

四川大渡河黑金台子金矿成矿流体稀土元素地球化学

李晓峰¹, 毛景文¹, 朱和平², 王瑞廷³

(1. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 北京 100037; 2. 中国科学院 地质与地球物理研究所, 北京 100029;
3. 西北大学 地质系, 陕西 西安 710069)

摘要: 黑金台子金矿位于青藏高原东缘, 赋存于大渡河剪切带的次级剪切带中。本文在对矿床成矿流体包裹体测试的基础上, 通过对石英流体包裹体中的稀土元素、单矿物石英中的稀土元素、含金石英脉全岩稀土元素、赋矿围岩的稀土元素特征的研究, 并结合区域上康定杂岩的稀土元素特征, 讨论了成矿流体来源, 证实了黑金台子金矿成矿流体具有深部来源的特征。石英流体包裹体中的稀土元素含量变化于 $1\ 846.4 \times 10^{-12}$ ~ $16\ 003.4 \times 10^{-12}$ 之间, 分配模式为平坦型, 具有轻重稀土元素分馏作用特征, 明显不同于矿区外围元古宙康定杂岩中不同类型岩石的稀土元素特征, 而类似于矿区赋矿岩石的特征。

关键词: 流体包裹体; 稀土元素; 成矿流体; 黑金台子; 大渡河; 四川

中图分类号: P618.51; P595

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2005)04-0311-08

Characteristics of rare earth elements in fluids inclusions of the Heijintaizi gold deposit, Daduhe areas, Sichuan Province

LI Xiao_feng¹, MAO Jing_wen¹, ZHU He_ping² and WANG Rui_ting³

(1. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 3. Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China)

Abstract: The Heijintaizi gold deposit is located on the western margin of the Yangtze craton and also on the eastern margin of Tibet. The gold deposit is hosted in Proterozoic plagioplate and controlled by a NS_trending ductile_brittle shear zone. Gold mineralization occurs mainly as auriferous quartz veins. This paper presents REE analyses of fluid inclusions and quartz which hosts the fluid inclusions as well as auriferous quartz veins. The results show that the REE content of fluid inclusions ranges from $1\ 846.4 \times 10^{-12}$ to $16\ 003.4 \times 10^{-12}$, that of quartz ranges from 2.15×10^{-6} to 4.35×10^{-6} , and that of auriferous quartz veins varies from 2.59×10^{-6} to 7.70×10^{-6} . Combined with REE characteristics of host rocks and Kangding complex in the area, the authors hold that REE characteristics of fluid inclusions give some clues to the origin of the ore_forming fluids, which must have been derived from deep fluids. The REE of fluid inclusions in quartz were also derived from deep fluids. It is concluded that a careful study of REE in fluid inclusions may play an important role in probing into ore genesis and fluid evolution.

Key words: fluid inclusions; REE; ore_forming fluids; Heijintaizi; Daduhe; Sichuan Province

成矿流体来源是矿床成因研究的一个重要方面。近年来, 随着分析测试技术手段的不断提高, 人们已经开始利用 ICP_MS 测试矿物流体包裹体中的稀土元素(包括微量元素)组成, 探讨成矿流体来源

收稿日期: 2004-12-06; 修订日期: 2005-05-10

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(2003033209); 国家重点基础研究发展规划项目(G1999043211)

作者简介: 李晓峰(1971-), 男, 副研究员, 主要从事矿床地质和地球化学的科研工作, E_mail: lxfdc@sina.com。

及成矿作用(Michard, 1989; Andreast *et al.*, 1998; Robert *et al.*, 1999; Ulrich *et al.*, 1999; 范建国等, 2001, 徐九华等, 2004)。目前这方面的研究还处于探索阶段。不同的学者对此有不同的看法和结论(范建国等, 2000; 王莉娟等, 2002; 李厚民等, 2003)。本文在研究流体包裹体特征的基础上, 利用流体包裹体中稀土元素组成及其特征对成矿流体来源及其与流体成矿作用的关系进行了探讨。

1 矿床地质特征

黑金台子金矿位于青藏高原东缘, 赋存于大渡河剪切带的次级剪切带中。该矿床距离康定县城 53 km, 坐落于大渡河的东岸。该矿床的地质工作程度较低, 1997 年四川省地质矿产开发局 402 地质队对该矿床进行了勘探。赋矿岩石主要为元古宙康定群花岗闪长质混合岩, 矿体也主要赋存于元古宙花岗闪长质混合岩中。控矿构造主要为近 NS 向脆-韧性剪切带(图 1)。目前已发现含金破碎带控制长度 1 260 m, 圈出 4 个金矿体。金矿体呈脉状-透镜状产出。矿石类型为石英脉型。金的品位为 3.3~12.3 g/t。金的形态为不规则粒状、脉状和树枝状, 主要呈裂隙金和晶隙金嵌布于黄铁矿、石英和碲银矿裂隙及间隙中。围岩蚀变主要有黄铁矿化、绢云母化、硅化以及绿泥石化和碳酸盐化^①。黑金台子金矿为中低温热液矿床, 黄铁矿和方铅矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 为 $-1.41\text{‰} \sim +1.72\text{‰}$, 平均 0.16‰ , 与陨硫接近, 硫来源于上地幔^①。黄铁矿流体包裹体 He、Ar 同位素和石英流体包裹体 O、H 同位素显示成矿流体为地幔流体、变质流体和大气降水的混合流体(李晓峰等, 2004)。

