

·专题研究·

# 新疆北山红石山含铜镍镁铁-超镁铁质岩体 PGE 和 Re-Os 同位素地球化学特征及成矿意义

夏芳<sup>1</sup> 柴凤梅<sup>1</sup> 陈斌<sup>1,2</sup> 卢鸿飞<sup>3</sup> 严玉圃<sup>4</sup>

(1. 新疆中亚造山带大陆动力学与成矿预测实验室, 新疆 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)

**摘要:** 对新疆北山地区红石山镁铁-超镁铁质岩体中含铜镍的硫化物矿石和岩石进行了铂族元素和 Re-Os 同位素地球化学特征研究, 结果表明, 矿石及岩石的铂族元素(PGE)总量较低, 变化于  $0.54 \times 10^{-9}$  ~  $15.84 \times 10^{-9}$  之间。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。较高的 Cu/Pd 和 Ti/Pd 比值表明岩浆在演化过程中发生了硫化物的熔离。岩体的母岩浆为有早期结晶橄榄石加入的高镁的玄武质岩浆。 $\gamma_{Os}(t)$  的变化较大, 变化于 -282 ~ +282 之间, 表明有较多的地壳物质混入。地壳物质混染和橄榄石等矿物的分离结晶可能是引起岩浆中的 S 达到饱和进而熔离的重要因素。红石山岩体是经历了结晶分异和硫化物熔离后橄榄石的堆积体与残余岩浆演化的混合体。

**关键词:** 铂族元素; Re-Os 同位素; 地球化学; 镁铁-超镁铁质岩; 红石山

中图分类号: P588.12; P597

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2012)01-0001-12

## Geochemical characteristics of platinum group elements and Re-Os isotopes of the Hongshishan Cu-Ni sulfide-bearing mafic-ultramafic intrusion in Beishan block of Xinjiang and their metallogenic significance

XIA Fang<sup>1</sup>, CHAI Feng-mei<sup>1</sup>, CHEN Bin<sup>1,2</sup>, LU Hong-fei<sup>3</sup> and YAN Yu-pu<sup>4</sup>

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

**Abstract:** The Pobei mafic-ultramafic belt is an important Ni-Cu sulfide metallogenic prospective province in Beishan area, eastern Xinjiang. About 20 intrusions (e. g., Bijiashan, Hongshishan, Cihai, Poyi, Poshi and Luodong) were recognized along the fault in this area and almost all the intrusions are associated with Ni-Cu sulfide deposits. The Hongshishan mafic-ultramafic complexes are located in the eastern part of the Pobei mafic-ultramafic belt and the southern part of the Baidiwa-Yunihe fault in this area. They intruded into quartz schist of the Lower Carboniferous Hongliuhe Formation. They are mainly composed of dunite, peridotite, troctolite, pyroxenite, olivine gabbro, gabbro and diorite. These rocks were emplaced in two stages. The first stage consists of

收稿日期: 2011-05-08; 修订日期: 2011-07-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(40863001, 40973028, 40972069); 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2010211A08); 新疆大学“天山学者”特聘教授(陈斌)启动经费资助

作者简介: 夏芳(1981-), 女, 硕士, 矿物学、岩石学及矿床学专业, E-mail: xiafang0001@163.com; 通讯作者: 柴凤梅(1971-), 女, 教授, 主要从事岩石学、矿床学的教学与研究工作, E-mail: chaifengmei@163.com。

网络优先出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1966.P.20111024.0915.001.html>

peridotite and olivine gabbro, and the second stage comprises gabbro and diorite. The dunite, pyroxene peridotite and troctolite are the host rocks for Ni-Cu sulfide ores. The platinum-group elements and Re-Os isotopic compositions of ore and rocks from the Hongshishan Ni-Cu sulfide-bearing mafic-ultramafic intrusions were analyzed, and the result shows that the total PGE content is quite low, ranging from  $0.54 \times 10^{-9}$  to  $15.84 \times 10^{-9}$  and increasing with the increase of sulfide content. The PGE primitive mantle-normalized patterns display a positive slope and low fractionation between IPGE and PPGE. PGE, Cu and Ni are depleted relative to the primitive mantle with low and a narrow Pd/Ir range (3.19~10.5), indicating a weak influence of later hydrothermal alteration. Furthermore, the Ir displays positive correlations with Pt, Pd, Os, Ru and Rh, indicating a weak contribution of the fractionation and the partial melt to PGE depletion. The Cu/Pd ratios ( $73 \times 10^3 \sim 1\ 670 \times 10^3$ ) and Ti/Pd ratios ( $87 \times 10^3 \sim 2\ 857 \times 10^3$ ) of these rocks suggest that sulfur in the primary magmas had reached saturation, and immiscible sulfides droplets were segregated from silicate magmas before their emplacement. The relationship between Ni/Cu and Pd/Ir indicates that the parental magma was high-magnesium basaltic magmas. Their  $\gamma_{Os}(t)$  and  $(^{187}Os/^{188}Os)_i$  are variable, ranging from +18 to +282 and from 0.1483 to 0.4813, respectively, suggesting that abundant crustal material was mixed with the ascending magma. The fractionation of olivine and contamination by crustal material probably triggered the sulfide saturation and segregation and the Ni-Cu-(PGE) mineralization as well. The intrusions were generated from the magma that had undergone crystallization differentiation of olivine and segregation of sulfides.

**Key words:** platinum group element; Re-Os isotope; geochemistry; mafic-ultramafic intrusions; Hongshishan

红石山铜镍硫化物矿床位于新疆东部北山地区坡北镁铁-超镁铁质岩带中,该带是新疆近年来发现的又一重要的铜镍成矿远景区。由于该区生存环境极为恶劣,与东天山和中天山地区相比,北山地区的镁铁-超镁铁质岩体的研究较为薄弱,仅韩春明等(2010)<sup>①</sup>获得了橄榄辉长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为  $281.8 \pm 2.6$  Ma;苏本勋等(2009)对红石山的岩相学以及主要造岩矿物橄榄石、辉石、斜长石、角闪石和黑云母进行了研究,认为结晶分异、同化混染以及新岩浆注入在岩浆的演化过程中起到了至关重要的作用。这些研究表明,红石山岩体与东天山的黄山(Zhou *et al.*, 2004)、黄山东(韩宝福等, 2004)、香山(李月臣等, 2006)、葫芦(陈世平等, 2005)、中天山的天宇(唐冬梅等, 2009)、白石泉(吴华等, 2005;毛启贵等, 2006)、阿尔泰造山带南缘的喀拉通克(韩宝福等, 2004)含铜镍矿岩体是同时代的产物,并与这些岩体具有相近的矿物组合和岩相学特征。

铂族元素(PGE)以其既亲 Fe、Cu 又亲 S 的特殊的地球化学特性,成为探讨镁铁-超镁铁质岩体的成因以及与其有关矿床的成矿作用的有力手段(Naldrett *et al.*, 2000;王瑞廷等, 2005;王生伟等, 2006;

孙晓明等, 2006;唐冬梅等, 2009)。目前,红石山镁铁-超镁铁质岩体的 PGE 元素特征尚未见报道。本文通过对红石山含矿岩体的铂族元素(PGE)以及 Re-Os 同位素进行分析,探讨岩体的演化过程及铜镍矿的成矿机制,以期对北山地区铜镍硫化物矿床的找矿和勘查提供有益的资料。

## 1 地质背景

北山地区位于新疆东部,处于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,呈北东向展布(图 1a)(苏本勋等, 2009)。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;中元古界白湖群石英片岩、黑云母片岩、石榴石砂卡岩、大理岩;下石炭统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;上石炭统石板山组千枚岩、粉砂岩和少量玄武岩;第四系冲洪积物。区内岩浆岩较为发育,以石炭纪—二叠纪岩浆活动最为强烈,发育大量的中基性侵入岩,并出露有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

① 韩春明等. 2010. 国家科技支撑计划项目“东天山库鲁克塔格、北山成矿带大型铜(镍)金矿床预测和靶区优选评价技术与应用研究”研究报告.

