

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

陈列猛^{1,2)}, 宋谢炎¹⁾, Danyushevsky L. V. ³⁾, 肖加飞¹⁾, 朱丹¹⁾, 周国富¹⁾,
官建祥^{1,2)}, 刘世荣¹⁾, 郑文勤¹⁾

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, 贵阳, 550002; 2) 中国科学院研究生院, 北京, 100049; 3) School of Earth Sciences and ARC Center of Excellence in Ore Deposit, University of Tasmania, Australia

内容提要:金川铜镍硫化物矿床是仅次于加拿大 Sudbury 和俄罗斯 Noril'sk-Talnakh 的世界第三大在采镍矿床。金川岩体主要由含二辉橄榄岩、二辉橄榄岩、斜长二辉橄榄岩和橄榄辉石岩组成, 岩相学观察表明主要造岩矿物的结晶顺序为: 橄榄石→斜方辉石→单斜辉石→斜长石。为了进一步探讨金川岩体母岩浆成分及其分离结晶过程, 本文在前人工作基础上根据主要造岩矿物结晶顺序及其电子探针成分, 借助熔浆热力学软件“MELTS”的计算, 获得金川岩体更为准确的母岩浆成分为: SiO₂ 48.2%, TiO₂ 1.00%, Al₂O₃ 11.3%, FeO 12.9%, Fe₂O₃ 1.30%, MgO 12.6%, CaO 10.1%, Na₂O 1.51%, K₂O 0.72%, NiO 0.04%。MELTS 模拟计算表明金川岩体母岩浆的分离结晶经历了两个阶段, 在深度约为 10.9~12.5km 的深部岩浆房经历了约 5% 的橄榄石以及约 4% 的斜方辉石分离结晶, 并伴随硫化物熔离。在重力作用的影响下, 橄榄石、斜方辉石和硫化物向下沉降, 形成由下至上的分层: 橄榄石-斜方辉石-硫化物-硅酸盐熔浆层, 橄榄石-斜方辉石-硅酸盐熔浆层和硅酸盐熔浆层。硅酸盐熔浆首先挤出形成贫硫化物的岩体或喷出地表, 之后橄榄石-斜方辉石-硅酸盐熔浆被挤入到 7.6~9.2km 的浅部岩浆房, 经重力分异形成金川 I 号岩体的上部岩相带和 II 号岩体顶部的含辉橄榄岩。橄榄石-斜方辉石-硫化物-硅酸盐熔浆层最后被挤入金川岩体, 并再次结晶出橄榄石、单斜辉石、斜长石, 形成金川岩体的主要岩相和硫化物矿体。这些计算结果不仅与野外和室内岩相学观察吻合, 也与硫化物熔离过程的最新研究成果相一致。

关键词: 金川岩体; 母岩浆; 分离结晶; 熔浆热力学模型; MELTS

金川矿床是仅次于加拿大 Sudbury 和俄罗斯 Noril'sk-Talnakh 的世界第三大岩浆铜镍硫化物矿床, 更是“小岩体成大矿”现象的典型代表(汤中立, 1990)。金川岩体长度仅约 6.5km, 宽度不足 0.5 km, 但铜镍硫化物矿化率却达到约 50%, 金属 Ni 储量超过 550 万吨, Cu 储量超过 350 万吨, 其成矿过程受到中外地质学家的长期关注(汤中立, 1990; 汤中立和李文渊, 1995; Chai and Naldrett, 1992a, b; 解广轰等, 1998; De Waal et al., 2004; 张宗清等, 2004; Song et al., 2006, 2009; Lehmann et al., 2007)。众所周知, 铜镍硫化物的熔离与镁铁质岩浆的组成及其演化有着密不可分的内在联系, 然而, 长期以来, 金川岩体母岩浆的成分

及其演化过程却仍然存在争议。汤中立等(1990, 1995, 1996)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 and Naldrett (1992a, b) 提出金川岩体的母岩浆为高镁拉斑玄武岩, 同时认为金川岩体为原地分异大型层状侵入体的根部。然而, 近年来新的研究成果提供了更多的支持“深部熔离-依次贯入”观点的证据(Li et al., 2004; De Waal et al., 2004; 李献华等, 2004; 王瑞廷等, 2004; 李士彬等, 2007; Lehmann et al., 2007)。Song et al. (2006, 2009) 发现深部和浅部岩浆房熔离的硫化物的铂族元素组成存在差异, 再次证明了“深部熔离-依次贯入”观点的合理

注: 本文为科技部“973”计划“2007CB411408”, 国家自然科学基金(40730420, 40573014)和中国科学院“百人计划”资助的成果。

收稿日期: 2008-05-13; 改回日期: 2009-03-10; 责任编辑: 郝梓国。

作者简介: 陈列猛, 男, 1981年生。博士研究生。矿物学, 岩石学, 矿床学专业。Email: chenliemeng@163.com。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。Email: songxieyan@vip.gyig.ac.cn。

性。

岩浆铜镍硫化物矿床是当镁铁-超镁铁岩浆通过特殊的演化过程达到 S 饱和后,熔离的硫化物聚集成矿的结果。硫化物中铜、镍、铂族元素的含量不仅取决于熔离硫化物与硅酸盐浆之间的比例,也与这些元素在母岩浆中的含量有关,而这些元素在不同性质的镁铁-超镁铁岩浆中的含量和比例关系有着显著的差异。因此,母岩浆成分和岩浆演化过程总是岩浆铜镍硫化物矿床的研究重点,金川矿床铜镍硫化物的聚集成矿无疑是严格受到岩浆演化过程制约的。然而,由于金川岩体有超镁铁质堆积岩组成,岩体冷凝边后期断层活动而缺失,也未观察到与岩浆侵入通道有密切关系的镁铁质岩墙,使得金川岩体母岩浆成分和岩浆在深部和浅部岩浆房的分离结晶过程尚不清楚。尽管 Chai and Naldrett (1992a) 根据硫化物 Ni/Cu 比值、铂族元素组成特征,认为金川岩体母岩浆为高镁拉斑玄武岩浆,并运用橄榄石-熔浆平衡原理计算得到金川岩体母岩浆的氧化物组成。但他们的计算尚缺乏更全面的矿物学和熔浆热力学约束,而且橄榄石成分容易受晶间硅酸盐熔浆作用及橄榄石-硫化物之间 Fe-Ni 交换

等多种因素影响(Li et al., 2007),特别是,这种高镁拉斑玄武岩浆的演化过程还不明确。本文在细致的岩相学和橄榄石、斜方辉石和单斜辉石矿物学研究基础上,借助熔浆热力学模型“MELTS”的模拟计算,重新厘定了金川岩体母岩浆成分,并对深部和浅部岩浆房内岩浆演化结晶分离过程进行了系统研究,建立岩体岩浆演化模式。本研究对深入理解金川矿床的成岩成矿过程具有重要意义,为建立更为合理的成岩成矿模式奠定了基础。

1 金川岩体基本地质特征

金川超镁铁质岩体位于华北地台阿拉善地块西南边缘龙首山隆起带,南邻祁连早古生代褶皱系的北祁连褶皱带,北依准噶尔晚古生代褶皱系(汤中立, 1995;汤中立和白云来,1999)(图 1)。金川岩体呈似岩墙状不整合侵入于元古宙龙首山群的白家嘴子组混合岩、片麻岩和大理岩中,岩体总体走向 NW50°,长约 6500m,两端为第四系覆盖;倾向 SW,倾角 50°~80°,延深大于 1100 m。岩体宽 20~527 m,地表出露面积 1.34km²。岩体空间形态受 NW 向扭张性、NNE 向张扭性和 NEE 向压扭性断裂控

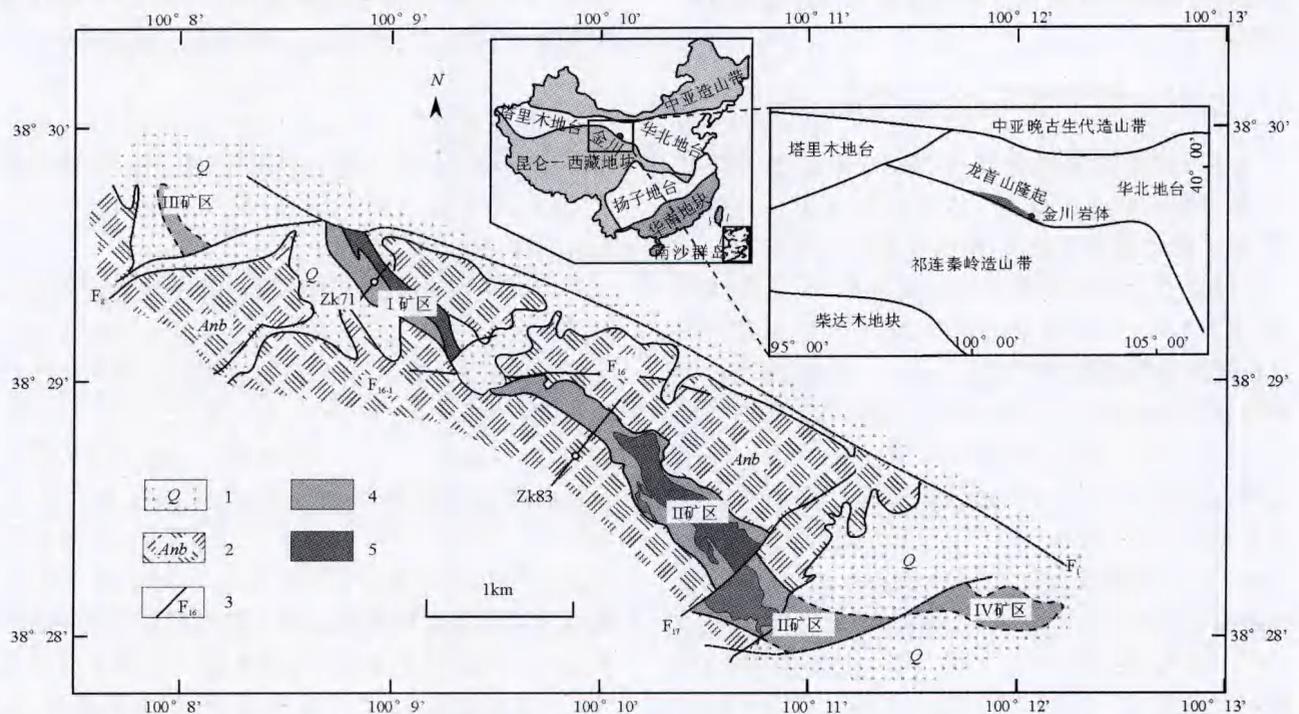


图 1 金川岩体地质示意图(据汤中立和李文渊,1995,宋谢炎等,2005。含辉橄榄岩的分布为本次研究地表实际观测结果)

