

# 金川小岩体成矿中岩浆质量平衡：来自年代学与地球化学的证据\*

焦建刚<sup>1, 2</sup>, 汤中立<sup>1</sup>, 闫海卿<sup>1</sup>, 刘民武<sup>2</sup>, 孙涛<sup>1</sup>, 王亚磊<sup>1</sup>, 王永才<sup>3</sup>

(1 长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 2 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710054; 3 金川集团有限公司矿产资源部, 甘肃 金昌 737100)

金川铜镍硫化物矿床长 6.5 km, 宽 20~527 m, 面积 1.34 km<sup>2</sup>, 赋存了世界第三大的铜镍硫化物矿床, Ni 金属量大于 5.5×10<sup>6</sup>t, Cu 金属量大于 3.5×10<sup>6</sup>t, 矿石类型主要为海绵陨铁状、浸染状、块状。金川超镁铁质岩体主体为二辉橄榄岩组成, 其次为斜长二辉橄榄岩、辉石岩, 有大量橄榄石堆晶, 缺乏基性岩组成部分, 然而, 根据岩浆平衡计算, 现在的金川岩体只占整个岩浆房的 3% (Li et al, 2003), 岩浆房中大量的基性岩浆是被剥蚀了, 还是形成现在的金川外围镁铁-超镁铁质岩体呢? 本文选择金川附近的毛草泉、塔马子沟岩体群开展了岩石学、年代学、岩石地球化学、同位素地球化学研究, 试图判别其与金川岩体的成因联系, 从而论证金川矿床的岩浆质量平衡。

## 1 岩体地质

毛草泉镁铁-超镁铁质岩体位于金川超镁铁质岩体西南方向约 3km 处, 东经 102°06'15", 北纬 38°28'45" (本次锆石采样位置)。岩体产状 220~230°∠50~70°, 呈瘤状产出, 由 50 多个小岩体组成, 受控于龙首山陆缘带北缘断裂。岩体样品镁铁比值为 2.7~5.40, 属于铁质超基性岩。岩体侵位于龙首山岩群塔马子沟组含石墨大理岩及云母片岩中, 岩性组合为橄榄辉石岩、辉石岩、暗色角闪辉长岩等, 岩相之间为过渡接触。其中暗色角闪辉长岩镜下鉴定含普通角闪石占 75%, 偶见透辉石残核; 基性斜长石多钠黝帘石化, 占 15%; 绿泥石化黑云母占 8%, 白钛矿占 2%, 含少量的磷灰石, 偶见锆石。岩石多发生自变质, 没有经历区域变质或动力变质; 暗色矿物集中地段接近含长角闪岩, 淡色地段为含黑云角闪辉长岩。

塔马子沟岩体位于金川超镁铁质岩体 285°方向约 4 km 处, 呈瘤状产出, 由 60 多个小岩体组成, 侵位于龙首山岩群塔马子沟组云母石英片岩夹不纯石墨大理岩内, 受龙首山北缘断裂控制。岩相分带明显, 透闪石化辉石岩 (占 50%) 与透闪石化橄榄岩仅分布于个别岩体中部, 透闪石化滑石化辉石岩主要分布于岩体边缘。

## 2 毛草泉岩体的锆石 U-Pb 年龄

从样品测试结果看, 茅草泉岩体样品中锆石 12 个分析点的 <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄范围在 (826±6)~(851±6) Ma 之间, Th/U 值集中于 0.51~0.94。在一致曲线图中, 数据点成群分布特征, 其 <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄的加权平均值为 (833.8±4.0) Ma, 代表了茅草泉岩体的结晶年龄, 反映了茅草泉岩体成岩时代为新元古代, 与金川的成岩年龄一致, 可能与 Rodinia 大陆裂解事件有关。

值得注意的是, 锆石中有 19 亿年与 24 亿年的核部年龄, 代表了继承锆石 (本区龙首山岩群和结晶基底) 的年龄; 4~5 亿年的锆石多在谐和线下方, 具有明显铅丢失, 反映了古生代变质事件发生的时间。

\*本文为国家自然科学基金项目 (40702015)、公益性行业科研专项 (200911007) 及深部探测技术与试验研究专项 (SinoProbe-05-01) 联合资助  
第一作者简介 焦建刚, 男, 1976 年生, 副教授, 博士, 从事矿床学及矿产勘查研究。Email: [jiangang@chd.edu.cn](mailto:jiangang@chd.edu.cn)。

### 3 岩石地球化学特征

茅草泉与塔马子沟岩体群样品具有较高的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  与  $\text{CaO}$  含量,这主要与岩石中斜长石含量的高低有关,暗示茅草泉与塔马子沟岩体群基性程度较金川岩体低。除矿石样品外,3个岩体群样品的镁铁比值 ( $m/f$ ) 介于 2.07 ~ 5.33,  $\text{Mg}^\# (\text{Mg}^\# = \text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe})) = 0.68 \sim 0.84$ , 属铁质超基性岩(吴利仁, 1963)。在  $\text{Ol}'-\text{Ne}'-\text{Q}'$  图中,样品点都落入亚碱性岩区,  $\text{FAM}$  图显示样品属于拉斑玄武岩系列。

