

河北武安矿山村矿田铁矿的稀土元素特征 及其地质意义

杜高峰^{1,2}, 戴塔根^{1,2}, 邹海洋^{1,2}, 李文斌³, 胡援越³

(1. 中南大学 有色金属成矿预测教育部重点实验室, 长沙 410083;

2. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083;

3. 中国五矿邯邢矿业邯邢地质勘查设计有限公司, 邯郸 056000)

摘要: 为了解河北武安矿山村矿田两类不同就位环境下的铁成矿差异, 对两类铁矿进行了稀土元素地球化学研究; 一类为就位于岩体外部接触带的玉石洼型铁矿, 另一类为产于岩体内部的五家子型铁矿。前者2件致密块状铁矿样品的 $\sum w(\text{REE})$ 含量变化范围为 $10.195 \times 10^{-6} \sim 11.615 \times 10^{-6}$, $w(\text{LREE})/w(\text{HREE})$ 比值为11.639~13.160, $\delta(\text{Eu})$ 为0.844~0.957; 后者3件脉状铁矿石样品 $\sum w(\text{REE})$ 含量变化范围为 $44.412 \times 10^{-6} \sim 49.840 \times 10^{-6}$, $w(\text{LREE})/w(\text{HREE})$ 比值为4.387~5.724, $\delta(\text{Eu})$ 为0.306~0.438。上述5件铁矿样品稀土元素分配型式均为铈异常不明显的右倾曲线, 与4件岩体样品稀土特征基本相似, 成矿流体与岩浆流体关系密切。五家子磁铁矿稀土总量 $\sum w(\text{REE})$ 较高, 具明显铈负异常, 轻、重稀土分馏程度低, 与典型矽卡岩就位环境下的玉石洼铁矿区别明显。结合矿体产出的野外地质特征, 推测除矽卡岩成矿机制外, 矿山村矿田内铁矿存在与岩浆关系更密切的成矿机制。

关键词: 矿山村矿田; 铁矿; 地球化学; 稀土元素; 成矿流体; 矽卡岩

中图分类号: P618.31

文献标志码: A

Rare earth elements characteristics and geological significance of iron deposit in Kuangshancun ore field of Wu'an County, Hebei Province, China

DU Gao-feng^{1,2}, DAI Ta-gen^{1,2}, ZOU Hai-yang^{1,2}, LI Wen-bin³, HU Yuan-yue³

(1. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals, Ministry of Education,

Central South University, Changsha 410083, China;

2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China;

3. Hanxing Mining Geological Exploration Design Co., Ltd., China Minmetals Corporation, Handan 056000, China)

Abstract: In order to clarify metallogenic differences of iron deposit in different locational environments, the contents of rare earth elements of two types of iron ore and wall rock in ore field of Wu'an County, Hebei Province, China, were analyzed. One is two massive iron ore samples which are from the exterior contact zones of Yushiwa ore deposit ($\sum w(\text{REE})=10.195 \times 10^{-6} \sim 11.615 \times 10^{-6}$, $w(\text{LREE})/w(\text{HREE})=11.639 \sim 13.160$, $\delta(\text{Eu})=0.844 \sim 0.957$). The other is three veinlet iron ore samples inside of Wujiazi ore deposit which are in the form of xenolith ($\sum w(\text{REE})=44.412 \times 10^{-6} \sim 49.840 \times 10^{-6}$, $w(\text{LREE})/w(\text{HREE})=4.387 \sim 5.724$, $\delta(\text{Eu})=0.306 \sim 0.438$). The REE distribution of the five samples is right deviation, with slightly negative Eu anomalies, and similar with that of the four rock samples, which show that the origin of ore-forming fluids is closely related with magmatic fluids. In contrast, the total contents of rare earth elements of Wujiazi are high with negative Eu anomalies, and the fractionation of LREE and HREE is weak. Combined with field geological operations, it is speculated that Kuangshancun ore field has certain kinds of ore-forming mechanism closely related with magma expect for skarns ore-forming mechanism.

Key words: Kuangshancun ore field; iron deposit; geochemistry; rare earth elements (REE); metallogenic fluid; skarn

矿山村矿田位于华北地台南缘邯邢砂卡岩铁矿成矿带的北东,系邯邢铁矿成矿带内重要矿田之一。矿田内铁矿体多产于岩体外接触带上,同时也有一些铁矿体就位于岩体内部,前者以玉石洼铁矿为代表,后者以五家子铁矿为代表。矿山村矿田开发时间较早,研究程度较高,累积了丰富的地质资料。前人研究^[1-2]显示矿山村岩体由中性及偏碱性岩类构成,包括二长闪长岩、含辉石二长岩及角闪二长岩,另外,还发育少量正长细晶岩脉。这些中性及偏碱性岩类是邯邢式砂卡岩磁铁矿床的成矿母岩,矿田内铁矿的形成与普遍发育的钠长石化关系密切,成矿流体与地幔或深部流体有明显的亲缘关系^[1-3]。目前,对区内就位于岩体内部的铁矿尚未开展过系统研究,因此,本文作者以五家子铁矿及玉石洼铁矿为对象,开展稀土元素地球化学研究,探讨不同就位环境对铁矿成矿物、化条件的制约及其地质意义。

