

陕西山阳庙梁金矿地质特征及流体包裹体研究

陈永康^{1,2}, 梁婷^{1,3}, 周义¹, 丁亮¹, 李聪¹, 李尚¹, 岑炬标¹, 张三龙⁴

(1. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西西安 710054; 2. 南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 南京大学地球科学与工程学院, 江苏南京 210093; 3. 长安大学成矿作用及其动力学实验室, 陕西西安 710054; 4. 陕西地矿综合地质大队, 陕西渭南 714000)

摘要: 庙梁金矿床位于南秦岭柞水-山阳矿集区的中心地带, 为了查明庙梁金矿成矿流体特征、金的沉淀机制及矿床成因, 对该矿床不同成矿阶段脉石矿物中的流体包裹体进行了详细的岩相学、显微测温、激光拉曼光谱分析研究并与周边典型金矿床特征进行了对比。结果表明, 该矿床包裹体类型丰富, 成矿早阶段主要为 H₂O-NaCl 型包裹体(II型)、部分 H₂O-CO₂ 型包裹体(III型)和少量纯 CO₂ 型包裹体(I型); 主成矿阶段主要为 H₂O-NaCl 型包裹体(II型)和 H₂O-CO₂ 型包裹体(III型); 成矿晚阶段主要为 H₂O-NaCl 型包裹体(II型)。显微测温结果显示, 从早阶段到晚阶段, 流体性质由中高温、中等盐度、低密度、富 CO₂ 流体向中低温、中低盐度、中等密度、贫 CO₂ 流体演化。激光拉曼成分分析表明包裹体气相成分除 CO₂ 外, 还含有一定量的 CH₄ 和 H₂S。综合研究认为在低氧逸度的还原环境下, 金在流体中以 Au(HS)₂ 络合物的形式迁移, 流体在向上运移过程中, 因温度、压力的降低而发生不混溶现象是金沉淀的主要机制。

关键词: 地球化学; 流体包裹体; 庙梁金矿床; 南秦岭

中图分类号: P618.51; P611

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2022)01-0095-17

Geological characteristics and fluid inclusions of Miaoliang gold deposit, Shanyang, Shaanxi Province

CHEN Yong-kang^{1,2}, LIANG Ting^{1,3}, ZHOU Yi¹, DING Liang¹, LI Cong¹, LI Shang¹, CEN Ju-biao¹ and ZHANG San-long⁴

(1. School of Earth Sciences and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 3. Laboratory of Mineralization and Dynamics, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 4. Shaanxi Geological and Mineral Comprehensive Geological Brigade, Weinan Shaanxi 714000, China)

Abstract: The Miaoliang gold deposit is located in the center of the Southern Qinling Zhashui-Shanyang ore concentration area. In order to find out the characteristics of ore-forming fluids, the precipitation mechanism of gold and genesis of the Miaoliang gold deposit, the fluid inclusions in gangue minerals at different metallogenic stages of the deposit were studied in detail by petrography, microthermometry, laser Raman spectroscopy, comparing with the characteristics of typical surrounding gold deposits. The results show that the deposit is rich in types of inclusions. The early stage of mineralization is mainly H₂O-NaCl type inclusions (type II), part of H₂O-CO₂ type inclusions (type III) and a small amount of pure CO₂ type inclusions (type I); the main metallogenic stage is mainly H₂O-NaCl type inclusions (type II) and H₂O-CO₂ type inclusions (type III); the late mineralization stage is mainly

收稿日期: 2021-04-08; 接受日期: 2021-11-03; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20160346, DD20190379-53); 陕西地矿局综合地质大队项目(220227180191)

作者简介: 陈永康(1995-), 男, 博士研究生, 主要从事矿床学、地球化学研究, E-mail: ykchen0324@163.com。

网络首发时间: 2021-12-22; 网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1966.P.20211221.1808.002.html>

H₂O-NaCl type inclusions (type II). Microscopic temperature measurements show that from the early stage to the late stage, the fluid properties evolve from medium and high temperature, medium salinity, low density, CO₂-rich fluid to medium and low temperature, medium-low salinity, medium density and CO₂-poor fluid. Laser Raman analysis shows that the gas phase of inclusions contains a certain amount of CH₄ and H₂S in addition to CO₂. Comprehensive study concluded that gold migrates in the form of Au(HS)₂⁻ complex in the fluid under the reduction environment of low oxygen fugacity, and that immiscibility due to the decrease of temperature and pressure is the main mechanism of gold precipitation in the process of fluid upward migration.

Key words: geochemistry; fluid inclusion; Miaoliang gold deposit; South Qinling

Fund support: Project of China Geological Survey (DD20160346, DD20190379-53); Project of Comprehensive Geological Brigade of Shaanxi Bureau of Geology and Mineral Resources (220227180191)

秦岭造山带是华北地块与扬子地块经过长期的碰撞汇聚和陆内造山作用的结果,是我国重要的金属成矿带(张国伟等, 2001)。柞水-山阳矿集区作为南秦岭多金属成矿带重要矿集区之一,区内岩浆作用和构造活动强烈,发育一系列走向近东西-北西西及南北向断裂,出露有大量中酸性侵入体,深部存在有隐伏岩体,具有良好成矿条件,发育铜、铁、金、银、铅、锌等多种类型的金属矿床(祁思敬, 1993)。

庙梁金矿位于柞水-山阳矿集区的中心地带,是陕西地矿局综合地质大队有限公司近年来新发现的矿床。前人只对庙梁金矿的区域地质背景、矿床地质特征、岩浆岩的形成时代、矿物学特征、矿床成因进行了初步研究,且不同学者对于矿床的成因认识不一(张三龙等, 2017^①; 郑忠林等, 2019; 李尚, 2019; 陈永康等, 2020)。庙梁金矿床在地质特征、矿化类型等方面明显不同于其周边地区的龙头沟金矿、夏家店金矿、王家坪金矿等具有工业价值的矿床,有其特殊性,目前在流体包裹体方面的研究尚属空白,对于成矿流体的物理化学条件、成矿过程和成矿机制等问题认识还不清楚,影响了该区找矿勘查评价工作。

基于此,本文在详细的野外地质工作基础上,初步总结了矿床的成矿特征,系统开展了不同成矿阶段脉石矿物石英、方解石中流体包裹体的岩相学、显微测温及激光拉曼光谱分析等方面的研究,进而探讨了成矿流体的性质、成矿物理化学条件和成矿机理,欲为该矿区的找矿勘探提供重要的理论基础。

1 区域地质背景

研究区的大地构造位置处于华北板块南缘与扬子板块北缘碰撞消亡带中的南秦岭造山带东段的柞水-山阳多金属矿集区,矿集区北部通过商-丹缝合带(SF1)连接北秦岭,南部以走向近东西的凤镇-山阳断裂(SF2)为界(图1)。矿集区经历了多期次的构造变形和岩浆活动,构造线主要以走向近EW、NWW向展布,同时还叠加有走向NNE及近SN向的次一级断裂,为成矿提供了有利条件,形成了铜、钼、金、铁等多金属矿床(闫臻等, 2007; 王瑞廷等, 2008; 张西社等, 2012)。

区域出露地层主要有中上泥盆统以及下石炭统(图2),在凤镇-山阳断裂的南北两侧地层岩性略有差异。断裂以北,岩性主要以海相碎屑岩为主,局部夹热水喷流岩建造,厚度可达万米(苏春乾等, 2006; 闫臻等, 2007);断裂以南,岩性以海相碎屑岩、碳酸盐岩为主,厚度约5 000~6 000 m(张西社等, 2012; 刘凯等, 2014)。

区内岩浆活动强烈且持续时间长,广泛发育中酸性侵入岩,基性-超基性岩体相对较少,形成时代大致有新元古代、古生代以及中生代3期,中生代的岩体最为发育,在矿集区大量出露(图2)。新元古代形成的迷魂阵蚀变闪长岩体、冷水沟辉长岩体、色河花岗岩、板板山花岗岩分布于凤镇-山阳断裂的附近;晚三叠世形成的东江口花岗岩体、柞水花岗岩体、曹坪花岗岩体、沙河湾花岗岩体等呈大的岩基状分布于矿集区北部;晚侏罗世形成的中酸性花岗岩

① 张三龙, 王书勤, 李万生. 2017. 陕西省山阳县庙梁金矿床勘探地质报告.

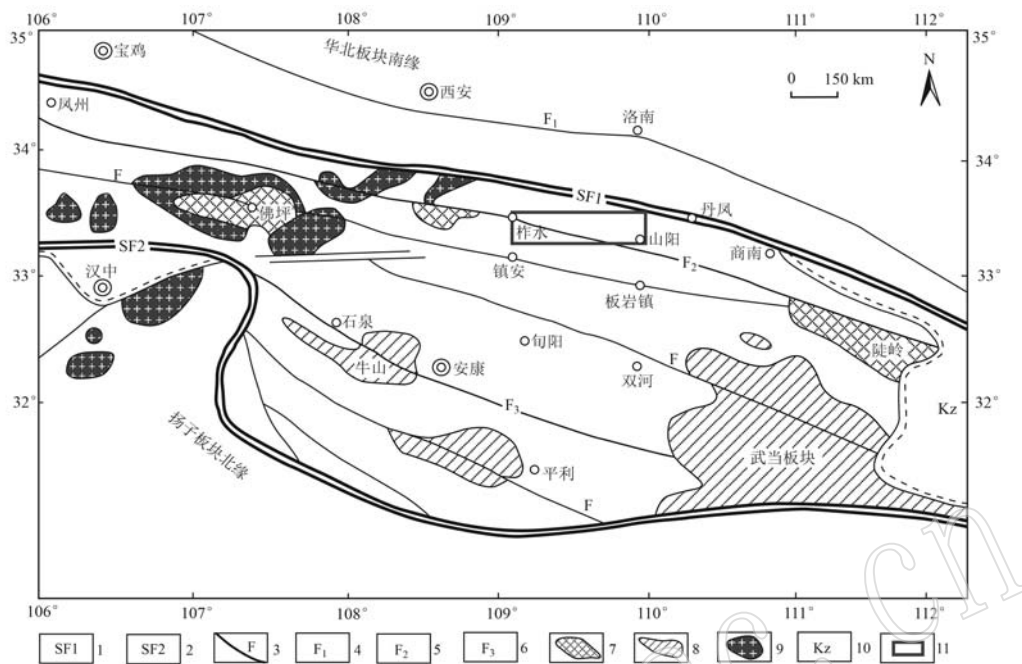


图 1 柞水-山阳地区大地构造位置略图[据张西社等(2012)修改]

Fig. 1 Sketch map of geotectonic location of the Zhashui-Shanyang area(modified after Zhang Xishe *et al.*, 2012)

- 1—商丹缝合带; 2—勉略缝合带; 3—断裂; 4—洛南-栾川断裂; 5—凤镇-山阳断裂; 6—石泉-安康-竹山断裂; 7—结晶基底岩块; 8—过渡性基底岩块; 9—花岗岩; 10—新生界; 11—研究区
- 1—Shangdan suture zone; 2—Mianlue suture zone; 3—fault; 4—Luonan-luanchuan fault; 5—Fengzhen-Shanyang fault; 6—Shiquan-Ankang-Zhushan fault; 7—crystalline basement block; 8—transitional basement blocks; 9—granites; 10—Cenozoic; 11—the study area

