

辽宁南芬露天铁矿床地球化学特征及其地质意义

彭明生¹, 张朋¹, 杨宏智¹, 王希今¹, 乔树岩²

1. 沈阳地质矿产研究所, 沈阳 110034
2. 中煤地质工程总公司, 北京 100073

摘要 辽宁南芬铁矿是中国乃至亚洲最大的露天开采铁矿。自 1949 年以来, 辽宁南芬铁矿一直是本钢集团的主体矿山和高品位富矿的主要供应地。本文在总结辽宁南芬铁矿床成矿地质背景及矿床地质特征的基础上, 对矿区内的磁铁石英岩的主量元素和稀土元素特征进行分析。通过主量元素和稀土元素相结合的方法, 对铁矿成矿物质来源提出了有效制约。研究表明, 条带状铁矿(BIF)的化学成分主要由 T(Fe_2O_3)和 SiO_2 组成, 并且具有较低含量的 Al_2O_3 和 TiO_2 。这一特征与鞍-本地区、山西五台山和冀东迁安地区铁矿一致, 表明该 BIF 型铁矿是由极少碎屑物质加入的化学沉积岩。稀土元素的总量很低, 经标准化后的稀土元素配分模式呈现轻稀土亏损、重稀土富集的特征, 具有明显铕(Eu)正异常特征, 说明该 BIF 的地球化学特征(REE)来源于火山热液和海水混合液。

关键词 条带状铁矿; 地球化学特征; 辽宁南芬

中图分类号 P595

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.01.004

Geochemical Characteristics and Geological Significance of Iron Deposit in Nanfen, Liaoning

PENG Mingsheng¹, ZHANG Peng¹, YANG Hongzhi¹, WANG Xijin¹, QIAO Shuyan²

1. Shenyang Institute of Geology and Mineral Resources, Shengyang 110034, China
2. China Coal Geology Engineering Corporation, Beijing 100073, China

Abstract The Nanfen iron deposit is the largest open-pit iron deposit not only in China but also in Asia. Since 1949, it has become the main mine to provide high grade iron for the Benxi Steel Iron Cooperation. This paper discusses the geological background of the mineralization the geological characteristics and the major and rare earth elements in the Nanfen iron deposit. The major and rare earth elements (REE) of banded iron formations are analyzed and it is shown that the average bulk compositions of banded iron formations (BIF) are rich in Fe and SiO_2 , but with very low Al_2O_3 and TiO_2 contents, as consistent with the characteristics in Anshan-Benxi, Wutaishan and Qianshan. These chemical features show that they are chemical sediments of detrital input, with very low REE concentrations, with the shale-normalized REE patterns of distinct positive anomalies of Eu and the depletion of light REE relative to heavy REE. This demonstrates that the BIFs are the products of chemical sedimentations from the paleo-seawater with significant input of volcanic hydrothermal fluids.

Keywords banded iron formation; characteristics geochemistry; Nanfen, Liaoning

0 引言

前寒武纪是铁矿资源重要的成矿期,许多大规模铁矿床都形成于这一时期。其中条带状铁矿(Banded Iron Formation, BIF)是中国乃至全球重要的铁矿资源,它是前寒武纪时期沉

积成岩演化过程中形成的特有地质产物。根据其形成条件和成因,BIF可进一步划分为阿尔戈马(Algoma)型和苏必利尔(Superior)型。鞍-本地区是中国 BIF 型铁矿重要集中区,前人在该地区做了许多详细工作^[1-3],但长期以来,对该地区 BIF

收稿日期: 2012-06-06;修回日期: 2012-10-31

基金项目: 中国地质调查局项目(1212011085287)

