

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.224>



华北克拉通北缘新太古代清原绿岩带 BIF 与 VMS 共生矿床的构造背景及成因联系

张连昌^{1,2,3}, 彭自栋^{1,2,3}, 翟明国^{1,2,3}, 佟小雪^{1,2,3}, 朱明田^{1,2,3}, 王长乐^{1,2,3}

1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 中国科学院矿产资源研究重点实验室, 北京 100029
2. 中国科学院地球科学研究院, 北京 100029
3. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 华北克拉通北缘新太古代清原绿岩带, 以产出中国最古老的红透山火山岩型块状硫化物(VMS)铜锌矿床而闻名。但近年同位素年代学研究表明, 该绿岩带还发育同期的条带状(BIF)铁矿。对该绿岩带开展 BIF 铁矿、VMS 铜锌矿时空和成因关系及其形成构造背景和海洋环境的研究非常必要。在综述近年笔者及前人获得的清原绿岩带地质剖面观察、典型 VMS 铜锌矿床和 BIF 铁矿床地质、锆石 U-Pb 年代学、主微量元素和 Nd-Fe-S 同位素地球化学等资料的基础上, 总结了清原绿岩带 VMS-BIF 矿床组合形成的构造背景、成矿物质来源及形成规律。最后建立了新太古代清原绿岩带 VMS-BIF 弧后盆地系统成矿模式。这对于指导区域找矿预测、了解新太古代陆壳演化和古海洋环境均有重要的科学意义。

关键词: 清原绿岩带; 新太古代; 火山岩型块状硫化物; 条带状铁建造; 矿床组合; 华北克拉通; 岩石学。

中图分类号: P581

文章编号: 1000-2383(2020)01-001-16

收稿日期: 2019-09-04

Tectonic Setting and Genetic Relationship between BIF and VMS-in the Qingyuan Neoproterozoic Greenstone Belt, Northern North China Craton

Zhang Lianchang^{1,2,3}, Peng Zidong^{1,2,3}, Zhai Mingguo^{1,2,3}, Tong Xiaoxue^{1,2,3}, Zhu Mingtian^{1,2,3},
Wang Changle^{1,2,3}

1. Key Laboratory of Mineral Resources, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China
2. Institutions of Earth Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The Neoproterozoic Qingyuan greenstone belt (QGB) is located in the northern margin of the North China Craton (NCC). It is characterized by the occurrence of the oldest Cu-Zn volcanogenic massive sulfide (VMS) deposits in China. Recent geochronological data indicates that the QGB also hosts a certain amount of Neoproterozoic BIF-type iron deposits. Hence, a detailed study on the enigmatic association of VMS and BIF deposits should be conducted urgently. In this study, the previous geological, U-Pb geochronological, element geochemical, as well as Nd-S-Fe isotopic data on the VMS, BIF, and associated lithologies of the QGB was reviewed in detail. Based on the review, we concluded the tectonic setting, source of ore-forming materials, and

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 41572076); 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(No. 2012CB416601).

作者简介: 张连昌(1959-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事矿床地质相关工作. ORCID: 0000-0003-3509-1646.

E-mail: lc Zhang@mail.iggcas.ac.cn

引用格式: 张连昌, 彭自栋, 翟明国, 等, 2020. 华北克拉通北缘新太古代清原绿岩带 BIF 与 VMS 共生矿床的构造背景及成因联系. 地球科学, 45(1):1-16.

genesis of the QGB VMS-BIF paragenetic assemblage, and thus established a ore-forming model in a back-arc basin for the QGB VMS-BIF metallogenic system. Generally, this model is significant in assessing regionally metallogenic endowment, and also in better understanding Archean continental crust evolution and marine environment.

Key words: Qingyuan greenstone belt; Neoproterozoic; volcanic-hosted massive sulfide; banded iron formations; assemblage of ore deposit; North China Craton; petrology.

条带状铁建造 (banded iron formation, 简称 BIF) 是世界上最重要的铁矿资源类型, 广泛分布于地质时期的 3.8~1.9 Ga 之间 (Huston and Logan, 2004). BIF 是早前寒武纪特殊环境的产物, 记录了地壳生长、大气、海洋和生物等方面的重要信息 (Bekker *et al.*, 2010; 李延河等, 2010; 李志红等, 2012). BIF 形成高潮与地壳增生峰期的对应关系, 反映出地壳快速生长伴随强烈的表生风化作用和大规模海底火山—热液活动, 与 BIF 具有成因联系. 同时地质学家 (Isley and Abbott, 1999; Rasmussen *et al.*, 2012) 发现早前寒武纪 BIF 发育的高峰还与火山岩型块状硫化物矿床 (VMS) 的峰期存在时间上的偶合关系 (图 1), 这是由于地壳快速生长、镁铁质—超镁铁质岩浆广泛发育、海底火山—热液活动和 VMS 矿床大量发育, 为海洋中溶解的巨量铁和大规模形成 BIF 提供了物质来源. Barley *et al.* (2005) 则认为或许是地幔柱作用诱发较高的海底扩张速率、海底和地表强烈的火山活动, 形成多重热液系统, 为 BIF 和 VMS 提供丰富的物质来源.

但是上述前寒武纪 VMS、BIF 和地壳增生时间演化 (图 1), 仅仅是前人按时间范围统计的结果, 还是三者空间和成因上存在联系? 或者说 BIF 与 VMS 是否可存在于一个地区, 一个地区的 VMS 和 BIF 是否可同时形成, 二者构造背景如何, 是否存在

成因上的关系, 是科学家们关注的热点问题. 目前已发现北美阿比提毕和苏必利尔地区、中国清源和五台地区的 VMS 和 BIF 是近乎同期形成的 (万渝生等, 2005; Thurston *et al.*, 2008; 彭自栋等, 2018), 但目前工作程度较低, 急需深入开展这方面的研究工作.

本文首先综述了国际上近年有关 BIF 与 VMS 矿床共生组合方面的研究进展和所反映的主要科学问题, 之后重点介绍了华北克拉通北缘新太古代清原绿岩带 BIF 与 VMS 铜锌矿的时空展布、典型矿床地质特征, 探讨了这两类矿床共生组合形成的构造背景及可能的成因联系, 最后建立了华北克拉通北缘新太古代 BIF-VMS 弧后盆地系统的成矿模式.

1 前寒武纪 VMS 与 BIF 矿床共生组合研究进展

目前在全球范围内已报道多地存在前寒武纪 VMS 与 BIF 空间共生的现象, 如在北美阿比提毕 (Abitibi) 绿岩带 (Thurston *et al.*, 2008)、西格陵兰伊苏瓦 (Isua) 绿岩带 (Veizer *et al.*, 1989; Huston *et al.*, 2014)、及美国亚利桑那 (Arizona) 和苏必利尔 (Superior) 地区 (Slack *et al.*, 2007) 等、巴西卡拉加斯 (Carajás) 地区 (Dreher *et al.*, 2008)、中国河北内丘 (祁思敬, 1983)、清原 (张秋生等, 1984; 张雅静等, 2014; Zhu *et al.*, 2015; 彭自栋等, 2017) 和五台 (张秋生等, 1984; 李碧乐等, 2007) 等地区. 这些地区均存在 VMS 铜锌矿或 VMS 黄铁矿与 BIF 铁矿共同存在于一个地区的情况, 有的 BIF 铁矿围绕 VMS 的四周展布, 有的为二者相伴而生, 同时发现 VMS 与 BIF 在同一区域共存且近乎同时形成. 综合前人资料, 笔者发现 BIF 与 VMS 共生成矿包括以下特点: (1) VMS 多金属矿床和 BIF 型铁矿在同一套火山—沉积岩系中相伴产出; (2) VMS 与 BIF 在空间分布上呈此消彼长的关系, 如北美新太古代阿比提毕 (Abitibi) 绿岩带中, 由东到西以 BIF 为主转变为以 VMS 为主 (Thurston *et al.*, 2008); (3) 层位

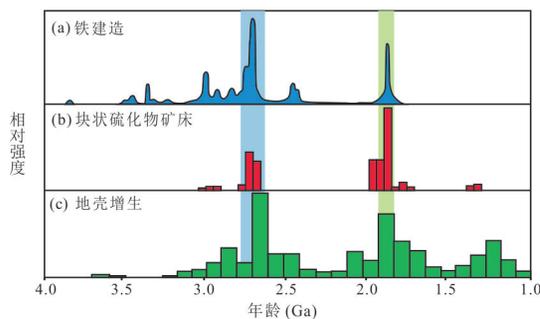


图 1 前寒武纪 VMS、BIF 和地壳增生时间演化

Fig.1 Histogram showing the abundance of VMS and BIF together with the intensity of crust growth in Precambrian

改自 Rasmussen *et al.* (2012)

上,块状硫化物通常为 BIF 的底板,但个别也形成于 BIF 的上部(Slack *et al.*, 2007). VMS 与 BIF 在同一区域共存且近乎同时产生的现象主要出现于太古代,其次为元古代.

形成于 38 亿年的格陵兰伊苏瓦(Isua)构造带, BIF 与玄武质凝灰岩中的含铜硫化物矿床由镁铁质和长英质变质火山岩以及变质沉积岩系组成,虽然面积只有 4 km×30 km,但产有大规模条带状磁铁矿建造以及少量含铜块状硫化物矿床,条带状铁建造和火山成因块状硫化物具有共存成矿的特点(Veizer *et al.*, 1989).

北美阿比提毕绿岩带是全球最大最完整的太古代绿岩带(图 2). Wyman *et al.*(2002)研究发现该绿岩带岩浆活动发生于 2 735~2 670 Ma,持续了 65 Ma;岛弧岩浆活动、块体增生和碰撞作用具有穿时特征(从北向南,时代变新);晚太古代俯冲—碰撞带地壳结构仍然保存,具有板块体制主导的侧向增生的完好地质记录,具有板块构造和地幔柱物质贡献的可靠依据,其穹窿构造、科马提质岩和玄武岩类广泛发育.形成于其中的诺兰达(Noranda)块状硫化物矿床储量在 1 亿吨以上,是同类矿床中规

模最大者,属于火山成因块状硫化物(VMS)矿床.含矿建造由流纹岩—凝灰岩—凝灰角砾岩和含 BIF 岩层组成,矿体呈透镜状、豆荚状分布在穹窿顶部和边部.块状硫化物透镜体下部常具有伴生的硫化物网状脉并有蚀变晕,矿体上盘为未蚀变的安山岩,矿床具有垂直分带性.从下部的黄铜矿—黄铁矿网状脉,向上逐渐变为块状及层状黄铜矿—黄铁矿透镜体,再向上为条带状闪锌矿—黄铜矿,最上部变为黄铁矿与闪锌矿互层.同时 Thurston *et al.*(2008)发现形成于~2.7 Ga 阿比提毕绿岩带中的 VMS 矿床与 BIF 有密切伴生的关系(图 2),但空间上由西到东,以 VMS 为主逐步转变为以 BIF 为主.

