

金矿床, 成矿过程, 稀土族, 热液蚀变

配位键

81-90

p618.510.5, p618.510.4

东坪金矿床成矿过程中稀土元素活动性*

包志伟 赵振华

(中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640)

摘要 尽管稀土元素常被认为是惰性元素,但在热液交代蚀变和化学风化作用过程中具有一定程度的活动性。河北省东坪与碱性岩有关的改造型热液金矿床成矿过程中,热液蚀变作用使近矿围岩 LREE/HREE 比值增大,并出现铈正异常;石英脉型金矿石的稀土元素分布模式呈现出明显的继承性;脉石矿物石英、钾长石的稀土元素组成相对富 HREE,且在脉石石英中出现明显的铈正异常。研究结果表明在中、高温,近中性,较高氧逸度成矿流体的水/岩作用过程中,由于稀土氟(氟、碳)配合物对稀土元素的迁移作用造成 HREE 相对于 LREE 优先进入溶液,在溶液中发生的 Ce^{3+} 向 Ce^{4+} 的转化以及部分 Eu^{2+} 氧化成 Eu^{3+} ,使铈易从溶液中沉淀出来,而由于 Eu^{3+} 不象 Eu^{2+} 那样具有与 Sr^{2+} 和 Ca^{2+} 相近的离子半径优先进入长石晶格,所以更多地被保留在溶液中,导致脉石英(成矿溶液)具较高的 $(La/Yb)_N$ 比值、弱的铈负异常和较大的铈正异常。

关键词 稀土元素 活动性 热液蚀变 金矿成矿 河北省

东坪金矿是与碱性正长岩体有密切成因联系,产于碱性杂岩体内外接触带的改造型高中温热液金矿床^[1,2]。与加拿大阿比提比绿岩带金矿中金富集和 REE 丢失的协变关系相似^[3],东坪金矿(化)主要分布在水泉沟碱性杂岩体的东部,其特征是 REE 含量较低,Cu、Pb 为杂岩体的高值区,而 Sr、Ba、V 为杂岩体的低值区^[4]。本文拟通过对东坪金矿赋矿岩石、蚀变围岩、矿石及脉石矿物的稀土元素组成的研究,探讨成矿过程中热液蚀变对稀土元素活化、迁移的控制作用。

1 矿床地质特征

东坪与碱性岩有关的金矿床产于冀西北崇礼、赤城两县境内,华北地台北缘深大断裂——尚义—赤城断裂带南侧的水泉沟碱性杂岩体的内外接触带。成矿岩体为侵入于太古宙桑干群变质岩系,向南侧倾伏的碱性杂岩体,岩体主要由碱性长石正长岩、石英正长岩、辉石角闪正长岩组成。岩体的形成时代为海西期(角闪石³⁹Ar-⁴⁰Ar 年龄为 327.4 Ma),金成矿时代为 157—177 Ma,成岩成矿时差达 150 Ma 左右,金成矿物质主要来源于碱性杂

第一作者简介:包志伟 男 34岁 副研究员 地球化学

* 国家科委攀登B资助项目(85-34-05A-03)

收稿日期 1997-03-12, 改回日期 1997-04-16

岩体^[2]。

东坪金矿床由三种类型矿石组成,在空间上由上而下依次为含金石英脉型;石英脉+脉旁蚀变岩型;硅化、钾化蚀变岩型。矿石为贫硫化物型,矿物组成简单,金属硫化物以黄铁矿为主,脉石矿物主要为石英、钾长石。矿石具有碱性岩金矿特征的 Au-Te 组合,普遍含有碲金矿、碲铅金矿等金碲化物。矿床的围岩蚀变类型有钾长石化、硅化、黄铁矿化、绢云母化和成矿期后的碳酸盐化。

2 矿床稀土元素组成

2.1 采样与分析方法

本次研究系统采集了东坪金矿 1 号脉下延至 70 号脉不同标高、不同矿化类型的矿石样品,并且对石英脉型(牧场沟)和石英脉+脉旁蚀变岩型(70 号脉 1464 中段)矿化进行了穿脉剖面取样。

