

内蒙古迪彦钦阿木斑岩钼矿床成矿流体的出溶、演化及对成矿的制约

崔凯¹, 李腊梅², 吴皓然², 王兴源³, 王信³, 廉永³, 谢玉玲¹

(1. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083; 2. 中国冶金地质总局 矿产资源研究院, 北京 101300;
3. 锡林郭勒盟山金白音呼布矿业有限公司, 内蒙古 锡林浩特 026316)

摘要: 迪彦钦阿木钼矿床位于内蒙古东乌旗地区, 矿区侵入岩不发育, 主要为细粒正长岩和基性岩脉, 矿体主要发育在侏罗纪火山岩中, 少量发育在细粒正长岩中, 主要矿化类型为细网脉状、脉状、浸染状, 具有斑岩型矿化特征。矿区的细粒正长岩中可见含石英-钾长石囊团或由之构成中心相的热液脉体, 是岩浆-流体转化过程的直接证据。本文在详细岩相学观察的基础上, 对石英-钾长石囊团中主要组成矿物开展了阴极发光图像分析, 对石英、萤石中流体包裹体开展了显微测温实验, 并借助 SEM/EDS、显微激光拉曼探针、LA-ICP-MS 等手段对包裹体成分进行了系统分析, 基于以上实验结果对岩浆流体的出溶过程、出溶流体特征及矿质沉淀机制进行了探讨。研究表明, 矿区钼成矿与细粒正长岩岩浆出溶流体有关; 富 F 和挥发分造成成矿岩浆具有低的固相线温度和较低的黏度, 因此成矿岩浆可以沿断裂快速上侵到地壳浅部; 岩浆上侵过程中的减压沸腾可能是流体出溶的主要机制; 早期出溶流体为富 F 和富 CO₂ 的中高温 (227~457℃)、中低盐度 [$w(\text{NaCl}_{\text{eq}}) = 0.3\% \sim 8.6\%$] 流体, 由于快速减压造成流体沸腾形成低盐度富 CO₂ 的气相和高盐度液相, 沸腾引起的 CO₂ 逃逸可能是矿质沉淀的主要原因。

关键词: 迪彦钦阿木; 流体包裹体; LA-ICP-MS; 斑岩型钼矿床; 流体出溶

中图分类号: P611.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2022)06-1120-15

Fluid exsolution, evolution for the ore-controlling in Diyanqin'amu porphyry Mo deposit, Inner Mongolia

CUI Kai¹, LI La-mei², WU Hao-ran², WANG Xing-yuan³, WANG Xin³, LIAN Yong³ and XIE Yu-ling¹

(1. Civil and Resource Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Institute of Mineral Resources Research, China Metallurgical Geology Bureau, Beijing 101300, China; 3. Xilin Gol League Shanjin Baiyin Hubu Mining Co., Ltd., Xilinhot 026316, China)

Abstract: The Diyanqin'amu Mo deposit is located in Dong Ujimqin Banner, Inner Mongolia. The barely exposed intrusive rocks in this deposit are mainly composed of fine-grained syenite and mafic dikes. The Mo mineralization predominantly occurs in Jurassic volcanic rocks with minor in fine-grained syenite veins, mainly including veinlet, vein and disseminated mineralization types. Ore-bearing quartz-potassium feldspar-fluorite miarolitic cavities or hydrothermal veins with these minerals in the center are identified in the fine-grained syenite, which are direct evidence for exsolution of magmatic fluids. In this study, based on detailed petrographic observation, we conducted cathodoluminescence imaging for main minerals in the quartz-potassium feldspar-fluorite miarolitic cavities, microthermometry

收稿日期: 2022-04-08; 接受日期: 2022-07-04; 编辑: 尹淑苹

基金项目: 山东黄金集团项目; 中国地质调查局项目 (DD12120113056700); 中国冶金地质总局科技创新项目 (CMGB202002)

作者简介: 崔凯 (1991-), 女, 汉族, 博士研究生, 研究方向为矿床学, E-mail: cuikai16@foxmail.com; 通讯作者: 李腊梅 (1982-), 女, 汉族, 博士, 高级工程师, 主要从事矿产战略、矿床研究, E-mail: lilamei-2004@163.com。

网络首发时间: 2022-07-08; 网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1966.P.20220707.1023.002.html>

for fluid inclusions in quartz and fluorite, and compositional analysis for fluid inclusions using SEM/EDS, LRM and LA-ICP-MS. On the basis of above analyses we discussed the process of fluid exsolution, features of initial ore-forming fluids and precipitation mechanism of ore minerals. Our results show that the Mo mineralization was genetically related to the magmatic fluids derived from fluid exsolution of the fine-grained syenite. Enriched fluorine and other volatiles decreased the solidus and viscosity of the ore-related magma, which enabled rapid upwelling of this melt to the shallow upper crust via faults. Rapid decompression during ascent was probably the major mechanism for fluid exsolution of magma. The initial magmatic fluids were F- and CO₂-riched fluids with medium-high temperature (227~457°C) and medium-low salinity [0.3%~8.6%, $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$]. The initial magmatic fluids separated into a CO₂-riched gas phase with low salinity and a liquid phase with high salinity owing to boiling caused by rapid decompression. Therefore, the escape of CO₂ caused by boiling was probably the main reason for molybdenite precipitation.

Key words: Diyanqin'amu; fluid inclusion; LA-ICP-MS; porphyry Mo deposit; fluid exsolution

Fund support: Project of Shandong Gold Group Corporation Limited; Project of China Geological Survey (DD12120113056700); Project of China Metallurgical Geology Bureau (CMGB202002)

迪彦钦阿木钼多金属矿床位于内蒙古自治区东乌旗境内,是近年来新发现的一个以钼为主,伴生铅、锌、银的多金属矿床,也是东乌旗地区目前发现的最大一例斑岩型钼多金属矿床(谢玉玲等, 2015)。截至2012年底,迪彦钦阿木矿区累计探获钼金属量77.80万吨(平均品位0.097%)、铅2.32万吨(平均品位2.61%)、锌2.69万吨(平均品位3.04%)、银94.48吨(平均品位 106.7×10^{-6}) (中国冶金地质总局第一地质勘查院, 2012)^①。近年来,前人对该矿床的矿床地质特征(张昊等, 2016)、矿床蚀变分带规律(阎浩等, 2012)、成岩成矿年龄(Leng *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2017)、侵入岩岩石成因(Wang *et al.*, 2017)和成矿物质来源(Leng *et al.*, 2015)等进行了一定的工作,但对矿床的成矿流体来源、演化及矿质迁移、沉淀机制等方面的研究还较为薄弱,制约了对矿床成因的深入认识。本文通过野外及显微镜下观察,发现矿区钻孔岩芯中的蚀变火山岩内侵位有细粒正长岩脉,且其中发育石英-钾长石囊团和晶洞,其中可见萤石和辉钼矿。侵入岩中的石英-钾长石囊团和晶洞记录了岩浆-流体的转化过程,是岩浆出溶流体的直接记录,为研究岩浆出溶流体过程、出溶流体特征等提供了最佳样本(Lowenstern and Sinclair, 1996; Harris *et al.*, 2003)。本文在详细的野外地质调研和矿区主要岩石的岩矿相观察基础上,通过对细粒正长岩中石英-钾长石囊团的矿物组成及石英、萤石中流体包裹体岩相学、显微测温、流体包裹体中子矿物的扫描电

镜/能谱(SEM/EDS)、单个流体包裹体的激光拉曼探针分析和激光剥蚀电感耦合等离子质谱(LA-ICP-MS)分析,查明了迪彦钦阿木钼矿床岩浆出溶流体的性质和演化特征,对岩浆流体出溶机理和矿质沉淀机制进行了探讨,以期对区内斑岩型钼矿床的矿床成因认识提供参考资料,为进一步找矿提供理论依据。

1 区域地质背景

迪彦钦阿木钼矿床位于大兴安岭中段二连浩特-东乌旗多金属成矿带东段。大兴安岭成矿带在大地构造位置上处于中亚造山带东段的兴蒙造山带东部(刘建明等, 2004; 曾庆栋等, 2016)。该区先后经历了古亚洲洋的闭合、蒙古-鄂霍茨克洋的俯冲、华北与西伯利亚克拉通的陆陆碰撞和碰撞后伸展以及燕山期受古太平洋板块俯冲影响等复杂的地质演化过程(Wilhem *et al.*, 2012; Eizenhofer and Zhao, 2018),造就了该区多期次、多来源的岩浆热事件和多种类型的成矿作用,并形成数量众多的Mo、Cu、Fe、Sn、W、Pb、Zn、Au、Ag等多金属矿产。区内主要矿床类型包括斑岩型、矽卡岩型、热液脉型、火山-次火山热液型(浅成低温热液型)、云英岩型等(赵一鸣等, 1994; 金岩等, 2005; 聂凤军等, 2007; 张万益等, 2009; 谢玉玲等, 2015; 曾庆栋等, 2016),其中以中生代斑岩型钼矿床发育最为广泛,如鸡冠山钼矿(151.1 ± 1.3 Ma, 陈伟军等, 2010)、岔路口钼多金

① 中国冶金地质总局第一地质勘查院. 2012. 内蒙古自治区东乌珠穆沁旗迪彦钦阿木矿区铅锌银钼矿勘探报告.