美国亚利桑那州 Jerome 地区古元古代变火山—沉积岩系可见 BIF 和 VMS 矿床密切共生, BIF 常产于 VMS 矿床的外围,空间上呈现过渡关系,在部分地区 BIF 产于 VMS 的上盘,类似于“铁帽”(Slack *et al.*, 2007; 图 3).位于苏必利尔(Superior)克拉通的 Flin Flon 古元古代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 (Malinows-

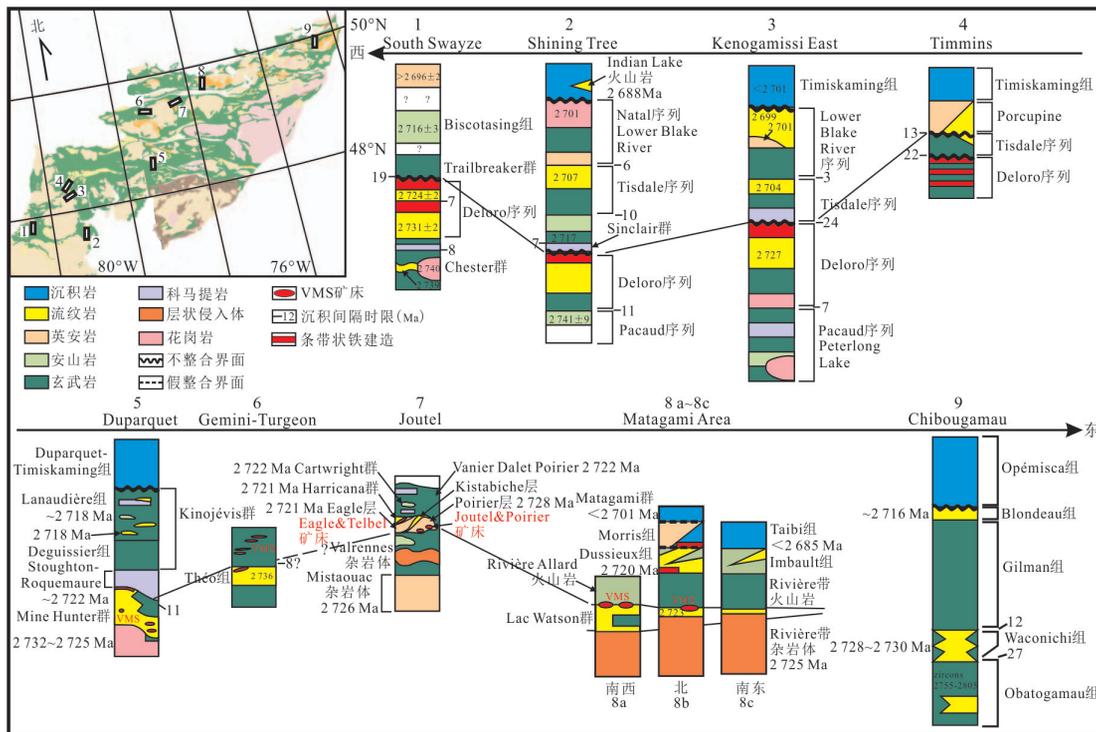


图 2 北美太古代阿比提毕绿岩带 VMS 与 BIF 空间分布

Fig.2 Geological map showing the spatial relationship of VMS and BIF in the North American Archean Abitibi greenstone belt

改自 Thurston *et al.*(2008); a. 阿比提毕绿岩带; b. 绿岩带内代表性地层柱状图

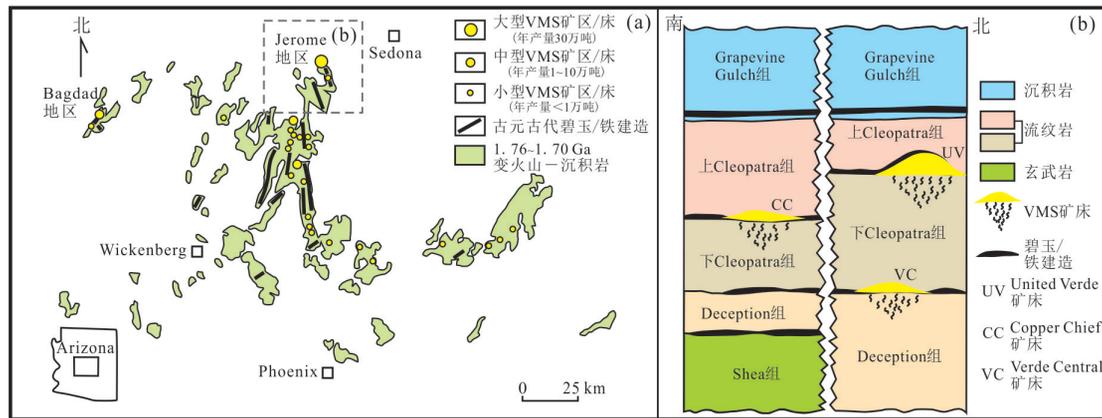


图3 美国亚利桑那州中元古代早期VMS与BIF共生分布

Fig.3 Geological map showing the distribution of VMS-BIF paragenetic assemblage in Arizona, USA

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

ki *et al.*, 2008), 年代学研究表明这些矿床主要形成于 1.92~1.88 Ga; 同时该地区也是苏必利尔型 BIF 最典型的发育区, 研究显示这些 BIF 的形成时代为 1.89~1.84 Ga (Schneider *et al.*, 2002; Rasmussen *et al.*, 2012).

当前关于前寒武纪 VMS 与 BIF 铁矿共生组合的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, 并取得了一定进展, 但也存在一些问题。

关于 BIF 与 VMS 矿床共生的形成构造环境, 一直存在地幔柱、裂谷及岛弧等争议。阿尔戈玛型 BIF 常形成于俯冲构造背景下, 部分可能存在于地幔柱的叠加作用 (Rasmussen *et al.*, 2012; Thurston *et al.*, 2012; 王长乐等, 2012; Zhang *et al.*, 2012; 张连昌等, 2012), 而 VMS 矿床普遍产于张性岛弧或裂谷环境 (Thurston *et al.*, 2008; Huston *et al.*, 2010; Piercey, 2010). Franklin *et al.* (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 成矿与板块俯冲及碰撞事件关系密切。如前所述, 太古代 VMS 与 BIF 共生现象主要发生于同时期绿岩带中, 因此通过绿岩带形成构造背景的研究可揭示二者共生的构造环境。

VMS 与 BIF 存在共生组合的另一个原因与物质来源有关。Isley (1995) 推测 VMS 系统可能是铁建造铁的来源, German and Von Damm (2004) 研究认为, 形成 VMS 矿床的热液系统同时也向深海输送了铁和锰, 热液中的铁是通过淋滤海底火山岩得到的, 并在海洋深处形成铁建造, 而 VMS 矿床一般

形成于火山源附近。Bekker *et al.* (2010) 则强调硫逸度和氧逸度对成矿的影响, 他认为在火山热液口附近因较大的硫逸度会形成 VMS 矿床, 而在远离热液喷口的地方, 加上早期富铁海水的贡献, 在较低的硫逸度和相对较高的氧逸度条件下形成 BIF 建造。Slack *et al.* (2007) 和 Slack and Cannon (2009) 研究发现形成于岛弧环境、较年轻的 1.85 Ga 的富铜 VMS 矿床包含大量赤铁矿或磁铁矿喷流岩, 由此提出当热液流阻碍了海洋的氧化还原反应时, 铁就会被搬运走并沉积在远离热液喷口的地方; 而若热液流量不足以阻碍海洋的氧化还原反应时, 铁就会在喷口附近以硫化物或氧化物的形式沉淀下来。

另外, 研究表明早前寒武纪 VMS、BIF 及伴生的喷流岩 (如硅质岩、碳酸盐岩和重晶石岩等) 可能为海洋环境提供信息。科学家发现这些喷流岩普遍呈几米厚的层状或透镜状赋存于 VMS 矿床的上盘或同一地层位; Slack *et al.* (2007) 首次提出利用空间上与富铜 VMS 矿床有联系的富铁喷流岩可作为同时代深海氧化还原状态的指示。Huston and Logan (2004) 和 Ohmoto *et al.* (2006) 根据地球化学和热动力学原理, 认为太古宙和早元古代早期的还原相喷流岩沉积于缺氧和硫化底层水的条件下。但 Slack *et al.* (2007) 认为喷流岩中大量赤铁矿和磁铁矿的产出及高的 Fe^{3+}/Fe^{2+} 比可排除矿化过程中硫化底部水的存在, 并且反映同时代的深水至少为低氧化条件。而早太古代晚期富赤铁矿和富磁铁矿的喷流岩, 其稀土元素的地球化学数据显示出弱的负到弱的正 Ce 异常 (页岩标准化), 而相比之下, 现代氢氧化物矿床具有较强的负 Ce 异常, 因此排除了

VMS 和相关喷流岩矿化过程中深水为全氧条件的可能性 (Slack *et al.*, 2007, 2009), 但不排除局部氧化盆地中存在该条件 (Slack and Cannon, 2009)。

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 *et al.* (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 H_2S), 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 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 *et al.* (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 H_2S 和 Fe^{2+} 相对含量变化导致的化学变层 (图 4)。

我国有少量学者也注意到早前寒武纪条带状铁 (BIF) 与块状硫化物 (VMS) 存在时空共存的现象, 除新太古代最大规模的清原红透山块状硫化物与条带状铁矿伴生外, 山西金岗库含铜黄铁矿被认为是新太古代中一个典型的铁氧化物与硫化物共存的矿床, 该含铜黄铁矿呈层状—似层状产出, 其围岩为条带状铁建造 (张秋生等, 1984); 前人在甘肃镜铁山矿床中—新元古代条带状铁层位之下也发现了硫化物相的铜矿层 (张连昌等, 1997; 杨秀清等, 2016)。但人们对大多数地区的 VMS 与 BIF 矿床在时空和成因关系方面尚未做深入的研究工作。

