

文章编号: 0258-7106(2012)05-1075-12

甘肃北山黑山岩浆铜镍硫化物矿床橄榄石 特征及成因意义*

徐 刚¹, 汤中立¹, 王亚磊², 闫海卿¹, 焦建刚¹, 王建中³

(1 长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 2 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054;
3 中国人民武装警察部队黄金第五支队, 陕西 西安 710100)

摘 要 黑山铜镍硫化物矿床是近年在甘肃北山发现的大型岩浆铜镍硫化物矿床, 含矿岩体主要由含矿橄榄岩相和南部边缘的角闪辉长岩相构成。研究发现含矿岩体中的橄榄石属贵橄榄石(F_o 值为 81.54~86.87), 其 $w(Ni)$ 介于 $(801.53 \sim 2\,703.19) \times 10^{-6}$, 利用橄榄辉长岩中最高 F_o 值和主量元素反演, 表明原始岩浆属高镁玄武质岩浆, $w(MgO) = 11.65\%$, $w(FeO) = 10.12\%$; 橄榄石分离结晶模拟计算结果表明, 橄榄石结晶过程中伴随有 $0.12\% \sim 0.17\%$ 硫化物熔离, 深部岩浆房中橄榄石分离结晶程度小于 3%, 橄榄石与硫化物最小质量比约 14:1, 隙间硅酸盐熔浆和硫化物熔浆作用明显, 是造成早期结晶橄榄石成分变化的重要原因。

关键词 地质学, 橄榄石, F_o 值, 硫化物熔离, 黑山铜镍硫化物矿床

中图分类号: P611.1⁺1

文献标志码: A

Features and genetic significance of olivine from Heishan magmatic sulfide ore-bearing intrusion in Beishan area, Gansu Province

XU Gang¹, TANG ZhongLi¹, WANG YaLei², YAN HaiQing¹, JIAO JianGang¹ and WANG JianZhong³

(1 College of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2 Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources, China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3 No. 5 Gold Party of Chinese People's Armed Police Force, Xi'an 710100, Shaanxi, China)

Abstract

Heishan is one of the important sulfide-bearing mafic-ultramafic intrusions in Beishan area of Gansu Province. The intrusion is composed mainly of ore-bearing peridotite and amphibole gabbro distributed at the southern edge of the intrusion. Electron microprobe analyses of the olivine show that almost all olivine crystals are chrysolite with the forsterite content (F_o) ranging from 81.54 to 86.87 and Ni content varying from 801.53×10^{-6} to $2\,703.19 \times 10^{-6}$. The main components of the primitive magma are $w(MgO) = 11.65\%$, $w(FeO) = 10.12\%$, suggesting relatively high MgO basaltic magma. Based on modeling of olivine fractional crystallization and sulfide segregation, the authors hold that the sulfide segregation (about $0.12\% \sim 0.17\%$) and olivine fractional crystallization occurred almost at the same time during the magma evolution. The results also show that less than 3% fractional crystallization of olivine has been separated from magma and their minimum mass ratio is 14:1. In addition, the re-equilibration of the olivine crystals from the trapped silicate liquid or sulfide liquid seems to be an important factor for the variation of olivine composition.

Key words: geology, olivine, F_o ; sulfide segregation, Heishan Ni-Cu sulfide deposit

* 本文得到深部探测技术与实验研究专项(项目编号: SinoProbe-05-01)和中央高校基本科研业务费专项资金(项目编号: CHD2011ZY004)联合资助

第一作者简介 徐 刚, 男, 1984 年生, 在读博士研究生, 矿床地球化学专业。Email: xugang09@163.com

收稿日期 2012-05-15; 改回日期 2012-08-02。张绮玲编辑。

黑山铜镍硫化物矿床是近年来在甘肃北山地区发现的大型岩浆铜镍硫化物矿床,位于北山裂谷带东部,黑山含矿岩体出露面积 0.257 km²,所以它是典型的小岩体型铜镍硫化物矿床(汤中立等,2011)。目前,对黑山含矿岩体的研究主要集中在岩体地质特征、年代学及构造背景等方面(邵小阳等,2010;颜炜等,2011;杨建国等,2012),而对其矿物学,特别是主要造岩矿物成因意义的研究尚少。镁铁质含硫化物岩体中橄榄石 Fo 值和 Ni 含量蕴含丰富的成岩成矿信息,橄榄石的成分不仅能反映原始岩浆性质,对硫化物熔离及隙间熔浆也能起到良好的示踪作用。本文在对黑山含矿岩体中含矿岩相方辉橄榄岩、橄榄辉长岩中的橄榄石进行系统分析的基础上,运用定量示踪方法,试图揭示出黑山含矿岩体岩浆分离

结晶过程与硫化物熔离间的关系,了解橄榄石成因意义,同时对评价本区与其相似的镁铁质岩体的成矿潜力也具有意义。

1 黑山含矿岩体地质概况

北山裂谷带内镁铁质-超镁铁质岩体众多,自西向东分布有红柳沟、大山头(均有矿化显示)等近 20 处基性、超基性杂岩体(群),规模较小,出露面积一般 < 1 km²。黑山含矿岩体位于塔里木板块东北缘双鹰山断裂带中,沿青白口系背形褶皱轴部断裂侵位,岩体平面上形似“鸭梨”(图 1),剖面上呈上缓下陡的倒漏斗状,纵向上向西倾伏,呈岩墙状产出,总体走向 310°。岩体长约 790 m,宽约 180~520 m,垂直

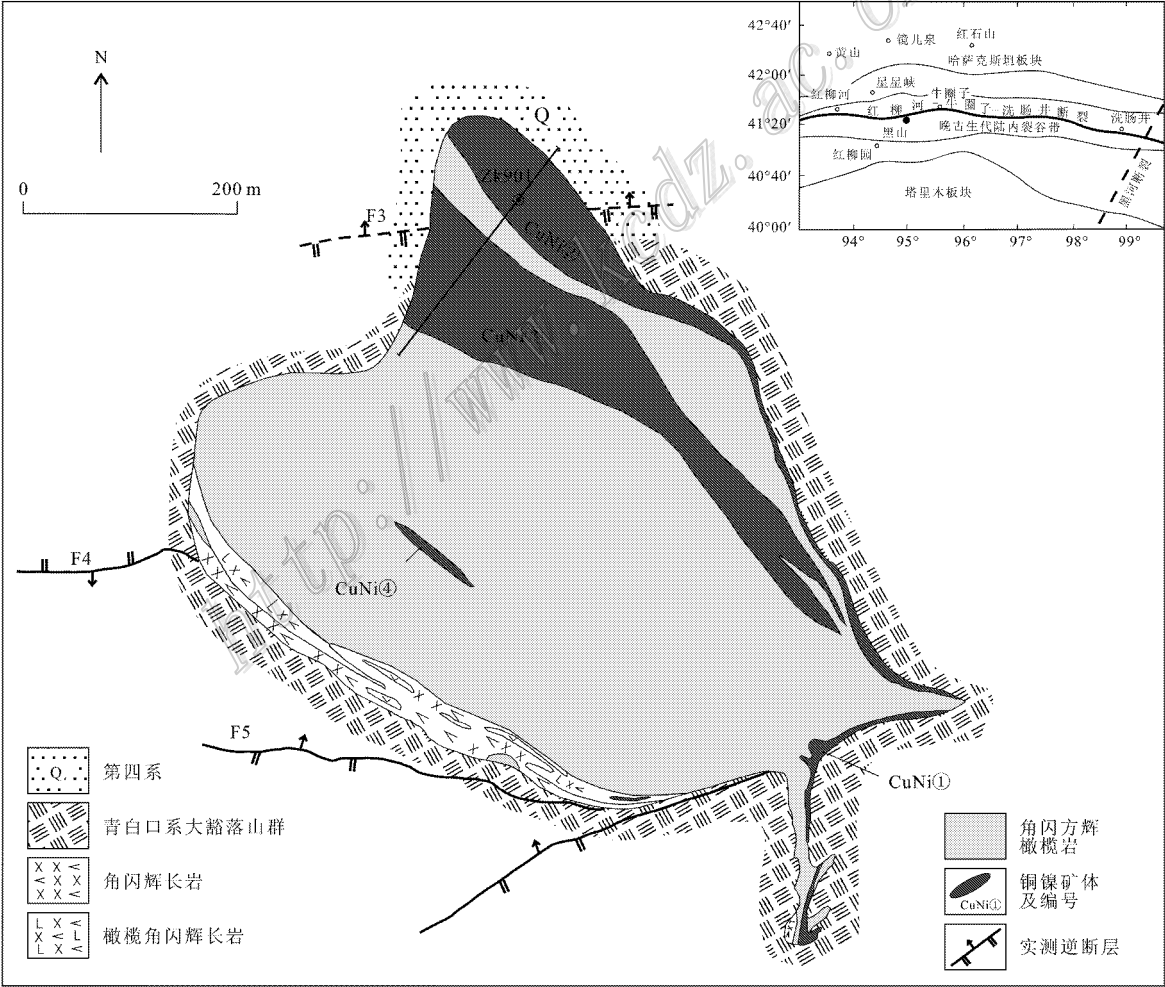


图 1 黑山岩体地质简图(据甘肃省地质调查院,2002^①)

Fig. 1 Geological sketch map of Heishan intrusion

① 甘肃省地质调查院. 2002. 北山地区铜镍硫化物矿床成矿条件研究报告. 内部资料.

