

金川铜镍硫化物矿床成矿物质深部 预富集过程探讨

王亚磊, 李文渊, 张照伟, 张江伟,
高永宝, 郭周平, 李侃, 钱兵

(西安地质矿产研究所, 国土资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘要: 金川矿床为世界第三大在采铜镍硫化物矿床, 该矿床赋矿岩体出露面积仅为 1.34 km^2 , 主要由超镁铁质岩石组成, 岩体矿化率高达 47%。不同岩相和矿石类型之间呈明显的突变接触关系。这些典型特征暗示成矿物质在侵入现存空间之前发生了明显的预富集。成矿物质的深部预富集过程主要探讨深部岩浆房内硫化物的熔离机制、硫化物熔离的相对时限及熔离量的大小、硫化物熔离后的迁移聚集及分离结晶过程。金川岩体不同岩石类型中橄榄石 Fo 变化范围小 ($Fo=80.11\sim85.68$), 暗示深部岩浆房是开放的岩浆系统, 存在多期次后续新鲜岩浆的贯入。依据橄榄石-液相平衡原理, 计算得到金川岩体母岩浆 MgO 含量为 10.8%~12.6%, 为高 Mg 拉斑玄武质岩浆, 表明岩浆源区发生了较高程度的部分熔融, 其为硫化物的大量熔离提供了丰富的成矿元素。金川岩体 Sr-Nd-Os 同位素和微量元素地球化学特征表明, 金川岩体原生岩浆遭受明显的地壳物质混染, 混染程度约为 5%~10%, Th-Ta、Th-Nb 和 $(Th/Ta)_{PM}$ - $(La/Nb)_{PM}$ 图解表明, 部分混染物为下地壳组分, 下地壳物质的混染可能是导致深部岩浆房内硫化物熔离的主要机制。金川矿床赋矿岩石类型主要为二辉橄榄岩和纯橄岩, 为金川岩体中基性程度最高的岩石类型, 同时“Melts”模拟计算也表明, 硫化物的熔离发生在岩浆演化的早期阶段, 并随着后续新鲜岩浆的持续贯入熔离出的硫化物含量不断增加。熔离后的硫化物在重力作用下下沉至岩浆房底部或中下部, 形成矿浆和富矿岩浆。金川矿床中块状矿石相对富集 IPGE, 富 Cu 矿体中则相对富集 Cu 和 PPGE。这种成矿元素的分异现象表明, 随着温度的降低, 硫化物在深部岩浆房内发生了明显的分离结晶作用。同时研究表明, 硫化物分离结晶程度与硫化物之间的连通性呈正相关关系。

关键词: 金川; 铜镍硫化物矿床; 原生岩浆; 深部预富集; 岩浆演化; 硫化物熔离

中图分类号: P611 **文献标识码:** A

矿床勘查实践表明, 很多与岩浆作用有关的矿床都与小岩体密切相关。汤中立等 (2006, 2011) 通过对这些矿床的深入研究, 将与小岩体有关的矿床分为两类: 一是与基性岩有关的铜镍硫化物矿

床, 以世界第三大金川铜镍硫化物矿床为典型代表; 二是与中酸性岩有关的斑岩型铜(钼)矿床。针对金川矿床的典型特征, 如金川岩体主要由超镁铁质岩石组成, 不同岩相和矿石类型之间呈突变接

收稿日期: 2012-08-20; **修回日期:** 2012-09-03

基金项目: 国家自然科学基金(41102050)和中国地质调查局地质大调查项目(1212010911032、1212011220897、121201112088、1212011120183 和 1212011121092)联合资助

作者简介: 王亚磊(1986-), 男, 研究实习员, 从事铜镍硫化物矿床成矿及预测研究。Email: wangyalei1986@126.com

触关系, 金川矿床矿化率高达 47%, 金川矿体呈典型的对称状, 汤中立院士在多年勘查研究基础上提出“深部熔离-多期贯入”的成矿模式, 这一模式得到了越来越多学者的支持(杨合群等, 1997; 解广轰等, 1998; De Waal et al., 2004; Song et al., 2006, 2009, 2010; 李士彬等, 2007; 陈列锰等, 2009; Tang et al., 2009, 苏尚国等, 2010)。这一成矿模式的核心是成矿物质在侵入金川矿床现存空间之前, 在深部岩浆房发生了预富集作用, 由此可见, 成矿物质在深部岩浆房的预富集过程是形成矿床的关键, 因此有必要对其进行专门的研究。前人尽管对金川矿床进行了系统的研究工作, 但是这些工作大都以金川矿床岩浆演化的总体过程为重点研究对象, 并未专门针对深部岩浆房内

岩浆的演化过程及成矿过程开展专门的论述。笔者在系统收集前人研究成果的基础上, 系统总结岩浆进入深部岩浆房之前岩浆源区的部分熔融和进入深部岩浆房之后成矿母岩浆的分离结晶作用、同化混染作用等演化过程, 在此基础上进一步总结深部岩浆房内成矿物质的预富集过程。通过对前人研究成果的总结, 笔者主要从深部岩浆房硫化物的熔离机制、硫化物熔离的相对时限及熔离量的大小、硫化物熔离后的迁移聚集以及分离结晶作用过程三个方面深入探讨成矿物质的深部富集过程。

1 矿床地质特征

金川铜镍硫化物矿床位于华北地块西南缘龙首山隆起带中部, 其含矿岩体已遭受明显的剥蚀, 现

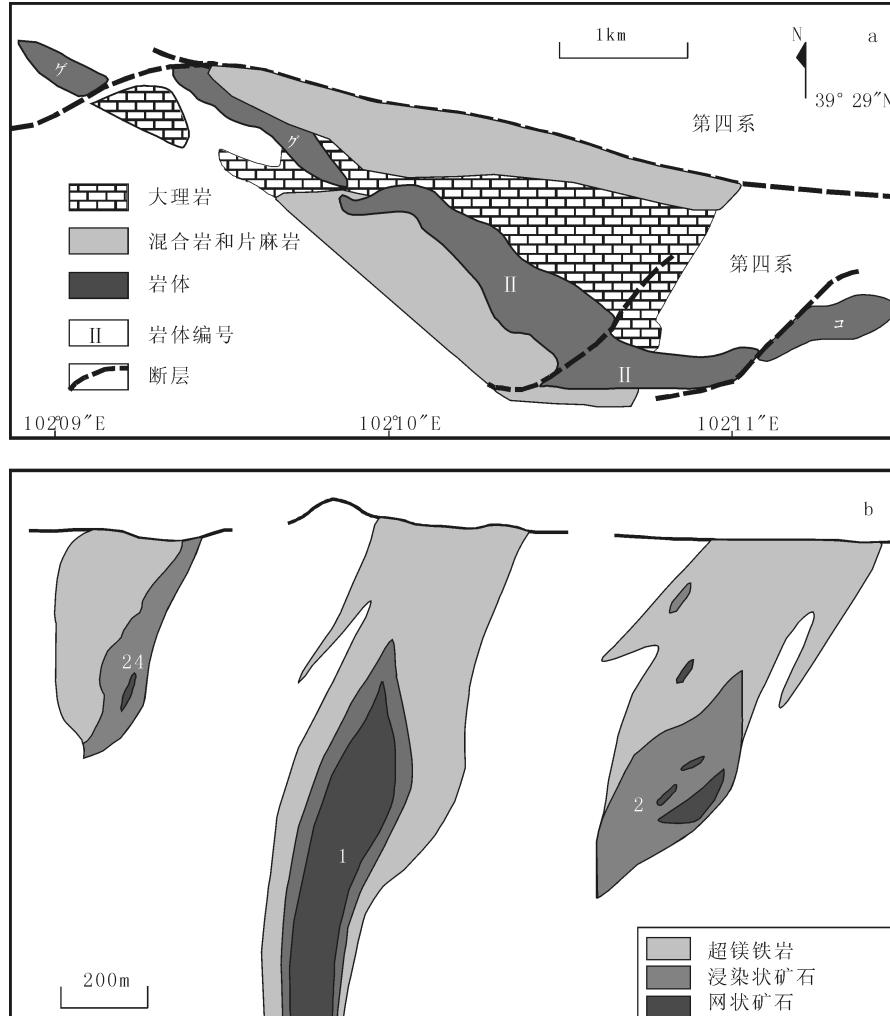


图 1 a 金川含矿岩体矿区地质简图; b 金川矿体纵剖面图 (据汤中立等, 1995 修改)

