



福建上杭县浸铜湖矿床成矿岩体的地球化学特征及其地质意义

李 斌^{1,2,3}, 鲁安怀^{1,2}, 赖健清^{1,2}, 杨 牧^{1,2}

(1. 中南大学 有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室, 长沙 410083;

2. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083;

3. 南京大学 地球科学与工程学院, 内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 南京 210093)

摘 要: 华南晚中生代发育大规模的岩浆活动及巨量金属成矿, 成岩成矿作用一直是花岗岩成矿省研究的主要内容。闽西浸铜湖铜钼矿床中发育有与矿化同时代的花岗闪长斑岩及花岗斑岩。为查明这两个岩体与矿化的关系, 对其进行详细的岩石地球化学分析。研究表明: 花岗闪长斑岩属弱过铝质岩, 具埃达克质岩石的亲缘性。元素和同位素特征指示其为俯冲交代富集地幔来源, 分离结晶作用控制着岩体的形成。花岗斑岩属过铝质岩, 发生斜长石的分离结晶。花岗斑岩的 Sr-Nd 同位素组成排除华夏元古代陆壳基底物质及幔源岩浆参与的可能, 指示其物质来源应为早期就位的火成岩或正变质岩。浸铜湖矿床形成于受古太平洋板块俯冲、折返影响而形成的伸展构造环境。

关键词: 花岗斑岩; 花岗闪长斑岩; 微量元素; Sr-Nd 同位素; 浸铜湖; 福建

中图分类号: P588.13; P597.3; P618.41

文献标志码: A

浸铜湖铜钼矿床位于福建省上杭县的紫金山矿田内^[1], 属紫金山浅成低温热液-斑岩成矿体系的一部分^[2]。紫金山矿田内主要发育有中晚侏罗世的壳源 S 型花岗岩以及白垩纪的中酸性次火山岩-浅成斑岩侵入体^[1, 3-9], 后者与矿田内发育的斑岩-浅成低温热液成矿系统密切相关^[1, 3-7, 10-11]。紫金山矿田内白垩纪岩浆事件具多期次、多阶段的特点。前人对矿田进行了大量的研究工作^[1, 3, 10], 积累了很多有意义的数据。然而, 对矿田内岩基及岩体的宽泛研究虽然便于讨论大尺度的构造-岩浆演化过程, 却缺乏对具体矿床中特定岩体及矿化的精细刻画, 这制约着对不同成矿体系成岩成矿机制的深入解析, 也不利于对紫金山矿田这一复杂且矿化类型齐全的浅成低温热液-斑岩成矿系统进行综合系统的研究。

斑岩型铜钼矿床主要形成于高氧逸度的岩浆体系, 其抑制岩浆熔体中形成大量的硫化物相, 阻止了岩浆中亲铜和亲硫元素的流失^[12]。而亲铜和亲铁元素主要以硫化物的形式储集在地幔中, 硫化物在高氧逸度的条件下将发生分解并释放 S 和金属元素进入到熔体中形成含矿岩浆^[12-14]。此外, 洋壳板片熔融导致斑

岩 Cu-Au 矿床多产于俯冲带地区, 俯冲作用为形成高氧逸度和高水含量的岩浆创造了条件^[15]。除板片熔融来源以外, 与大型斑岩矿床有关的埃达克质岩也可来源于富水玄武质岩浆经过角闪石±石榴子石的结晶分异作用^[15-16]。因此, 如何形成埃达克质岩浆存在有较大的争议。

对矿床中与矿化同期发育的含矿与不含矿岩体的对比研究是进行成岩成矿作用探讨的最有效手段^[6, 17]。通过对含矿与不含矿岩体的物质来源, 结晶分异及成岩物理化学条件的对比, 可判断相应的成矿物质来源及矿质运移、沉淀的机制, 并为进一步确定找矿标志及进行找矿预测提供依据。浸铜湖铜钼矿床中与矿化密切相关的主要为花岗闪长斑岩及花岗斑岩, 其研究工作也相对薄弱, 缺乏精确地岩石地球化学数据, 这成为制约岩浆演化及矿床成因研究的重要因素。

为更好地理解紫金山矿田内的构造-岩浆-矿化演化机制, 本文作者对前人研究相对较少的浸铜湖矿床开展了系统的岩石地球化学的研究, 以期阐明相应岩体的成因及其与成矿的关系, 揭示壳幔组分在成岩

成矿过程中的作用, 并为进一步探讨华南白垩纪时期的构造-岩浆演化模式及金属成矿作用提供新的依据。

1 地质背景

华夏地块北缘以江山-绍兴断裂与萍乡-玉山断裂为界, 向西南延伸到衡阳-祁东-永州-桂林一带, 南部以海南岛南部的九所-陵水断裂带为界(见图1)^[18-22]。从新元古代开始, 华夏与扬子地块发生碰撞聚合^[23], 逐渐形成了延伸约 1500 km 的江南新元古代弧形造山带。政和-大埔断裂是华夏地块内对中生代火成岩具有分区控制作用的基底断裂, 可能为两个大地构造单元之间的缝合线^[5-6, 22-24]。政和-大埔断裂呈 NE 向延伸, 其西侧为武夷隆起, 岩浆产物以花岗岩类为主; 断裂以东火山岩大面积出露(见图1)^[24]。

华夏基底变质岩主要为古元古代的花岗岩和变质岩, 中元古代的沉积岩以及新元古代的角闪岩、片麻岩、混合岩以及绿片岩^[25]。不同于元古代变质岩的零星分布, 古生代海相及陆相沉积地层分布较广^[25-26]。

晚石炭世到早三叠世主要为浅海相的碳酸盐岩沉积^[20]。中二叠世到早三叠世多发育粉砂岩、砂岩、泥岩和碳酸盐岩沉积^[26]。从三叠纪开始, 受印支运动影响广泛发育陆内的造山运动^[27]。中晚侏罗世到白垩纪时期发育大规模的岩浆活动, 且具有向洋年轻化的分布特征(见图1)^[20]。内陆发育侏罗纪的火山岩和花岗岩(见图1), 沿海发育白垩纪火山岩、花岗岩和玄武岩(见图1)^[19-20]。福建地区典型火山岩系列有南源群(143~130 Ma)以及石帽山群(104~95 Ma), 以长英质的火山岩类为主^[28]。

福建紫金山矿田位于福建省的西南部(见图2), 大地构造单元属上杭火山盆地的东北缘(见图2(a)), 且位于云霄-上杭构造带与宣和复背斜的交汇部位(见图2(a))。楼子坝群包括细粒变质砂岩和千枚岩, 为紫金山矿田内发育的新元古代地层; 且不整合接触于泥盆纪-石炭纪时期天瓦崇组和林地组的碎屑岩及灰岩(见图2(b))。紫金山矿田发育大规模的晚中生代火山岩及侵入岩。中晚侏罗世时期以紫金山复式花岗杂岩体及才溪二长花岗岩为主, 约占矿田总面积的一半以上(见图2(b))。白垩纪的火山岩系列有凝灰岩, 隐爆角砾岩, 英安玢岩等火山熔岩及次火山岩; 地表出露明显的侵

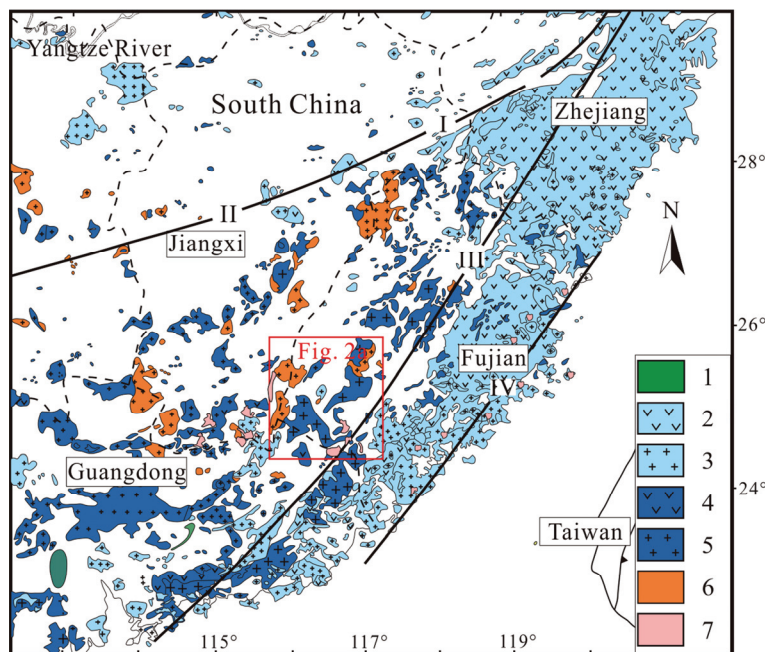


图1 华南中生代花岗岩及火山岩分布图(据文献[18-20]改绘): 1—古近纪岩浆岩; 2—白垩纪火山岩; 3—白垩纪花岗岩; 4—侏罗纪火山岩; 5—侏罗纪花岗岩; 6—三叠纪花岗岩; 7—中生代玄武岩; I—江山-绍兴断裂; II—萍乡-玉山断裂; III—政和-大埔断裂; IV—长乐-南澳断裂