深度超过1 000 m,出露面积 0.257 km²。岩体为同源岩浆经深部分异同期不同次侵入的复合岩体。岩体中辉长岩 ID-TIMS 锆石 U-Pb 年龄为(356.4 ± 0.6)Ma(Xie et al. , 2012) 辉长岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 测年结果为(374.6 ± 5.2) Ma(杨建国等 , 2012) 和 (358 ± 5) Ma(Xie et al. , 2012) ,二者一致 ,均为晚泥盆世。与东天山-北山地区其他含矿岩体(黄山、黄山东、白石泉、坡一、坡十等) 的年龄明显不同。

黑山岩体分为 2 期侵入岩相 ,第一侵入阶段为角闪辉长岩相 ,分布于岩体南部边缘 ,辉长岩相呈脉状贯入到角闪辉长岩相或分布于橄榄岩相边部 ;第二侵入阶段为橄榄岩相 ,构成岩体的主体 ,约占岩体总面积的 94 % ,是主要赋矿岩相。包括有角闪斜长方辉橄榄岩和角闪斜长二辉橄榄岩。除以上主要岩相之外 ,还发育有辉绿岩、煌斑岩晚期岩脉。ZK901 孔中岩相变化不大 ,主要发育有含长角闪方辉橄榄岩。目前经详查勘探 ,共圈出 130 个矿体 ,规模大小不等 ,呈透镜状、似层状和脉状 ,长度 400~1 000 m ,厚度 18.76~325 m ,多呈“ 悬浮状 ” 分布在岩体的下部或与围岩接触带部位。岩体 9 线的 ZK901 钻孔切穿橄榄岩相 ,最深处位于 7 号主矿体边部(图 2)。

ZK901 钻孔中方辉橄榄岩主要造岩矿物为橄榄石、辉石、斜长石及角闪石、金云母。整个岩体中各种矿物含量随岩石类型的不同而有较大变化。常见结构有自形-半自形中-细粒结构、包含结构、包橄结构、反应边结构、辉长结构等一些典型的镁铁质-超镁铁质岩石结构特征。各类岩石均发生了不同程度的蚀变作用 ,蚀变类型主要有透闪石化、绿泥石化、蛇纹石化等。

斜方辉石主要赋存在橄榄岩中 ,以古铜辉石为主 ,次为紫苏辉石和少量顽火辉石。呈半自形-他形粒状或集合体 ,粒径在 0.1~7.0 mm 之间 ,一般为 1.5~3.0 mm ,大颗粒的斜方辉石常包裹数个橄榄石颗粒 ,较小的颗粒呈填隙状。单斜辉石在橄榄岩和辉长岩中均有分布 ,橄榄岩中单斜辉石常包裹橄榄石 ,辉长岩中单斜辉石被斜长石包裹。在橄榄岩相和辉长岩中均有角闪石的分布 ,角闪石含量不均 ,主要呈他形充填于橄榄石或斜长石晶间 ,主要为钙质普通角闪石。斜长石出现在橄榄岩和辉长岩中。橄榄岩中 ,斜长石呈填隙状充填于橄榄石或辉石颗粒之间 ,在辉长岩中 ,斜长石多呈自形柱状、板状包裹橄榄石和单斜辉石。斜长石在黑山岩体中普遍存

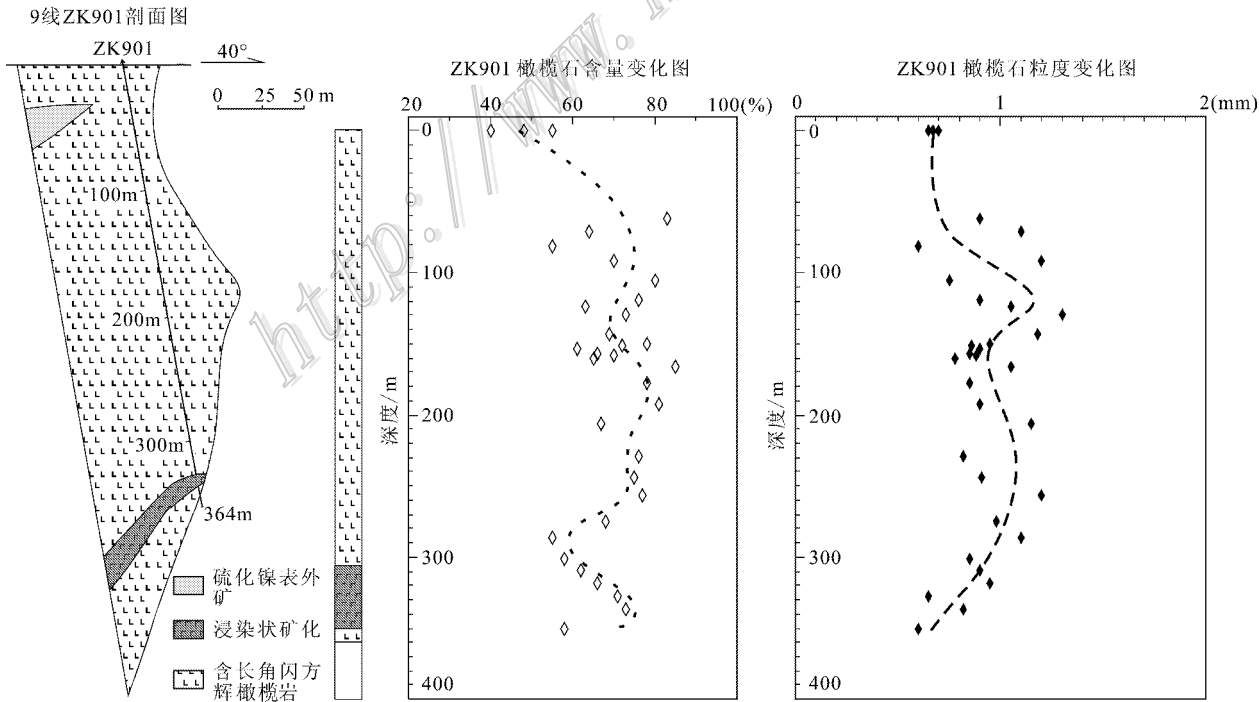


图 2 黑山岩体 9 线 ZK901 剖面橄榄石含量及粒度统计变化图(剖面图据甘肃省地质调查院 2002^①)

Fig. 2 Variations of content and grain size of olivine in borehole ZK901 along No. 9 exploration line of Heishan intrusion

① 甘肃省地质调查院. 2002. 北山地区铜镍硫化物矿床成矿条件石研究报告. 内部资料.

在,含量多在 5% 左右,而在岩体边部其含量可高达 20%~40%。

岩浆早期结晶阶段以造岩矿物的形成为主,造岩矿物的生成顺序为:橄榄石—辉石—角闪石—斜长石。金属硫化物的熔离作用开始于早期,主要发生在岩浆晚期。随着造岩矿物的晶出,金属硫化物和氧化物相继出现,生成顺序为:磁黄铁矿—镍黄铁矿—黄铜矿—磁铁矿。

2 橄榄石岩相学特征

橄榄石是黑山含矿岩体最重要的造岩矿物,在各岩相中均呈堆晶矿物产出(图 3A)。以贵橄榄石为主,次为镁橄榄石,颜色为橄榄绿色,遭受蚀变后呈黄褐色。橄榄石具自形-半自形或不规则的等间粒状或短柱状嵌晶结构,常呈浑圆粒状被辉石包裹,其次,被角闪石、斜长石等矿物包裹形成包橄结构(图 3B、C、D、E)。在岩体 9 线 ZK901 中,橄榄石均为贵橄榄石,主要呈离散状的堆晶相和包体相形式

存在。堆晶相橄榄石隙间矿物主要为斜长石,部分矿石样品中为金属硫化物。地表橄榄辉长岩样品中的橄榄石颗粒较小,主要被粗大的斜长石包裹。矿物粒度一般在 0.05~2.5 mm 之间,以中细粒为主,不同部位其粒度略有变化,上部和中部辉石橄榄岩中橄榄石含量分别为 60%~85% 和 65%~80%,而浸染状矿化方辉橄榄岩中橄榄石含量有所减少,为 60%~75%(图 2),自岩体中部到边部橄榄石含量具有随岩相的变化而减少的明显规律;而粒度主要集中在 0.8~1.1 mm 之间,个别可达 2.5 mm 以上,自岩体中部到边部,具有明显变小的趋势(图 2)。橄榄石具有不同程度的蚀变,其中,呈包裹状的橄榄石较新鲜(图 3A、D、E),自形-半自形,仅沿橄榄石切面裂隙中有蛇纹石和尘状磁铁矿;蚀变较强时,蛇纹石等蚀变矿物呈网状贯穿整个切面,网眼中仍留有未蚀变的橄榄石残晶(图 3F),形成具有淡绿色、黑色的网状结构;蚀变强烈时,则残晶减少,或整个切面均被蛇纹石、尘状磁铁矿的混合物取代,有时见红棕色的伊丁石(或包林皂石),但仍保留其矿物轮廓。

