

苏丹哈佳吉金矿床稀土元素地球化学特征

李 杰^{1,2}, 杨立新², 李世勇³, 倪师军¹, 张成江¹, 于林松⁴

(1.成都理工大学核技术与自动化工程学院, 成都 610059; 2.山东省第六地质矿产勘查院, 威海 264209;
3.山东省地质矿产勘查开发局, 济南 250013; 4.山东省物化探研究院, 济南 250013)

摘 要:通过对苏丹哈佳吉金矿床矿石和围岩稀土元素含量的研究,发现该矿床近矿围岩稀土总量较矿石稀土总量明显要高,轻重稀土元素分馏明显, Eu 呈现中等程度或弱的负异常, Ce 含量则相对较稳定,表明成矿环境为还原环境。根据近矿围岩的稀土元素 C1 球粒陨石标准化曲线及北美页岩标准化曲线,可以推断该区古老变质基底所处的构造环境应属大洋岛弧环境,而且在成岩过程中并没有大量海相物质加入。矿石与近矿围岩的稀土配分曲线对比表明矿石中成矿物质既来自变质基底,又有深源物质的参与。

关键词: 稀土元素; 地球化学; 配分模式; 哈佳吉金矿床; 苏丹

中图分类号: P618.51; P595

文献标识码: A

文章编号: 1672-4135(2011)03-0215-05

苏丹哈佳吉金矿床位于苏丹中北部的尼罗河畔,由中非投资发展有限公司开发,是山东省地质六队于2010年提交的一处中型金矿床。由于该矿床刚被发现,目前正处于勘探开发阶段,故对矿床的整体研究程度较低^[1]。本文试图通过研究苏丹哈佳吉金矿床矿石和围岩的稀土元素地球化学特征,来揭示矿石与围岩在成因上的联系,进而探讨成矿物质来源及矿床成因,为该区的地质勘探和研究提供了参考。

1 矿床地质

1.1 区域地质概况

哈佳吉金矿床位于东非大裂谷之红海褶皱带西缘,分布于主要由元古宙变质基底所构成的大型韧性剪切带中。区内发育大型韧性剪切构造,为尼罗河断裂带的组成部分。

区域构造线以近南北向为主,北东向次之,它们均受控于近东西向的韧性剪切带。金矿化与构造关系非常密切,金矿体常产于几组不同方向断裂构造的交叉部位。区域北部有较大的花岗岩岩基;西部、南部亦有规模不等的酸性岩岩株分布,伴随着较明显的铅、铜矿化。蚀变类型与岩浆期后中低温热液蚀变一致。

1.2 哈佳吉金矿床地质特征

哈佳吉金矿床位于苏丹能矿部划定的21区块东部,为一处受区域韧剪带控制的岩浆热液构造蚀变

岩型金矿床。矿体赋存于元古宙 Kurmut 统、Abu harik 统的含石榴黑云斜长变粒岩、绢云片岩及硅质岩等组成的构造蚀变带内。矿床内韧性剪切构造比较发育,主要为近东西向揉皱,被后期北东、近南北向断裂所切割。岩层之间多为整合接触,界线明显。矿体主要产于构造蚀变带内岩性变化及断裂叠加部位(图1)。

