内蒙古西拉沐伦成矿带羊场石英脉型钼矿床成矿流体地球化学特征研究*

张作伦[1,2] 刘建明[2] 褚少雄[2]

ZHANG ZuoLun[1,2], LIU JianMing[2] and CHU ShaoXiong[2]

1. 中铁资源集团中铁资源地质勘查有限公司,北京 100039
2. 中国科学院地质与地球物理研究所矿产资源研究重点实验室,北京 100029
1. *China Railway Resources Exploration Co. LTD*, *China Railway Resources Group*, *Beijing* 100039, *China*
2. *Key Laboratory of Mineral Resources*, *Institute of Geology and Geophysics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100029, *China*

2011-08-20 收稿, 2011-10-27 改回.

Zhang ZL, Liu JM and Chu SX. 2012. Ore-forming fluid geochemistry of Yangchang quartz vein molybdenum deposit in Xilamulun molybdenum metallogenic belt, Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 28(2):391 – 400

Abstract The Yangchang Mo deposit is located in the Xilamulun molybdenum metallogenic belt on northern margin of North China Craton, Inner Mongolia. The mineralization is occurred within the NW- to NNW- trending faults and fractures hosted by the Yanshanian biotite monzogranite. The ore-forming hydrothermal process can be subdivided into four stages: quartz vein stage (Ⅰ), quartz-pyrite stage (Ⅱ-1), quartz-pyrite-molybdenite-chalcopyrite-galena-sphalerite stage (Ⅱ-2) and carbonate stage(Ⅲ). Three types of fluid inclusions are observed in quartz crystals, i. e. liquid-rich (V_{H_2O} < 50%) inclusion, gas-rich (V_{H_2O} = 50% ~ 90%) inclusion and vapor inclusions. Homogenization temperatures of Ⅰ, Ⅱ-1, Ⅱ-2 stages are 173 ~ 280℃, 180 ~ 467℃, 151 ~ 366℃, respectively. From Ⅰ stage to Ⅱ-1 stage the temperatures become higher, suggesting the magmatic water was introduced into the mineralizing system. Salinities of Ⅰ, Ⅱ-1, Ⅱ-2 stages are in the range of 4.03% ~ 10.61% NaCleqv, 2.07% ~ 10.36% NaCleqv, 2.41% ~ 9.98% NaCleqv, respectively. The composition of the hydrothermal fluids at different stages are mainly H_2O (>94.39mol%), with minor CO_2, N_2, CH_4, C_2H_6, Ar, H_2S, and Na^+, HS^-, Cl^- ions. These suggest the Yangchang Mo deposit was formed in reduction condition and the ore-forming fluids were of the NaCl-H_2O ± CO_2 system. Hydrogen and oxygen isotopes of fluid inclusions in various mineralization stages are −119.66‰ ~ −98.79‰ and −0.08‰ ~ 1.90‰ respectively, indicating that the ore-forming fluids were the mixture of magmatic water and meteoric water. It is suggested that the mixing of different fluids with distinct natures might be responsible for the precipitation of molybdenite.

Key words Fluid inclusions; Hydrogen and oxygen isotope; Yangchang; Xilamulun

摘 要 内蒙古羊场钼矿床产于华北克拉通北缘西拉沐伦钼多金属成矿带内,矿体主要以石英脉形式产于燕山期黑云母二长花岗岩内,受NW、NNW向断裂构造控制。成矿过程包括石英大脉阶段(Ⅰ)、石英-黄铁矿亚阶段(Ⅱ-1)、石英-黄铁矿-辉钼矿-黄铜矿-方铅矿-闪锌矿亚阶段(Ⅱ-2)、碳酸岩化阶段(Ⅲ)。流体包裹体研究发现,按照气相比不同可将包裹体分为W_L型(<50%)、W_V型(50% ~90%)、G型(100%)。Ⅰ、Ⅱ-1、Ⅱ-2阶段包裹体均一温度分别为173 ~ 280℃、180 ~ 467℃、151 ~ 366℃,不具有继承演化关系,可能是成矿作用过程中加入有岩浆热液的结果;盐度分别为4.03% ~ 10.61% NaCleqv、2.07% ~ 10.36% NaCleqv和2.41% ~ 9.98% NaCleqv。各阶段流体成分均以H_2O为主(>94.39 mol%),含少量挥发份CO_2、N_2、CH_4、C_2H_6、Ar、H_2S等还原性气体,阳离子以Na^+为主,阴离子以HS^-、Cl^-为主,属含少量CO_2的NaCl-H_2O体系;各阶段石英氢、氧同位素$\delta^{18}O_{H_2O}$介于−0.08‰ ~ 1.90‰、δD介于−119.66‰ ~ −98.79‰。上述特征说明该矿床的成矿流体是岩浆热液与古大气降水混合而成。不同来源、不同性质的流体混合作用是造成羊场辉钼矿沉淀成矿的主要原因。

关键词 流体包裹体;氢、氧同位素;羊场;西拉沐伦

中图法分类号 P618.65

---

* 本文受国家自然科学基金项目(40972065)、全国危机矿山接替资源找矿综合研究项目(20089931)和中国中铁股份有限公司2010年度重点科技开发计划(2010-04、2010-07)联合资助.

第一作者简介: 张作伦,男,1981年生,博士,工程师,主要从事矿床成因研究和矿产勘查评价工作,E-mail:zhangzuolun@163.com

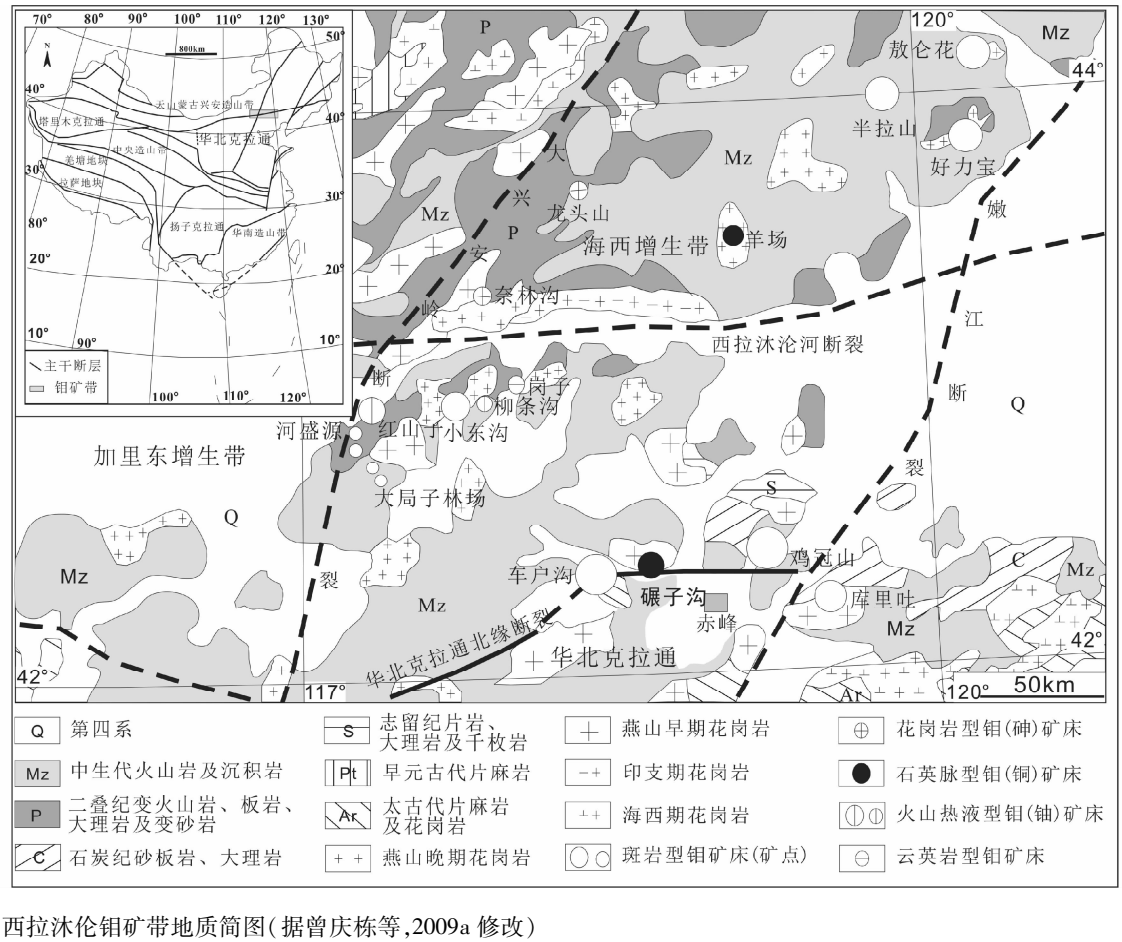

图 1 西拉沐伦钼矿带地质简图(据曾庆栋等,2009a 修改)

