

中国金川岩浆 Cu-Ni(PGE)硫化物矿床 2 号矿体成因：来自深部新发现矿体的制约

隆廷茂^{1,2}, 宋谢炎^{1*}, 康健^{1,2}, 梁庆林^{1,2}, 李晓栋^{1,2}, 王永才³, 李德贤³,
艾启兴³, 索文德³, 卢健全³

(1. 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; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 镍钴资源综合利用国家重点实验室, 甘肃金川 737100)

世界级金川岩浆 Ni-Cu (PGE)硫化物矿床由 4 个大的矿体组成 (1, 2, 3 以及 24 号矿体), 目前探明 Ni 和 Cu 的储量分别为 625 和 400 万吨, 其中 2 号矿体储量占比 19%。深部的井下钴探工程新发现了 2 号矿体向下可观的再膨大矿体, 为了方便区分, 我们将深部新发现的矿体命名为 2a 矿体, 而之前已经探明的主矿体是 2b 矿体。2a 矿体从下至上由赋存在橄榄辉石岩的浸染状矿石, 赋存在二辉橄榄岩中的网脉状矿石以及块状矿石组成。而 2 号矿体之前已经探明的主矿体部分从下至上依次产出于二辉橄榄岩中的浸染状矿石, 产出于纯橄岩中的网脉状矿石和块状矿石组成。尽管两部分矿体的矿石赋存在不同的岩石中, 相同类型的矿石的 Ni, Cu 以及 PGE 品位是相当的, 说明这两部分矿体的母岩浆成分一致, 经历了相同的硫化物熔离过程。质量平衡计算表明 2 号矿体的母岩浆含有 0.01-0.05ppb 的 Ir 和 0.2-0.8 的 Pd, 比没有发生过 PGE 亏损的大陆溢流玄武岩浆要低一个数量级, 且相对 1,3 以及 24 号矿体的母岩浆也更低, 说明其母岩浆经历了较高级别的前期硫化物熔离 (Song et al., 2009)。

金川的直接围岩贫硫且硫同位素结果显示地壳硫的加入对成矿的贡献 (Ripley et al., 2005), 即便在原地因为大理岩的混染会轻微地降低岩浆的硫饱和和浓度 (Lehmann et al., 2007), 硫化物的熔离应该主要发生在更深部, 随后硫化物被岩浆携带上升。2 号矿体两部分矿体的网脉状矿石百分百硫化物 PGE 含量向上逐渐增加是由于岩浆: 硫化物的比值(R 值) 逐渐升高或者是批次补充的岩浆演化程度逐渐降低。由于金川的原始产状近于水平 (Song et al. 2012), 2a 矿体与 2b 矿体在空间上也是连续的, 我们认为现在深部的矿体位于 2 号矿体整个岩浆岩通道的上游, 而上部的主矿体位于下游。硫化物熔体在经过岩浆通道膨大的位置时由于重力作用堆积下来分别形成现在的 2a 和 2b 矿体。

2 号矿体还产出可观的块状矿石, 它们在矿体的底部、中部以及上部都有产出且时常穿插浸染状以及网脉状矿石, 这说明块状矿石的形成晚于这两类矿石, 是矿体形成后纯的硫化物矿浆挤入形成的。Pt 和 Pd 具有类似的地球化学性质, 但块状矿石相对浸染状和网脉状矿石具有显著低的 Pt 含量 (1-55ppb) 和 Pt/Pd 比值 (块状矿石 Pt/Pd 比值: 0.01-0.33, 而网脉状矿石 Pt/Pd 比值平均为 2.2)。在一些矿床中也观察到了这种现象(如东博茨瓦纳的 Selkirk 和 Phoenix 矿床, 澳大利亚的 Mount Keith 和 Nova-Bollinger, Maier et al., 2008; Barnes et al. 2012, 2022), 但还缺少相应合理的解释。Pt 和 Pd 因为对单硫化物固溶体 (MSS) 不相容 (Li et al. 1996), 在硫化物熔体分离结晶过程中会富集在残余的硫化物熔体中, 因此堆晶相的硫化物会具有很低的 Pt 和 Pd 的含量。但是, 最近的研究发现镍黄铁矿能在高温条件下 (870-800℃)通过转熔反应形成 (Kitakaze et al., 2016), 而金川矿石中 70% 的 Pd 都赋存在镍黄铁矿中 (Chen et al., 2015)。据此我们认为块状矿石 Pt 的亏损是因为在硫化物熔体结晶过程中富 Pt 的富铜熔体抽离造成的, 而 Pd 则因为镍黄铁矿的存在被保留在块状矿石中, 导致堆晶相的块状矿石 Pt 相对 Pd 明显亏损。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (批准号: 41772067, 41630316)

第一作者简介: 隆廷茂, 男, 1995 年生, 博士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业。

*通信作者: 宋谢炎(1962-), 男, 研究员, 博士生导师, 研究方向: 幔源岩浆及其成矿作用。

参考文献:

- Lehmann J, Arndt N, Windley B, et al. 2007. Field relationships and geochemical constraints on the emplacement of the Jinchuan intrusion and its Ni-Cu-PGE sulfide deposit, Gansu, China. *Econ Geol* 102:75–94. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.102.1.75>
- Chen LM, Song XY, Danyushevsky LV, et al. 2015. 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. *Ore Geol Rev* 65:955–967
- Kitakaze A, Machida T, Komatsu R. 2016. Phase Relations in the Fe–Ni–S System from 875 To 650 °C. *Can Mineral* 54:1175–1186. <https://doi.org/10.3749/canmin.1500087>
- Li CS, Barnes SJ, Makovicky E, et al. 1996. Partitioning of nickel, copper, iridium, rhenium, platinum, and palladium between monosulfide solid solution and sulfide liquid: effects of composition and temperature. *Geochim Cosmochim Acta* 60:1231–1238
- Song XY, Keays RR, Zhou MF, et al. 2009. Siderophile and chalcophile elemental constraints on the origin of the Jinchuan Ni-Cu-(PGE) sulfide deposit, NW China. *Geochim Cosmochim Acta* 73:404–424
- Song XY, Danyushevsky LV, Keays RR, et al. 2012. Structural, lithological, and geochemical constraints on the dynamic magma plumbing system of the Jinchuan Ni-Cu sulfide deposit, NW China. *Miner Deposita* 47:277–297
- Ripley EM, Sarkar A, Li CS. 2005. Mineralogic and stable isotope studies of hydrothermal alteration at the Jinchuan Ni-Cu deposit, China. *Econ Geol* 100:1349–1361
- Barnes SJ, Liu WH. 2012. Pt and Pd mobility in hydrothermal fluids: Evidence from komatiites and from thermodynamic modelling. *Ore Geol Rev* 44:49–58
- Barnes SJ, Stanley CR, Taranovic V. 2022. Compositions and Ni-Cu-platinum group element tenors of Nova-Bollinger Ores with implications for the origin of Pt anomalies in platinum group element-poor massive sulfides. *Econ Geol* 117:1687–1707. <https://doi.org/10.5382/econgeo.4894>
- Maier WD, Barnes SJ, Chinyepi G, et al. 2008. The composition of magmatic Ni-Cu-(PGE) sulfide deposits in the Tati and Selebi-Phikwe belts of eastern Botswana. *Miner Deposita* 43:37–60