

# 小岩体成大矿的核心——岩浆通道系统成矿

宋 谢 炎

(中国科学院 地球化学研究所 矿床地球化学重点实验室, 贵州 贵阳 550002)

“小岩体成大矿”是汤中立院士针对岩浆硫化物矿床提出的重要概念(汤中立,1990),并在许多矿床的找矿勘探过程中得到印证和应用,笔者认为这个概念对于理解其他岩浆矿床的成因也具有极其重要的意义。那么,岩浆通道系统上含矿岩体的主要特征是什么?为什么岩浆通道系统上的小岩体能够形成超大型矿床?主要的成矿标志有哪些?这些问题是运用“小岩体成大矿”概念进行找矿实践的关键。

## 1 产于岩浆通道系统上含矿岩体的主要特征

### 1.1 极高的矿化率

产于岩浆通道系统中的镍、铜、钼、族矿床的含矿岩体,其硫化物矿体所占的比例非常高。例如,甘肃金川超镁铁岩体出露面积仅 1.34 km<sup>2</sup>,而 3 个巨大的镍、铜硫化物矿体就占岩体体积的约 47% (汤中立等,1995);新疆喀拉通克 1 号岩体面积仅 0.1 km<sup>2</sup>,而镍、钼硫化物矿床达到大型规模,矿体占岩体体积的约 60% (王润民和赵昌龙,1991);俄罗斯 Noril'sk 地区 3 个含矿岩体为厚度 <300 m 的岩席,但却蕴含着世界最大的镍、钼、铂、族元素硫化物矿床 (Zen'ko and Czamanske,1994)。四川攀枝花岩体厚度仅为约 2 000 m,而仅块状磁铁矿层厚度就累计达到 100 m。

### 1.2 含矿岩体的岩相学及造岩矿物成分特征都显示出岩浆反复补充的特征

尽管母岩浆为镁铁质岩浆,但岩体超镁铁质岩

相却占据很大比例,甚至是主要岩相。例如,根据橄榄石 Fo 牌号计算,金川岩体的母岩浆为 MgO 含量约为 12% 的高 Mg 玄武岩岩浆,但其主要岩相为二辉橄榄岩 (陈列锰等,2009a);甘肃西部的黑山岩体主要由斜长二辉橄榄岩和方辉橄榄岩组成,但其母岩浆 MgO 含量仅为 11.3% (Xie et al.,2012)。这种特征说明橄榄石、辉石等矿物从不断补充的玄武质岩浆中分离结晶并堆积是主要的成岩机制。这种机制的另一个标志就是含矿岩体主要造岩矿物成分从下至上呈现多个旋回式的变化。例如:黑山岩体橄榄石的 Fo 牌号显示出 3 个大的旋回 (Xie et al.,2012);金川岩体橄榄石的 Fo 牌号集中分布在 82~86,变化很小 (陈列锰等,2009b);四川白马钒钛磁铁矿含矿岩体的橄榄石、斜长石及磁铁矿的成分也都显示出若干个旋回式的变化 (Zhang et al.,2012)。

### 1.3 含矿岩体产状受围岩地质特征影响,呈岩席状、透镜状或漏斗状

含矿岩体的产状往往取决于围岩的地质特性。侵入于未褶皱和未变质沉积岩中的岩体往往呈舒展的、延伸较大的岩席,而侵入于褶皱地层或变质岩中的岩体则往往较小、并呈现复杂的形态。俄罗斯 Noril'sk 地区的含矿岩体侵入未变质的泥盆系一早二叠系沉积地层,3 个含矿岩席中,Kharaelakh 岩体呈三角形的岩席,而 Talnakh 和 Noril'sk 岩体则呈宽度 <2 km,长度达 15~20 km 的“隧道状”岩席 (Naldrett et al.,1995;Arndt et al.,2005)。峨眉火成岩省北部杨柳坪地区的几个含矿岩

体顺层侵位于泥盆系大理岩中,形成厚度 $<300$  m,延长达 $1\sim 3$  km的岩席(Song et al., 2003, 2008)。

侵位于变质岩中的含矿岩体的典型实例包括我国的金川岩体和加拿大的Voisey's Bay岩体。金川岩体由东、西两个独立的岩体的厚度均小于 $500$  m,长度均小于 $4$  km(Tang et al., 2009; Song et al., 2012)。加拿大东部的Voisey's Bay岩体侵入于早元古代变质岩中,数个铜、镍、钴硫化物矿体分布在东、西两个橄长岩岩体之间狭窄的岩浆通道中(Li et al., 2000)。而峨眉大火成岩省侵位于元古宙变质岩中的力马河岩体呈漏斗状,岩相分布也不够规则(Song et al., 2008; Tao et al., 2008)。