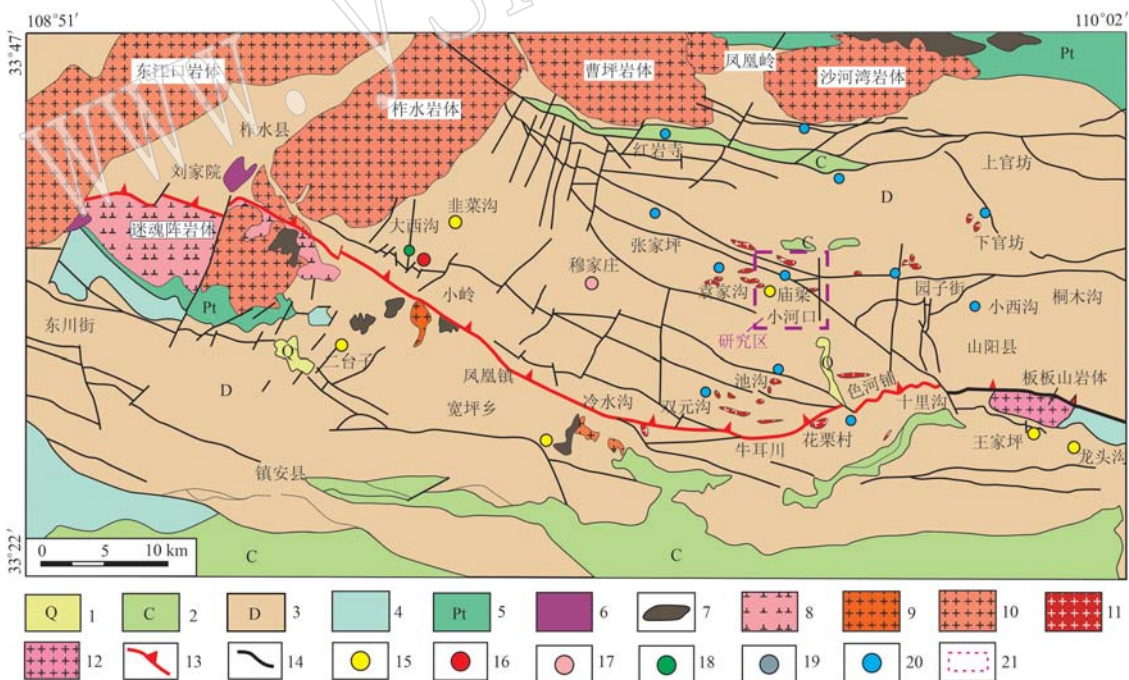


图 2 柞水-山阳矿集区地质矿产简图[据刘凯等(2014)修改]

Fig. 2 Brief map of geology and mineral resources in the Zhashui-Shanyang ore gathering area(modified after Liu Kai *et al.*, 2014)

- 1—第四系; 2—石炭系; 3—泥盆系; 4—下古生界; 5—前寒武系; 6—角闪岩; 7—辉长岩-辉绿岩; 8—闪长玢岩; 9—新元古代花岗岩; 10—印支期花岗岩; 11—160~120 Ma 花岗岩; 12—120~100 Ma 花岗岩; 13—断层; 14—缝合带; 15—金矿; 16—热水沉积改造型银矿; 17—热水沉积改造型银矿; 18—热水沉积改造型铁矿; 19—岩浆分结型铁矿; 20—夕卡岩-斑岩型铜矿床/矿化点; 21—研究区
- 1—Quaternary; 2—Carboniferous; 3—Devonian; 4—Lower Paleozoic; 5—Precambrian; 6—hornstone; 7—gabbro-diorite; 8—diorite porphyrite; 9—Neoproterozoic granites; 10—Indosinian granite; 11—160~120 Ma granite; 12—120~100 Ma granites; 13—fault; 14—suture band; 15—gold deposit; 16—hydrothermal sedimentary reworked silver deposit; 17—hydrothermal sedimentary reworked silver deposit; 18—hydrothermal sedimentary reworked iron deposit; 19—magmatic nodular iron deposit; 20—skarn-porphyry copper deposit; 21—the study area

体和岩脉成群分布在双元沟、池沟一带和下官坊、园子街、袁家沟、小河口、庙梁一带(牛宝贵等, 2006; 弓虎军等, 2009; 刘仁燕等, 2011; 谢桂青等, 2012)。

2 矿床地质特征

矿区位于红岩寺-黑山复式向斜南翼的袁家沟-

小河口次级背斜和刘家坡次级向斜之间,其二级背斜向北西西倾伏,褶皱的轴向为 300° 。区内构造活动强烈,走向 NWW 和近 SN 的两组断裂发育,断裂多顺层发育;走向 NWW 的断裂为矿区内主要的控矿构造,主要有 F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 、 F_5 、 F_6 (图 3), 这些断裂特征相似,宽度变化不大,在 0~15 m 左右,以压扭性为主,断裂带主要是褐黄色的碎裂构造蚀变岩

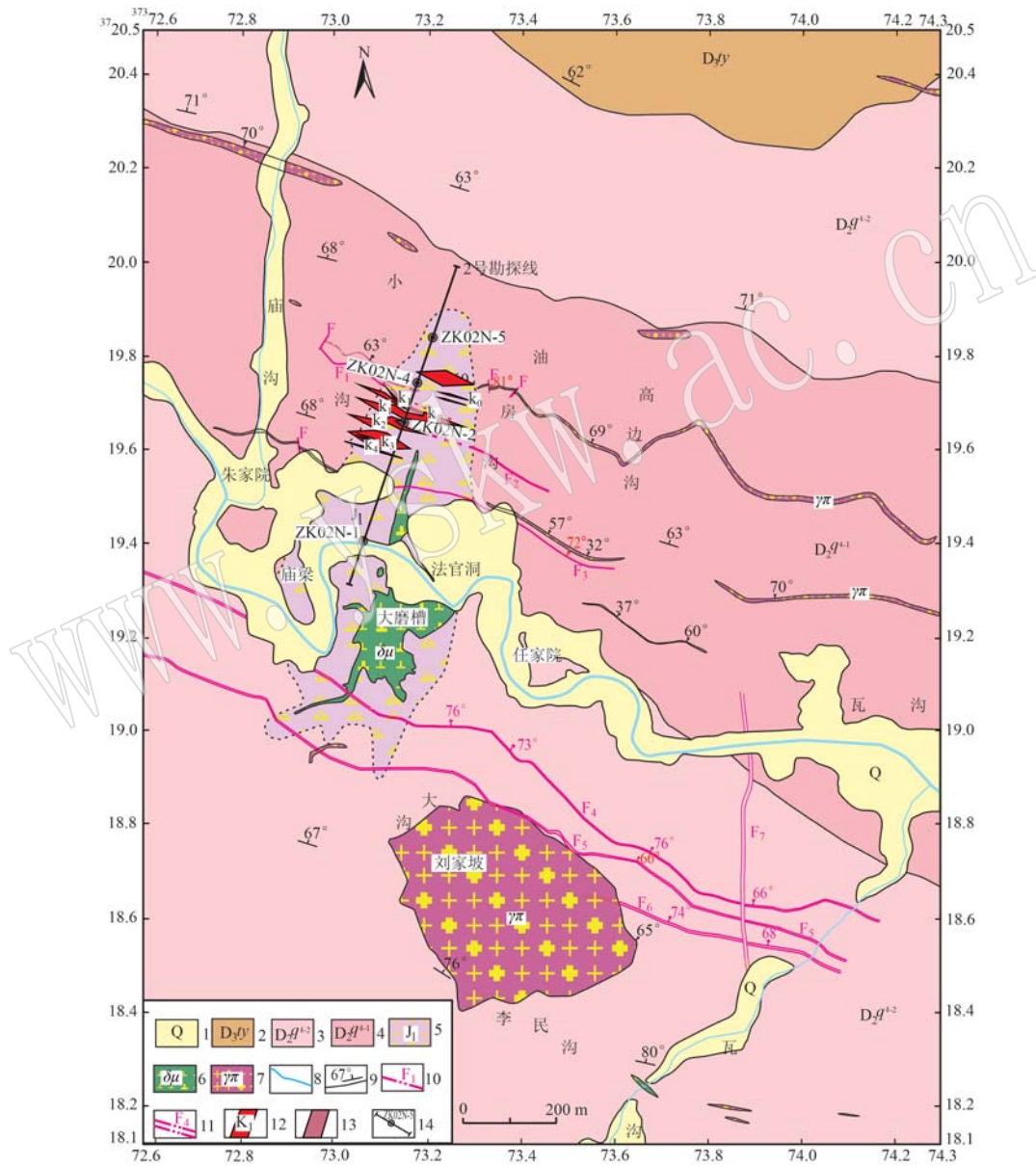


图 3 庙梁金矿区地质简图[据张三龙等(2017)^①修改]

Fig. 3 Geological sketch map of the Miaoliang mining area(modified after Zhang Sanlong *et al.*, 2017)^①

- 1—第四系; 2—上泥盆统桐峪寺组; 3—青石垭组第四岩性段上亚段; 4—青石垭组第四岩性段下亚段; 5—角砾岩; 6—花岗闪长岩;
- 7—花岗岩; 8—河流; 9—地层产状; 10—实测断层; 11—断层破碎带; 12—矿体; 13—低品位矿体; 14—勘探线及钻孔位置
- 1—Quaternary; 2—Upper Devonian Tongyusi Formation; 3—upper sub-section of the fourth lithology section of Quingshiya Formation; 4—lower section of the fourth lithology section of Quingshiya Formation; 5—breccia; 6—granodiorite porphyrite; 7—granite porphyry; 8—river; 9—stratum occurrence; 10—measured fault; 11—fault fracture zone; 12—orebody; 13—low grade ore body; 14—exploration line and drilling location

① 张三龙, 王书勤, 李万生. 2017. 等. 陕西省山阳县庙梁金矿床勘探地质报告.

和角砾岩, 发育有石英脉和金属矿化; 走向近 SN 的断裂主要为 F_7 , 分布于矿区西南部。

区内地层整体上走向呈北西西(图 3), 出露的地层主要有中泥盆统青石崖组第 4 岩性段(D_2q^4)、上泥盆统桐峪寺组(D_3ty) 和第四系全新统(Q)。 D_2q^4 在矿区广泛出露, 是庙梁金矿床主要的赋矿层位, 又分为下亚段($D_2q_4^1$) 和上亚段($D_2q_4^2$)。上下两个亚段岩性略有差异, 下亚段在矿区中部分布, 主要由粉砂质千枚岩、砂质板岩夹变砂岩组成, 上亚段在矿区北西部和中南部分布, 主要由绿泥绢云千枚岩及少量的铁白云岩和结晶灰岩组成; D_3ty 在矿区西北角出露, 岩性为砂质板岩、变质砂岩以及薄层灰岩组成; Q 沿河道分布, 主要是河流冲积物和松散堆积物。

区内岩浆岩广泛发育, 可见中酸性岩体和岩脉大量出露, 形成时代为晚侏罗世(李尚, 2019), 主要有刘家坡花岗岩体、大磨槽花岗闪长玢岩体以及走向北西西的各条中酸性小岩脉(庙沟-小沟花岗斑岩脉、高边沟花岗斑岩脉)。

角砾岩呈近南北向分布在矿区中部偏西, 赋存于青石崖组第 4 岩性段下亚段和上亚段中, 出露面积约 0.24 km^2 。角砾岩与围岩之间界线不清楚, 呈渐变关系, 主要成分为千枚岩角砾及少量的花岗闪长角砾、花岗斑岩角砾和石英角砾, 角砾的大小不一, 形状可见浑圆状、次棱角状、不规则状, 呈现出一定的定向性; 角砾间的胶结物主要为一些破碎的岩屑、岩粉及绿泥石、绢云母等低温热液矿物, 很少见岩浆热液成分。矿区内角砾岩为震裂和坍塌成因的角砾岩, 受区内北西西向断裂活动的持续挤压与剪切作用, 角砾岩间发生微扭曲, 劈理化明显, 含大量成矿元素的热液沿着矿区内北西西向断裂在蚀变角砾岩的裂隙和石英脉中大量富集, 是金矿床良好的容矿场所。

