

内蒙古柳坝沟金矿床石英和黄铁矿的 稀土元素地球化学特征及成矿意义

张 岩^{1,2}, 顾雪祥³, 章永梅³, 程文斌³, 孙雨沁^{1,2,3}

1. 山东省地质科学实验研究院, 山东 济南 250013; 2. 山东省金属矿产成矿地质过程与资源利用重点实验室,
山东 济南 250013; 3. 中国地质大学 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083

摘 要: 内蒙古柳坝沟金矿床位于华北地台北缘, 是一个典型的以广泛发育钾长石化为重要特色的金矿床。柳坝沟矿床中矿体的石英和黄铁矿的稀土元素特征显示其早期(钾长石化阶段)成矿流体为高温、相对还原的, 晚期成矿流体温度逐渐降低。石英和黄铁矿 Eu 正异常大小是本区寻找石英-钾长石脉型金矿的重要标型特征, Eu 正异常越明显, 含矿性越好。柳坝沟矿区 313[#] 脉矿体中部(163 勘探线附近)以及 163 勘探线以东区域为下一步找矿重点区域, 深部寻找石英-钾长石脉型金矿的可能性较大。

关 键 词: 稀土元素; 成矿流体; 成矿预测; 柳坝沟金矿床; 内蒙古

中图分类号: P618.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2802(2012)01-0023-08

Geochemical Characteristics of Rare Earth Elements and Its Significance in the Mineralization of Quartz and Pyrite in the Liubeigou Gold Deposit, Inner Mongolia

ZHANG Yan^{1,2}, GU Xue-xiang³, ZHANG Yong-mei³,
CHENG Wen-bin³, SUN Yu-qin^{1,2,3}

1. Shandong Institute and Laboratory of Geological Sciences, Shandong, Jinan 250013, China; 2. Shandong Key Laboratory of Geological processes and resource utilization in metallic minerals, Shandong Jinan, 250013, China; 3. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

Abstract: Liubagou gold deposit, lying in the north margin of North China Craton, is a typical deposit characterized by largely potash feldspathization. Geological characteristics of rare earth elements in quartz and pyrite of the Liubagou gold deposit show that the early ore-forming fluid (K-feldspar) is hypothermal and reductive, and that the ore-forming fluid temperature decreases gradually. The Eu positive anomaly of quartz and pyrite is an important typomorphic characteristic for exploring the quartz and K-feldspar vein type gold deposits, and the Eu positive anomaly is proportional to ore-bearing potential. The middle and east parts of No. 313 vein in the Liubagou gold deposit are the key prospecting areas. It is very possible to find the quartz and K-feldspar vein type gold deposit in the deep region.

Key words: rare earth element; ore-forming fluid; metallogenic prediction; liubagou gold deposit; Inner Mongolia

哈达门沟—柳坝沟金矿田位于内蒙古自治区包头市西部, 是华北地台北缘产出的超大型金矿床, 具有重要的经济价值。哈达门沟金矿床成因类型特

殊, 控矿因素复杂, 长期以来对该矿床成矿物质来源、成矿物理化学条件、成矿机制等重要理论问题的认识存在激烈的争论^[1~5], 从而制约了对矿化富集

收稿日期: 2011-01-10 收到, 01-23 改回

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40772060); 国家重点基础研究发展计划项目(2009CB421003-01); 长江学者和创新团队计划资助; 高等学校创新引智计划(B07011); 中国人民武装警察部队科研项目

第一作者简介: 张 岩(1985—), 男, 硕士研究生, 主要从事固体矿产资源勘查、矿床地球化学的研究。E-mail: da-lang@sohu.com.

通讯作者: 顾雪祥(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事矿床学与地球化学研究。E-mail: xuexiang_gu@cugb.edu.cn.

机理以及对深部和外围成矿潜力的认识。

本次研究主要是针对哈达门沟金矿田外围的柳坝沟金矿床,试图研究与 Au 成矿关系极为密切的黄铁矿和石英单矿物的稀土元素特征,来示踪柳坝沟金矿床成矿流体来源和性质,并对矿区深部资源前景进行预测。

1 区域地质概况

矿床位于华北地台北缘,地处阴山前寒武纪变质岩地块与鄂尔多斯中生代凹陷带的衔接部位。哈达门沟—柳坝沟金矿田位于内蒙台隆的乌拉山—大青山复背斜南翼,南北两侧分别被呈北东东向的乌拉山—大青山山前呼市—包头大断裂和临河—集宁山后深大断裂夹持。区域内出露的地层主要为晚太古界乌拉山群。区内总体构造线方向为东西向,控制了整个区域的构造格局,构造非常复杂,褶皱、断裂构造都很发育。

矿区内没有大的岩体,但脉岩相当发育,主要是花岗伟晶岩、辉绿玢岩等。矿体全部赋存于上太古界乌拉山群变质岩中,严格受构造控制,成带分布。矿体多呈脉状、似板状,以近东西向分布为主(如 313[#] 矿脉等),柳坝沟矿区地质简图如图 1。

各矿脉的矿石类型、矿物成分及矿化特征相近,均属贫硫化物型矿石,氧化带不发育,以原生矿为主。矿石自然类型可分为含金黄铁矿-石英脉型,含金黄铁矿-钾长石-石英脉型及含金黄铁矿-硅化钾化蚀变岩型三种,多呈渐变过渡和交替分布。矿石结构主要为它形细粒结构、压碎结构、交代残余结构及花岗变晶结构等,矿石构造多为致密块状、角砾状、

