

# 前寒武纪 VMS 与 BIF 铁矿床共生组合研究进展\*

彭自栋<sup>1,2</sup>, 王长乐<sup>1</sup>, 赵刚<sup>3</sup>, 朱明田<sup>1</sup>, 张连昌<sup>1\*\*</sup>, 佟小雪<sup>1,2</sup>, 南景博<sup>4</sup>

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

2 中国科学院大学地球科学学院, 北京 100049; 3 中国有色集团抚顺红透山矿业有限公司, 辽宁 抚顺 113000;

4 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083)

**摘要** VMS 和 BIF 铁矿作为两种重要的矿床类型, 在前寒武纪常常以共生组合方式赋存于古老克拉通内的表壳岩系中, 是早期地球构造和环境演化耦合作用的产物。该组合不仅记录了当时特定的构造及大气和海洋环境, 而且两者也是全球铜、铁、铅、锌等金属的重要来源, 因此, 开展 VMS 与 BIF 共生组合的研究具有重大科学价值和经济效益。前人研究表明, 前寒武纪 VMS 与 BIF 集中出现于 ~2.7 Ga 和 ~1.9 Ga, 与同时期地幔柱活动和地壳增生的高峰相对应, 两者共生时 BIF 通常产出于 VMS 外围或上盘, 但在矿体空间展布上具有此消彼长的关系, 研究还认为, 前寒武纪地幔柱活动诱发的海底扩张、海底和地表强烈的火山活动形成的多重热液系统, 可同时为 VMS 和 BIF 提供物质来源, 海水的硫逸度、氧逸度及大气的氧含量是影响 VMS 与 BIF 空间分布及 VMS 硫同位素组成的重要因素。目前, VMS 与 BIF 共生组合研究取得了较大进展, 但仍存在一些问题, 缺乏典型共生实例的精细解剖, 已有共生模型缺乏详细的矿床成因机制研究支撑, 对两者共生组合产出的构造背景和古海洋环境仍存在不同认识。华北克拉通的清原和五台新太古代绿岩带发育有较大规模的 VMS 与 BIF 铁矿共生现象, 对其开展详细研究工作将为解决上述问题提供借鉴。

**关键词** 地质学; 火山成因块状硫化物矿床; 条带状铁建造; 成因机制

中图分类号: P618.31

文献标志码: A

## Research progress of Precambrian VMS-BIF paragenetic assemblage

PENG ZiDong<sup>1,2</sup>, WANG ChangLe<sup>1</sup>, ZHAO Gang<sup>3</sup>, ZHU MingTian<sup>1</sup>, ZHANG LianChang<sup>1</sup>,  
TONG XiaoXue<sup>1,2</sup> and NAN JingBo<sup>4</sup>

(1 Key Laboratory of Mineral Resources, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2 School of Earth Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3 China Nonferrous Hongtoushan Ming Group Co., Ltd., Fushun 113000, Liaoning, China; 4 School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

### Abstract

VMS and BIF are two kinds of important deposit types, regarded as syngenetic and stratabound deposits within the supracrustal rocks of old craton in Precambrian, which were formed as a result of the coupling of tectonic movement and environmental evolution of the early Earth. Previous researches indicated that the mantle plume activity and crustal growth at ~2.7 Ga and ~1.9 Ga culminated the VMS-BIF paragenetic assemblage

\* 本文得到国家自然科学基金项目“晚太古代清原绿岩带 BIF 与 VMS 矿床的成因联系及沉积环境”(批准号:41572076)和“973”项目“华北克拉通前寒武纪重大地质事件与成矿”(批准号:2012CB416601)联合资助

第一作者简介 彭自栋,男,1988年生,博士研究生,矿物学、岩石学、矿床学专业。Email: pengzidong2007@126.com

\*\* 通讯作者 张连昌,男,1959年生,研究员,矿床地质与地球化学专业。Email: lc Zhang@mail.iggcas.ac.cn

收稿日期 2016-05-16; 改回日期 2017-06-01。秦思婷编辑。

in Precambrian, and when BIF and VMS formed synchronously they usually occurred at the same stratigraphic horizon with BIF in the immediate vicinity of or slightly higher than the VMS. These studies also suggested that mantle plume events in Precambrian led to the spreading of midocean ridges and volcanism, which happened both on the ocean floor and at the earth surface, both processes thus having contributed to the forming of multiple hydrothermal systems; meanwhile, those systems provided ore-forming materials for VMS and BIF. Furthermore, the sulfur fugacity of the hydrosphere and the oxygen content of the ocean and atmosphere seem to have been key factors influencing the distribution of VMS and BIF as well as the sulfur isotopic compositions of VMS. Great progress has been made to figure out this intriguing and not fully answered question about the co-existence of VMS and BIF. However, there are still some problems, for example, there is no sufficient detailed study of living cases, the existing paragenetic model requires more study on genetic mechanism, and the geological setting and hydrosphere conditions for the formation of VMS and BIF remain ambiguous. Specifically, both the VMS and BIF in the Neoproterozoic Qingyuan and Wutai greenstone belt of the North China Craton were formed synchronously as shown by recent high-precision geochronology work; hence, a detailed study of those deposits may be a fruitful approach to solving the above questions.

**Key words:** geology, volcanogenic massive sulfide deposit, banded iron formation, genetic mechanism

火山成因块状硫化物矿床(Volcanogenic Massive Sulfide, VMS)的形成受区域伸展性构造运动、火山活动及海底热液作用等的影响,是地球演化过程中出现的最为特殊的一类矿床,它在整个地球演化历程的75%时间内广泛出现,从太古代到中生代均有产出(Franklin et al., 2005; Huston et al., 2007; Van Kranendonk et al., 2008; Piercey, 2010)。条带状铁建造(Banded Iron Formation, BIF)是前寒武纪特有的富铁( $>15\%$ )化学沉积岩,为早期地壳的重要组成部分,其产出的构造背景和成分、结构特征可为早期地球构造演化、水圈和大气圈成分以及生命活动等方面提供重要信息(Klein, 2005; Bekker et al., 2010; 王长乐等, 2012)。同时,这2类矿床也是世界上铜、铁、铅、锌等重要矿产的主要来源(Isley, 1995; Piercey, 2010)。

近年来随着前寒武纪地质研究工作的深入,有学者发现VMS与BIF铁矿在早前寒武纪存在共生现象(Weizer, 1976; Meyer, 1988; Isley et al., 1999; Huston et al., 2004)。目前,关于二者共生问题的研究,在时间和空间分布特征上取得了一定认识,即大规模的共生现象主要见于新太古代早期和古元古代晚期的表壳岩系中,而且二者在同一区域的分布常具此消彼长的过渡性。然而,关于2类矿床共生的内在成因联系、构造背景及形成古环境等方面仍存在诸多争议(Slack et al., 2007; Thurston et al., 2004; Bekker et al., 2004; 2010; Huston et al., 2010; 2014; Rasmussen et al., 2012; Lodge et

al., 2015)。

本文在系统收集和总结近年来国内外相关资料的基础上,详细阐述了VMS与BIF铁矿共生的时空分布特征、成因联系及其形成时的古构造和古环境等,简要剖析了当前研究存在的问题,以期对中国华北克拉通的VMS与BIF铁矿共生组合研究工作有所启示。

## 1 前寒武纪 VMS 与 BIF 铁矿共生组合特征

在早期地质工作中,VMS与BIF铁矿通常被视为2类独立的矿床进行研究,关于二者共生组合特征的认识始于早前寒武纪VMS矿床周围含铁石英岩和BIF的发现以及硫化物相BIF的识别(Weizer, 1976; James, 1983)。进一步通过将前寒武纪VMS与BIF形成时间和数量与地壳增生强度对比发现,~2.7 Ga和~1.9 Ga这2个全球地壳快速增长时期,VMS与BIF无论在数量还是在规模方面都达到了高峰(Isley et al., 1999; Bekker et al., 2010; Rasmussen et al., 2012)(图1)。然而,VMS与BIF是否可共存于同一地区,一个地区的VMS与BIF可否同时形成,这些问题已逐渐成为学者们关注的焦点。

统计显示,目前在全球范围内已有多地存在VMS与BIF铁矿共生的现象,如北美Abitibi绿岩带(Thurston et al., 2008)西格陵兰Isua绿岩带(Weizer

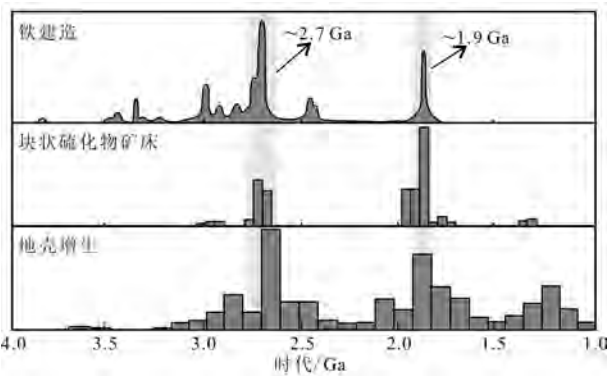


图 1 前寒武纪 VMS、BIF 和地壳增生时间演化图  
(改自 Rasmussen et al., 2012)

Fig. 1 Histogram showing the abundance of VMS and BIF together with the intensity of crust growth in Precambrian (modified after Rasmussen et al., 2012)

et al., 1989; Huston et al., 2014)、中国河北内丘(祁思敬, 1983)、清原(顾连兴等, 2004; 万渝生等, 2005; Gu et al., 2007; 张雅静等, 2014; Zhu et al., 2015; 彭自栋等, 2015)和五台等地区(Polat et al., 2005; 李碧乐等, 2007)以及美国 Arizona 州 Jerome 地区(Slack et al., 2007)。此外, 基于对前人(Isley et al., 1999; Huston et al., 2004; Franklin et al., 2005; 李文渊, 2007; Bekker et al., 2010; Mercier-Langevin et al., 2014)年代学资料的总结, 发现 VMS 与 BIF 在同一区域共存且近乎同时形成的现象较为普遍, 且主要出现于太古代其次为元古代(图 2)。

