

# 内蒙古呼扎盖吐钼矿床成矿流体特征及成矿机制

刘瑞斌<sup>1,2,3)</sup>, 柳振江<sup>4)</sup>, 宓奎峰<sup>4,5)</sup>, 李春风<sup>6)</sup>, 王建平<sup>4)</sup>

- 1) 中国地质科学院地质研究所, 北京, 100037; 2) 北京大学地球与空间科学学院, 北京, 100871;  
3) 山西工程技术学院地质与环境工程系, 山西阳泉, 045000;  
4) 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京, 100083;  
5) 中国地质调查局发展研究中心, 北京, 100037; 6) 核工业北京化工冶金研究院, 北京, 101149

**内容提要:**内蒙古呼扎盖吐钼矿床是得尔布干成矿带上新发现的一座斑岩型钼矿床, 钼矿体分布在燕山早期花岗岩闪长岩岩体内及其流纹岩接触带中, 矿床以辉钼矿化和黄铁矿化为主, 伴随有铅锌矿化和少量的黄铜矿化。成矿过程主要分为 4 个阶段: 硅化阶段、石英-辉钼矿阶段、石英-多金属硫化物阶段和石英-方解石阶段。流体包裹体可分为富液相包裹体、富气相包裹体、含子矿物的多相包裹体和含 CO<sub>2</sub> 的三相包裹体 4 种类型。以主成矿阶段为研究重点, 对不同成矿阶段(II→IV 阶段)矿脉中石英/方解石中的包裹体进行了显微测温 and 激光拉曼探针分析。结果显示: 石英-辉钼矿阶段, 包裹体均一温度主要集中在 280~400℃ 之间, 盐度变化范围在 2.57%~51.68%。该阶段富气相包裹体、含子矿物的多相包裹体和含 CO<sub>2</sub> 的三相包裹体共存, L 型包裹体液相成分主要为 H<sub>2</sub>O-NaCl, V 型包裹体气相成分除 H<sub>2</sub>O 为主外, 部分还含有 CO<sub>2</sub>, 含石盐子晶的三相包裹体, 检测到不透明子矿物黄铜矿的峰值。发育铅锌矿化和黄铜矿化的石英-多金属硫化物阶段, 包裹体均一温度集中在 180~280℃ 之间, 盐度变化范围为 0.18%~9.73%。成矿晚期石英-方解石脉中仅发育 L 型的气-液两相流体包裹体, 均一温度集中在 140~240℃ 之间, 盐度变化范围为 0.35%~7.17%。结合最新研究成果, 本文认为该矿床初始流体是中等盐度和密度的岩浆流体, 在主成矿阶段由于压力释放发生流体沸腾作用, 成矿流体系统的物理化学条件和氧化-还原环境发生骤变, 导致辉钼矿和其他硫化物等成矿物质在脉状裂隙中发生卸载沉淀。

**关键词:**呼扎盖吐; 斑岩型钼矿床; 流体包裹体; 成矿流体; 流体沸腾

东北地区是仅次于我国东秦岭-大别山钼成矿带的重要钼多金属资源基地(Huang Fan et al., 2011)。迄今为止, 在张广才岭-小兴安岭地区、吉黑褶皱带、大兴安岭南段和华北地块北缘一带先后发现并探明大中型钼矿床 70 余处(Chen Yanjing et al., 2012)。得尔布干成矿带位于内蒙古东北部地区, 是我国重要的多金属成矿带(She Hongquan et al., 2009)。在该成矿带内, 已探明和可进行开采的大中型斑岩铜(钼)矿床相对较少, 仅有乌奴格吐山、八大关以及八八一等(图 1)。近些年来新发现

太平川钼矿、呼扎盖吐钼矿床, 使该成矿带内斑岩型钼矿床的勘查和研究取得了新进展。

呼扎盖吐斑岩型钼矿床位于中亚造山带东段, 蒙古-鄂霍茨克缝合带东南缘的得尔布干成矿带内。区域上先后经历了前中生代期间古亚洲洋构造域的演化、中生代-新生代蒙古鄂霍茨克洋的闭合以及北东向环太平洋构造体系的叠加影响(Chen Yanjing et al., 2012; Wang Xi et al., 2016; Duan Mingxin et al., 2017; Zhao Yan et al., 2018)。近几年来, 随着众多学者对得尔布干成矿带内斑岩型

注: 本文为中国地质调查局地质调查项目(编号 1212011220923)、山西省煤基重大专项(编号 MC2016-02)、山西工程技术学院校级科研项目(编号 KYQD-02)和矿物岩石学应用型课程开发与建设项目(编号 2017101722)联合资助成果。

收稿日期: 2018-08-14; 改回日期: 2019-06-03; 网络发表日期: 2019-07-22; 责任编辑: 周健。

作者简介: 刘瑞斌, 男, 1990 年生。助教, 山西工程技术学院专任教师, 从事地质勘查与矿床学研究。中国地质科学院与北京大学联合培养在读博士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业。Email: liurb\_cugb@163.com。通讯作者: 柳振江, 男, 1983 年生。讲师, 主要从事矿床学教学与研究。Email: ljz@cugb.edu.cn。

**引用本文:**刘瑞斌, 柳振江, 宓奎峰, 李春风, 王建平. 2019. 内蒙古呼扎盖吐钼矿床成矿流体特征及成矿机制. 地质学报, 93(9): 2330~2347, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2019193.

Liu Ruibin, Liu Zhenjiang, Mi Kuifeng, Li Chunfeng, Wang Jianping. 2019. The characteristics of ore-forming fluid and mineralization mechanism in the Huzhagaitu porphyry Mo deposit, Inner Mongolia. Acta Geologica Sinica, 93(9): 2330~2347.



# 1 矿床地质特征

## 1.1 矿区地质概况

呼扎盖吐钼矿床地处海拉尔市和额尔古纳市中间“六一牧场”至“七一牧场”一带的草原腹地。矿区出露的地层主要是上泥盆统大民山组及第四系。大民山组是一套浅海相沉积碎屑岩夹酸性火山岩,岩性主要有砂质板岩、板岩、变质砂岩、片理化英安岩、流纹岩、流纹质凝灰岩等,矿区内地层呈北东走向,倾向 SE, 倾角  $50^{\circ} \sim 70^{\circ}$ 。第四系主要为松散堆积物,分布于矿区的南部和东部等沟谷低洼处。

区域上由于受 NE 向得尔布干大断裂和乌努尔-鄂伦春古缝合带的控制和影响,中生代以来形成一系列 NE 向或 NNE 向断裂及其次级断裂。在这种构造背景下,矿区内主要发育北东向和近南北向两组断裂。 $F_1$  断裂分布于矿区西部(图 2),断裂性质不明,推测其延伸长度约 7000m,走向  $25^{\circ} \sim 30^{\circ}$ ,倾向南东。 $F_2$  断裂为  $F_1$  断裂派生的次级构造,为张扭性断裂,走向近南北,长约 3600m;在断层西部有石英斑岩脉的贯入,断层东部见有构造角砾岩分布。

矿区出露燕山早期中酸性侵入岩,主要为花岗闪长岩和花岗斑岩,在矿区西南侧断层附近有石英斑岩脉的侵入。前人曾对矿区含矿岩体花岗闪长岩中的黑云母做了 K-Ar 同位素地质年龄的测定,得到的年龄值为 198 Ma,与辉钼矿的成矿年龄比较接近(Zhang Fujiang et al., 2013)。矿区内与成矿关系最为密切的是花岗闪长岩,分布在矿区中部,呈岩株状侵入到矿区泥盆系大民山组的流纹岩中,在岩体内及其与流纹岩接触带部位矿化较好,形成具有工业品位的钼矿体。该岩体出露面积约  $0.8 \text{ km}^2$ 。花岗斑岩呈小岩株状分布于矿区东南部,侵入到泥盆系大民山组砂岩-凝灰砂岩岩段,出露面积约  $0.016 \text{ km}^2$ ,呈北东向展布,该岩体蚀变和矿化都比较弱,为燕山早期第二阶段侵入的岩浆岩体。

## 1.2 矿体和矿石特征

钼矿体主要分布在燕山早期花岗闪长岩岩体内及其流纹岩接触带上,以含矿岩体为中心,矿体的分布形态总体上构成环状,划分为三个钼矿化带。I 号钼矿化带:分布于勘探区西北,呈北东向分布,位于 6~16 号勘探线。该带实控长 900~1000m,宽

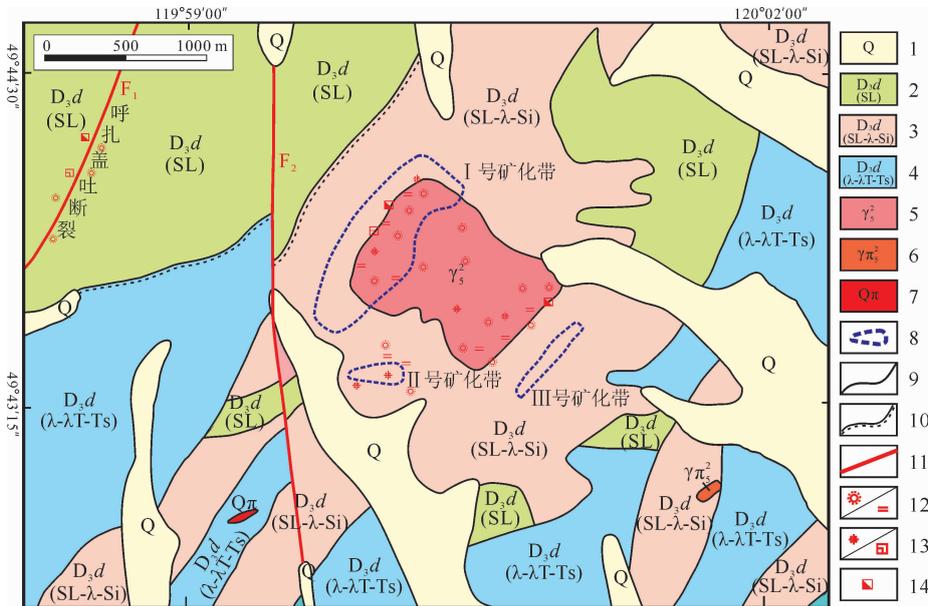


图 2 内蒙古呼扎盖吐钼矿床地质简图

Fig. 2 Simplified geological map of Huzhagaitu molybdenum deposit in Inner Mongolia

1—第四系沉积物;2—上泥盆统大民山组板岩;3—上泥盆统大民山组板岩、流纹岩、硅质岩和构造角砾岩;4—上泥盆统大民山组流纹岩、流纹质凝灰岩、凝灰砂岩和变质砂岩;5—燕山早期细粒花岗闪长岩;6—燕山早期花岗斑岩;7—石英斑岩脉;8—矿化带;9—地质界线;10—平行不整合界线;11—断层;12—硅化和绢云母化;13—云英岩化和萤石化;14—褐铁矿化

1—Quaternary sediments; 2—slate of Upper Devonian Damingshan Formation; 3—slate, rhyolite, silicstone and tectonic breccia of Upper Devonian Damingshan Formation; 4—rhyolite, rhyolitic tuff, tuff sandstone and metamorphic sandstone of Upper Devonian Damingshan Formation; 5—fine-grained granodiorite of Early Yanshan; 6—granite porphyry of Early Yanshan; 7—quartz porphyry vein; 8—mineralized zone; 9—geological boundary; 10—parallel unconformity boundary; 11—fault; 12—silicification and sericitization; 13—greisenization and fluoritization; 14—limonitization

400~700m,是矿区中最大的钼矿化带,带内已发现 4 条具有工业品位的钼矿体。Ⅱ号钼矿化带:分布于勘探区南部,近 NE 向分布,长度 1400m,宽度 400~700m,形态总体上西窄东宽。后续补充勘探工作中,在 21~24 号勘探线之间新发现 4 条铅锌矿体和 1 条铜矿体。Ⅲ号钼矿化带位于勘探区东南部位,呈 NE 向分布,实际控制长度 500~550m,宽 100~200m。

矿石类型以钼矿石为主。矿石矿物主要有黄铁矿、辉钼矿,含有少量的黄铜矿、闪锌矿、方铅矿等,次生矿物有褐铁矿、钼华等。脉石矿物主要有石英、方解石、金云母,此外还有绢云母、白云母、萤石和石膏等(图 3)。矿石结构主要为自形一半自形粒状结构、交代残余结构和镶嵌结构,矿石构造主要为脉状、网脉状、细脉状和团块状。

### 1.3 围岩蚀变与矿化

该矿床具有斑岩型铜钼矿床的蚀变特征,蚀变呈带状分布。大致可分为:硅化带、石英-绢云母化带。其中硅化带为内带,石英-绢云母化带为外带,各带之间呈渐变过渡(图 2)。岩体中发育大面积的硅化蚀变,远离岩体硅化逐渐减弱。由于岩浆期后热液蚀变作用的影响,云英岩化也较为发育。在蚀变的岩体中,长石普遍发育绢云母化,黑云母发育绢云母化和绿泥石化。碳酸盐化分布比较广泛,在岩体中和围岩中均有不同程度的存在,以脉状、细脉状和网脉状充填于岩石裂隙和节理中。