属矿(147.0±0.8 Ma, 聂凤军等, 2011)、迪彦钦阿木钼矿(157.1±1.3 Ma, 王玘, 2015)和东不拉格钼多金属矿(165.2±2.8 Ma, 李腊梅等, 2017)等。

东乌旗一带古生代和中生代地层除三叠系外均有不同程度的出露(图1)。区内最古老的地层为下古生界奥陶系, 出露面积较小, 主要分布在东乌旗查干敖包、迪彦钦阿木等地, 岩性主要为碎屑岩、碳酸盐岩、火山沉积岩, 其上为志留系。志留系仅在额仁高比东南侧和查干敖包北侧有零星分布, 与下伏奥陶系呈整合接触, 岩性为海相碎屑岩、板岩。上古生界包括泥盆系、石炭系和二叠系。泥盆系主要分布在区域北部, 与下伏志留系呈不整合接触, 主要岩性为凝灰质砂岩、泥岩、碳酸盐岩; 石炭系分

布在宝力格庙-查干敖包一带, 不整合于泥盆系之上, 岩性主要为安山质火山岩; 二叠系分布在研究区东南部, 与下伏石炭系呈不整合接触, 主要岩性为海相碎屑岩、火山沉积岩。中生界为侏罗系和白垩系, 侏罗系在区内出露面积较广泛, 与二叠系呈不整合接触, 主要分布在哈拉盖图农场-贺斯格乌拉和东乌旗中部宝力格庙-乌拉盖一带, 岩性主要为火山熔岩及火山碎屑岩; 白垩系主要出露在贺根山和乌兰查布附近, 岩性为火山碎屑岩及泥质粉砂岩。此外, 区域内还出露第三系砂砾岩及第四系沉积物。

区域经历了海西期和燕山期的多次构造运动, 褶皱及断裂构造发育, 包括以NNE、NE和NNW向断

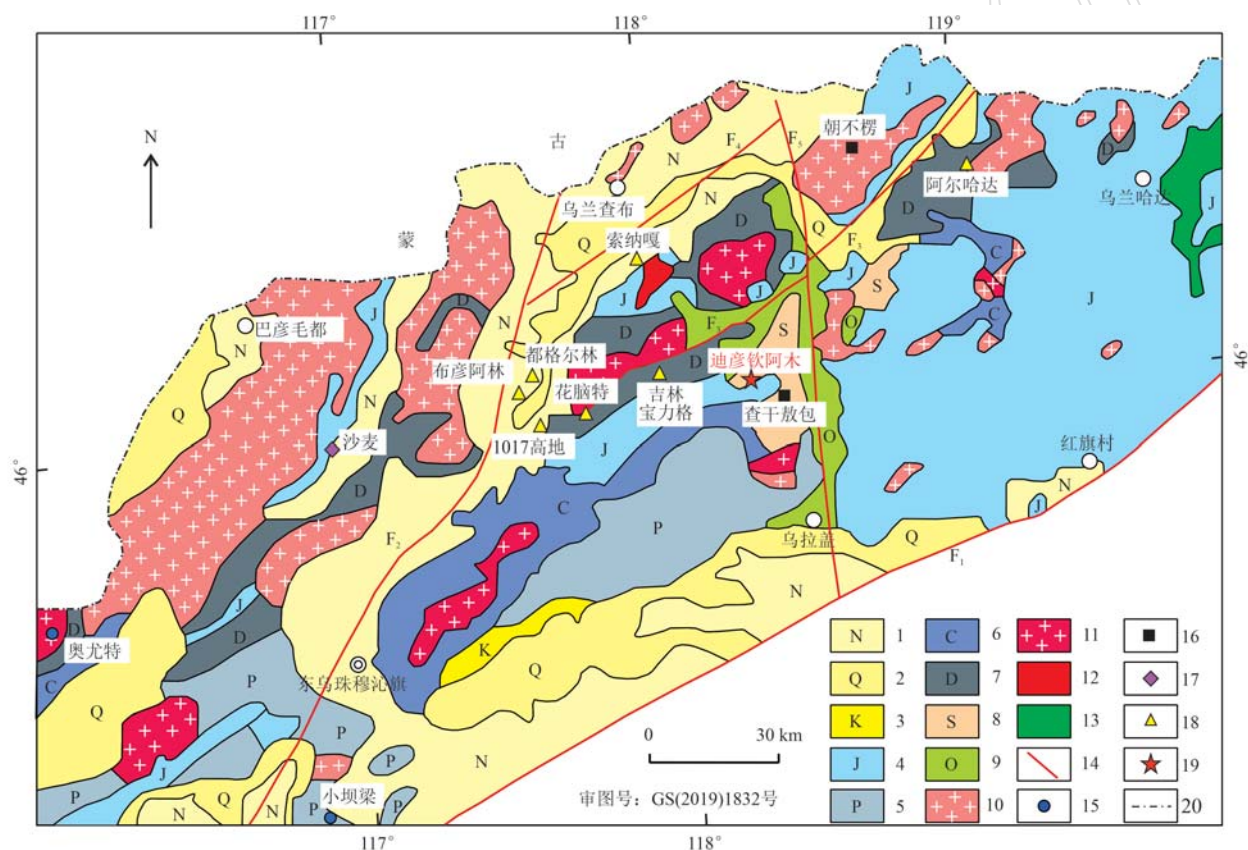


图1 内蒙古东乌旗地区地质简图(据张万益等, 2009修绘)

Fig. 1 Simplified geological map of the Dong Ujimqin Banner, Inner Mongolia (modified after Zhang Wanyi *et al.*, 2009)

1—新近系; 2—第四系; 3—白垩系; 4—侏罗系; 5—二叠系; 6—石炭系; 7—泥盆系; 8—志留系; 9—奥陶系; 10—燕山期花岗岩; 11—海西期花岗岩; 12—石英斑岩; 13—玄武岩; 14—断裂; 15—Cu矿床; 16—Fe多金属矿床; 17—W矿床; 18—Ag-Pb-Zn矿床; 19—Mo矿床; 20—国界线; F₁—二连-贺根山深断裂带; F₂—东乌旗-伊和沙巴尔深大断裂; F₃—白云呼布尔-满都宝力格大断裂; F₄—巴润沙巴尔-朝不楞北大断裂; F₅—朝不楞西-乌拉盖断裂

1—Neocene; 2—Quaternary; 3—Cretaceous; 4—Jurassic; 5—Permian; 6—Carboniferous; 7—Devonian; 8—Silurian; 9—Ordovician; 10—Yanshanian granite; 11—Hercynian granite; 12—quartz porphyry; 13—basalt; 14—fault; 15—Cu deposit; 16—Fe deposit; 17—W deposit; 18—Ag-Pb-Zn deposit; 19—Mo deposit; 20—National boundary line; F₁—Erlan-Hegenshan fault-zone; F₂—Dong Ujimqin Banner Yihebaishaer fault; F₃—Baiyunhubu'er-Mandubaolige fault; F₄—Barunshaba'er-Chaobuleng fault; F₅—Chaobuleng-Wulagai fault

裂为主的断裂构造(图1)和轴向为NE、NEE向的紧闭线型褶皱。东乌旗地区岩浆活动强烈,表现为区域上大规模出露的侵入岩和喷出岩。侵入岩整体呈NE向带状展布,以晚古生代和中生代花岗岩类最为发育。火山岩由酸性、碱性和基性的火山熔岩及火山碎屑岩组成,以晚侏罗世火山岩最为发育,主要岩性为流纹质-英安质熔结凝灰岩、英安岩、流纹质凝灰角砾岩、流纹岩、玄武岩、珍珠岩等(内蒙古自治区地质矿产局,1991)。区内金属矿产以铅-锌、银、铁、钼、铜为主,其次为钨、金、铋等(图1),已发现20余处矿床及矿点。

2 矿床地质特征

迪彦钦阿木矿区内地层出露相对简单,主要为中奥陶统汉乌拉组 and 上侏罗统查干诺尔组(图2)。其中,汉乌拉组岩性主要为凝灰质砂岩、凝灰质板岩和硅质岩,大多分布于矿区北部、东部;查干诺尔组岩性为火山角砾岩、凝灰岩和安山岩,为一套中基性-酸性火山熔岩及火山碎屑岩组合,是矿区的主要赋矿围岩。矿区侵入岩出露较少,仅在少数钻孔岩芯中见小规模岩脉,岩性主要为细粒正长岩和闪斜煌斑岩脉,两者常密切共生。细粒正长岩的主要矿物为钾长石,有时可见少量石英、斜长石和黑

云母(图3a、3b);闪斜煌斑岩的主要矿物组成为斜长石、角闪石(图3c、3d),并可见少量辉石,副矿物主要为钛铁矿和磷灰石。

矿区矿石矿物主要为辉钼矿,矿化类型以浸染状(图4a)和脉状-网脉状(图4b)为主,矿体主要发育在侏罗纪火山岩中,少量发育在细粒正长岩脉中。矿区围岩蚀变广泛发育,主要有钾长石化、硅化、萤石化、绢云母化、绿泥石化、碳酸盐化等,其中钾长石化、硅化、萤石化、绿泥石化与钼矿化关系密切。钾硅化主要表现为火山岩中浸染状钾长石化、硅化(图5a、5b);萤石化是成矿早阶段热液活动的产物,多发育在细粒正长岩中(图5c)或与石英、钾长石构成细脉;绢云母化表现为火山岩围岩中的斜长石被绢云母交代或围岩中出现石英-绢云母脉(图5d);绿泥石化主要是火山岩中绿泥石交代暗色矿物,并常见石英-绿泥石脉,在石英-钾长石脉矿物粒间可见呈放射状的绿泥石(图5e);碳酸盐化为晚期热液活动的表现,可见方解石交代闪斜煌斑岩中的角闪石或表现为围岩中的方解石细脉(图5f)。

迪彦钦阿木矿区脉体发育,围岩中广泛发育石英脉、石英-钾长石脉(图6a)及石英-钾长石-萤石脉,常见石英-钾长石脉被后期的石英-绢云母-黄铁矿脉、石英-绿泥石-黄铁矿脉或碳酸盐脉切穿(图6b),石英脉被石英-绢云母-黄铁矿脉切穿(图6c)。此外,闪斜煌斑岩及围岩中发育大量石英-绿泥石脉,常被后期的碳酸盐脉切穿(图6d)。

根据野外脉体穿插关系及岩、矿相学观察结果,矿区成矿过程可划分为4个成矿阶段。Ⅰ石英-钾长石-萤石阶段:主要表现为细粒正长岩中的石英-钾长石囊团、围岩的钾长石化、硅化或石英-钾长石-萤石脉,其主要矿物组成为钾长石、石英、萤石、辉钼矿等;Ⅱ石英-白云母(绢云母)-黄铁矿阶段:主要表现为围岩的绢云母化或石英-绢云母-黄铁矿脉,其矿物组成主要为石英、黄铁矿、白云母/绢云母、金红石、磷灰石、萤石等,可见少量黄铜矿和辉钼矿;Ⅲ绿泥石-黄铁矿阶段:主要表现为石英-绿泥石-黄铁矿脉、绿泥石-黄铁矿脉或围岩中浸染状绿泥石化、黄铁矿化,主要矿物组成为绿泥石、黄铁矿、闪锌矿、黄铜矿、赤铁矿、石英等;Ⅳ碳酸盐阶段:为热液活动晚期的产物,主要矿物组成为石英、方解石。其中,第Ⅰ阶段的细粒正长岩中的石英-钾长石囊团和围岩中的石英-钾长石-萤石脉是岩浆出溶流体的直接记录,可代表早期出溶流体的特征。



