

新疆北山罗东岩体橄榄石特征对岩浆演化和硫化物熔离的指示

孙赫¹, 秦克章², 唐冬梅², 肖庆华², 苏本勋², 卢鸿飞³

1. 中国冶金地质总局矿产资源研究院, 北京 100025
2. 中国科学院地质与地球物理研究所; 中国科学院矿产资源研究重点实验室, 北京 100029
3. 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第六地质大队, 新疆哈密 839000

摘要 罗东岩体是新疆北山地区沿北山裂谷带的一个典型镁铁质—超镁铁质岩体, 研究表明坡北杂岩带与东天山杂岩带的产出时代具有时间上的耦合性, 并且其大地构造产出背景与东天山镁铁质—超镁铁质杂岩也具有一定的关系, 可能与碰撞背景下幔源物质的上侵有关, 并且受到俯冲板片的影响。该岩体具有较完整的岩相分异, 包括橄榄岩、辉石岩、辉长岩。镁橄榄石指数 Fo 值为 81~88, 属于贵橄榄石, 橄榄石具有环带结构, 从橄榄石边缘到中心, Mg 逐渐升高, 说明橄榄石在岩浆演化过程中发生了与残余岩浆的交换反应。通过主量元素反演, 得到原始岩浆中 $w(\text{MgO})=8\%$ 、 $w(\text{FeO})=6\%$, 属于拉斑玄武岩。通过橄榄石的定量模拟计算, 显示罗东岩体的橄榄石为正常岩浆演化的产物, 橄榄石中 Ni 的质量分数没有发生明显亏损, 这些证据表明岩浆可能没有经历过显著的硫化物熔离作用。

关键词 罗东岩体; 橄榄石; 岩浆演化; 定量模拟

中图分类号 P5

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)18-0021-06

Olivine Characteristics' Implication for Magmatic Evolution and Sulfide Segregation of Luodong Complex in Beishan Area, Xinjiang

SUN He¹, QIN Kezhang², TANG Dongmei², XIAO Qinghua², SU Benxun², LU Hongfei³

1. Institute of Mineral Resources Research, China Metallurgical Geology Bureau, Beijing 100025, China
2. Key Laboratory of Mineral Resources; Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China
3. No. 6 Geological Division, Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources, Hami 839000, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China

Abstract The Luodong complex is one of the typical mafic-ultramafic intrusions along Beishan Fault in Beishan area of Xinjiang and its generation shows a temporal consistency with the mafic-ultramafic complex belt in Eastern Tianshan, another typical mafic-ultramafic complex belt in Xinjiang well known for its rich deposits. Both the belts may share a similar tectonic background, related to intrusions of mantle melts during stretching after collision and the origin is affected by diving plates. Luodong intrusion consists of peridotite, lherzolite and gabbro. Olivines mainly consist of forsterites, with Fo from 81 to 88. Halo rings are characteristic of olivines, showing increasing trend of Mg moving from the marginal to central parts, which represents a reaction between the crystallized olivines and silicate melts. Based on calculations, the main composition of the primitive magma is simulated to obtain $w(\text{MgO})=8\%$, $w(\text{FeO})=6\%$, with a tholeiitic basalt composition. Quantitative simulated calculation implies that olivines are the products of magmatic evolution, without markable evidence of massive sulfide segregation.

Keywords Luodong complex; olivine; magmatic evolution; quantitative simulation

收稿日期: 2010-06-23; 修回日期: 2010-08-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(40772066); 《科技导报》博士生创新研究资助计划项目(kjdb20090101-2)

作者简介: 孙赫, 博士, 研究方向为岩浆成矿作用及其成矿潜力评价, 电子信箱: sunhe218@gmail.com

0 引言

新疆东部分布有众多镁铁质—超镁铁质岩体,大致可分为5条带:①东天山康古尔—黄山杂岩带(觉罗塔格构造带),分布有一系列铜镍硫化物矿床,如香山、黄山、黄山东、黄山南、葫芦、图拉尔根等;②阿尔泰山南缘额尔齐斯断裂发育的镁铁质—超镁铁质杂岩群,含有喀拉通克铜镍硫化物矿床;③西南天山中的菁布拉克铜镍硫化物矿床;④沙泉子断裂南缘位于中天山地块中的镁铁质—超镁铁质杂岩群,并发育一些铜镍矿化,如白石泉铜镍矿、天宇铜镍矿、石西岩体等;⑤北山地区产于中元古界长城系中的镁铁质—超镁铁质杂岩群和铜镍矿化岩体,如坡一岩体、坡十岩体、罗东岩体、红石山岩体、漩涡岭岩体、笔架山岩体。新疆镁铁质—超镁铁质杂岩分布如图1所示,图中II₁表示西准噶尔古生代弧盆系,III₁表示觉罗塔格石炭纪岩浆型被动陆缘,III₂表示巴仑台—星星峡中间地块,III₃南天山非岩浆型被动陆缘,III₄表示塔里木地块。

