文章编号:0258-7106(2013)02-0273-07

肖家营子钼铁矿床成矿物质来源

——来自 PGE 元素和 S 同位素的证据

代军治¹²,谢桂青²,王瑞廷¹,任 涛³,王 涛¹,张西社³

(1 西北有色地质勘查局地质勘查院,陕西 西安 710054;2 中国地质科学院矿产资源研究所,北京 100037;3 西北有色地质勘查局七一三总队,陕西 商洛 726000)

摘 要 肖家营子矿床是一个与细粒闪长岩有关的砂卡岩型钼铁矿床。采用 ICP-MS 法对该矿床主要矿石矿 物和围岩中的铂族元素进行分析表明:PGE 元素在不同矿物中的含量变化较大,在辉钼矿和黄铁矿中比较富集,而 在磁铁矿、石榴子石及细粒闪长岩、白云岩中则含量较低,这与 PGE 趋向在硫化物中富集的行为有关。不同矿物或 岩石的原始地幔标准化曲线呈似 W 型,显示出 Ir 和 Pt 负异常,Ru 正异常。辉钼矿和黄铁矿中的 PGE 分异较明显, 具有相似的配分模式,磁铁矿、石榴子石、细粒闪长岩和白云岩内的 PGE 分异不明显,具有相近的 IPGE 配分模式。 硫同位素分析结果显示,多数硫化物的 δ^{34} S 值为 3‰~5‰,与赋矿细粒闪长岩的 δ^{34} S 值(1.1‰~3.5‰)较相似。 PGE 和硫同位素分析表明,肖家营子矿床不同成矿阶段成矿物质的来源不同,砂卡岩阶段的成矿物质主要来自细粒 闪长岩和白云岩,热液硫化物阶段的成矿物质不全是来自细粒闪长岩和白云岩,还可能有壳幔混源物质的加入。

关键词 地球化学 流化物 ;PGE ;成矿物质来源 ;肖家营子 中图分类号 : P618.65 ; P618.31 文献标志码 :A

Metal sources of Xiaojiayingzi Mo (Fe) deposit: Evidence from PGE and S isotope analyses

DAI JunZhi^{1,2}, XIE GuiQing², WANG RuiTing¹, REN Tao³, WANG Tao¹ and ZHANG XiShe³ (1 Institute of Geology & Exploration of Northwest Bureau of Mining and Geology for Nonferrous Metals, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2 Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3 No. 713 Geological Party of Northwest Bureau of Mining and Geology for Nonferrous Metals, Shangluo 726000, Shaanxi, China)

Tarty of Northwest bureau of Mining and Geology for Northenous Metals, Shanguo 720000, Shaanxi, China)

Abstract

The Xiaojiayingzi Mo (Fe) deposit is temporally and spatially associated with diorite, and the mineralization is hosted in skarn. Concentrations of platinum group elements (PGE) in various major ore minerals and host rocks of the Xiaojiayingzi deposit were analyzed by using the inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). The results show that the total PGE values in various samples vary greatly between 0.46×10^{-9} to 216×10^{-9} . PGE is rich in molybdenum and pyrite and poor in magnetite, garnet, diorite and dolomite, suggesting that PGE tends to be concentrated in sulfides. The primary mantle-normalized PGE patterns of various samples show marked negative Ir and Pt and positive Ru anomalies. The molybdenum shows marked fractiona-

^{*} 本文得到国土资源大调查项目(编号:1212010634001),"十二五 '国家科技支撑计划项目(编号:2011BAB04B05)和公益性行业科研专 项(编号:201111007-3)的联合资助

第一作者简介 代军治,男,1978年生,博士,高级工程师,主要从事金属矿床成因及矿产勘查的研究。Email:daijunzhi@163.com 收稿日期 2012-04-26;改回日期 2013-01-06。许德焕编辑。

tion of PGE and is similar to the pyrite. The fractionation patterns of PGE in magnetite and garnet are characterized by weak PGE anomalies, similar to things of diorite and dolomite, suggesting that the metal sources were closely related to the diorite and dolomite. An analysis of S isotope of sulfides from the Xiaojiayingzi deposit indicates that the δ^{34} S values of most sulfides from the Xiaojiayingzi deposit show a peak of $3\% \sim 5\%$, similar to things of diorite. Based on geological characteristics, PGE and S isotope of the Xiaojiayingzi deposit, the authors hold that different ore-forming stages had different metallogenic materials. The metallogenic materials of the skarn mineralization stage were derived mainly from the diorite and dolomite. The metallogenic materials of the hydrothermal sulfide stage were derived not only from the diorite and dolomite but also from the mixed crustmantle system.

