

·专题研究·

# 山西五台山和冀东迁安地区条带状铁矿的岩石 化学特征及其地质意义

沈其韩<sup>1</sup>, 宋会侠<sup>1</sup>, 杨崇辉<sup>1</sup>, 万渝生<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 2. 北京离子探针中心, 北京 100037)

**摘要:**详细报道了五台山地区白峪里、柏枝岩和峨口(又名山羊坪铁矿)3个新太古代条带状铁矿床和冀东迁安地区条带状铁矿样品的岩石学和岩石化学特征,并与辽宁鞍山和山东韩旺以及国外同类矿床进行了对比。五台山地区和冀东迁安地区条带状铁矿的微量元素和稀土元素的含量和配分特征与国内外同类矿床十分一致;4个地区条带状铁矿样品均富集 Th、U、La、Ce、P、Sm 等元素,亏损 K、Nb、Sr、Hf、Er、Ti 等元素,稀土元素总量均较低,是太古宙海洋沉积特征之一,轻稀土元素轻微亏损,重稀土元素稍富集,具有明显的 Eu 的正异常,部分具有 Y 正异常。Y 的异常通常代表了海水的特征, Eu 的正异常指示了高温海底热液的特征,由此可判断铁硅质建造形成于热海水环境。五台山地区与条带状铁矿伴生的黄铁矿的  $\delta^{34}\text{S}$  值在零附近,表明其来源于地幔。由此可知所研究条带状铁矿床是慢源的火山喷发或火山喷气带来的硅铁质溶于海水后在特定条件下经化学沉积而成。

**关键词:**条带状铁矿, 岩石化学, 五台山, 迁安

中图分类号: P618.31; P595

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2011)02-0161-11

## Petrochemical characteristics and geological significations of banded iron formations in the Wutai Mountain of Shanxi and Qian'an of eastern Hebei

SHEN Qi-han<sup>1</sup>, SONG Hui-xia<sup>1</sup>, YANG Chong-hui<sup>1</sup> and WAN Yu-sheng<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

2. Beijing SHRIMP Center, Beijing 100037, China)

**Abstract:** Petrological and petrochemical characteristics of samples from four Neo-Archean banded iron ore deposits of Baiyuli, Baizhiyan and Ekou in Wutai Mountain area and Qian'an in eastern Hebei Province are reported in this paper. Some comparisons are also made with Anshan iron deposit in Liaoning, Hanwang iron deposit in Shandong and some other iron deposits of the same kind abroad. The authors have found that these iron deposits have highly consistent characteristics in the following four aspects: all of the samples are depleted in Th, U, La, Ce, P and Sm and enriched in K, Nb, Sr, Hf, Er and Ti; as one of the characteristics of Archean marine sediments, they all have very low REE content, with the average values of the iron deposits in the four areas being  $27.65 \times 10^{-6}$ ,  $14.56 \times 10^{-6}$ ,  $19.03 \times 10^{-6}$  and  $16.46 \times 10^{-6}$  respectively; all of the iron deposits in the four areas are depleted in light rare earth elements and enriched in heavy rare earth elements, with Pr/Yb ratios in the range of 0.81~1.84, 0.35~1.21, 0.76~1.33 and 0.95~1.92 respectively; they have obvious positive anomalies of Y and Eu, with ratios of  $\text{Eu}/\text{Eu}^*$  being 2.55~3.36, 2.07~2.25, 1.44~2.56 and 1.43~3.77 respectively, suggesting characteristics of sea water and high temperature seafloor hydrothermal solution.

收稿日期: 2010-02-22; 修订日期: 2010-05-27

基金项目: 中国地质调查局计划资助项目(1212010711815)

作者简介: 沈其韩(1922-), 男, 研究员, 中国科学院院士, 主要从事前寒武纪地质研究, E-mail: huixiasong@cags.ac.cn.

Therefore, the Fe-Si formations were probably formed in a hot sea water environment. In addition, as the values of  $\delta^{34}\text{S}$  of pyrite associated with BIF are close to zero, the authors hold that the sulfur might have come from the mantle. It is thus concluded that the studied BIF are chemical-sedimentary ore deposits formed in a high temperature sea water environment after the derivation of silicon and iron from mantle-derived volcanic eruption or exhalation.

**Key words:** banded iron formation; petrochemistry; Wutai Mountain; Qian'an

山西五台山和冀东迁安地区是我国太古宙条带状铁矿的重要成矿集中区,铁矿床分布广泛。对这两个地区条带状铁矿的研究已有不少文章和专著发表(孙大中等,1984;钱祥麟等,1985;李树勋等,1986;张贻侠等,1986;沈保丰等,1994;沈其韩,1998;骆辉等,2002),而内部的勘探报告更是数量众多。已有资料多着重于对铁矿床的地质特征及主量元素和矿床质量的研究。五台山地区铁矿床有少量微量元素和稀土元素数据,但缺少系统的研究。冀东地区铁矿床有较多的主量元素和少量的微量元素数据,而对稀土元素特征的研究尚属空白。五台山地区不同层位的铁矿床已分别遭受绿片岩相和角闪岩相变质,冀东迁安铁矿则普遍遭受麻粒岩相变质。不同的变质作用对条带状铁矿的稀土和微量元素有什么样的影响,同一地区不同层位铁建造中微量元素和稀土元素有何差别和共性?为解决上述问题,本文结合主量元素数据和微量元素对比值及已有 $\delta^{34}\text{S}$ 数据,对铁矿的铁质来源和沉积条件以及不同变质作用条件对微量元素的影响等做一些探讨。

## 1 条带状铁矿地质特征简介

### 1.1 五台山地区

本区主要出露有新太古代的五台群和古元古代的溥沱群,后者不整合于五台群之上。五台群自下而上分为石嘴亚群、台怀亚群和高凡亚群。在石嘴亚群和台怀亚群中均赋存有大、中、小型条带状铁矿,习惯上称为鞍山式铁矿,是我国条带状铁矿主要集中区之一。石嘴亚群中的下部条带状铁矿产于该亚群的金岗库组下部黑云变粒岩和角闪片岩中,夹有数层铁矿。原岩为具基性-中性火山凝灰质特征的火山沉积岩系,其上部为富铝岩段,主要由二云母片岩、白云母石英片岩和黑云变粒岩组成,其中富含蓝晶石、十字石和石榴子石,其原岩属粘土质沉积岩。矿床严格受地层和岩相控制。本层位代表性矿床为白峪里铁矿,矿区位于代县城南 15 km,矿层沿

北东方向延展,控矿构造为一倒转背斜,矿体呈层状产于次一级向斜中,全区由 7 个矿层组成,其中 1、3 和 6 层为主要含矿层,全区铁矿平均品位(全铁) 30%~32%,易选,矿床储量达大型。样品 BYL03、BYL04、BYL07、BYL10、BYL02-1、BYL02-3 均采自于该矿床地表。

石嘴亚群的另一含铁层位为文溪组顶部。该组主要分布于五台山东部,是一套角闪岩相变质的火山沉积岩,主要由斜长角闪岩、角闪片岩和黑云变粒岩等组成,代表性的铁矿床为峨口铁矿(又称为山羊坪铁矿),矿区位于山西代县东 25 km,构造特点是褶皱发育,对矿体的集中分散、分枝复合、尖减、重叠起着重要的控制作用。该铁矿床主要有 3 个含矿层,最上一层是矿山主要开采层,全长 2 000 m,最大厚度 230 m(叠加的厚度),平均 57.8 m。样品 EK01、EK03、W-EK-1、W23-45 来自于该层。下部两层有时因隔层尖灭而合并为一层,厚度较小,一般在 20 m 以内。铁矿石主要是原生磁铁矿,有 3 种矿石类型:石英磁铁矿型(氧化物相)、闪石-石英磁铁矿型和绿泥石磁铁矿型,后两种属硅酸盐相。该矿床属大型铁矿,全铁品位 27.55%,硫和磷的含量均较低。

