华北陆块2.56～2.52 Ga增氧事件对成矿和生命演化的影响

沈保丰[1,2)]，毕君辉[1,2)]，张阔[1,2)]

1) 中国地质调查局天津地质调查中心，天津，300170；2) 中国地质调查局华北地质科技创新中心，天津，300170

内容提要：地球表层大气氧浓度的显著增高是地球史上最重大的地质事件之一，它不仅改变了地球表层环境，促进了生命演化，而且加速了表生地质过程，形成一系列适应环境突变的岩石和重要矿床。地球在前寒武纪时期曾发生过两次大气快速增氧事件，分别为大氧化事件(GOE)和新元古代氧化事件(NOE)。本文主要论述华北陆块新太古代晚期增氧事件的时限及其对成矿和生命演化的影响。华北陆块新太古代晚期形成千余个氧化物相BIF型铁矿床和矿点，属于阿尔戈马型，累计查明资源储量约335.36亿t，占全国铁矿总资源储量46%。该类矿床和矿点形成于弱碱性氧化环境，成矿时代主要介于2.56～2.52 Ga，并经历了2.51～2.50 Ga的变质作用。通过对BIF型铁矿床中矿石的Ce异常、铁同位素组成和硫同位素非质量分馏效应(MIF-S)等特征研究，显示在2.56～2.52 Ga期间大气圈的氧浓度大幅度升高，并由缺氧还原环境变为具一定氧浓度(1%～10% PAL)的氧化环境，暗示华北陆块在此期间曾出现过一次显著的增氧事件。其对华北陆块的成矿作用产生了重要影响，主要表现在以下三个方面：① 形成大量氧化物相BIF型铁矿床，这是中国最重要的铁矿床类型和铁矿石开采对象，但缺少碳酸盐相BIF型铁矿床的产出；② 制约了新太古代晚期VMS型铜锌块状硫化物矿床的发育，目前仅在辽北红透山地区有报道；③ 缺失南非兰德型金-铀砾岩矿床。此外，此次增氧事件也加速了华北陆块上生命演化的进程。一般来说，从以单细胞为主的真核生物演化到宏观多细胞真核生物大约需经历1.6～1.7 Ga。然而，华北陆块从新太古代晚期(2.56～2.52 Ga)的增氧事件到中元古代蓟县纪高于庄组宏观化石的发现，即从以单细胞为主的真核生物向宏观多细胞真核生物演化仅经历了约1.0 Ga。上述研究结果表明，华北陆块上第一次出现显著增氧过程的时限为2.56～2.52 Ga，不仅时间上比全球其他地区(～2.4 Ga)早了约1亿多年，而且生命演化也比其他地区提早0.6～0.7 Ga。

关键词：大氧化事件(GOE)；华北陆块；氧化物相BIF型铁矿床；2.56～2.52 Ga；成矿作用；生命演化

地球表层大气氧浓度的显著增高是地球史上最重大的地质事件之一，它不仅改变了地球表层环境条件，促进了生命演化，而且加速了表生地质过程，形成一系列适应环境突变的岩石和重要矿床。地球在前寒武纪时期曾发生过两次大气快速增氧事件，对地球表层系统和生物圈演化影响极大。研究表明元古宙以前的大气圈基本不含氧，因此海洋处于缺氧状态，约在2.4 Ga大气含氧量快速上升至约0.02～0.04 atm(或1%～10% PAL)，这个过程被称为“大氧化事件”(Great Oxygenation Event，GOE)。海洋环境也因此发生重大变化，出现了表层氧化、中层富硫、深层缺氧富铁的状态。随后在新元古代晚期约0.8～0.6 Ga发生了第二次大氧化事件，又称“新元古代氧化事件”(Neoproterozoic Oxygenation Event，NOE)，导致大气氧含量进一步上升，接近显生宙水平(Shi Xiaoying et al.，2016)。

近年来，虽然明确了大氧化事件(GOE)的产生是由于地球大气圈中甲烷含量(CH_4)降低，触发了氧含量持续增加，但对其发生的时间、条件及成因模型等问题至今仍存在争论。目前，普遍认为大氧化事件(GOE)发生的时间在2.4 Ga前左右(Zhao Zhenhua，2010)。Cloud(1968)提出大气圈中O_2含量在2.2～1.9 Ga前明显增加，而后逐渐增加到现代大气圈中O_2含量水平。Chen Yanjing et al.

注：本文为中国地质调查局中国矿产地质与成矿规律综合集成和服务项目(矿产地质志)(编号DD20160346)资助的成果。
收稿日期：2020-10-09；改回日期：2020-11-12；网络发表日期：2020-11-29；责任编委：范宏瑞；责任编辑：周健。
作者简介：沈保丰，男，1935年生。研究员，博士生导师，主要从事矿床和前寒武纪成矿作用的研究。Email：sbaofeng.2009@163.com。

引用本文：沈保丰，毕君辉，张阔. 2021. 华北陆块2.56～2.52 Ga增氧事件对成矿和生命演化的影响. 地质学报，95(2)：336～351，doi：10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2021109.
Shen Baofeng，Bi Junhui，Zhang Kuo. 2021. Effect of 2.56～2.52 Ga oxidation event on mineralization and life evolution in the North China block. Acta Geologica Sinica，95(2)：336～351.

(1996, 2000, 2018)根据苏必利尔湖型 BIF 铁矿床大量出现,兰德型金-铀砾岩矿床消失,沉积岩稀土元素组成,古元古代碳酸盐碳同位素正异常等资料,认为地球环境在～2.3 Ga 发生突变。然而,Kaufmam et al.(2007)通对澳大利亚新太古代 Mount McRae 黑色页岩的硫、钼同位素等研究,发现在～2.5 Ga 海洋表层存在氧化现象,认为 GOE 的发生比过去早 50 Ma。同时,部分学者也曾提出在 2.66～2.50 Ga 已经出现大气圈的部分氧化(Kendall et al., 2010; Scott et al., 2011)。此外,"非质量硫同位素分馏"(MIF-S)被认为是标定大气是否含氧的最可靠证据,研究表明在～2.45 Ga 非质量硫同位素分馏现象消失,暗示地球表层由缺氧还原环境转变为富氧的氧化环境(Farquhar et al., 2000, 2007)。

华北陆块是地球上最古老的克拉通之一,保存着较为完好的岩石记录,蕴藏丰富的矿产资源,是研究地球早期构造-演化史的重要窗口。然而,目前对地球早期成矿作用及其规律的探索还存在很多不确定性:华北陆块在新太古代晚期为什么缺失阿尔戈马型厚层菱铁矿床?华北陆块 VMS 型铜锌块状硫化物矿床为什么这么少,仅分布在辽东红透山矿区一带?华北陆块在此期间为什么大量产出氧化物相 BIF 型铁矿床?古元古代早期形成的南非兰德型金-铀砾岩矿床在中国为什么至今没有发现?究其原因有很多,但其中很重要的是与此期间地球表层发生的增氧事件有关。鉴于此,本文依据华北陆块新太古代晚期条带状铁建造(BIF)型铁矿床的分布、矿物地球化学、同位素地球化学和成矿时代等特征,结合同期其他矿床的产出特点和古生物演化等方面的研究成果,探讨华北陆块增氧事件发生的时代及其对成矿和生命演化的影响。

1　华北陆块新太古代晚期 BIF 型铁矿床的地质特征

地球上的大氧化事件(GOE)与早期前寒武纪 BIF 型铁矿床的形成有着密切的关系。条带状铁建造(Banded Iron Formation,BIF)是指由燧石(变质后为石英)和含铁矿物组成,呈黑白相间具明显条带—条纹状构造,经海底热液喷流(气)作用形成的无碎屑状岩屑的化学沉积含铁硅质岩。其主要形成于早前寒武纪,记录了当时大气和海洋的化学成分、氧化还原状态和演化特点,随后经过后期风化淋滤作用的改造形成富铁矿石。当该岩石的含铁量达到工业品位,且具有经济利用价值时,就形成了 BIF 型铁矿床(Shen Baofeng, 2012)。在 2.56～2.52 Ga 期间,华北陆块(面积约 170 万 km^2)上形成了几千个规模大小不等的氧化物相 BIF 型铁矿床,累计查明资源储量约 335.36 亿 t,占全国铁矿总资源储量 46%(Li Houmin et al., 2015)。这在有限范围内集中产出几千个矿床和矿点,并呈新太古代晚期氧化物相 BIF 型铁矿床产出,在全球很少见,也可能是唯一的地区。

1.1　BIF 型铁矿床的分布和地质特征

华北陆块新太古代期间形成的 BIF 型铁矿床分布广泛,又相对集中(图 1)。按铁矿床的集中分布状况,主要可划分为北缘东段辽北-吉南、鞍山-本溪等矿集区,中段辽西、密怀-冀东等矿集区;西缘内蒙古中西部三合明等矿集区;东缘鲁西、胶东等矿集区;中部五台山-恒山等矿集区;南缘豫东等矿集区。其中以鞍山-本溪、密怀-冀东和五台山-恒山等矿集区尤为集中。鞍山-本溪(简称鞍本)矿集区内大型、超大型矿床数量众多,如西鞍山、东鞍山、齐大山、南芬、弓长岭、胡家庙子和歪头山等矿床,铁矿床查明资源储量达 125 亿 t,约占全国总查明资源储量 24%。冀东地区是我国仅次于鞍本地区 BIF 型铁矿床的分布区,铁矿床查明资源储量达近 80 亿 t,约占全国总查明资源储量 15.36%。大型、超大型矿床包括司家营、水厂、石人沟、大石河、孟家沟、马兰庄和柞栏杖子等矿床,其中司家营铁矿床累计探明铁矿资源量达 32 亿 t,属于超大型矿床。

华北陆块在此期间形成的 BIF 型铁矿床与花岗岩-绿岩带在时空分布和成因上关系密切,如鞍本地区 BIF 型铁矿床均产于鞍本绿岩带的中上部,即鞍山群茨沟组二段和樱桃园组。其中樱桃园组位于最上部,含铁岩系主要为绢云千枚岩、绢云变粒岩、云母石英片岩和磁铁-赤铁石英岩。原岩为一套泥质-中酸性杂砂岩(夹基性火山岩)-硅铁质火山沉积建造,也就是铁矿床的产出层位以(火山)沉积岩为主。该类铁矿床在鞍山地区分布最广、规模最大,代表性矿床有齐大山、胡家庙子、西鞍山和东鞍山等。另外,山西五台山地区山羊岭、柏枝岩、平型关和大明烟等大型 BIF 型铁矿床也都产在五台山-恒山绿岩带的中部层序,即五台群文溪组和柏枝岩组地层中,含铁岩系为斜长角闪岩、绿泥片岩、黑云变粒岩、云母石英片岩和磁铁石英岩,其原岩为一套厚度较大的基性火山岩-中酸性火山杂岩-黏土质粉砂岩-铁硅质建造等。值得注意的是,华北陆块在新太古代