2 流体包裹体类型及均一温度和盐度

用于流体包裹体类型、均一温度和盐度测试的样品均取自黑金台子金矿含金石英脉矿石。先制成流体包裹体薄片, 然后在 Olympus BH_2 显微镜上观察、鉴定不同阶段的包裹体, 划分出包裹体的类型, 圈出适合测温的包裹体。再将符合测温的包裹体片用酒精浸泡并清洗干净用于显微测温。显微测温分析在中国地质大学 Linkam THMS600 冷、热台上完

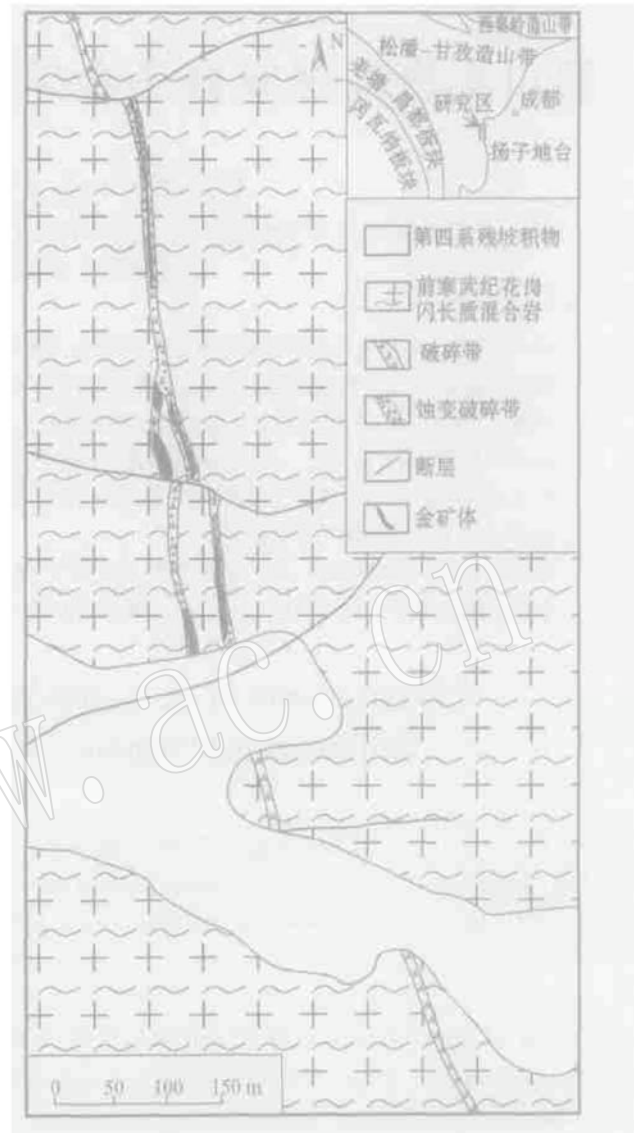


图 1 黑金台子金矿地质简图^①

Fig. 1 Geological map of the Heijintaizi gold deposit

成, 可测温度范围为 $-180 \sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$, 采用人工合成流体包裹体作为标样; 冷热台精度为: 低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$; $0\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$; 高于 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。测定矿物主要为石英。

2.1 流体包裹体类型和特征

室温下, 经显微镜下观察, 按照物理状态, 该矿床流体包裹体主要为气体包裹体、液体包裹体和纯气体包裹体 3 种(图 2), 其中绝大部分为液体包裹体, 纯气体包裹体仅在局部可见。总的来说, 包裹体的个体较小, 多为 $3 \sim 10\text{ }\mu\text{m}$, 形态多为不规则状。其中, 气体包裹体多为不规则状, 大小为 $6 \sim 8\text{ }\mu\text{m}$;

^① 四川地质矿产开发局 402 地质队, 1997. 四川省康定县黑金台子岩金矿床勘探地质报告, 1~99.

