

冀东司家营 BIF 型铁矿北矿区典型矿石矿物特征 及其对成矿演化的约束

李文韬¹,董国明²,丁枫¹,曹瑞明²,杨立群²,范宇航¹,刘佳²,郑新²

(1. 成都理工大学地球与行星科学学院, 四川 成都 610059; 2. 河北省地矿局第二地质大队, 河北 唐山 063000)

摘要:冀东司家营 BIF 型铁矿床是我国最典型的条带状铁矿床之一,系统的矿石、矿物特征研究对 BIF 型铁矿床的成矿演化具有重要的指示意义。本文对该矿区多种典型铁矿石开展了详细的岩相学研究,结合矿物原位电子探针(EPMA)测试分析,共识别出 5 种磁铁矿类型,划分出原始沉积期、变质变形期、热液蚀变期以及表生氧化期 4 个成矿演化期次,并获得与之相关的磁铁矿、黑云母、绿泥石以及角闪石等矿物的化学定量分析结果。通过分析磁铁矿矿物化学特征,计算黑云母与绿泥石形成时的温度差异,结合化学特征指示的成矿环境变化,认为矿床早期为典型的沉积变质成因,后期遭受了变质、变形以及热液作用的影响和改造。综合地质特征、矿石矿物与脉石矿物的岩相学特征、主量元素分析等,我们认为抬升至地表后的氧化作用对矿床影响较小,Fe 的富集可能与 Mg、Mn 和 Ca 等元素的迁移有关,变质变形期末-热液蚀变期为冀东司家营 BIF 铁矿床富铁矿形成最重要的时期。

关键词:冀东司家营; BIF 型铁矿床; 磁铁矿; 矿物特征; 成矿演化

中图分类号: P618.31; P57

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2025)01-0068-19

Mineralogical characteristics of typical ore from the BIF-type iron deposit at Sijiaying north mining district in eastern Hebei Province and their constraints on the metallogenic evolution

LI Wen-tao¹, DONG Guo-ming², DING Feng¹, CAO Rui-ming², YANG Li-qun², FAN Yu-hang¹,
LIU Jia² and ZHENG Xin²

(1. College of Earth and Planetary Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. No. 2 Geological Party, Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources, Tangshan 063000, China)

Abstract: The BIF-type iron deposit at Sijiaying in eastern Hebei Province is considered one of the most representative banded iron deposits in China. A systematic investigation of ore and mineral characteristics holds significant implications for understanding the metallogenic evolution of BIF-type iron deposits. In this study, we conducted comprehensive petrographic observations on various typical iron ores from this mining area, and combined them with in situ electron probe (EPMA) testing and analysis, five distinct magnetite types were identified. Furthermore, we identified four stages of metallogenic evolution: the initial sedimentary stage, metamorphic deformation stage, hydrothermal alteration stage, and epigenetic oxidation stage. EPMA results were obtained for magnetite, biotite,

收稿日期: 2023-10-11; 接受日期: 2024-01-10; 编辑: 宋会侠

基金项目: 河北省地质勘查资金项目(13000022P0069B4100396, 13000023P00F2D410305X); 国家自然科学基金项目(42377194); 四川省自然科学基金项目(2023NSFSC0282); 四川省中央引导地方科技发展项目(2023ZYD0151)

作者简介: 李文韬(1999-), 男, 硕士研究生, 主要从事矿物学、岩石学、矿床学方面的研究工作, E-mail: 1067810031@qq.com; 通讯

作者: 董国明(1974-), 男, 教授级高级工程师, 主要从事矿产勘查、矿山地质环境等工作, E-mail: 173924783@qq.com;

丁枫(1973-), 男, 博士, 副教授, 主要从事矿产资源调查、区域地质调查方面的研究工作, E-mail: 22847785@qq.com。

网络首发时间: 2024-03-09; 网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1966.P.20240307.1609.002.html>

chlorite, and hornblende. By analyzing the chemical characteristics of magnetite and calculating the different formation temperature of biotite and chlorite, and considering changes in the metallogenic environment indicated by their chemical characteristics, it indicated that a typical feature of sedimentary metamorphism is present in the early stage of the deposit and that it suffered from metamorphism, deformation, and hydrothermal effects in the later stage. Combined with geological features, petrographic characteristics of ore minerals and gangue minerals, major element analysis, and other studies, we considered that the oxidation after uplifting to the surface had less influence to the deposit; the enrichment of Fe may be related to the migration of elements such as Mg, Mn, and Ca. The end of the metamorphic deformation stage to the hydrothermal alteration stage is the most important stage for the formation of Fe-rich iron ore in the BIF-type iron deposit at Sijiaying in eastern Hebei Province.

Key words: Sijiaying in eastern Hebei Province; BIF-type iron deposit; magnetite; mineral characteristics; metallogenic evolution

Fund support: Hebei Geological Exploration Fund Project(13000022P0069B4100396, 13000023P00F2D410305X); National Natural Science Foundation of China (42377194); Natural Science Foundation of Sichuan Province (2023NSFSC0282); Sichuan Province Central Guiding Local Science and Technology Development Project (2023ZYD0151)

条带状铁建造 (banded iron formation, 简称 BIF) 型铁矿床是广泛发育于晚太古代-元古宙 (3.7~1.8 Ga) 克拉通中 (张连昌等, 2012) 的沉积变质型铁矿床, 既是全球最重要的铁矿石资源之一, 也是研究地球早期的大气、海洋环境、生物活动以及地质演变的重要对象 (Klein, 2005; Bekker *et al.*, 2010)。BIF 通常形成于浅海环境, 主要是由中-新太古代大量喷发的富铁幔源基性-超基性岩浆与海水混合随着氧化还原条件的改变沉积形成, 在其形成后通常遭受区域变质作用的改造, 而 BIF 型富铁矿多是受后期流体改造形成 (李文君等, 2012; Hagemann *et al.*, 2016; Eggseder *et al.*, 2019; 张招崇等, 2021; 李厚民等, 2022)。

华北克拉通是中国最重要的 BIF 型铁矿矿集区, 产量约占全国的 1/10 (图 1a, 张连昌等, 2012; 翟明国, 2019)。司家营铁矿床位于华北克拉通北缘中段的冀东地区南部的滦县滦南成矿区带中 (图 1b), 是冀东规模最大、保存最完好、最典型的沉积变质型铁矿床, 已探明铁矿资源量近 2.4×10^{10} t, 铁矿石年产量超过 3×10^7 t (高新宇等, 2022), 前人通过总结司家营铁矿床地质特征、地球化学特征及成岩成矿时代, 认为司家营铁矿床为新太古代 (2.54 Ga \pm) 阿尔戈马型 BIF 铁矿, 与海底火山沉积作用密切相关 (Cui *et al.*, 2014; 陈靖等, 2014; 高新宇等, 2022)。目前, 针对司家营铁矿床的矿物化学特征欠缺系统性探讨, 在矿床形成过程中受变质和热液作用的改造也缺少相关的矿物学依据。

BIF 原始沉积的结构、构造以及矿物成分会因不同程度变质、蚀变作用发生改变 (Klein, 2005), 而这些变化通常蕴藏着关于 BIF 演化、形成环境等方面的重要指示信息。通过对 BIF 的矿物组成进行探讨, 确定矿物成因, 探讨矿物的形成条件, 可以反映铁矿床形成过程中成矿及海洋环境物理化学条件的变化, 有助于探索 BIF 的原始矿物组成、形成环境及演化过程 (孟旭阳等, 2014)。这些工作对于总结 BIF 的形成机制、了解地球早期古海洋及氧化还原环境, 揭示早期地球表生环境变化机制等均具有重要的科学意义 (佟小雪等, 2018; 胡军等, 2019; 张连昌等, 2020; 田忠华等, 2022)。

为厘定矿床成矿演化期次和各期矿物元素地球化学特征, 本文以司家营 BIF 型铁矿床北矿区矿石为研究对象, 利用电子探针微区分析法 (EPMA) 对磁铁矿石岩的磁铁矿和硅酸盐等矿物进行了系统性研究, 以期加深对司家营铁矿床形成过程的认识, 更好地了解含铁矿物的演化历史, 从而加深对冀东地区前寒武纪 BIF 成矿演化与变质变形-热液耦合关系的理解, 为进一步了解该类型矿床的形成机理和控制因素提供科学依据。

1 区域及矿床地质特征

华北克拉通总体呈倒立三角形展布, 周围被四条造山带围绕 (图 1a)。司家营铁矿床地处华北克拉通东部地块北部的冀东地区, 区域出露地层主要

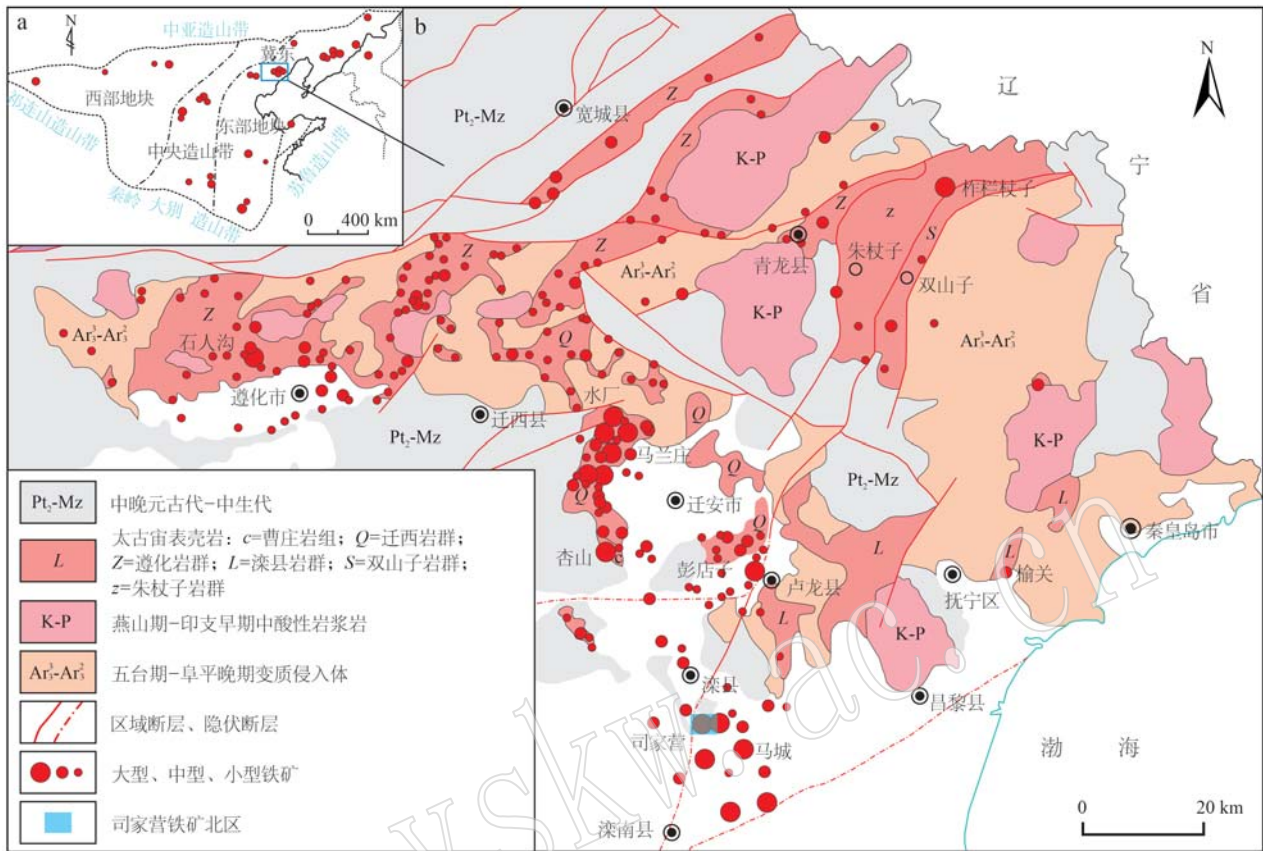


图1 华北克拉通主要BIF时空分布图(a, 据Zhao *et al.*, 2005修改)和冀东地区区域地质图(b, 据河北省区域地质矿产调查研究所, 2017修改)

Fig. 1 Distribution of major BIF deposits in the North China Craton(a, modified after Zhao *et al.*, 2005) and regional geological sketch map of eastern Hebei Province(b, modified after Hebei Institute of Regional Geology and Mineral Resources, 2017)

为曹庄岩组 (Ar_2^2C) (2 936~2 800 Ma)、迁西岩群 (Ar_3^1Q) (2 800~2 700 Ma)、遵化岩群 (Ar_3^2Z) (2 700~2 600 Ma)、滦县岩群 (Ar_3^3L) (2 700~2 600 Ma)、双山子岩群 (Ar_3^4S) (>2 500 Ma)、朱杖子岩群 (Ar_3^5z) (>2 500 Ma) (图1b; 河北省区域地质矿产调查研究所, 2017)。岩石组合包括条带状铁建造、黑云斜长变粒岩、斜长角闪岩、斜长片麻岩等, 原岩为以硅铁质沉积岩、黏土岩、凝灰岩和火山岩为主的火山-沉积建造, 变质程度主要为绿片岩相-高角闪岩相, 部分地区可达麻粒岩相 (崔伟等, 2022b)。

