

岩浆通道成矿核心内涵“两深一浅一通道”及其找矿意义

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

内容提要:岩浆通道成矿模型的建立深刻改变了岩浆铜镍硫化物矿床成因研究的范式, 成为该领域的研究前沿, 而且已经成功地应用于找矿勘查中。该模型揭示了硫化物熔离与聚集成矿在空间上的不一致性以及成矿与相关玄武岩铂族元素强烈亏损的成因联系, 很好地解释了为什么很多含矿岩体围岩贫硫化物的现象。笔者将该模型的核心内涵概括为“两深一浅一通道”, “两深”指成矿物质来源于地幔、硫化物熔离发生在深部, “一浅”指硫化物的聚集成矿主要发生在较浅的岩浆房, “一通道”指较稳定的岩浆通道更有利于成大矿。结合对典型矿床和成矿带的分析, 笔者提出侵位较浅的、规模相对较大的岩体, 其成矿潜力好于深部的岩浆通道相。因此, 认为地表矿化并不是唯一可靠的、甚至不能作为最重要的找矿标志, 要提高找矿效率(特别是隐伏矿床), 首先要全面分析成矿带岩浆通道系统在不同区域的埋藏、剥蚀和暴露状况, 目标岩体地质产状及其与围岩时代差异等宏观地质要素, 查明深部通道相与浅部岩体空间分布和形成深度的差异, 在此基础上, 判断浅部岩体的位置、合理部署重点勘查区域、选择有效的勘查技术、定位目标岩体, 进行钻探验证。

关键词:岩浆铜镍硫化物矿床; 岩浆通道成矿模型; 含矿岩体产状; 侵位深度; 围岩时代

岩浆 Ni-Cu-(PGE-铂族元素) 硫化物矿床是 Ni、Co、PGE 等战略性关键金属的主要资源形式(宋谢炎等, 2018), 我国这些金属资源的对外依存度都超过 90%(翟明国和胡波, 2020)。如何根据最新的研究成果正确理解这类矿床的成因, 并从中挖掘和提炼野外找矿标志, 更好地将矿床成因模型转换为找矿模型、切实提高找矿效率, 是地质工作者必须认真思考的问题。

自 1883 年加拿大巨大的 Sudbury 岩体底部一系列多硫化物型 Ni-Cu-PGE 矿床的发现和研发, 逐渐形成了大型岩浆房硫化物熔离、向下沉降-聚集的成矿模式。此后上百年, 大型镁铁-超镁铁层状岩体(如非洲 Bushveld 和 Great Dyke, 北美 Duluth 和 Stillwater, 格林兰 Skaergaard 等)成为西方国家寻找这类矿床的首选目标, 但发现的却主要是少硫化物型的富 PGE 矿层。而非西方国家在规模相对较小的镁铁-超镁铁岩体中却发现了若干大型-超大型的多硫化物型 Ni-Cu-(PGE) 矿床, 如 1920~1960

年代在俄罗斯西伯利亚探明的 Noril'sk-Talnakh 世界级的 Ni-Cu-PGE 矿床(2320 万吨 Ni, 12438 吨 PGE), 1960 年代在我国甘肃省发现的金川超大型 Ni-Cu-PGE 矿床(~625 万吨 Ni, ~150 吨 PGE)(Naldrett, 2005; 宋谢炎等, 2023)。这些事实使矿床学家认识到 Sudbury 与成矿有关的基性岩浆活动是由陨石撞击诱发的, 只是一个极为罕见的特例(Keays and Lightfoot, 2004), 大多数岩浆硫化物成矿远非岩浆房内部硫化物原地熔离-沉降-聚集那样简单。

冷战结束后, 国际著名矿床学家 Anthony Naldrett 教授等人有机会前往俄罗斯 Noril'sk-Talnakh 矿床进行野外考察和比较系统的地质-地球化学研究, 发现附近的西伯利亚玄武岩(Siberian Traps)有一个近 500 m 厚的层位出现了强烈的 Ni、Cu 和 PGE 亏损, 意识到玄武岩这些元素的亏损与成矿之间的成因联系。认为含矿岩体是幔源玄武岩浆通向地表的岩浆通道系统上的一个岩浆房, 地壳

注: 本文为国家自然科学基金项目(编号 42330807, 42121003)资助的成果。

收稿日期: 2024-03-21; 改回日期: 2024-05-01; 网络发表日期: 2024-05-30; 责任编辑: 毕献武; 责任编辑: 周健。

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。E-mail: songxieyan@vip.gyig.ac.cn。

引用本文: 宋谢炎. 2024. 岩浆通道成矿核心内涵“两深一浅一通道”及其找矿意义. 地质学报, 98(7): 1941~1952, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.20241111.

Song Xieyan. 2024. The core connotation of magma conduit model “two deep, one shallow and single channel” and its significances on exploration. Acta Geologica Sinica, 98(7): 1941~1952.

物质的同化混染、特别是膏岩层硫的加入导致硫化物熔离,并被运移到更浅的含矿岩体中聚集成矿,残余的玄武岩浆喷出地表形成金属元素强烈亏损的玄武岩,从而初步建立了岩浆通道成矿模型(Naldrett et al., 1992)。该模型认为含矿岩体为岩浆通道系统上硫化物的聚集提供了空间,很好地解释了为什么在 Noril'sk-Talnakh 地区,大量硫化物集中堆积在几个厚度不超过 300 m 的岩席底部,使这些含矿岩体具有极高的矿化率,并形成了世界级的 Ni-Cu-PGE 矿床。

在岩浆通道成矿模型思想的指导下,1993~1997 年仅用了四年时间就探明了加拿大 Voisey's Bay 超大型 Ni-Cu-Co 矿床(Ni 金属储量达 200 万吨)(表 1; Li et al., 2000; Evans-Lamswood et al., 2000),这是 1970 年以后找到的全球最大的铜镍矿床。根据这个模型,美国 Kennecott Exploration Ltd 改变了在北美大陆裂谷以 Duluth 等大型层状岩体底部为对象的勘查策略,转向以小型岩席和岩墙作为勘查目标,于 2002 年发现了 Eagle 小型 Ni-Cu-PGE 矿床(Ding Xin et al., 2010)。

这些成功案例说明岩浆通道成矿模型具有很好的找矿指导意义。但在实际找矿工作中要合理和有效地应用该模型,除了要把小岩体作为重点勘查对象外,还需要充分考虑控制硫化物熔体运移和聚集的其他地质要素,才能明确野外找矿标志、切实地提高勘查效率,目前这些还缺乏系统的梳理。要弄清这些问题,就必须从该模型的逻辑脉络及其对成矿地质过程各个环节的分析入手,准确把握其核心内涵,挖掘和提炼可用性强的判断镁铁—超镁铁岩体找矿潜力的宏观地质标志。

1 岩浆通道模型对成矿过程的解释及其核心内涵

由于 Ni、Co、Cr、PGE 都是亲铁元素,它们在地幔中的丰度远高于地壳,因此,幔源镁铁—超镁铁质岩浆必然是岩浆硫化物成矿金属元素的物质来源,不同构造背景幔源玄武岩浆活动的剧烈程度是区域成矿规模大小的重要制约因素。在岩浆通道成矿模型出现之前,大量研究已经认识到结晶分异、特别是地壳物质同化混染是导致硫化物熔离的主要因素,铜镍硫化物的成矿就是硫化物熔体从岩浆中萃取和富集 Cu、Ni、PGE、As、Se、Te 等亲铜和亲铁元素,并在岩浆房底部或其他适宜部位的聚集过程。所以,玄武质岩浆与地壳之间的物质交换也是成矿过

程的重要环节。建立在 Sudbury 矿床的传统观点认为硫化物的熔离和聚集都发生在一个巨大的岩浆房中,研究视角主要局限于含矿岩体本身,因此,认为含矿岩体越大、矿床规模就越大,岩体规模成为判断找矿潜力的重要指标。