Key words: geochemistry, sulfide, PGE, metal sources, Xiaojiayingzi

铂族元素(PGE)包括 Os、Ir、Ru、Rh、Pd、Pt,是 一组在物理和化学性质上十分相似的贵金属元素, 主要富集于地核或地幔 ,在地壳和酸性岩浆中以痕 量或超痕量形式存在。由于具有高熔点、高沸点和 低溶解度等物理化学性质 ,PGE 在常温条件下一般 不与氧、硫、氟、氯等挥发性元素发生作用 ,因而其总 量、分配系数及配分模式在不同地质体中有着规律 性的差异(Naldrett et al., 1979 Barnes et al., 1985; Garuti et al., 1997;李胜荣等, 1994;储雪蕾等, 2001)。因此 ,PGE 不仅广泛应用于与基性-超基性 岩有关的各类金属矿床成矿作用的示踪研究(Zhou et al., 1996;1998;储雪蕾等,2001;2002),而且《在 韧性剪切带型金矿床(李晓峰等,2002;孙晓明等, 2007),斑岩型铜(钼)矿床(Sotnikov et al., 2001; Berzina et al., 2005;2007)等金属矿床成矿物质来 源示踪方面也得到较好的应用。为了进一步了解 PGE 在钼矿床中的变化信息,本文选择燕辽成矿带 内与中-基性岩有关的肖家营子钼铁矿床进行了尝 试性研究 选择该矿床的赋矿岩石、硫化物及围岩进 行了 PGE 含量分析 结合硫化物的硫同位素分析探 讨了该矿床的成矿物质来源。

1 成矿地质背景

肖家营子钼铁矿床位于华北板块北缘燕辽钼-铜-铅锌多金属和贵金属成矿带的北东端,大地构造 位置处于内蒙古隆起与燕辽褶皱带结合部位的北东 部。在该区域的西部,出露的地层为太古界建平群 变质杂岩,主要由黑云斜长片麻岩、斜长角闪岩、变 粒岩等组成;在北部和东部,广泛发育中元古界长城 系、蓟县系白云岩、白云质灰岩、页岩;在南部,则分 布有古生界寒武系、奥陶系海相碳酸盐及海陆交互

相沉积岩 ,其上不整合覆盖着中生界火山碎屑沉积 岩系。

肖家营子矿区内出露的地层主要是蓟县系雾迷 山组含燧石条带白云岩和白云质灰岩,产状稳定,为 NW 走向,倾向 SW,倾角 15~30°,呈单斜岩层产出。

区内构造主要是一些成矿前断裂构造,以 NNE 向和 NWW 向为主。NNE 向断裂以朱力科-中三家 断裂为主,该断裂是由 NW 朝 SE 逆冲的逆冲断层, 长 80 km,宽 50~100 m,展布于该矿区的西部。其 次是一些与其平行的次级断裂,如水塘沟-三道沟断 裂、康杖子-姜家店断裂,等等。NWW 向断裂主要有 姜家店-三道沟断裂和肖家营子-康杖子断裂。

沿 NNE 向断裂与 NWW 向断裂的交汇部位,侵 位有肖家营子中-基性复式岩体(图1)。该岩体出露 面积为 0.8 km²,呈岩株状产出,主要由辉长辉绿岩 及中-细粒闪长岩组成,前者分布于该侵入体的东 部,后者分布于该侵入体的西部,两者呈侵入接触关 系,局部可见中-细粒闪长岩呈岩枝状、舌状侵入到 辉长辉绿岩中,或者,闪长岩中含有辉长辉绿岩的包 体。康书泽(1979)应用 K-Ar 法测得辉长辉绿岩的包 体。康书泽(1979)应用 K-Ar 法测得辉长辉绿岩的包 年龄为 177 Ma,并认为辉长辉绿岩与闪长岩是同源 岩浆演化的产物。Dai 等(2009)对细粒闪长岩是同源 岩浆演化的产物。Dai 等(2009)对细粒闪长岩是同源 岩浆演化的产物。Dai 等(2009)对细粒闪长岩是同源 岩浆演化的产物。Dai 等(2009)对细粒闪长岩是同源 岩浆演化的产物。Dai 等(2009)对细粒闪长岩

