

豫西陆院沟金矿床正长斑岩脉 蚀变围岩的元素迁移规律

刘亚剑¹, 雷万杉², 张海东², 夏明哲², 张磊²

1. 紫金矿业洛宁华泰矿业开发有限公司, 河南 洛阳 471700; 2. 长安大学 地球科学与资源学院, 西安 710054

摘要:为探讨陆院沟矿区斑岩在成矿中的作用,依据质量平衡方程和等比线法,对斑岩株蚀变围岩的元素迁移规律进行定量分析。结果表明,紧邻侵入体的强蚀变围岩中主量元素相对迁移率为 $-168.2\% \sim 71.9\%$,矿化元素相对迁移率为 $23.9\% \sim 611.7\%$,远离侵入体的弱蚀变围岩中主量元素相对迁移率为 $-53.1\% \sim 42.5\%$,矿化元素相对迁移率为 $-52.5\% \sim 43.9\%$ 。 SiO_2 迁出率随蚀变增强而升高; K_2O 质量分数随蚀变增强先降后升, MgO 和 CaO 亦如此; Na_2O 随蚀变增强先升高后期迁出殆尽, TiO_2 、 FeO 、 Fe_2O_3 、 MnO 和 P_2O_5 等与之规律相似。正长斑岩侵位早期蚀变流体以富气、少水、高能为特征,蚀变范围广,强度低,以绿泥石化为主;侵位中后期形成富水、赋矿的流体,蚀变范围小、强度大,以钾化、绿泥石化和矿化为主。陆院沟矿区内斑岩株是花山岩基的延伸,是深部能量、流体和矿质释放的通道。

关键词:元素迁移规律;质量平衡计算;正长斑岩株;陆院沟金矿

中图分类号:P595 文章编号:1007-2802(2015)06-1247-07 doi:10.3969/j.issn.1007-2802.2015.06.017

Migration Regularities of Elements in Altered Wallrocks around the Syenite Porphyry Dyke in the Luyuangou Gold Deposit, Western Henan

LIU Ya-jian¹, LEI Wan-shan², ZHANG Hai-dong², XIA Ming-zhe², ZHANG Lei²

1. Department of Mineral Exploration, Henan Huatai Zijin Mining Industry Co., Ltd, Luoyang 471700, China;

2. College of Earth Science and Land Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China

Abstract: In order to discuss the role of syenite porphyry dyke on the gold mineralization in the Luyuangou gold deposit, migration regularities of elements in altered wallrocks around the syenite porphyry dyke have been quantitatively probed by using mass-balance equation and isocon graphic methods proposed by Grant. Results show that relative migration rates of major elements in altered wallrocks near the syenite porphyry dyke vary from -168.2% to 71.9% , whereas those of ore-forming elements in those altered wallrocks vary from 23.9% to 611.7% . However, migration rates of major elements in altered wallrocks far away from the syenite porphyry dyke range from -53.1% to 42.5% , while those of ore-forming elements range from -52.5% to 43.9% . SiO_2 is gradually migrated into the altered wallrocks with the enhancement of alteration. The mass portions of K_2O , MgO and CaO of altered wallrocks are decreased firstly and then increased secondly with the increase of alteration intensity. However, the mass portions of Na_2O , TiO_2 , FeO , Fe_2O_3 , MnO , and P_2O_5 of altered wallrocks are increased firstly and then increased secondly with the increase of alteration intensity. In early stage of syenite porphyry dyke intrusion, the alteration fluid, which is characterized with rich gas, poor water and high energy, caused a broader zone of weak chloritization. In late stage of syenite porphyry dyke intrusion, the alteration fluid, which is enriched in water and ore-forming material, caused a narrow zone of strong chlorite and potassic alteration and mineralization. It is believed that the syenite porphyry dyke in the Luyuangou gold deposit could be a branch of the Huashan granite batholith, and could provide a channel way for releasing energy, fluid and ore-forming materials. The correlation between alteration and mineralization associated with the syenite porphyry dyke in the Luyuangou gold deposit provides a new thinking way for the mineral prospecting in the region.

Key words: migration regularities of elements; mass-balance calculation; syenite porphyry dyke; Luyuangou gold deposit

收稿日期:2015-01-19 收到,2015-02-09 改回

基金项目:中央高校基本科研经费项目(2014G1271067)

第一作者简介:刘亚剑(1978-),男,博士,研究方向:找矿勘探. E-mail: 41739709@qq.com.

构造蚀变岩型金矿是指含矿热液沿运移通道与围岩发生交代作用(流体-岩石反应),与地质流体活动相关的交代作用会活化和迁移水溶性元素和金属,导致流体与围岩的性质发生显著变化,并于有利部位沉淀成矿。通过蚀变矿化过程中组分的得失研究,有助于认识元素的地球化学性状及热液作用的性质与强度。东秦岭蚀变岩型矿床最典型的代表是上宫金矿,陆院沟蚀变岩型金矿床矿化蚀变特征与其相似。关于上宫金矿成矿物质和成矿流体的来源,不同的研究者争议较大,主要有2种认识:①矿区南侧的官道口群-栾川群地层在A型俯冲过程中发生的变质脱水脱气作用,提供了主要的成矿流体和成矿物质(陈衍景等,2004a,2004b; Chen *et al.*,2008);②燕山期花岗岩浆提供了主要的成矿物质,岩浆热液是成矿流体的主要来源(范宏瑞等,1993,1994;程广国,1994;谢奕汉等,1998;李永峰等,2005;王长明等,2006;王卫星等,2010)。因此查明侵入岩体对围岩的交代特征对明确岩体在蚀变成矿中的作用具有重要的理论价值。