司家营铁矿床以S6勘探线为界分为南矿区与北矿区, 北矿区主要为露天开采, 南矿区为地下开采。区内出露基岩主要为太古界滦县群阳山岩组变质岩以及上元古界长城系大红峪组 (图2)。阳山岩组是最主要的赋矿层位, 由一套达角闪岩相变质程度的黑云斜长变粒岩夹磁铁石英岩建造组成; 大红

峪组以角度不整合覆盖于太古宇变质岩之上, 自下而上主要由砂岩和含燧石条带白云岩组成 (崔伟等, 2022b)。区内构造复杂, 主要受太古宙后的两期褶皱作用影响, 发育滦南、兴隆庄两组向斜; 断裂构造广泛发育, 错断矿体走向, 对矿体有一定破坏作用。区内岩浆岩规模不大, 以遍及全区的小规模伟晶岩脉以及呈区段性分布的变质辉长辉绿岩脉为主。

区内矿体整体走向延伸4 km, 倾向延深最大可达300 m, 自东向西将矿体划分为I、II、III、IV这4个矿体 (图2)。各矿体产状较为一致, 走向近南北, 西倾, 倾角分布于 $25^\circ \sim 50^\circ$ (崔伟等, 2022a)。其中I、III、IV矿体属典型的板状矿体, 由多层矿层呈平行层状组成并产出于阳山岩组 (Ar_3^2y) 中, III矿体规模最大, 为北矿区主要矿体; II矿体属板状矿体的过渡类型, 多呈扁豆状或透镜状产出, 详细特征见表1。

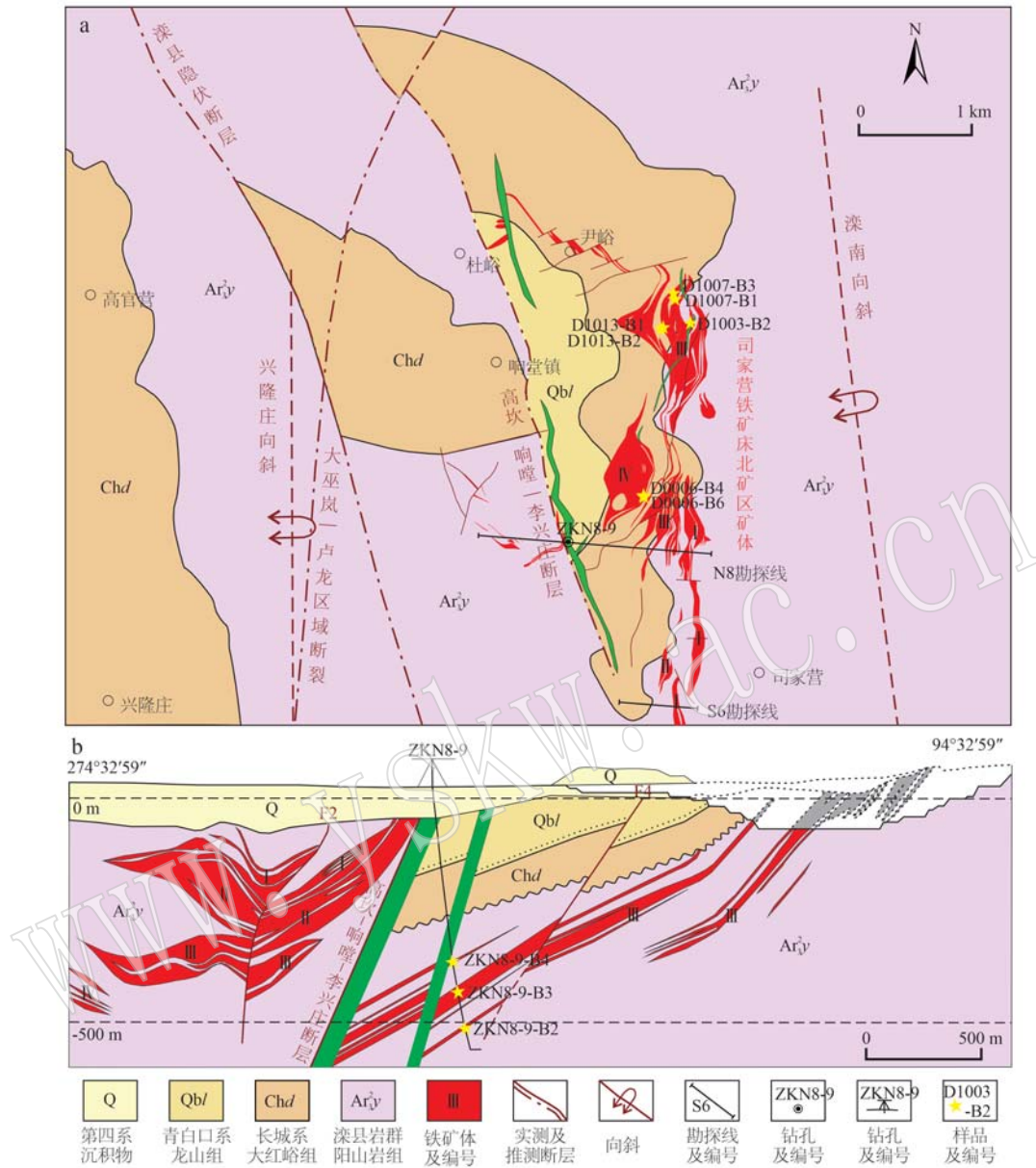


图 2 司家营铁矿床北矿区地质简图(a, 据河北省区域地质矿产调查研究所, 2017 修改)和 N8 勘探线剖面图 (b, 据河北省地矿局第二地质大队, 2021 修改)

Fig. 2 Geological map of northern Sijiaying BIF (a, modified after Hebei Institute of Regional Geology and Mineral Resources, 2017) and profile of exploration line N8 (b, modified after No. 2 Geological Party, Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources, 2021)

表 1 司家营铁矿床北矿区矿体特征
Table 1 Characteristic of ore bodies in the northern mining area of the Sijiaying iron deposit

编号	走向延伸/m	分布标高/m	倾向延深/m	矿体类型	产状特征
I	约 2 150	96~ -340	5~ 113	板状	矿体呈层状产出, 中部出露地表, 南北两端隐伏于第四系或长城系大红峪组之下, 局部可见膨胀和收缩现象, 上厚下薄, 分支尖灭。
II	约 900	60~ -558	30~ 80	过渡形状	矿体呈扁豆状或纺锤状产出, 局部有露头, 绝大部分隐伏于第四系或长城系大红峪组之下, 厚度、延深变化较大, 向深部变薄尖灭趋势明显。
III	约 2 800	57~ -1 288	100~ 300	板状	矿体呈层状产出, 局部出露地表, 大部分隐伏于第四系或长城系大红峪组之下, 夹有多层夹石, 被高坎-响哩-李兴庄断层错断, 沿走向有膨胀和分枝复合现象。
IV	约 1 840	-11~ -725	20~ 40	板状	矿体呈层状产出, 全部隐伏于长城系大红峪组之下, 多尖灭于高坎-响哩-李兴庄断层以东。

2 矿石矿物特征

2.1 矿石特征及矿物组成

区内矿石类型主要为磁铁矿石英岩型铁矿石,矿石矿物主要为磁铁矿,少量赤铁矿、假像赤铁矿、黄铁矿、黄铜矿等,脉石矿物主要为石英,少量绿帘石、绿泥石、黑云母、阳起石、方解石等。此外,近地表发育有少量赤铁矿石英岩型氧化矿石,矿石矿物主要为赤铁矿、假像赤铁矿,少量磁铁矿等,脉石矿物主要为石英、角闪石、绿泥石等。矿石常见结构包括鳞片状变晶结构、粒状变晶结构、交代结构等,构造常见条带状构造、块状构造及少量揉皱构造。根据成矿期次可划分为变质变形期矿石、热液蚀变期矿石和表生氧化期矿石,下文依照3种类型对矿石进行分述:

(1) 变质变形期矿石:系原始BIF的沉积构造被大规模的区域变质作用改造形成(Klein, 2005),主要为条带状磁铁矿石、条纹状磁铁矿石以及细纹状磁铁矿石,手标本及镜下均可见磁铁矿与脉石矿物呈互层产出(图3a~3c、3e,图4a、4b),矿物组合基本一致,以磁铁矿、石英为主,磁铁矿含量多在40%以下,粒度相对较细,此外还有阳起石、普通角闪石、黑云母等与磁铁矿共存(图4c、4d)。

条带状磁铁矿石(图3a)区内少见,矿石石英条带宽度大于5 mm,磁铁矿条带1~2 mm或稍宽一些,矿石品位较低,TFe含量在20%左右。

条纹状磁铁矿石(图3b)为区内分布最广泛的矿石之一,常与细纹状矿石呈渐变关系,石英条纹宽一般为1~3 mm,个别宽达5 mm,磁铁矿条纹宽度多在1 mm左右,矿石品位相对较低,TFe含量一般在25%~30%之间。

细纹状磁铁矿石(图3c)亦为区内分布最广泛的矿石之一,磁铁矿条纹与石英条纹宽度基本相等,纹宽均小于1 mm,矿石品位较高,TFe含量一般在30%以上。

(2) 热液蚀变期矿石:该类矿石多由热液蚀变作用引发贫铁矿石中磁铁矿、石英重结晶形成,多呈致密块状(图3d),区内分布较少,矿石平均品位较高,TFe含量一般达50%以上,磁铁矿含量可达50%~85%,粒度相对较大,镜下可见少量磁铁矿中残留有菱铁矿(图4e),边部及裂隙分布有黄铜矿、黄铁矿(图3f),并可见少量绿帘石、绿泥石,碳酸盐矿物蚀变

或穿切早期形成的矿物产出(图3h,图4f~4h)。

(3) 表生氧化期矿石:该类矿石多为氧化期产物,以赤铁矿石为主,主要分布于矿区上部氧化带中,品位较高,但规模较小,主要由赤铁矿、磁铁矿、硅酸盐矿物等组成,赤铁矿多呈不规则粒状集合体出现,有时呈浸染状交代磁铁矿产出(图3g、3i、图4i)。

2.2 磁铁矿

磁铁矿是司家营BIF最主要的矿石矿物,主要包括5种类型:磁铁矿-1粒度较细(<100 μm),自形程度较差,多分布于变质程度较低的条带状磁铁矿石中,呈他形粒状与石英组成条带产出;磁铁矿-2粒度相对较细(<150 μm),多分布于条纹状磁铁矿石中,呈他形-半自形粒状;磁铁矿-3粒度相对较粗(100~300 μm),多呈半自形-自形粒状分布于细纹状磁铁矿石中;磁铁矿-4为蚀变作用影响重结晶形成,粒度较粗(200~400 μm),多呈他形-半自形粒状集合体分布于块状磁铁矿石中;磁铁矿-5主要分布于赤铁矿石中,粒度不等,多受氧化作用影响被赤铁矿交代形成(图3)。

