

# 辽宁思山岭铁矿元素地球化学特征及其地质意义

孟旭阳<sup>1</sup> 王 鹏<sup>2</sup> 张东阳<sup>1</sup> 梁明娟<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 北京华夏建龙矿业科技有限公司, 北京 100070)

**摘要:**思山岭铁矿位于辽宁南芬地区,大地构造位置属于华北陆块东北缘,控矿地层为太古宇鞍山群茨沟组,矿石类型主要分为磁铁矿英岩和赤铁矿,铁建造沉积相属氧化物相-硅酸盐相。通过对矿床中主要矿物、矿石及围岩的元素地球化学研究,表明铁建造为基性火山岩-泥砂岩-硅铁质建造,变质等级达低角闪岩相,本区铁建造中变质火山岩具有大洋拉斑玄武岩的特点。经 PAAS 标准化后,矿石稀土元素分配模式为轻稀土亏损,重稀土富集,高 Y/Ho 值,具有 La、Y 正异常,与华北陆台其他地区条带状铁建造相比,具有强烈的钕正异常。成矿物质来源于幔源火山热液和海水的混合溶液。

**关键词:**条带状铁建造;矿物学;元素地球化学;思山岭铁矿;辽宁

**中图分类号:**P618.31 **文献标志码:**A **文章编号:**10100-3657(2012)06-1857-17

华北陆块广泛发育前寒武纪条带状铁建造,这些铁建造的原岩主要为火山-沉积岩系,为前寒武纪海相化学沉积岩,后期遭受了不同程度的变质作用<sup>[1-2]</sup>。从大地构造角度看,多数属于产自岛弧、弧后盆地或克拉通内部断裂带中的阿尔戈马型(Algoma 型)铁建造<sup>[3-5]</sup>。华北陆块的铁建造形成时代为 3.5~2.4 Ga,是早期地壳的重要组成部分<sup>[6]</sup>。李伟源<sup>[7]</sup>认为前寒武纪铁建造形成的终止是气候变化所致。

鞍本地区为中国重要的铁建造富集区域,已经发现了一系列的矿床,如歪头山铁矿、欢喜岭铁矿、北台铁矿、南芬铁矿、弓长岭铁矿、眼前山铁矿、东-西鞍山铁矿等(图 1)。前人<sup>[8-9]</sup>对本区的矿床成因、岩石矿物及元素特征进行了较为系统的研究,认为鞍本地区的铁建造与基性火山岩之间有着密切联系,物质来源具幔源特征。思山岭矿床为在南芬地区新发现的隐伏矿床,是近年来在本区找矿的一个重大突破,估计新增资源量 24.87 亿 t<sup>①</sup>。已有成果主要限于岩石矿石特征的研究<sup>[10]</sup>,认为其为沉积变质成因。本文拟通过对该矿床矿石、围岩的矿物学和元素地

球化学特征进行研究,并与华北陆块典型的铁建造的对比,揭示本区围岩原岩、变质程度及建造类型,推断构造环境及成矿物质来源并对矿床的形成机制提供制约条件。

## 1 地质概况

### 1.2 矿区地质

思山岭铁矿位于辽宁南芬地区,隶属于华北板块东北缘,大地构造处于中朝准地台—胶辽台隆—太子河—浑江台陷之辽阳—本溪凹陷中南部<sup>①</sup>。矿区盖层构造由新生界第四系、寒武系、震旦系、青白口系组成,呈角度不整合接触于主要由古元古界辽河群、太古宇鞍山群组成的结晶基底之上。寒武系分布于矿区东南角,由下而上分别为碱厂组、馒头组、毛庄组、徐庄组、张夏组,主要为条带状灰岩、竹叶状灰岩、页岩、粉砂岩、石英砂岩等组成;震旦系岩性主要为桥头组的磁铁矿英岩夹页岩与康家组的页岩,青白口系岩性包括钓鱼台组的石英岩、砾岩与南芬组的页岩、泥灰岩,辽河群浪子山组与上覆青白口系不

收稿日期:2012-04-27;改回日期:2012-10-31

基金项目:中国地质大学(北京)创新性实验计划资助。

作者简介:孟旭阳,男,1991年生,地质学专业;E-mail:mengxuyang1991@163.com。

通讯作者:张东阳, E-mail:zhangdongyang85@163.com。

①北京华夏建龙矿业科技股份有限公司.辽宁省本溪市思山岭铁矿详查报告(内部资料),2010.

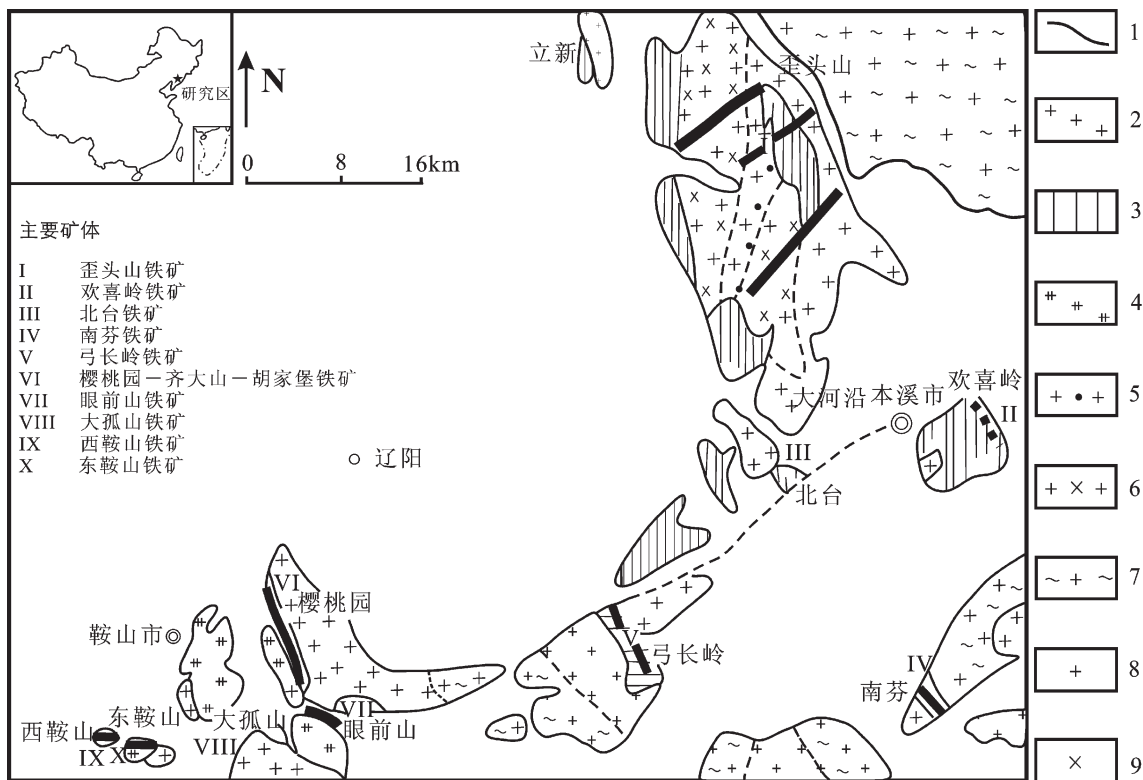


图1 辽宁鞍山—本溪地区条带状铁矿分布略图(据沈其韩<sup>[1]</sup>,1998)

1—以陆源沉积物为主的含铁岩系; 2—过渡型含铁岩系; 3—以碱性—中酸性火山沉积为主的含铁岩系; 4—大于2.8 Ga的花岗质杂岩体; 5—英云闪长岩; 6—花岗闪长岩—黑云母花岗岩; 7—时代不明的花岗质岩石; 8—形成于2.5 Ga的钾质花岗岩; 9—中生代花岗岩

Fig.1 Distribution of banded iron formations in Anshan—Benxi area of Liaoning Province (after Shen Q, 1998<sup>[1]</sup>)

1—Iron rock series mainly consisting of terrigenous sediments; 2—Transitional iron rock series; 3—Iron rock series mainly consisting of basic and intermediate—acidic igneous rocks; 4—>2.8Ga granitic complex; 5—Tonalite; 6—Granodiorite—biotite granite; 7—Granites with unknown ages; 8—Potassic granite with age of 2.5 Ga; 9— Mesozoic granites

整合接触,岩性主要为绿片岩、白云石大理岩、千枚岩和石英岩。鞍山群主要由混合岩和含铁石英岩系组成,其中混合岩自下而上为含绿泥石夹层的混合质云母石英片岩,长石化比较发育,上部为绿泥石化二云母石英片岩和石英岩的互层。区内构造线方向基本为NE向,并广泛发育着一组北东40°~50°的压扭性断层,大部分在本矿区通过。基底构造轮廓为向斜构造,为思山岭铁矿的矿体形态,构造复杂,在本区主要发育NE—NNE向断裂体系(图2)。区内岩浆岩仅见辉绿玢岩、闪长玢岩、花岗闪长玢岩、花岗斑岩及石英斑岩,时代可能属燕山期。其中辉绿玢岩及闪长玢岩分布广泛,前者主要分布于矿区南东部;后者地表出露较少,钻孔中发育,局部成群出现。

前人对厘定鞍山群年龄时限做过大量研究,但较为精确的年龄为万渝生(1992)<sup>[39]</sup>用离子探针质谱法测定弓长岭二矿区近20粒锆石所得,年龄限定为

2 500 ~ 2 700 Ma;周世泰(1994)<sup>[8]</sup>综合了前人测定的同位素年龄数据,认为鞍山群地质年龄下限应为2 500 Ma;同时将中、上鞍山群同位素年龄上下时限限定为2 800 Ma,即代表了中鞍山群的变质年龄;中、下鞍山群与下鞍山群之间地质年龄分界应以3 000 Ma为宜。本区矿体赋存于鞍山群茨沟组(属中鞍山群)中,因此,铁建造形成时代经厘定应为新太古代。

## 1.2 矿床地质

根据工程钻孔见矿情况,可将矿床自下而上圈定I~V号5个矿体,其中IV矿体为主矿体。矿体形态呈北缓南陡椭圆形向斜构造,长轴方向约290°,赋存于鞍山群含铁石英岩建造中。推测铁矿带东西长1 500 m,南北平均宽度960 m,最大深度1 580 m。埋藏深度为404~1 934 m(图3)。含铁岩系基本上为条带状磁(赤)铁石英岩。赤铁矿体主要由I,II,

