

鞍山一本溪地区前寒武纪条带状铁建造 铁矿时代、物质来源与形成环境

张连昌,代堰锬,王长乐,刘 利,朱明田

(中国科学院地质与地球物理研究所 矿产资源研究重点实验室,北京 100029)

摘 要:前寒武纪条带状铁建造(BIFs)蕴含丰富的铁矿石资源,记录了早期地球演化的重要信息。鞍山一本溪地区发育巨量的太古宙 BIFs。鞍山一本溪地区 BIFs 由互层的硅铁条带组成,金属矿物以磁铁矿为主,含少量赤铁矿、黄铁矿及菱铁矿等。围岩与 BIFs 呈整合接触,具有变火山岩的岩石学特征及地球化学特征,表明 BIFs 属于阿尔戈玛型,其变火山岩围岩年龄可大致代表 BIFs 沉积时代。锆石 U-Pb 年代学显示,鞍山一本溪地区至少发育约 3.10 Ga 及约 2.55 Ga 两期 BIFs 沉积成矿事件,后者在华北克拉通广泛发育。鞍山一本溪地区 BIFs 地球化学具有以下特征:①低的 TiO_2 与 Al_2O_3 含量及高场强元素负异常,表明沉积过程中陆源碎屑物质加入量很少;②PAAS 标准化 REE 配分模式显示重稀土元素富集,La、Y 及 Eu 正异常,暗示 BIFs 沉积自海水与海底高温热液的混合溶液;③接近同时代亏损地幔的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(3.0~4.7),表明 Fe 可能来源于海底热液活动淋滤洋壳;④BIFs 中仅发育少量黄铁矿,基本不显示 Ce 负异常且富集铁的重同位素($\delta(^{57}\text{Fe})$)值为 $(0.13\sim2.73)\times10^{-3}$,暗示古海洋整体处于低硫、缺氧环境,BIFs 的沉淀可能与富 Fe^{2+} 溶液遭遇环境突变有关。元素地球化学分析表明,大孤山与陈台沟围岩具有弧火山岩特征,南芬与歪头山围岩类似于弧后盆地玄武岩,因此,鞍山一本溪地区 BIFs 沉积于火山弧相关构造背景。

关键词:条带状铁建造;太古宙;物质来源;形成机制;构造背景;鞍山一本溪地区;华北克拉通

中图分类号:P618.31

文献标志码:A

Age, Material Sources and Formation Setting of Proterozoic BIFs Iron Deposits in Anshan-Benxi Area

ZHANG Lian-chang, DAI Yan-pei, WANG Chang-le, LIU Li, ZHU Ming-tian

(Key Laboratory of Mineral Resources, Institute of Geology and Geophysics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: Precambrian banded iron formations (BIFs) contain large amounts of iron ores and record some important information about the evolution of early earth. Anshan-Benxi area has huge occurrences of Archean BIFs, which are helpful to enrich the theories of BIFs metallogenesis and advance the understanding of early evolution of North China Craton. These hosting rocks all have parallel occurrences to BIFs, and they show petrological and geochemical affinities with meta-volcanics. Therefore, the BIFs belong to the Algoma type and their formation ages can be reflected by the ages of wall rocks. It is proposed that there are at least two-stage BIFs deposition at about 3.10 Ga and about 2.55 Ga in Anshan-Benxi area, and the latter is widely distributed in North China Craton. The geochemical features of these BIFs include: ① low concentrations of

收稿日期:2014-06-25

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)项目(2012CB416601);国家自然科学基金项目(41372100)

作者简介:张连昌(1959-),男,陕西西安人,研究员,博士研究生导师,理学博士,E-mail:lczhang@mail.igcas.ac.cn.

Al_2O_3 , TiO_2 and high field strength elements, suggesting that terrigenous detrital materials contributed insignificantly to the chemical precipitation; ② enrichment in heavy rare earth elements with positive La, Eu and Y anomalies on PAAS-normalized REE patterns, indicating their precipitation from marine seawater with a high-temperature hydrothermal component; ③ $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ values (3.0–4.7) close to those of the coeval depleted mantle, implying that the iron is most likely derived from the leaching of oceanic crust by marine hydrothermal activities; ④ BIFs have only a few pyrites within them, and most of them show no Ce anomaly with enrichment of $\delta(^{57}\text{Fe})$ ($(0.13\text{--}2.73)\times 10^{-3}$), indicating that Archean ocean is in low abundances of S and O_2 . It is proposed that the deposition of BIFs is associated with environment variation during the transport of Fe^{2+} -rich solutions. Geochemical analyses show that Dagushan and Chentaigou wall rocks have the characteristics of arc volcanics, and Nanfen and Waitoushan rocks are similar to back-arc basin basalts. Therefore, the BIFs in Anshan-Benxi area are deposited in the volcanic arc setting.

Key words: banded iron formations; Archean; material source; formation mechanism; tectonic setting; Anshan-Benxi area; North China Craton

0 引言

条带状铁建造(Banded Iron Formations, BIFs)是指全铁含量(质量分数,下同)大于 15%,由富铁矿物(以磁铁矿或赤铁矿为主)和脉石矿物(以石英为主)组成的具有条带状或条纹状构造的化学沉积岩^[1-2]。BIFs 多分布于前寒武纪古老克拉通内^[3-4],时代主要介于 1.8~3.8 Ga^[5],尤其以 2.0~2.7 Ga 最为发育^[6]。BIFs 在全球广泛发育,主要分布在南美洲、北美洲、格陵兰、非洲、澳大利亚、俄罗斯、中国和印度等地。根据 BIFs 的形成时代及含矿建造,可将其分为阿尔戈玛(Algoma)型和苏比利尔湖(Superior Lake)型。阿尔戈玛型 BIFs 主要产于太古宙,通常形成于岛弧、弧后盆地或克拉通内裂谷带,与海底火山活动关系密切;苏比利尔湖型 BIFs 主要产于古元古代,一般发育于浅海环境且与沉积作用密切相关,其沉积规模多大于阿尔戈玛型^[3-4]。

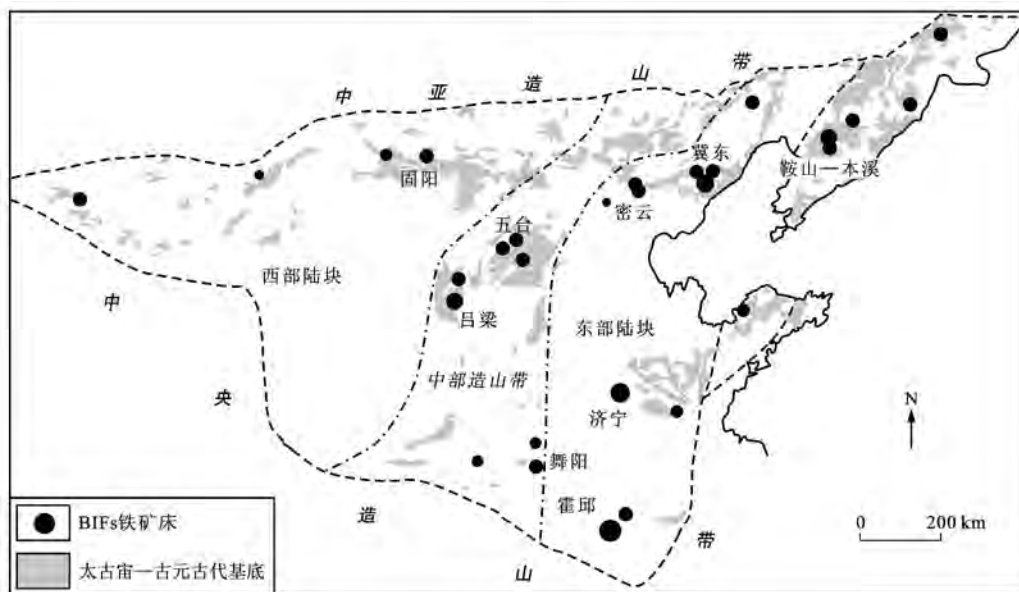
BIFs 是早前寒武纪时期特殊环境的产物,记录了当时地球深部、大气、海洋和生物等方面的重要信息^[7]。例如,Ribeiro 等在研究巴西 2.75 Ga Carajas BIFs 时,发现硅铁条带分别具瓣状构造(直径 5~10 μm)及管状构造(直径 0.5~5.0 μm),其 $\delta(^{13}\text{C})$ 值为 -24.5×10^{-3} ,这些构造的发育表明 BIFs 的形成与微生物活动有关^[8]。前寒武纪 BIFs 是典型的无碎屑状岩屑化学沉积物,其稀土元素组成反映了当时海水的地球化学特征,进而可推测当时的大气圈氧化状态。其中: $\delta(\cdot)$ 表示同位素组成。

中国华北 BIFs 铁矿具有一些显著特点:以新太古代为主,古元古代次之;含矿岩系主要为新太古代

火山岩和火山-沉积岩系;矿石相对较贫,以磁铁矿为主;矿体遭受强烈变质变形影响,部分矿体产状陡,富矿在深部。同时,该地区 BIFs 铁矿还不同程度受到古生代和中生代构造叠加作用的影响,与加拿大、澳大利亚和南非等稳定克拉通地区铁矿的展布规律以及发育大量风化壳型富铁矿的特征明显不同^[9-10]。中国矿床类型以产于绿岩带中(如冀东、鞍山—本溪、舞阳、固阳等地区)的阿尔戈玛型铁矿为主,少量为发育于克拉通盆地内(如吕梁)的苏比利尔湖型铁矿。BIFs 铁矿的物质来源、成矿条件和机制、富铁矿成因以及华北克拉通不发育苏比利尔湖型铁矿的原因等方面还亟待深入研究^[11]。鞍山—本溪地区(简称“鞍本地区”)铁矿是中国最具代表性的前寒武纪 BIFs 铁矿,对其开展科学研究将为解决上述问题提供有益依据。笔者依据近年开展的 BIFs 铁矿研究进展,综合介绍和探讨了鞍本地区 BIFs 铁矿的形成时代、物质来源、形成环境和构造背景等。

1 研究进展

中国 BIFs 主要分布于华北克拉通的鞍本、冀东、鲁西、五台—吕梁、内蒙古固阳、河南舞阳及安徽霍邱等地区(图 1)。在中国,对 BIFs 的研究始于 20 世纪 60 年代^[12],之后一些地质学家对国内 BIFs 特征总结如下:① BIFs 多分布于华北克拉通边缘及裂谷之中;② 围岩主要产于新太古代,其次为古元古代;③ 围岩以变火山岩为主,兼含少量变沉积岩,铁矿床多属于阿尔戈玛型;④ 后期复杂的变质变形作用对 BIFs 改造强烈;⑤ BIFs 以贫矿为主,富矿少且