样品由中国科学院广州地球化学研究所等离子体质谱组用等离子体质谱法(ICP-MS)测定,稀土元素分析误差 $\leq 5\%$,分析结果见表 1。

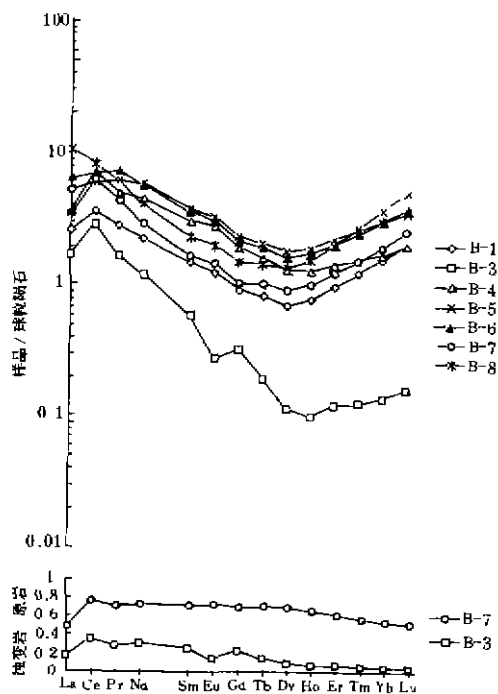


图 1 70 号脉 1427 中段穿脉剖面稀土分布模式

Fig. 1 REE distribution patterns of the wall rocks from the transverse drift section at 1427m level of Vein No. 70
样品编号见表 1。

活化转移。蚀变围岩的稀土元素分布模式受原岩的制约,但均显示出明显的稀土元素

2.2 结果讨论

稀土元素广泛用作火成岩、变质岩和沉积岩岩石成因和演化过程的示踪剂,尽管稀土元素常被认为是相对稳定的不活泼元素,但大量的研究表明,在热液交代蚀变和岩石风化过程中稀土元素被活化迁移,在不同的温度、压力和 pH 条件下蚀变岩石的稀土元素分布模式发生相应的改变。对稀土元素在变质作用、表生风化和热液蚀变过程中的地球化学活动性的研究始于 70 年代中期,稀土元素在不同地质条件下的活动与否一直有不同的认识,然而近年来多数研究者倾向于在有水溶液参与的条件稀土元素是活动的^[5-7],但在热液矿床方面的研究却很有限^[8]。这些研究表明,稀土元素在热液成矿作用过程中具有不同程度的活动性,对于解释热液矿床的成因等方面有一定的指示意义。

围岩中稀土元素的迁移 对东坪金矿床的系统采样分析结果(表 1)表明,稀土元素在热液成矿过程中有着明显的

表 1 东坪金矿床矿石、蚀变围岩的稀土元素含量 ($\times 10^{-6}$)
Table 1 REE contents of the ores and altered wall rocks from the Dongping gold deposit ($\times 10^{-6}$)

