

辽冀地区条带状铁建造地球化学特征： I. 主量元素特征^{*}

杨秀清^{1,2} 李厚民^{1**} 李立兴¹ 姚通¹ 陈靖¹ 刘明军³

YANG XiuQing^{1,2}, LI HouMin^{1**}, LI LiXing¹, YAO Tong¹, CHEN Jing¹ and LIU MingJun³

1. 中国地质科学院矿产资源研究所, 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037

2. 北京大学地球与空间科学学院, 造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京 100871

3. 辽宁省冶金地质勘查局地质勘查研究院, 鞍山 114002

1. Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Resource Assessment, MLR, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2. Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, MOE, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

3. Institute of Geological Exploration, Liaoning Bureau of Metallurgical Geological Exploration, Anshan 114002, China

2013-10-08 收稿, 2014-01-22 改回.

Yang XQ, Li HM, Li LX, Yao T, Chen J and Liu MJ. 2014. Geochemical characteristics of Banded Iron Formations in Liaoning-eastern Hebei area: I. Characteristics of major elements. *Acta Petrologica Sinica*, 30(5):1218–1238

Abstract Liaoning-eastern Hebei area (it mainly includes Anshan-Benxi area and eastern Hebei Province), where plenty of large-superlarge banded iron formations (BIFs) type iron deposits distributed, is located at the northeastern North China Craton. Anshan-Benxi area and eastern Hebei Province are the two largest iron ore clusters in China. The iron ore reserves of Anshan-Benxi area account for about 24% in China, and the iron ore reserves of eastern Hebei Province account for more than 10%. Although most BIFs which belong to Algoma-type in Liaoning-eastern Hebei area formed in Neoproterozoic granite-greenstone belt, they may formed at different environment and experienced different late reformations. The BIFs in Anshan-Benxi experienced greenschist to amphibolite facies metamorphism, however the BIFs experienced greenschist to granulite facies metamorphism in eastern Hebei Province, and migmatization is ubiquity in both areas. In this study, we mainly report major elements of 200 iron ore samples from 28 iron deposits in the Liaoning-eastern Hebei area, which offers more information of the formation of the BIFs. The studied BIFs are mostly composed of $\text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ (the average value of Anshan-Benxi area is 95.10%, the average value of eastern Hebei Province is 88.06%). The contents of MgO and CaO are next to SiO_2 and $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$, and the positive correlation also between MgO and CaO in the studied area. The contents of Al_2O_3 , TiO_2 , K_2O , Na_2O , MnO, P_2O_5 are very low, all of which indicate that BIFs are typical chemical sedimentary rock, the protolith of BIFs are colloid composed of silicious, iron and small amounts of carbonate mud; Both Al_2O_3 and TiO_2 simultaneously increase in the studied BIFs indicates that these chemical sediments incorporate minor detrital components. In eastern Hebei Province, this correlation is more obvious, and the major elements concentrations are higher than that of Anshan-Benxi area except $\text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$, all of which represents eastern Hebei Province BIFs forming at wave base, more detrital material input. The average bulk chemistry of BIFs, from greenschist to granulite facies, which formed different mineral composition, the major elements are very similar, these suggest that metamorphic reaction is essentially isochemical. Alkali contents of Anshan-Benxi area BIFs ($\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$) and eastern Hebei Province (both are higher than Anshan-Benxi area, and $\text{Na}_2\text{O} < \text{K}_2\text{O}$) are different, combining with field geological characteristics, may indicate that migmatization had more strong influence on eastern Hebei Province than Anshan-Benxi area BIFs.

Key words Major elements; Banded iron formations; Anshan-Benxi area; Eastern Hebei Province; North China Craton

* 本文受国家“973”项目(2012CB416801)、国土资源部公益性行业专项经费项目(201111002、200911007)和地质矿产评价项目(1212011120988)联合资助。

第一作者简介: 杨秀清, 男, 1987年生, 博士生, 矿床学专业, E-mail: xiuqing2008@126.com

** 通讯作者: 李厚民, 男, 1962年生, 研究员, 从事区域成矿规律、成矿预测及矿产勘查评价工作, E-mail: lihomin2002@163.com

摘要 辽冀地区(主要包括鞍山-本溪地区和冀东地区)位于华北克拉通东北部,产出有诸多 BIFs 型大型-特大型铁矿床。鞍山-本溪地区和冀东地区是我国最大的两个铁矿集区,其中鞍本地区铁矿储量占全国的 24% 左右,冀东地区铁矿资源储量占全国的 10% 以上。虽然辽冀地区 BIFs 大多为形成于新太古代绿岩带中的 Algoma 型 BIFs,但不同矿区 BIFs 形成环境和受后期改造的程度不一致,鞍本地区 BIFs 变质级别为绿片岩相-角闪岩相,冀东地区 BIFs 经历了绿片岩相-麻粒岩相的变质作用,且辽冀地区普遍发育混合岩化。本文主要对比研究了辽冀地区 28 个铁矿床 200 件铁矿石的主量元素特征,为探讨辽冀地区 BIFs 的形成提供了更多的信息。BIFs 样品主要由 SiO_2 和 $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ 组成,其中鞍山-本溪地区 $\text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ 平均为 95.10%,冀东地区 $\text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ 平均为 88.06%,CaO 和 MgO 含量仅次于 SiO_2 和 $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$,且大部分矿区具有正相关关系, Al_2O_3 、 TiO_2 、 K_2O 、 Na_2O 、 MnO 、 P_2O_5 含量很低,这暗示 BIFs 原岩为一种化学沉积岩,主要为含有少量碳酸盐泥的硅质和铁质的胶体沉积;辽冀地区 Al_2O_3 和 TiO_2 均可见明显的正相关,这可能是由于 BIFs 沉积过程中有少量碎屑物质的加入,这种相关性在冀东地区更为明显,且除 $\text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ 外,其它氧化物含量明显高于鞍本地区,说明冀东地区 BIFs 形成时沉积环境更为动荡,有更多的碎屑物质加入;虽然辽冀不同地区 BIFs 经历了不同级别的变质作用,形成了不同的矿物组合,但是氧化物含量却变化不大,这说明了变质反应主要为等化学反应;鞍本地区 and 冀东地区碱质含量也存在差异性,前者的 Na_2O 和 K_2O 含量均低于后者,且后者 $\text{Na}_2\text{O} < \text{K}_2\text{O}$,结合野外地质特征,可能暗示了混合岩化作用对冀东地区的影响更为显著。

关键词 主量元素;条带状铁建造;鞍山-本溪地区;冀东地区;华北克拉通

中图法分类号 P595; P618.31

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,资源储量和开采量均居世界首位。James(1954)定义 BIFs 为一种化学沉积岩,具有典型的薄层或薄板状,铁的含量一般 $\geq 15\%$,主要由硅质(碧玉、燧石、石英)和铁质(磁铁矿、赤铁矿)薄层组成。Gross(1965)根据前寒武纪铁建造的沉积环境和共生岩石组合的不同,分为与火山活动关系密切的阿尔戈马型(Algoma-type)和远离火山活动的苏必利尔型(Superior-type)或哈默斯利型(Hamersley-type)两种。

在我国,BIFs 主要分布于华北克拉通地区,形成了辽宁鞍山-本溪(简称鞍本地区)、冀东-北京密云、山西五台-吕梁、河南舞阳、安徽霍邱、山东鲁西等铁矿集区(李厚民等,2012a,b;张连昌等,2012;沈保丰等,2012;Li *et al.*,2014;Zhang *et al.*,2014)。鞍本地区和冀东地区是我国最大的铁矿集区,其中鞍本地区铁矿资源储量约占全国的 24%,冀东地区铁矿资源储量占全国的 10% 以上,绝大多数为鞍山式铁矿(Algoma 型)。前人已对部分铁矿形成时代和地球化学特征进行过研究(翟明国等,1989;Zhai *et al.*,1990;万渝生,1993;周世泰,1994;沈其韩,1998;李志红等,2008,2010;丁文君等,2009;李延河等,2011;Zhang *et al.*,2011,2012;代堰培等,2012;相鹏等,2012;万渝生等,2012),认为辽冀地区 BIFs 具有大体一致的地球化学特征。但是,我们发现不同矿区 BIFs 地球化学特征存在差异性,这可能代表不同地区 BIFs 形成环境以及受后期改造的差异性。为了全面研究和深入对比不同地区不同岩群中 BIFs 的地球化学特征,我们对鞍本地区 13 个铁矿区和冀东地区 15 个铁矿区的约 200 件铁矿石样品进行了主量元素、稀土元素和其它微量元素分析。受篇幅所限,本文仅分析讨论这些样品的主量元素特征。稀土元素特征和微量元素特征将另文发表(姚通等,2014)。

1 地质特征

华北、扬子和塔里木克拉通组成了中国大陆的主要构造格局(图 1a),华北克拉通北接阴山-燕山造山带,南接秦岭-大别山造山带(Kusky *et al.*,2007;Li and Kusky,2007),多数学者认为该克拉通基底是由不同微陆块拼合而成。尽管对于华北克拉通基底微陆块划分还存在争论(伍家善等,1998;翟明国等,2000;Zhao *et al.*,2001;赵国春,2009;Kusky,2010;Santosh *et al.*,2010),但大部分学者认为这些微陆块普遍经历了新太古代末期的拼合事件,形成了华北克拉通前寒武纪结晶基底,随后华北克拉通进入相对稳定期,在 $\sim 1.8\text{Ga}$ 发生大规模裂解事件(翟明国,2010;张连昌等,2012)。辽冀地区地处华北克拉通东北部,包括鞍本和冀东我国最重要的两个铁矿集中区。

1.1 鞍本地区地质特征

鞍本地区主要包括鞍山、本溪和辽阳等地,位于华北克拉通东部陆块北缘胶-辽-吉活动带以南(Song *et al.*,1996;Wan *et al.*,2005;万渝生等,2005;Wu *et al.*,2010)(图 1a),其形成的构造模式为陆-弧-陆碰撞模式,BIFs 沉积于大陆边缘的火山沉积盆地,浅-中海水环境,原岩建造主要为基性火山岩-中酸性火山岩、杂砂岩、泥质岩-硅铁质沉积建造,遭受了绿片岩相至角闪岩相的变质作用(万渝生,1993;万渝生等,2005;翟明国等,1990;沈其韩,1998;张连昌等,2012)。鞍本地区太古宙岩石呈弧形分布,由约 30% 的含铁岩系和 70% 的花岗质岩石组成(图 1b)。出露的地层自老而新依次是太古宙鞍山群、元古宙辽河群、震旦系、古生界和新生界地层,其中最主要赋矿地层是太古宙鞍山群,矿体主要出现在中、上鞍山群。赋矿地层的主要特征如下:

(1) 上鞍山群:程裕洪(1957)认为上鞍山群主要有樱桃

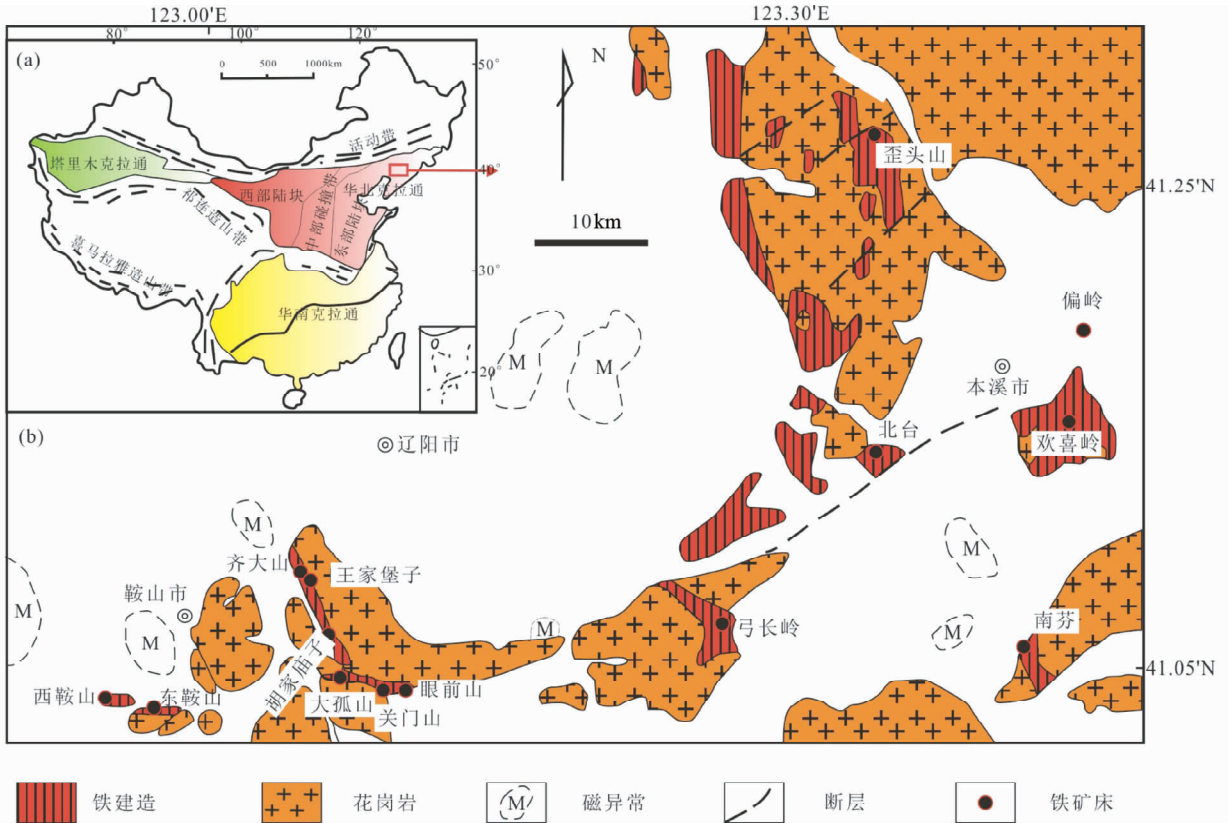


图1 鞍本地区地质简图(a,据 Zhao *et al.*, 2001; b,据沈其韩,1998)

Fig.1 Geological map of Anshan-Benxi area (a, after Zhao *et al.*, 2001; b, after Shen, 1998)

园组和大峪沟组,而周世泰(1994)、徐光荣和陈江洪(1984)将大峪沟组划入中鞍山群。樱桃园组主要出露于鞍山地区的齐大山及东西鞍山地区,主要变质岩石类型有角闪片岩、绿泥角闪片岩、绿泥千枚片岩、绿泥片岩、绿帘黑云母片岩、绿帘黑云石英片岩、白云绿泥石英片岩,变质级别为绿片岩相,主要铁矿床有西鞍山铁矿、东鞍山铁矿、齐大山铁矿等。大峪沟组主要出露于本溪歪头山-大峪沟一线以西,呈近南北向展布,主要变质岩石类型有长英质变粒岩类的角闪变粒岩、黑云更长变粒岩、透辉角闪变粒岩、透辉透闪绿帘变粒岩、透闪变粒岩、二云夕线石英片岩、石榴二云片岩和角闪黑云钾长片岩,角闪类的斜长角闪岩、黑云角闪斜长片麻岩和二云夕线长英片麻岩等,变质级别为角闪岩相,主要铁矿床有南芬铁矿和北台铁矿。

(2)中鞍山群:主要为茨沟组,周世泰(1994)将其划分为烟龙山组和山城子组,主要出露于歪头山地区和弓长岭地区,是主要的赋矿层位之一。主要变质岩石类型有斜长角闪岩类、片麻岩类、黑云变粒岩类、石英岩类、大理岩类和片岩类等,变质级别为角闪岩相,主要铁矿床有歪头山铁矿和弓长岭铁矿。

(3)下鞍山群:主要为石棚子组,出露于歪头山地区和小岭子地区,矿体很少,主要变质岩石类型有麻粒岩类、片麻岩类、变粒岩类和角闪岩类,其变质级别可达麻粒岩相,主要铁

矿床有小岭子铁矿(徐光荣和陈江洪,1984;翟明国等,1990;周世泰,1994)。

区内主要发育的断裂有NNE向郟庐断裂、NE向寒岭断裂、NW向石桥子断裂以及EW向的太子河断裂。前人将鞍本地区变形作用主要划分为2900~2800Ma的构造变形、2600Ma左右的构造变形和2000Ma左右发生的叠加在第二期构造变形之上的某些韧性剪切带的第三期构造变形,三期构造变形的结果是形成了片麻状花岗岩、构造片麻岩、各类片岩、构造片岩、石英岩和糜棱岩等,同时矿体和矿石也发生了各种构造变形(杨振升等,1983;张宝华等,1986)。鞍本地区出露的太古宙岩浆岩主要是花岗杂岩,主要有始太古代白家坟奥长花岗岩(38亿年)、古太古代陈台沟花岗岩(33亿年)、中太古代立山花岗岩(31亿年)、东鞍山花岗岩(29亿年)、铁架山花岗岩(29亿年)、新太古代齐大山花岗岩(伍家善等,1998)。太古宙后岩浆岩主要有前震旦系超基性岩、基性岩和和燕山期中酸性岩浆岩(周世泰,1994)。

