

新疆坡北镁铁-超镁铁杂岩体中橄榄石成分特征及其成因意义

刘艳荣^{1,2}, 吕新彪¹, 梅 微¹, 代玉才³

1. 中国地质大学 资源学院, 武汉 430074; 2. 长安大学 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 西安 710054; 3. 新疆地矿局 第六地质大队, 新疆 哈密 839000

摘 要: 橄榄石的矿物化学成分可以很好的反映母岩浆成分、岩浆分异结晶及硫化物熔离作用等信息。坡北镁铁-超镁铁杂岩体中橄榄石电子探针成分分析表明: 橄榄石均为贵橄榄石, 其化学成分与寄主岩石类型密切相关, 其中橄榄辉长岩中橄榄石的 Fo 值在 74~81 之间, 橄长岩或橄榄单斜辉石岩中橄榄石 Fo = 75~82.7, 异剥橄榄岩或橄榄岩中橄榄石 Fo 值为 83.6~86.3, 暗示橄榄岩结晶早于橄榄辉长岩。橄榄石 Ni 含量变化范围为 $(174 \sim 2281) \times 10^{-6}$ 。利用最高 Fo 含量的橄榄石成分计算得到坡北岩体母岩浆 MgO = 14.38%, 为高镁玄武岩浆。橄榄石分离结晶和硫化物熔离模拟显示: 坡北岩体主要发生了 ~25% 的橄榄石分离结晶, 在橄榄石结晶程度为 2%~4% 的过程中, 发生过硫化物熔离作用, 但熔离程度较低 (~0.2%)。总体来看, 该区成矿远景不佳。

关 键 词: 坡北镁铁-超镁铁杂岩体; 橄榄石分离结晶; 硫化物熔离

中图分类号: P571 文献标识码: A 文章编号: 1007-2802(2012)03-0249-08

Genetic Significances and Composition Characteristics of Olivine from Pobei Mafic-Ultramafic Complex, Xinjiang

LIU Yan-rong^{1,2}, LV Xin-biao¹, MEI Wei¹, DAI Yu-cai³

1. Faculty of Resource Department, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Key Laboratory of Western Mineral Resources and Geological Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 3. No. 6 Geological Party, Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Hami 839000, China

Abstract: The composition of olivine can directly give the messages of parental magma composition, magmatic fractional crystallization, and sulfide segregation. Electron microprobe analyses show that all olivine grains in the Pobei complex are chrysolite and their chemical compositions are closely related to the types of host rocks. The Fo values of the olivines in olivine-gabbro, troctolite or olivine-clinopyroxenite, wehrlite or peridotite are in the ranges of 74 to 81, 75 to 82.7, and 83.6 to 86.3, respectively, indicating that peridotite was crystallized earlier than olivine-gabbro. Ni contents of the olivines vary from 308×10^{-6} to 1762×10^{-6} . The MgO content of the parent magma, which contains the highest Fo olivine, was estimated to be 14.38%, indicating that the parent magma of the Pobei complex is a high-MgO basalt. Modeling results of olivine fractional crystallization and sulfide segregation show that ~25% olivine in the parental magma of the Pobei complex was fractionated and crystallized. A slight sulfide segregation (~0.2%) occurred during the period of olivine fractional crystallization proceeding from 2% to 4% suggests that the metallogenic potential of the Pobei complex is limited.

Key words: Pobei mafic-ultramafic complex; olivine fractional crystallization; sulfide segregation

橄榄石是坡北镁铁-超镁铁杂岩体中重要的造岩矿物之一,也是最早结晶的矿物之一。橄榄石中

收稿日期: 2011-05-31 收到, 06-20 改回

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAB06B04-05); 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室开放基金资助项目(CHD2010JC144)

第一作者简介: 刘艳荣(1978-), 女, 博士研究生, 专业方向: 铜镍硫化物矿床岩浆演化与成矿。

通讯作者: 吕新彪(1962-), 男, 博士生导师. E-mail: lvxb_01@163.com.

Ni 的含量受硅酸盐母岩浆成分和橄榄石分离结晶过程的影响,在 S 不饱和体系中,常呈类质同像进入早期结晶的橄榄石晶格中,当体系达到 S 饱和时, Ni 是强亲硫元素,在岩浆中优先参与到硫化物相中,当硫化物发生熔离后,就必然造成硅酸盐中 Ni 亏损,相应主要造岩矿物橄榄石中的 Ni 含量也将会显著降低,从而表现出不同程度的亏损。前人通过分析侵入体中橄榄石的 Ni、Mg 含量,并与 Simkin 和 Smith^[1]得出的各种火成岩中橄榄石的 Ni、Mg 含量比较以确定 Ni 是否亏损,进而推测橄榄石是否来自硫化物饱和、有经济价值的岩浆,研究显示这种简单的对比会导致错误^[2]。近年来,部分学者通过定量模拟橄榄石等矿物的分离结晶过程,判定硫达到饱和的时间及硫化物熔离程度的研究取得了一定成效。Li 等^[3]、李士彬等^[4]发现在橄榄石结晶过程中,硫化物熔离时间对于橄榄石成分变化有显著影响,并初步定量模拟了不同时间硫化物熔离,橄榄石 Ni 含量的变化过程。在此基础上,陈列锰等^[5]、官建祥等^[6]分析了金川 I 号岩体、峨眉火成岩省内的数十个镁铁质-超镁铁质岩体内的橄榄石成分并定量模拟了各岩体的硫化物熔离强度。此外,早期结晶的橄榄石成分还会因与间隙硅酸盐熔浆或与硫化物熔体的再平衡作用而发生改变^[2,7,8]。总之,镁铁质-超镁铁质岩体中橄榄石 Ni 含量不仅反映母岩浆成分信息,而且很好的记录了岩浆演化、硫化物熔离程度以及与后期物质交换等成矿信息。