陆院沟金矿区毗邻花山花岗岩基,矿区被多条南西-北东向斑岩株穿过,是研究岩浆活动在破碎蚀变岩型金矿中成矿意义的有利场所。本文以正长斑岩株外围蚀变剖面为研究对象,采用 Gresens (1967) 方程、Grant (1986) 等比线分析法与传统地质学相结合的方法,分析不同部位元素质量迁移规律,为蚀变岩型矿床成矿机理研究提供证据。

1 区域地质概况

陆院沟矿床位于豫西熊耳山金银成矿带中部洛宁县赵村乡境内,大地构造位置处于华北地台南缘、华熊台缘凹陷、崤山—鲁山拱褶断束的中部。矿区出露地层为中元古界熊耳群玄武安山岩和安山质凝灰岩系和太古界太华群角闪片麻岩系。研

究区断裂主要有北东向、北北东向、北北西向和近东西向4组,4组构造夹持于洛宁山前断裂与马超营断裂之间,组成了本区基本的构造格架。区内褶皱构造不发育,太华群地层总体倾向南,具舒缓波状变化,呈简单的背-向形构造。熊耳群地层同样总体倾向南,倾角 $15^{\circ}\sim 40^{\circ}$,呈简单的单斜形式。

研究区矿脉主要发育于层间滑脱破碎蚀变带。根据矿石结构构造、矿物共生组合以及矿脉之间的相互穿插关系,可将陆院沟矿床的形成分为2个成矿期4个矿化阶段,第1期成矿与熊耳山岩浆穹窿首次抬升形成的层间韧性滑脱有关,分别是石英-黄铁矿化阶段和石英-多金属硫化物阶段;第2期成矿与熊耳地体的再次抬升引发的构造岩浆活动有关,可分为石英-铅银矿化阶段和碳酸盐化-萤石化-自然银金阶段。区内岩浆活动频繁,矿区北侧2 km处为花山花岗岩基,矿区内见正长斑岩株与矿脉的交切关系(图1a),但斑岩外围发生强烈黄铁-绿泥石化,与主矿体矿化特征具有一定的相似性,因此正长斑岩株对成矿流体和物质的影响机制研究具有重要理论和实践意义。

2 正长斑岩蚀变围岩剖面质量平衡计算

2.1 样品采集与分析

陆院沟蚀变型金矿矿区内正长斑岩株对围岩产生强烈的流体改造作用。蚀变岩样品采用垂直正长斑岩与围岩接触界面方向向围岩采样,采样点距接触界面分别为0.5 m、2 m和5 m,自正长斑岩株向外围依次为黄铁-绿泥石化玄武安山岩(强蚀变岩 LYG06SB)、绿泥石化玄武安山岩(弱蚀变岩 LYG05SB)和未蚀变玄武安山岩(原岩 LYG01AS)。采样位置和样品代号见图1。

样品手工破碎至长宽高1 cm左右,再用玛瑙研

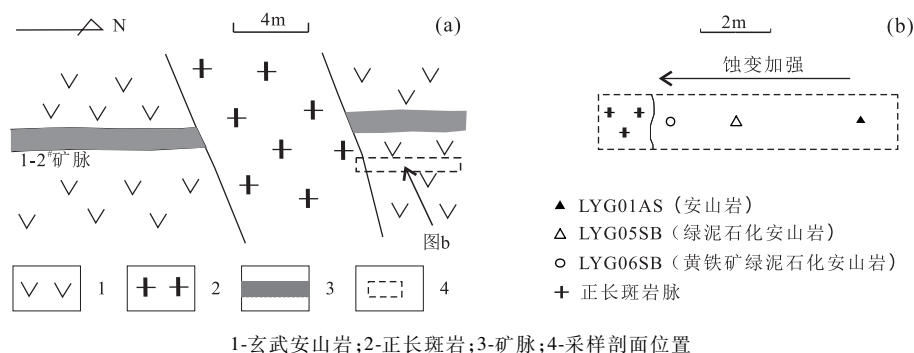


图1 (a)正长斑岩株与矿体关系图,(b)采样分布图

Fig.1 (a) A sketch showing spatial relationship between syenite porphyry dyke and ore body;
(b) A sketch showing locations of sampling

钵磨至 200 目。主量元素测试分析在国土资源部东北矿产资源监督检测中心利用 X 射线荧光光谱仪完成,检测标准为 GB/T 14506. 28-2010。部分矿化元素利用 ICP 质谱仪等完成,检测标准为 DZ/T0223-2001 等。分析数据见表 1 所列。

表 1 陆院沟金矿正长斑岩株蚀变围岩化学成分
Table 1 Chemical components of altered wall-rocks around the syenite porphyry dyke in the Luyuangou gold deposit

