



# 大别造山带沙坪沟斑岩型钼-热液脉型铅锌矿成矿系统：流体包裹体及稳定同位素约束

王莹<sup>1</sup>, 谢玉玲<sup>1</sup>, 钟日晨<sup>1</sup>, 王爱国<sup>2</sup>, 吴皓然<sup>1</sup>, 安卫军<sup>1</sup>

(1. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083;

2. 中国地质科学院 南京地质矿产研究所, 南京 210016)

**摘要:** 沙坪沟钼矿床位于安徽省金寨县, 大地构造位置属于大别造山带东段, 是世界第二大斑岩型钼矿床。沙坪沟钼矿外围发现有银山、盖井等多处铅锌矿床, 但其与斑岩型钼矿的成因联系不明。以沙坪沟斑岩型钼矿及矿区北部的银山铅锌矿为研究对象, 在野外地质调研的基础上, 通过流体包裹体岩相学、显微测温学、显微激光拉曼和稳定同位素等研究, 系统阐明斑岩型钼矿与外围铅锌矿的成矿流体来源、成矿流体特征及演化、成矿物质来源, 初步建立斑岩型钼矿与周边铅锌矿的成因联系。流体包裹体岩相学结果表明, 沙坪沟斑岩型钼矿主要发育 3 类流体包裹体, 包括 AV 类(气液两相包裹体)、AC 类(富 CO<sub>2</sub> 三相包裹体)、ADV 类(含子晶多相包裹体)。成矿早阶段三种类型均有发育, 均一温度范围为 325~420 °C, AV 和 AC 类盐度介于 0.8%~15.4% NaCl<sub>eqv</sub>(质量分数)之间, ADV 类盐度介于 33%~46% NaCl<sub>eqv</sub> 之间。成矿中阶段发育 AV 类、AC 类和 ADV 类, 均一温度范围为 226~367 °C, AV 类与 AC 类盐度介于 0.4%~13.2% NaCl<sub>eqv</sub> 之间, ADV 类盐度介于 33.3%~39.6% NaCl<sub>eqv</sub> 之间。成矿晚阶段主要发育 AV 类包裹体, 均一温度范围为 185~300 °C, 盐度介于 0.7%~8.4% NaCl<sub>eqv</sub> 之间。银山铅锌矿主成矿阶段石英中只发育 AV 类包裹体, 其均一温度范围为 175~315 °C, 盐度介于 0.6%~4.9% NaCl<sub>eqv</sub> 之间。流体包裹体中水的 H-O 同位素结果表明, 沙坪沟钼矿成矿早阶段流体主要来自岩浆水, 晚期铅锌矿化阶段, 成矿热液为岩浆水与大气水的混合, 与银山铅锌矿主成矿阶段石英中流体包裹体中水的 H-O 同位素相似。S 同位素数据表明两矿床主成矿阶段硫化物的硫元素主要来自深源岩浆, Pb 同位素数据显示矿石铅具有壳幔混源的特征。S、Pb、H、O 同位素及流体包裹体特征均指示, 研究区钼矿及铅锌矿床具有一致的物质来源, 成矿流体具有由高温-高盐度岩浆热液流体向中低温-低盐度流体和从富 CO<sub>2</sub> 至贫 CO<sub>2</sub> 的演化趋势, 沙坪沟周边铅锌矿为斑岩成矿系统的组成部分。

**关键词:** 流体包裹体; H-O-S-Pb 同位素; 钼铅锌成矿系统; 沙坪沟; 大别造山带

文章编号: 1004-0609(2019)-03-0628-21

中图分类号: P611

文献标志码: A

中国是世界上的钼资源量大国, 仅次于美国位居世界第二, 且中国一半以上钼资源来自东秦岭大别钼成矿带<sup>[1]</sup>。东秦岭大别地区是我国最重要的钼-铅-锌成矿带<sup>[2]</sup>, 新近发现的超大型沙坪沟斑岩型钼矿, 其钼金属资源储量  $2.39 \times 10^6$  t, 是“亚洲最大、世界第二大”的钼矿, 也是目前中国最大的世界级钼矿床<sup>[3]</sup>。该矿床由于巨大的经济意义和独特的产出背景而引起地质学界广泛关注, 成为新的斑岩型钼矿研究的天然实验室。前人对沙坪沟钼矿开展了大量的研究工作, 包括岩石地球化学<sup>[4-6]</sup>、岩浆岩成岩年代学<sup>[5, 7-10]</sup>、成矿年代学<sup>[8-10]</sup>、矿床学<sup>[11-12]</sup>和成矿流体特征<sup>[13-14]</sup>等, 但对沙坪沟斑岩型钼矿与外围铅锌矿关系研究尚未见详

细报道。

成矿系统研究一直是矿床学研究的重点, 也是目前国际上最为活跃的研究领域之一, 掌握成矿系统的特征, 并将其作为一个整体研究, 对认识成矿规律及进一步指导找矿工作具有重要意义<sup>[15-16]</sup>。沙坪沟钼矿与其外围脉状铅锌矿在空间上紧密相伴, 基于钼矿成矿年代与铅锌矿成矿年代分别为 115 Ma<sup>[10]</sup>和 120 Ma<sup>[17]</sup>, 是同一地质事件的产物, 查明斑岩型钼矿与周边铅锌矿床的成因联系对指导区域找矿具有重要意义。本文作者在详细的野外地质工作基础上, 分别对沙坪沟斑岩型钼矿不同成矿阶段石英中的流体包裹体, 以及矿区北部的银山铅锌矿区含矿石英脉的石英

基金项目: 国土资源部公益性行业基金资助项目(201011011); 中国地质调查局项目(2014-01-020-010)

收稿日期: 2018-07-30; 修订日期: 2019-02-26

通信作者: 谢玉玲, 教授, 博士; 电话: 13601236643; E-mail: yulingxic63@Hotmail.com

中流体包裹体进行详细研究, 从流体包裹体岩相学、显微测温学、显微激光拉曼和 H-O、硫、铅稳定同位素等方面, 探讨斑岩型钼矿与外围铅锌矿成矿流体特征及其流体演化过程, 重塑超大型斑岩矿床成矿系统的成矿流体演化过程, 初步建立了斑岩型钼矿与外围热液型铅锌矿的成因联系。

## 1 区域地质和矿区地质概况

### 1.1 区域地质背景

大别造山带是中国中央造山带的重要组成部分, 是扬子板块与华北板块之间经历了洋壳俯冲、弧岩浆活动、弧陆碰撞、陆陆碰撞等复杂的地质过程所形成<sup>[18-19]</sup>(见图 1)。王清晨等<sup>[20]</sup>将大别造山带的构造单元自北向南依次划为: 北淮阳构造带、北大别构造带、南大别构造带和宿松构造带。

大别造山带出露的地层主要包括: 晚太古代-早元古代的大别-桐柏变质核杂岩, 岩性以二长花岗质片麻岩、英云闪长质片麻岩和黑云斜长片麻岩为

主<sup>[21-22]</sup>。中元古代的秦岭群变质杂岩、龟山岩组、红安岩群, 新元古代-早古生代的二郎坪群浅变质火山-沉积岩系, 震旦纪-奥陶纪的滨海-浅海相碎屑岩-碳酸盐岩建造以及泥盆纪南湾组<sup>[23]</sup>。其中, 秦岭群和二郎坪群分布于龟梅断裂以北, 局部被绢云石英片岩及炭质石英片岩覆盖<sup>[24]</sup>。龟山岩组以斜长角闪片岩、绢云石英片岩、云母斜长片岩为主。红安岩群为一套浅中变质的片岩及片麻岩<sup>[25]</sup>。南湾组主要岩性为二云斜长片岩、白云钠长片麻岩、白云石英片岩、绿帘斜长角闪片岩及大理岩透镜体等(见图 1)。

大别造山带经历了多期构造运动, 因此构造特征十分复杂, 主要发育两组断裂构造: 一是与造山带平行展布的 NW 向断裂; 二是与郯庐断裂带平行的一系列 NE 向断裂。总体构成了 NW 向和 NE 向的网格状构造。NW 向断裂主要有晓天-磨子潭断裂、龟山-梅山断裂、襄樊-广济断裂等。NE 向断裂主要有商城-麻城断裂、郯庐断裂等(见图 1)。

大别造山带岩浆活动频繁, 各个地质时期均有不同程度的表现, 尤以燕山期最为强烈, 主要发育燕山期中酸性花岗(斑)岩、陆相火山岩; 少量基性-超基性

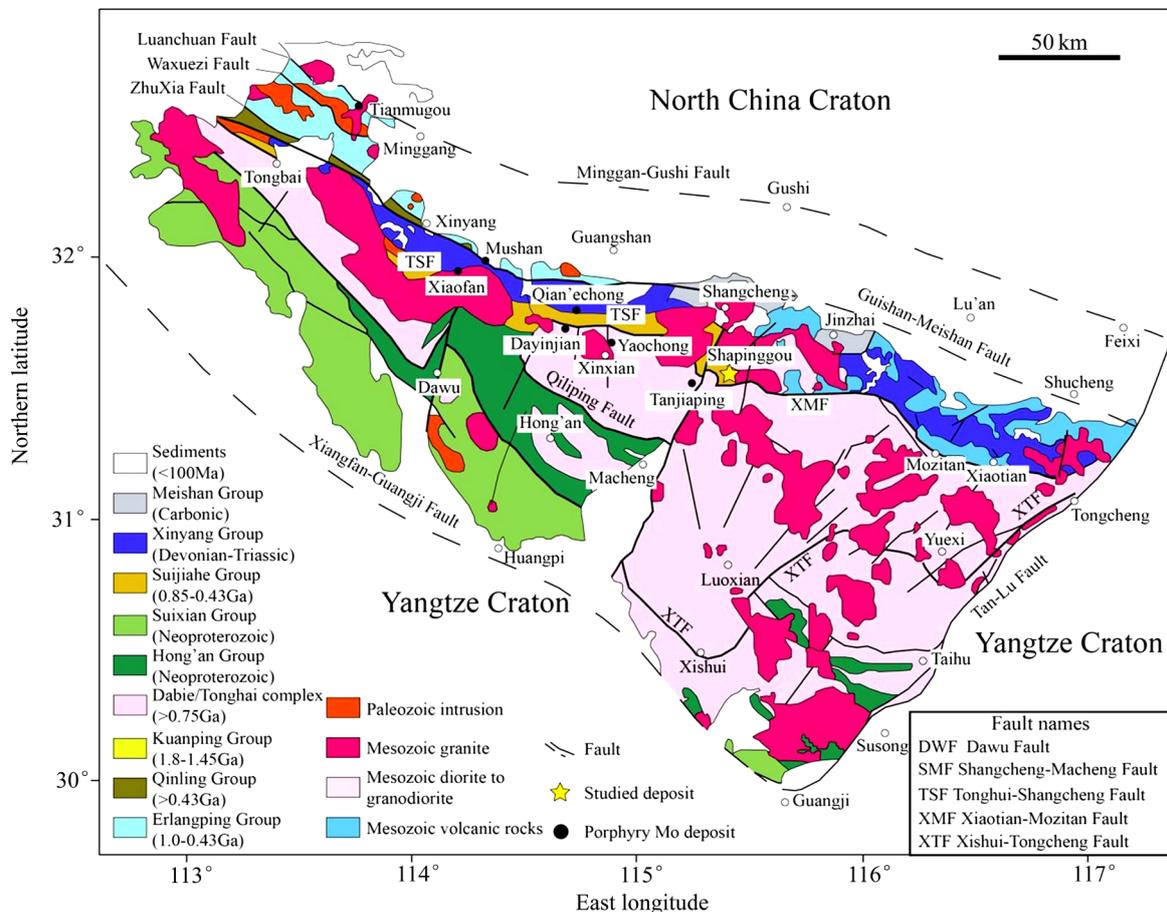


图 1 大别造山带地质简图及主要钼矿床分布(据文献[26]修绘)

Fig. 1 Geological sketch map of Dabie orogenic belt (modified from Ref.[26])

岩以及晋宁期中酸性侵入岩。燕山期火山岩包括两个火山旋回：第一旋回以形成于陆内挤压构造环境的安山岩-粗安岩-粗面岩组合为主，属高钾钙碱性岩石系列；第二旋回为形成于陆壳减薄拉张环境的一套玄武岩-碱性粗面岩-假白榴石响岩组合<sup>[24-25]</sup>。

## 1.2 矿区地质

沙坪沟钼矿床位于安徽省金寨县，大地构造位置处于大别造山带东段，晓天-磨子潭断裂与商麻断裂交汇处的东北侧<sup>[3]</sup> (见图1)。该区出露地层主要是中元古界庐镇关岩群的变火山-沉积岩。在沙坪沟矿区，由于强烈的岩浆侵入作用，变质地层呈残留体产出，

主要岩性为角闪斜长片麻岩和花岗片麻岩<sup>[10]</sup> (见图2)。矿区内断裂构造发育，晓天-磨子潭区域性深大断裂从该区南部穿过，并发育一系列的次级断裂，次级断裂以NE向、NW向断裂为主，次为近SN向、近EW向断裂<sup>[3,9,27]</sup> (见图2)。矿区内中生代侵入岩发育广泛，岩性从超基性岩-酸性岩-偏碱性岩均有分布，以中酸性为主。矿区中酸性侵入岩包括花岗闪长岩、石英二长岩、二长花岗岩、正长岩、钾长花岗斑岩等<sup>[27]</sup>。

尽管地表可见少量的钼矿化，但沙坪沟钼矿床总体为隐伏矿床，主矿体总体近似椭球状，主矿体中资源量占该矿床总资源量的99.93%<sup>[3,27]</sup>，且矿体保存完整，矿化连续，赋矿围岩主要为花岗斑岩。岩矿相结