Fig.1 Geological map of the Jinchuan intrusion

(After Tang and Li, 1995, Song et al., 2005. Distribution of pyroxene dunite is according to the investigation of this study)

1—第四纪;2—元古宙龙首山群变质岩;3—断层;4—二辉橄榄岩;5—含辉橄榄岩

1—Quaternary sediments; 2—Proterozoic Longshoushan Group metamorphic rocks; 3—fault; 4—lherzolite; 5—pyroxene dunite

制,被一系列 NE 向断层分割成四个小岩体,由西至东依次为 III、I、II、IV 岩体(图 1)(汤中立和李文渊, 1995)。最新的 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年结果表明金川岩体形成年龄为新元古代 $827 \pm 8\text{Ma}$ (Li et al., 2004, 2005)。

金川岩体有四个主要岩相:含二辉橄榄岩、二辉橄榄岩、斜长二辉橄榄岩和橄榄辉石岩,以及少量纯橄岩,但四个岩体的岩相分布具有不同特点,本次研究重点是 I 号和 II 号岩体。II 号岩体岩相具有对称分布的特点,从岩体中心向两边,从下至上依次为硫化物含二辉橄榄岩、二辉橄榄岩、斜长二辉橄榄岩和橄榄辉石岩,各岩相间一般呈渐变关系,但其顶部的中细粒含辉橄榄岩与其下部的中粗粒二辉橄榄岩呈短程渐变的的关系,1 号和 2 号矿体赋存于 II 号岩体的西部和东部的含二辉橄榄岩中(图 1)。I 号岩体则根据橄榄石的含量和粒度可以将其分为上下两个岩相带,上部岩相带由中细粒含辉橄榄岩和二辉橄榄岩组成,下部岩相带由中粗粒含辉橄榄岩和二辉橄榄岩组成。尽管两个岩相带内部岩相间呈渐变过渡,而岩相带之间为突变或短程渐变关系,24 行矿体产于 I 号岩体中粗粒二辉橄榄岩相的下部(图 2)。这些岩相学特点无法用一次岩浆贯入的分离结晶作用解释。

2 金川岩体主要造岩矿物的岩相学

金川超基性岩体各岩相主要造岩矿物为橄榄石、单斜辉石和斜方辉石,以及少量斜长石和角闪石,副矿物主要为尖晶石、磁铁矿和钛铁矿等。

橄榄石为各岩相最主要的造岩矿物,呈浑圆粒状(图 3 a、b、c),常被单斜辉石、斜方辉石或者斜长石包裹构成“包橄结构”(图 3 a、c)。钻孔统计表明不同岩相中橄榄石的含量和粒度呈现有规律性的变化。I 号岩体上部岩相带橄榄石含量在 40%~85% 之间,主要在 65%~80% 之间,随深度增加其含量增大;橄榄石粒度在 1.5~3.5mm 之间,主要 2~3mm 之间,随深度增加粒度缓慢增大;下部岩相带橄榄石含量在 20%~85% 之间,大部分集中在 35%~60% 之间,随深度增加含量先增大再急剧减小;橄榄石粒度在 1.5~10mm 之间,大部分在 4~6mm 之间(图 2 a、b),变化较小。II 号岩体橄榄石粒度主要范围为 3.0~4.5 mm,大部分集中在 2.5~3.5 mm 之间,橄榄石含量在 30%~95% 之间,主要在 50%~85% 之间(扣除硫化物)(图 2 c、d)。无论在 I 号岩体还是在 II 号岩体,硫化物二辉橄榄岩中橄

石粒度都有规律地减小。橄榄石普遍遭受不同程度的蛇纹石化(图 3 a、b、c、d)。

斜方辉石常包含小的橄榄石颗粒,构成“包橄结构”(图 3 a、c),亦有少量被橄榄石所包含(De Waal et al., 2004)。斜方辉石由于解理发育,大多遭受强烈的滑石化和蛇纹石化,保存较少。单斜辉石普遍存在于岩体各个岩相中,呈填隙状充填在橄榄石和斜方辉石颗粒之间,常包含橄榄石和斜方辉石构成“包含结构”(图 3 a)。I 号岩体上部岩相带单斜辉石含量在 10%~60% 之间,主要在 20%~30% 之间,随深度增加含量逐渐减少;下部岩相带单斜辉石含量在 5%~70% 之间,集中在 25%~35% 之间,随深度增加含量增加,(图 2 a、b)。II 号岩体单斜辉石的含量约在 20%~60% 之间,最高达到 80%(图 2 c、d),单斜辉石遭受强烈的透闪石化和绿泥石化。根据上述岩相学特征,结合热力学相图研究得到金川岩体矿物结晶顺序为:尖晶石→橄榄石→斜方辉石→单斜辉石→斜长石(李士彬等, 2007)。

3 样品分析和结果

样品采自金川 I 号岩体 24 行 ZK71 钻孔、II 号岩体 14 行 ZK83 钻孔及地表(图 1,图 2)。样品分析在澳大利亚 Tasmania 大学完成。分析条件为: Cameca SX-50 电子探针,加速电压 15 kV,电流 10 nA,分析束斑直径 20 μm ,计数时间 20s,以标准矿物 SCOL 校正。每个样品选取若干个矿物颗粒测试分析,结果如表所示(表 1,表 2,表 3),表中数据为各个样品的平均值。

分析结果表明金川岩体橄榄石成分总体变化不大, Fo 在 81~86 之间(图 4),这与前人的分析结果基本一致(Li et al., 2004),斜方辉石主要为顽火辉石,其端员组分为: $W_o=1.95\sim9.38$, $En=74.5\sim82.4$, $Fs=13.4\sim21.0$ 。单斜辉石主要为顽透辉石和普通辉石,其端员组分分别为 $W_o=21.9\sim48.5$, $En=41.3\sim68.7$, $Fs=4.63\sim11.2$ (图 4),与前人的分析结果基本相吻合(Chai and Naldrett, 1994)。值得注意的是含辉橄榄岩和二辉橄榄岩中上述造岩矿物的成分是有差异的:含辉橄榄岩中橄榄石的成分 Fo 值主要在 83.4~85.3 之间,斜方辉石的 En 在 78.4~82.4 之间,单斜辉石的 En 在 49.4~68.7。而二辉橄榄岩中这几种矿物的镁排号均稍低,橄榄石 Fo 值介于 80.9~84.8 之间,斜方辉石和单斜辉石的 En 分别为 74.5~82.4 和 41.3~63.0(见表 1,表 2,表 3,图 4)。