2 华北清原绿岩带地质及 VMS-BIF 时空分布特征

2.1 一般地质特征

清原绿岩带是中国太古代 VMS 矿床的集中发育区, 与 BIF 的广泛产出不同, 目前已发现和开采的数十处 VMS 矿床、矿点均产于绿岩带中部的红透山组 (于凤金, 2006)。此类矿床是国内已知最古老的 VMS 矿床, 根据矿石有用元素相对丰度, 可将其划分为铜锌型和硫铁矿型两类, 前者以红透山和树基沟为代表, 后者以大荒沟为代表 (图 5)。其中红透山矿床位于清原绿岩带浑北地区的红透山镇, 为我国规模最大的太古代 Cu-Zn 型 VMS 矿床, 截至目前该矿床已探明铜金属量 50 万吨 (品位 1.5%~1.8%), 锌 70 万吨 (品位 2.0%~2.5%), 金 20 吨 (品位 0.5~0.8 g/t) 以及银 1 000 吨 (品位 20~60 g/t) (Gu *et al.*, 2007)。

新太古代清原绿岩带, 位于华北克拉通北缘的辽宁北部地区, 主要由新太古代片麻状花岗岩 (60%~70%) 和绿岩带 (20%~25%) 组成 (图 5)。根据表壳岩系的岩石组合及变质程度差异, 清原绿岩带自下而上可分为 3 个组 (图 5 和图 6), 分别为石棚子组、红透山组和南天门组 (Zhai *et al.*, 1985; 于凤金, 2006)。

石棚子组主要出露于浑南汤图—小菜河一带, 在浑北仅在花岗片麻岩中呈大小不等的残留体分布, 其中在柵乃甸附近出露面积稍大。石棚子组主要由变火山岩构成, 其变质程度可达高角闪岩相至麻粒岩相, 根据岩石组合差异进一步细分为上段和

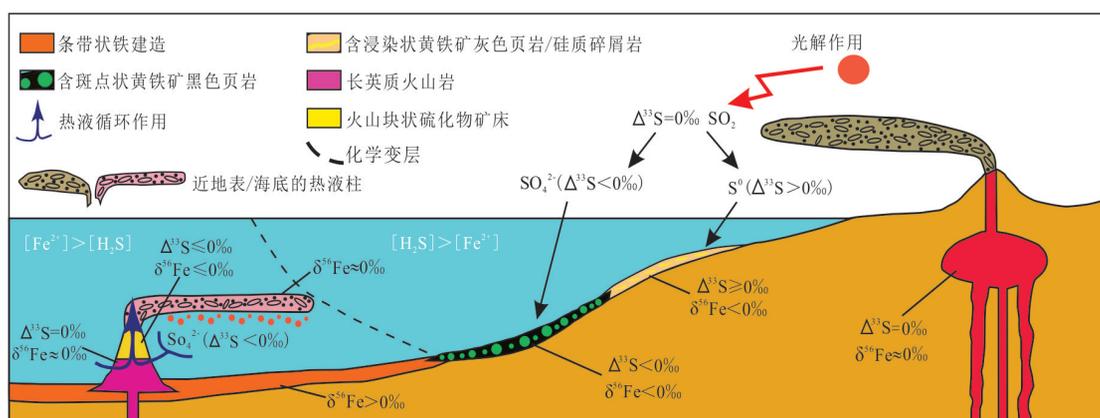


图 4 太古代 VMS 和 BIF 共生假想成因模式

Fig.4 Hypothetical genetic model schematic of Archean VMS-BIF paragenetic assemblage

改自 Bekker *et al.* (2010), Farquhar *et al.* (2011)

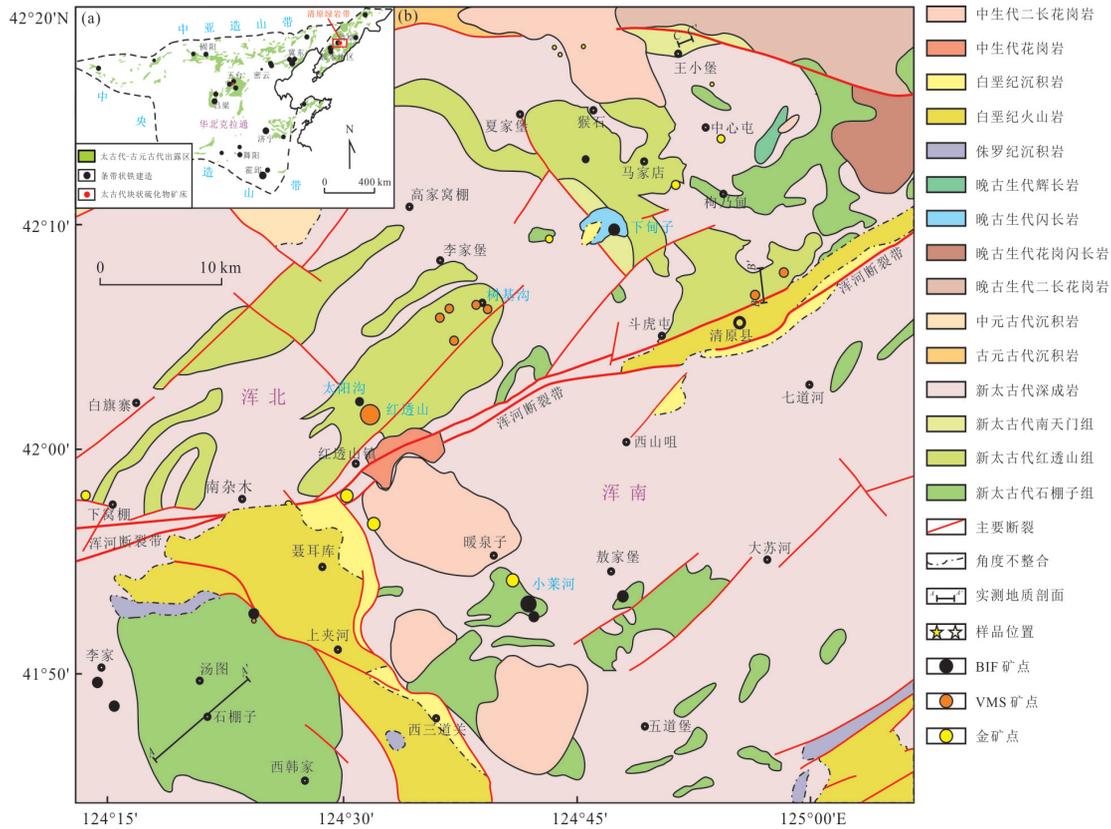


图5 新太古代清源绿岩带 VMS 铜锌矿与 BIF 铁矿空间分布简图

Fig.5 Geological map showing the distribution of VMS-BIF paragenetic assemblage in Neoproterozoic Qingyuan greenstone belt, NCC

据彭自栋等(2018)

下段,上段出露岩石主要为互层的斜长角闪岩和黑云斜长片麻岩,局部为少量的含辉石角闪片岩、云母石英片岩和 BIF(如小菜河 BIF);下段则以斜长角闪岩和辉石角闪岩为主,同时可见少量的黑云斜长片麻岩,基本无 BIF 发育(张雅静, 2014;彭自栋等, 2018)。

红透山组集中分布于浑北地区的红透山、树基沟、斗虎屯和夏家堡一带,在浑南仅局部出露。红透山组主要由一系列角闪岩相变质的双峰式火山岩和少量沉积岩构成,该组可进一步细分为 3 个段,自下而上依次为树基沟段、红透山段和大荒沟段。各段出露的主要岩石类型基本一致,均为互层的斜长角闪岩和黑云斜长片麻岩,以及少量的黑云母片岩和阳起石片岩(Zhai *et al.*, 1985; Qian *et al.*, 2014)。区内已发现的 VMS 矿床,如红透山、树基沟、红旗山和大荒沟 VMS 等均产于红透山组,该组也同时产出小规模 BIF(如太阳沟、树基沟等)。

南天门组同样主要分布于浑北地区,在马家店和王小堡一带大面积出露,该组主要由角闪岩相变

质的变沉积岩,如片岩、石英岩、大理岩和 BIF 组成,下部含少量斜长角闪岩(Qian *et al.*, 2014; 张雅静, 2014)。其中, BIF 主要分布于南天门组下段的变火山—沉积岩中(如下甸子 BIF),而在上段(代表性剖面位于王小堡村北侧)变沉积岩中未见 BIF 产出。

新太古代清原绿岩带分布有多个 VMS 矿床(图 5),其中红透山、红旗山、树基沟和张胡子沟为 Cu-Zn 矿床,大荒沟为含铜黄铁矿矿床。这些矿床均产于一个厚约百米的岩性段内,该岩性段位于红透山组上部,为“薄层互层带”,由薄层黑云母变粒岩、片麻岩和斜长角闪岩互层而成,并被磁铁石英岩层覆盖,笔者推测其原岩为玄武岩和流纹岩组合以及含有泥质凝灰质沉积岩。红透山太古代 VMS 矿床赋存在由黑云斜长片麻岩和斜长角闪片麻岩组成的“薄层互层带”中,其中黑云斜长片麻岩是红透山 VMS 矿床最主要的赋矿层位,在空间上与层状块状硫化矿体关系密切。红透山铜锌矿矿体内以及矿体的外侧(南翼矿体的南侧和北翼矿体的北侧)常常会出现变形的肠状、团块状

硅质体. 硅质体与浸染状硫化物矿化关系密切, 形成不规则硅质脉、或石英团块.

关于清原绿岩带的定年早期存在不同的认识. 前人曾运用全岩 Sm-Nd 法(毛德宝等, 1997)测定表壳岩的形成时代, 得到中太古代的成岩年龄. 随着微区精确定年测试手段的引进, 人们获得了准确的清原地区表壳岩及花岗岩的形成时代. 万渝生(2005)所测浑北小莱河片麻状 TTG 花岗岩锆石的 U-Pb 年龄为 $2\ 556 \pm 18$ Ma. 近期一些研究者进一步获得了新的锆石 U-Pb 年代学数据, 表明研究区主要成岩成矿年龄集中在 $2\ 570 \sim 2\ 500$ Ma 之间(张雅静等, 2014; Zhu *et al.*, 2015; 彭自栋等, 2018).