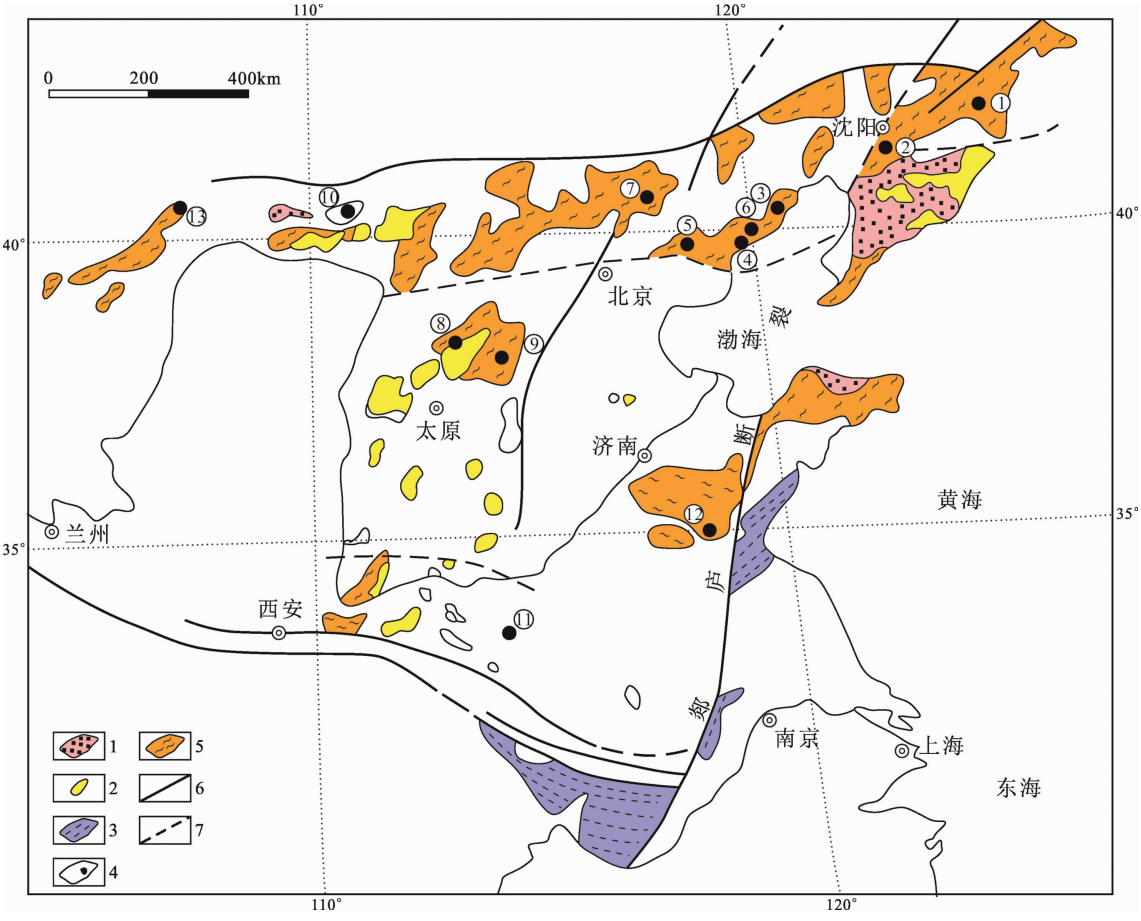


图 1 华北陆块新太古代 BIF 型铁矿床矿集区分布示意图(据 Shen Qihan, 1998 修改)

Fig. 1 Distribution of ore concentration areas of Neoarchean BIF type iron deposits in North China block (modified from Shen Qihan, 1998)

①—吉南地区(板石沟等铁矿);②—辽宁鞍本地区(东、西鞍山、齐大山、庙儿沟、弓长岭等铁矿);③—辽西地区(宝国老等铁矿);④—河北迁安—滦县地区(水厂、孟家沟、宫店子、司家营、大贾庄、马城等铁矿);⑤—河北遵化—迁安地区(龙湾和石人沟等铁矿);⑥—河北青龙地区(柞栏杖子和前白枣等铁矿;⑦—北京密云地区(沙厂、大槽等铁矿);⑧—五台山地区(山羊坪、柏枝岩、黑山庄、八塔等铁矿);⑨—河北阜平地区(东城铺等铁矿);⑩—内蒙古中部和中南部地区(三合明、书记沟、东五分子、壕赖沟、黑脑包等铁矿);⑪—河南登封—许昌地区(许昌、泉店-灵井等铁矿);⑫—鲁西地区(韩旺、东平和苍峄等铁矿);⑬—内蒙古阿拉善地区(迭布斯格等铁矿);1—古元古界上部岩层分布区;2—古元古界下部岩层分布区;3—元古宇片岩分布区;4—BIF 型铁矿床矿集区(字母代表矿集区编号);5—太古宇分布区;6—实测断裂;7—推测断裂

①—Southern Jilin Province (Banshigou and other iron deposits); ②—Anshan-Benxi area in Liaoning Province (East and West Anshan, Qidashan, Miaoergou, Gongchangling and other iron deposits); ③—western Liaoning Province (Baoguolao and other iron deposits); ④—Qian'an-Luanxian areas in Hebei Province (Shuichang, Mengjiagou, Gongdianzi, Sijiaying, Dajiazhuang, Macheng and other iron deposits); ⑤—Zunhua-Qian'an areas in Hebei Province (Longwan, Shirengou and other iron deposits); ⑥—Qinglong area in Hebei Province (Zhalanzhangzi, Qianbaizao and other iron deposits); ⑦—Miyun area in Beijing (Shachang, Dacao and other iron deposits); ⑧—Wutaishan area (Shanyangping, Baizhiyan, Heishanzhuang, Bata and other iron deposits); ⑨—Fuping area in Hebei Province (Dongchengpu and other iron deposits); ⑩—central and south-central Inner Mongolia (Sanheming, Shujigou, Dongwufenzi, Haolaigou, Heinaobao and other iron deposits); ⑪—Dengfeng-Xuchang areas in Henan Province (Xuchang, Quandian-Lingjing and other iron deposits); ⑫—Luxi area (Hanwang, Dongping, Cangyi and other iron deposits); ⑬—Alashan area in Inner Mongolia (Diebusige and other iron deposits); 1—Upper Paleoproterozoic strata distribution area; 2—Lower Paleoproterozoic strata distribution area; 3—Proterozoic schist distribution area; 4—BIF type iron ore deposit concentration area (letter represents the number of ore concentration area); 5—Archean distribution area; 6—measured fault; 7—inferred fault

晚期形成的 BIF 型铁矿床都属于阿尔戈马型。

华北陆块 BIF 明显遭受后期变质-变形作用的叠加改造,从绿片岩相—麻粒岩相不等,以角闪岩相为主(表 1)。如鞍山地区齐大山、东鞍山、西鞍山、胡家庙子和眼前山等超大型、大型铁矿床,五台山—恒山地区产于台怀亚群柏枝岩组的山羊坪、柏枝岩、

表 1　华北陆块主要 BIF 型铁矿床的地质特征

Table 1　Geological characteristics of main BIF type iron deposits in North China block

矿床名称	齐大山	东鞍山	歪头山	南芬	司家营	水厂
矿区位置	鞍山市	鞍山市	本溪市	本溪市	冀东滦县	冀东迁安市
赋矿层位	鞍山群 樱桃园组	鞍山群 樱桃园组	鞍山群 茨沟组二段	鞍山群 茨沟组二段	滦县群 司家营组	迁西群 水厂岩组
含铁岩系岩石组合	绢云石英绿泥千枚岩或片岩、黑云变粒岩以及斜长角闪岩夹厚大 BIF 铁矿层	绢云石英绿泥千枚岩或片岩、黑云变粒岩、斜长角闪岩夹厚大 BIF 铁矿层	斜长角闪岩、阳起石片岩、黑云角闪片麻岩、变粒岩	黑云变粒岩、绿帘角闪岩、石英绿泥片岩、云母石英片岩	黑云斜长变粒岩,少量黑云钾长变粒岩、黑云角闪钾长变粒岩、角闪黑云变粒岩	二辉麻粒岩、黑云麻粒岩为主,夹有斜长角闪岩、紫苏黑云斜长片麻岩、角闪黑云斜长片麻岩、浅粒岩
变质相	绿片岩相	绿片岩相	角闪岩相	高绿片岩相—低角闪岩相	绿帘角闪岩相—角闪岩相	角闪岩相—麻粒岩相
矿石主要矿物组成	磁铁矿、假象赤铁矿、磁铁假象赤铁矿;透闪石、阳起石、绿泥石、白云石和石英	磁铁矿、假象赤铁矿和赤铁矿;石英为主,次为绿泥石、透闪-阳起石、角闪石	磁铁矿;阳起石、石英、白云石	磁铁矿、赤铁矿;石英、透闪石	磁铁矿、假象赤铁矿、少量赤铁矿;石英为主,次为铁闪石、阳起石	磁铁矿为主,含少量假象赤铁矿;石英、透辉石为主,其次为紫苏辉石、石榴子石
矿物相	氧化物相	氧化物相	氧化物相为主,少量硅酸盐相	氧化物相为主,少量硅酸盐相	氧化物相	氧化物相为主,少量硅酸盐相
矿床平均品位(%)	31.79	32.46	TFe 31.28～33.05,SFe 26.22～28.65	31.82	30.08	可溶铁 26.80
矿床规模	超大型	超大型	大型	超大型	超大型	近超大型
矿床名称	柞栏杖子	山羊岬	柏枝岩	三合明	苍峄	
矿区位置	冀东青龙县	五台山代县	五台县	内蒙古达尔罕茂明安联合旗(百灵庙)	山东省枣庄市和苍山县交界处	
赋矿层位	朱杖子群 桲罗台组	五台群 石嘴亚群文溪组	五台群 台怀亚群柏枝岩组	色尔腾山群 东五分子组	泰山群 山草峪组	
含铁岩系岩石组合	黑云变粒岩夹石榴黑云变粒岩、斜长角闪岩、斜长角闪片岩、绿泥石英片岩、浅粒岩	以绿泥片岩为主,间夹绢云片岩、绿泥角闪片岩	以绿泥片岩、绿泥斜长角闪岩为主,夹少量绢云石英片岩	斜长角闪岩、透闪石片岩、石榴黑云片岩、石英岩	黑云变粒岩夹云母片岩、斜长角闪岩	
变质相	绿片岩相—低角闪岩相	绿片岩相	绿片岩相	角闪岩相	角闪岩相	
矿石主要矿物组成	磁铁矿、赤铁矿、次为假象赤铁矿和磁黄铁矿;石英、镁铁闪石和绿泥石	磁铁矿、镁菱铁矿;石英、绿泥石、镁铁闪石	磁铁矿为主,其次为赤铁矿、镜铁矿;石英为主,其次为绿泥石、闪石类矿物	主要由磁铁矿(30%～50%)、赤铁矿、石英组成,次要矿物有黄铁矿、透闪石、黑云母等	磁铁矿、假象赤铁矿;石英、普通角闪石、铁闪石、透闪-阳起石	
矿物相	氧化物相,其次为硅酸盐相	氧化物相为主,其次为硅酸盐相、碳酸盐相	氧化物相为主,少量硅酸盐相	氧化物相,少量硅酸盐相	氧化物相,其次硅酸盐相	
矿床平均品位(%)	TFe 29.06,SFe 20.41	TFe 30.10,CFe(碳酸铁)3.47,GFe(硅酸铁)3.80,mFe(磁性铁)19.70	33.47	TFe 34.82,SFe 27.70	TFe 32.86,SFe 24.97,GFe(硅酸铁)7.89	
矿床规模	大型	大型	大型	大型	大型	

注:数据来源:Yao Peihui et al.,1993;Shen Baofeng et al.,2005,2006;Shen Baofeng,2012。

大明烟和大草坪等矿床多经受高绿片岩相的变质作用。冀东地区变质岩系的变质作用程度较高,西部迁安—迁西地区水厂、孟家沟、大石河、石人沟和太平寨等铁矿床主要受高角闪岩相—低麻粒岩相变质作用,东部滦县、青龙地区的司家营、马城和柞栏杖子等铁矿床主要受角闪岩相变质作用。鲁西地区的苍峄、东平和韩旺等铁矿床,内蒙古西部三合明、书记沟和东五分子等铁矿床则主要受角闪岩相变质

