

江西广丰铜山中酸性岩体锆石 U-Pb 年代学、 地球化学特征及成因研究

吕劲松¹⁾, 张雪辉^{1,2)}, 孙建东¹⁾, 骆学全¹⁾, 康丛轩¹⁾, 简崑峰²⁾, 唐正²⁾

1) 中国地质调查局南京地质调查中心, 南京, 210016;

2) 成都理工大学, 成都, 610059

内容提要: 广丰铜山中酸性岩体侵位于华夏地块和扬子地块的结合部位——钦杭结合带东段。岩性为花岗闪长斑岩和石英闪长玢岩, 与之伴生有中型矽卡岩型铜矿床。花岗闪长斑岩的锆石环带结构明显, Th/U 值较大(0.40~1.07), 为典型的岩浆锆石, LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 成岩年龄为 171.0 ± 1.6 Ma ($n=15$, MSWD=0.16)。主微量元素特征表明该套中酸性侵入岩属于高钾过铝—偏铝质 I 型花岗岩类, 轻重稀土分异明显 ($La_N/Yb_N=10.53 \sim 38.37$), 无明显 Eu 异常 (δEu 平均值 1.05), 富集大离子亲石元素 (Rb, Ba, Th, U, K), 亏损 Nb, Ta, Ti, 低 Y ($< 10.4 \times 10^{-6}$), Yb ($< 0.93 \times 10^{-6}$), 高 Sr/Y 比值 (> 26), 具有弧型岩石和埃达克质岩石的双重地球化学特征。综合研究表明, 铜山矿区的中酸性岩石形成压力大于 1.5 GPa, 熔体起源深度大于 50 km, 源区为富含金红石的角闪榴辉岩, 形成于古太平洋板块斜向俯冲的挤压后松弛阶段, 由新元古代洋壳俯冲形成的增厚下地壳部分熔融形成。其埃达克质特性使其易于萃取、聚集铜金等成矿物质, 因此具有扩大找矿的潜力。

关键词: 江西广丰; 铜山中酸性侵入岩; 埃达克质; 锆石 U-Pb 定年; 地球化学

江西广丰地处赣东北地区, 位于钦杭成矿带东段, 多年来随着找矿成果的不断突破, 赣东北地区已成为华东重要的成矿区, 也是全国重要的铜(金)多金属矿化密集区 (Li Peizheng et al., 1999; Wang Denghong et al., 2014; Ying Lijuan et al., 2014), 如德兴铜矿、银山铅锌矿、冷水坑银铅锌矿等大型矿床 (Wang Changming et al., 2010)。这些矿床大多与中生代, 特别是燕山期的构造-岩浆活动紧密相关。

近十年来, 一些学者对华南中生代内生金属矿床区域成矿规律做了大量的综合研究, 取得了新的进展 (Hua Renmin et al., 2003, 2005; Mao Jingwen et al., 2004, 2008, 2009; 毛建仁等, 2013a), 显示了新的资源前景。特别是国内学者对与非俯冲环境的埃达克质岩及其与之相关的斑岩型和浅成热液型 Cu-Mo-Au 矿床方面的研究有了重大的突破以后, 对埃达克质岩的识别已成为指导勘探 Cu-Mo-Au 矿床的新思路 (Zhang Qi et al., 2002, 2004a, 2004b; 王强等, 2002; Wang Qiang et al., 2003, 2007, 2008; Hou Zengqian et al., 2003, 2005; Wang Yuanlong et al., 2003, Liu

Hongtao et al., 2004)。但对长江中下游成矿带的与埃达克质岩及相关 Cu-Mo-Au 矿床的研究较多 (Wang Yuanlong et al., 2001, 2004; 王强等, 2002; Wang Qiang et al., 2004a)。钦杭成矿带中燕山期与埃达克质岩相关的 Cu-Mo-Au 矿床报道的很少, 除研究表明德兴铜矿 (Wang Qiang et al., 2004b)、银山多金属矿床 (Wang et al., 2012) 和建德岭后铜矿 (Jia Shaohua et al., 2014) 与埃达克质岩有密切成因外, 其他地区鲜有发现与埃达克质岩相关的 Cu-Mo-Au 矿床。毛建仁等 (2013b)、Mao Jianren et al. (2014) 报道了广丰铜山地区燕山期中酸性岩石具有埃达克质特征, 本文在此基础上对与广丰铜山铜矿密切相关中酸性岩石进行详细的岩相学和年代学、地球化学研究, 进一步探求赣东北地区及钦杭成矿带的成矿规律。

1 区域地质背景及岩石学特征

广丰铜山地区位于江西东北部, 大地构造位置上位于萍乡-广丰-江山-绍兴深大断裂之上, 华夏地块和扬子地块的结合部位, 东乡龙游混杂岩带南侧 (图 1), 属于钦杭结合带东段。

注: 本文为中国地质调查局地调项目“钦杭成矿带东段整装勘查区及重点勘查区勘查示范与综合研究(编号 12120113065500)”资助成果。

收稿日期: 2015-10-09; 改回日期: 2016-02-04; 责任编辑: 周健。

作者简介: 吕劲松, 男, 1987 年生。助理研究员, 主要从事区域地质调查、岩石学、矿床学等研究工作。Email: lv-jingsong@qq.com。

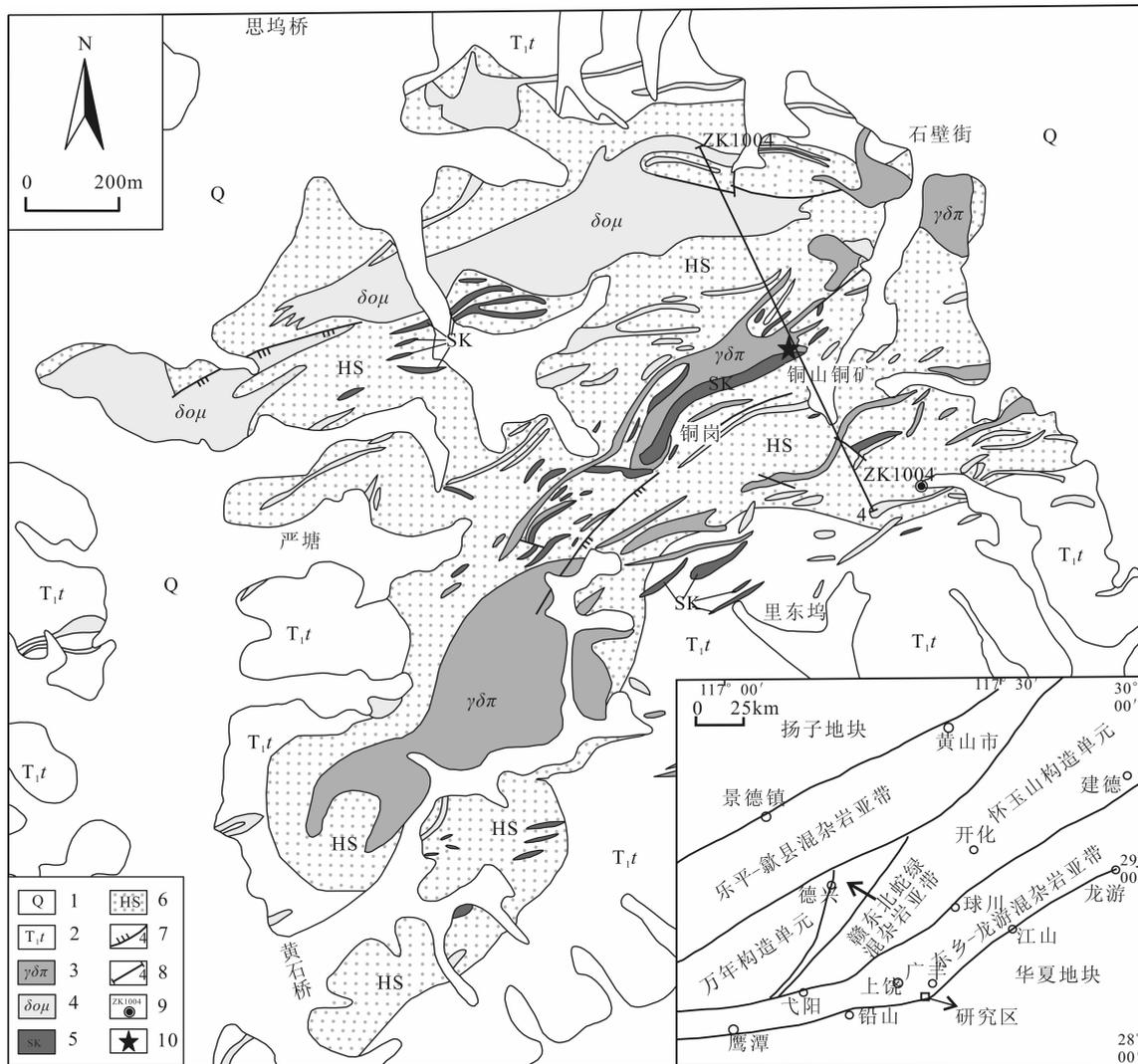


图 1 广丰铜山矿区地质简图

Fig. 1 Geological sketch map of Tongshan orefield, Guangfeng County

1—第四系;2—上三叠统铁石口组;3—花岗闪长斑岩;4—石英闪长玢岩;5—砂卡岩;6—角岩;7—断层;
8—4号勘探线位置;9—钻孔位置;10—锆石采样位置

1—Quaternary;2—Upper Triassic Tieshikou Formation;3—granodiorite-porphryty;4—quartz diorite-porphryrite;5—skarn;
6—hornstone;7—fault;8—4# prospecting line position;9—drilling location;10—zircon sample location

矿区出露的地层为中生界下三叠统铁石口组 (T_{1t}),其主要岩性为一套细碎屑岩(粉砂岩为主)夹钙质泥岩、泥灰岩、灰岩,岩层主要为北东走向,倾向南东,其中的钙质夹层多呈长条状,走向延伸不稳定。燕山期中酸性岩浆沿岩层脆弱面顺层侵入,呈脉状或小岩株状产出,总体也为北东串珠分布,并围绕岩体形成大面积的围岩蚀变矿化。主要蚀变有砂卡岩化、角岩化、大理岩化,矿化主要有黄铜矿化、黄铁矿化、磁铁矿化。矿体、矿化体主要产于砂卡岩化较强部位,受控于岩体与灰岩、泥灰岩接触面和层面裂隙以及硅化构造破碎带,与地层产状基本一致,为似层状和脉状矿体(图2)。主要矿石自然类型为块

状、团块状、浸染状和细脉浸染状铜硫砂卡岩矿石,局部有金矿化。铜品位平均0.89%,矿体规模为小型。

区内岩体主要岩性有花岗闪长斑岩、石英闪长玢岩,其中花岗闪长斑岩与成矿更为密切。从地表露头可明显的辨别出两期岩浆活动,在两者的接触界面附近,花岗闪长斑岩有明显的硅化,石英闪长玢岩硅化较弱,孙建东(待刊)获得邻区船坑铜矿石英闪长玢岩 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 162.9 ± 3.6 Ma,而本文测得铜山铜矿花岗闪长斑岩年龄为 171.0 ± 1.6 Ma。因此,花岗闪长斑岩形成时间早于石英闪长玢岩。其岩石学特征如下:

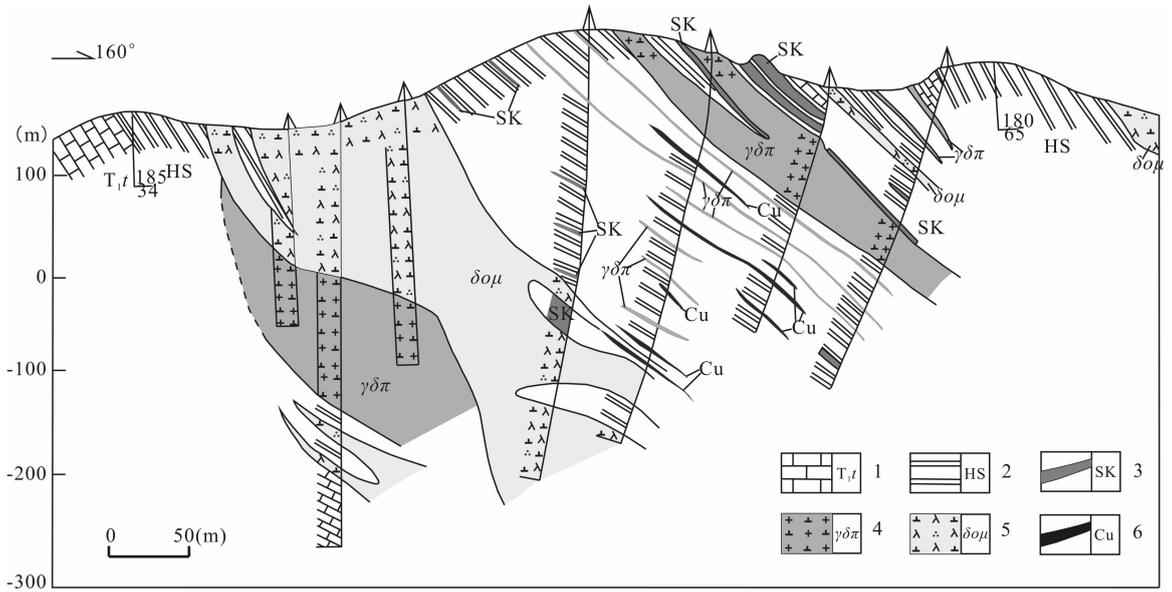


图 2 铜山矿区 4[#] 勘探线剖面图

Fig. 2 4[#] prospecting line profile map of Tongshan orefield

1—铁石口组灰岩;2—角岩;3—砂卡岩;4—花岗闪长斑岩;5—石英闪长玢岩;6—铜矿体

1—Limestone of Tieshikou Formation; 2—hornstone ; 3—skarn ; 4—granodiorite-porphry; 5—quartz diorite-porphryrite; 6—copper body

花岗闪长斑岩:多具斑状结构(图 3a),部分似斑状,斑晶粒度多在 1~4 mm,主要为斜长石(20%±)、石英(10%±)、碱性长石(5%±),角闪石(0~15%)和黑云母(5%~10%)含量变化较大。斜长石聚片双晶清晰,部分环带结构发育,局部见嵌晶结构。长石斑晶明显绢云母化,角闪石普遍有绿泥石化,石英边部多有熔蚀现象。基质为全晶质,主要为微-细晶石英和长石,有绢云母化、碳酸盐化,局部有星点状黄铁矿化。

石英闪长玢岩:斑状结构为主(图 3b,3c),个别呈似斑状结构,斑晶粒度在 0.5~5.5 mm,主要为

斜长石(12%~15%)、角闪石(5%~15%)、碱性长石(5%±)、石英斑晶(<2%)、黑云母(0~10%)。斜长石发育聚片双晶,多有环带结构,无序或聚斑状分布。长石常有不同程度的绢云母化、碳酸盐化,偶有较强的绿帘石化。角闪石多呈半自形—自形,普遍具有绿泥石化、碳酸盐化。石英多呈他形粒状。基质主要为微晶长英质和隐晶质,粒度<0.05 mm。部分含星点状黄铁矿。

2 样品分析方法

全岩组成分析样品取自自由本项目在铜山矿区施

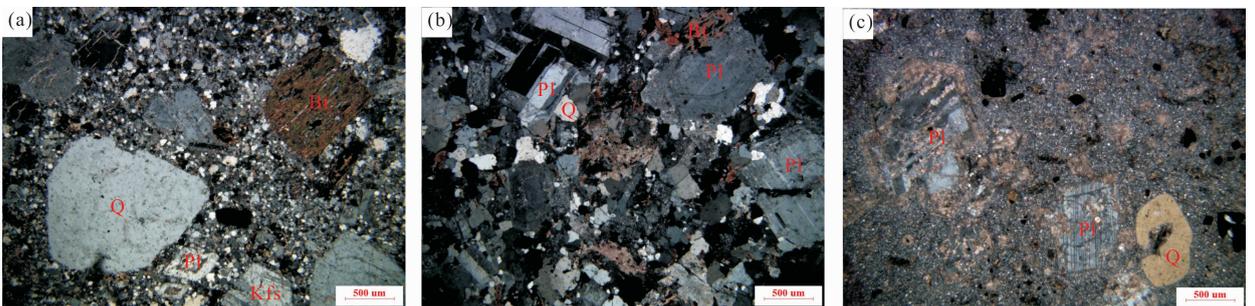


图 3 铜山中酸性侵入岩显微照片

Fig. 3 Microphotographs of the Tongshan intermediate-acid intrusive rocks

(a)—花岗闪长斑岩(正交偏光);(b)—似斑状花岗闪长岩(正交偏光);(c)—石英闪长玢岩(正交偏光);

Q—石英;Kfs—钾长石;Pl—斜长石;Bt—黑云母

(a)—granodiorite-porphry(crossed nicols); (b)—Porphyritic-like granodiorite (crossed nicols); (c)—quartz diorite-porphryrite (crossed nicols); Q—quartz; Kfs—kfeldspar; Pl—plagioclase; Bt—biotite

工的 ZK1004 钻孔岩芯,选择较新鲜样品做主微量组成分析,由国土资源部华东矿产资源监督检测中心完成。

锆石样品取自铜山铜矿 4 号勘探线 168 m 中段的花岗闪长斑岩(样号为 TS-1)。经人工破碎后,通过浮选、电磁选等方法分选后,在双目镜下挑出锆石。用环氧树脂将锆石颗粒固定于样品靶上,将靶上锆石磨至一半以使锆石内部暴露。进行锆石透射光、反射光照相后,对锆石进行阴极发光(CL)分析,锆石 CL 实验在北京铅年领航科技有限公司的实验室进行。根据阴极发光照射结果选择典型岩浆锆石进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年分析。定年工作在内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室完成,ICP-MS 型号为 Agilent7500a 型,激光剥蚀使用 New Wave 公司 UP213 固体激光剥蚀系统。测试过程中激光脉冲重复频率 5 Hz,剥蚀孔径为 25 μm ,剥蚀时间 60 s,背景扫描时间 40 s。使用 GEMOC/GJ-1(608 Ma)标样进行同位素分馏校正,锆石标样 Mud Tank(735 Ma)作为同位素监控样,本实验测定的锆石标样结果和误差与推荐值一致。实验过程严格按照相关原理和测试方法。ICP-MS 测试数据通过即时分析软件 GLITTER 计算获得同位素比值、年龄和误差,采用 Isoplot 软件绘制谱和图并计算加权平均年龄。年龄值采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄,单数据点误差为 1σ 。

3 分析结果

3.1 年代学测定

铜山花岗闪长斑岩样品(TS-1)中锆石为无色透明,金刚光泽,多呈长柱状,个别短柱状,自形晶。在阴极发光(CL)图像上,可见典型岩浆震荡环带(图 4)。本次定年共对样品中的 19 个锆石进行测定(表 1),锆石 U 含量变化范围在 $126 \times 10^{-6} \sim 1741 \times 10^{-6}$ 之间,Th 含量 $60 \times 10^{-6} \sim 1162 \times 10^{-6}$,Th/U 值 0.40~1.07,表明所测锆石均为典型岩浆锆石(Hoskin,2000)。样品中有 4 个测点(16~19)测得年龄不在谐和线上,在计算年龄时未统计在内,有 15 个测点(1~15) ^{206}Pb

表 1 铜山花岗闪长斑岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄测定结果
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating results of the Tongshan granodiorite porphyry

测点号	^{232}Th ($\times 10^{-6}$)	^{238}U ($\times 10^{-6}$)	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	
				比值	1σ	比值	1σ	年龄(Ma)	1σ	年龄(Ma)	1σ	年龄(Ma)	1σ	年龄(Ma)	1σ
TS-1-1	266	614	0.43	0.1866	0.0069	0.0268	0.0004	0.0098	0.0014	0.0014	0.0014	0.0014	0.0014	197.4	28.6
TS-1-2	172	341	0.50	0.1829	0.0146	0.0269	0.0006	0.0096	0.0023	0.0023	0.0023	0.0023	0.0023	192.9	46.3
TS-1-3	280	518	0.54	0.1927	0.0130	0.0269	0.0006	0.0025	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	49.8	5.0
TS-1-4	578	743	0.78	0.1821	0.0093	0.0273	0.0006	0.0017	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	34.3	2.6
TS-1-5	894	1354	0.66	0.1835	0.0052	0.0268	0.0004	0.0035	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	70.6	6.4
TS-1-6	92	192	0.48	0.1834	0.0262	0.0270	0.0008	0.0134	0.0051	0.0051	0.0051	0.0051	0.0051	268.4	102.4
TS-1-7	1035	1148	0.90	0.1753	0.0056	0.0267	0.0004	0.0091	0.0019	0.0019	0.0019	0.0019	0.0019	184.0	37.5
TS-1-8	135	259	0.52	0.1835	0.0129	0.0268	0.0005	0.0081	0.0015	0.0015	0.0015	0.0015	0.0015	162.3	29.6
TS-1-9	296	414	0.71	0.1833	0.0130	0.0268	0.0006	0.0104	0.0035	0.0035	0.0035	0.0035	0.0035	208.9	70.2
TS-1-10	91	158	0.58	0.1875	0.0348	0.0269	0.0009	0.0066	0.0018	0.0018	0.0018	0.0018	0.0018	132.6	36.9
TS-1-11	301	614	0.49	0.1825	0.0085	0.0269	0.0005	0.0029	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	57.5	5.3
TS-1-12	859	909	0.94	0.1879	0.0072	0.0268	0.0004	0.0074	0.0016	0.0016	0.0016	0.0016	0.0016	148.3	32.8
TS-1-13	265	500	0.53	0.1861	0.0098	0.0275	0.0005	0.0026	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	52.4	5.2
TS-1-14	1114	1037	1.07	0.1822	0.0075	0.0268	0.0005	0.0073	0.0019	0.0019	0.0019	0.0019	0.0019	146.4	38.6
TS-1-15	448	968	0.46	0.1485	0.0018	0.0269	0.0004	0.0050	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009	101.0	18.3
TS-1-16	543	781	0.69	0.1959	0.0112	0.0304	0.0006	0.0132	0.0049	0.0049	0.0049	0.0049	0.0049	264.3	97.65
TS-1-17	583	745	0.78	0.1865	0.0066	0.0301	0.0005	0.0031	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	61.9	5.41
TS-1-18	91	206	0.44	0.1865	0.0165	0.0305	0.0006	0.0039	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	78.8	8.13
TS-1-19	1072	1049	1.02	0.1723	0.0076	0.0279	0.0005	0.0017	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	34.1	3.27