坡北镁铁-超镁铁杂岩体是新疆国家三〇五项目 III 9 课题组在 1989 年发现的,岩体局部含矿性较好,具有一定的铜镍硫化物成矿前景。前人对坡北基性-超基性杂岩体已有一定程度的研究。张旺生等^[9]、李鸿儒等^[10]对该区的大地构造背景和基性超基性岩带的控岩构造特征进行了探索,认为构造属性为陆内裂谷。高怀忠^[11]、孙燕等^[12]、姜常义等^[13]分析了岩体的岩石学、矿物学和岩石地球化学等特征,初步讨论了该杂岩体的成因及含矿性。坡北 1 号、10 号岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年表明该杂岩体形成于早二叠世^[14,15]。总之,对该矿床的研究较多,但对矿物学特征以及其反映的硫化物熔离等成矿作用信息的分析却涉及较少。因此,本文拟以坡北基性-超基性杂岩体为研究对象,通过分析橄榄石成分特征,探讨该区岩浆演化和硫化物熔离过程,预测研究区的成矿前景。

1 岩体地质特征

坡北基性-超基性杂岩体构造上位于新疆塔里木板块内的次级构造单元北山裂谷构造带西段,夹峙于白地洼断裂带和小长山南-平梁子断裂带之间。侵位围岩主要是中元古界长城系白湖群变质岩系。坡北岩体总体呈大型葫芦状产出,长轴方向为北东向,出露面积约 180 km²(图 1)。岩体主要由幔源岩浆经深部分异,经两个阶段侵位而形成的 5 个岩相构成。早期侵入的为角闪辉长岩相和辉长苏长

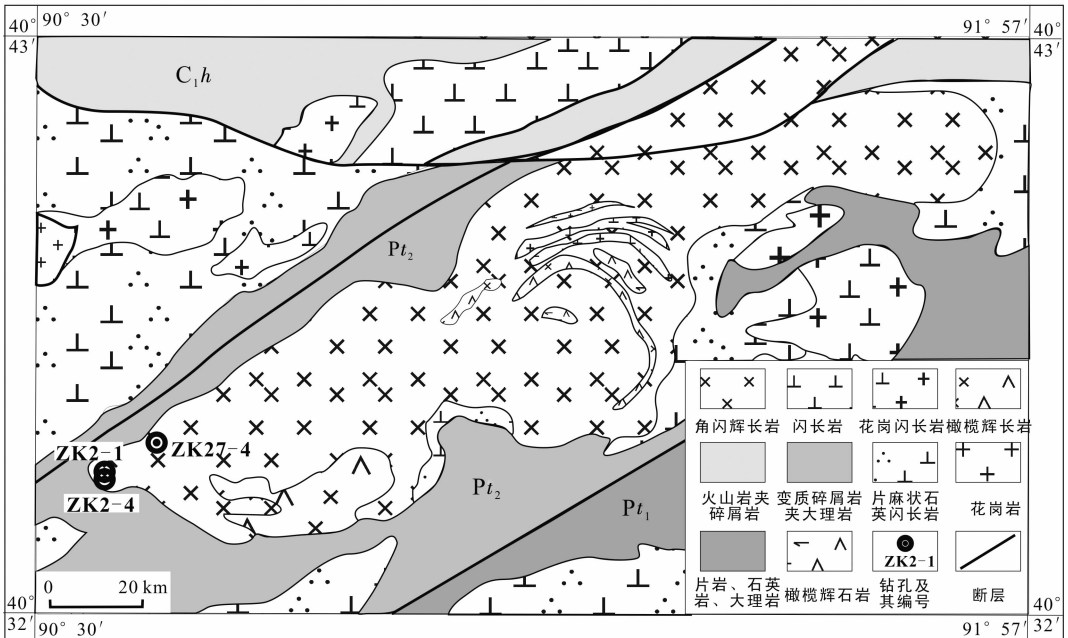


图 1 坡北杂岩体地质图(据文献[16]改绘)

Fig. 1 Geologic map of the Pobei complex(modified after ref. [16])

岩相。角闪辉长岩相占据岩盆中心部位,岩体规模较大,按岩体内部构造特征可分为东、西两个“颈状”相连的盆状侵入体,两岩体均具向中心倾斜的流面构造。辉长苏长岩相分布在角闪辉长岩相之内,呈北东东向不规则小岩株及细长岩脉状产出。晚期侵入的为橄榄辉长岩相、橄榄辉石岩-异剥橄榄岩相和斜长岩相。橄榄辉长岩相呈环形脉状及岩墙状产出,其分布局限在角闪辉长岩相之内,流层构造发育。橄榄辉石岩-异剥橄榄岩相分布在杂岩体西段盆状岩体的近中心部位,呈透镜状、脉状岩枝产出,穿侵于环状橄榄辉长岩之中。斜长岩相呈东西向小岩脉状产于辉长苏长岩相单元之中,出露面积非常小^[12,16]。坡北岩体的赋矿围岩为橄榄辉长岩、橄榄辉石岩和异剥橄榄岩。在地表矿体呈半圆状出现在橄榄质岩相与辉长岩之间靠橄榄质岩相的一侧,矿体倾向岩体中心,倾角 $22^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 不等。深部矿体主要产于橄榄辉石岩和异剥橄榄岩相的中下部或底部,呈悬浮状产出,矿体形态与岩体底部形态基本相似,呈弧形或近似盆状产出。总的来讲,坡北岩体矿化较弱,金属硫化物有镍黄铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿,主要呈星散状或浸染状分布。

