



怀安杂岩中含 BIF 岩石组合的形成时代及产出构造背景

田 辉^{1,2}, 张家辉^{1,2}, 王惠初^{1,2}, 任云伟^{1,2}, 王 权³

1. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170

2. 中国地质调查局前寒武纪地质研究中心, 天津 300170

3. 山西省地质调查院晋中地质调查分院, 山西晋中 030600

摘要: 华北克拉通北部的怀安杂岩中分布着一些呈团块状、透镜状或似层状产出的含 BIF 岩石组合。相对于华北克拉通绿岩带, 研究区内的含 BIF 岩石组合具有规模小、岩性复杂多样以及后期叠加强烈的变质-变形改造等特点, 其研究程度较低。在野外地质填图的基础上, 通过岩石学、同位素年代学、地球化学研究表明: (1) 天镇-怀安地区的含 BIF 岩石组合主要由条带状(含辉石/角闪)磁铁矿石岩、变质基性火山岩(二辉麻粒岩/含辉石斜长角闪岩/高压麻粒岩)、石榴黑云斜长片麻岩和少量石榴石英岩条带或团块组成, 这些岩石彼此呈夹层或互层状伴生产出; 天镇-怀安地区 BIF 矿体规模小、与变质火山岩密切共生等特征表明其属于 Algoma 型。(2) 条带状(含辉石/角闪)磁铁矿石岩中残留的中-基性火成岩锆石年龄(2489 ± 19 Ma)可代表含 BIF 岩石组合的形成时代, 并经历了 1800~1850 Ma 变质作用叠加改造。(3) 含 BIF 岩石组合中火山岩地球化学特征显示 Rb、Ba、U、Pb 等元素富集和 Nb、Ta 等元素亏损, 结合微量元素蛛网图和稀土配分模式对比认为其产出构造背景为弧后盆地, 铁矿石 PAAS 标准化稀土配分图解具有明显 Eu 正异常, 表明与海底热液活动密切相关。

关键词: 天镇-怀安地区; 含 BIF 岩石组合; U-Pb 定年; 地球化学; 岩石学。

中图分类号: P581

文章编号: 1000-2383(2019)01-37-15

收稿日期: 2018-06-25

Formation Age and Tectonic Setting of Iron-Bearing Formation in Huai'an Complex, North China Craton

Tian Hui^{1,2}, Zhang Jiahui^{1,2}, Wang Huichu^{1,2}, Ren Yunwei^{1,2}, Wang Quan³

1. Tianjin Center of China Geological Survey, Tianjin 300170, China

2. Pre-Cambrian Geological Research Center of China Geological Survey, Tianjin 300170, China

3. Jinzhong Branch, Shanxi Institute of Geological Survey, Jinzhong 030600, China

Abstract: Iron-bearing formations (BIFs) in lumpy, lenticular or stratified forms frequently occur in the Huai'an Complex, North China Craton. Compared with BIFs in greenstone belts on North China Craton, the iron-bearing formation with characteristics of small scale, complicated lithology, and high-grade metamorphism-deformation in the study area has rarely been studied. Petrology, geochronology and geochemical studies on the basis of field survey have been conducted, and it is concluded: (1) The iron-bearing formations in Tianzhen-Huai'an area are comprised of banded (perilla/amphibole) magnetic quartzite, metamorphic basic volcanic rock (two-pyroxene granulite/plagioclase amphibolites/high-pressure granulite), garnet-biotite-plagiogneiss, and a few garnet-quartzite strips or lumps, and these rocks are intercalated or symbiotic with each other. Characteristics of being small in scale, closely symbiotic with metamorphic volcanic rocks suggesting BIF ore in Tianzhen-Huai'an area belongs to Algoma type. (2) The age (2489 ± 19 Ma) of residual intermediate-basic igneous zircons in banded (perilla/amphibole) magnetic quartzite may represent the formation age of the BIFs in Tianzhen-Huai'an area, which afterwards underwent the 1800-1850 Ma metamorphism. (3) The geochemical characteristics of metamorphic volcanic rocks of

基金项目: 中国地质调查局二级项目(No.DD20160042)。

作者简介: 田辉(1985-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事前寒武纪地质调查与研究。ORCID: 0000-0002-8877-6991. E-mail: 309702629@qq.com

引用格式: 田辉, 张家辉, 王惠初, 等, 2019. 怀安杂岩中含 BIF 岩石组合的形成时代及产出构造背景. 地球科学, 44(1): 37-51.

iron-bearing formations show enrichment in elements Rb, Ba, U, Pb, and depletion in elements Nb and Ta. It is concluded the iron-bearing formations are closely related to seabed hydrothermal activity formed in back-arc basin according to the patterns of trace elements and rare earth distribution of metamorphic volcanic rocks and positive anomaly of Eu in PAAS normalized rare earth elements distribution pattern of iron ore.

Key words: Tianzhen-Huai'an area; iron-bearing formation; U-Pb dating; geochemistry; petrology.

0 引言

前寒武纪 BIF (banded iron formation) 作为世界上最大规模、最高品位的一类含铁矿沉积物(化学沉积岩)的代表,具有规模大、易开采的特点,铁矿资源量占世界的 90% 以上(Bekker *et al.*, 2010). 前人根据时代、成因、含矿性等特征将 BIF 铁矿分为 3 种类型(Gross, 1980; Klein, 2005): (1) 太古代—古元古代 Algoma 型,一般规模较小,多出于绿岩带中,与同期火山活动有关,以加拿大 Abitibi、澳大利亚 Yilgarn 和印度 Dharwar 绿岩带中的 BIF 为代表,形成时代多为 3.8~1.8 Ga(Huston and Logan, 2004); (2) 元古代 Lake Superior 型,多呈大规模产出,具沉积型层控特征,基本与同期火山活动无关,多沉积于大陆架浅海区,以北美苏必利尔湖、澳大利亚 Hamersley、巴西 Quadrilatero Ferrifero 等地的 BIF 为代表(Gross, 1980),多形成于 2.5~1.8 Ga; (3) 新元古代 Rapitan 型,相对前两者所占比例较小,多与全球“雪球事件”有关,以加拿大 Rapitan、巴西 Urucum 和南非 Damara 的 BIF 为代表,多形成于 0.80~0.54 Ga(Klein, 2005).

与国外的 BIF 相比,我国境内 BIF 多遭受了变质变形作用的叠加改造,近年来随着铁矿开发程度加大及测试技术水平的提高,BIF 在我国成为研究热点(张连昌等, 2012; Zhang *et al.*, 2012; Li *et al.*, 2014; 耿元生和陆松年, 2014; 代堰镔等, 2016). Li *et al.* (2014) 根据形成时代、矿物组合及铁矿品位将中国的 BIF 分为 7 类: (1) 鞍山式: 以磁铁矿为主, 与新太古代火山—沉积建造有关, 属于 Algoma 型, 以辽宁歪头山铁矿、冀东水厂铁矿、山西五台山羊坪铁矿等为代表; (2) 袁家村式: 以磁铁矿和赤铁矿为主, 为古元古代碎屑沉积建造, 属于 Lake Superior 型, 以吕梁袁家村铁矿为代表; (3) 大栗子式: 以磁铁矿、赤铁矿和菱铁矿为主, 为古元古代碎屑—碳酸盐岩建造, 属于 Lake Superior 型, 以吉林大栗子铁矿、新疆天湖铁矿为代表; (4) 新余式: 以磁铁矿为主, 属于 Rapitan 型, 江西杨家桥铁矿和湖南江口铁矿属此类型; (5) 镜铁山式: 以赤铁矿和镜铁矿为主, 形成于

新元古代, 目前国内特指甘肃镜铁山铁矿; (6) 弓长岭式: 鞍山式铁矿受后期热液叠加改造的高品位铁矿, 品位高于 50%, 以弓长岭铁矿为代表; (7) 石碌式: 以赤铁矿为主, 形成于新元古代, 品位高于 50%, 目前国内特指海南石碌铁矿.

针对 BIF 铁矿的成因存在诸多解释: (1) 与地壳增生事件有关(Zhai and Windley, 1990); (2) 与古元古代早期的大氧化事件相关(Klein, 2005); (3) 与新太古代—古元古代地幔柱和大火成岩省事件有关(Barley *et al.*, 1997); (4) 与古元古代陨石事件有关(Cannon *et al.*, 2010); (5) 与太古代生物事件有关(Bekker *et al.*, 2010). 目前主流观点认为(Gross, 1980; Klein, 2005; 张连昌等, 2012; 代堰镔等, 2016) 大多数 BIF 形成于新太古代岛弧、弧后盆地、克拉通裂谷背景或者古元古代被动陆缘、克拉通盆地浅海环境.

前人(万渝生等, 2012, 2018; 张连昌等, 2012; 刘利等, 2012; Zhang *et al.*, 2012; 代堰镔等, 2016) 研究表明我国 BIF 多产于华北地区新太古代绿岩带之中(图 1a), 主要年龄在 2.54 Ga 左右: 如辽宁鞍山—本溪绿岩带、鲁西雁翎关绿岩带、冀东遵化绿岩带、河南登封—舞阳绿岩带、山西五台绿岩带、内蒙固阳绿岩带等, 产出了诸如辽宁弓长岭(2 550 Ma)、齐大山铁矿(2 533 Ma, 万渝生和刘敦一, 1993); 冀东石人沟铁矿(2 541 Ma, 2 553 Ma, Zhang *et al.*, 2012), 固阳三合明铁矿(2 562 Ma, 刘利等, 2012) 等. 这些铁矿以 Algoma 型为主, 例如: 鞍山地区弓长岭铁矿, 本溪地区南芬铁矿, 五台地区山羊坪铁矿, 固阳地区三合明铁矿等; 少数为 Lake Superior 型, 如吕梁袁家村铁矿、吉林大栗子铁矿.

笔者近年来在天镇—怀安地区开展了区域地质调查工作, 在该地区出露的怀安杂岩中厘定了一些含 BIF 的岩石组合, 多呈透镜状、条带状或似层状产出, 具有变质—变形程度高、矿体规模小、品位不均等特征. 本文拟从岩石组合、同位素组成及地球化学特征 3 个方面对天镇—怀安地区 BIF 的岩石组成、成矿时代及构造背景进行讨论.