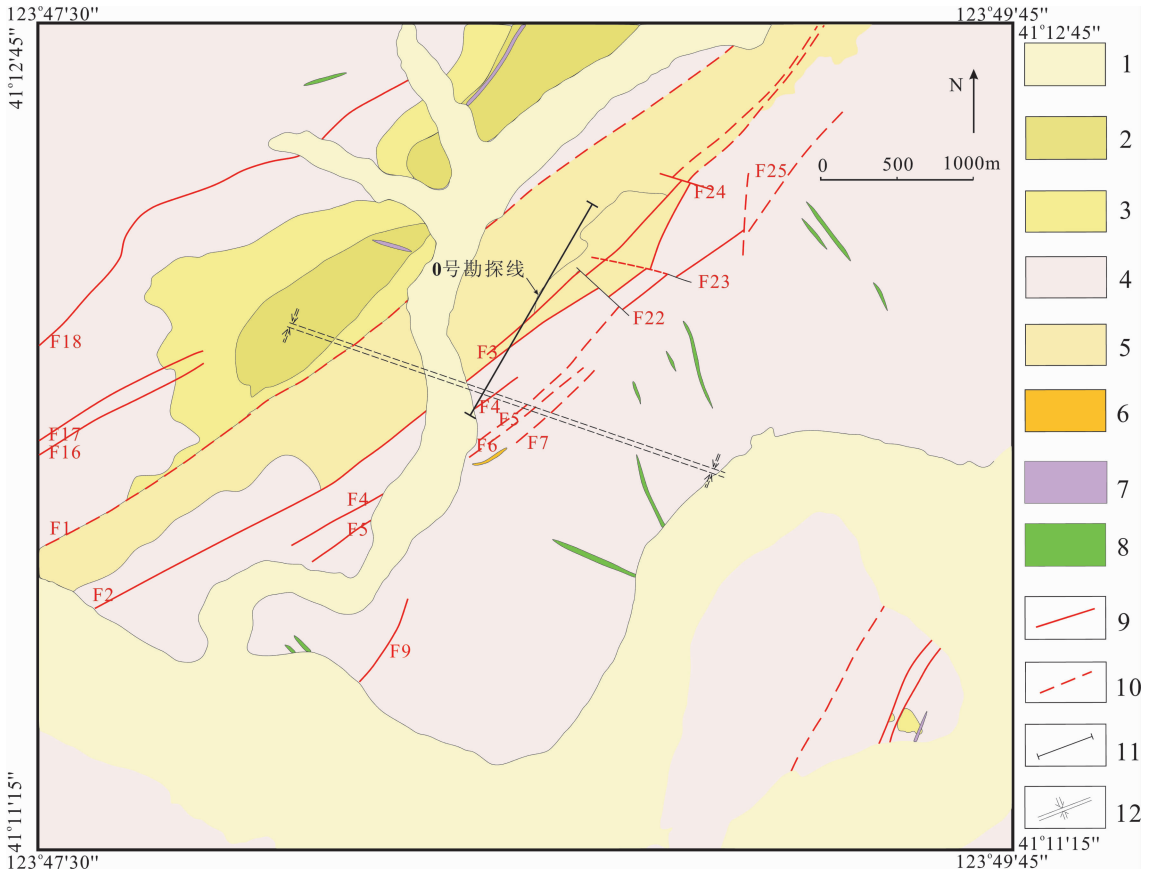


图 2 思山岭铁矿地质图(据华夏建龙矿业科技股份有限公司内部资料<sup>①</sup>)

1—第四纪冲积层;2—震旦系康家组扁豆状泥灰岩、深灰色粉砂质页岩;3—震旦系桥头组灰绿色粉砂质岩夹灰绿色、灰白色磁铁矿石岩;4—青白口系南芬组页岩、泥灰岩、砂质页岩;5—青白口系钓鱼台组灰白色巨厚层状石英岩;6—石英斑岩;7—花岗闪长斑岩;8—辉绿玢岩;9—实测及推测正断层;10—实测及推测逆断层;11—0号勘探线;12—向斜轴线

Fig.2 Regional geological map of the Sishanling iron deposit in Benfen area (after Beijing Huaxia Jianglong Mining Science and Technology Co., Ltd.<sup>①</sup>)

1—Quaternary alluvium; 2—Lenticular marl, dark gray powder sandy shale of Sinain Kangjia Formation; 3—Grayish-green silty rock intercalated with grayish-green, gray magnetite quartzite of Sinian Qiaotou Formation; 4—Shale, marl and sandy shale of Neoproterozoic Nanfen Formation; 5—Gray thick bedded quartzite of Neoproterozoic Diaoyutai Formation; 6—Quartz porphyry; 7—Granodiorite porphyry; 8—Diabase porphyrite; 9—Measured and inferred fault; 10— Inferred unknown fault;

11—No. 0 exploration line; 12—Fault and syncline axis

V 3 个矿体组成,主要位于矿床上部或呈互层状分布于磁铁矿体中,与磁铁矿体平行整合接触,呈层状、厚层状、透镜状产出;磁铁矿体由 III、IV 2 个矿体组成,位于赤铁矿体下部或呈互层状分布于赤铁矿体中。磁铁矿石平均品位 TFe 约为 31.6%,赤铁矿矿石平均品位 TFe 约为 30.79%。根据矿石矿物组分和相对含量,将矿石分为磁铁矿石岩矿石和赤铁矿矿石。

(1)磁铁矿石岩矿石主要赋存于 III、IV 号矿体中,矿石矿物主要为磁铁矿(~28%),有少量的赤铁

矿(~3%)和黄铁矿(偶见)。脉石矿物主要为石英(~37%),次为长石、云母、碳酸盐(~28%)。矿石以粒状变晶结构较为发育,构造以条纹状、条带状构造为主。磁铁矿和石英一般呈他形粒状,局部可见呈团块状磁铁矿,磁铁矿也呈微小尘染状分布于石英等颗粒中。

(2)赤铁矿矿石主要赋存于 I、II、V 号矿体中,矿石矿物主要为赤铁矿(~35%),少量磁铁矿和黄铁矿(~8%),偶见假象赤铁矿。脉石矿物主要为石英(~35%),碳酸盐岩(~10%),绿泥石(~10%)和绿帘

①北京华夏建龙矿业科技股份有限公司.辽宁省本溪市思山岭铁矿详查报告(内部资料),2010.

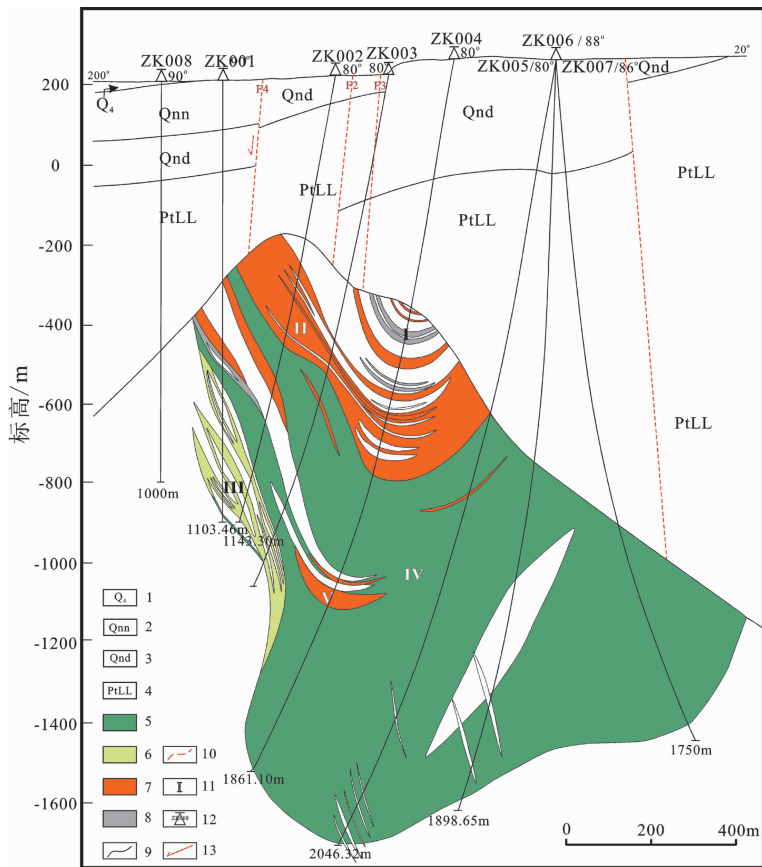


图3 思山岭铁矿0号勘探线地质剖面图(据华夏建龙矿业科技股份有限公司内部资料<sup>①</sup>)

1—第四纪冲积层;2—青白口系南芬组泥灰岩;3—青白口系钓鱼台组石英砂岩、硅化白云石大理岩、绿片岩互层;  
4—辽河群千枚岩;5—磁铁矿;6—低品位磁铁矿;7—赤铁矿;8—低品位赤铁矿;9—实测地质界线;10—推测断层;11—矿体编号;  
12—钻孔标识及编号;13—正断层

Fig.3 Geological section along No. 0 exploration line of the Sishanling iron deposit (after Beijing Huaxia Jianglong Mining Science and Technology Co., Ltd.<sup>①</sup>)

1— Quaternary alluvium; 2—Marl of Nanfen Formation; 3—Interbedded quartz sandstone, silicified dolomite marble and green schist of Diaoyutai Formation; 4—Phyllite of Liaoho Group; 5—Magnetite; 6—Low grade magnetite; 7—Hematite; 8—Low grade hematite;  
9—Measured geological boundary; 10—Inferred fault; 11—Serial number of ore body; 12—Logo and serial number of drill hole; 13—Normal fault

石。矿石以粒状变晶结构较为发育,条纹状、条带状构造。

矿体围岩主要包括盖层围岩、古风化壳和顶、底板围岩。盖层围岩主要为绿泥片岩;古风化壳由含铁砾岩组成,砾石成分为赤铁矿、磁铁矿石岩和含铁硅质岩;顶板围岩主要为二云片岩、黑云片岩、含铁绢云片岩、黑云黝帘角闪片岩、斜长角闪岩;底板主要为混合岩化二云片岩、混合岩、含铁石英岩。本文研究中围岩样品主要取自矿体部分盖层围岩和顶板围岩。矿体中出现富矿体,本文不做研究。

## 2 主要矿物的化学成分特征

### 2.1 角闪石

本区角闪石主要产于新太古界鞍山群茨沟组中的黑云黝帘角闪片岩、斜长角闪岩中,矿石中未见。镜下呈粒状、长柱状或针状、放射状集合体,浅绿色、绿色,多色性显著,绿-浅黄,吸收性  $N_g > N_m > N_p$ ,正中突起,闪石式解理,最高干涉色Ⅱ级蓝,异常干涉色绿色。角闪石的电子探针分析结果见表1,围岩角闪石中  $SiO_2$  的含量为 42.54%~53.24%,

<sup>①</sup>北京华夏建龙矿业科技股份有限公司.辽宁省本溪市思山岭铁矿详查报告(内部资料),2010.

