

doi:10.3799/dqkx.2011.031

块状硫化物矿床成矿构造环境研究进展

孙华山¹, 吴冠斌¹, 刘 浏¹, 谢小峰¹, 段 磊²

1. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

2. 招金矿业股份有限公司, 山东招远 265400

摘要: 对 VHMS 型、SEDEX 型和 VSHMS 型 3 种块状硫化物矿床近年来成矿构造环境研究进展进行了较全面的回顾。其中, VHMS 型块状硫化物矿床重点对弧间裂谷及弧后盆地构造环境下矿床时空演化及分布规律、古代 VHMS 型块状硫化物矿床全球对比认识及沟—弧—盆体系下现代海底块状硫化物研究热点地区的岩石类型、组合及岩浆演化规律进行了总结; SEDEX 型块状硫化物矿床重点对澳大利亚北部元古代 SEDEX 型块状硫化物矿床集中区近年来成矿动力学背景研究进展进行了介绍。指出该区巨大的 SEDEX 型矿床成矿构造环境不是以往认为的被动大陆边缘裂谷, 而是汇聚板块地球动力学背景之下远离弧后的大陆拉张盆地, 尤其值得关注的是不仅元古界 SEDEX 型矿床如此, 而且那些古生代的典型 SEDEX 型矿床(如沙利文, 红狗矿床)同样被认为具有相同的产出构造背景。同时认为此种构造背景形成的 SEDEX 型矿床具有更大的找矿价值; VSHMS 型矿床是近十年来逐渐得到重视的一类块状硫化物矿床, 矿化特征及成矿作用与以上两类矿床相似, 但其成矿构造环境应当位于上述两类矿床的过渡部位, 对构造环境判断具有重要的指示意义。因此, 在汇聚板块动力学背景下, 上述 3 种块状硫化物矿床, 自板块边缘岛弧一侧向远离板块边缘的大陆内部, 构成了一个很好的矿床分带或成矿序列, 即从 VHMS 型→VSHMS 型→SEDEX 型。

关键词: 成矿作用; 构造环境; 块状硫化物矿床。

中图分类号: P618.2

文章编号: 1000-2383(2011)02-0299-08

收稿日期: 2010-11-29

Research Advances in Metallogenic Tectonic Environment of Massive Sulfide Deposits

SUN Hua-shan¹, WU Guan-bin¹, LIU Liu¹, XIE Xiao-feng¹, DUAN Lei²

1. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Zhaojin Mining Industry Co., Ltd., Zhaoyuan 265400, China

Abstract: This paper summarizes in detail some advances in recent years about the ore-forming tectonic environment of VHMS type, SEDEX type and VSHMS type massive sulfide deposits, on which VHMS type deposit emphasizes three aspects as follows: the spatial and temporal distribution regularities of VHMS type ore deposits which occurred in intra-arc or backarc rift; metallogenic knowledge acquired from contrasting of ancient global VHMS type deposits; summary on the characteristics of lithological types and rock association, and general evolutionary processes of magma from modern seabed hydrothermal areas controlled under trench-island arc-backarc basin tectonic system. SEDEX type deposit emphasizes the metallogenic geodynamic environment from shale-hosted massive sulfide deposits of Proterozoic northeastern Australia. It is different from traditional understandings that these super-large size deposits do not occur in the intra-continental rift or aulocogen tectonic environments, whereas occurred in far-field backarc continental extension basin under plate convergent process, and it is especially pointed out that the paleozoic typical SEDEX type deposit, such as Sullivan, Red dog, is also regarded as the same metallogenic geodynamic setting as their Proterozoic counterparts. Apart from this, these deposits under the tectonic environment related to convergent plate have more important ore-finding prospect. VSHMS type deposit was concerned much more in the latest ten years, although it has the similar occurrence and metallogenic process as those deposits mentioned above, the different metallogenic tectonic environments, generally occurring in the transition tectonic setting between VHMS type and SEDEX type deposit, making it more important implication for tectonic setting. Accordingly, under convergent plate tectonic setting, from the plate

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (No. CUG090102).

作者简介: 孙华山 (1969—), 男, 博士, 副教授, 主要从事成矿理论及成矿预测教学与科研工作. E-mail: sunhsh@cug.edu.cn

boundary to far-field backarc intra-continental extension basin, a metallogenic sequence was established, i. e. VHMS→VSHMS→SEDEX.

Key words: mineralization; tectonic environment; massive sulfide deposit.