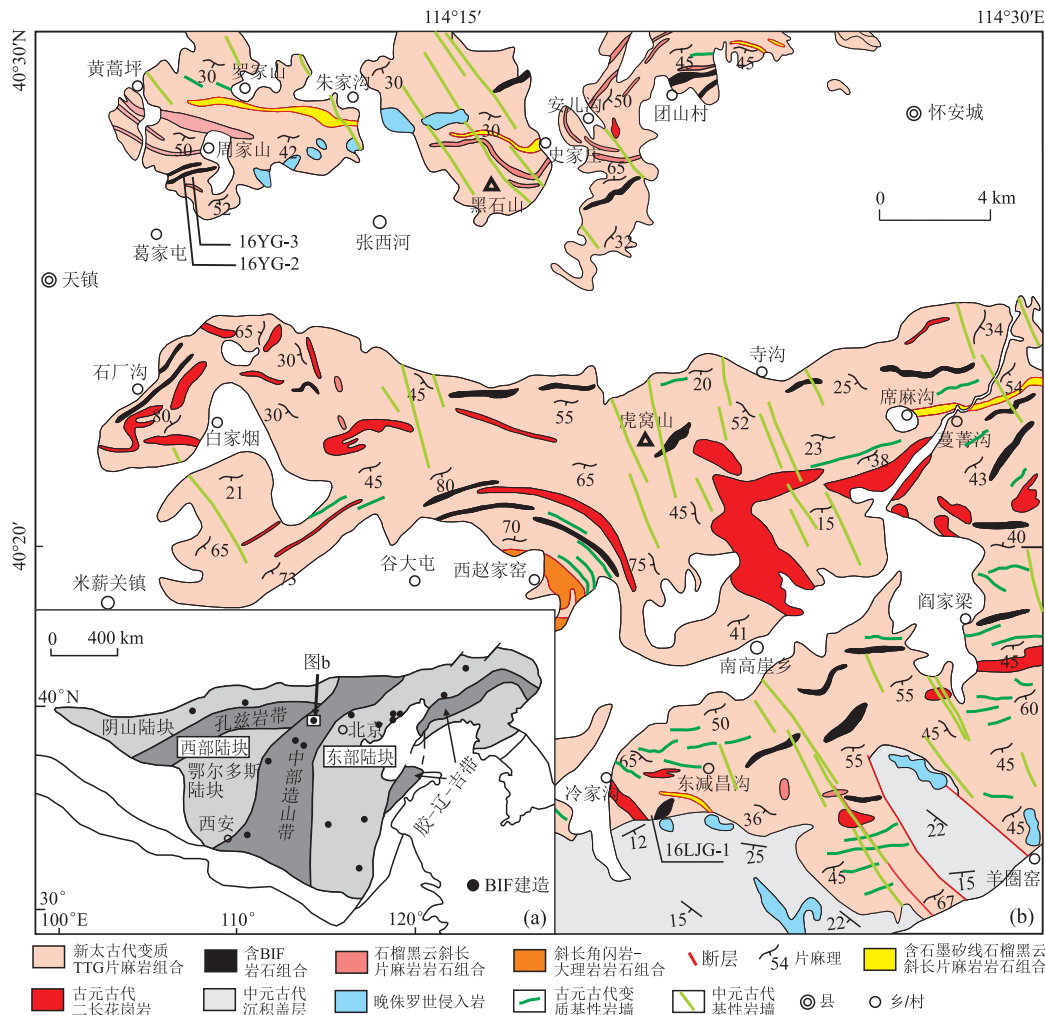


图 1 天镇—怀安地区地质简图

Fig.1 Geological sketch of the Tianzhen-Huai'an area

据 Han et al.,(2017)和张家辉等(2019)修改

1 区域地质背景

天镇—怀安地区位于晋冀蒙交界地带,大地构造位置属华北克拉通中部造山带北段(图 1a, Zhao et al., 2005, 2008),以南出露恒山、五台、阜平杂岩,以东为宣化盆地.大致以大同一浑源窑断裂为界,北西侧为孔兹岩系,主要由石墨砂线石榴黑云斜长片麻岩、石榴变粒岩/浅粒岩、长石石英岩以及大理岩等构成,时代归属于古元古代(Wan et al., 2006; 蔡佳等, 2017),东南侧为怀安杂岩,主要由 TTG 片麻岩、新太古代—古元古代变质表壳岩和古元古代高压麻粒岩等构成.

天镇—怀安地区位于大同一浑源窑断裂东南侧的怀安杂岩出露区,区内具有基底与盖层的双层结构,中元古代盖层分布在研究区南部,地层产状相对平缓,表明区内变质基底的构造形态在中元古代之

前即已形成.区内怀安杂岩作为变质基底以近东西向或北东东向构造线为主,组成岩石十分复杂,以新太古代角闪岩相—麻粒岩相变质的 TTG 片麻岩、二长花岗质片麻岩、片麻状二长花岗岩等(2.55~2.45 Ga, Liu et al., 2012; Zhang et al., 2016)为主,少量新太古代—古元古代变质表壳岩,以及古元古代花岗岩和高压麻粒岩(郭敬辉等, 1993; Guo et al., 2005; Zhao et al., 2005, 2008; Zhang et al., 2011, 2016)等.其中,变表壳岩包括磁铁石英岩、石榴黑云斜长片麻岩、石榴石英岩、石墨砂线石榴黑云斜长片麻岩、大理岩等.这些变质表壳岩多表现为岩石组合形式,如磁铁石英岩—二辉麻粒岩(斜长角闪岩)—石榴黑云斜长片麻岩—石榴石英岩组合、斜长角闪岩—大理岩组合等.研究区内 BIF 属于其中一种重要的变质表壳岩组合产出于怀安杂岩中.

最近几年,研究区内怀安杂岩引起了前寒武纪

地质研究学者的广泛关注,尤其是其中的蔓菁沟高压麻粒岩已为国内外学者所熟知.大量的研究表明,怀安杂岩中变质深成岩的形成时代为 2.55~2.45 Ga(Zhao *et al.*, 2008; Liu *et al.*, 2012; Su *et al.*, 2014),具“白眼圈”结构的高压基性麻粒岩记录了峰期高压麻粒岩相和后期麻粒岩相一角闪岩相退变质作用过程,并具有顺时针 *P-T* 演化轨迹(郭敬辉等,1993;Guo *et al.*, 2005;Zhang *et al.*, 2016).而且年代学研究(Zhao *et al.*, 2005,2008;Liu *et al.*, 2012;Su *et al.*, 2014)表明,研究区内变质基底岩石均记录了~1.85 Ga 主期变质事件,可能代表了西部陆块和东部陆块碰撞形成统一的华北克拉通基底的构造过程.

怀安杂岩在早期地质工作中曾被称为桑干杂岩,20 世纪 90 年代随着变质表壳岩、深成岩的解体,衍生出怀安杂岩、马市口群、集宁群等划分方案(郭敬辉等,1993),其中产出的 BIF 曾被认为是孔兹岩的一部分,时代置于新太古代(卢良兆等,1996).之后又几经沿革(张家辉等,2019 及其文献),2014 年山西省地质调查院在地质矿产调查工作中将天镇—怀安地区的深变质岩系解体为变质深成岩和变质表壳岩两部分,将变质深成岩划归为葛胡窑组,将变质表壳岩中含磁铁石英岩和变质基性岩部分(含 BIF 岩石组合)划归为阳高岩组;将富碳、富铝片麻岩、变质基性岩及大理岩部分划归集宁岩群黄土窑岩组和右所堡岩组,时代均置于新太古代.

近两年笔者参与的 1:5 万区域地质调查工作,对区内怀安杂岩中的变质深成岩和变质表壳岩进行了进一步解体,认为变质深成岩主要由新太古代 TTG 片麻岩组成(80%以上),另外有少量新太古代—古元古代二长花岗质片麻岩和变质基性岩体;同时将其中的变质表壳岩划分为 4 套岩石组合,分别是(1)含 BIF 岩石组合:包括条带状(含辉石/角闪石)磁铁石英岩、变质基性火山岩(二辉麻粒岩、含辉石斜长角闪岩、高压麻粒岩)以及含石榴黑云斜长片麻岩,局部可见少量石榴石英岩;(2)石榴黑云斜长片麻岩岩石组合:主要由中—粗粒石榴黑云斜长片麻岩和石榴变粒岩组成;(3)斜长角闪岩—大理岩岩石组合:包括变质基性火山岩(斜长角闪岩)、大理岩、透闪大理岩、蛇纹石大理岩;(4)含石墨矽线石榴黑云斜长片麻岩岩石组合:包括石墨矽线石榴黑云斜长片麻岩、石榴浅粒岩夹少量大理岩.前两套岩石组合归属于新太古代,后两套岩石组合归属于古元

古代,各岩石组合的分布特征见图 1b.

2 含铁(BIF)建造的产状及岩石组合特征

含 BIF 岩石组合在研究区内分布较广泛,是区内主要铁矿产出层位,在天镇县周家村南、团山村、石厂沟、虎窝山、怀安县寺沟—蔓菁沟以及东减昌沟—阎家梁等地出露较好(图 1b).单个含 BIF 岩石组合露头规模较小,主要产出形态表现为:多种岩石构成共生组合,呈团块状、透镜状、条带状或似层状分布于 TTG 片麻岩围岩之中(图 2a~2c),岩石组合内部不同岩性之间呈夹层、互层状(图 2b、2d)或包裹状,由于后期变质变形作用较强,刚性体岩石(磁铁石英岩或二辉麻粒岩)可呈现“石香肠”构造(图 2e).区内含 BIF 岩石组合走向主要为北东东向—近东西向,含矿层一般厚为 0.3~2.0 m,条带状构造,长数米到数百米,多呈长条状、似层状分布,延伸较为稳定(图 2f),规模较大的铁矿往往具有较明显的似层状或扁豆状外貌.铁矿品位相差较大,20%以下及 50%以上均有发现,多在 30%左右,而且铁含量多与其内部条带构造的发育程度有关.由于前几年铁矿价格攀升,区内较大规模的 BIF 露头多被开采,现有的“长条状”采坑可反映 BIF 铁矿在围岩中的原始产出形态(图 2c).