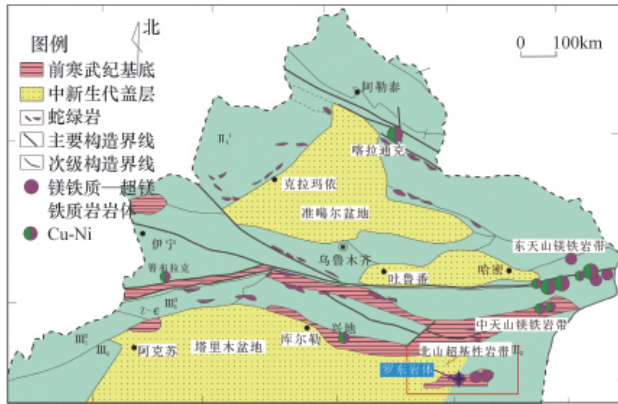


图1 新疆镁铁质—超镁铁质杂岩分布示意图

Fig. 1 Locations of mafic-ultramafic complex belts in Xinjiang

罗东岩体位于坡北镁铁质—超镁铁质岩带,是坡北杂岩带上的一个典型杂岩体。这条杂岩带位于塔里木板块东北部北山裂谷带内,长约16km,宽8km,目前已发现镁铁质—超镁铁质杂岩体20余个,是新疆重要的铜镍成矿远景区之一。岩体侵位于下石炭统红柳园组(C_{1h}),规模较大、分异良好。对该杂岩带上的坡北岩体已有过一些研究,姜常义等^[1]通过锆石U-Pb定年得到坡北岩体的成岩年龄为(274±4)Ma,地球化学证据认为坡北岩体源于亏损地幔的部分熔融形成,在晚古生代可能遭受了削减板片的影响。李华芹等^[2]通过辉长岩样品中锆石SHRIMP U-Pb年龄确定其成岩年龄为(278±2)Ma,认为坡北铜镍矿区的成岩成矿作用发生于晚石炭世—早二叠世,是后碰撞构造背景下幔源岩浆上侵的产物。韩春明测得罗东岩体的锆石U-Pb年龄为283Ma,罗东岩体与其他岩体成岩时代具有一致性。这些研究结果表明,坡北杂岩带与东天山杂岩带的产出时代具有时间上的耦合性,并且其大地构

造产出背景与东天山杂岩也带具有一定的关系,可能与碰撞背景下幔源物质的上侵有关,并且受到俯冲板片的影响。

罗东岩体在大地构造位置上不同于东天山地区的康古尔—黄山杂岩带和中天山白石泉杂岩带,但成矿时代和上述杂岩体具有一致性,岩浆起源也有相似性。近些年长期的钻探验证未取得突破,罗东岩体的岩浆演化过程和硫化物成矿潜力成为研究的重点问题。众所周知,橄榄石是玄武质岩浆演化早期的结晶矿物,Ni对于橄榄石具有强相容性,并且当硫化物熔离之后,Ni又作为亲铜元素进入硫化物液相,因此橄榄石成为探讨岩浆演化和硫化物熔离的一个重要窗口^[3-6]。本文以罗东岩体的橄榄石矿物特征为窗口,通过其成分及岩浆演化特征来分析岩浆演化和硫化物熔离过程,进而判断罗东岩体的成矿潜力,为进一步勘探提供一定的理论依据。

1 罗东岩体地质概况

罗东岩体区域地层出露较全,从中下元古界到新生界地层均有,以中下元古界和石炭系为主,次为震旦系、寒武系、奥陶系、二叠系。罗东岩体主要侵位于下石炭统红柳园组,主要为砾岩、砂砾岩、杂砂岩、石英角斑岩、流纹岩、英安岩、安山岩及凝灰岩,为偏双峰式分异的火山—陆源碎屑岩建造,其中未发现含有明显的硫化物,北侧侵位于花岗片麻岩。

罗东镁铁质—超镁铁质杂岩体呈北东走向,长约2km,宽约1.2km,面积2.4km²。岩体平面形态为眼球状(图2)。主要岩相包括:①橄榄岩相,为超基性岩相的主要组成部分,呈岩墙状、岩脉状分布在岩体的偏南部位,地表出露最大宽度100m,长度大于1km,局部分异有斜长橄榄岩、橄榄辉石岩、辉石橄榄岩;②辉石岩相,位于岩体西部,长约100m,宽约20m,近南北