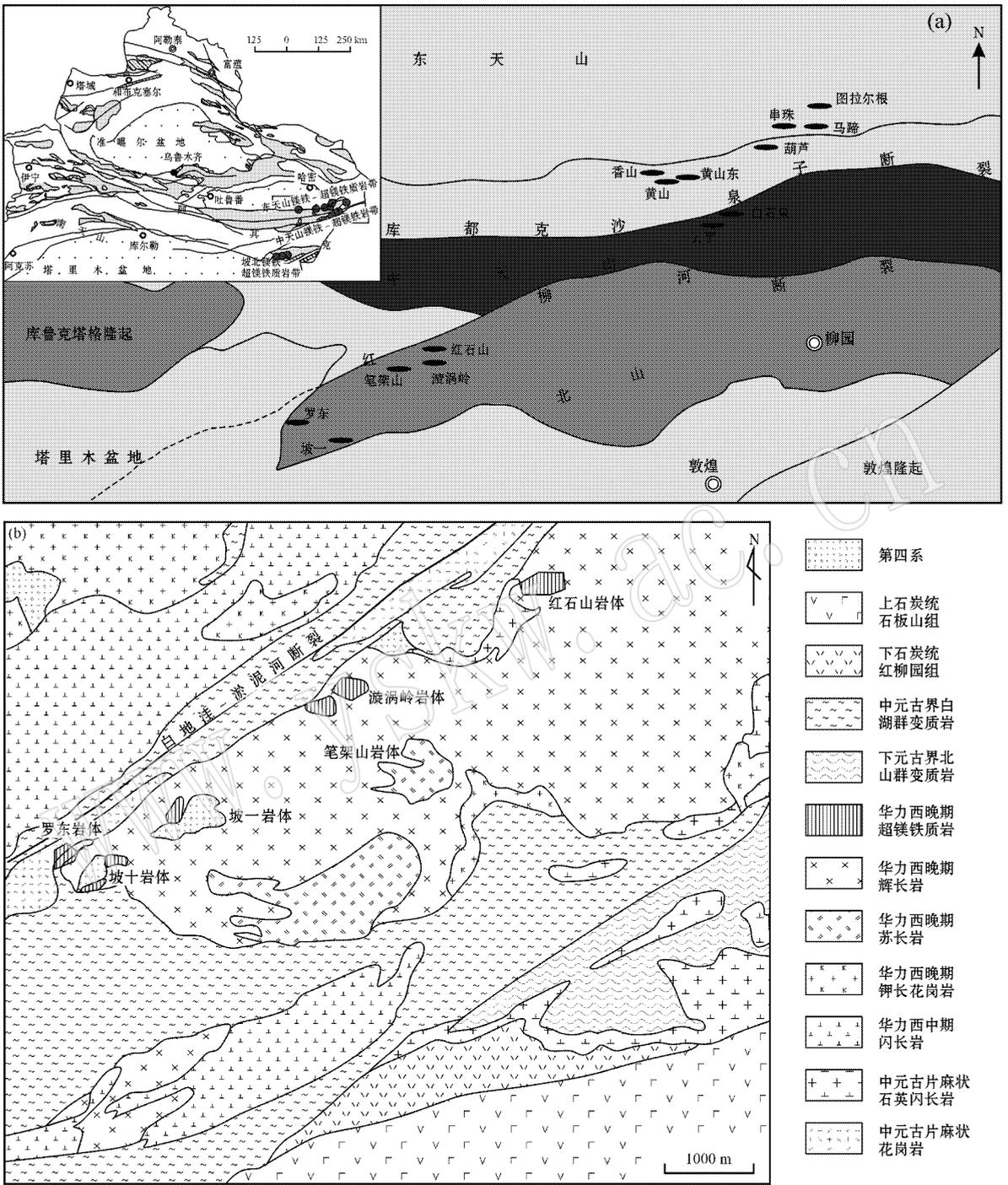


图 1 北山大地构造位置图及研究区区域地质图 [据苏本勋等(2009)修改]

Fig. 1 Simplified tectonic location map of Beishan and regional geological sketch map of the study area (modified after Su Benxun *et al.*, 2009)

元古代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)。

红石山岩体位于北山镁铁-超镁铁质岩带东段, 依孜塔格深白地洼-淤泥河断裂南侧, 侵位于下石炭统红柳园组大理岩和石英片岩中 (图 2), 多被第四系

沉积物覆盖 (图 3a), 出露面积 2.63 km<sup>2</sup>。岩体呈北东东向产出, 长约 5 km, 南北宽度变化较大, 最宽处约 920 m。根据地表及钻孔的岩相穿插关系可划分为 2 个侵入期次和 3 个岩相, 主要由早期的橄榄岩相、橄榄辉长岩相和晚期的浅色辉长岩相 (和闪长岩

相组成。橄榄岩相岩石风化强烈,多成碎片状,辉长岩相岩石地表球状风化极为发育而呈圆球形(图 3b)。橄榄岩相是主体岩相,面积约 1.97 km<sup>2</sup>,沿东西向出露,发育有纯橄榄岩、橄长岩、辉橄岩和辉石岩;橄榄辉长岩相主要出露于岩体西段和西部的北侧、东部的南侧以及橄榄岩相内,呈平行岩体长轴方向的不连续小透镜体产出,面积约 0.51 km<sup>2</sup>,与橄榄

岩相呈渐变过渡,界线不明显,浅色辉长岩相呈豆荚状不连续分布,与岩体走向一致,与橄榄岩相和橄榄辉长岩相呈明显的侵入接触关系。目前已圈定 29 个镍矿(化)体,其中 4 个矿体规模较大,主要呈透镜状、脉状赋存于橄长岩、辉橄岩和纯橄榄岩的顶部(苏本勋等,2009),主要的矿石矿物有磁黄铁矿、镍黄铁矿和黄铜矿,矿石主要以浸染状为主<sup>①</sup>。

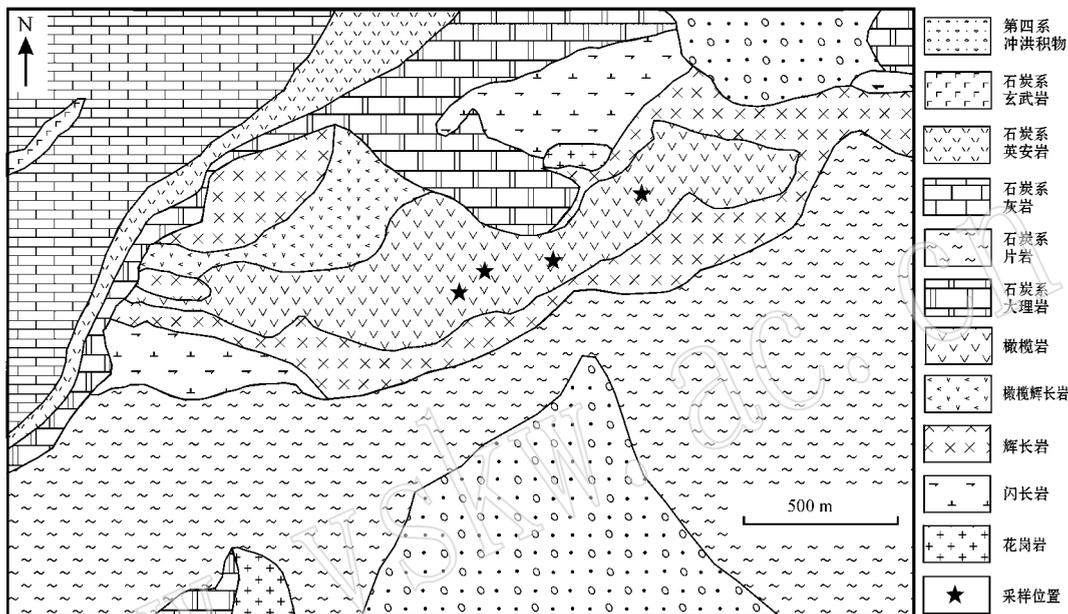


图 2 红石山镁铁-超镁铁质岩体地质图 [据韩春明等(2010)<sup>①</sup>修改]

