

# 河南窑场和辽宁思山岭铁矿磁铁矿矿物学和 氧同位素特征对比

## ——对 BIF 型铁矿成因与形成环境的启示

孟旭阳<sup>1</sup>, 张东阳<sup>1</sup>, 闫兴虎<sup>2</sup>, 申俊峰<sup>1</sup>, 王鹏<sup>3</sup>, 田磊<sup>4</sup>, 梁明娟<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学 地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 金堆城铝业集团有限公司, 陕西 华县 714102;  
3. 北京华夏建龙矿业科技有限公司, 北京 100070; 4. 河南省有色金属地质矿产局 第二地质大队,  
河南 郑州 450000)

**摘要:**河南窑场铁矿和辽宁思山岭分别位于华北陆块的南缘和东北缘。通过对其主要矿石矿物磁铁矿单矿物的化学成分、热电性及氧同位素的分析发现,磁铁矿均具有高 Ni 低 Co 的特征,暗示成矿来源与深部物质有关。它们均相对富集轻稀土元素,显示 Eu 正异常和无明显 Ce 负异常,其中辽宁思山岭铁矿磁铁矿 Eu 异常较为强烈。此外,窑场和思山岭磁铁矿的  $\delta^{18}\text{O}$ 、热电系数平均值分别为 7.1‰、-59.05  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$  和 2.3‰、-57.18  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 。化学成分显示两者均属火山沉积变质成因,其中思山岭磁铁矿类质同像程度较低,结构较为均匀。对华北陆块产出的主要铁建造岩群的磁铁矿  $\delta^{18}\text{O}$  值和稀土元素组成的对比分析结果显示,贫富矿石中磁铁矿氧同位素组成具有规律性,与富化机制有密切联系;不同岩群中贫矿石磁铁矿  $\delta^{18}\text{O}$  值高低与变质程度具有一定联系。根据中太古代-古元古代 BIFs 的 Ce、Eu 异常程度的综合分析结果,推测华北陆块 BIFs 形成时的古海洋整体上处于缺氧或少氧环境,但伴随华北陆块演化,还原环境影响趋弱,不利于条带状铁建造的形成。

**关键词:**条带状铁建造,磁铁矿,矿物学,地球化学,氧同位素,华北陆块

中图分类号: P578.4; P611.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2014)01-0109-18

## A comparative study of mineralogical and oxygen isotope characteristics between the Yaochang iron deposit in Henan Province and the Sishanling iron deposit in Liaoning Province: Insights into ore genesis and forming environment of BIF

MENG Xu-yang<sup>1</sup>, ZHANG Dong-yang<sup>1</sup>, YAN Xing-hu<sup>2</sup>, SHEN Jun-feng<sup>1</sup>, WANG Peng<sup>3</sup>, TIAN Lei<sup>4</sup>  
and LIANG Ming-juan<sup>1</sup>

(1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Jinduicheng Molybdenum Group Co., Ltd., Huaxian 714102, China; 3. Beijing Huaxia Jianlong Mining Science and Technology Co., Ltd., Beijing 100070, China; 4. No. 2 Geological Party, Henan Bureau of Geology for Non-Ferrous Metal Resources, Zhengzhou 450000, China)

**Abstract:** The Yaochang and Sishanling iron deposits are located respectively in southern and northwestern margin of North China block. A systematic study of chemical composition, pyroelectricity and oxygen isotope components of magnetite samples revealed some important information. The magnetite samples are all characterized by high values of Ni and low values of Co, indicating that the mineralization was related to deep materials. They

收稿日期: 2013-01-18; 修订日期: 2013-06-22

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2014CB440903, 2012CB416801); 中国地质大学(北京)大学生创新性实验计划项目

作者简介: 孟旭阳(1991-), 男, 学士, 研究方向为矿床学与矿床地球化学, E-mail: mengxuyang1991@163.com; 通讯作者: 张东阳(1985-), 男, 在读博士研究生, 研究方向为岩石学与金属矿床学, E-mail: zhangdongyang85@163.com

网络出版时间: 2013-11-19; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/1966.P.20131119.1104.002.html>

have similar PAAS-normalized REY distribution patterns and are enriched in light REE, with moderately positive Eu anomalies and lightly negative Ce anomalies; nevertheless, the magnetite in the Sishanling iron deposit has a more obvious Eu positive anomaly. The average  $\delta^{18}\text{O}$  values and thermoelectric coefficients of magnetites from these two deposits are 7.1‰ and 2.3‰,  $-59.05 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$  and  $-57.18 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$  respectively. Based on chemical analyses and other typomorphic peculiarities of magnetite, the authors hold that the magnetite is of the volcanic-sedimentary metamorphic origin, but magnetite samples from the Sishanling iron deposit have relatively low isomorphic extent and a more homogeneous structure. A systematic comparison with the main terrains in North China block in such aspects as oxygen isotope and REE compositions indicates that the oxygen isotope components of rich and poor ores show regularity related to different mechanisms of mineralization and enrichment. The values of  $\delta^{18}\text{O}$  in poor ores are related to the metamorphic grade of different terrains, consistent with oxygen isotope fractionation. Systematic investigation of the  $\text{Ce}/\text{Ce}^*$  and  $\text{Eu}/\text{Eu}^*$  ratios of BIFs from Archean-Pleoproterozoic strata in North China block indicates relatively low redox levels in the seawater, but with the growth of North China block, the oxygen-free environment exerted less effect on the formation of BIFs, which was unfavorable for the generation of banded iron formation.

**Key words:** BIFs; magnetite; mineralogy; geochemistry; oxygen isotope; North China block

前寒武纪条带状铁建造(banded iron formations, 简称 BIFs)是世界上最重要的铁矿资源类型和地球早期特有的化学沉积建造(李延河等, 2010),约占世界铁矿总储量的 60%,占中国铁矿探明总储量的 57.7%(姚培慧, 1993; 沈保丰等, 2005)。BIF 多赋存于早前寒武纪古老变质岩系中,通常指全铁含量大于 15%、具有由富铁矿物(以磁铁矿为主)和脉石矿物(以石英为主)组成的条带状或条纹状构造的化学沉积岩(James, 1954, 1983)。根据其形成时代和含矿建造,可进一步划分为与海底火山作用密切相关的阿尔戈马型和与沉积作用密切相关的苏必利尔型(Gross, 1965),前者为我国条带状铁建造的主要类型(沈保丰等, 2006)。华北陆块是我国前寒武纪铁建造铁矿资源的集中分布区,共有 16 个矿床集中区(图 1),形成于始太古代到古元古代早期,大规模 BIF 只形成于新太古代晚期(2.50~2.55 Ga, 万渝生等, 2012)。

近年来随着地质找矿工作的深入,探明铁矿资源储量也随之增加,沉积变质型铁矿矿区数占所有成因类型铁矿矿区数的 42%,探明资源储量达 48%(李厚民等, 2012)。本文研究区为近年来新发现的河南窑场和辽宁思山岭两个铁矿,估计新增资源量分别为 40 万吨<sup>①</sup>和 24.87 亿吨<sup>②</sup>,分别位于华北陆块南缘和东北缘,分别属于河南鲁山-登封-许昌和

鞍山-本溪矿集区。已有的工作主要是对矿床中的矿体和围岩进行的岩相学、地球化学以及主要组成矿物的矿物化学的研究(张东阳等, 2009, 2010; 孟旭阳等, 2012),尚未对作为主要矿石矿物的磁铁矿进行详细而系统的研究。磁铁矿是自然界中分布极广的矿物,主要以副矿物形式赋存于不同类型岩石中(杨守业等, 2000),根据成因类型的不同,彼此成分和性质也有所差别。研究表明,不同成因类型的磁铁矿,其类质同像替代程度也不同,因此主要元素和微量元素均具有标型性(张建中等, 1987)。按照成因矿物学理论(陈光远等, 1987),矿物的标型特征差异能够为认识矿床形成过程和指导矿床勘探提供依据。因此,本文重点测试上述两矿床磁铁矿单矿物的主量元素、微量元素、氧同位素以及热电特性,并与其他典型矿床进行对比,试图探讨这两个矿床以及华北陆块不同时期产出的典型条带状铁建造成因,反演不同时期 BIFs 形成时的古海洋环境,并进一步探讨河南窑场矿体规模较小的可能原因。

## 1 矿床特征

华北陆块主要由西部地体和东部地体以及两者之间过渡的华北造山带组成,从新太古代至古元古代,东西地体之间存在着一个宽阔的古海洋,至 1 800

① 河南省有色金属地质矿产局第二地质大队. 2006. 河南省鲁山县窑场矿区铁矿详细地质报告(内部资料)。

② 北京华夏建龙矿业科技股份有限公司. 2010. 辽宁省本溪市思山岭铁矿详查报告(内部资料)。

Ma 左右, 两地块碰撞拼合成相对稳定的华北克拉通 (Zhao *et al.*, 2001)。河南窑场与辽宁思山岭铁矿大地构造位置分别位于华北陆块南缘和东北缘 (图 1)。

### 1.1 河南窑场铁矿

河南窑场铁矿位于河南鲁山地区, 大地构造位置处于华北陆块南缘和秦岭造山带的边界线附近<sup>①</sup>。

矿区出露地层主要为太古宙太华群荡泽河组和铁山岭组以及分布于河谷中的第四系砂砾岩, 控矿地层主要为太华群的铁山岭组。区内岩浆活动较为强烈, 出露有花岗质混合岩和长英质脉岩。根据岩性组合和变质特征, 太华群自下而上可分为荡泽河组、铁山岭组、水底沟组和雪花沟组 (图 2a), 其中, 铁山岭

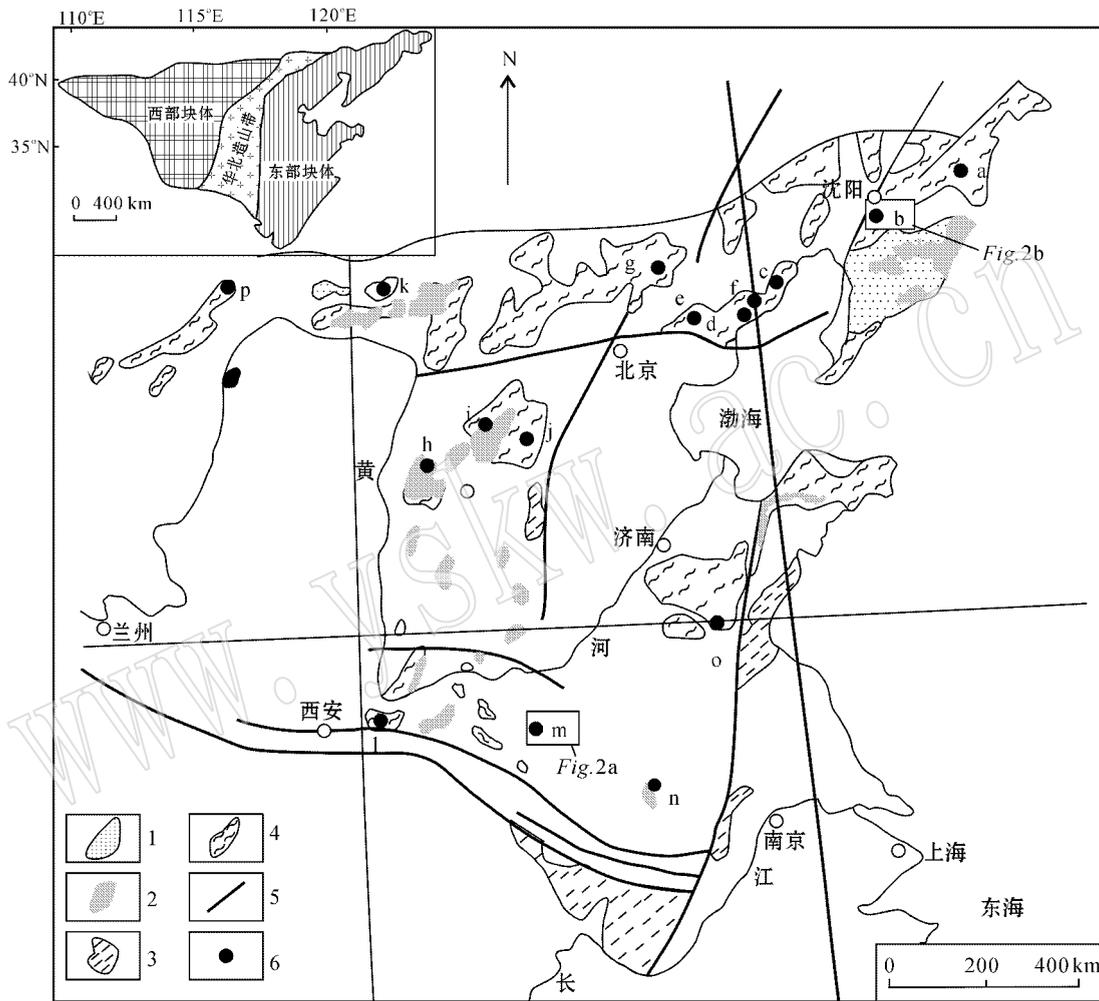


图 1 华北陆块条带状铁建造集中区分布示意图 (据沈其韩, 1998; Zhao *et al.*, 2001)