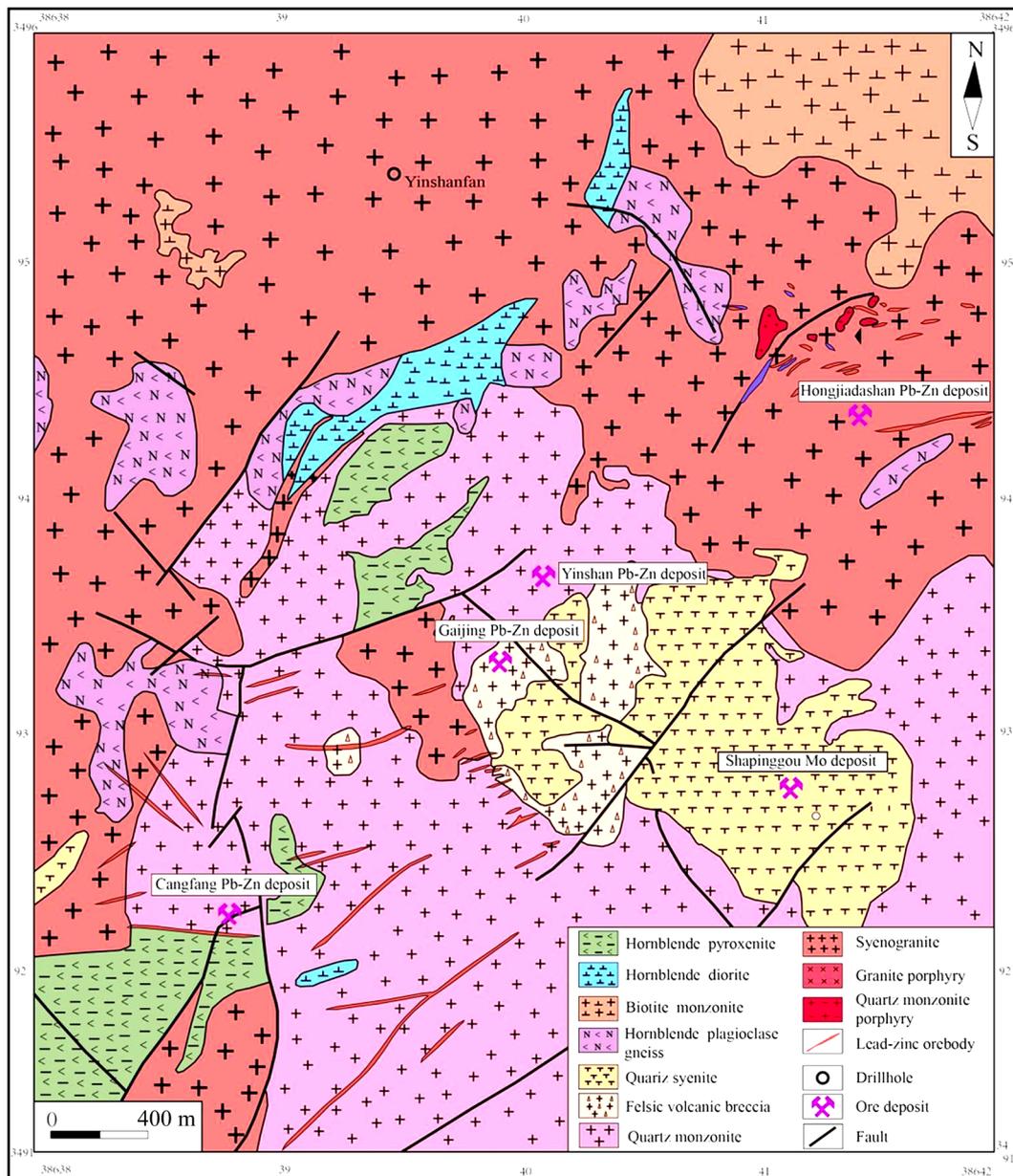


图2 安徽金寨沙坪沟钼矿区地质图(据文献[3]修绘)

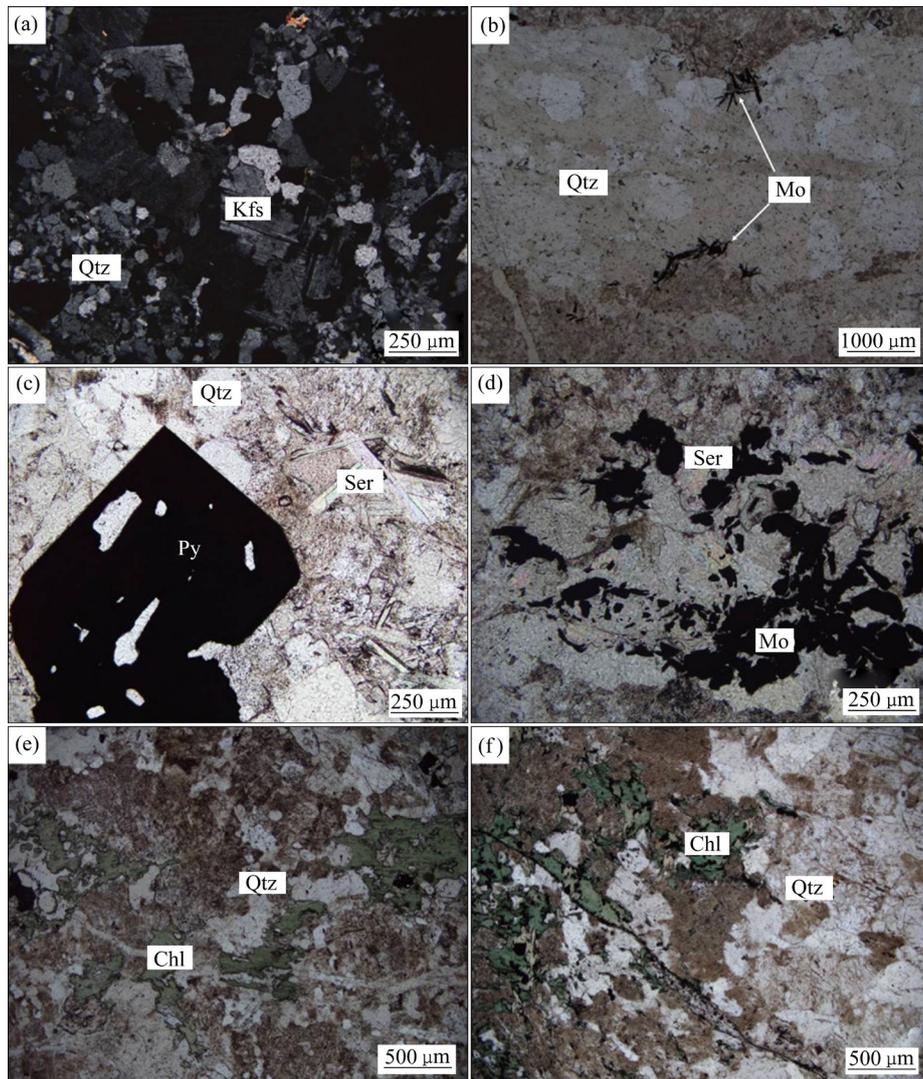
Fig. 2 Geological sketch map of Shapinggou district (modified from Ref.[3])

果表明,矿区的矿石矿物主要为辉钼矿,其次为黄铜矿、方铅矿、闪锌矿等,脉石矿物主要为石英、钾长石、白云母、萤石等。辉钼矿或沿岩石裂隙充填或与石英、钾长石、白云母等形成脉体。矿石构造有细脉浸染状、网脉状、角砾状构造等。

沙坪沟矿区外围已发现多个铅锌矿床,包括沙坪沟钼矿北侧的洪家大山铅锌矿,西北侧的盖井、银山铅锌矿,西侧的仓房铅锌矿,这些铅锌矿床总体呈NE向的带状分布,距沙坪沟钼矿1.5~2.5 km。本次重点对银山铅锌矿床进行了研究,并与沙坪沟钼矿进行对比。银山铅锌矿床的矿化主要呈脉状,少量星点状、

浸染状矿化,产于燕山期中、细粒二长花岗岩和花岗闪长岩中。矿区的矿化明显受断裂、裂隙控制,主要表现为裂隙充填的脉状及产于构造蚀变岩中的浸染状矿化。岩相学和矿相学研究结果表明,铅锌矿石中主要金属矿物为方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、黄铜矿。非金属矿物为石英和少量钾长石、绿泥石、碳酸盐矿物等<sup>[24]</sup>。

沙坪沟矿区蚀变普遍发育,与典型斑岩矿床类似。主要蚀变类型有早期的钾化和硅化(石英-钾长石-黑云母化)(见图3(a)和(b))、绢英岩化(石英-绢云母-黄铁矿化)(见图3(c)和(d))以及青磐岩化(绿泥石-绿帘



**图3** 沙坪沟钼矿主要蚀变岩的透光显微镜下照片:(a)钾长花岗岩斑岩(+);(b)早阶段辉钼矿-石英脉,辉钼矿位于石英脉两侧(-);(c)黄铁绢英岩化正长岩,黄铁矿呈自形晶(-);(d)石英-绢云母化正长岩,辉钼矿呈鳞片状分布于绢云母之间(-);(e)绿泥石化黑云母正长岩,黑云母蚀变成绿泥石(-);(f)绿泥石化正长岩,绿泥石脉穿切于石英之中(-)。矿物名称缩写:Qtz—石英;Kfs—钾长石;Ser—绢云母;Chl—绿泥石;Mo—辉钼矿;Py—黄铁矿;(+ )正交偏光;(-)单偏光

**Fig. 3** Microphoto of alteration in Shapinggou Mo deposit: (a) K-silication moyite porphyry(+); (b) Molybdenite-quartz vein in early stage, showing molybdenite growing besides quartz vein (-); (c) Idiopathic pyrite in beresitization syenite (-); (d) Scattered molybdenite in quartz-sericitization biotite syenite (-); (e) Biotite changed into chlorite in chloritization biotite syenite (-); (f) Chlorite cut quartz vein in chloritization syenite. Minerals abb.: Q-quartz; Kfs—K-feldspar; Ser—Sericitite; Chl—Chlorite; Mo—Molybdenite; Py—Pyrite; (+) Crossed polars; (-) Planepolars

石化)(见图 3(e)和(f))。根据蚀变类型及矿物组合, 任志等<sup>[12]</sup>将沙坪沟钼矿自花岗斑岩体向外大致分为 3 个蚀变带, 分别为硅化-钾化带、黄铁-绢英岩化带、青磐岩化带, 蚀变带特征明显。钾化、硅化和绢英岩化与钼矿化关系最为密切, 铅锌矿化主要产于青磐岩化带。

根据野外脉体穿插关系、不同脉体中的矿物共生组合及矿石结构等可以将沙坪沟钼矿的成矿过程分为早(I)、中(II)、晚(III)3 个阶段。早阶段(石英-钾长石阶段)以发育石英-钾长石脉为特征; 石英-钾长石脉主要产于较深部的花岗斑岩和黑云母正长岩中, 脉两侧发育钾长石化晕, 辉钼矿脉与石英-钾长石脉相互穿插(见图 4(a)~(d)); 矿物组合为石英、萤石、钾长石、磁铁矿、黄铁矿、少量辉钼矿等。中阶段(石英-绢云母-黄铁矿-辉钼矿阶段), 以发育石英-辉钼矿脉、石英-绢云母-黄铁矿脉为特征, 石英-辉钼矿脉大量发育, 脉体不规则状, 相互穿插呈网脉状(见图 4(e)和(f)),

石英-辉钼矿脉广泛产于钻孔中部, 矿物组合为石英、绢云母、黄铁矿、辉钼矿、并含少量方铅矿和黄铜矿等, 为主要的钼成矿阶段。晚阶段(石英-绿泥石-绿帘石阶段)以发育绿泥石、绿帘石脉为特征, 主要矿物组成包括石英、方解石、绿泥石、绿帘石和黄铁矿、闪锌矿、方铅矿, 并见少量辉钼矿。

## 2 样品与测试分析方法

本次研究分析样品主要采自沙坪沟矿区和北部银山矿区地表和钻孔岩芯包括各类蚀变岩样品和各类脉体。流体包裹体研究样品采集后磨制成厚度为 0.2 mm 双面抛光的薄片, 选取矿石中透明矿物石英进行流体包裹体相学观察和显微测温分析。流体包裹体显微测温分析在北京科技大学流体包裹体实验室完成, 测试仪器为 Linkam THMS 600 型冷热台, 仪器测定温度

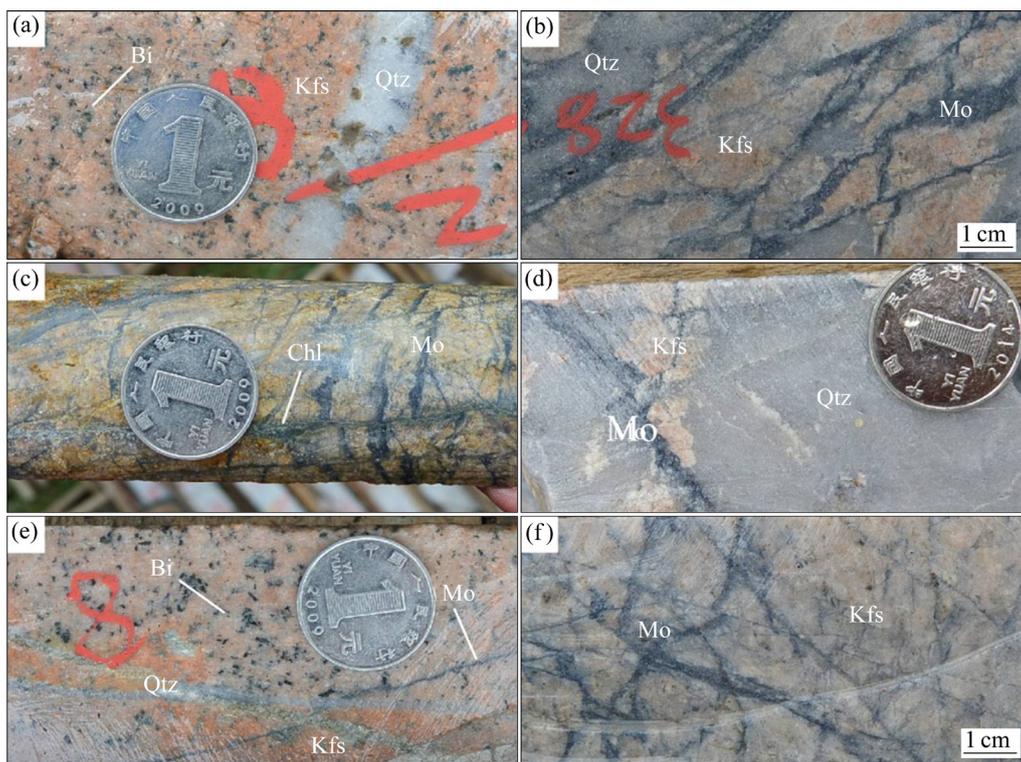


图 4 沙坪沟斑岩型钼矿床的钻孔岩芯照片: (a) 蚀变花岗斑岩中不规则状石英脉; (b), (c) 钾硅化花岗斑岩中的网脉状辉钼矿脉; (d) 粗晶石英、钾长石中细脉状辉钼矿; (e) 蚀变花岗斑岩中早期辉钼矿细脉被石英-绢云母-黄铁矿脉穿切; (f) 蚀变花岗斑岩中细网脉状辉钼矿脉。矿物名称缩写: Qtz—石英; Kfs—钾长石; Bi—黑云母; Chl—绿泥石; Mo—辉钼矿