作者简介: 彭明生,高级工程师,研究方向为矿产勘查和综合研究,电子信箱: 247119086@qq.com

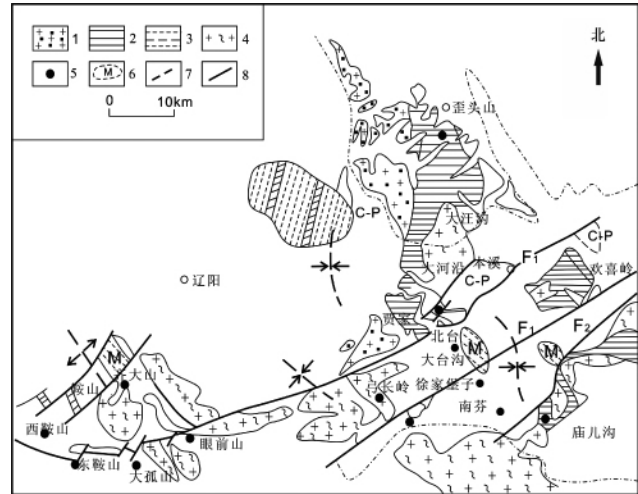
型铁矿成矿物质的来源问题存在较大争议。一种观点认为,成矿物质来源于陆源物质风化,另一种观点认为成矿物质来源于海底火山作用。导致这种争论的根本原因在于缺少对成矿物质来源进行直接示踪的技术方法。随着科学技术的进步,元素地球化学研究被广泛应用于示踪源区、成矿作用等许多方面^[4-6]。本文结合已有的铁同位素研究,拟通过矿石的主量、微量元素地球化学分析,对鞍-本地区南芬铁矿的成矿物质进行示踪,为进一步找矿及鞍-本地区铁矿物质来源探讨提供新的科学依据,同时对研究鞍-本地区前寒武纪地壳的形成和演化也提供一定的借鉴。

1 成矿地质背景

鞍-本地区地处中朝准地台胶辽台隆太子河-浑江台陷的辽阳-本溪凹陷上(IV级构造单位),该地区是中国重要的太古宙花岗岩-绿岩带分布区,分布有太古界鞍山群中上部的茨沟岩组、大峪沟岩组和樱桃园岩组^[7]。该地区大面积出露太古宙花岗岩,其中残留着为数众多的表壳岩,其岩性组合主要为基性、中基性火山岩-硅铁建造组合、中酸性火山岩-硅铁建造组合和沉积岩-硅铁建造组合。目前,该地区已经发现和开发众多大型、超大型铁矿床,如大台沟、徐家堡子、弓长岭、南芬、齐大山、东鞍山等(图1^[8])。

2 矿区地质特征

南芬铁矿是鞍-本地区典型的BIF铁矿,是目前中国乃至亚洲最大的黑色冶金露天矿,也是本溪钢铁集团铁矿石



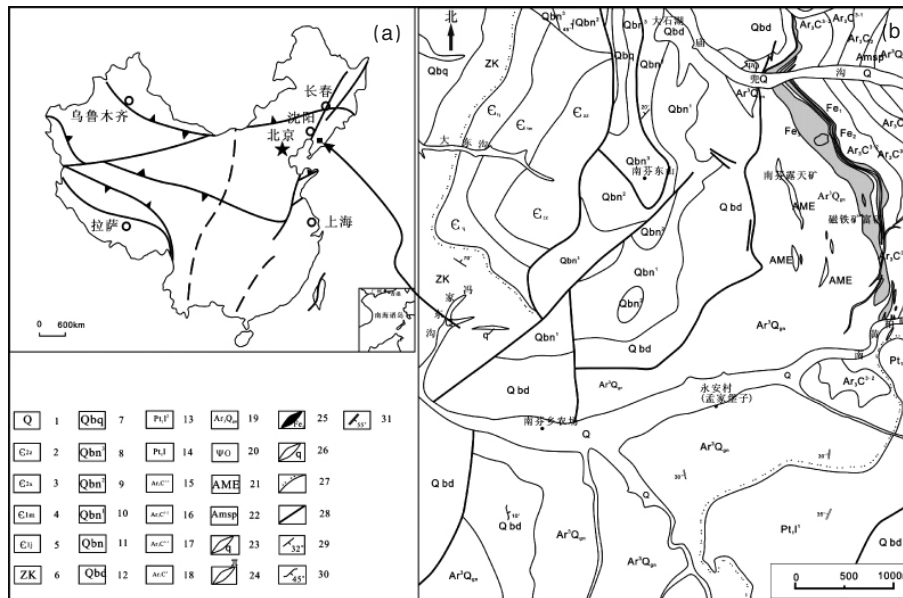
1—大峪沟组;2—茨沟组;3—樱桃园组;4—花岗岩岩石;5—矿床;
6—磁异常;7—震旦系-寒武系分布区;8—大断裂

