

doi:10.3799/dqkx.2012.135

# 内蒙古乌日尼图钨钼矿床成矿流体特征及地质意义

杨增海<sup>1,2</sup>, 王建平<sup>1,2\*</sup>, 刘家军<sup>1,2</sup>, 王守光<sup>3</sup>, 王清义<sup>4</sup>, 康书光<sup>4</sup>

1. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083

2. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083

3. 内蒙古自治区地质调查院, 内蒙古呼和浩特 010020

4. 内蒙古自治区第九地质矿产勘查开发院, 内蒙古锡林浩特 026000

**摘要:** 乌日尼图钨钼矿位于内蒙古苏尼特左旗境内, 是近几年该区新发现的较大规模的钨钼矿床。钨钼矿体主要产于燕山期花岗岩体的内外接触带附近, 以细脉状矿化类型为主。该矿床中的流体包裹体主要发育气液两相、富气相、富液相和纯液相包裹体等类型。包裹体均一温度为 130.0~371.7 °C (峰值为 160.0~260.0 °C), 盐度为 0.2%~15.9% NaCl eqv (峰值为 0.2%~12.5% NaCl eqv), 属于中低温、中低盐度钨钼矿床。激光拉曼和群体包裹体成分分析结果表明, 流体体系气相成分以 H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub> 为主, 其次为 N<sub>2</sub>、O<sub>2</sub> 以及少量 CO、CH<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 和 C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 等; 液相成分以 Ca<sup>2+</sup>、Na<sup>+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Cl<sup>-</sup> 为主, 其次为 K<sup>+</sup>、F<sup>-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、Mg<sup>2+</sup> 以及少量 Br<sup>-</sup> 和 Li<sup>+</sup>。成矿流体为 H<sub>2</sub>O-NaCl-CO<sub>2</sub> 体系。流体包裹体氢氧同位素分析表明, 成矿流体的 δ<sup>18</sup>O<sub>水</sub> 的含量范围为 -2.11%~-0.11%, δD<sub>水</sub> 的含量范围为 -85%~-108%, 成矿流体为岩浆水与大气降水的混合物。结合矿床地质和成矿流体特征, 认为该矿床为与燕山期岩浆活动有关的中低温热液石英脉型钨钼矿床, 成矿物质以深源为主。

**关键词:** 石英脉型钨钼矿; 流体包裹体; 氢氧同位素; 乌日尼图; 岩石学; 成矿预测; 矿床。

中图分类号: P611

文章编号: 1000-2383(2012)06-1268-11

收稿日期: 2012-07-19

## Characteristics and Its Geological Significance of Fluid Inclusions of the Wurinitu W-Mo Deposit in Inner Mongolia, China

YANG Zeng-hai<sup>1,2</sup>, WANG Jian-ping<sup>1,2\*</sup>, LIU Jia-jun<sup>1,2</sup>, WANG Shou-guang<sup>3</sup>, WANG Qing-yi<sup>4</sup>, KANG Shu-guang<sup>4</sup>

1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

3. Geological Survey Institute of Inner Mongolia, Huhehaote 010020, China

4. Inner Mongolia Ninth Geology Mineral Exploration and Development Co. Ltd., Xilinhaote 026000, China

**Abstract:** The Wurinitu W-Mo deposit, located in Sunid Zuoqi area in the Inner Mongolia autonomous region, is a large W-Mo deposit discovered in recent years. The W-Mo orebodies mainly occurred in Yanshanian granite rock body and the nearby contact zone, with the major type of veinlet mineralization. Petrographic study of fluid inclusions suggests that the main types of fluid inclusions of Wurinitu metallogenic fluid system are two-phase vapor-liquid inclusions, vapor-rich phase inclusions, liquid-rich phase inclusions and pure liquid phase inclusions. The homogenization temperature and salinity of the fluid inclusions vary in 130.0–371.7 °C (the peak value vary in 160–260 °C) and 0.2%–15.9% NaCl eqv (the peak value vary in 0.2%–12.5% NaCl eqv). The deposit belongs to a medium-low temperature, medium-low salinity W-Mo deposit. Laser Raman spectroscopic and inclusion groups components studies indicate that gas composition of the ore-forming fluid are mainly H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub>, some N<sub>2</sub> and O<sub>2</sub>, and less CO, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> and C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, liquid composition are mainly Ca<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup>, some K<sup>+</sup>, F<sup>-</sup>, Mg<sup>2+</sup> and NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, and less Br<sup>-</sup> and Li<sup>+</sup>. The ore-forming fluids belong to the H<sub>2</sub>O-NaCl-CO<sub>2</sub> system. The hydrogen and oxygen isotopic compositions of fluid inclusions showed that the ore-forming fluids had lower values of δ<sup>18</sup>O<sub>water</sub> ranging from -2.11% to -0.11%, and the value of δD<sub>water</sub> ranged from -85% to -108%. The ore-forming fluids came from the mixing

**基金项目:** 中国地质调查局矿产资源调查评价专项工作项目“重要示范区带区域成矿系统研究”(No. 1212011085471)。

**作者简介:** 杨增海(1982-), 男, 硕士研究生, 主要从事矿床学与矿床地球化学的研究。E-mail: yangzenghai21023@163.com

\* **通讯作者:** 王建平, E-mail: jpwang@cugb.edu.cn

of magma water and meteoric water. Based on the geological and ore-forming fluids characteristics of the deposit, it is concluded that the Wurinitu quartz vein type W-Mo deposit is a Yanshanian magmatism-related and moderate-low temperature hydrothermal system. The ore-forming materials were mainly derived from the depth.

**Key words:** quartz vein type W-Mo deposit; fluid inclusions; hydrogen and oxygen isotope; Wurinitu; petrology; ore prospecting; ore deposits.

## 0 引言

内蒙古大兴安岭成矿省二连—东乌旗晚古生代—中生代成矿带是近几年来我国重点开展地质勘查和研究工作的地区之一。目前,在该成矿带取得了良好的找矿效果,先后发现了一系列矿床和矿点,如准苏吉花钨铜矿床、乌日尼图钨钼矿床、乌兰德勒钨铜矿床、乌花敖包钨矿点及达来敖包钨矿床等(邵积东等,2009;陶继雄等,2010),从而在该区形成了一个规模巨大的金属矿化集中区。

乌日尼图钨钼矿床位于内蒙古自治区中东部苏尼特左旗查干敖包镇西北乌日尼图地区,南距二连浩特市 170 km,北与蒙古接壤。该矿床是内蒙古自治区地质调查院于 2005 年开展“内蒙古二连—东乌旗成矿带铜矿评价”项目时被首次发现。2008 年,内蒙古自治区地质调查院在 1 km<sup>2</sup> 的详查区内进行了勘探,探明三氧化钨工业矿体( $W_{\text{品位}} \geq 0.12\%$ )储量大于 4.58 万 t。目前,详查区及其外围由内蒙古自治区第九地质矿产勘查开发院进行大规模的勘探工作。

研究成矿流体特征是揭示矿床成因的重要途径(Zhu *et al.*, 2001; 范宏瑞等, 2003; 徐九华等, 2006)。由于该矿床为新发现矿床,前人尚未对乌日尼图钨钼矿的成因及成矿流体的特征等方面进行深入研究。本文以矿床主成矿阶段含矿石英脉为研究对象,通过包裹体岩相学、显微测温、激光拉曼分析、群体包裹体气液相成分分析及氢氧同位素分析等研究,对乌日尼图钨钼矿床成矿流体特征及地质意义进行探讨,为矿床成因提供成矿流体方面的依据。这些研究对于系统认识乌日尼图钨钼矿床成矿作用和形成机制具有重要的理论意义。