岩石类型	玄武安山岩 (原岩)	绿泥石化玄武安山岩 (弱蚀变岩)	黄铁-绿泥石化玄武安山岩 (强蚀变岩)
样品编号	LYG01AS	LYG05SB	LYG06SB
SiO ₂	54.5	51.73	37.32
TiO ₂	1.32	1.68	0.64
Al ₂ O ₃	15.48	16.89	18.28
T Fe ₂ O ₃	11.05	12.64	12.26
FeO	6.13	9.52	7.5
MnO	0.17	0.25	0.28
MgO	4.65	4.11	7.29
CaO	6.8	3.48	7.19
Na ₂ O	2.74	3.92	0.14
K ₂ O	1.97	1.15	6.02
P ₂ O ₅	0.37	0.45	0.18
LOI	0.79	3.5	10.15
Ba	1200	631	1500
Cr	71.5	46	137
V	124	164	154
Pb	28.1	13	200
Cu	11.9	11.8	70.9
Zn	134	194	418

注:氧化物单位为×10⁻²,其他元素为×10⁻⁶。分析者:国土资源部东北矿产资源监督检测中心(2012)。

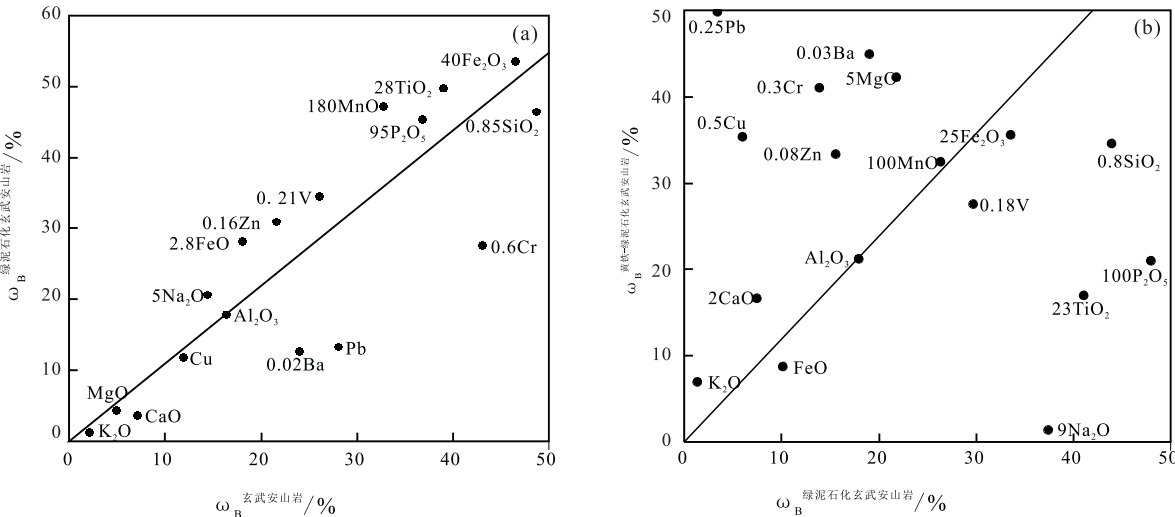
2.2 元素质量迁移计算

研究物质迁移一般有 4 种限制条件:①地质作用前后质量守恒;②地质作用前后体积守恒;③地质作用中某些组分守恒;④地质作用中某些元素对比值恒定。其中利用不活动组分进行质量平衡计算是目前最常用的,郭顺(2013)在结合 Grant(1986)工作基础上提出选择不活动组分的 4 点原则:①对地质过程的正确认识,例如热液蚀变、风化作用、混合岩化等;②对地质过程中组分活动性的正确认识;③所选择组分在研究的地质过程中含量不太低,并且可被准确测定;④基于该组分计算的物质迁移规律不能违背地质事实。从表 1 中可见 3 个样品的烧失量(LOI)分别为 0.79、3.5 和 10.15,未蚀变原岩(LYG01AS)烧失量为 0.79 说明我们采用的原岩较为新鲜,与两个蚀变岩(LYG05SB 和 LYG06SB)递增的烧失量说明斑岩株对围岩的蚀变作用在增强。Grant(2005)认为热液蚀变过程中 Al₂O₃ 可以作为守恒元素,本文在此基础上通过 Grant(1986)提出的改进的等比线分析法,计算获得了正长斑岩围岩由玄武安山岩→绿泥石化玄武安山岩→黄铁-绿泥石化玄武安山岩的成分变异图(图 2a、2b)和质量平衡方程式如下:

100g 玄武安山岩-7.38gSiO₂+0.23gTiO₂
+0.05gFe₂O₃+2.71gFeO+0.06gMnO
-0.92gMgO-3.76gCaO+0.89gNa₂O
-0.95gK₂O+0.05gP₂O₅
=93.49g 绿泥石化玄武安山岩

100g 绿泥石化玄武安山岩-17.61gSiO₂
-1.12gTiO₂-0.13gFe₂O₃-2.64gFeO

(1)



(a) 玄武安山岩→绿泥石化玄武安山岩;(b) 绿泥石化玄武安山岩→黄铁-绿泥石化玄武安山岩,
ω_B 分别代表蚀变前后岩石组分的质量分数

图 2 陆院沟金矿根据 Al₂O₃ 质量分数确定的等比线图

Fig.2 Grant's isoco diagram based on the mass fraction of Al₂O₃ in the Luyuangou gold deposit

$$\begin{aligned}
 &+0.01\text{gMnO}+2.68\text{gMgO}+3.24\text{gCaO} \\
 &-3.87\text{gNa}_2\text{O}+4.50\text{gK}_2\text{O}-0.29\text{gP}_2\text{O}_5 \\
 &=90.77\text{g 黄铁-绿泥石化玄武安山岩} \quad (2)
 \end{aligned}$$

