

- 200

- Pu W, Zhao KD, Ling HF *et al.* 2004. High precision Nd isotope measurement by Triton TI Mass Spectrometry. *Acta Geoscientia Sinica*, 25(2): 271–274 (in Chinese with English abstract)
- Pu W, Gao JF, Zhao KD *et al.* 2005. Separation method of Rb-Sr, Sm-Nd Using DCTA and HIBA. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 41(4): 445–450 (in Chinese with English abstract)
- Qi L, Hu J and Gregoire DC. 2000. Determination of trace elements in granites by inductively coupled plasma mass spectrometry. *Talanta*, 51(3): 507–513
- Quan TJ, Kong H, Fei LD *et al.* 2012. Petrogenesis of granodiorite porphyry in Baoshan deposit: Constraints from geochemistry, zircon U-Pb chronology and Hf isotopes. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 22(3): 611–621 (in Chinese with English abstract)
- Rao JR, Wang JH and Cao YZ. 1993. Deep structure in Hunan. *Hunan Geology*, 7(Suppl.): 1–100 (in Chinese)
- Rao JR, Xiao YH, Liu YR *et al.* 2012. Location of the Yangtze-Cathaysia plate convergence zone in Hunan. *Chinese Journal of Geophysics*, 55(2): 484–502 (in Chinese with English abstract)
- Richards JP, Boyce AJ and Pringle MS. 2001. Geologic evolution of the Escondida area, northern Chile: A model for spatial and temporal localization of porphyry Cu mineralization. *Economic Geology*, 96(2): 271–305
- Rollinson HR. 1993. *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation*. Essex: Longman Science & Technical, 120–121
- Rudnick RL and Gao S. 2003. Composition of the continental crust. In: Rudnick RL, Holland HD and Turekian KK (eds.). *Treatise on Geochemistry*. Pergamon, Oxford: Elsevier, 3: 1–64
- Rutherford MJ and Devine JD. 1988. The May 18, 1980, eruption of Mount St. Helens: 3. Stability and chemistry of amphibole in the magma chamber. *Journal of Geophysical Research*, 93 (B10): 11949–11959
- Scherer E, Munker C and Mezger K. 2001. Calibration of the lutetium-hafnium clock. *Science*, 293(5530): 683–687
- Smith RE and Smith SE. 1976. Comments on the use of Ti, Zr, Y, Sr, K, P and Na in classification of basaltic magmas. *Earth and Planetary Science Letters*, 32(2): 114–120
- Sturchio NC, Muehlenbachs K and Seitz MG. 1986. Element redistribution during hydrothermal alteration of rhyolite in an active geothermal system: Yellowstone drill cores Y-7 and Y-8. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 50(8): 1619–1631
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basalts*. Geological Society, London, Special Publication, 42(1): 313–345
- Sun T. 2006. A new map showing the distribution of granites in South China and its explanatory notes. *Geological Bulletin of China*, 25(3): 332–335 (in Chinese with English abstract)
- Swanson SE. 1977. Relation of nucleation and crystal-growth rate to the development of granite textures. *American Mineralogist*, 62(9–10): 966–978
- Tanaka T, Togashi S, Kamioka H *et al.* 2000. JNd-1: A neodymium isotopic reference in consistency with La Jolla neodymium. *Chemical Geology*, 168(3–4): 279–281