地壳内矿床的形成和时空分布是不均匀的,但也不是随机的. 它们的分布与其所处的成矿构造环境密切相关 (Hutchison, 1980; Meyer, 1988; Barley and Groves, 1992). 查明某类矿床的成矿构造环境,一方面有利于提高对该类矿床产出和分布规律的认识,提高成矿预测的成功率;另一方面,有利于加深对成矿作用的理解. 因此,成矿构造环境一直是成矿学研究的重要内容和研究方向之一 (Sawkins, 1972, 1976, 1990; Sillitoe, 1972, 1974; Titley and Heidrick, 1975; Laznicka, 1976; Betts and Giles, 2002; Betts *et al.*, 2003; Mortensen *et al.*, 2008; Piercey *et al.*, 2008). 鉴于海底热液块状硫化物矿床巨大的经济价值及其对成矿理论研究的重要意义,近 40 年来,该类矿床一直是国际成矿学界的研究热点. 目前,该类矿床中的某些类型与成矿构造环境之间关系已初步达成共识. 如,一般认为 SEDEX 型矿床形成的构造环境为被动大陆边缘裂谷或拗拉槽 (Sawkins, 1972, 1976, 1990; Goodfellow *et al.*, 1993; Lydon, 2004; Barrett *et al.*, 2008; Large *et al.*, 2008); 塞浦路斯型块状硫化物矿床形成构造环境为洋中脊,黑矿型块状硫化物矿床形成的构造环境为弧后盆地裂谷,尤其是 Hutchison (1980) 根据北美卡迪勒拉和阿巴拉契亚造山带提出的块状硫化物矿床与板块构造关系模型大大地提高了人们对块状硫化物矿床成矿构造环境的认识,并有力地指导了造山区古代块状硫化物矿床的找矿评价工作. 近 10 年来,通过现代海底热液区块状硫化物矿床研究及全球古代重要块状硫化物矿床成矿构造环境对比,得出了一些新认识,在此将这些认识归纳整理如下.

1 VHMS 型块状硫化物矿床成矿构造环境

火山岩赋矿块状硫化物矿床包括:塞浦路斯型 (Cyprus-type)、黑矿型 (Kuroko-type)、诺兰达型 (Noranda-type) 和别子型 (Besshi-type) 4 种类型. 其中,塞浦路斯型块状硫化物矿床产出的构造环境目前已经达成一致,即产于洋中脊拉张环境,含矿岩系为一套大洋拉斑玄武岩,经后期俯冲碰撞出现在造

山带蛇绿岩套之中. 诺兰达型和黑矿型块状硫化物矿床均产于火山岛弧环境,但二者产出时代和赋矿岩系及矿石成分方面存在差异. 其中,诺兰达型成矿时代一般出现在太古代和古元古代,赋矿围岩镁铁质火山岩含量大于长英质火山,矿石成分中以 Cu-Zn 组合为主, Pb 含量低,相反,黑矿型矿床矿石成分中 Pb 的含量显著增加,成为矿石中主要成分之一. 别子型矿床目前大多认为产出在弧前盆地(或海槽)环境. 由于大洋俯冲过程中强烈的消减作用,导致塞浦路斯型和别子型矿床很难被保存,因此,产于岛弧和弧后盆地环境中的黑矿型矿床是最常见的一种古海底块状硫化物矿床 (Groves and Bierlein, 2007; Piercey *et al.*, 2008). 近年来围绕该类矿床成矿构造环境研究取得了很多新认识,归纳如下:

(1) 通过现代和古代岛弧成矿环境演化研究,对岛弧有关的块状硫化物矿床时空分布规律有了更深入认识. 以往认为岛弧环境是块状硫化物矿床形成的有利构造环境,但是,岛弧环境的现代海底成矿作用仅见于西太平洋小笠原岛弧,总体上矿化较弱,尚未发现有一定规模的矿床,与古代矿床中多认为形成于岛弧环境的认识显著不同. 不过近来愈来愈多的研究已表明,过去认识的岛弧成矿环境并非与挤压造弧阶段的岛弧钙碱性中酸性火山岩有关,而是形成于岛弧开裂断陷阶段的双峰式岩石组合中,是岛弧裂谷的产物,日本的黑矿和三江地区的呷村提供了这方面的实例. 而岛弧裂谷是一种特殊的弧后盆地,其进一步发育就形成了弧后盆地,只是弧后盆地的形成发育是一个过程,从幼年期到成熟期,岩石组合不同,成矿可能不同. 幼年期可能形成铅锌铜矿床,成熟期扩张脊拉出的新洋壳出现,发育典型的大洋中脊玄武岩,故形成铜锌矿床. 西南太平洋弧后盆地冲绳 (Okinawa) 海槽和马里亚纳 (Mariana) 海槽的成矿作用其实就是这种认识的现代例子. 冲绳海槽发育在厚 20 km 的陆壳基底上的弧后扩张盆地,是菲律宾大洋板块向西俯冲致使琉球弧张裂的产物,尚属于岛弧裂谷阶段的弧后扩张盆地,在深 1 200~1 600 m 的弧后盆地内,发育双峰式火山岩组合,由流纹岩 (英安岩) 和玄武岩构成,成矿特征十分类似于日本的黑矿,硫化物丘为铅锌铜矿化特征; 马里亚纳海槽则经强烈扩张出现洋壳,东侧为 Pa-

gan 岛弧,西侧为残留弧,发育典型的大洋中脊玄武岩而非双峰岩石组合,水深 1 600~3 700 m,矿化类型似于大洋中脊的情况,以铜锌矿化为主。劳(Lau)海盆类型、矿化类型介于冲绳海槽和马里亚纳海槽之间,属过渡类型(李文渊,2007)。

