辽宁肖家营子矽卡岩型钼(铁)矿床高盐度流体特征及演化*

代军治[1,2] 毛景文[1] 赵财胜[3] 李福让[4] 王瑞廷[2] 谢桂青[1] 杨富全[1]

DAI JunZhi[1,2], MAO JingWen[1], ZHAO CaiSheng[3], LI FuRang[4], WANG RuiTing[2], XIE GuiQing[1] and YANG FuQuan[1]

1. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 北京 100037
2. 西北有色地质勘查局, 西安 710054
3. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037
4. 西北有色地质勘查局 711 总队, 勉县 724212

1. *Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing* 100037, *China*
2. *North-West Mining and Geological Exploration Bureau for Nonferrous Metals, Xi'an* 710054, *China*
3. *Development and Resource Center of China Geological Survey, Beijing* 100037, *China*
4. *No.* 711 *Geological Party, North-West Mining and Geological Exploration Bureau for Nonferrous Metals, Mianxian* 724212, *China*

2008-02-19 收稿, 2008-07-14 改回.

Dai JZ, Mao JW, Zhao CS, Li FR, Wang RT, Xie GQ and Yang FQ. 2008. High salinity fluid characteristic and evolution of Xiaojiayingzi Mo (Fe) deposit, Liaoning province. *Acta Petrologica Sinica*, 24(9):2124 – 2132

Abstract Xiaojiayingzi Mo (Fe) deposit is temporally and spatially associated with intermediate to mafic rocks and the mineralization hosted in skarn. Fluid inclusion studies show that two types of primary fluid inclusion occur in calcite and quartz from molybdenite mineralization stage: daughter crystal-bearing polyphase inclusion and aqueous two-phase inclusion. The former homogenized to liquid phase by dissolution of daughter minerals, with homogenization temperatures from 203 to 440℃ and salinity ranging from 32.0% to 52.0% NaCl equiv. The latter homogenized to the liquid phase by disappearance of the vapor bubble at homogenization temperatures from 146 to 340℃, salinity between 4.3% to 18.4% NaCl equiv. The fluid inclusion in granet and chondrodite from garnet skarn stage and magnetite mineralization stage are mainly of daughter crystal-bearing polyphase, which homogenized to the liquid phase by disappearance of vapor phase and homogenization temperatures from 505 to 560℃ and 435 to 541℃, salinity from 43.4% to 50.0% NaCl equiv and 44.9% to 56.9% NaCl equiv, respectively. Fluid inclusion and H-O isotope analysis show that the ore-forming fluid from pre-ore stage is characterized by high temperature and high salinity. The high temperature and high salinity fluid came from magmatic hydrothermal fluid during the decreasing of pressure and temperature. The ore-forming fluid from molybdenite mineralization stage are characterized by mixed fluid of high temperature and high salinity fluid end and medium to lower temperature and lower salinity fluid end. During the evolutional processes of ore-forming fluid, the transformed of the pressure and density of high temperature and high salinity fluid play an important role to magnetite minealization, and the mixing of fluid between high salinity and lower salinity take a positive influence to molybdenite deposition.

Key words Xiaojiayingzi; Skarn deposit; Fluid inclusion; High temperature and high salinity fluid

摘 要 肖家营子矿床是一个与中-基性侵入岩有关的矽卡岩型钼(铁)矿床,矿体主要赋存于矽卡岩体中。流体包裹体研究表明,辉钼矿化阶段以含子矿物包裹体和气液两相包裹体为主,含子矿物包裹体通过子矿物最终消失而均一,均一温度为203~440℃,盐度($NaCl_{eq}$)为32.0%~52.0%,气液两相包裹体通过气泡消失而均一,均一温度为146~340℃,盐度($NaCl_{eq}$)为4.3%~18.4%;石榴石矽卡岩阶段和磁铁矿化阶段主要为含子矿物包裹体,含子矿物包裹体通过气泡消失而均一,包裹体均一温度分别为505~560℃和435~541℃,盐度($NaCl_{eq}$)分别为43.4%~50.0%和44.9%~56.9%。流体包裹体特征和氢

* 本文得到中央级公益性科研院所基本科研业务费(K0729)和国土资源大调查项目(1212010634001)的联合资助.

第一作者简介: 代军治, 男, 1978 年生, 博士, 矿床学专业, 主要从事金属矿床成矿规律及成矿作用研究, E-mail: daijunzhi@163.com

氧同位素分析表明，肖家营子矿床含矿流体由含一定金属成矿元素的高温、高盐度的岩浆热液和低温、低盐度的地层水或大气水组成。成矿早期为含一定金属成矿元素的高温、高盐度流体，这类流体是在降压、降温的过程中由岩浆热液演化而成；辉钼矿阶段流体为中温、高盐度流体和中-低温、低盐度的混合流体。含矿流体在演化的过程中，高温、高盐度流体由于压力和密度的转化对磁铁矿沉淀富集具有重要影响；中温、高盐度与低盐度流体的混合有利于辉钼矿富集成矿。

关键词　肖家营子；矽卡岩；包裹体；高温、高盐度流体

中图法分类号　P588.312；P618.65

斑岩型、矽卡岩型钼矿床是当前国际地学界研究的热点之一。大量的研究表明，斑岩型、矽卡岩型 Mo 矿或 Mo-Cu 矿床通常形成于陆内裂谷或与陆弧有关的内陆环境，主要与石英二长岩或高硅、富碱的花岗岩类小侵入体有关(黄典豪等，1989，1996；罗铭玖等，1991；Seedorff and Einaudi，2004a，b；Anita，2005)，而与基性岩有关的钼矿床的报道几乎没有。位于华北板块北缘的肖家营子矿床是一个与闪长岩—辉长岩侵入体有关矽卡岩型钼(铁)矿床。钼平均品位 0.23%，金属量 10.5 万吨；铁平均品位 33.4%，矿石量 887 万吨，达到大型钼矿床规模。前人曾对该矿床做过一定的研究，在矿床地质特征、成矿物化条件、成矿年龄及矿床成因等方面取得了许多重要成果(康书泽，1979①；黄典豪等，1989；敖颖锋等，2001，2002；马建德等，2002)，然而对于该矿床成矿流体演化特征未做过详细的研究。文章通过典型矿石、矿物组合分析及系统的流体包裹体研究探讨了成矿流体的组成及演化。