2.3 蚀变作用

司家营铁矿床发育有以绿帘石化、绿泥石化、碳酸盐化为主的多种热液蚀变作用。

绿帘石化(图3d、图4b):区内广泛发育,具多期次、多阶段的特点,多呈浸染状发育于矿石的裂隙面,与矿石具有密切的接触关系。

绿泥石化(图3c、3e、3h,图4f、4g):区内主要发育的蚀变类型之一,属较晚阶段的蚀变作用,呈不规则状广泛分布于矿石表面、裂隙面,多为蚀变黑云母产出。

碳酸盐化(图3i,图4h、4i):多沿矿石裂隙呈脉状穿切脉石矿物产出。

3 成矿期次

根据矿石结构构造、矿物特征、矿物组合及接触关系,结合前人研究成果,可将司家营铁矿床大致分为4个期次(图5),即原始沉积期、变质变形期、热液蚀变期、表生氧化期。

(1) 原始沉积期:矿物组合为燧石、铁氢氧化物、菱铁矿,大多已经因变质变形、热液作用而重结晶或蚀变、交代,原始的沉积构造也多被改造(Klein, 2005)。

(2) 变质变形期:受区域上绿帘-角闪岩相变质

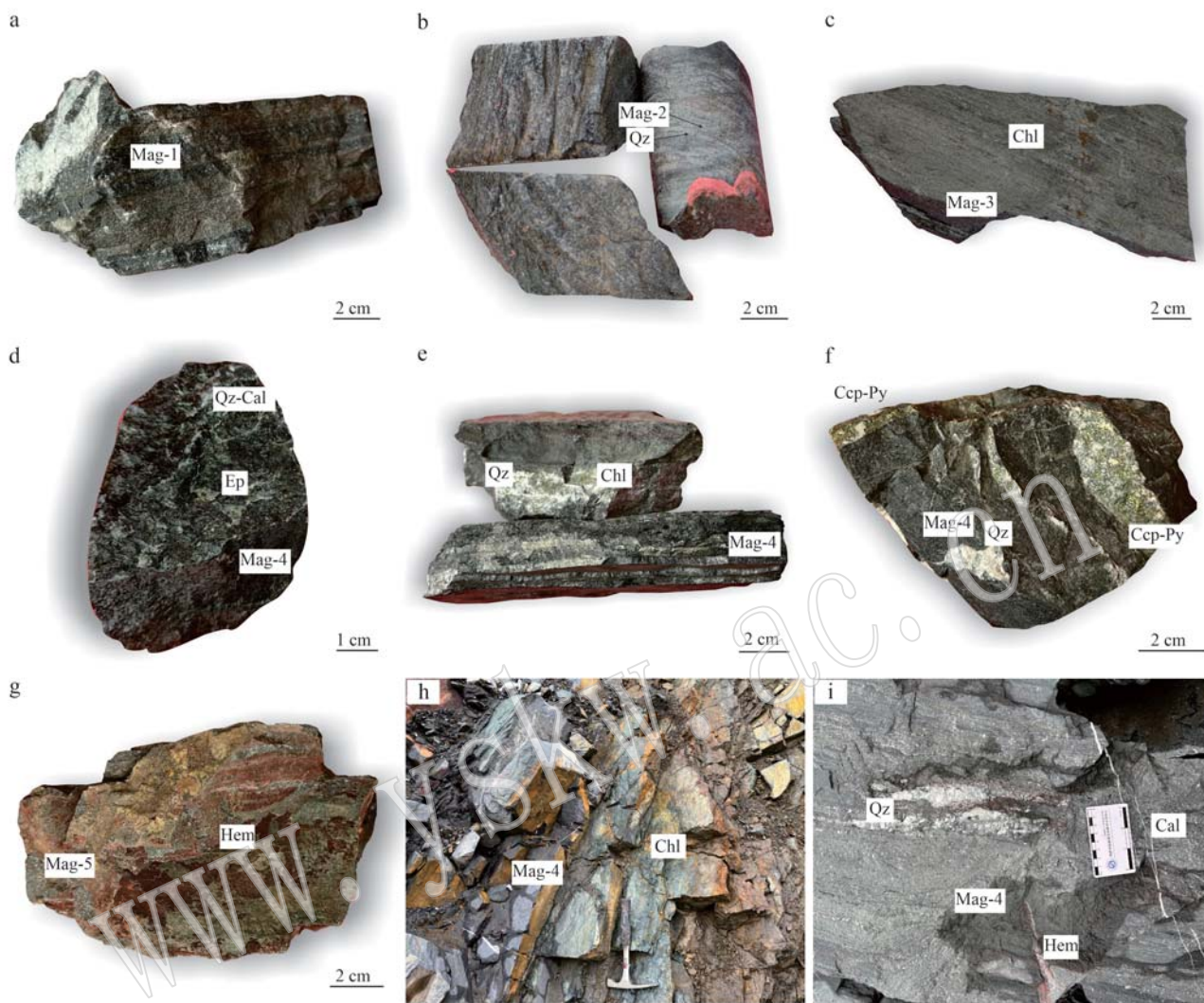


图 3 司家营 BIF 矿石特征

Fig. 3 Characteristics of ore from the Sijiaying BIF

a—条带状磁铁矿石；b—条纹状磁铁矿石；c—绿泥石化细纹状磁铁矿石，发育有石英、方解石细脉；d—绿帘石化块状磁铁矿石，发育有石英、方解石细脉；e—绿帘石化磁铁矿石，磁铁矿-4、绿泥石、石英呈条带分布；f—块状磁铁矿石，发育黄铜矿、黄铁矿；g—赤铁矿石；h—块状磁铁矿石与围岩界线，发育绿泥石化；i—方解石脉穿切矿石；Mag—磁铁矿；Hem—赤铁矿；Py—黄铁矿；Ccp—黄铜矿；Ep—绿帘石；Chl—绿泥石；Qz—石英；Cal—方解石

a—banded magnetite ore；b—striped magnetite ore；c—chlorite-altered striped magnetite ore, with quartz and calcite veins；d—epidote-altered blocky magnetite ore, with quartz and calcite veins；e—magnetite ore with chlorite alteration, exhibiting the banded distribution of magnetite, chlorite, and quartz；f—blocky magnetite ore, with the development of chalcopyrite and pyrrhotite；g—hematite ore；h—boundary between blocky magnetite ore and surrounding rocks, with chlorite alteration；i—calcite veins crosscutting the ore；Mag—magnetite；Hem—hematite；Py—pyrite；Ccp—chalcopyrite；Ep—epidote；Chl—chlorite；Qz—quartz；Cal—calcite

作用以及动力变质作用的影响,原始沉积的硅铁建造组分开始发生分异,形成主要由石英、磁铁矿组成的条纹条带状磁铁矿石(陈靖, 2014)。该期次形成的矿物组合为磁铁矿-1、磁铁矿-2、磁铁矿-3、石英、钠长石、中长石、黑云母、阳起石、普通角闪石、铁铝榴石。

(3) 热液蚀变期: BIF 的磁铁矿富矿体的形成与热液蚀变息息相关(Duuring and Hagemann, 2013),热液作用催动“去硅富铁”改造贫铁矿的进程,使已形成的条纹条带状铁建造硅质发生迁移,形成块状磁铁矿石。该期次形成的矿物组合包括磁铁矿-4、石英以及黄铁矿、黄铜矿、绿帘石、白云石、方

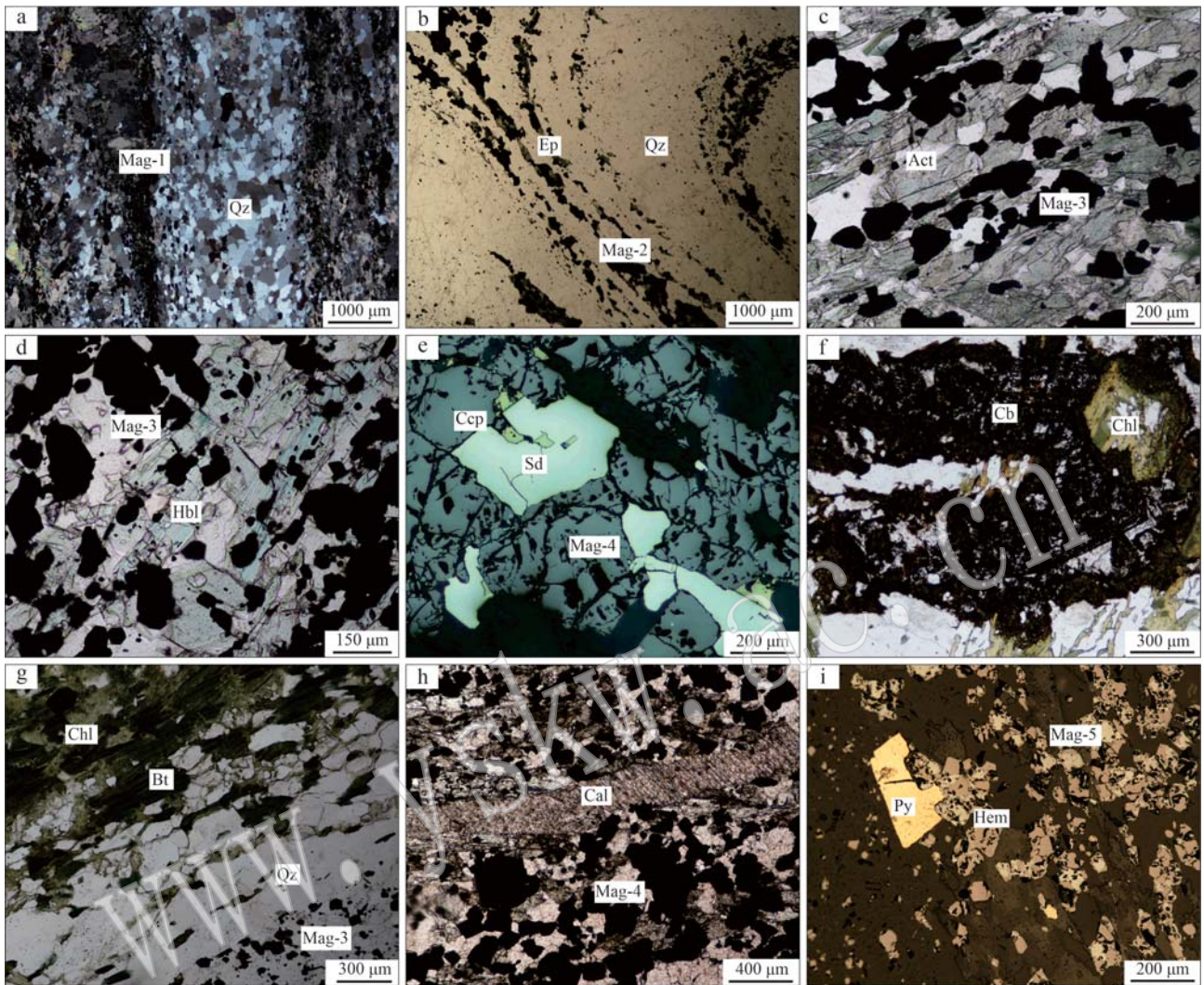


图4 司家营 BIF 矿物特征

Fig. 4 Characteristics of minerals from the Sijiaying BIF

a—条带状磁铁矿石,石英与磁铁矿-1呈条带产出(+); b—条纹状磁铁矿石发育揉皱构造(-); c—磁铁矿-3与阳起石共存(-); d—磁铁矿-3与普通角闪石共存(-); e—磁铁矿-3中残余菱铁矿,边部分布有黄铜矿(反射光); f—碳酸盐矿物和绿泥石呈角闪石横切面的假像(-); g—绿泥石蚀变黑云母与磁铁矿-3呈条带产出(-); h—方解石脉穿切硅铁条带; i—赤铁矿交代磁铁矿-5产出,残余磁铁矿-5边部发育黄铁矿(反射光); Mag—磁铁矿; Hem—赤铁矿; Py—黄铁矿; Ccp—黄铜矿; Sd—菱铁矿; Act—阳起石; Ep—绿帘石; Chl—绿泥石; Qz—石英; Cal—方解石; Bt—黑云母; Cb—碳酸盐矿物; Hbl—普通角闪石; (-)—单偏光; (+)—正交偏光

a—banded magnetite ore with banded occurrences of magnetite-1 and quartz (+); b—striated magnetite ore with foliation structures (-); c—coexistence of magnetite-3 and actinolite (-); d—coexistence of magnetite-3 and hornblende (-); e—residual siderite within magnetite-3, with the peripheral distribution of chalcopyrite (reflective light); f—carbonate minerals and chlorite displaying pseudomorphs after hornblende (-); g—chlorite resulting from biotite alteration, occurring in banded association with magnetite-3 (-); h—cross-cutting calcite veins within siliceous iron bands; i—hematite replacement of magnetite-5, with peripheral development of pyrite (reflected light); Mag—magnetite; Hem—hematite; Py—pyrite; Ccp—chalcopyrite; Sd—siderite; Act—actinolite; Ep—epidote; Chl—chlorite; Qz—quartz; Cal—calcite; Bt—biotite; Cb—carbonate mineral; Hbl—hornblende; (-)—single polarized light microscope; (+)—orthogonal polarizing microscope

解石、绿泥石。

(4) 表生氧化期: 铁矿体经过一系列变质变形、热液蚀变等作用后被抬升至地表, 出露地表的少部

分磁铁矿石在大气及深部、浅部流体的氧化作用下, 被氧化形成赤铁矿石。该期次形成的矿物组合为赤铁矿、假像赤铁矿、磁铁矿-5 以及铁白云石。

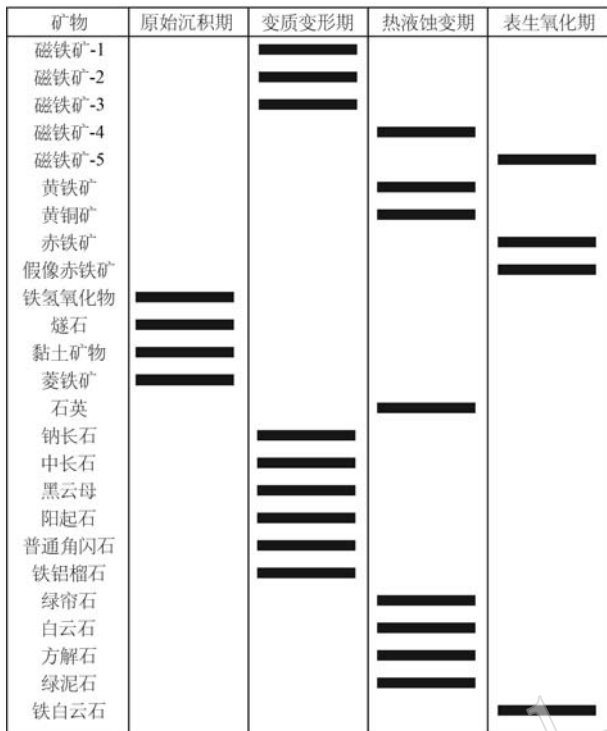


图 5 司家营铁矿床矿物生成顺序

Fig. 5 Paragenetic sequence of minerals for the Sijiaying iron deposit

4 样品采集与测试分析

本次实验样品采自司家营铁矿床露天采场及钻孔岩芯,包括变质变形期的条带状磁铁石英岩、条纹状磁铁石英岩、细纹状磁铁石英岩,热液蚀变期的块状磁铁石英岩和表生氧化期的条纹状赤铁石英岩,具体采样位置见图 2。

电子探针主量元素分析在西南石油大学地球科学与技术学院电子探针实验室完成,采用 JEOL-JXA-8230 型号电子探针。工作条件为:加速电压 15 kV,加速电流 20 nA,束斑直径 10 μm。所有测试数据均进行了 ZAF 校正处理。Na、Mg、K、Ca、Fe、Ti、Al、Si、Ni、Cr、Mn 元素特征峰的测量时间为 10 s,上下背景的测量时间分别是峰测量时间的一半。