Fig. 2 Geological map of the Hongshishan mafic-ultramafic intrusions in Beishan, Xinjiang (modified after Han Chunming *et al.*, 2010<sup>①</sup>)

纯橄榄岩呈黑色,具全晶质中细粒结构,块状构造。主要由橄榄石组成,偶见辉石和角闪石,并可见铬铁矿和其他金属矿物。橄榄石约 90% 左右,中细粒,粒大者约 1 mm × 1.4 mm,粒小者约 0.9 mm × 0.5 mm。辉石或角闪石多呈包裹橄榄石存在,铬铁矿约 2% 左右,多成自形的八边形充填于橄榄石颗粒间。含矿者蚀变强烈,不含矿者较为新鲜。橄榄石或者沿裂隙及边缘发生蛇纹石化蚀变,仅在中心有残留而呈孤岛状和网状结构,部分颗粒则完全蚀变仅保留其假象。金属硫化物分布于橄榄石间,磁铁矿等分布于橄榄石颗粒裂隙或边缘(图 3c、3d、3e)。硫化物主要分布于岩体上部的纯橄榄岩中,在下部的橄榄岩中不发育。

辉石橄榄岩呈绿黑色,具全晶质中细粒结构,块

状构造。主要由橄榄石和辉石组成,并可见少量黑云母和斜长石。辉石多已蚀变为绿色的纤闪石和蛇纹石(图 3f)。偶见充填于橄榄石和辉石颗粒间的尖晶石。硫化物主要分布于造岩矿物之间或其裂隙中(苏本勋等,2009)。

橄长岩呈灰黑色,具全晶质中细粒结构,块状构造。主要由橄榄石和斜长石组成,并含少量辉石、角闪石、黑云母及不透明金属矿物等组成。发育有 3 期结晶的尖晶石(苏本勋等,2009)。橄榄石多成半自形短柱状及椭圆粒状,斜长石多以包裹橄榄石存在,且与橄榄石接触处有一薄层闪石化次变边,沿橄榄石颗粒四周成放射状的裂纹较为发育,具橄长岩典型结构。

辉长岩主要由斜长石和辉石组成,偶见尖晶石。

① 韩春明等. 2010. 国家科技支撑计划项目“东天山库鲁克塔格、北山成矿带大型铜(镍)金矿床预测和靶区优选评价技术与应用研究”研究报告.

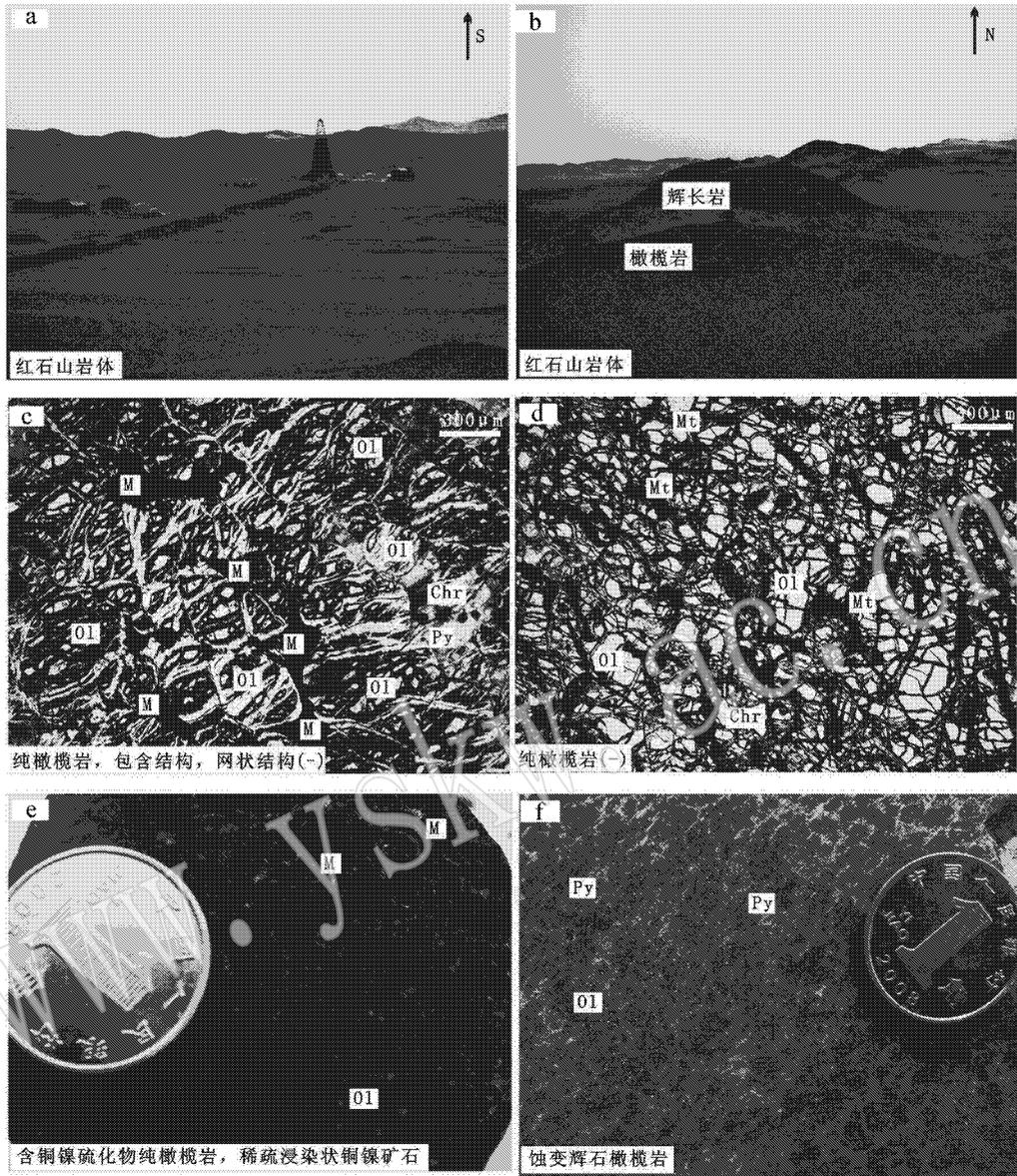


图 3 红石山镁铁-超镁铁质岩体岩石照片

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

上部岩石发育金云母和碳酸盐脉 (苏本勋等, 2009)。

## 2 样品特征及分析方法

本次研究共选取了具有代表性的较为新鲜的样品 9 件, 主要为含矿和不含矿的橄榄岩, 主要特征见表 1。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 和 Cr 含量在澳实分析检测有限公司采用 ME-ICP 法测定。铂族元

素分析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, 加入适量钨稀剂在 1 150℃ 高温炉内熔融, 将熔体倒入铁模中冷却后取出钨扣, 用 HCL 溶解钨扣滤出不溶物, 在封闭溶样器中用王水溶解滤渣, 最后在 ICP-MS 上测定 Pt、Pd、Rh、Ir、Ru 和 Os。全流程空白值为: Os、Ir、Ru、Pd 为  $0.3 \times 10^{-9}$ , Pt、Rh 为  $0.06 \times 10^{-9}$ 。

Re-Os 同位素分析在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超净化学实验室采用 Perkin-Elmer Sciex ELAN DRC-e 等离子质谱测定。

