

赵晨辉, 王成辉, 赵如意, 等. 广东大宝山铜矿英安斑岩的同位素组成与蚀变特征及其找矿意义[J]. 岩矿测试, 2020, 39(6): 908 – 920.

ZHAO Chen – hui, WANG Cheng – hui, ZHAO Ru – yi, et al. Isotopic Composition and Alteration Characteristics of Dacite Porphyry, and Their Prospecting Significance in the Dabaoshan Copper Deposit of Guangdong Province[J]. Rock and Mineral Analysis, 2020, 39(6): 908 – 920. 【DOI: 10.15898/j.cnki.11-2131/tl.202007310107】

广东大宝山铜矿英安斑岩的同位素组成与蚀变特征及其找矿意义

赵晨辉¹, 王成辉^{1*}, 赵如意², 刘善宝¹, 饶娇萍³, 刘武生⁴, 张熊⁴, 蒋金昌⁴, 李挺杰⁴

(1. 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;
2. 东华理工大学核资源与环境国家重点实验室, 江西 南昌 330013;
3. 中国地质大学(北京), 北京 100083;
4. 广东省大宝山矿业有限公司, 广东 韶关 512127)

摘要: 铜矿床类型以斑岩型和矽卡岩型为主, 英安斑岩是斑岩型铜钼金成矿系统中普遍发育的岩石类型, 当发育良好的热液蚀变时即可作为找矿标志和成矿岩体。广东大宝山是华南目前最大的铜多金属矿, 前人研究表明该矿区英安斑岩既是铜多金属矿的成矿母岩, 又是有利的赋矿围岩, 但关于该矿区英安斑岩与成矿的关系目前存在多种认识, 随着近年来英安斑岩中厚大矿体的找矿突破, 英安斑岩与成矿的关系再度成为关注的焦点。本文在野外工作和室内分析的基础上, 采用 X 射线荧光光谱法(XRF)和电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)等技术测定大宝山英安斑岩样品中的铜、钨、硅、铝和钙等主次痕量元素的含量, 重点研究了该矿区英安斑岩的同位素、金属元素组成与蚀变特征, 探讨蚀变与找矿方向的关系。结果表明: ①铜元素含量变化于 107 ~ 6909 μg/g 之间, 与矿区采场铜矿石品位 0.3% ~ 0.5% 一致, 烧失量(LOI)等可代表蚀变程度的地球化学指标与铜存在正相关性; ②热液蚀变在英安斑岩中广泛发育, 由早到晚依次为钾硅酸盐化蚀变、青磐岩化蚀变和绢英岩化蚀变; ③各种蚀变中, 绢英岩化蚀变中的铜含量要高出其他蚀变带 2 ~ 5 倍, 表明绢英岩化热液蚀变与铜矿化关系密切, 是重要的找矿标志; ④英安斑岩深部(270m 标高以下)蚀变强度没有减弱, 仍然具有很大的找矿潜力; 此外, 英安斑岩与侏罗系接触带以及岩体中的围岩捕虏体也是重要的找矿方向, 均可能赋存有矽卡岩型的富铜矿。

关键词: 华南; 大宝山; 斑岩铜矿; 英安斑岩; X 射线荧光光谱法; 电感耦合等离子体质谱法; 主次痕量元素; 成矿时代

要点:

(1) XRF 和 ICP-MS 测试结果指示铜矿化与晚阶段的绢英岩化关系密切。

(2) 划分了新的矿区中南部英安斑岩蚀变分带。

(3) 指出了大宝山矿区英安斑岩和粤北地层中的找矿方向。

中图分类号: O628; O657.31; O657.63 文献标识码: A

英安斑岩或英安岩, 是斑岩型铜钼金成矿系统中普遍发育的岩石类型, 通常具有高钾钙碱性特征, 当发育良好的热液蚀变时即可作为找矿标志和成矿岩体^[1-4]。例如, 南美阿根廷 Josemaría 超大型斑岩

收稿日期: 2020-07-31; 修回日期: 2020-11-18; 接受日期: 2020-11-25

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“中国矿产地志”(DD20160346, DD20190379)

作者简介: 赵晨辉, 硕士研究生, 研究方向为金属矿产成矿规律。E-mail: GEOChenhui@163.com。

通讯作者: 王成辉, 博士, 副研究员, 研究方向为金矿和稀有稀散稀土矿产。E-mail: wangchenghui131@sina.com。

铜金矿床在25Ma有多期侵入体沿逆断层侵位并且发育钾硅酸盐化蚀变、青磐岩化蚀变、绢英岩化和高级泥化蚀变^[5];全球最大的斑岩型铜钼矿床El Teniente中,铜的富集与晚期英安斑岩和英安岩侵入早期镁铁质-中性杂岩体密切相关^[6];秘鲁南部Don Javier大型铜钼矿床的筒状矿体主要赋存在绢英岩化英安斑岩中^[7]。XRF、LA-ICP-MS、U-Pb年代学、Lu-Hf同位素分析技术发展迅速,但我国应用这些技术对英安斑岩的研究相对较弱且相对集中在金矿等方面。如西秦岭格陵金矿区的含矿英安斑岩源于古老地壳部分熔融,为成矿前岩浆活动产物^[8];大兴安岭争光金矿的英安斑岩源于新生洋壳的部分熔融^[9];江西相山铀矿的英安斑岩源于基底变质岩的部分熔融^[10]。

华南地区是近百年来矿产开发强度和研究程度较高的地区,形成了诸如赣南钨矿、桂北锡矿、湘南铅锌矿等一大批矿集区^[11]。广东大宝山矿床是华南目前最大的铜多金属矿,在地表氧化矿和浅部层状、似层状矿体开采之后,矿山如何可持续发展,实乃当务之急。位于氧化矿和层状、似层状矿体之下的英安斑岩,也存在矿化,但以往认为品位偏低、矿化不均匀而没有进行系统评价,也没有探明资源储量。2014年以来,中国地质科学院矿产资源研究所等单位对大宝山矿床英安斑岩进行了系统研究并取得了找矿突破。该矿区出露的英安斑岩被认为是志留纪高钾钙碱性系列的火山岩^[12-14]。赵如意等^[15-16](2019,2020)根据英安斑岩与上下盘围岩接触关系及其接触带、围岩矿化蚀变特征,认为英安斑岩既是铜多金属矿的成矿母岩,又是有利的赋矿围岩。但关于该矿区英安斑岩与成矿的关系尚存在较多争议^[17-23]。

随着近年分析测试技术发展迅速^[24-26],更加贴近野外工作,有助于解决重大科学问题。本文根据英安斑岩不同蚀变带中主量元素与铜元素的关联特征,应用X射线荧光光谱法(XRF)和电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)等技术手段测定了大宝山英安斑岩样品中的铜、硅、铝、钙等主次痕量元素,以及 H_2O^+ 、烧失量(LOI)等,重点研究围岩蚀变与铜矿化的关系,探讨矿区深部的找矿方向,拟为下一步找矿提供依据。

1 地质背景

广东省大宝山矿床在区域上位于南岭纬向构造成矿带中南段之粤北矿集区中部,北东向吴川—四

会深大断裂带内的北江新华夏断裂与近东西向大东山—贵东构造岩浆岩带交汇处。矿区出露地层以古生界为主,西北部出露寒武系下统高滩组(八村群)浅变质砂岩和泥质板岩,与上覆中下泥盆统桂头群(老虎头组)砂砾岩、石英砂岩角度不整合接触。中泥盆统东岗岭组(棋梓桥组)为块状、厚层状灰岩夹粉砂岩,上泥盆统天子岭组以灰岩为主,泥盆系内地层之间呈整合接触(图1)。侏罗系下统金鸡组(兰塘群)岩性为浅海相石英砂岩和泥岩。矿区范围内出露的岩浆岩包括英安斑岩、花岗闪长岩斑岩和少量基性岩脉。

大宝山矿区包括东部矿带、西部矿带、船肚矿带、九曲岭矿带和鸡麻头矿带。东部矿带上部为褐铁矿铁帽,于2017年底开采殆尽。下部东岗岭组下段灰岩中赋存的块状、层状-似层状铜铅锌矿富集带,是矿区目前开采的主矿带。西部矿带位于大宝山英安斑岩墙以西,以板状硫、铜铅锌矿化产出在侏罗系金鸡组和大宝山英安斑岩之间的碎裂带内,矿石内发育胶状黄铁矿。