肖家营子矿区内的矽卡岩体由石榴子石矽卡 岩、石榴子石-透辉石矽卡岩、透辉石-镁橄榄石矽卡 岩、粒硅镁石-金云母矽卡岩及矽卡岩化白云岩组 成。自岩体向围岩方向依次为:辉长辉绿岩→中-细 粒闪长岩→石榴子石矽卡岩→石榴子石-透辉石矽



图 1 肖家营子矿区地质图(据代军治等,2008)

1—第四系沉积物;2—白垩系火山碎屑岩;3—侏罗系安山质火山碎屑岩;4—奥陶系白云质灰岩;5—寒武系白云质灰岩及粉砂岩; 6—蓟县系白云质灰岩;7—长城系高于庄组白云岩;8—太古界片麻岩;9—侏罗纪闪长岩;10—侏罗纪石英二长岩;11—侏罗纪花岗岩; 12—晚古生代黑云母花岗岩;13—辉绿岩脉;14—实测及推测断裂;15—钼矿床

Fig. 1 Geological map of the Xiaojiayingzi ore district (after Dai et al., 2008)

1—Quaternary sediment; 2—Cretaceous volcanic clastic rocks; 3—Jurassic andesitic volcanic clastic rocks; 4—Ordovician dolomitic limestone; 5—Cambrian dolomitic limestone and siltstone; 6—Dolomitic limestone of Jixian System; 7—Gaoyuzhuang Formation dolomite of Changcheng System; 8—Archean gneiss; 9—Jurassic diorite; 10—Jurassic quartz monzonite; 11—Jurassic granite; 12—Late Palaeozoic biotite granite; 13—Diabase dike; 14—Measured and inferred fault; 15—Mo ore deposit

卡岩→透辉石-镁橄榄石砂卡岩→粒硅镁石-金云母 砂卡岩→矽卡岩化白云岩→白云岩。辉钼矿主要分 布于石榴子石矽卡岩和石榴子石-透辉石矽卡岩中; 磁铁矿则主要赋存于粒硅镁石-金云母矽卡岩中。

肖家营子矿床是一个钼、铁共生的矿床,现已查 明钼、铁矿体 80 余条,主要呈不规则的脉状、透镜状 和似层状,分布于矽卡岩带内,构成矽卡岩型钼、铁 矿体,有少部分呈细网脉状分布在细粒闪长岩的边 缘,形成了细脉浸染型矿体。矽卡岩型矿体长100~ 800 m,延深100~600 m,一般厚4~21 m,其矿石品 位较高, α (Mo)为0.1%~0.3%, α (Fe)为35%~ 50%;细脉浸染型矿体长400 m,延深570 m,厚10~ 30 m,其矿石品位较低, α (Mo)为0.03%~0.10% (敖颖锋等,2001;马建德等,2002)。

该矿床的成矿过程可划分为矽卡岩期和热液硫

化物期。矽卡岩期包括 2 个阶段,即早期无矿阶段 及磁铁矿化阶段。热液硫化物期可分为辉钼矿阶段 及铜-铅锌矿化阶段。

早期无矿阶段 主要形成石榴子石、透辉石、镁 橄榄石 ,属于无水矽卡岩阶段 ,该阶段的后期有少量 磁铁矿产出;

磁铁矿化阶段 主要形成粒硅镁石、方柱石、符 山石、透闪石、阳起石、金云母、绿帘石、磁铁矿及少 量的黄铁矿、磁黄铁矿、辉钼矿 属含水矽卡岩阶段;

辉钼矿阶段 继矽卡岩形成之后,开始有大量的辉钼矿沉淀成矿,并伴有少量黄铁矿、黄铜矿等硫 化物和方解石、白云石等脉石矿物的形成;

铜-铅锌矿化阶段 为成矿晚期阶段,产生少量 的黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、方铅矿等矿 化,工业价值低。