彭自栋等(2017, 2018)进一步的研究表明, 清原绿岩带及有关矿产均形成于新太古代的 $2\ 570 \sim 2\ 530$ Ma, 并于 $2\ 520 \sim 2\ 480$ Ma 遭受变质作用改造. 总体而言, 绿岩带火山岩及其有关矿产均形成于较短的时间范围. 其中 VMS 铜锌矿、黄铁矿与 BIF 铁矿具有空间相伴、时间相随的特征(图 5 和图 6).

2.2 VMS 与 BIF 成矿地质特征

清原绿岩带最有名的 VMS 矿床是红透山 Cu-Zn 矿床. 该矿床出露地层为红透山组中部的红透山段, 主要岩石组合自下而上依次为巨厚斜长角闪岩、石榴阳起石片岩、黑云斜长片麻岩及“薄层互层带”. 这种“薄层互层带”(张秋生等, 1984)是一套以黑云斜长片麻岩和互层的斜长角闪岩为主的岩石组合, 其单层厚度为 $3 \sim 5$ m, “带”的厚度为 $10 \sim 25$ m, 红透山 VMS 的矿体形态多为层状或似层状, 其中层状矿体一般倾向南东, 与围岩界限平行, 而似层状矿体的形态受构造作用影响较为明显, 通常以不连续的透镜状平行于围岩片麻理产出, 偶尔也可见到其呈脉状—网脉状穿切围岩. 块状矿石为区内最为常见的类型, 但局部也可见到由互层的硫化物和片麻岩构成的纹层状—条带状矿石, 其硫化物条带通常与岩石片麻理平行, 且同步褶皱. 黄铜矿为红透山 VMS 中最主要的含铜矿物, 它主要产于块状、稠密浸染状和网脉状矿石中. 闪锌矿为区内分布最为广泛的硫化物, 在各类矿石中均普遍出现(彭自栋, 2018). 同时红透山的正北方向, 与红透山直线距离约 300 m 的太阳沟见有 BIF 赋存于黑云斜长片麻岩中(图 7), 笔者观察发现该 BIF 产状较陡, 局部可能发生了倒转. 同时, Gu *et al.* (2007) 也认为该 BIF 在层位上位于红透山 VMS 之上, 以盖层形式产出.

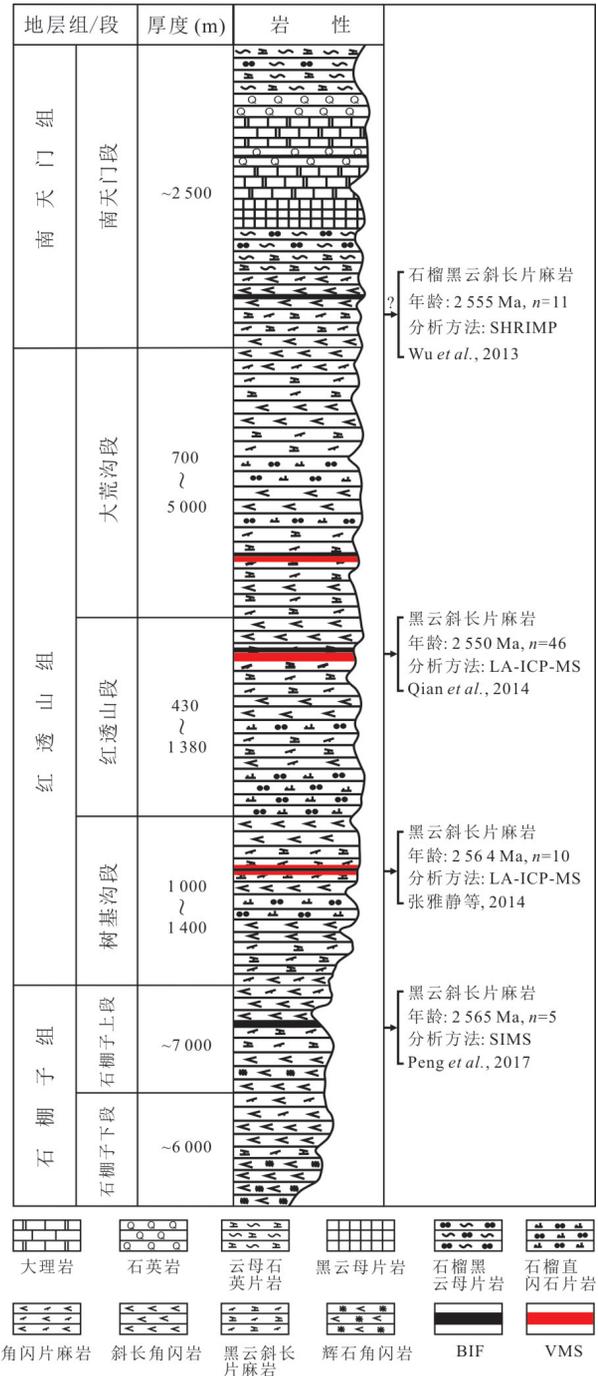


图 6 清原绿岩带表壳岩系综合柱状图

Fig.6 Stratigraphic column showing formation and member names for different rock assemblages in the QGB

据彭自栋等(2018), 图中给出了各组变酸性火山岩的形成年龄

该观点得到了矿区最新勘探工作的验证, 部分钻孔显示 BIF 矿体深部有 VMS 型铜矿化出现(辽宁省有色地质局 101 队, 2015, 辽宁省清原县黄泥坑地区铜锌矿详查报告).

树基沟分布有清原地区第二大 VMS 矿床, 位于红透山—树基沟成矿带的东段(图 5). 区内出露

地层以红透山组树基沟段为主,岩石类型主要包括黑云斜长片麻岩和斜长角闪岩,其次还有少量的砂线石黑云斜长片麻岩、石榴黑云斜长片麻岩和角闪斜长片麻岩等(于凤金, 2006);其中VMS矿体主要赋存于由黑云斜长片麻岩和斜长角闪岩构成的互层带内,其矿体普遍顺层产出,具明显的层控特点.矿体产状与片麻理基本一致,呈纹层状一条带状、脉状、囊状和似筒状等形态产出,矿石的主要矿石矿物为黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿和少量的磁黄铁矿,条带状矿石通常由黄铁矿、黄铜矿和闪锌矿等集合体构成的硫化物条带与石英、金云母和绿泥石等脉石矿物构成的浅色富硅条带互层组成.钻孔中观察到的矿石有两类,一类为纹层状一条带状硫化物矿石,另一类为浸染状—网脉状硫化物矿石;两类矿石的主要矿石矿物为黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿和少量的磁黄铁矿,但相对而言后者的黄铜矿含量略高;脉石矿物则均以石英为主,可见少量的金

云母、绿泥石、长石和方解石等.此外,在该钻孔的上部还发现了少量的BIF,然而受限于观察条件以及后期的变形作用,目前尚无法准确地限定二者的相对空间关系.

BIF是清原绿岩带的重要组成部分,在绿岩带各层位中都有产出,如石棚子组上段的小莱河和于家堡BIF,红透山组VMS层位上部的太阳沟、大荒沟和马家店BIF,以及南天门组下部的下甸子BIF(图6).

其中下甸子II号BIF铁矿体整体呈似层状—层状、连续性好,总体走向324°,倾向东北,倾角50°~70°,局部近直立(图8),地表延伸长度大于400 m,矿体厚度约1.5~10.0 m.矿体整体变形较弱,局部可见较强的揉皱(图8),其中揉皱核部的铁条带有明显的兼并现象.矿体的上下盘岩性均为斜长角闪岩,但是在矿体上段可见到少量的斜长角闪岩、绿泥石榴黑云母片岩及少量蚀变玄武岩以夹层形式产于BIF中,这些岩石及其与BIF之间的接触界线均较明显(图9a).但与小莱河和太阳沟BIF不同,下甸子矿区的部分矿石(约占BIF总体积的25%)中硫化物含量较高(5%~10%),这些硫化物通常聚集成硫化物条带,与BIF的富铁和富硅条带互层产出(图8,图9b).其中,富硅条带主要由细—中粒(0.1~0.4 mm)他形石英颗粒及少量零星分布的粉尘状磁铁矿(<2 μm)、细粒黄铁矿(0.05~0.20 mm)和方解石(~0.2 mm)颗粒构成(图9c);富铁条带由大量不规则状的细粒磁铁矿(0.01~0.10 mm)、磁铁矿集合体及其交互生长的阳起石、石英和少量黄铁矿

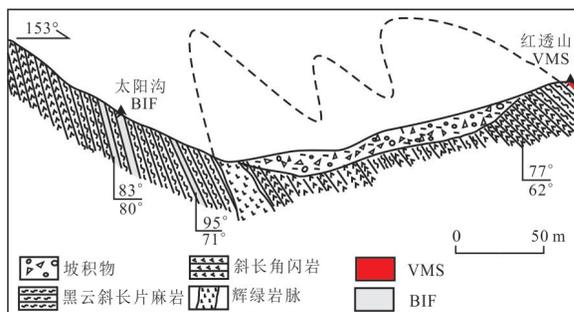


图7 红透山—太阳沟VMS-BIF地质剖面

Fig.7 The VMS-BIF geological section sketch of Hongtoushan to Taiyanggou region

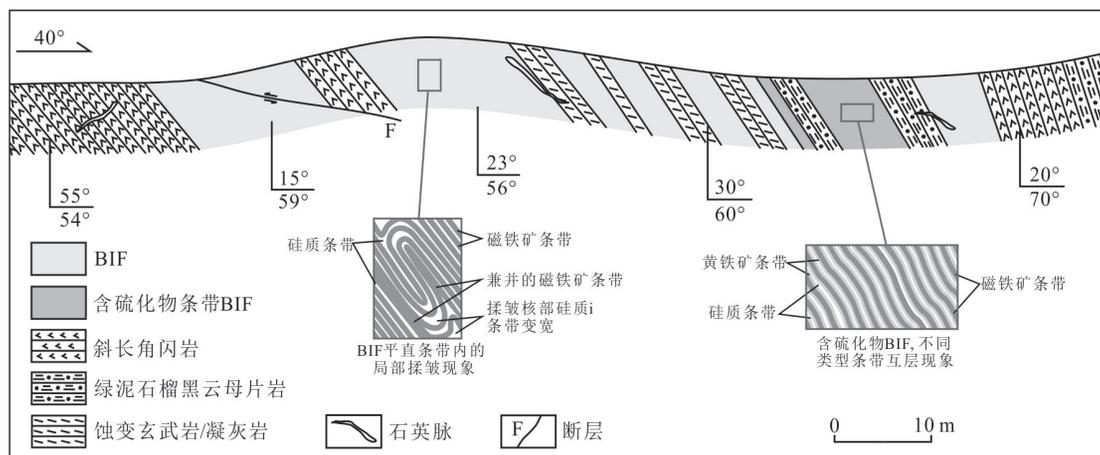


图8 下甸子BIF铁矿区代表性地质剖面

Fig.8 Representative sketch profiles from the Xiadianzi BIF, showing relationships between the BIF and associated lithologies
据彭自栋(2018)