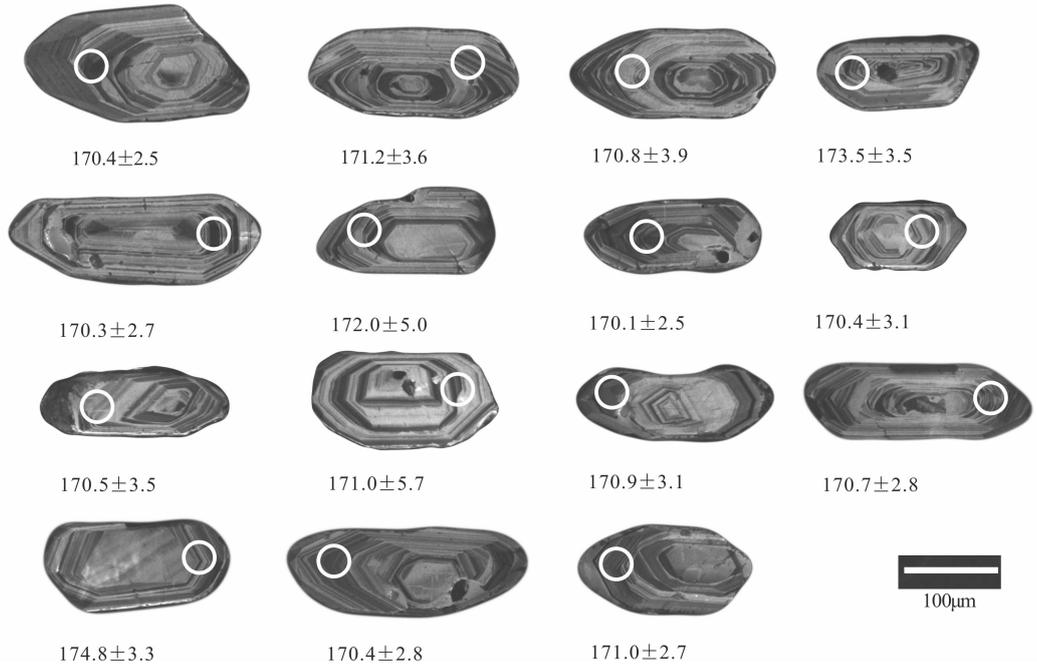


图 4 铜山花岗闪长斑岩锆石阴极发光图像

Fig. 4 Zircon CL images of the Tongshan granodiorite porphyry

^{238}U 年龄集中在 170.1~174.8 Ma 之间,且全落在 U-Pb 年龄谐和线上(图 5),计算得出加权平均年龄为 $171.0 \pm 1.6 \text{ Ma}$ ($n=15, \text{MSWD}=0.16$),也大致代表了铜山地区矽卡岩型矿床的成矿年龄,表明铜山铜矿形成于华南地区中生代 3 次大规模成矿作用中的第一阶段(Hua Renmin et al., 2005)。

3.2 主微量元素组成

花岗闪长斑岩 SiO_2 含量变化范围在 62.30%~

67.79% 之间(表 2),平均含量 65.26%,TAS 图解上全部落入花岗闪长岩区域(图 6a)。 Na_2O 平均含量为 1.49%, K_2O 变化范围为 2.2%~3.06%,平均含量为 2.7%。 CaO 含量为 3.08%~5.53%, MgO 含量为 0.59%~1.33%, Al_2O_3 含量为 13.06%~15.89%, $\text{A}/\text{CNK}=0.98\sim 1.15$ (平均值 1.1),属于总体属于高钾钙性过铝质花岗岩类(图 6b,c,d)。

石英闪长玢岩 SiO_2 含量在 59.12%~68.43% 之间,平均含量为 61.64%,个别样品有硅化使得 SiO_2 含量较高,TAS 图解上全部落入花岗闪长岩与闪长岩界线附近(图 6a)。 Na_2O 平均含量为 2.52%; K_2O 变化范围为 2.27%~3.71%,平均含量为 2.94%。 CaO 含量为 3.47%~6.77%, MgO 含量为 0.63%~3%, Al_2O_3 平均含量 16.14%, $\text{A}/\text{CNK}=0.9\sim 1.29$ (平均值 1.02),总体上属于高钾钙性一钙碱性偏铝质花岗岩类(图 6b,c,d)。

花岗闪长斑岩的 ΣREE 总量变化范围分别为 $69.18 \times 10^{-6} \sim 98.28 \times 10^{-6}$,轻重稀土比值(LREE/HREE)为 12.94~19.83, $(\text{La}/\text{Yb})_N = 13.70\sim 37.87$,在稀土配分形式图表现为向右陡倾,分异明显(图 7a)。 $\delta\text{Eu} = 0.82 \sim 1.18$ (平均值 1.04),没有明显 Eu 的负异常,说明岩浆源区无斜长石残留。石英闪长玢岩 ΣREE 总量变化范围为

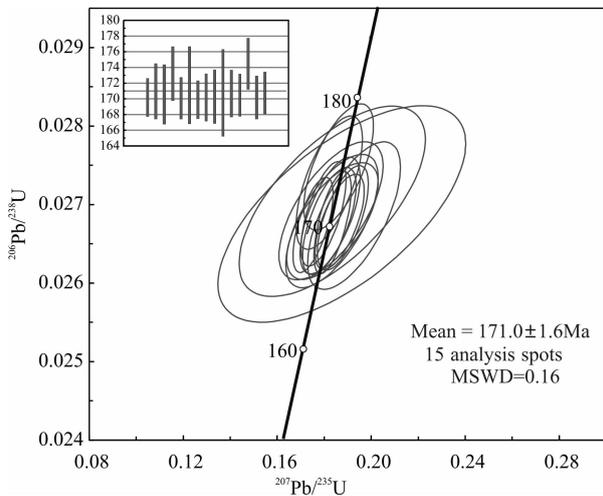


图 5 铜山花岗闪长斑岩锆石 U-Pb 谐和图

Fig. 5 Zircon U-Pb concordia diagram of the Tongshan granodiorite porphyry

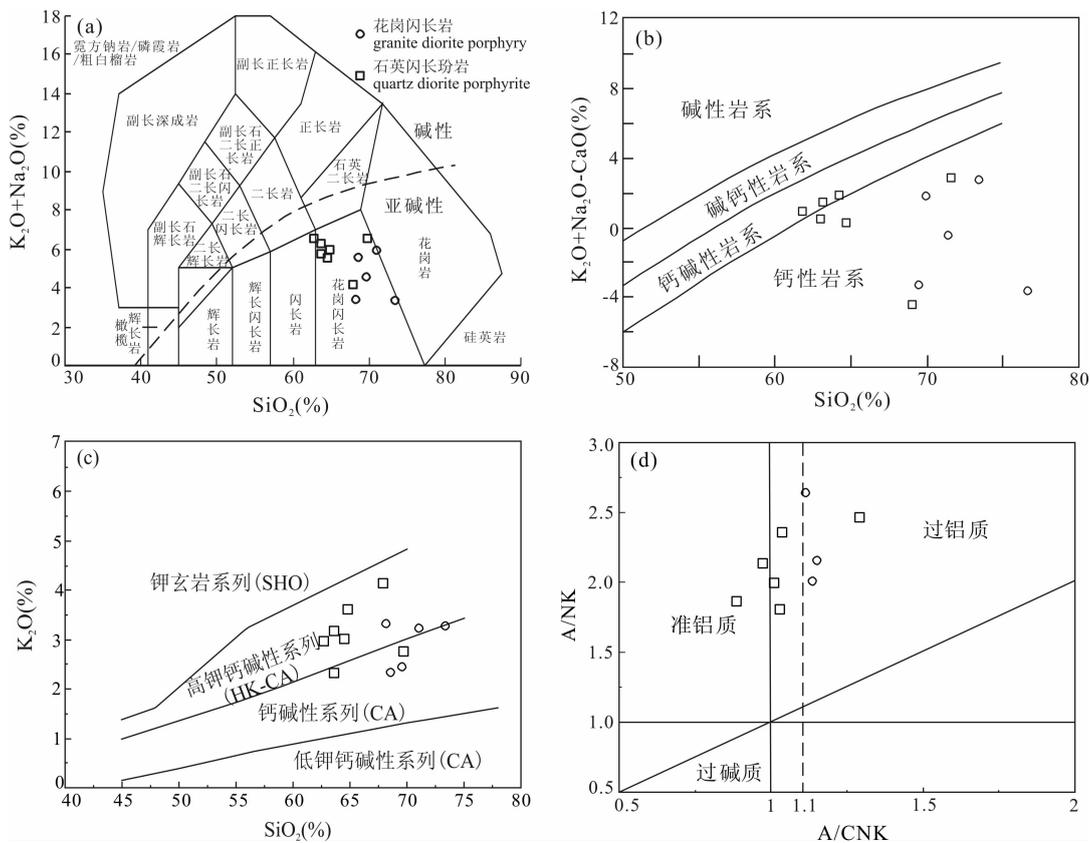


图 6 铜山中酸性岩石类型和系列划分图解

Fig. 6 Classification and series diagrams of the Tongshan intermediate-acid intrusive rocks

(a) —全碱-硅(TAS)图解(据 Middlemost, 1994); (b) — $(K_2O+Na_2O-CaO)-SiO_2$ 图解(据 Frost, 2001);

(c) — K_2O-SiO_2 图解; (d) —A/NK-A/CNK 图解

(a) —TAS diagram (after Middlemost, 1994); (b) — $(K_2O+Na_2O-CaO)-SiO_2$ diagram; (c) — K_2O-SiO_2 diagram; (d) —A/NK-A/CNK diagram

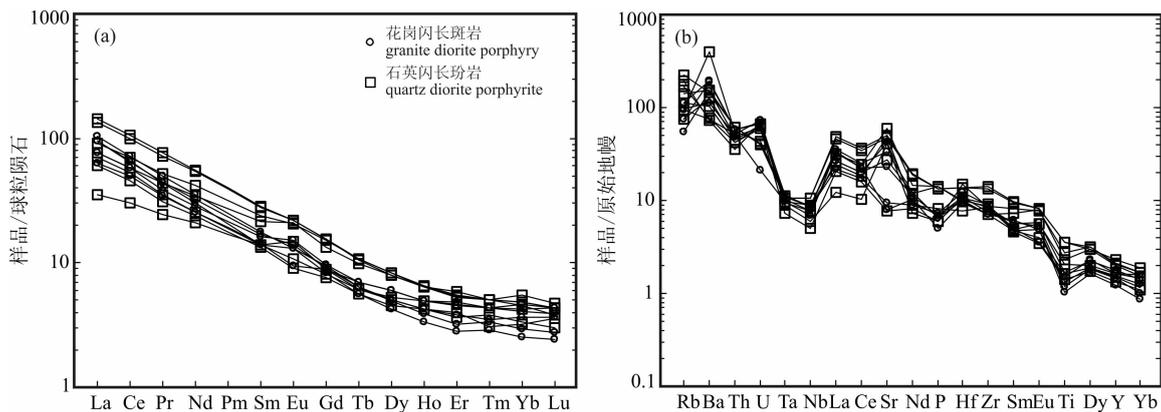


图 7 岩石稀土配分图(a)、微量元素比值蛛网图(b)(据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 7 Chondrite-normalized REE pattern (a) and primitive-mantle-normalized trace element (b) diagram of the Tongshan intermediate-acid intrusive rocks (normalization values after Sun and McDonough, 1989)