图件引自文献[10],有所修改

图1 华北克拉通主要构造单元及BIFs分布

Fig. 1 Main Tectonic Units and Distribution of BIFs in North China Craton

多位于深部^[9-11,13-15]。随着试验测试技术的发展,近年国内学者在华北克拉通BIFs研究方面取得了许多新认识,主要包括年代学、物质来源及矿床成因等方面。

1.1 年代学

华北克拉通绝大多数BIFs属于阿尔戈玛型,表明BIFs沉积作用与火山活动关系密切。BIFs与变火山岩夹层或围岩属于同一期火山-沉积作用的产物,变火山岩年龄可以间接代表BIFs形成时代^[16-18]。近年来,国内学者对与华北克拉通BIFs相关的岩系做了大量锆石U-Pb年代学研究^[16-17,19-22]。统计结果表明,这些BIFs多形成于约2.55 Ga,并经历了约2.50 Ga及1.85 Ga两期变质作用(图2)。同时,近期研究发现鞍山的大孤山铁矿可能形成于3.1 Ga左右^[23],吕梁的袁家村铁矿可能形成

于2.3 Ga左右^[24]。

1.2 古海洋环境及物质来源

中国学者同样发现华北克拉通BIFs明显缺乏Ce负异常并富集铁的重同位素,认为当时的海洋整体处于缺氧环境;稀土元素示踪表明,BIFs沉积作用与海底高温热液具有成因联系^[17,23-25]。李志红等发现鞍山地区BIFs的 $\delta(^{57}\text{Fe})$ 值与Eu异常成正比,这为Fe来源与海底火山热液活动相关提供了直接证据^[25]。李厚民等在弓长岭二矿区识别出一套与BIFs整合产出的白云质大理岩,在V-PDB标准下的 $\delta(^{13}\text{C})$ 值为 $(-7.0 \sim -6.0) \times 10^{-3}$,与地幔值一致; ^{13}C 亏损的特征暗示大理岩为海底喷气沉积成因,亦表明该BIFs的发育与海底热液活动有关^[20]。李延河等统计了华北克拉通不同时代、不同类型BIFs的硅同位素组成, $\delta(^{30}\text{Si})$ 值介于 $(-2.0 \sim$

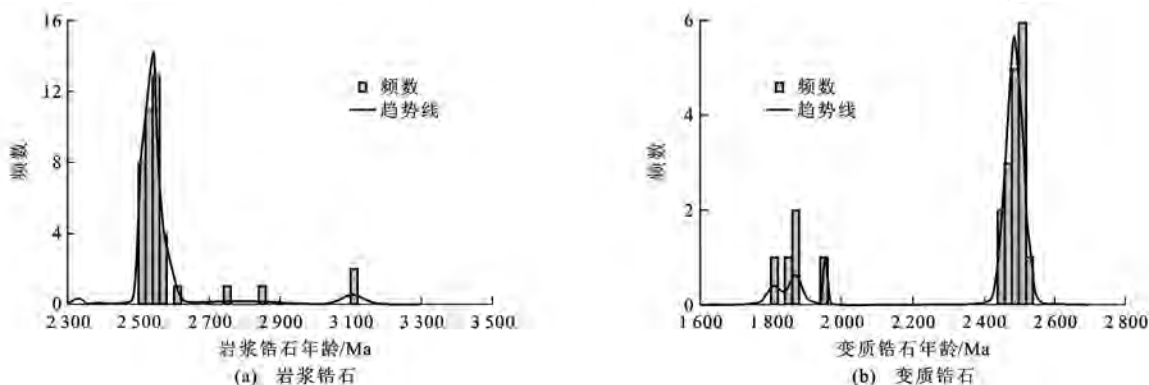


图2 华北克拉通BIFs相关岩系中岩浆及变质锆石U-Pb年龄统计

Fig. 2 Statistical Charts of U-Pb Ages for Magmatic and Metamorphic Zircons from BIFs-associated Rocks in North China Craton

$-0.3) \times 10^{-3}$, 平均 -0.8×10^{-3} ^[26-27]; Si 同位素分析结果暗示华北克拉通 BIFs 中的硅质属热液成因。

1.3 构造环境及矿床成因

目前,多数国内学者认为华北克拉通太古宙阿尔戈玛型 BIFs 产于俯冲相关构造背景。例如, Zhang 等认为冀东水厂 BIFs(年龄为 2 547 Ma)与斜长角闪片麻岩夹层形成于同一时代,后者具有贫 Ti 且富轻稀土元素及大离子亲石元素,亏损重稀土元素及高场强元素的特征^[28],据此提出该 BIFs 形成于岛弧或者弧后盆地环境。Zhang 等对其他 BIFs 的研究也提出了相同认识,如冀东地区石人沟^[17]与鞍山地区齐大山^[29]、陈台沟^[23]、弓长岭^[29-30]、歪头山^[23]等均形成于 2 550 Ma 左右。刘利等发现固阳地区三合明 BIFs(年龄为 2 562 Ma)斜长角闪岩围岩具有 T-MORB 特征,结合区内岩石组合特征及前人提出的岛弧叠加地幔柱模式,认为该 BIFs 形成于弧后盆地并有地幔柱叠加的构造环境^[31]。Ma 等在研究固阳地区东五分子 BIFs(年龄为 2 538 Ma)时,认为东五分子绿岩带形成于太古宙板块俯冲过程^[32];基于区内两种科马提岩的发育,提出该 BIFs 的形成与洋中脊俯冲导致板片窗地幔上涌有关。此外,蓝廷广等发现鲁东昌邑 BIFs(年龄为 2 193~2 240 Ma)沉积过程中有大量陆源碎屑物质的参与,围岩中含有较多酸

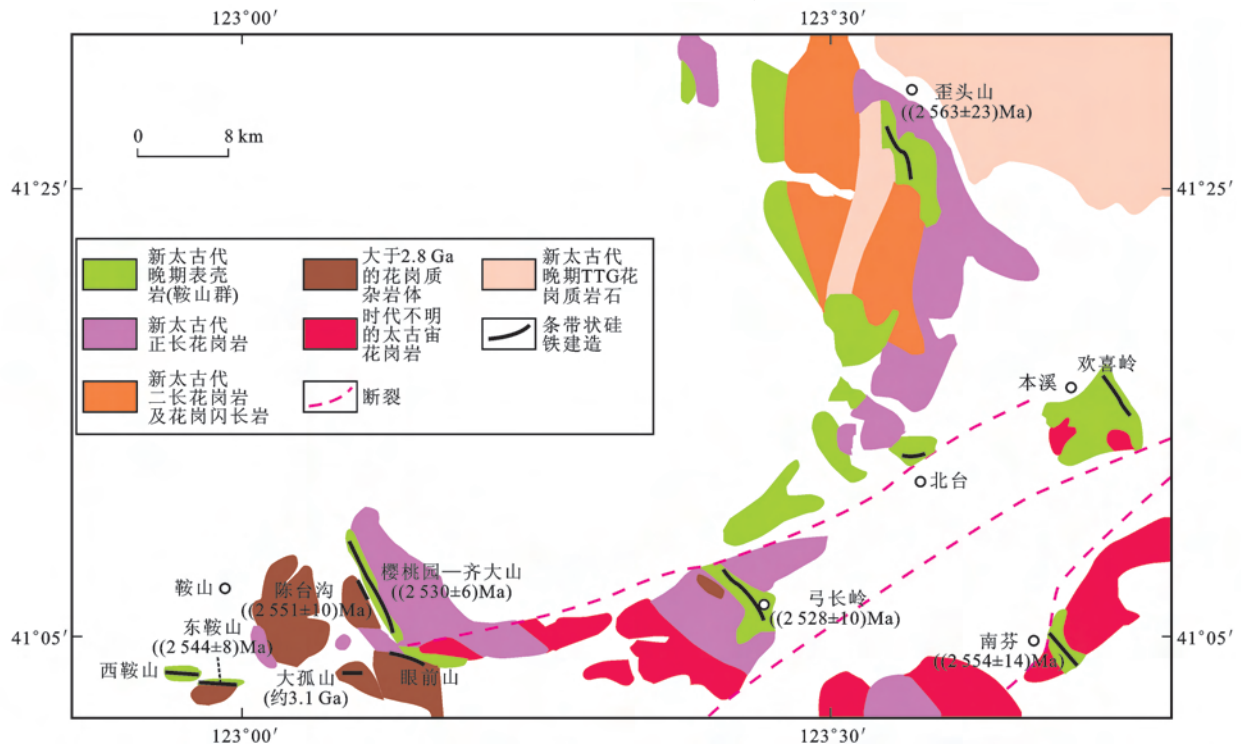
性到中基性火山岩,总体上显示双峰式特征,认为该 BIFs 形成于大陆裂谷环境^[33]。李延河等对比了阿尔戈玛型与苏比利尔湖型 BIFs 的 Si、O、Fe 同位素特征,认为两种类型 BIFs 均由地球早期的海底热液喷气作用在大气氧浓度不足现在大气氧水平 1% 的还原条件下形成,二者属于同一成矿系统^[26-27];并进一步指出,阿尔戈玛型 BIFs 距离同期火山活动中心更近,形成时代稍早,多形成于环境更加还原的深水盆地,而苏比利尔湖型 BIFs 与之恰好相反。

2 地质特征及形成时代

2.1 容矿岩系

鞍山地区铁矿是中国最大的条带状铁矿成矿区,位于华北地台东北缘胶辽台隆的西北部^[34]。除个别中太古代地层外,绝大多数条带状铁矿赋存于新太古代的鞍山群火山沉积变质岩系(绿岩带)中(图 3、表 1)。代堰镕等研究认为,其原岩建造为基性火山岩-中酸性(火山)杂砂岩、泥质岩-硅质沉积建造,矿床的形成与海相火山作用在时间上、空间上和成因上密切相关,属于(火山)沉积变质类型,相当于阿尔戈玛型铁矿^[19,23]。