网脉状和浸染状。矿体顶底板围岩主要是黑云斜长片麻岩等,顶底板的围岩蚀变主要是钾长石化、硅化、绢云母化和黄铁矿化。

根据矿脉之间的穿插关系,矿物共生组合及矿石组构等特点,可将该金矿的成矿期划分为三个成矿阶段。分别为金-黄铁矿-石英-钾长石阶段(Ⅰ)、金-多金属硫化物-石英阶段(Ⅱ)、铁氧化物-石英-碳酸盐阶段(Ⅲ)。

2 分析方法与结果

2.1 样品的采集与分析方法

在柳坝沟矿区 313[#] 矿脉的不同深度和沿矿脉走向方向采集了不同类型矿石样品,另有少数样品采自哈达门沟金矿东柏树沟矿区 818[#] 中段,主要为Ⅰ~Ⅲ阶段石英和黄铁矿。黄铁矿呈他形一半自形粒状集合体分布,将样品清洗干净,粉碎至 60~80 目,通过人工重砂法从样品中分离出黄铁矿,再在双目镜下手工挑选与金成矿关系密切的黄铁矿,其中,黄铁矿大多是来自于所圈定的矿体部分,且黄铁矿是其主要的载金矿物。伴有明显钾长石化的属Ⅰ阶段矿石,伴有多金属硫化物共生的属Ⅱ阶段矿石,挑选出的黄铁矿单矿物经过了详细的镜下检查,纯度高于 99%。石英是将其粉碎至 40~60 目,在双目镜下手工挑选,纯度高于 99%。

微量元素分析采用核工业北京地质分析测试研究中心 Finnigan MAT 制造的 HR-ICP-MS 测定,测试方法和依据为 DZ/T0223-2001 电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)方法通则。测试样品温度 20℃,相对湿度 30%。

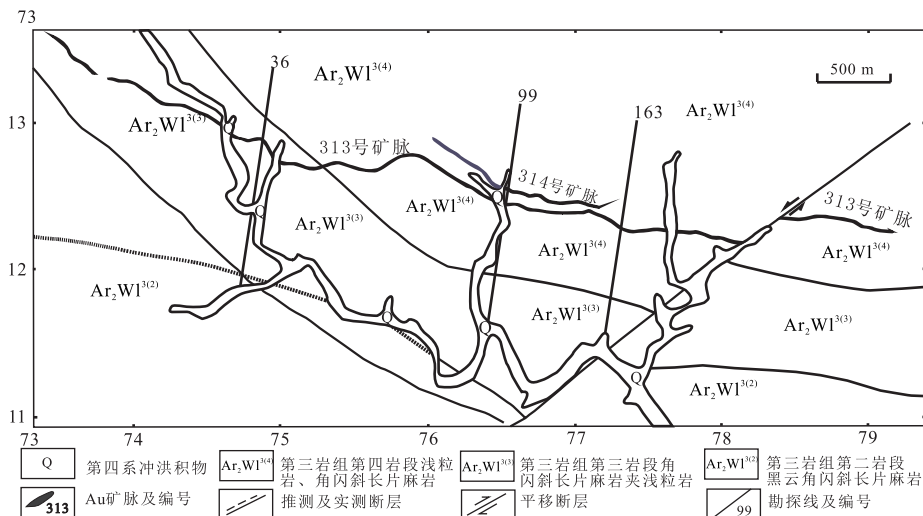


图 1 柳坝沟矿区地质简图(据中国人民武装警察部队黄金第二支队内部资料修改)
Fig.1 Geological sketch map of the Liubeigou gold deposit

2.2 结果

石英的稀土元素及其特征值见表1,稀土元素配分型式见图2,测试石英主要来自于石英脉、石英-钾长石脉、蚀变片麻岩、钾硅化蚀变岩及伟晶岩脉,均与成矿关系较为密切。

石英稀土元素球粒陨石标准化配分模式较为相似,仅一个样品表现为弱Eu负异常(ZK16304-16-1)。稀土元素总量较低, ΣREE 为 $5.74 \times 10^{-6} \sim 63.52 \times 10^{-6}$ 。轻稀土总量为 $4.36 \times 10^{-6} \sim 61.59 \times 10^{-6}$ 。重稀土总量为 $1.07 \times 10^{-6} \sim 4.59 \times 10^{-6}$ 。轻重稀土比 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 为 $1.77 \sim 31.91$ 。球粒陨石标准化曲线缓右倾,属轻稀土富集型。 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 为 $1.08 \sim 104.97$ 。 $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 为 $1.18 \sim 11.17$ 。Eu正异常极为明显, δEu 为 $0.78 \sim 6.61$,平均为 2.81 。Ce为弱的负异常, δCe 为 $0.86 \sim 1.04$,平均为 0.96 。

伟晶岩脉(ZK16305-28-2)中石英的稀土元素总量较高, ΣREE 为 63.52×10^{-6} ,轻重稀土之间的分馏以及轻稀土之间的分馏均较为明显,轻重稀土比 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 为 31.91 , $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 为 104.97 ,

$(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 为 11.17 ,均明显高于石英脉等的平均值,但Eu正异常、Ce弱负异常等特征与石英脉中石英的较为一致。

