

湘中秋旺冲金矿区脉岩岩石学与地球化学特征及其地质意义

周溪^{1,2}, 彭建堂^{2,3}, 鲁玉龙^{1,2}, 徐军伟^{1,2}, 谢帅¹, 谢青^{1,2}

(1. 湖南省有色地质勘查局二总队, 湖南湘潭 411102; 2. 中南大学地球科学与信息物理学院 有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室, 湖南长沙 410083; 3. 中国科学院地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州贵阳 550002)

摘要: 对位于湘中EW向白马山-紫云山成矿带东端的秋旺冲金矿区中的脉岩进行了岩石学和地球化学研究。研究结果显示, 这些脉岩主要为似斑状花岗岩、含电气石花岗岩和文象花岗岩, 属富硅、富碱的准铝-弱过铝质、钙碱性花岗岩, 其地球化学特征表现为富集Rb、K、Th、U、Ce、Nd、Zr和Hf元素, 强烈亏损Ba、Sr、P和Ti元素, 稀土元素总量低, 轻重稀土元素分馏均不明显, 重稀土元素相对较富集, Eu负异常极为明显。通过岩石成因和构造环境判别图解, 结合区域上前人的研究成果, 提出该区脉岩成因类型属于高分异的I型花岗岩, 是在碰撞造山后伸展构造环境中形成的。综合矿区及毗邻矿床的地质勘查资料分析, 认为该区脉岩与金矿化存在空间对应关系, 对金成矿有指示意义。

关键词: 地质意义; 岩石学; 地球化学; 脉岩; 秋旺冲; 湘中

中图分类号: P588.12⁺1; P595

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2020)04-0441-13

Petrology and geochemical characteristics of felsic dykes in the Qiuwangchong gold deposit, central Hunan, and their geological significance

ZHOU Xi^{1,2}, PENG Jian-tang^{2,3}, LU Yu-long^{1,2}, XU Jun-wei^{1,2}, XIE Shuai¹ and XIE Qing^{1,2}

(1. No. 2 Geological Party, Hunan Geological Exploration Bureau of Nonferrous Metals, Xiangtan 411102, China; 2. Key Laboratory of Non-ferrous Metals Metallogenic Prediction of Ministry of Education, School of Geosciences and Info-physics, Central South University, Changsha 410083, China; 3. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China)

Abstract: Some felsic dykes have been discovered in recent years in the Qiuwangchong mining area, located in the eastern part of the EW-striking Baimashan-Ziyunshan metallogenic belt in central Hunan. Petrology and whole-rock geochemistry of these felsic dykes were studied in this paper. It is revealed that these dykes, lithologically, are mainly composed of porphyritic granite, tourmaline-bearing granite and graphic granite. In terms of geochemical characteristics of elements, these dykes in the Qiuwangchong deposit belong to the metaluminous to weakly peraluminous, calc-alkaline granite, and exhibit Si- and alkaline- enrichment signature. All dykes are rich in K, Rb, Th, U, Ce, Nd, Zr and Hf, but obviously depleted in Ba, Sr, P and Ti. In general, the total REE concentrations in these dykes are relatively low, and no obvious fractionation took place between LREE and HREE. All dykes are characterized by HREE-enrichment, with an extremely obvious negative Eu anomaly. Based on the discrimination

收稿日期: 2020-03-08; 接受日期: 2020-06-12; 编辑: 尹淑苹

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41972090, 41473043)

作者简介: 周溪(1987-), 男, 硕士研究生, 工程师, 从事矿产勘查与矿床地质研究工作, E-mail: 523787406@qq.com; 通讯作者: 彭建堂(1968-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事地球化学和矿床学研究, E-mail: jtpeng@126.com。

diagrams of petrogenetic types and tectonic setting, in combination with previous studies for regional dykes, it is concluded that the dykes in this study belong to the highly-fractionated I-type granite, which was emplaced under the post-orogenic extensional tectonic background. According to geological data in the study area and its adjacent areas, it can be concluded that these dykes are spatially associated with gold mineralization, and they are indicative of ore genesis and the further prospecting for gold mineralization in the study area.

Key words: geological significance; petrology; geochemistry; felsic dykes; Qiuwangchong; central Hunan

Fund support: National Natural Science Foundation of China(41972090, 41473043)

湘中地区以盛产金、锑矿闻名,且在多个矿区发现有脉岩与金、锑矿化相伴生的现象(刘继顺, 1996; 鲍振襄等, 2002; 赵军红等, 2005; 鲁玉龙等, 2017a),如龙山金锑矿、符竹溪金矿、板溪锑矿、廖家坪金锑钨矿、包金山金矿等。前人对湘中地区部分矿区中脉岩与金、锑成矿的关系进行过初步探讨,并认为这些脉岩中长英质脉岩与金、锑矿化存在紧密的时空和成因联系;长英质脉岩主要形成于印支晚期,其侵位时间大多与成矿时间相近,它们为本区金、锑成矿有的提供重要热源和成矿流体,有的直接作为成矿母岩,其侵入作用本身就是成矿作用(刘继顺, 1996; 鲍振襄等, 2002; 鲁玉龙等, 2017a)。但总体上对该区脉岩研究不多,缺乏系统性的研究,这些脉岩的岩石成因、形成的构造环境等方面的资料仍相当少(赵军红等, 2005; 鲁玉龙等, 2017a)。

秋旺冲金矿区位于湘中 EW 向白马山-紫云山成矿带东端、紫云山花岗岩体的北东侧。前人在该矿区及其周边地区,对紫云山岩体及该矿区西侧的包金山金矿中的脉岩进行了少量年代学和地球化学研究(刘凯等, 2014; 鲁玉龙等, 2017a, 2017b),结果显示,紫云山花岗岩体与包金山金矿中的花岗闪长斑岩脉侵位时间都在印支晚期,且在包金山金矿区,花岗闪长斑岩脉与金成矿时间相近,空间上相互穿插,为成矿期脉岩(鲁玉龙等, 2017a)。2015 ~ 2016 年,笔者项目组在秋旺冲金矿区开展地质填图、钻探等地质勘查工作时,新发现了较多的长英质脉岩(周溪等, 2017)^①,且这些脉岩可能与金成矿有关,但因发现较晚,且矿区地质工作程度偏低,目前尚未引起学者的关注,其岩石类型和地球化学特征如何,是否与金成矿关系密切,均不清楚。因此,本文拟对该矿区脉岩进行岩石学和全岩地球化学研究,并结合区域上前人的研究成果,初步探讨这些脉岩的成因、形成的构造环境及其与金矿化

在空间上的对应关系,以期为进一步深入认识整个湘中地区脉岩的成因及其与金、锑成矿的关系提供资料。

1 脉岩的分布与岩石学特征

湘中地区大地构造上处于扬子陆块与华夏陆块汇聚带的北侧(图1),区域构造较复杂,整体表现为穹盆构造,岩浆活动也较频繁,花岗岩分布非常广泛(鲁玉龙等, 2017b)。受构造-岩浆活动的影响,该地区形成了丰富的金、锑、钨、铅锌等矿产,是湖南重要的贵金属、有色金属成矿区(刘继顺, 1996; 赵军红等, 2005; 鲁玉龙等, 2017b)。秋旺冲金矿区位于湘中盆地东缘,矿区内出露的地层主要为新元古界板溪群马底驿组($Pt_3 bnm$),为一套浅变质岩,主要为砂质板岩、含钙质粉砂质板岩和变质砂岩。区内断裂较发育,以 EW-NWW 向为主,NE 向和 SN 向次之,其中 EW-NWW 向断裂构造是本区金矿的容矿构造。矿区西南部为湘中地区规模较大的紫云山岩体(图1),出露面积达 280 km²,岩性主要为似斑状花岗岩、二长花岗岩、黑云母花岗岩(刘凯等, 2014; 鲁玉龙等, 2017b)。矿区脉岩主要出露在南部靠近紫云山花岗岩体界线约 500 m 范围内,目前发现有 5 条脉岩出露地表,另据矿区钻孔资料反映深部还有多条隐伏脉岩,规模都不大,以花岗岩脉(M γ)为主。

该矿区脉岩较发育,均为浅色的长英质脉岩,出露于金矿化带附近的脉岩,大体可分为似斑状花岗岩、含电气石花岗岩和文象花岗岩 3 类(图2)。这些脉岩的岩石学特征分述如下:

似斑状花岗岩,岩石呈灰白色,似斑状结构,块状构造(图2a),斑晶含量一般为 10% ~ 20%。主要矿物为石英(35% ~ 40%)、钾长石(30% ~ 40%)和斜长石($An = 2 \sim 8$, 钠长石, 20% ~ 25%),副矿物

① 周溪, 黄建伟, 曾晓霞, 等. 2017. 湖南省湘乡市秋旺冲矿区金矿预查报告. 湖南省有色地质勘查局二总队.