表 1 红石山镁铁-超镁铁质岩体主要岩石特征

Table 1 Mineral composition features and petrological characteristics of the Poyi and Ludong mafic-ultramafic intrusions in Beishan

样品编号	采样位置	岩石名称	结构	硫化物含量
HSS101-4	ZK0-2.90 m	蛇纹石化橄榄岩	全晶质中粗粒结构 堆晶结构	N
HSS101-6	ZK0-2.100 m	蛇纹石化纯橄榄岩	网状结构 堆晶结构	N
HSS101-8	ZK0-2.105 m	蛇纹石化纯橄榄岩	半自形中粒结构 堆晶结构	N
HSS102-4	ZK0-4.260 m	蛇纹石化辉石橄榄岩	网状结构	N
HSS103-3	ZK23-1.820 m	纯橄榄岩	网状结构	N
HSS104-4	ZK4-2.560 m	纯橄榄岩	全晶质中粗粒结构 堆晶结构	N
HSS105-1	ZK16-1.860 m	含斜长石纯橄榄岩	斜长石充填于橄榄石堆晶间	星点状 4%
HSS105-4	ZK16-1.880 m	含斜长石纯橄榄岩	斜长石充填于橄榄石堆晶间	星点状 5%
HSS106-1	ZK16-2.800 m	蛇纹石化纯橄榄岩	网状结构	稀疏浸染状 10%

分析流程采用该实验室所建立流程完成(苟体忠等, 2010)。对于 Re, 选择质量数为 185、187, 用 190 监测 Os; 对于 Os, 选择质量数为 186、187、188、189、190、192, 用 185 监测 Re。实验全流程空白 Re 约为  $2 \times 10^{-12}$ , Os 约为  $1 \times 10^{-12}$ , 远小于待测样品中的 Re 和 Os 的含量。

### 3 分析结果

#### 3.1 铂族元素(PGE)地球化学特征

9 件样品的 PGE、Cu 和 Ni 数据列于表 2。从表 2 可以看出, 样品的铂族元素总量( $\Sigma$ PGE)相差较大, 介于  $0.54 \times 10^{-9} \sim 15.84 \times 10^{-9}$  之间, 主要与硫化物含量多少有关, 含硫化物者较不含硫化物者的 PGE 总量高, 含硫化物多者较含硫化物少者的 PGE

总量高。所有样品的 PPGE(Ir、Pt、Pd) 较 IPGE(Ir、Os、Ru) 富集(PPGE/IPGE = 1.80 ~ 4.43), Pd/Ir 比值较低(3.19 ~ 10.5), Ni/Cu 比值变化大(1.35 ~ 38.5), Pt/Pd 比值介于 0.95 ~ 2.07 之间。所有样品的 Pt 与 Pd、Cu 与 Ni 以及 Ir 与 Pt、Pd、Os、Ru 和 Rh 呈现明显的正相关, 但 PGE 与 Cr 无相关性(图 4)。PGE 总量与东天山地区的香山、图拉尔根矿床和黄山东矿床中的相同类型矿石和不含矿岩石的 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(汤中立等, 1995)。

在 PGE 原始地幔标准化模式图解(图 5)上, 所有样品具有相似的配分型式, 即稍向左倾的“Pt-Pd”型。与科马提岩、苦橄岩和含铜镍矿的镁铁-超镁铁岩(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) 的铂

表 2 红石山镁铁-超镁铁质岩体铂族元素含量及参数

Table 2 PGE abundances and parameters of analyzed samples

样号	HSS101-4	HSS101-6	HSS101-8	HSS102-4	HSS103-3	HSS104-4	HSS105-1	HSS105-4	HSS106-1
Os	0.18	0.22	0.17	0.27	0.04	0.24	2.21	2.29	3.1
Ir	0.05	0.1	0.07	0.17	0.02	0.1	1.05	1.27	1.61
Ru	0.08	0.14	0.11	0.28	0.05	0.22	1.52	2.1	3.13
Rh	0.02	0.02	0.02	0.04	0.02	0.02	0.28	0.41	0.83
Pt	0.54	0.98	1.01	1.16	0.2	0.67	5.44	5.72	13.2
Pd	0.4	0.7	0.52	0.56	0.21	0.57	3.45	4.05	12
Ni	2340	2310	1950	1530	1310	1470	2780	6860	7770
Cu	668	623	443	84	34	69	250	2310	5760
Cr	4520	3460	3510	3380	2630	2290	3490	4440	4040
MgO	33.9	33.8	33.2	34.7	36.7	36.3	40.8	39.5	35.2
Ni/Cu	3.5	3.7	4.4	18.2	38.5	21.3	11.1	2.97	1.35
Pd/Ir	8	7	7.43	3.29	10.5	5.7	3.29	3.19	7.45
Cu/Pd $\times 10^3$	1670	890	852	150	162	121	73	570	480
Ti/Pd $\times 10^3$	1750	1000	962	714	2857	1754	87	99	92