作用。

华北陆块在新太古代晚期形成的 BIF 型铁矿床的矿石主要金属矿物以磁铁矿为主,其次为赤铁矿(表 1),如鞍本地区齐大山铁矿床矿石主要金属矿物为磁铁矿和假象赤铁矿,西鞍山铁矿床矿石主要金属矿物为磁铁矿、假象赤铁矿和赤铁矿,南芬铁矿床矿石主要金属矿物为磁铁矿和赤铁矿,歪头山铁矿床矿石主要金属矿物为磁铁矿等。冀东地区司家营铁矿床矿石主要金属矿物为磁铁矿、假象赤铁矿和赤铁矿,水厂铁矿床矿石主要金属矿物为磁铁矿和假象赤铁矿,脉石矿物则以石英、透辉石为主,柞栏杖子铁矿床矿石主要金属矿物为磁铁矿和赤铁矿,脉石矿物以石英、镁铁闪石和绿泥石为主。五台山地区柏枝岩铁矿床矿石主要金属矿物为磁铁矿,白峪里铁矿床矿石主要金属矿物为磁铁矿、假象赤铁矿和赤铁矿,山羊坪铁矿床矿石主要金属矿物为磁铁矿和镁菱铁矿,脉石矿物为石英、绿泥石和镁铁闪石等。综上,华北陆块新太古代晚期形成的 BIF 型铁矿床的矿石主要金属矿物为磁铁矿和少量赤铁矿,为氧化物沉积相,局部地区可见少量硅酸盐相,极个别地区如山羊坪矿床矿石成分以磁铁矿和镁菱铁矿为主,沉积相以氧化物相为主,其次为硅酸盐相和碳酸盐相。

1.2 BIF 型铁矿床的形成时代

为了更好地了解华北陆块太古宙 BIF 型铁矿床的形成时代,本文系统收集了大量采用 SHRIMP、SIMS 和 LA-ICP-MS 等高精度的锆石测年资料,显示华北陆块太古宙 BIF 型铁矿床主要形成于 2.72～2.51 Ga 期间(表 2)。其中仅胶东昌邑—莱州地区 BIF 型铁矿床形成时代较老,为 2726±10 Ma(Wang Huichu et al., 2015),北京密云地区沙厂 BIF 型铁矿床形成于 2619±25 Ma(Fang Tongming et al., 2017)。因此,华北陆块新太古代 BIF 型铁矿床主要形成于 2.56～2.52 Ga,并经历了 2.51～2.50 Ga 的变质作用(图 2;Sun Huiyi et al., 2010; Liu Li et al., 2012; Wan Yusheng et al., 2012; Zhang Lianchang et al., 2012a, 2012b, 2018)。

表 2 华北陆块主要 BIF 型铁矿床的形成时代

Table 2 Formation ages of main BIF type iron deposits in North China block

地区	铁矿床(区)名称	测年对象	测年方法	形成年龄(Ma)	变质时代(Ma)	资料来源
辽宁鞍山—本溪	南芬	绿泥角闪片岩夹层	锆石 LA-ICP-MS	2552±18	2482±11	Zhu et al.,2015
	歪头山	斜长角闪岩夹层	锆石 SIMS	2533±11		Dai Yanpei et al.,2012
	齐大山	黑云变粒岩	单颗粒锆石稀释法	2533±53		Wang Shoulun and Zhang Ruihua, 1995
	弓长岭	角闪变粒岩	锆石 SHRIMP	2528±10		Wan Yusheng et al.,2012
辽宁清源	小莱河	角闪变粒岩夹层	锆石 SIMS/SHRIMP	2565±7.8	2515±6	Wan Yusheng et al.,2012 Peng Zidong et al., 2019
鲁西	济宁	变质酸性火山岩	锆石 SHRIMP	2522±7		Wan Yusheng et al.,2012
	韩旺	黑云变粒岩	锆石 SHRIMP	2520		Wan Yusheng et al.,2012
胶北	莱州-昌邑	变质中酸性火山岩	锆石 SHRIMP	2726±10		Wang Huichu et al., 2015
冀东	杏山-黄柏峪	变粒岩	锆石 SHRIMP	2534±8		Nutman et al.,2011
	石人沟	角闪斜长片麻岩	锆石 SIMS	2541±21	2512±13	Zhang Lianchang et al.,2012a
	水厂	斜长角闪片麻岩夹层	锆石 SIMS	2547±7	2513±4	Zhang Xiaojing et al.,2011
	司家营	黑云变粒岩夹层	锆石 SIMS	2537±13		Cui Minli et al.,2014
	周台子	斜长角闪岩	锆石 SIMS	2512±21		Xiang Peng et al., 2012
	柞栏杖子	变质酸性火山岩	锆石 SHRIMP	2516±8		Sun Huiyi et al., 2010
北京密云	沙厂	黑云斜长片麻岩	锆石 LA-ICP-MS	2619±25	2544±16	Fang Tongming et al., 2017
内蒙古固阳	三合明	斜长角闪岩夹层	锆石 SIMS	2562±14		Liu Li et al., 2012
	公益民	斜长角闪岩夹层	锆石 SIMS	2569±78		Liu Li et al.,2014
山西五台	王家庄	角闪岩夹层	锆石 SIMS	2543±4		Wang Changle et al.,2014

2 华北陆块 BIF 型铁矿床与增氧事件的关系

2.1 BIF 型铁矿床的 Ce 异常

自然界中 Ce 元素一般为+3 价,在氧化条件下 Ce 元素被氧化成+4 价,并容易发生水解,从而造成在 BIF 的 REE 配分曲线中呈现出 Ce 负异常,因此通常选用 Ce 异常判断海水的氧化还原环境(Nozaki et al., 1999)。研究表明,华北陆块中 BIF 普遍具有明显的 Ce 负异常或无异常,如鞍本地区 BIF 型铁矿床弓长岭一矿区 δCe 为 0.81,南芬磁铁石英岩和赤铁石英岩分别为 0.81 和 0.90,大孤山

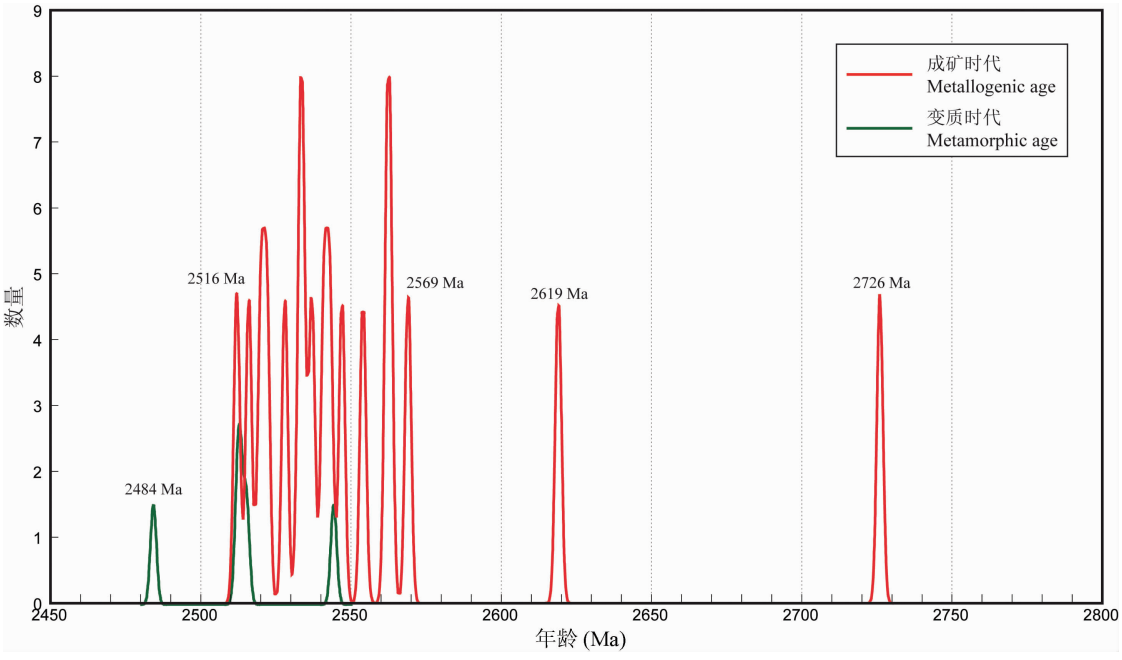


图 2　华北陆块新太古代 BIF 型铁矿床年龄频率分布图

Fig. 2　Age frequency distribution of Neoarchean BIF type iron deposits in North China block

为 0.85,活龙寨为 0.82,西鞍山为 0.73(Li Zhihong et al., 2012)。内蒙古三合明铁矿中的 δCe 为 0.76～1.09,平均 0.94(Liu Li et al., 2012)。冀东地区石人沟、水厂、大石河、二马和柞栏杖子 BIF 型铁矿床中的 δCe 分别为 0.92、0.93、0.97、0.88 和 0.93(未发表数据),司家营 7 件磁铁石英岩的 δCe 为 0.68～0.95,平均为 0.86(Xu Yingxia et al., 2014)等。上述结果表明,华北陆块新太古代晚期 BIF 型铁矿床矿石中 Ce 元素具有低氧化的特征。虽然 Ce 异常的判断常受到 La 正异常的影响,在 $(Ce/Ce^*)_{SN}$-$(Pr/Pr^*)_{SN}$ 图解中大部分样品表现出无 Ce 异常,仅个别样品落在了 Ce 负异常的区域范围内(图 3)。但值得注意的是,这些数据是大气氧在现代水平情况下取得,而在 2.4 Ga 左右大气中的氧气浓度仅达到现代大气氧浓度的 1%～10% PAL(Holland, 2006)。因此,目前测试的 Ce 负异常(0.68～0.97)应反映出地球的第一次快速增氧事件。

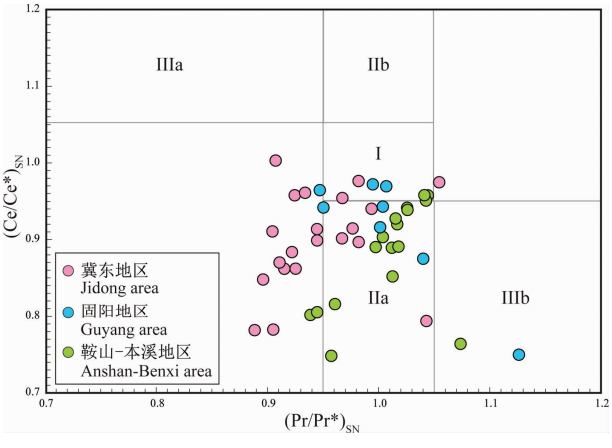


图 3　Ce 负异常判别图解(据 Bau and Dulski, 1996)

Fig. 3　Ce/Ce^* versus Pr/Pr^* discrimination diagram (after Bau and Dulski, 1996)

I—La 和 Ce 均无异常;IIa—La 正异常且无 Ce 异常;IIb—La 负异常且无 Ce 异常;IIIa—Ce 正异常;IIIb—Ce 负异常(数据来自 Li Zhihong et al., 2012; Liu Li et al., 2012; Xu Yingxia et al., 2014)

I—Neither Ce_{SN} nor La_{SN} anomaly; IIa—positive La_{SN} anomaly but no Ce_{SN} anomaly; IIb—negative La_{SN} anomaly but no Ce_{SN} anomaly; IIIa—positive Ce_{SN} anomaly; IIIb—negative Ce_{SN} anomaly (data from Li Zhihong et al., 2012; Liu Li et al., 2012; Xu Yingxia et al., 2014)

2.2　BIF 型铁矿床的铁同位素组成

铁作为变价元素,氧化-还原作用是导致 Fe 同位素分馏的重要因素。在氧化还原过程中,Fe 同位素会产生较大的分馏效应,并且在三价铁相中富集 Fe 重同位素,在二价铁相中富集 Fe 轻同位素。因此,Fe 同位素可能是一种示踪海洋氧化过程的重要手段。Li Zhihong et al.(2008, 2012)对鞍本地区南芬、弓长岭、齐大山、大孤山、东鞍山和西鞍山等矿区磁铁石英岩中的磁铁矿、赤铁石英岩中的赤铁矿和矿石全岩分别进行了铁同位素测定(表 3),结果

表 3 鞍山—本溪地区条带状铁建造的 Fe 同位素组成(据 Li Zhihong et al., 2012)