- Tang CY. 2005. Structural controlling characteristics of mineralization in Baoshan polymetallic ore field, Hunan Province. *Mineral Resources and Geology*, 19(1): 43–47 (in Chinese with English abstract)
- Taylor SR and McLennan SM. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. London: Blackwell Scientific Publications, 57–72
- Thirlwall MF, Smith TE, Graham AM *et al.* 1994. High field strength element anomalies in arc lavas: Source or process? *Journal of Petrology*, 35(3): 819–838
- Tong QM, Wu RH, Peng JL *et al.* 1995. Metallogeny of W, Sn, Pb-Zn, Au and Ag Deposits in the Chenxian-Guiyang Region, South Hunan, China. Beijing: Geological Publishing House, 1–98 (in Chinese with English abstract)
- Vernon RH. 1984. Microgranitoid enclaves in granites: Globules of hybrid magma quenched in a plutonic environment. *Nature*, 309(5967): 438–439
- Vervoort JD, Patchett PJ, Blichert-Toft J *et al.* 1999. Relationships between Lu-Hf and Sm-Nd isotopic systems in the global sedimentary system. *Earth and Planetary Science Letters*, 168(1–2): 79–99
- Vielzeuf D and Montel JM. 1994. Partial melting of metagreywackes: Part 1. Fluid-absent experiments and phase relationships. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 117(4): 375–393
- Wang DZ. 2004. The study of granitic rocks in South China: Looking back and forward. *Geological Journal of China Universities*, 10(3): 305–314 (in Chinese with English abstract)
- Wang HP. 2005. Geological characteristics and prospecting methods of Baoshan western lead-zinc mineral deposit. *Hunan Nonferrous Metals*, 21(5): 1–4 (in Chinese with English abstract)
- Wang Q, Zhao ZH, Jian P *et al.* 2004. SHRIMP zircon geochronology and Nd-Sr isotopic geochemistry of the Dexing granodiorite porphyries. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2): 315–324 (in Chinese with English abstract)
- Wang Q, Li JW, Jian P *et al.* 2005. Alkaline syenites in eastern Cathaysia (South China): Link to Permian-Triassic transtension. *Earth and Planetary Science Letters*, 230: 339–354
- Wang Q, Xu JF, Jian P *et al.* 2006. Petrogenesis of adakitic porphyries in an extensional tectonic setting, Dexing, South China: Implications for the genesis of porphyry copper mineralization. *Journal of Petrology*, 47(1): 119–144
- Wang XL, Zhao GC, Zhou JC *et al.* 2008. Geochronology and Hf isotopes of zircon from volcanic rocks of the Shuangqiaoshan Group, South China: Implications for the Neoproterozoic tectonic evolution of the eastern Jiangnan orogen. *Gondwana Research*, 14(3): 355–367
- Wang YJ, Fan WM, Guo F *et al.* 2001. Petrological and geochemical characteristics of Mesozoic granodioritic intrusions in Southeast Hunan Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 17(1): 169–175 (in Chinese with English abstract)
- Wang YJ, Fan WM, Guo F *et al.* 2002. U-Pb dating of Early Mesozoic granodioritic intrusions in southeastern Hunan Province, South China and its petrogenetic implications. *Science in China (Series D)*, 45(3): 280–288