表 1 角闪石电子探针成分分析结果(%)

Table 1 Electron microprobe analyses of amphiboles (in percentage)

岩性 样品号	黑云黝帘角闪片岩			斜长角闪岩			
	SSL0-11			SSL1-4			
SiO <sub>2</sub>	52.77	51.66	53.24	45.51	43.16	42.54	44.14
TiO <sub>2</sub>	0.23	0.28	0.20	0.40	0.53	0.40	0.23
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.14	5.35	4.34	7.63	9.90	10.82	10.62
FeO	9.89	11.87	9.08	20.22	21.77	21.71	21.15
MnO	0.37	0.45	0.23	0.36	0.30	0.37	0.23
MgO	16.83	15.23	17.90	10.12	8.40	8.71	9.09
CaO	11.63	11.99	12.07	10.85	10.90	10.32	10.43
Na <sub>2</sub> O	0.55	0.69	0.64	0.91	1.07	1.24	1.16
K <sub>2</sub> O	0.29	0.66	0.10	0.56	0.79	0.58	0.41
<b>Total</b>	97.70	98.18	97.80	96.56	96.82	96.69	97.46
Si	7.500	7.419	7.534	6.965	6.670	6.571	6.706
Al <sup>IV</sup>	0.500	0.581	0.467	1.035	1.330	1.429	1.294
Al <sup>VI</sup>	0.361	0.325	0.257	0.342	0.474	0.541	0.607
Ti	0.025	0.030	0.021	0.046	0.062	0.047	0.026
Fe <sup>3+</sup>	0.853	0.746	0.820	0.510	0.395	0.360	0.472
Fe <sup>2+</sup>	0.323	0.680	0.255	2.078	2.419	2.445	2.215
Mn	0.045	0.055	0.028	0.047	0.039	0.048	0.030
Mg	3.566	3.261	3.776	2.309	1.935	2.006	2.059
Ca	1.771	1.845	1.830	1.779	1.805	1.708	1.698
Na	0.152	0.192	0.176	0.270	0.321	0.371	0.342
K	0.053	0.121	0.018	0.109	0.156	0.114	0.080
<b>Total</b>	15.147	15.254	15.180	15.490	15.605	15.640	15.528
BCa+BNa	1.828	1.904	1.843	1.669	1.677	1.554	1.591
BNa	0.057	0.059	0.014	0.000	0.000	0.000	0.000
TSi	7.500	7.419	7.534	6.965	6.670	6.571	6.706
Mg/(Mg <sup>2+</sup> +Fe <sup>2+</sup> )	0.917	0.828	0.937	0.526	0.445	0.451	0.482

注:分析单位:中国地质大学(北京)地学实验中心电子探针实验室;实验条件:加速电压 1 kV,电流 1×10<sup>-8</sup>A,束斑 1 μm,ZAF 修正法。下同。

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为 4.34 %~10.82 %, FeO 为 9.08 %~21.77 %, MnO 为 0.23 %~0.45 %, MgO 为 8.40 %~17.90 %。与典型的前寒武纪条带状铁建造(辽东弓长岭铁矿床)中角闪石相比发现,本区角闪石的 FeO 含量总体略低于弓长岭铁矿床<sup>[1]</sup>角闪石中的为 11.19%~43.39%。结合角闪石电子探针分析结果,以氧离子数 23 为基准,求得全部样品的阳离子系数(表 1),显示本区角闪石均为钙质角闪石(图 4)。根据角闪石的分类方案(Leake et al., 1997<sup>[12]</sup>)可知,本区所测定的围岩中的角闪石样品落在透闪石、镁角闪石、铁闪石区域。

## 2.2 黑云母

本区黑云母主要产出于新太古界鞍山群茨沟组中的二云片岩、黑云片岩、黑云黝帘角闪片岩、绿泥黑云片岩等围岩中,矿石中未见。镜下呈绿色,多色性明显,暗绿-浅黄,自形-半自形,板片状、鳞片状,可见一组极完全解理,正中突起,Ⅲ级中干涉色,平行消光,部分蚀变,异常干涉色。结合黑云母的电子探针分析结果并以氧为 11 计算阳离子数(表 2),黑云母中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量为 15.82 %~18.00 %,MgO 为 9.31 %~16.77 %,FeO 为 11.65 %~23.52 %;而弓长岭铁矿床围岩中的黑云母 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MgO、FeO 的含量依次



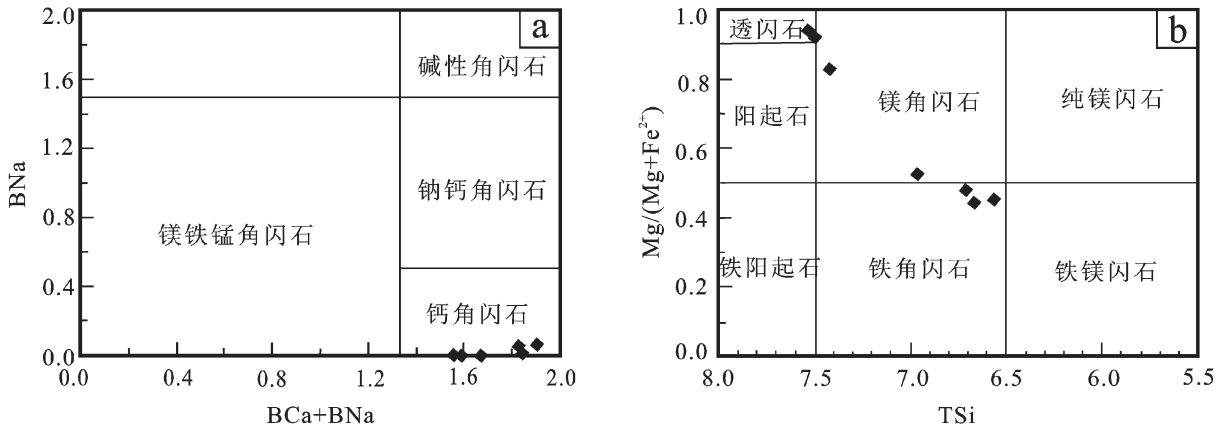


图 4 角闪石成分分类(底图据 Leake et al., 1997<sup>[12]</sup>)  
 Fig.4 Classification of amphiboles (after Leake et al., 1997<sup>[12]</sup>)

表 2 黑云母电子探针成分分析结果(%)  
 Table 2 Electron microprobe analyses of biotites (in percentage)

岩性	二云片岩			黑云片岩			黑云黝帘角闪片岩			黑云母石英片岩		
	SSL0-8-1	SSL0-8-2	SSL0-8-3	SSL0-12-1	SSL0-12-2	SSL0-12-3	SSL0-1-1-4	SSL0-1-1-5	SSL0-1-1-6	SSL2-7-1	SSL2-7-2	SSL2-7-3
SiO <sub>2</sub>	35.07	34.39	35.00	38.69	38.35	39.27	38.16	38.08	37.86	36.24	37.78	36.33
TiO <sub>2</sub>	2.05	2.06	1.89	1.03	1.27	1.32	1.49	1.03	1.11	0.31	0.17	0.28
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.83	17.45	16.89	17.08	16.47	15.82	17.25	16.91	17.52	17.54	16.80	18.00
FeO	23.52	23.07	23.52	11.83	11.77	11.65	13.37	12.94	12.99	16.63	15.69	16.98
MnO	0.17	0.36	0.26	0.22	0.05	0.05	0.22	0.32	0.23	0.14	0.12	0.00
MgO	9.67	9.31	9.77	16.33	16.07	16.50	15.07	15.63	14.96	14.49	15.37	16.77
CaO	0.06	0.12	0.09	0.01	0.00	0.04	0.02	0.07	0.14	0.06	0.03	0.00
Na <sub>2</sub> O	0.08	0.17	0.22	0.14	0.55	0.00	0.10	0.35	0.38	0.16	0.26	0.05
K <sub>2</sub> O	7.59	8.27	8.39	10.40	10.53	10.47	9.87	9.47	9.53	9.39	9.05	7.08
<b>Total</b>	95.05	95.21	96.02	95.73	95.05	95.12	95.55	94.78	94.72	94.96	95.27	95.47
Si	2.713	2.668	2.696	2.831	2.835	2.888	2.811	2.822	2.808	2.734	2.814	2.688
Al <sup>IV</sup>	1.287	1.332	1.304	1.169	1.165	1.113	1.189	1.178	1.192	1.266	1.187	1.312
Al <sup>VI</sup>	0.248	0.264	0.229	0.304	0.269	0.259	0.309	0.298	0.339	0.294	0.288	0.258
Ti	0.119	0.120	0.110	0.057	0.071	0.073	0.083	0.057	0.062	0.018	0.010	0.016
Fe <sup>3+</sup>	0.219	0.164	0.143	0.129	0.087	0.155	0.172	0.145	0.157	0.068	0.112	0.151
Fe <sup>2+</sup>	1.303	1.333	1.372	0.595	0.641	0.561	0.652	0.657	0.648	0.981	0.866	0.900
Mn	0.011	0.024	0.017	0.014	0.003	0.003	0.014	0.020	0.014	0.009	0.008	0.000
Mg	1.115	1.077	1.122	1.781	1.771	1.809	1.655	1.727	1.654	1.630	1.706	1.850
Ca	0.005	0.010	0.007	0.001	0.000	0.003	0.002	0.006	0.011	0.005	0.002	0.000
Na	0.012	0.026	0.033	0.020	0.079	0.000	0.014	0.050	0.055	0.023	0.038	0.007
K	0.749	0.819	0.824	0.971	0.993	0.982	0.928	0.895	0.902	0.904	0.860	0.668
<b>Total</b>	7.781	7.836	7.857	7.871	7.913	7.845	7.828	7.855	7.843	7.932	7.888	7.849
矿物定名	铁叶云母						铁质黑云母					

为 15.30%~18.26%、6.29%~12.65%、17.42%~26.09%<sup>[11]</sup>,可见弓长岭铁矿床围岩中的黑云母中的 FeO 含量明显偏高,MgO 的含量则偏低。

在黑云母的 Mg-(Al<sup>VI</sup>+Fe<sup>3+</sup>+Ti)-(Fe<sup>2+</sup>+Mn)分类图解<sup>[13]</sup>(图5)中,本区黑云母主要为铁质黑云母,少数样品落在铁叶云母区域;而弓长岭铁矿床围岩中的黑云母多为铁质黑云母,少量镁质黑云母<sup>[11,14]</sup>,反映了思山岭与弓长岭铁矿床围岩均处于富铁的环境中。

### 2.3 磁铁矿

本区磁铁矿主要产出于新太古界鞍山群茨沟组的条带状磁铁矿石岩中,在围岩中也有少量产出。由磁铁矿电子探针分析结果(表 3)可知,本区铁英岩中磁铁矿的 SiO<sub>2</sub> 含量为 0.00%~0.71%,TiO<sub>2</sub> 为 0.00%~0.16%,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为 0.00%~0.16%,MgO 为 0.00%~0.23%,FeO 为 30.78%~32.06%,平均 31.31%;Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为 67.56%~69.31%,平均 68.47%。弓长岭铁矿床中磁铁矿的 SiO<sub>2</sub>、TiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MgO、FeO、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的含量分别为 0.74%~1.84%、0.03%~0.06%、0.31%~0.33%、0.05%~0.09%、30.45%~30.79%、65.66%~67.93%<sup>[11]</sup>。由上可见两个矿区的磁铁矿的主要化学成分十分相近,反映其可能具有一定的共性。本区磁铁矿的 FeO 含量高于理论值(31.06%),Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量低于理论值(68.94%),这可能是磁铁矿在结晶过程中,混入了一定量的镁、铝成分所致,这一现象反映了在其形成过程中具有较低的氧逸度。

在不同的地质作用下,磁铁矿具有明显的专属性<sup>[15]</sup>,Fe 及其他主要元素的含量存在较大差异<sup>[16]</sup>,根据组分标型对比可以发现(表 4),本区磁铁矿与沉积变质型矿床磁铁矿成分符合,与其他类型铁矿床中磁铁矿成分相比<sup>[17]</sup>,本类型磁铁矿 TiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MnO、MgO 等杂质含量很低,总体含 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 FeO 比较高,以纯磁铁矿为特征。

## 3 元素地球化学

本文样品来自思山岭矿区的围岩和矿石,经过手标本及显微镜下挑选具有代表性的样品,进行的分析测试,经清洗、研磨、缩分的样品在玛瑙研钵里研制 200 目粉末进行了元素地球化学分析测试。主量及微量元素分析均在核工业北京地质研究院等离子光谱实验室完成,测试仪器分别为 XRF 和 ICP-MS。前者分析精度优于 0.1~1.0,其中 FeO 的含量用湿化法测试,精度优于 0.5%~1%;后者的溶液测量

