

利用熔浆热力学模型模拟金川岩体 母岩浆成分和岩浆演化

陈列锰^{1,2}, 宋谢炎¹, 朱丹¹, 李士彬^{1,2}, 聂晓勇^{1,2}

(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 550002;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

岩体母岩浆成分是研究岩体形成的基础, 而岩浆演化过程是岩体形成的关键, 二者是岩石学家关注和研究的重点, 也是一个难点。作为最具代表的“小岩体成大矿”的金川岩体, 其成岩过程受到广大地质学家的密切关注。汤中立院士(1990; 1995) 经过长期的勘探和研究认为岩浆演化过程和硫化物熔离均发生在深部岩浆房, 提出岩浆“深部分异-熔离, 依次贯入”成岩成矿模式。Chai等(1992) 则认为金川岩体是大型侵入岩墙的根部, 为原地岩浆分异和硫化物熔离的产物, 并提出金川岩体的母岩浆为高镁拉玄武岩。然而, 进一步研究表明金川含矿岩体各主要岩相及矿体的产状和分布与原地结晶模式相矛盾, 岩体硫化物熔离的深部岩浆房与岩浆侵位的浅部岩浆房在空间上是分离的(宋谢炎等, 2005), 岩体原生橄榄石 Fo 值表明橄榄石结晶于深部岩浆房(Chusi等, 2004)。Song等(2006) 对金川岩体的微量元素和铂族元素地球化学研究证实了深、浅两个岩浆房的存在。铬铁矿和橄榄石中多相包裹体的相平衡关系以及热力学计算表明岩体的岩浆房深度在4~15km的深度(De Waal等, 2004; Yang等, 1998)。上述相关研究表明金川岩体母岩浆为高镁拉斑玄武岩, 岩浆演化过程复杂。虽然金川岩体母岩浆性质基本确定, 但是对其组分中各氧化物含量的厘定研究相对薄弱, 母岩浆的

演化过程研究不足。本研究借助熔浆热力学软件“MELTS”首次成功模拟得到金川岩体的母岩浆成分和岩浆演化过程, 修正了Chai等(1992) 得到的母岩浆成分, 进一步厘定各氧化物组分。模拟计算表明金川岩体母岩浆成分主要氧化物SiO₂、TiO₂、Al₂O₃、Cr₂O₃、FeO、Fe₂O₃含量依次为: 48.2、1.00、11.30、0.18、12.90、1.30, 而MnO、CaO、Na₂O、K₂O和NiO含量依次为: 0.15、12.60、10.10、1.51、0.72、0.04。同时, 得到岩体岩浆的演化过程, 表明金川岩体岩浆演化分两个阶段结晶, 在深度约为10.9~12.5 km(10 kbar/33 km)的深部岩浆房先结晶出尖晶石、橄榄石及斜方辉石, 之后带有“晶粥”的岩浆再次上涌, 上涌过程中部分橄榄石和斜方辉石重熔, 并且混染围岩, 侵入7.6~9.2 km的浅部岩浆房, 结晶出橄榄石、单斜辉石、斜长石。模拟结果与实际的岩相学观察及相关的研究一致。

MELTS软件是Chiorso等(1995)及其研究小组(Asimow等, 1998; Smith等, 2005) 基于大量的相关矿物相及硅酸盐熔浆的实验热力学数据和热力学模型, 经过多年开发的一套用于模拟计算岩浆体系各相平衡关系的熔浆热力学软件。MELTS可以模拟计算500~2000°C、0~2 Gbar和一定氧逸度变化范围内, 岩浆的平衡结晶和分离结晶。同时, 还可以计算稀土元素在各个物质相的分配和含量变化。MELTS能够很好的模拟镁铁质岩浆体系岩浆演化, 得到广大地质学家的认可。

本次研究基于一个前提条件: MELTS软件能够很好的模拟岩浆演化过程, 同时模拟岩浆演化的结果有以下5个必要条件: ①矿物结晶顺序与岩相学观察到的完全相同; ②矿物的成分

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 40573014; 40373030); 中国科学院“百人计划”项目