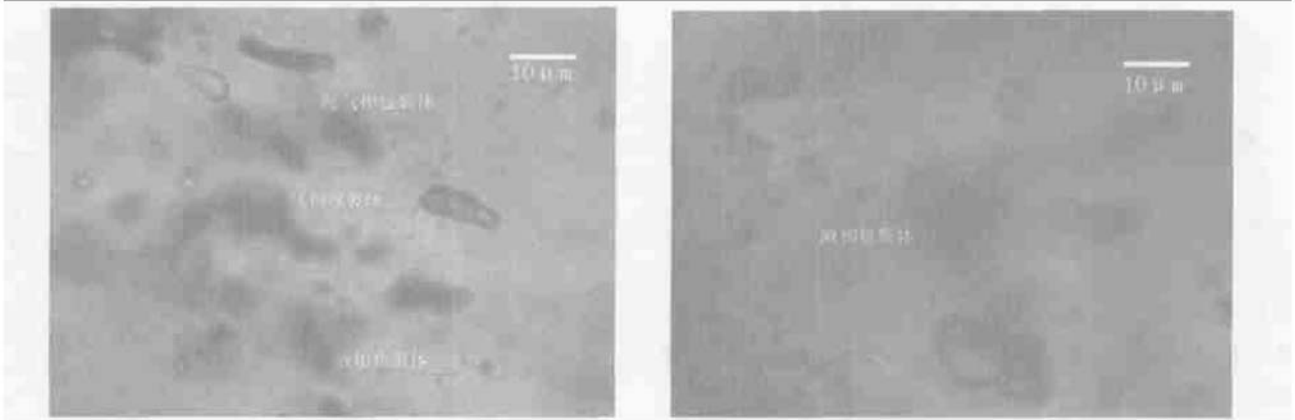


图 2 流体包裹体显微照片
Fig. 2 Microphotographs of fluid inclusions

液体包裹体多为椭圆状和四边形,少数为不规则状,大小为 3~ 16 μm;纯气相包裹体为椭圆形,大小为 8 μm 左右。

2. 2 流体包裹体测温

a. 纯气体包裹体: 这类包裹体在室温下为单相气体包裹体。当冷却时,在包裹体边缘会出现一小圈液相。

b. 液相包裹体: 该类包裹体在室温下主要为液相和一个小气泡组成的二相包裹体,加热时均一到液相,包裹体充填度一般在 5%~ 10%。这类包裹体在被冷冻回温过程中,于 - 5. 3~ - 11. 2 °C 之间冰晶融化。随着温度的升高,流体包裹体在 180~ 389 °C 均一到液相。

c. 气相包裹体: 该类包裹体在室温下主要由少量液相和一个较大气泡组成,加热均一到气相,包裹体充填度一般大于 80%。这类包裹体在被冷冻回温过程中,于 - 8. 1~ - 9. 3 °C 之间冰晶融化。随着温度的升高,流体包裹体在 241~ 319 °C 均一到液相。

流体包裹体测温结果显示,黑金台子金矿成矿流体包裹体的均一温度为 180~ 389 °C,冰点温度为 - 5. 3~ - 11. 2 °C。气相和液相包裹体的盐度根据包裹体冷冻回温后得到的冰融化温度(冰点),利用 Bodnar(1993) 的方程计算获得: $w(\text{NaCl}) = 0. 00 + 1. 78x - 0. 044 2x^2 + 0. 000 557x^3$ (x 为冰点温度)。结果显示,相应的盐度为 8. 28%~ 15. 17% NaCl,大部分属于中低盐度流体(图 3)。由均一温度-盐度直方图(图 4)可以看出,大多数流体包裹体具有相同的盐度,而它们的温度则有较大的变化范围,明显缺乏两类不同温度和盐度流体包裹体发生混合作用的特征。产生这种现象的原因主要是由压力触动的降温作用所致(Wilkinson, 2001; Sánchez_España *et al.*, 2003)。根据流体包裹体的显微特点(图 2)以及局部出现不同气/液比的流体包裹体甚至纯气体包裹体的特点推测,这种作用可能是断层阀机制所导致的减压沸腾降温作用。

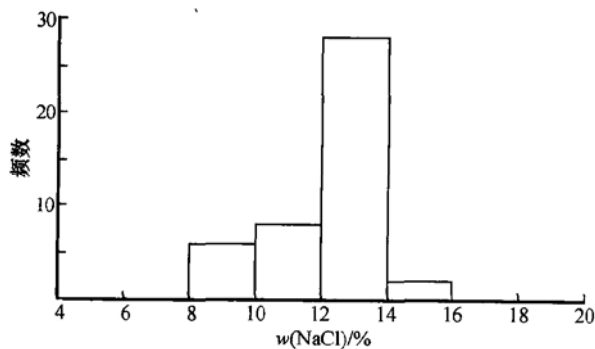


图 3 流体包裹体盐度直方图
Fig. 3 Histogram showing salinities of fluid inclusions

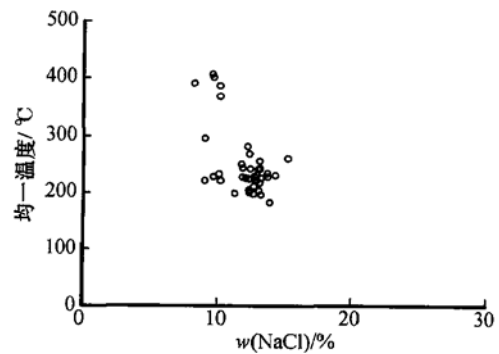


图 4 流体包裹体均一温度-盐度关系图
Fig. 4 Plot of homogenization temperature versus salinities of fluid inclusions

3 不同类型岩石稀土元素特征

3.1 稀土元素测试

含金石英脉流体包裹体和不同类型岩石(包括石英脉全岩、单矿物石英、矿区发育的煌斑岩以及围岩康定杂岩各种主要类型岩石)中的稀土元素含量均用 ICP-MS 进行测试。含金石英脉石英流体包裹体中的稀土元素组成在中国地质与地球物理研究所矿物探查中心完成,含金石英脉全岩、石英单矿物以及围岩和煌斑岩的稀土元素组成测试在国土资源部国家地质测试中心完成。有关分析方法和分析流程参见文献(苏文超等, 1998; 范建国, 2000)。

