

福建永定大排铁铅锌多金属矿区岩浆岩 地球化学特征及其地质意义

赵希林, 姜杨*, 邢光福, 黄文成, 余明刚, 刘凯, 王存智

中国地质调查局 南京地质调查中心, 南京 210016

摘要: 大排铁铅锌多金属矿床是近年来新发现的一个大型矿床, 为探讨矿区内的岩浆作用特征及其与成矿的关系, 对与成矿作用有关的花岗岩类进行了全岩地球化学及 Sr-Nd-Hf 同位素测试。结果表明, 矿区花岗岩与二长花岗斑岩均属于壳幔混源型花岗岩, 可能是在岩浆底侵作用下由中元古代地壳物质部分熔融所致; Sr-Nd-Hf 同位素特征反映幔源物质在其形成过程中起到了重要作用, 其 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 值和 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 的变化趋势表明闽西南地区早白垩世地幔岩浆在岩浆形成过程中的参与程度逐渐加大, 壳幔作用下形成的花岗岩岩浆作用对闽西南地区成矿起到了积极作用。

关键词: 福建永定大排铁铅锌矿; 地球化学; Sr-Nd-Hf 同位素; 成矿作用

中图分类号: P618.2; P588.1 文章编号: 1007-2802(2017)01-0154-12 doi: 10.3969/j.issn.1007-2802.2017.01.018

Geochemical Characteristics of Magmatic Rocks in the Dapai Fe-Pb-Zn Polymetallic Deposit in Yongding County, Fujian Province and Its Implications

ZHAO Xi-lin, JIANG Yang*, XING Guang-fu, HUANG Wen-cheng,
YU Ming-gang, LIU Kai, WANG Cun-zhi

Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, China

Abstract: The Dapai Fe-Pb-Zn polymetallic deposit, a newly discovered large polymetallic deposit, is located in Yongding County, Southwestern Fujian province. In order to understand the magmatism and its role in polymetal mineralization of the deposit, our study focused on the elemental geochemistry and Sr-Nd-Hf isotopic compositions of mineralization-related granodiorite porphyry and granodiorite. Elemental and isotopic compositions show that these granitic rocks were derived from mixed crustal-mantle sources. Sr-Nd-Hf isotopic compositions suggested partial melting of Mesoproterozoic crust was possibly triggered by underplating of mantle-derived magmas. The trends of ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i and $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ shows that the proportion of mantle components have increased in later-formed rocks so that the crust-mantle interaction may have played an important role in the metallization in Southwest Fujian province.

Key words: Dapai Fe-Pb-Zn deposit; geochemical characteristics; Sr-Nd-Hf isotope; mineralization

闽西南地区大地构造位置上位于环太平洋岩浆岩带西侧, 区内矿产资源丰富, 成矿地质条件优越, 是南岭成矿带的东延部分与武夷山成矿带的交汇地段。区内分布有如上杭紫金山铜金多金属矿、上杭罗卜岭铜钨矿、马坑铁矿、汤泉铁矿、玉水铜矿、漳平北坑场钨矿、攀洛铁矿、中甲铁锡多金属矿等, 是武夷山成矿带地质矿产研究热点之一, 已有

众多的地质学家对该区的岩浆作用、成矿作用、区域成矿模式、成矿系列等进行了研究, 提出了许多不同的认识 (Hsü *et al.*, 1990; 吴淦国等, 2000; 毛建仁等, 2001, 2002, 2004a, 2004b; 华仁民等, 2003, 2005; 毛景文等, 2004; Chen *et al.*, 2007; 赵希林等, 2007, 2009, 2012, 2016; 毛景文, 2009; 王果胜等, 2009; 张达等, 2010), 特别是紫金山铜多金属矿床、

收稿日期: 2016-03-31 收到, 2016-04-23 改回

基金项目: 国家重点研发计划课题 (2016YFC0600205); 中国地质调查局地质矿产调查项目 (DD20160037)

第一作者简介: 赵希林 (1980-), 男, 副研究员, 研究方向: 矿物学、岩石学、矿床学. E-mail: zxl24@126.com; zxljgm@sina.com.cn.

* 通讯作者简介: 姜杨 (1980-), 女, 高级工程师, 研究方向: 岩石学. E-mail: 23287567@qq.com.

马坑式铁矿、汤泉式铁矿等的研究经久不衰(许靖华等,1987;张德全等,2001;刘晓东和华仁民,2005;张德全等,2005;黄仁生,2008;赵希林等,2008;王少怀等,2009;陈静等,2011;钟军等,2011;梁清玲等,2012;张承帅等,2012;黄文婷等,2013; Jiang *et al.*,2013; Zhang and Zuo,2014; Zhang *et al.*,2015; Zuo *et al.*,2015)。

近年来,随着地质找矿工作的不断推进,在闽西南地区新发现了大型的铁铅锌多金属矿——福建省永定县大排铁铅锌多金属矿,其铅锌资源量达到大型规模,伴生的金属钼和铁均达到中型规模,并有少量的银。赵希林等(2016)利用锆石 SHRIMP U-Pb定年法测得大排铁铅锌多金属矿区的蚀变花岗岩成岩年龄为 127.0 ± 1.8 Ma,并认为大排铁铅锌多金属矿成矿物质来源具有多样性,古生代的海相火山热水沉积地层、古生代火山活动、中生代岩浆岩都为成矿作用提供了物质来源,应属于含金属热水溶液海底喷出的层控矽卡岩型-斑岩型复合多金属矿床,其主要成矿期是燕山期。但对矿区内的岩浆岩研究工作仍然薄弱,对区内岩浆作用与成矿作用关系缺乏系统性的研究。本研究对与成矿作用有关的晚中生代花岗岩类进行了全岩地球化学测试及 Sr-Nd 同位素测试,并对赵希林等(2016)测年用锆石样品进行了 Hf 同位素测试,在此基础上探讨闽西南地区中生代岩浆岩岩石成因、物质源区特征及岩浆作用对成矿作用影响等。

1 区域地质及矿床地质特征

1.1 区域地质特征

福建省永定县大排铁铅锌多金属矿地处闽西南-粤北坳陷带内次一级坳陷带大田-龙岩坳陷带南部,政和-大埔深大断裂西侧,特提斯东西向构造域与环太平洋构造域的交界部位(毛建仁等,2001,2002,2004a,2004b;张德全等,2001,2005;赵希林等,2007,2009,2016;王果胜等,2009;张达等,2010;钟军等,2011;梁清玲等,2012;张承帅等,2012; Guo *et al.*,2012;黄文婷等,2013),在漫长的地质演化过程中受到多期构造-岩浆事件的强烈改造,构造格局复杂多样,使区内蕴藏着丰富的 Fe、Cu、Pb、Zn、Au、Sn 等多金属矿产,是武夷山成矿带重要的成矿地段(张德全等,2001,2005;毛建仁等,2001,2004a;王果胜等,2009;张达等,2010;钟军等,2011;梁清玲等,2012;张承帅等,2012;李斌等,2013;黄文婷等,2013;武丽艳等,2013; Mao *et*

al.,2013;陈静等,2015)。关于闽西南地区中生代以前的构造格局,不同学者提出了不同的认识,最主要的观点有2种:一是认为闽西南地区中-新元古代和晚古生代到三叠纪为小洋盆,两侧为不同基底岩系的陆块(许靖华等,1987;张庆龙等,2008;王果胜等,2009);二是认为中-新元古代和晚古生代闽西南地区处于较为封闭的浅海半深海沉积裂谷环境(吴淦国等,2004;舒良树,2012)。张振杰和左仁广(2015)将闽西南地区的构造发展归纳为3个阶段:基底形成阶段-沉积盖层形成阶段-燕山期活动大陆边缘阶段。

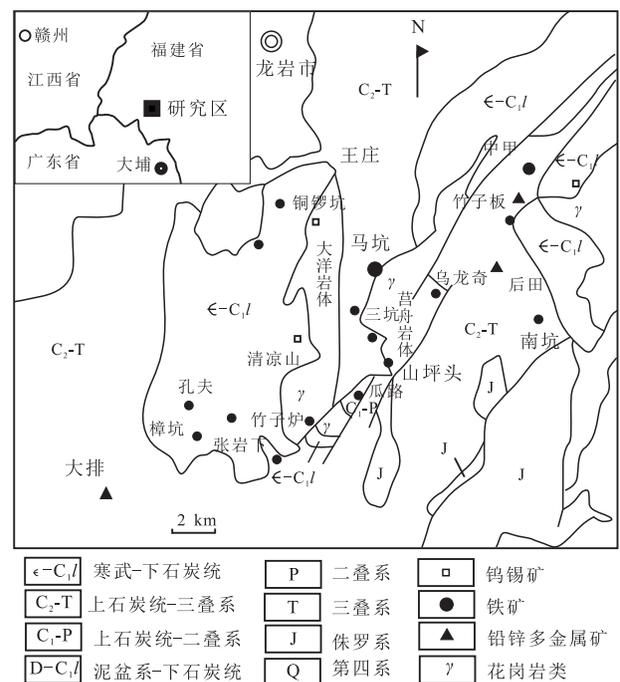


图1 福建龙岩地区地质矿产略图(据赵希林等,2016)

Fig.1 Geological sketch map of the Longyan area in Fujian Province(modified after Zhao Xilin *et al.*, 2016)