VMS 矿床常以火山岩为赋矿围岩, 成因上与火山作用相关, 因而在前寒武纪与其共生的 BIF 应隶

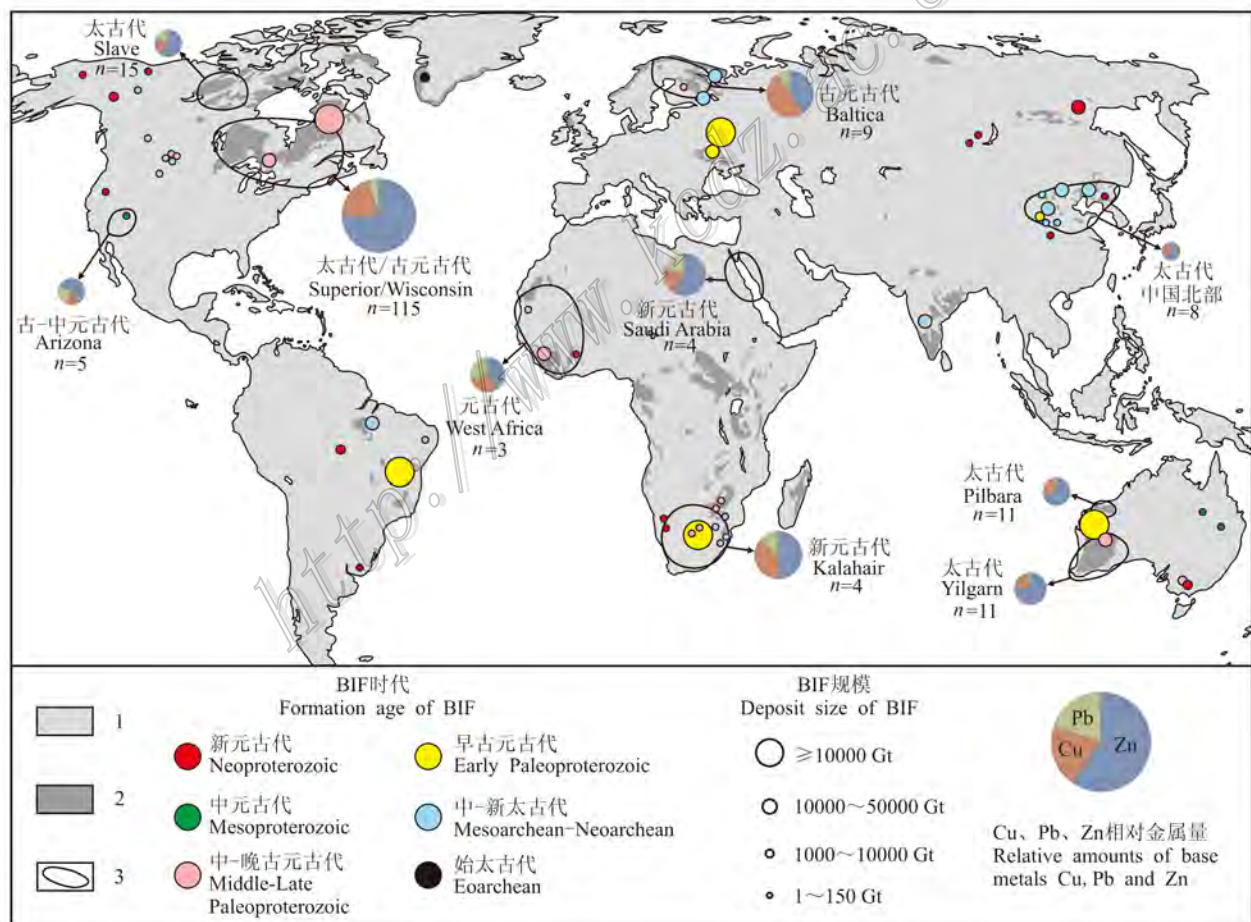


图 2 前寒武纪全球主要 VMS 和 BIF 分布图(改自 Trendall, 2002; Franklin et al., 2005; Bekker et al., 2010; Mercier-Langevin et al., 2014)

1—后太古代地体; 2—太古代地体; 3—VMS 矿床产区

Fig. 2 Geological map showing the distribution of main VMS and BIF in the world in Precambrian (modified after Trendall, 2002; Franklin et al., 2005; Bekker et al., 2010; Mercier-Langevin et al., 2014)

1—Post Archean terranes; 2—Archean terranes; 3—VMS mineralization areas

属于 Algoma 型,其主要赋存于始太古代—古元古代早期的绿岩带火山-沉积序列中(Goodwin, 1973; James, 1983; Isley et al., 1999) (表 1)。位于北美的 Abitibi 绿岩带为全球最大、最完整的绿岩带,是新太古代板块俯冲-碰撞和地幔柱活动叠加作用的综合产物(Ayer et al., 2002; Sproule et al., 2002; Wyman, 2002),详细的锆石年代学研究表明,Abitibi 绿岩带的岩浆活动主要发生于 2750~2670 Ma,持续约 90 Ma,根据年代学和岩相学差异,该绿岩带自下而上划分为 7 个火山-沉积旋回,各旋回的岩相组合从基部的超镁铁质-镁铁质岩石到上部的长英质岩石,再到顶部的沉积岩(Ayer et al., 2002; Thurston et al., 2008)。每个火山-沉积旋回的演化

均伴随大规模的成矿作用,据统计产于该绿岩带中的 VMS 金属量约占太古代 VMS 矿床金属总量的 80%(Huston et al., 2014; Mercier-Langevin et al., 2014)。基于对该绿岩带层序地层学及相关 BIF 地质特征的研究,Thurston 等(2008; 2012)认为其中的 VMS 与 BIF 矿床密切共生于同一套火山-沉积序列中,且 BIF 一般位于单个火山序列的顶端,表明其成矿作用主要发生于火山活动的间歇期。此外,2 类矿床在整个绿岩带中的产出具此消彼长的过渡特征,空间上有明显的分带性,自西向东由以 BIF 为主逐渐转变为以 VMS 为主(图 3)。相似的共生现象在澳大利亚 Koolyanobbing 绿岩内也有发现,其中 ~3.0 Ga BIF 下部常见富含黄铁矿的块状硫化物透

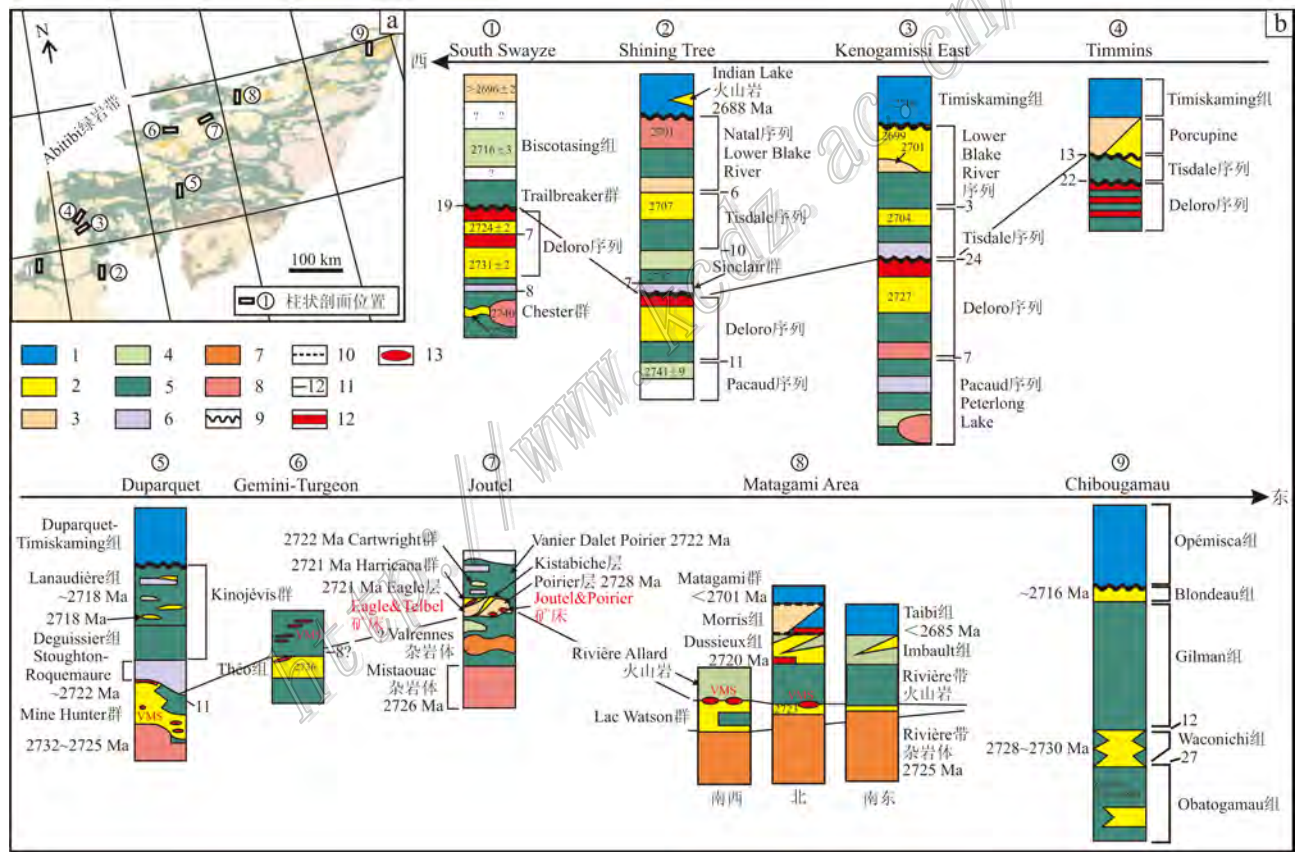


图 3 北美太古代 Abitibi 绿岩带 VMS 与 BIF 空间分布图(改自 Thurston et al., 2008)

a. Abitibi 绿岩带; b. 绿岩带内代表性地层柱状图

1—沉积岩; 2—流纹岩; 3—英安岩; 4—安山岩; 5—玄武岩; 6—科马提岩; 7—层状侵入体; 8—花岗岩; 9—不整合界面; 10—假整合界面; 11—沉积间隔时限(Ma); 12—铁建造; 13—块状硫化物矿床

Fig. 3 Geological map showing the spatial relationship of VMS and BIF in the North American Archean Abitibi greenstone belt (modified after Thurston et al., 2008)

a. Abitibi greenstone belt; b. Representative stratigraphic columns from selected locations across the greenstone belt

1—Sediments; 2—Rhyolite; 3—Dacite; 4—Andesite; 5—Basalt; 6—Komatiite; 7—Layered intrusion; 8—Granite; 9—Unconformity; 10—Pseudoconformity; 11—Duration of depositional gap (Ma); 12—Iron Formation; 13—VMS deposit

表 1 Algoma 与 Superior 型 BIF 矿床地质特征对比(改自王长乐等, 2012)

Table 1 Comparison of geological features between Algoma- and Superior-type BIF deposits (modified after Wang et al., 2012)

对比内容	Algoma 型	Superior 型
形成时代	主要为中-新太古代, 2.8~2.7 Ga 为成矿高峰期	主要为古元古代, 2.5~2.4 Ga 和 1.9~1.8 Ga 为成矿高峰期
含铁岩系原岩及建造类型	与超基性、基性火山岩-火山沉积岩系关系密切; 铁建造多发育于基性火山岩与酸性火山岩或火山岩与火山沉积岩系之间	与碎屑岩-碳酸盐岩关系密切; 铁建造主要分布于沉积碎屑岩与碳酸盐岩之间
沉积构造环境	岛弧、弧后盆地或扩张大洋中脊附近	被动大陆边缘, 大陆架浅海环境, 克拉通内盆地
沉积相	常见氧化物相、硅酸盐相, 部分情况下可见硫化物相-含硫化物相	主要为氧化物相、碳酸盐相
矿石特征	主要为条带状磁铁矿, 矿石品位较低, 矿体厚度通常较小	主要为条带状和块状赤铁矿-磁铁矿; 矿石品位较高, 一般矿体厚度大
变质变形	通常变质程度较高, 可达绿片岩-角闪岩相; 变形较强, 混合岩化较弱	一般变质程度浅, 多为绿片岩相; 变形弱, 混合岩化不明显
典型矿床/地区	美国 Vermilion 铁矿、加拿大 Michipicoten 铁矿、中国冀东石人沟和司家营铁矿等	美国-加拿大 Superior 湖地区, 澳大利亚 Hamersley 地区, 中国袁家村 BIF 等

镜体(Angerer et al., 2013)。

元古代 VMS 与 BIF 共生现象集中出现于 1.9~1.8 Ga, 目前已报道的较大规模共生现象位于美国 Arizona 州 Jerome 地区(1.76~1.70 Ga)。在该地区的变火山-沉积岩系中, 经常可见含磁铁矿/赤铁矿碧玉及 BIF 和 VMS 矿床密切共生, 并且铁碧玉和 BIF 常产于 VMS 矿床的外围, 空间上呈现过渡, 在部分情况下铁碧玉和 BIF 也可产于 VMS 的上盘, 类