金川、毛草泉、塔马子沟岩体超镁铁质岩样品的稀土元素经球粒陨石标准化后的配分曲线属于右倾型,  $(\text{La}/\text{Sm})_N = 1.31 \sim 2.65$ ,  $(\text{Gd}/\text{Yb})_N = 1.33 \sim 1.57$ , 即轻稀土元素与重稀土元素的配分曲线斜率基本一致,具有板内玄武岩的特征,因为板块会聚边缘玄武岩一般表现为轻稀土元素配分曲线普遍向右陡倾,而重稀土元素配分曲线相对平坦。样品普遍具有负  $\delta\text{Eu}$  异常,表明斜长石发生了分离结晶作用,一般高的  $\delta\text{Eu}$  值与斜长石的堆积有关,而低的  $\delta\text{Eu}$  值则与斜长石的亏损有关。岩体群  $\sum\text{REE} = 16 \sim 44$ , 比较一致,普遍轻稀土富集的特征暗示岩浆来源于富集型地幔或受到地壳混染。

不相容元素判断不同岩体的演化特征与构造环境比较有效。在  $\text{Th}-\text{Hf}/3-\text{Nb}/16$  图中,所有样品点落入板内玄武岩区,指示了这些岩体形成于相同的构造环境;  $\text{Nb}/\text{Y}-\text{Zr}/\text{TiO}_2 * 0.0001$  图解中样品点又都落入亚碱性玄武岩系列,结合相似的稀土配分曲线图、微量元素蛛网图,指示了金川、毛草泉、塔马子沟岩体群具有相同或相似的岩浆演化特征。

茅草泉岩体样品  $\text{Sr}$ 、 $\text{Nd}$  同位素测试分析,  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = -7.94 \sim -8.07$ ;  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.7085 \sim 0.7134$ , 与金川岩体  $\text{Sr}$ 、 $\text{Nd}$  同位素组成非常一致(Li et al., 2005),进一步证实了金川与毛草泉岩体具有相同的岩浆源区。

### 4 讨论

金川岩体表现为大量橄榄石堆晶,作为一个完整的岩浆演化系统,矿床中缺乏基性岩浆部分,利用主要元素的组成可以大致估算控制岩石成分的主要矿物相,在  $(\text{Mg}+\text{Fe})/\text{Si}-\text{Si}/\text{Ti}$  摩尔比值图解上,三个岩体的样品点大致沿着斜方辉石与橄榄石控制线分布,说明橄榄石与斜方辉石是岩体群的主要组成矿物,岩浆演化主要受斜方辉石与橄榄石结晶控制,与金川岩体中大量的橄榄石堆晶,主体为二辉橄榄岩特征吻合,也与岩石薄片的观察结果一致。在  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{T}-\text{SiO}_2$  图中,三个岩体样品显示逐渐变化的负相关关系,毛草泉、塔马子沟岩体群样品较金川岩体相对高  $\text{Si}$  低  $\text{Fe}$ , 具有残余岩浆特征。

$\text{Cu}$  为高度亲铜元素,而  $\text{Zr}$  为不亲铜元素,在硫化物不饱和的镁铁质岩浆早期分离结晶的过程中这两个元素具类似的不相容性,均表现为高度不相容。一般情况下,不亏损亲铜金属的典型玄武岩  $\text{Cu}/\text{Zr}$  值接近 1,而由于硫化物熔离,亏损亲铜金属的玄武岩  $\text{Cu}/\text{Zr}$  值往往小于 1(Lightfoot et al., 2005)。金川、毛草泉、塔马子沟岩体样品的  $\text{Cu}/\text{Ni}$  与  $\text{Cu}/\text{Zr}$  值具有过渡变化特征,金川岩体的  $\text{Cu}/\text{Zr} > 1$ ,而毛草泉、塔马子沟岩体  $\text{Cu}/\text{Zr}$  值小于 1 或在 1 附近,暗示 3 个岩体具有演化关系,毛草泉、塔马子沟岩体可能为金川岩体贡献了亲铜元素。

前人针对铜镍硫化物矿床提出了小岩体成矿的理论(汤中立, 2002),这种成矿过程的实质是镁铁质岩浆在深部岩浆房中发生了熔离作用,大量的岩浆提供了成矿物质,导致近地表矿床表现为小岩体。茅草泉、塔马子沟岩体群距离金川超镁铁质岩体 3~5 km,年代学、岩石地球化学、同位素地球化学等这些基性岩体群为同源岩浆演化形成,证实了金川超基性小岩体成矿的质量平衡,丰富了小岩体成矿的理论模型。

### 参考文献

- 汤中立. 2002. 中国的小岩体岩浆矿床[J]. 中国工程科学. 4(6): 9-12.
- Li C, Xu Z H, De Waal S A, et al. 2004. mingeral chemistry of olivine from the Jinchuan Ni-Cu sulfide deposit, Western China: Implications for ore genesis[J]. Mineralium Deposita 39: 159-172.
- Li X. H, Su L, Chung S L, Li Z X., Liu Y, Song B and Liu D Y. 2005. 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]. Geochim. Geophys. Geosyst., 6(11): 1029-1044.