Fig. 1 Sketch map showing geology of the Xilamulun Mo belt (modified after Zeng *et al.*, 2009a)

1 引言

石英脉型矿床是钼矿床的主要类型之一,相对斑岩型和夕卡岩型矿床经济意义较小,长期以来未引起研究领域的广泛关注。较早与石英脉型钼矿床相关的文献仅见于浙江石坪川钼矿(沈庭槐和陆永顺,1979;陈南生,1984;罗铭玖等,1991)。近年在东秦岭、燕辽、西拉沐伦等主要钼成矿带内相继发现了石英脉型钼矿化,并引起了较多关注。这些石英脉型矿化既有产于花岗岩体内的,也有产于变质火山岩内的。前者如西拉沐伦钼矿带的碾子沟钼矿(曾庆栋等,2009a;张作伦等,2009, 2010;Liu *et al.*, 2011)、燕辽钼矿带的兰家沟钼矿(代军治等,2007);后者如东秦岭钼矿带的纸房钼矿、寨凹钼矿、前范岭钼矿等(陈衍景,2006;邓小华等,2008a, b;高阳等,2010)。

内蒙古西拉沐伦钼多金属成矿带内的羊场钼多金属矿床发现于 2005 年,矿体主要以石英脉形式产于黑云母二长花岗岩体中。该矿床研究工作较薄弱,仅 Zeng *et al.* (2010a) 对矿床地质特征及主要金属矿物辉钼矿形成时代作过研究,获得的等时线年龄为 134.8 ± 5.1Ma,矿体形成于早白垩世。本文在前人工作基础上,以含矿石英脉为研究对象,通过流体包裹体岩相学、显微测温、群体包裹体气液相成分分析,石英氢、氧同位素分析,对羊场钼多金属矿石英脉型矿化成矿流体性质进行探讨。

2 成矿地质背景

西拉沐伦钼矿带大地构造上位于华北克拉通和西伯利亚克拉通之间的中亚-蒙古巨型造山带东段(Zeng *et al.*, 2011a, b, c, d),以西拉沐伦河断裂为界分为南、北两部分(曾庆栋等,2009a, b)。羊场钼多金属矿位于矿带北部(图 1),区域地层除少量早元古代片麻岩外,主要由二叠纪海相碎屑岩-碳酸盐岩和燕山期火山岩-次火山岩组成(赵一鸣等,1997;范书义等,1997;刘建明等,2004; Zeng *et al.*, 2009)。

区域侵入岩包括海西期、印支期、燕山期。海西期主要由花岗闪长岩、二长花岗岩、辉长岩组成,常与二叠纪中基性和中酸性海相火山岩相伴生(张德全,1993)。印支期主要由花岗闪长岩、二长花岗岩、钾长花岗岩、碱长花岗岩和碱性花岗岩组成,与燕山早期较难区分(吴福元等,1999)。燕山期

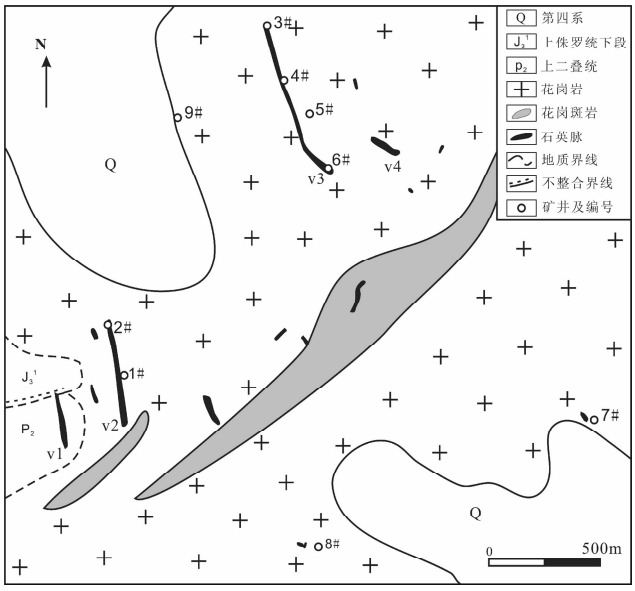

图 2 羊场矿区实测地质图

Fig. 2 Geological map of the Yangchang orefeild

中酸性侵入岩分布广泛，常与同期陆相火山岩相伴产出，早期岩体规模较大，晚期多为规模较小的花岗斑岩体（张德全，1993；吴福元等，1999）。燕山期岩浆活动与北矿带的钼成矿作用密切相关，小东沟、敖伦花、半拉山、羊场等钼矿床均为燕山期成矿（聂凤军等，2007；覃锋等，2008；Zeng *et al.*，2010a，b；Liu *et al.*，2011）。

3 矿床地质特征

羊场钼多金属矿主体位于燕山期黑云母二长花岗岩体内（图 2）。二长花岗岩内侵入有两条长 300m、2100m 的花岗斑岩脉，矿区井下偶见有闪长玢岩脉。发育的地层除第四系外，西部出露有晚侏罗系凝灰岩、凝灰角砾岩；晚二叠系砂质—粉砂质板岩、硅质板岩。矿区断裂构造以 NNW 向为主，其次为 NW 向和 NE 向。NNW 向、NW 向断裂控制着石英脉型矿体的产出。

矿区共出露有 4 条石英脉型矿体（图 2）。其中 V1 脉长 250m，宽 0.2 ~ 1m，走向 351°，位于二叠系地层中，仅有六个

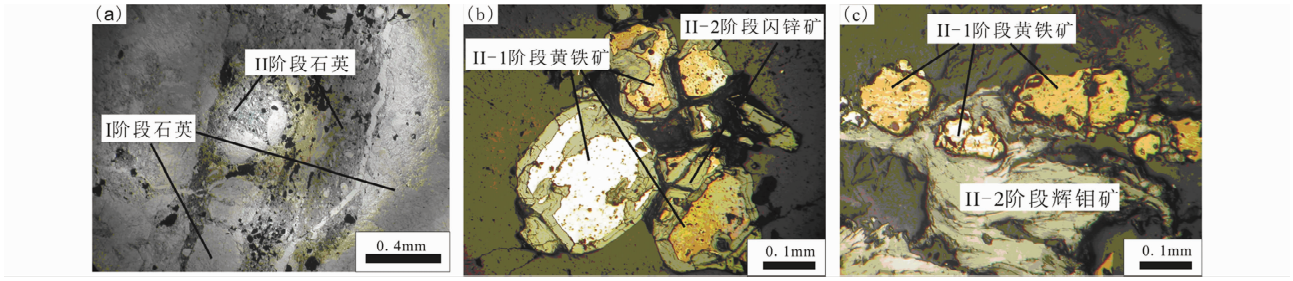

图 3 羊场钼矿床显微照片

(a)-Ⅱ阶段石英穿切Ⅰ阶段石英；(b)-Ⅱ-2 阶段闪锌矿包裹Ⅱ-1 阶段黄铁矿；(c)-Ⅱ-2 阶段辉钼矿包裹Ⅱ-1 阶段黄铁矿

Fig. 3 Microphotographs of Yangchang Mo deposit

(a)-microphotograph of Ⅱ stage quartz and Ⅰ stage quartz; (b)-microphotograph of the sphalerite formed in Ⅱ-2 stage and the pyrite formed in Ⅱ-1 stage; (c)-microphotograph of the molybdenite formed in Ⅱ-2 stage and the pyrite formed in Ⅱ-1 stage