## 1 地质概况

乌日尼图钨钼矿床位于西伯利亚板块东南大陆边缘晚古生代陆缘增生带,二连—贺根山板块对接带西北侧。中生代则处于滨太平洋构造域之大兴安岭中生界火山—岩浆岩带的西部边缘,属古亚洲成

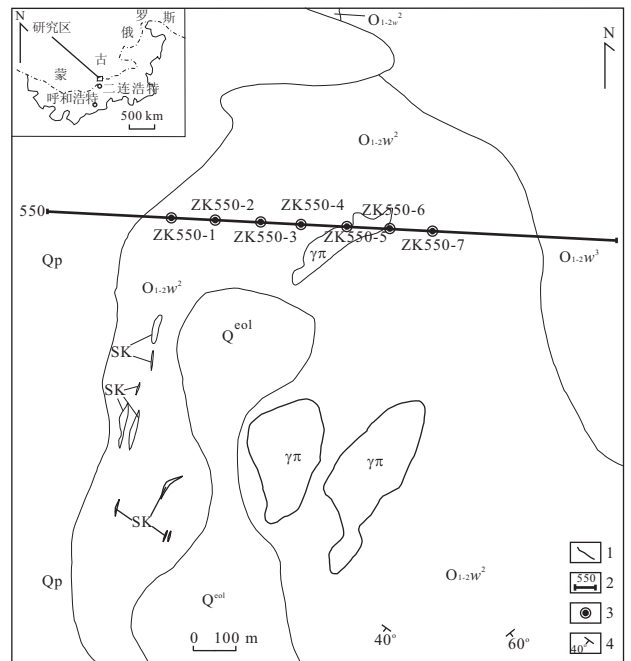


图1 乌日尼图钨钼矿床矿区地质简图(据内蒙古自治区第九地质矿产勘查开发院,2011,苏尼特左旗乌日尼图钨钼矿 1:2 000 地形地质图修编)

Fig. 1 Simplified geological map of the Wurinitu tungsten and molybdenum deposit

Q<sup>col</sup>. 第四系风成砂; Q<sup>p</sup>. 第四系砾石层; O<sub>1-2</sub>w<sup>3</sup>. 中下奥陶统乌宾敖包组三段; O<sub>1-2</sub>w<sup>2</sup>. 中下奥陶统乌宾敖包组二段;  $\gamma\pi$ . 花岗斑岩; SK. 砂卡岩; 1. 地层界线及侵入岩接触界线; 2. 勘探线编号; 3. 钻孔位置; 4. 地层产状

矿域内蒙古大兴安岭成矿省二连—东乌旗晚古生代—中生代成矿带(邵积东等,2009;肖伟等,2010)。

矿区出露面积最大的地层为中下奥陶统乌宾敖包组二段浅海相灰绿—灰褐色绢云母板岩、粉砂质板岩、紫红—灰绿色变质长石砂岩夹变质粉砂岩及灰岩透镜体,局部夹安山岩、英安岩及沉凝灰岩、安山质火山角砾岩等。局部地段见石榴石砂卡岩,但是与钨钼矿化并无直接关系。该地层为主要的赋矿围岩层位。乌宾敖包组三段主要发育灰紫色粉砂质板岩、变质粉砂岩夹砾岩以及灰绿色变质长石石英砂岩等(图1)。矿区地表第四系覆盖严重,仅于深部见燕山期花岗岩侵入体(133 Ma,尚恒胜,2012)、石英斑岩脉及花岗斑岩脉(129 Ma,尚恒胜,2012)等。矿

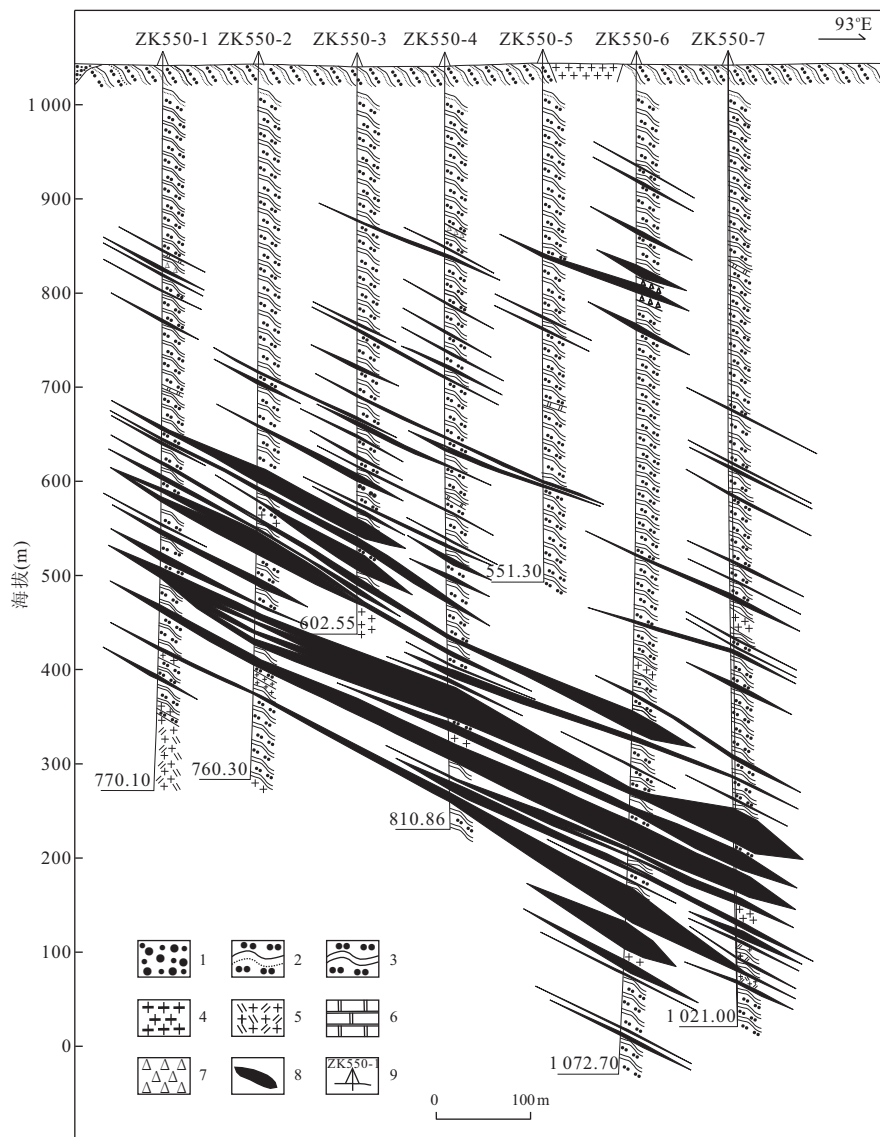


图 2 乌日尼图钨钼矿床 550 线勘探线剖面图(据内蒙古自治区地质调查院,2010,乌日尼图矿区 550 勘探线设计 1:1000 剖面图修编)

Fig. 2 Exploration profiles in 550 line of the Wurinitu tungsten and molybdenum deposit

1. 第四系砾石层;2. 中下奥陶统乌宾敖包组二段变质粉砂岩;3. 中下奥陶统乌宾敖包组二段粉砂质板岩;4. 花岗斑岩;5. 细粒二长花岗岩;6. 大理岩;7. 破碎带;8. 矿体;9. 钻孔位置及编号