2 样品特征及测试方法

本次研究所用的测试样品均采自肖家营子矿床 井下6中段 550 m标高 和9中段 425 m标高 不同 成矿阶段的矿石及围岩。用于 PGE 分析的样品分别 采自矽卡岩型矿体及矿体下盘远离矿化的细粒闪长 岩体和矿体上盘的白云岩 其中的6件为矿石样品 3 件为岩石样品 经薄片鉴定 岩石样品蚀变弱。用于S 同位素测试的6件样品为硫化物单矿物 全部采自6 中段和9中段的矽卡岩型矿石。全岩和单矿物样品 的分选工作由中国地质科学院地质研究所样品加工 室完成。对所有样品进行了无污染碎样、分离和提 纯。对单矿物样品 ,先确保其纯度大于 99% ,再粉碎 至 40~60 目 ,全岩样品则直接粉碎到 200 目。

岩石及矿石样品的 PGE 分析由中国地质科学

院国家地质实验测试中心完成,其分析流程为: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,加入适当量的锇稀释剂,在 1050℃的马弗炉中熔融1~1.5 小时,把熔体倒入铁 模中冷却后取出镍扣,用6 mol/L的 HCl溶解镍扣, 用 Te 共沉淀富集 PGE,在封闭溶样器中用王水溶解 滤渣,然后用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测 定。ICP-MS 测定精度为 RSD \leq 6.5%,Os、Ir、Ru、 Rh的检测限为 0.01×10⁻⁹,Pt、Pd 的检测限分别为 0.06×10⁻⁹、0.17×10⁻⁹。测试分析无重复样品,测 试结果见表 1。

样品的 S 同位素测试由中国地质科学院矿产资源研究所完成。样品测试以 Cu₂O 作为氧化剂制样,以 V-CDT 为标准进行分析,测试仪器为 MAT-251EM 型质谱仪,测试精度为±0.2‰,测试结果见表 2。

Table 1 PGE content and relative parameters of ores and host rocks from the Xiaojiayingzi deposit											
样品号	样只	采样位置	$_m/_{ m g}$	τε(B) /10 ⁻⁹						DDCE/IDCE	NDCE
	1+44			Os	_ Ir	Ru	Rh	Pt	Pd	PPGE/IFGE	ZFGE
XJ001	热液硫化物阶段黄铁矿	6中段	10	0.34	0.13	0.92	0.14	0.89	3.67	3.38	6.09
XJ011a	热液硫化物阶段辉钼矿	9中段	7.5	140.00	0.13	1.75	0.20	1.85	9.63	0.08	153.56
XJ012a	热液硫化物阶段辉钼矿	9中段	2	207.00	0.09	1.21	0.23	9.95	60.50	0.34	278.98
XJ005	磁铁矿阶段磁铁矿	6中段	10	0.14	0.03	0.32	0.05	< 0.2	< 0.2	0.51	0.74
XJ012b	石榴石矽卡岩阶段磁铁矿	9中段	10	0.17	< 0.02	0.67	0.03	< 0.2	0.21	0.40	1.19
XJ011b	石榴石矽卡岩阶段石榴子石	9中段	10	0.13	0.03	0.28	< 0.02	< 0.2	0.26	0.84	0.81
XJY01	细粒闪长岩-1	9中段	20	0.06	0.02	0.28	0.02	< 0.2	< 0.2	0.61	0.58
XJY1	细粒闪长岩-2	9中段	20	0.06	0.02	0.17	< 0.02	< 0.2	< 0.2	0.84	0.46
XJ006	细晶白云岩	6中段	20	0.11	0.02	0.14	< 0.02	0.28	< 0.2	1.44	0.66
原始地幔 华北陆壳				3.40	3.20	5.00	0.90	7.10	3.90	1.03	28.50
				0.052	0.028	0.05	0.056	1.20	1.10	18.44	2.486