$46.35 \times 10^{-6} \sim 145.17 \times 10^{-6}$, 轻重稀土比值 (LREE/HREE) 为 $8.71 \sim 17.08$, $(La/Yb)_N = 10.53 \sim 29.72$, 分异明显, 与花岗闪长斑岩具有相似的稀土配分形式, $\delta Eu = 0.88 \sim 1.30$ (平均值 1.06), 总体也不具明显的 Eu 负异常。说明铜山中酸性岩

石来源相同的源区。

花岗闪长斑岩、石英闪长玢岩和闪长玢岩有相似的微量元素特征, 均富集大离子亲石元素 (Rb、Ba、Th、U、K), Nb、Ta、Ti 出现明显负异常, 表明岩浆起源于含水并残留石榴子石的角闪榴辉岩。部分

表 2 铜山中酸性岩石主量元素 (%) 及微量、稀土元素 ($\times 10^{-6}$) 含量
 Table 2 Major element content (%), trace and rare earth element ($\times 10^{-6}$)
 concentration of the Tongshan intermediate-acid intrusive rocks

样品号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	花岗闪长斑岩					石英闪长玢岩						
SiO ₂	63.37	62.3	67.45	65.38	67.79	68.43	61.19	62.26	60.21	59.35	59.12	60.93
TiO ₂	0.29	0.32	0.22	0.36	0.26	0.35	0.5	0.59	0.78	0.78	0.44	0.31
Al ₂ O ₃	14.36	14.24	13.06	15.89	14.86	16.17	17.12	17.41	15.25	15.86	16.5	14.7
Fe ₂ O ₃	2.06	1.97	0.67	0.73	0.71	0.66	1.98	0.67	1.39	1.43	1.31	1.04
FeO	1.65	3.26	1.09	2.6	2.15	0.8	3.05	3.6	3.49	3.08	1.89	1.4
MnO	0.03	0.06	0.05	0.06	0.04	0.03	0.14	0.08	0.08	0.08	0.05	0.06
MgO	0.89	0.59	0.61	1.33	0.73	1.47	1.9	2.09	3	2.42	1.42	0.63
CaO	4.08	5.3	5.53	3.5	3.08	3.7	3.47	4.65	4.68	5.14	4.9	6.77
Na ₂ O	1.87	0.009	0.009	3.05	2.51	3.67	2.34	3.82	2.38	3.34	2.1	0.009
K ₂ O	2.2	3.02	3.00	2.2	3.06	2.69	2.86	2.27	3.00	2.79	3.28	3.71
P ₂ O ₅	0.15	0.16	0.11	0.15	0.14	0.13	0.31	0.31	0.29	0.29	0.18	0.13
L. O. I	4.29	7.59	7.14	2.37	2.24	1.68	5.02	2.13	5.47	5.28	5.06	8.42
Total	95.24	98.82	98.94	97.62	97.57	99.78	99.88	99.88	100.02	99.84	96.25	98.11
FeO*	3.5	5.03	1.69	3.26	2.79	1.39	4.83	4.2	4.74	4.37	3.07	2.34
FeO*/MgO	3.94	8.53	2.78	2.45	3.82	0.95	2.54	2.01	1.58	1.8	2.16	3.71
σ	0.75	0.44	0.35	1.18	1.21	1.57	1.40	1.88	1.57	2.13	1.59	0.69
Mg [#]	0.31	0.17	0.39	0.42	0.32	0.65	0.41	0.47	0.53	0.5	0.45	0.32
A/CNK	1.12	1.1	0.98	1.15	1.14	1.03	1.29	1.01	0.97	0.89	1.04	0.9
La	22.3	14.9	22.7	18.2	24.5	8.37	18.2	21.7	31.9	33.6	16.6	14.2
Ce	39.8	30.7	40.1	35.2	44.3	18.4	35.6	42.9	60.9	64.6	32.3	27.8
Pr	4.27	3.25	4.13	3.64	4.7	2.34	4.14	4.94	6.85	7.22	3.34	2.95
Nd	15.1	11.9	14	13.3	16.5	9.74	16	19.7	25.5	26.1	11.9	11.1
Sm	2.6	2.2	2.13	2.49	2.69	2.11	3.26	3.67	4.24	4.36	2.15	2.03
Eu	0.81	0.55	0.76	0.88	0.76	0.62	1.21	1.19	1.27	1.26	0.86	0.53
Gd	1.85	1.8	1.7	1.98	1.93	1.68	2.77	3.13	3.16	3.21	1.81	1.55
Tb	0.24	0.26	0.21	0.26	0.24	0.23	0.37	0.4	0.39	0.4	0.23	0.21
Dy	1.28	1.54	1.09	1.53	1.25	1.28	2.01	2.12	2	2.11	1.35	1.15
Ho	0.24	0.28	0.19	0.28	0.22	0.24	0.36	0.37	0.36	0.36	0.28	0.24
Er	0.63	0.8	0.47	0.75	0.53	0.6	0.97	0.92	0.87	0.89	0.76	0.66
Tm	0.09	0.11	0.07	0.11	0.09	0.1	0.13	0.13	0.13	0.13	0.11	0.08
Yb	0.62	0.78	0.43	0.69	0.5	0.57	0.93	0.82	0.77	0.82	0.72	0.54
Lu	0.09	0.11	0.06	0.1	0.07	0.08	0.12	0.11	0.1	0.11	0.11	0.09
REE	89.92	69.18	88.05	79.41	98.28	46.35	86.07	102.1	138.44	145.17	72.52	63.13
LREE/HREE	16.83	11.18	19.83	12.94	19.37	8.71	10.24	11.76	16.8	17.08	12.5	12.97
δ Eu	1.07	0.82	1.18	1.17	0.97	0.97	1.2	1.05	1.02	0.98	1.3	0.88
(La/Yb) _N	25.8	13.7	37.87	18.92	35.15	10.53	14.04	18.98	29.72	29.39	16.54	18.86
La/Yb	35.97	19.1	52.79	26.38	49	14.68	19.57	26.46	41.43	40.98	23.06	26.3
Cs	4.37	10	5.29	1.91	2	1.64	8.82	3.45	5.25	4.27	4.31	9.17
Rb	59.6	70.9	61.4	34.4	47.7	47.1	123	70.5	142	89.4	59.4	107
Ba	519	1340	782	1040	1320	871	503	722	1030	1070	2810	535
Th	4.41	4.95	4.26	4.16	4.91	3.77	3.01	3.59	5.15	5.28	4.6	3.6
U	1.53	1.41	0.45	1.29	1.46	1.35	1.39	1.32	0.84	0.86	0.92	1.25
Ta	0.45	0.47	0.4	0.42	0.46	0.37	0.39	0.4	0.44	0.44	0.46	0.3
Nb	6.11	6.02	4.91	5.45	6.12	4.25	5.54	6.28	7.46	7.54	6.09	3.61
Pb	8.26	7.87	8.03	8.61	9.3	9.46	7.15	13.7	12.2	15.9	10	10.3
Sr	487	197	166	893	700	876	570	1270	993	1050	1040	162
Hf	3.4	3.8	2.9	3.2	3.1	4.6	3	3.1	4.2	4.2	2.4	3.3
Zr	85.2	99.7	78.2	94.4	79.5	94.5	78.2	97	150	158	95.1	104
Y	7	7.48	5.5	8.07	6.55	6.72	10.4	9.73	9.12	9.28	7.32	6.15
δ Sr	0.47	0.25	0.16	0.98	0.62	1.63	0.58	1.07	0.61	0.62	1.26	0.22
Sr/Y	69.6	26.3	30.2	110.7	106.9	130.4	54.8	130.5	108.9	113.1	142.1	26.3

续表 2

样品号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Mo	32.2	20.1	4.06	0.26	1.13	5.41	0.66	0.15	0.25	1.66	0.33	0.52
V	45.4	45.7	25	56.8	32.1	54.8	68.6	84.9	109	111	80.5	50.7
Cr	4.83	6.87	3.54	5.08	3.95	17.9	3.23	3.5	60.2	62.1	6.98	18.8
Co	9.9	10.9	6.84	8.52	6.83	2.99	5.54	7.03	13.7	14.9	9.09	6.94
Ni	4.6	5.46	2.89	4.12	2.87	7.02	2.74	4.34	25.7	26.9	4.19	9.43
Cu	664	591	147	143	311	491	7.47	23.6	23.4	79.6	288	33.1
Zn	38.2	48.8	29.3	36.5	35.8	32.8	72	59.2	75.7	60.6	30	24.7
Ga	15.9	17.1	15.4	17.7	17.3	19.6	19.4	21.1	19	19.8	17.6	19

注:样品取自钻孔 ZK1004 岩芯; $FeO^* = FeO + Fe_2O_3 \times 0.8998$; $Mg^\# = Mg^{2+} / (Mg^{2+} + Fe^{2+})$ (全铁) (离子数之比); $A/NKC = Al_2O_3 / (Na_2O + K_2O + CaO)$ (分子数之比); $\sigma = (Na_2O + K_2O)^2 / (SiO_2 - 43)$; $\delta Sr = 2 \times Sr_N / (Ce + Nd)_N$ 。

样品有 P 的亏损,可能有部分的磷灰石结晶分离。除 3 个样品显示 Sr 负异常外,其他都有明显的 Sr 正异常。均具有弧型岩浆的微量元素含量特征,即富集大离子亲石元素(LILE)和轻稀土元素(LREE)(表 2),亏损高场强元素(HFSE),尤其是 TNT 呈强负异常(图 7b),在 Ta-Yb 与 Nb-Y 判别图上也落入火山弧花岗岩区域(图 8)。

4 岩石成因

4.1 岩石地球化学分类

从岩相学分析,铜山中酸性岩石没有白云母、堇青石等过铝质矿物,因此不具有 S 型花岗岩的特征。A 型花岗岩在矿物组成和化学成分特点上,均由黑云母、条纹长石、钠长石($An < 8\%$)和石英组成,有特殊的晶洞构造,具有高 $SiO_2 (> 73\%)$ 、高碱($K_2O + Na_2O = 7.63 \sim 8.51\%$)、低钙($CaO < 1\%$)、高 $FeO/MgO (24 \sim 97)$ 的特点,而微量元素上,A 型花岗岩的 $10000Ga/Al$ 值高(> 2.6), $Zr + Nb + Ce + Y$ 元素组合值 $> 350 \times 10^{-6}$ (Collins et al., 1982;

Whalen et al., 1987),而铜山岩体的 Ga/Al 和 $Zr + Nb + Ce + Y$ 元素组合值均偏低,分别为 $2.02 \sim 2.36$ 和 $123.87 \sim 239.42$,从主量元素和微量元素特征上,也都不具 A 型花岗特征。从稀土配分曲线上看,铜山岩体也不具 S 型和 A 型花岗岩“海鸥型”稀土配分形式的特征,而是向右陡倾,无明显 Eu 亏损,与 I 型花岗岩特征一致。

