

文章编号: 1009-6248(2012)04-0117-11

“小岩体成大矿”的核心——岩浆通道系统成矿原理、特征及找矿标志

宋谢炎, 陈列锰

(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 550002)

摘要:“小岩体成大矿”是根据我国岩浆硫化物矿床找矿勘探实践提出的独创性的理论,其核心就是现今被广泛研究的“岩浆通道系统成矿”。结合典型的矿床实例,系统分析总结了产于岩浆通道系统上小型含矿岩体的主要特征、小岩体形成超大型矿床的关键因素以及岩浆通道系统型矿床的找矿方向和标志,以期促进对该类型矿床的进一步研究。

关键词:小岩体成大矿; 岩浆通道系统; 岩浆矿床; 岩浆补充

中图分类号: P611.11 **文献标识码:** A

“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, 1999, 1993, 1995, 2000, 2006a, 2006b),并在许多矿床的找矿勘探过程中得到印证和应用。我国金川超大型 Ni-Cu-(PGE)矿床(汤中立, 1991; 汤中立等, 1995; 宋谢炎等, 2005; Song et al. 2009, 2012)、新疆喀拉通克(Song et al., 2009)、四川杨柳坪(Song et al., 2003, 2004, 2006a)等岩浆 Ni-Cu 硫化物矿床,以及加拿大的 Voisey's Bay 超大型 Ni-Cu-Co 矿床(Li et al., 1999; Naldrett et al., 2000)、俄罗斯的 Noril'sk-Talnakh 超大型 Ni-Cu-PGE 矿床(Naldrett et al., 1995; Arndt et al., 1997; Naldrett et al., 1999)都产于镁铁质-超镁铁质小岩体中。从“大型层状岩体有利成矿”到“小岩体有利成矿”是整个 20 世纪地质勘探寻找岩浆 Ni-Cu 硫化物矿床实践所得出的最重要结论,地质学家逐渐认识到大型层状岩体不利于大规模的硫化物堆积,而岩浆通道系统中的小型基性-

超基性岩体却可能为硫化物熔离和大规模堆积提供各种必要条件(Maier et al., 2001)。笔者认为“小岩体成大矿”这个概念不仅有利于理解岩浆硫化物矿床的成因,对于其他岩浆矿床的研究和找矿也具有极其重要的意义。笔者试图通过分析典型矿床来阐明以下问题:岩浆通道系统上小型含矿岩体的主要特征是什么?岩浆通道系统上的小岩体形成超大型矿床的关键控制因素是什么?主要的成矿规律和找矿标志有哪些?这些问题的解决是运用“小岩体成大矿”概念进行找矿实践的关键。

1 小岩体成大矿的典型——甘肃金川超大型岩浆 Ni-Cu-(PGE)矿床

甘肃金川超大型岩浆 Ni-Cu-(PGE)矿床位于华北地台东部阿拉善地块西南缘的龙首山推覆体北缘(甘肃省地质矿产局第六地质队, 1984; 汤中立等, 1995),是仅次于俄罗斯 Noril'sk 矿床和加拿大

收稿日期: 2012-11-26

基金项目: 国家自然科学基金(40973038, 41172090), 矿床地球化学国家重点实验室“十二五”项目群(SKLOGD-ZY125-06)

作者简介: 宋谢炎(1962-), 男, 研究员, 从事岩石及矿床地球化学研究。E-mail: songxieyan@vip.gyig.ac.cn

Sudbury 矿床的世界第三大在采镍矿床 (Naldrett, 2004)。金川矿床的 Ni 平均品位为 1.2%，金属储量为 545×10^4 t，占全国 Ni 总储量的 62.2%；Cu 平均品位为 0.73%，金属储量为 350×10^4 t，占全国总储量的 6.4%；特别是铂储量居全国首位，铂族金属储量约占全国总储量的 53%，是我国重要的铂族金属产出地 (汤中立等, 1995)。

金川岩体总长约 6 500 m，宽 20~527 m，地表出露面积仅 1.34 km²，而矿化率高达 47%，是被汤中立院士誉为“小岩体成大矿”的典型代表。金川岩体侵入于古元古界白家咀子组的片麻岩、混合岩、大理岩中。以一系列北东东向平移断层 (F₈、F₂₃ 和 F₁₆₋₁) 为界，由西至东分为 III、I、II、IV 四个岩体。最大的 1 号和 2 号矿体分别赋存在 II 号岩体的西部和东部，第三大的 24 号矿体产于 I 号岩体中下部 (图 1)。岩体以二辉橄榄岩、含辉橄榄岩为主，含少量辉石岩、斜长二辉橄榄岩 (汤中立等, 1995)。

汤中立等 (1990, 1991, 1992, 1995, 1996) 经过长期的勘探和研究提出“幔源岩浆深部分异-熔离，依次贯入”成岩成矿模式：地幔深部富 S 的铁质超基性岩浆上侵到地壳深部岩浆房，发生橄榄石结晶和硫化物熔离，由于重力作用在岩浆房中形成了自上而下岩浆、含矿岩浆、富矿岩浆和矿浆的分层。在构造应力脉动式作用驱动下，第一期最上层的贫硫化物岩浆侵入，构成了金川岩体的二辉橄榄岩和橄榄二辉岩；第二期含矿岩浆主要形成少硫化物二辉橄榄岩，构成金川岩体的主体 (占岩体的 67.7%)，底部有稀疏浸染状硫化物；第三期为富矿岩浆侵入，形成富硫化物橄榄岩，构成了 1 号、2 号和 24 号主矿体；第四期为硫化物矿浆沿 2 号矿体下部构造裂隙的贯入形成块状矿石。这种成岩成矿模式得后续研究者的广泛支持，并且进一步研究发现金川岩体的西段和东段岩体及其矿体的地质、地球化学特征差异显著，二者是两个独立的岩体，它们的成岩成矿过程不同 (Tang et al., 2009; 陈列锰, 2009; Song et al., 2012)。地壳物质同化混染、以及硅酸盐矿物分离结晶作用是导致 S 饱和和发生硫化物熔离和成矿的最主要因素 (Song et al., 2006b; Lehmann et al., 2007; 陈列锰等, 2008)，硫化物深部熔离是导致金川硫化物矿石 PGE 亏损的最重要的机制 (Su et al., 2008; Song