1 区域地质背景

华北地台中生代属滨西太平洋大陆边缘活动带,以陆内挤压造山为主,形成了包括鲁西隆起区和太行

隆起区在内的大规模北北东向隆起,岩浆活动频繁,为砂卡岩型铁矿大规模成矿提供了理想的成矿地质条件^[1]。邯邢砂卡岩铁矿成矿带地处太行隆起区东侧与华北沉降带的过渡带,区域内广泛发育的中奥陶统地层为一套海相碳酸盐岩地层,以灰岩为主。本区与成矿有关的中性岩浆岩按形成时间可分为3期:燕山早期的辉长-闪长岩、辉石闪长岩、角闪闪长岩;燕山中期的黑云母闪长岩、闪长岩和二长岩等;燕山晚期的钠质正长岩、霓辉正长岩、闪长玢岩和二长花岗岩等。其中,与本区成矿关系最密切的是燕山中期闪长岩^[2]。

2 典型矿床地质特征

矿山村矿田位于武安县城北西13 km处。矿田内主要出露有奥陶系、石炭系和二叠系地层(见图1)。下奥陶统分布于矿田西部;中奥陶统分布于矿田的中部及南部,常见中奥陶统以捕掳体形式赋存于岩体内部。石炭系和二叠系均出露于矿田东南部。矿田内主要发育北北东向断裂。矿田内大面积出露矿山村复式岩体,出露面积达35 km²,岩性主要为闪长岩、二长

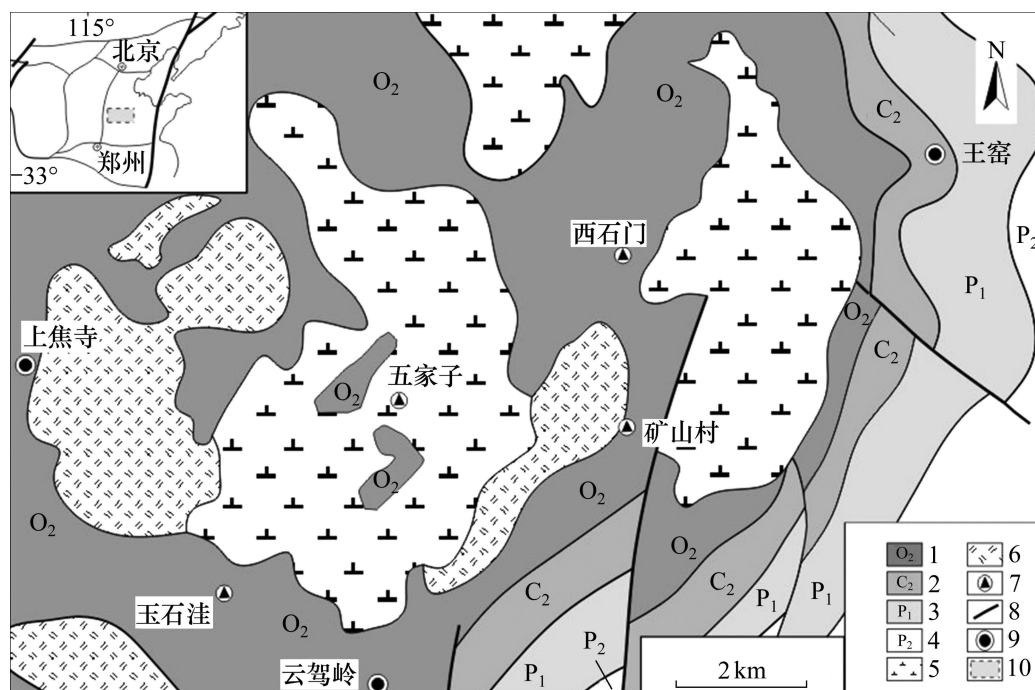


图1 河北武安矿山村矿田地质简图(据邯邢冶金矿山管理局地质队 1986): 1—中奥陶统灰岩; 2—中石炭统碎屑岩; 3—早二叠统砂岩; 4—晚二叠统粉砂岩; 5—燕山期闪长岩类; 6—燕山期二长岩类; 7—铁矿; 8—断裂带; 9—村镇; 10—研究区

