

文章编号: 1000-4734(2022)03-0376-11

甘肃金川II号岩体橄榄石成因探讨

索文德¹, 康健^{2,3*}, 艾启兴¹, 宋谢炎²

(1. 金川集团股份有限公司, 甘肃 金昌 737102; 2. 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; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 金川是世界第三大在采岩浆铜镍硫化物矿床, 其成因备受中外地质学家的关注。金川岩体被一系列北东-东向左行平移断层自西向东依次划分为III、I、II、IV等 4 个岩体。金川岩体主要由硫化物纯橄岩、二辉橄榄岩、橄榄辉石岩组成, 边缘断续分布少量斜长石二辉橄榄岩和辉石岩。金川最大的 1 号矿体产于II号岩体的中心, 呈现出由中间硫化物纯橄岩向两侧浸染状的二辉橄榄岩和橄榄辉石岩过渡的对称式岩相分布。电子探针分析结果显示, 金川II号岩体橄榄石 Fo 值在 79.7%~83.9% 之间变化, w(Ni)为 $959 \times 10^{-6} \sim 2060 \times 10^{-6}$, 大多低于从硫不饱和玄武岩浆中结晶出的橄榄石 Ni 含量。模拟计算表明金川岩体母岩浆为高 MgO 玄武岩浆 (w(MgO)=10%~13%, w(FeO)=11.5%~12.5%)。橄榄石 Ni 含量偏低的原因是橄榄石结晶的同时发生了硫化物熔离, 橄榄石与硫化物的质量比值约为 40 : 1。硫化物纯橄岩和二辉橄榄岩中橄榄石的 Ni 含量及其与 Fo 值的相关性都存在显著的区别, 暗示它们可能是从 Ni 含量不同的母岩浆中结晶出来的。同时, 硫化物纯橄岩中橄榄岩经历了与硫化物熔体的 Fe-Ni 交换, 而二辉橄榄岩中的橄榄石经历了与硅酸盐熔体的 Mg-Fe 交换。

关键词: 金川超镁铁质岩体; 岩浆铜镍矿床; 橄榄石; 母岩浆; 硫化物熔离

中图分类号: P611; P595

文献标识码: A

doi: 10.16461/j.cnki.1000-4734.2022.42.033

第一作者: 索文德, 男, 1968 年生, 高级工程师, 长期从事地质勘查、资源管理及地质环境保护等工作. E-mail: suowende@jnmcc.com

Petrogenesis of olivine from the Segment II of the Jinchuan intrusion in the Jinchuan mine in Gansu Province, NW China

SUO Wen-de¹, KANG Jian^{2,3*}, AI Qi-xing¹, SONG Xie-yan²

(1. Jinchuan Group Co. Ltd., Jinchang 737102, China; 2. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; 3. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

Abstract: The giant Jinchuan magmatic sulfide deposit in China is the third largest mining deposit in the world. Its genesis has attracted the attention of many geologists. The Jinchuan intrusion was divided into four segments, named Segment III, I, II and IV from west to east, by a series of NEE-trending left-lateral strike-slip faults. It consists mainly of sulfide-bearing dunite, lherzolite, and olivine pyroxenite, with a small amount of plagioclase lherzolite and pyroxenite discontinuously distributed in its margin. The largest No.1 orebody of the Jinchuan deposit is hosted in the center of the Segment II. From center to margin of the Segment II, rock types are systematically transitioned from sulfide-mineralized dunite, to lherzolite, and olivine pyroxenite. The EPMA analytical results display that Fo values and Ni contents of olivines of the Segment II are changed from 79.7 to 83.9 and from 959 ppm to 2060 ppm, respectively. Ni contents of olivines of the Segment II are mostly lower than those of olivines crystallized from the sulfur-unsaturated basaltic magma. Model calculation results indicate that the parental magma of the Jinchuan intrusion was a high-MgO basaltic magma which containing about 10%—13% of MgO and 11.5%—12.5% of FeO. The relatively low Ni contents of olivine crystals could be caused by the

收稿日期: 2021-06-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (编号: 41630316; 41772067)

* 通讯作者, E-mail: kaingjian@mail.gyig.ac.cn

sulfide segregation at the time of olivine crystallization from the basaltic magma with about 40:1 for the mass ratio of olivine to sulfide. The Ni contents and their correlations with Fo values of olivines in sulfide-bearing dunite and lherzolite are significantly different, suggesting that olivines of the sulfide-bearing dunite and lherzolite could be crystallized from different parental magmas with different Ni contents. Meanwhile, olivines in the sulfide-bearing dunite had experienced the Fe-Ni exchange reaction with sulfide melt, while olivines in the lherzolite had experienced the Mg-Fe exchange reaction with silicate melt.

Keywords: Jinchuan ultramafic intrusion; magmatic Ni- Cu sulfide deposit; olivine; parental magma; sulfide segregation

金川超镁铁质岩体位于华北克拉通西南缘, 呈透镜状产出, 地表出露面积仅 1.34 km², 赋存着我国最大的岩浆硫化物矿床, 以高矿化率(47%)及单个矿体巨大闻名于世。其成因备受中外地质学家的关注^[1-3], 有关金川矿床年代学、岩石地球化学和矿床成因等方面已经有很多研究成果^[4-24], 但对成矿母岩浆性质的认识仍然存在分歧。

橄榄石是镁铁质岩浆中最早结晶的矿物之一, 其镁橄榄石摩尔分数(Fo值)和Ni含量主要受以下几个因素控制: 岩浆成分, 岩浆分离结晶和硫化物熔离过程^[25-27], 橄榄石与粒间熔体相互反应^[6,28-31]。前人对金川岩体橄榄石成因意义的主要研究进展包括: 1) 金川岩体存在深、浅两个岩浆房, 母岩浆进入浅部岩浆房之前发生了少量橄榄石和斜方辉石的早期结晶^[32-33]; 2) 橄榄石粒径统计表明金川I和II号岩体经历了不同的固结过程, 即I号岩体橄榄石是早期结晶的橄榄石在浅部岩浆房中再生长形成的, 而II号岩体橄榄石以浅部岩浆房中原地结晶生长为主^[34]; 3) 岩浆正常结晶的橄榄石颗粒亏损轻稀土元素和具复杂的成分环带, 而由辉石颗粒熔融后重结晶的橄榄石则具相对高的稀土元素含量^[35]。然而, 对金川最大的1号矿体硫化物纯橄岩及其边缘二辉橄橄榄岩中橄榄石成分差异的研究还非常薄弱。本文通过对1号矿体稠密浸染状矿石和边缘贫矿岩石中橄榄石矿物化学成分的研究, 探讨橄榄石成分变化的影响因素和成因意义。