Fig. 1 Schematic geological map of South China showing distribution of Mesozoic granitoid and volcanic rocks (modified after Ref. [18-20]): 1—Paleogene magmatic rocks; 2—Cretaceous volcanics; 3—Cretaceous granites; 4—Jurassic volcanics; 5—Jurassic granites; 6—Triassic granites; 7—Mesozoic basalts; I—Jiangshan-Shaoxing fault; II—Pingxiang-Yushan fault; III—Zhenghe-Dapu fault; IV—Changle-Nan'ao fault

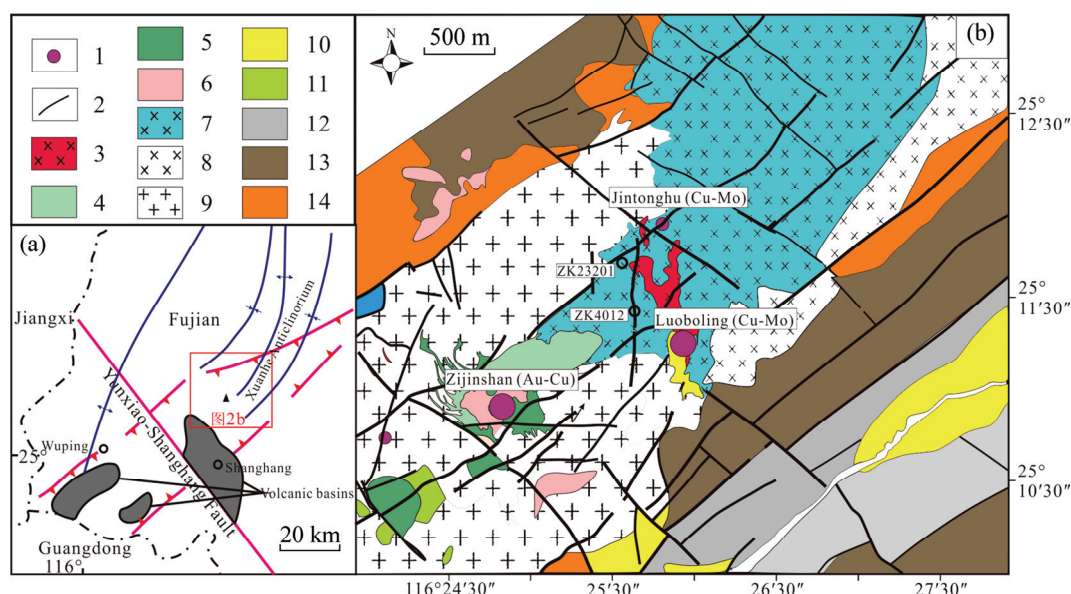


图2 福建西南部区域构造图及紫金山矿田地质图(据文献[2, 8-9]改绘): 1—矿床; 2—断裂; 3—罗卜岭花岗闪长斑岩(K1); 4—英安玢岩(K1); 5—隐爆角砾岩(K1); 6—凝灰岩(K1); 7—四方花岗闪长岩(K1); 8—才溪二长花岗岩(J3); 9—紫金山复式岩体(J2-J3); 10—第四系沉积; 11—石帽山群(白垩纪); 12—林地组(石炭纪); 13—天瓦崇组(泥盆纪); 14—楼子坝群(新元古代)

Fig. 2 Regional tectonic framework of Zijinshan region (a) and geological map (b) of Zijinshan Cu-Au ore field showing cluster of porphyry Cu-Mo, porphyry-epithermal Au-Cu deposits (modified after Ref. [2, 8-9]): 1—Deposits; 2—Fault; 3—Luoboling granodiorite porphyry (K1); 4—Porphyry dacite (K1); 5—Cryptoexplosive breccia (K1); 6—Tuff (K1); 7—Sifang granodiorite (K1); 8—Caixi monzogranite (J3); 9—Zijinshan Complex (J2-J3); 10—Quaternary deposits; 11—Shimaoshan Formation (Cretaceous); 12—Lindi Group (Carboniferous); 13—Tianwadong Group (Devonian); 14—Louziba Formation (Neoproterozoic)

入岩有四方花岗闪长岩, 罗卜岭花岗闪长斑岩等(见图2(b))。浸铜湖矿床中主要发育有四方花岗闪长岩及与成矿有关的花岗闪长斑岩和花岗斑岩, 此外还有后期的石英二长岩及二长岩脉侵入。

2 样品采集及岩相学特征

浸铜湖铜钼矿区内花岗闪长斑岩出露面积较小, 仅 0.2 km^2 (见图2(b))^[7]。花岗闪长斑岩浅部风化较强, 含矿部位发育较强的蚀变, 而深部远离矿体则较为新鲜^[7]。本研究样品采自钻孔 ZK4012, 距地表 158~555 m 位置, 样品经历较弱的蚀变影响。花岗闪长斑岩呈灰白色或轻微红色, 斑状结构(见图3(a)和(b)), 发育自形到半自形斜长石、石英、角闪石、黑云母以及钾长石斑晶, 粒径约为 1~5 mm, 散布在细粒基质中(粒径 0.02~0.5 mm), 基质主要包含有钾长石、斜长石、石英和少量黑云母、磷灰石、锆石、磁铁矿及金红石等。斑晶中自形板状斜长石(约 40%, 体积分数)发育有钠长石双晶及振荡环带。自形-半自形的钾长石

(<15%, 约 0.5 mm)和石英(<15%, 约 0.5 mm)斑晶与其他透明矿物不规则交生。角闪石(约 15%, <5 mm)与黑云母(约 10%, <3 mm)斑晶均呈自形或半自形散布在基质中(见图3(a)和(b))。

浸铜湖花岗斑岩样品采自紫金山矿田内钻孔 ZK23201, 深度为 287~1003 m(见图2(b))。花岗斑岩呈浅肉红色、灰白色, 具中细粒花岗、斑状结构; 斑晶主要有石英(55%)、斜长石(30%)、黑云母(15%) (见图3(c)和(d)); 基质则主要由碱性长石、斜长石和石英组成。石英矿物粒径一般为 0.5~4 mm(见图3(c)和(d))。副矿物组合为榍石-锆石-磷灰石等。

3 实验

进行岩石地球化学分析时, 首先将样品破碎、磨细(75 μm)后制成分析样品。主、微量元素和 Sr-Nd 同位素测试均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。其中主量元素分析方法为 X 荧光光谱法, 仪器为美国热电 ARL9800XP+型 XRF 射线

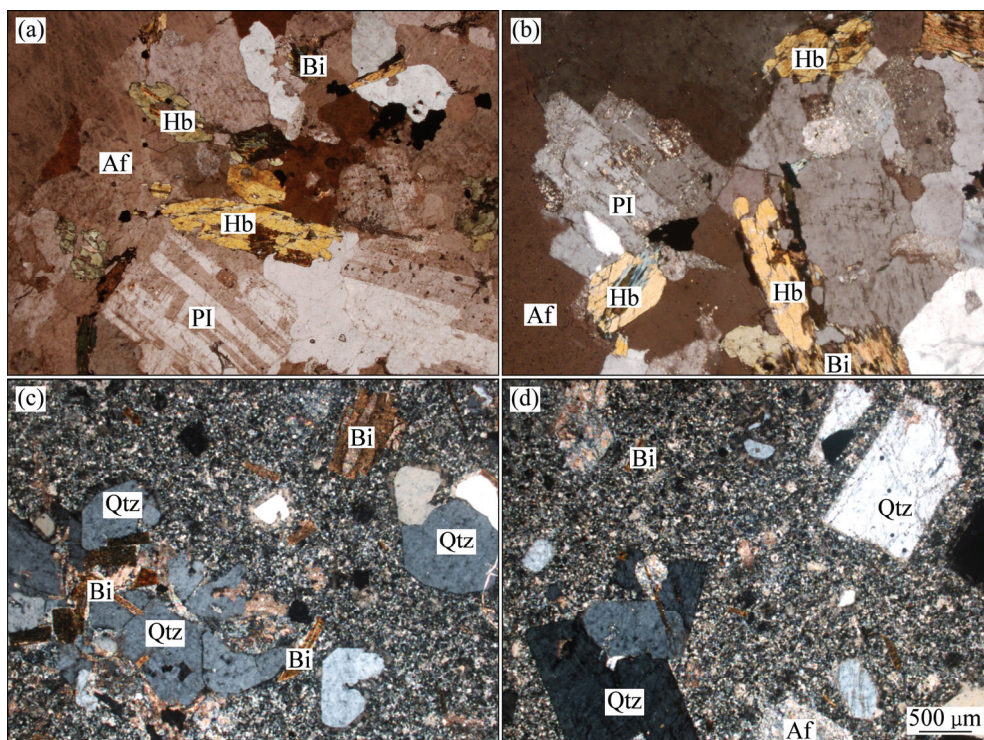


图3 浸铜湖花岗闪长斑岩及花岗斑岩的岩相学显微照片

Fig. 3 Microphotographs of representative Jintonghu granodiorite porphyries and granites (Qtz—quartz; Af—Alkali feldspar orthoclase; Bi—Biotite; Hb—hornblende)