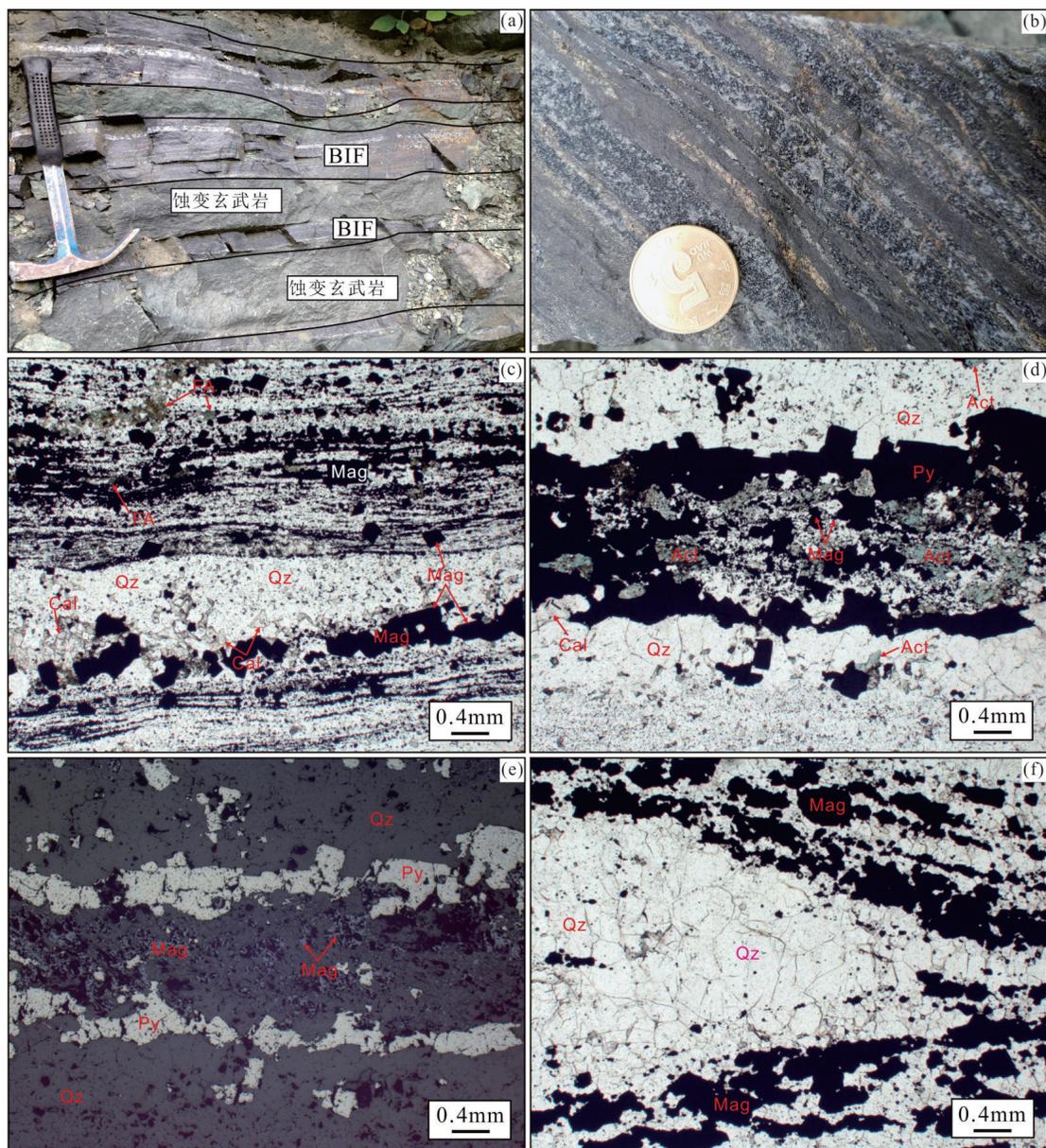


图9 下旬 BIF 与黄铁矿条带的野外和镜下照片

Fig.9 Field photo and photomicrographs showing typical textures and petrographic relationships among main mineral phases in the Taiyanggou BIFs

据彭自栋等(2017):a. 互层的 BIF 和蚀变玄武岩,二者之间为整合接触,界线平直;b. 由互层的富铁条带、富硅条带和黄铁矿条带构成的含硫化物 BIF,三类条带间均为平直接触;c. 硅酸盐相 BIF 的富铁条带由更细的磁铁矿和石英微条带构成,一些粗粒的(0.1~0.2 mm)磁铁矿和铁阳起石通常穿切这些微条带,同时在富硅条带中可见到少量的方解石颗粒(单偏光);d. 含硫化物 BIF 的富铁条带中可见大量板条状阳起石(粒径 0.2~0.4 mm)与石英颗粒交互生长,在富硅条带中可见到粉尘状磁铁矿、磁铁矿集合体及少量的方解石颗粒(单偏光);e. 半自形—自形黄铁矿颗粒(0.1~0.5 mm)或构成连续的微条带或呈孤立的颗粒沿富铁条带边部分布(反射光);f. 由纯净的磁铁矿微条带和石英微条带构成的氧化物相 BIF,在磁铁矿微条带内可见到粗粒石英颗粒构成的结核(单偏光). 矿物缩写:Mag. 磁铁矿;Qz. 石英;Act. 阳起石;Py. 黄铁矿

颗粒构成(图 9c、图 9d);相对而言,硫化物条带矿物组合较为简单,主要为细—中粒(0.1~0.5 mm)半自形—自形黄铁矿颗粒,偶见少量不规则状黄铁矿晶体(图 9e).

3 清原绿岩带新太古代构造演化及控矿作用

3.1 构造背景及演化

自 20 世纪 50 年代发现红透山矿床以来,首先

引起争论的是有关红透山矿床的构造背景问题. 早期人们多认为其构造背景为大陆边缘的裂谷(裂陷)或地幔柱环境, 如 Wu *et al.* (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)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, 清原绿岩带发育超镁铁质—镁铁质火山岩、双峰式火山岩以及与表壳岩近同期的 TTG, 他们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. 但近期越来越多的学者认为红透山铜锌矿含矿建造为钙碱性—拉斑过渡系列, 近矿围岩发育厚层拉斑玄武岩, 其构造背景为岛弧—弧后盆地环境 (Li and Wei, 2017; Peng *et al.*, 2018).

Hart *et al.* (2004) 依据长英质火山岩地球化学特征与源区深度的关系, 将其划分为 FI、FII、FIII 型, 它们分别对应碱性、钙碱性过渡至拉斑质火山

岩, 源区深度也依次变浅. FI 具有很陡的稀土元素配分模式, 显示源区石榴石相的稳定存在, 源区深度 >30 km; FII 型相对 FI 具有较低的稀土元素配分模式及中等的 Nb、Ta 元素负异常, 显示岩浆与源区角闪石 + 斜长石平衡, 其源区深度为 10~30 km; FIII 型的地球化学特征显示源区没有石榴石 + 角闪石存在, 而仅仅存在斜长石, 显示较浅的形成深度. 同时认为最有利于 VMS 成矿的是 FIII 型长英质火山岩, 但也有部分 VMS 矿床的成矿地质体为 FII 型长英质火山岩. 彭自栋等 (2017, 2018) 研究认为, 清原绿岩带石棚子组原岩以拉斑和过渡性玄武岩为主, 其上部发育少量以 N-MORB 型玄武岩和 FI 型英安岩为原岩的双峰式火山岩组合; 红透山组岩石的原岩类型相对单一, 为大规模双峰式火山岩和少量火山碎屑岩, 但与石棚子组双峰式火山岩不同, 其酸性端元为 FII 型英安岩 (图 10); 南天门组则以