庙梁金矿的赋矿围岩为中泥盆统青石崖组第 4 岩性段下亚段粉砂质绢云千枚岩、砂质板岩及角砾岩, 主矿体受矿区多条北西西断裂控制, 主要赋存于脆-韧性构造控制的蚀变角砾岩裂隙和石英脉中, 矿石类型主要有蚀变角岩型和构造石英脉型两种(图 4)。

矿区围岩蚀变主要为黄铁矿化、硅化、绢云母化, 其次为钾化、绿泥石化、褐铁矿化、碳酸盐化; 其中绢云母化、硅化在矿区内广泛发育, 在构造交互

部位蚀变现象强烈。

根据矿脉的穿插交切关系、矿石的结构构造和矿物之间的共生组合等特征, 将庙梁金矿床划分为两个成矿期次: 热液期和表生期, 热液期是主要的成矿期, 进一步分为: ① 黄铁矿-石英阶段(早阶段), 金属矿物主要是黄铁矿及少量黄铜矿, 非金属矿物主要是石英、绢云母以及少量绿泥石, 矿化较弱, 可见中粗粒黄铁矿呈半自形-自形的立方体分布于石英脉之中(图 5a、5b、5e、5i); ② 石英-多金属硫化物阶段(主阶段), 金属硫化物主要是黄铁矿和黄铜矿, 其次是毒砂、方铅矿、磁黄铁矿, 还有少量的闪锌矿, 非金属矿物主要是石英、绢云母、少量绿泥石, 金属硫化物多呈稠密浸染状、团块状分布于蚀变角砾岩裂隙的石英脉中(图 5a、5c、5f、5g、5j、5k、5n), 金矿物呈包裹金、粒间金等形式存在于金属硫化物中(图 5l、5m); ③ 石英-黄铁矿-方解石阶段(晚阶段), 金属矿物主要是黄铁矿, 该阶段碳酸盐化明显增强, 可见大量方解石脉沿蚀变角砾岩裂隙及早阶段的石英脉分布, 黄铁矿化微弱(图 5d、5h)。其中石英-多金属硫化物阶段是金矿物沉淀富集的主要阶段(表 1)。

3 流体包裹体研究

3.1 样品及分析方法

本研究样品主要为采自庙梁金矿区 800 m 和 900 m 中段坑道内的 K0、K1、K2、K3 矿体以及 2 号勘探线钻孔岩芯内的脉石矿物石英和方解石, 涵盖了各成矿阶段的代表性样品, 具有一定的空间性。首先将这些矿物样品磨制呈约 0.2 mm 厚的包裹体片, 在显微镜下观察并选取各阶段个体较大的原生包裹体, 进行显微测温实验以及激光拉曼光谱气相成分的测定。

流体包裹体显微测温实验在长安大学成矿作用及其动力学实验室完成, 所用仪器为英国 Linkam Scientific Instruments 公司产的 Linkam THMSG 600 型冷热台, 实验前通过纯 H_2O 包裹体(0°C)、纯 CO_2 包裹体(-56.6°C)、临界状态 H_2O 包裹体(374°C) 进行温度校正; 可测温度范围为 $-195 \sim +600^\circ\text{C}$, 分析精度为: $\pm 0.2^\circ\text{C}$, $< 30^\circ\text{C}$; $\pm 1^\circ\text{C}$, $< 300^\circ\text{C}$; $\pm 2^\circ\text{C}$, $< 600^\circ\text{C}$; 在冷冻-加热过程中, 设置温度升降速率不超过 $20^\circ\text{C}/\text{min}$, 在接近相变点附近速率降至 $1^\circ\text{C}/\text{min}$ 以下。



图4 庙梁金矿矿体地质特征

Fig. 4 Geological characteristics of orebody in the Miaoliang gold deposit

a、b—刚性岩体角砾与脆性千枚岩角砾挤压，劈理化增强；c—石英角砾；d—脆性千枚岩角砾发生扭曲变形，矿化明显；e、f—角砾岩受构造挤压，沿裂隙有大量金属硫化物，褐铁矿化现象明显；g、h—石英细脉岩构造裂隙充填于角砾岩中，金属矿化明显；i—构造石英脉型矿石；j—蚀变角砾岩型矿石

a, b—rigid rock breccia and brittle phyllite breccia are compressed, and cleavage is enhanced; c—quartz breccia; d—brittle phyllite breccia is distorted and mineralized obviously; e, f—breccia is compressed by structure, and there are a lot of metal sulfides along fractures, and the phenomenon of limonitization is obvious; g, h—quartz veiniferite structural fissures are filled in breccia and the metal mineralization is obvious; i—structural quartz vein type ore; j—altered breccia type ore

单个流体包裹体成分的激光拉曼探针测试工作在长安大学成矿作用及其动力学实验室完成，仪器为法国 HORIBA 公司 LabRAM HR Evolution 新一代高分辨拉曼光谱仪，实验在温度 23℃、湿度 65% 的

条件下进行。

3.2 岩相学特征

本文对庙梁金矿不同成矿阶段矿石中脉石矿物石英及方解石中的包裹体进行了详细的岩相学观

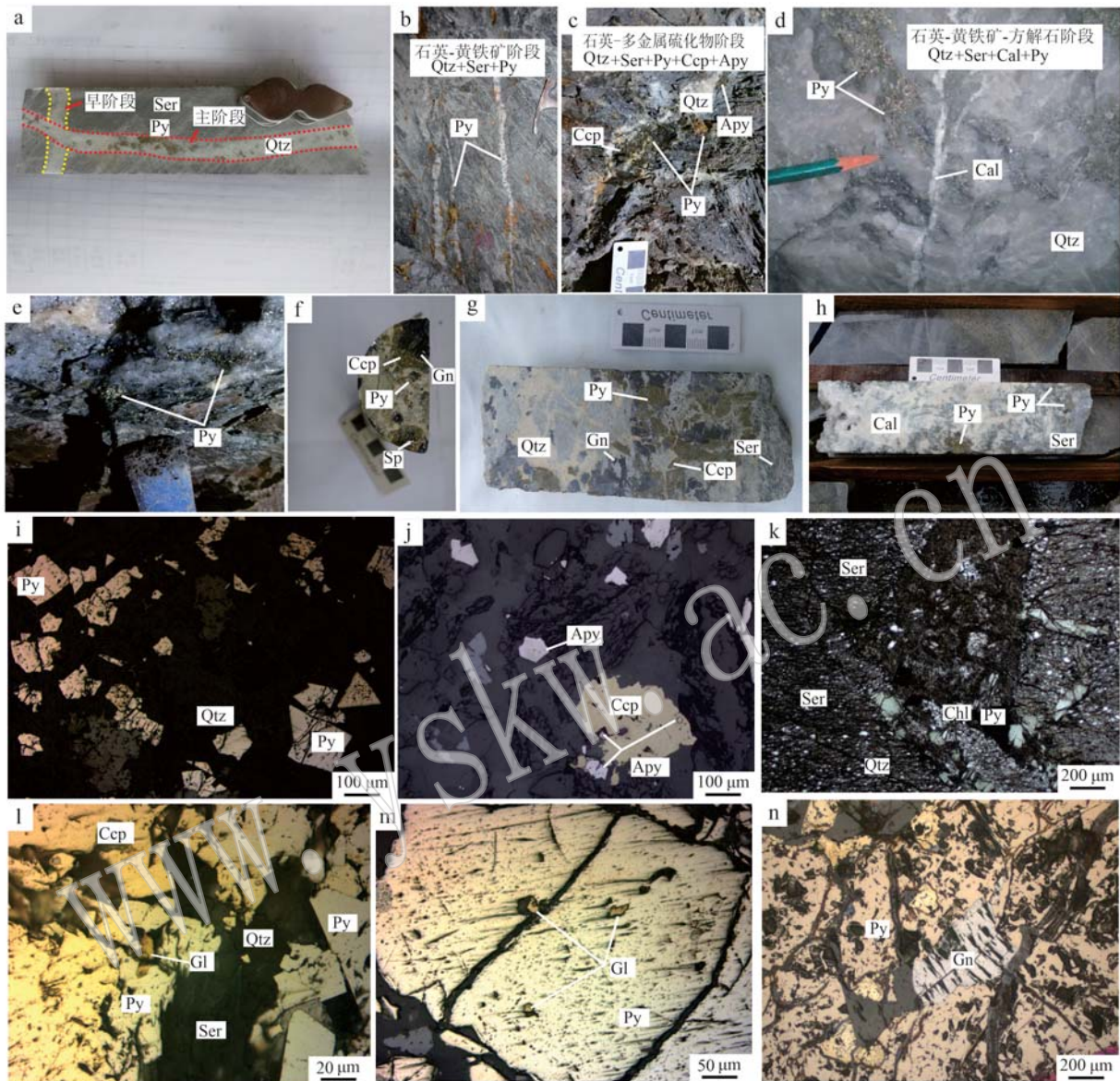


图 5 庙梁金矿野外及显微镜下照片

Fig. 5 Field and microscopic photos of the Miaoliang gold deposit

a—早阶段石英脉被后期石英-硫化物脉切断；b—石英-黄铁矿阶段，平硐 800 中的自形、半自形黄铁矿与石英共生；c—石英-多金属硫化物阶段，平硐 800 中的黄铁矿、黄铜矿等沿构造裂隙分布在石英边缘；d—石英-黄铁矿-方解石阶段，平硐 900 中的多金属硫化物被方解石脉切断；e—石英-黄铁矿阶段矿石；f、g—石英-多金属硫化物阶段矿石；h—石英-黄铁矿-方解石阶段矿石；i—黄铁矿呈自形-半自形粒状分布在石英中；j—毒砂呈半自形-自形粒状零星分布，并被黄铜矿包裹；k—石英、绢云母、硫化物组合，绢云母部分发生绿泥石化；l—黄铁矿与黄铜矿中的粒间金；m—黄铁矿中的包裹金；n—黄铁矿交代方铅矿；Py—黄铁矿；Ccp—黄铜矿；Apy—毒砂；Gn—方铅矿；Gl—自然金；Sp—闪锌矿；Qtz—石英；Cal—方解石；Chl—绿泥石

a—early stage quartz veins are cut off by late quartz-sulfide veins; b—quartz-pyrite stage, idiomorphic and hypidiomorphic pyrite in adit 800 are symbiotic with quartz; c—quartz-polymetallic sulfide stage, pyrite and chalcopyrite in adit 800 are distributed along the quartz edge along the structural fractures; d—quartz-pyrite-calcite stage, the polymetallic sulfide in adit 900 is cut off by calcite vein; e—quartz-pyrite stage ore; f, g—quartz-polymetallic sulfide stage ore; h—quartz-pyrite-carbonate stage ore; i—pyrite is distributed in quartz in the form of idiomorphic-hypidiomorphic granules; j—arsenopyrite is sporadically distributed in the form of hypidiomorphic to idiomorphic granules and is enclosed by chalcopyrite; k—combination of quartz, sericite, and sulfide, part of sericite is chloritized; l—intergranular gold in pyrite and chalcopyrite; m—wrapped gold in pyrite; n—pyrite metasomatic galena; Py—pyrite; Ccp—chalcopyrite; Apy—arsenopyrite; Gn—galena; Gl—gold; Sp—sphalerite; Qtz—quartz; Cal—calcite; Chl—chlorite