Fig. 1 Sketch map showing the concentration area of banded iron formations in North China platform (after Shen, 1998; Zhao *et al.*, 2001)

- 1—古元古界上部岩层分布区; 2—古元古界下部地层分布区; 3—元古宇片岩区; 4—太古宇分布区; 5—断裂; 6—条带状铁建造铁矿床集中区; a—吉南地区; b—辽宁鞍山地区; c—辽西地区; d—河北迁安-滦县地区; e—河北遵化-迁安地区; f—河北青龙地区; g—北京密云地区; h—山西吕梁地区; i—山西五台地区; j—河北阜平地区; k—内蒙古中部及中南部地区; l—陕西小秦岭地区; m—河南鲁山-登封-许昌地区; n—安徽霍邱地区; o—鲁中西部地区; p—内蒙古阿拉善地区

- 1—distribution of Paleoproterozoic upper strata; 2—distribution of Paleoproterozoic lower strata; 3—Proterozoic schist zone; 4—distribution of Archean strata; 5—fault; 6—concentration area of BIFs; a—Jinan area; b—Anshan area of Liaoning Province; c—Liaoxi area; d—Qianan-Luanxi area of Hebei Province; e—Zunhua-Qianan area of Hebei Province; f—Qinglong area of Hebei Province; g—Miyun area of Beijing; h—Lvliang area of Shanxi Province; i—Wutai area of Shanxi Province; j—Fuping area of Hebei Province; k—central and middle-south area of Inner Mongolia; l—Xiaolinling area of Shanxi Province; m—Lushan-Dengfeng-Xuchang area of Henan Province; n—Huoqiu area of Anhui Province; o—mid-west area of Shandong Province; p—Alxa area of Inner Mongolia

① 河南省有色金属地质矿产局第二地质大队. 2006. 河南省鲁山县窑场矿区铁矿详细地质报告 (内部资料).

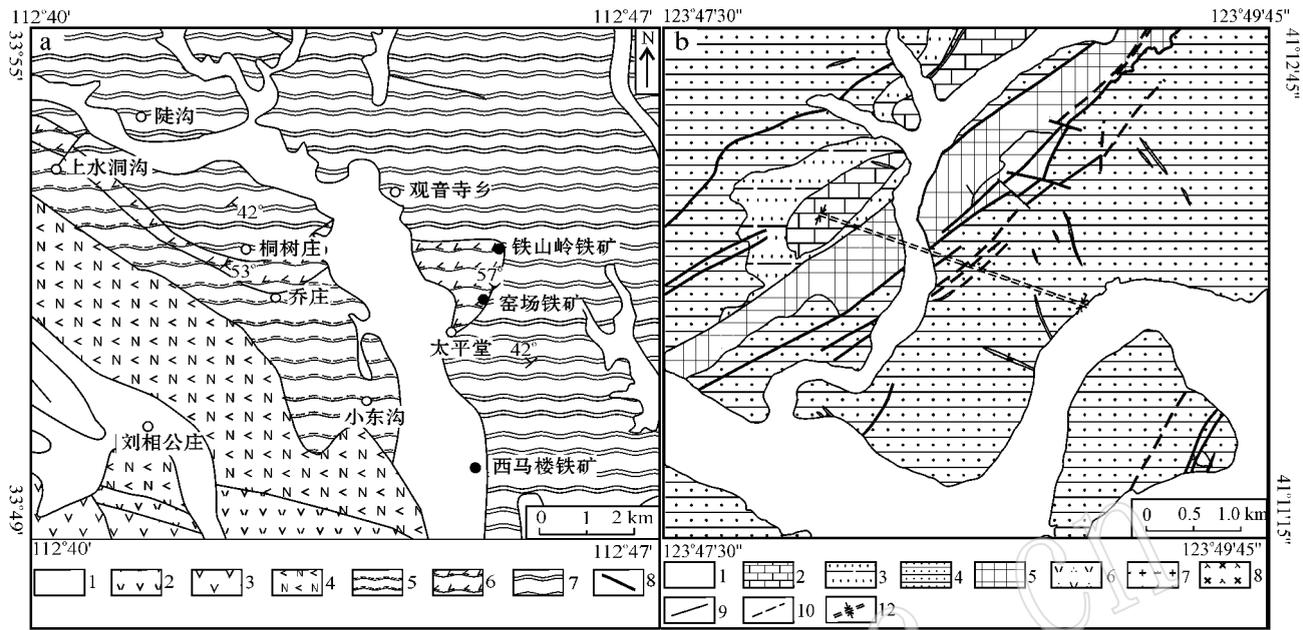


图 2 河南窑场 (a, 据河南省有色金属地质矿产局第二地质大队<sup>①</sup>修改) 和辽宁思山岭铁矿 (b, 据北京华夏建龙矿业科技股份有限公司<sup>②</sup>修改) 区域地质图

Fig. 2 Regional geological map of the Yaochang iron deposit in Henan Province (a, modified after No. 2 Geological Party of Nonferrous Metal Bureau of Geology and Mineral Resources of Henan Province<sup>①</sup>) and the Sishanling iron deposit in Liaoning Province (b, modified after Beijing Huaxia Jianlong Mining Science and Technology Co., Ltd.<sup>②</sup>)

a: 1—第四系; 2—中元古界熊耳群鸡蛋坪组; 3—中元古界熊耳群许山组; 4—古元古界太华群雪花沟组; 5—古元古界太华群水底沟组; 6—古元古界太华群铁岭组; 7—新太古界太华群荡泽河组; 8—断层; b: 1—第四系; 2—震旦系康家组; 3—震旦系桥头组; 4—青白口系南芬组; 5—青白口系钓鱼台组; 6—石英斑岩; 7—花岗岩长斑岩; 8—辉绿玢岩; 9—实测及推测断层; 10—推测性质不明断层; 11—向斜轴线  
a: 1—Quaternary; 2—Mesoproterozoic Xionger Group Jidanping Formation (dacite or rhyolite); 3—Mesoproterozoic Xionger Group Xushan Formation (andesite); 4—Paleoproterozoic Taihua Group Xuehuagou Formation (amphibolite or leptynite); 5—Paleoproterozoic Taihua Group Shuidigou Formation (gneiss, leptynite or marble); 6—Paleoproterozoic Taihua Group Tieling Formation (hornblende-schist, leptynite, biotite-schist); 7—Neoproterozoic Taihua Group Dangzehe Formation (leptynite, biotite-schist); 8—fault; b: 1—Quaternary; 2—lenticular marl, dark gray powder sandy shale intercalated with bedded layer of Sinian Kangjia Formation; 3—grayish-green silty rock with grayish-green, gray magnetite quartzite of 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—syncline axis

组主要为角闪质岩类、黑云变粒岩、石榴黑云片岩, 夹榴辉大理岩透镜体、黑云辉石岩和铁英岩, 岩石局部混合岩化, 主要为肉红色长英质混合岩; 建造类型为火山岩-中酸性杂砂岩-硅质沉积建造, 变质程度主要为角闪岩相(张东阳, 2009)。

窑场铁矿床矿体产状与岩层产状基本一致, 呈似层状、透镜状, 平面上矿体呈不规则长条状和梯形状, 沿岩层走向断续分布。根据工程见矿和产状特征可圈出 6 个矿体, 其中两个矿体 (I、II) 为主矿

体。I 号矿体沿走向长 170 m, 宽 90~160 m, 剖面上呈层状, 矿石量约  $28.7 \times 10^4$  吨, TFe 品位范围在 17.34%~36.32% 之间, 平均为 29.08%; II 号矿体沿走向长 470 m, 水平宽 150~310 m, 剖面上呈近层状, 矿石量约为  $169.9 \times 10^4$  吨, TFe 品位为 18.12%~36.65%, 平均为 27.92%。矿体围岩蚀变不发育, 一般仅在矿体附近数米到几十米范围内, 主要为绿帘石化、绿泥石化和碳酸盐化。矿体矿石矿物主要为磁铁矿, 含少量假像赤铁矿和镜铁矿; 脉石矿物

① 河南省有色金属地质矿产局第二地质大队. 2006. 河南省鲁山县窑场矿区铁矿详细地质报告(内部资料)。

② 北京华夏建龙矿业科技股份有限公司. 2010. 辽宁省本溪市思山岭铁矿详查报告(内部资料)。

主要为石英,其次为辉石、角闪石和石榴石等。矿石结构类型以粒状变晶结构为主,构造类型主要为条带状和浸染状。以矿石中矿物组分种类和相对含量,将矿石分为两种类型:辉石铁英岩和角闪石铁英岩。前者在窑场铁矿床中最为发育,属于较富铁矿石,主要组成矿物为磁铁矿(30%~40%)、石英(30%~40%)和辉石(5%~20%),含少量石榴子石(5%~10%)和角闪石(<5%)等矿物。后者为次要矿石类型,产于辉石铁英岩边部或深延部分的尖灭端,或呈薄层和透镜体夹于辉石铁英岩矿体内部,主要组成矿物为磁铁矿(30%~35%)、石英(35%~40%)和角闪石(15%~20%),含少量石榴子石(<3%)和方解石等矿物。两类矿石呈过渡接触,磁铁矿在矿石中可聚集成团状,也可呈不规则状和稀疏-稠密浸染状产出,结晶程度不一,有的颗粒呈自形晶体,有的呈半自形-他形,颗粒一般在0.05~0.25 mm之间(张东阳等,2009,2010)。

## 1.2 辽宁思山岭铁矿

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,呈角度不整合覆盖于主要由下元古界辽河群、太古界鞍山群组成的结晶基底之上(图2b)。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。其中鞍山群主要由混合岩和含铁石英岩系组成,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。原岩建造属基性火山岩-杂砂岩-硅铁质建造,变质程度为低角闪岩相(孟旭阳等,2012)。

根据工程钻孔资料,可将思山岭铁矿床分为 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型向斜构造,长轴方向约 290°,推测铁矿带东西长 1 500 m,南北平均宽度为 960 m,最大深度 1 580 m,埋藏深度范围为 404~1 934 m。含铁岩系基本上由条带状磁(赤)铁石英岩组成,本文研

究样品均采自磁铁石英岩。磁铁矿体由 III、IV 两个矿体组成,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 TFe 平均品位约为 31.6%,矿石矿物主要为磁铁矿(~28%),含少量赤铁矿(~3%)和黄铁矿(偶见);脉石矿物主要为石英(~37%),次为长石、云母和碳酸盐(~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它形粒状,局部可见团块状磁铁矿,也可见磁铁矿呈微小尘染状分布于石英等颗粒中。

## 2 样品采集及测试

本文选取了窑场和思山岭铁矿共 12 件磁铁矿样品进行了分析测试,所有样品均经过手标本和显微镜观察后,利用双目镜挑选出纯净的磁铁矿单矿物,纯度达 99% 以上。窑场磁铁矿样品主要来自围岩和矿石,围岩包括黑云片岩、变粒岩、斜长角闪岩等,矿石包括辉石铁英岩和角闪铁英岩;思山岭磁铁矿样品主要选自矿石,岩性均为条带状铁英岩。

窑场和思山岭磁铁矿单矿物的微量元素测定分别在中国地质大学(北京)地质实验中心和核工业北京地质研究院分析测试中心完成,测试样品共 10 件,其中,前者样品的微量元素测试方法为 ICP-MS(详见 Han *et al.*, 2007),分析精度优于  $\pm 1\%$ ;后者样品微量元素的分析方法为 DZ/T 0223-2001 电感耦合等离子质谱方法(ICP-MS)通则(详见戴慧敏等,2007),测试仪器为 Finnigan MAT 制造,HR-ICP-MS(Element 1),仪器编号为 6 493,测试温度为 20℃,相对湿度为 30%,分析误差小于 10%,分析精度优于  $\pm 1\%$ 。

氧同位素测试工作在核工业北京地质研究院分析测试中心完成,氧同位素测试采用 BrF<sub>5</sub> 法,测试结果以 SMOW 为标准,分析精度优于  $\pm 0.2\%$ 。

热电性测试在中国地质大学(北京)标型矿物实验室进行,测试采用新型 BHTE-06 型热电测试仪,冷端温度为室温,热端温度最高 100℃,活化温度 10~70℃ 之间,热端增温步长可精确到 0.1℃。温度调控和数据采集由计算机控制。实验分别测试河南窑场 3 件共 180 粒、辽宁思山岭 4 件共 240 粒样品。