1.2 矿床地质特征

1.2.1 矿区地层 大排铁铅锌多金属矿矿区出露的地层多为古生代以来形成的沉积盖层,矿区地层由老至新主要为下石炭统林地组(C₁l)、中、上石炭统船山组(C_{2,3}c)、下二叠统栖霞组(P₁q)、下二叠统文笔山组(P₁w)、下二叠统童子岩组(P₁t)、第四系(Q)(图2)。林地组(C₁l)为一套浅海-滨海相碎屑岩沉积,具较强的硅化、大理岩化、矽卡岩化;船山组(C_{2,3}c)为一套海相碳酸盐岩沉积;栖霞组(P₁q)为一套浅海相碳酸盐岩,是该矿区的主要含矿层位;文笔山组(P₁w)为海湾湖相碎屑沉积,也是本区的含矿层位之一;童子岩组(P₁t)为一套海陆交互碎屑岩沉积;第四系(Q)为一套堆积、洪积及

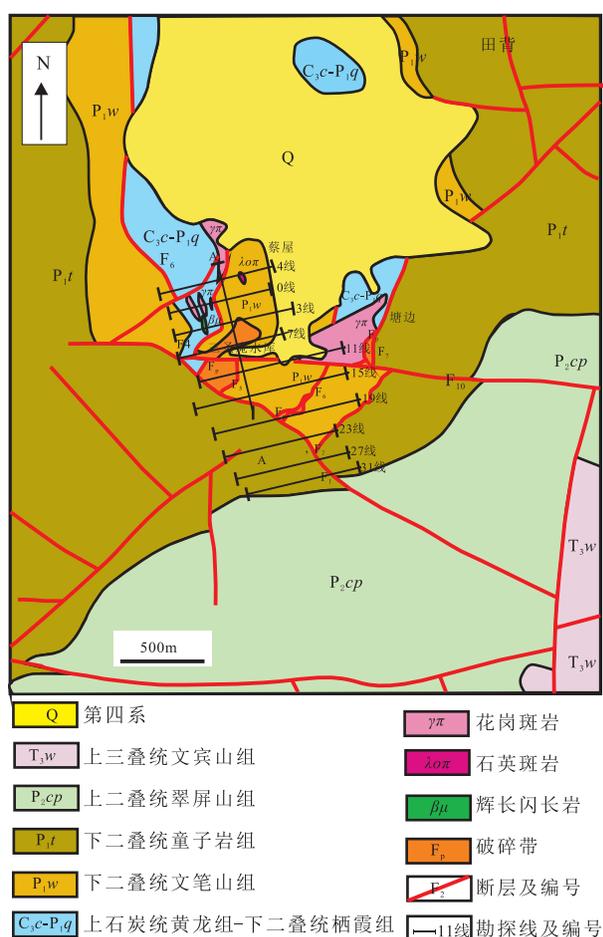


图2 福建永定大排铜铅锌多金属矿区地质简图
(赵希林等, 2016)

Fig.2 Geological sketch map of the Yongding-Dapai area in Fujian Province (modified after Zhao Xilin *et al.*, 2016)

残坡积层。

1.2.2 矿区构造 矿区褶皱构造及断裂构造极为发育。褶皱构造以大排复式倒转背斜为主,轴向北北西,轴面倾向北东,倾角约 50° ,核部地层为二叠系栖霞组灰岩,东西两翼由文笔山组、童子岩组构成,地层倾向总体北东-南东,倾角 $40^\circ\sim 50^\circ$ 。其中背斜东翼由于受 F_2 断层和二长花岗斑岩侵入的影响而表现不明显。背斜西翼次一级褶皱较强烈,由于遭受断层破坏,地层重复出现。矿区东南部童子岩组内,有一组褶皱构造,由一向斜和一背斜组成。向斜轴向从南端的北北东转为北端的北北西,轴面倾向西,倾角约 80° 。

断裂构造主要有近南北向、北西向、北东向3组。近南北向断裂是矿区规模较大、最为发育的一组断裂,从西向东,对矿床有影响的断裂主要有 F_3 、 F_4 、 F_5 三条断裂。其中 F_3 断裂对41、42号矿体起控制作用,为成矿提供导矿通道和赋矿空间; F_4 、 F_5 位

于矿区西部,之间夹持一条大的层间构造破碎带(F_p),是区内主要的多金属矿控矿和容矿构造,控制了上含矿层的矿体产出特征和氧化矿的分布范围。

1.2.3 矿区岩浆岩 矿区出露的岩浆岩主要为花岗斑岩,以及脉状的辉绿岩、辉长闪长岩、辉绿玢岩、石英斑岩、钾长花岗岩、二长花岗岩等。其中花岗斑岩呈北东向展布,岩体顶面倾向总趋势是自南东往北西方向逐渐降低,被北东向 F_2 断层切断,与成矿关系密切。

1.2.4 矿体特征 大排铁铅锌多金属矿铅锌矿体主要产于花岗斑岩体的外接触带的地层中,主要赋矿层位为下石炭统林地组(C_1l)、上石炭统船山组(C_3c)和下二叠统栖霞组(P_1q)。矿区内矿石类型主要为铅锌矿石(包括氧化铅锌矿石和硫化铅锌矿石)和磁铁矿石。

大排铁铅锌多金属矿区内变质作用分为接触交代变质作用和接触热变质作用,接触交代作用在矿区发育广泛,根据其物质成分及产出部位的不同可以分为内、外矽卡岩带。内矽卡岩带发育较弱,与矿化关系不大;外矽卡岩带较发育,与铁、铅、锌、铜矿成矿关系密切。

2 样品特征与测试方法

2.1 样品特征

本次研究对矿区二长花岗岩及花岗斑岩进行了地球化学和同位素测试工作,并对赵希林等(2016)测年用的锆石样品进行了Hf同位素测试。

二长花岗岩样品呈灰色、灰白色,中细粒花岗岩结构,块状构造。斜长石含量为 $35\%\sim 40\%$,钾长石含量为 $30\%\sim 35\%$,粒度 $1\sim 1.5\text{ mm}$;石英量为 $15\%\sim 20\%$,呈他形粒状充填在斜长石、铁镁矿物晶粒之间。暗色矿物(以黑云母为主)约 10% ,粒度 1 mm 左右。副矿物有钛磁铁矿、磷灰石。蚀变普遍,斜长石具水云母化,暗色矿物往往绿泥石化,钛磁铁矿已风化成白钛矿。

花岗斑岩样品呈肉红色,斑状结构,基质具花岗结构,块状构造,斑晶以更长石为主,斑晶分布不均,含量一般 $5\%\sim 10\%$;基质主要由石英(含量约 $15\%\sim 20\%$)、条纹长石与更长石(含量约 60%)、暗色矿物如角闪石和黑云母等组成(二者含量共约 15% 左右),副矿物为锆石、磁铁矿、磷灰石、黄铁矿、独居石等。岩石蚀变较强,斜长石多已绢云母化、钾长石化、碳酸盐化,黑云母出现绿泥石化。从15线剖面可看出,直接与围岩接触的为花岗斑岩。

2.2 分析测试方法

样品的全岩微量元素含量测试在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)完成,所用仪器为 Agilent 7500a ICP-MS。用于 ICP-MS 分析的样品处理如下:①称取粉碎至大约 200 目的岩石粉末 50 mg 于 Teflon 溶样器中;②采用 Teflon 溶样弹将样品用 HF+HNO₃ 在 195℃ 条件下消解 48 h;③将在 120℃ 条件下蒸干除 Si 后的样品用 2% HNO₃ 稀释 2000 倍,定容于干净的聚酯瓶。详细的样品消解处理过程、分析精密度和准确度同 Liu 等(2008)。

全岩 Nd、Sr 同位素测试在中国地质大学 GPMR 实验室完成。Sr、Nd 同位素样品采用 HNO₃+HF 混合酸和溶样弹溶解(190℃, 48 h),溶好的样液用 AG50×8 阳离子交换树脂分离 Rb、Sr 和 REE,再用 Eichrom 公司生产的 LN 特效树脂分离和纯化 Nd。制备好的样品用热电离同位素质谱仪(TIMS, Triton TI)进行 Sr 和 Nd 同位素比值测量。仪器的准确度分别用标样 NBS987 和 LaJolla 国际标样进行监测。Sr 同位素质量分馏用 ⁸⁸Sr/⁸⁶Sr = 8.375 209 校正,国际标样 NBS987 和 NBS607 的 ⁸⁸Sr/⁸⁶Sr 测量结果分别为 0.710 300±4 (2δ_m,下同)和 1.198 898±4; Nd 同位素质量分馏用 ¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd = 0.721 900 校正,国际标样 La Jolla 和 BCR-2 的 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 测试结果分别为 0.511 837±0.6 和 0.512 619±2。

锆石 Hf 同位素测试在中国地质科学院矿产资源研究所国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室完成,分析仪器为 Neptune 多接收等离子质谱和 Newwave UP213 紫外激光剥蚀系统(LA-MC-ICP-MS)。实验过程中采用 He 作为剥蚀物质载气,根据锆石大小,剥蚀直径采用 40 μm,测定时使用锆石国际标样 GJ1 和 Plesovice 作为参考物质,分析点与 U-Pb 定年分析点为同一位置。相关仪器运行条件及详细分析流程见侯可军等(2007)。锆石标样 GJ1 的 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 测试加权平均值分别为 0.282007±0.000007(2σ, n=36),与侯可军等(2007)和 Morel 等(2008)的报道值在误差范围内完全一致。