分析含量单位: PGE 为  $10^{-9}$ , Cu、Ni、Cr 为  $10^{-6}$ , MgO 为 %。

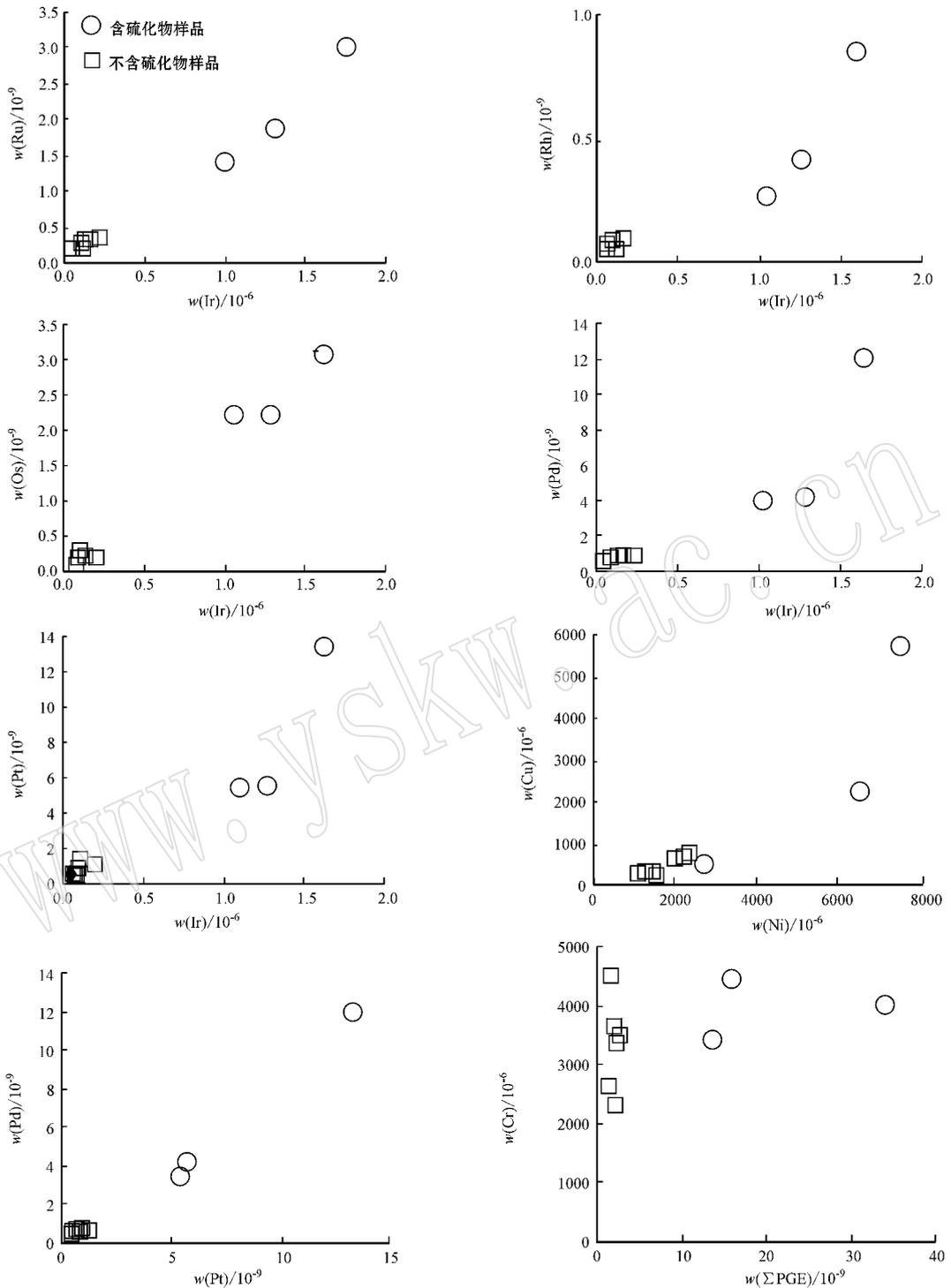


图 4 红石山镁铁-超镁铁质岩体 PGE 相互关系图

Fig. 4 Concentrations of PGE relationship in the Hongshishan mafic-ultramafic intrusions in Beishan

族元素分布型式一致,与 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 的弱正异常,表明所有样品具有相同的物质来源。

### 3.2 Re-Os 同位素地球化学特征

4 件样品的 Re-Os 同位素测定结果列于表 3。

可以看出,不同样品的 Re 和 Os 含量明显不同。含硫化物样品的 Re ( $4.79 \times 10^{-9}$ ) 和 Os ( $1.59 \times 10^{-9}$ ) 含量高于不含硫化物样品的 Re ( $0.72 \times 10^{-9} \sim 4.27 \times 10^{-9}$ ) 和 Os ( $0.095 \times 10^{-9} \sim 0.23 \times 10^{-9}$ ) 含量。含矿样品的  $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$  比值 (14.6),  $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$  比

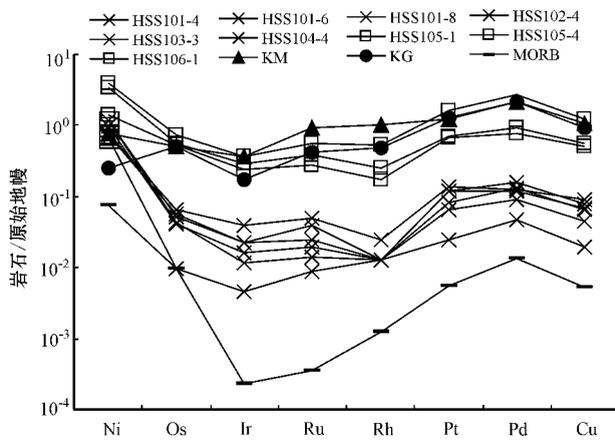


图 5 红石山镁铁-超镁铁质岩体 PGE 原始地幔标准化图解 (原始地幔值引自 Barnes *et al.*, 1988)

Fig. 5 Primitive mantle-normalized PGE patterns of the Hongshishan mafic-ultramafic intrusions in Beishan (normalization values after Barnes *et al.*, 1988)

表 3 红石山镁铁-超镁铁质岩体 Re-Os 同位素组成

Table 3 Re-Os isotopic data of the Hongshishan Ni-Cu sulfide-bearing mafic-ultramafic intrusions in Beishan

样品	Rd(总) $\times 10^{-9}$	2 $\sigma$	Os(总)	2 $\sigma$	Re/Os	$^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$	2 $\sigma$	$^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$	2 $\sigma$	$\gamma_{\text{Os}}$	( $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ )
HSS101-4	4.271 1	0.116 5	0.111 2	0.001 1	38.4	198.9	5.8	0.707 4	0.013 0	-282.2	-0.229 1
HSS101-8	1.124 3	0.021 0	0.095 0	0.001 8	11.8	61.8	1.6	0.772 3	0.012 9	282.8	0.481 3
HSS102-4	0.721 3	0.001 8	0.228 5	0.000 7	3.2	15.4	0.4	0.220 7	0.000 5	17.9	0.148 3
HSS105-1	4.786 7	0.281 9	1.593 5	0.021 5	3.0	14.6	0.9	0.223 8	0.000 4	23.1	0.154 8

注:  $\gamma_{\text{Os}}(t) = [(^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os})_{\text{样品}} / (^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os})_{\text{球粒陨石}} - 1] \times 100$  (Walker *et al.*, 1994); 282 Ma 球粒陨石的  $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os} = 0.096 00 + 0.400 \lambda e^{-\lambda T} - e^{-\lambda T}$ , 其中  $T$  (地球形成年龄) = 4.558 Ga (Shirey and Walker, 1998),  $\lambda = 1.666 \times 10^{-11}$  (Smoliar *et al.*, 1996); Re/Os 中的 Os 为总 Os。

物和岩体的 Pd/Ir 比值大于 100 (Keays, 1995; Maier *et al.*, 1998)。前人研究成果表明, 不同成因类型的岩石具有明显不同的 Pd/Ir 和 Ni/Cu 数值分布范围, 而且硫化物的熔离对残余岩浆的 Pd/Ir 比值和 Ni/Cu 比值影响不大, 因此常用 Pd/Ir - Ni/Cu 关系图解指示母岩浆的性质 (Barnes and Lightfoot, 2005)。在 Pd/Ir - Ni/Cu 图解 (图 6) 上, 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。利用橄榄石-熔体平衡原理, 根据 Mg-Fe 在橄榄石-熔体之间的分配系数  $K_D^{\text{Oliv-Melt}} = 0.3 \sim 0.33$  (Roeder and Emslie, 1970; Li *et al.*, 2004), 结合岩体中橄榄石 MgO 含量最高的  $F_0 = 89$ , 推算出与其共存熔体的  $\text{MgO}/\text{FeO}^T < \text{样品的 } \text{MgO}/\text{FeO}^T$ , 表明岩石的成分不能代表共存的熔体成分, 岩浆中有过剩的橄榄石加入, 母岩浆是经过深部橄榄石结晶的演化岩浆。这与岩相学观察的结果一致。假设与该橄榄石平衡熔体的  $\text{FeO}^T$  即为岩石的  $\text{FeO}^T$  含量, 由此计算出母岩浆的 MgO 含量为 11.89%。

值 (0.223 8) 以及 Re/Os 比值 (3.0) 分别低于不含矿样品的相应值 (15.4 ~ 198.9, 0.220 7 ~ 0.772 3, 3.2 ~ 38.4)。以橄榄辉长岩锆石 U-Pb 年龄 281.8 Ma 作为岩体同位素衰变计数年龄, 计算获得各样品的初始同位素组成 ( $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ ) 和  $\gamma_{\text{Os}}$  (281.8 Ma) ( $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ ) 组成极不均一,  $\gamma_{\text{Os}}$  (281.8 Ma) 具有显著差异, 分别介于 -0.229 1 ~ +0.481 3 和 -282.2 ~ +282.2 之间。

## 4 讨论

### 4.1 岩浆性质

岩体的 Pd/Ir 比值 (介于 3.19 - 8.0) 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

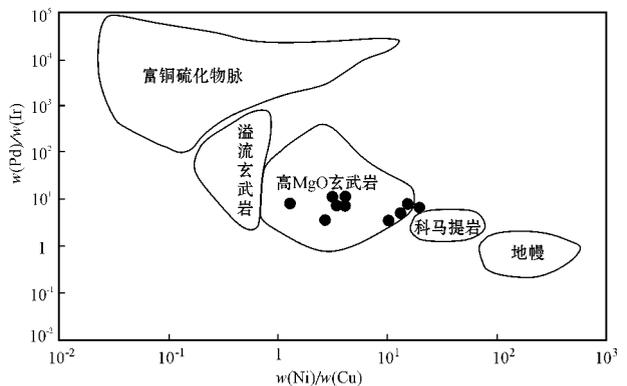


图 6 红石山镁铁-超镁铁质岩体 Ni/Cu-Pd/Ir 图解 (原图据 Chai 和 Naldrett, 1992)

Fig. 6 Diagram of Ni/Cu versus Pd/Ir of the Hongshishan mafic-ultramafic intrusions in Beishan (after Chai and Naldrett, 1992)

该数值较原生岩浆的 MgO 低, 因为早期结晶的橄榄石与残余的晶间熔体之间发生再平衡作用, 使得早期结晶的橄榄石比其在原生岩浆中结晶时的橄榄石

中的镁质含量低(Wu *et al.*, 2004),因此红石山镁铁-超镁铁质岩体的母岩浆为高镁成分的岩浆。

#### 4.2 亲铜元素亏损和硫化物的熔离

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)。那么红石山岩体具有极低的 PGE 含量是由何种因素所致?