1.2 冀东地区地质特征

冀东地区是指河北省东部的唐山市-秦皇岛市一带地区,包括遵化、迁西、宽城、青龙、迁安、滦县和秦皇岛(姚培慧,1993;沈保丰,2012)。冀东地区铁矿的原岩以火山岩-火山沉积岩为主,铁矿层多位于由基性火山岩向偏酸性火山岩

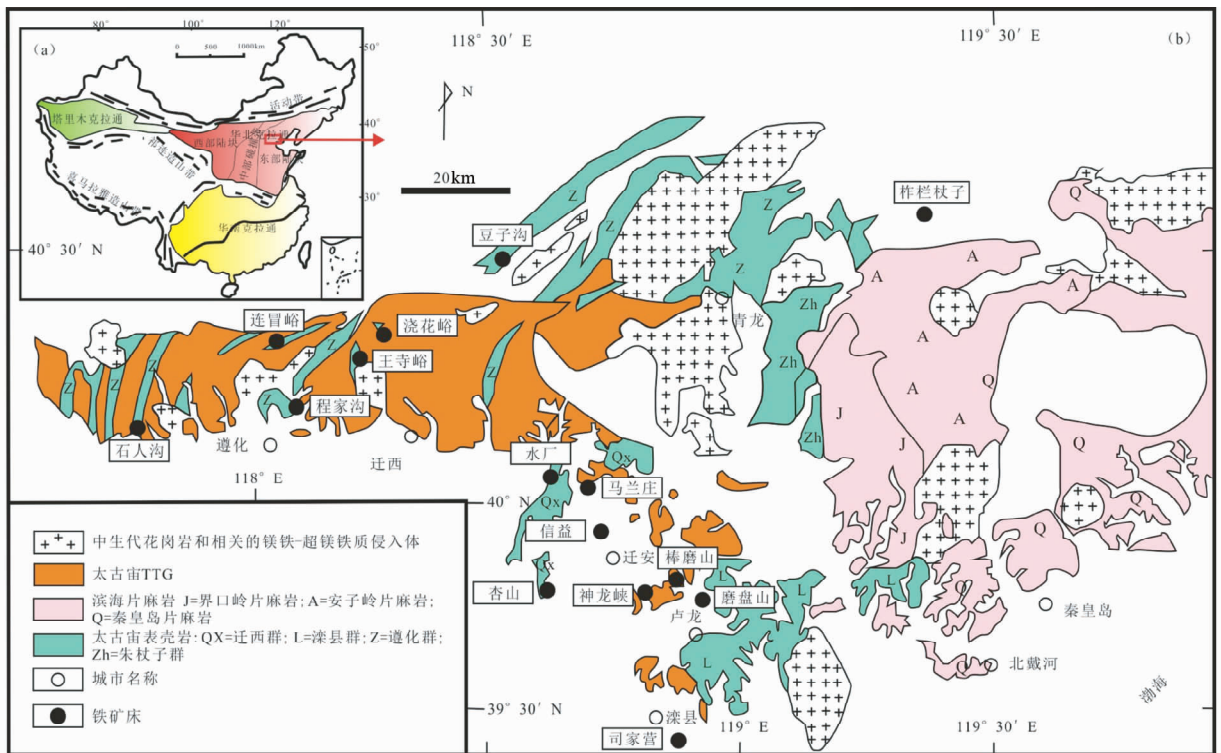


图2 冀东地区地质简图(a, 据 Zhao *et al.*, 2001; b, 据 Nutman *et al.*, 2011, 有修改)

Fig. 2 Geological map of eastern Hebei Province (a, after Zhao *et al.*, 2001; b, after Nutman *et al.*, 2011)

或沉积岩的过渡部位, 形成于新太古代火山喷发的间隙期 (Zhang *et al.*, 2011; Zhang *et al.*, 2012; 张连昌等, 2012)。冀东地区地层可划分为结晶基底和沉积盖层两部分, 其中结晶基底主要为太古宙(以新太古代为主)TTG 和花岗质岩石, 约占高级变质区的 80%, 此外为变质火山岩、磁铁石英岩等组成的表壳岩系, 约占 20%。沉积盖层包括中上元古界、古生界、中生界和第四系, 其中以中上元古界和第四系为主, 古生界出露最少(图 2)。赋矿各岩群的分布及特征如下:

(1) 迁西岩群: 主要分布在迁安水厂-松汀一带, 在迁西太平寨、迁安篓子山等地也有分布。在迁安水厂-松汀一带, 迁西群主要由暗色麻粒岩、含辉石黑云斜长片麻岩、辉石磁铁石英岩组成, 在铁矿层的上部出现石榴夕线斜长片麻岩和堇青斜长片麻岩; 在迁西太平寨一带, 迁西群主要由二辉斜长角闪岩、黑云石榴斜长片麻岩、石榴石变粒岩和黑云斜长变粒岩等组成, 有的地段在黑云斜长变粒岩中夹有磁铁石英岩; 在迁安县城西平林镇及篓子山一带, 迁西岩群主要由黑云紫苏石英斜长片麻岩和磁铁石英岩等组成。变质级别为高角闪岩-麻粒岩相, 产出有棒磨山、神龙峡、水厂、信益、杏山、马兰庄和磨盘山等铁矿床。

(2) 滦县岩群: 滦县岩群主要分布在冀东滦县-卢龙-迁安南部, 主要由变粒岩、斜长角闪岩、条带状磁铁石英岩等组成。大致可分为上、中、下三部分: 下部以斜长角闪岩、斜长角闪片麻岩为主, 夹黑云变粒岩、石榴角闪变粒岩和浅粒岩等薄层, 主要分布在卢龙仙景山一带; 中部主要为黑云变粒

岩和斜长角闪岩的互层, 主要分布在卢龙阳山和府君山一带; 上部则以黑云变粒岩为主, 夹大量磁铁石英岩、薄层斜长角闪岩和黑云变粒岩等, 主要分布在滦县司家营至马城一带。主体变质程度为低角闪岩相, 产出有司家营铁矿床等。

(3) 遵化岩群: 遵化岩群主要指分布在遵化、迁西北部、宽城东南部和青龙东部的一套中高级变质岩层。在遵化清东陵至迁西龙湾一带, 遵化岩群主要有斜长角闪岩、辉石角闪岩、含辉石石榴角闪岩、黑云角闪斜长片麻岩及中薄层至中厚层磁铁石英岩所组成, 有时可见少量的石榴斜长片麻岩(变粒岩)。宽城东南下板城一带遵化岩群主要由斜长角闪岩、含透辉(或黑云)角闪斜长片麻岩, 石榴黑云斜长片麻岩、磁铁石英岩及少量石榴黑云斜长变粒岩所组成。在王厂-青龙一带则以斜长角闪岩、石榴斜长角闪岩夹薄层磁铁石英岩为主。本岩群变质作用以高角闪岩相为主, 局部可达麻粒岩相, 并伴有中等到强烈的混合岩化作用。主要有石人沟、王寺峪、程家沟、浇花峪和连帽峪等铁矿床。

(4) 朱杖子岩群: 朱杖子岩群包括前人划分的朱杖子群(或青龙河群)和单塔子群(或双山子群), 岩性以黑云变粒岩、浅粒岩为主, 夹磁铁石英岩, 偶夹斜长角闪岩薄层。朱杖子岩群具有绿岩带性质, 产出有柞栏杖子等铁矿床。

冀东地区断裂构造十分发育, 区域性大断裂有三条, 分别是: 密云-喜峰口大断裂, 平坊-桑园大断裂和青龙-滦县大断裂, 除大断裂之外, 其次还发育数条一般断裂, 按走向主要分为 EW 向或者近 EW 向和 NNE-NE 向两组。区内太古宙、

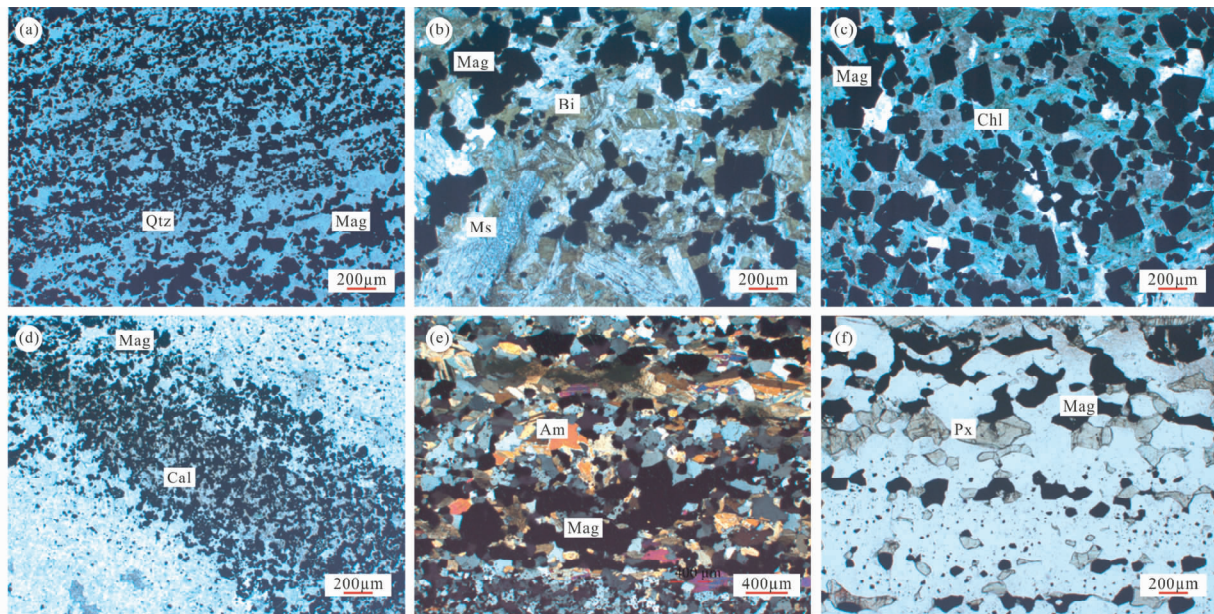


图3 辽冀地区铁矿石镜下照片

(a)-磁铁矿石英岩(南芬铁矿床);(b)-云母磁铁矿石英岩(弓长岭铁矿床);(c)-绿泥磁铁矿石英岩(弓长岭铁矿床)(d)-碳酸盐磁铁矿石英岩(东鞍山铁矿床);(e)-角闪磁铁矿石英岩(歪头山铁矿床);(f)-辉石磁铁矿石英岩(棒磨山铁矿床);(e)为正交偏光,其它照片为单偏光. Qtz-石英; Mag-磁铁矿; Bi-黑云母; Ms-白云母; Chl-绿泥石; Cal-方解石; Am-角闪石; Px-辉石

Fig. 3 Photomicrographs of iron ore from Liaoning-eastern Hebei area

(a)-magnetite quartzite (Nanfen iron deposit); (b)-mica magnetite quartzite (Gongchangling iron deposit); (c)-chlorite magnetite quartzite (Gongchangling iron deposit); (d)-carbonate magnetite quartzite (Donganshan iron deposit); (e)-amphibole magnetite quartzite (Waitoushan iron deposit); (f)-pyroxene magnetite quartzite (Bangmoshan iron deposit). All photomicrographs studied by plane polarized light, except (e) is cross-polarized light. Qtz-quartz; Mag-magnetite; Bi-biotite; Ms-muscovite; Chl-chlorite; Cal-calcite; Am-amphibole; Px-pyroxene

元古宙、古生代和中生代岩浆岩都有发育,以太古宙、中生代岩浆活动最为强烈,元古宙与古生代岩浆活动非常微弱。太古宙侵入岩主要为TTG花岗岩类,其次为闪长岩,另有少量紫苏花岗岩和超基性岩;中生代侵入岩主要形成于燕山期,岩性主要为黑云母花岗岩、二长花岗岩、花岗闪长岩以及少量的正长岩和碱性花岗岩(罗镇宽等,2001;Wu *et al.*, 2005; Geng *et al.*, 2012)。

2 样品选择与分析测试

鞍本地区13个矿区(西鞍山、东鞍山、齐大山、王家堡子、胡家庙子、关门山、眼前山、大孤山、南芬、北台、歪头山、偏岭和小岭子地区)78件样品和冀东地区15个矿区(棒磨山、神龙峡、水厂、信益、杏山、马兰庄、磨盘山、司家营、石人沟、王寺峪、程家沟、浇花峪、连帽峪、柞栏杖子和豆子沟)122件样品均采自采矿场,无明显的风化现象。矿石类型主要有:磁铁(赤铁)石英岩、黑(白)云磁铁矿石英岩、绿泥磁铁矿石英岩、碳酸盐磁铁矿石英岩、角闪磁铁矿石英岩和辉石磁铁矿石英岩等(图3)。

主量元素测试在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室完成。取200目全岩粉末0.4g与3g四硼酸锂和

1g偏硼酸锂混合均匀后,加入2滴饱和LiBr,在铂金坩锅内1000℃下融化成玻璃薄片,采用X射线荧光光谱仪(型号为ARL ADVANT XP+)进行测定,烧失量(LOI)采用重量法测定。分析过程中采用的标样为GSR-1和GSR-15,分析误差小于1%。200件样品主量元素测试结果见表1。

3 主量元素特征

3.1 SiO_2 和 Fe_2O_3^T

SiO_2 主要以石英形式赋存在BIFs中, Fe_2O_3^T 主要以磁铁矿和赤铁矿的形式出现。鞍本地区BIFs SiO_2 含量变化范围较大,8.45%~85.9%,平均为56.94%, SiO_2 平均含量最低的是歪头山地区(52.35%),平均含量最高的是齐大山地区(64.18%); Fe_2O_3^T 含量变化范围为11.71%~82.04%,平均为38.24%,平均含量最低的为齐大山地区(34.64%),平均含量最高的为东鞍山地区(40.26%); $\text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3^T$ 变化范围为72.79%~99.64%,平均为95.10%,平均含量最低的为歪头山地区(89.73%),平均含量最高的为齐大山地区(99.82%)。

冀东地区BIFs SiO_2 含量变化范围为41.41%~72.56%,平均为53.62%,低于鞍山地区 SiO_2 平均含量, SiO_2

表 1 辽冀地区样品主量元素测试结果 (wt%)