含 BIF 岩石组合的围岩主要为灰黑色含辉石英云闪长质片麻岩,含 BIF 岩石组合在围岩中作为(透镜状或条带状)包体产出时,多数包体的长轴方向(条带延伸方向)、包体内部片麻理产状和围岩片麻理产状三者基本一致,因此,含 BIF 岩石组合与 TTG 片麻岩围岩之间为平行片麻理的构造接触关系(图 2f).

本地区含 BIF 岩石组合主体岩石为条带状(含辉石/角闪)磁铁石英岩(图 2g、2k、2l)、变质基性火山岩(二辉麻粒岩、含辉石斜长角闪岩或高压麻粒岩(图 2h、图 2i))以及石榴黑云斜长片麻岩(图 2j)和少量石榴石英岩条带或团块.石榴黑云斜长片麻岩一般与含辉石角闪磁铁石英岩、石榴石英岩呈夹层或互层状产出(图 2d),变质基性火山岩既可呈透镜体与含辉石角闪磁铁石英岩条带伴生产出(图 2f),也可与后者呈夹层状产出(图 2b),从区域统计来看,变质基性火山岩+石榴黑云斜长片麻岩占比最高(70%~80%),磁铁石英岩占比约 20%,石榴石

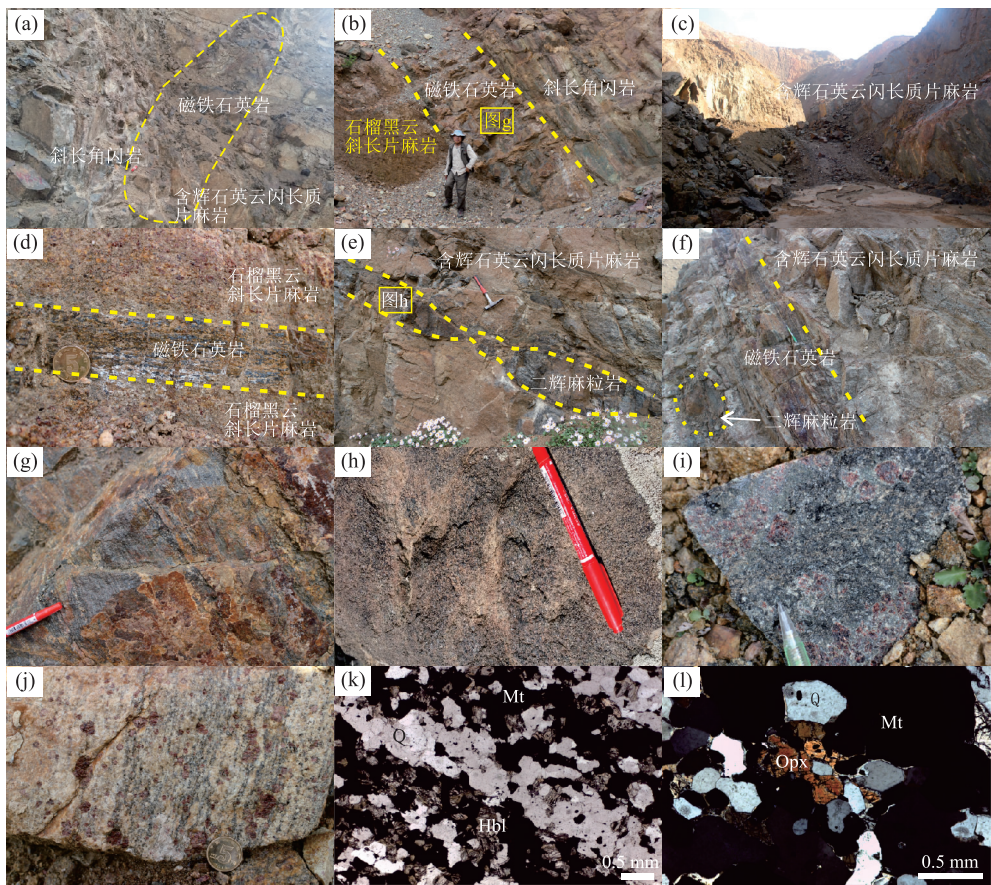


图 2 BIF 在 TTG 围岩中的产出形态以及 BIF 岩石组合的主要岩石特征

Fig.2 Occurrence of BIF in TTG and petrographic characteristics of the main lithology of BIF-bearing assemblage
a.条带状磁铁石英岩呈透镜体产出;b.条带状磁铁石英岩呈似层状产出;c.残留的长条状铁矿采坑;d.石榴黑云斜长片麻岩中夹层状 BIF 铁矿;
e.二辉麻粒岩的“石香肠”构造;f.含 BIF 岩石组合与围岩的构造接触界线;g.条带状磁铁石英岩;h.二辉麻粒岩;i.高压麻粒岩;j.石榴黑云斜长片麻岩;k.磁铁石英岩中角闪石呈填隙状分布于磁铁矿条带中;l.磁铁石英岩中的紫苏辉石

英岩占比小于 10%.BIF 共生组合内部各岩性经变质—变形改造均已平行化定向,其原始的接触关系难以识别,多体现为构造接触.

灰黑色含辉石英云闪长质片麻岩围岩特征如下:整体颜色较深,局部可见熔融分异条带,条带由暗色条带和浅色条带组成,暗色条带富集辉石及角闪石;浅色条带主要由石英和斜长石组成,含少量暗色矿物.由于强烈片麻理化,整体而言条带界面较为平直,局部片麻理较强或混合岩化程度较高者甚至呈似层状外貌;风化面和新鲜面均呈灰黑色,鳞片状中细粒变晶结构,片麻状或条带状构造;主要由石英、斜长石组成,钾长石含量较低,含角闪石、辉石和黑云母等暗色矿物,暗色矿物含量 15%左右,镜下特征见图 3a,紫苏辉石的出现表明其变质程度达到麻粒岩相.

含 BIF 岩石组合主要岩石类型的岩石学特征如下:

条带状含(辉石/角闪石)磁铁石英岩(图 2g):为主要含矿岩石,粒状变晶结构,条纹状或条带状构造,主要矿物组合为石英+磁铁矿+紫苏辉石+单斜辉石+角闪石±长石,辉石多退变为角闪石,局部可见少量残留.镜下可见石英为不规则粒状,可见波状消光,具有变晶特征,粒径为 0.3~0.5 mm,含量 50%以上;磁铁矿为不规则粒状,定向较好,粒径 0.1~0.6 mm,与石英构成相间条带,含量约 15%~30%,条带构造较强时,变质形成的角闪石和辉石多以填隙物形式富集于磁铁矿条带中呈定向分布(图 2k),反映 BIF 形成过程中有火山物质的卷入;局部见残留的紫苏辉石(图 2l).另外通过含辉石角闪磁铁石英岩的全景薄片照相(图 3d~3f)对比可知磁铁石英岩中条带越发育,磁铁矿越富集.

麻粒岩:主要为二辉麻粒岩(图 2h),其次为二辉麻粒岩退变形成的含辉石斜长角闪岩以及少数铁矿中具有退变反应边结构(图 2i)的高压麻粒岩.根

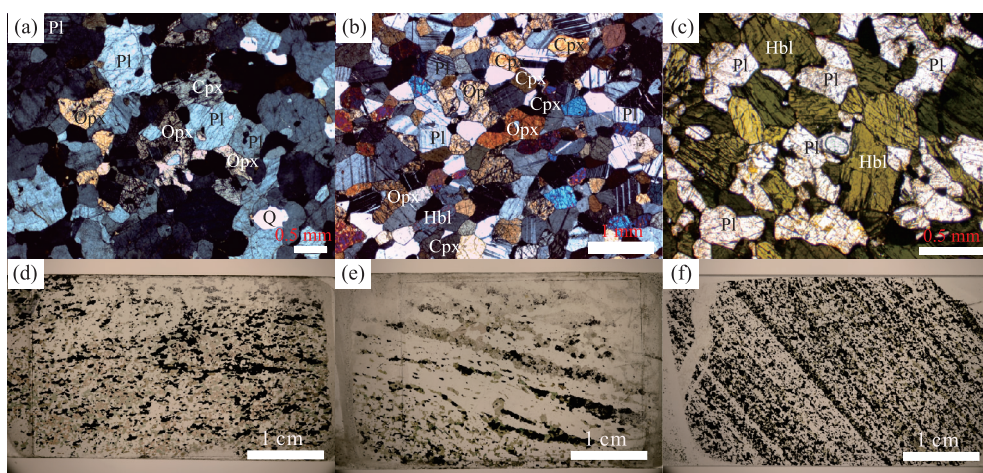


图 3 TTG 及含 BIF 岩石组合主要岩石的镜下特征

Fig.3 Microscopic characteristics of TTG and main lithology of BIF-bearing assemblage

a.含辉石英云闪长质片麻岩镜下特征(+); b.二辉麻粒岩镜下特征(+); c.斜长角闪岩镜下特征(+); d.含辉石角闪磁铁石英岩(弱定向); e.条带状含辉石角闪磁铁石英岩; f.强条带状含辉石角闪磁铁石英岩

据野外地质调查,笔者在研究区内绝大多数采坑均发现麻粒岩与磁铁石英岩、石榴黑云斜长片麻岩呈夹层状或伴生状产出;出露(含辉石/角闪)磁铁石英岩、麻粒岩、石榴黑云斜长片麻岩、石榴石英岩组合,极少数采坑中岩性组合出露不全者怀疑被开采运输(采坑附近可见各岩性转石),因此根据区内麻粒岩与各类表壳岩的密切共生关系有理由判断含 BIF 岩石组合中的麻粒岩原岩为火山岩而非岩脉/墙。灰黑色中细粒二辉麻粒岩(图 3b)风化面 and 新鲜面呈灰黑色,中细粒变晶结构,块状构造;主要由斜方辉石、单斜辉石、角闪石、斜长石组成;(含辉石)斜长角闪岩主要由二辉麻粒岩、高压麻粒岩退变形成,镜下主要见角闪石和斜长石,含量 90% 以上(图 3c)。

灰白色中细粒石榴黑云斜长片麻岩:风化面呈灰白色,新鲜面灰色—灰白色;中细粒变晶结构或鳞片变晶结构,片麻状构造;主要由斜长石、石英、黑云母和石榴石组成(图 2j)。