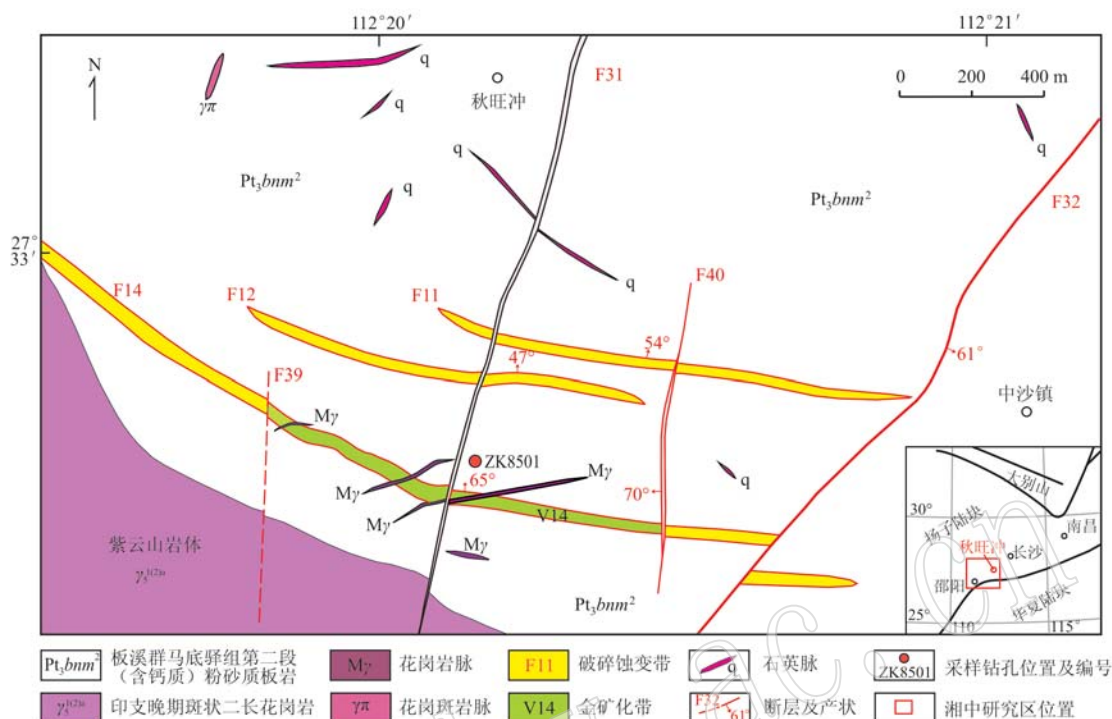


图1 湘中秋旺冲金矿区地质简图

Fig. 1 Geological sketch map of the Qiuwangchong gold deposit, central Hunan

有磷灰石、磁铁矿等,斑晶主要由斜长石和石英组成。石英为他形粒状,与长石互嵌、互为伸入,并交代长石。钾长石以半自形-他形为主,与石英互嵌、互为伸入。斜长石呈半自形-自形板条状,弱绢云母化,边缘常被熔蚀,发育聚片双晶(图 2b、2c)。

含电气石花岗岩,岩石呈灰白色,中细粒花岗岩结构,块状构造(图 2d)。主要矿物为石英(30% ~ 35%)、钾长石(35% ~ 40%)和斜长石($An = 5 \sim 11$, 钠长石-更长石,15% ~ 20%),次要矿物为电气石(5% ~ 10%)、白云母(1% ~ 3%)和少量石榴子石,副矿物有磷灰石、锆石、磁铁矿等。石英为他形粒状,与钾长石互嵌、互为伸入,并交代斜长石。钾长石以他形为主,少量具格子双晶,可见卡氏双晶,表面泥化显混浊,与石英互嵌、互为伸入(图 2e、2f)。斜长石呈半自形-自形板条状,弱绢云母化,边缘常被熔蚀,发育聚片双晶(图 2e)。电气石多呈短柱-长柱状(图 2e),偶见楔状,横切面呈不规则状(图 2f),横向裂理发育,具强的吸收性、多色性,见彩色环带,在正交偏光下其干涉色常被掩盖,总体呈较均匀分散分布在长石、石英粒间。白云母呈片状,具鲜艳的干涉色,零散分布,部分碳酸盐化。石榴子石颗粒极小,呈圆形颗粒分布于石英中,单偏光镜下无

色,突起较高,正交偏光下全消光。

文象花岗岩,岩石呈灰白-肉红色,石英在钾长石中呈有规则象形文字产出,构成显微文象结构(图 2h、2i),块状构造。主要矿物为钾长石(60% ~ 65%)、石英(25% ~ 35%),次要矿物有斜长石($An = 4 \sim 15$, 钠长石-更长石,3% ~ 5%),少量黑云母和白云母,副矿物有磷灰石、锆石、磁铁矿等。钾长石颗粒粗大,具条纹结构,在其中石英呈象形文字状嵌布,表面泥化混浊状。石英为它形,呈象形文字状嵌布在钾长石中,在正交偏光镜下同时消光。斜长石呈半自形板条状,见聚片双晶发育,边缘常被熔蚀呈不规则状,见绢云母化。黑云母和白云母分布不均匀,局部位置可见少量;前者呈自形、半自形板状、片状,后者呈片状,具鲜艳的干涉色。

2 样品及测试

从秋旺冲金矿区 V14 金矿化带附近发现的 3 类脉岩中采集了 3 组共 10 个脉岩样品(采样位置见图 1),来进行岩石地球化学分析,样品均采自钻孔岩芯,新鲜,无风化现象。

主量元素分析采用 X 射线荧光光谱法(XRF),

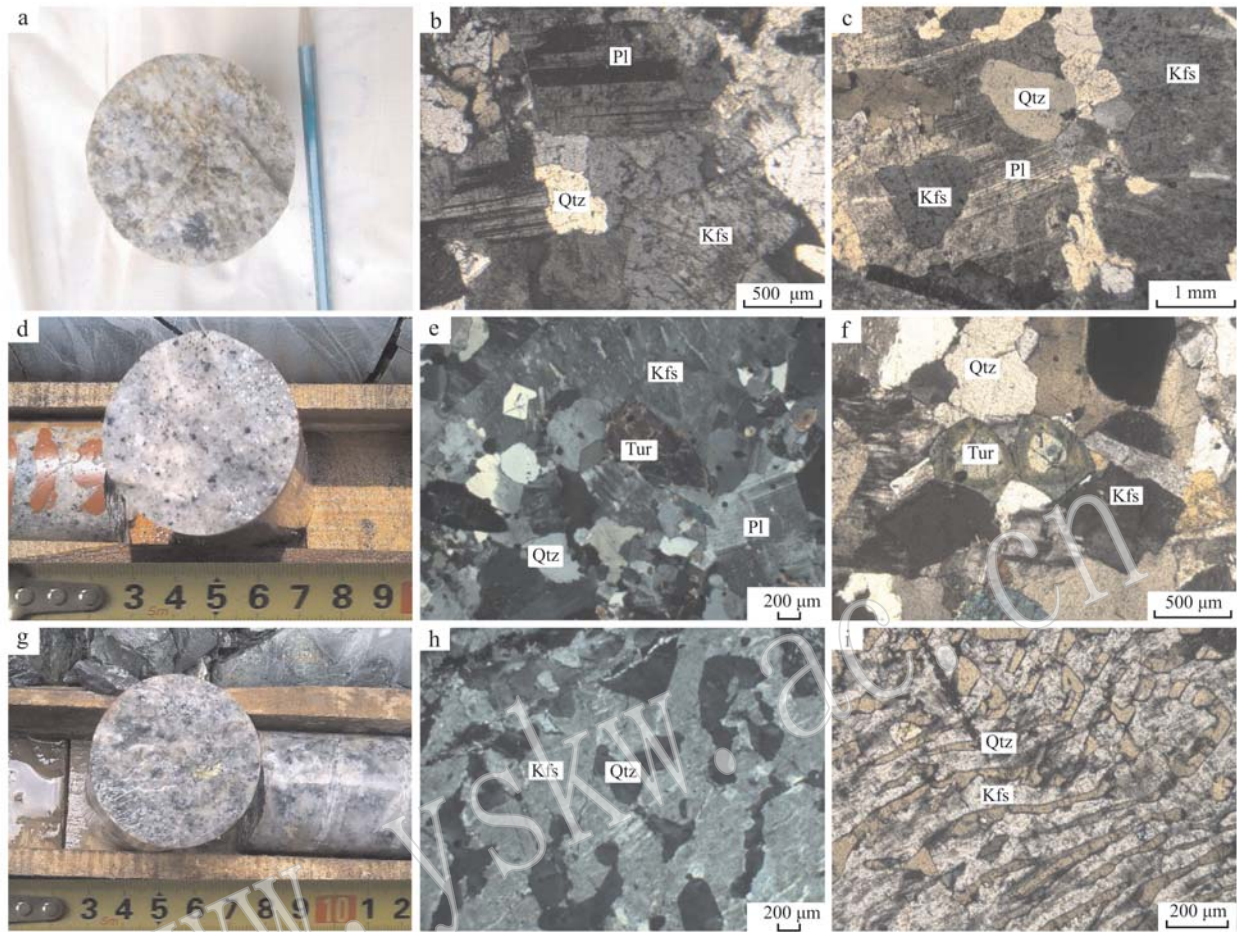


图2 秋旺冲金矿区脉岩手标本和显微照片(矿物缩写符号据沈其韩, 2009)