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

### 3 测试结果

#### 3.1 磁铁矿稀土元素特征

河南窑场铁矿和辽宁思山岭铁矿的 10 个磁铁矿单矿物的稀土元素分析结果列于表 1。因 Y 的地球化学性质和 REE 相似,在此一并讨论。表中 La 异常用  $La/La^* = La_{PAAS} / (3 Pr_{PAAS} - 2 Nd_{PAAS})$  来计算;Ce 异常用  $Ce/Ce^* = 2 Ce_{PAAS} / (La_{PAAS} + Pr_{PAAS})$  来计算;Pr 异常用  $Pr/Pr^* = 2 Pr_{PAAS} / (Ce_{PAAS} + Nd_{PAAS})$  来计算;Eu 异常用  $Eu/Eu^* = 2 Eu_{PAAS} / (Sm_{PAAS} + Nd_{PAAS})$  来计算;Y 异常用  $Y/Y^* = 2 Y_{PAAS} / (Dy_{PAAS} + Ho_{PAAS})$  来计算 (Robert *et al.*, 2004)。经 PAAS (Post Archean Australian Shale, McLennan, 1989) 标准化后的 REE 配分曲线如图 3 所示。河南窑场和辽宁思山岭铁矿磁铁矿经 PAAS 标准化后的配分图解均呈现出轻稀土元素相对亏损,重稀土元素相对富集。河南窑场铁矿磁铁矿稀土含量变化范围为  $(0.89 \sim 5.59) \times 10^{-6}$ , 平均值为  $2.94 \times 10^{-6}$ , 显示 Eu、La 明显正异常、Ce 轻微负异常以及 Y 和 Pr 的轻微或不明显正异常。其中  $Eu/Eu^*$  变化范围为 1.39~2.40, 平均值为 2.0;  $Ce/Ce^*$  变化范围为 0.66~0.89, 平均值为 0.82;  $La/La^*$ 、 $Y/Y^*$ 、 $Pr/Pr^*$  的变化范围分别为 1.13~6.07、0.061~3.7、0.80~1.14, 平均值分别为 1.93、1.62 和 1.00。辽宁思山岭铁矿磁铁矿稀土元素含量变化范围在  $(1.92 \sim 5.03) \times 10^{-6}$  之间, 平均值为  $3.14 \times$

$10^{-6}$ , 显示出明显 Eu、La 正异常和轻微 Ce、Pr 负异常以及明显 Y 负异常,  $Eu/Eu^*$  变化范围为 2.20~4.54, 平均值为 3.39;  $Ce/Ce^*$  变化范围为 0.70~0.82, 平均值为 0.74;  $La/La^*$ 、 $Y/Y^*$  和  $Pr/Pr^*$  的变化范围分别为 1.96~3.41、0.05~0.07 和 0.89~1.0, 平均值分别为 2.49、0.07 和 0.94。以上特点与现代大洋中脊、红海等热水流体及富含金属的化学沉积物相似 (应立娟等, 2006), 反映了两矿床的形成均可能与海底火山作用有关。

#### 3.2 磁铁矿微量元素特征

由微量元素含量的测试结果 (表 2) 可知, 河南窑场铁矿和辽宁思山岭铁矿的磁铁矿中 Sc、Ti、V、Cr、Mn、Co、Ni、Cu、Zn、Ga、Rb、Sr、Zr、Nb、Mo、Cs、Ba、Hf、Ta、Pb、Th、U 等微量元素均有一定的含量, 河南窑场中磁铁矿的某些微量元素含量相对于其他微量元素比较高, 如 Ti 平均含量  $855 \mu\text{g/g}$ , Mn 平均含量  $1746 \mu\text{g/g}$ , Zn 平均含量  $51.59 \mu\text{g/g}$ , Ni 平均含量  $8.67 \mu\text{g/g}$ ; 而 Nb、Cs、Hf、Th、U 等元素的平均含量较低, 分别为  $0.55$ 、 $0.04$ 、 $0.13$ 、 $0.19$ 、 $0.10 \mu\text{g/g}$ 。思山岭铁矿与河南窑场铁矿中磁铁矿相比, 微量元素的含量相近但个别元素含量差异较大, 如 Ti 平均含量为  $346 \mu\text{g/g}$ , Mn 平均含量  $322.7 \mu\text{g/g}$ , Zn 平均含量为  $25.33 \mu\text{g/g}$ , Cu 平均含量为  $24.17 \mu\text{g/g}$ , Ni 平均含量为  $7.78 \mu\text{g/g}$ , Zr 平均含量为  $51.13 \mu\text{g/g}$ 。而 Cs、Nb、Th 平均含量较低, 分别为  $0.05$ 、 $0.05$ 、 $0.05 \mu\text{g/g}$ 。

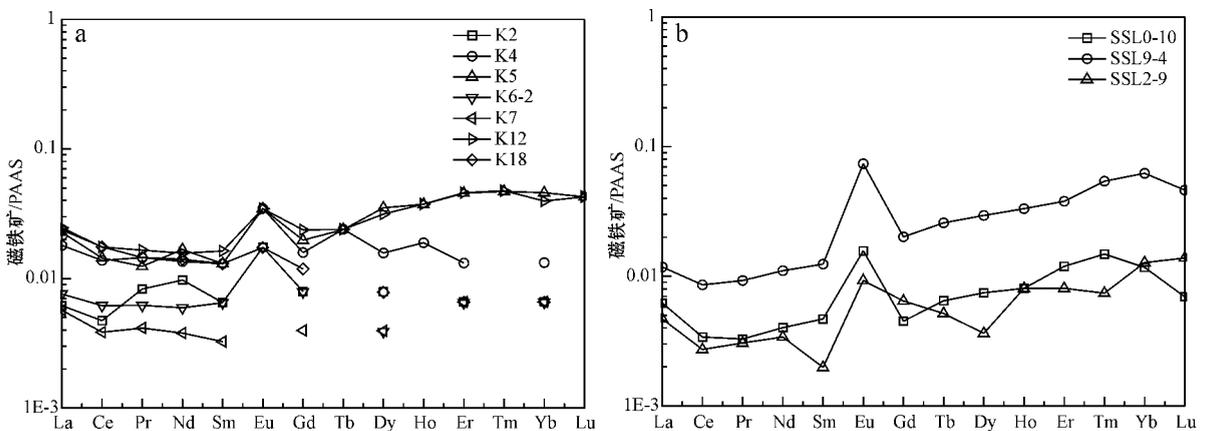


图 3 河南窑场 (a) 和辽宁思山岭 (b) 矿床磁铁矿稀土元素配分图解 (标准化数据据 McLennan, 1989)

Fig. 3 PAAS-normalized REY patterns of magnetite from Yaochang and Sishanling deposits (normalized values after McLennan, 1989)

$w_B/10^{-6}$

表1 河南窑场和辽宁思山岭铁矿磁铁矿稀土元素含量

Table 1 REE content of magnetite in Yaochang and Sishanling deposits

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
样品编号	K2	K4	K5	K6-2	K7	K12	K18	SSL0-10	SSL9-4	SSL2-9	3#-2-1	3#-3-18N	Q-12	Qx-6	TS-03-7	Mk-1	JBZ(6)
La	0.236	0.689	0.870	0.290	0.217	0.942	0.906	0.238	0.451	0.179	0.166	0.422	1.7	0.84	5.28	2.18	5.435
Ce	0.376	1.096	1.143	0.491	0.306	1.390	1.393	0.27	0.684	0.217	0.873	1.486	3.51	1.64	9.17	4.41	11.278
Pr	0.073	0.128	0.110	0.055	0.037	0.146	0.128	0.029	0.082	0.027	0.108	0.101	—	0.29	1.16	0.69	1.233
Nd	0.330	0.458	0.567	0.201	0.128	0.531	0.476	0.136	0.374	0.115	0.92	0.424	2.84	1.89	5.03	3.59	4.713
Sm	0.036	0.072	0.072	0.036	0.018	0.090	0.072	0.026	0.069	0.011	0.399	0.129	0.94	0.86	1.45	1.22	0.929
Eu	0.019	0.037	0.037	—	—	0.037	0.019	0.017	0.08	0.01	0.221	0.038	1.05	0.37	0.65	0.73	0.563
Gd	0.037	0.074	0.092	0.037	0.018	0.111	0.055	0.021	0.094	0.03	0.383	0.187	1.51	1.08	1.74	1.42	1.026
Tb	—	0.019	0.018	—	—	0.019	—	0.005	0.02	0.004	0.061	0.038	0.27	0.19	0.27	0.24	0.174
Dy	0.037	0.074	0.164	0.018	0.018	0.147	0.037	0.035	0.138	0.017	0.436	0.245	—	1.14	1.64	1.5	0.978
Ho	—	0.019	0.037	—	—	0.037	—	0.008	0.033	0.008	0.097	0.056	0.34	0.22	0.3	0.33	0.243
Er	0.019	0.038	0.130	0.019	0.019	0.131	0.019	0.034	0.108	0.023	0.285	0.178	—	0.61	0.83	1.01	0.676
Tm	—	—	0.019	—	—	0.019	—	0.006	0.022	0.003	0.044	0.026	0.13	0.09	0.11	0.14	0.104
Yb	0.019	0.037	0.130	0.018	0.019	0.112	0.019	0.033	0.176	0.036	0.278	0.179	0.76	0.58	0.64	0.86	0.633
Lu	—	—	0.018	—	—	0.018	—	0.003	0.02	0.006	0.048	0.024	0.13	0.09	0.09	0.12	0.095
Y	0.186	0.374	1.614	0.172	0.113	1.827	0.151	1.06	2.68	1.78	2.89	1.695	—	5.82	8.51	9.75	6.985
LREE	1.070	2.480	2.799	1.073	0.706	3.137	2.994	0.716	1.74	0.559	2.687	2.6	10.04	5.89	22.74	12.82	24.152
HREE	0.111	0.260	0.609	0.092	0.074	0.593	0.129	0.145	0.611	0.127	1.632	0.933	3.140	4.000	5.620	5.620	10.914
LREE/HREE	9.602	9.549	4.596	11.660	9.522	5.290	23.199	4.938	2.848	4.402	1.646	2.787	3.197	1.473	4.046	2.281	2.213
ΣREE	1.368	3.114	5.022	1.336	0.893	5.558	3.274	1.921	5.031	2.466	7.209	5.228	13.180	15.710	36.870	28.190	35.066
(Pr/Yb) <sub>PAMS</sub>	1.248	1.094	0.270	0.946	0.626	0.418	2.200	0.281	0.149	0.240	0.124	0.180	—	0.160	0.579	0.256	0.622
(Sm/Yb) <sub>PAMS</sub>	0.981	0.983	0.283	0.991	0.492	0.411	1.976	0.400	0.199	0.155	0.729	0.366	0.628	0.753	1.151	0.721	0.745
Eu/Eu*	2.404	2.403	2.111	—	—	1.731	1.391	3.425	4.544	2.199	2.656	1.110	3.941	1.772	1.897	2.577	2.692
Ce/Ce*	0.655	0.847	0.816	0.894	0.783	0.848	0.917	0.713	0.815	0.704	1.323	1.660	—	0.751	0.855	0.819	1.005
La/La*	1.152	1.099	6.065	1.127	1.175	1.348	1.546	3.406	2.037	1.962	—	1.188	—	—	1.420	2.522	1.009
Y/Y*	—	0.142	0.061	—	—	0.081	—	0.074	0.051	0.072	0.023	0.037	—	0.027	0.078	0.043	0.105
Pr/Pr*	1.144	1.061	0.798	1.025	1.084	0.999	0.918	0.887	0.946	1.000	0.642	0.734	—	0.860	0.997	0.969	0.995

注: ΣREE包含Y; PAMS标准化值采用 McLennan(1989)推荐值,其中样品1~4采自河南窑场II号矿体及其围岩,5~7采自I号矿体及围岩;K6-2、K12为矿体中磁铁矿单矿物样品,样品分析在中国地质大学(北京)地质实验中心完成;8~10均为思山岭铁矿矿体中的磁铁矿,样品分析在核工业北京研究院完成;“—”表示低于检测线;11、12引自新疆阿尔泰乔夏哈拉铁矿磁铁矿(应立娟等,2006),13~16数据引自闫升好等(2005);17数据引自刘慧平等(2007);13、14为乔夏哈拉块状含铜磁铁矿;15为托斯巴斯(乔夏哈拉东南)的块状磁铁矿;16为蒙库铁矿状磁铁矿数据;17为近北庄沉积变质型铁矿6组磁铁矿单矿物平均值。