地表探槽控制。V2、V3、V4 脉产于二长花岗岩内，V2 脉长 450m，宽约 1m，走向 350°，控制深度 150m，钼平均品位 0.123%（羊场钼矿化验室①）；V3 脉长 700m，宽约 1m，走向 345°，控制深度 120m，钼平均品位 0.085%；V4 脉地表出露长 126m，宽约 0.2 ~ 2m，走向 303°。除石英脉型矿化外，矿区 9 号竖井中打出了角砾岩矿石，9 井控制深度 40m，钼平均品位 0.068%，辉钼矿以胶结物形式产于引爆角砾岩中，角砾成分二长花岗岩，应存在斑岩型矿化。

根据野外和镜下观察，矿石中金属矿物主要有辉钼矿、黄铜矿、黄铁矿、方铅矿、闪锌矿；表生金属氧化物有褐铁矿、孔雀石；脉石矿物主要为石英。原生金属矿物呈浸染状、细脉状分布于石英脉中。围岩蚀变主要为硅化、高岭土化、绢云母化。热液流体活动大致分为三个阶段：从早到晚包括石英大脉阶段、石英-多金属硫化物阶段、碳酸岩化阶段。1）石英大脉阶段（Ⅰ阶段）在构造破碎带中形成，基本不含金属硫化物（图 3a）。2）石英-多金属硫化物阶段（Ⅱ阶段）沿早阶段石英大脉的挤压破碎裂隙形成，形成矿物有黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、辉钼矿、石英（图 3b，c），是成矿主阶段，该阶段按照矿物组合及生成顺序可进一步细分为石英-黄铁矿亚阶段（Ⅱ-1 阶段）和石英-黄铁矿-辉钼矿-黄铜矿-方铅矿-闪锌矿亚阶段（Ⅱ-2 阶段）。3）碳酸岩化阶段（Ⅲ阶段）：形成晚阶段方解石脉，穿切石英多金属硫化物脉。

4 样品和测试

成矿流体研究样品采自地表和井下不同中段，采集的样

① 羊场品位数据引自羊场钼矿化验室测试报告（内部资料）

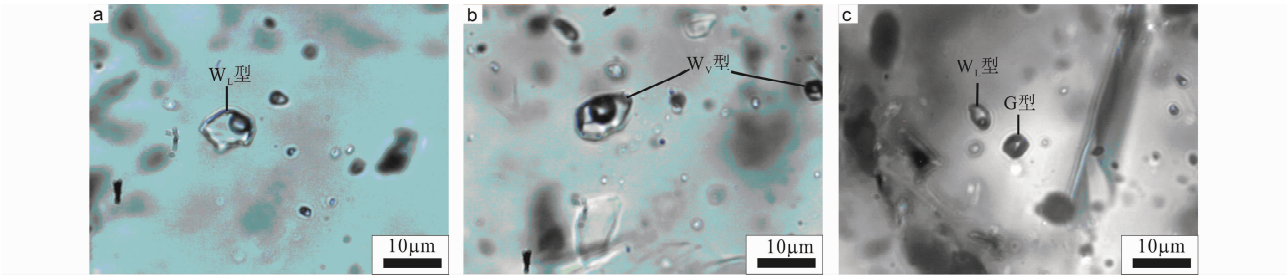

图 4 羊场钼矿床流体包裹体显微特征

(a)-Ⅱ-1 阶段 W_L 型包裹体;(b)-Ⅱ-2 阶段 W_V 型包裹体(c)-Ⅱ-1 阶段 W_L 型包裹体和 G 型包裹体

Fig. 4 Microcharacteristics of representative fluid inclusions of Yangchang Mo deposit

(a)-W_L type fluid inclusions in Ⅱ-1 ore-forming stage quartz; (b)-W_V type fluid inclusions in Ⅱ-2 ore-forming stage quartz; (c)-W_L and G type fluid inclusions in Ⅱ-1 ore-forming stage quartz

品代表了不同的成矿阶段。流体包裹体显微测温是委托中国地质大学(北京)包裹体实验室测试完成;群体包裹体气、液相成分,石英氢、氧同位素分析是在中国科学院地质与地球物理研究所测试完成。

显微测温仪器采用 Linkam THMSG600 型冷热台,分析精度 ±0.1℃。群体包裹体气相成分采用 Prisma TM QMS200 型四极质谱仪完成,将清洗干净的样品放入石英试管内,逐步升温到 100℃时抽真空,待分析管内真空度为 6×10^{-6} Pa 以下时测定气相成分,直至以 1℃/3s 的速度升温到 500℃时分析完成(朱和平等,2003)。液相成分采用离子色谱法,将清洗干净的样品放入石英管后在 500℃爆裂 15min,冷却后加水 5mL,超生振荡 10min,利用 HIC-6A 型离子色谱仪进行测试。

石英氢、氧同位素分析采用质谱仪型号为 MAT-252,所报数据均为相对国际标准 V-SOM 数据。氢同位素分析时采用爆裂法将包裹体爆裂以释放出其中的水,在真空中用干冰将水冻住并引入金属铬反应器中,在 800℃下使水瞬间液化为氢气,将制得的氢气上质谱测量 δD 值。石英氧同位素分析采用 BrF_5 法制气,将称得的样品(10~30mg)在真空条件、500~700℃与纯净的 BrF_5 恒温反应释放出氧气。用组合冷阱分离生成的 SiF_4、BrF_3 等杂质组分,令纯化后的氧气在 700℃铂催化作用下与碳棒逐级反应生成 CO_2,逐一收集 CO_2 气样送质谱仪测试。

5 流体包裹体地球化学

5.1 岩相学特征

岩相学观察表明,流体包裹体主要分布在早阶段无矿石英脉(Ⅰ阶段)、中阶段黄铁矿-石英脉(Ⅱ-1 阶段)、石英—多金属硫化物脉(Ⅱ-2 阶段)内,晚阶段方解石脉(Ⅲ阶段)内没有观察到包裹体。包裹体类型简单,主要为气液两相包裹体,未观测到含子矿物包裹体和 CO_2 包裹体。原生包裹体多呈群散乱分布或孤立分布,次生包裹体呈串珠状分布。按照包裹体相比不同,将其分为 W_L 型、W_V 型、G 型三类。

W_L 型包裹体为气液两相包裹体,包裹体气相比 <50%(图 4a),此类包裹体在Ⅰ阶段(相比 3% ~20%、大小 6~30μm)、Ⅱ-1 阶段(气相比 10% ~40%、大小 3~34μm)、Ⅱ-2 阶段(气相比 3% ~40%、大小 3~30μm)石英中均可见到,是羊场钼矿床最主要的包裹体类型,包裹体呈浑圆型、椭圆形、长条形、不规则状。

W_V 型包裹体也为气液两相包裹体,包裹体气相比 50% ~90%(图 4b),此类包裹体在Ⅱ-1 阶段(气相比 50% ~90%、大小 4~18μm)、Ⅱ-2 阶段(气相比 50% ~80%、大小 4~8μm)石英中均可见到,并以Ⅱ-1 阶段石英中最多。呈椭圆形、长条形、不规则状,数量占整个流体包裹体的 6% 左右。

G 型包裹体为气相包裹体,包裹体相比 100%,大小 4~20μm(图 4c)。此类包裹体在各阶段石英中均可见到,多呈不规则状,少量呈椭圆形,数量占整个流体包裹体的 8% 左右。

5.2 显微测温结果

本次研究共测得均一温度 293 个,冰点温度 280 个,测温结果见表 1。包裹体盐度根据冰点温度与盐度关系表(Bodnar,1993)求得。

Ⅰ阶段石英中仅见 W_L 型包裹体,冰点温度 -7.1~-2.4℃,对应盐度为 4.03% ~10.61% NaCleqv,向液相均一,均一温度介于 173~280℃。

