

文章编号:1672-6561(2014)04-0032-13

投稿网址:<http://jese.chd.edu.cn/>

湘西合仁坪钠长石-石英脉型金矿床 围岩蚀变及质量平衡

张 婷^{1,2}, 彭建堂^{1,2,3}

(1. 中南大学 有色金属成矿预测教育部重点实验室, 湖南 长沙 410083; 2. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 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:湘西柳林汉一带钠长石-石英脉型金矿十分发育。为了揭示该区金矿的成矿物质来源、成矿过程及成矿流体信息, 对该区最典型的合仁坪钠长石-石英脉型金矿床围岩蚀变特征进行研究, 并利用标准化 Isocon 图解法, 对围岩蚀变过程中物质带入、带出进行质量平衡计算。结果表明: 合仁坪金矿床的围岩蚀变主要包括绢云母化(褪色化)、黄铁矿化和绿泥石化, 其中褪色化分布最为广泛, 是该区金矿床最重要的蚀变类型; 在合仁坪金矿床形成过程中, 围岩中的 Al_2O_3 为惰性组分, Na_2O 、Sr、V、Cr、W、Nb、Th 及部分挥发分(S、 CO_2 和 H_2O) 等组分被带入围岩中, 而 SiO_2 、 Fe_2O_3 、 K_2O 、CaO、MgO、Cu、As、Pb、Zn、Ni、Co、Sb、Li、Rb、Ba 等组分从围岩中迁出; 轻稀土元素的迁出程度远远大于重稀土元素, 围岩蚀变过程中轻、重稀土元素发生强烈的分异; 矿脉中钠长石的钠质并非来自赋矿围岩, 而是由成矿流体从外界带入的; 矿脉石英中硅质则部分来自赋矿围岩。

关键词:金矿床; 围岩蚀变; 质量平衡; 标准化 Isocon 图解法; 元素迁移; 湖南

中图分类号:P618.51 **文献标志码:**A

Wall-rock Alteration and Mass Balance of Herenping Albite-quartz Vein-type Gold Deposit in the Western Hunan

ZHANG Ting^{1,2}, PENG Jian-tang^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Non-ferrous Metals Metallogenic Prediction of Ministry of Education, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China; 2. School of Geosciences and Info-physics, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China; 3. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, Guizhou, China)

Abstract: Albite-quartz vein-type gold deposit in Liulincha area of the western Hunan is widespread and poorly constrained. Herenping gold deposit is most typical in the area. In order to reveal the source of ore-forming material, ore-forming process and fluid of the gold deposit, the altered wall-rocks of Herenping gold deposit were studied; mass transfer between the host rock and the ore-forming fluid in the process of wall-rock alteration was calculated by the normalized Isocon diagram method. The results show that wall-rock alteration of Herenping gold deposit mainly includes sericitization (decolorization), pyritization and chloritization, and decolorization is widespread and important for the gold deposit; Al_2O_3 in the wall-rock is inert component in the forming process of Herenping gold deposit, and the components including Na_2O , Sr, V, Cr, W, Nb, Th and part volatiles (S, CO_2 and H_2O), etc., are transferred into wall-rock, but the

收稿日期:2014-05-14

基金项目:国家自然科学基金项目(40673021,41073036)

作者简介:张 婷(1989-),女,湖南浏阳人,理学硕士研究生,E-mail:381560742@qq.com。

通讯作者:彭建堂(1968-),男,湖南邵阳人,中南大学教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:jtpeng@126.com。

components including SiO_2 , Fe_2O_3 , K_2O , CaO , MgO , Cu , As , Pb , Zn , Ni , Co , Sb , Li , Rb , Ba , etc., are transferred out; the emigration of light rare earth element is far more than that of high rare earth element, and the differentiation between light and high rare earth elements is strong during wall-rock alteration; Na of albite in ore vein is not derived from ore-host wall-rock, and is mainly transferred into wall-rock by ore-forming fluid; Si of quartz in ore vein is partly derived from ore-host wall-rock.

Key words: gold deposit; wall-rock alteration; mass balance; normalized Isocon diagram method; element transfer; Hunan

0 引言

围岩蚀变是热液成矿作用的重要组成部分,也是热液矿床的主要特征之一。对热液矿床围岩蚀变的研究能揭示成矿时的物理化学条件,热液的性质和演化,成矿元素的迁移、富集和矿石沉淀的相关信息^[1-4],因此,围岩蚀变一直是矿床学研究的重要内容。

湘西一带脉型金矿床分布广泛,且层控特征非常明显。该区80%以上的金矿赋存于新元古界板溪群马底驿组紫红色板岩中^[5]。这些脉型金矿床主要为石英脉型,但在柳林汉一带,金矿床矿脉中肉红色钠长石体积分数通常可超过30%。目前,柳林汉一带金矿床的研究程度较低,其成矿物质来源、成矿流体性质及成矿过程均不清楚。笔者拟以该区合仁坪钠长石-石英脉型金矿床为研究对象,试图对蚀变带进行质量平衡计算,揭示这类金矿在成矿过程中近围岩所遭受的物理化学变化,以便为示踪该矿的成矿物质来源以及成矿过程提供依据。

1 区域地质概况

湖南雪峰山一带金矿广泛分布,是华南最重要的金成矿区带之一。湖南省80%金矿床(点)分布于该区,是该省最重要的黄金产地^[6-7]。特别是在湘西沅陵、桃源、安化一带,金矿分布最为集中;目前,该区已经发现金矿床(点)超过100处,大致可分为柳林汉金矿带、渣滓溪金锑钨矿带、西安金锑钨矿带、沃溪金锑钨矿带和西冲金锑钨矿带^[8]。

柳林汉金矿带位于湘西成矿区的北部,在大地构造位置上处于江南古陆武陵隆起与雪峰隆起带之间的次级隆起区内。目前,该区已发现超过10处金矿床,这些金矿主要分布于万善桥—柳林汉一带,柳林汉金矿带呈 $\text{NE}60^\circ\sim 70^\circ$ 展布,长65 km,宽2~6 km(图1)。该区金矿床均为脉型金矿床,且所有矿床(点)都产于新元古界板溪群马底驿组紫红色砂质绢云母板岩中,受 NEE 向断裂的控制^[8]。该区金

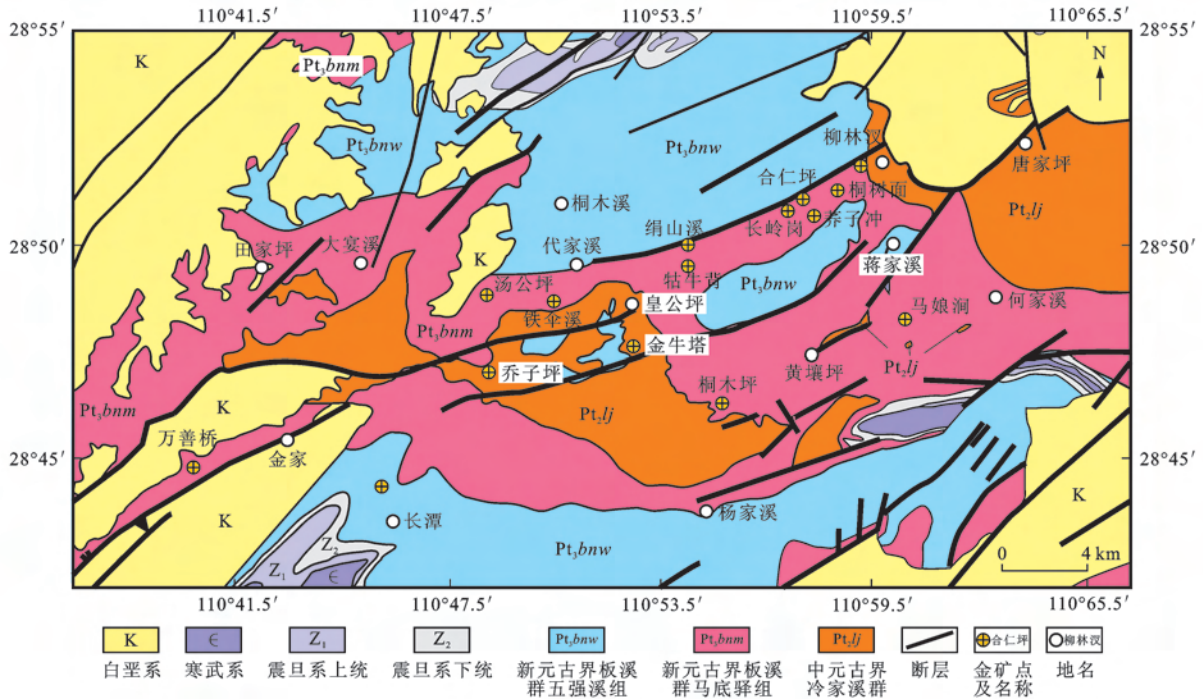
矿脉中普遍含有肉红色的钠长石,由于颜色与常见钠长石明显有区别,所以曾被误认为是钾长石。合仁坪金矿床是该区规模最大的金矿床,采矿历史悠久,清末民初是其开采的鼎盛时期,该矿床也是湖南境内4处主要的产金矿山之一。

2 矿床地质特征

合仁坪金矿分布于柳林汉金矿带的东北段,主要包括合仁坪、莽子冲、长岭岗和桐树面等矿段(图1)。除第四系覆盖层外,矿区出露的地层为新元古界板溪群马底驿组(Pt_3bnm)和五强溪组(Pt_3bnw),五强溪组分布于矿区两侧,马底驿组分布在矿区中部,构成长岭岗背斜(图2);在背斜核部,亦有少量五强溪组地层分布。矿区及其外围未见岩浆岩出露。