- Wang YJ, Fan WM, Guo F *et al.* 2003. Geochemistry of Early Mesozoic potassium-rich diorites-granodiorites in southeastern Hunan Province, South China: Petrogenesis and tectonic implications. *Geochemical Journal*, 37(4): 427–448
- Wang YJ, Liao CL, Fan WM *et al.* 2004. Early Mesozoic OIB-type alkaline basalt in central Jiangxi Province and its tectonic implications. *Geochimica*, 33(2): 109–117 (in Chinese with English abstract)
- Wang YJ, Fan WM, Sun M *et al.* 2007. Geochronological, geochemical and geothermal constraints on petrogenesis of the Indosinian peraluminous granites in the South China Block: A case study in the Hunan Province. *Lithos*, 96(3–4): 475–502
- Wang YJ, Fan WM, Cawood PA *et al.* 2008. Sr-Nd-Pb isotopic constraints on multiple mantle domains for Mesozoic mafic rocks beneath the South China Block hinterland. *Lithos*, 106(3–4): 297–308
- Watson EB and Harrison TM. 1983. Zircon saturation revisited: Temperature and composition effects in a variety of crustal magma types. *Earth and Planetary Science Letters*, 64(2): 295–304
- Wei DF, Bao ZY and Fu JM. 2006. A tentative discussion on the metallogenic regularity of tin deposits in Nanling region. *Mineral Deposits*, 25(Suppl.): 379–382
- Wei DF, Bao ZY, Fu JM *et al.* 2007. Diagenetic and mineralization age of the Hehuaping tin-polymetallic orefield, Hunan Province. *Acta Geologica Sinica*, 81(2): 244–252
- Weis D, Kieffer B, Maerschalk C *et al.* 2006. High-precision isotopic characterization of USGS reference materials by TIMS and MC-ICP-MS. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 7(8): 1525–2027
- White AJR, Chappell BW and Wyborn D. 1999. Application of the

- restitute model to the Deddick granodiorite and its enclaves-A reinterpretation of the observations and data of Mass *et al.* *Journal of Petrology*, 40(3): 413–421
- Woodhead JD and Hergt JM. 2005. A preliminary appraisal of seven natural zircon reference materials for in situ Hf isotope determination. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 29(2): 183–195
- Wu CQ, Liang DY and Xu ZH. 1995. Study on the occurrence of silver in the Lead-Zinc-Silver ore deposit in West Baoshan. *Journal of Guangdong Non-ferrous Metals*, 5(1): 13–19 (in Chinese with English abstract)
- Wu CQ. 2001. The occurrence of silver in mixed ores from Baoshan Pb-Zn-Ag deposit. *Acta Mineralogica Sinica*, 21(3): 537–538 (in Chinese with English abstract)
- Wu FY, Yang YH, Xie LW *et al.* 2006a. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology. *Chemical Geology*, 234(1–2): 105–126
- Wu FY, Li XH, Zheng YF *et al.* 2007. Lu–Hf isotopic systematics and their applications in petrology. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185–220 (in Chinese with English abstract)
- Wu RX, Zheng YF, Wu YB *et al.* 2006b. Reworking of juvenile crust: Element and isotope evidence from Neoproterozoic granodiorite in South China. *Precambrian Research*, 146(3–4): 179–212
- Wu YB and Zheng YF. 2004. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age. *Chinese Science Bulletin*, 49(15): 1554–1569