大量研究成果表明,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,残余岩浆中的 PGE 较 Cu、Ni、Ti 大大亏损。即使有 0.01% 的硫化物熔离,就将导致玄武岩中 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 = 6 500) (Maier *et al.*, 1998; Barnes *et al.*, 1988) 和 Ti/Pd 比值(Ti/Pd =  $3 \times 10^3$ ) (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 and Wilson, 1990)。红石山岩体中所有样品具有异常低的 PGE 含量和远高于原始地幔的 Cu/Pd 比值(介于  $73 \times 10^3 \sim 1 670 \times 10^3$  之间)和 Ti/Pd 比值(介于  $87 \times 10^3 \sim 2 857 \times 10^3$  之间)表明红石山岩体的母岩浆经过了强烈的硫化物熔离,即不含矿岩体是发生了硫化物熔离的残余岩浆结晶而来,硫化物是从 PGE 强烈亏损的玄武岩中熔离出来的。Ir 与 Pt、Pd、Os、Ru 和 Rh 明显的正相关以及变化较小的 Pd/Ir 比值,表明 IPGE 与 PPGE 没有发生明显的分异。这也暗示了结晶分异或部分熔融不是 PGE 元素亏损的主要因素。

#### 4.3 地壳物质混染

Re 和 Os 均是强的亲铜和亲铁元素,在地球的形成和演化过程中,由于化学性质的差异,使得它们在不同的地球化学储库中具有不同的同位素特征(Snow and Reisberg, 1995; Meisel *et al.*, 1996; Widom and Shirey, 1996; Foster *et al.*, 1996)。Re 相对于 Os 主要分布于地壳中,地壳中有较高的 Re/Os 比值以及高的放射成因 Os,而亏损的岩石圈地幔和接近球粒陨石的软流圈地幔则有较低的 Re/Os 比值以及低的放射成因 Os,地壳物质的混入可以引起

幔源物质 Re/Os 比值的明显变化。Re、Os 具有较高的硫化物熔体/硅酸盐熔体分配系数( $D > 100$ , Leshner and Stone, 1996),它们皆在不混溶硫化物中富集,同时 Os 也是一种 PGE,其母子体元素均为难熔的高度亲铁元素,对地幔交代作用不敏感(Shirey and Walker, 1998; Puchtel *et al.*, 1999; Alard *et al.*, 2002),可以直接提供成矿流体及岩浆中贵金属来源的信息。因此,Re-Os 同位素体系是幔源岩浆演化过程中地壳物质混入程度的灵敏指示剂,也是岩浆型 Ni-Cu-PGE 硫化物矿床成矿作用有效的示踪剂(Foster *et al.*, 1996; Lambert *et al.*, 1999)。

目前常用  $\gamma_{Os}(t)$  作为指示地壳物质加入幔源岩浆体系的重要参数, $\gamma_{Os}(t) = [(^{187}Os/^{188}Os)_{\text{样品}(t)} / (^{187}Os/^{188}Os)_{\text{球粒陨石}(t)}] - 1 \times 100$  (Walker *et al.*, 1994)。其中, $(^{187}Os/^{188}Os)_{\text{球粒陨石}(t)} = (^{187}Os/^{188}Os)_{\text{初始值}} + ^{187}Re/^{188}Os(e^{\lambda T} - e^{\lambda t})$ , $(^{187}Os/^{188}Os)_{\text{初始值}} = 0.096$ , $^{187}Re/^{188}Os = 0.4007$ , $T(\text{地球形成年龄}) = 4.558 \text{ Ga}$  (Shirey and Walker, 1998), $\lambda = 1.666 \times 10^{-11}$  (Smoliar *et al.*, 1996)。幔源岩浆中混入的地壳物质越多, $\gamma_{Os}(t)$  越偏向高的正值(Walker *et al.*, 1994)。

红石山岩体极低的呈现负值的 $(^{187}Os/^{188}Os)$  和  $\gamma_{Os}$  没有地质意义,可能是后期地质作用扰动了 Re-Os 体系,造成偏于实际高得多的 $^{187}Re/^{188}Os$  比值。高的  $\gamma_{Os}$  (+18 ~ +282) 比任何类型的地幔储集库都高得多,表明岩浆在演化过程中有地壳物质混入,导致了高放射成因初始 Os 同位素组成。由于样品具有较高的 Os 含量,少量的地壳混染不会使 Os 同位素组成发生明显的变化,样品的初始 Os 同位素组成极不均一,可能是不同初始 Os 同位素组成熔体的混合造成的。这与前人对红石山主要造岩矿物进行的研究获得的认识一致(苏本勋等, 2009)。

## 5 成矿过程探讨

前已述及,红石山岩体的原生岩浆在演化过程中经过了硫化物的熔离,硫化物熔离作用的发生是由于岩浆中的 S 达到了饱和。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)。因此,在红石山原生岩浆演化过程中必然有某种因素触发了岩浆中的 S 达到饱和。大量研究成果表明,岩浆的结晶分异(Haughton *et al.*, 1974),

温度压力的快速变化( Maier *et al.* , 1998 ) 地壳物质的混入( Maier *et al.* , 2002 ) 以及不同成分岩浆的混合( Irvine , 1975 ; Campbell and Barnes , 1983 ; Lambert *et al.* , 1998 ) 是引起岩浆中的 S 达到饱和的主要机制。岩浆中的 S 达到饱和进而引起硫化物的熔离是形成岩浆型铜镍硫化物矿床的关键。对于任何一个岩浆型 Ni-Cu-PGE 硫化物矿床来说 , 其岩浆中的 S 达到饱和的机制可以是一种 , 也可以是几种( 柴凤梅等 , 2005 )。

前已述及 , 红石山岩体的 Re-Os 同位素体系和造岩矿物学特征均表明了原生岩浆在演化过程中有地壳物质的混入。硫化物矿物充填于堆晶的橄榄石晶体之间 , 表明硫化物的形成晚于橄榄石 ; 硫化物主要分布于纯橄榄岩的底部 , 表明硫化物主要形成于橄长岩和辉长岩之前。结合岩相学及橄榄石-熔体平衡原理研究结果 , 红石山岩体的原生岩浆经过了早期橄榄石以及尖晶石等的结晶分异作用 , 母岩浆为有早期结晶的橄榄石加入的演化岩浆。因此 , 我们推测 , 红石山原生岩浆中的 S 达到饱和可能与岩浆的结晶分异和地壳物质混入有关。至于是否还有其他的因素影响以及哪种因素起到决定性的作用还有待于进一步研究。

综上所述 , 红石山镁铁-超镁铁质岩体的形成过程可以概括为 : 幔源的原生岩浆在上升过程中随着温度的降低使橄榄石结晶 , 在此期间有地壳物质混入 , 它们共同作用的结果导致了岩浆中的 S 达到饱和而使硫化物发生熔离。这种携带硫化物、橄榄石的“晶粥”上升到高位岩浆房 , 并发生了就地分异 , 形成了目前出露的橄长岩和辉长岩岩体。

