

河北木吉村铜(钼)矿床辉钼矿 Re-Os 年龄及成矿流体特征

陈 超¹ 王宝德¹ 牛树银¹ 马国玺² 张建珍¹ 孙爱群¹
马宝军¹ 陈志宽² 张福祥¹ 王自力³

(1. 石家庄经济学院资源学院, 河北 石家庄 050031; 2. 河北省保定地质工程勘察院, 河北 保定 071051;
3. 天津华北地质勘查局, 天津 300170)

摘要: 木吉村铜(钼)矿床位于河北省涞源县杨家庄镇木吉村, 大地构造处于太行山脉中北段阜平幔枝构造的北东倾伏端, 涞源哑铃状杂岩体连接处西侧上盘拆离带的次级断陷盆地中, 已探明为一大型铜(钼)金银多金属矿床。在成矿地质背景的基础上, 通过对不同钻孔不同深度矿心中 5 件辉钼矿 Re-Os 同位素的测定, 获得模式年龄变化范围 $(143.2 \pm 2.2) \text{Ma} \sim (144.9 \pm 2.3) \text{Ma}$, 加权平均值为 $(144 \pm 1) \text{Ma}$; 并计算得出等时线年龄为 $(143.8 \pm 1.2) \text{Ma}$, 可厘定成矿时限为燕山晚期, 这与太行山中北段区域多金属成矿大爆发事件基本一致。此外, 根据流体包裹体特征和矿石辉钼矿 Re 含量, 表明包裹体主要有气液两相包裹体、富气相包裹体、含二氧化碳包裹体和气液固多相包裹体 4 种类型。液相成分和气相成分均以 H_2O 为主, 其中气态包裹体还可见 CO_2 ; 成矿温度大体为中温, 盐度为中低盐度; 成矿物质来源于地球深部。

关键词: 辉钼矿; Re-Os 同位素年龄; 成矿流体; 铜(钼)矿床; 河北木吉村

中图分类号: P597; P618.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2013)06-1889-11

河北涞源县木吉村铜(钼)矿床位于河北省涞源县杨家庄镇木吉村, 地理坐标为东经 $114^\circ 48' 41.6'' \sim 114^\circ 53' 36.7''$, 北纬 $39^\circ 19' 28.1'' \sim 39^\circ 23' 17.2''$, 自从 20 世纪 60—70 年代被发现以来, 经 80 年代普查, 2002 年详查以及 2010 年危机矿山项目深入研究, 储量迅速增加, 目前控制矿体南北长 1.5 km, 东西宽 400~800 m, 埋深 0.2~1.2 km, 矿带南东侧深部尚未控制, 已探明为一大型铜(钼)金银多金属矿床, 铜资源量达大型, 钼资源量达中型, 伴生金达大型, 伴生银达中型, 伴生硫达大型, 且外围还展布有鸽子岭、小立沟、铁岭、浮图峪、茅儿峪、东沟等中、小型铁铜矿、大

湾大型锌钼矿, 区域外围的安妥岭、野狐、龙门斑岩型(铜)钼矿均有大型矿床的远景, 展示了很好的找矿潜力, 有望为河北省摘掉“贫铜”的帽子。

众所周知, Re-Os 同位素分析法是目前针对金属矿床获得准确矿化年龄最为有效的定年方法。近年来, 随着高分辨率质谱仪的应用, 众多地质学家^[1-20]利用 Re-Os 同位素分析手段在国内外矿床学研究方面取得了很大进展, 而在太行山北段多金属矿床运用可查资料相对甚少。本文通过对河北省木吉村铜(钼)矿床中辉钼矿 Re-Os 同位素的测定, 厘定其成矿时代, 并进行成矿物质来源研究, 为深入探讨矿床

收稿日期: 2012-12-14; 改回日期: 2013-03-19

基金项目: 全国危机矿山项目(20109901、20089948)、国家自然科学基金(40872137)、我国典型金属矿科学基地研究(200911007)和河北省科技厅项目(11277106D)联合资助。

作者简介: 陈超, 男, 1981 年生, 博士, 主要从事构造地质学与构造成矿控矿的教学与科研工作; E-mail: goldcc@163.com。

成因提供基础证据。

1 矿床地质特征

木吉村铜(钼)矿床产于太行山脉中北段阜平幔枝构造的北东倾伏端,涞源哑铃状杂岩体连接处西侧上盘拆离带的次级断陷盆地中,加上外围构成斑岩型铜(钼)-矽卡岩型铁铜-热液脉型铅锌等构成了三位一体的铜多金属矿田,是NNE向展布的中生代构造-岩浆-多金属成矿带内的重要一环(图1)。

区内地层以碳酸盐岩沉积盖层为主,由于受岩体的侵入和断裂的切割呈断块状分布,从老到新主要为新太古界五台群片麻岩和中-新元古界、下-

中生界碳酸盐岩以及中生界安山质火山碎屑岩与火山熔岩,沟谷中分布有第四系冲积物等。矿区赋矿围岩主要为中元古界长城系高于庄组和蓟县系雾迷山组白云岩。

区内构造活动较为强烈,以断裂构造、古火山构造为主。古火山构造位于矿区东北部,断裂构造有NNE、NE、NEE、近SN、NW向等多组,以NNE、NE向乌龙沟断裂系为主,大多具多次活动历史。成矿断裂主要为F4,位于矿区中部小立沟-磨石沟一带,长5~6 km,断距超2 km,走向NNE 5°~15°,倾向SE,倾角50°~70°,向深部变缓。木吉村及其周围鸽子岭、小立沟、浮图峪、茅儿峪等矿床(段)均受其控制。

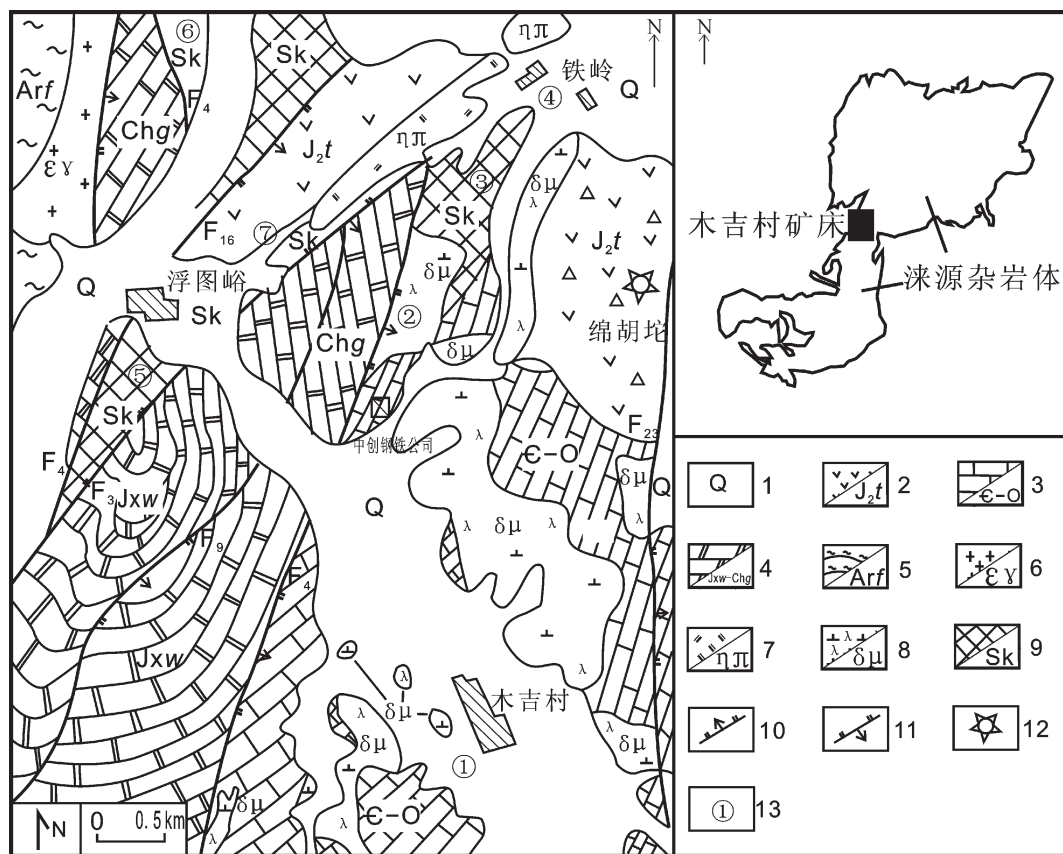


图1 木吉村矿田地质略图 [21]