鞍山地区的铁矿包括东鞍山、西鞍山、齐大山和大孤山等。辽阳弓长岭地区包括弓长岭一矿区、二



图件引自文献[35],有所修改

图 3 鞍山—本溪地区 BIFs 铁矿分布

Fig. 3 Distribution of BIFs Iron Deposits in Anshan-Benxi Area

表 1 鞍山—本溪地区代表性 BIFs 铁矿地质特征

Tab. 1 Geological Features of BIFs Iron Deposits in Anshan-Benxi Area

地区	矿区	地层单元	矿体形态与顶、底板岩性	矿石矿物组合	矿石构造	资料来源
鞍山	大孤山	樱桃园组(未定)	层状铁矿体,围岩绿泥石英片岩、混合片麻岩	磁铁矿	条带状构造	[19]
	陈台沟	樱桃园组	层状铁矿体,顶板绿泥石英片岩,底板角闪石英片岩	磁铁矿+赤铁矿	条带状构造	[23]
	东鞍山	樱桃园组	层状铁矿体,赋存于绢云千枚岩、绿泥千枚岩中	磁铁矿+赤铁矿	条带状构造	[9]
	西鞍山	樱桃园组	层状铁矿体,赋存于绢云千枚岩、绿泥千枚岩中	磁铁矿+赤铁矿	条带状构造	[9]
	胡家庙子	樱桃园组	层状铁矿体,赋存于绢云千枚岩、绿泥千枚岩中	磁铁矿+赤铁矿	条带状构造	[9]
	黑石砬子	樱桃园组	层状铁矿体,赋存于绢云千枚岩、绿泥千枚岩中	磁铁矿+赤铁矿	条带状构造	[9]
	齐大山	樱桃园组	层状铁矿体,赋存于绿泥石英片岩、绿泥千枚岩中	磁铁矿+赤铁矿	条带状-块状- 蜂窝状构造	[29]
辽阳	小岭子	樱桃园组	层状铁矿体,呈残留体产于混合花岗岩中	磁铁矿+赤铁矿		[9]
	弓长岭	茨沟组	层状铁矿体,赋存于绿泥石英片岩、斜长角闪岩中	磁铁矿+赤铁矿+ 黄铁矿	条带状构造	[20]
	弓矿二矿区西北	茨沟组	层状铁矿体,赋存于绿泥石英片岩、斜长角闪岩中	磁铁矿+赤铁矿	块状-条带状构造	[9]
本溪	南芬	茨沟组	层状铁矿体,赋存于绿泥角闪片岩中	磁铁矿+赤铁矿	条带状- 块状构造	[19]
	歪头山	茨沟组	层状铁矿体,赋存于斜长角闪岩中	磁铁矿+赤铁矿	条带状构造	[19]
	徐家堡	茨沟组	层状铁矿体,赋存于斜长角闪岩中	磁铁矿+赤铁矿	条带状- 块状构造	[9]

矿区、独木和中茨等。容矿岩系主要为绢云石英千枚岩、绢云绿泥片岩、绿泥石英片岩,夹变粒岩、磁铁矿石英岩及薄层斜长角闪岩,原岩为泥质-粉质沉积岩,夹硅铁质岩及少量基性—中酸性火山岩,变质程度为绿片岩相。

本溪地区铁矿包括南芬、歪头山等,分布于本溪及北台一带。容矿岩系以斜长角闪岩、混合岩化片麻岩及黑云变粒岩为主,夹云母石英片岩、绿泥石英片岩及条带状磁铁矿石英岩,原岩为基性—中酸性火山岩、火山碎屑岩,夹泥质-粉砂质沉积岩和硅铁质岩,变质程度为角闪岩相。

硅铁建造中的含铁矿石英岩虽然都具有类似的条带状构造,但由于构造位置及环境的差异,形成了鞍山群不同的岩石组合,如产于鞍山群樱桃园组中的铁矿,其容矿岩石组合为磁(赤)铁矿石英岩-千枚岩-片岩组合,主要分布于鞍山地区,深部向磁铁矿石英岩-斜长角闪岩-变粒岩组合相变。樱桃园组的铁矿床规模大,储量丰富,分布有东鞍山、西鞍山、齐大山、胡家庙子等特大型矿床;产于茨沟组中的铁矿主要分布在辽阳、本溪等地,原岩以基性熔岩为主,夹含铁硅质岩,少量陆源碎屑沉积,上部中酸性凝灰岩增多。该组有两个含铁矿层位,自下而上为:①歪头山段含铁矿层位分布于歪头山、梨树沟等地,岩石类型主要有斜长角闪岩、角闪片麻岩夹阳起石磁铁矿石

英岩,已发现大型矿床 1 处,中型矿床 3 处;②弓长岭段含铁矿层位分布于辽阳、本溪等地,岩石类型主要有黑云变粒岩夹斜长角闪岩及磁铁矿石英岩。该地已发现 6 处大型铁矿床、10 处中型铁矿床,弓长岭富矿体规模大,长可达 1 800 m,厚 2~30 m,全铁(TFe)品位为 45.5%~67.6%。

2.2 矿物组成及演化

BIFs 类型铁矿石呈中细粒变晶结构、条带状构造,由铁条带及硅条带组成[图 4(a)~(c)]。金属矿物主要为磁铁矿、赤铁矿、假象赤铁矿及少量黄铁矿;脉石矿物以石英、角闪石、绿泥石、阳起石、透闪石[图 4(d)、(e)]及黑云母为主。BIFs 中局部发育活化石英脉,两侧铁条带有增宽的迹象[图 4(f)]。磁铁矿为自形—他形,粒度 10~600 μm,局部被假象赤铁矿交代。有的磁铁矿显示弱定向构造,局部被自形黄铁矿包裹[图 4(g)]。赤铁矿主要为他形粒状,粒径 10~300 μm;局部可见被磁铁矿包裹的板条状赤铁矿[图 4(h)],该现象被认为是 BIFs 中磁铁矿形成于后期成岩过程、晚于早期赤铁矿(水铁矿脱水而成)的证据^[36]。富铁矿石显示中粒变晶结构及块状构造,主要由磁铁矿(体积分数大于 80%)及少量赤铁矿(约 10%)、黄铁矿(约 5%)、石英(小于 5%)组成;局部可见富矿石中石英被绿泥石、阳起石交代破坏的现象。围岩蚀变主要围

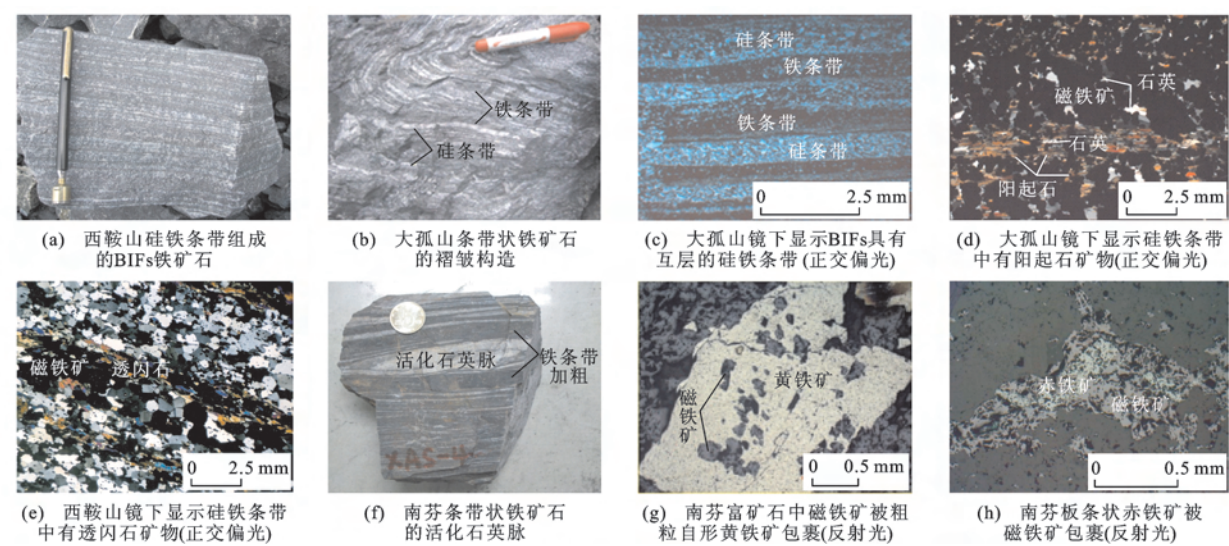


图 4 鞍山一本溪地区 BIFs 铁矿石及其显微照片

Fig. 4 BIFs Iron Ores in Anshan-Benxi Area and Their Photomicrographs

绕富铁矿体发育,包括硅化、绿泥石化及黄铁矿化等^[37]。

鞍本地区 BIFs 铁矿床矿石中磁铁矿成分接近理想纯磁铁矿^[23],显示沉积变质成因;赤铁矿多为次生氧化形成,可见磁铁矿假象;富铁条带中石英粒度小于 0.05 mm,贫铁条带中石英粒度大于 0.1 mm,反映富铁条带晚于贫铁条带形成。部分矿石发育黄铁矿化及阳起石化,表明部分富铁矿的形成可能与后期热液作用有关。综合镜下观察结果及前人研究认识,厘定出鞍本地区 BIFs 铁矿经历了原生沉积、成岩作用、变质变形作用和表生氧化等 4 个演化阶段。每个阶段主要矿物的生成顺序见表 2。

2.3 BIFs 铁矿时代

围岩与 BIFs 呈整合接触,具有变火山岩的岩石学特征及地球化学性质,表明上述 BIFs 属于阿尔戈玛型,其变火山岩围岩年龄可大致代表 BIFs 沉积时代^[11,14]。近期,锆石 U-Pb 年代学显示^[19,23],大孤山 BIFs 形成于 3 101~3 110 Ma,陈台沟、南芬及歪头山 BIFs 分别沉积于 2 551 Ma、2 554 Ma 和 2 563 Ma。此外,大孤山岩矿石 Sm-Nd 混合等时线年龄为 3 168 Ma,与其他矿区(年龄为 2 642 Ma)差异很大,再次暗示大孤山 BIFs 形成时代特殊。据此,提出鞍本地区至少发育约 3.10 Ga 及约 2.55 Ga 两期 BIFs 成矿事件(表 3),后者在华北克拉通广泛发育。

表 2 鞍山一本溪地区 BIFs 铁矿的矿物生成顺序

Tab. 2 Paragenetic Chart for Minerals in BIFs Iron Deposits of Anshan-Benxi Area

矿物	演化阶段			
	原生沉积	成岩作用	变质变形作用	表生氧化
水铁矿	●			
板条状赤铁矿		●		
菱铁矿		●		
BIFs中石英		●		
BIFs中磁铁矿		●		
绿泥石			●	
阳起石			●	
活化石英脉中石英			●	
脉状赤铁矿			●	
半自形—自形黄铁矿			●	
方解石			●	
富铁矿中磁铁矿			●	
假象赤铁矿				●