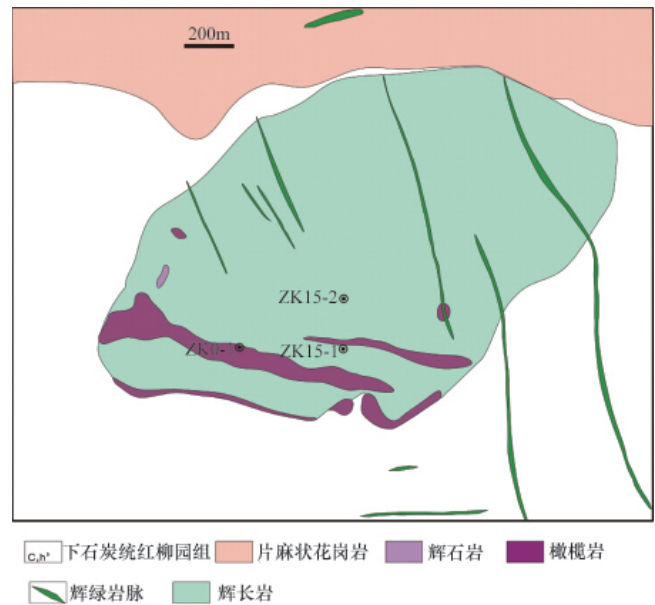
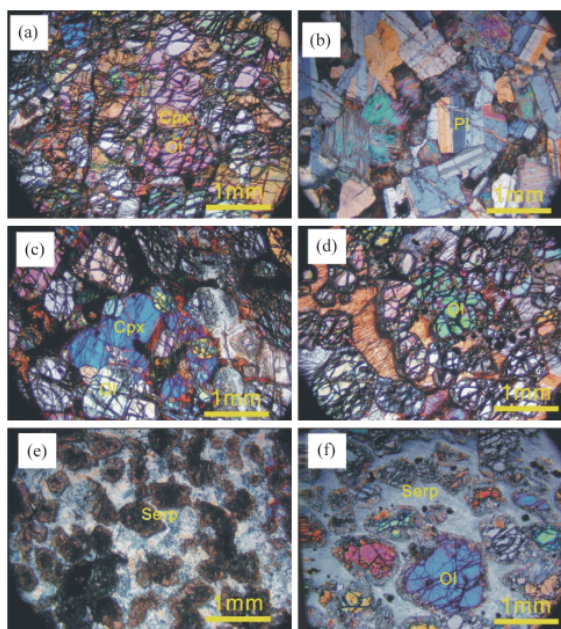


图2 新疆北山罗东岩体地质图

Fig. 2 Geological map of Luodong intrusion of Beishan of Xinjiang

向产出;③ 辉长岩相,是组成罗东基性—超基性杂岩体的主要岩相,长约2km,宽约1km,局部穿插有辉绿岩脉、正长岩脉。

罗东岩体各岩相显微镜下特征如图3所示,其中,(a)为橄辉岩,橄榄石被单斜辉石包裹,矿物新鲜;(b)为中粒辉长岩,长石新鲜,辉石发生纤闪石化;(c)为橄橄榄岩,橄榄石紧密堆积,十分新鲜;(d)为橄辉岩,橄榄石被单斜辉石包裹,矿物新鲜;(e)为橄辉岩,橄榄石、辉石均发生强蛇纹石化;(f)为橄辉岩,橄榄石残留新鲜的核部。罗东岩体岩相镜下特征如下:各岩相整体比较新鲜,局部岩相出现较强蚀变;罗东岩体辉长岩蚀变较强,主要为辉石发生纤闪石化,长石未发生蚀变;橄橄榄岩蚀变相对较弱,局部橄橄榄岩发生蛇纹石化,橄橄榄岩十分新鲜,具有橄橄榄石堆晶结构;从矿物生成顺序来看,橄橄榄石先于辉石和长石结晶。



Ol—橄橄榄石;Pl—斜长石;Cpx—单斜辉石;Serp—蛇纹石化

图3 罗东岩体岩相镜下特征(正交偏光)

Fig. 3 Microscopic images of Luodong intrusion (cross polarizer)

2 罗东岩体的橄橄榄石矿物学特征

采用中国科学院地质与地球物理研究所研制的JXA-8100型电子探针对罗东造岩矿物成分进行测定,采样主要针对含新鲜橄橄榄石的岩石样品,均选较为新鲜的没有蚀变的晶体做分析。测试加速电压20kV,束电流20nA,束斑直径5 μ m,测试精度符合要求。