表1 庙梁金矿床成矿阶段及矿物生成顺序
Table 1 Metallogenic stage and mineral forming sequence of Miaoliang gold deposit

成矿期 阶段 矿物	热液期		
	黄铁矿-石英 阶段	石英-多金属 硫化物阶段	石英-黄铁矿- 方解石阶段
石英	████████████████████████████████████████		
黄铁矿	████████████████████████████████████████		
自然金	████████████████████████████████████████		
银金矿	████████████████████████████████████████		
黄铜矿	████████████████████████████████████████		
磁黄铁矿	████████████████████████████████████████		
方铅矿	████████████████████████████████████████		
毒砂	████████████████████████████████████████		
闪锌矿	████████████████████████████████████████		
绢云母	████████████████████████████████████████		
绿泥石	- - - - -		
方解石	████████████████████████████████████████		

主要
 次要
 微量

察,根据卢焕章等(2004)和 Roedder (1984)提出的流体包裹体在室温下相态分类准则和包裹体冷冻升温过程中的相态变化,将矿区流体包裹体划分为纯 CO_2 体系包裹体(I型)、 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ 型包裹体(II型)、 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 型包裹体(III型)及含子矿物的多相包裹体(IV型)这4种类型的包裹体。

黄铁矿-石英阶段(成矿早阶段)的石英脉中可见自形-半自形的立方体状黄铁矿及星散的黄铜矿分布,石英脉较主成矿阶段略宽,主要发育II型包裹体、部分III型包裹体,还有少量I型包裹体;石英-多金属硫化物阶段(主成矿阶段)的石英细脉中可见大量黄铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿、方铅矿等金属硫化物呈细粒、稠密浸染状、团块状分布,主要发育II型、III型包裹体;石英-黄铁矿-方解石阶段(成矿晚阶段)矿化弱,出现大量方解石脉,主要发育II型包裹体。

各类型的包裹体特征如下:

(1) 纯 CO_2 体系包裹体(I型):此类包裹体主要寄生于石英中,室温下呈单一的气相,多呈孤立状产出,呈椭圆形,直径一般为 $1\sim 8\ \mu\text{m}$,包裹体边界颜色很深。降温过程中,当温度低于3种相态的临界点时,包裹体的边界线很粗很黑(图6k)。该类包裹体含量少,在成矿早阶段亦有发现。

(2) $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ 型包裹体(II型):在室温状态下,该类型包裹体由液相和气相两相组成,广泛分布于寄主矿物石英、方解石中。根据包裹体中的气相和液相所占体积分数可进一步分为富液相的L+V

两相 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ 体系包裹体(IIa)和富气相的L+V两相 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ 体系包裹体(IIb)两个亚类。

IIa型:富液相L+V两相 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ 体系包裹体,室温下由气相和盐水溶液两相组成,液相体积占整个包裹体总体积的50%以上。包裹体体积变化范围较大,直径一般为 $8\sim 25\ \mu\text{m}$,气液比变化范围较小;形状多呈负晶形、椭圆形、长条形及不规则形状(图6e、6f、6g、6h)。包裹体测温过程中,随着温度的升高,气泡体积逐渐缩小,最后都均一至液相,其中部分体积较大的包裹体因发生颈缩出现卡脖子现象(图6l)。此类包裹体在成矿各阶段均大量存在。

IIb型:富气相L+V两相 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ 体系包裹体。较富液相 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ 体系包裹体相比占少数。室温下由气相和盐水溶液两相组成,气相体积占包裹体总体积的50%以上,直径一般为 $5\sim 20\ \mu\text{m}$,个别可达 $25\ \mu\text{m}$ 左右;形状多呈负晶形及椭圆形。包裹体测温过程中,随着温度的升高,气泡体积逐渐增大,最后都均一至气相;常与富液相气液两相包裹体共生(图6f、6i)。此类包裹体在成矿早阶段和主阶段存在。

(3) $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 型包裹体(III型):在室温状态下,该类型包裹体由气相和液相组成,根据降温-冷冻过程中所观察的相态变化可进一步划分为不显液相 CO_2 的 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 体系包裹体(IIIa)和含液相 CO_2 的 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 体系包裹体(IIIb)和两个亚类。此类包裹体含量较少,在成矿早阶段和主阶段存在。

IIIa型:不显液相 CO_2 的 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 体系包裹体,在室温下,流体包裹体中仅可见气相 CO_2 和盐水溶液,在降温过程中会出现液相 CO_2 。此类包裹体数量少,包裹体直径一般为 $10\sim 20\ \mu\text{m}$,形状多呈负晶形、不规则形等,一般为原生包裹体,常与IIa型包裹体共生(图6e)。

IIIb型:含液相 CO_2 的 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 体系包裹体,在室温下,可见典型“双眼皮”特征,包裹体由液相 CO_2 、气相 CO_2 以及盐水溶液组成。升温过程可依次观察到固态 CO_2 的熔化、 CO_2 笼合物的熔化及其 CO_2 部分均一现象(图6a、6c、6d、6g)。包裹体体积变化范围较大,直径一般为 $5\sim 25\ \mu\text{m}$,形状多呈椭圆形、不规则形等。此类包裹体一般为原生包裹体,呈孤立状产出。

(4) 含子矿物的多相包裹体(IV型):这类包裹体一般为原生包裹体,直径比较大,一般为 $10\sim 35$

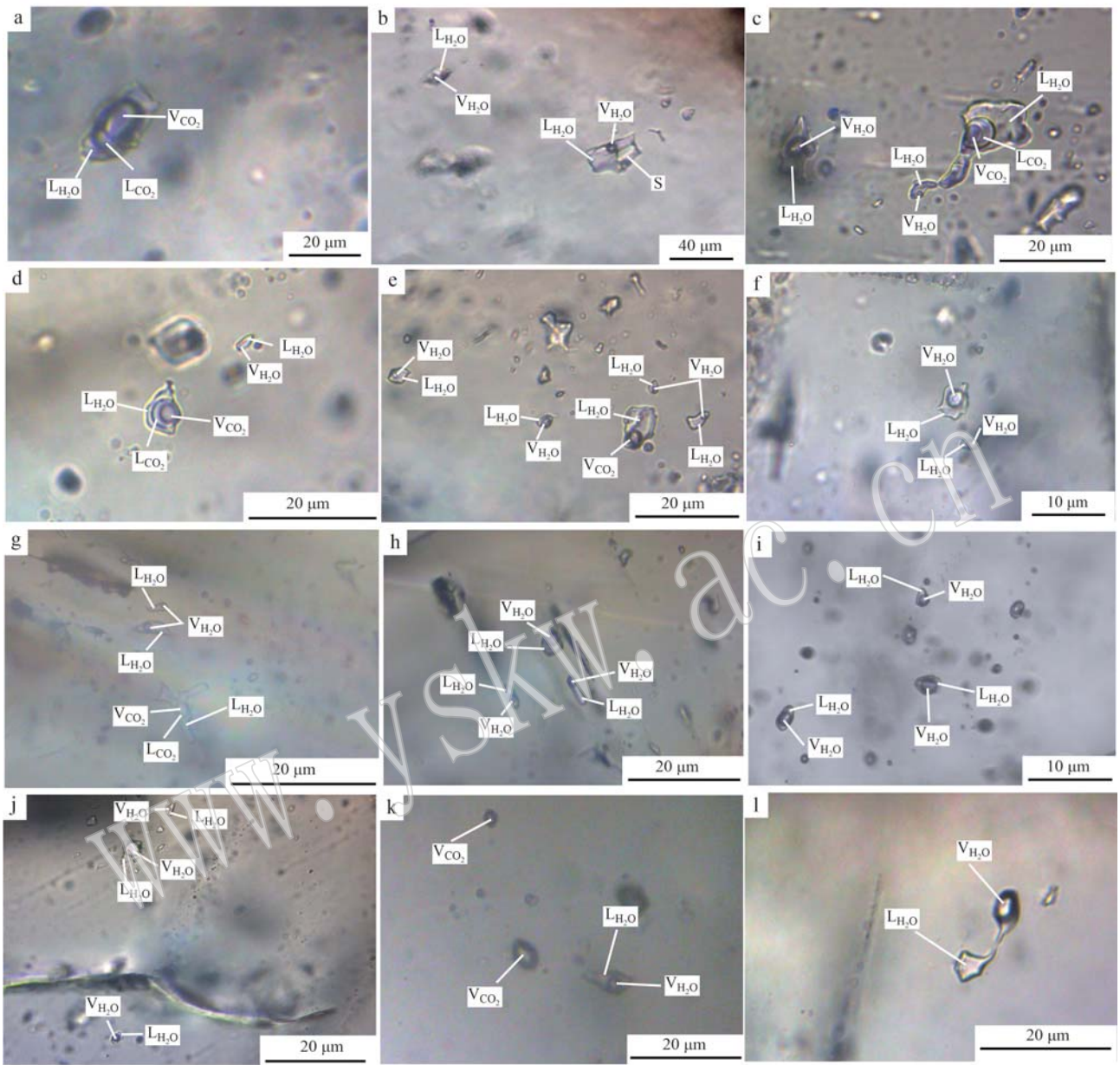


图 6 庙梁金矿床不同类型流体包裹体

Fig. 6 Different types of fluid inclusions in the Miaoliang gold deposit

a—成矿早阶段 H_2O-CO_2 气液三相包裹体；b—含子矿物多相包裹体；c、d、g—主成矿阶段 H_2O-CO_2 气液三相包裹体与富液相的 $H_2O-NaCl$ 盐水溶液包裹体共存；e、f、j—主成矿阶段富液相的 $H_2O-NaCl$ 盐水溶液包裹体与富气相的 $H_2O-NaCl$ 盐水溶液包裹体共存；h—成矿晚阶段富液相的 $H_2O-NaCl$ 盐水溶液包裹体；i、j—主成矿阶段富气相的 $H_2O-NaCl$ 盐水溶液包裹体；k—成矿早阶段 H_2O-CO_2 气液三相包裹体、纯气相 CO_2 包裹体与富液相的 $H_2O-NaCl$ 盐水溶液包裹体；l—主成矿阶段 $H_2O-NaCl$ 盐水溶液包裹体中的“卡脖子”现象

a— H_2O-CO_2 gas-liquid three-phase inclusions in the early stage of mineralization；b—multiphase inclusions of daughter minerals；c、d、g— H_2O-CO_2 gas-liquid three-phase inclusions coexist with liquid-rich $H_2O-NaCl$ brine inclusions in the main mineralization stage；e、f、j—the liquid-rich $H_2O-NaCl$ brine solution inclusions coexist with the gas-rich $H_2O-NaCl$ brine solution inclusions in the main mineralization stage；h—the liquid-rich $H_2O-NaCl$ brine solution inclusions in the late mineralization stage；i、j—the vapor-rich $H_2O-NaCl$ brine solution inclusions in the main mineralization stage；k— H_2O-CO_2 gas-liquid three-phase inclusions, pure gas phase CO_2 inclusions and liquid-rich $H_2O-NaCl$ brine inclusions in the early mineralization stage；l—“stuck neck” phenomenon in the inclusion of liquid-rich $H_2O-NaCl$ brine solution in the main mineralization stage