Fig. 4 Characteristics of ore veins in Shapinggou Mo deposit: (a) Irregular quartz vein in altered granite porphyry; (b), (c) Stockwork molybdenite veins in K-silication altered granite porphyry; (d) Molybdenite vein in coarse quartz and potassium feldspar; (e) Molybdenite vein cut by Quartz-sericite-pyrite veins in early altered granite porphyry; (f) Tiny stockwork molybdenite veins in altered granite porphyry. Minerals abb.: Qtz—Quartz; Kfs—K-feldspar; Bi—Biotite; Chl—Chlorite; Mo—Molybdenite

范围为 $-196\sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,冰点和均一温度测量精度分别为 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。流体包裹体测试过程中,开始时升温或降温速度在 $10\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ,接近相变点附近速度降至 $0.1\sim 1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ,并进行反复测温检验,保证相转变温度测试的准确性。

单个包裹体成分的显微激光拉曼探针(LRM)分析在北京大学地球与空间科学学院显微激光拉曼实验室进行,测试仪器为 Horiba Jobin-Yvon 公司生产的 LabRAM HR Evolution 高分辨率激光拉曼光谱仪,光源为 Yag 晶体倍频固体激光器,测试过程中温度、湿度分别为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $50\%$ ,采用激光波长为 $532\text{ nm}$ ,输出功率为 $44\text{ mW}$ ,所测光谱计数时间是 $10\text{ s}$ ,每 $1\text{ cm}^{-1}$ (波数)计数一次,扫描范围为 $100\sim 4200\text{ cm}^{-1}$ 。

在完成流体包裹体岩相学与显微测温的基础上,选取不同成矿阶段的代表性样品进行石英中流体包裹体水的 H-O 同位素分析及金属硫化物的硫、铅同位素分析。测试分析所用的单矿物的挑选工作由河北廊坊单矿物分选有限公司完成。H-O 同位素及硫、铅同位素的分析测试工作均由北京核工业地质研究所完成。

石英中的流体包裹体的 H-O 同位素实验分析流程为:选取 $250\sim 425\text{ }\mu\text{m}$ 的纯净样品,在 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温下真空去气 $4\text{ h}$ 以上,以去除样品表面吸附水和次生包裹体水,用 $\text{BrF}_5$ 与测试所用的含氧矿物在真空和高温条件下反应提取矿物氧,并与灼热石墨棒燃烧转化成 $\text{CO}_2$ 气体,收集并在质谱仪 DZ/T0184.13-1997 上测试氧同位素组成,分析精度优于 $\pm 0.02\%$ 。而对于氢同位素组成测试则是将去气样品在 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高温下用爆裂法提取出原生包裹体中的水,进行收集、冷凝和纯化处理,然后与金属锌反应生成 $\text{H}_2$ ,在质谱仪 DZ/T0184.19-1997 上测试氢的组成,分析精度优于 $\pm 0.02\%$ 。H 和 O 同位素标准采用国际标准 V-SMOW。取得石英样品的 $\delta^{18}\text{O}$ 值,根据石英-水同位素分馏方程<sup>[33]</sup>: $1000\ln\alpha_{\text{Qtz-H}_2\text{O}} = 3.38 \times 10^6/T^2 - 3.4$  计算出流体包裹体水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值。

硫同位素分析样品取自不同成矿阶段矿石样品。首先进行单矿物分选,从矿石样品中挑选新鲜的方铅矿、闪锌矿、黄铁矿单矿物样品,纯度达 $99\%$ 以上,在北京核工业地质研究所同位素实验室进行硫同位素分析。方法如下:将粒径小于 $80\text{ }\mu\text{m}$ 纯净样品和氧化亚铜按一定比例混合均匀,在真空达 $2.0 \times 10^{-2}\text{ Pa}$ 状态下加热,进行氧化反应,反应温度为 $980\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,生成二氧化硫气体。在真空条件下,用冷冻法收集二氧化硫气体,并用 Delta v plus 气体同位素质谱分析硫同位

素组成,以 VCDT 为标准,测试精度为 $\pm 0.02\%$ 。硫化物参考标准为 GBW-04414、GBW-04415 硫化银标准,其 $\delta^{34}\text{S}$ 分别是 $(-0.007 \pm 0.013)\%$ 和 $(2.215 \pm 0.014)\%$ 。

铅同位素分析样品与硫同位素分析样品完全对应。硫化物单矿物样品的铅同位素分析采用酸溶法,铅的分离与提纯采用传统的 AG1-X8 阴离子交换树脂柱方法。在测试过程中将样品用磷酸硅胶将样品粘在铈带上,运用 ISOPROBE-T 热表面电离质谱仪 (MAT261) 测量同位素比值,测量结果采用国际标样 NBS981 进行校正。

### 3 流体包裹体研究

#### 3.1 流体包裹体岩相学特征

沙坪沟铅矿区不同期次脉体中石英的流体包裹体岩相学观察结果显示,不同成矿阶段石英中均发育大量流体包裹体,其类型丰富,形态多样。根据室温下的流体包裹体相态组成以及加温和冷冻过程中的相态变化,并结合单个流体包裹体成分的 LRM 分析结果,将矿区的流体包裹体分为 AV 类、AC 类、ADV 类,各类包裹体的岩相学特征详述如下。

AV 类:气液两相包裹体。室温下由液相和气相组成(见图 5(a)、(b)、(c))。液相主要为水溶液( $\text{L}_{\text{H}_2\text{O}}$ ),气相主要为水蒸气( $\text{V}_{\text{H}_2\text{O}}$ ),气相充填度一般在 $5\%\sim 25\%$ 之间,包裹体长轴长度集中于 $3\sim 15\text{ }\mu\text{m}$ 。多呈椭圆形、拉长状、负晶形状或不规则状。此类包裹体可见于从早至晚的各个成矿阶段。

AC 类:富 $\text{CO}_2$ 三相包裹体。由气相 $\text{CO}_2$ 、液相 $\text{CO}_2$ 和盐水溶液组成的三相包裹体(见图 5(d)),即 $\text{V}_{\text{CO}_2} + \text{L}_{\text{CO}_2} + \text{L}_{\text{H}_2\text{O}}$ 。气相 $\text{CO}_2$ 含量相对较高,气相充填度在 $30\%\sim 70\%$ 之间,包裹体长轴长度集中于 $5\sim 40\text{ }\mu\text{m}$ 。呈孤立状分布,该类包裹体多数室温下呈典型“双眼皮”特征。该类包裹体发育广泛,主要见于早阶段(I)和中阶段(II)。

ADV 类:含子矿物多相包裹体。由液相、气相和子矿物组成(见图 5(e))。液相主要为水溶液( $\text{L}_{\text{H}_2\text{O}}$ ),气相主要为 $\text{V}_{\text{H}_2\text{O}}$ ,少数为 $\text{V}_{\text{CO}_2}$ 。子矿物可以是一个或多个,以立方体状的石盐子矿物为主,并常见浑圆状的钾盐子矿物和柱状、菱面体状碳酸盐子矿物。包裹体长轴长度集中于 $3\sim 15\text{ }\mu\text{m}$ 。多呈椭圆状、负晶形、长柱状,呈孤立状产出,或沿着石英中愈合裂隙分布。该类包裹体仅见于早阶段(I)和中阶段(II)的石英脉中,并多与富 $\text{CO}_2$ 三相包裹体共存。

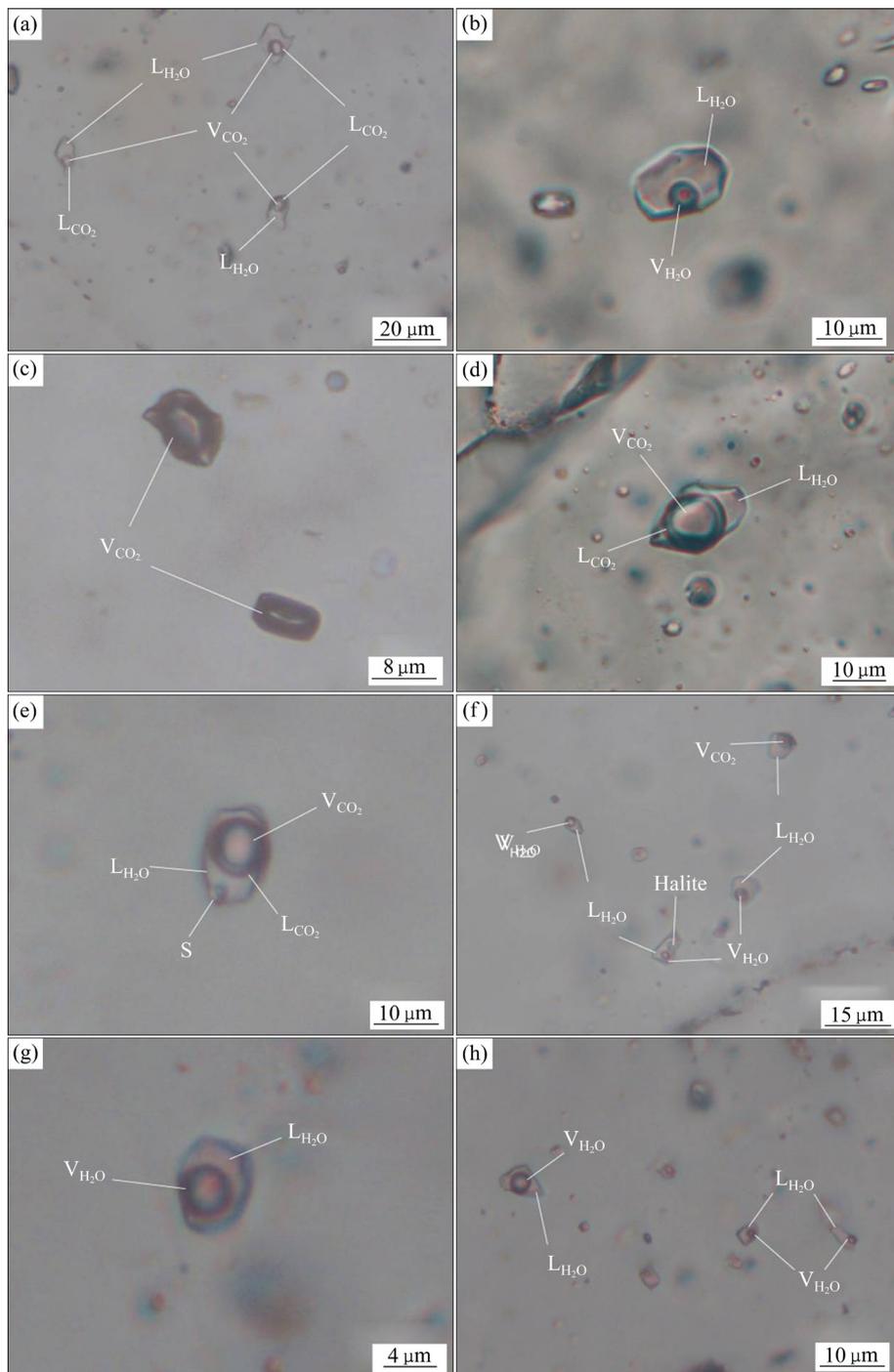


图5 沙坪沟钼矿床及银山铅锌矿不同阶段石英脉中各类包裹体岩相学照片：(a) 沙坪沟矿床早阶段石英中 AV 类流体包裹体群；(b) 沙坪沟矿床中阶段石英中 AV 类流体包裹体；(c) 沙坪沟矿床晚阶段石英中 AV 类流体包裹体；(d) 沙坪沟矿床中阶段石英中 AC 类流体包裹体；(e) 沙坪沟矿床中阶段石英中含不透明子矿物的 ADV 类流体包裹体；(f) 沙坪沟矿床早阶段石英中 AV 与 ADV 类流体包裹体组合；(g), (h) 银山铅锌矿主成矿阶段石英中 AV 类流体包裹体。图中缩写：V<sub>CO<sub>2</sub></sub>—气相二氧化碳；L<sub>CO<sub>2</sub></sub>—液相二氧化碳；V<sub>H<sub>2</sub>O</sub>—气相水；L<sub>H<sub>2</sub>O</sub>—液相水；Halite—石盐；S—未知子矿物

**Fig. 5** Photomicrographs of fluid inclusions from Shapinggou Mo deposit and Yinshan Pb-Zn deposit: (a) AV-type inclusions of quartz in early stage of Shapinggou district; (b) AV-type inclusion of quartz in middle stage of Shapinggou district; (c) AV-type inclusion of quartz in late stage of Shapinggou district; (d) AC-type inclusion of quartz in middle stage of Shapinggou district; (e) Inclusion with halite and opaque daughter-mineral of quartz in middle stage of Shapinggou district; (f) AV-type inclusion and ADV-type inclusion of quartz in early stage of Shapinggou district; (g), (h) AV-type inclusion of quartz in ore-forming stage of Yinshan Pb-Zn deposit. Abbreviations: V<sub>CO<sub>2</sub></sub>—Vapor phase CO<sub>2</sub>; L<sub>CO<sub>2</sub></sub>—Liquid phase CO<sub>2</sub>; V<sub>H<sub>2</sub>O</sub>—Vapor phase water; L<sub>H<sub>2</sub>O</sub>—Liquid phase water; S—daughter mineral