合仁坪金矿区所有的金矿脉均产于长岭岗背斜的次级褶皱两翼或轴部新元古界板溪群马底驿组紫红色条带状绢状绢云母板岩中,构造控矿非常明显。矿体一般呈层状、似层状产出,与赋矿地层产状基本一致(图3),局部可见切层现象[图3(b)],网脉状矿体亦可见,矿脉分支复合,尖灭再现特征明显。矿区目前已发现超过20条含金矿脉,这些矿脉走向呈 NEE 向,倾向 NNW 或 SSE ,倾角 $25^\circ\sim 72^\circ$ 。单脉走向长10~200 m,沿倾斜延深126~135 m,厚0.3~1.2 m。矿脉主要由肉红色的钠长石和石英构成,钠长石的体积分数一般为30%~40%,局部可超过80%。

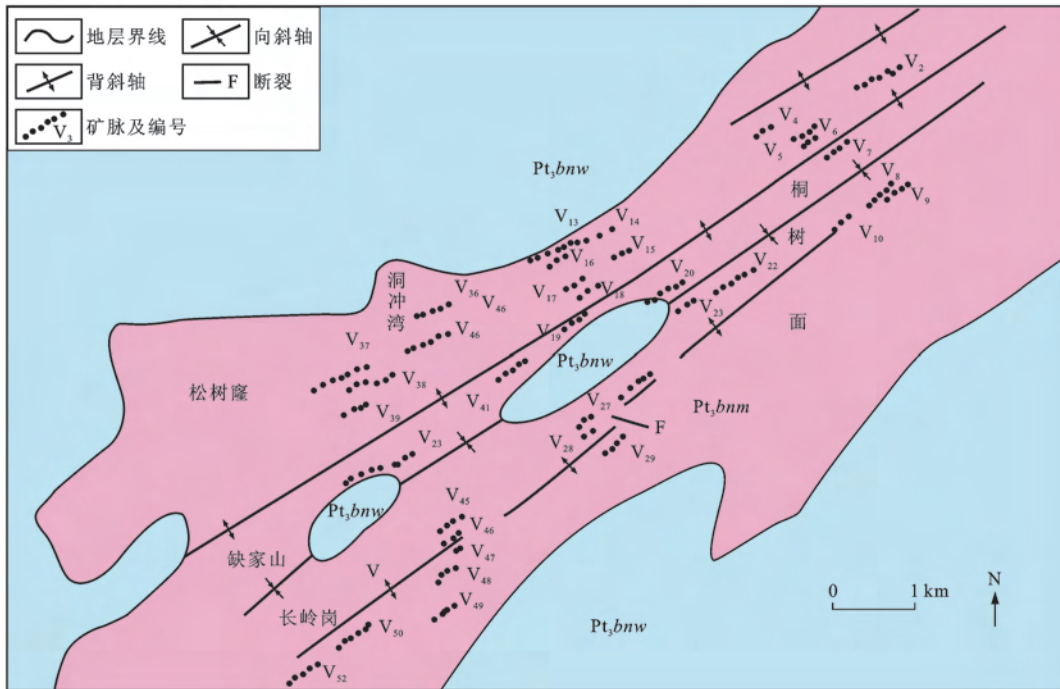
该区矿石类型主要为自然金-钠长石-石英型和自然金-钠长石-石英-硫化物型。金属矿物主要有黄铁矿、自然金、方铅矿、黝铜矿和闪锌矿等,局部可见黄铜矿、毒砂和磁黄铁矿;非金属矿物主要有石英、钠长石和方解石,另外还有少量绿泥石、叶腊石和高岭石。金矿物主要为自然金,载金矿物主要为石英、钠长石和硫化物(方铅矿、黝铜矿和黄铁矿);石英和钠长石中常可见明金。



图件引自湖南省 1 : 200 000 区域矿产图(内部资料)

图 1 湘西柳林汉金矿带金矿床分布

Fig. 1 Distribution of Gold Deposits in Liulincha Gold Belt of the Western Hunan



图件引自文献[8]

图 2 合仁坪金矿床地质概况

Fig. 2 Geological Map of Herenping Gold Deposit

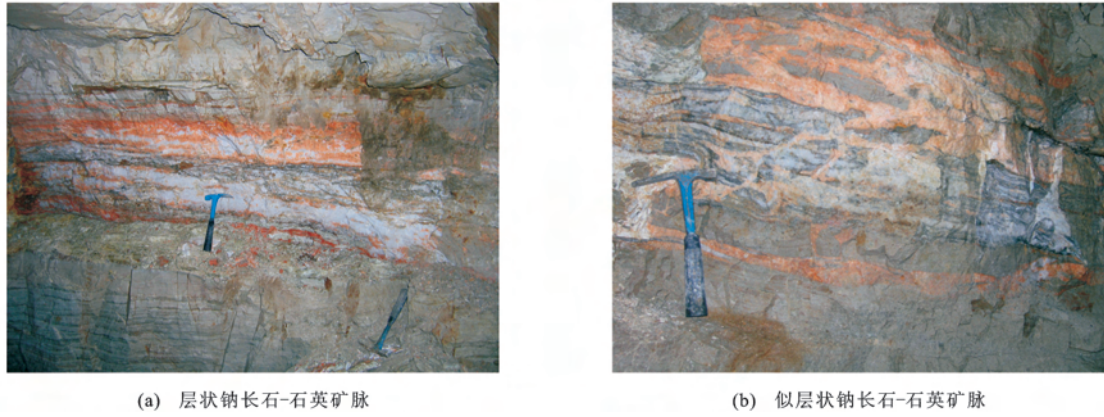
3 围岩蚀变

该矿区的围岩蚀变较发育,主要表现为绢云母化(褪色化)(图 3、4)、黄铁矿化[图 4(b)、(d)]和绿泥石

化[图 4(c)、(d)],局部可见高岭土化和叶腊石化。

3.1 绢云母化

绢云母化是矿区范围内最为发育的蚀变类型,通常分布于矿脉的两侧(图 3、4)。当矿脉规模较小

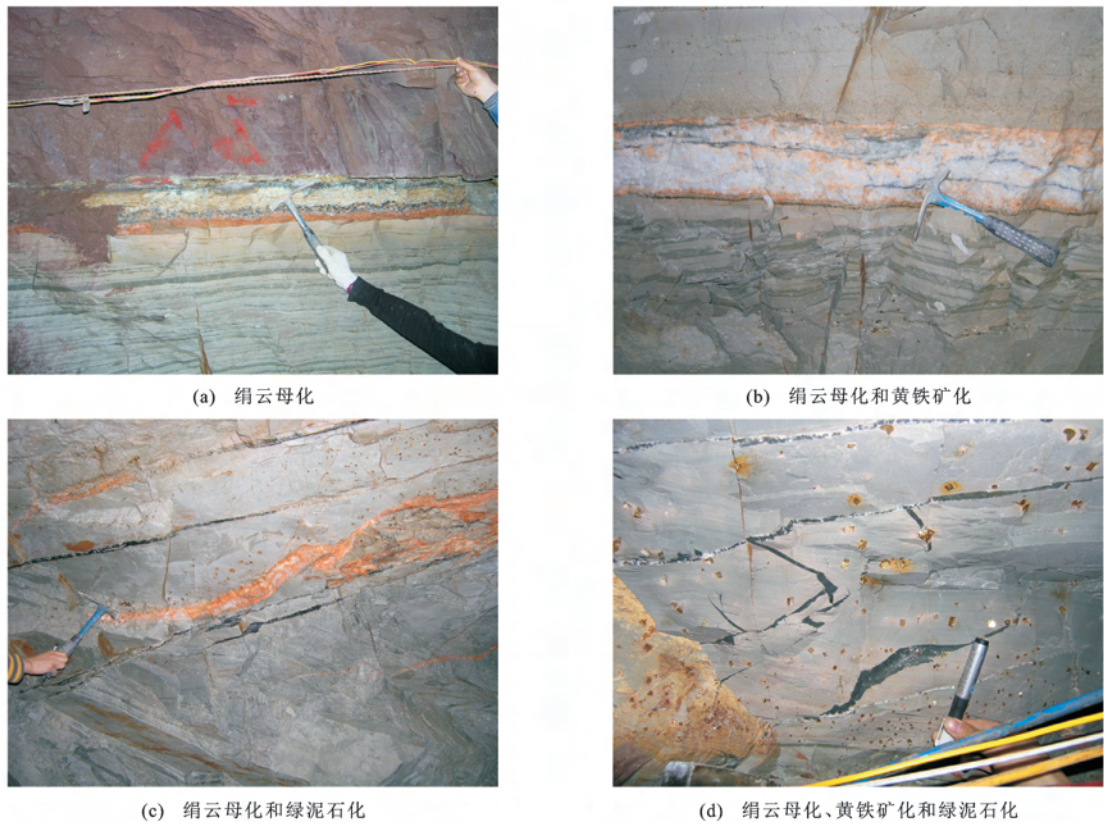


(a) 层状钠长石-石英矿脉

(b) 似层状钠长石-石英矿脉

图 3 合仁坪矿区的钠长石-石英矿脉照片

Fig. 3 Photos of Albite-quartz Veins in Herenping Mining Area



(a) 绢云母化

(b) 绢云母化和黄铁矿化

(c) 绢云母化和绿泥石化

(d) 绢云母化、黄铁矿化和绿泥石化

图 4 合仁坪矿区的围岩蚀变照片

Fig. 4 Photos of Wall-rock Alterations in Herenping Mining Area

时,褪色化蚀变往往只发育于矿体下盘的近矿围岩中[图 4(a)],但通常情况下褪色化沿矿脉两侧大致呈对称分布,且蚀变宽度远大于矿脉厚度[图 4(b)、(c)]。湘西一带 80%以上的金矿床均赋存于板溪群马底驿组地层中,紫红色板岩是该区赋矿围岩[图 5(a)、(b)]。在含矿热液的作用下,近矿的紫红色板岩发生蚀变,颜色明显变浅[图 5(c)、(d)]。这种褪色化蚀变类型在湘西一带金矿床普遍发育,被视为整个湘西地区最重要的找矿标志^[8]。