该矿床现已圈定大小矿体10个,其中3个为盲矿体。由于该矿床深部尚未完全控制,可以预测今

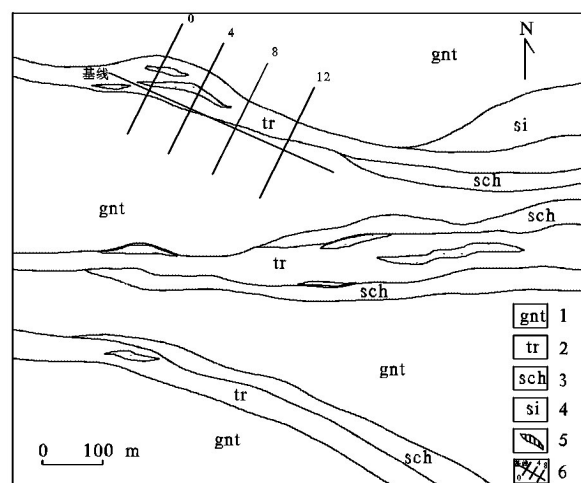


图1 哈佳吉金矿区地质略图

Fig.1 Geological sketch of the Alhagagia gold deposit, Sudan

1.变粒岩; 2.韧性剪切带; 3.片岩; 4.硅质岩;
5.金矿体; 6.勘探线及编号

收稿日期: 2011-03-28

基金项目: 中非投资发展有限公司项目

作者简介: 李杰(1982-),男,山东莱芜人,博士研究生,地球化学专业,现主要从事金矿地质勘查和地球化学科研工作,
Email: lijie-cdut.cn@163.com。

后在矿床深部尚会有新的矿体发现。矿体形态不规则,大多呈透镜状、条带状、少量为脉状,沿走向,倾向和厚度方向上变化不一,呈矿体群出现(图2)^[2,3]。

1.3 矿石矿物特征

矿石类型绝大部分属于黄铁矿化碎裂岩型,部分属黄铁矿化硅化变粒岩质碎裂岩型,少量属硫化物石英脉型。由于金矿化产于变质程度较深的变粒岩及钙硅质岩石等组成的破碎带内,所以矿石的结构构造较为复杂,一般多为团块状、雪花状、眼球状、脉状、网脉状以及斑杂状构造,其次为角砾状及交错脉状构造;以晶粒状结构为主,其次有碎裂结构、填隙结构、包含结构和糜棱结构等。围岩蚀变较为普遍,主要为绢云母化、碳酸盐化、绿泥石化、硅化、高岭土化,蚀变作用延续时间长,各蚀变作用相互叠加,蚀变分带较明显,各带之间为渐变关系。

矿石中的金矿物以银金矿和金银矿为主,自然金少量。赋存状态以裂隙金为主,晶隙金次之,包体金少量。银金矿多数单独沿黄铁矿、石英裂隙、晶隙分布,少数与黄铜矿、方铅矿等金属硫化物共生,沿黄铁矿、石英裂隙分布。金银矿主要沿方铅矿裂隙及边部分布,其次沿方铅矿与石英晶隙分布,少数沿

闪锌矿晶隙及石英与黄铁矿晶隙分布。金矿物粒径最大380 μm ,最小0.4 μm ,以60 μm 级居多。

矿石中的主要矿物成分复杂,已鉴定出的金属矿物有黄铁矿、磁黄铁矿、闪锌矿、黄铜矿、毒砂、方铅矿、银金矿、斑铜矿;非金属矿物有石英、绢云母、长石、碳酸盐、绿泥石、绿帘石、锆石等。表生矿物主要有褐铁矿、孔雀石、辉铜矿、铜蓝、高岭石等。

2 样品测试

将所取的样品用颚式碎样机粗碎,然后在玛瑙研钵中研磨,过200目筛,用ICP-MS(美国珀金埃尔默公司生产,型号:Elan DRC-e)测试。具体测试方法如下:称取50.00 mg样品至聚四氟消解罐(内罐)中,加几滴蒸馏水润湿样品,然后加入1 mL HF、1 mL HNO_3 ,封好后放至对应铁罐(外罐)中拧紧,放至烘箱内加热40小时(第一个小时温度为100℃,之后调至180℃),自然冷却后,用加热板蒸干,之后加1 mL HNO_3 溶解、蒸干,温度<120℃,重复1次。对蒸干好的样品加入1 mL的1 $\mu\text{g/mL}$ 事先配好的Rh标准液作内标,加入1 mL HNO_3 、1 mL蒸馏水,封好后放至烘箱内加热4小时(第一个小时温度为100℃,之后调至140℃),使其充分溶解,之后转移至10 mL容量瓶中定容、充分摇匀,之后再取1 mL该溶液定容至10 mL充分摇匀后待测。所有实验操作均在成都理工大学地球化学系超净实验室内完成。