表 1 肖家营子矿床矿石和岩石的 PGE 元素含量及其比值

原始地幔数据引自 McDonough et al. ,1995 华北陆壳数据引自鄢明才等 ,1997。

表 2 肖家营子矿床硫同位素分析结果

		Table 2	Sulfur isotope con	mpositions of the	Xiaojiayingzi deposit		
样品号	采样位置	测试对象	$\delta^{34}S_{CDT}$ /‰	资料来源	测试对象	$\delta^{34}S_{CDT}/\%$	资料来源
XJ011	9中段	辉钼矿	7.3	本文	辉钼矿	2.1	康书泽 ,1979
XJ11	6 中段	辉钼矿	8.9	本文	辉钼矿	4.1	康书泽 ,1979
XJ13	6 中段	辉钼矿	9.8	本文	黄铜矿	4.8	康书泽 ,1979
XJ16	6 中段	黄铁矿	3.1	本文	黄铜矿	2.7	康书泽 ,1979
XJ005	6 中段	黄铁矿	5.2	本文	黄铜矿	4.4	康书泽 ,1979
XJ10	6 中段	黄铁矿	6.0	本文	闪锌矿	3.6	康书泽 ,1979
		黄铁矿	5.3	康书泽 ,1979	闪锌矿	3.4	康书泽 ,1979
		黄铁矿	1.1	康书泽 ,1979	闪锌矿	3.8	康书泽 ,1979
		黄铁矿	4.3	康书泽 ,1979	方铅矿 方铅矿	3.3	康书泽 ,1979
		辉钼矿	8.0	康书泽 ,1979	似斑状细粒闪长岩	1.1	康书泽 ,1979
		辉钼矿	7.7	康书泽 ,1979	似斑状细粒闪长岩	3.5	康书泽 ,1979

3 测试结果

3.1 PGE 含量与分布

由表1可见:① 肖家营子矿床中各矿物和围岩 的u(Os)变化范围最大,为(0.06~207)×10⁻⁹, u(Ir)为($0.02 \sim 0.13$) $\times 10^{-9}$,u(Ru)为($0.14 \sim$ 1.75)×10⁻⁹, u (Rh)从低于检测限到 0.23×10^{-9} , u(Pt)和u(Pd)除在辉钼矿和黄铁矿中较高外,在 其他样品中基本上都低于检测限。由图 2 可见 ,从 矿石到矽卡岩、细粒闪长岩,再到白云岩,各铂族元 素的含量呈降低趋势 (2) 不同矿物的 PGE 总量差异 很大,其中,辉钼矿的 PGE 总量最大,平均为 216.27 $\times 10^{-9}$,黄铁矿的 PGE 总量次之,为 6.09 $\times 10^{-9}$,磁 铁矿、石榴子石及细粒闪长岩和白云岩的 PGE 总量 比较接近,为(0.46~1.19)×10⁻⁹,平均为0.74× 10⁻⁹ 表明在热液流体作用过程中 PGE 在硫化物中 的分配程度不同于氧化物、硅酸盐和碳酸盐矿物 ;③ 除黄铁矿、白云岩外,其他单矿物和细粒闪长岩样品 富集 IPGE(Os + Ir + Ru), 亏损 PPGE(Rh + Pt + Pd) PPGE/IPGE 小于 1 为 0.34~0.84; ④ 与原始 地幔相比 除辉钼矿富集 Os、Pt、Pd 外 磁铁矿、石榴 子石、细粒闪长岩和白云岩都明显亏损 PGE ,与华北 陆壳相比,该矿床内的金属硫化物富集 PGE 而磁铁 矿、石榴子石、细粒闪长岩及白云岩则富集 Os 和 Ru ,亏损 Ir、Rh、Pt、Pd。

将肖家营子矿床不同矿物和岩石的铂族元素与 原始地幔进行标准化后作成配分模式图(图3)。由



图 2 肖家营子矿床不同矿物、岩石 PGE 含量关系图 Fig. 2 PGE content of major ore minerals and

host rocks from the Xiaojiayingzi deposit



5—Molybdenite-2; 6—Magnitite-2; 7—Finely crystalline

dolomitite; 8—Fine grained diorite-1; 9—Fine grained diorite-2

图 3 可见,该矿床的 PGE 配分模式可分为 2 组:-组是 PGE 分异和富集明显的辉钼矿、黄铁矿;另一 组是 PGE 分异和富集不明显的磁铁矿、石榴子石、 细粒闪长岩和白云岩。辉钼矿与黄铁矿的配分模式 相似(除 Os 外),但 PPGE 分异程度大,两者的 PGE 与原始地幔标准化值较高;后一组不如前一组富集 PGE 其 IPGE 配分模式彼此相近,配分曲线比较平 缓,IPGE 未发生明显的分异或富集。总体而言,所 有矿物和岩石的 PGE 配分曲线基本上呈似 W 型, 具有 Ir 负异常、Ru 正异常。