## 6 结论

(1) 红石山岩体具有极低的 PGE 含量 , 较低的 Pd/Ir 比值表明 PGE 主要受岩浆作用的影响 , 母岩浆是有早期结晶的橄榄石加入的高镁玄武质岩浆 ;

(2) 红石山岩体具有较高的 Cu/Pd 比值和 Ti/Pd 比值 , 表明岩浆在演化过程中经过了硫化物的熔离 ;

(3) Re-Os 同位素显示红石山岩体在演化过程中有地壳物质混入 ; 早期矿物相的分离结晶和地壳物质混入的共同作用引起了硫化物熔离。

(4) 红石山岩体是原生岩浆在深部发生了橄榄石等矿物的结晶分异作用以及硫化物的熔离作用

后 , 橄榄石的堆积体与残余岩浆演化的混合体。

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成员给予的支持与帮助 , PGE 分析得到了中国地质科学院测试中心工作人员的帮助 , Re-Os 同位素分析得到了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老师的帮助 , 在此一并表示诚挚的谢意。

## References

- Alard O , Griffin W L , Pearson N J , *et al.* 2002. New insights into the Re-Os systematics of sub-continental lithospheric mantle from in situ analysis of sulphides [ J ]. *Earth and Planetary Science Letters* , 203 : 651 ~ 663.
- Barnes S J , Boyd R , Komeliusson A , *et al.* 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 [ A ]. Prichard H M , Potts P J , Bowles J F W , *et al.* *Geo-Platinum 87 C* [ J ]. London : Elsevier , 113 ~ 143.
- Barnes S J and Lightfoot P C. 2005. Formation of magmatic nickel sulfide ore deposits and processes affecting their copper and platinum group element contents [ J ]. *Economic Geology 100th Anniversary* , 34 : 179 ~ 214.
- Barnes S J , Naldrett A J and Gorton M P. 1985. The origin of the fractionation of platinum-group elements in terrestrial magmas [ J ]. *Chemical Geology* , 53 : 303 ~ 323.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Xinjiang Uygur Autonomous Region. 1993. *Regional Geology of Xinjiang Uygur Autonomous Region* [ M ]. Beijing : Geological Publishing House ( in Chinese ).
- Campbell I H and Barnes S J. 1983. A model for the origin of the platinum-rich sulphide horizons in the Bushveld and Stillwater Complexes [ J ]. *J. Petrol.* , 24 : 133 ~ 165.
- Chai Fengmei , Zhang Zhaochong , Mao Jingwen , *et al.* 2005. Some research progresses on magmatic nickel-copper-PGE sulfide deposits [ J ]. *Mineral Deposits* , 24( 3 ) : 325 ~ 335 ( in Chinese with English abstract ).
- Chai G and Naldrett A J. 1992. Characteristics of Ni-Cu-PGE mineralization and genesis of the Jinchuan deposit , Northwest China [ J ]. *Economic Geology* , 87 : 1475 ~ 1495.
- Chen Shiping , Wang Denghong , Qu Wenjun , *et al.* 2005. Geological features and ore formation of the Hulu , Cu-Ni sulfide deposit , Eastern Tianshan , Xinjiang [ J ]. *Xinjiang Geology* , 23( 3 ) : 230 ~ 233 ( in Chinese ).
- Fleet M E , Crocket J H and Stone W E. 1996. Partitioning of platinum-group elements ( Os , Ir , Ru , Pt , Pd ) and gold between sulfide liquid and basalt melt [ J ]. *Geochim. Cosmochim. Acta* , 60 : 2397 ~ 2412.