Fig. 2 Hand specimens and microscopic photographs of felsic dykes in the Qiawangchong gold deposit (mineral abbreviation after Shen Qihan, 2009)

a—似斑状花岗岩手标本; b—斜长石聚片双晶(+); c—斜长石聚片双晶、它形粒状石英(+); d—含电气石花岗岩手标本; e—斜长石聚片双晶、短柱状电气石(+); f—电气石彩色环带(+); g—文象花岗岩手标本; h—石英、钾长石文象结构(+); i—石英、钾长石文象结构(+); Pl—斜长石; Kfs—钾长石; Qtz—石英; Tur—电气石

a—hand specimens of porphyritic granite; b—polysynthetic twin of plagioclase(+); c—polysynthetic twin of plagioclase and xenomorphic granular quartz(+); d—hand specimens of tourmaline-bearing granite; e—polysynthetic twin of plagioclase and prismatic tourmaline(+); f—colored band of tourmaline(+); g—hand specimens of hebraic granite; h—graphic texture formed by quartz and potassium feldspar(+); i—graphic texture formed by quartz and potassium feldspar(+); Pl—plagioclase; Kfs—potassium feldspar; Qtz—quartz; Tur—tourmaline

在广州澳实矿物实验室完成。总氧化物分析误差为1%~3%。实验流程为:称取适量样品→加入适量硼酸锂-硝酸锂高温熔融成玻璃片→在XRF上用外标法测定氧化物含量。

微量元素分析采用电感耦合等离子质谱法(ICP-MS),在贵州同微测试科技有限公司完成。测试所使用仪器型号为德国热电(Thermo Fisher)ICP-MS X2,稀释后的上机溶液含4个内标,原始数据用昆士兰大学俸月星博士编写的程序计算含量,每个样品每个元素均测试4位,RSD值为0.12%~8.66%。

3 地球化学特征

3.1 主量元素特征

主量元素测试分析结果(表1)显示,3种长英质脉岩的 SiO_2 含量介于72.45%~84.52%之间(平均为76.88%),属酸性-超酸性岩;在全碱-硅(TAS)分类图解(图3a)中所有样品都落到花岗岩区域。脉岩的 Al_2O_3 含量介于8.37%~14.92%之间,均值为12.58%;A/CNK值介于0.94~1.18之间,除一个样品略大于1.1外,其它均小于1.1;A/NK值为1.05~

表 1 秋旺冲金矿区脉岩主量元素分析结果

$w_B/\%$

Table 1 Major element compositions of felsic dykes in the Qiuwangchong gold deposit

样号	似斑状花岗岩					含电气石花岗岩		文象花岗岩				平均值
	QWC-1-1	QWC-1-2	QWC-1-3	QWC-1-4	QWC-1-5	QWC-2	QWC-3-1	QWC-3-2	QWC-3-3	QWC-3-4		
SiO ₂	73.99	72.45	76.93	76.71	75.78	74.89	75.55	77.93	80.09	84.52	76.88	
TiO ₂	<0.01	<0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	<0.01		
Al ₂ O ₃	14.05	14.92	12.99	12.93	13.34	14.12	12.34	11.78	10.94	8.37	12.58	
TFe ₂ O ₃	0.53	0.35	0.88	0.84	1.17	0.93	0.57	0.53	0.38	0.49	0.67	
MnO	0.02	0.02	0.02	0.02	0.05	0.09	0.02	0.01	0.01	0.01	0.03	
MgO	0.03	0.04	0.07	0.06	0.07	0.03	0.07	0.06	0.05	0.05	0.05	
CaO	0.11	0.12	0.46	0.52	0.51	0.44	1.02	0.57	0.25	0.42	0.44	
Na ₂ O	2.52	4.06	5.56	4.72	4.39	4.45	3.16	3.86	4.48	3.92	4.11	
K ₂ O	8.59	6.98	1.95	3.14	3.88	3.56	5.60	3.93	2.51	1.26	4.14	
P ₂ O ₅	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.04	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01		
BaO	0.01	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	0.01		
Cr ₂ O ₃	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01		
SO ₃	<0.01	<0.01	0.01	0.01	<0.01	<0.01	0.05	0.11	0.06	0.02		
SrO	0.01	0.01	<0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01		
LOI	0.38	0.41	0.50	0.46	0.33	0.48	1.06	0.50	0.41	0.53		
Total	100.28	99.41	99.43	99.46	99.59	99.63	99.12	99.55	99.28	99.19		
A/CNK	1.03	1.03	1.07	1.07	1.08	1.18	0.94	1.01	1.04	0.98		
A/NK	1.05	1.05	1.15	1.16	1.17	1.26	1.10	1.11	1.08	1.07		
σ	3.98	4.14	1.66	1.83	2.09	2.01	2.36	1.74	1.32	0.65	2.18	
MALI	11.00	10.92	7.05	7.34	7.76	7.57	7.74	7.22	6.74	4.76		
K ₂ O + Na ₂ O	11.11	11.04	7.51	7.86	8.27	8.01	8.76	7.79	6.99	5.18	8.25	
K ₂ O/Na ₂ O	3.41	1.72	0.35	0.67	0.88	0.80	1.77	1.02	0.56	0.32		
DI	97.95	98.12	94.90	94.79	93.99	93.66	94.63	95.51	97.29	97.10		

注: A/CNK = molar[Al₂O₃ / (CaO + Na₂O + K₂O)]; A/NK = molar[Al₂O₃ / (Na₂O + K₂O)]; σ = (Na₂O + K₂O)² / (SiO₂ - 43); MALI = Na₂O + K₂O - CaO; DI = Q + Or + Ab + Ne + Lc + Kp(CIPW)。

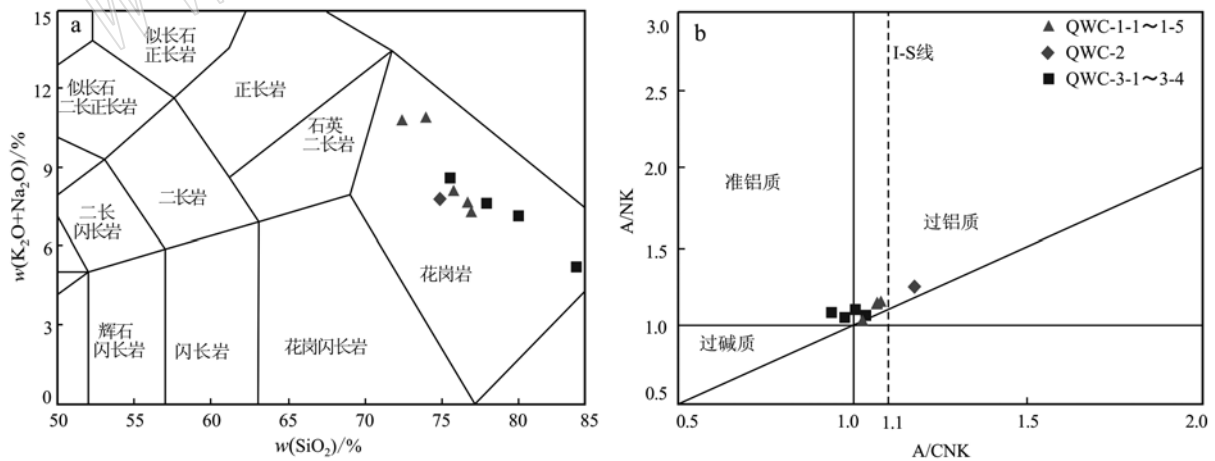


图 3 秋旺冲金矿区脉岩 TAS 图解(a, 据 Middlemost, 1994)和 A/NK - A/CNK 图解(b, 据 Maniar and Piccoli, 1989)
Fig. 3 TAS diagram (a, after Middlemost, 1994) and A/NK - A/CNK diagram (b, after Maniar and Piccoli, 1989) of felsic dykes in the Qiuwangchong gold deposit