Table 1 Major element analyses (wt%) of samples from Liaoning-eastern Hebei area

样品号	采样点	矿石类型	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ ^T	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅	LOI	TOTAL	SiO ₂ + Fe ₂ O ₃ ^T	MnO/Fe ₂ O ₃ ^T	SiO ₂ /Al ₂ O ₃
鞍本地区																	
X11-11		赤铁矿石英岩	50.77	0.51	48.27	0.03	0.02	-	0.04	-	-	0.01	0.32	99.97	99.04	-	98.82
X11-12		赤铁矿石英岩	60.48	0.40	38.43	0.10	0.06	0.02	0.03	-	0.02	0.07	0.37	99.97	98.90	-	151.40
X11-19		赤铁矿石英岩	85.90	0.95	11.71	0.15	0.13	0.02	0.06	0.01	0.02	0.09	0.90	99.94	97.61	0.00	90.70
XAS-4		赤铁矿石英岩	48.65	0.48	49.89	0.04	0.06	0.04	0.01	0.01	0.01	0.08	0.72	99.97	98.53	0.00	101.91
XAS-3		赤铁矿石英岩	48.68	0.59	49.90	0.04	0.08	0.02	0.01	0.01	0.03	0.12	0.48	99.94	98.58	0.00	82.93
X11-7		磁铁矿石英岩	44.00	0.37	53.20	0.09	0.23	0.01	0.11	0.11	0.01	0.01	1.83	99.95	97.19	0.00	120.53
XAS-6	西鞍山	磁铁矿石英岩	62.23	0.36	36.45	0.05	0.06	0.02	0.12	0.01	0.01	0.05	0.58	99.94	98.68	0.00	173.28
XAS-2		磁铁矿石英岩	55.47	0.39	43.53	0.02	0.02	0.02	0.01	-	0.01	0.01	0.53	100.0	99.00	-	143.11
X11-13		磁铁矿石英岩	73.34	0.27	25.83	0.04	0.06	0.01	0.08	-	0.01	0.06	0.24	99.94	99.18	-	267.61
X11-14		磁铁矿石英岩	50.19	1.15	47.74	0.05	0.12	0.01	-	-	0.02	0.02	0.66	99.96	97.93	-	43.74
X11-15		磁铁矿石英岩	74.91	1.50	22.30	0.04	0.05	0.05	0.01	-	0.02	0.07	1.02	99.97	97.21	-	49.86
X11-18		磁铁矿石英岩	57.41	0.31	41.74	0.02	0.01	-	0.03	0.01	-	0.01	0.42	99.96	99.15	0.00	183.58
X11-9		磁铁矿石英岩	57.36	0.23	41.14	0.16	0.13	-	-	0.07	-	0.01	0.78	99.89	98.50	0.00	249.93
		西鞍山平均(13)	59.18	0.58	39.24	0.06	0.08	0.02	0.05	0.03	0.02	0.05	0.68	99.96	98.42	0.00	102.55
DAS-4		绿泥磁铁矿石英岩	57.69	1.66	39.40	0.06	0.35	0.01	-	0.02	0.03	0.04	0.71	99.97	97.09	0.00	34.80
DAS-3	东鞍山	磁铁矿石英岩	57.24	0.59	41.12	0.28	0.20	0.01	0.01	0.01	0.01	0.11	0.40	99.99	98.36	0.00	97.75
		东鞍山平均(2)	57.47	1.12	40.26	0.17	0.28	0.01	0.01	0.01	0.02	0.08	0.56	99.98	97.73	0.00	51.23
QDS-11		磁铁矿石英岩	72.82	0.32	25.92	0.06	0.09	0.02	-	0.03	-	0.02	0.70	99.98	98.74	0.00	224.55
QDS-2	齐大山	磁铁矿石英岩	55.54	0.22	43.36	0.17	0.48	0.03	0.00	0.03	0.01	0.14	-	99.97	98.90	0.00	250.28
		齐大山平均(2)	64.18	0.27	34.64	0.11	0.29	0.02	0.00	0.03	0.01	0.08	0.70	99.98	98.82	0.00	235.01
W11-3		赤铁矿石英岩	69.87	0.14	28.97	0.02	0.01	0.01	-	-	-	0.02	0.94	99.98	98.84	-	514.36
WJPZ-3		磁铁矿石英岩	38.94	0.82	59.94	0.04	0.11	0.01	0.01	0.01	0.01	0.07	-	99.97	98.88	0.00	47.38
J11-10		磁铁矿石英岩	44.67	0.87	52.40	0.12	0.06	0.07	0.04	0.02	0.02	0.21	0.36	98.85	97.07	0.00	51.42
W11-2		磁铁矿石英岩	70.25	0.26	29.13	0.02	0.01	-	-	0.01	-	0.09	0.19	99.96	99.38	0.00	265.37
W11-20		磁铁矿石英岩	68.05	0.18	31.59	0.01	0.00	-	-	0.02	0.01	0.02	0.10	99.98	99.64	0.00	368.06
W11-9		磁铁矿石英岩	58.18	0.66	40.83	0.02	0.01	-	-	0.02	-	0.17	-	99.88	99.01	0.00	88.72
WJPZ-1		磁铁矿石英岩	69.81	0.99	28.56	0.02	0.04	0.06	0.04	0.02	0.01	0.02	0.41	99.97	98.37	0.00	70.45
WJPZ-5		磁铁矿石英岩	54.41	0.63	44.25	0.03	0.22	-	0.09	0.02	0.02	0.05	-	99.71	98.66	0.00	86.24
		王家堡子平均(8)	59.27	0.57	39.46	0.03	0.06	0.04	0.05	0.02	0.01	0.08	0.40	99.79	98.73	0.00	104.13
H11-10		绿泥磁铁矿石英岩	50.69	2.56	45.17	0.11	1.11	0.01	-	0.03	0.01	0.12	0.02	99.82	95.86	0.00	19.80
H11-9		磁铁矿石英岩	59.40	0.69	39.29	0.03	0.16	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.34	99.98	98.69	0.00	85.70
HJMZ-4		磁铁矿石英岩	72.79	0.35	22.69	1.55	1.06	0.01	0.12	0.05	-	0.06	1.25	99.93	95.48	0.00	208.09
HJMZ-7	胡家庙子	磁铁矿石英岩	28.40	1.22	69.63	0.16	0.31	0.04	-	0.01	0.02	0.17	-	99.95	98.02	0.00	23.25
H11-5		磁铁矿石英岩	73.20	0.49	25.57	0.07	0.07	0.01	0.02	0.04	0.01	0.09	0.43	99.98	98.77	0.00	149.12
HJMZ-3		角闪磁铁矿石英岩	53.19	0.62	25.86	6.79	11.01	0.02	0.24	0.32	0.01	0.07	1.83	99.96	79.05	0.01	85.71

续表 1

Continued Table 1

样品号	采样点	矿石类型	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ ^T	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅	LOI	TOTAL	SiO ₂ + Fe ₂ O ₃ ^T	MnO/Fe ₂ O ₃ ^T	SiO ₂ /Al ₂ O ₃
	胡家庙子平均(6)		56.28	0.99	38.03	1.45	2.29	0.02	0.10	0.08	0.01	0.09	0.77	99.94	94.31	0.00	56.89
GMS-8		赤铁矿石英岩	72.16	0.32	26.98	0.02	0.01	-	0.02	-	0.01	0.02	0.44	99.97	99.14	-	228.11
GMS-26		赤铁矿石英岩	57.58	0.56	40.57	0.02	0.02	0.02	-	0.02	0.01	0.04	1.13	99.98	98.15	0.00	102.00
GMS-7		赤铁矿石英岩	52.66	0.33	46.31	0.04	0.03	-	0.04	0.01	0.01	0.03	0.50	99.95	98.97	0.00	159.55
GMS-14	关门山	磁铁矿石英岩	51.47	0.40	47.33	0.04	0.04	0.02	0.03	0.20	0.01	0.02	0.42	99.98	98.80	0.00	127.18
GMS-24		磁铁矿石英岩	82.13	0.32	17.20	0.03	0.01	0.01	0.01	-	-	0.01	0.27	99.99	99.33	-	254.03
GMS-5		磁铁矿石英岩	52.03	0.34	46.83	0.05	0.04	0.01	0.01	0.02	0.04	0.03	0.58	99.99	98.86	0.00	151.57
GMS-17		磁铁矿石英岩	47.58	0.25	48.93	0.02	0.01	0.01	-	0.01	-	0.05	3.09	99.94	96.51	0.00	194.14
	关门山平均(7)		59.37	0.36	39.16	0.03	0.02	0.01	0.02	0.05	0.02	0.03	0.92	99.97	98.54	0.00	164.45
YQS-34		赤铁矿石英岩	46.45	0.38	49.19	0.35	0.57	0.03	-	0.23	0.01	0.08	2.69	99.98	95.64	0.00	123.80
YQS-17		磁铁矿石英岩	52.98	0.99	28.75	8.69	3.14	0.13	0.04	0.16	0.19	0.03	4.84	99.96	81.74	0.01	53.45
YQS-12		磁铁矿石英岩	38.75	0.16	52.27	2.33	4.97	0.01	0.01	0.10	-	0.21	1.19	99.99	91.03	0.00	244.70
YQS-33		磁铁矿石英岩	37.65	0.83	55.57	1.64	0.96	0.01	-	0.20	0.02	0.08	2.25	99.20	93.22	0.00	45.46
YQS-35	眼前山	磁铁矿石英岩	73.40	0.47	21.64	0.23	0.37	0.03	0.06	0.12	-	0.03	3.61	99.94	95.04	0.01	155.16
YQS-1		磁铁矿石英岩	60.47	0.23	35.40	1.28	1.83	0.01	-	0.06	-	0.02	0.66	99.96	95.87	0.00	266.52
YQS-11		磁铁矿石英岩	48.58	0.16	39.79	3.52	3.63	0.01	0.09	-	-	0.21	3.86	99.83	88.37	-	313.27
YQS-3		磁铁矿石英岩	60.63	0.26	35.67	1.22	1.81	0.01	0.01	0.03	-	0.02	0.31	99.99	96.30	0.00	231.18
	眼前山平均(8)		52.36	0.43	39.79	2.41	2.16	0.03	0.04	0.13	0.07	0.08	2.43	99.86	92.15	0.00	120.71
DGS-20		磁铁矿石英岩	43.20	0.38	55.11	0.51	0.51	0.02	0.06	0.05	0.02	0.01	-	99.86	98.31	0.00	112.30
DGS-6		磁铁矿石英岩	57.44	1.60	33.44	2.82	2.07	0.03	0.05	0.14	0.03	0.04	2.30	99.95	90.87	0.00	36.00
DGS-25		磁铁矿石英岩	76.90	0.28	17.36	0.57	4.19	0.01	-	0.10	-	0.02	0.57	99.99	94.26	0.01	279.42
DGS-12		磁铁矿石英岩	45.77	0.43	46.40	3.31	2.59	0.02	0.14	0.12	0.01	0.12	0.99	99.91	92.17	0.00	106.38
DGS-22	大孤山	黑云磁铁矿石英岩	54.07	0.22	37.78	1.82	4.39	0.01	0.02	0.15	-	0.02	1.48	99.96	91.85	0.00	245.48
DGS-11		黑云磁铁矿石英岩	46.81	0.24	43.17	4.26	3.49	0.02	0.03	0.13	0.01	0.09	1.72	99.98	89.99	0.00	196.72
DGS-4		黑云磁铁矿石英岩	63.32	4.44	18.24	4.80	2.36	2.32	0.03	0.43	0.11	0.05	3.64	99.75	81.56	0.02	14.25
DGS-31		角闪磁铁矿石英岩	67.61	0.68	25.63	0.52	3.98	0.04	0.19	0.44	0.01	0.12	0.69	99.91	93.24	0.02	99.40
	大孤山平均(8)		56.89	1.03	34.64	2.33	2.95	0.31	0.07	0.19	0.03	0.06	1.63	99.91	91.53	0.01	55.05
BT-5	北台	磁铁矿石英岩	53.58	0.23	40.39	2.39	2.91	0.01	0.11	0.17	-	0.16	-	99.96	93.97	0.00	230.48
BT-1		角闪磁铁矿石英岩	58.56	0.25	35.32	3.79	0.79	0.01	0.09	0.06	-	0.07	0.99	99.95	93.88	0.00	229.98
	北台平均(2)		56.07	0.24	37.86	3.09	1.85	0.01	0.10	0.11	-	0.12	0.99	99.95	93.93	0.00	230.22
NF-3		磁铁矿石英岩	8.45	1.87	82.04	0.26	6.01	0.78	-	0.22	0.01	0.03	-	99.67	90.49	0.00	4.52
NF-2		磁铁矿石英岩	57.51	0.17	31.54	2.20	6.44	0.03	-	0.11	-	0.16	1.78	99.94	89.05	0.00	344.62
NF-12		磁铁矿石英岩	58.40	0.15	40.88	0.05	0.43	0.01	0.02	0.02	-	0.01	-	99.97	99.28	0.00	380.80
NF-1	南芬	磁铁矿石英岩	55.71	0.17	31.37	0.37	11.45	0.03	-	0.44	-	0.05	-	99.59	87.08	0.01	328.64
NF-8		角闪磁铁矿石英岩	80.48	0.32	13.72	0.18	4.84	0.01	0.01	0.20	0.01	0.02	0.19	99.97	94.20	0.01	255.06
NF-10		角闪磁铁矿石英岩	62.29	0.26	32.24	0.33	4.15	0.01	-	0.09	0.01	0.17	-	99.52	94.52	0.00	240.37

续表 1

Continued Table 1

样品号	采样点	矿石类型	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ ^T	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅	LOI	TOTAL	SiO ₂ + Fe ₂ O ₃ ^T	MnO/Fe ₂ O ₃ ^T	SiO ₂ /Al ₂ O ₃
	南芬平均(6)		53.81	0.49	38.63	0.56	5.55	0.14	0.01	0.18	0.01	0.07	0.99	99.78	92.44	0.00	110.06
WTS-7		角闪磁铁矿石英岩	25.25	0.98	61.02	3.68	8.34	0.05	0.16	0.09	0.01	0.33	-	99.91	86.27	0.00	25.75
WTS-1		角闪磁铁矿石英岩	63.53	0.36	31.33	1.65	2.54	0.04	0.16	0.02	-	0.26	-	99.89	94.86	0.00	175.63
WTS-2		角闪磁铁矿石英岩	55.73	0.62	38.33	1.69	3.22	0.03	0.11	0.05	0.01	0.14	-	99.93	94.06	0.00	89.89
WTS-11	歪头山	角闪磁铁矿石英岩	60.44	0.39	32.98	2.00	2.21	0.02	0.07	0.03	0.02	0.28	1.50	99.94	93.42	0.00	154.97
WTS-15		角闪磁铁矿石英岩	40.30	4.11	32.49	11.99	9.87	0.27	0.55	0.13	0.09	0.11	-	99.90	72.79	0.00	9.81
WTS-16		角闪磁铁矿石英岩	64.53	0.63	29.22	2.13	3.19	0.04	0.08	0.03	0.02	0.10	-	99.97	93.75	0.00	102.43
WTS-17		角闪磁铁矿石英岩	56.65	0.30	36.28	2.88	3.02	0.02	0.07	0.08	0.02	0.63	-	99.95	92.93	0.00	188.83
	歪头山平均(7)		52.35	1.06	37.38	3.72	4.63	0.07	0.17	0.06	0.03	0.26	1.50	99.93	89.73	0.00	49.57
PL-2		角闪磁铁矿石英岩	56.64	1.00	40.59	0.27	1.13	0.14	0.02	0.09	0.08	0.02	-	99.98	97.23	0.00	56.49
PL-5		角闪磁铁矿石英岩	62.31	0.25	35.88	0.20	1.15	0.01	0.07	0.09	-	0.01	-	99.97	98.19	0.00	251.70
PL-3	偏岭	角闪磁铁矿石英岩	67.97	0.74	28.76	0.26	1.82	0.09	0.03	0.16	0.03	0.03	-	99.89	96.73	0.01	92.40
PL-6		角闪磁铁矿石英岩	56.57	0.23	40.86	0.19	1.85	0.01	0.06	0.11	0.01	0.02	-	99.90	97.43	0.00	244.68
PL-8		角闪磁铁矿石英岩	53.03	0.50	44.34	0.34	1.54	0.03	0.03	0.13	0.02	0.02	-	99.97	97.37	0.00	106.00
	偏岭平均(5)		59.30	0.54	38.09	0.25	1.50	0.06	0.04	0.11	0.03	0.02	-	99.94	97.39	0.00	109.13
LL-3		磁铁矿石英岩	61.25	0.54	33.12	1.38	2.83	0.03	0.63	0.06	0.01	0.01	-	99.86	94.37	0.00	113.59
LL-5		磁铁矿石英岩	61.21	0.46	34.68	0.22	1.83	0.04	1.11	0.14	-	0.08	-	99.78	95.90	0.00	133.57
LL-2	小岭	磁铁矿石英岩	57.00	1.15	37.18	1.92	2.16	0.05	0.09	0.14	0.03	0.18	-	99.91	94.18	0.00	49.55
LL-18		黑云磁铁矿石英岩	49.95	0.31	44.67	1.83	3.02	0.01	0.01	0.07	-	0.08	-	99.96	94.63	0.00	159.16
	小岭平均(4)		57.35	0.62	37.41	1.34	2.46	0.03	0.46	0.10	0.02	0.09	-	99.88	94.77	0.00	93.20
	鞍本平均(78)		56.94	0.65	38.24	1.16	1.85	0.07	0.09	0.09	0.02	0.08	1.12	99.90	95.18	0.00	87.02
冀东地区																	
BMS-6		角闪磁铁矿石英岩	55.08	0.20	36.82	1.68	5.91	0.01	0.04	0.06	0.01	0.11	-	99.91	91.90	0.00	272.55
BMS-21		角闪磁铁矿石英岩	48.75	0.63	44.60	2.12	3.40	0.03	0.14	0.14	0.06	0.11	-	99.98	93.35	0.00	76.98
BMS-3	棒磨山	磁铁矿石英岩	61.51	2.23	31.73	1.16	2.40	0.12	0.37	0.07	0.21	0.13	-	99.94	93.24	0.00	27.53
BMS-2		辉石磁铁矿石英岩	49.48	0.14	45.22	1.49	3.29	-	0.03	0.06	0.01	0.07	-	99.79	94.70	0.00	348.13
BMS-7		辉石磁铁矿石英岩	47.67	0.12	42.77	3.56	4.85	0.01	0.09	0.24	-	0.11	-	99.40	90.44	0.01	393.52
BMS-19		角闪磁铁矿石英岩	46.72	0.61	47.23	1.91	2.92	0.02	0.36	0.06	0.02	0.10	-	99.94	93.95	0.00	76.95
	棒磨山平均(6)		51.53	0.66	41.40	1.99	3.80	0.04	0.17	0.10	0.06	0.10	-	99.83	92.93	0.00	78.47
CJG-2		磁铁矿石英岩	50.35	2.20	41.58	2.32	2.06	0.03	0.02	0.06	0.30	0.24	0.80	99.95	91.94	0.00	22.84
CJG-1		磁铁矿石英岩	48.97	2.08	43.58	2.12	1.81	0.61	0.31	0.04	0.06	0.28	-	99.84	92.54	0.00	23.55
CJG-15	程家沟	磁铁矿石英岩	54.30	4.64	33.81	1.60	2.82	1.89	0.35	0.06	0.14	0.17	-	99.79	88.11	0.00	11.69
CJG-6		磁铁矿石英岩	48.28	2.37	43.97	1.79	2.63	0.04	0.02	0.07	0.44	0.16	0.17	99.94	92.25	0.00	20.40
CJG-22		辉石磁铁矿石英岩	52.37	7.79	26.48	3.51	3.39	3.98	0.78	0.10	0.34	0.20	0.49	99.40	78.85	0.00	6.72
CJG-3		辉石磁铁矿石英岩	50.52	3.33	39.36	2.27	2.58	1.17	0.31	0.06	0.10	0.18	-	99.87	89.88	0.00	15.19