3 测试结果

大排铁铅锌多金属矿矿区二长花岗岩和花岗斑岩的主量元素、微量元素和稀土元素数据列于表 1。

3.1 主量元素

由表 1 可见,二长花岗岩与花岗斑岩具有类似

的主量元素地球化学特征。花岗斑岩总体上硅含量低,总碱含量相对二长花岗岩较高,而铝含量相对较低。5 件花岗斑岩样品的 SiO₂ 含量变化范围较大,为 61.53%~65.47%,均值为 63.80%; K₂O+Na₂O 含量为 6.90%~8.59%,均值为 7.81%; 5 件样品均具有较低的分异指数相当,大致为 67.74~80.09,均值为 76.22; 在 TAS 侵入岩分类图解中,5 件样品均投影于二长岩和碱长花岗岩区域(图 3a),在 QAP 图解中均落入花岗岩区域(图 3b),属于亚碱性系列岩石(图 3a)。其 A/CNK 值变化范围为 0.70~0.93,均值为 0.83,为准铝质(图 3c); 5 件样品具有较高的 K₂O 含量,在 SiO₂-K₂O 图解中均投影于钾玄岩系列岩石区域(图 3d)。

2 件二长花岗岩与花岗斑岩具有类似的地球化学特征,其硅含量稍高,总碱较低,并具有相对较高的铝含量。2 件二长花岗岩样品的 SiO₂ 含量变化范围较小,为 67.26%~67.58%,均值为 67.42%; K₂O+Na₂O 含量为 6.68%~6.79%,均值为 6.73%; 2 件样品均具有较低的分异指数相当,大致为 74.92~75.26,均值为 75.10; 在 TAS 侵入岩分类图解中,2 件样品均投影于花岗闪长岩区域(图 3a),在 QAP 图解中均落入二长花岗岩区域(图 3b),属于亚碱性系列岩石(图 3a)。其 A/CNK 值变化范围为 0.97~1.04,均值为 1.00,为准铝质(图 3c); 2 件样品具有相对较低的 K₂O 含量,在 SiO₂-K₂O 图解中均投影于中钾-高钾钙碱性系列岩石区域(图 3d)。

在主量元素 Hark 图解中,7 件花岗岩类样品的 TiO₂、MnO、MgO、CaO 含量与 SiO₂ 含量负相关,而 Al₂O₃、Na₂O 含量与 SiO₂ 含量正相关,其他元素与 SiO₂ 含量之间的关系并不明显(图 4)。

3.2 稀土元素

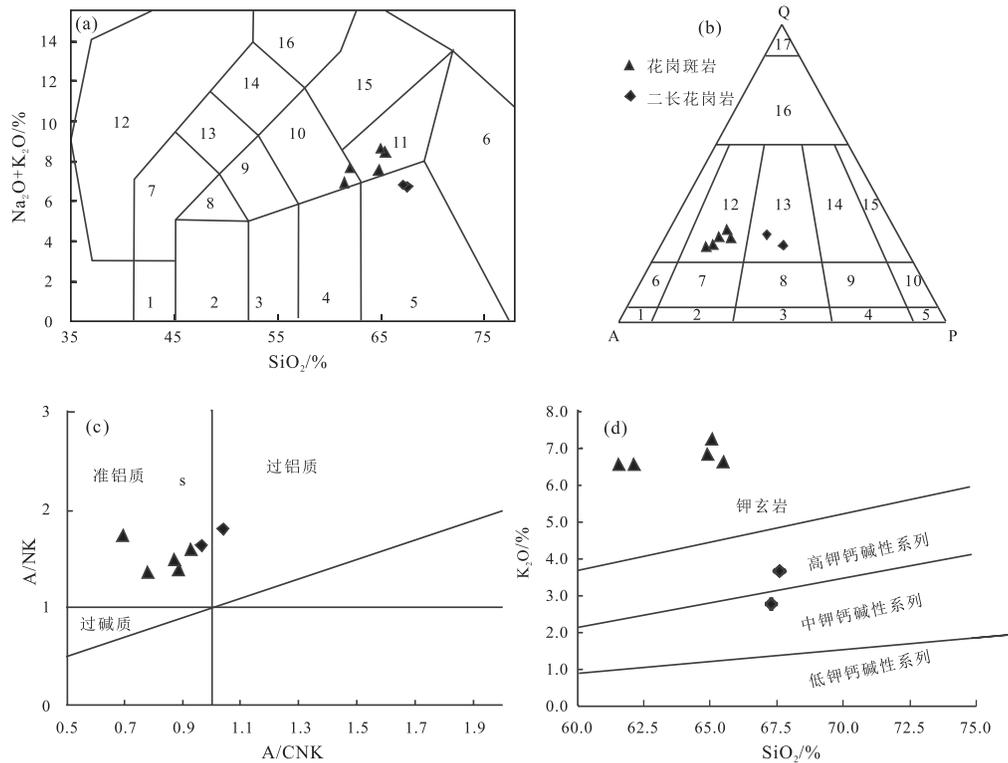
二长花岗岩和花岗斑岩也具有相近似的稀土元素特征。花岗斑岩总体特征是 ΣREE 含量较高,为 229.10×10⁻⁶~311.11×10⁻⁶,均值为 273.71×10⁻⁶; 轻稀土元素内部分馏作用明显,反映轻稀土分馏程度的(La/Sm)_N 为 3.84~4.46,均值为 4.28; 重稀土元素内部之间分馏程度较弱,反映重稀土分馏程度的(Gd/Yb)_N 为 1.52~1.61,均值为 1.57。轻重稀土元素之间分馏程度明显,反映轻重稀土分馏程度的 ΣHREE/ΣHREE 和 (La/Yb)_N 分别为 8.45~10.16 和 8.80~11.80,均值分别为 9.54 和 10.37,属于轻稀土富集型,具有中等的 Eu 负异常, Eu/Eu* 值为 0.51~0.63,均值为 0.57,球粒陨石标准化的稀土配分曲线为右倾的轻稀土富集型(图 5a)。

表 1 大排花岗斑岩和二长花岗岩的主量元素、微量元素和稀土元素含量

Table 1 Major element, rare-earth element and trace-element concentrations of magmatic rocks in Dapai area

岩性 样号	二长花岗岩		花岗斑岩					岩性 样号	二长花岗岩		花岗斑岩				
	97SZ6	97DJ1	ZK-1	ZK-2	ZK-3	ZK-4	ZK-5		97SZ6	97DJ1	ZK-1	ZK-2	ZK-3	ZK-4	ZK-5
SiO ₂	67.58	67.26	65.47	65.04	64.88	62.1	61.53	Y	16.8	10.3	38.92	37.15	40.75	43.33	36.55
TiO ₂	0.37	0.37	0.55	0.53	0.5	0.51	0.52	Sc	6.59	5.04	11.5	10.86	10.64	12.45	10.92
Al ₂ O ₃	16.06	15.65	13.97	13.66	13.58	13.07	13.24	Rb	101	52	281.85	323	342.53	299.77	364.73
Fe ₂ O ₃	1.37	2.02	1.21	0.82	1.28	2.46	1.16	Sr	331	426	410.63	398.24	257.35	327.47	185.54
FeO	1.73	1.64	0.79	0.95	0.99	1	1.71	Ba	709	625	1019.52	1156.54	929.35	899.39	766.01
MgO	1.33	1.31	1.54	1.26	1.5	1.31	1.61	Th	14.8	11	23.12	20.4	22.45	24.04	26.41
MnO	0.099	0.069	0.07	0.11	0.08	0.07	0.17	U	3.1	2.36	5.39	4.8	5.97	6.23	6.45
CaO	3.58	3.63	3.1	4.11	3.34	3.38	6.26	Nb	12.2	11.3	19.84	19.94	19.1	20.39	18.05
Na ₂ O	3.02	4.02	1.78	1.32	0.68	1.05	0.34	Ta	0.81	1.34	1.85	1.85	1.88	1.96	1.68
K ₂ O	3.66	2.77	6.62	7.27	6.85	6.57	6.56	Hf	3.75	3.49	6.14	6.61	5.88	6.04	5.52
P ₂ O ₅	0.21	0.16	0.17	0.16	0.15	0.16	0.16	Zr	124	113	228.78	239.53	206.34	207.53	198.15
LOI	1.01	0.87	2.83	3.75	4.12	3.96	6.35	V	85.2	84.6	70.94	67.97	59.31	67.3	61.08
Total	100.02	99.77	98.1	98.98	97.95	95.64	99.61	Cr	30.1	26.7	4.36	3.69	3.22	4.32	4.23
La	33.9	28.1	68.98	46.98	61.79	67.29	55.34	Co	14	13.6	8.31	9.42	8.18	15.57	5.06
Ce	54.9	45.2	123.36	98.59	126.68	135.43	108.05	Cu	3.75	2.75	9.98	38.26	15.26	7.96	7.56
Pr	6.41	5.63	13.2	10.53	13.83	14.85	11.6	Pb	22.5	26.4	17.79	20.53	23.2	21.49	23.08
Nd	23.5	20.4	47.63	39.53	48.71	53.8	42.98	Zn	51.7	66.1	58.22	82.58	68.63	53.26	79.18
Sm	4.35	3.65	8.55	7.7	8.76	9.5	7.91	W	199	691	1.95	80.89	2.68	1.87	7.74
Eu	1.16	0.94	1.6	1.52	1.37	1.47	1.49	Sn	10	12	7.06	8.82	6.06	7.08	2.83
Gd	3.88	2.87	7.46	7.07	7.69	8.32	7.04	(La/Sm) _N	4.90	4.84	5.07	3.84	4.44	4.46	4.40
Tb	0.71	0.55	1.2	1.14	1.2	1.35	1.1	(Gd/Yb) _N	1.71	2.34	1.53	1.58	1.52	1.55	1.61
Dy	2.94	1.9	7.02	6.42	7.06	7.71	6.42	(La/Yb) _N	12.49	19.14	11.80	8.80	10.24	10.45	10.57
Ho	0.68	0.46	1.29	1.24	1.33	1.44	1.22	δEu	0.86	0.89	0.61	0.63	0.51	0.51	0.61
Er	1.79	1.12	3.84	3.65	4.02	4.31	3.64	∑REE	136.7	112.2	289.25	229.1	287.71	311.11	251.4
Tm	0.34	0.22	0.59	0.56	0.59	0.65	0.54	∑HREE	12.49	8.29	25.93	24.25	26.57	28.77	24.03
Yb	1.83	0.99	3.94	3.6	4.07	4.34	3.53	∑LREE	124.2	103.9	263.32	204.85	261.14	282.34	227.37
Lu	0.32	0.18	0.59	0.57	0.61	0.65	0.54	A/CNK	1.04	0.97	0.89	0.78	0.93	0.87	0.70

