



引文格式:焦阳,冯俊环.西秦岭地区猪婆沟金矿成矿物质来源及矿床成因分析[J].西北地质,2024,57(1):219-229. DOI: 10.12401/j.nwg.2023179

Citation: JIAO Yang, FENG Junhuan. Source of ore Forming Materials and Genesis of Zhupogou Gold Deposit in West Qinling Mountains[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(1): 219-229. DOI: 10.12401/j.nwg.2023179

## 西秦岭地区猪婆沟金矿成矿物质来源及矿床成因分析

焦阳,冯俊环

(甘肃省地质矿产勘查开发局第一地质矿产勘查院,甘肃天水 741020)

**摘要:**猪婆沟金矿位于西秦岭之北秦岭鸳鸯镇-关子镇蛇绿混杂岩带的反“S”形构造的转折端,金矿体赋存在早古生代李子园群中,矿体的产出受NW向和NE向韧性断裂及其次级构造控制,矿体形态为脉状。矿床热液期主成矿阶段石英中包裹体主要为气液两相包裹体、含子晶三相包裹体。含子晶三相包裹体的冰点温度为 $-4.8\sim-4.3^{\circ}\text{C}$ ;气液两相包裹体的冰点温度为 $-5.3\sim-0.1^{\circ}\text{C}$ 。该阶段含子晶三相包裹体的均一温度为 $141.3\sim198.6^{\circ}\text{C}$ ,平均为 $160.7^{\circ}\text{C}$ ;气液两相包裹体的均一温度为 $128.9\sim285.3^{\circ}\text{C}$ ,平均为 $174.1^{\circ}\text{C}$ 。成矿流体的均一温度值为 $130\sim170^{\circ}\text{C}$ ,峰值范围较宽。流体盐度为 $1.40\sim8.28\%$  NaCleqv,平均为 $5.84\%$  NaCleqv,具有中低温、低盐度特征;石英 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值为 $-3.29\%\sim4.42\%$ , $\delta\text{D}$ 值为 $-110.1\%\sim-86.6\%$ ,成矿流体来源于原生岩浆水,在岩浆分异成矿的过程中,大气降水的含量逐渐增多。主成矿阶段黄铁矿和毒砂 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $10.7\%\sim11.5\%$ ,矿物质分别来源于岩浆岩和地层;Pb同位素组成相似,主要来源于造山带铅,有部分上地壳铅和地幔铅加入,成矿物质来源于岩浆岩和地层两个端元,具有多期次特征。综合分析认为,猪婆沟金矿成因类型属沉积变质-岩浆期后热液叠加改造的构造蚀变岩型金矿床。

**关键词:**流体包裹体;成矿流体;成矿物质;同位素地球化学;猪婆沟金矿;西秦岭地区

中图分类号: P618.51; P611

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2024)01-0219-11

### Source of ore Forming Materials and Genesis of Zhupogou Gold Deposit in West Qinling Mountains

JIAO Yang, FENG Junhuan

(The First Geological and Mineral Exploration Institute of Gansu Provincial Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Tianshui 741020, Gansu, China)

**Abstract:** Zhupogou gold deposit is located at the turning end of the anti "s" shaped structure of the Yuanyang town Guanzi town Ophiolitic Melange belt in the north of the West Qinling Mountains. The gold deposit is hosted in the early Paleozoic Liziyuan group. The occurrence of the ore body is controlled by NW and NE trending ductile faults and their secondary structures, and the shape of the ore body is vein. The inclusions in quartz in the

收稿日期: 2021-03-13; 修回日期: 2022-05-08; 责任编辑: 姜寒冰

基金项目: 甘肃省基础地质调查研究项目“甘肃省天水市柴家庄-太阳寺一带金矿矿集区成矿规律及找矿方向研究”(201509), 中国地质调查局项目“甘肃省天水市柴家庄-太阳寺地区金及多金属矿整装勘查区矿产调查与找矿预测”(DD20160050-106)联合资助。