矿化见于花岗闪长岩及其流纹岩接触带部位,与蚀变分布范围基本一致。主要有辉钼矿化、黄铁矿化,其次为黄铜矿化、闪锌矿化、褐铁矿化和钼华等。蚀变与矿化关系密切,辉钼矿化和黄铁矿化主

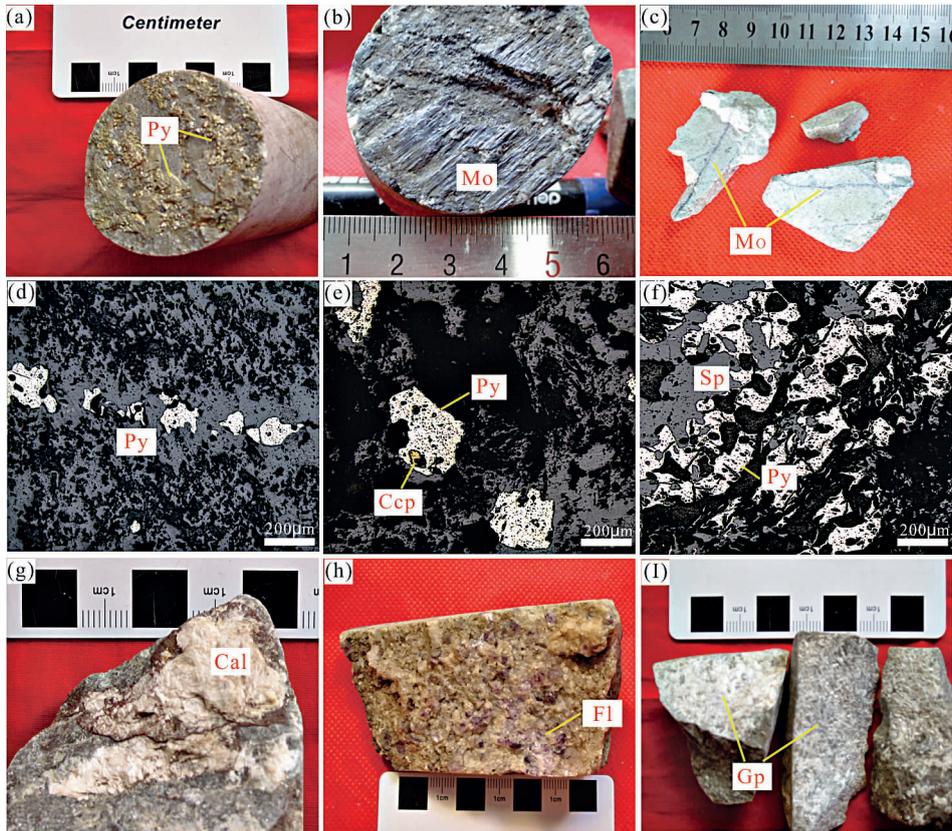


图 3 呼扎盖吐钼矿区主要矿物组成

Fig. 3 The major ore minerals in Huzhagaitu molybdenum deposit

(a) —黄铁矿呈自形、半自形晶粒状产出;(b) —沿节理面形成的薄膜状辉钼矿;(c) —细脉状辉钼矿矿石;(d) —黄铁矿细脉显微照片;(e) —黄铜矿分布在黄铁矿内部;(f) —闪锌矿交代黄铁矿;(g) —团块状方解石;(h) —具萤石化的石英脉;(i) —脉状石膏;Py—黄铁矿;Mo—辉钼矿;Ccp—黄铜矿;Sp—闪锌矿;Cal—方解石;Fl—萤石;Gp—石膏  
(a) —Pyrite occurs in the form of automorphic and semi-automorphic grains; (b) —thin film molybdenite occurs along the joint surface; (c) —fine veined molybdenite ore; (d) —microphotographs of pyrite veins; (e) —chalcopyrite distributes in the interior of pyrite; (f) —pyrite replaced by sphalerite; (g) —massive calcite; (h) —quartz veins with fluorite mineralization; (i) —vein gypsum; Py—pyrite; Mo—molybdenite; Ccp—chalcopyrite; Sp—sphalerite; Cal—calcite; Fl—fluorite; Gp—gypsum

要发育在石英-绢云母化带内,萤石化与辉钼矿化相伴,发育有萤石脉、辉钼矿萤石脉,脉体一般呈黄色、紫红色,少量呈灰色、蓝色。在钼矿石中还可可见黑钨矿、磁铁矿、黄铁矿分布。在地表由于氧化作用,形成褐铁矿化和钼华等。

#### 1.4 矿化期和矿化阶段划分

呼扎盖吐钼矿床以辉钼矿化和黄铁矿化为主,伴随有铅锌矿化和少量的黄铜矿化。根据矿床中圈定的不同矿体及其矿化情况、矿石组构特征、脉体相互穿插情况,将成矿过程划分为岩浆热液期和表生氧化期两个矿化期,其中岩浆热液期又可划分为4个矿化阶段(表1)。

表1 呼扎盖吐钼矿区主要矿物先后生成顺序表

Table 1 Main mineral paragenesis of the Huzhagaitu deposit

矿物	岩浆热液期				表生氧化期
	I阶段	II阶段	III阶段	IV阶段	
石英	————	————	————	————	
白云母	————	————	————	————	
磁铁矿	——				
黄铁矿	————	————	————	————	
绢云母	————	————	————	————	
绿泥石	————	————	————	————	
辉钼矿	————	————	————	————	
黑钨矿	——				
黄铜矿		————	————	————	
方铅矿			————	————	
闪锌矿			————	————	
萤石		————	————	————	
方解石		————	————	————	
石膏				————	
褐铁矿					————
钼华					————

(1)岩浆热液期。I硅化阶段:为岩浆期后热液交代初期,成矿温度较高,以硅化蚀变为主,矿体中心形成大面积硅化,在岩体边部与围岩接触带附近以发育脉状石英为主。本阶段黄铁矿化较弱,以稀疏浸染状分布于围岩中,被后期脉体穿插或相互切割。II石英-辉钼矿阶段:为主要的成矿阶段,该阶段矿物组合以石英-辉钼矿为主,伴随黄铁矿化,萤石化在该阶段也普遍出现。辉钼矿主要以脉状、细脉状和网脉状分布于钼矿石中(图3b~c),发育大量辉钼矿脉,其次为辉钼矿-石英脉(图4a~c)、辉钼矿-萤石脉。该阶段为大量辉钼矿形成阶段,主要发生在石英-绢云母化蚀变带,还有少量的黑钨矿生成。辉钼矿在矿石中与其他金属矿物的关系不密切,镜下见有极少量的黄铁矿与辉钼矿连晶,嵌布在早期形成的黄铁矿和磁铁矿中<sup>①</sup>。III石英-多金属硫化物阶段:以出现黄铁矿-闪锌矿-方铅矿-黄铜矿矿物组合为特征。该阶段在矿区北部I号钼矿化带

中以发育大量的黄铁矿化为主,石英-黄铁矿脉(图4d~e)分布广泛。沿石英-黄铁矿脉切片,在镜下可见黄铜矿呈乳滴状分布于黄铁矿中,闪锌矿交代黄铁矿现象(图3e~f)。该阶段黄铜矿与方铅矿、闪锌矿密切共生,呈乳滴状或散点状分布于闪锌矿中。在矿区II号钼矿化带中以发育大量的铅锌矿化和黄铜矿化为主,形成铅锌矿体和铜矿体,赋存于花岗闪长岩构造破碎带中。IV石英-方解石阶段:该阶段矿物组合以石英-方解石为主(图3g和图4f),发育弱黄铁矿化,在成矿晚期阶段也形成萤石、石膏等低温矿物组合(图3h~i)。

(2)表生氧化期。矿床中出露于地表的部分,由于外界风化淋滤作用,形成褐铁矿、钼华等表生氧化矿物。

## 2 样品采集与分析方法

由于地质勘探工作程度较低,本次流体包裹体研究的样品均采集于矿区北部的探槽和钻孔岩芯。其中发育辉钼矿化的石英脉样品(13-HZ-13A、13-HZ-13B、13-HZ-4)代表了主成矿期石英-辉钼矿阶段,发育大量黄铁矿-石英脉样品(13-HZ-ZK1、14-HZ-ZK54、14-HZ-ZK61)代表了钼矿化之后的石英-多金属硫化物阶段,方解石-石英脉、萤石-石英脉样品(13-HZ-6、14-HZ-ZK6、14-HZ-ZK25)代表了成矿晚期阶段。

包裹体岩相学观察和显微测温分析在中国地质大学(北京)地球科学与资源学院流体包裹体实验室完成。岩相学观察所用的仪器为德国ZEISS公司生产的Axioskop 40及Axiolab显微镜;显微测温所用的仪器为英国Linkam公司生产的MDSG600型冷热台,测温范围是-196~+600℃(测试精度及稳定性实验理论值为0.1℃)。降温的速率一般保持在5~10℃/min,升温速率一般保持在5~20℃/min。接近冰点、CO<sub>2</sub>相变点温度时温度控制在0.1~0.5℃/min,读数误差为±0.1℃;在接近均一相时升温速率控制在1~5℃/min,读数误差为±1℃。在实验的过程中,采用冷冻—均一—测温的程序,先将温度降至-120℃并持续1min时间(保证包裹体中流体全部结冰),再逐渐升温至0℃冰晶全部熔化,观察其冰点温度;通过升温,观察包裹体部分均一温度(含CO<sub>2</sub>三相包裹体)和完全均一温度。气液两相包裹体的盐度根据流体包裹体冷冻法冰点与盐度关系换算表(Bodnar, 1993)查出,含子晶矿物包裹体的盐度,根据其NaCl晶体熔化温度和盐度的关系

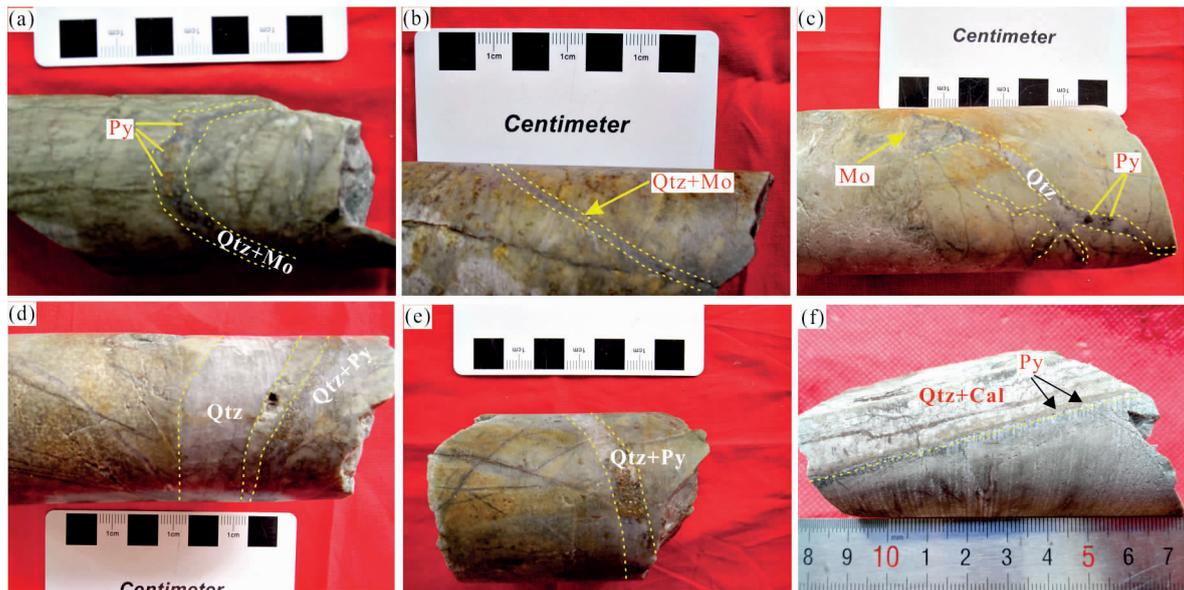


图 4 呼扎盖吐钼矿床不同成矿阶段及矿物组合

Fig. 4 The different stages and mineral assemblages of Huzhagaitu molybdenum deposit

(a) — II 阶段石英—辉钼矿脉, 含少量黄铁矿; (b) — II 阶段辉钼矿呈浸染状分布于石英细脉中; (c) — II 阶段石英—辉钼矿脉中, 黄铁矿呈零星浸染状分布; (d~e) — III 阶段石英—多金属硫化物中的石英—黄铁矿脉; (f) — IV 阶段发育弱黄铁矿化的石英—方解石脉; Qtz—石英; Py—黄铁矿; Mo—辉钼矿; Cal—方解石

(a) — Quartz-molybdenite vein with a small amount of pyrite (stage II); (b) — molybdenite is disseminated in quartz vein (stage II); (c) — a little pyrite is disseminated in quartz-molybdenite vein (stage II); (d~e) — quartz-pyrite vein in quartz-polymetallic sulphide stage (stage III); (f) — quartz-calcite vein with a small amount of pyritization (stage IV); Qtz—quartz; Py—pyrite; Mo—molybdenite; Cal—calcite

式 (Hall et al., 1988; Liu Bin et al., 1987; Liu Bin, 2001) 计算得到, 含  $\text{CO}_2$  三相包裹体的盐度利用  $\text{CO}_2$  笼合物熔化和盐度关系表 (Collins, 1979) 查出。