作者简介: 陈列锰, 男, 1981年生, 博士研究生, 地球化学专业, 研究方向: 矿床地球化学

通讯作者: 宋谢炎, 男, 1962年生, 研究员, 岩石与矿床地球化学专业。E-mail: songxieyan@vip.gyig.ac.cn

与实际电子探针分析的数据基本一致;③母岩浆性质为拉斑玄武岩;④实际观察的岩相学特征相吻合;⑤母岩浆成分中 $MgO/(MgO + FeO)$ 值约为 0.64 (Chai 等, 1992)。在这些必要条件下, 首先以 Chai 等(1992) 计算得到的母岩浆成分, 在一定的压力下, 逐步降低温度模拟计算岩浆演化。模拟结果表明, 计算得到的矿物结晶顺序不一致, 而且橄榄石的成分与实际的电子

探针分析结果有一定的差异。然后不断的调整各种氧化物的含量变化, 以及压力的变化来模拟计算岩浆演化。通过大量的计算, 分析比较各种变化对岩浆演化结果的影响, 总结相关规律, 不断向上述必要条件回归。经过多次回归, 模拟计算得到上述结果, 模拟得到岩体的岩浆演化如图所示(图 1, 图 2)。

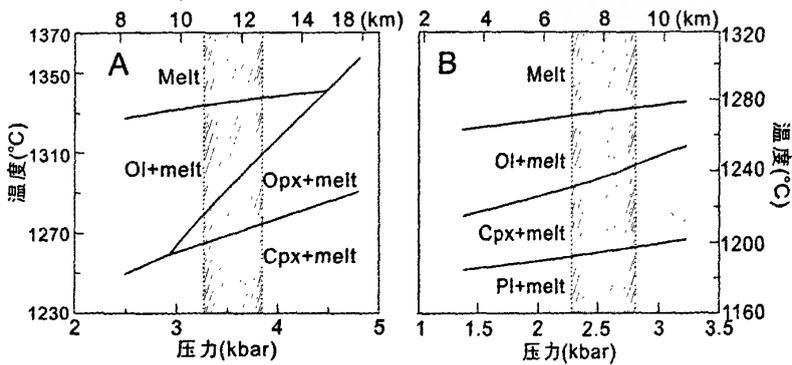


图 1 金川岩体岩浆演化模拟计算主要造岩矿物结晶顺序及温度压力

(结合矿物结晶顺序及电子探针成分分析, 岩浆演化分两个阶段结晶: A. 深部岩浆房深度约为 10.9~12.5 km (灰色区间, 压力在 3.3~3.8 kbar 之间); B. 浅部岩浆房深度约为 7.6~9.2 km (灰色区间, 压力在 2.3~2.8 kbar 之间)。

Ol: 橄榄石; Opx: 斜方辉石; Cpx: 单斜辉石; Pl: 斜长石

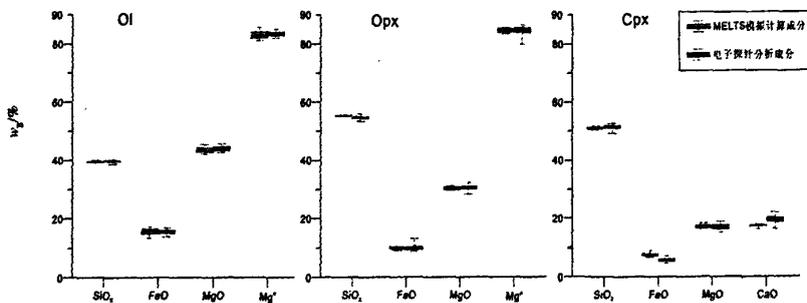


图 2 金川岩体岩浆演化模拟计算矿物成分与电子探针成分分析成分对比

模拟计算结果与上述 5 个必要条件基本一致。模拟计算岩浆演化结晶顺序与岩相学观察及热力学相图研究表明结果完全一致。通过镜下观察发现, 金川岩体矿物中没有出现橄榄石和斜方辉石反应边, 而有少量的橄榄石被斜方辉石包裹, 同时也有斜方辉石被橄榄石包裹现象 (Chai 等, 1992; De Waal 等, 2004; 李士彬等, 2007), 大部分橄榄石被单斜辉石直接包裹。岩