et al., 2009; 陈列锰, 2009)。

2 产于岩浆通道系统上小型含矿岩体的主要特征

2.1 岩体具有极高的矿化率和较高的矿石品位

与大型层状岩体硫化物原地熔离的矿床相比，产于岩浆通道系统中的 Ni-Cu- (PGE) 矿床的含矿岩体体积小得多，其硫化物矿体所占的比例非常高，矿石品位也高得多，这是因为熔离出的硫化物与后续不断补充的大量的岩浆发生反应。如：甘肃金川超镁铁岩体出露面积仅 1.34 km²，而 3 个巨大的 Ni-Cu 硫化物矿体就占岩体体积的约 47% (汤中立等, 1995)，并且 Ni 平均品位为 1.2%，Cu 平均品位为 0.73%；新疆喀拉通克 1 号岩体面积仅 0.1 km²，而 Ni-Cu 硫化物矿床达到大型规模，矿体占岩体体积的 60% (王润民等, 1991)；Ni 平均品位为 0.8%，Cu 平均品位为 1.3%；俄罗斯 Noril' sk 地区 3 个含矿岩体为厚度小于 300 m 的岩席，但却蕴含着世界最大的 Ni-Cu-PGE 硫化物矿床，Ni 平均品位为 1.77%，Cu 平均品位为 3.57% (Naldrett et al., 1995; Arndt et al., 1997; Naldrett et al., 1999)。除岩浆硫化物矿床外，近年来发现岩浆氧化物矿床也表现出“小岩体成大矿”的这种特征，如峨眉大火成岩省的钒钛磁铁矿含矿岩体，钒钛磁铁矿层厚度占岩体厚度的比例很大，质量平衡计算表明岩体本身无法提供如此多的成矿物质 (宋谢炎等, 2005a; Zhang et al., 2012)。

2.2 含矿岩体沿深断裂呈串珠状分布

俄罗斯 Noril' sk 矿集区由 Kharaelakh、Talnakh 和 Noril' sk 3 个含矿岩体为厚度小于 300 m 的岩席组成，蕴含着世界最大的 Ni-Cu-PGE 硫化物矿床 (Naldrett et al., 1995; Arndt et al., 2005)。加拿大的 Voisey' s Bay 超大型 Ni-Cu-Co 矿床从东部到西部由 Eastern Deeps、Ovoid、Discovery Hill 和 Reid Brook 4 个小型岩墙构成 (Li et al., 2000; Lightfoot et al., 2012)，这些岩体由狭窄的岩浆通道相联。