单个包裹体成分的激光拉曼显微探针分析工作一部分在中国地质科学院国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室完成, 其余部分在中国地质大学 (北京) 矿床教研室激光拉曼实验室完成。挑选出主成矿阶段和成矿晚期的 5 件石英样品, 在核工业北京地质研究院分析测试中心进行氢氧同位素分析, 仪器型号为 MAT-253 质谱仪, 测试结果精度优于  $\pm 0.2\text{‰}$ 。氢同位素分析采用爆裂法, 首先去除矿物中的吸附水和次生包裹体, 再继续加热, 使原生流体包裹体爆裂, 提取其中的水蒸气与锌粒反应置换出  $\text{H}_2$ , 进行质谱分析测定; 氧同位素的测定利用  $\text{BrF}_5$  法, 使萃取得到的氧气与碳棒发生反应生成  $\text{CO}_2$ , 供同位素分析。

### 3 流体包裹体特征

#### 3.1 流体包裹体岩相学特征

流体包裹体岩相学特征是包裹体研究的第一步, 是决定包裹体测试数据正确性和解释合理性的

基础和前提 (Lu Huanzhang et al., 2004)。各成矿阶段样品寄主矿物 (脉石英和方解石) 中发育大量的流体包裹体, 类型丰富, 形态多样 (图 5)。根据室温镜下观察和显微测温过程中的相态变化, 结合包裹体成分分析结果, 将该斑岩型钼矿中流体包裹体划分为 4 种类型。

L 型富液相  $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$  型流体包裹体, 常温下由气液两相组成, 气泡较小, 无色透明, 气相体积一般在  $5\% \sim 20\%$ , 少数在  $35\% \sim 40\%$ 。包裹体形态主要呈负晶形、椭圆状、多边形、长管状、不规则状等。加热时气泡较小的均一到液相, 少数气相体积在  $40\%$  左右的达到临界均一。

V 型富气相  $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$  型流体包裹体, 室温下为两相, 由气体及少量液体组成, 气泡较大, 一般气相体积在  $50\%$  以上, 少数为纯气相包裹体。包裹体形态一般呈近圆形、椭圆状、不规则状等, 大小在  $8 \sim 18\mu\text{m}$ 。加热时气相体积在  $50\% \sim 75\%$  的达到临界均一, 气相体积在  $80\%$  以上的一般均一到气相。个别纯气相包裹体在冷冻过程中温度降至室温 (约  $27^\circ\text{C}$ ) 以下时, 单相包裹体成为两相, 根据其相变温度估计应为纯  $\text{CO}_2$  包裹体。

S 型含子晶  $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$  型多相流体包裹体, 由

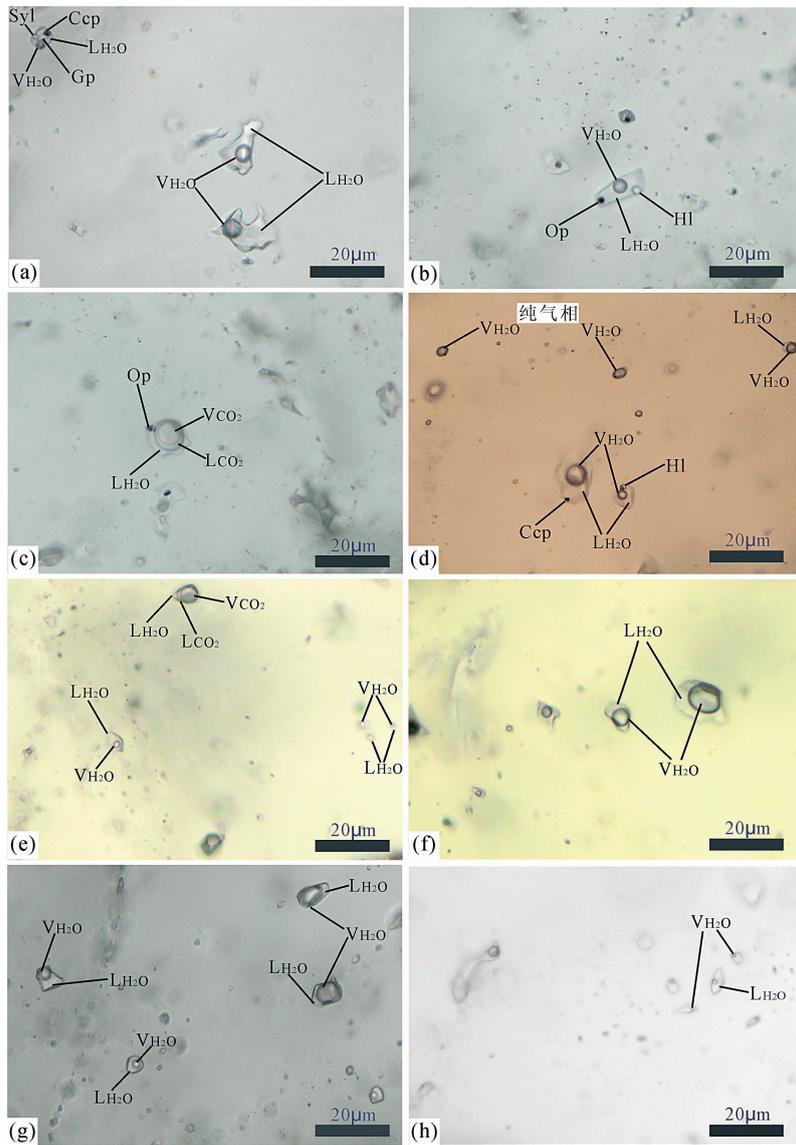


图5 呼扎盖吐钼矿床典型流体包裹体显微照片

Fig. 5 Photomicrographs of typical fluid inclusions from the Huzhagaitu molybdenum deposit

(a~b)—II阶段辉钼矿石英脉中含子晶矿物的多相包裹体与气液两相包裹体共存,不透明矿物可能为黄铜矿,透明矿物主要为石盐颗粒,偶见钾盐和硬石膏;(c)—II阶段辉钼矿石英脉中富气相的 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-NaCl}$ 型流体包裹体,具双眼皮构造;(d)—II阶段辉钼矿石英脉中富气相的包裹体和纯气相包裹体与含子晶多相包裹体共存;(e)—III阶段黄铁矿石英脉中 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-NaCl}$ 型流体包裹体与气液两相包裹体共存;(f~g)—III阶段黄铁矿石英脉中富气相包裹体和富液相包裹体;(h)—IV阶段方解石或石英脉中大多数为富液相的气液两相包裹体; $\text{LH}_2\text{O}$ —液相水; $\text{VH}_2\text{O}$ —气相水; $\text{LCO}_2$ —液相 $\text{CO}_2$ ; $\text{VCO}_2$ —气相 $\text{CO}_2$ ; $\text{Syl}$ —钾盐; $\text{Gp}$ —石膏; $\text{Op}$ —不透明子矿物; $\text{Ccp}$ —黄铜矿; $\text{Hal}$ —石盐

(a~b)—Multiphase inclusions containing daughter minerals in quartz veins (stage II) coexist with gas-liquid two-phase inclusions, opaque minerals may be chalcopyrite, transparent minerals are mainly halite particles, sylvine and anhydrite are found occasionally; (c)—rich-vapor phase  $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-NaCl}$  type inclusions with double eyelid structure in quartz veins (stage II); (d)—vapor-rich phase inclusions and pure gas phase inclusions coexist with multiphase inclusions containing daughter minerals in quartz veins (stage II); (e)— $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-NaCl}$  type inclusions coexist with gas-liquid two-phase inclusions in quartz veins (stage III); (f~g)—rich-vapor inclusions and rich-liquid inclusions in the veins (stage III); (h)—most inclusions in the veins (stage IV) are rich-liquid inclusions;  $\text{LH}_2\text{O}$ —liquid phase  $\text{H}_2\text{O}$ ;  $\text{VH}_2\text{O}$ —vapor phase  $\text{H}_2\text{O}$ ;  $\text{LCO}_2$ —liquid phase  $\text{CO}_2$ ;  $\text{VCO}_2$ —vapor phase  $\text{CO}_2$ ;  $\text{Syl}$ —sylvine;  $\text{Gp}$ —gypsum;  $\text{Op}$ —opaque metallic mineral;  $\text{Ccp}$ —chalcopyrite;  $\text{Hal}$ —halite

气相、液相和一个或多个固体子矿物构成。根据子矿物种类,分为 $\text{S}_1$ 型和 $\text{S}_2$ 型包裹体。 $\text{S}_1$ 型包裹体中主要为透明子矿物,常见立方状石盐子晶,晶体较大

者其边长可达 $6\mu\text{m}$ ,偶见浑圆状钾盐子晶和长板状的硬石膏子晶。包裹体形态主要为四边形、椭圆状和不规则状,大小为 $4\sim 32\mu\text{m}$ ,一般在 $12\sim 18\mu\text{m}$ ,

气相百分数普遍约为 10%~15%。加热时该类包裹体普遍气泡先消失,石盐或钾盐子晶后消失,最终均一为液相。 $S_2$ 型包裹体中主要为不透明子矿物,矿物主要呈立方体自形晶或浑圆状(似草莓状),激光拉曼测试中只检测到黄铜矿的特征峰值。包裹体形态呈椭圆状、近三角状和不规则状等,大小为 12~20 $\mu\text{m}$ ,气相百分比在 45%~80%之间较多,一般气泡较大,颜色较深。个别流体包裹体石盐子晶中包含有不透明子矿物,这可能是在成矿早期捕获了非均匀流体相中不透明子矿物,流体中过饱和溶液中的盐类以此为晶核结晶生长的结果。加热时不透明子矿物消失的温度高于本次实验设置的允许范围(最高 500 $^{\circ}\text{C}$ ),因此以气泡消失或含石盐子晶消失为该类包裹体达到均一的标志。

C型富气相  $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-NaCl}$  型流体包裹体,由气相  $\text{CO}_2$ 、液相  $\text{CO}_2$  和液相水组成,形成“双眼皮”构造。气泡体积较大,呈近圆形,约占整个包裹体的 50%~60%,颜色较暗。包裹体形态呈椭圆形和不规则形,大小在 18 $\mu\text{m}$  左右,有的可达 20 $\mu\text{m}$  以上。个别 C型包裹体中还含有不透明子矿物,加热时均一到气相。Chen Yanjing et al. (2007) 提出,矿床发育特殊的含子晶的  $\text{CO}_2$  包裹体,可作为大陆碰撞造山带成矿流体系统下的标志之一,这一特殊岩相学特征,也为我们后续探索该矿床形成的大地构造背景给予相关提示。

不同成矿阶段流体包裹体具有不同的特征及其组合类型:① 石英-辉钼矿阶段石英脉中的流体包裹体类型以 L型、V型、 $S_1$  和  $S_2$  型为主(图 5a~b)。其中 L型包裹体数量最多,气相比一般在 5%~45%。V型包裹体个体发育普遍比 L型包裹体稍大,长轴一般都在 10 $\mu\text{m}$  以上,气相比一般在 50%~90%,相比其他阶段富气相的气-液两相包裹体,气体充填度明显较高,气泡较大的一般都均一到气相。S型包裹体中含有石盐、钾盐、硬石膏、黄铜矿等子矿物,并与不同气液比的 L型、V型包裹体成群出现(图 5a 和图 5d),其均一温度相近,但均一方式各异,显示出流体的沸腾现象。在镜下进行岩相学观察时还看到少量富气相  $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-NaCl}$  型流体包裹体(图 5c)。② 石英-多金属硫化物阶段石英-黄铁矿脉中主要发育 L型流体包裹体、少量的 V型流体包裹体和 C型富气相  $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-NaCl}$  型流体包裹体(图 5e~g)。L型流体包裹体气相比一般在 10%~35%。与主成矿阶段相比,该矿化阶段 V型流体包裹体发育数量明显减少。 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-NaCl}$  型

流体包裹体在显微测温时仅观察到一例。③ 石英-方解石阶段,在寄主矿物石英或方解石脉中包裹体类型简单,仅发育 L型气-液两相流体包裹体。该阶段发育的流体包裹体个体一般较小,长轴一般在 2~10 $\mu\text{m}$  以内,气相比一般在 3%~20%(图 5h)。

### 3.2 均一温度和盐度

与其他斑岩型矿床相似,呼扎盖吐钼矿床流体包裹体的均一温度分布范围较大,显微测温结果及其相关参数见表 2。

根据前人对斑岩型矿床不同成矿阶段的划分及其对每个成矿阶段流体包裹体均一温度、盐度的研究,成矿斑岩石英斑晶中的流体包裹体和成矿初始阶段含矿石英脉中的流体包裹体,分别捕获于岩浆结晶的过程中和岩浆期后的初始热液中,具有高温、高盐度、氧逸度高和密度大等特点。然而最近的研究结果表明,斑岩矿床的初始流体是中等盐度和密度的岩浆流体(Lu Huanzhang et al., 2016; Tang Pan et al., 2017)。该矿床钾长石化不发育,本次研究中没有采集到成矿斑岩和成矿初期第 I 阶段的石英脉样品,仅对矿区北部 I 号钼矿化带石英-辉钼矿阶段、石英-多金属硫化物阶段和石英-方解石阶段(II→IV 阶段)石英或方解石脉中的包裹体进行了测温。本文对不同成矿阶段的 9 件样品进行了测试,共获得有效数据 184 条。均一温度主要集中在 280~400 $^{\circ}\text{C}$ 、180~280 $^{\circ}\text{C}$ 、140~240 $^{\circ}\text{C}$  三个区间里(图 6),现分述如下:

石英-辉钼矿阶段石英脉中 L型流体包裹体均一温度变化范围在 221~432 $^{\circ}\text{C}$ ,盐度变化在 2.57%~20.67%。大多数 L型流体包裹体加热最终均一到液相,少数部分达到临界均一。该阶段 V型包裹体的均一温度变化范围在 273~431 $^{\circ}\text{C}$ ,盐度变化在 5.71%~16.34%。 $S_1$ 型流体包裹体在加热过程中一般都是气泡先消失,石盐子晶后熔化,少部分出现子晶先于气泡消失的现象,均一温度变化范围在 265~437 $^{\circ}\text{C}$ ,盐度变化在 35.65%~51.68%; $S_2$ 型流体包裹体均一温度变化范围在 354~487 $^{\circ}\text{C}$ ,盐度变化在 3.23%~16.71%。总体来看,该阶段流体包裹体均一温度范围在 221~437 $^{\circ}\text{C}$ ,其峰值主要集中在 280~400 $^{\circ}\text{C}$  之间(图 6a);盐度变化范围在 2.57%~51.68%,包裹体盐度峰值主要集中在 10%~14%与 40%~46%两个区间(图 6b)。整体上显示出该阶段成矿流体具有高温高盐度的特征。

石英-多金属硫化物阶段石英-黄铁矿脉中 L型流体包裹体均一温度变化范围在 175~305 $^{\circ}\text{C}$ ,盐度

变化在 0.18%~8.28%。V 型包裹体的均一温度变化范围在 191~312℃, 盐度变化在 2.41%~9.73%。CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O-NaCl 型流体包裹体在显微测温时仅观察到一例, 测试得到笼合物熔化的温度和部分均一温度分别为 8.6℃ 和 29.3℃, 其盐度为 2.77%, 完全均一温度为 314℃。总体来看, 该阶段流体包裹体均一温度范围为 175~314℃, 温度变化峰值主要集中在 180~280℃ 之间(图 6c); 盐度变化范围为 0.18%~9.73%, 峰值主要集中在 2%~6%

之间(图 6d)。整体上显示出该阶段成矿流体具有中温低盐度的特征。

成矿晚期以发育大量的碳酸盐化和萤石化蚀变为特征, 该阶段石英-方解石脉中发育大量富液相的气-液两相流体包裹体, 未见 V 型包裹体。包裹体均一温度范围为 126~346℃, 主要集中在 140~240℃ 之间(图 6e); 盐度变化范围为 0.35%~7.17%, 主要集中在 2%~4% 之间(图 6f)。整体上显示出该阶段成矿流体具有低温低盐度的特征。

表 2 呼扎盖吐钼矿床流体包裹体显微测温结果

Table 2 Micro-thermometric data of fluid inclusions from the Huzhagaitu molybdenum deposit

阶段	样品编号	类型(个数)	长轴(μm)	相比(气相)	冰点/笼合物融化温度(℃)	部分均一温度(℃)	子晶消失温度(℃)	气泡消失温度(℃)	完全均一温度(℃)	盐度(%)	密度(g/cm <sup>3</sup> )	均一压力(MPa)
II	13-HZ-13A	L(17)	2~24	3%~48%	-17.6~-1.8	28.6	306~420	178~395	232~432	3.06~20.67	0.629~0.978	2.8~35.2
		V(7)	10~16	50%~90%	-12.4~-7.7				326~431	11.34~16.34	0.663~0.843	10.9~33.0
		S <sub>1</sub> (8)	4~32	2%~65%					318~420	38.63~49.68	1.002~1.095	7.3~22.0
		S <sub>2</sub> (2)	12~20	5%~40%	-12.8~-4.4				354~410	7.02~16.71	0.694~0.742	16.6~27.2
		C(1)	18	80%	5.6				432	8.03	—	—
	13-HZ-13B	L(12)	8~34	8%~45%	-14.1~-5.1		265~386	148~281	221~402	8.00~17.87	0.688~0.965	2.2~26.2
		V(5)	10~24	48%~90%	-8.9~-3.5				273~360	5.71~12.73	0.662~0.860	5.4~17.9
		S <sub>1</sub> (4)	10~16	8%~15%					265~386	35.65~45.95	1.085~1.100	3.5~15.0
	13-HZ-4	L(13)	4~14	3%~45%	-15.8~-1.5		265~437	204~312	271~397	2.57~19.29	0.682~0.866	5.5~25.5
		V(2)	8~10	60%~80%	-8.4~-7.9				377~412	11.58~12.16	0.670~0.712	20.8~29.1
S <sub>1</sub> (7)		8~16	5%~15%		312~437				35.65~51.68	1.053~1.103	7.2~22.7	
III	14-HZ-ZK1	L(11)	2~20	10%~35%	-4.0~-0.1				175~305	0.18~6.45	0.777~0.916	0.9~8.9
		V(3)	6~24	65%~80%	-6.4~-1.4				191~312	2.41~9.73	0.802~0.921	1.2~9.5
	L(17)	4~14	10%~35%	-5.3~-2.1	192~269				3.55~8.28	0.822~0.926	1.3~5.2	
	14-HZ-ZK61	L(24)	6~22	10%~35%	-4.7~-0.3				178~272	0.53~7.45	0.819~0.920	0.9~5.5
		V(1)	10	45%	-2.8				247	4.65	0.846	3.6
C(1)	24	40%	8.6	29.3	314	2.77	—	—				
IV	13-HZ-6	L(21)	2~10	3%~45%	-4.1~-0.3			152~346	0.53~6.59	0.607~0.925	0.5~15.7	
	14-HZ-ZK25	L(14)	4~30	5%~20%	-3.4~-0.2			158~269	0.35~5.56	0.814~0.937	0.6~5.3	
	14-HZ-ZK6	L(14)	2~6	8%~30%	-4.5~-0.7			126~237	1.22~7.17	0.858~0.976	0.3~3.1	

### 3.3 均一压力与密度

根据测出的包裹体的均一温度和盐度数据, 可以计算出流体包裹体的密度与均一压力。气-液两相流体包裹体密度与压力的计算使用 Duan Zhenhao et al. (2006) 和 Mao Shide et al. (2008, 2011) 开发的在线计算模型程序 (Calculation Site of Geochem-Model.org) 进行处理, 与 FLINCOR 软件计算结果具有一致性 (Brown, 1989), 数据结果可靠。含石盐子晶的 S<sub>1</sub> 型流体包裹体的密度计算与压力估算使用 Steele-Macinnis et al. (2012) 开发的软件进行数据处理。

就不同类型的流体包裹体而言, S<sub>1</sub> 型流体包裹

体的密度在 1.002~1.103 g/cm<sup>3</sup>, 平均值为 1.079 g/cm<sup>3</sup>, 压力在 3.5~22.7MPa, 平均值为 12.6MPa, 密度与压力的数值相对集中。V 型流体包裹体的密度相对集中, 压力相对分散。主成矿期石英-辉钼矿阶段发育的 V 型包裹体的密度在 0.714~0.860 g/cm<sup>3</sup>, 平均值为 0.736 g/cm<sup>3</sup>, 压力为 5.6~34.0MPa, 平均值为 19.6MPa; 辉钼矿化后的石英-多金属硫化物阶段发育的 V 型包裹体密度为 0.802~0.921 g/cm<sup>3</sup>, 平均值为 0.862 g/cm<sup>3</sup>, 压力在 1.2~9.5MPa, 平均值为 4.03MPa。可以看出随着成矿温度的下降, 富气的流体包裹体发育数量减少, 流体的密度逐渐变大, 压力明显降低。L 型流体包裹

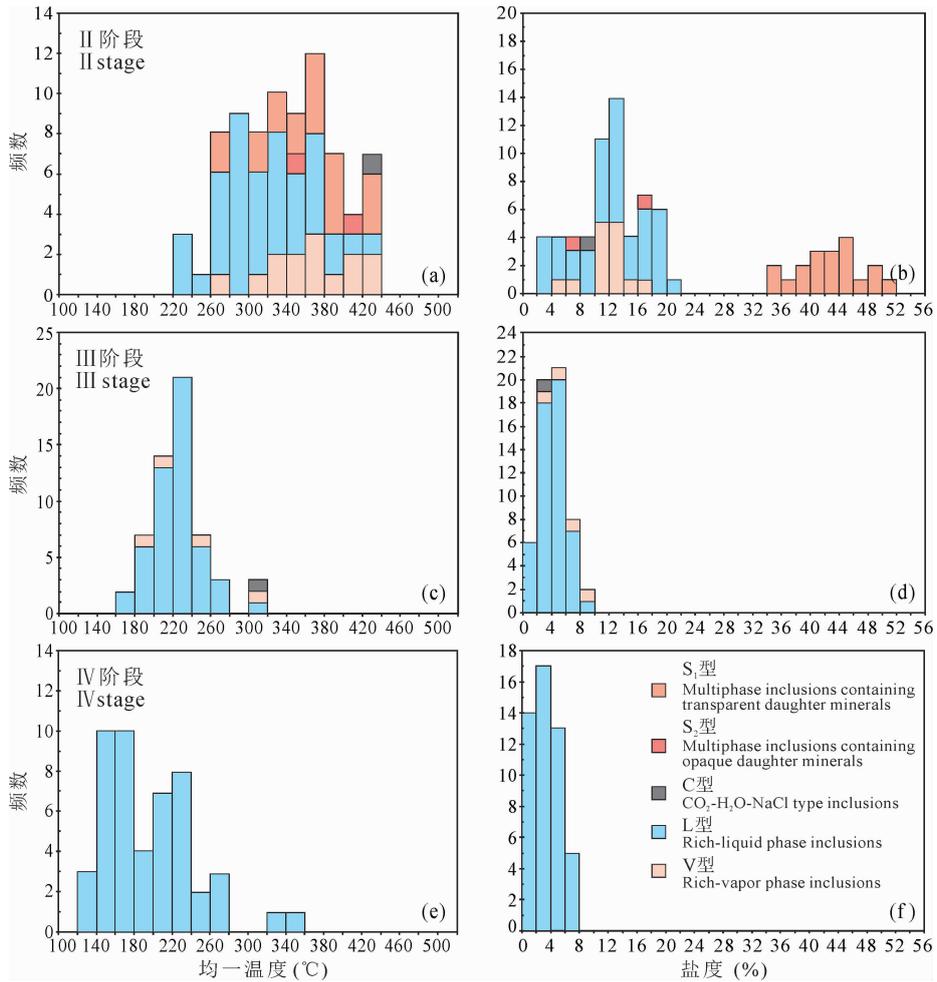


图 6 呼扎盖吐斑岩型钼矿床不同阶段流体包裹体均一温度、盐度分布直方图

Fig. 6 Histograms of homogenization temperatures and salinities of fluid inclusions from the Huzhagaitu molybdenum deposit (a~b)—II 阶段辉钼矿石英脉中含子晶矿物的多相包裹体、气液两相包裹体、C 型包裹体均一温度直方图和盐度直方图; (c~d)—III 阶段黄铁矿石英脉中富气相包裹体、富液相包裹体和少量 C 型包裹体均一温度直方图和盐度直方图; (e~f)—IV 阶段方解石或石英脉中富液相的气液两相包裹体均一温度直方图和盐度直方图

(a~b)—Homogeneous temperature histogram and salinity histogram of multiphase inclusions containing daughter minerals, gas-liquid two-phase inclusions, and C-type inclusions in quartz-molybdenite veins (stage II); (c~d)—homogeneous temperature histogram and salinity histogram of rich-vapor inclusions, rich-liquid inclusions, and a small amount of C-type inclusions in quartz-pyrite veins (stage III); (e~f)—homogeneous temperature histogram and salinity histogram of rich-liquid inclusions in quartz veins or calcite veins (stage IV)

体密度和压力的数值相对分散,分布的区间范围比较广。主成矿期石英-辉钼矿阶段 L 型流体包裹体的密度为  $0.629 \sim 0.978 \text{ g/cm}^3$ , 平均值为  $0.818 \text{ g/cm}^3$ , 压力为  $2.2 \sim 35.2 \text{ MPa}$ , 平均值为  $11.2 \text{ MPa}$ ; 石英-多金属硫化物阶段和石英-方解石阶段 L 型流体包裹体的密度在  $0.607 \sim 0.976 \text{ g/cm}^3$ , 大多数包裹体的密度接近于  $1.0 \text{ g/cm}^3$ , 压力在  $0.24 \sim 15.67 \text{ MPa}$ , 相比主成矿期压力降低。