而岩浆通道成矿模型将观察和研究的视角扩展到幔源玄武质岩浆从进入地壳后,在整个岩浆通道系统中可能发生的各种地质、化学和物理过程(宋谢炎, 2019)。近年来,大量研究使岩浆通道成矿模型不断完善,首先,野外观察表明,多数含矿岩体的直接围岩是贫硫化物的,即使有些含矿岩体的直接围岩富含硫化物,但热接触变质晕很窄,能够贡献的硫的量与成矿规模不成比例,说明直接围岩的同化混染对硫化物熔离的贡献非常有限,硫化物熔离更可能主要发生在深部(Ripley and Li, 2013; Robertson et al., 2015)。这意味着深部熔离的硫化物乳珠并没有大量原地堆积,而是被岩浆向上携带到含矿岩体所在的岩浆房聚集-成矿。Noril'sk 等超大型矿床厚大的矿体与较薄的含矿岩体之间的巨大反差说明,含矿岩体犹如岩浆通道系统上的“过滤器”,将硫化物留下来,残余岩浆则溢出形成其他更浅的无矿岩体或玄武岩。在相同岩浆通量条件下,岩浆通道越狭窄岩浆流速越高、携带硫化物乳珠的能力越强,所以,硫化物主要在岩浆通道变宽、变平缓的部位、特别是相对较大的岩浆房发生重力沉降和聚集(Mungall et al., 2015; Barnes et al., 2016)。因此,岩浆通道系统的地质和几何学特征也非常重要(Song Xieyan et al., 2016, 2021),深部通道相的含矿岩体常常呈陡峭的岩墙状,而浅部的含矿岩体更可能是规模较大的漏斗状或平缓的岩席状。迄今为止国内外的观察表明,浅部含矿岩体的厚度总是大于深部通道相含矿岩墙的宽度,说明通道相岩体的规模普遍小于浅部岩体相。显然,与成矿有关的岩浆通道系统一定是穿越了当时含矿岩体,甚至地表之下的全部地壳岩石,通道相岩墙或岩体围岩的形成时代必然老于浅部含矿岩体的围岩。因此,对玄武岩浆活动对应的岩浆通道系统穿越的地层范围、镁铁—超镁铁岩体地质产状及其围岩时代的分析,是判断含矿岩体究竟是深部通道相还是浅部岩体相及其找矿潜力的重要内容。

2 岩浆通道相和浅部岩体相成矿规模的分析

综合上述分析,岩浆通道成矿模型的核心内涵

可以概括为“两深一浅一通道”。“两深”指成矿物质来源深(地幔)、硫化物熔离主要发生在含矿岩体之下岩浆通道较深的部位;“一浅”指熔离硫化物的聚集和成矿主要发生在相对较浅的岩浆通道和岩浆房中;“一通道”指硫化物熔离、运移和聚集的岩浆通道系统的空间范围相对固定。必须指出的是多个岩浆通道或同一个岩浆通道上多个深度的岩浆房都发生硫化物聚集,将会导致硫化物的分散,结果是形成很多个矿床或含矿岩体,不利于形成大型或超大型矿床,造成“只见星星不见月亮”的现象。因此,要形成大矿不仅需要岩浆通道系统空间位置的相对稳定,而且需要硫化物只在个别岩浆房大量聚集。

“两深一浅一通道”高度概括了岩浆通道成矿过程的基本特点,特别是反映出形成大型铜镍硫化物矿床的必要条件,为运用岩浆通道成矿模型分析和判断不同矿化岩体的找矿潜力、更好地指导区域找矿工作提供了新的思维逻辑。那么,究竟如何判断深部通道相与浅部岩体,如何分析哪些区域可能发

现找矿潜力大的隐伏的含矿岩体,这些都是找矿工作中必须考虑的问题。岩浆通道成矿最典型的实例除了俄罗斯 Noril'sk-Talnakh 矿床,就是加拿大 Voisey's Bay 矿床。Voisey's Bay 橄长岩体是加拿大东部克拉通中元古代 Nain 镁铁质岩套中发现的唯一的含矿岩体,锆石 U-Pb 年龄(1305.0 ± 0.8 Ma, Amelin et al., 1999)说明该岩体形成于中元古代。因此,相应的岩浆通道系统发育于太古宙—中元古代的岩石中,Voisey's Bay 岩体侵位于太古宙基底之上的古元古代变质岩中,说明其侵位深度并不大。大量地表露头、勘探揭露和构造恢复表明,Voisey's Bay 矿床由浅部较大的岩体底部的大矿体和深部赋存在通道相岩墙中的若干不连续的透镜状小矿体构成。成岩成矿研究认为深部下西岩体含硫化物围岩的同化混染导致硫化物熔离,而只有少量深部熔离的硫化物在岩浆通道相岩席和岩墙变宽处堆积形成若干小的矿体,绝大部分硫化物被带到更浅部岩体的底部形成 Ovoid 这样的主矿体。图 1 概

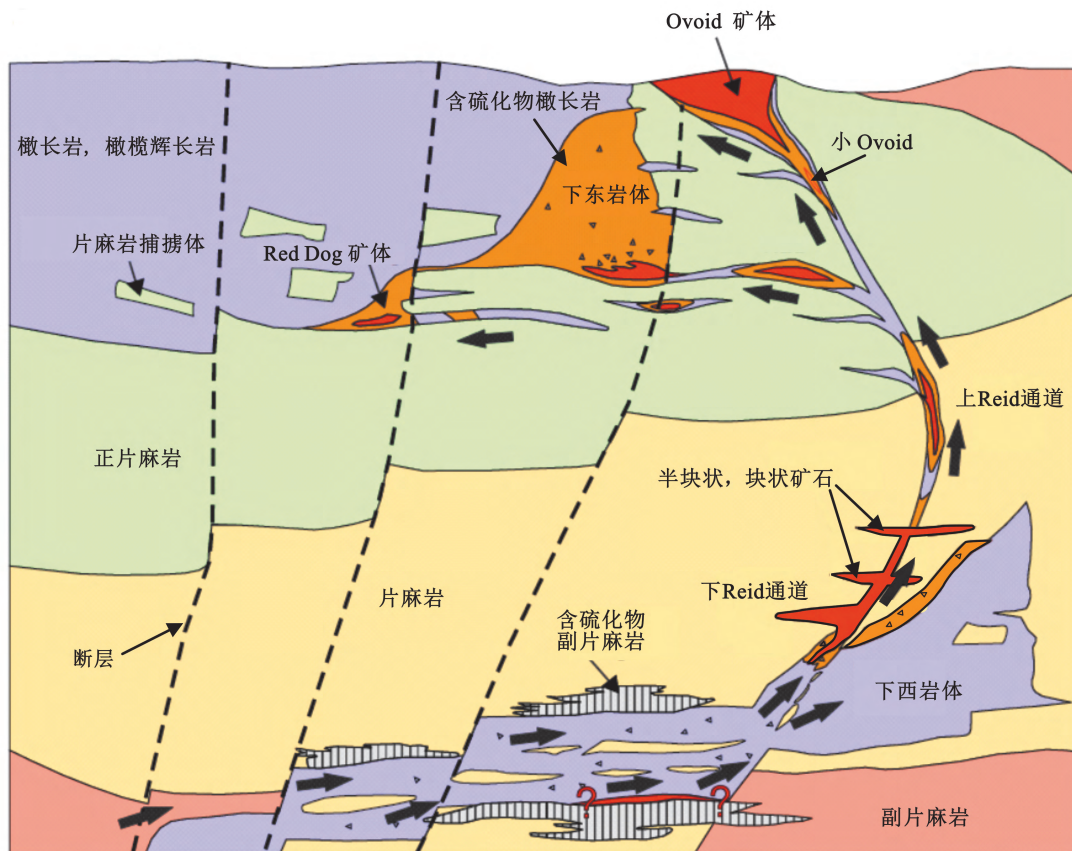


图 1 加拿大 Voisey's Bay 矿床成因模式图(据 Lightfoot et al., 2012)

Fig. 1 Formation model diagram of the Voisey's Bay deposit in Canada (after Lightfoot et al., 2012)

红色代表块状矿石和角砾状矿石,桔黄色代表浸染状矿石

Massive and breccia ores are red colored, disseminated ores are orange colored

括的成矿模式反映出浅部岩体底部矿体(包括 Ovoid 矿体和下东岩体底部的矿体)的规模远大于深部通道相的透镜状矿体(包括 Reid 通道相矿体、小 Ovoid 矿体和发现山矿体等)(Lightfoot et al., 2012)。表 1 中不同矿体的统计数据更清楚地显示出浅部较大岩体底部矿体的矿石量、矿石平均品位和金属储量都远大于通道相透镜状矿体(Evans-