1　成矿地质背景

肖家营子钼(铁)矿床位于辽宁西部喀左县境内，大地构造位置处于华北板块北缘内蒙古隆起和燕辽褶皱带结合部位的北东端。矿区出露地层主要为新元古界蓟县系雾迷山组(图 1)，岩性以燧石条带白云岩和白云质灰岩为主，其间夹有燧石条带或结核。该岩层呈单斜构造产出，倾向 220°～240°，倾角 20°～40°，厚度可达 4000m 左右。区内断裂构造发育，主要有 NNE、NWW 向两组断裂。NNE 向断裂以朱力科—中三家断裂为主，构成了矿区的西部边界；NWW 向断裂主要有水塘沟—三道沟断裂和肖家营子—康杖子断裂。在 NNE、NWW 向断裂的交汇部位，侵位有肖家营子中-基性复式岩体。该岩体呈岩株状产出，出露面积为 0.8km^2(图 1)，主要由辉长岩和中-细粒闪长岩组成。康书泽(1979)利用 K-Ar 法测得辉长辉绿岩年龄为 177Ma①，本次对细粒闪长岩中的锆石进行 SHRIMP U-Pb 分析，获得细粒闪长岩加权平均年龄为(169.9±1.4)Ma(待刊数据)，表明岩浆侵位于中侏罗世。二类侵入体中，细粒闪长岩与钼、铁矿床的形成关系最为密切。

矿区目前已查明钼、铁矿体 80 余条，主要呈不规则的脉状、透镜状和似层状，分布于细粒闪长岩与雾迷山组白云岩接触部位的矽卡岩体内，构成矽卡岩型钼、铁矿体。矽卡岩体由石榴石矽卡岩、石榴石—透辉石矽卡岩、透辉石—镁橄

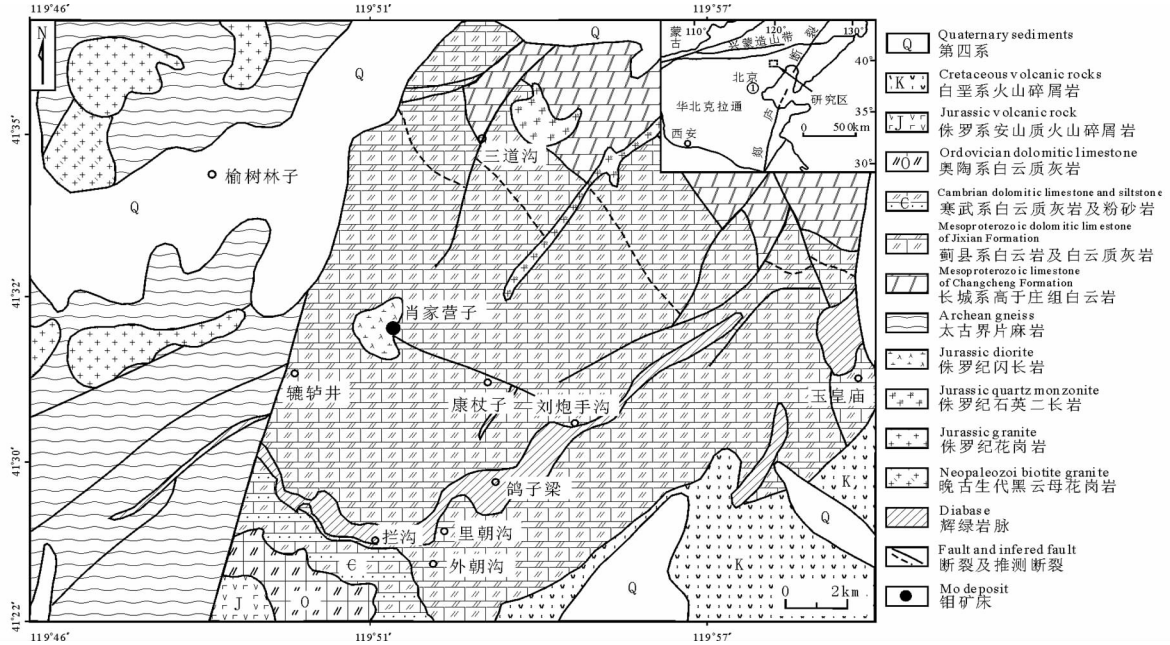

图 1　肖家营子矿区地质图

Fig. 1　Geological map of Xiaojiayingzi molybdenum deposit

① 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. 朝阳：辽宁朝阳地质勘查院，24－38

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。辉钼矿主要分布于石榴石矽卡岩和石榴石—透辉石矽卡岩中;磁铁矿主要赋存于粒硅镁石—金云母矽卡岩中。少量辉钼矿、磁铁矿呈细网脉状分布在细粒闪长岩体内,形成细脉浸染型钼矿体。

根据矿床地质特征和矿物共生组合特征,肖家营子矿床的成矿作用可分为4个阶段:ⅰ无矿矽卡岩化阶段,最常见矿物为石榴石、透辉石、镁橄榄石,基本不含金属矿物,属于无水矽卡岩阶段;ⅱ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、正长石、金云母、绿帘石等,金属矿物以磁铁矿为主,少量黄铁矿、磁黄铁矿及辉钼矿等;ⅲ辉钼矿化阶段,主要形成辉钼矿,并伴随有黄铁矿、黄铜矿等金属矿物,脉石矿物以方解石为主,少量石英;ⅳ铜、铅锌矿化阶段,为成矿晚期阶段,发生少量的黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、方铅矿等矿化现象。钼矿化主要是继矽卡岩形成之后产生的,并叠加于矽卡岩之上。

2 流体包裹体研究

用于研究的样品采自井下6中段(标高538m)和8中段(标高458m)矽卡岩体内,这些样品主要为含辉钼矿的石榴石矽卡岩,含磁铁矿的粒硅镁石矽卡岩和辉钼矿化阶段的方解石、石英。室内首先将所选样品磨制成双面抛光的包体片,进行流体包裹体岩相学、均一-冷冻法测温研究及成分分析。流体包裹体测温工作在中国地质科学院矿产资源研究所流体包裹体与成矿模拟实验室完成。测温仪器为英国产Linkam THMS-600型冷热台,测温范围为-198 ~ +600℃,温度在-120 ~ -30℃,100 ~600℃区间,测温精度为±1℃;温度在-30 ~0℃区间,测温精度为±0.1℃。测温过程中选择那些形态较规则的原生包裹体进行测试。

2.1 流体包裹体类型

岩相学观察表明,肖家营子钼矿床中流体包裹体相对较少,根据包裹体室温下的相态特征,这些包裹体主要有3类:Ⅰ型含子矿物多相包裹体、Ⅱ型气液两相包裹体、Ⅲ型富气相包裹体。这些包裹体多呈小群随机分布于矽卡岩阶段的石榴石、粒硅镁石单颗粒矿物内,或呈孤立态分布于辉钼矿化阶段的方解石和石英中,主要为原生包裹体。