Fig. 1 Geological sketch map of Kuangshancun ore-field in Wu'an: 1—Middle Ordovician limestone; 2—Middle Carboniferous clastic rock; 3—Early Permian Series sandstone; 4—Late Permian Series siltstone; 5—Yanshan diorites; 6—Yanshan monzonite; 7—Iron deposit; 8—Fault belt; 9—Town; 10—Research area

闪长岩和二长岩等。

玉石洼铁矿位于矿田南部, 矿区出露均为中奥陶统灰岩, 矿山村岩体在矿区内隐伏于中奥陶统灰岩之下, 并向南小角度倾伏。矿体产于矿山村闪长岩体与中奥陶灰岩的接触带内(见图 2(a)), 矿体的形态和产状受接触带控制, 呈似层状, 走向 NW-SE, 倾向 SW, 倾角 $10^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 。矿体顶板多为灰岩, 局部为矽卡岩和大理岩; 底板多为闪长岩, 局部为矽卡岩。矿石的矿物组合较简单, 金属矿物以磁铁矿为主, 少量黄铁矿、假象赤铁矿及黄铜矿等; 脉石矿物主要为透辉石、透闪石和方解石, 少量蛇纹石、金云母和阳起石等。矿石具自形-半自形粒状和它形粒状结构; 矿石构造以条带状及浸染状构造为主, 致密块状及斑点状构造次之。

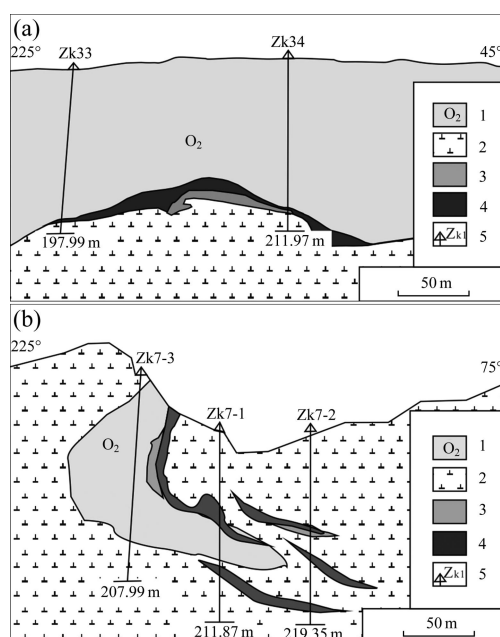


图 2 勘探线剖面图: (a)—玉石洼铁矿 10[#]勘探线剖面图; (b)—五家子铁矿 7[#]勘探线剖面图; 1—中奥陶统灰岩; 2—燕山期闪长岩类; 3—矽卡岩; 4—矿体; 5—钻孔及编号

Fig. 2 Prospecting line profile maps: (a) Prospecting line 10[#] profile map of Yushiwa iron deposit; (b) Prospecting line 7[#] profile map of Wujiazhi iron deposit; 1—Middle Ordovician limestone; 2—Yanshan diorites; 3—Skarn; 4—Orebody; 5—Drilling and number

五家子铁矿位于矿田中部, 矿区内广泛出露燕山期闪长岩, 局部见中奥陶统灰岩捕虏体, 呈透镜状产出, 其长轴呈近南北向展布, 倾向东, 倾角 $15^{\circ}\sim 35^{\circ}$ 。该铁矿由多个矿体构成, 部分矿体沿灰岩捕虏体与闪长岩接触带产出, 其形体和产状受接触带控制(见图

2(b)); 而大多数矿体远离接触带, 呈透镜状或脉状直接赋存于岩体或灰岩捕虏体的裂隙中, 这些矿脉走向 NE~SW, 倾向 SE, 倾角 $10^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 。五家子铁矿金属矿物以磁铁矿为主, 少量黄铁矿、黄铜矿及镜铁矿等。脉石矿物则以绿泥石为主, 其次有高岭土、方柱石和绿帘石等。矿石结构以自形-半自形粒状和它形粒状为主; 矿石构造多为致密块状或条带状构造, 角砾构造、浸染状和斑点状构造次之。

3 样品的选取与分析测试

通过详细的野外工作, 分别在玉石洼铁矿和矿山村五家子矿区采集了具有代表性的致密块状磁铁矿样品, 破碎至 $75\ \mu\text{m}$ 。样品送国土资源部长沙矿产资源监督检测中心检测。采用等离子体质谱法分析, 检测方法为 DZG20.01-1991, 使用仪器为 ICP-MS 全谱仪, 室内温度为 $22\ ^{\circ}\text{C}$, 相对湿度为 65%。