似于“铁帽”(Slack et al., 2007)(图 4)。位于 Superior 克拉通的 Flin Flon 变火山岩带是世界上 VMS 矿床产出规模最大的区域之一, 该地区已知规模较大的 Cu-Zn 型 VMS 矿床有 24 个, 其中规模最大的 Flin Flon 矿床金属总量达 62.4 Mt (Syme et al., 1993; Malinowski et al., 2008), 年代学研究表明这些矿床主要形成于 1.92~1.88 Ga (Hoffman, 1988; Syme et al., 1993); 同时, Superior 克拉通也是 Supe-

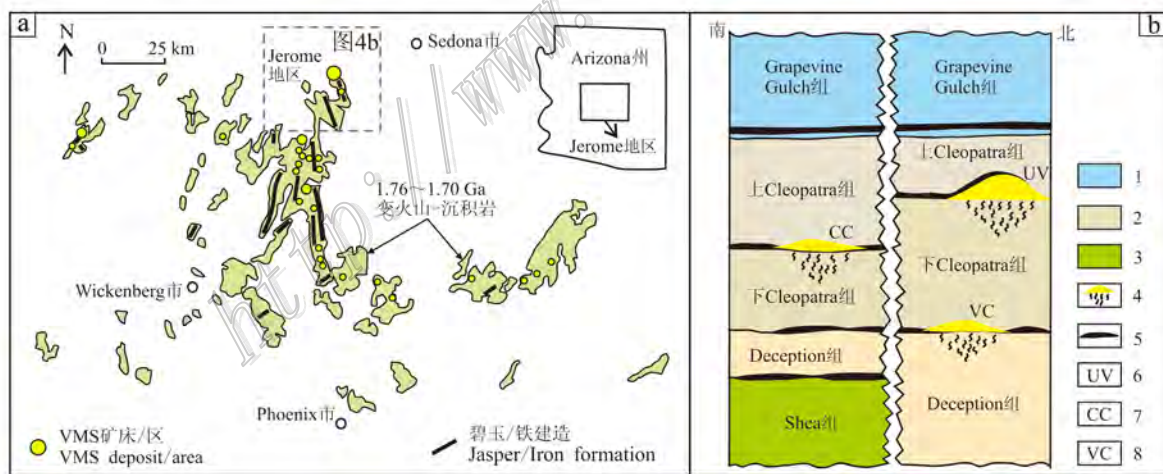


图 4 美国 Arizona 州中元古代早期 VMS 与 BIF 共生分布图(改自 Slack et al., 2007)

a. 美国 Arizona 州中部地区地质简图, 仅显示中元古代地层; b. Jerome 地区南部和北部中元古代地层剖面图, 为清楚展示 VMS 与 BIF 的相对空间位置, 矿床规模进行了一定程度的扩大

1—沉积岩; 2—流纹岩; 3—玄武岩; 4—VMS 矿床; 5—碧玉/铁建造; 6—United Verde 矿床; 7—Copper Chief 矿床; 8—Verde Central 矿床

Fig. 4 Geological map showing the distribution of VMS-BIF paragenetic assemblage in Arizona, USA (modified after Slack et al., 2007)

a. Sketch map of central Arizona, Mesoproterozoic strata only; b. Section of Mesoproterozoic strata of south and north Jerome, in order to show the spatial relationship of VMS and BIF (their scale is exaggerated to some extent)

1—Sediments; 2—Rhyolite; 3—Basalt; 4—VMS deposit; 5—Jasper/Iron Formation; 6—United Verde deposit; 7—Copper Chief deposit; 8—Verde Central deposit

rior 型 BIF 最典型的发育区,且研究显示这些 BIF 的形成时代为 1.89~1.84 Ga (Findlay et al., 1995; Fralick et al., 2002; Schneider et al., 2002; Rasmussen et al., 2012)。前已述及,前寒武纪与 VMS 共生的 BIF 为 Algoma 型,但 Superior 克拉通上同时发育大规模的 VMS 和 Superior 型 BIF,这是否同样为一类共生现象,目前尚缺乏相关研究。

## 2 前寒武纪 VMS 与 BIF 铁矿共生组合的成因联系

大量证据表明,普遍出现于前寒武纪的 VMS 与 BIF 铁矿共生组合并非偶然,二者存在成因方面的联系 (Peter, 2003; Slack et al., 2007; Bekker et al., 2010)。当前,关于其成因联系的研究主要集中于物质来源和形成机制 2 个方面。

### 2.1 物质来源

前寒武纪 VMS 与 BIF 铁矿在形成时间和规模上具有一致性,均与地质历史时期中的一些重大事件(如地幔柱、板块构造)密切相关 (Bekker et al., 2010; Huston et al., 2010; Planavsky et al., 2010)。地幔柱或构造运动可诱发海底强烈的火山-热液活动,与此同时,大量的铁质和还原性气体的输入可为形成 VMS 与 BIF 提供物质 (Barley et al., 2005)。Abrams 等 (1982a; 1982b; 1984) 基于美国 Georgia 州西部前寒武纪晚期 (1.3~1.0 Ga) VMS、BIF 及围岩岩相学和地球化学特征分析认为,该区的 VMS 和 BIF 存在成因联系,它们均与双峰式火山活动有关,成矿作用主要发生于火山活动的间歇期,且 VMS 的热液系统为 BIF 提供成矿物质。Angerer 等 (2013) 和 Hollis 等 (2015) 对澳大利亚西部太古代 Yilgarn 克拉通内的 VMS 和 BIF (3.2~2.7 Ga) 开展了围岩岩相学和地球化学研究,结合前人年代学资料,他们认为那些成矿时间相近的 VMS 与 BIF 产于同一火山-沉积序列,并且形成于相同的构造背景,据此推测 BIF 成矿物质源自 VMS 的热液系统。

综上,VMS 与 BIF 成矿物质来自共同的热液系统,但目前在其具体成矿过程方面仍存在不同认识。Zaleski 等 (1995) 对 Superior 地区 Manitouwadge 绿岩带的 Geco VMS 矿床 (2.72 Ga) 开展了详细的岩相学和地质填图工作,并根据矿化类型、蚀变特征、矿体与 BIF 空间关系变化及矿石有用组分差异将矿体划分为 3 类:下部富 Cu、网脉状-浸染状矿体、中部

块状 Zn-Cu-(Pb) 矿体和上部以 BIF 为围岩的块状 Zn-Pb-(Cu) 矿体。通过对比不同类型矿体中矿石 Cu/Zn 比值及其空间产出关系,他们认为下部高 Cu/Zn 比值的矿体形成于热液活动早期的高温阶段,而上部低 Cu/Zn 比值的矿体及其围岩 BIF 则形成于热液系统衰减期的低温阶段。Gross (1995) 对全球古太古代-元古代铁建造的不同沉积相(氧化物相、硅酸盐相、碳酸盐相、硫化物相)进行全岩地球化学特征分析,结果表明与 VMS 共生的 BIF 与双峰式火山作用关系密切,多形成于火山-热液喷口或其附近,其成矿物质来自 VMS 成矿系统外围伴生的小规模、低温热液系统。

### 2.2 形成机制

基于太古代硅质碎屑岩、黑色页岩、VMS 中硫化物及 BIF 中磁铁矿的  $\Delta^{33}\text{S}$  和  $\delta^{56}\text{Fe}$  特征的系统研究, Bekker 等 (2010) 认为控制 VMS 与 BIF 共生的主导机制为古海洋氧逸度和硫逸度的变化。海底火山-热液活动会向海洋中输送大量还原性气体(如  $\text{H}_2\text{S}$ ),促使火山口或热液喷口附近硫逸度显著升高,最终可导致 VMS 矿床的形成;与此同时,在距离热液喷口偏远的地方,由于海水的稀释作用会导致硫逸度下降,进而在低硫逸度和较高氧逸度条件下会沉淀 BIF。此外,在近陆一侧,陆相火山活动产生的  $\text{SO}_2$  光解产物和陆源物质的输入会造成含黄铁矿黑色页岩和硅质碎屑岩的沉积。Farquhar 等 (2011) 通过太古代硫化物和硫酸盐硫同位素特征的研究,指出古海洋存在因  $\text{H}_2\text{S}$  和  $\text{Fe}^{2+}$  相对含量变化导致的化学变层 (图 5)。

美国 Jerome 地区发育大规模空间关系密切的含磁铁矿/赤铁矿碧玉、BIF 和富铜 VMS,它们均产于厚约 1.0~2.5 km 的古元古代晚期 (1.74~1.71 Ga) 火山-沉积序列中 (Lindberg, 1986; Lindberg et al., 1987; Anderson, 1989)。通过铁碧玉和 BIF 的全岩地球化学分析, Slack 等 (2007) 认为海底火山-热液活动强度是控制其与 VMS 共生的主要因素。当热液强度较大,足以阻碍深海氧化反应时,铁会被搬运并在远离热液喷口的地方形成 BIF;若其不足,则铁以硫化物或氧化物形式沉淀在喷口附近。Foustoukos 等 (2008) 认为,在深水缺氧环境中 BIF 的形成与海底火山热液作用相关,铁的氧化沉淀可能发生于热液气液相分离条件下,此时挥发性组分(如  $\text{H}_2$  和  $\text{HCl}$ )优先进入气相,余下部分相应渐变为碱性、氧化的高盐度溶液,进而造成  $\text{Fe}^{2+}$  氧化沉淀形

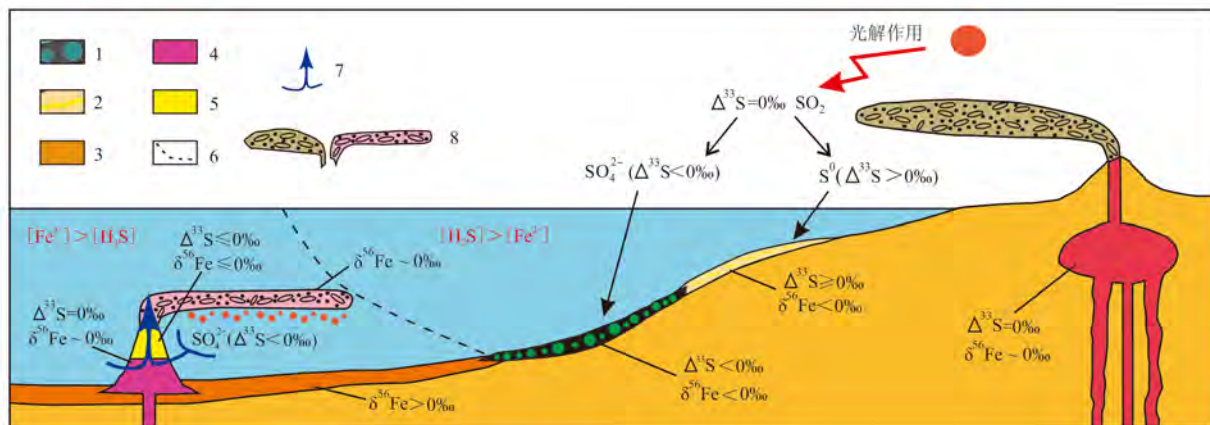


图 5 太古代 VMS 和 BIF 共生假想成因模式图(改自 Bekker et al., 2010; Farquhar et al., 2011)

1—含球状黄铁矿黑色页岩; 2—含浸染状黄铁矿灰色页岩/硅质碎屑岩; 3—条带状铁建造; 4—长英质火山岩; 5—火山成因块状硫化物矿床; 6—化学变层; 7—热液循环单元; 8—近海平面/海底热液柱

Fig. 5 Hypothetical genetic model schematic diagram of Archean VMS-BIF paragenetic assemblage (modified after Bekker et al., 2010; Farquhar et al., 2011)

1—Black shale with pyrite nodules; 2—Gray shale/fine-grained siliciclastic rock with disseminated pyrite; 3—Banded iron formation; 4—Felsic volcanic rock; 5—Volcanogenic massive sulfides; 6—Chemocline; 7—Hydrothermal circulation cells; 8—Subaerial/submarine plumes