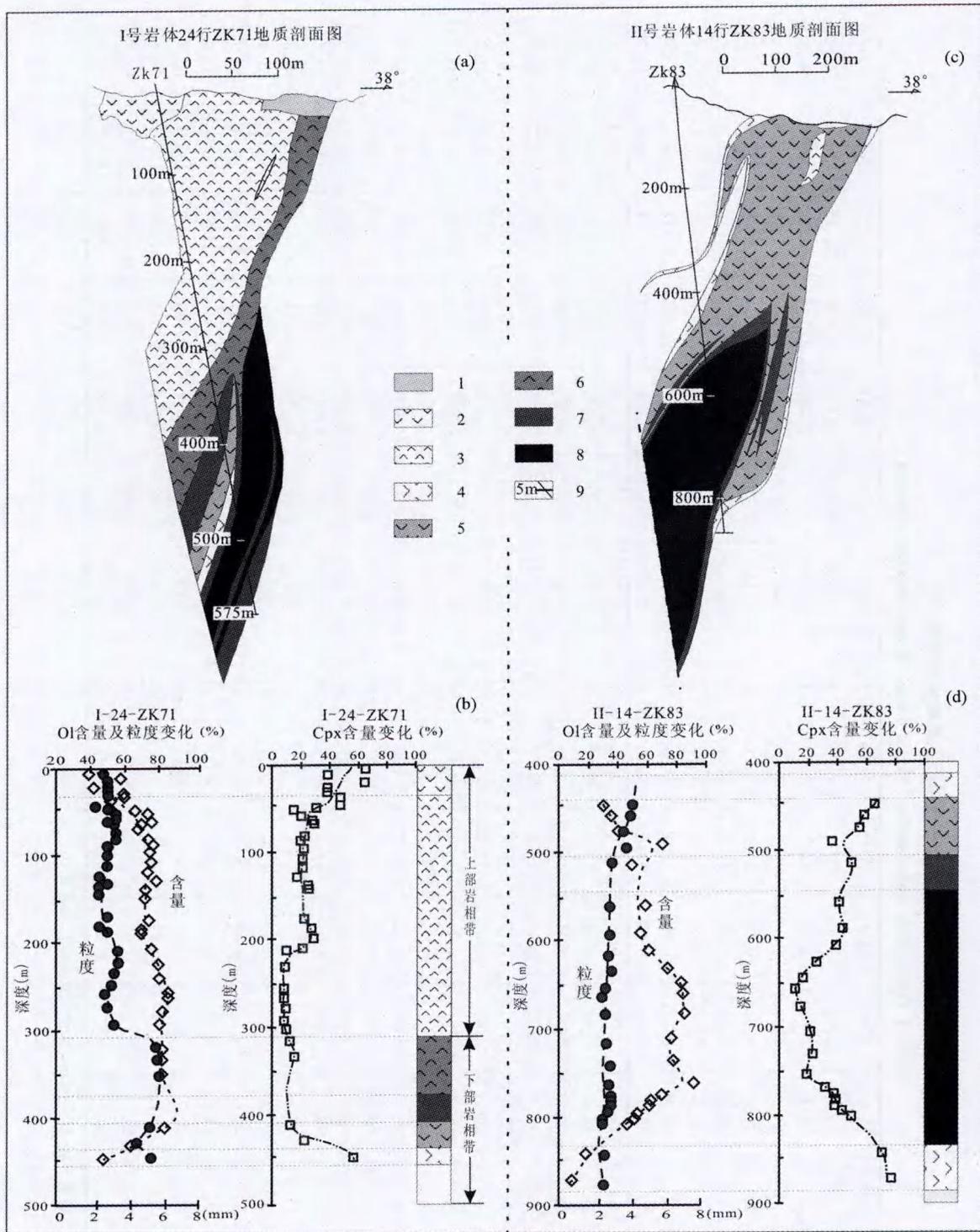


图 2 金川 I 号岩体 24 行 ZK71(a, b)和 II 号岩体 14 行钻孔 ZK83(c, d)中各岩相橄榄石粒度、含量及单斜辉石含量统计(剖面图据甘肃省地矿局第六地质队,1981 年^①)

Fig. 2 The variations of the grain-size of olivine; the contents of olivine and clinopyroxene along the borehole ZK71 in exploration line 24 of rock mass I (a, b) and the borehole ZK83 in exploration line 14 of rock mass II (c, d) (The cross section diagrams is modified after the Sixth Geological Team of the Geological Survey, Gansu, China, 1981)

- 1—氧化带;2—中细粒二辉橄榄岩;3—细粒含辉橄榄岩;4—中粗粒橄榄辉石岩;5—中粗粒二辉橄榄岩;6—中粗粒含辉橄榄岩;
- 7—稀疏浸染状矿石;8—稠密浸染状矿石;9—钻孔深度
- 1—Oxidized zone; 2—medium-fine-grained lherzolite; 3—fine-grained pyroxene dunite; 4—medium-coarse-grained olivine pyroxenite;
- 5—medium-coarse-grained lherzolite; 6—medium-coarse-grained pyroxene dunite; 7—disseminated sulfide ore;
- 8—net-textured sulfide ore; 9—drill hole and its depth

表 1 金川岩体橄榄石主要氧化物含量 (%)
Table 1 Major oxide compositions (%) of olivine of the Jinchuan intrusion

岩体	样品号	岩相	点数	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO*	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Cr ₂ O ₃	NiO	Total	Fo	
I 号 岩 体 上 部 岩 相 带	JC06-209	含辉橄榄岩	10	39.6	0.03	0.01	14.3	0.21	45.7	0.093	0.006	0.005	0.012	0.211	100.1	85.1	
	JC06-214	含辉橄榄岩	10	39.3	0.02	0.02	14.4	0.19	45.2	0.066	0.010	0.002	0.014	0.212	99.4	84.9	
	JC06-220	含辉橄榄岩	10	39.5	0.03	0.03	14.3	0.20	45.6	0.091	0.005	0.003	0.018	0.219	100.0	85.0	
	JC06-222	含辉橄榄岩	11	39.5	0.03	0.04	14.4	0.20	45.5	0.112	0.008	0.006	0.014	0.225	100.1	84.9	
	JC06-244	含辉橄榄岩	3	39.6	0.03	0.01	14.2	0.20	45.6	0.130	0.005	0.000	0.020	0.238	100.0	85.1	
	JC06-201	二辉橄榄岩	11	39.2	0.02	0.03	14.6	0.20	45.0	0.088	0.006	0.000	0.015	0.230	99.4	84.6	
	JC06-205	二辉橄榄岩	12	39.4	0.02	0.02	14.4	0.20	45.1	0.147	0.005	0.007	0.017	0.217	99.6	84.8	
	JC06-207	二辉橄榄岩	10	39.4	0.03	0.02	14.4	0.19	45.2	0.173	0.004	0.001	0.023	0.214	99.6	84.9	
	JC04-102	含辉橄榄岩	8	39.2	0.02	0.03	15.6	0.22	44.6	0.165	0.006	0.006	0.006	0.021	0.222	100.1	83.6
	JC05-1	含辉橄榄岩	15	39.5	0.01	0.02	14.1	0.32	45.7	0.215	0.006	0.005	0.007	0.036	99.9	85.3	
	JC05-8	含辉橄榄岩	12	39.2	0.02	0.01	14.6	0.20	45.4	0.065	0.003	0.005	0.004	0.208	99.6	84.8	
	JC05-11	含辉橄榄岩	10	39.6	0.02	0.01	14.4	0.19	45.7	0.078	0.004	0.005	0.016	0.208	100.3	85.0	
	JC04-73	二辉橄榄岩	5	39.2	0.01	0.02	16.8	0.23	43.6	0.195	0.004	0.004	0.027	0.251	100.3	82.2	
JC04-77	二辉橄榄岩	9	39.1	0.01	0.02	17.5	0.24	42.8	0.274	0.003	0.004	0.008	0.212	100.1	81.3		
JC04-81	二辉橄榄岩	11	38.9	0.01	0.02	16.9	0.23	43.2	0.123	0.005	0.005	0.012	0.224	99.6	82.0		
JC04-83	二辉橄榄岩	7	39.1	0.01	0.02	15.9	0.19	44.1	0.145	0.008	0.005	0.017	0.178	99.6	83.2		
JC04-91	二辉橄榄岩	8	39.0	0.01	0.02	14.7	0.21	45.3	0.082	0.002	0.005	0.016	0.225	99.5	84.6		
JC04-92	二辉橄榄岩	6	39.0	0.01	0.02	15.3	0.21	44.4	0.036	0.005	0.005	0.015	0.217	99.3	83.8		
JC04-99	二辉橄榄岩	6	39.0	0.02	0.01	15.1	0.21	45.1	0.072	0.011	0.000	0.026	0.212	99.7	84.2		
JC04-111	二辉橄榄岩	11	39.4	0.01	0.02	16.1	0.22	44.0	0.130	0.009	0.001	0.014	0.237	100.1	83.0		
JC04-116	二辉橄榄岩	11	39.1	0.01	0.02	15.4	0.20	44.2	0.133	0.008	0.003	0.011	0.274	99.4	83.6		
JC04-121	二辉橄榄岩	10	38.9	0.02	0.02	17.0	0.23	43.1	0.162	0.008	0.004	0.019	0.224	99.7	81.9		
JC04-123	二辉橄榄岩	3	39.5	0.02	0.02	15.3	0.21	44.7	0.101	0.020	0.002	0.023	0.240	100.1	83.9		
JC05-3	二辉橄榄岩	9	38.7	0.01	0.03	17.9	0.23	42.6	0.140	0.006	0.002	0.027	0.203	99.9	80.9		
JC05-4	二辉橄榄岩	5	39.0	0.01	0.02	17.1	0.22	43.5	0.075	0.009	0.005	0.005	0.207	100.2	81.9		
JC05-5	二辉橄榄岩	2	39.6	0.02	0.02	15.7	0.25	44.5	0.022	0.021	0.004	0.021	0.203	100.4	83.4		
JC05-7	二辉橄榄岩	19	39.5	0.02	0.03	14.8	0.20	45.2	0.089	0.006	0.004	0.019	0.214	100.1	84.4		
JC05-13	二辉橄榄岩	6	39.1	0.01	0.02	16.8	0.23	43.7	0.052	0.005	0.002	0.016	0.209	100.1	82.2		

注:橄榄石电子探针分析由宋谢炎研究员在澳大利亚 Tasmania 大学完成,FeO* 为全铁。

表 2 金川岩体斜方辉石主要氧化物含量及其端员组分(%)
Table 2 Major oxide compositions (%) of orthopyroxene of the Jinchuan intrusion