Table 3 Fe isotopic composition of banded iron formation in Anshan-Benxi area (after Li Zhihong et al., 2012)

样品号	采样地区	样品描述	δ^{56}Fe(‰)			δ^{57}Fe(‰)		
			磁铁矿	赤铁矿	矿石全岩	磁铁矿	赤铁矿	矿石全岩
NF06-7	南芬	磁铁石英岩	0.95		0.86	1.45		1.28
NF06-8	南芬	磁铁石英岩	1.27		1.13	1.85		1.66
NF06-20	南芬	磁铁石英岩	0.56		0.52	0.91		0.76
NF-21′	南芬	磁铁石英岩	0.83			1.14		
Gc062-17	弓长岭二矿区	磁铁石英岩	0.74		0.75	1.05		1.15
Gc062-22	弓长岭二矿区	磁铁石英岩	0.32			0.53		
Gc062-25	弓长岭二矿区	磁铁石英岩	0.69			1.07		
Gc061-15	弓长岭一矿区	磁铁石英岩	0.47		0.36	0.67		0.54
Dm06-6	弓长岭独木	磁铁石英岩	0.61		0.54	0.86		0.79
Dash-13-2	东鞍山	磁铁石英岩	0.67		0.70	1.01		0.97
Dansh-13′	东鞍山	磁铁石英岩	0.56			0.84		
Qdsh06-4	齐大山	磁铁石英岩	0.4		0.33	0.57		0.52
Qdsh-24′	齐大山	磁铁石英岩	0.2			0.29		
Dgsh06-13	大孤山	磁铁石英岩	0.7			1.04		
NF06-27	南芬	赤铁石英岩		0.75	0.83		1.24	1.23
NF06-34	南芬	赤铁石英岩		0.76	0.8		1.25	1.17
Xash06-2	西鞍山	赤铁石英岩		0.58	0.65		0.86	0.92

显示磁铁石英岩中磁铁矿样品最显著的特征是铁的重同位素富集且具有较大的变化范围。不同矿区磁铁石英岩中磁铁矿 δ^{56}Fe 具有相似的变化范围,介于 0.08‰～1.27‰之间,平均值为 0.55‰。从表 3 可知,磁铁矿与全岩的 Fe 同位素组成在误差范围内一致,这也与磁铁矿是磁铁石英岩中铁的主要载体相符。

赤铁石英岩中赤铁矿及样品全岩的 Fe 同位素组成均显示重同位素富集且变化范围较小。不同矿区赤铁矿 δ^{56}Fe 总的变化范围为 0.58‰～0.76‰,平均值为 0.70‰;全岩 δ^{56}Fe 总的变化范围为 0.65‰～0.83‰,平均值为 0.70‰。因此,鞍本地区 BIF(磁铁石英岩和赤铁石英岩)具有非常相似的 Fe 同位素组成,即 Fe 同位素均为正值,富集铁的重同位素,反映了增氧的事实。

2.3 BIF 型铁矿床的非质量硫同位素分馏效应

非质量硫同位素的分馏效应(MIF-S)与地球早期大气圈、水圈和生物圈的演化密切相关,其消失可能与生物的出现和氧气浓度的增加有关。Farquhar et al.(2000)在地球早期的沉积岩和变质岩中首次发现了硫的非质量同位素分馏效应。研究结果显示,年龄老于 2450 Ma 的样品具有明显的非质量硫同位素分馏效应($\triangle^{33}S=-1.29‰\sim2.04‰$);年龄在 2450～2090 Ma 的样品$\triangle^{33}S$变化范围为 0.02‰～0.34‰,非质量硫同位素的分馏效应不太明显;年龄小于 2090 Ma 的样品$\triangle^{33}S$变化范围为−0.11‰～0.02‰,属于与质量相关同位素分馏。因此,目前普遍认为 MIF-S 是标定大气是否含氧的最可靠证据之一(Canfield et al., 2013; Lyons et al., 2014)。

Li Yanhe et al.(2010)选取齐大山、东鞍山、西鞍山、南芬、弓长岭、水厂、石人沟、司家营、二马、峨口、白峪里、苍峄和韩旺等 18 个矿区的 BIF 型铁矿床分别对全岩、硅质条带和磁铁矿条带中分离出的黄铁矿单矿物进行了硫同素分析。这些矿区均属于阿尔戈马型,其成矿时代介于 2.56～2.52 Ga(表 2)。本文根据 $\delta^{33}S_{V\text{-}CDT}$ 和 $\delta^{34}S_{V\text{-}CDT}$ 关系计算了上述 18 个矿区 98 个样品的$\triangle^{33}S$硫同位素数据,结果表明硫化物的$\triangle^{33}S$值变化范围很大(−1.548‰～+1.206‰),具有明显的非质量硫同位素分馏效应(图 4)。从图 4 中可以看出大部分样品的$\triangle^{33}S$为负值,介于−0.5‰～0‰。另外,研究表明火山喷气(流)产生的 SO_2 等经太阳紫外线照射可以产生较大的非质量硫同位素分馏效应,这种光化学反应的发生和反应产物的保存都需要一定的大气环境。Farquhar et al.(2001)通过计算认为能够产生这种同位素异常的大气氧浓度上限应不足现代大气氧水平的千分之一。Pavlov(2002)甚至认为只有在当时大气氧水平低于现代大气氧水平 10^{-5} 的情况下,非质量硫同位素的分馏现象才能产生并得以保存。华北陆块在 2.56～2.52 Ga 前后,大气圈的氧浓度有较大幅度升高,由缺氧的还原环境转变为氧化环境,非质量硫同位素的分馏效应消失,暗示大陆氧化风化现象开始。

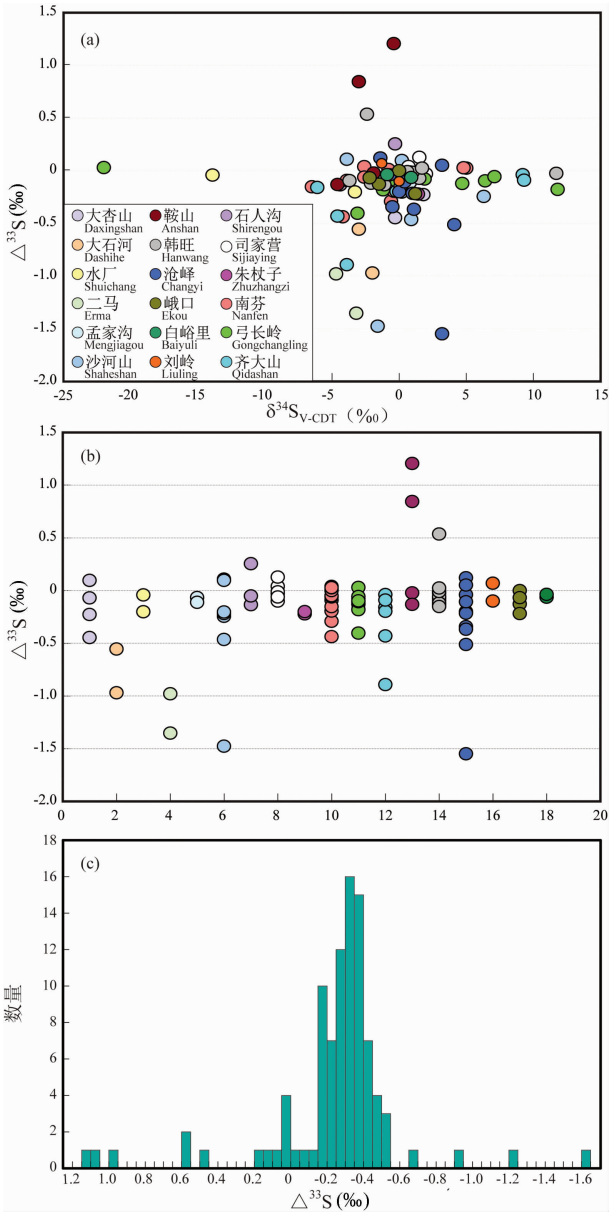


图 4　华北陆块阿尔戈马型 BIF 的 $\delta^{34}S_{V\text{-}CDT}$ 和 $\Delta^{33}S$ 关系图(a),硫同位素分布图(b)和硫同位素频率分布图(c)(数据来自 Li Yanhe et al., 2010)

Fig. 4　The $\delta^{34}S_{V\text{-}CDT}$ versus $\Delta^{33}S$ (a), sulfur isotope distribution (b) and sulfur isotope frequency distribution diagrams (c) of Algoma type BIF in North China block (date from Li Yanhe et al., 2010)

2.4　新太古代晚期 BIF 型铁矿床的形成环境

早期地球由于地壳厚度较薄,地壳强烈的不稳定性,火山和海底喷流活动剧烈,形成了一个具有还原性的原始大气圈,富含 NH_3、H_2、H_2O 和 CH_4 等,在水圈中富含 S、Fe、Au 和 Si 等物质,形成强酸性还原性的盆地。

铁是变价元素,在自然界有 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 两种离子存在。氧化环境中铁呈 Fe^{3+} 状态存在,Fe^{3+} 只有在酸度很高(pH=2～3)的介质中才能稳定存在,这种介质在地表却一般不常存在。当 pH>3 时 Fe^{3+} 就会发生水解而沉淀,因而 Fe^{3+} 的迁移能力极小。Fe^{3+} 也可能呈 $Fe(OH)_3$ 胶体或络合物形式,其迁移能力就会增加。还原环境中铁以 Fe^{2+} 状态存在,形成 $Fe(OH)_2$、$FeCO_3$ 和 $FeCl_2$ 等化合物,它们在 pH 变化较大的范围内存在于溶液中,而在弱酸性至中性条件下才发生沉淀。因此,氧化环境有利于铁的沉淀,还原环境有利于铁的迁移。

铁在沉积时可以形成赤铁矿、菱铁矿和黄铁矿等不同矿物,这主要取决于介质的物理、化学等条件,如 pH 和 Eh 值等(图 5)。总之,铁在溶液中的溶解完全受环境的影响,控制铁的溶解度及溶解与沉淀的最根本因素是 pH 和 Eh。主要表现为:pH 降低,在酸性环境下,铁的还原作用增强,促使铁呈二价铁被溶解到溶液中去。pH 升高,在碱性环境下,铁的氧化作用增强,促使铁呈三价铁从溶液中沉淀下来。Eh 降低,在还原条件下,促使铁呈二价铁被溶解。Eh 升高,在氧化条件下,促使铁呈三价铁被沉淀。简单地说,氧化条件促使铁发生沉淀,还原条件促使铁溶解到溶液中去,酸性介质促使铁溶解,碱性介质促使铁沉淀。

当溶液中 CO_2 和 S 同时存在,pH 和 Eh 变化时,各种矿物的稳定情况如图 5b 所示:

(1)赤铁矿越向碱性其稳定范围越大,越向酸性稳定范围越窄。pH < 2 则全部溶解。

(2)菱铁矿主要在还原环境和微酸性(pH>6)到碱性环境中稳定存在,铁浓度增高,pH 可延伸到 5 以下。

(3)黄铁矿主要在还原环境中,但可以在 Eh=0.1～0.2 V 的弱氧化环境中出现。黄铁矿的 pH 范围较宽,从强酸到较强的碱性之间均可存在。

(4)磁铁矿的范围很窄,只在 pH>9 的还原环境中稳定存在。

从上可知,含铁矿物可表征沉积环境的氧化-还原性,也是成岩作用氧化还原条件最重要的指示矿物。

华北陆块在> 2.6 Ga 时,由于强烈的火山和洋底喷流作用,大气圈和海盆地基本是处于强酸性和强还原环境。在盆地中大量的铁呈二价离子,以氢氧化铁或其他络合物形式搬运,从海底深部火山口向浅海上升,在不同地段由于 pH 和 Eh 条件,氧逸度、二氧化碳逸度及硫、硅、铁等浓度,形成不同的