续表 1

Continued Table 1

样品号	采样点	矿石类型	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ ^T	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅	LOI	TOTAL	SiO ₂ + Fe ₂ O ₃ ^T	MnO/Fe ₂ O ₃ ^T	SiO ₂ /Al ₂ O ₃
	程家沟平均(6)		50.80	3.73	38.13	2.27	2.55	1.28	0.30	0.06	0.23	0.21	0.49	99.80	88.93	0.00	13.60
DZG-10		磁铁石英岩	57.87	0.58	37.01	1.65	2.20	0.09	0.17	0.03	0.02	0.35	-	99.96	94.88	0.00	100.64
DZG-29		磁铁石英岩	51.53	3.99	36.18	1.95	2.27	2.18	0.32	0.05	0.12	0.37	0.95	99.91	87.72	0.00	12.92
DZG-35		磁铁石英岩	47.84	4.59	38.12	2.43	2.64	2.52	0.23	0.05	0.13	0.37	1.00	99.92	85.96	0.00	10.42
DZG-12		磁铁石英岩	51.64	2.66	38.81	1.87	2.73	1.17	0.11	0.06	0.08	0.78	0.02	99.94	90.46	0.00	19.45
DZG-17		磁铁石英岩	68.02	4.17	20.07	2.21	1.41	1.53	0.80	0.06	0.20	0.20	1.24	99.91	88.09	0.00	16.30
DZG-36		磁铁石英岩	55.40	1.56	37.58	2.14	2.04	0.03	0.03	0.06	0.25	0.20	0.67	99.96	92.98	0.00	35.50
DZG-2		磁铁石英岩	51.10	1.50	42.81	1.32	2.74	0.07	0.06	0.05	0.05	0.24	-	99.93	93.90	0.00	33.96
	豆子沟平均(7)		54.77	2.72	35.80	1.94	2.29	1.08	0.24	0.05	0.12	0.36	0.78	99.93	90.57	0.00	20.13
JHY-16		磁铁石英岩	46.86	4.72	40.37	1.96	3.56	1.01	0.12	0.08	0.23	0.41	0.55	99.87	87.23	0.00	9.94
JHY-10		磁铁石英岩	40.10	3.52	40.49	8.58	5.82	0.44	0.43	0.17	0.16	0.15	-	99.87	80.59	0.00	11.38
JHY-11		磁铁石英岩	51.18	2.85	40.43	1.12	2.86	0.15	0.18	0.06	0.84	0.26	-	99.93	91.61	0.00	17.97
JHY-15		磁铁石英岩	48.27	1.89	44.12	1.83	2.56	0.10	-	0.07	0.53	0.26	0.28	99.92	92.39	0.00	25.52
JHY-4		角闪磁铁石英岩	53.07	3.69	36.76	1.28	2.94	0.85	0.44	0.08	0.45	0.30	-	99.86	89.83	0.00	14.39
	浇花峪平均(5)		47.90	3.33	40.43	2.95	3.55	0.51	0.29	0.09	0.44	0.28	0.42	99.89	88.33	0.00	14.37
LMY-23		磁铁石英岩	47.66	1.61	45.86	1.94	1.72	0.03	0.05	0.05	0.05	0.36	0.62	99.95	93.52	0.00	29.52
LMY-9		磁铁石英岩	51.43	1.07	43.17	1.06	1.76	0.03	0.09	0.06	0.30	0.18	-	99.15	94.60	0.00	48.13
LMY-20		磁铁石英岩	53.06	4.92	33.14	2.25	2.37	1.42	0.07	0.08	0.18	0.16	1.97	99.62	86.20	0.00	10.79
LMY-15		磁铁石英岩	57.08	6.98	22.79	1.51	4.21	2.03	0.80	0.06	0.35	0.21	2.51	98.54	79.87	0.00	8.17
LMY-17		磁铁石英岩	44.25	1.44	40.89	2.59	2.55	0.20	0.01	0.09	0.05	0.29	7.60	99.97	85.14	0.00	30.65
LMY-6		磁铁石英岩	51.22	0.96	44.25	1.44	1.53	0.03	0.02	0.06	0.20	0.26	-	99.96	95.46	0.00	53.29
LMY-11		黑云磁铁石英岩	47.98	2.05	45.70	0.43	1.31	0.12	0.10	0.03	0.12	0.29	1.77	99.91	93.68	0.00	23.38
LMY-8		辉石磁铁石英岩	57.29	2.23	37.11	0.49	1.36	0.31	0.12	0.03	0.07	0.31	0.61	99.93	94.40	0.00	25.66
LMY-7		角闪磁铁石英岩	45.81	2.40	43.82	2.73	2.69	0.06	0.04	0.07	0.13	0.39	1.79	99.93	89.63	0.00	19.12
LMY-24		角闪磁铁石英岩	50.99	2.28	40.95	1.83	2.43	0.44	0.23	0.06	0.37	0.36	-	99.94	91.94	0.00	22.37
LMY-16		角闪磁铁石英岩	43.90	2.68	44.75	2.64	3.26	0.05	0.16	0.08	0.55	0.49	1.34	99.90	88.65	0.00	16.37
LMY-13		角闪磁铁石英岩	54.74	2.58	33.43	2.03	1.88	0.36	0.01	0.07	0.10	0.14	3.99	99.33	88.18	0.00	21.23
	连帽峪平均(12)		50.45	2.60	39.66	1.75	2.26	0.42	0.14	0.06	0.21	0.29	2.47	99.68	90.11	0.00	19.40
MLZ-18		磁铁石英岩	54.18	0.27	43.60	0.25	1.46	0.02	0.03	0.11	0.01	0.04	-	99.97	97.78	0.00	199.80
MLZ-10		磁铁石英岩	49.10	0.14	46.62	1.34	2.53	0.01	0.06	0.07	0.00	0.10	-	99.97	95.73	0.00	354.31
MLZ-17		磁铁石英岩	56.60	1.24	36.90	1.96	2.78	0.02	0.08	0.08	0.05	0.17	-	99.89	93.50	0.00	45.68

续表 1

Continued Table 1

样品号	采样点	矿石类型	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ ^T	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅	LOI	TOTAL SiO ₂ + Fe ₂ O ₃ ^T	MnO/Fe ₂ O ₃ ^T	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	
MLZ-2		磁铁矿石英岩	41.63	0.80	45.16	3.14	6.90	0.01	0.03	0.39	0.18	1.56	-	99.80	86.79	0.01	51.97
MLZ-6		磁铁矿石英岩	51.33	0.17	44.15	2.03	2.05	0.01	0.06	0.08	0.01	0.07	-	99.95	95.47	0.00	295.00
MLZ-26		磁铁矿石英岩	66.61	0.34	30.09	1.63	0.82	0.02	0.06	0.16	0.01	0.21	-	99.95	96.70	0.01	193.68
MLZ-4	马兰庄	辉石磁铁矿石英岩	58.54	0.26	35.84	2.39	2.59	0.02	0.06	0.14	0.01	0.14	-	99.99	94.38	0.00	228.74
MLZ-11		辉石磁铁矿石英岩	57.23	0.56	38.63	1.07	1.94	0.05	0.06	0.19	0.02	0.22	-	99.97	95.86	0.00	102.66
MLZ-22		辉石磁铁矿石英岩	58.74	0.33	36.85	1.72	2.08	0.02	0.09	0.07	0.01	0.08	-	99.97	95.58	0.00	180.27
MLZ-7		辉石磁铁矿石英岩	57.67	0.34	36.56	3.34	1.27	0.01	0.06	0.21	0.01	0.40	-	99.87	94.23	0.01	169.86
	马兰庄平均(10)		55.16	0.44	39.44	1.89	2.44	0.02	0.06	0.15	0.03	0.30	-	99.93	94.60	0.00	124.06
MPS-3		角闪磁铁矿石英岩	61.40	2.58	30.79	0.70	2.71	0.67	0.39	0.09	0.34	0.13	-	99.78	92.19	0.00	23.75
MPS-16		角闪磁铁矿石英岩	44.98	0.61	46.96	1.92	5.07	0.02	0.10	0.16	0.04	0.08	-	99.94	91.94	0.00	73.92
MPS-14		磁铁矿石英岩	66.82	0.57	30.79	1.16	0.33	0.05	0.11	0.04	0.02	0.08	-	99.96	97.61	0.00	116.70
MPS-10		磁铁矿石英岩	44.14	2.44	43.93	3.59	4.41	0.16	0.07	0.80	0.10	0.10	-	99.74	88.06	0.02	18.06
MPS-4		磁铁矿石英岩	51.09	0.49	42.07	2.75	3.05	0.05	0.20	0.12	0.01	0.10	-	99.94	93.16	0.00	103.82
MPS-1		黑云磁铁矿石英岩	57.67	1.26	36.61	0.82	2.95	0.05	0.15	0.08	0.16	0.15	-	99.91	94.28	0.00	45.95
MPS-8		辉石磁铁矿石英岩	59.81	3.55	31.59	1.11	2.50	0.13	0.97	0.07	0.08	0.09	-	99.89	91.39	0.00	16.87
MPS-6		辉石磁铁矿石英岩	60.26	1.53	33.06	1.42	2.95	0.14	0.19	0.06	0.03	0.10	-	99.73	93.32	0.00	39.49
MPS-20		辉石磁铁矿石英岩	50.36	0.15	43.56	2.00	3.60	0.01	0.06	0.13	0.01	0.07	-	99.95	93.92	0.00	340.81
MPS-13		辉石磁铁矿石英岩	55.10	0.51	41.77	0.24	1.81	0.04	0.11	0.12	0.02	0.03	0.23	99.97	96.87	0.00	107.40
	磨盘山平均(10)		55.16	1.37	38.11	1.57	2.94	0.13	0.24	0.17	0.08	0.09	0.23	99.88	93.27	0.00	40.30
SLX-33		角闪磁铁矿石英岩	46.50	5.23	31.52	6.99	5.05	0.48	0.88	0.34	0.54	2.33	-	99.85	78.01	0.01	8.89
SLX-13		角闪磁铁矿石英岩	58.19	0.41	33.01	3.36	4.22	0.01	0.08	0.22	0.04	0.21	-	99.75	91.19	0.01	142.59
SLX-19		角闪磁铁矿石英岩	47.82	2.07	43.62	2.11	3.57	0.31	0.25	0.09	0.03	0.10	-	99.96	91.43	0.00	23.12
SLX-41		角闪磁铁矿石英岩	50.58	0.22	43.22	2.19	3.48	0.01	0.07	0.11	0.01	0.08	-	99.97	93.80	0.00	232.82
SLX-18		角闪磁铁矿石英岩	49.86	0.10	44.57	2.05	3.23	0.00	0.01	0.08	-	0.09	-	99.99	94.44	0.00	517.96
SLX-14		磁铁矿石英岩	60.01	0.43	33.43	2.48	3.27	0.01	0.08	0.17	0.01	0.08	-	99.97	93.45	0.01	139.10
SLX-27	神龙峡	磁铁矿石英岩	67.23	0.43	27.01	3.53	1.37	0.03	0.10	0.16	0.02	0.09	-	99.96	94.24	0.01	158.15
SLX-20		磁铁矿石英岩	56.99	0.72	34.20	2.82	3.99	0.04	0.12	0.11	0.02	0.10	0.07	99.18	91.19	0.00	78.61
SLX-40		磁铁矿石英岩	53.38	0.21	37.71	6.06	2.20	0.01	0.13	0.16	0.01	0.10	-	99.96	91.09	0.00	254.06
SLX-35		辉石磁铁矿石英岩	72.56	0.32	20.71	5.31	0.78	0.02	0.04	0.12	0.01	0.08	0.04	99.99	93.28	0.01	228.04
SLX-3		辉石磁铁矿石英岩	59.61	0.18	35.23	3.31	1.35	0.01	0.04	0.14	-	0.09	-	99.97	94.84	0.00	336.42
SLX-24		角闪磁铁矿石英岩	46.09	1.17	42.58	3.73	5.60	0.08	0.30	0.15	0.18	0.04	-	99.93	88.67	0.00	39.35

续表 1

Continued Table 1

样品号	采样点	矿石类型	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ ^T	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅	LOI	TOTAL	SiO ₂ + Fe ₂ O ₃ ^T	MnO/Fe ₂ O ₃ ^T	SiO ₂ /Al ₂ O ₃
SLX-15		角闪磁铁矿石英岩	66.58	2.65	21.10	4.67	3.62	0.12	0.45	0.20	0.04	0.53	-	99.96	87.67	0.01	25.08
SLX-7	神龙峡	角闪磁铁矿石英岩	52.37	0.32	37.66	5.16	4.07	0.01	0.07	0.24	-	0.08	-	99.97	90.03	0.01	165.40
SLX-5		角闪磁铁矿石英岩	47.90	0.43	42.47	3.42	5.31	0.01	0.14	0.17	0.02	0.09	-	99.95	90.37	0.00	110.88
	神龙峡平均(15)		55.71	0.99	35.20	3.81	3.41	0.08	0.18	0.16	0.08	0.27	0.06	99.89	90.91	0.00	56.16
SRG-9		角闪磁铁矿石英岩	48.84	1.45	44.73	1.88	2.30	0.40	0.06	0.05	0.06	0.19	-	99.95	93.57	0.00	33.76
SRG-31		磁铁矿石英岩	53.50	2.15	35.31	4.63	1.45	0.52	0.13	0.06	0.22	0.21	1.73	99.92	88.82	0.00	24.92
SRG-6		磁铁矿石英岩	55.80	5.62	27.76	3.31	3.60	2.13	0.82	0.07	0.18	0.23	0.38	99.91	83.57	0.00	9.92
SRG-8	石人沟	磁铁矿石英岩	53.14	3.15	37.35	1.76	2.71	1.02	0.50	0.03	0.06	0.23	-	99.94	90.49	0.00	16.86
SRG-15		角闪磁铁矿石英岩	47.78	1.91	43.55	3.13	2.62	0.25	0.30	0.06	0.07	0.24	-	99.92	91.33	0.00	24.96
SRG-7		角闪磁铁矿石英岩	52.39	0.91	41.75	2.19	2.14	0.15	0.10	0.03	0.07	0.22	-	99.96	94.15	0.00	57.39
	石人沟平均(6)		51.91	2.53	38.41	2.82	2.47	0.75	0.32	0.05	0.11	0.22	1.06	99.94	90.32	0.00	20.49
SC-17		磁铁矿石英岩	59.69	0.47	34.07	3.08	2.26	0.02	0.07	0.20	0.01	0.11	-	99.96	93.76	0.01	128.11
SC-1		磁铁矿石英岩	58.15	0.26	36.01	0.92	4.26	0.01	0.02	0.04	0.01	0.16	0.09	99.92	94.16	0.00	226.78
SC-18		磁铁矿石英岩	52.46	0.44	41.81	1.77	2.90	0.02	0.05	0.23	0.01	0.23	0.00	99.92	94.27	0.01	119.32
SC-8		磁铁矿石英岩	65.84	1.86	23.11	4.50	2.49	0.09	0.04	0.17	0.03	0.15	1.38	99.68	88.94	0.01	35.42
SC-16	水厂	磁铁矿石英岩	60.45	0.18	30.63	0.63	7.49	0.01	0.01	0.05	0.01	0.08	0.44	99.99	91.08	0.00	330.01
SC-7		磁铁矿石英岩	48.82	1.18	46.14	1.00	2.48	0.01	0.02	0.09	0.03	0.20	0.00	99.99	94.96	0.00	41.26
SC-20		磁铁矿石英岩	52.92	0.74	39.26	2.08	3.20	0.01	0.09	0.13	0.14	0.11	1.27	99.96	92.19	0.00	71.96
SC-15		磁铁矿石英岩	51.09	0.14	43.00	0.92	4.65	0.01	-	0.09	0.01	0.08	-	99.99	94.09	0.00	363.23
SC-21		磁铁矿石英岩	52.38	3.25	40.66	0.29	3.04	0.02	-	0.09	0.19	0.02	-	99.94	93.04	0.00	16.13
	水厂平均(9)		55.76	0.95	37.19	1.69	3.64	0.02	0.04	0.12	0.05	0.13	0.53	99.93	92.94	0.00	58.96
SY-26		角闪磁铁矿石英岩	66.26	0.46	30.17	0.58	2.22	0.01	0.02	0.06	0.01	0.13	-	99.93	96.43	0.00	143.46
SY-27		角闪磁铁矿石英岩	65.52	0.59	31.05	0.64	1.70	0.04	0.04	0.07	0.01	0.17	-	99.84	96.57	0.00	111.39
SY-39		角闪磁铁矿石英岩	31.41	1.08	60.04	1.59	5.44	0.03	0.13	0.10	0.03	0.12	-	99.96	91.45	0.00	29.03
SY-42		角闪磁铁矿石英岩	52.55	0.96	40.32	1.88	3.76	0.05	0.05	0.08	0.09	0.09	-	99.82	92.87	0.00	55.00
SY-44		角闪磁铁矿石英岩	55.17	0.55	42.78	0.42	0.56	0.04	0.07	0.07	0.01	0.23	-	99.90	97.96	0.00	100.75
SY-32	司家营	赤铁矿石英岩	72.18	1.13	24.81	0.12	0.25	0.04	0.28	0.03	0.02	0.07	0.93	99.86	96.99	0.00	63.73
SY-31		赤铁矿石英岩	48.14	0.54	50.37	0.06	0.21	0.02	0.03	0.03	0.01	0.06	0.46	99.95	98.51	0.00	89.24
SY-46		赤铁矿石英岩	53.90	0.41	44.64	0.12	0.17	0.02	0.02	0.03	0.01	0.15	0.47	99.93	98.53	0.00	130.88
SY-23		磁铁矿石英岩	55.23	1.16	39.72	0.67	2.87	0.09	0.04	0.05	0.02	0.10	-	99.96	94.95	0.00	47.62
SY-24		磁铁矿石英岩	67.84	0.57	29.06	0.58	1.64	0.02	0.06	0.05	0.01	0.12	-	99.96	96.90	0.00	119.20