Ⅱ-1 阶段石英中具有 W_L 型和 W_V 型两类包裹体,W_L 型包裹体冰点温度 -6.9~-1.2℃,对应的包裹体盐度为 2.07% ~10.36% NaCleqv;均一到液相,均一温度 180~357℃;W_V 型包裹体冰点温度 -6.5~-2.6℃,对应的包裹体盐度为 4.34% ~9.86% NaCleqv;均一到液相或气相,均一温度 247~467℃,总体高于 W_L 型。

Ⅱ-2 阶段石英中也具有 W_L 型、W_V 型两类包裹体,W_L 型包裹体冰点温度 -6.6~-1.4℃,对应的包裹体盐度为 2.41% ~9.98% NaCleqv;均一到液相,均一温度 151~374℃;

表 1 羊场钼矿床流体包裹体显微测温结果

Table 1 Microthermometric data of fluid inclusions from Yangchang Mo deposit

序号	样品号	样品特征	类型	大小(μm)	相比(%)	冰点温度(℃)	均一温度(℃)	盐度(wt% NaCleqv)	密度(g/cm³)
Ⅰ阶段	D-17	无矿石英	W_L	6~30	3~20	-7.1~-2.4	173~280(16)	4.03~10.61(14)	0.82~0.91
Ⅱ-1阶段	2-21	含黄铁矿石英	W_L	3~16	10~40	-5.8~-1.7	206~357(14)	2.90~8.95(14)	0.68~0.89
			W_V	5	50	-4.8	345	7.59	0.72
	4-11	含黄铁矿石英	W_L	4~10	10~40	-6.9~-3.8	249~304(9)	6.16~10.36(7)	0.82~0.87
			W_V	4~8	50~90	-6.5~-6.0	261~392(7)	9.21~9.86(3)	0.79
	5-1	含黄铁矿石英	W_L	6~34	10~30	-4.0~-1.2	180~332(14)	2.07~6.45(14)	0.71~0.91
			W_V	6~18	50	-2.6	380~384(2)	4.34(1)	0.56
	5-4	含黄铁矿石英	W_L	6~16	10~30	-5.3~-1.5	202~343(16)	2.57~9.60(16)	0.63~0.91
			W_L	5~14	10~40	-5.6~-3.4	194~309(13)	5.56~8.68(13)	0.78~0.93
	9-1	含黄铁矿石英	W_V	8~12	80~90	-4.4~-4.8	247~467(3)	7.02~7.59(2)	0.84~0.88
Ⅱ-2阶段	1-13	含方铅矿、黄铁矿石英	W_L	4~20	5~20	-6.0~-1.6	201~255(17)	2.74~9.21(17)	0.85~0.93
	2-20	含黄铁矿石英	W_L	4~12	10~30	-6.6~-4.8	202~351(15)	7.59~9.98(15)	0.72~0.93
			W_V	7	50	-6.0	310	9.21	
	4-21	含方铅矿、闪锌矿、黄铁矿石英	W_L	5~16	10~30	-4.0~-6.4	209~272(17)	6.45~9.73(17)	0.84~0.93
			W_L	4~16	10~30	-4.4~-2.5	171~237(16)	4.18~7.02(16)	0.86~0.94
	6-3	含方铅矿、闪锌矿、黄铜矿石英	W_L	4~20	5~40	-4.8~-1.4	192~295(16)	2.41~7.59(16)	0.77~0.92
			W_V	4	80	364			
	6-4	含辉钼矿石英	W_L	3~20	5~20	-6.1~-1.6	168~274(16)	2.74~9.34(16)	0.85~0.95
	8-3	含黄铜矿、辉钼矿石英	W_L	4~14	10~20	-4.6~-1.8	193~270(15)	3.06~7.31(15)	0.81~0.92
	8-6	含黄铁矿石英	W_V	8	70	-2.0	366	3.39	
			W_L	5~20	10~25	-5.0~-1.4	157~274(17)	2.41~7.86(17)	0.84~0.94
	9-2	含辉钼矿石英	W_L	6~30	10~40	-4.6~-3.1	179~374(16)	5.11~7.31(16)	0.63~0.94
	9-5	含辉钼矿、黄铁矿石英	W_V	6	50	-3.6	324	5.86	0.73
			W_L	4~22	5~30	-3.4~-2.0	151~332(16)	3.39~5.56(14)	0.68~0.94
	9-10	含方铅矿、黄铁矿石英	W_V	7	60	-3.7	292	6.01	0.79

W_V 型包裹体冰点温度 -6.0~-2.0℃，对应的包裹体盐度为 3.39%~9.21% NaCleqv；均一到液相或气相，均一温度 292~366℃，高于 W_L 型。

在频点图中(图 5)各阶段包裹体盐度变化不大，温度差异较明显。Ⅰ阶段包裹体总体表现为低温。Ⅱ-1 阶段包裹体温度具有 200~220℃、260~300℃两个峰值，显示出中低温、中高温两种流体并存特征，且中低温流体均为 W_L 型，中高温流体包含 W_L 型和 W_V 型。Ⅱ-2 阶段流体温度峰值为 180~270℃，为中低温流体。在包裹体温度总直方图中各阶段流体温度变化表现的更为明显。

根据 Bodnar(1983)提出的密度公式对羊场钼多金属矿包裹体密度进行了估算。结果显示Ⅰ阶段包裹体密度为 0.82~0.97g/cm³。Ⅱ-1 阶段 W_L 型包裹体密度为 0.63~0.93g/cm³，W_V 型包裹体流体密度为 0.56~0.88g/cm³；Ⅱ-2 阶段 W_L 型包裹体密度为 0.63~0.95g/cm³，W_V 型包裹体流体密度为 0.73~0.79g/cm³。在 *T-W-ρ* 关系图(图 6)上可以看出包裹体盐度与温度无关，包裹体密度主要受温度控制，Ⅰ阶段流体具有中等密度，与成矿关系密切的Ⅱ-1 阶段和Ⅱ-2 阶段流体属中低(0.56~0.94g/cm³)密度流体。

5.3 包裹体成分特征

群体包裹体气相成分分析结果(表 2)显示各阶段热液流体气相成分均以 H_2O 为主，摩尔含量 > 94.39%，次为 CO_2，摩尔含量 0.922%~5.371%，其余为 N_2、CH_4、C_2H_6 及微量的 Ar、H_2S 等显示还原环境气体(申萍等，2004)。H_2O/CO_2 = 17.6~107.3，平均 52.5；CO_2 + CH_4 = 0.938 mol%~5.401mol%，平均 2.608mol%。Ⅱ-1 阶段 N_2、Ar、CH_4、C_2H_6 含量高于Ⅰ阶段和Ⅱ-2 阶段，CO_2、H_2S 变化不显著。

群体包裹体液相成分分析结果(表 2)显示成矿流体中阳离子均以 Na^+ 为主，含少量 K^+、Ca^{2+} 以及微量 Mg^+，Na^+/K^+ = 2.9~74，平均 25.4；阴离子以 SO_4^{2-}、Cl^- 为主，Ⅰ阶段 Cl^- 含量最高，Ⅱ-2 阶段 SO_4^{2-} 含量最高，F^- 仅出现在Ⅰ阶段，且含量较低。因成矿环境处于还原环境，液相成分测定中的 SO_4^{2-} 代表了 HS^- 的含量，由Ⅱ-1 阶段到Ⅱ-2 阶段 Cl^- 含量变化不大，SO_4^{2-} 含量增高，表明 HS^- 的增多为Ⅱ-2 阶段 Pb、Zn、Cu、Mo 成矿提供了物质基础。