注：主量元素单位为%，微量元素和稀土元素为 μg/g。



(a)5-花岗闪长岩；10-二长岩；11-碱长花岗岩；(b)12-花岗岩；13-二长花岗岩；(d)Low-K: 低钾钙碱性系列；Med-K: 中钾钙碱性系列；Hi-K: 高钾钙碱性系列；Shosh: 钾玄岩系列

图 3 大排铁铅锌多金属矿区二长花岗岩和花岗斑岩的 TAS(a)、QAP(b)、A/CNK-A/NK(c)和 SiO₂-K₂O(d) 岩石命名分类图

Fig.3 Diagram of TAS(A), QAP(B), A/CNK-A/NK(C) and SiO₂-K₂O(D) of granitic rocks in the Dapai area

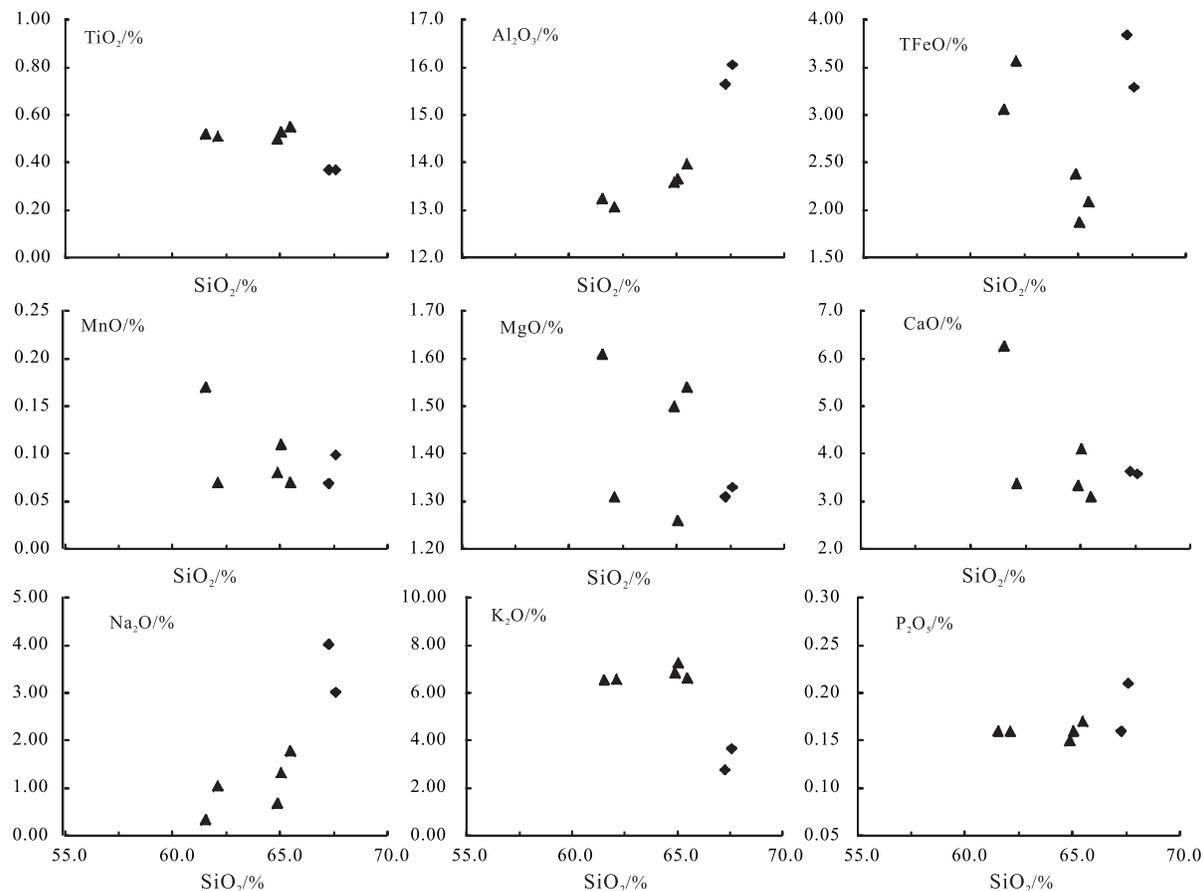


图 4 大排铁铅锌多金属矿矿区二长花岗岩和花岗斑岩 Harker 图
Fig.4 Harker diagram of major elements of magmatic rocks in the Dapai area

二长花岗岩总体特征是 ΣREE 含量相对较低, 2 件样品的 ΣREE 分别为 136.7×10^{-6} 和 112.2×10^{-6} ; 轻稀土元素内部分馏作用明显, 反映轻稀土分馏程度的 $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 分别为 4.84 和 4.90; 重稀土元素内部之间分馏程度较弱, 反映重稀土分馏程度的 $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 分别为 1.71 和 2.34。轻重稀土元素之间分馏程度明显, 反映轻重稀土分馏程度的 $\Sigma\text{HREE}/\Sigma\text{LREE}$ 分别为 9.94 和 12.53, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 分别为 12.49 和 19.14, 属于轻稀土富集型, 具有较弱的 Eu 负异常, Eu/Eu^* 值分别为 0.86 和 0.89, 球粒陨石标准化的稀土配分曲线为右倾的轻稀土富集型(图 5c)。

3.3 微量元素

在微量元素特征上, 花岗斑岩表现出明显的 Rb、Th、U、K、Pb 的富集, 特别是 Rb 和放射性生热元素 Pb 含量较高, 而相对亏损 Nb、Ta、Ba、Sr、P、Ti 等元素; 在原始地幔标准化图解中(图 5b), 显示出 Rb、Th、U、K、Pb 的正异常和 Nb-Ta、Ti、Ba、Sr-P 的负异常, 曲线总体呈平坦型, 显示了类似于活动大陆边缘/岛弧钙碱性系列的特征和演化趋势。

二长花岗岩表现出与花岗斑岩相类似的微量

元素地球化学特征, 在原始地幔标准化图解中(图 5d), 也显示出 Rb、Th、U、K、Pb 的正异常和 Nb-Ta、Ti、Ba、Sr-P 的负异常。

3.4 同位素地球化学特征

大排铁铅锌多金属矿矿区花岗斑岩样品的 Rb-Sr、Sm-Nd 及 Hf 同位素数据列于表 2 和表 3。

据赵希林等(2016)报道, 大排花岗闪长斑岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 127 Ma, 并将这一年龄作为大排花岗闪长斑岩的成岩年龄。以 127 Ma 作为成岩年龄计算得到的花岗斑岩 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值为 0.708 908~0.710 276, 均值为 0.709 409; $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 -5.50~-5.73, 均值为 -5.64; 以 127 Ma 计算的二阶段 Nd 模式年龄 $t_{2\text{DM}}$ 为 1.48~1.50 Ga, 均值为 1.49 Ga。

锆石 Hf 测试结果表明, 样品 25 个测点的 $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 均值分别为 0.173 392 和 0.003 607, 显示锆石在结晶以后具有仅有少量的放射性成因 Hf 积累, 可以用初始 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值代表锆石形成时的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值(Wu *et al.*, 2007)。

以 127 Ma 计算的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -6.05~-2.70(均值为 -4.31), Hf 单阶段模式年龄 (t_{DM1}) 为 0.89~