荧光光谱仪, 大多数元素的分析精度优于 5%; 微量元素用 ICP-MS 测定(Finnigan Element II 型)。

Sr、Nd 同位素采用 BioRad AG 50W×8 阳离子树脂纯化 Sr、Nd 元素, 用 TIMS(Finnigan Triton TI 型)分析测试, Sr 测试过程中采用 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr}=0.1194$ 校正质量分馏。Nd 测试过程中采用 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.7219$ 校正质量分馏。

4 结果

4.1 主量及微量元素

详细的主、微量元素分析测试结果见表 1 和表 2。花岗闪长斑岩 SiO_2 的含量为 64.65%~65.85%(质量分数), CaO 的含量为 2.52%~4.08%, 全碱的为 5.99%~7.68%。在硅碱(TAS)岩石分类图解上, 样品基本落在花岗闪长岩的区域(见图 4(a))。在 $\text{A}/\text{CNK}-\text{A}/\text{NK}$ 图解上, 表现出弱过铝质的特征(见图 4(b)), 且表现出高 K_2O 及低 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值的特点, 属高钾钙碱性岩系列(见图 4(c)); 此外, 其 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值随 SiO_2 含量的变化表现出较陡的演化趋势(见图 4(d))。相比而言, 花岗斑岩的具高 SiO_2 含量, 变化为 71.50%~76.70%,

落在花岗岩区域(见图 4(a)), 属过铝质(见图 4(b))。花岗斑岩具有较高的钾含量以及较缓的 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 演化趋势(见图 4(c)和(d))。

在 Harker 图解上, 花岗闪长斑岩及花岗斑岩在主量及微量元素上均表现出协变性: SiO_2 和 TiO_2 , $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$, CaO , Al_2O_3 , P_2O_5 , MgO , Cr 以及 Sr (见图 5^[29])。花岗闪长斑岩具相对较陡的演化趋势, 而花岗斑岩的演化趋势则相对平坦。前者在球粒陨石标准化稀土配分图解上(见图 6(a)), 表现出相对富集轻稀土($\Sigma\text{LREE}=1.09\times 10^{-4}\sim 1.61\times 10^{-4}$), 具明显右倾的特征且轻重稀土分异明显 $[(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}=11.4\sim 21.3]$, 却有较弱的重稀土分异特征 $[(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}=1.31\sim 1.80]$, 几乎无 Eu 异常。在原始地幔标准化蛛网图上(见图 6(b)), 样品表现出富集大离子亲石元素(LILEs, 如 Rb 、 Ba 、 Th 、 U 和 Pb), 亏损高场强元素(HFSEs, 如 Nb 、 Ta 、 P 及 Ti)的特征。其高 $\text{Sr}(4.38\times 10^{-4}\sim 5.50\times 10^{-4})$, 低 $\text{Y}(1.28\times 10^{-5}\sim 2.01\times 10^{-5})$ 及 HREE 含量(如 $\text{Yb}=1.32\times 10^{-6}\sim 2.24\times 10^{-6}$), 较高的 $\text{Sr}/\text{Y}(24\sim 39)$ 以及 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 比值具埃达克质岩石的亲缘性。花岗斑岩的稀土元素特征则表现为具明显的 Eu 负异常, 且亏损 Sr 、 P 、 Ti 等元素, 具有明显的 Pb 正异常。

表 1 浸铜湖铜钼矿中罗卜岭花岗闪长斑岩与花岗斑岩的主量元素成分 (质量分数, %)

Table 1 Major element concentration of Luoboling granodiorite porphyries and Jintonghu granites, Fujian province, SE China (mass fraction, %)

Sample	Granodiorite porphyry ^[6]			Granitic porphyry		23201-5	23201-6	23201-7
	4012-1	4012-2	4012-3	23201-3	23201-4			
SiO ₂	65.41	65.74	65.85	73.20	76.70	75.90	72.20	71.50
TiO ₂	0.44	0.41	0.41	0.19	0.08	0.08	0.22	0.21
Al ₂ O ₃	15.93	16.02	16.06	12.70	12.15	13.15	13.15	13.15
Fe ₂ O _{3T}	3.73	3.49	3.48	1.47	0.51	0.58	1.53	1.53
MnO	0.1	0.08	0.08	0.09	0.03	0.01	0.08	0.09
MgO	1.72	1.59	1.57	0.84	0.29	0.35	0.87	0.82
CaO	3.93	3.91	3.9	1.41	1.10	0.28	1.23	1.71
Na ₂ O	3.42	3.46	3.41	1.90	0.15	0.19	1.74	1.55
K ₂ O	4.26	4.04	4.06	5.27	6.55	7.09	5.95	6.06
P ₂ O ₅	0.24	0.21	0.21	0.06	0.01	0.01	0.06	0.06
LOI	1.13	1.22	1.22	2.28	2.24	1.72	2.23	2.64
TOTAL	100.05	99.91	99.98	99.52	99.90	99.46	99.42	99.46
A/CNK	0.91	0.93	0.93	1.11	1.30	1.55	1.14	1.08
A/NK	1.53	1.57	1.58	1.41	1.61	1.60	1.38	1.41
Mg#	48	47	47	53	53	54	53	51

Note: $Mg\# = n(Mg) / [n(Mg) + n(Fe_T)]$.

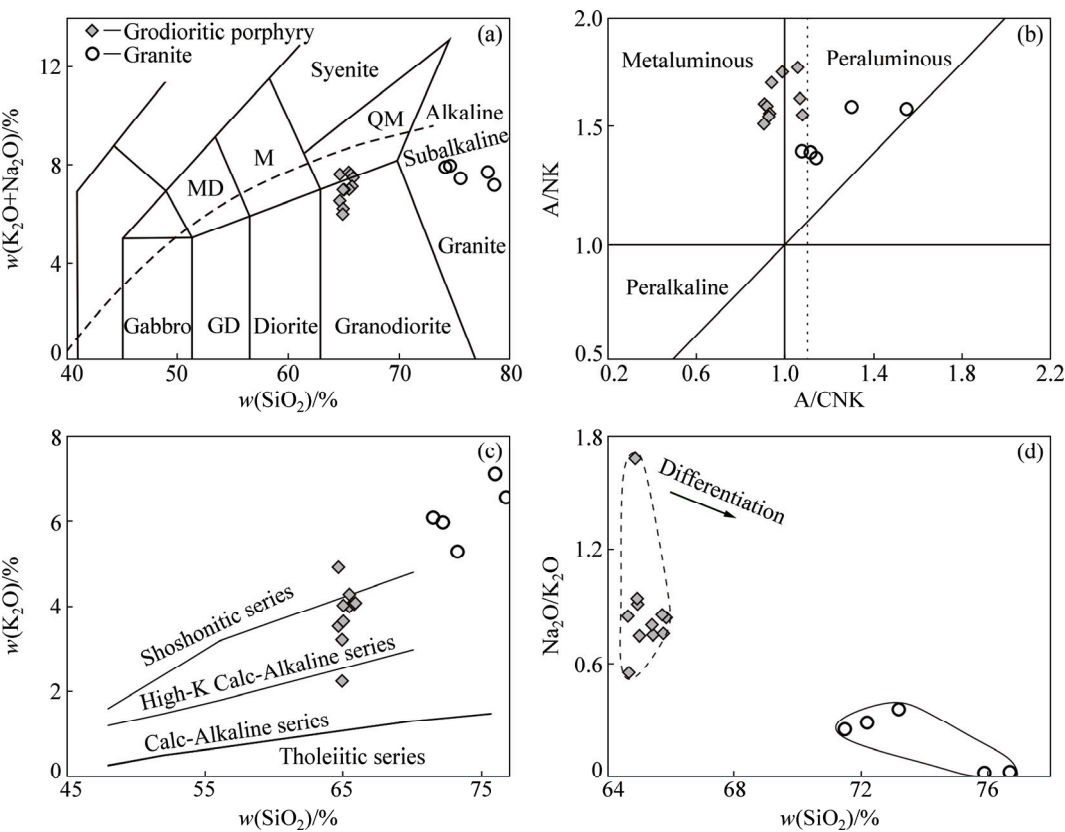


图 4 浸铜湖花岗闪长斑岩及花岗斑岩的岩石分类图解(部分花岗闪长斑岩数据来自文献[6])

Fig. 4 Classification of granodiorite porphyries and granites (Some data of granodiorites are from Ref. [6]): (a) Total alkali-silica (TAS) diagram; (b) A/NK-A/CNK diagram; (c) SiO_2 - K_2O diagram; (d) Na_2O/K_2O - SiO_2 diagram

表 2 浸铜湖铜钼矿中罗卜岭花岗闪长斑岩与花岗斑岩的微量元素成分(质量分数, 10⁻⁶)

Table 2 Trace element concentrations of Luoboling granodiorite porphyries and Jintonghu granites, Fujian province, SE China (mass fraction, 10⁻⁶)