注:椭圆大小代表形成矿物的数量;椭圆在表中的位置表示矿物生成的先后顺序。

表 3 华北克拉通 BIFs 相关岩系锆石 U-Pb 年龄统计结果

Tab. 3 Statistical Results of Zircon U-Pb Ages for BIFs-associated Rocks in North China Craton

地点	岩性	产状	测年方法	锆石年龄/Ma			资料来源
				碎屑锆石	岩浆锆石	变质锆石	
大孤山	绿泥石英片岩	BIFs 夹层	锆石 SIMS		3 110±32		[19]
		BIFs 围岩	锆石 LA-ICP-MS		3 101±28		[19]
陈台沟		BIFs 夹层		2 739±50	2 551±10	2 469±23	[23]
南芬	绿泥角闪片岩	BIFs 夹层		2 617±36	2 554±14	2 484±12	
	磁铁石英岩					2 480±63	[23]
歪头山	斜长角闪岩	BIFs 夹层	锆石 SIMS	2 610±5	2 533±11		[38]
东鞍山	黑云绿泥石英片岩	BIFs 夹层	锆石 SHRIMP		2 544±8		[39]
齐大山	黑云变粒岩	BIFs 围岩	单颗粒锆石稀释法		2 533±53		[14]
	正长花岗岩	侵入 BIFs	锆石 SHRIMP		2 503±10		[38]
	黑云绿泥石英片岩	BIFs 夹层			2 530±6		[26]
弓长岭	角闪变粒岩	BIFs 围岩		约 2 700	2 528±10		[27]
	蚀变石榴石岩					1 861±25	[14]

近年来,国内学者运用高精度锆石 U-Pb 定年方法研究鞍本地区含铁岩系的形成时代(表 3)。结果进一步表明,鞍本地区的中—上鞍山群并不存在上、下层位关系,当属同一时代空间相变的产物^[19,40]。这一研究结果有悖于鞍山地区表壳岩均形成于新太古代的认识^[41],暗示在新太古代樱桃园组地层之下可能存在更古老的地层单元。

综上所述,目前国内学者对鞍本地区鞍山群的划分尚不准确,详细划分方案需进一步的工作。鞍本地区含铁岩系多形成于约 2.55 Ga,而大孤山 BIFs 形成于约 3.10 Ga。在没有地层缺失或未遭受构造强烈影响的条件下,区内深部存在寻找 BIFs 铁矿的潜力。

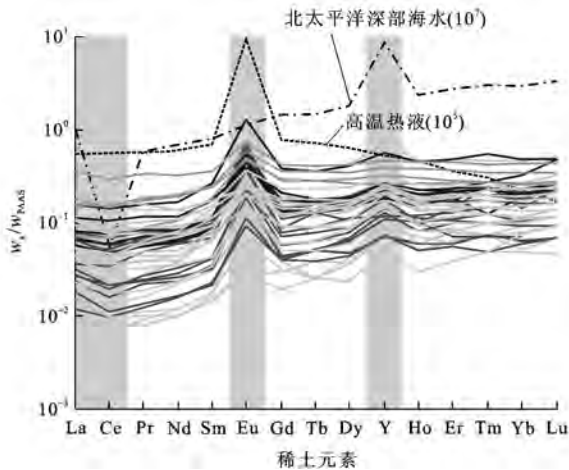
3 物质来源与形成环境

代堰镔等对鞍本地区 BIFs 进行了主、微量元素分析^[19,23]。鞍本地区 BIFs 的 SiO₂ 含量(质量分数,下同)为 24.43%~69.32%,平均 51.62%;TFe₂O₃ 含量为 25.63%~59.71%,平均 42.43%;二者占氧化物组分的 80.97%~100%,平均 94.06%。Al₂O₃ 含量为 0.02%~2.64%,平均 0.58%;MgO 含量为 0.08%~8.05%,平均 2.16%;CaO 含量为 0.01%~7.14%,平均 1.84%;其他氧化物组分含量均很低。极少数 BIFs 具有较高的烧失量,可能与 BIFs 中发育的碳酸盐矿物(菱铁矿等)有关。BIFs 型矿石的 TiO₂ 与 Al₂O₃ 含量之和为 0.03%~2.69%,平均 0.59%;由于 TiO₂ 及 Al₂O₃ 不能被溶液引入,二者较低的含量暗示 BIFs 沉积过程中陆源碎屑物质加

入量较少。

在 BIFs 沉积过程中,稀土元素仅发生很小的分馏,因此,稀土元素示踪被认为是研究 BIFs 物质来源的最佳手段^[7]。Bau 等指出前寒武纪 BIFs 稀土元素组成不会被后期低级变质作用影响^[42-43]。由于鞍本地区 BIFs 仅经历了绿片岩相-角闪岩相变质过程^[41],并且其 REY 配分模式类似于世界上变质程度很低的前寒武纪 BIFs,因此,鞍本地区 BIFs 保留了原始沉积溶液的特征。鞍本地区 BIFs 稀土元素总含量(包括 Y 元素,表示为 w_{REY})为 $(3.93\sim74.0)\times 10^{-6}$,平均 20.6×10^{-6} 。后太古代澳大利亚页岩(Post Archean Australian Shale, PAAS)标准化稀土元素配分模式(图 5)显示,BIFs 富集重稀土元素($w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 0.10~1.23,平均 0.38),具有 La 正异常(0.98~3.90,平均 1.52)、Y 正异常(0.97~2.30,平均 1.41)及高 $w(\text{Y})/w(\text{Ho})$ 值(26.0~53.3,平均 35.8),与现代海水稀土元素特征一致^[44],暗示 BIFs 沉积自海水。此外,鞍本地区 BIFs 还显示强烈的 Eu 正异常(1.43~7.67,平均 3.39),后者当属海底高温(高于 350℃)热液的特征^[43]。BIFs 中 Fe 与稀土元素在运移过程中不会发生分馏^[7],暗示鞍本地区 BIFs 中稀土元素与 Fe 可能均来自海水与海底高温热液的混合溶液。其中: $w(\cdot)$ 表示元素或化合物含量; $w(\cdot)_{\text{N}}$ 表示元素含量球粒陨石标准化后的值。

鞍本地区 BIFs 中微量元素 Rb、Ba、Sr、Pb、V 等含量相对较高,分别为 $(0.12\sim34.50)\times 10^{-6}$ 、



w_s 为样品含量; w_{PAA} 为 PAAS 含量; PAAS 标准化数据引自文献[45], 北太平洋深海海水数据引自文献[44], 高温热液数据引自文献[43]

图 5 鞍山一本溪地区 BIFs 的 PAAS 标准化稀土元素配分模式

Fig. 5 PAAS-normalized REE Pattern of BIFs in Anshan-Benxi Area

$(0.18 \sim 212.00) \times 10^{-6}$ 、 $(0.88 \sim 84.90) \times 10^{-6}$ 、 $(0.41 \sim 27.50) \times 10^{-6}$ 和 $(1.00 \sim 38.10) \times 10^{-6}$ 。高场强元素地球化学性质非常稳定, 在风化、搬运过程中不易流失, 因此, 陆源碎屑物质的高场强元素负异常不甚明显^[46-47]。微量元素组成显示^[23], 鞍本地区 BIFs 具有强烈的高场强元素 Nb、Ta、Ti、Zr、Hf 负异常, 暗示 BIFs 沉积过程中陆源碎屑物质贡献量极少。火山岩和海相沉积物的 $w(\text{Sr})/w(\text{Ba})$ 值大于 1, 陆源沉积岩的 $w(\text{Sr})/w(\text{Ba})$ 值小于 1; 铁质页岩的 $w(\text{Ti})/w(\text{V})$ 值为 1.33~10.90, 火山建造为 13~85。鞍本地区 BIFs 的 $w(\text{Sr})/w(\text{Ba})$ 值平均为 5.81,

$w(\text{Ti})/w(\text{V})$ 值平均为 22.8, 暗示 BIFs 的形成与火山作用具有成因联系。

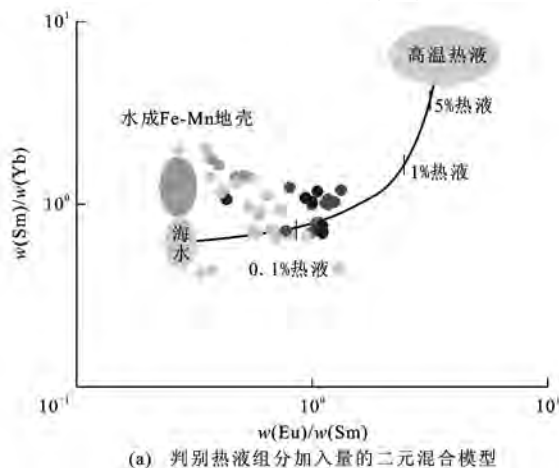
Alexander 等介绍了一个二元混合模型来判断原始混合溶液中海水与高温热液的相对含量; 该模型显示, 仅需约 0.1% 的海底高温热液即能产生较大的 Eu 正异常[图 6(a)]^[48]。

自然界中 Ce 一般呈稳定的三价离子。在氧化条件下, Ce 会被氧化为四价, Ce^{4+} 易发生水解, 从而导致 BIFs 的 REY 配分模式呈现 Ce 负异常。因此, 根据 Ce 异常可以有效判断 BIFs 沉积时古海洋的氧化还原状态。Bau 等认为常规算法下 Ce 负异常的出现与 La 正异常有关, 并建立了用常规算法计算的 Ce 异常和 Pr 异常来判别真正 Ce 负异常的图解^[42]。在该图解中, 绝大多数鞍本地区 BIFs 均位于 La 正异常区域, 并未落于 Ce 负异常区域[图 6(b)]。本文采用 Bolhar 等推荐的算法^[49], Ce 异常为 0.75~1.44, 平均 0.99, 同样未显示明显 Ce 负异常。Ce 负异常的缺失表明, BIFs 沉积过程中海水整体处于缺氧环境。