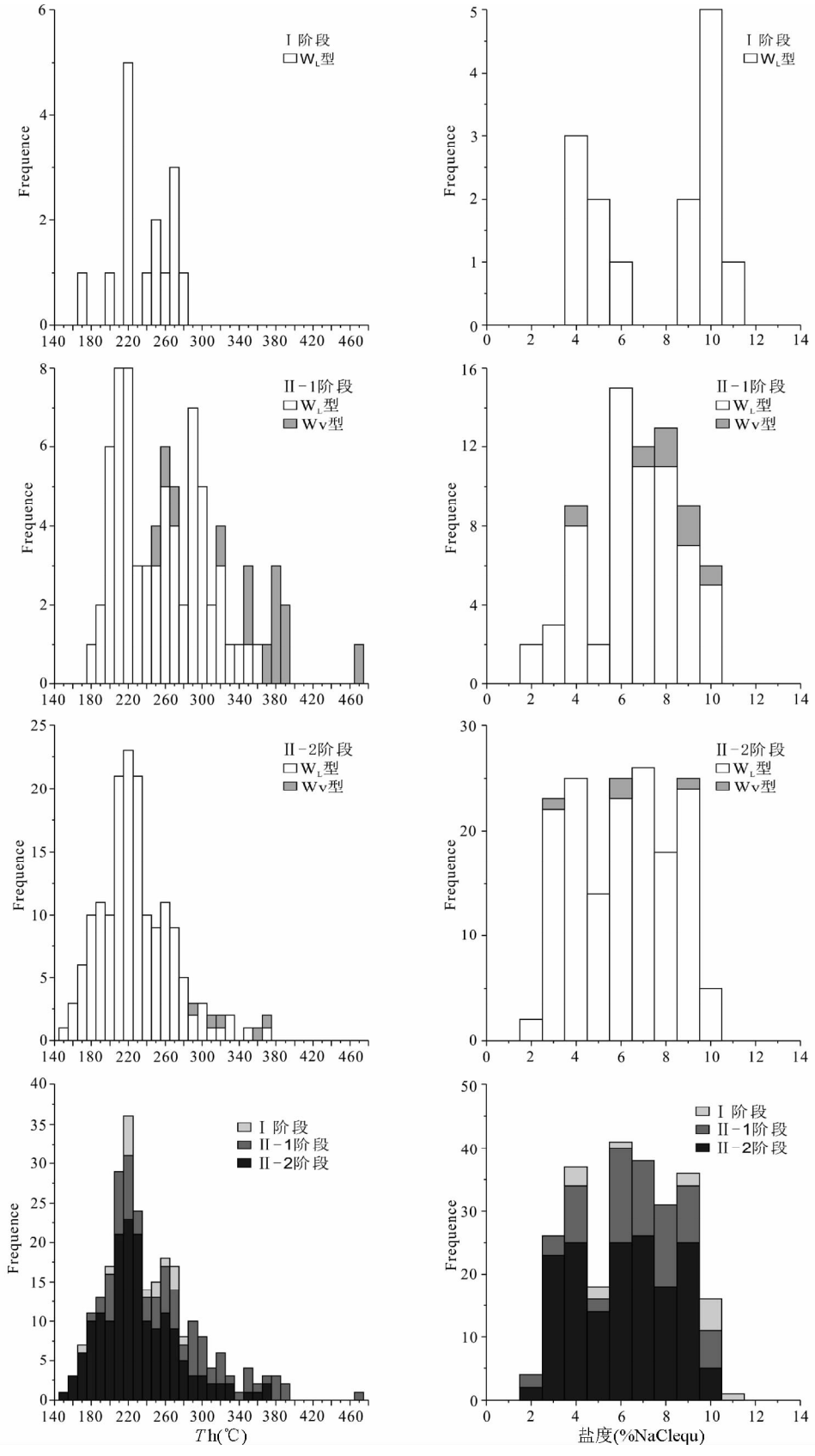

图5 羊场钼矿床流体包裹体均一温度、盐度直方图

Fig. 5 Histograms of homogenization temperatures and salinities of fluid inclusions from Yangchang Mo deposit

表 2 羊场钼矿床石英中流体包裹体气相(mol%)和液相($\times 10^{-6}$)成分

Table 2 Molecule (mol%) and ion ($\times 10^{-6}$) contents in fluid inclusions from Yangchang Mo deposit

样品号	D-17	5-1	9-1	2-20	8-6	9-5
成矿阶段	Ⅰ阶段	Ⅱ-1阶段	Ⅱ-1阶段	Ⅱ-2阶段	Ⅱ-2阶段	Ⅱ-2阶段
H_2O	96.13	98.94	94.39	98.07	98.42	97.74
N_2	0.076	0.108	0.187	0.060	0.062	0.100
Ar	0.000	0.008	0.006	0.002	0.003	0.005
CO_2	3.776	0.922	5.371	1.853	1.500	2.130
CH_4	0.012	0.016	0.030	0.010	0.009	0.017
C_2H_6	0.006	0.006	0.016	0.005	0.007	0.007
H_2S	0.0000	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0000
F^-	0.048	–	–	–	–	–
Cl^-	6.21	0.654	2.84	0.708	0.900	1.96
SO_4^{2-}	2.57	1.93	1.18	7.17	4.53	3.42
Na^+	5.61	1.03	2.52	2.22	1.92	2.52
K^+	0.315	0.351	0.090	0.030	0.150	0.150
Mg^{2+}	–	0.030	–	0.027	–	–
Ca^{2+}	0.138	0.114	0.084	0.393	0.186	0.093
H_2O/CO_2	25.5	107.3	17.6	52.9	65.6	45.9
CO_2+CH_4	3.788	0.938	5.401	1.863	1.509	2.147
Na^+/K^+	17.8	2.9	28.0	74.0	12.8	16.8

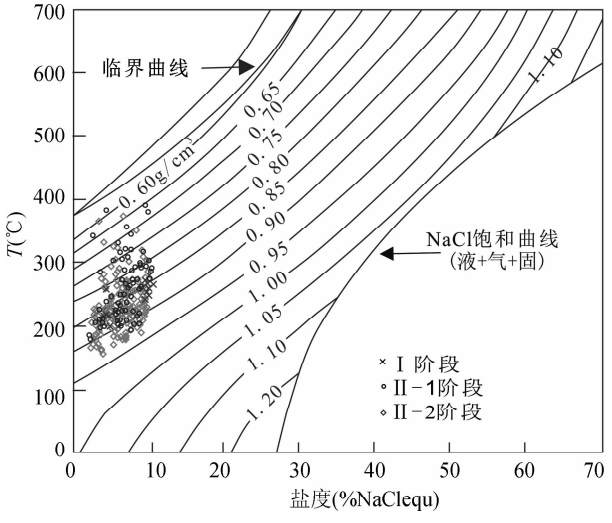

图 6 羊场钼矿床流体包裹体 *T-W-ρ* 相图(底图据 Bodnar,1983)

Fig. 6 Temperatures-salinities-densities plot of vapor-saturated H_2O-NaCl solutions from Yangchang Mo deposit (after Bodnar, 1983)

6 氢、氧同位素特征

各阶段流体中氢、氧同位素特征列于表 3。表中 $\delta^{18}O_{H_2O}$ 值系根据公式 $1000\ln\alpha_{石英-水} = 3.38 \times 10^6 T^{-2} - 3.40$ (Clayton *et al.*, 1972)以及各阶段包裹体均一温度平均值计算获得。

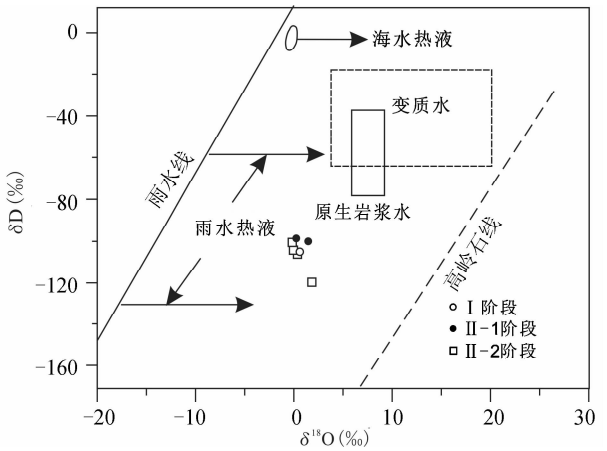

图 7 羊场钼矿床成矿流体 δD-$\delta^{18}O$ 同位素组成图解(底图据 Taylor,1974)