续表 1

Continued Table 1

样品号	采样点	矿石类型	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ ^T	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅	LOI	TOTAL	SiO ₂ + Fe ₂ O ₃ ^T	MnO/Fe ₂ O ₃ ^T	SiO ₂ /Al ₂ O ₃
SY-22		磁铁矿石英岩	55.98	1.13	39.10	0.65	2.78	0.09	0.06	0.05	0.02	0.10	-	99.97	95.08	0.00	49.42
SY-19		磁铁矿石英岩	53.81	0.63	41.90	0.46	1.74	0.30	0.15	0.12	0.02	0.25	0.60	99.98	95.71	0.00	85.39
SY-20		磁铁矿石英岩	51.39	2.17	41.79	0.81	2.42	0.70	0.06	0.05	0.04	0.15	-	99.59	93.18	0.00	23.65
SY-3		磁铁矿石英岩	55.69	0.98	39.94	0.36	1.78	0.06	0.04	0.09	0.03	0.16	-	99.14	95.63	0.00	56.54
SY-30	司家营	磁铁矿石英岩	50.87	0.56	47.36	0.08	0.47	0.03	0.01	0.02	0.02	0.06	0.49	99.96	98.23	0.00	90.70
SY-7		磁铁矿石英岩	55.78	2.42	38.37	0.47	1.28	0.62	0.11	0.06	0.06	0.29	0.48	99.94	94.15	0.00	23.06
SY-37		磁铁矿石英岩	64.72	0.83	32.48	0.33	0.66	0.02	0.52	0.05	0.02	0.28	-	99.91	97.20	0.00	77.96
SY-38		黑云磁铁矿石英岩	54.44	2.48	37.99	0.60	2.44	0.02	0.06	0.03	0.02	0.47	1.41	99.95	92.43	0.00	21.96
SY-14		角闪磁铁矿石英岩	52.67	1.22	40.85	1.07	3.11	0.37	0.37	0.12	0.02	0.18	-	99.98	93.52	0.00	43.27
	司家营平均(19)		55.98	1.05	39.62	0.60	1.87	0.14	0.11	0.06	0.03	0.17	0.69	99.87	95.59	0.00	53.51
WSY-20		磁铁矿石英岩	52.21	1.69	41.84	1.32	2.00	0.17	0.09	0.04	0.31	0.29	-	99.96	94.06	0.00	30.93
WSY-6		磁铁矿石英岩	53.39	1.75	39.06	1.85	3.12	0.17	0.11	0.05	0.05	0.23	-	99.78	92.45	0.00	30.53
WSY-8		磁铁矿石英岩	47.98	2.97	42.33	2.42	2.79	0.81	0.15	0.05	0.06	0.21	-	99.76	90.30	0.00	16.13
WSY-11	王寺峪	磁铁矿石英岩	49.80	2.95	39.42	2.70	2.71	1.45	0.20	0.04	0.09	0.20	-	99.58	89.22	0.00	16.88
WSY-5		辉石磁铁矿石英岩	53.21	2.05	39.85	1.44	2.06	0.01	0.03	0.05	0.15	0.26	0.84	99.96	93.06	0.00	25.95
WSY-4		角闪磁铁矿石英岩	50.92	1.92	42.08	1.58	2.55	0.38	0.14	0.04	0.07	0.25	-	99.93	93.01	0.00	26.54
	王寺峪平均(6)		51.25	2.22	40.76	1.88	2.54	0.50	0.12	0.04	0.12	0.24	0.84	99.83	92.02	0.00	23.07
XY-7		角闪磁铁矿石英岩	68.45	13.62	5.56	2.13	2.08	3.30	3.20	0.04	0.56	0.09	0.73	99.75	74.01	0.01	5.03
XY-6		角闪磁铁矿石英岩	47.97	0.22	44.06	2.54	4.78	0.02	0.06	0.07	0.01	0.05	0.21	99.98	92.03	0.00	216.83
XY-11		磁铁矿石英岩	67.26	0.64	19.60	5.66	2.46	0.02	0.03	0.19	0.01	0.11	3.93	99.91	86.86	0.01	104.92
XY-10	信益	磁铁矿石英岩	67.43	0.55	28.72	1.68	1.22	0.01	0.02	0.05	0.01	0.10	-	99.80	96.15	0.00	122.31
XY-1		磁铁矿石英岩	47.63	0.39	42.45	6.24	0.41	0.01	0.01	0.07	0.08	0.08	2.61	99.97	90.08	0.00	122.17
XY-5		磁铁矿石英岩	52.48	0.38	42.57	2.39	0.79	0.02	0.05	0.07	0.01	0.07	1.13	99.97	95.05	0.00	138.73
XY-8		角闪磁铁矿石英岩	41.30	0.30	37.93	6.48	6.60	0.02	0.04	0.35	0.01	0.04	6.91	99.97	79.23	0.01	136.90
	信益平均(7)		56.07	2.30	31.55	3.87	2.62	0.48	0.49	0.12	0.10	0.08	2.59	99.91	87.63	0.00	24.38
XS-11		角闪磁铁矿石英岩	46.33	0.20	48.18	0.79	4.29	0.01	0.03	0.06	0.01	0.07	-	99.97	94.51	0.00	227.74
XS-4	杏山	角闪磁铁矿石英岩	48.86	0.14	45.30	0.23	5.28	0.01	0.04	0.10	-	0.02	-	99.97	94.15	0.00	361.11
	杏山平均(2)		47.60	0.17	46.74	0.51	4.79	0.01	0.03	0.08	0.01	0.05	-	99.97	94.33	0.00	281.01
Z122-2		磁铁矿石英岩	54.60	1.11	34.64	2.16	2.54	0.06	0.02	0.12	0.03	0.09	4.30	99.68	89.24	0.00	49.14
Z122-3		柞栏杖子磁铁矿石英岩	33.37	0.84	58.86	3.13	2.93	0.02	0.02	0.13	0.03	0.33	0.12	99.79	92.23	0.00	39.50
	柞栏杖子平均(2)		43.98	0.98	46.75	2.65	2.73	0.04	0.02	0.13	0.03	0.21	2.21	99.74	90.73	0.00	44.98
	冀东平均(122)		53.62	1.65	38.36	2.09	2.75	0.33	0.18	0.10	0.11	0.21	1.30	99.87	91.97	0.00	32.45

注:“-”代表含量很低在检测线以下或未测定,括号内为样品数

平均含量最低的是柞栏杖子地区(43.98%),平均含量最高的是信益地区(56.07%); $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ 含量变化范围也较大,为5.56%~60.04%,平均为38.36%,与鞍本地区比较类似,平均含量最低的是信益地区(31.55%),平均含量最高是柞栏杖子地区(46.75%); $\text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ 变化范围为74.01%~98.53%,平均为88.06%,低于鞍本地区,平均含量最低的为信益地区(87.63%),平均含量最高的为司家营地区(95.59%)。

3.2 CaO、MgO 和 MnO

Klein(2005)研究表明 BIFs 中 CaO、MgO 和 MnO 反映了碳酸盐矿物的存在(菱铁矿、铁白云石和少量方解石),在辽冀地区 BIFs 中菱铁矿石很少见,仅出现在黑石砬子地区(未发表数据),主要为铁白云石和方解石,且碳酸盐矿物中 MnO 含量很低,其次,绿泥石、黑云母、阳起石、透闪石和辉石中 MgO 含量也较高。鞍本地区 CaO 含量变化范围为 0.01%~11.99%,平均为 1.16%,平均含量最低的为关门山地区(0.03%),最高的为歪头山地区(3.72%);MgO 含量变化范围为 0~11.45%,平均为 1.85%,平均含量最低的为关门山地区(0.02%),最高的为南芬地区(5.55%)。MnO 含量极低,变化范围为 0~0.44%,平均含量为 0.09%,平均含量最低的为东鞍山地区(0.01%),最高的为大孤山地区(0.19%)。

冀东地区 CaO 含量变化范围为 0.06%~8.58%,平均为 2.05%,平均含量最低的是杏山地区(0.51%),最高的是信益地区(3.87%);MgO 变化范围为 0.17%~7.49%,平均为 2.75%,平均含量最低的是司家营地区(1.87%),平均含量最高的为杏山地区(4.79%);MnO 变化范围为 0.02%~0.80%,平均为 0.10%,平均含量最低的为王寺峪地区(0.04%),最高的为磨盘山地区(0.17%)。

3.3 Al_2O_3 和 TiO_2

Al_2O_3 主要存在于硅酸盐矿物中,在国外 BIFs 中大量出现钠闪石、铁蛇纹石和黑硬绿泥石(Klein,2005),而这几种矿物在鞍本地区和冀东地区基本不存在,辽冀地区硅酸盐矿物主要为阳起石、镁铁闪石、透闪石、绿泥石、石榴石、云母和辉石等矿物。鞍本地区 Al_2O_3 含量变化范围为 0.14%~4.44%,平均含量为 0.65%,平均含量最低的为北台地区(0.24%),最高的为东鞍山地区(1.12%); TiO_2 含量很低,变化范围为 0~0.19%,平均为 0.02%,含量最低的为北台地区(0.00%),最高的为眼前山地区(0.07%)。

冀东地区 Al_2O_3 和 TiO_2 含量高于鞍本地区, Al_2O_3 变化范围为 0.10%~13.62%,平均含量为 1.65%,其中含量最低的为杏山地区(0.17%),最高的为程家沟地区(3.73%); TiO_2 含量也很低,变化范围为 0~0.22%,平均为 0.11%,含量最低的为杏山地区(0.01%),最高的为浇花峪地区(0.44%)。

3.4 Na_2O 和 K_2O

Na_2O 和 K_2O 同 Al_2O_3 一样,主要出现在硅酸矿物中,但是它们的含量很低。鞍本地区 Na_2O 含量变化范围为 0~1.11%,平均为 0.09%,平均含量最低的是齐大山地区(0.00%),最高的为小岭子地区(0.46%)。 K_2O 含量低于 Na_2O 含量,变化范围为 0~2.32%,平均为 0.07%,含量最低的为东鞍山地区(0.01%),最高的为大孤山地区(0.31%)。

冀东地区 Na_2O 和 K_2O 均含量高于鞍本地区, Na_2O 含量变化范围为 0~3.20%,平均为 0.18%,平均含量最低的为柞栏杖子地区(0.02%),最高的为信益地区(0.49%); K_2O 含量高于 Na_2O ,变化范围为 0~3.98%,平均为 0.33%,平均含量最低的为杏山地区(0.01%),最高的为程家沟地区(1.28%)。

3.5 P_2O_5

鞍本地区 BIFs 的 P_2O_5 变化范围为 0.01%~0.63%,平均 0.08%,最低的为偏岭地区(0.09%),最高的为歪头山地区(0.26%)。冀东地区变化范围为 0.02%~2.33%,平均为 0.21%,最低的为杏山地区(0.05%),最高的为豆子沟地区(0.78%)。

BIFs 是一种特殊的化学沉积岩,具有比较高的 $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ (变化范围为 20%~45%) 和 SiO_2 含量(变化范围为 34%~56%),CaO、MgO、MnO、 Al_2O_3 、 Na_2O 和 K_2O 含量非常低(表 2)。Klein(2005)对世界上大量 BIFs 主量元素统计结果如下:CaO 和 MgO 含量变化范围分别为 1.70%~9.0% 和 1.2%~6.7%;MnO 含量很低,变化范围为 0.1%~1.15%; Al_2O_3 含量变化范围为 0.07%~1.8%; Na_2O 和 K_2O 含量也很低,分别为 0~0.8% 和 0~1.15%。辽冀地区 BIFs 主量元素与国内外 BIFs 大体组成比较一致, $\text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ 含量达 90% 以上,其他氧化物含量很低,且 SiO_2 与 $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ 呈明显的负相关关系,与 Algoma 型和 Superior 型 BIFs 相比,鞍本地区与冀东地区 SiO_2 含量明显较高,在图 4 中也有体现。Lepp and Goldisch(1964)研究认为前寒武纪 BIFs 中 Al_2O_3 、 TiO_2 、 P_2O_5 、CaO 和 MnO 含量比寒武纪后铁建造低,在 Al_2O_3 - SiO_2 - $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ 和 $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ -(CaO + MgO)- SiO_2 图解中,鞍本地区与冀东地区大部分 BIFs 与其它前寒武纪 BIFs 化学组成比较相似(图 4),但是鞍本地区和冀东地区 BIFs 主量元素变化范围较大,特别是 MgO、 Na_2O 、 K_2O 、 P_2O_5 波动幅度很大。

4 讨论

4.1 BIFs 原岩恢复

辽冀地区 BIFs 主量元素主要由 SiO_2 和 $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ 组成,其它氧化物含量均很低,表明其物质来源比较单一。A-C-FM 图解能区分较多的原岩类型,并且计算结果不易受交代作用

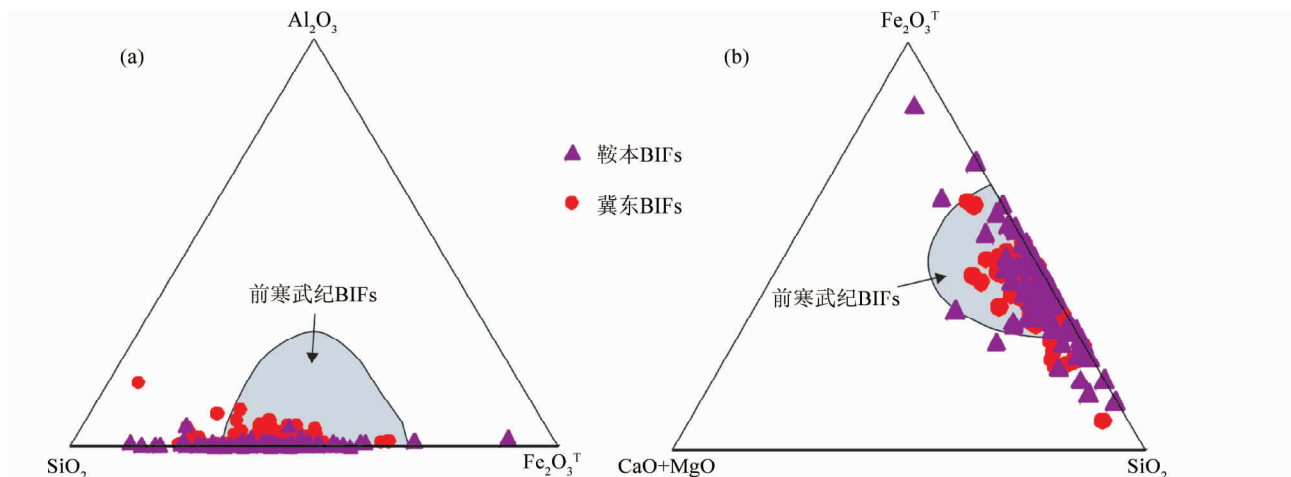


图4 鞍本地区和冀东地区 BIFs 地球化学组成(a 底图据 Lepp and Goldich,1964;b 底图据 Govett,1966)

Fig.4 Geochemical composition of Liaoning and eastern Hebei Province BIFs (a after Lepp and Goldich,1964;b after Govett,1966)