此外,过去很少从应力状态去划分火山弧的类型。然而近年来的研究表明,应力状态对火山弧的演化具有重要的影响,从这个角度可以将其划分为张性火山弧和压性火山弧两类。张性火山弧是指经历过张一压交替历史、具有弧间裂谷(或裂陷)的火山弧;压性火山弧是指不具张一压交替历史和弧间裂谷(陷)的火山弧。产生张性火山弧的原因可能是由于俯冲角度较陡,在成弧前为张性应力背景,而产生压性火山弧的原因则可能是由于俯冲角较缓,成弧前无张性背景。因此,压性火山弧表现为弧前区(弧一沟间断)一主弧区一弧后区的空间配置格局,是人们比较熟悉的;而张性火山弧却复杂得多,通常表现为弧前区一外弧一弧间裂谷(陷)一内弧一弧后盆地的空间格局,是人们不太熟悉的。三江造山带内的义敦岛弧就是一个典型的张性古岛弧(莫宣学等,2001)。世界上很多地区的情况表明,张性火山弧是黑矿型(Kuroko 型)块状硫化物金属矿床形成最有利的构造环境,应当引起特别注意(Scott,1980)。

(2)通过全球古代火山岩赋矿的海底热液块状硫化物矿床的研究对比,对该类矿床的产出构造环境有了进一步理解。Allen *et al.* (2002)根据 VHMS 型矿床的全球对比,将该类矿床的形成构造环境、赋矿围岩及火山活动特征总结如下:①所有主要的 VHMS 型矿床主要与地堑下降导致的地壳伸展拉张作用有关,在这些拉张下陷区形成局部或广泛发育的海相深水条件,有幔源铁镁质岩浆注入地壳,矿床形成的大地构造背景一般位于俯冲带部位的弧后盆地。②大多数世界级 VHMS 型矿床产出区都有大量的长英质火山岩发育。这些火山岩的形成与演化加厚的大洋岛弧、陆缘岛弧、大陆边缘或加厚的洋壳拉张有关。③VHMS 型矿床通常形成于拉张背景,但是,这些部位的峰期拉张(peak extension)持续时间不长,但很剧烈,通常是不彻底的裂谷(failed rift)。VHMS 型矿床形成的时间跨度一般不超过几个百万年,而与火山活动持续的时间无关。④主要的 VHMS 型矿床均在赋矿地层内部发育数层长英质或镁铁质火山岩,主矿体赋存在这些火山岩中。⑤主要 VHMS 型矿床一般出现在同生裂谷长英质火山岩地层单元的顶部层位,并伴随有火山作用方式、成

分、强度和沉积作用的明显改变。⑥主要 VHMS 型矿床一般与靠近喷口的流纹岩有关,尤其是流纹岩演化的晚期阶段。⑦矿石矿物组合主要受矿体下部的岩石化学控制,尽管有部分来源于岩浆流体。⑧矿层中通常伴随喷流岩,但如何区分喷流岩、其他成因的喷流岩和已蚀变的层状、细粒的凝灰质岩石尚不清楚。⑨VHMS 型矿床普遍遭受褶皱一冲断作用及变形改造。原因在于它们形成于板块边缘短期伸展的盆地内,随着盆地闭合不可避免地被反转和变形。⑩矿床形成是海底热液喷流作用的结果。成矿流体的来源可能有两种,一种是长英质岩浆一热液循环作用形成富含矿质的成矿热液,沿同生断裂系统上升至海底或近海底,通过与海水混合、还原或热液沸腾而迅速堆积沉淀;另一种可能是特殊的岩浆作用控制了一种富含金属的地下水热液在喷流管道附近汇聚,热液上升及成矿方式与以上相似;或者二者兼而有之。

(3)对沟一弧一盆体系不同演化阶段的岩石类型及岩石组合有了更深入的了解。如,Haraguchi *et al.* (2008)通过西太平洋伊豆一小笠原一马里亚纳岛弧(IBM)俯冲带前弧中、上始新世火山岩展示了 IBM 原始岛弧早期火山岩演化过程,火山岩由拉斑质二辉玄武岩一安山岩组合构成。其中,拉斑玄武岩具有高场强元素(HFSE),高结晶温度,低水的特征;原始岛弧晚期钙碱性安山岩具有低 HFSE,低结晶温度,高水特征。前者是 IBM 原始岛弧早期弱亏损地幔无水条件下高程度部分熔融的产物,后者为 IBM 原始岛弧晚期亏损地幔有水条件下低程度熔融的产物。Lidiak *et al.* (2008)报道了大安德烈斯群岛 Rican-Virgin 岛弧早白垩世一始新世火山岩一个连续的岩石学和地球化学变化过程,从第一阶段原始岛弧拉斑玄武岩(IAT)为主→第二阶段相对成熟岛弧的钙碱性火山岩(CA)→第三、四阶段成熟岛弧的高钾、富集不相容元素的橄榄粗玄武岩(SHO)→火山活动间歇→第五阶段钙碱性玄武岩、安山岩和英安岩再次喷出。Ishizuka *et al.* (2006a,2006b)通过伊豆一小笠原一马里亚纳火山群岛早期岛弧火山岩演化过程研究表明,岛弧初期火山岩为玻安岩,然后向高镁安山岩过度,最后向拉斑玄武岩一钙碱性安山岩组合的成熟岛弧转变。Smith *et al.* (2006)和 Smith and Price(2006)通过西南太平洋 Tonga-Kermadec 洋内俯冲带成年期岛弧火山岩研究表明,火山弧早期火山岩主要以低钾、高铝玄武岩或玄武安山岩为主,但是,近 4000 年来,火山弧发展进入了成