Fig. 1 a: The simplified geological maps of Jinchuan intrusion; b: The cross sections of orebodies

存岩体呈岩墙状, 长约 6 500 m, 宽 20~527 m, 出露面积约 1.34 km²。岩体走向北西 50°, 倾向南西, 倾角 60°~70°, 呈小角度不整合侵入与古元古界白家咀子组混合岩和大理岩之间(甘肃地质六队, 1984)。岩体被北东东向压扭性断层错断, 由西向东依次划分为Ⅲ、Ⅰ、Ⅱ、Ⅳ矿区(图 1-a), 由西向东主要矿体为 24 号、1 号和 2 号(图 1-b)。

金川含矿岩体是一个脉动式贯入的复式岩体(地质六队, 1984; 汤中立等, 1995; 杨合群, 1997; Song et al., 2006, 2009; Li et al., 2009, 陈列锰, 2009), 几乎全部由超镁铁质岩石组成, 主要岩石类型为纯橄榄岩、二辉橄榄岩和橄榄辉石岩。依据侵入接触关系, 可划分为 4 期: 第一期侵入体岩石组合为中细粒二辉橄榄岩-橄榄辉石岩-二辉橄榄岩, 矿石类型为星点状和浸染状, 呈悬浮状小透镜体。第二期侵入体岩石组合为二辉辉橄榄岩-二辉橄榄岩-橄榄二辉岩-二辉岩, 中粗粒结构, 矿石类型以浸染状-半海绵状为主, 形成厚大的似层状和透镜状矿体, 分布于岩体的中部和中下部。第三期侵入体岩石组合为二辉辉橄榄-纯橄榄岩, 中粒结构, 矿石全部为海绵陨铁结构, 呈“火焰状”分布于岩体下侧, 其 Ni 金属储量占全区的 85% 左右。第四期主要为块状硫化物, 不含或含很少硅酸盐矿物, 呈脉状、扁豆状和囊状分布。金川矿床富 Cu 盲矿体位于金川Ⅰ 和Ⅱ 之间, 研究表明, 其为深部岩浆房内硫化物发生单硫化物固溶体(MSS)分离结晶作用后形成的残余硫化物熔体(田毓龙等, 2009; 陈列锰等, 2009; 高亚林等, 2009; Gao et al., 2009; 苏尚国等, 2010)。

2 岩相学及矿物晶体化学特征

金川岩体主要岩石类型为二辉橄榄岩、斜长二辉橄榄岩、橄榄辉石岩和纯橄榄岩。岩石普遍发育堆晶结构和包橄结构, 堆晶矿物以橄榄石为主, 还有少量铬尖晶石和单斜辉石; 填隙矿物主要为单斜辉石、斜方辉石、斜长石和金属硫化物等, 金属硫化物多围绕橄榄石颗粒分布。岩石蚀变强烈, 橄榄石主要发生蛇纹石化蚀变, 单斜辉石常遭受较强的次闪石化和绿泥石化, 斜方辉石多数遭受强烈滑石化和绢石化。尽管遭受了较强烈的蚀变作用, 依据

新鲜矿物之间的相互包裹关系, 矿物的结晶顺序为: 橄榄石—斜方辉石—单斜辉石—斜长石。

橄榄石是金川岩体中最主要的造岩矿物, 也是 Mg、Fe、Ni 的主要寄主矿物, 其成分变化特征蕴含着丰富的成岩成矿信息(Li et al., 2007)。电子探针数据表明, 各不同侵入期次及岩石类型中橄榄石 Fo 变化范围为 80.11~85.68, 较国内其他典型铜镍硫化物矿床中橄榄石的 Fo 变化范围小(黄山东橄榄石 Fo 为 68.5~82.5, 喀拉通克橄榄石 Fo 为 73.17~81.39)(贾志永等, 2009; 高萍, 2011; 邓宇峰等, 2012); 金川岩体中橄榄石 Ni 含量的变化范围为 $1\ 179 \times 10^{-6}$ ~ $2\ 485 \times 10^{-6}$ (Chai G et al., 1992b; Li et al., 2004; 陈列锰等, 2009), 也明显较国内其他典型铜镍硫化物矿床中橄榄石 Ni 含量高。金川岩体中橄榄石较小的 Fo 变化范围表明, 橄榄石结晶时岩浆体系中的 Mg/Fe 值变化范围较小, 在深部岩浆房内应该存在多期次的新鲜岩浆的补给。由于 Ni 在岩浆体系中在没有发生硫化物熔离时倾向于进入橄榄石中, 但在发生硫化物熔离时则更倾向于进入硫化物中, 依据橄榄石 Fo-Ni 之间的关系, 可以反演岩浆体系中硫化物熔离与橄榄石结晶的相对时限关系。不同学者对金川岩体中橄榄石成分变化特征进行了模拟计算(图 2)(Li et al., 2004; 陈列锰等, 2009), 结果表明, 金川岩体中多数橄榄石的分离结晶作用和硫

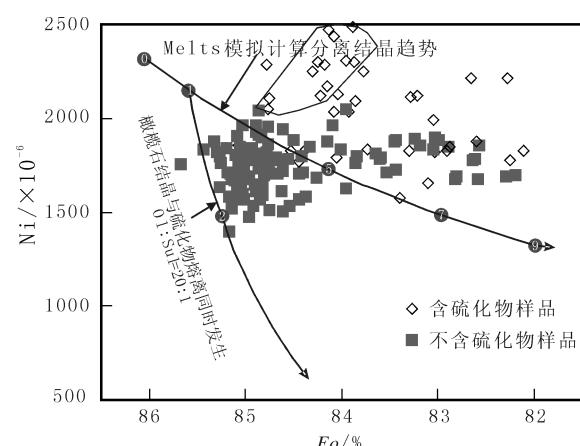


图 2 金川矿床中橄榄石 Fo-Ni 关系

Fig. 2 The correlation of Fo-Ni in olivine of Jinchuan deposit

(图中数字代表岩浆发生分离结晶程度; 模拟曲线引自陈列锰等, 2009; 橄榄石数据引自 De Waal et al., 2004;

Li et al., 2004; 陈列锰等, 2009)

化物熔离同时发生，部分橄榄石结晶时没有发生硫化物的熔离。多数含硫化物样品中橄榄石的 Ni 含量较高，局部甚至出现 Fo-Ni 之间的负相关关系，这可能是橄榄石与硫化物熔体之间发生了 Fe-Ni 物质交换造成的。

金川矿床中不同岩石类型中单斜辉石组分变化范围较大 (En 为 46.58~68.52, Wo 为 19.54~44.71)，具有向透辉石端元演化的特征，且成分变化具有一定的间断性 (图 3)，这暗示了在岩浆演化过程中可能有 Ca 组分的加入 (汤中立等，

1995; De Waal et al., 2004; 陈列锰等, 2008)，且这种组分的加入发生在浅部岩浆房内。斜方辉石主要为古铜辉石 (图 3)，各组分变化范围小 (En 为 80.65~83.5, Fs 为 13.54~15.24)。研究表明，呈堆晶相的斜方辉石较呈填隙相的具有低的 Al_2O_3 和 CaO (De waal et al., 2004)，这表明岩浆呈填隙相的斜方辉石的分离结晶主要发生在浅部岩浆房内。单斜辉石和斜方辉石的组分特征共同表明，金川矿床母岩浆演化过程存在明显的阶段性 (陈列锰, 2009)。

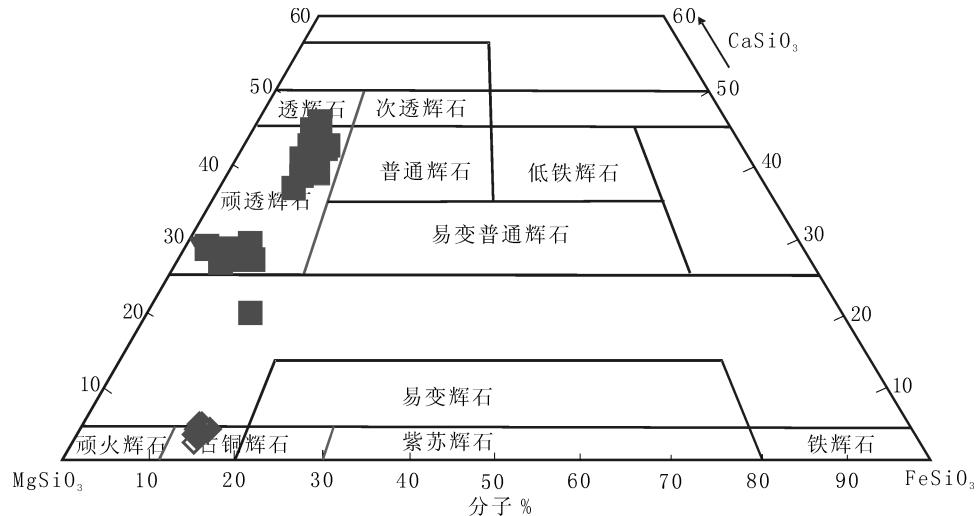


图 3 金川矿床辉石分类图解 (辉石电子探针数据引自李士彬等, 2008; 陈列锰, 2009)