Sample	Granodiorite porphyry ^[6]			Granitic porphyry		23201-5	23201-6	23201-7
	4012-1	4012-2	4012-3	23201-3	23201-4			
V	65	72	90	13.5	2.48	4.49	15.0	14.9
Cr	15.0	16.2	16.6	2.18	0.00	0.64	0.83	0.00
Co	7.76	8.32	13.74	0.73	0.00	0.14	0.62	1.17
Ni	7.83	8.28	12.22	2.09	0.69	0.36	1.71	1.71
Rb	153	159	148	179	203	247	196	198
Sr	444	515	466	68.1	29.2	37.5	56.9	85.9
Y	12.8	13.2	18.7	21.7	13.6	10.7	21.9	22.2
Zr	88.0	127	118	135	81.3	105	151	143
Nb	14.9	14.0	18.3	25.0	24.9	22.1	26.2	25.0
Ba	673	796	675	595	302	287	707	667
La	43.1	30.4	36.4	45.4	25.4	30.3	46.8	42.5
Ce	74.4	59.7	59.8	82.3	33.6	37.8	83.3	77.4
Pr	7.28	5.98	6.4	8.72	3.15	4.05	8.85	8.17
Nd	24.2	21.9	26.7	29.4	9.94	12.0	29.9	27.5
Sm	3.78	3.69	4.85	4.28	1.44	1.98	4.33	4.04
Eu	0.95	0.97	1.22	0.91	0.30	0.37	0.95	0.94
Gd	2.87	2.78	3.03	3.99	1.47	1.70	4.05	3.83
Tb	0.37	0.36	0.43	0.50	0.20	0.26	0.51	0.49
Dy	2.36	2.38	2.70	2.38	1.16	1.39	2.44	2.43
Ho	0.49	0.5	0.53	0.45	0.25	0.30	0.46	0.46
Er	1.48	1.43	1.50	1.41	0.87	0.99	1.46	1.48
Tm	0.21	0.21	0.23	0.21	0.15	0.20	0.22	0.22
Yb	1.38	1.47	1.5	1.47	1.16	1.45	1.52	1.57
Lu	0.24	0.26	0.24	0.24	0.20	0.27	0.24	0.25
Hf	2.63	3.54	3.77	4.30	3.01	3.27	4.68	4.53
Ta	1.99	1.60	1.65	1.41	1.38	2.06	1.48	1.47
Pb	11.4	12.6	17.8	43.6	20.2	21.8	33.8	26.9
Th	22.1	35.6	18.2	33.1	34.9	32.8	33.2	33.1
U	9.00	11.7	9.76	5.48	7.24	8.36	5.88	5.76

Note: $Eu/Eu^*=Eu_N/(Sm_N \cdot Gd_N)^{1/2}$, N denotes chondrite normalization^[30].

4.2 Sr-Nd 同位素组成

样品的 Sr、Nd 同位素测试结果列于表 3。花岗闪长斑岩的初始 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值为 0.7065~0.7068, ε_{Nd}(t) 值为 -4.0~-3.1, 两阶段 Nd 模式年龄变化范围为 1.15 Ga 到 1.23 Ga(见图 7)。花岗斑岩的初始 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值为 0.7078~0.7242, ε_{Nd}(t) 值为 -6.1~-5.7, 两阶段 Nd 模式年龄变化范围为 1.37 Ga 到 1.39 Ga(见图 7)。

5 讨论

5.1 岩浆来源

岩体的形成及其上侵过程中极易受陆壳混染作用的影响, 而陆壳混染作用则会导致岩浆表现出不相容

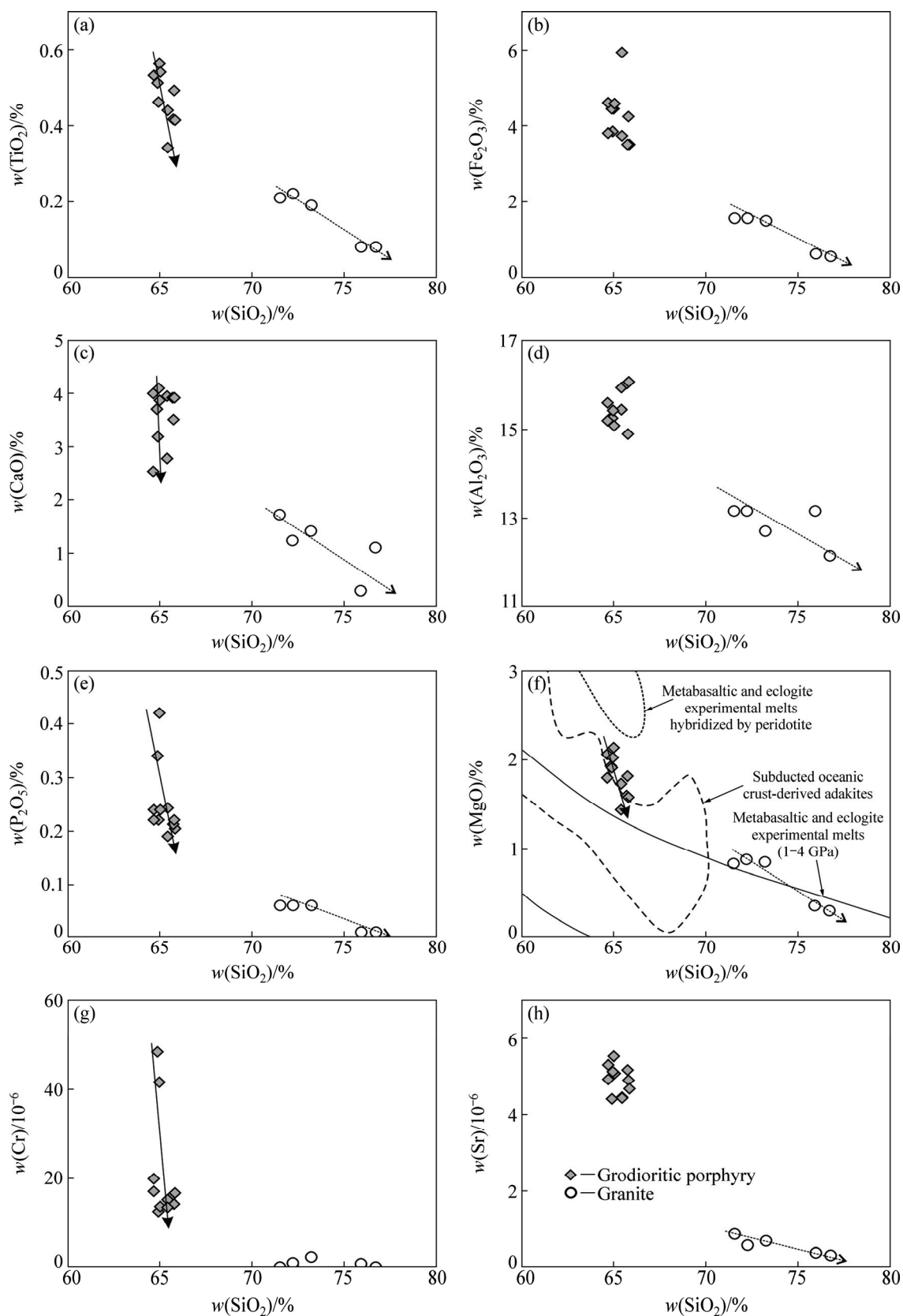


图5 浸铜湖花岗闪长斑岩及花岗斑岩的主量及微量元素组成变异图解(部分花岗闪长斑岩数据来自文献[6]; 图5(f)中不同类型的埃达克质岩石数据来自文献[29])

Fig. 5 Major and trace elements variation diagrams for granodiorite porphyries and granites (Some data of granodiorites are from Ref. [6]; Fields of others adakite-like rocks are from Ref. [29])