Ⅰ型包裹体 室温下由液相、气泡及固体子矿物多相构成(图2A-2E、2H),属高盐度流体。气相体积所占百分数一般为10% ~25%,少数小于5%,子矿物所占比例一般为10% ~15%,子矿物多呈透明状,形态为立方体,依据子矿物晶形特征,判定为石盐子晶,个别钾盐子晶(棱角较圆)。Ⅰ型包裹体为该矿床最常见的包裹体类型,其数目占整个包裹体总数量的80%。

Ⅱ型包裹体 室温下由气泡和水溶液2相组成,气相体积所占百分比多在10% ~30%(图2F、2G、2J)。Ⅱ型包裹体数量占整个流体总数的20%左右。

Ⅲ型包裹体 室温下由气泡和水溶液2相或纯气相组成,气相体积所占比例在50% ~95%(图2Ⅰ)。Ⅲ型数量不到整个流体包裹体数目的1%。

2.2 不同矿化阶段包裹体特征及显微测温

2.2.1 无矿矽卡岩化阶段

该阶段的流体包裹体主要赋存于石榴石中,包裹体以Ⅰ型为主,含极少量Ⅲ型包裹体,不含Ⅱ型包裹体。Ⅰ型包裹体多呈小群随机分布,部分沿石榴石的生长环带分布(图2A);包裹体大小一般10μm ~20μm,个别达60μm ~80μm;形态有长条形、三角形及不规则状,少数包裹体发生颈缩或卡脖子(图2A)。多数Ⅰ型包裹体中含一个子矿物(图2A),部分包裹体中发育2个以上子矿物(图2B),子矿物多是石盐子晶,极少数钾盐子晶。此外,个别Ⅰ型包裹体内尚含有黑色不透明子矿物(图2D),这类子晶在升温到550℃时也未呈现消失迹象,推断其为金属矿物。

由于Ⅰ型包裹体是高盐度流体,研究过程中只对其进行了升温测试。均一法测温显示,石榴石中的Ⅰ型包裹体在加热过程中表现为子矿物首先溶解,子矿物完全溶解温度为360 ~423℃,包裹体最终通过气泡的消失而均一,均一温度为505 ~560℃,子矿物的溶解温度和气泡消失温度平均相差100 ~170℃。由于子矿物几乎为石盐子晶,因此按照NaCl-H_2O高盐度流体体系公式(Hall *et al.*, 1988),计算的石榴石中Ⅰ型包裹体的盐度($NaCl_{eq}$)为43.4% ~50.0%,平均46.0%(表1;图3)。Ⅲ型包裹体在石榴石中发育很少,呈孤立态分布,测温过程中仅观测到1个包裹体在温度高于550℃时也未完全均一。

2.2.2 磁铁矿化阶段

磁铁矿化阶段流体包裹体主要赋存于粒硅镁石中,且只发育Ⅰ型包裹体,以不规则四边形为主,多呈小群随机分布,大小一般5μm ~10μm,包裹体中只含有一个子矿物,主要是石盐子晶(图2C)。在加热过程中,这类包裹体主要表现为子矿物先溶解,子矿物完全溶解温度为376 ~479℃,相应的流体盐度($NaCl_{eq}$)为44.9% ~56.9%,包裹体最终通过气泡消失而完全均一,均一温度为435 ~541℃。粒硅镁石中Ⅰ型包裹体的子矿物消失温度较包裹体均一温度相差1 ~70℃,但盐度基本高于石榴石中流体盐度(表1;图3)。

2.2.3 辉钼矿化阶段

辉钼矿化阶段流体包裹体赋存于方解石和石英中。包裹体以Ⅰ型和Ⅱ型为主,极少量Ⅲ型。Ⅰ型包裹体数目相对石榴石和粒硅镁石中较少,包裹体以椭圆形、三角形为主,多以孤立形态分布,大小5μm ~15μm,多数包裹体包含一个石盐子晶(图2E),个别含有2个子晶(图2H)。加热时,Ⅰ型包裹体多数通过子矿物的最终溶解而均一,少数通过气泡消失而均一。石英和方解石中Ⅰ型包裹体的均一温度分别为203 ~440℃和268 ~487℃,计算的相应的流体盐度($NaCl_{eq}$)