Fig. 3 The diagram of pyroxene classification in Jinchuan deposit

3 原生岩浆成分及部分熔融程度

研究表明，要形成铜镍硫化物矿床，首先应保证原生岩浆中含有丰富的成矿元素，即要求地幔源区发生较高程度的部分熔融作用。由于地幔源区部分熔融方式的差异使准确厘定部分熔融程度有一定的困难 (Arndt et al., 2005)，但是通过厘定原生岩浆 MgO 含量可估算地幔源区的部分熔融程度。由此可见，在探讨成矿作用过程之前有必要首先对原生岩浆成分及部分熔融程度进行准确的厘定。

金川岩体原生岩浆成分的厘定一直是争论的焦点之一，不同学者利用不同方法对其进行了估算 (汤中立等, 1995; 徐章华等, 1998; Chai et al., 1992a; De Waal et al., 2004; 陈列锰, 2009;

Tonnier, 2010; Li et al., 2010)。最初认为，金川岩体是由 MgO 含量大于 28% 的超镁铁质岩浆结晶形成的 (汤中立等, 1995)。Chai et al. (1992) 首先利用橄榄石-液相平衡原理计算得出金川岩体原生岩浆 MgO 含量为 11.6%。随后不同学者通过不断改进该方法并对其原生岩浆成分进行了估算，估算其 MgO 含量分别为 10.8% (徐章华等, 1998)、12.6% (陈列锰, 2009)、15.36% (Tonnier, 2010) 和 12.33% (Li et al., 2010)。由上可知，尽管不同研究者的估算结果不同，但是总的研究成果表明，金川矿床原生岩浆为高镁拉斑玄武质岩浆，与世界范围内其他铜镍硫化物矿床原生岩浆性质一致 (Lightfoot et al., 1999; McCallum et al., 1999; Wilson et al., 1999; 汤中立等, 2006)。

岩浆源区部分熔融程度决定了原生岩浆中

MgO 和亲 Cu 元素 (Ni、Cu 和 PGE) 的含量, 较高的部分熔融程度是形成铜镍矿的首要因素 (Barnes et al., 2005; Arndt, 2005; Naldrett, 2009)。上已述及, 金川岩体原生岩浆为高 Mg 玄武质岩浆, 这暗示了地幔源区发生了较高程度的部分熔融作用。地幔源区中 PGE 和 Cu 主要赋存在硫化物中, Ni 则主要受橄榄石的控制, 研究表明, 当地幔源区的部分熔融程度为 18%~40% 时, 地幔中的硫化物全部溶解进入岩浆中 (Keays, 1995; Arndt et al., 2005; Barnes et al., 1985, 2005; Naldrett, 2009)。如果部分熔融程度继续变大, 则 PGE 和 Cu 含量会逐渐降低, 而 Ni 的含量会继续逐渐升高 (Naldrett, 2009)。杨合群 (1997) 研究认为, 金川岩体原生岩浆是地幔橄榄岩经过 33% 部分熔融的产物。最近的研究认为, 金川岩体的原生岩浆是不亏损 PGE 的 (汤中立等, 2006; Su et al., 2008; Song et al., 2009; 陈列锰, 2009), 这表明岩浆源区的部分熔融程度至少应大于 18%。由此可见, 金川岩体岩浆源区发生了较高程度的部分熔融, 使进入深部岩浆房内的岩浆含有丰富的成矿物质。

4 深部岩浆房内分离结晶和同化混染作用

分离结晶作用和同化混染作用是导致硫化物熔离的两个最重要机制, 要探讨硫化物熔离机制, 应首先准确厘定岩浆的分离结晶和同化混染作用过程。前已述及, 金川矿床硫化物的熔离主要发生在深部岩浆房内, 笔者在前人研究成果基础上, 重点讨论深部岩浆房内岩浆的分离结晶和同化混染作用。

4.1 分离结晶作用

岩浆中硫的溶解度与 Fe^{2+} 含量呈正相关, 镁铁质矿物 (如橄榄石和辉石) 的分离结晶可以降低岩浆中 Fe^{2+} 含量, 进而可以促使岩浆中硫化物发生熔离。金川岩体主要由呈堆晶相的超镁铁质岩石组成, 岩相学研究表明, 金川岩体主要发生了铬尖晶石、橄榄石、斜方辉石和单斜辉石的分离结晶作用。主量元素地球化学研究表明, 岩体成分变化主要受橄榄石分离结晶作用影响 (Chai et al., 1992a; De waal et al., 2004; 李士彬等, 2007;

陈列锰, 2009)。各矿物之间的相互包裹关系表明, 矿物的分离结晶顺序为铬尖晶石—橄榄石—斜方辉石—单斜辉石—斜长石。陈列锰 (2009) 结合矿物成分变化特征, 利用 “Melts” 软件模拟计算认为, 金川岩体母岩浆分离结晶发生在深部不同的两个岩浆房内。在深部岩浆房 (10.9~12.5 km) 内经历了约 5% 的橄榄石 (De waal et al., 2004; Li et al., 2004) 及约 4% 的斜方辉石的分离结晶。此时结晶的斜方辉石主要呈堆晶相, 同时岩浆中的硫化物熔离也主要发生在这一阶段, 并在重力作用下形成了富含镁铁质矿物的“晶粥”, “晶粥” 由上到下镁铁质矿物和硫化物含量都呈逐渐降低的趋势 (汤中立, 1991, 2006; 汤中立等, 1995; De waal et al., 2004; 杨合群等, 1997; Song et al., 2009; Tang et al., 2009; 苏尚国等, 2010)。深部岩浆房的各层“晶粥” 在构造应力或其他作用力影响下依次上侵进入浅部岩浆房 (7.6~9.2 km), 在浅部岩浆房 (即岩体现存空间) 内发生了少量橄榄石、斜方辉石、单斜辉石和斜长石的分离结晶, 此时结晶的斜方辉石、单斜辉石和斜长石呈填隙状充填在堆晶矿物颗粒之间。这一模拟计算结果无论从岩浆房的深度还是矿物的结晶顺序以及矿物的物质成分组成都与以往的研究成果相吻合的 (汤中立等, 1995; De waal et al., 2004; Li et al., 2004; 杨轩住等, 1991; Yang et al., 1998)。Li (2010) 通过模拟计算认为, 如果分离结晶及硫化物熔离主要发生在深部岩浆房, 则要求形成的“晶粥” 含有 70% 的橄榄石, 23% 的硅酸盐熔体和 7% 的硫化物熔体。由此可见, 金川岩体深部岩浆房内发生了大量橄榄石、斜方辉石和少量铬尖晶石和单斜辉石的分离结晶作用, “晶粥” 进入浅部岩浆房后仅发生了少量的矿物分离结晶作用。

4.2 同化混染作用

同化混染作用被认为是导致硫化物熔离的最重要机制 (柴凤梅等, 2005; Arndt et al., 2005; Barnes et al., 2005; Naldrett, 2009)。它主要通过两种方式使得硫化物发生熔离: ①地壳中 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 和 CO_2 的加入可以降低岩浆体系中 S 的溶解度, 从而导致硫化物的熔离 (Irvine, 1975; Naldrett, 1989; Lightfoot, 1997; Ripley, 2003; 张招崇等, 2003; Li et al., 2009)。②围岩中地壳 S 进入岩浆中使硫化物发生熔离 (Lesher et

al., 1993, 1996; Naldrett et al., 1992, 1999, 2009; Li et al., 2009)。

从岩体宏观地质特征、矿物晶体化学、微量元素地球化学、Sr-Nd-Os 和 S 同位素方面综合分析岩体是否发生了同化混染作用及同化混染程度。在岩体与大理岩的接触部位广泛发育有蛇纹石化大理岩, 这暗示了在浅部岩浆房, 岩浆和围岩之间存在明显的同化混染作用, 对同化混染作用敏感的单斜辉石和斜方辉石的矿物晶体化学特征也暗示了浅部岩浆房存在富 Ca 组分的加入, 同时也从侧面证明了地壳深部和浅部岩浆房内岩浆所同化的地壳物质成分有所不同。

