

新疆北山地区两个含铜镍镁铁—超镁铁质岩体 铂族元素地球化学研究

柴凤梅¹⁾, 夏芳¹⁾, 陈斌^{1,2)}, 卢鸿飞³⁾, 王恒³⁾, 李军³⁾, 严玉圃⁴⁾

1) 新疆大学地质与矿业工程学院, 新疆中亚造山带大陆动力学与成矿预测实验室, 乌鲁木齐, 830049;
2) 北京大学地球与空间科学学院, 北京, 100871; 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; 4) 吐哈油田勘探开发研究院, 新疆哈密, 839009

内容提要:对北山地区坡一和罗东含铜镍的镁铁—超镁铁质岩体铂族元素研究表明, 两个岩体的铂族元素(PGE)总量较低, PPGE 较 IPGE 富集, 原始地幔标准化模式呈正斜率, 均较原始地幔亏损, 具 Ir 和 Rh 的弱负异常。较低的 Pd/Ir 比值表明岩石主要受岩浆作用控制, 后期热液作用影响不明显。两个岩体的原生岩浆均为 MgO 含量较高的 PGE 不亏损的拉斑玄武质岩浆, 较高的 Cu/Pd、Ti/Pd 比值表明岩浆在演化过程中发生了硫化物的熔离。罗东岩体早期矿物相(橄榄石、铬铁矿)的分离结晶作用对岩浆中的硫达到饱和具有重要的贡献, 而坡一岩体该作用对硫化物熔离的贡献不明显。坡一和罗东岩体的 R 值表明两岩体均具有达到中型 Ni 矿床的潜力。

关键词: 铂族元素; 地球化学; Ni-Cu 成矿作用; 镁铁—超镁铁质岩; 新疆北山

新疆东部地区广泛分布着镁铁—超镁铁质岩体, 如东天山的黄山—镜儿泉镁铁—超镁铁质岩带、中天山的白石泉—天宇镁铁—超镁铁质岩带和北山的坡北镁铁—超镁铁质岩带。与新疆东部的其他地区相比, 北山地区因其自然环境极为恶劣, 区内镁铁—超镁铁质岩体的研究工作最为薄弱。目前, 北山地区已发现有 20 多个镁铁—超镁铁质岩体(如磁海、漩渦岭、笔架山、红石山、坡北、罗东等), 主要沿断裂呈带状分布(图 1a), 并且这些岩体均有不同程度的铜镍矿化(胡旺亮等, 1992; 高怀忠, 1992; 李鸿儒, 1994; 杨甲全等, 2002; 姜常义等, 2006; 李华芹等, 2006, 2009; 苏本勋等, 2009, 2010; 孙燕等, 2009; 闫军武等, 2010), 是新疆又一重要的铜镍成矿远景区。这些岩体形成于中晚二叠世(姜常义等, 2006; 李华芹等, 2006, 2009; 苏本勋等, 2010), 与新疆北部含铜镍矿的镁铁—超镁铁质岩体体系同一时代的产物(韩宝福等, 2004; 毛景文等, 2002; 唐冬梅等, 2009; 肖庆华等, 2010; 孙涛等, 2010), 并且具有相似的岩石矿物组合和母岩浆性质(姜常义等, 2006; 孙燕等, 2009; 李华芹等, 2006, 2009; 苏本勋等, 2009, 2010; 孙赫等, 2010)。

尽管如此, 对于北山地区镁铁—超镁铁质岩体矿化规模和强度具有明显差异的原因尚不清楚, 并

且铜镍硫化物矿床的形成机制以及成矿潜力等问题尚需进一步研究。本文利用铂族元素(PGE)这一探讨镁铁—超镁铁质岩体的成因以及与其有关矿床成矿作用的有利手段(Barnes et al., 1993; Naldrett et al., 2000; 王瑞廷等, 2005; 王生伟等, 2006, 2007; 孙晓明等, 2006; 柴凤梅等, 2006; 唐冬梅等, 2009), 研究北山地区坡一和罗东岩体的成因以及铜镍硫化物矿床的成矿机制以及潜力, 以期对北山地区铜镍硫化物矿床的找矿和勘查提供科学依据。

1 地质背景

北山地区位于新疆东部, 中天山地块与塔里木盆地和敦煌地块之间, 其北以中天山南缘断裂为界, 南以疏勒河断裂为界, 呈北东东向展布(苏本勋等, 2010)。地层以中下元古界和石炭系为主, 主要为下元古界北山群片麻岩、浅粒岩、斜长角闪片岩、云母片岩、片麻岩、石英岩等; 中元古界为白湖群石英片岩、黑云母片岩、石榴石矽卡岩、大理岩; 下石炭统为红柳园组黑云母斜长片麻岩、变粒岩、石英片岩、砾岩、砂砾岩、千枚岩及基性火山岩; 上石炭统为石板山组千枚岩、粉砂岩和少量玄武岩; 第四系为冲洪积物。区内岩浆岩较为发育, 以石炭纪—二叠纪岩浆

注: 本文为国家自然科学基金项目(编号 40863001、41162006、40973028)和新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(编号 2010211A08)共同资助的成果。

收稿日期: 2011-04-10; 改回日期: 2012-03-20; 责任编辑: 郝梓国, 黄敏。

作者简介: 柴凤梅, 女, 1971 年生。教授, 主要从事岩石学、矿床学的教学与研究工作。Email: chaifengmei@163.com。

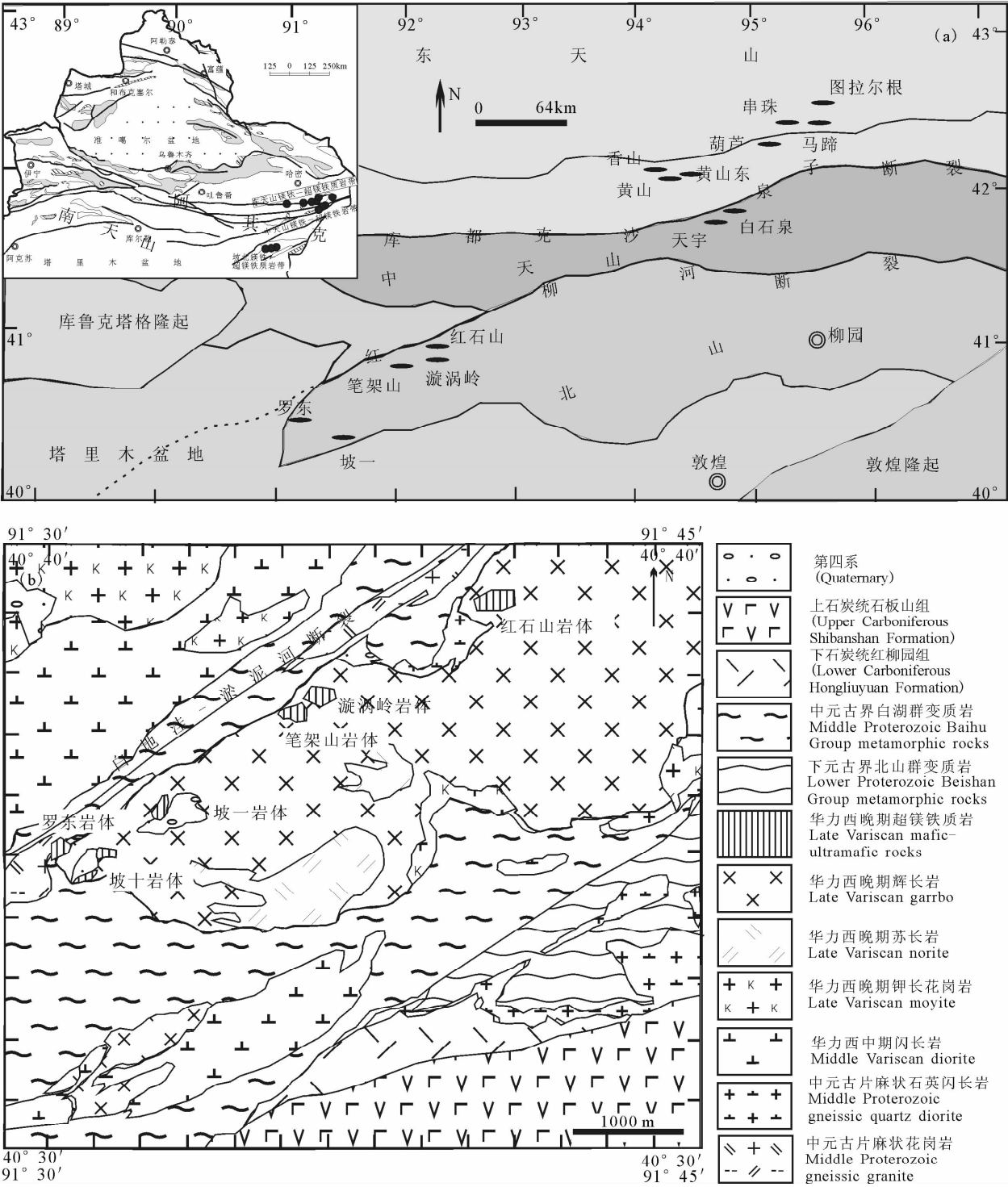


图 1 新疆北山大地构造位置图及研究区区域地质图 (据苏本勋等,2010 修改)