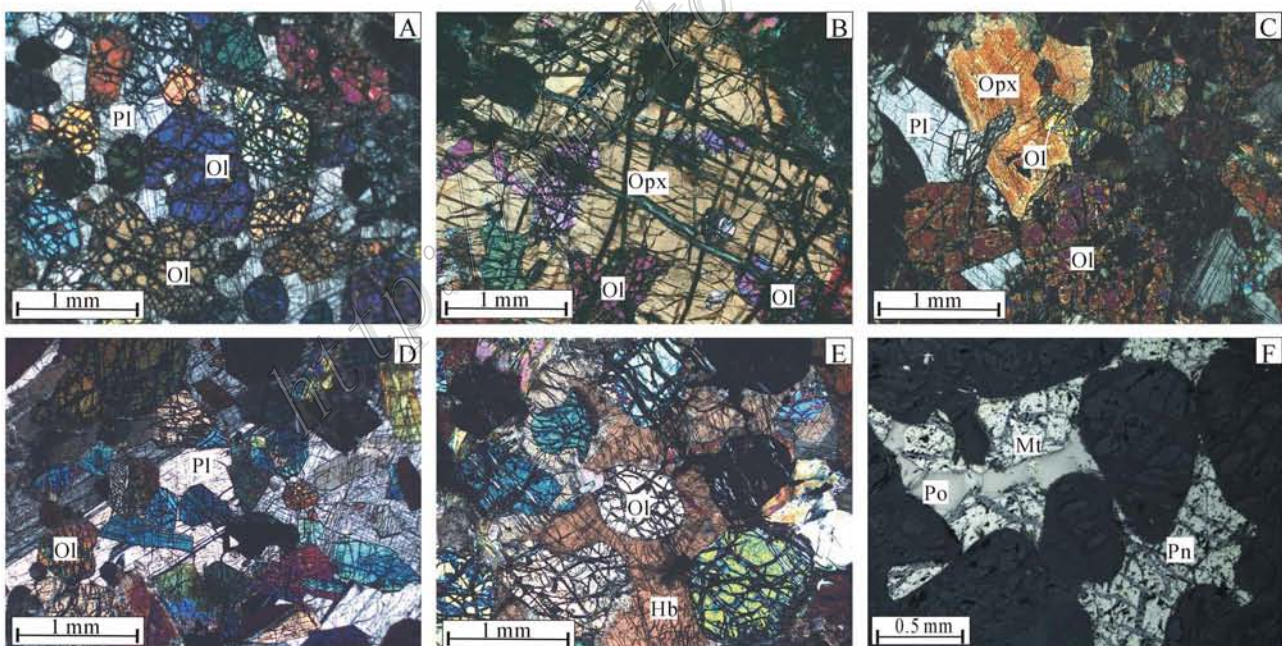


图 3 黑山含矿岩体岩石和矿石中橄榄石产出特征

A. 橄榄石堆晶结构,半自形; B. 细粒浑圆状橄榄石被斜方辉石包含,包橄结构; C. 橄榄辉长岩中半自形橄榄石被斜方辉石包裹;

D. 斜长石包裹辉石及半自形橄榄石,辉长结构; E. 角闪石包裹橄榄石; F. 浸染状矿石中硫化物充填橄榄石之间

Ol—橄榄石; Opx—斜方辉石; Pl—斜长石; Hb—角闪石; Pn—镍黄铁矿; Po—磁黄铁矿; Mt—磁铁矿

Fig. 3 Microscopic images of shapes and modes of occurrence of olivine crystals in rocks and disseminated ores

A. Heap crystal structure of olivine; B. Rounded olivine grains wrapped in orthopyroxene; C. Subhedral olivine grains wrapped in orthopyroxene;

D. Subhedral olivine grains wrapped in plagioclase; E. Olivine grains wrapped in the hornblende; F. Olivine surrounded by sulfide in disseminated ore

3 橄榄石的成分特征

3.1 样品分析方法

对黑山含矿岩体 9 线 ZK901 岩芯中的方辉橄榄岩及下部浸染状矿化岩石进行了样品采集,并进行系统的薄片、探针片及光片磨制,主要组成矿物为橄榄石、辉石、角闪石、斜长石等,选择新鲜的橄榄石矿物颗粒进行电子探针波谱定量分析。样品分析在长安大学西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室完成。分析仪器为 JXI-8100 型电子探针,分析条件:加速电压 15 kV,束斑直径 1~3 μm ,电流 10 nA,以获得最高的峰背比和最好的空间分辨率,分析结果见表 1。

3.2 橄榄石的分析结果

橄榄石的电子探针分析结果显示,橄榄石的 $w(\text{Ni})$ 变化范围较大,为 $801.53 \times 10^{-6} \sim 2\,703.19 \times 10^{-6}$,其中,个别样品(HS901-37 浸染状矿化辉石橄榄岩)变化值达 $1\,901.66 \times 10^{-6}$ (图 4B)。 F_o 值为

81.54~86.87,属贵橄榄石,钻孔中单个样品中橄榄石 F_o 值变化范围 0.66~2.42,最大可达 5.33(HS-1 地表含斜长石橄榄辉长岩)(图 4A)。ZK901 中岩石主要为方辉橄榄岩,岩相随深度变化较小,不同深度样品中橄榄石 F_o 值和 Ni 含量的变化较单个样品内变化明显较小,其中 F_o 平均变化为 1.38, $w(\text{Ni})$ 变化为 582.28×10^{-6} 。 F_o 值总体变化不大,单个样品中变化明显,这与金川 I 号岩体的上部岩相中橄榄石成分特征(陈列锰等,2009)具有很好的相似性,可能显示出岩浆演化过程中有新的岩浆补充及橄榄石结晶后与隙间硅酸盐熔浆发生作用;而 $w(\text{Ni})$ 在单个样品橄榄石中大的变化,可能与该样品中部分橄榄石与隙间硫化物熔浆反应有关。

橄榄石 F_o 值与 $w(\text{SiO}_2)$ 、 $w(\text{CaO})$ 均呈弱的正相关(图 5A、D),与 $w(\text{MnO})$ 呈弱的负相关(图 5C)关系,而与 Ni 关系不明显,部分呈正相关,部分呈现出负相关关系(图 5B)。橄榄石 F_o 与氧化物间的良好相关性表明橄榄石应为同一母岩浆结晶作用的产物。

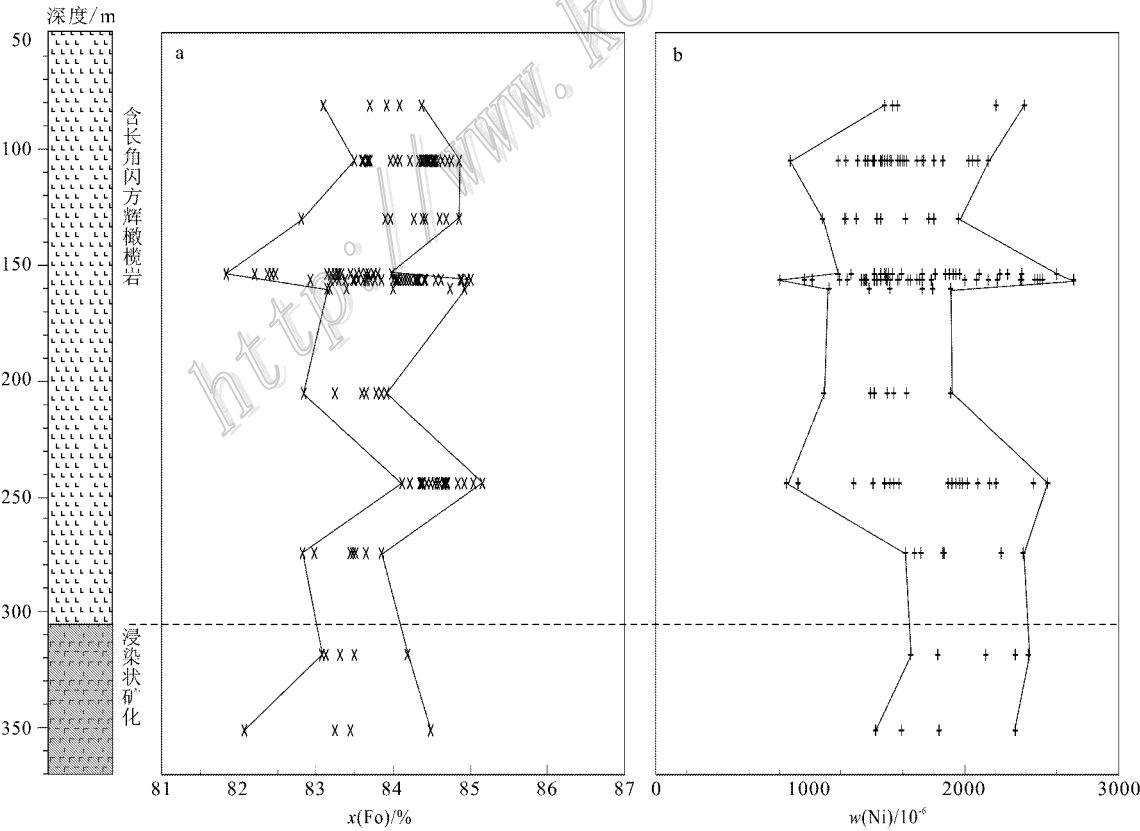


图 4 黑山含矿岩体 9 线 ZK901 橄榄石 F_o 值与 Ni 含量随深度变化图

Fig. 4 Compositional variations of olivine in borehole ZK901 along No. 9 exploration line of Heishan intrusion

表 1 黑山岩体 9 线 ZK901 钻孔岩相橄榄石氧化物成分及 Ni 含量

Table 1 Oxide and Ni content of olivine from borehole ZK901 along No. 9 exploration line of Heishan intrusion