经典的埃达克岩低 Y 和 HREE, $Y < 18 \times 10^{-6}$ 、 $Yb < 1.9 \times 10^{-6}$,高 Sr (通常 $> 400 \times 10^{-6}$)、低 HFSE、 $Sr/Y > 20 \sim 40$, $La/Yb > 20$ (Defant and Drummond, 1990, 1993; Qian Qing et al., 2001),铜山地区的中酸性岩石微量元素含量与上述特征基本一致, Y 含量为 $5.5 \times 10^{-6} \sim 10.4 \times 10^{-6}$ 、Yb 含量 $0.43 \times 10^{-6} \sim 0.93 \times 10^{-6}$,花岗闪长斑岩 Sr 的平均含量为 488.6×10^{-6} , Sr/Y 平均值为 68.72, $La/Yb = 19.1 \sim 52.79$ (平均值 38.65)。石英闪长玢岩具更高的 Sr 含量,其平均含量高达 851.57×10^{-6} , Sr/Y 平均值高达 100.88, $La/Yb = 19.57 \sim 41.43$ (平均值 27.5)。在 Sr/Y-Y 和 $(La_N/Yb_N) - Yb_N$ 判

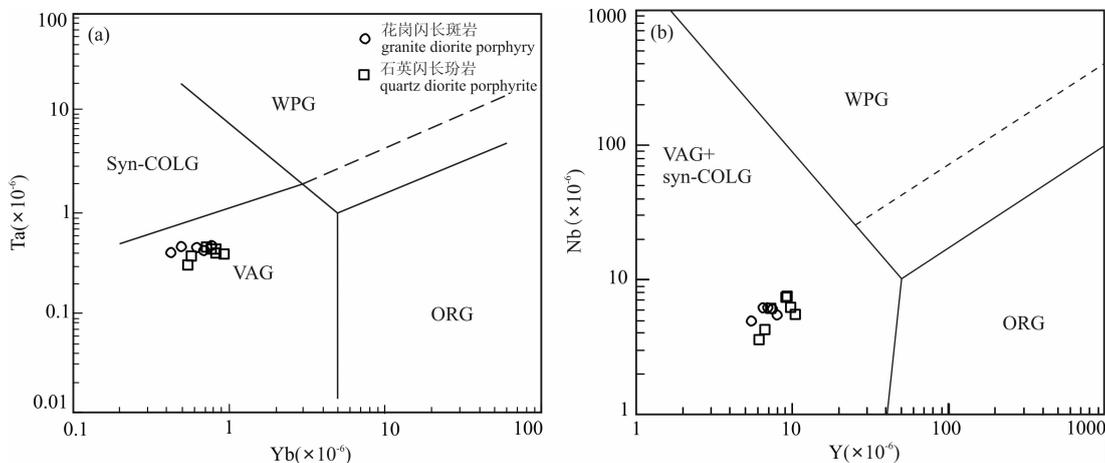


图 8 铜山中酸性岩石 Ta-Yb (a)与 Nb-Y 判别图(b)

Fig. 8 Ta vs Yb (a) and Nb vs Y (b) discrimination diagrams of the Tongshan intermediate-acid intrusive rocks

别图中也都落入埃达克岩区域(图 9)。

根据岩相学和主微量元素地球化学综合分析,铜山中酸性岩石属于埃达克质的 I 型花岗岩类。

4.2 构造环境

燕山早期是华南地区由特提斯构造体制向古亚洲构造体制和太平洋构造体制转换的重要时期(Song Chuanzhong et al., 2010)。长期以来,许多研究者认为形成华南地区燕山期大面积火成岩的主要原因为古太平洋板块向欧亚大陆的俯冲(Jahn, 1974; 朱训等, 1983; 芮宗瑶等, 1984; Zhou and Li, 2000)。近年来,随着华南内陆地区越来越多的燕山期 A 型花岗岩、板内火山岩及其他伸展型岩浆和矿床的发现,大多研究者认为华南地区燕山期大面积火成岩形成的重要原因是岩石圈伸展或古太平洋板块的俯冲所导致弧后伸展所致(Chen et al., 2002; Wang Qiang et al., 2004b; Hua Renmin et al., 2005; Li Xiaofeng et al., 2006; Lu Huijuan et al., 2007)。Mao Jianren et al. (2014) 提出华南在印支期完成了多板块汇聚后,大约在 175 ± 5 Ma 进入古太平洋板块斜向俯冲为主的陆内造山体系。燕山早期长江中下游地区受到对冲推覆作用,其南缘的江南造山带则发生从东南向北西的逆冲推覆作用,江绍断裂北部的德兴—上饶地区古生界和早燕山期构造层(J_1 — J_2)都产生了褶皱-逆冲构造,发育线性展布的紧闭褶皱(Wang Pengcheng et al., 2012)。强烈的挤压推覆也使得地壳缩短,岩石圈加厚(Song Chuanzhong et al., 2010)。Mao Jianren et al. (2014) 认为古太平洋俯冲/后撤是大面积火山岩形成的动力学机制,以钦杭结合带为代表,燕山期陆内

构造是长期的伸展与短期的挤压相伴随,在钦杭结合带和长江中下游结合带都有从挤压到伸展构造事件的岩浆活动纪录,在华夏地块内也形成了大面积花岗岩类和东南沿海的下火山岩系。Wang Qiang et al. (2004b) 认为位于钦杭结合带东段的德兴铜厂、富家坞埃达克质花岗闪长斑岩是在古太平洋板块斜向俯冲为主的构造体系下,形成于伸展构造动力学背景,广丰铜山埃达克质中酸性岩体成岩时间(171 ± 1.6 Ma)与德兴铜厂花岗闪长斑岩(171 ± 3 Ma)几乎一致,应是形成于同一应力背景。综上,广丰铜山埃达克质中酸性岩体应形成于古太平洋俯冲挤压的松弛阶段。

4.3 源区讨论及形成机制

具有弧型微量元素分布(LILE 和 LREE 富集、HFSE 亏损)的岩石不一定是直接洋壳俯冲引起,取决于岩浆形成的时间,如果早期弧型岩石再次部分熔融,所形成的岩石也表现出弧型微量元素分布特征,这是火成岩石地球化学的“继承性”(Xue Huaimin et al., 1996; Wang et al., 2013)。研究区燕山期没有火山弧构造背景,但基底地层存在新元古代俯冲洋壳所形成的岛弧岩石,分布于赣东北、浙西新元古代的双桥山群、双溪坞群和铁砂街群都具备这种弧型地球化学条件。位于赣杭带赣东北地区的银山火山-侵入杂岩和德兴斑岩型铜矿的成矿岩体研究成果表明,两者都是具有类弧型地球化学特征的中酸性岩石,可能是江南造山带新元古代洋壳俯冲形成的新生地壳部分熔融的产物(Liu et al., 2012; Wang et al., 2012),铜金成矿物质则来自此类岛弧岩石。因此,同属赣杭带赣东北地区的具弧

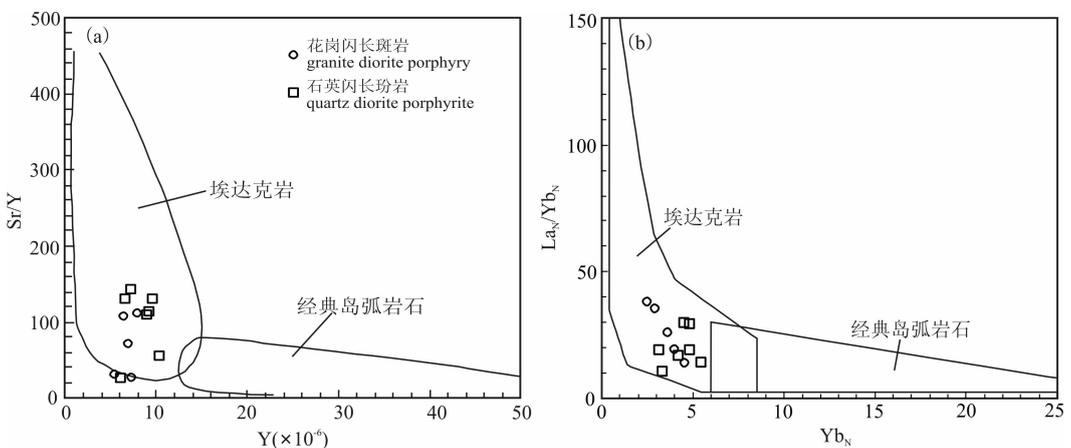


图 9 铜山中酸性岩石 Sr/Y-Y (a) 和 (La_N/Yb_N) - Yb_N (b) 判别图(据 Defant and Drummond, 1990)

Fig. 9 Sr/Y versus Y (a) and (La_N/Yb_N) versus Yb_N (b) diagrams of the Tongshan intermediate-acid intrusive rocks (after Defant and Drummond, 1990)

型微量元素特征的铜山中酸性岩石也可能是新元古代洋壳俯冲形成的弧型岩石再熔融而成。

铜山中酸性岩石的高 Sr 和无明显 Eu 负异常的特征表明源区无斜长石残留相,相对亏损 HFSE (Nb、Ta、Ti),说明源区存在稳定的金红石残留相 (Martin et al., 2005; Xiong Xiaolin et al., 2007);石榴子石是能够导致产生轻重稀土强烈分异的最主要的矿物 (Martin et al., 2005),岩体亏损 HREE 和 Y,表明源区石有稳定石榴子石残留相。以上岩石化学特征表明,铜山埃达克质中酸性熔体起源于富含金红石的榴辉岩相的部分熔融。实验岩石学的研究成果已证实,玄武质岩石部分熔融产生的熔体要与石榴子石残留相达到平衡,压力必须大于 1.2 GPa (即相当于地壳 40 km 更深处) (Rapp, 1995, 1999; Sen, 1994)。而金红石是导致埃达克质岩浆 Nb、Ta 亏损的必要残留矿物,金红石必须在压力 1.5 GPa 以上才能稳定存在,从而限定埃达克质岩熔体必定产生在大约 50 km 以上 (Xiong Xiaolin et al., 2007),由此判断铜山埃达克质中酸性熔体起源深度大于 50 km。

埃达克质岩可分为以下几种成因类型 (Moyen, 2009): ①经典的板片熔融可以很好地解释“高硅埃达克岩”的成因; ②交代地幔 (埃达克质岩石) 在有石榴子石残留的熔融可以解释“低硅埃达克岩”的成因,成岩深度大于 2.5 GPa (>60 km, 与高镁安山岩形成深度相当); ③“大陆”埃达克质岩实际包括了很大范围的一组岩石,是中国东部和青藏高原所特有,其中极大部分岩石不同于“高硅”和“低硅”埃达克岩。这种“大陆”埃达克质主要有两种成因模式 (Wang Qiang et al., 2004b); 增厚古老下地壳物质的熔融 (Zhang Qi et al., 2001, 2004b; 王强等, 2002); 新底侵下地壳物质的熔融 (Wang Qiang et al., 2001; Zhang Qi et al., 2001, 2003) 和拆沉下地壳物质的熔融 (Xu et al., 2002; Wang Qiang et al., 2004b)。我国华南地区,底侵玄武质下地壳熔融不是埃达克质岩形成的主要模式,且中生代可能存在的玄武质岩浆的底侵作用形成时代主要为 140~106 Ma (Wang Qiang et al., 2001),与广丰铜山岩体形成时间相差太大,研究区也未有基性岩浆出露,因此,广丰铜山地区埃达克质中酸性岩石不可能是新底侵下地壳物质熔融形成。Wang Qiang et al. (2007) 认为华南扬子地块东部的一些埃达克质岩石则是榴辉岩质的下地壳拆沉进入下伏热的和更塑性的岩石圈或软流圈地幔中后发生部分熔融所致,而 Zhang Qi et al. (2005, 2006) 认为,地壳拆沉仅发生在