Fig.1 Tectonic location simplified map of the Beishan and the regional geological sketch map of research area in Xinjiang(modified from Su Benxun et al. , 2010)

活动最为强烈,发育大量的中性—基性火山岩,并出露大量的花岗质岩体和镁铁—超镁铁质岩体,除此之外,出露有中元古片麻状黑云母花岗岩和片麻状石英闪长岩(新疆维吾尔自治区地质矿产局,

1993)(图 1b)。

2 岩体地质特征

坡一岩体和罗东岩体为北山坡北镁铁—超镁铁

质杂岩带上的代表性杂岩体。它们分布于白地洼—淤泥河大断裂南侧(图 1)。前人研究成果表明,两岩体属于同时代岩浆活动的产物[如坡一岩体辉长岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 $278 \pm 2\text{Ma}$ (李华芹等, 2006), 罗东岩体锆石 U-Pb 年龄为 283Ma (韩春明等未刊资料)], 坡一岩体呈现明显的 Cu、Ni 矿化(李华芹等, 2006), 罗东岩体 Cu、Ni 矿化程度不高, 且缺乏硫化物已发生熔离的证据(孙赫等, 2010)。

2.1 坡一岩体

坡一岩体位于北山镁铁—超镁铁质岩带中段, 侵位于中元古界白湖群变质岩中(图 2a)。地表岩体大部分由第四系冲洪积层覆盖, 局部见零星超基性岩。经钻探验证, 岩体呈南部较缓东北部较陡的岩盆状产出, 平面形态呈东大西小的水滴状(李华芹等, 2006), 长约 2.8km , 宽约 2.4km , 出露面积 6.72km^2 。岩体分异较好, 主要由辉长岩相、橄榄岩相和辉石岩相组成, 辉长岩相分布于岩体边缘, 橄榄岩相和辉石岩相分布于岩体中心。辉长岩相为主体岩相, 发育有橄榄辉长岩、橄榄辉长苏长岩和角闪辉长岩。橄榄辉长岩规模大小不等, 最宽约 200m , 最长达 500m ; 橄榄辉长苏长岩相主要呈岩枝状产出, 宽约为 120m , 长约 200m ; 角闪辉长岩呈环带状围绕超镁铁质岩分布, 多被辉长岩脉、辉绿岩脉、花岗岩脉切穿。橄榄岩相由纯橄榄岩、斜长单辉辉橄岩、斜长单辉橄岩组成, 纯橄榄岩主要分布于岩体的东部, 形状不规则, 最宽约 300m , 最长约 650m , 褐铁矿化明显, 岩石条带状或火成堆积的层状构造发育, 橄榄石堆晶带与辉石堆晶带交替出现; 斜长单辉辉橄岩不连续分布于岩体中心, 平面大小不一, 形状不规则, 最宽约 200m , 最长约 300m , 褐铁矿化明显; 斜长单辉橄岩规模不大, 呈不规则状、条带状零星分布, 最宽约 100m , 最长约 330m ; 辉石岩相主要为斜长橄榄单辉辉石岩, 出露规模不大, 呈不规则状, 最宽约 150m , 最长约 300m , 火成堆积的层状构造发育。各岩相岩石均发生了不同程度的蚀变。目前已发现 20 个矿(化)体(地表 10 个, 深部 10 个), 矿化体位于靠近超镁铁质岩与橄榄辉长岩接触带, 主要产于橄榄岩底部或靠近其底部呈悬浮状态产出, 赋矿岩石主要为斜长橄榄岩和辉石橄榄岩^①。

2.2 罗东岩体

罗东岩体侵位于下石炭统红柳园组黑云石英片岩中。岩体呈北东向展布, 平面形态为眼球状, 长约 2.2km , 宽约 1.3km , 面积 2.4km^2 。岩相分异较好, 主要由橄榄岩相、辉石岩相和辉长岩相组成。其中

橄榄岩相主要呈岩墙状、岩脉状分布于岩体偏南部, 地表出露最大宽度约 100m , 长大于 1km , 主要为纯橄榄岩、辉石橄榄岩和含斜长石辉石橄榄岩; 辉石岩相主要呈近南北向分布于岩体西部, 长约 100m , 宽约 20m ; 辉长岩相为主体岩相, 主要由辉长岩和橄长岩组成, 长约 2km , 宽约 1km , 局部见有辉绿岩脉、正长岩脉穿过(图 2b)。目前已发现 2 个镍矿(化)体, 地表氧化镍矿(化)体沿近东西走向连续出露, 长 850m , 宽 $4 \sim 60\text{m}$, 含 Ni $0.1\% \sim 0.28\%$ 。镍矿(化)体均产于橄榄岩相中, 主要赋矿岩石为含斜长石橄榄岩和辉石橄榄岩, 走向与岩体走向基本一致^①。

3 样品特征及分析方法

本次研究共选取了具有代表性的坡一岩体和罗东岩体各 6 件样品。这些样品主要具自形—半自形中—细粒结构、包含结构、辉长结构等镁铁—超镁铁质深成岩典型结构。原生矿物主要为橄榄石、辉石、斜长石、角闪石和不透明金属矿物。

坡一岩体样品有辉石橄榄岩和纯橄榄岩。其中辉石橄榄岩由橄榄石(约 $55\% \sim 65\%$)、辉石($15\% \sim 20\%$)、角闪石(10%)、斜长石(8%)和金属矿物等($5\% \sim 15\%$)组成(图 3a); 橄榄石多被辉石或者角闪石包裹(图 3b), 偶见橄榄石包裹铬铁矿。纯橄榄岩主要由橄榄石组成, 并可见少量辉石、角闪石和金属矿物。两类岩石中含矿者蚀变较强, 网状结构发育, 并且橄榄石呈孤岛状残留体(图 3c)。矿物的结晶顺序为橄榄石—铬铁矿—辉石。

罗东岩体样品有斜长橄榄岩、辉石橄榄岩、纯橄榄岩和辉长岩。其中斜长橄榄岩由橄榄石(80%)、斜长石(10%)、铬铁矿($3\% \sim 4\%$)和金属硫化物等($3\% \sim 4\%$)组成; 橄榄石相对新鲜, 多被斜长石包裹(图 3d), 含矿者蚀变较强, 仅橄榄石中心有残留。辉石橄榄岩主要由橄榄石($75\% \sim 80\%$)、辉石($15\% \sim 20\%$)、铬铁矿($2\% \sim 3\%$)和磁铁矿($1\% \sim 2\%$)等组成, 偶见黑云母, 常见辉石包裹橄榄石, 并且多已蚀变(图 3e)。纯橄榄岩主要由橄榄石组成, 偶见斜长石和辉石。辉长岩主要由辉石、斜长石和橄榄石等组成, 辉长结构, 样品较新鲜(图 3f)。

样品特征列于表 1。所研究的样品均是通过显微镜的仔细观察, 挑选出具有代表性的较为新鲜的样品。在粉碎前用切割机将其表皮去除, 然后放在超声装置中用 Millipore 水清洗干净, 以避免样品受到其他物质的混染。样品的 MgO、Cu、Ni 含量在澳实分析检测有限公司采用 MS-ICP 法测定。铂族元