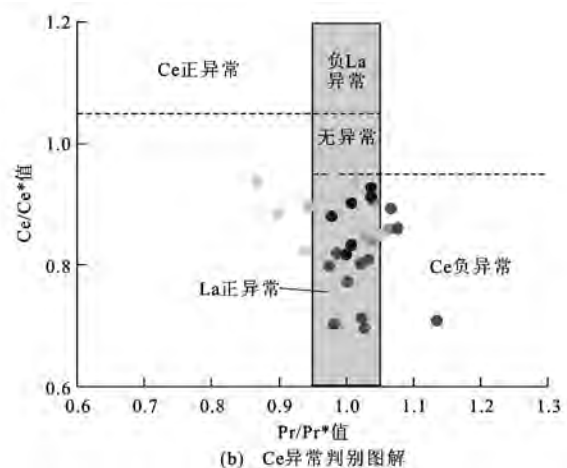
4 构造背景及形成模式

4.1 构造背景

研究表明, 陈台沟 BIFs 围岩绿泥石英片岩 SiO_2 含量为 65.87%~66.35%, Al_2O_3 为 13.92%~14.21%, TFe_2O_3 为 6.60%~7.22%, MgO 为 3.14%~3.46%, CaO 为 1.43%~1.56%, Na_2O 为 4.04%~4.19%, K_2O 为 1.35%~1.84%, TiO_2 、 MnO 及 P_2O_5 含量很低^[19,23]。综合研究表明, 绿泥石英片岩原岩属钙碱性系列的火山岩。绿泥石英片岩稀土元



(a) 判别热液组分加入量的二元混合模型



(b) Ce异常判别图解

图中圆点代表不同矿区样品; Ce/Ce^* 值为 $2w(\text{Ce})_{\text{PAA}}$ 与 $w(\text{La})_{\text{PAA}} + w(\text{Pr})_{\text{PAA}}$ 的比值; Pr/Pr^* 值为 $2w(\text{Pr})_{\text{PAA}}$ 与 $w(\text{Ce})_{\text{PAA}} + w(\text{Nd})_{\text{PAA}}$ 的比值; $w(\cdot)_{\text{PAA}}$ 表示元素含量 PAAS 标准化后的值; 图(a)引自文献[48], 图(b)引自文献[42]

图 6 判别热液组分加入量的二元混合模型和 Ce 异常判别图解

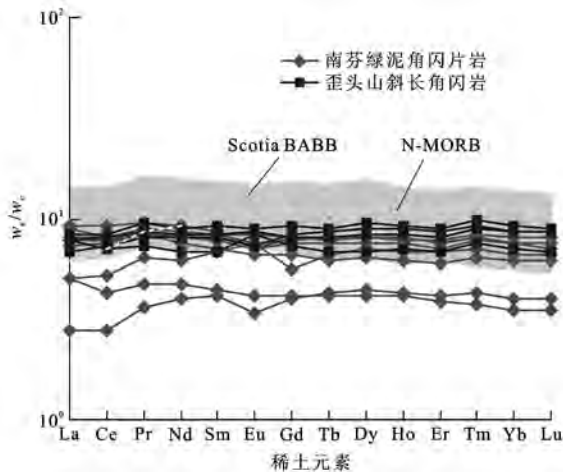
Fig. 6 Bivariate Mixture Model Discriminating Hydrothermal Component Addition and Discriminant Diagram of Ce Abnormal

素总含量为 $(95.1 \sim 126.0) \times 10^{-6}$, $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 $10.3 \sim 12.6$, 球粒陨石标准化稀土元素配分模式显示绿泥石英片岩无明显 Eu 负异常 ($0.92 \sim 0.98$), 在原始地幔标准化微量元素蛛网图上, 绿泥石英片岩显示强烈亏损高场强元素 Nb、Ta、P、Ti, 并富集 Rb、Th、U、LREE, 类似于岛弧长英质火山岩, 但与裂谷长英质火山岩存在差异。

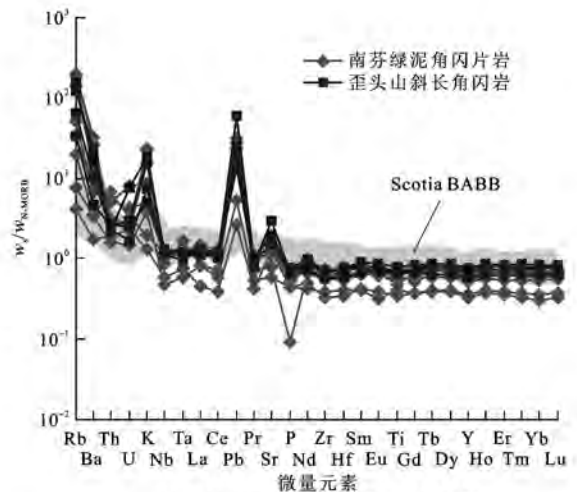
南芬矿区资料表明, 绿泥角闪片岩具有较低的 SiO_2 含量 ($43.78\% \sim 50.30\%$) 以及较高的 Al_2O_3 含量 ($11.09\% \sim 14.45\%$)、 MgO 含量 ($7.44\% \sim 17.31\%$)、 CaO 含量 ($5.49\% \sim 10.09\%$) 和 TFe_2O_3 含量 ($10.96\% \sim 14.75\%$), 其他氧化物含量均非常低^[19,23]。歪头山斜长角闪岩 SiO_2 含量介于 $46.06\% \sim 48.42\%$, 具有较高的 Al_2O_3 含量 ($13.85\% \sim 14.96\%$)、 MgO 含量 ($6.72\% \sim 8.60\%$)、 CaO 含量 ($6.37\% \sim 9.78\%$) 和 TFe_2O_3 含量 ($13.68\% \sim 15.45\%$), 但 TiO_2 、 MnO 、 K_2O 及 P_2O_5 含量均很低。研究表明, 两类岩石均属正变质岩, 其原岩具有拉斑系列岩石的地球化学特征。南芬绿泥角闪片岩稀土元素含量变化较大, 介于 $(15.8 \sim 37.2) \times 10^{-6}$, $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 $0.71 \sim 1.44$, 无明显 Eu 异常 ($0.83 \sim 1.22$); 片岩具有较高的 Rb 含量 ($(2.33 \sim 112) \times 10^{-6}$)、Ba 含量 ($(10.8 \sim 203.0) \times 10^{-6}$)、Sr 含量 ($(54.8 \sim 117.0) \times 10^{-6}$) 及 Zr 含量 ($(24.8 \sim 54.2) \times 10^{-6}$)。歪头山斜长角闪岩稀土元素总含量较为均一, 介于 $(30.7 \sim 38.2) \times 10^{-6}$, $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 $0.80 \sim 1.10$, 不具有明显 Eu 异常 ($0.88 \sim 1.16$);

微量元素中 Rb 含量 ($(19.1 \sim 88.4) \times 10^{-6}$)、Ba 含量 ($(29.5 \sim 142) \times 10^{-6}$)、Sr 含量 ($(136 \sim 269) \times 10^{-6}$)、Zr 含量 ($(41.6 \sim 52.5) \times 10^{-6}$) 及 Pb 含量 ($(4.14 \sim 18.10) \times 10^{-6}$) 较高, 表明其原岩均为基性火山岩。

综合来看, 歪头山和南芬矿区变基性岩围岩具有低的 K_2O 含量 ($0.09\% \sim 1.60\%$), 与岛弧拉斑玄武岩相似。Condie 认为岛弧拉斑玄武岩具有较低的 $w(\text{Ti})/w(\text{V})$ 值 (低于 30), 而板内玄武岩 $w(\text{Ti})/w(\text{V})$ 值较大 (大于 30); 变基性岩 $w(\text{Ti})/w(\text{V})$ 值为 $13.9 \sim 21.3$, 与岛弧拉斑玄武岩一致^[50]。Fitton 等认为陆内拉张带或初始裂谷玄武岩 $w(\text{Th})/w(\text{Ta}) > 4$, 一般为 $4 \sim 10$ ^[51], 变基性岩 $w(\text{Ti})/w(\text{V})$ 值为 $1.55 \sim 5.06$, 平均 2.66, 表明其产出环境与大陆裂谷无关, 而低的 $w(\text{Th})/w(\text{Ta})$ 值是岛弧玄武岩的特征。两类岩石均显示平坦的球粒陨石标准化稀土元素配分模式 [图 7(a)], 轻、重稀土元素不存在明显分馏, 与大陆裂谷玄武岩右倾的稀土元素配分模式不一致, 亦与正常型洋中脊玄武岩 (N-MORB) 存在差别, 而与 Scotia 弧后盆地玄武岩 (Back-arc Basin Basalt, BABB) 相似。N-MORB 标准化微量元素蛛网图显示 [图 7(b)], 变基性岩围岩富集大离子亲石元素 Rb、Ba、Sr、K, 其高场强元素 Nb、Ta、Zr、Ti 等无明显亏损, 配分模式整体较为平坦, 与 Scotia 弧后盆地玄武岩具有一致性。Fretzdorff 等认为, 弧后盆地玄武岩化学组成兼具岛弧拉斑玄武岩及 N-MORB 的特征^[52]。在 Nb-Zr-Y 构造环境判别图解 (图 8) 上, 变基性岩样品落入岛弧玄武岩或 N-MORB 区域, 表明其