深度、样品	$\alpha(B)\%$													总和	Ni/10 ⁻⁶	Fo
号及点号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	MnO	CaO	Na ₂ O	Cr ₂ O ₃	K ₂ O	NiO	BaO				
地表 HS-1																
0I-1	40.1	—	0.03	13.4	46.5	0.17	0.12	—	—	—	0.28	—	100.60	2184.55	86.10	
0I-2	39.2	0.00	—	15.4	43.5	0.28	0.16	0.01	0.91	—	0.19	0.03	99.68	1485.18	83.40	
0I-3	39.6	0.01	0.01	16.4	44.2	0.24	0.09	—	0.04	0.00	0.22	—	100.81	1697.35	82.80	
0I-4	40.2	0.05	—	14.7	45.1	0.17	0.14	—	0.06	0.01	0.22	0.02	100.63	1705.21	84.50	
0I-5	40.1	—	—	12.5	46.5	0.20	0.15	—	0.04	—	0.31	—	99.80	2443.87	86.87	
0I-6	39.6	—	—	17.0	44.4	0.23	0.15	—	0.01	—	0.16	0.04	101.59	1265.15	82.33	
0I-7	40.0	—	0.01	16.1	44.0	0.30	0.12	—	—	0.01	0.17	0.01	100.72	1343.73	82.95	
0I-8	39.5	0.02	—	17.2	42.7	0.29	0.15	—	—	—	0.14	—	100.00	1068.70	81.54	
0I-9	40.2	0.02	—	15.0	44.8	0.20	0.16	0.02	0.04	—	0.23	—	100.65	1815.22	84.19	
地表 HS-4																
0I-1	39.7	—	—	16.9	43.7	0.29	0.11	—	0.02	—	0.19	—	100.91	1461.61	82.14	
0I-2	39.7	—	—	16.3	44.5	0.21	0.12	—	0.00	—	0.12	0.00	100.95	919.40	82.95	
0I-3	39.8	—	—	17.2	43.3	0.26	0.13	0.01	0.06	0.01	0.11	—	100.88	864.39	81.80	
0I-4	39.4	0.01	0.02	17.3	43.2	0.18	0.15	0.00	0.06	0.01	0.12	0.01	100.46	919.40	81.63	
81 m HS901-08																
0I-1	39.5	—	0.06	15.0	44.0	0.22	0.15	0.07	0.06	0.01	0.20	0.05	99.32	1563.76	83.92	
0I-2	39.0	—	0.04	15.0	44.4	0.21	0.15	0.02	0.06	0.01	0.28	0.01	99.18	2208.13	84.08	
0I-3	39.2	0.01	—	15.2	43.7	0.24	0.12	—	0.04	0.01	0.19	—	98.71	1485.18	83.70	
0I-4	39.3	—	0.03	14.9	45.2	0.24	0.11	0.02	—	0.02	0.20	—	100.02	1532.33	84.36	
105 m HS901-16																
0I-1	39.3	0.01	0.03	15.6	44.5	0.20	0.11	0.01	0.05	—	0.19	0.03	100.03	1500.90	83.59	
0I-2	39.7	0.03	0.00	15.5	44.1	0.29	0.10	—	0.11	0.00	0.26	—	100.09	2027.39	83.50	
0I-3	40.1	—	—	15.5	44.7	0.17	0.08	—	0.12	—	0.17	0.02	100.86	1304.44	83.68	
0I-4	39.7	—	0.03	15.4	44.0	0.24	0.10	—	0.02	0.00	0.21	—	99.70	1626.63	83.61	
0I-5	40.0	0.01	—	15.4	44.3	0.23	0.18	0.02	0.02	0.01	0.20	—	100.37	1571.62	83.66	
0I-6	39.3	—	0.02	15.3	44.1	0.28	0.08	—	0.03	0.01	0.22	—	99.34	1728.78	83.68	
0I-7	40.1	—	—	14.3	44.7	0.19	0.16	0.03	0.05	0.00	0.15	0.01	99.69	1178.71	84.75	
0I-8	40.1	—	0.01	14.8	45.3	0.25	0.10	0.07	0.07	—	0.18	—	100.88	1414.46	84.53	
0I-9	39.7	0.02	0.04	15.5	44.6	0.28	0.13	0.06	0.06	0.01	0.20	—	100.60	1563.76	83.69	
0I-10	40.0	0.00	0.03	15.1	44.4	0.25	0.14	—	0.04	0.01	0.20	—	100.17	1603.05	83.96	
0I-11-1	39.9	—	0.03	14.6	44.3	0.21	0.15	—	—	—	0.27	0.06	99.52	2153.12	84.41	
0I-11-2	40.0	0.05	—	14.7	44.6	0.19	0.05	0.04	0.02	0.01	0.20	—	99.86	1579.48	84.43	
130 m HS901-26																
0I-1	40.1	—	—	14.7	45.3	0.15	0.13	0.02	0.10	0.00	0.19	—	100.69	1461.61	84.60	
0I-2	39.9	—	0.02	14.4	45.4	0.20	0.10	0.01	0.02	0.01	0.25	0.01	100.32	1956.67	84.86	
0I-3	40.0	0.03	0.03	14.6	45.2	0.19	0.13	—	—	0.01	0.18	—	100.37	1430.17	84.68	
0I-4	40.2	—	0.01	14.8	44.9	0.25	0.11	0.01	—	—	0.16	—	100.44	1225.86	84.42	
0I-5	39.9	—	0.02	15.2	44.7	0.22	0.20	0.01	0.03	—	0.16	—	100.44	1233.72	83.97	
0I-6	39.2	—	0.01	14.5	43.7	0.20	0.13	—	0.47	0.00	0.23	0.00	98.44	1799.50	84.27	
0I-7	40.0	—	0.02	14.7	45.3	0.21	0.13	0.02	0.05	—	0.23	0.02	100.68	1768.07	84.61	
0I-8	39.5	—	0.00	16.2	43.8	0.24	0.13	—	—	—	0.21	0.02	100.10	1618.77	82.81	
0I-9	40.4	—	—	15.3	44.7	0.23	0.12	—	0.30	0.00	0.14	—	101.19	1084.42	83.90	
0I-10	39.6	—	0.01	14.8	44.8	0.31	0.13	0.04	0.52	—	0.17	—	100.38	1296.59	84.38	
154 m HS901-35																
0I-1	39.8	0.01	—	16.7	43.4	0.33	0.04	0.00	—	—	0.33	0.01	100.62	2601.03	82.20	
0I-2	39.8	—	—	16.7	44.0	0.27	0.07	0.02	0.04	0.02	0.24	0.03	101.19	1901.66	82.42	
0I-3	39.6	0.02	0.04	15.6	44.1	0.31	0.09	—	0.00	0.01	0.19	0.03	99.99	1508.76	83.44	
0I-4	39.2	—	0.01	15.6	43.7	0.21	0.09	—	0.02	—	0.25	—	98.08	1940.95	83.33	
0I-5	39.1	0.02	0.05	15.8	44.3	0.16	0.09	—	0.01	0.01	0.24	0.02	99.80	1878.09	83.28	
0I-6	39.6	—	—	15.7	43.7	0.23	0.09	0.03	0.02	0.01	0.28	—	99.66	2231.70	83.25	
0I-7	39.5	—	—	15.9	44.1	0.20	0.10	0.06	0.03	—	0.27	—	100.16	2098.11	83.20	
0I-8	39.8	0.02	—	15.9	44.1	0.22	0.08	—	—	0.02	0.20	—	100.34	1532.33	83.14	
0I-9	39.7	0.05	—	16.7	43.8	0.25	0.08	—	0.05	0.01	0.20	—	100.84	1595.19	82.38	
0I-10	39.6	0.00	0.03	17.1	43.1	0.22	0.07	—	0.10	0.02	0.22	0.01	100.47	1728.78	81.84	
0I-11	39.7	—	0.03	16.7	44.0	0.22	0.06	0.01	0.05	—	0.23	0.01	101.05	1807.36	82.42	
0I-12	39.6	0.04	0.05	15.4	44.8	0.21	0.12	—	0.02	0.00	0.19	—	100.43	1493.04	83.80	
0I-13	39.9	0.04	0.04	15.9	44.4	0.27	0.09	0.02	0.07	0.02	0.25	0.05	101.05	1925.23	83.28	
0I-14	39.5	0.05	—	15.5	44.2	0.21	0.08	0.01	0.07	0.00	0.18	—	99.80	1414.46	83.53	
0I-15	39.5	—	0.01	15.5	44.5	0.24	0.13	—	—	—	0.19	0.04	100.11	1461.61	83.65	
0I-16	40.0	—	0.04	15.4	44.0	0.22	0.16	—	—	0.01	0.15	0.01	99.99	1178.71	83.58	