3.2 石英流体包裹体稀土元素地球化学

从该矿床石英流体包裹体的分布特征来看,黑金台子金矿的流体包裹体绝大部分为富液相的流体包裹体,没有明显两类流体包裹体发生混合作用的证据,故可认为流体包裹体中的稀土元素含量可以代表原始成矿流体中的稀土元素含量。黑金台子金矿石英流体包裹体的稀土元素含量及其特征值列于表 1。由表可知,该矿床石英流体包裹体稀土元素总量为 $1\ 846.4 \times 10^{-12} \sim 16\ 003.4 \times 10^{-12}$, 不同样品之间稀土元素的含量变化较大。但总的来说,该矿床石英流体包裹体中的稀土元素含量比黔西南烂泥沟金矿(苏文超等, 1998)、辽宁四道沟金矿(范建国等, 2000)、河北蔡家营铅锌矿(王莉娟等, 2002)以及胶东金矿(李厚民等, 2003)成矿流体包裹体中的稀土元素含量低。另外,黑金台子金矿 LREE/HREE 值为 1.56~3.72, $(La/Yb)_N$ 值为 2.20~23.17, $(Ce/Yb)_N$ 值为 1.72~17.52, $(La/Lu)_N$ 值为 1.26~21.83, δEu 为 0.83~1.17, δCe 为 0.76~1.22, 这些特征值都较胶东金矿石英流体包裹体中稀土元素的特征值(李厚民等, 2003)低,而高于河北蔡家营铅锌矿(王莉娟等, 2002)。稀土元素配分模式为平坦型,轻重稀土元素分馏作用不明显(图 5)。

3.3 石英单矿物稀土元素地球化学

由表 2 可知,黑金台子金矿石英单矿物稀土元素总量为 $2.15 \times 10^{-6} \sim 4.35 \times 10^{-6}$, LREE/HREE 值为 0.937~0.995, $(La/Yb)_N$ 值为 0.490~0.838, $(Ce/Yb)_N$ 值为 0.423~0.635, $(La/Lu)_N$ 值为 0.237~0.852, δEu 为 0.981~1.171, δCe 为 0.962

表 1 黑金台子金矿石英流体包裹体稀土

元素含量 $w_B/10^{-12}$

Table 1 REE compositions of fluid inclusions in quartz from the Heijintaizi gold deposit

样品编号	FHJ_1	FHJ_8	FHJ_9	FHJ_10	FHJ_16
La	259.5	773.6	753.3	1 711.6	2 087.4
Ce	579.0	1 572.2	1 537.6	2 429.0	5 621.9
Pr	46.2	164.5	183.1	289.1	572.2
Nd	206.7	923.8	995.9	1 094.7	2 412.7
Sm	66.9	232.4	286.3	191.9	474.3
Eu	23.4	92.3	131.7	56.8	128.8
Gd	110.8	273.4	428.3	261.4	526.1
Tb	18.2	46.8	89.1	33.0	70.8
Dy	86.5	200.1	479.8	158.4	338.6
Ho	28.3	42.9	113.5	30.9	77.7
Er	52.5	112.5	326.2	83.7	201.9
Tm	13.7	15.8	52.8	12.1	21.1
Yb	49.7	77.8	231.0	49.8	83.0
Lu	13.7	14.0	62.1	8.3	10.4
Y	291.2	880.5	701.7	915.5	3 376.3
ΣREE	1 846.5	5 422.5	6 372.6	7 326.1	16 003.4
LREE/HREE	1.77	2.26	1.56	3.72	2.40
$(La/Yb)_N$	3.52	6.71	2.20	23.17	16.95
$(Ce/Yb)_N$	3.01	5.23	1.72	12.63	17.52
$(La/Lu)_N$	1.96	5.73	1.26	21.83	20.80
δEu	0.83	1.17	1.15	0.78	0.79
δCe	1.18	1.01	0.97	0.76	1.22

注: 流体包裹体样品 FHJ_1、FHJ_8、FHJ_9、FHJ_10、FHJ_16 分别对应于样品 HJ_1、HJ_8、HJ_9、HJ_10、HJ_16 中的石英流体包裹体。

~1.013, 大大低于胶东金矿含金石英脉中石英单矿物稀土元素的含量和特征值(李厚民等, 2003), $(La/Yb)_N$ 、 $(Ce/Yb)_N$ 和 $(La/Lu)_N$ 等特征值均小于石英流体包裹体中的相应值, 而 δCe 和 δEu 则基本一致。

3.4 不同类型岩石稀土元素特征及其与流体包裹体稀土元素的对比

黑金台子金矿含矿岩石、赋矿岩石以及与成矿作用有关的岩石(如煌斑岩)和矿区外围康定杂岩不同类型岩石的稀土元素含量及其特征值也列于表 2。由表可知,石英脉型矿石稀土元素总量为 $2.59 \times 10^{-6} \sim 21.25 \times 10^{-6}$, 非矿石英脉稀土元素总量为 $1.92 \times 10^{-6} \sim 2.85 \times 10^{-6}$, 较石英脉型矿石稀土元素含量低。总的来说,非矿与含矿石英脉中的稀土元素总量大大低于矿区其他岩石类型的稀土元素总量(花岗闪长岩稀土元素总量为 $62.86 \times 10^{-6} \sim 188.99 \times 10^{-6}$, 煌斑岩稀土元素总量为 $128.75 \times 10^{-6} \sim 241.22 \times 10^{-6}$)。同样石英脉中的稀土元素