黄铁矿的稀土元素及其特征值见表2和表3,稀土元素配分型式见图3,测试的黄铁矿主要采自于石英脉或石英-钾长石脉、硫化物矿石、围岩片麻岩及非含矿石英脉。

由表2和图3A可知,柳坝沟含矿石英脉的黄铁矿单矿物稀土元素球粒陨石标准化配分模式较为相似。稀土元素总量较低, ΣREE 为 $0.83 \times 10^{-6} \sim 36.99 \times 10^{-6}$ 。轻稀土总量为 $0.76 \times 10^{-6} \sim 35.63 \times 10^{-6}$ 。重稀土总量为 $0.07 \times 10^{-6} \sim 1.35 \times 10^{-6}$ 。轻重稀土比 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 为 $5.74 \sim 26.34$,球粒陨石标准化曲线明显右倾,属轻稀土富集型。 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 为 $13.21 \sim 121.34$ 。 $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 为 $2.34 \sim 5.97$ 。Eu正异常极为明显, δEu 为 $1.24 \sim 9.17$ (哈达门沟一个样品为 9.17),平均为 3.56 。Ce为弱的负异常(仅一件为弱正异常), δCe 为 $0.87 \sim 1.12$,平均为 0.94 。

表1 石英的稀土元素含量及其特征值

Table 1 Rare earth elements concentrations and feature values of the quartz

$w_B/10^{-6}$

岩石名称	石英脉					石英-钾长石脉	硅化片麻岩	钾硅化蚀变岩
样号	313-TK-10	H818-C121-3	ZK16304-16-1	ZK3603-7	ZK9903-14	H818-C139-3-2	ZK10802-4	ZK16305-28-2
La	0.98	2.56	5.41	2.90	0.90	1.25	2.85	18.00
Ce	1.95	4.52	9.38	5.28	1.71	2.97	5.66	29.40
Pr	0.24	0.65	0.90	0.62	0.21	0.43	0.81	2.94
Nd	1.00	2.33	3.00	2.54	0.98	2.17	3.63	9.55
Sm	0.31	0.55	0.41	0.47	0.27	0.69	1.03	1.04
Eu	0.18	1.79	0.11	0.45	0.28	0.62	1.15	0.66
Gd	0.36	1.25	0.43	0.50	0.30	0.83	1.18	1.12
Tb	0.10	0.13	0.04	0.09	0.06	0.21	0.17	0.11
Dy	0.58	0.83	0.20	0.57	0.36	1.40	0.83	0.34
Ho	0.11	0.14	0.04	0.10	0.07	0.26	0.14	0.05
Er	0.33	0.42	0.12	0.26	0.24	0.80	0.33	0.15
Tm	0.04	0.07	0.03	0.04	0.04	0.13	0.05	0.02
Yb	0.25	0.38	0.19	0.21	0.26	0.83	0.21	0.12
Lu	0.03	0.06	0.03	0.03	0.04	0.14	0.03	0.02
ΣREE	6.45	15.66	20.28	14.07	5.74	12.72	18.07	63.52
ΣLREE	4.66	12.39	19.21	12.27	4.36	8.13	15.13	61.59
ΣHREE	1.79	3.27	1.07	1.80	1.37	4.59	2.94	1.93
$\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$	2.60	3.80	17.90	6.81	3.17	1.77	5.15	31.91
Eu/Eu*	1.65	6.61	0.78	2.83	3.02	2.52	3.19	1.86
Ce/Ce*	0.99	0.86	1.04	0.96	0.96	0.99	0.91	0.99
$(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$	2.84	4.90	20.64	9.77	2.46	1.08	9.55	104.97
$(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$	2.03	3.02	8.62	3.97	2.14	1.18	1.79	11.17

注: H818-C121-3 和 H818-C139-3-2 采自哈达门沟矿区,样品均属于 I 成矿阶段。 $\text{Eu}/\text{Eu}^* = (\text{Eu})_{\text{N}}/(\text{Sm}_{\text{N}} \times \text{Gd}_{\text{N}})^{1/2}$, $\text{Ce}/\text{Ce}^* = (\text{Ce})_{\text{N}}/(\text{La}_{\text{N}} \times \text{Pr}_{\text{N}})^{1/2}$, $\text{LREE}/\text{HREE} = \Sigma(\text{La}-\text{Sm})/\Sigma(\text{Gd}-\text{Lu})$, 球粒陨石标准化值据 Sun *et al.*, 1989

表 2 含石英-钾长石脉中黄铁矿稀土元素含量及其特征值
Table 2 Rare earth elements concentrations and feature values of the pyrite in the ore-bearing quartz-k-feldspar veins

	$w_B/10^{-6}$							
样 号	ZK16035-20-1	ZK16305-23	ZK3602-6	PD2-7	PD2-8	H818-C121-3	ZK26704-12	ZK5206-9
La	1.86	9.43	1.00	0.17	0.72	0.27	0.96	0.61
Ce	2.85	15.90	1.81	0.31	1.27	0.55	1.81	0.84
Pr	0.35	1.79	0.23	0.04	0.15	0.07	0.16	0.09
Nd	1.30	6.89	0.98	0.16	0.60	0.27	0.68	0.44
Sm	0.25	1.02	0.22	0.05	0.10	0.05	0.12	0.11
Eu	0.20	0.60	0.07	0.03	0.09	0.16	0.04	0.20
Gd	0.18	0.73	0.14	0.03	0.09	0.05	0.06	0.09
Tb	0.02	0.08	0.02	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02
Dy	0.07	0.26	0.09	0.02	0.09	0.03	0.07	0.12
Ho	0.01	0.04	0.02	0.00	0.01	0.01	0.01	0.03
Er	0.02	0.11	0.04	0.01	0.04	0.02	0.03	0.07
Tm	0.00	0.02	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01
Yb	0.01	0.09	0.03	0.01	0.04	0.01	0.03	0.06
Lu	0.00	0.02	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01
ΣREE	7.13	36.99	4.67	0.83	3.23	1.51	3.98	2.68
ΣLREE	6.81	35.63	4.32	0.76	2.93	1.38	3.77	2.28
ΣHREE	0.31	1.35	0.35	0.07	0.30	0.13	0.22	0.40
ΣLREE/ΣHREE	21.70	26.34	12.38	11.72	9.86	10.67	17.53	5.74
Eu/Eu*	2.86	2.14	1.24	2.89	2.76	9.17	1.44	6.01
Ce/Ce*	0.87	0.95	0.92	0.91	0.94	0.95	1.12	0.87
(La/Yb) _N	121.34	71.99	21.11	20.81	13.21	15.01	23.82	7.49
(La/Sm) _N	4.73	5.97	2.91	2.34	4.68	3.25	5.27	3.46