区位于东乌旗复背斜南东翼次一级背斜的转折端,产状较为平缓,向南西倾伏。区内断裂构造以北东向为主,次一级为北西向,且为北东向构造的派生构造。

乌日尼图钨钼矿体主要赋存于中下奥陶统乌宾敖包组与深部隐伏花岗岩外接触带中。矿体呈似层状、似板状及脉状产出,走向为北东向和北西向,并严格受区内北东、北西向断裂构造控制。矿体总体走向为北东向,矿体多为中等倾斜,倾角在  $30^\circ$  左右,倾向为东倾。矿化类型多为浸染状、细脉—浸染状和细脉状矿化,其中以细脉状矿化为主(图 2,3)。钨钼矿体在垂向上具有“上钨下钼”的分布规律,钨在上部品位高,随着深度增加矿化减弱,品位逐渐降低,

而钼矿化则随钨矿化减弱逐渐增加。在垂向上可分成钨矿化带、钨钼矿化带、钼矿化带。此外,还共生少数钨钼矿体、钨铜矿体、钨铜钼矿体。

## 2 流体包裹体特征

### 2.1 样品特征与测试方法

本次研究,主要以矿床主成矿期含矿石英脉中的原生流体包裹体为对象,通过显微测温、激光拉曼光谱分析和流体包裹体的气相和液相成分分析方法测定其均一温度、盐度和包裹体成分。

研究样品全部采自乌日尼图钨钼矿的钻孔岩

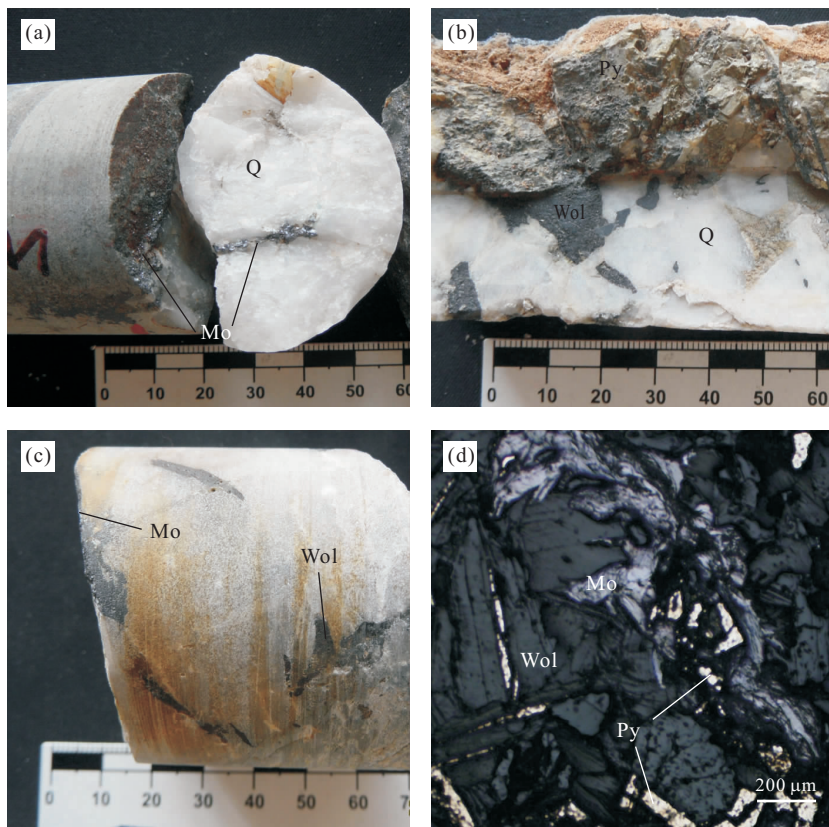


图3 乌日尼图钨钼矿床矿石宏观及显微结构特征

Fig. 3 The petrofabric characteristics of ores from the Wurinitu tungsten and molybdenum deposit

a. 主成矿期细脉状辉钼矿; b. 主成矿期颗粒状黄铁矿与板状黑钨矿共生; c. 主成矿期辉钼矿与黑钨矿共生; d. 显微镜下主成矿期板状黑钨矿与叶片状辉钼矿共生; Mo. 辉钼矿; Py. 黄铁矿; Wol. 黑钨矿; Q. 石英

心,均为新鲜的原生含矿石英脉.将样品磨制成包裹体片后,在显微镜下进行岩相学观察,然后选择具代表性的包裹体进行显微测温测试等研究.

流体包裹体测温在中国地质大学(北京)地球科学与资源学院矿产与资源勘查室流体包裹体实验室完成.显微冷热台为英国 Linkam 公司专用于地质包裹体测定的 MDSG600 冷/热台与德国 ZEISS 公司的偏光显微镜匹配进行地质样片、包裹体观察及测定工作,此系统可以直接观察在加温或冷冻过程中包裹体相态的连续变化过程,并能随时控制操作,记录所需参数进行分析,通过图像采集系统可以进行即时图像连续拍照、采集工作. MDSG600 冷/热台的温度控制范围为 $-196\sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,可控的冷冻/加温速率范围为 $0.01\sim 130.00\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ,精确度及稳定性在 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之内,样品最大镜域直径 $1\text{ cm}$ .

单个流体包裹体中气液相成分分析,即激光拉曼光谱分析,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.测试仪器为 Renishaw System-2000 型激光拉曼光谱仪,激发激光波

长 $514.53\text{ nm}$ ,激光功率为 $20\text{ mW}$ ,激光束斑最小直径 $1\text{ }\mu\text{m}$ ,光谱分辨率 $1\sim 2\text{ cm}^{-1}$ .

流体包裹体的气相和液相成分分析是在中国地质科学院矿产资源研究所完成的.流体包裹体的气相成分分析采用加热爆裂法提取气体,再经过 TCD 和 FID 检测,实验所用仪器为 GC-2010 气相色谱仪和澳大利亚 SGE 公司的热爆裂炉,取样温度为 $100\sim 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,GC-2010 型气相色谱仪最低检出限为 $1\times 10^{-6}$ .流体包裹体的液相成分分析采用加热爆裂法,使用仪器为日本岛津公司 Shimadzu HIC-SP Super 型离子色谱仪进行测试,其最低检出限阴离子为 $1\times 10^{-9}$ ,阳离子为 $1\times 10^{-6}$ .标准物质来源于国家标准物质研究中心.

