

岩浆硫化物矿床研究现状及重要科学问题*

宋谢炎

(中国科学院地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550081)

摘要 20世纪90年代, 岩浆通道成矿模型的提出为岩浆硫化物矿床成因研究提供了崭新的思路, 但对成矿机制和找矿标志的认识依然存在分歧。2000年以来, 不同学者从岩浆通道形成的构造因素, 外来硫加入的方式和控制因素, 硫化物熔离、运移和沉降的热力学条件及动力学机制, 区域找矿标志等方面对岩浆通道成矿机理进行了更深入的探讨。最近的研究发现, 原来建立在热力学平衡假设基础上的一些认识需要纠正, 硫化物熔离的化学动力学机制以及岩浆流体动力学状态对矿床的地质和地球化学特征具有不可忽视的影响, 玄武岩铂族元素亏损的形成机制和找矿意义需要重新认识。

关键词 地质学; 岩浆硫化物矿床; 岩浆通道; 热力学平衡; 动力学机制; 研究现状; 重要科学问题

中图分类号: P618.41; P618.53; P618.63

文献标志码: A

Current research status and important issues of magmatic sulfide deposits

SONG XieYan

(State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, Guizhou, China)

Abstract

The ore-forming model in magma conduit proposed in 1990's was a new approach for study of the formation of magmatic sulfide deposits. However, there still exists controversy concerning ore-forming mechanism and prospecting indicators. Since 2000, detailed studies of the formation of magmatic sulfide deposits in the magma conduit systems have been focused on structural factors controlling the formation of magma conduit, mechanism and factors governing input of external sulfur into the magma, thermodynamic conditions and dynamic mechanism of sulfide immiscibility, movement and segregation, and regional prospecting indicators. These new studies indicated that some insights based on equilibrium thermodynamics need to be modified corrected. The geological and geochemical features of magmatic sulfide deposits are significantly affected by kinetic mechanism of sulfide immiscibility as well as magma fluid dynamics. The mechanism of depletion of platinum-group elements in basalts and its prospecting significance should be reevaluated.

Key words: geology, magmatic sulfide deposit, magma conduit, equilibrium thermodynamics, kinetic mechanism, current research status, important scientific issues

岩浆硫化物矿床是由从镁铁-超镁铁岩浆中熔离出来的硫化物熔体聚集形成的, 全球约40%的镍、90%的铂族元素(PGE)和3%的铜资源蕴藏在岩浆硫

化物矿床中。随着以中国为首的新兴工业化国家的高速发展, 2000年以来, 全球镍的生产和消费强劲增长。据中国有色金属工业协会数据, 2018年仅中国就

* 本文得到国家自然科学基金项目(编号: 41630316、41772067、41473050)和国家重点研发计划(编号: 2016YFC0600503)资助

第一作者简介 宋谢炎, 男, 1962年生, 研究员, 博士生导师, 主要从事岩浆矿床及相关岩浆作用研究。Email: songxieyan@vip.gyig.ac.cn
收稿日期 2019-03-10; 改回日期 2019-06-06。秦思婷编辑。

生产镍68万t,较2010年增长了近一倍,尽管其中进口红土型镍矿的贡献非常大,但就中国地质条件而言,岩浆硫化物矿床仍然是最重要的镍矿床类型。鉴于中国少硫化物型铂族元素矿床不甚发育的特点,限于篇幅,本文着重对多硫化物型铜镍铂族元素矿床的最新研究进展、发展趋势和关键科学问题进行综述。

尽管20世纪90年代岩浆通道成矿模型的提出为岩浆硫化物矿床成因研究提供了崭新的思路,对该模型研究的逐渐深化在以下几个方面形成了基本共识:①成矿需要大量的幔源镁铁-超镁铁岩浆参与;②硫化物熔离需要地壳硫的加入;③硫化物熔离一般发生在深部,被岩浆携带到较浅的岩浆房聚集成矿;④成矿过程往往发生在相对固定的岩浆通道系统中。该模型建立在地球化学研究基础上,能较好地解释为什么相对较小的镁铁-超镁铁岩体可以形成俄罗斯Noril'sk和加拿大Voisey's Bay那样的超大型矿床。然而,严格地说,该模型更像是一个理论框架,岩浆通道成矿机制的不少细节并不清楚,争论依然存在,导致利用该模型评价区域找矿潜力、建立找矿标志时遇到一些困难。实际上,岩浆通道成矿模型与汤中立院士提出的“小岩体成大矿”的概念有许多相似之处,只是前者强调含矿岩体是岩浆通道系统上的岩浆房之一,硫化物在其中沉淀聚集成矿,残余岩浆则溢出形成其他不含矿岩体或喷出岩(宋谢炎等,2010);而后者认为含矿岩体是岩浆通道的终点(汤中立等,1995)。

2000年以来,国内外不少学者对岩浆硫化物成矿规律、条件和机制的若干理论问题进行了更深层次的梳理、反思和探讨,如:地幔柱活动对成矿而言是不是必须的?深部熔离的硫化物被携带到浅部岩浆房并聚集的地质过程和物理机制是什么?什么样的区域构造过程有利于成矿岩浆通道系统的形成?地壳硫进入岩浆并导致硫化物熔离的具体机制是什么?含硫的直接围岩究竟对成矿有多大贡献,能不能作为找矿标志?

对这些问题的反思和探讨使得地球化学数据的多解性受到越来越多的重视,不少学者认识到还必须注意物理机制、化学动力学过程和构造地质要素对成矿过程的约束,只有这样才能建立完整的岩浆通道成矿理论,明确这类矿床的找矿标志,更好地为找矿工作服务。

1 成矿作用的构造约束

1.1 成矿的区域构造背景

岩浆硫化物矿床形成的大地构造背景是区域找矿必须考虑的重要问题,一直受到重视。全球共有140多个镍金属储量超过10万t的岩浆硫化物矿床(Hoatson et al., 2006),这些矿床主要分布于古老大陆边缘,在造山带也有发现;虽然多数矿床与拉斑系列的镁铁-超镁铁岩浆有关,但也有一些矿床与碱性和钙碱性系列岩浆有关。

传统观点认为大陆裂谷伸展背景有利于大规模镁铁-超镁铁岩浆活动,能够带来充足的成矿物质,是最有利于成矿的构造背景(Naldrett, 2004),这的确符合超大型岩浆硫化物矿床往往产于太古代绿岩带及大火成岩省的特点。Kerrick等(2005)注意到许多岩浆硫化物矿床(特别是超大型矿床)往往产于大陆岩石圈边缘。结合含矿岩体形成时代与地幔柱活动的耦合关系,Begg等(2010)认为由于大陆岩石圈厚度大,使地幔柱到达大陆岩石圈底部时难以发生减压熔融,从而迫使地幔柱向岩石圈较薄和强度较低的大陆岩石圈边缘运移,并在较小的深度发生强烈的减压熔融、形成巨量镁铁-超镁铁岩浆,为大规模岩浆硫化物提供物质和能量条件(图1a、b)。由于克拉通岩石圈厚度更大、更冷、更稳定,这种现象在克拉通边缘显得尤其明显,形成于克拉通边缘的岩浆硫化物矿床还不易因后期碰撞造山作用隆升而遭受剥蚀。如Noril'sk矿床位于西伯利亚克拉通边缘,加拿大苏必利尔克拉通边缘分布着Thompson、Eagle、Sudbury等矿床,Voisey's Bay位于奈恩克拉通边缘,中国金川矿床位于华北克拉通西南缘等(Begg et al., 2010)。澳大利亚西部与科马提岩有关的岩浆硫化物矿床却多分布在伊尔岗克拉通的内部,Begg等(2010)将这种现象归因于克拉通的多次增生使得若干形成较早的岩浆硫化物矿床被包裹于克拉通内部。

然而,个别超大型矿床与地幔柱的关系还缺乏充足的证据,如中国金川超大型岩浆硫化物矿床所在的龙首山地体并没有发现同时代的玄武岩;Voisey's Bay岩体形成于1333 Ma,明显晚于奈恩侵入岩套代表的地幔柱活动的时代1350 Ma (Amelin et al., 1999; Ryan, 2001)。另一方面,国内外一些造山带也发现了不少岩浆硫化物矿床,如北美阿巴拉