质量平衡公式(1)和等比线图2(a)反映了玄武安山岩在绿泥石化蚀变过程中, TiO_2 , Fe_2O_3 , FeO , MnO , Na_2O , P_2O_5 为迁入组分, 而 SiO_2 , MgO , CaO , K_2O 为迁出组分, 矿化元素 V、Zn 为迁入组分, Pb、Ba 为迁出组分。公式(2)和等比线图2b显示由绿泥石化玄武安山岩进一步蚀变为黄铁-绿泥石化玄武安山岩过程中, MnO , MgO , CaO , K_2O 为迁入组分, SiO_2 , TiO_2 , Fe_2O_3 , FeO , Na_2O , P_2O_5 为迁出组分, 矿化元素除 V 迁出外都为迁入元素。

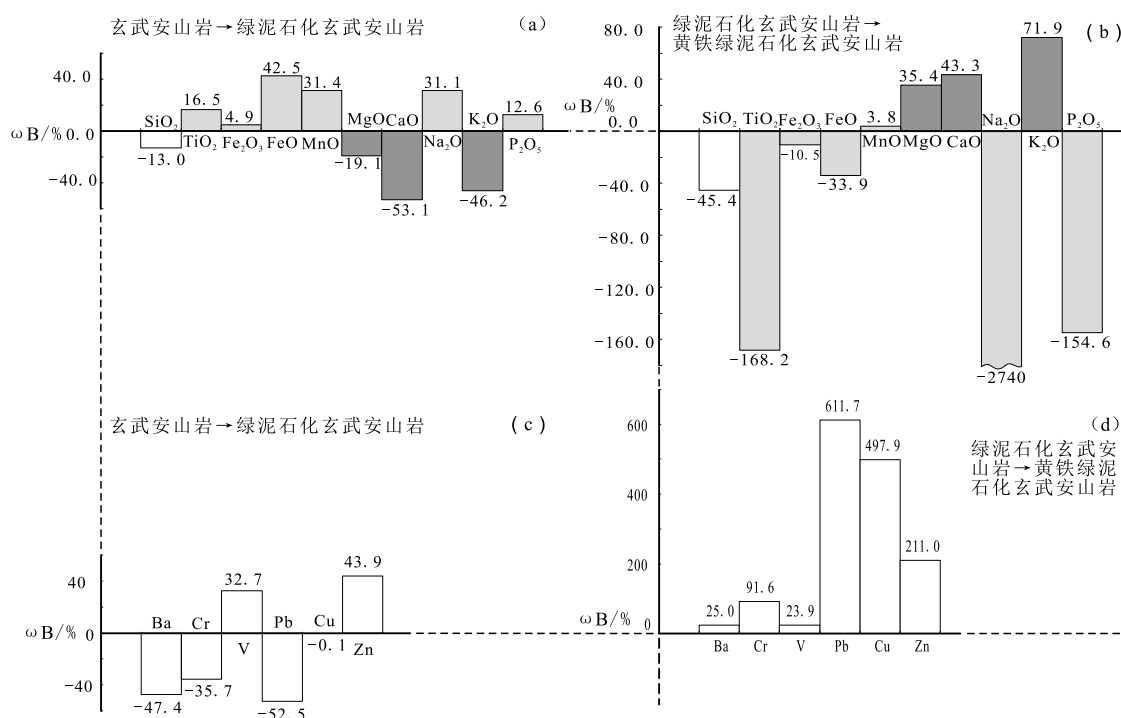
根据各蚀变阶段组分迁入迁出量占原岩中该组分的质量分数大小(图3), 可以确定岩石成分由强到弱的变化序列: ①玄武安山岩绿泥石化过程中主量元素: $\text{CaO} > \text{K}_2\text{O} > \text{FeO} > \text{MnO} > \text{Na}_2\text{O} > \text{MgO} > \text{TiO}_2 > \text{SiO}_2 > \text{P}_2\text{O}_5 > \text{Fe}_2\text{O}_3$, 相对迁移率在 $-53.1\% \sim 42.5\%$ 之间, 标准差为 31.1% ; 矿化元素变化序列为: $\text{Pb} > \text{Ba} > \text{Zn} > \text{Cr} > \text{V} > \text{Cu}$, 相对迁移率在 $-52.5\% \sim 43.9\%$ 之间, 标准差为 41.7% ; ②玄武安山岩黄铁-绿泥石化过程中各组分由强至弱的变化序列为: $\text{Na}_2\text{O} > \text{TiO}_2 > \text{P}_2\text{O}_5 > \text{K}_2\text{O} > \text{SiO}_2 > \text{CaO} > \text{MgO} > \text{FeO} > \text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{MnO}$, 相对迁移率除 Na_2O 为 -27.40% , 其他元素在 $-168.2\% \sim 71.9\%$ 之间, 标准差为 79.7% ; 矿化元素变化序列为: $\text{Pb} > \text{Cu} > \text{Zn} > \text{Cr} > \text{Ba} > \text{V}$, 均为元素迁入, 相对迁移率在 $23.9\% \sim 611.7\%$ 之间, 标准差为 253.1% , 其中 Cu、Pb、Zn 相对迁移率分加紧为 497.9% 、 211% 和 611.7% 。