罗东岩体的橄橄榄石做电子探针分析结果如表1所示,罗东岩体橄橄榄石Fo值为81~88,均属于贵橄橄榄石。由图4可以看出,橄橄榄石中MgO的质量分数与FeO的质量分数负相关,与Ni的质量分数正相关。在岩浆演化过程中,Ni属于相容元素进入到橄橄榄石中,随着橄橄榄石的结晶分异,岩浆中Ni的质量分数逐渐降低,晚结晶的橄橄榄石中Ni的质量分数也会逐渐

降低,说明了橄橄榄石的结晶分异对岩浆中Ni的质量分数的控制作用。橄橄榄石中w(CaO)较低,均在0.1%之下,表明罗东岩体的橄橄榄石不是地幔残留体,与地幔柱也可能无关,因为来自地幔柱的岩浆形成的橄橄榄石的w(CaO)一般在0.2%以上^[7-8]。

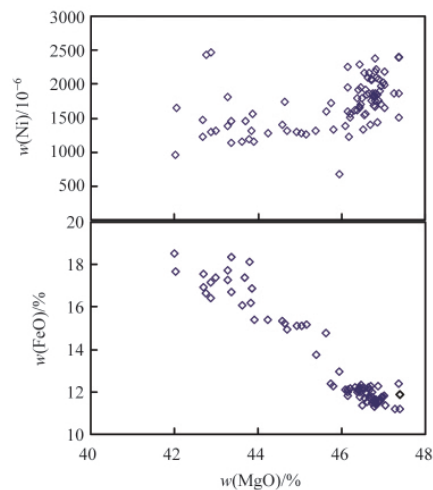


图4 橄橄榄石中w(FeO)、w(Ni)与w(MgO)相关图

Fig. 4 Plot of covariation of w(MgO) to w(FeO) and w(Ni) in olivine

罗东岩体中橄橄榄石的另一特征是发育明显的反应边现象,在背散射图像下表现为橄橄榄石具有环带状的幔边结构(图5)。从边部到核部的成分特征如表2所示,从橄橄榄石边部到核部,Fo值逐渐升高,Ni的质量分数也逐渐升高(图6),说明橄橄榄石在岩浆演化过程中与残余岩浆发生了交换反应,晚期结晶的橄橄榄石具有低镁低镍的特征,也反应出橄橄榄石在结晶之后与残余岩浆发生交换反应,形成反应边。