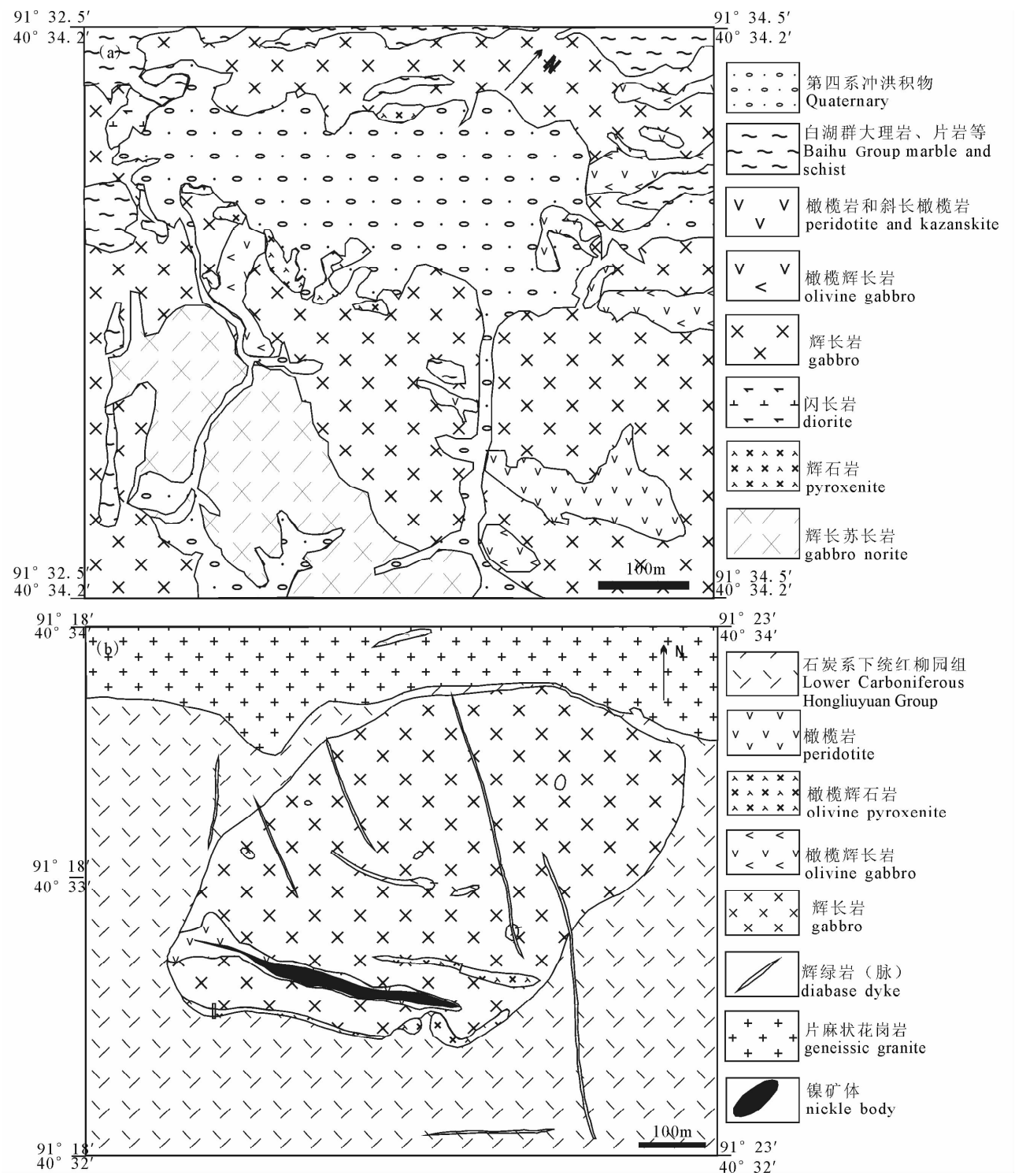


图 2 新疆北山地区坡一(a)和罗东(b)镁铁—超镁铁质岩体地质图 (据新疆地质矿产勘查开发局第六地质大队,1993)

Fig. 2 Geological map of the Poyi (a) and Luodong (b) mafic-ultramafic intrusions in Beishan, Xinjiang (modified from No. 6 Geological Team of Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources,1993)

素分析是在国家地质实验测试中心完成,分析流程主要为:首先将待测样品与碳酸钠、硼酸钠、硼砂、玻璃粉、硫磺、面粉混合,倒入坩埚中,其次,加入适量钼稀释剂在 1150℃ 高温炉内熔融,将熔体倒入铁模

中冷却后取出钼扣,用 HCl 溶解钼扣滤出不溶物,在封闭溶容器中用王水溶解滤渣,最后在 ICP-MS 上测定 Pt、Pd、Rh、Ir、Ru 和 Os,全流程空白值:Os、Ir、Ru、Pd 为 0.3ng,Pt、Rh 为 0.06ng。

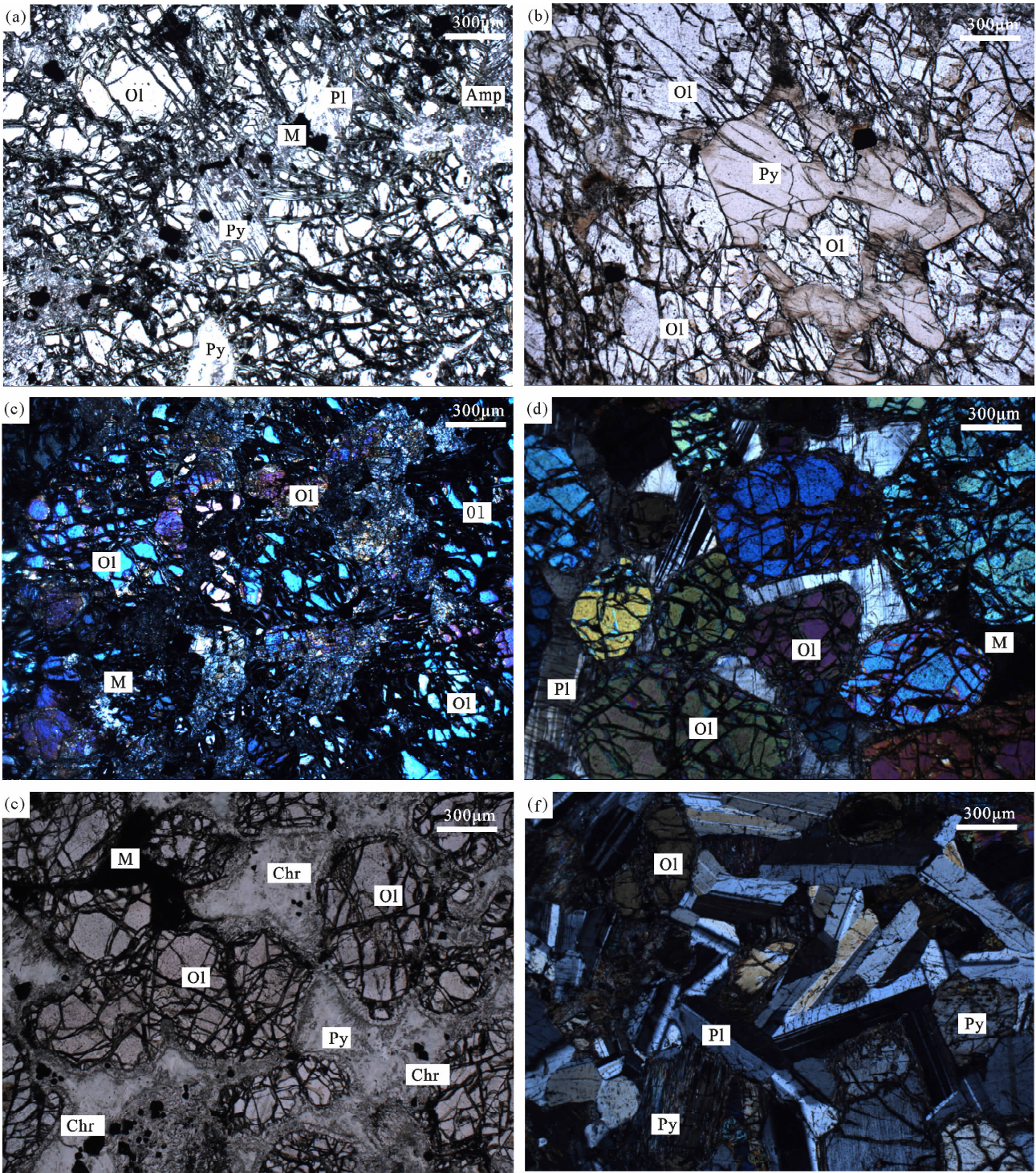


图 3 新疆北山地区坡一和罗东镁铁—超镁铁质岩体岩石照片

Fig. 3 Photographs of rocks from the Poyi and Luodong mafic-ultramafic intrusions in Beishan, Xinjiang