- 1—第四系;2—侏罗系髫髻山组安山岩;3—寒武—奥陶系灰岩;4—蓟县系雾迷山组白云岩;5—长城系高于庄白云岩;
- 6—太古宇五台群片麻岩;7—钾长花岗岩;8—闪长玢岩;9—矽卡岩;10—正断层;11—逆断层;12—古火山口;
- 13—矿床(段);①—木吉村铜钼矿;②—鸽子岭铁铜矿;③—小立沟铁铜矿;④—铁岭铁铜矿;⑤—浮图峪铁铜矿;
- ⑥—茅儿峪铁铜矿;⑦—东沟铁铜矿

Fig.1 Geological sketch map of the Mujicun ore field [21]

- 1—Quaternary; 2—Andesite of Jurassic Tiaojishan Formation; 3—Cambrian—Ordovician limestone; 4—Dolomite of Wumishan Formation of Jixian System; 5—Dolomite of Gaoyuzhuang Formation of Changcheng System; 6—Gneiss of Archean Wutai Group;
- 7—Moyite; 8—Diorite porphyrite; 9—Skarn; 10—Normal fault; 11—Inverse fault; 12—Paleo-crater; 13—Ore deposit (segment): ①—Mujicun copper (molybdenum) deposit; ②—Geziling iron-copper deposit; ③—Xiaoligou iron-copper deposit;
- ④—Tieling iron-copper deposit; ⑤—Futu Yu iron-copper deposit; ⑥—Maoyeru Fe-Cu deposit; ⑦—Donggou iron-copper deposit

区内岩浆以闪长玢岩体为主,分布于矿区中部木吉村一带,北由铁岭南至磨石沟,西自 F4 东到顾家沟,地表出露面积约 1.5 km²,是主要赋矿岩体。岩体总体呈“蘑菇状”,顶盖展布受 NNE 向断裂(F₄)及层间裂隙破碎带控制,呈岩枝、岩床状叠层产出,一般厚度 150~200 m,主体“岩颈”长轴近南北向,东西两壁陡立,目前长大于 600 m,宽约 400 m,东南段深度大,尚未控制。

1.1 矿体特征

由于受岩浆活动、断裂、岩性等地质条件控制,木吉村铜(钼)矿体主要分布于闪长玢岩体及其相关的构造-矽卡岩带中,埋藏深度几十米到上千米(北部埋藏浅,南部埋藏深),矿带整体向南倾伏,以岩体中强硅化区(几乎不含矿)为界,总体可分为上下两个矿带:

上部矿带以斑岩型铜钼矿及接触带矽卡岩型铜铁矿为主体,其中以斑岩型为主,主要分布在地表下 200~850 m 深度范围内。矿带长 1000 余米,东西宽 180~790 m,厚度 18.39~343.51 m,平均厚度 218.41 m。矿带长轴近 SN 向,略向南东倾伏,倾角 20°左右。

下部矿带以矽卡岩型铜(钼)矿为主,穿插有部分斑岩型铜矿或铜钼矿。分布在地表下 850~1300 m 深度范围内,矿带控制长 400 余米,宽度 460~700 m,厚度 67.4~393 m,平均厚度 247.82 m,南部深部尚未控制。产状与上部矿带大体一致,但倾角略陡,在 35°左右。

1.2 矿石特征

本区矿石按照成因可以分为斑岩型矿石和矽卡岩型矿石两大类(图 2-a,2-b):其中斑岩型矿石金属矿物含量一般小于 10%,主要为黄铜矿、黄铁矿以及辉钼矿,非金属矿物主要有斜长石、石英、绢(白)云母、钾长石,局部见硬石膏、黑云母、绿(黝)帘石、萤石等。矿石结构主要为细粒半自形-他形晶粒结构,构造以浸染状矿化为主,少量细脉状;矽卡岩型矿石的金属矿物含量变化大多小于 10%,金属矿物主要为黄铜矿、黄铁矿、磁铁矿、镜铁矿及闪锌矿,非金属矿物有透辉石、透闪石、蛇纹石、阳起石、绿帘石、绿泥石、石英、方解石、白云母等。矿石结构主要为细粒半自形-他形晶粒结构,构造类型比较复杂,有脉状构造、浸染状、角砾状、条带状、不均匀团块状等。主要成矿元素为 Cu、Mo,分别主要富集于黄铜矿和辉钼矿之中,共伴生有 S、Fe、Zn 等,平均品位 Cu 为 $0.26 \times 10^{-2} \sim 0.49 \times 10^{-2}$ 、Mo 为 $0.038 \times 10^{-2} \sim 0.142 \times 10^{-2}$ 。

1.3 围岩蚀变与矿化

木吉村铜(钼)矿床是主要受构造-岩浆作用控制的斑岩-矽卡岩型矿床,以铜钼矿化为主,矿区在地表平面和深部纵剖面上大体形成以闪长玢岩为中心的矿化分带明显,岩体内部为斑岩型铜钼矿化,岩体周围的碳酸盐岩围岩为矽卡岩型含铜磁铁矿化。根据野外地质特征、蚀变类型及矿物组合主要可分为岩体内、外两个蚀变带;其中内蚀变带为典型斑岩

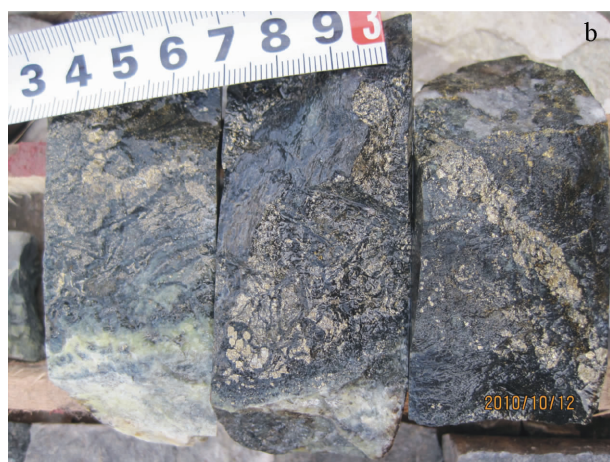


图2 木吉村铜(钼)矿床矿石特征

a—斑岩型铜钼矿石;b—矽卡岩型铜矿石

Fig.2 Ore characteristics of Mujicun Cu(Mo)deposit

a—Porphyry copper-molybdenum ore; b—Skarn copper ore

热液蚀变带,从岩体中心向外大体分为强硅化带、钾长石化带、硬石膏化带、石英-绢云母化带、强绢云母化带、青磐岩化带,其中钾化与斑岩型铜(钼)矿化关系最密切。外蚀变带为热液交代蚀变带,主要发育于闪长玢岩与围岩接触带,及外围构造裂隙,从接触带向外主要分为矽卡岩带、大理岩带、碳酸盐化带和灰岩带。

1.4 成矿阶段

根据前人资料^[20]及矿区矿物之间的组合关系、蚀变与矿化特征,总体来说矿床早期(岩浆活动冷却期)闪长玢岩侵入与围岩发生广泛的接触交代作用而形成矽卡岩型含铜磁铁矿床,而晚期(岩浆期后热液期)形成斑岩型铜钼矿床和热液叠加-矽卡岩型铜铁矿床以及外围热液脉型铅锌矿床。

2 样品采集与处理

2.1 样品采集

由于矿区目前尚未达到勘探开采阶段,所以主要针对钻孔矿心进行系统取样。为尽量保证样品的代表性,在样品采集时尽可能选取不同钻孔、不同标高、不同类型的新鲜辉钼矿矿石,因此5件辉钼矿样品均取自于距地表450 m以下的不同钻孔矿心中斑岩型铜钼矿石(表1,图3~4)。野外样品经室内机械破碎、过筛(根据辉钼矿颗粒大小定筛孔目数),并在双目镜下挑选单矿物,最终得到纯度大于98%的辉钼矿粉末,称重后送至国家地质实验测试中心Re-Os同位素实验室测试。

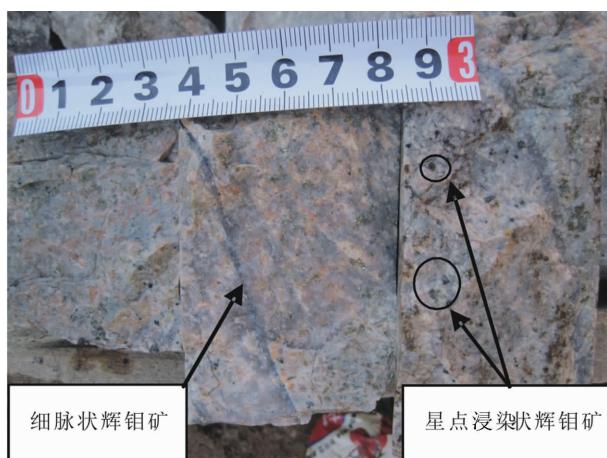


图3 ZK7202 石英钾长石化辉钼矿矿石

Fig.3 Molybdenite ore with silicification and K-feldspathization in drill hole ZK7202