华北,华南没有拆沉作用。由于拆沉下地壳物质熔融形成的埃达克质岩浆在穿过地幔的过程中,将会与地幔橄榄岩发生物质交换,因此,这类埃达克质岩一般具有较高的地幔组分,并具有较高的 $MgO(Mg^{\#})$ 、Ni 和 Cr 含量、低 FeO/MgO 比值的特征 (Xu et al., 2002; Gao et al., 2004; Guan Yili et al., 2013; Xu Jifeng et al., 2014)。而铜山埃达克质中酸性岩石个别样品 $Mg^{\#}$ 虽最高可达 0.63,但总体仍偏低,平均仅 0.41,多数样品 MgO、Ni、Cr 含量较低,FeO/MgO 比值较高,表明受地幔橄榄岩混染较少。在其特征元素的图解上 (图 10),绝大多数也都落入玄武质增厚下地壳形成的埃达克质岩区域。综上,铜山埃达克质中酸性岩石应是增厚下地壳部分熔融形成,其高钾特征可能是受到不同程度上地壳的混染。

由于埃达克质岩浆为在高压、高温条件下熔融形成 (Sen et al., 1994; Rapp et al., 1999; Martin et al., 2005),富含大量流体 (Kay and Mpodozis, 2001; Mungall, 2002; Wang Yuanlong et al., 2003; Xiong Xiaolin et al., 2007),能够快速携带成矿物质上升,而萍乡-广丰-江山-绍兴深大断裂是岩浆运移的良好通道 (Mao Jingwen et al., 2014),当铜山埃达克质熔体运移至地壳浅部时,由于压力的释放,成矿流体出溶,岩浆凝固成岩,成矿流体遇钙质围岩形成矽卡岩型铜矿。对于铜山地区深部岩体是否能形成德兴铜厂式的斑岩铜矿,还需做进一步的勘查和研究。

5 结论

(1) 铜山矿区花岗闪长斑岩加权平均年龄为 171.0 ± 1.6 Ma,形成于中侏罗世,代表了铜山地区中酸性岩石的主要成岩年龄阶段,成矿作用与岩浆活动的时代大致相同。

(2) 铜山地区中酸性岩石总体属于高钾过铝—偏铝质 I 型花岗岩,具有弧型岩石和埃达克质岩石的双重地球化学特征,是由元古宙洋壳俯冲形成的增厚下地壳再次部分熔融形成,其形成压力 > 1.5 GPa,起源深度大于 50 km,源区为富含金红石的角闪榴辉岩。其是在古太平洋板块大致由南向北的斜向俯冲动力学启动机制下,挤压后松弛阶段形成。

(3) 铜山地区中侏罗世埃达克质中酸性岩浆成矿活动属于华南地区燕山期 3 次大规模成矿作用中的早期阶段,其埃达克质岩浆的特性易于萃取、聚集 Cu、Au 等多金属成矿物质,因此具有扩大找矿的潜力。

致谢:衷心感谢毛建仁研究员对本文的指导,使

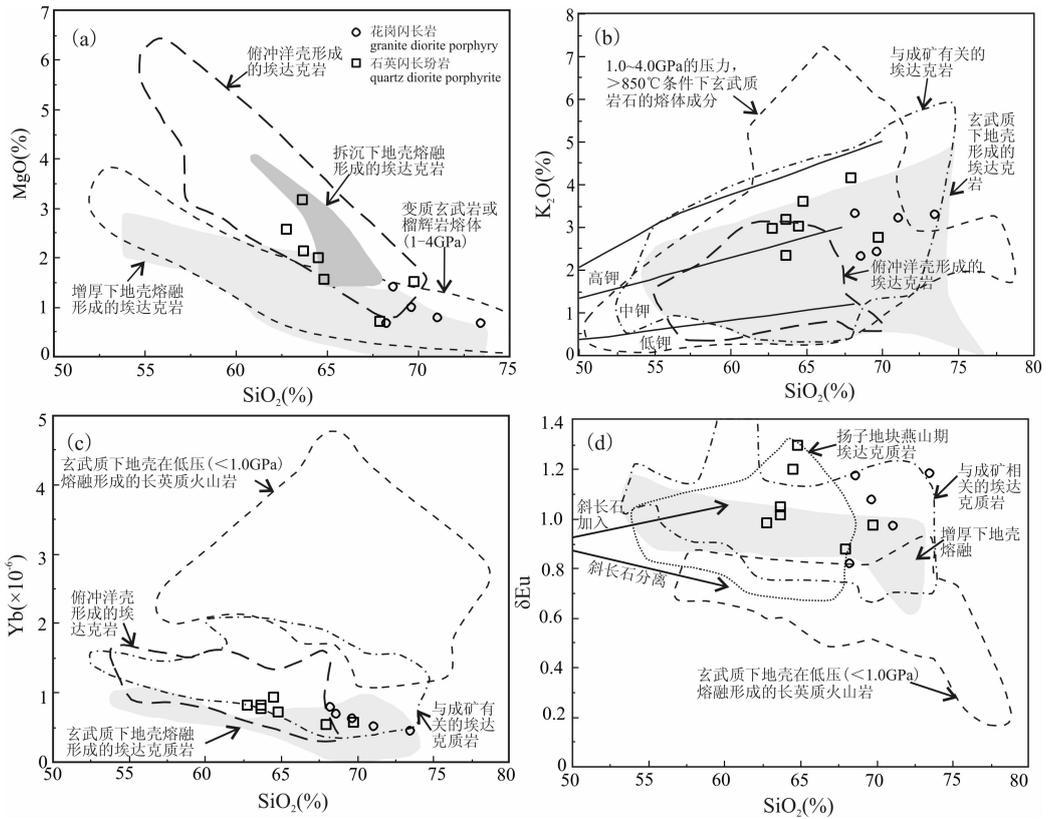


图 10 铜山中酸性岩石元素图解

Fig 10 Elements diagrams of the Tongshan intermediate-acid intrusive rocks

K₂O-SiO₂ (a)、Y-SiO₂ (c)、δEu-SiO₂ (d) 图解转引自文献(王强等,2002),MgO-SiO₂ (b)图解转引自文献(Wang Qiang et al.,2004a)

K₂O-SiO₂ (a)、Y-SiO₂ (c)、δEu-SiO₂ (d) diagrams after (Wang et al,2002); MgO-SiO₂ (b) after (Wang et al,2004a)

本文增色不少;感谢匿名审稿专家对本文的指正及宝贵建议。

References

Chen P R, Hua R M, Zhang B T, Lu J J, Fan C F. 2002. Early Yanshannian post-orogenic granitoids in the Nanling region; petrological constraints and geodynamic setting. *Science in China (Series D)*, 45(8): 755~768.

Collins W J, Beams S D, White A J R, Chappell B W. 1982. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 80: 189~200.

Defant M J, Drummond M S. 1993. Mount St. Helens: potential example of partial melting of subducted lithosphere in a volcanic arc. *Geology*, 21: 547~550.

Defant M J, Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by of young subducted lithosphere. *Nature*, 347: 662~665.

Frost. 2001. A Geochemitic Classification For Granitic Rocks. *Journal of petrology*, 42: 2033~2048.

Gao S, Rudnick R L, Yuan H L, Liu X M, Liu Y S, Xu W L, Ling W L, Ayers J, Wang X C, Wang Q H. 2004. Recycling lower

continental crust in the North China craton. *Nature*, 432: 892~897.

Guan Yili, Yuan Chao, Long Xiaoping, Wang Yujing, Zhang Yunying, Huang Zongying. 2013. Early Paleozoic intracontinental orogeny of the eastern South China Block: evidence from I-type granitic plutons in the SE Yangtze block. *Geotectonica et Metallogenia*, 37 (04): 698 ~ 720 (in Chinese with English abstract).

Hoskin P W O. 2000. Patterns of chaos: Fractal statistics and the oscillatory chemistry of zircon. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(11): 1905~1923.

Hou Zengqian, Meng Xiangjin, Qu Xiaoming, Gao Yongfeng. 2005. Copper ore potential of adakitic intrusives in Gangdese porphyry copper belt; Constrains from rock phase and deep melting process. *Mineral Deposits*, 24 (02): 108 ~ 121 (in Chinese with English abstract).

Hou Zengqian, Mo Xuanxue, Gao Yongfeng, Qu Xiaoming, Meng Xiangjin. 2003. Adakite: A possible host rock for porphyry copper deposits; case studies of porphyry copper belts in Tibetan Plateau and in Northern Chile. *Mineral Deposits*, 22 (01): 1~12 (in Chinese with English abstract).

Hua Renmin, Chen Peirong, Zhang Wenlan, Lu Jianjun. 2005. Three major metallogenic events in Mesozoic in South China. *Mineral*