图1 辽宁鞍-本地区条带状铁矿分布简图

Fig. 1 Distribution of iron deposits in Anshan-Benxi area

主要生产基地之一,位于辽宁省本溪市南芬区东南约4km,北距大台沟铁矿10km,西距弓长岭铁矿25km,矿区南北长5.5km,东西宽0.4~1km,面积为4.6km²,大地构造位置处于华北地台辽东台背斜营口-宽甸隆起的北缘太子河凹陷中(图2(a)),属于鞍-本铁矿成矿带重要组成部分,系鞍-本地区典型“鞍山式”铁矿床之一。

矿区出露的地层主要为太古界鞍山群茨沟岩组、元古界



1—第四系;2—张夏组;3—徐庄组;4—馒头组;5—碱厂组;6—康家组;7—桥头组;8—南芬组三段;9—南芬组二段;10—南芬组一段;
11—南芬组一段、二段不可分;12—钓鱼台组;13—浪子山组二段;14—浪子山组一段;15—云母石英片岩;16—石英绿泥片岩;
17—二云母石英片岩;18—黑云母变粒岩;19—片麻;20—斜长角闪岩;21—绿帘角闪片岩;22—斜长角闪片岩;23—石英斑岩脉;
24—花岗斑岩脉;25—铁矿体;26—石英脉;27—角度不整合界线;28—断层;29—层理产状;30—片麻理产状;31—片理产状

图2 本溪南芬露天铁矿床大地构造位置图(a)和矿区地质简图(b)

Fig. 2 Tectonic map (a) and geological sketch map (b) of Nanfen iron deposit Benxi, Liaoning

辽河群浪子山组、震旦系钓鱼台组、南芬组、寒武系碱厂组、馒头组等,其中鞍山群茨沟岩组与铁矿关系最为密切,岩组可分为上、中、下3段,上部为云母石英片岩,中部为绿帘角闪石英绿泥片岩及铁矿体,下部为二云母长石石英片岩和二云母石英片岩。

矿区主要构造有断裂构造和褶皱构造,断裂构造主要有北东—北北东向的扭性—压扭性断裂构造、近东西向的区域性压性断裂构造、北西向张性断裂构造及北东—北北东向压扭性断裂,其中北东—北北东压性断裂对铁矿起改造和破坏作用,同时也起储矿作用。褶皱构造有露天矿倒转背斜和黑背山倒转穹窿,露天矿倒转背斜规模较小,轴向近南北,轴面西倾,倾角为30°,沿背斜核部发育齐大山片麻杂岩,杂岩外侧依次为钓鱼台组、南芬组、桥头组及寒武系地层,褶皱北部地层东西走向,北倾,倾角为20°~30°,南部地层北东走向,北西倾斜,倾角为20°~40°。黑背山倒转穹窿构造呈椭圆形,穹窿的核部为齐大山片麻杂岩体,向外依次出露鞍山群片岩段和含铁岩段,辽河群地层不整合覆盖其上,穹窿的轴面西倾,倾角为40°。

岩浆岩主要为太古代齐大山片麻杂岩、印支期斜长花岗岩、燕山期中细粒斑状黑云母花岗岩和粉红色中粒花岗岩。

3 矿床地质特征

南芬铁矿由3条大致平行的铁矿体组成,编号分别为Fe₁、Fe₂和Fe₃,矿体分布见图2(b)。矿体总体走向呈北西—南东向,倾向南西,倾角为40°~55°。铁矿体产于绿帘角闪石英绿泥片岩和石英片岩之间,呈层状、似层状产出,与围岩近于平行不整合接触(图3)。