就不同成矿阶段的流体包裹体而言,主成矿期石英-辉钼矿(II)阶段成矿温度较高,发育的包裹体类型较多,密度与压力的数值分散。包裹体密度在

$0.629 \sim 1.103 \text{ g/cm}^3$ , 平均值为  $0.865 \text{ g/cm}^3$ , 压力在  $2.8 \sim 35.2 \text{ MPa}$ , 主要集中在  $5 \sim 22 \text{ MPa}$ , 平均值为  $13.3 \text{ MPa}$ 。石英-多金属硫化物(III)阶段发育的流体包裹体密度在  $0.777 \sim 0.926 \text{ g/cm}^3$ , 平均值为  $0.868 \text{ g/cm}^3$ , 压力在  $0.9 \sim 9.5 \text{ MPa}$ , 平均值为  $2.8 \text{ MPa}$ ; 与主成矿期相比流体的密度值较为接近, 但压力明显降低。石英-方解石(IV)阶段发育的流体包裹体密度在  $0.607 \sim 0.976 \text{ g/cm}^3$ , 平均值为  $0.886 \text{ g/cm}^3$ , 压力在  $0.3 \sim 15.7 \text{ MPa}$ , 平均值为  $2.2 \text{ MPa}$ 。从整个矿床形成的过程来看,随着成矿温度的下降,II → IV 阶段成矿流体的密度逐渐增大,成

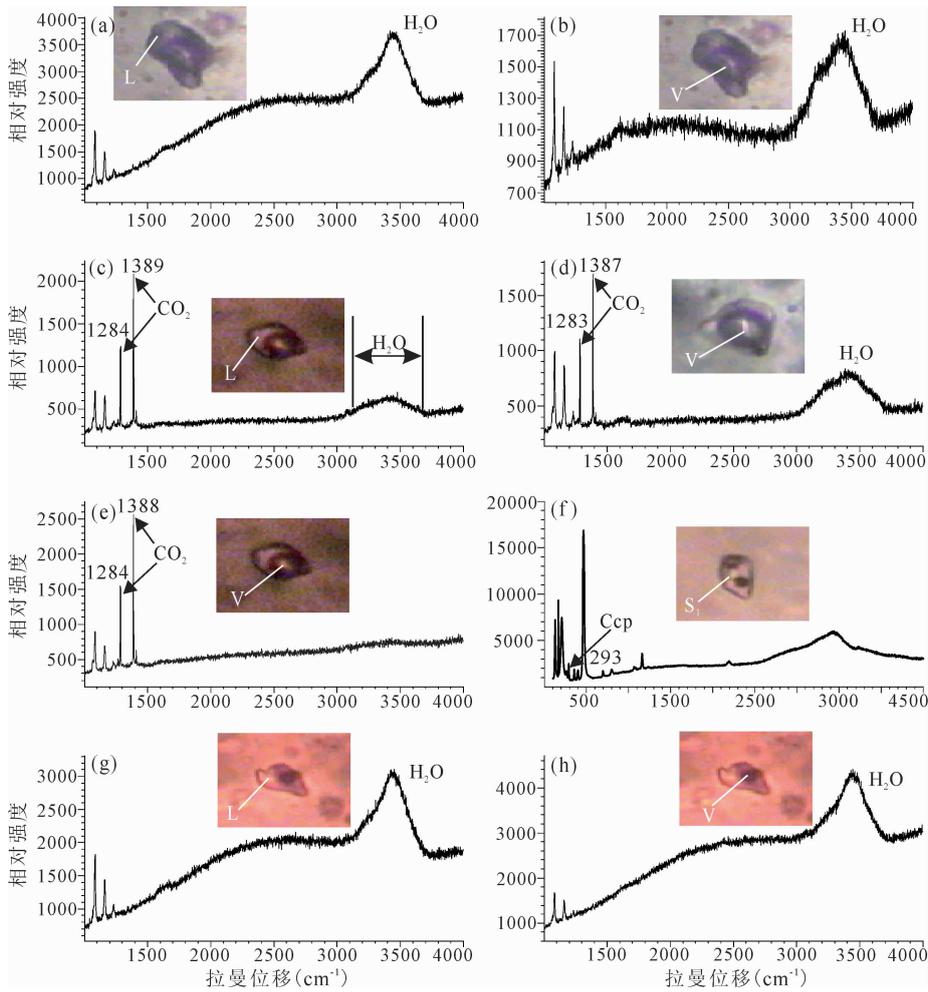


图7 呼扎盖吐钼矿床流体包裹体激光拉曼图谱

Fig. 7 Laser Raman spectra of fluid inclusions from the Huzhagaitu molybdenum deposit

(a~d)—主成矿期流体包裹体的气、液相成分检测出 H<sub>2</sub>O 和 CO<sub>2</sub>; (e)—主成矿期流体包裹体气相成分只检测出 CO<sub>2</sub> 成分; (f)—含石盐子晶的多相包裹体中检测到黄铜矿的峰值; (g、h)—成矿晚期流体包裹体液相和气相成分主要为 H<sub>2</sub>O

(a~d)—H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> spectrum peak was detected in vapor and liquid phase of fluid inclusions in the major ore-forming period; (e)—CO<sub>2</sub> spectrum peak was detected in vapor phase of fluid inclusions in the major ore-forming period; (f)—characteristic peak of chalcopyrite was detected in multiphase inclusions containing opaque mineral crystals; (g, h)—vapor phase and liquid phase components of fluid inclusions in the late mineralization stage are mainly H<sub>2</sub>O

矿压力不断下降。

### 3.4 激光拉曼探针分析

本次研究对呼扎盖吐钼矿床主成矿期石英-辉钼矿(Ⅱ)阶段和成矿晚期石英-方解石(Ⅳ)阶段不同类型的流体包裹体进行了激光拉曼探针分析,其光谱分析如图7所示。

石英-辉钼矿阶段主要对L型、V型和S型流体包裹体气、液、固三相做了详细的激光拉曼显微探针分析。大多数L型流体包裹体液相中显示出明显的H<sub>2</sub>O峰(图7a),部分流体包裹体液相中还检测出CO<sub>2</sub>成分(图7c特征峰值为1284 cm<sup>-1</sup>和1389 cm<sup>-1</sup>);气相成分主要为H<sub>2</sub>O和CO<sub>2</sub>(图7b、d),部

分包裹体气相成分只检测到CO<sub>2</sub>的峰值(图7e)。V型包裹体气相成分主要为H<sub>2</sub>O和CO<sub>2</sub>。含石盐子晶的三相包裹体,对其中不透明矿物进行激光拉曼显微探针分析,检测到黄铜矿矿物峰值(Cpy, 293 cm<sup>-1</sup>)(图7f)。这些表明主成矿期成矿流体发生沸腾作用,为含CO<sub>2</sub>等气体的高盐度水溶液。

石英-方解石阶段主要发育L型流体包裹体,对其中的气、液两相做了激光拉曼显微探针分析,液相和气相成分中只检测到H<sub>2</sub>O峰(图7g、h)。在经过主成矿期大量矿物质的沉淀和CO<sub>2</sub>气体的释放后,成矿晚期流体成分较为简单,主要为低盐度的水溶液。

### 4 氢、氧同位素分析

呼扎盖吐钼矿床不同成矿阶段石英单矿物的氢、氧同位素测试结果见表 3。从表中可以看出,测试结果中与矿化有关的石英脉样品中  $\delta D_{V-SMOW}$  值为  $-125.0\text{‰} \sim -107.3\text{‰}$ ,极差为  $17.7\text{‰}$ ,平均值  $114.68\text{‰}$ ;  $\delta O_{V-SMOW}$  值在  $9.6\text{‰} \sim -15.1\text{‰}$ ,极差为

$5.5\text{‰}$ ,平均值  $13.14\text{‰}$ 。依据石英-水之间的同位素平衡分馏公式:  $1000 \ln \alpha_{\text{石英-水}} \approx \delta O_{\text{石英}} - \delta O_{\text{水}} = 3.38 \times 10^6 / T^2 - 3.40$ ,可以计算出相应平衡体系下热液流体中  $\delta O_{\text{水}}$  的值 (Clayton et al., 1972)。计算时各个样品采用的温度和对应的  $\delta^{18}O_{\text{水}}$  值见表 3,呼扎盖吐钼矿床中成矿流体  $\delta^{18}O_{\text{水}}$  的值在  $2.08\text{‰} \sim 7.29\text{‰}$ ,极差为  $5.21\text{‰}$ ,平均值  $3.68\text{‰}$ 。

表 3 呼扎盖吐钼矿床不同成矿阶段石英中 H-O 同位素组成

Table 3 H-O isotopic composition of quartz in different ore-forming stages in the Huzhagaitu molybdenum deposit

样号	测试矿物	阶段	温度 (°C)	矿物检测值 (‰)		计算流体值 (‰)	
				$\delta D_{V-SMOW}$	$\delta^{18}O_{V-SMOW}$	$\delta D_{V-SMOW}$	$\delta^{18}O_{\text{水}}$
13-HZ-4	石英	II	322.0	-125.0	9.6	-125.0	3.46
13-HZ-13	石英	II	335.9	-118.9	13.0	-118.9	7.29
14-HZ-ZK56	石英	IV	198.1	-113.8	15.1	-113.8	3.28
14-HZ-ZK60	石英	IV	198.1	-107.3	13.9	-107.3	2.08
14-HZ-ZK62	石英	IV	198.1	-108.4	14.1	-108.4	2.28

注: II—石英-辉钼矿阶段; IV—石英-方解石阶段。

将计算得到的成矿流体中  $\delta^{18}O_{\text{水}}$  的值和  $\delta D_{V-SMOW}$  的值投影在  $\delta D-\delta^{18}O$  关系图解(图 8)中:主成矿期石英-辉钼矿阶段的样品一件分布在岩浆水的正下方,另一件位于岩浆水范围的左下方,说明在主成矿阶段成矿流体以岩浆来源为主外,可能已经混合了部分大气降水。成矿晚期石英-方解石阶段的样品均落于岩浆热液与大气降水之间的区域,显示出二者混合的特征,并有向大气降水方向逐渐漂移的趋势,说明随着成矿流体的不断演化,大气降水混入的比例有所增加。

单一来源流体的成矿作用一般很少发生,成矿流体一般都是由几种不同来源的流体相互混合,在一定的地质作用下形成的 (Xiao Rongge et al., 2001)。在岩浆侵入区域,由岩浆活动提供的热源而导致的对流系统对成矿流体的形成更为重要,而且与成矿关系密切的岩浆热液,从广义上讲不仅包括了岩浆结晶分异晚期析出的流体相和热水溶液,也包括了在新的平衡体系下与岩体发生反应的围岩中的热流体 (Fei Hongcai et al., 2002; Xiao Rongge et al., 2004)。将 II 阶段与 IV 阶段石英中氢、氧同位素的投影点,落于水-岩交换过程氢、氧同位素组成演化模式图中(图 9),可看出成矿热液中流体的 H-O 同位素的组成与我国内蒙古、黑龙江地区的大气降水的演化曲线较为协调 (Chen Zhensheng et al., 1992; Chen Zhensheng, 1997),并且水/岩比值变化较大,说明在成矿流体不断演化的过程中,大气降水参与的比例逐渐加大。

### 5 讨论

#### 5.1 岩浆侵位与构造条件

岩浆岩的侵位上升与斑岩型矿床的成因和矿体在空间的分布有着密切的联系。呼扎盖吐钼矿床位于得尔布干深大断裂或其次级断裂的东南侧,海拉尔坳陷盆地边缘。区域上构造线主要呈北东向分布,其次为北西、近东西和近南北向断裂。矿区内发育近北东向的断裂  $F_1$  和近南北向次级断裂  $F_2$ ,中生代以来,随着蒙古-鄂霍次克洋的闭合,在陆陆碰撞或后碰撞的伸展作用过程中,这些断裂在侏罗纪期

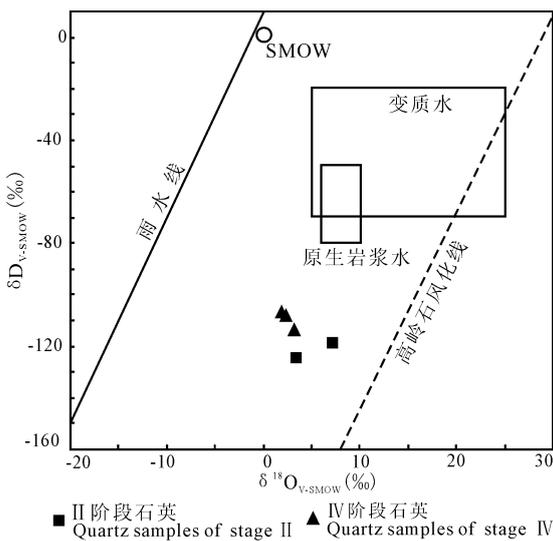


图 8 呼扎盖吐钼矿床不同成矿阶段石英中 H-O 同位素图解

Fig. 8 Diagram of hydrogen-oxygen isotopic compositions in different ore-forming stages in the Huzhagaitu molybdenum deposit

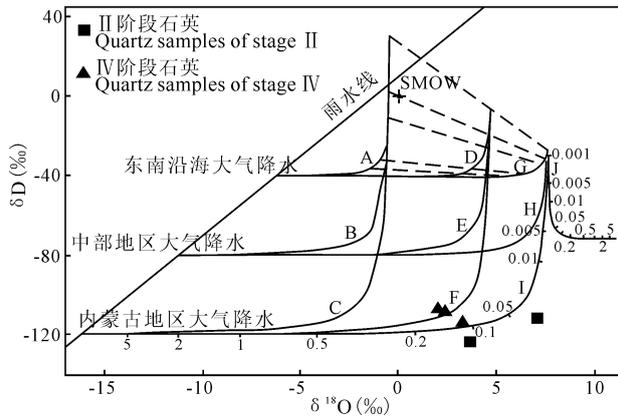


图9 热液体系水-岩交换过程中氢、氧同位素组成演化模式图(底图据 Chen Zhensheng, 1992)