样号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Fu	Cd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Σ REE	δ Eu	δ Ce	LREE/HREE (La/Yb) _N	
70号脉穿脉	0.804	2.911	0.344	1.354	0.289	0.092	0.235	0.039	0.225	0.056	0.204	0.04	0.322	0.062	6.98	1.08	1.33	4.90	
B1	0.52	2.318	0.204	0.714	0.115	0.02	0.083	0.009	0.036	0.007	0.025	0.004	0.028	0.005	4.09	0.63	1.71	19.8	
B3	1.098	5.799	0.604	2.642	0.6	0.206	0.496	0.076	0.417	0.091	0.296	0.049	0.35	0.064	12.79	1.155	1.71	5.95	
B4	1.037	4.733	0.746	3.454	0.735	0.24	0.599	0.099	0.583	0.135	0.467	0.082	0.624	0.112	13.65	1.11	1.29	4.05	
B5	2.002	5.574	0.877	3.367	0.706	0.225	0.552	0.091	0.518	0.123	0.419	0.079	0.63	0.118	15.28	1.10	1.01	5.04	
B6	1.567	4.98	0.528	1.733	0.321	0.106	0.261	0.048	0.291	0.071	0.253	0.048	0.401	0.081	10.69	1.12	1.31	6.35	
B7	3.297	6.338	0.743	2.399	0.453	0.146	0.381	0.068	0.427	0.109	0.421	0.086	0.76	0.159	15.99	1.07	1.01	5.63	
B8	0.325	0.85	0.12	0.476	0.129	0.046	0.13	0.023	0.13	0.03	0.09	0.012	0.079	0.012	2.45	1.09	1.03	3.85	
DP92-273	1.533	3.242	0.452	1.629	0.316	0.086	0.222	0.033	0.169	0.036	0.113	0.018	0.117	0.02	7.99	0.99	0.937	9.97	
DP92-227	0.672	2.38	0.358	1.561	0.412	0.143	0.519	0.1	0.617	0.138	0.42	0.064	0.44	0.077	7.90	0.95	1.17	2.33	
DP92-230	0.662	1.635	0.268	1.103	0.238	0.061	0.17	0.028	0.154	0.034	0.109	0.018	0.13	0.025	4.64	0.93	0.934	5.94	
DP92-251	0.867	2.393	0.392	1.576	0.32	0.094	0.209	0.032	0.164	0.035	0.107	0.017	0.119	0.02	6.35	1.11	0.988	8.03	
DP92-269	16.67	42.998	4.102	14.145	2.39	0.625	1.509	0.213	1.016	0.209	0.632	0.095	0.625	0.103	85.33	1.01	1.251	18.4	
DP92-70-1	30.719	47.25	6.385	21.637	3.831	1.039	2.337	0.381	1.958	0.411	1.261	0.192	1.281	0.206	118.89	1.06	0.812	13.8	
DP92-70-2	26.951	44.135	5.866	19.934	3.394	0.919	2.076	0.309	1.469	0.287	0.843	0.122	0.822	0.137	107.26	1.06	0.845	16.7	
DP92-70-3	14.028	24.467	3.281	11.289	1.995	0.55	1.283	0.186	0.844	0.163	0.456	0.064	0.436	0.074	59.12	1.05	0.868	15.9	
DP92-70-5	37.692	29.788	7.525	26.648	4.9	1.437	3.443	0.507	2.301	0.419	1.108	0.14	0.894	0.143	116.95	1.07	0.426	12.1	
DP92-70-6	18.134	45.452	4.295	14.451	2.444	0.639	1.438	0.206	0.912	0.174	0.498	0.069	0.444	0.076	89.23	1.04	1.24	22.4	
DP92-70-7	23.711	41.063	5.605	19.619	3.386	0.914	2.053	0.288	1.222	0.223	0.585	0.075	0.457	0.072	99.27	1.06	0.857	19.0	
DP92-70-8	24.199	66.358	5.118	17.311	2.981	0.807	1.944	0.282	1.36	0.28	0.844	0.127	0.876	0.146	122.63	1.03	1.44	19.9	
DP92-70-9	38.25	70.49	6.97	28.59	5.84	1.72	4.45	0.584	3.191	0.60	1.599	0.243	1.445	0.224	164.20	1.03	1.03	12.31	
辉石角闪 正长岩																			17.85

注:表中B1-B8为70号脉1427中段剖面样品;DP92-70-1--DP92-70-9为牧场沟穿脉剖面样品,DP92-273、227、230、251、269分别为1464、1538、1503、YD6、YD3各中段矿石样品,其中230号为蚀变岩型、251为石英脉+钾化蚀变岩型,其余均为石英脉型矿石。

样品由中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学研究所ICP-MS组测定。(1)为ICP-AES法分析,由湖北省地质矿产局地质实验研究所测定。