Lamswood et al., 2000)。这些特征都符合“两深一浅一通道”的成矿特点,说明深部熔离的硫化物绝大多数被带到浅部较大的岩体底部堆积成矿,只有少量硫化物在浅部较大岩体之下通道相岩墙变宽的部位和小岩席中堆积,清楚地反映出浅部较大的岩体的找矿潜力明显地大于深部通道相岩墙和小岩体(图 1,表 1)。

表 1 加拿大 Voisey's Bay 矿床主矿体及通道相矿体矿石储量及品位

Table 1 Reserves and grades of the ores from the main orebodies and conduits in the Voisey's Bay deposit

	矿石量($\times 10^6$ t)	Ni(%)	Cu(%)	Co(%)
Ovoid (浅部岩体底部的主矿体)	31.7	2.83	1.68	0.12
Eastern Deepes (下东岩体底部矿体)	52.2	1.35	0.60	0.08
Discovery Hill (发现山,通道相)	7.3	1.01	0.81	0.06
Reid Brook (通道相)	29.2	1.17	0.53	0.08
总量	120.4			

注:数据来源于 Evans-Lamswood et al. (2000)。

但对于大多数矿床而言,尽管钻探工程对含矿岩体及矿体产状的揭露比较充分,但岩浆通道大多没有被揭露。因此,要验证 Voisey's Bay 矿床的上述现象是否具有普遍性,还需要对典型成矿带多个含矿岩体地质特征进行全面对比和分析,才能进一步验证和明确岩浆通道系统成矿“两深一浅一通道”规律的合理性和宏观地质特征。

3 黄山-镜儿泉成矿带深部通道相和浅部岩体相成矿特征与找矿潜力对比

新疆北部是中亚造山带南缘岩浆硫化物成矿作用最发育的区域,主要矿床分布在准噶尔地块北缘(喀拉通克),北天山(黄山-镜儿泉成矿带),中天山(西部的菁布拉克,东部的天宇和白石泉),以及塔里木地块北缘的北山褶皱带(坡北、红石山、罗东和黑山等)。其中黄山-镜儿泉成矿带的矿床和含矿岩体最多,不仅是全球造山带中规模最大的铜镍硫化物成矿带,勘查和研究程度也最高,已经探明黄山、黄山东、黄山南和图拉尔根等 4 个大型矿床,土墩、葫芦、香山等 3 个中小型矿床,以及若干矿化岩体(表 2)。该成矿带以干墩断裂为界,南北两侧分别出露上石炭统干墩组和中泥盆统梧桐窝子组(图 2)(邓宇峰等, 2021)。梧桐窝子组厚约 5000 m,主要由浅变质的中酸性凝灰岩夹砂岩构成;干墩组厚约 6000 m,下部为碳质、粉砂质板岩夹大理岩,上部为变质砂(砾)岩夹薄层硅质岩。

侵入南带干墩组的含矿岩体规模较大,呈菱形、蝌蚪形或椭圆形,其长宽分别达数百米至 5 km 和数百米至 2 km,4 个大型矿床中的 3 个赋存在这些

岩体中(表 2)。而侵入北带梧桐窝子组的含矿岩体除葫芦岩体呈小的岩盆状外,均呈岩墙状或串珠状,岩墙宽仅数十米,长度数十米至上千米不等;其中仅图拉尔根矿床达到大型规模,但其镍金属储量仅是黄山和黄山东矿床的 1/3 左右(表 2,图 3)。无论南带还是北带的含矿岩体,矿体都主要赋存于超镁铁质岩相中。Song Xieyan et al. (2021)在对 11 个岩体中 12 个含矿岩相和 4 个不含矿辉长岩相锆石 U-Pb 年代学测量基础上,结合 2000 年以后发表的锆石 U-Pb 年龄数据,指出成矿带从俯冲到碰撞后阶段都有玄武岩浆活动,导致辉长岩的锆石 U-Pb 年龄范围很大(390~260 Ma),但含矿的镁铁-超镁铁岩相的锆石 U-Pb 年龄均局限在 285~280 Ma(表 2,图 3),说明成矿具有“爆发性”,发生在碰撞后早期阶段。

碰撞后区域伸展阶段,南倾的干墩正断层的活动导致南侧上石炭统干墩组向下滑动,使得侵入中泥盆统梧桐窝子组、代表深部岩浆通道相的图拉尔根、香山等岩墙状含矿和矿化岩体因强烈剥蚀暴露地表;而侵位于上石炭统干墩组的黄山、黄山东等岩体则代表了浅部较大的含矿岩体(Song Xieyan et al., 2021)。研究表明黄山-镜儿泉成矿带岩浆通道成矿主要特点是:① 矿石与围岩 $\delta^{34}\text{S}$ 及 S/Se 比值的对比表明无论是梧桐窝子组还是干墩组中的硫化物对硫化物熔离的贡献都很小,说明硫化物熔离发生在深部,至少发生在中泥盆统之下的地层(Deng Yufeng et al., 2022)。② 硫化物随岩浆上升过程中可以在深部岩墙变宽的部位和小的水平岩席堆积形成通道相矿化,但规模较小。③ 南带黄山、黄山

表 2 中国新疆东天山黄山-镜儿泉铜镍硫化物成矿带浅部岩体与深部通道地质特征与含矿性对比
Table 2 Geological features and metallogenic potential of the shallow intrusions and beneath conduits along the Huangshan-Jingerquan Ni-Cu sulfide metallogenic belt in Xinjiang, China

围岩	岩体名称	岩体形态、规模及含矿岩相	镍/铜金属储量(万 t)	数据来源
上石炭统干墩组	黄山东	漏斗状镁铁—超镁铁杂岩体, 地表呈菱形, 长约 5.3 km, 最宽 2.0 km, 超镁铁岩及辉长苏长岩含矿	36/17	Deng Yufeng et al., 2014; Song Xieyan et al., 2021
	黄山	漏斗状镁铁—超镁铁杂岩体, 地表呈蝌蚪状, 长约 2.5 km, 最宽 0.7 km, 超镁铁岩含矿	33.8/17.3	Zhou Meifu et al., 2004; Qin Kezhang et al., 2011
	黄山南	漏斗状镁铁—超镁铁杂岩体, 地表呈椭圆形, 长约 5.2 km, 宽约 1.3 km, 超镁铁岩含矿	估计为大型	Song Xieyan et al., 2021
	二红洼	地表呈椭圆形, 长约 3.33 km, 宽约 2.60 km, 超镁铁岩弱矿化		Sun Tao et al., 2013; Song Xieyan et al., 2021
	土墩	漏斗状镁铁—超镁铁杂岩体, 地表呈椭圆形, 长约 1.4 km, 宽约 0.7 km, 超镁铁岩含矿	1.5/0.3	Song Xieyan et al., 2013
	大黄山	漏斗状镁铁—超镁铁杂岩体, 地表呈椭圆形, 超镁铁岩弱矿化		Song Xieyan et al., 2021
中泥盆统梧桐窝子组	香山	镁铁—超镁铁质岩墙, 长约 10 km, 宽 0.1~3.0 km, 超镁铁岩含矿	5/2	Shi Yu et al., 2018
	红石岗	椭圆形岩筒状, 0.57 km ² , 超镁铁岩弱矿化		师震等, 2019
	红石岗北	岩墙状, 长 1.5 km, 宽 0.9 km, 超镁铁岩弱矿化		王亚磊等, 2017
	葫芦	岩盆状, 长约 1.4 km, 宽 0.72 km, 超镁铁岩含矿	8/4	Zhao Yun et al., 2018
	马蹄	马蹄形岩筒状, 长约 800 m, 宽约 200 m, 超镁铁岩弱矿化		Song Xieyan et al., 2021
	图拉尔根	超镁铁质岩墙, 长约 800 m, 宽 20~60 m, 超镁铁岩矿化	12/8	三金柱等, 2010; Song Xieyan et al., 2021
	镜儿泉北	透镜状, 超镁铁岩弱矿化		Song Xieyan et al., 2021
	咸水泉	岩墙状, 长 300 m, 宽 50 m, 超镁铁岩弱矿化		
	红柳沟	岩墙状, 长 800 m, 宽 300 m, 超镁铁岩弱矿化		