2 样品采集及测试方法

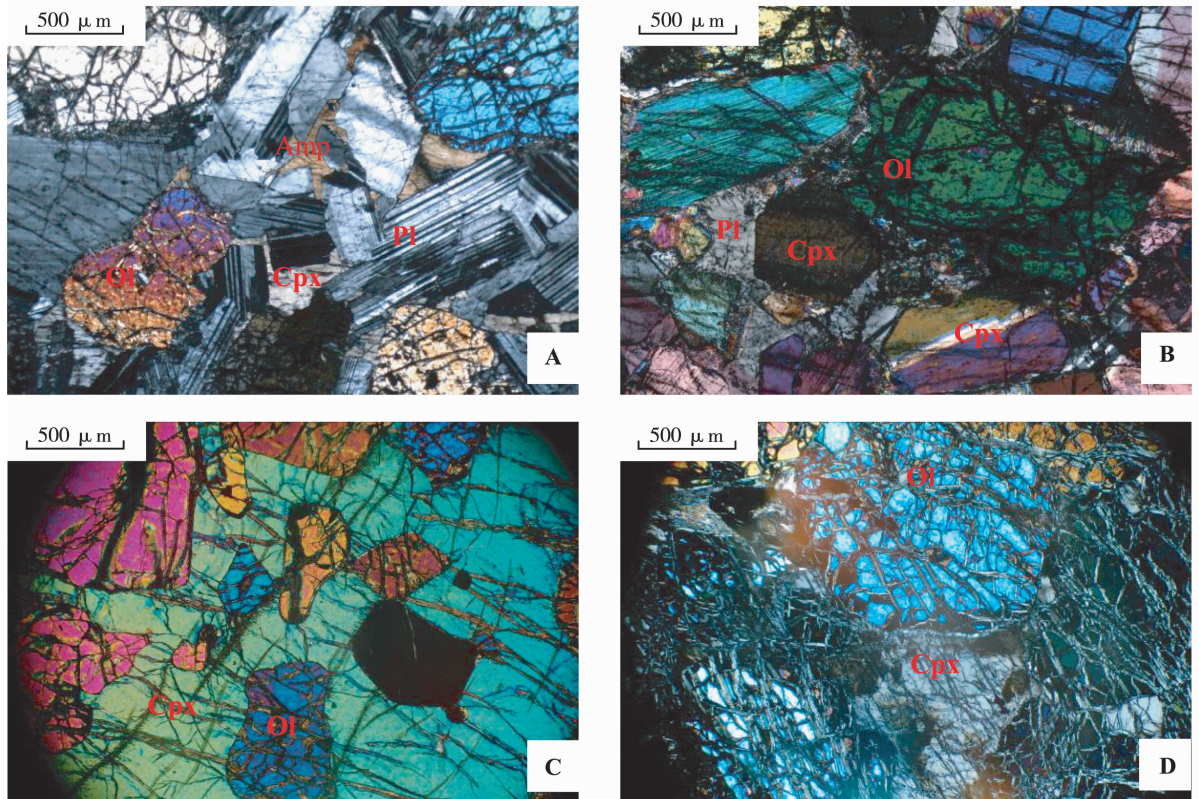
本次测试样品主要取自钻孔,编号 py-1、py-3、py-4 的样品采自 ZK27-4;ps-1、ps-2 样品采自 ZK2-1;ps-4、ps-5 样品来自 ZK2-4。这些不同岩性的样品中均保留有含量不等的新鲜橄榄石。橄榄石成分测试在长安大学西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室电子探针室完成,电子探针仪器型号:JCSA-733,工作条件:15 kV,20 nA,峰计数时间 20 s,背景计数时间 10 s。

3 橄榄石矿物学特征

坡北岩体的橄榄石主要分布在晚期侵位的橄榄辉长岩相和橄榄辉石岩-异剥橄榄岩相中。橄榄辉长岩相的岩石类型主要为橄榄辉长岩,呈深灰色、褐灰色,中-细粒辉长结构、包橄结构及反应边结构,块状构造、流状构造,其中橄榄石含量较低,约 $5\% \sim 10\%$,主要呈浑圆状被辉石、斜长石、角闪石或者蚀变矿物包裹,裂理普遍发育,常发生蛇纹石化和伊丁石化,蛇纹石及析出的铁质沿其边缘及裂隙分布而使其呈网脉状,斜长石具半自形-它形粒状,有的呈嵌晶状包裹于辉石中,含量 $40\% \sim 60\%$,单斜辉石多呈不规则粒状,边缘或表面被角闪石交代形成

反应边和补丁状,局部蚀变为次闪石和绿泥石,含量 $20\% \sim 30\%$,角闪石分布在辉石边缘或其它矿物颗粒间隙,含量 $2\% \sim 4\%$ 。橄榄辉石岩-异剥橄榄岩相的岩石类型包括橄长岩、橄榄单斜辉石岩、异剥橄榄岩和橄榄岩。橄榄岩呈黑色、黑绿色,常见它形-自形粒状结构、堆晶结构,块状构造、流状构造,主要矿物为橄榄石,含量 $90\% \sim 95\%$,多为自形-半自形粒状,堆晶结构,裂理发育,蛇纹石化、伊丁石化强烈,此外含少量单斜辉石 $4\% \sim 8\%$ 和极少量角闪石 $1\% \sim 2\%$ 。异剥橄榄岩呈深灰色、黑绿色,自形-半自形粒状结构、包橄结构,堆晶结构,块状构造,其中橄榄石含量 $60\% \sim 90\%$,自形-半自形粒状,呈不连续堆晶结构或被辉石、斜长石包含形成包橄结构,裂理发育,蚀变较强,单斜辉石分布在橄榄石颗粒间隙,常蚀变为纤闪石和绿泥石,含量 $10\% \sim 40\%$,角闪石含量 $1\% \sim 4\%$,斜长石含量 $1\% \sim 2\%$ 。橄榄(斜长)单斜辉石岩为深灰色或灰绿色,自形-半自形粒状结构、嵌晶结构、包橄结构,块状构造,橄榄石呈半自形粒状-浑圆状,常被单斜辉石包含构成包橄结构,含量 $15\% \sim 35\%$,单斜辉石呈自形-半自形粒状,边缘或裂隙发生角闪石化,蚀变中等,含量 70% ,斜长石含量 $3\% \sim 10\%$,分布在辉石颗粒间隙中,少量被辉石包裹或镶嵌。橄长岩为灰白色、灰色,具自形-半自形粒状结构、包橄结构,块状构造,斜长石为自形-半自形板状,局部发生黝帘石化、绿泥石化,含量 $60\% \sim 80\%$,橄榄石呈浑圆状被斜长石包裹形成包橄结构,含量 $15\% \sim 30\%$,辉石呈它形粒状,含量 $2\% \sim 4\%$ 。