图2 迪彦钦阿木钼矿区岩基地质简图(据 Leng *et al.*, 2015 修绘)

Fig. 2 Simplified bedrock geological map of the Diyanqin'amu Mo deposit (modified after Leng *et al.*, 2015)

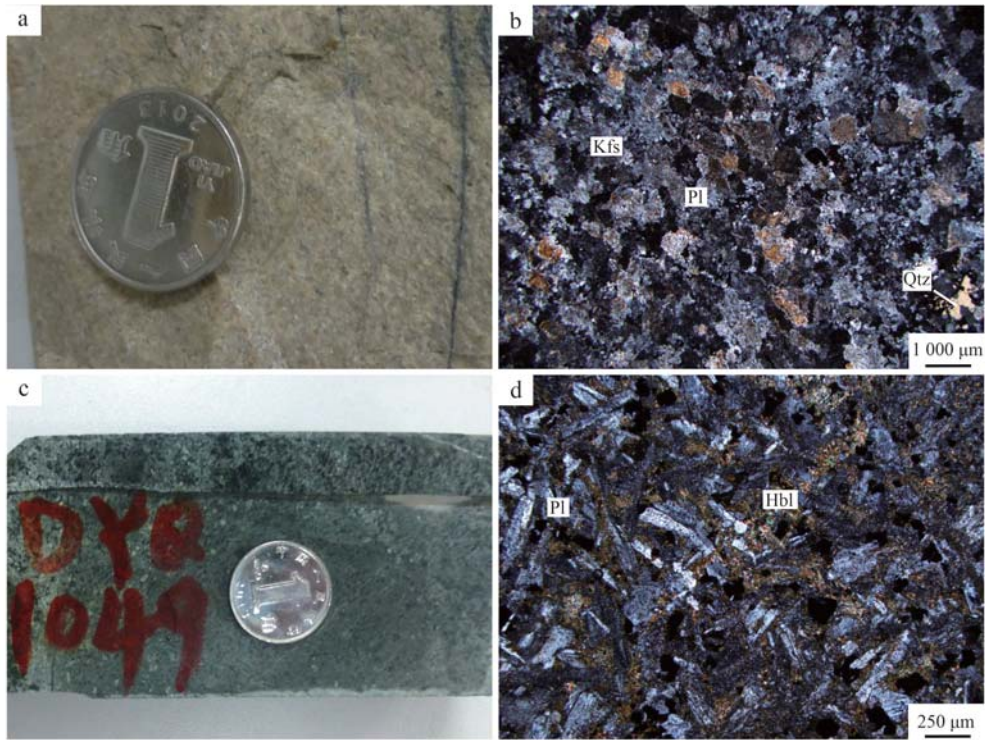


图 3 迪彦钦阿木矿区主要侵入岩的手标本和显微镜下照片

Fig. 3 Hand specimen and micrograph photos of intrusive rocks in Diyanqin'amu Mo deposit
a—细粒正长岩手标本照片; b—细粒正长岩显微照片(正交偏光); c—闪斜煌斑岩手标本照片; d—闪斜煌斑岩显微照片(正交偏光);
Hbl—角闪石; Kfs—钾长石; Pl—斜长石; Qtz—石英
a—fine-grained syenite sample; b—micrograph of fine-grained syenite (crossed-polar light); c—lamprophyre sample; d—micrograph of
lamprophyre (crossed-polar light); Hbl—hornblende; Kfs—K-feldspar; Pl—molybdenite; Qtz—quartz

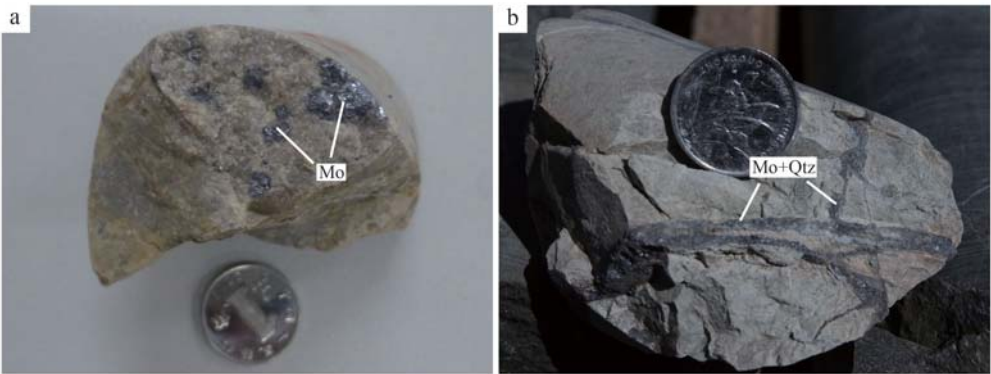


图 4 迪彦钦阿木矿区钼矿化手标本照片

Fig. 4 Photos of different Mo mineralization in Diyanqin'amu deposit
a—细粒正长岩中浸染状钼矿化; b—围岩地层中脉状-网脉状钼矿化; Mo—辉钼矿; Qtz—石英
a—disseminated Mo mineralization in fine-grained syenite; b—vein type Mo mineralization in wall rock; Mo—molybdenite; Qtz—quartz

3 样品及测试方法

本次研究对象为第 I 阶段细粒正长岩中的石英-钾长石囊团和侏罗系火山岩中的石英-钾长石-萤

石脉。显微岩矿相分析、阴极发光成像 (CL) 分析、流体包裹体显微测温分析均在北京科技大学岩矿实验室进行。岩矿相所用仪器为 BX51 型偏光显微镜。阴极发光成像 (CL) 分析利用尼康 CL8200 Mk5-2 型光学阴极发光仪, 配以尼康 LV100NPOL 型偏光显

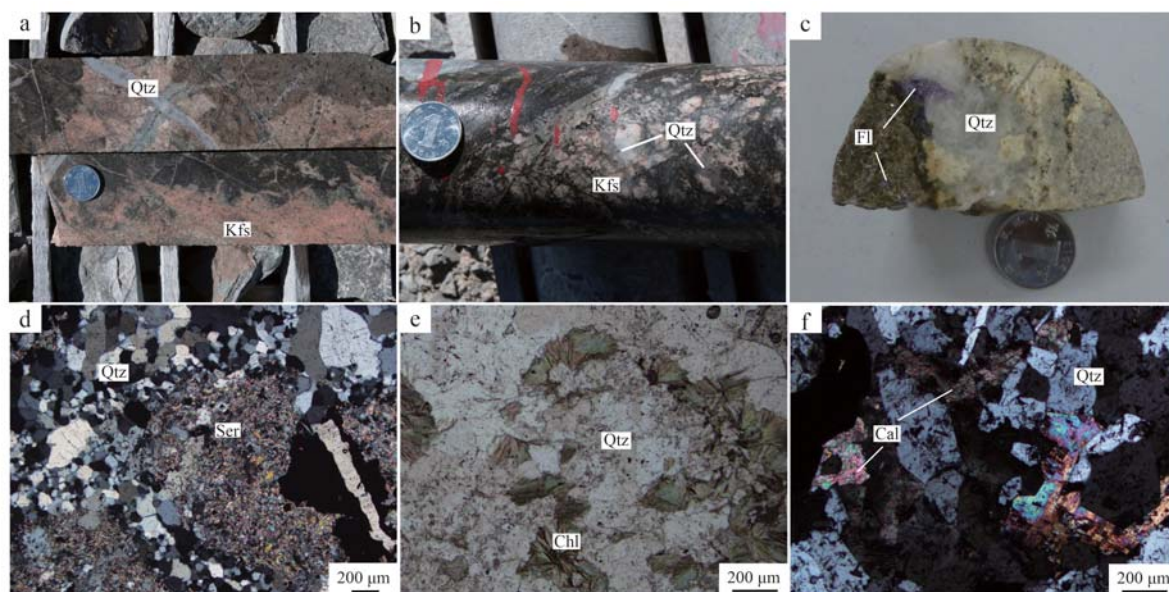


图5 迪彦钦阿木矿区蚀变类型手标本和显微照片

Fig. 5 Field and micrograph photos of different alteration in Diyanqin'amu deposit

a—火山岩中浸染状-网脉状钾长石化蚀变; b—构造带附近火山岩中钾化、硅化蚀变; c—细粒正长岩中硅化、萤石化; d—火山岩中斜长石被绢云母交代(正交偏光); e—石英-钾长石脉粒间呈放射状的绿泥石(单偏光); f—围岩中方解石细脉(正交偏光); Cal—方解石;

Chl—绿泥石; Fl—萤石; Kfs—钾长石; Qtz—石英; Ser—绢云母

a—stockwork-disseminated K-feldspar alteration in volcanic rock; b—disseminated K-feldspar alteration and silication in shear deformed volcanic rock; c—silication and fluoritization in fine-grained syenite; d—feldspar is altered into sericite in volcanic (crossed-polar light); e—chlorite in quartz-K-feldspar vein (plan-polar light); f—carbonatation vein in wall rock (crossed-polar light); Cal—calcite; Fl—fluorite; Chl—chlorite; Kfs—K-feldspar; Qtz—quartz; Ser—sericite