表1 木吉村铜(钼)矿床辉钼矿采样位置
Table 1 Sampling position of molybdenite from the Mujicun copper (molybdenum) deposit

样品号	采样位置	矿石类型	矿物名称
Fmj7202-2	ZK7202 孔 742.27 m	石英钾长石化辉钼矿矿石	辉钼矿
Fmj7805-17	ZK7805 孔 925.78 m	硅化黄铁矿化矿石	辉钼矿
Fmj7807-4	ZK7807 孔 459.64 m	黄铜矿化矿石	辉钼矿
Fmj7807-5	ZK7807 孔 893.38 m	辉钼矿矿石	辉钼矿
Fmj7807-6	ZK7807 孔 929.82 m	辉钼矿矿石	辉钼矿

2.2 分析方法

辉钼矿样品 Re-Os 含量的测定是在国家地质实验测试中心 Re-Os 同位素实验室进行。实验所用的仪器是电感耦合等离子体质谱仪 TJA X-series ICP-MS,采用 Carius tube 熔样法,所用的 ^{190}Os 和 ^{185}Re 稀释剂来自于美国橡树岭国家实验室。具体操作步骤见相关文献^[22-25],本次分析方法简述如下:

(1) 分解样品

准确称取待分析样品,通过长细颈漏斗加入到 Carius 管(一种高硼厚壁大玻璃安瓿瓶)底部。缓慢加液氮到有半杯乙醇的保温杯中,调节温度到摄氏 $-50\sim-80^\circ\text{C}$ 。装好样的 Carius 管放到该保温杯中,通过长细颈漏斗把准确称取的 ^{185}Re 和 ^{190}Os 混合稀释剂加入到 Carius 管底部,再加入 2 mL 10 mol/L HCl, 4 mL 16 mol/L HNO_3 , 1 mL 30% H_2O_2 , 当管底溶液冰冻后,用丙烷氧气火焰加热封好 Carius 管的细颈部分。放入不锈钢套管内。轻轻放套管入鼓风

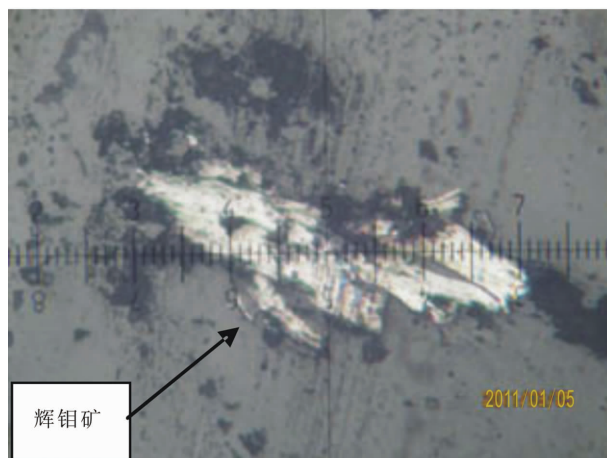


图4 ZK7805 硅化黄铁矿化矿石光片

Fig.4 Ore radiographs with silicification and pyritization in drill hole ZK7805

烘箱内,待回到室温后,逐渐升温到 230℃,保温 24 h。在底部冷冻的情况下,打开 Carius 管,并用 40 mL 水将管中溶液转入蒸馏瓶中。

(2)蒸馏分离 Os

于 105~110℃蒸馏 50 min,用 10 mL 水吸收蒸出的 OsO₄。用于 ICP-MS(TJAX-series)测定 Os 同位素比值。将蒸馏残液倒入 150 mL Teflon 烧杯中待分离 Re。

(3)萃取分离 Re

将第一次蒸馏残液置于电热板上,加热近干。加少量水,加热近干。重复两次以降低酸度。加入 10 mL 5 mol/L NaOH,稍微加热,转为碱性介质。转入 50 mL 聚丙烯离心管中,离心,取上清液转入 120 mL Teflon 分液漏斗中。加入 10 mL 丙酮,振荡 5 min,萃取 Re。静止分相,弃去水相。加 2 mL 5 mol/L NaOH 溶液到分液漏斗中,振荡 2 min,洗去丙酮相中的杂质。弃去水相,排丙酮到 150 mL 已加有 2 mL 水的 Teflon 烧杯中。在电热板上 50℃加热以蒸发丙酮。加热溶液至干。加数滴浓硝酸和 30%过氧化氢,加热蒸干以除去残存的 Os。用数毫升稀 HNO₃ 溶解残渣,稀释到硝酸浓度为 2%。备 ICP-MS 测定 Re 同位素比值。如含铼溶液中盐量超过 1 mg/mL,则需采用阳离子交换柱除去钠。

(4)质谱测定

采用美国 TJA 公司生产的 TJAX-series ICP-MS 测定同位素比值。对于 Re,选择测定 ¹⁸⁵Re 和 ¹⁸⁷Re。有时含 Re 的溶液中会残留少量未被分离的 ¹⁸⁷Os,从而影响 ¹⁸⁷Re,因此选用 ¹⁹⁰Os 来监测 ¹⁸⁷Os。如果在测试过程中观测到微弱的 ¹⁹⁰Os 信号,那么要用 Os 稀释剂的 ¹⁸⁷Os/¹⁹⁰Os 比值来修正 ¹⁸⁷Re 信号中的 ¹⁸⁷Os。对于 Os,选择测定 ¹⁸⁷Os、¹⁹⁰Os 和 ¹⁹²Os。类似的,会有少量 ¹⁸⁷Re 混入而影响 ¹⁸⁷Os,用 ¹⁸⁵Re 来监测 Re,用稀释剂的 ¹⁸⁵Re/¹⁸⁷Re 比值进行修正。修正通常很少,不超过同位素信号的 0.1%,这里用到的最大修正百分比小于 1%。

本实验全流程 Re、Os 和 ¹⁸⁷Os 空白值分别为 (0.0061 ± 0.0014) ng, (0.0003 ± 0.0011) ng 和 (0.0001 ± 0.0000) ng, 远远小于所测样品的 Re、Os 含量,不会影响实验中 Re、Os 含量的准确测定。实验测得标样 JDC 的 Re 含量为 (16.95 ± 0.13) μg/g, ¹⁸⁷Os 的含量为 (25.13 ± 0.22) ng/g, 与推荐值十分一致,这对实验结果的可靠性起到重要的监控作用(表 2)。因此,本次所获得的年龄是可靠的。

2.3 测试结果

5 件辉钼矿样品 Re-Os 同位素测试结果见表 3。本次测定辉钼矿的 ¹⁸⁷Re 为 14.86~167.5 μg/g,

表 2 本次试验 Re-Os 同位素标准物质分析结果

Table 2 Test results of Re-Os isotopes from standard reference materials in this study

编号	原样名	样重/g	Re/ (μg g ⁻¹)		¹⁸⁷ Os/ (ng g ⁻¹)		模式年龄/Ma	
			测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度
110426-19	JDC	0.09999	16.95	0.13	25.13	0.22	141.4	2.0
GBW04436	JDC		17.39	0.32	25.46	0.60	139.6	3.8

表 3 木吉村铜钼矿中辉钼矿 Re-Os 同位素数据

Table 3 Re-Os isotopic data of the molybdenite from the Mujicun copper (molybdenum) deposit

样号	样重/g	Re/ (μ g g ⁻¹)		普 Os/ (ng g ⁻¹)		¹⁸⁷ Re/ (μ g g ⁻¹)		¹⁸⁷ Os / (ng g ⁻¹)		模式年龄/Ma	
		测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度
Fmj7807-4	0.02060	266.5	2.8	0.0255	0.0810	167.5	1.8	403.8	3.5	144.5	2.3
Fmj7807-5	0.00555	142.3	1.2	0.0482	0.2162	89.46	0.77	213.7	2.2	143.2	2.2
Fmj7807-6	0.00508	225.7	1.7	0.0499	0.2237	141.8	1.0	338.7	3.1	143.2	2.0
Fmj7202-2	0.00568	23.65	0.20	0.0472	1.7981	14.86	0.13	35.53	0.55	143.3	2.8
Fmj7805-17	0.00544	53.52	0.49	0.1032	0.1091	33.64	0.31	81.32	0.78	144.9	2.3

注:模式年龄计算所用衰变常数为 ¹⁸⁷Re=1.666×10⁻¹¹a⁻¹(Smoliar et al., 1996)^[9], 不确定值是 2σ 水平;测试单位:国家地质实验测试中心 Re-Os 同位素实验室。