1.26, 在 A/NK - A/CNK 图解中(图 3b), 所有样品均落入准铝质-弱过铝质区域, 因此, 秋旺冲金矿区的脉岩应为准铝质-弱过铝质系列。脉岩的全碱

(K₂O + Na₂O) 介于 5.18% ~ 11.11% 之间, 均值为 8.25%; K₂O/Na₂O 值变化较大, 为 0.32 ~ 3.41。样品里特曼组合指数 值为 0.65 ~ 4.14, 大多小于 3.3,

均值为 2.18, 总体属于钙碱性系列; 该区脉岩在 MALI-SiO₂ (碱钙指数) 图解 (图 4) 中也大多落入钙碱性区域, 与里特曼组合指数所反映的特征一致。该区脉岩的分异指数 (DI) 普遍高, 为 93.66 ~ 98.12, 显示岩浆分异演化程度高。

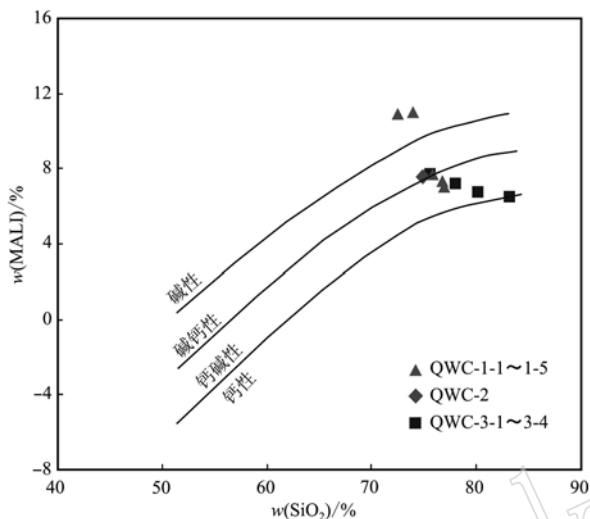


图 4 秋旺冲金矿区脉岩 MALI-SiO₂ 图解 (据 Frost *et al.*, 2001)

Fig. 4 MALI-SiO₂ diagram of felsic dykes in the Qiawangchong gold deposit (after Frost *et al.*, 2001)

在主要元素 Harker 图解中 (图 5), 该区脉岩 SiO₂ 与 Al₂O₃ 呈明显负相关性, 与 K₂O 也存在一定程度的负相关, 与其他主要元素相关性不明显, 表明在岩浆结晶过程中有富铝、富钾矿物的结晶分离 (刘凯等, 2014), 且在岩浆演化过程中可能存在斜长石的分馏结晶作用 (赵军红等, 2005)。脉岩样品中 TiO₂、MnO、P₂O₅ 含量都很低, 部分样品含量甚至低于 0.01%, 说明可能在脉岩结晶过程的早中期大部分钛矿物、磷灰石等矿物就已发生结晶分离。脉岩中 SiO₂ 含量高而 CaO、MgO、Fe₂O₃ 含量较低, 整体表现出酸度高、相对贫钙、贫镁、贫铁的特点。3 组样品主要元素之间这些相同的特点, 也反映了该矿区这 3 种类型的脉岩应为同一母岩分异演化形成的。

3.2 微量元素特征

微量元素测试分析结果见表 2。在原始地幔标准化蛛网图中 (图 6a), 10 件样品微量元素配分型式基本一致, 有 2 个样品略有差异 (富钾, 与主要元素特征一致), 均属于右倾型。3 种脉岩样品都具有较高的 Rb 含量及 Rb/Sr 值, 强不相容元素 Rb 高度富

集, 表明岩浆分异作用进行得比较充分 (王永磊等, 2007; 尹光候等, 2010), 花岗岩在形成过程中经历了较高级的演化。岩石中强烈亏损 Ba、Sr、P、Ti 元素, 呈明显的 V 型谷, 其中 P、Ti 元素亏损说明在岩浆分异过程中可能存在磷灰石和钛铁矿的分离结晶作用, Ba、Sr 元素亏损可能是与斜长石的分离结晶作用有关 (赵军红等, 2005), Sr 的负异常可能还与岩浆分异或岩浆中钙含量偏低有关。岩石中富集 Rb、K 等大离子亲石元素 (LILE), Th、U、Ce、Nd、Zr、Hf 这些高场强元素 (HFSE) 也都表现出一定程度的富集。该区脉岩的岩石微量元素正负异常 (峰、谷) 都比较突出, 反映了其较强的分异演化特点 (张利军, 2015)。

该区脉岩的 K/Rb、Zr/Hf、Nb/Ta 值均较小, 暗示其岩浆分异演化过程中有流体的参与 (Shaw, 1968), 并发生了壳、幔之间流体和熔体的相互作用, 同时说明本区长英质脉岩的岩浆分异演化程度相对较高 (Irber, 1999; 刘朕语, 2018)。其微量元素特征与紫云山岩体相比, 相对富集或亏损的元素基本相同, 曲线分布型式大体相似, 但 K/Rb、Nb/Ta 值都明显降低 (刘凯等, 2014; 鲁玉龙等, 2017b), 具有更高的演化程度。

3.3 稀土元素特征

稀土元素测试分析结果 (表 2) 显示, 该区脉岩的稀土元素总量相当低, 介于 $10.4 \times 10^{-6} \sim 94.8 \times 10^{-6}$ 之间, 均值为 51.1×10^{-6} 。在稀土元素球粒陨石标准化配分型式图 (图 6b) 中, 所有样品的稀土元素配分型式基本相同, 类似海鸥型, 说明秋旺冲矿区 3 种脉岩的岩浆应是由同一母岩浆演化而来 (张舒等, 2009); 轻稀土元素较为平坦, 重稀土元素趋势总体平坦略微左倾, 且轻、重稀土元素分馏都不明显。轻稀土元素总量为 $4.2 \times 10^{-6} \sim 29.9 \times 10^{-6}$, 均值 11.5×10^{-6} , 重稀土元素总量为 $6.2 \times 10^{-6} \sim 83.0 \times 10^{-6}$, 均值 39.6×10^{-6} ; 轻、重稀土元素比值为 0.14 ~ 0.85 (平均为 0.35), (La/Yb)_N 值介于 0.17 ~ 1.04 间, 大多小于 1.0, 表明重稀土元素相对较富集, 而轻稀土元素相对亏损。

脉岩 δEu 值为 0.01 ~ 0.15, 均值为 0.07, 强烈亏损 Eu, 稀土元素配分型式图上呈明显 V 型谷, 说明岩浆演化过程中有大量的斜长石分离结晶, 暗示该区脉岩的岩浆经历了强烈结晶分异作用, 分异演化程度很高, 这与其主要、微量元素所反映的地球化学特征相吻合; Ce 异常不明显, δCe 值大都在 1.0