表 2 黑金台子金矿岩石、矿石、石英单矿物以及康定杂岩不同型岩石稀土元素含量
 Table 2 REE compositions of different rocks from the Heijintaizi gold deposit and neighboring areas

样品编号	石英脉型矿石					花岗闪长岩					非石英脉					煌斑岩脉					石英单矿物					康定杂岩				$w_B/10^{-6}$
	HJ-1	HJ-8	HJ-9	HJ-16	HJ-19	HJ-3	HJ-5	HJ-11	HJ-12	HJ-7	HJ-20	HJ-21	Q-1	Q-9	Kan1	Kan2	Kan3	Kan4												
La	0.24	0.42	0.87	2.42	10.90	8.49	33.20	0.18	0.22	38.00	20.60	19.50	0.16	0.41	22.72	24.16	22.22	17.52												
Ce	0.55	1.13	1.85	5.11	21.80	20.30	71.40	0.44	0.33	80.50	47.80	43.00	0.36	0.81	38.70	44.85	45.68	38.68												
Pr	<0.05	0.14	0.21	0.66	2.31	2.16	6.93	<0.05	<0.05	7.74	1.81	4.72	<0.05	0.08	4.71	5.99	6.63	5.70												
Nd	0.20	0.84	1.10	3.53	9.43	9.69	26.00	0.30	0.23	31.40	20.50	20.50	0.30	0.48	16.40	20.20	24.68	22.20												
Sm	0.13	0.37	0.22	0.79	2.33	2.14	4.85	0.21	0.09	6.78	4.05	5.31	0.12	0.28	2.67	4.80	5.67	4.99												
Eu	0.05	0.12	0.12	0.37	0.77	0.74	0.57	0.09	0.05	1.02	1.24	1.31	0.05	0.11	0.89	0.75	1.53	0.98												
Gd	0.14	0.31	0.41	0.83	2.47	2.34	5.22	0.17	0.15	7.47	4.10	4.86	0.20	0.29	2.71	4.72	5.26	5.32												
Tb	<0.05	0.07	0.06	0.14	0.40	0.36	0.79	<0.05	<0.05	1.24	0.56	0.75	<0.05	0.05	0.29	1.02	0.91	0.74												
Dy	0.15	0.58	0.31	0.96	1.89	2.18	4.78	0.19	0.19	7.55	3.09	3.87	0.10	0.36	2.15	4.98	5.13	5.12												
Ho	<0.05	0.11	0.09	0.18	0.43	0.44	0.92	0.05	<0.05	1.62	0.68	0.80	<0.05	0.06	0.51	1.00	0.98	0.98												
Er	0.10	0.36	0.28	0.45	1.22	1.34	3.33	0.16	0.13	5.00	1.93	2.40	0.13	0.18	1.39	2.70	2.64	2.64												
Tm	<0.05	0.05	0.05	0.07	0.20	0.18	0.45	<0.05	<0.05	0.78	0.30	0.36	<0.05	<0.05	0.22	0.46	0.46	0.47												
Yb	0.19	0.32	0.39	0.51	1.07	0.93	2.79	0.33	0.11	5.32	1.83	1.79	0.22	0.33	1.67	2.81	2.90	3.18												
Lu	0.09	0.10	0.08	0.09	0.19	0.17	0.46	0.07	0.05	0.80	0.26	0.33	0.07	0.05	0.26	0.39	0.46	0.46												
Y	0.55	2.03	1.66	5.14	11.10	11.40	27.30	0.51	0.17	46.00	17.00	22.10	0.24	0.81	12.21	26.52	26.47	27.63												
ΣREE	2.59	6.95	7.70	21.25	66.51	62.86	188.99	2.85	1.92	241.22	128.75	131.60	2.15	4.35	107.44	145.35	151.61	136.59												
LREE/HREE	0.891	0.768	1.312	1.539	2.506	2.25	3.105	0.804	1.021	2.183	3.328	2.532	0.937	0.995	4.03	2.26	2.35	1.94												
(La/Yb) _N	0.852	0.885	1.504	3.199	6.868	6.155	8.023	0.368	1.348	4.816	7.589	7.345	0.490	0.838	9.20	5.80	5.17	3.72												
(Ce/Yb) _N	0.749	0.913	1.227	2.592	5.270	5.646	6.620	0.345	0.776	3.914	6.756	6.214	0.423	0.635	6.01	4.13	4.08	3.15												
(La/Lu) _N	0.277	0.436	1.130	2.793	5.959	5.187	7.497	0.267	0.457	4.934	8.230	6.138	0.237	0.852	9.25	6.42	4.99	3.98												
δEu	1.127	1.055	1.204	1.388	0.975	1.006	0.344	1.413	1.307	0.436	0.922	0.775	0.981	1.171	1.00	0.47	0.84	0.58												
δCe	1.15	1.118	1.011	0.957	0.997	1.114	1.078	1.100	0.730	1.071	1.117	1.048	0.962	1.013	0.86	0.81	0.90	0.93												