4 稀土元素分析结果

共分析了 12 件岩矿石样品(见表 1)。稀土元素的球粒陨石标准化采用 Boynton 数据^[4]。样品的稀土元素地球化学特征如下。

玉石洼铁矿致密磁铁矿样品 2 件, 稀土总含量 $\sum w(\text{REE})$ 变化范围为 $10.195\times 10^{-6}\sim 11.615\times 10^{-6}$, 稀土配分模式为右倾轻稀土富集型(见图 3), $w(\text{LREE})/w(\text{HREE})$ 比值为 11.639~13.160, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 为 11.566~16.638, 具极弱的负 Eu 异常($\delta(\text{Eu})$ 为 0.844~0.957)。五家子铁矿 3 件脉状致密磁铁矿样品的稀土总含量变

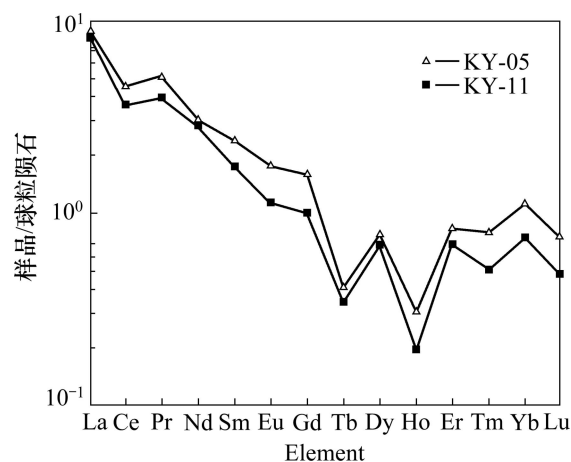


图 3 玉石洼矿区铁矿石的 REE 配分图

Fig. 3 REE distribution of ores from Yushiwa iron ore area

表 1 典型样品稀土元素分析结果

Table 1 Analytical results of REE of typical samples

参数	五家子采坑					玉石洼 240 m 水平			
	DK-05 闪长岩	DK-11 闪长岩	KK-10 矿石	KK-11 矿石	KK-17 矿石	DY-02 闪长岩	DY-17 闪长岩	KY-05 矿石	KY-11 矿石
$w(\text{La})/10^{-6}$	31.290	24.920	9.639	7.018	7.855	29.290	26.210	3.235	3.127
$w(\text{Ce})/10^{-6}$	53.890	54.340	17.610	14.893	16.603	60.210	52.489	4.012	3.391
$w(\text{Pr})/10^{-6}$	6.571	7.016	2.398	2.142	2.105	7.220	6.050	0.652	0.517
$w(\text{Nd})/10^{-6}$	26.330	28.140	10.78	10.130	9.545	27.300	22.000	2.192	2.018
$w(\text{Sm})/10^{-6}$	4.871	5.053	1.831	1.793	1.518	5.240	3.860	0.481	0.341
$w(\text{Eu})/10^{-6}$	1.539	1.283	0.170	0.192	0.203	1.761	1.319	0.124	0.081
$w(\text{Gd})/10^{-6}$	4.306	4.558	1.579	1.524	1.324	4.812	3.804	0.326	0.252
$w(\text{Tb})/10^{-6}$	0.721	0.803	0.344	0.347	0.312	0.671	0.479	0.015	0.013
$w(\text{Dy})/10^{-6}$	3.671	4.497	2.075	2.201	2.020	3.528	2.906	0.197	0.175
$w(\text{Ho})/10^{-6}$	0.735	1.007	0.450	0.507	0.469	0.695	0.534	0.017	0.011
$w(\text{Er})/10^{-6}$	1.953	2.885	1.315	1.568	1.418	2.252	1.563	0.136	0.117
$w(\text{Tm})/10^{-6}$	0.274	0.471	0.208	0.262	0.248	0.330	0.241	0.02	0.013
$w(\text{Yb})/10^{-6}$	1.672	2.836	1.258	1.597	1.600	2.007	1.780	0.189	0.127
$w(\text{Lu})/10^{-6}$	0.295	0.416	0.183	0.238	0.277	0.280	0.181	0.019	0.012
$w(\text{Y})/10^{-6}$	18.610	24.480	10.440	12.110	11.780	19.303	14.801	1.298	1.003
$\sum w(\text{REE})/10^{-6}$	138.118	138.225	49.84	44.412	45.497	145.580	123.400	11.615	10.195
$w(\text{LREE})/10^{-6}$	124.491	120.752	42.428	36.168	37.829	131.021	111.928	10.696	9.475
$w(\text{HREE})/10^{-6}$	13.627	17.473	7.412	8.244	7.668	14.575	11.488	0.919	0.720
$w(\text{LREE})/w(\text{HREE})$	9.136	6.911	5.724	4.387	4.933	8.999	9.759	11.639	13.160
$\text{La}_\text{N}/\text{Yb}_\text{N}$	13.424	6.303	5.178	2.970	3.318	10.508	10.558	11.566	16.638
$\delta(\text{Eu})$	1.005	0.801	0.306	0.356	0.438	1.053	1.041	0.957	0.844
$\delta(\text{Ce})$	0.875	0.992	0.858	0.900	0.957	0.985	0.985	0.647	0.625