- Deposits, 24(02):99~107 (in Chinese with English abstract).
- Jahn B M. 1974. Mesozoic thermal events in southeast China. *Nature*, 248:480~483.
- Jia Shaohua, Zhao Yuanyi, Wang Zongqi, Wu Yudong, Wang Tao, Chen Lei. 2014. Zircon U-Pb dating and geochemical characteristics of granodiorite-porphry in the Linghou copper deposit, Western Zhejiang, and their geological significance. *Acta Geologica Sinica*, 88(11):2071~2085 (in Chinese with English abstract).
- Kay S M, Mpodozis C. 2001. Central Andean ore deposits linked to evolving shallow subduction system and thickening crust. *GSA Today*, 11(3):4~9.
- Li Peizheng, Deng Guoping, Tao Hong, Wu Yanzhi. 1999. *Geotectonica et Metallogenia*, 23(04):300~307 (in Chinese with English abstract).
- Li Xiaofeng, Chen Wen, Mao Jingwen, Wang Chunzeng, Xie Guiqing, Feng Zuohai. 2006. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of sericite from altered dacite porphyry and quartz porphyry in Yinshan polymetallic deposit of Jiangxi Province and its geological significance. *Mineral Deposits*, 25(01):17~26 (in Chinese with English abstract).
- Liu Hongtao, Zhang Qi, Liu Jianming, Ye Jie, Zeng Qindong, Yu Changming. 2004. Adakite versus porphyry copper and epithermal gold deposits: a possible metallogenetic specialization of magmatism required in-deep assessment. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2):205~218 (in Chinese with English abstract).
- Liu X, Fan H R, Santosh M, Hu F F, Yang K F, Li Q L, Yang Y H, Liu Y S. 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.
- Lu Huijuan, Hua Renmin, Mao Guangzhou, Long Guangming. 2007. Isotope geochronological study of igneous rocks in Northeastern Jiangxi Province and its implication to geologic evolution. *Geological Review*, 53(02):207~216 (in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Xie Guiqing, Li Xiaofeng, Zhang Changqing, Mei Yanxiong. 2004. Mesozoic large scale mineralization and multiple lithospheric extension in South China. *Earth Science Frontiers*, 11(01):45~55 (in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Luo Maocheng, Xie Guiqing, Liu Jun, Wu Shenghua. 2014. Basic characteristics and new advances in research and exploration on Porphyry Copper deposits. *Acta Geologica Sinica*, 88(12):2153~2175 (in China with English abstract).
- Mao Jingwen, Xie Guiqing, Guo Chunli, Yuan Shunda, Cheng Yanbo, Chen Yuchuan. 2008. Spatial-Temporal distribution of Mesozoic ore deposits in South China and their metallogenetic settings. *Geological Journal of China Universities*, 14(04):510~526 (in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Xie Guiqing, Cheng Yanbo, Chen Yuchuan. 2009. Mineral deposit models of Mesozoic ore deposits in South China. *Geological Review*, 55(03):347~354 (in Chinese with English abstract).
- Mao JianRen, Li Zilong, Ye Haimin. 2014. Mesozoic tectono-magmatic activities in South China: Retrospect and prospect. *Science China: Earth Sciences*, 44(01):1~25 (in Chinese with English abstract).
- Martin H, Smithies R H, Rapp R P, Moyen J F, Champion D C. 2005. An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid; relationships and some implications for crustal evolution. *Lithos*, 79:1~24.
- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth-Science Reviews*, 37(3~4):215~224.
- Moyen J F. 2009. High Sr/Y and La/Yb ratios the meaning of the "adakitic signature". *Lithos*, 112:556~574.
- Mungall J E. 2002. Roasting the mantle: Slab melting and the genesis of major Au and Au-rich Cu deposits. *Geology*, 30(10):915~918.
- Qian Qing. 2001. Adakite: geochemical characteristics and genesis. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 20(03):297~306 (in Chinese with English abstract).
- Rapp R P, Shimizu N, Norman M D, Applegate G S. 1999. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: experimental constraints at 3.8 GPa. *Chemical Geology*, 160:335~356.
- Rapp R P. 1995. Amphibole-out phase boundary in partially melted metabasalt, its control over liquid fraction and composition, and source permeability. *Geophys. Res.*, 100:15601~15610.
- Sen C, Dunn T. 1994. Dehydration melting of a basaltic composition amphibolite at 1.5 and 2.0 GPa: implications for the origin of adakites. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 117:394~409.
- Song Chuanzhong, Lin Shoufa, Zhou Taofa, Yan Jun, Ren Shenglian, Li Jiahao, Tu Wenchuan, Zhang Yan. 2010. Mesozoic tectonic regime transition of the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River and its adjacent area. *Acta Petrologica Sinica*, 26(9):2835~2849 (in China with English abstract).
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotope systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders A D, Norry M J eds. *Magmatism in Ocean Basins*. Geological Society of London, Special Publications, 42:313~345.
- Wang Changming, Wu Ganguo, Zhang Da, Luo Ping, Di Yongjun, Yu Xinqi. 2010. Regional metallogenetic characteristics and mineralizing pedigree in northeastern Jiangxi. *Global Geology*, 29(04):588~600 (in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong, Xu Zhigang, Shen Jifu, Zhu Mingyu, Xu Jue, Yuan Zhongxin, Bai Ge, Qu Wenjun, Li Huaqin, Chen Zhenhui, Wang Chenhui, Huang Fan, Zhang Changqin, Wang Yonglei, Ying Lijuan, Li Houmin, Gao Lan, Sun Tao, Fu Yong, Li Jiankang, Wu Guang, Tang Juxing, Feng Chenyou, Zhao Zhen, Zhang Daquan. 2014. Progress on the study of regularity of major mineral resources and regional metallogenetic regularity in

- China; a review. *Acta Geologica Sinica*, 88(12): 2176~2191 (in China with English abstract).
- Wang G G, Ni P, Zhao K D, Wang X L, Liu J Q, Jiang S Y, Chen H. 2012. Petrogenesis of the Middle Jurassic Yinshan volcanic-intrusive complex, SE China; Implications for tectonic evolution and Cu-Au mineralization. *Lithos*, 150: 135~154.
- Wang Pengcheng, Li Sanzhong, Liu Xin, Yu Shan, Liu Bo, Suo Yanhui, Xue Youchen and An Huiting. 2012. Yanshanian fold-thrust tectonics and dynamics in the Middle-Lower Yangtze River area, China. *Acta Petrologica Sinica*, 28(10): 3418~3430 (in China with English abstract).
- Wang Qiang, Zhao Zhenhua, Xiong Xiaolin, Xu Jifeng. 2001. Melting of the underplated basaltic lower crust: Evidence from the Shaxi adakitic sodic quartz diorite-porphyrates, Anhui Province, China. *Geochimica*, 30(04): 353~362 (in Chinese with English abstract).
- Wang Qiang, Xu Jifeng, Zhao Zhenhua. 2003. Intermediate-acid igneous rocks strongly depleted in heavy rare earth elements (or adakitic rocks) and copper-gold metallogenesis. *Earth Science Frontiers*, 10(04): 561~572 (in Chinese with English abstract).
- Wang Qiang, Zhao Zhenhua, Xu Jifeng, Bai Zhenghua, Wang Jianxin, Liu Chengxin. 2004a. The geochemical comparison between the Tongshankou and Yinzuo adakitic intrusive rocks in southeastern Hubei: (delaminated) lower crustal melting and the genesis of porphyry copper deposit. *Acta Petrologica Sinica*, 20(02): 351~360 (in Chinese with English abstract).
- Wang Qiang, Zhao Zhenhua, Jian Ping, Xu Jifeng, Bao Zhiwei, Ma Jinlong. 2004b. SHRIMP zircon geochronology and Nd-Sr isotopic geochemistry of the Dexing granodiorite porphyries. *Acta Petrologica Sinica*, 20(02): 315~324 (in Chinese with English abstract).
- Wang Qiang, Xu Jifeng, Zhao Zhenhua, Zi Feng, Tan Gongjian, Jia Xiaohui, Jiang Ziqi. 2007. Adakites or adakitic rocks and associated metal metallogenesis in China. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 26(04): 336~349 (in Chinese with English abstract).
- Wang Qiang, Tang Gongjian, Jia Xiaohui, Zi Feng, Jiang Ziqi, Xu Jifeng, Zhao Zhenhua. 2008. The metalliferous mineralization associated with adakitic rocks. *Geological Journal of China Universities*, 14(03): 350~364 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yuanlong, Zhang Qi, Wang Yan. 2001. Geochemical characteristics of volcanic rocks from Ningwu area, and its significance. *Acta Petrologica Sinica*, 17(04): 565~575 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yuanlong, Zhang Qi, Wang Qiang, Liu Hongtao, Wang Yan. 2003. Study on adakitic rock and Cu-Au mineralization. *Acta Petrologica Sinica*, 19(03): 543~550 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yuanlong, Wang Yan, Zhang Qi, Jia Xiuqin, Han Song. 2004. The geochemical characteristics of Mesozoic intermediate-acid intrusives of the Tongling area and its metallogenesis-geodynamic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 20(02): 325~338 (in Chinese with English abstract).
- Wang Y J, Zhang A M, Cawood P A, Fan W M, Xu J F, Zhang G W, Zhang Y Z. 2013. Geochronological, geochemical and Nd-Hf-Os isotopic fingerprinting of an early Neoproterozoic arc-back-arc system in South China and its accretionary assembly along the margin of Rodinia. *Precambrian Research*, 231: 343~371.
- Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95: 407~419.
- Xiong Xiaolin, Han Jiangwei, Wu Jinhua. 2007. Phase equilibrium and trace element partitioning between minerals and melt in the metabasalt system: constraints on the formation conditions of TTG/adakite magmas and the growth of early continental crust. *Earth Science Frontiers*, 14(2): 149~158 (in Chinese with English abstract).
- Xu J F, Shinjo R, Defant M J, Wang Q, Rapp R P. 2002. Origin of Mesozoic adakitic intrusive rocks in the Ningzhen area of east China: Partial melting of delaminated lower continental crust? *Geology*, 30: 1111~1114.
- Xu Jifeng, Wu Jianbin, Wang Qiang, Chen Jianlin, Cao Kang. 2014. Research advances of adakitic rocks in China. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 33(01): 6~13 (in Chinese with English abstract).
- Xue Huaimin, Tao Kuiyuan and Shen Jialin. 1996. Sr and Nd isotopic characteristics and magma genesis of Mesozoic volcanic rocks along the coastal region of Southeastern China. *Acta Geologica Sinica*, 70(1): 35~47 (in China with English abstract).
- Ying Lijuan, Chen Yuchuan, Wang Denghong, Tang Juxing, Chen Zhenghui, Wang Chenhui. 2014. Metallogenic regularity of Copper ore in China. *Acta Geologica Sinica*, 88(12): 2216~2226 (in China with English abstract).
- Zhang Qi, Wang Yan, Qian Qing, Yang Jinhui, Wang Yuanlong, Zhao Taiping and Guo Guangjun. 2001. The characteristics and tectonic-metallogenic significances of the adakites in Yanshan period from eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 17(2): 236~244 (in China with English abstract).
- Zhang Qi, Wang Yuanlong, Zhang Fuqin, Wang Qiang, Wang Yan. 2002. Adakite and porphyry copper deposit. *Geology and Mineral Resources of South China*, (03): 85~90 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Wang Yan, Wang Yuanlong. 2003. On the relationship between adakite and its tectonic setting. *Geotectonica et Metallogenia*, 27(02): 101~108 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Qin Kezhang, Wang Yuanlong, Zhang Fuqin, Liu Hongtao, Wang Yan. 2004a. Study on adakite broadened to challenge the Cu and Au exproation in China. *Acta Petrologica Sinica*, 20(02): 195~204 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Qin Kezhang, Xu Jifeng, Liu Hongtao, Wang Yanlong, Wang Yan, Jia Xiuqin, Han Song. 2004b. Discussion of

distribution, prospecting principle and method for deposits related to adakites in China. *Geology and Mineral Resources of South China*, (02): 1~8 (in Chinese with English abstract).

- Zhang Qi, Li Cendong, Wang Yan, Wang Yuanlong, Jin Weijun, Jia Xiuqin, Han Song. 2005. Mesozoic high-Sr and low-Yb granitoids and low-Sr and high-Yb granitoids in eastern China: comparison and geological implication. *Acta Petrologica Sinica*, 21(06): 1527~1537 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Jin Weijun, Wang Yuanlong, Li Chengdong, Wang Yan, Jia Xiuqin. 2006. Ocean lithosphere delamination and the lower crust delamination: the different mechanism and geological implication: Comment on the delamination model of lower crust and lithosphere mantle. *Acta Petrologica Sinica*, 22(11): 2631~2638 (in Chinese with English abstract).
- Zhou X M, Li W X. 2000. Origin of late Mesozoic igneous rocks in southeastern China: implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas. *Tectonophysics*, 326: 269~287.