Fig. 7 Diagram of δD-$\delta^{18}O$ in fluid inclusions of quartz from Yangchang Mo deposit (after Taylor, 1974)

其中Ⅰ阶段流体 $\delta^{18}O_{H_2O} = 0.53‰$,$\delta D = -105.880‰$;Ⅱ-1 阶段流体 $\delta^{18}O_{H_2O} = -0.08‰ \sim 1.41‰$,$\delta D = -99.967‰ \sim -98.789‰$;Ⅱ-2 阶段流体 $\delta^{18}O_{H_2O} = -0.24‰ \sim 1.90‰$,$\delta D = -119.655‰ \sim -101.104‰$。在 $\delta D \sim \delta^{18}O$ 关系图上(图 7),各阶段成矿热液投影点均落入岩浆水左下方,大气水与岩浆水混合区域。

7 讨论

7.1 成矿流体性质

羊场石英脉型钼矿主成矿阶段(Ⅱ-1 阶段、Ⅱ-2 阶段)包裹体均一温度集中于 180 ~ 300℃,盐度 2.07% ~ 10.36% NaCleqv,密度 0.56 ~ 0.95 g/cm³;包裹体气相成分主要为 H_2O(>94.39mol%),并含少量 CO_2(平均 2.355mol%)等挥发份;阳离子以 Na^+ 为主,阴离子主要为 HS^-、Cl^-,这些特征说明羊场石英脉型钼成矿流体属于具有中低温、中低盐度、中低密、含少量 CO_2 的 NaCl-H_2O 体系。

这种性质的成矿流体与已发表的产在花岗岩体内石英脉型钼矿床成矿流体特征非常相似。兰家沟钼矿床产于细粒花岗岩体内,浅部为石英脉型矿化,成矿阶段包裹体均一温度集中于 180 ~ 320℃,盐度 2.4% ~ 14% NaCleqv,含少量 CO_2(代军治等,2007)。碾子沟石英脉型钼矿床产于黑云母二长花岗岩体中,成矿阶段包裹体均一温度集中于 170 ~ 240℃,盐度 0.53% ~ 19.92% NaCleqv,CO_2 平均 2.258mol%(张作伦等,2010)。

羊场、兰家沟、碾子沟石英脉型钼成矿流体均属具中低温、中低盐度、含少量 CO_2 的 NaCl-H_2O 体系。这种成矿流体与变质火山岩内石英脉型钼矿床的成矿流体具有一定差别,后者成分较为复杂,温度变化较大。寨凹石英脉型钼矿床位

表 3 羊场钼矿床石英氢、氧同位素组成

Table 3 Hydrogen and oxygen isotopic composition of quartz from Yangchang Mo deposit

样品号	特征	成矿阶段	δD_{H_2O}(‰)	$\delta^{18}O_{石英}$(‰)	$\delta^{18}O_{H_2O}$(‰)	T(℃)
D-17	地表无矿石英	Ⅰ阶段	-105.88	10.02	0.53	239
5-1	含黄铁矿石英	Ⅱ-1 阶段	-99.97	9.47	1.41	270
9-1	褐铁矿化石英	Ⅱ-1 阶段	-98.79	8.14	0.08	270
2-20	含黄铁矿石英	Ⅱ-2 阶段	-101.10	9.79	-0.11	231
4-21	含黄铁矿、方铅矿、闪锌矿石英	Ⅱ-2 阶段	-100.56	9.66	-0.24	231
6-3	含方铅矿、闪锌矿、黄铜矿石英	Ⅱ-2 阶段	-119.66	11.80	1.90	231
8-6	含黄铁矿石英	Ⅱ-2 阶段	-106.37	10.24	0.34	231
9-5	含黄铁矿、辉钼矿石英	Ⅱ-2 阶段	-104.56	9.93	0.03	231

于熊耳群火山岩中,成矿阶段包裹体温度变化于 100 ~ 260℃,盐度 2% ~30% NaCleqv,属中低温、高盐度流体,是 $CaCl_2$ 流体参与成矿的结果(邓小华等,2008a)。纸房钼矿床矿体也以石英脉形式产于熊耳群火山岩中,成矿阶段包裹体均一温度 250 ~360℃,盐度 0.01% ~20.70% NaCleqv,含大量 CO_2,具有造山型矿床具有的低盐度、富 CO_2 特征(邓小华等,2008b)。这种差别与产出环境不同、流体性质不同的一些热液金矿床较为相似,反映了热液来源及起源深度上的差异(陈衍景等,2007)。

7.2 成矿流体演化及矿质沉淀

羊场石英脉型钼矿床Ⅰ阶段包裹体均为 W_L 型,流体温度 173 ~280℃,盐度 4.03% ~10.16% NaCleqv,密度 0.82 ~ 0.91g/cm^3。Ⅱ-1 阶段包裹体具有 W_L 型和 W_V 型两类,流体温度 180 ~467℃,盐度 2.07% ~10.36% NaCleqv,密度 0.56 ~0.93g/cm^3。Ⅱ-2 阶段包裹体具有 W_L 型和 W_V 型两类,流体温度 151 ~ 366℃,盐度 2.41% ~9.98% NaCleqv,密度 0.63 ~0.95g/cm^3。总体具有各阶段盐度相近,Ⅱ-1 阶段流体温度高于其它各阶段,Ⅱ-1 阶段和Ⅱ-2 阶段出现低密度流体特征。

羊场钼矿床Ⅰ阶段流体以中、低温为特征,Ⅱ-1 阶段流体具有中低温流体(W_L 型)和中高温(W_V 型)流体两类,且温度高于Ⅰ阶段,成矿流体无明显继承演化关系,这种现象可能是热液成矿作用过程中加入有岩浆热液的结果(付绍洪和王苹,2000)。这种特征与斑岩型矿床从成矿早阶段到成矿晚阶段温度逐渐降低的特点(芮宗瑶等,1984)明显不同。各阶段成矿热液氢、氧同位素数据:$\delta^{18}O_{H_2O}$ = -0.24‰ ~ 1.90‰、δD = -98.787‰ ~ -119.655‰,与典型岩浆水 $\delta^{18}O_{H_2O}$ = 5.5‰ ~ 9.5‰,δD = -40‰ ~ -80‰差异显著(Sheppard,1986),具有大气水与岩浆水混合特征(Li *et al.*, 2009),说明成矿机制并非是单一性质、单一来源热液演化而成,而是由不同来源、不同性质的流体混合而成。

当裂隙构造发育时,火成岩体浅部可以建立起热液循环体系(Roedder,1984)。羊场钼矿矿体以石英大脉形式产于黑云母二长花岗岩体内的 NNW、NW 向断裂构造中,推测在同一热动力背景下,不同来源、不同性质的流体在参与矿体形成时经历了如下过程:1)古大气降水下渗、受热在花岗岩浅部(断裂构造附近)建立起热液循环体系,形成石英大脉;2)岩浆期后含矿热液与古大气降水混合,流体体系温度、压力等物理化学条件改变,金属矿物沉淀。羊场钼矿金属物质的沉淀符合温度较高的岩浆热液和较冷的大气水热液混合成矿模式(卢焕章等,2004)。

8 结论

(1)羊场石英脉型钼矿化主成矿阶段包裹体均一温度集中于 180 ~300℃,盐度 2.07% ~10.36% NaCleqv,流体成分均以 H_2O 为主,含微量的 CO_2,阴离子主要为 HS^-、Cl^-,说明成矿流体属具中低温、中低盐度、含少量 CO_2 的 NaCl-H_2O 体系。

(2)已有研究实例表明产于花岗岩体内的石英脉型钼矿床成矿流体特征相似,均为中低温、中低盐度、含少量 CO_2 的 NaCl-H_2O 体系;这些特点与产于变质火山岩内的石英脉型钼矿床流体性质差异显著,后者流体成分复杂,部分矿床为低盐度、富 CO_2 的造山型矿床。