^{187}Os 为 35.53~403.8 ng/g。辉钼矿模式年龄变化范围 (143.2±2.2)Ma~(144.9±2.3)Ma, 较为一致, 模式年龄加权平均值为 (144±1) Ma。利用 Isoplot 对上述结果进行等时线加权拟合, 分别得到一条相关性很好的等时线。计算得出初始 ^{187}Os =(0.03±0.73)ng/g, 平均权重方差分别为 MSWD=1.0, 等时线年龄为 (143.8±1.2) Ma (图 5), 显然模式年龄和等时线年龄非常接近, 误差很小。这一结果基本能够代表木吉村铜(钼)矿的成矿时代。该年龄与高永丰(2011)^[28]5 件辉钼矿样品的 Re-Os 测年模式年龄 (141.6~143.0 Ma), 加权平均模式年龄为 (142.30±0.97) Ma, 等时线年龄为 (142.5±1.4) Ma (MSWD=0.39) 较为一致, 从而也佐证了本次测试结果。

2.4 讨论

Re-Os 同位素定年方法是目前比较成熟的直接确定成矿年龄的定年方法之一。在辉钼矿、毒砂、含砷黄铁矿、含碳页岩等 Re-Os 同位素定年的测定对象中, 辉钼矿是最理想的。该方法的 $\lambda^{187}\text{Re}$ (衰变常数) = $1.666 \times 10^{-11}/\text{a}$ ^[26], 适合于测定地球形成(约 45 亿年)以来成矿事件的年龄。由于 Re-Os 同位素测年法直接测定硫化物而不是赋矿岩石和脉石矿物, 因而是获得准确矿化年龄的关键^[27]。同时, 辉钼中的 Re-Os 同位素体系一般不受成矿期后热液流体的影响, 能够提供理解成矿系统中硫化物类矿物沉淀的重要信息, 而这些信息是蚀变矿物内其他同位素体系所不能反映的。

本次样品采集及制备时考虑了不同空间、不同深度, 以保证所取样品的代表性, 同时安排一组 5 件样品, 以确保所测年龄的可靠性。本文获得木吉村铜(钼)矿矿床 5 件辉钼矿样品 Re-Os 同位素分析结果, 其等时线年龄 (143.8±1.2) Ma 与模式年龄加权平均年龄 (144±1) Ma 在误差范围内是一致的, 从 MSWD 值及拟合概率来看, 其等时线年龄和加权平均模式年龄都是可靠的。且从上述两个批次、同种矿物、同样的测试方法测试的结果来看, 其误差非常小, 对于厘定该矿床的成矿年龄无疑是非常有帮助的。如果用 10 件样品模式年龄平均值来作为木吉村斑岩铜钼矿床的成矿年龄, 其年龄应约为 143.05 Ma。上述年龄非常接近于其南侧 10 km 处的大湾斑岩钼矿单个辉钼矿 Re-Os 年龄 (144.4±7.4) Ma 以及临近燕山地区北京大庄科爆发角砾岩型钼矿 ((144±7)~(146±4)Ma) 和冀北寿王坟斑岩型铜(钼)矿 ((148±4) Ma) 的辉钼矿 Re-Os 模式年龄^[27], 由此, 木吉村铜(钼)矿成矿时限可厘定为燕山期晚侏罗世。同时这也与闪长玢岩(有学者称之为成矿母岩)的锆石 U-Pb 年龄 (141.7±1.6) Ma^[29] 在误差范围内基本一致。

此外, 前人对中国斑岩型辉钼矿 Re-Os 同位素测试数据进行了分析总结, 并将其归纳为: 成矿物质来源是以地幔物质为主的钼矿, 其辉钼矿 Re 含量基本为 100~1 000 $\mu\text{g/g}$; 成矿物质是具有壳幔混合源的钼矿, 其辉钼矿中 Re 含量大多在十几微克至

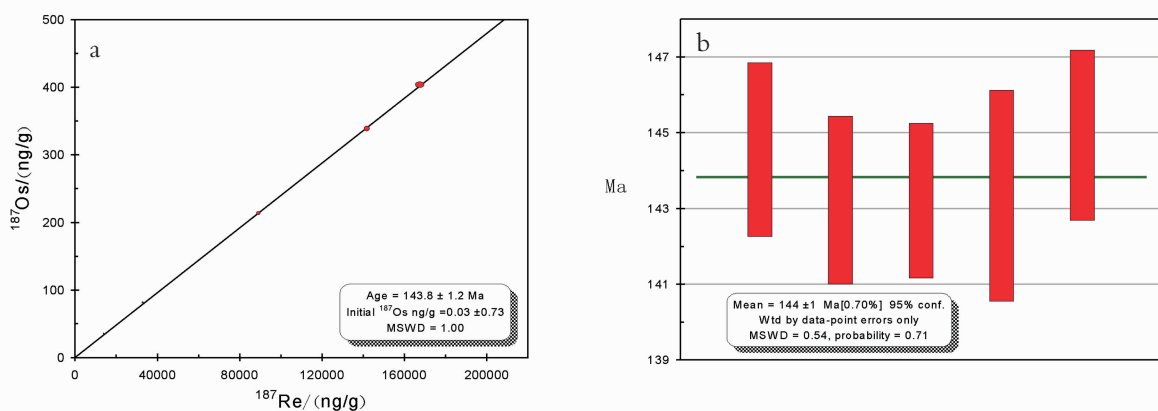


图 5 木吉村铜钼矿中辉钼矿 Re-Os 同位素等时线年龄(a)和模式年龄加权平均值(b)
Fig.5 Re-Os isotopic isochron curve (a) and weighted average of Re-Os model age data (b) of molybdenites from the Mujicun copper (molybdenum) deposit

几十微克;成矿物质完全来自壳源的矿床,其辉钼矿 Re 含量为 1~n μg/g 或更低^[27,30-31]。本次研究的 5 个样品测试数据(表 3),可见辉钼矿 Re 含量在 23.65~266.5 μg/g,平均值为 142.33 μg/g,位于前人所划分的地幔来源和部分壳幔混合源数据区间。同时结合矿石硫、铅同位素特征(矿石硫同位素 δ³⁴S=-3.5‰~2‰;矿石铅同位素 ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb=15.566~17.072,平均 16.691;²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb=15.031~15.525,平均 15.284;²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb=26.292~37.375,平均 36.947)^[32],综合表明木吉村铜钼矿的成矿物质主要来源于地球深部。

结合地质特征和成矿时限,从幔枝构造理论视角分析,推测在燕山期阜平幔枝构造演化过程中,晚期发育闪长玢岩次火山岩体为载矿岩体,其侵位为后期深部含矿气液流体进入矿田开辟通道,从而在浅部构造有利部位形成木吉村铜(钼)多金属矿床。

3 成矿流体特征

3.1 包裹体形态特征

在光学显微镜下,通过对木吉村铜(钼)矿矿化

蚀变样品进行观察,本次选择 ZK7202,ZK7404,ZK7805,ZK7808 等钻孔矿石中有代表性的共计 8 块包裹体,对保存于石英、萤石和方解石中 124 个有效包裹体进行测试,分析统计:矿区包裹体均较为发育,以原生为主,少量假次生和次生包裹体(本次研究均选择原生包裹体)。包裹体形态多样,有椭圆形、菱形、梯形、三角形和各种不规则形状。包裹体密度小,多为随机分布,部分沿晶内裂隙和晶体生长带分布,因此可判断为原生包裹体。包裹体个体相对较小,多数在 2 μm×3 μm~12 μm×10 μm。从相态看,主要有气液两相、富气气液两相、含二氧化碳的气液两相和气液固多相包裹体 4 种类型,极少数含金属包裹体,气液比变化较大,从 5%~80%均有产出,但以 5%~30%的气液比常见(图 6,表 4)。

3.2 包裹体成分

利用光学显微镜观察上述流体包裹体岩相学特征,划分出包裹体类型和共生组合,并圈定包裹体较大且集中区域开展显微激光拉曼测试工作。本次激光拉曼测试在中国地质科学院矿产资源研究所流体包