3.2 硫同位素特征

硫同位素测试结果(表 2)表明,矿石中硫化物的 $\delta^{34}S$ 值变化范围为 1.1‰~9.8‰,平均 4.7‰。从 矿床内硫化物的种类来看,方铅矿的 $\delta^{34}S$ 值最低 (3.3‰),闪锌矿(3.4‰~3.8‰),黄铜矿(2.7‰~ 4.8‰),黄铁矿(1.1‰~6.0‰)居中,辉钼矿最高 (2.1‰~9.8‰)。这基本上符合矿物与 H₂S 之间硫 同位素 平衡分馏规律: $\delta^{34}S_{5铅T} < \delta^{34}S_{黄铜T} < \delta^{34}S_{5HT} < \delta^{34}$ 1997) 表明硫化物沉淀时 S 同位素分馏达到了平衡。野外观察和室内研究表明,肖家营子矿床不含硫酸盐矿物,因此,其硫化物的 δ³⁴S 平均值可近似代表含矿热液的硫同位素值。

4 成矿物质来源

目前,世界上已知的钼矿床多与酸性花岗质岩 浆有关,而与中-基性侵入体有关的钼矿床鲜见报 道。肖家营子矿床是一个与细粒闪长岩有关的矽卡 岩型钼铁矿床。长期来,关于该矿床成矿物质的来 源一直是众所关注的重点。权恒等(1992)、黄典豪 等(1996)通过对华北板块北缘区域地球化学异常的 分析 发现燕辽地区蓟县纪、古生代和中生代岩浆岩 的 Mo 含量较高,据此提出了区域上钼矿床的产出 与该地区的 Mo 地球化学异常有着不容忽视的重要 联系。敖颖锋等(2001)通过对肖家营子矿床硫化物 的硫同位素分析认为,该矿床的成矿物质主要来源 于上地幔,同时又有一部分上部地壳物质的加入。 代军治等(2007)在研究了肖家营子矿床内辉钼矿的 Re含量之后指出,其Re含量明显高于与壳源岩浆 有关的钼矿床 ,而相似于与壳幔混源型岩浆有关的 钼矿床,并认为该矿床的成矿物质来源于壳幔混源。

肖家营子矿床的 PGE 分析表明 热液硫化物阶 段的辉钼矿和黄铁矿的 PGE 含量高 特别是辉钼矿 的 Os 含量最高 这可能与辉钼矿中 Re 衰变出的 Os 有关。除去 Os,其硫化物的 IPGE 与 PPGE 分异明 显 配分模式相似。该矿床 PGE 的这种配分、富集 特征与俄罗斯 Aksug 斑岩 Cu-Mo 矿床相似,与 PGE 强烈依赖于硫化物相的行为及硫化物的饱和程度有 关 Berzina et al., 2007)。研究表明,在铂族元素 中,只有Ru能够与硫形成二硫化物RuS,(Barnes et al., 1985) 因此 Ru 可以用来判断熔浆或热液中的 硫是否达到饱和。肖家营子细粒闪长岩、热液硫化 物阶段的硫化物和矽卡岩阶段的氧化物中 PGE 含 量经原始地幔标准化后 ,其 PGE 配分模式均显示出 Ru 正异常,可能暗示了细粒闪长岩是由硫饱和的原 始岩浆分异而成的,该矿床中的氧化物和硫化物是 在硫饱和的岩浆或热液流体环境中交代围岩地层而 形成的。

PGE 含量和组成显示出,肖家营子矿床的岩石 及不同成矿阶段的矿石中 PGE 的富集程度差异较 大,反映出其源区物质存在差异,即矽卡岩阶段和硫 化物阶段的成矿物质是由不同物源提供的。矽卡岩 阶段的磁铁矿、石榴子石及赋矿围岩的 PGE 含量 低、氧化物和围岩的 IPGE 与 PPGE 的分异不如硫化 物明显。矽卡岩阶段氧化物及细粒闪长岩和围岩白 云岩的 PGE 均具有 IPGE 值相近、配分模式相似、 PPGE 基本低于检测值的特征 暗示出这些氧化物与 矽卡岩阶段的交代作用有关,细粒闪长岩和地层都 提供了物源。这些特征与该矿床的氢、氧同位素分 析结果相似,矽卡岩阶段矿物中的氢、氧同位素值由 混合的岩浆水和大气降水组成(代军治等,2008)。 热液硫化物阶段的硫化物虽与细粒闪长岩、白云岩 在 IPGE 配分模式上有部分相似,但其 PGE 配分模 式总体上不同。热液硫化物富 PPGE ,其 PGE 值介 于原始地幔与华北陆壳之间,暗示了该阶段硫化物 的物源不全由细粒闪长岩和地层提供,还可能有其 他物源。结合肖家营子矿床辉钼矿 Re 含量介于壳 源与幔源之间的同位素特征(代军治等,2007),认为 热液硫化物阶段的物源可能混有壳幔混源物。