Fig. 9 The evolitional model of H and O isotope compositions of meteoric and magmatic water during water-rock interactions in hydrothermal system (modified after Chen Zhensheng, 1992)

A, D, G—东南沿海地区大气降水分别在 150℃、250℃、350℃ 时的演化曲线; B, E, H—中部地区大气降水分别在 150℃、250℃、350℃ 时的演化曲线; C, F, I—内蒙古地区大气降水分别在 150℃、250℃、350℃ 时的演化曲线; J—花岗岩与其衍生岩浆水在 350℃ 高温热液体系中的演化曲线; 曲线 I, J 上的数字表示热液系统中参加反应的水与岩石的摩尔分数比

A, D, G—Evolution curves of atmospheric precipitation in the southeast coastal areas at 150 °C, 250 °C, and 350 °C, respectively; B, E, H—evolution curves of atmospheric precipitation in the Midlands at 150 °C, 250 °C and 350 °C, respectively; C, F, I—evolution curves of atmospheric precipitation in Inner Mongolia at 150 °C, 250 °C and 350 °C, respectively; J—evolution curve of granite and its derived magmatic water in high temperature hydrothermal system at 350 °C; the numbers on curve I and J represent the mole fraction ratio of water to rock participating in the reaction of hydrothermal system

间又开始强烈活动,为矿区内岩浆岩的侵入和成矿流体的形成提供了重要通道。

斑岩型矿床最显著的特征就是成矿岩体顶部或边部发育密集的连接网脉状裂隙,成矿热液在其中发生过广泛的渗流,这也是大多数斑岩型矿床的矿石都具有脉状、网脉状构造的原因。岩浆侵位上升到近地表以后,随着岩浆的演化与无水硅酸盐矿物的结晶(如石英、钾长石,蚀变类型表现为硅化和钾化)(Liu Li et al., 2012),挥发性组分不断聚集而使蒸汽压力加大。当超过围岩压力和岩石的抗张强度时,流体相迅速膨胀并在岩体中发生大规模的沸腾,使得已经形成的固体外壳部分发生迅速而广泛的破裂,这些裂隙系统也为成矿热液的运移和矿质沉淀提供了重要的卸载场所(Xue Chunji et al.,

2006)。这种网脉状裂隙在岩体内侧钾化带内发育较差,外侧由强至弱,这也与斑岩型矿床在石英-绢云母化带内矿化较发育的现象是一致的。在岩体内发育的这种网脉状裂隙构造,很大程度上为含矿热液的流通和含石英脉的形成提供了有利条件。

## 5.2 流体演化与成矿

通过对流体包裹体的物质成分、密度、温压等物理参数的研究,可以很好地揭示热液矿床中成矿流体的来源与性质(Ulrich et al., 1999; Chi Guoxiang et al., 2009, 2011; He Shuyue et al., 2017)。本次研究中未采集到成矿斑岩和成矿初期硅化阶段发育石英-磁铁矿-黄铁矿或具钾化的石英脉样品,但根据前人对斑岩型矿床流体包裹体研究的结果表明,岩浆期后的初始热液中,成矿流体具有高温、氧逸度高和富 CO<sub>2</sub> 等特点。此时成矿热液中较高的氧逸度和高 CO<sub>2</sub> 含量等原因,导致成矿系统中流体 S<sup>2-</sup> 活度低,不利于硫化物的沉淀,矿化较微弱(Wang Pin, 2015)。据呼扎盖吐钼矿床补充勘探资料(2011)显示,在 I 阶段中仅见有少量黄铁矿与辉钼矿的连晶分布或嵌布在磁铁矿中。

石英-辉钼矿阶段(II 阶段),流体包裹体显微测温结果显示,主成矿阶段流体的温度在 221~437℃ 的范围内,主要集中在 280~400℃ 之间;盐度在 2.57%~51.68% 的范围内,其中气液两相包裹体的盐度集中在 10%~14% 之间,含子晶三相包裹体的盐度集中在 40%~46% 之间;包裹体密度在 0.629~1.103 g/cm<sup>3</sup> 之间。与初始成矿流体相比,该阶段 CO<sub>2</sub> 等挥发性气体大量逃逸,流体发生明显的沸腾作用。包裹体岩相学观察表明,该阶段包裹体类型丰富,在同一个包裹体片的视域内可见富液相流体包裹体、富气相流体包裹体、含子晶三相包裹体和少量含 CO<sub>2</sub> 的三相包裹体共存,指示成矿流体产生过沸腾作用,其中含不透明子晶矿物(激光拉曼探针光谱分析为黄铜矿)包裹体的出现,暗示了成矿流体具有较强的金属搬运能力。均一温度-盐度图解中(图 10),在相近的温度下,盐度把包裹体大致分为上下两个集中区间,中低盐度与高盐度的显著差异也反映出该阶段流体存在明显的沸腾作用。CO<sub>2</sub> 等挥发性气体的散失逃逸,使得流体中 H<sup>+</sup> 活动降低,OH<sup>-</sup> 的活动性增强,pH 值降低,发生大规模的绢云母化、白云母化和绿泥石化等围岩蚀变(Jian Wei et al., 2010),流体产生的沸腾作用,也使得整个成矿流体系统的物理化学条件和氧化-还原环境发生骤变,从而导致辉钼矿等成矿物质发生大规模的卸载

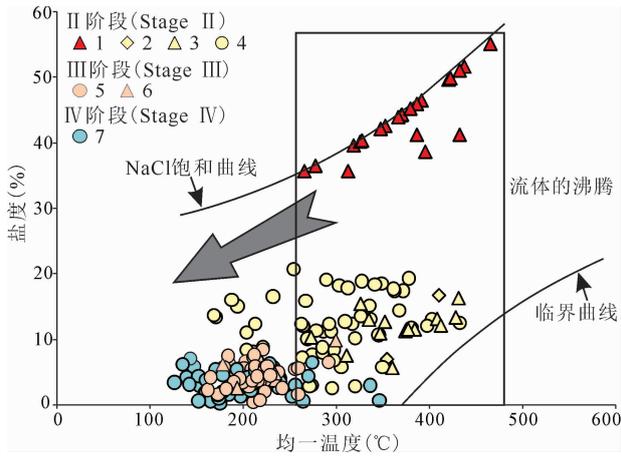


图 10 呼扎盖吐钼矿床各阶段流体包裹体均一温度-盐度散点图

Fig. 10 Scatter diagram of salinity-homogenization temperature of fluid inclusions in different stage of Huzhagaitu molybdenum deposit

1—II 阶段含透明子晶矿物的多相包裹体( $S_1$ ); 2—II 阶段含不透明子晶矿物的多相包裹体( $S_2$ ); 3—II 阶段富气相的流体包裹体(V); 4—II 阶段富液相的流体包裹体(L); 5—III 阶段富液相的流体包裹体(L); 6—III 阶段富气相的流体包裹体(V); 7—IV 阶段富液相的流体包裹体(L)

1—Multiphase fluid inclusions containing transparent daughter minerals in stage II ( $S_1$ ); 2—multiphase fluid inclusions containing opaque daughter minerals in stage II ( $S_2$ ); 3—rich-vapor phase fluid inclusions in stage II (V); 4—rich-liquid phase fluid inclusions in stage II (L); 5—rich-liquid phase fluid inclusions in stage III (L); 6—rich-vapor phase fluid inclusions in stage III (V); 7—rich-liquid phase fluid inclusions in stage IV (L)

和沉淀。

在成矿的中晚期(II→IV 阶段),成矿流体的温度降至 126~346°C 的范围内,主要集中在 140~240°C 之间;盐度变化在 0.18%~9.73% 范围内,主要集中在 2%~6% 之间;密度在 0.607~0.976 g/cm<sup>3</sup> 之间。整体上显示出成矿流体具有中低温低盐度的特征。随着成矿流体的不断演化,温度和压力下降,流体迁移成矿物质的能力也逐渐减弱,由于主成矿阶段辉钼矿和黄铁矿的大量沉淀,流体中  $S^{2-}$  大量消耗,在成矿中晚期黄铁矿、方铅矿、闪锌矿等矿物逐步沉淀下来。随着水-岩反应的不进行,成矿流体向晚期低温低盐度的大气降水热液演化,在呼扎盖吐矿区形成以碳酸盐化、萤石化、高岭土化为特征的低温围岩蚀变。

### 5.3 钼的运移与矿质沉淀

Yokoi et al. (1993) 利用 EXAFS 和 XANES 方法研究了钼在酸性溶液中的赋存状态,当溶液中

HCl 浓度大于 3M 时,Mo 元素会以钼-氧-氯络合物的形式存在。Ulrich et al. (2008) 通过 XANES 实验分析指出,钼在纯水中以钼酸( $H_2MoO_4$ ) 的形式存在,在盐度(%KCl<sub>eqv</sub>)<11% 时,钼以离子对的形式( $KHMoO_4$ ) 存在于溶液中,在盐度(%KCl<sub>eqv</sub>)>20% 时,则以钼-氧-氯络合物的形式( $MoO_2Cl^+$ ) 存在于溶液中。大量的研究表明,钼在成矿流体中的含量与 NaCl、KCl 和 HCl 的含量呈正相关(Cao Xiaoyun, 1989; Kudrin, 1989; Webster, 1997; Ulrich et al., 2008; Wang Pin, 2015)。Rempel et al. (2006) 在 300~360°C、39~154 bar 的实验条件下,发现钼在流体的气相中能以气态水合物( $MoO_3 \cdot nH_2O$ ) 的形式搬运,含量高出于常压下几十个数量级,富硫气相在斑岩矿床物质迁移中的作用逐渐被研究重视(Leng Chengbiao et al., 2009; Sun Yan et al., 2012; Zhang Rongzhen, 2015)。钼元素在热液中搬运的形式还有待研究,但呼扎盖吐钼矿床成矿流体为矿质的迁移起到至关重要的作用。

成矿物质在流体中迁移时影响其沉淀的因素主要有流体的沸腾、物理化学条件变化(如温压、氧逸度、氧化-还原环境等骤变)和流体的混合等(Zhang Dehui, 1997; Lu Huanzhang et al., 2004)。岩浆侵位上升以后,在岩浆中释放的挥发性组分不断聚集,当蒸汽压大于围限的压力时流体相产生过压爆裂作用,在已形成的岩体外壳及其接触带部位形成连通的网脉状裂隙,这些开放的裂隙使整个流体系统的温度、压力等发生急剧下降,当发生减压沸腾作用以后,CO<sub>2</sub> 等挥发性组分大量逃逸,氧逸度降低,硫以还原价态的形式( $S^{2-}$ ) 出现,  $HMoO_4^-$  发生分解,  $MoS_2$  产生大规模的沉淀。在成矿初期,可见少量的磁铁矿等氧化性矿物,说明当时成矿流体处于氧化环境;在主成矿阶段,氧逸度下降,辉钼矿、黄铁矿等硫化物大量出现,说明成矿环境处于还原性质。H-O 同位素研究表明,呼扎盖吐钼矿区内成矿流体不是单一的岩浆来源,在整个水-岩反应中,还混合了部分大气水。岩体外壳开放的裂隙系统、较冷的大气水的参与加剧了流体沸腾作用的发生。成矿初始阶段,高温、高氧逸度、中等盐度和密度的岩浆流体对 Mo 具有很强的迁移能力,随着流体的沸腾和大气水的加入,温度和压力逐渐下降,流体对金属元素的搬运能力也逐渐减弱。随着成矿作用的进行,矿质沉淀殆尽,晚阶段以发育石英-方解石脉为主。

## 6 结论

(1) 呼扎盖吐斑岩型钼矿床流体包裹体类型丰富, 发育 L 型富液相包裹体、V 型富气相包裹体、S 型含子矿物的多相包裹体和 C 型含 CO<sub>2</sub> 的三相包裹体 4 种类型。包裹体液相成分主要为 H<sub>2</sub>O-NaCl, 气相成分以 H<sub>2</sub>O 为主, 部分还含有 CO<sub>2</sub>。含子晶多相包裹体与 L 型、V 型包裹体成群出现, 透明子矿物有石盐、硬石膏, 不透明子矿物有黄铜矿等其他金属硫化物, 成矿流体为 H<sub>2</sub>O-NaCl-CO<sub>2</sub> 体系。

(2) 从主成矿阶段到成矿晚期, 流体包裹体主要均一温度分别集中在 280~400℃、180~280℃、140~240℃, 盐度变化范围分别为 2.57%~51.68%、0.18%~9.73%、0.35%~7.17%。随着成矿流体的不断演化, 温度和压力逐渐下降, 主成矿阶段以后, 成矿流体具有低温低盐度的特征。结合 H-O 同位素分析, 主成矿阶段成矿流体以岩浆来源为主, 可能已经混合了部分大气降水, 随着成矿流体的不断演化, 到了成矿晚期大气降水混入的比例有所增加。

(3) 岩浆侵位上升以后, 随着岩浆的演化和无水硅酸盐矿物的结晶, 挥发性组分不断聚集而使蒸汽压力加大, 当超过围岩压力和岩石的抗张强度时, 已经形成的固体外壳部分发生迅速而广泛的破裂, 这种网脉状裂隙构造, 很大程度上为含矿热液的流通和含矿石英脉的形成提供了有利条件。石英-辉钼矿阶段, 初始流体在上升过程中由于压力释放发生沸腾作用, CO<sub>2</sub> 散逸、温度降低, 整个成矿流体系统的物理化学条件和氧化-还原环境发生骤变, 从而导致辉钼矿等成矿物质发生大规模的卸载和沉淀。

**致谢:** 流体包裹体显微测温和激光拉曼测试得到中国地质大学(北京)地球科学与资源学院矿床与勘探教研室刘丽老师的悉心指导, 匿名审稿专家对该论文提出了宝贵的修改意见, 在此表示衷心感谢!

### 注 释

- ① 内蒙古地质工程有限责任公司. 2016. 内蒙古自治区陈巴尔虎旗呼扎盖吐矿区铜铅锌钼矿资源储量核实报告.
- ② 黑龙江省有色金属地质勘查局 703 队. 2010. 内蒙古自治区陈巴尔虎旗呼扎盖吐矿区钼矿勘探报告.