5 矿物电子探针分析

5.1 磁铁矿

结果显示(表 2),区内磁铁矿元素特征较为一致,以 TFeO 为主, TiO₂、SiO₂、MnO、MgO 较少,其余

表 2 司家营 BIF 磁铁矿电子探针成分

w_B/%

Table 2 Electron probe composition of magnetite from the Sijiaying BIF

样品类型	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	TFeO	MnO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Total	Fe ₂ O ₃	FeO	Ti	Fe ³⁺	Fe ²⁺	Mn
磁铁矿-1 (n=22)	0.04	-	-	0.01	91.90	0.23	0.01	-	0.02	92.20	68.24	30.48	-	2.00	0.99	0.01
	-	0.02	-	-	92.50	0.29	0.01	0.02	-	92.84	68.83	30.55	-	2.00	0.99	0.01
	-	0.03	-	-	91.80	0.26	0.01	-	-	92.10	68.16	30.45	-	2.00	0.99	0.01
	0.04	-	-	-	91.58	0.30	0.02	-	-	91.94	68.02	30.35	-	2.00	0.99	0.01
	0.01	0.40	-	0.02	88.06	0.01	-	0.02	0.02	88.53	64.83	29.71	0.01	1.98	1.01	-
	0.01	0.45	0.01	-	87.66	-	0.01	-	-	88.15	64.33	29.76	0.01	1.97	1.01	-
	0.02	0.48	-	0.02	88.98	0.01	0.01	-	0.01	89.53	65.30	30.21	0.01	1.97	1.01	-
	0.01	0.02	-	-	91.63	0.07	0.02	0.01	-	91.75	67.96	30.47	-	2.00	1.00	-
	0.02	0.34	-	-	87.86	0.02	0.02	0.01	0.02	88.29	64.73	29.61	0.01	1.98	1.01	-
	0.03	0.45	0.01	-	88.55	0.01	-	-	-	89.04	64.97	30.07	0.01	1.97	1.01	-
	0.04	0.01	-	0.01	92.45	0.18	-	0.02	0.02	92.71	68.66	30.65	-	2.00	0.99	-
	0.02	0.01	-	-	92.53	0.12	0.02	0.05	-	92.74	68.82	30.60	-	2.00	0.99	-
	0.04	0.01	-	-	92.07	0.14	0.01	-	-	92.26	68.24	30.65	-	2.00	1.00	-
	0.03	0.30	0.02	0.02	88.22	0.01	-	-	-	88.59	64.90	29.81	0.01	1.98	1.01	-
	0.05	0.40	0.01	-	86.81	-	0.04	-	-	87.31	63.77	29.42	0.01	1.97	1.01	-
	0.04	0.44	-	-	89.31	-	0.01	-	-	89.80	65.53	30.33	0.01	1.97	1.01	-
	0.02	0.40	0.01	0.01	87.80	-	-	0.02	-	88.26	64.58	29.68	0.01	1.98	1.01	-
	0.02	0.45	-	0.02	89.26	-	0.04	-	0.01	89.80	65.56	30.25	0.01	1.97	1.01	-
	0.06	0.02	0.01	-	92.73	0.18	-	0.01	0.01	93.01	68.78	30.82	-	2.00	0.99	0.01
	-	0.42	0.01	0.01	88.88	-	-	0.02	-	89.34	65.37	30.05	0.01	1.98	1.01	-
	-	0.37	-	-	88.52	-	0.01	0.01	-	88.91	65.17	29.87	0.01	1.98	1.01	-
	0.01	0.44	-	0.04	88.83	-	-	-	-	89.31	65.19	30.15	0.01	1.97	1.01	-
磁铁矿-2 (n=19)	-	0.04	0.00	0.05	93.19	0.12	0.02	-	0.01	93.41	69.10	31.00	-	2.00	1.00	-
	0.02	0.04	0.02	0.06	94.26	0.07	0.01	0.02	-	94.51	69.88	31.37	-	2.00	1.00	-
	0.03	-	-	0.29	92.26	-	0.03	0.05	-	92.67	68.46	30.64	-	1.99	0.99	-
	0.01	-	0.01	0.03	93.25	0.16	0.01	0.02	0.02	93.51	69.30	30.88	-	2.00	0.99	0.01
	0.03	-	0.04	0.06	91.53	0.19	-	0.02	-	91.87	67.93	30.39	-	2.00	0.99	0.01
	0.01	0.02	0.01	0.01	92.62	0.19	0.03	-	0.01	92.90	68.77	30.73	-	2.00	0.99	0.01

续表 2-1
Continued Table 2-1

样品类型	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	TFeO	MnO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Total	Fe ₂ O ₃	FeO	Ti	Fe ³⁺	Fe ²⁺	Mn
磁铁矿-2 (n=19)	0.04	0.02	-	0.04	94.05	0.02	-	0.02	-	94.18	69.67	31.34	-	2.00	1.00	-
	0.03	0.03	0.02	0.01	92.24	0.09	0.05	0.01	0.01	92.48	68.41	30.67	-	2.00	0.99	-
	0.01	0.03	0.03	-	92.25	0.06	-	-	-	92.37	68.33	30.75	-	2.00	1.00	-
	-	0.03	0.03	0.04	93.23	0.09	0.03	0.02	-	93.45	69.19	30.95	-	2.00	0.99	-
	-	0.03	0.01	0.04	93.13	0.14	-	-	-	93.35	69.06	30.98	-	2.00	1.00	-
	0.01	0.04	-	0.06	91.96	0.03	-	0.01	-	92.10	68.10	30.67	-	2.00	1.00	-
	-	0.04	0.03	0.05	92.42	0.12	0.01	-	-	92.67	68.50	30.77	-	2.00	1.00	-
	0.01	0.01	-	-	92.66	0.08	-	0.05	-	92.82	68.92	30.64	-	2.00	0.99	-
	-	0.03	-	0.01	92.03	0.15	0.01	0.01	-	92.24	68.32	30.54	-	2.00	0.99	-
	0.02	0.01	-	0.03	93.50	0.22	-	0.01	0.02	93.81	69.49	30.95	-	2.00	0.99	0.01
	0.04	-	0.01	-	91.72	0.21	0.03	-	-	92.00	68.08	30.45	-	2.00	0.99	0.01
0.02	-	0.01	0.04	90.93	0.06	0.01	0.01	0.03	91.09	67.47	30.21	-	2.00	0.99	-	
0.02	-	0.01	-	91.71	0.15	0.02	0.01	-	91.91	68.10	30.42	-	2.00	0.99	0.01	
磁铁矿-3 (n=22)	0.03	0.03	0.00	-	92.73	0.08	0.01	0.03	-	92.92	68.81	30.80	-	2.00	0.99	-
	0.03	0.05	0.01	-	92.27	0.06	0.01	0.01	-	92.43	68.34	30.77	-	2.00	1.00	-
	-	0.03	-	-	92.72	0.06	0.03	-	-	92.84	68.75	30.84	-	2.00	1.00	-
	0.02	0.03	-	0.02	91.05	0.07	0.03	0.02	-	91.24	67.55	30.25	-	2.00	0.99	-
	-	0.01	-	0.01	92.52	0.02	0.02	0.03	-	92.62	68.71	30.68	-	2.00	0.99	-
	0.04	0.01	-	0.01	91.46	0.06	0.04	0.01	-	91.62	67.79	30.45	-	2.00	1.00	-
	0.01	-	-	0.01	92.90	0.09	0.04	0.01	-	93.07	68.95	30.84	-	2.00	0.99	-
	0.03	0.02	0.02	-	92.37	0.05	0.05	0.03	-	92.56	68.55	30.68	-	2.00	0.99	-
	-	0.01	-	-	92.81	0.06	0.03	0.07	-	92.97	69.12	30.60	-	2.00	0.99	-
	0.03	0.02	-	0.01	92.95	0.07	0.04	0.04	0.01	93.17	69.11	30.76	-	2.00	0.99	-
	0.03	-	-	-	93.27	-	0.01	-	-	93.31	69.06	31.11	-	2.00	1.00	-
	0.05	0.01	0.01	0.01	92.57	0.07	-	0.01	-	92.74	68.59	30.84	-	2.00	1.00	-
	-	-	0.01	-	92.33	0.05	-	-	-	92.40	68.43	30.74	-	2.00	1.00	-
	-	0.02	0.01	-	93.28	0.09	0.03	-	0.01	93.44	69.21	30.98	-	2.00	0.99	-
	0.03	0.02	-	-	92.55	0.05	0.01	0.01	0.01	92.68	68.60	30.81	-	2.00	1.00	-
	0.05	0.06	-	-	92.40	0.06	0.01	-	-	92.58	68.37	30.87	-	1.99	1.00	-
	0.01	0.04	0.03	-	90.79	0.03	0.02	0.01	-	90.94	67.29	30.23	-	2.00	1.00	-
0.04	0.03	-	0.01	93.12	0.05	-	-	-	93.25	68.91	31.10	-	1.99	1.00	-	
0.05	-	0.02	0.02	92.85	0.01	0.02	0.02	-	92.98	68.81	30.92	-	2.00	1.00	-	
0.03	-	-	-	92.61	0.01	-	-	0.01	92.66	68.61	30.86	-	2.00	1.00	-	
-	-	-	0.01	92.94	0.06	0.01	-	0.01	93.02	68.93	30.90	-	2.00	1.00	-	
0.03	0.03	-	0.02	92.35	0.05	-	-	0.01	92.50	68.40	30.79	-	2.00	1.00	-	
磁铁矿-4 (n=11)	0.02	0.02	-	0.03	92.70	0.05	0.01	0.01	0.01	92.84	68.72	30.85	-	2.00	1.00	-
	-	-	0.01	0.02	93.47	0.01	-	0.02	0.01	93.53	69.36	31.05	-	2.00	1.00	-
	-	0.02	0.02	0.03	93.02	0.02	-	0.01	-	93.14	68.93	30.98	-	2.00	1.00	-
	0.03	0.03	-	-	93.81	0.03	0.01	-	-	93.91	69.47	31.29	-	2.00	1.00	-
	0.02	-	-	-	93.57	0.05	-	0.01	-	93.66	69.36	31.14	-	2.00	1.00	-
	-	0.01	0.02	0.01	92.08	0.09	0.01	-	0.01	92.22	68.31	30.60	-	2.00	1.00	-
	-	-	0.00	0.01	94.14	0.10	-	0.03	-	94.28	69.93	31.20	-	2.00	0.99	-
	0.03	-	-	0.01	92.65	0.08	-	-	-	92.77	68.64	30.87	-	2.00	1.00	-
	0.04	-	-	-	92.89	0.03	-	0.03	0.01	93.00	68.93	30.85	-	2.00	0.99	-
	0.01	-	-	0.01	92.69	0.05	-	0.01	0.01	92.78	68.78	30.79	-	2.00	1.00	-
0.02	0.04	0.01	0.03	93.07	0.07	-	-	-	93.24	68.90	31.06	-	1.99	1.00	-	
磁铁矿-5 (n=9)	0.03	0.02	0.02	0.06	94.20	0.02	-	0.01	-	94.36	69.74	31.43	-	1.99	1.00	-
	0.03	-	-	0.08	94.55	0.01	-	-	-	94.67	69.98	31.58	-	2.00	1.00	-
	0.03	0.04	-	0.02	93.79	-	-	-	0.04	93.93	69.49	31.25	-	2.00	1.00	-
	0.08	0.01	0.01	0.02	93.79	0.02	-	-	-	93.92	69.34	31.38	-	1.99	1.00	-
	0.02	0.06	-	0.05	95.24	-	0.02	0.02	-	95.40	70.55	31.74	-	2.00	1.00	-
	0.02	-	-	0.03	94.99	0.02	0.01	0.02	-	95.09	70.43	31.60	-	2.00	1.00	-
	0.01	0.01	-	0.03	93.24	0.01	0.01	0.03	-	93.33	69.17	30.98	-	2.00	1.00	-
	-	0.03	-	0.02	93.55	-	-	-	-	93.59	69.27	31.21	-	2.00	1.00	-
0.03	0.03	-	0.03	94.03	0.03	0.02	-	-	94.18	69.64	31.36	-	2.00	1.00	-	

注：“-”表示低于检测限；TFeO 为全铁含量。

主量元素含量极低。由于电子探针数据无法直观的表现 Fe^{3+} 与 Fe^{2+} 的具体含量或者二者所占比例关系,故先采用郑巧荣(1983)的剩余氧算法计算出矿物中 Fe^{3+} 与 Fe^{2+} 各自的量,再以 4 个氧原子为基准计算出司家营 BIF 磁铁石英岩磁铁矿相应参数及其化学式。

磁铁矿-1 的 TFeO 含量为 86.81%~92.73%,平均值为 89.90%; TiO_2 含量分布在 0~0.48%之间,平均值为 0.25%; SiO_2 含量分布在 0~0.06%之间,平均值为 0.02%;MnO 含量分布在 0~0.30%之间,平均值为 0.08%;MgO 含量分布在 0~0.04%之间,平均值为 0.01%。测得化学分子式为: $(\text{Fe}_{0.99-1.01}^{2+}\text{Mn}_{0-0.01})_{1-1.01}(\text{Fe}_{1.97-2}^{3+}\text{Ti}_{0-0.01})_{1.98-2}\text{O}_4$ 。

磁铁矿-2 的 TFeO 含量为 90.93%~94.26%,平均值为 92.58%; TiO_2 含量分布在 0~0.04%之间,平均值为 0.02%; SiO_2 含量分布在 0~0.04%之间,平均值为 0.02%;MnO 含量分布在 0~0.22%之间,平均值为 0.11%;MgO 含量分布在 0~0.05%之间,平均值为 0.01%。测得化学分子式为: $(\text{Fe}_{0.99-1}^{2+}\text{Mn}_{0-0.01})_{0.99-1}\text{Fe}_{1.99-2}^{3+}\text{O}_4$ 。