其中, HJ-21 为弱蚀煌斑岩脉, Kan1 为变粒岩, Kan2 为花岗岩, Kan3 为斜长角闪岩, Kan4 为英云闪长岩。

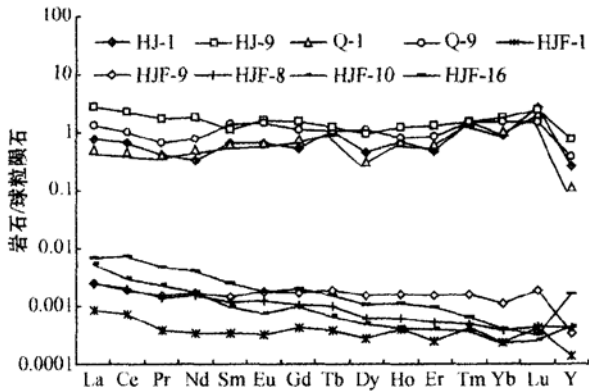


图5 石英流体包裹体稀土元素配分模式图
Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns of fluid inclusions in quartz

总量也低于矿区外围康定杂岩不同类型岩石中的稀土元素总量。

对于同一样品,从矿石、石英单矿物到石英的流体包裹体(如HJ_1、Q_1和FHJ_1以及HJ_9、Q_9和FHJ_9),稀土元素的含量和特征值也各不相同。流体包裹体中的LREE/HREE、 $(La/Yb)_N$ 、 $(Ce/Yb)_N$ 、 δCe 和 $(La/Lu)_N$ 值均大于矿石和石英单矿物中的参数,但是其中的 δEu 则没有一致的大小关系,反映了稀土元素在不同类型的岩石、石英单矿物以及石英流体包裹体中的分馏程度是不一致的。从稀土元素的分配模式图(图6)可以看出,康定杂岩中,除了花岗岩之外,其他类型的岩石都具有明显的 δEu 负异常。总的来讲,各类样品的REE曲线比较平坦,轻重稀土元素分馏较弱。

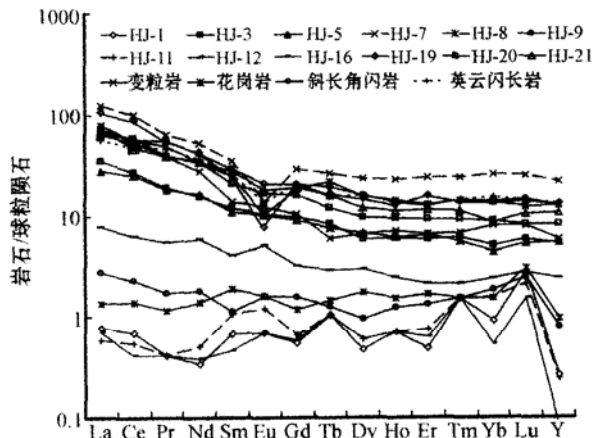


图6 各类岩石稀土元素配分曲线图
Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns of different rocks

4 稀土元素特征与流体成矿作用

4.1 流体包裹体中的稀土元素对成矿作用的示踪

稀土元素在多数情况下为不相容元素,在岩浆结晶过程中易保留在残余流体相中(酸性体系除外)(赵振华, 1997),王莉娟等(2002)认为岩浆热液矿床包裹体中的流体是来自成岩过程中残余的流体,能够代表原始成矿流体的REE组分,是探索成矿流体包裹体来源的最具说服力的证据之一。赵振华等(1997)认为深成矿床石英的稀土元素分布模式几乎与阿尔卑斯超基性岩的曲线一致,稀土元素分异较弱,可以认为成矿物质通过基性岩浆或深部流体运移时,稀土元素是由地幔源带入的。我国东坪金矿的成矿流体来源于地幔,东坪金矿石英的REE曲线与深成矿床石英类似(赵振华, 1997)。

REE在剪切带中的分布行为可能是由剪切过程中不同阶段体系中水/岩比的差别以及流体运移聚集方式的不同造成的。在剪切带浅层环境内流体的移动是由断层阀作用引起的(Sibson, 1975, 1977),此时往往有巨量的循环水通过断层,流体的活动以充填方式为主。在深层剪切带,体系水/岩比相对较低,流体的运动以渗滤扩散方式为主。在中浅层韧性过渡环境,流体的活动兼有充填和渗滤的双重特点。显然,从韧性变形到脆性变形阶段,由于体系中水/岩比逐渐提高,流体的运移和聚集以充填方式为主,结果石英脉中REE分布型式越来越受到流体性质的影响。也就是说在剪切过程中虽然变形和热液循环作用是相辅相成的,然而REE的地球化学行为似乎和变形作用关系不大,而主要受热液作用的影响。

成矿过程中的各种蚀变产物是成矿流体活动的记录,是水/岩反应的信息载体。利用REE示踪成矿过程的一个主要途径是分析对比原岩和不同成矿蚀变阶段产物中的REE组成与分布,从而恢复成矿流体的性质和演化。在水/岩反应达到热力学平衡的蚀变产物中,REE的分布主要受原岩和成矿流体中REE的组成以及水/岩比大小控制,其他因素的控制作用(如温度、压力、矿物的晶格结构等)可能处于次要的地位。在水/岩比低的条件下,原岩中的REE组成是支配蚀变产物或矿体中REE分布的主