岩体	样品号	岩相	点数	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO*	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Cr ₂ O ₃	NiO	Total	Wo	En	Fs
I 号岩体上部岩相带	JC06-209	含辉橄辉岩	8	54.6	0.47	1.58	9.12	0.20	31.2	1.98	0.042	0.001	0.461	0.06	99.7	3.76	82.3	13.8
	JC06-222	含辉橄辉岩	8	54.7	0.41	1.88	9.10	0.21	30.8	2.30	0.046	0.003	0.552	0.07	100.0	4.38	81.6	13.8
	JC06-201	二辉橄辉岩	7	54.5	0.38	1.54	9.22	0.21	30.8	1.74	0.041	0.007	0.431	0.04	99.0	3.35	82.4	14.1
	JC06-205	二辉橄辉岩	4	54.2	0.48	1.59	9.22	0.20	30.7	1.94	0.045	0.001	0.471	0.05	99.0	3.73	82.0	14.1
	JC06-207	二辉橄辉岩	4	54.0	0.49	1.76	9.17	0.20	30.5	2.11	0.042	0.003	0.526	0.05	98.9	4.07	81.7	14.0
	JC04-102	含辉橄辉岩	13	54.4	0.25	2.26	9.24	0.20	30.5	2.34	0.054	0.002	0.678	0.06	100.0	4.48	81.2	14.1
	JC04-122	含辉橄辉岩	10	54.4	0.19	1.99	8.75	0.20	29.3	4.13	0.080	0.004	0.741	0.05	99.9	7.99	78.4	13.4
	JC05-8	含辉橄辉岩	3	54.6	0.27	1.79	9.21	0.19	31.1	1.90	0.026	0.006	0.574	0.05	99.7	3.64	82.4	13.9
	JC05-11	含辉橄辉岩	2	54.0	0.25	1.86	9.10	0.20	30.7	2.14	0.052	0.002	0.577	0.06	99.0	4.09	81.9	13.8
	JC04-73	二辉橄辉岩	5	55.4	0.13	1.25	11.0	0.25	30.9	1.02	0.025	0.001	0.274	0.03	100.2	1.95	81.4	16.6
II 号岩体	JC04-77	二辉橄辉岩	5	54.3	0.29	1.62	9.71	0.20	30.6	1.68	0.037	0.002	0.438	0.06	99.0	3.23	81.8	14.8
	JC04-81	二辉橄辉岩	2	55.4	0.11	0.94	10.6	0.28	30.6	1.25	0.028	0.002	0.206	0.04	99.5	2.41	81.3	16.2
	JC04-83	二辉橄辉岩	8	54.8	0.17	1.61	9.18	0.20	30.7	2.03	0.065	0.005	0.591	0.05	99.4	3.90	81.9	14.0
	JC04-88	二辉橄辉岩	11	53.8	0.37	2.33	9.47	0.19	30.0	2.20	0.062	0.003	0.624	0.05	99.0	4.27	80.9	14.6
	JC04-91	二辉橄辉岩	9	53.9	0.33	2.12	9.28	0.19	30.5	2.29	0.042	0.001	0.638	0.07	99.4	4.40	81.3	14.1
	JC04-92	二辉橄辉岩	18	53.7	0.29	1.90	9.82	0.21	29.9	2.14	0.044	0.004	0.540	0.03	98.5	4.15	80.6	15.1
	JC04-99	二辉橄辉岩	9	54.6	0.31	1.71	9.60	0.21	30.9	1.85	0.031	0.002	0.433	0.06	99.7	3.53	81.9	14.5
	JC04-110	二辉橄辉岩	21	54.2	0.18	1.56	12.3	0.29	29.5	1.14	0.084	0.003	0.248	0.04	99.5	2.22	78.7	18.8
	JC04-111	二辉橄辉岩	13	55.1	0.08	1.57	9.91	0.25	30.8	1.33	0.037	0.029	0.386	0.04	99.6	2.56	82.1	15.2
	JC04-116	二辉橄辉岩	1	54.9	0.14	1.50	9.03	0.23	30.5	2.32	0.050	0.002	0.577	0.07	99.3	4.46	81.5	13.8
	JC04-121	二辉橄辉岩	13	54.1	0.32	2.06	10.2	0.22	29.9	2.12	0.042	0.003	0.537	0.06	99.5	4.09	80.2	15.6
	JC04-123	二辉橄辉岩	20	54.3	0.21	2.32	9.03	0.19	30.3	2.40	0.051	0.004	0.692	0.08	99.6	4.62	81.4	13.8
	JC04-124	二辉橄辉岩	10	53.6	0.24	2.21	9.77	0.20	29.7	2.43	0.043	0.004	0.624	0.06	98.9	4.71	80.1	15.0
JC05-3	二辉橄辉岩	11	53.9	0.25	2.29	10.4	0.21	29.6	2.27	0.052	0.008	0.576	0.05	99.6	4.37	79.5	16.0	
JC05-4	二辉橄辉岩	13	53.7	0.39	2.26	9.93	0.21	28.0	4.77	0.095	0.006	0.603	0.06	100.0	9.38	75.1	15.2	
JC05-5	二辉橄辉岩	10	54.6	0.26	2.23	9.56	0.23	30.3	2.12	0.048	0.004	0.632	0.06	100.0	4.08	81.1	14.7	
JC05-7	二辉橄辉岩	1	57.4	0.01	0.19	12.0	0.50	25.4	1.91	0.112	0.010	0.006	0.04	97.5	4.03	74.5	21.0	
JC05-13	二辉橄辉岩	9	53.8	0.42	2.25	10.3	0.22	29.8	2.23	0.052	0.003	0.552	0.06	99.6	4.30	79.8	15.7	

注:斜方辉石电子探针分析由宋谢炎研究员在澳大利亚 Tasmania 大学完成;FeO* 为全铁。

表3 金川岩体斜辉石主要氧化物含量及其端员组分(%)
Table 3 Major oxide compositions (%) of clinopyroxene of the Jinchuan intrusion

岩体	样品号	岩相	点号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO*	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Cr ₂ O ₃	NiO	Total	Wo	En	Fs
I号岩体上部岩相带	JC06-209	含辉橄岩	1	52.5	0.83	3.52	5.14	0.16	18.2	19.5	0.45	0.004	1.08	0.06	101.4	39.3	50.8	8.29
	JC06-214	含辉橄岩	7	54.5	0.45	3.13	3.86	0.11	20.9	15.1	0.69	0.058	0.45	0.03	99.3	31.1	59.9	6.43
	JC06-220	含辉橄岩	5	51.7	0.83	3.12	4.79	0.16	17.7	20.5	0.36	0.002	1.08	0.02	100.3	41.3	49.6	7.77
	JC06-222	含辉橄岩	6	52.8	0.60	3.01	5.45	0.18	19.2	18.2	0.33	0.003	1.08	0.04	100.8	36.6	53.5	8.80
	JC06-244	含辉橄岩	11	55.7	0.22	2.89	3.12	0.07	22.4	13.2	0.73	0.098	0.25	0.03	98.6	27.4	64.7	5.23
	JC06-205	二辉橄岩	1	51.8	0.69	3.23	4.53	0.17	17.0	21.3	0.47	0.007	1.10	0.04	100.3	43.0	47.9	7.40
II号岩体	JC04-102	含辉橄岩	4	51.7	0.40	5.14	4.87	0.16	20.2	14.2	1.27	0.035	0.76	0.05	98.7	29.3	57.9	8.06
	JC05-1	含辉橄岩	4	47.9	1.75	7.98	5.47	0.14	14.1	23.1	0.29	0.003	0.01	0.00	100.7	48.5	41.3	9.13
	JC05-11	含辉橄岩	1	50.3	0.59	6.83	4.09	0.13	20.7	12.1	1.30	0.072	0.55	0.07	96.7	26.1	61.8	7.06
	JC05-12	含辉橄岩	1	55.3	0.04	1.57	4.28	0.14	24.5	10.9	0.64	0.027	0.27	0.06	97.6	21.9	68.7	7.00
	JC04-73	二辉橄岩	16	52.3	0.60	3.61	5.45	0.17	17.5	20.1	0.41	0.006	1.10	0.04	101.2	40.5	49.2	8.82
	JC04-77	二辉橄岩	9	51.9	0.88	3.51	5.56	0.20	17.7	19.4	0.38	0.002	1.03	0.03	100.5	39.4	50.1	9.12
	JC04-81	二辉橄岩	4	52.7	0.33	2.60	5.52	0.20	17.9	20.2	0.26	0.004	0.86	0.04	100.6	40.4	49.8	8.92
	JC04-83	二辉橄岩	15	52.1	0.69	3.75	5.16	0.17	17.4	20.1	0.37	0.004	1.17	0.03	101.0	40.9	49.3	8.45
	JC04-88	二辉橄岩	6	51.6	0.81	3.70	5.17	0.16	17.5	19.9	0.38	0.005	1.15	0.02	100.4	40.5	49.7	8.46
	JC04-91	二辉橄岩	7	50.6	0.54	3.26	5.45	0.19	18.2	19.4	0.35	0.002	1.14	0.04	99.2	39.1	50.9	8.80
	JC04-92	二辉橄岩	4	51.8	0.44	3.57	5.19	0.17	17.8	19.7	0.34	0.002	1.22	0.01	100.2	40.0	50.3	8.48
	JC04-110	二辉橄岩	2	51.1	0.56	3.19	6.94	0.22	17.8	18.9	0.32	0.035	0.84	0.04	99.9	37.9	49.8	11.2
	JC04-116	二辉橄岩	4	52.0	0.68	3.39	5.34	0.18	18.1	19.3	0.40	0.004	1.14	0.04	100.6	39.0	50.9	8.66
	JC04-121	二辉橄岩	7	52.7	0.33	2.98	5.77	0.18	18.7	18.6	0.35	0.002	1.11	0.04	100.8	37.3	52.2	9.29
	JC04-122	二辉橄岩	7	52.6	0.86	2.77	5.00	0.16	17.5	20.3	0.33	0.006	0.59	0.02	100.2	41.2	49.5	8.16
JC04-123	二辉橄岩	2	54.9	0.17	2.31	4.24	0.18	20.2	16.6	0.27	0.046	0.66	0.03	99.7	34.1	57.8	7.12	
JC04-124	二辉橄岩	8	51.8	0.52	3.55	5.59	0.17	17.6	19.6	0.35	0.004	1.07	0.04	100.2	39.9	49.7	9.13	
JC05-3	二辉橄岩	3	54.4	0.12	3.80	5.37	0.13	21.6	11.5	0.97	0.042	0.41	0.06	98.4	24.2	63.0	9.06	
JC05-4	二辉橄岩	3	52.3	0.58	3.56	5.59	0.19	17.5	20.1	0.34	0.000	1.06	0.04	101.2	40.5	49.1	9.10	
JC05-5	二辉橄岩	11	52.6	0.51	3.41	5.64	0.18	18.5	19.2	0.36	0.002	1.10	0.04	101.5	38.3	51.4	9.04	
JC05-7	二辉橄岩	1	56.8	0.10	2.36	2.75	0.08	22.7	13.5	0.61	0.068	0.18	0.04	99.1	27.8	65.2	4.63	
JC05-13	二辉橄岩	12	52.2	0.54	3.42	6.05	0.20	18.4	18.8	0.34	0.007	0.98	0.04	100.9	37.8	51.3	9.73	