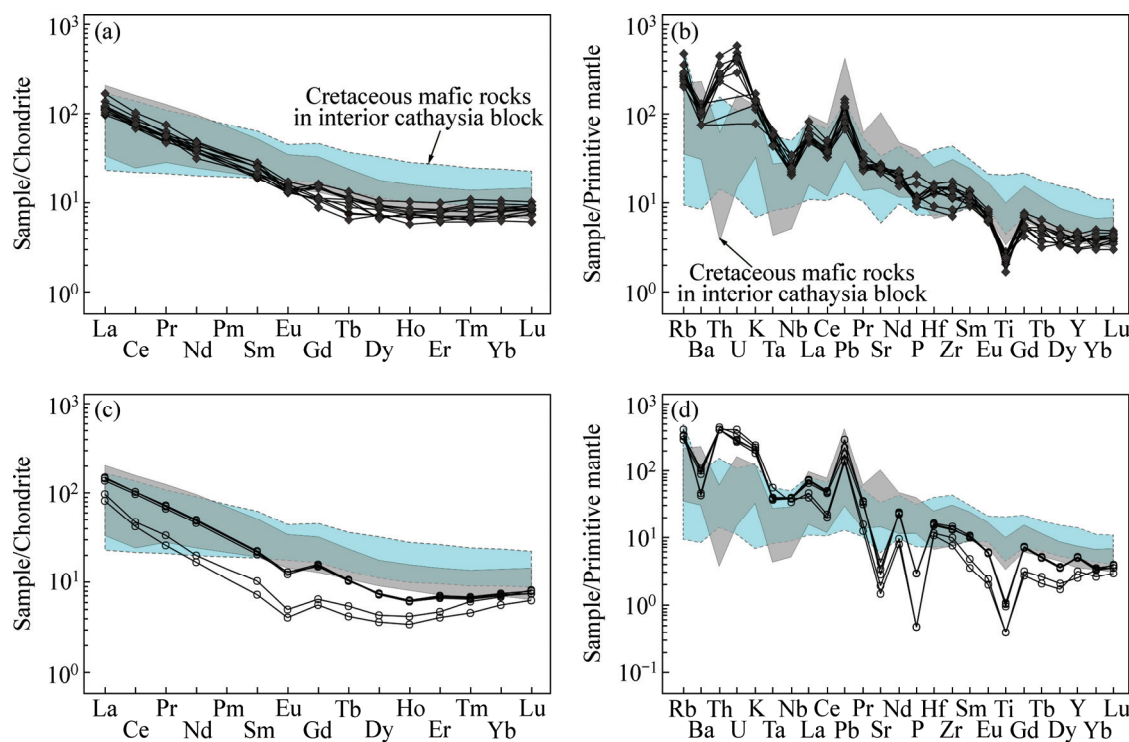


图 6 浸铜湖侵入岩的球粒陨石标准化稀土元素配分图(a, 标准化值据文献[32])和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b, 标准化值据文献[30])(灰色阴影代表华夏沿海白垩纪玄武质岩, 绿色阴影代表内陆玄武质岩^[12, 33])

Fig. 6 Chondrite-normalized REE (normalization values from Ref. [32]) ((a), (c)) and primitive mantle-normalized multi-element patterns (normalization values from Ref. [30]) ((b), (d)) for intrusions from Jintonghu deposit (Gray shaded fields without outline are for coeval basaltic volcanic rocks in Coastal Cathaysia, while green shaded field are for Cretaceous mafic rocks in Interior Cathaysia^[12, 33])

表 3 浸铜湖花岗闪长斑岩及花岗斑岩的 Sr-Nd 同位素组成分析结果

Table 3 Sr and Nd isotopic compositions of the Cretaceous Jintonghu intrusions in Fujian province, SE China

Type	Sample	Age/Ma	w(Rb)/ 10 ⁻⁶	w(Sr)/ 10 ⁻⁶	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	2s	I _{Sr}	w(Sm)/ 10 ⁻⁶	w(Nd)/ 10 ⁻⁶	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	2s	e _{Nd} /t	T _{DM2} / Ga
Granodiorite porphyry	ZK4012-1 ^[6]	103	153	443.6	0.9982	0.707969	10	0.7066	3.78	24.2	0.0942	0.512404	7	-3.3	1.16
	ZK4012-2 ^[6]	103	159	515.4	0.8903	0.707910	15	0.7067	3.69	21.9	0.1018	0.512395	7	-3.5	1.19
	ZK402-2 ^[31]	103	142	524.7	0.7807	0.707890	30	0.7068	4.96	27.5	0.1091	0.512375	9	-4.0	1.23
	ZK402-4 ^[31]	103	158	490.8	0.9307	0.707800	60	0.7065	4.31	23.7	0.1099	0.512425	6	-3.0	1.15
Granitic porphyry	23201-3	101	179	68.1	7.5883	0.718996	5	0.7084	4.28	29.4	0.0878	0.512270	4	-5.8	1.37
	23201-4	101	203	29.2	20.1802	0.747672	5	0.7195	1.44	9.94	0.0873	0.512255	4	-6.1	1.39
	23201-5	101	247	37.5	19.1129	0.750796	6	0.7242	1.98	12.0	0.0995	0.512279	10	-5.8	1.37
	23201-6	101	196	56.9	10.0093	0.721718	5	0.7078	4.33	29.9	0.0874	0.512272	4	-5.7	1.37
	23201-7	101	198	85.9	6.6836	0.718078	5	0.7088	4.04	27.5	0.0889	0.512274	4	-5.7	1.37

元素含量高的特点。这对判断岩浆源区的性质存在一定的干扰。实际上, 花岗闪长斑岩的 K₂O 含量及大部分不相容元素的含量明显的高于下地壳的平均值^[34],

因此, 这些元素对地壳混染均不敏感。均一的 Nd 同位素组成以及继承锆石的存在充分说明地壳混染作用并不明显。花岗闪长斑岩与花岗斑岩的锆石 U-Pb 定

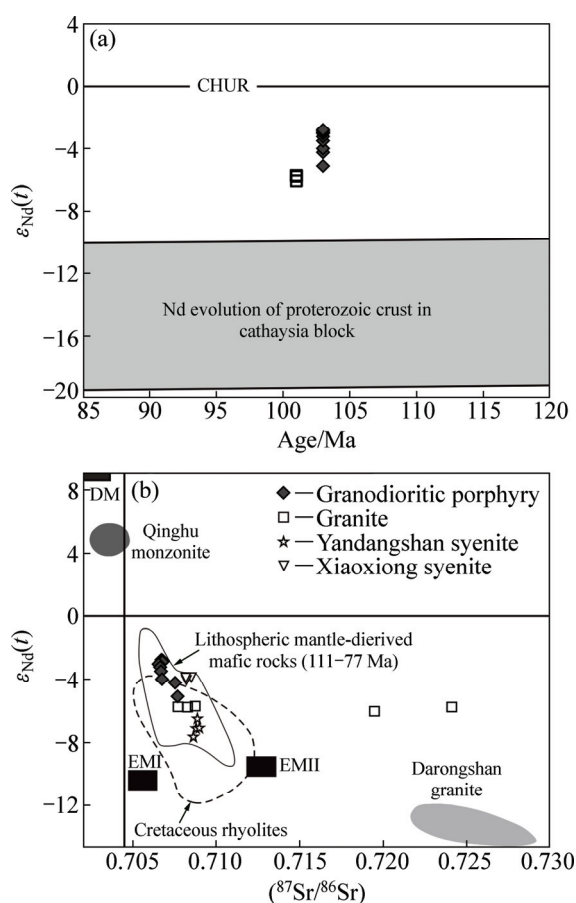


图 7 浸铜湖侵入岩的年龄- $\epsilon_{Nd}(t)$ 图以及初始 $^{87}Sr/^{86}Sr$ - $\epsilon_{Nd}(t)$ 图

Fig. 7 Age- $\epsilon_{Nd}(t)$ values plot (a) and initial $^{87}Sr/^{86}Sr$ - $\epsilon_{Nd}(t)$ diagrams (b) for intrusions

年显示其年龄分别为 (103.1 ± 1.1) Ma 和 (101.1 ± 1.9) Ma, 显示其形成时代相近。此外, 浸铜湖和罗卜岭铜钼矿床对应的成矿年龄为 $(104.9 \pm 1.6) \sim (104.6 \pm 1.0)$ (辉钼矿的 Re-Os 等时线年龄)^[7], 这表明花岗闪长斑岩与花岗斑岩的形成和矿化的形成成为同时代的产物, 存在成岩与成矿的对应关系。花岗闪长斑岩具有相对较高的 Mg 含量(见图 5(f)), 落在纯壳源熔融物来源的埃达克岩范围之外^[35], 表明其不可能是壳源的。此外, 花岗闪长斑岩的 Nd 同位素组成也位于华夏元古代地壳基底演化域的上方(见图 5(f)), 这更加排除了华夏基底地壳物质发生直接熔融而成岩的可能。花岗闪长斑岩在 Sr-Nd 同位素组成上与 MORB 存在明显不同, 这排除了其属年轻俯冲板片部分熔融的可能。此外, 实验岩石学表明俯冲洋壳板片直接熔融形成的埃达克质岩石表现出富 Na_2O 低 K_2O 的特征^[35-36], 这与罗卜岭岩体高 K_2O 含量的特征明显不符。因此, 花岗闪长斑岩不属于俯冲洋壳直接熔融的产物^[35]。下地壳发生拆

沉作用形成的埃达克质岩石具有高 Cr、Ni 含量和高 Mg 指数的特点^[37]。而花岗闪长斑岩的 Cr、Ni 含量以及 Mg 指数相对较低, 这排除了拆沉下地壳的成因模式。而岩浆混合作用则缺乏岩相学及地球化学的证据。除此以外, 交代岩石圈地幔直接部分熔融也是形成埃达克质岩石^[38], 其往往表现出极高的钾含量, 属橄榄玄粗岩系列。浸铜湖的花岗闪长斑岩均属高钾钙碱性系列岩(见图 4(c)), 这与此种成因模式也不相符。