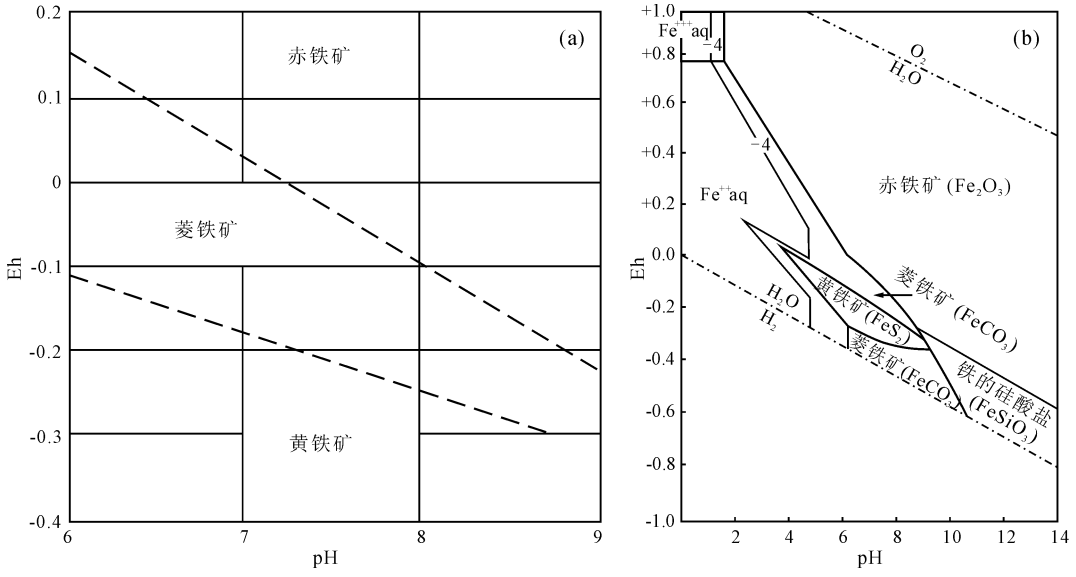


图 5 铁矿物沉积时的 pH 和 Eh 条件(a，据 Department of Geology，Nanjing University，1984)和矿物的稳定范围(b，据 Garrels et al.，1958)

Fig. 5 pH and Eh conditions (a, after Department of Geology, Nanjing University, 1984) and stable range (b, after Garrels et al., 1958) of iron minerals during deposition

BIF 沉积相(图 6)。

如图 6 所示，浅海部分沉积褐铁矿粗砂存在于 Eh=+0.05～0.4 V，pH=7.2～8.5 的强氧化弱碱性环境。褐铁矿粗砂在经受后期不同程度的变质作用后，形成赤铁矿、磁铁矿的 BIF 氧化物沉积相。因此，这在华北陆块的有限区域范围内，分布着上千个氧化物相 BIF 型铁矿床和矿点，表明在新太古代(2.56～2.52 Ga)期间，已出现增氧事件。

综上所述，根据华北陆块 BIF 型铁矿床的地质特征、地球化学和同位素测年等资料，可以得出华北陆块首次显著增氧事件发生在 2.56～2.52 Ga，它比一般认为的大氧化事件(GOE；～2.4 Ga)提早达 1 亿多年。

3 增氧事件对华北陆块成矿作用的影响

华北陆块 2.56～2.52 Ga 增氧事件对成矿作用的影响可以反映在以下三个方面：首先，形成大量氧化物相 BIF 型铁矿床，缺少碳酸盐相 BIF 型铁矿床；其次，仅在辽北分布着 VMS 型红透山式铜锌块状硫化物矿床；第三，至今尚未发现古元古代早期兰德型金-铀砾岩矿床。

(1)形成大量氧化物相 BIF 型铁矿床，缺少碳酸盐相 BIF 型铁矿床：在新太古代晚期，特别在 2.56～2.52 Ga 增氧事件中，华北陆块上分布着上千个规模、大小不等的氧化物相 BIF 型铁矿床和矿点，它们均属于阿尔戈马型，累计查明资源储量约 335.36 亿 t，占全国铁矿总资源储量 46%，是中国最重要的铁矿床类型和铁矿石开采对象，其中齐大山、东鞍山、西鞍山、南芬、司家营和水厂等为超大型铁矿床(Li Houmin et al.，2015)。该类型铁矿石主要金属矿物为磁铁矿，少量赤铁矿，基本不含菱铁矿。然而，在此期间加拿大安大略阿尔戈马型铁矿区麦克劳德(Maclod)矿却分布着厚大的菱铁矿体，厚度达 91.44 m，矿体围岩由酸性凝灰岩、集块岩和流纹岩组成。该类碳酸盐相 BIF 型铁矿体产出于还原环境，并不是加拿大的主要矿床类型。虽然中国华北陆块和加拿大阿比提比绿岩带在新太古代晚期产出的 BIF 型铁矿都属于阿尔戈马型，但由于形成环境不同，前者是氧化环境，形成以磁铁矿为主，少量赤铁矿的氧化物相铁矿体；后者是还原环境，形成以菱铁矿为主的铁矿体。

(2)新太古代晚期 VMS 型铜锌块状硫化物矿床不甚发育，仅在辽北清原红透山等地区有分布：在全球范围内，新太古代晚期是 VMS 型铜锌型块状硫化物矿床产出的重要时期。在华北陆块，甚至全国仅集中分布在辽北清原红透山等地区，以红透山大型铜锌矿床及稗子沟、树基沟等小型矿床(矿点)组成矿集区(Chen Lu and Liu Liandeng，1982；Shen Baofeng et al.，1994)。红透山铜锌硫化物矿床是区内目前发现最大的铜锌矿床，累计探明锌储量 103.6 万 t，铜 73.7 万 t，为大型铜锌矿床。矿床

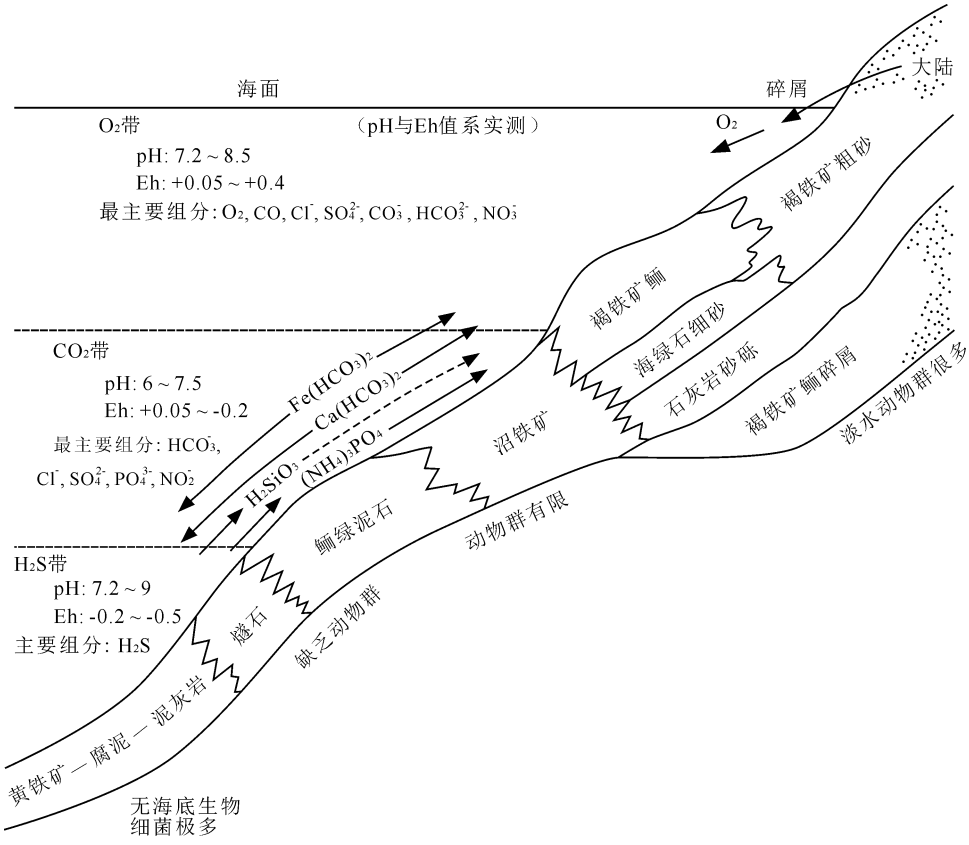


图 6　铁矿剖面及其物理化学条件(据 Borchert, 1960 修改)

Fig. 6　Iron ore profile and its physicochemical conditions (modified from Borchert, 1960)

产在清原绿岩带内的清原群,自下而上可分为金凤岭岩组和红透山岩组。金凤岭岩组主要由斜长角闪岩组成,红透山岩组主要岩石类型为黑云(二云)变粒岩和角闪变粒岩,呈薄层互层产出。区内块状硫化物矿床严格受层位控制,矿体均赋存在红透山岩组的"薄层互层带"中,是一套以变粒岩为主的岩石组合,单层厚度为 3～5 m,"带"的厚度为 10～25 m。矿体顶板为矽线黑云片岩,底板为石榴堇青直闪片岩。这两种岩层分布在黑云变粒岩层中,分布局限于矿区内,远离矿区片岩层呈透镜状迅速尖灭。矿体整体上呈似层状,与围岩整合接触,并与围岩片理产状一致。但是实际上矿体形态较为复杂,存在似层状、透镜状、柱状和脉状等,在倾竖褶皱枢纽部位出现矿柱。矿石的金属矿物组合主要有黄铁矿(占金属硫化物 65%～80%)、磁黄铁矿(20%～30%)、闪锌矿(5%～10%)、黄铜矿(<10%),其次有少量方黄铜矿、银金矿等。矿石中主要有用组分为 Cu、Zn、S,平均品位分别是 1.7%～1.8%、2.3%～2.5%和 20%～25%,伴生有益组分为 Au、Ag、Cd、Se、In、Co。红透山岩组角闪变粒岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 2479±5 Ma(Wan Yusheng et al., 2005),黑云变粒岩单颗粒锆石 U-Pb 年龄为 2505±18 Ma(Li Junjian et al., 1995),表明红透山矿床形成于新太古代晚期。

在加拿大和澳大利亚广泛分布新太古代晚期 VMS 型铜锌型块状硫化物矿床,包括提敏斯、诺兰达和马塔加米三个著名矿田和若干矿床。以加拿大为例,该类矿床已发现 200 多个,是加拿大铜、锌金属的主要开采对象。矿床主要产在加拿大地盾太古宙阿比提比绿岩带内,与绿岩带岩序列中的安山质到长英质火山岩有关。长英质火山岩分布不均匀,集中在代表火山活动中心的部分地区内。

在提敏斯矿田中分布着世界著名的超大型基德克里克(Kidd Creek)铜锌矿床,铜品位 2.4%,储量 333 万 t,锌品位 9.75%,铅品位 0.4%,铅锌储量 952 万 t,银品位 120 g/t。矿床容矿岩石主要包括流纹质火山碎屑岩、碳质层、块状流纹岩、石英斑岩、英安岩系、安山岩-闪长岩和蚀变超基性岩等。流纹质火山碎屑岩组成长英质火山岩堆,岩堆厚达 457.2 m,矿床直接位于长英质火山岩堆上,矿石产于流纹质火山碎屑岩层上部层位中。流纹质火山碎屑岩的碎屑岩性和结构不均一,其中长英质岩石碎

屑最多,局部含有黄铁矿、闪锌矿和带状黄铁矿-闪锌矿碎屑,偶而可见黄铜矿碎屑。基德克里克矿床可分南部和北部矿体,进一步细分为五个大的矿带。矿床矿石平均含黄铁矿 25%～30%、闪锌矿 15%、黄铜矿 5%、方铅矿 0.5%、磁黄铁矿<1%,每吨矿石平均含银约 134 g。矿床成因属于与长英质火山岩共生的火山成因块状硫化物矿床(Dai Zixi et al., 2005)。