(3)与斑岩型矿床不同,羊场石英脉型钼矿床包裹体均一温度Ⅱ阶段高于Ⅰ阶段,成矿流体无明显继承演化关系;石英氢、氧同位素数据与典型岩浆水差异显著,位于岩浆水和大气降水混合区域,成矿流体是在同一热动力背景下由不同来源、不同性质的流体混合而成。

致谢 感谢刘红涛研究员、两位匿名审稿人、编辑部俞良军博士对本文提出的宝贵意见;感谢内蒙古赤峰市巴林右旗政府、国土资源局、国英矿业等单位有关领导与技术人员在样品采集过程中给予的大力支持和热情帮助。

References

Bodnar RJ. 1983. A method of calculating fluid inclusion volumes based on vapor bubble diameters and *P-V-T-X* properties of inclusion fluids. Economic Geology, 78: 535 -542

Bodnar RJ. 1993. Revised equation and table for determining the freezing point depression of H_2O-NaCl solutions. Geochimica et

Cosmochimica Acta, 57: 683 – 684
Chen NS. 1984. Geological-geochemical features and genesis of the molybdenum deposits in China. Henan Geology, (Suppl.): 47 – 54 (in Chinese)
Chen YJ. 2006. Orogenic-type deposits and their metallogenic model and exploration potential. Geology in China, 33(6): 1181 – 1196 (in Chinese with English abstract)
Chen YJ, Ni P, Fan HR, Pirajno F, Lai Y, Su WC and Zhang H. 2007. Diagnostic fluid inclusions of different types hydrothermal gold deposits. Acta Petrologica Sinica, 23(9): 2085 – 2108 (in Chinese with English abstract)
Clayton RN, O'Neil JR and Mayeda TK. 1972. Oxygen isotope exchange between quartz and water. Journal of Geophysical Research, 77 (17): 3057 – 3067
Dai JZ, Mao JW, Xie GQ, Yang FQ and Zhao CS. 2007. Ore-forming fluid characteristics and genesis of Lanjiagou molybdenum deposit in western Liaoning Province. Mineral Deposits, 26(4): 443 – 454 (in Chinese with English abstract)
Deng XH, Chen YJ, Yao JM, Li WB, Li N, Wang Y, Mi M and Zhang Y. 2008a. Fluid inclusion constraints on the origin of the Zhaiwa Mo deposit, Luoning County, Henan Province. Geology in China, 35 (6): 1250 – 1266 (in Chinese with English abstract)
Deng XH, Li WB, Li N, Mi M and Zhang Y. 2008b. Fluid inclusion constraints on the origin of the Zhifang Mo deposit, Songxian County, Henan Province. Acta Geologica Sinica, 24(9): 2133 – 2148 (in Chinese with English abstract)
Fan SY, Mao HR, Zhang XS, Sun XL and Li Y. 1997. Stratigraphic geochemistry of Permian strata in the central Da Hinggan Mountains and its metallogenic significance. Regional Geology of China, 16 (1): 89 – 97 (in Chinese with English abstract)
Fu SH and Wang P. 2000. Study of fluid inclusions and constraint for ore-forming conditions of gold deposit at Manaoke, northwestern Sichuan Province. Acta Petrologica Sinica, 16(4): 569 – 574 (in Chinese with English abstract)
Gao Y, Li YF, Guo BJ, Cheng GX and Liu YW. 2010. Geological characteristics and molybdenite Re-Os isotopic dating of Qianfanling quartz-vein Mo deposit in Songxian County, western Henan Province. Acta Petrologica Sinica, 26(3): 757 – 767 (in Chinese with English abstract)
Li WY, Deng J, Gao YB, Guo ZP, Zhang ZW and Song ZB. 2009. Geology, geochemistry and minerogenesis of the Shijuligou zinc-copper deposit in Gansu, China. Acta Geologica Sinica, 83(6): 1052 – 1063
Liu C, Deng JF, Kong WQ, Xu LQ, Zhao GC, Luo ZH and Li N. 2011. LA-ICP-MS zircon U-Pb geochronology of the fine-grained granite and molybdenite Re-Os dating in the Wurinitu molybdenum deposit, Inner Mongolia, China. Acta Geologica Sinica, 85 (5): 1057 – 1066
Liu JM, Zhang R and Zhang QZ. 2004. The regional metallogeny of Da Hingganling, China. Earth Science Frontiers, 11(3): 269 – 277 (in Chinese with English abstract)
Liu L, Hao ZG, Zhang JQ, Jiang SQ and Fei HC. 2011. The molybdenum resources, molybdenum tailings exploration and utilization in China. In: Wu ZY (ed.). Mine Geological Environment Protection, Land Reclamation and Ecological Rehabilitation Technology Exchang Seminar, Huangshan, China, 2011. State of California: Scientific Research Publishing, USA: 174 – 179 (in Chinese with English abstract)
Lu HZ, Fan HR, Ni P, Ou GX, Shen K and Zhang WH. 2004. Fluid Inclusion. Beijing: Science Press, 1 – 344 (in Chinese)
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)
Nie FJ, Zhang WY, Du AD, Jiang SH and LiuY. 2007. Re-Os istopic dating on molybdenite separates from the Xiaodonggou porphyry Mo deposit, Hexigten Qi, Inner Mongolia. Acta Geologica Sinica, 81 (7): 898 – 905 (in Chinese with English abstract)
Qin F, Liu JM, Zeng QD and Zhang RB. 2008. The metallogenic epoch and source of ore-forming materials of the Xiaodonggou porphyry molybdenum deposit, Inner Mongolia. Geoscience, 22(2): 173 – 180 (in Chinese with English abstract)
Roedder E. 1984. Fluid inclusions. Reviews in Mineralogy, 12: 644
Rui ZY, Huang CK, Qi GM, Xu J and Zhang HT. 1984. Porphyry Copper (Molybdenum) Deposits of China. Beijing: Geological Publishing House, 171 – 200 (in Chinese)
Sheppard SMF. 1986. Characterization and isotope variation in nature water. In: Valley JW, Taylor HP and O'Neil JR (eds.). Stable Isotopes in High Temperature Geological Processes. Reviews in Mineralogy. Mineralogical Society of American, 16: 165 – 184
Shen P, Shen YC, Li GM, Liu TB and Zeng QD. 2004. Ore-forming fluid inclusions of Kuoerzhengkuola gold deposit, Xinjiang. Acta Petrologica Sinica, 20(4): 969 – 976 (in Chinese with English abstract)
Shen TH ang Lu YS. 1979. Preliminary study of ore-controlling structures of the Shipingchuan molybdenum deposit, Qingtian. Lishui Geology, 1: 63 – 73 (in Chinese)
Taylor HP. 1974. The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problems of hydrothermal alteration and ore deposition. Economic Geology, 69: 843 – 883
Wu FY, Sun DY and Lin Q. 1999. Petrogenesis of the phanerozoic granites and crustal growth in northeast China. Acta Petrologica Sinica, 15(2): 181 – 189 (in Chinese with English abstract)
Zeng QD, Liu JM, Zhang ZL, Jia CS, Yu CM, Ye J and Liu HT. 2009. Geology and lead-isotope study of the Baiyinnuoer Zn-Pb-Ag deposit, south segment of the Da Hinggan Mountains, Northeastern China. Resource Geology, 59(2): 170 – 180
Zeng QD, Liu JM, Zhang ZL, Chen WJ, Qin F, Zhang RB, Yu WB, Zhang XH and Zai MG. 2009a. Mineralizing types, geological characteristics and geodynamic background of molybdenum deposits in Xilamulun molybdenum polymetal metallogenic belt on northern margin of North China Craton. Acta Petrologica Sinica, 25(5): 1225 – 1238 (in Chinese with English abstract)
Zeng QD, Liu JM, Zhang ZL. Qin F, Chen WJ, Zhang RB, Yu CM and Ye J. 2009b. Ore forming time of the Jiguanshan porphyry molybdenum deposit, north margin of North China Craton and the Indosinian mineralization. Acta Petrologica Sinica, 25(2): 393 – 398 (in Chinese with English abstract)
Zeng QD, Liu JM and Zhang ZL. 2010a. Re-Os geochronology of porphyry molybdenum deposit in south segment of Da Hinggan Mounntains, Northeast China. Journal of Earth Sciences, 21(4): 392 – 401
Zeng QD, Liu JM, Qin F and Zhang ZL. 2010b. Geochronology of the Xiaodonggou porphyry Mo deposit in northern margin of North China Craton. Resource Geology, 60(2): 192 – 202
Zeng QD, Liu JM, Zhang ZL, Chen WJ and Zhang WQ. 2011a. Geology and geochronology of the Xilamulun molybdenum metallogenic belt in eastern Inner Mongolia, China. International Journal of Earth Sciences, 100: 1791 – 1809
Zeng QD, Liu JM, Zhang ZL, Zhang WQ, Chu SX, Zhang S, Wang ZC and Duan XX. 2011b. Geology, fluid inclusion, and sulfur isotope studies of the Chehugou porphyry molybdenum-copper deposit, Xilamulun metallogenic belt, NE China. Resource Geology, 61(3): 241 – 258
Zeng QD, Liu JM, Yu CM, Ye J and Liu HT. 2011c. Metal deposits in the Da Hinggan Mountains, NE China: Styles, characteristics, and exploration potential. International Geology Review, 53: 846 – 878
Zeng QD, Yang JH, Liu JM, Chu SX, Duan XX, Zhang ZL, Zhang WQ and Zhang S. 2011d. Genesis of the Chehugou Mo-bearing granitic complex on the northern margin of the North China Craton: Geochemistry, zircon U-Pb age and Sr-Nd-Pb isotopes. Geological Magazine, doi: 10.1017/S0016756811000987
Zhao YM and Zhang DQ. 1997. Metallogeny and Prospective Evaluation of Copper Polymetallic Deposits in the Da Hinggan Mountains and Its Adjacent Regions. Beijing: Seismological Press, 125 – 144 (in Chinese)
Zhang DQ. 1993. Two granitoid series in different tectonic environments