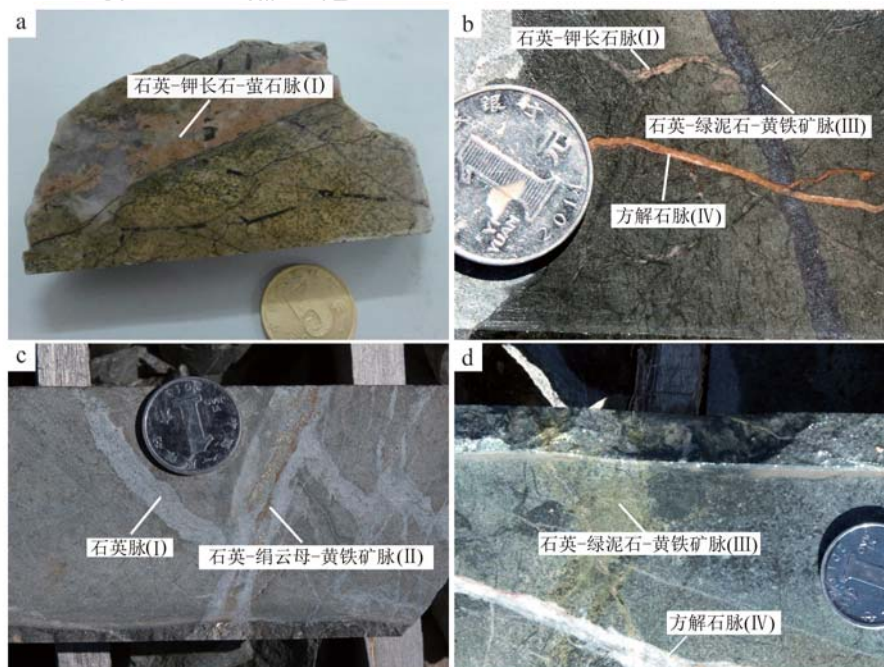


图6 迪彦钦阿木矿区各成矿阶段脉体特征

Fig. 6 Characteristics of veins from different mineralization stages in Diyanqin'amu deposit

a—细粒正长岩中石英-钾长石脉; b—石英-绿泥石-黄铁矿脉切穿早期的石英-钾长石脉, 后又被方解石脉所切穿; c—石英-绢云母-黄铁矿脉切穿早期阶段石英脉; d—石英-绿泥石脉被方解石脉切穿

a—quartz-K-feldspar vein in fine-grained syenite; b—quartz-chlorite-pyrite vein crosscut the quartz-K-feldspar vein, calcite vein crosscut the quartz-chlorite-pyrite vein; c—quartz-sericite-pyrite vein crosscut quartz vein; d—quartz-chlorite veins cut through by calcite veins

显微镜完成,电压 18 kV,束电流 200 μ A。流体包裹体显微测温实验利用 Linkam THMS 600 型冷热台,配以 Olympus BH-51 型偏光显微镜,冷热台测温范围为-196~600 $^{\circ}$ C,测温过程中的升温速率为 0.1~30 $^{\circ}$ C/min,冰点和均一温度附近速率分别为 0.1 $^{\circ}$ C/min 和 1.0 $^{\circ}$ C/min,数据精度分别为 $\pm 0.1^{\circ}$ C 和 $\pm 1.0^{\circ}$ C。

对流体包裹体中矿物的扫描电镜/能谱分析 (SEM/EDS) 分析在北京科技大学岩矿实验室进行。扫描电子显微镜-能谱分析所用的仪器为 Phenom XL 台式扫描电子显微镜 (扫描-X 射线能谱一体机)。扫描电镜加速电压为 15 kV,工作距离为 6~8 nm,高真空背散射电子图像分辨率为 8 nm,最大放大倍数 10 万倍;X 射线激发电压 15 kV,能量范围 0~20 keV,点分析采集时间为 60 s。测试前将样品中石英颗粒破碎至 3~5 mm,将相对平整的断面朝上粘贴在玻璃板上,镀金后置于电镜中进行观察。

流体包裹体激光拉曼探针成分分析 (LRM) 在核工业北京地质研究院进行。显微激光拉曼光谱仪型号为 HOPTBA JOBIN YVON HR800 型,激光波长

633 nm,光源为 Yag 晶体倍频固体激光器,搭配 OLYMPUS BX41 型显微镜。光谱的计数为 6/s,共扫描 6 次,全波段一次取峰。激光束斑大小约为 1 μ m,光谱分辨率 0.14 cm^{-1} 。

激光剥蚀电感耦合等离子质谱分析 (LA-ICP-MS) 在澳大利亚塔斯马尼亚大学 (CODES) 完成,UP-213 激光剥蚀系统配以 Agilent 4500 电感耦合等离子质谱仪。为取得包裹体整体组成,避免选择性取样,激光束斑略大于包裹体直径而能够将整个包裹体完全包裹。流体包裹体元素含量的计算采用最常用的 NaCl 等效盐度为内标的计算方法,详细的计算公式及介绍参见蓝廷广等 (2017)。

4 结果与分析

4.1 细粒正长岩中石英-钾长石囊团或不规则脉体的矿物组成

迪彦钦阿木矿区围岩中常见石英-钾长石脉 (图 7a),其中可见辉钼矿。细粒正长岩中可见石英-钾长石呈囊团或不规则脉状构成细粒正长岩脉的中

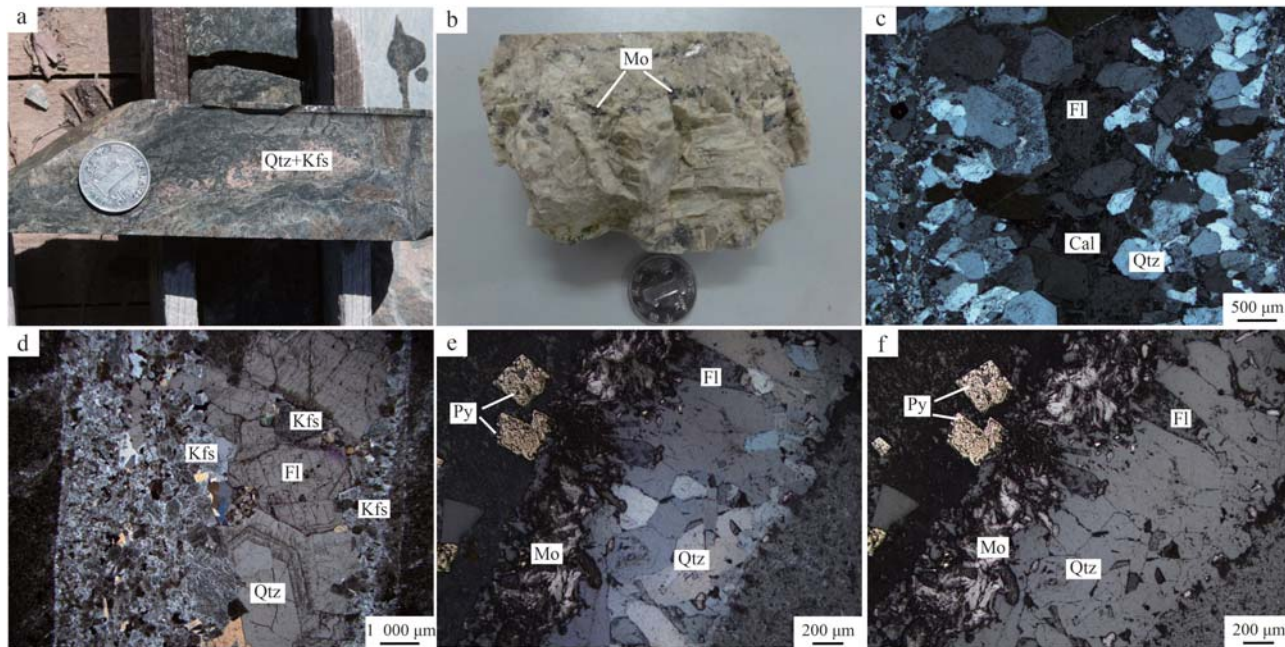


图 7 迪彦钦阿木矿区石英-钾长石囊团及石英-钾长石-萤石细脉的手标本及显微镜下照片

Fig. 7 Field and microscope photos of quartz-K-feldspar capsule and quartz-K-feldspar-fluorite veins in Diyanqin'amu deposit
a—火山岩中石英-钾长石脉; b—采自细粒正长岩脉中的伟晶状石英-钾长石囊团手标本; c—细粒正长岩中石英-萤石脉显微照片 (正交偏光); d—细粒正长岩脉中部的石英、钾长石和萤石,石英和萤石见明显生长环带 (单偏光); e、f—石英-钾长石-萤石脉中发育辉钼矿 (分别为透射光和反光镜下照片); Cal—方解石; Fl—萤石; Kfs—钾长石; Mo—辉钼矿; Py—黄铁矿; Qtz—石英

a—quartz-K-feldspar vein in volcanic; b—sample of quartz-K-feldspar capsule in fine-grained syenite; c—micrography of quartz-fluorite vein in fine-grained syenite (crossed-polar light); d—quartz, K-feldspar and fluorite in fine-grained syenite vein with obvious growth bands (plan-polar light); e, f—molybdenite occurs in quartz-K-feldspar-fluorite vein (transmission light and reflected light, respectively); Cal—calcite; Fl—fluorite; Kfs—K-feldspar; Mo—molybdenite; Py—pyrite; Qtz—quartz

心相(图 7b), 石英-钾长石-萤石脉与细粒正长岩无明显边界, 但钾长石的结晶方向和晶粒大小有明显差别(图 7c、7d)。钾长石-石英-萤石脉中石英和萤石均可见明显的生长环带(图 7d)。岩矿相结果表明, 细粒正长岩中的石英-钾长石囊团/脉主要矿物组成包括石英、钾长石、萤石和辉钼矿(图 7e、7f)。从矿物之间的关系上看, 石英的结晶晚于钾长石, 可见石英在钾长石晶体上生长的现象。阴极发光(CL)图像显示, 脉体中的萤石发光强度较高, 可见到明显的生长环带; 石英的阴极发光性较差, 但仍可见其中清晰、细密的生长环带(图 8a), 显示了热液石英的特征。石英的晶体形态明显受限于萤石(图 8a), 并沿萤石中裂隙发育(切穿生长环带)(图 8b), 表明石英结晶晚于萤石。从萤石和石英的 CL

特征可以看出, 其受后期流体蚀变影响较小, 表明其中的流体包裹体主要为原生流体包裹体。除石英、钾长石外, 脉中还可见辉钼矿和碳酸盐矿物, 碳酸盐矿物主要分布于石英粒间, 表明其形成晚于石英(图 7c)。辉钼矿主要发育在石英粒间, 也有少量发育于萤石中, 但常切穿萤石的生长环带(图 9a、9b), 表明辉钼矿的结晶与石英同期或稍晚。

4.2 流体包裹体岩相学分析结果

由于钾长石透明度较差且解理发育, 本次主要对细粒正长岩中的石英-钾长石囊团和不规则状石英-钾长石-萤石脉中的石英和萤石中的流体包裹体进行了详细的岩相学工作。结果表明, 石英和萤石中流体包裹体组成复杂, 根据流体包裹体室温下的相态特征可以分为如下几类:

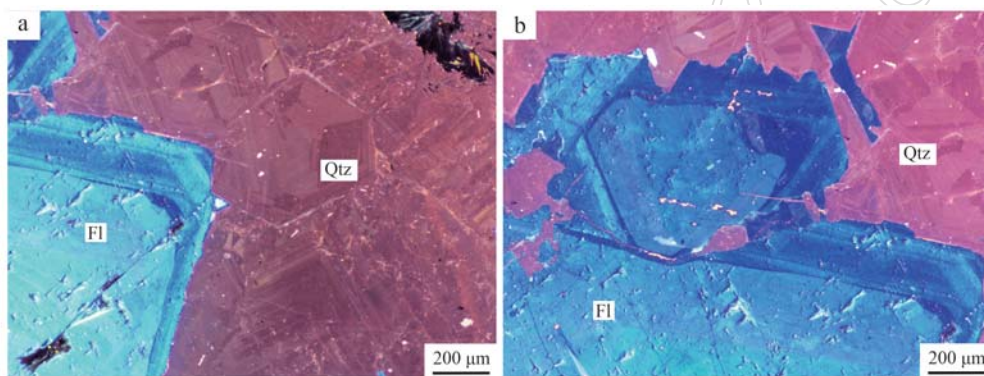


图 8 矿区矿石中石英、萤石的阴极发光(CL)照片

Fig. 8 CL images of quartz and fluorite from ore rocks

a—石英显示明显的生长环带; b—石英切穿萤石的生长环带; Fl—萤石; Qtz—石英

a—quartz shows obvious oscillatory zonation in CL image; b—quartz crosscuts the oscillatory zone of fluorite; Fl—fluorite; Qtz—quartz

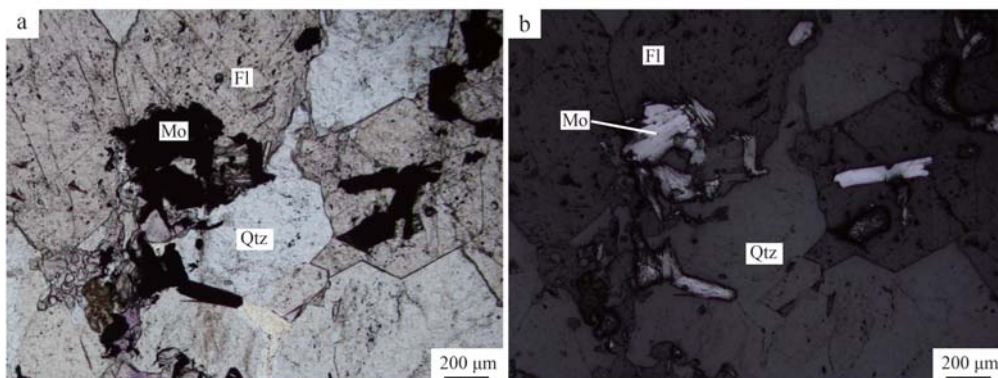


图 9 细粒正长岩脉中的石英-萤石-辉钼矿细脉的显微镜下照片

Fig. 9 Micrograph of quartz-fluorite-Mo veinlets in fine-grained syenite veins

a、b—辉钼矿发育在石英粒间, 切穿萤石颗粒(a 单偏光; b 反射光); Fl—萤石; Mo—辉钼矿; Qtz—石英

a、b—molybdenite develops between quartz grains and cuts through fluorite grains (a plan-polar light; b reflected light); Fl—fluorite;

Mo—molybdenite; Qtz—quartz

含子晶多相包裹体(ADV类):主要呈椭圆形、圆形,室温下由气相、液相和一个或多个子矿物相组成,大小 $5\sim 30\ \mu\text{m}$ 。子矿物的类型包括石盐、钾盐、透明非盐类子矿物和不透明子矿物多种(图10a、10b、10c),其中偶见针状子矿物(图10b)。

气液两相包裹体(AV类):主要为负晶形、圆形、椭圆形、方形和长条形,室温下由气相和液相组成,根据充填度大小可分为富液相包裹体(AV1类)和富气相包裹体(AV2类)。富液相流体包裹体(AV1亚类):主要呈负晶形、圆形、椭圆形和长条形

等(图10d),大小 $5\sim 30\ \mu\text{m}$,气相充填度变化较大,5%~30%不等。富气相流体包裹体(AV2亚类):主要呈负晶形、圆形和多边形等,大小 $6\sim 25\ \mu\text{m}$,气相充填度大于50%(图10e)或室温下由纯气相组成(图10f),常与AV1类包裹体构成包裹体群(图10f)。

石英中ADV类和不同气相充填度的AV类流体包裹体紧密共生,显示了沸腾包裹体群的特征,而萤石中包裹体主要发育AV类,ADV类包裹体不发育。

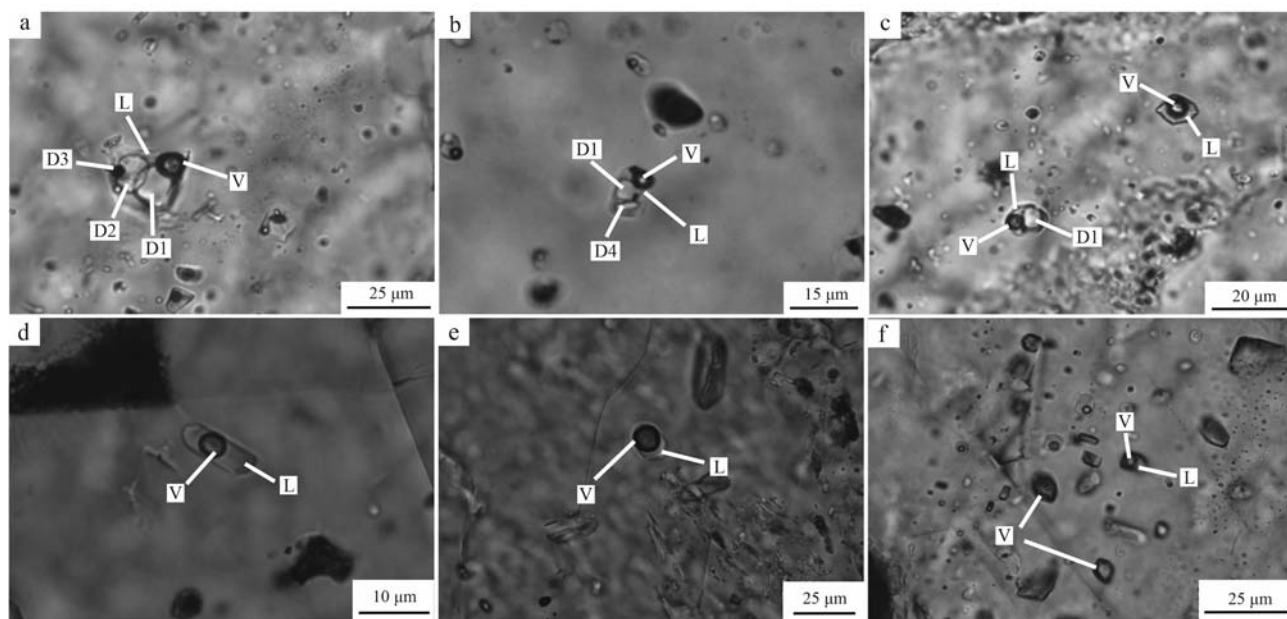


图10 迪彦钦阿木钨矿床石英-钾长石-萤石阶段流体包裹体显微照片

Fig. 10 Microscopic photographs of fluid inclusions in quartz-K-feldspar-fluorite stage of the Diyanqin'amu deposit

a—ADV 类流体包裹体, 含石盐、钾盐及硫化物子矿物; b—ADV 类流体包裹体, 含石盐子矿物和针状子矿物; c—石英中的 ADV+AV 类流体包裹体组合; d—石英中的 AV1 类流体包裹体; e—石英中的 AV2 类流体包裹体; f—萤石中的 AV1 类和 AV2 类流体包裹体组合;

L—液相; V—气相; D1—石盐; D2—钾盐; D3—非透明子矿物; D4—针状透明子矿物

a—ADV type fluid inclusions, containing the daughter minerals of halite, sylvite and sulfide; b—ADV type fluid inclusions containing halite and needle-like daughter mineral; c—ADV + AV type fluid inclusions assemblage in quartz; d—AV1 type fluid inclusions in quartz; e—AV2 type fluid inclusions in quartz; f—AV1 + AV2 type fluid inclusion assemblage in fluorite; L—liquid phase; V—gas phase; D1—halite; D2—sylvite;

D3—opaque daughter mineral; D4—needle-like transparent mineral

4.3 流体包裹体的显微测温分析结果

本次主要对石英、萤石中的流体包裹体进行了显微测温分析, 结果见表1。结果显示, AV1类流体包裹体的完全均一温度主要集中在 $273\sim 457^{\circ}\text{C}$, 升温后均一至液相; 冰点温度在 $-5.5\sim -0.2^{\circ}\text{C}$ 之间, 计算获得流体盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}}) = 0.4\% \sim 8.6\%$ 。AV2类流体包裹体的完全均一温度主要集中在 $227\sim 432^{\circ}\text{C}$, 升温后均一至气相, 冰点温度在 $-5.0\sim$

-0.2°C 之间, 计算获得流体盐度为 $0.3\% \sim 7.8\%$ 。ADV类包裹体的均一温度和盐度均较高, 气液相均一温度变化范围为 $336\sim 446^{\circ}\text{C}$, 石盐子晶熔化的温度范围为 $378\sim 470^{\circ}\text{C}$, 据石盐子晶熔化温度计算获得的流体盐度为 $45.1\% \sim 55.8\%$ 。此类包裹体大多为气泡先消失子晶再熔化而达到完全均一, 个别的包裹体在加热时气泡和子晶近于同时消失, 温度约为 $383\sim 406^{\circ}\text{C}$, 温度较为集中。

表 1 流体包裹体显微测温结果
Table 1 Data of fluid inclusions microthermomete

编号	矿物	类型	$t_{m, ice}/^{\circ}C$	均一方式	$t_{h, total}/^{\circ}C$	$t_{m, halite}/^{\circ}C$	$w(NaCl_{eq})/\%$
DYQ1022	石英	AV1	-5.5~-2.6(3)	→L	389~457(3)		4.3~8.6
		AV2	-5.0(1)	→V	432(1)		7.8
		ADV		→D	341~446(9)	378~470(9)	45.1~55.8
DYQ1007	石英	AV1	-4.7~-4.3(2)	→L	372~395(2)		1.57~8.6
		ADV		→D	336~380(6)	383~430(6)	45.5~50.9
DYQ1023	萤石	AV1	-3.2~-0.2(3)	→L	273~346(3)		0.4~5.3
		AV2	-1.5~-0.2(2)	→V	227~260(2)		0.3~2.6