在排除了陆壳混染作用的前提下, 花岗闪长斑岩的地球化学特征应继承自岩浆源区。花岗闪长斑岩的 Sr-Nd 同位素组成与同时代岩石圈地幔来源的玄武质岩极为相似(见图 7)。两者在稀土及微量元素的分布趋势上也基本重叠(见图 6(a)和(b))。此外, 花岗闪长斑岩富集大离子亲石元素元素, 亏损高场强元素, 有明显的 Ta、Nb 及 Ti 负异常(见图 6(a)和(b)); 其 La/Nb 和 Ba/Nb 比值也与弧岩浆的类似, 表明其形成与俯冲作用有关(见图 8)。岩体的 Nb/U 比值(1.2~2.6)明显低于 MORB 的, 洋岛玄武岩(OIB)(约 47), 陆弧火山岩(Nb/U=12)^[37], 上地壳(Nb/U~9)以及平均地壳(Nb/U~6.2)^[36], 这说明源区有俯冲流体和熔融物的加入; 而其 Ce/Pb 比值变化范围为 2.4~6.5, 也明显不同于 MORB 及 OIB(约 25), 类似于陆弧火山岩(Ce/Pb=7.7)^[37]、上地壳(Ce/Pb~3.9)以及下地壳(Ce/Pb~5.0)^[34], 这些均表明俯冲作用的影响。因此, 可以判断花岗闪长斑岩应来源于来源于俯冲板片流体或熔融物交代的富集岩石圈地幔^[12, 33]。

浸铜湖花岗斑岩具有明显高于华夏元古代地壳的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值(见图 7), 指示其初始岩浆不可能为单纯的陆壳物质来源。其多变的初始 Sr 同位素组成, 则可能指示岩浆混合作用或源区的不均一性。浸铜湖花岗斑岩为典型的黑云母花岗岩, 造岩矿物主要为黑云母、石英和两种长石, 虽然岩石化学上表现出过铝质, 但不

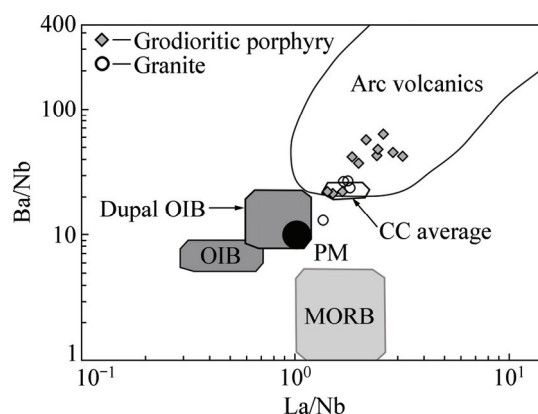


图 8 岩体的 La/Nb-Ba/Nb 图

Fig. 8 La/Nb-Ba/Nb plot for these intrusions

含 S 型花岗岩的特征矿物富铝矿物白云母或堇青石, 也没有 I 型花岗岩的特征矿物角闪石。这一特征与燕山早期“南岭系列”花岗岩极为类似。新近的研究表明“南岭系列”花岗岩属高分异的 I 型花岗岩, 不属于强过铝质的 S 型花岗岩。花岗斑岩的 P_2O_5 与 SiO_2 也存在负相关关系(见图 5(e)), 属典型高分异 I 型花岗岩的特征, 其源岩以火成岩为主。花岗斑岩的同位素组成也表明不是单纯陆壳物质熔融的产物。因此, 华夏早期形成的火成岩可能浸铜湖花岗斑岩的主要物质来源。

5.2 岩石成因

如图 4(d)所示, 花岗斑岩的 Na_2O/K_2O 比值随着 SiO_2 含量的增加而降低指示长石的分离结晶, 这表征着岩浆的结晶分异作用在岩浆演化过程中起到了重要作用, 而不是反映岩浆源区的性质。 TiO_2 、 $Fe_2O_3^T$ 、 MgO 、 CaO 、 Al_2O_3 、 Ni 与 SiO_2 表现出明显的负相关关系, 表明花岗闪长斑岩与花岗斑岩均发生显著的分离结晶作用。花岗闪长斑岩的 REE 配分曲线和微量元素并未表现出强烈的负 Eu 和 Sr 异常, 这排除了斜长石的分离结晶。通过对花岗闪长斑岩分离结晶作用的模拟发现, 角闪石和黑云母的分离结晶并不明显, 却指示石榴子石的分离结晶作用(见图 9)。与花岗闪长斑岩同源的玄武质岩岩的形成经历了橄榄石与辉石的分离结晶作用^[29]。因此, 花岗闪长斑岩在岩浆早期阶段可能同样经历了类似的分离结晶作用。随后, 岩浆演化则转向以石榴子石为主的分离结晶作用以及可能存在的一些副矿物的分离结晶。

花岗斑岩的 Sr-Nd 同位素组成类似同时期的流纹质火山岩和印支期的大容山 S 型花岗岩, 这表明其可能为早期多阶段火成岩源岩部分熔融的产物。同时也说明花岗斑岩的源岩为多组分的混合源, 包含印支期燕山晚期花岗岩组分。虽然存在比较明显的 Eu 负异常, 然而微量元素模拟结果却排除了发生普遍分离结晶的可能。因此, 花岗斑岩的微量元素特征应继承于源岩的地球化学特性。

5.3 构造及成矿意义

5.3.1 构造意义

华夏地块白垩纪的岩浆活动与古太平洋板块的俯冲密切相关^[13-14]。HE 等^[39]认为华南燕山晚期构造活动经历了由古太平洋板块俯冲形成的挤压向伸展环境的转换, 转换时限约在 110 Ma。MENG 等^[33]认为, 早白垩世时期俯冲板片后撤及随后的陆壳边缘塌陷(例如, 板片破坏和拆沉)是导致大量幔源岩浆底侵和陆壳熔融的主要原因; 在 110~90 Ma 期间, 东南沿海

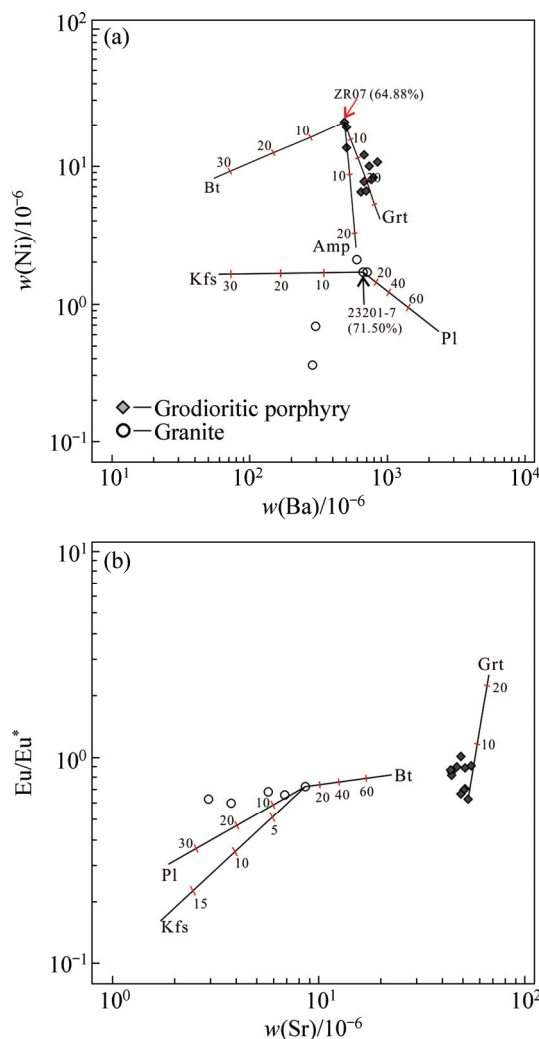


图9 浸铜湖侵入岩的 Ba-Ni 图解和 Sr-Eu/Eu* 图解(分配系数引自网站 <http://earthref.org/cgi-bin/er.cgi>): Pl—斜长石; Kf—钾长石; Bt—黑云母; Amp—角闪石; Grt—石榴子石; 图例同图 4

Fig. 9 Ba-Ni (a) and Sr-Eu/Eu* (b) diagram (Partition coefficients are from GERM Partition Coefficient (Kd) Database (website: <http://earthref.org/cgi-bin/er.cgi>): Pl — Plagioclase; Kf—K-feldspar; Bt—Biotite; Amp—Amphibole; Grt—Garnet; Symbols are same as in Fig. 4

地区受俯冲的影响, 而内陆地区主要表现为软流圈上涌^[13, 29]。然而, 白垩纪岩浆岩与现代弧岩浆在组成上存在明显不同^[28]。沿海多数侵入岩在 100Ma 以后则与 A 型花岗岩密切相关。此外, 在 135~122 Ma, 华南赣杭构造带上也发育有大量的 A 型花岗岩, 这均表明伸展的构造环境在白垩纪时期居于主导地位。这一时期形成的大量壳幔源起源的岩浆岩也表明了多期次、多阶段构造—岩浆活动的影响^[22]。在古太平洋板块俯冲所形成的岩石圈伸展的大构造背景下, 大规模的岩石

圈地幔部分熔融, 底侵以及广泛的壳幔相互作用兼有软流圈的上涌是造成晚中生代时期的岩浆作用的主要原因^[5-6, 18, 22]。而从 110 Ma 开始发生的板块的俯冲及后撤, 是造成华夏地块陆内及沿海地区大规模伸展及成岩成矿作用大爆发的直接原因^[2, 5-6, 8, 22], 这一模式能很好地解释华夏地块内陆发育多阶段的玄武质岩浆活动以及内陆及沿海地区差异化分布的 A 型花岗岩。