样品由国土资源部长沙矿产资源监督检测中心测试。

化范围为 $44.412 \times 10^{-6} \sim 49.840 \times 10^{-6}$, 稀土配分模式为右倾轻稀土富集型(见图 4), $w(\text{LREE})/w(\text{HREE})$ 比值

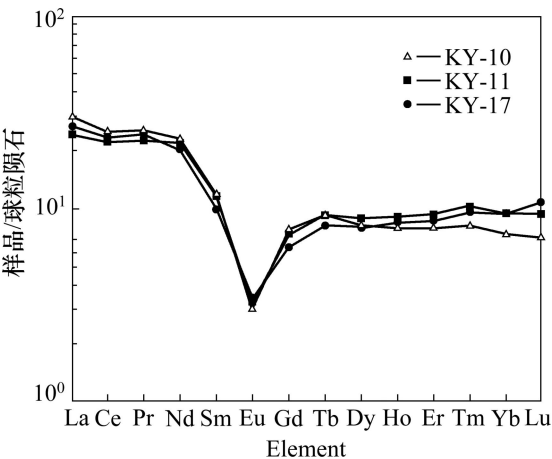


图 4 五家子矿区铁矿石的 REE 配分图

Fig. 4 REE distribution of ores from Wujiazhi iron ore area

为 $4.387 \sim 5.724$, $(\text{La}/\text{Yb})_\text{N}$ 为 $2.969 \sim 5.717$, 具有明显的负异常($\delta(\text{Eu})$ 为 $0.306 \sim 0.438$)。

4 件矿山村岩体样品的稀土总量为 $123.400 \times 10^6 \sim 145.580 \times 10^6$, 明显高于磁铁矿稀土总量, 但稀土配分模式为右倾轻稀土富集型(见图 5), 与磁铁矿铁矿类似, $w(\text{LREE})/w(\text{HREE})=6.911 \sim 9.759$, $(\text{La}/\text{Yb})_\text{N}$ 为 $6.303 \sim 13.424$, 铕负异常不明显($\delta(\text{Eu})$ 为 $0.801 \sim 1.053$)。

5 讨论

矿石稀土元素特征反映成矿流体特性^[5-6]。我国鞍山式沉积铁矿以及世界上其他的 BIF 型铁矿稀土元素特征均显示轻稀土元素相对亏损、重稀土相对富集, 无明显 Ce 异常, 具强烈的 Eu 正异常, 反映出早前寒武纪海洋化学沉积特点^[7-8](见图 6)。而矿山村矿

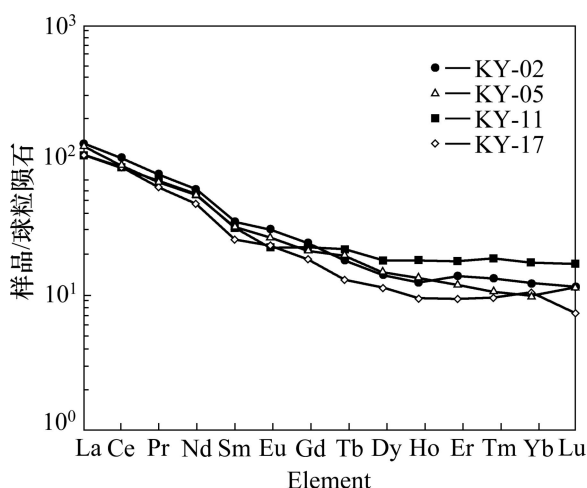
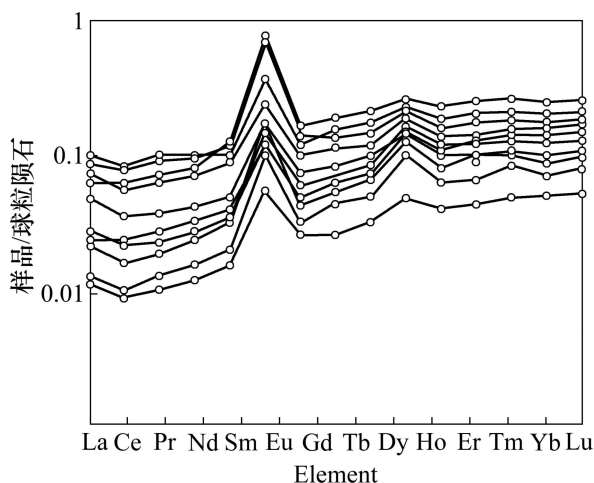