从上可知,无论是中国红透山铜锌矿床还是加拿大基德克里克(Kidd Creek)铜锌矿床其成矿特征和成因均相似。它们都形成于新太古代晚期,产于海相长英质火山岩系中,处于海底弱酸性的还原环境经火山喷气(热液)作用形成的硫化物矿床。因此,在新太古代晚期,加拿大阿比提比绿岩带处于还原环境,有利于形成大面积的 VMS 型铜锌硫化物矿床。然而,华北陆块此时正处于增氧过程,仅在局部地区(如红透山地区)存在还原环境,因而不利于大面积形成 VMS 型铜锌硫化物矿床。

(3)华北陆块至今尚未发现南非兰德型金-铀砾岩矿床:维特瓦德斯兰德型金-铀砾岩矿床(简称兰德型金-铀砾岩矿床)是世界上最重要的金矿床类型之一,也是南非金矿的主要开采对象。该类金矿从 1886 年起至 1993 年已开采 45610 t,还存有储量 3.2 万 t,其中证实储量 2.3 万 t。除金作为主要金属开采对象外,尚可一同开采铀、铂族矿物、银、黄铁矿等。金矿区沿兰德盆地周边分布,即东部、东北部、西部和西南部边缘。盆地的基底是由太古宙 Swaziland 超群和太古宙花岗岩组成的 Kaapvaal 克拉通,其内部沉积了巨厚的元古宙火山-沉积岩系,面积大于 10 万 km^2。金-铀砾岩矿层产于太古宙花岗岩-绿岩带的基底之上,主要分布于 Witwatersrand 超群内,该超群的地层总厚为 5500～7500 m。矿石中主要有用矿物包括自然金、沥青铀矿、碳铀钍矿和黄铁矿,主要容矿岩石是富石英砾岩、砂屑岩、碳质层,而页岩和粉砂质白云岩也常有矿化。自然金的粒度多数在 5～100 mm,明金少见,金粒具有不规则状,通常在胶结物中。沥青铀矿颗粒一般都较小,大致在 0.1 mm 左右,品位为 280 g/t。需要指出的是,在金-铀砾岩矿床中一个很突出的特点即出现滚圆状的黄铁矿和沥青铀矿的碎屑。控制该矿床形成的主要因素是:① 大气圈处于还原环境;② 有利于沉积和保存的构造条件;③ 特殊的古地理环境,金矿田位于太古宙火山沉积岩类和花岗岩穹窿之间的下陷部分,呈现河积扇或扇形三角洲的形状;④ 花岗岩-绿岩带基底是金和铀的主要来源。矿床的成因是沉积形成(Chen Yuchuan et al., 1995)。

兰德型金-铀砾岩矿床在中国至今尚未找到,而与华北陆块地质特征较为相似的是山西五台山区。在区内古元古代滹沱群的下部豆村亚群四集庄组、南台组和大石岭组内均有分布变质砾岩,其中展布规模和含金性以四集庄组变质砾岩发育最好。四集庄组不整合沉积在五台群基底上,下部以变质砾岩为主体,兼夹少量石英砂岩构成变质砾岩段,上部为砂质千枚岩。该组变质砾岩厚度变化较大,一般厚数百米,最厚可达 2000 m 以上。变质砾岩的砾石含量一般为 30%～70%,多以石英岩为主,次为磁铁石英岩、绿泥片岩,以及不等量的花岗质岩石和少量脉石英,并常见有金发育。变质砾岩基质中主要金属矿物包括磁铁矿、褐铁矿、黄铁矿和磁黄铁矿,局部出现赤铁矿和钛铁矿等。五台山变质砾岩型金矿床(化)可细分为三个亚类:① 沉积变质-热液叠加型;② 沉积-变质型;③ 沉积(弱变质)型。矿床规模均为小型或矿化点,其中以七图村—四集庄地区的西山金矿床最为典型。

西山金矿床是小型金矿床,矿区出露地层为四集庄组和南台组。区内岩浆活动十分微弱,仅发育古元古代变质镁铁质火山岩和中条期变质辉绿岩脉,矿体主要赋存在四集庄组下部变质砾岩与变质镁铁质火山岩之间的变质含砾砂岩内。矿区构造以褶皱和韧性剪切带为主,矿化带断续延伸约 1.5 km,矿体产状同韧性剪切带一致,呈似层状、透镜状。矿石类型可分为石英脉型和细脉浸染型两类。石英脉型矿石矿物主要为黄铁矿、自然金,偶见黄铜矿,次生矿物为褐铁矿。细脉浸染型矿石矿物主要为镜铁矿、黄铁矿和自然金。围岩蚀变依矿石类型而不同,石英脉型围岩蚀变较弱,而细脉浸染型围岩蚀变较强。

五台山变质砾岩金矿与兰德型金-铀砾岩矿床相比,在地质特征、形成条件及形成时间上有许多相似之处,但金矿成矿条件有明显的差异,主要表现在以下几个方面:① 变质砾岩层的分布范围和规模远不如兰德金-铀矿;② 金矿成矿物质来源明显少于兰德金-铀矿;③ 沉积环境和保存的构造条件远不如兰德金-铀矿;④ 成矿作用不如兰德金-铀砾岩矿;⑤ 热液叠加、改造富集作用不如兰德金-铀砾岩矿(Shen Baofeng et al., 1998)。兰德金-铀砾岩层中富含碳质层、沥青铀矿碎屑和滚圆状黄铁矿颗粒,可推测当时处于大气圈缺氧的还原地球化学环境。此

外,盆地的底面形状又影响着沉积作用。金-铀砾岩层位于太古宙绿岩和花岗岩穹窿之间的下陷部位,盆地边缘蚀源区经多次隆起,使盆地内沉积物反复沉积,形成金和铀的工业富集地段。相比之下,五台山四集庄砾岩层并不发育碳质层和黄铁矿层,出现红色石英砂岩夹层,表明四集庄砾岩层形成于氧化环境。研究表明砾岩层形成后又经受吕梁运动、印支-燕山运动等多期次构造岩浆活动叠加,故岩层保存条件较差。

综上所述,产在南非元古宙 Witwatersrand 超群内的兰德型金-铀砾岩矿床形成环境是大气圈处于还原环境,有利于自然金、黄铁矿和沥青铀矿的形成。然而,华北陆块在新太古代晚期(2.56～2.52 Ga)出现增氧事件,五台山古元古代滹沱群四集庄砾岩形成环境是大气圈为氧化环境,不利于金、铀和黄铁矿的沉淀,因而不可能形成大规模的金-铀矿床。

4　华北陆块增氧事件与生命演化进程的耦合关系

华北陆块在新太古代晚期(2.56～2.52 Ga)增氧事件后,大气圈氧气有一定的增长,对生物圈演化影响很大,从原核生物演化为以单细胞为主的真核生物,促进了生命演化的进程。目前,已知早于新元古代晚期震旦(埃迪卡拉)纪(0.635～0.541 Ga)的宏观真核生物非常稀少。近年来,在华北陆块燕山地区中元古代蓟县纪高于庄组中发现了大量的宏观化石,保存时代为～1.56 Ga,为碳质压型化石。该化石个体较大,具有规则线形到披针形态,长可达 30 cm,宽近 8 cm,首次纪录了如此大的底栖多细胞真核生物的个体,同生碎片由～10 μm 的细胞构成并分布于同一厚层上。将分米级大型多细胞真核生物出现的时间提前 9 亿多年(Zhu et al., 2016)。一般来说,从以单细胞为主的真核生物向宏观多细胞真核生物演化大约需经历 1.6～1.7 Ga。然而,华北陆块从 2.56～2.52 Ga 增氧事件到中元古代蓟县纪高于庄组宏观化石的发现,即从以单细胞为主的真核生物向宏观多细胞真核生物演化仅经历了～1.0 Ga。这不仅反映了华北陆块上第一次出现显著的增氧事件比全球其他地区早了约 1 亿多年,而且生命演化也比其他地区提前 0.6～0.7 Ga。

5　结论

(1)地球上大氧化事件(GOE)与早期前寒武纪 BIF 型铁矿床形成有着密切的关系。新太古代晚期,华北陆块在 170 万 km^2 的土地上,分布着几千个规模大小不等的氧化物相 BIF 型铁矿床,属阿尔戈马型。累计查明资源储量约 335.36 亿 t,占全国铁矿总资源储量 46%。这在一个有限范围的区域内集中产出几千个矿床和矿点,并呈新太古代晚期氧化物相铁矿床产出,在全球很少见也可能是唯一的地区。

(2)华北陆块新太古代晚期 BIF 型铁矿床分布广泛又相对集中。主要分布在华北陆块北缘、中部、南缘和东缘,其中以鞍山-本溪、密怀-冀东和五台山-恒山等矿集区尤为集中。鞍山-本溪矿集区内大型、超大型矿床数量较多,如西鞍山、东鞍山、齐大山、南芬、弓长岭、胡家庙子和歪头山等大型、超大型矿床。铁矿床查明资源储量达 125 亿 t,占全国总查明资源储量 24%左右。冀东地区是我国仅次于鞍山—本溪地区 BIF 型铁矿床分布区,铁矿床查明资源储量近 80 亿 t,约占全国总查明资源储量 15.36%。区内大型、超大型矿床包括司家营、水厂、石人沟、大石河、孟家沟、马兰庄和柞栏杖子等矿床,其中司家营铁矿床是累计探明铁矿资源储量达 32 亿 t 的超大型矿床。BIF 型铁矿床矿石的主要金属矿物为磁铁矿和少量赤铁矿,为氧化物沉积相。太古宙 BIF 型铁矿床主要形成在 2.56～2.52 Ga。此外,BIF 中稀土元素的 Ce 异常,铁同位素组成和非质量硫同位素分馏效应等特征,均反映出在 2.56～2.52 Ga 期间大气圈氧的浓度大幅度升高,并由缺氧还原环境变为具一定氧浓度(1%～10% PAL)的氧化环境。地球上,华北陆块在 2.56～2.52 Ga 期间出现第一次显著的增氧事件,比一般认为的大氧化事件(GOE;～2.4 Ga)提早达 1 亿多年。

(3)华北陆块 2.56～2.52 Ga 增氧事件对成矿的影响可以反映在以下三个方面:① 形成大量氧化物相的 BIF 型铁矿床,是中国最重要的铁矿床类型和铁矿石开采对象,占全国铁矿总资源储量 46%,缺少碳酸盐相 BIF 型铁矿床产出;② 制约了新太古代晚期 VMS 型铜锌块状硫化物矿床发育。该类矿床在加拿大阿比提比绿岩带中特别发育,已发现 200 多个矿床,其中包括超大型基德克里克铜锌矿床,它们产出在缺氧的还原环境。然而,华北陆块在此期间已处在氧化环境,不利于 VMS 型矿床大面积发育,仅局部如红透山地区发育此类矿床;③ 南非兰德型金-铀砾岩矿床是世界上最重要的金矿床类型,也是南非金矿的主要开采对象。金矿区沿兰德盆地周边分布,盆地面积大于 10 万 km^2。盆地的

基底是太古宙花岗岩-绿岩带,内部沉积了巨厚的元古宙火山-沉积岩系。金-铀砾岩矿层主要产在Witwatersrand超群内,主要容矿岩石是富石英砾岩、砂屑岩、碳质层,而页岩和粉砂质白云岩也常有矿化,矿石中主要有用矿物包括自然金、沥青铀矿、碳铀钍矿和黄铁矿。兰德金-铀砾岩层中富含碳质层、沥青铀矿碎屑和滚圆状黄铁矿颗粒,推测当时可能处于大气圈缺氧还原的地球化学环境。兰德型金-铀砾岩矿床在中国至今尚未找到,与华北陆块地质特征较为相似的是山西五台山地区古元古代滹沱群的下部豆村亚群四集庄组、南台组和大石岭组,其内均分布有变质砾岩,而展布规模和含金性以四集庄组变质砾岩发育最好。四集庄组不整合沉积在五台群基底上,五台山变质砾岩金矿与兰德型金-铀砾岩矿床相比,其地质特征、形成条件和形成时间有许多相似之处。然而,金矿成矿条件有明显的差异,五台山古元古代滹沱群四集庄砾岩形成的大气圈环境是氧化环境,不利于金、铀和黄铁矿的沉淀,因而不可能形成大规模金-铀矿床。

(4)加速了华北陆块生命演化的进程。通常认为大氧化事件(GOE)后,由于氧浓度有一定的增长,促使生物圈从原核生物演化为以单细胞为主的真核生物,促进了生命演化的进程。目前早于新元古代晚期(埃迪克拉纪,0.635~0.541 Ga)的宏观真核生物非常稀少。近几年,在华北燕山地区中元古代蓟县纪高于庄组发现了大量宏观化石,保存时代为1.56 Ga,将分米级大型多细胞真核生物的出现时间提前9亿多年。一般来说,从以单细胞为主的真核生物演化到多细胞真核生物大约需经历1.6~1.7 Ga。然而,华北陆块从2.56~2.52 Ga增氧事件到中元古代蓟县纪高于庄组大量宏观化石的发现,即从以单细胞为主的真核生物向宏观多细胞真核生物演化仅经历了~1.0 Ga。这不仅反映了华北陆块上第一次显著的增氧事件比全球其他地区早了约1亿多年,而且生命演化也比其他地区快了0.6~0.7 Ga。

致谢:曾与古生物学专家朱士兴研究员对论文中有关古生物的内容进行讨论,提出了宝贵意见,在此表示感谢!在工作过程中得到陈毓川院士和王登红研究员的大力支持和帮助,作者表示感谢!