(a) 球粒陨石标准化稀土元素配分模式

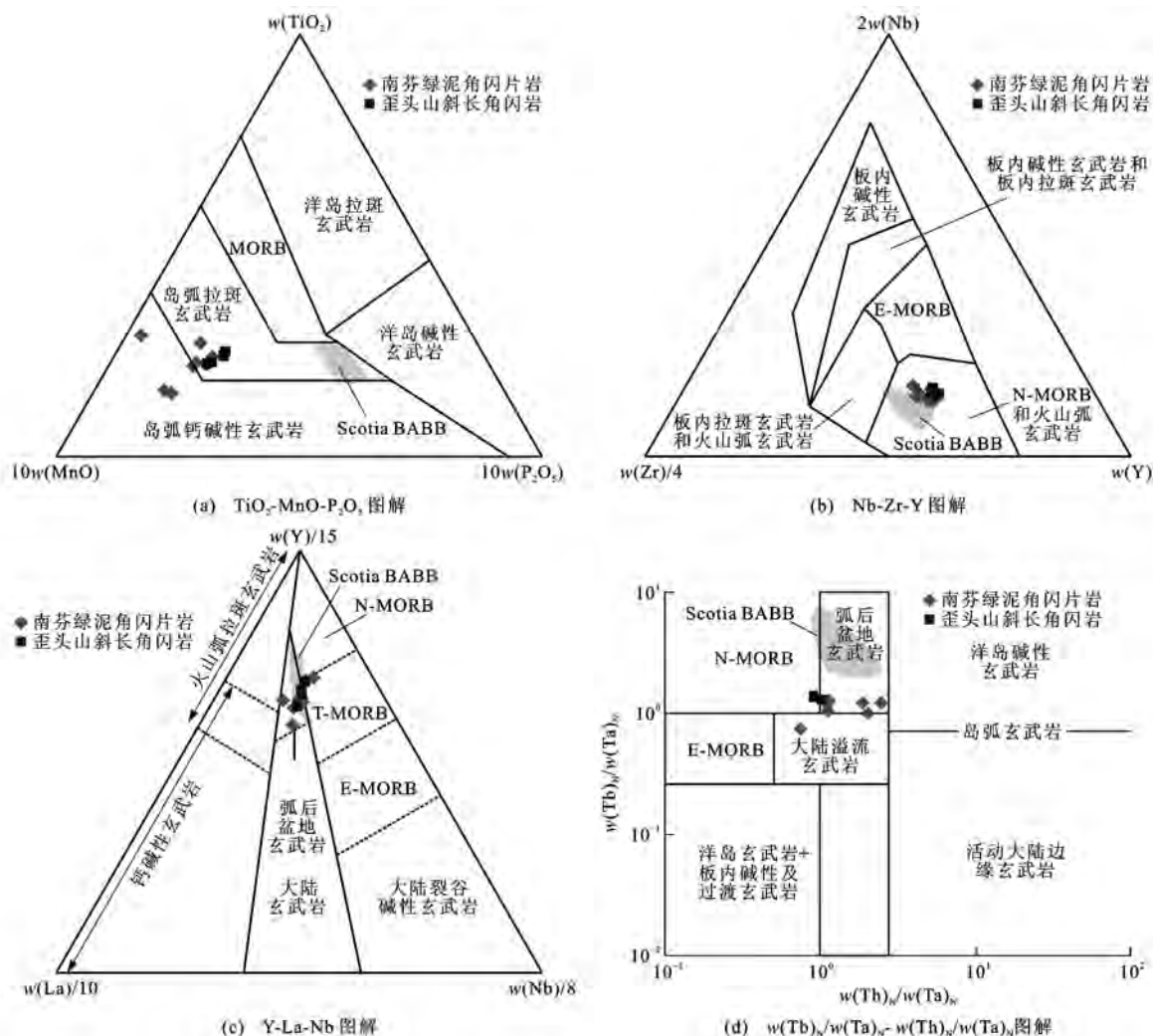


(b) N-MORB标准化微量元素蛛网图

w_c 为球粒陨石含量; $w_{\text{N-MORB}}$ 为 N-MORB 含量; Scotia BABB 数据引自文献^[52]

图7 南芬与歪头山围岩球粒陨石标准化稀土元素配分模式和 N-MORB 标准化微量元素蛛网图

Fig. 7 Chondrite-normalized REE Pattern and N-MORB-normalized Trace Element Spider Diagram of Wall Rocks in Nanfen and Waitoushan



T-MORB 为过渡型洋中脊玄武岩; E-MORB 为异常型洋中脊玄武岩; 图(a)引自文献[53]; 图(b)引自文献[54]; 图(c)引自文献[55];

图(d)引自文献[56]; Scotia BABB 数据引自文献[52]

图 8 鞍山一本溪地区南芬与歪头山 BIFs 铁矿形成的构造环境判别

Fig. 8 Tectonic Discriminant Diagrams of Nanfen and Waitoushan BIFs Iron Deposits in Anshan-Benxi Area

原岩很可能属于弧后盆地玄武岩。

4.2 形成模式

鞍山地区 BIFs 的 $w(\text{Sr})/w(\text{Ba})$ 值平均为 5.81, 与火山岩 $w(\text{Sr})/w(\text{Ba})$ 值 (大于 1) 一致, 且不同于陆源沉积岩 ($w(\text{Sr})/w(\text{Ba}) < 1$); $w(\text{Ti})/w(\text{V})$ 值平均为 22.8, 处于火山建造 $w(\text{Ti})/w(\text{V})$ 值范围 (13~85), 且与铁质页岩存在较大差异 ($w(\text{Ti})/w(\text{V})$ 值为 1.33~10.90^[35]), 暗示鞍山地区 BIFs 与火山作用具有成因联系。对南芬、歪头山和陈台沟等 BIFs 铁矿研究表明, 这些 BIFs 均与火山活动关系密切, 应属阿尔戈玛型 BIFs。

近年来, 学者多采用变火山岩夹层 (围岩) 的锆石 U-Pb 年龄来间接限定阿尔戈玛型 BIFs 的形成时代^[11, 16-17]。代堰镔等对鞍山地区 4 个 BIFs 的夹层或围岩进行了 SIMS 及 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定

年^[19, 23], 结果显示: 大孤山绿泥石英片岩形成于 3 101~3 110 Ma, 代表 BIFs 沉积时代; 陈台沟绿泥石英片岩中岩浆锆石指示 BIFs 形成于 2 551 Ma; 南芬绿泥角闪片岩中岩浆锆石显示 BIFs 沉积于 2 554 Ma; 歪头山斜长角闪岩形成于 2 563 Ma, 代表该 BIFs 的沉积时代。大孤山 BIFs 形成于 3 100 Ma, 与其他 3 个矿区存在很大差别, 同样指示了大孤山 BIFs 形成时代的特殊性。但全球范围古一中太古代 BIFs 比比皆是, 如南非 Berberton 绿岩带 Moodies 群中 BIFs、津巴布韦克拉通 Buhwa 绿岩带内 BIFs、乌克兰地盾 Konka 超大群中 BIFs、澳大利亚 Yilgarn 克拉通 Cleaverville 组中 BIFs、印度 Singhbhum-Orissa 克拉通 Iron Ore 群中 BIFs、巴西 Amazonia 克拉通 Imataca 杂岩内 BIFs 等。综合认为, 鞍山地区太古宙至少发育约 3.10 Ga 及约 2.55 Ga 两期 BIFs 成

矿事件。前者可能是迄今为止华北克拉通具有精确定年的最古老 BIFs,后者则隶属于新太古代末华北克拉通普遍发育的一期 BIFs 沉积事件。

基于对鞍本地区 BIFs 的元素地球化学研究,在 BIFs 沉积过程中陆源碎屑物质摄入量很低,BIFs 具有低的 $w(\text{TiO}_2) + w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 值。在微量元素蛛网图中,BIFs 具有强烈的高场强元素负异常。PAAS 标准化稀土元素配分模式显示,鞍本地区 BIFs 兼具现代海水(重稀土元素富集、La-Y 正异常及高 $w(\text{Y})/w(\text{Ho})$ 值)与海底高温热液(强烈 Eu 正异常)的特征(图 5),暗示 BIFs 沉积自二者的混合溶液^[6-7],其中海底高温热液组分仅占约 0.1%[图 6(a)]。

BIFs 是早期地球特殊环境的产物,能反映古大气与古海洋环境^[7]。由于 BIFs 沉积自海水并记录了古海水的稀土元素特征,显示重稀土元素富集、La-Y 正异常及高 $w(\text{Y})/w(\text{Ho})$ 值等,暗示早前寒武纪海水与现代海水具有相似的稀土元素组成。鞍本地区绝大多数 BIFs 不具有明显 Ce 负异常[图 6(b)],表明 BIFs 沉积时古海洋处于缺氧环境^[49],这也正是形成 BIFs 的必要条件之一^[6-7]。对全球 BIFs 年龄统计显示,其形成时代几乎连续分布于 1.8~3.8 Ga^[5-6],暗示早前寒武纪海洋化学性质较为稳定,长期处于缺氧与富 Fe^{2+} 的环境。Huston 等研究了 Fe-S-O 矿物在不同物理化学条件下的稳定性,发现 Fe 在高氧化、富硫环境的现代海水中溶解度非常低;要使 Fe 在海水中具有高溶解度以便被携带、运移,其周围海水必定是处于低硫状态^[5]。镜下观察表明,鞍本地区 BIFs 中仅发育少量黄铁矿,暗示古海洋确实处于低硫条件,因此,BIFs 的沉淀可能是原本含有大量 Fe^{2+} 、处于低氧及低硫状态的酸性溶液在运移过程中遭遇环境突变(如氧气浓度升高、pH 值升高)的结果。

Gross 研究表明,阿尔戈玛型 BIFs 多形成于岛弧与弧后盆地或克拉通内裂谷^[3-4]。大孤山与陈台沟绿泥石英片岩原岩当属钙碱性中—酸性火山岩,其稀土、微量元素组成与岛弧长英质火山岩一致,而与裂谷长英质火山岩存在较大差别。由于阿尔戈玛型 BIFs 与变火山岩围岩(局部为矿体夹层)形成时代相近,二者理应产于同一构造背景,所以大孤山与陈台沟 BIFs 沉积于火山弧环境。南芬与歪头山矿区围岩为拉斑质的变基性岩,其 $w(\text{Ti})/w(\text{V})$ 值、 $w(\text{Th})/w(\text{Ta})$ 值及稀土元素配分模式均与裂谷玄武岩存在显著差异,暗示其并非形成于大陆裂谷环境。两类岩石均显示较为平坦的球粒陨石标准化稀土元

素配分模式及 N-MORB 标准化微量元素蛛网图,与 Scotia 弧后盆地玄武岩具有较强的一致性[图 7(b)]。在 Y-La-Nb 构造环境判别图解上,变基性岩样品落入弧后盆地玄武岩区域(图 8),因此,南芬与歪头山变基性岩围岩产于弧后盆地构造背景,代表了两个矿区 BIFs 的形成环境。

综上所述,笔者建立了鞍本地区太古宙 BIFs 的沉积模式(图 9)。太古宙时期的海洋整体处于低氧逸度^[5-6]、低硫逸度状态,海底热液通过淋滤洋壳向酸性海水中输入大量 Fe^{2+} ^[57]。海水与海底高温热液的混合溶液携带 Fe^{2+} 运移至物理化学条件突变位置(如产氧细菌引起的氧气浓度升高、pH 值升高等), Fe^{2+} 被氧化为 Fe^{3+} ,进而形成 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 并沉淀^[5-6,58]。鞍本地区大规模 BIFs 沉积事件发生于约 2.55 Ga,如陈台沟、齐大山、弓长岭、南芬及歪头山 BIFs 等。鞍山地区 BIFs 形成于靠近岛弧一侧,其围岩以中—酸性火山岩为主;本溪地区 BIFs 产于靠近弧后盆地一侧,其围岩以基性火山岩为主。在 BIFs 沉积过程中,偶尔伴随有火山喷发事件,并形成 BIFs 火山岩夹层。