年阶段,以大量的英安岩岩浆出现为特征.长英质与镁铁质岩浆共存是岛弧发展到成年期的一个典型标志.通过目前世界上唯一典型的发育在大陆边缘、由陆壳扩张而成尚处于扩张早期阶段的冲绳海槽弧后盆地火山岩研究,表明该盆地火山岩属双峰式高铝拉斑玄武岩系列(Kimura *et al.*, 1986),并具低碱特征(Sibuet *et al.*, 1987; Ishikawa *et al.*, 1991).与洋内俯冲带岛弧火山岩相比,弧后盆地早期火山岩虽然也表现出从玄武岩、安山岩(英安岩)到流纹岩等多种复杂的岩石组合,但是,总体上以中酸性岩石为主(Ishizuka *et al.*, 1990).

总之,现代俯冲带岛弧相关的火山岩总体表现出从早期高镁、低碱(洋壳基底)/高铝、中碱(洋—陆过度壳)/高碱(陆壳基底)的玄武岩,向晚期低镁、高硅、高碱的安山岩、流纹岩演化的特点.根据这些认识,在一些造山区已经成功地识别出古俯冲带不同演化阶段的岛弧火山岩.如:Shukuno *et al.* (2006)和 Ota *et al.* (2007)研究发现南西伯利亚迪卡拉纪—寒武纪 Gorny Altai 俯冲带 Cryogenian(成冰期)岛弧杂岩体中包含有玻安质岩石,指示本区 Cryogenian 时期处于岛弧发展的初期阶段. Carl(2005)通过新西兰南部 Brook Street 地体火山岩研究,识别出了一个二叠纪大洋内部原始的岛弧系统,主要由斜长石—单斜辉石斑晶玄武岩、高 MgO 橄榄玄武岩和玄武质—安山质火山碎屑岩和沉积岩组成.英安岩和流纹岩相对少见.

2 SEDEX 矿床成矿构造环境

2.1 SEDEX 型矿床成矿动力学背景新观点

与 VHMS 型块状硫化物矿床不同,以往一直认为 SEDEX 型矿床产出的构造背景为大陆裂谷、拗拉槽或被动大陆边缘,并且与 VHMS 型矿床不同,其形成的地球动力学背景不是板块汇聚边缘而是离散板块边缘或离散板块内部裂谷.但是,近年来随着澳大利亚北部元古代世界级 SEDEX 型铅锌矿床成矿动力学背景的研究深入,表明这些矿床成矿构造环境不是以往认为的被动大陆边缘裂谷,而是汇聚板块地球动力学背景之下的远离弧后的大陆拉张盆地(far-field backarc continental extension basin)(Betts and Giles, 2002; Betts *et al.*, 2003).虽然以上认识仍然承认这些 SEDEX 型矿床成矿构造环境是大陆内部的断陷盆地,但是,二者形成的地球动力学背景已完全不同,即由传统的大陆裂解动力

学背景转为板块汇聚的动力学背景(图 1).

Groves and Bierlein(2007)在金属矿床系统的地球动力学背景中进一步明确指出:现在看来,不仅产出于元古代克拉通盆地中的 SEDEX 型铅锌矿床形成构造背景具有上述特点,而且显生宙 SEDEX 型矿床与元古界 SEDEX 型矿床也具有相似的成矿动力学背景.如以往认为的典型的古生代 SEDEX 型矿床—沙利文、红狗等铅锌矿床,根据它们赋矿沉积盆地及其成因来看,与元古代 SEDEX 型矿床具有广泛的相似性.根据晚泥盆纪大陆恢复结果显示,这些矿床的形成与 Pangaea 超大陆汇聚有关,产出部位也是远离弧后的陆内拉张盆地(Lydon, 2004; Groves and Bierlein, 2007).因此,那些以往被认为产出于被动陆缘裂谷环境的大型 SEDEX 型矿床成矿动力学背景无疑值得给予更多研究关注.