(a) — 坡一岩体中的辉石橄榄岩; (b) — 坡一岩体辉石橄榄岩包橄结构; (c) — 坡一岩体纯橄榄岩网状结构; (d) — 罗东岩体斜长橄榄岩包含结构; (e) — 罗东岩体辉石橄榄岩包含结构; (f) — 罗东岩体橄榄辉长岩辉长结构

(a) — Pyroxene peridotite in Poyi intrusion; (b) — poikilitic texture of pyroxene peridotite in Poyi intrusion; (c) — netted texture of dunite in Poyi intrusion; (d) — poikilitic texture of kazanskite in Luodong intrusion; (e) — poikilitic texture of pyroxene peridotite in Luodong intrusion; (f) — gabbro texture of olivine gabbro in Luodong intrusion

表 1 新疆北山地区坡一和罗东镁铁—超镁铁质岩体主要岩相岩石特征

Table 1 Petrology characteristics of the Poyi and Luodong mafic-ultramafic intrusions in Beishan, Xinjiang

样品编号	岩石名称	结构	主要矿物组合	硫化物含量
Py101-3	蛇纹石化橄榄岩	包橄结构	Ol(80%)+Opx+Bi+ Amp(10%) +M(15%)	3%
Py101-6	辉石橄榄岩	包含结构,网状结构	Ol(60%) +Opx+Cpx(15%)+ Amp(7%)+Pl (8%)+M(10%)	5%
Py101-11	辉石橄榄岩	半自形中粒	Ol(60%)+Opx+Cpx(15%)+ Amp(10%)+M(15%)	10%
Py101-12	辉石橄榄岩	网状结构	Ol(65%)+Opx+Cpx(20%)+Amp(10%)+M(5%)	N.
Py101-17	辉石橄榄岩	包橄结构	Ol(65%)+Opx+Cpx(15%)+Amp(10%)+M(10%)	3%
Py101-21	纯橄榄岩	包橄结构	Ol(90%)+ Opx+ Amp(6%)+M(4%)	N.
LD101-4	斜长橄榄岩	包橄结构	Ol(80%)+Pl(10%)+ M(10%)	3%.
LD101-8	蛇纹石化纯橄榄岩	包橄结构	Ol(90%)+ Pl(7%)+M(3%)	N.
LD101-12	辉石橄榄岩	包含结构	Ol(75%)+Opx(20%)+M(5%)	N.
LD101-15	橄榄辉长岩	辉长结构	Ol(15%)+Cpx(35%)+Pl(50%)+M(1%)	N.
LD102-4	辉石橄榄岩	包橄结构	Ol(80%)+Opx+Bi(17%)+M(3%)	N.
LD103-4	蛇纹石化纯橄榄岩	半自形中粒	Ol(90%)+Opx(6%)+M(4%)	N.

注:Ol—橄榄石; Cpx—单斜辉石; Opx—斜方辉石; Amp—角闪石; Pl—斜长石; Bi—黑云母; M—金属矿物; N. —未见。

表 2 新疆北山地区坡一和罗东镁铁—超镁铁质岩体铂族元素含量(×10⁻⁹)及参数

Table 2 The PGE abundances (×10⁻⁹) and parameters of the analyzed samples in Beishan, Xinjiang

样号	Os	Ir	Ru	Rh	Pt	Pd	Ni(×10 ⁻⁶)	Cu(×10 ⁻⁶)	Cr(×10 ⁻⁶)	MgO(%)	Ni/Cu	Pd/Ir	Cu/Pd(×10 ³)	Ti/Pd(×10 ³)
PY101-3	0.43	0.23	0.45	0.08	1.67	1.69	1840	151	2370	34.8	12.19	7.35	89	296
PY101-6	1.13	0.49	0.82	0.21	3.76	2.66	2410	839	1990	34.4	2.87	5.43	315	113
PY101-11	1.93	0.98	1.68	0.49	7.76	5.82	2310	503	2300	38.1	4.59	5.94	86	103
PY101-12	0.47	0.17	0.33	0.05	0.54	0.59	1350	121	1950	36.9	11.16	3.47	205	1525
PY101-17	0.48	0.24	0.46	0.09	1.35	1.37	1380	75	2040	36.6	18.40	5.71	55	511
PY101-21	0.48	0.2	0.37	0.03	1.07	0.85	1460	45	2190	39.9	32.44	4.25	53	1059
LD101-4	0.31	0.15	0.32	0.06	0.88	1.46	2810	1300	8720	34.3	2.16	9.73	890	1164
LD101-8	0.07	0.04	0.07	0.02	0.32	0.52	1910	414	3130	36.9	4.61	13.00	796	2885
LD101-12	0.09	0.04	0.06	0.02	0.28	0.45	2300	696	2530	37.9	3.30	11.25	1547	1556
LD101-15	0.04	0.02	0.06	0.02	0.2	0.21	79	81	657	11.55	0.98	10.50	386	10476
LD102-4	0.09	0.03	0.1	0.02	0.37	0.62	1380	255	1280	32.7	5.41	20.67	411	1774
LD103-4	0.11	0.04	0.11	0.02	0.37	0.6	1880	352	2020	35.4	5.34	15.00	587	2667

4 铂族元素(PGE)地球化学特征

12 件样品的 PGE、Cu、Ni、Cr 和 MgO 数据列于表 2。可以看出,坡一岩体的铂族元素总量(∑PGE)相差较大,介于 2.15×10⁻⁹~18.66×10⁻⁹之间,PPGE 较 IPGE 富集(PPGE/IPGE=1.22~3.09),Ni/Cu 比值变化大(2.87~32.4),Pd/Ir 比值较低(3.47~7.35),Pt/Pd 比值介于 0.92~1.41 之间。Pt 与 Pd 和 Cu 与 Ni 具有明显的正相关,Ir 与 Pt、Pd、Os、Ru 和 Rh 呈现明显的正相关(图 4)。罗东岩体的铂族元素总量(∑PGE)较低,为 0.55×10⁻⁹~3.18×10⁻⁹,PPGE 较 IPGE 明显富集(PPGE/IPGE=3.08~4.78),Ni/Cu 比值为 0.98~5.41,Pd/Ir 比值为 9.73~20.67,Pt/Pd 比值较低,为 0.60~0.95。Pt 与 Pd 和 Cu 与 Ni 具有明显的正相关,Ir 与 Pt、Pd、Os、Ru 和 Rh 未呈现明显的

相关性(图 4)。两岩体不同岩性样品的铂族元素总量有一定的差异,且含硫化物样品中的各元素含量高于不含硫化物样品中的各元素含量。两个岩体的 PGE 总量与东天山地区的香山、图拉尔根矿床和黄山东矿床岩石的 PGE 总量相近(孙赫等,2008;钱壮志等,2009),低于金川矿床中超镁铁质岩石的 PGE 总量(35×10⁻⁹)(汤中立等,1995)。

在 PGE 原始地幔标准化模式图解上(图 5),所有样品具有相似的配分型式,呈正斜率的“Pt-Pd”型,Os-Ru 平缓,Rh-Pd 稍向左倾,Pt、Pd 较 Os、Ir、Ru 和 Rh 富集。这与含铜镍矿的超镁铁岩中呈平坦或正斜率的铂族元素分布型式一致(如新疆东天山的黄山、黄山东,中天山的白石泉、天宇,南非的 Bushveld 和澳大利亚的 Sudbury),与科马提岩、苦橄岩和 MORB 明显不同。所有样品的 Ni 较 Cu 富集,并呈现 Ir 和 Rh 的弱负异常以及 Pd 的弱正异