## 2.2 流体包裹体类型

岩相学研究表明,石英中的流体包裹体数量均较多,既有原生包裹体也有次生包裹体.原生包裹体常孤立随机分布或成群分布,其大小差异较大,集中在 $3\sim 18\text{ }\mu\text{m}$ ,个别可达 $39\text{ }\mu\text{m}$ .包裹体形态主要为椭圆状、次圆状和不规则状,少数为三角状和四边形



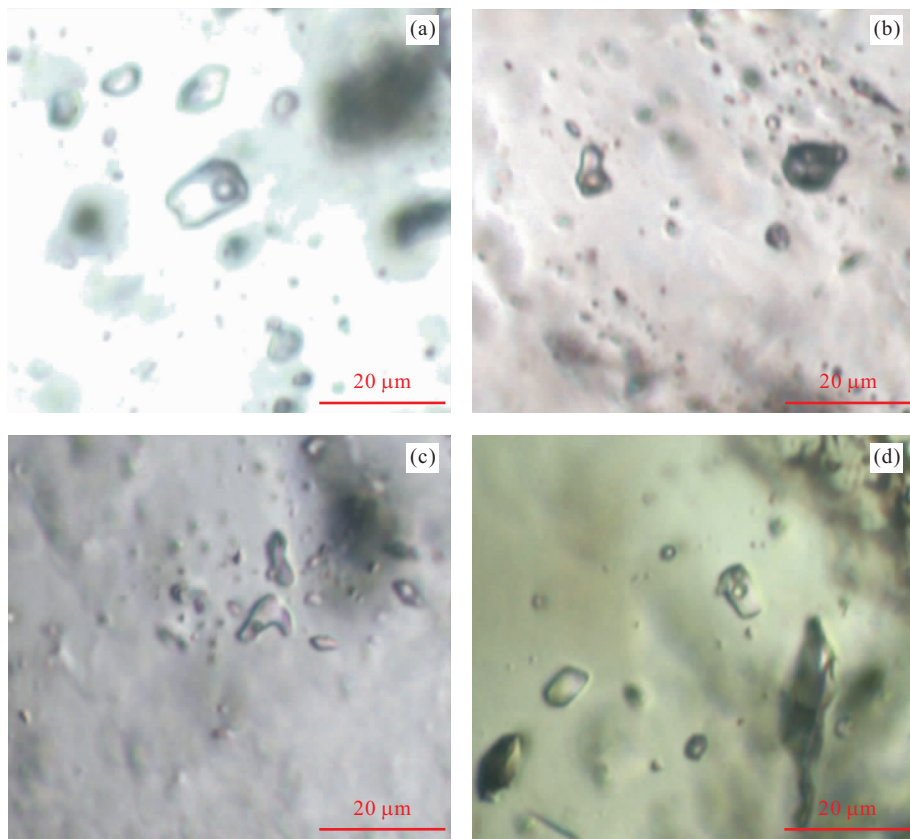


图 4 乌日尼图钨钼矿床中流体包裹体显微照片

Fig. 4 Photomicrographs of fluid inclusions in the Wurinitu tungsten and molybdenum deposit  
a. 纯液相包裹体及气液两相包裹体共生同一个结晶平面; b. 富气包裹体; c. 富液包裹体; d. 含 2 个气泡的包裹体

状. 包裹体气相和液相以无色为主, 气/液比为 5%~45% (室温条件下), 大部分集中在 10%~25% 之间. 次生包裹体主要沿裂隙呈线性分布, 多为负晶形. 次生包裹体以水溶液包裹体和富液包裹体为主.

原生包裹体类型比较简单, 依据室温下所观察到的包裹体相态特征可分为气液两相包裹体、富液包裹体、富气包裹体及纯液相包裹体等多种类型, 此外还可见少量含 2 个气泡的包裹体出现 (图 4).

### 2.3 流体包裹体显微测温 and 盐度计算

本次研究工作, 共采集 17 件含矿石英脉进行流体包裹体测温工作. 对流体包裹体进行显微测温时, 首先进行冷冻, 在缓慢回温过程中记录冰点温度 ( $T_{m,ice}$ ), 然后测定气-液相均一温度 ( $T_h$ ). 根据 (Hall *et al.*, 1988)  $H_2O-NaCl$  体系盐度-冰点公式 ( $W_{NaCl} = 0.00 + 1.78 T_m - 0.044 2 T_m^2 + 0.000 557 T_m^3$ ), 即可获得盐水溶液流体包裹体的盐度值 (表 1, 图 5).

由表 1 和图 5 可知, 石英中流体包裹体的均一温度为 130.0~371.7 °C ( $N=258$ ), 整体呈正态分布, 峰值为 160.0~260.0 °C, 平均为 218.0 °C. 总体

上看, 矿床成矿流体属于中-低温热液流体体系.

由表 1 和图 5 可知, 石英中流体包裹体盐度为 0.2%~15.9% NaCl eqv ( $N=258$ ), 平均为 6.87% NaCl eqv. 分布范围较广, 整体呈正态分布, 峰值为 0.2%~12.5% NaCl eqv.

### 2.4 流体包裹体激光拉曼光谱分析

激光拉曼光谱是对单个包裹体进行非破坏测定最有效的方法 (Bruke, 2001; Yamamoto *et al.*, 2002). 通过对不同类型的单个流体包裹体进行气液相成分分析, 可以探测各种成岩和成矿流体以及岩浆的来源和源区组成 (褚少雄等, 2010).

石英中的流体包裹体激光拉曼光谱分析表明, 除了主矿物石英拉曼峰外, 流体包裹体中气相成分主要含有  $CO_2$ , 其特征峰值为  $1\ 386.5\ cm^{-1}$ . 部分包裹体检测出  $CO_3^{2-}$ , 其特征峰值为  $1\ 068.9\ cm^{-1}$ . 液相成分主要为  $H_2O$ , 其特征峰值为  $3\ 510.9\ cm^{-1}$  (图 6).

### 2.5 流体包裹体群体成分分析

本次研究工作, 共采集 6 件含矿石英脉样品进行群体成分分析. 流体包裹体气液相成分分析结果

表 1 乌日尼图钨钼矿床石英中流体包裹体参数特征

Table 1 Parameter characteristics of fluid inclusion in quartz from the Wumitu tungsten and molybdenum deposit