3 稀土元素地球化学特征

通过对哈佳吉矿床的近矿围岩(5件)和矿石(6件)的稀土元素含量进行测定,得到稀土元素含量值(表1、表2)和特征参数值(表3)。本次采集的11件样品均取自钻孔岩芯,为具代表性的围岩和矿石。

表3中稀土元素总量(ΣREE)为镧系14个元素含量之和,铈(Ce)和铕(Eu)异常的计算公式为:

$$\delta\text{Ce} = \text{Ce}_N / 0.5(\text{La}_N + \text{Pr}_N), \delta\text{Eu} = \text{Eu}_N / 0.5(\text{Sm}_N + \text{Gd}_N), \text{特征参数为用Sun McDonough (1989) 提出的C1球粒陨石丰度值进行标准化所得}^{[4]}。$$

3.1 稀土元素含量及分布特征

从表1、表3可见,哈佳吉金矿床近矿围岩整体稀土含量较低, ΣREE 为 $115.66 \times 10^{-6} \sim 152.97 \times 10^{-6}$,平均值为 133.92×10^{-6} , $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值为4.12~5.83, LREE/HREE值为4.54~5.95,这些数据表明近矿围岩中轻重稀土元素之间发生了明显的分馏作用,轻稀

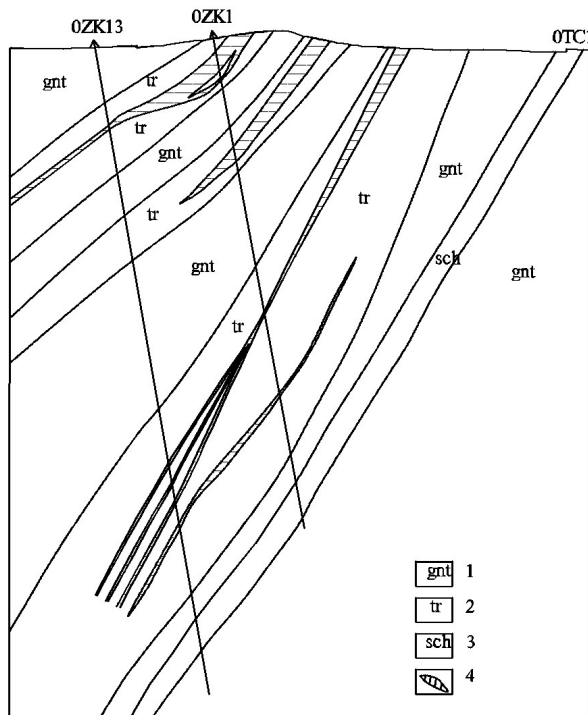


图2 哈佳吉金矿床0号勘探线剖面示意图

Fig.2 Schematic section of the No.0 exploration line in the Alhagagia gold deposit

1.变粒岩; 2.韧性剪切带; 3.片岩; 4.金矿体

表1 哈佳吉金矿床近矿围岩稀土元素含量(×10⁻⁶)
Table 1 The REE content of the wallrocks in the Alhagagia gold deposit,Sudan(×10⁻⁶)

样品号	样品名	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y
2ZK4-105	gnt	16.96	38.89	5.49	26.07	6.01	1.74	5.70	0.99	6.05	1.13	3.16	0.51	2.95	0.47	30.71
2ZK4-134	gnt	20.49	43.17	5.70	23.87	4.62	1.18	4.35	0.74	4.65	0.91	2.62	0.41	2.52	0.43	26.53
6ZK2-43	sch	22.34	47.64	6.43	27.59	5.54	1.18	5.32	0.93	6.25	1.29	3.81	0.62	3.97	0.64	37.02
6ZK2-94	gnt	25.30	55.05	7.48	31.12	6.49	1.62	6.06	1.10	7.43	1.43	4.19	0.68	4.32	0.71	41.85
6ZK2-99	sch	26.19	54.99	7.22	30.50	6.36	1.41	5.84	1.03	6.93	1.42	4.06	0.65	4.05	0.65	41.84