注: $t_{m, ice}$ 为冰点温度; $t_{h, total}$ 为气液相均一温度; $t_{m, halite}$ 为子晶溶化温度(计算公式据 Hall *et al.*, 1988)。

4.4 流体包裹体成分分析结果

4.4.1 单个流体包裹体的激光拉曼探针分析

石英中 AV 类流体包裹体的激光拉曼显微探针分析结果显示, AV1 类包裹体气、液相成分以 H_2O 为主(图 11a、11b); AV2 类包裹体气相成分主要为 CO_2 、 N_2 (图 11c), 有些纯气相包裹体中还检测到 C_2H_4 、 C_2H_6 (图 11d)。

4.4.2 包裹体中子矿物的 SEM/EDS 分析

显微岩相学观察发现 ADV 类流体包裹体中常见多种(图 10a~10c), 包括透明和不透明两类。透明子矿物常具有一定的晶型, 加热至一定温度(378~470 $^{\circ}C$)可熔化, SEM/EDS 分析显示其为石盐(图

12a)和钾石盐(图 12b)。另有一些子矿物加热至 500 $^{\circ}C$ 以上仍不熔化, SEM/EDS 分析主要为以下几种子矿物: ① 具有立方体晶型, 能谱分析显示具有明显的 Fe 和 S 的峰值, 应为黄铁矿(图 12c); ② 半透明, 菱面体晶型, 能谱分析显示具有 Fe、Mn 和 C 的峰, 可能为铁锰碳酸盐, 与石盐子矿物共生(图 12d、12e); ③ 不透明, 能谱分析显示具有 Cu、Fe 和 S 的峰值, 应为黄铜矿(图 12f)。

4.4.3 单个包裹体成分的 LA-ICP-MS 分析

本次主要对石英-钾长石脉中含石盐子矿物的高盐度流体包裹体进行了成分分析。由于包裹体尺寸较小, 获得的 LA-ICP-MS 分析测试结果有限, 仅

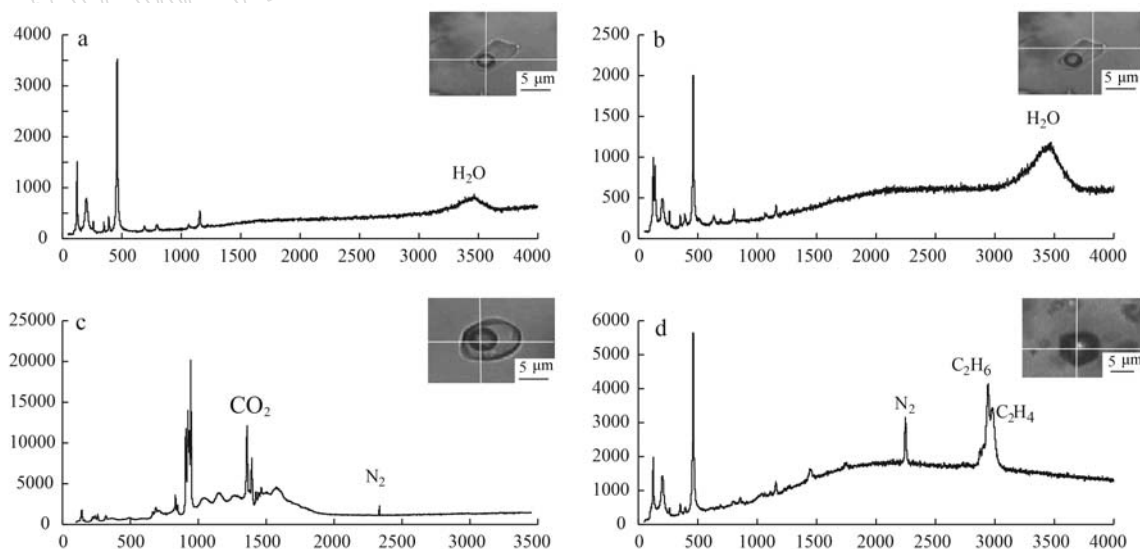


图 11 石英-钾长石囊团中流体包裹体激光拉曼谱图

Fig. 11 Laser Raman spectrums of fluid inclusions of quartz-K-feldspar capsule from Diyanqin'amu Mo deposit

a—AV1 类包裹体中气相 H_2O 的光谱; b—AV1 类包裹体中液相 H_2O 的光谱; c—AV2 类包裹体中 CO_2 和 N_2 的光谱; d—AV2 类包裹体中 N_2 、 C_2H_6 和 C_2H_4 的光谱

a—spectra of H_2O (gas phase) in type AV1 inclusions; b—spectra of H_2O (liquid phase) in type AV1 inclusions; c—spectra of CO_2 and N_2 in type AV2 inclusions; d—spectra of N_2 、 C_2H_6 and C_2H_4 in type AV2 inclusions

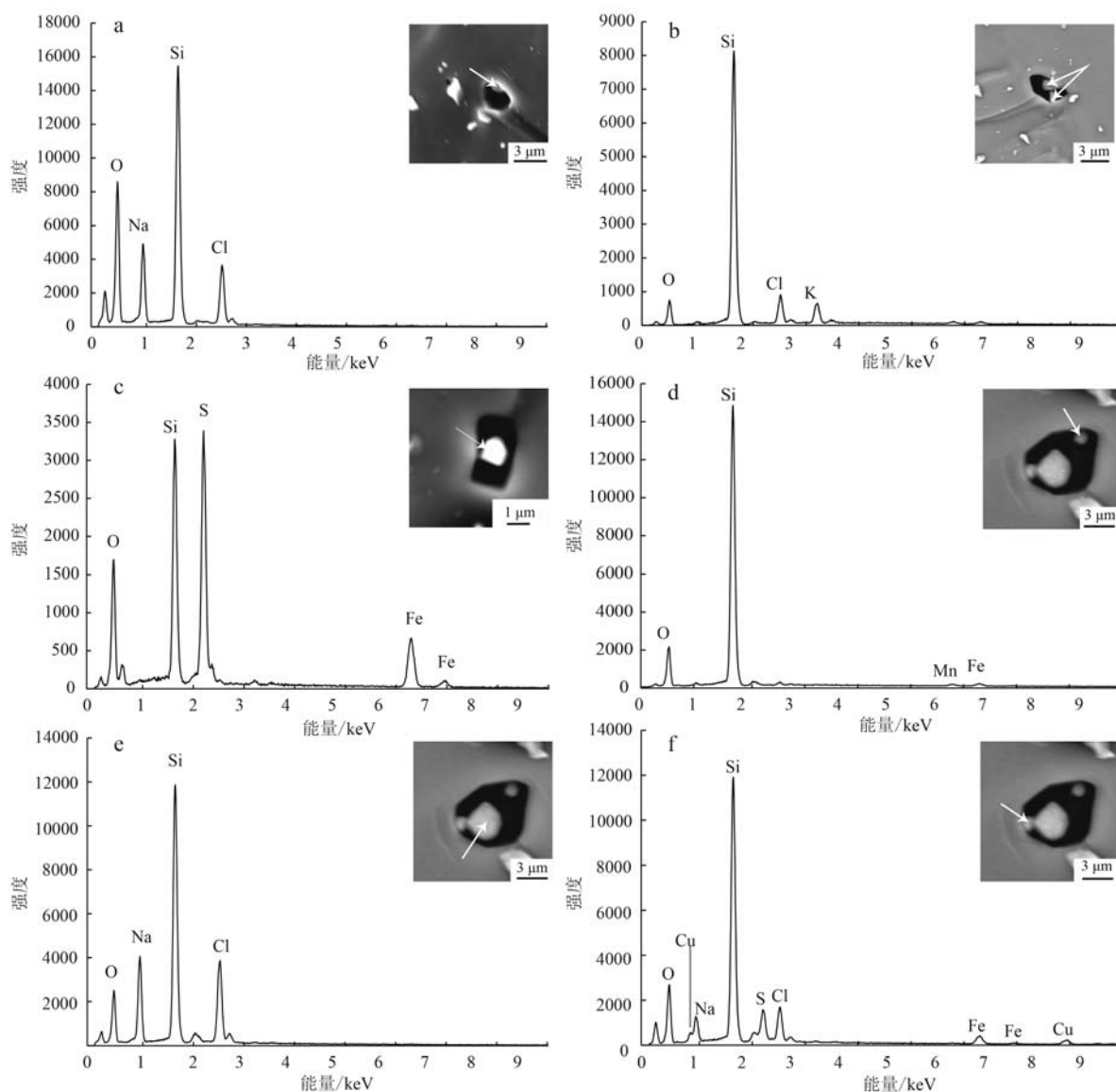


图 12 石英-钾长石囊团流体包裹体中子矿物背散射(BSE)和X射线能谱图(EDS)

Fig. 12 BSE images and X-ray energy spectrums of daughter minerals in fluid inclusions from quartz-K-feldspar capsule
a—流体包裹体中石盐子矿物背散射图像和能谱; b—流体包裹体中钾石盐子矿物背散射图像和能谱; c—流体包裹体中黄铁矿子矿物背散射图像和能谱; d,e,f—流体包裹体中共生的铁锰碳酸盐(d)、石盐(e)、黄铜矿(f)子矿物的背散射图像和能谱
a—BSE image and X-ray energy spectra of halite in fluid inclusion; b—BSE image and X-ray energy spectra of sylvite in fluid inclusion; c—BSE image and X-ray energy spectra of pyrite in fluid inclusion; d,e,f—BSE image and X-ray energy spectra of paragenetic Fe-Mn carbonate(d), halite(e) and chalcopyrite(f) in fluid inclusion

有的数据显示石英中含子矿物多相包裹体中除了明显的Na、K、Cl峰外,Fe、Mn、Pb、Zn、As、Cu、Sb、Ba、Sr、La、Ce也明显高于背景值,表明流体中富含多种成矿金属元素(图13),高的Fe、Mn、Cu含量也与流体包裹体中黄铁矿、铁锰碳酸盐和黄铜矿子矿物的结果吻合。