近年来，对金川岩体细致的岩相学、矿物学和地球化学研究发现，东部的 II 号岩体西段具有独特的对称的岩相分布，硫化物纯橄岩分布在中心构

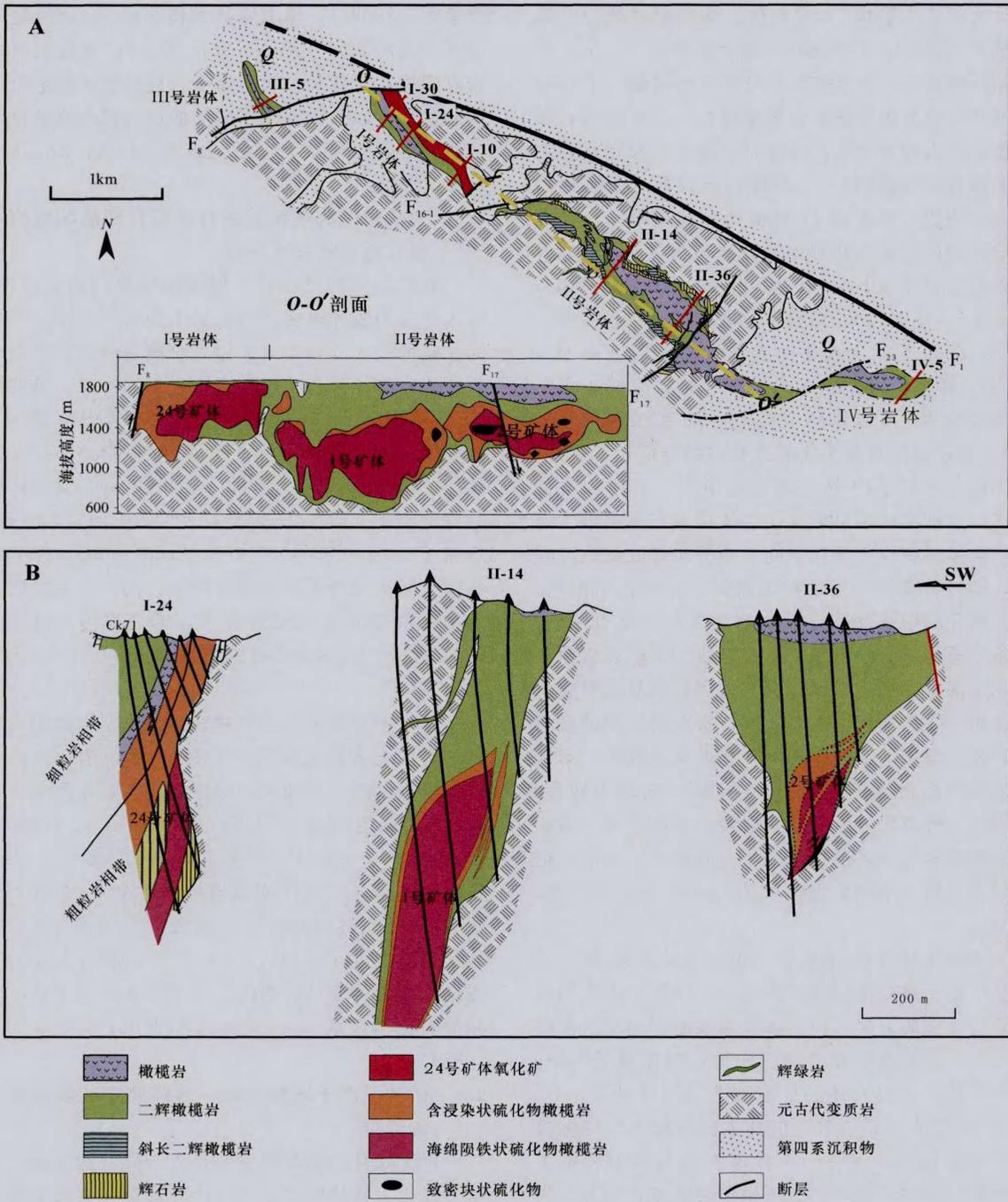


图 1 甘肃金川超镁铁岩体及 Ni-Cu-(PGE) 硫化物矿床地质剖面简图及主要剖面图
 (据甘肃省地质矿产局第六地质队, 1984 和 Song et al., 2009 修改)

Fig.1 Simplified geological map and main cross sections of the Jinchuan ultramagmatic intrusion and hosted Ni-Cu-(PGE) sulfide deposit

成巨大的“火焰状”1号矿体，向两侧过渡为二辉橄榄岩（图1）。而西部的1号岩体却由上、下2个岩相带构成，2个岩相带之间呈突变接触。上部岩相带从下至上由中细粒含辉橄榄岩、二辉橄榄岩和橄榄二辉岩构成，下部岩相带则由中粗粒硫化物含辉橄榄岩、（硫化物）二辉橄榄岩及部分含硫化物透辉岩构成，巨大的24号矿体分布其中。这种岩相学差异以及矿区断裂构造特征表明，金川存在2个独立的岩体（Tang et al., 2009; 陈列锰, 2009; Song et al., 2012）；新疆喀拉通克矿床也是由Y1、Y2和Y3三个相互连通的岩体组成（Song et al., 2009）；峨眉大火成岩省内带多个钒钛磁铁矿含矿岩体沿南北向断裂分布（宋谢炎等, 2005）。

2.3 含矿岩体具有多次岩浆补充的特征

由于含矿基性-超基性岩体很小，矿体相对大而富，这种矿体不可能从小岩体自身产生出来。因此，岩体在就位于现存空间之前的深部或就位过程中，经过特殊的演化过程在深部达到硫化物饱和，发生硫化物熔离和部分分离结晶。由于重力作用，岩浆分异为不含矿岩浆、含矿岩浆、富矿岩浆和矿浆几个部分。通常，经过深部熔离、结晶分异后的不含矿岩浆的体积比含矿岩浆、富矿岩浆和矿浆的体积要大得多，在岩浆不断补充上侵过程中，不含矿岩浆大部分都侵位到不同的空间或喷溢出地表，形成岩体群或岩流。剩余的岩浆、含矿岩浆、富矿岩浆和矿浆可以多次贯入同一空间成岩、成矿，也可以分别贯入不同的空间成岩、成矿（汤中立等, 2007）。

这种深部熔离-多次贯入的过程在岩体的岩相学及矿物学成分得以很好的表现。尽管小岩体的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含量约为12.6%的高MgO玄武质岩浆，但其主要岩相为二辉橄榄岩（陈列锰等, 2009b）；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：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, 2009a）；黑山岩体橄榄石的Fo牌号显示出3个大的旋回（Xie et al., 2012）；峨眉大火成岩省攀枝花岩体和白马岩体全岩成分和矿物成分的旋回式变化以及钒钛磁铁矿层的形成都与富铁钛的岩浆的反复补充有关（张晓琪等, 2011; Zhang et al., 2012）。

2.4 含矿岩体的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下二叠统沉积地层，3个含矿岩席中，Kharaelakh岩体呈三角形的岩席，而Talnakh和Noril'sk岩体则呈宽度小于2 km、长度达15~20 km的“隧道状”岩席（Naldrett et al., 1995; Arndt et al., 2005）。我国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，形成厚度小于300 m、延长达1~3 km的岩席（Song et al., 2003, 2004）。

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、西二个独立的岩体组成，其厚度均小于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Cu-Ni-Co硫化物矿体分布在东、西二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代变质岩中的力马河岩体呈漏斗状，岩相分布也不规则（Song et al., 2008; Tao et al., 2008）。

2.5 矿体多产于岩体底部、岩体变宽或坡度变缓的部位

由于硫化物熔浆密度明显大于硅酸盐岩浆，在重力作用下硫化物乳珠向下沉降聚集在岩浆房的下部。当硫化物熔离明显早于硅酸盐矿物结晶时，往往在岩体底部形成层状致密块状硫化物或海绵陨铁状硫化物；而当硫化物熔离与硅酸盐矿物结晶同时发生时，镁铁质矿物与硫化物乳滴一起向下沉降形成浸染状硫化物层。

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，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，如 Voisey's Bay 矿床 (Li et al., 2000; Naldrett et al., 2007; Lightfoot et al., 2012)。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 (宋谢炎等, 2005; Song et al., 2009)，力马河硫化物矿体分布在岩体的边部 (Song et al., 2008; Tao et al., 2008)。这种分布特征表明，含矿岩浆的定位受流体动力学状态突然变化的控制。

3 岩浆通道系统上的小岩体形成超大型矿床的关键控制因素

3.1 S 不饱和的幔源岩浆是形成 Ni-Cu- (PGE) 硫化物矿床的前提条件

幔源岩浆的 Ni、Cu 和 PGE 组成主要取决于以下几个因素：①地幔源区的成分特点。② Ni、Cu 和 PGE 的赋存状态。③部分熔融程度。上地幔由 98% 的硅酸盐矿物、2% 尖晶石、0.07% 硫化物和极少量的金属合金 (<0.05%) 组成 (Barnes et al., 1999)。地幔中的 Ni 主要赋存于主要的造岩矿物橄榄石中。这意味着幔源岩浆中 Ni 的含量受橄榄石熔融量的控制，即受部分熔融程度的控制；而 PGE 和 Cu 的含量则取决于硫化物是否能够全部被熔融出来。高程度部分熔融形成的幔源原始岩浆可达到 S 不饱和，并为成矿奠定了物质基础。部分熔融程度最高的科马提岩和苦橄岩具有最高的 Ni 和 PGE 含量，而部分熔融程度较低的大洋中脊玄武岩具有非常低的 PGE 含量 (宋谢炎等, 2009)。值得指出的是，由于地幔是不均一的，受流体交代后形成的辉石岩地幔尽管其部分熔融程度不高，但由于没有 Ni 的赋存相容硅酸盐矿物 (橄榄石)，也可以形成 Ni 含量很高的镁铁质-超镁铁质岩浆 (Sobolev et al. 2007)。