大宝山英安斑岩岩墙出露岩体面积约1.5km²,具北深南浅的特征,倾斜产出在泥盆系和侏罗系之间,倾角约60°,岩墙中脉体陡倾,倾角65°~70°,野外可见部分脉体近乎垂直产出在英安斑岩中。岩石手标本以灰黑色为主,块状构造,斑状结构。

2 实验部分

2.1 实验样品

本研究采集了大宝山7个钻孔中的23个英安斑岩样品,这些样品已发生不同程度的热液蚀变,包括绢英岩化(图2a)、钾长石化(图2b)、黑云母化(图2c)、绿泥石化(图2c)等。岩石手标本呈灰色、灰绿色。斑状结构,斑晶含量15%~20%,基质含量80%~85%。斑晶成分为石英和少量长石,未发现玻屑和岩屑,未见大量棱角-次棱角斑晶或晶屑。斑晶中包括石英(75%左右)、长石(18%左右)、黑云母(5%左右)、辉石(2%左右)。

2.2 样品测量方法

样品分析测试工作在国家地质实验测试中心完成。

2.2.1 X射线荧光光谱分析

本研究主要包括岩石全岩样品主量元素和Cu、W元素的检测,旨在解决Cu、W元素与主量元素及烧失量的关系,进而指出蚀变类型与Cu、W含量的关系。

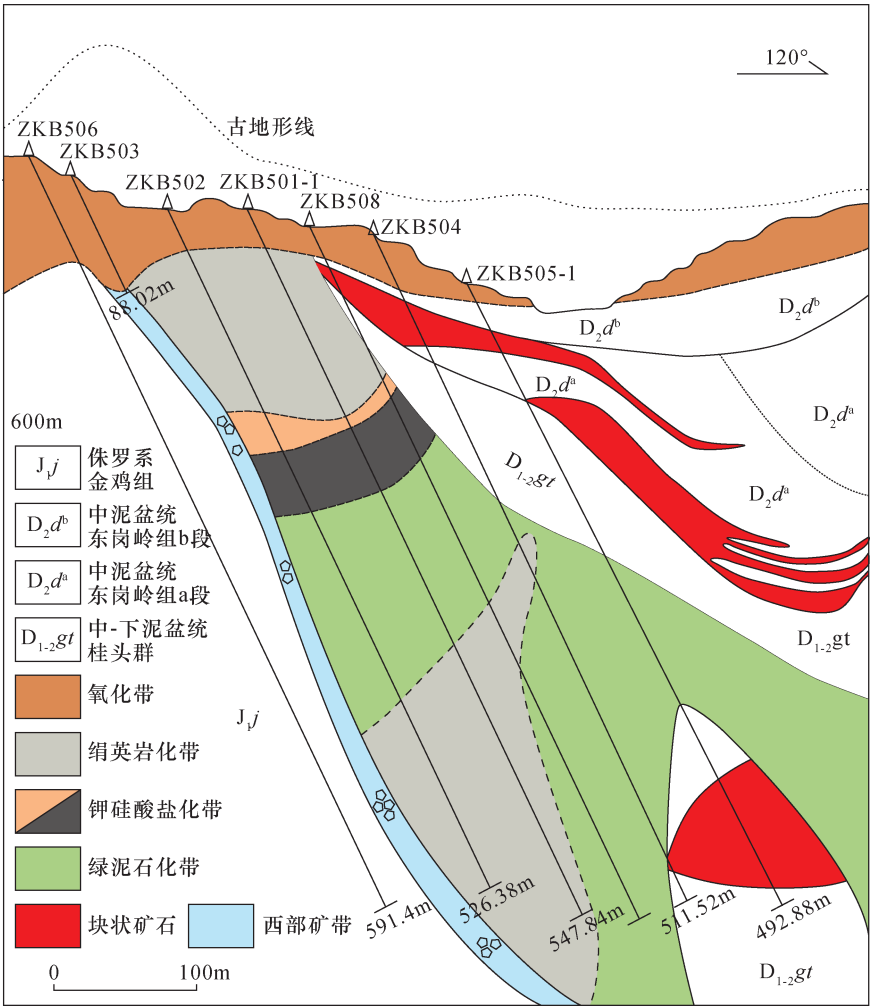


图1 广东大宝山英安斑岩体蚀变地质特征及蚀变分带简图
Fig.1 Alteration geological characteristics and alteration zoning diagram of Dabaoshan dacite porphyry

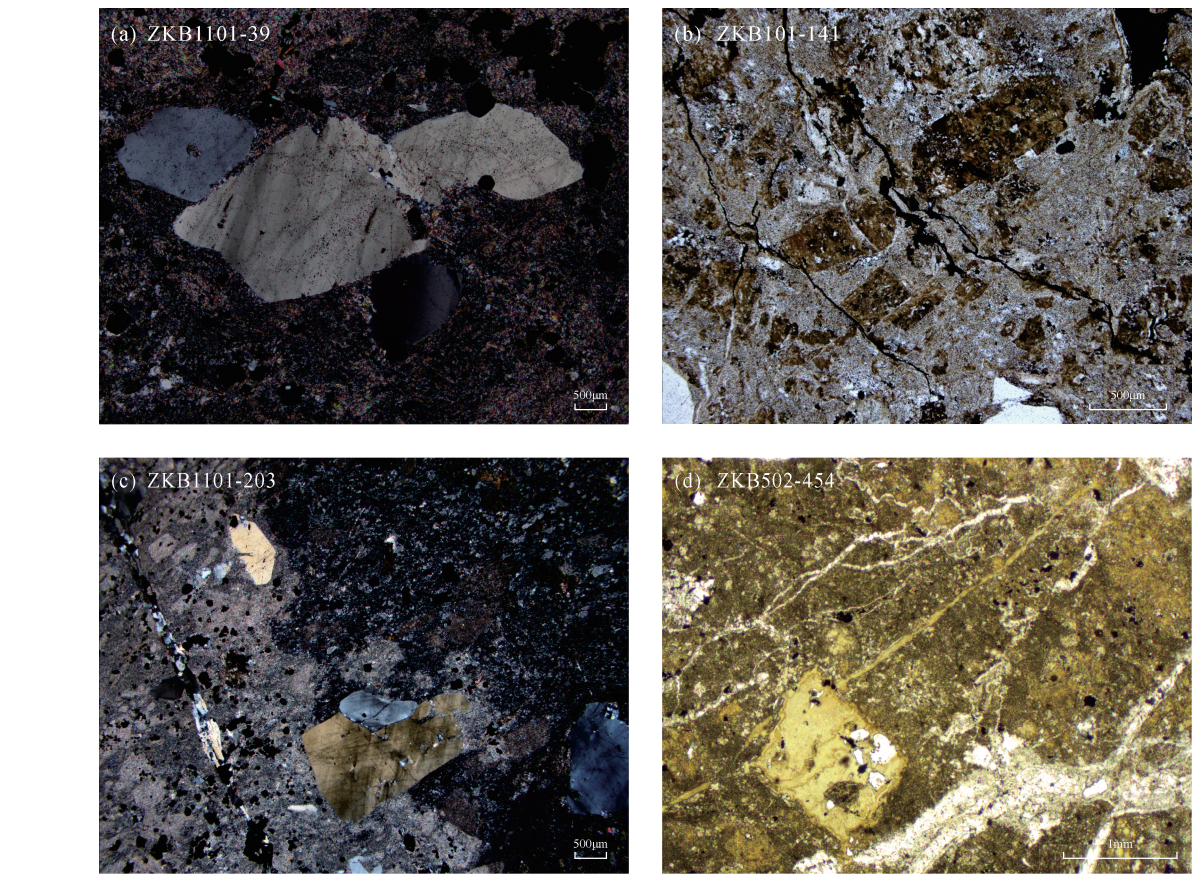
主量元素通过 X 射线荧光光谱仪 (型号 PW4400) 进行测定。该仪器重现性好、测量速度快、灵敏度高,能分析⁵B~⁹²U 之间所有元素。主量元素检测方法依据国家标准 GB/T 14506. 28—2010。样品可以是固体、粉末、熔融片、液体等,故本次分析项目包括 SiO₂、Al₂O₃、CaO、TF₂O₃、K₂O、MgO、MnO、Na₂O、P₂O₅、TiO₂。X 射线荧光光谱仪实验过程中首先打开交流稳压器电源,X 射线管电压为 50kV,电流为 50mA,然后打开水冷机电源,等待水冷机进入制冷工作,检查光谱仪显示参数,设备真空度小于 100Pa,P10 气体流量 0.8~1.5L/min,打开仪器高压开关,待仪器内部温度升至 30℃时,进行光管老化。老化完成后,可使用仪器进行样品分析工作。