综合含铁建造及其围岩的野外产状、变质矿物共生组合特征判断该套岩石组合遭受了麻粒岩相变质以及后期的退变质和韧—塑性变形作用改造。

3 含 BIF 岩石组合的 U-Pb 同位素年代学特征

本次工作共选取 3 件同位素测年样品进行了锆石 U-Pb 年龄测试:16LJG-1(石榴黑云斜长片麻岩)、16YG-2(条带状含辉石角闪磁铁石英岩)、

16YG-3(含辉石英云闪长质片麻岩),分别采自冷家沟村和周家山村南侧(图 1b)。另外采集了二辉麻粒岩、含辉石斜长角闪岩等变质火山岩样品,但未能分选出有效锆石。

样品的粉碎及锆石分选均在河北省廊坊市宇能岩石矿物分选有限责任公司完成。锆石制靶、阴极发光(CL)以及透、反射照相均在北京锆年领航有限公司完成。锆石 U-Pb 同位素测试在天津地质调查中心同位素实验室利用激光剥蚀多接收器电感耦合等离子体质谱仪(LA-MC-ICPMS)上进行。

条带状含辉石角闪磁铁石英岩(16YG-2)样品中大部分锆石呈短柱状或椭球状,大小多为 80~150 μm ,少数为长柱状,长轴 150~200 μm ;具变质核一边结构者多见(图 4),核部锆石呈灰黑色或灰白色,振荡环带多不清晰,边部为灰色或灰白色;变质锆石边部一般较窄,少数宽度达到激光剥蚀束斑直径(如测点 5 和测点 62,图 4)。另外可见一类具宽缓条带(纹)的板柱状锆石(如测点 23、34、61,图 4),根据其形态及 Th/U 推测为中—基性火山岩锆石,应该来自与磁铁石英岩共生的变质火山岩,此类锆石明显具有较大的年龄值(~2.5 Ga)。

对该样品 66 颗锆石进行了 U-Pb 同位素测定(张家辉等,2019)。Th/U 多介于 0.02~1.10;在图 5 中,谐和线及附近的锆石年龄可明显分为两组:年龄老的一组锆石表面年龄主要介于 2 300~2 500 Ma,其中年龄较大的 4 个数据点加权平均 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 2 489 $\pm$ 19 Ma;年龄小的一组数据相对集中,26 个数据点加权平均 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 1 807 $\pm$ 8 Ma

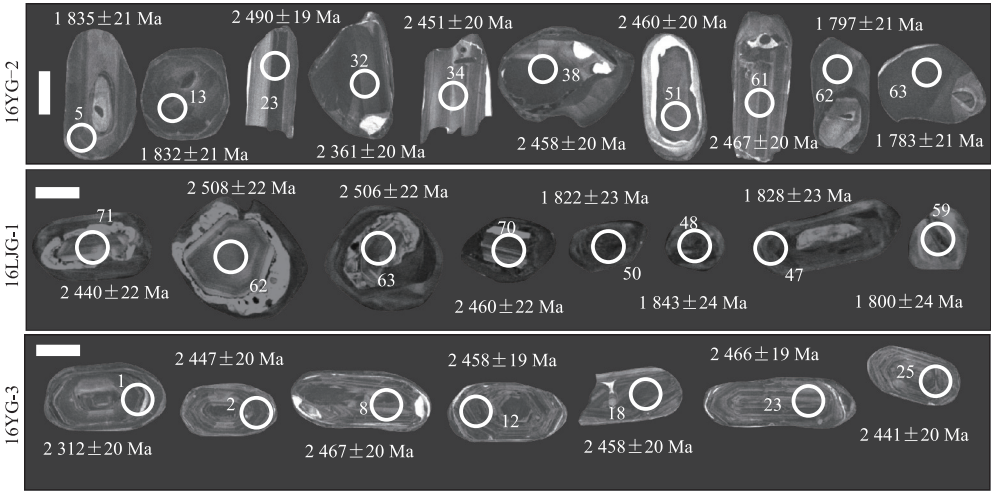


图 4 样品 16YG-2、16LJG-1、16YG-3 锆石 CL 照相及测试点位

Fig.4 CL images and laser-ablated spots of zircons from samples 16YG-2, 16LJG-1 and 16YG-3

图中比例尺为 50 μm

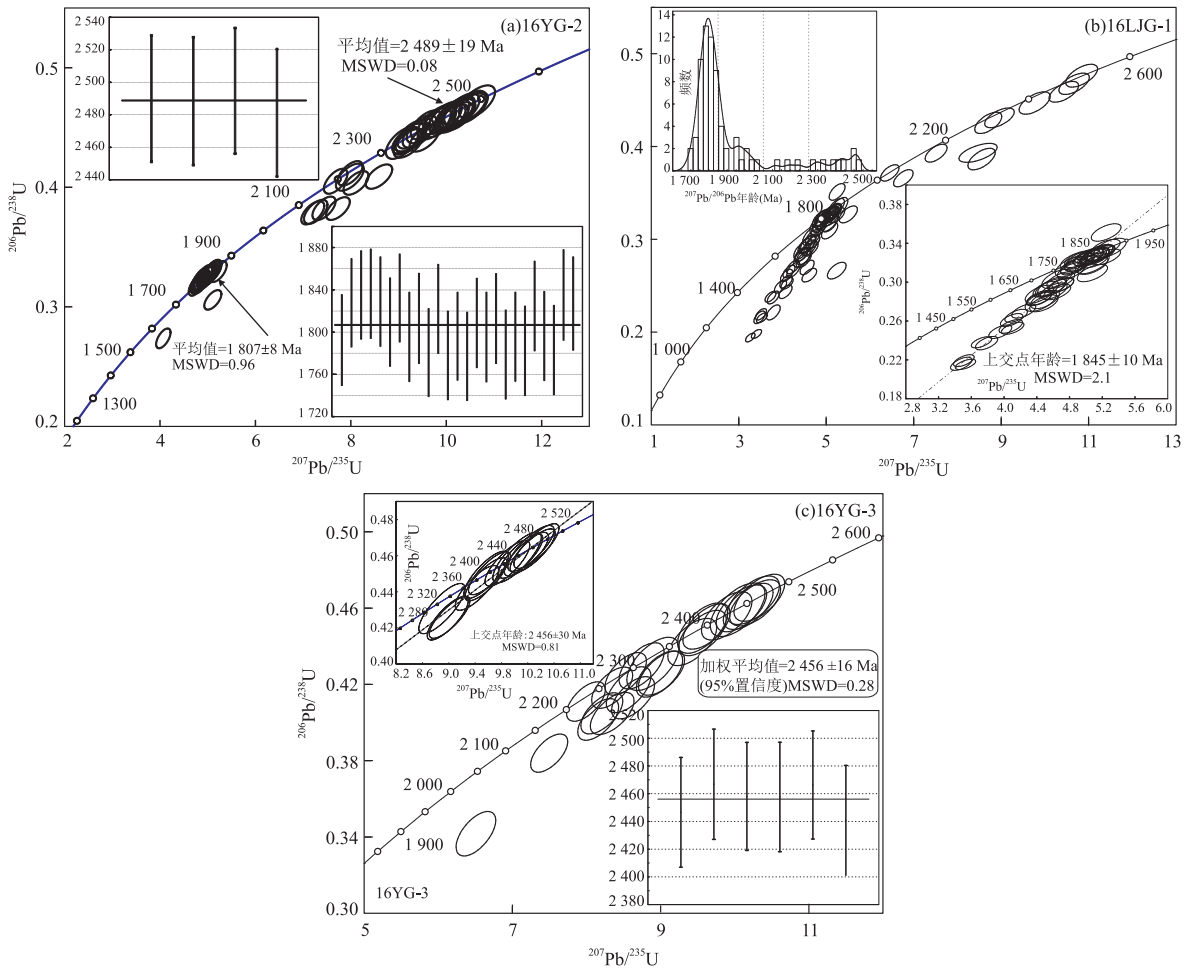


图 5 样品 16YG-2、16LJG-1、16YG-3 锆石 U-Pb 谐和图

Fig.5 Zircon U-Pb concordia diagrams for samples 16YG-2, 16LJG-1 and 16YG-3

(MSWD=0.96),可以解释为区域变质作用的年龄。

石榴黑云斜长片麻岩(16LJG-1)中的锆石多呈 椭球状,部分呈长柱状,直径(长轴)介于 100 ~ 300 μm ,形态可大概分为两类:一类较大的锆石具

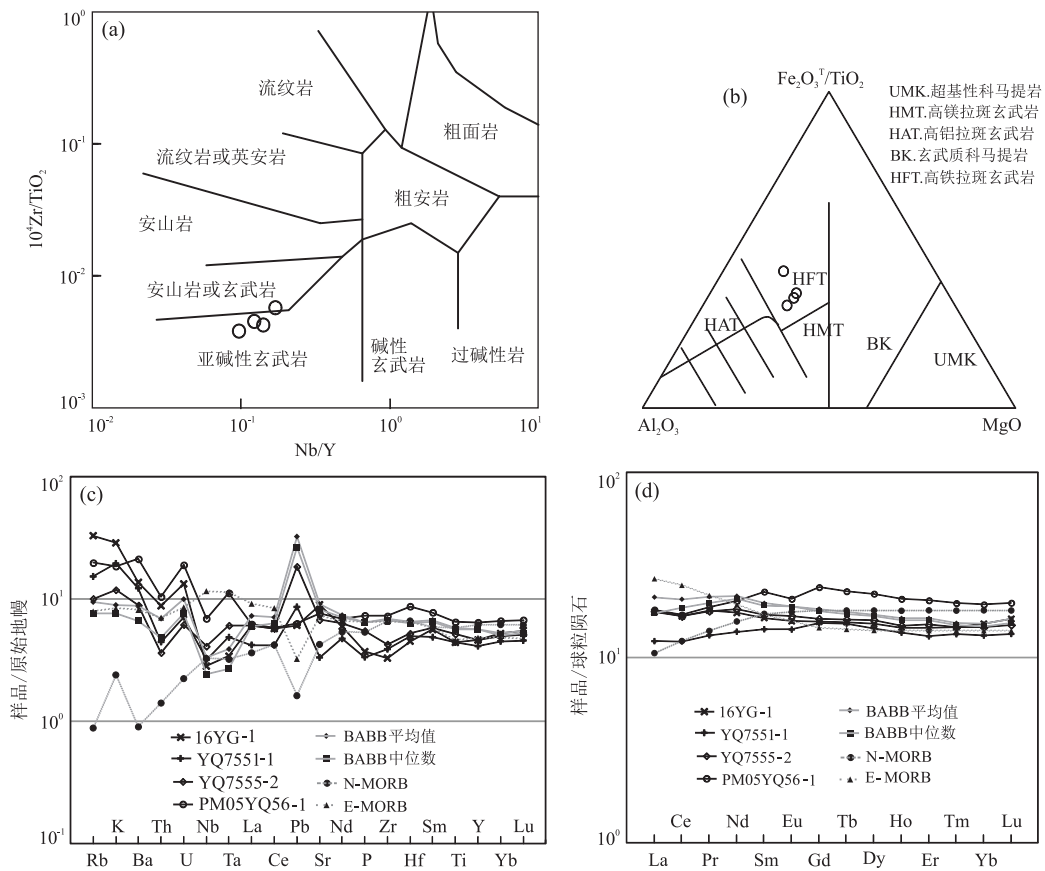


图 6 与铁矿共生的变质火山岩 Nb/Yb-Zr/TiO₂ 图解(a)、Fe₂O₃^T/TiO₂-Al₂O₃-MgO 图解(b)以及原始地幔标准化微量元素蛛网图(c)、球粒陨石标准化稀土元素配分图解(d)