总的来看,橄榄辉长岩中的橄榄石含量最低,橄榄石多呈浑圆状被辉石、斜长石、角闪石或者蚀变矿物包裹形成包橄结构,裂理普遍发育,常发生蛇纹石化和伊丁石化。橄榄辉石岩-异剥橄榄岩相的橄长岩和橄榄单斜辉石岩中,橄榄石含量中等,多为半自形粒状或浑圆状,被辉石、斜长石或角闪石包含形成包橄结构,橄榄石内部裂理发育,沿裂理或边缘易发生蛇纹石化形成网脉状(图 2A,B)。橄榄辉石岩-异剥橄榄岩相的异剥橄榄岩和橄榄岩中橄榄石含量较高,呈自型-半自型粒状结构,堆晶结构,局部被辉石、长石包含形成包橄结构,间隙充填辉石、斜长石和角闪石等(图 2C,D),橄榄石裂理发育,蛇纹石化、滑石化、伊丁石化程度不等,有的只在裂隙和边缘发生蚀变形成网脉状结构,有的甚至完全发生蛇纹石交代而仅保留其假象。



A-橄长岩内橄榄石被斜长石包含形成包橄结构;B-橄榄单斜辉石岩内橄榄石被单斜辉石和斜长石包含构成包橄结构;
C-异剥橄榄岩中橄榄石被单斜辉石包含形成包橄结构;D-橄榄岩内橄榄石构成堆晶结构,颗粒间隙充填单斜辉石;
Ol = 橄榄石, Cpx = 单斜辉石, Pl = 斜长石, Amp = 角闪石

A-Olivine inclusions enclosed by plagioclase in troctolite; B-olivine inclusions enclosed by clinopyroxene and plagioclase in olivine-clinopyroxenite; C-olivinite inclusions enclosed by clinopyroxene in wehrlite; D-olivine cumulus crystals with interstitial clinopyroxene in peridotite; Ol = olivine, Cpx = clinopyroxene, Pl = plagioclase, Amp = amphibole

图2 坡北杂岩体中橄榄石形态及其与其它矿物的关系

Fig. 2 Selected photos showing shapes of olivine crystals and relationships between olivine and other minerals in the rocks from Pobei Complex

橄榄石化学成分的电子探针分析结果见表1。橄榄石的Fo值分布在74~86.3之间,都为贵橄榄石。橄榄石Fo分子含量与岩石类型有关,其中橄榄辉长岩中橄榄石的Fo值在74~81之间,橄长岩或橄榄单斜辉石岩中橄榄石Fo=75~82.7,异剥橄榄岩或橄榄岩中橄榄石Fo值为83.6~86.3,略高于橄榄辉石岩、橄长岩和橄榄辉长岩中橄榄石的Fo值。一般随着岩浆演化作用的进行,岩浆中MgO逐渐减少,FeO相对增加,所以形成的橄榄石中Fo分子也相对减少,表明橄榄岩和异剥橄榄岩中橄榄石结晶早于其他类型岩石的橄榄石。橄榄石Ni含量变化范围为 $174 \times 10^{-6} \sim 2281 \times 10^{-6}$ 。

4 母岩浆特征

Roeder and Emslie^[17]通过实验研究发现原始岩浆在结晶过程中,橄榄石与熔浆之间的铁镁交换遵

循一定的分配系数: $K_D = X_{\text{FeO/MgO}}^{\text{Ol}} / X_{\text{FeO/MgO}}^{\text{melt}} = 0.3 \pm 0.03$, K_D 受温度、压力及岩浆成分的影响较小,可以视为常量,该区铜镍矿床的成矿压力不高^[11], K_D 值取0.30。

利用橄榄石熔体平衡原理可以估算进入岩浆房中母岩浆的MgO含量。早期结晶的橄榄石与晶间残余液体会发生再平衡作用,使得早期结晶橄榄石镁含量比其在原生岩浆中结晶的橄榄石低。因此,Fo值最高的橄榄石组分可能更接近于液相线橄榄石的组成。坡北岩体橄榄石Fo的最高值为86.3%,推算与其共存熔体的 $\text{MgO}/\text{TFeO} = 1.06$,岩体中大部分样品的 MgO/TFeO 都大于1.06^[13],因此各岩石的成分不能代表共存的熔体成分,推测母岩浆不是地幔直接熔融形成的,而是原始岩浆在深部岩浆房分离结晶作用的产物。依据张招崇和王福生^[18]提出的判别原始岩浆的方法,在MgO-Fo-