3.2 独特的岩浆演化促使岩浆中 S 达到饱和导致硫化物熔离

镁铁-超镁铁岩浆的 S 溶解度与岩浆成分、温

度、压力、氧逸度和硫逸度有关。Li et al. (2005) 根据前人的实验数据，在氧逸度为 QFM 缓冲剂条件下，1 200~1 600 °C 内拟合出玄武质岩浆 S 溶解度与 FeO、SiO₂、Na₂O、K₂O、MgO 的含量、温度、压力关系的经验公式：

$$\ln X_S = 1.229 - 0.74 (10^4/T) - 0.021 (P) - 0.311 \ln X_{FeO} - 6.166 X_{SiO_2} - 9.153 X_{Na_2O+K_2O} - 1.914 X_{MgO} + 6.594 X_{FeO} \dots \dots \dots (1)$$

岩浆 S 的溶解度实际上还与 TiO₂ 的含量有关，H₂O 对岩浆氧逸度会产生重要影响，而氧逸度不仅会对 Fe²⁺ 和 Fe³⁺ 的比例产生影响，对 S 的溶解度有重要影响。因此，Liu et al. (2007) 提出了另一个经验公式：

$$\ln(S \text{ in ppm}) = 11.35251 - (4454.6/T) - 0.03190(P/T) + 0.71006 \ln(MFM) - 1.98063[(MFM)(X_{H_2O}^{melt})] + 0.21867 \ln(X_{H_2O}^{melt}) + 0.36192 \ln X_{FeO}^{melt} \dots \dots \dots (2)$$

式中：MFM = [Na + K + 2 (Ca + Mg + Fe²⁺)] / [(Si + (Al+Fe³⁺))]

从上述公式可以看出，镁铁质岩浆 S 的溶解度与温度、FeO、MgO 含量成正相关关系，而与压力、SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃ 含量成负相关关系。

由于 S 溶解度与压力成负相关关系，幔源岩浆的上升将导致其中 S 的溶解度增大而难以到达 S 饱和，因此，基性-超基性岩浆需要经历独特的演化过程才能达到 S 饱和。导致岩浆中 S 饱和的机制主要有 (Naldrett, 2004, 2010)：①地壳混染作用。一方面，由于岩浆中 FeO 的含量一般随 SiO₂ 含量的增高而降低，地壳硅铝质岩石的同化混染往往会使得幔源岩浆 SiO₂ 含量增高和 (FeO+TiO₂) 含量降低，导致 S 的溶解度降低和硫化物的熔离；另一方面，地壳中的 S 通过同化混染作用进入岩浆，导致 S 含量的增加达到 S 饱和，这往往是导致硫化物熔离的关键因素，许多矿床 (如：Noril'sk, Duluth) 的 S 同位素组成都说明有大量地壳 S 的加入。②岩浆温度的快速降低可导致岩浆 S 溶解度降低。③岩浆的结晶分异作用。④岩浆混合作用。⑤体系的氧逸度降低。对于具体的岩浆铜镍硫化物矿床而言，导致 S 达到饱和的机制可能是一种或多种。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 S 溶解度和高的 S 含量，其硫化物熔离可能与岩浆在地

壳中的还原作用有关，而不一定需要地壳物质的同化混染（宋谢炎等，2010）。

3.3 深部岩浆房分离结晶过程形成负铁钛岩漿是形成大型钒钛磁铁矿矿床的主要机制

峨眉大火成岩省表明岩体有多个岩相旋回，橄欖石、斜长石、单斜辉石成分也显示出旋回式变化，表明有多次岩漿补充。橄欖石较低的 Fo 牌号表明，岩漿在进入岩体之前经历了强烈的分离结晶。根据这些特点利用 MELTS 软件的模拟计算发现深部岩漿房（5 kbar）的分离结晶会产生富 Fe、Ti 的岩漿，而这种研究进入白马岩体之后（~1 kbar），磁铁矿成为近液相线矿物，有利于在岩漿房底部的堆积成矿（Zhang et al., 2012）。因此，峨眉大火成岩省内带的超大型钒钛磁铁矿矿床实际上也形成于岩漿通道系统，这样的岩漿通道系统中深、浅 2 个岩漿房的分离结晶过程控制了超大型钒钛磁铁矿矿床的形成。

3.4 含矿岩体处于开放系统上——大量岩漿参与成矿

大量同源岩漿参与成矿作用，特别是这些岩漿是连续补充的，不混溶的硫化物熔体与后续补充的岩漿持续反应，有利于形成大规模、集中的矿化（Naldrett, 1999, 2004; Li et al., 2001; 宋谢炎等, 2010）。俄罗斯 Noril'sk 地区含矿岩体的体积仅为约 3.5 km³，而其金属 Ni 储量达 2 300×10⁴t，意味着约 1 000 km³ 的玄武岩漿参与了成矿（Naldrett, 2004）。金川岩体的体积仅约 1 km³，其约 545×10⁴t 金属 Ni 储量需要约 300 km³ 的玄武岩漿参与成矿。基于质量平衡的计算表明，成矿的岩漿房一定是一个开放体系，当新的岩漿注入时，硫化物乳珠沉降下来，其余岩漿随着新岩漿的不断补充而不断被挤出，形成不含矿岩体或喷出岩。