续表 1
Continued Table 1

深度、样品 号及点号	Σ(BY)%													总和	Ni/10 ⁻⁶	Fo
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	MnO	CaO	Na ₂ O	Cr ₂ O ₃	K ₂ O	NiO	BaO				
154 m , HS901-35																
0l-17	40.0	0.01	—	15.7	44.0	0.17	0.14	0.07	0.02	0.01	0.25	—	100.37	1972.38	83.30	
0l-18	39.0	0.03	0.04	15.8	44.1	0.29	0.14	—	—	—	0.18	—	99.58	1414.46	83.32	
0l-19	39.6	—	0.01	16.6	43.9	0.28	0.11	0.01	0.01	—	0.25	0.04	100.81	1972.38	82.48	
0l-20	39.9	0.01	—	15.5	44.5	0.20	0.17	0.05	0.07	—	0.30	0.03	100.73	2373.15	83.68	
0l-21	39.2	—	0.04	15.3	44.2	0.21	0.16	0.01	—	—	0.19	—	99.31	1485.18	83.74	
0l-22	39.8	0.01	—	15.4	44.4	0.21	0.15	0.01	0.02	—	0.16	0.03	100.19	1265.15	83.74	
0l-23	39.3	0.03	0.01	14.7	43.4	0.28	0.09	0.02	0.01	0.01	0.29	0.02	98.16	2278.85	83.99	
157 m , HS901-37																
0l-1	39.9	—	0.05	15.5	45.0	0.28	0.14	—	0.05	—	0.21	0.01	101.14	1650.20	83.76	
0l-2	39.7	0.00	—	15.0	44.6	0.20	0.14	—	0.03	0.02	0.26	—	99.95	2003.82	84.10	
0l-3-1	40.0	—	—	15.8	45.1	0.25	0.13	0.03	0.03	—	0.32	0.06	101.72	2491.02	83.61	
0l-3-2	40.0	—	—	14.9	44.8	0.22	0.13	—	0.04	—	0.10	—	100.19	801.53	84.28	
0l-3-3	40.2	0.00	0.05	14.7	44.8	0.21	0.17	0.01	0.09	0.01	0.17	—	100.41	1351.59	84.42	
0l-4	39.8	0.02	—	14.3	45.1	0.19	0.12	0.01	0.05	0.03	0.12	—	99.74	958.69	84.89	
0l-5	40.0	—	0.07	14.2	45.0	0.27	0.13	0.06	0.06	0.04	0.22	—	100.05	1705.21	84.95	
0l-6	39.7	0.01	0.03	16.0	43.5	0.29	0.10	0.01	0.03	0.01	0.30	—	99.98	2373.15	82.92	
0l-7	39.1	—	—	15.6	43.4	0.32	0.13	0.02	0.05	0.02	0.20	—	98.84	1563.76	83.25	
0l-8	39.5	—	0.00	15.6	44.1	0.20	0.12	—	0.02	—	0.31	—	99.85	2451.73	83.48	
0l-9	39.5	0.00	—	15.7	43.9	0.28	0.14	0.03	0.05	—	0.32	0.02	99.94	2475.30	83.30	
0l-10	40.2	0.01	0.01	15.7	44.9	0.29	0.14	—	—	—	0.32	0.01	101.58	2506.73	83.61	
0l-11	39.8	0.05	—	15.5	44.5	0.28	0.12	—	—	0.00	0.34	—	100.59	2703.19	83.65	
0l-12	39.8	—	0.01	15.5	44.1	0.21	0.12	—	0.12	—	0.28	—	100.14	2215.98	83.54	
160 m , HS901-39																
0l-1	39.7	0.02	—	15.9	44.0	0.19	0.09	—	0.01	—	0.18	0.00	100.09	1383.03	83.14	
0l-2	40.0	0.03	0.00	15.8	44.6	0.23	0.08	0.01	0.10	—	0.23	—	101.08	1791.65	83.40	
0l-3-1	39.8	0.03	—	14.3	45.3	0.19	0.12	—	0.05	0.01	0.14	—	99.94	1123.71	84.93	
0l-3-2	40.0	0.03	0.01	14.6	45.5	0.21	0.10	—	0.03	—	0.19	0.00	100.67	1516.61	84.73	
0l-4	39.7	0.00	0.03	15.9	44.2	0.25	0.14	0.00	0.03	0.01	0.22	—	100.48	1728.78	83.17	
0l-5	39.6	0.01	—	15.0	44.1	0.20	0.15	0.01	0.01	0.02	0.24	—	99.34	1909.52	84.00	
206 m , HS901-51																
0l-1	39.8	0.01	—	15.8	44.0	0.23	0.13	0.01	0.02	—	0.21	0.00	100.21	1626.63	83.24	
0l-2	38.3	0.03	0.04	15.9	43.0	0.20	0.18	—	1.36	—	0.24	—	99.25	1909.52	82.84	
0l-3	39.6	—	0.03	15.0	44.0	0.23	0.11	0.05	0.06	0.00	0.14	0.00	99.22	1092.28	83.92	
0l-4	38.1	—	0.00	14.8	42.4	0.21	0.15	—	1.04	—	0.18	0.01	96.89	1414.46	83.65	
0l-5	39.9	—	0.10	15.2	44.0	0.26	0.15	—	0.06	—	0.20	0.02	99.89	1540.19	83.78	
0l-6	39.0	—	0.03	15.3	43.6	0.18	0.19	0.01	0.54	0.02	0.19	—	99.06	1500.90	83.59	
0l-7	39.8	—	0.01	15.2	44.3	0.19	0.14	0.02	0.04	0.01	0.18	0.02	99.91	1390.88	83.85	
244 m , HS901-63																
0l-1-1	39.9	—	—	14.5	44.2	0.26	0.10	0.09	0.02	—	0.24	0.01	99.32	1917.38	84.44	
0l-1-2	40.0	—	—	14.3	44.4	0.26	0.13	—	0.05	—	0.19	—	99.33	1516.61	84.69	
0l-2	40.1	0.04	0.05	14.0	45.0	0.27	0.10	0.04	—	—	0.25	0.00	99.85	1988.10	85.15	
0l-3	39.8	—	—	14.8	44.4	0.16	0.16	—	—	—	0.28	0.07	99.67	2160.98	84.22	
0l-5	39.1	—	0.07	13.9	43.7	0.23	0.01	0.02	0.19	—	0.25	0.00	97.47	1972.38	84.84	
275 m , HS901-71																
0l-1	39.3	0.03	0.02	16.2	44.1	0.21	0.12	0.04	0.03	—	0.30	0.00	100.35	2381.00	82.97	
0l-2	39.6	—	0.02	16.1	43.6	0.22	0.10	—	0.04	—	0.29	—	99.97	2239.56	82.82	
0l-3	39.8	—	—	15.6	44.1	0.18	0.15	0.00	—	0.03	0.24	—	100.10	1862.37	83.48	
0l-4	39.6	—	—	15.5	43.9	0.21	0.12	—	—	0.01	0.24	—	99.58	1870.23	83.45	
0l-5	39.9	0.01	0.01	15.3	43.9	0.22	0.13	—	—	—	0.22	0.03	99.72	1720.92	83.65	
0l-6	39.3	—	0.06	15.5	44.2	0.21	0.15	0.02	0.06	—	0.21	0.06	99.77	1673.78	83.52	
0l-7	38.8	0.00	.04	14.9	43.3	0.25	0.11	—	0.16	0.01	0.21	0.04	97.82	1618.77	83.85	
318 m , HS901-84																
0l-1	39.3	.00	—	15.6	43.1	0.26	0.16	—	1.22	—	0.31	—	99.95	2412.44	83.07	
0l-2	38.9	0.02	0.03	5.6	43.0	0.25	0.08	—	0.13	—	0.21	0.03	98.25	1650.20	83.13	
0l-3	39.3	—	—	15.5	43.9	0.23	0.11	0.01	0.05	—	0.30	—	99.40	2326.00	83.49	
0l-4	39.7	0.00	—	15.0	44.7	0.21	0.15	0.02	0.04	0.02	0.27	0.02	100.13	2137.40	84.19	
0l-5	39.4	—	0.07	15.5	43.3	0.18	0.12	0.01	—	—	0.23	0.02	98.83	1823.08	83.31	
351 m , HS901-94																
0l-1	40.7	—	0.05	14.6	44.7	0.23	0.25	0.02	2.78	0.02	0.23	0.02	103.60	1830.94	84.49	
0l-2	39.1	0.01	—	15.6	43.4	0.21	0.18	0.10	0.08	0.03	0.30	0.05	99.06	2326.00	83.25	
0l-3	38.5	0.05	0.01	15.0	42.5	0.25	0.13	0.05	0.57	0.01	0.20	—	97.27	1595.19	83.44	
0l-4	39.3	0.04	0.06	16.6	42.6	0.29	0.14	—	0.01	—	0.18	—	99.22	1422.32	82.07	