1 金川矿床地质特征

金川岩体位于华北克拉通西南缘龙首山隆起的北侧(图1a)。龙首山地体北部与潮水盆地相邻, 南缘与祁连褶皱带相隔(图1b)。金川岩体呈似岩墙状不整合侵位于古元古代龙首山群的白家咀子组混合岩、片麻岩和大理岩中(图1c)。岩体走向北西-南东, 长约6500 m, 宽20~500 m不等, 最大延伸超过1100 m。金川岩体被一系列北东东向左行平移断层(F₈、F₁₆₋₁、F₂₃)自西向东依次划分为III、I、II、IV等4个部分^[36](图1c)。Song等(2012)基于岩相学、地球化学以及构造恢复认为金川原本为东、西2个岩体。F₁₆₋₁以西的I和III部分构成西岩体, 赋存24号矿体; F₁₆₋₁以东的II和IV部分构成东岩体, 赋存1号和2号矿体。

金川岩体主要由硫化物纯橄岩、二辉橄橄榄岩、橄橄榄辉石岩组成, 岩体边缘断续分布着少量斜长石二辉橄橄榄岩和辉石岩。本次研究的II号岩体全长3000余m, 最宽处约530 m, 岩体倾向南西, 倾角介于50°~80°之间^[36]。II号岩体以中心对称的岩相分布为特征, 金川矿床最大的1号矿体构成II号岩体的核心, 向两侧过渡为二辉橄橄榄岩和橄橄榄辉石岩(图2)。1号矿体的主体为稠密浸染状硫化物纯橄岩, 含浸染状硫化物的二辉橄橄榄岩构成边缘贫矿^[13]。矿石矿物主要为磁黄铁矿、镍黄铁矿和黄铜矿。

2 橄榄石的岩相学特征

橄榄石是硫化物纯橄岩、二辉橄橄榄岩和橄橄榄辉石岩等岩相的主要造岩矿物(图3a、b)。橄榄石通常呈半自形或浑圆粒状, 发育堆晶结构和包橄结构, 辉石和斜长石则充填于橄榄石颗粒间(图3c、d)。橄榄石在硫化物纯橄岩中粒径为1.5~3.0 mm, 而在二辉橄橄榄岩中为2.5~4.0 mm, 体现出在不同岩相

中的差异(图2)。二辉橄榄岩中橄榄石常被辉石包裹(图3c、d),部分与单斜辉石或硫化物接触(图3a),而硫化物纯橄岩中橄榄石被硫化物包裹(图3b、图4)。橄榄石普遍遭受不同程度的蛇纹石化。

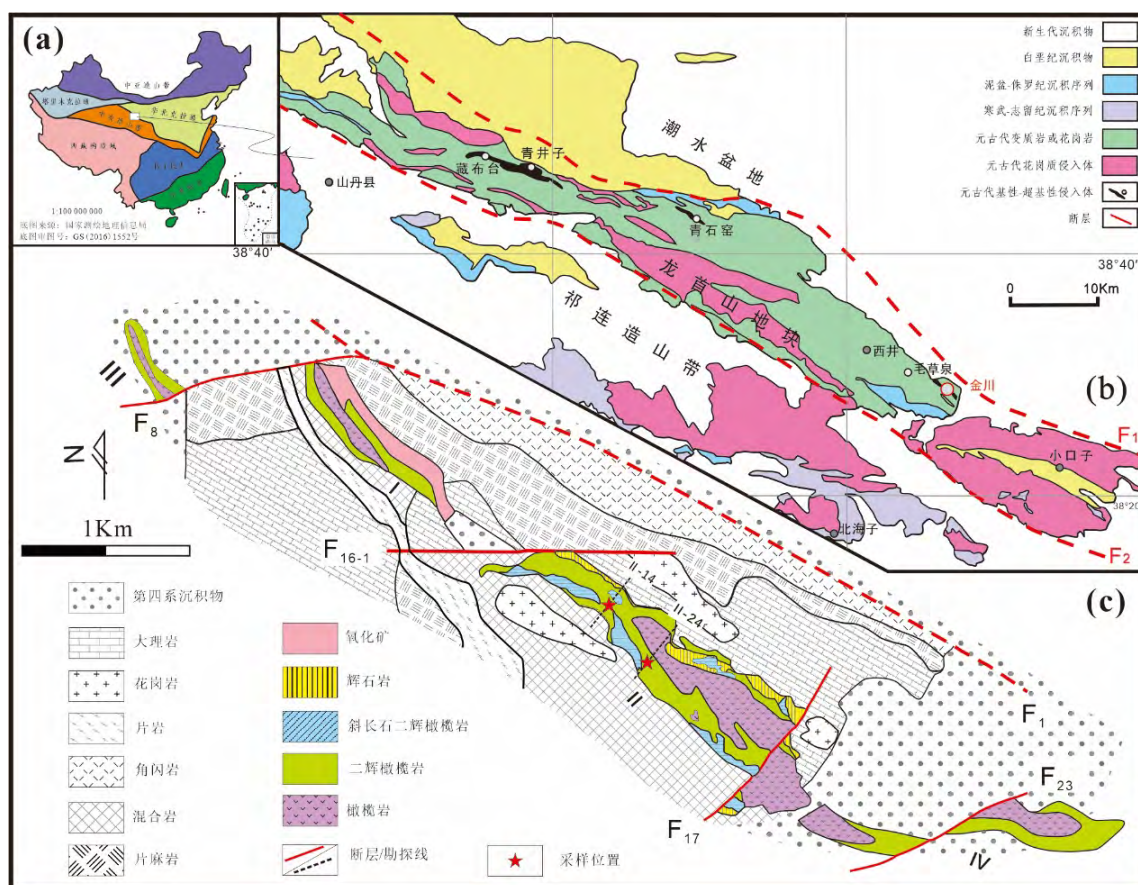


图1 (a) 中国大地构造单元图, 金川岩体位于华北克拉通的西南缘(据文献[21]修改); (b) 龙首山山体简要地质图, 金川岩体位于龙首山隆起的北侧(据文献[21]修改); (c) 金川岩体地质图, 简要显示了岩相分布规律和样品采集的位置(据文献[16]修改)

Fig. 1. (a) Tectonic sketch map for China. The Jinchuan ultramafic intrusion is located at the southwestern margin of the North China craton (modified after reference [21]); (b) Geological map for the Longshoushan terrane, showing the location of the Jinchuan intrusion (modified after reference [21]); (c) Simplified geological map for the Jinchuan intrusion, showing the distribution of major rock units and the sampling locations (modified after reference [16]).