不同体系熔离出的硫化物中金属元素的含量有所差异。当体系为封闭系统（Closed system），硫化物与硅酸盐岩漿不断反应达到平衡时，熔离出的硫化物熔体中金属元素的浓度满足下列关系式（Campbell et al., 1979）：

$$C_s = C_L * D * (R + 1) / (R + D) \dots (3)$$

式中：C_s——金属元素在硫化物熔体中的浓度；

C_L——金属元素在硅酸盐岩漿中的浓度；

D——金属元素在硫化物/岩漿的分配系数；

R——硅酸盐岩漿与硫化物熔体的体积比。

硫化物中金属元素的含量与 R 因子的关系如图 2-A 所示。

当体系为简单开放系统（Simple Multistage Upgrading System）时，即先前熔离出的硫化物熔体不断提取后期持续补充的岩漿中的金属元素，进一步富集 Cu、Ni 和 PGE 等，硫化物熔体中金属元素的浓度满足下列关系式（Kerr et al., 2005）：

$$C_s = C_L * D * \{1 - [D / (R_{inc} + D)]^N\} \dots (4)$$

式中：C_s——金属元素在硫化物熔体中的浓度；

C_L——金属元素在硅酸盐岩漿中的浓度；

D——金属元素在硫化物/岩漿的分配系数；

R_{inc}——每次硅酸盐岩漿与硫化物熔体发生反应的体积比；

N——与后期岩漿持续补充脉动次数。

经过 N 次岩漿脉动补充反应之后，总的反应的岩漿质量与硫化物质量之比 R_{cum} 为：

$$R_{cum} = N * R_{inc} \dots (5)$$

硫化物中金属元素的含量与 R_{cum} 因子的关系如图 2-B 所示。

还有一种为复杂开放系统（Multistage-dissolution Upgrading System），新的 S 不饱和岩漿持续脉动式补充，重新溶解部分已经熔离出的硫化物熔体，硫化物与后来补充的岩漿反应达到平衡后，硫化物中金属元素的浓度满足下列关系式（Kerr et al., 2005）：

$$C_s = C_L * [D * R'_{inc} / (R'_{inc} - L * D)] * \{1 - [D / (R'_{inc} + D - L * D)]^N\} \dots (6)$$

式中：C_s——金属元素在硫化物熔体中的浓度；

C_L——金属元素在硅酸盐岩漿中的浓度；

D——金属元素在硫化物/岩漿之间的分配系数；

R'inc——后期补充的岩漿与反应前硫化物质量比值；

L——硫化物溶解占总的硫化物体积百分比；

N——与后期岩漿持续补充脉动次数。

经过 N 次岩漿脉动补充反应之后，参与反应的岩漿总质量与硫化物质量之比 R_{cum} 为：

$$R_{cum} = M_{mag(cum)} / M_{sulN} = R'_{inc} * [1 / (1 - L)^N - 1] \dots (7)$$

硫化物中金属元素的含量与 R_{cum} 因子（参与反应的岩浆总质量与硫化物质量之比）的关系如图 2-C 所示。

3.5 适宜的成矿构造背景及环境

大陆岩石圈伸展和减薄往往会引发上地幔的大规模部分熔融，为岩浆 Ni-Cu- (PGE) 硫化物成矿创造有利的地质背景。地幔柱活动、软流圈上涌、碰撞造山后的岩石圈松弛等地质事件都可以导致大陆岩石圈伸展，强烈的大陆岩石圈伸展可以形成大陆裂谷。与地幔柱有关的大火成岩省是大规模岩浆

活动最为典型的表现。例如，俄罗斯 Noril'sk-Talnakh 矿床和加拿大 Voisey's Bay 矿床是地幔柱作用形成的大火成岩省成矿的典型实例 (Li et al., 2001, 2003; Nalddrett, 2004)。汤中立等 (1995) 认为金川超大型 Ni-Cu- (PGE) 硫化物矿床形成于大陆边缘裂谷，Li et al. (2005) 认为金川矿床可能是新元古代地幔柱活动的产物。许多学者研究证明我国峨眉山大火成岩省的一系列岩浆硫化物矿床都和二叠纪峨眉山地幔柱有关 (Song et al., 2003, 2008; Wang et al., 2006; Tao et al., 2008; 宋谢