银山铅锌矿主成矿阶段的流体包裹体较为发育,但包裹体类型比较单一。在石英-铅锌矿脉内只发育AV类气液两相包裹体(见图5(g)和(h))。液相主要为水溶液(L<sub>H<sub>2</sub>O</sub>),气相主要为水蒸气(V<sub>H<sub>2</sub>O</sub>),气相充填度一般在5%~20%之间,个别气相充填度大于50%。包裹体长轴长度集中于2~10 μm。呈浑圆状、负晶形状或不规则状。

### 3.2 流体包裹体显微测温及盐度计算

分别对沙坪沟不同成矿阶段和银山主成矿阶段石英中流体包裹体进行显微测温分析。AV类包裹体盐度根据HALL等<sup>[28]</sup>提出的H<sub>2</sub>O-NaCl体系盐度-冰点公式 $W=1.78T-0.0442T^2+0.000557T^3$ 算出,式中 $T$ 为冰点温度(°C)。AC类包裹体盐度是通过ROEDDER等<sup>[29]</sup>提出的公式 $W=15.52022-1.02342T-0.05286T^2$ 算出,式中 $T$ 为CO<sub>2</sub>笼合物消失温度(°C)。ADV类含子晶多相包裹体盐度是通过HALL等<sup>[28]</sup>提出的公式计算得出。显微测温结果及盐度计算结果如表1所列。

早阶段石英中AV类流体包裹体的均一温度范围为325~420 °C,平均为410 °C,均一成液相。冰点温度为-11.4~-3.4 °C,据冰点计算的盐度范围为6.0%~15.4% NaCl<sub>eqv</sub>,平均为10.94% NaCl<sub>eqv</sub>。AC类包裹体均一温度范围为365~420 °C,平均均一温度为385 °C,大多数均一至液相,只有少数均一至CO<sub>2</sub>气相。CO<sub>2</sub>笼形物分解温度为6.3~9.6 °C。据此计算的盐度范围为0.8%~6.9% NaCl<sub>eqv</sub>,平均盐度为4.52% NaCl<sub>eqv</sub>。ADV类包裹体升温过程中,完全均一至液相。其中大多数包裹体是以子晶先熔化而达到均一,极个别包裹体气泡先消失。均一温度范围为330~410 °C,平均为375 °C。子晶熔化温度范围为330~400 °C,子晶熔化温度平均为365 °C,盐度范围为33%~46% NaCl<sub>eqv</sub>,平均盐度为41.66% NaCl<sub>eqv</sub>。

中阶段石英中AV类流体包裹体均一温度变化范围为226~365 °C,平均为310 °C,均一成液相。冰点温度为-9.3~-2.5 °C,据冰点计算的盐度为2.9%~13.2% NaCl<sub>eqv</sub>。AC类包裹体完全均一温度变化范围为257~367 °C,CO<sub>2</sub>相部分均一温度为27.3~29.5 °C。CO<sub>2</sub>笼形物分解温度为6.5~9.5 °C。据此计算的盐度范围为0.4%~6.1% NaCl<sub>eqv</sub>,平均盐度为2.85% NaCl<sub>eqv</sub>。ADV类包裹体其中大部分没有测到均一温度,很少部分测得完全均一温度为345~362 °C,平均为355 °C。ADV类包裹体升温过程中,完全均一至液相。多数几个包裹体是以子晶先熔化,极个别

包裹体气泡先消失。子晶熔化温度范围为300~380 °C,子晶熔化温度平均为345 °C。盐度范围为33.3%~39.6% NaCl<sub>eqv</sub>,平均盐度为37.33% NaCl<sub>eqv</sub>。

晚阶段主要发育AV类包裹体,包裹体均一温度范围为185~300 °C,平均均一温度为260 °C,冰点温度范围为-5.8~-0.5 °C,盐度范围为0.7%~8.4% NaCl<sub>eqv</sub>,平均盐度为2.72% NaCl<sub>eqv</sub>。

银山铅锌矿主成矿阶段石英中AV类流体包裹体均一温度范围为175~315 °C,平均均一温度为225 °C,冰点温度为-3.0~-0.3 °C,盐度范围为0.6%~4.9% NaCl<sub>eqv</sub>,平均盐度为2.19% NaCl<sub>eqv</sub>,与沙坪沟钼矿晚阶段石英中AV类流体包裹体的均一温度和盐度相似。

### 3.3 流体包裹体成分的LRM分析

部分流体包裹体成分的LRM分析结果(见图6)。

沙坪沟钼矿床的石英中各类型包裹体激光拉曼显微探针分析显示,各阶段同类型包裹体的流体成分类似,均以水为主。成矿早阶段AV类包裹体气相显示CO<sub>2</sub>(1285 cm<sup>-1</sup>和1387 cm<sup>-1</sup>)的峰,N<sub>2</sub>(2300 cm<sup>-1</sup>)的峰,宽缓的H<sub>2</sub>O峰(2900~3750 cm<sup>-1</sup>)(见图6(a));AC类包裹体气相显示CO<sub>2</sub>(1285 cm<sup>-1</sup>和1387 cm<sup>-1</sup>)的峰;ADV类包裹体显示CO<sub>2</sub>的峰、N<sub>2</sub>(2300 cm<sup>-1</sup>)的峰、H<sub>2</sub>O的峰(见图6(b))。中阶段AV类包裹体气相出现CO<sub>2</sub>(1285 cm<sup>-1</sup>和1387 cm<sup>-1</sup>)的峰,H<sub>2</sub>O的峰(2900~3750 cm<sup>-1</sup>)、N<sub>2</sub>(2300 cm<sup>-1</sup>)的峰(见图6(c));AC类流体包裹体气相中出现CO<sub>2</sub>(1285 cm<sup>-1</sup>和1387 cm<sup>-1</sup>)、N<sub>2</sub>(2300 cm<sup>-1</sup>)的峰(1285 cm<sup>-1</sup>和1387 cm<sup>-1</sup>)(见图6(d));ADV类包裹体不显示CO<sub>2</sub>的峰、只显示N<sub>2</sub>(2300 cm<sup>-1</sup>)的峰;晚阶段AV类包裹体液相以水为主,气相仅只出现H<sub>2</sub>O的峰,未见CO<sub>2</sub>的谱峰(见图6(e))。综上表明各类包裹体中气相均以CO<sub>2</sub>为主。三种类型包裹体的分析表明,沙坪沟钼矿成矿流体以富含H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub>及少量N<sub>2</sub>成分为特征。外围铅锌矿石英中AV类气液两相包裹体表明气相成分显示为CO<sub>2</sub>(见图6(f))。

上述分析结果表明,沙坪沟钼矿床的成矿流体经历了从早期高温、较高盐度富含CO<sub>2</sub>到晚期中低温、贫CO<sub>2</sub>的演化过程。外围的银山铅锌矿属斑岩系统成矿流体演化晚期的产物,其流体包裹体类型和包裹体均一温度、盐度和包裹体中气液相成分均与沙坪沟矿床晚阶段流体包裹体一致,因此成矿流体同属H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>-NaCl体系。

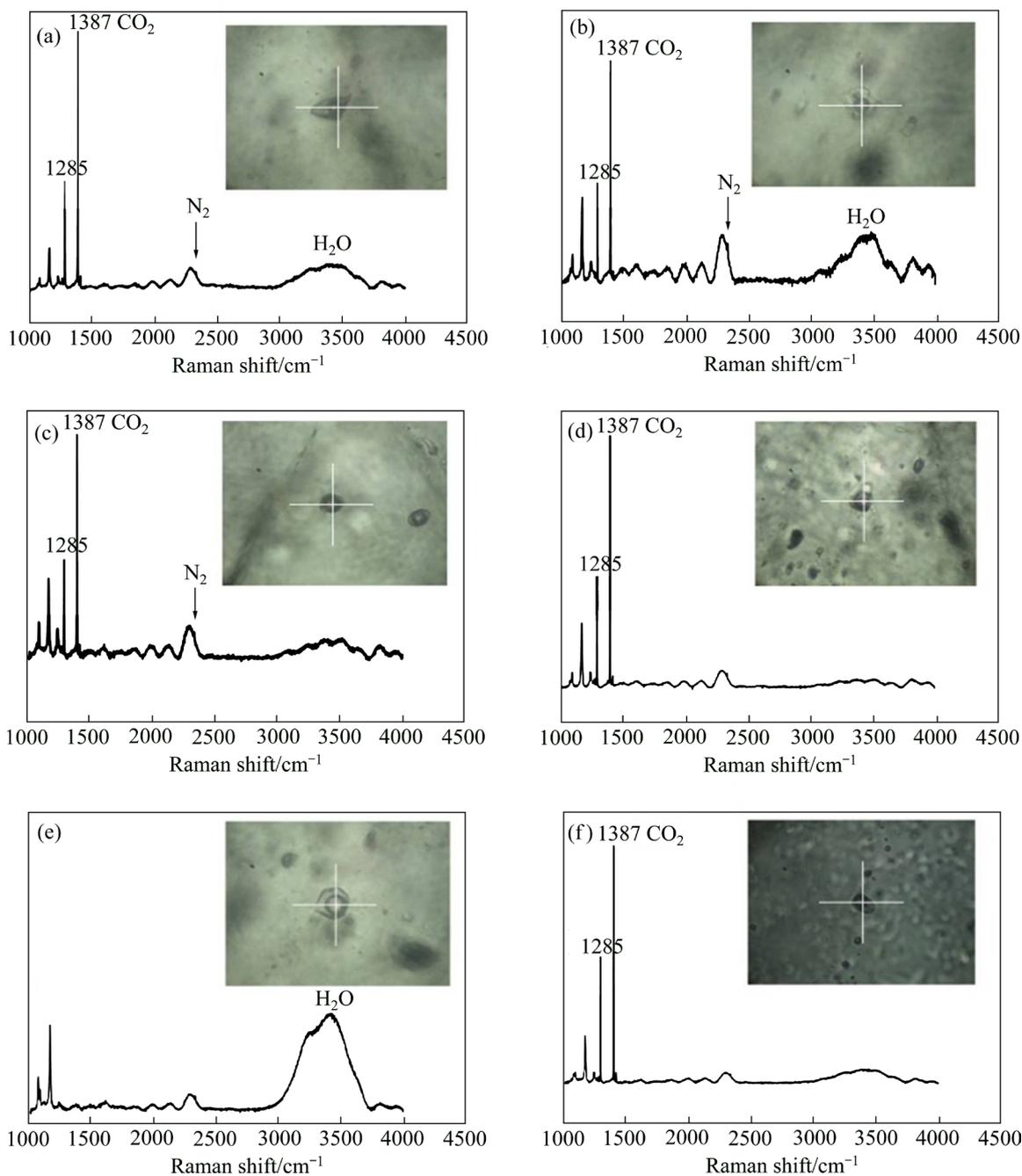


图6 沙坪沟钼矿及银山铅锌矿流体包裹体拉曼光谱: (a) 沙坪沟钼矿早阶段石英中 AV 类包裹体气相; (b) 沙坪沟钼矿早阶段石英中 ADV 类包裹体中气相; (c) 沙坪沟钼矿中阶段石英中 AV 类包裹体气相; (d) 沙坪沟钼矿中阶段石英中 AC 类包裹体气相; (e) 沙坪沟钼矿晚阶段石英中 AV 类包裹体气相; (f) 银山铅锌矿主成矿阶段石英中 AV 类包裹体气相。插图包裹体镜下照片及测点位置

**Fig. 6** Raman spectra of representative fluid inclusions from Shapinggou Mo deposit and Yinshan Pb-Zn deposit: (a) Vapor phase Raman spectrum of AV-type fluid inclusions in early stage quartz of Mo deposit; (b) Vapor phase Raman spectrum of ADV-type fluid inclusions in early stage quartz of Mo deposit; (c) Vapor phase Raman spectrum of AV-type fluid inclusion in middle stage quartz of Mo deposit; (d) Vapor phase Raman spectrum of AC-type fluid inclusion in late stage quartz of Mo deposit; (e) Vapor phase Raman spectrum of AV-type fluid inclusion in late stage quartz of Mo deposit; (f) Vapor phase Raman spectrum of AV-type fluid inclusion in main ore-forming stage quartz of Pb-Zn deposit

表 1 沙坪沟钼矿及银山铅锌矿流体包裹体显微测温结果

Table 1 Microthermometric data and related parameters of fluid inclusions from Shapingou Mo deposit and Yinshan Pb-Zn deposit

Deposit	Stage	Mineral	Type	$t_{m,CO_2}/^{\circ}C$	$t_{m,ice}/^{\circ}C$	$t_{m,clath}/^{\circ}C$	$t_{h,CO_2}/^{\circ}C$	$t_{h,total}/^{\circ}C$	$t_{m,halite}/^{\circ}C$	$\omega(NaCl_{eq.})/\%$
Shapingou Mo deposit	I	Quartz	AV		-11.4— -3.4(30)			325—420(34)		6.0—15.4
			AC	-58.5— -56.5(26)		6.3—9.6(30)	25—29.5(30)	365—420(30)		0.8—6.9
			ADV					330—410(28)	330— 400(20)	33.0—46.0
	II	Quartz	AV		-9.3—-2.5(28)			226—365(32)		2.9—13.2
			AC	-59.6— -56.6(25)		6.5—9.5(28)	27.3— 29.5(28)	257—367(28)		0.4—6.1
			ADV					345—362(25)	300— 380(16)	33.3—39.6
III	Quartz	AV		-5.8—-0.5(26)			185—300(26)		0.7—8.4	
Yinshan Pb-Zn deposit	Pb-Zn mineralization	Quartz	AV		-3.0—-0.3(30)			175—315(35)		0.6—4.9

Note:  $t_{m,CO_2}$ —Melting temperature of solid  $CO_2$ ;  $t_{m,clath}$ —Melting temperature of  $CO_2$  clathrate;  $t_{h,CO_2}$ —Homogenization temperature of  $CO_2$  phase;  $t_{m,ice}$ —Melting temperature of ice;  $t_{m,halite}$ —Melting temperature of halite;  $t_{h,total}$ —Total homogenization temperature;  $\omega$ —Salinity; Number in parentheses—Number of analyses