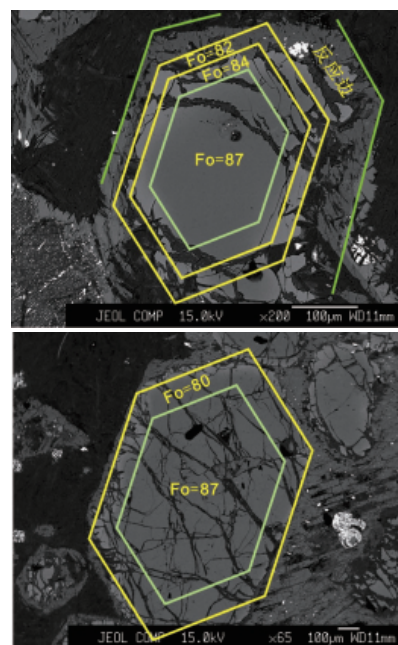


图5 罗东岩体橄橄榄石的环带状结构的背散射图像

Fig. 5 Backscattered image of annular structure of olivine in Luodong intrusion

表 1 罗东岩体橄榄石电子探针成分
Table 1 Composition of olivine of Luodong intrusions

编号和岩类型	w(SiO ₂)/%	w(TiO ₂)/%	w(Cr ₂ O ₃)/%	w(MgO)/%	w(CaO)/%	w(MnO)/%	w(FeO)/%	总计/%	w(Ni)/10 ⁻⁶	Fo 值
01-474 橄榄岩	41.13	0.06	0	47.38	0.06	0.16	11.86	101	2389.6	87.8
	39.53	0.07	0.03	46.81	0.02	0.16	11.5	98.4	2386.5	88
	38.26	0.04	0.03	46.42	0.09	0.22	11.75	97	2291	87.7
	38.75	0.02	0.02	46.16	0.09	0.18	11.8	97.3	2261.6	87.6
	37.75	0.04	0.02	46.66	0.06	0.23	11.69	96.7	2163.3	87.8
	39.66	0.05	0.06	46.55	0.09	0.21	11.71	98.5	2160	87.7
	40.08	0.06	0.07	46.83	0.03	0.17	11.46	98.9	2103.2	88
	40.32	0.07	0.08	46.89	0.05	0.2	11.54	99.3	2080.8	88
250-1 橄榄岩	38.68	0.06	0.05	46.73	0.06	0.21	11.5	97.5	2072.2	88
	40.38	0.07	0.03	46.71	0.06	0.11	11.96	99.5	2051.7	87.5
	39.88	0.06	0.01	47	0.06	0.1	11.77	99.1	2021.9	87.8
	40.44	0.07	0.06	47.02	0.08	0.23	11.8	100	1982.6	87.8
	40.2	0.07	0.04	46.95	0.06	0.13	11.68	99.3	1972	87.9
	40.86	0.06	0.03	46.41	0.03	0.09	12.13	99.9	1924.4	87.3
	40.8	0.06	0.03	46.57	0.04	0.15	11.94	99.8	1920.9	87.5
	40.54	0.06	0.08	46.93	0.06	0.21	11.61	99.7	1901.3	87.9
40.44	0.07	0.06	46.81	0.06	0.16	11.51	99.2	1872.4	88	
LD-1 橄榄岩	40.16	0.07	0.04	46.76	0.04	0.19	11.52	99	1870.6	88
	41.2	0.05	0.02	47.38	0.06	0.16	11.17	100.3	1863.2	88.4
	40.86	0.02	0.01	47.27	0.05	0.15	11.18	99.8	1860	88.4
	40.72	0.07	0.04	46.8	0.05	0.17	11.62	99.6	1856.5	87.9
	40.11	0.05	0.03	46.61	0.06	0.19	11.56	98.8	1851	87.9
	40.6	0.07	0.06	46.86	0.05	0.15	11.56	99.5	1837.8	87.9
	40.6	0.07	0.06	46.86	0.05	0.15	11.56	99.5	1837.8	87.9
	40.18	0.07	0.04	46.8	0.05	0.14	11.47	99	1834.1	88
LD-2 橄辉岩	39.59	0.06	0.06	46.78	0.04	0.16	11.29	98.2	1823.9	88.2
	39.59	0.06	0.06	46.78	0.04	0.16	11.29	98.2	1823.9	88.2
	40.74	0.06	0.01	46.76	0.05	0.16	11.7	99.7	1802.3	87.8
	39.49	0.02	0.04	46.48	0.08	0.18	11.36	97.9	1784.6	88
	40.5	0.07	0.05	46.89	0.04	0.14	11.57	99.5	1764.9	87.9
	39.03	0	0.02	43.86	0.04	0.23	16.86	100.28	1555.9	82.4
	41.71	0	0.03	43.69	0.08	0.29	17.37	103.4	1453.7	81.9
	40.16	0.01	0.01	42.86	0.02	0.17	16.42	99.97	2459.6	82.4
	39.68	0.03	0	43.37	0.03	0.26	18.38	101.94	1453.7	80.9
	41.45	0	0.02	46.64	0.03	0.15	12.2	100.75	2098.1	87.3
LD-3 橄辉岩	40.91	0.04	0.02	46.45	0.03	0.15	12.34	100.2	1956.7	87.1
	40.81	0.02	0	46.14	0.02	0.17	12.09	99.5	1948.8	87.3
	41.03	0.05	0.04	46.4	0.04	0.21	12.18	100.2	1909.5	87.3
	41.36	0.02	0.01	46.66	0.04	0.22	12.12	100.7	1870.2	87.4
	41.52	0.03	0.01	46.46	0.11	0.18	12.16	100.7	1705.2	87.3
	39.71	0.05	0.02	46.86	0.04	0.17	12.26	99.3	1445.9	87.3
	41.13	0.02	0	46.68	0	0.17	12.3	100.5	1398.7	87.2
	40.91	0.02	0.01	46.09	0.06	0.16	12.08	99.5	1390.9	87.3
	41.31	0	0	45.8	0.03	0.17	12.28	99.8	1335.9	87
	40.47	0.04	0.01	42.87	0.02	0.25	17.18	101	1304.4	81.8
LD-4 橄辉岩	41.71	0.03	0	46.19	0.08	0.21	12.17	100.5	1233.7	87.2
	41.92	0.04	0.01	42.69	0.04	0.23	17.56	102.6	1233.7	81.4
	40.64	0.01	0	43.79	0.07	0.30	18.11	103.1	1194.4	81.3
	40.07	0.04	0	42.01	0.02	0.33	18.53	101.1	966.5	80.3
	40.8	0.03	0	43.35	0.02	0.26	16.73	101.4	1141.4	82.3
	40.59	0.02	0	44.25	0.03	0.23	15.37	100.6	1273	83.8
	41.52	0.03	0.01	43.83	0.04	0.23	16.17	102	1311.3	83
	40.73	0.02	0.01	45.05	0.07	0.24	15.13	101.4	1279.9	84.3
	40.74	0.02	0	43.63	0.02	0.25	16.07	100.9	1146.3	83