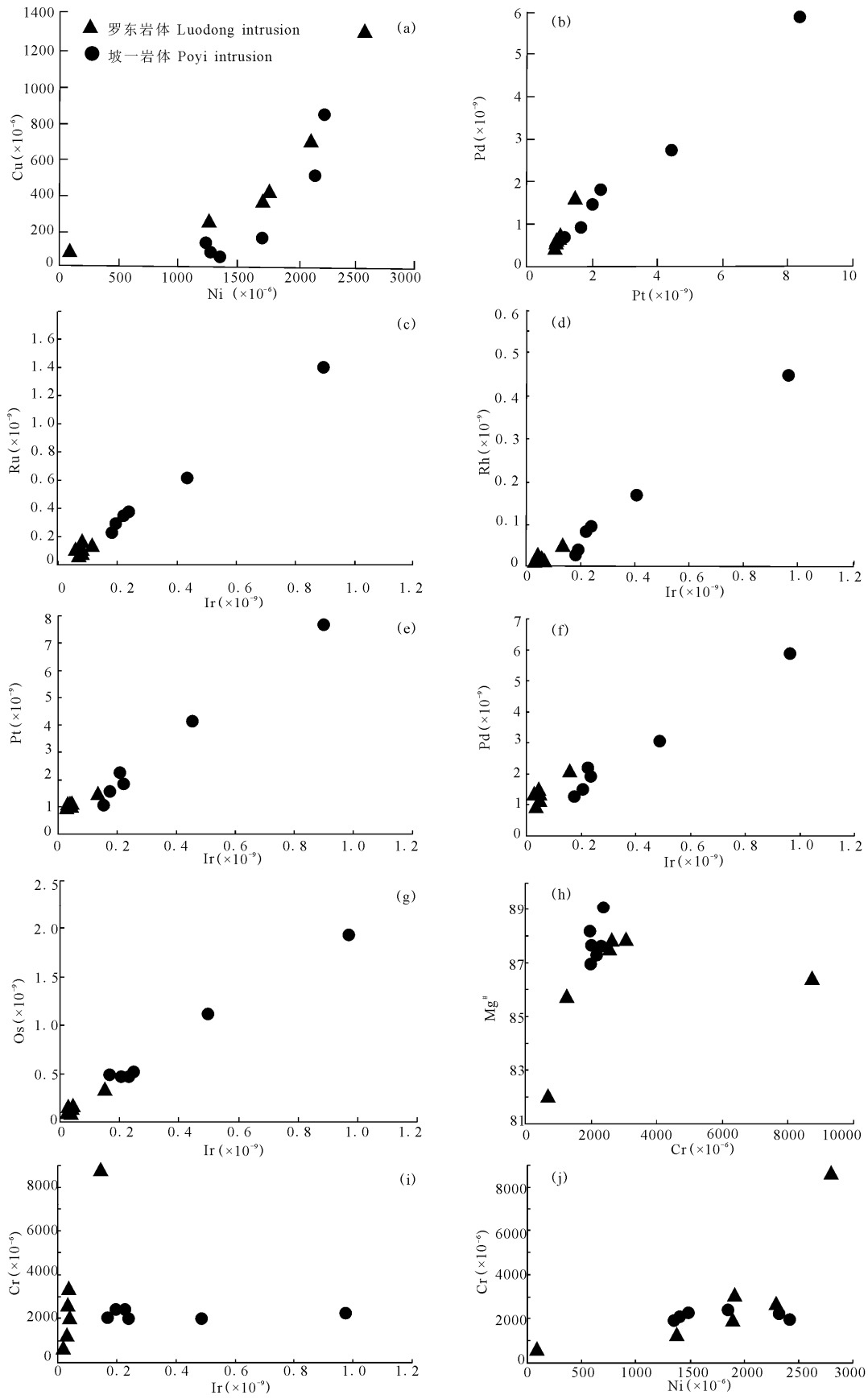


图 4 新疆北山地区坡一和罗东镁铁—超镁铁质岩体 PGE 相关关系图

Fig. 4 The concentrations of PGE relationship in the Poyi and Luodong mafic-ultramafic intrusions in Beishan, Xinjiang

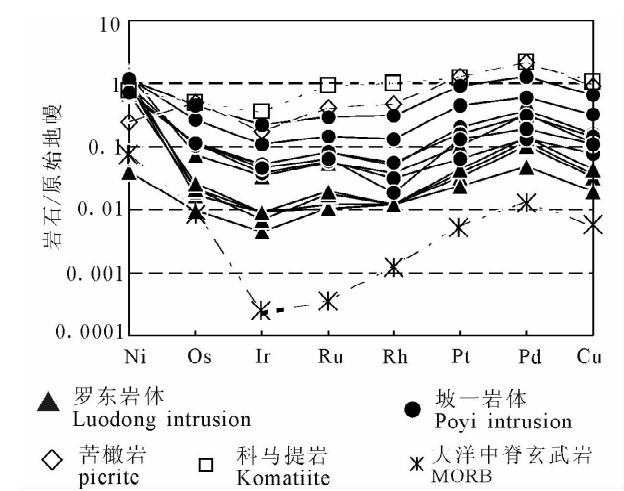


图 5 新疆北山地区北山坡一和罗东镁铁—超镁铁质岩体 PGE 原始地幔标准化图解(原始地幔值引自 Barnes et al. ,1988)

Fig. 5 Primitive mantle-normalized PGE patterns of the Poyi and Luodong mafic-ultramafic intrusions in Beishan, Xinjiang (the normalization values from Barnes et al. , 1988)

常,除个别样品的 Ni 较原始地幔富集外,其余所有样品的 PGE、Cu 和 Ni 均较原始地幔亏损。暗示坡一和罗东两岩体可能具有相同的物质来源。

5 讨论

5.1 物质来源

Pd 与 Ir 是 PGE 元素中地球化学性质差异最大的元素,常用 Pd/Ir 比值表征铂族元素的总体分异特征。坡一和罗东岩体具有高于原始地幔的 Pd/Ir 比值(1.22),与地幔橄榄岩包体的 PGE 未分异特征明显不同,表明它们的 PGE 发生了分异。前人研究成果表明,不同成因类型的硫化物矿床和岩石有不同的 Pd/Ir 数值分布范围。坡一和罗东岩体的 Pd/Ir 比值均低于 100,表明 PGE 特征主要为岩浆作用的结果,受热液蚀变作用影响小,因为受热液交代作用影响的硫化物和岩体的 Pd/Ir 比值大于 100 (Keays, 1995; Maier et al. , 1998)。罗东岩体的 Pd/Ir 比值较坡一岩体的 Pd/Ir 比值高,表明罗东岩体的 PGE 分异程度较坡一岩体高。

前人研究成果表明,PGE 在镁铁—超镁铁岩中的含量受地幔源区成分、部分熔融程度、Ni、Cu 和 PGE 的赋存状态、岩浆结晶分异作用以及硫化物熔离作用的影响 (Barnes et al. , 1985; 宋谢炎等, 2009)。坡一和罗东岩体具有极低的 PGE 含量, PGE 元素内部各元素之间以及 PGE 与 Cu、Ni 之间

发生分异,这些特征是由何种因素所致?