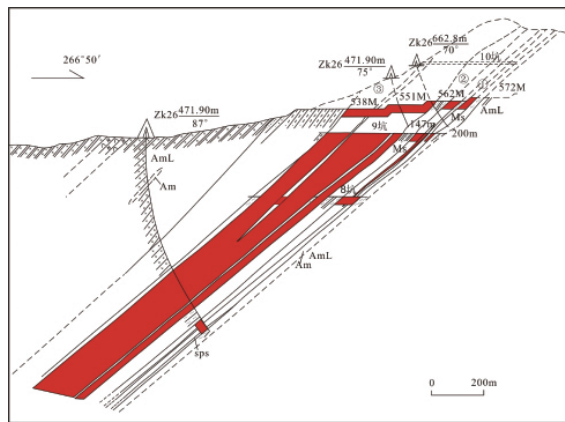


图3 本溪南芬露天铁矿床10勘探线剖面
Fig. 3 Cross section of No. 10 exploration line of Nanfen iron deposit

3.1 矿体形态

Fe₁铁矿体矿层:走向北西,倾向南西或西,倾角平均为47°。矿体工业矿段长2200m,矿体厚度主要介于7~18m,最厚28m,平均厚度为11m,T(Fe₂O₃)含量25%~40%,平均为34%,组成矿体的矿石以赤铁石英岩为主。

Fe₂铁矿体矿层:走向北西,倾向南西或西,倾角平均

47°。矿体工业矿段长2500m,矿体厚度主要介于8~78m,平均厚度为21m,倾斜延伸较为稳定,T(Fe₂O₃)含量20%~40%,平均为32%,矿体由赤铁石英岩和磁铁石英岩组成,局部夹有赤铁矿和磁铁矿富矿。

Fe₃铁矿体矿层:走向为北西,倾向南西,倾角为47°。矿体工业矿段长2900m,矿体厚度沿走向变化较大,而沿倾向较稳定,一般为35~100m,平均厚度为88m,T(Fe₂O₃)含量20%~40%,平均为30%,该矿体组成较为复杂,自下而上为赤铁石英岩、磁铁石英岩、透闪石磁铁石英岩和磁铁透闪石片岩。

3.2 矿石特征

矿石的矿物成分比较简单,主要有磁铁矿、赤铁矿,次要成分为黄铁矿、镜铁矿、菱铁矿及少量黄铜矿;脉石矿物有石英、透闪石、白云母、方解石和阳起石等。矿石结构为不均匀粒状变晶结构、纤状变晶结构,构造主要是条带状、条纹状和块状构造。根据矿石矿物组合、结构构造特征,矿石可分为磁铁石英岩、透闪石磁铁石英岩、磁铁赤铁石英岩和赤铁磁铁石英岩、赤铁石英岩、菱铁磁铁石英岩和磁铁滑石片岩6种自然类型。

全区铁矿石主要成分为SiO₂及T(Fe₂O₃),两者占矿石化学成分的30%,矿层中全铁品位约占25%~40%。全铁含量与矿石类型密切相关,含铁最高的是磁铁石英岩,一般在28%~40%,赤铁石英岩次之,含量分布在25%~37%之间,透闪磁铁石英岩较低,多为20%~30%,一般低于20%^[9]。

4 条带状铁矿石的地球化学特征

2010年,在南芬矿区采取了6个条带状磁铁石英岩样品进行主量元素和稀土元素测试分析。这些样品均是经过手标本和显微镜下鉴定后挑选出来的具有代表性的样品,其主量元素和稀土元素的测试分析在中国地质调查局沈阳地质调查中心实验室完成,主量元素采用荧光光谱仪(XRF)分析,稀土元素采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)分析。