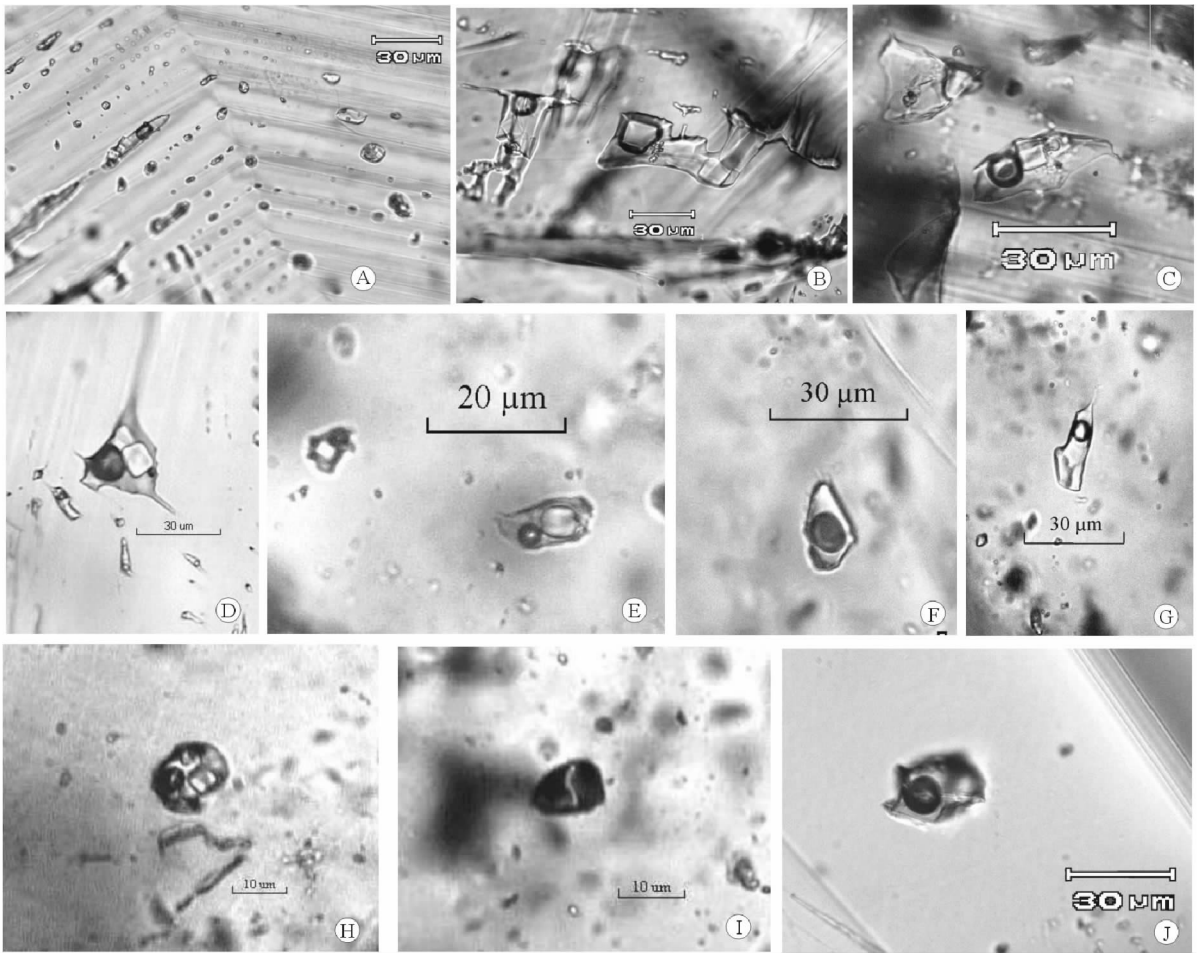

图 2　肖家营子矿床流体包裹体显微照片

A-沿石榴子石生长环带分布的含子矿物多相包裹体；B-石榴子石中含子矿物多相包裹体；C-硅镁石中含 NaCl 子矿物包裹体；D-石榴石中金属矿物包裹体(小黑点)；E-石英中含 KCl 和 NaCl 子矿物包裹体；F，G-石英中气液两相包裹体；H-方解石中含子矿物多相包裹体；I-方解石中富气相包裹体；J-方解石中气液两相包裹体

Fig. 2　Photomicrographs of fluid inclusions in Xiaojiayingzi deposit

A-type I inclusions in garnet growth zoning; B-type I inclusions in garnet; C-NaCl crystal-bearing inclusion occurred in humite; D-NaCl and metal crystal-bearing inclusion in garnet; E-NaCl and KCl crystal-bearing inclusion in quartz; F, G-type II inclusions in quartz; H-type I inclusions occurred in calcite; I-vapor-rich inclusion in calcite; J-type II inclusions in calcite

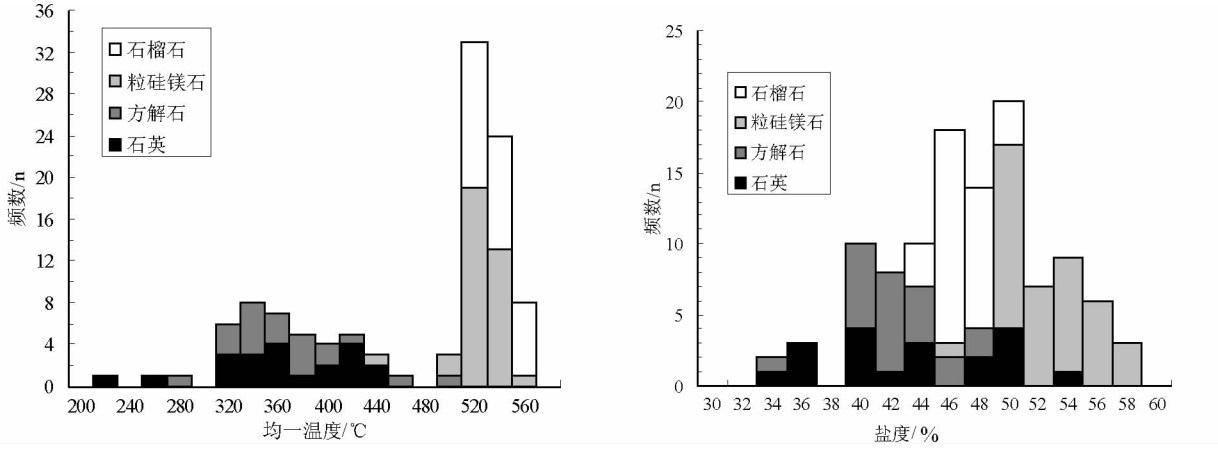

图 3　含子矿物多相包裹体温度、盐度直方图

Fig. 3　Histograms of homogenization temperatures and salinities of daughter mineral bearing inclusions

表 1 肖家营子钼(铁)矿床流体包裹体均一温度、盐度结果表

Table1 Microthermometric result of fluid inclusions from Xiaojiayingzi Mo(Fe) depsoit

成矿阶段	矿物	包裹体类型	冰晶消失温度(℃)	子晶消失温度(℃)	均一温度(℃)		盐度($NaCl_{eq}$)(%)	
					范围	均值	范围	均值
矽卡岩阶段	石榴石	Ⅰ(52)		360~423	505~560	526	43.4~50.0	46.0
		Ⅲ(1)			>550			
	粒硅镁石	Ⅰ(38)		376~479	435~541	515	44.9~56.9	51.6
辉钼矿化阶段	石英	Ⅰ(21)		203~440	203~440	353	32.0~52.0	42.3
		Ⅱ(37)	-2.6~-6.5		183~331	288	4.3~9.8	7.3
		Ⅲ(1)			>550			
	方解石	Ⅰ(20)		237~392	268~487	358	33.9~46.6	41.5
		Ⅱ(32)	-2.9~-14.5		146~340	255	4.8~18.4	9.9
		Ⅲ(3)			383,405,459			

注:括号中数字为测试个数

为32.0%~52.0%和33.9%~46.6%(表1;图3)。

石英和方解石中的Ⅱ型包裹体大小4μm~18μm,形态为管形、四边形,呈孤立或小群分布,其形态及产出特征表明,不属于流体卡脖子或泄漏造成的,属原生包裹体。Ⅱ型包裹体与Ⅰ型包裹体共生产出较少,表明其与Ⅰ型包裹体属于不同类型流体。冷冻-升温过程中观测的Ⅱ型包裹体冰晶最终消失温度为-2.6~-14.5℃,根据低盐度流体盐度计算公式(Bodnar,1993),计算的包裹体盐度($NaCl_{eq}$)为4.3%~18.4%,盐度($NaCl_{eq}$)集中于6%~10%。该类包裹体大部分最终均一到液相,均一温度集中于200~340℃(表1;图4),只有一个包裹体均一到气相,均一温度为402℃。