3 元素迁移规律与蚀变过程

3.1 元素迁移规律

SiO_2 明显属于蚀变过程中从围岩中迁出的组分, 并且离斑岩越近, 其带出量越大, 说明斑岩株作为流体与热量的来源, 在对围岩进行交代改造作用中迁移出大量的硅质, 这也与石英是蚀变岩型和石英脉型矿床主要赋矿矿物的事实相符。

K_2O 和 Na_2O 具有相反的变化规律。 K_2O 质量分数由未蚀变的 1.97% 至弱蚀变的 1.15% , 形成强蚀变的 6.02% , 指示早期贫 K、后期富 K 的流体特征, 与 K_2O 具有相似变化规律的有 MgO 和 CaO 。 Na_2O 质量分数由未蚀变的 2.74% 变为弱蚀变的 3.92% , 至强蚀变的 0.14% , 其相对迁移率达 -2740% , 说明 Na 在蚀变早期为迁入组分, 在强烈流体作用下迁出殆尽, 可能指示早期富 Na、后期贫 Na 的流体特征, 与 Na_2O 具有相似变化规律的有 TiO_2 、 FeO 、 Fe_2O_3 、 MnO 和 P_2O_5 。



(a)和(b)为主量元素的迁移柱状图;(c)和(d)为矿化元素的迁移柱状图, $\omega_B/\%$ 为组分相对迁移率

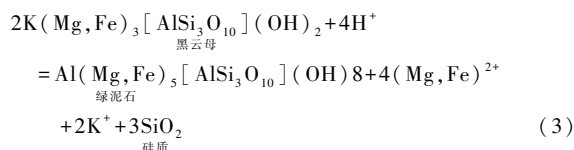
图3 陆院沟金矿正长斑岩株蚀变围岩相对于原岩含量的组分迁移柱状图

Fig.3 Histograms of migrated components in altered wallrocks around the syenite porphyry dyke in the Luyuangou gold deposit in comparison with the original wallrocks

弱蚀变作用中 Zn 和 V 显示为迁入的特征,而 Ba、Cr、Pb 和 Cu 显示为迁出的特征,迁出强度不超过 $\pm 60\%$, 强蚀变作用后,各矿化元素显示为整体迁入,迁入较强的 Pb、Cu 和 Zn 在 211%~612% 之间,证实了外来成矿物质的加入,也显示后期含矿流体对蚀变流体和蚀变围岩具有整体的改造作用。

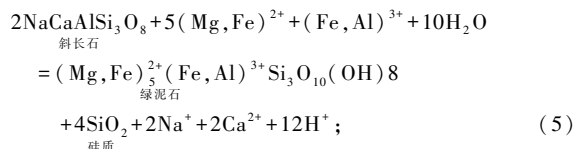
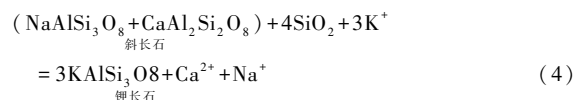
3.2 蚀变过程与元素富集机制

岩浆就位过程中,伴随温度下降热液演化有如下规律:岩浆熔体 $\rightarrow$ 高盐度的熔体 $\rightarrow$ 高盐度的热液 $\rightarrow$ 低盐度的热液的完整过程(张德会等,2001;冷成彪等,2009;单强等,2011)。岩浆熔体和高盐度熔体作为岩浆热液的早阶段产物,伴随着强烈的熔体、气体和液体的不混溶作用(卢焕章,1990,1996;Roedder,1992;Audétat and Pettke,2003;Chang and Meinert,2004;Kamenetsky *et al.*,2004;Audétat *et al.*,2008),使得蕴含较高能量的气相物质对围岩产生较强的物理作用和气化蚀变,由于没有流体的参与,成矿物质的加入也有限,此阶段影响范围较大,但蚀变和元素迁移相对较弱,此阶段典型产物为绿泥石化玄武安山岩,化学反应如下:



该阶段高温气化蚀变作用仅对少量富水矿物如黑云母和角闪石影响较大,造成 Si 初步迁出的同时,K、Mg 和 Fe 等元素转换为离子态也随之迁移降低,元素变化特征如图 3a、3c 所示。

随着岩浆进一步分异冷凝,形成富 K^+ 、高盐度、富含矿质的流体,此阶段由于流体具有高盐度的特征,对蚀变发生具有一定的催化效果,在发生上面蚀变作用基础上,普遍发生斜长石的钾化(公式 4)和绿泥石化(公式 5):



该阶段流体充足、矿化元素丰富,由于缺少气化阶段的高能量和气体扩散能力,因此作用范围小于前一阶段。而富 K 和富矿化元素的流体特征,使得蚀变后的围岩具有富 K 和富 Pb、Zn、Cu 等矿化元素的特征,元素变化特征如图 3b、3d 所示。