五台群台怀亚群的含铁层位位于柏枝岩组的绿泥片岩中,分布于五台山的中西部,为一套绿片岩相变质的火山沉积建造,岩石主要包括绿泥片岩、钠长绿泥片岩、绿泥绢云斜长片岩夹绢云片岩,原岩为基性-中酸性火山岩(熔岩和凝灰岩),具有双峰式火山沉积岩的典型特征。代表性矿床为柏枝岩铁矿。矿区位于五台县城东北 45 km 处柏枝岩村北,矿体成群出露,共圈出矿体 25 个,大都呈似层状产出,其中 3 个矿体最大,储量占全矿区的 77.19%,矿石类型大部分属原生石英磁铁矿(氧化物相),其次为绿泥石磁铁矿型(硅酸盐相),矿石全铁平均品位 34.53%,硫和磷含量均低,属大型矿床。样品 BZY02-1、BZY02-2、BZY02-4 采自于柏枝岩矿床地表矿体。

从全区构造角度考虑,石嘴亚群顶部的文溪组

与台怀亚群的柏枝岩组可能属同一背斜的两翼,变质程度不同,柏枝岩组与文溪组为同时异相地层。由此,峨口铁矿和柏枝岩铁矿含矿层位可以对比。

## 1.2 冀东迁安地区

分布于冀东迁安一带的条带状铁矿赋存于中太古代迁西岩群三屯营岩组变质岩系中,原岩属泥砂质基性-中酸性火山岩-铁硅质建造,主要变质岩石组合为黑云(角闪)斜长片麻岩、二辉斜长麻粒岩、辉石斜长片麻岩、斜长辉石岩、石英磁铁贫矿(铁英岩)和浅粒岩等,变质相基本属麻粒岩相,少数退变为高角闪岩相,混合岩化作用普遍。迁安地区是冀东铁矿成矿集中区西部的重要组成部分,已发现和探明大、中、小型铁矿30余处。按所处的构造部位可将铁矿床分为西、东、南3个矿带。西矿带包括水厂、孟家沟、北屯、蔡园、蔡园西沟、王家湾等矿床;东矿带包括官店子、白马山、裴庄、裴村、柳河峪、羊崖山、大杨庄、二郎庙、马家山和衡山等矿床;南矿带有赤甲山-松木庄、大石河、耗子沟、松江、塔山、护国寺、杏山、脑峪门矿床及黄杨峪和白龙港等矿点。矿体一般呈层状、似层状及透镜状,少数呈扁豆状和串珠状,厚度不一,产出层位稳定,与围岩分界清楚,矿石品位一般30%左右,磁铁矿含量高,粒度粗,易于选矿。硫和磷含量低。样品J0007和J0010分别采自于东矿带的羊崖山铁矿和大杨庄铁矿,样品J0023、J0027和J0034分别采自于南矿带的黄白峪矿点、杏山铁矿和白龙峪矿点,西矿带未进行采样。

## 2 岩石学特征

### 2.1 白峪里铁矿

该矿床产出于石嘴亚群中,共采取该矿床矿石标本11块。矿石既有硅酸盐相也有氧化物相,呈条纹条带状或以条纹、条带之一为主,条纹一般宽0.5~2 mm,条带宽3~5 mm,部分条纹条带分界清楚,界线整齐。条纹条带由于受到褶皱而弯曲,部分石英条带被挤压成透镜状。条带组合有磁铁矿+阳起石(角闪石)、石英+阳起石、石英+阳起石+磁铁矿和阳起石+石英+微量微粒磁铁矿等4种,有时有石榴子石与阳起石伴生(BYL01、BYL03、BYL08)。阳起石和角闪石呈柱状,大体平行于条带方向。矿石已达角闪岩相变质。

### 2.2 柏枝岩铁矿

该矿床的富集层位相当于台怀亚群,共采取该

矿床矿石标本7块,含铁建造为氧化物相和硅酸盐相。手标本中条纹与条带相结合,有的条带由极细的条纹组成,少数条带已显褶皱(BZY02-1),部分条纹已显极微小的褶皱(BZY01-1、BZY02-2、BZY02-3)。矿石中除磁铁矿外,普遍存在阳起石,氧化物相则以石英+磁铁矿为主,个别标本中具有少量方解石,裂隙中部分磁铁矿已氧化为褐铁矿+赤铁矿(BZY01-1、BZY01-2、BZY02-2),有的磁铁矿经重结晶已连接在一起(BZY01-2),磁铁矿粒度一般为0.5~0.2 mm,个别可达5~6 mm,极细条纹中磁铁矿的粒度在0.01 mm以下。

### 2.3 峨口铁矿

该矿床产出于台怀亚群,共采取该矿床矿石标本7块,矿石均呈条带-条纹状,是由石英条带+阳起石或镁铁闪石条带+磁铁矿条带组成。在石英和磁铁矿条带中均伴有不等量的阳起石或镁铁闪石等硅酸盐矿物,部分标本中还见有粒状石榴子石(有的具较好的自形晶),其边缘已绿泥石化,有的石榴子石晶体中保留有由极细的磁铁矿微粒组成的平行条带,大体与晶体外由磁铁矿组成的条带平行,但粗细略有不同,说明石榴子石的形成晚于磁铁矿条带,而且形成时环境稳定,磁铁矿条带未受到干扰。个别薄片(EK-06)中见有一定含量的方解石,有的矿石条带主要由磁铁矿条带和镁铁闪石条带组成,后者最宽可达6 mm,其中含有少量细粒的磁铁矿。薄片多见微型褶皱,有的呈平卧褶皱,条带显示倾缩尖减,如褶皱背形呈尖形。有的只在一小层中显示小的波状褶曲,说明在沉积阶段也有发生。磁铁矿的粒度以细粒(W23-45)至中粒为主,有的磁铁矿经重结晶后已连接成片,分不出晶形(W-EK-1),且在石英颗粒中见许多尘状磁铁矿微粒。

### 2.4 冀东迁安地区铁矿

分别从大杨庄铁矿、羊崖山铁矿和杏山铁矿及黄柏峪和龙港矿点各采取了1个样品,矿石呈块状(J0007)至条纹条带状(J0034、J0023),有的已遭受褶皱而显揉皱,条带已被破坏只能隐约可见(J0027),条纹和条带由磁铁矿+紫苏辉石和/或次透辉石和石英+少量磁铁矿组成。磁铁矿条带中的磁铁矿经重结晶连接成片而呈不规则状。石英条带中的磁铁矿有的呈极小的四方晶形,有的呈不等粒状,紫苏辉石和次透辉石均比较新鲜呈不规则粒状和枝状。变质作用达麻粒岩相。

### 3 主量元素地球化学特征

前人(李树勋等,1986;沈保丰等,1994;骆辉等,2002)对五台地区条带状铁矿的主元素、微量元素和稀土元素均进行过部分分析。在此基础上,本文对本区两个含矿建造的3个矿区的铁矿床和冀东迁安地区不同变质程度的铁矿床的微量和稀土元素进行了较系统的研究,数据详见表1,并绘制了微量元素和稀土元素的配分图,以便比较其差异和探讨其地质含义。

#### 3.1 白峪里铁矿

白峪里铁矿中全铁( $\text{TFe}_2\text{O}_3$ )含量的变化范围为38.42%~57.99%,平均为49.99%。 $\text{SiO}_2$ 含量为39.01%~55.72%,平均为45.18%。 $\text{MnO}$ 含量变化范围为0.07%~0.22%。 $\text{MgO}$ 含量变化范围为1.06%~2.27%,平均值为1.74%。 $\text{CaO}$ 含量的变化范围为1.50%~3.59%,平均值为2.47%。 $\text{K}_2\text{O}$ 含量的变化范围为<0.01%~0.09%。 $\text{Na}_2\text{O}$ 含量变化范围为<0.01%~0.13%。 $\text{TiO}_2$ 的含量变化范围为<0.01%~0.04%。 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量变化范围为0.56%~1.42%,平均值为0.83%。 $\text{P}_2\text{O}_5$ 含量变化范围为0.13%~0.23%,平均值为0.16%。