μm , 气相体积分数为 10%~30%, 形状呈椭圆形、不规则形。此类包裹体含量极少, 部分矿物为方解石, 在主成矿阶段偶见(图 6b)。

3.3 流体包裹体测温及热力学参数

3.3.1 均一温度

本次研究选择各成矿阶段相态较好的包裹体进

行了测温, 共测试了原生流体包裹体 166 个, 其中包括黄铁矿-石英阶段(早阶段) II 型和部分 III 型包裹体 50 个、石英-多金属硫化物阶段(主成矿阶段) II 型和 III 型包裹体 83 个、石英-黄铁矿-方解石阶段(成矿晚阶段) II 型包裹体 33 个。不同类型流体包裹体测温结果见表 2。

表 2 庙梁金矿流体包裹体测温数据表

Table 2 Temperature data of fluid inclusions in the Miaoliang gold deposit

成矿阶段	寄主矿物	包裹体类型	数量/个	固相 CO ₂ 的熔化温度 $t_{m, \text{CO}_2}/^\circ\text{C}$	冰点温度 $t_{m, \text{ice}}/^\circ\text{C}$	CO ₂ 笼合物 熔化温度 $t_{m, \text{cla}}/^\circ\text{C}$	CO ₂ 部分 均一温度 $t_{h, \text{CO}_2}/^\circ\text{C}$	均一温度 $t_{h, \text{total}}/^\circ\text{C}$	盐度 $w(\text{NaCl})/\%$
早	石英	II 型	42	—	-8.7~-2.9	—	—	271~372	4.8~12.5
		III 型	8	-59.5~-57.1	—	7.2~9.2	25.6~30.1	330~376	1.6~5.4
中	石英	II 型	59	—	-7.8~-2.1	—	—	196~325	3.5~11.5
		III 型	24	-60.6~-57.7	—	7.3~9.6	26.4~30.5	225~341	0.8~5.2
晚	方解石	II 型	33	—	-6.3~-2.2	—	—	127~221	3.7~9.6

—表示无数据。

各阶段流体包裹体均一温度直方图(图 7)显示, 温度(未经压力校正)分布范围相对较宽, 从早阶段至晚阶段温度逐渐降低。成矿早阶段石英脉中的流体包裹体主要是 II 型包裹体和部分 III 型包裹体, 其中 II 型包裹体的均一温度分布范围为 271~372 $^\circ\text{C}$, III 型包裹体的均一温度分布范围为 330~376 $^\circ\text{C}$, 属中高温成矿流体。主成矿阶段石英脉中的流体包裹体主要是 II 型包裹体和 III 型包裹体, 其中 II 型包裹体的均一温度分布范围为 196~325 $^\circ\text{C}$, III 型包裹体的均一温度分布范围为 225~341 $^\circ\text{C}$, 总体上属中温成矿流体。成矿晚阶段方解石细脉中的流体包裹体主要是 II 型包裹体, 均一温度范围为 127~221 $^\circ\text{C}$, 属中低温成矿流体。

3.3.2 盐度

对于 H₂O-NaCl 气液两相包裹体, 盐度计算采用公式 $W=0.00+1.78 t_m-0.044 2 t_m^2+0.000 557 t_m^3$ (0%~23.3%的 NaCl 溶液适用), 其中, W 为流体的盐度(%), 即流体中 NaCl 的质量分数, t_m 为冰点温度($^\circ\text{C}$)(Hall *et al.*, 1988)。对于 H₂O-CO₂ 气液三相包裹体, 盐度计算采用公式 $W=15.520 22-1.023 42 t-0.052 86 t^2$, 式中 W 为盐度(%), 即流体中 NaCl 的质量分数, t 为笼合物的熔化温度($^\circ\text{C}$), 应用范围为 $-9.6^\circ\text{C} \leq t \leq +10^\circ\text{C}$ (Roedder, 1984)。采用上述两个公式计算得到的各阶段流体包裹体的盐度见表 2 和图 7。

成矿早阶段石英中 II 型包裹体的冰点温度范围为 $-8.7 \sim -2.9^\circ\text{C}$, 对应盐度为 4.8%~12.5%; III 型包裹体的固相 CO₂ 熔化温度(t_{m, CO_2})为 $-59.5 \sim -57.1^\circ\text{C}$, 略低于 CO₂ 的三相点(-56.6°C), 表明可能含有少量 CH₄ 等其他挥发组分, CO₂ 笼合物熔化温度($t_{m, \text{cla}}$)分布范围为 $7.2 \sim 9.2^\circ\text{C}$, 对应盐度范围为 1.6%~5.4%。

主成矿阶段石英中 II 型包裹体的冰点温度范围为 $-7.8 \sim -2.1^\circ\text{C}$, 盐度为 3.5%~11.5%; III 型包裹体的固相 CO₂ 熔化温度(t_{m, CO_2})为 $-60.6 \sim -57.7^\circ\text{C}$, 同样略低于 CO₂ 的三相点, 表明可能含有少量 CH₄ 等其他挥发组分, 这和其后的激光拉曼所测的结果相符合, CO₂ 笼合物熔化温度($t_{m, \text{cla}}$)分布范围为 $7.3 \sim 9.6^\circ\text{C}$, 对应盐度范围为 0.8%~5.2%。

成矿晚阶段方解石中 II 型包裹体的冰点温度范围为 $-6.3 \sim -2.2^\circ\text{C}$, 盐度分布在 3.7%~9.6%之间。

不同阶段流体包裹体均一温度-盐度关系图显示(图 8), 各阶段流体盐度分布在 0.6%~12.5%之间; 从成矿早阶段到晚阶段, 流体包裹体的均一温度及盐度逐渐降低, 也有一定的重合区间, 这也反映了成矿流体演化过程中的连续性。

3.3.3 密度

根据前面所测得的流体包裹体均一温度和计算出的盐度估算包裹体密度时参考了 Bodnar (1983) 的 NaCl-H₂O 体系相图, 将各阶段测试的 H₂O-NaCl

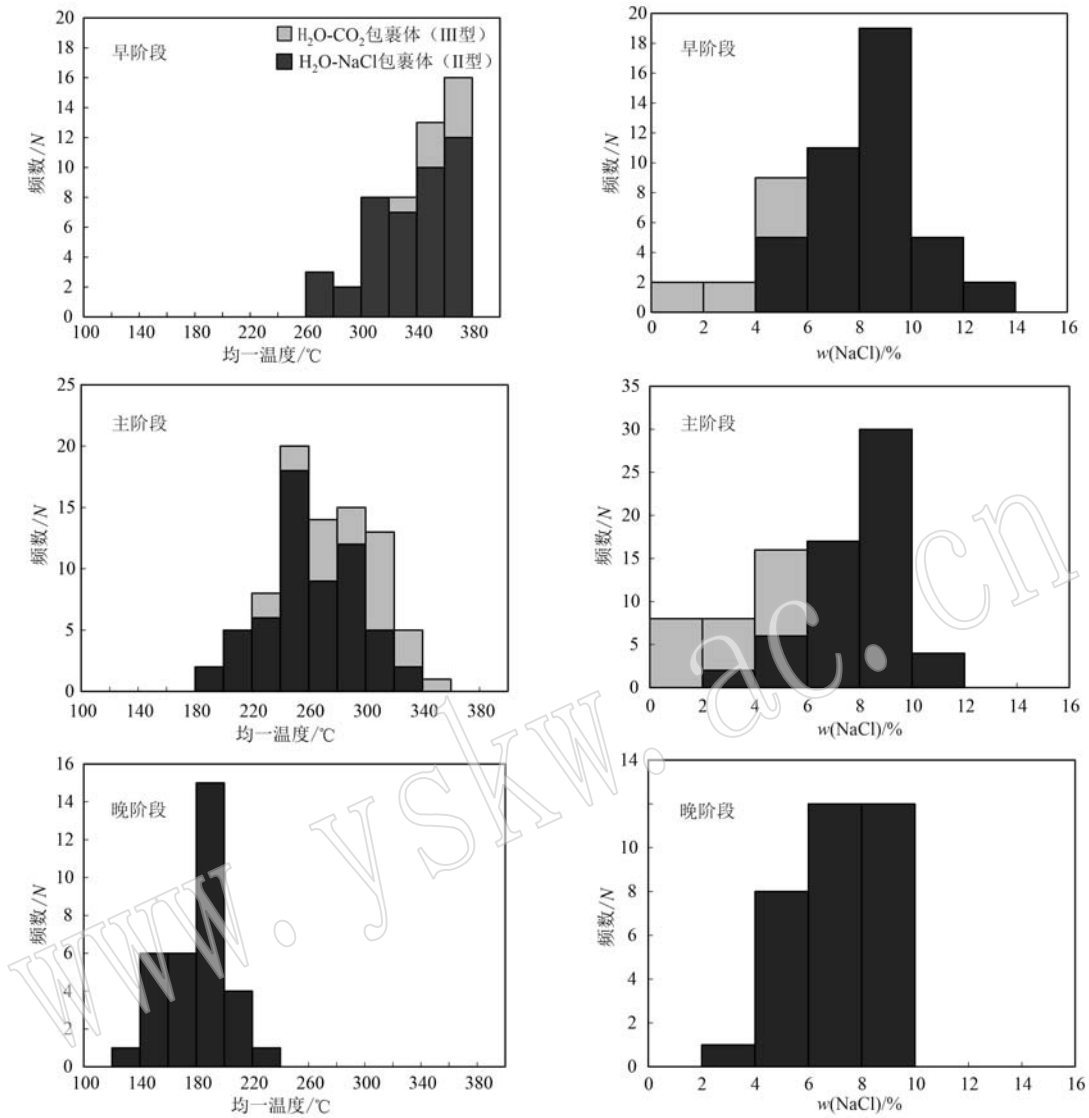


图 7 庙梁金矿不同成矿阶段流体包裹体均一温度及盐度直方图

Fig. 7 Histograms of homogenization temperatures and salinities of fluid inclusions in different metallogenic stages in the Miaoliang gold deposit

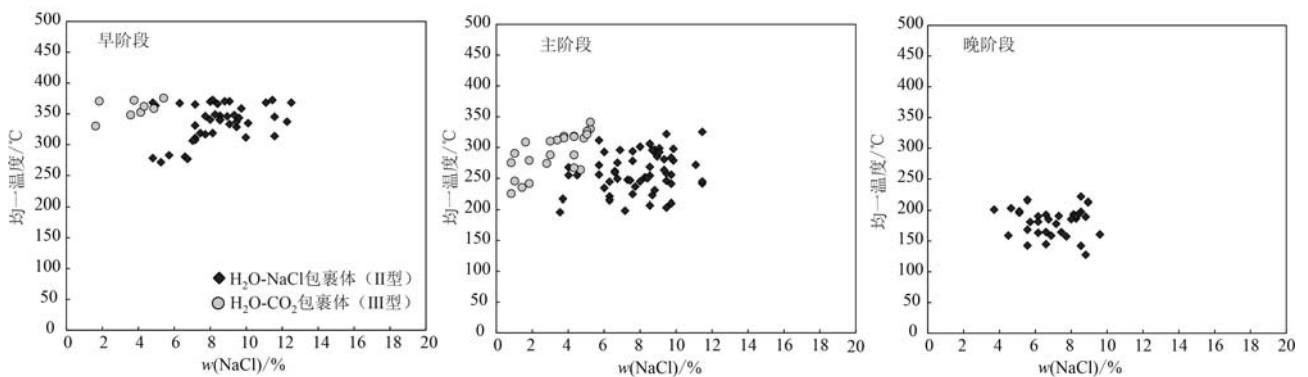


图 8 流体包裹体均一温度-盐度关系图

Fig. 8 Diagrams of salinity and homogeneous temperature of fluid inclusions

型包裹体的均一温度和盐度数据投点至 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ 体系的 $t-W-\rho$ 相图上, 结果显示早阶段流体包裹体密度集中在 $0.65\sim 0.80\text{ g/cm}^3$ 之间, 主阶段流体包裹体密度集中在 $0.75\sim 0.95\text{ g/cm}^3$ 之间, 晚阶段流体包裹体密度集中在 $0.90\sim 1.00\text{ g/cm}^3$ 之间(图9)。相比而言, 从早阶段到晚阶段, 随着温度的降低, 密度有增大趋势。