表 2 河南窑场和辽宁思山岭铁矿磁铁矿微量元素含量

 $\omega_B/10^{-6}$ 

Table 2 Trace elements content in Yaochang and Sishanling iron deposits

序号	样品号	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr
1	K2	0.26	318.2	6.13	5.32	1543	0.35	2.13	9.13	111.4	1.41	0.54	3.79
2	K4	0.43	1047	94.09	232.9	1238	10.83	21.05	28.46	50.38	9.35	0.64	10.84
3	K5	0.66	2121	59.23	59.95	3202	4.41	7.96	49.07	36.98	12.36	1.03	4.69
4	K6-2	0.41	78.43	9.00	70.54	525.6	1.28	4.44	3.56	20.01	1.00	0.30	2.23
5	K7	0.27	62.95	6.60	52.20	686.4	4.55	5.74	7.22	30.24	3.13	0.31	3.84
6	K12	0.54	2210	55.56	41.24	3788	7.02	16.06	192.5	86.58	12.01	0.84	6.33
7	K18	0.25	149.4	5.51	6.83	1243	0.39	3.32	4.49	25.50	1.07	0.33	8.85
8	平均 1	0.40	855.4	33.73	67.00	1747	4.12	8.67	42.05	51.59	5.76	0.57	5.79
9	SSL0-10	0.68	239.80	9.84	5.76	154.92	2.20	7.43	7.82	16.10	0.91	0.17	3.40
10	SSL9-4	1.08	439.60	5.41	6.62	490.59	1.03	7.16	40.00	34.70	0.68	0.28	6.35
11	SSL2-9	0.96	359.70	30.70	5.62	—	3.36	8.75	24.70	25.20	1.07	0.26	3.43
12	平均 2	0.91	346.37	15.32	6.00	322.76	2.20	7.78	24.17	25.33	0.89	0.23	4.39
序号	样品号	Zr	Nb	Mo	Cs	Ba	Hf	Ta	Pb	Th	U	Ni/Co	Ti/V
1	K2	2.21	0.41	1.50	0.05	2.38	0.06	0.08	4.79	0.12	0.06	6.01	51.88
2	K4	4.93	0.82	17.22	0.05	4.78	0.13	0.11	5.96	0.39	0.19	1.94	11.13
3	K5	12.72	0.85	8.95	0.05	4.54	0.36	0.13	9.13	0.28	0.15	1.81	35.81
4	K6-2	1.00	0.29	5.82	0.02	2.40	0.04	0.07	2.64	0.06	0.07	3.48	8.71
5	K7	1.12	0.26	5.01	0.02	2.64	0.02	0.04	7.21	0.08	0.06	1.26	9.53
6	K12	9.86	1.02	5.54	0.07	7.69	0.30	0.15	38.67	0.26	0.11	2.29	39.78
7	K18	0.79	0.20	1.09	0.04	45.66	0.02	0.06	24.99	0.12	0.04	8.63	27.10
8	平均 1	4.66	0.55	6.45	0.04	10.01	0.13	0.09	13.34	0.19	0.10	2.11	25.36
9	SSL0-10	41.10	0.04	—	0.03	13.20	0.91	—	3.51	0.07	0.87	3.38	24.37
10	SSL9-4	69.40	0.07	0.02	0.09	22.00	1.54	—	4.33	0.03	0.10	6.95	81.26
11	SSL2-9	42.90	0.03	—	0.03	19.40	0.98	—	3.99	0.03	0.73	2.60	11.72
12	平均 2	51.13	0.05	0.02	0.05	18.20	1.14	—	3.94	0.05	0.57	4.31	39.11

注:样品 1~4 采自河南窑场 II 号矿体及其围岩;5~7 采自 I 号矿体及其围岩;样品 9~11 为思山岭铁矿矿体中的磁铁矿;8、12 分别代表两个铁矿磁铁矿微量元素含量以及比值的平均值;“—”表示低于检测线。

### 3.3 氧同位素

河南窑场铁矿和辽宁思山岭铁矿的 10 个磁铁矿氧同位素分析结果见于表 3。河南窑场铁矿磁铁矿的  $\delta^{18}\text{O}$  值变化范围为 5.7‰~8.6‰,平均值为 7.1‰。辽宁思山岭铁矿磁铁矿  $\delta^{18}\text{O}$  值变化范围为 0.6‰~4.3‰,平均值为 2.3‰。两者之间  $\delta^{18}\text{O}$  值不存在交集,前者明显偏大(图 4)。

### 3.4 热电性

前人研究表明,多数半导体矿物具有显著的热电特性(李家驹,1965;陈光远等,1989;李高山等,1993),即当半导体矿物处于温差(又称活化温度)条件下时,会产生温差电动势,其导电类型包括电子型或 N 型、空穴型或 P 型。热电系数  $\alpha$  (即单位温差下的电动势,单位为  $\pm\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ,极性符号“—”和“+”分别对应 N 型导电和 P 型导电)可以表征半导体矿物的热电性。

图 5 和图 6 是两个铁矿磁铁矿的热电性测试结果,显然:①两铁矿床中磁铁矿颗粒的热电势值均

表 3 河南窑场和辽宁思山岭铁矿磁铁矿氧同位素组成  
Table 3 Oxygen isotope compositions of magnetite from the Yaochang iron deposit in Henan Province and the Sishanling iron deposit in Liaoning Province

矿区	样品编号	样品描述	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}/\text{‰}$
河南窑场	K4	矿化角闪片岩	5.7
	K5	斜长角闪片岩	6.6
	K6-2	辉石磁铁石英岩	7.6
	K12	磁铁石英岩	6.8
	K18	黑云角闪片岩	8.6
辽宁思山岭	SSL0-10	条带状磁铁石英岩	1.5
	SSL0-9	条带状磁铁石英岩	2.5
	SSL2-9	条带状磁铁石英岩	0.6
	SSL6-1	条带状磁铁石英岩	4.3
	SSL9-4	条带状含云磁铁石英岩	2.5

为负值,说明磁铁矿的温差导电类型为电子型导电(即 N 型);②两铁矿床磁铁矿热电势绝对值随着活化温度的增加具有明显的增长趋势,而且热电势与活化温度之间具有良好的相关性;③随着温差增加,热电系数离散性趋减。河南窑场磁铁矿热电势

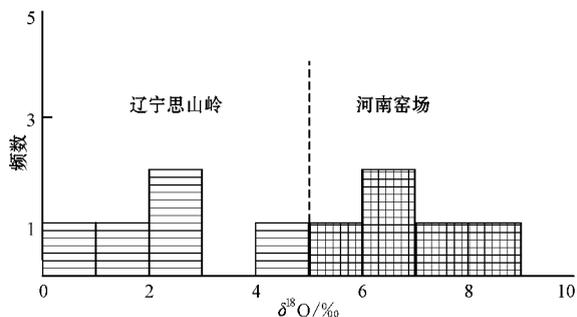


图 4 研究区磁铁矿中氧同位素频数直方图

Fig. 4 Histogram of oxygen isotope composition of magnetite from the study area

与活化温度之间的线性拟合结果显示,热电势  $y$  与温差  $T$  存在明显线性函数关系,为  $y = -0.05446x - 0.12399$  相关系数 0.84。数据显示,热电势平均值为  $-0.27 \text{ mV}$ ,最大值为  $-4.1 \text{ mV}$ 。辽宁思山岭磁铁矿热电系数与活化温度也呈线性关系,函数关系为  $y = -0.05313x - 0.10792$ ,相关系数为 0.99,热电势平均值为  $-2.22 \text{ mV}$ ,最大值为  $-5.5 \text{ mV}$ 。两矿床磁铁矿的热电特征对比看出,二者的热点势变化趋势具有相似性,但具体变化特点略有区别。其中,河南窑场和辽宁思山岭磁铁矿热电系数平均值存在一定偏差,分别为  $-59.05 \mu\text{V}/\text{C}$  和  $-57.18 \mu\text{V}/\text{C}$ 。前者的热电系数略偏小。

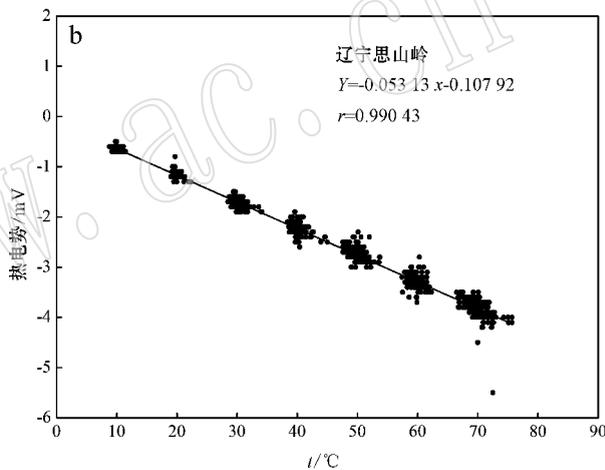
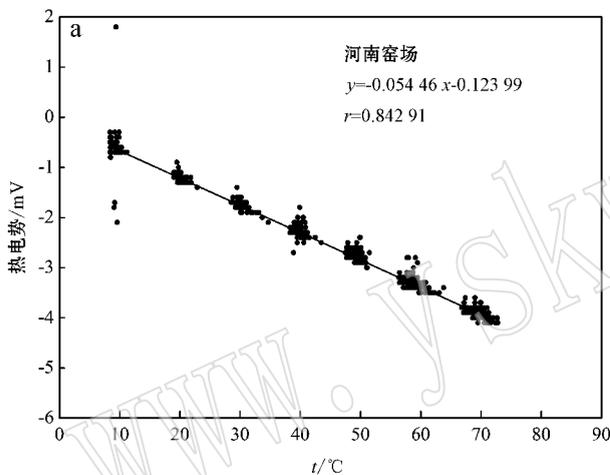


图 5 河南窑场 (a)和辽宁思山岭 (b)磁铁矿热电势与活化温度关系图

Fig. 5 The relationship between thermal voltage and temperature difference in Yaochang and Sishanling deposits

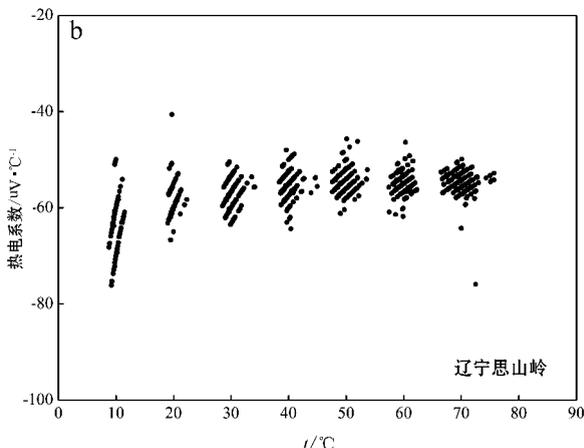
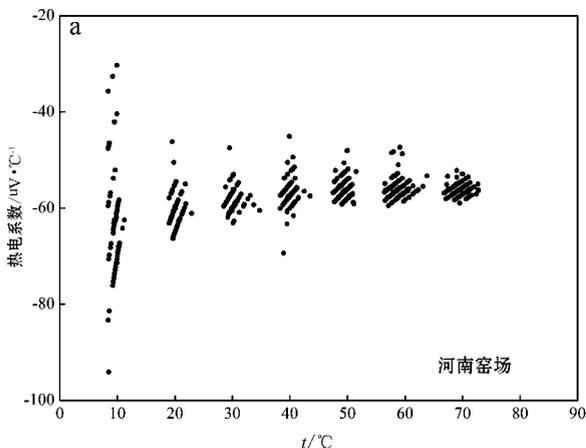


图 6 河南窑场 (a)和辽宁思山岭 (b)磁铁矿热电系数与活化温度关系图

Fig. 6 The relationship between thermoelectric coefficient and temperature difference in Yaochang and Sishanling iron deposits

## 4 讨论

### 4.1 磁铁矿成因标型

#### 4.1.1 磁铁矿成分标型讨论

众所周知,磁铁矿结构式为  $\text{Fe}^{\text{II}}\text{Fe}_2^{\text{III}}\text{O}_4$ , 属于反尖晶石结构(Fleet, 1981, 1986)。其中,  $\text{Fe}^{\text{II}}$  离子常常可以有  $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Zn}^{2+}$ 、 $\text{Mn}^{2+}$ 、 $\text{Ni}^{2+}$  等离子进行类质同像替代;  $\text{Fe}^{\text{III}}$  常被  $\text{Al}^{3+}$ 、 $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{Ti}^{4+}$ 、 $\text{Cr}^{3+}$  等替代(Lindsley, 1976; Ramdohr, 1980; 潘兆鲁, 1984; Pettijohn *et al.*, 1987; 王顺金, 1987)。实际上, 由于磁铁矿形成的地质环境不同, 其化学成分及类质同像置换情况会有所不同, 因而具有成因标型意义。徐国风等(1979)对各类成因类型磁铁矿矿床磁铁矿的化学成分进行了总结、归纳后认为: 不同成因类型铁矿床中磁铁矿标型组分具有一定差异。林师整(1982)对国内不同地区、不同成因类型矿床的约 3000 个磁铁矿样品的化学成分进行了测试分析, 归纳制作  $\text{TiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{MgO} + \text{MnO})$  磁铁矿成因三角图解, 将磁铁矿成因分为 6 类: 侵入岩中副矿物型、岩浆型、火山岩型、接触交代型、矽卡岩型和沉积变质型。陈光远等(1987)也曾通过对磁铁矿单矿物化学成分资料进行统计, 建立了  $\text{TiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO}$  成因三角图解, 将矿床中磁铁矿成因分为沉积变质