- Foster J G , Lambert D D and Frick L R . 1996 . Re-Os isotopic evidence for genesis of Archaean nickel ores from uncontaminated komatiites [ J ] . *Nature* , 382 : 703 ~ 706 .
- Gou Tizhong , Zhong Hong , Zhu Weiguang , *et al* . 2010 . Geochemical characteristics of platinum group elements and Re-Os isotope of the Lengshuiqing Cu-Ni sulfide deposit in western Sichuan Province and implications from internalization [ J ] . *Acta Petrologica Sinica* , 26 ( 11 ) : 3 363 ~ 3 374 ( in Chinese with English abstract ) .
- Han Baofu , Ji Jianqing , Song Biao , *et al* . 2004 . SHRIMP U-Pb zircon age of the mafic-ultramafic rocks and geological significance in karatungk and Huangshan , Xinjiang [ J ] . *Chinese Science Bulletin* , 49 ( 22 ) : 2 324 ~ 2 328 ( in Chinese ) .
- Houghton D R , Roeder P L and Skinner B J . 1974 . Solubility of sulfur in mafic magma [ J ] . *Economic Geology* , 69 : 451 ~ 467 .
- Irvine T N . 1975 . Crystallization sequences of the Muskox intrusion and other layered intrusions : II . Origin of chromitite layers and similar deposits of other magmatic ores [ J ] . *Geochimica et Cosmochimica Acta* , 39 : 991 ~ 1 020 .
- Keays R R . 1995 . The role of komatiitic and picritic magmatism and S-saturation in the formation of ore deposits [ J ] . *Lithos* , 34 : 1 ~ 18 .
- Lambert D D , Foster J G , Frick L R , *et al* . 1998 . Geodynamics of magmatic Cu-Ni-PGE sulfide deposits : New insights from the Re-Os isotopic system [ J ] . *Economic Geology* , 93 ( 2 ) : 121 ~ 137 .
- Lambert D D , Foster J G , Frick L R , *et al* . 1999 . Re-Os isotopic systematics of the Voisey 's Bay Ni-Cu-Co magmatic ore system , Labrador , Canada [ J ] . *Lithos* , 47 ( 1 ~ 2 ) : 69 ~ 88 .
- Leshner C M and Stone W E . 1996 . Exploration geochemistry of komatiites [ A ] . Wyman D A . Trace Element Geochemistry of Volcanic rocks : Applications for Massive Sulphide Exploration [ C ] . Geological Association of Canada Short Course Notes , 12 : 153 ~ 204 .
- Li C S , Xu Z H , De Wall S A , *et al* . 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 Yuechen , Zhao Guochun , Qu Wenjun , *et al* . 2006 . Re-Os isotopic dating of the Xiangshan deposit , East Tianshan-NW China [ J ] . *Acta Petrologica Sinica* , 22 ( 1 ) : 245 ~ 251 ( in Chinese with English abstract ) .
- Maier W D , Barnes S J and 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 [ J ] . *South African Geol.* , 101 ( 3 ) : 237 ~ 253 .
- Maier W D , Barnes S J and Li C S . 2002 . A re-evaluation of the role of crustal contamination in the formation of magmatic sulfides in the Bushveld Complex [ A ] . The 9th international PGE symposium [ C ] . Montana , USA , July 21 ~ 25 , 2002 .
- Mao Qigui , Xiao Wenjiao , Han Chunming , *et al* . 2006 . Zircon U-Pb age and the geochemistry of the Baishiquan mafic-ultramafic complex in the Eastern Tianshan , Xinjiang province : constraints on the closure of the Paleo-Asian ocean [ J ] . *Acta Petrologica Sinica* , 22 : 153 ~ 162 ( in Chinese with English abstract ) .
- Meisel T , Walker R J and Morgan J W . 1996 . The osmium isotopic composition of the Earth 's primitive upper mantle [ J ] . *Nature* , 383 : 517 ~ 520 .
- Naldrett A J , Mohammed A and Sasa K . 2000 . The composition of mineralization at the Voisey 's bay Ni-Cu sulfide deposit with special reference to platinum-group elements [ J ] . *Economic Geology* , 95 : 845 ~ 865 .
- Naldrett A J and 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 [ J ] . *Chemical Geology* , 88 : 279 ~ 300 .
- Puchtel I S , Brugmann G E and Hofmann A W . 1999 . Precise Re-Os mineral isochron and Pb-Nd-Os isotope systematics of a mafic-ultramafic sill in the 2.0 Ga Onega plateau ( Baltic Shield ) [ J ] . *Earth and Planetary Science Letters* , 170 : 447 ~ 461 .
- Qian Zhuangzhi , Sun Tao , Tang Zhongli , *et al* . 2009 . Platinum-group elements geochemistry and its significances of the Huangshandong Ni-Cu sulfide deposit East Tianshan , China [ J ] . *Geological Review* , 55 ( 6 ) : 873 ~ 884 ( in Chinese with English abstract ) .
- Roeder P L and Emslie R F . 1970 . Olivine-liquid equilibrium [ J ] . *Contributions to Mineralogy and Petrology* , 29 : 275 ~ 289 .
- Shirey S B and Walker R J . 1998 . The Re-Os isotope system in cosmochemistry and high-temperature geochemistry [ J ] . *Annual Review of Earth Planetary Science* , 26 : 423 ~ 500 .
- Smoliar M I , Walker R J and Morgan J W . 1996 . Re-Os ages of group II A , III A , IV A and VI B iron meteorites [ J ] . *Science* , 271 : 1 099 ~ 1 102 .
- Snow J E and Reisberg L . 1995 . Os isotopic systematics of the MORB mantle : results from altered abyssal peridotites [ J ] . *Earth and Planetary Science Letters* , 133 : 411 ~ 421 .
- Song Xieyan , Hu Ruizhong and Chen Liemeng . 2009 . Geochemical natures of copper , nickel and PGE and their significance for the study of origin and evolution of mantle derived magmas and magmatic sulfide deposits [ J ] . *Earth Science Frontiers* , 16 ( 4 ) : 287 ~ 305 ( in Chinese with English abstract ) .
- Su Benxun , Qin Kezhang , Sun He , *et al* . 2009 . Petrological and mineralogical characteristics of Hongshishan mafic-ultramafic complex in Beishan area , Xinjiang : Implications for assimilation and fractional crystallization [ J ] . *Acta Petrologica Sinica* , 25 ( 4 ) : 873 ~ 887 ( in Chinese with English abstract ) .
- Sun He , Qin Kezhang , Li Jinxiang , *et al* . 2008 . Constraint of mantle partial melting on PGE mineralization of mafic-ultramafic intrusions in Eastern Tianshan : Case study on Tulaergen and Xiangshan Cu-Ni deposits [ J ] . *Acta Petrologica Sinica* , 24 ( 5 ) : 1 079 ~ 1 086 ( in Chinese with English abstract ) .
- Sun Xiaoming , Xiong Dexin , Wang Shengwei , *et al* . 2006 . Platinum group elements ( PGE ) geochemistry of Mojiang Au-Ni deposit and its constraint on ore genesis [ J ] . *Mineral Deposits* , 25 ( 4 ) : 438 ~ 446 ( in Chinese with English abstract ) .
- Sun S S , de Waal S A , Hoatson D M , *et al* . 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[J]. *Precambrian Res.*, 50:1~35.
- Tang Dongmei, Qin Kezhang, Sun He, *et al.* 2009. PGE geochemical characteristics of Tianyu magmatic Cu-Ni Deposit: Implications for magma evolution and sulfide segregation[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(4):817~831(in Chinese with English abstract).
- Tang Zhongli and Li Wenyuan. 1995. Mineralisation Model and Geology of Jinchuan Ni-Cu Sulphide Deposit Bearing PGE[M]. Beijing: Geological Publishing House, 209(in Chinese).
- Walker R J, Morgan J W, Naldrett A J, *et al.* 1994. Re-Os isotope evidence for an enriched-mantle source for the Noril'sk-type, ore-bearing intrusion, Siberia[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58:4179~4197.
- Wang Ruiting, Mao Jingwen, He Ying, *et al.* 2005. Geochemical characteristics of Platinum group elements of the sulfide nickel ores and related rocks in Jiachaling, Lueyang country, Shannxi province, China and their implication for genesis[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1):219~226(in Chinese with English abstract).
- Wang Shengwei, Sun Xiaoming, Shi Guiyong, *et al.* 2006. Platinum group element(PGE) geochemistry of Baimazhai Ni-Cu Sulfide deposit and its constraints on the ore genesis[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(9):1474~1486(in Chinese with English abstract).
- Widom E and Shirey S B. 1996. Os isotope systematics in the Azores: implications for mantle plume sources[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 142(3~4):451~465.
- Wu F Y, Wilde S A, Zhang G L, *et al.* 2004. 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*, 23:781~797.
- Wu Hua, Li Huaqin, Mo Xinhua, *et al.* 2005. Age of the Baishiquan mafic-ultramafic complex, Hami, Xinjiang and its geological significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 79(4):498~502(in Chinese with English abstract).
- Zhou Meifu, Leshner C M, Yang Z X, *et al.* 2004. Geochemistry and petrogenesis of 270 Ma Ni-Cu(PGE) sulfide-bearing mafic intrusions in the Huangshan district, Eastern Xinjiang, Northwest China: implications for the tectonic evolution of the Central Asia orogenic belt[J]. *Chemical Geology*, 209:233~257.
- 研究的几个问题探讨[J]. *矿床地质*, 24(3):325~335.
- 陈世平, 王登红, 屈文俊, 等. 2005. 新疆葫芦铜镍硫化物矿床的地质特征与成矿时代[J]. *新疆地质*, 23(3):230~233.
- 苟体忠, 钟宏, 朱维光, 等. 2010. 川西冷水箐 Cu-Ni 硫化物矿床的 PGE 和 Re-Os 同位素地球化学特征及成矿意义[J]. *岩石学报*, 26(11):3363~3374.
- 韩宝福, 季建清, 宋彪, 等. 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[J]. *科学通报*, 49(22):2324~2328.
- 李月臣, 赵国春, 屈文俊, 等. 2006. 新疆香山铜镍硫化物矿床 Re-Os 同位素测定[J]. *岩石学报*, 22(1):245~251.
- 毛启贵, 肖文交, 韩春明, 等. 2006. 新疆东天山白石泉铜镍矿床基性-超基性岩体锆石 U-Pb 同位素年龄、地球化学特征及其对古亚洲洋闭合时限的制约[J]. *岩石学报*, 22:153~162.
- 钱壮志, 孙涛, 汤中立, 等. 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[J]. *地质论评*, 55(6):873~884.
- 苏本勋, 秦克章, 孙赫, 等. 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[J]. *岩石学报*, 25(4):873~887.
- 孙赫, 秦克章, 李金祥, 等. 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[J]. *岩石学报*, 24(5):1079~1086.
- 孙晓明, 熊德信, 王生伟, 等. 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[J]. *矿床地质*, 25(4):438~446.
- 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[J]. *地质前缘*, 16(4):287~305.
- 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[M]. 北京:地质出版社, 209.
- 唐冬梅, 秦克章, 孙赫, 等. 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[J]. *岩石学报*, 25(4):817~831.
- 王瑞廷, 毛景文, 赫英, 等. 2005. 煎茶岭硫化镍矿床的铂族元素地球化学特征及其意义[J]. *岩石学报*, 21(1):219~226.
- 王生伟, 孙晓明, 石贵勇, 等. 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[J]. *地质学报*, 80(9):1474~1486.
- 吴华, 李华芹, 莫新华, 等. 2005. 新疆哈密白石泉铜镍矿区基性-超基性岩的形成时代及其地质意义[J]. *地质学报*, 79(4):498~502.

## 附中文参考文献

柴凤梅, 张招崇, 毛景文, 等. 2005. 岩浆型 Ni-Cu-PGE 硫化物矿床研