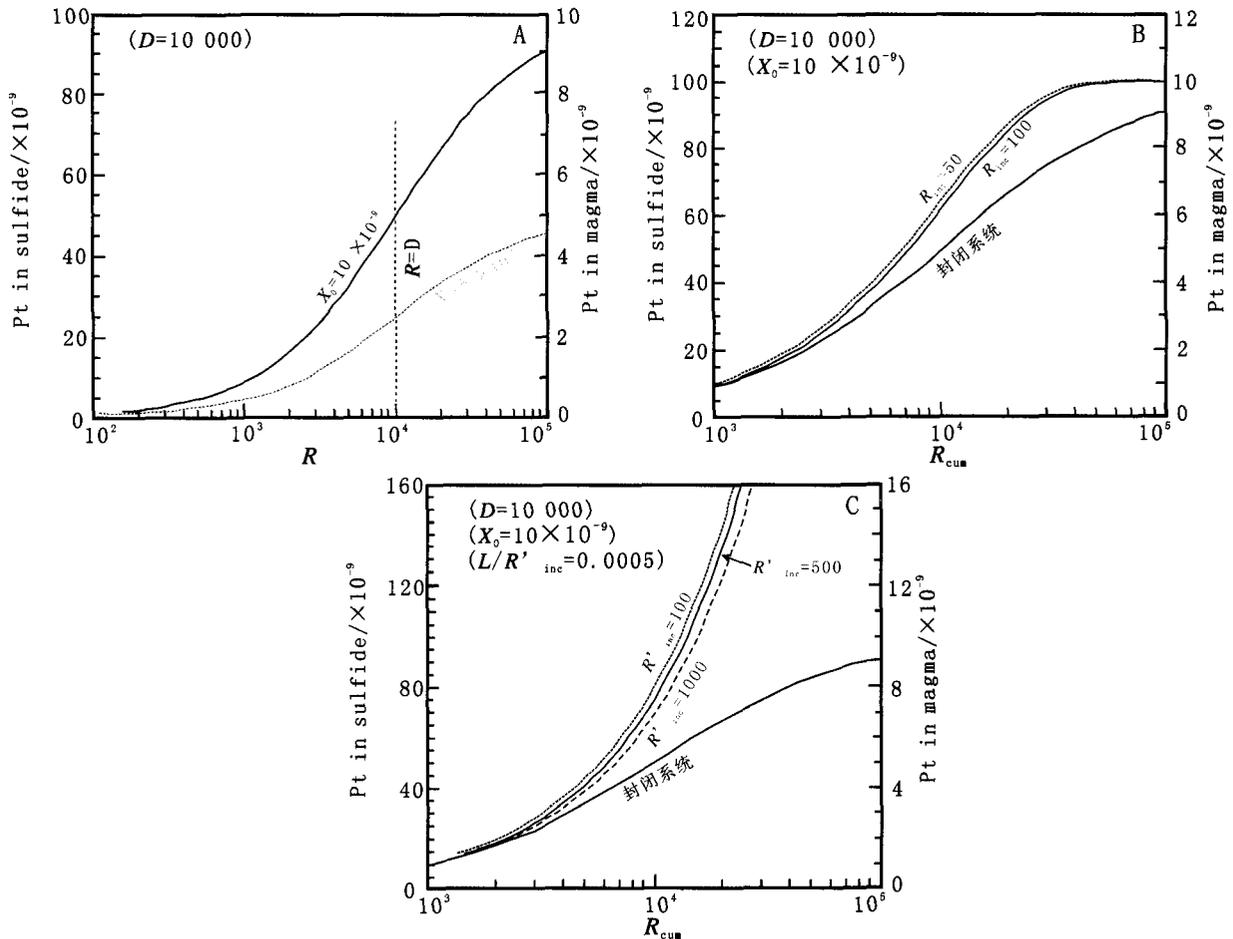


图 2 不同体系发生硫化物熔离作用后硫化物中 PGE 的含量变化示意图 (以 Pt 为例)

图中各参数含义和文中一致 (据 Kerr et al., 2005)

Fig. 2 Examples of element (Pt) behavior in (A) closed system, (B) simple multistage upgrading and (C) multistage-dissolution upgrading, as shown by the sulfide metal concentrations plotted against the cumulative R factor (R_{cum}) for various values of R'_{inc} (After Kerr et al., 2005)

A. 封闭系统，硫化物中 PGE 的含量与 R 因子以及母岩浆中 PGE 的初始含量的关系；B. 简单开放系统，硫化物中 PGE 的含量与 R_{cum} 累积因子以及 R_{inc} 增加因子之间的关系，该体系中 PGE 的含量比封闭系统增加更加迅速，并且 R_{inc} 越小增加越快；C. 复杂开放系统，硫化物中 PGE 的含量与 R_{cum} 累积因子以及 R'_{inc} 增加因子之间的关系。该体系中 PGE 的含量比封闭系统、简单开放体系增加更加迅速，并且 R'_{inc} 越小增加越快

炎等, 2005; 陶琰等, 2006)。需要强调的是, 并不是所有岩浆硫化物矿床的形成都与地幔柱有关。如形成与在汇聚板块边缘环境中的铜镍硫化物矿床, 它们的形成很可能与俯冲板片拆离有关, 俯冲板片拆离, 软流圈地幔发生减压熔融也可以形成大量的成矿岩浆 (Song et al., 2011; Xie et al., 2012)。

岩浆可以快速上侵到地壳, 含矿岩体本身就是镁铁质岩浆通道 (Li et al., 2001; 宋谢炎等, 2004; Li et al., 2005)。形成岩浆 Ni-Cu-PGE 硫化物矿床一个关键条件是原始岩浆在上侵到地壳之前没有或者只有很少量橄榄石分离结晶, 而且没有硫化物移出。因为 Ni 在橄榄石中为中等相容元素, 橄榄石分离结晶会导致岩浆中 Ni 含量的减少。类似的 Ni、Cu 和 PGE 金属元素在硫化物熔浆/硅酸盐熔浆中分配系数很高, 即使少量硫化物移出, 残余岩浆中的这些成矿元素的含量会急剧亏损, 难以形成岩浆 Ni-Cu-PGE 硫化物矿床 (Lightfoot et al., 1997)。薄的地壳 (裂谷)、地壳断裂通常是成矿最有利的构造环境 (Naldrett, 1999, 2009)。

4 找矿方向和找矿标志

毫无疑问, 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 (宋谢炎等, 2010)。

4.1 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。

4.2 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。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。

4.3 有效找矿标志的确定

物化探方法是寻找岩浆硫化物矿床的重要手段, 最有效的是磁法勘探。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 (References):

- 甘肃省地质矿产局第六地质队. 百家咀子硫化铜镍矿床地质 [M]. 北京: 地质出版社, 1984.
- Sixth Geological Unit. Geology of the Baijiaozuizi Cu-Ni sulfide deposit [M]. Geological Publishing House, Beijing, 1984 (in Chinese).
- 陈列锰. 甘肃金川 I 号岩体及其铜镍硫化物矿床特征和成因 [R]. 地球化学研究所, 贵阳: 中国科学院研究生院, 2009.
- Chen, L. M. Features and genesis of Segment I and its hosted Ni-Cu sulfide deposits of the Jinchuan intrusion, Gansu Province [R]. Institute of Geochemistry, the Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Guiyang, 2009 (in Chinese with English abstract).
- 陈列锰, 宋谢炎, L. V. Danyushevsky, 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, 2009a, 25: 3369-3378.
- Chen, L. M., X. Y. Song, L. V. Danyushevsky, et al.