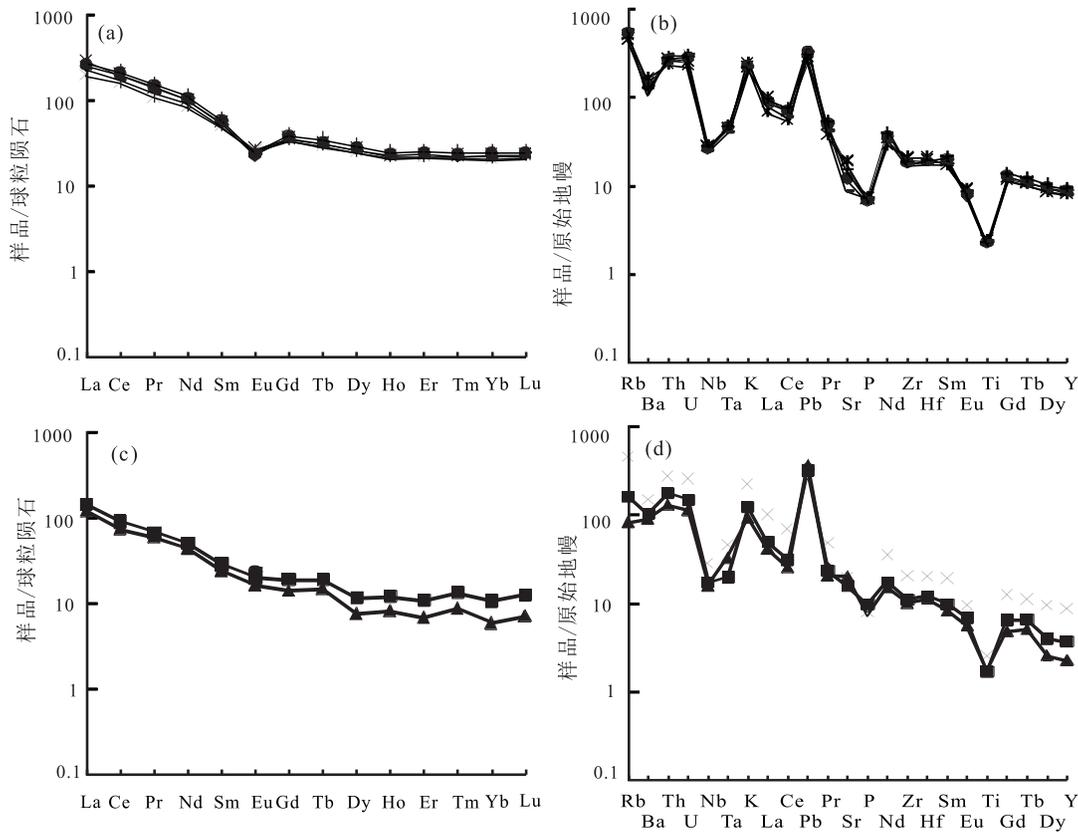


图5 大排矿区二长花岗岩和花岗斑岩稀土元素球粒陨石标准化配分模式和原始地幔标准化微量元素蛛网图(底图据 Sun and McDonough, 1989)

Fig.5 Chondrite-normalized REE patterns and Primitive mantle-normalized spidergrams of magmatic rocks in the Dapai area (framework cited from Sun and McDonough, 1989)

表2 大排花岗斑岩 Rb-Sr、Sm-Nd 同位素测试结果表

Table 2 Rb-Sr and Sm-Nd isotopic compositions for granodiorites of the Dapai area

样号	年龄 /Ma	Rb /($\times 10^{-6}$)	Sr /($\times 10^{-6}$)	$\frac{87\text{Rb}}{86\text{Sr}}$	$\frac{87\text{Sr}}{86\text{Sr}}$	$\left(\frac{87\text{Sr}}{86\text{Sr}}\right)_i$	Sm /($\times 10^{-6}$)	Nd /($\times 10^{-6}$)	$\frac{147\text{Sm}}{144\text{Nd}}$	$\frac{143\text{Nd}}{144\text{Nd}}$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	t_{DM2}/Ga
ZK-1	127	282	411	1.98618	0.713028(15)	0.709443	8.55	47.63	0.10851	0.512283(12)	-5.50	1.48
ZK-2	127	323	398	2.34929	0.713149(7)	0.708908	7.70	39.53	0.11775	0.512279(3)	-5.73	1.50
ZK-3	127	257	221.9	3.35373	0.716330(12)	0.710276	8.76	48.71	0.10871	0.512275(11)	-5.66	1.49
ZK-4	127	300	327	2.65594	0.713803(3)	0.709009	9.50	53.80	0.10674	0.512272(4)	-5.68	1.49

注：年龄数据引自赵希林等(2016)。

1.08 Ga (均值为 1.01 Ga), Hf 二阶段模式年龄 (t_{DM2}) 为 1.54~1.35 Ga, 均值为 1.43 Ga, 与计算的二阶段 Nd 模式年龄 (均值为 1.49 Ga) 有很好的—致性。

4 讨论

4.1 岩石成因

大排二长花岗岩和花岗斑岩具有较低的 SiO_2 含量 (61.53%~67.58%), 较低的 A/CNK 值 (均值为 0.88), 几乎不出现标准矿物分子刚玉; 在 Harker

图解上, SiO_2 与 TiO_2 、 MnO 、 MgO 、 CaO 呈负相关, 而与 Na_2O 、 Al_2O_3 呈正相关, 与其他主量元素之间无明显的相关关系, 表明岩浆结晶过程中有铁镁矿物、含钛矿物等的结晶; 具有较高的 Mg、Ca、Rb、Th、U、K、Pb 值, 且 Nb、Ta、Ti、P、Ba、Sr 等的亏损程度比紫金山壳源型黑云母花岗岩低 (赵希林等, 2012, 2013); $\left(\frac{87\text{Sr}}{86\text{Sr}}\right)_i$ 为 0.708908~0.710276、 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 -5.50~-5.73, t_{DM2} 为 1.48~1.50 Ga, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值均高于凌洪飞等 (2006) 统计的象头山等 6 个强过铝壳源型花岗岩 [$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 (-13.4~-10.0, 均值为

表3 锆石 LA-ICP-MS Lu-Hf 测试结果

Table 3 LA-ICP-MS zircon Lu-Hf isotope analyses of zircons from the Dapai area

Sport	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf _i	ε _{Hf} (t)	t _{DM} /Ga	t _{DM2} /Ga
1	0.098864	0.002340	0.001999	0.000028	0.282621	0.000023	0.282616	-3.14	0.92	1.36
2	0.241901	0.002061	0.005432	0.000028	0.282614	0.000028	0.282601	-3.70	1.03	1.39
3	0.120409	0.001428	0.002252	0.000014	0.282620	0.000021	0.282615	-3.19	0.93	1.36
4	0.254361	0.002661	0.005659	0.000124	0.282586	0.000025	0.282572	-4.70	1.08	1.46
5	0.244130	0.005589	0.005877	0.000189	0.282636	0.000026	0.282622	-2.95	1.00	1.35
6	0.154294	0.002785	0.002578	0.000044	0.282564	0.000024	0.282558	-5.22	1.02	1.49
7	0.080153	0.003243	0.001618	0.000095	0.282631	0.000031	0.282628	-2.75	0.89	1.33
8	0.069163	0.000329	0.001290	0.000018	0.282579	0.000017	0.282576	-4.56	0.96	1.45
9	0.064155	0.000553	0.001195	0.000029	0.282537	0.000017	0.282534	-6.05	1.02	1.54
10	0.264336	0.004338	0.005516	0.000094	0.282575	0.000029	0.282562	-5.06	1.09	1.48
11	0.222904	0.004559	0.004700	0.000139	0.282570	0.000021	0.282559	-5.17	1.07	1.49
12	0.417892	0.004151	0.009918	0.000081	0.282616	0.000074	0.282593	-3.99	1.18	1.41
13	0.155893	0.002821	0.003279	0.000068	0.282577	0.000020	0.282569	-4.82	1.02	1.46
14	0.193119	0.005650	0.004736	0.000201	0.282602	0.000025	0.282591	-4.06	1.02	1.42
15	0.104749	0.000319	0.001552	0.000008	0.282581	0.000014	0.282577	-4.54	0.97	1.45
16	0.191203	0.004770	0.003938	0.000113	0.282607	0.000019	0.282597	-3.82	0.99	1.40
17	0.150945	0.002264	0.002234	0.000019	0.282584	0.000018	0.282579	-4.46	0.98	1.44
18	0.163877	0.004580	0.002927	0.000080	0.282586	0.000019	0.282579	-4.47	0.99	1.44
19	0.141193	0.003384	0.002232	0.000036	0.282591	0.000015	0.282586	-4.23	0.97	1.43
20	0.182273	0.001782	0.004217	0.000055	0.282603	0.000024	0.282593	-3.96	1.00	1.41
21	0.212829	0.002351	0.004901	0.000073	0.282593	0.000037	0.282581	-4.39	1.04	1.44
22	0.129356	0.001959	0.002548	0.000083	0.282570	0.000017	0.282564	-4.99	1.01	1.48
23	0.123233	0.002542	0.002461	0.000104	0.282586	0.000016	0.282580	-4.43	0.98	1.44
24	0.263022	0.006463	0.005470	0.000148	0.282635	0.000024	0.282622	-2.95	0.99	1.35
25	0.090542	0.000602	0.001649	0.000014	0.282538	0.000014	0.282535	-6.04	1.03	1.54

注：年龄数据引自赵希林等(2016)。

-12.1]; t_{DM2} 为 1.76~2.08 Ga, 均值为 1.96 Ga, 低于壳源型花岗岩。在 ε_{Nd}(t)-(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i 图解中投影于华南壳源型花岗岩之外, 靠近地幔演化区域(图 6a); 在 ε_{Nd}(t)-t 图解中投影于中元古代地壳演化域的上方(图 7a), 反映幔源物质在其形成过程中起到了重要作用。同时, 测年锆石的 ε_{Hf}(t) 值为 -6.05~-2.70 (均值为 -4.31), Hf 二阶段模式年龄 (t_{DM2}) 为 1.54~1.35 Ga (均值为 1.43 Ga) (图 8), 与计算的二阶段 Nd 模式年龄有很好的-一致性。以上特征表明, 大排铁铅锌多金属矿矿区二长花岗岩与花岗斑岩为壳幔混源型花岗岩。