of southern Da Hinggan Mountains, China. Acta Petrologica et Mineralogica, 12 (1): 1 – 11 (in Chinese with English abstract)

Zhang ZL, Zeng QD, Qu WJ, Liu JM, Sun XG, Zhang RB, Chen WJ and QF. 2009. The molybdenite Re-Os dating from the Nianzigou Mo deposit, Inner Mongolia and its geological significance. Acta Petrologica Sinica, 25 (1): 212 – 218 (in Chinese with English abstract)

Zhang ZL, Liu JM, Duan XX and Chen WJ. 2010. Ore-forming fluid geochemistry of Nianzigou molybdenum deposit in Xilamulun molybdenum metallogenic belt, Inner Mongolia. Acta Petrologica Sinica, 26(5): 1375 – 1385 (in Chinese with English abstract)

Zhu HP, Wang LJ and Liu JM. 2003. Determination of quadrupole mass spectrometer for gaseous composition of fluid inclusion from different mineralization stages. Acta Petrologica Sinica, 19(2): 314 – 318 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

陈南生. 1984. 我国钼矿床的地质地球化学特征及成因探讨. 河南地质, (增刊): 47 – 54

陈衍景. 2006. 造山型矿床、成矿模式及找矿潜力. 中国地质, 33(6): 1181 – 1196

陈衍景, 倪培, 范宏瑞, Pirajno F, 赖勇, 苏文超, 张辉. 2007. 不同类型热液金矿系统的流体包裹体特征. 岩石学报, 23(9): 2085 – 2108

代军治, 毛景文, 谢桂青, 杨富全, 赵财胜. 2007. 辽西兰家沟钼矿床成矿流体特征及成因探讨. 矿床地质, 26(4): 443 – 454

邓小华, 陈衍景, 姚军明, 李文博, 李诺, 王运, 糜梅, 张颖. 2008a. 河南省洛宁县寨凹钼矿床流体包裹体研究及矿床成因. 中国地质, 35(6): 1250 – 1266

邓小华, 李文博, 李诺, 糜梅, 张颖. 2008b. 河南嵩县纸房钼矿床流体包裹体研究及矿床成因. 岩石学报, 24(9): 2133 – 2148

范书义, 毛华人, 张晓东, 孙秀丽, 李颖. 1997. 大兴安岭中段二叠系地球化学特征及其成矿意义. 中国区域地质, 16(1): 89 – 97

付绍洪, 王莘. 2000. 川西北马脑壳金矿床流体包裹体研究及对成矿条件的制约. 岩石学报, 16(4): 569 – 574

高阳, 李永峰, 郭保健, 程国祥, 刘彦伟. 2010. 豫西嵩县前范岭石英脉型钼矿床地质特征及辉钼矿 Re-Os 同位素年龄, 岩石学报, 26(3): 757 – 767

刘建明, 张锐, 张庆洲. 2004. 大兴安岭地区的区域成矿特征. 地学前缘, 11(3): 269 – 277

刘恋,郝梓国,张金青,江少卿,费红彩. 2011. 中国钼资源及钼尾矿开发利用. 见:吴征洋编. 矿山地质环境保护与土地复垦、生态重建技术交流研讨会,中国黄山,2011. 加里福尼亚:美国科研出版社,174 – 179

卢焕章, 范宏瑞, 倪培, 欧光习, 沈昆, 张文淮. 2004. 流体包裹体. 北京: 科学出版社, 1 – 344

罗铭玫, 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

聂凤军, 张万益, 杜安道, 江思宏, 刘妍. 2007. 内蒙古小东沟斑岩型钼矿床辉钼矿铼-锇同位素年龄及地质意义. 地质学报, 81(7): 898 – 905

覃锋, 刘建明, 曾庆栋, 张瑞斌. 2008. 内蒙古小东沟斑岩型钼矿床的成矿时代及物质来源. 现代地质, 22(2): 173 – 180

芮宗瑶, 黄崇轲, 齐国明, 徐珏, 张洪涛. 1984. 中国斑岩铜(钼)矿床. 北京: 地质出版社, 171 – 200

申萍, 沈远超, 李光明, 刘铁兵, 曾庆栋. 2004. 新疆阔尔真阔腊金矿床成矿流体包裹体研究. 岩石学报, 20(4): 969 – 976

沈庭槐, 陆永顺. 1979. 青田石平川钼矿控矿构造的初步认识. 丽水地质(科技), 1: 63 – 73

吴福元, 孙德有, 林强. 1999. 东北地区显生宙花岗岩的成因与地壳增生. 岩石学报, 15(2): 181 – 189

曾庆栋, 刘建明, 张作伦, 陈伟军, 覃锋, 张瑞斌, 于文斌, 张晓辉, 翟明国. 2009a. 华北克拉通北缘西拉沐沦钼多金属成矿带钼矿化类型、特征及地球动力学背景. 岩石学报, 25(5): 1225 – 1238

曾庆栋, 刘建明, 张作伦, 覃锋, 陈伟军, 张瑞斌, 于昌明, 叶杰. 2009b. 华北克拉通北缘鸡冠山斑岩钼矿床成矿年代及印支期成矿事件. 岩石学报, 25(2): 393 – 398

赵一鸣, 张德全. 1997. 大兴安岭及其邻区铜多金属矿床成矿规律与远景评价. 北京: 地震出版社, 125 – 144

张德全. 1993. 大兴安岭南段不同构造环境中的两类花岗岩. 岩石矿物学杂志, 12(1): 1 – 11

张作伦, 曾庆栋, 屈文俊, 刘建明, 孙兴国, 张瑞斌, 陈伟军, 覃锋. 2009. 内蒙碾子沟钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及其地质意义. 岩石学报, 25(1): 212 – 218

张作伦, 刘建明, 段晓侠, 陈伟军. 2010. 内蒙古西拉沐伦成矿带碾子沟钼矿床成矿流体地球化学特征. 岩石学报, 26(5): 1375 – 1385

朱和平, 王莉娟, 刘建明. 2003. 不同成矿阶段流体包裹体气相成分的四机质谱测定. 岩石学报, 19(2): 314 – 318