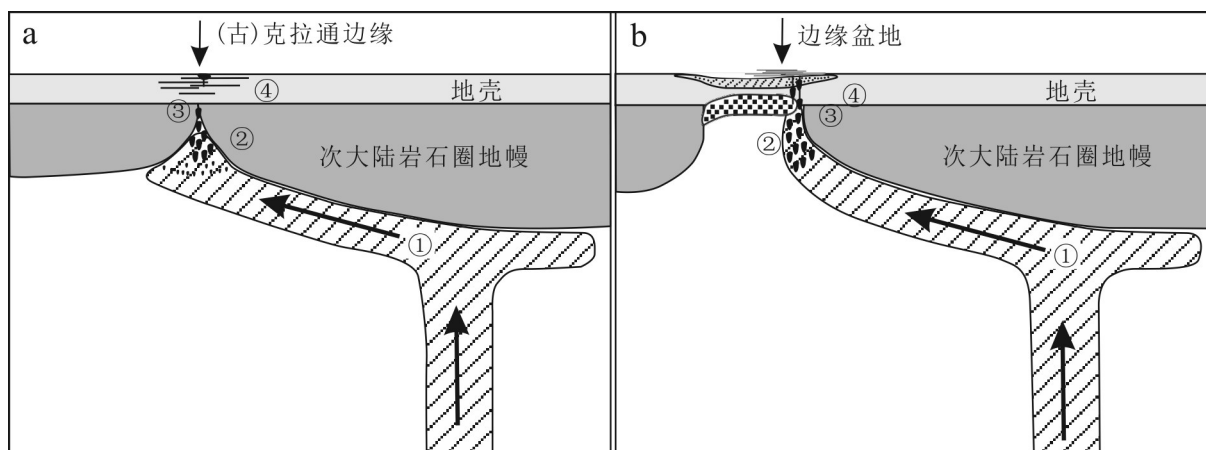


图1 地幔柱上升到厚的(>150 km)、比较完整的活动岩石圈边缘产生减压熔融及岩浆进入地壳并发生岩浆硫化物成矿过程示意图(据Begg et al., 2010)

a. 两个大陆岩石圈接合部位; b. 大陆岩石圈之间边缘盆地

①—地幔柱向岩石圈变薄的部位挤入; ②—地幔柱在较浅的深度减压熔融; ③—岩浆沿岩石圈断裂运移进入地壳并形成相互连通的岩浆房(岩席)网络; ④—岩浆与地壳发生相互作用

Fig. 1 Generalized model for the formation and localization of nickel sulfide deposits on the tectonically active margins of thick (>150 km), spatially coherent lithospheric blocks (after Begg et al., 2010)

a. The junction position of two blocks of continental lithosphere; b. An intervening marginal basin between continental blocks

①—Mantle plume impact and flow towards areas of thinner lithosphere; ②—Decompression melting of plume at shallower levels; ③—Transfer of melts into the (upper) crustal environment via active trans-lithospheric faults and an interconnected intrusion (sills) network;

④—Variable interaction of melts with the crust

契亚造山带、芬兰瓦马拉(Vammala)造山带和西班牙阿瓜布兰卡(Aguablanca)造山带,以及中亚造山带南缘都发现了若干不同规模的岩浆硫化物矿床(Thompson et al., 1984; Peltonen, 1995; Barnes et al., 2009; Ortega et al., 2004; Piña et al., 2006; Song et al., 2009c; Zhang et al., 2009; Li et al., 2012; Qin et al., 2011; Song et al., 2011; 2013; Xie et al., 2012; 2014等)。尤其是中国东昆仑造山带夏日哈木超大型镍钴矿床的发现(Li et al., 2015; Song et al., 2016; Liu et al., 2018),说明尽管造山带这类矿床往往镍品位较低、贫铂族元素,但也有非常好的找矿潜力。由于全球造山带的面积远远大于大火成岩省的面积,岩浆硫化物矿床的找矿范围被大大地拓展了。

然而,一般认为造山运动是挤压和隆升的过程,只有进入造山后阶段才演变成伸展环境,镁铁-超镁铁岩浆作用一般不很发育。因此,造山带演化到哪个阶段、什么样的过程更有利于产生大量的镁铁-超镁铁岩浆,并能够顺利进入地壳发生岩浆硫化物成矿作用还存在分歧。可喜的是近年来对造山带幔源

岩浆上升过程取得了一些新的认识,有助于对造山带岩浆硫化物成矿作用的理解(Song et al., 2013; Lightfoot et al., 2015; 宋谢炎等, 2018)。

1.2 区域性走滑对成矿的意义

尽管Begg等(2010)着重强调了地幔柱与岩石圈相互作用对形成超大型岩浆硫化物矿床的重要意义,但同时认为在同碰撞、后碰撞或碰撞后阶段,如果造山带处于弱挤压或挤压走滑、甚至弱拉张的状态,也可能形成岩浆硫化物矿床。Lightfoot等(2015)专门撰文讨论了岩浆硫化物含矿岩体与走滑断层的关系,认为走滑构造带内形成的含矿岩体平面上往往是不对称的菱形,其长轴方向近平行于走滑断层,纵向上常呈向下收敛的漏斗状并具有岩脉状的根部;最典型的例子是中国新疆黄山东和黄山岩体以及吉林红旗岭岩体,认为加拿大Voisey's Bay岩体的若干矿化部位正是构造走滑作用下形成的岩脉膨大部位,硫化物在这种部位沉淀成矿。构造走滑也可以形成扁平的管道状岩体,如中国新疆的喀拉通克岩体。

中国新疆黄山-镜儿泉成矿带较好地展示了大型区域构造走滑与岩浆硫化物成矿作用的关系。前人的构造地质学研究早在20世纪80年代就已经在黄山-镜儿泉成矿带识别出韧性剪切构造(李德惠等, 1989), 包括拉伸线理、沉积岩砾石的塑性变形等等。Wang等(2007)根据古地磁研究, 认为该巨型的韧性剪切带延绵上千公里, 形成于晚石炭世一早二叠世, 是伊利-准噶尔地块相对于塔里木地块强烈右行走滑的结果。陈文等(2005)根据岩石和矿物的Ar-Ar年代学研究, 认为该韧性剪切带早期(300~280 Ma)可能与板块俯冲-碰撞过程有关; 晚期(262~242 Ma)以碰撞后陆内走滑为主。对黄山和黄山东岩体边缘及围岩的韧性剪切构造及岩体内部的断裂构造的分析表明区域性剪切作用形成的次一级张性构造为幔源岩浆上升提供了通道, 并为岩浆房的形成提供了空间(Branquet et al., 2012; Wang et al., 2014)。区域性剪切作用导致了黄山岩体独特的“蝌蚪状”形态和黄山东岩体的“菱形”形态, 以及它们向下收敛的楔形纵剖面(Branquet et al., 2012; Lightfoot et al., 2015)。宋谢炎等(2018)认为, 黄山-镜儿泉成矿带与成矿有关的玄武质岩浆作用是早二叠世康古尔-雅满苏岛弧与中天山地块的碰撞导致俯冲板片断裂、软流圈上涌及地幔部分熔融的结果。同碰撞阶段发生大规模的区域性剪切走滑使上述俯冲洋壳的断裂更加容易, 剪切走滑产生的局部拉伸为幔源岩浆的上升提供了顺畅的通道, 也在地壳为含矿岩体的形成创造了良好的空间, 从而在近500 km狭长的黄山-镜儿泉成矿带上形成了4个大型镍矿床和若干小型矿床, 大片戈壁覆盖区仍有找矿潜力。

2 导致硫化物熔离的因素和机制

硫在镁铁-超镁铁岩浆中的溶解度随压力的降低而升高, 因此, 幔源岩浆等温上升过程中不可能发生自发的硫化物熔离, 地壳硫的加入至关重要。尽管也有学者认为外来硫并不重要(Lightfoot et al., 1997), 岩浆分离结晶和温度的降低确实可以促使硫化物熔离(Li et al., 2009; Ripley et al., 2013), 这对少硫化物型富铂族元素矿床可能是正确的, 这些矿床的硫化物是从数千倍于它的质量的岩浆中熔离出来的(Campbell et al., 1983), 硫化物乳珠非常细小, 为数十至数百微米(Godel et al., 2014)。但从质量平衡