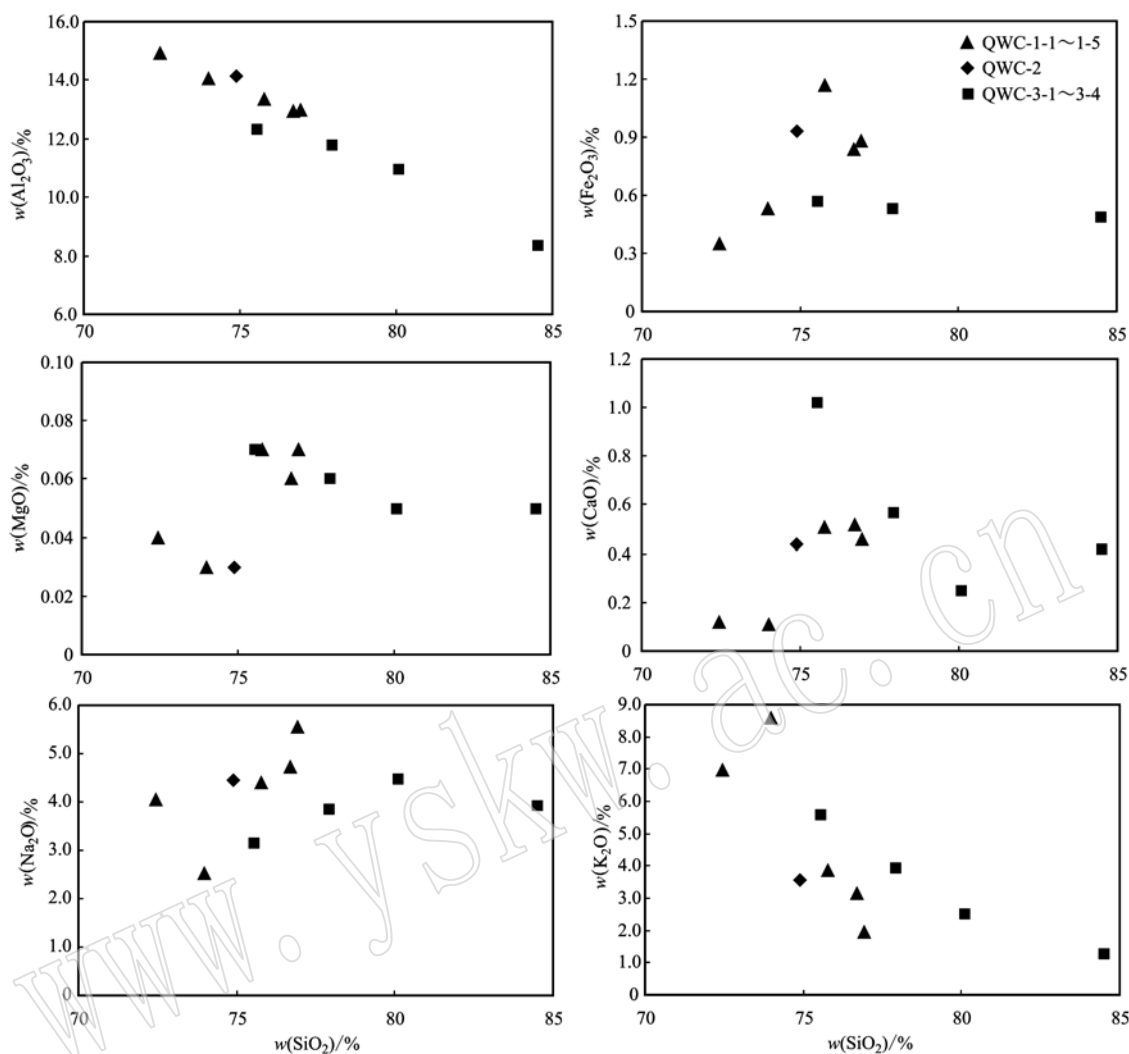


图5 秋旺冲金矿区脉岩 Harker 图解

Fig. 5 Harker diagrams of felsic dykes in the Qiuwangchong gold deposit

附近。与邻近的紫云山岩体相比,该区脉岩的 LREE 及 LREE/HREE 明显降低(刘凯等, 2014; 张利军, 2015; 鲁玉龙等, 2017b), 应是岩浆分异作用进行得更加充分。

4 讨论

4.1 脉岩成因类型的探讨

花岗岩分类方案有多种, 其中 I、S、M、A 分类方案较为常用。前述已对秋旺冲金矿区脉岩做了岩石学与地球化学特征分析, 其主量元素具有富 Si、Na、K 而贫 Al、Ca、Mg 的特点; 微量元素具有富集 Rb、Th、U、Ce、Nd、Zr、Hf 而亏损 Ba、Sr、P、Ti 的特点; 全碱($K_2O + Na_2O$)含量较高, 里特曼指数大多小于 3.3, 总体属于钙碱性花岗岩; 矿区脉岩的 A/CNK 值

大多小于 1.1, 绝大部分样品落入准铝质-弱过铝质区域(图 3b), 总体上具有 I 型花岗岩的特征(Chappell, 1999), 与紫云山岩体基本一致(刘凯等, 2014; 鲁玉龙等, 2017b)。在 Y-Ga/Al 及 Zr-Ga/Al 判别图解(图 7a、7b)中, 该区脉岩的样品主要落入 I & S 型花岗区域, 只有个别样品落入 A 型花岗岩范围; 在 Ce-SiO₂ 判别图解(图 7c)中, 所有样品点均落入 I 型花岗岩范围; 在($K_2O + Na_2O$)/CaO - (Zr + Nb + Ce + Y) 判别图解(图 7d)中, 样品点则主要落入高分异 I 型花岗区域, 表明本区脉岩可能兼具 I 型和 A 型花岗岩的部分特征。但矿区脉岩中并未见有碱性暗色矿物, 且 10 000 Ga/Al 值介于 1.44 ~ 2.73 之间, 除一个样品值略大于 2.6 外, 其它均小于 2.6, 故该区脉岩不应是 A 型花岗岩, 其部分与 A 型花岗岩相似的特征, 很可能是脉岩岩浆高度分异(图 8)所致

表2 秋旺冲金矿区脉岩微量及稀土元素分析结果

 $w_B/10^{-6}$

Table 2 Trace element and REE compositions of felsic dykes in the Qiuwangchong gold deposit

样号	似斑状花岗岩					含电气石花岗岩		文象花岗岩				平均值
	QWC-1-1	QWC-1-2	QWC-1-3	QWC-1-4	QWC-1-5	QWC-2	QWC-3-1	QWC-3-2	QWC-3-3	QWC-3-4		
Li	1.59	1.66	2.26	2.38	6.30	23.20	3.24	6.63	8.48	29.20	8.49	
Be	2.06	8.92	5.70	7.18	10.40	14.20	9.95	6.29	4.66	1.26	7.06	
Cr	9.8	10.2	13.4	13.6	11.8	15.8	14.4	21.6	39.2	24.0	17.4	
Co	0.282	0.021	0.116	0.046	0.086	0.045	0.158	0.200	0.109	0.278	0.134	
Ni	0.879	0.274	0.597	0.451	0.735	0.251	0.434	0.278	0.315	0.866	0.508	
Ga	10.7	15.8	16.0	15.6	18.2	20.4	12.7	12.1	9.6	7.4	13.9	
Rb	790	561	120	231	348	659	292	227	105	46	338	
Sr	7.66	5.20	2.34	3.01	3.02	1.84	11.00	9.96	15.30	13.10	7.24	
Zr	6.9	32.6	114.0	99.2	73.5	46.2	34.9	59.8	65.4	42.7	57.5	
Nb	5.89	15.40	36.30	15.30	15.10	18.20	9.80	8.86	9.62	7.11	14.16	
Sn	8.03	5.23	12.30	14.70	18.20	25.30	4.59	5.91	4.23	2.69	10.12	
Sb	1.22	3.06	1.14	1.48	2.32	5.97	0.67	0.67	0.71	0.82	1.81	
Cs	25.5	19.0	6.55	20.8	50.0	213.0	9.1	8.6	3.7	3.4	36.0	
Ba	33.1	77.5	24.5	26.9	39.3	5.3	33.2	38.2	153.0	93.9	52.5	
Hf	0.82	4.54	6.56	5.44	4.47	3.21	1.82	3.58	3.69	2.57	3.67	
Ta	1.85	3.53	3.28	2.67	4.48	5.78	1.33	2.49	3.15	2.63	3.12	
Tl	4.31	3.31	0.93	1.65	2.09	4.17	1.84	1.38	0.73	0.32	93.4	
Pb	62.6	14.9	184.0	26.2	37.6	14.2	40.1	45.2	5.9	5.5	43.6	
Th	0.80	1.67	6.59	12.90	9.71	7.74	6.46	9.75	7.23	4.32	6.72	
U	1.66	2.52	11.60	8.55	7.04	12.40	6.63	9.45	9.63	9.22	7.87	
Rb/Sr	103.1	107.9	51.3	76.7	115.2	358.2	26.5	22.8	6.9	3.5	87.2	
K/Rb	88.3	101.1	132.0	110.4	90.6	43.9	155.8	140.7	194.2	221.1	127.8	
Zr/Hf	8.4	7.2	17.4	18.2	16.4	14.4	19.2	16.7	17.7	16.6	15.2	
Nb/Ta	3.2	4.4	11.1	5.7	3.4	3.1	7.4	3.6	3.1	2.7	4.8	
La	0.57	2.40	0.92	1.28	2.46	4.74	1.25	1.74	1.07	0.90	1.73	
Ce	2.57	4.68	1.87	3.72	7.66	12.10	3.15	3.04	2.09	1.98	4.29	
Pr	0.157	0.882	0.344	0.546	1.040	2.010	0.684	0.711	0.466	0.319	0.716	
Nd	0.64	3.54	1.57	2.56	4.54	8.19	3.81	3.34	2.27	1.41	3.19	
Sm	0.29	1.55	0.80	1.45	2.10	2.87	2.79	1.73	1.13	0.66	1.54	
Eu	0.008	0.017	0.009	0.020	0.027	0.013	0.074	0.073	0.055	0.040	0.034	
Gd	0.40	2.26	1.49	2.44	2.90	2.58	5.13	2.48	1.63	1.00	2.23	
Tb	0.088	0.543	0.393	0.612	0.700	0.510	1.230	0.534	0.361	0.242	0.521	
Dy	0.59	3.99	3.16	4.62	5.31	3.25	8.41	3.68	2.53	1.79	3.73	
Ho	0.121	0.914	0.793	1.080	1.310	0.674	1.730	0.812	0.563	0.416	0.841	
Er	0.35	3.04	2.65	3.48	4.58	2.22	5.01	2.59	1.78	1.35	2.71	
Tm	0.057	0.562	0.456	0.583	0.872	0.435	0.814	0.460	0.309	0.235	0.478	
Yb	0.37	3.97	2.98	3.75	6.27	3.28	4.99	3.18	2.09	1.58	3.25	
Lu	0.054	0.601	0.458	0.567	0.975	0.519	0.680	0.494	0.322	0.238	0.491	
Y	4.14	31.50	20.30	29.70	39.10	21.50	55.00	23.90	16.10	11.90	25.31	
ΣREE	10.4	60.5	38.2	56.4	79.8	64.9	94.8	48.8	32.8	24.1	51.1	
LREE	4.2	13.1	5.5	9.6	17.8	29.9	11.8	10.6	7.1	5.3	11.5	
HREE	6.2	47.4	32.7	46.8	62.0	35.0	83.0	38.1	25.7	18.8	39.6	
LREE/HREE	0.68	0.28	0.17	0.21	0.29	0.85	0.14	0.28	0.28	0.28	0.35	
(La/Yb) _N	1.04	0.41	0.21	0.23	0.27	0.98	0.17	0.37	0.35	0.38	0.44	
δEu	0.08	0.03	0.02	0.03	0.03	0.01	0.06	0.11	0.12	0.15	0.07	
δCe	2.02	0.75	0.78	1.04	1.12	0.92	0.80	0.64	0.69	0.87	0.96	