3 采样与分析

本次研究样品采自于金川II号岩体14行ZK83孔的硫化物纯橄岩和24行地表的二辉橄榄岩中(图1c)。样品磨制成薄片后,在显微镜下选择新鲜的橄榄石颗粒进行主量元素分析,测试过程中避开表面凹坑和裂纹。橄榄石主量元素分析在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电子探针实验室完成。分析仪器型号为JEOL JXA-8530F型电子探针,束斑直径为 $10\ \mu\text{m}$,电流为 $10\ \text{nA}$,加速电压为 $25\ \text{kV}$ 。校准用SPI标准矿物,分析误差小于2%,分析结果列于表1。

电子探针分析结果表明,金川II号岩体橄榄石Fo值在 $79.7\%\sim 83.9\%$ 之间变化(表1),与前人分析的结果基本一致^[6,29,35,37-38]。金川II号岩体稠密浸染状矿石中被硫化物包裹的橄榄石Fo值变化范围为 $82.5\%\sim 83.8\%$, $w(\text{Ni})$ 变化范围为 $1630\times 10^{-6}\sim 2060\times 10^{-6}$ 。同一橄榄石颗粒剖面未显示出明显的Fo值变化,但 $w(\text{Ni})$ 变化达到 228×10^{-6} (图4)。二辉橄榄岩中橄榄石Fo值具较大的变化范围和偏低的Ni含量,变化范围分别在 $79.7\%\sim 83.9\%$ 和 $959\times 10^{-6}\sim 1714\times 10^{-6}$ 之间。

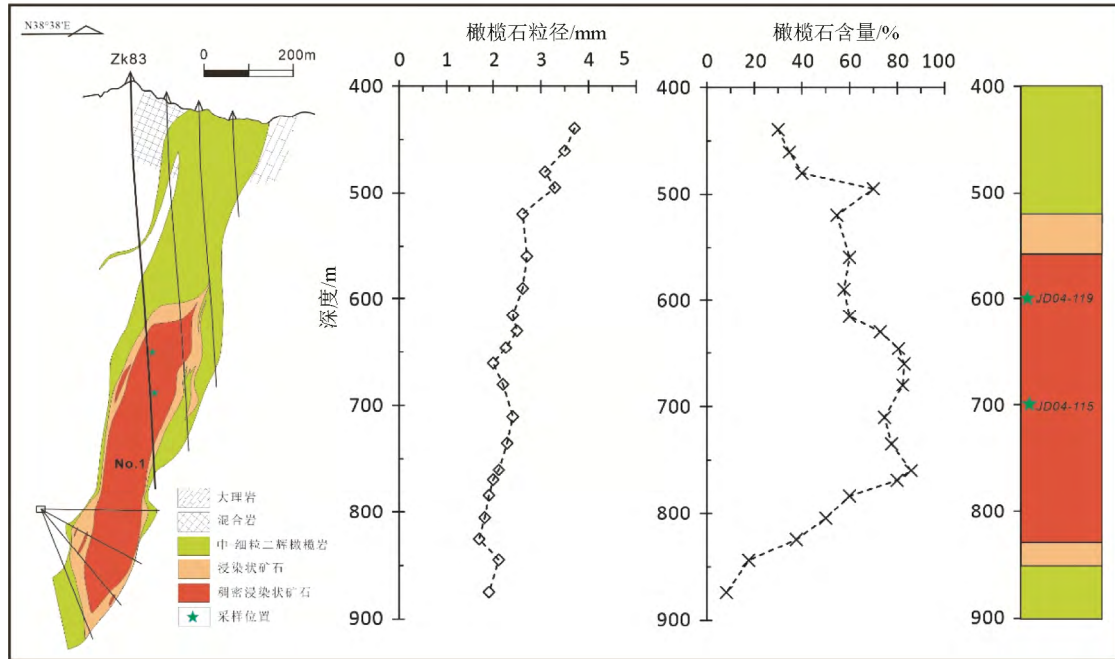


图 2 金川 II 号岩体 14 行剖面图, 显示了 ZK83 孔从上到下橄榄石粒径和含量的变化规律
 Fig. 2. The variations of the olivine grain sizes and contents along the borehole ZK83 in the exploration line 14 of the Segment II.