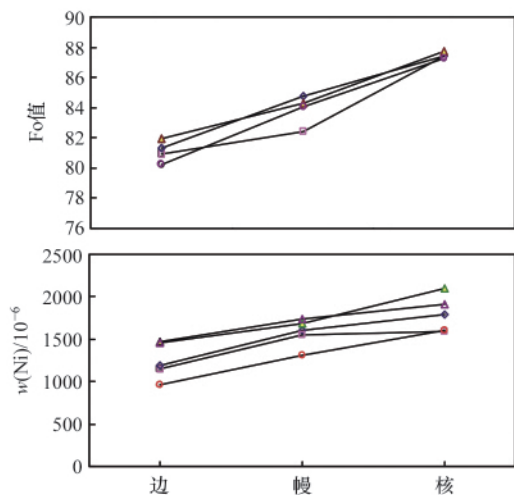


图 6 环带橄榄石的成分变化

Fig. 6 Compositional transition of the annular olivine

表 2 橄榄石环带的含量变化

Table 2 Compositional transition of the annular olivine

		边	幔	核
Ol-1	Fo 值	81.3	84.8	87.4
	w(Ni)/10 ⁻⁶	1194.4	1603.1	1791.6
Ol-2	Fo 值	80.9	82.4	87.4
	w(Ni)/10 ⁻⁶	1153.7	1555.9	1595.2
Ol-3	Fo 值	81.9	84.3	87.7
	w(Ni)/10 ⁻⁶	1453.7	1689.1	2098.1
Ol-4	Fo 值	80.3	81.8	87.2
	w(Ni)/10 ⁻⁶	966.5	1304.4	1610.9
Ol-5	Fo 值	80.2	84.1	87.3
	w(Ni)/10 ⁻⁶	1469.5	1736.6	1909.5

表 3 罗东岩体各岩相的化学成分

Table 3 Compositions of major components of Luodong intrusion

样品编号	LD-4	LD-6	LD-8	LD01-55	LD01-270	LD01-285	LD01-380	LD01-485	LD-8
岩石名称	辉长岩	辉长岩	辉长岩	橄榄岩	辉长岩	细粒橄辉岩	细晶橄辉岩	含长橄辉岩	辉长闪长岩
化学成分	SiO ₂	51.66	46.61	51.74	36.75	46.61	39.83	39.32	57.24
	TiO ₂	0.40	0.75	0.50	0.27	0.30	0.45	0.22	1.21
	Al ₂ O ₃	16.37	18.57	17.04	4.79	19.43	5.99	4.81	15.30
	Fe ₂ O ₃	5.20	6.80	4.73	8.25	5.45	11.46	10.75	11.93
	MnO	0.10	0.10	0.09	0.12	0.08	0.15	0.14	0.15
	MgO	10.99	10.59	9.80	34.58	12.36	33.99	35.16	26.85
	CaO	10.81	9.82	11.58	1.52	9.63	2.84	2.89	2.20
	Na ₂ O	2.25	3.68	2.31	0.54	2.25	1.02	0.46	1.60
	K ₂ O	0.06	0.24	0.10	0.12	0.06	0.08	0.04	0.04
	P ₂ O ₅	0.03	0.08	0.03	0.03	0.02	0.07	0.03	0.04
	LOI	1.45	2.43	1.57	12.27	3.22	3.66	5.45	8.38
	总计	99.32	99.67	99.49	99.25	99.40	99.54	99.27	99.34
	FeO	4.19	5.12	3.80	2.56	4.56	7.90	7.47	7.15