与紫红色原岩对比研究发现,发生褪色化的蚀

变围岩中最显著的变化就是绢云母体积分数大幅度增加(图 6),因此,所谓的褪色化实际上就是绢云母化。前人和本次研究均表明,绢云母化主要以交代钠长石、碳酸盐矿物以及原生的绢云母重结晶或新生成等方式进行^[9]。与未蚀变岩石中的原生绢云母对比,蚀变作用中形成的绢云母也呈鳞片状,但片径明显增大,且呈一定的定向排列(图 6)。

3.2 黄铁矿化

黄铁矿发育于矿脉中和近矿的褪色化蚀变围岩中,呈浸染状、细脉状、条带状产出。靠近矿体的褪

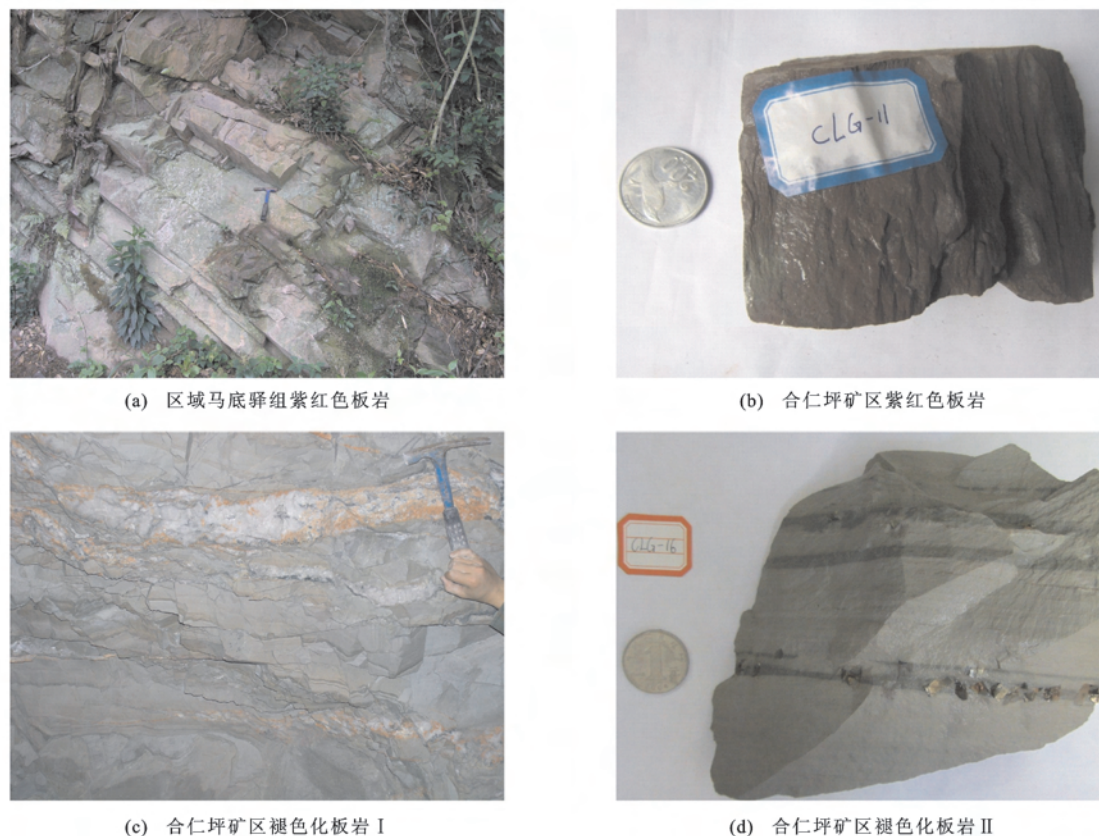


图5 合仁坪矿区围岩的野外及手标本照片

Fig. 5 Outdoor and Hand Specimen Photos of Wall-rocks in Herenping Mining Area

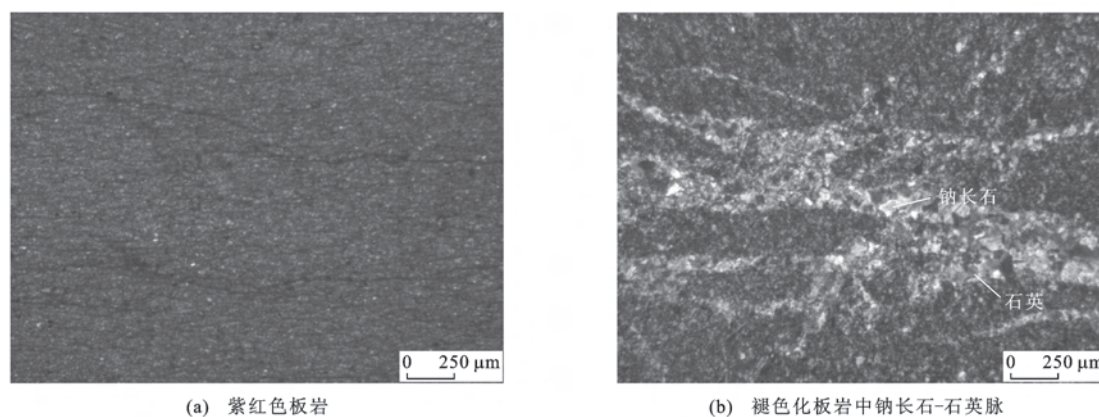


图6 合仁坪矿区围岩的镜下显微照片

Fig. 6 Photomicrographs of Wall-rocks in Herenping Mining Area

色化围岩中,黄铁矿分布较多;越靠近矿体,黄铁矿化越强烈,并且黄铁矿呈浸染状分布,颗粒细小,晶形主要以五角十二面体为主[图4(b)];远离矿脉,黄铁矿化逐渐减弱,并且黄铁矿数量明显减少,但粒径变粗,晶形主要以立方体为主[图4(b)、(d)]。

3.3 绿泥石化

暗绿色的绿泥石以变质矿物和代替白云母的热液蚀变矿物的形式出现在围岩中[图4(c)、(d)],一般呈顺层状或不规则脉状。在钠长石-石英脉中也

常伴生有条带状的绿泥石[图4(b)]。

4 蚀变过程中的质量平衡计算

4.1 计算方法的选择

研究围岩蚀变最主要的方法是通过质量平衡计算来推断蚀变过程中不同组分的迁移规律^[10]。发生在自然界中的大部分地质过程在一个开放的环境中进行,这样就避免不了各种元素或组分不同程度的迁入和迁出。众多研究都表明,在地质流体活动的情况

下,产生的交代作用都会使大量的活泼元素发生活化和迁移^[11-12]。直接比较两类样品总质量的改变,不能准确反映出各组分的真实迁移程度。为了计算出蚀变过程中岩石和流体之间物质传递有意义的信息,校正岩体总质量改变后的全岩地球化学数据是非常有必要的。因此,质量平衡计算的根本目的就是为消除总质量变化带来的影响^[13-17]。

目前的计算方法均是以假设在开放体系中存在一个或者几个不活泼组分为前提条件,进而确定其他组分在体系开放前、后的质量迁移规律^[18-20]。在早期的研究中,Gresens等主要是采用成分-体积图解法^[13]和 Isocon 图解法^[14]来进行蚀变过程中的质量平衡计算。值得注意的是,上述两种方法均存在明显不足和缺陷,除了需要总质量和体积因子等数据外,在应用上还有如下缺陷:①成分-体积图解法需要大量精确的密度和体积方面的数据信息,大大增加了研究过程的难度和工作量;②Isocon 图解法的优点是将“体积变化”关系转换为“质量变化”关系,去掉了密度参数,这大大简化了计算过程,但是也有一个明显不足,就是它只适合于两个样品之间的物质迁移计算,并不适用于实际中复杂的多组分迁移。事实上,开放体系并不是如理论模型中讨论的蚀变前、后两个简单且截然不同的样品组成,实际上其是呈梯度变化的^[21-23],因此,如果只在每两个样品之间建立彼此独立的图解,多组分之间就缺乏直接对比性^[24-26]。

近两年发展起来的标准化 Isocon 图解法^[25]可以弥补上述方法的缺陷。该方法可以将多个样品的 Isocon 线整合到一个图解中,在标准化过程中,可以在各独立样品之间建立一个可直接对比的共同参照^[26]。已有研究表明,这种方法非常适合于热液持续充填交代作用过程中所产生的围岩蚀变^[23],因此,本文拟采用标准化 Isocon 图解法来研究合仁坪金矿床的围岩蚀变,并在应用过程中对该方法进行局部改进。

为了减少运算量,对合仁坪金矿床的蚀变模型进行适当简化:以矿区未蚀变的紫红色板岩作为原岩,将由交代反应产生的连续变化蚀变围岩人为地分为近矿蚀变围岩和远矿蚀变围岩两部分(图7)。

4.2 惰性组分的选择

李昌年等常将熔沸点和电价较高、离子半径和溶解度较小的 P_2O_5 、 MnO 、 Al_2O_3 和 TiO_2 作为惰性组分^[27-31]。本文分别对区域马底驿组紫红色板岩、合仁坪矿区紫红色板岩、近矿蚀变围岩和远矿蚀变

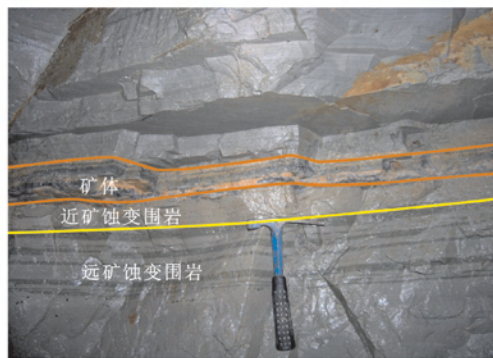


图7 合仁坪金矿矿体及蚀变围岩分带

Fig. 7 Ore Body of Herenping Gold Deposit and Altered Wall-rocks Zoning

围岩分别进行了主量、微量及稀土元素(REE)分析(表1、2)。主量元素含量(质量分数,下同)测试采用 XRF 方法,在中南大学地球科学与信息物理学院完成;微量元素和稀土元素含量测试采用 ICP-MS 分析方法,在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完成。