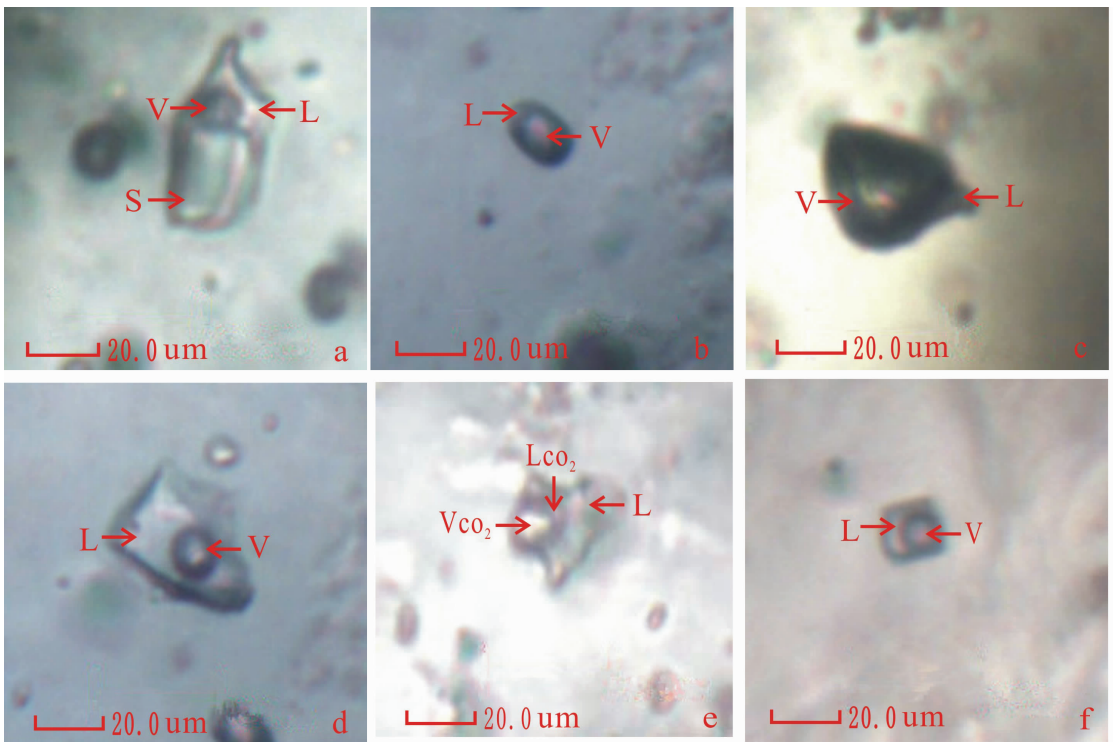


图 6 木吉村铜钼矿床流体包裹体特征

a—ZK7202-1 石英中 V-L+S 包裹体; b—ZK7202-1 石英中富气包裹体; c— ZK7202-1 石英中富气包裹体; d—ZK7202-1 石英中 V-L 包裹体; e—ZK7202-4 石英中 L-CO₂ 包裹体; f—ZK7805-12 方解石中 V-L 包裹体

Fig. 6 Characteristics of fluid inclusion in the Mujicun copper (molybdenum) deposit

a—V-L+S inclusions in quartz; b—rich gas inclusions in quartz; c—rich gas inclusions in quartz; d—V-L inclusions in quartz; e—L-CO₂ inclusions in quartz; f—V-L inclusions in calcite

表 4 木吉村铜钼矿床流体包裹体特征及参数

Table 4 Characteristics and parameters of inclusions in the Mujicun copper (molybdenum) deposit

样品编号	主矿物	种类	大小/ $\mu\text{m}\times\mu\text{m}$	气液比/%	均一温度/ $^{\circ}\text{C}$	冰点/ $^{\circ}\text{C}$	盐度/wt%	
Fmj7202-1	石英	V-L 富气	6×10	75	>600			
	石英	V-L+S	7×13	10	233			
	石英	V-L+S	5×8	15	314			
	石英	V-L	4×8	30	435	-19	21.68	
	石英	V-L 富气	9×11	95	>600			
	石英	V-L	5×7	40	456			
	石英	V-L	5×6	40	>600	-18.9	21.61	
	石英	V-L 富气	2×5	75	431→V	-18.6	21.4	
	石英	V-L	2×6	80	370→V	-18.7	21.47	
	石英	V-L	3×5	30	334	-4.7	7.45	
	石英	V-L	3×6	10	249	-5.5	8.55	
	石英	V-L	3×4	30	343	-3.6	5.86	
	石英	V-L	3×3	20	332	-4.4	7.02	
	石英	V-L	7×12	20	244	-4.6	7.31	
	石英	V-L 富气	3×5	90	360→V			
	石英	V-L	5×6	10	164	-4.6	7.31	
	石英	V-L	4×4	30	322	-4.3	6.88	
	石英	V-L 富气	3×7	70	421→V	-4.5	7.17	
Fmj7202-4	石英	L-CO ₂	6×8	25	311 爆裂		2.96	
	石英	L-CO ₂	3×7	30	330		3.15	
	石英	L-CO ₂	2×5	30	338		3.89	
	石英	V-L	2×3	10	172			
	石英	V-L	4×14	10	103			
	石英	L-CO ₂	3×7	20	224			
	石英	L-CO ₂	5×5	60	250 爆裂		6.02	
	石英	L-CO ₂	4×6	60	259 爆裂		5.68	
	石英	L-CO ₂	5×7	60	278 爆裂		5.33	
	石英	L-CO ₂	3×10	30	308 爆裂		6.2	
	石英	L-CO ₂	4×7	70	290 爆裂		4.8	
	石英	L-CO ₂	3×4	70	251 爆裂		5.51	
	石英	V-CO ₂	5×6	10	17.4			
	石英	L-CO ₂	2×11	40	253 爆裂		7.05	
	石英	V-L 富气	2×5	50	238			
	石英	V-L	3×5	20	279	-6.2	9.47	
	石英	V-L	3×3	15	288	-5.6	8.68	
	Fmj7202-6	石英	V-L+S	3×6	10	169		41.49
石英		V-L+S	3×6	10	146		40.61	
石英		V-L+S	3×4	10	160		39.19	
石英		V-L	3×7	30	333	-13.3	17.17	
石英		V-L	4×5	10	196	-12.9	16.8	
石英		V-L 富气	3×6	50	451	-11.7	15.67	
石英		V-L 富气	4×8	70	414→V	-10.4	14.36	
石英		V-L+S	4×6	5	114		38.55	
石英		V-L	3×3	15	267	-13.6	17.43	
石英		V-L+S	3×9	10	182		35.32	
石英		V-L	7×12	30	351	-14.9	18.55	
石英		V-L 富气	3×5	80	453→V			
石英		V-L+S	2×4	10	186		46.37	
石英		V-L+S	2×7	10	147		49.68	
石英		V-L 富气	4×9	60	>600	-14.4	18.13	
石英		V-L	2×6	20	246	-11.8	15.76	
石英		V-L+S	3×5	10	135		33.26	
石英		V-L	2×5	10	195	-11.3	15.27	
Fmj7404-3	石英	V-L	3×5	5	151			
	石英	V-L	1×3	10	172	-0.9	1.57	
	石英	V-L	2×4	10	188	-1	1.74	
	石英	V-L	2×4	10	177	-1	1.74	
	石英	V-L	3×3	10	142	-0.5	0.88	
	石英	V-L	4×5	30	309	-1.2	2.07	
	石英	V-L	1×2	10	150			
	石英	V-L	1×4	5	133			
	石英	V-L	3×4	30	311 爆裂	-1.3	2.24	
	石英	V-L	4×5	10	186	-1.1	1.91	
	石英	V-L	1×3	10	179	-1	1.74	
	石英	V-L	3×4	10	168	-0.8	1.4	
	石英	V-L	2×5	20	271	-1.2	2.07	
	石英	V-L	3×4	10	176	-0.6	1.05	
	石英	V-L	2×7	15	276	-1.2	2.07	
	Fmj7805-11	石英	V-L	1×6	10	190	-4	6.45
		石英	V-L	2×7	30	367	-5.4	8.41
		石英	V-L	2×9	20	324	-6.4	9.73
石英		V-L	3×5	30	360	-4.9	7.73	
石英		V-L	3×5	25	357	-4.6	7.31	
石英		V-L	3×6	5	122			
石英		V-L	3×4	10	151			
石英		V-L	2×4	10	176	-5.9	9.08	
石英		V-L 富气	4×4	50	274	-3.2	5.26	