注:Eu/Eu*=(Eu)_N/(Sm_N×Gd_N)^{1/2},Ce/Ce*=(Ce)_N/(La_N×Pr_N)^{1/2},LREE/HREE=Σ(La-Sm)/Σ(Gd-Lu),球粒陨石标准化值据 Sun *et al.*,1989,样品均属于 I 成矿阶段

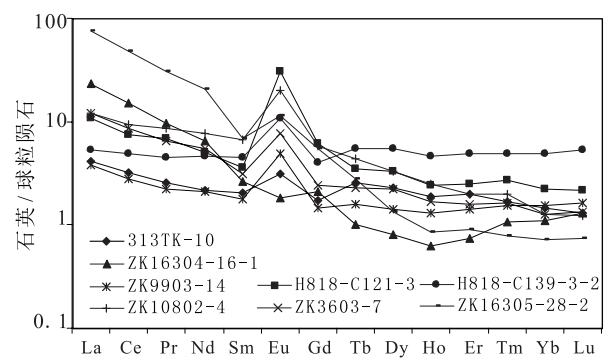


图 2 石英稀土元素分布型式
Fig.2 REE patterns of the quartz

由表 3 和图 3B 可知,多金属硫化物阶段的黄铁矿单矿物稀土元素球粒陨石标准化配分模式也较为相似,但是明显不同于含石英脉中黄铁矿单矿物稀土元素球粒陨石标准化配分模式,ΣREE 为 5.60×10⁻⁶~25.58×10⁻⁶。轻稀土总量为 5.12×10⁻⁶~23.32×10⁻⁶。重稀土总量为 0.48×10⁻⁶~2.26×10⁻⁶。轻重稀土比 ΣLREE/ΣHREE 为 10.33~15.16。球粒陨石标准化曲线明显右倾,属轻稀土富集型。(La/Yb)_N 为 11.48~35.65。(La/Sm)_N 为 4.00~5.74。δEu 为 0.75~1.24(仅一件

为弱 Eu 正异常),平均为 0.94,为弱负异常。δCe 为 0.98~1.07,平均为 1.01。

为了便于对比分析,本次研究还测试了围岩和不含石英脉中的黄铁矿。总体来说,蚀变片麻岩和非含石英脉中黄铁矿稀土元素总量较低。

由表 3 和图 3C 非含石英脉中黄铁矿 ΣREE 为 9.82×10⁻⁶,轻稀土总量为 9.04×10⁻⁶,重稀土总量为 0.78×10⁻⁶,轻重稀土比 ΣLREE/ΣHREE 为 11.57,球粒陨石标准化曲线明显右倾,属轻稀土富集型,(La/Yb)_N 为 16.98,(La/Sm)_N 为 2.66。δEu 为 0.76,为负异常,δCe 为 1.03,为弱正异常。围岩片麻岩的黄铁矿单矿物稀土元素球粒陨石标准化配分模式变化较大。ΣREE 为 3.56×10⁻⁶~15.79×10⁻⁶。轻稀土总量为 3.35×10⁻⁶~17.63×10⁻⁶。重稀土总量为 0.21×10⁻⁶~1.51×10⁻⁶。轻重稀土比 ΣLREE/ΣHREE 为 9.48~15.89。球粒陨石标准化曲线明显右倾,属轻稀土富集型。(La/Yb)_N 为 13.36~19.42。(La/Sm)_N 为 1.12~3.05。δEu 为 0.37~1.45,平均为 0.91,为弱负异常。δCe 为 1.05~1.21,平均为 1.13,为弱正异常。