References

Borchert H. 1960. Genesis of marins sedimentary iron ores. Bulletin of the Institution of Mining and Metallurgy, 69: 261~279.

Canfield D E, Ngombi-Pemba L, Hammarlund E U, Bengtson S, Chaussidon M, Gauthier-Lafaye F, Meunier A, Riboulleau A, Rollion-Bard C, Rouxel O, Asael D, Pierson-Wickmann A, Albani A E. 2013. Oxygen dynamics in the aftermath of the Great Oxidation of Earth's atmosphere. Proceedings of the National Academy of Sciences, 110: 16736~16741.

Chen Lu, Liu Liandeng. 1982. Geology of the Archean massive sulfide ores province in northern Liaoning, China. Journal of ChangchunUniversity of Earth Sciences, (supp): 117~138 (in Chinese with English abstract).

Chen Yanjing, Yang Qiujian, Deng Jian, Ji Haizhang, Fu Shigu, Zhou Xiaoping, Lin Qing. 1996. An important turning point of the earth's evolution—the revelation of the geological environment disaster at 2300 Ma and its significance. Geogeochemistry, (3): 106~125 (in Chinese with English abstract).

Chen Yanjing, Liu Congqiang, Chen Huayong, Zhang Zengjie, Li Chao. 2000. Carbon isotope geochemistry of graphite deposits and ore-bearing khondalite series in North China: implications for several geoscientific problems. Acta Petrologica Sinica, 16: 233~244 (in Chinese with English abstract).

Chen Yanjing, Tang Haoshu. 2018. Determination of the great oxidation event in North China. In: Zhai Mingguo, Zhang Lianchang, Chen Bin, eds. Major Precambrian Geological Events and Mineralization in North China Craton. Beijing: Science Press, 155~170 (in Chinese).

Chen Yuchuan, Shen Baofeng, Cai Wenyan, Zhu Mingyu, Qihe Rige. 1995. Survey of mines in South Africa. Precambrian Geology Abroad, 2: 1~18 (in Chinese with English abstract).

Cloud P. 1968. Atmospheric and hydrospheric evolution on the primitive Earth. Science, 160: 729~736.

Cui Minli, Zhang Lianchang, Wu Huaying, Xu Yingxia, Li Wenjun. 2014. Timing and tectonic setting of the Sijiaying banded iron deposit in the eastern Hebei Province, North China Craton: Constraints from geochemistry and SIMS zircon U-Pb dating. Jounal of Asian Earth Sciences, 94: 240~251.

Dai Yanpei, Zhang Lianchang, Wang Changle, Liu Li, Cui Minli, Zhu Mingtian, Xiang Peng. 2012. Genetic type, formation age and tectonic setting of the Waitoushan banded iron formation, Benxi, Liaoning Province. Acta Petrologica Sinica, 28(11): 3574~3594 (in Chinese with English abstract).

Dai Zixi, Sheng Jifu, Bai Ye. 2005. Distribution and Potentiality of Lead and Zinc Resources in the World. Beijing: Earthquake Press, 77~82 (in Chinese).

Department of Geology, Nanjing University. 1984. Geochemistry (Revised Edition). Beijing: Science Press, 339 ~ 364 (in Chinese).

Fang Tongming, Sun Yonghua, Cheng Xinbin, Liu Hong, Wu Hujun, Wei Bo. 2017. Geochemical characteristics and metallogenic age of BIF type Fe deposit at Shachang in Miyun Country, Beijing. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 32(1): 42~49 (in Chinese with English abstract).

Farquhar J, Bao Huiming, Thiemens M. 2000. Atmospheric influence of Earth's earliest sulfur cycle. Science, 289: 756~758.

Farquhar J, Savarino J, Aireau S, Thiemens M H. 2001. Observation of wavelength-sensitive mass-independent sulfur isotope effect during SO_2 photolysis implications for the early atmosphere. Journal of Geophysical Research, 106: 32829~32830.

Farquhar J, Peters M, Johnston D T, Strauss H, Masterson A, Wiechert U, Kaufman A J. 2007. Isotopic evidence for Mesoarchaean anoxia and changing atmospheric sulphur chemistry. Nature, 449: 706~709.

Garrels R M, Naeser C R. 1958. Equilibrium distribution of dissolved sulfur species in water at 25°C and 1 atmosphere total pressure. Geochimica et Cosmochimica Acta, 15(1~2): 113~130.

Holland H D. 2006. The oxygenation of the atmosphere and oceans.

Geochimica et Cosmochimica Acta, 66(21): 903～915.
Kaufman A J, Johnston D T, Farquhar J, Masterson A L, Lyons T W, Bates S, Anbar A D, Arnold G L, Garvin J, Buick R. 2007. Late Archean biospheric oxygenation and atmospheric evolution. Science, 317: 1900～1903.
Kendall B, Reinhard C T, Lyons T W, Kaufman A J, Poulton A W, Anbar A D. 2010. Pervasive oxygenation along late Archaean ocean margins. Nature Geoscience, 3(9): 647～652.
Li Houmin, Li Lixing. 2015. Metallogenic regularity of iron ore. In: Chen Yuchuan, Wang Denghong, Xu Zhigang, eds. Important Mineral and Regional Metallogenic Regularity in China. Beijing: Geological Publishing House, 36～54 (in Chinese).
Li Junjian, Shen Baofeng, Li Shuangbao. 1995. The Geology and Gold Mineralization of the Greenstone Belts in Qingyuan-Jiapigou Region, China. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press, 1～132 (in Chinese).
Li Yanhe, Hou Kejun, Wan Defang, Zhang Zengjie, Yue Guoliang. 2010. Formation mechanism of Precambrian banded iron formation and atmosphere and ocean during early stage of the earth. Acta Geologica Sinica, 84(9): 1359～1373 (in Chinese with English abstract).
Li Zhihong, Zhu Xiangkun, Tang Suohan. 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 Zhihong, Zhu Xiangkun, Tang Suhan. 2012. Fe isotope compositions of banded iron formation from Anshan-Benxi area: Constraints on the formation mechanism and Archean ocean environment. Acta Petrologica Sinica, 28(11): 3545～3558 (in Chinese with English abstract).
Liu Li, Zhang Lianchang, Dai Yanpei, Wang Changle, Li Zhiquan. 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).
Liu Li, Zhang Lianchang, Dai Yanpei. 2014. Formation age and genesis of the banded iron formations from the Guyang greenstone belt, western North China Craton. Ore Geology Reviews, 63(1): 388～404.
Lyons T W, Reinhard C T, Planavsky N J. 2014. The rise of oxygen in Earth's early ocean and atmosphere. Nature, 506: 307～315.
Nozaki Y, Alibo D S, Amakawa H, Gamo T, Hasumoto H. 1999. Dissolved rare earth elements and hydrography in the Sulu Sea. Geochimica et Cosmochimica Acta, 63(15): 2171～2181.
Nutman A P, Wan Yusheng, Du Lilin, Friend C R, DongChunyan, Xie Hangqiang, Wang Wei, Sun Huiyi, Liu Dunyi. 2011. Multistage late Neoarchaean crustal evolution of the North China Craton, eastern Hebei. Precambrian Research, 189(1～2): 43～65.
Pavlov A A, Kasting J F. 2002. Mass-independent fraction sulfur isotopers in Archean sediments: strong evidence for an anoxic Archean atmosphere. Astobiology, 2(1): 27～41.
Peng Zidong, Wang Changle, Zhang Lianchang, Zhu Mingtian, Tong Xiaoxue. 2019. Geochemistry of metamorphosed volcanic rocks in the Neoarchean Qingyuan greenstone belt, North China Craton: Implications for geodynamic evolution and VMS mineralization. Precambrian Research, 326(15): 196～221.
Scott C T, Bekker A, Reinhard C, Schnetger B, Krapez B, Rumble D, Lyons T W. 2011. Late Archean euxinic condition before the rise of atmospheric oxygen. Geology, 39(2): 119～122.
Shen Baofeng. 2012. Geologicalcharacters and resource prospect of the BIF type iron ore deposits in China. Acta Geologica Sinica, 86(9): 1376～1395 (in Chinese with English abstract).
Shen Baofeng, Luo Hui, Han Guogang. 1994. Archean Geology and Metallization in Northern Liaoning Province and Southern Jilin Province. Beijing: Geological Publishing House, 1～255 (in Chinese).
Shen Baofeng, Sun Jiyuan, Tian Yongqing, Luo Hui, Mao Debao, Li Shuangbao, Li Junjian. 1998. Geology of Gold Deposits in Wutaoshan-Hengshan Greenstone Belt, Shanxi, China. Beijing: Geological Publishing House, 103～115 (in Chinese).
Shen Baofeng, Zhai Anmin, Yang Chunliang, Cao Xiulan. 2005. Temporal-spatial distribution and evolutional characters of Precambrian iron deposits in China. Geological Survey and Research, 28(4): 196～212 (in Chinese with English abstract).
Shen Baofeng, Zhai Anmin, Miao Peisen, Sima Xianzhang, Li Junjian. 2006. Geological character and potential resources of iron deposits in the North China Block. Geological Survey and Research, 29(4): 245～252 (in Chinese with English abstract).
Shen Qihan. 1998. Geological characteristics and geological background of Early Precambrian banded ferrites in North China platform. In: Shen Qihan, Cheng Yuqi, eds. Papers on the Early Precambrian Geology of the North China Platform. Beijing: Geological Publishing House, 1～30 (in Chinese).
Shi Xiaoying, Li Yiliang, Cao Changqun, Tang Dongjie, Shi Qing. 2016. Life origin, early evolution stages, and ocean environment changes. Earth Science Frontiers, 23(6): 128～139 (in Chinese with English abstract).
Sun Huiyi, Dong Chunyan, Xie Hangqiang, Wang Wei, Ma Mingzhu, Liu Dunyi, Nutman A P, Wan Yusheng. 2010. The formation age of the Neoarchean Zhuzhangzi and Dantazi Groups in the Qinglong area, eastern Hebei Province: Evidence from SHRIMP U-Pb zircon dating. Geological Review, 36(6): 888～898 (in Chinese with English abstract).
Wan Yusheng, Song Biao, Yang Chun, Liu Dunyi. 2005. Zircon SHRIMP U-Pb geochronology of Archaean rocks from the Fushun-Qingyuan area, Liaoning Province and its geological significance. Acta Geologica Sinica, 79(1): 78～87 (in Chinese with English abstract).
Wan Yusheng, Dong Chunyan, Xie Hangqiang, Wang Shijin, Song Mingchun, Xu Zhongyuan, Wang Shiyan, Zhou Hongying, Ma Mingzhu, Liu Dunyi. 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 Changle, Zhang Lianchang, Lan Caiyun, Dai Yanpei. 2014. Petrology and geochemistry of the Wangjiazhuang banded iron formation and associated supracrustal rocks from the Wutai greenstone belt in the North China Craton: Implications for their origin and tectonic setting. Precambrian Research, 255(4): 603～626.
Wang Huichu, Kang Jianli, Ren Yunwei, Chu Hang, Lu Songnian, Xiao Zhibin. 2015. Identification of ～2.7 Ga BIF in North China Craton: Evidence from geochronology of iron-bearing formation in Laizhou-Changyi area, Jiaobei terrane. Acta Petrologica Sinica, 31(10): 2991～3011 (in Chinese with English abstract).
Wang Shoulun, Zhang Ruihua. 1995. U-Pb isotope age of individual zircon from biotite leptynite in the Qidashan iron deposit and its significance. Mineral Deposits, (3): 216～219 (in Chinese with English abstract).
Xiang Peng, Cui Minli, Wu Huaying, Zhang Xiaojing, Zhang Lianchang. 2012. Geological characteristics, 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 Yingxia, Zhang Longfei, Gao Xiaomin, Li Houmin, Jia Dongsuo, Li Lixing. 2014. Metallogenic conditions of high-grade ores in the Sijiaying sedimentary metamorphic iron deposit, eastern Hebei Province. Geology and Exploration, 50(4): 675～688 (in Chinese with English abstract).
Yao Peihui, Wang Kenan, Du Chunlin. 1993. Records of China's Iron Ore Deposits. Beijing: Metallurgic Industry Press, 1～662