接触交代磁铁矿、超基性-基性-中基性岩浆磁铁矿、酸性-碱性岩浆磁铁矿。

根据前人总结归纳出的成因分类图解进行成分投图(图 7), 发现磁铁矿成分主要分布于沉积变质型和岩浆型磁铁矿区域, 与基性岩磁铁矿有着成因相似性, 反映出磁铁矿形成与基性岩存在联系。另外, 磁铁矿成分中一些微量元素和比值对其成因也具有显著的指示意义。一般认为,  $\text{Ni}$ 、 $\text{Co}$  更易于在地壳深部富集, 高的  $\text{Ni}/\text{Co}$  值是深源的特征(严炳铨等, 1993)。研究区磁铁矿  $\text{Ni}/\text{Co}$  值均大于 1, 表明其成因可能与深部物质有关。Mercex 认为矿石中  $\text{Ni}/\text{Co}$  的比值为 2~8, 反映了沉积成因(转引自曾玫吾等, 1981)。河南窑场和辽宁思山岭铁矿中磁铁矿的  $\text{Ni}/\text{Co}$  比值范围分别为 1.26~8.63、2.60~6.95, 均集中在 2~8 区间内, 而且有些学者认为  $\text{Ni} > \text{Co}$  的情况只出现在沉积变质型矿床中(叶庆同, 1982)。 $\text{Ti}/\text{V}$  的比值同样有类似的指示意义, 阙梅英(1984)指出,  $\text{Ti}/\text{V}$  比值大于 3.5 的多属沉积成因磁铁矿,  $\text{Ti}/\text{V}$  比值小于 3.2 的通常为火山成因或接触交代成因磁铁矿。河南窑场磁铁矿中  $\text{Ti}/\text{V}$  的比值均在 8.7 以上, 思山岭地区磁铁矿  $\text{Ti}/\text{V}$  在 11.7 以上, 说明两矿均为沉积变质成因。值得说明的是, 两矿床中磁铁矿  $\text{Sc}$  含量均较低, 平均值分别为  $0.4 \times 10^{-6}$  和  $0.9 \times 10^{-6}$ , 与火山沉积型( $\text{Sc} < 1.0 \times 10^{-6}$ )或与火山热

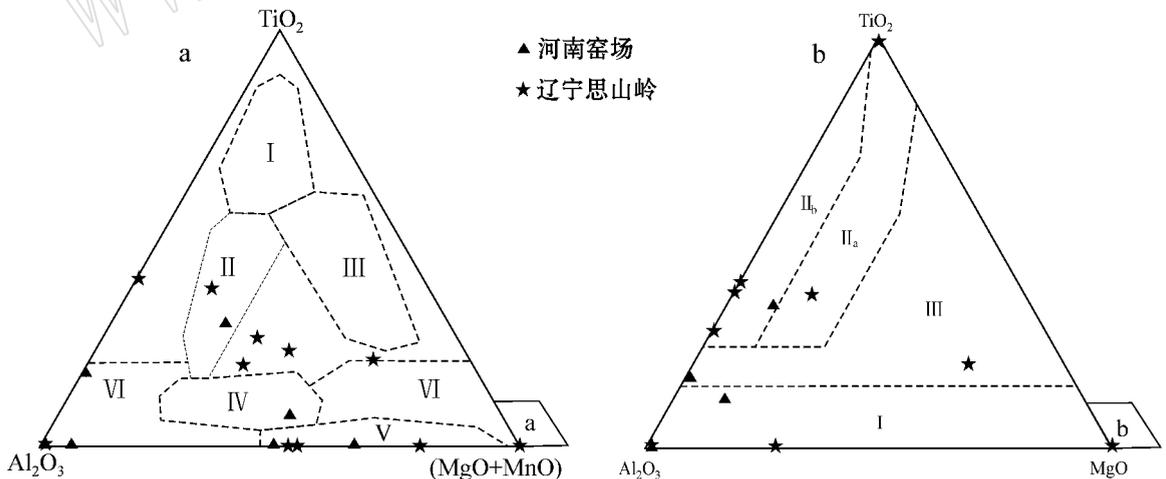


图 7 磁铁矿成因分类图解(a 据林师整, 1982; b 据陈光远等, 1987)

Fig. 7 Magnetite genetic classification diagram(a after Lin Shizheng, 1982; b after Chen Guangyuan *et al.*, 1987)

a: I—副矿物型; II—岩浆型; III—火山岩型; IV—接触交代型; V—矽卡岩型; VI—沉积变质型; b: I—沉积岩-矽卡岩磁铁矿趋势区; II—超基性-基性-中性岩浆磁铁矿趋势区; III—酸性-碱性岩浆磁铁矿趋势区

a: I—mineral magnetite; II—magnetite in magmatic deposit; III—magnetite in volcanic deposit; IV—magnetite in contact metasomatic deposit; V—magnetite in skarn deposit; VI—magnetite in metasedimentary deposit; b: I—magnetite in sedimentary and skarn deposit; II—magnetite in ultrabasic-basic-intermediate rock; III—magnetite in silicic-alkaline rock

液作用有关的磁铁矿中  $S_c$  值较为接近。河南窑场 Cu、Zn 平均值为  $51.59 \times 10^{-6}$ 、 $42.05 \times 10^{-6}$ , 与火山沉积型铁矿床磁铁矿 ( $50 \times 10^{-6}$ 、 $50 \times 10^{-6}$ , 王奎仁, 1989) 较为接近; 思山岭矿区的 Zn 平均值为  $25.33 \times 10^{-6}$ , 与区域变质型铁矿床磁铁矿 ( $30 \times 10^{-6}$ , 王奎仁, 1989) 较为接近。

#### 4.1.2 磁铁矿热电标型讨论

半导体矿物在温差下产生热电势通常被认为是由于矿物晶格中存在杂质元素或晶格缺陷所致。铁的氧化物和氢氧化物由于变价元素  $Fe^{2+}$  和  $Fe^{3+}$  的类质同像代替, 极易成为半导体矿物, 因而常常具有较明显的热电特性 (Banerjee and Chattopadhyay, 2008; Zheng, 2008)。研究表明热电性标型特征反映出矿物成分和晶体结构的细微差异 (陈光远等, 1987)。一般研究结果表明 (陈光远等, 1987; 申俊峰等, 2009, 2010), 不同类型矿床产出的磁铁矿, 其热电系数均为 N 型, 且变化不大, 集中于  $-50 \sim -70 \mu V/^\circ C$  之间。

表 4 为所列举的不同成因类型磁铁矿热电系数值, 从中可以看出窑场和思山岭铁矿磁铁矿热电系数远低于岩浆型、矽卡岩型, 而与沉积变质型磁铁矿接近 (申俊峰等, 2009, 2010)。磁铁矿作为半导体, 热电系数值可以反映结构的均一程度。岩浆成因磁铁矿降温晶出后极易出现固溶体条片, 导致结构不均一, 因而热电系数值较高; 沉积变质成因磁铁矿, 结构均匀, 热电系数较低。

表 4 不同成因类型磁铁矿热电系数值

Table 4 Thermoelectric coefficients of different genetic types of magnetite

序号	成因类型	热电系数 ( $\mu V/^\circ C$ )
1	岩浆型-含磁铁矿的橄榄岩	-70.00
2	岩浆型-河北大庙辉长岩中的磁铁矿	-63.33
3	岩浆型-基性岩中的钼钛磁铁矿	-64.90
4	岩浆型-辉长岩中的磁铁矿	-64.90
5	矽卡岩型-邯郸铁矿中的磁铁矿	-64.33
6	矽卡岩型-湖北大冶富铁矿中磁铁矿	-64.33
7	矽卡岩型-磁铁矿富矿	-66.20
8	氧化带中由硫化物变成的磁铁矿	-68.60
9	河南窑场围岩及矿石中磁铁矿	-59.05
10	辽宁思山岭铁矿英岩中磁铁矿	-57.18

注: 1~8 组数据转引自陈光远等 (1984)。

综上所述可以认为, 河南窑场和辽宁思山岭铁矿中磁铁矿均应属于火山沉积变质成因, 均与深部

有关, 且后者磁铁矿类质同像程度较低, 结构较为均一。

#### 4.2 BIFs 磁铁矿氧同位素组成对比

华北陆块条带状铁建造中矿石矿物类型主要为磁铁矿和赤铁矿, 其中磁铁矿氧同位素组成对于矿床形成的地质环境具有指示意义。将本次研究的河南窑场和辽宁思山岭的氧同位素  $\delta^{18}O$  值与华北陆块其他地区含磁铁矿建造 (如迁安岩群、鞍山岩群、遵化岩群、滦县岩群、冀东朱杖子岩群等) 的磁铁矿氧同位素  $\delta^{18}O$  值进行了对比研究 (表 5、图 8), 结果不难发现:

(1) 迁安岩群、遵化岩群和冀东朱杖子岩群的  $\delta^{18}O$  均大于零。就贫矿而言, 鞍山岩群和滦县岩群的  $\delta^{18}O$  值域较大, 负值正值均有。

(2) 冀东司家营北区和南区贫矿磁铁矿的  $\delta^{18}O$  平均值大致与原生沉积磁铁矿一致, 而大贾庄磁铁矿  $\delta^{18}O$  范围及平均值却与原生沉积磁铁矿及本岩群的其他矿区不一致;

(3) 冀东朱杖子岩群仅有贫矿数据, 前白枣山磁铁矿  $\delta^{18}O$  值与柞栏杖子相比极低;

(4) 除石人沟矿区外, 其他地区贫矿石中磁铁矿  $\delta^{18}O$  平均值均比富矿石磁铁矿高。沈其韩 (1998) 认为高  $\delta^{18}O$  值磁铁矿可能是由菱铁矿转化而来, 而低值磁铁矿可能是火山喷发的沉积产物。

通过总结前人研究成果可知 (魏菊英等, 1979, 1980; 钱祥麟等, 1985; 沈其韩, 1998), 华北陆块条带状铁建造磁铁矿富矿形成机制主要分为原始沉积、贫矿经热液改造 (分混合岩化热液和变质热液两种) 以及原始沉积的菱铁矿在变质作用下分解形成。钱祥麟等 (1985) 认为柞栏杖子铁矿的氧同位素组成可以反映出本区磁铁矿富矿应是由菱铁矿变质分解转化而来, 而冀东司家营等矿区富矿是由原始沉积的贫矿经地表水热液富集改造而来 (魏菊英等, 1979)。弓长岭二矿区富矿发育, 前人 (魏菊英等, 1980; 刘军等, 2010) 认为富矿是由具负  $\delta^{18}O$  值的热液改造磁铁矿石岩而形成的。本研究辽宁思山岭磁铁矿氧同位素变化范围在弓长岭二号矿区之内, 由于二者同属于鞍本矿集区, 且矿床成因较为接近, 反映了两者氧同位素同源性。河南窑场铁矿  $\delta^{18}O$  范围则与基性-超基性岩 ( $5.4\% \sim 6.6\%$ ) 较为接近。

从上述各岩群变质程度的角度对贫矿中磁铁矿氧同位素组成进行分析 (表 5), 可以看出, 除出现的个别矿区外 (如冀东朱杖子岩群柞栏杖子铁矿和滦

表5 华北陆块各岩群铁建造中磁铁矿氧同位素组成

Table 5 Oxygen isotope composition in magnetite of different banded iron formations in North China block

样品产出层位	位置	样品名称	样品数量	$\delta^{18}\text{O}$ 范围/‰	$\delta^{18}\text{O}$ 平均值/‰	变质等级	时代	数据来源
迁安岩群	二马矿区		3	2.7~6.9	5.3	麻粒岩相	中太古代	丁文君 (2010)
	杏山矿区	富矿石	3	2~3.9	2.97			
		铁英岩	10	1.3~5.5	4.04			
	水厂大杨庄采场	铁英岩	6	5.39~8.43	6.46			魏菊英等 (1979)
鞍山岩群	弓长岭二号矿区	富矿石	40	-5.4~-0.41	-2.9	高绿片岩相- 低角闪岩相	新太古代	魏菊英等 (1980)
		条带状铁英岩	42	-5.24~-6.16	0			
遵化岩群	石人沟	富矿	2	4.62~4.82	4.72	麻粒岩相	新太古代	
		贫矿	2	3.88~4.16	4.02			
	孟家沟	贫矿	7	2.06~4.79	3.67			
滦县岩群	司家营北区 司家营南区 大贾庄	富矿	6	-4.94~3.25	-1.57	高绿片岩相- 低角闪岩相	新太古代	钱祥麟等 (1985)
		贫矿	29	-0.99~5.81	3.27			
		富矿	4	-4.17~6.57	0.13			
		贫矿	12	-0.46~5.98	3.86			
		富矿	8	-5.43~-1.62	-3.96			
		贫矿	14	-6.35~4.81	-1.29			
冀东朱杖子群	前白枣山	贫矿	3	1.05~2.42	1.65	绿片岩相-角 闪岩相	古元古代	
	柞栏杖子	贫矿	4	1.59~11.58	8.77			
太华岩群	河南窑场矿床	铁英岩及围岩	5	5.7~8.6	7.06	高角闪岩相	古元古代	本研究;时 代引自万渝 生等(2012)
鞍山岩群	辽宁思山岭矿床	铁英岩	5	0.6~4.3	2.28	低角闪岩相	新太古代	