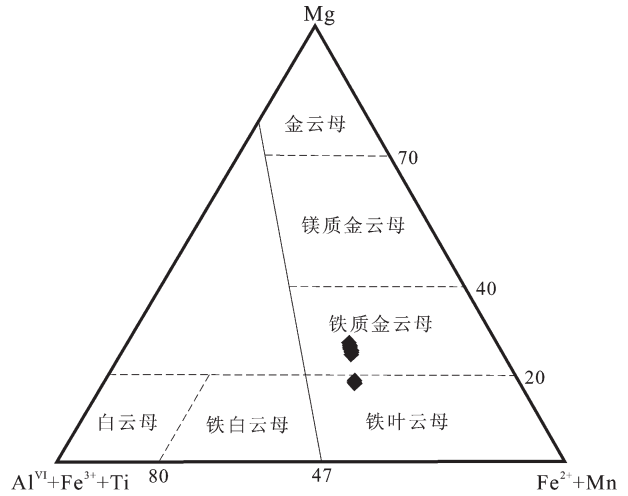


图 5 黑云母成分分类图(底图据 Foster, 1960<sup>[13]</sup>)  
Fig. 5 Classification of biotites (after Foster, 1960<sup>[13]</sup>)

检出限达 10~13 g/mL。

### 3.1 主量元素

如表 5 所示可知,围岩中 SiO<sub>2</sub> 含量为 49.15%~64.10%,TiO<sub>2</sub> 为 0.001%~0.91%,Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为 4.95%~10.37%,FeO 为 5.90%~10.50%,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为 0.17%~14.11%,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 为 0.01%~0.16%;而磁铁矿石岩中的 SiO<sub>2</sub>、TiO<sub>2</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、FeO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量分别为 53.09%~59.22%、<0.004%、17.43%~18%、15.25%~15.80%、0.029%~0.059%、0.0057%~0.31%,Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> 比值为 0.29~0.34,Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/FeO 比值为 1.10~1.18,SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 比值为 1003.7~1830.7。磁铁矿石岩中含量最多的化学成分是 SiO<sub>2</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、FeO,三者之和达 86.36%~92.45%,矿石 SiO<sub>2</sub> 含量与全铁含量呈反消长关系(图略)。TiO<sub>2</sub> 的含量均小于 0.004%,镜下未观察到含钛矿物表明矿石中的 Ti 主要以类质同象形式存在于磁铁矿中,而其他组分(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MnO、MgO、CaO、Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)的含量非常低,与围岩相比,条带状铁建造矿石明显经过了净化,与薄片观察到的极小铁矿分布于石英颗粒间的现象所给出的化学沉积物信息一致,反映了极少有碎屑物加入的化学沉积物,并具有高硅、低磷和铝特征,可能与火山有关的海相火山沉积产物有关<sup>[19]</sup>。

### 3.2 微量元素

思山岭矿床的微量元素含量见表 5,经原始地幔标准化的微量元素蛛网图见图 6。围岩中 Ga 含量为 1.44~18.5×10<sup>-6</sup>,平均值为 13.768×10<sup>-6</sup>;Co 含量为 0.434~64.7×10<sup>-6</sup>,平均值为 17.397×10<sup>-6</sup>;Ni 含量为

表 3 磁铁矿电子探针成分分析结果(%)  
Table 3 Electron microprobe analyses of magnetite (in percentage)

岩性 样品 号	条带状磁铁矿石英岩			条带状磁铁矿石英岩			条带状磁铁矿石英岩			条带状含云磁铁矿石英岩		
	SSL6 -1-1	SSL6 -1-2	SSL6 -1-3	SSL2 -9-1	SSL2 -9-2	SSL2 -9-3	SSL0 -10-1	SSL0 -10-2	SSL0 -10-3	SSL9 -4-1	SSL9 -4-2	SSL9 -4-3
SiO <sub>2</sub>	0.17	0.22	0.71	0.00	0.18	0.19	0.12	0.15	0.23	0.15	0.17	0.35
TiO <sub>2</sub>	0.00	0.00	0.08	0.05	0.04	0.09	0.06	0.16	0.00	0.04	0.08	0.00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.16	0.00	0.13	0.08	0.06	0.11	0.15	0.00	0.08	0.00	0.08	0.04
TFeO	93.85	93.68	92.85	92.18	93.01	92.47	92.85	93.28	92.98	93.68	92.04	92.20
MnO	0.11	0.00	0.14	0.06	0.00	0.00	0.10	0.00	0.09	0.00	0.00	0.15
MgO	0.06	0.09	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.23	0.00
CaO	0.00	0.00	0.10	0.00	0.07	0.00	0.02	0.00	0.03	0.13	0.03	0.08
NiO	0.00	0.41	0.18	0.00	0.21	0.22	0.00	0.00	0.20	0.00	0.19	0.00
<b>Total</b>	94.35	94.4	94.19	92.37	93.56	93.12	93.31	93.51	93.62	94	92.82	92.82
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	69.31	69.14	67.56	68.23	68.57	68.05	68.52	68.63	68.54	69.21	68.07	67.86
FeO	31.48	31.47	32.06	30.78	31.31	31.24	31.20	31.52	31.31	31.40	30.79	31.14
<b>Total</b>	101.29	101.33	100.96	99.21	100.44	99.94	100.16	100.47	100.48	100.93	99.64	99.62
Si	0.007	0.008	0.027	0.000	0.007	0.007	0.005	0.006	0.009	0.006	0.007	0.014
Ti	0.000	0.000	0.002	0.002	0.001	0.003	0.002	0.005	0.000	0.001	0.002	0.000
Al	0.007	0.000	0.006	0.004	0.003	0.005	0.007	0.000	0.004	0.000	0.004	0.002
Fe <sup>3+</sup>	1.980	1.977	1.933	1.993	1.978	1.972	1.981	1.979	1.976	1.986	1.976	1.971
Fe <sup>2+</sup>	1.000	1.000	1.019	1.000	1.004	1.006	1.002	1.010	1.003	1.002	0.993	1.005
Mn	0.004	0.000	0.005	0.002	0.000	0.000	0.003	0.000	0.003	0.000	0.000	0.005
Mg	0.003	0.005	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.013	0.000
Ca	0.000	0.000	0.004	0.000	0.003	0.000	0.001	0.000	0.001	0.005	0.001	0.003
Ni	0.000	0.013	0.006	0.000	0.007	0.007	0.000	0.000	0.006	0.000	0.006	0.000
<b>Total</b>	3.000	3.003	3.001	3.000	3.002	3.002	3.000	3.000	3.002	3.000	3.002	3.000

表 4 不同矿床类型磁铁矿化学成分对比(%)

Table 4 Comparison of some main components in different magnetites (in percentage)

矿床类型	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	TFe
岩浆型 <sup>[17]</sup>	5.95	2.00	0.22	1.82	47.66	32.90	80.56
火山岩型 <sup>[17-18]</sup>	1.10	0.37	0.24	0.68	67.91	27.61	95.52
接触交代型 <sup>[17]</sup>	0.22	0.89	0.28	0.59	67.43	28.71	96.14
热液交代型 <sup>[17]</sup>	0.15	0.51	0.21	4.52	---	---	90.54
夕卡岩型 <sup>[17-18]</sup>	0.19	0.90	1.48	3.17	65.34	25.70	91.04
沉积变质型 <sup>[17]</sup>	0.09	0.41	0.04	0.22	68.11	29.45	97.56
思山岭铁矿床	0.05	0.07	0.05	0.04	68.47	31.31	99.78

注: ---表示缺少原始数据。

1.96~211×10<sup>-6</sup>,平均值为 47.32×10<sup>-6</sup>;V 含量为 0.82~195×10<sup>-6</sup>,平均值为 58.24×10<sup>-6</sup>;Cu 含量为 0.287~151×10<sup>-6</sup>,平均值为 33.66×10<sup>-6</sup>;Zn 含量为 8.12~131×10<sup>-6</sup>,平均值为 59.46×10<sup>-6</sup>。矿石中的 Ga、Co、

Ni、V、Cu、Zn 的平均值分别为 1.113×10<sup>-6</sup>、2.532×10<sup>-6</sup>、10.49×10<sup>-6</sup>、31.54×10<sup>-6</sup>、4.155×10<sup>-6</sup>、8.35×10<sup>-6</sup>。从表 5 和图 6 中可以明显看出围岩样品具有 U、La、Ce、Nd 正异常,Nb、Ti、Sr、P 呈负异常; 矿石具 U、



表 5 思山岭铁围岩、矿石与其他地区矿石的主量(%)、微量及稀土元素含量(10<sup>-6</sup>)  
 Table 5 Major elements (%), trace elements and ores in the Sishanling iron deposit and other main BIFs