4 陆院沟金矿斑岩成矿意义

华北南缘及邻区发育了大规模晚中生代伸展构造(Ratschbacher *et al.*,2000)。沿秦岭—大别山脉由北西向南东依次为小秦岭变质核杂岩、熊耳山岩浆穹隆、桐柏山变质核杂岩和北大别变质核杂岩(Zhang *et al.*,1997;Wang *et al.*,1998;王志光和张录星,1999;许光和王二七,2010;冀文斌等,2011;Wang *et al.*,2011;Cui *et al.*,2012)。刘树文等(1998)通过绿帘石 p - t 轨迹记录认为豫西变质核杂岩的形成经历了 2 个大的阶段,首先是由的早期伸展隆升作用使其隆升到中地壳,其后在中地壳滞留一段时间后经又一次的隆升而被抬升到地表。变质核杂岩周边发育未变质-浅变质的沉积岩或高压、超高压榴辉岩(冀文斌等,2011;Wang *et al.*,2011;Cui *et al.*,2012),二者之间通常发育有超过几十米厚的糜棱岩带,而这些糜棱岩带通常以低角度的产状分布于穹隆的周缘,构成了变质核杂岩的拆离断层(Zhang *et al.*,1997;Wang *et al.*,2011;冀文斌等,2011)。林伟等(2013)认为华北东部的伸展穹隆与相关的拆离断层的伸展峰期较为接近,处于 130~126 Ma 之间,前者在研究区以花山花岗岩基和斑岩体为表现形式,后者在研究区作为主赋矿构造存在(赵锡岩等,2002;郭保健等,2005;吴发富等,2012)。而矿区内矿脉被斑岩株穿切正是拆离断层与岩浆穹隆多期活动的有利证据。罗照华(2007)在前人研究基础上提出透岩浆成矿理论,认为岩浆系统和成矿流体系统是两个独立的地质系统,它们具有类似的起源,金属堆积有赖于深部含矿流体的快速上升,岩浆体是含矿流体上升的有利通道,流体是岩浆快速上升侵位的驱动力之一,这一认识为斑岩株在矿床中的作用提供了新的可能,即深源流体活动促使斑岩岩株快速上升,上升的斑岩岩株一方面携带大量热能和流体为成矿提供动力保障,另一方面沿斑岩岩株内部和侵入接触界面上升的流体系统自身携带和交代围岩获得成矿元素为矿床形成提供物质保障。汤中立和李小虎(2006)也提出中酸性小岩体头部是岩浆“气(挥发份)”、“液(流体)”和“矿质”聚集的最有利场所,也是成矿的中心部位。花山花岗岩基作为伸展穹隆的核心是沟通深源流体的主体,陆院沟正长斑岩岩株是花山岩基的延伸,是深部能量、流体和矿质释放的通道。

熊耳山岩浆穹隆是晚中生代区域性伸展构造发育的结果,构造伸展引发的地幔隆升造成下地壳抬升和减压熔融,下地壳抬升引起基底和盖层间拆

离断层的发育,而减压熔融和热流值上升则诱发了岩浆熔体和成矿流体的发育。豫西已发现矿床全部位于花山岩体外围 1~9 km 范围的环带之中,说明花山岩基具有明确的区域控矿作用。虽然未见明确的岩浆控矿现象,但是岩浆作用结合拆离构造控矿是毋庸置疑的。陆院沟金矿的成矿过程可能是早期岩浆系统提供热液和矿质在中深部与广泛发育的拆离断层系统相汇合,由于拆离断层系统相对开放,使得成矿流体系统上升至中上地壳时压力骤降并沸腾沉淀,该期岩浆流体系统的结束封闭了表层构造系统,该期矿化产物即赋存于拆离断层中的矿体。后期岩浆流体系统在积聚一定能量和物质后在构造薄弱位置侵位上升并切穿早期矿脉,形成携带流体和矿质的正长斑岩岩株。陆院沟金矿床斑岩体迁移矿质与拆离断层成矿的相互作用机制需要深部勘探资料的进一步证实,但斑岩矿化系统的发现为区域找矿勘探提供了新的机遇和方向。

5 结论

(1) 陆院沟金矿床由斑岩株向围岩一侧,矿化蚀变作用递减,黄铁-绿泥石化过程中主量元素相对迁移率为-168.2%~71.9%,矿化元素相对迁移率为23.9%~611.7%。绿泥石化过程中主量元素相对迁移率为-53.1%~42.5%,矿化元素相对迁移率为-52.5%~43.9%。

(2) SiO_2 迁出率随蚀变增强而增大; K_2O 质量分数随蚀变增强先降后升, MgO 和 CaO 与之规律相似; Na_2O 随蚀变增强先升后期迁出殆尽, TiO_2 、 FeO 、 Fe_2O_3 、 MnO 和 P_2O_5 等与之规律相似。

(3) 岩株侵位早期以富气、少水、高能为特征,蚀变范围广,强度低,以绿泥石化为主;侵位中后期形成富水、赋矿的流体,蚀变范围小,强度大,以钾化、绿泥石化和矿化为主。

(4) 陆院沟矿区内斑岩株是花山岩基的延伸,是深部能量、流体和矿质释放的通道,斑岩体运矿与拆离断层成矿的作用机制需要深部勘探资料的进一步证实,但斑岩蚀变矿化系统的发现为区域找矿勘探提供了新方向。

参考文献 (References):

Audétat A, Pettke T. 2003. The magmatic-hydrothermal evolution of two barren granites: A melt and fluid inclusion study of the Rito del Medio and Cañada Pinabete plutons in northern New Mexico (USA). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(1): 97-121