5.3.2 与铜钼矿化的关系

地幔对含矿岩浆的贡献是形成大量 Cu、Au 聚集并形成斑岩型矿床的关键^[16]。Cu 主要来源于俯冲板片或地幔^[12]这一点似乎没有争议。目前学术界争议的焦点主要集中在铜金钼富集成矿的过程。单一阶段的成矿模式认为: 下插板片或地幔中不稳定的硫化物熔融释放出 Cu, 以及亲硫元素到岩浆中, 岩浆将 Cu 带到浅部地壳, 形成 Cu 堆积。而另外一种观点则认为, Cu 的富集是岩浆进程导致的, 主要发生在地壳中, 属多阶段的叠加堆积过程, 并不是直接来源于地幔与俯冲板片的部分熔融^[16]。早期的俯冲循环作用将地幔中的成矿物质带到下地壳并形成铜矿床或富铜的堆积岩, 新生的幔源岩浆经过异常富集的下地壳会变得的更加富集金属元素, 磁铁矿的分离结晶, 导致陆弧岩浆发生硫化物沉淀^[13]。

紫金山矿田内发育的斑岩铜矿系统中主要以 Cu-Mo 矿化为主, 而 Au 矿化较弱。Mo 并不仅仅是壳源的, 岩石圈地幔的长期富集作用也可以聚集大量的 Mo 并形成幔源的 Mo 矿床。富 S^{2-} 流体可能将 Au 从赋围岩中运移出来, 而且 Au 在低氧逸度条件下, 通过以 $(Au(HS)^{-2})$ 络合物的形式也极易发生迁移, 在低温、低压条件下, 往往沉淀在构造变形及裂隙发育的部位。这导致 Au 的矿化可能远离 Cu-Mo 矿化区域。富集地幔来源起源的花岗闪长斑岩与铜钼矿化关系密切, 其形成受板片俯冲作用的触发。紫金山矿田的下伏地幔在早白垩世时期受俯冲交代作用的影响发生部分熔融, 产生富集 LILEs 以及 LREE, 亏损 HFSEs 的含矿铁镁质岩浆, 其在上侵过程中经历广泛的岩浆分异作用, 最终形成含矿的花岗闪长斑岩; 受石榴子石分离结晶的影响, 表现出埃达克质岩的特征。而花岗斑岩则主要来源于陆壳中早期形成的不含矿火成岩的再熔融过程, 形成的初始岩浆不含矿。

6 结论

1) 浸铜湖铜钼矿床发育的花岗闪长斑岩及花岗斑岩其形成时代与矿化同期。

2) 花岗闪长斑岩来源于受板片俯冲作用影响而形成的富集交代地幔的部分熔融; 广泛的分离结晶作用控制着岩浆的形成; 石榴子石的分离结晶作用导致形成具埃达克质岩的特征。花岗斑岩主要由早期形成的火成岩发生再熔融作用而形成的, 并没有古老地壳基底及新生幔源物质的参与。

3) 花岗闪长斑岩及花岗斑岩形成于受古太平洋板块俯冲及后撤所导致的活动大陆边缘环境。

4) 富集地幔来源的花岗闪长斑岩是浸铜湖铜钼矿床的主要含矿母岩, 主要的成矿物质应来自地幔。而花岗斑岩则属高分异的 I 型花岗岩, 其源岩不含成矿物质且与矿化无关。

REFERENCES

- [1] 武丽艳, 胡瑞忠, 齐有强, 朱经经. 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[J]. 岩石学报, 2013, 29(12): 4151-4166.
WU Li-yang, HU Rui-zhong, QI You-qiang, ZHU Jing-jing. Zircon La-ICP-MS U-Pb ages and geochemical characteristics of quartz syenite porphyry from Jintonghu deposit in Zijinshan ore field, Fujian Province, South China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(12): 4151-4166.
- [2] 李 斌. 福建紫金山矿田中生代岩浆演化与铜金钼成矿作用地球化学研究[D]. 南京: 南京大学, 2015: 1-134.
LI Bin. Geochemistry of mesozoic magmatic rocks and related cu-au-mo mineralizations in the zijinshan orefield of fujian province[D]. Nanjing: Nanjing University, 2015: 1-134.
- [3] JIANG Si-hong, BAGAS L, LIANG Qing-ling. New insights into the petrogenesis of volcanic rocks in the Shanghang Basin in the Fujian Province, China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, 105: 48-67.
- [4] JIANG Si-hong, LIANG Qing-ling, BAGAS L, WANG Shao-huai, NIE Feng-jun, LIU Yi-fei. 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[J]. Ore Geology Reviews, 2013, 53: 287-305.
- [5] LI Bin, JIANG Shao-yong. Geochronology and geochemistry of Cretaceous Nanshanping alkaline rocks from the Zijinshan district in Fujian Province, South China: Implications for crust-mantle interaction and lithospheric extension[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2014, 93: 253-274.
- [6] LI Bin, JIANG Shao-yong. A subduction-related metasomatically enriched mantle origin for the Luoboling and Zhongliao Cretaceous granitoids from South China: Implications for magma evolution and Cu-Mo mineralization[J]. International Geology Review, 2015, 57(9/10): 1239-1266.

- [7] ZHONG Jun, CHEN Yan-jing, PIRAJNO F, CHEN Jing, LI Jing, QI Jin-ping, LI Nuo. Geology, geochronology, fluid inclusion and H-O isotope geochemistry of the Luoboling Porphyry Cu-Mo deposit, Zijinshan Orefield, Fujian Province, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2014, 57: 61–77.
- [8] 李 斌, 赵葵东, 杨水源, 戴宝章. 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[J]. *岩石学报*, 2013, 29(12): 4167–4185.
- LI BIN, ZHAO Kui-dong, YANG Shui-yuan, DAI Bao-zhang. Petrogenesis of the porphyritic dacite from Ermiaogou Cu-Au deposit in Zijinshan ore field and its metallogenetic implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(12): 4167–4185.
- [9] 李 斌, 赵葵东, 张 倩, 徐耀明, 朱志勇. 福建紫金山复式岩体的地球化学特征和成因[J]. *岩石学报*, 2015, 31(3): 811–828.
- LI Bin, ZHAO Kui-dong, ZHANG Qian, XU Yao-ming, ZHU Zhi-yong. Petrogenesis and geochemical characteristics of the Zijinshan granitic complex from Fujian Province, South China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2015, 31(3): 811–828.
- [10] 胡春杰, 黄文婷, 包志伟, 梁华英, 王春龙. 福建紫金山矿田晚中生代英安玢岩形成时代及其成矿意义[J]. *大地构造与成矿学*, 2012, 36(2): 284–292.
- HU Chun-jie, HUANG Wen-ting, BAO Zhi-wei, LIANG Hua-ying, WANG Chun-long. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of the dacite porphyry from Zijinshan Cu-Au deposit and its metallogenetic implications[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2012, 36(2): 284–292.
- [11] 黄文婷, 李 晶, 梁华英, 王春龙, 林书平, 王秀璋. 福建紫金山矿田罗卜岭铜钼矿化斑岩锆石 LA-ICP-MSU-Pb 年龄及成矿岩浆高氧化特征研究[J]. *岩石学报*, 2013, 29(1): 283–293.
- HUANG Wen-ting, LI Jing, LIANG Hua-ying, WANG Chun-long, LIN Shu-ping, WANG Xiu-zhang. Zircon LA-ICP-MS U-Pb ages and highly oxidized features of magma associated with Luoboling porphyry Cu-Mo deposit in Zijinshan ore field, Fujian Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(1): 283–293.
- [12] MUNGALL J E. Roasting the mantle: Slab melting and the genesis of major Au and Au-rich Cu deposits[J]. *Geology*, 2002, 30: 915–918.
- [13] 刘清泉, 张 宇, 张智慧, 李 冰, 张 驰. 豫南姚冲钼矿床二长花岗岩锆石微量元素特征及其地质意义[J]. *中国有色金属学报*, 2015, 25(3): 776–785.
- LIU Qing-quan, ZHANG Yu, ZHANG Zhi-hui, LI Bing, ZHANG Chi. Zircon trace element characteristics and its implication of monzogranite in Yaochong Mo deposit, Southern Henan, China[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2015, 25(3): 776–785.
- [14] 赵 超, 谢兴楠, 柳建新, 顾连兴, 胡 建, 肖 娥. 安徽省池州市马头斑岩型铜钼矿床特征、成因和找矿方向[J]. *中国有色金属学报*, 2013, 23(12): 3503–3517.
- ZHAO Chao, XIE Xing-nan, LIU Jian-xin, GU Lian-xing, HU Jian, XIAO E. Characteristics, origin and future prospecting of porphyry copper-molybdenum deposit at Matou of Chizhou City, Anhui Province, China[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2013, 23(12): 3503–3517.
- [15] CHIARADIA M, ULIANOV A, KOUZMANOV K, BEATE, B. Why large porphyry Cu deposits like high Sr/Y magmas?[J]. *Scientific Reports*, 2012, 2: 1–7.
- [16] WILKINSON J J. Triggers for the formation of porphyry ore deposits in magmatic arcs[J]. *Nature Geoscience*, 2013, 6: 917–925.
- [17] 曾认宇, 赖健清, 毛先成, 艾启兴, 岳 斌. 金川铜镍硫化物矿床两个主要矿体的母岩浆在岩浆演化过程中的关系[J]. *中国有色金属学报*, 2015, 25(3): 761–775.
- ZENG Ren-yu, LAI Jian-qing, MAO Xian-cheng, AI Qi-xing, YUE Bin. Relationship between two kinds of parental magma of main orebodies during magma evolution in Jinchuan Cu-Ni(PGE) sulfide deposit, China[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2015, 25(3): 761–775.
- [18] CHEN Cheng-hong, LEE Chi-yu, SHINJO R. Was there Jurassic paleo-Pacific subduction in South China?: Constraints from ^{40}Ar - ^{39}Ar dating, elemental and Sr-Nd-Pb isotopic geochemistry of the Mesozoic basalts[J]. *Lithos*, 2008, 106: 83–92.
- [19] LI Zheng-xiang, LI Xin-hua. Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: A flat-slab subduction model[J]. *Geology*, 2007, 35: 179–182.
- [20] ZHOU Xin-min, SUN Tao, SHEN Wei-zhou, SHU Liang-shu, NIU Yao-ling. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: A response to tectonic evolution[J]. *Episodes*, 2006, 29: 26–33.
- [21] LI Bin, JIANG Shao-yong, ZHANG Qian, ZHAO Hai-xiang, ZHAO Kui-dong. Geochemistry, geochronology and Sr-Nd-Pb-Hf isotopic compositions of Middle to Late Jurassic syenite-granodiorites-dacite in South China: Petrogenesis and tectonic implications[J]. *Gondwana Research*, 2016, 35: 217–237.
- [22] LI Bin, JIANG Shao-yong, ZHANG Qian, ZHAO Hai-xiang, ZHAO Kui-dong. Cretaceous crust-mantle interaction and tectonic evolution of Cathaysia Block in South China: Evidence from pulsed mafic rocks and related magmatism[J]. *Tectonophysics*, 2015, 661: 136–155.
- [23] LI Xin-hua, LI Wu-xian, LI Zheng-xiang, LUO Ching-hua, WANG Jian, YE Mei-fang, YANG Yue-heng. 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[J].