岩(矿)石 岩性 样品编号	围岩				矿石				其他矿区矿石					
	含铁绢云 片岩 SSL0-4	斜长 角闪岩 SSL1-4	斜长角闪 岩* 斜长角闪 岩* 斜长角闪 岩*	斜长角闪 岩* 斜长角闪 岩* 斜长角闪 岩*	斜长角闪 岩* 斜长角闪 岩* 斜长角闪 岩*	斜长角闪 岩* 斜长角闪 岩* 斜长角闪 岩*	斜长角闪 岩* 斜长角闪 岩* 斜长角闪 岩*	斜长角闪 岩* 斜长角闪 岩* 斜长角闪 岩*	赤铁矿 <sup>+</sup> SSL1-5	赤铁矿 <sup>+</sup> SS1-9-3	赤铁矿 <sup>+</sup> SS1-1-8	赤铁矿 <sup>+</sup> 鞍山地区	赤铁矿 <sup>+</sup> 山东韩旺	赤铁矿 <sup>+</sup> 冀东迁安
SiO <sub>2</sub>	49.94	49.15	48.13	50.05	50.89	50.05	59.22	53.09	52.8	40.23	46.21	44.62	44.62	44.62
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.17	10.77	15.39	14.69	14.49	14.49	0.059	0.029	0.6	0.41	0.28	0.7	0.7	0.7
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.46	7.59	4.1	2.81	2.92	2.92	17.43	18	41.2	---	---	34.02	34.02	34.02
FeO	9.8	10.5	6.2	9.68	7.14	7.14	15.8	15.25	1.5	---	---	16.98	16.98	16.98
TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21.26	18.09	10.3	12.49	10.06	10.06	33.23	33.25	46.1	58.42	52.39	52.89	52.89	52.89
CaO	0.08	8.05	12.45	9.5	8.23	8.23	0.31	3.56	0.1	1.88	1.45	0.88	0.88	0.88
MgO	24.31	6.09	8.46	8.3	9.33	9.33	6.94	7.06	0.4	1.61	1.89	1.32	1.32	1.32
Na <sub>2</sub> O	0.11	2.67	1.97	2.37	2.94	2.94	0.059	0.059	0.1	0.07	0.04	0.13	0.13	0.13
K <sub>2</sub> O	0.011	1.92	0.63	0.36	0.01	0.01	0.01	0.011	<0.01	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03
TiO <sub>2</sub>	0.001	0.91	0.41	0.46	0.5	0.5	<0.004	<0.004	<0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
MnO	0.075	0.27	0.18	0.22	0.24	0.24	0.026	0.11	0	0.08	0.09	0.1	0.1	0.1
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.02	0.16	0.03	0.07	0.03	0.03	0.057	0.31	0.04	0.06	0.06	0.17	0.17	0.17
LOI	3.56	1.81	4.47	3.98	1.45	1.45	<0.10	2.47	---	<0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Sc	0.334	28.1	43	49.6	47.3	47.3	2.65	0.383	1.1	1.31	0.8	0.31	0.31	0.31
Ti	5.995	5455.45	2463.95	2769.69	3021.48	3021.48	<5.995	<5.995	<5.995	119.9	119.9	119.9	119.9	119.9
Rb	0.084	81.6	96.6	108.9	182.9	182.9	0.357	0.224	0.9	1	1.18	2.28	2.28	2.28
Sr	1.02	181	158	169	136	136	4.47	12.1	1.8	10.39	12.09	11.02	11.02	11.02
Ba	0.099	632	69	131	300	300	29.2	4	36.3	6.53	12.39	41.27	41.27	41.27
Cr	4.02	469	597.4	676.9	649.1	649.1	2.06	1.94	3.9	23.8	8.53	5.92	5.92	5.92
Co	0.434	64.7	46	47.4	43.9	43.9	0.338	0.508	1	3.31	1.06	1.7	1.7	1.7
Ni	1.96	211	131.7	136.3	136.3	136.3	7.01	7.17	5.2	17.57	5.72	4.58	4.58	4.58
V	0.822	195	176	177	210	210	1.36	0.963	13.2	8.54	13.8	14.4	14.4	14.4
Cu	0.287	151	45.1	98.3	11.2	11.2	0.34	0.624	10.3	62.19	11.77	12.73	12.73	12.73
Zn	37.7	131	---	---	---	---	6.99	6.47	6.8	41.92	13.8	14.4	14.4	14.4
Pb	0.274	18.7	---	---	---	---	3.18	0.891	1.3	1.92	1.93	1.56	1.56	1.56
Zr	2.11	219	91	39	32	32	13.2	4.38	0.6	1.39	3.83	3.21	3.21	3.21
Hf	0.037	5.77	2.32	1.14	1.16	1.16	0.343	0.078	0.01	0.05	0.09	0.09	0.09	0.09
Ga	1.44	13.7	---	---	---	---	2.55	0.404	0.7	1.51	1.87	1.75	1.75	1.75
Nb	0.013	7.39	1.3	1.6	3.2	3.2	0.411	0.047	0.1	0.19	0.45	0.15	0.15	0.15
Ta	0.013	0.557	0.5	0.19	0.55	0.55	0.074	0.004	0.04	0.05	0.06	0.05	0.05	0.05
Th	0.085	8.13	1.88	0.74	3.03	3.03	0.02	0.034	0.1	0.11	0.23	0.09	0.09	0.09
U	0.192	2.57	0.12	0.16	0.84	0.84	0.189	0.065	0.8	0.15	0.15	0.05	0.05	0.05
La	0.505	24.8	2.5	2.2	2.9	2.9	1.79	1.76	1.4	0.97	2.93	1.49	1.49	1.49
Ce	0.783	44.8	5.8	5.2	6.4	6.4	1.91	2.27	2.4	1.8	4.39	2.89	2.89	2.89
Pr	0.103	5.16	0.75	0.79	0.92	0.92	0.177	0.268	0.3	0.22	0.51	0.32	0.32	0.32
Nd	0.591	22	3.6	3.68	4.49	4.49	0.844	1.28	1.4	0.97	1.88	1.53	1.53	1.53
Sm	0.203	3.96	1.05	1.22	1.34	1.34	0.114	0.222	0.4	0.25	0.33	0.43	0.43	0.43
Eu	0.122	1.25	0.47	0.55	0.47	0.47	0.126	0.3	0.3	0.13	0.17	0.24	0.24	0.24

续表 5

岩(矿)石	围岩				矿 石		其他矿区矿石							
	含铁绢云 片岩	斜长 角闪岩	斜长角闪 岩*	斜长角闪 岩*	赤铁矿*	条带状云磁 铁石英岩	赤铁矿*	条带状磁 铁石英岩	赤铁矿*	条带状磁 铁石英岩	赤铁矿*	条带状磁 铁石英岩	赤铁矿*	条带状磁 铁石英岩
样品编号	SSL0-4	SSL1-4	SSL2-7	SSL1-5	SSL1-5	SSL1-8	SSL1-8	SSL1-8	SSL1-8	SSL1-8	SSL1-8	SSL1-8	SSL1-8	SSL1-8
Gd	0.301	3.7	3.36	1.41	0.101	0.175	0.316	0.4	0.41	0.44	0.62	0.4	0.41	0.44
Tb	0.084	0.688	0.896	0.34	0.018	0.035	0.051	0.1	0.07	0.07	0.1	0.1	0.07	0.1
Dy	0.42	3.52	5.93	1.86	0.018	0.124	0.212	0.6	0.49	0.45	0.63	0.6	0.49	0.45
Ho	0.091	0.721	1.31	0.4	0.038	0.053	0.09	0.1	0.12	0.12	0.14	0.1	0.12	0.12
Er	0.262	2.28	4.45	1.22	0.156	0.17	0.288	0.4	0.38	0.37	0.42	0.4	0.38	0.37
Tm	0.043	0.316	0.793	0.2	0.023	0.026	0.038	0.1	0.06	0.06	0.06	0.1	0.06	0.06
Yb	0.269	2.26	5.76	1.29	0.206	0.202	0.331	0.4	0.4	0.36	0.38	0.4	0.4	0.36
Lu	0.044	0.33	0.884	0.2	0.042	0.04	0.056	0.1	0.06	0.06	0.06	0.1	0.06	0.06
Y	3.42	19.1	37	---	1.29	2.83	4.13	4.2	3.99	4.33	5.25	4.2	3.99	4.33
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiO <sub>2</sub>	0.23	0.15	0.09	0.09	0.18	0.29	0.34	0.78	---	---	0.76	0.78	---	---
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /FeO	1.17	0.72	0.95	0.66	20.29	1.10	1.18	27.47	---	---	2.00	27.47	---	---
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	293.76	4.56	5.36	3.13	4.60	1003.73	1830.69	88.00	98.12	165.04	63.74	88.00	98.12	165.04
Sr/Ba	10.30	0.29	0.01	2.29	1.34	0.15	3.03	0.05	1.59	0.98	0.27	0.05	1.59	0.98
Ti/V	7.30	28.92	189.29	14.00	3.19	17.65	24.92	---	14.39	---	---	---	14.39	---
Ni/Co	4.52	3.26	0.57	2.86	2.56	20.74	14.11	5.20	5.31	5.40	2.69	5.20	5.31	5.40
Zr/Hf	57.03	37.95	18.24	39.22	37.32	41.38	56.15	60.00	27.80	42.56	35.67	60.00	27.80	42.56
Th/U	0.44	3.16	0.29	15.67	0.71	0.11	0.52	0.13	0.73	1.53	1.80	0.13	0.73	1.53
Zr/Nb	17.88	29.63	3.44	70.00	31.14	249.06	93.19	6.00	7.32	8.51	21.40	6.00	7.32	8.51
Y/Nb	28.98	2.58	0.65	---	3.14	53.40	87.87	42.00	21.00	9.62	35.00	42.00	21.00	9.62
La/Nb	4.28	3.36	0.19	1.92	3.24	33.77	37.45	14.00	5.11	6.51	9.93	14.00	5.11	6.51
LREE	2.31	101.97	51.09	14.17	4.35	4.98	6.10	6.20	4.34	10.21	6.90	6.20	4.34	10.21
HREE	1.51	13.82	23.38	6.92	0.71	0.91	1.52	2.20	1.99	1.93	2.41	2.20	1.99	1.93
LREE/HREE	1.52	7.38	2.18	2.05	6.14	5.46	4.02	2.82	2.18	5.29	2.86	2.82	2.18	5.29
ΣREE	3.82	115.79	74.47	21.09	5.05	5.89	7.62	8.40	6.33	12.14	9.31	8.40	6.33	12.14
Eu/Sm	0.60	0.32	0.15	0.45	1.00	0.94	1.35	0.75	0.52	0.52	0.56	0.75	0.52	0.52
La/Yb	1.88	10.97	1.89	1.94	6.46	8.86	5.32	3.50	2.43	8.14	3.92	3.50	2.43	8.14
Pr/Yb	0.38	2.28	0.48	0.58	0.94	0.88	0.81	0.75	0.55	1.42	0.84	0.75	0.55	1.42
Sm/Nd	0.34	0.18	0.28	0.29	0.17	0.16	0.17	0.29	0.26	0.18	0.28	0.29	0.26	0.18
Eu/Eu*	2.23	1.54	0.65	1.77	4.93	3.78	5.15	3.52	1.81	2.05	2.11	3.52	1.81	2.05
Ce/Ce*	0.79	0.91	0.96	0.97	0.85	0.72	0.75	0.85	0.90	0.82	0.97	0.85	0.90	0.82
Y/Ho	37.58	26.49	28.24	---	33.95	53.40	45.89	42.00	33.25	36.08	37.50	42.00	33.25	36.08
La/La*	104.03	1.43	0.99	1.54	1.32	4.53	2.97	1.90	1.92	1.23	2.11	1.90	1.92	1.23
Y/Y*	1.37	0.93	1.04	---	1.45	2.08	1.82	1.32	1.28	1.45	1.38	1.32	1.28	1.45

注:由核工业北京地质研究院等离子光谱实验室分析。围岩部分\*表示缺少原始数据。---

李志红<sup>[2]</sup>, 2007; 沈其韩等<sup>[28-29]</sup>, 2009, 2011。\*代表引用数据,引自刘军等<sup>[30]</sup>, 2010。鞍本地区赤铁矿,山东韩旺,冀东迁安,五台柏枝岩矿床矿石数据分别引自

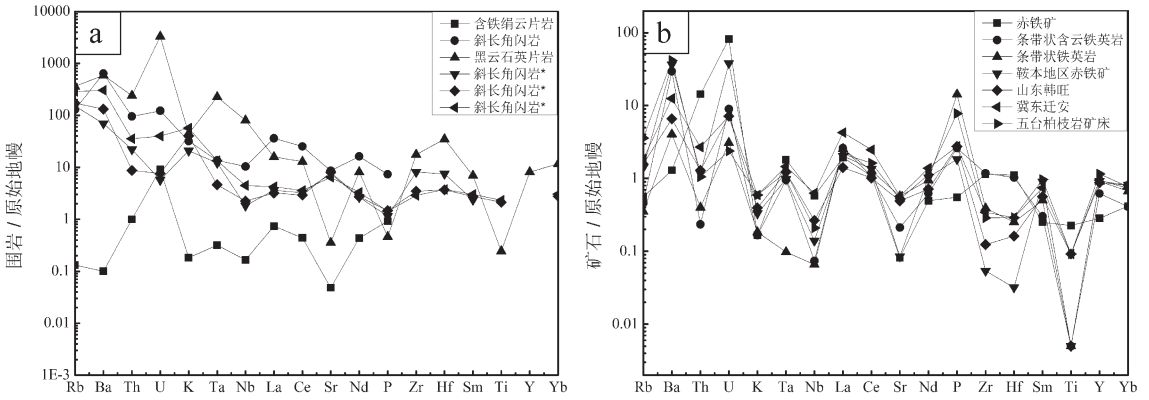


图 6 思山岭铁矿围岩(a)与矿石(包括其他矿区矿石,b)原始地幔标准化微量元素蛛网图(标准化数据据 Sun et al., 1989<sup>[11]</sup>)  
 Fig. 6 Primitive mantle normalized trace element spidergram of wall rocks (a) and ores (including other main BIFs, b) in the Sishanling ore deposit (normalized values after Sun et al., 1989<sup>[11]</sup>)