作者简介: 焦阳(1973-), 男, 高级工程师, 主要从事矿产地质勘查及区域矿产地质与找矿预测工作。E-mail: 715160504@qq.com。

main metallogenic stage of the hydrothermal period of the deposit are mainly gas-liquid two-phase inclusions and three-phase inclusions containing daughter crystals. The freezing point temperature range of three-phase inclusions containing daughter crystals is  $-4.8\sim-4.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; The freezing point temperature of gas-liquid two-phase inclusions ranges from  $-5.3$  to  $-0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . At this stage, the homogenization temperature of three-phase inclusions containing daughter crystals is in the range of  $141.3\sim198.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ , with an average of  $160.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; The gas-liquid two-phase inclusions are in the range of  $128.9\sim285.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ , with an average of  $174.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . The homogenization temperature of ore-forming fluid is  $130\sim170\text{ }^{\circ}\text{C}$ , and the peak range is wide. Fluid salinity is  $1.40\%\sim8.28\%$  NaCleqv, average  $5.84\%$  NaCleqv. It has the characteristics of medium low temperature and low salinity; quartz  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  is  $-3.29\%\sim4.42\%$ ,  $\delta\text{D}$  is  $-110.1\%\sim-86.6\%$ , and the ore-forming fluid comes from primary magma water. In the process of magmatic differentiation and mineralization, the content of atmospheric precipitation gradually increases. Pyrite and arsenopyrite in the main metallogenic stage  $\delta^{34}\text{S}$  value is  $10.7\%\sim11.5\%$ , and the minerals are derived from magmatic rocks and strata respectively; Pb isotopic composition is similar, mainly from the orogenic belt, with some upper crust lead and mantle lead added. The metallogenic material comes from the two end elements of magmatic rock and stratum. Comprehensive analysis shows that the genetic type of Zhupogou gold deposit belongs to the tectonic altered rock type gold deposit of sedimentary metamorphism post magmatic hydrothermal superimposition.

**Keywords:** fluid inclusion; ore forming fluid; metallogenic material; isotope geochemistry; Zhupogou gold mine; West Qinling region

## 1 区域背景

猪婆沟金矿位于甘肃省天水市境内,大地构造处于西秦岭造山带北秦岭加里东鸳鸯镇-关子镇蛇绿混杂岩带(白彦祥等, 2018)(图1)。前人虽对区内造山带型金矿床有大量研究,但对矿化特征、地质特征和地球化学特征以及秦岭碰撞造山机制综合性的研究还比较欠缺(冯建忠等, 2002; 齐金忠等, 2005; 雷时斌等, 2007; 张复新等, 2009; 王洁明等, 2023),致使对金矿床的成因仍存争议。有些学者认为成矿作用发生在岩体形成之前,成矿作用与岩浆作用无直接联系。也有学者认为,韧脆性剪切带形成之后,岩体才开始侵入,岩体仅为成矿作用提供了热动力,促使矿源层中的成矿有用元素活化迁移,并在韧脆性剪切带的虚脱部位沉淀聚集成矿(齐金忠等, 2003; 胡晓隆等, 2008; 张峻, 2008)。近年来,通过对八卦庙金矿、李坝金矿和大水金矿等大型类卡林型金矿床的研究,大多学者(闫升好等, 2000; 张复新等, 2001; 赵彦庆等, 2003; 陈衍景等, 2004; 袁士松等, 2008; 谭文娟等, 2023)认为该类型金矿床同时受到韧脆性剪切带和岩浆岩体的共同控制,岩浆岩体与金成矿有密切的成因关系,并为金成矿提供了充分的热源、水源和部分物源,认为金矿床就是在