#### 3.2 柏枝岩铁矿

柏枝岩铁矿中全铁( $\text{TFe}_2\text{O}_3$ )含量的变化范围为47.96%~61.55%,平均为52.89%。 $\text{SiO}_2$ 含量为35.14%~49.61%,平均为44.62%。 $\text{MnO}$ 含量变化范围为0.09%~0.12%。 $\text{MgO}$ 含量变化范围为1.02%~1.58%,平均值为1.23%。 $\text{CaO}$ 含量的变化范围为0.22%~1.78%,平均值为0.88%。 $\text{K}_2\text{O}$ 含量的变化范围为<0.01%~0.06%。 $\text{Na}_2\text{O}$ 含量变化范围为0.01%~0.27%,平均值为0.13%。 $\text{TiO}_2$ 的含量变化范围为<0.01%~0.02%。 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量变化范围为0.45%~0.92%,平均值为0.70%。 $\text{P}_2\text{O}_5$ 含量变化范围为0.14%~0.20%,平均值为0.17%。

#### 3.3 峨口铁矿

峨口铁矿中全铁( $\text{TFe}_2\text{O}_3$ )含量的变化范围为50.49%~60.46%,平均为55.73%。 $\text{SiO}_2$ 含量为36.46%~44.48%,平均为41.08%。 $\text{MnO}$ 含量变化范围为0.07%~0.15%。 $\text{MgO}$ 含量变化范围为0.63%~2.68%,平均值为1.41%。 $\text{CaO}$ 含量的变化范围为1.22%~1.89%,平均值为1.61%。 $\text{K}_2\text{O}$

含量的变化范围为<0.01%~0.04%。 $\text{Na}_2\text{O}$ 含量变化范围为0.02%~0.14%,平均值为0.09%。 $\text{TiO}_2$ 的含量变化范围为<0.01%~0.05%。 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量变化范围为0.14%~1.37%,平均值为0.71%。 $\text{P}_2\text{O}_5$ 含量变化范围为0.11%~0.16%,平均值为0.14%。

#### 3.4 冀东迁安铁矿

迁安铁矿中全铁( $\text{TFe}_2\text{O}_3$ )含量的变化范围为41.93%~58.23%,平均为52.39%。 $\text{SiO}_2$ 含量为39.35%~55.84%,平均为46.21%。 $\text{MnO}$ 含量变化范围为0.06%~0.15%。 $\text{MgO}$ 含量变化范围为1.44%~2.36%,平均值为1.89%。 $\text{CaO}$ 含量的变化范围为0.84%~1.83%,平均值为1.45%。 $\text{K}_2\text{O}$ 含量的变化范围为<0.01%~0.04%。 $\text{Na}_2\text{O}$ 含量变化范围为0.02%~0.05%,平均值为0.04%。 $\text{TiO}_2$ 的含量变化范围为<0.01%~0.04%。 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量变化范围为0.08%~0.70%,平均值为0.28%。 $\text{P}_2\text{O}_5$ 含量变化范围为0.03%~0.09%,平均值为0.06%。

可以看出,这4个铁矿中全铁( $\text{TFe}_2\text{O}_3$ )含量相差不大,平均全铁含量最高的峨口铁矿为55.73%,含量最低的白峪里铁矿为49.99%。

## 4 微量和稀土元素特征

18个条带状铁矿全岩样品的稀土和微量元素分析结果见表1。表中La的异常用 $\text{La}/\text{La}^* = \text{La}_{\text{PAAS}} / (3 \text{Pr}_{\text{PAAS}} - 2 \text{Nd}_{\text{PAAS}})$ 来计算,Ce的异常用 $\text{Ce}/\text{Ce}^* = \text{Ce}_{\text{PAAS}} / (2 \text{Pr}_{\text{PAAS}} - \text{Nd}_{\text{PAAS}})$ 来计算,Y的异常用 $\text{Y}/\text{Y}^* = 2 \text{Y}_{\text{PAAS}} / (\text{Dy}_{\text{PAAS}} + \text{Ho}_{\text{PAAS}})$ 来计算(Robert *et al.*, 2004)。对微量元素含量用原始地幔数据进行标准化,对稀土元素含量用PAAS(post Archean Australian shale)(McLennan, 1989)进行标准化。

#### 4.1 白峪里铁矿

白峪里铁矿的微量和稀土元素含量见表1,其经原始地幔标准化后的微量元素配分曲线图见图1a。从表2和图1a中可以明显看出样品具有Th、U、La、Ce、P、Sm正异常,K、Nb、Sr、Hf、Zr、Ti呈负异常,Ti、Co、Ni、Mn、Ba等元素的含量都较低。白峪里铁矿的稀土元素含量范围为 $11.55 \times 10^{-6} \sim 43.51 \times 10^{-6}$ ,平均为 $27.65 \times 10^{-6}$ ,高于山东韩旺和鞍山弓长岭地区铁矿的稀土元素含量。白峪里条带状铁矿

表 1 条带状铁矿主量(  $w_B/\%$  ) 微量和稀土元素含量(  $w_B/10^{-6}$  )Table 1 Main elements(  $w_B/\%$  ), trace elements and rare earth elements(  $w_B/10^{-6}$  ) content of studied BIF

样品号	白峪里铁矿							柏枝岩铁矿			
	BYL03	BYL04	BYL07	BYL10	BYL02-1	BYL02-3	平均	BZY02-1	BZY02-2	BZY02-4	平均
SiO <sub>2</sub>	43.03	37.18	55.72	44.41	39.01	51.73	45.18	49.61	35.14	49.12	44.62
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.42	0.56	0.59	0.85	0.67	0.88	0.83	0.92	0.45	0.73	0.70
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24.37	34.66	18.69	34.59	30.69	24.98	28.00	28.23	41.27	32.57	34.02
FeO	22.58	20.64	17.76	16.78	23.90	17.08	19.79	17.76	18.25	14.94	16.98
T(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	49.46	57.59	38.42	53.23	57.25	43.96	49.99	47.96	61.55	49.17	52.89
CaO	3.09	2.79	3.59	1.50	1.78	2.09	2.47	0.22	1.78	0.64	0.88
MgO	2.13	1.34	1.73	1.06	2.27	1.88	1.74	1.58	1.10	1.02	1.23
K <sub>2</sub> O	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.09	0.02	0.06	0.01	0.01	0.03
Na <sub>2</sub> O	0.07	0.01	0.02	0.01	0.01	0.13	0.04	0.12	0.01	0.27	0.13
TiO <sub>2</sub>	0.04	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02
MnO	0.22	0.10	0.12	0.07	0.11	0.07	0.12	0.12	0.09	0.10	0.10
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.16	0.13	0.13	0.18	0.13	0.23	0.16	0.16	0.20	0.14	0.17
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	0.64	0.56	0.12	0.38	0.18	0.34	0.37	0.32	0.50	0.34	0.39
CO <sub>2</sub>	2.02	2.07	0.88	0.44	1.05	1.05	1.25	0.58	0.88	0.53	0.66
LOI	0.17	0.13	0.01	0.01	0.01	0.01	0.06	0.01	0.01	0.01	0.01
Cr	8.57	38.2	6.71	20.5	10.1	7.32	15.23	6.32	6.37	5.07	5.92
Ni	6.13	16.4	3.19	10.8	4.80	3.75	7.51	5.11	4.76	3.87	4.58
Co	2.57	1.81	1.63	2.19	0.98	0.89	1.68	2.25	1.28	1.58	1.70
Sc	1.33	0.14	0.31	1.13	0.34	0.83	0.68	0.49	0.04	0.39	0.31
Ba	7.23	3.65	4.82	4.04	1.79	6.74	4.71	69.1	12.6	42.1	41.27
Sr	25.2	32.9	50.1	21.4	33.6	27.7	31.82	6.07	16.4	10.6	11.02
Rb	1.91	1.12	0.94	1.28	0.37	6.13	1.96	4.06	0.73	2.04	2.28
Zr	11.8	1.98	2.62	7.80	2.91	5.35	5.41	4.70	1.03	3.89	3.21
Hf	0.31	0.05	0.05	0.16	0.07	0.12	0.13	0.12	0.05	0.10	0.09
Ta	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Ge	7.96	5.68	3.69	4.46	6.72	5.84	5.73	4.24	5.91	4.41	4.85
Ga	2.34	1.74	1.69	2.36	2.02	1.49	1.94	2.22	1.38	1.64	1.75
Cu	27.9	14.5	4.46	10.2	5.43	6.03	11.42	9.91	27.0	6.30	14.40
Zn	25.2	27.3	15.8	16.1	21.8	10.8	19.50	14.1	10.8	13.3	12.73
Pb	1.43	1.71	1.44	1.20	1.71	2.94	1.74	1.61	1.81	1.25	1.56
U	0.14	0.05	0.05	0.07	0.05	0.05	0.07	0.05	0.05	0.06	0.05
Th	0.48	0.10	0.12	0.29	0.07	0.28	0.22	0.12	0.05	0.10	0.09
Nb	0.52	0.32	0.46	0.44	0.35	0.58	0.45	0.16	0.13	0.15	0.15
La	3.90	1.38	3.90	4.79	2.02	5.19	3.53	2.56	0.35	1.55	1.49
Ce	7.65	2.76	8.60	11.1	3.83	12.3	7.71	4.77	0.86	3.05	2.89
Pr	0.82	0.33	0.97	1.27	0.43	1.41	0.87	0.52	0.13	0.32	0.32
Nd	3.36	1.33	3.89	5.21	1.92	5.71	3.57	2.35	0.81	1.42	1.53
Sm	0.65	0.31	0.89	1.12	0.45	1.30	0.79	0.56	0.31	0.41	0.43
Eu	0.39	0.23	0.48	0.79	0.37	0.98	0.54	0.29	0.24	0.20	0.24
Gd	0.65	0.39	0.88	1.09	0.66	1.43	0.85	0.71	0.66	0.49	0.62
Tb	0.12	0.06	0.16	0.18	0.10	0.24	0.14	0.11	0.10	0.08	0.10
Dy	0.74	0.36	1.08	1.04	0.62	1.53	0.90	0.71	0.71	0.48	0.63
Ho	0.18	0.09	0.26	0.23	0.15	0.34	0.21	0.15	0.16	0.12	0.14
Er	0.53	0.25	0.90	0.68	0.44	1.03	0.64	0.46	0.43	0.36	0.42
Tm	0.09	0.05	0.14	0.10	0.07	0.16	0.10	0.08	0.06	0.05	0.06
Yb	0.59	0.32	0.94	0.69	0.53	1.12	0.70	0.43	0.37	0.33	0.38
Lu	0.10	0.05	0.17	0.11	0.07	0.17	0.11	0.07	0.05	0.05	0.06
Y	6.72	3.64	8.88	7.24	4.88	10.6	6.99	5.59	5.69	4.47	5.25
ΣREE	26.49	11.55	32.14	35.64	16.54	43.51	27.65	19.36	10.93	13.38	14.56
Sr/Ba	3.49	9.01	10.39	5.30	18.77	4.11	6.75	0.09	1.30	0.25	0.27
Sr/Rb	13.19	29.38	53.30	16.72	90.81	4.52	16.25	1.50	22.47	5.20	4.84