原因,目前仍很难直接测定成矿溶液(流体包裹体)的稀土元素的组成,以下我们将从矿石及其脉石矿物组成入手探讨成矿溶液的稀土元素组成特征。

矿石中稀土元素含量较低,除钾化蚀变岩型矿石(DP92-230)轻重稀土元素比值较小,在稀土元素分布模式图(图3)上为较平坦的直线型外,其余均为右倾分布模式,无明显的铈异常,但具有微弱的铈负异常存在,对比蚀变围岩(图1)中铈的正异常可以看出,成矿热液为较强的氧化环境,在围岩交代蚀变过程中(钾长石、绢云母交代原岩中的钠更长石和微斜长石),活化出来的 Ce^{3+} 在中酸性氧化条件下部分地被氧化成 Ce^{4+} ,而较易从溶液中析出并沉淀在蚀变矿物表面或次生矿物结构中或其表面,在蚀变围岩中形成铈的正异常。石英网脉型矿石(DP92-251、269)具有与碱性岩类似的稀土分布型式,表明矿石稀土分布模式继承了碱性岩的特征。以上稀土元素活化迁移特征也从一个侧面支持金成矿物质来源于碱性杂岩体。

从矿石中分选出的脉石钾长石的稀土元素含量相当于或略高于正长岩中的钾长石,

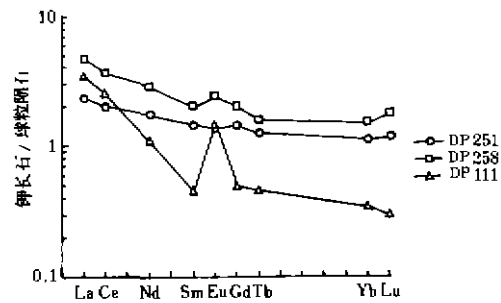


图 4 东坪金矿钾长石的稀土元素分布模式

Fig.4 REE distribution patterns of K-feldspar from the Dongping gold deposit

DP111 为未蚀变碱长正长岩中的钾长石; DP251、258 为矿石后期蚀变作用形成的似伟晶状钾长石。

但两者间在稀土分布模式上存在着明显的不同(图4、表2),从图4可以看出,与正长岩中钾长石的稀土分布模式相比,矿石中的钾长石具有弱的铈负异常和较小的铈正异常,以及较小的 LREE / HREE 比值和 $(La / Yb)_N$ 比值。成矿溶液的稀土元素组成应与次生钾长石的相接近。

由于石英具有稳定的结构,硅氧四面体以牢固的架状连结,杂质离子含量低,且难以进入石英晶格,所以石英中的稀土元素可以认为主要存在于其包裹体溶液中。钱志鑫等¹⁾正在进行的研究,也表明用爆裂法或研磨法提取石英中的流体包裹体后,残留石英中稀土元素非常低

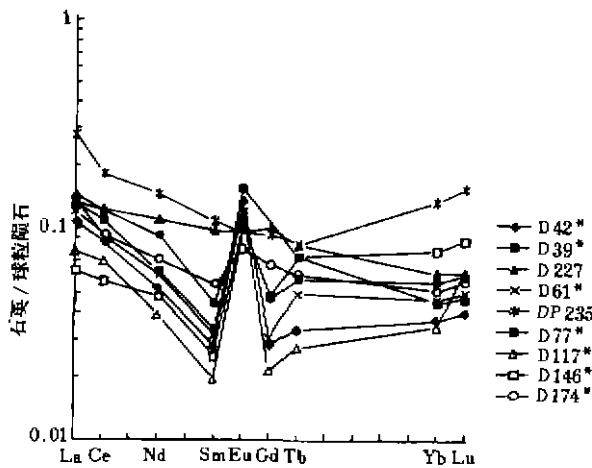


图 5 东坪金矿不同标高矿石中石英的稀土分布模式

Fig.5 REE distribution patterns of quartz of ores from various levels in the Dongping gold deposit
样品编号见表 2; *据文献 [9]。

1) 钱志鑫、王一先、牛贺才等,个人交流。

表 2 东坪金矿一号脉矿石中石英、钾长石稀土元素组成 ($\times 10^{-6}$)Table 2 REE compositions of quartz and K-feldspar in the ores from Vein No.1 in the Dongping gold deposit ($\times 10^{-6}$)