2.2 产于汇聚板块体制下的 SEDEX 型矿床具有更大的成矿潜力

Betts *et al.* (2003)指出:与传统上形成于板内裂谷、拗拉槽和被动大陆边缘的 SEDEX 型砂页岩型铅锌矿床相比,这类形成于汇聚板块边缘远离弧后拉张裂陷盆地中的砂页岩型铅锌矿床,具有更大的成矿潜力和找矿价值.原因在于:(1)这些地区具有长期的拉张历史,如北澳地区赋存 SEDEX 型矿床的盆地具有 140 Ma(1 800~1 660 Ma)的拉张历史.相反,大陆裂谷拉张的历史一般都较短,如,同样是北澳的 Adelaidean 新元古界被动陆缘裂谷拉张历史仅有 75 Ma(830~755 Ma),而简单的陆内裂谷或拗拉槽拉张的历史就更短;(2)在长期拉张条件下,沉积了一套巨厚的富含陆缘碎屑的沉积层序,为 SEDEX 型铅锌矿床的形成准备了巨量的成矿物质条件;(3)在长期拉张背景下,盆地内部发育形成了一套完整的断裂体系以及高渗透疏导能力的含水层,为大规模流体聚集及运移提供了条件;(4)在长期拉张背景下,伴随大规模岩石圈减薄,软流圈上涌,导致大范围的地热梯度升高,为大规模盆地流体循环、含矿流体的形成创造了条件;(5)俯冲碰撞后期,伴随热量降低,软流圈下降,岩石圈回弹,拉张盆地发展阶段结束(extensional-basin phase),进入拗陷盆地发展阶段(sag-basin phase),盆地进入缺氧沉积,形成一套富含有机质的黑色岩系,为成矿物质从流体中大规模沉淀提供了物理化学条件;(6)板块俯冲过程中俯冲角度、挤压应力的间歇性调整,为盆地断裂的间歇式活动提供了条件,成矿流体的间歇性喷流是形成大规模 SEDEX 型矿床的重要保障;

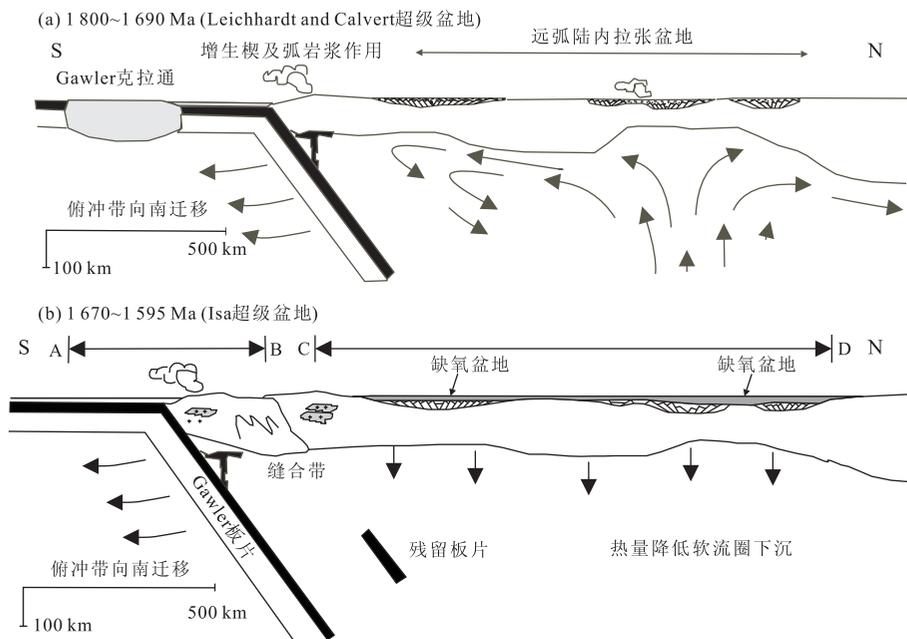


图 1 澳大利亚北部 Mount Isa 盆地元古代 SEDEX 型块状硫化物矿床成矿构造环境(据 Betts *et al.*, 2003 修编)

Fig. 1 Metallogenic tectonic environment of Proterozoic SEDEX-type massive sulfide deposit in Mount Isa basin of northern Australia

(7)与大陆裂谷狭窄的规模不同,远离弧后的拉张裂陷盆地规模大,因此,造山过程中盆地遭受隆升剥蚀及变形破坏的程度要小得多,有利于矿床保存。

由此可见,虽然 SEDEX 型矿床既可以出现在离散板块动力学背景下的陆内裂谷、拗拉槽或被动大陆边缘裂谷,又可以出现在汇聚板块动力学背景下远离弧后的拉张断陷盆地,但是,后者成矿潜力和找矿前景明显比前者大。

3 VSHMS 矿床成矿构造环境

除上述两种常见的块状硫化物矿床之外,还有一种常见的块状硫化物矿床,已经成为最近 10 年来块状硫化物矿床研究的一种新动向。它们的容矿围岩为火山沉积岩。Goodfellow *et al.* (2003)和 Goodfellow and McCutcheon(2003)将此类矿床称为火山沉积岩容矿型块状硫化物矿床(volcanic sediment-hosted massive sulfide deposit,简称 VSHMS 型矿床)。

Goodfellow and McCutcheon(2003)认为加拿大新布伦瑞克北部世界级巴瑟斯特块状硫化物矿床(Bathurst-type)即属于此类矿床,其成矿动力学背景为汇聚板块边缘的硅铝质弧后裂谷盆地。Tornos and Chiaradia(2004)也将西班牙伊比利亚半岛奥萨莫雷纳成矿带(Ossa Morena Zone)中的很多块状硫