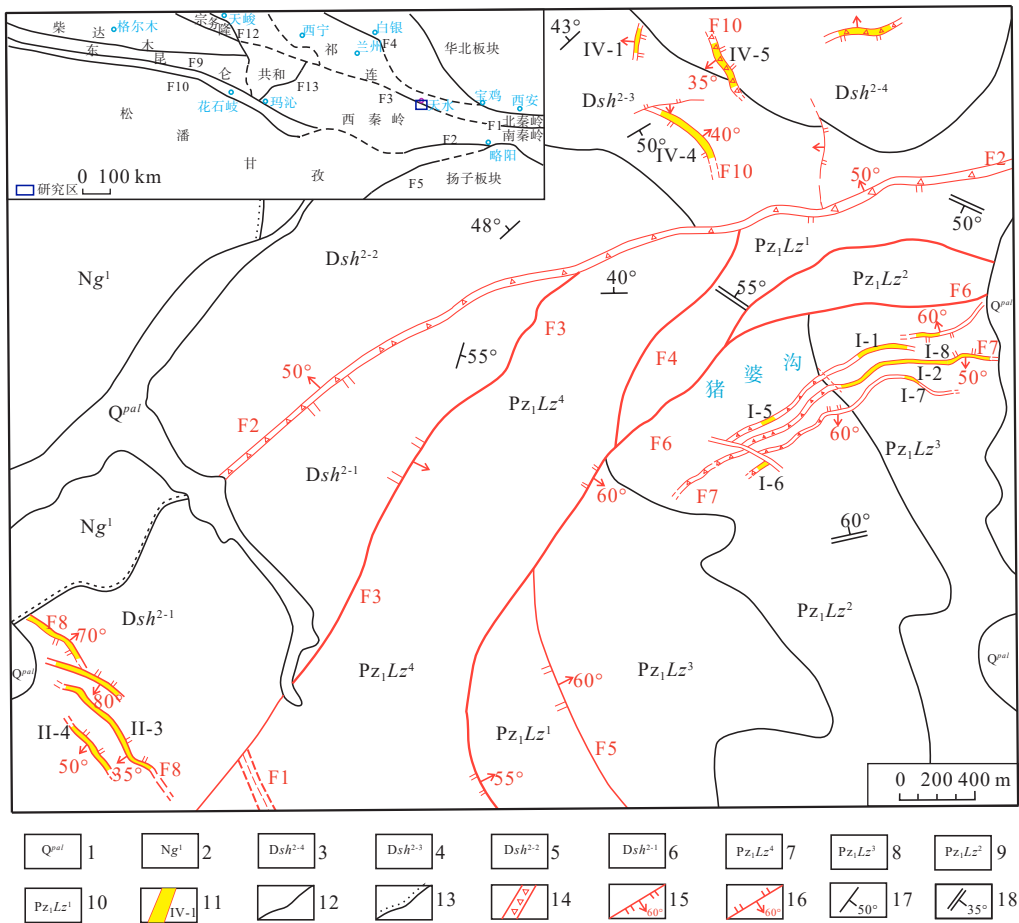
岩浆热液作用下形成的。流体包裹体被认为是成矿作用的“探针”(郭玲利, 2016; 李康宁等, 2023),笔者利用猪婆沟金矿矿石 H、O、S、Pb、Sr、Nd 等同位素示踪方面的研究来讨论成矿流体及成矿元素的时空变化规律,对猪婆沟金矿床成矿物质来源研究和矿床成因进行探讨和总结。

### 1.1 矿区地质

矿区位于西秦岭造山带北秦岭加里东鸳鸯镇-关子镇蛇绿混杂岩带(白彦祥等, 2018),出露地层为早古生代李子园岩群和中泥盆世舒家坝群。猪婆沟金银矿赋矿岩组为早古生代李子园群(图1)。本区经历了多期的构造运动,构造较为复杂,区内主要金银、铅锌等矿床(点)均分布于复式背斜南翼的次级褶皱与断裂发育的虚脱部位。矿区断裂构造复杂,以 NW 向和 NE 向构造为主。其中, NW 向断裂对中酸性岩浆侵入和金的成矿起到重要的控制作用。矿区内岩浆活动相对较弱,未见大的侵入体出露,主要为石英脉和花岗岩脉,石英脉是本区的主要找矿标志。

### 1.2 矿体特征

矿区工程控制共圈出矿体 12 条,其中 7 条金矿体、3 条金银矿体、1 条铜矿体和 1 条金铜铁矿体。矿体地表长度为  $80\sim1280\text{ m}$ ,厚度为  $1.20\sim19.20\text{ m}$ , Au 品位一般为  $1.29\sim20.22\text{ g/t}$ , Ag 品位为  $2.26\sim48.00\text{ g/t}$ , Au 品位变化系数为  $77.58\%$ , 银品位变化系数为



1.第四系冲洪积、砾石层; 2.新近系甘泉寺组第一岩性段中厚层状砾岩; 3.泥盆系舒家坝组第二岩性段第四岩性层绢云母板岩夹粉砂岩; 4.泥盆系舒家坝组第二岩性段第三岩性层石英杂砂岩及板岩; 5.泥盆系舒家坝组第二岩性段第二岩性层钙质板岩、石英杂砂岩; 6.泥盆系舒家坝组第二岩性段第一岩性层细晶大理岩、绢云千枚岩; 7.下古生界李子园群第四岩性段绿泥绢云石英片岩; 8.下古生界李子园群第三岩性段绢云石英片岩夹绢云绿泥石英片岩; 9.下古生界李子园群第二岩性段绢云绿泥石英片岩; 10.下古生界李子园群第一岩性段斜角闪岩; 11.金矿体; 12.地质界线; 13.不整合界线; 14.构造破碎带; 15.正断层; 16.逆断层; 17.层理产状; 18.片理产状

图1 西秦岭造山带构造略图(a)和猪婆沟金矿矿区地质简图(b)