#### 1.4 矿体产于岩体底部、岩体变宽的部位、岩浆通道的入口处或岩体中部

在舒展的岩席状岩浆通道中,硫化物可以形成巨大而连续的层状矿体分布于岩席底部。例如,俄罗斯Noril'sk地区的含矿岩体和我国四川杨柳坪地区的含矿岩体。在比较复杂的岩浆通道系统中,硫化物会在岩浆通道变宽或变缓的部位,以及上部岩浆房入口处沉积形成矿体。例如,Voisey's Bay矿床(Li et al., 2000; Naldrett et al., 2007)。如果硫化物-硅酸盐晶粥在构造挤压下发生再次迁移,则可能形成更为复杂的硫化物矿体分布,如金川1号矿体分布在II号岩体中心(Song et al., 2009),力马河硫化物矿体分布在岩体的边部(Tao et al., 2008)。

## 2 为什么岩浆通道系统上的小岩体能够形成超大型矿床

### 2.1 含矿岩体是开放系统—大量岩浆参与成矿

俄罗斯Noril'sk地区含矿岩体的体积仅为约 $3.5$  km<sup>3</sup>,而其金属Ni储量达 $2\ 300$  t,意味着约 $1\ 000$  km<sup>3</sup>的玄武岩浆参与了成矿(Naldrett, 2004)。金川岩体的体积仅约 $1$  km<sup>3</sup>,其约 $545$  t金属Ni储量需要约 $300$  km<sup>3</sup>的玄武岩浆参与成矿。基于质量平衡的计算表明成矿的岩浆房一定是一个开放体系,当新的岩浆注入时,硫化物乳珠沉降下来,其余岩浆随着新岩浆的不断补充而不断被挤

出,形成不含矿岩体或喷出岩。这种机制使得岩浆通道系统上的一些岩浆房成为理想的成矿空间。质量平衡计算表明峨眉大火成岩省的超大型钒钛磁铁矿矿床含矿层状岩体本身无法提供巨厚钒钛磁铁矿层所需要的成矿物质。例如,攀枝花岩体仅 $100$  m厚的块状矿床就需要超过 $3\ 000$  m厚的富Fe-Ti的玄武质岩浆。说明这些含矿层状岩体也是岩浆通道上的岩体。

### 2.2 岩浆通道中岩浆演化有利于成矿

迄今为止,世界上发现的铜镍硫化物矿床的形成几乎无一例外都与地壳混染有关,地壳硫或地壳硅铝物质的加入是硫化物熔离的先决条件。然而,对于起源于交代地幔的原始岩浆,由于其高氧逸度导致高的硫溶解度和高的硫含量,其硫化物熔离可能与岩浆在地壳中的还原有关,而不一定需要地壳S的加入。对于钒钛磁铁矿矿床而言,岩浆通道系统中深部岩浆房的分离结晶是形成富Fe-Ti岩浆的前提,这种富Fe-Ti的玄武质岩浆进入含矿岩体中磁铁矿较早结晶并堆积是基本的成矿机制(Zhang et al., 2012)。

## 3 找矿方向和找矿标志

找矿工作要解决的问题包括:①区域找矿潜力大小的评价。②可能的矿床类型和潜在的矿床规模的估计。③有效找矿标志的确定。

### 3.1 区域找矿潜力大小的评价

因为大型-超大型矿床不仅需要岩浆的连续补给,还需要硫化物能够在同一岩体内沉降富集,所以,与镁铁质岩浆通道系统有关的铜镍硫化物矿床只可能形成于岩浆活动较强烈的地质部位,沿深大断裂分布的岩体应该是勘察的首选;在同一区域每个岩体都含矿可能并不利于形成大型-超大型矿床。区域地质研究不仅要正确认识与成矿有关的幔源岩浆活动与区域地质事件的对应关系、地质背景、含矿岩体分布与深大断裂以及岩浆活动中心关系等基础地质问题;也要评价后期构造活动的作用,正确恢复含矿岩体及岩浆通道系统的地质产状。

### 3.2 矿床类型和潜在的矿床规模的估计

对于剥蚀程度不高的岩体,上部岩石全岩PGE的地球化学和橄榄石的矿物学特征可以作为

判断岩体底部硫化物矿化类型的标志。这些岩石强烈的PGE亏损以及橄榄石显著的Ni的亏损意味着岩体底部可能存在岩浆硫化物矿化。岩体上部岩石出现PGE亏损,但其中橄榄石Ni的亏损不明显则意味着深部可能存在PGE矿化(官建祥等,2010)。小的含矿岩体边缘出现较宽的热接触变质可能标志着有大量岩浆在较长的时间穿过该岩体,这时,如果周围同源岩体及喷出岩出现了较广泛的PGE亏损,则暗示可能有大量岩浆参与了含矿岩体的成矿。

### 3.3 有效找矿标志的确定

物化探是寻找岩浆硫化物矿床的重要手段,最有效的是磁法。但需要注意的是镁铁—超镁铁侵入体中的磁铁矿往往都可以导致较强的磁异常而成为干扰。笔者强烈建议在磁异常的解译过程中要密切结合上述地质标志的研究。由于岩浆矿床不会形成广泛的元素迁移,不会形成宽广的原生晕,因此,除非岩浆硫化物矿体出露地表,很难形成显著地化探异常。