硫同位素分析显示,肖家营子矿床硫化物的 δ^{34} S 值为1.1‰~9.8‰,极差小于10‰,表明硫化物的 硫源比较均一。结合前人资料(康书泽,1979),绘制 了硫同位素分布直方图(图4)。由图4可见,硫化物 的 δ^{34} S 值呈现塔式分布,其峰值出现在3‰~5‰之 间,与赋矿细粒闪长岩的 δ^{34} S 值(1.1‰~3.5‰)及 幔源硫相比,虽显略大,但比较接近,表明肖家营子 矿床硫化物的硫主要源于细粒闪长岩或幔源岩浆。 部分辉钼矿的 δ^{34} S 值大于5‰,高于与其共生的其 他硫化物的 δ^{34} S 值,指示出含矿岩浆在上升过程中 与地层发生了交代作用,选择性地同化了地层中的 硫,致使辉钼矿的 δ^{34} S 值超出了细粒闪长岩的硫同 位素值范围。

5 结 论

(1)肖家营子矿床岩石、矿石的 PGE 含量总体 上较低,不同矿物的 PGE 含量差异较大。PGE 主要 趋向于在硫化物中富集,磁铁矿、石榴子石及细粒闪 长岩、白云岩的 PGE 含量较低,但相近,且具有相似 的 IPGE 配分模式。从矿石到围岩,PGE 含量有降 低的趋势。

(2)PGE 和硫同位素测试结果表明,肖家营子 矿床不同成矿阶段的成矿物质来源不同,矽卡岩阶 段的成矿物质主要来自细粒闪长岩和白云岩,热液





Fig. 4 Histograms of sulfur isotope compositions of the Xiaojiayingzi deposit

硫化物阶段的成矿物质不全来自细粒闪长岩和白云 岩,还可能有壳幔混源物质的加入。

(3)上述研究表明,PGE可作为一种地球化学 示踪剂,在判断成矿物质来源方面具有潜在的应用 价值。但是,对铂族元素的研究尚未如其他地球化 学示踪剂(如微量元素、稀土元素)那样成熟,测试精 度亦不够高,还存在不少问题,因此,在应用 PGE 判 断成矿物质来源时,若能结合其他同位素示踪剂共 同进行分析,定会取得更好的效果。

志 谢 野外工作期间得到了朝阳新华钼业有限责任公司李长龙总经理、白杰工程师及其他地质 工作者的大力支持 ;室内岩(矿)石 PGE 分析得到了 国家测试中心屈文俊老师的指导与帮助,在此一并 表示感谢。同时,感谢两位审稿人对文章初稿提出 的建设性建议。

参考文献/References

- 敖颖锋 国铁成 袁国平. 2001. 肖家营子斑岩体地质特征及找矿标 志 J]. 矿产与地质 15(4) 233-237.
- 储雪蕾 孔 敏 周美夫. 2001. 化学地球动力学中的铂族元素地球 化学[J] 岩石学报 ,17(1):112-122.
- 储雪蕾 孙 敏 周美夫. 2002. 内蒙古林西大井铜多金属矿床矿石 的铂族元素分布及物质来源 J]. 科学通报 AT(6):457-461.
- 代军治,毛景文 杜安道,谢桂青,白 杰,杨富全,屈文俊. 2007. 辽 西肖家营子银(铁)矿床 Re-Os 年龄及其地质意义[J]. 地质学 报 81(7)917-923.
- 代军治,毛景文 赵财胜,李福让,王瑞廷,谢桂青,杨富全. 2008. 肖 家营子砂卡岩型钼(铁)矿床高盐度流体及其演化[J]. 岩石学 报 24(9)2124-2132.