角度讲, 外来硫的加入对于形成多硫化物型岩浆铜镍矿床至关重要。因为, 幔源岩浆的硫含量很低, 尽管岩浆分离结晶和同化混染可以导致微弱的硫化物熔离, 但不可能使岩浆中的硫全部熔离为硫化物, 所以, 很难导致强烈的硫化物熔离。然而, 地壳岩石中硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值范围非常宽, 变化很大, 囊括了地幔值, 即使硫化物熔离是地壳硫的大量加入导致的, 矿石的 $\delta^{34}\text{S}$ 组成仍可能与地幔值($0\pm 2\%$)接近。如金川矿床矿石的 $\delta^{34}\text{S}$ 介于 $-3\%\sim +5\%$, Voisey's Bay矿石的 $\delta^{34}\text{S}$ 介于 $-5\%\sim +1\%$ (Ripley et al., 1999; 2005)。因此, 仅仅根据 $\delta^{34}\text{S}$ 特征判断地壳岩石硫对成矿的贡献不够全面, 还需要其他指标的配合。

2.1 含硫化物围岩对成矿的贡献分析

很多含矿岩体的直接围岩是贫硫化物的, 例如中国金川矿床(Ripley et al., 2005; Song et al., 2009a; 2012), 很容易推测促使硫化物熔离的外来硫来源于深部。但如果直接围岩富含硫化物和碳质, 围岩硫化物对成矿的贡献以及能否作为找矿标志则需要通过更细致的分析和研究加以判断。

美国Eagle铜镍矿床含矿岩体的围岩为含碳质和硫化物的元古代地层, 其接触变质晕不超过20 m, 但矿石与围岩的 $\delta^{34}\text{S}$ 不一致, 质量平衡分析也说明直接围岩不可能为岩体底部约500万t的块状矿石提供足够的硫(Ding et al., 2012a; 2012b), 因此, 硫化物熔离主要发生在深部(Robertson et al., 2015)。Noril'sk矿床矿石的 $\delta^{34}\text{S}$ 为 $+4\%\sim +16\%$, 与附近膏岩层的 $\delta^{34}\text{S}$ 组成基本一致(Gorbachev et al., 1973; Grinenko, 1985), 因此, 膏岩层被认为是导致硫化物熔离成矿的最主要的外来硫来源(Wooden et al., 1992; 1993)。附近西伯利亚玄武岩铂族元素强烈亏损的层位曾被认为是含矿岩体的残余岩浆喷出形成的(Lightfoot et al., 2005), 但这层玄武岩却具有地幔 $\delta^{34}\text{S}$ 组成, 与矿石相去甚远, 暗示上述判断可能是错误的(Ripley et al., 2003)。这提醒我们与含矿岩体同时代玄武岩的铂族元素亏损能否作为找矿标志还需要仔细斟酌。

另一方面, 过去的研究发现岩浆只能吸收周围岩石一定范围和一定形式的硫。因此, 含硫围岩对成矿的贡献还需要通过以下几个方面进行判断和评价: ① 接触变质晕的宽度; ② 围岩中硫化物的存在形式及含量; ③ 矿石与围岩同位素及元素地球化学特征的对比; ④ 质量平衡计算(Mungall, 2002; Ripley et al., 2003; Leshner, 2017)。

2.2 地壳岩石中硫化物的存在形式及其释放硫的方式

众所周知,地壳岩石中硫主要以硫化物(包括黄铁矿和磁黄铁矿等硫化物矿物)和硫酸盐(石膏)的形式存在,它们释放硫的条件和能力是不同的。黄铁矿在较低的压力下($<2 \times 10^5$ kPa)即使温度低至 400°C ,也可以与水反应分解为磁黄铁矿和 H_2S (Andrews et al., 1989);而磁黄铁矿非常稳定,其熔融温度高达 1000°C ,Crerar等(1976;1978)认为,变质流体中的Cl能促使其分解并释放出 H_2S 。Tomkins(2010)认为碳质板岩的脱水作用最易导致其中硫化物的分解并释放出 H_2S ($\text{FeS}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{C} = \text{FeS} + \text{H}_2\text{S} + \text{CO}_2 + \text{CH}_4$)。需要注意的是,黄铁矿分解会形成磁黄铁矿,所以,只能释放出50%的硫。

硫酸盐更不容易分解,石膏的熔点高达 1450°C (Van der Sluis, 2010),因此,需要流体中含NaCl,有利于促使硫酸盐在 $600\sim 800^\circ\text{C}$ 分解并释放硫(Newton et al., 2005)。Noril'sk矿床蒸发岩围岩中的石膏被认为是通过化学反应($\text{CaSO}_4 + \text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{CaSiO}_3 + \text{H}_2\text{S} + 2\text{O}_2$ 或 $\text{CaSO}_4 + \text{SiO}_2 + 4\text{H}_2 = \text{CaSiO}_3 + \text{H}_2\text{S} + 3\text{H}_2\text{O}$)分解的(Arndt et al. 2005; Jugo et al., 2005; Thakurta et al., 2008),可见还原性流体有利于硫酸盐的分解。

尽管从化学原理出发,地层中硫化物或硫酸盐可以分解并为岩浆释放硫,但从质量平衡角度分析,即便岩体的直接围岩含硫,受热接触变质的影响范围的限制,通过化学反应并不能释放出全部的硫,也很难满足成矿的需要(Robertson et al., 2015)。以美国Duluth杂岩体中的Partridge River含矿岩体为例,要形成 $1\,000\,000\text{ m}^3$ 的含3%硫化物的浸染状矿石就需要 $5 \times 10^4\text{ t}$ 硫。 $\delta^{34}\text{S}$ 计算表明,矿石中至少50%的硫是外来的(Ripley et al., 2007),这需要接触带约300 m厚的弗吉尼亚群(含约0.6%的硫)通过黄铁矿的分解形成磁黄铁矿向岩浆释放 H_2S ,而热接触变质带的实际宽度仅数十米;另一方面,由于热扩散速度(约 $10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}$)比化学扩散速度(约 $10^{-10}\text{ m}^2/\text{s}$)高4个数量级(Cussler, 1997),距岩体边缘百米的 H_2S 扩散进入岩浆房需要数百万年的时间(Robertson et al., 2015),所以,即使直接围岩含有丰富的硫化物也很难对成矿有关键性的贡献。

卷入岩浆的围岩碎块比岩浆房围岩更容易被加热和熔融吞噬,从而释放出全部的硫。根据热传导公式计算,厘米大小的围岩碎块可以在数分钟内被熔融,数米大小的围岩碎块也仅需要数小时就可以

被熔融(Robertson et al., 2015),因此,岩浆通道上被捕获的围岩碎块很难留存。该过程不仅使围岩中的硫全部释放进入岩浆,而且可以降低岩浆的Fe含量,从而降低岩浆对硫的溶解度。另一方面,岩浆流速越高对围岩的侵蚀能力越强,围岩越易剥落、密度越低,越易于被岩浆裹挟,围岩温度越高、熔融温度越低,越易被熔融。因此,在岩浆通道系统中深部围岩被同化、向岩浆释放硫并导致硫化物熔离的可能性更高(Lesher, 2017)。这很可能就是为什么大多数岩浆硫化物矿床往往具有深部熔离、浅部成矿的特征的根源,也说明在根据含矿岩体直接围岩特征进行成矿潜力评价时需要谨慎。

3 岩浆通道系统中硫化物熔体的运移和聚集

一般认为,岩浆上升的主要驱动力是低于围岩密度所产生的浮力。由于硫化物熔体的密度($>4.0\text{ g/cm}^3$),远高于镁铁质岩浆的密度(约 2.6 g/cm^3)(Dobson et al., 2000; McBirney et al., 1984),也高于地壳岩石的平均密度(约 2.7 g/cm^3),镁铁质岩浆中硫化物的含量超过5%就将失去上升所需要的浮力(Barnes et al., 2016)。因此,大量深部熔离的硫化物是在什么样的岩浆通道系统中如何运移和聚集?是岩浆硫化物成矿的另一个重要问题。

3.1 有利于成矿的岩浆通道系统的样式

大多数含矿岩体和矿体的产状是清楚的,但成矿的岩浆通道系统大多没有被揭露,或已经被后期构造作用破坏,例如金川矿床(Song et al., 2012)。钻探揭露比较充分的成矿岩浆通道系统是加拿大Voisey's Bay矿床和美国的Eagle矿床。Voisey's Bay含矿岩体为沿NWW向分布的狭长的橄长岩-辉长岩岩体中,其水平延展超过5000 m,纵向延深超过1500 m,宽度则小于1000 m。浸染状或致密块状矿体分布在岩体的膨大部位,是岩浆通道成矿系统的典型实例。矿化和无矿化岩脉的几何形态、空间分布、矿石结构构造变化等特征表明该岩浆通道系统的形成与右行走滑有关(Lightfoot et al., 2015; Saumur et al., 2015)。这些岩脉反映出围岩中网状的裂隙系统,含硫化物岩浆正是沿该裂隙系统上升的,因此,矿化可能是陡立脉状,也可能是近水平透镜状(Barnes et al., 2016)。Eagle矿床则产于NWW向、陡立的岩脉中,主要由浸染状矿石构成,块状矿石分布