-0.14%(见图 7)。

## 4 稳定同位素特征

### 4.1 氢-氧同位素

用来测试的样品为沙坪沟钼矿不同成矿阶段的石英脉和银山铅锌矿的含矿石英。流体包裹体中水的氧同位素计算时采用的平衡温度用该成矿阶段包裹体均一温度的平均值。流体包裹体中水的氢氧同位素测试结果如表 2 所列。两个矿床的石英矿物中包裹体的  $\delta D_{V-SMOW}$  值为 -8.44%~-5.70%，均值为 -7.03%； $\delta^{18}O$  值变化范围为 0.14%~0.93%，变化范围较大，均值为 0.56%。沙坪沟钼矿早阶段(I)石英包裹体水的  $\delta D_{V-SMOW}$  值为 -6.23%~-5.73%， $\delta^{18}O_{V-SMOW}$  值变化范围为 0.80%~0.93%。中阶段(II)石英包裹体水的  $\delta D_{V-SMOW}$  值为 -6.92%~-5.70%， $\delta^{18}O_{V-SMOW}$  值变化范围为 0.54%~0.77%。银山铅锌矿主成矿阶段石英包裹体水的  $\delta D_{V-SMOW}$  值为 -8.44%~-8.01%， $\delta^{18}O_{V-SMOW}$  值变化范围为 0.14%~0.51%。同矿物平衡的水的氧同位素分馏，根据石英-水同位素分馏方程<sup>[30]</sup>： $1000 \ln \alpha_{Qtz-H_2O} = 3.38 \times 10^6/T^2 - 3.4$  计算(式中  $\alpha$  是分馏作用系数， $T$  为绝对温度值，单位为 K)，计算得到沙坪沟钼矿石英的  $\delta^{18}O_{W-SMOW}$  值为 0.01%~0.52%，外围银山铅锌矿石英的  $\delta^{18}O_{W-SMOW}$  值为 -0.51%~

### 4.2 硫同位素

沙坪沟钼矿床 4 件金属硫化物及铅锌矿 9 件金属硫化物的硫同位素组成如表 3 所列。表中还列出了前人发表沙坪沟钼矿床 14 件硫化物样品和银山铅锌矿床 8 件硫化物样品的硫同素结果<sup>[14, 32-33]</sup>。沙坪沟钼矿床中，14 件黄铁矿样品  $\delta^{34}S$  值介于 0.28%~0.55% 之间，均值为 0.42%；4 件辉钼矿样品  $\delta^{34}S$  值介于 0.32%~0.39% 之间，均值为 0.35%。本文测试的银山铅锌矿床 9 件硫化物样品中，2 件黄铁矿样品  $\delta^{34}S$  值介于 0.28%~0.37% 之间，均值为 0.32%；3 件闪锌矿样品  $\delta^{34}S$  值介于 0.13%~0.20% 之间，均值为 0.18%；4 件方铅矿样品  $\delta^{34}S$  值介于 0.14%~0.18% 之间，均值为 0.16%。总体  $\delta^{34}S_{Py} > \delta^{34}S_{Sp} > \delta^{34}S_{Gn}$ ，表明硫化物矿物之间硫同位素基本上达到分馏平衡。

### 4.3 铅同位素

前人对沙坪沟钼矿硫化物的铅同素进行大量的分析<sup>[14, 17, 24, 34-35]</sup>，本次重点对矿区北侧的银山铅锌矿中主要硫化物进行了铅同位素分析，结果列于表 4。由表 4 可以看出，前人测得的沙坪沟钼矿中主要硫化物的  $^{206}Pb/^{204}Pb$  比值为 16.955~18.252，均值为 17.446； $^{207}Pb/^{204}Pb$  比值为 15.413~15.650，均值为 15.554； $^{208}Pb/^{204}Pb$  比值为 37.874~38.709，均值为 37.977。

表2 沙坪沟钼矿及银山铅锌矿石英中流体包裹体中水的氢、氧同位素组成分析结果

Table 2 H and O isotopic composition of quartz from Shapinggou Mo deposit and Yinshan Pb-Zn deposit

Deposit	Sample No.	Stage	Mineral	$\delta D_{V-SMOW}/\%$	$\delta^{18}O_{V-SMOW}/\%$	$t_h/^\circ C$	$\delta^{18}O_{W-SMOW}/\%$
Shapinggou Mo deposit	SPG2055	I	Quartz	-6.08	0.87	400	0.46
	SPG2039-1	I		-5.73	0.80	400	0.39
	SPG2047	I		-5.89	0.86	400	0.45
	SPG2052	I		-6.23	0.93	400	0.52
	SPG2039-2	II		-5.80	0.77	330	0.18
	SPG2121-1	II		-6.80	0.62	330	0.03
	SPG2062	II		-6.92	0.69	330	0.10
	SPG2121-2	II		-5.83	0.67	330	0.08
	SPG2059	II		-5.70	0.63	330	0.04
	SPG2122	II		-5.78	0.54	330	0.01
Yinshan Pb-Zn deposit	YS2002	Main ore-forming stage	Quartz	-8.20	0.19	260	-0.46
	YS2014			-8.01	0.14	260	-0.51
	YS2017-1			-8.23	0.22	260	-0.43
	YS2017-2			-8.44	0.39	260	-0.26
	YS2006			-8.17	0.35	260	-0.30
	YS2004			-8.26	0.47	260	-0.18
	YS2020			-8.23	0.51	260	-0.14
	YS2015			-8.21	0.36	260	-0.29

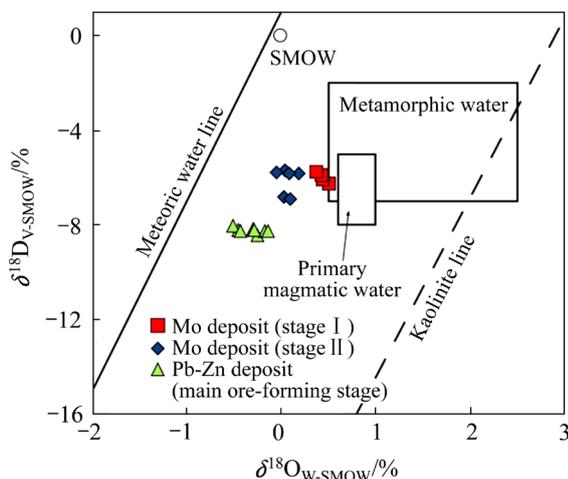


图7 沙坪沟钼矿及银山铅锌矿氢-氧同位素图解(据文献[31]修绘)

Fig. 7  $\delta D-\delta^{18}O$  diagram of water from the Shapinggou Mo deposit and Yinshan Pb-Zn deposit (modified from Ref.[31])

本次测得的银山铅锌矿硫化物矿石英铅  $^{206}Pb/^{204}Pb$  比值为 17.016~17.074, 均值为 17.034。  $^{207}Pb/^{204}Pb$  比值为 15.416~15.458, 均值为 15.434。  $^{208}Pb/^{204}Pb$  比值为 37.896~38.029, 均值为 37.958。其中, 2 件黄铁矿的  $^{206}Pb/^{204}Pb$  比值分别为 17.027、17.028,  $^{207}Pb/^{204}Pb$  比

值分别为 15.432、15.433,  $^{208}Pb/^{204}Pb$  比值分别为 37.948、37.952。3 件闪锌矿的  $^{206}Pb/^{204}Pb$  比值为 17.036~17.074,  $^{207}Pb/^{204}Pb$  比值介于 15.438~15.458,  $^{208}Pb/^{204}Pb$  比值为 37.977~38.029; 4 件方铅矿的  $^{206}Pb/^{204}Pb$  比值为 17.016~17.032,  $^{207}Pb/^{204}Pb$  比值为 15.416~15.434,  $^{208}Pb/^{204}Pb$  比值为 37.896~37.957。与沙坪沟钼矿的铅同位素组成基本一致(见图 8)。

## 5 讨论

### 5.1 沙坪沟钼矿成矿流体性质

沙坪沟钼矿石英中的包裹体类型丰富, 包括 AV 类气液两相包裹体、AC 类含  $CO_2$  三相包裹体和 ADV 类含子矿物的多相包裹体。早阶段的原生包裹体, 可以揭示原始成矿流体的性质与来源<sup>[30, 36-40]</sup>, 沙坪沟钼矿成矿早期的钾长石-石英脉或石英-钾长石-萤石脉的石英中发育原生的富  $CO_2$  包裹体(AC 类), 表明岩浆早期出溶流体富含  $CO_2$ , 其均一温度和盐度代表了早期出溶流体的特征。I、II 阶段石英中流体包裹体组合相似, 均表现为多相高盐度流体包裹体, 其与富气相的 AC 类或 AV 类包裹体共存, 显示了沸腾包裹体

表 3 沙坪沟钼矿及银山铅锌矿金属硫化物硫同位素组成分析结果<sup>[14, 32-33]</sup>Table 3 S isotopic composition of metal sulphides from Shapinggou Mo deposit and Pb-Zn deposit<sup>[14, 32-33]</sup>

Deposit	Sample No.	Mineral	Stage	$\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}/\%$	AVG/%	Data resource
Shapinggou Mo deposit	SPG2055			0.28		
	SPG2035	Pyrite	II	0.33	0.42	This work
	SPG2029			0.55		
	SPG2008			0.50		
ZK3901-3	Pyrite			0.29		
Shapinggou Mo deposit	ZK3901-5	Molybdenite		0.39		
	ZK3901-9	Molybdenite		0.33	0.34	Ref. [33]
	ZK3901-10	Molybdenite		0.32		
	ZK91-11	Molybdenite		0.37		
		Py-1		0.27		
Shapinggou Mo deposit	Py-2			0.22		
	Py-3			0.21		
	Py-4			0.38		
	Py-5	Pyrite		0.43	0.32	Ref. [14]
	SPG109			0.31		
	SPG110			0.30		
	SPG124			0.37		
	SPG203			0.41		
		YS2006-1	Pyrite		0.28	
Yinshan Pb-Zn deposit	YS2006-2	Pyrite		0.37		
	YS2006	Sphalerite		0.13		
	YS2017-1	Sphalerite		0.20		
	YS2017-2	Sphalerite		0.20	0.21	This work
	YS2017-1	Galena		0.14		
	YS2017-2	Galena		0.16		
	YS2006-1	Galena		0.15		
	YS2006-2	Galena		0.18		
Yinshan Pb-Zn deposit	A-2	Galena		-0.05		
	A-1-1	Galena		0.12	0.12	Ref. [32]
	A-3	Pyrite		0.28		
	A-1	Chalcopyrite		0.14		
	28-1	Sphalerite		-0.41		
Yinshan Pb-Zn deposit	28-1	Galena		-0.55	-0.03	Ref. [33]
	29-1	Pyrite		0.49		
	29-2	Pyrite		0.44		

表4 沙坪沟钼矿及银山铅锌矿硫化物的铅同位素组成<sup>[8, 14, 17, 35]</sup>Table 4 Pb isotopic composition of metal sulphides from Shapinggou Mo deposit and Yinshan Pb-Zn deposit<sup>[8, 14, 17, 35]</sup>

Deposit	Sample No.	Mineral	<sup>206</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb	<sup>207</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb	<sup>208</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb	Data resource	
Shapinggou Mo deposit	ZK92-93	Pyrite	17.124	15.427	37.922	Ref. [8]	
	ZK92-107		17.052	15.414	37.901		
	ZK92-126		17.785	15.552	38.366		
	ZK92-175		17.395	15.461	38.106		
	ZK92-965		17.319	15.432	38.161		
	ZK92-1102		17.226	15.431	38.007		
	Py-1	Pyrite	17.409	15.476	38.519	Ref. [14]	
	Py-2		18.073	15.638	38.612		
	Py-3		17.492	15.494	38.208		
	Py-4		17.456	15.483	38.561		
	Py-5		17.567	15.515	38.144		
	SPG110		17.738	15.553	38.224		
	SPG124		17.429	15.485	38.031		
	SPG203		18.252	15.650	38.709		
	SPG253		18.145	15.604	38.356		
	ZK04-7		Pyrite	17.282	15.440		38.658
	ZK06-1	17.131		15.437	37.973		
	ZK06-2	17.152		15.439	37.992		
	ZK06-3	17.254		15.459	38.054		
	ZK06-4	16.955		15.399	37.863		
ZK3103-1	17.445	15.452		38.118			
ZK3103-4	17.577	15.489		38.339			
ZK3103-6	17.022	15.415		37.932			
Yinshan Pb-Zn deposit	YS2006-1	Pyrite	17.028	15.432	37.948	This work	
	YS2006-2	Pyrite	17.027	15.433	37.952		
	YS2006	Sphalerite	17.036	15.445	37.990		
	YS2017-1	Sphalerite	17.046	15.458	38.029		
	YS2017-2	Sphalerite	17.074	15.438	37.977		
	YS2017-1	Galena	17.016	15.416	37.896		
	YS2017-2	Galena	17.028	15.433	37.956		
	YS2006-1	Galena	17.017	15.420	37.916		
	YS2006-2	Galena	17.032	15.434	37.957		
				17.011	15.405		37.900
		Galena		17.026	15.414		37.948
			17.010	15.412	37.920		
	Galena		16.994	15.373	37.768	Ref. [24]	

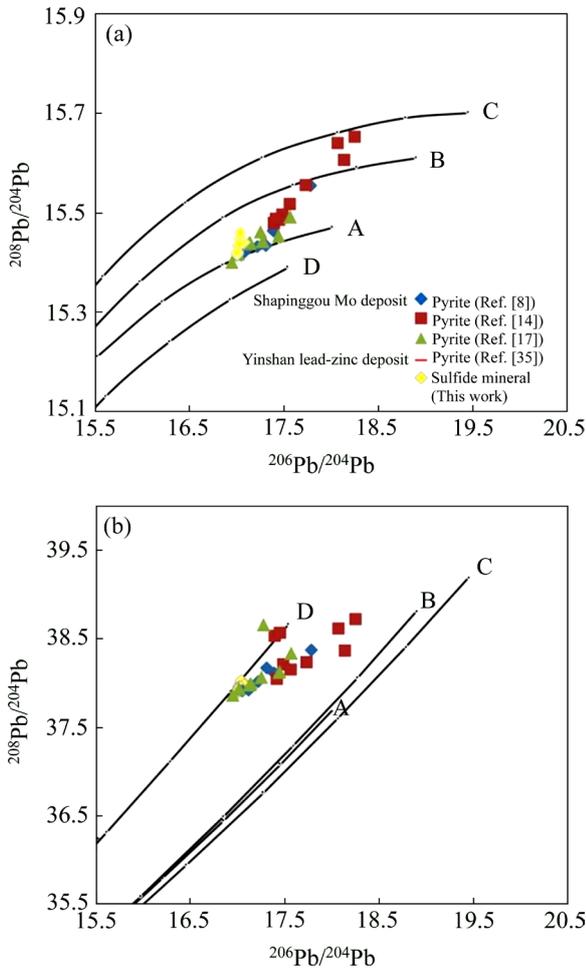


图 8 沙坪沟钼矿及银山铅锌矿硫化物铅同位素组成图解(据文献[36]修绘): (a)  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ — $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  增长曲线图; (b)  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ — $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  增长曲线图。图中增长曲线 A—地幔; B—造山带; C—上地壳; D—下地壳。