从表3可以看出,与 Al_2O_3 和 TiO_2 相比, P_2O_5 和 MnO 在本次分析的样品中含量都非常低,以其为参照来进行计算时,基数太小,容易产生较大误差,故将其剔除。近矿蚀变围岩和远矿蚀变围岩中, Al_2O_3 和 TiO_2 的含量是同步变化的(表3)。从围岩裂隙中充填有大量钠长石和石英以及碳酸盐类矿物的细脉来看,岩石的体积是收缩的,假设岩石的密度基本不变,则岩石总质量是减少的。

惰性组分 i 的 Isocon 线斜率计算公式为

$$k_i = M^O / M^A = C_i^A / C_i^O \quad (1)$$

式中: k_i 为惰性组分 i 的 Isocon 线斜率; M^O 为原岩总质量; M^A 为蚀变岩总质量; C_i^A 为惰性组分 i 在蚀变岩中的含量; C_i^O 为惰性组分 i 在原岩中的含量。

由式(1)计算得到:①近矿蚀变围岩中,惰性元素 Al 的 Isocon 线斜率为 1.493 3,惰性元素 Ti 的 Isocon 线斜率为 1.476 2,且前者大于后者;②远矿蚀变围岩中,惰性元素 Al 的 Isocon 线斜率为 1.172 0,惰性元素 Ti 的 Isocon 线斜率为 1.190 5,且前者小于后者。由此可以假设:①对于近矿蚀变围岩,当 Ti 为理想的不活泼元素时,Al 为迁入元素,当 Al 为不活泼元素时,Ti 为迁出元素;②对于远矿蚀变围岩,当 Ti 为理想的不活泼元素时,Al 为迁出元素,当 Al 为不活泼元素时,Ti 为迁入元素。

值得注意的是,由于元素的普遍存在性,即元素迁入或者迁出时的组分不可能绝对不含有某个元素,所以只存在数值大小的差异。近矿蚀变围岩和

表 1 不同岩层主量元素分析结果

Tab. 1 Analysis Results of Major Elements from Different Rock Strata

岩层	样品编号	$w(\text{Na}_2\text{O})$	$w(\text{MgO})$	$w(\text{Al}_2\text{O}_3)$	$w(\text{SiO}_2)$	$w(\text{P}_2\text{O}_5)$	$w(\text{K}_2\text{O})$	$w(\text{CaO})$	$w(\text{TiO}_2)$	$w(\text{MnO})$	$w(\text{TFeO})$	烧失量	w_{total}
区域马底驿组紫红色板岩	YR-11	1.43	1.31	15.51	70.57	0.05	3.50	0.20	0.80	0.08	3.98	3.53	100.96
	BX-5	2.31	1.56	17.89	62.86	0.11	3.35	0.37	1.00	0.13	8.49	2.65	100.72
	BX-6	2.26	1.65	16.64	65.34	0.08	3.13	0.18	0.97	0.11	6.98	2.32	99.64
	BX-8	2.50	1.82	17.26	64.92	0.07	3.31	0.30	0.83	0.17	7.18	2.75	101.11
	BX-9	2.49	1.91	18.47	62.78	0.08	3.58	0.22	0.83	0.20	7.07	2.67	100.29
	BX-10	2.77	2.07	17.67	65.01	0.09	2.99	0.39	0.81	0.24	7.01	2.65	101.70
合仁坪矿区紫红色板岩	HRP-5-1	1.07	0.96	18.16	67.18	0.07	3.43	0.30	0.89	0.05	5.65	2.95	100.71
	HRP-12	1.00	1.93	17.11	61.60	0.09	3.26	2.01	0.85	0.22	6.75	5.63	100.45
	HRP-21	0.62	0.93	15.78	67.80	0.12	3.45	0.70	0.87	0.08	5.64	4.57	100.57
	HRP-32	0.37	0.78	15.38	68.42	0.12	3.92	0.47	0.83	0.08	7.33	3.21	100.92
	HRP-52	0.91	1.13	17.76	65.23	0.11	4.01	0.20	0.95	0.03	7.32	3.07	100.71
	HRP-53	1.39	0.97	17.69	66.04	0.09	3.70	0.17	0.89	0.04	6.53	2.97	100.48
	HRP-54	0.55	0.58	16.47	67.97	0.05	4.15	0.27	0.71	0.04	6.75	3.10	100.64
	CLG-7	0.70	1.95	14.31	64.46	0.11	3.07	2.23	0.78	0.22	6.24	6.30	100.36
	CLG-11	0.43	0.91	17.79	67.72	0.08	3.98	0.24	0.72	0.04	6.74	3.32	101.98
	CLG-42	0.92	1.36	16.09	65.46	0.07	3.42	1.26	0.80	0.13	7.50	4.05	101.06
	CLG-43	1.25	1.04	20.66	61.10	0.16	4.14	0.31	0.86	0.03	7.07	3.49	100.10
	QZC-5	1.11	0.85	19.34	63.48	0.08	4.69	0.16	0.94	0.02	5.51	4.45	100.63
近矿蚀变围岩	HRP-7	3.28	0.81	25.26	56.77	0.09	4.90	0.17	0.96	0.01	3.43	4.48	100.17
	HRP-16	4.93	1.19	26.66	54.19	0.07	4.10	0.69	1.66	0.04	2.15	4.27	99.95
	HRP-37	1.59	0.97	31.65	47.60	0.08	7.44	0.13	2.02	0.01	3.19	4.87	99.54
	HRP-40	9.20	1.02	17.68	63.69	0.04	0.53	1.78	1.18	0.13	1.30	3.29	99.83
	HRP-45	8.17	0.50	23.18	60.78	0.07	2.27	0.15	0.92	0.01	1.19	2.59	99.84
	CLG-18	2.08	1.08	18.03	64.39	0.04	3.94	0.89	0.80	0.13	3.73	5.22	100.33
	CLG-28	2.27	0.88	31.14	49.04	0.13	6.99	0.20	1.26	0.01	2.59	5.96	100.48
	QZC-9	3.91	0.55	31.74	51.86	0.13	5.90	0.20	0.72	0.00	1.82	4.40	101.22
远矿蚀变围岩	HRP-34	2.37	1.29	23.41	55.46	0.11	5.05	1.61	1.33	0.14	2.96	6.85	100.57
	CLG-10	3.02	2.51	20.79	49.78	0.11	3.68	3.21	1.12	0.35	6.94	9.50	101.00
	CLG-15	1.45	1.43	17.19	63.92	0.05	3.84	1.42	0.81	0.18	4.77	6.04	101.11
	CLG-16	1.20	1.26	18.02	65.43	0.06	4.12	1.04	0.84	0.14	3.74	5.09	100.95
	CLG-34	2.60	0.54	16.44	71.30	0.11	2.91	0.19	0.80	0.01	1.90	4.15	100.95
	CLG-35	2.15	0.86	19.04	65.68	0.12	3.78	0.20	0.91	0.02	3.23	4.26	100.24
	QZC-3	2.36	1.24	26.53	53.97	0.13	4.71	0.17	1.59	0.03	3.61	7.06	101.39

注： $w(\cdot)$ 为元素或化合物含量； w_{total} 为主量元素总含量。

远矿蚀变围岩的总质量都是减少的,也就是相对于其迁入,迁出的程度或质量更大,因此,在进行远矿蚀变围岩惰性元素筛选时,假设“当Ti为理想的不活泼元素时,Al为迁出元素”符合实际情况,而假设“当Al为不活泼元素时,Ti为迁入元素”与实际情况不符,故应选取 TiO_2 为理想的不活泼组分,即惰

性元素Ti的Isocon线斜率为1.1905。同理可得到近矿蚀变围岩应选 Al_2O_3 为不活泼组分,即惰性元素Al的Isocon线斜率为1.4933。考虑到本次分析的样品中 Al_2O_3 含量远高于 TiO_2 ,因此,最终选取 Al_2O_3 为不活泼组分,这样更有利于确保计算的准确性和严谨性。同样,高斌等对湘西沃溪金锑

表 2 不同岩层微量和稀土元素分析结果

Tab. 2 Analysis Results of Trace and Rare Earth Elements from Different Rock Strata