一般来说,部分熔融程度越大,岩浆中的 Pd/Ir 比值越小,Ni/Cu 比值越大 (Garuti et al. , 1997)。坡一和罗东岩体的 Pd/Ir 比值均高于原始地幔的值(1.22)和科马提岩的值(5.9),低于 MORB 的值和富硫化物拉斑玄武岩的值(77.8) (Barnes et al. , 1985)。Ni/Cu 比值不但低于原始地幔的值(71.4),而且低于超镁铁质岩浆形成的硫化物矿床的 Ni/Cu 比值(>7) (Leshner et al. , 1984),与镁铁质岩浆形成的硫化物矿床的 Ni/Cu 比值接近(<2) (Naldrett, 2004),说明它们的母岩浆可能为地幔中等熔融程度形成的玄武质岩浆。在常用的指示母岩浆性质的 Pd/Ir-Ni/Cu 图解中(图 6),坡一和罗东岩体中所有样品均位于高 MgO 玄武岩区,表明它们的母岩浆为高 Mg 玄武质岩浆。这与前人对该区相似岩体研究的结论一致(姜常义等, 2006; 苏本勋等, 2010),也与新疆北部含铜镍矿的镁铁—超镁铁质岩体母岩浆的性质一致(唐冬梅等, 2009; 肖庆华等, 2010)。有研究表明,形成高 Mg 玄武质岩浆的地幔部分熔融程度应该 $\geq 10\%$ (Le Bas, 2000),在原始地幔部分熔融程度与 PGE 元素含量图解上(孙赫等, 2008),坡一及罗东岩体位于 $10\% \sim 15\%$ 熔融曲线上,表明两岩体的 PGE 可能是地幔经过了 $10\% \sim 15\%$ 熔融的结果(图略)。两岩体的原生岩浆 PGE 是不亏损的,因为高镁玄武质岩浆和科马提岩浆在形成之初为硫化物不饱和岩浆(Keays, 1995)。坡一和罗东岩体的 PGE 亏损只能由其他地质过程导致。

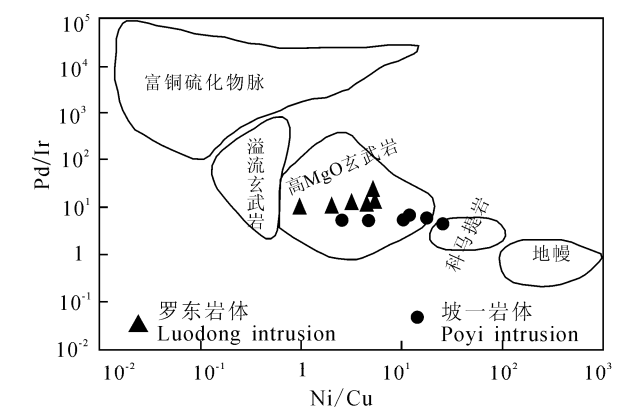


图 6 新疆北山地区坡一和罗东镁铁—超镁铁质岩体 Ni/Cu - Pd/Ir 图解(原图据 Chai G et al. , 1992)

Fig. 6 Diagram of Ni/Cu versus Pd/Ir of the Poyi and Luodong mafic-ultramafic intrusions in Beishan, Xinjiang (after Chai G et al. , 1992)

5.2 PGE 亏损与硫化物的熔离

岩浆在硫不饱和时的结晶分异过程中, Ni、Ir、Ru 是橄榄石、单斜辉石、尖晶石和铬铁矿的相容元素, Pt 是单斜辉石、尖晶石和铬铁矿的相容元素, Rh 是橄榄石的相容元素, Cu 和 Pd 总是这些矿物的不相容元素 (Pearson et al., 2004; Brenan et al., 2005; 宋谢炎等, 2009)。因此, 随着早期橄榄石、辉石、铬铁矿或者尖晶石的分离结晶, 残余的硅酸盐熔浆中的 Cu 和 Pd 含量会增加, Ni、IPGE 和 Pt 含量会逐渐降低, Pd/Ir 比值和 Pd/Pt 比值会显著增加, Cu/Pd 比值则保持不变。坡一和罗东岩体的 Cu 和 Pd 含量较低, Pd/Ir 比值和 Pd/Pt 比值变化不大, 但 Cu/Pd 比值变化较大, 暗示了 PGE 特征并不完全受硅酸盐矿物结晶分异作用的控制。

PGE 在硫化物与硅酸盐熔体间的分配系数极高 ($10^4 \sim 10^5$) (Fleet et al., 1996), Cu 与 Ni、Ti 的分配系数较 PGE 小的多 (达 2 个数量级), PGE 较 Cu、Ni 和 Ti 易进入硫化物。如果岩浆在演化过程中 S 达到饱和发生硫化物熔离时, 发生硫化物熔离后的残余岩浆中的 PGE 较 Cu、Ni、Ti 大大亏损。有研究表明, 0.01% 的硫化物的熔离将导致玄武岩中 90% 以上 PGE 亏损, Ni 和 Cu 只发生微弱的降低 (孙赫等, 2008; 宋谢炎等, 2009)。因此, 硫化物熔离后的残余岩浆具有比原始地幔高得多的 Cu/Pd 比值 [Cu/Pd = 6500 (Maier et al., 1998; Barnes et al., 1988)] 和 Ti/Pd 比值 [Ti/Pd = 3×10^3 (Sun et al., 1991)], 并且早期形成的硫化物较晚期形成的硫化物 PGE 富集 (Naldrett et al., 1990)。坡一和罗东岩体中所有样品的 Cu/Pd 比值 (分别介于 $53 \times 10^3 \sim 315 \times 10^3$ 和 $385 \times 10^3 \sim 1547 \times 10^3$ 之间) 和 Ti/Pd 比值 (分别介于 $103 \times 10^3 \sim 1525 \times 10^3$ 和 $1555 \times 10^3 \sim 2884 \times 10^3$ 之间) 远大于相应的原始地幔值, 表明坡一和罗东岩体母岩浆在演化过程中发生了强烈的硫化物熔离作用。

为进一步验证硫化物熔离情况, 对两岩体进行模拟计算。假设它们的初始岩浆与 PGE 不亏损的大陆拉斑玄武岩相当, 即 Cu 为 90×10^{-6} , Ni 为 99×10^{-6} , Pt 为 4.3×10^{-9} , Pd 为 4.7×10^{-9} , Rh 为 0.19×10^{-9} , Os 为 0.08×10^{-9} , Ru 为 1×10^{-9} , Ir 为 0.1×10^{-9} (Fryer et al., 1995; Brüggmann et al., 1993); 又假设 PGE 在硫化物熔体与硅酸盐熔体中的分配系数 $D_{iSul/Sil}$ 分别为: Cu = 1000, Pt = 10000, Pd = 17000, Ir = 26000, Os = 30000, Ru = 6400 (Fleet et al., 1996)。根据以下公式 (Campbell et al.,

1979): $C_{iSul} = C_{iSil} \times D_{iSul/Sil} \times (R+1)/(R + D_{iSul/Sil})$, (其中: C_{iSul} 和 C_{iSil} 分别为元素 i 在硫化物熔体和硅酸盐熔体中的含量, $D_{iSul/Sil}$ 为元素 i 在硫化物熔体和硅酸盐熔体间的分配系数, R 为硅酸盐熔体/硫化物熔体的比值)。获得坡一岩体的 R 值介于 305 ~ 2805 之间, 罗东岩体的 R 值介于 993 ~ 7063 之间。根据 R 值获得的母岩浆中 PGE 和 Cu、Ni 含量较假设的 PGE 不亏损初始岩浆明显亏损, 说明硫化物的熔离是 PGE 亏损的主控因素。这也导致了所有样品中 Pt 与 Pd 和 Cu 与 Ni 具有明显的正相关, PPGE 较 IPGE 富集以及坡一岩体中 Ir 与 Pt、Pd、Os、Ru 和 Rh 明显的正相关关系。罗东岩体的 Cr 与 Ni、Ir 呈现明显的正相关, 暗示了岩浆经过了铬铁矿、橄榄石的早期分离结晶, 这与岩相学观察结果一致, 也与孙赫等 (2010) 对罗东岩体高 Ni 含量橄榄石的研究结论一致, 这也可能是导致 Ir 与 Pt、Pd、Os、Ru 和 Rh 的相关性不明显的主要原因。

硫化物熔离的发生是由于岩浆中的 S 达到了饱和, 引起岩浆中的硫达到饱和的机制主要有: 岩浆的结晶分异、温度压力的快速变化、地壳物质的混入以及不同成分岩浆的混合。对于任何一个岩浆型 Ni-Cu-PGE 硫化物矿床来说, 其岩浆中的硫达到饱和的机制可以是一种, 也可以是几种 (柴凤梅等, 2005)。罗东岩体在硫化物熔离前发生了铬铁矿 (或者尖晶石)、橄榄石等早期矿物相的分离结晶作用, 说明岩浆的结晶分异作用对硫化物的熔离具有一定的贡献。坡一岩体早期矿物相的分离结晶过程不很明显, Re-Os 同位素测定结果显示 (另文发表), 样品的 γ_{Os} (283Ma) 为高的正值 (介于 +26.3 ~ +86 之间) 并且具有高的 Os 含量 ($609.4 \times 10^{-12} \sim 3282 \times 10^{-12}$), 这表明岩浆演化过程中有地壳物质混入, 因此推测地壳物质混入对硫化物的熔离具有重要影响。这与 Duluth 矿床、Voisey's Bay 矿床、Noril'sk 矿床及红旗岭矿床的形成机制相同 (Naldrett, 1997; Maier et al., 1998)。