磁铁矿-3 的 TFeO 含量为 90.79%~93.28%,平均值为 92.49%; TiO_2 含量分布在 0~0.06%之间,平均值为 0.02%; SiO_2 含量分布在 0~0.05%之间,平均值为 0.02%;MnO 含量分布在 0~0.09%之间,平

均值为 0.05%;MgO 含量分布在 0~0.05%之间,平均值为 0.02%。测得化学分子式为: $\text{Fe}_{0.99-1}^{2+}\text{Fe}_{1.99-2}^{3+}\text{O}_4$ 。

磁铁矿-4 的 TFeO 含量为 92.08%~94.14%,平均值为 93.10%; TiO_2 含量分布在 0~0.04%之间,平均值为 0.01%; SiO_2 含量分布在 0~0.04%之间,平均值为 0.02%;MnO 含量分布在 0.01%~0.10%之间,平均值为 0.05%。测得化学分子式为: $\text{Fe}_{0.99-1}^{2+}\text{Fe}_{1.99-2}^{3+}\text{O}_4$ 。

磁铁矿-5 的 TFeO 含量为 93.24%~95.24%,平均值为 94.15%; TiO_2 含量分布在 0~0.06%之间,平均值为 0.02%; SiO_2 含量分布在 0~0.08%之间,平均值为 0.03%;MnO 含量分布在 0~0.03%之间,平均值为 0.01%;MgO 含量分布在 0~0.02%之间,平均值为 0.01%。测得化学分子式为: $\text{Fe}^{2+}\text{Fe}_{1.99-2}^{3+}\text{O}_4$ 。

司家营 BIF 磁铁矿主量元素特征图解(图 6)显示,变质程度较低的磁铁矿-1 的 TFeO 含量最低,随着变质程度的升高,磁铁矿-2 与磁铁矿-3 的 TFeO 含量逐渐增加,热液蚀变期进一步萃取形成的磁铁矿-4 的 TFeO 含量更高,而表生氧化期叠加了氧化作用的磁铁矿-5 的 TFeO 含量最高。 TiO_2 值的变化说明磁铁矿成因逐渐向热液交代成因过渡,而 SiO_2 、MgO+MnO 也与 TFeO 呈弱的负相关。

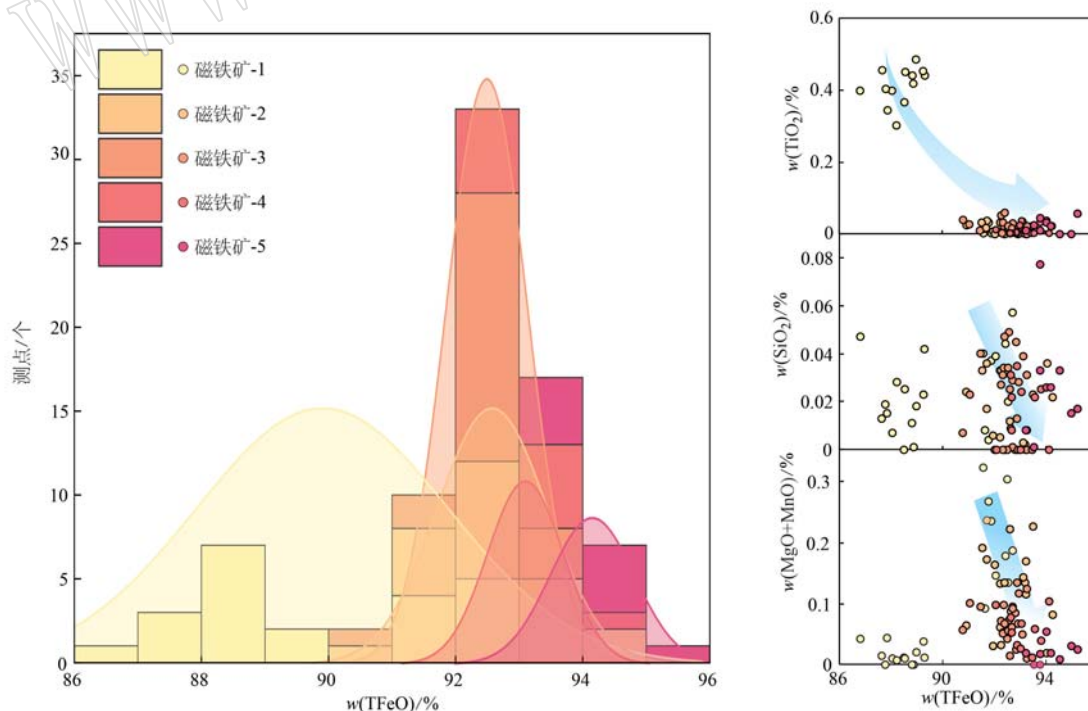


图 6 司家营 BIF 磁铁矿主量元素特征

Fig. 6 Major element characteristics of magnetite from the Sijiaying BIF

5.2 黑云母

研究区黑云母大多呈褐色片状、鳞片状产出,具

浅黄-绿多色性,粒径通常为 0.01~0.30 mm (图 4g)。分析结果(表3)显示黑云母中TFeO含量在

表3 司家营 BIF 黑云母电子探针成分
Table 3 Electron probe composition of biotite from the Sijiaying BIF

$w_B/\%$

样品编号	ZK2-1	ZK2-2	ZK2-3	ZK2-4	ZK2-5	ZK2-6	ZK2-7	ZK2-8
SiO ₂	35.79	36.12	36.63	36.84	36.44	36.46	36.50	36.47
TiO ₂	1.55	1.76	1.59	1.64	1.85	1.73	1.81	1.74
Al ₂ O ₃	16.94	16.89	17.00	16.75	16.95	17.12	17.11	16.85
Cr ₂ O ₃	0.09	0.07	0.05	0.05	0.10	0.07	0.06	0.05
TFeO	22.01	20.83	21.20	19.79	21.06	21.02	21.00	20.44
MnO	0.31	0.28	0.31	0.29	0.34	0.33	0.31	0.34
MgO	9.44	9.11	9.37	9.35	9.18	9.07	8.99	9.35
CaO	-	-	-	-	0.01	-	-	-
Na ₂ O	0.05	0.04	0.03	0.04	0.04	0.07	0.13	0.02
K ₂ O	9.06	9.78	9.79	9.85	9.61	9.76	9.84	9.63
Total	73.22	74.06	74.77	74.81	74.53	74.62	74.75	74.45
Fe ₂ O ₃	3.34	3.31	3.31	3.36	3.46	3.38	3.36	3.41
FeO	19.01	17.84	18.22	16.76	17.94	17.98	17.97	17.38
Si	2.74	2.77	2.78	2.81	2.77	2.77	2.77	2.78
Al ^{IV}	1.26	1.23	1.23	1.19	1.23	1.23	1.23	1.22
Al ^{VI}	0.27	0.29	0.29	0.32	0.29	0.30	0.30	0.30
Ti	0.09	0.10	0.09	0.09	0.11	0.10	0.10	0.10
Fe ³⁺	0.19	0.19	0.19	0.19	0.20	0.19	0.19	0.20
Fe ²⁺	1.22	1.14	1.15	1.07	1.14	1.14	1.14	1.11
Mn	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Mg	1.08	1.04	1.06	1.06	1.04	1.03	1.02	1.06
Na	0.01	0.01	-	0.01	0.01	0.01	0.02	-
K	0.89	0.96	0.95	0.96	0.93	0.95	0.95	0.94
Total	7.76	7.75	7.76	7.73	7.73	7.75	7.75	7.73
Li*	0.44	0.50	0.58	0.62	0.55	0.56	0.56	0.56

注:“-”表示低于检测限;TFeO 为全铁含量。

19.79%~22.01%之间,平均值为 20.92%;MgO 含量分布在 8.99%~9.44%之间,平均值为 9.23%;K₂O 含量分布在 9.06%~9.85%之间,平均值为 9.66%;SiO₂ 含量分布在 35.79%~36.84%之间,平均含量为 36.41%;Al₂O₃ 含量分布在 16.75%~17.12%之间,平均含量为 17.12%;其余主量元素含量均较低。首先用待定阳离子数法计算出 Fe²⁺ 和 Fe³⁺ 的含量(林文蔚等, 1994),再以 11 个氧原子为基准计算出相应参数及结构式: $(K_{0.89-0.97}Na_{0-0.02})_{0.89-0.97}\{(Mg_{1.02-1.08}Fe_{1.07-1.22}Fe_{0.19-0.20}Al_{0.27-0.32}Mn_{0.02-0.02}Ti_{0.09-0.11})_{2.76-2.86}[(Al_{1.19-1.26}Si_{2.74-2.81})_4O_{10}](OH)_2\}$ 。

研究区黑云母普遍成分稳定,具高铝、低钛、低钠、高钾的特征,FeO、MgO 含量较高,CaO 含量很低,大多低于检测限,表明所测黑云母基本不受或很少受绿泥石化蚀变影响。通过云母矿物分类图解(图7)投图可知,黑云母均属铁质黑云母类别。

5.3 绿泥石

绿泥石为区内主要蚀变矿物,形态不规则,多呈

他形粒状,少量呈鳞片状,粒径通常为 0.01~0.3 mm,具浅黄-绿多色性(图 4f、4g)。分析结果显示(表4)绿泥石中 TFeO 含量分布在 26.70%~35.74%之间,平均值为 32.37%;MgO 含量分布在 7.77%~13.93%之间,平均值为 10.00%;SiO₂ 含量分布在 25.62%~27.30%之间,平均含量为 26.55%;Al₂O₃ 含量分布在 17.23%~18.23%之间,平均含量为 17.75%,其余含量均较低。以 28 个氧原子为基准计算出绿泥石的相应参数及结构式: $(K_{0-0.10}Ca_{0-0.02}Na_{0-0.04},Mg_{2.60-4.47}Fe_{4.63-6.58}Mn_{0.01-0.06},Al_{2.32-2.53}Fe_{0.11-0.24}Ti_{0-0.03})_{11.70-11.86}[(Si_{5.71-5.95},Al_{2.05-2.29})_8O_{20}](OH)_8$ 。

区内绿泥石铁镁质量分数变化范围相对较大,硅铝质量分数变化范围相对较小,指示司家营 BIF 绿泥石存在普遍的铁镁相互置换的作用。通过 Deer 等(1967)提出的绿泥石 Fe-Si 分类图解(图8)对绿泥石种类进行具体判定,结果显示,所有样品点均处

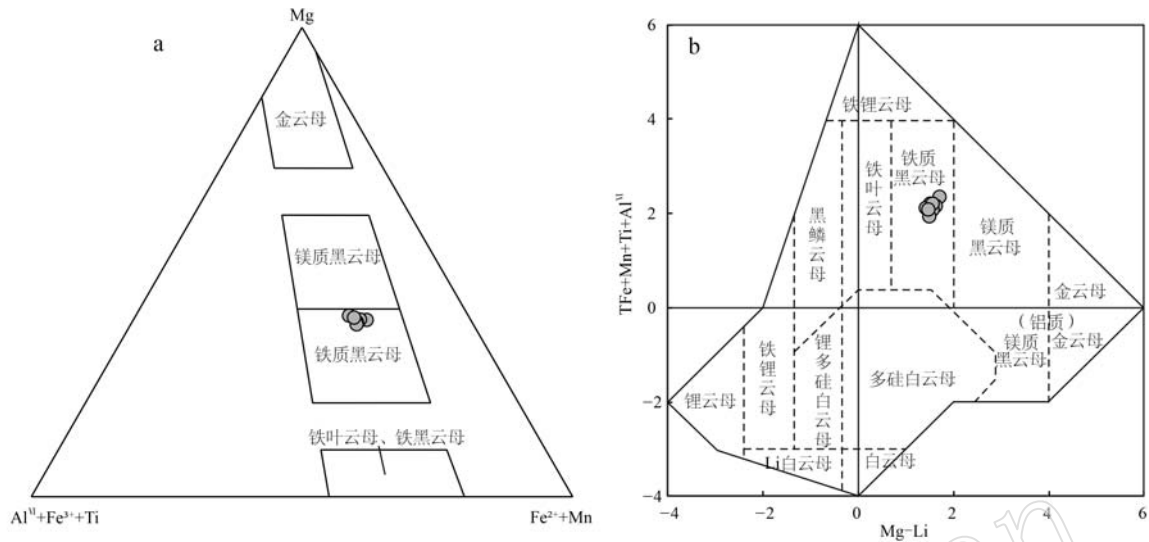


图 7 司家营 BIF 云母 $Mg-(Al^{IV}+Fe^{3+}+Ti)-(Fe^{2+}+Mn)$ 图解 (a, 据 Foster, 1960) 与 $(TFe+Mn+Ti+Al^{VI})-(Mg-Li)$ 图解 (b, 据 Tischendorf *et al.*, 1999)

Fig. 7 $Mg-(Al^{IV}+Fe^{3+}+Ti)-(Fe^{2+}+Mn)$ diagram (a, modified after Foster, 1960) and $(TFe+Mn+Ti+Al^{VI})-(Mg-Li)$ diagram (b, modified after Tischendorf *et al.*, 1999) of mica from the Sijiaying BIF