参 考 文 献

- 关义立, 袁超, 龙晓平, 王毓婧, 张运迎, 黄宗莹. 2013. 华南地块东部早古生代的陆内造山作用: 来自 I 型花岗岩的启示. *大地构造与成矿学*, 37(04): 698~720.
- 侯增谦, 莫宣学, 高永丰, 曲晓明, 孟祥金. 2003. 埃达克岩: 斑岩铜矿的一种可能的重要含矿母岩——以西藏和智利斑岩铜矿为例. *矿床地质*, 22(01): 1~12.
- 侯增谦, 孟祥金, 曲晓明, 高永丰. 2005. 西藏冈底斯斑岩铜矿带埃达克质斑岩含矿性: 源岩相变及深部过程约束. *矿床地质*, 24(02): 108~121.
- 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, 顾晨彦. 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: 地球科学)*, (04): 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(02): 99~107.
- 贾少华, 赵元艺, 王宗起, 武昱东, 王涛, 陈雷. 2014. 浙江建德岭后铜矿花岗闪长斑岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其意义. *地质学报*, 88(11): 2071~2085.
- 李培铮, 邓国萍, 陶红, 吴延之. 1999. 赣东北壳体构造演化与铜(金)多金属成矿系列. *大地构造与成矿学*, 23(04): 300~307.
- 李晓峰, 陈文, 毛景文, 王春增, 谢桂青, 冯佐海. 2006. 江西银山多金属矿床蚀变绢云母⁴⁰Ar~³⁹Ar 年龄及其地质意义. *矿床地质*, 25(01): 17~26.
- 刘红涛, 张旗, 刘建明, 叶杰, 曾庆栋, 于昌明. 2004. 埃达克岩与 Cu-Au 成矿作用: 有待深入研究的岩浆成矿关系. *岩石学报*, 20(02): 205~218.
- 陆慧娟, 华仁民, 毛光周, 龙光明. 2007. 赣东北地区岩浆岩同位素年代学研究及地质演化. *地质评论*, 53(02): 207~216.
- 毛建仁, 邢光福, 叶海敏, 等. 2013a. 中国东南部及邻区中生代岩浆作用与成矿. 北京: 科学出版社.
- 毛建仁, 叶海敏, 厉子龙, 刘凯, 邱瑞昭, 胡逸涛, 赵希林, 周静. 2013b. 钦杭结合带(东段)晚中生代挤压-伸展构造的岩浆活动与成矿记录. *矿物学报*, S2: 30~31.
- 毛建仁, 厉子龙, 叶海敏. 2014. 华南中生代构造-岩浆活动研究: 现状与前景. *中国科学: 地球科学*, 44(01): 1~25.
- 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(01): 45~55.
- 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 袁顺达, 程彦博, 陈毓川. 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(04): 510~526.
- 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. *地质评论*, 55(03): 347~354.
- 毛景文, 罗茂澄, 谢桂青, 刘军, 吴胜华. 2014. 斑岩铜矿床的基本特征和研究勘查新进展. *地质学报*, 88(12): 2153~2175.
- 钱青. 2001. adakite 的地球化学特征及成因. *岩石矿物学杂志*, 20(03): 297~306.
- 芮宗瑶, 黄崇珂, 齐国明, 徐压, 张洪涛. 1984. 中国斑岩铜(钼)矿床. 北京: 地质出版社, 1~350.
- 宋传中, 周涛发, 闫峻, 任升莲, 李加好, 涂文传, 张妍. 2010. 长江中下游及其邻区中生代构造体制转换. *岩石学报*, 26(09): 2835~2849.
- 王长明, 吴淦国, 张达, 罗平, 狄永军, 余心起. 2010. 赣东北地区的区域成矿特征和成矿谱系. *世界地质*, 29(04): 588~600.
- 王鹏程, 李三忠, 刘鑫, 余珊, 刘博, 索艳慧, 薛友辰, 安慧婷. 2012. 长江中下游燕山期逆冲推覆构造及成因机制. *岩石学报*, 28(10): 3418~3430.
- 王登红, 徐志刚, 盛继福, 朱明玉, 徐珏, 袁忠信, 白鹤, 屈文俊, 李华芹, 陈郑辉, 王成辉, 黄凡, 张长青, 王永磊, 应立娟, 李厚民, 高兰, 孙涛, 付勇, 李建康, 武广, 唐菊兴, 丰成友, 赵正, 张大权. 2014. 全国重要矿产和区域成矿规律研究进展综述. *地质学报*, 88(12): 2176~2191.
- 王强, 赵振华, 熊小林, 许继峰. 2001. 底侵玄武质下地壳的熔融: 来自安徽沙溪 adakite 质富钠石英闪长玢岩的证据. *地球化学*, 30(04): 353~362.
- 王强, 赵振华, 许继峰, 李献华, 熊小林, 包志伟, 刘义茂. 2002. 扬子地块东部燕山期埃达克质(adakite-like)岩与成矿. *中国科学(D辑: 地球科学)*, S1: 127~136.
- 王强, 许继峰, 赵振华. 2003. 强烈亏损重稀土元素的中酸性火成岩(或埃达克质岩)与 Cu、Au 成矿作用. *地学前缘*, 10(04): 561~572.
- 王强, 赵振华, 许继峰, 白正华, 王建新, 刘成新. 2004a. 鄂东南铜山口、殷祖埃达克质(adakitic)侵入岩的地球化学特征对比:(折沉)下地壳熔融与斑岩铜矿的成因. *岩石学报*, 20(02): 351~360.
- 王强, 赵振华, 简平, 许继峰, 包志伟, 马金龙. 2004b. 德兴花岗闪长斑岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学和 Nd-Sr 同位素地球化学. *岩石学报*, 20(02): 315~324.
- 王强, 许继峰, 赵振华, 资锋, 唐功建, 贾小辉, 姜子琦. 2007. 中国埃达克岩或埃达克质岩及相关金属成矿作用. *矿物岩石地球化学通报*, 26(04): 336~349.
- 王强, 唐功建, 贾小辉, 资锋, 姜子琦, 许继峰, 赵振华. 2008. 埃达克质岩的金属成矿作用. *高校地质学报*, 14(03): 350~364.
- 王元龙, 王焰, 张旗, 贾秀琴, 韩松. 2004. 铜陵地区中生代中酸性侵入岩的地球化学特征及其成矿-地球动力学意义. *岩石学报*, 20(02): 325~338.
- 王元龙, 张旗, 王强, 刘红涛, 王焰. 2003. 埃达克质岩与 Cu-Au 成矿

- 作用关系的初步探讨. 岩石学报, 19(03):543~550.
- 王元龙, 张旗, 王焰. 2001. 宁芜火山岩的地球化学特征及其意义. 岩石学报, 17(04):565~575.
- 熊小林, 韩江伟, 吴金花. 2007. 变质玄武岩体系相平衡及矿物-熔体微量元素分配: 限定 TTG/埃达克岩形成条件和大陆壳生长模型. 地学前缘, 14(02):149~158.
- 许继峰, 邬建斌, 王强, 陈建林, 曹康. 2014. 埃达克岩与埃达克质岩在中国的研究进展. 矿物岩石地球化学通报, 33(01):6~13.
- 薛怀民, 陶奎元, 沈加林. 1996. 中国东南沿海中生代酸性火山岩的锶和钽同位素特征与岩浆成因. 地质学报, 70(1):35~47.
- 应立娟, 陈毓川, 王登红, 唐菊兴, 陈郑辉, 王成辉. 2014. 中国铜矿成矿规律概要. 地质学报, 88(12):2216~2226.
- 张旗, 王焰, 钱青, 杨进辉, 王元龙, 赵太平, 郭光军. 2001. 中国东部燕山期埃达克岩的特征及其构造~成矿意义. 岩石学报, 02:236~244.
- 张旗, 王元龙, 张福勤, 王强, 王焰. 2002. 埃达克岩与斑岩铜矿. 华南地质与矿产, 03:85~90.
- 张旗, 王焰, 王元龙. 2003. 埃达克岩与构造环境. 大地构造与成矿学, 27(02):101~108.
- 张旗, 秦克章, 王元龙, 张福勤, 刘红涛, 王焰. 2004a. 加强埃达克岩研究, 开创中国 Cu、Au 等找矿工作的新局面. 岩石学报, 20(02):195~204.
- 张旗, 秦克章, 许继峰, 刘红涛, 王元龙, 王焰, 贾秀琴, 韩松. 2004b. 中国与埃达克质岩有关的矿床分布、找矿方向及找矿方法刍议. 华南地质与矿产, 02:1~8.
- 张旗, 李承东, 王焰, 王元龙, 金惟俊, 贾秀勤, 韩松. 2005. 中国东部中生代高 Sr 低 Yb 和低 Sr 高 Yb 型花岗岩: 对比及其地质意义. 岩石学报, 21(06):1527~1537.
- 张旗, 金惟俊, 王元龙, 李承东, 王焰, 贾秀勤. 2006. 大洋岩石圈拆沉与大陆下地壳拆沉: 不同的机制及意义——兼评“下地壳+岩石圈地幔拆沉模式”. 岩石学报, 22(11):2631~2638.
- 朱训, 黄崇柯, 丙宗瑶, 周耀华, 朱贤甲, 胡涂生, 梅占魁. 1983. 德兴斑岩铜矿. 北京: 地质出版社, 1~338.

Geochronology, Geochemistry and Petrogenesis of the Tongshan Intermediate-Felsic Rocks in Guangfeng County, Jiangxi Province

LÜ Jinsong¹⁾, ZHANG Xuehui^{1,2)}, SUN Jiandong¹⁾, LUO Xuequan¹⁾,
KANG Congxuan¹⁾, JIAN Yinfeng²⁾, TANG Zheng²⁾

1) Nanjing Geological Survey Center, China Geological Survey, Nanjing, 210016, China;

2) Chengdu University of Technology, Chengdu, 610059

Abstract

The Tongshan intermediate-felsic rocks emplaced in conjunction area between Yangtze block and Cathaysian block, i. e. in the eastern part of the Qinhang conjunction areas. Tongshan intermediate-felsic rocks consist of granite diorite porphyry and quartz diorite porphyrite, accompanied with medium-sized skarn copper deposits. The zircons from granite diorite porphyry show distinct zonation structure with high Th/U ratios (0.40~1.07), suggesting that zircons are typical magmatic in origin. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating yields an age of 171.0 ± 1.6 Ma ($n=15$, MSWD=0.16). Major element and trace element characteristics indicate that the intermediate-acid intrusive rocks are high K peraluminous-aluminous I-type granitoid, with strong LREE/HREE fractionation ($La_N/Yb_N=10.53\sim38.37$) and no significant negative Eu anomalies (δEu average of 1.05). Enrichment of large ion lithophile elements (Rb, Ba, Th, U and K) and depletion of Nb, Ta and Ti, low contents of Y ($<10.4 \times 10^{-6}$) and Yb ($<0.93 \times 10^{-6}$), high Sr/Y ratio (>26), suggest the rocks are of double geochemical characteristics of arc volcanic rock and adakite. Comprehensive study shows that the intermediate-felsic rocks formed at the pressure greater than 1.5 GPa, magmatic source depth was more than 50 km, and the source region composition was rutile-rich amphibole eclogite facies rocks, which resulted from partial melting of thickening lower crust with relaxation environment after extension caused by the oblique subduction tectonic of the Paleo-Pacific Plate. The ore-forming materials were easily extracted and accumulated to form Cu-Au deposits from the magmatic melts with adakitic characteristics. Therefore, the Tongshan area has the potential of mineralization and is worth broadening exploration.

Key words: Guangfeng County, Jiangxi Province; Tongshan intermediate-felsic intrusive rocks; adakite-like; zircon U-Pb dating; geochemistry