- Wyllie PL, Cox KG and Biggar GM. 1962. The habit of apatite in synthetic systems and igneous rocks. *Petrology*, 3(2): 238–243
- Xu KQ, Zhu JC, Liu CS *et al.* 1989. Genetic series and material sources of granitoids in South China. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 1(3): 1–19 (in Chinese with English abstract)
- Xu XB, Zhang YQ, Jia D *et al.* 2009. Early Mesozoic geotectonic processes in South China. *Geology in China*, 36(3): 573–593 (in Chinese with English abstract)
- Xu XS, Fan QC, O'Reilly SY *et al.* 2004. U-Pb dating of zircons from quartz diorite and its enclaves at Tongguanshan in Anhui and its petrogenetic implication. *Chinese Science Bulletin*, 49(19): 2073–2082
- Yang GG and Chen ZQ. 1998. Alteration of wallrocks and the mineralization zoning features in Baoshan copper-molybdenum-lead-zinc-silver mineralization field. *Mineral Resources and Geology*, 12(2): 96–100 (in Chinese with English abstract)
- Yang JH, Wu FY, Wilde SA *et al.* 2007. Tracing magma mixing in granite genesis: In situ U-Pb dating and Hf-isotope analysis of zircons. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 153(2): 177–190
- Yang MG, Huang SB, Lou FS *et al.* 2009. Lithospheric structure and large-scale metallogenic process in southeast China continental area. *Geology in China*, 36(3): 528–543 (in Chinese with English abstract)
- Yao JM, Hua RM and Lin JF. 2005. Zircon LA-ICPMS U-Pb dating and geochemical characteristics of Huangshaping granite in southeast Hunan province. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 688–696 (in Chinese with English abstract)
- Yao JM, Hua RM and Lin JF. 2006. REE, Pb-S isotope geochemistry, and Rb-Sr isochron age of pyrites in the Baoshan deposit, South Hunan Province, China. *Acta Geologica Sinica*, 80(7): 1045–1054 (in Chinese with English abstract)
- Yin JP. 1998. Metallogenic tectonics analysis about Baoshan Pb-Zn-Ag polymetallic deposit, Hunan, China. *Geotectonica et Metallogenia*, 22(Suppl.): 57–61 (in Chinese with English abstract)
- Yu JH, Zhou XM, Zhao L *et al.* 2005. Mantle-crust interaction generating the Wuping granites: Evidence from Sr-Nd-Hf-U-Pb isotopes. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 651–664 (in Chinese with English abstract)
- Zhai YS. 1999. On the metallogenic system. *Earth Science Frontiers*, 6(1): 13–28 (in Chinese with English abstract)
- Zhang GS. 1996. Occurrence of associated silver of Mesozonal Pb-Zn ore body in Baoshan lead-zinc-silver mine, Guiyang County. *Hunan Geology*, 15(3): 159–162 (in Chinese with English abstract)
- Zhang JH. 2007. Metallogenic characteristics of sandstone-shale type lead-zinc deposit in western mine of Baoshan and ore prediction in new area. *Mineral Resources and Geology*, 21(1): 56–58 (in Chinese with English abstract)
- Zhang RQ, Lu JJ, Zhu JC *et al.* 2010. Zircon U-Pb geochronology and Hf isotopic compositions of Hehuaping granite porphyry, southern Hunan Province, and its geological significance. *Geological Journal of China Universities*, 16(4): 436–447 (in Chinese with English abstract)