表 1 坡北岩体橄榄石化学成分测试结果

Table 1 Olivine compositions of selected samples from the Pobei complex

样品 编号	岩石 名称	Na ₂ O	FeO	P ₂ O ₅	SiO ₂	CaO	TiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	MnO	MgO	Cr ₂ O ₃	NiO	Total	Fo	Ni	
py-1-2-1	橄榄岩		13.74		40.65	0.021				0.239	44.87	0.009	0.153	99.7	85.3	1208	
py-1-2-4		0.007	13.46	0.01	40.46	0.031		0.01		0.154	44.64		0.134	98.9	85.5	1058	
py-1-2-3			13.49	0.007	40.84	0.029				0.154	44.44	0.03	0.081	99.1	85.5	639	
ps-1-1			14.88	0.02	38.52	0.008	0.072	0.166	0.001	0.143	42.55	0.563	0.144	97.1	83.6	1137	
ps-1-1		0.066	12.93	0.005	40.85	2.267		0.078		0.155	42.03		0.208	98.6	85.3	1642	
ps-1-1		0.015	13.48		40.20	0.01		0.019	0.009	0.207	44.42	0.003	0.095	98.5	85.5	750	
ps-5-1-3	异剥橄榄岩		12.83		40.27	0.016	0.01	0.021	0.008	0.266	45.35	0.003	0.066	98.8	86.3	521	
ps-4-1-1		0.007	13.25		40.95	0.001	0.018		0.008	0.034	45.13	0.024	0.123	99.5	85.9	971	
ps-4-1-2		0.015	12.94		40.41	0.017		0.021	0.004	0.198	44.85	0.009	0.195	98.7	86.1	1539	
ps-4-1-3				13.65		40.31	0.009	0.068			0.189	44.55		0.085	98.9	85.3	671
ps-4-1-4				13.63		40.85	0.011		0.007	0.006	0.155	45.03		0.113	99.8	85.5	892
ps-4-1-5				13.57	0.034	40.49		0.013			0.223	44.62		0.16	99.1	85.4	1263
ps-4-1-6			0.002	13.27	0.029	40.31	0.012	0.015		0.026	0.232	44.46	0.021	0.207	98.6	85.7	1634
ps-4-1-7			0.015	13.02	0.024	40.76	0.017			0.015	0.163	45.33		0.107	99.4	86.1	845
ps-4-1-8				13.04		40.57	0.002	0.038		0.01	0.189	45.68	0.012	0.151	99.7	86.2	1192
3801*			-	13.80	-	39.41	0	0.024	0	-	0.23	46.99	-	0.119	100.6	86	936
ps-7-1-5	橄榄斜长 单斜辉石岩	0.018	16.58	0.002	39.35					0.137	43.03	0.027	0.129	99.3	82.2	1018	
py-3-1-1	橄榄单斜辉石岩		16.54	0.04	39.80	0.028			0.005	0.162	42.80	0.056	0.03	99.4	82.2	237	
py-3-1-3		0.008	16.63	0.012	40.02	0.036			0.003	0.384	42.99		0.153	100.2	82.2	1208	
3685*	橄榄单斜辉石岩	-	18.27	-	38.92	0.004	0.048	0	-	0.216	42.76	-	0.11	100.3	81	865	
3844*		-	19.83	-	39.55	0	0.01	0	-	0.480	40.22	-	0.26	100.4	75	2045	
ps-2-3-1	橄长岩		16.27		39.22	0.059			0.011	0.145	43.70	0.021	0.078	99.5	82.7	616	
ps-2-3-2			16.20		40.20	0.01	0.01	0.02		0.26	42.70	0.09	0.087	99.5	82.4	687	
py-4-1-1			23.53	0.005	37.63	0.01	0.003	0.061		0.28	38.11		0.022	99.6	74.3	174	
3858*	橄榄辉长岩	-	20.71	-	38.94	0.06	0.11	0.23	-	0.38	39.09	-	0.29	99.8	75	2281	
3683*		-	17.46	-	38.63	0.017	0	0	-	0.302	43.22	-	0.101	99.7	81	795	
3846*		-	17.25	-	39.93	0.01	0	0	-	0.54	41.78	-	0.12	99.6	81	944	
1709*		-	24.42	-	38.07		0.024	0.019	-	0.209	38.35	-	0.082	101.2	74	645	
3845*	浅色橄榄辉长岩	-	22.01	-	39.41	0.090	0.12	0	-	0.33	38.87	-	0.06	100.9	74	472	
3842*		-	18.64	-	39.83	0	0.12	0.17	-	0.21	41.52	-	0.21	100.7	78	1652	

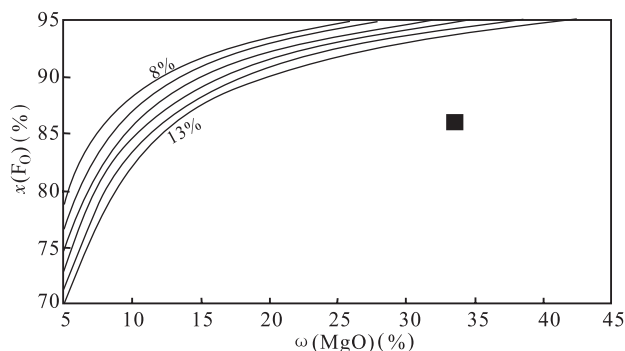
注：* 据文献[11]，- 为无测试数据，空白代表含量在检测限以下

FeO 图解上(图 3)，该样品位于代表母岩浆成分曲线的下方，也同样表明进入高位岩浆房的母岩浆中有过剩橄榄石的加入。该样品的 TFeO = 13.68%，计算得到与之平衡熔体的 MgO 含量为 14.38%，是一种比正常玄武岩富镁的玄武岩浆，约有 47.8% 的橄榄石加入。