Fig.6 Nb/Yb-Zr/TiO₂ diagram (a), Fe₂O₃^T/TiO₂-Al₂O₃-MgO diagram (b), primitive mantle-normalized spidergrams (c) and chondrite-normalized REE patterns (d) for the metamorphic volcanic rocks of BIF-bearing rock assemblage

图 a 据 Winchester and Floyd(1977);图 b 据 Jensen(1976);图 c 据 Sun and McDonough(1989);图 d 据 Sun and McDonough(1989)

有明显的变质核一边结构,核部大部分具明显的岩浆振荡环带,少部分核部环带不明显.边部普遍较窄,只有少量可满足测试条件(如测点 47,图 4);另一类相对较小,且多数核一边结构不明显(如测点 48、50、59,图 4).

本样品共测试同位素数据 72 组(详见附表 1),锆石 Th/U 多介于 0.01~0.65,多数小于 0.1,部分具有较明显的 Pb 丢失(图 5).部分位于谐和线上的数据点介于 2.0~2.5 Ga,呈串珠状分布,另外一部分 Pb 丢失明显,构成的不一致线上交点年龄为 1 845±10 Ma.锆石核部年龄多为~2.5 Ga(图 4),边部年龄多为~1.85 Ga,不具变质核一边结构的较小锆石年龄约 1.85 Ga.据此笔者推测谐和线上 1.85~2.45 Ga 年龄可能多为核一边混合年龄,变质锆石核部 2.45~2.50 Ga 的年龄可能为物源区岩石形成年龄,但也不排除为热变质事件的年龄.不一致线与谐和线的上交点年龄 1 845±10 Ma 代表区域变质事

件的年龄.

含辉石英云闪长质片麻岩(16YG-3)中锆石多呈长柱状或板柱状,长轴 200~300 μm;多数锆石未见核一边结构,具有清晰的振荡环带(图 4),具有岩浆锆石的特征.

25 颗锆石的测试结果(附表 2)表明,多数数据具有 Pb 丢失,Th/U 多为 0.3~0.5,排除 Pb 丢失数据后,在谐和线上的 6 颗锆石加权平均年龄为 2 456±16 Ma,不一致线的上交点年龄为 2 456±30 Ma,二者在误差范围内基本一致(图 5),该年龄可以代表原岩的形成年龄.

4 含 BIF 岩石组合的地球化学特征

本次所分析的样品分别来自含 BIF 岩石组合中的变质基性火山岩(4 件)和含辉石角闪磁铁石英岩(6 件).样品的元素地球化学组成见附表 3.

样品表面冲洗干净并晾干,机械破碎至 200 目后送实验室分析.岩石主微量元素分析在天津地质调查中心实验室完成,主量元素用 X 射线荧光光谱(XRF)法测试,FeO 采用氢氟酸、硫酸溶样、重铬酸钾滴定容量法,分析精度优于 2%,微量元素使用 ICP-MS 测试,分析精度优于 5%.

4.1 变质基性火山岩地球化学特征

主量元素特征:SiO₂ 含量较低,平均值为 49.8%;Fe₂O₃^T、Al₂O₃、MgO 较为富集,平均值分别为 12.1%、13.9% 和 6.9%;Na₂O(2.4%)含量显著高于 K₂O 含量(0.6%).在图 6a 中,样品主要落于亚碱性玄武岩区域,在图 6b 中,样品落于 HFT(高铁拉斑玄武岩)系列.

含辉石斜长角闪岩样品微量元素含量详见附表 3,原始地幔标准化蛛网图表现为 Rb、Ba、U、Pb 等不相容元素较富集,Nb、Ta 略亏损.样品球粒陨石标准化 REE 配分模式表现为轻重稀土分异不明显(稀土总量较低,ΣREE=34.24×10⁻⁶~50.72×10⁻⁶),轻重稀土内部亦未见明显分异,无明显 Eu 和 Ce 异常,整体表现为“平坦”模式,LREE/HREE 主要介于 1~3,(La/Yb)_N 主要介于 1~2(图 6).

4.2 含辉石角闪磁铁石英岩地球化学特征

天镇—怀安地区铁矿石的主要组成为 Fe₂O₃^T (31.3%~50.4%,平均 42.8%)和 SiO₂ (平均为 46.2%),二者呈负相关,并且随着铁矿石中条带构造的增强,Fe₂O₃^T 含量可达到 50%以上;Al₂O₃ 平均值为 1.3%,TiO₂ 平均值为 0.12%,Mg[#] 为 39.7~54.0,详细数据见附表 3.

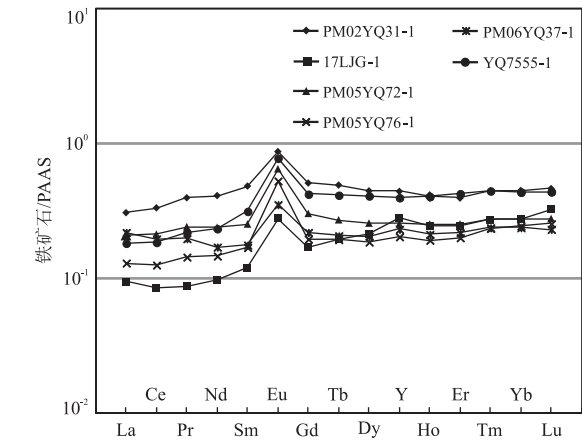


图 7 铁矿石稀土元素 PAAS 标准化配分图解
Fig.7 PAAS-normalized REE patterns for the ores of BIF-bearing rock assemblage
PAAS 标准化值据 McLennan(1989)

铁矿石 REE 总量平均值为 38.8×10⁻⁶.PAAS (Post-Archean Australian Shale; McLennan, 1989)标准化的稀土配分模式显示出较为明显的轻重稀土分异,轻稀土亏损,重稀土富集,LREE/HREE 介于 4~8,(La/Yb)_N 均小于 1;且具有明显的 Eu 正异常(图 7),δEu 平均值为 2.13;Y/Ho 重量比介于 27~31,平均为 29.

5 讨论

2.8~2.7 Ga 和 2.6~2.5 Ga 全球主要克拉通普遍经历了大规模的陆壳生长过程,如今 80%以上的陆壳形成于这一阶段(Zhai and Santosh, 2011).在北美、西澳和印度的克拉通基底中,绿岩地体的形成峰期均在~2.7 Ga,中国华北古老克拉通也出现该期地壳生长事件(Zhai and Santosh, 2011).我国华北地区的 BIF 形成峰期集中在 2.56~2.52 Ga,与该时段广泛的地壳增生事件和华北克拉通化的完成密不可分.该地壳增生事件在天镇—怀安地区亦有响应;Liu *et al.*(2012)等在研究怀安片麻岩地体时发现怀安片麻岩是~2.5 Ga 增长的新生地壳;Zhang *et al.*(2011)在怀安杂岩中获得 2.44~2.49 Ga SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄,并认为怀安地区该时段岩浆活动与华北克拉通聚合后的新生地壳伸展有关.而且,全球地壳增生事件的峰期是 2.8~2.7 Ga,但华北克拉通在~2.5 Ga 发育了最强烈的构造—岩浆热事件,尽管该构造—热事件的构造机制仍存在岛弧岩浆作用(Kröner *et al.*, 2005)、地幔柱或板底垫托(耿元生和陆松年,2014)等争议性解释,但是~2.5 Ga 的构造热事件很可能为该时段的 BIF 提供了物质来源和适宜的沉积环境,因此在一定程度上可以认为 BIF 沉积是地幔活动和地壳快速增生的结果.

5.1 天镇—怀安地区含铁建造的岩石组合

张连昌等(2012)总结了华北克拉通 BIF 岩石组合的 5 种类型:(1)斜长角闪岩(夹角闪斜长片麻岩)—磁铁石英岩组合;(2)斜长角闪岩—黑云变粒岩—云母石英片岩—磁铁石英岩组合;(3)黑云变粒岩(夹黑云石英片岩)—磁铁石英岩组合;(4)黑云变粒岩—绢云绿泥片岩—黑云石英片岩—磁铁石英岩组合;(5)斜长角闪岩(片麻岩)—大理岩—磁铁石英岩组合.Zhang *et al.*(2014)认为华北克拉通 BIF 岩石组合的原岩组合可能为以下 3 种:(1)铁镁质火山岩(拉斑质玄武岩)和泥砂质岩;(2)沉积岩夹火山

岩;(3)含凝灰质沉积岩.原岩组合在形成 BIF 过程中均经历了不同程度的变质作用,总体而言古一中太古代的 BIF 基本经历了麻粒岩相变质,新太古代的 BIF 经历了角闪岩相变质,古元古代之后的 BIF 最多经历了绿片岩相变质.