表 4 司家营 BIF 绿泥石电子探针成分

$w_B/\%$

Table 4 Electron probe composition of chlorite from the Sijiaying BIF

样品编号	ZK2-1	ZK2-2	ZK2-3	ZK2-4	D7-1-1	D7-1-2	D7-1-3	D7-1-4	D7-1-5	D7-1-6	D7-1-7	D7-1-8
SiO ₂	26.84	27.22	27.30	27.10	26.50	26.91	26.85	26.72	25.72	25.66	25.62	26.19
TiO ₂	0.08	0.08	0.05	0.13	0.14	0.18	0.17	0.12	0.02	0.02	-	0.06
Al ₂ O ₃	17.28	17.85	17.75	17.91	17.77	17.23	17.43	17.93	17.99	18.23	17.83	17.76
Cr ₂ O ₃	0.05	0.02	-	0.03	-	-	0.02	0.04	-	-	0.03	-
TFeO	30.16	28.15	26.95	26.70	33.23	34.02	35.10	33.33	34.87	35.25	35.74	34.97
MnO	0.31	0.30	0.33	0.27	0.08	0.08	0.08	0.05	0.06	0.04	0.04	0.03
MgO	11.97	13.69	13.93	13.48	8.80	8.51	7.92	9.50	7.88	8.26	7.77	8.33
CaO	0.02	-	0.02	0.02	0.05	0.01	-	0.01	0.07	0.04	0.06	0.07
Na ₂ O	0.01	0.01	0.01	-	0.04	0.01	0.03	0.02	-	0.05	-	0.05
K ₂ O	0.01	0.01	0.01	0.06	0.08	0.21	0.14	0.06	0.04	0.02	0.01	0.02
Si	5.87	5.83	5.88	5.87	5.87	5.95	5.93	5.84	5.77	5.71	5.75	5.81
Ti	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	-	-	-	0.01
Cr	0.01	-	-	0.01	-	-	-	0.01	-	-	0.01	-
Fe ³⁺	0.13	0.12	0.16	0.20	0.24	0.24	0.24	0.20	0.18	0.11	0.14	0.16
Fe ²⁺	5.39	4.93	4.70	4.63	5.92	6.05	6.24	5.90	6.37	6.45	6.58	6.33
Mn	0.06	0.05	0.06	0.05	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Mg	3.90	4.37	4.47	4.35	2.91	2.80	2.61	3.10	2.64	2.74	2.60	2.76
Ca	-	-	-	-	0.01	-	-	-	0.02	0.01	0.01	0.02
Na	0.01	0.01	0.01	-	0.03	0.01	0.03	0.02	-	0.04	-	0.04
K	-	-	0.01	0.04	0.04	0.12	0.08	0.04	0.02	0.01	0.01	0.01
OH*	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00
Total	35.83	35.85	35.79	35.74	35.70	35.71	35.71	35.75	35.77	35.86	35.82	35.80
Al ^{IV}	2.13	2.17	2.12	2.13	2.13	2.05	2.07	2.16	2.23	2.29	2.25	2.19
Al ^{VI}	2.32	2.34	2.38	2.44	2.51	2.44	2.46	2.47	2.53	2.49	2.47	2.46

注：“-”表示低于检测限；TFeO 为全铁含量。

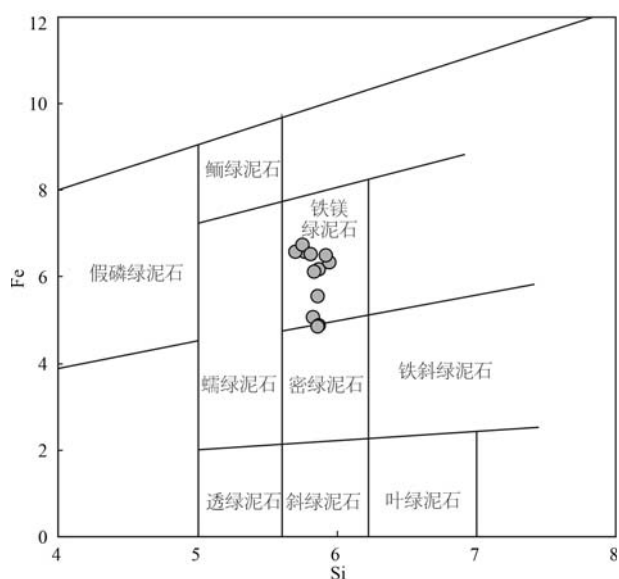


图8 司家营 BIF 绿泥石 Fe-Si 图解(图据 Deer *et al.*, 1967)

Fig. 8 Fe-Si diagram of chlorite from the Sijiaying BIF (modified after Deer *et al.*, 1967)

于铁镁绿泥石区域或边缘上,而富铁绿泥石通常多形成于相对酸性的还原环境,与热液沸腾作用关系紧密。

5.4 角闪石

区内角闪石常呈半自形-自形浅绿色-深绿色柱状产出,粒径一般在 0.01~1 mm 之间,多色性不明显,多被绿泥石、碳酸盐矿物交代(图 4c、4d、4f)。分析结果显示(表 5)角闪石中 TFeO 含量分布在 6.36%~16.36%之间,平均值为 12.61%;SiO₂ 含量分布在 56.00%~58.90%之间,平均含量为 57.02%;Na₂O 含量分布在 0.57%~5.51%之间,平均值为 3.84%;MgO 含量分布在 13.83%~20.66%之间,平均值为 16.17%;K₂O 含量分布在 0.04%~1.31%之间,平均值为 0.56%;CaO 含量为 2.89%~11.94%之间,平均值为 5.93%;MnO 含量分布在 0.10%~0.35%之间,平均值为 0.23%;Al₂O₃ 含量分布在 0.12%~0.49%之间,平均含量为 0.33%;TiO₂ 含量分布在 0~0.08%之间,平均值为 0.03%;Cr₂O₃ 含量分布在 0~0.02%之间,平均值为 0.01%。以 23 个氧原子为基准计算出角闪石阳离子数,按 IMA2003 矿物分类命名规则可以识别出铁阳起石与铁蓝透闪石两种,得出其化学式分别为 K_{0.05-0.24}

(Na_{1.35-1.50}Ca_{0.44-0.65})_{1.94-2}(Mg_{2.91-3.11}Fe_{1.10-1.62}Fe_{0.31-0.70}Al_{0.06-0.08}Mn_{0.02-0.04})_{4.89-4.99}Si₄O₁₁]₂(OH)₂与 K_{0.01-0.13}(Na_{0.15-1.35}Ca_{0.61-1.74})_{1.80-1.96}(Mg_{3.01-4.23}Fe_{0.53-1.41}Fe_{0.13-0.37}Al_{0.02-0.07}Mn_{0-0.04})_{4.90-5.00}Si₄O₁₁]₂(OH)₂。

表 5 司家营 BIF 角闪石电子探针主量元素分析

w_B/%

Table 5 Electron probe composition of hornblende from the Sijiaying BIF

样品编号	D13-1-1	D13-1-2	D13-1-3	D13-1-4	D13-1-5	D13-2-1	D13-2-2	D6-6-1	D6-6-2	D6-6-3
SiO ₂	56.40	56.00	56.61	56.09	56.17	56.67	56.94	58.23	58.90	58.23
TiO ₂	0.08	0.03	0.07	0.06	0.03	0.04	-	-	0.01	-
Al ₂ O ₃	0.43	0.49	0.44	0.35	0.40	0.40	0.46	0.12	0.12	0.14
Cr ₂ O ₃	0.01	0.02	-	-	-	-	0.01	0.01	0.01	0.01
FeO	14.69	15.05	14.42	14.45	14.98	16.30	16.36	6.65	6.36	6.85
MnO	0.29	0.31	0.24	0.31	0.35	0.21	0.19	0.17	0.15	0.10
MgO	14.63	14.41	14.61	14.60	14.17	13.83	13.95	20.45	20.44	20.66
CaO	4.19	4.15	4.01	4.27	4.02	3.02	2.89	10.75	11.94	10.11
Na ₂ O	5.03	5.03	4.96	4.94	4.89	5.47	5.51	1.04	0.57	0.96
K ₂ O	0.91	0.90	1.31	0.82	0.69	0.38	0.30	0.10	0.04	0.16
Total	96.66	96.39	96.66	95.89	95.71	96.32	96.58	97.52	98.53	97.21
Si	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00
Al	0.07	0.08	0.07	0.06	0.07	0.07	0.08	0.02	0.02	0.02
Ti	0.01	-	0.01	0.01	-	-	-	-	-	-
Fe ³⁺	1.18	1.10	1.32	1.24	1.41	1.59	1.62	0.53	0.55	0.61
Mg	3.09	3.07	3.08	3.11	3.01	2.91	2.92	4.19	4.20	4.15
Fe ²⁺	0.56	0.70	0.39	0.48	0.37	0.34	0.31	0.23	0.17	0.17
Mn	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02
Ca	0.64	0.64	0.61	0.65	0.61	0.46	0.44	1.58	1.74	1.49
Na	1.38	1.40	1.36	1.37	1.35	1.50	1.50	0.28	0.15	0.26
K	0.16	0.16	0.24	0.15	0.13	0.07	0.05	0.02	0.01	0.03
IMA2003 矿物种类	铁阳 起石	铁阳 起石	铁阳 起石	铁阳 起石	铁蓝 透闪石	铁阳 起石	铁阳 起石	铁蓝 透闪石	铁蓝 透闪石	铁蓝 透闪石

注:“-”表示低于检测限;TFeO 为全铁含量。

透闪石与铁阳起石为类质同象系列,均为变质矿物,纯的透闪石一般不含铁,但由于变质作用导致环境 Fe 的富集,透闪石的 Mg 被 Fe 置换,形成铁阳起石,因而铁阳起石相较于铁蓝透闪石,其 Fe 含量更高而 Mg 含量更低,铁蓝透闪石-铁阳起石系列指示了变质作用晚期,Fe 不足以完全替代 Mg,铁蓝透

闪石是绿片岩相的标志(崔文元等, 1983),表明变质作用晚期变质程度退变为绿片岩相。

综合分析研究区脉石矿物黑云母、绿泥石、角闪石均为富铁种属,结合司家营 BIF 矿物化学成分特征图解(图 9)发现,其 SiO₂、MgO+MnO 均显示与 TFeO 呈弱的负相关。

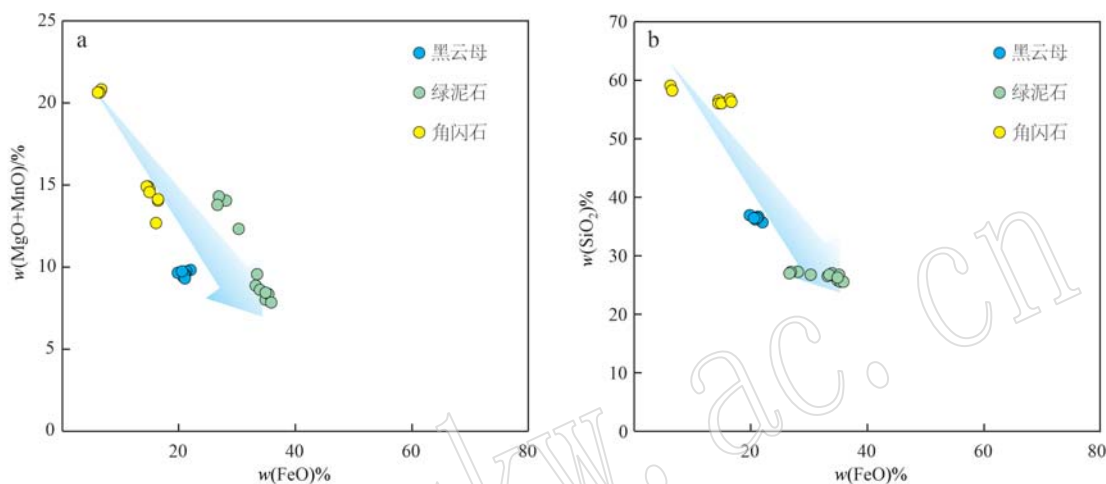


图 9 司家营 BIF 矿物化学成分特征图解

Fig. 9 Diagram of mineral chemistry from the Sijiaying BIF

6 讨论

6.1 矿床成因

沉积变质型铁矿床中的磁铁矿以“纯磁铁矿”为特征,具有很低的 TiO₂、MnO、CaO、Al₂O₃ 含量(Dupuis and Beaudoin, 2011)。司家营 BIF 磁铁矿主要

成分为 TFeO,含量介于 85.15%~95.24%之间,平均值为 92.07%,其他成分含量大多低于 0.1%,甚至低于检测限。司家营 BIF 磁铁矿的 Fe₂O₃ 与 FeO 含量平均比值为 2.22,接近理想磁铁矿的比值(2:1),同时 Fe²⁺、Fe³⁺变化范围都相对较小,所得磁铁矿化学式均接近 Fe²⁺Fe³⁺O₄,表明司家营 BIF 磁铁矿纯度较高,类质同象混入物较少,与沉积变质型磁铁矿接近(表 6)。

表 6 不同成因类型磁铁矿标型组分对比

Table 6 Comparison of characteristic elements of magnetite of different genesis types