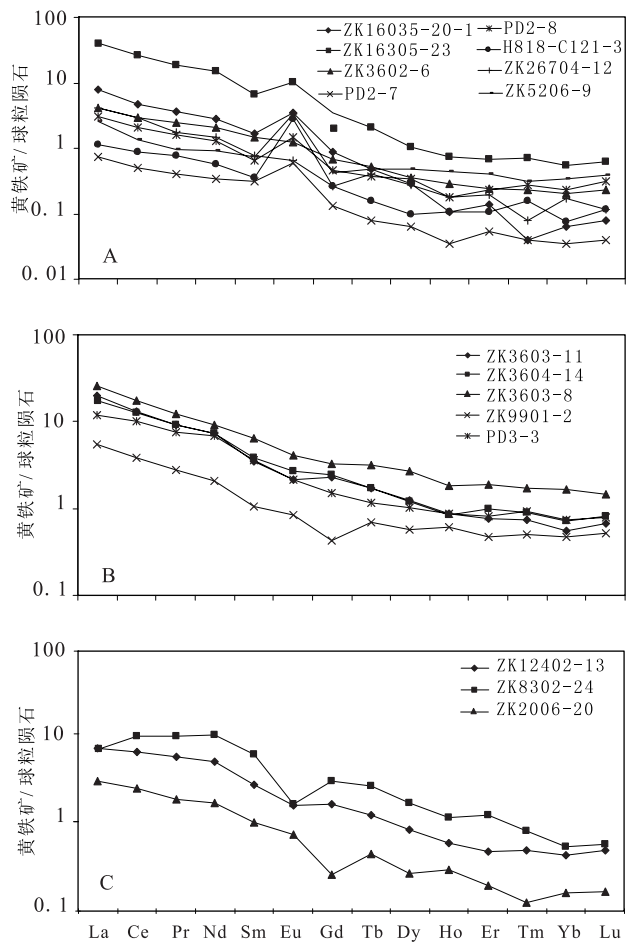


图3 黄铁矿稀土元素分布型式
Fig.3 REE patterns of the pyrite

3 分析结果及讨论

3.1 成矿流体特征

由于石英具有稳定的结构,硅氧四面体以牢固的架状结构连接,杂质离子含量低,且难以进入石英晶格,所以石英的稀土元素可以认为主要存在于其包裹体溶液中^[6~8]。因此,含矿石英脉或石英-钾长石脉中的石英稀土元素组成基本可以代表成矿流体的组成特征,主要表现为极明显的Eu正异常和弱Ce负异常,属轻稀土富集型,轻重稀土和轻稀土之间的分馏并不明显。与东坪碲化物热液型金矿床^[6]和胶东焦家式金矿床成矿早期的钾长石化阶段^[8]石英的特征基本相同。另外,石英脉或石英-钾长石脉型矿石黄铁矿的稀土元素配分型式与石英的基本一致,但多金属硫化物阶段矿石黄铁矿的稀土元素配分型式却与石英的显著不同。石英-钾长石脉型矿石属Ⅰ成矿阶段(钾化阶段)的产物,多金属硫化物型矿石属Ⅱ成矿阶段的产物,说明从早期矿化到晚期矿化阶段,黄铁矿的Eu正异常在减弱,成矿温度在逐渐减低。

热液成因石英的稀土元素配分型式通常显示Eu正异常,而变质成因石英则未见Eu异常^[9],本文中含矿石英与Kasperske Hory和Muruntau热液石英脉型金矿中石英的REE配分型式^[9]也较为

表3 多金属硫化物、围岩、非含矿石英脉中黄铁矿稀土元素含量及其特征值

Table 3 Rare earth elements concentrations and feature values of the pyrite in the polymetallic sulphides, wall rocks and non-ore-bearing quartz veins

岩石名称 样 号	多金属硫化物矿石					片麻岩(围岩)		$w_B/10^{-6}$ 非含矿石英脉
	ZK3603-11	ZK3604-14	ZK3603-8	ZK9901-2	PD3-3	ZK8302-24	ZK2006-20	ZK12402-13
La	4.67	4.12	6.02	1.28	2.78	1.62	0.70	1.68
Ce	8.04	7.68	10.60	2.38	6.20	6.03	1.51	3.98
Pr	0.87	0.86	1.16	0.27	0.72	0.92	0.18	0.53
Nd	3.41	3.40	4.33	0.98	3.18	4.68	0.77	2.35
Sm	0.53	0.60	0.97	0.16	0.55	0.94	0.15	0.41
Eu	0.12	0.16	0.24	0.05	0.12	0.09	0.04	0.09
Gd	0.47	0.49	0.68	0.09	0.31	0.61	0.05	0.33
Tb	0.07	0.06	0.12	0.03	0.04	0.10	0.02	0.05
Dy	0.32	0.30	0.68	0.15	0.26	0.42	0.07	0.21
Ho	0.05	0.05	0.10	0.03	0.05	0.06	0.02	0.03
Er	0.13	0.17	0.31	0.08	0.14	0.20	0.03	0.08
Tm	0.02	0.02	0.04	0.01	0.02	0.02	0.00	0.01
Yb	0.09	0.12	0.28	0.08	0.12	0.09	0.03	0.07
Lu	0.02	0.02	0.04	0.01	0.02	0.01	0.00	0.01
ΣREE	18.80	18.05	25.58	5.60	14.52	15.79	3.56	9.82
ΣLREE	17.64	16.81	23.32	5.12	13.55	14.28	3.35	9.04
ΣHREE	1.16	1.24	2.26	0.48	0.97	1.51	0.21	0.78
ΣLREE/ΣHREE	15.16	13.57	10.33	10.69	14.03	9.48	15.89	11.57
Eu/Eu*	0.75	0.87	0.90	1.24	0.91	0.37	1.45	0.76
Ce/Ce*	0.98	1.00	0.98	1.00	1.07	1.21	1.05	1.03
(La/Yb) _N	35.65	24.43	15.37	11.48	16.08	13.36	19.42	16.98
(La/Sm) _N	5.74	4.47	4.00	5.04	3.27	1.12	3.05	2.66

注:Eu/Eu* = (Eu)_N / (Sm_N × Gd_N)^{1/2}, Ce/Ce* = (Ce)_N / (La_N × Pr_N)^{1/2}, LREE/HREE = Σ(La-Sm) / Σ(Gd-Lu), 球粒陨石标准化值据 Sun et al., 1989, 样品均属于Ⅱ成矿阶段