微量元素可以作为岩浆同化混染作用良好示踪剂, 尤其是强不相容元素 (Zr、Th 和 REE 等) 及其比值具有很好的指示意义。在金川岩体微量元素蛛网图上 (图 4), 不同期次及岩石类型样品相对于

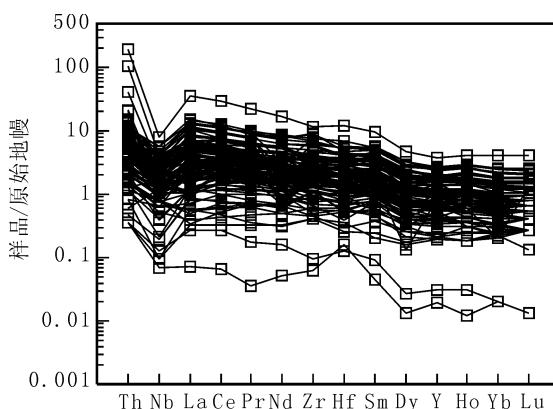


图 4 金川岩体微量元素蛛网图

Fig. 4 Primitive mantle-normalized spider

diagram of traceelement of Jinchuan intrusion

(原始地幔标准化值据 Sun et al., 1989; 微量元素数据引自 Chai G, 1992a; 汤中立等, 1995; Song et al., 2006; 陈列锰, 2009; Tonneller, 2010。图 4、图 6、图 7、图 8 数据来源相同)

Th 和 La, 均表现出明显 Nb 的负异常, 且随着微量元素含量越高 Nb 的亏损程度越明显。在 $\epsilon\text{Nd-(La/Sm)}_N$ 图解上 (图 5), 二者具有明显的负相关性, 这暗示了随着岩浆演化同化混染的程度逐渐增强。金川岩体 Zr/Nb 值变化范围为 0.94~67.14, 除个别样品外, 绝大部分样品高于原始地幔 ($\text{Zr}/\text{Nb} = 15.7$) 和 OIB ($\text{Zr}/\text{Nb} = 4.15$) 的比值 (Sun, 1980; Sun et al., 1989)。Nb 与 U、Ce 和 Pb

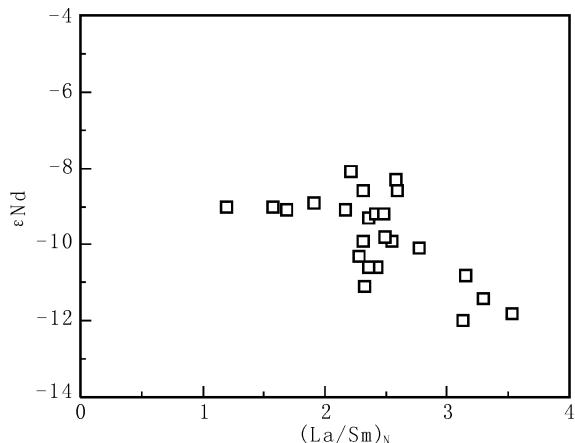


图 5 金川岩体 $\epsilon\text{Nd-(La/Sm)}_N$ 图解

(数据引自 Li et al., 2004; Tonneller, 2010)

Fig. 5 The diagram of $\epsilon\text{Nd-(La/Sm)}_N$ of Jinchuan intrusion

由于具有相似的总分配系数 (Hofmann, 1988; Sun et al., 1989), Nb/U 和 Ce/Pb 值在地幔部分熔融过程中不发生明显的分异。洋中脊玄武岩 (MORB) 和 洋岛玄武岩 (OIB) 的 Nb/U 值为 47 ± 10 (Hoffman, 1988), 原始地幔该比值约为 34 (Sun et al., 1989), 大陆地壳 Nb/U 值约为 9.7 (Campbell, 2002)。典型地幔 Ce/Pb 值为 25 ± 5 , 地壳 Ce/Pb 值小于 15 (Furman et al., 2004)。金川岩体 Nb/U 值变化范围大 ($0.12 \sim 67.50$), Ce/Pb 变化范围为 $0.12 \sim 15.45$, 绝大多数样品都小于 9.7, 平均值为 2.92。这些元素地球化学比值表明, 金川岩体母岩浆遭受了一定程度的地壳物质混染, 且混染物质具有明显的成分不均一性。同时表明, 岩浆源区遭受了明显的流体交代作用, 这与同位素研究结果相吻合 (汤中立等, 1991, 1992; 杨合群等, 1997; Li et al., 2005; Tonneller, 2010)。在 Th-Ta、Th-Nb 和 $(\text{Th}/\text{Ta})_{PM} - (\text{La}/\text{Nb})_{PM}$ 相关图解 (图 6、图 7、图 8) 上, 多数数据点都落入下地壳和上地壳之间, 这也表明岩浆演化过程中分别遭受了上下地壳物质的混染。利用岩体 Sr-Nd 同位素变化模拟认为, 岩浆发生同化混染的程度约为 5%~10% (Li et al., 2004, 2010), 这与块状矿石的 Os 同位素研究结果一致 (杨刚等, 2005)。由此可见, 金川岩体在岩浆演化过程中遭受了比较明显的地壳物质同化混染, 且在不同深度岩浆房内所混染的地壳物质组分也各不相同。

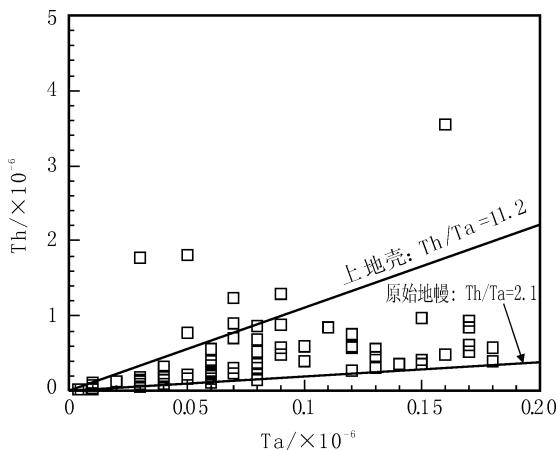


图6 金川岩体 Th-Ta图解

Fig. 6 The diagram of Th-Ta

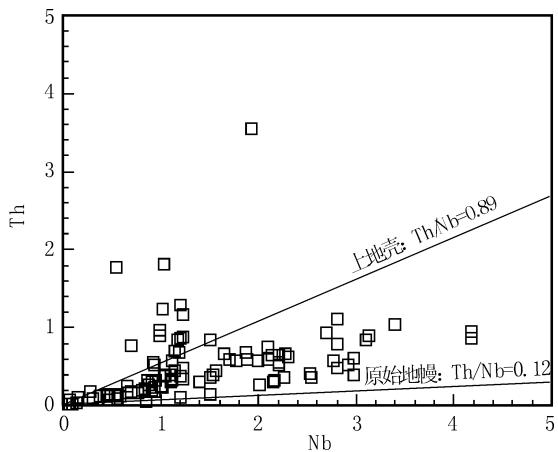
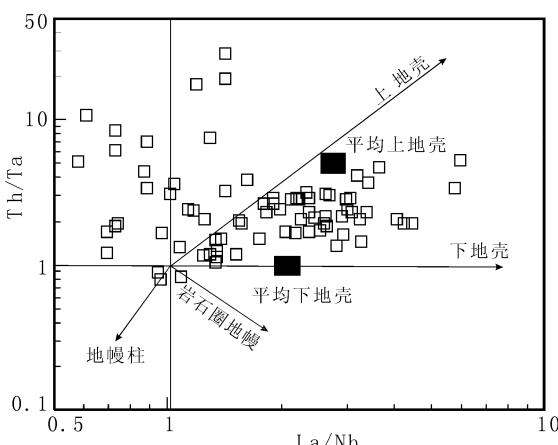
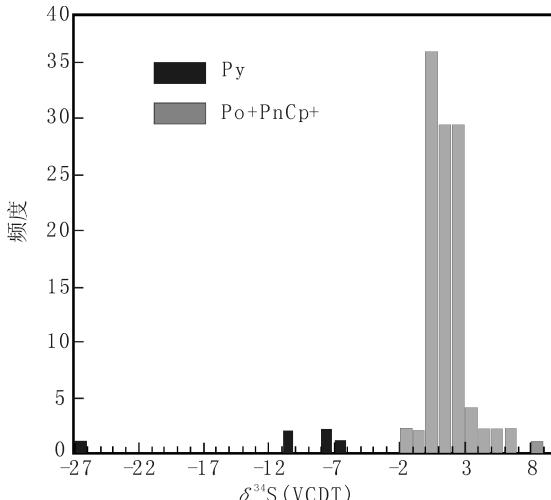