要因素;在水/岩比高的情况下,流体的化学性质与组成特征决定了蚀变产物或矿体中 REE 的分布。此外,流体的来源也是决定水/岩反应产物中 REE 组成和分布的重要因素。如果流体来源于含矿建造本身,反应产物的 REE 组成与原岩相比变化不大;如果流体衍生于与围岩性质迥异的另一来源(如岩浆流体),则可能根本改变蚀变产物中 REE 组成。因此,REE 可以成为示踪成矿流体作用过程的重要工具(陈骏等,1997)。

4.2 成矿流体来源

成矿流体在金属矿床的形成过程中扮演着重要的角色,对于各类热液金属矿床来说成矿流体更是起着十分关键的作用(华仁民,1993;李晓峰等,2000)。流体的形成、运移、演化和淀积基本上反映了整个成矿过程(毛景文等,1999),尤其是流体的来源对于正确认识矿床成因至关重要。前人利用流体包裹体中的稀土元素对金属矿床的成矿流体来源的示踪已经做了前瞻性的工作,如辽宁丹东五龙金矿,该金矿赋存于印支期片麻状花岗岩中,产于燕山期三股流花岗岩外接触带中。范建国(2000)通过对五龙金矿、三股流花岗岩和片麻状花岗岩的流体包裹体 REE 和 FIP (流体包裹体面)研究发现,五龙金矿流体包裹体中 REE 分配模式为右倾型,而蚀变岩石(片麻状花岗岩)的稀土元素分配模式为左倾型,三股流花岗岩稀土元素分配模式为右倾型,基本与流体包裹体中的稀土元素分配模式一致,从而认为成矿流体来自岩浆流体。王莉娟等(2002)在研究河北蔡家营铅锌矿时,发现闪锌矿流体包裹体中稀土元素分配模式为平坦型,轻重稀土元素分馏不明显,认为成矿流体来源于深部。徐九华等(2004)通过对小秦岭文峪-东闯金矿床流体包裹体微量元素(包括稀土元素)研究认为,小秦岭文峪-东闯金矿的成矿流体来源与燕山晚期花岗岩无关。

从黑金台子金矿石英流体包裹体以及石英单矿物和不同类型岩石的稀土元素分配模式图(图4.5)可以看出,含金石英脉矿石石英流体包裹体和石英单矿物 REE 曲线都具有平滑、轻重稀土元素分馏弱的特征,具有深部来源的特点。康定杂岩中,除了花岗岩之外,其他类型的岩石都具有明显的 δEu 负异常。总的来讲,各类样品的 REE 曲线比较平坦、轻重稀土元素分馏较弱。石英流体包裹体的稀土元素配分模式不同于康定杂岩中的变粒岩、花岗岩、斜长角闪岩和英云闪长岩,虽然与矿区围岩的分配模式类似,但

又具有不同的稀土元素特征值。这说明成矿流体在运移过程中,与围岩发生了较强烈的水/岩反应,使得石英流体包裹体中的稀土元素不仅具有本身成矿流体来源的特征,而且使矿区围岩也具有了成矿流体中稀土元素分配的特征。另外,从黑金台子金矿与石英共生的黄铁矿流体包裹体的氦同位素($^3\text{He}/^4\text{He}=0.43\sim 0.79\text{ Ra}$, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}=334\sim 545$)来看,其成矿流体也具有地幔来源的特征(李晓峰等,2004)。

5 结 论

黑金台子成矿流体包裹体主要为液相包裹体,均一温度为 $180\sim 389\text{ }^\circ\text{C}$,盐度变化范围为 $8.28\%\sim 15.17\%\text{ NaCl}$ 。成矿作用过程中以流体减压降温作用为主。石英流体包裹体中的稀土元素含量变化于 $1846.4\times 10^{-12}\sim 16003.4\times 10^{-12}$ 之间,稀土元素分配模式为平坦型,具有轻重稀土元素分馏作用不明显的深部来源的特征,明显不同于矿区外围元古宙康定杂岩中不同类型岩石的稀土元素特征,而类似于矿区赋矿岩石的特征,说明石英流体包裹体中的稀土元素可能来源于深部流体。由于强烈的水/岩反应,使赋矿围岩也具有了某些深部来源的特征。

Reference

- Andreast A, Detlef G and Christop A H. 1998. Formation of a magmatic hydrothermal ore deposit: insights with LA-ICP-MS analysis of fluid inclusions[J]. *Science*, 279: 2091~2094.
- Chen Jun and Wang Henian. 1997. Water-rock interaction involved in ore-forming processes traced by rare earth elements distribution[J]. *Journal of Nanjing University (Natural Science)*, 33(Geofluid issue): 28~35(in Chinese with English abstract).
- Fan Jianguo, Ni Pei, Su Wenchao, et al. 2000. Characteristics and significance of rare earth elements in quartz of Sidaogou hydrothermal gold deposit, Liaoning[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 16(4): 587~590(in Chinese with English abstract).
- Hua Renmin. 1993. Studies on the role and significance of fluids in the forming processes of ore deposits[J]. *Journal of Nanjing University (Earth Science)*, 5(3): 351~360(in Chinese).
- Li Houmin, Shen Yuanchao, Mao Jingwen, et al. 2003. REE features of quartz and pyrite and their fluid inclusions: an example of Jiaojia-type gold deposits, northwestern Jiaodong peninsula[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 19(2): 267~274(in Chinese with English abstract).
- Li Xiaofeng and Hua Renmin. 2000. A study on fluid action in the ductile shear zone: a review[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 19(4): 333~340(in Chinese with English abstract).