图5 两矿区岩体样品的REE配分图

Fig. 5 REE distribution of host rocks from two iron ore areas

图6 鞍山—本溪地区BIF型铁矿石的REE配分图^[7-8]Fig. 6 PAAS-normalized REE diagram of BIF from Anshan—Benxi area^[7-8]

田内郎邢式磁铁矿样品稀土组成总体特征显示较富集轻稀土和具有中等、弱的铕负异常,呈右倾式轻稀土富集型展布。可见不同类型的磁铁矿铁矿石稀土元素特征区别明显。矿山村矿田内铁矿石与岩体稀土配分模式相近,均为右倾模式、富集轻稀土,表明区内铁矿石稀土来源与岩浆岩联系密切。

对比两矿区铁矿石稀土元素特征可以看出:五家子铁矿稀土总量较高,轻、重稀土分馏程度低,具有明显负Eu异常;而玉石洼铁矿稀土含量较低、轻、重稀土分馏程度高。

岳书仓和徐晓春^[9]的研究表明:稀土元素主要以REE³⁺络离子赋存于溶液中,其稳定性随温度降低而减弱,且HREE³⁺相对LREE³⁺稳定性降幅较大,导致

稀土元素总量随着温度下降而减少,但分馏程度随温度的降低而提高。样品稀土总量和分馏程度的区别反映了五家子矿区成矿温度应高于玉石洼矿区。

徐晓春等^[10]发现:硅酸盐熔体-蒸气相共存体系中,稀土元素在含Cl⁻溶液与熔体之间的分配系数主要取决于溶液中Cl⁻的摩尔浓度以及溶液与熔体平衡时的压力,正Eu异常对应低压下低Cl⁻浓度的弱氧化性流体,负Eu异常对应高压下富Cl⁻的还原性流体^[11-12]。玉石洼铁矿极弱的铕异常,显示成矿流体为低压下低Cl⁻浓度的弱氧化性流体,而五家子显示出较高的负铕异常,则暗示五家子磁铁矿成矿热液流体可能为相对较高压力条件下分异形成的富Cl⁻还原性流体。

研究表明:在氧逸度较高的条件下,Ce³⁺易被氧化为Ce⁴⁺,而Ce⁴⁺的溶解度很小,易脱离溶液体系,使整个溶液体系亏损^[13-14]。玉石洼矿区磁铁矿负 $\delta(\text{Ce})$ 异常,显示其成矿流体的氧逸度高于五家子矿区的,结合 $\delta(\text{Eu})$ 异常反映出两者氧化-还原条件的差别,推测五家子铁矿形成于还原性环境,相对玉石洼铁矿,其成矿温度和压力可能更高。

五家子矿区多见铁矿体侵入岩体内部及灰岩捕虏体内部(见图7),如图7(a)中条带状磁铁矿体侵入岩体,与岩体界线分明,无过渡蚀变带;图7(b)中则可见由致密块状磁铁矿体与灰岩接触,形成明显的烘烤边。湖北大冶、程潮及安庆铜铁矿床中亦发育类似特征的铁矿体,被视为岩浆成矿类型^[15-16]。

模拟实验显示,在高温(850~1300℃)、高压(300~600 MPa)条件下,闪长岩+灰岩+Fe₂O₃熔融冷却后结晶产生磁铁矿质玻璃^[17-18]。范良伍等^[19]据此提出安庆铜铁矿床中形态具有岩浆成因特征的磁铁矿,系月山闪长质岩浆上侵过程中吞噬和同化大量灰岩,因温度和压力的下降,致使大量Fe₃O₄从岩浆中析出,从而富集成矿,认为该类磁铁矿非气成-热液期双交代的产物,而是岩浆成因。

区内碳同位素组成研究显示,部分磁铁矿 $\delta(^{13}\text{C})$ 值偏低,混入地壳有机碳是造成样品 $\delta(^{13}\text{C})$ 值偏低的原因之一^[3, 20],因此,不排除因被闪长质岩浆捕虏和同化,当Fe₃O₄从岩浆中析出富集时,灰岩中有机碳混入,导致部分铁矿石 $\delta(^{13}\text{C})$ 值偏低的可能性。

综上所述,五家子铁矿就位环境特殊,产于岩体内部,稀土元素特征表明其成矿流体具有相对高温和高压条件、富Cl⁻及具还原性的特征,相对接触交代机制,安庆铜铁矿床中早期磁铁矿带成矿机理更适合解释五家子岩体内部铁矿的形成机制,即岩浆在上侵过程中俘虏和同化大量CaCO₃,当温度和压力条件发生