注：电子探针分析在长安大学西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室测试完成。

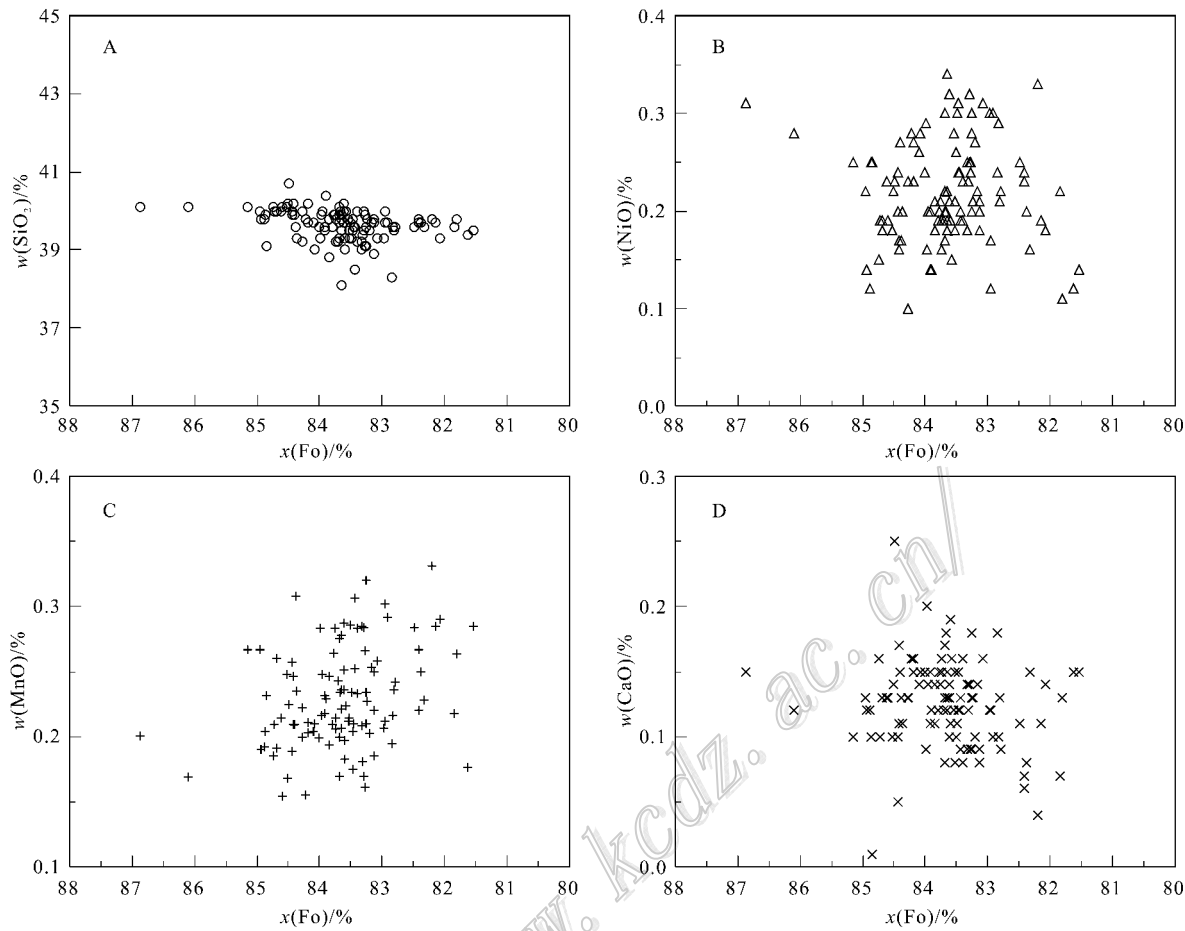


图 5 黑山含矿岩体中橄榄石成分相关关系图

Fig. 5 Compositional correlation diagrams of olivine from Heishan sulfide mineralized intrusion

地表橄榄辉长岩中橄榄石多呈较小颗粒被斜长石包裹,橄榄石存在较明显的 Fo-Ni 正相关性(图 6A)。该样品中橄榄石 Fo 变化范围最大,且 Fo 值最高(86.87)本件样品中橄榄石具有堆晶结构,颗粒新鲜,最高 Fo 值橄榄石的成分代表了岩浆演化过程中橄榄石成分的变化趋势,同时橄榄石由于被包裹而受周围的环境变化影响较小,根据其成分可以对黑山含矿岩体的母岩浆的基性程度及成分加以估算,较好约束黑山岩体的母岩浆性质。

对比研究显示,不接触金属硫化物、呈包体形式及离散状橄榄石的 Fo 与 $w(\text{Ni})$ 之间均表现出正相关性(图 6B、C),显示随着岩浆分离结晶的进行,橄榄石中 $w(\text{Ni})$ 也随着 Fo 值的减小而减小,虽受其他因素影响成分有所改变,但保留了初始结晶的特征。而不同浸染状矿石样品中与金属硫化物接触的橄榄石,由边部到中部,距硫化物由近及远的成分分析显示,此类橄榄石的 Fo 与 $w(\text{Ni})$ 呈较明显的负相关关

系(图 6D),不同于未与硫化物接触的橄榄石,其具有相对高的 $w(\text{Ni})$ 和较低的 Fo 值,显示出橄榄石与金属硫化物存在 Ni-Fe 交换。

4 讨论

4.1 橄榄石的指示意义

橄榄石作为 Mg、Fe 和 Ni 的主要寄主矿物,也是镁铁质-超镁铁质岩体中主要造岩矿物和最早结晶的硅酸盐矿物之一,蕴含着丰富的成岩成矿信息。影响橄榄石成分变化的因素主要有以下几方面:① 母岩浆成分;② 橄榄石分离结晶作用(陈列锰等, 2009);③ 橄榄石与后期隙间熔浆(硅酸盐熔浆或硫化物熔浆)再平衡作用(Duke et al., 1978; Barnes, 1986; Cawthorn et al., 1992; Li et al., 1999);④ 后期热液蚀变(Li et al., 2004)。

在岩浆分离结晶作用过程中, Mg、Fe 由于相容

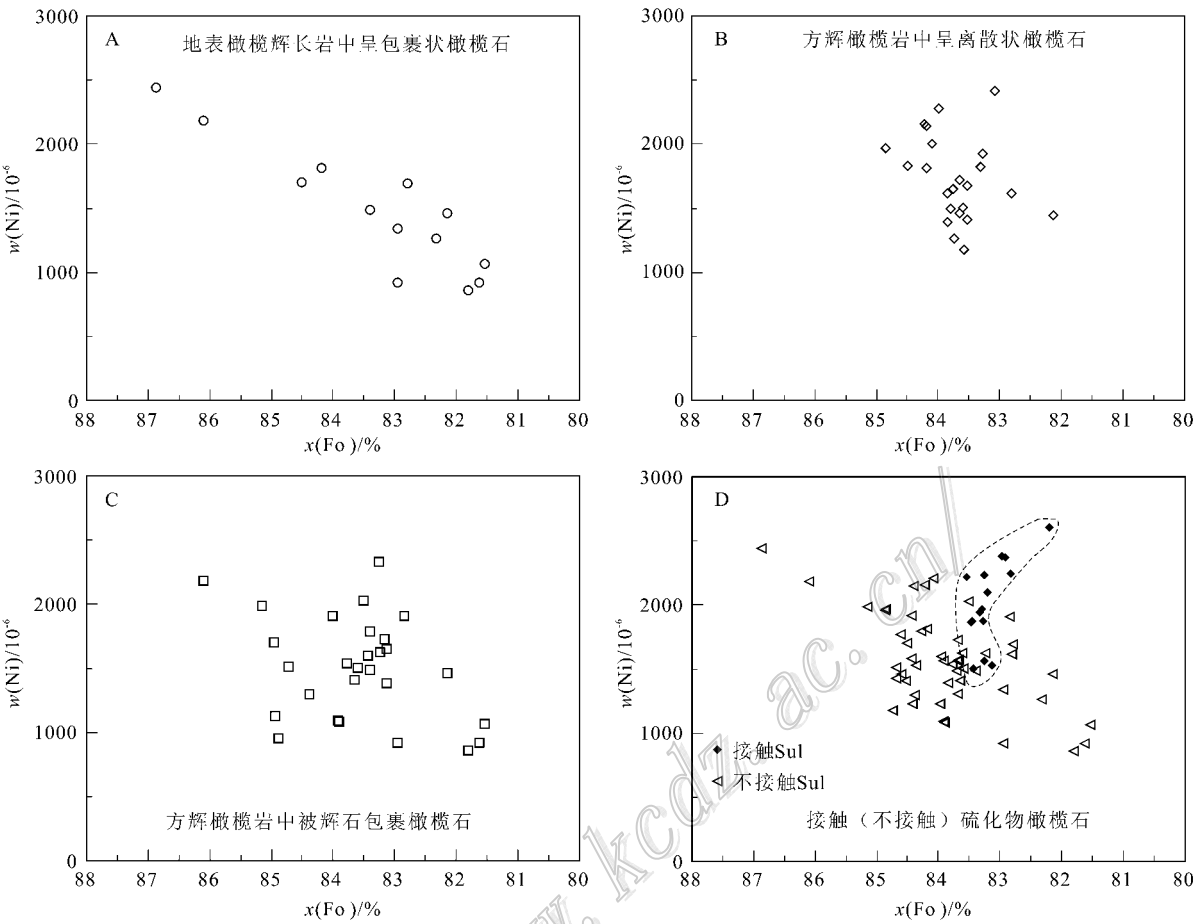


图 6 黑山含矿岩体不同类型橄榄石中 Fo-Ni 相关关系图

Fig. 6 Compositional variations of different types of olivine from Heishan intrusion

性的差异,剩余熔体和橄榄石中 FeO/MgO 比值逐渐升高,橄榄石 Fo 值逐渐降低,故 Fo 值可作为分离结晶作用的指示剂。实验得到玄武质岩浆结晶时橄榄石-岩浆 Mg-Fe 分配系数为 (Roeder et al., 1970):

$$K_D = (X_{Ol}^{Fe}/X_{Ol}^{Mg})/(X_{melt}^{Fe}/X_{melt}^{Mg}) = 0.3 \pm 0.03 \quad (1)$$

Ni²⁺ 由于具有较高的八面体晶体场稳定能使其易于类质同象取代 Mg²⁺ 由硅酸盐岩浆进入早结晶八面体配位的橄榄石晶格 (Henderson, 1984)。同时, Ni 作为岩浆中的微量元素,在岩浆演化过程中其地球化学行为遵循亨利定律:

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

相应地,在橄榄石中 Ni 含量为:

$$C_{ol}^{Ni}/C_0^{Ni} = D \times F^{(D-1)} \quad (3)$$

其中 C₀^{Ni}、C_L^{Ni}、C_{ol}^{Ni} 分别代表 Ni 在母岩浆和结晶后残余岩浆中的含量以及橄榄石中 Ni 含量; F 是初始岩浆分离结晶后残余岩浆份额 (分离结晶程度), D 为 Ni 在结晶相与熔体间的总分配系数:

$$D = X_\alpha K^{\alpha/L} + X_\beta K^{\beta/L} + \dots \quad (4)$$

式中 X_α 为结晶相中 α 矿物的百分含量; K^{α/L} 为矿物 α 对 Ni 的分配系数。同时, D 随熔体成分和温度的改变而改变 (Bedard, 2005)。