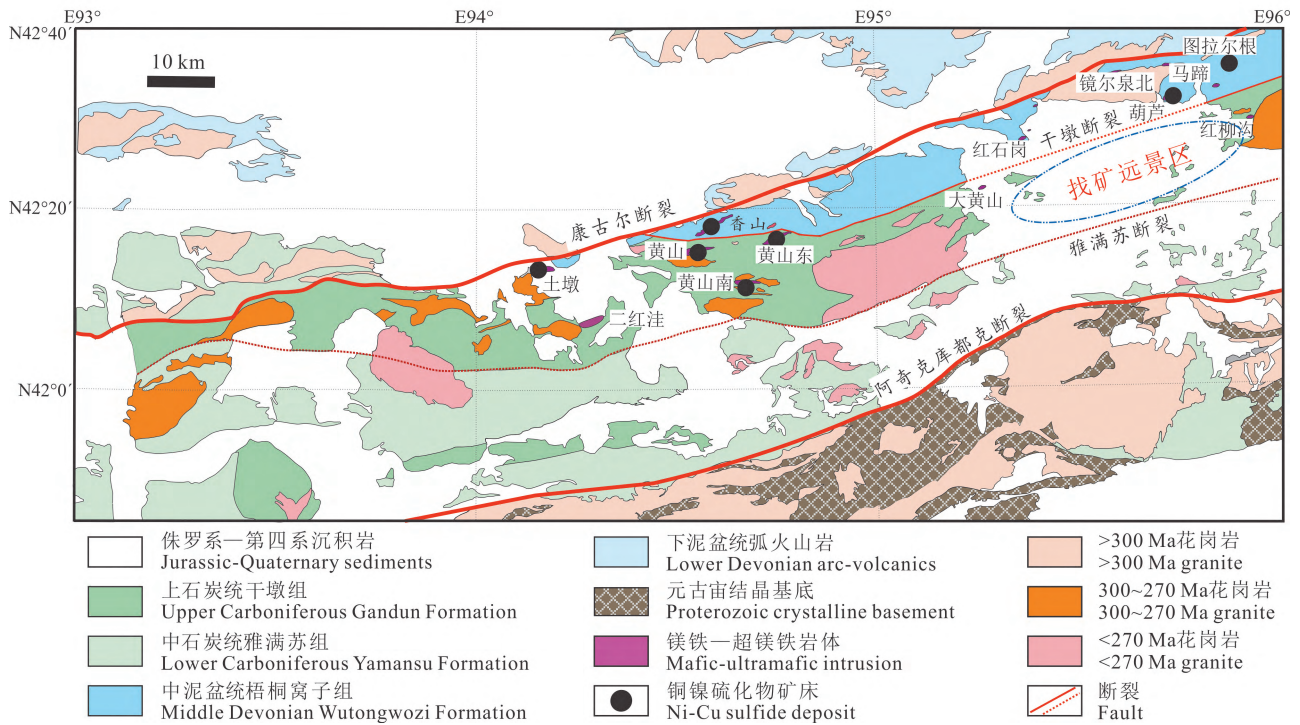


图 2 黄山-镜儿泉成矿带地质简图(据宋谢炎等, 2022 修改)

Fig. 2 Simplified geological map of the Huangshan-Jingerquan metallogenic belt (after Song Xieyan et al., 2022)

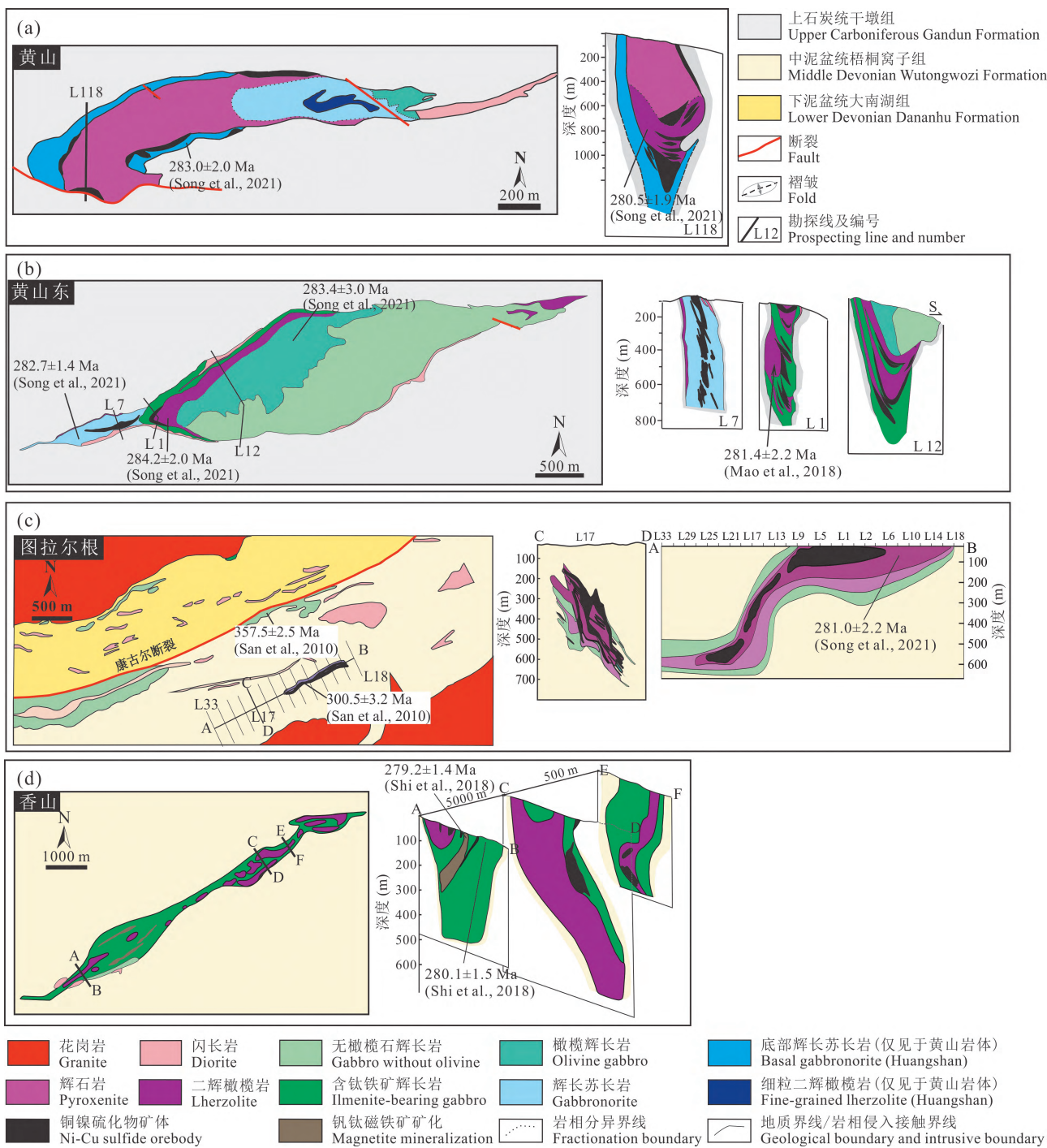


图3 黄山-镜儿泉成矿带典型矿床地质平面及剖面简图(据 Song Xieyan et al., 2021 修改)

Fig. 3 Simplified geological map and cross sections of the representative deposits in the Hungshan-Jingerquan metallogenic belt (after Song Xieyan et al., 2021)

东、黄山南等大型矿床的成矿年龄(285~280 Ma)稍早于上石炭统干墩组围岩的沉积时代,说明主要的含矿岩体不仅规模大,而且侵位深度非常浅。这些特征说明,与 Voisey's Bay 矿床相似,在黄山-镜儿泉成矿带,只有少数硫化物聚集在深部通道相,而更多的硫化物被带到较浅且较大的岩浆房聚集成矿,“再一次验证了”两深一浅一通道“的成矿规律”。

因此,浅部较大的镁铁—超镁铁岩体较之深部通道相,具有更大的找矿潜力。

然而,黄山-镜儿泉成矿带各种含矿岩体分布东西长 150 多千米的狭长地带(图 2),说明成矿岩浆通道比较分散。此外,由于该成矿带与成矿有关的玄武岩浆活动发生于碰撞后早期阶段,相对于地幔柱背景玄武质岩浆活动强度较弱、成矿物质供给较