4 讨论

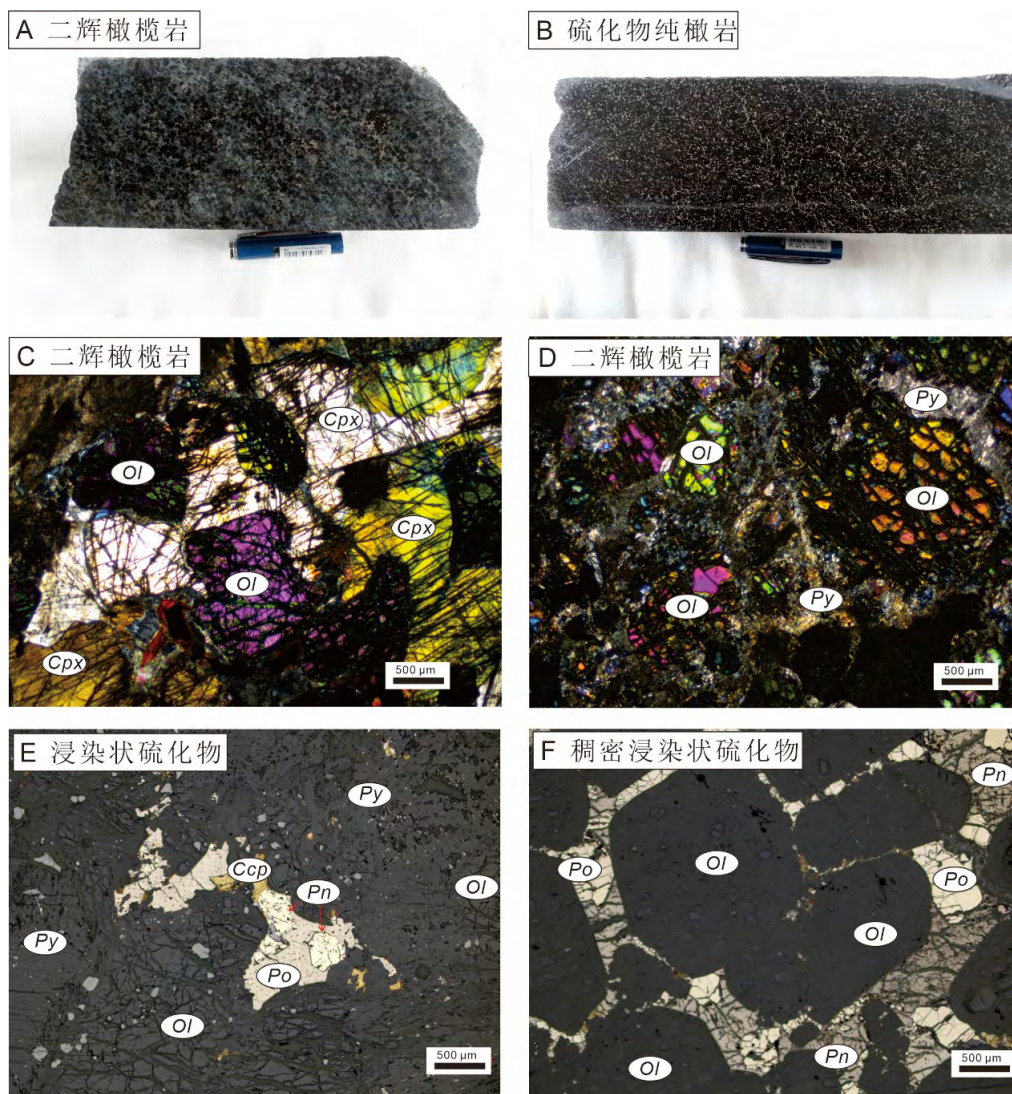
4.1 母岩浆性质

采用多种方法对金川岩体母岩浆成分进行估算: 1) 根据橄榄石-熔体平衡^[39]结合质量平衡原理, 利用橄榄石成分以及寄主岩石 MgO 含量与其他氧化物的协变关系估算母岩浆成分^[37-38,40]; 2) 利用 MELTS 软件计算的结果与岩体中硅酸盐矿物进行成分比较, 估算母岩浆成分^[33]; 3) 根据成矿元素含量或比值 (例如: Ni/Cu-Pd/Ir 图解) 间接确定成矿母岩浆的性质^[5,16,40]。这些方法得出金川岩体母岩浆属高镁玄武质岩浆, w(MgO)具较大的变化范围 (11.5%~15.36%)。由于橄榄石在亚固相线阶段会与晶间熔体发生再平衡作用, 导致橄榄石的镁指数降低; 因此, 直接利用橄榄石-熔体平衡原理计算得到的母岩浆成分通常偏低。而全岩的 Mg/Fe 比值可以规避掉矿物间亚固相线成分交换的影响, 能拟合得到更为原始的橄榄石 Mg/Fe 比值。故本次研究挑选已发表的金川 1 号矿体全岩数据对金川母岩浆成分做进一步限定。金川岩体全岩氧化物的协变关系表明橄榄石是岩石中主要的堆晶相^[37]。1 号矿体岩石全岩 Mg/Ti 与 Fe/Ti 相关图 (图 5a) 的回归斜率结合橄榄石-熔体平衡原理 ($K_D^{Ol/Melt} = 0.3$ ^[39]) 指明平均堆晶橄榄石的 Fo 值约为 86.7%, 该值明显高于本次分析得到的橄榄石 Fo 值。在 MgO 与 FeO 二元相关图中 (图 5b), 与橄榄石平衡的母岩浆 w(MgO)为 10%~13%, w(FeO)为 11.5%~12.5%, 说明金川岩体母岩浆为高 MgO 的玄武质岩浆。

4.2 影响橄榄石成分变化的因素

4.2.1 岩浆分离结晶和硫化物熔离

实验研究表明, Ni 在硫化物熔体/硅酸盐熔体中的分配系数远大于 Ni 在橄榄石/硅酸盐熔体中的分配系数 ($D_{Ni}^{Sul/Sil} = 500$ ^[41]; $D_{Ni}^{Ol/Sil} = 2.86 \sim 13.6$ ^[42])。当岩浆体系 S 不饱和时, 结晶出的橄榄石 Ni 含量会随着分离结晶作用的进行而缓慢降低。在 S 饱和的岩浆系统中, 橄榄石的 Ni 含量则会出现不同程度的亏损。因此, 橄榄石的 Ni 含量可以指示岩浆分离结晶和硫化物熔离的过程。



Ol-橄榄石; Cpx-单斜辉石; Py-辉石; Pn-镍黄铁矿; Po-磁黄铁矿; Ccp-黄铜矿

图3 (A) 二辉橄榄岩具浸染状矿化, 主要由橄榄石(约40%), 辉石(约50%)和硫化物(约8%)组成; (B) 硫化物纯橄岩具稠密浸染状矿化, 主要由橄榄石(约60%)和硫化物(约35%)组成; (C) 二辉橄榄岩中发育包橄结构(正交光); (D) 二辉橄榄岩中橄榄石构成主要堆积相, 辉石则呈填隙相分布(正交光); (E) 浸染状硫化物主要由镍黄铁矿, 磁黄铁矿和黄铜矿组成(反射光); (F) 稠密浸染状硫化物中硫化物构成连续的网格包裹橄榄石颗粒(反射光)

Fig. 3. (A) Disseminated sulfides in Iherzolite which is mainly composed of olivine (~40%), pyroxene (~50%), and sulfides (~8%); (B) Net-textured and densely disseminated sulfides in dunitite which is mainly composed of olivine (~60%) and sulfides (~35%); (C) Olivine grains enclosed by clinopyroxene in Iherzolite with poikilitic texture (cross-polarized light); (D) Olivine occurred mainly as cumulus phase in Iherzolite, plagioclase and clinopyroxene occurred as interstitial phase (cross-polarized light); (E) Interstitial clusters of disseminated sulfides consisting mainly of pyrrhotite, pentlandite, and chalcopyrite (reflected light); (F) Densely disseminated sulfide aggregates form a semi-continuous network that partially to completely enclose olivine grains (reflected light).

Ni 在橄榄石和硅酸盐岩浆之间的含量关系可以用瑞利分馏定律来描述:

$$c_L = c_0 F^{(D-1)}$$

式中: c_L 为微量元素在残余熔体中的浓度; c_0 为微量元素在原始熔体中的浓度; F 为原始熔体经历橄榄石分离结晶作用后剩余的部分; D 为元素在结晶相与熔体相之间的总分配系数。当岩浆中结晶矿物相和比例发生变化时, 需要重新计算 c_L 、 c_0 和 D 值以便模拟进一步的分异。

在橄榄石和硅酸盐熔体以及硫化物熔体和硅酸盐熔体之间的分配系数分别为 7 和 500。模拟结果显示 (图 6), 金川 II 号岩体大部分橄榄石的 Ni 含量落于模式曲线 A—B 之下, 暗示橄榄石是从硫饱和的岩浆中结晶出来的。大部分橄榄石颗粒 Ni 含量位于模拟曲线 A—B 和 A—C 之间, 表明橄榄石中 Ni 含量变化主要受橄榄石结晶分异和硫化物不混溶作用共同控制, 橄榄石结晶和硫化物熔离同时进行其质量比值约为 40 : 1。