5 讨论

5.1 流体出溶机制及出溶流体特征

岩浆流体出溶在岩浆-热液系统中发挥着关键作用,出溶流体可携带大量的成矿金属元素并富集,

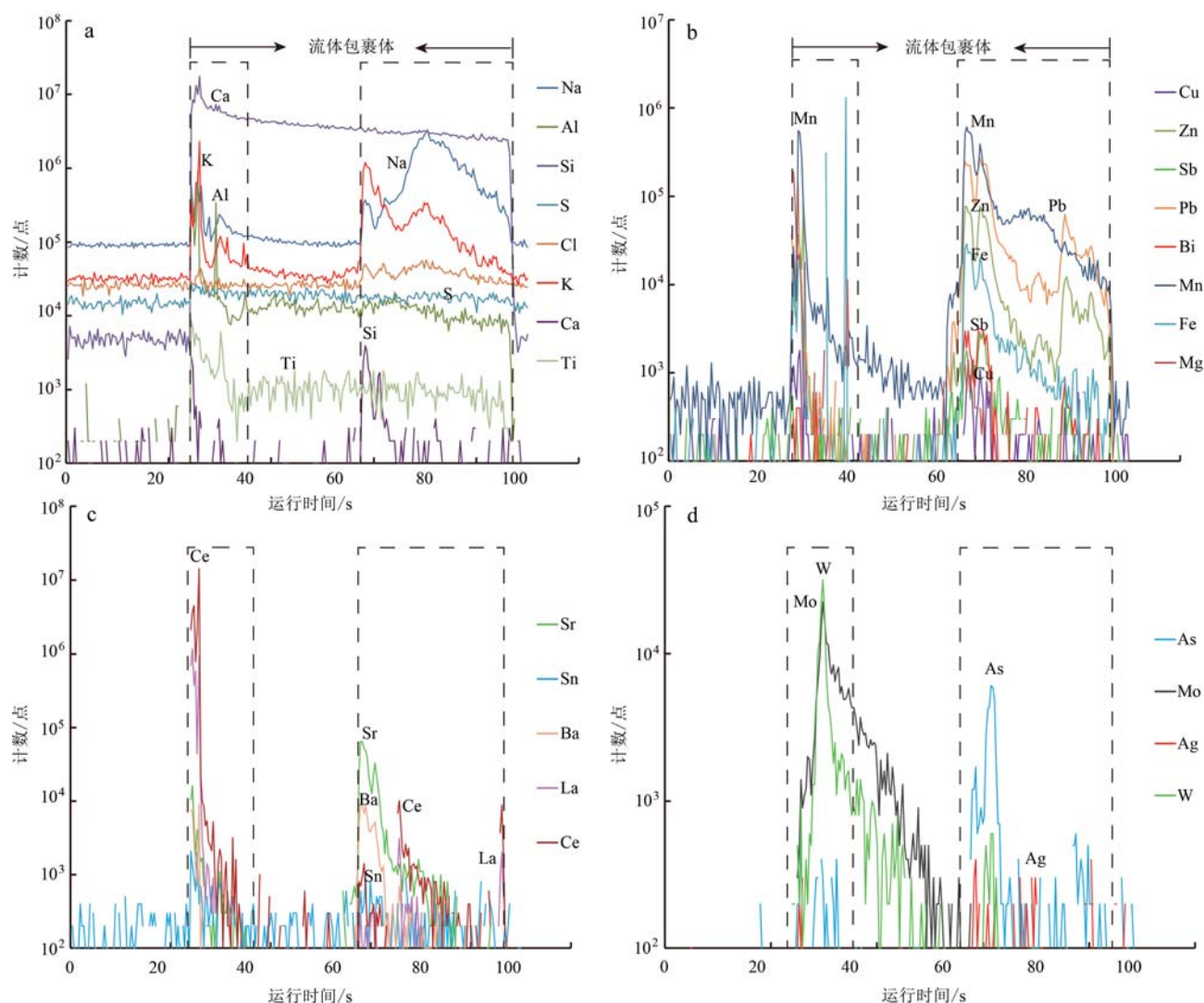


图 13 石英-钾长石脉中高盐度流体包裹体的 LA-ICP-MS 谱图

Fig. 13 LA-ICP-MS spectrum of a high salinity fluid inclusion hosted by quartz-K-feldspar vein

a—流体包裹体中富集 Na、Al、Si、K、Cl 元素；b—流体包裹体中富集 Cu、Pb、Zn、Sb 元素；c—流体包裹体中富集 La、Ce、Sn、Ba、Sr 元素；d—流体包裹体中富集 W、Mo、Ag、As 元素

a—enriched in Na, Al, Si, K, Cl in fluid inclusion; b—enriched in Cu, Pb, Zn, Sb in fluid inclusion; c—enriched in La, Ce, Sn, Ba and Sr in fluid inclusion; d—enriched in W, Mo, Ag, As in fluid inclusion

进而形成与岩浆热液有关的金属矿床 (Shinohara, 1994; Kamenetsky *et al.*, 1999)。迪彦钦阿木矿区侵入岩不发育, 仅见呈脉状侵位的细粒正长岩和闪斜煌斑岩, 且脉体平直, 有时可见显微尺度的细粒正长岩脉, 表明岩浆具有低黏度的特征。前人研究表明, 碱质、F、CO₂、H₂O 的存在可以有效降低岩浆的黏度和固相线温度, 富水的碱性硅酸盐熔体的温度可以低到 350℃ (Huang *et al.*, 2009), 低黏度和低的固相线温度可以使熔体沿断裂上侵至浅部, 并造成岩浆中出溶流体的温度明显低于一般云英质岩浆出溶流体 (Ackerson *et al.*, 2018)。低黏度也有利

于岩浆流体的出溶和聚集。岩浆中流体出溶造成的岩浆淬冷导致了正长岩的细粒结构。从细粒正长岩的结构及其中的石英-钾长石囊团产状可推测, 岩浆快速侵位造成的减压沸腾可能是流体出溶的主要机制。本次对代表岩浆出溶流体记录的石英-钾长石囊团和脉体中萤石和石英中流体包裹体的显微测温结果表明, 其均一温度并不高 (<457℃), 这可能与岩浆中富碱和多种挥发分 (如 F、CO₂、H₂O) 有关。石英-钾长石囊团中普遍发现萤石, 石英流体包裹体中发现有黄玉和碳酸盐矿物, 这些均表明岩浆是富 F 和 CO₂ 的。

从石英-钾长石囊团中矿物的生成顺序可以看出, 萤石先于石英结晶, 萤石中流体包裹体组合为气液两相富液相流体包裹体和富气相包裹体, 高盐度流体包裹体不发育, 流体为低盐度、含 CO_2 流体, 表明早期岩浆出溶流体为含 CO_2 的低盐度流体。与水相比, CO_2 在岩浆中的溶解度受压力的影响明显高于水, 因此减压会首先造成 CO_2 出溶, 因此早期流体中更富 CO_2 , 这也可以从萤石中流体包裹体气相中更富 CO_2 得到证实。石英中的流体包裹体组合为含子晶的高盐度包裹体、富液相流体包裹体和富气相流体包裹体, 且含子矿物的高盐度流体包裹体与富气相流体包裹体具有相似的均一温度, 显示了沸腾包裹体组合的特征, 表明岩浆流体出溶后经历了流体的沸腾作用。流体包裹体中矿物的 SEM/EDS 结果表明, 除石盐子矿物外, 其中还发现有钾石盐、黄铁矿、黄铜矿和铁锰碳酸盐子矿物, 表明成矿流体中富含 Fe、Mn、Cu 等成矿金属。LA-ICP-MS 分析结果也表明, 流体中除含有 Cl、Na、K 外, 其 Fe、Cu、Sr、Ba、Ce、La 也显示了明显的峰, 表明出溶流体富含多种成矿金属及 Sr、Ba、REEs。

5.2 成矿物质迁移和沉淀机制

斑岩系统中岩浆-流体的转化过程、金属元素进入流体的方式、成矿金属元素在结晶相和流体相之间的不均匀分配是影响金属成矿作用的重要因素(张德会等, 2001; 徐兴旺等, 2012)。对 Mo 在流体中的迁移形式和沉淀机制前人进行了大量的研究, 但仍存在不同的认识。有学者认为, 斑岩钼矿的成矿流体主要为 $\text{NaCl-H}_2\text{O}(\pm\text{CO}_2)$ 体系, 可含少量 KCl 、 SO_2 、 H_2S 、 CH_4 、 HF 等, 早期成矿流体主要为岩浆水, 晚期可能会混合部分大气水并认为 Mo 元素是以 Cl^- 络合物的形式迁移(Heinrich, 2005); 但也有学者认为 Mo 只有在酸性条件下才能与 Cl^- 形成络合物, 根据 Lewis 酸碱理论, Mo^{4+} 为硬酸, 在流体中可与硬碱配体(如 HCO_3^- 和 CO_3^{2-}) 形成络合物进行迁移(Robb, 2005)。对石英中高盐度流体包裹体的 LA-ICP-MS 分析结果表明, 其中富含多种成矿金属, 但 Mo 未见明显的峰值, 而与石英同期的矿物组合中可见辉钼矿, 表明在流体沸腾过程中辉钼矿发生了沉淀。从流体包裹体组合看, 萤石中的流体包裹体更富 CO_2 , 并可见富 CO_2 的气相包裹体与富水的流体包裹体共存, 而石英中的流体包裹体以高盐度流体包裹体和富水的气液相流体包裹体为主, 表明 CO_2 在流体沸腾过程中主要进入气相。 CO_2 的逃逸

造成残余流体中 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 含量降低, 而萤石的结晶可以造成流体中 F^- 的降低, 这可能是造成辉钼矿沉淀的主要原因。

6 结论

(1) 迪彦钦阿木钼矿区细粒正长岩中发育大量石英-钾长石囊团, 是岩浆出溶流体的直接记录, 其中辉钼矿的发现表明成矿与正长岩出溶流体有关。石英-钾长石囊团中萤石的发现及石英和萤石中大量发育的流体包裹体表明成矿岩浆具有富 F、 CO_2 和 H_2O 的特征。富碱和挥发分造成岩浆具有低黏度和低固相线温度, 因此有利于岩浆的快速上侵和流体出溶。

(2) 钾硅化蚀变矿物组成和流体包裹体岩相学、显微测温 and 成分分析结果表明, 岩浆出溶流体具有中高温($\sim 457^\circ\text{C}$)、中低盐度、富 F 和含 CO_2 的特征, 出溶流体中富含 Mo、Pb、Zn、Fe、Cu、Sr、Ba、REEs 等多种成矿元素。

(3) 萤石和石英中流体包裹体组合特征表明, 岩浆出溶流体经历了流体沸腾作用, 萤石的结晶造成的流体中 F^- 含量降低及流体沸腾造成的 CO_2 逃逸可能是辉钼矿沉淀的主要原因。

References

- Ackerson M R, Mysen B O, Tailby N D, *et al.* 2018. Low-temperature crystallization of granites and the implications for crustal magmatism [J]. *Nature*, 559(7712): 94~97.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Inner Mongolia Autonomous Region (BGMRI). 1991. *Geology of Inner Mongolia Autonomous Region* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~725 (in Chinese).
- Chen Weijun, Liu Jianming, Liu Hongtao, *et al.* 2010. Geochronology and fluid inclusion study of the Jiguanshan porphyry Mo deposit, Inner Mongolia [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(5): 1 423~1 436 (in Chinese with English abstract).
- Eizenhofer P R and Zhao G C. 2018. Solonker suture in East Asia and its bearing on the final closure of the eastern segment of the Palaeo-Asian Ocean [J]. *Earth-Science Reviews*, 186: 153~172.
- Hall D L, Sterner S M and Bodnar R J. 1988. Freezing point depression of $\text{NaCl-KCl-H}_2\text{O}$ solutions [J]. *Economic Geology*, 83: 197~202.