少, 这些可能是导致该成矿带没有发现超大型矿床的重要因素, 因此, 相对固定的岩浆通道系统才有利于成大矿。该成矿带含矿岩体的地质特点还说明, 成矿岩浆通道系统的保存状况与后期的构造变形和剥蚀程度密切相关, 浅部较大的含矿岩体在剥蚀程度较低的情况下得以保存, 干墩组戈壁覆盖区可能还有隐伏的含矿岩体; 当剥蚀程度较大时, 岩浆通道相被暴露地表 (图 2)。

对 Voisey's Bay 和黄山-镜儿泉成矿带的分析表明, 成矿(区)带深部通道相和浅部岩体相的判断方法和标志主要包括: ① 在细致的同位素年代学研究基础上, 明确成矿作用的年代, 结合区域地质研究, 揭示成矿岩浆通道系统贯穿的地壳岩层范围; ② 明确研究区含矿岩体围岩地层的时代和层序, 通过各个含矿岩体围岩时代差异的对比, 查明不同含矿岩体侵位的深浅; ③ 对不同含矿岩体的形态、产状、规模等地质特点以及矿化强度、矿石结构、矿体规模、形态等矿床学特征进行系统对比; ④ 综合上述 3 点, 系统总结和确定不同侵位深度含矿岩体的地质学和矿床学特点, 从而揭示深部通道相与浅部岩体相的空间分布。

根据黄山-镜儿泉成矿带含矿岩体地质特点和空间分布规律, 宋谢炎等(2022) 提出甘墩断裂以南的戈壁覆盖区是未来找矿的重点区域, 例如大黄山以东以及土墩和二红洼岩体之间的区域 (图 2)。应该以物探方法为先导寻找类似于黄山和黄山东岩体的隐伏岩体, 经钻探验证发现矿化超镁铁质岩相后, 再逐步开展找矿勘查。需要指出的是, 当大多数硫化物在含矿岩浆房中聚集之后, 逃逸的残余岩浆将亏损 Ni、Co、Cu、PGE 等成矿元素, 这些残余岩浆可能形成更浅的、但并不含矿的岩体。因此, 并不是侵位越浅的岩体含矿性越好, 黄山-镜儿泉成矿带南带的二红洼等不含矿岩体可能就是这样形成的。当然, 这些现象还需要进一步的研究和论证。

4 “两深一浅一通道”规律的普遍性分析

为进一步分析岩浆通道成矿模型“两深一浅一通道”规律是否具有普遍意义, 本文对国内外多个典型 Ni-Cu-(PGE) 矿床含矿岩体的规模、年龄、基本地质特征、岩浆通道系统围岩地层时代范围和含矿岩体侵位深度进行了分析和对比, 表明这些矿床的形成深度都不大 (表 3)。

表 3 全球几个代表性铜镍硫化物矿床地质产状特点及含矿岩体侵位深度分析

Table 3 Geological features of the representative Ni-Cu sulfide deposits world-wide and the depths of the deposit hosting intrusions

成矿背景	矿床名称	镍金属储量(万 t) @平均品位(%)	含矿岩体形成 年龄(Ma)	矿体地质特征	含矿岩体 围岩时代	岩浆通道 围岩时代	主要成 矿深度	参考文献
俄罗斯西伯利亚大火成岩省	Noril'sk-Talnakh	2300@1.77	251.6±0.01, 251.8±0.07, 251.9±0.07	含矿岩体为分异良好的镁铁质岩席, 长宽可达十多千米, 厚度不超过 300 m, 侵位于西伯利亚玄武岩下 300~500 m 深度的泥盆系中。浸染状和块状硫化物聚集在岩席底部	泥盆系沉积岩	太古宙—古生代岩石	很浅	Naldrett et al., 1992; Burgess and Bowring, 2015
俄罗斯科拉半岛	Pecheanga	339@1.18	1980	含矿岩体为分异良好的镁铁—超镁铁质岩席, 长宽小于 6.5 km, 厚度不超过 600 m, 围岩年龄与含矿岩体相近。浸染状硫化物聚集在岩席底部	古元古代变质沉积岩	太古宙—古元古代岩石	很浅	Naldrett, 2005; Hanski et al., 2011
美国北美大陆裂谷	Eagle	5.63@1.64	1107.2±5.7	含矿岩体为镁铁—超镁铁质岩墙, 约 500 m 长, 100~200 m 宽。浸染状和块状矿石产于岩体下部	古中元古代变质岩	太古宙—古中元古代变质岩及花岗岩	较浅	Ding Xin et al., 2010
中国华北克拉通西南缘	金川	625@1.1	827±8	含矿岩体为两个相互独立的超镁铁质岩席。有 4 个主要矿体, 其中最大的 1 号矿体产于东岩体中西段的中部, 2 号矿体产于东岩体东段的底部; 3 号和 24 号矿体则分别产于西岩体上下岩相旋回的底部	古元古代变质岩	太古宙—新元古代变质岩及花岗岩	~5000 m	Li Xianhua et al., 2005; Song Xieyan et al., 2009; Kang Jian et al., 2022; Su Wenhao et al., 2023

例如俄罗斯 Noril'sk-Talnakh 矿床位于西伯利亚克拉通北部,相关地幔柱岩浆作用发生在 251.9~251.6 Ma (表 3) (Naldrett et al., 1992; Burgess and Bowring, 2015)。因此,岩浆通道系统贯穿了太古宙—二叠纪的岩石,而含矿岩体侵入早三叠世 Siberian Traps 之下 300~500 m 深的泥盆系,说明含矿岩体侵位深度非常浅。此外,Noril'sk 地区只有 3 个大的含矿岩体,说明成矿岩浆通道数量不多且相对稳定,有利于成矿物质的集中聚集。

我国金川矿床产于华北克拉通西南缘,含矿岩体锆石 U-Pb 年龄为~830 Ma (Li Xianhua et al., 2005),说明相应的玄武岩浆通道系统贯穿了太古宙—新元古代岩石,而金川岩体的围岩是古元古界龙首山群白家咀子组变质岩,其原生锆石核的 U-Pb 年龄为~1900 Ma,矿区新元古界韩母山群最年轻碎屑锆石的 U-Pb 年龄为 842 Ma,稍早于金川岩体的形成时代 (Su Wenhao et al., 2023)。因此,根据金川矿区附近龙首山群上覆中、新元古代变质地层厚度估计金川岩体的侵位深度约为 5000 m,说明成矿深度也较小。类似的对比表明,位于东欧克拉通西北缘的俄罗斯 Pecheanga 和位于北美克拉通中元古代大陆裂谷的 Eagle 矿床的含矿岩体的侵位深度也都比较浅 (表 3)。

这些对比再一次证明岩浆通道成矿“两深—一浅—一通道”的规律具有普遍意义。这个规律说明大型和超大型矿床的含矿岩体大多侵位深度不大,也说明深部熔离的硫化物多数被带到浅部较大的岩浆房聚集才更有利于形成大矿。因此,找矿工作的重点和首选目标应该是侵位深度相对较浅、规模相对较大的镁铁—超镁铁岩体,深部通道相的岩墙和规模较小的岩体也可以成矿,但规模较小,勘查意义相对较小。反之,如果某个成矿区域侵位深度较浅的岩体成矿规模较小,则可能意味着深部通道相的找矿潜力可能较大,但由于硫化物的分散聚集,找到大矿的潜力反而不大。

5 根据“两深—一浅—一通道”规律对峨眉大火成岩省铜镍硫化物找矿方向的分析

峨眉大火成岩省由分布于扬子地块西部的晚二叠世峨眉山玄武岩以及同源镁铁—超镁铁岩体和 A 型花岗岩构成,是~260 Ma 地幔柱活动的产物 (Xu Yigang et al., 2001; Song Xieyan et al., 2001; Zhou Meifu et al., 2002)。地幔柱活动短时间内产

生的巨量的玄武质岩浆可以为铜镍硫化物成矿提供充足的物质条件,世界上许多大型—超大型 Ni-Cu-PGE 矿床的形成都与地幔柱活动有关 (Naldrett, 2005),因此,峨眉大火成岩省具备了很好的成矿条件。峨眉大火成岩省的内带和外带也的确都发现了不少铜镍硫化物矿床和含矿岩体,包括中国杨柳坪超大型 Ni-Cu-PGE 矿床,越南 Ban Phuc 大型 Ni-Cu-PGE 矿床,中国金宝山大型 PGE 矿床,中国白马寨和力马河小型 Ni-Cu 矿床等。根据岩浆通道成矿“两深—一浅—一通道”的规律,分析和判断不同区域和含矿岩体的成矿潜力,有利于科学合理部署未来的找矿工作。