续表 1-1

continued Table 1-1

样品号	白峪里铁矿							柏枝岩铁矿			
	BYL03	BYL04	BYL07	BYL10	BYL02-1	BYL02-3	平均	BZY02-1	BZY02-2	BZY02-4	平均
Ti/V	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ni/Co	2.39	9.06	1.96	4.93	4.90	4.21	4.48	2.27	3.72	2.45	2.69
Cr/Ni	1.40	2.33	2.10	1.90	2.10	1.95	2.03	1.24	1.34	1.31	1.29
Ga/Ge	0.29	0.31	0.46	0.53	0.30	0.26	0.34	0.52	0.23	0.37	0.36
Nb/Ta	10.40	6.40	9.20	8.80	7.00	11.60	8.90	3.20	2.60	3.00	2.93
Cr/Zn	0.34	1.40	0.42	1.27	0.46	0.68	0.78	0.45	0.59	0.38	0.46
Co/Zn	0.10	0.07	0.10	0.14	0.04	0.08	0.09	0.16	0.12	0.12	0.13
Ni/Zn	0.24	0.60	0.20	0.67	0.22	0.35	0.38	0.36	0.44	0.29	0.36
Zr/Hf	38.06	39.60	52.40	48.75	41.57	44.58	42.71	39.17	20.60	38.90	35.63
Th/U	3.43	2.00	2.40	4.14	1.40	5.60	3.27	2.40	1.00	1.67	1.69
LREE/HREE	1.73	1.22	1.40	2.14	1.20	1.62	1.60	1.33	0.33	1.08	0.90
La/Yb	6.61	4.31	4.15	6.94	3.81	4.63	5.05	5.95	0.95	4.70	3.95
Sm/Nd	0.19	0.23	0.23	0.21	0.23	0.23	0.22	0.24	0.38	0.29	0.28
Eu/Sm	0.60	0.74	0.54	0.71	0.82	0.75	0.69	0.52	0.77	0.49	0.57
Y/Ho	37.33	40.44	34.15	31.48	32.53	31.18	33.57	37.27	35.56	37.25	36.63
Pr/Yb	1.39	1.03	1.03	1.84	0.81	1.26	1.25	1.21	0.35	0.97	0.86
Pr/Pr*	0.95	1.01	0.99	0.98	0.93	0.99	0.98	0.91	0.85	0.90	0.90
Y/Y*	1.47	1.61	1.33	1.18	1.27	1.17	1.29	1.37	1.35	1.48	1.39
Ce/Ce*	1.11	0.98	1.03	1.04	1.18	1.02	1.05	1.24	1.95	1.25	1.29
La/La*	1.27	1.07	1.02	1.01	1.61	0.96	1.08	1.76	-2.53	1.63	1.97
Eu/Eu*	2.81	3.05	2.55	3.36	3.08	3.35	3.09	2.12	2.25	2.07	2.15
峨口铁矿							冀东迁安				
样品号	EK01	EK03	W-EK-1	W23-45	平均	J0007	J0010	J0023	J0027	J0034	平均
SiO <sub>2</sub>	41.57	44.48	41.80	36.46	41.08	50.51	41.24	44.10	39.35	55.84	46.21
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.87	1.37	0.14	0.47	0.71	0.70	0.24	0.22	0.08	0.15	0.28
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	29.86	21.65	40.46	43.10	33.77	—	—	—	—	—	—
FeO	22.26	25.96	15.21	15.62	19.76	—	—	—	—	—	—
T(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	54.59	50.49	57.36	60.46	55.73	47.68	58.15	55.98	58.23	41.93	52.39
CaO	1.66	1.66	1.22	1.89	1.61	1.83	1.51	0.84	1.61	1.43	1.45
MgO	1.54	2.68	0.63	0.80	1.41	1.87	1.44	1.89	2.36	1.86	1.89
K <sub>2</sub> O	0.01	0.01	0.01	0.04	0.02	0.03	0.04	0.02	0.01	0.04	0.03
Na <sub>2</sub> O	0.14	0.13	0.02	0.08	0.09	0.05	0.05	0.04	0.02	0.04	0.04
TiO <sub>2</sub>	0.02	0.05	0.01	0.04	0.03	0.04	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02
MnO	0.14	0.15	0.07	0.09	0.11	0.08	0.09	0.06	0.15	0.07	0.09
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.15	0.14	0.11	0.16	0.14	0.09	0.04	0.03	0.06	0.08	0.06
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	0.54	0.42	0.25	0.12	0.33	—	—	—	—	—	0.00
CO <sub>2</sub>	0.79	0.96	0.99	2.07	1.20	—	—	—	—	—	0.00
LOI	0.01	0.01	0.01	0.75	0.20	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Cr	5.50	10.5	16.5	11.6	11.03	4.04	14.75	3.15	3.27	17.45	8.53
Ni	3.59	6.55	5.18	5.57	5.22	3.48	9.34	2.71	3.76	9.29	5.72
Co	2.02	7.97	2.47	12.9	6.34	1.39	1.08	0.68	0.71	1.46	1.06
Sc	0.33	1.31	0.42	1.06	0.78	0.94	0.81	0.65	0.77	0.84	0.80
Ba	14.6	14.0	3.32	6.09	9.50	13.23	22.18	9.36	4.18	13.01	12.39
Sr	16.7	52.0	3.75	14.1	21.64	12.74	21.82	4.65	15.49	5.73	12.09
Rb	0.85	2.96	0.26	1.12	1.30	2.30	1.43	1.29	0.39	0.49	1.18
Zr	5.76	12.8	0.93	4.60	6.02	7.04	3.83	3.39	2.08	2.81	3.83