5 橄榄石成因研究

橄榄石从堆积的液体中结晶，Ni 作为岩浆中的微量元素随着橄榄石结晶，受 $D^{ol/sul}$ 控制，在橄榄石晶体和残余的熔体中进行分配，因此橄榄石中 Ni 的含量会随着结晶分异程度的变化而发生变化。橄榄石中 Ni 含量与硅酸盐岩浆中 Ni 含量之间的关系可用瑞利分馏定律来描述：

$$C_L = C_0 F^{(D-1)} \quad (2)$$



曲线上数字代表 FeO 的含量图

Numerals of the curve are FeO contents of magma

图 3 MgO-Fo-FeO 图解(据文献[18])

Fig. 3 The map of MgO-Fo-FeO(modified after ref. [18])

式中： C_L 和 C_0 分别代表微量元素 i 在残余岩浆和初始岩浆中的浓度； F 是残余岩浆的份额； D 是元素 i 在

结晶相和熔体之间的总分配系数,由下式计算得到:

$$D = X_{\alpha} K_{\alpha/L} + X_{\beta} K_{\beta/L} \cdots \quad (3)$$

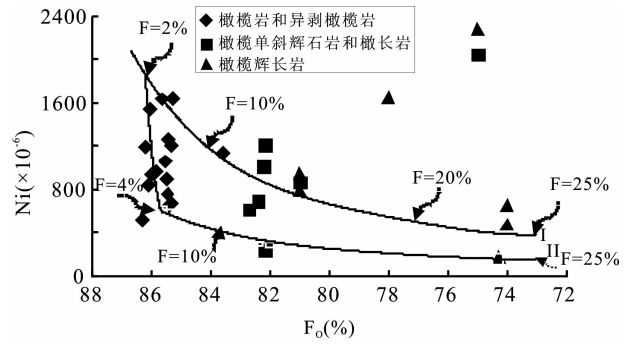
式中: X_{α} 为结晶相中 α 矿物的百分含量; $K_{\alpha/L}$ 为元素 i 在矿物 α 和熔体 L 之间的分配系数。

实验研究表明, Ni 在橄榄石/硅酸盐岩浆间的分配系数 $D^{ol/sil} = 2.86 \sim 13.6^{[19]}$, 一般设定为 7; Ni 在硫化物熔体/硅酸盐熔浆间分配系数 $D^{sul/sil} = 300 \sim 1000^{[20]}$, 一般为 500。

研究区的硫化物主要以它形粒状或海绵陨铁结构分布在橄榄石、单斜辉石和斜长石的颗粒间隙, 在橄榄石中未见硫化物产出, 而橄榄石又是最先结晶的矿物, 这说明硫化物熔离发生在橄榄石结晶之后。因此, 本文主要考虑只有橄榄石分离结晶, 以及橄榄石分离结晶到一定程度, 硫化物出现熔离的情况。根据上面计算得到的母岩浆成分, 考虑该值常低于真实母岩浆的 MgO 含量^[21], 因此假设坡北岩体母岩浆 MgO、FeO 的含量分别为 15% 和 13.7%, Ni 含量假定为 300×10^{-6} , 该值在苦橄岩 Ni 含量 (500×10^{-6})^[22] 范围之内。定量模拟计算岩浆分离结晶和硫化物熔离过程的假设条件和计算方法详见李士彬等^[4]。

橄榄石分离结晶和硫化物熔离定量模拟结果如图 4。图 4 中 I 号曲线为橄榄石在不同结晶分异程度下 Ni 含量的变化曲线, 可以看出随着结晶分异程度的增加, 橄榄石中 Fo 值逐渐降低, 同时 Ni 的含量也逐渐降低。如果岩浆在橄榄石结晶时没有发生硫化物熔离, 则橄榄石 Ni 的含量在 Ni-Fo 图中将投影在橄榄石分离结晶曲线上; 相反, 如果橄榄石 Ni 含量在分离结晶趋势线下, 说明橄榄石实际结晶过程中有硫化物熔离作用发生^[3,7]。坡北岩体橄榄石的数据部分投影在橄榄石分离结晶曲线上, 但多数投影在分离结晶趋势线下, 根据定量模拟分析 (II 号曲线) 可知: 坡北岩体母岩浆最初只发生了橄榄石分离结晶, 在橄榄石结晶到 2% 以后, 伴随着橄榄石结晶, 硫化物发生熔离作用, 在橄榄石结晶到 4% 时, 硫化物熔离结束, 硫化物熔离程度相对较低 ($\sim 0.2\%$); 此后亏损岩浆继续经历了广泛的橄榄石分离结晶作用 ($\sim 25\%$)。

早期结晶的橄榄石成分还会与晶间熔浆发生交换反应, 橄榄石成分变化特征可定性判断晶间熔浆类型。若晶间熔浆为硅酸盐岩浆, 橄榄石-熔体平衡会导致橄榄石堆晶 Fo 降低, 但不改变 Ni-Fo 的正相关关系; 若晶间熔浆是硫化物熔浆, 晶体-熔

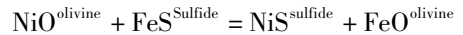


I-橄榄石分离结晶曲线; II-橄榄石分离结晶和硫化物熔离曲线, 母岩浆发生了 $\sim 25\%$ 橄榄石分离结晶, 橄榄石结晶 2% ~ 4% 时, 伴随有硫化物熔离, 硫化物熔体与橄榄石的质量比为 1:10
I-The curve of olivine fractional crystallization; II-The curve of olivine fractional crystallization and sulfide segregation, the parent magma experienced approximately 25% olivine crystallization, and when olivine crystallized from 2% to 4% there had sulfide segregation, the mass ratio of sulfide to olivine was about 1:10

图 4 橄榄石分离结晶和硫化物熔离模拟计算结果

Fig. 4 The modeling result of olivine fractional crystallization and sulfide segregation