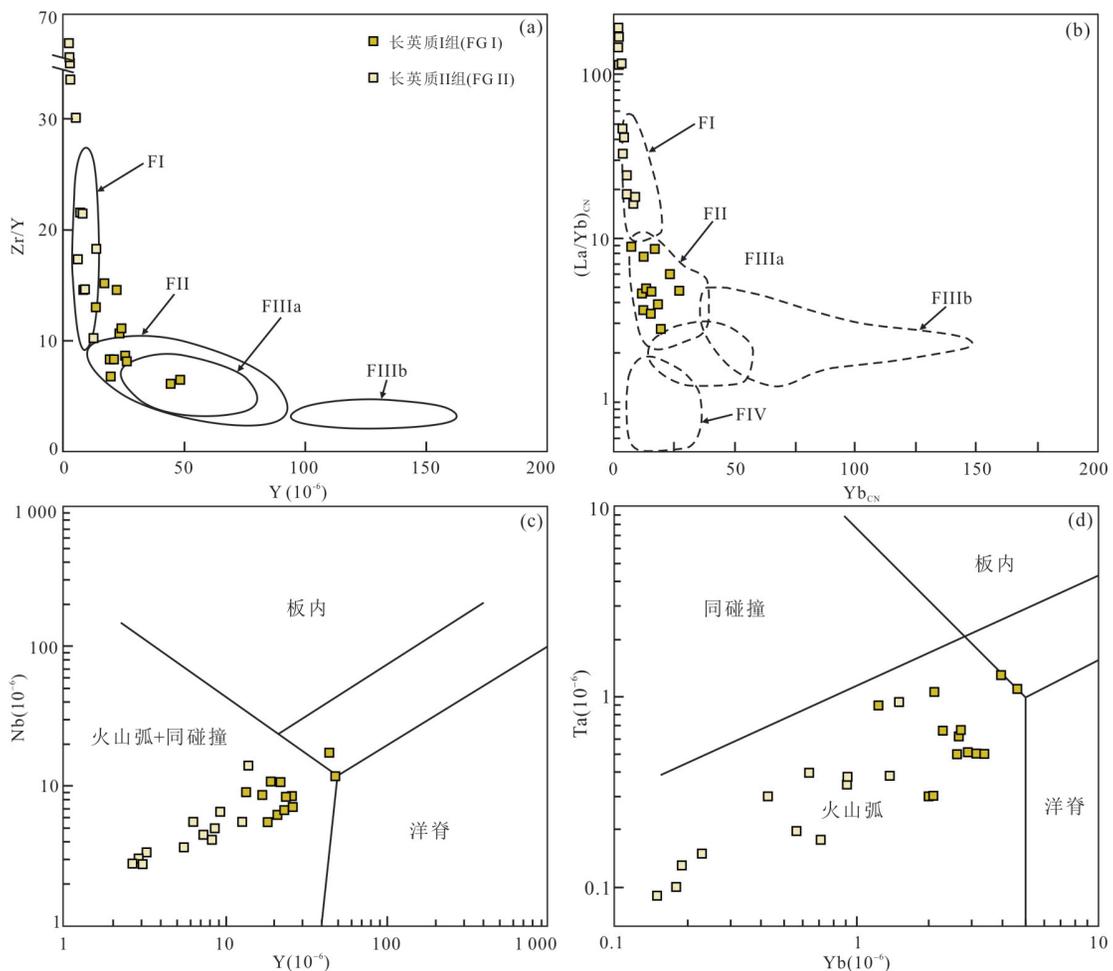


图 10 清原绿岩带变英安岩样品地球化学图解

Fig.10 Geochemical diagrams of meta-dacite samples in the QGB

图 a 和图 b 分别为 Zr/Y vs. Y 和 $(La/Yb)_{CN}$ vs. Yb_{CN} 酸性火山岩类型判别图解, 改自 Hart *et al.* (2004); 图 c 和图 d 分别为 Nb vs. Y 和 Ta vs. Yb 酸性火山岩构造环境图解, 改自 Pearce *et al.* (1984)

变沉积岩为主(如大理岩、片岩和石英岩),仅下部发育少量原岩为N-MORB型的玄武岩.清原地区新太古代N-MORB型玄武岩均显示正的初始 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(+2~+3.4),表明其形成于亏损地幔的部分熔融;而过渡和拉斑质玄武岩则发育显著的负Nb异常,指示它们源自受俯冲带流/熔体交代的亏损地幔的部分熔融.与变N-MORB型玄武岩互层的FI和FII型变英安岩显示较大的初始 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值范围(-4.6~+3.0),结合其地球化学特征,这两类岩石应当形成于镁铁质源区在地壳不同深度的部分熔融,同时伴随有古老陆壳物质不同程度的添加.上述地球化学特征综合指示清原绿岩带的形成与新太古代末期(~2.57 Ga)活动大陆边缘的洋-陆俯冲作用密切相关;而火山岩类型从基性火山岩为主变为双峰式火山岩占主导的特征,记录了区域地球动力学背景从压性向张性的转变.绿岩带中的BIF和VMS矿床普遍赋存于绿岩带双峰式火山岩序列中,说明成矿主要发生在弧后盆地的拉张阶段;而已知VMS-BIF共生组合则仅出现于以FII型变英安岩为酸性端元的红透山组,反映拉张作用强度是制约该组合发育的主要因素.

3.2 构造演化对成矿的控制

对比分析清原绿岩带各组岩石组合及区内主要矿床产出层位,可认为清原绿岩带的主要成矿作用,尤其是区内的VMS矿床,均集中出现于绿岩带演化过程的拉张阶段.该观点与目前对现代海底以及其他地质历史时期的VMS矿床的认识一致,即此类矿床普遍产出于张性构造环境.拉张作用一方面会导致区域性的地壳减薄,另一方面会促使形成大量的正断层(Piercey, 2010).上述地质过程不但能够极大地提高岩石渗透性,有利于热液流体的疏导,而且可以为镁铁质-超镁铁质熔体向地壳浅部侵位提供通道,进而促使局部地温梯度的升高(Schardt *et al.*, 2006),最终为发育大规模海底热液循环提供必须的条件(Ohmoto *et al.*, 2006; Piercey, 2010).

另外,通过对大量岩石地球化学数据的研究,结果表明空间上VMS矿床总是与某些特定类型的酸性火山岩(如FII和FIII型流纹岩)密切共生,这实际上也为这些酸性火山岩是否具有发育VMS成矿的潜力提供了指示(Hart *et al.*, 2004; Piercey, 2010).清原绿岩带下部的石棚子组上段和中部的红透山组均发育典型的双峰式火山-沉积岩石组合,

指示拉张环境(Peng *et al.*, 2015; Li *et al.*, 2017);然而值得注意的是,区内的VMS矿床均发育于以FII型变英安岩为酸性端元的红透山组,而其下部以FI型变英安岩为酸性端元的石棚子组上段却缺乏VMS矿床.相比于FI型变英安岩,FII型变英安岩一般形成于镁铁质下地壳较浅深度(10~15 km)和较高温度(~700~900 °C)条件下的含水部分熔融过程;因此,上述FII型变英安岩的出现表明在红透山组形成阶段,这一地区的地壳浅部存在相应的高温热源,而地壳浅部的高温热源正是发育大规模长期、稳定热液循环系统的前提(Schardt *et al.*, 2006; Piercey, 2010).

4 清原绿岩带VMS-BIF弧后盆地系统成矿模式

年代学研究显示,清原地区的VMS与BIF矿床均产于同一绿岩带近同期火山-沉积旋回中.原岩恢复和地球化学特征表明(Peng *et al.*, 2018),小莱河BIF围岩黑云斜长片麻岩具FI型长英质火山岩特征,明显不同于红透山地区黑云斜长片麻岩,后者具有相对平缓的左倾稀土配分模式,显示FII型长英质火山岩特征并有向FIIIa-IV演化的趋势.同时,下甸子BIF围岩角闪岩原岩为拉斑质玄武岩,而红透山VMS斜长角闪岩-角闪岩原岩为钙碱性-拉斑质玄武岩(张雅静, 2014).基于上述特征,红透山VMS可能产于火山弧向弧后盆地过渡环境,下甸子BIF可能产于弧后盆地环境,而小莱河BIF可能产于火山弧环境(Peng *et al.*, 2018).

基于清原地区主要VMS与BIF矿床矿石和围岩的岩相学及地球化学综合分析,笔者认为清原绿岩带VMS与BIF组合形成的条件大致为:新太古代海洋整体呈弱酸性、富 Fe^{2+} 的还原状态,板块运动诱发的海底热液活动一方面为VMS成矿提供了必要条件,另一方面促进了海水中 Fe^{2+} 含量的进一步增加;此时局部海洋(如清原)中的铁已经开始沉淀,而同时期海底热液喷口的间歇性活动形成了一系列VMS型Cu-Zn矿床(如,红透山、树基沟);在距离热液喷口较近区域,由于受热液活动影响海水整体硫逸度较高,不利于铁的沉淀,因此,VMS矿床附近缺乏BIF,而在远离VMS的区域由于海水的稀释作用,海洋整体硫逸度保持在较低水平,则有铁的沉淀(如,小莱河、下甸子BIF).然而,热液喷口的间歇性活动仍对远离喷口的铁质沉淀过程造成了一

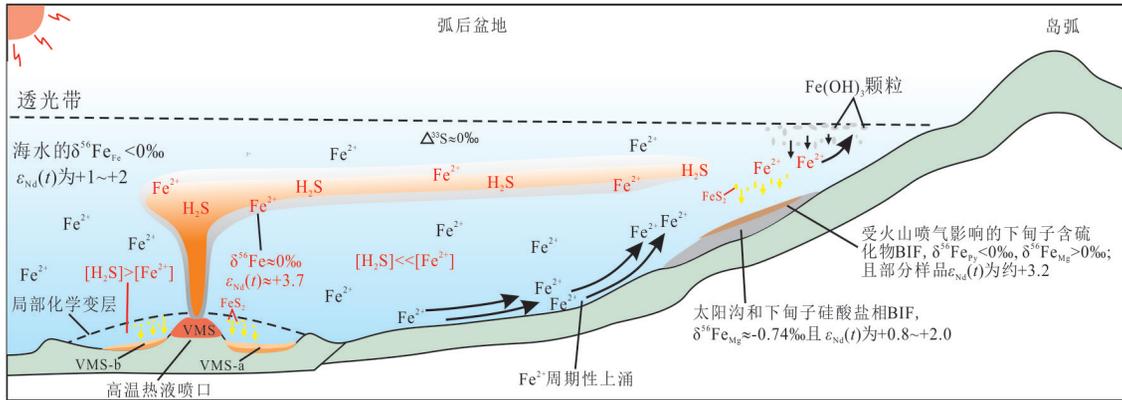


图 11 华北克拉通新太古代清原绿岩带 BIF-VMS 弧后盆地系统成矿模式

Fig.11 Tectonic-sedimentary ore-forming model of VMS-BIF paragenetic assemblage in Neoproterozoic Qingyuan greenstone belt, NCC

修改自彭自栋(2018); VMS. 红透山 VMS 块状矿石, $\delta^{56}\text{Fe}_{\text{py}}$ 约为 0‰ ; VMS-a. 红透山 VMS 纹层状矿石, $\delta^{56}\text{Fe}_{\text{py}}$ 约为 -0.55‰ ; VMS-b. 红透山 VMS 纹层状矿石, $\delta^{56}\text{Fe}_{\text{py}}$ 约为 $+0.30\text{‰}$

定的影响,即下甸子 BIF 矿石中出现黄铁矿与富铁和富硅条带互层现象。

侯可军等(2006)分析了辽宁太古代红透山铜矿中硫化物的多硫同位素组成和石英的硅氧同位素组成,其中 $\delta^{34}\text{S}$ 在 $-0.7\text{‰} \sim +3.1\text{‰}$,与深部幔源硫相似, $\Delta^{33}\text{S}$ 约为 0,显示硫同位素非质量分馏效应不明显,表明该矿床中的硫几乎没有经历大气循环过程。矿石中石英的 $\delta^{30}\text{Si}$ 分布在 $-0.8\text{‰} \sim +0.4\text{‰}$ 之间, $\delta^{18}\text{O}$ 分布在 $+8.5\text{‰} \sim +9.5\text{‰}$ 之间,与海底黑烟囱及热水喷气成因硅质岩的硅氧同位素组成相似。