注:单斜辉石电子探针分析由宋焱炎研究员在澳大利亚 Tasmania 大学完成;FeO*为全铁。

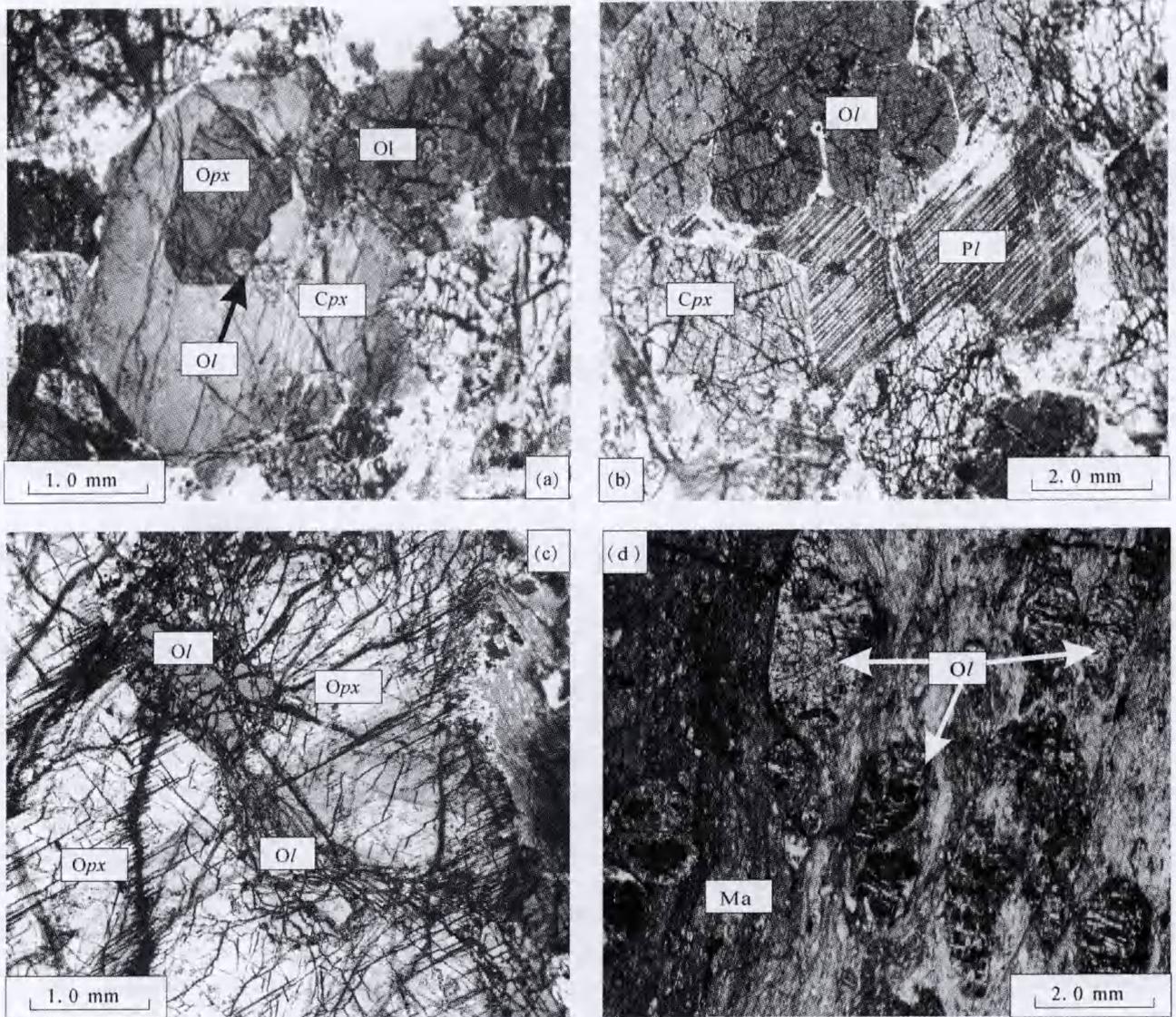


图 3 金川岩体典型岩相中岩石结构显微图

Fig. 3 Selected microscope photos showing typical lithological textures of the Jinchuan intrusive rocks

(a)—II号岩体二辉橄榄岩中Ol、Opx和Cpx间的包裹关系；(b)—I号岩体斜长二辉橄榄岩中填隙状Pl；(c)—II号岩体斜长二辉橄榄岩中Opx包裹Ol；(d)—II号岩体边缘橄榄石大理岩中的Ol假象；Ol—橄榄石；Opx—斜方辉石；Cpx—单斜辉石；Pl—斜长石；Ma—大理岩
 (a)—Olivine grains are enclosed by orthopyroxene and both of them are surrounded by clinopyroxene in lherzolite of the rock mass II；(b)—plagioclase and clinopyroxene are interstitial to cumulus olivine in plagioclase lherzolite of the rock mass I；(c)—olivine grains are enclosed by orthopyroxene in plagioclase lherzolite of the rock mass II；(d)—pseudomorph of olivine in olivine marble are at the margin of the rock mass II；Ol—olivine；Opx—orthopyroxene；Cpx—clinopyroxene；Pl—plagioclase；Ma—marble

4 金川岩体母岩浆成分的调整

母岩浆性质不仅决定岩浆岩的矿物组合和岩体的分异序列,还决定岩浆硫化物中各种金属元素的组合和比例关系。大量研究表明与玄武岩质岩浆有关的岩浆硫化物矿床,其Ni/Cu远小于与科马提岩有关的岩浆硫化物矿床(前者Ni/Cu一般小于2,而后的Ni/Cu > 30)(Chai and Naldrett, 1992a),如加拿大的Sudbury矿床(Ni/Cu = 1)(Pye et al.,

1984)和前苏联的Noril'sk矿床(Ni/Cu = 0.5~1)(Genkin et al., 1981)。因此,准确获得岩体母岩浆成分对深入认识岩浆矿床成因具有重要意义。汤中立和李文渊(1995)以及杨合群等(1997)研究认为金川岩体的母岩浆可能为一种苦橄质拉斑玄武岩。而橄榄石的Fo值(81~86)(Li, et al., 2004)和硫化物金属元素比例关系(Ni/Cu介于0.2~5.4之间,平均值为1.86)则表明金川岩体母岩浆应该为玄武质岩浆(Chai and Naldrett, 1992b)。Chai and

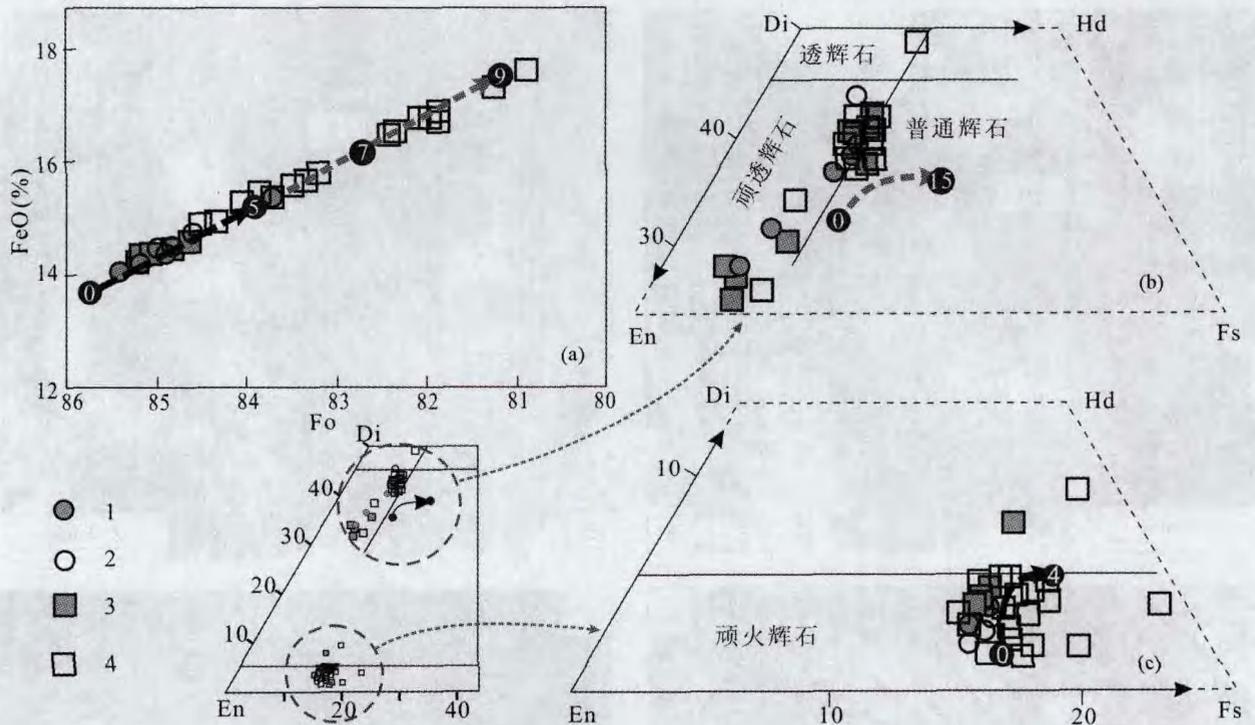


图4 金川岩体橄榄石、斜方辉石和单斜辉石电子探针分析成分与“MELTS”模拟计算成分对比

Fig. 4 Comparison of the composition of olivine, orthopyroxene and clinopyroxene of the Jinchuan intrusive rocks between analyzed by electron microprobe and calculated using MELTS