- Correlation between Ni and MgO contents of olivine in Segment I of the Jinchuan intrusion, NW China, and its geological implication [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25: 3369-3378.
- 陈列锰, 宋谢炎, L V Danyushevsky. 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*, 2009b, 83: 1302-1315.
- Chen, L M, X Y Song, D L V, et al. MELTS Thermodynamic Calculation of Compositions of Parental Magma and Fractional Crystallization of the Jinchuan Intrusion, Gansu Province [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2009, 83: 1302-1315 (in Chinese with English abstract).
- 宋谢炎, 胡瑞忠, 陈列锰. 铜, 镍, 铂族元素地球化学性质及其在幔源岩浆起源、演化和岩浆硫化物矿床研究中的意义[J]. *地学前缘*, 2009, 16: 287-305.
- Song X Y, Hu R Z, Chen L M. Geochemical natures of copper, nickel and PGE and their significance for the study of origin and evolution of mantle-derived magmas and magmatic sulfide deposits [J]. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16 (4): 287-305 (in Chinese with English abstract).
- 宋谢炎, 胡瑞忠, 张成江, 等. 峨眉大火成岩省岩浆矿床成矿作用与地幔柱动力学过程的耦合关系[J]. *矿物岩石*, 2005, 25 (4): 35-44.
- Song X Y, Hu R Z, Zhang C J, et al., Genetic links of magmatic deposits in the Emeishan Large Igneous Province with dynamics of mantle plume [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2005, 25 (4): 35-44.
- 宋谢炎, 李士彬, 王玉山, 等. 含矿岩浆通道对于岩浆铜镍硫化物矿床找矿工作的意义[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2005, 24 (4): 293-298.
- Song X Y, Li S B, Wang Y S, et al. Significance of conduit of sulfide-bearing magma for exploration of magmatic sulfide deposit [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2005, 24 (4): 293-298 (in Chinese with English abstract).
- 汤中立. 金川硫化铜镍矿床成矿模式[J]. *现代地质*, 1990, 4 (4): 55-64.
- Tang, Z L. Mineralogical model of the Jinchuan Copper and Nickel sulfide deposit [J]. *Geosciences*, 1990, 4 (4): 55-64 (in Chinese with English abstract).
- 汤中立. 金川含铂硫化铜镍矿床成矿模式 [J]. *甘肃地质学报*, 1991, 12: 104-125.
- Tang, Z L. Genetic model of the Jinchuan Pt-bearing Copper-Nickel sulfide deposit [J]. *Gansu Geology*, 1990, 12: 104-125 (in Chinese with English abstract).
- 汤中立. 超大型岩浆硫化物矿床的类型及地质对比意义 [J]. *甘肃地质学报*, 1992, 1 (1): 24-47.
- Tang, Z L. Classification and geological contrastable significance of super large magmatic sulfide deposit [J]. *Acta Geology Gansu*, 1992, 1 (1): 24-47 (in Chinese with English abstract).
- 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.
- Tang, Z L, Li W Y. Mineralization model and geology of the Jinchuan PGE-bearing deposit [M]. Geological publishing House, Beijing, 1995 (in Chinese).
- 汤中立. 金川铜镍硫化物矿床岩浆成矿作用的偏在性 [J]. *甘肃地质学报*, 1996a, 5 (2): 73-85.
- Tang, Z L. Magmatic mineralization preferentiality of the Jinchuan Cu-Ni sulfide deposit [J]. *Acta Geology Gansu*, 1996a, 5 (2): 73-85 (in Chinese with English abstract).
- 汤中立. 中国岩浆硫化物矿床的主要成矿机制 [J]. *地质学报*, 1996b, 70 (3): 237-243.
- Tang, Z L. The main mineralization mechanism of magmatic sulfide deposits in China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1996b, 70 (3): 237-243 (in Chinese with English abstract).
- 汤中立, 闫海卿, 焦建刚, 等. 中国岩浆硫化物矿床新分类与小岩体成矿作用 [J]. *矿床地质*, 2006, 25 (1): 1-9.
- Tang, Z L, Yan H Q, Jiao J G. New classification of magmatic sulfide deposits in China and ore-forming processes of small intrusive bodies [J]. *Mineral Deposits*, 2006, 25 (1): 1-9 (in Chinese with English abstract).
- 汤中立, 闫海卿, 焦建刚, 等. 中国小岩体镍铜 (铂族) 矿床的区域成矿规律 [J]. *地学前缘*, 2007, 14 (5): 92-103.
- Tang Z L, Yan H Q, Jiao J G. Regional metallogenic controls of small intrusion-hosted Ni-Cu- (PGE) ore deposits in China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14 (5): 92-103 (in Chinese with English abstract).
- 王润民, 赵昌龙. 新疆喀拉通克一号铜镍硫化物矿床 [J]. 北京: 地质出版社, 1991. 1-298.
- Wang R M, Zhao C L. Karatungku Cu - Ni sulfide no. 1 ore deposit in Xinjiang [M]. Geological Publishing House, Beijing, 1991 (in Chinese).
- 张晓琪, 张加飞, 宋谢炎, 等. 斜长石和橄榄石成分对四川攀枝花钒钛磁铁矿床成因的指示意义 [J]. *岩石学报*, 2011, 27 (12): 3675-3688.
- Zhang X Q, Zhang J F, Song X Y, et al., Implications of compositions of plagioclase and olivine on the formation of the Panzhihua V-Ti magnetite deposit, Sichuan Province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27