- Harris A C, Kamenetsky V S and White N C. 2003. The magmatic-hydrothermal transition: Volatile separation in silicic rocks at Bajo de la Alumbrera porphyry Cu-Au deposit, NW Argentina [A]. *Magma to Mineralisation: The Ishihara Symposium* [C]. Sydney, 69~74.
- Heinrich C A. 2005. The physical and chemical evolution of low-salinity magmatic fluids at the porphyry to epithermal transition: A thermodynamic study [J]. *Mineralium Deposita*, 39: 864~889.
- Huang Fang, Lundstrom C C, Glessner J, *et al.* 2009. Chemical and isotopic fractionation of wet andesite in a temperature gradient: Experiments and models suggesting a new mechanism of magma differentiation [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(3): 729~749.
- Jin Yan, Liu Yutang and Xie Yuling. 2005. Relationship between magmatism and polymetal mineralization in Dongwuqi area, Inner Mongolia [J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 21(1): 8~12 (in Chinese with English abstract).
- Kamenetsky V S, Wolfe R C, Eggins S M, *et al.* 1999. Volatile exsolution at the Dinkidi Cu-Au porphyry deposit, Philippines: A melt-inclusion record of the initial ore-forming process [J]. *Geology*, 27: 691~694.
- Lan Tingguang, Hu Ruizhong, Fan Hongrui, *et al.* 2017. In-situ analysis of major and trace elements in fluid inclusion and quartz: LA-ICP-MS method and applications to ore deposits [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(10): 3 239~3 262 (in Chinese with English abstract).
- Leng Chengbiao, Zhang Xingchen, Huang Zhilong, *et al.* 2015. Geology, Re-Os ages, sulfur and lead isotopes of the Diyanqinamu porphyry Mo deposit, Inner Mongolia, NE China [J]. *Economic Geology*, 110(2): 557~574.
- Li Lamei, Xie Yuling, Li Fengguo, *et al.* 2017. Molybdenite Re-Os age and characteristics of ore-forming fluid of the Dongbulage Mo-Pb-Zn deposit, Inner Mongolia [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 41(1): 1~15 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jianming, Zhang Rui and Zhang Qingzhou. 2004. The regional metallogeny of Da Hinggan Ling, China [J]. *Earth Science Frontiers*, 11(1): 269~277 (in Chinese with English abstract).
- Lowenstern J B and Sinclair W D. 1996. Exsolved magmatic fluid and its role in the formation of comb-layered quartz at the Cretaceous Logtung W-Mo deposit, Yukon Territory, Canada [J]. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 87: 291~303.
- Nie Fengjun, Jiang Sihong, Zhang Yiliu, *et al.* 2007. Metallogeny and Ore Prospecting of Ore Deposits Occurring Along the Border Region of China and Mongolia [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~574 (in Chinese).
- Nie Fengjun, Sun Zhenjiang, Li Chao, *et al.* 2011. Re-Os isotopic dating of molybdenite separates from Chalukou porphyry Mo polymetallic deposit in Heilongjiang Province [J]. *Mineral Deposits*, 30(5): 828~836 (in Chinese with English abstract).
- Robb L. 2005. *Introduction to Ore-Forming Processes* [M]. England: Blackwell Publishing, 1~373.
- Shinohara H. 1994. Exsolution of immiscible vapor and liquid phases from a crystallizing silicate melt: Implications for chlorine and metal transport [J]. *Geochimica et Cosmochimica*, 58: 5 215~5 221.
- Wang Pin. 2015. Comparative Study of Porphyry Mo Mineralization in Continental Collision and Magmatic Arc-Insights from Yaochong and Diyanqinamu Porphyry Mo Deposits [D]. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences (in Chinese with English abstract).
- Wang Pin, Chen Yanjing, Wang Chengming, *et al.* 2017. Genesis and tectonic setting of the giant Diyanqin'amu porphyry Mo deposit in Great Hingan Range, NE China: Constraints from U-Pb and Re-Os geochronology and Hf isotopic geochemistry [J]. *Ore Geology Reviews*, 81: 760~779.
- Wilhem C, Windley B F and Stampfli G M. 2012. The Altaids of Central Asia: A tectonic and evolutionary innovative review [J]. *Earth-Science Reviews*, 113: 3~4.
- Xie Yuling, Li Lamei, Li Yingxu, *et al.* 2015. Yanshanian Molybdenum (Tungsten)-Lead-Zinc (Silver) Metallogenic System in East Wuzhumu Banner, Inner Mongolia [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~107 (in Chinese).
- Xu Xingwang, Wu Qi, Huang Xuefei, *et al.* 2012. Formation mechanism and evolution process of copper-rich porphyry magma [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(2): 421~432 (in Chinese with English abstract).
- Yan Hao, Huang Feixin, Sun He, *et al.* 2012. A model for alteration zoning of hydrothermal mineralization based on Surpac software for the Diyanqinamu Mo mine district, Inner Mongolia [J]. *Geology and Exploration*, 48(5): 932~939 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Qingdong, Liu Jianming, Chu Shaoxiong, *et al.* 2016. Poly-metal mineralization and exploration potential in southern segment of the Da Hinggan Mountains [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 46(4): 1 100~1 123 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Dehui, Zhang Wenhui and Xu Guojian. 2001. Exsolution and evolution of magmatic hydrothermal fluids and their constraints on the porphyry ore-forming system [J]. *Earth Science Frontiers*, 8(3): 193~202 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Hao, Zhang Yifei, Xu Yanhui, *et al.* 2016. Geological characteristics of the Diyanqin'amu molybdenum deposit in Inner Mongolia and

- its mineralization genesis[J]. *Geology and Exploration*, 52(3): 451~461 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Wanyi, Nie Fengjun, Jiang Sihong, *et al.* 2009. Magmatic Activity and Metallogeny of Dong Ujimqin Banner Inner Mongolia[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~128 (in Chinese).
- Zhao Yiming, Wang Dawei and Zhang Dequan. 1994. Ore-Controlling Factors and Ore-Prospecting Models for Copper-Polymetallic Ore Deposits in Southeastern Inner Mongolia[M]. Beijing: Seismological Publishing House, 1~234 (in Chinese).
- ### 附中文参考文献
- 陈伟军, 刘建明, 刘红涛, 等. 2010. 内蒙古鸡冠山斑岩钼矿床成矿时代和成矿流体研究[J]. *岩石学报*, 26(5): 1 423~1 436.
- 金 岩, 刘玉堂, 谢玉玲. 2005. 内蒙古东乌旗地区岩浆活动与多金属成矿的关系[J]. *华南地质与矿产*, 21(1): 8~12.
- 蓝廷广, 胡瑞忠, 范宏瑞, 等. 2017. 流体包裹体及石英 LA-ICP-MS 分析方法的建立及其在矿床学中的应用[J]. *岩石学报*, 33(10): 3 239~3 262.
- 李腊梅, 谢玉玲, 李凤国, 等. 2017. 内蒙古东不拉格钼铅锌矿床的成矿年代及成矿流体特征[J]. *大地构造与成矿学*, 41(1): 1~15.
- 刘建明, 张 锐, 张庆洲. 2004. 大兴安岭地区的区域成矿特征[J]. *地学前缘*, 11(1): 269~277.
- 内蒙古自治区地质矿产局. 1991. 内蒙古自治区区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1~725.
- 聂凤军, 江思宏, 张义刘, 等. 2007. 中蒙边境中东段金属矿床成矿规律和找矿方向[M]. 北京: 地质出版社, 1~574.
- 聂凤军, 孙振江, 李 超, 等. 2011. 黑龙江岔路口钼多金属矿床辉钼矿-同位素年龄及地质意义[J]. *矿床地质*, 30(5): 828~836.
- 王 玘. 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[D]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所.
- 谢玉玲, 李腊梅, 李应栩, 等. 2015. 内蒙古东乌珠穆沁旗地区燕山期钼(钨)-锌(银)成矿系统[M]. 北京: 地质出版社, 1~107.
- 徐兴旺, 吴 琪, 黄雪飞, 等. 2012. 富铜斑岩岩浆形成机制与演化过程[J]. *岩石学报*, 28(2): 421~432.
- 阎 浩, 黄费新, 孙 赫, 等. 2012. 内蒙古迪彦钦阿木钼矿区热液矿化蚀变分带建模——基于 Surpac 软件[J]. *地质与勘探*, 48(5): 932~939.
- 曾庆栋, 刘建明, 褚少雄, 等. 2016. 大兴安岭南段多金属矿成矿作用和找矿潜力[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 46(4): 1 100~1 123.
- 张德会, 张文淮, 许国建. 2001. 岩浆热液出溶和演化对斑岩成矿系统金属成矿的制约[J]. *地学前缘*, 8(3): 193~202.
- 张 昊, 张乙飞, 胥燕辉, 等. 2016. 内蒙古迪彦钦阿木钼矿的地质特征和矿床成因[J]. *地质与勘探*, 52(3): 451~461.
- 张万益, 聂凤军, 江思宏, 等. 2009. 内蒙古东乌珠穆沁旗岩浆活动与金属成矿作用[M]. 北京: 地质出版社, 1~128.
- 赵一鸣, 王大畏, 张德全. 1994. 内蒙古东南部铜多金属成矿地质条件及找矿模式[M]. 北京: 地震出版社, 1~234.