(Whalen *et al.*, 1987; Wu *et al.*, 2002; 吴福元等, 2007)。

因此,根据秋旺冲金矿区脉岩的地质和地球化

学特征以及成因类型判别研究可知,该区花岗岩脉应属于高分异的 I 型花岗岩,应是其母岩紫云山花岗岩体进一步高度分异演化的产物。

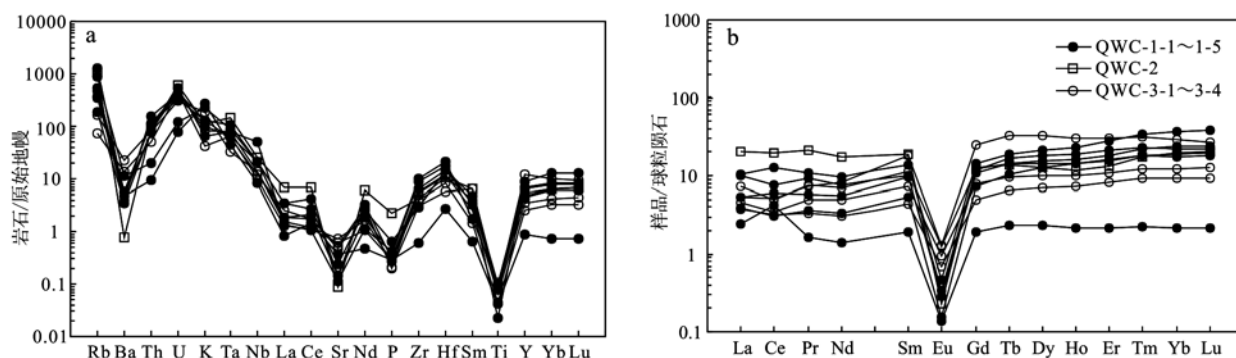


图 6 秋旺冲金矿区脉岩微量元素原始地幔标准化蛛网图(a)和稀土元素球粒陨石标准化配分型式图(b)(原始地幔和球粒陨石数据据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 6 Spidergrams of the primitive mantle-normalized trace elements (a) and chondrite-normalized REE patterns (b) of felsic dykes in the Qiuwangchong gold deposit (primitive mantle-normalized values and chondrite-normalized values after Sun and McDonough, 1989)

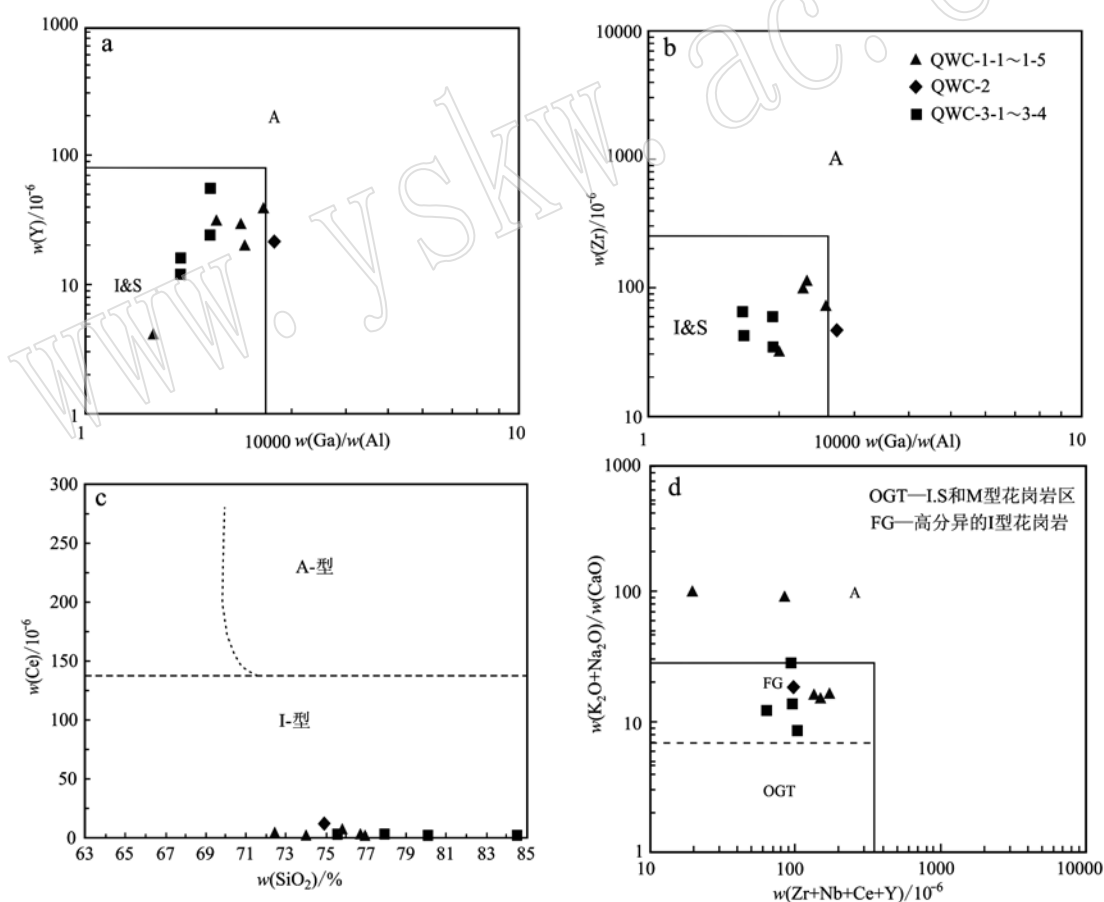


图 7 秋旺冲金矿区脉岩 $Y - Ga/Al$ 、 $Zr - Ga/Al$ 、 $Ce - SiO_2$ 和 $(K_2O + Na_2O)/CaO - (Zr + Nb + Ce + Y)$ 成因类型判别图解(a、b 据 Whalen *et al.*, 1987; c 据 Collins *et al.*, 1982; d 据 Eby, 1992)

Fig. 7 $Y - Ga/Al$, $Zr - Ga/Al$, $Ce - SiO_2$ and $(K_2O + Na_2O)/CaO - (Zr + Nb + Ce + Y)$ genetic discrimination diagrams of felsic dykes in the Qiuwangchong gold deposit (a, b after Whalen *et al.*, 1987; c after Collins *et al.*, 1982; d after Eby, 1992)

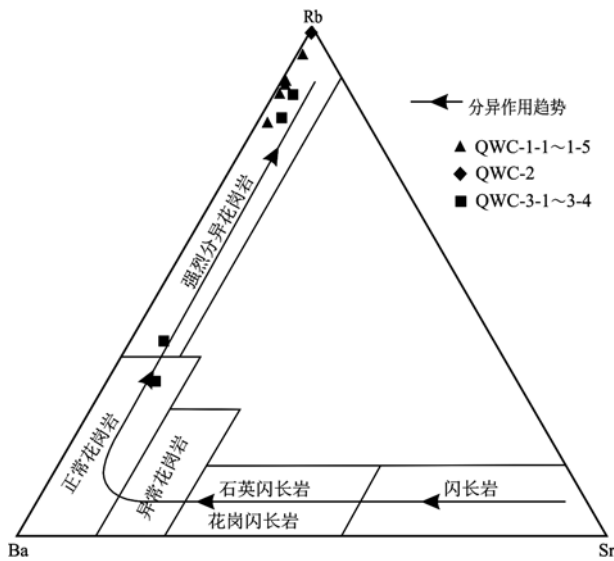


图8 秋旺冲金矿区脉岩 Rb - Ba - Sr 三元图解
(据谢磊等, 2013)