成 BIF。然而,这一假想缺乏实验数据和典型实例支持,但仍可在一定程度上解释 VMS 与 BIF 的共生机制。

### 3 前寒武纪 VMS 与 BIF 共生组合所反映的古构造和古环境

#### 3.1 古构造环境

Algoma 型 BIF 常形成于俯冲构造背景下,部分可能存在地幔柱的叠加作用(Zhang et al., 2012; 张连昌等, 2012; Thurston et al., 2012; Rasmussen et al., 2012; Haugaard et al., 2012; Angerer et al., 2013),而 VMS 矿床普遍产出于张性构造环境(如张性岛弧或裂谷等)(Franklin et al., 2005; Galley et al., 2007; Thurston et al., 2008; Piercey, 2010; Huston et al., 2010)。Franklin 等(2005)发现 VMS 形成的峰期与各微陆块聚合形成超大陆的时间具有一致性,进而推测 VMS 成矿与板块俯冲或碰撞事件关系密切。如前所述,太古代 VMS 与 BIF 共生现象主要发生于同时期的绿岩带中,因此,绿岩带形成构造背景的研究可反映二者共生的构造环境。

Taylor 等(2003)和 Lodge 等(2015)对 ~2.7 Ga Vermilion 绿岩带(位于 Superior 地区)的岩相学和地球化学研究显示, VMS 矿床集中分布地区发育科马提岩和大量具岛弧-弧后特征的镁铁质火山岩(主要

为拉斑质和钙碱性玄武岩),同时,仅以 VMS 围岩形式出现的长英质岩石,经原始地幔标准化后,微量元素配分曲线略微右倾,具明显的 Nb、Ti 负异常和 Zr、Hf 正异常,其 LREE(轻稀土元素)和 HREE(重稀土元素)相对于原始地幔的富集程度分别为 10~50 倍和 7~20 倍,整体与 FII 型长英质火山岩类似,据此认为其形成构造环境为地幔柱叠加的张性岛弧。而 Lodge 等(2015)对该区规模最大的 Soudan BIF 的围岩地球化学研究显示,经原始地幔标准化后,其镁铁质火山岩微量元素配分曲线可分为 2 类:一类呈平坦-略微右倾, Th、Nb 和 LREE 相对亏损, Nb/Th 比值介于 0.8~1.2 之间,并且其 Th/Yb 和 Zr/Y 比值具有与拉斑玄武岩类似的特征;另一类微量元素配分曲线略微右倾,具负的 Nb 和 Ti 异常, Nb/Th 比值小于 0.5, Th/Yb 和 Zr/Y 比值与钙碱性玄武岩一致。上述特征表明,其原岩主要为钙碱性玄武岩和拉斑玄武岩,暗示该 BIF 产于岛弧向弧后过渡的环境。Ayer 等(2002)通过对 Abitibi 绿岩带的岩相学、同位素年代学和同位素地球化学进行研究认为,该绿岩带内的火山岩可划分为 2750~2697 Ma 的以拉斑玄武岩和科马提岩组合占主导的 5 个火山旋回和 2696~2675 Ma 的以钙碱性玄武岩为主导的 2 个旋回,对 11 件不同旋回中的科马提岩、拉斑-钙碱性玄武岩、长英质火山岩的 Nd 同位素分析显示,其  $\epsilon_{Nd}(t)$  值变化于 2.2~3.4, 平均为  $2.5 \pm$

0.5, 据此认为 Abitibi 绿岩带为地幔柱和俯冲作用下原地演化的产物。Sproule 等(2002)对 Abitibi 绿岩带广泛发育的科马提岩的地球化学研究显示, 它们的化学组成具有明显的时空差异, 经原始地幔标准化后, 形成于 2750~2735 Ma 的科马提岩 Ti 亏损, 具高的  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  比值(25~35)及低的  $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{PM}}$  比值(0.6~0.8), 2725~2720 Ma 的科马提岩 Al 亏损、Ti 富集, 具低的  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  (6~14) 比值和高的  $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{PM}}$  比值(1.2~2.0), 而 2718~2710 Ma 的科马提岩则具有相对居中的  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  比值(15~25)和  $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{PM}}$  比值(0.8~1.2), 这些都表明时间跨度长达 50 Ma 的科马提岩应当为多期次地幔柱活动的产物。在上述工作基础上梳理, 认为该绿岩带不同于世界范围内其他的绿岩带, 其广泛发育双峰式火山岩并有大规模的科马提岩产出, 相应的地球化学特征指示其镁铁质火山岩具有岛弧玄武岩-拉斑玄武岩特征。综上所述 Abitibi 绿岩带应当形成于张性岛弧-弧后盆地环境, 同时具有同期地幔柱作用的叠加。

### 3.2 对古环境的指示

BIF 的形成需要 3 个重要前提条件: ① 还原-弱氧化的大气和海洋环境(Holland, 1984; Bekker et al., 2004); ② 海洋中低的硫酸盐和硫化物含量(Habicht et al., 2002); ③ 大型海底热液系统对铁的供给(Kump et al., 2005)。据此, 部分学者利用 BIF 的丰度变化来指示古海洋氧化还原状态的转变(Cloud, 1973; Holland, 1973; 1984; Beukes et al.,

1992; Huston et al., 2004)。VMS 作为海底热液与周围海水混合作用的产物(Huston et al., 2010), 其中硫化物硫同位素组成及伴生喷流沉积岩的地球化学特征可反映同时期的海洋和大气环境(Farquhar et al., 2003; Slack et al., 2007)。因此, 二者的共生组合特征可有效约束前寒武纪古大气和古海洋环境。

大规模 VMS 与 BIF 共生现象最早出现于~2.7 Ga, 这一时期的地质记录中缺乏沉积成因的层状硫酸盐矿床, 但发育巨量的 BIF (以 Algoma 型为主, 少量 Superior 型), 表明新太古代海洋整体缺硫低氧(Huston et al., 2004)。同时, 大量研究表明, 与 BIF 同时期的 VMS 和海洋积物中的硫化物、硫酸盐均记录了硫同位素( $\Delta^{33}\text{S}$ )的非质量分馏现象( $\Delta^{33}\text{S} = -2\text{‰} \sim 10\text{‰}$ )(Farquhar et al., 2000; Mojzsis et al., 2003; Sharman et al., 2015), 且硫化物( $\delta^{34}\text{S} = -1\text{‰} \sim 3\text{‰}$ )和硫酸盐( $\delta^{34}\text{S} = 3.8\text{‰} \sim 5.4\text{‰}$ )的  $\delta^{34}\text{S}$  值未发生较大程度分馏(Veizer et al., 1982; Hayes et al., 1992)(图 6a,b), 说明当时大气应处于缺氧状态(Farquhar et al., 2000)。

一般认为, 发生于 2.45~2.20 Ga 的大氧化事件(Great Oxidation Event, GOE)导致了大气中氧含量明显上升, 至 2.2 Ga 时, 氧含量已基本接近现代水平(Holland, 2002; 2006; Bekker et al., 2004; Hannah et al., 2004)。大气氧含量的升高一方面引起硫同位素非质量分馏效应的消失(Farquhar et al., 2000; Pavlov et al., 2002)(图 6a,b), 并造成大陆有

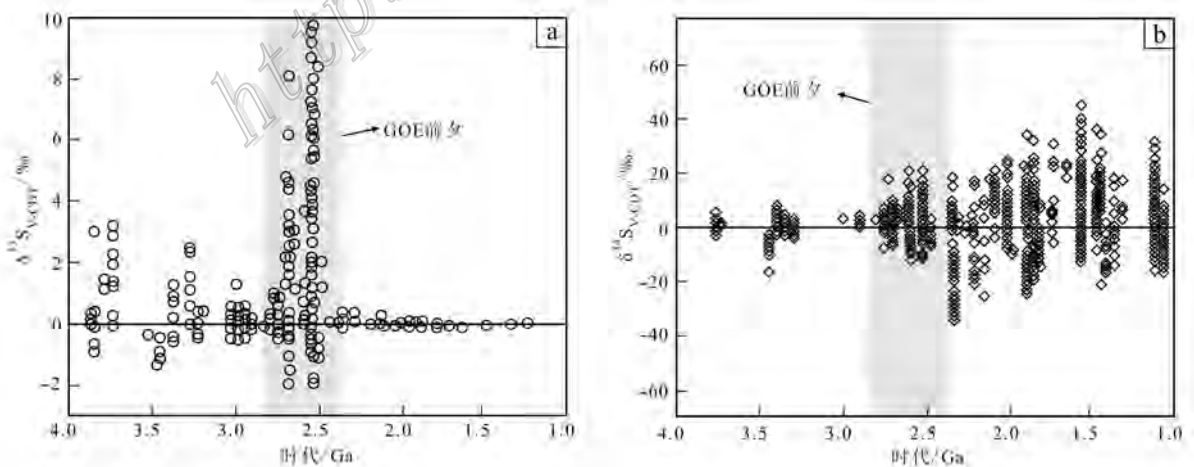


图 6 前寒武纪硫化物及硫酸盐硫同位素特征演化图(GOE-大氧化事件)

a.  $\Delta^{33}\text{S}$  同位素; b.  $\delta^{34}\text{S}$  同位素(改自 Farquhar et al., 2011)

Fig. 6 Diagram showing characteristics of S isotope evolution of sulfide and sulfate in Precambrian (GOE-Great Oxidation Event)

a.  $\Delta^{33}\text{S}$  isotopes; b.  $\delta^{34}\text{S}$  isotopes (modified after Farquhar et al., 2011)



氧风化作用的增强,促使大量的可溶性硫酸盐进入海洋(Huston et al., 2010);另一方面使得海洋从浅部到深部的逐渐氧化,最终在 1.8 Ga 左右海洋整体氧化,从而导致 BIF 大规模消失(Cloud, 1972; Huston et al., 2004)。大量研究显示,1.8 Ga 左右 Fe、U 等氧化还原状态变化敏感元素的地球化学行为发生了转变,如古土壤中 Fe 的亏损、沥青铀矿和黄铁矿等演化还原敏感矿物的消失、BIF 中 U 含量的升高,同样表明这段时间内大气氧含量的增加(Holland, 1984; Holland et al., 1990; Rye et al., 1998; Ono et al., 2000; Partin et al., 2013a; 2013b)。

然而,关于这一时期大规模 BIF 消失的原因存在不同认识。Canfield 等(1996; 1998)研究了~1.8 Ga 深海沉积物中广泛发育的硫化物的硫同位素,结果显示其  $\delta^{34}\text{S}$  值普遍为负值,最低可达  $-20\text{‰}$ ,表明这些硫化物中的硫来自微生物对海洋中大量的硫酸盐的还原而非海底热液(2.35 Ga 之前海水中硫酸盐含量小于  $0.001 \text{ mol/L}$ ,在这种低硫酸盐含量的环境中,微生物造成的  $\delta^{34}\text{S}$  分馏一般小于  $4\text{‰}$ ; Cameron, 1982)。据此,研究者认为 1.8 Ga 之后大规模 BIF 沉淀的消失主要归咎于当时海水高的硫逸度,而非由于海洋的氧化,进一步的认为 GOE 虽然导致了大气氧含量增加,并造成了这类氧化还原敏感元素地球化学行为的转变,但这并不足以证明当时海洋发生了完全氧化。