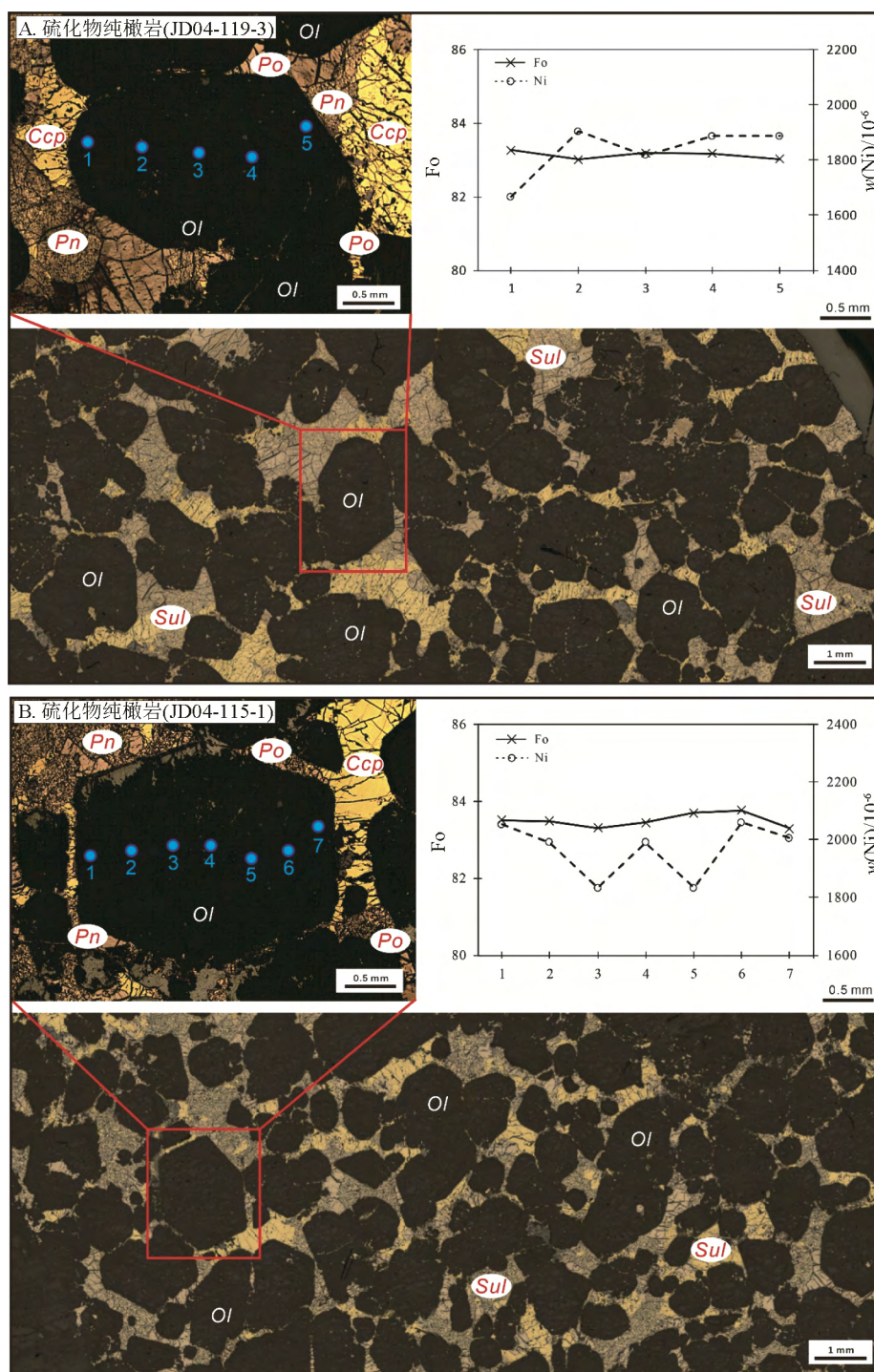


图 4 金川 II 号岩体硫化物橄橄榄岩中橄榄石颗粒的成分剖面

Fig. 4. The composition profiles of olivine grains coexisted with the net-textured sulfides in sulfide-bearing dunite in the Segment II at Jinchuan.

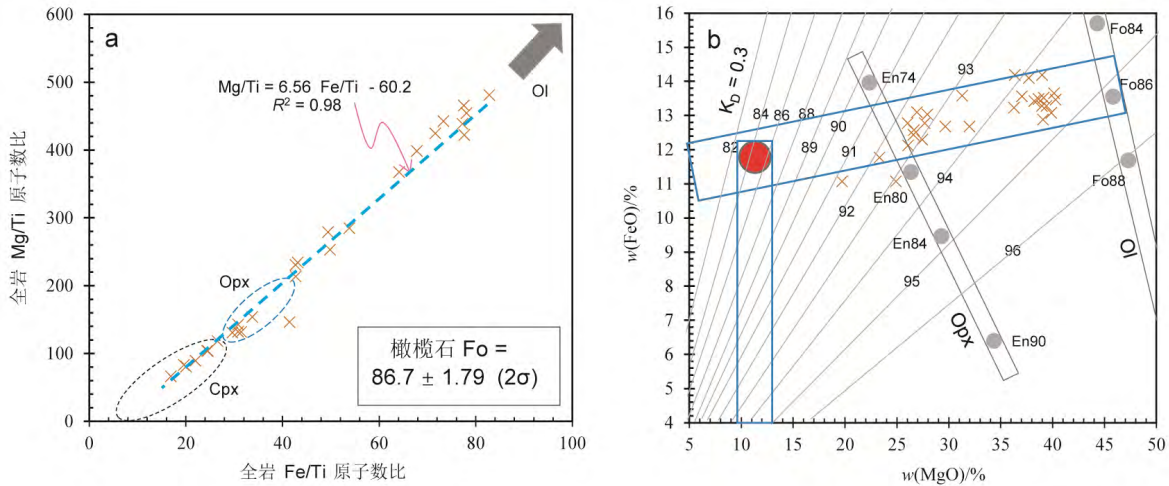


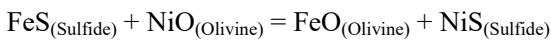
图 5 (a) 金川 II 号岩体全岩 Mg/Ti 与 Fe/Ti (原子比) 相关图中显示出平均堆晶橄榄石 (Ol) Fo 值约为 86.7: 黑色和蓝色的虚线框分别代表了单斜辉石 (Cpx) 和斜方辉石 (Opx) 的成分范围, 矿物成分数据引自于文献[10-11,38]; (b) 全岩 MgO 与 FeO 相关图中显示出橄榄石控制的样品在 Fo 86%~87%和 w(MgO) 10%~13%, w(FeO) 11.5%~12.5%间产生一个趋势: 灰色实线代表了与指定橄榄石成分相平衡的熔体的 MgO-FeO 比值($K_D = (\text{FeO}/\text{MgO})^{\text{橄榄石}}/(\text{FeO}/\text{MgO})^{\text{岩浆}} = 0.3$), 标记 Opx 和 Ol 的线分别代表了纯斜方辉石和橄榄石的成分, 全岩数据引自于文献[9,13]

Fig. 5. (a) Correlation of Mg/Ti against Fe/Ti (whole-rock atomic ratios) for samples from the Segment II defines a slope which gives average Fe/Mg ratio and Fo value of $86.7 \pm 1.79 (2\sigma)$ for cumulus olivine in samples. The black and blue dashed ellipses represent compositional ranges of the clinopyroxene (Cpx) and orthopyroxene (Opx) at Jinchuan, respectively^[10-11,38]; (b) Plots of FeO vs. MgO of whole-rock samples from the Segment II. There is a trend for olivine-controlled samples which contain olivines with Fo values of 86-87, 10%-13% of MgO, and 11.5%-12.5% of FeO. Sloping gray lines represent MgO-FeO ratios of magmas whose compositions are in equilibrium with the indicated olivines ($K_D = (\text{FeO}/\text{MgO})^{\text{olivine}}/(\text{FeO}/\text{MgO})^{\text{magma}} = 0.3$). The lines labelled Opx and Ol represent compositions of pure orthopyroxene and olivine, respectively. The data of whole rock samples are from references^[9,13].