化物矿床归类于 VSHMS 型矿床。对矿石铅同位素研究表明,奥萨莫雷纳成矿带矿石铅同位素($^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)比值明显比两侧的中伊比利亚带(北东)和南葡萄牙带(西南)铅同位素比值低,也比显生宙岩浆岛弧带铅同位素比值低,因此,该带是一个铅同位素亏损带。导致该带铅同位素比值偏低的原因是板块俯冲造山阶段深部镁铁质岩浆的侵位带来的原始地幔铅与地壳铅混合的结果。可见,该带块状硫化物矿床的成矿动力学背景是汇聚板块边缘与岛弧有关的裂谷。此外,与带内其他类型矿床相比,该带块状硫化物矿石铅组成明显具有地壳铅特征,反应了矿石铅主要来源于盆地内部的沉积物,与典型的 SEDEX 型矿床铅同位素特征相似(Large *et al.*, 2008)。最近,Bradshaw *et al.* (2008)对加拿大育肯(Yukon)芬雷森湖地区(Finlayson Lake)的沃尔沃瑞恩(Wolverine)VSHMS 型块状硫化物矿床的成因进行了研究,明确指出该矿床形成的动力学背景与上述巴瑟斯特矿床相似(即汇聚板块边缘硅铝质弧后裂谷,见图 2),认为二者的相似之处包括:(1)二者均形成于汇聚板块边缘硅铝质弧后裂谷环境;(2)容矿围岩均为长英质火山碎屑岩和黑色页岩;(3)矿石相对富 Zn(最高可达 30%以上);(4)空间上与含铁建造有关。此外,沃尔沃瑞恩矿床透镜状矿体的上盘围岩为热水喷流成因的碳酸盐,这种明显的呈夹层出现的热热水喷流碳酸盐在其

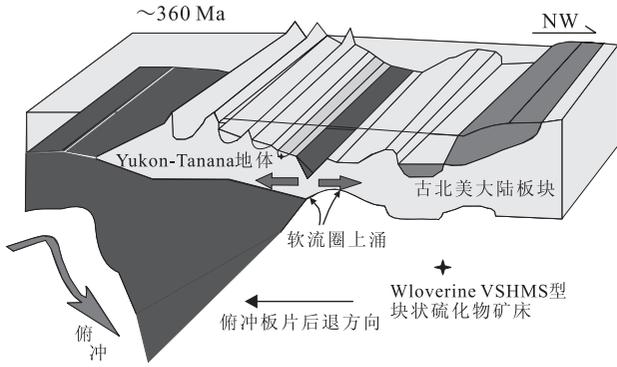


图 2 加拿大 Yukon Finlayson Lake Wolverine VSHMS 型块状硫化物矿床成矿构造环境(据 Bradshaw *et al.*, 2008 修编)

Fig. 2 Metallogenic tectonic environment of VSHMS-type massive sulfide deposit in Yukon Finlayson Lake Wolverine of Canada

他块状硫化物矿区报道的不多. 同时, Bradshaw *et al.* (2008) 认为 VSHMS 型矿床与 SEDEX 型矿床相似之处包括: (1) Pb + Zn 品位较高; (2) 发育热水沉积岩; (3) 块状硫化物形成于封闭或局部封闭的缺氧沉积盆地; (4) 矿石中存在生物还原(海水硫酸盐)硫同位素; (5) 铅来源于盆地内部沉积物. 此外, Goodfellow *et al.* (2003) 在划分该类矿床时指出, 该类矿床的关键特征包括: (1) 形成于一个裂开的大陆岛弧或弧后裂谷背景(a rifted continental arc or back-arc setting); (2) 赋矿地层中火山岩、火山碎屑岩和泥质沉积岩比例大体相当; (3) 成矿主要出现在显生宙, 尤其是奥陶纪—石炭纪; (4) 规模大(平均金属量 32.7 Mt); (5) Zn + Pb + Cu + Ag 品位比 VHMS 型矿床高.

总之, 专门针对 VSHMS 型块状硫化物矿床目前研究资料还不多, 但是, 从已有的成果看, 它们应当是位于 VHMS 型和 SEDEX 型之间的一类过渡型块状硫化物矿床. 它们的成矿机制和矿化特征与 VHMS 和 SEDEX 型块状硫化物矿床相似, 但三者之间形成的地球动力学背景及成矿构造环境上存在明显差异. 其中, 与 VHMS 型矿床相比, VSHMS 型矿床虽然也形成于汇聚板块边缘, 但 VSHMS 型矿床成矿构造背景一般为大陆硅铝壳基础上发展起来的岛弧/弧后裂谷环境, 尚未见洋中脊和洋岛弧裂谷的报道, 而弧间裂谷一般是 VHMS 型矿床形成的最有利环境; 与 SEDEX 型矿床相比, 一方面, VSHMS 型矿床仅形成于汇聚板块动力学背景之下, 而 SEDEX 型矿床除汇聚板块动力学背景还可

以形成于离散板块背景. 另一方面, 即使都是汇聚板块边缘, VSHMS 型矿床形成于弧后盆地, 而 SEDEX 型矿床形成于远离弧后的陆内裂陷盆地.