天镇—怀安地区含 BIF 岩石组合为一套高级变质表壳岩组合:含辉石角闪磁铁矿英岩—变质基性火山岩(二辉麻粒岩、含辉石斜长角闪岩、高压麻粒岩)—石榴黑云斜长片麻岩以及少量石榴石英岩.含辉石角闪磁铁矿英岩为含矿岩石,其规模较小,呈多层分布,内部辉石、角闪石多沿磁铁矿条带呈填隙物状分布,表明一部分基性火山岩物质很可能直接参与形成了条带状铁建造;变质基性火山岩与含辉石/角闪磁铁矿英岩呈夹层状产出或呈透镜状与含矿岩石伴生产出,笔者推测其原始形态为一套火山—沉积建造,经强烈剪切变形后成为残留的刚性透镜体(条带).石榴黑云斜长片麻岩与含矿岩石多呈互层状产出则更好地反映了原始的“沉积层序”.因此,含辉石角闪磁铁矿英岩与变质基性火山岩、石榴黑云斜长片麻岩、石榴石英岩之间的伴生组合特征表明该套岩石组合为同时代形成的一套火山—沉积建造,后期经历了强烈的变质(退变质)和构造变形改造.该套组合可能与张连昌等(2012)总结的斜长角闪岩(夹角闪斜长片麻岩)—磁铁矿英岩组合相对应,石榴黑云斜长片麻岩和石榴石英岩可能来自于泥砂质原岩,即含 BIF 岩石组合的原岩可能与 Zhang *et al.* (2014) 认为的铁镁质火山岩(拉斑质玄武岩)和泥砂质岩石组合相对应.

综上所述,从 BIF 的岩石组合来看,天镇—怀安地区 BIF 铁矿以磁铁矿为主,具有平均品位低、小规模多层分布、与火山活动关系密切等特点,按照国外学者分类(Gross, 1980; Klein, 2005)其铁矿类型应该属于 Algoma 型,按照国内学者分类(Li *et al.*, 2014)则属于~2.5 Ga 形成的鞍山式铁矿,局部较富的 BIF(50%以上)铁矿应属于受后期热液叠加改造的高品位铁矿(弓长岭式).

5.2 天镇—怀安地区含 BIF 岩石组合的形成时代

根据前人统计(刘利等, 2012; 张连昌等, 2012; Zhang *et al.*, 2012; 万渝生等, 2012, 2018; 代堰镔等, 2016), 华北克拉通 Algoma 型 BIF 的产出峰期为 2.56~2.52 Ga, 平均为 2.54 Ga. 天镇—怀安地区野外调查结果表明, 含 BIF 岩石组合主要作为包体(透镜状、条带状)分布于 TTG 片麻岩围岩(~2.46 Ga)之中, 根据其产出形态笔者认为其形成

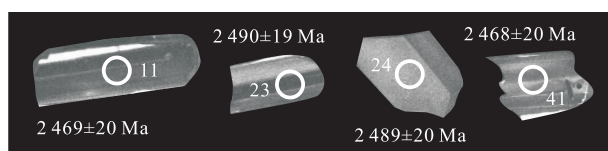


图 8 来自 16YG-2 样品中部分火山岩锆石年龄测点
Fig.8 Cathodoluminescence image and laser-ablated spots of zircons from volcanic rocks from sample 16YG-2

时代应老于 TTG 片麻岩.

TTG 片麻岩围岩(16YG-3)岩浆锆石年龄为 2456 ± 16 Ma; 含辉石角闪磁铁矿英岩(16YG-2)中的锆石具有中—基性火山岩锆石特征(图 8), 并且在谐和线上的锆石(Th/U 介于 0.5~1.0)加权平均年龄为 2489 ± 19 Ma; 其余具有变质核—边结构的年龄在 2300~2500 Ma 之间(可能为变质核—边混合年龄), 变质年龄为 1807 ± 8 Ma; 石榴黑云斜长片麻岩(16LJG-1)物源区岩石形成年龄可能为 2450~2500 Ma, 变质年龄为 1850 ± 10 Ma.

由于 Algoma 型 BIF 的成因与火山活动密切相关(Gross, 1980), 而且研究区的变质火山岩与磁铁矿英岩共生并直接参与了 BIF 条带构造的形成, 因此可以认为含辉石角闪磁铁矿英岩(16YG-2)中的中—基性火山岩锆石年龄可代表含 BIF 岩石组合的形成时代, 即天镇—怀安地区含 BIF 岩石组合形成时代为 2489 ± 19 Ma, 老于 TTG 围岩(含辉石英云闪长质片麻岩) 2456 ± 16 Ma 的形成年龄. 研究区 1.80~1.85 Ga 变质年龄源于古元古代 1.95~1.85 Ga 变质事件(Guo *et al.*, 2005; Zhang *et al.*, 2016)的叠加改造, 并且蔡佳等(2017)推测其于 1.95~1.90 Ga 经历了高压麻粒岩相变质事件, 于 1.90~1.85 Ga 经历了退变质事件. 因此, 笔者推测天镇—怀安地区 BIF 在新太古代末形成后经历了古元古代的深俯冲—地壳加厚—高压变质—折返抬升—退变质等一系列过程.

岩石学和锆石年代学证据表明~2.5 Ga 的火山活动为 BIF 铁矿的形成提供了物质来源, 但对于含 BIF 岩石组合中石榴黑云斜长片麻岩 2.45~2.50 Ga 年龄信息, 人们却尚未找到明确依据. 尽管 Zhang *et al.* (2016) 在怀安地区奥长花岗岩中获得了~2.53 Ga 锆石 SHRIMP U-Pb 年龄, 笔者也在天镇—怀安地区获得了若干~2.49 Ga 二长花岗岩原岩锆石 U-Pb 年龄(未发表资料), 但也有研究者在该地区报道了~2.50 Ga 变质事件(郭敬辉等, 1993); 因此, 含 BIF 岩石组合中石榴黑云斜长片麻

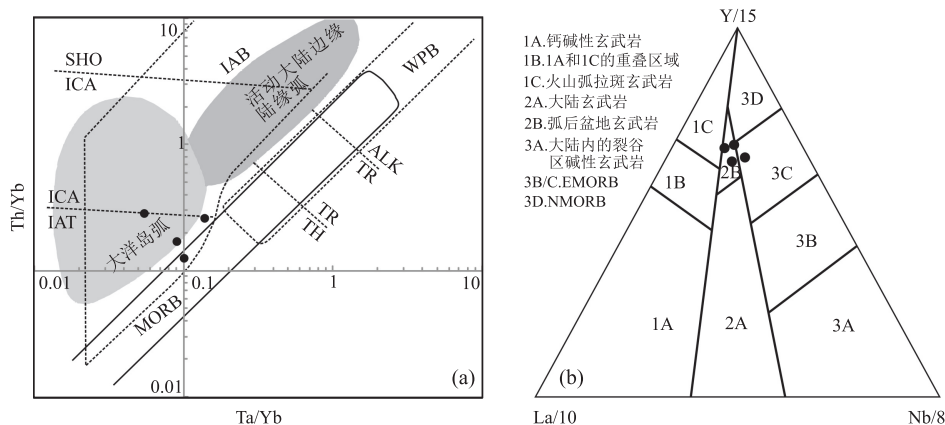


图 9 与铁矿共生的变质火山岩样品 Th/Yb-Ta/Yb 图解(a)和 Y/15-La/10-Nb/8 图解(b)

Fig.9 Th/Yb-Ta/Yb diagram (a) and Y/15-La/10-Nb/8 diagram (b) for the metamorphic volcanic rocks of BIF-bearing rock assemblage

图 a 据 Pearce(1982);图 b 据 Cabanis and Lecolle(1989)

岩中具有核一边结构的锆石核部年龄(2.45~2.50 Ga)并不一定为源区岩石的形成年龄,也有可能代表更古老地壳的变质年龄。

由以上可知,天镇—怀安地区 TTG 与其南部相邻的五台地区 TTG 形成时代(Wilde *et al.*, 2005)一致,天镇—怀安地区 Algoma 型 BIF 铁矿的形成时代为 2489 ± 19 Ma, 与其南部五台地区绿岩带中产出的 Algoma 型 BIF (~2.5 Ga; Wilde *et al.*, 2005; Han *et al.*, 2017)及其东部相邻的北京密云麻粒岩相变质带中产出的 Algoma 型 BIF (2.45~2.5 Ga; 史志强和石玉若, 2016)形成时代一致,稍晚于其西部固阳绿岩带 Algoma 型 BIF (~2.56 Ga; 刘利等, 2012)。

5.3 天镇—怀安地区 BIF 的构造背景

2.7~2.0 Ga 为全球 BIF 发育的峰期阶段,产出的 Algoma 型铁矿多产于太古宙岛弧、弧后盆地或克拉通裂谷带(Gross, 1980)。

天镇—怀安地区 Algoma 型 BIF 铁矿形成于 2489 ± 19 Ma, 与 TTG 片麻岩围岩(2456 ± 16 Ma)基本形成于同一时代。Smithies(2000)认为 TTG 熔体的形成是由于太古宙洋壳可以产生平坦俯冲,导致基性下地壳熔融所致。虽然新太古代是否存在板块俯冲机制尚存不同认识,但 Martin and Moyen(2002)、王惠初等(2018)通过对太古宙 TTG 岩系的研究认为 $Mg^\#$ 逐渐增加的趋势与新太古代末期板块俯冲和地幔楔的形成有关。天镇—怀安地区南部五台杂岩中存在岛弧、洋中脊玄武岩以及埃达克质岩石也表明该地区新太古代末有过俯冲作用(Wang *et al.*, 2004),由于研究区与五台地区具有同时代的 TTG 杂岩(Kröner *et al.*, 2005; Wilde *et*

al., 2005; Zhao *et al.*, 2005),因而 Liu *et al.* (2012)将天镇—怀安地区 2.55~2.45 Ga 的 TTG 岩石解释为俯冲板片熔体与地幔楔反应的结果。以上研究表明研究区 ~2.5 Ga TTG 形成于板块俯冲背景。

伴随着 ~2.5 Ga 的板块俯冲作用,在消减带之上可以形成岛弧玄武岩(IAB)或弧后盆地玄武岩(BABB),弧后盆地玄武岩是在俯冲作用下海沟向大洋方向迁移的背景下形成,在早期俯冲作用为主时往往具有岛弧玄武岩特征(Hawkins *et al.*, 1990),在后期阶段俯冲作用减弱,弧后盆地玄武岩多具有 MORB 的特点(Klein and Langmuir, 1987)。