样号	个数	大小( $\mu\text{m}$ )	气液比(%)	冰点 $T_{\text{m,ice}}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	均一温度 $T_{\text{h}}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	盐度( % NaCl eqv)	密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	成矿压力(MPa)	成矿深度(km)
WR-1	16	4.6~38.7	5~30	-8.1~-3.5(-6.3)	187.0~263.8(233.2)	5.7~12.1(9.5)	0.82~0.96(0.90)	51.79~74.46(64.13)	1.73~2.48(2.14)
WR-2	14	4.1~13.5	10~15	-5.3~-0.3(-2.6)	224.1~243.0(238.5)	0.5~8.1(4.3)	0.81~0.88(0.85)	45.00~66.02(61.29)	1.50~2.20(2.04)
WR-3	15	3.1~12.9	5~35	-9.3~-4.6(-7.1)	161.7~316.6(229.7)	7.3~13.2(10.5)	0.77~0.97(0.91)	44.39~78.28(63.42)	1.48~2.89(2.11)
WR-4	16	2.0~6.5	5~20	-10.7~-3.8(-7.3)	174.4~321.1(234.6)	6.2~14.7(10.7)	0.84~0.98(0.91)	48.38~89.48(64.79)	1.61~2.88(2.16)
WR-6	15	3.3~12.5	5~15	-11.7~-0.3(-3.8)	130.0~260.5(208.2)	0.5~15.7(6.0)	0.84~0.98(0.90)	30.30~70.90(55.10)	1.01~2.36(1.84)
WR-15	14	2.7~17.5	5~20	-3.6~-0.3(-1.2)	168.2~258.9(215.5)	0.5~5.9(2.0)	0.79~0.92(0.86)	39.02~65.47(50.86)	1.32~2.18(1.70)
WR-16	15	4.0~22.3	3~20	-11.9~-3.0(-7.7)	159.8~352.6(223.3)	5.0~15.9(11.2)	0.78~1.01(0.92)	44.49~97.99(61.64)	1.48~3.27(2.05)
WR-18	15	3.5~10.6	5~35	-5.2~-1.6(-3.7)	162.4~271.4(209.6)	2.7~8.1(6.0)	0.86~0.93(0.90)	42.47~74.05(56.51)	1.42~2.47(1.88)
WR-21	16	3.7~20.6	5~15	-5.4~-0.1(-3.2)	170.0~236.6(209.6)	0.2~8.4(5.2)	0.82~0.96(0.89)	29.46~63.90(53.95)	0.98~2.13(1.80)
WR-22	14	3.0~30.2	5~15	-6.9~-3.9(-5.1)	174.9~216.5(201.1)	6.3~10.4(7.9)	0.89~0.96(0.92)	48.18~59.81(55.00)	1.61~1.99(1.83)
WR-25	14	3.3~18.1	5~25	-9.3~-0.2(-3.4)	171.8~272.5(212.7)	0.4~13.2(5.3)	0.84~0.94(0.89)	32.89~75.22(53.16)	1.10~2.51(1.77)
WR-26	16	2.0~9.5	3~30	-8.4~-2.6(-5.1)	139.7~334.5(211.0)	4.3~12.2(8.0)	0.77~0.99(0.91)	38.39~92.44(59.90)	1.28~3.08(2.00)
WR-37	16	2.4~13.5	3~15	-6.1~-0.2(-3.4)	136.4~211.9(168.5)	0.4~9.3(5.4)	0.89~0.97(0.94)	21.09~56.91(45.44)	0.70~1.90(1.51)
WR-41	16	5.2~15.5	5~15	-5.5~-1.0(-3.7)	179.5~265.5(205.0)	1.7~8.5(6.0)	0.81~0.95(0.90)	46.99~70.29(54.98)	1.57~2.34(1.83)
WR-42	15	3.2~13.4	5~15	-5.2~-2.0(-3.9)	134.0~256.7(205.8)	3.4~8.1(6.2)	0.86~0.97(0.90)	35.99~70.34(55.65)	1.20~2.34(1.86)
WR-46	16	3.2~14.6	10~15	-8.7~-0.1(-4.3)	219.5~305.7(259.4)	0.2~12.5(6.8)	0.74~0.90(0.84)	35.84~84.55(67.99)	1.19~2.82(2.27)
WR-47	15	2.7~9.7	10~30	-6.3~-0.3(-2.8)	178.2~371.7(240.3)	0.5~9.3(5.2)	0.68~0.91(0.85)	41.66~102.09(62.04)	1.39~3.40(2.07)

注:括号内为平均值。

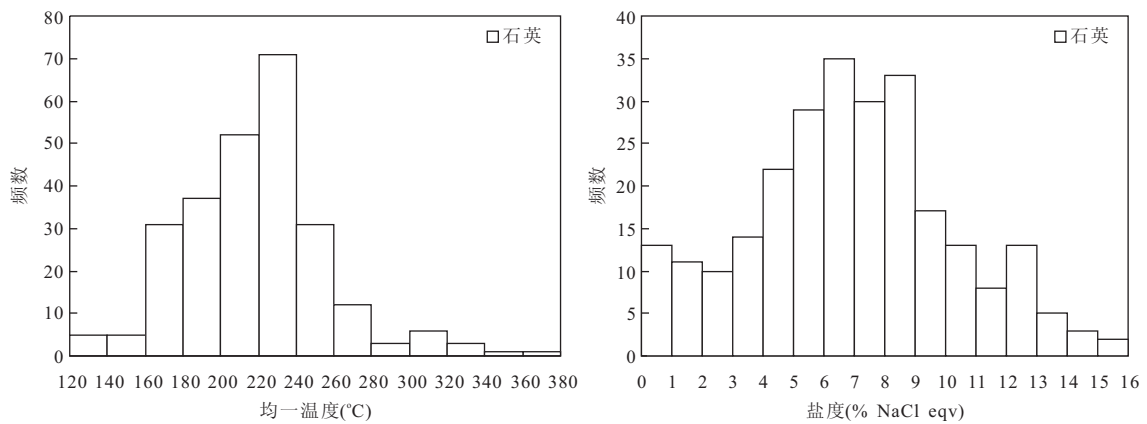


图 5 石英流体包裹体均一温度与盐度直方图

Fig. 5 Histograms of homogenization temperatures and salinity of fluid inclusions in quartz

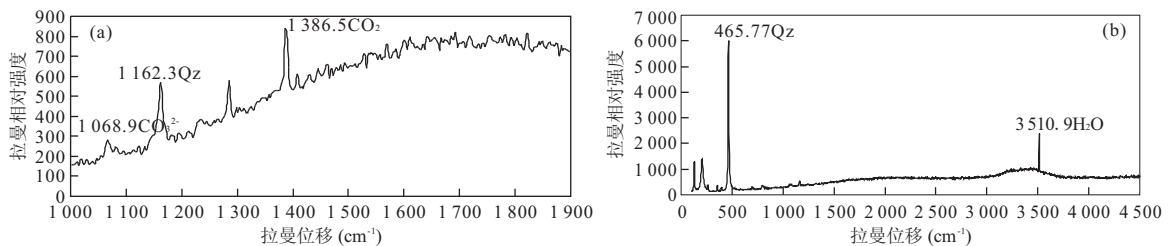


图 6 乌日尼图钨钼矿床流体包裹体激光拉曼分析光谱

Fig. 6 Laser Raman spectra of fluid inclusions in the Wurinitu tungsten and molybdenum deposit

a. 气液两相包裹体中的  $\text{CO}_2$  和  $\text{CO}_3^{2-}$ ; b. 气液两相包裹体中的  $\text{H}_2\text{O}$ ; Qz. 石英

见表 2。由于热爆过程中的氧化作用，表 2 中的  $\text{SO}_4^{2-}$  代表了流体包裹体中的所有含硫物相，如  $\text{S}^{2-}$ 、 $\text{HS}^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$ ； $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{CO}_2/\text{N}_2$  表示摩尔分数之比， $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)/(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ 、 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+/\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{F}^-/\text{Cl}^-$ 、 $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$  表示摩尔比值。

### 3 流体氢氧同位素组成

氢氧同位素分析在中国地质科学院矿产资源研究所稳定同位素实验室完成，所用仪器为 Finnigam MAT253EM 型质谱仪。矿物的氧同位素分析采用  $\text{BrF}_5$  法；包裹体水的氢同位素采用爆裂法取水、锌法制氢，爆裂温度为  $550^\circ\text{C}$ 。氢氧同位素分析精度分别为  $\pm 2\%$  和  $\pm 0.2\%$ ，分析结果均以 SMOW 为标准。测定结果见表 3。本次共采集了 10 件主成矿期的石英进行测试。对流体包裹体进行显微测温，测得石英脉中流体包裹体均一温度平均值  $218.0^\circ\text{C}$ 。利用石英—水分馏方程  $1000\ln\alpha_{\text{石英-水}} = 3.38 \times 10^6 / T^2 - 3.4$  (T 为绝对温度) (Clayton *et al.*, 1972)，计

算出与石英相平衡的热液水的  $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}$  值(表 3)。

由分析测试结果可知，石英的  $\delta^{18}\text{O}_{\text{石英}}$  值为  $8.5\% \sim 11.1\%$ ，平均为  $10.13\%$ 。包裹体中水的  $\delta\text{D}$  实测值为  $-85\% \sim -108\%$ ，平均为  $-99.4\%$ 。与石英相平衡的热液水的  $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}$  值为  $-2.11\% \sim -0.11\%$ ，平均值为  $-0.48\%$ 。