相似,但是后者 Ce 正异常更为明显。本区石英的稀土元素总量明显要高于热液石英脉型金矿床中石英的稀土总量,这可能是由于柳坝沟金矿床为受钾长石化等蚀变影响的热液—蚀变岩型金矿。另外,德国的巴伐利亚剪切带内的金矿中石英的 Eu 正异常表明围岩中发生了较强的钾长石化^[10]。然而,本区的一个重要的找矿标志就是围岩的钾长石化,通过本次研究得出本区与成矿关系密切的石英中基本均为明显的 Eu 正异常,暗示钾长石化的确对 Au 的富集起到了促进作用。Kempe 在研究热液锡矿床中得出:在较为还原的条件下,富重稀土的流体与高温的花岗质熔体之间的相互作用导致了 Eu 在花岗岩中的负异常,以及热液流体的 Eu 正异常^[11]。另外,Myutenbai 的石英和白钨矿显示为 Eu 正异常,表明 Myutenbai 矿床下部的花岗岩与流体的相互作用是与成矿过程存在一定的可能性^[9]。

当 Eu 主要以 Eu^{2+} 形式存在于矿石中时,具有较大离子半径和较小电荷数的 Eu^{2+} 相对其他三价稀土显然更容易被流体带出矿石,因此矿石沉淀后的流体作用不会导致其 Eu 正异常的出现。因此矿石 Eu 正异常不应是后期地质作用的结果,而是矿石沉淀时所继承的成矿热液稀土特征反映^[12]。虽然对流体中 Eu 正异常的形成机理尚存在不同的解释,但是有一点可以肯定的是, Eu 主要应以 2 价态离子出现为前提^[12,13]。 Eu^{2+} 和 Eu^{3+} 的相对稳定性以及 Eu 正异常或负异常的出现与温度,其次与 fO_2 关系密切^[14]。 Eu^{2+} 通常在高温(大于 250°C)、强还原条件下更为稳定^[14]。如前所述,柳坝沟矿区石英单矿物的 δEu 为 $0.78\sim6.61$,平均为 2.81 。早期钾化阶段黄铁矿单矿物的 δEu 为 $1.24\sim9.17$,平均为 3.56 。石英单矿物和早期钾化阶段黄铁矿单矿物的极明显的 Eu 正异常充分说明在较高温度和较为还原的条件下有足够多的成矿流体中的 Eu^{3+} 被还原为 Eu^{2+} 。指示本矿区成矿早期为较高温度(大于 250°C)和相对还原的流体特征。后期多金属硫化物阶段的黄铁矿单矿物的 δEu 为 $0.75\sim1.24$,平均为 0.94 。说明随着成矿作用的进行成矿温度逐渐降低,成矿流体中 Eu^{3+} 逐渐增多。另外,通过对柳坝沟金矿床的流体包裹体进行系统的研究得出成矿流体属中高温、中低盐度、中等密度的流体,早期的石英—钾长石阶段的流体包裹体的均一温度为 $330\sim480^\circ\text{C}$,石英—多金属硫化物阶段的均一温度为 $190\sim340^\circ\text{C}$,矿床形成于中深成矿环境,成矿作用是一个温度退缩的过程^[15]。因此,根据流体包裹体研究得出的结论与本文通过研究单矿物稀土元素得出

的结论近于一致,充分说明石英和黄铁矿的稀土元素特征反应了成矿流体的特征和变化规律。

虽然柳坝沟矿区不同类型岩脉的轻、重稀土之间的分馏较为明显,但总体来看,不同类型脉岩的稀土元素配分型式与上述的成矿流体的特征较为相似,均显示为较明显 Eu 正异常的轻稀土富集型,尤其是与矿区西部的大桦背花岗伟晶岩脉的稀土配分型式较为相似^[16]。综合上述,可以推断岩浆期后的热液作用很可能在成矿过程中发挥了重要作用。

3.2 对于成矿预测的指示意义

哈达门沟金矿区成矿早期的黄铁矿主要以较低的 ΣREE 值和较高的 Eu 正异常为主要特征,而柳坝沟金矿区地表矿体的黄铁矿(PD2-7 和 PD2-8)的稀土配分型式及各特征参数值与其较为接近,仅 Eu 正异常程度明显不如哈达门沟矿区。柳坝沟金矿区 313[#] 脉矿体由顶部至底部黄铁矿 Eu 正异常变化并不明显,但是沿矿体走向方向上变化较大,矿体西部黄铁矿 Eu 正异常并不明显,而矿体中部(163 勘探线附近)以及 163 勘探线以东区域黄铁矿 Eu 正异常较为明显。成矿早期(钾化阶段)的石英或石英—钾长石脉的石英和黄铁矿的稀土配分模式近于一致,并且其 Eu 正异常越明显,含矿性越好,石英和黄铁矿 Eu 正异常大小是本区寻找石英—钾长石脉型金矿的重要标型。

硫化物型矿石黄铁矿的 Eu 无明显异常,轻重稀土之间分馏比前者小,可能更多的继承了围岩片麻岩的稀土元素特征,并不一定反映成矿流体的特征。这种矿石黄铁矿的 ΣREE 比石英—钾长石脉型的 ΣREE 高, $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 值较接近,前者表现为无明显 Eu 异常,后者表现为 Eu 正异常。围岩中黄铁矿主要表现为 Eu 负异常或无明显异常,但受含矿热液的影响,接近矿体部分围岩的黄铁矿表现为 Eu 正异常。矿体部分黄铁矿相对其近矿围岩中黄铁矿的 ΣREE 值偏大, $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 值偏小, δEu 值相当。因此,围岩中黄铁矿 Eu 正异常也是其附近存在矿体的有利证据。