在图 9a 中,本文样品主要落于 IAT(岛弧拉斑玄武岩)以及 IAT 与 MORB 交界区域,在图 9b 中,样品点主要落于 BABB 区域。

根据前人总结的 PetDB 数据库中 12 332 个 BABB 的大数据计算结果(杨婧等, 2016),本文将图 6c 和 6d 中 BABB 的平均数和中位数与含 BIF 岩石组合中的变质火山岩样品数据和 N-MORB、E-MORB 平均值进行了对比;本文样品与 BABB 均存在 Rb、Ba、U 等元素的富集和 Nb、Ta 等元素的亏损,二者微量元素特征基本一致,稀土配分图解中均呈平坦模式;样品的微量元素与 N-MORB 差异较大,与 E-MORB 有一定相似性,但样品中存在 Pb 富集,可以与 N-MORB 和 E-MORB 普遍存在 Pb 亏损相区别。这是因为俯冲沉积物或陆壳混染对 Pb 的影响十分明显,初始弧后盆地玄武岩受俯冲影响常表现为明显的 Pb 富集,后期成熟弧后盆地虽受俯冲影响较小,但总体上玄武岩 Pb 平均值多倾向于富集,至少也不会表现为 Pb 亏损(Klein and

Langmuir, 1987; Hawkins *et al.*, 1990). 因此, 天镇—怀安地区含 BIF 岩石组合中的变质火山岩应该是俯冲带后拉张环境(弧后盆地)中软流圈的上涌所形成。

含 BIF 岩石组合中铁矿石的稀土配分模式中轻稀土略亏损、重稀土略富集且存在明显的 Eu 正异常(图 7)。海底热流(泉)通常具有明显的正 Eu 异常(Campbell *et al.*, 1988; Rao and Naqvi, 1995), 正 Eu 异常的形成通常与洋中脊或弧后扩展中心高温玄武岩的蚀变有关(Campbell *et al.*, 1988)。而且热水成因的沉积物通常表现为 REE 总量较低, HREE 相对富集, 非热水沉积物则相反。铁矿石 Y/Ho 重量比为 27~31, 平均为 29, 海底热液喷口 Y/Ho 重量比为 28(Bau, 1996), 现代海水 Y/Ho 重量比为 44~65(Bau and Dulski, 1996), 因此很可能是海底热液混合了表层海水。由此可知, 研究区 BIF 铁矿的形成与海底热液活动的关系密切, 这与地质学家的普遍观点: BIF 中 Fe 来源于海水和海底高温热液混合溶液(Klein, 2005; Bekker *et al.*, 2010)相一致。

6 结论

(1) 天镇—怀安地区怀安杂岩中的 BIF 铁矿属于 Algoma 型, 含 BIF 岩石组合主体岩石为条带状(含辉石/角闪)磁铁矿石岩、变质基性火山岩(二辉麻粒岩或含辉石斜长角闪岩、高压麻粒岩)、石榴黑云斜长片麻岩和石榴石英岩条带或团块, 为一套同时代的表壳岩组合。

(2) 天镇—怀安地区 BIF 形成时代为 2489 ± 19 Ma, 与华北克拉通 Algoma 型 BIF 发育峰期基本一致, 后期经历了 $1800 \sim 1850$ Ma 变质—退变质作用改造。

(3) 天镇—怀安地区含 BIF 岩石组合中火山岩直接参与了条带建造, 其地球化学特征显示: 存在 Rb、Ba、U、Pb 等元素的富集和 Nb、Ta 等元素的亏损, 形成背景为弧后盆地; 铁矿石 PAAS 标准化稀土配分图解具有明显正 Eu 异常, BIF 成因与海底热液密切相关。

致谢: 野外地质调查工作中得到了中国地质大学(北京)邓晋福教授、中国科学院地质与地球物理研究所郭敬辉研究员、吉林大学金巍教授和李伟民副教授的指导; 同时, 中国地质调查局天津地质调查中心陆松年研究员和赵凤清研究员对我们的研究工作给予了长期的指导和帮助; 匿名审稿专家也提供

了许多有益建议。本文锆石 U-Pb 同位素测年工作得到了天津地质调查中心耿建珍、张健、张永清、崔玉荣等人的支持和帮助, 在此一并致以诚挚的感谢! 附补充信息表见: <http://www.earth-science.net/WebPage/view.aspx?id=20190117061127.pdf>

References

- Barley, M. E., Pickard, A. L., Sylvester, P. J., 1997. Emplacement of a Large Igneous Province as a Possible Cause of Banded Iron Formation 2.45 Billion Years Ago. *Nature*, 385(6611): 55–58. <https://doi.org/10.1038/385055a0>
- Bau, M., 1996. Controls on the Fractionation of Isovalent Trace Elements in Magmatic and Aqueous Systems: Evidence from Y/Ho, Zr/Hf, and Lanthanide Tetrad Effect. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 123(3): 323–333. <https://doi.org/10.1007/s004100050159>
- Bau, M., Dulski, P., 1996. Distribution of Yttrium and Rare-Earth Elements in the Penge and Kuruman Iron-Formations, Transvaal Supergroup, South Africa. *Precambrian Research*, 79(1–2): 37–55. [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(95\)00087-9](https://doi.org/10.1016/0301-9268(95)00087-9)
- Bekker, A., Krapez, B., Slack, J. F., et al., 2010. Iron Formation: The Sedimentary Product of a Complex Interplay among Mantle, Tectonic, Oceanic, and Biospheric Processes—A Reply. *Economic Geology*, 107(2): 379–380. <https://doi.org/10.2113/econgeo.107.2.379>
- Cabanis, B., Lecomte, M., 1989. Le Diagramme La/10-Y/15-Nb/8: Un outil Pour la Discrimination des Series Volcaniques et la Mise en Evidence des Processus de Melange et/ou de Contamination Crustale. *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences, Serie 2, Mecanique, Physique, Chimie, Sciences de l'Univers, Sciences de la Terre*, 309: 2023–2029.
- Cai, J., Liu, P. H., Ji, L., et al., 2017. Zircon Geochronology of the Paleoproterozoic High-Grade Supracrustal Rocks from the Huai'an Terrane, Northwestern Hebei. *Acta Petrologica Sinica*, 33(9): 2811–2826 (in Chinese with English abstract).
- Campbell, A. C., Palmer, M. R., Klinkhammer, G. P., et al., 1988. Chemistry of Hot Springs on the Mid-Atlantic Ridge. *Nature*, 335(6190): 514–519.
- Cannon, W. F., Schulz, K. J., Horton, J. W., et al., 2010. The Sudbury Impact Layer in the Paleoproterozoic Iron Ranges of Northern Michigan, USA. *Geological Society of America Bulletin*, 122(1–2): 50–75. <https://doi.org/10.1130/b26517.1>

- Dai, Y. P., Zhu, Y. D., Zhang, L. C., et al., 2016. An Overview of Studies on Precambrian Banded Iron Formations (BIFs) in China and Abroad. *Geological Review*, 62 (3): 735—757 (in Chinese with English abstract).
- Geng, Y. S., Lu, S. N., 2014. Advances in the Study of Precambrian Chronostratigraphy in China: A Review. *Earth Science Frontiers*, 21 (2): 102—118 (in Chinese with English abstract).
- Gross, G. A., 1980. A Classification of Iron-Formations Based on Depositional Environments. *Canadian Mineralogist*, 18 (1): 215—222.
- Guo, J. H., Sun, M., Chen, F. K., et al., 2005. Sm-Nd and SHRIMP U-Pb Zircon Geochronology of High-Pressure Granulites in the Sanggan Area, North China Craton: Timing of Paleoproterozoic Continental Collision. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24 (5): 629—642. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2004.01.017>
- Guo, J. H., Zhai, M. G., Zhang, Y. G., et al., 1993. Early Precambrian Manjinggou Highpressure Granulite Melange Belt on the South Edge of the Huaian Complex, North China Craton: Geological Features, Petrology and Isotopic Geochronology. *Acta Petrologica Sinica*, 9 (4): 329—341 (in Chinese with English abstract).
- Han, C. M., Xiao, W. J., Su, B. X., et al., 2017. Neoarchean Algoma-Type Banded Iron Formation from the Northern Shanxi, the Trans-North China Orogen: SIMS U-Pb Age, Origin and Tectonic Setting. *Precambrian Research*, 303: 548—572. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.06.023>
- Hawkins, J. W., Lonsdale, P. F., Macdougall, J. D., et al., 1990. Petrology of the Axial Ridge of the Mariana Trough Backarc Spreading Center. *Earth and Planetary Science Letters*, 100 (1—3): 226—250. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(90\)90187-3](https://doi.org/10.1016/0012-821x(90)90187-3)
- Huston, D. L., Logan, G. A., 2004. Barite, BIFs and Bugs: Evidence for the Evolution of the Earth's Early Hydrosphere. *Earth and Planetary Science Letters*, 220 (1—2): 41—55. [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(04\)00034-2](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(04)00034-2)
- Jensen, L. S., 1976. A New Plot for Classifying Subalkalic Volcanic Rocks. *Ontario Division of Mines Miscellaneous Paper*, 1—66.
- 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. <https://doi.org/10.2138/am.2005.1871>
- Klein, E. M., Langmuir, C. H., 1987. Global Correlations of Ocean Ridge Basalt Chemistry with Axial Depth and Crustal Thickness. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 92 (B8): 8089—8115.
- Kröner, A., Wilde, S. A., Li, J. H., et al., 2005. Age and Evolution of a Late Archean to Paleoproterozoic Upper to Lower Crustal Section in the Wutaishan/Hengshan/Fuping Terrain of Northern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24 (5): 577—595. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2004.01.001>
- Li, H. M., Zhang, Z. J., Li, L. X., et al., 2014. Types and General Characteristics of the BIF-Related Iron Deposits in China. *Ore Geology Reviews*, 57: 264—287. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.09.014>
- Liu, F., Guo, J. H., Peng, P., et al., 2012. Zircon U-Pb Ages and Geochemistry of the Huai'an TTG Gneisses Terrane: Petrogenesis and Implications for ~2.5 Ga Crustal Growth in the North China Craton. *Precambrian Research*, 212—213: 225—244. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2012.06.006>
- Liu, L., Zhang, L. C., Dai, Y. P., et al., 2012. Formation Age, Geochemical Signatures and Geological Significance of the Sanheming BIF-Type Iron Deposit in the Guyang Greenstone Belt, Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 28 (11): 3623—3637 (in Chinese with English abstract).
- Lu, L. Z., Xu, X. C., Liu, F. L., et al., 1996. Early Precambrian Khondalite Series in the North China. Changchun Press, Changchun, 16—118 (in Chinese).
- Martin, H., Moyen, J. F., 2002. Secular Changes in Tonalite-Trondhjemite-Granodiorite Composition as Markers of the Progressive Cooling of Earth. *Geology*, 30 (4): 319—322. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2002\)030<0319:scittg>2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2002)030<0319:scittg>2.0.co;2)
- McLennan, S. M., 1989. Rare Earth Elements in Sedimentary Rocks: Influence of Provenance and Sedimentary Processes. *Reviews in Mineralogy*, 21 (8): 169—200.
- Pearce, J. A., 1982. Trace Element Characteristics of Lavas from Destructive Plate Boundaries. In: Thorpe, R. S., ed., *Andesites: Orogenic Andesites and Related Rocks*. Wiley, Chichester, 528—548.
- Rao, T. G., Naqvi, S. M., 1995. Geochemistry, Depositional Environment and Tectonic Setting of the BIF's of the Late Archaean Chitradurga Schist Belt, India. *Chemical Geology*, 121 (1—4): 217—243. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)00116-p](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00116-p)
- Shi, Z. Q., Shi, Y. R., 2016. SHRIMP U-Pb Ages of Zircons from Banded Magnetite Quartzite of Shachang Formation in Miyun Area of Beijing and Their Significance. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 38 (4):