### References

Bodnar R J. 1993. Revised equation and table for determining the freezing point depression of H<sub>2</sub>O-NaCl solutions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57(3): 683~684.

Brown P E. 1989. Flicor: A microcomputer program for the reduction and investigation of fluid-inclusion data. *American Mineralogist*, 74(11~12): 1390~1393.

Cao Xiaoyun. 1989. Solubility of molybdenite and the transport of

molybdenum in hydrothermal solutions. Doctor dissertation of Iowa State University, 1~103.

Chen Yanjing, Ni Pei, Fan Hongrui, F Pirajno, Lai Yong, Su Wenchao, Zhang Hui. 2007. Diagnostic fluid inclusions of different types hydrothermal gold deposit. *Acta Petrologica Sinica*, 23(09): 2085~2108 (in Chinese with English abstract).

Chen Yanjing, Zhang Cheng, Li Nuo, Yang Yongfei, Deng Ke. 2012. Geology of the Mo deposits in northeast China. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 42(5): 1221~1268 (in Chinese with English abstract).

Chen Zhensheng, Zhang Ligang. 1992. Hydrogen and oxygen isotope fractionation mechanism in the hydrothermal system and its geologic significance. *Acta Geologica Sinica*, 66(02): 158~169 (in Chinese with English abstract).

Chen Zhensheng. 1997. Oxygen and hydrogen isotope behavior in hydrothermal water-rock interaction process. *Geotectonica et Metallogenia*, 21(01): 51~61 (in Chinese with English abstract).

Chen Zhiguang, Zhang Lianchang, Lu Baizhi, Li Zhanlong, Wu Huaying, Xiang Peng and Huang Shiwu. 2010. Geochronology and geochemistry of the Taipingchuan copper-molybdenum deposit in Inner Mongolia, and its geological significances. *Acta Petrologica Sinica*, 26(5): 1437~1449 (in Chinese with English abstract).

Chi Guoxiang, Lai Jianqing. 2009. Roles of fluid inclusions in study of mineral deposits. *Mineral Deposits*, 28(06): 850~855 (in Chinese with English abstract).

Chi Guoxiang, Xue Chunji. 2011. Principles, methods and applications of hydrodynamic studies of mineralization. *Earth Science Frontiers*, 18(05): 1~18 (in Chinese with English abstract).

Clayton R N, O'Neil J R, Mayeda T K. 1972. Oxygen isotope exchange between quartz and water. *Journal of Geophysical Research*, 77(17): 3057~3067.

Collins P L F. 1979. Gas hydrates in CO<sub>2</sub>-bearing fluid inclusions and the use of freezing data for estimation of salinity. *Economic Geology*, 74(6): 1435~1444.

Duan Mingxin, Ren Yunsheng, Guo Hongyu, Wang Bochao, Zhao Xidong, Cai Yanlong. 2017. Ore-Forming Fluids and Genesis of Qiyimuchang Lead-zinc Deposit in Erguna Area, Inner Mongolia. *Geology and Resources*, 26(06): 557~563 (in Chinese with English abstract).

Duan Zhenhao, Sun Rui, Zhu Chen, Chou I-Ming. 2006. An improved model for the calculation of CO<sub>2</sub> solubility in aqueous solutions containing Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Cl<sup>-</sup>, and SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>. *Marine Chemistry*, 98(2~4): 131~139.

Fei Hongcai, Xiao Rongge. 2002. Ore-forming fluid evolution and metallogenetic physical chemistry. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 21(02): 139~144 (in Chinese with English abstract).

Hall D L, Sterner S M, Bodnar R J. 1988. Freezing point depression of H<sub>2</sub>O-NaCl solutions. *Economic Geology*, 83: 197~202.

He Shuyue, Li Yulong, Chen Jing, Xu Qinglin, Wang Yadong, Bai Zonghai, Shu Shulan. 2017. Characteristics of ore-forming fluid and metallogenetic mechanism of Halongxiuma porphyry molybdenum deposit in the eastern part of East Kunlun. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 37(03): 22~30 (in Chinese with English abstract).

Huang Fan, Chen Yuchuan, Wang Denghong, Yuan Zhongxin, Chen Zhenghui. 2011. A discussion on the major molybdenum ore concentration areas in China and their resource potential. *Geology in China*, 38(05): 1111~1134 (in Chinese with English abstract).

Huang Shiwu, Zhang Lianchang, Li Keqing, Chen Zhiguang, Wu Huaying, Xiang Peng, Zhang Xiaojing. 2010. CH<sub>4</sub>-containing fluid inclusion study of the Taipingchuan porphyry Cu-Mo deposit, Inner Mongolia. *Acta Geologica Sinica*, 26(05): 1386~1396 (in Chinese with English abstract).

Jian Wei, Liu Wei, Shi Lihong. 2010. Advances in study of

- porphyry molybdenum deposits. *Mineral Deposits*, 29(02): 308~316 (in Chinese with English abstract).
- Kang Yongjian, Xiang Anping, She Hongquan, Sun Yuliang, Yang Wensheng. 2016. The Characteristics of Ore-forming Fluids and Mineralization Mechanism in the Badaguan Porphyry Cu-Mo Deposit, Inner Mongolia, NE China. *Acta Geologica Sinica*, 90(08): 1778~1797 (in Chinese with English abstract).
- Kudrin A V. 1989. Behavior of Mo in aqueous NaCl and KCl solutions at 300~450°C. *Geochemistry International*, 26(8): 87~99.
- Mao Shide, Duan Zhenhao. 2008. The  $P$ ,  $V$ ,  $T$ ,  $x$  properties of binary aqueous chloride solutions up to  $T=573$  K and 100 MPa. *The Journal of Chemical Thermodynamics*, 40(7): 1046~1063.
- Mao Shide, Duan Zhenhao, Zhang Dehui, Shi Lanlan, Chen Yali, Li Jing. 2011. Thermodynamic modeling of binary  $\text{CH}_4\text{-H}_2\text{O}$  fluid inclusions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(20): 5892~5902.
- Mi Kuifeng, Liu Zhenjiang, Li Chunfeng, Liu Ruibin, Wang Jianping, Peng Runmin. 2017. Origin of the Badaguan porphyry Cu-Mo deposit, Inner Mongolia, northeast China: Constraints from geology, isotope geochemistry and geochronology. *Ore Geology Reviews*, 81: 154~172.
- Mi Kuifeng, Liu Zhenjiang, Liu Ruibin, Li Chunfeng, Wang Jianping, Peng Runmin. 2018. U-Pb zircon, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic constraints on age and origin of the intrusions from Wunugetushan porphyry deposit, Northeast China: implication for Triassic-Jurassic Cu-Mo mineralization in Mongolia-Erguna metallogenic belt. *International Geology Review*, 60(4): 496~512.
- Leng Chengbiao, Zhang Xingchun, Wang Shouxu, Qin Chaojian, Wu Kongwen, Ren Tao. 2009. Advances of Researches on the Evolution of Ore-forming Fluids and the Vapor Transport of Metals in Magmatic-Hydrothermal Systems. *Geological Review*, 55(01): 100~112 (in Chinese with English abstract).
- Li Nuo, Chen Yanjing, Lai Yong, Li Wenbo. 2007. Fluid inclusion study of the Wunugetushan porphyry Cu-Mo deposit, Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 23(09): 2177~2188 (in Chinese with English abstract).
- Liu Bin, Duan Guangxian. 1987. The density and isochoric formulae for  $\text{NaCl-H}_2\text{O}$  fluid inclusions and their applications. *Acta Mineralogica Sinica*, 7(04): 345~352 (in Chinese with English abstract).
- Liu Bin. 2001. Density and Isochoric Formulae for  $\text{NaCl-H}_2\text{O}$  Inclusions with Medium and High Salinity and Their Applications. *Geological Review*, 47(06): 617~622 (in Chinese with English abstract).
- Liu Li, Zeng Qingdong, Liu Jianming, Duan Xiaoxia, Sun Shouke, Zhang Lianchang. 2012. Characteristics of fluid inclusions from the Laojiagou porphyry Mo deposit in the Xilamulun metallogenic belt, Inner Mongolia and their geological significance. *Geology and Exploration*, 48(04): 663~676 (in Chinese with English abstract).
- Lu Huanzhang, Fan Hongrui, Ni Pei, Ou Guangxi, Shen Kun, Zhang Wenhui. 2004. Fluid inclusions. Beijing: Science Press, 1~274 (in Chinese with English abstract).
- Lu Huanzhang, Bi Xianwu, Wang Die and Shan Qiang. 2016. Ore-forming fluids of porphy copper (molybdenum-gold) deposit. *Mineral Deposits*, 35(05): 933~952 (in Chinese with English abstract).
- Rempel K U, Migdisov A A, Williams-Jones A E. 2006. The solubility and speciation of molybdenum in water vapour at elevated temperatures and pressures: Implications for orogenesis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(3): 687~696.
- She Hongquan, Li Honghong, Li Jinwen, Zhao Shibao, Tan Gang, Zhang Dehui, Jin Jun, Dong Yingjun, Feng Chengyou. 2009. The Metallogenetical Characteristics and Prospecting Direction of the Copper-Lead-Zinc Polymetal Deposits in the Northern-Central Daxing'anling Mountain, Inner Mongolia. *Acta Geologica Sinica*, 83(10): 1456~1472 (in Chinese with English abstract).
- Steele-MacInnis M, Lecumberri-Sanchez P, Bodnar R J. 2012. HOKIEFLINCS-H<sub>2</sub>O-NACL: A Microsoft Excel spreadsheet for interpreting microthermometric data from fluid inclusions based on the PVTX properties of H<sub>2</sub>O-NaCl. *Computers & Geosciences*, 49: 334~337.
- Sun Yan, Liu Jianming, Zeng Qingdong. 2012. An approach to the metallogenic mechanism of porphyry copper (molybdenum) deposits and porphyry molybdenum(copper) deposits: Influence of evolving process of ore-forming fluids and tectonic setting. *Earth Science Frontiers*, 19(06): 179~193 (in Chinese with English abstract).
- Tan Gang, She Hongquan, Yin Jianping, Yang Yuncheng, Li Jinwen, Xiang Anping, Zhang Bin. 2013. Source and evolution of ore-fluid in Wunugetushan large Cu-Mo deposit, Inner Mongolia: evidence from fluid inclusions and hydrogen and oxygen isotopic geochemistry. *Global Geology*, 32(03): 463~482 (in Chinese with English abstract).
- Tang Pan, Chen Yuchuan, Tang Juxing, Zheng Wenbao, Leng Qiufeng, Lin Bin. 2017. A study of fluid inclusions from Lakang'e porphyry Cu-Mo deposit in Tibet. *Mineral Deposits*, 36(01): 68~82 (in Chinese with English abstract).
- Ulrich T, Guenther D, Heinrich C A. 1999. Gold concentrations of magmatic brines and the metal budget of porphyry copper deposits. *Nature*, 399(6737): 676~679.
- Ulrich T, Mavrogenes J. 2008. An experimental study of the solubility of molybdenum in H<sub>2</sub>O and KCl-H<sub>2</sub>O solutions from 500°C to 800°C, and 150 to 300MPa. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(9): 2316~2330.
- Wang Jianguo, Zhang Jing, Wang Shengwen, Zhang Da, Qi Xiaojun, Wu Ganguo, Zhao Pizhong. 2009. Characteristics of fluid inclusions and metallogenetic geodynamical setting of the Taipinggou Mo deposit in Inner Mongolia, China. *Acta Petrologica Sinica*, 25(10): 2621~2630 (in Chinese with English abstract).
- Wang Pin. 2015. Comparative study of porphyry Mo mineralization in continental collision and magmatic arc-insights from Yaochong and Diyanqinamu porphyry Mo deposits. Doctor dissertation of Graduate University of Chinese Academy of Sciences (Guangzhou Institute of Geochemistry), 1~217 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xi, Duan Mingxin, Ren Yunsheng, Hou Zhaoshuo, Sun Deyou, Hao Yuji. 2016. Characteristics of Fluid Inclusions and Mineralization Age of Badaguan Cu-Mo Deposit in Erguna Area, Inner Mongolia. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 46(05): 1354~1367 (in Chinese with English abstract).
- Webster J D. 1997. Exsolution of magmatic volatile phases from Cl-enriched mineralizing granitic magmas and implications for ore metal transport. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(5): 1017~1029.
- Wu Guang. 2006. Metallogenic Setting and Metallogenesis of Nonferrous-precious Metal in Northern Da Hinggan Mountain. Doctor dissertation of Jilin University, 1~202 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Rongge, Yuan Zhenlei, Liu Jingdang, Fei Hongcai, Ge Zhenhua, Zhang Mingyan. 2004. The formation and evolution of regional ore-forming fluid. *Earth Science Frontiers*, 11(02): 461~469 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Rongge, Zhang Zongheng, Chen Huiquan, Zhang Hancheng. 2001. Types of geological fluids and ore-forming fluid. *Earth Science Frontiers*, 8(04): 245~251 (in Chinese with English abstract).
- Xiong Suofei, He Mouchun, Yao Shuzhen, Cui Yubao, Hu Xinlu, Chen Bin. 2014. Compositions and Microthermometry of Fluid Inclusions of Chalukou Porphyry Mo deposit from Great Xing'