Fig. 8 Plumbotectonics model of  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  versus  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  and  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  versus  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  in Shapinggou Mo deposit and Yinshan Pb-Zn deposit (modified from Ref.[36]): (a)  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  versus  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  (b)  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  versus  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ . A—Mantle; B—Orogenic; C—Upper Crust; D—Lower crust

组合特征。这些包裹体具有相似的均一温度, 表明成矿流体早期发生了流体沸腾作用。成矿晚阶段及银山铅锌矿主成矿期石英中流体包裹体为 AV 类, 其气相仍为  $\text{CO}_2$ , 但均一温度和盐度明显低于 I、II 阶段; 流体包裹体中水的 H-O 同位素结果也显示成矿晚期可能有大气降水的加入, 在 H-O 同位素图解(见图 7)中明显向大气水方向偏移。大气水的加入会明显使流体温度降低, 同时盐度也大大降低, 并造成铅锌等沉淀。

在流体包裹体温度-盐度相关图(见图 9)上可以看

出, 沙坪沟钼矿成矿早期以高温、高盐度的岩浆热液流体为主, 铅锌矿床成矿流体与沙坪沟成矿晚期流体特征相似, 具有为中低温-低盐度的特点。从成矿早期到晚期, 成矿流体的温度逐渐下降。激光拉曼光谱(LRM)分析结果表明, 沙坪沟钼矿及铅锌矿成矿流体以富含  $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}_2$  及少量  $\text{N}_2$  等成分为特征, 高盐度流体包裹体中子矿物类型多样, 除石盐子矿物外还常含有钾盐子矿物和其他未知的子矿物, 表明成矿流体体系复杂。

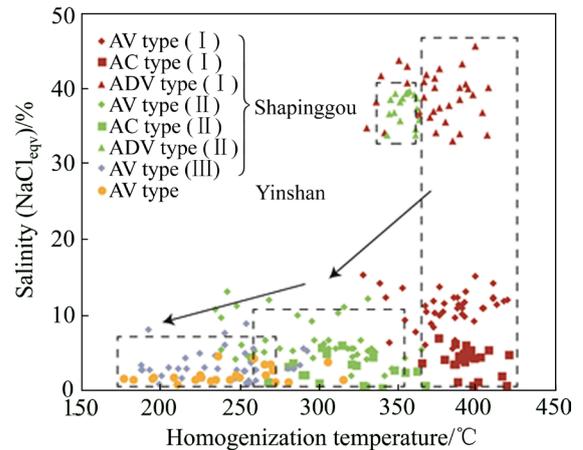


图 9 沙坪沟钼矿及银山铅锌矿包裹体均一温度-盐度散点图

Fig. 9 Homogenization temperature versus salinity plots of fluid inclusions from Shapinggou Mo deposit and Yinshan Pb-Zn deposit

### 5.2 成矿流体演化

杨永飞等<sup>[41]</sup>认为形成于碰撞后伸展阶段的大陆内部斑岩矿床, 高温、富  $\text{CO}_2$  可作为大陆内部斑岩成矿流体的共性特征, 而沙坪沟钼矿床产于东秦岭碰撞造山带内部, 成矿年龄 112~117 Ma<sup>[7-10]</sup>, 形成于中国东部碰撞后伸展体制; 同时流体包裹体研究也表明, 沙坪沟钼矿亦具有前述斑岩成矿流体的共性特征。如前所述本文认为初始成矿流体应为高温、高盐度、富  $\text{CO}_2$  的岩浆热液。

沙坪沟钼矿床早阶段发育大量  $\text{CO}_2$ - $\text{H}_2\text{O}$  包裹体、含子晶的  $\text{CO}_2$  包裹体, 表明初始成矿流体富含  $\text{CO}_2$ 。存在富气相  $\text{CO}_2$  包裹体和含子晶包裹体密切共存的现象, 而且两者均一温度接近, 盐度相差较大, 表明这些流体包裹体是从非均匀流体中捕获的, 早阶段开始流体沸腾。中阶段各样品中均存在共生的  $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$  相差悬殊的富  $\text{CO}_2$  三相包裹体, 完全均一温度相近, 均一方式各异, 盐度相差很大, 表明其为流体沸腾的产物。早阶段和中阶段均发生了成矿流体沸腾作用, 大

量  $\text{CO}_2$  逸出。晚阶段未见富  $\text{CO}_2$  三相包裹体,表明在此之前成矿流体中  $\text{CO}_2$  已经全部逸失。通过上述现象可以判断成矿流体早期来自岩浆水、流体以富含  $\text{CO}_2$  等气体为特征,经历了沸腾、 $\text{CO}_2$  逃逸等过程。晚期主要发育低温、低盐度的流体包裹体是成矿晚期随着温度、压力的降低,流体体系中加入了大量的大气降水造成。从早期成矿流体由高温、高盐度、富  $\text{CO}_2$  的岩浆热液体系向晚期低温、低盐度、贫  $\text{CO}_2$  体系演化。

### 5.3 成矿流体和成矿物质来源

H 和 O 同位素常被用来示踪热液矿床的成矿流体来源<sup>[37, 40-42]</sup>。沙坪沟钼矿成矿流体的  $\delta\text{D}_{\text{SMOW}}$  值范围为  $-5.70\% \sim -6.92\%$ ,  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$  值为  $0.54\% \sim 0.93\%$ , 显示了典型岩浆水同位素组成特征,说明初始成矿流体来自岩浆。银山铅锌矿主成矿期流体的  $\delta\text{D}_{\text{SMOW}}$  值范围为  $-8.01\% \sim -8.44\%$ , 成矿流体的  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$  值为  $0.14\% \sim 0.51\%$ , 在 H-O 同位素投影中落在岩浆水与大气水之间,说明成矿晚期有大气水的加入,与前人研究结果<sup>[14, 17, 35]</sup>基本一致。从早期成矿阶段到主成矿阶段,流体  $\delta^{18}\text{O}$  值向大气降水线接近,指示天水的混入比例越来越大;大气降水的不断混入,大气水的作用逐渐增强,促使早期高温-高盐度岩浆流体向低温-低盐度流体演化。钼矿成矿阶段以岩浆水为主,而铅锌矿成矿过程已明显远离岩浆水,大气降水贡献明显,表明随着流体演化,大气降水显著参与了成矿过程,这可能与成矿时期区域构造有关。地壳拉张伸展<sup>[43-45]</sup>形成一系列断裂,使得地表浅层水(如大气降水等)能够有效对流循环到地壳较深的位置,并加入到成矿流体中,造成含矿流体物理化学性质变化,大气降水的加入导致的流体盐度降低可能是造成铅锌等成矿物质沉淀的机制。

热液成矿作用研究的核心问题就是成矿物质来源示踪, S-Pb 同位素是示踪成矿物质的来源的有效手段<sup>[46-48]</sup>。硫作为成矿元素迁移与沉淀的主要配体元素,其来源常代表了成矿金属来源,因此常用成矿流体的总硫同位素组成( $\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}}$ )示踪成矿物质来源<sup>[48]</sup>。

成矿热液体系中硫同位素分馏过程复杂,  $\delta^{34}\text{S}$  值的变化受温度( $T$ )、氧逸度( $f_{\text{O}_2}$ )、pH 值等因素影响制约<sup>[41-42, 47]</sup>, 因此讨论热液矿床中硫的来源必须依据源区物质  $\delta^{34}\text{S}$  值和热液迁移时含硫物质沉淀的物理化学条件<sup>[49]</sup>。沙坪沟矿区最为常见的硫化物为黄铁矿、辉钼矿、黄铜矿、铅锌矿,由于这种矿物组合少见硫酸盐的存在,表明成矿热液体系中的硫以  $\text{H}_2\text{S}$  为主,故而金属硫化物的  $\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}$  值可近似反映成矿流体的

$\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}$  值范围,进而指示其来源<sup>[50]</sup>。沙坪沟钼矿的黄铁矿样品  $\delta^{34}\text{S}$  值集中分布于  $0.28\% \sim 0.55\%$  之间,辉钼矿硫同位素  $\delta^{34}\text{S}$  组成变化范围较窄,均值为  $0.42\%$ 。说明其具有较均一的硫源,相似于世界上大多数的斑岩型钼矿床和东秦岭大别造山带的斑岩型钼矿床<sup>[26, 51-54]</sup>, 与典型斑岩钼矿床的主成矿期硫化物  $\delta^{34}\text{S}$  值( $0.28\% \sim 0.48\%$ )<sup>[55]</sup>一致。对比 3 个不同储库的硫同位素特征来看<sup>[56-57]</sup>, 沙坪沟钼矿床  $\delta^{34}\text{S}$  值与幔源硫<sup>[56, 58]</sup>相近,表明成矿热液中硫的来源主要为深源岩浆硫,并具有幔源硫的特点。由于  $\delta^{34}\text{S}$  值范围分布集中,不同于沉积岩通常具有负的或者较宽的  $\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}$  值域范围<sup>[59-60]</sup>, 而且其略高于地幔硫的范围,说明成矿流体主要来自于岩浆作用,与岩浆硫的  $\delta^{34}\text{S}$  值( $0 \pm 0.3\%$ )相似<sup>[56, 58]</sup>。银山铅锌矿床金属硫化物的  $\delta^{34}\text{S}$  值主要分布于  $0.13\% \sim 0.37\%$ , 同样具有塔式分布特征,说明亦具有较均一的硫源,且与沙坪沟钼矿的硫同位素组成接近,表明两者具有相同的硫源,均为深源岩浆硫特征。

因为金属硫化物基本不含铀、钍,形成的矿物中基本没有放射成因的铅,因此该金属硫化物的铅同位素组成可反映成矿热液的初始铅同位素组成,从而可以对其来源进行示踪<sup>[61-63]</sup>。

依据表 4 数据,将沙坪沟钼矿及外围铅锌矿的矿石铅同位素数据投影到  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  构造分配模式图(见图 8)。可见沙坪沟钼矿及周边铅锌矿矿石铅同位素组成的投影点相对集中,并呈一定的线性关系,暗示它们可能具有相同的来源<sup>[64]</sup>。从  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  和  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  增长曲线(见图 8(a))可以看出,沙坪沟钼矿床的样品投影点大多数落在造山带与地幔演化曲线之间,极个别落在上地壳与造山带演化曲线之间;铅锌矿的样品投影点比较集中,均落在造山带与地幔演化曲线之间。投影点位于造山带增长线下方的矿石铅说明来源于地幔或下地壳,造山带增长线附近矿石铅的特征为壳幔混源<sup>[65-66]</sup>。投影点如靠近地幔线,暗示可能受到幔源物质的混染。通过对比沙坪沟钼矿区内与成矿有关的岩体铅同位素数据<sup>[14]</sup>可知,钼矿金属硫化物的初始铅同位素组成与矿区内成矿有关的岩体的铅同位素初始值具有一致的分布范围,说明它们具有相同的来源。通过这两个常用的铅同位素投影图来看,沙坪沟的金属硫化物铅可能主要来自于地幔或下地壳。由图 8(b)可以看出,钼矿床和铅锌矿床铅同位素组成投点均在下地壳与地幔来源范围内,表明矿区成矿系统的矿石铅主要显示深部壳幔混源的特征。

## 6 结论

1) 流体包裹体和 H-O 同位素结果表明,沙坪沟钼矿成矿早期流体具有高温、高盐度、富 CO<sub>2</sub> 的特征,流体主要来自岩浆出溶流体,晚期有大气水的参与。高盐度流体包裹体中多种子矿物的发育表明成矿流体成分复杂,除 CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O、NaCl 外,可能还含有较高的 KCl、CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 等多种组分。

2) 流体包裹体组合及显微测温结果表明,沙坪沟斑岩型钼矿床早期成矿流体发生了明显的流体沸腾作用,在流体沸腾过程中 CO<sub>2</sub> 进入到气相并快速向上远移和逃逸,造成流体中 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 含量的降低,Mo 迁移能力下降。流体沸腾是造成钼沉淀的主要机制。

3) 流体沸腾后形成的高盐度液相沿断裂运移,并与下渗的大气水混合,造成晚期成矿流体温度和盐度降低,大气降水加入导致的流体盐度降低是造成铅锌沉淀的主要机制。

4) 硫、铅同位素结果表明,沙坪沟钼矿床与周边的银山铅锌矿床中的硫均来自岩浆硫,具有幔源硫特征,铅同位素也显示深部壳幔混源的特征。

5) 沙坪沟钼矿床与周边的银山铅锌矿床具有相一致的成矿流体来源和成矿物质来源,均与深部岩浆作用有关,大别造山带沙坪沟地区金属成矿作用是燕山晚期岩浆活动的产物。

**致谢:** 野外工作得到安徽省地质矿产勘查局 311 地质队、南京地质矿产研究所相关工作人员的大力协助。研究测试工作得到了核工业北京地质研究院分析测试中心及北京大学地球与空间科学学院拉曼实验室相关人员的协助。此外审稿人对本文提出的建设性意见,在此一并致以诚挚的感谢!