4.2.2 橄榄石与晶间熔体反应

早期结晶的橄榄石其成分还会受到堆积后与粒间熔体反应的影响。首先, 贫硫化物岩石中橄榄石会与粒间硅酸盐熔体发生 Mg-Fe 交换使其 Fo 值和 Ni 含量降低。其次, 硫化物矿石中橄榄石的 Ni 含量也会因与硫化物熔体发生 Fe-Ni 交换反应而升高^[6,29-30]。因此, 依据橄榄石 Fo 值与 Ni 含量的关系可以判别晶间熔体的类型。金川 1 号矿体二辉橄榄岩中橄榄石 Fo 值与 Ni 含量间负相关关系表明堆晶橄榄石发生了与粒间硅酸盐熔体的反应。稠密浸染状矿石普遍认为是由硫化物熔体在重力作用下自发向下渗透置换堆晶橄榄石颗粒间的硅酸盐熔体形成的^[34,46]。这表明部分堆晶橄榄石颗粒首先会与粒间硅酸盐熔体接触, 同时也有可能和粒间硅酸盐熔体发生反应形成橄榄石 Fo 值与 Ni 含量间负相关关系。但当硫化物熔体置换硅酸盐熔体以后, 橄榄石则主要和硫化物熔体发生 Fe-Ni 交换反应。由于硫化物熔体最终固结温度要低于硅酸盐熔体, 因此, 橄榄石记录的是与硫化物熔体发生 Fe-Ni 交换反应以后的结果。

橄榄石与硫化物熔体间 Fe-Ni 交换反应可以表示为:



该反应的平衡常数用 Fe-Ni 交换系数 K_D 来表示:

$$K_D = (X_{\text{NiS}}/X_{\text{FeS}})_{\text{sulfide liquid}} / (X_{\text{NiO}}/X_{\text{FeO}})_{\text{olivine}}$$

式中 X_i 表示组分 i 在相中的摩尔分数。交换系数 K_D 是体系氧逸度 ($f(\text{O}_2)$)、硫逸度 ($f(\text{S}_2)$)、温度和硫化物熔体 Ni 含量的函数, 其值在 5~35 间变化^[47]。通常, K_D 随着硫化物熔体中 Ni 含量的升高而增大, 但在特定的氧逸度、硫逸度和 Ni 含量条件下其值保持恒定^[48-49]。因此, 当硫化物熔体中 Ni 越富集时,

Fe-Ni 交换系数 K_D 越大, 硫化物熔体更易于从橄榄石颗粒中得到 Ni 而提高其品位。

现研究认为橄榄石与硫化物熔体间的 Fe-Ni 交换反应是很多高镍铜镍矿床形成的重要机制^[50-51]。Barnes 等(2013) 认为澳大利亚 Betheno 矿床和巴西 Mirabela 矿床中硫化物高 Ni 是由于橄榄石与硫化物熔体发生 Fe-Ni 交换反应的结果, Mao 等(2018b) 估算认为硫化物与橄榄石 Fe-Ni 交换反应使黄山南矿床中硫化物额外富集约 3%镍。这些现象均表明 Fe-Ni 交换反应过程中硫化物从橄榄石中得到 Ni, 依据质量平衡原理, 这必然导致橄榄石亏损 Ni, 使橄榄石成分落在岩浆结晶分异演化线的左下方。同时, 橄榄石 Fo 值可能相应地降低由于增加了 Fe 的成分。本次分析的金川 1 号矿体稠密浸染状矿石中橄榄石 Ni 含量多位于岩浆正常结晶趋势线 (A-B) 的附近(图 6), 这并不意味着 Fe-Ni 交换反应没有发生。类似于 Betheno、黄山南等高镍硫化物矿床中橄榄石 Ni 含量变化趋势^[51-52], 表明橄榄石中 Ni 丢失不明显, 这可能与大量橄榄石参与 Fe-Ni 交换反应或橄榄石与熔体发生了 Fe-Mg 再平衡相关^[53]。相反, 稠密浸染状矿石中橄榄石颗粒边缘较中间具较高的 Ni 含量(图 4) 暗示橄榄石从硫化物中得到 Ni, 表明亚固相线冷却阶段 Ni 从硫化物中扩散进入橄榄石颗粒边缘。同时高 FeO 含量的橄榄石较低 FeO 含量的橄榄石将容纳更多的 Ni 形成 Fo-Ni 负相关关系^[49,51,54]。本次分析的位于模拟线 AB 之上的(图 6) 橄榄石颗粒记录的高 Ni 信息可能与上述原因相关。

4.3 岩体成岩过程

金川 II 号岩体橄榄石的 Fo 值变化范围大, 介于 83.9%~79.7%之间, 且单个薄片橄榄石 Fo 值也有较大的变化。这些现象说明岩浆演化过程中不断有成分相近的新鲜岩浆补充, 使得橄榄石结晶并没有显著影响到岩浆的成分。硫化物纯橄岩和无矿的二辉橄岩中橄榄石 Fo 值和 Ni 含量具不同的变化范围, 除了橄榄石与粒间熔体发生反应之外, 岩体形成过程对橄榄石中元素的含量也存在影响。

现研究普遍认为, 金川岩体原始产状是近水平的^[15-16], 当侵位的岩浆流过岩席发生结晶分异时, 早期结晶的矿物会沉降在岩浆房底部。金川母岩浆的结晶序列为: 橄榄石-斜方辉石-单斜辉石-斜长石+单斜辉石^[25,29]。因此, 最早发生沉降堆积的矿物应该是橄榄石, 这样会形成钻孔剖面从上而下橄榄石含量逐渐增多的趋势。但 I 号矿体这种“同心圆”状对称分布的岩相特征显然不能用重力作用下橄榄石和硫化物的沉降来解释(图 2)。Song 等(2009) 通过详细的岩相学和地球化学分析, 提出这种“火焰状”的矿体形态是由密度分层的硅酸盐熔浆和硫化物-橄榄石“晶粥”从深部岩浆房中依次脉动式上侵所致, 即玄武质岩浆在深部岩浆房中发生硫化物熔离和橄榄石结晶, 硫化物和橄榄石在重力分异作用下

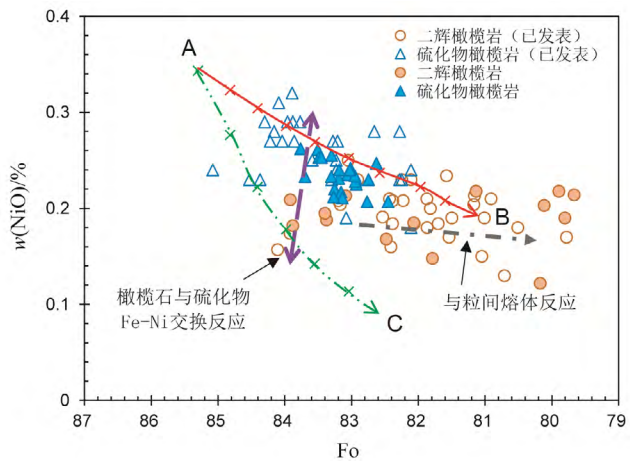


图 6 金川 II 号岩体橄榄石 Fo-NiO 间二元相关图: 模拟计算方法详见文献^[55-56]; A-B 和 A-C 指估算的瑞利分离模式线, A-B 模式线指岩浆中仅橄榄石结晶, A-C 模式线指橄榄石和硫化物以 40:1 的比例从岩浆中共结; 已发表的橄榄石数据引自于文献^[6,35,38,45]