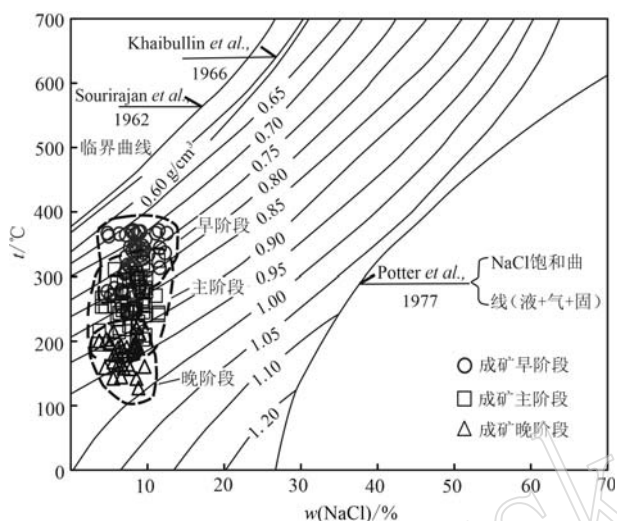


图9 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ 体系的 $t-W-\rho$ 相图

Fig. 9 Phase diagram of $t-W-\rho$ for the $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ system

3.4 激光拉曼成分分析

显微激光拉曼光谱分析可以准确地测定流体的成分组成, 是单个流体包裹体成分非破坏性分析的重要手段。本次在对流体包裹体进行详细的岩相学观察的基础上, 选取各成矿阶段有代表性的包裹体进行了激光拉曼成分分析。分析结果显示, 成矿早阶段Ⅲ型包裹体中气相成分以 CO_2 为主, 还含有少量 H_2O ; 主成矿阶段Ⅲ型包裹体中, 气相成分主要是 CO_2 , 此外可见少量挥发性气体 CH_4 和 H_2S ; 成矿晚阶段Ⅱ型包裹体中, 气相组分为 H_2O (图10)。本次测试的Ⅲ型包裹体气相成分除 CO_2 外, 还含有少量的 CH_4 和 H_2S , 表明成矿流体当时处于低氧逸度的还原环境, 有利于金以低价态的络合物形式存在, 为金矿的形成创造了良好的条件。流体包裹体岩相学特征和激光拉曼成分分析表明成矿流体在早期主要是 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 体系, 晚期逐渐演化为 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ 体系。

4 讨论

4.1 流体的演化特征

原生流体包裹体可以揭示原始成矿流体的性质

和来源。对矿区不同成矿阶段原生流体包裹体的研究表明, 成矿流体的特征具有明显变化规律:

黄铁矿-石英阶段: 主要发育 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ 气液两相型包裹体(Ⅱ型)、部分 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 气液三相型包裹体(Ⅲ型), 还有少量纯 CO_2 型包裹体(Ⅰ型); Ⅱ型包裹体和Ⅲ型包裹体的均一温度分别为 $271\sim 372^\circ\text{C}$ 和 $330\sim 376^\circ\text{C}$, 盐度分别为 $4.8\%\sim 12.5\%$ 和 $1.6\%\sim 5.4\%$; Ⅱ型包裹体的密度为 $0.65\sim 0.80\text{ g/cm}^3$; Ⅲ型包裹体的气相成分主要 CO_2 , 还含有少量的 H_2O 。总体上, 黄铁矿-石英阶段成矿流体属于中(高)温、中低盐度、低密度的 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{CO}_2$ 体系。

石英-多金属硫化物阶段: 主要发育 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ 气液两相型包裹体(Ⅱ型)、 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 气液三相型包裹体(Ⅲ型); Ⅱ型包裹体和Ⅲ型包裹体的均一温度分别为 $196\sim 325^\circ\text{C}$ 和 $225\sim 341^\circ\text{C}$, 盐度分别为 $3.5\%\sim 11.5\%$ 和 $0.8\%\sim 5.2\%$; Ⅱ型包裹体的密度为 $0.75\sim 0.95\text{ g/cm}^3$; Ⅲ型包裹体的气相成分主要 CO_2 , 还含有少量挥发性气体。总体上, 石英-多金属硫化物阶段成矿流体属于中温、中低盐度、低密度的 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{CO}_2$ 体系。

石英-黄铁矿-方解石阶段: 该阶段主要发育 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ 气液两相型(Ⅱ型)包裹体; Ⅱ型包裹体均一温度为 $127\sim 221^\circ\text{C}$, 盐度为 $3.7\%\sim 9.6\%$, 密度为 $0.90\sim 1.00\text{ g/cm}^3$, Ⅱ型包裹体的气相成分主要是水蒸气。总体上, 石英-黄铁矿-方解石阶段成矿流体属于低温、中低盐度、中等密度的 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ 体系。

总体上, 成矿流体成分从早阶段至晚阶段由 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{CO}_2$ 体系向 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ 体系演化, 流体性质由中(高)温、中等盐度、低密度、富 CO_2 的流体向中低温、低盐度、中等密度、贫 CO_2 的流体演化。在整个热液活动过程中, 流体的均一温度和盐度均呈现出逐渐降低的趋势(图8)。

4.2 流体的不混溶性与成矿

流体包裹体研究可以为成矿物质的来源、迁移方式以及沉淀机制等成矿过程提供重要的证据, 是揭示成矿物质源-运-储等过程重要的研究手段(倪培等, 2018)。在自然体系中, 导致成矿物质迁移沉淀的主要机制是流体的不混溶、流体的沸腾、流体混合作用、降温冷却以及水岩反应(Barnes, 1979; 卢焕章, 2011; 倪培等, 2018)。庙梁金矿含金石英脉中流体包裹体类型丰富, 成矿早阶段和主阶段流体发生不混溶作用, 主要表现为: ①同一视域下, 主成

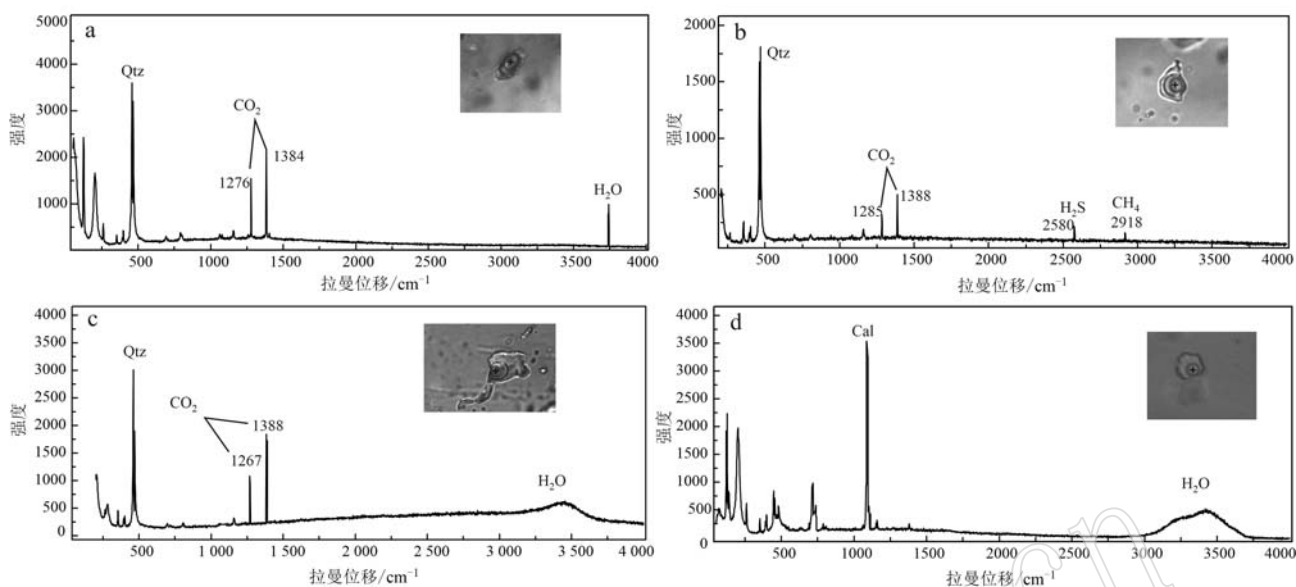


图 10 庙梁金矿流体包裹体激光拉曼图谱

Fig. 10 Laser Raman spectra mapping of fluid inclusions in the Miaoliang gold deposit

a—成矿早阶段Ⅲ型包裹体中 CO₂ 的光谱; b、c—主成矿阶段Ⅲ型包裹体中 CO₂、CH₄、H₂S 的光谱; d—成矿晚阶段Ⅱ型包裹体中 H₂O 的光谱
a—spectra of CO₂ in type III inclusions in the early stage of mineralization; b, c—spectra of CO₂, CH₄, H₂S in type III inclusions in the main mineralization stage; d—spectra of H₂O in type II inclusions in the late mineralization stage

矿阶段 H₂O-NaCl 气液两相型包裹体(Ⅱ型)和 H₂O-CO₂ 气液三相型包裹体(Ⅲ型)共存,且为原生包裹体(图 6c、6d、6e、6g),两类包裹体均一温度相近(Ⅱ型包裹体为 196~325℃,Ⅲ型包裹体为 225~341℃),而盐度不同(Ⅱ型包裹体为 3.5%~11.5%,Ⅲ型包裹体为 0.8%~5.2%),表明它们被同时捕获于不同性质的流体中;②Ⅱ型包裹体和Ⅲ型包裹体的均一方式也不同,Ⅱ型包裹体均一为液态 H₂O,Ⅲ型包裹体多均一为 CO₂ 相;③同一视域下,纯气相 CO₂ 包裹体(Ⅰ型)与 H₂O-NaCl 气液两相型包裹体(Ⅱ型)共存(图 6k)。以上特征表明成矿流体捕获了富 H₂O-NaCl 型包裹体和富 CO₂ 气相包裹体两个端员的流体,显示流体经历了不混溶作用(Craw *et al.*, 1993; 卢焕章等, 2004; Bodnar *et al.*, 2014; 倪培等, 2020)。

Hayashi 和 Ohmoto(1991)通过研究认为成矿流体中的金在中温热液金矿床中主要通过含氯络合物 [AuCl₂⁻、AuCl⁰、AuCl(OH)⁻] 和含金-硫络合物 [Au(HS)⁰、Au(HS)₂⁻] 的形式搬运。Seward(1979)和卢焕章(2008)认为流体中的 CO₂ 具有一定的弱酸性,作为氧化剂消耗了流体中的部分还原性硫,使含金-硫络合物在流体中的稳定性降低,是导致金属沉淀的重要因素。前人研究表明成矿流体的不混

溶作用是金属硫化物大量富集的关键因素,流体的不混溶作用通过使单一的流体发生相分离,成为两种或两种以上的不均匀流体,破坏了原有体系的平衡状态,导致流体中某些有用组分发生沉淀并富集成矿(Craw *et al.*, 1993; 卢焕章等, 2004)。流体不混溶作用是在成矿流体从较深的源区向相对较浅的区域长距离迁移过程中,由于压力突然下降导致流体中 CO₂、H₂S 等挥发组分逸失,流体中 HS 的活动性下降,pH 值升高,引起络合物分解,使金在流体中的溶解度降低,是金富集沉淀的主要原因(Seward, 1979; Ramboz *et al.*, 1982; Sterner and Bodnar, 1984; 赵财胜等, 2005; Ni *et al.*, 2015, 2017)。