- (12): 3675-3688 (in Chinese with English abstract) .
Zhang X Q, Song X Y, Chen L M. Fractional crystallization and the formation of thick Fe-Ti oxide stratiform in the Baima layered intrusion [J] . SW China, Ore Geology Review, 2012, 49: 96-108
- Arndt, N T, Naldrett A J, Hunter D R. Ore deposits associated with mafic magmas in the Kaapvaal craton [J] . Mineralium Deposita, 1997, 32: 323-334.
- Barnes, S, Maier W. The fractionation of Ni, Cu and the noble metals in silicate and sulphide liquids [M] . In: RR Keays, CM Leshner, PC Lightfoot, CEG Farrow, editors. Dynamic processes in magmatic ore deposits and their application to mineral exploration: Geological Association of Canada, Short Course Notes, 1999.
- Campbell, I H, Naldrett A J. The influence of silicate: sulfide ratios on the geochemistry of magmatic sulfides [J] . Economic Geology, 1979, 74: 1503-1506.
- Kerr, A, Leitch A M. Self-destructive sulfide segregation systems and the formation of high-grade magmatic ore deposits [J] . Economic Geology, 2005, 100: 311-332.
- Lehmann, J, Arndt N, Windley B, et al. . Field Relationships and Geochemical Constraints on the Emplacement of the Jinchuan Intrusion and its Ni-Cu-PGE Sulfide Deposit, Gansu, China [J] . Economic Geology, 2007, 102: 75-94.
- Li, C, Lightfoot P C, 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: 771-799.
- Li, C, Naldrett A J. Geology and petrology of the Voisey' s Bay intrusion; reaction of olivine with sulfide and silicate liquids [J] . Lithos, 1999, 47: 1-31.
- Li, C S, Ripley E M. Empirical equations to predict the sulfur content of mafic magmas at sulfide saturation and applications to magmatic sulfide deposits [J] . Mineralium Deposita, 2005, 40: 218-230.
- Li, X H, Su L, Chung S L, et al. Formation of the Jinchuan ultramafic intrusion and the world' s third largest Ni-Cu sulfide deposit; associated with approximately 825 Ma south China mantle plume? [J] . Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2005, doi 1110. 1029/2005GC001006.
- Lightfoot, P C, Keays R R, Evans-Lamswood D. Sulfide saturation history of Nain Plutonic Suite mafic intrusions: origin of the Voisey' s Bay Ni-Cu-Co sulfide deposit, Labrador, Canada [J] . Mineralium Deposita, 2012, 47: 23-50.
- Liu, Y, Samaha N T, Baker D R. Sulfur concentration at sulfide saturation (SCSS) in magmatic silicate melts [J] . Geochimica et Cosmochimica Acta, 2007, 71: 1783-1799.
- Maier, W D, Li C S, De Waal S A. Why are there no major Ni-Cu sulfide deposits in large layered mafic-ultramafic intrusions [J] . Canadian Mineralogist, 2001, 39: 547-556.
- Naldrett, A J. Magmatic Sulfide Deposits: Geology, Geochemistry and Exploration; Springer [M] . 2004.
- Naldrett, A J. From the mantle to the bank: the life of a Ni-Cu- (PGE) sulfide deposit [J] . South African Journal of Geology, 2010, 113: 1-32.
- Naldrett, A J, Asif M, Krstic S, et al. The composition of mineralization at the Voisey' s Bay Ni-Cu sulfide deposit, with special reference to platinum-group elements [J] . Economic Geology, 2000, 95: 845-865.
- 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. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy [J] . Section B-Applied Earth Science, 1995, 104 B: 18-36.
- Naldrett, A J, Lightfoot P C. Ni-Cu-PGE deposits of Noril' sk region, Siberia: their formation in conduits for flood basalt volcanism [J] . Dynamic processes in magmatic ore deposits and their application to mineral exploration. Geological Association of Canada, Short Course Notes, 1999, 13: 195-249.
- Sobolev, A V, Hofmann A W, Kuzmin DV, et al. The Amount of Recycled Crust in Sources of Mantle-Derived Melts [J] . Science, 2007, 316: 412-417.
- Song, X Y, Danyushevsky L, Keays R. et al. Structural, lithological, and geochemical constraints on the dynamic magma plumbing system of the Jinchuan Ni-Cu sulfide deposit, NW China [J] . Mineralium Deposita, 2012, 47: 277-297.
- Song, X Y, 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, 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: 303-327.
- Song, X Y, 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.
- Song, X Y, Zhou M F, Cao Z M. Genetic relationships between base-metal sulfides and platinum-group minerals in the Yangliuping Ni-Cu- (PGE) sulfide deposit, southwestern China [J]. *The Canadian Mineralogist*, 2004, 42: 469-483.
- Song, X Y, Zhou M F, Cao Z M, et al. Ni-Cu- (PGE) magmatic sulfide deposits in the Yangliuping area, Permian Emeishan Igneous province, SW China [J]. *Mineralium Deposita*, 2003, 38: 831-843.
- Song, X Y, Zhou M F, Keays R R, et al. Geochemistry of the Emeishan flood basalts at Yangliuping, Sichuan, SW China: implications for sulfide segregation [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2006a, 152: 53-74.
- Song, X Y, M F Zhou, C Y Wang, et al. Role of crustal contamination in formation of the Jinchuan intrusion and its world-class Ni-Cu- (PGE) sulfide deposit, northwest China [J]. *International Geology Review* 2006b, 48: 1113-1132.
- Su, S, Li C, Zhou M F, et al. Controls on variations of platinum-group element concentrations in the sulfide ores of the Jinchuan Ni-Cu deposit, western China [J]. *Mineralium Deposita*, 2008, 43: 609-622.
- Tang, Z L, Song X Y, Su S G. Ni-Cu deposits related to high-Mg basaltic magma, Jinchuan, Western China. In: C Li, MR Edward, editors. *New developments in magmatic Ni-Cu and PGE deposits [M]*. Geological Publishing House, Beijing, 2009.
- Tao, Y, Li C, Song XY, et al. Mineralogical, petrological, and geochemical studies of the Limahe 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: 209-230.

The Core Issue of the Large-scale Mineralization in Small Intrusion: Mineralization in Magmatic Plumbing System Principles, Key Features and Exploration Marks

SONG Xie-Yan, CHEN Lie-meng

(State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 46th Guanshui Road, Guiyang 550002, China)

Abstract: The theory of the large-scale mineralization occurring in small intrusion is based on mineral exploration of magmatic sulfide deposit in China, and is an original principle of ore deposit. The key of this theory is similar to the formation of magmatic sulfide deposits in magma conduit system. In this paper, we attempt to summarize the general features and the key formation mechanism of the small intrusions of the magmatic sulfide deposits occurring on magmatic conduit system. We also try to estimate the prospecting direction and criteria of this type magmatic sulfide deposit. All of these are very significant to promote further researches and exploration of this type of deposit.

Key words: large-scale mineralization in small intrusion; magma plumbing system; magmatic deposit; magma replenishment