Fig. 8 Rb - Ba - Sr diagrams of the felsic dykes in the Qiawangchong gold deposit (after Xie Lei et al., 2013)

4.2 脉岩形成的构造环境探讨

秋旺冲金矿区脉岩大都出露在距紫云山花岗岩体 500 m 的范围内,因而对其形成的构造环境的探讨应与紫云山岩体相结合。以往的研究显示,紫云山岩体属于华南印支晚期(锆石 U-Pb SIMS 年龄为 227 ~ 222 Ma)花岗岩,为碰撞晚期或碰撞后构造背景的产物(刘凯等, 2014; 鲁玉龙等, 2017b)。

在微量元素 Nb - Y、Rb - (Yb + Ta) 构造环境判别图解(图 9a、9b)中,所有样品点均落入同碰撞花岗岩(Syn-COLG)或火山弧花岗岩(VAG)区域内;在 Rb - (Y + Nb) 判别图解(图 9c)中,样品点主要落入碰撞后花岗岩(Post-collision)区域内。在 $TFeO/(TFeO + MgO) - SiO_2$ 判别图解(图 9d)中,矿区脉岩样品点主要落入造山后花岗岩(POG)区域。上述构造环境判别图解表明,秋旺冲矿区脉岩的总体上属于碰撞后花岗岩,同时也与造山作用有关。

华南陆块位于秦岭-大别山和 Song Ma 两条印支期缝合带之间,而本区在大地构造上则位于华南陆块内部的扬子陆块与华夏陆块的拼合的边缘薄弱地带(图 1)。在印支运动中,印支陆块与华南陆块南缘发生碰撞拼合,所产生的挤压应力由南向北传递(刘凯等, 2014),华南陆块内部的薄弱地带随之发生地壳加厚而产生造山作用(刘凯等, 2014; 张利军,

2015),并由此伴随着强烈的构造-岩浆作用,而该区脉岩很可能就形成于此时的造山后伸展环境中。

4.3 脉岩与金矿化的关系

在秋旺冲金矿区,已发现的金矿(化)体主要赋存于 EW-NWW 向的断裂构造中(图 1),在该组断裂构造中,附近有脉岩密集发育并在空间上与之相互穿插的地段也是金矿化较强之处(V14 中段)。矿区地质勘查资料显示,本文所研究的 3 类脉岩其钻孔原生晕数据中 Au 含量为 $4.5 \times 10^{-9} \sim 14.7 \times 10^{-9}$ (石墨炉原子吸收光谱法测定)(周溪等, 2017)^①,是中国陆壳 Au 丰度(2.25×10^{-9})(黎彤, 1994)的 2.0 ~ 6.5 倍;钻孔一般岩矿分析数据中脉岩的 Au 含量为 $0.03 \times 10^{-6} \sim 0.20 \times 10^{-6}$ (泡沫塑料富集火焰法测定)(周溪等, 2017)^①,且这两种方法测定的数据都显示,越靠近金矿(化)体的脉岩其金含量越高,在空间上与金矿(化)体相互穿插的脉岩本身就是弱金矿化体。总之,该区脉岩在空间上与金矿化存在对应关系,对研究金矿的成因及下一步的找矿勘查,均具有一定指示意义。

秋旺冲金矿区邻近的包金山金矿区,长英质的脉岩也相当发育,且矿体与脉岩存在相互切穿关系,脉岩与金成矿关系密切(鲁玉龙等, 2017a)。最近的定年结果亦显示,包金山金矿形成于印支期,其成矿年龄与长英质脉岩及紫云山岩体的侵位年龄相当吻合(鲁玉龙等, 2017a, 2017b)。因此,可以推断,包括秋旺冲、包金山等矿区在内的湘中地区的长英质脉岩,在成因上,与该区的金成矿也应存在密切联系。

5 结论

(1) 秋旺冲金矿区脉岩岩性主要有似斑状花岗岩、含电气石花岗岩和文象花岗岩,都为浅色长英质脉岩。

(2) 该区脉岩为准铝-弱过铝质、钙碱性花岗岩;富硅、富碱,富集 Rb、Th、U、K、Ce、Nd、Zr 和 Hf 元素,强亏损 Ba、Sr、P 和 Ti 元素;稀土元素总量低,轻重稀土元素分馏均不明显,重稀土元素相对较富集, Eu 负异常极为明显;分异指数高,显示岩浆分异演化程度高。

(3) 该区脉岩成因类型属于高分异的 I 型花岗

① 周溪, 黄建伟, 曾晓霞, 等. 2017. 湖南省湘乡市秋旺冲矿区金矿预查报告. 湖南省有色地质勘查局二总队.

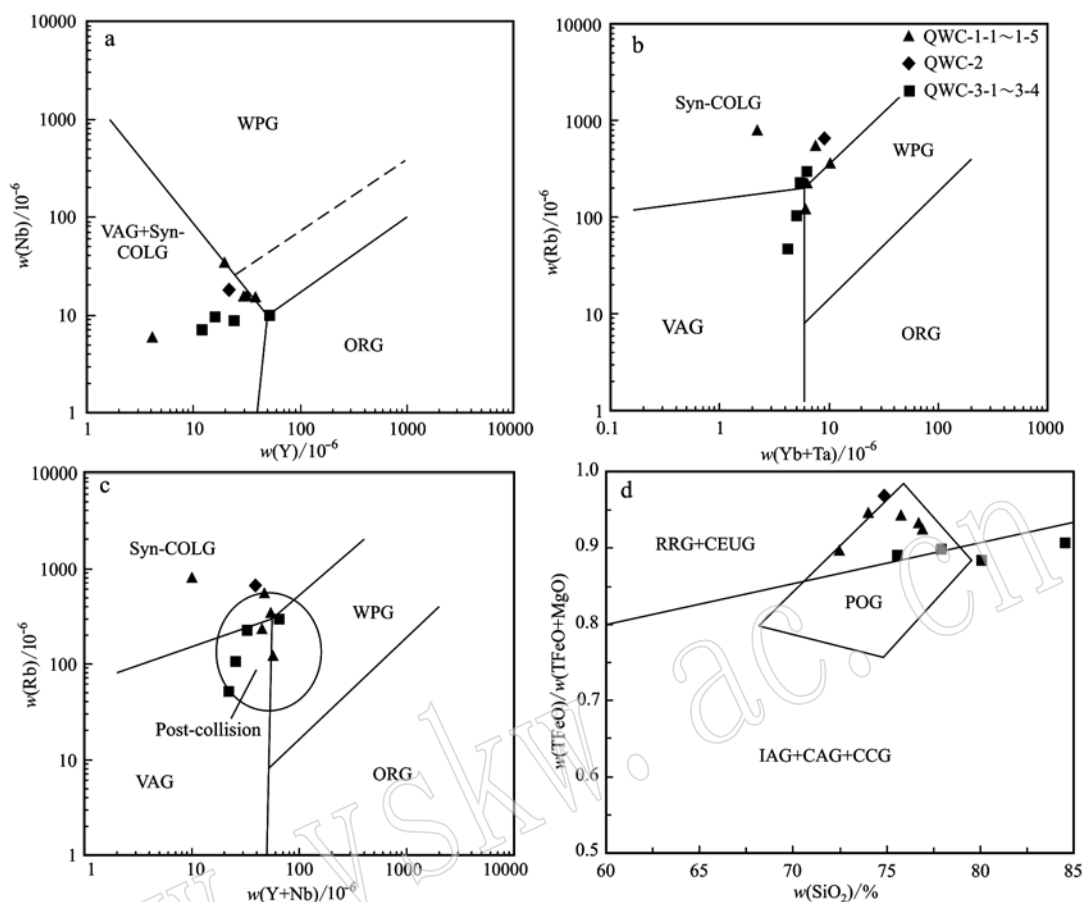


图9 秋旺冲金矿区脉岩的构造环境判别图解(a、b 据 Pearce *et al.*, 1984; c 据 Pearce, 1996; d 据 Maniar and Piccoli, 1989)

Fig. 9 Tectonic discrimination diagram of felsic dykes in the Qiuwangchong gold deposit (a, b after Pearce *et al.*, 1984; c after Pearce, 1996; d after Maniar and Piccoli, 1989)

ORG—洋中脊花岗岩; WPG—板内花岗岩; VAG—火山弧花岗岩; Syn-COLG—同碰撞花岗岩; Post-collision—碰撞后花岗岩; IAG—岛弧花岗岩; CAG—大陆弧花岗岩; CCG—大陆碰撞带花岗岩; POG—造山后花岗岩; RRG—裂谷花岗岩; CEUG—大陆造陆隆起花岗岩
 ORG—ocean ridge granites; WPG—within plate granites; VAG—volcanic arc granites; Syn-COLG—syn-collision granites; Post-collision—post-collision granites; IAG— island arc granites; CAG—continental arc granites; CCG—continental collision granites; POG—post orogeny granites; RRG—related granites; CEUG—continental epirogenic uplift granites

岩, 应是其母岩紫云山花岗岩体进一步高度分异结晶的产物。

(4) 该区脉岩是在碰撞造山后伸展构造环境中形成的, 属于碰撞后花岗岩。

(5) 该区脉岩与金矿化存在空间对应关系, 在成因上也可能关系密切, 这些脉岩对金矿床的成因及找矿勘查均有一定的指示意义。

致谢 匿名审稿人和编辑在文章修改过程中提供了许多建设性的意见, 在此致以诚挚的谢意!