图7 金川岩体 Th-Nb图解

Fig. 7 The diagram of Th-Nb

图8 金川岩体 $(\text{La}/\text{Nb})_{\text{PM}}$ - $(\text{Th}/\text{Ta})_{\text{PM}}$ 相关图解Fig. 8 The diagram of $(\text{La}/\text{Nb})_{\text{PM}}$ - $(\text{Th}/\text{Ta})_{\text{PM}}$

S同位素是成矿物质来源的重要示踪剂，同时也是探讨是否存在地壳S加入的重要证据。前人对金川不同金属硫化物的S同位素进行了系统的研究(汤中立等, 1995; Ripley et al., 2005)，测试结果表明，金川岩体中磁黄铁矿-镍黄铁矿-黄铜矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 变化范围为-2‰~8‰。其中，超过80%样品的 $\delta^{34}\text{S}$ 变化范围为-2‰~2‰(图9)，具有典型地幔S的特征，这与具有明显地壳S加入的Noril'sk-Kharaelakh矿床具有明显的区别($\delta^{34}\text{S}$ 变化范围10‰~12‰)。一些学者据此认为，金川岩体中S来自岩浆本身而不存在围岩硫的混入(杨和群等, 1997; 汤中立等, 1995, 2002, 2006; 姜常义等, 2011)。同时，与国外其他矿床不同，金川岩体围岩中的S含量低于 100×10^{-6} (Ripley et al., 2005; Li et al., 2010)，这也间接证明了在终端岩浆房内可能不存在围岩硫的混染。

图9 金川矿床 $\delta^{34}\text{S}$ 变化范围图解

(数据引自 Ripley et al., 2005; 高亚林等, 2009)

Fig. 9 Histogram of $\delta^{34}\text{S}$ Values from the Jinchuan deposit

5 深部岩浆房成矿物质预富集过程

尽管一些学者质疑深部岩浆房赋矿岩浆及矿浆发生长距离的运移具有相当大的难度(Chai et al., 1992a; Tonnelier, 2010; Li et al., 2010)，但是越来越多证据表明，金川矿床是“深部分异熔离—多期贯入终端岩浆房”成岩成矿的产物，并且这一模式也适用于国内其他铜镍硫化物矿床(如喀

拉通克、黄山东、图拉尔根) (钱壮志等, 2009; 姜常义等, 2009; 孙涛等, 2009; 刘平平等, 2010; 邓宇峰等, 2012)。尽管研究认为金川矿床母岩浆在进入深部岩浆房之前和贯穿终端岩浆房(浅部岩浆房)之后都发生了少量的硫化物熔离作用 (Song et al., 2009; Tang et al., 2009; 陈列锰等, 2009), 但是硫化物的熔离主要发生在深部岩浆房内。笔者在综合上述研究成果的基础上, 拟对深部岩浆房内导致硫化物熔离的机制、硫化物熔离相对时限及熔离量、硫化物的迁移聚集及分离结晶作用过程等关键问题进行系统总结, 明晰深部岩浆房内成矿物质的预富集过程。

5.1 深部岩浆房硫化物熔离机制

研究表明, 多数玄武质岩浆在离开地幔源区时是硫不饱和的 (Keays, 1995; Naldrett, 1997, 1999, 2009; Arndt et al., 2005), 这使得岩浆源区亲铜元素能有效的进入原生岩浆中, 而要形成矿床则必须保证在岩浆演化的某一阶段岩浆中 S 是过饱和的, 使 Ni、Cu 和 PGE 进入到硫化物中并在某一有利部位聚集起来。导致 S 饱和的机制主要有: ①不同成分岩浆的混合作用。②岩浆温度的快速降低。③镁铁质矿物分离结晶作用。④围岩同化混染。

金川矿床的深部岩浆房硫化物熔离机制一直是争论的焦点, 李文渊 (1996) 通过对金川矿床 PGE 分布特征研究后认为, 金川矿床可能是由 2 种不同成分岩浆混合形成的。另外一些学者则认为, 金川矿床母岩浆来自相同的岩浆源区, 并结合 S 同位素特征认为, 金川矿床没有围岩 S 的混入, 硫化物熔离是地壳物质混染和镁铁质矿物分离结晶共同作用的结果 (杨合群等, 1997; 汤中立等, 1998, 2002, 2006; Song et al., 2006; 陈列锰等, 2009; 李士彬等, 2008)。尽管矿体 S 同位素和金川现在岩体围岩 S 含量特征都不支持存在围岩 S 的加入, 但是一些学者依据实验研究结果认为, 岩浆中 S 的溶解度随着岩浆的上升总体是增大趋势 (Mavrogenes et al., 1999; Naldrett, 2009; Holzheid et al., 2002; Li et al., 2009), 要达到硫的过饱和必须有外来 S 的加入, 并据此推测金川矿床围岩 S 的加入发生在深部岩浆房内 (Lehmann et al., 2007; Tonnelier, 2010; Li et al., 2010)。

确定深部岩浆房内硫化物的熔离机制需要从多方面考虑。从赋矿岩石类型看, 金川矿床的主要赋矿岩相是金川岩体中基性程度最高的纯橄岩和二辉橄榄岩中 (明显不同于喀拉通克和黄山东) (钱壮志等, 2009; 姜常义等, 2009; 夏明哲等, 2010), 表明硫化物熔离应发生在岩浆演化的早期阶段。同时模拟计算也表明, 深部岩浆房内硫化物熔离时仅发生了约 1% 的橄榄石分离结晶 (陈列锰等, 2009), 如此低程度的镁铁质矿物分离结晶不能导致岩浆中 S 的过饱和 (Naldrett, 2009)。前已述及, 在岩浆演化过程中, 岩浆混染了大量下地壳物质组分, 据此推测深部岩浆房的围岩中极有可能存在一定量的 S, 且其 S 同位素也具有幔源 S 的特征, 这使得从 S 同位素角度鉴别不出地壳 S 的混入。通过以上综合考虑, 笔者认为金川母岩浆在深部岩浆房内具有幔源 S 同位素特征的围岩 S 的加入是导致硫化物熔离的最重要和最直接因素。同时, 围岩中 SiO₂ 等组分的加入进一步促进了 S 的过饱和, 镁铁质矿物分离结晶作用对硫化物熔离作用贡献最小。

5.2 深部岩浆房硫化物熔离相对时限及熔离量

在硫化物熔离之前, 大量橄榄石的分离结晶会使岩浆中 Ni 大量进入橄榄石中, 这极不利于铜镍矿床的形成 (Arndt et al., 2005; Barnes et al., 2005), 因此硫化物的熔离与橄榄石分离结晶的相对时限直接制约着矿床的品位及规模。金川矿床的主要赋矿岩性为二辉橄榄岩和纯橄岩, 在金川岩体中基性程度最高。同时模拟计算表明, 金川岩体母岩浆在深部岩浆房内约发生了 1% 的橄榄石分离结晶后, 硫化物便开始熔离, 同时继续发生橄榄石的分离结晶, 二者之间的质量比为 1 : 20 ~ 1 : 40 (Li et al., 2004; 陈列锰等, 2009)。这些研究都表明, 金川矿床深部岩浆房中硫化物开始熔离发生在岩浆演化早期, 这使岩浆中的成矿元素能最大程度的进入硫化物中。

前已述及, 金川矿床深部岩浆房是一个开放的岩浆系统, 存在多期次的岩浆贯穿 (汤中立等, 1995; De Waal et al., 2004; Tang et al., 2009)。模拟计算也表明, 现存金川岩体体积仅占参与成矿岩浆体积的 3% 左右 (Li et al., 2004; Jiao et al., 2009; 宋谢炎等, 2010), 这为保证大量的硫化物熔离提供了物质基础。在深部岩浆房