实验研究表明,玄武岩岩浆体系中, Ni 在橄榄石与硅酸盐岩浆间的分配系数 (D_{Ni^{ol/melt}}) 约为 7 (Takahashi, 1978), 其在科马提岩岩浆体系中, 橄榄石/熔体分配系数为 3~5 (Arndt, 1977), 而在硫饱和熔体中, Ni 在硫化物熔体与硅酸盐岩浆间的分配系数 (D_{Ni^{Sul/sil}}) 为 300~1 000 (Barnes et al., 1999), 通常取值为 500 (Peach et al., 1993)。

在岩浆结晶过程中橄榄石的 Ni 含量受岩浆成分和硫化物熔离的控制, 根据上述公式, 依据实验获得的分配系数及母岩浆的初始成分, 可以分不同情况对橄榄石分离结晶过程中橄榄石 Ni 含量进行定量计算, 详细计算方法参见李士彬等 (2008) 文献。图 7 中模式曲线是以 Katinniq 科马提质玄武岩原始

岩浆成分[$w(\text{MgO}) = 18.9\%$, $w(\text{FeO}) = 14.4\%$, $w(\text{Ni}) = 360 \times 10^{-6}$, Dowling et al., 1992; Barnes et al., 1982]为母岩浆进行封闭岩浆房中橄榄石分离结晶的模拟计算结果。

Ni 在硫化物熔体与硅酸盐岩浆的分配系数远远高于橄榄石与硅酸盐岩浆的分配系数,因此在 S 不饱和岩浆中, Ni 优先进入富含 Mg 的橄榄石中,其 Ni 含量取决于母岩浆 Ni 丰度及分配系数(可由式(1)(2)模拟计算)随着岩浆分离结晶作用进行,橄榄石中的 Ni 含量也随着 F_o 值的减小而减小,橄榄石的 $w(\text{Ni})$ 与 F_o 值之间存在明显的相关关系(图 7 趋势线 A [Simkin et al., 1970]),在 S 饱和岩浆中,发生硫化物熔离,则岩浆中 Ni 急剧亏损,导致结晶出的橄榄石也将亏损 Ni (图 7 趋势线 B),此时橄榄石 Ni 含量明显受硫化物熔离作用控制,其 Ni 亏损程度取决于分离结晶的橄榄石与因结晶而熔离的硫化物熔体质量比以及硫化物熔离与橄榄石的结晶顺序。所以橄榄石中 Ni 含量变化为判断岩浆何时 S 饱和及硫化物熔离程度提供了良好的示踪信息。

另外,受隙间熔浆效应,早期结晶的橄榄石 F_o 值会因与隙间硅酸盐熔浆发生 Mg-Fe 物质交换而降低(Barnes et al., 1985; Barnes, 1985; 1986; Beard, 1994), $w(\text{Ni})$ 与 F_o 值仍表现为正相关性(图 7 趋势线 C),橄榄石与隙间硫化物熔体之间发生 $w(\text{Ni})$ - Fe 物质交换会使橄榄石中的 Ni 含量升高, F_o 值降低,产生 Ni-Fo 负相关关系(Li et al., 1999; Brenan et al., 2000)(图 7 趋势线 D)。隙间硅酸盐熔浆对橄榄石成分影响程度可以通过质量平衡计算获得(Barnes, 1986)或利用熔浆热力学软件“MELTS”(Ghiorso et al., 1995)计算得到(Li et al., 2003)。金川 I 号岩体橄榄石成分的改变(陈列锰等, 2009)以及力马河辉长岩、橄榄岩和杨合武岩体橄榄石成分变化均受隙间硅酸盐岩浆不同作用程度的影响(官建祥等, 2010)。因此橄榄石的成分也是反映隙间熔浆类型及作用程度的良好示踪剂。

热液蚀变对橄榄石成分的影响表现为橄榄石的阳起石化,会使橄榄石转变为更加富 FeO 的变种,这种现象存在于金川岩体中(Li et al., 2004)。所以在利用橄榄石成分约束母岩浆成分时应尽量避免后期重结晶作用的影响。

4.2 黑山含矿岩体橄榄石成因意义

通过上述的橄榄石示踪方法,笔者对黑山岩体的母岩浆性质、岩浆演化中硫化物熔离过程进行探

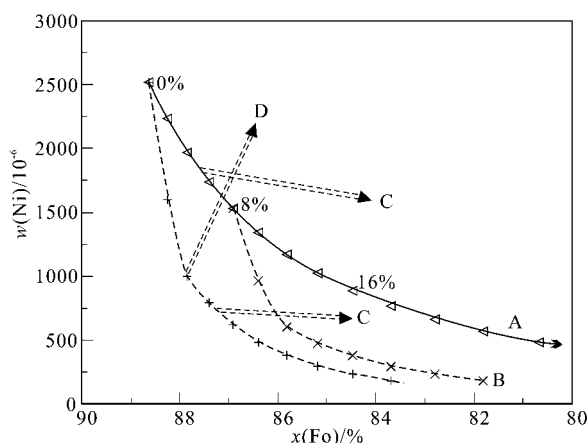


图 7 含硫化物镁铁质-超镁铁质岩体中橄榄石分离结晶中成分变化

实线 A—无硫化物熔离橄榄石分离结晶趋势线;虚线 B—有硫化物熔离橄榄石结晶趋势线(橄榄石与因结晶而熔离硫化物熔体间质量比为 30:1);C—隙间硅酸盐熔浆作用影响趋势;D—隙间硫化物熔浆作用影响趋势

Fig. 7 Compositions of fractionating olivine in sulfide-bearing mafic-ultramafic intrusion

A—Sulfide-undersaturated case (solid curve); B—Sulfide-saturated case (dashed curve); C—Tendency of trapped liquid shift; D—Tendency of sulfide liquid effect

讨。对于黑山岩体母岩浆性质,笔者采用 Irvine (1977) 和 Bickle 等(1977)的方法,将岩石样品看作早期结晶相和岩浆演化晚期液相混合产物,假定橄榄石为最早期的液相线矿物(与黑山岩体实际造岩矿物结晶顺序相符),选择堆晶相镁值含量最高(F_o 为 86.87)新鲜的橄榄石,根据质量平衡原理,确定与其达到平衡的原始岩浆中的 $w(\text{FeO})$ 和 $w(\text{MgO})$ 比值线与黑山方辉橄榄岩样品全岩分析的回归线的交叉点(全岩数据未刊),则可以确定原始岩浆中 $w(\text{FeO})$ 和 $w(\text{MgO})$ 。 $w(\text{FeO})$ 由 $\text{FeO} = 0.9\text{FeO}_t$ 来计算。其他主量元素的丰度通过其与 $w(\text{MgO})$ 回归线所获得。计算得到的黑山含矿岩体母岩浆的 $w(\text{MgO})$ 为 11.65%, $w(\text{FeO})$ 为 10.12%,属高镁玄武质岩浆,与金川、喀拉通克母岩浆相似(Chai et al., 1992; 姜常义等, 2009)。需要注意的是,由于早期橄榄石结晶后与隙间熔体之间发生了再平衡或者橄榄石内部的物质扩散造成了橄榄石 F_o 值的降低,因此,利用橄榄石成分估算得到的母岩浆的 $w(\text{MgO})$ 通常略低于其真实值。

由上可知,黑山岩体母岩浆的 $w(\text{MgO})$ 和 $w(\text{FeO})$ 分别为 11.65% 和 10.12%,假设其母岩浆

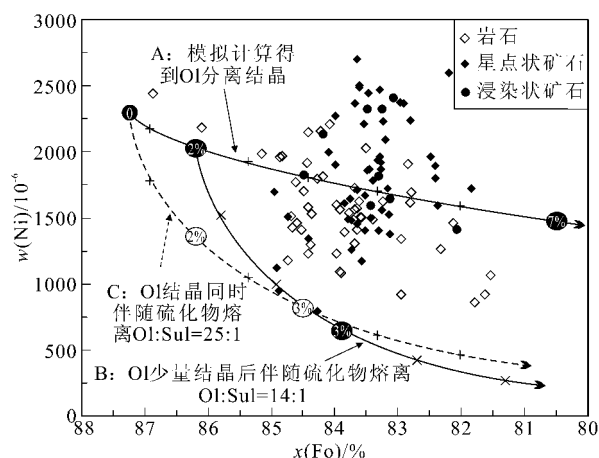


图8 黑山含矿岩体中橄榄石分离结晶模拟计算结果

Fig. 8 Modeling of olivine fractional crystallization of Heishan intrusion

具有拉班玄武质岩浆 $w(\text{Ni})$ 的平均值 330×10^{-6} (Li et al., 2004), Ni 在橄榄石与硅酸盐岩浆间的分配系数 $D_{\text{Ni}}^{\text{ol/melt}}$ 为7 (Takahashi, 1978; Li et al., 2007), 在硫化物熔体与硅酸盐岩浆间的分配系数 $D_{\text{Ni}}^{\text{Sul/sil}}$ 为500 (Peach et al., 1993), 笔者对黑山含矿岩体橄榄石成分进行系统的模拟计算, 计算结果如图8所示。

黑山岩体岩石样品中橄榄石成分随着 Fo 值降低, Ni 含量呈下降趋势, 星点状矿石样品表现不明显, 总体显示有下降趋势, 但部分矿石样品中 Fo 值与 Ni 含量呈负相关, 这在与硫化物接触的橄榄石中尤为明显(图6D), 很可能是结晶的橄榄石与隙间硫化物熔体发生了不同程度的 Ni-Fe 交换, 造成相当部分矿石样品和少部分岩石样品中橄榄石 Ni 含量落在结晶线的上方及部分出现负相关。而岩石、矿石样品中橄榄石成分均明显向右下偏移应是结晶橄榄石与隙间硅酸盐熔浆发生 Mg-Fe 物质交换所致, 并有较大程度的物质交换。