- Zhang SY. 1988. Study on occurrence of silver in western Baoshan lead-zinc-silver deposits, Guiyang. *Mineral Resources and Geology*, 2(2): 10–15 (in Chinese with English abstract)
- Zhang YQ, Dong SW, Zhao Y *et al.* 2007. Jurassic tectonics of North China: A synthetic view. *Acta Geologica Sinica*, 81(11): 1462–1480 (in Chinese with English abstract)
- Zhang YQ, Xu XB, Jia D *et al.* 2009. Deformation record of the change from Indosinian collision-related tectonic system to Yanshanian subduction-related tectonic system in South China during the Early Mesozoic. *Earth Science Frontiers*, 16(1): 234–247 (in Chinese with English abstract)
- Zhang YQ, Dong SW, Li JH *et al.* 2012. The new progress in the study of Mesozoic tectonics of South China. *Acta Geoscientia Sinica*, 33(3): 257–279 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZJ, Badal B, Li YK *et al.* 2005. Crust-upper mantle seismic velocity structure across southeastern China. *Tectonophysics*, 395(1–2): 137–157
- Zhao KD, Jiang SY, Jiang YH *et al.* 2006. SHRIMP U-Pb dating of the Furong unit of Qitangling granite from Southeast Hunan Province and their geological implications. *Acta Petrologica Sinica*, 22(10): 2611–2616 (in Chinese with English abstract)
- Zhao KD, Jiang SY, Zhu JC *et al.* 2010. Hf isotopic composition of zircons from the Huashan-Guposhan intrusive complex and their mafic enclaves in northeastern Guangxi: Implication for petrogenesis. *Chinese Science Bulletin*, 55(6): 509–519
- Zhao KD, Jiang SY, Yang SY *et al.* 2012. Mineral chemistry, trace elements and Sr-Nd-Hf isotope geochemistry and petrogenesis of Cailing and Furong granites and mafic enclaves from the Qitianling batholith in the Shi-Hang zone, South China. *Gondwana Research*, 22(1): 310–324
- Zhao ZH, Bao ZW and Zhang BY. 1998. Geochemistry of the Mesozoic basaltic rocks in southern Hunan Province. *Science in China (Series D)*, 41(Suppl.): 102–112
- Zheng YF, Zhang SB, Zhao ZF *et al.* 2007. Contrasting zircon Hf and O isotopes in the two episodes of Neoproterozoic granitoids in South China: Implications for growth and reworking of continental crust. *Lithos*, 96(1–2): 127–150
- Zhou JC, Jiang SY, Wang XL *et al.* 2005. Re-Os isochron age of Fankeng basalts from Fujian of SE China and its geological significance. *Geochimical Journal*, 39(6): 497–502
- Zhou Q, Jiang YH, Zhao P *et al.* 2012. Origin of the Dexing Cu-bearing porphyries, SE China: Elemental and Sr-Nd-Pb-Hf isotopic constraints. *International Geology Review*, 54(5): 572–592
- Zhou XM and Li WX. 2000. Origin of Late Mesozoic igneous rocks in southeastern China: Implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas. *Tectonophysics*, 326(3–4): 269–287
- Zhou XM. 2003. My thinking about granite geneses of South China. *Geological Journal of China Universities*, 9(4): 556–565 (in Chinese with English abstract)
- Zhou XM, Sun T, Shen WZ *et al.* 2006. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: A response to tectonic evolution. *Episodes*, 29(1): 26–33