庙梁金矿床所处位置构造发育,金矿体的空间展布受多条北西西向断裂构造的控制,在成矿过程中,构造活动频繁,富矿体主要发育在脆性-韧性断裂带的交汇部位。从成矿早阶段至晚阶段,构造活动从压扭性转变为张性构造,成矿流体沿断裂构造形成的通道向上迁移过程中压力骤降,流体发生不混溶作用,流体中的 CO₂、H₂S 等挥发分大量逸散。单个包裹体的成分也显示出主阶段气相成分为 CO₂ 以及少量 H₂S 等组分,晚阶段以液态 H₂O 为主,同样指示挥发分的大量逸散,同时带走大量的热量,导致流体的温度迅速下降,pH 组分浓度降低,氧逸

度、硫逸度等发生变化,进而降低含金的硫络合物稳定性,在流体多次运移过程中成矿物质在有利部位得以大量沉淀下来,从而富集形成金矿体。因此,流体的不混溶作用是庙梁金矿床主要的成矿机制。

4.3 与柞水-山阳矿集区内金矿床特征对比

柞水-山阳矿集区内成矿作用强烈,目前发现多个金属矿床,主要为Cu、Mo、Ag、Fe、Pb、Zn等矿床,但金矿床比较少,主要以龙头沟、王家坪等小型矿点为主。

通过与南秦岭柞水-山阳矿集区内近年来发现的龙头沟和王家坪金矿床在地质特征、矿物学和流体包裹体方面的特征对比(表3),发现庙梁金矿与矿集区内金矿床的不同之处主要有:庙梁金矿区有明显的中酸性岩体和岩脉出露,赋矿围岩主要是粉砂质千枚岩及角砾岩,流体包裹体类型丰富,主成矿阶段具有中温中低盐度的流体特征;不同类型矿石中的载金矿物黄铁矿均表现出轻度亏损Fe、S的特征, δFe 和 δS 值变化范围不大,绝大多数在5%

以内;黄铁矿的Co/Ni值介于0.81~5.87之间,绝大多数值在1~5之间;黄铁矿中的As含量低,平均值为 1.110×10^{-6} ,这些都表明矿区内的载金矿物黄铁矿与岩浆热液型成因黄铁矿的特征一致(Bajwah *et al.*, 1987; 严育通等, 2012; 陈永康等, 2020)。黄铁矿的 $\text{Fe}/(\text{S}+\text{As})$ 值与其形成深度有较好的相关性,其形成深度在深、中、浅部时,相应的 $\text{Fe}/(\text{S}+\text{As})$ 的值分别为0.846、0.863和0.926(周学武等, 2005),研究区黄铁矿 $\text{Fe}/(\text{S}+\text{As})$ 值绝大多数值大于0.863,指示庙梁金矿床中黄铁矿形成于中浅部(陈永康等, 2020)。黄铁矿中 Au/Ag 值也可指示成矿温度,中低温热液型矿床中黄铁矿 Au/Ag 值大于0.5,高温热液型金矿床中 Au/Ag 值小于0.5(周学武等, 2005; 曹素巧等, 2014),矿区内黄铁矿的 Au/Ag 值为1.98~4.54,远大于0.5,也指示庙梁金矿形成于中低温(陈永康等, 2020),这也与流体包裹体的测温结果相符合。综上所述,初步认为庙梁金矿为受构造控制的中低温中浅成岩浆热液型金矿床。

表3 庙梁金矿与矿集区典型金矿床特征对比

Table 3 Comparison of ore deposit characteristics between Miaoliang gold deposit and typical gold deposit in the ore concentration area

对比内容	龙头沟金矿	王家坪金矿	庙梁金矿
矿区位置	山阳县东南13 km	山阳县东南8 km	山阳县西北35 km
断裂	近EW、NW、NE向	近EW、NNW向	近EW、NWW、NS向
岩浆岩	未见明显出露	未见明显出露	发育中酸性岩体及岩脉
赋矿围岩	长石石英砂岩、粉砂质板岩、绢云母板岩	砂岩、砾岩、砂质板岩	粉砂质千枚岩、角砾岩
围岩蚀变	碳酸盐化、硅化、重晶石化、黄铁矿化、褐铁矿化	硅化、碳酸盐化、黄铁矿化、炭化、雌黄化、雄黄化	黄铁矿化、绢云母化、硅化、绿泥石化、碳酸盐化、黄铜矿化、褐铁矿化
矿石类型	破碎蚀变岩型、石英脉型	构造破碎角砾岩型、粘土质灰岩型	蚀变角砾岩型、构造蚀变岩型
金的赋存状态	主要为粒间金,其次为包裹金	主要为粒间金,其次为包裹金	主要为包裹金,其次为粒间金
包裹体类型	气液两相型	富液相气液两相型	主要为 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ 型气液两相型和 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 气液三相型
成矿流体特征	主成矿期温度集中在 $200\sim 260^\circ\text{C}$; 盐度为 $0.18\%\sim 13.07\%$; 密度为 $1.15\sim 1.25\text{ g/cm}^3$	均一温度 $90\sim 250^\circ\text{C}$; 盐度 $4.61\%\sim 22.38\%$; 密度 $0.97\sim 1.12\text{ g/cm}^3$	主阶段II型包裹体和III型包裹体的均一温度分别为 $196\sim 325^\circ\text{C}$ 和 $225\sim 341^\circ\text{C}$; 盐度分别为 $3.5\%\sim 11.5\%$ 和 $0.8\%\sim 5.2\%$
黄铁矿的S/Fe值	平均值为1.988		蚀变角砾岩平均为2.019,构造蚀变岩平均为1.985
黄铁矿Co/Ni值	0.28~4.88, 平均1.68	0.225~0.464, 平均0.34	0.81~5.87, 绝大多数大于1
黄铁矿Au/Ag值	5.5		蚀变角砾岩为1.98, 构造蚀变岩中为4.54
黄铁矿的As含量	平均为 1.117×10^{-6}	$148 \times 10^{-6} \sim 1.630 \times 10^{-6}$	平均为 1.110×10^{-6}
$\delta^{34}\text{S}$ 值	$0.1\%\sim 3.74\%$, 平均 1.39%	$-1.51\%\sim 12.8\%$, 平均 7.8%	蚀变角砾岩为 $2.37\%\sim 6.01\%$, 平均 4.71% ; 构造蚀变岩为 $3.88\%\sim 4.72\%$, 平均 4.34%
矿床类型	与造山带有关的中温热型金矿	卡林型金矿	受构造控制的中温中浅成岩浆热液型金矿
资料来源	宁磊(2015)、赵超(2019)	刘新伟等(2016)、邵乐奇(2017)	陈永康(2020)、本次研究

5 结论

(1) 庙梁金矿流体包裹体类型丰富, 主要为 H_2O -NaCl 气液两相型包裹体和 H_2O - CO_2 气液三相型包裹体; 流体成分从早阶段至晚阶段由 H_2O -NaCl- CO_2 体系向 H_2O -NaCl 体系演化, 流体性质由中(高)温、中等盐度、低密度、富 CO_2 的流体向中低温、低盐度、中等密度、贫 CO_2 的流体演化。

(2) 主成矿阶段流体发生不混溶作用, 往往伴随 CO_2 、 H_2S 等挥发分的散失, 导致流体的 pH 值、氧逸度、硫逸度等发生变化, 进而降低含金络合物的稳定性, 导致成矿物质在流体中的溶解度降低, 在有利部位富集形成金矿体。流体的不混溶作用是庙梁金矿金沉淀成矿的主要因素。

(3) 通过与柞水-山阳矿集内周边典型金矿床特征对比, 结合前人的研究, 初步认为庙梁金矿为受构造控制的中低温中浅成岩浆热液型金矿床。

References

- Bajwah Z U, Seccombe P K and Offler R. 1987. Trace element distribution, Co: Ni ratios and genesis of the Big Cadia iron-copper deposit, New South Wales[J]. *Mineralium Deposita*, 22(4): 292~300.
- Barnes H L. 1979. *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits* [M]. New York, Chichester, Brisbane, Toronto: John Wiley.
- Bodnar R J. 1983. A method of calculating fluid inclusion volumes based on vapor bubble and P-B-T-X properties of inclusion fluids[J]. *Economic Geology*, 87(3): 535~542.
- Bodnar R J, Lecumberri-Sanchez P, Moncada D, *et al.* 2014. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits [A]. Holland H D and Turekian K K. *Treatise on Geochemistry* (2nd ed.) [C]. Oxford: Elsevier, 13: 119~142.
- Cao Suqiao, Jia Jinsheng, Zhong Zengqiu, *et al.* 2014. Composition and sulfur isotope characteristics of auriferous pyrite from the Shilongtou gold deposit in Kaihua, western Zhejiang Province[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 33(5): 937~946 (in Chinese with English abstract).
- Chen Yongkang, Liang Ting, Ding Liang, *et al.* 2020. Mineralogical study of pyrite in Miaoliang gold deposit Shanyang, Shaanxi Province and its metallogenic significance[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 39(6): 1 215~1 231 (in Chinese with English abstract).
- Craw D, Teagle D A H and Belocky R. 1993. Fluid immiscibility in late-Alpine gold-bearing veins, Eastern and Northwestern European Alps [J]. *Mineralium Deposita*, 28(1): 28~36.
- Gong Hujun, Zhu Laimin, Sun Boya, *et al.* 2009. Zircon U-Pb ages and Hf isotope characteristics and their geological significance of the Shanhewan, Caoping and Zhashui granitic plutons in the South Qinling orogen[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(2): 24~264 (in Chinese with English abstract).
- Hall D L, Sterner S M and Bodnar R J. 1988. Freezing point depression of NaCl-KCl- H_2O solutions[J]. *Economic Geology*, 83(1): 197~202.
- Hayashi K I and Ohmoto H. 1991. Solubility of gold in NaCl- and H_2S -bearing aqueous solutions at 250~350°C [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55: 2 111~2 126.
- Khaibullin I K and Borisov N M. 1966. Experimental investigation of thermal properties of aqueous and vapor solutions of sodium and potassium chlorides at phase equilibrium[J]. *High Temperature*, 4(4): 489.
- Li Shang. 2019. Study on the Chronology and Geochemistry of Magmatic Rocks and Its Geological Significance in Miaoliang Gold Mine, Shanyang County, Shaanxi [D]. Chang'an University (in Chinese with English abstract).
- Liu Kai, Ren Tao, Meng Deming, *et al.* 2014. Metallogenic regularities of porphyry copper deposits and prospecting direction in the Zhashui-Shanyang ore concentration area, Qinling orogenic belt[J]. *Geology and Exploitation*, 50(6): 1 096~1 108 (in Chinese with English abstract).
- Liu Renyan, Niu Baogui, He Zhengjun, *et al.* 2011. LA-ICP-MS zircon U-Pb geochronology of the eastern part of the Xiaomaoling com-posite intrusives in Zhashui area, Shaanxi, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 30(2/3): 448~460 (in Chinese with English abstract).
- Liu Xinwei, Wang Chao, Han Lu, *et al.* 2016. Geological Geochemical Characteristics and Genesis of Wangjiaping Gold Deposit [J]. *Gold Science and Technology*, 24(4): 39~46 (in Chinese with English abstract).
- Lu Huanzhang. 2008. Role of CO_2 fluid in the formation of gold deposits: Fluid inclusion evidences[J]. *Geochimica*, 37(4): 321~328 (in Chinese with English abstract).
- Lu Huanzhang. 2011. Fluids immiscibility and fluid inclusions[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(5): 1 253~1 261 (in Chinese with English abstract).
- Lu Huanzhang, Fan Hongrui, Ni Pei, *et al.* 2004. Fluid Inclusion [M].