## 4 讨论

### 4.1 成矿流体性质

在所研究的流体包裹体中，可见气液两相包裹体、富液相包裹体、富气相包裹体及纯液相包裹体等多种类型的包裹体密切相邻，共生于同一结晶平面上，应属同时捕获。它是含矿热液流体自超临界状态向临界点转化时应力骤然降低的结果。矿物同时捕获性质迥异流体的现象被称为非均一捕获，是流体不混溶或沸腾的典型标志(王晓勇等, 2010)。

此外，不同温度、压力、盐度和密度的流体相混合，可以引起流体的沸腾(张振亮等, 2005)。激光拉曼和群体成分分析显示，该矿床的流体中显然包含

表2 乌日尼图钨钼矿床石英中流体包裹体群气相和液相成分( $\mu\text{g/g}$ )

Table 2 Gas components and aqueous components of grouped fluid inclusions from quartz in the Wurinitu tungsten and molybdenum deposit

样号	WR-1	WR-4	WR-6	WR-25	WR-26	WR-37
样品名称	含矿石英脉	含矿石英脉	含矿石英脉	含矿石英脉	含矿石英脉	含矿石英脉
CH <sub>4</sub>	1.134	0.091	0.138	0.659	0.240	0.122
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> +C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	0.355	0.228	0.345	0.641	0.587	0.215
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	微量	微量	0.010	0.072	0.027	微量
CO <sub>2</sub>	215.394	93.991	179.044	352.493	204.057	92.912
H <sub>2</sub> O	217.082	204.064	60.020	421.716	178.399	174.747
O <sub>2</sub>	8.623	9.626	19.379	9.512	12.011	8.343
N <sub>2</sub>	42.338	45.142	93.596	58.817	63.648	39.963
CO	15.688	11.242	48.108	93.460	70.792	13.137
CO <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O	0.406	0.189	1.221	0.342	0.468	0.218
CO <sub>2</sub> /N <sub>2</sub>	3.238	1.325	1.218	3.815	2.041	1.480
Li <sup>+</sup>	0.038	0.076	0.022	0.047	0	0.035
Na <sup>+</sup>	3.617	4.047	2.446	3.891	2.035	4.490
K <sup>+</sup>	2.269	3.439	2.223	1.949	2.940	2.434
Mg <sup>2+</sup>	0.025	0.028	0.043	0.031	0.029	0.021
Ca <sup>2+</sup>	1.481	2.145	3.002	2.347	2.333	1.600
F <sup>-</sup>	0.454	0.263	0.289	0.671	0.166	0.372
Cl <sup>-</sup>	2.968	2.712	2.757	3.672	2.126	4.532
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	0	0	0	0	0	0
Br <sup>-</sup>	0	0	0.087	0.156	0	0
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	2.117	2.345	2.122	2.448	1.823	1.880
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	10.334	8.621	6.971	9.442	7.319	9.078
(Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup> )/(Ca <sup>2+</sup> +Mg <sup>2+</sup> )	5.670	4.829	2.129	3.662	2.756	6.315
Mg <sup>2+</sup> /Ca <sup>2+</sup>	0.028	0.022	0.024	0.022	0.020	0.022
Na <sup>+</sup> /K <sup>+</sup>	2.711	2.001	1.871	3.395	1.177	3.137
Na <sup>+</sup> /Ca <sup>2+</sup>	4.258	3.289	1.420	2.890	1.521	4.892
F <sup>-</sup> /Cl <sup>-</sup>	0.285	0.181	0.196	0.341	0.146	0.153
Cl <sup>-</sup> /SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.778	0.852	1.072	1.054	0.787	1.353

注:数据由中国地质科学院地质矿产研究所流体包裹体实验室分析,分析人杨丹。

表3 乌日尼图钨钼矿床氢氧同位素测试结果

Table 3 Hydrogen and oxygen isotope data of the Wurinitu tungsten and molybdenum deposit

样号	WR-1	WR-3	WR-16	WR-18	WR-21	WR-25	WR-26	WR-37	WR-42	WR-47
产出位置	矿石	矿石	矿石	矿石	矿石	矿石	矿石	矿石	矿石	矿石
测试矿物	石英	石英	石英	石英	石英	石英	石英	石英	石英	石英
$\delta^{18}\text{O}_{\text{石英}}(\%)$	8.7	10.5	9.6	10.5	10.3	10.0	11.1	9.9	12.2	8.5
$\delta\text{D}_{\text{水}}(\%)$	-99	-97	-105	-103	-85	-106	-108	-105	-87	-99
$\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}(\%)$	-1.91	-0.11	-1.01	-0.11	-0.31	-0.61	0.49	-0.71	1.59	-2.11

多种组分,如 NaCl、CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub> 和少量 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 等,显示出它们捕获于一种不均匀的流体状态(Shepherd *et al.*, 1985),与相分离作用的特征相符. 所以,乌日尼图钨钼矿在成矿过程中,流体经历了不混溶或沸腾作用,导致了相分离.

流体包裹体显微测温、激光拉曼光谱分析和群体成分分析表明,多数成矿流体包裹体的密度较低,介于 0.68~1.01 g/cm<sup>3</sup>,平均 0.89 g/cm<sup>3</sup>(表 1),与大多数岩浆热液的流体密度( $\rho < 1.0 \text{ g/cm}^3$ )较为

一致.

流体包裹体液相成分中 Na<sup>+</sup>/Ca<sup>2+</sup> 的比值为 1.420~4.892,平均为 3.045; Na<sup>+</sup>/K<sup>+</sup> 的比值为 1.177~3.395,平均为 2.382; F<sup>-</sup>/Cl<sup>-</sup> 的比值为 0.146~0.341,平均为 0.217; Cl<sup>-</sup>/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 的比值为 0.778~1.353,平均为 0.983. 说明 Na<sup>+</sup> 和 Cl<sup>-</sup> 在成矿流体中可能占据主导地位. 总体来讲,成矿流体应该属于富含 Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup> 和 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>; 其次为 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、F<sup>-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>; 少量 Li<sup>+</sup> 和 Br<sup>-</sup> 的热热水溶液,并具



有较强的溶解成矿物质的能力。经统计,阳离子的电荷总数大于阴离子的电荷总数,证实成矿液相组分中也存在未分析的其他阴离子,如  $\text{CO}_3^{2-}$  等。激光拉曼测试显示确实某些包裹体中存在  $\text{CO}_3^{2-}$  等阴离子。

流体包裹体气相成分以  $\text{H}_2\text{O}$  (0.255~0.717, 平均 0.585) 和  $\text{CO}_2$  (0.135~0.311, 平均 0.217) 为主,  $\text{H}_2\text{O}$  具有绝对优势,属高含水型流体;其次为  $\text{N}_2$  和  $\text{O}_2$ ;还有少量的还原性气体  $\text{CO}$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{C}_2\text{H}_2$ 、 $\text{C}_2\text{H}_4$  和  $\text{C}_2\text{H}_6$  等组分。甲烷等烃类的存在,可能指示了深源流体的存在(杜玉雕等,2011),也指示其具有低的氧逸度。矿石中黄铁矿等硫化物的出现,也表明了主成矿期成矿流体还原性的特点(图 3)。  $\text{CO}_2/\text{N}_2$  摩尔分数比值为 1.218~3.815, 平均为 2.186。  $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$  为 0.189~1.221, 平均为 0.474, 比值变化较大,具有花岗质岩浆热流体的特征,并可能有幔源组分参与(芮宗瑶等,2003)。这表明成矿流体与该矿床深部发育的燕山期花岗岩有关。