Ⅲ型包裹体在石英和方解石中发育很少,呈孤立分布为主(图2Ⅰ),大小5μm~15μm,个别与Ⅰ型和Ⅱ型包裹体共生产出。由于这类包裹体气相体积所占比例大,液相少,加热过程中仅观测到4个包裹体的相变化特征,3个包裹体最终均一到气相,均一温度为383℃、405℃、459℃,1个包裹体在温度升高到550℃也未完全均一,包裹体的冰点未观测到。

3 氢-氧同位素分析

氢-氧同位素分析样品为矽卡岩阶段的石榴石,热液硫化物阶段的方解石及与矽卡岩接触部位围岩中的重结晶白云岩,热液硫化物阶段石英少且小,未能挑选出用于测试的样品。测试前对这些不同阶段的代表性样品进行粉碎,并通过物理和化学方法挑选出纯度大于99%的石榴石、方解石、白云石各10g左右。

氢同位素分析采用热爆裂法,首先从样品中提取矿物包裹体中的H_2O,再使之在400℃条件下与Zn反应制取H_2,

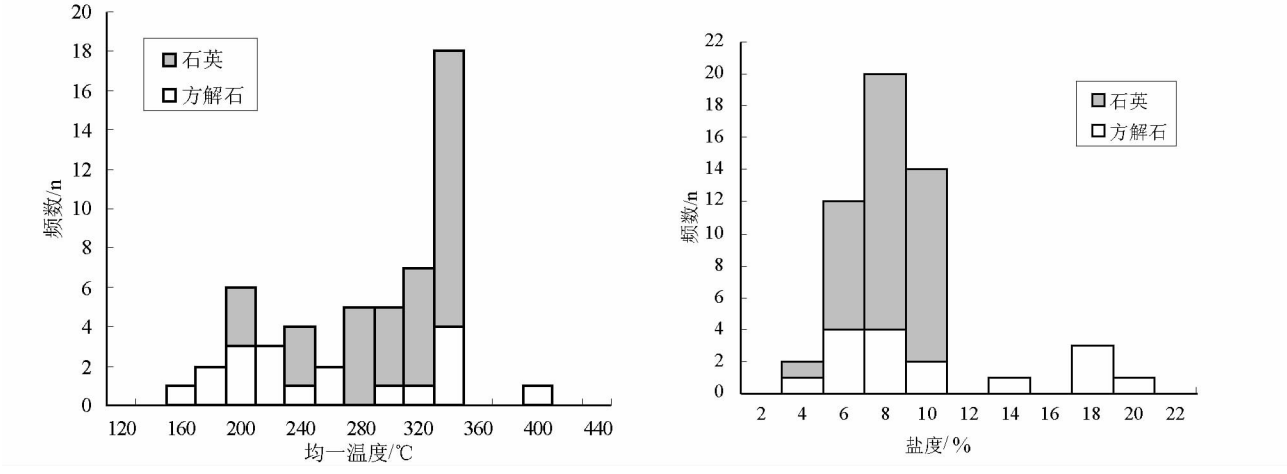

图4 气液两相包裹体温度、盐度直方图

Fig.4 Histograms of homogenization temperatures and salinities of aqueous two-phase inclusions

表 2 肖家营子矿床氢-氧同位素测试结果

Table 2 Oxygen and hydrogen isotope data of Xiaojiayingzi deposit

样号	测试矿物	形成阶段	$\delta D_{V\text{-}SMOW}$/‰	$\delta^{18}O_{V\text{-}SMOW}$/‰	均一温度/℃	$\delta^{18}O_{H2O}$/‰
XJ5	石榴石	无水矽卡岩阶段	-93	7.1	520	8.73
XJ13	石榴石	无水矽卡岩阶段	-106	5.6	425	6.61
XJ10	白云石	磁铁矿阶段	-108	15.1	417	9.40
XJ15	方解石	辉钼矿阶段	-86	12.8	346	8.45
XJ4	方解石	辉钼矿阶段	-75	10.1	325	5.18
XJ002	方解石	成矿后热液	-112	16.3	160	4.16
XJ009	方解石	重结晶白云岩	-124	14.4	160	2.97

然后用质谱进行氢同位素测定，并以 SMOW 为标准。氧同位素分析采用磷酸法，石榴石和方解石中的氧同位素分析是在 25℃条件下，与磷酸反应释放出 CO_2，白云石则是在 50℃条件下与磷酸反应释放出 CO_2，然后用质谱计测定 CO_2 中的 $\delta^{18}O_{PDB}$。$\delta^{18}O_{PDB}$ 和 $\delta^{18}O_{SMOW}$ 的换算，采用公式：$\delta^{18}O_{SMOW} = 1.03086 \times \delta^{18}O_{PDB} + 30.86$（Friedman，1977）。氢-氧同位素测试在中国地质科学院矿产资源研究所同位素实验室完成，测试仪器型号为 MAT253 EM 型质谱仪。氢同位素的分析精度为 ±2‰；氧同位素的分析精度为 ±0.2‰。

肖家营子矿床氢氧同位素测试结果列于表 2。由测试结果可以看出，石榴石、方解石、白云石包裹体中 δD_{SMOW} 值范围为 -75‰ ~ -124‰，平均 -100‰，其中早期矽卡岩阶段石榴石和磁铁矿阶段的 δD 为 -106‰ ~ -93‰，磁铁矿阶段的 δD 为 -108‰，辉钼矿阶段的 δD 为 -86‰ ~ -75‰，成矿后热液方解石和重结晶白云岩的 δD 为 -112‰ ~ -124‰。测试样品的 $\delta^{18}O_{SMOW}$ 值变化较大，变化范围为 5.6‰ ~ 16.3‰，平均 11.6‰，与矿物平衡的水的氧同位素分馏依照公式 $1000\ln\alpha_{石榴石-水} = 1.22 \times 10^6 T^{-2} - 3.70$（Bottinga，1975）、$1000\ln\alpha_{方解石-水} = 2.78 \times 10^6 T^{-2} - 3.40$（O'Neil *et al.*，1969）和 $1000\ln\alpha_{白云石-水} = 3.20 \times 10^6 T^{-2} - 1.50$（Northrop *et al.*，1969）计算获得。以上各式中 T 为对应样品中流体包裹体均一温度的均值。计算的 $\delta^{18}O_{H2O}$ 值为 2.97‰ ~ 9.4‰，平均 6.5‰，其中，早期矽卡岩阶段、磁铁矿阶段、辉钼矿阶段和围岩地层中的 $\delta^{18}O_{H2O}$ 分别为 6.6‰ ~ 8.7‰、9.4‰、5.2‰ ~ 8.5‰、2.97‰。