通过对玲珑型和焦家型金矿普遍发育强烈的交代蚀变作用的研究得出交代蚀变作用及其所产生的岩石在时间上(从早到晚),空间上(自下而上)的演化一般为:碱交代(钾长石化为主)—氢交代带(如绢云母化和黄铁绢英岩化)—硅化、泥化—碳酸盐化^[17,18]。另外,产在碱性杂岩体内外接触带的东坪改造型热液金矿床也存在这种空间关系^[6],表明二者在成因、时空关系上都存在紧密联系。将哈达门沟—柳坝沟金矿田与胶东的玲珑和焦家型金矿田进

行对比,认为 313[#]脉矿体出露位置已经到达或接近碱交代带,上部的氢交代带和硅化带等已经遭受了一定程度的剥蚀。另外,通过对哈达门沟和柳坝沟金矿区矿体部分的石英和黄铁矿的晶胞参数特征研究得出,哈达门沟金矿区石英样品的晶胞参数(a_0)恰好与柳坝沟金矿区的石英晶胞参数(a_0)呈线性关系^[16],推断柳坝沟矿区的成矿温度压力及成矿条件较为相似,但柳坝沟 313[#]矿脉的西部比中东部抬升和剥蚀更严重。313[#]脉东部深部的黄铁矿 a_0 值有继续变大的可能,是寻找金的重点区域。柳坝沟矿区 313[#]矿脉中东部的深部会有更好的成矿潜力。对比哈达门沟矿区的成矿地质条件,本区深部寻找石英-钾长石脉型金矿的可能性极大。

4 结 论

(1)主成矿阶段(钾化阶段)的成矿流体显示为较高温度(大于 250℃)和相对还原的流体特征。从早期矿化到晚期矿化阶段,黄铁矿的 Eu 正异常在减弱,成矿温度在逐渐减低。岩浆期后的热液作用很可能在成矿过程中发挥了重要作用。

(2)石英和黄铁矿 Eu 正异常大小是本区石英-钾长石脉型金矿的重要标型特征。Eu 正异常越明显,含矿性越好。

(3)柳坝沟矿区 313[#]脉矿体中部(163 勘探线附近)及 163 勘探线以东区域为下一步找矿重点区域,深部寻找石英-钾长石脉型金矿的可能性较大。

致 谢:野外工作和资料收集过程得到了武警黄金部队刘纲、李润军、李福亮、樊威、石磊等的大力支持,野外工作还得到了武警黄金部队第二支队战士们、中国地质大学(北京)2005 级和 2006 级国防生们及王立强、景亮兵、沈阳的协助,审稿老师提出了宝贵的修改意见和建议,在此一并致谢!

参考文献 (References):

- [1] 李强之,朱成伟,吴尚全,刘纲. 内蒙古哈达门沟金矿床钾长石化蚀变特征及其成矿意义[J]. 现代地质, 1999, 13(3): 315—322.
Li Qiangzhi, Zhu Chengwei, Wu Shangquan, Liu Gang. Alteration features of K-feldspathization and its significance to gold mineralization, Hadamengou gold deposit, the Inner Mongolia[J]. Geoscience, 1999, 13(3): 315—322. (in Chinese with English abstract)
- [2] 李强之,陈衍景,徐登科,杨理勤. 哈达门沟金矿床单矿物金浸出实验研究及其地质意义[J]. 矿床地质, 2003, 22(3): 271—277.
Li Qiangzhi, Chen Yanjing, Xu Dengke, Yang Liqin. An experimental study of gold leaching from host minerals of Hadamengou gold deposit and its geological implications[J]. Mineral Deposits, 2003, 22(3): 271—277. (in Chinese with English abstract)
- [3] 聂凤军,江思宏,刘妍,胡朋. 再论内蒙古哈达门沟金矿床的成矿时限问题[J]. 岩石学报, 2005, 21(6): 1719—1728.
Nie Fengjun, Jiang Sihong, Liu Yan, Hu Peng. Re-discussions on the time limitation of gold mineralization occurring within the Hadamengou deposit, south-central Inner Mongolia autonomous region[J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 21(6): 1719—1728. (in Chinese with English abstract)
- [4] 苗来成, Qiu Yumin, 关康, Neal Menaughton, 裴有守, 罗镇宽, David Groves. 哈达门沟金矿床成岩成矿时代的定点定年研究[J]. 矿床地质, 2000, 19(2): 182—190.
Miao Laicheng, Qiu Yumin, Guan Kang, Neal Menaughton, Qiu Youshou, Luo Zhenkuan, David Groves. Shrimp chronological study of the granitoids and mineralization in the Hadamengou gold deposit, Inner Mongolia[J]. Mineral Deposits, 2000, 19(2): 182—190. (in Chinese with English abstract)
- [5] 孟伟,陈小伍,李蒙文. 内蒙古哈达门沟金矿成矿时代及成矿阶段研究[J]. 黄金地质, 2002, 8(4): 13—17.
Meng Wei, Chen Xiaowu, Li Mengwen. Study on metallogenic epoch and metallogenic stages of the Hadamengou gold deposit, Inner Mongolia[J]. Gold Geology, 2002, 8(4): 13—17. (in Chinese with English abstract)
- [6] 包志伟,赵振华. 东坪金矿床成矿过程中稀土元素活动性[J]. 地球化学, 1998, 27(1): 81—90.
Bao Zhiwei, Zhao Zhenhua. Rare-earth element mobility during ore-forming process of Dongping gold deposit[J]. Geochimica, 1998, 27(1): 81—90. (in Chinese with English abstract)
- [7] 范建国,倪培,苏文超,漆亮,田京辉. 辽宁四道沟热液金矿床中石英的稀土元素的特征及意义[J]. 岩石学报, 2000, 16(4): 587—590.
Fan Jianguo, Ni Pei, Su Wenchao, Qi Liang, Tian Jinghui. Characteristics and significance of rare earth elements in quartz of Sidaogou hydrothermal gold deposit, Liaoning[J]. Acta Petrologica Sinica, 2000, 16(4): 587—590. (in Chinese with English abstract)
- [8] 李厚民,沈远超,毛景文,刘铁兵,朱和平. 石英、黄铁矿及其包裹体的稀土元素特征——以胶东焦家式金矿为例[J]. 岩石学报, 2003, 19(2): 267—274.
Li Houmin, Shen Yuanchao, Mao Jingwen, Liu Tiebing, Zhu Heping. REE features of quartz and pyrite and their fluid inclusions: An example of Jiaojia-type gold deposits, northwestern Jiaodong peninsula[J]. Acta Petrologica Sinica, 2003, 19(2): 267—274. (in Chinese with English abstract)
- [9] Monecke T, Kempe U, Gotze J. Genetic significance of the trace element content in metamorphic and hydrothermal quartz: A reconnaissance study[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2002, 202: 709—724.
- [10] Peucker-Ehrenbrink B, Schnier C. Investigation of rare earth