SiO₂、Al₂O₃ 采用 K α 分析线,分别利用 PET、SbIn 分析晶体测定峰值和背景值,计数时间峰值 20s,背景值 10s。CaO、K₂O、MnO、TiO₂采用 K α 分析线,利用 LiF (200) 分析晶体测定峰值和背景值。

CaO、K₂O 计数时间峰值 20s,背景值 10s。MnO 计数时间峰值 40s,背景值 20s。TiO₂ 计数时间峰值 40s,背景值 10s。TF₂O₃ 采用 L α 分析线,利用 LiF (200) 分析晶体测定峰值和背景值,计数时间峰值 20s,背景值 10s。MgO、Na₂O 采用 K α 分析线,利用 TAP 分析晶体测定峰值和背景值,计数时间峰值均为 100s,背景值分别为 40s、20s。P₂O₅ 采用 K α 分析线,利用 Ge (111) 分析晶体测定峰值和背景值,计数时间峰值 40s,背景值 10s。选择国家一级标准物质,根据标准样品浓度给出 (或人为设定) 的浓度,使用 X 射线荧光光谱仪分析软件校准并计算元素的 X 射线荧光光谱强度测量值^[27]。

2.2.2 电感耦合等离子体质谱分析

铜元素通过 X-Series 电感耦合等离子体质谱仪 (美国 ThermoFisher 公司) 进行测定。该仪器具有高灵敏度、干扰少、超痕量检测限、多元素同时分析等优点。电感耦合等离子体质谱系统工作条件如下:射频功率



a—绢英岩化英安斑岩; b—钾长石化英安斑岩; c—褪色蚀变, 绢云母化叠加黑云母化英安斑岩(左—绢英岩化, 右—黑云母化); d—绿泥石化。

图2 英安斑岩岩石学特征

Fig. 2 Petrology characteristics of dacite porphyry

1375W,载气(He)流量 1.0L/min,辅助气(Ar)流量0.8 L/min,雾化气(Ar)流量 0.9 L/min,冷却气(Ar)流量 14.0L/min,停留时间0.01s,数据采集模式:时间分辨(TRM),碰撞池模式:标准模式(STD)^[28]。铜作为微量元素检测方法依据国家标准 GB/T 14506. 30—2010。选择监测同位素⁴⁹Ti 和内标元素¹⁰³Rh,编制样品分析表。在测定过程中,仪器点燃后至少稳定 30min,期间用含 1ng/mL 铍、钴、铟、铈、铀的调谐溶液进行仪器参数最佳化调试,通过三通在线引入内标元素混合溶液(铈和铀含量各 10ng/mL)。以标准空白溶液为零点,一个或多个浓度水平的校准标准溶液建立标准曲线,校准数据采集至少 3 次,取平均值。每批样品测定时,同时测定实验室试剂空白溶液,同时分析单元素干扰溶液,以获得干扰系数 k 并进行校正。

2.2.3 其他分析

H₂O⁺、CO₂、LOI、FeO 检测方法分别依据国家标准 GB/T 14506. 2—2010、NY/T 86—1988、GB/T 14506. 34—2019、GB/T 14506. 14—2010。

3 测试结果与讨论

3.1 英安斑岩样品分析结果

大宝山英安斑岩中铜和硅、铝、钙等主次痕量元素分析测定结果(表 1)显示,不同蚀变类型及蚀变程度的英安斑岩样品中,Cu 元素含量变化于 107 ~ 6909µg/g,W 元素含量变化于 8. 75 ~ 237. 0µg/g,SiO₂ 含量变化于 25. 79% ~ 72. 53%,Al₂O₃ 含量变化于 3. 25% ~ 22. 10%,CaO 含量变化于 0. 05% ~ 3. 35%,TF₂O₃ 含量分布范围为 2. 67% ~ 43. 86%,FeO 含量变化于 0. 90% ~ 20. 30%,K₂O 含量变化于 0. 66% ~ 7. 53%,MgO 含量变化于 0. 34% ~ 1. 72%。

样品中几乎不含 Na₂O,大部分样品中的Na₂O 含量低于检出限;P₂O₅、TiO₂在英安斑岩中的含量低,分别为 0.02% ~ 0.16% 和 0.14% ~ 0.71%;CO₂ 含量变化于 0.17% ~ 1.50%;H₂O⁺ 含量为 0.60% ~ 3.80%;烧失量(LOI)变化大,从 1.74% 到 22.75%。

表 1 大宝山英安斑岩中 Cu 等主次痕量元素测定结果

Table 1 Analytical results of Cu and other major, minor and trace elements in Dabaoshan dacite porphyry

蚀变类型	样品编号	Cu (μg/g)	W (μg/g)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	TFe ₂ O ₃ (%)	FeO (%)	K ₂ O (%)	MgO (%)	MnO (%)	Na ₂ O (%)	P ₂ O ₅ (%)	TiO ₂ (%)	CO ₂ (%)	H ₂ O ⁺ (%)	LOI (%)
弱蚀变 英安斑岩	ZKB502-357	454	8.75	66.9	14.72	1.16	5.07	3.48	6.41	1.55	0.02	0.34	0.11	0.47	0.50	2.00	2.77
钾长石化 英安斑岩	ZKB101-141	5449	94.2	25.79	3.25	0.13	43.86	7.13	0.66	0.77	0.04	<0.01	0.05	0.15	1.50	1.52	22.75
	ZKB502-142	1658	34.00	70.92	12.78	0.11	5.23	1.51	4.52	0.83	0.01	<0.01	0.05	0.45	0.17	2.16	4.68
	ZKB701-148	368	24.6	67.44	15.03	0.39	4.17	1.83	6.35	1.72	0.02	<0.01	0.14	0.54	0.33	2.44	3.76
黑云母化 英安斑岩	ZKB1101-203	974	126.0	65.62	13.90	1.41	6.37	1.72	5.39	1.37	0.02	0.57	0.11	0.46	0.75	1.42	4.11
	ZKB1101-244	156	23.3	67.88	15.00	2.99	4.42	2.51	4.55	1.34	0.05	2.01	0.11	0.50	0.50	0.60	1.74
	ZKB701-201-1	363	42.7	63.74	15.06	1.12	7.29	2.98	4.80	1.59	0.05	<0.01	0.15	0.54	0.58	3.48	4.99
	ZKB701-201-2	252	83.4	65.14	15.92	1.10	5.93	4.38	4.94	1.64	0.08	<0.01	0.16	0.54	0.33	3.72	4.34
	ZKB902-159	107	237.0	66.39	12.84	1.41	7.12	1.56	4.80	1.28	0.05	<0.01	0.09	0.43	1.00	2.12	5.42
	ZKB902-211	483	54.5	66.28	14.91	1.32	5.03	1.60	6.72	1.27	0.02	0.52	0.12	0.53	0.83	1.60	3.59
	ZKB902-310	1374	115	66.59	13.39	3.35	3.74	2.41	5.04	1.13	0.04	0.09	0.12	0.48	1.50	2.16	3.76
绢英岩化 英安斑岩	ZKB302-188	3253	194.0	71.39	15.03	0.17	2.67	0.90	5.14	1.04	0.01	<0.01	0.12	0.46	0.23	1.70	3.47
	ZKB302-197	472	21.3	65.86	16.22	0.17	5.05	1.11	5.49	1.17	0.01	<0.01	0.11	0.55	0.33	2.16	4.74
	ZKB502-120	2138	50.8	72.53	13.39	0.05	4.02	1.38	4.42	0.74	0.01	<0.01	0.02	0.46	0.50	1.60	4.03
	ZKB701-70	4909	64.3	68.56	14.60	0.07	3.69	1.32	4.35	1.01	0.01	0.24	0.06	0.50	0.33	2.54	4.64
	ZKB902-86	1785	33.8	68.06	16.62	0.07	3.72	1.15	4.60	0.63	0.01	<0.01	0.05	0.53	0.67	3.80	5.33
	ZKB502-401	2225	155.0	66.62	14.14	0.90	5.85	1.08	4.79	0.93	0.02	<0.01	0.13	0.53	0.67	1.84	5.51
绿泥石化 英安斑岩	ZKB501-1-256-1	1301	35.1	66.51	14.15	0.22	6.64	3.56	7.33	1.20	0.01	<0.01	0.11	0.48	0.55	1.36	3.24
	ZKB501-1-256-2	1289	37.7	66.24	14.09	0.22	6.64	3.99	7.34	1.20	0.01	<0.01	0.11	0.51	0.50	1.44	3.45
	ZKB501-1-264	6909	26.0	71.74	3.66	0.70	13.27	2.62	1.14	0.34	0.02	<0.01	0.03	0.14	0.67	0.60	7.18
	ZKB502-451	843	68.6	35.92	22.10	0.25	23.99	20.30	7.53	1.57	0.01	<0.01	0.16	0.71	0.50	2.50	7.07
	ZKB502-454-1	1200	84.0	62.59	14.20	0.23	11.13	5.42	3.57	1.71	0.02	<0.01	0.12	0.52	0.50	3.24	5.58
	ZKB502-454-2	1212	89.7	62.55	14.21	0.23	11.08	5.22	3.55	1.70	0.02	<0.01	0.12	0.52	0.50	3.22	5.51