La、Ce、P、Sm 正异常, Th、K、Nb、Sr、Hf、Ti 负异常。

### 3.3 稀土元素

思山岭条带状铁矿床围岩和矿石的稀土元素分析结果见表 5, La、Ce、Eu、Y 的异常分别用  $La/La^* = La_{PAAS}/(3Pr_{PAAS} - 2Nd_{PAAS})$ 、 $Ce/Ce^* = Ce_{PAAS}/(2Pr_{PAAS} - Nd_{PAAS})$ 、 $Eu/Eu^* = 2Eu_{PAAS}/(Sm_{PAAS} + Nd_{PAAS})$ 、 $Y/Y^* = 2Y_{PAAS}/(Dy_{PAAS} + Ho_{PAAS})$  来计算<sup>[20]</sup>。经 PAAS (post Archean Australian shale)<sup>[21]</sup> 标准化后的 REY 配分曲线如图 7 所示。由表 5 和图 7-b 可知, 思山岭铁矿石的稀土元素总量较低, 为  $5.05 \times 10^{-6} \sim 7.62 \times 10^{-6}$ , 平均为  $6.19 \times 10^{-6}$ 。从图 7-b 上看, 思山岭条带状铁矿样品经 PAAS 标准化后呈现非常一致的稀土配分曲线, 其特征是具轻稀土元素相对亏损, 重稀土相对富集; 无明显 Ce 异常,  $Ce/Ce^* = 0.72 \sim 0.85$ ; 具强烈的 Eu

正异常,  $Eu/Eu^* = 3.78 \sim 5.15$ 。由图 7 可见 Y 的正异常,  $Y/Y^*$  变化范围为 1.45~2.08,  $Y/Ho$  比值的变化范围为 33.95~53.40, 以上这些特征与世界许多地区的 BIF 特征一致<sup>[22-29]</sup>, 均属于早前寒武纪海洋化学沉积的产物。

## 4 讨论

### 4.1 建造类型

通过对手标本和薄片的仔细观察, 磁铁矿石岩矿物共生组合可分为石英+方解石+磁铁矿, 石英+白云母+磁铁矿以及石英+绿泥石+磁铁矿。前人研究表明, 不同地区不同时代的铁建造由于其原岩建造以及后期叠加的变质作用的不同, 造成了岩石矿物组合的差异。根据前寒武纪不同代表性的 BIF 的

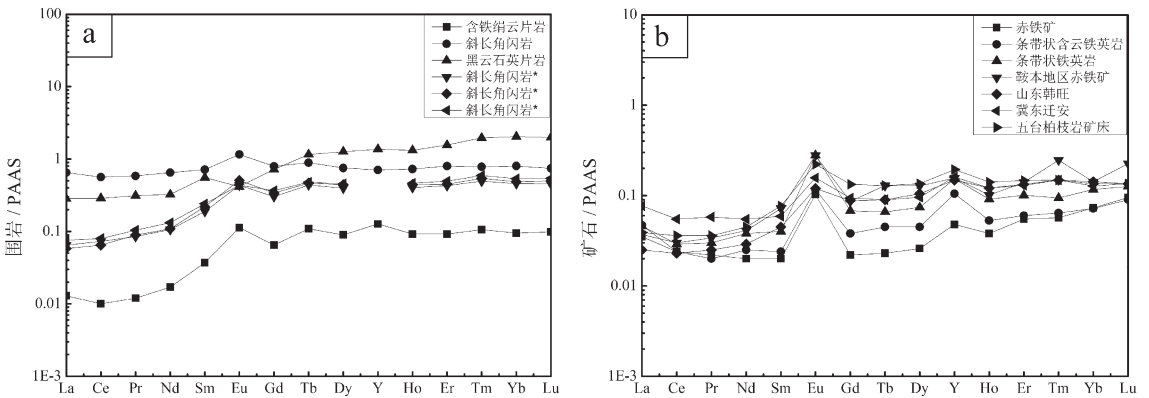


图 7 思山岭矿床围岩(a)与矿石(包括其他矿区矿石,b)稀土元素标准化配分曲线  
 (标准化数据据 McLennan, 1989<sup>[21]</sup>)

Fig.7 REE patterns of wall rocks (a) and ores (including other main BIFs, b) in the Sishanling ore deposit (normalized values after McLennan, 1989<sup>[21]</sup>)

特征,其沉积相主要有氧化物相、硅酸盐相以及少量的碳酸盐相<sup>[32]</sup>。对比发现(表6),本区属氧化物相-硅酸盐相。思山岭铁矿围岩中角闪石的( $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ )- $\text{TiO}_2$ 和 $\text{Ti}-\text{Al}^{\text{IV}}$ 关系图解(图8)显示本区测定的角闪石均一致处于低角闪岩相区。根据岩性和岩石化学特征,采用KA图解<sup>[8]</sup>和AFM图解<sup>[33]</sup>对围岩进行原岩恢复,围岩经原岩恢复之后显示为火山岩和泥质-泥砂质沉积岩(图9-a),变质火成岩从拉斑玄武岩向钙碱性火山岩演化(图9-b)。一般认为在低于角闪岩相的变质作用过程中,稀土元素不会发生明显的迁移<sup>[36]</sup>,可用于示踪岩石成岩环境和演化。Wilson<sup>[37]</sup>对东非裂谷和埃塞俄比亚裂谷中的玄武岩的 $\text{Zr}/\text{Nb}$ 比值研究表明来自亏损软流圈的地幔源的 $\text{Zr}/\text{Nb}$ 比值约为25,而高度富集地幔源或大量地壳物质混染的玄武岩 $\text{Zr}/\text{Nb}$ 比值约为6.6。斜长角闪岩 $\text{Zr}/\text{Nb}=10\sim 70$ 、平均值为33.53;含铁绢云片岩 $\text{Zr}/\text{Nb}=17.9$ ,表明变质火成岩具有亏损地幔源的特征。Condie<sup>[38]</sup>认为以 $\text{La}/\text{Nb}=1.4$ 为界,洋中脊玄武岩、洋岛玄武岩和大洋玄武岩的 $\text{La}/\text{Nb}<1.4$ , $\text{Ni}>30\times 10^{-6}$ ,岛弧玄武岩的 $\text{La}/\text{Nb}$ 的值大于1.4,本区茨沟组基性变质火山岩 $\text{La}/\text{Nb}$ 值分布于0.15~4.28,多数小于1.4<sup>[30]</sup>, $\text{Ni}>30\times 10^{-6}$ ,表明具有大洋中脊玄武岩的特点。前人对弓长岭铁矿二矿区鞍山群茨沟组斜长角闪岩原岩恢复,同样认为茨沟组斜长角闪岩属于大洋中脊拉斑玄武岩<sup>[30,34]</sup>。历来研究者们为恢复鞍本地区含铁建造产出环境做过大量工作,但得出的认识却各有不同。万渝生(1993)<sup>[39]</sup>在对弓长岭二矿区研究后,在认为太古宙末期大陆板块已具足够的规模和厚度且地幔对流的水平分量已足够大的前提下,结合区域地质特点,认为此矿区含铁岩系可能形成于弧后-边缘盆地构造环境;沈保丰等(1994)<sup>[4]</sup>

对铁建造中火山岩系和沉积岩系进行分析,结果表明变质火成岩具有双峰态火山岩系的特点,形成于岛弧和大陆活动边缘,而沉积岩系具有弧间盆地火山碎屑岩和碎屑岩的特点,在此基础上,认为鞍本地区原岩建造形成的构造环境为类似于现代岛弧向弧后扩张盆地演化的大陆边缘裂谷;胡桂明等(1998)<sup>[2]</sup>则在通过对鞍本地区南北分带的地质特征和火山岩系成分分析的基础上,认为鞍本地体早、晚绿岩带之间具有继承和演化的关系,且原岩建造特征具有岛弧环境的特点。综合以上信息和表6可知,华北陆块前寒武纪铁建造沉积相主要为氧化物相,部分为硅酸盐相,也出现了硅酸盐相铁英岩中伴生的碳酸盐矿物,具有混合相的特点<sup>[1]</sup>;由古太古代高角闪岩相-麻粒岩相、中太古代麻粒岩相到新元古代低角闪岩相,变质程度显示出整体下降的趋势;综合前人研究成果<sup>[1]</sup>,根据时代划分,中国铁建造最为发育且储量最多的应为新太古代,其次为中太古代,古太古代规模仅达到中等,而古元古代铁建造相比于太古宙,规模储量均较小;思山岭铁矿原岩建造应为基性火山岩-泥砂岩-硅铁质沉积建造,规模储量可达到大型,符合华北陆块鞍山岩群新太古代铁建造的特点。

#### 4.2 成矿机制

条带状铁建造的一些参数能够判别沉积物源和成因信息。本区磁铁石英岩中 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 的比值为0.29~0.34, $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ 比值变化范围是1.10~1.18, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值范围为1103.73~1830.69。一般认为正常沉积变质铁矿的 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值小于10,火山沉积变质铁矿应大于10<sup>[29]</sup>;火山岩和海相沉积物的 $\text{Sr}/\text{Ba}$ 比值大于1,陆源沉积岩的 $\text{Sr}/\text{Ba}$ 值小于1,思山岭条带状磁铁石英岩 $\text{Sr}/\text{Ba}$ 值为0.15~3.03,平均

表6 华北陆块前寒武纪不同地区与不同时代代表性条带状铁建造特征

Table 6 Characteristics of Precambrian banded iron formations in North China platform

铁建造名称	时代	铁英岩主要矿物	铁英岩次要矿物	变质岩石组合	原岩建造	沉积相	变质等级
鞍山岩群铁建造(弓长岭铁矿)	新太古代	磁铁矿、石英	镁铁闪石、透闪石	斜长角闪岩+黑云变粒岩+云母石英片岩	基性火山岩-中酸性杂砂岩(过渡为泥砂岩)-硅铁质沉积建造	氧化物相-硅酸盐相	绿片岩相-低角闪岩相
山西吕梁群铁建造	元古宙	磁铁矿、赤铁矿、石英、铁白云石、镁铁闪石	绿泥石、铁滑石、黑硬绿泥石	绢云千枚岩+绿泥片岩+变质石英砂岩+铁英岩	泥质-泥砂质-硅铁质沉积建造	碳酸盐相-硅酸盐相	
冀东迁安群铁建造	中太古代	磁铁矿、石英、紫苏辉石、(次)透辉石	角闪石、黑云母、石榴子石、磷灰石、斜长石	二辉斜长片麻岩+(石榴)黑云紫苏斜长片麻岩+夕线斜长片麻岩+铁英岩	基性火山岩-中酸性杂砂岩-泥质质-硅铁质沉积建造	氧化物相-硅酸盐相	麻粒岩相
冀东曹庄岩群铁建造	古太古代	磁铁矿、石英、镁铁闪石	阳起石、普通角闪石	斜长角闪岩+铬云母石英岩+钙硅酸盐+夕线斜长片麻岩+铁英岩	基性火山岩-泥砂岩-不纯碳酸盐-硅铁质沉积建造	氧化物相	高角闪岩相-麻粒岩相