续表 1-2  
continued Table 1-2

样品号	峨口铁矿					冀东迁安					
	EK01	EK03	W-EK-1	W23-45	平均	J000-7	J0010	J0023	J0027	J0034	平均
Hf	0.18	0.33	0.05	0.14	0.18	0.16	0.09	0.09	0.05	0.05	0.09
Ta	0.06	0.06	0.05	0.05	0.06	0.09	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06
Ge	5.25	5.99	5.22	2.23	4.67	6.65	4.70	4.10	3.67	8.08	5.44
Ga	1.70	5.43	—	—	3.57	4.54	1.06	0.97	1.00	1.80	1.87
Cu	18.6	30.8	—	—	24.70	11.62	10.42	9.37	17.12	10.33	11.77
Zn	43.3	56.5	—	—	49.90	15.45	8.76	6.91	4.69	33.21	13.80
Pb	2.22	2.36	—	—	2.29	1.44	1.43	1.74	3.41	1.64	1.93
U	0.11	0.16	0.07	0.09	0.11	0.15	0.11	0.16	0.13	0.20	0.15
Th	0.49	0.62	0.08	0.14	0.33	0.37	0.22	0.23	0.14	0.21	0.23
Nb	0.42	0.38	0.09	0.28	0.29	1.22	0.27	0.27	0.13	0.37	0.45
La	2.67	3.45	0.58	2.62	2.33	7.58	2.17	1.15	1.78	1.95	2.93
Ce	5.13	7.83	1.25	5.40	4.90	11.35	3.31	2.04	2.56	2.67	4.39
Pr	0.57	0.85	0.13	0.62	0.54	1.37	0.35	0.22	0.29	0.32	0.51
Nd	2.31	3.64	0.67	2.71	2.33	4.85	1.34	0.81	1.07	1.34	1.88
Sm	0.46	0.86	0.20	0.63	0.54	0.76	0.23	0.15	0.21	0.28	0.33
Eu	0.29	0.29	0.11	0.30	0.25	0.25	0.12	0.07	0.13	0.28	0.17
Gd	0.59	1.01	0.44	0.76	0.70	0.86	0.35	0.25	0.32	0.42	0.44
Tb	0.10	0.17	0.07	0.13	0.12	0.12	0.05	0.05	0.05	0.06	0.07
Dy	0.76	1.08	0.45	0.87	0.79	0.89	0.37	0.24	0.33	0.39	0.45
Ho	0.17	0.22	0.09	0.19	0.17	0.22	0.09	0.07	0.10	0.09	0.12
Er	0.55	0.66	0.23	0.57	0.50	0.73	0.31	0.23	0.29	0.30	0.37
Tm	0.09	0.10	0.05	0.08	0.08	0.11	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06
Yb	0.55	0.64	0.17	0.55	0.48	0.72	0.28	0.23	0.30	0.27	0.36
Lu	0.08	0.09	0.05	0.07	0.07	0.12	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06
Y	6.50	6.72	2.40	5.28	5.23	7.64	3.63	2.99	3.86	3.54	4.33
ΣREE	20.82	27.61	6.89	20.78	19.03	37.57	12.72	8.61	11.38	12.01	16.46
Sr/Ba	1.14	3.71	1.13	2.32	2.28	0.96	0.98	0.50	3.71	0.44	0.98
Sr/Rb	19.65	17.57	14.42	12.59	16.68	5.53	15.27	3.60	39.92	11.67	10.24
Ti/V	—	—	—	—	—	54.90	23.63	34.95	30.28	18.73	34.01
Ni/Co	1.78	0.82	2.10	0.43	0.82	2.51	8.63	4.00	5.32	6.35	5.37
Cr/Ni	1.53	1.60	3.19	2.08	2.11	1.16	1.58	1.16	0.87	1.88	1.49
Ga/Ge	0.32	0.91	0.00	0.00	0.76	0.68	0.23	0.24	0.27	0.22	0.34
Nb/Ta	7.00	6.33	1.80	5.60	5.32	13.15	5.38	5.46	2.62	7.40	7.73
Cr/Zn	0.13	0.19	—	—	0.22	0.26	1.68	0.46	0.70	0.53	0.62
Co/Zn	0.05	0.14	—	—	0.13	0.09	0.12	0.10	0.15	0.04	0.08
Ni/Zn	0.08	0.11	—	—	0.10	0.22	1.06	0.39	0.80	0.28	0.41
Zr/Hf	32.00	38.79	18.60	32.86	34.41	44.85	40.72	38.06	40.69	56.20	43.40
Th/U	4.45	3.88	1.14	1.56	3.09	2.52	1.96	1.44	1.12	1.04	1.56
LREE/HREE	1.22	1.58	0.74	1.44	1.34	2.29	1.45	1.07	1.13	1.32	1.63
La/Yb	4.85	5.39	3.41	4.76	4.88	10.60	7.84	5.04	5.91	7.15	8.15
Sm/Nd	0.20	0.24	0.30	0.23	0.23	0.16	0.17	0.19	0.19	0.21	0.17
Eu/Sm	0.63	0.34	0.55	0.48	0.46	0.33	0.54	0.46	0.64	1.01	0.53
Y/Ho	38.24	30.55	26.67	27.79	31.19	34.13	39.05	45.26	39.39	37.61	37.67
Pr/Yb	1.04	1.33	0.76	1.13	1.14	1.92	1.27	0.97	0.95	1.18	1.42
La/La*	1.22	1.22	3.27	1.35	1.31	1.10	1.42	1.09	1.33	1.67	1.22
Ce/Ce*	1.06	1.16	1.62	1.12	1.14	0.85	1.04	0.97	0.95	1.00	0.92
Y/Y*	1.44	1.10	0.95	1.04	1.15	1.36	1.55	1.86	1.68	1.47	1.52
Pr/Pr*	0.97	0.94	0.83	0.95	0.94	1.09	0.98	1.01	1.03	1.00	1.05
Eu/Eu*	2.56	1.44	1.56	2.01	1.86	1.43	1.95	1.60	2.32	3.77	2.08

由国家地质实验测试中心用等离子光谱(X-serise)测定；—为未检出。

样品经 PAAS 标准化后呈现非常一致的稀土元素配分曲线,其特征是轻稀土元素相对亏损,重稀土相对富集,Pr/Yb=0.81~1.84,无明显 Ce 异常,Ce/Ce\*

=0.98~1.18,具强烈的 Eu 正异常,Eu/Eu\* = 2.55~3.36,显示较弱的 Y 的正异常,Y/Y\* = 1.17~1.61,Y/Ho 比值的 变化 范围 为 31.18~40.44。Eu/

$Sm$  为 0.54~0.82, 高于年轻的铁建造, 与世界上其他地区太古宙铁建造稀土元素分布特征相吻合。

#### 4.2 柏枝岩铁矿

柏枝岩铁矿经标准化后的微量和稀土元素配分曲线见图 2。从表 1 和图 2a 中可以明显看出样品不同于白峪里铁矿, 具有 Ba、La、Ce、P、Sm 正异常, K、Nb、Sr、Hf、Zr、Ti 呈负异常。柏枝岩铁矿的稀土元素总量很低, 为  $10.93 \times 10^{-6} \sim 19.36 \times 10^{-6}$ , 平均为  $14.56 \times 10^{-6}$ 。柏枝岩条带状铁矿样品经 PAAS 标准化后呈现轻稀土元素相对亏损, 重稀土相对富集,  $Pr/Yb=0.35 \sim 1.21$ ; 无明显 Ce 异常,  $Ce/Ce^* = 1.24 \sim 1.95$ ; 具 Eu 正异常,  $Eu/Eu^* = 2.07 \sim 2.25$ ; 显示较弱的 Y 的正异常,  $Y/Y^* = 1.35 \sim 1.48$ ,  $Y/Ho$  比值的范围为 35.56~37.27。Eu/Sm 变化范围为 0.49~0.77。