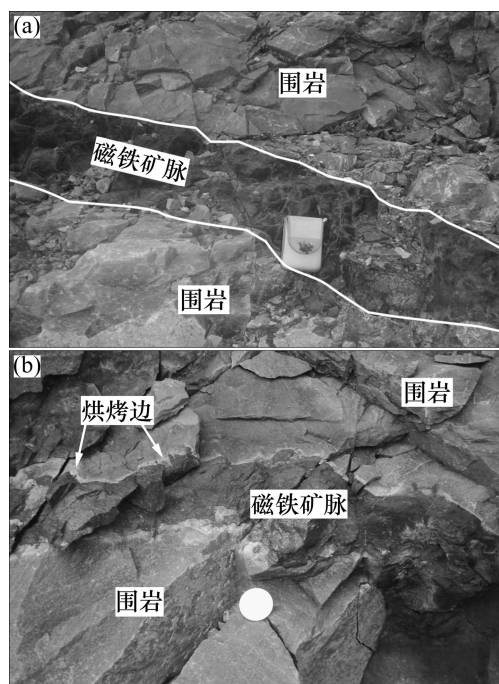


图7 铁矿产出状态野外照片: (a), (b)—磁铁矿体呈脉状侵入围岩及形成烘烤边

Fig. 7 Pictures of iron deposit: (a), (b)—Magnetite body being vein-like intruded into wall rock and formed optalic border

变化时,大量 Fe_3O_4 从岩浆中析出,富集形成矿浆就位成矿。不同的成矿机制是造成两类铁矿石稀土特征差异的主要原因,位于外接触带上的玉石洼铁矿,经历气成-热液期双交代,热液体系内稀土元素消耗殆尽,并因温度下降, REE^{3+} 的络离子失稳分馏,相对前者稀土含量降低,轻、重稀土分馏明显。

6 结论

1) 就位于岩体内部的五家子铁矿与就位于岩体与灰岩接触带内的玉石洼铁矿的矿石均为轻稀土富集、配分模式右倾,与岩体特征接近,显示与岩浆热液具有亲缘性。

2) 五家子铁矿与玉石洼铁矿矿石在稀土总量、稀土配分模式、轻、重稀土分馏及铈异常等特征上具有明显区别,表明两者在温度、压力和成矿流体性质等方面存在差异。

3) 结合现场观察及前人相关研究成果,推测矿山村矿田可能存在两种不同的成矿方式,即矽卡岩型接触双交代成矿和岩浆成因的矿浆贯入型成矿。

REFERENCES

- [1] 陈毓川,朱裕生. 中国矿床成矿模式[M]. 北京:地质出版社, 1993: 23-66.
CHEN Yu-chuan, ZHU Yu-sheng. Mineral deposit models of China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993: 23-66.
- [2] 沈保丰,翟安民,李增慧,汪玉麟. 冀南邯-邢式铁矿成矿地质条件分析[J]. 地质学报, 1981, 55(2): 127-138.
SHEN Bao-feng, ZHAI An-min, LI Zeng-hui, WANG Yu-lin. The analysis of geological conditions for mineralization of the iron deposits of Han-Xing subtype in southern Hebei[J]. Acta Geological Sinica, 1981, 55(2): 127-138.
- [3] 郑建民. 冀南—邯邢地区矽卡岩铁矿成矿流体及成矿机制[D]. 北京:中国地质大学地球科学与资源学院, 2007: 77-82.
ZHENG Jian-min. The ore-forming fluid and mineralization of skarn Fe deposits in Handan—Xingtai area, south Hebei[D]. Beijing: School of Geosciences and Resources, China University of Geosciences, 2007: 77-82.
- [4] BOYNTON W V. Geochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies [C]// HENDERSON P. Rare Earth Element Geochemistry. Amsterdam: Elsevier, 1984: 63-114.
- [5] 徐九华,谢玉玲,刘建明,朱和平,贾长顺. 玲珑—焦家式金矿床流体包裹体的稀土和微量元素特征[J]. 岩石学报, 2005, 21(5): 1389-1394.
XU Jiu-hua, XIE Yu-ling, LIU Jian-ming, ZHU He-ping, JIA Chang-shun. Trace elements in fluid inclusions of Linglong—Jiaojia type gold deposit [J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 21(5): 1389-1394.
- [6] 李厚民,王登红,张长青,陈毓川,李立兴. 陕西几类重要铅锌矿床的矿物微量元素和稀土元素特征[J]. 矿床地质, 2009, 28(4): 434-448.
LI Hou-min, WANG Deng-hong, ZHANG Chang-qing, CHEN Yu-chuan, LI Li-xing. Characteristics of trace and rare earth elements in minerals from some typical lead-zinc deposits of Shanxi Province[J]. Mineral Deposits, 2009, 28(4): 434-448.
- [7] CARLOS A S, SONIA M B O, ALCIDES N S, FRANCISCO J R. Geochemistry and genesis of the banded iron formation of the Caue formation, Quadrilatero Ferrifero, Minas Gerais, Brazil[J]. Precambrian Research, 2007, 152(3/4): 170-206.
- [8] 李志红,朱祥坤,唐索寒. 鞍山—本溪地区条带状铁建造的铁同位素与稀土元素特征及其对成矿物质来源的指示[J]. 岩石矿物学杂志, 2008, 27(4): 285-290.
LI Zhi-hong, ZHU Xiang-kun, TANG Su-han. Characters of Fe isotopes and rare earth elements of banded iron formations from Anshan—Benxi area: Implications for Fe source[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2008, 27(4): 285-290.
- [9] 岳书仓,徐晓春. 火山—侵入杂岩带的成岩—成矿专属性[J]. 地学前缘, 1999, 6(2): 305-313.
YUE Shu-cang, XU Xiao-chun. The magmatic and