- an Range: Implications for Ore Genesis. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 39(07): 820~836 (in Chinese with English abstract).
- Xue Chunji, Qi Sijing, Kui Heming. 2006. *Basic Ore Deposit Geology*. Beijing: Geological Publishing House, 75~114 (in Chinese with English abstract).
- Yokoi K, Matsubayashi N, Miyanaga T, Watanabe I, Ikeda S. 1993. Studies on the structure of molybdenum (VI) in acidic solution by XANES and EXAFS. *Polyhedron*, 12(8): 911~914.
- Zeng Weishun, Zhou Jianbo, Dong Ce, Cao Jialin and Wang Bin. 2014. Subduction record of Mongol-Okhotsk Ocean: Constrains from Badaguan metamorphic complexes in the Erguna massif, NE China. *Acta Petrologica Sinica*, 30(07): 1948~1960 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Dehui. 1997. Geochemistry on boiling and mixing of fluids during the processes of hydrothermal deposits. *Advance in earth science*, 12(6): 546~552 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Fujiang, Zhang Wanjun. 2013. Characteristics of ore-forming intrusive rock and prospecting potential of the Huzhagaitu molybdenum deposit in Chen Barag Banner, Inner Mongolia. *Western Resources*, (6): 115~116 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Rongzhen. 2015. Characteristics of ore-forming fluids and metallogenic depth estimation in the Shiyagou porphyry Molybdenum deposit, Eastern Qinling. Master dissertation of China University of Geosciences in Beijing, 1~64 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Yan, Lv Junchao, Zhang Peng, Zhang Debao, Shen Xin, Bi Zhongwei. 2018. Characteristics of Ore-Forming Fluids in the Dong'rbur Pb-Zn-Ag Deposit in the NW Great Hinggan Mountains and Its Significance. *Acta Geologica Sinica*, 92(01): 142~153 (in Chinese with English abstract).
- ### 参 考 文 献
- 陈衍景,倪培,范宏瑞,F Pirajno,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(09): 2085~2108.
- 陈衍景,张成,李诺,杨永飞,邓軻. 2012. 中国东北钼矿床地质. *吉林大学学报(地球科学版)*, 42(5): 1221~1268.
- 陈振胜,张理刚. 1992. 热液体系氢、氧同位素分馏机制及其地质意义. *地质学报*, 66(02): 158~169.
- 陈振胜. 1997. 热液体系水-岩作用过程中的氧氢同位素行为. *大地构造与成矿学*, 21(01): 51~61.
- 陈志广,张连昌,卢百志,李占龙,吴华英,相鹏,黄世武. 2010. 内蒙古太平川铜钼矿成矿斑岩时代、地球化学及地质意义. *岩石学报*, 26(5): 1437~1449.
- 池国祥,赖健清. 2009. 流体包裹体在矿床研究中的作用. *矿床地质*, 28(06): 850~855.
- 池国祥,薛春纪. 2011. 成矿流体动力学的原理、研究方法及应用. *地学前缘*, 18(05): 1~18.
- 段明新,任云生,郭宏宇,王博超,赵喜东,蔡艳龙. 2017. 内蒙古额尔古纳地区七一牧场铅锌矿床成矿流体特征及成因探讨. *地质与资源*, 26(06): 557~563.
- 费红彩,肖荣阁. 2002. 成矿流体演化与成矿物理化学. *矿物岩石地球化学通报*, 21(02): 139~144.
- 何书跃,李玉龙,陈静,许庆林,王亚栋,白宗海,舒树兰. 2017. 东昆仑东段哈陇体玛斑岩型钼矿成矿流体特征及成矿机制探讨. *矿物岩石*, 37(03): 22~30.
- 黄凡,陈毓川,王登红,袁忠信,陈郑辉. 2011. 中国钼矿主要矿集区及其资源潜力探讨. *中国地质*, 38(05): 1111~1134.
- 黄世武,张连昌,李克庆,陈志广,吴华英,相鹏,张晓静. 2010. 得尔布干成矿带太平川铜钼矿床含 CH<sub>4</sub> 流体包裹体研究. *岩石学报*, 26(05): 1386~1396.
- 简伟,柳维,石黎红. 2010. 斑岩型钼矿床研究进展. *矿床地质*, 29(02): 308~316.
- 康永建,向安平,余宏全,孙宇亮,杨文生. 2016. 内蒙古八大关斑岩型 Cu-Mo 矿床成矿流体特征及成矿机制研究. *地质学报*, 90(08): 1778~1797.
- 冷成彪,张兴春,王守旭,秦朝建,吴孔文,任涛. 2009. 岩浆-热液体系成矿流体演化及其金属元素气相迁移研究进展. *地质论评*, 55(01): 100~112.
- 李诺,陈衍景,赖勇,李文博. 2007. 内蒙古乌努格吐山斑岩铜钼矿床流体包裹体研究. *岩石学报*, 23(09): 2177~2188.
- 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(04): 345~352.
- 刘斌. 2001. 中高温 NaCl-H<sub>2</sub>O 包裹体的密度式和等容式及其应用. *地质论评*, 47(06): 617~622.
- 刘利,曾庆栋,刘建明,段晓侠,孙守格,张连昌. 2012. 内蒙古西拉木伦成矿带劳家沟斑岩型钼矿床流体包裹体特征及地质意义. *地质与勘探*, 48(04): 663~676.
- 卢焕章,毕献武,王蝶,单强. 2016. 斑岩铜(钼-金)矿床的成矿流体. *矿床地质*, 35(05): 933~952.
- 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, 1~274.
- 余宏全,李红红,李进文,赵士宝,谭刚,张德全,金俊,董英君,丰成友. 2009. 内蒙古大兴安岭中北段铜铅锌金多金属矿床成矿规律与找矿方向. *地质学报*, 83(10): 1456~1472.
- 孙燕,刘建明,曾庆栋. 2012. 斑岩型铜(钼)矿床和斑岩型铜(铜)矿床的形成机制探讨: 流体演化及构造背景的影响. *地学前缘*, 19(06): 179~193.
- 谭钢,余宏全,印建平,杨郎城,李进文,向安平,张斌. 2013. 内蒙古乌奴格吐山大型铜钼矿床成矿流体来源及演化: 流体包裹体及氢氧同位素地球化学证据. *世界地质*, 32(03): 463~482.
- 唐攀,陈毓川,唐菊兴,郑文宝,冷秋锋,林彬. 2017. 西藏拉抗俄斑岩铜钼矿床流体包裹体研究. *矿床地质*, 36(01): 68~82.
- 王建国,张静,王圣文,张达,祁小军,吴淦国,赵丕忠. 2009. 内蒙古太平沟钼矿床流体包裹体特征及成矿动力学背景. *岩石学报*, 25(10): 2621~2630.
- 王珅. 2015. 大陆碰撞与岩浆弧背景斑岩钼矿对比研究——以姚冲和迪彦钦阿木钼矿床为例. 中国科学院研究生院(广州地球化学研究所)博士学位论文, 1~217.
- 王晰,段明新,任云生,侯召硕,孙德有,郝宇杰. 2016. 内蒙古额尔古纳地区八大关铜钼矿床流体包裹体特征与成矿时代. *吉林大学学报(地球科学版)*, 46(05): 1354~1367.
- 武广. 2006. 大兴安岭北部区域成矿背景与有色、贵金属矿床成矿作用. 吉林大学博士学位论文, 1~202.
- 肖荣阁,原振雷,刘敬党,费红彩,葛振华,张明燕. 2004. 区域成矿流体的形成与演化. *地学前缘*, 11(02): 461~469.
- 肖荣阁,张宗恒,陈卉泉,张汉城. 2001. 地质流体自然类型与成矿流体类型. *地学前缘*, 8(04): 245~251.
- 熊索菲,何谋查,姚书振,崔玉宝,胡新露,陈斌. 2014. 大兴安岭岔路口斑岩钼矿床流体成分及成矿意义. *地球科学(中国地质大学学报)*, 39(07): 820~836.
- 薛春纪,祁思敬,魏合明. 2006. 基础矿床学. 北京: 地质出版社, 75~114.
- 曾维顺,周建波,董策,曹嘉麟,王斌. 2014. 蒙古-鄂霍茨克洋俯冲的记录: 额尔古纳地区八大关变质杂岩的证据. *岩石学报*, 30(07): 1948~1960.
- 张德全. 1997. 流体的沸腾和混合在热液成矿中的意义. *地球科学进展*, 12(06): 546~552.
- 张福江,张万军. 2013. 内蒙古陈巴尔虎旗呼扎盖吐斑岩型钼矿控矿岩体特征及成矿远景. *西部资源*, (6): 115~116.
- 张荣臻. 2015. 大秦岭石窑沟斑岩型钼矿成矿流体研究及成矿深度估算. 中国地质大学(北京)硕士学位论文, 1~64.
- 赵岩,吕骏超,张朋,张德宝,沈鑫,毕中伟. 2018. 大兴安岭北段得耳布尔铅锌银矿床成矿流体特征与意义. *地质学报*, 92(01): 142~153.

## The characteristics of ore-forming fluid and mineralization mechanism in the Huzhagaitu porphyry Mo deposit, Inner Mongolia

LIU Ruibin<sup>1,2,3)</sup>, LIU Zhenjiang<sup>\*4)</sup>, MI Kuifeng<sup>4,5)</sup>, LI Chunfeng<sup>6)</sup>, WANG Jianping<sup>4)</sup>

1) *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037;*

2) *School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing, 100871;*

3) *Department of Geology and Environmental Engineering, Shanxi Institute of Technology, Yangquan, Shanxi, 045000;*

4) *School of Earth Sciences and Resources, China University of Geology, Beijing, 100083;*

5) *Development and Research Center, CGS, Beijing, 100037;*

6) *Beijing Research Institute of Chemical Engineering and Metallurgy, CNNC, Beijing, 101149*

*\* Corresponding author: lzj@cugb.edu.cn*

### Abstract

The Huzhagaitu molybdenum deposit is a newly discovered porphyry deposit in the middle segment of the Derbugan metallogenic belt in Inner Mongolia. The molybdenum orebodies are mainly hosted within the Early Yanshan granodiorite, and its contact zone with rhyolite. The deposit is dominated by molybdenum mineralization and pyrite mineralization, accompanied by lead-zinc mineralization and a small amount of copper mineralization. The ore-forming process can be divided into four stages: silicification stage, quartz-molybdenum stage, quartz-polymetallic sulphide stage, and quartz-calcite stage. There are four types of fluid inclusions: liquid-rich phase inclusions, vapor-rich phase inclusions, multiphase inclusions including daughter minerals and CO<sub>2</sub>-bearing three-phase inclusions. With the main mineralization stage as the focus of our research, this study carried out microscopic temperature measurement and laser Raman microprobe analysis for the inclusions in quartz or calcite in different mineralization stages (stage II to IV). The results show that the homogenization temperatures of the inclusions in the quartz-molybdenum-pyrite stage are mainly concentrated between 280°C and 400°C, and the salinities vary from 2.57% to 51.68%. In this stage, vapor-rich phase inclusions and multiphase inclusions including daughter minerals coexist with CO<sub>2</sub>-bearing three-phase inclusions. The liquid phase composition of L-type inclusions is mainly H<sub>2</sub>O-NaCl. The gas phase composition of V-type inclusions is mainly H<sub>2</sub>O, and some of them also contain CO<sub>2</sub>. Characteristic peak of laser Raman shift of daughter mineral chalcopyrite was detected in halite-bearing three phase inclusions. In the quartz-pyrite stage with lead-zinc mineralization and chalcopyrite mineralization, the homogenization temperatures of the inclusions are concentrated between 180°C and 280°C, and the salinities vary from 0.18% to 9.73%. In late stage, only L-type inclusions occur in quartz-calcite veins, with the homogenization temperatures mainly ranging between 140°C and 240°C, salinities varying from 0.35% to 7.17%. Combined with the latest research results, this paper suggests that the initial fluid of the deposit was magmatic fluid characterized by medium salinity and medium density. In the main stage of mineralization, the boiling of ore-forming fluid due to pressure release resulted in sudden change of the physical and chemical conditions of the ore-forming fluid system and the oxidation-reduction environment, causing the unloading and precipitation of molybdenite and other sulfide minerals in vein fractures.

**Key words:** Huzhagaitu; porphyry molybdenum deposit; fluid inclusions; ore-forming fluid; fluid boiling