扬子地块西缘由元古宙变质基底和古生代—中生代沉积盖层构成,因此,260 Ma 的峨眉地幔柱玄武岩浆在地壳中形成的岩浆通道系统贯穿了古元古代变质岩和上二叠统之下的古生代沉积地层。表 4 的统计表明,无论在峨眉大火成岩省的内带还是外带,超大型和大型多硫化物型 Ni-Cu-(PGE)矿床和大型少硫化物型 PGE 矿床含矿岩体的围岩都是古生代地层,说明这些含矿岩体的侵位深度普遍相对较浅,并且它们都呈规模较大的岩席状或管道状。而大火成岩省内带,侵位于中元古界会理群变质岩中岩墙状或漏斗状的含矿岩体不仅普遍规模小,而且,除力马河 Ni-Cu 矿床达到小型外,其他岩体仅有不同程度的矿化,呈现岩浆通道相的矿化特点。峨眉大火成岩省内带通道相矿化岩体比较密集地出现说明硫化物熔离的确发生在深部,但只有少量硫化物在岩浆通道相的岩墙和小岩体堆积,这些特征符合“两深—一浅—一通道”规律。更重要的是,这些现象暗示可能有更多的硫化物被带到浅部较大的岩体堆积成矿。

1:20 万区域地质填图(如会理幅)表明,峨眉大火成岩省内带早古生代和晚古生代地层均很发育,大量元古宙变质岩的出露是中新生代构造运动和强烈剥蚀的结果。因此,侵位于中元古代变质岩中的含矿岩体,如力马河、清矿山等,代表了深部岩浆通道相。这意味着侵位深度较浅、含矿性更好的岩体可能仍然隐伏在残存的古生代地层中、没有出露地表,或已经因剥蚀而彻底消失。

基于上述分析,笔者认为峨眉大火成岩省未来铜镍硫化物找矿工作不应该仅考察镁铁—超镁铁岩体是否具有地表矿化等直接的找矿线索,还应该分析周围峨眉山玄武岩是否存在 PGE 亏损等暗示深部硫化物熔离的地球化学标志,更要考虑镁铁—超

表 4 峨眉山大火成岩省铜镍硫化物矿床地质产状特点及含矿岩体侵位深度分析

Table 4 Geological features of the Ni-Cu sulfide deposits and depths of their hosting intrusions in the Emeishan Large Igneous Province

矿床名称/ 位置	金属储量(万 t) @平均品位	含矿岩体形成 年龄(Ma)	矿体地质特征	含矿岩体 围岩时代	岩浆通道 围岩时代	主成矿 部位	参考文献	
中国杨柳坪 /外带	Ni:57@0.5%		镁铁—超镁铁岩席(厚<300 m, 延长达 3 km)底部成矿,从上至下为浸染状、稠密浸染状和块状矿石	石炭纪 大理岩	元古宙— 晚古生 代地层	较浅	Song Xieyan et al., 2003	
中国金宝山 /内带	似层状铂族 元素矿化, Pt+Pd:0.0045@ 1×10 ⁻⁶ ~5×10 ⁻⁶	260±3.5	PGE 矿化层产于镁铁质岩席(厚<150 m,延长达 5 km)内部	泥盆纪 地层			Tao Yan et al., 2007	
中国白马寨 /外带	Ni:5.0@1.03%	258.5±3.5	管道状超镁铁岩体,长约 530 m、 宽约 190 m,稠密浸染状和块状矿 石产于岩体中部	奥陶纪 地层			Wang and Zhou, 2006	
越南 Ban Phuc/外带	Ni:12@6.4%		超镁铁岩盆底部成矿,特征与杨 柳坪矿床相似。含矿岩盆长约 1500 m,宽约 1000 m	泥盆纪 地层			Glotov et al., 2001	
中国力马河 /内带	Ni:3.0@1.0%	263±3	含矿岩体地表呈透镜状,长约 900 m、最宽 180 m,纵向呈漏斗状;块 状及浸染状矿体产于岩体底部	中元古代 晚期会理 群变质岩		较深	Tao Yan et al., 2008; Song Xieyan et al., 2008	
中国杨合武 /内带	弱矿化		含矿岩体为半径约 500 m 的圆 形,纵向漏斗状;矿化产于岩体 边缘					
中国清矿山 /内带	小型矿床		镁铁—超镁铁岩墙,长约 200 m, 厚约 80 m;岩墙内部稠密浸染状 矿化					官建祥等, 2010a, 2010b
中国清水河 /内带	小型矿床		镁铁—超镁铁岩墙,长约 800 m; 岩墙一侧边缘稠密浸染状矿化					
中国黄草坪 /内带	矿化		镁铁—超镁铁岩墙					

镁铁岩体的侵位深度。侵位于古生代地层的、较大的镁铁—超镁铁岩体,即使缺乏地表矿化显示,也应该是未来找矿重要的筛选目标,要结合物探和钻探验证其深部含矿性。同时,还要扩展找矿视野,重视隐伏岩体含矿性的评价。元古宙变质岩中镁铁—超镁铁岩体,即使地表矿化明显,也并不意味着有好的找矿潜力。

6 结论

铜镍硫化物岩浆通道成矿模型的核心内涵是“两深一浅一通道”,即成矿物质来源于地幔、硫化物熔离发生在地壳较深的部位,尽管部分硫化物可能在岩浆通道变宽或变缓的部位堆积,但更多的硫化物会被携带到浅部较大的岩浆房聚集成矿,空间位置相对固定的岩浆通道有利于形成大矿。

总体而言,侵位深度较小、规模较大的岩体的含矿性普遍好于侵位深度较大的通道相岩墙和较小的岩体,因此,岩体的侵位深度是找矿重要的参考指标。

因此,必须在系统分析深部岩浆通道相和浅部含矿岩体地质产状和围岩时代差异的基础上,结合成矿的地球化学标志,以侵位深度较浅、规模较大的镁铁—超镁铁岩体为重点部署区域找矿工作、筛选重点勘查对象,提高找矿效率。

由于造山带镁铁—超镁铁杂岩体的不同岩相可能形成于不同构造演化阶段,而铜镍硫化物成矿主要发生在碰撞后早期阶段。因此,还要结合岩石-矿床地球化学和同位素年代学研究,针对碰撞后早期阶段形成的岩相进行找矿评价。

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等单位的大力支持。特别感谢审稿人的中肯意见和建议,有助于帮助笔者提高本文的质量。

References

- Amelin Y, Li C, Naldrett A J. 1999. Geochronology of the Voisey's Bay intrusion, Labrador, Canada, by precise U-Pb dating of coexisting baddeleyite, zircon, and apatite. *Lithos*, 47: 33~51.