体平衡过程中 Ni-Fe 交换反应会产生负的 Ni-Fo 关系^[8]。硫化物熔浆与橄榄石之间的 Ni-Fe 交换可以表示为:



该反应的平衡常数为:

$$K = K_D (\gamma_{\text{NiS}}/\gamma_{\text{FeS}})^{\text{sulfide}} / (\gamma_{\text{NiO}}/\gamma_{\text{FeO}})^{\text{olivine}}$$

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

γ 为活度系数。如果 Ni 和 Fe 进入橄榄石的时候是理想展位, γ_{NiO} 和 γ_{FeO} 都为 1^[23], 得到:

$$K = K_D (\gamma_{\text{NiS}}/\gamma_{\text{FeS}})^{\text{sulfide}}$$

交换系数 K_D 在 5 ~ 35 之间^[24], $\gamma_{\text{NiS}}/\gamma_{\text{FeS}}$ 也不是恒定的。然而在一定的温度、氧逸度、硫逸度和 Ni 含量条件下, K_D 是一个常数, 那么当橄榄石和硫化物熔浆发生 Ni-Fe 交换后, FeO 含量高的橄榄石比 FeO 含量低的橄榄石将容纳更多的 Ni, 从而在橄榄石中出现 Ni-Fo 负相关。

图 4 中部分橄榄石 Ni 含量高于橄榄石结晶线, 呈现 Ni-Fo 负相关关系, 表明少许富铁橄榄石和晶间硫化物熔浆发生了物质交换反应。

6 结 论

本文利用橄榄石熔体平衡原理, 对坡北镁铁-超镁铁岩体的母岩浆成分进行了初步分析, 结合岩体中橄榄石的矿物化学成分特征, 定量模拟计算了岩浆结晶和硫化物熔离过程, 取得的主要认识有:

(1) 坡北岩体母岩浆 MgO 含量约为 14.38%。

(2) 橄榄石的 Fo 值与岩石类型相关, 其中橄榄辉长岩中橄榄石的 Fo 值在 74 ~ 81 之间, 橄长岩或橄榄辉石岩中橄榄石 Fo = 75 ~ 82.7, 异剥橄榄岩或橄长岩中橄榄石 Fo 值为 83.6 ~ 86.3, 表明橄长岩相橄榄石结晶早于橄长辉长岩中橄榄石, 橄榄石 Ni 含量变化范围为 $(174 \sim 2281) \times 10^{-6}$ 。

(3) 岩浆结晶演化过程中, 坡北岩体经历了广泛的橄榄石分离结晶作用 (~25%), 硫化物熔离作用发生在橄榄石结晶程度为 2% ~ 4% 的过程中, 硫化物熔离程度较低 (~0.2%)。这与区内野外实际观察比较接近, 也表明坡北岩体发生过一定程度的硫化物熔离, 但成矿前景不佳。

致 谢: 感谢中国地质大学莫亚龙博士、曹晓峰博士陈露硕士、长安大学西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室电子探针室刘民武对本文工作中的大力帮助。

参考文献 (References):

- [1] Simkin T, Smith J V. Minor element distribution in olivine[J]. *Journal of Geology*, 1970, 78: 304 - 325.
- [2] Li C S, Ripley E M. Compositional variations of olivine and sulfur isotopes in the Noril'sk and Talnakh intrusions, Siberia: Implications for ore-forming processes in dynamic magma conduits[J]. *Economic Geology*, 2003, 98: 69 - 86.
- [3] Li C S, 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.
- [4] 李士彬, 胡瑞忠, 宋谢炎, 陈烈锰, 沈能平. 硫化物熔离对岩浆硫化物含矿岩体中橄榄石 Ni 含量的影响—以金川岩体为例[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2008, 27(2): 146 - 152.
- Li Shibin, Hu Ruizhong, Song Xieyan, Chen Liemeng, Shen Nengping. Sulfide separation control in Ni content of olivine in bearing-ore intrusion of magna deposit: An example from Jinchuan intrusion[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2008, 27(2): 146 - 152. (in Chinese with English abstract)
- [5] 陈列锰, 宋谢炎, Danyushevsky L V, 肖加飞, 李士彬, 官建祥. 金川 I 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.
- Chen Liemeng, Song Xieyan, Danyushevsky L V, Xiao Jiafei, Li Shibin, Guan Jianxiang. Correlation between Ni and MgO contents of olivine in Segment I of the Jinchuan intrusion, NW China, and its geological implication[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(12): 3369 - 3378. (in Chinese with English abstract)
- [6] 官建祥, 宋谢炎, Danyushevsky L V, 陈列锰, 聂晓勇. 峨眉火成岩省内带岩浆硫化物含矿岩体橄榄石的成因意义[J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 2010, 35(2): 225 - 234.