综上所述, 坡一及罗东岩体是地幔中等程度熔融的结果, 其初始岩浆为 PGE 不亏损的高镁玄武质岩浆, 在演化过程中均经历了硫化物的熔离过程。罗东岩体早期矿物相的分离结晶作用对岩浆中的硫达到饱和和具有重要贡献, 坡一岩体中地壳物质混入对硫化物熔离具有重要影响。至于两个岩体母岩浆发生硫化物的熔离是否与温度压力的快速变化和岩浆混合有关还有待进一步的研究。

5.3 成矿指示意义

硫化物的熔离是形成岩浆型铜镍硫化物矿床的根本,硫化物中 Cu、Ni、PGE 的含量主要受母岩浆中各元素含量和 R 值的影响(Campbell et al., 1992)。前已述及,坡一和罗东岩体均经过了硫化物的熔离,那么这两个岩体的矿床类型以及成矿潜力如何是值得进一步探讨的问题。

Naldrett (2004) 研究表明: $R=100\sim 2000$, 主要形成 Ni 富集矿床,并且 PGE 含量低; $R=10000\sim 100000$ 时,主要形成 PGE 矿床,Ni 和 Cu 含量较低; $R=1000$ 时,Cu、Ni 含量一般为 6% 左右。另外,有研究表明,Cu/Pd 比值介于 $10^4\sim 10^5$,说明有 PGE 富集;早期发生硫化物熔离的岩浆形成 PGE 矿床的潜力小(唐冬梅等,2009)。通过两岩体的 Cu/Pd 比值和早期发生过硫化物熔离,推测 PGE 达不到富集成矿品位。根据计算获得坡一和罗东岩体的 R 值推测,两岩体仅能形成 Cu、Ni 矿,PGE 富集成矿的可能性小。所有样品的 Ni/Cu 比值均大于 1,且含硫化物的岩石较不含硫化物的岩石含量高,表明它们应该是以 Ni 为主的矿床,PGE 不能达到矿化品位。

与东天山地区的黄山、黄山东等岩体成矿控制因素(钱壮志等,2009;孙涛等,2010;唐冬梅等,2009;孙赫等,2008)较为相近,推测坡一与罗东岩体具有形成中型 Ni 矿床的潜力。

6 结论

(1)坡一和罗东岩体的 PGE 含量较低,PPGE 较 IPGE 富集,具有相似的岩浆来源,均为高镁拉斑玄武岩演化的产物;

(2)两岩体在岩浆演化过程中均发生了硫化物的熔离,导致了岩体 PGE 元素的强烈亏损;罗东岩体早期矿物相的分离结晶对硫化物熔离具有重要贡献,坡一岩体中地壳物质混入对硫化物熔离具有重要影响;

(3)两岩体均有形成中型 Ni 为主的矿床的潜力,PGE 富集成矿的可能性小。

致谢: 野外期间得到新疆维吾尔自治区地质矿产勘探开发局第六地质大队的罗布泊铜镍矿项目组给予的支持与帮助,PGE 分析得到了中国地质科学院测试中心工作人员的帮助,在此一并表示诚挚的谢意。

注 释

① 新疆维吾尔自治区地质矿产勘探开发局第六地质大队。2009.

新疆若羌县坡北—旋窝岭一带镍矿普查报告。

参 考 文 献

柴凤梅,张招崇,毛景文,董连慧,张作衡. 2005. 岩浆型 Ni-Cu-PGE 硫化物矿床研究的几个问题探讨. 矿床地质, 24(3): 325~335.

柴凤梅,张招崇,毛景文,董连慧,叶会寿,吴华,莫新华. 2006. 新疆哈密白石泉含铜镍镁铁-超镁铁质岩体铂族元素特征. 地球学报, 27(2): 123~128.

高怀忠. 1992. 新疆坡北基性-超基性岩带 1 号岩体地质特征及其含矿性研究. 地球科学:中国地质大学学报, 17(4): 391~401.

韩宝福,李建清,宋彪,陈立辉,李宗怀. 2004. 新疆喀拉通克和黄山东含铜镍矿镁铁-超镁铁杂岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 科学通报, 49(22): 2324~2328.

胡旺亮,周治新. 1992. 北山笔架山地区基性-超基性岩带地物化特征及含矿性研究. 新疆地质, 10(2): 167~175.

姜常义,程松林,叶书锋,夏明哲,姜寒冰,代玉财. 2006. 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. 岩石学报, 22(1): 115~126.

李鸿儒. 1994. 新疆坡北基性超基性岩带控岩构造特征及成矿专属性. 中国区域地质, (3): 227~233.

李华芹,陈富文,梅玉萍,吴华,程松林,杨甲全,代玉财. 2006. 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. 矿床地质, 25(4): 450~463.

李华芹,梅玉萍,屈文俊,蔡红,杜国民. 2009. 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. 矿床地质, 28(5): 633~642.

毛景文,杨建民,屈文俊,杜安道,王志良,韩春明. 2002. 新疆黄山东铜镍硫化物矿床 Re-Os 同位素测定及其地球动力学意义. 矿床地质, 21(4): 323~330.

钱壮志,孙涛,汤中立,姜常义,何克,夏明哲,王建中. 2009. 东天山黄山东铜镍矿床铂族元素地球化学特征及其意义. 地质论评, 55(6): 873~884.

宋谢炎,胡瑞忠,陈列锰. 2009. 铜、镍、铂族元素地球化学性质及其在幔源岩浆起源、演化和岩浆硫化物矿床研究中的意义. 地学前缘, 16(4): 287~305.

苏本勋,秦克章,孙赫,唐冬梅,肖庆华,曹明坚. 2009. 新疆北山红石山镁铁-超镁铁岩体的岩石矿物学特征: 对同化混染和结晶分异过程的启示. 岩石学报, 25(4): 873~887.

苏本勋,秦克章,孙赫,王恒. 2010. 新疆北山地区旋窝岭镁铁-超镁铁岩体的年代学、岩石矿物学和地球化学研究. 岩石学报, 26(11): 3283~3294.

孙赫,秦克章,李金样,唐冬梅,范新,肖庆华. 2008. 地幔部分熔融程度对东天山镁铁质-超镁铁质岩铂族元素矿化的约束——以图拉尔根和香山铜镍矿为例. 岩石学报, 24(5): 1079~1086.

孙赫,秦克章,唐冬梅,肖庆华,苏本勋,卢鸿飞. 2010. 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. 科技导报, 28(18): 21~26.

孙涛,钱壮志,汤中立,姜常义,何克,孙亚莉,王建中,夏明哲. 2010. 新疆葫芦铜镍矿床锆石 U-Pb 年代学、铂族元素地球化学特征及其地质意义. 岩石学报, 26(11): 3339~3349.