浆演化在深部和浅部岩浆房两次结晶, 深部岩浆房结晶的先橄榄石被后结晶的斜方辉石包裹, 而在浅部岩浆房结晶的橄榄石同时又能包裹深部岩浆房结晶的斜方辉石, 从而形成橄榄石和斜方辉石相互包裹的独特岩相学特征, 同时在浅部岩浆房晶出的单斜辉石直接包裹橄榄石。计算得到三种主要造岩矿物成分与电子探针成分分析基本一致 (Chusi 等, 2004) (图 2),

尤其是橄榄石和斜方辉石几乎完全相同,而单斜辉石的CaO含量电子探针分析比模拟计算的结果稍偏高,相应的FeO含量电子探针分析比模拟计算的结果稍偏低,可能由于岩浆从深部岩浆房上侵到浅部岩浆房的过程中混染大量富钙围岩导致的(Lehmann等,2007)。金川岩体各岩相中橄榄石大部分呈浑圆粒状,偶见自形、半自形粒状,这是由于在深部结晶的橄榄石再次与岩浆反应发生重熔形成浑圆粒状。包裹体研究表明深部岩浆房在12.9~15 km的深度,浅部岩浆房在6.9~9.3 km的深度(Yang等,

1998),与模拟计算得到的深部岩浆房为10.9~12.5 km,浅部岩浆房为7.6~9.2 km的深度相吻合。同时岩浆演化成矿过程中,硫化物的熔离基本与深部岩浆房岩浆结晶同时发生,而熔离出来的硫化物比重大,能够被带入浅部岩浆房,说明深部和浅部岩浆房之间的距离并不会太远,因此,本次模拟计算得到的两个岩浆房的压力范围可能更加符合实际地质特征。本模拟计算进一步支持汤中立院士提出的金川岩体“深部分异-熔离,依次贯入”成矿模式。

参 考 文 献:

- 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.岩石学报,2007(待刊).
- 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.矿物岩石地球化学通报,2005,(4):293-298.
- 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.北京:地质出版,1995:1-208.
- 汤中立.金川硫化铜镍矿床成矿模式.现代地质,1990,(4):55-64.
- Asimow P D,Chiorso M S. Algorithmic modifications extending MELTS to calculate subsolidus phase relations. *American Mineralogist*, 1998, 83(9-10):1127-1132.
- Chai G,Naldrett A J. The Jinchuan Ultramafic Intrusion: Cumulate of a High-Mg Basaltic Magma. *Journal of Petrology*, 1992, 33: 277-303.
- Chusi L,Zhanghua X,Sybrand A W, et al. Compositional variations of olivine from the Jinchuan Ni-Cu sulfide deposit, western China: implications for ore genesis. *Mineralium Deposita*, 2004, 39(2): 159-172.
- De Waal S A,Xu Z G,Li C S, et al. Emplacement of viscous mushes in the Jinchuan ultramafic intrusion, western China. *Canadian Mineralogist*, 2004, 42: 371-392.
- Chiorso M S,Sack R O. Chemical transfer in magmatic processes IV. A revised and internally consistent thermodynamic model for the interpolation and extrapolation of liquid-solid equilibria in magmatic systems at elevated temperatures and pressures. *Mineralogy and Petrology*, 1995, 119(2-3):197-212.
- 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. *Economic Geology*, 2007, 102: 75-94.
- Smith PM,Asimow PD. *Adiabat_1ph*: A new public front-end to the MELTS, pMELTS, and pHMELTS models. *Geochem Geophys Geosyst*, 6, art. No. Q02004, doi: 10.1029/2004GC000816.
- 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. *International Geology Review*, 2006, 48(12): 1113-1132.
- Yang X Z,Ishihara S,Matsueda H. Multiphase melt inclusions in the Jinchuan complex, China: Implications for petrogenic and metallogenic physico-chemical conditions. *International Geology Review*, 1998, 40(4): 335-349.