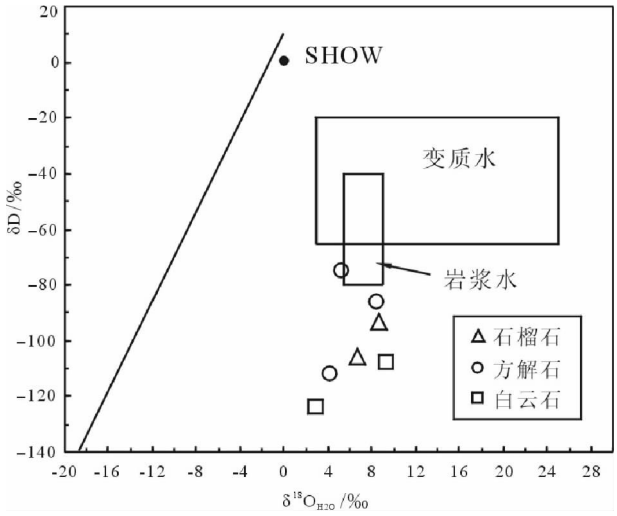

图 5 肖家营子矿床氢氧同位素组成投影图

Fig. 5 The diagram of δD vs. $\delta 18O_{H2O}$ of the inclusion from Xiaojiayingzi molybdenum deposit

4 讨论

4.1 成矿流体来源

关于矽卡岩型矿床成矿流体的来源，赵一鸣等（1990）、Pan and Dong（1999）和 Zhao *et al.*（2003）通过对中国矽卡岩型矿床的研究表明，矽卡岩型矿床的 δD 为 -90.3‰ ~ -48.3‰（平均 -67‰），$\delta^{18}O_{H2O}$ 为 3.35‰ ~ 9.59‰（平均 5.9‰），氢氧同位素组成基本落于岩浆水或接近岩浆水范围，成矿流体中岩浆水占据主要地位，大气降水的混合是次要的。肖家营子矿床氢氧同位素分析表明，辉钼矿阶段方解石中的氢氧同位素值与矽卡岩阶段石榴石、磁铁矿阶段白云石、成矿后热液方解石及围岩中重结晶白云岩存在明显的差别。石榴石和白云石的 δD_{SMOW} 值（-124‰ ~ -93‰）小于方解石的 δD_{SMOW} 值（-86‰ ~ -75‰）。在氢氧同位素图上（图 5），辉钼矿阶段方解石的氢氧同位素值接近岩浆水，表明成矿流体以岩浆水为主。矽卡岩阶段石榴石的氢同位素值虽然偏离岩浆水，但氧同位素值接近岩浆水氧同位素范畴。石榴石的氢同位素值偏离岩浆水，可能是来自深部的岩浆热液在升上的过程中与围岩地层中的大气降水发生了强烈的同位素交换反应，使得早期含矿热液中的 δD 发生了明显漂移。

4.2 流体包裹体组成及性质

流体包裹体研究表明,肖家营子矿床主要存在4种包裹体组合:①含有一定成矿金属元素的高温、高盐度包裹体,这类包裹体主要见于石榴石中。流体包裹体以含石盐子矿物多相为主,少部分包裹体中含有金属子矿物,含石盐子矿物包裹体以通过气泡消失而完全均一,包裹体均一温度较子矿物消失温度平均高139℃,代表了早期高温、高盐度的岩浆流体;②含盐类子矿物高温、高盐度包裹体,主要赋存于粒硅镁石中。这类包裹体虽然多通过气泡消失而均一,但包裹体均一温度与子矿物消失温度差明显减小(1~70℃),含矿流体盐度最高;③含盐类子矿物中温、高盐度包裹体,这类包裹体主要赋存于石英和方解石中,包裹体主要通过子矿物消失而均一,均一温度为203~440℃,盐度($NaCl_{eq}$)为32.0%~52.0%;④气液两相中-低温、低盐度包裹体,主要赋存于石英和方解石中,包裹体最终通过气泡消失而均一,包裹体均一温度146~340℃,盐度($NaCl_{eq}$)为4.3%~18.4%。

含石盐子矿物的流体包裹体常见于许多地质环境中,并且是斑岩型铜矿床和矽卡岩型矿床的特征包裹体类型。受体系 *P-T* 条件限制,不同密度的含石盐包裹体可以呈现三种不同的均一方式(Bodnar,1994;张德会等,2003):①在室温条件下,相对较小气相充填度的高密度包裹体,在加热过程中通过石盐的溶解而最终均一;②在室温条件下,相对气泡较大的低密度包裹体,在加热过程中最终通过气泡的消失而均一;③第三种是密度界于上述二者之间的临界包裹体,通过石盐和气泡的同时消失而均一。其中第一种情况是斑岩型矿床中常见的现象,Cline and Vanko(1995)和Bodnar(1994)认为这种高盐度包裹体不仅可以通过流体不混溶或沸腾作用而成,而且可以在岩浆结晶的最后阶段从浅部岩浆中直接出溶而成,或者在相对连续的温度条件下,由于压力波动而形成。第二种情况在斑岩型矿床中也出现,但不是主要类型,这类包裹体可能是不饱和的石盐溶液在高温和低于蒸汽饱和压力的条件下被捕获而成的,包裹体在捕获后沿着等容线变化,并随着压力和温度的逐渐降低而结晶出子矿物,反映了高温岩浆热液演化的某些特征。