- Guan Jianxiang, Song Xieyan, Leonid V V, Chen Liemeng, Nie Xiaoyong. Genetic significances of olivine from magmatic sulfide ore-bearing intrusions in central zone of Emeishan large igneous province[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2010, 35(2): 225 - 234. (in Chinese with English abstract)
- [7] Li C S, Naldrett A J. Geology and petrology of the voisey s bay intrusion: reaction of olivine with sulfide and silicate liquids[J]. *Lithos*, 1999, 47(1-2): 1 - 31.
- [8] Li C S, Xu Z H, De W S. A Compositional variations of olivine from the Jinchuan Ni-Cu sulfide deposit, western China: Implication for ore genesis[J]. *Mineralium Deposita*, 2004, 39: 159 - 172.
- [9] 张旺生. 新疆北山大体构造属性及演化特征[J]. *新疆地质*, 1992, 10(2): 129 - 137.
- Zhang Wangsheng. Geotectonics and evolution characteristics of Beishan, Xinjiang[J]. *Xinjiang Eology*, 1992, 10(2): 129 - 137. (in Chinese with English abstract)
- [10] 李鸿儒. 新疆坡北基性超基性岩带控岩构造特征及成矿专属性[J]. *中国区域地质*, 1994, 13: 227 - 233.
- Li Hongru. Rock-controlling structure of the Pobei basic-ultramafic belt in Xinjiang and its metallogenic specialization[J]. *Regional Geology of China*, 1994, 13: 227 - 233. (in Chinese with English abstract)
- [11] 高怀忠. 新疆坡北基性超基性岩带 I 号岩体地质特征及其含矿性研究[J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 1992, 17(1): 391 - 401.
- Gao huaizhong. Geological characteristics of NO. 1 basic-ultramafic intrusive body and its ore potentiality, Pobei, Xinjiang[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 1992, 17(1): 391 - 401. (in Chinese with English abstract)
- [12] 孙燕, 肖渊甫, 王道永, 邓江红, 吴德超. 新疆北山坡北基性超基性杂岩特征及成矿远景[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2009, 36(4): 402 - 408.
- Sun Yan, Xiao Yuanfu, Wang Daoyong, Deng Jianghong, Wu Dechao. The characteristics and the metallogenic future of the Pobei mafic-ultramafic complex in the Beishan area, Xinjiang, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2009, 36(4): 402 - 408. (in Chinese with English abstract)
- [13] 姜常义, 程松林, 叶书锋, 夏明哲, 姜寒冰, 代玉财. 新疆北山地区中坡北镁铁质岩与岩石成因[J]. *岩石学报*, 2006, 22(1): 115 - 126.
- Jiang Changyi, Cheng Songlin, Ye Shufeng, Xia Mingzhe, Jiang Hanbing, Dai Yucai. Lithochemistry and petrogenesis of Zhongposhanbei mafic rock body, at Beishan region, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(1): 115 - 126. (in Chinese with English abstract)
- [14] 李华芹, 陈富文, 梅玉萍, 吴华, 程松林, 杨甲全, 代玉财. 新疆坡北基性-超基性岩带 I 号岩体 Sm-Nd 和 SHRIMP U-Pb 同位素年龄及其地质意义[J]. *矿床地质*, 2006, 25(4): 463 - 469.
- Li Huaqin, Chen Fuwen, Mei Yuping, Wu Hua, Cheng Song-

- lin, Yang Jiaquan, Dai Yucai. Isotopic ages of No. 1 intrusive body in Pobei mafic-ultramafic belt of Xinjiang and their geological significance[J]. *Mineral Deposits*, 2006, 25(4): 463 - 469. (in Chinese with English abstract)
- [15] 李华芹, 梅玉萍, 屈文俊, 蔡红, 杜国民. 新疆坡北基性-超基性岩带 10 号岩体 SHRIMP U-Pb 和矿石 Re-Os 同位素定年及其意义[J]. *矿床地质*, 2009, 28(5): 633 - 642.
Li Huaqin, Mei Yuping, Qu Wenjun, Cai Hong, Du Guomin. SHRIMP zircon U-Pb and Re-Os dating of No. 10 intrusive body and associated ores in Pobei mafic-ultramafic belt of Xinjiang and its significance[J]. *Mineral Deposits*, 2009, 28(5): 633 - 642. (in Chinese with English abstract)
- [16] 校培喜, 王兴安, 王育习, 黄玉华, 王升勤, 张汉文, 王香萍, 陈莉群, 王静平. 笔架山幅 1:25 万区域地质调查(修测)K46C004002[M]. 西安地质矿产研究所, 2004.
Xiao Peixi, Wang Xing'an, Wang Yuxi, Huang Yuhua, Wang Shengqin, Zhang Hanwen, Wang Xiangping, Chen Liqun, Wang Jingping. Bijiashan 1:25 million regional geological survey (revision), K46C004002[M]. Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources, 2004. (in Chinese with English abstract)
- [17] Roeder P L, Emslie R F. Olivine-liquid equilibrium[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1970, 29: 275 - 289.
- [18] 张招崇, 王福生. 一种判别原始岩浆的方法—以苦橄岩和碱性玄武岩为例[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2003, 33(2): 130 - 134.
Zhang Zhaochong, Wang Fusheng. A method for identifying primary magma examples from picrite and alkali basalts[J]. *Journal of Jilin of University(earth science edition)*, 2003, 33(2): 130 - 134. (in Chinese with English abstract)
- [19] 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]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1978, 42(12): 1829 - 1844.
- [20] Barnes S J, Maier W D. The fractionation of Ni, Cu and the noble metals in silicate and sulfide liquids[C]. Keays R R, Leshner C M, Lightfoot P C, eds. *Dynamic processes in magmatic ore deposits and their application in mineral exploration*[A]. Geological Association of Canada Short Course Notes, 1999, 13: 69 - 106.
- [21] Wu F Y, Wilde S A, Zhang G L, Sun D Y. Geochronology and petrogenesis of the post-orogenic Cu-Ni sulfide-bearing mafic-ultramafic complexes in Jilin Province, NE China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2004, 23: 781 - 797.
- [22] Greenough J D, Owen J V. Platinum-group element geochemistry of continental tholeiites; analysis of the Long Range dyke swarm, Newfoundland, Canada[J]. *Chemical Geology*, 1992, 98(3-4): 203 - 219.
- [23] Campbell F E, Roe der P L. The solubility of olivine and pyroxene in the Ni-Mg-Si-O system[J]. *Am. Mineral.*, 1968, 53: 257 - 258.
- [24] Brenan J M. Effects of O_2 , S_2 , temperature and melt composition on Fe-Ni exchange between olivine and sulfide liquid; Implication for natural olivine-sulfide assemblages[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2003, 67(14): 2663 - 2681.