岩石样品中大部分橄榄石成分落于橄榄石分离结晶线A下方, 表明橄榄石主要是从硫饱和岩浆中结晶而出。橄榄石 Fo 值随分离结晶进行逐渐减小, 由于隙间硅酸盐熔浆和硫化物熔浆的影响, 使早期结晶的橄榄石中 Fo 减小而 Ni 含量升高, 因此模拟计算应选择最能代表橄榄石结晶时成分的橄榄石(Fo 最高, Ni 含量最低), 计算结果显示早期少量橄榄石结晶后, 橄榄石与硫化物的质量比约14:1(模拟曲线B)或始终伴随硫化物熔离, 橄榄石与硫化物的质量比约为25:1(模拟曲线C), 符合当时的结晶

条件。计算结果可见, 黑山含矿岩体橄榄石分离结晶和硫化物熔离程度分别约为7%和0.12%~0.17%(图8模拟曲线B,C), 根据伴随硫化物熔离橄榄石分离结晶线, 结合橄榄石的成分, 黑山岩体深部岩浆房中橄榄石结晶程度约小于3%。对于在结晶线附近的橄榄石, 由于其分离结晶时硫化物量很少, 主要受母岩浆分离结晶控制, 橄榄石与硫化物的质量比很高, 随着硫化物熔离, 橄榄石中 Ni 也急剧亏损。

5 结论

(1) 通过定量反演, 得到黑山含矿岩体原始岩浆属高镁玄武质岩浆, $w(\text{MgO})$ 、 $w(\text{FeO})$ 分别为11.65%和10.12%;

(2) 对橄榄石分离结晶过程的模拟, 结合橄榄石成分, 判断黑山含矿岩体原始岩浆演化过程中, 橄榄石结晶伴随硫化物熔离或少量(2%)结晶后出现硫化物熔离, 熔离程度约为0.12%~0.17%。黑山岩体深部岩浆房中橄榄石分离结晶程度小于3%, 橄榄石与硫化物最小质量比约14:1。

(3) 橄榄石成分受隙间熔浆(硅酸盐及硫化物熔浆)作用影响明显, 隙间硅酸盐熔浆作用导致单个样品中橄榄石 Fo 值变化显著, 硫化物熔浆作用导致部分橄榄石 Ni 含量明显升高。

参考文献/References

- 陈列锰, 宋谢炎, Danyushevsky L V, 肖加飞, 李士彬, 官建祥. 2009. 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, 25(12): 3369-3378.
- 官建祥, 宋谢炎, Danyushevsky L V, 陈列锰, 聂晓勇. 2010. 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, 35(2): 224-234.
- 姜常义, 夏明哲, 钱壮志, 余旭, 卢荣辉, 郭芳放. 2009. 新疆喀拉通克镁铁质岩体群的岩石成因研究[J]. 岩石学报, 25(4): 749-764.
- 李士彬, 胡瑞忠, 宋谢炎, 陈列锰, 沈能平. 2008. 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, 27(2): 164-152.
- 邵小阳, 孙柏年, 李相传, 何文龙, 李小明, 吕晓东, 杨永胜. 2010. 甘肃北山黑山铜镍矿成矿地质特征及成因探讨[J]. 甘肃地质, 19(3): 19-25.
- 汤中立, 钱壮志, 姜常义, 闫海卿, 焦建刚, 刘民武, 徐章华, 徐刚, 王亚磊. 2011. 岩浆硫化物矿床勘查研究的趋势与小岩体成矿系统[J]. 地球科学与环境学报, 33(1): 1-9.

- 颀 炜, 宋谢炎, 邓宇峰, 等. 2011. 甘肃黑山含铜镍硫化物岩体岩浆源区特征及构造背景探讨[J]. 矿物学报, 31(增刊): 351-352.
- 杨建国, 王 磊, 王小红, 谢 燮, 齐正广. 2012. 甘肃北山地区黑山铜镍矿化基性-超基性杂岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. 地质通报, 31(2/3): 448-454.
- Arndt N T. 1977. The partitioning of nickel between olivine and ultrabasic and basic komatiite liquids, Carnegie Inst[J]. Washington Year Book, 76 : 553-557.
- Barnes S J, Coats C J A and Naldrett A J. 1982. Petrogenesis of a Proterozoic nickel sulfide-komatiite association: The Katiniq Sill, Ungava, Quebec[J]. Econ. Geol., 77 : 413-429.
- Barnes S J. 1985. The petrography and geochemistry of komatiite flows from the Abitibi Greenstone Belt and a model for their formation[J]. Lithos, 18 : 241-270.
- Barnes S J and Naldrett A J. 1985. Geochemistry of J-M (Howland) Reef of the Stillwater Complex, Minneapolis Adit area: I, sulfide chemistry and sulfide-olivine equilibrium[J]. Econ. Geol., 80(3): 627-645.
- Barnes S J. 1986. The effect of trapped liquid crystallization on cumulus mineral compositions in layered intrusions[J]. Contrib. Mineral. Petrol., 93 : 524-531.
- Barnes S J and Maier W D. 1999. The fractionation of Ni, Cu and the noble metals in silicate and sulphide liquids[A]. In: Keays P R, Lshier C M, Lightfoot P C and Farrow C E G, eds. Dynamic processes in magmatic ore deposits and their application to mineral exploration[C]. Geological Association of Canada Short Course, 13 : 69-106.
- Beard J H. 1994. A procedure for calculating the equilibrium distribution of trace element among the minerals of cumulate rocks, and the concentration of trace elements in the coexisting liquids[J]. Chem. Geol., 118(1-4): 143-153.
- Bedard J H. 2005. Partitioning coefficients between olivine and silicate melts[J]. Lithos, 83 : 394-419.
- Bickle M J, Ford C E and Nisbet E G. 1977. The petrogenesis of peridotitic komatiites: Evidence from high-pressure melting experiments[J]. Earth and Planetary Science Letters, 37(1): 97-106.
- Brenan J M and Caciagli N C. 2000. Fe-Ni exchange between olivine and sulphide liquid: Implications for oxygen barometry in sulphide saturated magmas[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 64(2): 307-320.
- Cawthorn R G, Sander, B K and Jones I M. 1992. Evidence for the trapped liquid shift effect in the Mount Ayliff intrusion, South Africa[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 111(2): 194-202.
- Chai G and Naldrett A J. 1992. Petrology and geochemistry of Jinchuan ultramafic intrusion: Cumulate of a high-Mg basaltic magma[J]. J. Petrol., 33 : 277-303.
- Dowling S E and Hill R E T. 1992. The distribution of PGE in fractionated Archaean komatiites, western and central ultramafic units, Mt. Keith region, Western Australia[J]. Australian Journal of Earth Sciences, 39 : 349-3631.
- Duke J M and Naldrett A J 1978. A numerical model of the fractionation of olivine and molten sulfide from komatiite magma[J]. Earth and Planetary Science Letters, 39(2): 255-266.
- Ghiorso M S and Sack R O. 1995. Chemical mass transfer in magmatic processes IV: A revised and internally consistent thermodynamic model for the interpolation and extrapolation of liquidus-solidus equilibria in magmatic systems at elevated temperatures and pressure[J]. Contrib. Mineral. Petrol., 119 : 197-212.
- Henderson P. 1984. General geochemical properties and abundance of the rare earth element[A]. Henderson P, ed. Rare earth element geochemistry[C]. Amsterdam: Elsevier Science Publishers. 1-321.
- Irvine T N. 1977. Definition of primitive liquid compositions for basic magma[J]. Washington: Carnegie Inst. Yearbook. 76 : 454-461.
- Li C and Naldrett A J. 1999. Geology and petrology of Voisey's Bay intrusion: Reaction of olivine with sulfide and silicate liquids[J]. Lithos, 47 : 1-31.
- Li C, Ripley E M and Naldrett A J. 2003. Composition variations of olivine and sulfur isotopes in the Noril'sk and Talnakh intrusion, Siberia: Implication for ore-forming processes in dynamic magma conduits[J]. Econ. Geol., 98(1): 69-86.
- Li C, Xu Z H, De Waal S A, Ripley E M and Maier W D. 2004. Compositional variations of olivine from the Jinchuan Ni-Cu sulfide deposit, western China: Implications for ore genesis[J]. Mineralium Deposita, 39 : 159-172.
- Li C, Naldrett A J and Ripley E M. 2007. Controls on the Fe and Ni contents of olivine in sulfide-bearing mafic-ultramafic intrusions: Principles, models and examples from Voisey's Bay[J]. Earth Science Frontiers, 14(5): 177-185.
- Peach C L and Mathez E A. 1993. Sulfide melt-silicate melt distribution coefficients for nickel and iron and implication for the distribution of other chalcophile elements[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 57(13): 3013-3021.
- Roeder P L and Emslie R F. 1970. Olivine-liquid equilibrium[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 29 : 275-289.
- Simkin T and Smith J V. 1970. Minor element distribution in olivine[J]. Journal of Geology, 78 : 304-325.
- Takahashi E. 1978. Partitioning of Ni^{2+} , Co^{2+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} , and Mg^{2+} between olivine and silicate melts: Compositional dependence of partition coefficient[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 42(12): 1829-1844.
- Xie W, Song X Y, Deng Y F, Wang Y S, Ba D H, Zheng W Q and Li X B. 2012. Geochemistry and petrogenetic implications of a Late Devonian mafic-ultramafic intrusion at the southern margin of the Central Asian Orogenic Belt[J]. Lithos, 144-145 : 209-230.