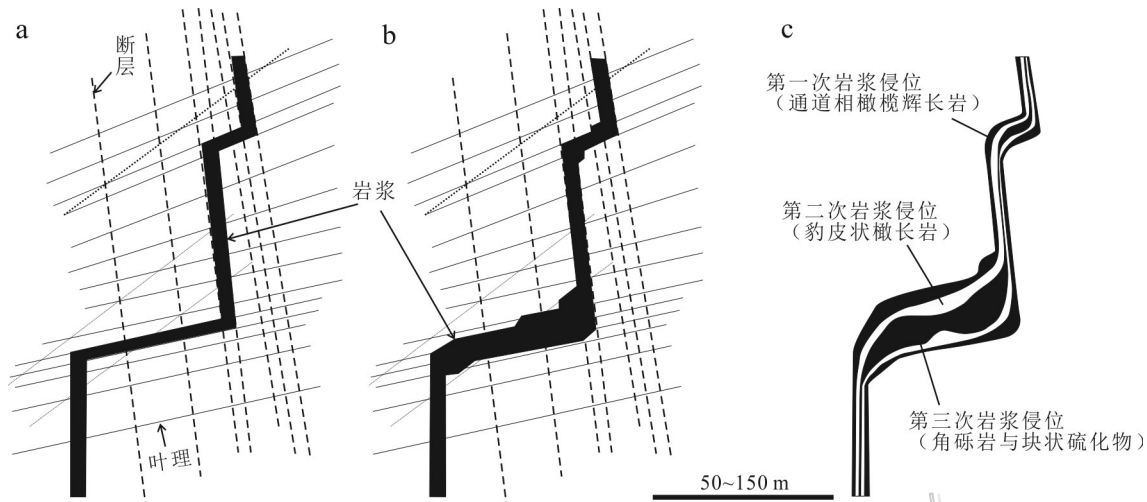


图2 加拿大 Voisey's Bay 矿床 Discovery Hill 矿化岩墙的构造控制示意图(据 Saumur et al., 2015)

a. 岩浆沿已有断裂-裂隙网络形成岩墙的纵剖面示意图; b. 热侵蚀导致岩墙在某些部位膨胀; c. Voisey's Bay 矿床 Discovery Hill 矿化岩墙典型的侵入相及矿化现象剖面

Fig. 2 Model for structurally-controlled emplacement as exemplified by the Discovery Hill Dyke at Voisey's Bay (after Saumur et al., 2015)

a. Vertical cross section of a dyke propagated through a preexisting fracture network; b. Thermo-mechanical erosion of dyke walls leading to preferential widening of gently dipping sections; c. Sketch cross section of intrusive phases and mineralisation within the Discovery Hill Dyke, Voisey's Bay

于矿体中部的膨大部位(Ding et al., 2012a; 2012b; Robertson et al., 2015)。

Barnes 等(2016)将含矿岩体分为具有偏平长筑体形态的“Noril'sk 型”,管状筑体形态的“Nebo-Babel 型”,具有叶片状断面的“Expo-Savannah 型”以及似管状或隧道状的“Eagle/Kalatongke 型”。无论哪种类型,硫化物矿化总是产于含矿岩体的底部,说明重力分异是硫化物沉降-聚集的主要机制。科马提岩型矿床硫化物也是集中在岩流或浅成岩席的底部,能够更好地反映硫化物从岩流中重力沉降的现象。

3.2 硫化物乳珠向上运移的物理因素

由于硫化物熔体的密度远大于硅酸盐岩浆,硫化物乳珠具有克服硅酸盐岩浆粘滞力向下沉降的趋势。根据 Hadamard-Rybczinsky 方程,硫化物乳珠的沉降速度与其半径的平方以及硫化物熔体与硅酸盐岩浆之间的密度差成正比,还与它们的黏度有关(Bremond et al., 2001),硫化物乳珠越大,越易沉降而不易被硅酸盐岩浆携带。由于岩浆的密度、黏度、表面张力、液相线和固相线温度等物理性质与其化学成分有密不可分的关系,其流体动力学行为受这些

物理性质的控制。所以,不同成分的岩浆携带硫化物乳珠的能力,以及硫化物乳珠在岩浆中的物理和化学行为必然有很大差异。Bremond d' Ars 等(2001)的计算显示当基性岩浆向上的流动速度达到 0.1 m/s (约 8640 m/天)时可以携带半径达 1.0 cm 的硫化物乳珠,说明基性岩浆携带硫化物乳珠的能力是很大的。

Patten 等(2012)统计了洋中脊玄武岩中硫化物乳珠的粒径,结果是乳珠直径 10~20 μm 的占 55%, 20~50 μm 的占 38%, >50 μm 的只占 7%。由于洋中脊玄武岩岩浆几乎没有外来硫加入的可能性,其中的硫化物乳珠应该代表了分离结晶过程中,岩浆达到硫饱和时熔离出硫化物乳珠的初始状态。

尽管矿石中圆形的硫化物乳珠保留下来的很少,但 Noril'sk 矿床浸染状矿石中的椭圆形硫化物被认为保留了硫化物乳珠的原始形态,其直径介于 0.5~20 mm 之间,粒径连续变化(Godel et al., 2013)。这些椭圆形硫化物乳珠常常存在一个空腔,因此, Mungall 等(2015)认为这些硫化物乳珠是附着于大的气泡随岩浆从深部岩浆房运移上来的,它们在含矿岩体中向下沉降和堆积,与橄榄石、铬铁矿等矿物同

时结晶和堆积,但硫化物乳珠的形态并没有因此发生改变。Bremond d'Ars等(2001)的计算表明,如果岩浆向上的流动速度达到0.1 m/s,这些硫化物乳珠可以被岩浆携带上升,并不需要附着在气泡上。然而,在含矿岩体固结过程中,橄榄石等镁铁质矿物的堆积常常发生压实作用,实际上,硫化物乳珠要保持其原始形态是十分困难的。Godel等(2013)认为Noril'sk矿床的一部分乳珠是机械搬运过来的,而另一些是硫化物乳珠原地均匀成核-生长形成的。Robertson等(2016)对多个与科马提岩有关矿床的硫化物乳珠的各种粒径频率分布进行了统计分析,发现了相似的频率分布规律;但Noril'sk等与玄武岩浆有关的矿床具有明显不同的硫化物乳珠粒径频率分布,有些矿床具有2个硫化物乳珠粒径频率分布趋势。这些现象可以为研究岩浆通道系统中硫化物熔离和迁移机制提供重要线索。

Robertson等(2016)的研究表明,硫化物乳珠在随岩浆运移过程中更可能被拆散成小乳珠,而不是相互聚集形成更大乳珠;即使在静止的岩浆中,虽然较大的硫化物乳珠因沉积速度较快,可能吞噬较小的乳珠而逐渐长大,但大的硫化物乳珠在沉降过程中也会因受硅酸盐岩浆粘滞力的影响,变得狭长直至拉断而分化成小的乳珠。此外,与层流态岩浆相比,湍流态岩浆中的硫化物乳珠更容易变形和被破碎成小的不规则乳珠,因此,湍流态岩浆携带硫化物乳珠的能力更强。

与固体颗粒不同,硫化物乳珠在随岩浆运移过程中不仅会发生拉长、扁化等变形,破裂或合并,还可能因为周围硅酸盐矿物的结晶而被挤压变形。因此,矿石中硫化物的分布、形态、连通性等状态受到多种因素的影响,要完全弄清硫化物乳珠的初始形态及其在成矿过程中如何长大和运移的行为是非常困难的,目前的认识程度还很低,许多问题还有待引进流体力学的知识开展研究。例如:除流动速度外,岩浆通道的地质特点和构造活动是如何影响岩浆的流动状态;不同状态岩浆流中部、底部、边部的流体力学状态有什么差异,受什么因素影响,如何控制硫化物乳珠的状态、运移和沉淀;如何根据矿石的结构、构造分析和判断硫化物的运移和沉积机制等等。