这类矿床找矿的基本工作程序应该是:①区域性镁铁—超镁铁岩浆作用性质和成矿作用潜力进行评价→②通过对相关岩体和喷出岩成矿元素丰度分析,对成矿作用类型做出合理判断→③部署针对性的物探工作→④对科研及物探工作圈定的异常进行钻探验证及进一步的勘探。

## 参考文献:

- 陈列猛,宋谢炎,Danyushevsky L. V.,等.金川I号岩体橄榄石Ni-MgO相互关系及其地质意义[J].岩石学报,2009b,25(12):3369-3378.
- 陈列猛,宋谢炎,Danyushevsky L. V.,等.金川岩体母岩浆成分及其分离结晶过程的熔浆热力学模拟[J].地质学报,2009a,83(9):1302-1315.
- 官建祥,宋谢炎,Danyushevsky L. V.,等.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[J].地球科学,2010,35(2):224-234.
- 官建祥,宋谢炎.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[J].矿床地质,2010,29(2):207-217.
- 汤中立,李文渊.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,1995.
- 汤中立.金川硫化铜镍矿床成矿模式[J].现代地质,1990,4(004):55-64.
- 王润民,赵昌龙.新疆喀拉通克一号铜镍硫化物矿床.中华人民共和国地质矿产部地质专报[M].北京:地质出版社,1991.
- Arndt N T, Lesher C M, Czamanske G K. Mantle-derived magmas and magmatic Ni-Cu- (PGE) deposits. Economic Geology [M]. 100th Anniversary Volume: 2005.
- Li C S, Lightfoot P C, Amelin Y, et al. Contrasting petrological and geochemical relationships in the Voisey's Bay and Mushuau intrusions, Labrador, Canada: Implications for ore genesis [J]. Economic Geology, 2000, 95 (4): 771-799.
- Naldrett A J, Fedorenko V A, Lightfoot P C, et al. Ni-Cu-PGE deposits of noril'sk region, siberia-their formation in conduits for flood-basalt volcanism [J]. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy Section B-Applied Earth Science, 1995, 104 B: 18-36.
- Naldrett A J. Key factors in the genesis of Noril'sk, Sudbury, Jinchuan, Voisey's bay and other world-class Ni-Cu-PGE deposits: implications for exploration [J]. Australian Journal of Earth Sciences, 1997, 44 (3): 283-315.
- Naldrett A J. Magmatic sulfide deposits: geology, geochemistry and exploration [M]. New York: Springer, 2004.
- Song X Y, Li X R. 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, 2009, 44 (3): 303-327.
- Song Xie yan, Zhou M F., Cao Z M., et al. The Ni-Cu- (PGE) Magmatic Sulfide Deposits in the Yangliuping Area Within the Permian Emeishan Large Igneous

- Province, SW China [J]. *Mineralium Deposita*, 2003, 38: 831-843.
- Song, X Y., Danyushevsky, L. V., Keays, R. R., et al. Dynamic magma conduit system related to the Jinchuan Ni-Cu sulfide deposit, NW China, new constraints from petrology, geochemistry, and fault structures [J]. *Mineralium Deposita*, 2012, 47: 277-297.
- Song, Xie yan, Keays, R. R., Zhou, M F., et al. Siderophile and chalcophile elemental constraints on the origin of the Jinchuan Ni-Cu- (PGE) sulfide deposit, NW China [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2009, 73: 404-424.
- Song, Xie yan, Zhou, M F., Tao, Y., et al. Controls on the metal compositions of magmatic sulfide deposits in the Emeishan large igneous province, SW China [J]. *Chemical Geology*, 2008, 253: 38-49.
- Tang Z L., Song X Y., Su S G. Ni-Cu deposits related to high-Mg basaltic magma, Jinchuan, Western China. In: Li C, Edward MR (eds). *New developments in magmatic Ni-Cu and PGE deposits* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009: 121-140.
- Tao Y., Li C., Song X Y., Ripley E. M. Mineralogical, petrological, and geochemical studies of the Limah mafic-ultramafic intrusion and associated Ni-Cu sulfide ores, SW China [J]. *Mineralium Deposita*, 2008, 43: 849-872.
- Xie W., Song X Y., Deng Y F., et al. Geochemistry and petrogenetic implications of a Late Devonian mafic-ultramafic intrusion at the southern margin of the Central Asian Orogenic Belt [J]. *Lithos*, 2012, 144-145: 209-230.
- Zen'ko T, Czamanske G. Tectonic controls on ore-bearing intrusions of the Talnakh ore junction: position, morphology and ore distribution [J]. *International Geology Review*, 1994, 36, 1033-1057.
- Zhang X Q., Song X Y., Chen L M., et al. Fractional crystallization and the formation of thick Fe-Ti oxide stratiform in the Baima layered intrusion, SW China [J]. *Ore Geology Review*, 2012, 49: 96-108.