4.2 物质来源

大排铁铅锌多金属矿矿区二长花岗岩与花岗斑岩为壳幔混源型花岗岩, 但又与区域上的壳幔混源型花岗岩相类似但又有所差别, 其(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i 值低于区域上较早的紫金山岩体、才溪和大洋岩体(赵希林等, 2007, 2013; 张承帅等, 2012; 李斌等,

2015), 而高于区域上较晚的太华、四方、罗卜岭和苏坑岩体(图 6b) (张承帅等, 2012; 赵希林等, 2013; Zhao et al., 2015), 而 ε_{Nd}(t) 与 (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i 值有相反的变化趋势(图 6a); 其 ε_{Hf}(t) 低于区域上较晚形成的四方岩体、罗卜岭岩体及苏坑岩体等(梁清玲等, 2013; 赵希林等, 2013; Jiang et al., 2013; Zhao et al., 2015), 这些 Sr-Nd-Hf 同位素特征表明区域上早白垩世期间随着时间的推移, 地幔岩浆在岩浆形成过程中的参与程度是逐渐加大的。福建省永定县大排铁铅锌多金属矿矿区二长花岗岩与花岗斑岩在 CMF-AMF 图上落入基性岩及变杂砂岩交界的部分熔融区(图 7b), 推测其可能是在岩浆底侵作用下由中元古代地壳物质部分熔融所形成, 在形成过程中有幔源物质组分加入。

4.3 岩浆作用与成矿关系

闽西南地区及邻区晚中生代中酸性岩与成矿作用关系密切, 具壳幔混源特征的花岗岩类对成矿

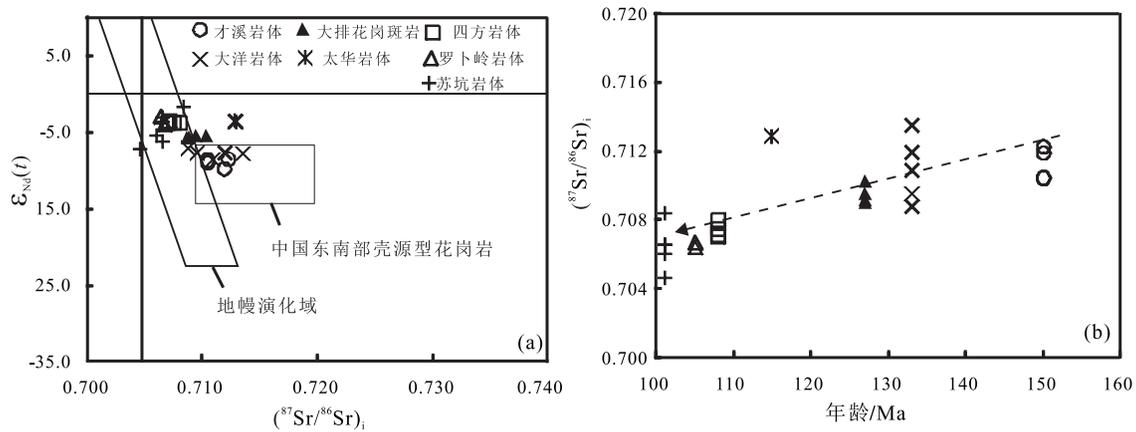


图6 闽西南地区早白垩世花岗岩类 $\epsilon_{Nd}(t) - (^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 和 $t - (^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 图解

Fig.6 $\epsilon_{Nd}(t) - (^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ and $t - (^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ diagram of granitic rocks in southwest Fujian Provinces

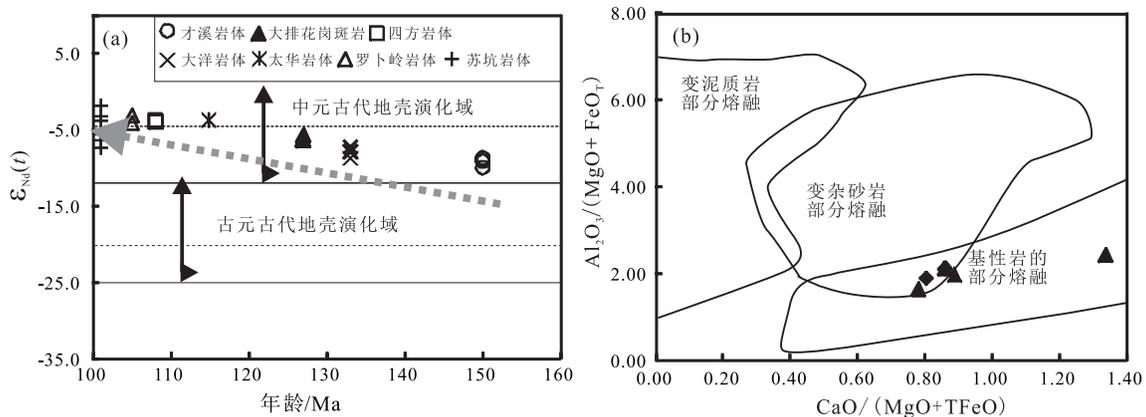


图7 花岗岩 $\epsilon_{Nd}(t) - t$ 图解和 AFM-CFM 图解 (a-据凌洪飞等,1999; b-据 Altherr *et al.*,2000)

Fig.7 $\epsilon_{Nd}(t) - t$ diagram and AFM-CFM diagram of granite

(a-modified after Ling Hongfei *et al.*, 1999; b-modified after Altherr *et al.*,2000)

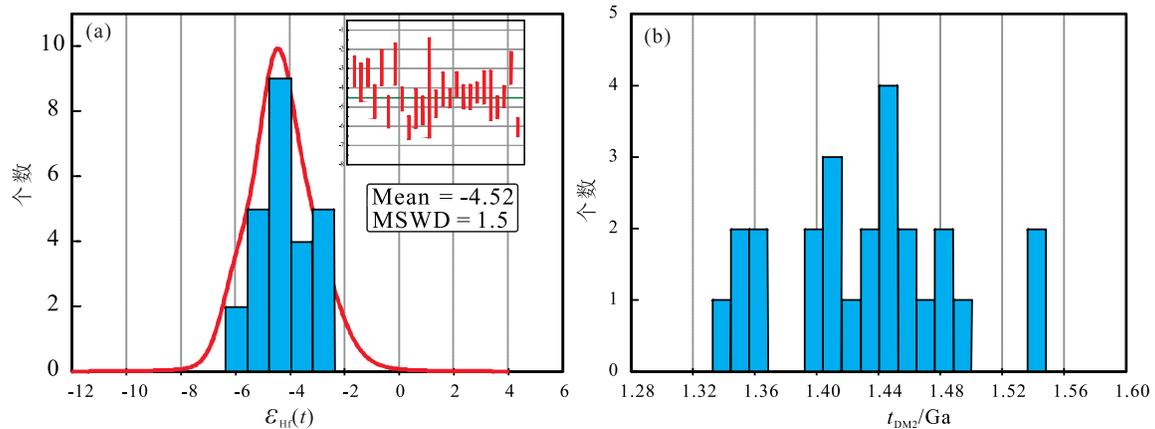


图8 大排铁铅锌多金属矿矿区锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ 和 t_{DM2} 频谱图

Fig.8 The diagrams of $\epsilon_{Hf}(t)$ and t_{DM2} of zircons from the Dapai area

作用起到了积极作用,可以作为找矿标志,如闽西南地区的“马坑式铁矿”和“汤泉式铁矿”均与后期岩浆作用相关,马坑铁矿区莒舟岩体和 大洋岩体、漳平市洛阳铁矿矿区似斑状花岗岩以及大田汤泉

地区高星矿区中酸性的汤泉岩体与太华岩体在岩浆侵入过程中的热叠加改造均对矿床的形成起到了积极作用;特别是有些岩体本身即是斑岩型铜钼矿体,如罗卜岭岩体等,已有众多学者对这期岩浆

作用与成矿作用进行了论述(Altherr *et al.*, 2000; 许乃政等, 2008; 钟军等, 2011; 倪建辉, 2012; 梁清玲等, 2012; 赵希林等, 2012, 2013; 黄文婷等, 2013; 黄小龙等, 2013; 赖晓丹和祁进平, 2014; 许泰和王勇, 2014; Zhang and Zuo, 2014, Zhong *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2015; Zhao *et al.*, 2015)。如赵希林等(2013)认为区内四方岩体从地幔中获取了大量的铜及其他金属和硫, 成为斑岩型铜金多金属矿床成矿系列的主要含矿母岩; 张承帅等(2012)提出马坑矿区莒舟-大洋岩体岩浆形成过程中地幔组分的加入对对马坑铁矿的形成也有重要作用。

张振杰和左仁广(2015)在对前人资料综合整理的基础上提出了闽西南地区的成矿系列, 认为闽西南地区早白垩世与壳源型中酸性侵入岩有关的矿床主要是铁-铜-铅-锌-钼多金属矿床, 多为层控矽卡岩型矿床; 与早白垩世壳幔混合源型中酸性侵入岩-次火山作用有关的矿床主要是金-银-铜-钼-铅-锌-铀等多金属矿床, 主要是斑岩型钼矿和高硫型浅成低温热液铜(金)矿床。