#### 4.2 成矿流体密度、压力和深度条件

沸腾包裹体群的均一温度可以近似地看作捕获温度(卢焕章等,2004)。故流体包裹体均一温度可以近似代表成矿的温度。根据流体包裹体均一温度和盐度数据,利用(刘斌和段光贤,1987)盐水溶液包裹体的密度计算经验公式:  $\rho = a + b \times T_h + c \times T_h^2$  ( $\rho$  为流体密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;  $T_h$  为均一温度( $^\circ\text{C}$ );  $a$ 、 $b$ 、 $c$  为无量纲参数,  $a = A_0 + A_1\omega + A_2\omega^2$ ;  $b = B_0 + B_1\omega + B_2\omega^2$ ;  $c = C_0 + C_1\omega + C_2\omega^2$ ;  $A_0 = 0.993\ 531$ ;  $A_1 = 8.721\ 47 \times 10^{-3}$ ,  $A_2 = -2.439\ 75 \times 10^{-5}$ ;  $B_0 = 7.116\ 52 \times 10^{-5}$ ,  $B_1 = -5.220\ 8 \times 10^{-5}$ ,  $B_2 = 1.266\ 56 \times 10^{-6}$ ,  $C_0 = -3.499\ 7 \times 10^{-6}$ ,  $C_1 = 2.121\ 24 \times 10^{-7}$ ,  $C_2 = -4.523\ 18 \times 10^{-9}$ )求得气液两相包裹体的密度(表 1)介于 0.68~1.01  $\text{g}/\text{cm}^3$ , 平均 0.89  $\text{g}/\text{cm}^3$ , 属较低密度流体。

根据流体包裹体的均一温度和盐度,利用流体压力计算的公式(邵洁涟,1988):  $P = P_0 \times t_h/t_0$  ( $10^5$  Pa) ( $P_0 = 219 + 2\ 620 \times \omega$ ,  $t_0 = 374 + 920 \times \omega$ , 其中  $P$  为成矿压力,  $P_0$  为初始压力,  $t_h$  为均一温度,  $t_0$  为初始温度,  $\omega$  为成矿溶液的盐度), 计算出包裹体的流体压力(表 1)。计算结果表明,气液两相包裹体的压力介于 29.46~102.09 MPa 之间, 平均 57.85 MPa。

成矿深度是研究矿床成因和判定勘查潜力的重要依据,目前确定成矿深度多用流体的成矿压力值定量计算,认为成矿深度与成矿压力是一种线性关

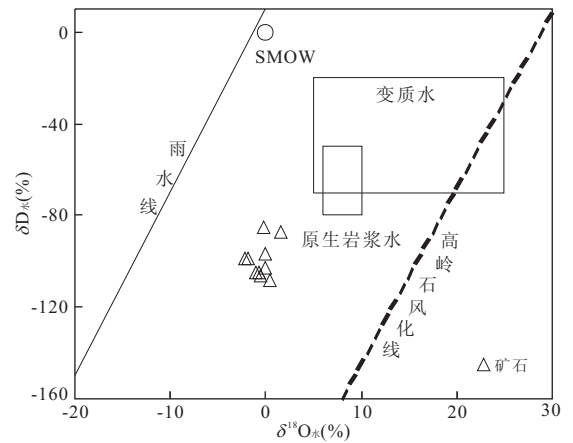


图 7 乌日尼图钨钼矿床成矿流体的  $\delta^{18}\text{O}_k - \delta\text{D}_k$  图解  
Fig. 7  $\delta^{18}\text{O}_k - \delta\text{D}_k$  diagram of ore-forming fluids in the Wurinitu tungsten and molybdenum deposit

系,笔者利用经验公式(邵洁涟,1988)  $H = P / (300 \times 10^5)$  (km) (式中  $H$  为成矿深度,  $P$  为成矿压力)进行成矿深度估算,其计算结果大致介于 0.70~3.40 km 之间, 平均为 1.93 km(表 1)。表明了矿质是在中浅深度成矿环境下沉淀就位的。

由上可知,乌日尼图钨钼矿床成矿流体包裹体显示了中一低温、中一低盐度和较低密度的流体特征,属中浅成矿压力和深度。

#### 4.3 成矿流体的来源

利用氢氧同位素测试结果,通过在  $\delta^{18}\text{O}_k - \delta\text{D}_k$  图解上投图可知(图 7),乌日尼图钨钼矿床主成矿期阶段所有石英样品的投点均偏离原始岩浆水区域向雨水线一侧迁移。其中,  $\delta\text{D}_k$  同位素的值整体上低于原生岩浆水,这可能反映了成矿流体在长时间的演化过程中强烈的去气过程。在此过程中,成矿流体中的低密度气相组分随着温度的降低从成矿体系中分离。野外及已有地质资料显示,矿床受北东向断裂及北西向次级断裂的控制,表明成矿流体的去气作用也应在该构造的控制之下发生。  $\delta^{18}\text{O}_k$  的含量也是明显低于岩浆水的值,并向雨水线靠近,发生了所谓的“ $\delta^{18}\text{O}_k$  漂移”现象。这就反映了主成矿期成矿流体可能受到了大气降水的影响,即大气降水与岩浆水中的氧同位素发生了不同程度的交换。主成矿期成矿流体具有岩浆水和大气降水相混合的特征。

## 5 结论

(1) 乌日尼图钨钼矿床含石英脉中的流体包

裹体包含气液两相、富液相、富气相及纯液相等多种类型. 流体包裹体气相以  $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{CO}_2$  为主, 其次为  $\text{N}_2$  和  $\text{O}_2$ , 还有少量的还原性气体  $\text{CO}$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{C}_2\text{H}_2$ 、 $\text{C}_2\text{H}_4$  和  $\text{C}_2\text{H}_6$  等组分. 成矿流体属于  $\text{H}_2\text{O}$ - $\text{NaCl}$ - $\text{CO}_2$  体系.

(2)成矿流体包裹体的测试和估算结果显示了中—低温( $130.0\sim 371.7\text{ }^\circ\text{C}$ , 平均  $218.0\text{ }^\circ\text{C}$ )、中—低盐度( $0.2\%\sim 15.9\%$   $\text{NaCl}$  eqv, 平均  $6.87\%$   $\text{NaCl}$  eqv)和较低密度( $0.68\sim 1.01\text{ g/cm}^3$ , 平均  $0.89\text{ g/cm}^3$ )的流体特征. 成矿压力为  $29.46\sim 102.09\text{ MPa}$ , 平均  $57.85\text{ MPa}$ ; 成矿深度为  $0.70\sim 3.40\text{ km}$ , 平均为  $1.93\text{ km}$ , 属中浅成矿压力和深度.

(3)氢氧同位素测试结果表明, 主成矿期成矿流体具有岩浆水和大气降水相混合的特征. 成矿过程中流体发生不混溶或沸腾作用, 减压沸腾作用促使流体介质条件发生变化可能是导致乌日尼图钨钼矿成矿作用发生的主要原因.

致谢:野外地质工作得到了内蒙古地质调查院及内蒙古自治区第九地质矿产勘查开发院的大力支持和帮助. 中国地质大学(北京)张捷先、赵云等同学参加了野外调研. 激光拉曼光谱分析和群体成分分析测试得到了徐文艺老师、杨丹老师以及贾丽琼等同学的帮助, 在此一并致以诚挚的谢意!