3.3 硫化物熔体的聚集

硫化物乳珠聚集的结果就是形成矿体,探矿工程可以将矿体的形态、在含矿岩体中的空间分布及其与构造的关系揭露得非常清楚。多硫化物型矿床

的矿体也主要分布在席状或漏斗状含矿岩体的底部和下凹部位(如俄罗斯Noril'sk,中国新疆黄山、黄山东、四川力马河等,Tao et al., 2008; Song et al., 2008, 2013; Lightfoot et al., 2015; Barnes et al., 2016)、管状岩体膨大部位(如新疆喀拉通克和青海夏日哈木等, Song et al., 2009c; Zhang et al., 2009; Song et al., 2016)、岩墙的转弯处或变宽的部位(如加拿大Voisey's Bay, Lightfoot et al., 2012)(图2a~c)。这些宏观特征表明形成矿体的机制就是当岩浆流速降低时,被携带的硫化物乳珠的重力沉降、卸载,或由于硫过饱和度增高使得硫化物乳珠快速长大而沉降(Bremond d'Ars et al. 2001; Robertson et al., 2016)。

但是,由于硫化物乳珠的沉降必然伴随着橄榄石、辉石等造岩矿物的结晶和堆积,而且造岩矿物的体积远大于硫化物,形成浸染状矿石是必然的。最近的实验研究表明,硫化物熔体可以润湿橄榄石,但不能润湿辉石(Rose et al., 2001),这使得橄榄岩中尽管硫化物含量很低,它们沿橄榄石颗粒边缘延伸形成连通性很好的网状浸染状结构;而辉石岩中硫化物常在辉石颗粒间形成孤立的斑杂状分布(Mungall et al., 2005; Barnes et al., 2008)。然而,形成致密块状矿石的机制并不十分清楚,尽管这暗示硫化物熔体可以沿橄榄石颗粒边缘向下渗透,但在这样狭窄的缝隙之间,硫化物熔体如何克服原有的硅酸盐熔体的表面张力还是很难理解的。一种可能的机制是,岩流底部的流速较低,硫化物比密度较小的硅酸盐矿物更易沉淀,逐渐聚集出大量硫化物熔体并结晶形成块状矿体。

4 化学动力学因素的意义

地质学研究中,尽管知道热和化学组分的扩散系数非常小,总是假定地质过程时间足够长,能够达到化学平衡而忽视动力学因素。在岩浆硫化物矿床研究中,R因子(硅酸盐熔体与硫化物熔体的质量比)的计算公式就建立在熔离的硫化物与母体硅酸盐岩浆达到了化学平衡的假设基础上(Campbell et al., 1979)。这种假设在热力学上是合理的,但在动力学上却是有缺陷的。因为,相对于化学扩散速度而言,具体矿床硫化物熔离、运用和聚集成矿过程的时间尺度并不是足够长的。近年来,元素在硅酸盐熔体中扩散速度对硫化物熔离过程和硫化物熔体成分的影响,以及对残余岩浆地球化学特征的影响开

始受到重视。这些细致的分析和研究正在对以往的一些成因和找矿标志的认识构成挑战。

4.1 硫化物成分的化学动力学约束

Cu、Ni、PGE 不仅具有不同的硫化物熔浆/硅酸盐熔浆分配系数,而且在硅酸盐熔浆中具有不同的扩散系数(Williams et al., 1999; Toplis et al., 1995; Mungall, 2002)。如铁质玄武岩浆中 Os 和 Ru 的扩散系数为 $6.4 \times 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$, 远小于 Pt、Pd、Rh、Ir 的扩散系数 ($1.3 \times 10^{-7} \sim 1.5 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$), Ni 的扩散系数 ($1.1 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$) 小于 Cu 的扩散系数 ($5.4 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$) (Toplis et al., 1995)。由于扩散系数的限制,在每个硫化物乳珠边界两侧都会形成金属元素浓度梯度,影响硫化物乳珠对金属元素的吸收。对于与硫化物熔浆/硅酸盐熔浆分配系数相近的亲铁和亲铜元素而言,硅酸盐熔体中扩散系数较高的元素能够更快地进入硫化物乳珠,从而使其较快地在硫化物熔体与硅酸盐熔浆之间的分配达到热力学平衡;而扩散系数较小的元素,其在硫化物熔体中需要更长的时间才能达到其平衡浓度。因此,对于具体矿床而言,扩散系数大的元素计算得到 R 因子往往高于扩散系数小的元素,同一个样品用不同元素计算得到的 R 值可以相差高达 5 个数量级(Mungall, 2002)。最近的研究表明,有些矿床的金属元素的分异受扩散控制,如 Mungall(2002)认为澳大利亚 Munni Munni 层状岩体矿化层位不同 PGE 的分异是它们扩散系数差异造成的。当然,硫化物熔体本身的分离结晶,后期热液蚀变都会造成矿石中亲铁和亲铜元素组成的变化,也会导致不同元素计算的 R 因子的差异,如何鉴别和排除这些后期因素的影响显得十分重要。

影响硫化物熔离的另一个化学动力学因素是比表面积。硫化物乳珠的半径越小,其比表面积越大,越有利于金属元素的吸收。因此,在硫化物熔离强度相似的情况下,硫化物乳珠越小、分布越均匀,达到热力学平衡的速度越快(Mungall, 2002)。大量外来硫加入导致的快速、强烈的硫化物熔离过程有利于形成大的、不均匀分布的硫化物乳珠,延缓了热力学平衡。已经熔离的硫化物与新补充的硅酸盐岩浆发生物质交换过程中,这种效应更加明显。沉淀在岩浆房底部的硫化物熔体往往不能充分地、与平稳流入的硫不饱和的岩浆发生反应,其 Ni、Cu 和 PGE 含量的提升将并不明显。如果新注入的硫不饱和和岩浆形成湍流,使得硫化物乳珠撕裂并充分地、与岩浆反

应,有利于硫化物中金属元素含量的升高,但总是难以达到热力学平衡。因此,尽管与新注入岩浆反应导致硫化物金属元素品位升高的现象非常普遍(Wang et al., 2006),但这个过程受到包括硫化物熔体状态、新注入岩浆的量及流体动力学状态、反应时间等多种因素的影响。这就是为什么很多矿床的块状矿石,100%硫化物的金属元素品位低于浸染状矿石的原因(Song et al., 2008; 2009)。

4.2 玄武岩 PGE 亏损的找矿意义及再思考

西伯利亚玄武岩系 Nd 层位强烈的 PGE 亏损被认为与 Noril'sk-Talnakh 矿床的形成具有成因联系(Naldrett et al., 1992; Lightfoot et al., 2005), Song 等(2006; 2009b)认为四川丹巴地区杨柳坪矿床的形成导致了该地区峨眉山玄武岩中段岩石的 PGE 亏损。因此,玄武岩系某个层位的 PGE 亏损被认为代表了硫化物熔离和金属元素抽取的事件,可以作为很好的岩浆硫化物成矿的找矿标志。然而,Arndt 等(2003)研究发现, Nd 层位玄武岩的 Os 同位素组成与 Noril'sk-Talnakh 含矿岩体并不一致,说明 Nd 层位的 PGE 亏损并不是 Noril'sk-Talnakh 矿床的硫化物熔离造成的,而是代表了另一个硫化物熔离事件。

另一方面,如前所述,由于扩散系数的限制,岩浆通道系统上某个岩浆房已经存在的硫化物乳珠与硫不饱和的玄武岩浆的反应可能并不充分,使得玄武岩的 PGE 亏损可能并不强烈。这暗示如果整体 PGE 不亏损的玄武岩系中,某个层位弱亏损 PGE 也有一定的找矿意义,但成因含义不一定相同(Song et al., 2009b)。与西伯利亚玄武岩 Nd 层强烈的 PGE 亏损不同,杨柳坪地区峨眉山玄武岩中段 PGE 的亏损程度变化很大(Song et al., 2006),可能是玄武岩浆通过含矿岩浆房时与硫化物乳珠发生不同程度反应形成的。

5 岩浆硫化物矿床研究中亟待解决的重要科学问题

20 世纪 80 年代末,学者们通过对俄罗斯 Noril'sk-Talnakh 巨型铜镍铂族元素矿床的研究,认识到岩浆通道成矿的重要性,大大促进了我们对岩浆硫化物成矿作用条件和过程的认识,并很好地指导了加拿大 Voisey's Bay 超大型铜镍矿床的勘查工作。这些重要进展在很大程度上是建立在地球化学研究基础上的。中国主要的岩浆硫化物矿床,包括金川、杨

柳坪、喀拉通克等,也都符合岩浆通道成矿的特点。此外,在造山带也发现了以东昆仑夏日哈木为代表的超大型岩浆硫化物矿床,扩展了找矿地质背景。然而,由于物理过程对岩浆矿床的形成具有至关重要的作用,而地球化学数据对于解读物理过程有一定的局限性和多解性,因此,还有不少重要问题需要更深入的研究加以解决,主要包括:

(1) 为什么只有少数大火成岩省和造山带发现了岩浆硫化物矿床? 如何总体上判断具体大火成岩省和造山带的找矿潜力? 如何确定找矿的地质、地球化学和地球物理标志?