- minerogenetic specialization in volcanic intrusive complexes zone[J]. *Earth Science Frontiers*, 1999, 6(2): 305–313.
- [10] 徐晓春, 陆三明, 谢巧勤, 储国正, 熊亚平. 铜陵狮子山矿田岩浆岩及金矿床的稀土元素地球化学[J]. *中国稀土学报*, 2006, 24(5): 615–622.
- XU Xiao-chun, LU San-ming, XIE Qiao-qin, CHU Guo-zheng, XIONG Ya-ping. Rare earth element in magmatic rocks and gold deposits in Shizishan ore-field of Tongling, China[J]. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*, 2006, 24(5): 615–622.
- [11] FLYNN R T, BURNHAM C W. An experimental determination of rare earth partition coefficient between a chloride containing vapor phase and silicate melts[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1978, 42(6): 685–701.
- [12] 徐晓春, 赵丽丽, 谢巧勤, 褚平利, 房海波, 王文俊. 铜陵狮子山矿田金矿床和铜矿床矿石稀土元素地球化学[J]. *高校地质学报*, 2009, 15(1): 35–47.
- XU Xiao-chun, ZHAO Li-li, XIE Qiao-qin, CHU Ping-li, FANG Hai-bo, WANG Wen-jun. Rare earth elements of ores in gold deposits and copper deposits of Shizishan ore-field, Tongling Region, Anhui Province[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2009, 15(1): 35–47.
- [13] CONSTANTOPOULOS J. Fluid inclusions and rare earth element geochemistry of fluorite from south-central Idaho[J]. *Economic Geology*, 1988, 83(3): 626–636.
- [14] MÖLLER P, MOERTEANI G. On the geochemical fractionation of rare earth elements during the formation of Ca-minerals and its application to problems of the genesis of ore deposits [C]// AUGUSTITHIS S S. *The Significance of Trace Elements in Solving Petrogenic Problems and Controversies*. Athens: Theophrastus Publications, 1983: 747–791.
- [15] MEINERT L D. Skarns and skarn deposits[J]. *Geoscience Canada*, 1992, 19(4): 145–162.
- [16] 翟裕生, 石准立, 林新多, 熊鹏飞, 王定域, 姚书振, 金振民. 鄂东大冶式铁矿成因的若干问题[J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 1982, 18(3): 239–242.
- ZHAI Yu-sheng, SHI Zhun-li, LIN Xin-duo, XIONG Peng-fei, WANG Ding-yu, YAO Shu-zhen, JIN Zhen-min. Genesis of “Daye type” iron ore deposits in eastern Hubei, China[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 1982, 18(3): 239–242.
- [17] 赵斌, 赵劲松, 张重泽, 朱成明, 蔡恩照. 岩浆成因夕卡岩的实验证据[J]. *科学通报*, 1993, 38(21): 1986–1989.
- ZHAO Bin, ZHAO Jin-song, ZHANG Chong-ze, ZHU Chen-ming, CAI En-zhao. Experimental evidence of the magma-genetic skarn[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1993, 38(21): 1986–1989.
- [18] 吴言昌, 邵桂清, 吴炼. 岩浆砂卡岩及其矿床[J]. *安徽地质*, 1996, 6(2): 30–39.
- WU Yan-chang, SHAO Gui-qing, WU Lian. Magmatic skarn and its ore deposits[J]. *Geology of Anhui*, 1996, 6(2): 30–39.
- [19] 范良伍, 张乾, 温汉捷. 安庆铜铁矿床磁铁矿成矿机理探讨[J]. *矿物学报*, 2008, 28(4): 476–482.
- FAN Liang-wu, ZHANG Qian, WEN Han-jie. Discussion on the genesis of magnetite in the Anqing Cu-Fe ore deposit[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2008, 28(4): 476–482.
- [20] 郑永飞, 陈江峰. 稳定同位素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 10–57.
- ZHENG Yong-fei, CHEN Jiang-feng. *Stable isotope geochemistry* [M]. Beijing: Science Press, 2000: 10–57.

(编辑 陈卫萍)