#### 4.3 峨口铁矿

峨口铁矿经标准化后的微量和稀土元素配分曲线见图 3。微量元素配分曲线图中显示样品具有 Th、U、La、Ce、P、Sm 正异常, K、Nb、Sr、Hf、Zr、Ti 呈负异常。峨口铁矿的稀土元素含量范围为  $6.89 \times 10^{-6} \sim 27.61 \times 10^{-6}$ , 平均为  $19.03 \times 10^{-6}$ , 高于山东韩旺和鞍山弓长岭地区的条带状铁矿的稀土含量。除样品 W-EK-1 稀土元素总量含量较低外, 其余条带状铁矿样品经 PAAS 标准化后呈现非常一致的配分模式, 即具轻稀土元素相对亏损, 重稀土相对富集,  $Pr/Yb = 0.76 \sim 1.33$ ; 无 Ce 异常,  $Ce/Ce^* = 1.06 \sim 1.62$ ; 具较强的 Eu 正异常,  $Eu/Eu^* = 1.44 \sim 2.56$ , 部分样品具有较弱的 Y 的正异常,  $Y/Y^* = 0.95 \sim 1.44$ ,  $Y/Ho$  比值的范围为 26.67~38.24。Eu/Sm 为 0.34~0.63。

#### 4.4 冀东迁安铁矿

迁安铁矿经标准化后的微量和稀土元素配分曲线见图 4。微量元素配分曲线图中显示样品具有 U、La、Ce、P、Sm 正异常, K、Nb、Sr、Hf、Zr、Ti 呈负异常。迁安铁矿的稀土元素总量为  $8.61 \times 10^{-6} \sim 37.57 \times 10^{-6}$ , 平均为  $16.46 \times 10^{-6}$ 。样品经 PAAS 标准化后的稀土元素配分曲线同样具有轻稀土元素相对亏损、重稀土元素相对富集的特征,  $Pr/Yb = 0.95 \sim 1.92$ ; 无明显 Ce 异常,  $Ce/Ce^* = 0.85 \sim 1.04$ ; 具强烈的 Eu 正异常,  $Eu/Eu^* = 1.43 \sim 3.77$ ; 显示较强的 Y 的正异常,  $Y/Y^* = 1.36 \sim 1.86$ ,  $Y/Ho$  比值的范围为 34.13~45.26。Eu/Sm 为 0.33~1.01。

## 5 讨论

条带状铁矿中主要的化学成分  $SiO_2$  和  $TFe_2O_3$  的含量对判断铁矿的沉积作用类型有一定的指示意义。白峪里铁矿、柏枝岩铁矿、峨口铁矿和冀东铁矿  $SiO_2$  和  $TFe_2O_3$  之和分别为 92.49%~97.64%、96.69%~98.29%、94.97%~99.16% 和 97.58%~100.08%, 其他组分的含量较低, 这一特征与山东韩旺(沈其韩等, 2009) 和鞍山地区条带状铁矿相同(李志红等, 2008), 指示了它们均为由极少碎屑物加入的化学沉积产物, 极低的 Zr 和  $TiO_2$  含量(0.02%~0.03%) 和相对高的  $Al_2O_3$  含量(大部分在 0.28%~0.83% 之间, 个别样品含量大于 1%), 因此具有较高的  $Al_2O_3/TiO_2$  比值, 说明在沉积岩中仅有极少粘土物质或陆源碎屑物混入, 表明它们是化学 Fe-Si 沉积岩。部分薄片观察到石英颗粒中存在尘状磁铁矿

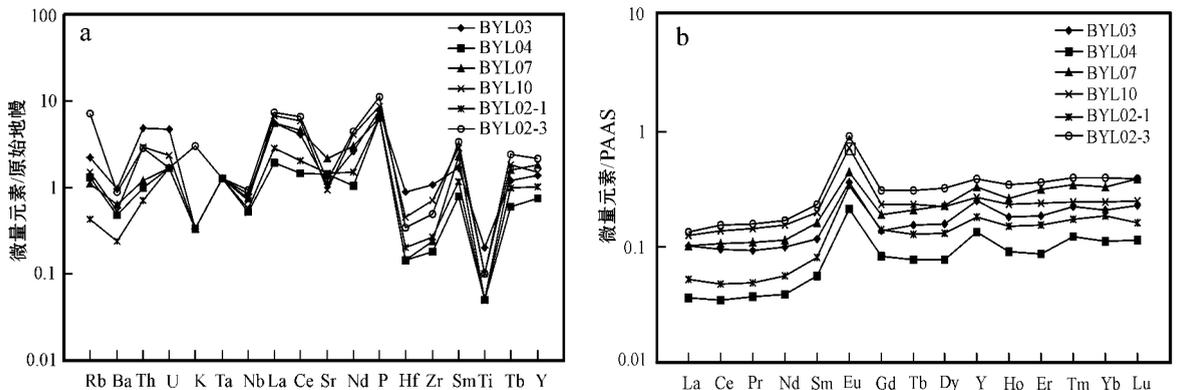


图 1 白峪里铁矿微量元素配分曲线(a)和稀土元素配分曲线(b)

Fig. 1 Trace elements patterns (a) and rare earth elements patterns (b) of the Baiyuli iron deposit

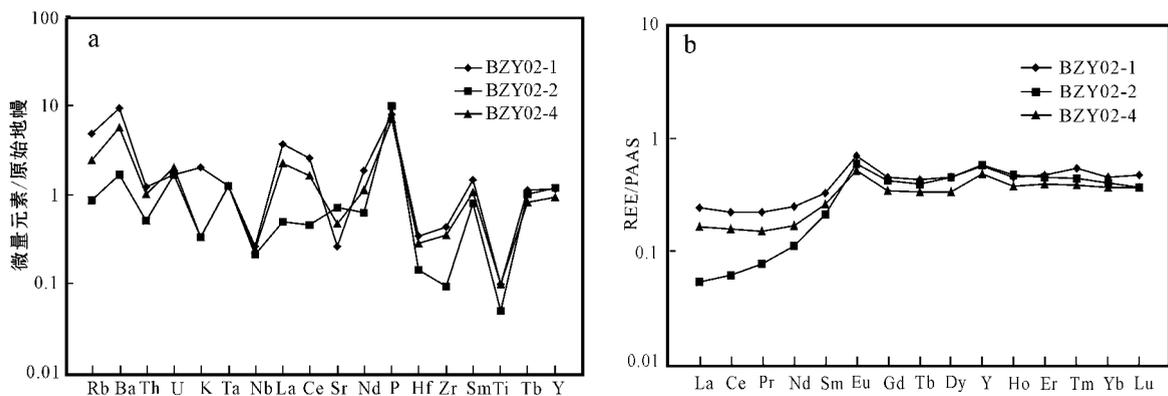


图 2 柏枝岩铁矿微量元素配分曲线 (a) 和稀土元素配分曲线 (b)

Fig. 2 Trace elements patterns (a) and REE patterns (b) of Baizhiyan iron deposit