样 品	产 地	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	
石 英	D42 ⁽¹⁾	1584中段	0.0329	0.0693	0.0310	0.00552	0.00976	0.00745	0.00158
	D39 ⁽¹⁾	1554中段	0.0404	0.0878	0.0377	0.00659	0.0114		0.00350
	DP259	CD-10	0.165	0.255	0.130	0.028	0.011	0.043	0.007
	DP227	1538中段	0.041	0.098	0.066	0.019	0.007	0.026	0.004
	D61 ⁽¹⁾	1538中段	0.0372	0.0740	0.0364	0.00617	0.00858	0.00788	0.00234
	DP230	1503中段	0.235	0.489	0.242	0.062	0.025	0.079	0.012
	DP235	1503中段	0.087	0.148	0.087	0.021	0.007	0.024	0.004
	D77 ⁽¹⁾	1503中段	0.0443	0.0975	0.0555	0.00864	0.00741	0.0121	0.00273
	D117 ⁽¹⁾	1464中段	0.0241	0.0569	0.0237	0.00386	0.00859	0.00563	0.00132
	D146 ⁽¹⁾	1427中段	0.0197	0.0460	0.0288	0.00494	0.00731	0.0125	0.00352
	D174 ⁽¹⁾	1390中段	0.0426	0.0743	0.0427	0.0107	0.00587	0.0175	0.00288
钾 长 石	DP251	YD6坑	0.721	1.63	1.05	0.287	0.0984	0.369	0.0586
	DP258	CD10坑道	1.45	2.93	1.71	0.395	0.177	0.519	0.0745
石	DP111	场地	1.07	2.02	0.657	0.087	0.108	0.127	0.0214
样 品	产 地	Yb	Lu	Total	δ Eu	LREE/HREE	(La/Yb) _N		
石 英	D42 ⁽¹⁾	1584中段	0.00781	0.0013	0.167	4.65	8.19	2.84	
	D39 ⁽¹⁾	1554中段	0.00942	0.00151	0.198		12.7	2.89	
	DP259	CD-10	0.033	0.006	0.68	1.00	6.62	3.35	
	DP227	1538中段	0.013	0.002	0.276	0.96	5.13	2.13	
	D61 ⁽¹⁾	1538中段	0.00967	0.00161	0.184	3.76	7.55	2.59	
	DP230	1503中段	0.054	0.009	1.21	1.09	6.84	2.92	
	DP235	1503中段	0.028	0.005	0.411	0.95	5.74	2.09	
	D77 ⁽¹⁾	1503中段	0.0119	0.00194	0.242	2.22	7.44	2.51	
	D117 ⁽¹⁾	1464中段	0.00727	0.00201	0.133	5.63	7.22	2.23	
	D146 ⁽¹⁾	1427中段	0.0165	0.00284	0.142	2.84	3.02	0.80	
	D174 ⁽¹⁾	1390中段	0.0107	0.00185	0.209	1.31	5.35	2.68	
钾 长 石	DP251	YD6坑	0.231	0.037	4.482	0.92	5.44	2.02	
	DP258	CD10坑道	0.314	0.0562	7.726	1.20	6.91	2.68	
石	DP111	场 地	0.0716	0.00953	4.17	3.14	17.17	10.08	

注:表中 DP251 为石英脉中伟晶状钾长石, DP258 为钾化细脉浸染状矿石中的钾长石; DP111 为未蚀变原岩中的钾长石。

分析者:中国科学院高能物理研究所核技术应用部杨瑞英;分析方法:仪器中子活化法(INAA)。

(1)据文献 [9]。

(仅为 10^{-6} 级)。可见矿床石英脉的稀土元素组成可以代表成矿流体的组成特征。东坪金矿矿石中石英的稀土元素含量很低。仪器中子活化法分析的 La、Ce、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Yb、Lu 等 9 个元素总和为 0.133×10^{-6} — 0.411×10^{-6} , 其 $(La/Yb)_N$ 比值明显小于未蚀变岩石和蚀变围岩, 从其稀土元素分布模式(图 5)可以看出, 几乎所有样品均显示出显著的铕正异常。由此可见, 尽管尚不能确切的测定或估算成矿流体稀土元素绝对含量, 但其分