样品编号	HRP-5-1	HRP-12	HRP-21	HRP-32	HRP-52	HRP-53	HRP-54	CLG-7	CLG-11	CLG-42	CLG-43	QZC-5	QZC-9	CLG-18
$w(\text{Li})/10^{-6}$	30.6	45.5	47.7	62.2	24.9	46.3	23.4	62.8	67.0	42.6	60.2	114.0	18.2	34.0
$w(\text{Be})/10^{-6}$	3.01	2.98	2.65	3.09	2.86	3.08	2.44	2.32	2.69	3.12	3.97	2.89	7.96	3.53
$w(\text{Sc})/10^{-6}$	11.70	23.20	13.40	9.80	9.90	12.70	13.70	16.50	12.00	21.50	11.20	13.00	7.591	7.70
$w(\text{V})/10^{-6}$	105.0	114.0	93.7	95.3	97.3	113.0	107.0	98.8	88.4	96.7	106.0	116.0	143.0	117.0
$w(\text{Cr})/10^{-6}$	96.6	96.7	97.2	90.2	79.9	88.8	86.5	94.2	64.1	81.7	86.1	129.0	32.6	132.0
$w(\text{Co})/10^{-6}$	12.40	17.80	9.80	13.90	9.70	13.50	6.50	20.00	9.40	14.40	12.70	12.00	3.16	24.70
$w(\text{Ni})/10^{-6}$	42.6	50.3	31.0	45.3	34.9	33.3	20.6	50.4	31.6	52.2	74.1	161.6	12.6	28.0
$w(\text{Cu})/10^{-6}$	21.60	16.80	17.30	13.90	13.20	13.50	10.80	24.00	8.80	13.20	12.20	21.20	14.00	6.33
$w(\text{Zn})/10^{-6}$	85.3	118.0	84.2	121.0	85.3	92.5	64.5	115.0	82.5	95.4	120.0	129.0	22.2	56.9
$w(\text{Ga})/10^{-6}$	20.8	20.9	19.4	21.7	19.0	21.7	20.9	17.3	21.4	20.8	24.6	22.7	30.7	24.1
$w(\text{Ge})/10^{-6}$	2.57	2.34	3.90	2.80	2.62	2.43	2.43	2.26	2.79	2.45	2.84	3.11	2.24	1.87
$w(\text{As})/10^{-6}$	11.10	10.80	10.30	11.50	10.80	10.20	11.10	11.00	10.40	10.80	11.60	11.10	12.60	10.40
$w(\text{Rb})/10^{-6}$	132	124	135	163	158	142	160	131	163	135	151	176	221	181
$w(\text{Sr})/10^{-6}$	173	164	195	120	89	150	113	131	83	198	217	111	300	199
$w(\text{Zr})/10^{-6}$	209	203	222	220	179	218	189	232	177	190	254	249	150	202
$w(\text{Nb})/10^{-6}$	14.8	13.1	14.6	16.4	14.2	14.8	11.8	12.6	13.2	15.3	19.6	15.8	29.8	14.2
$w(\text{Mo})/10^{-6}$	2.170	1.540	1.130	2.030	1.360	0.950	0.660	1.070	0.890	3.220	5.370	15.000	0.074	0.768
$w(\text{Ag})/10^{-6}$	0.297	0.475	0.513	0.437	0.374	0.314	0.264	0.319	0.300	0.464	0.464	0.362	0.741	0.394
$w(\text{Cd})/10^{-6}$	0.083	0.087	0.057	0.059	0.067	0.075	0.095	0.094	0.114	0.113	0.083	0.088	0.243	0.123
$w(\text{Sn})/10^{-6}$	2.34	2.44	2.47	2.22	2.40	2.51	2.98	2.30	3.01	2.28	2.93	3.01	5.15	2.09
$w(\text{Sb})/10^{-6}$	4.62	5.23	6.01	10.60	8.93	5.03	6.46	5.94	5.85	6.19	3.99	12.10	8.30	4.61
$w(\text{Cs})/10^{-6}$	12.4	12.6	14.4	20.3	18.0	14.5	15.2	16.5	21.4	14.4	15.4	17.0	27.9	17.6
$w(\text{Ba})/10^{-6}$	647	634	614	700	584	605	640	545	589	654	727	723	1370	542
$w(\text{Hf})/10^{-6}$	5.41	5.39	5.60	5.78	4.56	5.96	4.70	5.87	5.38	5.23	6.82	6.51	6.05	5.75
$w(\text{Ta})/10^{-6}$	1.130	0.924	0.931	1.090	0.931	1.020	0.840	0.803	0.992	0.954	1.250	1.080	2.760	1.280
$w(\text{W})/10^{-6}$	2.64	2.63	10.40	3.62	2.65	2.18	7.37	8.88	5.16	5.97	2.82	7.43	12.60	642.00
$w(\text{Tl})/10^{-6}$	0.484	0.458	0.499	0.651	0.622	0.566	0.641	0.507	0.687	0.515	0.610	0.730	0.970	0.649
$w(\text{Pb})/10^{-6}$	15.90	15.60	14.20	21.70	19.40	21.30	20.40	12.80	8.44	17.10	23.30	25.30	8.09	14.60
$w(\text{Th})/10^{-6}$	11.00	9.65	9.81	11.00	10.60	10.90	8.92	8.69	12.50	10.50	14.70	12.20	22.90	11.60
$w(\text{U})/10^{-6}$	1.550	1.410	1.460	1.580	1.310	2.080	1.450	1.100	1.290	1.120	1.810	1.830	0.955	1.670
$w(\text{La})/10^{-6}$	39.3	37.9	41.0	46.1	42.3	42.9	30.0	37.5	40.6	46.0	62.8	46.0	73.9	35.6
$w(\text{Ce})/10^{-6}$	78.6	76.3	84.2	94.0	85.5	85.5	60.7	75.9	85.0	93.0	127.0	92.9	149.0	40.4
$w(\text{Pr})/10^{-6}$	8.83	8.56	9.44	10.60	9.63	9.66	6.65	8.53	9.76	10.40	15.50	10.70	17.90	8.27
$w(\text{Nd})/10^{-6}$	31.6	31.0	34.2	38.7	35.3	34.4	23.7	32.1	34.7	37.1	55.1	37.8	64.7	29.7
$w(\text{Sm})/10^{-6}$	6.30	5.58	6.20	6.88	6.14	6.78	4.43	6.15	6.66	6.74	9.97	6.89	11.60	5.51
$w(\text{Eu})/10^{-6}$	1.46	1.42	1.40	1.48	1.39	1.67	1.07	1.49	1.39	1.55	1.97	1.55	2.10	1.14
$w(\text{Gd})/10^{-6}$	5.05	5.49	5.41	6.00	5.19	6.15	4.59	5.19	6.32	6.26	7.94	6.04	10.20	4.83
$w(\text{Tb})/10^{-6}$	0.817	0.820	0.860	0.984	0.796	0.985	0.782	0.829	1.080	1.010	1.160	0.978	1.640	0.826
$w(\text{Dy})/10^{-6}$	4.29	4.63	4.55	4.95	4.04	5.45	4.52	4.13	5.85	5.74	5.67	5.62	8.67	4.75
$w(\text{Ho})/10^{-6}$	0.922	0.992	0.965	0.990	0.885	1.120	0.976	0.832	1.250	1.170	1.120	1.180	1.730	1.150
$w(\text{Er})/10^{-6}$	2.69	2.95	2.69	2.90	2.72	3.33	2.96	2.49	3.47	3.42	3.41	3.50	3.96	3.24
$w(\text{Tm})/10^{-6}$	0.404	0.477	0.401	0.416	0.422	0.501	0.445	0.371	0.530	0.513	0.494	0.557	0.505	0.502
$w(\text{Yb})/10^{-6}$	2.56	2.88	2.61	2.68	2.70	3.32	2.86	2.47	3.49	3.04	3.07	3.32	3.10	3.31
$w(\text{Lu})/10^{-6}$	0.376	0.426	0.413	0.401	0.387	0.488	0.438	0.348	0.552	0.461	0.476	0.511	0.421	0.510
$w(\text{Y})/10^{-6}$	25.3	27.6	26.3	27.5	24.6	30.9	26.6	23.7	31.9	33.8	32.6	34.1	33.4	29.1
$w_{\text{REE}}/10^{-6}$	183	179	194	217	197	202	144	178	201	216	296	218	349	140
$w_{\text{LREE}}/10^{-6}$	166	161	176	198	180	181	127	162	178	195	272	196	319	121
$w_{\text{HREE}}/10^{-6}$	17.1	18.7	17.9	19.3	17.1	21.3	17.6	16.7	22.5	21.6	23.3	21.7	30.2	19.1
$w_{\text{LREE}}/w_{\text{HREE}}$	9.71	8.61	9.86	10.20	10.50	8.48	7.20	9.71	7.90	9.01	11.70	9.02	10.60	6.31
$w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$	11.00	9.44	11.30	12.30	11.20	9.27	7.52	10.90	8.34	10.90	14.70	9.94	17.10	7.71
$\delta(\text{Eu})$	0.788	0.786	0.739	0.705	0.750	0.791	0.723	0.806	0.657	0.728	0.678	0.736	0.590	0.673
$\delta(\text{Ce})$	1.030	1.040	1.050	1.040	1.040	1.030	1.050	1.040	1.050	1.040	0.998	1.030	1.000	0.580