(a) 模拟计算得到母岩浆在深部岩浆房经历了约5%的橄榄石结晶,其Fo值为84.1~85.7(深灰色粗线),在浅部岩浆房经历了约4%的橄榄石结晶,Fo值为81.2~83.9(浅灰色粗线),模拟计算得到的结果与电子探针分析结果一致。(b) 在浅部岩浆房经历了单斜辉石结晶,其成分为变化范围为 $Wo_{31.0-35.6}En_{47.8-54.7}Fs_{13.6-17.3}$ (浅灰色粗线)模拟计算结果与电子探针分析结果有所差异,可能是由于岩浆上侵时与地壳钙质物质同化混染所导致。(c) 一岩浆在深部岩浆房经历了约4%的斜方辉石结晶,其成分为变化范围为 $Wo_{3.71-4.65}En_{79.5-81.6}Fs_{14.6-15.8}$ (深灰色粗线),模拟计算得到的结果与电子探针分析结果一致。图中曲线上的数字代表分离结晶出的矿物的百分含量;1—I号岩体含辉橄榄岩;2—I号岩体二辉橄榄岩;3—II号岩体含辉橄榄岩;4—II号岩体二辉橄榄岩

(a) The thermodynamic simulations by using code “MELTS” indicates the parental magma experienced two stages of fractional crystallization. In the first stage, crystallization of about 5% olivine occurred in a lower magma chamber, and the Fo content of the olivine range from 84.1 to 85.7 (deep-gray broad-brush dashed); in the second stage, crystallization of about 4% olivine occurred in a shallower magma chamber, and the Fo content of the olivine range from 81.4 to 83.9 (light-gray broad-brush dashed); (b) in the second stage, crystallization of clinopyroxene occurred in a shallower magma chamber, and its composition is $Wo_{31.0-35.6}En_{47.8-54.7}Fs_{13.6-17.3}$ (light-gray broad-brush dashed). The inconsistent results between analyzed by electron microprobe and calculated using MELTS may because the magma experienced assimilation and contamination of the crustal carbonate-rich materials during it ascending to the shallower magma chamber. (c) in the first stage, crystallization of orthopyroxene occurred in the lower magma chamber, and its composition is $Wo_{3.71-4.65}En_{79.5-81.6}Fs_{14.6-15.8}$ (deep-gray broad-brush dashed); the simulations consisted with the results analyzed by electron microprobe. The numbers in the line of the figures represent the percentages of the fractional crystallization of minerals; 1—pyroxene dunite of segment I; 2—herzolite of the segment I; 3—pyroxene dunite of segment II; 4—herzolite of the segment II

Naldrett (1992a) 根据橄榄石-液相平衡原理 (Roeder and Emslie, 1970) 和质量平衡原理, 通过分析岩体中 MgO 含量和其他氧化物含量的关系, 进一步计算得到金川母体岩浆是含 MgO 11.5% 的拉斑玄武岩浆。

然而, 仅仅根据橄榄石和全岩氧化物的成分厘定母岩浆成分显然会有一定的误差, 要得到更为确切的母岩浆成分还需要考虑辉石的成分和熔浆热力

学约束。建立在严格热力学原理和实验数据基础上的 MELTS 软件 (Ghiorso and Sack, 1995; Asimow and Ghiorso, 1998; Smith and Asimow, 2005) 为我们根据橄榄石、斜方辉石和单斜辉石成分重新界定金川岩体母岩浆成分提供了新的重要方法。MELTS 可以模拟计算 500~2000°C、0~2Gbar 和多种氧逸度条件下, 岩浆的平衡结晶和分离结晶过程, 已经成功应用在模拟地幔部分熔融 (Farnetani

et al., 1996)、洋中脊深海橄榄岩成因(Asimow, 1999)、基性-超基性岩体岩浆演化分离结晶(Li et al., 2003, 2007; Maier et al., 2008)以及大西洋洋中脊富集地幔成因(Cooper et al., 2004)等研究中。在一定的温度、压力和氧逸度条件下,给定一个母岩浆成分,通过“MELTS”计算可以得到岩浆结晶分离矿物顺序、矿物成分以及结晶出矿物的含量。特别是,不同的母岩浆成分模拟计算得到的矿物成分不同,因此,当模拟计算结果满足以下 3 个条件时:①矿物结晶顺序与岩相学观察到的完全相同;②矿物成分与实际电子探针分析的数据基本一致;③模拟计算结果应该与相关研究相吻合,我们认为给定的母岩浆成分可能更加接近实际的岩体母岩浆成分。

我们认为 Chai and Naldrett (1992a) 计算得到的金川岩体母岩浆成分基本是正确的。首先利用该母岩浆成分,在一定的压力(1.5~4.5kbar)、氧逸度($\Delta QFM = -1 \sim +3$)条件下,从 1500°C 到 1000°C,运用 MELTS 进行模拟计算,计算结果表明矿物结晶顺序与实际岩相学观察不一致,主要造岩矿物成分与电子探针分析结果也有较大差异。随后通过不断调整母岩浆中各种氧化物的含量,经过大量模拟计算,分析比较母岩浆中各组分变化对岩浆演化结果的影响,总结相关规律,不断向上述 3 个限制条件回归,最终我们得到金川岩体母岩浆成分为:SiO₂ 48.2%, TiO₂ 1.00%, Al₂O₃ 11.3%, Cr₂O₃ 0.18%, 12.9% FeO, Fe₂O₃ 1.30%, MnO 0.15%, MgO 12.6%, CaO 10.1%, Na₂O 1.51%, K₂O 0.72%, NiO 0.04%(表 4)。模拟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(图 4),尤其是橄榄石和斜方辉石几乎完全相同,单斜辉石电子探针分析成分变化范围较大,与其他岩体如 Jimberlana、Skaergaard、Bushveld、Bjerkrem-Sogndal 等分离结晶过程相比,金川岩体单斜辉石显示出向透辉石端员(Di)演化的趋势,即 CaO 含量比模拟计算含量结果偏高,FeO 含量模拟计算结果

稍偏低,这可能因为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,这与金川岩体边缘存在橄榄石大理岩(图 3 d),岩浆上侵时发生了较强烈的钙质的同化混染的观察结果一致(陈列锰等,2008)。

5 金川岩体岩浆结晶过程的模拟计算

岩体岩相学和矿物组成特征除取决于母岩浆性质外,还受结晶物理化学条件的约束,因此,岩浆的结晶温度压力条件对于正确认识岩浆演化过程、建立成岩成矿模式也是及其重要的。铬铁矿和橄榄石中多相包裹体的相平衡关系表明金川岩体的成岩温、压条件是 1000~1320°C 和 1~5kbar (Yang et al., 1998; De Waal et al., 2004);而国内学者温、压计算结果的差异更大(996~1884°C 和 1~20kbar) (苟国朝和任端进,1990;徐庆生和宋学信,1994)。

根据前述调整后的金川母岩浆成分,通过 MELTS 模拟计算表明不同压力条件下主要造岩矿物的结晶顺序有很大差异。当岩浆房压力小于 2.9 kbar 时,岩浆演化结晶的矿物为:橄榄石→单斜辉石→斜长石,没有斜方辉石结晶(图 5 a),而当岩浆房压力大于 4.5kbar 时,岩浆演化结晶的矿物为:斜方辉石→单斜辉石→斜长石,没有橄榄石晶出(图 5 c);这些结果都与金川岩体的岩相学特征相矛盾。而当压力在 3.0~3.3kbar 之间时,结晶出斜方辉石的含量及其成分变化均很小,而当压力在 3.9~4.4 kbar 之间时,结晶的橄榄石的量和成分变化都很小(图 5 b),这都与岩相学观察和电子探针分析数据差别较大。因此,金川岩浆分离结晶更可能发生在 3.3~3.8kbar 的压力条件下(10.9~12.5km 深的岩浆房)(图 5 灰色区域)。然而,如果结晶作用在这个压力区间完成,则橄榄石的 Fo 值将局限在 84.1~85.7,大大小于橄榄石的实际成分变化(Fo=81~86),同时计算得到单斜辉石的成分(Wo=11.8~

表 4 MELTS 模拟计算得到岩体母岩浆成分与前人研究结果对比

Table 4 Comparison between the compositions of the parental magma calculated by Chai and Naldrett (1992a) and calculated using MELTS of this study

母岩浆	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Cr ₂ O ₃	NiO
1	48.2	1.0	11.3	12.9	1.3	0.15	12.6	10.1	1.51	0.72	0.18	0.04
2	50.8	1.0	12.5	11.20	1.0		11.5	10.3	1.30	0.80		0.04

注:1 为本次运用 MELTS 软件计算得到金川岩体母岩浆成分;2 为 Chai and Naldrett (1992a) 计算得到金川岩体母岩浆成分;表中各氧化物为重量百分数(%)。

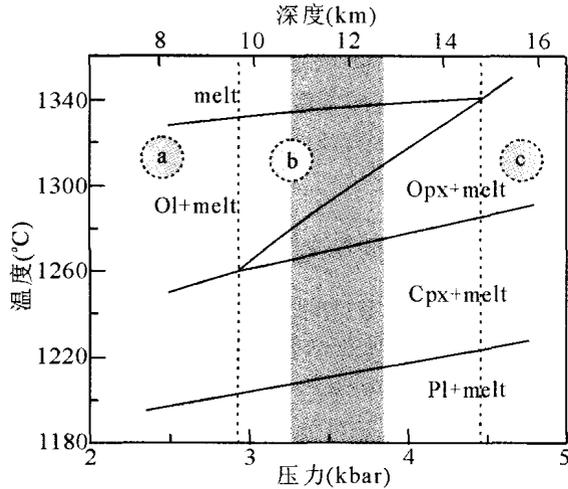


图5 不同温度-压力条件下运用MELTS软件计算的金川母岩浆主要造岩矿物分离结晶顺序, a 区域: 压力小于 2.9kbar 时, 主要造岩矿物分离结晶的顺序为: 橄榄石, 单斜辉石, 斜长石; b 区域: 压力在 2.9~4.4kbar 时, 主要造岩矿物分离结晶的顺序为: 橄榄石, 斜方辉石, 单斜辉石, 斜长石; c 区域: 压力大于 4.4kbar 时, 主要造岩矿物分离结晶的顺序为: 斜方辉石, 单斜辉石, 斜长石。(根据主要矿物结晶顺序及其成分, 深部岩浆房压力在 3.3~3.8kbar 之间(灰色区域))