3 原始岩浆模拟与岩浆演化

3.1 原始岩浆反演

岩浆硫化物矿床的形成过程同时也是镁铁质岩浆演化过程，可以通过罗东岩体的岩浆演化探讨硫化物的熔离过程。如果将岩石样品看作早期结晶相和岩浆演化晚期液相混合的产物，利用质量平衡可以定量估算原始岩浆的成分。玄武质岩浆发生结晶分异，橄榄石作为早期结晶相最先从熔体相中分异出来，因为 Mg 的相容性比 Fe 强，因此最先结晶的橄榄石具有最高的 Fo 值，在岩浆演化的晚期则形成贫 Mg 的液相，形成辉长质岩石。选取 Fo 值最高的橄榄石 (Fo=88) 确定最初原始岩浆中 w(FeO) 和 w(MgO) 的比值，由质量平衡原理，富橄榄石岩相与辉长岩相的拟合线与原始岩浆的 w(MgO)-w(FeO) 线相交则可以确定原始岩浆中的 w(FeO) 和 w(MgO)^[9]。

罗东岩体各个岩相的主量元素数据由中国科学院地质与地球物理研究所主量元素分析室利用 XRF 方法所得。具体测试方法如下：称取 0.6g 样品，然后加入 6g 四硼酸锂助熔剂，高温熔融制成玻璃片，最后在 Shimadzu XRF-1700 上采用外标法测定氧化物含量。测试精度满足要求，测试成分如表 4 所示。对于橄榄岩而言几乎所有的 Fe₂O₃ 都是由 FeO 氧化而来，因此图中所投数据均将 Fe₂O₃ 换算成 FeO。此外为避免烧失量过大的影响，所有 FeO 和 MgO 数据均为扣除烧失量后换算成的百分比含量。

橄榄石的成分区域与橄榄石的演化线一致 (图 7)，说明岩体的橄榄石是原始岩浆逐渐结晶分异的产物。橄榄石、橄榄岩和辉长岩的成分近乎在一条直线上，说明罗东岩体的辉长岩是原始岩浆发生橄榄石结晶分异的产物。模拟计算得出罗东岩体原始岩浆中 w(MgO)=8%，w(FeO)=6%。

3.2 橄榄石对岩浆演化的指示

岩浆铜镍矿的形成过程伴随有原始岩浆的结晶分异过

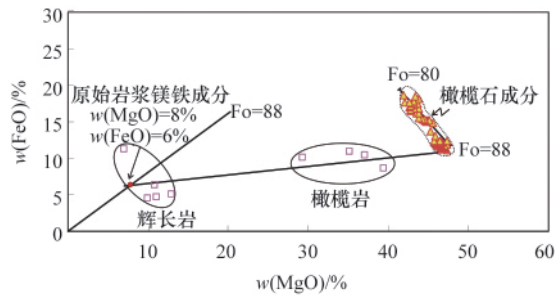


图7 罗东岩体原始岩浆成分图

Fig. 7 Primitive magma calculation of Luodong intrusion

程, Ni 作为岩浆中的微量元素随着橄榄石的结晶, 受元素在橄榄石和岩浆中的分配系数 $D_{Ni}^{O/melt}$ 控制进入橄榄石中, 因此橄榄石中 Ni 的质量分数会随着结晶分异程度的变化而变化^[10]。橄榄石是玄武岩早期结晶的矿物, 因此 Ni 作为微量元素遵循亨利定律在橄榄石和硅酸盐熔浆间分配。Li 等^[9]通过研究含硫玄武岩中 Ni 在橄榄石和熔体间的分配系数发现, D_{Ni} 在 4~9 之间。随着橄榄石的结晶分异, 橄榄石中 Ni 的质量分数将随着橄榄石的镁铁成分发生有规律的变化。如果岩浆发生过硫化物的熔离, 橄榄石中 Ni 的质量分数将发生亏损。在橄榄石与硫化物发生交换反应的情况下, 利用橄榄石中 Ni 的质量分数也可以估算硫化物中 Ni 的质量分数。由上述关系, 可以根据橄榄石中 Ni 的变化寻找岩浆中硫化物行为的证据。

根据罗东岩体的原始岩浆成分进行岩浆橄榄石结晶演化模拟, 模拟橄榄石中 Ni 的质量分数随 Fo 值的变化, 如图 8 所示。Ni 在橄榄石和硅酸盐熔浆之间的分配系数 $D_{Ni}^{O/melt}=7$, 图中曲线表示橄榄石中 Ni 的质量分数随橄榄石的结晶分异逐渐降低。将罗东岩体各个岩相中的橄榄石成分投到图中发现, 橄榄石的成分沿着正常演化曲线分布, 说明橄榄石中的 Ni 是正常演化情况下的质量分数。如果岩浆发生硫化物的熔离, 则结晶出来的橄榄石会发生 Ni 亏损, 其数据将落在正常演化曲线之下, 这一结果说明在岩浆演化的过程中可能未发生过较明显的硫化物熔离作用。