内, 当新鲜的岩浆贯入岩浆房时, 因为 Ni、Cu 和 PGE 元素在硫化物熔体/硅酸盐岩浆之间的分配系数很大 (Barnes et al., 1999; Mungall et al., 2005), 先前熔离的硫化物液滴从岩浆中进一步萃取亲铜元素, 使硫化物中亲铜元素品位含量逐渐升高。同时后期贯入深部岩浆房的岩浆也发生了硫化物的熔离, 使深部岩浆房内熔离出的硫化物含量逐渐增加, 从而提高了矿床的规模。

由此可见, 金川矿床硫化物熔离发生在岩浆演化的早期阶段, 开放的深部岩浆房中后期新鲜岩浆的持续贯入不仅使先前熔离的硫化物的成矿元素品位不断提高, 同时也使硫化物熔离的量逐渐增加, 为形成超大型矿床提供了可能。

5.3 深部岩浆房硫化物的迁移聚集及分离结晶

岩浆体系中最先熔离出的硫化物是 Fe-Ni-Cu-S 的固溶体, 其密度为 $4.20\sim4.60 \text{ g/cm}^3$, 明显大于玄武质岩浆和橄榄石的密度 ($3.27\sim3.48 \text{ g/cm}^3$)。在重力作用下硫化物熔体逐渐聚集在岩浆房底部, 并且沉降速度大于橄榄石等镁铁质矿物。较早期熔离的硫化物在沉降时由于岩浆体系的黏滞度较低, 可以下沉的岩浆房的底部形成硫化物矿浆。随后熔离出的硫化物则由于在沉降时岩浆的黏滞度和橄榄石含量逐渐增加使硫化物熔体呈填隙状充填在橄榄石的颗粒周围, 而表现为网状和浸染状结构。

由于 Ni、Cu 和 PGE 在硫化物熔体/硅酸盐熔体之间具有较大的分配系数, 硫化物熔离时亲铜元素强烈富集在硫化物中, 通常情况下, 矿石样品中亲铜元素 (Ni、Cu、PGE) 含量与 S 呈正相关关系。Li (2010) 则研究表明, 样品中 S 小于 15% 时 (对应浸染状和网状矿石), Ni 和 S 之间呈明显的正相关关系; 样品中 S 大于 22% 时 (对应半块状和块状矿石), Ni 和 S 之间不存在相关性。所有样品中 S-Cu、Ir-S、Pd-S 之间都不存在系统的相关性, 这暗示了在硫化物熔离之后发生了分离结晶作用。硫化物分离结晶作用通常形成单硫化物固溶体 (MSS) 和残余硫化物熔体, 在分异过程中 IPGE 在 MSS 中为相容元素, Cu 和 PPGE 为不相容元素, 而 Ni 则随着岩浆中氧逸度和硫逸度的变化而变化, 因此 MSS 中通常相对富集 IPGE, 而残余硫化物熔体中则富集 Cu 和 IPGE。金川不同矿石类型中 Cu-Pd 呈正相关关系, Ir-Pt、Ir-Pd 呈负相

关关系, 海绵陨铁状和块状矿石的 PGE 原始地幔标准化配分曲线 IPGE 和 PPGE 分异明显, 这都表明了硫化物发生了分离结晶作用 (Chai et al., 1992b; Song et al., 2009, 陈列锰, 2009; Li et al., 2010; 苏尚国等, 2010)。在金川矿床的 I、II 矿区之间, F6 断层下盘发育有呈“鸡窝状”的富铜矿体, 研究表明, 富铜矿体相对于其他矿石明显富 Cu 和 PPGE, 认为是硫化物发生 MSS 分离结晶后的残余硫化物熔体 (田毓龙等, 2009; 高亚林等, 2009; Gao et al., 2009; 苏尚国等, 2010)。陈列锰 (2009) 依据 Ni/Ir-Pd/Ir 关系对 I 号岩体硫化物分离结晶进行了定量模拟计算, 结果表明, 网状矿石是硫化物经过 20%~40% 的 MSS 分离结晶后残余硫化物固结形成的; 块状矿石则是由发生了约 90% 分离结晶的 MSS 固结形成的。由此可见, 在深部岩浆房内硫化物含量越高的部位由于硫化物之间的连通性较好, 导致硫化物发生了明显的分离结晶作用, 而硫化物之间连通性较差的部位则未发生明显的硫化物分离结晶, 硫化物中各成矿元素特征仍保持较好的相关性。同时硫化物的分离结晶作用也进一步表明, 在深部岩浆房内岩浆停留了足够长的时间, 主要的成矿作用过程都发生在深部岩浆房内, 深部岩浆房是开放岩浆通道的一部分, 而金川岩体的现存空间则为相对封闭的终端岩浆房, 不是岩浆通道。

6 结论和认识

金川铜镍硫化物矿床典型的地质特征表明, 成矿物质是在深部岩浆房内发生预富集后, 由于岩浆房顶盖垮塌或在后期构造应力挤压作用下多期贯入终端岩浆房形成的。在深部岩浆房内可能混入了具有幔源 S 同位素特征的围岩 S, 同时围岩中富 Si 组分的加入和橄榄石等镁铁质矿物的分离结晶共同导致了硫化物的熔离。

在深部岩浆房内硫化物的熔离发生在岩浆演化的早期阶段, 后期贯入的新鲜岩浆不仅使先前熔离的硫化物中金属品位进一步提高, 同时也使岩浆中熔离出的硫化物的量逐渐增加。熔离出的硫化物由于与玄武质岩浆和橄榄石之间的密度差异, 在重力作用下形成了由下向上成矿物质含量逐渐降低的分层现象。随着温度的降低, 熔离出的硫化物发生了

分离结晶作用,形成了富IPGE的固溶体硫化物(MSS)和富Cu和PPGE的残余硫化物熔体。

致谢:笔者在研究过程中得到了汤中立院士的悉心指导,在审稿过程中得到审稿人的支持与帮助,并给予了有益指导,在此向他们表示衷心的感谢。

参考文献 (References):

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[D].贵阳:中国科学院地球化学研究所,2009.

Chen Liemeng. Features and genesis of Segment I and its hosted Ni-Cu sulfide deposite of the Jinchuan intrusion, Gansu Provincece [D]. University of Chinese Academy of Sciences, Guiyang (in Chinese with English abstract), 2009.

陈列锰,宋谢炎,聂晓勇,等.甘肃金川Ⅱ号岩体辉石化学特征及其地质意义[J].矿物岩石,2008,28(1):88-96.

Chen Liemeng, Song Xieyan, Nie Xiaoyong, et al. Mineral chemistry and geological significance of pyroxene from segment Ⅱ of the Jinchuan intrusion, Gansu Province [J]. Mineral Petrol, 2008, 28 (1): 88-96.

陈列锰,宋谢炎,Danyushevsky LV,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,2009,25(12):3369-3378.

Chen Liemeng, Song Xieyan, Danyushevsky LV, 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 Petrological Sinica, 2009, 25 (12): 3369-3378 (in Chinese with English abstract).

柴凤梅,张招崇,毛景文,等.岩浆型Cu-Ni-PGE硫化物矿床研究的几个问题探讨[J].矿床地质,2005,24(3):325-335 (in Chinese).

Chai Fengmei, Zhang Zhaochong, Mao Jingwen, et al. Discussion on some problems concerning magmatic copper-nickel-PGE sulfide deposits [J]. Mineral Deposits, 2005, 24 (3): 325-335.

邓宇峰,宋谢炎,周涛发,等.新疆东天山黄山东岩体橄榄石成因以及探讨[J].岩石学报,2012,28(7):2224-2234.

Deng Yufeng, Song Xieyan, Zhou Taofa, et al., Correlations between Fo number and Ni content of olivine of the Huangshandong intrusion, eastern Tianshan, Xinjiang, and the genetic significances [J]. Acta Petrological Sinica, 2012, 28 (7): 2224-2234 (in Chinese

with English abstract).

高亚林,汤中立,宋谢炎,等.金川铜镍矿床隐伏富铜矿体成因研究及其深部找矿意义[J].岩石学报,2009,25(5):3379-3395.