Slack 等(2007; 2009)对产于深海环境与富铜 VMS 共生的含铁喷流沉积岩及 BIF(1.74~1.71 Ga)的地球化学研究表明,经页岩(PAAS)标准化后,其稀土元素配分型式呈现轻稀土元素亏损、重稀土元素富集( $[\text{La}/\text{Yb}]_{\text{SN}} = 0.17 \sim 0.75$ ),真正的 Eu 异常( $[\text{Eu}/\text{Eu}^*]_{\text{SN}} = 1.15 \sim 3.33$ )和微弱负 Ce 到正 Ce 异常( $[\text{Ce}/\text{Ce}^*]_{\text{SN}} = 0.95 \sim 1.36$ )。考虑到同时期的海洋中缺乏浅海相 BIF 产出,Slack 等(2007; 2009)认为~1.8 Ga 的海洋应为氧化还原分层的水体,即浅部处于富硫的氧化状态,而深部则为贫硫弱氧化。Rasmussen 等(2012)对西澳 Frere 组 BIF 凝灰岩夹层中的锆石开展了 SHRIMP 年代学研究,结果表明其形成于~1.89 Ga,近似代表了该 BIF 的形成时代,与北美 Superior 地区广泛发育的 BIF 沉淀时间一致(~1.88 Ga)(Findlay et al., 1995; Fralick et al., 2002; Schneider et al., 2002),进一步说明这种层化海洋的出现是全球性的,其形成应与~18.8 亿年大规模的地幔柱活动有关。

综上所述,VMS 与 BIF 共生组合研究可为古元古代晚期的海洋环境提供重要约束,表明当时海洋并非完全氧化或硫化,至少深海应该处于弱氧化贫硫状态。此外,研究显示,中-新元古代同样存在铁建造(Granular Iron Formation 和 Rapitan Iron Formation)与 VMS 或 Sedex 型矿床共生的现象,如印度拉贾斯坦邦的 Dariba Zn-Pb-Ag 矿床(1.8 Ga)(Deb et al., 2004a; Deb et al., 2004b),澳大利亚新南威尔士州的特大型 Broken Hill Pb-Zn-Ag 矿床(16.8 亿年)(Plimer, 1979; Lottermoser, 1989; Page et al., 2005),南非 Aggeneys 和 Gamsberg Pb-Zn-Ag 矿床(1.2 Ga)(Stalder et al., 2004; Cornell et al., 2009)以及纳米比亚 Otjosondu 地区的 Outer Shelf Fe-Mn 矿床(~0.7 Ga)(Bühn et al., 1992)等。这在一定程度上反映中-新元古代可能仍存在局部还原非硫化的海洋或深部海水。

#### 4 华北克拉通 VMS 与 BIF 铁矿共生组合特征

华北克拉通作为世界上最古老的克拉通之一,其长达~3.8 Ga 的演化史几乎记录了所有地球早期的重大地质事件,新太古代晚期的火山-沉积作用在华北形成了清原、五台、固阳、鲁西等一系列绿岩带(翟明国, 2011)。然而,长期以来华北克拉通 VMS 与 BIF 铁矿普遍被视为 2 类独立矿床进行研究,关于二者共生组合特征的报道相对较少。

祁思敬等(1983)较早注意到,河北内丘地区存在太古代杏树台 VMS 矿床与磁铁石英岩和磁铁角闪石英岩(条带状 BIF?)的共生和过渡现象,在矿体外围矿石逐渐从硫化物相转变为磁铁石英岩或磁铁角闪石英岩,部分矿段可见硫化物矿石与磁铁石英岩相伴产出,这些磁铁角闪石英岩的原始成分应为火山外围堆积的硅铁质化学沉积物。关于二者共生成因,祁思敬等(1983)认为,火山热液上升至海底与海水混合导致物理化学条件的变化,金属物质卸载形成 VMS,硫化物上部及外围的磁铁矿可能是当热液进入衰微时, $\Sigma\text{S}$  迅速降低、 $f(\text{O}_2)$  回升,海水中游离的残余铁质以氧化物相沉积下来的结果。

近年来大量的年代学研究表明,在新太古代清原和五台绿岩带同样存在 VMS 与 BIF 同时期产生的现象(Polat et al., 2005; 李碧乐等, 2007; 万渝生等, 2005; 张雅静等, 2014; Zhu et al., 2015; Wu et

al., 2016), 但目前关于二者是否为共生成因的研究相对欠缺。彭自栋等(2015)结合前人(辽宁省区域地质志, 1989; Zhai et al., 1985; 于凤金, 2006; 张雅静, 2014; 张雅静等, 2014; Zhu et al., 2015)资料对清原地区 VMS 与 BIF 地质特征进行了初步研究, 认为区内 VMS 矿床集中产于红透山组中段和上段, 赋矿地层岩性以黑云斜长片麻岩和角闪斜长片岩组成的薄层互层带为主, 矿床矿体形态多受后期构造运动影响, 呈似层状、脉状、囊状、似筒状等形态产出, 其中, 在树基沟矿区观察到铜-锌矿体中有条带状铁矿夹层, 在红透山矿区、大荒沟矿区观察到 VMS 矿床上盘有 BIF 产出, BIF 矿体围岩主要为角闪斜长片麻岩、角闪片麻岩、黑云变粒岩、角闪变粒岩, 矿体呈层状与围岩整合产出, 在区内小菜河、下甸子、马家店矿区矿石中均观察到黄铁矿微条带与磁铁矿微-中条带互层产出现象。Wu 等(2013)基于清原绿岩带浑北地区含石榴子石角闪岩(2.56~2.51 Ga, 万渝生等, 2005)的岩相学和  $p-t$  变质轨迹研究, 认为其演化过程遵循逆时针  $p-t$  轨迹, 同时, 考虑到清原绿岩带发育超镁铁质-镁铁质火山岩、双峰式火山岩以及大规模与绿岩带表壳岩近同期的 TTG(孙德育等, 1993; Bai et al., 1998), 认为清原绿岩带形成于地幔柱活动及其诱发的幔源岩浆底侵作用过程中。Peng 等(2015)对清原绿岩带浑南新宾地区的超镁铁质-镁铁质、长英质火山岩(>2.51 Ga)以及石英闪长岩(2.57~2.51 Ga)、TTG(2.57~2.51 Ga)和石英二长岩(2.51~2.49 Ga)系列开展了岩相学、地球化学及同位素年代学研究, 结果显示区内镁铁质侵入体和火山岩具有高的 MgO 含量(5.4%~7.5%)和  $Mg^\#$  值(48~61), 球粒陨石标准化后, 其稀土元素配分曲线平坦-略微右倾( $(La/Yb)_{CN}=0.4\sim 1.1$ ;  $(Gd/Yb)_{CN}=1.1\sim 1.3$ ); 变安山-流纹岩经球粒陨石标准化后显示, 轻、中稀土元素富集( $(La/Yb)_{CN}=50\sim 65$ ;  $(Gd/Yb)_{CN}=8.3\sim 12$ ), 在原始地幔标准化蛛网图中, 其大离子亲石元素富集, 高场强元素亏损; 石英闪长岩具有高的镁值(60~64), 球粒陨石标准化后稀土元素特征显示其轻、中稀土元素略富集( $(La/Yb)_{CN}=5.2\sim 6.7$ ;  $(Gd/Yb)_{CN}=2.5\sim 2.9$ ), 原始地幔标准化后显示大离子亲石元素略富集, TTG 岩系具有与变安山-流纹岩相似的稀土元素配分模式, 但在原始地幔标准化蛛网图中, 其 Nb、Ta 亏损, Zr、Hf 富集; 石英二长岩(球粒陨石标注化)稀土元素配分显示轻、中稀土元

素略富集( $(La/Yb)_{CN}=3.9\sim 7.8$ ;  $(Gd/Yb)_{CN}=2.5\sim 2.9$ ), 与石英闪长岩相比具有明显的负 Eu 异常( $(Eu/Eu^*)=0.6\sim 0.7$ ), 原始地幔标准化蛛网图中, 其大离子亲石元素富集, 高场强元素除 Zr、Hf 外明显亏损, 此外, TTG 岩系( $\epsilon_{Nd}(t)=2\sim 6$ ;  $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i\sim 0.700$ )相对于区内其他岩石( $\epsilon_{Nd}(t)=0\sim 2$ ;  $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i=0.701\sim 0.703$ )具有更为亏损的 Sr-Nd 同位素特征。综合上述特征, Peng 等认为清原绿岩带是洋壳低角度向陆壳俯冲同时结合垂相构造运动作用的综合产物, 其逆时针的  $p-t$  变质轨迹与火山弧岩浆作用和后期的克拉通化有关。

五台绿岩带地层自下而上依次被划分为石咀、台怀和高凡 3 个亚群, 区内 BIF 和 VMS 主要生产出于中部台怀亚群柏枝岩组的绿泥石阳起石片岩、云母石英片岩中和下部石咀亚群金岗库组的角闪岩、黑云角闪变粒岩、云母片岩及黑云变粒岩中; 其中, BIF 矿体通常呈层状、似层状与围岩整合产出, 而 VMS 矿体则多呈层状、透镜状、块状, 多数情况下其赋矿围直接为 BIF 和黄铁矿化燧石岩, 局部可见少量变镁铁质火山岩; 空间上 BIF 常位于 VMS 上盘, 部分情况下可见二者呈过渡现象(田永清等, 1996; Li et al., 2004; 牛向龙等, 2009)。Polat 等(2005)对该绿岩带中纯橄榄岩、斜辉橄榄岩的地球化学分析显示, 其 REE(稀土元素)和 HFSE(高场强元素)含量极低(如  $La=0.09\times 10^{-6}\sim 0.25\times 10^{-6}$ ,  $Ce=0.20\times 10^{-6}\sim 0.50\times 10^{-6}$ ,  $Y=0.31\times 10^{-6}\sim 2.2\times 10^{-6}$ ,  $Zr=1\times 10^{-6}\sim 11\times 10^{-6}$ ), 经球粒陨石标准化后, 其稀土元素配分模式呈“U 型”(  $(La/Sm)_{CN}=0.81\sim 1.92$  ( $(Gd/Yb)_{CN}=0.19\sim 0.74$ ), 与玻古安山岩类似, 认为它们应为同时期蛇绿岩套的残留物, 此外, 进一步的岩相学、地球化学研究表明, 五台绿岩带同时发育玄武岩、安山岩、英安岩和流纹岩等基性到酸性系列的火山岩, 经球粒陨石标准化后, 玄武岩 LREE 相对于 HREE 略分馏( $(La/Sm)_{CN}=1.6\sim 4.1$ ,  $(La/Yb)_{CN}=2.1\sim 6.0$ ,  $(Gd/Yb)_{CN}=1.2\sim 1.7$ ), 在原始地幔标准化蛛网图中, 其高场强元素 Nb( $(Nb/Nb^*)_{PM}=0.2\sim 0.5$ )和 Ti( $(Ti/Ti^*)_{PM}=0.7\sim 0.9$ )明显亏损; 相对于玄武岩, 安山岩具有较高的  $Al_2O_3/TiO_2$  (25~32)和 Zr/Y 比值(7~15)以及略低的 Ti/Zr 比值(19~45), 球粒陨石标准化后其 LREE 相对 HREE 分馏程度较高( $(La/Yb)_{CN}=8.6\sim 24$ ); 与流纹岩相比, 安山岩的 MgO、 $Fe_2O_3$ 、 $Al_2O_3$ 、CaO、 $K_2O$ 、 $P_2O_5$ 、Sr、Rb、V、Zr、LREE

含量较高,  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Na}_2\text{O}$  含量较低, 在球粒陨石标准化后的稀土元素配分图中, 2 类岩石的配分曲线略右倾, 安山岩轻、重稀土元素分馏程度更高, 并且具更低的  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 、 $\text{Th}/\text{La}$  和  $\text{Ti}/\text{V}$  比值。综上所述, Polat 等(2005)认为五台绿岩带形成于与洋脊俯冲作用有关的弧前构造环境, 其中 VMS 的产出与地幔构造窗有关。