注:sch为含碳质黑云石英片岩;gnt为含石榴黑云斜长变粒岩;表中数据由成都理工大学地球化学实验室用ICP-MS测试

表2 哈佳吉金矿床矿石稀土元素含量(×10⁻⁶)
Table 2 The REE content of ores in the Alhagagia gold deposit,Sudan(×10⁻⁶)

样品号	样品名	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y
0ZK1-38	Lm-tr	16.52	39.58	5.65	25.59	5.85	1.69	5.89	1.09	7.50	1.50	4.37	0.68	4.28	0.69	42.61
0ZK1-72	Py-tr	15.90	37.92	5.48	25.02	6.13	1.82	6.06	1.06	6.75	1.35	3.50	0.53	3.36	0.51	34.10
2ZK4-59	tr	12.98	30.67	4.29	19.70	4.75	1.50	4.65	0.91	6.13	1.16	3.46	0.55	3.45	0.55	34.31
2ZK4-68	Py-tr	14.51	34.20	4.81	21.85	4.79	1.58	4.61	0.80	5.28	1.05	2.94	0.45	2.78	0.43	28.94
6ZK2-21	Lm-tr	13.19	31.48	4.54	21.02	4.98	1.54	5.24	0.99	6.72	1.32	3.81	0.60	3.70	0.59	37.75
6ZK2-58	Py-tr	15.03	35.18	5.19	23.10	5.68	1.75	5.69	1.08	7.50	1.49	4.21	0.64	4.11	0.67	40.46

注:Lm-tr为褐铁矿化硅化变粒岩质碎裂岩;Py-tr为黄铁矿化硅化变粒岩质碎裂岩;tr为变粒岩质碎裂岩;
表中数据由成都理工大学地球化学实验室用ICP-MS测试

表3 哈佳吉金矿床近矿围岩及矿石稀土元素组成的特征参数
Table 3 The characteristic parameters of REE contents in the wallrocks and ores of the Alhagagia gold deposit

	样品号	样品名	ΣREE	LREE	HREE	LREE/HREE	La _N /Yb _N	δEu	δCe
近矿围岩	2ZK4-105	gnt	116.11	95.17	20.94	4.54	4.12	0.90	0.96
	2ZK4-134	gnt	115.66	99.03	16.64	5.95	5.83	0.79	0.96
	6ZK2-43	sch	133.56	110.72	22.84	4.85	4.04	0.65	0.96
	6ZK2-94	gnt	152.97	127.06	25.92	4.90	4.20	0.78	0.96
	6ZK2-99	sch	151.31	126.67	24.63	5.14	4.63	0.70	0.96
矿石	0ZK1-38	Lm-tr	120.86	94.88	25.98	3.65	2.77	0.87	1.00
	0ZK1-72	Py-tr	115.39	92.27	23.12	3.99	3.40	0.90	0.99
	2ZK4-59	tr	94.75	73.89	20.86	3.54	2.70	0.96	0.96
	2ZK4-68	Py-tr	100.07	81.74	18.33	4.46	3.74	1.01	0.96
	6ZK2-21	Lm-tr	99.71	76.75	22.95	3.34	2.56	0.91	0.96
	6ZK2-58	Py-tr	111.33	85.93	25.40	3.38	2.62	0.93	0.96

土富集,重稀土亏损^[5,6]。δCe为0.96,显示负铈异常不明显;δEu为0.65~0.90,平均为0.78,显示中等程度的负铕异常,属Eu亏损型。

从表2、表3可以看出,哈佳吉金矿床的矿石稀土元素含量相对近矿围岩更低,ΣREE为94.75×10⁻⁶~120.86×10⁻⁶,平均值为107.02×10⁻⁶,LREE/HREE值为3.34~4.46,(La/Yb)_N值为2.56~3.74,表明轻稀土富集,重稀土亏损,但分馏程度比围岩要低。δCe为0.96~1.0,显示铈的负异常更不明显。δEu为0.87~1.01,平均为0.93,显示铕负异常不明显,同时个别样品出现弱的铕正异常。