3.2 铜和钨元素与烧失量关系

铜含量最小值(107μg/g)出现在黑云母化蚀变带中,最大值(6909μg/g)出现在绿泥石化蚀变带中。出现最大值的样品编号为 ZKB501-1-264,其中含有一条黄铜黄铁矿细脉,可能对铜含量存在偶然影响。钨含量最小值(8.75μg/g)出现在弱蚀变英安斑岩中,最大值(237.0μg/g)出现在黑云母化蚀变带中。烧失量可代表蚀变的强弱,即烧失量越大蚀变越强。由表 1 测定结果可知,样品 ZKB502-357 弱蚀变英安斑岩的 LOI 值最低,为 2.77%。钾长石化、黑云母化、绢云母化和绿泥石化蚀变样品的 LOI 值均高于弱蚀变英安斑岩。样品 ZKB101-141 的 LOI 值为 22.75%,实际上也已经成为铁矿石而不再是“英安斑岩”。由图 3 显示,绢英岩化和绿泥石化蚀变带中的铜含量比钾长石化带和黑云母化带要高,绢英岩化蚀变中的铜含量要比其他蚀变带高出 2~5 倍,这表明绢英岩化热液蚀变与铜矿化关系密切。由图 4 显示,绢英岩化和黑云母化蚀变带中的钨含量比钾长石化带和绿泥石化带要高,钨与 LOI 含量存在正相关性。因此,寻找绢英岩化带也就成为大宝山深部找矿的重要方向。

3.3 铜和钨元素与主量元素关系

表 1 测定结果显示,各类样品的 SiO₂ 含量变化于 25.79%~72.53%,跨度大,尤以样品 ZKB101-141 和 ZKB502-451 最为特殊(SiO₂ 含量分别为 25.79% 和 35.92%)。实际上,这两个样品都是硫铁矿石。其他样品的 SiO₂ 含量变化于 62.55%~72.53%,与英安斑岩的正常含量接近。图 3 显示在 SiO₂ 含量较高的绢英岩化带中其铜含量较高,边界品位(2000μg/g)以上铜与 SiO₂ 含量存在正相关性。图 4 显示 SiO₂ 含量在 65%~67% 之间的绢英岩化带和黑云母化带中其钨元素含量较高,在 50μg/g 以上钨与 SiO₂ 含量存在正相关性,与 3.2 节得出的结论一致。

4 英安斑岩的找矿意义

4.1 英安斑岩年代学研究

前人曾用不同的同位素定年方法(K-Ar 稀释法、全岩 Rb-Sr 等时线法、单颗粒锆石 U-Pb 法以及 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法)对大宝山次火山岩体进行年代学研究,但定年结果存在争议(表 2),争论焦点为加里东期^[12-14,23]和燕山期^[15-16,31-32,35,37]。大宝山矿区确实存在大量 420~450 Ma U-Pb