鉴于华北克拉通演化的特殊性和复杂性, 细致研究其中 VMS 与 BIF 铁矿成因联系具有重要意义。首先, 华北克拉通的 VMS 与 BIF 主要形成于新太古代(2.6~2.5 Ga), 区别于国际上 ~2.7 Ga 和 ~1.8 Ga 的 2 个共生峰期, 并且该时间段的 VMS 矿床国外鲜有报道(Franklin et al., 2005), 因此, 开展此项研究一方面可填补 VMS 矿床研究的空白, 另一方面可加强和完善 VMS 与 BIF 的共生机制研究; 其次, 华北这 2 类矿床同时形成于 GOE 之前, 通过对 VMS 矿床外围喷流沉积岩和 BIF 的综合研究, 可为同期的古海洋和大气环境提供指示信息, 进一步通过与世界范围内更为古老的以及 GOE 之后的 BIF 和 VMS 特征进行详细对比, 可完整诠释早前寒武纪古环境的变化规律; 最后, 清原和五台地区的 VMS 和 BIF 作为华北克拉通太古代晚期演化的特色产物, 其共生机制研究可为阐释绿岩带形成的构造背景提供约束, 同时, 该研究对于总结区域成矿规律及建立 VMS-BIF 成矿系统具有重要理论意义, 可为进一步在华北克拉通寻找前寒武纪 VMS 和 BIF 矿产提供科学依据。

## 5 有待深入探讨的问题

当前关于前寒武纪 VMS 与 BIF 铁矿共生组合研究主要集中于二者共生的时空关系、共生成因以及对沉积环境和构造背景的约束等方面, 并取得一定进展。然而, 仔细来看, 其中仍存在问题, 具体包括 5 个方面。

(1) 研究对象。目前, 研究普遍侧重于 2 类矿床成矿作用与早期地球构造活动的联系(Isley et al., 1999; Bekker et al., 2010), 以及 VMS 或 BIF 形成同时期古大气和古海洋环境的探讨(Huston et al., 2004; Slack et al., 2007; 2009), 且上述研究工作或着眼于 VMS 或针对 BIF, 并未将二者的共生作为一个整体进行研究, 同时, 现有共生成因模型的建立同样是基于太古代以独立的 VMS、BIF 以及深海沉积物的  $\text{Fe}$ 、S

同位素特征研究(Bekker et al., 2010; Farquhar et al., 2011) 缺乏关于二者共生机制的探讨, 如共生成矿的物质来源、构造背景、海洋和大气环境等。

(2) 物质来源。海底火山活动或地幔柱作用诱发的热液系统一方面会形成 VMS(Piercey, 2010; Huston et al., 2014), 另一方面会向海洋中输送大量铁质(Isley, 1995; Isley et al., 1999; Barley et al., 2005); 同时, 太古代—古元古代出现了 VMS 与 BIF 的大规模共生现象(Isley et al., 1999; Bekker et al., 2010; Rasmussen et al., 2012)。据此, 前人认为二者具有相同的成矿物质来源。然而, 目前缺少典型共生实例研究的直接证据, 证明其成矿物质源自同一系统。

(3) 构造背景。太古代 VMS 与 BIF 共生现象主要出现于同时期绿岩带中, 因此, 绿岩带产出构造背景的研究可为共生构造环境提供有力约束, 但目前关于太古代绿岩带形成构造背景仍存在地幔柱和类板块构造机制的争议(Ayer et al., 2002; Sproule et al., 2002; Wyman, 2002; Taylor et al., 2003; Polat et al., 2005; Thurston et al., 2008; Lodge et al., 2015) 此外, 太古代和古元古代均存在二者共生现象, 这 2 个时期的成矿构造环境有无差异同样缺乏研究。

(4) 共生环境。与 VMS 共生的 BIF 主要为 Allogoma 型, 受限于产出的构造背景, 其地球化学特征仅能够反映局限海盆火山活动或者海底热液条件(Bekker et al., 2010), 鉴于此, 目前基于 VMS 与 BIF 共生特征研究获得的关于古海洋环境的认识是否具普遍意义, 可能是值得商榷的。

(5) BIF 的大规模沉淀通常与 VMS 成矿高峰相对应(Rasmussen et al., 2012), 然而精确的年代学研究表明 2.6~2.4 Ga 间沉淀了巨量的 BIF, 其总量占前寒武纪已知铁资源储量的 70%(Bekker et al., 2010), 但是这期间关于 VMS 矿床产出的报道并不如人们预期的那么多(Franklin et al., 2005), 这种 BIF 大规模产出却缺乏同期 VMS 现象的成因尚不清楚。

总体而言, 前寒武纪 VMS 与 BIF 铁矿共生需要特定的构造背景和环境条件, 是地壳和古环境演化耦合作用的结果, 但这种耦合作用的机制是什么, 这是亟待解决的问题。

志 谢 感谢匿名审稿人对稿件的评审及提出

的重要建议,感谢中国科学院地质与地球物理研究所郑梦天博士在写作过程中就相关问题的讨论。

## References

- Abbott D and Isley A E. 2001. Oceanic upwelling and mantle-plume activity :Paleomagnetic tests of ideas on the source of the Fe in Early Precambrian iron formations[ J ]. *Special Paper of the Geological Society of America* , 352 :323-339.
- Abrams C E and McConnell K I. 1982a. The relationship of banded iron formation to mines and prospects of western Georgia[ R ].
- Abrams C E and McConnell K I. 1982b. Banded iron formation : A key marker unit for massive sulfide exploration in the high grade metamorphic terrain of western Georgia[ R ].
- Abrams C E and McConnell K I. 1984. Geologic setting of volcanogenic base and precious metal deposits of the West Georgia Piedmont : A multiply deformed metavolcanic terrair[ J ]. *Econ. Geol.* , 79( 7 ) : 1521-1539.
- Anderson P. 1989. Proterozoic plate tectonic evolution of Arizona[ J ]. *Arizona Geological Society Digest* , 17 : 17-55.
- Angerer T , Kerrich R and Hagemann S G. 2013. Geochemistry of a komatiitic , boninitic , and tholeiitic basalt association in the Mesoproterozoic Koolyanobbing greenstone belt , southern Cross Domain , Yilgarn craton : Implications for mantle sources and geodynamic setting of banded iron formation[ J ]. *Precambrian Research* , 224 :110-128.
- Ayer J , Amelin Y , Corfu F , Kamo S , Ketchum J F , Kwok K and Trowell N F. 2002. Evolution of the abitibi greenstone belt based on U-Pb geochronology : Autochthonous volcanic construction followed by plutonism , regional deformation and sedimentation[ J ]. *Precambrian Research* , 115(s1-4 ) : 63-95.
- Bai J and Dai F Y. 1998. Archean crust of China[ A ]. In : Ma X Y and Bai J , eds. *Precambrian crust evolution of China*[ C ]. Beijing : Geological Publishing House. 15-86.
- Barley M E , Bekker A and Krapež B. 2005. Late Archean to Early Paleoproterozoic global tectonics , environmental change and the rise of atmospheric oxygen[ J ]. *Earth Planetary Science Letters* , 238( 1-2 ) : 156-171.
- Bekker A , Holland H D , Wang P L , Rumble D , Stein H J , Hannah J L , Coetzee L L and Beukes N J. 2004. Dating the rise of atmospheric oxygen[ J ]. *Nature* , 427( 6970 ) : 117-120.
- Bekker A , Slack J F , Planavsky N , Krapež B , Hofmann A , Konhauser K O and Rouxel O J. 2010. Iron formation : The sedimentary product of a complex interplay among mantle , tectonic , oceanic and biospheric processes[ J ]. *Econ. Geol.* , 105 : 467-508.
- Beukes N J and Klein C. 1992. Models for iron formation depositor[ A ]. In : Schopf J W and Klein C , eds. *The Proterozoic biosphere : A multidisciplinary study*[ M ]. New York : Cambridge University Press. 146-151.
- Bühn B , Stanistreet I G , Okrusch M , Stanistreet I G and Okrusch M. 1992. Late Proterozoic outer shelf manganese and iron deposits at Otjosondu( Namibia ) related to the Damaran oceanic opening[ J ]. *Econ. Geol.* , 87( 5 ) : 1393-1411.
- Cameron E M. 1982. Sulphate and sulphate reduction in Early Precambrian oceans[ J ]. *Nature* , 296( 2 ) : 145-148.
- Canfield D E and Teske A. 1996. Late Proterozoic rise in atmospheric oxygen concentration inferred from phylogenetic and sulphur isotope studies[ J ]. *Nature* , 382( 6587 ) : 127-132.
- Canfield D E. 1998. A new model for Proterozoic ocean chemistry[ J ]. *Nature* , 396( 396 ) : 450-453.
- Cloud P. 1973. Paleocological significance of the banded iron formation[ J ]. *Econ. Geol.* , 68( 7 ) : 1135-1143.
- Cloud P E. 1972. A working model of the primitive Earth[ J ]. *Am. J. Sci.* , 272 : 537-548.
- Cornell D H , Pettersson A , Whitehouse M J and Scherstén A. 2009. A new chronostratigraphic paradigm for the age and tectonic history of the mesoproterozoic bushmanland ore district , South Africa[ J ]. *Econ. Geol.* , 104( 3 ) : 385-404.
- Deb M and Pal T. 2004a. Geology and genesis of the base metal sulphide deposits in the Dariba-Rajpura-Bethumni belt , Rajasthan , India [ A ]. In : Deb M and Goodfellow W D , eds. *Sediment-hosted lead-zinc sulphide deposits*[ C ]. New Delhi : Narosa Publishing. 304-327.
- Deb M and Thorpe R I. 2004b. Geochronological constraints in the Precambrian geology of Rajasthan and their metallogenic implication[ A ]. In : Deb M and Goodfellow W D , eds. *Sediment-hosted lead-zinc sulphide deposit*[ C ]. New Delhi : Narosa Publishing. 246-263.
- Farquhar J , Bao H M and Thiemens M. 2000. Atmospheric influence of earth 's earliest sulfur cycle[ J ]. *Science* , 289( 5480 ) : 756-758.
- Farquhar J and Wing B A. 2003. Multiple sulfur isotopes and the evolution of the atmosphere[ J ]. *Earth Planetary Science Letters* , 213( 1-2 ) : 1-13.
- Farquhar J , Zerkle A L and Bekker A. 2011. Geological constraints on the origin of oxygenic photosynthesis[ J ]. *Photosynthesis Research* , 107( 1 ) : 11-36.
- Findlay J M , Parrish R R , Birkett T C and Watanabe D H. 1995. U-Pb ages from the Nimish Formation and Montagnais glomeroporphyritic gabbro of the Central New Québec Orogen , Canada[ J ]. *Can. J. Earth Sci.* , 32( 8 ) : 1208-1220.