注:资料引自沈其韩,1998<sup>[1]</sup>。

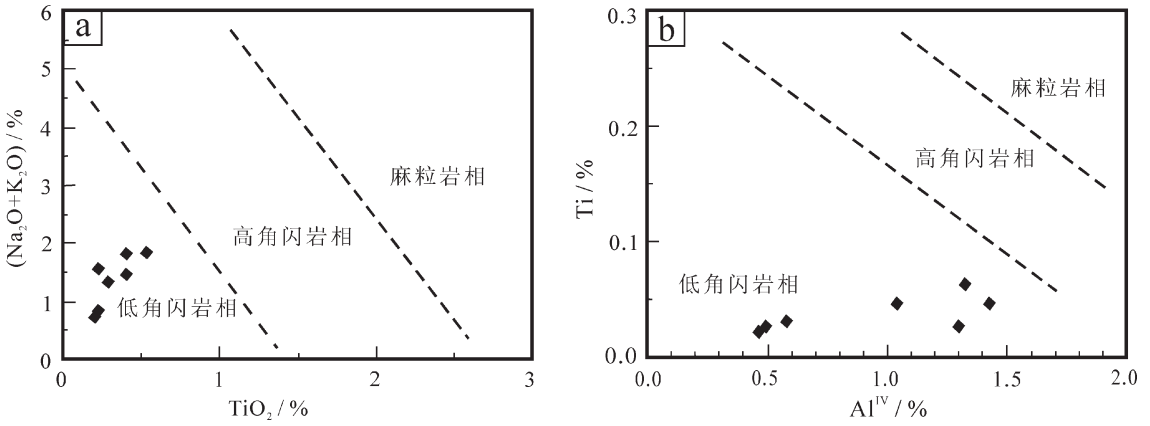


图 8 角闪石中  $TiO_2-Na_2O+K_2O$  关系图解和  $Al^{IV}-Ti$  关系图解(底图据沈其韩等, 2004<sup>[35]</sup>)  
 Fig.8  $TiO_2-Na_2O+K_2O$  and  $Al^{IV}-Ti$  diagrams for amphiboles (after Shen et al., 2004<sup>[35]</sup>)

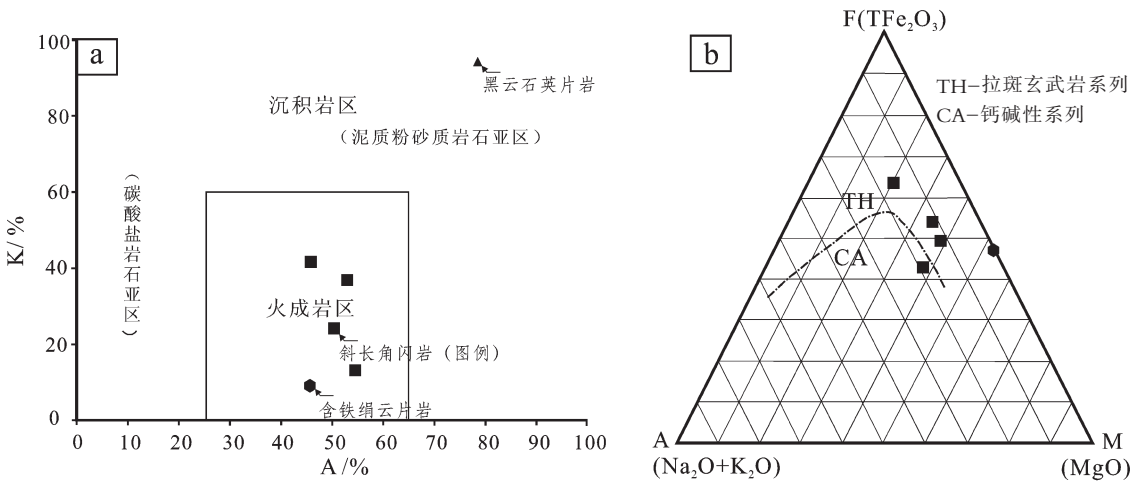


图 9 思山岭铁矿围岩 KA 图解(a)与变质火山岩 AFM 图解(b)(底图分别据周世泰, 1994<sup>[8]</sup>; Irvine, 1971<sup>[33]</sup>)  
 $K=K_2O/(Na_2O+K_2O) \times 100\%$ ;  $A=Al_2O_3/(Al_2O_3+CaO+Na_2O+K_2O) \times 100\%$   
 $A=(Na_2O+K_2O)$ ;  $F=(Fe_2O_3+FeO)$ ;  $M=MgO$ ;  
 Fig.9 KA diagram of wall rocks (a) and AFM graph for metamorphic volcanic rocks of the Sishanling ore deposit  
 (b) (after Zhou, 1994<sup>[8]</sup>; Irvine, 1971<sup>[33]</sup>)

为 1.59; Плаксенко 等认为<sup>[40]</sup>, 在铁质页岩中, Ti、V 含量的平均比值为 10.9~1.33, 在火山建造中则为 13~85, 思山岭铁矿磁铁矿石岩 Ti/V 比值为 17.65~24.92, 平均为 21.29。结合其他化学特征, 本区含铁建造源岩应为具有海相沉积特征的火山沉积建造, 后期经历了区域变质作用。

思山岭铁矿铁英岩的 REY 配分模式为轻稀土亏损、重稀土富集、轻微或无明显 Ce 负异常、具明显的 La、Eu、Y 正异常, 与华北陆块其他地区的 BIF 配分曲线基本一致。Eu 正异常是高温海底热液的特征, 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<sup>[41]</sup>, 李志红等<sup>[26-27]</sup>对鞍本地区的条带状铁

矿石 Fe 同位素研究表明 Fe 同位素成分与 Eu 异常具有相关性, 直接证实了鞍本地区铁质来源与海底火山热液活动有关。Y<sup>3+</sup>和 Ho<sup>3+</sup>具有相近的离子半径而被认为具相近的地球化学行为, 由于表层络合能力的不同, 使得 Ho 从海水中沉淀速率比 Y 约高 2 倍, Y/Ho 比值成为区别海相和非海相沉积环境的有用指标<sup>[42]</sup>。本区 Y/Ho 值在 33.95~53.40, 与海水中的 Y/Ho 比值(44~74)接近, 与高温流体 Y/Ho 比值(52~55)也有相近之处<sup>[43]</sup>, 而且 Y 的正异常也是海水本身的特征<sup>[44-45]</sup>。此外, 海底热流体及其沉积物的稀土元素组成和变化特征, 可以反映热水系统水-岩相互作用的信息<sup>[46]</sup>, 对高温热液和海水以 1:100 混合



实验得出了 REE 配分曲线显示 Eu 正异常、LREE 亏损、HREE 富集以及 La 正异常<sup>[47]</sup>,与思山岭铁建造稀土元素特征一致。高 Ni/Co 比值是深源的特征<sup>[48]</sup>,根据本区所测得磁铁矿具有高 Ni,低 Co 的特点(数据未发表),其 Ni/Co 比值均大于 1,说明其成矿物质来源与深部有关。前人得出鞍山本溪地区 6 个矿床采集的 26 个条带状铁矿石中同生硫化物的硫同位素值  $\delta^{34}\text{S}$  均为小正值或小负值<sup>[49]</sup>,具有未分异的陨石硫的特征,表明物质来源于地幔。澳大利亚 Hamersley 和加拿大的 Michipicoten 的 BIF 的 Nd 同位素也表明铁来源于太古宙大洋中脊的热液循环<sup>[48]</sup>。综上信息表明成矿物质来源于幔源火山热液和海水的混合溶液。

## 5 结 论

(1)通过矿物化学成分研究发现,思山岭铁矿的角闪石可分为透闪石、镁角闪石、铁闪石;黑云母主要为铁质黑云母,少量铁叶黑云母;磁铁矿以纯磁铁矿为特征。本区铁建造沉积相属氧化物相-硅酸盐相,变质等级为低角闪岩相,为基性火山岩-泥砂岩-硅铁质沉积建造。

(2)变质火成岩具有大洋中脊拉斑玄武岩的特点。思山岭矿床成矿物质与幔源火山热液和海水的混合溶液密切相关,为高温火山热液或火山喷气带来的硅铁质溶于海水中,在特定的物理化学条件下经化学沉积而成。与其他地区 BIF 矿床相比,研究区的高温热液流体对于海水的相对贡献量较多。

**致谢:**感谢中国地质大学(北京)地质实验中心电子探针实验室、核工业北京地质研究所等离子质谱实验室工作人员对论文中样品进行的测试分析,感谢中国地质科学院矿产资源研究所毛景文教授、李厚民研究员以及中国地质大学地球科学与资源学院申俊峰教授在论文完成过程中给予的指导和帮助,感谢审稿人提出的修改意见。

## 参考文献(References):

[1] 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]//程裕禄. 华北地台早前寒武纪地质研究论文集. 北京:地质出版社,1998:83-91.  
Shen Qihan. Geology character and formation conditions of early Precambrian BIFs in Huabei Craton [C]//Cheng Yuqi. Early Precambrian Geology Study on Huabei Craton. Beijing:Geological Publishing House, 1998:83-91(in Chinese with English abstract).

[2] 胡桂明,王守伦,谢坤一,等. 华北陆台缘地体构造和铁金矿产 [M]. 北京:地质出版社,1998:34-88  
Hu Guiming, Wang Shoulun, Xie Kunyi, et al. Terrane tectonics and metallogenetic division of iron and gold deposit in north margin of the north China platform [M]. Beijing:Geological Publishing House, 1998:34-88(in Chinese with English abstract).

[3] Gross G A. Geology of iron deposits in Canada [A]. General Geology and Evaluation of Deposits [C]. Geol. Surv. Can. Rep., 1965, 22:181.

[4] Gross G A. Tectonic systems and the deposition of iron-formation [J]. Precambrian Res., 1983, 30:63-80.

[5] Veizer J. Geologic evolution of the Archean - Early Proterozoic Earth [A]. Schopf J W. Earth's Earliest Biosphere [C]. Princeton: Princeton University Press, 1983:240-259.

[6] 沈保丰,翟安民,陈文明,等. 中国前寒武纪成矿作用 [M]. 北京:地质出版社,2006:45-71.  
Shen Baofeng, Zhai Anmin, Chen Wenmin, et al. The Precambrian mineralization of China [M]. Beijing:Geological Publishing House, 2006:45-71(in Chinese with English abstract).

[7] 李伟源. 古全球变化与非等时韵律沉积及前寒武纪条带状铁建造形成的终止[J]. 地学前缘, 1997, 4(1/2):101-104.  
Li Weiyuan. The past global environment and change in relationship with unperiodic rhythmic deposition and the cease from forming precambrian banded iron formations [J]. Earth Science Frontiers, 1997, 4(1/2):101-114(in Chinese with English abstract).

[8] 周世泰. 鞍山—本溪地区条带状铁矿地质[M]. 北京:地质出版社,1994:1-278.  
Zhou Shitai. Geology of Banded Iron Formation in Anshan-Benxi Area [M]. Beijing:Geological Publishing House, 1994:1-278 (in Chinese with English abstract).

[9] 沈保丰,骆辉,李双保,等. 华北陆台太古宙绿岩带地质及成矿 [M]. 北京:地质出版社,1994:1-202.  
Shen Baofeng, Luo Hui, Li Shuangbao, et al. Geology and Metallization of Archean Greenstone Belts in North China Platform [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994:1-202(in Chinese with English abstract).

[10] 吕广峻,李鑫磊. 辽宁省本溪市思山岭铁矿地质特征浅析[J]. 硅谷, 2011:121-122.  
Lv Guangjun, Li Xinlei. The Analysis in geological feature of Sishanling iron deposit in Benxi City, Liaoning Province[J]. Silicon Valley, 2011:121-122(in Chinese with English abstract).

[11] 陈光远,黎美华,汪雪芳,等. 弓长岭铁矿成因矿物学专辑 [J]. 矿物岩石, 1984, 4(2):12-54.  
Chen Guangyuan, Li Meihua, Wang Xuefang, et al. Genetic mineralogy of Gongchangling iron mine [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 1984, 4(2):1-254(in chinese with English).