续表 4

样品编号	主矿物	种类	大小/ $\mu\text{m}\times\mu\text{m}$	气液比/%	均一温度/ $^{\circ}\text{C}$	冰点/ $^{\circ}\text{C}$	盐度/wt%
	石英	V-L	1×5	10	155	-4.2	6.74
	石英	V-L	3×4	10	182	-3.7	6.01
	石英	V-L	1×4	5	135		
	石英	V-L	2×3	10	147		
	石英	V-L	3×4	10	178	-4.4	7.02
Fmj7805-12	方解石	V-L	3×4	15	224	-4.2	6.74
	方解石	V-L	3×4	15	198	-3.8	6.16
	方解石	V-L	2×4	10	172		
	方解石	V-L	5×10	30	281	-5.9	9.08
	方解石	V-L	4×7	20	274	-4	6.45
	方解石	V-L 富气	4×4	50	381	-3.8	6.16
	方解石	V-L	3×4	10	164	-4.4	7.02
	方解石	V-L	3×4	20	333	-5.5	8.55
	方解石	V-L	3×3	30	182 爆裂	-3.9	6.3
	方解石	V-L	3×5	20	365	-5.3	8.28
	石英	V-L+S	6×6	10	131		42.4
	石英	V-L+S	4×5	5	128		55.53
	石英	V-L+S	6×8	10	146		40.61
	石英	V-L+S+M	4×4	10	156		
	石英	V-L 富气	3×4	60	418	-6.7	10.11
	石英	V-L 富气	5×7	70	>600	-7.2	10.73
	石英	V-L	4×5	30	349 爆裂		
	石英	V-L	5×7	10	455→V		
	石英	V-L	3×6	40	383	-7.5	11.1
	石英	V-L+S	3×6	10	246		32.76
Fmj7805-14	石英	V-L	2×4	10	168	-7.2	10.783
	石英	V-L	2×3	10	174	-6.8	10.24
	石英	V-L	2×4	10	169		
	石英	V-L	3×5	10	178	-7.5	11.1
	石英	V-L	3×5	15	204	-6.8	10.24
	石英	V-L	2×5	10	183	-6.5	9.86
	石英	V-L	3×3	10	164	-6.9	10.36
	石英	V-L	3×10	5	107	-6.7	10.11
	石英	V-L	2×4	10	181		
	石英	V-L	2×7	20	288	-4.8	7.59
	石英	V-L	2×4	10	149	-6.5	9.86
	石英	V-L	2×2	10	168		
	石英	V-L	2×6	10	170	-6.2	9.47
	石英	V-L	4×7	5	123	-4.3	6.88
Fmj7808-3	萤石	V-L	2×5	10	169	-14.5	18.22
	萤石	V-L	1×3	10	180	-14.8	18.47
	萤石	V-L	1×3	10	172		
	萤石	V-L	1×3	10	176		
	萤石	V-L	3×5	10	148		
	萤石	V-L	2×6	10	135	-10.9	14.87
	萤石	V-L	4×4	20	205 爆裂	-12.5	16.43
	萤石	V-L	3×5	20	304		
	石英	V-L	3×11	15	312	-4.8	7.59
	石英	V-L	3×6	20	365	-3.1	5.11
	石英	V-L 富气	3×4	60	441→V	-3	4.96
	石英	V-L 富气	7×15	50	424→V	-3.8	6.16
	石英	V-L	3×4	40	373	-2.2	3.71
	石英	V-L 富气	4×4	50	472	-4.3	6.88
	石英	V-L	3×6	25	338	-3.1	5.11
	石英	V-L	7×8	25	330	-3.3	5.41
	石英	V-L	3×6	25	328	-2.6	4.34
	石英	V-L	4×6	30	335	-3.4	5.56
	石英	V-L	4×5	40	393	-2.8	4.65
	石英	V-L	3×7	35	381	-3.5	5.71

注:中国地质大学(北京)地质测试中心,测试仪器:Linkam THMSG-600 冷热台,2011 年。

裹体实验室完成,仪器为英国 Reinshaw 公司生产的 System-2000 型显微共焦激光拉曼光谱仪(有关参数为:光源采用 Ar+激光器,波长为 514.5 nm,激光功率为 20 mW,光谱分辨率为 1~2 cm^{-1} ,内置 CCD 探测器)。结果表明(图 7),除了石英的特征峰外,包裹体

液相成分和气相成分均以 H_2O 为主,在拉曼谱图上表现为 H_2O 的包络峰(2900~3750 cm^{-1}),气态包裹体中除 H_2O 外,还可见 CO_2 (1284 cm^{-1}),未检测到其他挥发分可能是由于检测时所用激光功率较低的原因造成的。

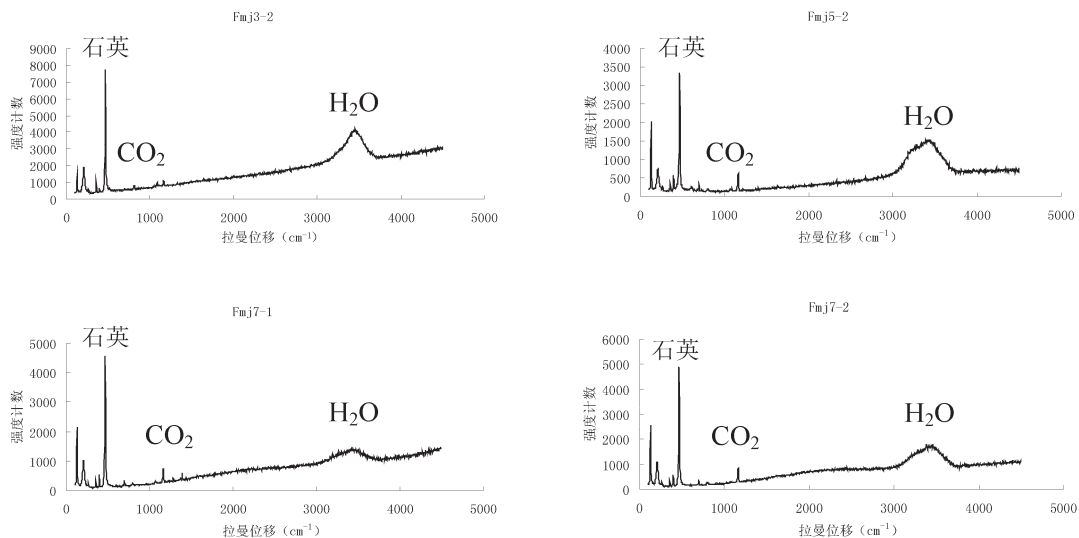


图7 木吉村铜钼矿床 ZK7202 辉钼矿矿石石英流体包裹体拉曼光谱分析
 Fig.7 Laser Raman spectra of quartz fluid inclusions from the molybdenites ore of drill hole ZK7202 in the Mujicun copper (molybdenum) deposit

3.3 包裹体均一温度及盐度

通过对矿区斑岩型铜钼矿石中各类流体包裹体进行测温、统计、分析,结果表明:

保存于石英中的 93 个有效包裹体均一温度数值位于 103℃~472℃ 之间, 呈现 150℃~200℃ 和 300℃~350℃ 两个峰值区域, 总平均值 237.99℃, 总体上气液比较较大流体包裹体主要出现在后者峰值区(图 8)。71 个石英中的包裹体冰点温度数值变化范围较窄, 在 -19℃~-0.5℃ 皆有分布, 主要值域为 -0.5℃~-9℃, 总体平均值为 -6.0℃。93 个盐度有效数值在 0.88wt%~55.53wt%, 主要集中于 1.0wt%~16.0wt%

和 32wt%~48wt% 两个值域之间, 总平均为 12.42wt%, 其中高盐度区主要为气液固多相流体包裹体, 且温度值较低(图 5)。产生上述总体低温高盐度、气液固多相和高温低盐度、气液两相为主的两个数值区, 推测包裹体可能是由于在热液成矿阶段热液沸腾分离所致。

此外, 保存于方解石内的 9 个有效流体包裹体均一温度为 164℃~381℃, 平均 265.78℃; 冰点变化于 -5.90~-3.80, 平均 -4.53℃; 对应的盐度在 6.16wt%~9.08wt%, 平均 7.19wt%。保存于萤石内的 7 个有效流体包裹体均一温度为 135℃~304℃, 平均

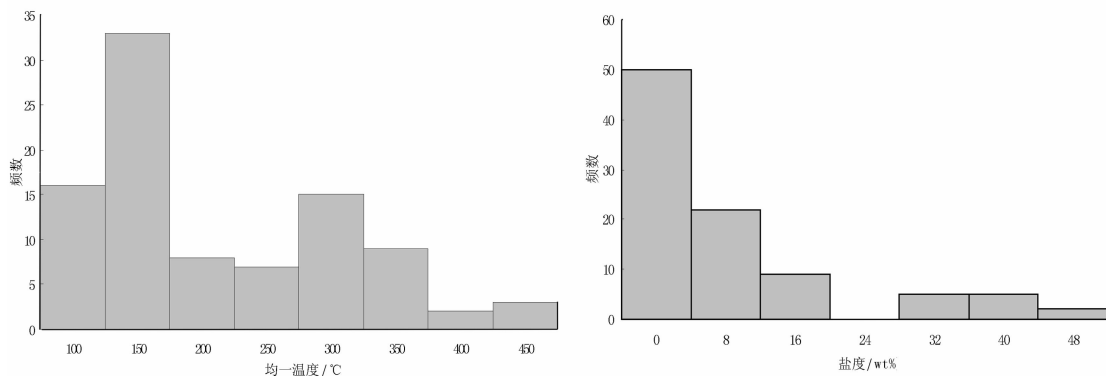


图 8 木吉村铜钼矿石英包裹体均一温度直方图(a)和盐度直方图(b)
 Fig. 8 Histograms of homogenization temperature(a) and salinity(b) for quartz fluid inclusions in Mujicun copper (molybdenum) deposit

183.43℃。冰点变化于-14.80~-12.50,平均-13.18℃;对应的盐度为14.87wt%~18.47wt%,平均17.00wt%。从温度、盐度数值表明萤石形成顺序相对更晚。

总体上来说,从包裹体信息反映出木吉村矿床成矿温度为中温,盐度为中低盐度。

4 结 论

(1)木吉村矿床矿石5件辉钼矿 Re-Os 同位素表明,等时线年龄为(143.8±1.2)Ma,成矿时限为燕山期晚侏罗世,与太行山中北段区域多金属成矿大爆发事件基本一致。

(2)矿床流体包裹体初步研究表明:包裹体相对较小,多数在 $2\mu\text{m}\times 3\mu\text{m}\sim 12\mu\text{m}\times 10\mu\text{m}$,从相态看,主要有气液两相、富气气液两相、含二氧化碳的气液两相和气液固多相包裹体4种类型;包裹体液相成分和气相成分均以 H_2O 为主,其中气态包裹体还可见 CO_2 ;成矿温度大体为中温,盐度为中低盐度,在热液成矿阶段发生过热液沸腾分离作用。

(3)河北木吉村铜(钼)矿成矿物质主要来源于地球深部,为壳幔混合型。

致谢:感谢评审专家和编辑部老师提出非常宝贵的修改意见和指导!