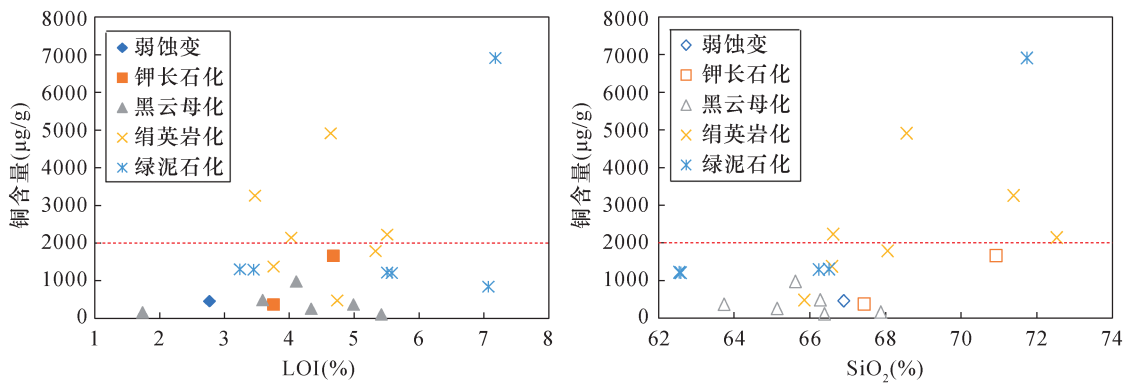


图 3 铜元素与烧失量、二氧化硅的关系

Fig. 3 Relationship between copper element with LOI and SiO₂

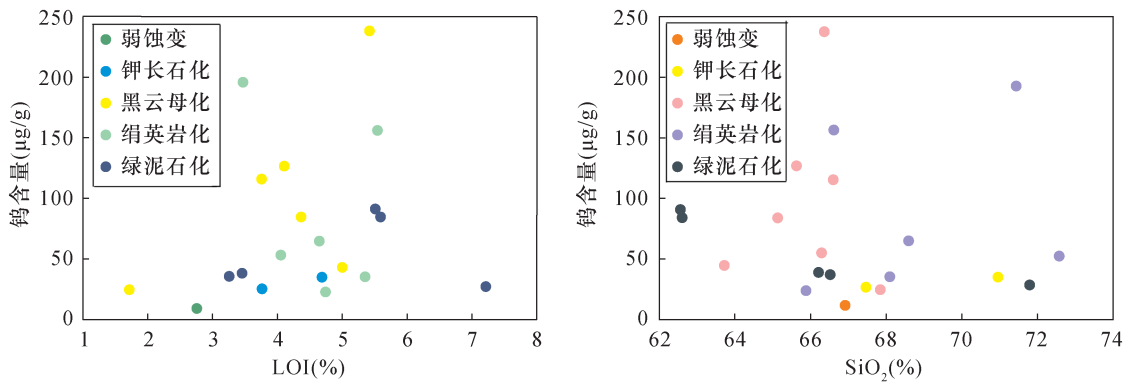


图 4 钨元素与烧失量、二氧化硅的关系

Fig. 4 Relationship between tungsten element with LOI and SiO₂

表 2 矿区及其外围英安斑岩年龄数据及其测试方法

Table 2 Age data of dacite porphyry and its analytical methods

岩体	岩石	测试矿物	分析对象	技术手段	年龄 (Ma)	数据来源
丘坝岩体	英安斑岩	锆石	U - Pb	LA - ICP - MS	429.6 ± 1.6	[15]
	英安斑岩	全岩	Rb - Sr	ICP - MS	195.5 ± 11	[29]
	英安斑岩	锆石	U - Pb	LA - ICP - MS	458.6 ± 3.8	[30]
	英安流纹熔岩	锆石	U - Pb	LA - ICP - MS	434.1 ± 4.4	[12]
	英安岩	锆石	U - Pb	LA - ICP - MS	437.3 ± 2.1	[13]
	英安岩	锆石	U - Pb	LA - ICP - MS	442 ± 2.2	[14]
九曲岭岩体	英安岩	锆石	单颗粒稀释法	-	441 ± 19	[18]
	英安岩	全岩	Rb - Sr	ICP - MS	135.3 ± 5.7	[29]
	英安岩	锆石	U - Pb	LA - ICP - MS	174.6 ± 1.5	[31]
	流纹质凝灰熔岩	锆石	U - Pb	LA - ICP - MS	436.4 ± 4.1	[12]
	英安岩	锆石	U - Pb	SHRIMP	437.1 ± 2.3	[13]
	英安岩	锆石	U - Pb	LA - ICP - MS	439.4 ± 2.7	[14]
大宝山 英安斑岩墙	英安斑岩	全岩	K - Ar	ICP - MS	163 ~ 166	[32]
	英安斑岩	全岩	K - Ar	ICP - MS	177	[33]
	强蚀变英安斑岩	锆石	U - Pb	LA - ICP - MS	154	[30]
	强蚀变英安斑岩	锆石	U - Pb	LA - ICP - MS	418.8	[30]
	英安斑岩	锆石	U - Pb	LA - ICP - MS	431.5 ± 0.12	[34]
	英安斑岩	锆石	U - Pb	LA - ICP - MS	427 ± 0.87	[34]
	英安岩	锆石	U - Pb	SHRIMP	439.1 ± 3.6	[13]
	英安岩	锆石	U - Pb	LA - ICP - MS	439.3 ± 3.2	[14]
徐屋岩体	流纹斑岩	锆石	U - Pb	LA - ICP - MS	426.9 ± 2.2	[35]
	英安斑岩	锆石	U - Pb	SHRIMP	441.2 ± 4.2	[36]

同位素年龄,该时期为华南巨量过铝质陆内花岗岩浆结晶的顶峰期^[38],但是野外观察到该次火山岩侵入泥盆纪和侏罗纪地层。因此,英安斑岩的成岩时代可能为燕山期,大量古生代锆石为华南大规模褶皱变形与隆升造山期的产物^[38]。值得指出的是,吴川一韶关断裂带及其两侧,多经历小型次火山-火山活动,成群出现次火山-火山岩墙、岩筒或爆破角砾岩筒,这种侵入到喷溢的陆相次火山-火山活动顺序,与从喷发到侵入的海底火山活动顺序恰好相反^[39]。

矿床形成过程中矿区热液活动频繁,考虑到 K-Ar 定年和 Rb-Sr 定年封闭温度一般低于 400℃,后期变质热液会不同程度地破坏封闭体系,如造成体系内 Ar 丢失。因此,上述两种方法很难获得燕山期前花岗岩类的精确定年数据,得出的测年结果不能准确代表岩体年龄,可能接近晚期热液活动的时间。单颗粒锆石测年方法存在局限性,测得年龄可能不具准确性。

随着实验技术的发展,2010 年之后获得的微区锆石 U-Pb 年龄精确度较高。除 Wang 等 (2011)^[20]报道的大宝山花岗闪长斑岩年龄为 $175.8 \pm 1.5\text{Ma}$ 和船肚岩体年龄为 $175.0 \pm 1.7\text{Ma}$ 外,其余的年龄多数集中于 162~168Ma 之间^[13,20,31,35]。经讨论,原作者认为略偏高的年龄结果与当时标样测年不准确有关,是由系统产生的误差所致。若考虑约 4% 的不确定度^[40],矿区大宝山花岗闪长斑岩和船肚岩体的时代应该是相同的,为 162~168Ma。结合花岗闪长斑岩侵入英安斑岩,所以英安斑岩侵位在 168Ma 之前。矿区西部花岗闪长斑岩并未与层状矿床(东部矿带)的围岩中泥盆统接触,不具备成为层状矿床成矿岩体的有利条件。此外,据最近国际地层表数据,中泥盆统时限为 382.7~393.3 Ma,成矿发生在成岩之后,也表明层状矿床的成矿岩体英安斑岩侵位在中泥盆统之后,并非志留纪。结合九曲岭岩体与大宝山英安斑岩岩墙深部互相连接^[32,41],认为 $174.6 \pm 1.5\text{Ma}$ ^[31]可大致代表大宝山英安斑岩的侵位时间。

此外,英安斑岩于次火山岩相,火山活动过程中锆石往往来不及结晶而含量偏低。目前所见的锆石可能是早古生代第一次岩浆活动的结晶产物,由于其稳定性而残留下来,长石、石英、云母则被交代而形成新的矿物组合,此时全岩 Rb-Sr 等时线年龄实际上代表的是交代岩的形成时间,即燕山早期。

4.2 蚀变与矿化分带性特征

前人认为,大宝山矿区与船肚花岗闪长斑岩有关的斑岩型钼矿床的围岩蚀变,以侵入岩体为中心向外蚀变类型包括钾长石-黑云母化、伊利石-白云母化、石英-绢云母化、绿泥石-绿帘石碳酸盐化等 4 个蚀变带^[42-43]。权立诚^[44](2015)在大宝山矿区进行了构造蚀变研究,建立矿区南部采场排土沟南侧剖面蚀变矿化分带和北部 47 线典型蚀变剖面,在此基础上,总结了蚀变剖面的成矿元素分布特征,完成对矿区构造蚀变图的修编工作。蒋金昌 (2018)依据矿区勘查资料,指出矿区东部矿带(采场)围岩蚀变的空间分布特征,蚀变类型为一套矽卡岩化蚀变^[45]。总之,前人研究集中于大宝山矿区船肚斑岩型钼矿和东部矿带的围岩蚀变。

英安斑岩东部围岩蚀变由近到远依次为:矽卡岩化(角岩化)→大理岩化→大理岩化灰岩。西部围岩蚀变矿化由近到远依次为:铜硫矿化(外接触带)→硅化(角岩化、矽卡岩化)→弱硅化。东部矽卡岩化发育,矽卡岩往往含有少量角岩;西部角岩化较矽卡岩化发育,且角岩中往往发育斑点状矽卡岩。硅化作用导致原岩的砂状结构几乎被隐晶结构所替代。

值得指出的是,大宝山英安斑岩热液蚀变分带发育,具有一定规律性,同时发育褪色蚀变。英安斑岩浅部到深部蚀变分带依次为(图 1):氧化带→高岭土化英安斑岩→绢英岩化英安斑岩→钾长石化英安斑岩→黑云母化英安斑岩→绿泥石化英安斑岩。蚀变与矿化是密切相关的,英安斑岩蚀变带中铜矿化等级:绢英岩化>黑云母化>绿泥石化;钨矿化等级:黑云母化>绿泥石化>绢英岩化(钨矿化零星出现),钨矿化与矿区花岗闪长斑岩有关;铅锌矿化等级:绢英岩化>黑云母化、绿泥石化;磁黄铁矿化等级:绿泥石化>黑云母化,钾长石化带不出现磁黄铁矿化。这也表明铜矿化与钨矿化对应的成矿作用可能不一样,铜和钨在大宝山矿区的共伴生,很可能是燕山晚期与燕山早期叠加成矿的结果。

4.3 下一步找矿方向

从矿区平面、剖面蚀变矿化分带图(图 1)可看出,构造展布和英安斑岩分布共同控制了矿区蚀变和矿化分带。矿田尺度的主要控矿要素为区域性推覆构造,次要控矿要素为英安斑岩。英安斑岩体实际上也是“容矿地质体”。泥盆系桂头群、英安斑