- Barnes S J, Cruden A R, Arndt N T, Saumur B M. 2016. The mineral system approach applied to magmatic Ni-Cu-PGE sulphide deposits. *Ore Geology Reviews*, 76: 296~316.
- Burgess S D, Bowring S A. 2015. High-precision geochronology confirms voluminous magmatism before, during, and after Earth's most severe extinction. *Science Advances*, 1 (7): 14847884.
- Deng Yufeng, Song Xieyan, Chen Liemeng, Zhou Taofa, Pirajno F, Yuan Feng, Xie Wei, Zhang Dayu. 2014. Geochemistry of the Huangshandong Ni-Cu deposit in northwestern China: Implications for the formation of magmatic sulfide mineralization in orogenic belts. *Ore Geology Reviews*, 56: 181~198.
- Deng Yufeng, Song Xieyan, Jie Wei, Yuan Feng, Zhao Zhaoming, Wei Shuai, Zhu Jinjin, Kang Jian, Wang Kaiyuan, Liang Qinglin, Chen Liemeng, Yu Songyue. 2021. Determination of sedimentary ages of strata in the Huangshan-Jingerquan mineralization belt and its geological significance. *Acta Geologica Sinica*, 95(2): 362~376 (in Chinese with English abstract).
- Deng Yufeng, Song Xieyan, Xie Wei, Chen Liemeng, Yu Songyue, Yuan Feng, Hollings P, Wei Shuai. 2022. The role of external sulfur in triggering sulfide immiscibility at depth: Evidence from the Huangshan-Jingerquan Ni-Cu metallogenic belt, NW China. *Economic Geology*, 117: 1867~1879.
- Ding Xin, Li Chusi, Ripley E M. 2010. The Eagle and East Eagle sulfide ore-bearing mafic-ultramafic intrusions in the Midcontinent Rift System, upper Michigan: Geochronology and petrologic evolution. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 11 (3): 1~22.
- Evans-Lamswood D, Butt D P, Jackson R S, Lee D V. 2000. Physical controls associated with the distribution of sulfides in the Voisey's Bay Ni-Cu-Co deposit, Labrador. *Economic Geology*, 95: 749~769.
- Glotov A I, Polyakov G V, Hoa T T, Balykin P A, Akimtsev V A, Krivenko A P, Tolstykh N D, Phuong N T, Thanh H H, Hung T Q, Petrova T E. 2001. The Ban Phuc Ni-Cu-PGE deposit related to the Phanerozoic komatiite-basalt association in the Song Da Rift, northwestern Vietnam. *Canadian Mineralogists*, 39: 573~589.
- Guan Jianxiang, Song Xieyan. 2010a. Platinum-group elements as ore potentially traces of a few small mafic-ultramafic intrusions in Panxi area, Sichuan Province. *Mineral Deposits*, 29(2): 207~217 (in Chinese with English abstract).
- Guan Jianxiang, Song Xieyan, Danyushevsky L V, Chen Liemeng, Nie Xiaoyong. 2010b. Genetic significances of olivine from magmatic sulfide ore-bearing intrusions in central zone of Emeishan Large Igneous Province. *Earth Sciences*, 35(2): 224~234 (in Chinese with English abstract).
- Hanski E J, Luo Z Y, Oduro H, Walker R J. 2011. The Pechenga Ni-Cu sulfide deposits, northwestern Russia: A review with new constraints from the feeder dikes. *Economic Geology*, 17: 145~162.
- Kang Jian, Song Xieyan, Long Tongmao, Liang Qinglin, Barnes S J, Chen Liemeng, Li Dexian, Ai Qixing, Gao Y-L. 2022. Lithological and geochemical constraints on the genesis of newly discovered orebody in the western intrusion at Jinchuan, NW China. *Economic Geology*, 117: 1809~1825.
- Keays R R, Lightfoot P C. 2004. Formation of Ni-Cu-platinum group element sulfide mineralization in the Sudbury impact melt sheet. *Mineralogy and Petrology*, 82: 217~258.
- Li C, Lightfoot P C, Amelin Y, Naldrett A J. 2000. Contrasting petrological and geochemical relationships in the Voisey's Bay and Mushuau intrusions, Labrador, Canada: Implications for ore genesis. *Economic Geology*, 95: 771~801.
- Li Xianhua, Su Long, Chung Sunlong, Li Z X, Liu Y, Song B, Liu D Y. 2005. Formation of the Jinchuan ultramafic intrusion and the world's third largest Ni-Cu sulfide deposit: Associated with the ~ 825 Ma South China mantle plume? *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 6(11): 1~16.
- Lightfoot P C, Keays R R, Evans-Lamswood D, Wheeler R. 2012. S saturation history of Nain plutonic suite mafic intrusions: origin of the Voisey's Bay Ni-Cu-Co sulphide deposit, Labrador, Canada. *Mineralium Deposita*, 47: 23~50.
- Mungall J E, Brenan J M, Godel B, Barnes S J, Gaillard F. 2015. Transport of metals and sulphur in magmas by flotation of sulphide melt on vapour bubbles. *Nature Geosciences*, 8: 216~219.
- Naldrett A J. 2005. *Magmatic Sulfide Deposits-Geology, Geochemistry and Exploration*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1~728.
- Naldrett A J, Lightfoot P C, Fedorenko V A, Doherty W, 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. *Economic Geology*, 87: 975~1004.
- Qin Kezhang, Su Benxun, Sakyi P A, Tang Dongmei, Li Xianhua, Sun He, Xiao Qinghua, Liu Pingping. 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. *American Journal of Science*, 311: 237~260.
- Ripley E M, Li C. 2013. Sulfide saturation in mafic magmas: Is external sulfur required for magmatic Ni-Cu- (PGE) ore genesis. *Economic Geology*, 108: 45~58.
- Robertson J C, Ripley E M, Barnes S J, Li C. 2015. Sulfur liberation from country rocks and incorporation in mafic magmas. *Economic Geology*, 110: 1111~1123.
- San Jinzhu, Qin Kezhang, Tang Dongmei, Su Benxun, Sun He, Xiao Qinghua, Liu Pingping. 2010. Precise zircon U-Pb age dating of two mafic-ultramafic complexes at Tulaergen large Cu-Ni district and its geological implications. *Acta Petrologica Sinica*, 26 (10): 3027~3035 (in Chinese with English abstract).
- Shi Yu, Wang Yuwang, Wang Jingbin, Zhao Lutong, Xie Hongjing, Long Lingli, Zou Tao, Li Dedong, Zhou Guochao. 2018. Physicochemical control of the Early Permian Xiangshan Fe-Ti oxide deposit in Eastern Tianshan (Xinjiang), NW China. *Journal of Earth Sciences*, 29: 520~536.
- Shi Zhen, Chen Hongjun, Qian Zhuangzhi, Xu Gang, Feng Yanqing, Duan Jun, Ren Men. 2019. Genesis and Cu-Ni metallogenetic potential of Hongshigang mafic-ultramafic intrusion in East Tianshan, China. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 41(2): 156~169 (in Chinese with English abstract).
- Song Xieyan. 2019. Current research status and important issues of magmatic sulfide deposits. *Mineral Deposits*, 38(4): 699~710 (in Chinese with English abstract).
- Song Xieyan, Zhou Meifu, Hou Zhengqian, Cao Zhimin, Wang Yunliang, Li Youguo. 2001. Geochemical constrains on the mantle source of the Upper Permian Emeishan continental flood basalts, southwestern China. *International Geology Review*, 43: 213~225.
- Song Xieyan, Zhou Meifu, Cao Zhimin, Sun Min, Wang Yunliang. 2003. The Ni-Cu-(PGE) magmatic sulfide deposits in the Yangliuping area within the Permian Emeishan large igneous province, SW China. *Mineralium Deposita*, 38: 831~843.
- Song Xieyan, Zhou Meifu, Tao Yan, Xiao Jiafei. 2008. Controls on the metal compositions of magmatic sulfide deposits in the Emeishan large igneous province, SW China. *Chemical Geology*, 253: 38~49.
- Song Xieyan, Keays R R, Zhou Meifu, Qi Liang, Ihlenfeld C, Xiao Jiafei. 2009. Siderophile and chalcophile elemental constraints on the origin of the Jinchuan Ni-Cu-(PGE) sulfide deposit, NW China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73: 404~424.
- Song Xieyan, Chen Liemeng, Deng Yufeng, Xie Wei. 2013. Syn-collisional tholeiitic magmatism induced by asthenosphere