Fig. 6. Binary plot of NiO contents vs. Fo values for olivines from the Segment II. The Curve A-B shows variations of Ni contents and Fo values of the olivines crystallized from the magma with no sulfide crystallization. The Curve A-C represents variations of Ni contents and Fo values of the olivines crystallized from the magma with minor sulfide segregation (with 40:1 for the mass ratio of olivine to sulfide). The simulation calculation method is after references^[55-56]. Initial Ni content of parental magma is assumed as 350 ppm, and a partition coefficient of Ni between olivine and magma is 7 at oxygen fugacity of \sim FMQ-0.5^[40]. The data of olivine compositions are from references^[6,35,38,45].

沉降在岩浆房的底部形成硫化物-橄榄石“晶粥”, 而经硫化物熔离和橄榄石分异后的残余岩浆则聚集在岩浆房上部形成硅酸盐熔浆。在后期构造应力扰动或者新岩浆补充深部岩浆房时, 上部的硅酸盐熔浆首先上侵至岩浆通道的平缓部位形成浅部岩浆房, 经过结晶分异和同化混染过程形成II号岩体边缘分布的贫矿的二辉橄榄岩。该岩相带中橄榄石具偏低的 Fo 值和 Ni 含量 (图 6); 部分橄榄石颗粒可见从核部到边部 Fo 值递减的成分剖面^[45], 这些特征均是由橄榄石堆晶后与粒间熔体反应所致。当深部岩浆房中硫化物-橄榄石“晶粥”进入浅部岩浆房后, 堆晶橄榄石会与晶间硫化物熔体发生 Fe-Ni 交换反应使硫化物中 Ni 含量升高。相较于二辉橄榄岩较小变化的橄榄石 Fo 值以及橄榄石核边无成分环带表明橄榄石结晶时岩浆成分稳定 (图 4, 图 6)。

5 结论

橄榄石成分在探讨母岩浆性质、岩浆分离结晶和硫化物熔离以及晶间熔浆效应方面有重要的指示意义。金川II号岩体母岩浆 $w(\text{MgO})$ 为 10%~13%, $w(\text{FeO})$ 为 11.5%~12.5%, 属高 MgO 的玄武质岩浆。岩浆上升过程中早期结晶的橄榄石和熔离的硫化物沉降在岩浆房底部形成硫化物-橄榄石“晶粥”, 残余岩浆则聚集在岩浆房上部形成硅酸盐熔浆。密度分层的熔浆在后期脉动式上涌进入浅部岩浆房后分别形成岩体中间的硫化物橄榄石和边缘贫矿的二辉橄榄岩。贫矿的二辉橄榄岩中橄榄石与硅酸盐熔体发生了 Mg-Fe 交换反应, 而硫化物橄榄岩中橄榄石则与硫化物熔体发生了 Fe-Ni 交换反应。

参考文献:

- [1] Naldrett A J. Magmatic sulfide deposits: geology, geochemistry and exploration[M]. Springer, 2004.
- [2] Naldrett A J. Fundamentals of magmatic sulfide deposits[M]. Springer, 2011.
- [3] 宋谢炎, 胡瑞忠, 陈列锰. 中国岩浆铜镍硫化物矿床地质特点及其启示[J]. 南京大学学报(自然科学), 2018, 54(2): 221-235.
- [4] 汤中立. 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.
- [5] Chai G, Naldrett A J. Characteristics of Ni-Cu-PGE mineralization and genesis of the Jinchuan Deposit, Northwest China[J]. Economic Geology, 1992, 87(6): 1475-1495.
- [6] Li C, Xu Z, Waal S D. Compositional variations of olivine from the Jinchuan Ni-Cu sulfide deposit, western China: implications for ore genesis[J]. Mineralium Deposita, 2004, 39(2): 159-172.
- [7] 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 the ~825 Ma south China mantle plume?[J]. Geochemistry Geophysics Geosystems, 2005, 6(11): 1-16.
- [8] Song X Y, Zhou M F, Wang C Y, 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, 2006, 48(12): 1113-1132.
- [9] Lehmann J, Naldrett A J, 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(1): 75-94.
- [10] 李士彬. 甘肃金川II号岩体岩浆演化及铜镍硫化物成矿过程探讨[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2008.
- [11] 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]. 北京: 中国科学院研究生院, 2009.
- [12] 高亚林. 金川矿区地质特征、时空演化及深边部找矿研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2009.
- [13] 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(2): 404-424.
- [14] Zhang M, Kamo S L, Li C, et al. Precise U-Pb zircon-baddeleyite age of the Jinchuan sulfide ore-bearing ultramafic intrusion, western China[J]. Mineralium Deposita, 2010, 45(2): 215-215.
- [15] Song X Y, Keays R R, Chen L M, 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(3): 277-297.
- [16] Chen L M, Song X Y, Keays R R, et al. Segregation and Fractionation of Magmatic Ni-Cu-PGE Sulfides in the Western Jinchuan Intrusion, Northwestern China: Insights from Platinum Group Element Geochemistry[J]. Economic Geology, 2013, 108(8): 1793-1811.
- [17] 江金进. 金川西岩体铜镍成矿的铂族及半金属元素地球化学及深边部找矿方向探讨[D]. 成都: 成都理工大学, 2014.
- [18] 段俊. 金川 Ni-Cu-(PGE)岩浆硫化物矿床成因与成矿模式研究[D]. 西安: 长安大学, 2015.
- [19] 符志强. 金川铜镍硫化物矿床 1 号矿体铂族元素及半金属元素地球化学及成因意义[D]. 成都: 成都理工大学, 2015.
- [20] 王亮. 甘肃金川 Ni-Cu 硫化物矿床 2 号矿体 PGE 及半金属元素地球化学及成因意义[D]. 成都: 成都理工大学, 2015.
- [21] Chen L M, Song X Y, Danyushevsky L V, et al. A laser ablation ICP-MS study of platinum-group and chalcophile elements in base metal sulfide minerals of the Jinchuan Ni-Cu sulfide deposit, NW China[J]. Ore Geology Reviews, 2015, 65: 955-967.
- [22] Yang S, Yang G, Qu W, et al. Pt-Os isotopic constraints on the age of hydrothermal overprinting on the Jinchuan Ni-Cu-PGE deposit, China[J]. Mineralium Deposita, 2017, 53(1): 1-18.