- Foustoukos D I and Bekker A. 2008. Hydrothermal Fe(II) oxidation during phase separation: Relevance to the origin of Algoma-type BIFs [ J ]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 72( Supp. ): 280.
- Fralick P, Davis D W and Kissin S A. 2002. The age of the Gunflint Formation, Ontario, Canada: Single zircon U-Pb age determinations from reworked volcanic ash [ J ]. *Can. J. Earth Sci.*, 39( 7 ): 1085-1091.
- Franklin J M, Gibson H L, Jonasson I R and Galley A G. 2005. Volcanogenic massive sulfide deposits [ C ]. *Econ. Geol.* 100th Anniversary Volume. 523-560.
- Galley A G, Hannington M D and Jonasson I R. 2007. Volcanogenic massive sulphide deposit [ A ]. *Mineral deposits of Canada: A synthesis of major deposit types* [ C ]. Newfoundland: Mineral Deposits Division Special Publication. 141-162.
- Goodwin A M. 1973. Archean iron-formations and tectonic basins of the Canadian Shield [ J ]. *Econ. Geol.*, 68( 7 ): 916-933.
- Gross G A. 1995. The distribution of rare earth elements in iron-formations [ J ]. *Global Tectonics and Metallogeny*, 5: 63-67.
- Gu L X, Tang X Q, Zheng Y C, Wu C Z, Tian Z M, Lu J J, Xiao X J and Ni P. 2004. Deformation, metamorphism and ore-component remobilization of the Archean massive sulphide deposit at Hongtoushan, Liaoning Province [ J ]. *Acta Petrologica Sinica*, 20( 4 ): 923-934 ( in Chinese with English abstract ).
- Gu L X, Zheng Y C, Tang X Q, Zaw K, Della-Pasque F, Wu C Z, Tian Z M, Lu J J, Ni P, Li X, Yang F T and Wang X W. 2007. Copper, gold and silver enrichment in ore mylonites within massive sulphide orebodies at Hongtoushan VHMS deposit, NE China [ J ]. *Ore Geology Reviews*, 30( 1 ): 1-29.
- Habicht K S, Gade M, Thamdrup B, Berg P and Canfield D E. 2002. Calibration of sulfate levels in the Archean ocean [ J ]. *Science*, 298: 2372-2374.
- Hannah J L, Bekker A, Stein H J, Markey R J and Holland H D. 2004. Primitive Os and 2316 Ma age for marine shale: Implications for Paleoproterozoic glacial events and the rise of atmospheric oxygen [ J ]. *Earth Planetary Science Letters*, 225( 1-2 ): 43-52.
- Haugaard R, Frei R, Stendal H and Konhauser K O. 2013. Petrology and geochemistry of the ~2.9 Ga Itilliarsuk banded iron formation and associated supracrustal rocks, West Greenland: Source characteristics and depositional environment [ J ]. *Precambrian Research*, 229: 150-176.
- Hayes J M, Lambert I B and Strauss H. 1992. The sulfur-isotope record [ A ]. In: Schopf J W and Klein C eds. *The Proterozoic biosphere—a multidisciplinary study* [ C ]. New York: Cambridge University Press. 129-132.
- Hoffman P F. 1988. United Plates of America, the birth of a craton: Early Proterozoic assembly and growth of Laurentia [ J ]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 16( 1 ): 543-603.
- Holland H D. 1973. The oceans: A possible source of iron in iron-formations [ J ]. *Econ. Geol.*, 68( 7 ): 1169-1172.
- Holland H D. 1984. The chemical evolution of the atmosphere and ocean [ M ]. New York: Princeton University Press. 1-582.
- Holland H D and Beukes N J. 1990. A paleoweathering profile from Griqualand West, South Africa: Evidence for a dramatic rise in atmospheric oxygen between 2.2 and 1.9 byb [ J ]. *Am. J. Sci.*, 290-A( 4 ): 1-34.
- Holland H D. 2002. Volcanic gases, black smokers, and the Great Oxidation event [ J ]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 66( 21 ): 3811-3826.
- Holland H D. 2006. The oxygenation of the atmosphere and ocean [ J ]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B Biological Sciences*, 361( 361 ): 903-915.
- Hollis S P, Yeats C J, Wyche S, Barnes S J, Ivanic T J, Belford S M, Davidson G J, Roache A J and Wingate M T D. 2015. A review of volcanic-hosted massive sulfide ( VHMS ) mineralization in the Archean Yilgarn Craton, western Australia: Tectonic, stratigraphic and geochemical associations [ J ]. *Precambrian Research*, 260: 113-135.
- Huston D L and Logan G A. 2004. Barite, BIFs and bugs: Evidence for the evolution of the Earth's early hydrosphere [ J ]. *Earth Planetary Science Letters*, 220( 1-2 ): 41-55.
- Huston D L, Morant P, Pirajno F, Cummins B, Baker D and Memagh T P. 2007. Paleoproterozoic mineral deposits of the Pilbara Craton: Genesis, tectonic environment and comparisons with younger deposits [ J ]. *Developments in Precambrian Geology*, 15( 1 ): 411-450.
- Huston D L, Pehrsson S, Eglington B M and Zaw K. 2010. The geology and metallogeny of volcanic-hosted massive sulfide deposits: Variations through geologic time and with tectonic setting [ J ]. *Econ. Geol.*, 105( 3 ): 571-591.
- Huston D L, Champion D C and Cassidy K F. 2014. Tectonic controls on the endowment of Neoproterozoic cratons in volcanic-hosted massive sulfide deposits: Evidence from lead and neodymium isotopes [ J ]. *Econ. Geol.*, 109( 1 ): 11-26.
- Isley A E. 1995. Hydrothermal plumes and the delivery of iron to banded iron formation [ J ]. *The Journal of Geology*, 103( 2 ): 169-185.
- Isley A E and Abbott D H. 1999. Plume-related mafic volcanism and the deposition of banded iron formation [ J ]. *Journal of Geophysical Research*, 104( B7 ): 15461-15477.
- James H L. 1983. Distribution of banded iron-formation in space and time [ J ]. *Developments in Precambrian Geology*, 6: 471-490.
- Klein C. 2005. Some Precambrian banded iron-formations ( BIFs ) from

- around the world: their age, geologic setting, mineralogy, metamorphism, geochemistry, and origin [J]. *Am. Mineral.*, 90(10): 1473-1499.
- Kump L R and Seyfried W E. 2005. Hydrothermal Fe fluxes during the Precambrian: Effect of low oceanic sulfate concentrations and low hydrostatic pressure on the composition of black smokers [J]. *Earth Planetary Science Letters*, 235: 654-662.
- Li B L, Huo L and Li Y S. 2007. Several problems involved in the study of banded iron formations (BIFs) [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 27(2): 205-210 (in Chinese with English abstract).
- Li J H, Kusky T, Feng J, Polat A. 2004. Neoproterozoic massive sulfide of Wutai Mountain, North China: A black smoker chimney and mound complex within 2.50 Ga-old oceanic crust [J]. *Developments in Precambrian Geology*, 13(4): 339-362.
- Li W Y. 2007. Classification, distribution and forming setting of massive sulfide deposits [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 29(4): 331-344 (in Chinese with English abstract).
- Liaoning Bureau of Geology and Mineral Resources. 1989. Regional geology of Liaoning Province [M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-856 (in Chinese).
- Lindberg P A and Gustin M S. 1987. Field-trip guide to the geology, structure, and alteration of the Jerome, Arizona ore deposits [A]. In: Davis G H and VandenDolder E M, eds. *Geologic diversity of Arizona and its margin* [C]. Arizona Bureau of Mines and Mineral Technology Special Paper, 5: 176-181.
- Lindberg P A. 1986. Geology of the copper chief mine, Jerome district, Arizona [J]. *Arizona Geological Society Digest*, 16: 343-349.
- Lodge R W D, Gibson H L, Stott G M, Franklin J M and Hudak G J. 2015. Geodynamic setting, crustal architecture, and VMS metallogeny of ca. 2720 Ma greenstone belt assemblages of the northern Wawa subprovince, Superior Province [J]. *Can. J. Earth Sci.*, 52(3): 196-214.
- Lottermoser B G. 1989. Rare earth element study of exhalites within the Wilyama Supergroup, Broken Hill Block, Australia [J]. *Mineralium Deposita*, 24(2): 92-99.
- Malinowski M, White D J, Mwenifumbo C J, Salisbury M, Bellefleur G, Schmitt D, Dietiker B, Schetselaar E and Duxbury A. 2008. Seismic exploration for VMS deposits within the Paleoproterozoic Flin Flon Belt, Trans-Hudson Orogen, Canada [J]. *Geophysical Research*, 10: 3745.
- Mercier-Langevin P, Gibson H L, Hannington M, Goutier J, Monecke T, Dubé B and Houllé M G. 2014. A special issue on Archean Magmatism, volcanism, and ore deposits: Part 2. volcanogenic massive sulfide deposits [J]. *Econ. Geol.*, 109(1): 1-9.
- Meyer C. 1988. Ore deposits as guides to geologic history of the Earth [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 16(1): 147-171.
- Mojzsis S J, Coath C D, Greenwood J P, McKeegan K D and Harrison T M. 2003. Mass-independent isotope effects in Archean (2.5 to 3.8 Ga) sedimentary sulfides determined by ion microprobe analysis [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 67(9): 1635-1658.
- Niu X L, Li J H, Feng J. 2009. Origin of the Neoproterozoic massive sulfide deposits in Wutaishan Mt: An indication for the submarine exhalation from the microstructures [J]. *Advances in Earth Science*, 9(24): 1009-1014 (in Chinese with English abstract).
- Ono S, Fayek M and Ohmoto H. 2000. Origin of uraninite in the Elliot lake district, Canada and the atmospheric oxygen level of 2.3 Ga Earth [J]. *Evolution of the Atmosphere, Ocean, Crust and Biosphere*, 67-74.
- Page R W, Stevens B P J and Gibson G M. 2005. Geochronology of the sequence hosting the Broken Hill Pb-Zn-Ag orebody, Australia [J]. *Econ. Geol.*, 100(100): 633-661.
- Partin C A, Bekker A, Planavsky N J, Scott C T, Gill B C, Li C, Podkovyrov V, Maslov A, Konhauser K O, Lalonde S V, Love G D, Poulton S W and Lyons T W. 2013a. Large-scale fluctuations in Precambrian atmospheric and oceanic oxygen levels from the record of U in shales [J]. *Earth Planetary Science Letters*, 369-370(3): 284-293.
- Partin C A, Lalonde S V, Planavsky N J, Bekker A, Rouxel O J, Lyons T W and Konhauser K O. 2013b. Uranium in iron formations and the rise of atmospheric oxygen [J]. *Chemical Geology*, 362(1): 82-90.
- Pavlov A A and Kasting J F. 2002. Mass-independent fractionation of sulfur isotopes in Archean sediments: Strong evidence for an anoxic Archean atmosphere [J]. *Astrobiology*, 2(1): 27-41.
- Peng P, Wang C, Wang X P and Yang S Y. 2015. Qingyuan high-grade granite-greenstone terrain in the eastern North China Craton: Root of a Neoproterozoic arc [J]. *Tectonophysics*, 662(1): 7-21.
- Peng Z D, Zhang L C, Wang C L and Zhu M T. 2015. The spatial and genetic relationship of VMS and BIF in the Qingyuan Greenstone Belt [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 35(s): 539-540 (in Chinese).
- Peter J M. 2003. Ancient iron-rich metalliferous sediments (iron-formations): Their genesis and use in the exploration for stratiform base metal sulphide deposits, with examples from the Bathurst Mining Camp [A]. In: Lentz D R, ed. *Geochemistry of sediments and sedimentary rocks: Considerations to mineral deposit-forming environments* [C]. Canada: Geological Association of Canada, Geo Text, 4: 145-176.
- Piercy S J. 2010. An overview of petrochemistry in the regional exploration for volcanogenic massive sulfide (VMS) deposits [J]. *Geo-*