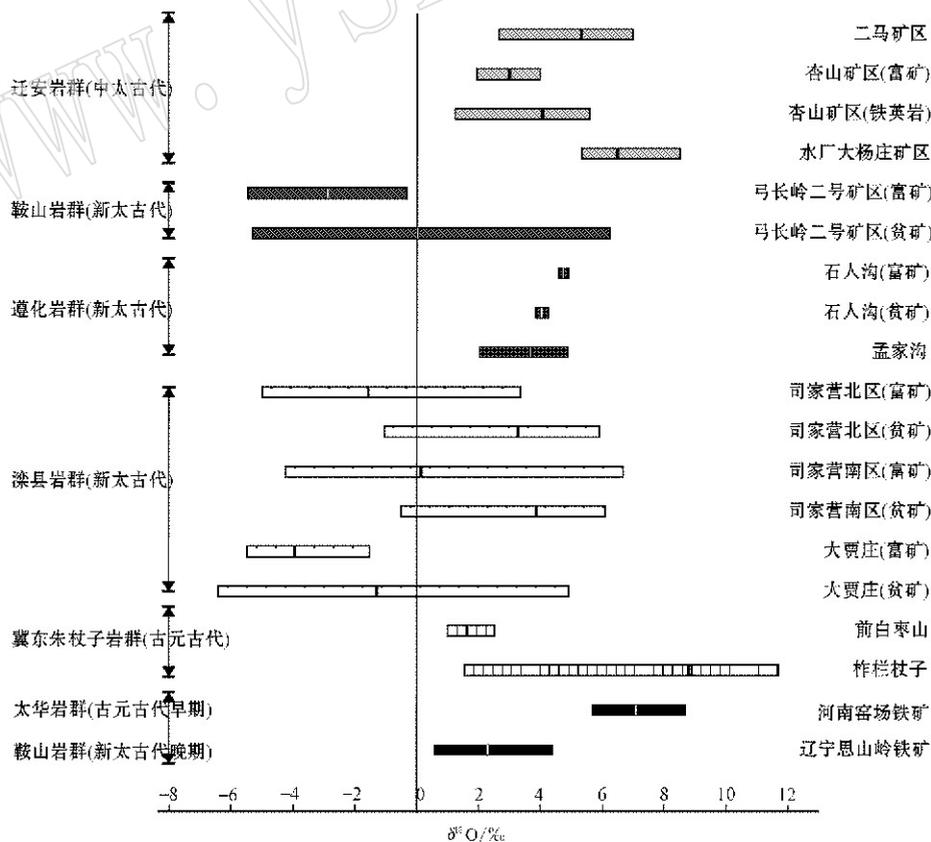


图8 华北陆块铁建造主要产出地区磁铁矿氧同位素组成对比图解

Fig. 8 Contrast diagram of magnetite oxygen isotope compositions from the main BIF-forming area in North China platform

县岩群大贾庄铁矿),  $\delta^{18}\text{O}$  值随变质程度的增加具有升高的趋势, 这与氧同位素在石英-磁铁矿矿物之间同位素分馏规律有关, 氧同位素因变质程度的升高而更易于分配在磁铁矿中。

### 4.3 BIFs 的形成环境

REE 在自然界中常呈稳定的 +3 价离子, 在氧化环境中 Ce 被氧化为 +4 价, 在还原环境中 Eu 可还原为 +2 价, 从而造成了 Ce、Eu 等元素与其他稀土元素的解耦。Ce 有两种价态 ( $\text{Ce}^{3+}$  和  $\text{Ce}^{4+}$ ), 对氧化还原环境敏感, 因此常用来作为示踪沉积盆地古海水的氧化还原状态 (Fryer, 1977)。与其他稀土元素相比, Ce 异常的判别由于 La 丰度的不规则变化而变得复杂, 因此 Bau 和 Dulski (1996) 建立了  $\text{Ce}/\text{Ce}^*$  和  $\text{Pr}/\text{Pr}^*$  图解来判别真正的 Ce 负异常。将河南窑场和辽宁思山岭铁矿中磁铁矿的  $\text{Ce}/\text{Ce}^*$  (0.66~0.92, 0.70~0.82) 和  $\text{Pr}/\text{Pr}^*$  (0.80~1.14, 0.89~1.0) 分别投在判别图解 (图 9) 中, 可以看出, 河南窑场绝大多数样品落到 Ce 负异常区域, 而辽宁思山岭样品全部落在了 La 正异常区域。Ce 负异常反映氧化环境, 通常在氧化的海水中, 经页岩标准化后的海水具有强烈的 Ce 负异常; 而低氧或缺氧的海水缺乏明显的 Ce 负异常。在氧化海水中,  $\text{Ce}^{3+}$  氧化成  $\text{Ce}^{4+}$ , 而  $\text{Ce}^{4+}$  由于水解而被 Fe-Mn 的氢氧化物、有机物和粘土等吸附而发生沉淀, 造成海水中 Ce 的

亏损 (Byren and Sholkovitz, 1996)。由此而知, 辽宁思山岭 BIF 未出现明显的 Ce 负异常, 暗示了其形成于还原环境, 这与早前寒武纪属缺氧环境的认识相符 (Planavsky *et al.*, 2010; Bekker *et al.*, 2010; 侯可军等, 2007)。

通过总结华北陆块中太古代、新太古代和古元古代等不同时期条带状矿石和富铁磁铁矿石岩 (由于磁铁矿含量较高, 可近似代表磁铁矿单矿物稀土元素含量) 的 Ce 异常值 (冀东、五台和吕梁数据引自李志红等, 2010; 内蒙古三合明、鞍本、歪头山、弓长岭、司家营、滦平周台子和鲁东昌邑数据依次引自刘利等, 2012; 李志红等, 2012; 代堰镛等, 2012; 杨秀清等, 2012; 李文君等, 2012; 相鹏等, 2012; 蓝廷广等, 2012), 并投入图 9, 可以看出: 绝大多数样品落入到 II a 区域, 但也有部分样品落入了 Ce 负异常区域 (III b), 其中古元古代 BIF 样品比例较高。Eu 正异常的强弱实际上也可以反映 BIFs 形成环境的氧化还原状况: 热液组分越多, 形成环境愈还原, Eu 异常就越明显, 反之亦然 (李延河等, 2012)。为此, 笔者对以上 BIFs 样品 (引文同图 9) 的 Eu 异常值进行对比 (图 10), 可以看出, 随 BIF 年龄由老到新, Eu 异常值整体趋减。结合前述, 反映了华北陆块 BIFs 形成时的古海洋整体上处于缺氧或少氧环境, 但从中太古代到古元古代, 还原环境影响趋弱。

李厚民等 (2012) 认为沉积变质型铁矿主要形成于早前寒武纪的太古宙和古元古代, 并可能与地球早期大气缺氧的特殊气候条件有关。沈其韩 (1998) 对前寒武纪条带状铁建造的时空分布进行了总结, 认为我国铁英岩矿床发育全盛时期为新太古代早期, 其次为中太古代和新太古代晚期; 而古元古代早期铁英岩矿床分布不普遍, 只在部分地区发育, 较太古宙而言储量较小。BIF 中 Eu 异常从太古宙正异常到中、新元古代呈逐渐增强的负异常, 反映大气圈从缺氧到富氧的变化 (赵振华, 2010)。由于铁为变价元素, 二价铁易溶, 而三价铁难溶, 因此, 只有在 2.2 Ga (蓝廷广等, 2012) 前大气缺氧的环境下, 才有可能有大量二价铁在海水中溶解富集, 为成矿创造条件, 而前寒武纪古地球气候变化导致地史上 BIFs 的全球性终止 (李厚民等, 2012)。辽宁思山岭铁矿形成时代初步厘定为新太古代, 新增资源量为 24.78 亿吨 (孟旭阳等, 2012), 而河南窑场形成时代为新太古代—古元古代之间或古元古代早期, 新增资源量仅为 40 万吨 (张东阳等, 2009)。从前寒武纪岩石

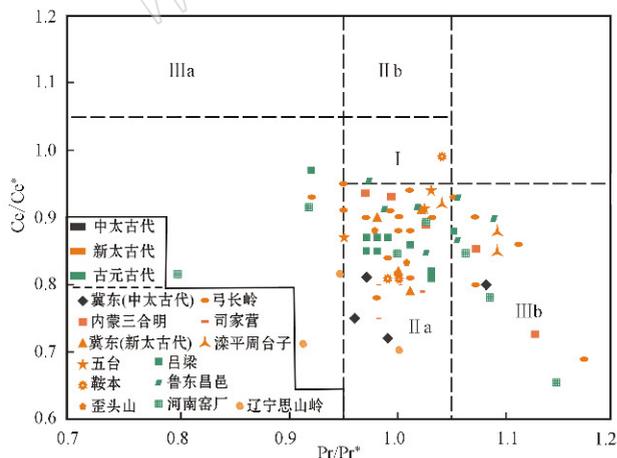


图 9 Ce 负异常判别图解 (据 Bau and Dulski, 1996)

Fig. 9  $\text{Ce}/\text{Ce}^*$  versus  $\text{Pr}/\text{Pr}^*$  discrimination diagram

(after Bau and Dulski, 1996)

III a—Ce 正异常; III b—Ce 负异常; II a—La 正异常且无 Ce 异常;

II b—La 负异常且无 Ce 异常

III a—positive Ce anomaly; III b—negative Ce anomaly; II a—positive

La anomaly without Ce anomaly; II b—negative La anomaly without

Ce anomaly

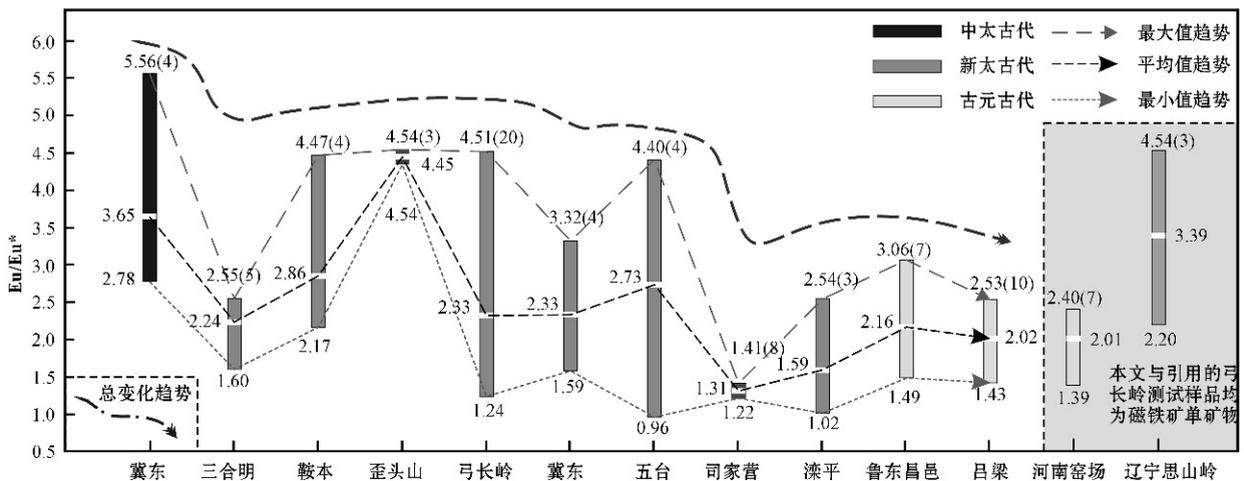


图 10 华北陆块各时期 BIFs 的 Eu 异常值变化趋势图

Fig. 10 Eu/Eu\* value-trending chart of BIFs from Archean to Early Proterozoic in North China block

圈演化的角度来看,太古宙是华北克拉通最重要的陆壳增生期,发生大规模火山-岩浆活动(翟明国, 2008),相对于太古宙,古元古代时期华北陆块基本上已完成克拉通化,处于相对稳定的构造环境(翟明国等, 2007)。Eu 正异常作为海底高温热液的特征,其值大小也反映了混合溶液中高温热液的相对贡献量(Danielson *et al.*, 1992)。河南窑场铁矿形成时代晚于前寒武纪岩浆活动的峰期(2.55~2.5 Ga),古元古代期间的构造环境使得火山-岩浆活动剧减,可能导致地壳尺度的热液活动减少(Bau and Möller, 1993)。以上因素可能是影响形成时代较晚的河南窑场铁矿矿体规模较小的一个方面。

## 5 结论

(1) 研究区(河南窑场和辽宁思山岭铁矿)磁铁矿成因上属于火山沉积变质,与海底火山沉积作用有联系,成矿来源与深部有关。其中,辽宁思山岭铁矿磁铁矿类质同像程度较低,结构较为均一。

(2) 华北陆块南北缘主要铁建造岩群贫富矿石磁铁矿  $\delta^{18}\text{O}$  值具有规律性,与富化机制之间存在密切联系;同时不同铁建造岩群中贫矿石磁铁矿  $\delta^{18}\text{O}$  值与变质程度存在联系,一般是随变质程度升高而升高。

(3) BIFs 形成环境整体为还原环境。华北陆块 BIFs 形成时的古海洋整体上处于缺氧或少氧环境,伴随华北陆块演化,还原环境影响趋弱,不利于条带

状铁建造的形成。

**致谢** 感谢中国地质大学(北京)地质实验中心、核工业北京地质研究院分析测试中心对样品进行了分析测试;感谢中国地质大学(北京)岩矿教研室实验室张秀宝工程师为磁铁矿热电性的测试工作提供了仪器的便利和理论上的指导,同时感谢孙嘉博士在论文完成过程中给予的帮助。最后,感谢匿名审稿人提供宝贵的指导修改意见!