Fig. 5 The fractional crystallization sequences of the main rock-forming minerals with the calculated parental magma of the Jinchuan using MELTS under different P-T conditions, a; the fractional crystallization sequences of the minerals of the are: ol, cpx, pl when the pressure of the magma chamber is less than 2.9 kbar; b; the sequences of the minerals of the fractional crystallization are: ol, opx, cpx, pl when the pressure of the magma chamber is between 2.9~4.4 kbar; c; the sequences of the minerals of the fractional crystallization are: opx, cpx, pl when the pressure of the magma chamber is more than 4.4 kbar. (According to fractional crystallization sequences of the main rock-forming minerals and its composition, it is reasonable that the pressure of the deeper magma chamber is arranged from 3.3 to 3.8 kbar (light-gray zone)).

melt—岩浆熔体; Ol—橄榄石; Opx—斜方辉石;
Cpx—单斜辉石; Pl—斜长石
melt—magma melt; Ol—olivine; Opx—orthopyroxene;
Cpx—clinopyroxene; Pl—plagioclase

16.8, $En=65.4\sim70.2$, $Fs=17.4\sim17.8$) 与实际矿物成分(表1, 表2, 表3)差别较大。因此, 我们推测还存在一个浅部岩浆房。模拟计算得到浅部岩浆房的压力为 2.3~2.8kbar, 即深度为 7.6~9.2km, 岩浆在浅部岩浆房结晶出橄榄石和单斜辉石(图6)。

这与岩体的单斜辉石压力估算结果(陈列锰等, 2008)和金川岩体的(Ol+Opx)-Cpx-Pl 相图研究结果(李士彬等, 2007)相一致, 也与金川岩体包裹体研究得到浅部岩浆房深度为 6.9~9.3km 的结果相吻合(Yang et al., 1998)。微量元素和铂族地球化学特征也证实金川岩体的岩浆分离结晶和硫化物熔离发生在不同深度(Song et al., 2006), 在深部岩浆房硫化物熔离与橄榄石结晶同时发生或稍晚(宋谢炎等, 2005)。模拟计算得到的两个岩浆房的压力范围符合实际地质特征。

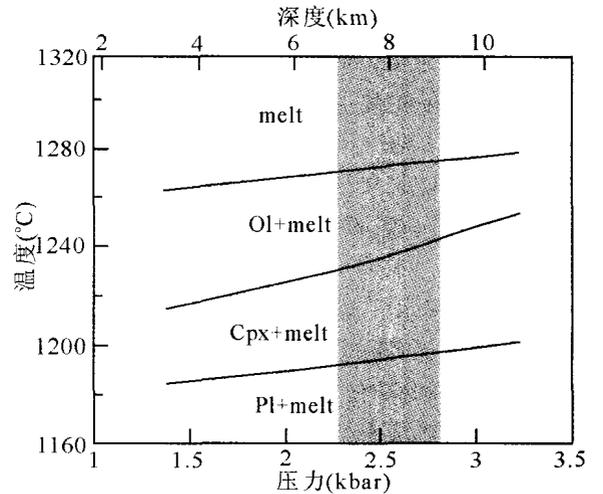


图6 浅部岩浆房金川岩浆分离结晶模拟计算结果(根据主要造岩矿物结晶顺序及其成分, 浅部岩浆房压力在 2.3~2.8kbar 之间(灰色区域))

Fig. 6 The simulation calculation of crystallization sequences with the Jinchuan parental magma in the shallower magma chamber using MELTS (according to the crystallization sequences of the main rock-forming minerals and its composition, it is reasonable that the pressure of the shallower magma chamber range from 2.3 to 2.8 kbar (light-gray zone))

melt—岩浆熔体; Ol—橄榄石; Opx—斜方辉石;
Cpx—单斜辉石; Pl—斜长石
melt—magma melt; Ol—olivine; Opx—orthopyroxene;
Cpx—clinopyroxene; Pl—plagioclase

上述模拟计算表明金川岩体母岩浆分离结晶发生在深度不同的两个岩浆房。在深部岩浆房(10.9~12.5km)经历了约 5% 的橄榄石以及约 4% 的斜方辉石的分离结晶, 橄榄石岩深部岩浆房结晶温度范围为 1330~1295°C, 成分区间为 $Fo=84.1\sim85.7$; 斜方辉石结晶温度范围为 1295~1270°C, 成分区间为: $Wo=3.71\sim4.65$, $En=79.5\sim81.6$, $Fs=14.6\sim15.8$ (图4a, c, 图5)。同时, 发生了较强烈的硫化

物熔离,橄榄石、斜方辉石和硫化物乳珠向岩浆房下部聚集,从而在深部岩浆房形成由下至上的分层:橄榄石-斜方辉石-硫化物-硅酸盐熔浆“晶粥”、橄榄石-斜方辉石-硅酸盐熔浆“晶粥”、硅酸盐熔浆,上部岩浆不断上侵形成其它基性岩体或喷出地表(Song et al., 2006)。部分橄榄石-斜方辉石-硅酸盐熔浆“晶粥”侵入到浅部岩浆房后, Fo 排号较高的橄榄石和 En 排号较高的斜方辉石向下聚集形成了 I 号岩体的上部岩相带和 II 号岩体顶部的含辉橄榄岩。

岩浆房下部的含橄榄石-斜方辉石-硫化物-硅酸盐“晶粥”依次再次上侵到 7.6~9.2km 的浅部岩浆房,已晶出的橄榄石和斜方辉石将与硅酸盐浆发生物质交换,使得橄榄石的 Fo 排号和斜方辉石的 En 排号降低,同时,继续结晶出含镁较低的橄榄石、单斜辉石、斜长石(图 6)。橄榄石在浅部浆房结晶温度范围为 1276~1234°C,成分区间为 Fo=81.2~83.9;单斜辉石的结晶温度为:1190~1236°C,成分区间为:Wo=31.0~35.6, En=47.8~54.7, Fs=13.6~17.3(图 4 a, b, 图 6)。

这些计算结果不仅与金川岩体岩相学观察获得的结晶顺序(橄榄石→斜方辉石→单斜辉石→斜长石)一致,也解释了各种矿物之间的包裹关系,特别是揭示了为什么单斜辉石总是包裹橄榄石和斜方辉石,斜长石为什么总是形成于其他矿物的间隙。本次研究的计算结果与由(Ol+Opx)-Cpx-Pl 相图研究得到的岩浆结晶过程,以及橄榄石与熔浆的反应关系结果相吻合(李士彬等, 2007)。进一步支持汤中立院士提出的金川岩体“岩浆深部分异熔离,依次贯入”的成岩成矿模式(汤中立, 1990;汤中立和李文渊, 1995)。

6 结论

本文根据主要造岩矿物结晶顺序及其电子探针成分,借助熔浆热力学软件“MELTS”的计算,进一步厘定的金川岩体母岩浆成分为: SiO₂ 48.2%, TiO₂ 1.00%, Al₂O₃ 11.3%, FeO 12.9%, Fe₂O₃ 1.30%, MnO 0.15%, MgO 12.6%, CaO 10.1%, Na₂O 1.51%, K₂O 0.72%, Cr₂O₃ 0.18%, NiO 0.04%。母岩浆的分离结晶作用发生在两个深度岩浆房,深部岩浆房压力范围为 3.3~3.8kbar(深度约 10.9~12.5km),浅部岩浆房压力范围为 2.3~2.8kbar(深度约 7.6~9.2km)。MELTS 模拟计算还表明金川岩体母岩浆在深部岩浆房经历了约 5% 的橄榄石以及约 4% 的斜方辉石结晶分异,并伴随

硫化物熔离。在重力作用的影响下,橄榄石、斜方辉石和硫化物向下沉降,形成由下至上的分层:橄榄石-斜方辉石-硫化物-硅酸盐熔浆层,橄榄石-斜方辉石-硅酸盐熔浆层和硅酸盐熔浆层。硅酸盐熔浆首先挤出形成贫硫化物的岩体或喷出地表,经重力分异形成金川 I 号岩体的上部岩相带和 II 号岩体顶部的含辉橄榄岩。橄榄石-斜方辉石-硫化物-硅酸盐熔浆层最后被挤入浅部岩浆房,再次结晶出橄榄石、单斜辉石、斜长石,形成金川岩体的主要岩相和硫化物矿体。

致谢: 本次研究野外工作得到了金川集团公司科技部、矿山研究院,特别是田毓龙院长、王玉山高级工程师、把多恒院长以及其它工程技术人员的大力协助,在此谨致谢意。特别感谢 California Institute of Technology 大学 Paula Antoshechkina 教授对本文给与的热情指导和帮助。