## References

- Bruke, E. A. J., 2001. Raman micro-spectrometry of fluid inclusions. *Lithos*, 55(1-4): 139-158. doi: 10.1016/S0024-4937(00)00043-8
- Chu, S. X., Zeng, Q. D., Liu, J. M., et al., 2010. Characteristics and its geological significance of fluid inclusions in Chehuhou porphyry Mo-Cu deposit, Xilamulun molybdenum metallogenic belt. *Acta Petrologica Sinica*, 26(8): 2465-2481(in Chinese with English abstract).
- Clayton, R. N., O'Neil, J. R., Mayeda, T. K., 1972. Oxygen isotope exchange between quartz and water. *Geophys. Res.*, 77(17): 3057-3067. doi: 10.1029/JB077i017p03057
- Du, Y. D., Yu, X. Q., Liu, J. J., et al., 2011. Characteristics of ore-forming fluids and sources of ore-forming materials in the Dongyuan W-Mo deposit, southern Anhui Province. *Geology in China*, 38(5): 1334-1346(in Chinese with English abstract).
- Fan, H. R., Xie, Y. H., Zhai, M. G., et al., 2003. A three stage fluid flow model for Xiaqingling lode gold metallogenesis in the He'nan and Shanxi Provinces, central China. *Petrologica Sinica*, 19(2): 260-266(in Chinese with English abstract).
- Hall, D. L., Sterner, S. M., Bodnar, R. J., 1988. Freezing point depression of  $\text{NaCl}$ - $\text{KCl}$ - $\text{H}_2\text{O}$  solutions. *Econ. Geol.*, 83: 197-202. doi: 10.2113/gsecongeo.83.1.197
- Liu, B., Duan, G. X., 1987. The density and isochoric formulae for  $\text{NaCl}$ - $\text{H}_2\text{O}$  fluid inclusions (salinity  $\leq 25\text{ wt}\%$ ) and their applications. *Acta Mineralogica Sinica*, 7(4): 345-352(in Chinese with English abstract).
- Lu, H. Z., Fan, H. R., Ni, P., et al., 2004. Fluid inclusion. Science Press, Beijing, 200-210(in Chinese).
- Rui, Z. Y., Li, Y. Q., Wang, L. S., et al., 2003. Approach to ore-forming conditions in light of ore fluid inclusions. *Mineral Deposits*, 21(1): 13-23(in Chinese with English abstract).
- Shang, H. S., 2012. The discovery and consideration of the Wurinitu W-Mo deposit in Sonid Left Banner. *Western Resources*, 1: 21(in Chinese).
- Shao, J. D., Tao, J. X., Li, S. W., et al., 2009. The new progress in ore prospecting within Daxing'anling mineralization belt, China. *Geological Bulletin of China*, 28(7): 955-962(in Chinese with English abstract).
- Shao, J. L., 1988. Prospecting mineralogy of gold deposit. China University of Geoscience Press, Wuhan, 38-45(in Chinese).
- Shepherd, T. J., Rankin, A. H., Alderton, D. M. H., 1985. A practical guide to fluid inclusion studies. Chapman & Hall, London.
- Tao, J. X., Zhong, R., Zhao, Y. M., et al., 2010. Geological characteristics and ore-prospecting criteria of the ulandler porphyry molybdenum deposit in Sonid Left Banner, Inner Mongolia. *Acta Geoscientica Sinica*, 31(3): 413-422(in Chinese with English abstract).
- Wang, X. Y., Jia, W. G., Wang, X. Z., et al., 2010. Fluid inclusion in the Hulalin gold deposit, Inner Mongolia. *Geology and Resources*, 19(2): 138-143(in Chinese with English abstract).
- Xiao, W., Wang, Y. T., Jiang, S. H., et al., 2010. Explanatory notes for the simplified geology and mineral resource map and typical geographical and topographic features of southern Mongolian and its neighboring areas. *Acta Geoscientica Sinica*, 31(3): 473-484(in Chinese with English abstract).
- Xu, J. H., Xie, Y. L., Zhang, J. H., et al., 2006. Sub-volcanic epithermal mineralization of Jiulongwan silver-polymetal deposit, eastern Daqingshan, Inner Mongolia, China: evidence from fluid inclusion. *Acta Petrologica Sinica*, 22(6): 1735-1743(in Chinese with English abstract).
- Yamamoto, J., Kagi, H., Kaneoka, I., 2002. Fossil pressures

- of fluid inclusions in mantle xenoliths exhibiting rheology of mantle minerals: implications for the geobarometry of mantle minerals using micro-Raman spectroscopy. *Earth and Planetary Science Letters*, 198(3-4): 511-519. doi:10.1016/S0012-821X(02)00528-9
- Zhang, Z. L., Huang, Z. L., Rao, B., et al., 2005. Study on the ore-forming fluid characteristics of Huize Pb-Zn ore deposits. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 20(2): 115-122 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, Y. F., Zeng, Y. S., Jiang, N., 2001. Geochemistry of the ore-forming fluids in gold deposits from the Taihang Mountains, northern China. *International Geology Review*, 43(5): 457-473. doi:10.1080/00206810109465026
- 附中文参考文献**
- 褚少雄, 曾庆栋, 刘建明, 等, 2010. 西拉沐伦钼矿带车户沟斑岩型钼-铜矿床成矿流体特征及其地质意义. *岩石学报*, 26(8): 2465-2481.
- 杜玉雕, 余心起, 刘家军, 等, 2011. 皖南东缘钨钼矿成矿流体特征和成矿物质来源. *中国地质*, 38(5): 1334-1346.
- 范宏瑞, 谢奕汉, 翟明国, 等, 2003. 豫陕小秦岭脉状金矿床三期流体运移成矿作用. *岩石学报*, 19(2): 260-266.
- 刘斌, 段光贤, 1987. NaCl-H<sub>2</sub>O 溶液包裹体的密度式和等容式及其应用. *矿物学报*, 7(4): 345-352.
- 卢焕章, 范洪瑞, 倪培, 等, 2004. 流体包裹体. 北京: 科学出版社, 200-210.
- 芮宗瑶, 李荫清, 王龙生, 等, 2003. 从流体包裹体研究探讨金属矿床成矿条件. *矿床地质*, 21(1): 13-23.
- 尚恒胜, 2012. 苏尼特左旗乌日尼图钨钼矿床的发现及思考. *西部资源*, (1): 21.
- 邵积东, 陶继雄, 李四娃, 等, 2009. 大兴安岭成矿带找矿工作新进展. *地质通报*, 28(7): 955-962.
- 邵洁涟, 1988. 金矿找矿矿物学. 武汉: 中国地质大学出版社, 38-45.
- 陶继雄, 钟仁, 赵月明, 等, 2010. 内蒙古苏尼特左旗乌兰德勒钼(铜)矿床地质特征及找矿标志. *地球学报*, 31(3): 413-422.
- 王晓勇, 贾伟光, 王献忠, 等, 2010. 内蒙古额尔古纳市虎拉林金矿床成矿流体包裹体研究. *地质与资源*, 19(2): 138-143.
- 肖伟, 王义天, 江思宏, 等, 2010. 南蒙古及邻区地质矿产简图及地形地貌特点. *地球学报*, 31(3): 473-484.
- 徐九华, 谢玉玲, 张巨华, 等, 2006. 大青山东段九龙湾银-多金属矿床的次生火山热液成因——流体包裹体证据. *岩石学报*, 22(6): 1735-1743.
- 张振亮, 黄智龙, 饶冰, 等, 2005. 会泽铅锌矿床成矿流体研究. *地质找矿论丛*, 20(2): 115-122.