岩相学及显微测温研究表明,肖家营子矿床与国内外众多岩浆成因矽卡岩型矿床相比存在一些共同特点,但又有许多差异性。比如,典型的岩浆成因矽卡岩型矿床中普遍存在熔融包裹体、熔-流包裹体及含子矿物包裹体,尤其是熔-流包裹体,这类包裹体是从岩浆缓慢冷却结晶过程中捕获的;成矿过程中,流体发生过明显的沸腾作用或不混溶作用(赵斌等,1995;赵一鸣等,1990;Wang *et al.*, 2001;谢玉玲等,2004)。肖家营子矿床中以含子矿物多相包裹体为特点,少量的富气相包裹体,基本不发育熔-流包裹体。如果含子矿物包裹体是由流体的不混溶或沸腾作用而成的,那么高盐度的流体就应该与大量低盐度的富气相包裹体共存,且他们应该具有相似均一温度。石榴石矽卡岩阶段和磁铁矿化阶段,虽然存在微量富气相包裹体,但基本呈孤立态产出,不与含子矿物类包裹体共生;含子矿物包裹体主要是通过气泡的消失而完全均一,微量的富气相包裹体的存在不足以说明含子矿物包裹体是在相对富气的环境中捕获的,即使在局部地段发生不混溶或沸腾作用也不能形成如此多的含子矿物包裹体。辉钼矿化阶段,虽然也存在富气相包裹体,但其与含子矿物包裹体基本不共生产出,个别富气相包裹体的均一温度不足以说明其与含子矿物包裹体温度相近,含子矿物类包裹体基本通过子晶消失而均一,表明流体包裹体是在液相相对稳定的环境中捕获的。以上特征表明,肖家营子矿床大量的含子矿物类包裹体可能不是通过流体不混溶或沸腾作用而成,而是由岩浆热液演化而成的。证据如下:①肖家营子矿床是一个与细粒闪长岩侵入体有关的矽卡岩型矿床,矿体主要产于矽卡岩体中,少量产在似斑状闪长岩中。年代学研究显示,赋矿细粒闪长岩的锆石SHRIMP U-Pb加权平均年龄为(169.9±1.4)Ma,辉钼矿Re-Os等时线年龄为(165.5±4.6)Ma(待刊数据),成岩与成矿年龄在误差范围内相等,表明矽卡岩化和矿化是伴随岩体侵位形成的;②早期阶段含子矿物包裹体以气泡消失而均一,包裹体均一温度大于500℃,盐度($NaCl_{eq}$)大于50%;③从早期无水矽卡岩阶段到热液硫化物阶段,流体包裹体温度、盐度、密度基本呈现出连续的变化趋势,表明高温、高盐度的流体可能来自岩浆热液;④氢氧同位素分析也证实主成矿期含矿流体主要为岩浆水;⑤肖家营子矿床含子矿物包裹体的这种均一方式与新几内亚岛Graberg斑岩型Cu-Au矿床(卢焕章,2000)存在一定相似性,反映了岩浆热液流体随压力和温度的逐渐降低呈现连续的变化特征。

4.3 含矿流体演化

前已述明,肖家营子矿床存在4种包裹体组合。流体包裹体特征和氢氧同位素资料表明,这4种包裹体组合来自含一定金属成矿元素的高温、高盐度的岩浆热液和来自围岩的低温低盐度流体,分别捕获于3个不同的热液演化阶段(图6):①早期矽卡岩化阶段,来自深部的岩浆热液沿着围岩裂隙上升并与镁质大理岩发生反应,形成了橄榄石、石榴石、透辉石等无水矽卡岩矿物,同时圈闭了以含子矿物多相为主高温、高盐度流体包裹体。这类包裹体捕获时处于相对开放的环境中,含矿体系压力较小,包裹体以气泡消失而完全均一(图6),均一温度与子矿物的熔化温度相差较大。成矿早期,部分含子矿物包裹体中包含有不透明金属矿物,表明早期从深部岩浆房中分异出来的高温、高盐度流体富含成矿元素,是携带成矿物质运移的介质,含矿流体在早期阶段以卤化物的形式进行搬运;②随着含矿热液继续向上迁移,成矿作用进入到磁铁矿阶段,围岩中原有的裂隙被充填,体系压力升高,形成了粒硅镁石、阳起石、金云母等含水矽卡岩矿物,含水矽卡岩矿物的形成消耗了含矿流体中大量水,使

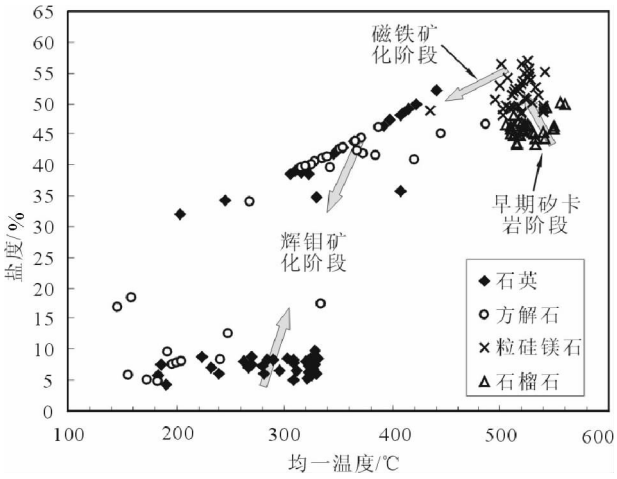

图6 肖家营子矿床流体包裹体均一温度-盐度图

Fig. 6 Homogenization temperature-salinity plot for fluid inclusions from Xjiaojiayingzi deposit

得残余流体的盐度升高(图6)。流体密度或盐度的这种转变有利于磁铁矿从含矿流体中分离出来,沉淀成矿;③伴随接触交代作用的进一步加强,成矿作用进入到辉钼矿化阶段,来自岩浆热液的含矿流体与外部流体(地层中流体)的结合形成了中温、高盐度的含子矿多相包裹体和中-低温、低盐度的气液两相包裹体。含子矿物包裹体和气液两相包裹体虽然在石英和方解石中都存在,但他们几乎不共生于同一石英或方解石单颗粒内及彼此相差较大的均一温度(平均相差90℃),表明他们不是由流体沸腾作用形成的,而是两种不同类型流体的混合作用而成(图6),这与氢氧同位素分析结果相符。这种中温、高盐度的流体与中-低温、低盐度流体(地层水或大气降水)的混合对辉钼矿沉淀富集产生了积极的影响。

5 结论

(1)肖家营子矿床主要存在4种包裹体组合:含一定成矿金属元素的高温、高盐度包裹体;含盐类子矿物高温、高盐度包裹体;含盐类子矿物中温、高盐度包裹体和气液两相中-低温、低盐度包裹体。大量的高温、高盐度包裹体是在岩浆热液演化的过程中捕获而成的。

(2)包裹体物化性质和氢氧同位素分析表明,肖家营子4种包裹体组合分别来自含一定金属成矿元素的高温、高盐度的岩浆热液和来自围岩的低温低盐度流体。

(3)含矿流体的形成经历了3个阶段的演化,早期石榴石矽卡岩化阶段是富含成矿元素的高温、高盐度流体,含矿流体在早期阶段以卤化物的形式迁移;磁铁矿化阶段,含矿流体为高温、高盐度类,包裹体均一温度与子矿物熔化温度比较接近;辉钼矿化阶段,中温、高盐度的流体与中-低温、低盐度流体发生了明显的混合作用。流体在演化的过程中富含金属元素的高温、高盐度流体由于压力和密度的转化和中温、高盐度流体与低盐度流体的混合作用分别对铁、钼元素沉淀富集产生了积极的影响。

致谢 野外工作期间得到了辽宁朝阳新华钼业有限责任公司李长龙总经理,白杰工程师及其它地质工作者的大力帮助;室内流体包裹体测试工作得到中国地质科学院矿产资源研究所流体包裹体与成矿模拟实验室徐文艺研究员和陈伟十工程师的帮助与指导;文章的最终定稿得益于两位匿名审稿专家富有建设性的意见,在此对上述个人和单位一并表示谢意。