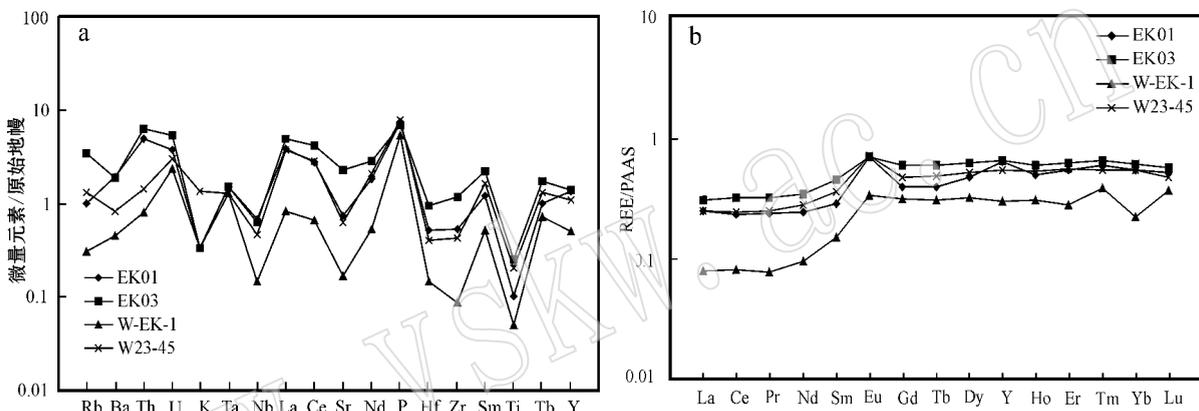


图 3 峨口铁矿微量元素配分曲线 (a) 和稀土元素配分曲线 (b)

Fig. 3 Trace elements patterns (a) and REE patterns (b) of Ekou iron deposit

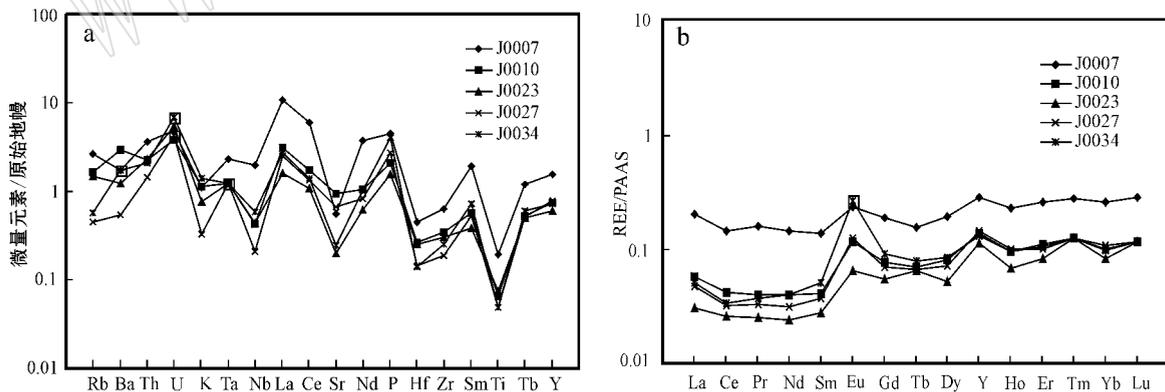


图 4 冀东迁安铁矿微量元素配分曲线 (a) 和稀土元素配分曲线 (b)

Fig. 4 Trace elements patterns (a) and REE patterns (b) of Qian'an iron deposit

颗粒,也是化学沉积的特征。值得注意的是白峪里铁矿的  $\text{SiO}_2$  和  $\text{TFe}_2\text{O}_3$  之和较低,而其  $\text{CaO}$  和  $\text{CO}_2$  的含量显著高于其他几个铁矿,这与该矿床中存在少量碳酸盐相铁矿有关。

一般认为沉积变质铁矿的  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  比值应小于 10,火山沉积变质铁矿的  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  应大于 10

(尽管这一表述可能是相对于碎屑沉积岩而言的,而 BIF 是化学沉积岩。如何判断化学沉积岩的物质来源问题,是个值得探索的问题,但可作为一种简要的参考)。白峪里铁矿、柏枝岩铁矿、峨口铁矿和冀东铁矿的  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  的比值分别为 30.3~94.4、53.9~78.1、32.5~298.6 和 72.4~491.9 均大于 10,这

些铁矿均赋存于火山沉积岩系中,结合其他参数还是判断它们属于火山沉积变质铁矿。

条带状铁矿的 Sr/Ba 比值可以反映沉积物源的信息,一般认为火山岩和海相沉积物的 Sr/Ba 比值大于 1,陆源沉积岩的 Sr/Ba 值小于 1。白峪里铁矿和峨口铁矿的 Sr/Ba 值分别为 3.49~18.77 和 1.13~3.71,均大于 1,具有火山岩和海相沉积物的特征;柏枝岩铁矿和冀东铁矿的 Sr/Ba 比值分别为 0.09~1.30 和 0.44~3.71,该数据不具有明显的源区指示意义。Ti/V 比值常用来区分成矿物质来源和条带状铁矿的成因类型,ПЛАКСЕНКО 等认为(转引自李树勋等,1986)在铁质页岩中,Ti、V 含量的平均比值变化于 10.9~1.33 之间,在火山建造中则为 13~85。笔者仅取得了冀东铁矿的 Ti、V 数据,其比值为 18.73~54.90,代表了其为火山沉积建造。前人资料表明整个五台山含铁建造的 Ti/V 平均值为 18.98(李树勋等,1986),其源岩应为火山沉积建造。

火山沉积铁矿中 Cr、Ni、Co 的含量一般高于陆源碎屑,而其 Ni/Co 比值一般低于陆源沉积铁矿。白峪里铁矿、柏枝岩铁矿、峨口铁矿和冀东铁矿的 Cr、Ni、Co 含量均为  $n \times 10^{-6}$ ,低于陆源沉积岩约 1 个数量级。白峪里铁矿、柏枝岩铁矿和冀东铁矿的 Ni/Co 比值相近,分别为 1.96~9.06、2.27~3.72 和 2.51~8.63,平均值分别为 4.48、2.69 和 5.37,峨口铁矿的 Ni/Co 比值显著低于该值,为 0.43~2.10,平均为 0.82,与火山沉积铁矿微量元素特征相似,反映其海洋化学沉积的特征。

在微量元素配分图解上 4 个地区的条带状铁矿样品均显示富集 Th、U、La、Ce、P、Sm 等元素,亏损 K、Nb、Sr、Hf、Zr、Ti 等元素,稍有不同的是柏枝岩铁矿显示为 Ba 的正异常和 Th 的负异常。所研究的条带状铁矿稀土元素总量均较低,是太古宙海洋沉积的特征之一。配分图上显示为中、重稀土元素稍微富集的左倾曲线,无明显 Ce 异常,白峪里铁矿、柏枝岩铁矿、峨口铁矿和冀东铁矿的 Ce/Ce\* 分别为 0.98~1.18、1.24~1.95、1.06~1.62 和 0.85~1.04,具强烈的 Eu 正异常 4 个铁矿床的 Eu/Eu\* 分别是 2.55~3.36、2.07~2.25、1.44~2.56 和 1.43~3.77;Y 显示较明显的正异常,Y/Y\* 分别为 1.17~1.61、1.35~1.48、0.95~1.44 和 1.36~1.86,Y/Ho 比值的范围分别为 31.15~40.44、35.56~37.27、26.67~38.24 和 34.13~45.26,与韩旺地区和鞍山弓长岭铁矿的数据基本一致(翟明国等,1989;李志红等,2008;沈其韩

等,2009)。这些特征与世界许多地区 BIF 特征也一致(李文达,1987;Robert *et al.*,2004;Carlos *et al.*,2007)表明它们都属于早前寒武纪海洋化学沉积的产物。Eu/Sm 稍高于年轻的铁建造,变化范围分别为 0.54~0.82、0.49~0.77、0.34~0.63 和 0.33~1.01,这与世界上其他地区的太古宙条带状铁矿的 Eu/Sm 比值相吻合。

前人的研究结果表明,Eu 的正异常是高温海底热液的特征(Danielson *et al.*,1992),而 Y 的正异常则是海水本身的特征(Bau and Dulski,1995;Alibo and Nozaki,1998),根据 Eu 和 Y 异常的强度可以推测二者比例的大小,由此可见所研究的 4 个条带状铁矿均形成于热液和海水混合的环境,属于火山沉积建造,铁硅质热液来自于火山喷发或喷气作用。