大排铁铅锌多金属矿矿体受构造、岩性、层位及岩浆岩等控制明显, 矿体多呈层状、似层状, 受下二叠统栖霞组(P_1q)、上石炭统船山组(C_3c)、下石炭统林地组(C_1l)地层控制明显。同时, 在大排矿区北部边缘的 ZK403 孔深部首次发现上石炭统经畚组, 并在该孔经畚组累计见磁铁矿厚度 86.82 m, 全铁品位 37.23%。这些层位岩性多以灰岩、大理岩为主, 易受岩浆作用的影响; 其矿石结构反映出交代作用的特征, 如交代结构、交代熔融结构及交代残留结构等(图 9); 其脉石矿物组合为石榴子石+透辉石+次透辉石+黑柱石+绿帘石+石英+方解石, 矿石矿物组合、主矿体的化学变化均反映出沉积-热液改造特征。

(a) 充填交代结构: 辉钼矿呈片状充填交代脉石矿物(20×12 倍); (b) 固溶体结构: 黄铜矿与赋存于其中的肠状闪锌矿呈固溶体(50×12 倍)

大排铁铅锌多金属矿层状-似层状矿体在产出位置上与斑岩体关系密切, 矿体多产于花岗斑岩体的外接触带, 特别是岩体的分叉等利于挥发分集中交代成矿的构造部位绿帘石矽卡岩化、石榴石矽卡岩化、透辉石矽卡岩化等作用更加明显, 因此斑岩体可能为成矿提供多金属矿化热液, 并对沉积介质中的铁铅锌多金属起到活化、叠加、转移和富集的作用; 同时, 花岗斑岩体本身钾长石化也较强烈, 含有一定量的 Cu、Pb、Zn 等成矿元素, 与围岩接触处成矿元素含量明显增加(赵希林等, 2016), 因此, 大排铁铅锌多金属矿兼具斑岩型矿床的特征。

因此, 大排铁铅锌多金属矿成矿兼具层控矽卡岩型和斑岩型矿床特征(赵希林等, 2016), 为层控矽卡岩型-斑岩型矿床, 且在同一成矿体系中矿种由浅部铅锌多金属矿到深部磁铁矿的例子也较少, 该矿床的发现为研究闽西南地区晚中生代岩浆作用、岩浆作用与成矿、矿床成因等提供了又一重要信息。

5 结论

(1) 大排铁铅锌多金属矿矿区二长花岗岩与花岗斑岩具有较低的 A/CNK 值(均值为 0.88), 富集 Mg、Ca、Rb、Th、U、K、Pb 元素, 亏损 Nb、Ta、Ti、P、Ba、Sr 等元素; $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 为 0.708 908 ~ 0.710 276、 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 -5.50 ~ -5.73、 t_{DM2} 为 1.48 ~ 1.50 Ga, 锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -6.05 ~ -2.70(均值为 -4.31), Hf 二阶段模式年龄(t_{DM2})为 1.54 ~ 1.35 Ga(均值为 1.43 Ga), 反映幔源物质在其形成过程中起到了重要作用, 可能是在岩浆底侵作用下由中元古代地壳物质部分熔融所形成, 在形成过程中有幔

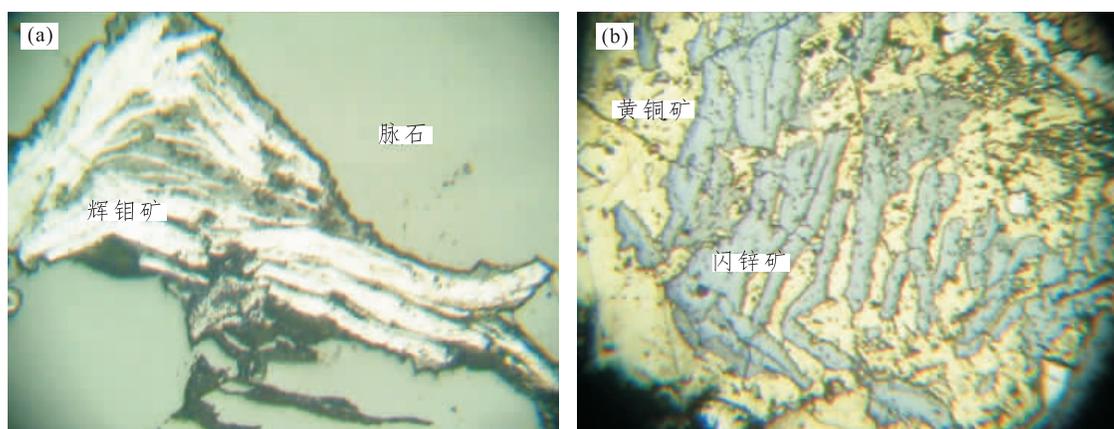


图 9 大排铁铅锌多金属矿矿石矿物显微特征

Fig.9 Microcharacteristics of ore mineral from the Dapai area

源物质组分加入,二者均属于壳幔混源型花岗岩。

(2) 大排铁铅锌多金属矿矿区二长花岗岩与花岗斑岩为壳幔混源型花岗岩,但又与区域上的壳幔混源型花岗岩有所差别,其 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值低于区域上较早的才溪和大洋岩体,而高于区域上较晚的太华、四方、罗卜岭和苏坑岩体,而 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 与 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值有相反的变化趋势,其 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 低于区域上较晚形成的四方岩体、罗卜岭岩体及苏坑岩体等,这些 Sr-Nd-Hf 同位素特征表明闽西南地区早白垩世期间随着时间的推移,地幔岩浆在岩浆形成过程中的参与程度是逐渐加大的。

(3) 闽西南地区壳幔混源特征的花岗岩类对成矿起到了积极作用。大排铁铅锌多金属矿成矿兼具层控矽卡岩型和斑岩型矿床特征,为层控矽卡岩型-斑岩型矿床,该矿床的发现为研究闽西南地区晚中生代岩浆作用与成矿作用提供了又一重要信息。

参考文献 (References):

- Altherr R, Holl A, Hegner E, Langer C, Kreuzer H. 2000. High-potassium, calc-alkaline I-type plutonism in the European variscides: Northern Vosges (France) and northern Schwarzwald (Germany). *Lithos*, 50(1-3): 51-73
- Chen Y J, Chen H Y, Zaw K, Pirajno F, Zhang Z J. 2007. Geodynamic settings and tectonic model of skarn gold deposits in China: An overview. *Ore Geology Reviews*, 31(1-4): 139-169
- Guo F, Fan W M, Li C W, Zhao L, Li H X, Yang J H. 2012. Multi-stage crust-mantle interaction in SE China: Temporal, thermal and compositional constraints from the Mesozoic felsic volcanic rocks in eastern Guangdong-Fujian provinces. *Lithos*, 150: 62-84
- Hsü K J, Li J L, Chen H H, Wang Q C, Sun S, Şengör A M C. 1990. Tectonics of South China: Key to understanding west pacific geology. *Tectonophysics*, 183(1-4): 9-39
- Jiang S H, Liang Q L, Bagas L, Wang S H, Nie F J, Liu Y F. 2013. Geodynamic setting of the Zijinshan porphyry-epithermal Cu-Au-Mo-Ag ore system, SW Fujian Province, China: Constrains from the geochronology and geochemistry of the igneous rocks. *Ore Geology Reviews*, 53: 287-305
- Liu Y S, Zong K Q, Kelemen P B, Gao S. 2008. Geochemistry and magmatic history of eclogites and ultramafic rocks from the Chinese continental scientific drill hole: Subduction and ultrahigh-pressure metamorphism of lower crustal cumulates. *Chemical Geology*, 247(1-2): 133-153
- Mao J W, Cheng Y B, Chen M H, Pirajno F. 2013. Major types and time-space distribution of Mesozoic ore deposits in South China and their geodynamic settings. *Mineralium Deposita*, 48(3): 267-294
- Morel M L A, Nebel O, Nebel-Jacobsen Y J, Miller J S, Vroon P Z. 2008. Hafnium isotope characterization of the GJ-1 zircon reference material by solution and laser-ablation MC-ICPMS. *Chemical Geology*, 255(1-2): 231-235
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313-345
- Wu F Y, Clift P D, Yang J H. 2007. Zircon Hf isotopic constraints on the sources of the Indus Molasse, Ladakh Himalaya, India. *Tectonics*, 26(2): TC2014
- Zhang Z J, Zuo R G. 2014. Sr-Nd-Pb isotope systematics of magnetite: Implications for the genesis of Makeng Fe deposit, southern China. *Ore Geology Reviews*, 57: 53-60
- Zhang Z J, Zuo R G, Cheng Q M. 2015. The mineralization age of the Makeng Fe deposit, South China: Implications from U-Pb and Sm-Nd geochronology. *International Journal of Earth Sciences*, 104(3): 663-682
- Zhao X L, Liu K, Yu M G, Jiang Y, Mao J R, Zhou X H, Yu S Y. 2015. Early Cretaceous I-type granites in the southwest Fujian Province: New constraints on the late Mesozoic tectonic evolution of southeast China. *Island Arc*, 24(3): 359-378
- Zhong J, Chen Y J, Pirajno F, Chen J, Li J, Qi J P, Li N. 2014. Geology, geochronology, fluid inclusion and H-O isotope geochemistry of the Luoboling porphyry Cu-Mo deposit, Zijinshan orefield, Fujian Province, China. *Ore Geology Reviews*, 57: 61-77
- Zuo R G, Zhang Z J, Zhang D J, Carranz E J M, Wang H C. 2015. Evaluation of uncertainty in mineral prospectivity mapping due to missing evidence: A case study with skarn-type Fe deposits in Southwestern Fujian Province, China. *Ore Geology Reviews*, 71: 502-515
- 陈静, 陈衍景, 钟军, 孙艺, 李晶, 祁进平. 2011. 福建省紫金山矿田五子骑龙铜矿床流体包裹体研究. *岩石学报*, 27(5): 1425-1438
- 陈静, 陈衍景, 钟军, 孙艺, 祁进平, 李晶. 2015. 福建省紫金山矿田龙江亭矿床地质和成矿流体特征及成因意义. *矿床地质*, 34(1): 98-118
- 侯可军, 李延河, 邹天人, 曲晓明, 石玉若, 谢桂青. 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
- 华仁民, 陈培荣, 张文兰, 刘晓东, 陆建军, 林锦富, 姚军明, 戚华文, 张展适, 顾晟彦. 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, 陆建军. 2005. 论华南地区中生代 3 次大规模成矿作用. *矿床地质*, 24(2): 99-107
- 黄仁生. 2008. 福建紫金山矿田火成岩系列与浅成低温热液-斑岩铜金银成矿系统. *地质力学学报*, 14(1): 74-86
- 黄文婷, 李晶, 梁华英, 王春龙, 林书平, 王秀璋. 2013. 福建紫金山矿田罗卜岭铜钼矿化斑岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及成矿岩浆高氧化特征研究. *岩石学报*, 29(1): 283-293
- 黄小龙, 钟军伟, 于洋, 李洁. 2013. 福建明溪麻粒岩包体的年代学和矿物学特征: 地温曲线及其华南中生代壳-幔相互作用意义. *矿物岩石地球化学通报*, 32(2): 212-221
- 赖晓丹, 祁进平. 2014. 福建省上杭县罗卜岭斑岩铜钼矿床构造控矿规律研究. *地质学报*, 88(10): 1904-1916
- 李斌, 赵葵东, 杨水源, 戴宝章. 2013. 福建紫金山矿田二庙沟铜(金)矿区英安玢岩的成因及其成矿意义. *岩石学报*, 29(12): 4167-4185