布模式应与图 5 大致相当,在成矿过程中,成矿流体与围岩的水/岩相互作用导致稀土元素发生活化迁移,围岩中的 HREE 迁出的比例较大。

热液蚀变过程中稀土元素分异的控制机理 岩石在交代蚀变及风化过程中稀土元素的活化迁移,主要与蚀变过程中所破坏原生矿物和新生矿物对稀土元素结合(晶格中)和吸附(矿物颗粒表面或晶格缺陷、裂隙中)作用有关。东坪金矿床最主要蚀变作用为钾长石化和硅化,对矿床的包裹体研究表明,成矿热液为中高温(包裹体均一温度 220—320℃),氧逸度较高($f_{O_2} = -30 \sim -34$, 矿石具有镜铁矿、白铁矿、磁铁矿、黄铁矿、闪锌矿、方铅矿、黄铜矿的较高氧逸度条件下的矿物组合),富 CO_2 (部分包裹体中见有 CO_2 流体),Cl/F 比值为 1.24—22.67。在水/岩相互作用过程中,稀土元素的离子电荷越高其吸附作用越强,REE 配合物越稳定,而在电荷相等的情况下,离子半径越大吸附作用越强而配合物的稳定性越弱;体系的温度越高,稀土元素离子的吸附作用越弱,稀土配合物越稳定。在六次配位时稀土元素离子半径为: $La^{3+} = 1.032 > Eu^{3+} = 0.947 > Lu^{3+} = 0.861$; $Eu^{2+} = 1.17 > La^{2+} = 1.032 > Lu^{2+} = 0.861$ ^[10],由于东坪金矿成矿(流体)温度较高,配合作用在稀土元素活化迁移过程中无疑是一重要控制因素。据 Wood^[11] 的研究成果,重稀土的氟配合物稳定常数高于轻稀土氟配合物的稳定常数,而稀土的氯配合物稳定性相对较低,且其轻稀土配合物的稳定常数略高。由东坪金矿包裹体特征及蚀变过程中稀土元素由原岩向强蚀变岩石 LREE/HREE 比值显著增加的分异特点,在交代蚀变过程中,稀土元素应主要以稀土氟配合物、稀土氟碳酸盐配合物及稀土氯的配合物形式迁移。由于氯离子在成矿溶液中的优势地位,其在成矿过程中金和稀土元素迁移作用中可能有着重要的意义。

铕是热液交代过程中变化最强烈的一个元素。近矿的蚀变围岩出现铕负异常,而成矿溶液(石英)稀土元素组成的一个重要特点则是均有明显的 Eu 正异常。铕是稀土元素中具有重要意义的变价元素,在还原条件下 Eu^{3+} 可以被还原为 Eu^{2+} , Eu^{3+}/Eu^{2+} 的氧化还原电位随温度的增加而强烈增大,随 pH 增大而有轻微增加,压力的变化影响很小(图 6)^[12]。根据东坪金矿成矿的物理化学条件,成矿溶液中的铕应处于 Eu^{3+} 的优势场中,铕主要以三价离子形式存在。在成矿围岩交代蚀变过程中,广泛存在钾长石沿边缘和解理裂隙交代微斜长石的现象,新生的钾长石取代原岩中的微斜长石。而原岩中的长石矿物具有较大的铕正异常,所以进入溶液的稀土元素中铕也有较高的含量,在较高的 f_{O_2} 条件下部分原以 Eu^{2+} 形式存在的 Eu 被氧化成 Eu^{3+} 。当新的钾长石从溶液中沉淀析出时,由于 Eu^{2+} 的比例和 LREE/HREE 比值减小,其稀土分布模式变得平直,且铕正异常变小。这一溶解-沉淀过程造成了

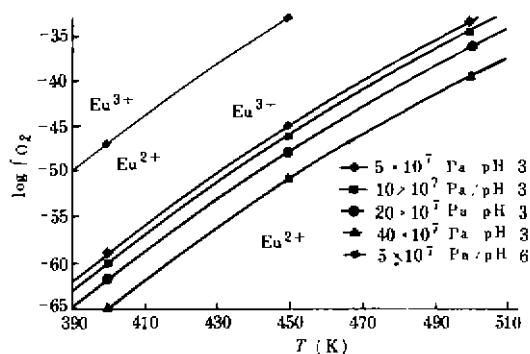


图 6 Eu^{2+}/Eu^{3+} 氧化平衡与氧逸度、温度、压力和 pH 值的变化关系^[12]