从所研究铁矿床的硫同位素特征来分析,就五台山铁矿而言,据李树勋等(1986)报道,柏枝岩组和金岗库组中与 BIF 伴生的黄铁矿的  $\delta^{34}\text{S}$  基本分布于零值附近,绝大多数在  $-2.4\text{‰} \sim +2.2\text{‰}$  之间,是未分异的陨石硫的特点,进一步指明铁硅质来源于地幔,应是火山喷发或喷气作用时带来的铁硅质热液流体溶于海水后,在一定温度、pH、Eh 等条件下经化学沉积而成。

关于变质作用对微量和稀土元素配分模式的影响问题,从现有的几个矿床比较,柏枝岩铁矿床相当于绿片岩相变质作用,峨口铁矿和白峪里铁矿相当于绿帘角闪岩相(低角闪岩相)变质作用,它们的微量元素特征和稀土元素配分模式十分一致,说明绿帘角闪岩相和绿片岩相变质作用对 BIF 矿床的微量和稀土元素特征未发生明显影响。冀东迁安地区的条带状铁矿属于麻粒岩相变质作用,与上述几个矿体比较,尽管变质作用的温压条件有较大差别,但微量元素和稀土元素配分模式总体上基本一致,无明显差别,说明在麻粒岩相变质作用条件下,微量元素和稀土元素没有出现大的迁移和丢失,但个别元素显示异常,如 La 相对富集、Y 和 Tm 的异常较低级变质作用更明显等,由于样品数量不足够多,不同变质作用对 BIF 岩石化学性质的影响尚需开展进一步研究。

## 6 初步结论

从五台山白峪里铁矿、柏枝岩铁矿、峨口铁矿和冀东迁安铁矿的矿床地质特征、岩石学特征、岩石化学、微量元素和稀土元素特征综合分析,认为它们是

海洋(伴随火山热液)化学沉积又经变质的火山沉积变质铁矿床。

五台地区和冀东迁安地区几个铁矿床经历了从绿片岩相、角闪岩相到麻粒岩相的变质作用,其微量元素和稀土元素基本没有受到影响,但在麻粒岩相变质作用条件下,La、Y 和 Tm 元素可能受到影响,由于样品数量较少,不能判断其受影响的程度。笔者对五台山 4 个铁矿的研究与李树勋等(1986)和骆辉等(2002)的测定结果也基本一致。

五台地区和冀东迁安地区条带状铁矿的微量元素和稀土元素特征与我国鞍山地区和山东韩旺地区以及国外太古宙同类铁矿床的特征基本一致,说明它们有一定的共性。

五台山条带状铁矿中伴生的黄铁矿的  $\delta^{34}\text{S}$  基本分布于零值附近,表明铁质来源于地幔,条带状铁矿铁硅质共生,由此推知,所研究条带状铁矿床是来源于幔源的火山喷发或火山喷气作用带来的铁硅质溶于海水中,在特定物理化学条件下经化学沉积作用形成的。

## References

Alibo D S and Nozaki Y. 1998. Rare earth element in seawater: particle association, shale normalization and Ce oxidation[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 63: 363~372.

Bau M and Dulski P. 1995. Yttrium and Holmium in South Pacific sea water: vertical distribution and possible fractionation mechanisms [J]. *Chemie Der Erde-Geochemistry*, 55: 1~15.

Carlos A S, Sonia M B, Alcides N S, et al. 2007. Geochemistry and genesis of the banded iron formation of the Caue formation, Quadrilatero Ferrifero, Minas Gerais, Brazil [J]. *Precambrian Research*, 152: 170~206.

Danielson A, Moller P and Dulski P. 1992. The europium anomalies in banded iron formations and the thermal history of the oceanic crust [J]. *Chemical Geology*, 97: 89~100.

Li Shuxun, Ji Shukai, Ma Zhihong, et al. 1986. *Geology of Metamorphic Sedimentary Iron Deposit in Wutaishan Area*[M]. Jilin Science and Technology Publishing House (in Chinese).

Li Wenda. 1987. Rare-Earth Element Application in Deposit Researching [M]. Beijing: Geological Publishing House, 161~168 (in Chinese).

Li Zhihong, Zhu Xiangkun and Tang Suohan. 2008. 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*, 27(4): 285~290 (in Chinese with English abstract).

Luo Hui, Chen Zhihong and Shen Baofeng. 2002. Ore-Earning Geology and Metallogenic Prognosis of BIF, Wutaishan Area [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).

McLennan S B. 1989. Rare earth elements in sedimentary rocks: influence of provenance and sedimentary processes [A]. Lipin B R and McKay G A. *Geochemistry and Mineralogy of Rare Earth Elements* [C]. Mineral Soc Am, Washington, 21: 169~200.

Qian Xianglin, Cui Wenyuan, Wang Shiqi, et al. 1985. *Geology of Jidong Pre-Cambrian Iron Ore*[M]. Shijiazhuang: Hebei Science and Technology Publishing House, 1~273 (in Chinese).

Robert B, Balz S K, Stephen M, et al. 2004. Characterisation of early Archaean chemical sediments by trace element signatures [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 222: 43~60.

Shen Baofeng, Luo Hui, Li Shuangbao, et al. 1994. *Geology and Metallization of Archean Greenstone Belts in North China Platform*[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).

Shen Qihan. 1998. Geological characteristics and settings of the Pre-Cambrian banded magnetite quartzite in north China platform [A]. Cheng Yuqi. *Collected Papers on Pre-Cambrian Geology Study of north China Platform* [C]. Beijing: Geological Publishing House, 1~30 (in Chinese).

Shen Qihan, Song Huixia and Zhao Ziran. 2009. Characteristic of rare earth elements and trace elements in Hanwang Neo-Archaean banded iron formations, Shandong Province [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 30(4): 693~699 (in Chinese).

Sun Dazhong, Bai Jin and Jin Wenshan. 1984. *The Earth Precambrian Geology of Jidong Area*[M]. Tianjin Science and Technology Publishing House, 1~273 (in Chinese).

Zhai Mingguo, Windley B F, Sills J D, et al. 1989. REE and trace element geochemistry of the Archean Anshan-Benxi BIF, Liaoning, northeast China [J]. *Geochimica*, (3): 241~249 (in Chinese).

Zhang Yixia, Ye Tingsong, Yan Hongquan, et al. 1986. *The Archean Geology and Banded Iron Formation of Jidong, Hebei Province*. Peoples' Republic of China Ministry of Geology and Mineral Resources-Regional Geology 6th [M]. Beijing: Geological Publishing House, 179 (in Chinese).

## 附中文参考文献

李文达. 1987. 稀土元素在矿床研究中的应用 [M]. 北京: 地质出版社, 161~168.

李志红, 朱祥坤, 唐索寒. 2008. 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*, 27(4): 285~290.

李树勋, 冀树楷, 马志红, 等. 1986. 五台山区变质沉积铁矿地质 [M]. 吉林科学技术出版社.

骆辉, 陈志宏, 沈保丰. 2002. 五台山区条带状铁建造含矿地质及成矿预测 [M]. 北京: 地质出版社.

钱祥麟, 崔文元, 王时骥, 等. 1985. 冀东寒武纪铁矿地质 [M]. 石家庄: 河北科学技术出版社, 1~273.

沈保丰, 骆辉, 李双保, 等. 1994. 华北陆台太古宙绿岩带地质及成矿 [M]. 北京: 地质出版社.

沈其韩. 1998. 华北地台早前寒武纪条带状铁英岩地质特征及形成的地质背景 [A]. 程裕淇. 华北地台早前寒武纪地质研究论文集 [C]. 北京: 地质出版社, 1~30.

沈其韩, 宋会侠, 赵子然. 2009. 山东韩旺新太古代条带状铁矿的稀土和微量元素特征 [J]. *地球学报*, 30(6): 693~699.

孙大中, 白瑾, 金文山. 1984. 冀东早前寒武地质 [M]. 天津科学技术出版社.

翟明国, Windley, Sills, 等. 1989. 鞍山太古代条带状铁建造(BIF)的稀土及微量元素特征 [J]. *地球化学* (3): 241~249.

张贻侠, 叶廷松, 阎鸿铨, 等. 1986. 冀东太古代地质及变质铁矿. 中华人民共和国地质矿产部地质专报-区域地质第 6 号 [M]. 北京: 地质出版社, 179.