Ce、Eu是具有重要意义的变价元素,可随环境的氧化还原条件不同而呈现不同的价态。在相对还原的条件下,Ce³⁺可较长时间地保存在溶液中,而Eu³⁺则

被还原成Eu²⁺沉淀,导致流体中出现Eu的亏损和Ce的相对稳定,所形成的热液矿物则出现Eu的负异常。而在相对氧化的环境下情况相反,Eu³⁺可较长时间地保存在溶液中,Ce³⁺却被氧化成Ce⁴⁺并产生沉淀,导致流体中出现Ce的亏损和Eu的相对稳定,所形成的热液矿物则出现Ce的负异常。因此δCe和δEu值可以作为氧化还原环境的指示标志^[7]。

哈佳吉金矿床近矿围岩和矿石的δEu、δCe值均显示出成矿体系处在一种相对还原的环境,但从围岩到矿石呈现出体系还原性降低的趋势。这可能是在成矿阶段有氧化性流体加入,打破了体系原有的地球化学平衡,使得体系还原性减弱,金得以聚集成矿。

吴国谋、王壁珍^[8,9]在对中国湖北大别山及武当山地区的变质岩做过大量分析后,得出结论:稀土含

量在原岩为火成岩的变粒岩中较高,原岩为沉积岩者则较低, ΣREE 在 $116 \times 10^{-6} \sim 303 \times 10^{-6}$ 范围之间,大约以 $\Sigma \text{REE} = 280 \times 10^{-6}$ 作为划分原岩是火成岩还是沉积岩的界限^[10]。本文所选围岩样品的 ΣREE 在 $115.66 \times 10^{-6} \sim 152.97 \times 10^{-6}$,按照该理论,其原岩应为沉积岩。下文将结合该区构造演化继续讨论。

3.2 稀土元素配分模式对比分析

根据近矿围岩及矿石中的稀土含量值(表1、表2),利用Sun McDonough(1989)提出的C1球粒陨石丰度值和LA Haskin等(1984)提出的北美页岩组合样(NASC)分别进行标准化,得图3、图4、图5^[4]。在研究沉积岩系稀土模式时常用北美页岩进行标准化,考虑到该区古老的变质基底最初原岩可能为沉积岩,故对围岩作了北美页岩的标准化。

从图3可看出,近矿围岩的稀土元素球粒陨石标准化模式呈现不同程度的“V”字型,表现出中等程度的Eu负异常,配分曲线向右倾斜(右倾型);从图4可看出,近矿围岩稀土元素北美页岩标准化模式表现为略向左倾,Eu呈正异常,这与大洋岛弧一般出现的Eu正异常相一致^[10, 11],故推测成岩时的构造环境为大洋岛弧。Ce异常不明显,可排除成岩过程中大量海相物质的加入。从图5可看出,矿石的稀土配分曲线与容矿岩石的稀土配分曲线有一定的类似,但又有所不同,这与该区所处的特殊大地构造背景有关(图6):该区处在洋壳向陆壳俯冲产生的增生楔中,陆壳物质在深部热源的作用下重熔,并与深源的地幔物质进行物质和能量的交换和重组,由于深部相对均匀的重熔物质的加入,使得矿石的稀土元素分馏程度减弱,也正是这种作用,为后来金的活化、迁移、富集成矿提供了充足的能量和物质来源。

4 结论

稀土元素有着相似的化学性质和地球化学行为,通常紧密共生,共同迁移,虽然在不同地质过程中,会有一定的分馏,但仍在很大程度上继承了原始物质,是一组能很好揭示成矿物质来源及成矿条件的示踪元素,特别是对热液型金矿床的成矿物质来源和矿床成因有很大的指示意义^[12-14]。基于此,对苏丹哈佳吉金矿床的近矿围岩和矿石进行了稀土元素的含量分析和配分模式的讨论,结合该区地质构造环境,得出如下结论:

(1)根据近矿围岩的稀土元素球粒陨石标准化

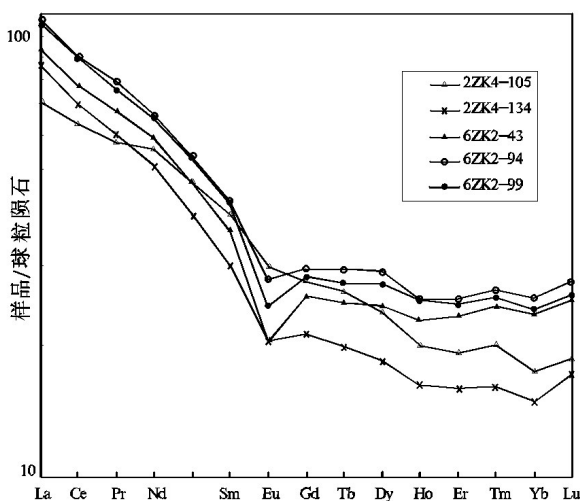


图3 近矿围岩稀土元素球粒陨石标准化谱图
Fig.3 REE Chondrite-normalized patterns of the wallrocks

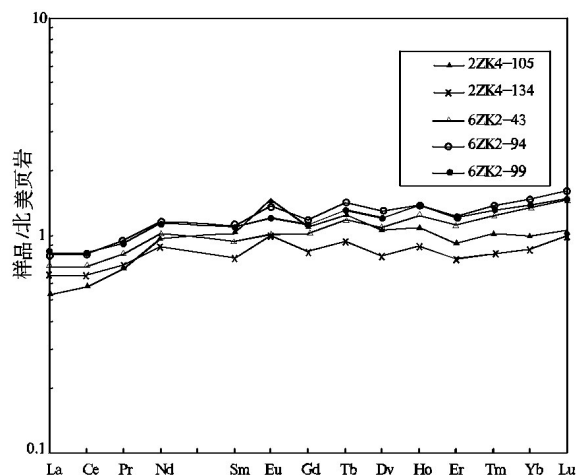


图4 近矿围岩稀土元素北美页岩标准化谱图
Fig.4 REE NASC-normalized patterns of the wallrocks

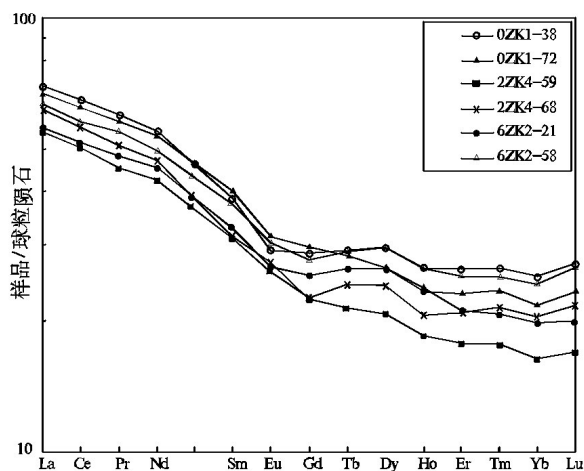


图5 矿石稀土元素球粒陨石标准化谱图
Fig.5 REE Chondrite-normalized patterns of the ores

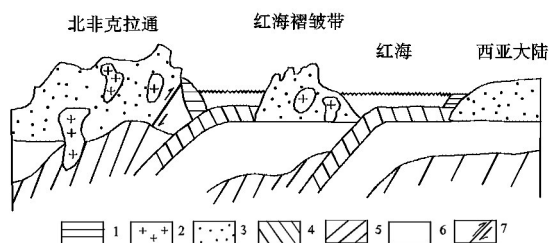


图6 苏丹北部地区大地构造背景示意图

Fig.6 The diagrammatic sketch of geotectonic background in northern Sudan

1.增生楔; 2.花岗岩类; 3.大陆壳; 4.洋壳; 5.软流层;
6.下地壳岩石圈; 7.压性断裂/逆冲断层

曲线及北美页岩标准化曲线,可以判断近矿围岩所处的构造环境应属大洋岛弧,在成岩成矿过程中并没有大量海相物质的加入。

(2)从近矿围岩和矿石的稀土组成球粒陨石标准化曲线中都可以看出,矿石中Eu有中等程度的亏损,Ce含量一直相对较稳定,表明成矿时所处环境为还原环境。

(3)将矿石的稀土配分曲线与近矿围岩的稀土配分曲线进行对比,矿石的稀土配分曲线与容矿岩石的稀土配分曲线有一定的类似,但又有所不同,表明成矿物质大部分来自变质基底,也有深源物质的参与。