- 孙晓明, 熊德信, 王生伟, 石贵勇, 翟伟. 2006. 云南哀牢山金矿带墨江金镍矿床铂族元素(PGE)地球化学及其对矿床成因的制约. 矿床地质, 25(4): 438~446.
- 孙燕, 肖渊甫, 王道永, 邓江红, 吴德超. 2009. 新疆北山坡北基性-超基性杂岩特征及成矿远景. 成都理工大学学报(自然科学版), 36(4): 402~407.
- 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, 1~209.
- 唐冬梅, 秦克章, 孙赫, 苏本勋, 肖庆华, 程松林, 李军. 2009. 天宇铜镍矿床的岩相学、锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征: 对东疆镁铁-超镁铁质岩体源区和成因的制约. 岩石学报, 25(4): 817~831.
- 王瑞廷, 毛景文, 赫英, 汤中立, 王东升, 任小华. 2005. 煎茶岭硫化镍矿床的铂族元素地球化学特征及其意义. 岩石学报, 21(1): 219~226.
- 王生伟, 孙晓明, 石贵勇, 熊德信, 翟伟. 2006. 云南白马寨铜镍硫化物矿床铂族元素地球化学及其对矿床成因的制约. 地质学报, 80(9): 1474~1486.
- 王生伟, 孙晓明, 石贵勇, 熊德信, 翟伟. 2007. 云南金宝山和白马寨铜镍硫化物矿床铂族元素(PGE)地球化学的差异及其成因意义. 地质学报, 81(1): 93~108.
- 肖庆华, 秦克章, 唐冬梅, 苏本勋, 孙赫, 三金柱, 曹明坚, 惠卫东. 2010. 新疆哈密香山西铜镍-钛铁矿床系同源岩浆分异演化产物——矿相学、锆石 U-Pb 年代学及地球化学证据. 岩石学报, 26(2): 503~522.
- 闫军武, 郭燕, 伊永国. 2010. 新疆北山坡十岩浆铜镍硫化物矿床特征及勘查方法. 西部探矿工程, (10): 178~180.
- 杨甲全, 钟莉, 邓刚. 2002. 北山地区坡北 1 号、10 号基性-超基性岩体成矿预测及找矿方向. 新疆地质, 20(3): 214~218.
- 新疆维吾尔自治区地质矿产局. 1993. 新疆维吾尔自治区区域地质志. 北京: 地质出版社.
- Barnes S J, Boyd R, Komeliusson A, Nilsson L P, Oftin M, Pedersen R B, Robins B. 1988. The use of mantle normalization and metal ratios in discriminating between the effects of partial melting, crystal fractionation and sulphide segregation on platinum-group elements, gold, nickel and copper; examples from Norway. In: Prichard H M, Potts P J, Bowles J F W, Cribb S J (eds). GeoPlatinum-87. London: Elsevier, 113~143.
- Barnes S J, Couture J F, Sawyer E W, Bouchaib C. 1993. Nickel-copper occurrences in the belletterre-Angliers belt of the Pontiac subprovince and the use of Cu-Pd ratios in interpreting platinum group element distributions. Economic Geology, 88: 1402~1418.
- Barnes S J, Naldrett A J, Gorton M P. 1985. The origin of the fractionation of platinum-group elements in terrestrial magmas. Chemical Geology, 53: 303~323.
- Brenan J M, McDonough W F, Ash R. 2005. An experimental study of the solubility and partitioning of iridium, osmium and gold between olivine and silicate melt. Earth and Planetary Science Letter, 237: 855~872.
- Brügmann G E, Naldrett A J, Asif M, Lightfoot P C, Gorbachev N S, Fedorenko V A. 1993. Siderophile and chalcophile metals as tracers of the evolution of the Siberian trap in the Noril'sk region, Russia. Geochimica et Cosmochimica Acta, 57(9): 2001~2018.
- Campbell I H, Naldrett A J. 1979. Influence of silicate sulfide ratios on the geochemistry of magmatic sulfides. Economic Geology, 74(6): 1503~1506.
- Chai G, Naldrett A J. 1992. Characteristics of Ni-Cu-PGE mineralization and genesis of the Jinchuan deposit, Northwest China. Economic Geology, 87: 1475~1495.
- Fleet M E, Crocket J H, Stone W E. 1996. Partitioning of platinum-group elements (Os, Ir, Ru, Pt, Pd) and gold between sulfide liquid and basalt melt. Geochimica et Cosmochimica Acta, 60: 2397~2412.
- Fryer B J, Greenough J. 1995. Evidence for mantle heterogeneity from platinum-group element abundances in Indian ocean basalts. Canadian Journal of Earth Science, 29: 2329~2339.
- Garuti G, Fershtater G, Bea F, Montero P, Pushkarev E V, Zaccarini F. 1997. Platinum-group elements as petrological indications in mafic-ultramafic complexes of the central and southern Urals: preliminary results. Tectonophysics, 276: 181~194.
- Keays R R. 1995. The role of komatiitic and picritic magmatism and S-saturation in the formation of ore deposits. Lithos, 34: 1~18.
- Le Bas M J. 2000. IUGS reclassification of the high-Mg and picritic volcanic rocks. Journal of Petrology, 41: 1467~1470.
- Leshner C M, Arndt N T, Groves D I. 1984. Genesis of komatiite associated nickel sulfide deposits at Kambalda, Western Australia: A distal volcanic model. In: Buchanan D L, Jone M J (eds). Sulfide deposits in mafic and ultramafic rocks. Institute of Mineralogy Metallurgy London, 70~80.
- Maier W D, Barnes S J, De Waal S A. 1998. Exploration for magmatic Ni-Cu-PGE sulphide deposits: A review of recent advances in the use of geochemical tools, and their application to some south African ores. South African Journal of Geology, 101(3): 237~253.
- Naldrett A J. 1997. Key factors in the genesis of Noril'sk, Sudbury, Jinchuan, Voisey's Bay and other world-class Ni-Cu-PGE deposits: implication for exploration. Australian Journal of Earth Sciences, 44: 281~315.
- Naldrett A J, Asif M, Krstic S, Li C. 2000. The composition of ore at the Voisey's Bay Ni-Cu sulfide deposit with special reference to platinum-group elements. Economic Geology, 95: 845~866.
- Naldrett A J, Wilson A H. 1990. Horizontal and vertical variations in noble-metal distribution in the Great Dyke of Zimbabwe: A model for PGE mineralization by fractional segregation of sulfide. Chemical Geology, 88: 279~300.
- Naldrett A J. 2004. Magmatic sulfide deposit: Geology, geochemistry and exploration. Berlin: Springer, 137~277.
- Pearson D G, Irvine G J, Lonov D A, Boyd F R, Dreibus G E. 2004. Re-Os isotopic systematics and platinum group element

fractionation during mantle melt extraction; a study of massif and xenolith peridotite suites. *Chemical Geology*, 208: 29~5.

Sun S S, de Waal S A, Hoatson D M, Glikson A Y, Keays R R. 1991. Use of geochemistry as a guide to platinum group element

potentials of mafic-ultramafic rocks: examples from the west Pilbara Block and Halls Creek Mobile Zone, western Australia. *Precambrian Research*, 50: 1~35.

Platinum Group Elements Geochemistry of Two Mafic-Ultramafic Intrusions in the Beishan Block, Xinjiang, NW China

CHAI Fengmei¹⁾, XIA Fang¹⁾, CHEN Bin^{1,2)}, LU Hongfei³⁾, WANG Heng³⁾, LI Jun³⁾, YAN Yupu⁴⁾

1) *Xinjiang Key Laboratory for Geodynamic Processes and Metallogenic Prognosis of the Central Asian Orogenic Belt, College of Geology and Mining Engineering, Xinjiang University, Urumqi, 830049*; 2) *School of Earth and Space Sciences, Peiking University, Beijing, 100871*; 3) *No.6 Geological Team of Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources, Hami, Xinjiang, 839000*; 4) *Tuha Oilfield Exploration & Development Research Institute, Hami, Xinjiang, 839009*

Abstract

PGE geochemistry of the Poyi and Luodong Ni-Cu sulphide-bearing mafic-ultramafic intrusions in the Beishan was analyzed in this study. The results show two intrusions have low total PGE contents, ranging from 2.15×10^{-9} to 18.66×10^{-9} in Poyi intrusion and 0.55×10^{-9} to 3.18×10^{-9} in Luodong intrusion, respectively, with PPGE higher than IPGE. The PGE primitive mantle-normalized patterns display a positive slop and low fractionation between IPGE and PPGE, and negative Ir and Rh anomalies. The PGE, Cu and Ni are depleted relative to the primitive mantle with low and narrow Pd/Ir ranges (3.47~7.35 and 9.73~20.67), indicating the magma contamination. The relationship between Ni/Cu and Pd/Ir indicates that the primary magma was high-magnesium tholeiitic. The Cu/Pd and Ti/Pd ratios of these rocks suggest that the primary magmas have undergone segragation of sulfide before their emplacement. The obviously positive correlation between Cr and Ni, Ir in the Luodong intrusion shows that fractionation crystallization of olivine and chromite made key contribution to sulfur saturation of the magma, with inconspicuous effect over sulfide segregation in the Poyi intrusion. Based on the PGE model calculations, calculated R values suggest that the two intrusions are of potential of medium-scale Ni deposit.

Key words: platinum group elements; geochemistry; Ni-Cu mineralization; mafic-ultramafic intrusions; Beishan; Xinjiang