表2 鞍本地区、冀东地区、五台地区以及 Algoma 型和 Superior 型铁矿床 BIFs 主量元素含量(wt%)

Table 2 Major elements contents (wt%) of BIFs from Anshan-Benxi area, eastern Hebei Province, Wutai area, Algoma-type and Superior-type

地区	SiO ₂	Fe ₂ O ₃ ^T	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅
鞍本	56.94	38.24	0.65	1.16	1.85	0.07	0.09	0.09	0.02	0.08
冀东	53.62	38.36	1.65	2.09	2.75	0.33	0.18	0.10	0.11	0.21
五台	41.88	48.46	0.51	2.42	1.89	0.05	0.05	0.17	0.03	0.18
Algoma	48.9	38.2	3.7	1.89	2	0.62	0.43			0.23
Superior	47.1	39.1	1.5	2.24	1.93	0.2	0.13			0.08

注:Fe₂O₃^T 为全铁含量;五台铁矿石数据引自沈其韩,1998;Algoma 和 Superior 为氧化物相 BIFs,引自 Gross and Mcleod,1980

的影响,因此常用来恢复原岩(王仁民等,1987)。在该图解中(图5)我们可以看到辽冀地区 BIFs 大部分落在 VI + VII 区(铁硅质岩亚类,原岩为胶体化学沉积岩),蓝廷广等(2012)对鲁东地区 BIFs 研究也获得了相同的结果。BIFs 中 MnO/Fe₂O₃ 比值均小于 0.02(表1),也指示了热水沉积成因(Sugitani,1992)。

鞍本地区和冀东地区 MgO 和 CaO 的含量仅次于 SiO₂ 和 Fe₂O₃^T,鞍本地区 CaO 含量变化范围为 0.01% ~ 11.99%, MgO 含量变化范围为 0 ~ 11.45%,冀东地区 CaO 含量变化范围为 0.06% ~ 8.58%, MgO 含量变化范围为 0.17% ~ 7.49%。在 MgO 和 CaO 关系图解中(图 6a, b),除个别矿区外(大孤山、偏岭地区、神龙峡和石人沟),大部分矿区都可见随 CaO 含量的增加 MgO 增多的趋势,且在 A-C-FM 图解中(图 5),鞍本地区(胡家庙子、眼前山、大孤山和歪头山地区)和冀东地区(神龙峡、水厂和杏山地区)均有样品落于 VIII 区(碱土低铝岩类,原岩为超基性火山岩及部分白云质岩石),这也暗示 BIFs 原岩形成过程中有碳酸盐物质的加入,形成了铁白云岩(未发表数据),例如李厚民等(2012c)在弓长岭铁矿二矿区西北部发现了白云质大理岩。此外,在辽冀地区普遍可见碳酸盐磁铁矿石岩的分布,也暗示了原岩中有碳酸

盐物质的加入。鞍本地区 CaO 和 MgO 正相关关系很明显(r = 0.62),特别是西鞍山、胡家庙子、关门山地区、歪头山地区和小岭子地区具有高度相关(图 6c-f),前人研究也表明这几个地区有碳酸盐岩的分布(周世泰,1994)。冀东地区 MgO 和 CaO 相关性没有鞍本地区明显(r = 0.31),除浇花峪、司家营和王寺峪地区可见高度正相关外(相关系数分别为 r = 0.97, r = 0.90 和 r = 0.63,图 6h-j),其它矿区虽然 CaO 和 MgO 含量高于鞍本地区,但是相关性没有鞍本地区明显,这可能与冀东地区 CaO 和 MgO 主要出现在硅酸盐矿物中有关。以上特征表明辽冀地区 BIFs 原始沉积物主体为硅质和铁质的胶体,其次还有少量碳酸盐泥。

虽然学界普遍认为 BIFs 原岩为化学沉积岩,但在 BIFs 中 Fe 和 Si 的物质来源方面,有上部来源(陆壳风化物质)和下部来源(海底火山喷发热液)两种认识。近年来,随着 BIFs 中稀土元素和铁同位素的大量研究,大部分学者认为成矿物质来自海底热液和海水的混合溶液(Arora et al.,1995;Barley et al.,1999;Klein,2005;李志红等,2008,2010;Bekker et al.,2010;杨秀清等,2012,2013)。对于含硅质、铁质和混有少量碳酸盐泥的胶体如何形成石英、赤铁矿和磁铁矿,分别有以下几种认识:(1)Siever(1957)认为石英是由于非晶形的硅质

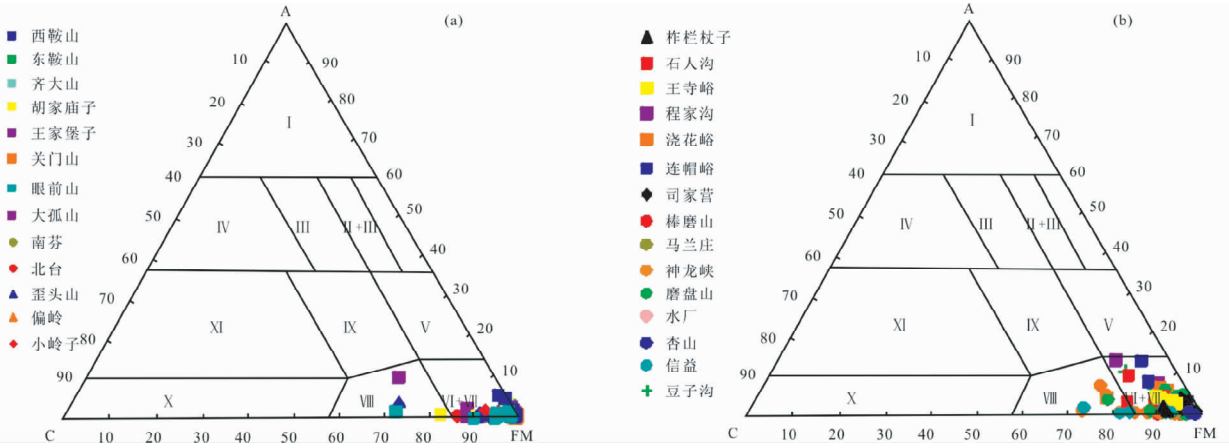


图5 辽冀地区 BIFs A-C-FM 判别图解(底图据王仁民等,1987)

(a)-鞍本地区; (b)-冀东地区. I-纯铝硅酸盐岩石亚类(原岩为纯泥质岩); II-铁铝硅酸盐岩石亚类(原岩为铁质泥质岩); III-碱土铝硅酸盐岩石亚类(原岩为中性-酸性火山岩); IV-钙铝硅酸盐岩石亚类(原岩为钙质泥质岩); V-铝镁铁质岩类(原岩为胶体化学沉积); VI-硅铁质岩亚类(原岩为胶体化学沉积及泥质岩); VII-镁质岩(原岩为超基性岩); VIII-碱土低铝岩类(原岩为超基性火山岩及部分白云质岩石); IX-碱土铝质岩类(原岩为基性火山岩及部分泥灰质岩石); X-钙硅酸盐岩亚类(原岩为碳酸盐沉积岩); XI-铝土钙质岩石亚类(原岩为泥灰质沉积岩). $\Sigma = \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + 2\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}} + \text{MgO}$ (分子数); $A = \text{Al}_2\text{O}_3 / \Sigma \times 100$; $C = \text{CaO} / \Sigma \times 100$; $F = 2\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}} / \Sigma \times 100$; $M = \text{MgO} / \Sigma \times 100$

Fig. 5 A-C-FM diagrams for discriminating sedimentary rock in Liaoning-eastern Hebei area (after Wang *et al.*, 1987)

(a)-Anshan-Benxi area; (b)-eastern Hebei Province

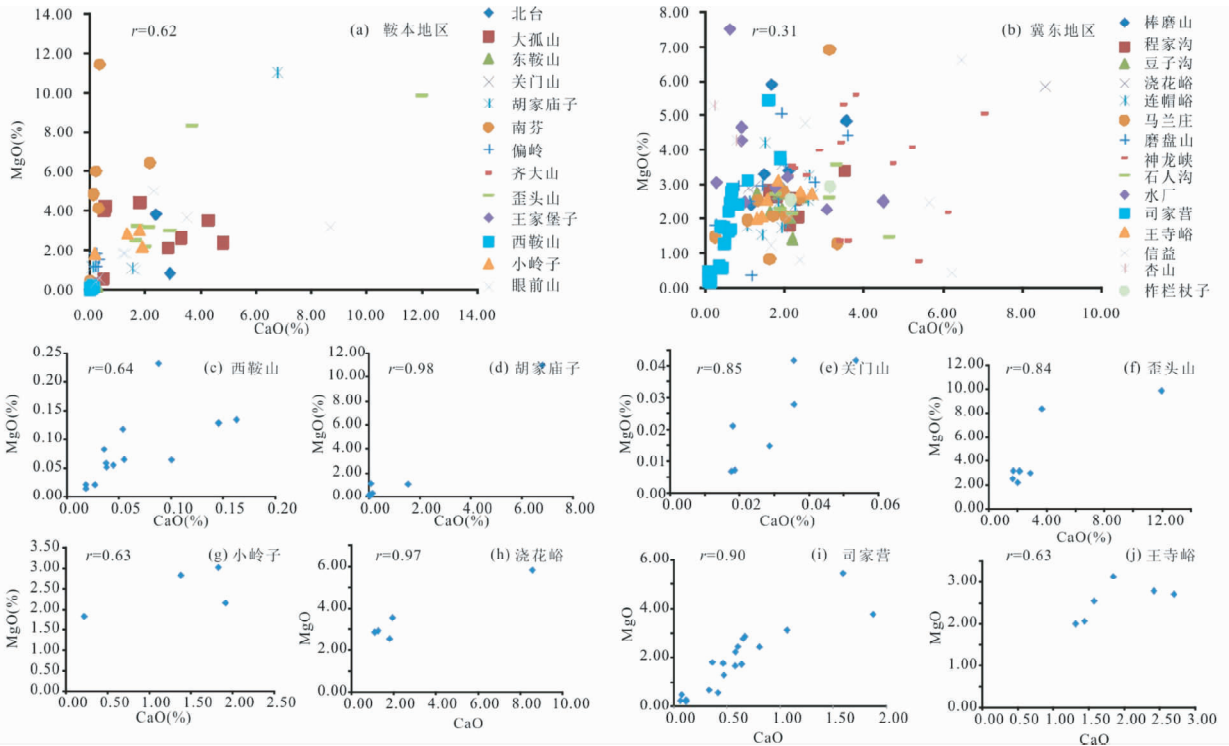
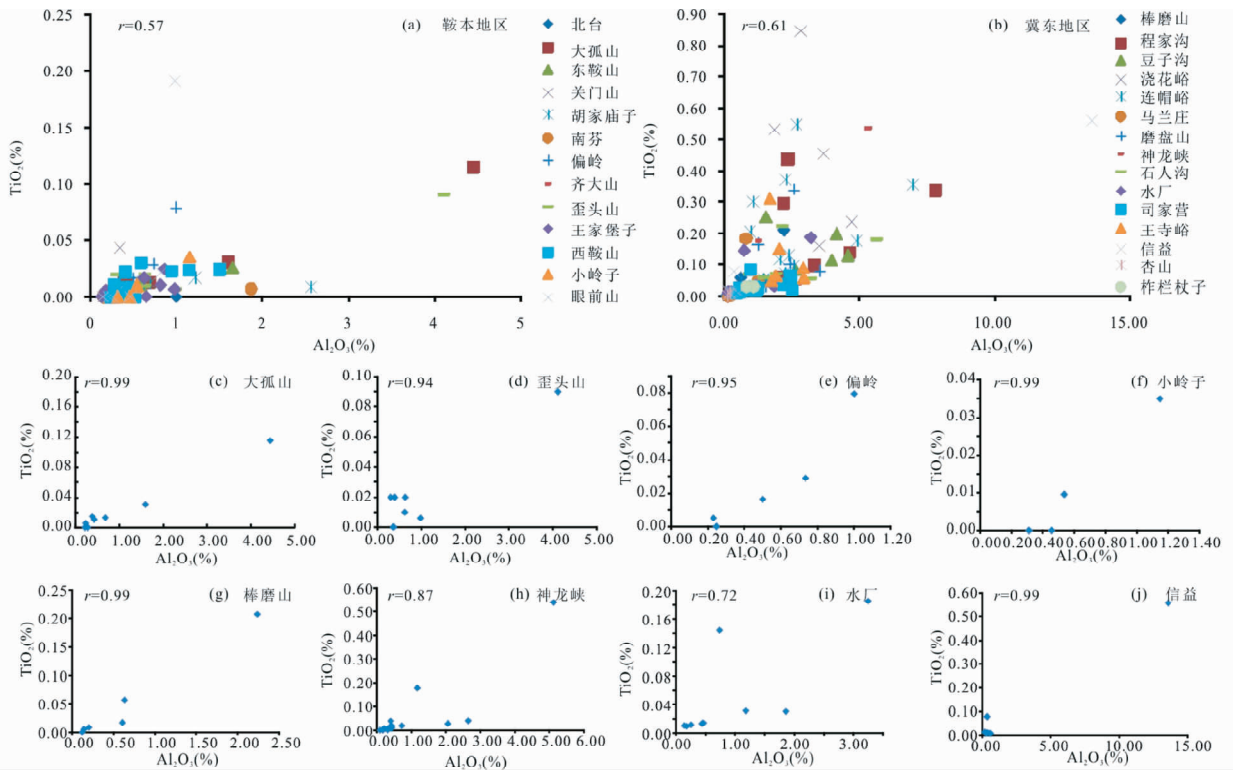


图6 辽冀地区 BIFs CaO 和 MgO 二元图解

Fig. 6 Binary diagrams of BIFs from Liaoning-eastern Hebei area showing MgO vs. CaO

饱和, 硅酸 (H_2SiO_4) 连续沉积形成蛋白石, 而后再形成石英; 而有学者认为石英来源于热液循环和硅质交代火山岩, 沉积岩而形成 (Paris *et al.*, 1985; Duchac and Hanor, 1987; Krapež

et al., 2003); (2) 一般认为赤铁矿 (Fe_2O_3) 是由含水的 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 胶体沉积物在压实过程中脱水形成的; (3) 但是对于磁铁矿 (Fe_3O_4) 成因认识不一致, 可能是 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 和

图7 辽冀地区 BIFs Al_2O_3 和 TiO_2 二元图解Fig. 7 Binary diagrams of BIFs from Liaoning-eastern Hebei area showing Al_2O_3 vs. TiO_2

$\text{Fe}(\text{OH})_2$ 的混合物,也可能是一种含水磁铁矿 ($\text{Fe}_3\text{O}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$),或者是一种类似于磁铁矿的物质经过脱水作用形成 (Klein, 2005)。

4.2 BIFs 中碎屑物质的加入

辽冀地区 BIFs 中 Al_2O_3 和 TiO_2 含量均很低,鞍本地区 Al_2O_3 平均含量为 0.65%, TiO_2 平均含量为 0.02%,冀东地区 Al_2O_3 和 TiO_2 含量均高于鞍本地区, Al_2O_3 平均含量为 1.65%, TiO_2 平均含量为 0.11%,但是大部分矿区 Al_2O_3 和 TiO_2 相关性很明显(图 7a, b), Al 和 Ti 在热液交代、成岩作用和风化作用中非常稳定 (Kranidiotis and MacLean, 1987), 因此辽冀地区 Al_2O_3 和 TiO_2 相关性暗示了辽冀地区 BIFs 在形成过程中有碎屑物质的加入 (Ewers and Morris, 1981; Dymek and Klein, 1988; Manikyamba *et al.*, 1993)。一般认为沉积变质型铁矿的 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值应小于 10, 而火山沉积变质铁矿的 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 应大于 10 (沈其韩, 1998; 沈其韩等, 2011), 鞍本地区 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 变化范围为 4.52 ~ 514.36 (只有 2 个数据小于 10), 冀东地区 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 变化范围为 5.03 ~ 517.96 (只有 6 个数据小于 10), 暗示辽冀地区 BIFs 均赋存于火山沉积岩系中, 有火山碎屑物质的加入。此外, 样品的矿物组成也体现出碎屑物质的加入, 例如在辽冀地区形成了大量的角闪磁铁矿英岩、绿泥磁铁矿英岩和黑云磁铁矿英岩等。前人对华北克拉通五台山白峪里地区、柏枝岩地区、

峨口地区、冀东迁安地区 (沈其韩等, 2011)、鲁东昌邑地区 (蓝廷广等, 2012)、印度 Jilling-Langalata 地区 (Roy and Venkatesh, 2009)、埃及 Wadi Karim 和 Um Anab 地区 (Basta *et al.*, 2011) BIFs 的研究也认为其形成过程受到碎屑物质混染。