(2) 相对稳定的岩浆通道系统是如何形成的,受哪些构造因素的控制? 硫化物熔体如何在动态的岩浆通道系统中聚集成矿?

(3) 地壳硫化物分解和进入岩浆的化学条件和物理机制是什么? 如何制约硫化物熔离过程以及硫化物熔体成分?

(4) 造山带演化过程的哪个阶段更有利于岩浆硫化物成矿? 岩浆硫化物成矿与斑岩成矿有什么关系或矛盾?

这些问题的解决需要岩石学、矿床学、构造地质学、地球化学和地球物理学等多学科的协同配合,才能使岩浆通道成矿模型真正上升为理论,并为找矿工作提供有效指导。

致谢 感谢国家自然科学基金委对笔者研究工作的长期资助,也感谢金川集团有限公司、四川地勘局106地质队、新疆地勘局地质六大队、青海地勘局五院等单位的大力支持,衷心感谢审稿人的中肯意见。

References

- Amelin Y, Li C and Naldrett A J. 1999. Geochronology of the Voisey's Bay intrusion, Labrador, Canada, by precise U-Pb dating of coexisting baddeleyite, zircon, and apatite[J]. *Lithos*, 47: 33-51.
- Andrews M S and Ripley E M. 1989. Mass transfer and sulfur fixation in the contact aureole of the Duluth complex, Dunka Road Cu-Ni deposit, Minnesota[J]. *The Canadian Mineralogist*, 27: 293-310.
- Arndt N T, Czamanske G K, Walker R J, Chavel D and Fredorenko V A. 2003. Geochemistry and origin of the intrusive hosts of the Noril'sk-Talnakh Cu-Ni-PGE sulfide deposits[J]. *Econ. Geol.*, 98(3): 495-515.
- Arndt N T, Leshner C M and Czamanske G K. 2005. Mantle-derived magmas and magmatic Ni-Cu-(PGE) deposits[J]. *Economic Geology*, 100th Anniversary Volume: 5-23.
- Barnes S J, Fiorentini M L, Austin P, Gessner K, Hough R and Squelch A. 2008. Three-dimensional morphology of magmatic sulfides sheds light on ore formation and sulfide melt migration[J]. *Geology*, 36: 655-658.
- Barnes S J, Makkonen H V, Dowling S E, Hill R E T and Peltonen P. 2009. The 1.88 Ga Kotalahti and Vammala Nickel Belts, Finland: Geochemistry of the mafic and ultramafic metavolcanic rocks[J]. *Bulletin of Geology Society of Finland*, 81: 103-141.
- Barnes S J, Cruden A R, Arndt N T and Saumur B M. 2016. The mineral system approach applied to magmatic Ni-Cu-PGE sulphide deposits[J]. *Ore Geology Reviews*, 76: 296-316.
- Begg G C, Hronsky J A M, Arndt N T, Griffin W, O'Reilly S Y and Hayward N. 2010. Lithospheric, cratonic, and geodynamic setting of Ni-Cu-PGE sulfide deposits[J]. *Econ. Geol.*, 105: 1057 - 1070.
- Branquet Y, Gumiaux C, Sizaret S, Barbanson L, Wang B, Cluzel D, Li G and Delaunay A. 2012. Synkinematic mafic/ultramafic sheeted intrusions: Emplacement mechanism and strain restoration of the Permian Huangshan Ni-Cu ore belt (eastern Tianshan, NW China)[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 56: 240-257.
- Bremond d'Arès J de, Arndt N T and Hallot E. 2001. Analog experimental insights into the formation of magmatic sulfide deposits[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 186: 371-381.
- Campbell I H and Naldrett A J. 1979. The influence of silicate: Sulphide ratios on the geochemistry of magmatic sulphides[J]. *Econ. Geol.*, 74: 1503-1506.
- Campbell I H, Naldrett A J and Barnes S J. 1983. A model for the origin of platinum-rich sulphide horizons in the Bushveld and Stillwater complexes[J]. *Journal of Petrology*, 24: 133-165.
- Chen W, Sun S, Zhang Y, Xiao W J, Wang Y T, Wang Q L, Jiang L F and Yang J T. 2005. ⁴⁰Ar/³⁹Ar geochronology of Qiumingtage-Huangshan ductile shear zone in East Tianshan, Xinjiang, NW China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 79(6): 790-804 (in Chinese with English abstract).
- Crerar D A and Barnes H L. 1976. Ore solution chemistry; V, Solubilities of chalcopyrite and chalcocite assemblages in hydrothermal solution at 200 degrees to 350 degrees[J]. *Econ. Geol.*, 71: 772-794.
- Crerar D A, Susak N J, Borsik M and Schwartz S. 1978. Solubility of the buffer assemblage pyrite+pyrrhotite+magnetite in NaCl solutions from 200 to 350°C[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 42: 1427-1437.
- Cussler E L. 1997. Diffusion: Mass transfer in fluid systems, 2nd edition[M]. Cambridge, United Kingdom, Cambridge University Press.
- Czamanske G K, Zen'ko T E, Fedorenko V A, Calk L C, Budahn J R, Bullock J H, Fries T L, King B S W and Siems D F. 1995. Petrographic and geochemical characterization of ore-bearing intrusions of the Noril'sk type, Siberia; with discussion of their origin[J]. *Resource Geology Special Issue*, 18: 1-48.
- Ding X, Ripley E M and Li C. 2012a. PGE geochemistry of the Eagle