续表 2

样品编号	CLG-28	HRP-7	HRP-16	HRP-37	HRP-40	HRP-45	QZC-3	CLG-10	CLG-15	CLG-16	CLG-34	CLG-35	HRP-34
$w(\text{Li})/10^{-6}$	154.0	61.5	291.0	29.1	8.2	21.0	125.0	199.0	34.1	44.6	60.8	59.7	43.6
$w(\text{Be})/10^{-6}$	6.77	5.33	4.66	6.12	1.22	2.68	4.14	3.28	3.66	3.24	2.34	3.96	4.13
$w(\text{Sc})/10^{-6}$	16.80	14.90	15.60	20.80	15.60	15.40	14.80	32.10	18.00	16.50	10.00	10.60	28.20
$w(\text{V})/10^{-6}$	202.0	117.0	229.0	264.0	61.4	107.0	177.0	174.0	109.0	112.0	82.2	96.4	181.0
$w(\text{Cr})/10^{-6}$	113.0	88.6	195.0	206.0	131.0	99.0	159.0	132.0	103.0	81.0	93.8	104.0	186.0
$w(\text{Co})/10^{-6}$	12.50	6.58	6.64	6.67	6.02	10.10	19.60	32.70	15.00	12.50	80.40	15.10	24.70
$w(\text{Ni})/10^{-6}$	29.2	26.6	26.7	24.3	11.1	21.3	43.1	65.2	34.8	30.7	45.4	35.1	31.0
$w(\text{Cu})/10^{-6}$	10.00	6.35	9.68	10.20	6.28	5.68	37.60	8.00	6.97	2 310.00	8.82	7.08	9.29
$w(\text{Zn})/10^{-6}$	46.2	68.9	61.7	68.5	34.1	48.7	97.3	142.0	68.4	83.0	74.8	80.8	64.8
$w(\text{Ga})/10^{-6}$	37.2	30.6	34.6	43.3	11.8	22.7	30.3	29.8	23.3	24.2	19.6	25.4	33.9
$w(\text{Ge})/10^{-6}$	2.73	2.94	2.45	3.02	2.14	2.38	5.20	2.09	1.86	1.82	2.35	2.37	2.50
$w(\text{As})/10^{-6}$	10.80	9.38	9.53	10.80	9.42	10.20	12.00	9.76	10.40	10.20	11.80	9.68	10.40
$w(\text{Rb})/10^{-6}$	277.0	198.0	151.0	320.0	25.7	67.6	168.0	163.0	178.0	184.0	122.0	165.0	213.0
$w(\text{Sr})/10^{-6}$	299.0	238.0	430.0	224.0	724.0	562.0	364.0	275.0	166.0	130.0	202.0	198.0	307.0
$w(\text{Zr})/10^{-6}$	327	253	472	476	308	247	332	263	208	205	234	248	337
$w(\text{Nb})/10^{-6}$	32.7	23.7	35.9	42.2	22.5	25.6	27.9	19.7	14.7	15.1	18.0	21.4	32.9
$w(\text{Mo})/10^{-6}$	0.080	0.061	2.579	0.277	15.821	3.137	0.075	3.490	0.023	0.033	0.073	0.086	3.950
$w(\text{Ag})/10^{-6}$	0.833	0.605	0.949	1.080	0.575	0.670	0.773	0.563	0.485	0.644	0.601	0.682	0.813
$w(\text{Cd})/10^{-6}$	0.325	0.166	0.211	0.186	0.072	0.166	0.154	0.174	0.088	0.153	0.238	0.106	0.197
$w(\text{Sn})/10^{-6}$	6.30	3.95	4.12	4.75	1.13	2.61	3.27	2.49	1.96	3.21	1.88	2.22	3.31
$w(\text{Sb})/10^{-6}$	5.96	4.41	6.07	7.08	5.49	4.25	13.20	4.72	4.24	4.21	4.03	4.28	5.08
$w(\text{Cs})/10^{-6}$	34.7	24.3	17.5	33.6	2.2	10.9	15.8	17.5	17.7	18.1	11.2	17.1	24.4
$w(\text{Ba})/10^{-6}$	822	650	715	1 270	134	450	869	628	553	575	552	709	875
$w(\text{Hf})/10^{-6}$	9.60	7.36	12.40	13.50	8.18	7.09	8.85	7.10	5.73	5.80	6.21	6.66	9.27
$w(\text{Ta})/10^{-6}$	2.370	1.600	2.490	2.550	1.430	1.970	1.890	1.460	1.100	1.080	1.720	1.490	2.150
$w(\text{W})/10^{-6}$	117.00	20.30	55.90	59.10	31.60	246.00	81.20	172.00	83.80	77.40	3 060.00	149.00	2 220.00
$w(\text{Tl})/10^{-6}$	1.260	0.877	0.711	1.350	0.096	0.411	0.784	0.607	0.671	0.713	0.464	0.623	0.888
$w(\text{Pb})/10^{-6}$	10.40	6.12	8.24	10.40	7.87	23.10	55.10	19.20	9.43	12.40	74.80	11.90	27.50
$w(\text{Th})/10^{-6}$	19.20	16.10	25.90	21.00	12.50	14.70	15.80	14.00	11.70	11.70	10.60	13.10	16.60
$w(\text{U})/10^{-6}$	1.910	1.530	3.120	2.940	2.090	1.560	4.140	1.770	1.710	1.670	1.590	1.550	1.990
$w(\text{La})/10^{-6}$	49.1	43.6	73.2	66.9	47.1	54.7	55.8	54.6	36.0	35.8	37.2	40.1	62.7
$w(\text{Ce})/10^{-6}$	102.0	63.7	147.0	140.0	90.4	103.0	107.0	109.0	41.3	40.7	40.1	44.3	123.0
$w(\text{Pr})/10^{-6}$	12.00	10.80	17.30	16.90	10.60	12.60	12.60	12.90	8.50	8.33	8.46	9.34	15.10
$w(\text{Nd})/10^{-6}$	42.6	37.8	61.8	63.0	38.7	44.9	45.8	47.2	30.7	30.4	29.9	33.6	54.8
$w(\text{Sm})/10^{-6}$	8.90	7.67	10.20	11.70	7.07	7.65	8.44	8.64	5.81	5.82	6.02	6.41	10.30
$w(\text{Eu})/10^{-6}$	1.71	1.42	1.81	2.50	1.61	1.43	1.94	1.85	1.22	1.15	1.22	1.25	2.18
$w(\text{Gd})/10^{-6}$	8.76	7.38	8.92	10.20	6.05	7.07	8.00	7.78	5.20	5.14	6.01	5.88	9.38
$w(\text{Tb})/10^{-6}$	1.610	1.280	1.500	1.690	1.040	1.210	1.310	1.260	0.837	0.805	1.080	0.974	1.530
$w(\text{Dy})/10^{-6}$	9.24	7.07	8.67	10.20	5.94	6.84	7.28	7.09	4.94	4.80	6.26	5.47	8.74
$w(\text{Ho})/10^{-6}$	2.050	1.580	2.100	2.440	1.400	1.580	1.620	1.590	1.170	1.140	1.530	1.250	1.960
$w(\text{Er})/10^{-6}$	5.50	4.35	6.01	6.92	3.92	4.13	4.43	4.35	3.26	3.31	4.45	3.47	5.39
$w(\text{Tm})/10^{-6}$	0.828	0.643	0.902	1.070	0.568	0.591	0.651	0.621	0.500	0.501	0.683	0.536	0.763
$w(\text{Yb})/10^{-6}$	5.54	4.43	6.01	7.14	3.80	3.86	4.22	4.12	3.35	3.31	4.41	3.55	4.98
$w(\text{Lu})/10^{-6}$	0.822	0.669	0.890	1.120	0.558	0.595	0.642	0.611	0.503	0.503	0.670	0.540	0.757
$w(\text{Y})/10^{-6}$	40.2	35.9	50.5	55.3	36.9	35.9	36.0	39.9	29.7	29.0	37.9	31.1	47.8
$w_{\text{REE}}/10^{-6}$	251	192	346	342	219	250	260	262	143	142	148	157	302
$w_{\text{LREE}}/10^{-6}$	216	165	311	301	195	224	232	234	124	122	123	135	268
$w_{\text{HREE}}/10^{-6}$	34.3	27.4	35.0	40.8	23.3	25.9	28.2	27.4	19.8	19.5	25.1	21.7	33.5
$w_{\text{LREE}}/w_{\text{HREE}}$	6.30	6.02	8.89	7.38	8.40	8.67	8.22	8.54	6.25	6.26	4.90	6.23	8.00
$w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$	6.36	7.06	8.74	6.72	8.89	10.16	9.48	9.51	7.71	7.76	6.05	8.10	9.03
$\delta(\text{Eu})$	0.59	0.57	0.58	0.70	0.75	0.59	0.72	0.68	0.68	0.64	0.62	0.62	0.67
$\delta(\text{Ce})$	1.03	0.72	1.01	1.02	0.99	0.96	0.98	1.00	0.57	0.57	0.55	0.56	0.98

注： w_{REE} 为稀土元素总含量； w_{LREE} 为轻稀土元素总含量； w_{HREE} 为重稀土元素总含量； $w(\cdot)_{\text{N}}$ 为元素含量球粒陨石标准化后的值； $\delta(\cdot)$ 为元素异常；YR-11、BX-5、BX-6、BX-8、BX-9和BX-10为区域马底驿组紫红色板岩；HRP-5-1、HRP-12、HRP-21、HRP-32、HRP-52、HRP-53、HRP-54、CLG-7、CLG-11、CLG-42、CLG-43和QZC-5为合仁坪矿区紫红色板岩；HRP-7、HRP-16、HRP-37、HRP-40、HRP-45、CLG-18、CLG-28和QZC-9为近矿蚀变围岩；HRP-34、CLG-10、CLG-15、CLG-16、CLG-34、CLG-35、QZC-3为远矿蚀变围岩。

表 3 不同岩层主量元素平均含量

Tab. 3 Average Contents of Major Elements from Different Rock Strata %

参数	区域马底驿组 紫红色板岩	合仁坪矿区 紫红色板岩	近矿蚀变 围岩	远矿蚀变 围岩
$w(\text{Na}_2\text{O})$	2.29	0.86	3.70	2.99
$w(\text{MgO})$	1.73	1.12	0.97	1.19
$w(\text{Al}_2\text{O}_3)$	17.15	17.21	25.70	20.17
$w(\text{SiO}_2)$	64.79	65.54	55.37	61.55
$w(\text{P}_2\text{O}_5)$	0.08	0.10	0.09	0.09
$w(\text{K}_2\text{O})$	3.28	3.77	4.86	3.62
$w(\text{CaO})$	0.28	0.70	0.71	0.91
$w(\text{TiO}_2)$	0.88	0.84	1.24	1.00
$w(\text{MnO})$	0.15	0.08	0.06	0.11
$w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$	6.89	6.58	2.65	3.63
烧失量	2.76	3.93	4.92	5.53

钨矿床褪色化围岩进行质量平衡计算选取的惰性组分也是 Al_2O_3 [32]。

4.3 计算结果及讨论

为了查明合仁坪矿区紫红色板岩和蚀变围岩之间的物质转移量,可以对合仁坪矿区紫红色板岩和蚀变围岩间以及合仁坪矿区紫红色板岩和远矿蚀变围岩间分别建立 Isocon 图解,形成两条斜率不同的等浓度线。上述图解只能分别比较出近矿和远矿蚀变围岩中各组分相对合仁坪矿区紫红色板岩的迁移量,而无法判别近矿和远矿蚀变围岩之间的物质转移。可以借鉴 Guo 等提出的方法 [22],把远矿蚀变围岩和合仁坪矿区紫红色板岩的 Isocon 线按比例调整到与近矿蚀变围岩和合仁坪矿区紫红色板岩的 Isocon 线重合,并按调整的比例相应调整对应的活动组分,这样就得到一条标准化 Isocon 线,从而获得近矿蚀变围岩、远矿蚀变围岩和合仁坪矿区紫红色板岩三者之间的物质转移信息。值得一提的是,为了佐证合仁坪矿区紫红色板岩数据的准确性,以及规避其他交代作用对试验数据的干扰,让数据更系统化和严谨化,本文加入区域马底驿组紫红色板岩数据进行分析。