鞍本地区 $\text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ 明显高于冀东地区, 但是其它氧化物含量均低于冀东地区, 且 Al_2O_3 和 TiO_2 相关性也不如冀东地区明显, 这可能暗示鞍本地区 BIFs 形成环境水体相对比较平静, 形成时海水较深, 而冀东地区沉积环境相对比较动荡, 有较多碎屑物质的加入。鞍本地区中鞍山群茨沟组和下鞍山群石棚子组 Al_2O_3 和 TiO_2 都具有明显的正相关关系 (歪头山地区 $r = 0.94$, 偏岭地区 $r = 0.95$, 小岭子地区 $r = 0.99$, 图 7d-f), 这可能说明了中、下鞍山群 BIFs 相对于上鞍山群 BIFs 有更多的碎屑物质的加入。冀东地区的棒磨山地区、神龙峡地区和信益地区具有很高的 Al_2O_3 和 TiO_2 相关系数 (相关系数分别为 $r = 0.99$ 、 $r = 0.87$ 、 $r = 0.72$ 和 $r = 0.99$, 图 7g-j), 这些矿区都赋存于迁西岩群, 这暗示相比于滦县岩群、遵化岩群、朱杖子群, 迁西岩群具有更多的碎屑物质的加入。

BIFs 中碎屑物质主要为陆源碎屑物质和火山碎屑物质。有学者研究认为 BIFs、碎屑沉积岩和火山岩韵律性成层出现是由于海进-海退作用引起的 (Klein and Beukes, 1989; Arora *et al.*, 1995; Klein, 2005)。辽冀地区 BIFs 中碎屑物质的加入



图 8 变质 BIFs 中矿物相对稳定性 (据 Klein, 1983, 2005)

灰色部分为辽冀地区 BIFs 中出现的矿物

Fig. 8 Relative stabilities of minerals in metamorphosed BIFs (after Klein, 1983, 2005)

The gray segments show minerals of Liaoning-eastern Hebei area

可能也是由于海进-海退引起的,海进时,浅海陆架主要以化学沉积物为主;海退时,化学沉积作用形成的 BIFs 被陆源沉积物覆盖,这时 BIFs 可能受到陆源碎屑物质的混染,在海进-海退循环期间同时伴随有火山活动,这时 BIFs 中可能又有火山碎屑物质的加入。

4.3 变质作用对 BIFs 的影响

研究表明 BIFs 原岩主要为富含硅质、铁质和少量碳酸盐的胶体,这种胶体受成岩作用或浅变质时主要形成以下几种矿物:燧石,磁铁矿,赤铁矿,碳酸盐(最常见的是菱铁矿和白云石-铁白云石系列矿物),铁蛇纹石,黑硬绿泥石,钠闪石和少量黄铁矿 (Klein, 2005)。然而大部分 BIFs,特别是太古代 BIFs 在形成之后均遭受了不同级别的变质作用,形成了不同的变质矿物组合。例如在中级变质作用下,含铁碳酸盐、石英和铁滑石就会形成镁铁闪石和铁闪石,磁铁矿和赤铁矿会发生重结晶作用,粒度变粗,部分地区可能还会有铁铝榴石出现;当变质程度较高时,就会出现无水矿物;碳酸盐矿物在低级和高级变质作用中都会出现(主要是铁白云石和方解石,菱铁矿很少),图 8 列出了 BIFs 在不同变质作用下出现的变质矿物 (Klein, 2005),其中灰色背景部分为辽冀地区 BIFs 中出现的矿物。鞍本地区经历了绿片岩相到角闪岩相变质作用,冀东地区经历了绿片岩相到麻粒岩相的变质作用 (张贻侠, 1986; 翟明国, 1990; 万渝生, 1993; 周世泰, 1994; 沈其韩, 1998),虽然不同矿区和矿集区经历的变质作用不同,形成了不同的矿物组合,在鞍山地区形成了石英 + 磁铁矿、角闪石 + 石英 + 磁铁矿、黑云母 + 石英 + 磁铁矿的矿物

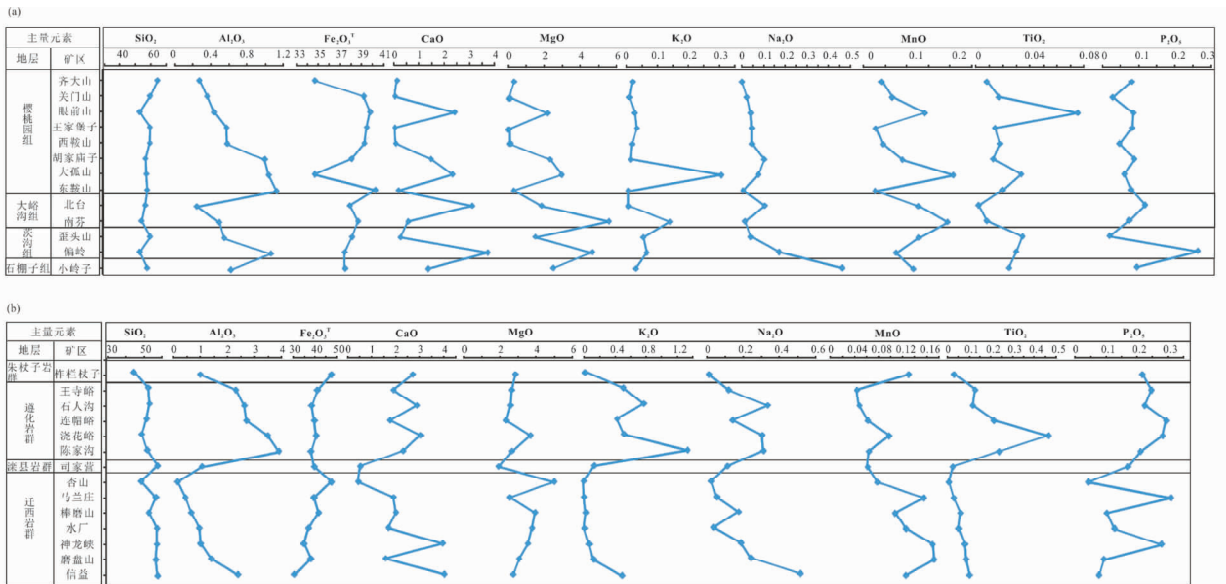


图 9 辽冀地区铁矿床主量元素变化图解

(a)-鞍本地区;(b)-冀东地区

Fig. 9 Diagrams showing variations of major elements of iron deposit from Liaoning-eastern Hebei area

(a)-Anshan-Benxi area;(b)-eastern Hebei Province



图 10 冀东地区铁矿石和混合岩化野外照片

(a)-磨盘山铁矿床可见铁矿体被混合花岗岩包裹;(b)-连帽峪铁矿床混合岩化铁矿石;(c)-豆子沟铁矿床混合岩化铁矿石

Fig. 10 Field photos of iron ore and migmatization of eastern Hebei Province

(a)-iron ore body was wrapped by migmatitic granite in Mopanshan iron deposit; (b)-migmatization iron ore of Lianmaoyu iron deposit; (c)-migmatization iron ore of Douzigou iron deposit

组合,歪头山地区主要形成了角闪石 + 石英 + 磁铁矿的矿物组合,南芬地区主要形成了石英 + 磁铁矿和绿泥石 + 石英 + 磁铁矿的矿物组合;柞栏杖子岩群主要为石英 + 磁铁矿的矿物组合,遵化岩群主要形成了石英 + 磁铁矿、角闪石 + 石英 + 磁铁矿的矿物组合,滦县岩群主要形成了石英 + 磁铁矿、角闪石 + 石英 + 磁铁矿和黑云母 + 石英 + 磁铁矿的矿物组合,迁西岩群形成了石英 + 磁铁矿、角闪石 + 石英 + 磁铁矿和辉石 + 石英 + 磁铁矿的矿物组合,但是在图 9 中我们可以看到各矿区和矿集区氧化物含量组成却没有明显的变化(豆子沟铁矿属于承德地区,未放入图中),这表明变质反应基本都是等化学反应(除了一些伴随着脱水和脱二氧化碳化学反应)。

辽冀地区普遍经历了多期混合岩化作用,形成了混合岩化岩石,这些混合岩化岩石碱质含量比较高(周世泰,1994)。鞍本地区 BIFs 碱质含量很低, Na_2O 平均含量为 0.09%, K_2O 平均含量为 0.07%,冀东地区碱质含量均高于鞍本地区, Na_2O 平均含量为 0.18%, K_2O 平均含量为 0.33%,高于 Na_2O ,在冀东地区大部分矿区都可见到混合岩化作用形成的混合岩和混合花岗岩,而且这些混合花岗岩大多为肉红色,显示钾长石含量高,且有混合岩化铁矿石的分布(图 10),而这类矿石在鞍本地区却很少看到,这些特征暗示混合岩化作用对冀东地区 BIFs 的影响更为明显,但是由于数据有限,还有待进一步研究。

5 结论

(1) 辽冀地区 BIFs 主量元素 $\text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ 含量很高,达 90% 以上, CaO 和 MgO 含量仅次于 SiO_2 和 $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$,且 CaO 和 MgO 具有正相关关系,表明 BIFs 原岩为含有少量碳酸盐泥的硅质和铁质胶体化学沉积岩。

(2) 辽冀地区 BIFs 中 Al_2O_3 和 TiO_2 含量较低,但是大部分矿区 Al_2O_3 和 TiO_2 具有明显的正相关关系,这暗示 BIFs 在形成过程中有碎屑物质的加入。与鞍本地区相比,冀东地

区显示有更多的碎屑物质加入,形成时沉积环境更为动荡,且以迁西岩群最为显著。

(3) 辽冀地区 BIFs 虽然经历了绿片岩相到麻粒岩相的变质作用,但不同变质级别的 BIFs 的主量元素却没有发生明显的变化,这暗示变质作用主要为等化学反应。

(4) 辽冀地区混合岩化作用比较普遍,BIFs 中 Na_2O 和 K_2O 含量却很低,鞍本地区 Na_2O 含量高于 K_2O ,但是冀东地区 Na_2O 和 K_2O 含量均高于鞍本地区,且 Na_2O 含量低于 K_2O ,这可能暗示混合岩化作用对冀东地区 BIFs 影响更为明显。

致谢 野外工作得到了辽宁省冶金地质勘查局、辽宁省地质矿产勘查局、河北省地质矿产局第二地质大队和河北联合大学等相关人员的帮助和支持;数据测试得到了北京大学杨斌老师的帮助和指导;审稿专家提出了宝贵意见;在此一并表示衷心感谢!

References

- Arora M, Govil PK, Charan SN, Raj BU, Balaram V, Manikyamba C, Chatterjee AK and Naqvi SM. 1995. Geochemistry and origin of Archean banded iron-formation from the Bababudan schist belt, India. *Economic Geology*, 90(7): 2040 - 2057
- Barley ME, Pickard AL, Hagemann SG and Folkert SL. 1999. Hydrothermal origin for the 2 billion year old Mount Tom Price giant iron ore deposit, Hamersley Province, Western Australia. *Mineralium Deposita*, 34(8): 784 - 789
- Basta FF, Maurice AE, Fontboté L and Favarger PY. 2011. Petrology and geochemistry of the banded iron formation (BIF) of Wadi Karim and Um Anab, Eastern Desert, Egypt: Implications for the origin of Neoproterozoic BIF. *Precambrian Research*, 187(3): 277 - 292
- Bekker A, Slack JF, Planavsky A, Krapež B, Hofmann A, Konhauser KO and Rouxel OJ. 2010. Iron formation: The sedimentary product of a complex interplay among mantle, tectonic, oceanic, and biospheric processes. *Economic Geology*, 105(3): 467 - 508
- Cheng YQ. 1957. The problem of high grade iron ore genesis in Precambrian Anshan-type banded iron deposits in the Liaoning and Shandong provinces, in the northeast of China. *Acta Geologica Sinica*, 37(2): 153 - 180 (in Chinese with English abstract)

- Dai YP, Zhang LC, Wang CL, Liu L, Cui ML, Zhu MT and Xiang P. 2012. Genetic type, formation age and tectonic setting of Waitoushan banded iron formation, Benxi, Liaoning Province. *Acta Petrologica Sinica*, 28(11): 3574–3594 (in Chinese with English abstract)
- Ding WJ, Chen ZL, Chen BL, Dong FX and Cui LL. 2009. Geochemical characters of banded iron formations from Xingshan iron deposit in Qian'an area, Hebei Province; Implication for their origin. *Journal of Geomechanics*, 15(4): 363–373 (in Chinese with English abstract)
- Duchac KC and Hanor JS. 1987. Origin and timing of the metasomatic silicification of an Early Archean komatiite sequence, Barberton Mountain Land, South Africa. *Precambrian Research*, 37(2): 125–146
- Dymek RF and Klein C. 1988. Chemistry, petrology and origin of banded iron-formation lithologies from the 3800Ma Isua supracrustal belt, West Greenland. *Precambrian Research*, 39(4): 247–302
- Ewers WE and Morris RC. 1981. Studies of the Dales Gorge member of the Brockman iron formation, Western Australia. *Economic Geology*, 76(7): 1929–1953
- Geng YS, Du DL and Ren LD. 2012. Growth and reworking of the Early Precambrian continental crust in the North China Craton: Constraints from zircon Hf isotopes. *Gondwana Research*, 21(2–3): 517–529
- Govett GJS. 1966. Origin of banded iron formations. *Geological Society of America Bulletin*, 77(11): 1191–1212
- Gross GA. 1965. Geology of iron deposits in Canada: General geology and evaluation of iron deposits. *Geological Survey of Canada Economic Report*, 22: 1–181
- Gross GA and McLeod CR. 1980. A preliminary assessment of the chemical composition of iron formations in Canada. *Canadian Mineralogist*, 16(2): 223–229
- James HL. 1954. Sedimentary facies of iron formation. *Economic Geology*, 49(3): 235–249
- Klein C. 1983. Diagenesis and metamorphism of Precambrian banded iron-formations. *Developments in Precambrian Geology*, 6: 417–469
- Klein C and Beukes NJ. 1989. Geochemistry and sedimentology of a facies transition from limestone to iron-formation deposition in the Early Proterozoic Transvaal Supergroup, South Africa. *Economic Geology*, 84(7): 1733–1774
- Klein C. 2005. Some Precambrian banded iron-formations (BIFs) from around the world: Their age, geologic setting, mineralogy, metamorphism, geochemistry, and origins. *American Mineralogist*, 90(10): 1473–1499
- Kramidiotis P and MacLean WH. 1987. Systematics of chlorite alteration at the Phelps Dodge massive sulfide deposit, Matagami, Quebec. *Economic Geology*, 82(7): 1898–1911
- Krapež B, Barley ME and Pickard AL. 2003. Hydrothermal and re-sedimented origins of the precursor sediments to banded iron formation: Sedimentological evidence from the Early Palaeoproterozoic Brockman Supersequence of Western Australia. *Sedimentology*, 50(5): 979–1011
- Kusky TM, Windley BF and Zhai MG. 2007. Tectonic evolution of the North China Block: From orogen to craton to orogen. In: Zhai MG, Windley BF, Kusky TM *et al.* (eds.). *Mesozoic Sub-Continental Lithospheric Thinning Under Eastern Asia*. Geological Society of London Special Publication, 280: 1–34
- Kusky TM. 2010. Geophysical and geological tests of tectonic models of the North China Craton. *Gondwana Research*, 20(1): 26–35
- Lan TG, Fan HR, Yan KF, Zheng XL and Zhang HD. 2012. Geological and geochemical characteristics of Paleoproterozoic Changyi banded iron formation deposit, Jiaodong Peninsula of eastern of China. *Acta Petrologica Sinica*, 28(11): 3595–3611 (in Chinese with English abstract)
- Lepp H and Goldich SS. 1964. Origin of Precambrian iron formations. *Economic Geology*, 59(6): 1025–1060
- Li HM, Wang DH, Li LX, Chen J, Yang XQ and Liu MJ. 2012a. Metallogeny of iron deposits and resource potential of major iron mineralogical units in China. *Geology in China*, 39(3): 559–580 (in Chinese with English abstract)
- Li HM, Chen YC, Li LX *et al.* 2012b. Metallogeny of the Iron Deposit China. Beijing: Geological Publishing House, 1–246 (in Chinese)
- Li HM, Liu MJ, Li LX, Yang XQ, Chen J, Yao LD, Hong XK and Yao T. 2012c. Geology and geochemistry of the marbe in the Gongchangling iron deposit in Liaoning Province and their metallogenetic significance. *Acta Petrologica Sinica*, 28(11): 3497–3512 (in Chinese with English abstract)
- Li HM, Zhang ZJ, Li LX, Zhang ZC, Chen J and Yao T. 2013. Types and general characteristics of the BIF-related iron deposits in China. *Ore Geology Reviews*, 57: 264–287
- Li JH and Kusky TM. 2007. A Late Archean foreland fold and thrust belt in the North China Craton: Implications for early collisional tectonics. In: Zhai MG, Xiao WJ, Kusky TM and Santosh M (eds.). *Tectonic Evolution of China and Adjacent Crustal Fragments*. *Gondwana Research*, 12(1): 47–66
- Li YH, Zhang ZJ, Wu JS and Shang LP. 2011. Metamorphic chronology of the BIF in Malanzhuang of eastern Hebei Province and its geological implications. *Mineral Deposits*, 30(4): 645–653 (in Chinese with English abstract)
- Li ZH, Zhu XK and Tang SH. 2008. Characters of Fe isotopes and rare earth elements of banded iron formations from Anshan-Benxi area: Implications for Fe source. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 27(4): 285–290 (in Chinese with English abstract)
- Li ZH, Zhu XK, Tang SH, LJ and Liu H. 2010. Characteristic of rare earth elements and geological significations of BIFs from Jidong, Wutai and Lvliang area. *Geoscience*, 24(5): 840–846 (in Chinese with English abstract)
- Luo ZK, Guan K, Qiu YS, Miao LC, Qiu YM, McNaughton NJ and Groves DI. 2001. Zircon SHRIMP U-Pb dating of albitized dyke in Jinchangyu gold mine, Jidong area, Heilong, China. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 16(4): 226–231 (in Chinese with English abstract)
- Manikyamba C, Balaram V and Naqvi SM. 1993. Geochemical signatures of polygenetic origin of a banded iron formation (BIF) of the Archean Sandur greenstone belt (schist belt) Karnataka nucleus, India. *Precambrian Research*, 61(1–2): 137–164
- Nutman AP, Wan YS, Du LL, Friend CR, Dong CY, Xie HQ, Wang W, Sun HY and Liu DY. 2011. Multistage Late Neoproterozoic crustal evolution of the North China Craton, eastern Hebei. *Precambrian Research*, 189(1–2): 43–65
- Paris I, Stanistreet IG and Hughes MJ. 1985. Cherts of the Barberton greenstone belt interpreted as products of submarine exhalative activity. *The Journal of Geology*, 111–129
- Roy S and Venkatesh AS. 2009. Banded Iron Formation to Blue Dust: Mineralogical and geochemical constraints from the Precambrian Jilling-Langalata deposits, Eastern Indian Craton. *Applied Earth Science*, 118(3–4): 178–188
- Santosh M, Zhao DP and Kusky T. 2010. Mantle dynamics of the Paleoproterozoic North China Craton: A perspective based on seismic tomography. *Journal Geodynamics*, 49(1): 39–53
- Shen BF. 2012. Geological characters and resource prospect of the BIF type iron ore deposit in China. *Acta Geologica Sinica*, 86(9): 1376–1395 (in Chinese with English abstract)
- Shen QH. 1998. Geological characteristics and forming environment of Early Precambrian banded iron formation in North China Platform. In: Cheng YQ (ed.). *Research Contributions of Early Precambrian Geology of North China Platform*. Beijing: Geological Publishing House, 1–30 (in Chinese)
- Shen QH, Song HX, Yang CH and Wan YS. 2011. Petrochemical characteristics and geological significations of banded iron formations in the Wutai Mountain of Shanxi and Qian'an of eastern Hebei. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 30(2): 161–171 (in Chinese with English abstract)
- Siever R. 1957. The silica budget in the sedimentary cycle. *American Mineralogist*, 42(11–12): 821–841
- Song B, Nutman AP, Liu D and Wu J. 1996. 3800 to 2500 Ma crustal evolution in the Anshan area of Liaoning Province, northeastern