- chemistry Exploration Environment Analysis, 10(2): 119-136.
- Planavsky N, Bekker A, Rouxel O J, Kamber B, Hofmann A, Knudsen A and Lyons T W. 2010. Rare earth element and yttrium compositions of Archean and Paleoproterozoic Fe formations revisited: New perspectives on the significance and mechanisms of deposition [ J ]. Geochim. Cosmochim. Acta, 74(22): 6387-6405.
- Plimer I R. 1979. Reply to D. Large's comment [ J ]. Mineralium Deposita, 14(1): 125-127.
- Polat A, Kusky T, Li J H, Fryer B, Kerrich R and Patrick K. 2005. Geochemistry of Neoproterozoic (ca. 2.55 ~ 2.50 Ga) volcanic and ophiolitic rocks in the Wutaishan greenstone belt, central orogenic belt, North China Craton: Implications for geodynamic setting and continental growth [ J ]. Geological Society of America Bulletin, 117(11/12): 1387-1399.
- Qi S J, Wang C Y, Yang J P, Gao Z X, Li Y K and Shao Z G. 1983. The origin of the Precambrian metavolcanic-sedimentary rock systems and the massive sulfide deposits in Xingshutai Neiqiu, Hebei Province [ J ]. Journal of Hebei College of Geology, 22(2): 1-16 (in Chinese).
- Rasmussen B, Fletcher I R, Bekker A, Muhling J R, Gregory C J and Thorne A M. 2012. Deposition of 1.88-billion-year-old iron formations as a consequence of rapid crustal growth [ J ]. Nature, 484(1): 498-501.
- Rye R and Holland H D. 1998. Geology and geochemistry of paleosols developed on the Hekpoort Basalt, Pretoria Group, South Africa [ J ]. Am. J. Sci., 300(2): 85-141.
- Schneider D A, Bickford M E, Cannon W F, Schulz K J and Hamilton M A. 2002. Age of volcanic rocks and syndeformational iron formations, Marquette Range Supergroup: Implications for the tectonic setting of Paleoproterozoic iron formations of the Lake Superior region [ J ]. Can. J. Earth Sci., 39(6): 999-1012.
- Shaman E R, Taylor B E, Minarik W G, Dubé B and Wing B A. 2015. Sulfur isotope and trace element data from ore sulfides in the Noranda district (Abitibi, Canada): Implications for volcanogenic massive sulfide deposit genesis [ J ]. Mineralium Deposita, 50(5): 591-606.
- Slack J F, Grenne T, Bekker A, Rouxel O J and Lindberg P A. 2007. Suboxic deep seawater in the Late Paleoproterozoic: Evidence from hematitic chert and iron formation related to seafloor-hydrothermal sulfide deposits, Central Arizona, USA [ J ]. Earth Planetary Science Letters, 255(1-2): 243-256.
- Slack J F, Grenne T and Bekker A. 2009. Seafloor-hydrothermal Si-Fe-Mn exhalites in the Pecos greenstone belt, New Mexico, and the redox state of ca. 1720 Ma deep seawater [ J ]. Geosphere, 5(3): 302-314.
- Sproule R A, Leshner C M, Ayer J A, Thurston P C and Herzberg C T. 2002. Spatial and temporal variations in the geochemistry of komatiites and komatiitic basalts in the Abitibi greenstone belt [ J ]. Precambrian Research, 115(1): 153-186.
- Stalder M and Rozendaal A. 2004. Apatite nodules as an indicator of depositional environment and ore genesis for the Mesoproterozoic Broken Hill-type Gamsberg Zn-Pb deposit, Namaqua Province, South Africa [ J ]. Mineralium Deposita, 39(3): 634-637.
- Sun D Y, Liu Z H, Lin X C and Zheng C Q. 1993. Metamorphism and tectonic evolution of Early Precambrian rocks in the Fushun area, northern Liaoning Province [ M ]. Beijing: Seismological Press. 99-120 (in Chinese).
- Syme E C and Bailes A H. 1993. Stratigraphic and tectonic setting of Early Proterozoic volcanogenic massive sulfide deposits, Flin Flon, Manitoba [ J ]. Econ. Geol., 88(3): 566-589.
- Taylor B and Martinez F. 2003. Back-arc basin basalt systematics [ J ]. Earth Planetary Science Letters, 210(3-4): 481-497.
- Thurston P C, Ayer J A, Goutier J and Hamilton M A. 2008. Depositional gaps in Abitibi Greenstone Belt stratigraphy: A key to exploration for syngenetic mineralization [ J ]. Econ. Geol., 103(6): 1097-1134.
- Tian Y Q, Peng Q M. 1986. The new viewpoint of the forming environment and deformation features for Banyukou Formation of Wutai Group [ J ]. Journal of Geology and Mineral Resource of the North China, 11(1): 137-141 (in Chinese with English abstract).
- Thurston P C, Kamber B S and Whitehouse M. 2012. Archean cherts in banded iron formation: Insight into Neoproterozoic ocean chemistry and depositional processes [ J ]. Precambrian Research, 214-215(3): 227-257.
- Trendall A F. 2002. The significance of iron-formation in the Precambrian stratigraphic record [ J ]. Special Publication International Association of Sedimentologists, 33: 33-66.
- Van Kranendonk M J, Philippot P, Lepot K, Bodorkos S and Pirajno F. 2008. Geological setting of Earth's oldest fossils in the ca. 3.5 Ga Dresser formation, Pilbara Craton, western Australia [ J ]. Precambrian Research, 167(s1-2): 93-124.
- Veizer J. 1976. Evolution of ores of sedimentary affiliation through geologic history; relations to the general tendencies in evolution of the crust, history, atmosphere and biosphere [ J ]. Supergene and Surficial Ore Deposits, 3: 1-41.
- Veizer J, Compston W, Hoefs J and Nielsen H. 1982. Mantle buffering of the early ocean [ J ]. Naturwissenschaften, 69(6): 173-180.
- Veizer J, Laznicka P and Jansen S L. 1989. Mineralization through geologic time: recycling perspective [ J ]. Am. J. Sci., 289: 484-524.
- Wan Y S, Song B, Yang C and Liu D Y. 2005. Zircon SHRIMP U-Pb geochronology of archaean rocks from the Fushun-Qingyuan area, Liaoning Province and its geological significance [ J ]. Acta Geologica Sinica, 79(1): 78-87 (in Chinese with English abstract).

- Wang C L, Zhang L C, Liu L and Dai Y P. 2012. Research progress of Precambrian iron formations abroad and some problems deserving further discussion [J]. *Mineral Deposits*, 31(6): 1311-1325 (in Chinese with English abstract).
- Wu K K, Zhao G C, Sun M, Yin C Q, He Y H and Tam P Y. 2013. Metamorphism of the northern Liaoning Complex: Implications for the tectonic evolution of Neoproterozoic basement of the eastern block, North China Craton [J]. *Geoscience Frontiers*, 4(3): 305-320.
- Wu M L, Lin S F, Wan Y S and Gao J F. 2016. Crustal evolution of the eastern block in the North China Craton: Constraints from zircon U-Pb geochronology and Lu-Hf isotopes of the northern Liaoning complex [J]. *Precambrian Research*, 275: 35-47.
- Wyman D A, Kerrich R and Polat A. 2002. Assembly of Archean cratonic mantle lithosphere and crust: Plume-arc interaction in the Abitibi-Wawa subduction-accretion complex [J]. *Precambrian Research*, 115(1): 37-62.
- Yu F J. 2006. The study of metallogenic model and prospecting pattern of Hongtoushan-type deposit (Doctor thesis) [D]. Supervisor: Wang E D. Shenyang: Northeastern University. 1-109 (in Chinese).
- Zaleski E and Peterson V L. 1995. Depositional setting and deformation of massive sulfide deposits, iron-formation and associated alteration in the Manitowadge greenstone belt, Superior Province, Ontario [J]. *Econ. Geol.*, 90(8): 2244-2261.
- Zhai M G, Yang R Y, Lu W J and Zhou J. 1985. Geochemistry and evolution of the Qingyuan Archean granite-greenstone terrain, NE China [J]. *Precambrian Research*, 27(1-3): 37-62.
- Zhai M G. 2011. Cratonization and the Ancient North China Continent: A summary and review [J]. *Science China Earth Science*, 54: 1110-1120 (in Chinese with English abstract).
- Zhang L C, Zhai M G, Zhang X J, Xiang P, Dai Y P, Wang C L and Pirajno F. 2012. Formation age and tectonic setting of the Shirengou Neoproterozoic banded iron deposit in eastern Hebei Province: Constraints from geochemistry and SIMS zircon U-Pb dating [J]. *Precambrian Research*, 222-223: 325-338.
- Zhang L C, Zhai M G, Wan Y S, Guo J H, Dai Y P, Wang C L and Liu L. 2012. Study of the Precambrian BIF-iron deposits in the North China Craton: Progresses and questions [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(11): 3431-3445 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Y J. 2014. Formation, evolution and metallogenesis of granite-greenstone belt in Qingyuan, Liaoning Province (Doctor thesis) [D]. Supervisor: Sun F Y. Changchun: Jilin University. 1-228 (in Chinese).
- Zhang Y J, Sun F Y, Huo L, Li B L, Ma F, Qian Y and Liu Z D. 2014. Metallogenic age and ore remobilization of Shujigou copper-zinc deposit, Liaoning Province, China [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 44(3): 786-795 (in Chinese with English abstract).
- Zhu M T, Zhang L C, Dai Y P and Wang C L. 2015. In situ zircon U-Pb dating and O isotopes of the Neoproterozoic Hongtoushan VMS Cu-Zn deposit in the North China Craton: Implication for the ore genesis [J]. *Ore Geology Reviews*, 67(67): 354-367.

### 附中文参考文献

- 顾连兴, 汤晓茜, 郑远川, 吴昌志, 田泽满, 陆建军, 肖新建, 倪培. 2004. 辽宁红透山铜锌块状硫化物矿床的变质变形和成矿组分再活化 [J]. *岩石学报*, 20(4): 923-934.
- 李碧乐, 霍亮, 李永胜. 2007. 条带状铁建造(BIFs)研究的几个问题 [J]. *矿物学报*, 27(2): 205-210.
- 李文渊. 2007. 块状硫化物矿床的类型、分布和形成环境 [J]. *地球科学与环境学报*, 29(4): 331-344.
- 辽宁省地质矿产局. 1989. 辽宁省区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社. 1-856.
- 牛向龙, 李江海, 冯军. 2009. 五台山新太古代块状硫化物矿床成矿作用研究——海底喷流沉积成因显微构造证据 [J]. *地球科学进展*, 24(10): 1009-1014.
- 彭自栋, 张连昌, 王长乐, 朱明田. 2015. 清原绿岩带 VMS 和 BIF 矿床的时空及成因关系 [J]. *矿物学报*, 35(增): 539-540.
- 祁思敬, 王承义, 杨剑平, 高占兴, 李运科, 邵振国. 1983. 河北内丘杏树台前寒武纪变质火山岩系及层状硫化物矿床成因 [J]. *河北地质学院学报*, 2(2): 1-16.
- 孙德育, 刘正宏, 凌贤长, 郑长青. 1993. 辽北抚顺东部地区前寒武纪地质及构造演化 [M]. 北京: 地震出版社. 99-120.
- 田永清, 彭齐鸣. 1996. 五台群“板峪口组”形成环境与变形特征的新认识 [J]. *华北地质矿产杂志*, 11(1): 137-141.
- 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 [J]. *地质学报*, 79(1): 78-87.
- 王长乐, 张连昌, 刘利, 代堰铭. 2012. 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*, 31(6): 1311-1325.
- 于凤金. 2006. 红透山式矿床成矿模式与找矿模型研究 (博士论文) [D]. 导师: 王恩德. 沈阳: 东北大学. 1-109.
- 翟明国. 2011. 克拉通化与华北陆块的形成 [J]. *中国科学: 地球科学*, 41(8): 1037-1046.
- 张连昌, 翟明国, 万渝生, 郭敬辉, 代堰铭, 王长乐, 刘利. 2012. 华北克拉通前寒武纪 BIF 铁矿研究: 进展与问题 [J]. *岩石学报*, 28(11): 3431-3445.
- 张雅静. 2014. 辽宁清原花岗-绿岩带的演化及其成矿作用研究 (博士论文) [D]. 导师: 孙丰月. 长春: 吉林大学. 1-228.
- 张雅静, 孙丰月, 霍亮, 李碧乐, 马芳, 钱烨, 刘哲东. 2014. 辽宁树基沟铜锌矿成矿时代及矿石再活化机制 [J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 44(3): 786-795.