- [12] Leake B E, Woolley A R, Arps C E S. Nomenclature of amphiboles: report of the subcommittee on amphiboles of the international mineralogical association, commission on new mineral and mineral Names [J]. *American Mineralogist*, 1997, 82:1019–1037.
- [13] Foster M D. Interpretation of the composition of trioctahedral micas [J]. *U. S. Geological Survey Professional Paper*, 1960, 354–B:11–49.
- [14] 张东阳, 苏慧敏, 田磊, 等. 河南窑场矿床成因矿物学研究及其地质意义[J]. *矿物岩石*, 2010, 30(1):53–63.  
Zhang Dongyang, Su Huimin, Tian Lei, et al. Genetic mineralogy of the Yaochang iron deposit in Henan Province and their geological implications [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2010, 30(1):53–63 (in Chinese with English abstract).
- [15] 陈光远, 孙岱生, 殷辉安. 成因矿物学与找矿矿物学 [M]. 重庆: 重庆出版社, 1987:1–29.  
Chen Guangyuan, Sun Daisheng, Yin Hui'an. *Genetic Mineralogy and Prospecting Mineralogy*[M]. Chongqing: Chongqing Publishing Group, 1987:1–29(in Chinese with English abstract).
- [16] 王顺金. 矿床矿物学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1989:75–78.  
Wang Shunjin. *Deposit Mineralogy*[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1989:75–78 (in Chinese with English abstract).
- [17] 赵一鸣, 林文蔚, 毕承思, 等. 中国夕卡岩矿床[M]. 北京: 地质出版社, 1990:1–354.  
Zhao Yiming, Lin Wenwei, Bi Chengsi, et al. *Skarn Deposits of China* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1990:1–278(in Chinese with English abstract).
- [18] 严炳铨, 吴克隆, 王文腾, 等. 福建漳州复式岩体磁铁矿的成因矿物学特征[J]. *福建地质*, 1993, 12(1):1–16.  
Yan Bingquan, Wu Kelong, Wang Wenteng, et al. Study on the genetic mineralogy of magnetites from the Zhangzhou Complex Massif in Fujian Province[J]. *Geology of Fujian*, 1993, 12(1):1–16 (in Chinese with English abstract).
- [19] Michael M Kimberley. Exhalative origins of iron formations[J]. *Ore Geology Reviews*, 1989, (5):13–154.
- [20] Robert B, Balz S K, Stephen M, Christopher M F, Martin J W. Characterisation of early Archaean chemical sediments by trace element signatures [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, (222):43–46.
- [21] McLenna S B. Rare earth elements in sedimentary rocks: influence of provenance and sedimentary progress[A]//Lipin B R and Mckay G A. *Geochemistry and Mineralogy of Rare Earth Elements*[C]. Mineral and Soc Am, Washington, 1989, 21:169–200.
- [22] 李文达. 稀土元素在矿床研究中的应用[M]. 北京: 地质出版社, 1987:161–168.  
Li Wenda. *Rare Earth Application in Deposit Researching* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987:161–168 (in Chinese with English abstract).
- [23] Carlos A S, Sonia M B, Alcides N S, et al. 2007. Geochemistry and genesis of banded iron formation of Caue formation, Quadrilatero Ferrifero, Minas Gerais, Brazil [J]. *Precambrian Research*, 152:170–206.
- [24] Klein C and Ladeira E. Geochemistry and Petrology of some Proterozoic banded iron formations of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil[J]. *Economic Geology*, 2000, (95):405–428.
- [25] Klein C. Some Precambrian banded iron formations (BIFs) from around the world: Their age, geologic setting, mineralogy, metamorphism, geochemistry, and origin[J]. *American Mineralogist*, 2005, (90):1473–1499.
- [26] 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 Zhihong, Zhu Xiangkun and Tang Suohan. Characters of Fe isotopes and rare earth elements of banded iron formation from Anshan–Benxi area: implications for Fe source [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2008, 27 (4):285–290 (in Chinese with English abstract).
- [27] 李志红. 辽宁省鞍山—本溪地区条带状含铁建造 Fe 同位素地球化学研究[D]. 北京: 中国地质科学院, 2007.  
Li Zhihong. *Iron Isotope Geochemistry of Banded Iron Formations from Anshan –Benxi Area, NE China* [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2007 (in Chinese with English abstract).
- [28] 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. Characteristics of rare earth elements and trace elements in Hanwang Neo–Archaean Banded Iron Formations, Shandong Province [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2009, 30(6):693–699(in Chinese with English abstract).
- [29] 沈其韩, 宋会侠, 杨崇辉, 等. 山西五台山和冀东迁安地区条带状铁矿的地球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 Chonghui, et al. Petrochemical characteristics and geological significations of banded iron formations in the Wutai Mountain of Shanxi and Qian'an of eastern Hebei [J]. *Acta Petrologica Et Mineralogica*, 2011, 30(2):161–171(in Chinese with English abstract).
- [30] 刘军, 靳淑韵. 辽宁弓长岭铁矿床斜长角闪岩类地球化学特征研究及原岩恢复[J]. *中国地质*, 2010, 37(2):324–333.  
Liu Jun, Jin Shuyun. Geochemical characteristics and original rock

- resoration of plagioclase amphibolites in the Gongchangling iron deposit, Liaoning Province[J]. *Geology in China*, 2010, 37(2):324–333(in Chinese with English abstract).
- [31] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotope systematics of oceanic basalts implications for mantle composition and process[C] //Saunders A D, Nony M J (eds.). *Magnetism in the Ocean Basin*. Geological Society Special Publication, 1989, 42:313–345.
- [32] James H L. Sedimentary facies of iron-formations [J]. *Economic Geology*, 1954, 49:235–293.
- [33] Irvine T N, Barager W R. A guide to the chelical classification of the common volcanic rocks [J]. *Canadian Journal of Earth Science*. 1971, 8:528–548.
- [34] 冯佳睿, 周振华, 肖荣阁. 辽宁弓长岭铁矿二矿区围岩原岩恢复[J]. *中国矿业*, 2009, 18(12):106–110.  
Feng Jiarui, Zhou Zhenhua, Xiao Rongge. The protolith restoration of the second diggings wall rock in Gongchangling iron ore, Liangning province[J]. *China Mining Magazine*, 2009, 18(12): 106–110(in Chinese with English abstract).
- [35] 沈其韩, 耿元生, 王新社, 等. 阿拉善地区前寒武纪斜长角闪岩组成矿物特征及变质温压条件 [J]. *地质调查与研究*, 2004, 27(4):209–216.  
Shen Qihan, Geng Yuansheng, Wang Xinshe, et al. Mineral Characteristics and Metamorphic P–T Condition of Precambrian Amphibolites in Alxa Region[J]. *Geological Survey And Research*, 2004, 27(4):209–216(in Chinese with English abstract).
- [36] 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, 1989:1–535.  
Wang Zhonggang, Yu Xueyuan, Zhao Zhenhua. *Geochemistry of REE* [M]. Beijing: Sciences Press, 1989:1–535 (in Chinese with English abstract).
- [37] Wilson M. *Igneous Petrogenesis* [M]. London: Unwin Hyman, 1989:195–323.
- [38] Condie K C. Mafic crustal xenoliths and the origin of the lower continental crust[J]. *Lithos*, 1999, 46:95–101.
- [39] 万渝生. 辽宁弓长岭含铁岩系的形成和演化[M]. 北京: 北京科学技术出版社, 1993:24–85.  
Wan Yusheng. *Formation and Evolution of the Iron-bearing Rock Series of the Gongchangling Area, Liaoning Province*[M]. Beijing: Beijing Science and Technology Press, 1993:24–85(in Chinese).
- [40] 李树勋, 冀树楷, 马志红, 等. 五台山区变质沉积铁矿地质[M]. 长春: 吉林科学技术出版社, 1986.  
Li Shuxun, Ji Shukai, Ma Zhihong, et al. *Geology of metamorphic sedimentary iron deposit in Wutai area* [M]. Changchun: Jilin Science and Technology Publishing House. 1986 (in Chinese with English abstract).
- [41] 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.
- [42] Nozaki Y, Zhang J, Amakawa H. The fraction between Y and Ho in the marine environment [J]. *Earth Planet Science Letters*, 1997, 148:329–340.
- [43] Michael Bau, Peter Dulski. Comparing yttrium and rare earths in hydrothermal fluids from the mid-Atlantic ridge: implications for Y and REE behavior during near-vent mixing and for the Y/Ho ratio of Proterozoic seawater[J]. *Chemical Geology*, 1999, 155:77–90.
- [44] Bau M and Dulski P. Yttrium and Holmium in South Pacific sea water: vertical distribution and possible fraction mechanisms [J]. *Chemie Der Erde-Geochemistry*, 1995, 55:1–15.
- [45] Alibo D S and Nozaki Y. Rare earth element in seawater: particle association, shale normalization and Ce oxidation [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1998, 63:363–372
- [46] 丁振举, 刘丛强, 姚书振, 等. 海底热液沉积物稀土元素组成及其意义[J]. *地质科技情报*, 2000, 19(1):27–35.  
Ding Zhenju, Liu Chongqiang, Yao Shuzhen, et al. REE composition and impication of hydrothermal sedimentation sea – floor[J], *Geological Science and Technology Information*, 2010, 19(1):27–35 (in Chinese with English abstract).
- [47] Dymek R F and Klein C. Chemistry, petrology, and origin of banded iron formation lithologies from the 3800 Ma Isua Supracrustal Belt, West Greenland[J]. *Precambrian Research*, 1988, 39:247–302.
- [48] Jacobsen S B, Pimentel-Klose M R. A Nd isotope study of the Hamersley and Michipicoten banded iron formations; the source of REE and Fe in Archean oceans [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1998, 87:29–44.

## Element geochemistry of the Sishanling iron deposit in Liaoning Province and its geological implications

MENG Xu-yang<sup>1</sup>, WANG Peng<sup>2</sup>, ZHANG Dong-yang<sup>1</sup>, LIANG Ming-juan<sup>1</sup>

(1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Beijing Huaxia Jianlong Mining Science and Technology Co., Ltd., Beijing 100070, China)

**Abstract:** The Sishanling iron deposit is located in the northern margin of North China platform and geographically lies in Benfen area, Liaoning Province. The ores are composed of magnetite and hematite and controlled by Anben Formation of Achean Cigou Group, the sedimentary facies is of the oxide-silicate phase. Through the study of element geochemistry of the main minerals, ores and wall rocks, the authors have obtained some useful information; Metamorphic facies has reached low amphibolite facies, and the BIF can be classified as mafic volcanic-muddy sandstone-ferrosilicic sedimentary formation. The metamorphic volcanic rocks are characterized by oceanic tholeiite. The shale-normalized REE patterns of the ores display depletion of light REE relative to heavy REE, high ratios of Y/Ho and distinct positive anomalies of La, Y. Eu shows stronger positive anomalies in comparison with the other main BIFs in North China platform. The geochemical information of the BIF shows that the ore-forming elements came from the mixed solution of volcanic-hydrothermal solution and sea water, and that the hydrothermal solution was related to the mantle material.

**Key words:** BIF; mineralogy; element geochemistry; Sishanling iron deposit; Liaoning

---

**About the first authors:** MENG Xu -yang, male, born in 1991, majors in geology; E -mail: mengxuyang1991@163.com.