- 李斌, 赵葵东, 张倩, 徐耀明, 朱志勇. 2015. 福建紫金山复式岩体的地球化学特征和成因. 岩石学报, 31(3): 811-828
- 梁清玲, 江思宏, 王少怀, 李超, 曾法刚. 2012. 福建紫金山矿田罗卜岭斑岩型铜钼矿床辉钼矿 Re-Os 定年及地质意义. 地质学报, 86(7): 1113-1118
- 梁清玲, 江思宏, 王少怀, 刘翼飞, 白大明, 陈春良. 2013. 福建紫金山地区中生代岩浆岩成因: 锆石 Hf 同位素证据. 岩石矿物学杂志, 32(3): 318-328
- 凌洪飞, 沈渭洲, 黄小龙. 1999. 福建省花岗岩类 Nd-Sr 同位素特征及其意义. 岩石学报, 15(2): 255-262
- 凌洪飞, 沈渭洲, 孙涛, 蒋少涌, 姜耀辉, 倪培, 高剑峰, 黄国龙, 叶海敏, 谭正中. 2006. 广东省 22 个燕山期花岗岩的源区特征及成因: 元素及 Nd-Sr 同位素研究. 岩石学报, 22(11): 2687-2703
- 刘晓东, 华仁民. 2005. 福建碧田金银铜矿床冰长石的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄. 地质论评, 51(2): 151-155
- 毛建仁, 陶奎元, 谢芳贵, 许乃政, 陈三元. 2001. 闽西南地区成岩成矿作用与构造环境. 岩石矿物学杂志, 20(3): 329-336
- 毛建仁, 陶奎元, 李寄嶠, 谢方贵, 许乃政. 2002. 闽西南晚中生代四方岩体同位素年代学、地球化学及其构造意义. 岩石学报, 18(4): 449-458
- 毛建仁, 许乃政, 胡青, 邢光福, 杨祝良. 2004a. 福建省上杭-大田地区中生代成岩成矿作用与构造环境演化. 岩石学报, 20(2): 285-296
- 毛建仁, 许乃政, 胡青, 李寄嶠, 谢芳贵. 2004b. 闽西南地区中生代花岗闪长质岩石的同位素年代学、地球化学及其构造演化. 吉林大学学报(地球科学版), 34(1): 12-20
- 毛景文, 谢桂青, 李晓峰, 张长青, 梅燕雄. 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, 程彦博, 陈毓川. 2009. 华南地区中生代主要金属矿床模型. 地质论评, 55(3): 347-354
- 倪建辉. 2012. 福建永定大排铁铅锌多金属矿床地质特征及找矿模式探讨. 福建地质, 31(3): 206-214
- 舒良树. 2012. 华南构造演化的基本特征. 地质通报, 31(7): 1035-1053
- 王果胜, 马文璞, 朱卫平. 2009. 闽西南晚古生代早三叠世沉积特征及其大地构造意义. 成都理工大学学报(自然科学版), 36(1): 87-91
- 王少怀, 裴荣富, 曾宪辉, 邱小平, 魏民. 2009. 再论紫金山矿田成矿系列与成矿模式. 地质学报, 83(2): 145-157
- 吴淦国, 张达, 陈柏林, 吴建设. 2000. 中国东南大陆中生代构造域的转换及其与成矿的关系: 以闽西南地区为例. 地球科学-中国地质大学学报, 25(4): 390-396
- 吴淦国, 张达, 彭润民, 吴建设, 高天钧, 陈柏林, 汪群峰, 狄永军, 张祥信. 2004. 东南沿海成矿带矿床形成的时间演化规律研究. 地学前缘, 11(1): 237-247
- 武丽艳, 胡瑞忠, 齐有强, 朱经. 2013. 福建紫金山矿田浸铜湖矿床石英正长斑岩锆石 U-Pb 年代学及其岩石地球化学特征. 岩石学报, 29(12): 4151-4166
- 许靖华, 孙枢, 李继亮. 1987. 是华南造山带而不是华南地台. 中国科学(B辑), (10): 1107-1115
- 许乃政, 毛建仁, 叶海敏, 沈莽庭, 刘仰炮, 陈乐柱. 2008. 福建省永定县大排铅锌矿床成矿地质特征及找矿新进展. 地质与勘探, 44(4): 20-23
- 许泰, 王勇. 2014. 赣南西华山钨矿床硫、铅同位素组成对成矿物质来源的示踪. 矿物岩石地球化学通报, 33(3): 342-347
- 张承帅, 苏慧敏, 于森, 胡兆国. 2012. 福建龙岩大洋-莒舟花岗岩锆石 U-Pb 年龄和 Sr-Nd-Pb 同位素特征及其地质意义. 岩石学报, 28(1): 225-242
- 张达, 吴淦国, 刘乃忠, 狄永军, 吕良冀, 曹文融. 2010. 福建漳平北坑场钨多金属矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及其地质意义. 地质学报, 84(10): 1428-1437
- 张德全, 李大新, 丰成友, 董英君. 2001. 紫金山地区中生代岩浆系统的时空结构及其地质意义. 地球学报, 22(5): 403-408
- 张德全, 丰成友, 李大新, 余宏全, 董英君. 2005. 紫金山地区斑岩-浅成热液成矿系统的成矿流体演化. 地球学报, 26(2): 127-136
- 张庆龙, 林奕源, 徐士银, 陈金水, 杜菊民, 葛荣峰. 2008. 福建省地体构造划分及构造演化. 资源调查与环境, 29(3): 168-176
- 张振杰, 左仁广. 2015. 闽西南地区大地构造演化和矿床时空分布规律. 岩石学报, 31(1): 217-229
- 赵希林, 毛建仁, 陈荣, 许乃政, 曾庆涛, 叶海敏. 2007. 闽西南地区才溪岩体锆石 SHRIMP 定年及其地球化学特征. 岩石矿物学杂志, 26(3): 223-231
- 赵希林, 毛建仁, 陈荣, 许乃政. 2008. 闽西南地区紫金山岩体锆石 SHRIMP 定年及其地质意义. 中国地质, 35(4): 590-597
- 赵希林, 毛建仁, 叶海敏, 许乃政, 胡青. 2009. 福建上杭地区晚中生代花岗质岩体黑云母的地球化学特征及成因意义. 矿物岩石地球化学通报, 28(2): 162-168
- 赵希林, 刘凯, 毛建仁, 叶海敏. 2012. 华南燕山早期晚阶段两类花岗质岩体与成矿作用: 以赣南-闽西南地区为例. 中国地质, 39(4): 871-885
- 赵希林, 刘凯, 毛建仁, 叶海敏, 于胜尧. 2013. 闽西南地区早白垩世两类花岗质岩体地球化学异同及其与成矿作用关系. 矿物岩石地球化学通报, 32(1): 87-96
- 赵希林, 于胜尧, 余明刚, 姜杨, 刘凯, 毛建仁. 2016. 福建省永定大排铁铅锌多金属矿床特征及成矿时代. 中国地质, 43(1): 174-187
- 钟军, 陈衍景, 陈静, 李晶, 祁进平, 戴茂昌. 2011. 福建省紫金山矿田罗卜岭斑岩型铜钼矿床流体包裹体研究. 岩石学报, 27(5): 1410-1424

(本文责任编辑: 龚超颖; 英文审校: 高剑峰)