参考文献(References):

- [1] Walker R J, Morgan J W, Naldreu A J, et al. Re-Os isotope systematics of Ni-Cu sulfide ores, Subury igneous complex, Ontario: Evidence for a major crustal component [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1991, 105: 416-429.
- [2] Horan M F, Morgan J W, Grauch R I, et al. Rhenium and osmium isotopes in black shales and Ni-Mo-PGE-rich sulfide layers, Yukon Territory, Canada, and Hunan and Guizhou Provinces, China [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, 58: 257-265.
- [3] Mao J W, Wang Y T, Lehmann B, et al. Molybdenite Re-Os and albite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of Cu-Au-Mo and magnetite porphyry systems in the Yangtze River valley and metallogenic implications [J]. *Ore Geology Reviews*, 2006, 29: 307-324.
- [4] 叶会寿,毛景文,李永峰,等.东秦岭东沟超大型斑岩钼矿 SHRIMP 锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义 [J]. *地质学报*, 2006, 80(7): 1078-1087.
Ye Huishou, Mao Jingwen, Li Yongfeng et al. Shrimp zircon U-Pb and molybdenite Re-Os dating for the superlarge Donggou porphyry Mo deposit in East Qinling, China, and its geological implication [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80 (7): 1078-1087(in Chinese with English abstract).
- [5] 韩春明,肖文交,赵国春,等.新疆喀拉通克铜镍硫化物矿床 Re-

Os 同位素研究及其地质意义 [J]. *岩石学报*, 2006, 22 (1): 163-170.

Han Chunming, Xiao Wenjiao, Zhao Guochun, et al. Re-Os isotopic analysis of the Kalatongke Cu-Ni Sulfide Deposit, Northern Xinjiang, NW China, and its geological implication [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22 (1): 163-170 (in Chinese with English abstract).

- [6] 李厚民,叶会寿,毛景文,等.小秦岭金(钼)矿床辉钼矿铼-钨定年及其地质意义 [J]. *矿床地质*, 2007, 26(4): 417-424.

Li Houming, Ye Huishou, Mao Jingwen, et al. Re-Os dating of molybdenites from Au (-Mo) deposits in Xiaoqinling gold ore district and its geological significance [J]. *Mineral Deposits*, 2007, 26 (4): 417-424(in Chinese with English abstract).

- [7] Zhang Z H, Mao J W, Du A D, et al. Re-Os dating of two Cu-Ni sulfide deposits in northern Xinjiang, NW China and its geological significance [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2008, 32 (2/4): 204-217.

- [8] 唐菊兴,陈毓川,王登红,等.西藏工布江达县沙让斑岩钼矿床辉钼矿铼-钨同位素年龄及其地质意义 [J]. *地质学报*, 2009, 83(5): 698-704.

Tang Juxing, Chen Yuchuan, Wang Denghong, et al. Re-Os dating of molybdenite from the Sharang porphyry molybdenum deposit in Gongbo'gyamda County, Tibet and its geological significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2009, 83 (5): 698-704(in Chinese with English abstract).

- [9] 杨梅珍,曾键年,覃永军,等.大别山北缘千鹤冲斑岩型钼矿床锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 年代学及其地质意义 [J]. *地质科技情报*, 2010, 29(5): 35-45.

Yang Meizhen, Zeng Jiannian, Qin Yongjun, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb and molybdenite Re-Os dating for Qian'echong porphyry-type Mo deposit in Northern Dabie, China, and its geological significance [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2010, 29(5): 35-45(in Chinese with English abstract).

- [10] 应立娟,王登红,唐菊兴,等.西藏甲玛铜多金属矿床辉钼矿 Re-Os 定年及其成矿意义 [J]. *地质学报*, 2010, 84(8): 1165-1174.

Ying Lijuan, Wang Denghong, Tang Juxing, et al. Re-Os dating of molybdenite from the Jiama copper polymetallic deposit in Tibet and its metallogenic significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2010, 84 (8): 1165-1174(in Chinese with English abstract).

- [11] 龙灵利,王玉往,杜安道,等.新疆希勒库都克铜钼矿床辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义 [J]. *矿床地质*, 2011, 30(4): 635-644.

Long Lingli, Wang Yuwang, Du Andao, et al. Molybdenite Re-Os age of Xilekuduke Cu-Mo deposit in Xinjiang and its geological significance [J]. *Mineral Deposits*, 2011, 30(4): 635-644 (in Chinese with English abstract).

- [12] 聂凤军,孙振江,李超,等.黑龙江岔路口钼多金属矿床辉钼矿铼-钨同位素年龄及地质意义 [J]. *矿床地质*, 2011, 30 (5): 828-836.

Nie Fengjun, Sun Zhenjiang, Li Chao, et al. Re-Os isotopic dating of molybdenite separates from Chalukou porphyry Mo