- elements in quartz from the Bavarian Pfahl, Germany, by means of instrumental neutron activation analysis[J]. Nucl. Geophys., 1992, 6: 249—260.
- [11] Kempe U, Belyatsky B V, Krymsky R S, Kremenetsky A A, Ivanov P A. Sm-Nd and Sr isotope systematics of scheelite from the giant Au(-W) deposit Muruntau (Uzbekistan): implications for the age and sources of Au mineralization[J]. Mineral. Deposita, 2001, 36: 379—392.
- [12] 丁振举, 姚书振, 刘丛强, 周宗桂, 杨明国. 东沟坝多金属矿床喷流沉积成矿特征的稀土元素地球化学示踪[J]. 岩石学报, 2003, 19(4): 792—798.
Ding Zhenju, Yao Shuzhen, Liu Congqiang, Zhou Zonggui, Yang Mingguo. The characteristics of exhalation-sedimentary deposit of Donggouba polymetal deposit: Evidence from ore's REE composition[J]. Acta Petrologica Sinica, 2003, 19(4): 792—798. (in Chinese with English abstract)
- [13] 顾雪祥, 刘建明, Oskar Schulz, Franz Vavtar, 付绍洪. 湖南沃溪金-锑-钨矿床成因的稀土元素地球化学证据[J]. 地球化学, 2005, 34(5): 428—442.
Gu Xuexiang, Liu Jianming, Oskar Schulz, Franz Vavtar, Fu Shaohong. REE geochemical evidence for the genesis of the Woxi Au-Sb-W deposit, Hunan Province[J]. Geochimica, 2005, 34(5): 428—442. (in Chinese with English abstract)
- [14] Sverjensky, Dimitri A. Europium redox equilibria in aqueous solution[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1984, 67(1): 70—78.
- [15] 沈阳. 内蒙古柳坝沟金矿床流体包裹体研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2010: 1—61.
- Shen Yang. Fluid inclusion study of the Liubeigou gold deposit in Inner Mongolia[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2010: 1—61. (in Chinese with English abstract)
- [16] 张岩. 内蒙古柳坝沟金矿床成因矿物学与找矿矿物学研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2010: 1—85.
Zhang Yan. Genetic mineralogy and prospecting mineralogy of the Liubeigou gold deposit in Inner Mongolia, China[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2010: 1—85. (in Chinese with English abstract)
- [17] 胡受奚, 赵懿英, 周顺之, 陈衍景, 叶瑛, 季海章, 卢冰, 徐兵, 刘红樱. 华北地台金矿成矿规律[J]. 南京大学学报(自然科学版), 2000, 36(2): 133—139.
Hu Shouxi, Zhao Yiyong, Zhou Shunzhi, Chen Yanjing, Ye Ying, Ji Haizhang, Lu Bing, Xu Bing, Liu Hongying. Geology and geochemistry of gold deposits in the North China platform[J]. J. Nanjing University (*Natural Sciences Edition*), 2000, 36(2): 133—139. (in Chinese with English abstract)
- [18] 胡受奚, 赵懿英, 孙景贵, 凌洪飞, 叶瑛, 卢冰, 季海章, 徐兵, 刘红樱, 方长泉. 华北地台重要金矿成矿过程中的流体作用及其来源研究[J]. 南京大学学报(自然科学版), 2002, 38(3): 381—391.
Hu Shouxi, Zhao Yiyong, Sun Jinggui, Ling Hongfei, Ye Ying, Lu Bing, Ji Haizhang, Xu Bing, Liu Hongying, Fang Changquan. Fluids and their sources for gold mineralizations in the North China platform[J]. J. Nanjing University (*Natural Sciences Edition*), 2002, 38(3): 381—391. (in Chinese with English abstract)