考虑到蚀变过程中蚀变围岩总体质量可能发生变化,故为了精确评价蚀变过程中围岩组分的带入、带出情况,须先对选定的惰性组分 Al_2O_3 含量进行校正。以近矿蚀变围岩中 Al_2O_3 为基准,将远矿蚀变围岩中 Al_2O_3 含量乘以近矿、远矿蚀变围岩中惰性元素 Al 的 Isocon 线斜率之比,得到 1.274 1,从而得到与近矿蚀变围岩一致的 Al_2O_3 含量标准化值(表 4)。采用同样的方法,可以对远矿蚀变围岩

中其他元素进行标准化(表 4)。同理,该计算方法也可以应用到区域马底驿组紫红色板岩和合仁坪矿区紫红色板岩中。对区域马底驿组紫红色板岩和合仁坪矿区紫红色板岩也进行标准化,建立各组数据之间的联系(表 4)。通过对比各组数据间的差值大小,不仅可以得出不同岩层间组分的走向,甚至可以直观看出迁移程度的大小。

表 4 不同岩层主量元素平均含量标准化值

Tab. 4 Normalized Average Contents of Major Elements from Different Rock Strata %

参数	区域马底驿组 紫红色板岩	合仁坪矿区 紫红色板岩	近矿蚀变 围岩	远矿蚀变 围岩
$w(\text{Na}_2\text{O})$ 标准化值	3.43	1.28	3.70	3.81
$w(\text{MgO})$ 标准化值	2.59	1.67	0.97	1.52
$w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 标准化值	25.70	25.70	25.70	25.70
$w(\text{SiO}_2)$ 标准化值	97.09	97.87	55.37	78.42
$w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 标准化值	0.12	0.15	0.09	0.11
$w(\text{K}_2\text{O})$ 标准化值	4.92	5.63	4.86	4.61
$w(\text{CaO})$ 标准化值	0.42	1.05	0.71	1.16
$w(\text{TiO}_2)$ 标准化值	1.32	1.25	1.24	1.27
$w(\text{MnO})$ 标准化值	0.22	0.12	0.06	0.14
$w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$ 标准化值	10.32	9.83	2.65	4.62
烧失量标准化值	4.14	5.87	4.92	7.05

4.3.1 主量元素

从图 8 和表 5 可以看出,合仁坪金矿床蚀变过程中,围岩中主量元素的迁移规律比较明显。显著带入的组分是 Na_2O 以及部分挥发分(S 、 CO_2 和 H_2O)。这与在显微镜下观察到蚀变围岩中发育有钠长石细脉和黄铁矿化、碳酸盐化的地质事实相吻合。值得注意的是,区域板溪群马底驿组地层中 Na_2O 含量远高于矿区未蚀变板岩(表 3),但明显小

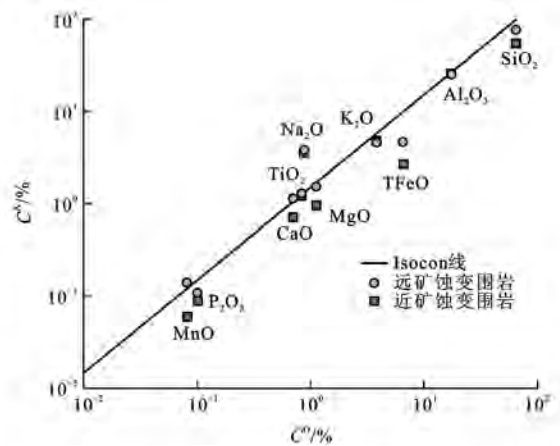


图 8 蚀变围岩主量元素迁移的标准化 Isocon 图解
Fig. 8 Normalized Isocon Diagram for Major Element Transfer of Altered Wall-rocks

表5 蚀变围岩主量元素迁移定量计算结果

Tab. 5 Calculated Results of Major Element Transfer of Altered Wall-rocks

%

参数	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃
近矿蚀变围岩元素含量增量	2.42	-0.70	0	-42.50	-0.06	-0.77	-0.34	-0.01	-0.06	-7.18
远矿蚀变围岩元素含量增量	2.53	-0.15	0	-19.45	-0.04	-1.02	0.11	0.02	0.02	-5.21

于合仁坪矿区的蚀变围岩,这表明合仁坪矿区紫红色板岩在金矿形成之前可能经历了一次钠质丢失事件。

围岩蚀变过程中,明显带出的组分有 SiO₂、Fe₂O₃、K₂O、CaO、MgO(图8)。围岩中 SiO₂ 的减少表明该金矿床钠长石-石英脉体中的硅质可能部分来自围岩;并且从表5可知,近矿蚀变围岩比远矿蚀变围岩提供的硅质更多。围岩中 Fe₂O₃ 较少,可能与蚀变围岩和矿体中黄铁矿的形成有关,正是围岩中Fe与流体中S的结合消耗了成矿流体中的大量S,才导致Au发生沉淀;近矿蚀变围岩比远矿蚀变围岩带出的铁质更多,这种迁移趋势与硅质完全吻合,这也与离矿体越近,黄铁矿越发育的野外地质

现象吻合。另外,围岩中 K₂O、CaO、MgO 的带出与矿脉中存在较多绢云母和碳酸盐矿物相吻合。

4.3.2 微量元素

从表6可以看出:合仁坪金矿床形成过程中,相对于围岩而言,Cu、As、Pb、Zn、Ni、Co、Sb、Li、Rb、Ba等元素均为带出元素;从远矿蚀变围岩到近矿蚀变围岩,Ba、Ni、Co、Cu、Pb、Zn、As等与成矿有关的元素带出量趋于增加。值得注意的是,围岩中Cu、Pb、Zn、As、Sb等与成矿有关的元素带出与在矿脉中观察到的金属矿物组合非常一致。在合仁坪矿区,黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、砷黝铜矿和含As黄铁矿均为常见的金属矿物。

表6 蚀变围岩微量元素迁移定量计算结果

Tab. 6 Calculated Results of Trace Element Transfer of Altered Wall-rocks

10⁻⁶

参数	Rb	Sr	Ba	V	Cr	Ni	Co	Cu	Pb	Zn	As
远矿蚀变围岩元素含量增量	-29.59	48.74	-129.04	11.32	12.61	-13.91	-0.72	-7.19	-7.76	-53.02	-3.01
近矿蚀变围岩元素含量增量	-21.93	50.54	-331.23	25.67	16.14	-33.11	-7.40	-14.64	-17.75	-91.91	-6.17
参数	Sb	W	Zr	Nb	Ta	Ag	Li	Cs	Hf	Th	U
远矿蚀变围岩元素含量增量	-4.22	164.53	0.92	2.69	0.38	0.27	-17.03	-2.96	0.30	1.21	-0.15
近矿蚀变围岩元素含量增量	-4.16	387.47	0.39	9.76	0.72	0.23	-23.35	2.08	0.68	3.18	-0.06

Sr、V、Cr、W、Nb、Th等元素均为明显带入元素,表明成矿流体富含上述元素,并在成矿流体与围岩发生水岩作用过程中,通过渗透交代作用进入围岩中。从近矿蚀变围岩至远矿蚀变围岩,这些元素的含量趋于减少,也证实上述过程的存在。元素Sr和Nb主要赋存在长石类、云母类矿物晶格中^[33],围岩蚀变产生的钠长石化、绢云母化使得这些元素富集。Zr、Ta、Ag、U等元素迁移量很小,基本可以忽略不计,再次验证了它们的不活泼性。

4.3.3 稀土元素

为了对本区蚀变围岩做进一步的研究,对不同

蚀变带中的稀土元素进行了对比研究。结果表明,在水岩作用过程中,轻、重稀土元素基本上都存在不同程度的带出(表7)。远矿蚀变围岩的迁出量大于近矿蚀变围岩,且两者都表现为轻稀土元素的迁出程度远远大于重稀土元素,表明轻稀土元素的活动性明显高于重稀土元素,围岩蚀变过程中轻、重稀土元素均发生强烈分异。

5 结 语

(1)合仁坪矿区的围岩蚀变主要有绢云母化(褪色化)、黄铁矿化和绿泥石化,其中绢云母化和黄铁

表7 蚀变围岩稀土元素迁移定量计算结果

Tab. 7 Calculated Results of Rare Earth Element Transfer of Altered Wall-rocks

10⁻⁶

参数	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy
远矿蚀变围岩元素含量增量	-15.29	-71.81	-3.32	-12.19	-1.89	-0.65	-1.35	-0.16	-0.32
近矿蚀变围岩元素含量增量	-5.75	-14.07	-0.97	-3.31	-0.68	-0.35	-0.39	0.00	0.61
参数	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	稀土元素	轻稀土元素	重稀土元素
远矿蚀变围岩元素含量增量	0.12	0.15	0.03	0.39	0.06	-2.00	-106.20	-105.13	-1.08
近矿蚀变围岩元素含量增量	0.30	0.54	0.06	0.60	0.09	-0.11	-23.13	-24.95	1.82

矿化与金成矿最为密切。

(2)合仁坪金矿床形成过程中,围岩中的 Al_2O_3 为惰性组分。围岩蚀变过程中主要带入的组分为 Na_2O 、Sr、V、Cr、W、Nb、Th 以及部分挥发分(S、 CO_2 和 H_2O),带出的组分有 SiO_2 、 Fe_2O_3 、 K_2O 、CaO、MgO、Cu、As、Pb、Zn、Ni、Co、Sb、Li、Rb 和 Ba 等。轻稀土元素的迁出程度远远大于重稀土元素,围岩蚀变过程中轻、重稀土元素发生强烈的分异。这些活动组分的迁移强度基本都由热液蚀变程度来决定。围岩蚀变程度越强,也就是越靠近矿脉,活动组分的带入或带出量越大。

(3)合仁坪钠长石-石英矿脉中钠长石的钠质不是来自赋矿围岩,而是由成矿流体从外界带入的,可能来自更古老的基底。矿脉石英中的硅质部分来自赋矿围岩。

(4)围岩中 Cu、Pb、Zn、As、Sb、Fe 等元素的带出与矿脉中发育的金属矿物组合(黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、砷黝铜矿和含 As 黄铁矿)非常一致,自然金往往与这些矿石矿物伴生。