- Ni-Cu-(PGE) deposit, Upper Michigan: Constraints on ore genesis in a dynamic magma conduit[J]. *Mineralium Deposita*, 47: 89-104.
- Ding X, Ripley E M, Shirey S B and Li C. 2012b. Os, Nd, O and S isotope constraints on country rock contamination in the conduit-related Eagle Cu-Ni-(PGE) deposit, Midcontinent Rift System, Upper Michigan[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 89: 10-30.
- Dobson D P, Crichton W A, Vocadlo L, Jones A P, Wang Y, Uchida T, Rivers M, Sutton S and Brodholt J P. 2000. In situ measurement of viscosity of liquids in the Fe-FeS system at high pressures and temperatures[J]. *American Mineralogist*, 85: 1838-1842.
- Godel B, Barnes S J and Barnes S J. 2013. Deposition mechanisms of magmatic sulphide liquids: Evidence from high-resolution X-ray computed tomography and trace element chemistry of komatiite-hosted disseminated sulphides[J]. *Journal of Petrology*, 54: 1455-1481.
- Godel B, Rudashevsky N S, Nielsen T F D, Barnes S J and Rudashevsky V N. 2014. New constraints on the origin of the Skaergaard intrusion Cu-Pd-Au mineralization: Insights from high-resolution X-ray computed tomography[J]. *Lithos*, 190-191: 27-36.
- Gorbachev N S and Grinenko L N. 1973. The sulfur isotope ratios of the sulfides and sulfates of the Oktyabr'sk sulfide deposit, Noril'sk region, and the problem of its origin[J]. *Geokhimiya*, 8: 1127-1136.
- Grinenko L N. 1985. Sources of sulfur of the nickeliferous and barren gabbro-dolerite intrusions of the northwest Siberian platform[J]. *International Geology Review*, 28: 695-708.
- Hoatson D M, Jaireth S and Jaques A L. 2006. Nickel sulfide deposits in Australia: Characteristics, resources, and potential[J]. *Ore Geology Reviews*, 29: 177-241.
- Jugo P J and Leshner C M. 2005. Redox changes caused by evaporate and carbon assimilation at Noril'sk and their role in sulfide precipitation[M]. *Geological Society of America Abstracts with Programs*, 39: 360.
- Kerrick R, Goldfarb R J and Richards J P. 2005. Metallogenic provinces in an evolving geodynamic framework[J]. *Economic Geology*, 100th Anniversary volume: 1097-1136.
- Leshner C M. 2017. Roles of xenomelts, xenoliths, xenocrysts, xenovolatiles, residues, and skarns in the genesis, transport, and localization of magmatic Fe-Ni-Cu-PGE sulfides and chromite[J]. *Ore Geology Reviews*, 90: 465-484.
- Li C and Ripley E M. 2009. Sulfur contents at sulfide-liquid or anhydrite saturation in silicate melts: Empirical equations and example applications[J]. *Econ. Geol.*, 104: 405-412.
- Li C, Zhang M J, Fu P, Qian Z, Hu P and Ripley E M. 2012. The Kalatongke magmatic Ni-Cu deposits in the Central Asian Orogenic Belt, NW China: Product of slab window magmatism[J]? *Mineralium Deposita*, 47: 51-67.
- Li C, Zhang Z, Li W, Wang Y, Sun T and Ripley E M. 2015. Geochronology, petrology and Hf-S isotope geochemistry of the newly discovered Xiarihamu magmatic Ni-Cu sulfide deposit in the Qinghai-Tibet plateau, western China[J]. *Lithos*, 216-217: 224-240.
- Li D H, Bao X C and Zhu G Q. 1989. Studies on geology, geophysics, geochemistry of the Huangshan Cu-Ni deposit belt and its prospecting targets ("305" Project Report)[M]. Chengdu: Chengdu College of Technology (in Chinese).
- Lightfoot P C and Hawkesworth C J. 1997. Flood basalts and magmatic Ni, Cu, and PGE sulphide mineralization: Comparative geochemistry of the Noril'sk (Siberian Traps) and West Greenland sequences[A]. In: Mahoney J J and Coffin M F, eds. Large igneous provinces: continental, oceanic and planetary flood volcanism[C]. Washington: American Geophysical Union. 357-380.
- Lightfoot P C and Keays R R. 2005. Siderophile and chalcophile metal variations in flood basalts from the Siberian Trap, Noril'sk region: Implication for the origin of the Ni-Cu-PGE sulfide ores[J]. *Econ. Geol.*, 100: 439-462.
- Lightfoot P C, Keays R R, Evans-Lamswood D and Wheeler R. 2012. Sulfur saturation history of Nain plutonic suite mafic intrusions; origin of the Voisey's Bay Ni-Cu-Co sulphide deposit, Labrador, Canada[J]. *Mineralium Deposita*, 47: 23-50.
- Lightfoot P C and Evans-Lamswood D. 2015. Structural controls on the primary distribution of mafic-ITRAMAFIC intrusions containing Ni-Cu-Co-(PGE) sulfide mineralization in the roots of large igneous provinces[J]. *Ore Geology Reviews*, 64: 354-386.
- Liu Y G, Li W Y, Jia Q Z, Zhang Z W, Wang Z A, Zhang Z B, Zhang J W and Qian B. 2018. The Dynamic sulfide saturation process and a possible slab break-off model for the giant Xiarihamu magmatic nickel ore deposit in the East Kunlun Orogenic Belt, northern Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. *Econ. Geol.*, 113 (6): 1383-1417.
- McBirney A R and Murase T. 1984. Rheological properties of magmas[J]. *Annual Review of Earth Planetary Sciences*, 12: 337-357.
- Mungall J E. 2002. Kinetic controls on the partitioning of trace elements between silicate and sulfide liquids[J]. *Journal of Petrology*, 43: 749-768.
- Mungall J E and Su S. 2005. Interfacial tension between magmatic sulfide and silicate liquids: Constraints on kinetics of sulfide liquation and sulfide migration through silicate rocks[J]. *Earth Planetary Science Letter*, 234: 135-149.
- Mungall J E, Brenan J M, Godel B, Barnes S J and Gaillard F. 2015. Transport of metals and sulphur in magmas by flotation of sulphide melt on vapour bubbles[J]. *Nature Geosciences*, 8: 216-219.
- Naldrett A J, Lightfoot P C, Fedorenko V, Doherty W and Gorbachev N S. 1992. Geology and geochemistry of intrusions and flood basalts of the Noril'sk region, USSR, with implications for the origin of the Ni-Cu ores[J]. *Econ. Geol.*, 87(4): 975-1004.
- Naldrett A J. 2004. Magmatic sulfide deposits-geology, geochemistry and exploration[M]. Berlin: Heidelberg. New York: Springer. 1-728.
- Newton R C and Manning C E. 2005. Solubility of anhydrite, CaSO₄, in NaCl-H₂O solutions at high pressures and temperatures: Applications to fluid-rock interaction[J]. *Journal of Petrology*, 46: 701-716.

- Ortega L, Lunar R, Garcia-Palomo F, Moreno T, Martin-Estrevéz J R, Prichard H M and Fisher P C. 2004. The Aguablanca Ni-Cu-PGE Deposit, southwestern Iberia: Magmatic ore-forming processes and retrograde evolution[J]. *Canadian Mineralogist*, 42: 325-350.
- Patten C, Barnes S J and Mathez E A. 2012. Textural variations in MORB sulphide droplets due to differences in crystallization history[J]. *Canadian Mineralogist*, 50: 675-692.
- Peltonen P. 1995. Magma-country rock interaction and the genesis of Ni-Cu deposits in the Vammala nickel belt, SW Finland[J]. *Mineralogy and Petrology*, 52: 1-24.
- Pina R, Lunar R, Ortega L, Gervilla F, Alapieti T and Martínez C. 2006. Petrology and geochemistry of mafic-ultramafic fragments from the Aguablanca Ni-Cu Ore Breccia, southwest Spain[J]. *Econ. Geol.*, 101: 865-881.
- Qin K Z, Su B X, Sakya P A, Tang D M, Li X H, Sun H, Xiao Q H and Liu P P. 2011. SIMS zircon U-Pb geochronology and Sr-Nd isotopes of Ni-Cu-bearing mafic-ultramafic intrusions in eastern Tianshan and Beishan in correlation with flood basalts in Tarim basin (NW China): Constraints on a ca. 280 Ma mantle plume 2006[J]. *American Journal of Science*, 311: 237-260.
- Ripley E M, Lambert D D and Frick L R. 1999. Re-Os, Sm-Nd, and Pb isotopic constraints on mantle and crustal contributions to magmatic sulfide mineralization in the Duluth Complex[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62: 3349-3365.
- Ripley E M and Li C. 2003. Sulfur isotope exchange and metal enrichment in the formation of magmatic Cu-Ni-(PGE) deposits[J]. *Econ. Geol.*, 98: 635-641.
- Ripley E M and Li C. 2013. Sulfide saturation in mafic magmas: Is external sulfur required for magmatic Ni-Cu-(PGE) ore genesis[J]? *Econ. Geol.*, 108: 45-58.
- Ripley E M, Lightfoot P C, Li C and Elswick E R. 2003. Sulfur isotopic studies of continental flood basalts in the Noril'sk region: Implications for the association between lavas and ore-bearing intrusions[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67: 2805-2817.
- Ripley E W, Sarkar A and Li C. 2005. Mineralogic and stable isotope studies of hydrothermal alteration at the Jinchuan Ni-Cu deposit, China[J]. *Econ. Geol.*, 100: 1349-1361.
- Ripley E M, Taib N I, Li C and Moore C H. 2007. Chemical and mineralogical heterogeneity in the basal zone of the Partridge river intrusion: Implications for the origin of Cu-Ni mineralization in the Duluth Complex, Midcontinent Rift System[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 154: 35-54.
- Robertson J C, Ripley E M, Barnes S J and Li C. 2015. Sulfur liberation from country rocks and incorporation in mafic magmas[J]. *Econ. Geol.*, 110: 1111-1123.
- Robertson J C, Barnes S J and Vaillant M L. 2016. Dynamics of magmatic sulphide droplets during transport in silicate melts and implications for magmatic sulphide ore formation[J]. *Journal of Petrology*, 56: 2445-2472.
- Rose L A and Brenan J M. 2001. Wetting properties of Fe-Ni-Co-Cu-O-S melts against olivine: Implications for sulfide melt mobility[J]. *Econ. Geol.*, 96: 145-157.
- Ryan B. 2001. A provisional subdivision of the Nain plutonic suite in its type-area, Nain, Labrador (NTS map area 14C/12) [M]. Report-Government of Newfoundland and Labrador Dept of Mines and Energy, Geological Survey. 127-157.
- Saumur B M, Cruden A R, Evans-Lamswood D M and Lightfoot P C. 2015. Wall-rock structural controls on the genesis of the Voisey's Bay intrusion and its Ni-Cu-Co magmatic sulfide mineralization (Labrador, Canada)[J]. *Econ. Geol.*, 110: 691-711.
- Song X Y, Zhou M F, Keays R R, Cao Z M, Sun M and Qi L. 2006. Geochemistry of the Emeishan flood basalts at Yangliuping, Sichuan, SW China: Implication for sulfide segregation[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 152: 53-74.
- Song X Y, Zhou M-F, Tao Y and Xiao J F. 2008. Controls on the metal compositions of magmatic sulfide deposits in the Emeishan large igneous province, SW China[J]. *Chemical Geology*, 253: 38-49.
- Song X Y, Keays R R, Long X, Qi H W and Ihlenfeld C. 2009a. Platinum-group element geochemistry of the continental flood basalts in the Central Emeishan Large igneous Province, SW China[J]. *Chemical Geology*, 262: 246-261.
- Song X Y, Keays R R, Zhou M F, Qi L, Ihlenfeld C and Xiao J F. 2009b. Siderophile and chalcophile elemental constraints on the origin of the Jinchuan Ni-Cu-(PGE) sulfide deposit, NW China[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73: 404-424.
- Song X Y and Li X R. 2009c. Geochemistry of the Kalatongke Ni-Cu-(PGE) sulfide deposit, NW China: Implications for the formation of magmatic sulfide Mineralization in a post-collisional environment[J]. *Mineralium Deposita*, 44: 303-327.
- Song X Y, Xiao J F, Zhu D, Zhu W G and Chen L M. 2010. New insight on the formation of magmatic sulfide deposits in magma conduit system[J]. *Earth Science Frontiers*, 17: 153-163 (in Chinese with English abstract).
- Song X Y, Xie W, Deng Y F, Crawford A J, Zheng W Q, Zhou G F, Deng G, Cheng S L and Li J. 2011. Slab break-off and the formation of Permian mafic-ultramafic intrusions in southern margin of Central Asian Orogenic Belt, Xinjiang, NW China[J]. *Lithos*, 127: 128-143.
- Song X Y, Danyushevsky L V, Keays R R, Chen L M, Tian Y L and Xiao J F. 2012. Structural, lithological, and geochemical constraints on the dynamic magma plumbing system of the Jinchuan Ni-Cu sulfide deposit, NW China[J]. *Mineralium Deposita*, 47: 277-297.
- Song X Y, Chen L M, Deng Y F and Xie W. 2013. Syn-collisional tholeiitic magmatism induced by asthenosphere upwelling due to slab detachment at the southern margin of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Journal of the Geological Society, London*, 170: 941-950.
- Song X Y, Yi J N, Chen L M, She Y W, Liu C Z, Dang X Y, Yang Q A and Wu S K. 2016. The giant Xiarihamu Ni-Co sulfide deposit in the East Kunlun Orogenic Belt, northern Tibet Plateau, China[J]. *Econ. Geol.*, 111: 29-55.