- Precambrian Research, 2009, 174: 117–128.
- [24] XU Xi-sheng, O'REILLY S Y, GRIFFIN W L, WANG Xiao-lei, PEARSON N J, HE Zhen-yu. The crust of Cathaysia: Age, assembly and reworking of two terranes[J]. Precambrian Research, 2007, 158: 51–78.
- [25] 舒良树. 华南构造演化的基本特征[J]. 地质通报, 2012, 31: 1035–1053.
- SHU Liang-shu. An analysis of principal features of tectonic evolution in South China Block[J]. Geological Bulletin of China, 2012, 31: 1035–1053.
- [26] HU Li-sha, CAWOOD P A, DU Yuan-sheng, YANG Jiang-hai, JIAO Liang-xuan. Late Paleozoic to Early Mesozoic provenance record of Paleo-Pacific subduction beneath South China[J]. Tectonics, 2015, 34: 986–1008.
- [27] ZHENG Yong-fei, ZHAO Zi-fu, WU Yuan-bao, ZHANG Shao-bing, LIU Xiao-ming, WU Fu-yuan. Zircon U-Pb age, Hf and O isotope constraints on protolith origin of ultrahigh-pressure eclogite and gneiss in the Dabie orogen[J]. Chemical Geology, 2006, 231: 135–158.
- [28] GUO Feng, FAN Wei-min, LI Chao-wen, ZHAO Liang, LI Hong-ping, YANG Jin-hui. Multi-stage crust-mantle interaction in SE China: Temporal, thermal and compositional constraints from the Mesozoic felsic volcanic rocks in eastern Guangdong–Fujian provinces[J]. Lithos, 2012, 150: 62–84.
- [29] WANG Qiang, XU Ji-feng, JIAN Ping, BAO Zhi-wei, ZHAO Zhen-hua, LI Chao-feng, XIONG Xiao-lin, MA Jin-long. Petrogenesis of adakitic porphyries in an extensional tectonic setting, Dexing, South China: Implications for the genesis of porphyry copper mineralization[J]. Journal of Petrology, 2006, 47: 119–144.
- [30] MCDONOUGH W F, SUN Shen-su. The composition of the Earth[J]. Chemical Geology, 1995, 120: 223–253.
- [31] 张德全, 余宏全, 阎升好, 徐文艺. 福建紫金山地区中生代构造环境转换的岩浆岩地球化学证据[J]. 地质论评, 2001, 47(6): 608–616.
- ZHANG De-quan, SHE Hong-quan, YAN Sheng-hao, XU Wen-yi. Geochemistry of Mesozoic magmatites in the Zijinshan region and implication on regional tectonic inversion[J]. Geological Review, 2001, 47(6): 608–616.
- [32] BOYNTON W V. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies[C]//HENDERSON P. Rare Earth Element Geochemistry. New York: Elsevier, 1984: 63–114.
- [33] MENG Li-feng, LI Zheng-xiang, CHEN Han-lin, LI Xian-hua, WANG Xuan-ce. Geochronological and geochemical results from Mesozoic basalts in southern South China Block support the flat-slab subduction model[J]. Lithos, 2012, 132: 127–140.
- [34] RUDNICK R L, GAO Shan. Composition of the continental crust[C]//Rudnick(ed). The Crust Vol. 3, Treatise on Geochemistry(eds. Holland H D and Turekian K K). New York: Elsevier, 2003: 1–64.
- [35] RAPP R P, SHIMIZU N, NORMAN M D, APPLIGATE G S. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: Experimental constraints at 3.8 GPa[J]. Chemical Geology, 1999, 160: 335–356.
- [36] CASTILLO P R, JANNEY P E, SOLIDUM R U. Petrology and geochemistry of Camiguin Island, southern Philippines: Insights to the source of adakites and other lavas in a complex arc setting[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1999, 134: 33–51.
- [37] KELEMEN P B, HANGHOJ K, GREENE A R. One view of the geochemistry of subduction-related magmatic arcs, with an emphasis on primitive andesite and lower crust[J]. Treatise on geochemistry, 2003, 3: 593–659.
- [38] JIANG Yao-hui, JIANG Shao-yong, LING Hong-fei, DAI Bao-zhang. Low-degree melting of a metasomatized lithospheric mantle for the origin of Cenozoic Yulong monzogranite-porphyry, east Tibet: Geochemical and Sr-Nd-Pb-Hf isotopic constraints[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2006, 241(3/4): 617–633.
- [39] HE Zhen-yu, XU Xi-sheng. Petrogenesis of the Late Yanshanian mantle-derived intrusions in southeastern China: Response to the geodynamics of paleo-Pacific plate subduction[J]. Chemical Geology, 2012, 328: 208–221.

Geochemical signatures and geological implications of metallogenic rockbodies in Jintonghu deposit, Shanghang, Fujian province

LI Bin^{1,2,3}, LU An-huai^{1,2}, LAI Jian-qing^{1,2}, YANG Mu^{1,2}

(1. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring,

Ministry of Education, Central South University, Changsha 410083, China;

2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China;

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

Abstract: South China was characterized as widespread magmatic activities during the Late Mesozoic and of particular close association with economically abundant mineralization according to the accumulation of metal elements, in which diagenesis and ore-forming processes has been the main involved contents of research objectives for the Mesozoic great granite province. Granodiorite porphyries and granites are almost simultaneous with the Cu-Mo mineralization within the Jintonghu orefield. In order to determine the genetic relationship between these intrusions and Cu-Mo mineralization, whole rock major, trace element and Sr-Nd isotope analyses of the granodiorite porphyries and granites in the Jintonghu deposit were carried out. The granodiorite porphyries were classified as weakly pre-aluminous granites, showing an adakitic affinity. Detailed petrologic and geochemical data indicate that these granodioritic intrusions are derived directly from a metasomatized enriched mantle source, and the fractional crystallization processes play a key role in the formation of them. By contrast, the granites are classified as pre-aluminous, demonstrating that the intrusion might have undergone the fractional crystallization of plagioclase during magma ascent. The Sr-Nd isotopic compositions preclude that the initial magmas of the granites are dominantly sourced from the Proterozoic crustal basement metirals and juvenile or enriched mantle compositions. Interpretation of the elemental and isotopic data suggests that the granite is likely derived from partial melting of the early deep-seated magmatic rocks. The granodiorite porphyries and granites are emplaced in a back-arc extensional setting resulted from a forward and roll-back of the subducted paleo-Pacific slab under an active continental margin environment.

Key words: granite; granodiorite; trace element; Sr-Nd isotope; Jintonghu; Fujian province

Foundation item: Project(2015CX008) supported by the Innovation-driven Plan of Central South University

Received date: 2015-10-12; **Accepted date:** 2016-02-26

Corresponding author: LAI Jian-qing; Tel: +86-13875983805; E-mail: lj@csu.edu.cn

(编辑 王 超)