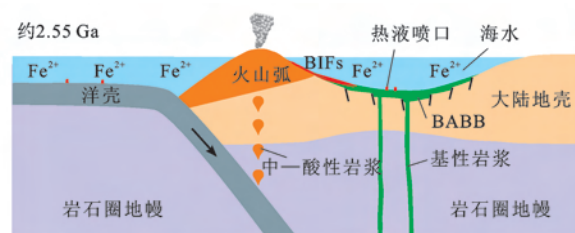


图9 鞍山—本溪地区太古宙 BIFs 沉积模式

Fig. 9 Sedimentary Model for Archean BIFs in Anshan-Benxi Area

5 结 语

(1) 鞍本地区 BIFs 由互层的硅铁条带组成,金属矿物以磁铁矿为主,含少量赤铁矿、黄铁矿及菱铁矿等,围岩主要为变火山岩。依据沉积构造背景和围岩岩性,鞍本地区 BIFs 主要属阿尔戈玛型。锆石 U-Pb 年代学显示,鞍本地区至少发育约 3.10 Ga 及约 2.55 Ga 两期 BIFs 成矿事件。对鞍本地区 4 个 BIFs 的夹层或围岩进行 SIMS 及 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年,结果显示大孤山 BIFs 形成于 3101~3110 Ma,陈台沟 BIFs 形成于 2551 Ma,南芬 BIFs 形成于 2554 Ma,歪头山 BIFs 形成于 2563 Ma。

(2) 鞍本地区 BIFs 的 TiO_2 、 Al_2O_3 含量低,高场强元素呈负异常,PAAS 标准化稀土元素配分模式显示重稀土元素富集,La、Y 及 Eu 呈正异常,接

近同时代亏损地幔的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(3.0~4.7)。BIFs 中仅发育少量黄铁矿,基本不显示 Ce 负异常且富集铁的重同位素($\delta(^{57}\text{Fe})$ 值为 $(0.13 \sim 2.73) \times 10^{-3}$),暗示新太古代古海洋整体处于低硫、缺氧环境。元素地球化学分析表明,鞍本地区的 BIFs 沉积于火山弧相关构造背景。

(3) 鞍本地区 BIFs 铁矿形成于新太古代,该时期的海洋环境整体处于低氧逸度、低硫逸度状态,海底热液通过淋滤洋壳向酸性海水中输入大量的 Fe^{2+} 。海水与海底高温热液的混合溶液携带 Fe^{2+} 运移至物理化学条件变化地带, Fe^{2+} 被氧化为 Fe^{3+} , 进而形成 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 并沉淀。进一步推测鞍山地区 BIFs 形成于靠近岛弧一侧,其围岩以中—酸性火山岩为主,本溪地区 BIFs 产于靠近弧后盆地一侧,其围岩以基性火山岩为主。

参考文献:

References:

- [1] JAMES H L. Sedimentary Facies of Iron-formation [J]. *Economic Geology*, 1954, 49(3): 235-293.
- [2] JAMES H L. Distribution of Banded Iron-formation in Space and Time[J]. *Developments in Precambrian Geology*, 1983, 6: 471-490.
- [3] GROSS G A. A Classification of Iron Formations Based on Depositional Environments[J]. *The Canadian Mineralogist*, 1980, 18(2): 215-222.
- [4] GROSS G A. Tectonic Systems and the Deposition of Iron-formation [J]. *Precambrian Research*, 1983, 20(2/3/4): 171-187.
- [5] HUSTON D L, LOGAN G A. Barite, BIFs and Bugs: Evidence for the Evolution of the Earth's Early Hydrosphere[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 220(1/2): 41-55.
- [6] KLEIN C. Some Precambrian Banded Iron-formations (BIFs) from Around the World: Their Age, Geologic Setting, Mineralogy, Metamorphism, Geochemistry, and Origins [J]. *American Mineralogist*, 2005, 90(10): 1473-1499.
- [7] BEKKER A, SLACK J F, PLANAVSKY N, et al. Iron Formation: The Sedimentary Product of a Complex Interplay Among Mantle, Tectonic, Oceanic, and Biospheric Processes [J]. *Economic Geology*, 2010, 105(3): 467-508.
- [8] RIBEIRO D B, CROWLEY J K. Morphological and Chemical Evidence of Stromatolitic Deposits in the 2.75 Ga Carajas Banded Iron Formation, Brazil [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2012, 355/356: 60-72.
- [9] 沈保丰, 翟安民, 陈文明, 等. 中国前寒武纪成矿作用 [M]. 北京: 地质出版社, 2006.
SHEN Bao-feng, ZHAI An-min, CHEN Wen-ming, et al. *Ore-forming Processes of China Precambrian* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006.
- [10] 沈保丰. 中国 BIF 型铁矿床地质特征和资源远景 [J]. *地质学报*, 2012, 86(9): 1376-1395.
SHEN Bao-feng. *Geological Characters and Resource Prospect of the BIF Type Iron Ore Deposits in China* [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 86(9): 1376-1395.
- [11] 张连昌, 翟明国, 万渝生, 等. 华北克拉通前寒武纪 BIF 铁矿研究: 进展与问题 [J]. *岩石学报*, 2012, 28(11): 3431-3445.
ZHANG Lian-chang, ZHAI Ming-guo, WAN Yu-sheng, et al. *Study of the Precambrian BIF-iron Deposits in the North China Craton: Progresses and Questions* [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(11): 3431-3445.
- [12] 程裕淇, 沈其韩, 陆宗斌, 等. 鞍山附近鞍山群的层序和时代 [J]. *中国地质科学院院刊甲种 1 号: 前寒武纪专刊*, 1963(1): 1-135.
CHENG Yu-qi, SHEN Qi-han, LU Zong-bin, et al. *Sequence and Age of Anshan Group Around Anshan Area* [J]. No. 1 *Journal of Chinese Academy of Geological Sciences: Precambrian*, 1963(1): 1-135.
- [13] ZHAI M G, WINDLEY B F, SILLS J D. Archaean Gneisses, Amphibolites and Banded Iron-formations from the Anshan Area of Liaoning Province, NE China: Their Geochemistry, Metamorphism and Petrogenesis [J]. *Precambrian Research*, 1990, 46(3): 195-216.
- [14] 万渝生, 董春艳, 颜强, 等. 华北克拉通早前寒武纪条带状铁建造形成时代: SHRIMP 锆石 U-Pb 定年 [J]. *地质学报*, 2012, 86(9): 1447-1478.
WAN Yu-sheng, DONG Chun-Yan, XIE Hang-qiang, et al. *Formation Ages of Early Precambrian BIFs in the North China Craton: SHRIMP Zircon U-Pb Dating* [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 86(9): 1447-1478.
- [15] LI H M, ZHANG Z J, LI L X, et al. Types and General Characteristics of the BIF-related Iron Deposits in China [J]. *Ore Geology Reviews*, 2014, 57: 264-287.
- [16] TRENDALL A F, BASEI M A S, DE LAETER J R, et al. SHRIMP Zircon U-Pb Constraints on the Age of the Carajas Formation, Grao Para Group, Amazon Craton [J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 1998, 11(3): 265-277.
- [17] ZHANG L C, ZHAI M G, ZHANG X J, et al. Formation Age and Tectonic Setting of the Shirengou Neo-

- archean Banded Iron Deposit in Eastern Hebei Province; Constraints from Geochemistry and SIMS Zircon U-Pb Dating[J]. *Precambrian Research*, 2012, 222/223:325-338.
- [18] CABRAL A R, ZEH A, KOGLIN N, et al. Dating the Itabira Iron Formation, Quadrilátero Ferrífero of Minas Gerais, Brazil, at 2.65 Ga; Depositional U-Pb Age of Zircon from a Metavolcanic Layer[J]. *Precambrian Research*, 2012, 204/205:40-45.
- [19] 代堰铭, 张连昌, 王长乐, 等. 辽宁本溪歪头山条带状铁矿的成因类型、形成时代及构造背景[J]. *岩石学报*, 2012, 28(11):3574-3594.
- DAI Yan-pei, ZHANG Lian-chang, WANG Chang-le, et al. Genetic Type, Formation Age and Tectonic Setting of the Waitoushan Banded Iron Formation, Benxi, Liaoning Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(11):3574-3594.
- [20] 李厚民, 刘明军, 李立兴, 等. 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[J]. *岩石学报*, 2012, 28(11):3497-3512.
- LI Hou-min, LIU Ming-jun, LI Li-xing, et al. Geology and Geochemistry of the Marble in the Gongchangling Iron Deposit in Liaoning Province and Their Metallogenic Significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(11):3497-3512.
- [21] 兰彩云, 张连昌, 赵太平, 等. 河南舞阳铁山庙式 BIF 铁矿的矿物学与地球化学特征及对矿床成因的指示[J]. *岩石学报*, 2013, 29(7):2567-2582.
- LAN Cai-yun, ZHANG Lian-chang, ZHAO Tai-ping, et al. Mineral and Geochemical Characteristics of the Tieshanmiao-type BIF-iron Deposit in Wuyang Region of Henan Province and Its Implications for Ore-forming Processes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(7):2567-2582.
- [22] 李红中, 翟明国, 张连昌, 等. 华北克拉通南缘舞阳地区太古代 BIF 中方解石的微区特征及地质意义研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33(11):3061-3065.
- LI Hong-zhong, ZHAI Ming-guo, ZHANG Lian-chang, et al. Study on Microarea Characteristics of Calcite in Archean BIF from Wuyang Area in South Margin of North China Craton and Its Geological Significances[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 33(11):3061-3065.
- [23] 代堰铭, 张连昌, 朱明田, 等. 鞍山陈台沟 BIF 铁矿与太古代地壳增生: 锆石 U-Pb 年龄与 Hf 同位素约束[J]. *岩石学报*, 2013, 29(7):2537-2550.
- DAI Yan-pei, ZHANG Lian-chang, ZHU Ming-tian, et al. Chentaigou BIF-type Iron Deposit, Anshan Area Associated with Archean Crustal Growth: Constraints from Zircon U-Pb Dating and Hf Isotope[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(7):2537-2550.
- [24] 王长乐, 张连昌, 刘利, 等. 国外前寒武纪铁建造的研究进展与有待深入探讨的问题[J]. *矿床地质*, 2012, 31(6):1311-1325.
- WANG Chang-le, ZHANG Lian-chang, LIU Li, et al. Research Progress of Precambrian Iron Formations Abroad and Some Problems Deserving Further Discussion[J]. *Mineral Deposits*, 2012, 31(6):1311-1325.
- [25] 李志红, 朱祥坤, 唐索寒. 鞍山—本溪地区条带状铁矿的 Fe 同位素特征及其对成矿机理和地球早期海洋环境的制约[J]. *岩石学报*, 2012, 28(11):3545-3558.
- LI Zhi-hong, ZHU Xiang-kun, TANG Suo-han. Fe Isotope Compositions of Banded Iron Formation from Anshan-Benxi Area: Constraints on the Formation Mechanism and Archean Ocean Environment[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(11):3545-3558.
- [26] 李延河, 侯可军, 万德芳, 等. 前寒武纪条带状硅铁建造的形成机制与地球早期的大气和海洋[J]. *地质学报*, 2010, 84(9):1359-1373.
- LI Yan-he, HOU Ke-jun, WAN De-fang, et al. Formation Mechanism of Precambrian Banded Iron Formation and Atmosphere and Ocean During Early Stage of the Earth[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2010, 84(9):1359-1373.
- [27] 李延河, 侯可军, 万德芳, 等. Algoma 型和 Superior 型硅铁建造地球化学对比研究[J]. *岩石学报*, 2012, 28(11):3513-3519.
- LI Yan-he, HOU Ke-jun, WAN De-fang, et al. A Compare Geochemistry Study for Algoma- and Superior-type Banded Iron Formations[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(11):3513-3519.
- [28] ZHANG X J, ZHANG L C, XIANG P, et al. 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[J]. *Gondwana Research*, 2011, 20(1):137-148.
- [29] SUN X H, ZHU X Q, TANG H S, et al. The Gongchangling BIFs from the Anshan-Benxi Area, NE China: Petrological-geochemical Characteristics and Genesis of High-grade Iron Ores[J]. *Ore Geology Reviews*, 2014, 60:112-125.
- [30] SUN X H, ZHU X Q, TANG H S, et al. Protolith Reconstruction and Geochemical Study on the Wall Rocks of Anshan BIFs, Northeast China: Implications for the Provenance and Tectonic Setting[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, 136:65-75.