矿床类型	TiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	MgO	资料来源
岩浆型	3.55~21.72, 平均 10.22	1.25~4.60	0.11~1.57	0.38~7.32	徐国风等, 1979
	5.95	2.00	0.22	1.82	陈光远等, 1984
	6.83	3.00	0.54	2.22	林师整, 1982
火山岩型	1.10	0.37	0.24	0.68	林师整, 1982
接触交代型	0.07~0.40, 平均 0.183	0.037~0.80	0.095~2.15	0.35~11.51	徐国风等, 1979
	0.22	0.89	0.28	0.59	陈光远等, 1984
	0.11	1.04	0.45	0.37	林师整, 1982
热液交代型	0.107~0.88, 平均 0.334	1.82~4.71	0.06~0.227	1.29~13.04	徐国风等, 1979
	0.15	3.51	0.21	4.52	陈光远等, 1984
	0~1.20, 平均 0.0887	0.02~0.59	0.017~0.14	0.19~0.55	徐国风等, 1979
沉积变质型	0.09	0.41	0.04	0.22	陈光远等, 1984
	司家营铁矿床	0~0.484, 平均 0.079	0~0.044, 平均 0.006	0~0.298, 平均 0.070	0~0.046, 平均 0.012

在 $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-(MnO+MgO)}$ 中(图 10a), 司家营 BIF 磁铁矿主要落于沉积变质型铁矿区域及其边

界部位, 在 $(\text{Ca+Al+Mn})\text{-(Ti+V)}$ 图解中(图 10b) (因 V 低于检测限, 以 0.01 计算), 大部分磁铁矿落

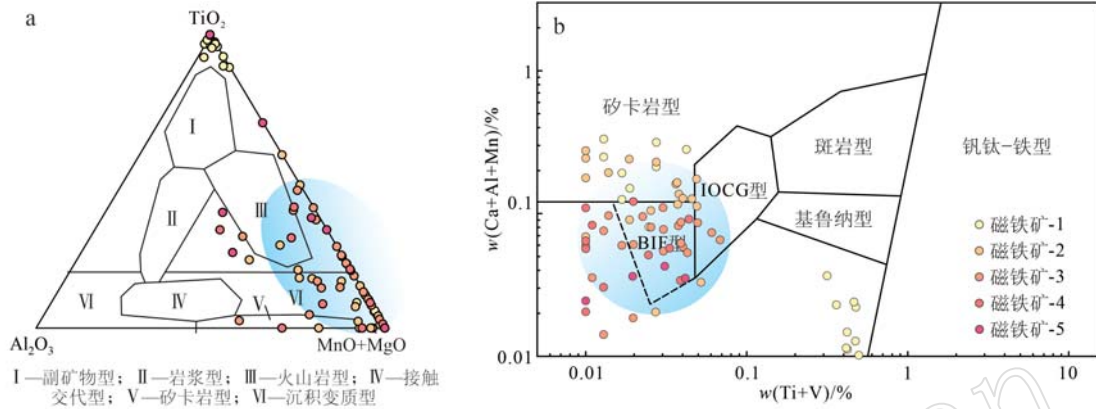


图 10 司家营 BIF 磁铁矿 $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-(MnO+MgO)}$ 成因图解(a, 据林师整, 1982)与 $(\text{Ca+Al+Mn})\text{-(Ti+V)}$ 图解(b, 据 Dupuis and Beaudoin, 2011)

Fig. 10 $\text{TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-(MgO+MnO)}$ diagram(a, modified after Lin Shizheng, 1982) and $(\text{Ca+Al+Mn})\text{-(Ti+V)}$ diagram (b, modified after Dupuis and Beaudoin, 2011) of magnetite from the Sijiaoying BIF

入 BIF 型区域, 部分落入矽卡岩型区域, 充分显示出司家营 BIF 磁铁矿典型的沉积变质型特征, 而部分投点的偏离表明磁铁矿受到一定程度的接触-交代作用, 反映出成矿成岩后期热液作用及构造热事件对矿床的改造作用。

因此, 司家营铁矿床早期具典型的沉积变质型成因特征, 经历一系列变质变形及热液作用的叠加改造后, 提高了矿石品位, 再被抬升至地表, 在大气及深部、浅部变质流体的氧化作用下, 部分磁铁矿被氧化成赤铁矿与假象赤铁矿, 另一部分也完成了进一步对 Fe 的富集。

6.2 变质作用对铁矿的改造

司家营 BIF 形成之后遭受了峰期为绿帘-角闪岩相, 晚期为绿片岩相的变质作用。黑云母 Ti 含量对成矿作用或变质作用的温度有良好的指示意义, 根据 Wu 等(2015)的算法公式, 可计算出黑云母的结晶温度, 公式如下: $\ln t = 6.313 + 0.224 \ln(X_{\text{Ti}}) - 0.288 \ln(X_{\text{Fe}}) - 0.449 \ln(X_{\text{Mg}}) + 0.15 p$, 式中 t 为温度($^{\circ}\text{C}$), 校准范围: $X_{\text{Fe}} = 0.19 \sim 0.55$, $X_{\text{Mg}} = 0.23 \sim 0.67$, $X_{\text{Ti}} = 0.02 \sim 0.14$, $t = 450 \sim 840^{\circ}\text{C}$; p 为压力, $p = 0.1 \sim 1.9 \text{ GPa}$ 。

陈靖等(2014)曾利用流体包裹体的显微测温测出司家营 BIF 变质流体压力为 $0.11 \sim 0.20 \text{ GPa}$ 。通过代入 0.10 GPa 、 0.20 GPa 压力值计算研究区黑云

母结晶温度, 发现每增加 0.1 GPa 压力, 结晶温度会上升约 7°C , 说明温度计结果受压力影响较大。因此, 本次研究以陈靖等(2014)提出的 0.20 GPa 的压力上限作为约束条件来估计黑云母的结晶温度。结果显示黑云母的结晶温度介于 $448 \sim 469^{\circ}\text{C}$ 之间, 平均值为 460°C , 与陈靖等(2014)测定的变质流体温度 $352 \sim 560^{\circ}\text{C}$ 和魏菊英等(1979)测定的成矿温度 $366 \sim 434^{\circ}\text{C}$ 近似。

根据 Wones 和 Eugster(1965)的 $\text{Fe}^{3+}\text{-Fe}^{2+}\text{-Mg}^{2+}$ 氧逸度缓冲剂图解(图 11), 发现黑云母都位于 NNO 缓冲线附近, 说明黑云母是在相对高的氧逸度条件下形成的, 据此推断, 在变质作用初期, 成矿环境中氧逸度发生了很大的改变。

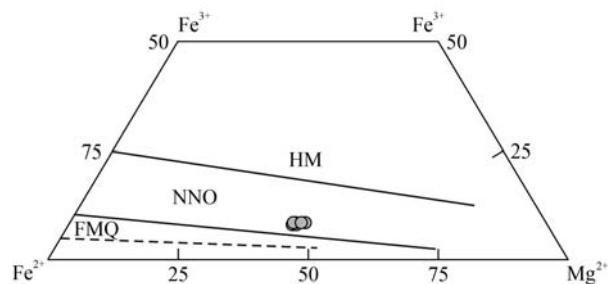


图 11 司家营 BIF 黑云母 $\text{Fe}^{3+}\text{-Fe}^{2+}\text{-Mg}^{2+}$ 图解 (图据 Wones and Eugster, 1965)

Fig. 11 $\text{Fe}^{3+}\text{-Fe}^{2+}\text{-Mg}^{2+}$ diagram of biotite from the Sijiaoying BIF(modified after Wones and Eugster, 1965)

司家营 BIF 在变质作用对铁矿的控制主要表现为矿石矿物成分和结构构造的变化,原始沉积形成的构造特征均被改造为条带状构造。早期形成的矿石品位较差,磁铁矿粒径较小,随着变质变形作用的进行,温压条件的改变,原始沉积的矿物重结晶形成更稳定的矿物,或使矿物粒度增大,原始的沉积韵律被改造为条纹状甚至细纹状构造,更有利于选矿。变质作用会导致成矿环境氧逸度的升高,有利于磁铁矿的进一步沉淀,促进形成更有经济价值的沉积变质型铁矿。通过分析司家营 BIF 磁铁矿主量元素特征(图 6、图 9)可见随着矿石变质程度升高,矿石中磁铁矿 FeO 含量也会小幅度增加,矿石矿物与脉石矿物均具有极低的 CaO 含量,其 Mg、Mn 含量均与 Fe 的含量呈明显的负相关,说明矿石在成矿演化过程中,随着变质作用的进行,Fe 在不断富集的同时,可能伴随着 Mg、Mn、Ca 等成分的迁出。

6.3 热液作用对铁矿的改造

热液作用对司家营 BIF 进行了一定的改造,但究竟是变质热液、混合岩化热液或其他成因的热液尚有争论,通过矿物化学的研究可以对热液作用有个大致了解。

区内绿泥石多为蚀变黑云母形式产出,电子探针结果显示,绿泥石 Al_2O_3 与 MgO 含量特征与黑云母相似,可能继承自黑云母; SiO_2 含量显著降低,表明随温度等环境变化,不同矿物晶体特征对 Si 的结晶有一定的限制作用; TiO_2 含量的降低,可能指示了绿泥石化过程中 Al^{IV} 取代 Ti 并伴随着一些钛铁氧化物的析出; $TFeO$ 的增多表明绿泥石既有对黑云母中的 Fe 元素的继承,又有部分来自对外部富 Fe 蚀变流体的萃取。绿泥石 $Fe/(Fe+Mg)$ 值与其形成环境的氧逸度有一定的关系,氧逸度越差、还原性越强,比值越大(Brydzia and Steven, 1987),研究区绿泥石 $Fe/(Fe+Mg)$ 值为 0.512~0.717,平均值为 0.640,表明其形成时热液流体具还原性质。根据 Rausell-Colom 等(1991)提出,经 Nieto(1997)修正的公式,计算出绿泥石面网间距 d_{001} ,公式如下: $d_{001} = 14.399 - 0.1155 Al^{IV} - 0.0201 Fe^{2+}$,再根据 Battaglia(1999)拟合出的公式,计算绿泥石的形成温度 $t(^{\circ}C)$,公式如下: $d_{001} = 14.399 - 0.001 t$,测出研究区绿泥石形成温度为 339~393 $^{\circ}C$,平均为 365 $^{\circ}C$,说明研究区热液作用属于中低温热液蚀变范围,其温度较之黑云母的结晶温度下降了近 100 $^{\circ}C$ 。司家营 BIF 绿泥石形成于中低温、还原的环境,相较于黑云母结晶时的

环境发生巨大改变。

司家营 BIF 的富铁矿石(块状磁铁矿石岩)大都受到了后期流体作用的影响,甚至表现出热液流体的特征(李文君等,2012)。野外观察司家营铁矿床的富矿围岩都有明显的热液蚀变现象,本次测得黑云母及绿泥石成分、温度、氧逸度特征的变化表示热液作用对成矿环境造成了改变,并引起了 Fe 等成矿物质的再次沉淀。司家营 BIF 磁铁矿 Si、Ti 均与 Fe 含量呈负相关,且磁铁矿-4 的 Ti 含量相对最少(图 6),说明矿体在绿泥石化和碳酸盐化等蚀变类型的高中低温蚀变热液改造的催动下,发生“去硅富铁”(李厚民等,2022),促进了 Fe 的富集以及 Si、Ti 的分离,使磁铁矿与石英进一步分离且粒度变粗,从而提升矿石品质形成富铁矿石。说明热液作用不仅会影响成矿物质的迁移,还可以使成矿环境温度、压力、氧逸度等条件发生改变,有利于矿区形成具有重要工业意义的富铁矿体。

由图 6 可知,随着成矿期次的进行,磁铁矿的 $TFeO$ 逐渐富集,但表生氧化期对于司家营 BIF 的改造相对较弱,仅在地表形成了少量的赤铁矿化矿石,因此,综合上述特征,我们认为变质变形期末-热液蚀变期是司家营 BIF 富铁矿形成最重要的时期。

7 结论

(1) 司家营 BIF 型铁矿床可划分为原始沉积期、变质变形期、热液蚀变期和表生氧化期,其中变质变形期末-热液蚀变期是司家营 BIF 富铁矿形成最重要的时期。

(2) 司家营 BIF 型铁矿床成矿具有典型的沉积变质型成因特征,经历了一系列变质变形作用和热液叠加改造作用以及抬升氧化作用,少部分磁铁矿被氧化成赤铁矿,在整个成矿演化过程中,矿石中 Fe 元素的富集可能伴随着 Mg、Mn 和 Ca 等元素的迁出。

(3) 变质作用与热液作用改变了成矿环境温度、压力、氧逸度等条件,变质作用对司家营 BIF 矿石矿物成分和结构构造进行了改造,使原始沉积的矿物重结晶形成更稳定、粒度更大的矿物,将原始的沉积韵律改造为条带、条纹甚至更高级的细纹、块状构造,便于选矿;热液作用促进成矿物质的迁移,引起 Fe 等成矿物质的再次沉淀,从而提高矿石的品质,有利于矿区形成具有重要工业意义的富铁矿体。

致谢 感谢河北省地矿局第二地质大队提供的资料以及在野外工作中提供的支持与帮助;感谢西南石油大学地球科学与技术学院电子探针实验室陈曦老师对电子探针测试提供的指导帮助;感谢匿名审稿专家为本文提出的宝贵意见。