4.1 主量元素地球化学特征

南芬铁矿矿石主量元素分析结果见表1。从表1可以看出,南芬铁矿石中SiO₂含量的变化范围为43.80%~47.07%,平均值44.67%;Fe₂O₃含量为33.60%~44.87%,平均值38.16%;FeO含量为7.37%~16.57%,平均值13.29%;MnO含量为0.044%~0.068%,平均值0.69%;MgO含量为0.55%~1.28%,平均值0.88%;CaO含量为0.59%~0.77%,平均值0.70%;Na₂O含量为0.03%~0.30%,平均值0.13%;K₂O含量为0.05%~0.63%,平均值0.42%;P₂O₅含量为0.03%~0.19%,平均值0.09%;Al₂O₃含量为0.06%~0.10%,平均值0.49%;TiO₂含量为0.006%~0.078%,平均值0.05%。

由上可知,南芬矿区条带状铁矿中含量最多的化学成分是SiO₂和T(Fe₂O₃),二者含量之和在94.95%~99.47%之间,平均值为97.61%,其他组分(MnO、CaO、Na₂O、K₂O、P₂O₅、TiO₂、Al₂O₃、MgO)含量非常低。因此,南芬BIF型铁矿主要由SiO₂、T(Fe₂O₃)组成,同时含有较低的Al₂O₃和TiO₂。这些特征表明,

表 1 南芬条带状铁矿的主量元素分析数据 (单位:wt%)

Table 1 Major element contents of ores in Nanfen iron deposit

主量元素	HQ-1	HQ-2	HQ-3	HQ-4	HQ-5	HQ-6
Na ₂ O	0.29	0.03	0.08	0.3	0.03	0.06
MgO	1.13	0.77	0.87	1.28	0.55	0.67
Al ₂ O ₃	0.09	0.95	0.1	0.06	0.88	0.88
SiO ₂	47.07	45.86	40.87	43.8	45.89	44.58
P ₂ O ₅	0.16	0.04	0.08	0.19	0.03	0.06
K ₂ O	0.05	0.63	0.55	0.06	0.63	0.61
CaO	0.75	0.71	0.77	0.73	0.67	0.59
TiO ₂	0.006	0.078	0.07	0.009	0.078	0.056
MnO	0.044	0.063	0.055	0.053	0.068	0.063
Fe ₂ O ₃	43.32	35.2	36.8	44.87	33.6	35.2
FeO	7.37	16.57	15.55	7.89	15.78	16.57
T(Fe ₂ O ₃)	51.51	53.61	54.08	53.64	51.13	53.61
LOI	0.32	0.13	0.38	0.37	0.28	0.16
总计	100.28	100.90	95.795	99.242	98.206	99.339
Fe ₂ O ₃ /SiO ₂	0.92	0.76	0.90	1.02	0.73	0.79
Fe ₂ O ₃ /FeO	5.88	2.12	2.37	5.69	2.13	2.12
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	523.00	48.27	408.70	730.00	52.18	50.66

表 2 南芬条带状铁矿矿石全岩样品 REE 元素分析结果 (单位:wt%)

Table 2 REE composition of BIF bulk samples from Nanfen iron deposit

REE 元素	XT-1	XT-2	XT-3	NF06-7*	NF06-8*	NF06-13*
La	1.7	2.67	2.03	3.00	2.11	2.50
Ce	5.52	8	3.76	5.40	4.20	3.90
Pr	0.69	0.88	0.62	0.70	0.60	0.50
Nd	2.3	3.33	3.14	2.70	2.50	2.10
Sm	0.92	1.22	1.18	0.60	0.60	0.50
Eu	0.5	1.3	1.29	0.80	0.70	0.40
Gd	0.66	0.9	0.73	0.50	0.60	0.40
Tb	0.25	0.17	0.16	0.10	0.10	0.10
Dy	1.33	1.32	1.28	0.70	0.90	0.50
Ho	0.36	0.32	0.31	5.20	6.10	4.80
Er	0.68	0.69	0.67	0.20	0.20	0.10
Tm	0.2	0.28	0.27	0.50	0.60	0.40
Yb	6.53	5.51	6.13	0.10	0.10	0.10
Lu	1.7	2.67	2.03	30	2.10	2.50
Y	5.52	8.00	3.76	5.40	4.20	3.90
∑REE	22.59	28.00	22.93	21.10	20.00	16.80
LREE	17.15	25.4	15.78	18.60	14.90	13.80
HREE	10.01	9.19	9.55	7.30	8.60	6.40
LREE/HREE	1.71	2.76	1.65	2.55	1.73	2.16
(La/Yb) _N	0.16	0.16	0.12	2.03	1.42	1.69
(La/Sm) _N	0.29	0.34	0.27	0.77	0.54	0.77
(Gd/Lu) _N	0.24	0.23	0.20	0.07	0.07	0.07
(Ce/Yb) _N	0.26	0.24	0.11	1.84	1.43	1.33
δEu	1.79	1.85	1.95	6.48	5.17	3.89
δCe	4.62	4.51	2.84	2.92	3.11	2.60