- Zhu B, Jiang SY, Ding X *et al.* 2008. Hydrothermal alteration and petrogenesis of granites in the Yongping copper deposit, Jiangxi Province: Constraints from mineral chemistry, element geochemistry, and Sr-Nd-Hf isotopes. *Acta Petrologica Sinica*, 24(8): 1900–1916 (in Chinese with English abstract)

- Zhu BQ, Chang XY and Wang HF. 1996. The geochemical boundary between south China and Yangtze blocks and its constraint on the formation of super large deposits. *Science in China (Series D)*, 39(1): 58–65
- Zhu DC, Mo XX, Niu YL *et al.* 2009. Geochemical investigation of Early Cretaceous igneous rocks along an east-west traverse throughout the central Lhasa Terrane, Tibet. *Chemical Geology*, 268(3–4): 298–312
- Zhu GC. 1988. The typomorphic characteristics and genetic significance of main minerals in Baoshan copper-polymetal deposit. *Mineral Resources and Geology*, 2(3): 56–63 (in Chinese with English abstract)
- Zhu JC, Zhang PX, Xie CF *et al.* 2006a. Magma mixing origin of the mafic enclaves in Lisong granite, NE Guangxi, western Nanling Mountains. *Geochimica*, 35(5): 506–516 (in Chinese with English abstract)
- Zhu JC, Zhang PH, Xie CF *et al.* 2006b. Zircon U-Pb age framework of Huashan-Guposhan intrusive belt, western part of Nanling Range, and its geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 22(9): 2270–2278 (in Chinese with English abstract)
- Zhu JC, Chen J, Wang RC *et al.* 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 *et al.* 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
- Zhu JC, Wang RC, Lu JJ *et al.* 2011. Fractionation, evolution, petrogenesis and mineralization of Laiziling granite pluton, southern Hunan Province. *Geological Journal of China Universities*, 17(3): 381–392 (in Chinese with English abstract)
- Zhu X, Huang CG, Rui ZY *et al.* 1983. *The Geology of the Dexing Porphyry Copper Ore Field*. Beijing: Geological Publishing House, 1–336 (in Chinese with English abstract)
- 附中文参考文献**
- 柏道远, 陈建超, 马铁球等. 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
- 陈江峰, 郭新生, 汤加富等. 1999. 中国东南地壳增长与 Nd 同位素模式年龄. *南京大学学报(自然科学版)*, 35(6): 649–658
- 陈培荣, 章邦桐, 孔兴功等. 1998. 赣南寨背 A 型花岗岩体的地球化学特征及其构造地质意义. *岩石学报*, 14(3): 289–298
- 陈培荣, 孔兴功, 王银喜等. 1999. 赣南燕山早期双峰式火山-侵入杂岩的 Rb-Sr 同位素定年及意义. *高校地质学报*, 5(4): 378–383
- 陈培荣, 华仁民, 章邦桐等. 2002. 南岭燕山早期后造山花岗岩类: 岩石学制约和地球动力学背景. *中国科学(D 辑)*, 32(4): 279–289
- 陈卫锋, 陈培荣, 黄宏业等. 2007. 湖南白马山岩体花岗岩及其包体的年代学和地球化学研究. *中国科学(D 辑)*, 37(7): 873–893
- 陈心才. 1996. 华南大地构造综述. 见: *湖南地质学新进展*. 长沙: 湖南科学技术出版社, 155–158
- 陈毓川, 裴荣富, 张宏良等. 1989. 南岭地区与中生代花岗岩类有关的有色及稀有金属矿床地质. 北京: 地质出版社, 1–508
- 陈毓川, 王登红. 2012. 华南地区中生代岩浆成矿作用的四大问题. *大地构造与成矿学*, 36(3): 315–321
- 陈志洪, 郭坤一, 董永观等. 2009a. 江山-绍兴拼合带平水段可能存在于新元古代早期板片窗岩浆活动: 来自锆石 LA-ICP-MS 年代学和地球化学的证据. *中国科学(D 辑)*, 39(7): 994–1008
- 陈志洪, 邢光福, 郭坤一等. 2009b. 浙江平水群角斑岩的成因: 锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素制约. *科学通报*, 54(5): 610–617
- 地矿部南岭项目花岗岩专题组. 1989. 南岭花岗岩地质及其成因和成矿作用. 北京: 地质出版社, 1–471
- 丁海潮. 1994. 湖南桂阳宝山铅锌银矿单铜矿石伴生金的赋存状态研究. *矿山地质*, 15(1): 47–52