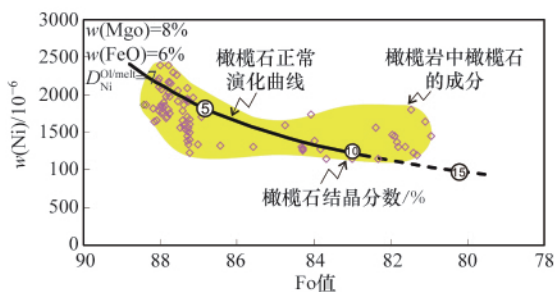


图8 罗东岩体橄榄石 Fo-w(Ni)相关图

Fig. 8 Fo-w(Ni) relation of Ol in Luodong intrusion

4 结论

1) 岩体具有从橄榄岩—辉橄岩—辉长岩的演化序列, 三者具有同源岩浆演化的特征;

2) 橄榄石成分属贵橄榄石, 并发育明显的反应边现象, 说明橄榄石在岩浆演化过程中与残余岩浆发生了交换反应, 或发生岩浆的混合作用;

3) 通过定量反演, 得到罗东岩体原始岩浆含 $w(MgO)=8\%$, $w(FeO)=6\%$, 属于拉斑玄武岩的成分;

4) 通过岩浆演化的数值模拟, 根据橄榄石的成分演化发现原始岩浆未发生过 Ni 亏损, 橄榄石按照正常岩浆演化序列演化, 说明原始岩浆可能未发生大规模硫化物熔离作用。

综上所述, 罗东岩体具有较好的分异岩相, 其盆状岩体也有利于硫化物的富集, 但从橄榄石中 Ni 的质量分数来看, 没有发现硫化物熔离的证据, 这一结论还需要进一步取样分析, 以增加可靠性。从围岩上看, 岩体直接侵入的围岩中没有硫化物存在, 在理论上分析不利于岩浆体系中硫化物的饱和, 但不排除在深部存在富硫岩相对岩浆中的硫含量造成影响, 这也需要进一步研究和确认。

参考文献 (References)

- [1] 姜常义, 程松林, 叶书锋, 等. 新疆北山地区中坡山北镁铁质岩体岩石地球化学与岩石成因[J]. 岩石学报, 2006, 22(1): 115-126.
Jiang Changyi, Cheng Songlin, Ye Shufeng, et al. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(1): 115-126.
- [2] 李华芹, 陈富文, 梅玉萍, 等. 新疆坡北基性—超基性岩带 1 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, et al. *Mineral Deposits*, 2006, 25(4): 463-469.
- [3] Li C, Lightfoot P C, Amelin Y, et al. Contrasting petrological and geochemical relationships in the Voisey's Bay and Mushuau intrusions, Labrador: Implications for ore genesis [J]. *Economic Geology*, 2000, 95: 771-800.
- [4] Li C, Xu Z H, Sybrand A W, et al. Compositional variations of olivine from the Jinchuan Ni-Cu sulfide deposit, western China: implications for ore genesis[J]. *Mineralium Deposita*, 2004, 39: 159-172.
- [5] Li C, Naldrett A J. The geology and petrology of the Voisey's Bay intrusion: reaction of olivine with trapped sulfide and silicate liquids[J]. *Lithos*, 1999, 47: 1-31.
- [6] Li C, Ripley E M, Mathez E A. The effect of S on the partitioning of Ni between olivine and silicate melt in MORB [J]. *Chemical Geology*, 2003, 201: 295-306.
- [7] Krishamurthy P, Gopalan K, MacDougall J D. Olivine compositions in picrite basalts and the Deccan volcanic cycle [J]. *Journal of Petrology*, 2000, 41:1057-1069.
- [8] Larsen I M, Pedersen A K. Processes in high-Mg, high-Ti magmas: Evidence from olivine, chromite and glass in Palaeogene picrites from West Greenland[J]. *Journal of Petrology*, 2000, 41: 1071-1098.
- [9] 孙赫, 秦克章, 苏本勋, 等. 中天山地块科马提质超镁铁岩体的发现: 新疆峡东岩体[J]. 岩石学报, 2009, 25(4): 738-748.
Sun He, Qin Kezhang, Su Benxun, et al. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(4): 738-748.
- [10] 孙赫, 唐冬梅, 秦克章, 等. 亲铜元素的地球化学行为研究进展及其在岩浆硫化物矿床中的应用[J]. 地质论评, 2009, 55(6): 840-850.
Sun He, Tang Dongmei, Qin Kezhang, et al. *Geological Review*, 2009, 55(6): 840-850.

(责任编辑 刘志远)