彭自栋(2018)分析了清原绿岩带不同层位 BIF 的 Nd-Fe 同位素特征。结果表明清原绿岩带 BIF 样品的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = +0.8 \sim +2.0$,与 27~38 亿年期间古海水 Nd 同位素组成 ($\epsilon_{\text{Nd}}(t) = +1 \sim +2$) 基本一致,证实了同时期海底热液对 BIF 有一定物质贡献,另一方面也反映了古海洋的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值从 38 亿年至 25 亿年未发生显著变化。此外,与 BIF 互层产出的含铁页岩样品均与区内玄武岩具有近似的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值,说明其物质主要源自绿岩带基性火山岩风化;而 BIF 与上述变含铁页岩的 Nd 同位素组成差异,反映了 BIF 物质来源具有多源性。清原绿岩带中部太阳沟以及上下甸子硅酸盐相 BIF 中磁铁矿的 $\delta^{56}\text{Fe}_{\text{Mg}}$ 值为 $-0.65\text{‰} \sim -0.83\text{‰}$,证实了它们沉淀之前水体中的 Fe^{2+} 已经发生了部分氧化;而下甸子硅酸盐相 BIF 上部层位的含硫化物 BIF 中磁铁矿却具有重 Fe 同位素富集的特征, $\delta^{56}\text{Fe}_{\text{Mg}}$ 值为 $+0.79\text{‰} \sim +0.85\text{‰}$,反映当时海水中的 Fe^{2+} 得到了补充。结合

区内部分 BIF 样品 ($+3.2 \sim +3.6$) 具有与同时期的 N-MORB 型玄武岩 (平均为 $+3.7$) 近似的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值,以及含硫化物 BIF 的平均组分相对于硅酸盐相 BIF 富集 LREE 且正 Eu 异常更为显著,以上信息共同指示同时期热液活动在供应物质的同时,也改变了局部水体的地球化学特征。在此基础上,可建立区域绿岩带 VMS-BIF 弧后盆地系统成矿模式(图 11)。

5 总结

本文综述了笔者及前人有关前寒武纪 VMS 和 BIF 矿床地质、地球化学等研究成果,探讨了清原地区 VMS-BIF 共生组合的成矿构造背景、控制因素及成因联系。取得以下主要认识:

(1) 全球范围前寒武纪陆壳巨量生长的峰期,往往大量发育 VMS 与 BIF 共生组合,它们之间不仅存在时空关系,还存在一定的成因联系。

(2) 新太古代清原绿岩带变火山岩组合的岩石学及地球化学研究,表明该绿岩带形成于活动大陆边缘的洋-陆俯冲过程,而区内 VMS 和 BIF 共生组合形成于伸展阶段的弧后盆地环境。

(3) 清原绿岩带 VMS 与不同层位 BIF 的地质和元素及 Nd-Fe-S 同位素地球化学特征,表明阿尔戈玛型 BIF 与同期 VMS 有一定的成因联系,具体表现为与 VMS 有关的热液活动不仅可以改变局部水体的氧逸度和硫逸度,而且通过海底热液对周围海水 Fe^{2+} 、Si 的输入,影响了 BIF 的元素和同位素组成。

References

- Barley, M., Bekker, A., Krapez, B., 2005. Late Archean to Early Paleoproterozoic Global Tectonics, Environmental Change and the Rise of Atmospheric Oxygen. *Earth and Planetary Science Letters*, 238(1-2): 156-171. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.06.062>
- Bekker, A., Slack, J. F., Planavsky, N., et al., 2010. Iron Formation: The Sedimentary Product of a Complex Interplay among Mantle, Tectonic, Oceanic, and Biospheric Processes. *Economic Geology*, 105(3): 467-508. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.3.467>
- Dreher, A. M., Xavier, R. P., Taylor, B. E., et al., 2008. New Geologic, Fluid Inclusion and Stable Isotope Studies on the Controversial Igarapé Bahia Cu-Au Deposit, Carajás Province, Brazil. *Mineralium Deposita*, 43(2): 161-184. <https://doi.org/10.1007/s00126-007-0150-6>
- Farquhar, J., Zerkle, A. L., Bekker, A., 2011. Geological Constraints on the Origin of Oxygenic Photosynthesis. *Photosynthesis Research*, 107(1): 11-36. <https://doi.org/10.1007/s11120-010-9594-0>
- Franklin, J. M., Gibson, H. L., Jonasson, I. R., et al., 2005. Volcanogenic Massive Sulfide Deposits. Economic Geology 100th Anniversary Volume. SEG, Littleton, 523-560.
- German, C. R., Von Damm, K. L., 2004. Hydrothermal Processes: Treatise on Geochemistry. Pergamon, Oxford, 181-222.
- Gu, L. X., Zheng, Y. C., Tang, X. Q., et al., 2007. Copper, Gold and Silver Enrichment in Ore Mylonites within Massive Sulphide Orebodies at Hongtoushan VHMS Deposit, N.E. China. *Ore Geology Reviews*, 30(1): 1-29. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2005.09.001>
- Hart, T. R., Gibson, H. L., Leshner, C. M., 2004. Trace Element Geochemistry and Petrogenesis of Felsic Volcanic Rocks Associated with Volcanogenic Massive Cu-Zn-Pb Sulfide Deposits. *Economic Geology*, 99(5): 1003-1013. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.99.5.1003>
- Hou, K. J., Li, Y. H., Wan, D. F., 2006. Stable Isotope Geochemistry and Genesis of the Archean Hongtoushan Sulfide Deposit in Liaoning Province. *Mineral Deposits*, 25(Suppl.): 167-170 (in Chinese with English abstract).
- Huston, D. L., Champion, D. C., Cassidy, K. F., 2014. Tectonic Controls on the Endowment of Neoproterozoic Cratons in Volcanic-Hosted Massive Sulfide Deposits: Evidence from Lead and Neodymium Isotopes. *Economic Geology*, 109(1): 11-26. <https://doi.org/10.2113/econgeo.109.1.11>
- Huston, D. L., Logan, G. A., 2004. Barite, BIFs and Bugs: Evidence for the Evolution of the Earth's Early Hydrosphere. *Earth and Planetary Science Letters*, 220(1-2): 41-55. [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(04\)00034-2](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(04)00034-2)
- Huston, D. L., Pehrsson, S., Eglington, B. M., et al., 2010. The Geology and Metallogeny of Volcanic-Hosted Massive Sulfide Deposits: Variations through Geologic Time and with Tectonic Setting. *Economic Geology*, 105(3): 571-591. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.3.571>
- Isley, A. E., 1995. Hydrothermal Plumes and the Delivery of Iron to Banded Iron Formation. *The Journal of Geology*, 103(2): 169-185. <https://doi.org/10.1086/629734>
- Isley, A. E., Abbott, D. H., 1999. Plume-Related Mafic Volcanism and the Deposition of Banded Iron Formation. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 104(B7): 15461-15477. <https://doi.org/10.1029/1999jb900066>
- Li, B. L., Huo, L., Li, Y. S., 2007. Several Problems Involved in the Study of Banded Iron Formations (BIFs). *Acta Mineralogica Sinica*, 27(2): 205-210 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y. H., Hou, K. J., Wan, D. F., et al., 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, Z., Wei, C. J., 2017. Two Types of Neoproterozoic Basalts from Qingyuan Greenstone Belt, North China Craton: Petrogenesis and Tectonic Implications. *Precambrian Research*, 292: 175-193. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.01.014>
- Li, Z. H., Zhu, X. K., Tang, S. H., 2012. Mineralization Mechanism of Precambrian Banded Iron Formation and Atmosphere and Ocean Environment in Early Earth—Evidences from Iron Isotope and Element Geochemistry. *Acta Petrologica Sinica*, 28(11): 3545-3558 (in Chinese with English abstract).
- Malinowski, M., White, D. J., Mwenifumbo, C. J., et al., 2008. Seismic Exploration for VMS Deposits within the Paleoproterozoic Flin Flon Belt, Trans-Hudson Orogen, Canada. *Geophysical Research*, 10: 37-45.
- Mao, D. B., Shen, B. F., Li, J. J., et al., 1997. Archena

- Geologica and Metallogeny in Qingyuan Area, Northern Liaoning Province, China. *Progress in Precambrian Research*, 20(3):1—10 (in Chinese with English abstract).
- Ohmoto, H., Watanabe, Y., Yamaguchi, K.E., et al., 2006. Chemical and Biological Evolution of Early Earth: Constraints from Banded Iron Formations. *Geological Society of America Memoir*, 198:291—331. [https://doi.org/10.1130/2006.1198\(17\)](https://doi.org/10.1130/2006.1198(17))
- Pearce, J. A., Harris, N. B. W., Tindle, A. G., 1984. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks. *Journal of Petrology*, 25(4): 956—983. <https://doi.org/10.1093/ptrology/25.4.956>
- Peng, P., Wang, C., Wang, X. P., et al., 2015. Qingyuan High-Grade Granite-Greenstone Terrain in the Eastern North China Craton: Root of a Neoproterozoic Arc. *Tectonophysics*, 662: 7—21. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2015.04.013>
- Peng, Z. D., 2018. Geodynamic Setting and Depositional Environment of the VMS-BIF Paragenetic Assemblage in the Neoproterozoic Qingyuan Greenstone Belt, North China Craton (Dissertation). Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Peng, Z. D., Wang, C. L., Tong, X. X., et al., 2018. Element Geochemistry and Neodymium Isotope Systematics of the Neoproterozoic Banded Iron Formations in the Qingyuan Greenstone Belt, North China Craton. *Ore Geology Reviews*, 102: 562—584. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.09.008>
- Peng, Z. D., Wang, C. L., Zhang, L. C., et al., 2017. Geochemistry of Metamorphosed Volcanic Rocks in the Neoproterozoic Qingyuan Greenstone Belt, North China Craton: Implications for Geodynamic Evolution and VMS Mineralization. *Precambrian Research*, 326: 196—221. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.12.033>
- Peng, Z. D., Wang, C. L., Zhao, G., et al., 2017. Research Progress and Problems of Precambrian VMS-BIF Paragenetic Assemblage. *Mineral Deposits*, 36(4): 905—920 (in Chinese with English abstract).
- Peng, Z. D., Zhang, L. C., Wang, C. L., et al., 2018. Geological Features and Genesis of the Neoproterozoic Pyrite-Bearing Xiadianzi BIF, Qingyuan Greenstone Belt. *Acta Petrologica Sinica*, 34(2): 398—426 (in Chinese with English abstract).
- Piercy, S. J., 2010. An Overview of Petrochemistry in the Regional Exploration for Volcanogenic Massive Sulphide (VMS) Deposits. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 10(2): 119—136. <https://doi.org/10.1144/1467-7873/09-221>
- Qi, S. J., Wang, C. Y., Yang, J. P., et al., 1983. The Origin of the Precambrian Metavolcanic-Sedimentary Rock Systems and the Massive Sulfide Deposits in Xingshutai Neiqiu, Hebei Province. *Journal of Hebei College of Geology*, 22(2): 1—16 (in Chinese).
- Qian, Y., Sun, F. Y., Zhang, Y. J., et al., 2014. Metallogenic and Metamorphic Age of the Hongtoushan Copper-Zinc Massive Sulfide Deposit, Liaoning Province, China. *Resource Geology*, 64(1): 17—24. <https://doi.org/10.1111/rge.12023>
- Rasmussen, B., Fletcher, I. R., Bekker, A., et al., 2012. Deposition of 1.88-Billion-Year-Old Iron Formations as a Consequence of Rapid Crustal Growth. *Nature*, 484(7395): 498—501. <https://doi.org/10.1038/nature11021>
- Schardt, C., Large, R., Yang, J. W., 2006. Controls on Heat Flow, Fluid Migration, and Massive Sulfide Formation of an Off-Axis Hydrothermal System—The Lau Basin Perspective. *American Journal of Science*, 306(2): 103—134. <https://doi.org/10.2475/ajs.306.2.103>
- Schneider, D. A., Bickford, M. E., Cannon, W. F., et al., 2002. Age of Volcanic Rocks and Syndepositional Iron Formations, Marquette Range Supergroup: Implications for the Tectonic Setting of Paleoproterozoic Iron Formations of the Lake Superior Region. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 39(6): 999—1012. <https://doi.org/10.1139/e02-016>
- Slack, J. F., Cannon, W. F., 2009. Extraterrestrial Demise of Banded Iron Formations 1.85 Billion Years ago. *Geology*, 37(11): 1011—1014. <https://doi.org/10.1130/g30259a.1>
- Slack, J. F., Grenne, T., Bekker, A., 2009. Seafloor-Hydrothermal Si-Fe-Mn Exhalites in the Pecos Greenstone Belt, New Mexico, and the Redox State of ca. 1.720 Ma Deep Seawater. *Geosphere*, 5(3): 302—314. <https://doi.org/10.1130/ges00220.1>
- Slack, J. F., Grenne, T., Bekker, A., et al., 2007. Suboxic Deep Seawater in the Late Paleoproterozoic: Evidence from Hematitic Chert and Iron Formation Related to Seafloor-Hydrothermal Sulfide Deposits, Central Arizona, USA. *Earth and Planetary Science Letters*, 255(1—2): 243—256. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.12.018>
- Thurston, P. C., Ayer, J. A., Goutier, J., et al., 2008. Depo-