注:带*者引自文献[11]。

Note: The date which marked by * are from Ref [11].

南芬铁矿同鞍-本地区其他 BIF 铁矿一样,是由极少碎屑物质加入的化学沉积岩^[10,11]。

4.2 稀土元素地球化学特征

本溪南芬铁矿 6 个铁矿石的全岩样品的 REE 分析结果列于表 2。表中 Eu 的异常用 $\delta Eu = 2Eu_{PAAS} / (Sm_{PAAS} + Nd_{PAAS})$ 计算, Ce 异常用 $\delta Ce = Ce_{PAAS} / (2Pr_{PAAS} - Nd_{PAAS})$ 计算,经 PAAS(Post Archean Australian Shale)^[11] 标准化后的 REE 配分曲线如图 4 所示。

由表 2 和图 4 可知,样品的稀土元素总量均较低 ($\sum REE$ 为 $(16.80 \sim 28.00) \times 10^{-6}$,这与太古宙海洋沉积物特征一致。南芬铁矿 BIF 样品 PAAS 标准化后呈现非常一致的稀土元素配分曲线,其特征为轻稀土元素相对亏损、重稀土元素相对富集的分馏模式,呈现明显的 Eu 正异常 (δEu 为 $(1.79 \sim 6.48) \times 10^{-6}$); Ce 异常不明显 (δCe 为 $(2.60 \sim 5.62) \times 10^{-6}$), Y/Ho 比值为 $(0.69 \sim 15.33) \times 10^{-6}$ 。这些特征与全球 BIF 的特征一致^[4,5],表明南芬铁矿为前寒武纪海洋化学沉积的产物。

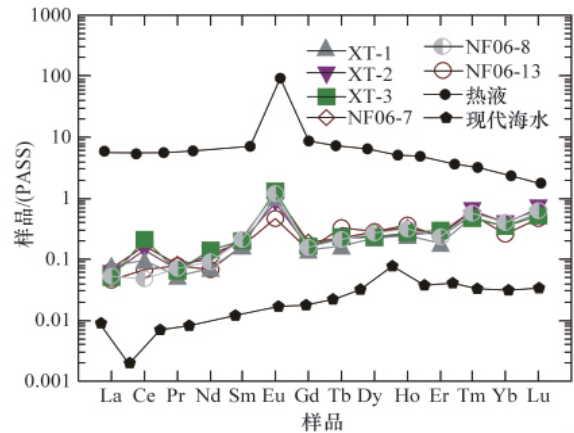


图 4 南芬条带状铁矿床、热液和现代海水的 REE 配分
Fig. 4 PAAS-normalized REE diagram of BIF from Nanfen, modern hydrothermal fluids and seawater