- 547—557 (in Chinese with English abstract).
- Smithies, R. H., 2000. The Archean Tonalite-Trondhjemitic-Granodiorite (TTG) Series is not an Analogue of Cenozoic Adakite. *Earth and Planetary Science Letters*, 182 (1): 115—125. [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(00\)00236-3](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(00)00236-3)
- Su, Y. P., Zheng, J. P., Griffin, W. L., et al., 2014. Zircon U-Pb Ages and Hf Isotope of Gneissic Rocks from the Huai'an Complex: Implications for Crustal Accretion and Tectonic Evolution in the Northern Margin of the North China Craton. *Precambrian Research*, 255: 335—354. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2014.10.007>
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society London Special Publications*, 42(1): 313—345.
- Wan, Y. S., Dong, C. Y., Xie, H. Q., et al., 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).
- Wan, Y. S., Dong, C. Y., Xie, H. Q., et al., 2018. Formation Age of BIF-Bearing Anshan Group Supracrustal Rocks in Anshan-Benxi Area: New Evidence from SHRIMP U-Pb Zircon Dating. *Earth Science*, 43 (1): 57—81 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.004>
- Wan, Y. S., Liu, D. Y., 1993. Ages of Zircons from Mid-Archean Gneissic Granite and Fuchsite Quartzite in the Gongchangling Area, Liaoning. *Geological Review*, 39 (2): 124—129 (in Chinese with English abstract).
- Wan, Y. S., Song, B., Liu, D. Y., et al., 2006. SHRIMP U-Pb Zircon Geochronology of Palaeoproterozoic Metasedimentary Rocks in the North China Craton: Evidence for a Major Late Palaeoproterozoic Tectonothermal Event. *Precambrian Research*, 149(3—4): 249—271. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2006.06.006>
- Wang, H. C., Kang, J. L., Xiao, Z. B., et al., 2018. Neoarchean Subduction in North China Craton: New Evidence from the Metamorphic High-Mg Igneous Assemblage in Yunzhognshan Area, Shanxi Province. *Acta Petrologica Sinica*, 34(4): 1099—1118 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z. H., Wilde, S. A., Wang, K. Y., et al., 2004. A MORB-Arc Basalt-Adakite Association in the 2.5 Ga Wutai Greenstone Belt: Late Archean Magmatism and Crustal Growth in the North China Craton. *Precambrian Research*, 131(3—4): 323—343. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2003.12.014>
- Wilde, S. A., Cawood, P. A., Wang, K. Y., et al., 2005. Granitoid Evolution in the Late Archean Wutai Complex, North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(5): 597—613. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2003.11.006>
- Winchester, J. A., Floyd, P. A., 1977. Geochemical Discrimination of Different Magma Series and Their Differentiation Products Using Immobile Elements. *Chemical Geology*, 20(4): 325—343.
- Yang, J., Wang, J. R., Zhang, Q., et al., 2016. Back-Arc Basin Basalt (BABB) Data Mining: Comparison with MORB and IAB. *Advances in Earth Science*, 31(1): 66—77 (in Chinese with English abstract).
- Zhai, M. G., Santosh, M., 2011. The Early Precambrian Odyssey of the North China Craton: A Synoptic Overview. *Gondwana Research*, 20(1): 6—25. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2011.02.005>
- Zhai, M. G., Windley, B. F., 1990. The Archean and Early Proterozoic Banded Iron Formations of North China: Their Characteristics, Geotectonic Relations, Chemistry and Implications for Crustal Growth. *Precambrian Research*, 48 (3): 267—286. [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(90\)90012-f](https://doi.org/10.1016/0301-9268(90)90012-f)
- Zhang, H. F., Wang, H. Z., Santosh, M., et al., 2016. Zircon U-Pb Ages of Paleoproterozoic Mafic Granulites from the Huai'an Terrane, North China Craton (NCC): Implications for Timing of Cratonization and Crustal Evolution History. *Precambrian Research*, 272: 244—263. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2015.11.004>
- Zhang, H. F., Zhai, M. G., Santosh, M., et al., 2011. Geochronology and Petrogenesis of Neoarchean Potassic Meta-Granites from Huai'an Complex: Implications for the Evolution of the North China Craton. *Gondwana Research*, 20(1): 82—105. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2011.01.009>
- Zhang, J. H., Tian, H., Wang, H. C., et al., 2019. Re-Definition of the Two-Stage Early-Precambrian Meta-Supracrustal Rocks in the Huai'an Complex, North China Craton: Evidences from Petrology and Zircon U-Pb Geochronology. *Earth Science*, 44(1): 1—22 (in Chinese with English abstract)
- Zhang, L. C., Zhai, M. G., Wan, Y. S., et al., 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, L. C., Zhai, M. G., Zhang, X. J., et al., 2012. Formation Age and Tectonic Setting of the Shirengou Neoarchean Banded Iron Deposit in Eastern Hebei Province: Constraints from Geochemistry and SIMS Zircon U-Pb Dat-

- ing. *Precambrian Research*, 222 — 223: 325 — 338.
<https://doi.org/10.1016/j.precamres.2011.09.007>
- Zhang, Z. C., Hou, T., Santosh, M., et al., 2014. Spatio-Temporal Distribution and Tectonic Settings of the Major Iron Deposits in China: An Overview. *Ore Geology Reviews*, 57: 247 — 263. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.08.021>
- Zhao, G. C., Sun, M., Wilde, S. A., et al., 2005. Late Archean to Paleoproterozoic Evolution of the North China Craton: Key Issues Revisited. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24 (5): 519 — 522. <http://dx.doi.org/10.1016/j.precamres.2004.10.002>
- Zhao, G. C., Wilde, S. A., Sun, M., et al., 2008. SHRIMP U-Pb Zircon Geochronology of the Huai'an Complex: Constraints on Late Archean to Paleoproterozoic Magmatic and Metamorphic Events in the Trans-North China Orogen. *American Journal of Science*, 308 (3): 270 — 303. <https://doi.org/10.2475/03.2008.04>
- ### 附中文参考文献
- 蔡佳, 刘平华, 冀磊, 等, 2017. 冀西北怀安地体高级变质表壳岩的锆石年代学研究. *岩石学报*, 33 (9): 2811 — 2826.
- 代堰镔, 朱玉娣, 张连昌, 等, 2016. 国内外前寒武纪条带状铁建造研究现状. *地质论评*, 62 (3): 735 — 757.
- 耿元生, 陆松年, 2014. 中国前寒武纪地层年代学研究的进展和相关问题. *地学前缘*, 21 (2): 102 — 118.
- 郭敬辉, 翟明国, 张毅刚, 等, 1993. 怀安蔓菁沟早前寒武纪高压麻粒岩混杂岩带地质特征、岩石学 and 同位素年代学. *岩石学报*, 9 (4): 329 — 341.
- 刘利, 张连昌, 代堰镔, 等, 2012. 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. *岩石学报*, 28 (11): 3623 — 3637.
- 卢良兆, 徐学纯, 刘福来, 1996. 中国北方早前寒武纪孔兹岩系. 长春: 长春出版社, 16 — 118.
- 史志强, 石玉若, 2016. 北京密云地区沙厂组条带状磁铁石英岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. *地球科学与环境学报*, 38 (4): 547 — 557.
- 万渝生, 董春艳, 颀颀强, 等, 2012. 华北克拉通早前寒武纪条带状铁建造形成时代——SHRIMP 锆石 U-Pb 定年. *地质学报*, 86 (9): 1447 — 1478.
- 万渝生, 董春艳, 颀颀强, 等, 2018. 鞍山一本溪地区鞍山群含 BIF 表壳岩形成时代新证据: 锆石 SHRIMP U-Pb 定年. *地球科学*, 43 (1): 57 — 81.
- 万渝生, 刘敦一, 1993. 辽宁弓长岭中太古代片麻状花岗岩和铬云母石英岩的锆石年龄. *地质论评*, 39 (2): 124 — 129.
- 王惠初, 康健丽, 肖志斌, 等, 2018. 华北克拉通新太古代板块俯冲作用: 来自山西云中山地区变质高镁火成岩组合的证据. *岩石学报*, 34 (4): 1099 — 1118.
- 杨婧, 王金荣, 张旗, 等, 2016. 弧后盆地玄武岩 (BABB) 数据挖掘: 与 MORB 及 IAB 的对比. *地球科学进展*, 31 (1): 66 — 77.
- 张家辉, 田辉, 王惠初, 等, 2019. 华北克拉通怀安杂岩中早前寒武纪两期表壳岩的重新厘定: 岩石学及锆石 U-Pb 年代学证据. *地球科学*, 44 (1): 1 — 22.
- 张连昌, 翟明国, 万渝生, 等, 2012. 华北克拉通前寒武纪 BIF 铁矿研究: 进展与问题. *岩石学报*, 28 (11): 3431 — 3445.