- polymetallic deposit in Heilongjiang Province[J]. Mineral Deposits, 2011, 30(5): 828-836(in Chinese with English abstract).
- [13] 杨宗锋, 罗照华, 卢欣祥, 等. 关于辉钼矿中 Re 含量示踪来源的讨论[J]. 矿床地质, 2011, 30(4): 654-674.
Yang Zongfeng, Luo Zhaohua, Lu Xinxiang, et al. Discussion on significance of Re content of molybdenite in tracing source of metallogenic materials[J]. Mineral Deposits, 2011, 30(4): 654-674 (in Chinese with English abstract).
- [14] 刘善宝, 王登红, 陈毓川, 等. 胶东半岛烟台地区邢家山钨钼矿床地质特征及其辉钼矿 Re-Os 同位素测年[J]. 地质通报, 2011, 30(8): 1294-1302.
Liu Shanbao, Wang Denghong, Chen Yuchuan, et al. Geological characteristics and molybdenite Re-Os age of the Xingjiashan W-Mo deposit in Yantai area, Jiaodong Peninsula, Shandong Province [J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30 (8): 1294-1302 (in Chinese with English abstract).
- [15] 李艳军, 魏俊浩, 伍刚, 等. 浙西南毛断铅锌多金属矿床辉钼矿 Re-Os 年代学及地质意义 [J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2011, 36(2): 289-298.
Li Yanjun, Wei Junhao, Wu Gang, et al. Re-Os dating of molybdenite from the Maoduan lead-zinc polymetallic deposit in Southwestern Zhejiang Province and its geological significance [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2011, 36(2): 289-298(in Chinese with English abstract).
- [16] 吴俊华, 赵赣, 屈文俊, 等. 赣南葛廷坑钨钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义[J]. 地学前缘, 2011, 18(3): 261-267.
Wu Junhua, Zhao Gan, Qu Wenjun, et al. Re-Os dating of molybdenites from Getingkeng molybdenum deposit of Southern Jiangxi Province and its geological significance [J]. Earth Science Frontiers, 2011, 18(3): 261-267(in Chinese with English abstract).
- [17] 代军治, 谢桂青, 王瑞廷, 等. 内蒙古赤峰鸡鸣山(铜)矿床辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义 [J]. 中国地质, 2012, 39(6): 1614-1621.
Dai Junzhi, Xie Guiqing, Wang Ruiting, et al. Re-Os isotope dating of molybdenite separates from the Yajishan Mo (Cu) deposit, Inner Mongolia, and its geological significance [J]. Geology in China, 2012, 39(6): 1614-1621.
- [18] 李强, 孟祥元, 杨富全, 等. 河北省青龙满族自治县四拨子—六拨子钨铜矿床的辉钼矿 Re-Os 年龄及意义[J]. 中国地质, 2012, 39(6): 1622-1634.
Li Qiang, Meng Xiangyuan, Yang Fuquan, et al. Re-Os ages of molybdenite from the Sibozhi-Liubozhi molybdenum-copper deposit in Qinglong County of Hebei Province and its implications for Metallogeny [J]. Geology in China, 2012, 39 (6): 1622-1634 (in Chinese with English abstract).
- [19] 王磊, 胡明安, 屈文俊, 等. 粤北大宝山多金属矿床 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 定年及其地质意义[J]. 中国地质, 2012, 39(1): 29-42.
Wang Lei, HU Mingan, Qu Wenjun, et al. Zircon LA-ICP-MS U-Pb and molybdenite Re-Os dating of the Dabaoshan polymetallic deposit in northern Guangdong Province and its geological implications[J]. Geology in China, 2012, 39(1): 29-42(in Chinese with English abstract).
- [20] 赵海杰, 郑伟, 余长发, 等. 粤西石碇铜钼矿床 Re-Os 同位素年龄及其地质意义[J]. 中国地质, 2012, 39(6): 1604-1613.
Zhao Haijie, Zheng Wei, Yu Zhangfa, et al. Re-Os dating of molybdenite from the Shilu Cu(Mo) deposit in western Guangdong Province and its geological implications [J]. Geology in China, 2012, 39(6): 1604-1613(in Chinese with English abstract).
- [21] 马国玺. 河北省涞源县木吉村铜矿地质特征及成矿模式[J]. 华北地质矿产杂志, 1997, 12(1): 52-66.
Ma Guoxi. Geological characteristics and metallogenic model of copper deposit at Muji Village of Laiyuan County, Hebei Province [J]. Journal of Geology and Mineral Resources of North China, 1997, 12(1): 52-66(in Chinese with English abstract).
- [22] 杜安道, 何红蓼, 殷宁万, 等. 辉钼矿的铼-钨同位素地质年龄测定方法研究[J]. 地质学报, 1994, 68(4): 339-347.
Du Andao, He Hongliao, Yin Ningwan, et al. A study on the rhenium-osmium geochronometry of molybdenites[J]. Acta Geologica Sinica, 1994, 68(4): 339-347(in Chinese with English abstract).
- [23] 杜安道, 赵敦敏, 王淑贤, 等. Carius 管溶样和负离子热表面质谱准确测定辉钼矿铼-钨同位素地质年龄[J]. 岩矿测试, 2001, 20(4): 247-252.
Du Andao, Zhao Dunmin, Wang Shuxian, et al. Precise Re-Os dating for molybdenite by ID-NTIMS with Carius Tube sample preparation [J]. Rock and Mineral Analysis, 2001, 20 (4): 247-252 (in Chinese with English abstract).
- [24] 屈文俊, 杜安道. 高温密闭溶样电感耦合等离子体质谱准确测定辉钼矿铼-钨地质年龄[J]. 岩矿测试, 2003, 22(4): 254-257.
Qu W J, Du A D. Highly precise Re-Os dating of molybdenite by ICP-MS with Carius Tube sample digestion [J]. Rock and Mineral Analysis, 2003, 22(4): 254-257(in Chinese with English abstract).
- [25] Du AD, Wu S Q, Sun D Z, et al. Preparation and certification of Re-Os dating reference materials: Molybdenite HLP and JDC[J]. Geostandard and Geoanalytical Research, 2004, 28(1): 41-52.
- [26] Smoliar M L, Walker R J, Morgan J W. Re-Os ages of group IIA, IIIA, IVA and IVB iron meteorites [J]. Science, 1996, 271: 1099-1102.
- [27] Stein H J, Markey R J, Morgan J W, et al. The remarkable Re-Os chronometer in molybdenite: How and why it works [J]. Terra Nova, 2001, 13(6): 479-486.
- [28] 黄典豪, 杜安道, 吴澄宇, 等. 华北地台钨(铜)矿床成矿年代学研究——辉钼矿铼-钨年龄及其地质意义 [J]. 矿床地质, 1996, 15(4): 365-373.
Huang Dianhao, Du Andao, Wu Cengyu, et al. Metallochronology of molybdenum (copper) deposits in the North China platform: Re-Os age of molybdenite and its geological significance [J]. Mineral Deposits, 1996, 15 (4): 365-373 (in Chinese with English abstract).
- [29] 高永丰, 魏瑞华, 侯增谦, 等. 木吉村斑岩铜矿成矿作用: 华北克拉

通中生代岩石圈减薄的响应[J]. 矿床地质, 2011, 30(5): 890-902.

Gao Yongfeng, Wei Ruihua, Hou Zengqian, et al. Mujicun porphyry copper mineralization: Response to Mesozoic thinning of lithosphere in North China Craton [J]. Mineral Deposits, 2011, 30(5): 890-902(in Chinese with English abstract).

[30] 毛景文, 张作衡, 张招崇, 等. 北祁连山小柳沟钨矿床中辉钼矿 Re-Os 年龄测定及其意义[J]. 地质论评, 1999, 45(4): 412-417.

Mao Jingwen, Zhang Zuoheng, Zhang Zhaochong, et al. Re-Os age dating of molybdenites in the Xiaoliugou tungsten deposit in the northern Qilian Mountains and its significance [J]. Geological Review, 1999, 45(4): 412-417 (in Chinese with English abstract).

[31] 孟祥金, 侯增谦, 董光裕, 等. 江西金溪熊家山钼矿床特征及其

Re-Os 年龄[J]. 地质学报, 2007, 81(7): 946-951.

Meng Xiangjin, Hou Zengqian, Dong Guangyu, et al. The geological characteristics and Re-Os isotope age of molybdenite of the Xiongjiashan molybdenum deposit, Jiangxi Province [J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81 (7): 946-951 (in Chinese with English abstract).

[32] 陈超, 牛树银, 马宝军, 等. 河北省木吉村铜(钼)矿床构造控矿分析[J]. 地质与勘探, 2013, 49(5): 861-871.

Chen Chao, Niu Shuyin, Ma Baojun, et al. An analysis on ore-controlling structures of the Mujicun Cu (Mo) deposit in Hebei Province [J]. Geology and Exploration, 2013, 49 (5): 861-871(in Chinese with English abstract).

Re-Os dating of molybdenite from the Mujicun Cu (-Mo) deposit in Hebei Province and characteristics of the ore-forming fluids

CHEN Chao^{1,2}, WANG Bao-de¹, NIU Shu-yin¹, MA Guo-xi², ZHANG Jian-zhen¹, SUN Ai-qun¹, MA Bao-jun¹, CHEN Zhi-kuan², ZHANG Fu-xiang¹, WANG Zi-li³

(1. College of Resources, Shijiazhuang University of Economics, Shijiazhuang 050031, Hebei, China; 2. Baoding Institute of Geological Engineering and Exploration of Hebei Province, Baoding 071051, Hebei, China; 3. North China Bureau for Geological Exploration, Tianjin 300170, China)

Abstract: Located in Mujicun Village of Laiyuan County, Hebei Province, the Mujicun copper (molybdenum) deposit has been proved to be a large-size copper (molybdenum) - gold and silver polymetallic deposit in northern Taihang Mountains, geotectonically lying in the secondary faulted basin in the upper block of the detachment zone on the western side of Laiyuan dumbbell-shaped complex rock body, along the northern section of Fuping mantle branch structure. In order to study the metallogenic ages of the Mujicun copper (molybdenum) deposit, the authors mainly analyzed the Re-Os isotopes of 5 pieces of molybdenite samples from different drill holes at different depths on the basis of the metallogenic geological background, and obtained three important metallogenic ages, i.e., $(143.2 \pm 2.2) \text{ Ma} \sim (144.9 \pm 2.3) \text{ Ma}$ (model age), $(144 \pm 1) \text{ Ma}$ (weighted mean model age) and $(143.8 \pm 1.2) \text{ Ma}$ (isochron age). The dating result suggests that the ore deposit was formed in the Late Jurassic of Yanshanian period, which is consistent with polymetallic metallogenic event in northern Taihang Mountains. In addition, according to the characteristics of fluid inclusions and the content of Re in molybdenite, this paper also indicates that the inclusions are composed of 4 types, i.e., gas-liquid inclusions, rich gas inclusions, CO₂-bearing inclusions and gas-liquid-solid multiphase inclusions, in which H₂O is the main composition for gas-liquid inclusions and rich gas inclusions. The ore-forming process took place under the condition of medium temperature and middle-low salinity, and the ore-forming materials were mainly derived from the depth of the earth.

Key words: molybdenite; Re-Os isotopic dating; ore-forming fluid; copper (molybdenum) deposit; Mujicun in Hebei Province

About the first author: CHEN Chao, male, born in 1981, doctor, engages in teaching and study of tectonics and related mineralization; E-mail: goldcc@163.com.