References

Bao Zhenxiang, Wan Rongjiang and Bao Juemin. 2002. Relationship between felsic dikes in Precambrian system strata and gold mineralization in Hunan[J]. *Gold Geology*, 8(1): 33 ~ 39(in Chinese with English abstract).

Chappell B W. 1999. Aluminum saturation in I and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites[J]. *Lithos*, 46(3):

- 535 ~ 551.
- Collins W J, Beams S D, White A J R, *et al.* 1982. Nature and origin of A type granites with particular reference to Southeastern Australia [J]. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 80(2): 189 ~ 200.
- Eby G N. 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications[J]. *Geology*, 20(7): 641 ~ 644.
- Frost B R, Barnes C G, Collins W J, *et al.* 2001. A geochemical classification for granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 42(11): 2 033 ~ 2 048.
- Irber W. 1999. The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb, Eu/Eu*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suites[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(3 ~ 4): 489 ~ 508.
- Li Tong. 1994. Element abundances of China's continental crust and its sedimentary layer and upper continental crust[J]. *Geochimica*, 23(2): 140 ~ 145(in Chinese with English abstract).
- Liu Jishun. 1996. Relationship between felsic dikes and antimony-gold mineralization in Central Hunan[J]. *Geological Exploration of Non-Ferrous Metals*, 5(6): 321 ~ 325(in Chinese with English abstract).
- Liu Kai, Mao Jianren, Zhao Xilin, *et al.* 2014. Geological and geochemical characteristics and genetic significance of the Ziyunshan pluton in Hunan province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(2): 208 ~ 227(in Chinese with English abstract).
- Liu Zhenyu. 2018. Geological and Geochemical Characteristics of the Bayinbulake Granite Porphyry in West Junggar and Its Indicative Significance[D]. Nanchang: East China University of Technology(in Chinese with English abstract).
- Lu Yulong, Peng Jiantang, Yang Jiehua, *et al.* 2017a. Zircon U-Pb ages and Hf-O isotopes of granodiorite-porphyry in Baojinshan mining area and their geological significance[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 27(7): 1 441 ~ 1 454(in Chinese with English abstract).
- Lu Yulong, Peng Jiantang, Yang Jiehua, *et al.* 2017b. Petrogenesis of the Ziyunshan pluton in central Hunan, South China: Constraints from zircon U-Pb dating, element geochemistry and Hf-O isotopes [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(6): 1 705 ~ 1 728(in Chinese with English abstract).
- Maniar P D and Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635 ~ 643.
- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Earth-Science Reviews*, 37(3 ~ 4): 215 ~ 224.
- Pearce J A. 1996. Sources and settings of granitic rocks[J]. *Episodes*, 19(4): 120 ~ 125.
- Pearce J A, Harris N B W and Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 25(4): 956 ~ 983.
- Shaw D M. 1968. A review of K-Rb fractionation trends by covariance analysis[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 32(6): 573 ~ 601.
- Shen Qihan. 2009. The recommendation of a systematic list of mineral abbreviations[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 28(5): 495 ~ 500(in Chinese with English abstract).
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of Oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society of London Special Publications*, 42(1): 313 ~ 345.
- Wang Yonglei, Pei Rongfu, Li Jinwen, *et al.* 2007. Geochemical characteristics and tectonic setting of Laochang granite in Gejiu[J]. *Acta Geologica Sinica*, 81(7): 979 ~ 985(in Chinese with English abstract).
- Whalen J B, Currie K L and Chappell B W. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407 ~ 419.
- Wu F Y, Sun D Y and Li H M. 2002. A-type granites in northeastern China: Age and geochemical constrain on their petrogenesis[J]. *Chemical Geology*, 187(1 ~ 2): 143 ~ 173.
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Yang Jinhui, *et al.* 2007. Discussion on the petrogenesis of granites[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1 217 ~ 1 238(in Chinese with English abstract).
- Xie Lei, Wang Rucheng, Zhu Jinchu, *et al.* 2013. Felsic dykes in the metallogenic area of southern Hunan Province and their implications for mineralization and exploration[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(12): 4 261 ~ 4 280(in Chinese with English abstract).
- Yin Guanghou, Xu Dong, Yu Haijun, *et al.* 2010. The mineralization with W, Mo, Cu, Pb, Zn of Yanshanian porphyry in the Gezha Indosinian volcanic-magmatic Gudong porphyry metallogenic belt[J]. *Mineral Deposits*, 29(S1): 323 ~ 324(in Chinese with English abstract).
- Zhang Lijun. 2015. Tentative Discuss on Petrogeochemical Characteristics and Tectonic Environment of Baojinshan Mine, Central Hunan [D]. Changsha: Central South University(in Chinese with English abstract).
- Zhang Shu, Zhang Zhaochong, Ai Yu, *et al.* 2009. The petrology, mineralogy and geochemistry study of the Huangshan granite intrusion in Anhui Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(1): 25 ~ 38(in Chinese with English abstract).
- Zhao Junhong, Peng Jiantang, Hu Ruizhong, *et al.* 2005. Chronology, petrology, geochemistry and tectonic environment of Banxi quartz por-

phyry dikes, Hunan Province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 26(6): 525 ~ 534(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 鲍振襄, 万榕江, 鲍珏敏. 2002. 湖南前寒武系地层中长英质脉岩与金成矿关系[J]. 黄金地质, 8(1): 33 ~ 39.
- 黎 彤. 1994. 中国陆壳及其沉积层和上陆壳的化学元素丰度[J]. 地球化学, 23(2): 140 ~ 145.
- 刘继顺. 1996. 湘中地区长英质脉岩与铋(金)成矿关系[J]. 有色金属矿产与勘查, 5(6): 321 ~ 325.
- 刘 凯, 毛建仁, 赵希林, 等. 2014. 湖南紫云山岩体的地质地球化学特征及其成因意义[J]. 地质学报, 88(2): 208 ~ 227.
- 刘朕语. 2018. 西准噶尔巴音布拉克花岗斑岩地质地球化学特征及其指示意义[D]. 南昌: 东华理工大学.
- 鲁玉龙, 彭建堂, 阳杰华, 等. 2017a. 湘中包金山矿区花岗闪长斑岩的锆石 U-Pb 年龄、Hf-O 同位素组成及其地质意义[J]. 中国有色金属学报, 27(7): 1 441 ~ 1 454.
- 鲁玉龙, 彭建堂, 阳杰华, 等. 2017b. 湘中紫云山岩体的成因: 锆石 U-Pb 年代学、元素地球化学及 Hf-O 同位素制约[J]. 岩石学报, 33(6): 1 707 ~ 1 728.
- 沈其韩. 2009. 推荐一个系统的矿物缩写表[J]. 岩石矿物学杂志, 28(5): 495 ~ 500.
- 王永磊, 裴荣富, 李进文, 等. 2007. 个旧老厂矿田花岗岩地球化学特征及其形成构造背景[J]. 地质学报, 81(7): 979 ~ 985.
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等. 2007. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. 岩石学报, 23(6): 1 217 ~ 1 238.
- 谢 磊, 王汝成, 朱金初, 等. 2013. 湘南矿集区长英质脉岩的特征及其成矿、找矿意义[J]. 岩石学报, 29(12): 4 261 ~ 4 280.
- 尹光候, 许 东, 余海军, 等. 2010. 格咱印支期火山-岩浆弧东斑岩成矿带燕山期斑岩钨钼、铜、铅锌成矿作用[J]. 矿床地质, 29(S1): 323 ~ 324.
- 张利军. 2015. 湘中包金山矿区岩石地球化学特征及构造环境探讨[D]. 长沙: 中南大学.
- 张 舒, 张招崇, 艾 羽, 等. 2009. 安徽黄山花岗岩岩石学、矿物学及地球化学研究[J]. 岩石学报, 25(1): 25 ~ 38.
- 赵军红, 彭建堂, 胡瑞忠, 等. 2005. 湖南板溪脉岩的年代学、岩石学、地球化学及其构造环境[J]. 地球学报, 26(6): 525 ~ 534.