4 结论

综合上述三类块状硫化物矿床形成的动力学背景及成矿构造环境不难发现, 对于同时形成于汇聚板块动力学背景下的块状硫化物矿床, 它们成矿作用机理和矿化特征表现的很相似, 因此, 很难据此对其进行分类. 相反, 它们形成的构造环境却有明显的差异, 即 VHMS 型矿床形成于岛弧/弧后盆地裂谷, VSHMS 型矿床形成于弧后盆地裂谷, SEDEX 型矿床形成于远离弧后的陆内裂陷盆地. 因此, 根据成矿构造环境可以对其进行合理的分类, 并且这种形成于统一动力学背景之下(板块汇聚背景), 自板块边缘岛弧向远离弧后的大陆内部, 块状硫化物矿床有规律的变化, 构成了一个很好的成矿分带或成矿系列, 即从 VHMS 型 → VSHMS 型 → SEDEX 型. 这一分布规律是否存在还有待今后进一步研究关注, 一旦成立将对块状硫化物矿床的时分布规律认识及指导找矿起到重要的促进作用.

References

- Allen, R. L., Weihed, P., Blundell, D. J., et al., 2002. Global comparisons of volcanic-associated massive sulphide districts. *Geological Society of London Special Publication*, 204: 13–37.
- Barley, M. E., Groves, D. I., 1992. Supercontinent cycles and the distribution of metal deposits through time. *Geology*, 20: 291–294.
- Barrett, T. J., Dawson, G. J., Maclean, W., 2008. Volcanic stratigraphy, alteration, and sea-floor setting of the Paleozoic Feitais massive sulfide deposit, Aljustrel, Portugal. *Economic Geology*, 103: 215–239.
- Betts, P. G., Giles, D., 2002. Developing a geodynamically indicated targeting strategy for shale hosted massive sulphide Pb-Zn-Ag mineralization in the western fold belt of the Mount Isa terrane. *Australian Journal of Earth Science*, 49: 985–1010.
- Betts, P. G., Giles, D., Lister, G. S., 2003. Tectonic environment of shale-hosted massive sulfide Pb-Zn-Ag deposits of Proterozoic northeastern Australia. *Economic Geology*, 98: 557–576.
- Bradshaw, G. D., Rowins, S. M., Peter, J. M., et al., 2008. Genesis of the wolverine volcanic sediment-hosted mas-

- sive sulfide deposit, Finlayson lake district, Yukon, Canada; mineralogical, mineral chemical, fluid inclusion, and sulfur isotope evidence. *Economic Geology*, 103: 35—60.
- Carl, S., Kurtk, W., Richard, A. J., et al., 2005. Igneous rocks of the Brook Street terrane, New Zealand; implications for Permian tectonics of eastern Gondwana and magma genesis in modern intra-oceanic volcanic arcs. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 48: 167—183.
- Goodfellow, W. D., Lydon, J. W., Turner, R. J. W., 1993. Geology and genesis of stratiform sediment-hosted (SEDEX) zinc-lead-silver sulphide deposits. *Geological Association of Canada Special Paper*, 40: 201—251.
- Goodfellow, W. D., McCutcheon, S. R., 2003. Geologic and genetic attributes of volcanic sediment-hosted massive sulfide deposits of the Bathurst Mining Camp, northern New Brunswick—a synthesis. *Economic Geology Monograph*, 11: 245—301.
- Goodfellow, W. D., McCutcheon, S. R., Peter, J. M., 2003. Massive sulfide deposits of the Bathurst mining camp, New Brunswick, and northern Maine. *Economic Geology Monographs*, 11: 930—952.
- Groves, D. I., Bierlein, F. P., 2007. Geodynamic settings of mineral deposit systems. *Journal of the Geological Society, London*, 164: 19—30.
- Haraguchi, S., Ishii, T., Kimura, J. I., 2008. Early tholeiitic and calc-alkaline arc magmatism of Middle to Late Eocene age in the southern Ogasawara (Bonin) forearc. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 155 (5): 593—618.
- Hutchison, R. W., 1980. Massive base metal sulphide deposits as guides to tectonic evolution. In: Wilson, J. T., Strangway, D. W., et al., eds., The continental crust and its mineral deposits. *Geological Association of Canada Special Paper*, 20: 660—684.
- Ishizuka, H., Kawanobe, Y., Sarai, H., 1990. Petrology and geochemistry of volcanic rocks draged from the Okinawa trough, an active back-arc basin. *Geochemical Journal*, 24: 75—92.
- Ishikawa, M., Sato, H., Furukawa, M., et al., 1991. Report on DELP 1988 cruises in the Okinawa trough, Part VI; petrology of volcanic rocks. *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, 66: 151—178.
- Ishizuka, O., Kimura, J. I., Li, Y. B., et al., 2006a. Early stages in the evolution of Izu-Bonin arc volcanism; new age, chemical, and isotopic constraints. *Earth and Planetary Science Letters*, 250: 385—401.
- Ishizuka, O., Taylor, R. N., Andy, M. J., et al., 2006b. Variation in the mantle sources of the northern Izu Arc with time and space; constraints from high-precision Pb isotopes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 156: 266—290.
- Kimura, M., Kaneoka, I., Kato, Y., et al., 1986. Report on DELP 1984 cruises in the middle Okinawa Trough, Part V; topography and geology of the central grabens and their vicinity. *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, 61: 269—310.
- Large, R. R., Cooke, D., McGoldrick, P., et al., 2008. Advances in genetic understanding of sediment hosted base metal and gold deposits (abstracts). In: The 33rd international geological congress. <http://lib.cug.edu.cn/GeoScienceWorld>.
- Laznicka, P., 1976. Lead deposits in the global plate tectonic model. *Geological Association of Canada Special Paper*, 14: 243—271.
- Li, W. Y., 2007. Classification, distribution and forming setting of massive sulfide deposits. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 29 (4): 331—344 (in Chinese with English abstract).
- Lidiak, E. G., Jolly, W. T., Dickin, A. P., 2008. Geochemical and tectonic evolution of Albian to Eocene volcanic strata in the Virgin Islands and eastern and central Puerto Rico. *Geological Society of America*, 40: 105.
- Lydon, J. W., 2004. Sedimentary exhalative sulphides (SEDEX). In: Eckstrand, O. R., Sinclair, W. D., Thorpe, R. I., eds., *Geology of Canadian mineral deposit types. Geological Survey of Canada, Geology of Canada*, 8: 130—152.
- Meyer, C., 1988. Ore deposits as guides to geologic history of the Earth. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 16: 147—171.
- Mo, X. X., Deng, J. F., Dong, F. L., et al., 2001. Vocanical petroprotectonic assemblages in Sanjiang orogenic belt, SW China and implication for tectonic. *Geological Journal of China Universities*, 72 (2): 121—138 (in Chinese with English abstract).
- Mortensen, J. K., Hall, B. V., Bissig, T., et al., 2008. Age and paleotectonic setting of volcanogenic massive sulfide deposits in the Guerrero terrane of central Mexico; constraints from U-Pb age and Pb isotope studies. *Economic Geology*, 103: 117—140.
- Ota, T., Utsunomiya, A., Uchio, Y., et al., 2007. Geology of the Gorny Altai subduction-accretion complex, southern Siberia; tectonic evolution of an Ediacaran-Cambrian intra-oceanic arc-trench system. *Journal of Asian Earth*