- 范春方, 陈培荣. 2000. 赣南陂头 A 型花岗岩的地质地球化学特征及其形成的构造环境. *地球化学*, 29(4): 358–366
- 付建明, 马昌前, 谢才富等. 2004a. 湖南骑田岭岩体东缘菜岭岩体的锆石 SHRIMP 定年及其意义. *中国地质*, 33(1): 96–100
- 付建明, 马昌前, 谢才富等. 2004b. 湖南九嶷山复式花岗岩体 SHRIMP 锆石定年及其地质意义. *大地构造与成矿学*, 28(4): 370–378
- 付建明, 谢才富, 彭松柏等. 2006. 湖南骑田岭花岗岩及其暗色微粒包体的地球化学与壳幔岩浆的混合作用. *地球学报*, 27(6): 557–569
- 郭春丽, 毛景文, 陈毓川. 2010. 赣南营前岩体的年代学、地球化学、Sr-Nd-Hf 同位素组成及其地质意义. *岩石学报*, 26(3): 919–937
- 郭春丽, 陈毓川, 黎传标等. 2011. 赣南晚侏罗世九龙脑钨锡铅锌矿集区不同成矿类型花岗岩年龄、地球化学特征对比及其地质意义. *地质学报*, 85(7): 1188–1205
- 洪大卫, 谢锡林, 张季生. 2002. 试析杭州-诸广山-花山高 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值花岗岩带的地质意义. *地质通报*, 21(6): 348–354
- 洪大卫, 王涛, 童英. 2007. 中国花岗岩概述. *地质论评*, 53(增刊): 9–16
- 侯可军, 李延河, 邹天人等. 2007. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用. *岩石学报*, 23(10): 2595–2604
- 湖南省地质矿产局. 1988. 湖南省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1–719
- 胡瑞忠, 毛景文, 范蔚茗等. 2010. 华南陆块陆内成矿作用的一些科学问题. *地学前缘*, 17(2): 13–26
- 华仁民, 毛景文. 1999. 试论中国东部中生代成矿大爆发. *矿床地质*, 18(4): 300–308
- 华仁民, 陈培荣, 张文兰等. 2003. 华南中、新生代与花岗岩类有关的成矿系统. *中国科学(D 辑)*, 33(4): 335–343
- 华仁民, 陈培荣, 张文兰等. 2005. 南岭与中生代花岗岩类有关的成矿作用及其大地构造背景. *高校地质学报*, 11(3): 291–304
- 华仁民, 李光来, 张文兰等. 2010. 华南钨和锡大规模成矿作用的差异及其原因初探. *矿床地质*, 29(1): 9–23
- 黄标, 徐克勤, 孙明志等. 1993. 武夷山中段加里东早期交代改造型花岗岩类的特点及形成的碰撞造山环境. *岩石学报*, 9(4): 388–400
- 蒋少涌, 李亮, 朱碧等. 2008a. 江西武山铜矿区花岗岩闪长斑岩的地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素组成及成因探讨. *岩石学报*, 24(8): 1679–1690
- 蒋少涌, 赵葵东, 姜耀辉等. 2008b. 十杭带湖南-桂北段中生代 A 型花岗岩带成岩成矿特征及成因讨论. *高校地质学报*, 14(4):

496-509

- 李献华, 周汉文, 刘颖等. 1999. 桂东南钾玄质侵入岩带及其岩石学和地球化学特征. 科学通报, 44(8): 1992-1998
- 李献华, 李武显, 李正祥. 2007. 再论南岭燕山早期花岗岩的成因类型与构造意义. 科学通报, 52(9): 981-991
- 路远发, 马丽艳, 屈文俊等. 2006. 湖南宝山铜-钼多金属矿床成矿的 U-Pb 和 Re-Os 同位素定年研究. 岩石学报, 22(10): 2483-2492
- 罗兰, 蒋少涌, 杨水源等. 2010. 江西彭山锡多金属矿集区隐伏花岗岩体的岩石地球化学、锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素组成. 岩石学报, 26(9): 2818-2834
- 毛景文, 李红艳, 裴荣富. 1995. 湖南千里山花岗岩体的 Nd-Sr 同位素及岩石成因研究. 矿床地质, 14(3): 235-242
- 毛景文, 华仁民, 李晓波. 1999. 浅议大规模成矿作用与大型矿集区. 矿床地质, 18(4): 291-299
- 毛景文, 谢桂清, 李晓峰等. 2004. 华南地区中生代大规模成矿作用与岩石圈多阶段伸展. 地学前缘, 11(1): 45-55
- 毛景文, 谢桂青, 郭春丽等. 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
- 毛景文, 谢桂青, 郭春丽等. 2008. 华南地区中生代主要金属矿床时空分布规律和成矿环境. 高校地质学报, 14(4): 510-526
- 毛景文, 谢桂青, 程彦博等. 2009. 华南地区中生代主要金属矿床模型. 地质论评, 55(3): 347-354
- 毛景文, 陈懋弘, 袁顺达等. 2011. 华南地区钦杭成矿带地质特征和矿床时空分布规律. 地质学报, 85(5): 636-658
- 马铁球, 柏道远, 邝军等. 2005. 湘东南茶陵地区锡田岩体锆石 SHRIMP 定年及其地质意义. 地质通报, 24(5): 415-419
- 南京大学地质系. 1981. 华南不同时代花岗岩类及其与成矿关系. 北京: 科学出版社, 1-395
- 裴荣富, 邱小平, 尹冰川等. 1999. 成矿作用爆发异常及巨量金属堆积. 矿床地质, 18(4): 333-340
- 裴荣富, 王永磊, 李莉等. 2008. 华南大花岗岩省及其与钨锡多金属区域成矿系列. 中国钨业, 23(1): 10-13
- 彭头平, 席先武, 王岳军等. 2004. 湘东北早中生代花岗岩长岩地球化学特征及其构造意义. 大地构造与成矿学, 28(3): 287-296
- 彭卓伦, Rodney Grapes, 庄文明等. 2011. 华南花岗岩暗色微粒包体成因研究. 地学前缘, 18(1): 82-88
- 濮巍, 赵葵东, 凌洪飞等. 2004. 新一代高精度高灵敏度的表面热电离质谱仪(Triton II)的 Nd 同位素测定. 地球学报, 25(2): 271-274
- 濮巍, 高剑峰, 赵葵东等. 2005. 利用 DCTA 和 HIBA 快速有效分离 Rb-Sr、Sm-Nd 的方法. 南京大学学报(自然科学版), 41(4): 445-450
- 全铁军, 孔华, 费利东等. 2012. 宝山花岗岩闪长斑岩的岩石成因: 地球化学、锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素制约. 中国有色金属学报, 22(3): 611-621
- 饶家荣, 王纪恒, 曹一中. 1993. 湖南深部构造. 湖南地质, 7(增刊): 1-100