- [23] 王振江. 中国金川 Ni-Cu- (PGE) 硫化物矿床深部成矿过程的实验研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2020.
- [24] Liu M Y, Zhou M F, Su S G, et al. Contrasting geochemistry of apatite from peridotites and sulfide ores of the Jinchuan Ni-Cu sulfide deposit, NW China[J]. *Economic Geology*, 2021, 116(5): 1073-1092.
- [25] Li C, Ripley E M, Maier W D, et al. Olivine and sulfur isotopic compositions of the Uitkomst Ni-Cu sulfide ore-bearing complex, South Africa: evidence for sulfur contamination and multiple magma emplacements[J]. *Chemical Geology*, 2002, 188(3): 149-159.
- [26] Maier W D, Barnes S J, Sarkar A, et al. The Kabanga Ni sulfide deposit, Tanzania: I. Geology, petrography, silicate rock geochemistry, and sulfur and oxygen isotopes[J]. *Mineralium Deposita*, 2010, 45(5): 419-441.
- [27] Bulle F, Layne G D. Trace element variations in olivine from the Eastern Deeps Intrusion at Voisey's Bay, Labrador, as a monitor of assimilation and sulfide saturation processes[J]. *Economic Geology*, 2015, 110(3): 713-731.
- [28] Duan J, Li C, Qian Z Z, et al. Multiple S isotopes, zircon Hf isotopes, whole-rock Sr-Nd isotopes, and spatial variations of PGE tenors in the Jinchuan Ni-Cu-PGE deposit, NW China[J]. *Mineralium Deposita*, 2016, 51(4): 557-574.
- [29] 陈列锰, 宋谢炎, Danyushevsky L V, 等. 金川1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.
- [30] 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意义探讨[J]. *岩石学报*, 2012, 28(7): 280-290.
- [31] 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*, 2005, 100: 179-213.
- [32] Waal S D, Xu Z G, Li C S, et al. Emplacement of viscous mushes in the Jinchuan ultramafic intrusion, Western China [J]. *Canadian Mineralogist*, 2004, 42(2): 371-392.
- [33] 陈列锰, 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*, 2009b, 83(9): 1302-1315.
- [34] Mao Y J, Barnes S J, Duan J, et al. Morphology and particle size distribution of olivines and sulphides in the Jinchuan Ni-Cu sulphide deposit: Evidence for sulphide percolation in a crystal mush[J]. *Journal of Petrology*, 2018, 59(9): 1701-1730.
- [35] 刘美玉, 苏尚国, 姚远, 等. 金川岩浆铜镍(铂)硫化物矿床中两类橄榄石的发现及其成矿意义[J]. *岩石学报*, 2020, 36(04): 187-209.
- [36] 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: 1-225.
- [37] Chai G, Naldrett A J. The Jinchuan ultramafic intrusion: cumulate of a high-Mg basaltic magma[J]. *Journal of Petrology*, 1992a, 33(2): 277-303.
- [38] Tonnelier N J. Geology and genesis of the Jinchuan Ni-Cu-(PGE) deposit, China[D]. University de Grenoble, 2010.
- [39] Roeder P L, Emslie R F. Olivine-liquid equilibrium[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1970, 29(4): 275-289.
- [40] Li C, Ripley E M. The giant Jinchuan Ni-Cu-(PGE) deposit: Tectonic setting, magma evolution, ore genesis and exploration implications[J]. *Economic Geology*, 2011, 17: 163-180.
- [41] Peach C L, Mathez E A, Keays R R. Sulfide melt-silicate melt distribution coefficients for noble metals and other chalcophile elements as deduced from MORB: Implications for partial melting[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990, 54(12): 3379-3389.
- [42] Takahashi E. Partitioning of Ni^{2+} , Co^{2+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} and Mg^{2+} between olivine and silicate melts: compositional dependence of partition coefficient[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1978, 42(12): 1829-1844.
- [43] Ripley E M. Mineralogic and stable isotope studies of hydrothermal alteration at the Jinchuan Ni-Cu Deposit, China[J]. *Economic Geology*, 2005, 100(7): 1349-1361.
- [44] Barnes S J, Tang Z L. Chrome-spinels from the Jinchuan Ni-Cu sulfide deposit, Gansu Province, People's Republic of China[J]. *Economic Geology*, 1999, 94(3): 343-356.
- [45] 康健, 陈列锰, 宋谢炎, 等. 金川超大型 Ni-Cu-(PGE)矿床橄榄石微量元素特征及地质意义[J]. *地球科学进展*, 2019, 34(4): 382-398.
- [46] Barnes S J, Mungall J E, Vaillant M L, et al. Sulfide-silicate textures in magmatic Ni-Cu-PGE sulfide ore deposits: Disseminated and net-textured ores[J]. *American Mineralogist*, 2017, 102(3): 473-506.
- [47] Brenan J M, CaCiagli N C. Fe-Ni exchange between olivine and sulfide liquid: implications for oxygen barometry in sulfide-saturated magmas[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64, 307-320.
- [48] Brenan J M. Effects of f_{O_2} , f_{S_2} , temperature and melt composition on Fe-Ni exchange between olivine and sulfide liquid: Implications for natural olivine-sulfide assemblages[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2003, 67, 2663-2681.
- [49] Barnes S J, Godel B, Gürer D, et al. Sulfide-Olivine Fe-Ni exchange and the origin of anomalously Ni rich magmatic sulfides[J]. *Economic Geology*, 2013, 108, 1971-1982.
- [50] Mao Y J, Qin K Z, Barnes S J, et al. A revised oxygen barometry in sulfide-saturated magmas and application to the Permian magmatic Ni-Cu deposits in the southern Central Asian Orogenic Belt[J]. *Mineralium Deposita*, 2018, 53(6): 731-755.
- [51] Barnes S J, Locmelis B M, Fiorentini M L. Extremely Ni-rich Fe-Ni sulfide assemblages in komatiitic dunite at Betheno, Western Australia: results from synchrotron X-ray fluorescence mapping[J]. *Australian Journal of Earth Sciences: An International Geoscience Journal of the Geological Society of Australia*, 2011, 58(7): 691-709.
- [52] Mao Y J, Qin K Z, Li C, et al. Petrogenesis and ore genesis of the Permian Huangshanxi sulfide ore-bearing mafic-ultramafic intrusion in the Central Asian Orogenic Belt, western China[J]. *Lithos*, 2014, 200-201: 111-125.
- [53] 毛亚晶, 秦克章, 唐冬梅. 高镍铜镍矿床的特征、形成机制与勘查展望[J]. *岩石学报*, 2018, 34(8): 2410-2424.
- [54] 颜炜, 宋谢炎, 邓宇峰, 等. 甘肃黑山铜镍硫化物含矿岩体的地质特征及橄榄石成因探讨[J]. *岩石学报*, 2013, 29(10): 3487-3502.
- [55] 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): 1-31.
- [56] Li C, Naldrett A J, Ripley E M. Controls on the Fo and Ni contents of olivine in sulfide-bearing mafic/ultramafic intrusions: Principles, Modeling, and Examples from Voisey's Bay[J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(5): 177-183.