岩、侏罗系金鸡组中发育相同产状的黄铜黄铁矿脉,并且金鸡组中可见右行构造裂隙被后期硫化物充填(图 5)。因此,右行压扭性构造在英安斑岩侵位之后或同时发生,形成一组产状为 $305^{\circ} \angle 65^{\circ}$ 的优选性裂隙。矿区早期勘查工作显示 71 号勘探线中东部矿带层状矿体在与英安斑岩接触部位,矿体边界截然,引发众多疑问。若将英安斑岩网脉状厚大矿体与层状矿体联系在一起,则该问题可得到合理解释。因此,成矿热液可能是沿这一组裂隙进入英安斑岩和中泥盆统,与中泥盆统碳酸盐岩反应产生矽卡岩化蚀变,形成层状铜铅锌矿床。值得注意的是,英安斑岩中脉体发育程度与铜品位直接相关,脉体发育程度为:绢英岩化带 > 钾硅酸盐化带 > 绿泥石化带,因此绢英岩化带中铜品位较高。

通过上述分析,本项目组可获知下一步勘查方向应侧重于斑岩型矿床找矿思路。大宝山多金属矿自 2008 年开展危机矿山工作,2009 年探明钼矿为大型规模^[31],2016 年新增铜预测资源量 20.6 万吨^[46]。2018 年发现大宝山英安斑岩岩墙中厚大铜矿体,随即探明其规模可达大型。2020 年找矿方向仍然集中在大宝山英安斑岩,采区数据显示英安斑岩的铜品位非常稳定,约 0.3% ~ 0.5%,均可达到工业利用价值。

在综合分析成矿过程的基础上,本次工作提出除英安斑岩岩体外,以下三个方面也是今后找矿勘查工作需要注意的。

(1)最新勘查资料显示,B5 勘探线中英安斑岩内部存在泥盆系灰岩的捕掳体,含有高品位的浸染状、块状铜硫矿石(图 1)。中酸性岩体中的灰岩捕掳体往往会形成高品位的矿石,值得高度关注。

(2)岩心编录表明,英安斑岩与侏罗系之间普遍存在块状或稀疏浸染状矿石,矿山也称为外接触带,其深部的容矿空间亟待探索。总体上,外接触带具有很好的找矿潜力,但因为构造十分发育,可能对外接触带矿体产生破坏作用,导致矿体错失或移位的现象,这也是下一步找矿过程中需要注意的。

(3)在东岗岭组灰岩与桂头群砂岩的岩性渐变面(即硅钙界面),是层状矿体发育的有利位置,可作为找矿的重点方向。这一点对于在粤北开展区域找矿具有重要的现实意义。

5 结论

本文通过采用 XRF 和 LA-ICP-MS 测试分析和野外工作研究,认为大宝山矿区及其外围的中酸性岩体可能属于一个完整的斑岩型成矿系统,推覆构造为主要的导岩导矿构造。沿着推覆构造侵入的英安斑岩是非常重要的容矿地质体,蚀变强烈并且具有良好的分带性,由浅到深,其蚀变分带为:氧化带→高岭土化英安斑岩→绢英岩化英安斑岩→钾硅酸盐化英安斑岩→绿泥石化英安斑岩。不同蚀变带的铜矿化强度明显不同。英安斑岩的地球化学特征显示,主量元素的变化与铜的富集程度密切相关,烧失量(LOI)等可代表蚀变程度的地球化学指标与铜、钨含量存在正相关性。其中,绢英岩化蚀变带中铜含量最高,可作为今后找矿的主要目标。

根据矿山勘查结果,至 2020 年 11 月底,大宝山矿区的勘查深度推进到 270m 高程,钻探结果显示英安斑岩及其与围岩侏罗系的接触带仍存在良好的铜矿化。值得一提的是,矿山已同意 2021 年进一步开展钻探以验证这一科学找矿预测的结果。



图 5 大宝山英安斑岩与围岩中硫化物脉体特征

Fig. 5 Characteristics of veins in Dabaoshan dacite porphyry and its host rocks

致谢:中国地质科学院矿产资源研究所王登红研究员在论文完成过程中提供了建议和帮助,国家地质实验测试中心马天芳高级工程师和郭晓辰在实验分析过程中提供了帮助,广东省大宝山矿业有限公司在野外工作中提供了帮助和审稿专家提出修改建议,在此一致表示衷心的感谢!

6 参考文献

- [1] 侯增谦,杨志明,王瑞,等.再论中国大陆斑岩 Cu - Mo - Au 矿床成矿作用[J].地学前缘,2020,27(2):20-44.
Hou Z Q, Yang Z M, Wang R, et al. Further discussion on porphyry Cu - Mo - Au deposit formation in Chinese mainland[J]. Earth Science Frontiers, 2020, 27(2): 20-44.
- [2] 陈华勇,吴超.俯冲带斑岩铜矿系统成矿机理与主要挑战[J].中国科学(地球科学),2020,50(7):865-886.
Chen H Y, Wu C. Metallogenesis and major challenges of porphyry copper systems above subduction zones[J]. Science China (Earth Sciences), 2020, 50(7): 865-886.
- [3] Sillitoe R H. Porphyry copper systems[J]. Economic Geology, 2010, 105: 3-41.
- [4] 王登红,陈振宇,黄凡,等.南岭岩浆岩成矿专属性及相关问题探讨[J].大地构造与成矿学,2014,38(2):230-238.
Wang D H, Chen Z Y, Huang F, et al. Discussion on metallogenic specialization of the magmatic rocks and related issues in the Nanling Region[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2014, 38(2): 230-238.
- [5] Sillitoe R H, Devine F A M, Sanguinetti M I, et al. Geology of the Josemaría porphyry copper - gold deposit, Argentina: Formation, exhumation, and burial in two million years[J]. Economic Geology, 2019, 114: 407-425.
- [6] Cannell J, David C, Walshe J L, et al. Geology, mineralization, alteration, and structural evolution of the El Teniente porphyry Cu - Mo deposit[J]. Geology, 2005, 100: 979-1003.
- [7] 吴斌,方针,叶震超. Don Javier 斑岩型铜钼矿床地质特征[J].矿床地质,2013,32(6):1159-1170.
Wu B, Fang Z, Ye Z C. Geological characteristics of Don Javier porphyry copper molybdenum deposit[J]. Mineral Deposits, 2013, 32(6): 1159-1170.
- [8] 黄雅琪,邱昆峰,于皓丞,等.西秦岭格娄昂金矿床赋矿斑岩岩石成因及其地质意义[J].岩石学报,2020,36(5):1567-1585.
Huang Y Q, Qiu K F, Yu H C, et al. Petrogenesis of ore - hosting porphyry in the Gelouang gold deposit, West Qinling and its geological implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 2020, 36(5): 1567-1585.
- [9] 车合伟,周振华,马星华,等.大兴安岭北段争光金矿英安斑岩地球化学特征、锆石 U - Pb 年龄及 Hf 同位素组成[J].地质学报,2015,89(8):1417-1486.
Che H W, Zhou Z H, Ma X H, et al. Geochemical characteristics, zircons U - Pb ages and Hf isotopic composition of the Dacite porphyry from Zhengguang Au deposit in northern Great Xing' an Range[J]. Acta Geologica Sinica, 2015, 89(8): 1417-1486.
- [10] 杨水源,蒋少涌,姜耀辉,等.江西相山流纹英安岩和流纹英安斑岩锆石 U - Pb 年代学和 Hf 同位素组成及其地质意义[J].中国科学(地球科学),2010,40(8):953-969.
Yang S Y, Jiang S Y, Jiang Y H, et al. Zircon U - Pb geochronology, Hf isotopic composition and geological implications of the rhyodacite and rhyodacitic porphyry in the Xiangshan uranium ore field, Jiangxi Province, China[J]. Science China (Earth Sciences), 2010, 40(8): 953-969.
- [11] 王登红.对华南矿产资源深部探测若干问题的探讨——以若干超大型矿床深部找矿突破为例[J].中国地质,2016,43(5):1585-1598.
Wang D H. A discussion on some problems concerning deep exploration of mineral resources in South China[J]. Geology in China, 2016, 43(5): 1585-1598.
- [12] 伍静,王广强,梁华英,等.粤北大宝山矿区加里东期火山岩的厘定及其地质意义[J].岩石学报,2014,30(4):1145-1154.
Wu J, Wang G Q, Liang H Y, et al. Identification of caledonian volcanic rock in the Dabaoshan ore - field in northern Guangdong Province and its geological implication[J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(4): 1145-1154.
- [13] Wang L, Jin X B, Xu D M, et al. Geochronological, geochemical, and Nd - Hf isotopic constraints on the origin of magmatism in the Dabaoshan ore district of South China[J]. Geological Journal, 2019, 54: 1518-1534.
- [14] Su S Q, Qin K Z, Li G M, et al. Geochronology and geochemistry of Early Silurian felsic volcanic rocks in the Dabaoshan ore district, South China: Implications for the petrogenesis and geodynamic setting[J]. Geological Journal, 2019, 54: 3286-3303.
- [15] 赵如意,陈毓川,王登红,等.粤北大宝山矿区次英安斑岩与铜多金属矿之间关系研究[J].大地构造与成矿