- 饶家荣, 肖海云, 刘耀荣等. 2012. 扬子、华夏古板块会聚带在湖南的位置. 地球物理学报, 55(2): 484-502
- 孙涛. 2006. 新编华南花岗岩分布图及其说明. 地质通报, 25(3): 332-335
- 唐朝永. 2005. 湖南宝山多金属矿田构造控矿特征. 矿产与地质, 19(1): 43-47
- 童潜明, 伍仁和, 彭季来等. 1995. 郴桂地区钨锡铅锌金银矿床成矿规律. 北京: 地质出版社, 1-98
- 王德滋. 2004. 华南花岗岩研究的回顾与展望. 高校地质学报, 10(3): 305-314
- 王和平. 2005. 湖南宝山西部铅锌矿床地质特征及找矿方向. 湖南有色金属, 21(5): 1-4
- 王强, 赵振华, 简平等. 2004. 德兴花岗岩闪长斑岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学和 Nd-Sr 同位素地球化学. 岩石学报, 20(2): 315-324
- 王岳军, 范蔚茗, 郭峰等. 2001. 湘东南中生代花岗岩长质小岩体的岩石地球化学特征. 岩石学报, 17(1): 169-175
- 王岳军, 廖超林, 范蔚茗等. 2004. 赣中地区早中生代 OIB 碱性玄武岩的厘定及构造意义. 地球化学, 33(2): 109-117
- 魏道芳, 鲍征宇, 付建明. 2006. 南岭地区锡矿成矿规律浅析. 矿床地质, 25(增刊): 379-382
- 伍超群, 梁冬云, 许志华. 1995. 宝山西部铅锌银矿床银的赋存状态研究. 广东有色金属学报, 5(1): 13-19
- 伍超群. 2001. 宝山铅锌银矿床混合矿石中银矿物的赋存状态. 矿物学报, 21(3): 537-538
- 吴福元, 李献华, 郑永飞等. 2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用. 岩石学报, 23(2): 185-220
- 吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约. 科学通报, 49(16): 1589-1604
- 徐克勤, 朱金初, 刘昌实等. 1989. 华南花岗岩类的成因系列和物质来源. 南京大学学报(自然科学版), 1(3): 1-19
- 徐夕生, 范钦成, O'Reilly SY 等. 2004. 安徽铜官山石英闪长岩及其包体锆石 U-Pb 定年与成因探讨. 科学通报, 49(18): 1883-1891
- 徐先兵, 张岳桥, 贾东等. 2009. 华南早中生代大地构造过程. 中国地质, 36(3): 573-593
- 杨国高, 陈振强. 1998. 湖南宝山铜钨铅锌银多金属矿田围岩蚀变与矿化分带特征. 矿产与地质, 12(2): 96-100
- 杨明桂, 黄水保, 楼法生等. 2009. 中国东南陆区岩石圈结构与大规模成矿作用. 中国地质, 36(3): 528-543
- 姚军明, 华仁民, 林锦富. 2005. 湘东南黄沙坪花岗岩 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年及岩石地球化学特征. 岩石学报, 21(3): 688-696
- 姚军明, 华仁民, 林锦富. 2006. 湘南宝山矿床 REE、Pb-S 同位素地球化学及黄铁矿 Rb-Sr 同位素定年. 地质学报, 80(7): 1045-1054
- 印建平. 1998. 湖南宝山铅锌银多金属矿成矿构造机制分析. 大地构造与成矿学, 22(增刊): 57-61
- 于津海, 周新民, 赵蕾等. 2005. 壳幔作用导致武平花岗岩形成——Sr-Nd-Hf-U-Pb 同位素证据. 岩石学报, 21(3): 651-664
- 翟裕生. 1999. 论成矿系统. 地学前缘, 6(1): 13-28

- 张刚生. 1996. 桂阳宝山铅锌银矿中部铅锌矿伴生银赋存特征. 湖南地质, 15(3): 159-162
- 张金河. 2007. 宝山西部矿区砂页岩型铅-锌矿成矿地质特征及新区找矿预测. 矿床与地质, 21(1): 56-58
- 章荣清, 陆建军, 朱金初等. 2010. 湘南荷花坪花岗斑岩锆石 LA-MC-ICP-MS U-Pb 年龄、Hf 同位素制约及地质意义. 高校地质学报, 16(4): 436-447
- 张顺英. 1988. 桂阳宝山西部铅锌银矿床银的赋存状态研究. 矿产与地质, 2(2): 10-15
- 张岳桥, 董树文, 赵越等. 2007. 华北侏罗纪大地构造: 综评与新认识. 地质学报, 81(11): 1462-1480
- 张岳桥, 徐先兵, 贾东等. 2009. 华南早中生代从印支期碰撞构造体系向燕山期俯冲构造体系转换的形变记录. 地学前缘, 16(1): 234-247
- 张岳桥, 董树文, 李建华等. 2012. 华南中生代大地构造研究新进展. 地球科学, 33(3): 257-279
- 赵葵东, 蒋少涌, 姜耀辉等. 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
- 赵振华, 包志伟, 张伯友. 1998. 湘南中生代玄武岩类地球化学特征. 中国科学(D辑), 28(增刊): 7-14
- 中国科学院贵阳地球化学研究所. 1979. 华南花岗岩类的地球化学. 北京: 科学出版社, 1-421
- 周新民. 2003. 对华南花岗岩研究的若干思考. 高校地质学报, 9(4): 556-565
- 朱碧, 蒋少涌, 丁昕等. 2008. 江西永平铜矿区花岗岩热液蚀变与岩石成因: 矿物化学、元素地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素制约. 岩石学报, 24(8): 1900-1916
- 朱炳泉, 常向阳, 王慧芳. 1995. 华南-扬子地球化学边界及其对超大型矿床形成的控制. 中国科学(B辑), 25(9): 1004-1008
- 朱谷昌. 1988. 宝山铜多金属矿床中主要矿物标型特征及其成因意义. 矿产与地质, 2(3): 56-63
- 朱金初, 张佩华, 谢才富等. 2006a. 桂东北里松花岗岩中暗色包体的岩浆混合成因. 地球化学, 35(5): 506-516
- 朱金初, 张佩华, 谢才富等. 2006b. 南岭西段花山-姑婆山侵入岩带锆石 U-Pb 年代格架及其地质意义. 岩石学报, 22(9): 2270-2278
- 朱金初, 陈俊, 王汝城等. 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, 张佩华等. 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
- 朱金初, 王汝成, 陆建军等. 2011. 湘南癞子岭花岗岩体分异演化和成岩成矿. 高校地质学报, 17(3): 381-392
- 朱训, 黄崇轲, 芮宗瑶等. 1983. 德兴斑岩铜矿. 北京: 地质出版社, 1-336