- China. *Precambrian Research*, 78(1-3): 79-94
- Sugitani K. 1992. Geochemical characteristics of Archeancherts and other sedimentary rocks in the Pilbara Block, Western Australia: Evidence for Archean seawater enriched in hydrothermally-derived iron and silica. *Precambrian Research*, 57(1): 21-47
- Wan YS. 1993. The Formation and Evolution of the Banded Iron Formation in Gongchangling Distract, Liaoning. Beijing: Scientific and Technical Documentation Press, 1-93 (in Chinese)
- Wan YS, Liu DY, Song B, Wu JS, Yang CH, Zhang ZQ and Geng YS. 2005. Geochemical and Nd isotopic compositions of 3.8Ga meta-quartz dioritic and trondhjemitic rocks from the Anshan area and their geological significance. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(5): 563-575
- Wan YS, Song B, Geng YS and Liu DY. 2005. Geochemical characteristics of Archean basement in the Fushun-Qingyuan area, northern Liaoning Province and its geological significance. *Geological Review*, 51(2): 128-137(in Chinese with English abstract)
- Wan YS, Dong CY, Xie HQ, Wang SJ, Song MC, Xu ZY, Wang SY, Zhou HY, Ma MZ and Liu DY. 2012. Formation ages of Early Precambrian BIFs in the North China craton: SHRIMP zircon U-Pb dating. *Acta Geologica Sinica*, 86(9): 1447-1478 (in Chinese with English abstract)
- Wang RM, He GP, Chen ZZ, Zheng YS and Geng YS. 1987. *Graphic Method for Ptololith Metamorphic Rocks*. Beijing: Geological Publishing House, 1-199 (in Chinese)
- Wu FY, Zhao GC, Wilde SA and Sun DY. 2005. Nd isotopic constraints on crustal formation in the North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(5): 523-545
- Wu FY, Zhang YB, Yang JH, Xie LW and Yang YH. 2010. Zircon U-Pb and Hf isotopic constraints on the Early Archean crustal evolution in Anshan of the North China Craton. *Precambrian Research*, 167(3-4): 339-362
- Wu JS, Geng YS, Shen QH, Wan YS, Liu DY and Song B. 1998. *Archean Geological Characteristics and Tectonic Evolution of Sino-Korea Paleo-Continent*. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Xiang P, Cui ML, Wu HY, Zhang XJ and Zhang LC. 2012. Geological characteristic, ages of host rocks and its geological significance of the Zhoutaizi iron deposit in Luanping, Hebei Province. *Acta Petrologica Sinica*, 28(11): 3655-3669(in Chinese with English abstract)
- Xu GR and Chen JH. 1984. Metallogenic characteristics of iron deposit in Archean greenstone basin of Anshan-Benxi area, Northeast China. *Mineral Deposits*, 3(2): 1-10(in Chinese with English abstract)
- Yang XQ, Li HM, Li LX, Liu MJ, Chen J and Bai Y. 2012. Characteristics of rare earth elements and geological significations of magnetite from Gongchangling iron deposit in Liaoning Province. *Rock and Mineral Analysis*, 31(6): 1058-1066(in Chinese with English abstract)
- Yang XQ, Li HM, Xue CJ, Li LX, Liu MJ and Chen J. 2013. Geochemical characteristics of two types of iron ore from Waitoushan iron deposit, Liaoning Province: Constraints on ore-forming. *Acta Geologica Sinica*, 87(10): 1580-1592(in Chinese with English abstract)
- Yang ZS, Yu BX and Gao DH. 1983. Research of tectonic deformation of the metamorphic sedimentary iron-deposit in Waitoushan area, Liaoning Province. *Journal of Changchun University of Earth Science*, (2): 11-23(in Chinese with English abstract)
- Yao PH. 1993. *Iron ore Deposit of China*. Beijing: Metallurgical Industry Press, 242-247 (in Chinese)
- Yao T, Li HM, Yang XQ, Li LX, Chen J, Zhang JY and Liu MJ. 2014. Geochemical characteristics of Banded Iron Formations in Liaoning-eastern Hebei area: II. Characteristics of rare earth elements. *Acta Petrologica Sinica*, 30(5): 1239-1252 (in Chinese with English abstract)
- Zhai MG, Windley BF and Sill JD. 1989. REE and trace element geochemistry of the Archean Anshan-Benxi BIF, Liaoning, Northeast China. *Geochimica*, (3): 241-250 (in Chinese with English abstract)
- Zhai MG, Windley BF and Sills JD. 1990. Archean gneisses amphibolites, and banded iron-formations from the Anshan area of Liaoning Province, NE China: Their geochemistry, metamorphism and petrogenesis. *Precambrian Research*, 46(3): 195-216
- Zhai MG, Sills JD and Windley BF. 1990. Metamorphic minerals and metamorphism of Anshan group in Anshan-Benxi area Liaoning. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 9(2): 148-158 (in Chinese with English abstract)
- Zhai MG, Bian AG and Zhao TP. 2000. The amalgamation of the supercontinent of North China Craton at the end of Neo-Archean and its breakup during late Palaeoproterozoic and Meso-Proterozoic. *Science in China (Series D)*, 43(Suppl.1): 219-232
- Zhai MG. 2010. Tectonic evolution and metallogenesis of North China Craton. *Mineral Deposits*, 29(1): 24-36 (in Chinese with English abstract)
- Zhang BH, Cai YT, Zhang WB, Cui WZ, Zheng JQ and Liu RQ. 1986. Structural deformation of the Early Precambrian rock groups in the Anshan area, Liaoning Province. *Journal of Changchun University of Earth Science*, (2): 47-56 (in Chinese with English abstract)
- Zhang LC, Zhai MG, Zhang XJ, Xiang P, Dai YP, Wang CL and Pirajno F. 2012. Formation age and tectonic setting of the Shirengou Neoproterozoic banded iron deposit in eastern Hebei Province: Constraints from geochemistry and SIMS zircon U-Pb dating. *Precambrian Research*, 222-223: 325-328
- Zhang LC, Zhai MG, Wan YS, Guo JH, Dai YP, Wang CL and Liu L. 2012. Study of the Precambrian BIF-iron deposits in the North China Craton: Progresses and questions. *Acta Petrologica Sinica*, 28(11): 3431-3445 (in Chinese with English abstract)
- Zhang XJ, Zhang LC, Xiang P, Wan B and Pirajno F. 2011. Zircon U-Pb age, Hf isotopes and geochemistry of Shuichang Algoma-type banded iron-formation, North China Craton: Constraints on the ore-forming age and tectonic setting. *Gondwana Research*, 20(1): 137-148
- Zhang YX. 1986. *Archean Geology and Metamorphic Iron Deposit in the Eastern Hebei Province*. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Zhang ZC, Hou T, Santosh M, Li HM, Li JW, Zhang ZH, Song XY and Wang M. 2014. Spatio-temporal distribution and tectonic settings of the major iron deposits in China: An overview. *Ore Geology Reviews*, 57: 247-263
- Zhao GC, Wilde SM, Cawood PA and Sun M. 2001. Archean blocks and their boundaries in the North China Craton: Lithological, geochemical, structural and *P-T* path constraints and tectonic evolution. *Precambrian Research*, 107(1-2): 45-73
- Zhao GC. 2009. Metamorphic evolution of major tectonic units in the basement of the North China Craton: Key issues and discussion. *Acta Petrologica Sinica*, 25(8): 1772-1792 (in Chinese with English abstract)
- Zhou ST. 1994. *Geology of Banded Iron Deposits in Anshan-Benxi Area*. Beijing: Geological Publishing House, 1-276 (in Chinese)

附中文参考文献

- 程裕淇. 1957. 中国东北部辽宁山东等省前震旦纪鞍山式条带状铁矿中富矿的成因问题. *地质学报*, 37(2): 153-180
- 代堰培, 张连昌, 王长乐, 刘利, 崔敏利, 朱明田, 相鹏. 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. *岩石学报*, 28(11): 3574-3794
- 丁文君, 陈正乐, 陈柏林, 董法先, 崔玲玲. 2009. 河北迁安杏山铁矿床地球化学特征及其对成矿物质来源的指示. *地质力学学报*, 15(4): 363-373
- 蓝廷广, 范宏瑞, 胡芳芳, 杨奎锋, 郑小礼, 张华东. 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. *岩石学报*, 28(11): 3595-3611

- 李厚民, 王登红, 李立兴, 陈靖, 杨秀清, 刘明军. 2012a. 中国铁矿成矿规律及重点矿集区资源潜力分析. 中国地质, 39(3): 559-580
- 李厚民, 陈毓川, 李立兴等. 2012b. 中国铁矿成矿规律. 北京: 地质出版社, 1-246
- 李厚民, 刘明军, 李立兴, 杨秀清, 陈靖, 姚良德, 姚通. 2012c. 辽宁弓长岭铁矿区大理岩地质地球化学特征及其成矿意义. 岩石学报, 28(11): 3497-3512
- 李延河, 张增杰, 伍家善, 尚龙平. 2011. 冀东马兰庄条带状硅铁建造的变质时代及地质意义. 矿床地质, 30(4): 645-653
- 李志红, 朱祥坤, 唐索寒. 2008. 鞍山-本溪地区条带状铁建造的铁同位素与稀土元素特征及其对成矿物质来源的指示. 岩石矿物学杂志, 27(4): 285-290
- 李志红, 朱祥坤, 唐索寒, 李津, 刘辉. 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. 现代地质, 24(5): 840-846
- 罗镇宽, 关康, 裘有守, 苗来成, Qiu YM, McNaughton NJ, Groves DI. 2001. 冀东金厂峪金矿区钠长岩脉及青山口花岗岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年及其意义. 地质找矿论丛, 16(4): 226-231
- 沈保丰. 2012. 中国 BIF 型铁矿床地质特征和资源远景. 地质学报, 86(9): 1376-1395
- 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. 见: 程裕淇主编. 华北地台早前寒武纪地质研究论文集. 北京: 地质出版社, 1-30
- 沈其韩, 宋会侠, 杨崇辉, 万渝生. 2011. 山西五台山和冀东迁安地区条带状铁矿的岩石化学特征及其地质意义. 岩石矿物学杂志, 30(2): 161-171
- 万渝生. 1993. 辽宁弓长岭含铁岩系的形成与演化. 北京: 北京科学技术出版社, 1-93
- 万渝生, 宋彪, 耿元生, 刘敦一. 2005. 辽北抚顺-清原地区太古宙基底地球化学组成特征及其地质意义. 地质论评, 51(2): 128-137
- 万渝生, 董春燕, 颀颀强, 王世进, 宋明春, 徐仲元, 王世炎, 周红英, 马铭株, 刘敦一. 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 年龄. 地质学报, 86(9): 1447-1478
- 王仁民, 贺高珍, 陈珍珍, 郑松彦, 耿元生. 1987. 变质岩原岩图解判别法. 北京: 地质出版社, 1-199
- 伍家善, 耿元生, 沈其韩. 1998. 中朝古大陆太古宙地质特征及构造演化. 北京: 地质出版社
- 相鹏, 崔敏利, 吴华英, 张晓静, 张连昌. 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. 岩石学报, 28(11): 3655-3669
- 徐光荣, 陈江洪. 1984. 鞍本太古宙绿岩带盆地铁矿及其铁矿成矿特征. 矿床地质, 3(2): 1-10
- 杨秀清, 李厚民, 李立兴, 刘明军, 陈靖, 白云. 2012. 辽宁弓长岭铁矿床磁铁矿稀土元素特征及其地质意义. 岩矿测试, 31(6): 1058-1066
- 杨秀清, 李厚民, 薛春纪, 李立兴, 刘明军, 陈靖. 2010. 辽宁歪头山铁矿床两类矿石地球化学特征及其对成矿作用的制约. 地质学报, 87(10): 1580-1592
- 杨振升, 俞保祥, 高德华. 1983. 辽宁歪头山变质-沉积铁矿构造变形研究. 长春地质学院学报, (2): 11-23
- 姚培慧. 1993. 中国铁矿志. 北京: 冶金出版社, 242-247
- 姚通, 李厚民, 杨秀清, 李立兴, 陈靖, 张进友, 刘明军. 2014. 辽冀地区条带状铁建造地球化学特征: II. 稀土元素特征. 岩石学报, 30(5): 1239-1252
- 翟明国, Windley BF, Sill JD. 1989. 鞍本太古代条带状铁建造(BIF)的稀土及微量元素特征. 地球化学, (3): 241-250
- 翟明国, Sills JD, Windley BF. 1990. 鞍本地区鞍山群变质矿物及变质作用. 岩石矿物学杂志, 9(2): 148-158
- 翟明国, 卞爱国, 赵太平. 2000. 华北克拉通新太古代末超大陆拼合及古元古-中元古代裂解. 中国科学(D辑), 30(1): 129-137
- 翟明国. 2010. 华北克拉通的形成演化与成矿作用. 矿床地质, 29(1): 24-36
- 张宝华, 蔡一廷, 张文博, 崔文智, 郑峻庆, 刘如琦. 1986. 鞍山地区早前寒武纪岩群的构造变形. 长春地质学院学报, (2): 47-56
- 张连昌, 翟明国, 万渝生, 郭敬辉, 代堰铭, 王长乐, 刘利. 2012. 华北克拉通前寒武纪 BIF 铁矿研究: 进展与问题. 岩石学报, 28(11): 3431-3435
- 张贻侠. 1986. 冀东太古代地质及变质铁矿. 北京: 地质出版社
- 赵国春. 2009. 华北克拉通基底主要构造单元变质作用演化及其若干问题讨论. 岩石学报, 25(8): 1772-1792
- 周世泰. 1994. 鞍山-本溪地区条带状铁矿地质. 北京: 地质出版社, 1-276