Gao Yalin, Tang Zhongli, Song Xieyan, et al. Geological characteristics, genesis and its prospecting in depth, of concealed Cu rich orebody, in Jinchuan Deposit, western Chian [J]. Acta Geological Sinica, 2009, 25 (5): 3379-3395 (in Chinese with English abstract).

甘肃省地质矿产局第六地质队.白家咀子硫化铜镍矿床地质[M].北京:地质出版社,1984.

Sixth Geological Unit of the Gansu Geological Survey (SGU). Geological of Baijiazuizi Ni-Cu sulfide deposit [M]. Geological Publishing House, Beijing, 1984 (in Chinese with English abstract).

贾志永,张铭杰,汤中立,等.新疆喀拉通克铜镍硫化物矿床成矿岩浆作用过程[J].矿床地质,2009,28(5):673-686.

Jia Zhiyong, Zhang Mingjie, Tang Zhongli, et al. Petrogenesis of Kalatongke Cu-Ni sulfide deposit in Xinjiang [J]. Mineral Deposit, 2009, 28 (5): 673-686 (in Chinese with English abstract).

姜常义,夏明哲,钱壮志,等.新疆喀拉通克镁铁质岩体群的岩石成因研究[J].岩石学报,2009,25(4):749-764.

Jiang Changyi, Xia Mingzhe, Qian Zhuangzhi, et al. Petrogenesis of Kalatongke mafic rock intrusions, Xinjiang [J]. Acta Petrological Sinica, 2009, 25 (4): 749-764.

李士彬,宋谢炎,胡瑞忠,等.甘肃金川Ⅱ号岩体岩相学特征及分离结晶过程探讨[J].岩石学报,2007,23(10):2553-2560.

Li Shibin, Song Xieyan, Hu Ruizhong, et al. Petrographic feature of segment Ⅱ of the Jinchuan intrusion, Gansu, and its fractional crystallization [J]. Acta Petrological Sinica, 2007, 23 (10): 2553-2560 (in Chinese with English abstract).

钱壮志,王建中,姜常义,等.喀拉通克铜镍矿床铂族元素地球化学特征及其成矿作用意义[J].岩石学报,2009,25(4):832-844.

Qian Zhuangzhi, Wang Jianzhong, Jiang Changyi, et al. Geochemistry characters of platinum-group elements and its significances on the process of mineralization in the Kalatongke Cu-Ni sulfide deposit, Xinjiang, China [J]. Acta Petrological Sinica, 2009, 25 (4): 832-844.

苏尚国,汤中立.金川含矿超镁铁岩侵入体侵位序列[J].地学前缘,2010,17(2):118-126.

- Su Shangguo, Tang Zhongli. Emplacement sequence in the Jinchuan sulfide ore-bearing ultramafic intrusion, western China [J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17 (2): 118-126 (in Chinese with English abstract).
- 宋谢炎, 肖家飞, 朱丹, 等. 岩浆通道系统与岩浆硫化物成矿研究新进展[J]. 地学前缘, 2010, 17 (1): 153-163.
- Song Xieyan, Xiao Jiafei, Zhu Dan, et al. New insights on the formation of magmatic sulfide deposits in magma conduit system [J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17 (1): 153-163 (in Chinese with English abstract).
- 徐章华, 汤中立, 蔡克勤. 金川铜、镍(含PGE)岩浆硫化物矿床母岩浆成分的估计[J]. 现代地质, 1998, 12 (4): 506-514.
- Xu Zhanghua, Tang Zhongli, Cai Keqin. Estimation for chemical composition of parent magma of Jinchuan Cu-Ni (PGE) magma of Jinchuan Cu-Ni (PGE) magmatic sulfide deposit [J]. Geoscience, 1998, 12 (4): 506-514 (in Chinese with English abstract).
- 夏明哲, 姜常义, 钱壮志, 等. 新疆东天山花山东岩体岩石地球化学特征与岩石成因[J]. 岩石学报, 2010, 26 (8): 2413-2430.
- Xia Mingzhe, Jiang Changyi, Qian Zhuangzhi, et al. Geochemistry and petrogenesis of Huangshandong intrusion, East Tianshan, Xinjiang [J]. Acta Petrogenesis Sinica, 2010, 26 (8): 2413-2430 (in Chinese with English abstract).
- 汤中立, 钱壮志, 姜常义, 等. 中国镍铜铂族岩浆硫化物矿床与成矿预测[M]. 北京: 地质出版社, 2006.
- Tang Zhongli, Qian Zhuangzhi, Jiang Changyi, et al. Magmatic Ni-Cu-PGE sulfide Deposits and Metallogenetic Prognosis in China [M]. Geological Publishing House, Beijing, 2006 (in Chinese with English abstract).
- 汤中立, 钱壮志, 姜常义, 等. 岩浆硫化物矿床勘查研究的趋势与小岩体成矿系统[J]. 地球科学与环境学报, 2011, 33 (1): 0001-0009.
- Tang Zhongli, Qian Zhuangzhi, Jiang Changyi, et al. Trends of Research in Exploration of Magmatic Sulfide Deposits and Small Intrusions Metallogenetic System [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2011, 33 (1): 0001-0009 (in Chinese with English abstract).
- 汤中立, 李文渊. 金川铜镍硫化物(含铂)矿床成床模式及地质对比[M]. 北京: 地质出版社, 1995.
- Tang Zhongli, Li Wenyuan. Metallogenetic Model and Geological Constraints of the Jinchuan Platinum Bering Cu-Ni Sulfide Deposit [M]. Geological Publishing House, Beijing, 1995 (in Chinese with English abstract).
- 汤中立. 金川铜镍硫化物矿床成矿模式[J]. 现代地质, 1990, 4 (4): 55-64.
- Tang Zhongli. Formation of the Jinchuan Cu-Ni sulfide deposit [J]. Geoscience, 1990, 4 (4): 55-64 (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, 1996, 70 (3): 237-243.
- Tang Zhongli. Main mineralization mechanism of magmatic sulfide deposits in China [J]. Acta Geological Sinica, 1996, 70 (3): 237-243 (in Chinese with English abstract).
- Tonnelier, N. J. Geology and genesis of the Jinchuan Ni-Cu-(PGE) deposit, China: Unpublished Ph. D. thesis [R]. Sudbury, Canada, Laurentian University, 2010.
- 田毓龙, 包国忠, 汤中立, 等. 金川铜镍硫化物矿床岩浆通道型矿体地质地球化学特征[J]. 地质学报, 2009, 83 (10): 1515-1525.
- Tian Yulong, Bao Guozhong, Tang Zhongli, et al. Geological and Geochemical characteristics of the magma conduit-type orebodies of Jinchuan Cu-Ni sulfide deposit [J]. Acta Geologica Sinica, 2009, 83 (10): 1515-1525 (in Chinese with English abstract).
- 谢广轰, 汪云亮, 范彩云, 等. 金川超镁铁质岩侵入体及超大型硫化物矿床的成岩成矿机制[J]. 中国科学(D辑), 1998, 28 (增刊): 31-36.
- Xie Guanghong, Wang Yunliang, Fan Caiyun, et al. Ultramafic intrusion and diagenetic-mineralization mechanism of ultralarge sulfide deposit in the Jinchuan [J]. Science in China (Series D), 1998, 28 (Suppl.): 31-36 (in Chinese with English abstract).
- 杨合群, 汤中立, 苏犁, 等. 金川硫化铜镍矿床成矿岩浆性质和源区特征讨论[J]. 甘肃地质学报, 1997, 6 (1): 44-52.
- Yang Hequn, Tang Zhongli, Su Li, et al. Magma and source area in Jinchuan Cu-Ni sulfide deposit [J]. Acta Geological Gansu, 1997, 6 (1): 44-52 (in Chinese with English abstract).
- Arndt N T, Lescher, C M, Czamsnske G K. Mantle-Derived Magmas and Magmatic Ni-Cu-(PGE) Deposits [J]. Society of Economic Geologists, Inc. Economic Geology 100th Anniversary Volume, 2005, 5-23.
- Barnes S J, Lightfoot P C. Formation of magmatic nickel sulfide ore deposits and processes affecting their copper and platinum group element contents [J]. Economic Geology 100th Anniversary Volume, 2005, 179-213.
- Chai Gang, Naldrett A J. Characteristics of Ni-Cu-PGE mineralisation and genesis of the Jinchuan deposit, Northwest China [J]. Econ. Geol., 1992, 87: 1475-1495.
- Gao Yalin, Tang Zhongli, Zhang Mingjie, et al. Geochemical characteristics of concealed Cu-PGE rich ore body,