Reference

- Battaglia S. 1999. Applying X-ray geothermometer diffraction to a chlorite [J]. *Clays and Clay Minerals*, 47(1): 54~63.
- Bekker A, Slack J F, Planavsky N, *et al.* 2010. Iron formation: The sedimentary product of a complex interplay among mantle, tectonic, oceanic, and biospheric processes[J]. *Economic Geology*, 105(3): 467~508.
- Bryndzia L T and Scott S D. 1987. The composition of chlorite as a function of sulfur and oxygen fugacity: An experimental study[J]. *American Journal of Science*, 287(1): 50~76.
- Chen Guangyuan, Li Meihua, Wang Xuefang, *et al.* 1984. Mineralogical Album of Gongchangling iron ore genesis, Chapter 2, magnetite [J]. *Mineralogy and Petrology*, 4(2): 14~41 (in Chinese with English abstract).
- Chen Jing, Li Houmin, Li Lixing, *et al.* 2014. Fluid inclusions and oxygen isotope study of the Sijiaying BIF in the eastern Hebei Province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(5): 1 253~1 268 (in Chinese with English abstract).
- Cui M L, Zhang L C, Wu H Y, *et al.* 2014. Timing and tectonic setting of the Sijiaying banded iron deposit in the eastern Hebei Province, North China Craton: Constraints from geochemistry and SIMS zircon U-Pb dating[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 94: 240~251.
- Cui Wei, Dong Guoming, Gao Xiaomin, *et al.* 2022a. An analysis of the characteristics and prospecting directions of the Sijiaying iron deposit in Eastern Hebei [J]. *Journal of Heilbei Geo University*, 45(4): 20~28 (in Chinese with English abstract).
- Cui Wei, Dong Guoming, Zheng Siguang, *et al.* 2022b. Metallogenic regularity and prospecting direction of the sedimentary-metamorphic type iron deposits in eastern Hebei Province [J]. *Geology And Exploration*, 58(5): 989~1 000 (in Chinese with English abstract).
- Cui Wenyuan and Zhang Naixian. 1983. A study on Ferri-Winchite in the iron deposit of Sijiaying, Luanxian, east Hebei Province [J]. *Journal of Changchun University of Earth Science*, 13(3): 97~106 (in Chinese with English abstract).
- Deer W A, Howie R A and Zussman J. 1967. *Rock-forming Minerals*. Vol. 3: Sheet Silicates [M]. London: Longman, 528.
- Dupuis C and Beaudoin G. 2011. Discriminant diagrams for iron oxide trace element fingerprinting of mineral deposit types [J]. *Mineralium Deposita*, 46(4): 319~335.
- Duuring P and Hagemann S. 2013. Leaching of silica bands and concentration of magnetite in Archean BIF by hypogene fluids: Beebyn Fe ore deposit, Yilgarn Craton, Western Australia [J]. *Mineralium Deposita*, 48(3): 341~370.
- Eggsleder M S, Cruden A R, Tomkins A G, *et al.* 2019. Tiny particles building huge ore deposits-particle-based crystallisation in banded iron formation-hosted iron ore deposits (Hammersley Province, Australia) [J]. *Ore Geology Reviews*, 104: 160~174.
- Foster M D. 1960. Interpretation of the composition of lithium micas [J]. *Professional Paper*, 354: 115~147.
- Gao Xinyu, Wang Denghong, Huang Fan, *et al.* 2022. Discussion on deep prospecting of the Sijiaying iron deposit in eastern Hebei Province [J]. *Acta Geologica Sinica*, 96(7): 2 494~2 505 (in Chinese with English abstract).
- Hagemann S G, Angerer T, Duuring P, *et al.* 2016. BIF-hosted iron mineral system: A review [J]. *Ore Geology Reviews*, 76: 317~359.
- Hebei Institute of Regional Geology and Mineral Resources. 2017. *The Regional Geology of China. Hebei Province* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~39, 675~738 (in Chinese).
- Hu Jun, Wang He, Xu Deming, *et al.* 2019. Study of mineral electron probe micro analysis (EPMA) chemistry and hematite oxygen isotopes at the Dahongliutan iron deposit, west Kunlun [J]. *Geochimica*, 48(5): 458~467 (in Chinese with English abstract).
- Klein C. 2005. Some Precambrian banded iron-formations (BIFs) from around the world: Their age, geologic setting, mineralogy, metamorphism, geochemistry, and origins [J]. *American Mineralogist*, 90(10): 1 473~1 499.
- Li Houmin, Li Yanhe, Li Lixing, *et al.* 2022. Ore-forming conditions of the sedimentary metamorphic iron deposit and metallogenesis of the high-grade iron deposit [J]. *Acta Geologica Sinica*, 96(9): 3 211~3 233 (in Chinese with English abstract).
- 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 with English abstract).
- Lin Shizheng. 1982. Exploration of the mineral chemistry, genesis and evolution of magnetite [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2(3): 166~174 (in Chinese with English abstract).
- Lin Wenwei and Peng Lijun. 1994. The estimation of Fe³⁺ and Fe²⁺ contents in amphibole and biotite from EMPA data [J]. *Journal of Changchun University of Earth Science*, (2): 155~162 (in Chinese with English abstract).
- Meng Xuyang, Zhang Dongyang, Yan Xinghu, *et al.* 2014. A compar-

- tive 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[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 33(1): 109~126(in Chinese with English abstract).
- Nieto F. 1997. Chemical composition of metapelitic chlorites: X-ray diffraction and optical property approach[J]. *European Journal of Mineralogy*, 9(4): 829~841.
- No. 2 Geological Party, Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources. 2021. Report on the Results of the Mineral Geological Survey of the Iron Ore Concentration Area in Sijiaying, Hebei Province (Northern Sijiaying area) [R]. 57~58(in Chinese).
- Rausell-Colom J A, Wiewiora A and Matesanz E. 1991. Relationship between composition and d001 for chlorite[J]. *American Mineralogist*, 76(7): 1 373~1 379.
- Tian Zhonghua, Wang Wei and Liu Pinghua. 2022. Late Neoproterozoic tectonic evolution in eastern China: Enlightenment from the ancient continental core restoration [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 41(4): 681~694(in Chinese with English abstract).
- Tischendorf G, Förster H and Gottesmann B. 1999. The correlation between lithium and magnesium in trioctahedral micas: Improved Equations for Li₂O Estimation from MgO Data [J]. *Mineralogical Magazine*, 63(1): 57~74.
- Tong Xiaoxue, Zhang Lianchang, Wang Changle, *et al.* 2018. The characteristics of iron-bearing minerals and the depositional facies of BIF in Dagushan iron deposit, Anshan area: Indications of formation environment[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 34(4): 1 119~1 138(in Chinese with English abstract).
- Wei Juying, Zheng Shuhui and Mo Zhichao. 1979. Oxygen isotopic composition of magnetite in pre-sinian Fe-bearing quartzite in the area of Luanxian County, Hebei Province[J]. *Geochimica*, 8(3): 195~201 (in Chinese with English abstract).
- Wones D R and Eugster H P. 1965. Stability of biotite-experiment theory and application[J]. *American Mineralogist*, 50(9): 1 228~1 272.
- Wu Chunming and Chen Hongxu. 2015. Revised Ti-in-biotite geothermometer for ilmenite-rutile-bearing crustal metapelites[J]. *Science Bulletin*, 60(1): 116~121.
- Xu Guofeng and Shao Jieli. 1979. Characterization of magnetite speciation and its practical significance[J]. *Geology and Exploration*, 15(3): 30~37(in Chinese with English abstract).
- Zhai Mingguo. 2019. Tectonic evolution of the North China Craton [J]. *Journal of Geomechanics*, 25(5): 722~745(in Chinese with English abstract).
- Zhang Lianchang, Lan Caiyun, Wang Changle, *et al.* 2020. Changes of oceanic environment before and after the Paleoproterozoic great oxidation event (GOE): Evidence from petrography and geochemistry of banded iron formation (BIF) from the North China Craton [J]. *Journal of Palaeogeography*, 22(5): 827~840(in Chinese with English abstract).
- Zhang Lianchang, Zhai Mingguo, Wan Yusheng, *et al.* 2012. Study of the Precambrian BIF-iron deposits in the North China Craton: Progresses and questions [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(11): 3 431~3 445(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhaochong, Li Houmin, Li Jianwei, *et al.* 2021. Geological settings and metallogenesis of high-grade iron deposits in China [J]. *Science Sinica (Terrae)*, 51(6): 827~852(in Chinese with English abstract).
- Zhao Guochun, Sun Min, Simon A W, *et al.* 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: Key issues revisited [J]. *Precambrian Research*, 137: 149~172.
- Zheng Qiaorong. 1983. Calculation of the Fe³⁺ and Fe²⁺ contents in silicate and Ti-Fe oxide minerals from EPMA data [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 3(1): 55~62(in Chinese).

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, 第二章, 磁铁矿 [J]. *矿物岩石*, 4(2): 14~41.
- 陈靖, 李厚民, 李立兴, 等. 2014. 冀东司家营 BIF 铁矿流体包裹体及氧同位素研究 [J]. *岩石学报*, 30(5): 1 253~1 268.
- 崔伟, 董国明, 高孝敏, 等. 2022a. 冀东司家营铁矿床特征及找矿方向分析 [J]. *河北地质大学学报*, 45(4): 20~28.
- 崔伟, 董国明, 郑思光, 等. 2022b. 冀东沉积变质型铁矿成矿规律及找矿方向 [J]. *地质与勘探*, 58(5): 989~1 000.
- 崔文元, 张乃娟. 1983. 冀东滦县司家营铁矿中的高铁-蓝透闪石的研究 [J]. *长春地质学院学报*, 13(3): 97~106.
- 高新宇, 王登红, 黄凡, 等. 2022. 对冀东司家营铁矿深部找矿问题的探讨 [J]. *地质学报*, 96(7): 2 494~2 505.
- 河北省地矿局第二地质大队. 2021. 河北司家营铁矿矿集区矿产地质调查(司家营北部地区)课题成果报告 [R]. 石家庄: 河北省地矿局: 57~58.
- 河北省区域地质矿产调查研究所. 2017. 中国区域地质志·河北志 [M]. 北京: 地质出版社: 1~39, 675~738.
- 胡军, 王核, 徐德明, 等. 2019. 西昆仑大红柳滩铁矿床矿物电子探针化学成分和赤铁矿氧同位素特征研究 [J]. *地球化学*, 48(5): 458~467.
- 李厚民, 李延河, 李立兴, 等. 2022. 沉积变质型铁矿成矿条件及富铁矿形成机制 [J]. *地质学报*, 96(9): 3 211~3 233.
- 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.
- 林师整. 1982. 磁铁矿物化学、成因及演化的探讨[J]. 矿物学报, 2(3): 166~174.
- 林文蔚, 彭丽君. 1994. 由电子探针分析数据估算角闪石、黑云母中的 Fe^{3+} 、 Fe^{2+} [J]. 长春地质学院学报, (2): 155~162.
- 孟旭阳, 张东阳, 闫兴虎, 等. 2014. 河南窑场和辽宁思山岭铁矿磁铁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[J]. 岩石矿物学杂志, 33(1): 109~126.
- 田忠华, 王伟, 刘平华. 2022. 中国东部新太古代末期构造演化——来自古老陆核构造恢复的启示[J]. 岩石矿物学杂志, 41(4): 681~694.
- 佟小雪, 张连昌, 王长乐, 等. 2018. 鞍本地区大孤山条带状铁建造含铁矿物和相分带特征及形成环境分析[J]. 岩石学报, 34(4): 1 119~1 138.
- 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, 8(3): 195~201.
- 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, 15(3): 30~37.
- 翟明国. 2019. 华北克拉通构造演化[J]. 地质力学学报, 25(5): 722~745.
- 张连昌, 兰彩云, 王长乐, 等. 2020. 古元古代大氧化事件(GOE)前后海洋环境的变化:来自华北条带状铁建造(BIF)岩相学和地球化学的证据[J]. 古地理学报, 22(5): 827~840.
- 张连昌, 翟明国, 万渝生, 等. 2012. 华北克拉通前寒武纪 BIF 铁矿研究:进展与问题[J]. 岩石学报, 28(11): 3 431~3 445.
- 张招崇, 李厚民, 李建威, 等. 2021. 我国铁矿成矿背景与富铁矿成矿机制[J]. 中国科学:地球科学, 51(6): 827~852.
- 郑巧荣. 1983. 由电子探针分析值计算 Fe^{3+} 和 Fe^{2+} [J]. 矿物学报, 3(1): 55~62.

《岩石矿物学杂志》入选“2024 中国国际影响力优秀学术期刊”

由中国知网和清华大学图书馆联合研制的《中国学术期刊国际引证年报》(2024 版)近日发布,《岩石矿物学杂志》入选“2024 中国国际影响力优秀学术期刊”。

《中国学术期刊国际引证年报》自 2002 年起每年发布一次,旨在通过国际期刊对中国期刊的引用情况,客观反映我国学术期刊在国际学术研究领域的影响力。2024 版年报统计源期刊共计 26 555 种,涵盖 WoS、Scopus、EI、Medline 4 个重要国际索引数据库中大部分期刊,统计了 7 138 种中国学术期刊的国际被引情况,分别计算国际引证传播指数(ICCI),按该指数降序遴选了 330 种“中国最具国际影响力学术期刊”和 330 种“中国国际影响力优秀学术期刊”(简称 TOP 期刊)。国际影响力 TOP 期刊品牌已经得到期刊界和科研管理部门的广泛认可,在助力中国期刊走向国际舞台、树立国际学术品牌方面发挥了积极作用。

此前,《岩石矿物学杂志》曾于 2012、2013、2014 连续 3 年入选“中国最具国际影响力学术期刊”,2015~2020 年连续 6 年入选“中国国际影响力优秀学术期刊”。