参考文献:

References:

- [1] GROVES D I, FOSTER R P. Archaean Lode Gold Deposits[M]// FOSTER R P. Gold Metallogeny and Exploration. Berlin: Springer-Verlag, 1991: 63-103.
- [2] GUHA J, LU H Z, DUBE B, et al. Fluid Characteristics of Vein and Altered Wall Rock in Archean Mesothermal Gold Deposits[J]. Economic Geology, 1991, 86(3): 667-684.
- [3] DE RONDE C E J, SPOONER E T C, DE WIT M J, et al. Shear Zone-related, Au Quartz Vein Deposits in the Barberton Greenstone Belt, South Africa: Field and Petrographic Characteristics, Fluid Properties, and Light Stable Isotope Geochemistry[J]. Economic Geology, 1992, 87(2): 366-402.
- [4] MCCUAIG T C, KERRICH R. *P-T-t*-deformation-fluid Characteristics of Lode Gold Deposits: Evidence from Alteration Systematics[J]. Ore Geology Reviews, 1998, 12(6): 381-453.
- [5] 钟东球. 湖南金矿床类型和分布规律[J]. 湖南地质, 1990, 9(4): 9-14, 22.
ZHONG Dong-qiu. On the Classification and Distribution of Gold Deposits in Hunan Province[J]. Hunan Geology, 1990, 9(4): 9-14, 22.
- [6] 黎盛斯. 湖南找矿突破浅议[J]. 湖南地质, 1991, 10(1): 5-8, 16.

- LI Sheng-si. Elementary Opinion About the Ore-finding Breakthrough in Hunan[J]. Hunan Geology, 1991, 10(1): 5-8, 16.
- [7] 彭建堂. 湖南雪峰地区金成矿演化机理探讨[J]. 大地构造与成矿学, 1999, 23(2): 144-151.
PENG Jian-tang. Gold Mineralization and Its Evolution in the Xuefeng District, Hunan[J]. Geotectonica et Metallogenia, 1999, 23(2): 144-151.
- [8] 中国人民武装警察部队黄金指挥部. 湖南省沃溪式层控金矿地质[M]. 北京: 地震出版社, 1996.
Gold Headquarters of Chinese People's Armed Police Force. Geology of Woxi-type Stratabound Gold Deposit in Hunan Province[M]. Beijing: Seismological Press, 1996.
- [9] 王国强, 彭建堂, 张东亮, 等. 湘西柳林汉金矿带中钠长石的矿物学和地球化学特征[J]. 矿物学报, 2009, 29(4): 463-470.
WANG Guo-qiang, PENG Jian-tang, ZHANG Dong-liang, et al. Mineralogy and Geochemistry of Albites from the Liulincha Gold Ore Belt, Western Hunan Province, China[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2009, 29(4): 463-470.
- [10] BOHLKE J K. Comparison of Metasomatic Reactions Between a Common CO_2 -rich Vein Fluid and Diverse Wall Rocks: Intensive Variables, Mass Transfers, and Au Mineralization at Alleghany, California[J]. Economic Geology, 1989, 84(2): 291-327.
- [11] GAO J, JOHN T, KLEMD R, et al. Mobilization of Ti-Nb-Ta During Subduction: Evidence from Rutile-bearing Dehydration Segregations and Veins Hosted in Eclogite, Tianshan, NW China[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2007, 71(20): 4974-4996.
- [12] PUTNIS A, JOHN T. Replacement Processes in the Earth's Crust[J]. Elements, 2010, 6(3): 159-164.
- [13] GRESENS R L. Composition-volume Relationships of Metasomatism[J]. Chemical Geology, 1967, 2: 47-65.
- [14] GRANT J A. The Isocon Diagram: A Simple Solution to Gresens' Equation for Metasomatic Alteration[J]. Economic Geology, 1986, 81(8): 1976-1982.
- [15] MACLEAN W H. Mass Change Calculations in Altered Rock Series[J]. Mineralium Deposita, 1990, 25(1): 44-49.
- [16] MADEISKY H E, STANLEY C R. Lithogeochemical Exploration of Metasomatic Zones Associated with Volcanic-hosted Massive Sulfide Deposits Using Pearce Element Ratio Analysis [J]. International Geology Review, 1993, 35(12): 1121-1148.
- [17] AGUE J J. Crustal Mass Transfer and Index Mineral Growth in Barrow's Garnet Zone, Northeast Scotland [J]. Geology, 1997, 25(1): 73-76.

- [18] 杨欢欢,唐菊兴,林 彬,等. 西藏甲玛铜多金属矿床成矿系统元素的活动性及质量平衡[J]. 地球科学与环境学报,2014,36(2):51-61.
YANG Huan-huan, TANG Ju-xing, LIN Bin, et al. Element Mobility and Mass Balance of Ore-forming System in Jiama Copper Polymetallic Deposit of Tibet [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2014,36(2):51-61.
- [19] 张炳林,杨立强,黄锁英,等. 胶东焦家金矿床热液蚀变作用[J]. 岩石学报,2014,30(9):2533-2545.
ZHANG Bing-lin, YANG Li-qiang, HUANG Suo-ying, et al. Hydrothermal Alteration in the Jiaojia Gold Deposit, Jiaodong, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2014,30(9):2533-2545.
- [20] 龚庆杰,周连壮,胡 杨,等. 胶东玲珑金矿田煌斑岩蚀变过程元素迁移行为及其意义[J]. 现代地质,2012,26(5):1065-1077.
GONG Qing-jie, ZHOU Lian-zhuang, HU Yang, et al. Element Transfer Behaviors and Its Application During Lamprophyre Alteration in the Linglong Gold Deposit, Jiaodong Peninsula, China [J]. Geoscience, 2012, 26(5): 1065-1077.
- [21] JOHN T, KLEMD R, GAO J, et al. Trace-element Mobilization in Slabs Due to Non Steady-state Fluid-rock Interaction; Constraints from an Eclogite-facies Transport Vein in Blueschist (Tianshan, China) [J]. Lithos, 2008, 103(1/2): 1-24.
- [22] BEINLICH A, KLEMD R, JOHN T, et al. Trace-element Mobilization During Ca-metasomatism Along a Major Fluid Conduit; Eclogitization of Blueschist as a Consequence of Fluid-rock Interaction [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2010, 74(6): 1892-1922.
- [23] GUO S, YE K, CHEN Y, et al. Fluid-rock Interaction and Element Mobilization in UHP Metabasalt: Constraints from an Omphacite-epidote Vein and Host Eclogites in the Dabie Orogen [J]. Lithos, 2012, 136/137/138/139: 145-167.
- [24] MORI Y, NISHIYAMA T, YANAGI T. Chemical Mass Balance in a Reaction Zone Between Serpentinite and Metapelites in the Nishisonogi Metamorphic Rocks, Kyushu, Japan; Implications for Devolatilization [J]. Island Arc, 2007, 16(1): 28-39.
- [25] GUO S, YE K, CHEN Y, et al. A Normalization Solution to Mass Transfer Illustration of Multiple Progressively Altered Samples Using the Isocon Diagram [J]. Economic Geology, 2009, 104(6): 881-886.
- [26] 郭 顺,叶 凯,陈 意,等. 开放地质体系中物质迁移质量平衡计算方法介绍[J]. 岩石学报,2013,29(5):1486-1498.
GUO Shun, YE Kai, CHEN Yi, et al. Introduction of Mass-balance Calculation Method for Component Transfer During the Opening of a Geological System [J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(5): 1486-1498.
- [27] 李昌年. 火成岩微量元素岩石学[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1992.
LI Chang-nian. Igneous Petrology of Trace Element [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1992.
- [28] 南京大学地质学系. 地球化学[M]. 北京:科学出版社,1987.
Department of Geology, Nanjing University. Geochemistry [M]. Beijing: Science Press, 1987.
- [29] 解庆林,马东升,刘英俊. 蚀变岩中物质迁移的定量计算——以锡矿山锑矿床为例[J]. 地质论评,1997,43(1):106-112.
XIE Qing-lin, MA Dong-sheng, LIU Ying-jun. Calculation of Mass Transfer in Altered Rocks—A Case Study of the Xikuangshan Antimony Deposit [J]. Geological Review, 1997, 43(1): 106-112.
- [30] 魏俊浩,刘丛强,张德会,等. 蚀变岩岩石质量平衡及主要成分变异序列:以河南西峡石板沟金矿热液蚀变岩为例[J]. 地球化学,1999,28(5):479-486.
WEI Jun-hao, LIU Cong-qiang, ZHANG De-hui, et al. Major Composition Variation Sequences and Rock Mass Balance of Altered Rocks: As Evidenced by Hydrothermal Altered Rocks of Shibangou Gold Deposit in Xixia, Henan [J]. Geochimica, 1999, 28(5): 479-486.
- [31] 张可清,杨 勇. 蚀变岩质量平衡计算方法介绍[J]. 地质科技情报,2002,21(3):104-107.
ZHANG Ke-qing, YANG Yong. Introduction of the Method for Mass Balance Calculation in Altered Rocks [J]. Geological Science and Technology Information, 2002, 21(3): 104-107.
- [32] 高 斌,马东升. 围岩蚀变过程中地球化学组分质量迁移计算:以湖南沃溪 Au-Sb-W 矿床为例[J]. 地质找矿论丛,1999,14(2):23-29.
GAO Bin, MA Dong-sheng. Identifying the Immobile Elements and Evaluating Mass Transport in the Geochemical Process of the Wall-rock Alteration: Applied to the Woxi Au-Sb-W Deposit in Hunan Province, China [J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 1999, 14(2): 23-29.
- [33] 王 睿. 从江翁浪地区蚀变岩型金矿微量元素地球化学特征[J]. 地球学报,2009,30(1):95-102.
WANG Rui. Trace Elements Geochemical Characteristics of the Wenglang Structural Altered Rock Type Gold Deposit, Congjiang County [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2009, 30(1): 95-102.