- [31] 刘利,张连昌,代堰铭,等. 内蒙古固阳绿岩带三合明 BIF 型铁矿的形成时代、地球化学特征及地质意义[J]. 岩石学报, 2012, 28(11): 3623-3637.
- LIU Li, ZHANG Lian-chang, DAI Yan-pei, et al. Formation Age, Geochemical Signatures and Geological Significance of the Sanheming BIF-type Iron Deposit in the Guyang Greenstone Belt, Inner Mongolia[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(11): 3623-3637.
- [32] MA X D, FAN H R, SANTOSH M, et al. Chronology and Geochemistry of Neoarchean BIF-type Iron Deposits in the Yinshan Block, North China Craton: Implications for Oceanic Ridge Subduction[J]. Ore Geology Reviews, 2014, 63: 405-417.
- [33] 蓝廷广, 范宏瑞, 胡芳芳, 等. 鲁东昌邑古元古代 BIF 铁矿矿床地球化学特征及矿床成因讨论[J]. 岩石学报, 2012, 28(11): 3595-3611.
- LAN Ting-guang, FAN Hong-rui, HU Fang-fang, et al. Geological and Geochemical Characteristics of Paleoproterozoic Changyi Banded Iron Formation Deposit, Jiaodong Peninsula of Eastern China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(11): 3595-3611.
- [34] 沈其韩, 宋会侠. 加强前寒武纪条带状铁建造中伴生矿床的研究[J]. 岩石矿物学杂志, 2014, 33(4): 763-769.
- SHEN Qi-han, SONG Hui-xia. On the Strengthening of the Research on Au, Mn, Pb-Zn, Cu and Ni Ore Deposits Associated with Precambrian Banded Iron Formation[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2014, 33(4): 763-769.
- [35] 沈其韩. 华北地台早前寒武纪条带状铁英岩地质特征和形成的地质背景[C]//程裕淇. 华北地台早前寒武纪地质研究论文集. 北京:地质出版社, 1998: 1-30.
- SHEN Qi-han. Geological Characteristics and Setting of Banded Itabirite of North China Craton in Early Precambrian[C]//CHENG Yu-qi. Proceedings of Geological Research on North China Craton in Early Precambrian. Beijing: Geological Publishing House, 1998: 1-30.
- [36] AYRES D E. Genesis of Iron-bearing Minerals in Banded Iron Formation Mesobands in the Dales Gorge Member, Hamersley Group, Western Australia[J]. Economic Geology, 1972, 67(8): 1214-1233.
- [37] 姚培慧. 中国铁矿志[M]. 北京:冶金工业出版社, 1993.
- YAO Pei-hui. Iron Deposits in China[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1993.
- [38] 杨秀清, 李厚民, 薛春纪, 等. 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[J]. 地质学报, 2013, 87(10): 1580-1592.
- YANG Xiu-qing, LI Hou-min, XUE Chun-ji, et al. Geochemical Characteristics of Two Iron Ores from the Waitoushan Iron Deposit, Liaoning Province: Constraints on Ore-forming Mechanism[J]. Acta Geologica Sinica, 2013, 87(10): 1580-1592.
- [39] 王守伦, 张瑞华. 齐大山铁矿黑云母变粒岩单锆石年龄及意义[J]. 矿床地质, 1995, 14(3): 216-219.
- WANG Shou-lun, ZHANG Rui-hua. U-Pb Isotope Age of Individual Zircon from Biotite Leptynite in the Qidashan Iron Deposit and Its Significance[J]. Mineral Deposits, 1995, 14(3): 216-219.
- [40] 伍家善, 耿元生, 沈其韩, 等. 中朝古大陆太古宙地质特征及构造演化[M]. 北京:地质出版社, 1998.
- WU Jia-shan, GENG Yuan-sheng, SHEN Qi-han, et al. Geological Characteristics and Tectonic Evolution of Eastern China-Korea Palaeocontinent in Archean[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998.
- [41] 周世泰. 鞍山—本溪地区条带状铁矿地质[M]. 北京:地质出版社, 1994.
- ZHOU Shi-tai. Geological Characteristics of Banded Iron Deposit in Anshan-Benxi Area[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994.
- [42] BAU M, DULSKI P. Distribution of Yttrium and Rare-earth Elements in the Penge and Kuruman Ironformations, Transvaal Supergroup, South Africa[J]. Precambrian Research, 1996, 79(1/2): 37-55.
- [43] BAU M, DULSKI P. Comparing Yttrium and Rare Earths in Hydrothermal Fluids from the Mid-Atlantic Ridge: Implications for Y and REE Behaviour During Near-vent Mixing and for the Y/Ho Ratio of Proterozoic Seawater[J]. Chemical Geology, 1999, 155(1/2): 77-90.
- [44] ALIBO D S, NOZAKI Y. Rare Earth Elements in Seawater: Particle Association, Shale-normalization, and Ce Oxidation[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1999, 63(3/4): 363-372.
- [45] MCLENNAN S M. Rare Earth Elements in Sedimentary Rocks: Influence of Provenance and Sedimentary Processes[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 1989, 21(1): 169-200.
- [46] FREI R, POLAT A. Source Heterogeneity for the Major Components of ~ 3.7 Ga Banded Iron Formations (Isua Greenstone Belt, Western Greenland): Tracing the Nature of Interacting Water Masses in BIF Formation[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2007, 253(1/2): 266-281.
- [47] PECOITS E, GINGRAS M K, BARLEY M E, et al.

- Petrography and Geochemistry of the Dales Gorge Banded Iron Formation: Paragenetic Sequence, Source and Implications for Palaeo-ocean Chemistry[J]. *Precambrian Research*, 2009, 172(1/2): 163-187.
- [48] ALEXANDER B W, BAU M, ANDERSSON P, et al. Continentally-derived Solutes in Shallow Archean Seawater: Rare Earth Element and Nd Isotope Evidence in Iron Formation from the 2.9 Ga Pongola Supergroup, South Africa[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, 72(2): 378-394.
- [49] BOLHAR R, KAMBER B S, MOORBATH S, et al. Characterisation of Early Archaean Chemical Sediments by Trace Element Signatures[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 222(1): 43-60.
- [50] CONDIE K C. Geochemical Changes in Basalts and Andesites Across the Archaean-Proterozoic Boundary: Identification and Significance[J]. *Lithos*, 1989, 23(1/2): 1-18.
- [51] FITTON J G, JAMES D, LEEMAN W P. Basic Magmatism Associated with Late Cenozoic Extension in the Western United States: Compositional Variations in Space and Time[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1991, 96(B8): 13693-13711.
- [52] FRETZDORFF S, LIVERMORE R A, DEVEY C W, et al. Petrogenesis of the Back-arc East Scotia Ridge, South Atlantic Ocean[J]. *Journal of Petrology*, 2002, 43(8): 1435-1467.
- [53] MULLEN E D. MnO/TiO₂/P₂O₅: A Minor Element Discriminant for Basaltic Rocks of Oceanic Environments and Its Implications for Petrogenesis[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1983, 62(1): 53-62.
- [54] MESCHEDE M. A Method of Discriminating Between Different Types of Mid-ocean Ridge Basalts and Continental Tholeiites with the Nb-Zr-Y Diagram[J]. *Chemical Geology*, 1986, 56(3/4): 207-218.
- [55] CABANIS B, LECOLLE M. The La/10-Y/15-Nb/8 Diagram: A Tool for Discrimination Volcanic Series and Evidencing Continental Crust Magmatic Mixtures and/or Contamination[J]. *Comptes Rendus de Academie des Sciences Paris Series II*, 1989, 309(20): 2023-2029.
- [56] FEKKAK A, POUCKET A, OUGUIR H, et al. Geochemistry and Geotectonic Significance of Early Cryogenian Volcanics of Sagro (Eastern Anti-Atlas, Morocco)[J]. *Geodinamica Acta*, 2001, 14(6): 373-385.
- [57] PLANAVSKY N, ROUXEL O J, BEKKER A, et al. Iron Isotope Composition of Some Archean and Proterozoic Iron Formations[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2012, 80: 158-169.
- [58] CZAJA A D, JOHNSON C M, BEARD B L, et al. Biological Fe Oxidation Controlled Deposition of Banded Iron Formation in the Ca. 3 770 Ma Isua Supracrustal Belt (West Greenland)[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, 363: 192-203.

《地球科学与环境学报》2015 年变更为双月刊的通告

《地球科学与环境学报》从 2015 年起变更为双月刊, 欢迎广大作者踊跃投稿!

《地球科学与环境学报》作为教育部主管、长安大学主办的地球科学与环境领域的权威性学术刊物, 长期以来一直受到广大地球科学与环境领域科研工作者的关爱, 学术质量不断提高, 影响力不断扩大, 投稿量不断增加。为了进一步缩短论文发表时滞, 使地球科学与环境领域的学术成果更多、更快地发表, 打造更权威的地球科学与环境领域学术交流平台, 编辑部继 2013 年、2014 年连续两年增加页码之后决定再次扩容, 从 2015 年起由原来的季刊变更为双月刊。