- thn Jinchuan depositmnorthwestern China [J]. Northwestern Geology, 2009, 42 (zl): 44-47.
- Gao Yongbao, Li Wenyuan, Zhang Zhaowei, et al. Contrasting Jinchuan, Guansu, giant Ni-Cu deposit with Lashuixia Ni-Cu deposit, Qinghai province [J]. Northwestern Geology, 2009, 42 (zl): 49-52.
- Furman T Y, Bryce J C, Karson J, et al. East African rift system (EARS) plume structure: Insight from quaternary mafic lavas of Turkana [J]. Kenya. Journal of Petrology, 2004, 45: 1069-1088.
- Hofmann W. Chemical differentiation of the earth: The Relationship between mantle, continental crustal and oceanic crust [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1988, 90: 297-314.
- Irvine T N. Crystallization sequences of the Muskox intrusion and other layered intrusions: II. Origin of chromite layers and similar deposits of other magmatic ores [J]. Geochim. Comochim. Acta, 1975, 39: 991-1020.
- Keays R R. The Role of komatiitic and picritic magmatism and S-saturation in the formation of ore deposits [J]. Lithos, 1995, 34: 1-18.
- Keays R R. The role of komatiitic and picritic magmatism and S-saturation in the formation of the ore deposits [J]. Lithos, 1995, 34: 1-18.
- Li Xianhua, Su Li, Chung S, et al. Formation of the Jinchuan ultramafic intrusion and the World's third largest Ni-Cu sulfide deposit: Associated with the 825Ma south China mantle Plume [J]. Geochemistry Geophysics Geosystems, 2005, 6: 1-16.
- Li C, Xu Zhanghua, De Waal S A, et al. Compositionnal variations of olivine from the Jinchuan Ni-Cu sulfide deposit, Western Chian: Implation for ore genesis [J]. Mineralium Deposita, 2004, 39: 159-172.
- Li C, A J Naldrett, Ripley EM. Controls on the Fo and Ni Contents of olivine in sulfide-bearing mafic-ultramafic intrusions: Priciples, Models and examples from Voisey Bay [J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14 (5): 177-185.
- Li C, Ripley E M. A new genetic model for the giant Ni-Cu-PGE sulfide depositis associated with the Siberian flood basalts [J]. Economic Geological, Inc. Economic Geology, 2009, 104: 291-301.
- Li C, E M Ripley. The Giant Jinchuan Ni-Cu (PGE) deposit: Tectonic setting, magma evolution, ore genesis and exploration implications [J]. 2010, 1-40.
- Lehmann J, Arndt N, Windley B, et al. Field relationships and geological constraints on the emplacement of the Jinchuan intrusion and its Ni-Cu-PGE sulfide deposit, Gansu, China [J]. Economic Geology, 2007, 102: 75-94.
- Song Xieyan, Zhou Meifu, et al. Role of crustal contamination in formation of the Jinchuan intrusion and its world-class Ni-Cu (PGE) sulfide deposit, NW China [J]. Int. Geol. Rev, 2006, 48: 1113-1132.
- Song X Y, Keays R R, Zhou Meifu, et al. Ihlenfeld C, Xiao J F. 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.
- Jiao Jianggang, Yan Haiqing. Mass balance and prospecting orientation of JInchuan magmatic Ni-Cu (PGE) sulfide deposit [J]. Northwestern Geology, 2009, 42 (zl): 53-55.
- Ripley E M, Sarkar A, Li C. Mineralogic and Stable Isotope Studies of Hydrothermal Alteration at the Jinchuan Ni-Cu Deposit, China [J]. Society of Economic Geologists, Inc. Economic Geology, v. 100, 2005, 1349-1361.
- Su Shangguo, Li C, Zhou Meifu, 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: 609-626.
- Sun, McDonough WF. Chemical and isotope systematics of oceanic basalts: Implication for mantle composition and processes. In: Saundier AD and Norry MJ (eds). Magmatism in the Ocean Basins [J]. Geol. Soc. Spec. Publ., 1989, 42: 313-315.
- Li C , Zhang Mingjie, Jiang Changyi, et al. Precise U-Pb Zircon age and tectonic setting of the giant Jinchuan Ni-Cu sulfide deposit, western China [J]. Northwestern Geology, 2009, 42 (zl): 39.
- Tang Zhongli. Small intrusion making large ore: Significance for the exploration of Jinchuan Ni-Cu sulfide deposit [J]. Northwestern Geology, 2009, 42 (zl): 39.
- De Waal S A, Xu Zhanghua, Li C, et al. Emplacement of visous mushes in the Jinchuan ultramafic intrusion, Western China [J]. Can Mineral, 2004, 42: 371-392.
- Lesher C M, Campbell H. Geochemical and fluid dynamic controls on the composition of Komatiite-hosted nickel sulfide ores in Western Australia [J]. Econ Geol, 1993, 76: 1714-1728.
- Lesher C M, Stone W E. Exploration geochemistry of komatiites [A]. In: Application for massive sulfide exploration [C]. Geological Association of Canada Short Course Notes, 1996, 12: 153-204.
- Lightfoot P C, Hawkesworth C J. Flood basalts and mag-

matic Ni、Cu and PGE sulfide mineralization: Comparative geochemistry of the Noril'sk (Siberian Trap) and West Greenlan sequences [A]. In: Mahoney J J and Coffin M F, ed. Large igneous province [C]. Washington D C: American Geophysical Union. 1997, 357-380.

McDonough W W, Sun S S. The composition of the Earth [J]. Chemical Geology, 1995, 120: 223-253.
Naldrett A J. Fundamentals of magmatic sulfide deposits In: Li C, Ripley EM (eds) New developments in magmatic Ni-Cu and PGE deposits [M]. Geological Publishing House, Beijing, 2009.

The Preconcentration Process of Metal Mineral in the Deep Mgama Chamber of Jinchuan Ni-Cu Suphide Deposit

WANG Ya-lei, LI Wen-yuan, ZHANG Zhao-wei,
ZHANG Jiang-wei, GAO Yong-bao, GUO Zhou-ping,
LI Kan, QIAN Bing

(Key laboratory for the study of Focused Magmatism and Giant ore Deposits , MLR,
Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources, Xi'an 710054 , China)

Abstract: The Jinchuan Ni-Cu deposit is one of the three largest magmatic sulfide deposits in the world. Jinchuan deposit have some unusual typical geological characteristics. such as the small size of the host intrusion, mainly consist of ultramafic rocks, high sulfide/silicate ration., different rocks and ores showed the mutation contact relationship. These typical characteristics implied the metal had preconcentrated in the deep stage magma chamber. The preconcentration process mainly involved three aspects: The mechanism of sulfide segregation; The relative time of sulfide segregation and the amount of sulfide segregated from the magma; The migration and fractional crystallization process of the sulfide. The Fo of olivine in different rocks have a narrow range ($Fo = 80.11\text{--}85.68$), which suggest that the deep magma chamber is an open system, the penetration of fresh magma make the Fe/Mg ration of the magma constant. Follow the olivine-liquid equilibrium principle, the MgO content of Jinchuan intrusion parental magma calculated from 10.8%-12.6%, which indicated that the source have a high degree of partial melting. The Sr-Nd-Os isotope and trace element geochemical features implied that the jinchuan intrusion parental magma suffered apparent crustal materials, the extent fo the contamination is about 5%-10%. The Th-Ta, Th-Nb, $(Th/Ta)_{PM}$ - $(La/Nb)_{PM}$ diagram showed that part of the contaminated material is a component of the lower crust. The lower crustal material contamination may be the major pechanism of sulfide segregation in the deep magma chamber. The main ore-bearing rock types are lherzolite and dunite, The "Melts" software simulation calculation show that the sulfide segregation occurred in the early stage of magmatic evolution. After the sulfide segregation, as the gravity, it sink to the bottom or the lower part of the chamber. The massive ores of jinchuan deposit have the relative enrichment IPGE, and the rich copper ore body is relatively enriched in Cu and PPGE. The differrentiation of metal elements show that the sulfide had undergone significant fractional crystallization in the deep magma chamber.

Key words: Jinchuan; Ni-Cu sulfide deposit; parental magma; preconcentration in the deep chamber; magma evolution; sulfide segreation