References

Anita NB, Vitaly IS, Maria EE and Demetrios GE. 2005. Distribution of rhenium in molybdenite from porphyry Cu-Mo and Mo-Cu deposits of Russia (Siberia) and Mongolia. Ore Geology Review, 26: 91 – 113

Ao YF, Guo TC and Yuan GP. 2001. Geology characters and prospecting in dictators of Xiaojiayingzi porphyry. Mineral Resources and Geology, 15(4): 233 – 237(in Chinese with English abstract)

Ao YF, Yuan GP and Guo TC. 2002. Country rock alteration and mineralization of Xiaojiayingzi molybdenum-polymetallic deposit. Mineral Resources and Geology, 16(2): 78 – 81(in Chinese with English abstract)

Bodnar RJ. 1993. Revised equation and table for determining the freezing point depression of H_2O-NaCl solutions. Geochimicaet Cosmochimica Acta, 57: 683 – 684

Bodnar RJ. 1994. Synthetic fluid in natural quartz. Ⅶ. The system H_2O-NaCl: Experimental determination of the halite liquidus and isochores for a 40 % NaCl solution. Geochimica et Cosmochimica Acta, 58: 1053 – 1063

Cline JS and Vanko DA. 1995. Magmatically generated saline brines related to molybdenum at Questa, New Mexico, USA. In: Thompson JFH(ed.). Magmas, Fluids, and Ore Deposits. Mineralogical Association of Canada Short Course Series, 23: 153 – 174

Hall DL, Sterner SM and Bodnar RJ. 1988. Freezing point depression of NaCl-KCl-H_2O solutions. Economic Geology, 83: 197 – 202

Huang DH, Dong QY and Gan ZX. 1989. China molybdenum deposits. In: Song SH (ed.). China Deposits, Vol 1, 8th chapter. Beijing: Geological Publishing House, 493 – 536(in Chinese)

Huang DH, Du AD, W CY, Liu LS, Sun YL and Zou XQ. 1996. Metallochronology of molybdenum (copper) deposits in the north China platform: Re-Os age of molybdenite and its geological significance. Mineral Deposits, 15(4): 289 – 297(in Chinese with English abstrast)

Lu HZ. 2000. High temperature, salinity and high concentrated metal magmatic fluids: An example from Grasberg Cu-Au porphyry deposit. Acta Petrologica Sinica, 16(4): 465 – 472(in Chinese with English abstract)

Luo MJ, Zhang FM, Dong QY, Xu YR, Li SM and Li KH. 1991. China molybdenum deposits. ZhengZhou: Henan Science and Technology Press, 1 – 425(in Chinese)

Ma JD, Yu TB, Ao YF, Li XC, Zhang ZW and Guo TC. 2002. On

geological features and genesis of the Xiaojiayingzi molybdenum polymetallic deposit in Liaoning. Journal of Guilin Institute of Technology, 22(1): 5 – 10(in Chinese with English abstract)

Pan YM and Dong P. 1999. The lower Changjiang (Yangzi/Yangtze River) metallogenic belt, east central China: Intrusion and wall rock hosted Cu-Fe-Au, Mo, Zn, Pb, Ag deposits. Ore Geology Review, 15: 177 – 242

Seedorff E and Einaudi MT. 2004a. Henderson porphyry molybdenum system, Colorado: II decoupling of introduction and deposition of metals during geochemical evolution of hydrothermal fluids. Economic Geology, 99: 39 – 72

Seedorff E and Einaudi MT. 2004b. Henderson porphyry molybdenum system, Colorado: I sequence and abundance of hydrothermal mineral assemblages, flow paths of evolving fluids, and evolutionary style. Economic Geology, 99: 3 – 37

Wang LJ, Wang JB and Wang YW. 2001. Fluid-melt inclusions in fluorite of the Huanggangliang skarn iron-tin deposit and their significance to mineralization. Acta Geol. Sinica, 75(2): 204 – 212

Xie YL, Xu JH, Yang ZS, Meng YY, Xu WY, Qiu SD and Wang BH. 2004. SEM/EDS study of daughter minerals of fluid inclusions in garnet and diopside from tongguanshan copper deposit. Mineral deposits, 23(3): 375 – 382 (in Chinese with English abstract)

Zhang DH, Zhang WH and Liu W. 2003. The high salinity fluid inclusions and its significance in ore origin in the Yinshan polymetallic deposit. Acta Petrologica Sinica, 19(1): 173 – 180 (in Chinese with English abstract)

Zhao B, Li YS and Zhao JS. 1995. The evidence from inclusions for magma-genetic skarn. Geochimica, 24(2): 198 – 200(in Chinese)

Zhao YM, Lin WW, Bi CS, Li DX and Jiang CJ. 1990. Skarn deposits of China. Beijing: Geol. Publ. House, 1 – 354(in Chinese)

Zhao YM, Dong YG, Li DXand Bi CS. 2003. Geology, mineralogy, geochemistry, and zonation of the Bajiazi dolostone-hosted Zn-Pb-Ag skarn deposit, Liaoning Province, China. Ore Geology Review, 23: 153 – 182

附中文参考文献

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. 矿产与地质,15(4): 233 – 237

敖颖锋,袁国平,国铁成. 2002. 肖家营子钼多金属矿床围岩蚀变及矿化特征. 矿产与地质,16(2): 78 – 81

黄典豪,董群英,甘志贤. 1989. 中国钼矿床. 见: 宋叔和主编. 中国矿床,上册,第八章. 北京: 地质出版社,493 – 536

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. 矿床地质,15(4): 289 – 297

卢焕章. 2000. 高盐度、高温和高成矿金属的岩浆成矿流体——以格拉斯伯格 Cu-Au 矿为例. 岩石学报,16(4): 465 – 472

罗铭玖,张辅民,董群英,许永仁,黎世美,李昆华. 1991. 中国钼矿床. 郑州: 河南科学技术出版社,1 – 425

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. 桂林工学院学报, 22(1): 5 – 10

谢玉玲,徐九华,杨竹森,蒙义峰,徐文艺,邱士东,王葆华. 2004. 铜官山铜矿床矽卡岩矿物中流体包裹体及子矿物的扫描电镜研究. 矿床地质,23(3): 375 – 382

张德会,张文淮,刘伟. 2003. 江西银山多金属矿床高盐度包裹体及其成因意义. 岩石学报,19(1): 173 – 180

赵斌,李院生,赵劲松. 1995. 岩浆成因矽卡岩的包裹体证据. 地球化学,24(2): 198 – 200

赵一鸣,林文蔚,毕承思,李大新,蒋崇俊. 1990. 中国矽卡岩矿床. 北京: 地质出版社,1 – 354