- sitional Gaps in Abitibi Greenstone Belt Stratigraphy: A Key to Exploration for Syngenetic Mineralization. *Economic Geology*, 103(6): 1097–1134. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.103.6.1097>
- Thurston, P. C., Kamber, B. S., Whitehouse, M., 2012. Archean Cherts in Banded Iron Formation: Insight into Neoproterozoic Ocean Chemistry and Depositional Processes. *Precambrian Research*, 214–215: 227–257. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2012.04.004>
- Veizer, J., Laznicka, P., Jansen, S. L., 1989. Mineralization through Geologic Time; Recycling Perspective. *American Journal of Science*, 289(4): 484–524. <https://doi.org/10.2475/ajs.289.4.484>
- Wan, Y. S., Song, B., Yang, C., et al., 2005. Zircon SHRIMP U-Pb Geochronology of Archean Rocks from the Fushun-Qingyuan Area, Liaoning Province and Its Geological Significance. *Acta Geologica Sinica*, 79(1): 78–87 (in Chinese with English abstract).
- Wang, C. L., Zhang, L. C., Liu, L., et al., 2012. Research Progress and Some Problems Deserving Further Discussion of Precambrian Iron Formations. *Mineral Deposits*, 31(6): 1311–1325 (in Chinese with English abstract).
- Wu, K. K., Zhao, G. C., Sun, M., et al., 2013. Metamorphism of the Northern Liaoning Complex: Implications for the Tectonic Evolution of Neoproterozoic Basement of the Eastern Block, North China Craton. *Geoscience Frontiers*, 4(3): 305–320. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2012.11.005>
- Wyman, D. A., Kerrich, R., Polat, A., 2002. Assembly of Archean Cratonic Mantle Lithosphere and Crust: Plume-Arc Interaction in the Abitibi-Wawa Subduction-Accretion Complex. *Precambrian Research*, 115(1–4): 37–62. [https://doi.org/10.1016/s0301-9268\(02\)00005-0](https://doi.org/10.1016/s0301-9268(02)00005-0)
- Yang, X. Q., Zhang, Z. H., Duan, S. G., et al., 2016. Mineralogical and Sulfur Isotope Characteristics of Huashugou Copper Deposit in Northern Qilian: Implications for Metallogenesis. *Mineral Deposits*, 35(1): 185–195 (in Chinese with English abstract).
- Yu, F. J., 2006. The Study of Metallogenic Model and Prospecting Pattern of Hongtoushan-Type Deposit (Dissertation). Northeastern University, Shenyang (in Chinese with English abstract).
- Zhai, M. G., Yang, R. Y., Lu, W. J., et al., 1985. Geochemistry and Evolution of the Qingyuan Archean Granite—Greenstone Terrain, NE China. *Precambrian Research*, 27(1–3): 37–62. [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(85\)90005-1](https://doi.org/10.1016/0301-9268(85)90005-1)
- Zhang, L. C., Ji, J. S., Xue, C. J., et al., 1997. Geochemistry and Origin of Huashugou Fe-Cu Deposit in Gansu Province. *Journal of Xi'an Geological College*, 19(4): 13–19 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, L. C., Zhai, M. G., Wan, Y. S., et al., 2012. Study of the Precambrian BIF-iron Deposits in the North China Craton: Progresses and Questions. *Acta Petrologica Sinica*, 28(11): 3431–3445 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, L. C., Zhai, M. G., Zhang, X. J., et al., 2012. Formation Age and Tectonic Setting of the Shirengou Neoproterozoic Banded Iron Deposit in Eastern Hebei Province: Constraints from Geochemistry and SIMS Zircon U-Pb Dating. *Precambrian Research*, 222–223: 325–338. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2011.09.007>
- Zhang, Q. S., Li, S. Y., Liu, L. D., 1984. Precambrian Geology and Mineralization, China. Jilin Peoples Publishing House, Changchun, 166–171 (in Chinese).
- Zhang, Y. J., Sun, F. Y., Huo, L., et al., 2014. Metallogenic Age and Ore Remobilization of Shujigou Copper-Zinc Deposit, Liaoning Province, China. *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., et al., 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. *Ore Geology Reviews*, 67: 354–367. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.12.019>

附中文参考文献

- 侯可军, 李延河, 万德芳, 2006. 辽宁太古代红透山铜矿的稳定同位素地球化学特征及矿床成因. *矿床地质*, 25(增刊): 167–170.
- 李碧乐, 霍亮, 李永胜, 2007. 条带状铁建造(BIFs)研究的几个问题. *矿物学报*, 27(2): 205–210.
- 李延河, 侯可军, 万德芳, 等, 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, 2012. 鞍山—本溪地区条带状铁矿的成矿机理及地球早期的海洋环境——来自Fe同位素和元素地球化学的证据. *岩石学报*, 28(11): 3545–3558
- 毛德宝, 沈保丰, 李俊建, 等, 1997. 辽北清原地区太古宙地质演化及其对成矿的控制作用. *前寒武纪研究进展*, 20(3): 1–10.

彭自栋, 2018. 华北克拉通新太古代清原绿岩带 VMS-BIF 共生组合成矿构造背景及沉积环境 (博士学位论文). 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所.

彭自栋, 王长乐, 赵刚, 等, 2017. 前寒武纪 VMS 与 BIF 铁矿床共生组合研究进展. 矿床地质, 36(4): 905-920.

彭自栋, 张连昌, 王长乐, 等, 2018. 新太古代清原绿岩带下甸子 BIF 铁矿地质特征及含黄铁矿条带 BIF 的成因探讨. 岩石学报, 34(2): 398-426.

祁思敬, 王承义, 杨剑平, 等, 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. 河北地质学院学报, 22(2): 1-16.

万渝生, 宋彪, 杨淳, 等, 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.

王长乐, 张连昌, 刘利, 等, 2012. 前寒武纪条带状铁建造研究进展和值得进一步讨论的问题. 矿床地质, 31(6): 1311-1325.

杨秀清, 张作衡, 段士刚, 等, 2016. 北祁连桦树沟铜矿床矿物学和硫同位素特征及其成矿意义. 矿床地质, 35(1): 185-195.

于凤金, 2006. 红透山式矿床成矿模式与找矿模型研究 (博士学位论文). 沈阳: 东北大学.

张连昌, 姬金生, 薛春纪, 等, 1997. 甘肃桦树沟铁铜矿床地球化学及成因. 西安地质学院学报, 19(4): 13-19.

张连昌, 翟明国, 万渝生, 等, 2012. 华北克拉通前寒武纪 BIF 铁矿研究: 进展与问题. 岩石学报, 28(11): 3431-3445.

张秋生, 李守义, 刘连登, 1984. 中国早前寒武纪地质及成矿作用. 长春: 吉林人民出版社, 166-171.

张雅静, 孙丰月, 霍亮, 等, 2014. 辽宁树基沟铜锌矿成矿时代及矿石再活化机制. 吉林大学学报(地球科学版), 44(3): 786-795.

《地球科学》

2020年2月 第45卷 第2期 要目预告

北黄海盆地东部坳陷中生界烃源岩特征及其指示的油气勘探方向.....蔡来星等

内蒙古额济纳地区奥陶纪火山岩地球化学特征及其地质意义.....陈智斌等

非完整井下单井注抽试验数值模拟方法改进.....顾昊琛等

基于位移比模型的三峡库区云阳县域内蠕变型滑坡降雨预警.....郭子正等

南岭九嶷山地区砂子岭岩体成因与构造属性.....李剑锋等

阿尔金山前带东段基岩储层主要特征及评价.....李欣等

非达西裂隙流对渗透性基岩中流场及溶质羽的影响.....李一鸣等

内蒙古索伦山地区三叠纪侵入岩锆石 U-Pb 年龄、岩石地球化学特征及地质意义.....连琛芹等

一种高精度台式旋转超声岩石取心装置.....韩光超等