- upwelling due to slab detachment at the southern margin of the Central Asian Orogenic Belt. *Journal of Geological Society*, 170: 941~950.
- Song Xieyan, Yi Junnian, Chen Liemeng, She Yuwei, Liu Changzheng, Dang Xingyan, Yang Qi'an, Wu Shukuan. 2016. The giant Xiarihamu Ni-Co sulfide deposit in the East Kunlun Orogenic Belt, Northern Tibet Plateau, China. *Economic Geology*, 111: 29~55.
- Song Xieyan, Hu Ruizhong, Chen Liemeng. 2018. Characteristics and inspirations of the Ni-Cu sulfide deposits in China. *Journal of Nanjing University (Natural Science)*, 54(2): 221~235 (in Chinese with English abstract).
- Song Xieyan, Deng Yufeng, Xie Wei, Yi Junnian, Fu Bin, Chen Liemeng, Yu Songyue, Zheng Wenqin, Liang Qinglin. 2021. Prolonged basaltic magmatism and short-lived magmatic sulfide mineralization in orogenic belt. *Lithos*, 390~391: 106114.
- Song Xieyan, Deng Yufeng, Xie Wei, Zheng Wenqin. 2022. Ore-forming processes in magma plumbing systems and significances for prospecting of Huangshan-Jingerquan Ni-Cu sulfide metallogenetic belt, Xinjiang, NW China. *Mineral Deposits*, 41(6): 1108~1123 (in Chinese with English abstract).
- Song Xieyan, Kang Jian, Long Tongmao, Li Xiaodong, Wang Yongcai, Li Dexian, Ai Qixing, Lu Jianquan. 2023. Bifurcate Magma conduit of Jinchuan super-large Ni-Cu-PGE sulfide deposit in Gansu, China and its implication for deep ore prospecting. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 45(5): 1049~1062.
- Su Wenhao, Wang Qin, Kang Jian, Song Xieyan. 2023. Proterozoic evolution of the Alxa block in western China: A wandering terrane during supercontinent cycles. *Precambrian Research*, 389: 107002.
- Sun Tao, Qian Zhuangzhi, Li Chusi, Xia Mingzhe, Yang Suhong. 2013. Petrogenesis and economic potential of the Erhongwa mafic-ultramafic intrusion in the Central Asian Orogenic Belt, NW China: Constraints from olivine chemistry, U-Pb age and Hf isotopes of zircons, and whole-rock Sr-Nd-Pb isotopes. *Lithos*, 182-183: 185~199.
- Tao Yan, Li Chusi, Hu Ruizhong, Ripley E M, Du Andao, Zhong Hong. 2007. Petrogenesis and economic potential of the Erhongwa mafic-ultramafic intrusion in the Permian Emeishan large igneous province, SW China. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 153: 321~337.
- Tao Yan, Li Chusi, Song Xieyan, Ripley E M. 2008. Mineralogical, petrological, and geochemical studies of the Limahe mafic-ultramafic intrusion and associated Ni-Cu sulfide ores, SW China. *Mineralium Deposita*, 43: 849~872.
- Wang C Y, Zhou M-F. 2006. Geochemical constraints on the origin of the Permian Baimazhai mafic-ultramafic intrusion, SW China. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 152: 309~321.
- Wang Yalei, Zhang Zhaowei, Chen Shoubao, Zhang Jiangwei, Li Kan, You Minxin. 2017. Petrogenesis and metallogenic potential analysis of mafic intrusion in the Hongshigangbei Ni-Vu sulfide mineralization in East Tianshan, Xinjiang. *Acta Geologica Sinica*, 91(4): 776~791 (in Chinese with English abstract).
- Xu Yigang, Chung Sunlin, Jahn B M, Wu Genyao. 2001. Petrologic and geochemical constraints on the petrogenesis of Permian-Triassic Emeishan flood basalts in southwestern China. *Lithos*, 58: 145~168.
- Zhai Mingguo, Hu Bo. 2020. Thinking to state security, international competition and national strategy of mineral resources. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 43:1~11 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Yun, Xue Chunji, Symons D T A, Zhao Xiaobo, Zhang Guozhen, Yang Yongqiang, Zu Bo. 2018. Temporal variations in the mantle source beneath the Eastern Tianshan nickel belt and implications for Ni-Cu mineralization potential. *Lithos*, 314-315: 597~616.
- Zhou Meifu, Malpas J, Song Xieyan, Robinson P T, Sun Min, Kennedy A K, Lesher C M, Keays R R. 2002. A temporal link between the Emeishan large igneous province (SW China) and the end-Guadalupian mass extinction. *Earth and Planetary Science Letters*, 196: 113~122.
- Zhou Meifu, Lesher M C, Yang Zhengxi, Li Jianwei, Sun Min. 2004. Geochemistry and petrogenesis of 270 Ma Ni-Cu-(PGE) sulfide-bearing mafic intrusions in the Huangshan district, eastern Xinjiang, Northwest China: Implications for the tectonic evolution of the Central Asian orogenic belt. *Chemical Geology*, 209: 233~257.

参 考 文 献

- 邓宇峰, 宋谢炎, 颜炜, 袁峰, 赵照明, 韦帅, 祝近近, 康健, 王开元, 梁庆林, 陈列锰, 于宋月. 2021. 黄山-镜儿泉铜镍成矿带地层时代的厘定及其地质意义探讨. *地质学报*, 95(2): 362~377.
- 官建祥, 宋谢炎. 2010a. 四川攀西地区几个小型镁铁-超镁铁岩体含矿性的铂族元素示踪. *矿床地质*, 29(2): 207~217.
- 官建祥, 宋谢炎, Danyushevsky L V, 陈列锰, 聂晓勇. 2010b. 峨眉火成岩省内带岩浆硫化物含矿岩体橄榄石的成因意义. *地球科学*, 35(2): 224~234.
- 三金柱, 秦克章, 汤中立, 唐冬梅, 苏本勋, 孙赫, 肖庆华, 刘平平. 2010. 东天山图拉尔根大型铜镍矿区两个镁铁-超镁铁岩体的锆石 U-Pb 定年及其地质意义. *岩石学报*, 26: 3027~3035.
- 师震, 陈宏骏, 钱壮志, 徐刚, 冯延清, 段俊, 任萌. 2019. 东天山红石岗镁铁-超镁铁质岩体成因及铜镍成矿潜力. *地球科学与环境学报*, 41(2): 156~169.
- 宋谢炎. 2019. 岩浆硫化物矿床研究现状及重要科学问题. *矿床地质*, 38(4): 699~710.
- 宋谢炎, 胡瑞忠, 陈列锰. 2018. 中国岩浆铜镍硫化物矿床地质特点及其启示. *南京大学学报(自然科学版)*, 54(2): 221~235.
- 宋谢炎, 邓宇峰, 颜炜, 郑文勤. 2022. 新疆黄山-镜儿泉铜镍硫化物成矿带岩浆通道成矿特征及其找矿意义. *矿床地质*, 41(6): 1108~1123.
- 宋谢炎, 康健, 隆廷茂, 李晓栋, 王永才, 李德贤, 艾启兴, 卢建全. 2023. 甘肃金川超大型 Ni-Cu-PGE 硫化物矿床岩浆通道分枝构造及其深部找矿意义. *地球科学与环境学报*, 45(5): 1049~1062.
- 王亚磊, 张照伟, 陈寿波, 张江伟, 李侃, 尤敏鑫. 2017. 新疆东天山红石岗北铜镍矿化镁铁质岩体岩石成因及成矿潜力分析. *地质学报*, 91(4): 776~791.
- 翟明国, 胡波. 2020. 矿产资源国家安全、国际争夺与国家战略之思考. *地球科学与环境学报*, 43: 1~11.

The core connotation of magma conduit model “two deep, one shallow and single channel” and its significances on exploration

SONG Xieyan*

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

** Corresponding author: song.xieyan@vip.gyig.ac.cn*

Abstract

The magma conduit model has profoundly impacted the understanding of magmatic Ni-Cu sulfide deposit formation, establishing a new paradigm for research and exploration in this field. This model elucidates the decoupling of sulfide liquid segregation from its accumulation, thereby establishing a direct genetic link between the formation of such deposits and the depletion of platinum-group elements in related basalts. Furthermore, it provides a compelling explanation for the consistently low sulfide content observed in the wall rocks of the mineralized intrusions. This paper summarizes the core connotation of the magma conduit model as “two deep, one shallow, and a single channel.” The “two deep” principle refers to the mantle origin of metallogenic materials and the depth-dependent segregation of sulfide liquids during magma processes. The “one shallow” refers to the accumulation of sulfide liquids at relatively shallow depths. Finally, the “single channel” means that a positionally stable magma conduit is more beneficial to the formation of large ore deposit. An analysis of classic deposits and metallogenic belts suggests that relatively large intrusions emplaced in shallower crustal depths exhibit a greater mineralization potential compared to channel facies situated at deeper levels. This observation underscores the fact that surface mineralization is not a reliable, or even indicative, factor for prospecting. To optimize the efficiency of prospecting, particularly for concealed ore deposits, it is essential to meticulously assess the burial and exposure status of the magma conduit system across various locations within a metallogenic belt. Determining the characteristics, distribution, and original depths of the magma channel within both deep and shallow intrusions is crucial. This knowledge will enable the targeted selection of key areas and the application of appropriate exploration techniques, ultimately guiding prospecting drilling programs towards the most promising intrusions.

Key words: magmatic Ni-Cu sulfide deposit; magma conduit model; field relationship of mineralized intrusion; emplaced depth; age of wall-rock