(in Chinese).

Zhang Lianchang, Zhai Mingguo, Zhang Xiaojing, Xiang Peng, Dai Yanpei, Wang Changle, Pirajno F. 2012a. Formation age and tectonic setting of the Shirengou Neoarchean banded iron deposit in eastern Hebei Province: Constraints from geochemistry and SIMS zircon U-Pb dating. Precambrian Research, 222-223: 325～338.

Zhang Lianchang, Zhai Mingguo, Wan Yusheng, Guo Jinghui, Dai Yanpei, Wang Changle, Liu Li. 2012b. 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 Lianchang, Wang Changle, Peng Zidong. 2018. Formation environment and mechanism of BIF iron ore. In: Zhai Mingguo, Zhang Lianchang, Chen Bin, eds. Major Precambrian Geological Events and Mineralization in North China Craton. Beijing: Science Press, 112～120 (in Chinese).

Zhang Xiaojing, Zhang Lianchang, Xiang Peng, Wan Bo, 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.

Zhao Zhenhua. 2010. Banded iron formation and related great oxidation event. Earth Science Frontiers, 17(2): 1～12 (in Chinese with English abstract).

Zhu Mingtian, Dai Yanpei, Zhang Lianchang, Wang Changle, Liu Li. 2015. Geochronology and geochemistry of the Nanfen iron deposit in the Anshan-Benxi area, North China Craton: Implications for ～2.55 Ga crustal growth and the genesis of high-grade iron ores. Precambrian Research, 260: 23～38.

Zhu Shixing, Zhu Maoyan, Knoll A H, Yin Zongjun, Zhao Fangchen, Sun Shufen, Qu Yuangao, Shi Min, Liu Huan. 2016. Decimetre-scall multicellular eukaryotes from the 1.56-billion-year-old Gaoyuzhuang Formation in North China. Nature Communications, 7: 11500.

参 考 文 献

陈路, 刘连登. 1982. 中国红透山太古宙块状硫化物矿床集中区地质. 长春地质学院学报, (增刊): 117～138.

陈衍景, 杨秋剑, 邓健, 季海章, 富士谷, 周小平, 林清. 1996. 地球演化的重要转折——2300 Ma 时地质环境灾变的揭示及其意义. 地质地球化学, (3): 106～125.

陈衍景, 刘丛强, 陈华勇, 张增杰, 李超. 2000. 中国北方石墨矿床及赋矿孔达岩系碳同位素特征及有关问题讨论. 岩石学报, 16: 233～244.

陈衍景, 汤好书. 2018. 华北大氧化事件的确定. 见: 翟明国, 张连昌, 陈斌, 等著. 华北克拉通前寒武纪重大地质事件与成矿. 北京: 科学出版社, 155～170.

陈毓川, 沈保丰, 蔡文彦, 朱明玉, 其和日格. 1995. 南非矿山考察简况. 国外前寒武纪地质, 2: 1～18.

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): 3574～3594.

戴自希, 盛继福, 白冶. 2005. 世界铅锌资源的分布与潜力. 北京: 地震出版社, 77～82.

方同明, 孙永华, 程新彬, 刘鸿, 吴虎峻, 魏波. 2017. 北京密云沙厂 BIF 型铁矿地质地球化学特征与成矿时代. 地质找矿论丛, 32(1): 42～49.

李厚民, 李立兴. 2015. 铁矿成矿规律. 见: 陈毓川, 王登红, 徐志刚主编. 中国重要矿产和区域成矿规律. 北京: 地质出版社, 36～54.

李俊建, 沈保丰 李双保. 1995. 清原-夹皮沟绿岩带地质及金的成矿作用. 天津: 天津科学技术出版社, 1～132.

李延河, 侯可军, 万德芳 张增杰, 乐国良. 2010. 前寒武纪条带状硅铁建造的形成机制与地球早期的大气和海洋. 地质学报, 84(9): 1359～1373.

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. 2012. 鞍山—本溪地区条带状铁矿的 Fe 同位素特征及其对成矿机理和地球早期海洋环境的制约. 岩石学报, 28(11): 3545～3558.

刘利, 张连昌, 代堰培, 王长乐, 李智泉. 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.

南京大学地质学系. 1984. 地球化学(修订本). 北京: 科学出版社, 339～364.

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.

沈保丰, 骆辉, 韩国刚. 1994. 辽北—吉南太古宙地质及成矿. 北京: 地质出版社, 1～255.

沈保丰, 孙继源, 田永清, 骆辉, 毛德宝, 李双保, 李俊建. 1998. 五台山-恒山绿岩带金矿床地质. 北京: 地质出版社, 103～115.

沈保丰, 翟安民, 杨春亮, 曹秀兰. 2005. 中国前寒武纪铁矿床时空分布和演化特征. 地质调查与研究, 28(4): 196～212.

沈保丰, 翟安民, 苗培森, 司马献章, 李俊建. 2006. 华北陆块铁矿床地质特征和资源潜力展望. 地质调查与研究, 29(4): 245～252.

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: 沈其韩, 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.

史晓颖, 李一良, 曹长群, 汤冬杰, 史青. 2016. 生命起源、早期演化阶段与海洋环境演变. 地学前缘, 23(6): 128～139.

孙会一, 董春艳, 颉颃强, 王伟, 马铭株, 刘敦一, Nutman A P, 万渝生. 2010. 冀东青龙地区新太古代朱杖子群和单塔子群形成时代: 锆石 SHRIMP U-Pb 定年. 地质论评, 36(6): 888～898.

万渝生, 宋彪, 杨淳, 刘敦一. 2005. 辽宁抚顺—清原地区太古宙岩石 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学及其地质意义. 地质学报, 79(1): 78～87.

万渝生, 董春艳, 颉颃强, 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 定年. 地质学报, 86(9): 1447～1478.

王惠初, 康健丽 任云伟, 初航, 陆松年, 肖志斌. 2015. 华北克拉通～2.7 Ga 的 BIF: 来自莱州—昌邑地区含铁建造的年代学证据. 岩石学报, 31(10): 2991～3011.

王守伦, 张瑞华. 1995. 齐大山铁矿黑云变粒岩单锆石年龄及意义. 矿床地质, (3): 216～219.

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.

许英霞, 张龙飞, 高孝敏, 李厚民, 贾东锁, 李立兴. 2014. 冀东司家营铁矿床富矿成矿条件研究. 地质与勘探, 50(4): 675～688.

姚培慧, 王可南, 杜春林. 1993. 中国铁矿志. 北京: 冶金工业出版社, 1～662.

张连昌, 翟明国, 万渝生, 郭敬辉, 代堰锫, 王长乐, 刘利. 2012b. 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.

张连昌, 王长乐, 彭自栋. 2018. BIF 铁矿的形成环境与形成机制. 见: 翟明国, 张连昌, 陈斌, 等主编. 华北克拉通前寒武纪重大地质事件与成矿. 北京: 科学出版社, 112～120.

赵振华. 2010. 条带状铁建造(BIF)与地球大氧化事件. 地学前缘, 17(2): 1～12.

Effect of 2.56～2.52 Ga oxidation event on mineralization and life evolution in the North China block

SHEN Baofeng*[1,2], BI Junhui[1,2], ZHANG Kuo[1,2]

1) *Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin*, 300170;

2) *North China Center for Geoscience Innovation, China Geological Survey, Tianjin*, 300170

* *Corresponding author*: *sbaofeng*.2009@163.*com*

Abstract

The significant increase in atmospheric oxygen concentration on the earth's surface is one of the most important geological events in the earth's history. It not only changed the earth's surface environment and promoted the evolution of life, but also accelerated the supergene geological process, forming a series of rocks and important ore deposits adapted to the abrupt change of environment. During the Precambrian, the earth experienced two rapid atmospheric oxygen enrichment events, namely the Great Oxidation Event (GOE) and the Neoproterozoic Oxidation Event (NOE). This paper mainly discusses the time limit of the late Neoarcheanoxidation eventin the North China block and its influence on mineralization and biological evolution. In the late Neoarchean period, more than thousand oxide phase BIF type iron deposits and occurrences belonging to the Algoma type were formed in the North China block. The total identified reserves are about 33.536 billion tons, accounting for 46% of the total iron ore reserves in China. These deposits and mineralised pit occurrences were formed in a weakly alkaline oxidation environment, and their metallogenic ages are mainly between 2.56 Ga and 2.52 Ga, and underwent metamorphism at 2.51～2.50 Ga. The characteristics of Ce anomaly, iron isotopic composition and Mass-Independent Fractionation effect of sulfur isotope (MIF-S) in BIF type iron ore deposits show that the oxygen concentration in the atmosphere increased greatly during 2.56～2.52 Ga, and changed from anoxic reduction environment to oxidation environment with oxygen concentration (1% ～ 10% PAL), implying that a significant oxygenation event occurred in the North China block during this period. The oxidation event has an important impact on the mineralization of the North China landmass, mainly in the following three aspects: (1) the formation of a large number of oxide phase BIF type iron ore deposits, which are the most important iron deposit typesmined in China, but lack carbonate BIF type iron ore deposits; (2) restricting the development of VMS type Cu, Zn massive sulfide deposits in the late Neoarchean, which is only reported in the Hongtoushan area, Northern Liaoning Province; (3) there is no Rand type gold uranium conglomerate deposit as in South Africa. In addition, the oxidation event accelerated the evolution of life on the North China block. Generally, it takes about 1.6～1.7 billion years to evolve from single cell eukaryotes to macro multicellular eukaryotes. However, from the late Neoarchean (2.56～2.52 Ga) oxidation event to the discovery of macro fossils from the Gaoyuzhuang Formation of Jixian period in the North China block, the evolution from single cell eukaryotes to macro multicellular eukaryotes only took about 1 billion years. The results show that the time limit of the first oxidation event is 2.56～2.52 Ga in the North China block, which is not only about 100 million years earlier than the other regions of the world (～2.4 Ga), but also the life evolution is 600～700 million years earlier than other regions.

Key words: Great Oxygenation Event; North China block; oxide phase BIF type iron deposit; 2.56～2.52 Ga; mineralization; life evolution