- Li Xiaofeng, Mao Jingwen and Wangdenghong. 2004. Daduhe orogenic gold district in Sichuan province, China: He, Ar, S, O and H isotope data and their implications for the genesis[J]. *Acta Geologica Sinica*, 78(2): 189~ 200(in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Hua Renmin and Li Xiaobo. 1999. A preliminary study of large-scale metallogenesis and large clusters of mineral deposits[J]. *Mineral deposits*, 18(4), 291~ 299(in Chinese with English abstract).
- Michard A. 1989. Rare earth element systematics in hydrothermal fluids [J]. *Geochim. Acta*, 53: 745~ 750.
- Robert R L and John A M. 1999. Gold solubility in supercritical hydrothermal brines measured in synthetic fluid inclusions[J]. *Science*, 284: 2 159~ 2 163.
- Sánchez-España J, Velasco F, Boyce A J, *et al.* 2003. Source and evolution of ore-forming hydrothermal fluids in the northern Iberian pyrite belt: massive sulphide deposits (SW Spain): evidence from fluid inclusions and stable isotopes[J]. *Mineralium Deposita*, 38: 519~ 537.
- Su Wencho, Qi Liang, Hu Ruizhong, *et al.* 1998. Determination of the rare earth elements in fluids inclusions by ICP-MS[J]. *Chinese Science Bulletin*, 43(10): 1 094~ 1 098(in Chinese).
- Sibson R H. 1975. Generation of pseudotachylyte by ancient seismic faulting[J]. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 43: 775~ 794.
- Sibson R H. 1977. Fault rocks and fault mechanisms[J]. *Journal of the Geological Society (London)*, 133: 165~ 171.
- Ulrich T, Gunther D and Heinrich C A. 1999. Gold concentrations of magmatic brines and the metal budget of porphyry copper deposits [J]. *Nature*, 399: 676~ 679.
- Wang Lijuan, Wang Jingbin, Wang Yuwang, *et al.* 2002. Study on ore-forming fluid in Caijiaying lead-zinc-silver deposit, Hebei Province [J]. *Mineral deposits*, 21(suppl.): 1 037~ 1 040(in Chinese).
- Wilkinson J J. 2001. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits[J]. *Lithos*, 55: 229~ 272.
- Xu Jiuhua, Xie Yuling, Liu Jianming, *et al.* 2004. Trace elements in fluid inclusions of Wenyu-Dongchuang gold deposits in the Xiaqingling area, China[J]. *Geology and Prospecting*, 40(4): 1~ 6(in Chinese).
- Zhao Zhenghua. 1997. Principles of Trace Elements Geochemistry[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).

附中文参考文献

- 陈 骏, 王鹤年. 1997. 成矿流体过程中的 REE 示踪研究[J]. *南京大学学报(自然科学版)*, 33(地质流体及成矿作用专辑): 28~ 35.
- 范建国, 倪 培, 苏文超, 等. 2000. 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*, 16(4): 587~ 590.
- 华仁民. 1993. 流体在金属矿床形成过程中的意义——水岩反应研究进展系列评述(3)[J]. *南京大学学报(地球科学版)*, 5(3): 351~ 360.
- 李厚民, 沈远超, 毛景文, 等. 2003. 石英-黄铁矿及其包裹体的稀土元素特征[J]. *岩石学报*, 19(2): 267~ 274.
- 李晓峰, 毛景文, 王登红, 等. 2004. 四川大渡河金矿田成矿流体来源的氩氩硫氢氧同位素示踪[J]. *地质学报*, 78(2): 203~ 210.
- 李晓峰, 华仁民. 2000. 韧性剪切带内流体作用的研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 19(4): 333~ 340.
- 毛景文, 华仁民, 李晓波. 1999. 浅议大规模成矿作用与大型矿集区[J]. *矿床地质*, 18(4): 291~ 299.
- 苏文超, 漆 亮, 胡瑞忠, 等. 1998. 流体包裹体中稀土元素的 ICP-MS 分析研究[J]. *科学通报*, 43(10): 1 094~ 1 098.
- 王莉娟, 王京彬, 王玉往, 等. 2002. 河北蔡家营铅锌银矿床成矿流体研究[J]. *矿床地质*, 21(增刊): 1 037~ 1 040.
- 徐九华, 谢玉玲, 刘建明, 等. 2004. 小秦岭文峪-东闯金矿床流体包裹体的微量元素及成因意义[J]. *地质与勘探*, 40(4): 1~ 6.
- 赵振华. 1997. 微量元素地球化学原理[M]. 北京: 科学出版社.