5 讨论

条带状铁矿中主要化学成分 SiO₂ 和 T(Fe₂O₃) 的含量对判断铁矿的沉积作用类型有一定的指导意义^[13],南芬铁矿 SiO₂ 和 T(Fe₂O₃) 之和为 94.95%~99.47%,其他组分含量较低,这一特征与山东地区的韩旺铁矿^[14]和鞍-本地区的东鞍山、齐大山、大孤山、弓长岭铁矿相同^[11],它们均为极少数的碎屑物加入的化学沉积岩。样品具有极低的 TiO₂ 和较高的 Al₂O₃ 含量,因此,具有较高的 Al₂O₃/TiO₂ 比值,说明在沉积岩中仅有少量的黏土物质或陆源碎屑物混入,它们是化学 Fe-Si 沉积岩。一般认为沉积变质铁矿的 SiO₂/Al₂O₃ 比值应小于 10,火山沉积变质铁矿的 SiO₂/Al₂O₃ 应大于 10。南芬铁矿中 SiO₂/Al₂O₃ 比值介于 48.27~730.00 之间,均大于 10,因此,南芬铁矿赋存于火山沉积岩系中。

如上所述,南芬铁矿样品 REE 配分曲线重要特点是显著

的 Eu 正异常(图 4)。前人研究表明, Eu 的正异常是高温海底热液的特点^[5]。实验表明, 当热液与海水混合(1:100), REE 配分曲线显示 Eu 的正异常、LREE 亏损、HREE 相对富集和 La 正异常^[6]。这些特点与南芬铁矿 REE 配分曲线特征一致, 表明该铁矿中的 REE 元素来源于火山热液和海水混合液。由于 Eu 的正异常是高温海底热液的特征(图 4), Eu 异常的大小可以代表混合溶液中高温热液的相对贡献量^[5], 也就是说, 释放到海水中的高温热液越多, Eu 的正异常越明显。前人研究表明, 不同类型的 BIF 中 Eu 异常的程度不同: 与火山活动关系密切的 Algoma 型铁矿具有较大的 Eu 正异常(>1.8), 而与火山活动无明显关系的 Superior 型铁矿具有相对较弱的 Eu 正异常(<1.8)^[7]。南芬铁矿中 Eu 的正异常均大于 1.8(表 2), 表明该地区 BIF 的形成与更强烈的热液组分的输入有关, 这与鞍-本地区 BIF 型铁矿为 Algoma 型铁矿的认识相符。为了探讨鞍-本地区 BIF 中铁的物质来源, 文献[11]对鞍-本地区铁矿(含南芬铁矿)全岩样品进行了 Fe 同位素分析, 也清楚地表明南芬铁矿中铁的来源与海底火山热液活动有关。

6 结论

本文在对南芬铁矿床详细地质调查研究的基础上, 报道了该矿床 6 个全岩样品和 3 个稀土元素分析结果, 通过分析, 初步得出如下结论:

(1) 南芬铁矿的化学成分主要为 SiO_2 和 $\text{T}(\text{Fe}_2\text{O}_3)$ 组成, 并含有较低的 Al_2O_3 和 TiO_2 含量, 表明该地区 BIF 型铁矿是由极少数碎屑物质加入的化学沉积岩。

(2) 南芬铁矿 BIF 经页岩标准化后的稀土元素配分模式显示, 轻稀土亏损、重稀土富集, 且具有明显的 Eu 正异常, 这说明该地区稀土元素来源于火山热液和海水混合液。

致谢 本文测试得到沈阳地质矿产研究所测试中心赵爱林帮助, 数据整理和成图过程得到吉林大学崔培龙博士帮助, 在此对审稿人提出的宝贵意见一并表示感谢。

参考文献 (References)

- [1] 李鸿业, 赵秀德. 鞍本地区鞍山式铁矿地区地质构造 [J]. 前寒武纪研究进展, 1999, 22(3): 22-29.
Li Hongye, Zhao Xiude. Progress in Precambrian Research, 1999, 22(3): 22-29.
- [2] 蒋少涌, 丁梯平, 万德芳, 等. 辽宁弓长岭太古代条带状硅铁建造(BIF)的硅同位素组成特征[J]. 中国科学: B 辑, 1992(6): 626-631.
Jiang Shaoyong, Ding Tiping, Wan Defang, et al. Science in China: Series B, 1992(6): 626-631.
- [3] 李东林. 辽宁歪头山铁矿构造研究及构造控矿模式初探[J]. 地质找矿论丛, 2003, 18(2): 88-94.
Li Donglin. Contribution to Geology and Mineral Resources Research, 2003, 18(2): 88-94.
- [4] Frei R, Polat A. Source heterogeneity for the major components of -3.7Ga banded iron formation (Isua Greenstone Belt, western Greenland): Tracing the nature of interacting water masses in BIF formation [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2007, 253: 266-281.