Fig.6 The Eu^{2+}/Eu^{3+} redox equilibrium as a function of oxygen fugacity, temperature, pressure and pH value

(石英包裹体中)成矿溶液较大的铈正异常。

3 结 论

综上所述,东坪金矿成矿热液交代过程中,稀土元素的地球化学活化迁移行为可归纳如图 7 所示。

(1) 在东坪与碱性岩有关的改造型热液金矿床形成过程中,热液蚀变造成 REE 明显的活动,在围岩蚀变过程中 HREE 的活动性较强,蚀变强烈的近矿围岩的 LREE / HREE 比值显著增加。

(2) 在矿石的稀土元素组成中,石英脉型矿石由于样品中热液成因矿物比例较小,其

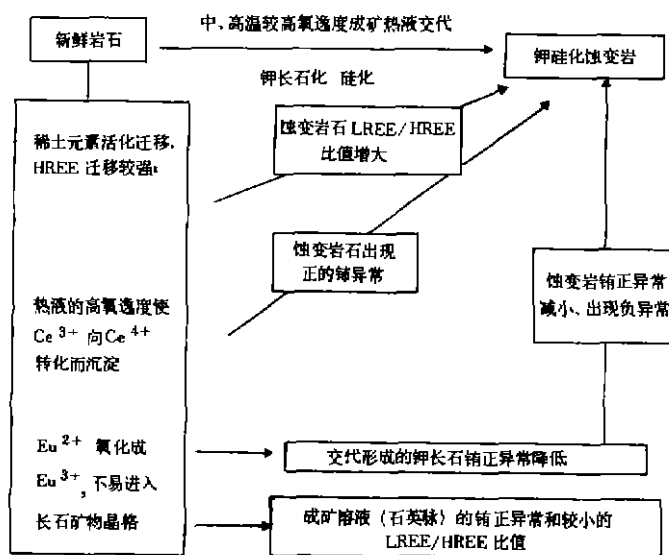


图 7 东坪金矿成矿过程中稀土元素活化迁移示意图

Fig.7 Suggested flow-chart for REE mobility during the ore-forming processes of the Dongping gold deposit

稀土元素分布模式与成矿围岩相似,呈现出明显的继承性;钾化蚀变岩型矿石的稀土元素分布模式由于受交代的钾长石的影响,其稀土元素分布模式比较平坦,反映了交代过程中矿物溶解、元素迁移、沉淀的地球化学共轭特性。

(3) 从矿石中脉石矿物石英的分析可以看出,成矿溶液与蚀变岩石相比具有较低的 LREE / HREE 比值和较高的铈正异常。结合包裹体地球化学分析成果,在交代蚀变过程中稀土元素主要受配合作用的控制,稀土元素主要以稀土氟配合物或稀土氟碳酸盐的形式迁移,成矿溶液中较高的铈正异常则与溶液较高的氧逸度密切相关。而较高的氧逸度条件也控制了近矿围岩铈的正异常和脉石矿物、成矿溶液中铈负异常的出现。

从以上对岩石、蚀变围岩、矿石以及脉石矿物稀土元素的分析研究,不难发现在中高温近中性的热液作用过程中,REE 具有明显的活动性。矿石稀土元素分布模式的继承性可以作为成矿物质来源于碱性杂岩体的证据之一。