- Beijing: Science Press, 1~487(in Chinese with English abstract).
- Ni Pei, Chi Zhe and Pan Junyi. 2020. An integrated investigation of ore-forming fluid evolution in porphyry and epithermal deposits and their implication on exploration[J]. *Earth Science Frontiers*, 27(2): 60~78(in Chinese with English abstract).
- Ni Pei, Chi Zhe, Pan Junyi, *et al.* 2018. The characteristics of ore-forming fluids and mineralization mechanism in hydrothermal deposits: A case study of some typical deposits in China[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 37(3): 369~394, 560(in Chinese with English abstract).
- Ni Pei, Pan Junyi, Wang Guoguang, *et al.* 2017. A CO₂-rich porphyry ore-forming fluid system constrained from a combined cathodoluminescence imaging and fluid inclusion studies of quartz veins from the Tongcun Mo deposit, South China[J]. *Ore Geology Reviews*, 81: 856~870.
- Ni Pei, Wang Guoguang, Yu Wen, *et al.* 2015. 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*, 65: 1 078~1 094.
- Ning Lei. 2015. The Study of the Genesis of Deposit and Its Geodynamic Setting of the Longtougou Gold Deposit in Shanyang-Zhashui Ore Concentration Area, Shanxi[D]. Beijing: China University of Geosciences(in Chinese).
- Niu Baogui, He Zhengjun, Ren Jishun, *et al.* 2006. SHRIMP U-Pb ages of zircons from the intrusions in the western Douling-Xiaomaoling uplift and their geological significances[J]. *Geological Review*, 52(6): 826~835(in Chinese with English abstract).
- Potter R W II, Babcock R S, Brown D L, *et al.* 1977. A new method for determining the solubility of salts in aqueous solutions at elevated temperatures[J]. *U. S Geological Survey Journal Research*, 5(3): 389~395.
- Qi Sijing. 1993. The sedimentary origin of the thermal water in the Pb-Zn ore deposits of the Qinling devoian system[J]. *Journal of Xi'an College of Geology*, 15(1): 27~34(in Chinese with English abstract).
- Ramboz C, Pichavant M and Weisbrod A. 1982. Fluid immiscibility in natural processes: Use and misuse of fluid inclusion data; II. Interpretation of fluid inclusion data in terms of immiscibility[J]. *Chem. Geol.*, 37: 29~48.
- Roedder E. 1984. *Fluid Inclusions*[M]. Mineralogical Society of America.
- Seward T M. 1979. Hydrothermal transport and deposition[A]. Glover J E and Groves D L. *Gold Mineralization* [C]. Australia Geol. Dep. & Extension Service, Publ., 3: 45.
- Shao Leqi. 2017. Study of Geological Characteristics and Metallogenic Mechanism of Wangjiaping Gold Deposit, Shanyang County, Shanxi Province[D]. Xi'an: Chang'an University(in Chinese with English abstract).
- Sterner S M and Bodnar R J. 1984. Synthetic fluid inclusions in natural quartz I. compositional types synthesized and applications to experimental geochemistry[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48: 2 659~2 668.
- Sourirajan S. 1962. The system H₂O-NaCl at elevated temperatures and pressures[J]. *American Journal of Science*, 260(2): 115~141.
- Su Chunqian, Hu Jianming, Li Yong, *et al.* 2006. The existence of two different tectonic attributes in Yaolinghe Group in South Qinling region[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 25(4): 287~298(in Chinese with English abstract).
- Wang Ruiting, Li Jianbin, Ren Tao, *et al.* 2008. Metallogenic conditions and prospecting potential of the Zhashui-Shanyang poly-metal ore cluster[J]. *China Geology*, 35(6): 1 291~1 298(in Chinese with English abstract).
- Xie Guiqing, Ren Tao, Li Jianbin, *et al.* 2012. Zircon U-Pb age and petrogenesis of ore-bearing granitoid for the Chigou Cu-Mo deposit from the Zhashan Basin, Shaanxi Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(1): 15~26(in Chinese with English abstract).
- Yan Yutong, Li Shengrong, Jia Baojian, *et al.* 2012. Composition typomorphic characteristics and statistic analysis of different genetic types[J]. *Earth Science Frontiers*, 19(4): 214~226(in Chinese with English abstract).
- Yan Zhen, Wang Zongqi, Wang Tao, *et al.* 2007. Tectonic setting of Devonian sediments in Qinling orogeny: Constraints from detrital modes and geochemistry of clastic rocks[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(5): 1 023~1 042(in Chinese with English abstract).
- Zhang Guowei, Dong Yunpeng and Yao Pingan. 2001. Review on the development of studies on the tectonic and orogen process of orogenic belt, and discussing on some new key problems[J]. *Northwestern Geology*, 34(1): 1~9(in Chinese with English abstract).
- Zhang Xishe, Dai Junzhi, Wang Ruitin, *et al.* 2012. Characteristics of Ling (shuigou) -Chi (gou)-Se (hepu) metallogenic belt in Zhashan area of Shaanxi Province and their regional ore-prospecting significance[J]. *Geology in China*, 39(6): 1 727~1 742(in Chinese with English abstract).
- Zhao Caisheng, Sun Fengyue, Mao Jingwen, *et al.* 2005. Fluid inclusion characteristics of Dachang gold deposit, Qinghai Province and their geological significance[J]. *Mineral Deposits*, 24(3): 305~316(in Chinese with English abstract).
- Zhao Chao. 2019. Research on the Mineralogical Characteristics of Metal-

lic Mineral and Mineralization of Longtougou Gold Deposit, Shan-yang, Shanxi Province [D]. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).

Zheng Zhonglin, Wei Xiaozhao and Hu Bo. 2019. Geological characteristics, ore genesis and prospecting potential of Miaoliang gold deposit, Shaanxi Province [J]. China Molybdenum Industry, 43 (1): 14 ~ 20, 34 (in Chinese with English abstract).

Zhou Xuewu, Li Shengrong, Lu Li, *et al.* 2005. Study of pyrite typomorphic characteristics of Wulong quartz-vein-type gold deposit in Dandong, Liaoning Province, China [J]. Geoscience, 19(2): 231~238 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

曹素巧, 贾锦生, 钟增球, 等. 2014. 浙西开化石龙头金矿含金黄铁矿的成分标型及硫同位素特征研究 [J]. 岩石矿物学杂志, 33 (5): 937~946.

陈永康, 梁 婷, 丁 亮, 等. 2020. 陕西山阳庙梁金矿床黄铁矿矿物学研究及其成因意义 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 39 (6): 1 215~1 231.

弓虎军, 朱赖民, 孙博亚, 等. 2009. 南秦岭沙河湾、曹坪和柞水岩体锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及其地质意义 [J]. 岩石学报, 25(2): 248~264.

李 尚. 2019. 陕西山阳县庙梁金矿区岩浆岩年代学、地球化学研究及地质意义 [D]. 西安: 长安大学.

刘 凯, 任 涛, 孟德明, 等. 2014. 秦岭造山带柞水-山阳矿集区斑岩型铜矿成矿规律及找矿方向分析 [J]. 地质与勘探, 50(6): 1 096~1 108.

刘仁燕, 牛宝贵, 和政军, 等. 2011. 陕西柞水地区小茅岭复式岩体东段 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年 [J]. 地质通报, 30(Z1): 448~460.

刘新伟, 汪 超, 韩 璐, 等. 2016. 王家坪金矿床地质地球化学特征及成因探讨 [J]. 黄金科学技术, 24(4): 39~46.

卢焕章. 2008. CO₂ 流体与金矿化: 流体包裹体的证据 [J]. 地球化学, 37(4): 321~328.

卢焕章. 2011. 流体不混溶性和流体包裹体 [J]. 岩石学报, 27(5): 1 253~1 261.

卢焕章, 范宏瑞, 倪 培, 等. 2004. 流体包裹体 [M]. 北京: 科学出版社, 1~487.

倪 培, 迟 哲, 潘君屹. 2020. 斑岩型和浅成低温热液型矿床成矿

流体与找矿预测研究: 以华南若干典型矿床为例 [J]. 地学前缘, 27(2): 60~78.

倪 培, 迟 哲, 潘君屹, 等. 2018. 热液矿床的成矿流体与成矿机制——中国若干典型矿床为例 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 37 (3): 369~394, 560.

宁 磊. 2015. 陕西山阳-柞水矿集区龙头沟金矿床成因及地球动力学背景研究 [D]. 北京: 中国地质大学.

牛宝贵, 和政军, 任纪舜, 等. 2006. 秦岭地区陡岭一小茅岭隆起带西段几个岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 测年及其地质意义 [J]. 地质论评, 52(6): 826~835.

祁思敬. 1993. 秦岭泥盆系中铅锌矿床的热液沉积成因 [J]. 长安大学学报 (地球科学版), 15(1): 27~34.

邵乐奇. 2017. 陕西省山阳县王家坪金矿床地质特征和成矿机制探讨 [D]. 西安: 长安大学.

苏春乾, 胡建民, 李 勇, 等. 2006. 南秦岭地区存在两种不同构造属性的耀岭河群 [J]. 岩石矿物学杂志, 25(4): 287~298.

王瑞廷, 李建斌, 任 涛, 等. 2008. 柞水-山阳多金属矿集区成矿条件及找矿潜力分析 [J]. 中国地质, 35(6): 1 291~1 298.

谢桂青, 任 涛, 李剑斌, 等. 2012. 陕西柞水盆地池沟铜矿含矿岩体的锆石 U-Pb 年龄和岩石成因 [J]. 岩石学报, 28(1): 15~26.

严育通, 李胜荣, 贾宝剑, 等. 2012. 中国不同成因类型金矿床的黄铁矿成分标型特征及统计分析 [J]. 地学前缘, 19(4): 214~226.

闫 臻, 王宗起, 王 涛, 等. 2007. 秦岭造山带泥盆系形成构造环境: 来自碎屑岩组成和地球化学方面的约束 [J]. 岩石学报, 23 (5): 1 023~1 042.

赵财胜, 孙丰月, 毛景文, 等. 2005. 青海大场金矿床流体包裹体特征及其地质意义 [J]. 矿床地质, 24(3): 305~316.

赵 超. 2019. 陕西山阳龙头沟金矿金属矿物特征及成矿作用研究 [D]. 北京: 中国地质大学.

张国伟, 董云鹏, 姚安平. 2001. 造山带与造山作用及其研究的新起点 [J]. 西北地质, 34(1): 1~9.

张西社, 代军治, 王瑞廷, 等. 2012. 陕西柞-山地区冷(水沟)-池(沟)-色(河铺)金铜矿带特征及其区域找矿意义 [J]. 中国地质, 39(6): 1 727~1 742.

郑忠林, 魏小昭, 胡 波. 2019. 陕西庙梁金矿床地质特征、矿床成因及找矿前景分析 [J]. 中国钨业, 43(1): 14~20, 34.

周学武, 李胜荣, 鲁 力, 等. 2005. 辽宁丹东五龙矿区石英脉型金矿床的黄铁矿标型特征研究 [J]. 现代地质, 19(2): 231~238.