Sciences, 30: 666—695.

- Piercey, S. J., Peter, J. M., Mortensen, J. K., 2008. A special issue devoted to continental margin massive sulfide deposits and their geodynamic environments. *Economic Geology*, 103: 1—4.
- Sawkins, F. J., 1972. Sulfide ore deposits in relation to plate tectonics. *Journal of Geology*, 80: 377—397.
- Sawkins, F. J., 1976. Metal deposits related to intracontinental hotspot and rifting environments. *Journal of Geology*, 84: 653—671.
- Sawkins, F. J., 1990. Integrated tectonic-genetic model for volcanic-hosted massive sulfide deposits. *Geology*, 18: 1061—1064.
- Scott, S. D., 1980. Geology and structural control of Kuroko-type massive sulfide deposits. In: Wilson, J. T., Strangway, D. W., eds., *The continental crust and its mineral deposits. Geological Association of Canada Special Paper*, 20: 706—720.
- Shukuno, H., Yoshihiko, T., Tani, K., et al., 2006. Origin of silicic magmas and the compositional gap at Sumisu submarine caldera, Izu-Bonin arc, Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 156: 187—216.
- Sibuet, J. C., Letouzey, J., Barbier, F., et al., 1987. Back-arc extension in the Okinawa trough. *Journal of Geophysical Research*, 92: 1041—1063.
- Sillitoe, R. H., 1972. A plate tectonic model for the origin of porphyry copper deposits. *Economic Geology*, 67: 184—

197.

- Sillitoe, R. H., 1974. Tectonic segmentation of the Andes: implications for magmatism and metallogeny. *Nature*, 250: 542—545.
- Smith, I. E. M., Worthington, T. J., Price, R. C., et al., 2006. Petrogenesis of dacite in an oceanic subduction environment: Raoul Island, Kermadec Arc. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 156: 252—265.
- Smith, I. E. M., Price, R. C., 2006. The Tonga-Kermadec arc and Havre-Lau back-arc system: their role in the development of tectonic and magmatic models for the western Pacific. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 156: 315—331.
- Titley, S. R., Heidrick, T. L., 1975. Tectonic evolution of some porphyry copper systems of the southwestern Pacific and its implications. *Economic Geology*, 70: 1331.
- Tornos, F., Chiaradia, M., 2004. Plumbotectonic evolution of the Ossa Morena Zone, Iberian Peninsula; tracing the influence of mantle-crust interaction in ore-forming processes. *Economic Geology*, 99: 965—985.

附中文参考文献

- 李文渊, 2007. 块状硫化物矿床的类型、分布和形成环境. *地球科学与环境学报*, 29(4): 331—344.
- 莫宣学, 邓晋福, 董方浏, 等, 2001. 西南三江造山带火山岩—构造组合及其意义. *高校地质学报*, 7(2): 121—138.