## REFERENCES

- [1] 黄凡,王登红,王成辉,陈郑辉,袁忠信,刘新星. 中国钼矿资源特征及其成矿规律概要[J]. 地质学报, 2014, 88(12): 2297-2314.  
HUANG Fan, WANG Deng-hong, WANG Cheng-hui, CHEN Zheng-hui, YUAN Zhong-xin, LIU Xin-xing. Resources characteristics of molybdenum deposits and their regional metallogeny in China[J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(12): 2297-2314.
- [2] 陈衍景,张成,李诺,杨永飞,邓轲. 中国东北钼

矿床地质[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(5): 1224-1268.

CHEN Yan-jing, ZHANG Cheng, LI Nuo, YANG Yong-fei, DENG Ke. Geology of the Mo deposits in Northeast China[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2012, 42(5): 1224-1268.

- [3] 张怀东,王波华,郝越进,程松,项斌. 安徽沙坪沟斑岩型钼矿床地质特征及综合找矿信息[J]. 矿床地质, 2012, 31(1): 41-51.

ZHANG Huai-dong, WANG Bo-hua, HAO Yue-jin, CHENG Song, XIANG Bing. Geological characteristics and comprehensive ore-prospecting information of Shapinggou porphyry-type molybdenum deposit in Anhui Province[J]. Mineral Deposits, 2012, 31(1): 41-51.

- [4] 王波华,郭宗玲,张怀东,彭海辉. 安徽省金寨银沙地区中生代岩浆岩地质地球化学特征及其找矿意义[J]. 安徽地质, 2007, 17(4): 245-248.

WANG Bo-hua, WU Zong-ling, ZHANG Huai-dong, PENG Hai-hui. Geological and geochemical features of mesozoic igneous rocks in the Yinsha area, Jinzhai, Anhui Province, and the implications[J]. Geological of Anhui, 2007, 17(4): 245-248.

- [5] 陈红瑾,陈衍景,张静,陈秀忠,张怀东. 安徽省金寨县沙坪沟钼矿含矿岩体锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 2013, 29(1): 132-145.

CHEN Hong-jin, CHEN Yan-jing, ZHANG Jing, CHEN Xiu-zhong, ZHANG Huai-dong. Zircon U-Pb ages and Hf isotope characteristics of the ore-bearing intrusion from the Shapinggou molybdenum deposit, Jinzhai County, Anhui Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(1): 132-145.

- [6] 徐刚,汤中立,焦建刚,韩晓宝,仲佳鑫,魏翔,邱根雷. 金堆城与沙坪沟小岩体型斑岩钼矿床对比研究[J]. 西北地质, 2012, 45(4): 359-369.

XU Gang, TANG Zhong-li, JIAO Jian-gang, HAN Xiao-bao, ZHONG Jia-xin, WEI Xiang, QIU Gen-lei. The comparative study on small intrusion type molybdenum deposits of Shapinggou and Jinduicheng[J]. Northwestern Geology, 2012, 45(4): 359-369.

- [7] 徐晓春,楼金伟,陆三明,谢巧勤,褚平利,尹滔. 安徽金寨银山钼-铅-锌多金属矿床 Re-Os 和有关岩浆岩 <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar 年龄测定[J]. 矿床地质, 2009, 28(5): 621-632.

XU Xiao-chun, LOU Jin-wei, LU San-ming, XIE Qiao-qin, ZHU Ping-li, YIN Tao. Re-Os ages of molybdenum-lead-zinc polymetallic deposits and <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar ages of related magmatic rocks in Yinshan area, Jinzhai, Anhui Province[J]. Mineral Deposits, 2009, 28(5): 621-632.

- [8] 黄凡, 王登红, 陆三明, 陈毓川, 王波华, 李超. 安徽省金寨县沙坪沟钼矿辉钼矿 Re-Os 年龄一兼论东秦岭-大别山中生代钼成矿作用期次划分[J]. 矿床地质, 2011, 30(6): 1040-1057.  
HUANG Fan, WANG Deng-hong, LU San-ming, CHEN Yu-chuan, WANG Bo-hua, LI Chao. Molybdenite Re-Os isotopic age of Shapinggou Mo deposit in Anhui Province and Mesozoic Mo ore-forming stages in East Qinling-Dabie Mountain region[J]. Mineral Deposits, 2011, 30(6): 1040-1057.
- [9] 张红, 孙卫东, 杨晓勇, 梁华英, 王波华, 王瑞龙, 王玉贤. 大别造山带沙坪沟特大型斑岩钼矿床年代学及成矿机理研究[J]. 地质学报, 2011, 85(12): 2040-2059.  
ZHANG Hong, SUN Wei-Dong, YANG Xiao-yong, LANG Hua-ying, WANG Rui-long, WANG Yu-xian. Geochronology and metallogenesis of the shapinggou giant porphyry molybdenum deposit in the Dabie orogenic belt[J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(12): 2040-2059.
- [10] 孟祥金, 徐文艺, 吕庆田, 屈文俊, 李先初, 史东方, 文春华. 安徽沙坪沟斑岩钼矿锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 年龄[J]. 地质学报, 2012, 86(3): 487-494.  
MENG Xiang-dong, XU Wen-yi, LÜ Qing-tian, QU Wen-jun, LI Xian-chu, SHI Dong-fang, WEN Chun-hua. Zircon U-Pb dating of ore-bearing rocks and molybdenite Re-Os age in Shapinggou porphyry molybdenum deposit, Anhui Province[J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(3): 487-494.
- [11] 阳珊, 王波华, 王枫, 遇祯. 安徽金寨县沙坪沟钼矿区铌赋存状态研究[J]. 岩矿测试, 2013, 32(2): 269-277.  
YANG Shan, WANG Bo-hua, WANG Feng, YU Zhen. The occurrence of niobium in Shapinggou molybdenum deposits, Jinzhai County, Anhui Province[J]. Rock and Mineral Analysis, 2013, 32(2): 269-277.
- [12] 任志, 周涛发, 张达玉, 袁峰, 范裕, 李先初, WHITE N. 大别山地区沙坪沟斑岩型钼矿床蚀变及矿化特征研究[J]. 岩石学报, 2015, 31(9): 2708-2723.  
REN Zhi, ZHOU Tao-fa, ZHANG Da-yu, YUAN Feng, FAN Yu, LI Xian-chu, WHITE N. Characteristics of alteration and mineralization of Shapinggou porphyry molybdenum deposit, Dabie orogenic belt[J]. Acta Petrologica Sinica, 2015, 31(9): 2708-2723.
- [13] 于文, 倪培, 王国光, 商力, 江来利, 王波华, 张怀东. 安徽金寨县沙坪沟斑岩钼矿床成矿流体演化特征[J]. 南京大学学报(自然科学), 2013, 48(3): 241-255.  
YU Wen, NI Pei, WANG Guo-guang, SHANG Li, JIANG Lai-li, WANG Bo-hua. Evolution of ore-forming fluids of the Shapinggou porphyry molybdenum[J]. Journal Of Nanjing University (Natural Sciences), 2013, 48(3): 241-255.
- [14] NI Pei, WANG Guo-guang, YU Wen, CHEN Hui, JIANG Lai-li, WANG Bo-hua, ZHANG Huai-dong, XU Ying-feng. Evidence of fluid inclusions for two stages of fluid boiling in the formation of the giant Shapinggou porphyry Mo deposit, Dabie Orogen, Central China[J]. Ore Geology Reviews, 2014, 65(2015): 1078-1094.
- [15] 翟裕生. 论成矿系统[J]. 地学前缘, 1999, 6(1): 14-28.  
ZHAI Yu-sheng. On the metallogenic system[J]. Earth Science Frontiers, 1999, 6(1): 14-28.
- [16] 翟裕生, 王建平, 邓军, 彭润民, 刘家军. 成矿系统时空演化及其找矿意义[J]. 现代地质, 2008, 22(2): 144-150.  
ZHAI Yu-Sheng, WANG Jian-ping, DENG Jun, PENG Run-min, LIU Jia-jun. Temporal spatial evolution of metallogenic systems and its significance to mineral exploration[J]. Geoscience, 2008, 22(2): 144-150.
- [17] 陆三明, 阮林森, 赵丽丽, 王波华, 张怀东, 王国光, 陈芳. 安徽金寨县沙坪沟钼铅锌矿田两期成岩成矿作用[J]. 2016, 90(6): 1167-1181.  
LU San-ming, YUAN Lin-sen, ZHAO Li-li, WANG Bo-hua, ZHANG Huai-dong, WANG Guo-guang, CHEN Fang. Two stages of diagenesis and metallogenesis of Shapinggou molybdenum lead-zinc ore field in Jinzhai County, Anhui Province[J]. Acta Geologica Sinica, 2016, 90(6): 1167-1181.
- [18] 邓晋福, 戴圣潜, 吴宗絮, 赵海玲, 杜建国, 罗照华. 大别造山带岩石学结构和热结构及其地质意义[J]. 地质学报, 2000, 74(3): 207-215.  
DENG Jin-fu, DAI Sheng-qian, WU Zong-xu, ZHAO Hai-ling, DU Jian-guo, LUO Zhao-hua. Petrological structure and thermal structure of the Dabie orogenic belt and its geological implications[J]. Acta Geologica Sinica, 2000, 74(3): 207-215.
- [19] 谢才富, 熊成云, 胡宁, 李劲松. 东秦岭-大别造山带区域成矿规律研究[J]. 华南地质和矿产, 2001(3): 15-21.  
XIE Cai-fu, XIONG Cheng-yun, HU Ning, LI Jin-song. A study on regional metallogenic regularity of the east Qinling-Dabie Orogenic belt[J]. Geology and Mineral Resources of South China, 2001(3): 15-21.
- [20] 王清晨, 林伟. 大别山碰撞造山带的地球动力学[J]. 地学前缘(中国地质大学, 北京), 2002, 9(4): 257-265.  
WANG Qing-chen, LIN Wei. Geodynamics of the Dabieshan collisional orogenic belt[J]. Earth Science Frontiers, 2002, 9(4): 257-265.
- [21] 李毅, 胡海珠, 陈丽娟, 白凤军, 李红超. 大别山北麓姚冲钼矿床地质特征及找矿标志[J]. 地质与勘探, 2013,

- 49(2): 280–288.
- LI Yi, HU Hai-zhu, CHEN Li-juan, BAI Feng-jun, LI Hong-chao. Geological features and ore-searching indicators of the Yaochong Mo deposit in the northern Piedmont of the Dabie Shang[J]. *Geology and Prospecting*, 2013, 49(2): 280–288.
- [22] 王运, 陈衍景, 马宏卫, 徐友灵. 河南省商城县汤家坪钼床地质和流体包裹体研究[J]. *岩石学报*, 2009, 25(2): 469–480.
- WANG Yun, CHEN Yan-jing, MA Hong-wei, XU You-ling. Study on ore geology and fluid inclusion of the Tangjiaping Mo deposit, Shangcheng County, Henan Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(2): 469–480.
- [23] 安徽省地质矿产局. 安徽省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1987: 5–94.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Anhui Province. Regional geology of Anhui province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987: 5–94.
- [24] 杜建国. 大别造山带中生代岩浆作用与成矿地球化学研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2000: 14–36.
- DU Jian-guo. On researching of mesozoic magmatism and geochemistry of mineralization in Dabie orogenic belt[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2000: 14–36.
- [25] REN Zhi, ZHOU Tao-fa, HOLLINGS P, WHITE N C. Magmatism in the Shapinggou district of the Dabie Orogen, China: Implications for the formation of porphyry Mo deposits in a collisional orogenic belt[J]. *Lithos*, 2018, 308/309: 346–363.
- [26] CHEN Yan-jing, WANG Pin, LI Nuo, YANG Yong-fei, FRANCO P. The collision-type porphyry Mo deposits in Dabie Shan, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 81(2): 405–430.
- [27] 安徽省地质矿产勘查局313地质队. 安徽省金寨县沙坪沟钼矿普查地质报告(内部资料)[R]. 2011: 1–18.
- No.313 Team of Anhui Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration. Geological survey report of Shapinggou Mo deposit in Jinzhai County, Anhui Province[R]. Anhui Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration. 2011: 1–18.
- [28] HALL D L, STERNER S M, BODNAR R J. Freezing point depression of NaCl-KCl-H<sub>2</sub>O solutions[J]. *Economic Geology*, 1988, 83(1): 197–202.
- [29] ROEDDER E. Fluid Inclusions: Reviews in mineralogy[M]. Washington: Mineral Society of America, 1984: 1–644.
- [30] CLAYTON R N, O'NEIL J R, MAYEDA T K. Oxygen isotope exchange between quartz and water[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1972, 77(17): 3057–3067.
- [31] TAYLOR B E. Magmatic volatiles: Isotopic variation of C, H, and S[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 1986, 16(1): 185–225.
- [32] 陆三明. 北淮阳构造带东段银山铅锌矿床形成的构造背景[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2003: 25–32.
- LU San-ming. The tectonic setting of Yingshan lead-zinc deposit in the east of north Huaiyan Tectonic Zone[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2000: 25–32.
- [33] 刘啟能. 安徽金寨沙坪沟斑岩钼矿床及其与岩浆岩的关系[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013: 27–36.
- LIU Qi-neng. Relationship between porphyry molybdenum deposit and magmatic rocks from Shapinggou in Jinzhai region, Anhui province[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2013: 27–36.
- [34] 黄凡, 王登红, 陈毓川. 中国东部中生代典型钼矿研究[J]. 北京: 地质出版社, 2010: 106–122.
- HUANG Fan, WANG Deng-hong, CHEN Yu-chuan. Typical molybdenum research in mesozoic, East of China, Beijing[J]. Geological Publishing House, 2013, 106–122.
- [35] XU Xiao-chun, LOU Jin-wei, XIE Qiao-qin, XIAO Qiu-xiang, LIANG Jian-feng, LUO San-ming. Geochronology and tectonic setting of Pb-Zn-Mo deposits and related igneous rocks in the Yinshan Region, Jinzhai, Anhui Province, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2011, 43(211):132–141.
- [36] ZARTMAN R E, DOE B R. Plumbotectonics: The model[M]. *Tectonophysics*, 1981, 75(1/2): 135–162.
- [37] ULRICH T, GUNTHER D, HEINRICH C A. Gold concentrations of magmatic brines and the metal budget of porphyry copper deposits[J]. *Nature*, 1999, 399(6737): 676–679.
- [38] PIRAJNO F. Hydrothermal processes and mineral system[J]. Berlin: Springer, 2009: 1–1250.
- [39] MERNAGH T P, BASTRAKOV E N, ZAW K, WYGRALAK A S, WYBORN L A. Comparison of fluid inclusion data and mineralization processes for Australian orogenic gold and intrusion-related gold systems[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(1): 21–32.
- [40] FAN H R, HU F F, WILDE S A, YANG K F, JIN C W. The Qiyugou gold-bearing breccia pipes, Xiong'er shan region, central China: Fluid inclusion and stable-isotope evidence for an origin from magmatic fluids[J]. *International Geology Review*, 2011, 53(1): 25–45.
- [41] 杨永飞, 李诺, 杨艳. 河南省栾川南泥湖斑岩型钼钨