## References

- Banerjee A N and Chattopadhyay K K. 2008. Reactive Sputtered Wild-banded Gap P-Type Semiconducting Spinel  $\text{AB}_2\text{O}_4$  and Delafossite  $\text{ABO}_2$  Thin Films for Transparent Electronics[M]. Berlin Heidelberg: Springer, 413~484.
- Bau M and Möller P. 1993. Rare earth element systematics of the chemically precipitated component in Early Precambrian iron formations and the evolution of the terrestrial atmosphere-hydrosphere-lithosphere system[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57: 2239~2249.
- Bau M and Dulski P. 1996. Distribution of yttrium and rare-earth elements in the Penge and Kuruman iron-formation, Transvaal Supergroup, South Africa[J]. *Precambrian Research*, 79: 37~55.
- Bekker A, Slack J F, Phinavsky N, *et al.* 2010. Iron formation: The sedimentary product of a complex interplay among mantle, tectonic, oceanic and biospheric processes[J]. *Economic Geologist*, 105: 467~408.

- Byren R and Sholkovitz E. 1996. Marine chemistry and geochemistry of the lanthanides[ A ]. Gschneider JrK A and Eyring L. Handbook on the Physics and Geochemistry of the Rare Earth[ C ]. Amsterdam : Elsevier , 79 : 497 ~ 593.
- Chen Guangyuan , Li Meihua , Wang Xuefang , *et al.* 1984. Minerageny album of Gongchangling iron deposit[ J ]. J. Mineral. Petrol. , 4 ( 2 ) : 14 ~ 42 ( in Chinese ).
- Chen Guangyuan , Shao Wei and Sun Daisheng. 1989. Genetic Mineralogy of Gold Deposits in Jiaodong Region with Emphasis on Gold Prospecting[ M ]. Chongqing : Chongqing Publishing House , 1 ~ 325 ( in Chinese ).
- Chen Guangyuan , Sun Daisheng and Yin Huiian. 1987. Genetic Mineralogy and Prospecting Mineralogy[ M ]. Chongqing : Chongqing Publishing House , 1 ~ 29 ( in Chinese ).
- Dai Huimin , Bao Qingzhong , Yang Zuosheng , *et al.* 2007. Granularity effects of rare earth elements ( REE ) of the Huanghe river sediments [ J ]. Quaternary Sciences , 27 ( 5 ) : 718 ~ 723 ( in Chinese ).
- Dai Yanpei , Zhang Lianchang , Wang Changle , *et al.* 2012. Genetic type , formation age and tectonic setting of the Waitoushan banded iron formation , Benxi , Liaoning Province[ J ]. Acta Petrologica Sinica , 28 ( 11 ) : 3 574 ~ 3 594 ( in Chinese ).
- 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.
- Ding Wenjun. 2010. Geochemical Characteristics and Genesis of Banded iron Formations from Iron Ore in Qian 'an Area[ D ]. Beijing : China University of Geosciences , 1 ~ 70 ( in Chinese ).
- Fleet M E. 1981. The structure of magnetite[ J ]. Acta Crystallography , B37 : 917 ~ 920.
- Fleet M E. 1986. The structure of magnetite : symmetry of cubic spinels [ J ]. J. Solid State Chem. , 62 ( 1 ) : 75 ~ 82.
- Fryer B.J. 1977. Rare earth evidence in iron formation for changing Precambrian oxidation states[ J ]. Geochimica et Cosmochimica , 41 : 361 ~ 367.
- Gross G A. 1965. Geology of iron deposit in Canada[ A ]. General geology and evaluation of deposits[ C ]. Geol. Surv. Can. Rep. 22 : 181.
- Han Yigui , Zhang Shihong , Franco Pirajno , *et al.* 2007. Evolution of the Mesozoic granites in the Xiong 'ershan- Waifangshan region , western Henan Province , China , and its tectonic implications[ J ]. Acta Geologica Sinica , 81 ( 2 ) : 253 ~ 265.
- Hou Kejun , Li Yanhe and Wan Defang. 2007. Constraints on the Archean atmospheric and sulfur cycle from mass-independent sulfur records from Anshan-Benxi BIFs , Liaoning Province , China[ J ]. Science in China Series D : Earth Sciences , 50 ( 10 ) : 1 471 ~ 1 478.
- James H.L. 1954. Sedimentary facies of iron formation. Economic Geology , 49 ( 3 ) : 235 ~ 293.
- James H L. 1983. Distribution of banded iron formation in space and time. Developments in Precambrian Geology , 6 : 471 ~ 490.
- Lan Tingguang , Fan Hongrui , Hu Fangfang , *et al.* 2012. Geological and Geochemical characteristics of Paleoproterozoic Changyi banded iron formation deposit , Jiaodong Peninsula of eastern China[ J ]. Acta Petrologica Sinica , 28 ( 11 ) : 3 595 ~ 3 611 ( in Chinese ).
- Li Gaoshan , Yang Dianfan , Xu Hong , *et al.* 1993. The Electric-Cave Center in Minerals and Its Application on Deposite Prospecting[ M ]. Beijing : Geological Publishing House ( in Chinese ).
- Li Houmin , Wang Denghong , Li Lixing , *et al.* 2012. Metallogeny of iron deposits and resource potential of major iron minerogenetic units in China[ J ]. China Geology , 39 ( 3 ) : 559 ~ 580 ( in Chinese ).
- Li Jiaju. 1965. The thermoelectric effect of minerals and its application [ J ]. Geological Review , 23 ( 4 ) : 316 ~ 317 ( in Chinese ).
- Li Wenjun , Jin Xindi , Cui Minli , *et al.* 2012. Characteristics of rare earth elements , trace elements and geological significations of BIF from Sijiaying in eastern Hebei[ J ]. Acta Petrologica Sinica , 28 ( 11 ) : 3 670 ~ 3 678 ( in Chinese ).
- Li Yanhe , Hou Kejun , Wan Defang , *et al.* 2012. A compare geochemistry study for Algoma-and Superior-type banded iron formations [ J ]. Acta Petrologica Sinica , 28 ( 11 ) : 3 513 ~ 3 519 ( in Chinese ).
- Li Yanhe , Hou Kejun , Wan Defang , *et al.* 2010. Formation Mechanism of Precambrian Banded Iron Formation and Atmosphere and Ocean during Early Stage of the Earth[ J ]. Acta Geological Sinica , 84 ( 9 ) : 1 359 ~ 1 373 ( in Chinese ).
- Li Zhihong , Zhu Xiangkun , Tang Suohan , *et al.* 2010. Characteristics of rare earth elements and geological significations of BIFs from Jidong , Wutai and Lvliang Area[ J ]. Geoscience , 24 ( 5 ) : 840 ~ 846 ( in Chinese ).
- Li Zhihong , Zhu Xiangkun and Tang Suohan. 2012. Fe isotope compositions of banded iron formation from Anshan-Benxi area : Constraints on the formation mechanism and Archean ocean environment[ J ]. Acta Petrologica Sinica , 28 ( 11 ) : 3 545 ~ 3 558 ( in Chinese ).
- Lin Shizheng. 1982. A contribution to the chemistry , origin and evolution of magnetite[ J ]. Acta Mineralogica Sinica , 3 : 166 ~ 174 ( in Chinese ).
- Lindsley D.H. 1976. The crystal chemistry and structure of oxinde minerals as exemplified by the Fe-Ti oxides[ A ]. Rumble III D. Oxide Minerals 3[ C ]. Reviews in Mineralogy , Mineralogical Society of America , L1 ~ L60.
- Liu Huizhuo , Tang Yuegang and Zhao Fenghua. 2007. Mineralogical characteristics of magnetite ore from Jinbeizhuang iron-ore deposit [ J ]. Nonferrous Metals , 59 ( 1 ) : 98 ~ 102 ( in Chinese ).
- Liu Jun and Le Shuyun. 2010. Genesis study of Magnetite-rich ore in

- Gongchangling iron deposit, Liaoning [ J ]. *Geoscience*, 24 ( 1 ): 80 ~ 88 ( in Chinese ).
- Liu Li, Zhang Lianchang, Dai Yanpei, *et al.* 2012. Formation age, geochemical signatures and geological significance of the Sanheming BIF-type iron deposit in the Guyang greenstone belt, Inner Mongolia [ J ]. *Acta Petrologica Sinica*, 28 ( 11 ): 3 623 ~ 3 637 ( in Chinese ).
- McLennan S B. 1989. 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, 21: 169 ~ 200.
- Meng Xuyang, Wang Peng, Zhang Dongyang, *et al.* 2012. Element geochemistry of the Sishanling iron deposit in Liaoning Province and its geological implications [ J ]. *China Geology*, 39 ( 6 ): 1 965 ~ 1 881 ( in Chinese ).
- Pan Zhaolu. 1984. *Crystallography and Mineralogy ( Volumes 2 )* [ M ]. Beijing: Geological Publishing House, 1 ~ 274 ( in Chinese ).
- Pettijohn F P, Potter P E and Siever R. 1987. *Sand and Sandstones ( 2nd )* [ M ]. New York: Springer-Verlag, 553.
- Planavsky N, Bekker A, Rouxel O J, *et al.* 2010. Rare earth element and yttrium compositions of Archean and Paleoproterozoic Fe formations revisited: New perspectives on the significance and mechanisms of deposits [ J ]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74: 6 387 ~ 6 405.
- Qian Xianglin, Cui Wenyuan, Wang Shilin, *et al.* 1985. *Geology of Precambrian iron ores in Eastern Hebei province, China* [ M ]. Shijiazhuang: Hebei Science and Technology Press, 1 ~ 273 ( in Chinese ).
- Que Meiyang. 1984. The origin of Etouchang iron deposit and the characteristics of its iron minerals [ J ]. *J. Mineral Petrol.*, 1: 57 ~ 70 ( in Chinese ).
- Ramdohr P. 1980. *The Ore minerals and Their Intergrowths* [ M ]. New York: Pergamon, 911 ~ 940.
- 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 ~ 46.
- Shen Baofeng, Zhai Anmin, Chen Wenming, *et al.* 2006. The Precambrian mineralization of China [ M ]. Beijing: Geol. Pub. House, 45 ~ 71 ( in Chinese ).
- Shen Baofeng, Zhao Anmin, Yang Chunliang, *et al.* 2005. Temporal-apatial distribution and evolution characters of Precambrian iron deposits in China [ J ]. *Geological Survey and Research*, 4 ( 28 ): 196 ~ 206 ( in Chinese ).
- Shen Junfeng, Shen Xuhui and Liu Qian. 2009. The enlightenment from thermoelectricity of a few natural semiconductor minerals for seismic electric field change [ J ]. *Earth Science Frontiers*, 16 ( 4 ): 313 ~ 319 ( in Chinese ).
- Shen Junfeng, Shen Xuhui and Liu Qian. 2010. The thermoelectric effect of magnetite: A new model for abnormal geo-electricity from the formation and occurrence of earthquake [ J ]. *J. Mineral. Petrol.*, 30 ( 4 ): 21 ~ 27 ( in Chinese ).
- Shen Qihan. 1998. *Geology character and formation conditions of early Precambrian BIFs in Huabei Crator* [ A ]. Cheng Y Q. *Early Precambrian Geology Study on Huabei Crator* [ C ]. Beijing: Geological Publishing House, 83 ~ 91 ( in Chinese ).
- Wang Kuiren. 1989. *Genetic Mineralogy of Earth and Universe* [ J ]. Education Publishing House of Anhui, 1 ~ 544 ( in Chinese ).
- Wan Yusheng, Dong Chunyan, Xie Hangqiang, *et al.* 2012. Formation ages of early Precambrian BIFs in the North China Craton: SHRIMP Zircon U-Pb Dating [ J ]. *Acta Geologica Sinica*, 86 ( 9 ): 1 447 ~ 1 478 ( in Chinese ).
- Wang Shunjin. 1987. The typical characteristics of magnetite [ J ]. *Coll. Mineral Petrol.*, ( 3 ): 139 ~ 154 ( in Chinese ).
- Wei Juying, Wang Guanyu, Qiang Demei, *et al.* 1980. The characteristics of oxygen isotope compositions in Gongchangling iron ore deposit, Anshan [ A ]. *The Records of Geological Research in Peking University* [ C ]. Beijing: Beijing University Press, 158 ~ 167 ( in Chinese ).
- Wei Juying, Zheng Shuhui and Mo Zhichao. 1979. Oxygen isotopic composition of magnetite in presinian Fe-bearing quartzite in the area of Lushan xian county, Hebei province [ J ]. *Geochimica*, 3: 195 ~ 201 ( in Chinese ).
- Xiang Peng, Cui Minli, Wu Huaying, *et al.* 2012. Geological characteristics, ages of host rocks and its geological significance of the Zhoutaizi iron deposit in Luanping, Hebei Province [ J ]. *Acta Petrologica Sinica*, 28 ( 11 ): 3 655 ~ 3 669 ( in Chinese ).
- Xu Guofeng and Shao Jieliang. 1979. Typomorphic characteristics of magnetite and its practical significance [ J ]. *Geology and Exploration*, 3: 30 ~ 37 ( in Chinese ).
- Yan Bingquan, Wu Kelong, Wang Wenteng, *et al.* 1993. Study on the genetic mineralogy of magnetites from the Zhangzhou Complex Massif in Fujian Province [ J ]. *Geology of Fujian*, 12 ( 1 ): 1 ~ 16 ( in Chinese ).
- Yan Shenghao, Zhang Zhaochong, Wang Yitian, *et al.* 2005. REE geochemistry of Qiaoxiahala type Fe-Cu deposits in Southern margin of Altay Mountains, Xinjiang, and its geological implication [ J ]. *Mineral Deposits*, 24 ( 1 ): 25 ~ 33 ( in Chinese ).
- Yang Shouye, Li Congxian, Zhu Jinchu, *et al.* 2000. Provenance indicator of chemical fingerprint of magnetite from the Yangtze River and the Yellow River sediments [ J ]. *Geochimica*, 29 ( 5 ): 478 ~ 484 ( in Chinese ).