黄典豪 杜安道,吴澄宇,刘兰笙,孙亚莉,邹晓秋. 1996. 华北地台钼 (铜,矿铼-锇年龄及其地质意义[J]. 矿床地质,15(4)289-297.

- 康书泽. 1979. 辽宁省喀左县肖家营子钼多金属矿床第一期地质勘 探报告[R]. 朝阳:辽宁朝阳地质勘查院. 24-38.
- 李胜荣,高振敏,陈南生. 1994. 试论铂族元素地球化学示踪体系 []]. 矿物岩石地球化学通讯(1):36-37.
- 李晓峰,华仁民,毛景文. 2002. 江西金山金矿成矿物质来源的铂族 元素证据 J]. 地质与勘探, 38(6):13-16.
- 马建德 徐天波 敖颖峰 李祥才 张志伟 国铁成. 2002. 辽宁肖家营子 钼多金属矿床地质特征及成因 J]. 桂林工学院学报 22(1)5-10.
- 权 恒,韩庆云,艾永富,林彦春,魏菊英. 1992. 燕辽地区多金属、
 金、银成矿与远景[M]. 北京 地质出版社. 134 页.
- 孙晓明,石贵勇,熊德信,王生伟,翟 伟,屈文俊,杜安道. 2007. 云 南哀牢山金矿带大坪金矿铂族元素(PGE)和 Re-Os 同位素地球 化学及其矿床成因意义[J]. 地质学报 81(3) 394-404.
- 鄢明才 迟清华. 1997. 中国东部地壳与岩石的化学组成 M]. 北京: 科学出版社. 11-155.
- Barnes S , Naldrett A J and Gorton M P. 1985. The origin of the fraction of platinum group elements in terrestrial magma J J. Chemical Geology , 53 : 303-323.
- Berzina A N , Sotnikov V I , Economou-Eliopoulos M and Demetrios G E. 2005. Distribution of rhenium in molybdenite from porphyry Cu-Mo and Mo-Cu deposits of Russia (Siberia) and Mongolia J]. Ore Geology Reviews , 26:91-113.
- Berzina A N and Korobeinikov A F. 2007. Rhenium and precious metal (Pt,Pd and Au) abundances in porphyry Cu-Mo deposits of central-Asian Mobile Bell J]. Acta Petrologica Sinica, 23(8):1957-1972.
- Dai J Z , Mao J W , Zhao C S , Xie G Q , Yang F Q and Wang Y T. 2009. New U-Pb and Re-Os age data and the geodynamic setting of the Xiaojiayingzi Mo (Fe) deposit , western Liaoning Province , Northeastern China J J. Ore Geology Reviews , 35:235-244.
- Garuti G , Fershtater G , Bea F , Montero P , Pushkarev E V and Zaccarini F. 1997. Platinum-group elemens as petrological indicators in mafic-ultramafic complexs of the central and southern Ural : Preliminary results J]. Tectonophysics , 276 : 181-194.
- McDonough W F and Sun S S. 1995. The composition of the Earth[J]. Chemical Geology , 120:223-25.
- Naldrett A J , Hoffman E L , Green A H , Chou C L and Naldrett S R. 1979. The composition of Ni-sulfide ores , with particular reference to their content of PGE and Au[J]. Canadian Miniral. , 17:403-415.
- Ohmoto H and Goldhaber M B. 1997. Sulfur and carbon isotopes [A]. In : Barnes H L , ed. Geochemistry of hydrothermal ore deposits (3rd edition J C]. New York : John Wiley and Sons. 517-611.
- Sotnikov V I , Berzina A N , Economou-Eliopoulos M and Eliopoulos D G. 2001. Palladium , platinum and gold distribution in porphyry Cu-Mo deposits of Russia and Mongolia J] Ore Geology Reivews , 18:95-111.
- Zhou M F, Robinson P T, Malpas J and Li Z. 1996. Podiform chromitites in the Luobusa ophiolite (Southern Tibet): Implications for melt-rock interaction and chromite segregation in the upper mantle [J]. J. Petrol., 37:3-21.
- Zhou M F , Sun M , Keays R R and Kerrich R W. 1998. Controls on platinum-group elemental distributions of podiform chromitites : A case study of high-Cr and high-Al chromitites from Chinese orogenic belts[J]. Geochim. Cosmochim. Acta , 62 :677-688.