Audétat A, Pettke T, Heinrich C A, Bodnar R J. 2008. The composition

of magmatic-hydrothermal fluids in barren and mineralized intrusions. *Economic Geology*, 103(5): 877-908

Chang Z S, Meinert L D. 2004. The magmatic-hydrothermal transition: Evidence from quartz phenocryst textures and endoskarn abundance in Cu-Zn skarns at the Empire Mine, Idaho, USA. *Chemical Geology*, 210(1-4): 149-171

Chen Y J, Pirajno F, Qi J P. 2008. The Shanggong gold deposit, Eastern Qinling Orogen, China: Isotope geochemistry and implications for ore genesis. *Journal of Asian Earth Sciences*, 33(3-4): 252-266

Cui J J, Liu X C, Dong S W, Hu J M. 2012. U-Pb and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of the Tongbai complex, central China: Implications for Cretaceous exhumation and lateral extrusion of the Tongbai-Dabie HP/UHP terrane. *Journal of Asian Earth Sciences*, 47: 155-170

Grant J A. 1986. The isocon diagram: a simple solution to Gresens' equation for metasomatic alteration. *Economic Geology*, 81(8): 1976-1982

Grant J A. 2005. Isocon analysis: A brief review of the method and applications. *Physics and Chemistry of the Earth*, 30(17-18): 997-1004

Gresens R L. 1967. Composition-volume relationships of metasomatism. *Chemical Geology*, 2: 47-65

Kamenetsky V S, Naumov V B, Davidson P, van Acherbergh E, Ryan C G. 2004. Immiscibility between silicate magmas and aqueous fluids: A melt inclusion pursuit into the magmatic-hydrothermal transition in the Omsukchan Granite (NE Russia). *Chemical Geology*, 210(1-4): 73-90

Ratschbacher L, Hacker B R, Webb L E, McWilliams M, Ireland T, Dong S W, Calvert A, Chateigner D, Wenk H R. 2000. Exhumation of the ultrahigh-pressure continental crust in east central China: Cretaceous and Cenozoic unroofing and the Tan-Lu fault. *Journal of Geophysical Research*, 105(B6): 13303-13338

Roedder E. 1992. Fluid inclusion evidence for immiscibility in magmatic differentiation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56(1): 5-20

Wang X D, Neubauer F, Genser J, Yang W R. 1998. The Dabie UHP unit, Central China: A Cretaceous extensional allochthon superposed on a Triassic orogen. *Terra Nova*, 10(5): 260-267

Wang Y S, Xiang B W, Zhu G, Jiang D Z. 2011. Structural and geochronological evidence for Early Cretaceous orogen-parallel extension of the ductile lithosphere in the northern Dabie orogenic belt, East China. *Journal of Structural Geology*, 33(3): 362-380

Zhang J J, Zheng Y D, Shi Q, Yu X, Zhang Q. 1997. The Xiaolinling detachment fault and metamorphic core complex of China: Structure, kinematics, strain and evolution. *Proceedings of the 30th International Geological Congress*, 14: 168-172

陈衍景, 李晶, Pirajno F, 林治家, 王海华. 2004a. 东秦岭上官金矿流体成矿作用: 矿床地质和包裹体研究. *矿物岩石*, 24(3): 1-12

陈衍景, 林治家, Pirajno F, 李晶, 王海华. 2004b. 东秦岭上官金矿流体成矿作用: 稳定同位素地球化学研究. *矿物岩石*, 24(3): 13-21