- [5] Spier C A, Sonia M B de O, Alcides N S, et al. Geochemistry and genesis of the banded iron formations of the Caue Formation, Quadrilatero Ferrifero, Minas Gerais, Brazil [J]. Precambrian Research, 2007, 152: 170-206.
- [6] Alexander B W, Bau M, Andersson P, et al. Continently derived solutes in shallow Archean seawater: Rare earth element and Nisotope evidence in iron formation from the 2.9Ga Pongola Supergroup, South Africa[J]. Geochim Cosmochim Acta, 2008, 77: 378-394.
- [7] 李士江, 全贵喜. 鞍山-本溪地区含铁变质地层的划分与对比[J]. 地质找矿论丛, 2010, 25(2): 109-111.
Li Shijiang, Quan Guixi. Contribution to Geology and Mineral Resources Research, 2010, 25(2): 109-111.
- [8] 沈其韩. 华北地台早前寒武纪条带状铁英岩地质特征和形成的地质背景[C]//程裕淇. 华北地台早前寒武纪地质研究论文集. 北京: 地质出版社, 1998.
Shen Qihan. Geology character and formation conditions of early precambrian BIFs in Huabei Craton [C]//Chen Yuqi. Early Precambrian Geology Study on Huabei Craton. Beijing: Geological Publishing House, 1998: 1-30.
- [9] 张朋, 乔树岩, 杨宏智. 辽宁南芬铁矿床地质特征及找矿前景[J]. 金属矿山, 2011, 40(12): 91-93.
Zhang Peng, Qiao Shuyan, Yang Hongzhi. Metal Mine, 2011, 40(12): 91-93.
- [10] 张东阳, 苏慧敏, 秦松, 等. 河南窑场铁矿地球化学特征及其地质意义[J]. 矿床地质, 2009, 28(3): 321-335.
Zhang Dongyang, Su Huiming, Qin Song, et al. Mineral Deposits, 2009, 28(3): 321-335.
- [11] 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, 4(27): 285-290.
Li Zhihong, Zhu Xiangkun, Tang Suohan. Acta Petrologica et Mineralogica, 2008, 4(27): 285-290.
- [12] McLennan S M. Rare earth elements in sedimentary rocks: Influence of provenance and sedimentary processes [C]//Lipin B R, McKay G A. Geochemistry and Mineralogy of Rare Earth Elements. Reviews in Mineralogy, 1989, 21: 169-200.
- [13] 沈其韩, 宋会侠, 杨崇辉, 等. 山西五台山和冀中迁安地区条带状铁矿的岩石化学特征及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2011, 30(2): 161-171.
Shen Qihan, Song Huixia, Yang Songhui, et al. Acta Petrologica et Mineralogica, 2011, 30(2): 161-171.
- [14] 沈其韩, 宋会侠, 赵子然. 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, 2009, 30(6): 693-699.
Shen Qihan, Song Huixia, Zhao Ziran. Acta Geoscientica Sinica, 2009, 30(6): 693-699.
- [15] Danielson A, Moller P, Dulski P. The europium anomalies in banded iron formations and the thermal history of the oceanic crust [J]. Chemical Geology, 1992, 97: 89-100.
- [16] Dymek R F, Klein C. Chemistry, petrology, and origin of banded ironformation lithologies from the 3800Ma Isua supracrustal Belt, West Greenland[J]. Precambrian Research, 1988, 39: 247-302.
- [17] Huston D L, Logan G A. Barite, BIFs and bugs: Evidence for the evolution of the earth's early hydrosphere [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2004, 220: 41-55.

(责任编辑 岳臣)