- 学,2019,43(1):123-140.
- Zhao R Y, Chen Y C, Wang D H, et al. Relationship between Cu - polymetallic mineralization and the porphyritic dacite in Dabaoshan orefield in the northern Guangdong Province [J]. *Geotectonia et Metallogenia*, 2019,43(1):123-140.
- [16] 赵如意,王登红,王要武,等. 广东省大宝山斑岩型铜矿床勘查突破及其区域找矿意义[J]. *地质学报*, 2020,94(1):204-216.
- Zhao R Y, Wang D H, Wang Y W, et al. A prospecting breakthrough and process in the Daobaoshan porphyry copper deposit in Guangdong Province [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020,94(1):204-216.
- [17] 王要武,王登红,刘战庆,等. 广东大宝山矿田船肚钼钨铜矿床的地质特征、成矿规律与找矿方向[J]. *矿床地质*, 2019,38(1):211-225.
- Wang Y W, Wang D H, Liu Z Q, et al. Geological characteristics, mineralization regularity and prospecting of Chuandu molybdenum, tungsten and copper deposit in Dabaoshan ore field, Guangdong Province [J]. *Mineral Deposits*, 2019,38(1):211-225.
- [18] 葛朝华,韩发. 广东大宝山矿床喷气-沉积成因地质地球化学特征[M]. 北京:北京科学技术出版社, 1987:1-111.
- Ge C H, Han F. Geological and geochemical features of exhalative - sedimentary mineralization of the Dabaoshan deposit in Guangdong Province [M]. Beijing: Beijing Science and Technology Press, 1987:1-111.
- [19] 傅晓明,张德贤,戴塔根,等. 不同成因类型矿化中黄铁矿微量元素地球化学记录——以广东大宝山多金属矿床为例[J]. *大地构造与成矿学*, 2018,42(3):505-519.
- Fu X M, Zhang D X, Dai T G, et al. Trace element record of pyrite from diverse deposits—Examples from the Dabaoshan polymetallic deposit of northern Guangdong, South China [J]. *Geotectonia et Metallogenia*, 2018,42(3):505-519.
- [20] Wang L, Hu M G, Yang Z, et al. U - Pb and Re - Os geochronology and geodynamic setting of the Dabaoshan polymetallic deposit, northern Guangdong Province, South China [J]. *Ore Geology Reviews*, 2011,43:40-49.
- [21] Huang W T, Liang H Y, Wu J, et al. Formation of porphyry Mo deposit in a deep fault zone, example from the Dabaoshan porphyry Mo deposit in northern Guangdong, South China [J]. *Ore Geology Reviews*, 2017,81:940-952.
- [22] Mao W, Rusk B, Yang F C, et al. Physical and chemical evolution of the Dabaoshan porphyry Mo deposit, South China: Insights from fluid inclusions, cathodoluminescence, and trace elements in quartz [J]. *Economic Geology*, 2017,112:889-918.
- [23] Qu H Y, Mao J W, Zhou S M. Metallogenesis of strati-form Cu mineralization in the Dabaoshan polymetallic deposit, northern Guangdong Province, South China [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2020,210:1-15.
- [24] 刘勇胜,胡兆初,李明,等. LA - ICP - MS 在地质样品元素分析中的应用[J]. *科学通报*, 2013,58(36):3753-3769.
- Liu Y S, Hu Z C, Li M, et al. Applications of LA - ICP - MS in the elemental analyses of geological samples [J]. *China Science Bulletin*, 2013,58:3863-3878.
- [25] 李超,王登红,屈文俊,等. 关键金属元素分析测试技术方法应用进展[J]. *岩矿测试*, 2020,39(5):655-666.
- Li C, Wang D H, Qu W J, et al. A review and perspective on analytical methods of critical metal element [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2020,39(5):655-666.
- [26] 秦燕,徐衍明,侯可军,等. 铁同位素分析测试技术研究进展[J]. *岩矿测试*, 2020,39(2):151-161.
- Qin Y, Xu Y M, Hou K J, et al. Progress of analytical techniques for stable iron isotopes [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2020,39(2):151-161.
- [27] 陈静,高志军,陈冲科,等. X 射线荧光光谱分析地质样品的应用技巧[J]. *岩矿测试*, 2015,34(1):91-98.
- Chen J, Gao Z J, Chen C K, et al. Application skills on determination of geological sample by X - ray fluorescence spectrometry [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2015,34(1):91-98.
- [28] 周文喜,王华建,付勇,等. 基于 LA - ICP - MS 多元素成像技术的早寒武世磷结核成因研究[J]. *岩矿测试*, 2017,36(2):97-106.
- Zhou W X, Wang H J, Fu Y, et al. Study on the formation mechanism of phosphate nodules in the Early Cambrian period using LA - ICP - MS multi - element imaging technology [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2017,36(2):97-106.
- [29] 蔡锦辉,刘家齐. 粤北大宝山多金属矿区岩浆岩的成岩时代[J]. *广东地质*, 1993,8(2):45-52.
- Cai J H, Liu J Q. The magma diagenetic age of Dabaoshan polymetallic mine lot in north Guangdong Province [J]. *Guangdong Geology*, 1993,8(2):45-52.
- [30] 蔡锦辉,韦昌山,张燕挥,等. 广东省大宝山钼多金属矿区岩浆岩成岩时代研究[J]. *华南地质与矿产*, 2013,29(2):146-155.
- Cai J H, Wei C S, Zhang Y H, et al. Zircon U - Pb ages of