野外工作中得到武警黄金部队八支队和河北省东坪金矿的大力协助;张伯友研究员参加了部分野外工作;王一先研究员审阅了论文初稿,在此谨致谢忱。

参 考 文 献

- 1 中国人民武装警察部队黄金指挥部. 河北省东坪碱性杂岩金矿地质. 北京:地质出版社, 1996. 110—131.
- 2 Bao Zhiwei, Zhao Zhenhua, Zhou Lingdi *et al.* Geochemistry and metallogenetic model of Dongping type gold deposit related to alkali-syenite. In: Pang Zhonghe, *et al.* ed. *Advances in Solid Earth Sciences*, Beijing: Science Press, 1996. 165—173.
- 3 Gault R., Trudel P. Petrographic and geochemical characteristics of gold ore mineralization at the Elder Mine, Abitibi, Quebec Can J Earth Sci, 1990, 27(12): 1637—1650.
- 4 包志伟,赵振华,周玲棣等. 冀西北与碱性岩有关的金矿床的成因探讨. 地质地球化学, 1996, (1): 72—77.
- 5 Humphris S E. The mobility of the rare earth elements in crust. In: Henderson P ed. *Rare earth element geochemistry*. Amsterdam: Elsevier Press, 1984. 317—342.
- 6 Alderton D H M, Pearce J A, Potts P J. Rare earth element mobility during granite alteration: evidence from southwest England. *Earth and Planet Sci Lett*, 1980, 49: 149—165.
- 7 Grauch R I. Rare earth elements in metamorphic rocks. In: Lipin B R, McKay G A eds. *Geochemistry and rare earth elements. Reviews in mineralogy*, 1989, 21: 147—167.
- 8 Taylor R P, Fryer B J. 稀土元素地球化学研究是认识热液矿床的一条途径. 李文达译. 北京:地质出版社, 1987. 1—5.
- 9 莫测辉. 张家口地区金矿床地球化学及成因研究:[博士学位论文]. 广州:中国科学院广州地球化学研究所, 1996. 48.
- 10 Shannon R D. Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distance in halides and chalcogenides. *Acta Crystallog (A)*, 1976, 32: 751—767.
- 11 Wood S A. The aqueous geochemistry of the rare-earth elements and yttrium 2. Theoretical predictions of speciation in hydrothermal solutions to 350°C at saturation water vapor pressure. *Chem Geol*, 1990, 88(1/2): 99—125.
- 12 Bau M. Rare-earth mobility during hydrothermal and metamorphic fluid-rock interaction and the significance of the oxidation state of europium. *Chem Geol*, 1991, 93(3/4):219—230.

RARE-EARTH ELEMENT MOBILITY DURING ORE-FORMING PROCESS OF DONGPING GOLD DEPOSIT

Bao Zhiwei Zhao Zhenhua

(Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640)

Abstract

Although the rare-earth elements are often considered to be relatively immobile, they are significantly mobile during hydrothermal alteration, metasomatism and chemical weathering. The investigation on the REE compositions of the source rocks, altered wall rocks, ores and the gangue minerals of Dongping gold deposit suggests that the REE are mobilized and differentiated during hydrothermal alteration. Because of the severe hydrothermal alteration, the altered wall rocks show positive Ce anomaly and higher LREE / HREE ratios comparing to unaltered rocks. The Chondrite-normalized REE patterns of the quartz vein-type gold ores are similar to those of the wall rocks; the gangue quartz and K-feldspar show relative lower LREE / HREE ratios. The most interesting phenomena is that the gangue quartz show significant positive Eu anomalies, while the secondary K-feldspars show less or no positive Eu anomalies.

The data derived from this investigation and other workers' indicate that the REE are mobile during hydrothermal alteration in the ore-forming process of the Dongping gold deposit under conditions of mid-high temperature, mildly acidic to mildly basic, and high f_{O_2} . The REE fluoride complexes and REE fluorocarbonate complexes might be important during the rock-fluid interaction, which results in the preferential HREE transporting into the fluid phase. Due to the oxidation of part of the Ce^{3+} to Ce^{4+} and Eu^{2+} to Eu^{3+} under high f_{O_2} , some of the Ce^{4+} precipitated, whereas Eu^{3+} retains in the fluid rather than into the secondary K-feldspar. Thus the altered wall rocks show HREE depleted patterns and the gangue quartz (hydrothermal fluid) shows HREE enriched patterns.

Key words: REE, mobility, hydrothermal alteration, gold deposit, Hebei Province