注 释

- ① 甘肃省地矿局第六地质队, 1981, 甘肃省永昌县白家嘴子铜镍矿第一矿区地质勘探补充报告。

参 考 文 献

- 陈列锰, 宋谢炎, 聂晓勇, 周国富, 刘世荣, 郑文勤, 李士彬. 2008. 甘肃金川 II 号岩体辉石化学特征及其地质意义. 矿物岩石, 28(1): 88~96.
- 苟国朝, 任端进. 1990. 金川超镁铁杂岩体中硅酸盐和氧化物的矿物化学特征. 甘肃地质, 11: 43~70.
- 解广轰, 汪云亮, 范彩云. 1998. 金川超镁铁岩侵入体及超大型硫化物矿的成岩成矿机制. 中国科学(D辑), 28(增刊): 31~36.
- 李士彬, 宋谢炎, 胡瑞忠, 陈列锰, 聂晓勇. 2007. 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, 23(10): 2553~2560.
- 李献华, 苏犁, 宋彪, 刘敦一. 2004. 金川超镁铁侵入岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及地质意义. 科学通报, 49(4): 401~402.
- 宋谢炎, 李士彬, 王玉山, 把多恒, 陈列锰. 2005. 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, 24(4): 293~298.
- 汤中立. 1990. 金川硫化铜镍矿床成矿模式. 现代地质, 4(4): 55~64.
- 汤中立, 李文渊. 1995. 金川铜镍硫化物(含铂)矿床成矿模式及地质对比. 北京:地质出版社, 1~42.
- 汤中立. 1996. 中国岩浆硫化物矿床的主要成矿机制. 地质学报, 70(3): 237~243.
- 汤中立, 白云来. 1999. 华北古大陆西南边缘构造格架与成矿系统. 地学前缘, 6(2): 271~283.
- 王瑞廷, 毛景文, 赫英, 王东生, 汤中立. 2004. 金川超大型铜镍硫化物矿床的铂族元素地球化学特征. 大地构造与成矿学, 28(3): 279~286.
- 徐庆生, 宋学信. 1994. 金川超镁铁质岩体矿物化学特征及矿物地

- 质温度计, 压力计研究. 甘肃地质学报, 3(1): 59~70.
- 杨合群, 汤中立. 1997. 金川硫化铜镍矿床成矿岩浆性质和源区特征讨论. 甘肃地质学报, 6(1): 44~52.
- 张宗清, 杜安道, 唐索寒, 卢纪仁, 王进辉, 杨刚. 2004. 金川铜镍矿床年龄和源区同位素地球化学特征. 地质学报, 78(3): 359~365.
- Asimow P D. 1999. A model that reconciles major- and trace-element data from abyssal peridotites. *Earth Planet Sci. Lett.*, 169(3-4): 303~319.
- Asimow P D, Ghiorso, M S. 1998. Algorithmic modifications extending MELTS to calculate subsolidus phase relations. *Am. Mineral.*, 83: 1127~1132.
- Chai G, Naldrett A J. 1992a. The Jinchuan ultramafic intrusion: cumulate of a high-Mg basaltic magma. *J. Petrology*, 33(2): 277~303.
- Chai G, Naldrett A J. 1992b. Characteristics of Ni-Cu-PGE mineralization and genesis of the Jinchuan Deposit, Northwest China. *Econ. Geol. Bull. Soc.*, 87(6): 1475~1495.
- Chai G, Naldrett A J. 1994. Pyroxene mineral chemistry of the Jinchuan intrusion, China. *Miner. Petrol.*, 51(1): 1~20.
- Cooper K M, Eller J M, Asimow P D, Langmuir C H. 2004. Oxygen isotope evidence for the origin of enriched mantle beneath the mid-Atlantic ridge. *Earth Planet Sci. Lett.*, 220(3-4): 297~316.
- De Waal S A, Xu, Z G, Li C S, Mouri H. 2004. Emplacement of viscous mushes in the Jinchuan ultramafic intrusion, western China. *Can. Mineral.*, 42(2): 371~392.
- Farnetani C G, Richards M A, Ghiorso M S. 1996. Petrological models of magma evolution and deep crustal structure beneath hotspots and flood basalt provinces. *Earth Planet Sci. Lett.*, 143(1-4): 81~94.
- Genkin A D, Distler V V, Gladyshev G D, Filiminova A A, Evstigneeva T L, Kovalenker V A, Laputina L P, Smirnov A V, Grokhovskaya T L. 1981. Sulfide Copper-Nickel Ores of the Noril'sk Deposit (in Russian). Moscow: Nauka, 1~234.
- Ghiorso M S, Sack R O. 1995. 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. *Contrib. Mineral. Petr.*, 119: 197~212.
- Lehmann J, Arndt N, Windley B, Zhou M F, Wang C Y, Harris C. 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(1): 75~94.
- Li C, Ripley E M, Naldrett A J. 2003. Compositional variations of olivine and sulfur isotopes in the Noril'sk and Talnakh intrusions, Siberia: implications for ore-forming processes in dynamic magma conduits. *Econ. Geol.*, 98(1): 69~86.
- Li C, Xu Z H, Sybrand A W, Edward M R, Wolfgang D M. 2004. Compositional variations of olivine from the Jinchuan Ni Cu sulfide deposit, western China: implications for ore genesis. *Miner. Deposita*, 39(2): 159~172.
- Li C, Naldrett A J, Ripley E M. 2007. Controls on the Fo and Ni contents of olivine in sulfide-bearing mafic-ultramafic intrusions: principles, models and examples from Voisey's Bay. *Earth Science Frontiers*, 14(5): 177~185.
- Li X H, Su L, Song B, Liu, D Y. 2004. SHRIMP U-Pb zircon age of the Jinchuan ultramafic intrusion and its geological significance. *Chinese Sci. Bull.*, 49(4): 420~422.
- Li X H, Su L, Chung, S L, Li Z X, Liu Y, Song B, Liu D Y. 2005. Formation of the Jinchuan ultramafic intrusion and the world's third largest Ni-Cu sulfide deposit; associated with approximately 825 Ma south China mantle plume? *Geochem. Geophys. Geosy.*, 6(11), Q1104, doi: 10.1029/2005GC001006.
- Maier W D, Barnes S J, Bandyayera D, Livesey T, Li C, Ripley E M. 2008. Early Kibaran rift-related mafic-ultramafic magmatism in western Tanzania and Burundi: Petrogenesis and ore potential of the Kapalagulu and Musongati layered intrusions. *Lithos*, 101(1-2): 24~53.
- Pye E, Naldrett A J, Giblin P. 1984. The geology and ore deposits of the Sudbury structure. Ontario: Geological Survey Special Publication, No. 1, 441~447.
- Roeder P L, Emslie R F. 1970. Olivine-liquid equilibrium. *Contrib. Mineral. Petr.*, 29(4): 275~289.
- Smith P M, Asimow P D. 2005. *Adiabat_1ph*: A new public front-end to the MELTS, pMELTS, and pHMELTS models. *Geochem. Geophys. Geosy.*, 6, no. Q02004, doi:10.1029/2004GC000816.
- Song X Y, Zhou M F, Wang C Y, Qi L, Zhang C J. 2006. Role of crustal contamination in formation of the Jinchuan intrusion and its world-class Ni-Cu-(PGE) sulfide deposit, northwest China. *International Geology Review*, 48(12): 1113~1132.
- Song X Y, Keays R R, Zhou M F, Qi L, Ihlenfeld C, Xiao J F. 2009. Siderophile and chalcophile elemental constraints on the origin of the Jinchuan Ni-Cu-(PGE) sulfide deposit, NW China. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 73(2): 404~424.
- Yang X Z, Ishihara S, Matsueda H. 1998. Multiphase melt inclusions in the Jinchuan complex, China: implications for petrogenic and metallogenic physico-chemical conditions. *International Geology Review*, 40(4): 335~349.

Parental Magma Compositions of the Jinchuan Intrusion, Gansu Province and MELTS Thermodynamic Modelling of Fractional Crystallization

CHEN Liemeng^{1,2)}, SONG Xieyan¹⁾, Danyushevsky L. V. ³⁾, XIAO Jiafei¹⁾, ZHU Dan¹⁾,
ZHOU Guofu¹⁾, GUAN Jianxiang^{1, 2)}, LIU Shirong¹⁾, ZHENG Wenqin¹⁾

1) *State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang, 550002;* 2) *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049;*

3) *School of Earth Sciences and ARC Center of Excellence in Ore Deposit, University of Tasmania, Australia*

Abstract

The Jinchuan intrusion consists of pyroxene dunite, lherzolite, plagioclase lherzolite and olivine pyroxenite and hosts the third largest magmatic Ni-Cu-(PGE) sulfide deposit in the world. Petrography indicates that the crystallization sequence of the main rock-forming minerals of the Jinchuan intrusion was olivine → orthopyroxene → clinopyroxene → plagioclase. Based on rock textures and compositions of the dominant rock-forming minerals, the more precise composition of the parental magma of the Jinchuan intrusion have been obtained by using the thermodynamic code "MELTS": 48.2% SiO₂, 1.00% TiO₂, 11.3% Al₂O₃, 12.9% FeO, 1.30% Fe₂O₃, 12.6% MgO, 10.1% CaO, 1.51% Na₂O, 0.72% K₂O, 0.04% NiO. The thermodynamic simulation also indicated that the parental magma experienced two stages of fractional crystallization. In the first stage, crystallization of about 5% olivine and 4% orthopyroxene as well as sulfide liquid immiscibility occurred in a magma chamber at a depth of 10.9~12.5km (pressure is 3.3~3.8kbar). Stratigraphic zones from the base to the top of the deep staging magma chamber were formed due to gravity segregation, including olivine-orthopyroxene-sulfide-silicate liquid mush, olivine-orthopyroxene-silicate liquid mush, silicate magma. The silicate magma was squeezed out firstly to form some sulfide poor mafic intrusions or erupted to the surface elsewhere. The olivine-orthopyroxene-silicate liquid mush was squeezed to the shallower magma chamber at a depth of about 7.6~9.2km and formed the upper sequences of the Segment I and the upper pyroxene dunite in the Segment II of the Jinchuan intrusion. The olivine-orthopyroxene-sulfide-silicate liquid mush lastly intruded into the shallow magma chamber, where further crystallization of olivine, clinopyroxene, and plagioclase occurred and formed the main rocks and sulfide ore bodies of the Jinchuan intrusion. These results are consistent with the petrology and petrography of the Jinchuan intrusion, and also are consistent with the results of recent studies on the formation of the Ni-Cu sulfides.

Key words: Jinchuan intrusion; Parental magma; Fractional crystallization; Melt thermodynamic model; MELTS