- 矿床流体包裹体研究[J]. 岩石学报, 2009, 25(10): 2550-2562.
- YANG Yong-fei, LI Nuo, YANG Yan. Fluid inclusion study of the Nannihu PorPhyry Mo-W deposit, Luanchuan County, Henan Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(10): 2550-2562.
- [42] 戴塔根, 李洁兰. 广西扶绥喀斯特型铝土矿氢氧同位素特征及地质意义[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(7): 1506-1514.
- DAI Ta-gen, LI Jie-lan. Features and significance of H-O isotopes from Fusui Karst Bauxite in Guangxi Province, China[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26(7): 1506-1514.
- [43] 李曙光. 大别山超高压变质岩折返机制与华北-华南陆块碰撞过程[J]. 地学前缘, 2004, 11(3): 63-70.
- LI Shu-guang. Exhumation mechanism of the ultrahigh-pressure metamorphic rocks in the Dabie mountains and continental collision process between the North and South China blocks[J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11(3): 63-70.
- [44] 李曙光, 李秋立, 侯振辉, 杨蔚, 王莹. 大别超高压变质岩的冷却史及折返机制[J]. 岩石学报, 2005, 21(4): 1117-1124.
- LI Shu-guang, LI Qiu-li, HOU Zhen-hui, YANG Wei, WANG Ying. Cooling history and exhumation mechanism of the ultrahigh-pressure metamorphic rocks in the Dabie mountains, central China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 21(4): 1117-1124.
- [45] 杨经绥, 许志琴, 张建新, 张泽明, 刘福来, 吴才来. 中国主要高压-超高压变质带的大地构造背景及俯冲/折返机制的探讨[J]. 岩石学报, 2009, 25(7): 1529-1560.
- YANG Jing-sui, XU Zhi-qin, ZHANG Jian-xin, ZHANG Ze-ming, LIU Fu-lai, WU Cai-lai. Tectonic setting of main high and ultrahigh-pressure metamorphic belts in China and adjacent region and discussion on their subduction and exhumation mechanism[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(7): 1529-1560.
- [46] 席振, 高光明, 马德成, 罗晗. 厄瓜多尔 Beroen 金银矿床硫铅同位素地球化学[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(4): 853-862.
- XI Zhen, GAO Guang-ming, MA De-cheng, LUO Han. Lead and sulfur isotope geochemistry of ecuadorian Beroen gold-silver deposit[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26(4): 853-862.
- [47] 祁进平, 陈衍景, 倪培, 赖勇, 丁俊英, 宋要武, 唐国军. 河南冷水北沟铅锌银矿床流体包裹体研究及矿床成因[J]. 岩石学报, 2009, 25(11): 2843-2854.
- QI Jin-ping, CHEN Yan-jing, NI Pei, LAI Yong, DING Jun-ying, SONG Yao-wu, TANG Guo-jun. Fluid inclusion constraints on the origin of the Lengshuibeiyou Pb-Zn-Ag deposit, Henan Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(11): 2843-2854.
- [48] OHMOTO H. Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits[J]. Economic Geology, 1972, 67(5): 551-578.
- [49] HOEFS J. Stable isotope geochemistry[M]. 4th edition. Berlin: Springer Verlag, 1997: 1-201.
- [50] 郑永飞, 陈江峰. 稳定同位素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 218-239.
- ZHENG Yong-fei, CHEN Jiang-feng. Stable isotope geochemistry[M]. Beijing: Science Press, 2000: 218-239.
- [51] 卢欣祥, 罗照华, 黄凡, 谷德敏, 李明立, 杨宗峰, 黄丹峰, 梁涛, 刘传权, 张震, 高源. 秦岭-大别山地区钼矿类型与矿化组合特征[J]. 中国地质, 2011, 38(6): 1519-1535.
- LU Xin-xiang, LUO Zhao-hua, HUANG Fan, GU De-min, LI Ming-li, YANG Zong-feng, LANG Tao, LIU Chao-quan, ZHANG Zhen, GAO Yuan. Mo deposit types and mineralization assemblage characteristics in Qinling-Dabie Mountain Area[J]. Geology In China, 2011, 38(6): 1519-1535.
- [52] 陈伟, 徐兆文, 李红超, 陈进全, 王浩, 王少华. 河南新县宝山寨钼矿床流体包裹体研究[J]. 南京大学学报(自然科学), 2012, 48(6): 710-718.
- CHEN Wei, XU Zhao-wei, LI Hong-chao, CHEN Jin-quan, WANG Hao, WANG Shao-hua. Fluid inclusions of the Baoanzhai Mo deposit in southern Henan Province, eastern China[J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 2012, 48(6): 710-718.
- [53] 杨梅珍, 曾键年, 李法岭, 潘思东, 陆建培, 任爱群. 河南新县大银尖钼矿床成岩成矿作用地球化学及地质意义[J]. 地球学报, 2011, 32(3): 279-292.
- YANG Mei-zhen, ZENG Jian-nian, LI Fa-ling, PAN Si-dong, LU Jian-pei, REN Ai-qun. Geochemistry of mineralization and granitic magmatism of Dayinjian Mo deposit, Xinxian County, Henan Province and its geological significance[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2011, 32(3): 279-292.
- [54] 郭波, 朱赖民, 李彝, 许江, 王建其, 弓虎军. 东秦岭金堆城大型斑岩钼矿床同位素及元素地球化学研究[J]. 矿床地质, 2009, 28(3): 265-281.
- GUO Bo, ZHU Lai-min, LI Ben, XU Jiang, WANG Jian-qi, GONG Hu-jun. Isotopic and element geochemical study of

- Jinduicheng superlarge porphyry Mo deposit in East Qinling area[J]. *Mineral Deposits*, 2009, 28(3): 265–281.
- [55] TAYLOR B E. Magmatic volatiles: Isotopic variation of C, H, and S[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 1986, 16(1): 185–225.
- [56] CHAUSSIDON M, ALBARÈDE F, SHEPPARD S M F. Sulphur isotope variations in the mantle from ion microprobe analyses of micro-sulphide inclusions[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1989, 92 (2):144–156.
- [57] RYE R O, OHMOTO H. Sulfur and carbon isotopes and ore genesis: A review[J]. *Economic Geology*, 1974, 69(6): 826–842.
- [58] OHMOTO H, GOLDHABER M B. Sulfur and carbon isotopes[C]// BARNES H L. *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. 3rd Edition. New York: John Wiley and Sons, 1997: 517–612.
- [59] DRUMMOND S E, OHMOTO H. Chemical evolution and mineral deposition in boiling hydrothermal systems[J]. *Economic Geology*, 1985, 80(1): 126–147.
- [60] FARQUHAR J, WU N P, CANFIELD D E, ODURO H. Connections between sulfur cycle evolution, sulfur isotopes, sediments, and basemetal sulfide deposits[J]. *Economic Geology*, 2010, 105(3): 509–533.
- [61] 周清, 姜耀辉, 廖世勇, 赵鹏, 靳国栋, 刘铮, 贾儒雅, 徐深谋. Pb同位素对德兴铜矿成矿物源的制约[J]. *地质学报*, 2013, 87(8): 1125–1135.
- ZHOU Qing, JIANG Yao-hui, LIAO Shi-yong, ZHAO Peng, JIN Guo-dong. Constraint of Pb isotope on ore-forming source origin of the Dexin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2013, 87(8): 1125–1135.
- [62] CALAGARI A A. Stable isotope (S, O, H and C) studies of the phyllic and potassic-phyllic alteration zones of the porphyry copper deposit at Sungun, East Azarbaijan, Iran[J]. *Journal of Asian Earth Science*, 2003, 21:767–780.
- [63] 彭南海, 邵拥军, 刘忠法, 汪程. 山西义兴寨金矿田成矿机理研究: 来自同位素和流体包裹体的证据[J]. *中国有色金属学报*, 2017, 27(2): 306–317.
- PENG Nan-hai, SHAO Yong-jun, LIU Zhong-fa, WANG Cheng. Metallogenic mechanism of Yixingzhai gold ore field in Fanshi county, Shanxi province: Evidences from isotopes and fluid inclusion[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2017, 27(2): 306–317.
- [64] 成曦晖, 徐九华, 王建雄, 褚海霞, 肖星, 张辉. 厄立特里亚阿斯马拉 VMS 矿床 S、Pb 同位素对成矿物质来源的约束[J]. *中国有色金属学报*, 2017, 27(4): 795–810.
- CHENG Xi-hui, XU Jiu-hua, WANG Jian-xiong, CHU Hai-xia, XIAO Xing, ZHANG Hui. Sulfur and lead isotope constrains on source of ore-forming materials in Asmara VMS-type deposits, Eritrea[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2017, 27(4): 795–810.
- [65] HARRIS A C, GOLDING S D, WHITE N C. Bajo de la Alumbrera copper-gold deposit: Stable isotope evidence for a porphyry-related hydrothermal system dominated by magmatic aqueous fluids[J]. *Economic Geology*, 2005, 100: 986–886.
- [66] SELBY D, NESBITT B E, CREASER R A. Evidence for a nonmagmatic component in potassic hydrothermal fluids of porphyry Cu-Au-Mo systems, Yukon, Canada[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2001, 65(4): 571–587.

## Metallogenic system of Shapinggou porphyry molybdenum-hydrothermal lead-zinc deposit in Dabie orogeny belt: Constraints from fluid inclusions and stable isotope

WANG Ying<sup>1</sup>, XIE Yu-ling<sup>1</sup>, ZHONG Ri-chen<sup>1</sup>, WANG Ai-guo<sup>2</sup>, WU Hao-ran<sup>1</sup>, AN Wei-jun<sup>1</sup>

(1. School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. Nanjing Institute of Geology and Mineral Resource, Chinese Academy of Geological Sciences, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** The Shapinggou molybdenum deposit, located in Jinzhai County, Anhui Province, China, is the second largest porphyry molybdenum deposit in the world. Several Pb-Zn deposits have been discovered in the periphery of Shapinggou Mo deposit, such as Yinshan and Gaijing deposits, but their genetic relationship with porphyry Mo deposit is misunderstood. In this work, we base on data from field work investigation combined with laboratory analyses data such as fluid inclusions petrography, microthermometry, laser Raman microprobe and stable isotopes to characterize the source and evolution of Shapinggou porphyry Mo deposit and surrounding Yinshan Pb-Zn deposits in order to establish a genetic relationship between both deposits. Petrography fluid inclusion of lithofacies from Shapinggou porphyry Mo deposit reveals 3 types of fluid inclusions including gas-liquid phase inclusions (AV), CO<sub>2</sub>-rich three phase inclusions (AC), and crystalline-bearing inclusions (ADV), developed in three stages of mineralization. In the early stage of mineralization, the homogeneous temperature of fluid inclusions ranges from 325 to 420 °C with relatively low salinity of AV and AC types ranging from 0.8% to 15.4% NaCl<sub>eqv</sub> and moderately high salinity of ADV type ranging from 33% to 46% NaCl<sub>eqv</sub>. In the middle stage of mineralization, AV, AC and ADV have uniform temperature at around 226–367 °C with low salinity of AV and AC types ranging from 0.4% to 13.2% NaCl<sub>eqv</sub> and relatively high salinity of ADV type ranging from 33.3% to 39.6% NaCl<sub>eqv</sub>. The late stage of mineralization develops AV type of fluid inclusion with homogeneous temperature ranging from 185 to 300 °C, and the salinity ranges from 0.7% to 8.4% NaCl<sub>eqv</sub>. However, in the Yinshan Pb-Zn deposits, only one stage of mineralization has been developed and displaying AV fluid inclusions. The homogeneous temperature of fluid ranges from 175 to 315 °C with salinity of 0.6%–4.9% NaCl<sub>eqv</sub>, which correspond to the late stage of Shapinggou porphyry Mo deposit. It clearly appear that the homogeneous temperature and salinity decrease from the earlier to the late stage of mineralization. H–O isotope results of water in fluid inclusions show that the early stage fluid of Shapinggou Mo deposit is principally originated from magmatic source, while in the late stage of Pb-Zn mineralization, the ore-forming hydrothermal fluid is a mixture of magmatic water and meteoric water, similar to H–O isotopes of water in quartz fluid inclusions in the main metallogenic stage of Yinshan Pb-Zn deposit. It appears that the early hydrothermal fluid was originated from magmatic source with a small amount of meteoric water, which has, therefore, gradually increased during the middle and late stage of mineralization. S-isotope data indicated that sulfur of the two deposits derives from deep magmatic source and Pb-isotope, however, has characteristic of crust-mantle mixed source. The characteristics of S, Pb, H, O isotopes and fluid inclusions indicate that, the Mo deposits and Pb-Zn deposits in the study area have the same material sources. The ore-forming fluid has an evolution trend from high-temperature-high-salinity magmatic hydrothermal fluid to low-temperature-low-salinity magmatic-meteoric mixed fluid and from CO<sub>2</sub>-rich to CO<sub>2</sub>-poor. The Yinshan Pb-Zn deposits around Shapinggou are part of the porphyry metallogenic system.

**Key words:** fluid inclusion; H–O–S–Pb isotope; molybdenum lead zinc metallogenic system; Shapinggou molybdenum deposit; Dabie orogenic belt

**Foundation item:** Projects(201011011) supported by the Ministry of Land and Resources Public Welfare Industry Foundation of China; Project(2014-01-020-010) supported by China Geological Survey Commission

**Received date:** 2018-07-30; **Accepted date:** 2019-02-26

**Corresponding author:** XIE Yu-ling; Tel: +86-13601236643; E-mail: yulingxie63@Hotmail.com

(编辑 王超)