致谢: 感谢成都理工大学地球化学系徐进勇、彭秀红老师在样品测试中的指导和帮助。

参考文献:

- [1] 李 杰,倪师军,张成江,等.苏丹哈佳吉金矿床成矿物质来源的微量元素地球化学特征[J].广东微量元素科学, 2010, 18(3):48-54.
- [2] Sadiger. Technical Report of Gold Prospecting in Block 21 Bayuda Desert[R], Research and Mineral Exploration Department of Sudan. 2005, 2-3.
- [3] 杨立新,鲍中义,李杰,等.苏丹拜尤达地区哈佳吉矿区金矿普查报告[R],山东省第六地质大队,2010,5.
- [4] 路远发. GeoKit: 一个用VBA构建的地球化学工具软件包[J].地球化学, 2004, 33(5):459-464.
- [5] 韩吟文,马振东,等.地球化学[M].北京,地质出版社,2003, 181-195.
- [6] 刘英俊,曹励明.元素地球化学导论[M].北京,地质出版社,1986,28-243.
- [7] 张成江,陈友良.510-1 铀矿床垂直分带规律的发现及其成因意义[J].地质与勘探,2010, 46(3):434-441.
- [8] 吴国谋.稀土元素在原岩回复上的应用,1983.
- [9] 王璧珍,湖北武当地区西段元古界武当山群变质岩的原岩恢复,1983.
- [10] 王中刚,于学元,赵振华,等.稀土元素地球化学[M].北京,科学出版社,1989.
- [11] Haskin M A, Haskin L A. Rare earth in European shales: a redetermination [J]. Science, 1966, 154:507-509.
- [10] 王小兵,高保明.新疆萨尔勒克金矿稀土元素地球化学特征[J].新疆地质,2001, 19(3):185-188.
- [11] 刘显凡,金景福,倪师军.滇黔桂微细浸染型金矿深部物源的稀土元素证据[J].成都理工学院学报, 1996, 23(4): 25-30.
- [12] 邱士东,王葆华,徐九华,等.陕西汉阴黄龙金矿稀土元素地球化学特征[J].中国稀土学报, 2009, 27(1): 145-150.

Geochemistry Characteristics of the Rare Earth Elements in the Alhagagia Gold Deposit, Sudan

LI Jie^{1,2}, YANG Li-xin², LI Shi-yong³, NI Shi-jun¹, ZHANG Cheng-jiang¹, YU Lin-song⁴

(1. College of Applied Nuclear Technology and Automation Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. The 6th Geology and Mineral Resources Survey Institute in Shandong Province, Weihai 264209, China;

3. Shandong Bureau of Geology and Mineral Resources, Jinan 250013, China;

4. The Geophysics and Geochemistry Research Institute in Shandong Province, Jinan 250013, China)

Abstract: Based on the study about REE content in the Alhagagia gold deposit and its wall rocks in Sudan, it is found that the REE total content of the wall rocks is higher than the ore minerals'. The fractionation of HREE and LREE is obvious with moderate or slightly negative Eu anomaly and stable content of Ce, which indicates that the ore formed in the deoxidized environment. According to the Chondrite-normalized and NASC-normalized REE patterns of the wall rocks, it is suggested that the metamorphosed basement formed in an oceanic island arc tectonic environment, and there are no much marine facies materials joining in this diagenetic stage. The REE geochemical features of the wall rocks and ores show the ore-forming materials came from metamorphosed basement as well as deep materials.

Keywords: REE; geochemistry; chondrite-normalized REE pattern; Alhagagia gold deposit; Sudan