- magmatic rocks of Dabaoshan molybdenum – polymetallic deposit, Guangdong Province [J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 2013, 29(2): 146 – 155.
- [31] 王磊, 胡明安, 屈文俊, 等. 粤北大宝山多金属矿床 LA – ICP – MS 锆石 U – Pb 和辉钼矿 Re – Os 定年及其地质意义[J]. *中国地质*, 2012, 39(1): 29 – 42.
- Wang L, Hu M A, Qu W J, et al. Zircon LA – ICP – MS U – Pb and molybdenite Re – Os dating of the Dabaoshan polymetallic deposit in northern Guangdong Province and its geological implications [J]. *Geology in China*, 2012, 39(1): 29 – 42.
- [32] 刘姝群, 杨世义, 张秀兰, 等. 粤北大宝山多金属矿床成因的初步探讨[J]. *地质学报*, 1985, 59(1): 47 – 61.
- Liu G Q, Yang S Y, Zhang X L, et al. A primary study on the genesis of the Dabaoshan polymetallic deposit in northern Guangdong Province [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1985, 59(1): 47 – 61.
- [33] 裴太昌, 钟树荣, 刘胜, 等. 粤北大宝山—雪山嶂地区成矿系列及成矿模式[J]. *地质找矿论丛*, 1994(3): 48 – 58.
- Pei T C, Zhong S R, Liu S, et al. Metallogenic series and model in Dabaoshan—Xueshanzhang Area, north Guangdong [J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 1994(3): 48 – 58.
- [34] 瞿泓滢, 毛景文, 周淑敏, 等. 粤北大宝山志留纪次英安斑岩年代学、地球化学特征及其地质意义[J]. *矿床地质*, 2019, 38(2): 331 – 354.
- Qu H Y, Mao J W, Zhou S M, et al. Geochronology and geochemistry of Silurian dacite – porphyry in Daobaoshan deposit, northern Guangdong Province, and its geological significance [J]. *Mineral Deposits*, 2019, 38(2): 331 – 354.
- [35] 毛伟, 李晓峰, 杨富初. 广东大宝山多金属矿床花岗岩锆石 LA – ICP – MS U – Pb 定年及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2013, 29(12): 4104 – 4120.
- Mao W, Li X F, Yang F C. Zircon LA – ICP – MS U – Pb ages of granites at Dabaoshan polymetallic deposit and its geological significance, Guangdong, South China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(12): 4104 – 4120.
- [36] 潘会彬, 康志强, 付文春. 粤北大宝山矿区徐屋岩体 SHRIMP 锆石 U – Pb 年龄及其地质意义[J]. *地质通报*, 2014, 33(6): 894 – 899.
- Pan H B, Kang Z Q, Fu W C. SHRIMP zircon U – Pb ages of Xuwu subdacitic porphyry in the Dabaoshan ore district of northern Guangdong Province and its geological implications [J]. *Geological Bulletin of China*, 2014, 33(6): 894 – 899.
- [37] 祝新友, 韦昌山, 王艳丽, 等. 广东大宝山钨钼多金属矿床成矿系统与找矿预测[J]. *矿产勘查*, 2011, 2(6): 661 – 667.
- Zhu X Y, Wei C S, Wang Y L, et al. The metallogenic system and the prognosis, Dabaoshan Mo – Cu – Pb – Zn deposit, Guangdong Province [J]. *Mineral Exploration*, 2011, 2(6): 661 – 667.
- [38] 舒良树, 陈祥云, 楼法生. 华南前侏罗纪构造[J]. *地质学报*, 2020, 94(2): 333 – 360.
- Shu L S, Chen X Y, Lou F S. Pre – Jurassic tectonics of the South China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020, 94(2): 333 – 360.
- [39] 古菊云, 吴琼英, 廖雪苹. 大宝山大陆次火山——火山活动和矿床成因的初步研究[J]. *地质与勘探*, 1984(3): 2 – 8.
- Gu J Y, Wu Q Y, Liao X P. A preliminary study on the subvolcanic volcanic activity and the genesis of the Deposit in Dabaoshan [J]. *Geology and Exploration*, 1984(3): 2 – 8.
- [40] 李献华, 柳小明, 刘勇胜, 等. LA – ICPMS 锆石 U – Pb 定年的准确度: 多实验室对比分析[J]. *中国科学(地球科学)*, 2015, 45(9): 1294 – 1303.
- Li X H, Liu X M, Liu Y S, et al. Accuracy of LA – ICPMS zircon U – Pb age determination: An inter – laboratory comparison [J]. *Science China (Earth Sciences)*, 2015, 45(9): 1294 – 1303.
- [41] 王磊, 胡明安, 杨振, 等. 粤北大宝山矿区花岗闪长斑岩 LA – ICP – MS 锆石 U – Pb 年龄及其地质意义[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2010, 35(2): 175 – 185.
- Wang L, Hu M A, Yang Z, et al. Geochronology and its geological implication of LA – ICP – MS zircon U – Pb dating of granodiorite porphyries in Dabaoshan polymetallic ore deposit, North Guangdong Province [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2010, 35(2): 175 – 185.
- [42] 魏振伟. 广东省大宝山斑岩型钼矿床围岩蚀变特征[J]. *甘肃科技*, 2007, 23(9): 103 – 104.
- Wei Z W. Wall rock alteration characteristics of Dabaoshan porphyry molybdenum deposit in Guangdong Province [J]. *Gansu Science and Technology*, 2007, 23(9): 103 – 104.
- [43] 王兰根, 王要武. 大宝山矿区铜硫矿体矿石类型与围岩蚀变的关系[J]. *南方金属*, 2012(6): 31 – 33.
- Wang L G, Wang Y W. Relationship between the rock type within the copper – sulfur ore body and the wall – rock alteration at Dabaoshan mine [J]. *Southern Metals*, 2012(6): 31 – 33.
- [44] 权立诚. 广东大宝山铜钼多金属矿床构造蚀变调查

与找矿预测[D]. 北京:中国地质科学院,2012.

Quan L C. Survey of tectonic – alteration Dabaoshan copper – molybdenum polymetallic deposit, Guangdong Province, and ore – prospecting [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences,2012.

[45] 蒋金昌,魏东,高桂山. 浅谈大宝山围岩蚀变与成矿的关系[J]. 南方金属,2018(4):34 – 36.

Jiang J C,Wei D,Gao G S. Discussion on the relationship between the alteration of the surrounding rocks and the mineralization in Dabaoshan[J]. Southern Metals,2018 (4):34 – 36.

[46] 应立娟,王登红,李超,等. 广东大宝山北部层状矿体硫化物 Re – Os 测年及指示[J]. 地学前缘,2017,24(5):31 – 38.

Ying L J, Wang D H, Li C, et al. Re – Os dating of sulfides in the north stratiform ore body in Dabaoshan, Guangdong Province and its indication [J]. Earth Science Frontiers,2017,24(5):31 – 38.

Isotopic Composition and Alteration Characteristics of Dacite Porphyry, and Their Prospecting Significance in the Dabaoshan Copper Deposit of Guangdong Province

ZHAO Chen – hui¹, WANG Cheng – hui^{1*}, ZHAO Ru – yi², LIU Shan – bao¹, RAO Jiao – ping³, LIU Wu – sheng⁴, ZHANG Xiong⁴, JIANG Jin – chang⁴, LI Ting – jie⁴

- (1. Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Resource Assessment, Ministry of Natural Resources; Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;
2. State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, China;
3. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;
4. Guangdong Province Dabaoshan Mining Co. , LTD, Shaoguan 512127, China)

HIGHLIGHTS

- (1) XRF and ICP – MS results indicated that copper mineralization was closely related to the late – stage quartz sericitization.
- (2) The new dacite porphyry alteration zone in the south – central of mining area was identified.
- (3) The new prospecting direction of dacite porphyry and strata in northern Guangdong was identified.

ABSTRACT

BACKGROUND: The main types of copper deposits are porphyry and skarn types. Dacite porphyry is a rock type commonly developed in the porphyry Cu – Mo – Au system. The rock can be used as a marker clue for ore prospecting and ore – forming rock when there is well – developed hydrothermal alteration. The Dabaoshan deposit is currently the largest copper polymetallic deposit in the South China Block. Previous studies have shown that the dacite porphyry of the mining area is not only the ore – forming parent rock, but also a favorable ore – bearing wall rock. However, there are some debates about the relationship between dacite porphyry and mineralization in this mining area. With the breakthrough of prospecting for medium and large dacite porphyry ore bodies in recent years, the relationship between dacite porphyry and mineralization has once again become a concern.

OBJECTIVES: To understand the relationship between dacite porphyry alteration and mineralization of the Dabaoshan deposit.

METHODS: Based on field work and indoor analysis, X – ray fluorescence spectroscopy (XRF) and inductively coupled plasma – mass spectrometry (ICP – MS) were used to determine copper, tungsten, silicon, aluminum and calcium in Dabaoshan dacite porphyry samples. The isotope composition, metal element contents and alteration characteristics of the dacite porphyry in the mining area were used to discuss the relationship between alteration and prospecting direction.

RESULTS: The copper content ranged from 107 to 6909 $\mu\text{g/g}$, which was consistent with the copper ore grade of 0.3% – 0.5% in the mining area. The LOI and other geochemical indicators that can represent the degree of alteration were positively correlated with copper. Hydrothermal alteration was widely developed in dacite porphyry, including potassium, prophylicite and quartz – sericitization from early to late stage. Among different stages of alterations, the copper content of quartz – sericitization was 2 to 5 times higher than other alteration types, indicating that quartz – sericitization was closely related to copper mineralization and was an important prospecting marker clue.

CONCLUSIONS: The deep alteration intensity of the dacite porphyry (below the 270m elevation) has not been weakened, suggesting a great prospecting potential. In addition, the contact zone between dacite porphyry and the Jurassic strata, and the xenoliths in the dacite porphyry are also important prospecting directions, which may host skarn – type copper – rich deposits.

KEY WORDS: South China Block; Dabaoshan; porphyry copper deposit; dacite porphyry; X – ray fluorescence spectrometry; inductively coupled plasma – mass spectrometry; major, minor and trace elements; metallogenic epoch