Chinese).

Yang Xiuqing, Li Houmin, Li Lixing, *et al.* 2012. Characteristics of rare elements and the geological significance of magnetite from Gongchangling iron deposit in Liaoning provic[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 06: 1 058~1 066(in Chinese).

Yao Peihui. 1993. *Iron Mine Record of China*[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1~66(in Chinese).

Ye Qingtong. 1982. Typomorphic characteristics and genesis significance of magnetite from some iron ore deposit in eastern Guangdong[J]. *Acta Petrologica Mineralogica et Analytica*, 1(1): 44~51(in Chinese).

Ying Lijuan, Wang Denghong, Liang Ting, *et al.* 2006. Chemical composition and typomorphic characteristics of magnetite and its geological significance in Qiaoxiahala iron-copper-gold deposit of Altai, Xinjiang[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 26(1): 59~68(in Chinese).

Zeng Meiwu, Wang Manzhi and Qu Weizheng. 1981. Minerageny of magnetite in Bayan Obo iron deposit[J]. *J. Mineral Petrol.*, 1: 44~58(in Chinese).

Zhai Mingguo and Peng Peng. 2007. Paleoproterozoic events in the North China Crator[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(11): 2 665~2 682(in Chinese).

Zhai Mingguo. 2008. Lower crust and lithospheric mantle beneath the North China Craton before the Mesozoic lithospheric disruption[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(10): 2 185~2 204(in Chinese).

Zhang Dongyang, Su Huimin, Qin Song, *et al.* 2009. Geochemical of Yaochang iron deposit in Henan Province and its geological implication[J]. *Mineral Deposit*, 28(3): 321~335(in Chinese).

Zhang Dongyang, Su Huimin, Tian Lei, *et al.* 2010. Genetic mineralogy of the Yaochang iron deposit in Henan province and their geological implication[J]. *J. Mineral Petrol.*, 30(1): 53~63(in Chinese).

Zhang Jianzhong, Feng Binhuan, Jin Haojia, *et al.* 1987. The genetic relationship between margin volcanic rocks and iron deposits at Abagong-Mengku area, Altay district, Xinjiang and ore-forming geological features[J]. *Northwest Geoscience*, 6: 89~172(in Chinese).

Zhao Guochun, Wilde S A, Cawood P A, *et al.* 2001. Archean blocks and their boundaries in the North China Craton: lithological, geochemical, structural and P-T path constraints and tectonic evolution[J]. *Precambrian Research*, 107: 45~73.

Zhao Zhenhua. 2010. Banded iron formation and related great oxidation[J]. *Earth Science Frontier*, 17(2): 1~12(in Chinese).

Zheng Jincheng. 2008. Recent advance on thermoelectric materia[J]. *Frontiers of Physics in China*, 3(3): 269~279.

## 附中文参考文献

陈光远,黎美华,汪雪芳,等. 1984. 弓长岭铁矿成因矿物学专辑[J]. *矿物岩石*, 4(2): 14~42.

陈光远,邵伟,孙岱生. 1989. 胶东金矿成因矿物学与找矿[M]. 重庆:重庆出版社, 1~325.

陈光远,孙岱生,殷辉安. 1987. 成因矿物学与找矿矿物学[M]. 重庆:重庆出版社, 1~29.

戴慧敏,鲍庆中,杨作升,等. 2007. 黄河沉积物中稀土元素(REE)组成的粒度效应[J]. *第四纪研究*, 27(5): 718~723.

代堰锴,张连昌,王长乐,等. 2012. 辽宁本溪歪头山条带状铁矿的成因类型、形成时代及构造背景[J]. *岩石学报*, 28(11): 3 574~3 594.

丁文君. 2010. 迁安铁矿地球化学特征及其对矿床成因的指示[D]. 北京:中国地质大学, 1~70.

侯可军,李延河,万德芳. 2007. 鞍山-本溪地区条带状硅铁建造中硫同位素非质量分馏效应对太古代大气和硫循环的制约[J]. *中国科学(D)地球科学*, 37(8): 997~1 003.

蓝廷广,范宏瑞,胡芳芳,等. 2012. 鲁东昌邑古元古代 BIF 铁矿床地球化学特征及矿床成因讨论[J]. *岩石学报*, 28(11): 3 595~3 611.

李高山,杨殿范,许虹,等. 1993. 矿物中的电子-空穴及其在找矿勘探中的应用[M]. 北京:地质出版社.

李厚民,王登红,李立兴,等. 2012. 中国铁矿成矿规律及重点矿集区资源潜力分析[J]. *中国地质*, 39(3): 559~580.

李家驹. 1965. 矿物的热电效应及其应用[J]. *地质论评*, 23(4): 316~317.

李文君,靳新娣,崔敏利,等. 2012. BIF 微量稀土元素分析方法及其在冀东司家营铁矿中的应用[J]. *岩石学报*, 28(11): 3 670~3 678.

李延河,侯可军,万德芳,等. 2010. 前寒武纪条带状硅铁建造的形成机制与地球早期的大气和海洋[J]. *地质学报*, 84(9): 1 359~1 373.

李延河,侯可军,万德芳,等. 2012. Algoma 型和 Superior 型硅铁建造地球化学对比[J]. *岩石学报*, 28(11): 3 513~3 519.

李志红,朱祥坤,唐索寒,等. 2010. 冀东、五台和吕梁地区条带状铁矿的稀土元素特征及其地质意义[J]. *现代地质*, 24(5): 840~846.

李志红,朱祥坤,唐索寒. 2012. 鞍山-本溪地区条带状铁矿的 Fe 同位素特征及其对成矿机理和地球早期海洋环境的制约[J]. *岩石学报*, 28(11): 3 545~3 558.

林师整. 1982. 磁铁矿矿物化学、成因及演化的探讨[J]. *矿物学报*, 3: 166~174.

- 刘慧卓,唐跃刚,赵峰华. 2007. 近北庄磁铁矿的矿物特征[J]. 有色金属, 59(1): 98~102.
- 刘军,靳淑韵. 2010. 辽宁弓长岭铁矿磁铁富矿的成因研究[J]. 现代地质, 24(1): 80~88.
- 刘利,张连昌,代堰锴,等. 2012. 内蒙古固阳绿岩带三合明BIF型铁矿形成时代、地球化学特征及地质意义[J]. 岩石学报, 28(11): 3623~3637.
- 孟旭阳,王鹏,张东阳,等. 2012. 辽宁思山岭铁矿元素地球化学特征及其地质意义[J]. 中国地质, 39(6): 1865~1881.
- 潘兆鲁. 1984. 结晶学与矿物学(下册)[M]. 北京:地质出版社, 1~274.
- 钱祥麟,崔文元,王时麒,等. 1985. 冀东前寒武纪铁矿地质[M]. 石家庄:河北科学技术出版社: 1~273.
- 阙梅英. 1984. 云南罗茨鹤头厂铁矿床主要铁矿物特征及矿床成因探讨[J]. 矿物岩石, 1: 57~70.
- 申俊峰,申旭辉,刘倩. 2009. 几种天然半导体矿物热电特性对地震电场影响的启示意义[J]. 地学前缘, 16(4): 313~319.
- 申俊峰,申旭辉,刘倩. 2010. 磁铁矿热电效应:地震地电异常的新模式[J]. 矿物岩石, 30(4): 21~27.
- 沈保丰,翟安民,陈文明,等. 2006. 中国前寒武纪成矿作用[M]. 北京:地质出版社, 47~71.
- 沈保丰,翟安民,杨春亮,等. 2005. 中国前寒武纪铁矿床时空分布和演化特点[J]. 地质调查与研究, 4(28): 196~206.
- 沈其韩. 1998. 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[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, 83~91.
- 万渝生,董春艳,颜顽强,等. 2012. 华北克拉通早前寒武纪条带状铁建造形成时代——SHRIMP 锆石 U-Pb 定年[J]. 地质学报, 86(9): 1447~1478.
- 王奎仁. 1989. 地球与宇宙成因矿物学[M]. 安徽教育出版社, 1~544.
- 王顺金. 1987. 论磁铁矿的标型特征[J]. 矿物岩石学论丛(3): 139~154.
- 魏菊英,王关玉,强德美,等. 1980. 鞍山弓长岭铁矿床的氧同位素组成特征[A]. 北京大学地质研究文集[C]. 北京:北京大学出版社, 158~167.
- 魏菊英,郑淑蕙,莫志超. 1979. 冀东滦县一带前震旦纪含铁石英岩中磁铁矿的氧同位素组成[J]. 地球化学, 3: 195~201.
- 相鹏,崔敏利,吴华英,等. 2012. 河北滦平周台子条带状铁矿地质特征、围岩时代及其地质意义[J]. 岩石学报, 28(11): 3655~3669.
- 徐国风,邵洁涟. 1979. 磁铁矿的标型特征及其实际意义[J]. 地质与勘探, 3: 30~37.
- 闫升好,张招崇,王义天,等. 2005. 新疆阿尔泰山南缘乔夏哈拉式铁铜矿床稀土元素地球化学特征及其地质意义[J]. 矿床地质, 24(1): 25~33.
- 严炳铨,吴克隆,王文腾,等. 1993. 福建漳州复式岩体磁铁矿的成因矿物学特征[J]. 福建地质, 12(1): 1~16.
- 杨守业,李从先,朱金初,等. 2000. 长江与黄河沉积物中磁铁矿成分标型意义[J]. 地球化学, 29(5): 478~484.
- 杨秀清,李厚民,李立兴,等. 2012. 辽宁弓长岭铁矿床磁铁矿稀土元素特征及其地质意义[J]. 岩矿测试, 06: 1058~1066.
- 姚培慧. 1993. 中国铁矿志[M]. 北京:冶金工业出版社, 1~662.
- 叶庆同. 1982. 鲁东一些铁矿床中磁铁矿标型特征及其地质意义[J]. 岩矿测试, 1(1): 44~51.
- 应立娟,王登红,梁婷,等. 2006. 新疆阿尔泰山乔夏哈拉铁铜金矿床磁铁矿的化学成分标型特征和地质意义[J]. 矿物学报, 26(1): 59~68.
- 曾玖吾,王曼社,曲维政. 1981. 白云鄂博铁矿磁铁矿成因矿物学的研究[J]. 矿物岩石, 1: 44~58.
- 翟明国. 2008. 华北克拉通中生代破坏前的岩石圈地幔与下地壳[J]. 岩石学报, 24(10): 2185~2204.
- 翟明国,彭澎. 2007. 华北克拉通古元古代构造事件[J]. 岩石学报, 23(11): 2665~2682.
- 张东阳,苏慧敏,秦松,等. 2009. 河南窑场铁矿床地球化学特征及其地质意义[J]. 矿床地质, 28(3): 321~335.
- 张东阳,苏慧敏,田磊,等. 2010. 河南窑场铁矿成因矿物学研究及其地质意义[J]. 矿物岩石, 30(1): 53~63.
- 张建中,冯秉寰,金浩甲,等. 1987. 新疆阿勒泰阿巴宫-蒙库海相火山岩与铁矿的成生关系及成矿地质特征[J]. 西北地质科学, 6: 89~172.
- 赵振华. 2010. 条带状铁建造(BIF)与全球大氧化事件[J]. 地学前缘, 17(2): 1~12.