- Song X Y, Deng Y F, Xie W, Chen L M, Yu S Y and Liang Q L. 2018. Magmatism of Huangshan-Jingerquan Ni-Cu ore deposit belt and relationship with regional strike slip structure in Xinjiang, China[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 40(5): 505-519 (in Chinese with English abstract).
- Tang Z L and Li W Y. 1995. Mineralisation mode and geology of the Jinchuan Ni-Cu sulfide deposit bearing PGE[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Tao Y, Li C, Song X Y and Ripley E M. 2008. Mineralogical, petrological, and geochemical studies of the Limahe mafic-ultramafic intrusion and associated Ni-Cu sulfide ores, SW China[J]. *Mineralium Deposita*, 43: 849-872.
- Thakurta J, Ripley E M and Li C. 2008. Geochemical constraints on the origin of sulfide mineralization in the Duke Island Complex, southeastern Alaska[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 9: 34.
- Thompson J F H and Naldrett A J. 1984. Sulphide-Silicate reactions as a guide to Ni-Cu-Co mineralization in Central Maine[M]. Institute of Mineral and Metallurgy, London, USA.
- Tomkins A G. 2010. Windows of metamorphic sulfur liberation in the crust: Implications for gold deposit genesis[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74: 3246-3259.
- Toplis M J and Carroll M R. 1995. An experimental study of the influence of oxygen fugacity on Fe-Ti oxide stability, phase relations, and mineral-melt equilibria in ferro-basaltic system[J]. *Journal of Petrology*, 36: 1137-1170.
- Van der Sluis M. 2010. Melting relations in the anhydrite-dolomite system[M]. Unpublished Master thesis, Utrecht, Netherlands: Universiteit Utrecht.
- Wang B, Chen Y, Zhan S, Shu L, Faure M, Cluzel D, Charvet J and Laurent-Charvet S. 2007. Primary Carboniferous and Permian paleomagnetic results from the Yili Block (NW China) and their implications on the geodynamic evolution of Chinese Tianshan Belt[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 263: 288-308.
- Wang B, Cluzel D, Jahn B M, Shu L, Chen Y, Zhai Y, Branquet Y, Barbanson L and Sizaret S. 2014. Late Paleozoic pre- and syn-kinematic plutons of the Kanggaur-Huangshanshear zone: Inference on the tectonic evolution of the eastern Chinese North Tianshan[J]. *American Journal of Science*, 314: 43-79.
- Wang Y C and Zhou M F. 2006. Genesis of the permian Baimazhai magmatic Ni-Cu-(PGE) sulfide deposit, Yunnan, SW China[J]. *Mineralium Deposita*, 41: 771-783.
- Williams D A, Ker R C and Lesher C M. 1999. Thermal and fluid dynamics of komatiitic lavas associated with magmatic Fe-Ni-Cu-(PGE) deposit[A]. *Dynamic processes in magmatic ore deposits and their application in mineral exploration*[C]. Geological Society of Canada Short Course Notes, 13: 367-412.
- Wooden J L, Czamanske G K, Bouse R M, Likhachev A P, Kunilov V E and Lyul'ko V. 1992. Pb isotope data indicate a complex, mantle origin for the Noril'sk-Talnakh ores, Siberia[J]. *Econ. Geol.*, 87: 1153-1165.
- Wooden J L, Czamanske G K, Fedorenko V A, Arndt N T, Chauvel C, Bouse R M, King B W, Knight R J and Siems D F. 1993. Isotopic and trace-element constraints on mantle and crustal contributions to Siberian continental flood basalts, Noril'sk area, Siberia[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57: 3677-3704.
- Xie W, Song X Y, Deng Y F, Wang Y S and Ba D H. 2012. Geochemistry and petrogenetic implications of a Late Devonian mafic-ultramafic intrusion at the southern margin of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Lithos*, 144-145: 209-230.
- Xie W, Song X Y, Chen L M, Deng Y F, Zheng W Q, Wang Y S and Ba D H. 2014. Geochemistry insights on the genesis of the subduction-related Heishan Magmatic Ni-Cu-(PGE) deposit in Gansu, NW China, at the southern margin of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Econ. Geol.*, 109: 1563-1583.
- Zhang Z C, Mao J W, Chai F M, Yan S H, Chen B L and Pirajno F. 2009. Geochemistry of the permian Kalatongke mafic intrusions, northern Xinjiang, northwest China: Implications for the genesis of magmatic Ni-Cu sulfide deposits[J]. *Econ. Geol.*, 104: 185-203.

附中文参考文献

- 陈文, 孙枢, 张彦, 肖文交, 王义天, 王清利, 姜立丰, 杨俊涛. 2005. 新疆东天山秋格明塔什-黄山韧性剪切带⁴⁰Ar/³⁹Ar年代学研究[J]. *地质学报*, 79(6): 790-804.
- 李德惠, 包相臣, 朱国强, 等. 1989. 黄山铜镍成矿带地质、地球物理和地球化学综合研究及找矿靶区优选报告(国家“305”项目)[M]. 成都: 成都理工学院.
- 宋谢炎, 肖家飞, 朱丹, 朱维光, 陈列锰. 2010. 岩浆通道系统与岩浆硫化物成矿研究新进展[J]. *地学前缘*, 17: 153-163.
- 宋谢炎, 邓宇峰, 颜炜, 陈列锰, 于宋月, 梁庆林. 2018. 新疆黄山-镜儿泉铜镍成矿带岩浆作用与区域走滑构造的关系[J]. *地球科学与环境学报*, 40(5): 505-519.
- 汤中立, 李文渊. 1995. 金川铜镍硫化物(含铂)矿床成矿模式及地质对比[M]. 北京: 地质出版社.