程广国. 1994. 河南熊耳山地区中生代花岗岩成因及构造环境与成矿关系. *有色金属矿产与勘查*, 3(1): 15-27

范宏瑞, 谢奕汉, 王英兰. 1993. 豫西花山花岗岩岩浆热液性质及

- 与金成矿的关系. 岩石学报, 9(2): 136-145
- 范宏瑞, 谢奕汉, 赵瑞, 王英兰. 1994. 豫西熊耳山地区岩石和金矿床稳定同位素地球化学研究. 地质找矿论丛, 9(1): 54-64
- 郭保健, 李永锋, 王志光, 叶会寿. 2005. 熊耳山 Au-Ag-Pb-Mo 矿集区成矿模式与找矿方向. 地质与勘探, 41(5): 43-47
- 郭顺, 叶凯, 陈意, 刘景波, 张灵敏. 2013. 开放地质体系中物质迁移质量平衡计算方法介绍. 岩石学报, 29(5): 1486-1498
- 冀文斌, 林伟, 石永红, 王清晨, 褚杨. 2011. 大别山早白垩世变质核杂岩的结构与演化. 地质科学, 46(1): 161-180
- 冷成彪, 张兴春, 王守旭, 秦朝建, 吴孔文, 任涛. 2009. 岩浆-热液体系成矿流体演化及其金属元素气相迁移研究进展. 地质论评, 55(1): 731-743
- 李永峰, 毛景文, 胡华斌, 郭保健, 白凤军. 2005. 东秦岭钼矿类型、特征、成矿时代及其地球动力学背景. 矿床地质, 24(3): 292-304
- 林伟, 王军, 刘飞, 冀文斌, 王清晨. 2013. 华北克拉通及邻区晚中生代伸展构造及其动力学背景的讨论. 岩石学报, 29(5): 1791-1810
- 刘树文, 张进江, 郑亚东. 1998. 小秦岭变质核杂岩同变形期的 *P-T* 路径. 科学通报, 43(3): 312-318
- 卢焕章. 1990. 流体熔融包裹体. 地球化学, 19(3): 225-229
- 卢焕章. 1996. 华南花岗岩的岩浆与岩浆-流体包裹体及其意义. 桂林工学院学报, 16(1): 1-13
- 罗照华, 莫宣学, 卢欣祥, 陈必河, 柯珊, 侯增谦, 江万. 2007. 透岩浆流体成矿作用-理论分析与野外证据. 地学前缘, 14(3): 165-183
- 单强, 廖思平, 卢焕章, 李建康, 杨武斌, 罗勇. 2011. 岩浆到热液演化的包裹体记录-以骑田岭花岗岩体为例. 岩石学报, 27(5): 1511-1520
- 汤中立, 李小虎. 2006. 两类岩浆的小岩体成大矿. 矿床地质, 25(增刊): 35-38
- 王长明, 邓军, 张寿庭. 2006. 河南熊耳山地区花山花岗岩与金矿化的关系. 现代地质, 20(2): 315-321
- 王卫星, 邓军, 龚庆杰, 韩志伟, 吴发富, 张改侠. 2010. 豫西熊耳山五丈山、花山、合峪花岗岩体与金成矿关系. 黄金, 31(4): 12-17
- 王志光, 张录星. 1999. 熊耳山变质核杂岩构造研究及找矿进展. 有色金属矿产与勘查, 8(6): 388-392
- 吴发富, 龚庆杰, 石建喜, 李建全, 王中亮. 2012. 熊耳山矿集区金矿控矿地质要素分析. 地质与勘探, 48(5): 865-875
- 谢奕汉, 范宏瑞, 王英兰. 1998. 小秦岭地区花岗岩体中 CO₂-H₂O 包裹体的找矿意义. 岩石学报, 14(4): 542-548
- 许光, 王二七. 2010. 桐柏杂岩的中生代隆升机制及其与南阳盆地沉降的耦合关系. 地质科学, 45(3): 626-652
- 张德会, 张文淮, 许国建. 2001. 岩浆热液出溶和演化对斑岩成矿系统金属成矿的制约. 地学前缘, 8(3): 193-202
- 赵锡岩, 刘国明, 陈德杰, 翟东兴, 张巧梅. 2002. 青岗坪金矿区拆离断层系统的控矿作用. 地质与勘探, 38(3): 38-41

(本文责任编辑:刘莹)

·亮点速读·

中国城市 PM_{2.5} 时空分布特征

由于近十几年中国工业化扩张、城市化及经济增长速度加快,全国范围内灰霾事件越来越多的受人关注,特别是经济发达并且人口稠密的长江三角洲、珠江三角洲以及京津唐地区。亚洲发展报告提供的资料显示,中国 500 个大城市中只有 1% 的城市空气质量达到世界卫生组织发布的标准。频发的灰霾事件引起人们对健康的关注的同时,也引起中国对治理空气质量的重视。耶鲁-南京信息工程大学大气环境中心研究团队首次报道了中国 190 个城市 PM_{2.5} (直径小于 2.5 微米的颗粒物) 污染物的时空分布特征,同时分析了造成这一现象的影响因素。相关成果发表在 10 月 15 日在线出版的《科学-报告》。章炎麟及其研究团队通过对 2014 年 4 月份到 2015 年 4 月份中国 190 个主要城市中 950 个监测站空气质量监测网络数据的分析,揭示了空气污染物 PM_{2.5} 在国内空间(北方和南方)和时间(不同季节及每天不同时间段)上的变化。研究者发现 PM_{2.5} 的浓度随季节变化发生显著的差异,中国冬季的 PM_{2.5} 浓度最高,夏季最低,并且在这一年中 190 个城市中只有 25 个城市能符合中国 2012 年修订的《环境空气质量标准》。研究表明,中国北

方的 PM_{2.5} 浓度普遍高于中国南方,此外中国西部春季 PM_{2.5} 浓度较高可能是与周围沙漠的沙尘气溶胶有关,而中国东部秋季 PM_{2.5} 高浓度则可能是收获季节开放式的生物质燃烧污染物的影响。另外,研究人员还发现,一些城市每天下午 PM_{2.5} 浓度最低,这个可能与风速有关;夜晚 PM_{2.5} 浓度最高,造成这一现象可能是人为排放强度变化的结果。研究人员在对北京空气质量进行分析时,发现交通限行措施影响着北京一天当中的空气质量,夜间的污染物浓度最高时是下午污染物浓度的 2 倍,研究人员推测这与夜间行驶的重型车辆有关,其尾气排放是轻型车辆的 6 倍。另外,北方冬季采暖的需求同样致使污染物浓度上升。研究指出,中国城市人口的 PM_{2.5} 暴露浓度约为 61 μg/m³, 3 倍于全球平均值;中国城市中仅有 9% 的人口居住在符合当前的中国国家标准的环境条件下,这警示中国正面临空气污染所引起的健康风险,同时城市 PM_{2.5} 分布的时空异质性预示着中国 PM_{2.5} 治理工作将面临巨大挑战。

(袁超 摘编)