Fig. 1 (a) Structural sketch of West Qinling orogenic belt and (b) geological sketch of Zhupogou gold mine

138.28%, 厚度变化系数为 121.19%; 矿体呈脉状或者是复脉状产出于脆性断裂带中(洪百雄, 2016), 矿体产状与断裂产状完全一致。矿体沿走向和倾向具有膨大缩小现象, 矿体顶、底板围岩为绢云石英片岩、绿泥绢云石英片岩、闪长岩(脉)等, 矿体由地表向深部产状稳定, 在深部见有金、金银、铜等盲矿体, 反映深部还有良好的找矿远景。近矿围岩蚀变主要有黄铁矿化、绢云母化、绿泥石化、黄铜矿化、硅化及碳酸盐岩化等(刘伟, 2020)。

### 1.3 矿石类型、组构

该区的矿石自然类型主要有黄铁矿化石英脉型、褐铁矿化石英脉型、块状硫化物型和褐铁矿化蚀变岩

型。矿石金属矿物成分主要有黄铁矿、褐铁矿、方铅矿、毒砂、银金矿、自然金等。脉石矿物主要为石英、绢云母、绿帘石、绿泥石等。矿石结构有自形-半自形粒状结构、交代结构、鳞片结构、碎裂结构。主要构造有块状构造、细脉浸染状构造、碎裂碎斑状构造、角砾状构造等。

## 2 同位素地球化学

H-O、C 同位素可以用于判断成矿流体来源; Pb、S、Sr 同位素可以对成矿过程中金属元素的来源起到有效示踪。

## 2.1 H-O 同位素特征

蚀变岩型矿石(II阶段)和块状硫化物型矿石(III阶段)为猪婆沟金矿床主要矿石类型,本次共采集代表性矿体(I-2、I-10矿体)矿石样品9件进行H-O同位素分析,其中4件为蚀变岩型矿石(II阶段),5件为块状硫化物型矿石(III阶段)(表1)。两阶段矿石石英流体包裹体H-O同位素分析结果见表2,其中从矿石挑选出的石英中的流体包裹体为氢同位素( $\delta D$ )和氧同位素( $\delta O_{V-SMOW}$ )的测试对象(吴晓波等,2011)。

表1 猪婆沟金矿床H-O同位素测试样品采样信息表

Tab. 1 sampling information of H-O isotope test samples of Zhupogou gold deposit

| 样品号      | 成矿阶段 | 岩石/矿物 | 矿石类型   | 采样位置   |
|----------|------|-------|--------|--------|
| ZK2702-1 | II   | 石英    |        |        |
| ZBGB01-2 | II   | 石英    | 蚀变岩型   | I-2矿体  |
| ZBGB03-2 | II   | 石英    |        |        |
| ZBGB04-2 | II   | 石英    |        |        |
| ZBGB05-2 | III  | 石英    |        |        |
| ZBGB05-3 | III  | 石英    | 块状硫化物型 | I-10矿体 |
| ZBGB06-2 | III  | 石英    |        |        |
| ZBGB06-4 | III  | 石英    |        |        |
| ZBGB07-2 | III  | 石英    |        |        |

表2 猪婆沟金矿床流体包裹体H-O同位素组成表(‰)

Tab. 2 H-O isotopic composition of fluid inclusions in Zhupogou gold deposit (‰)

| 样品号      | 成矿阶段 | 岩性 | $\delta D_{V-SMOW}$ | $\delta O_{V-SMOW}$ | T(°C) | $\delta^{18}O_{H_2O}$ |
|----------|------|----|---------------------|---------------------|-------|-----------------------|
| ZK2702-1 | II   | 石英 | -101.7              | 15.6                | 208.4 | 4.42                  |
| ZBGB01-2 | II   | 石英 | -110.1              | 13.8                | 196.9 | 1.90                  |
| ZBGB03-2 | II   | 石英 | -102.7              | 13.1                | 196.9 | 1.20                  |
| ZBGB04-2 | II   | 石英 | -98.1               | 12.7                | 196.9 | 0.80                  |
| ZBGB05-2 | III  | 石英 | -86.8               | 13.1                | 196.9 | 1.20                  |
| ZBGB05-3 | III  | 石英 | -95.1               | 16                  | 196.9 | 4.10                  |
| ZBGB06-2 | III  | 石英 | -90.7               | 11.6                | 156.7 | -3.29                 |
| ZBGB06-4 | III  | 石英 | -97.9               | 13                  | 156.7 | -1.89                 |
| ZBGB07-2 | III  | 石英 | -86.6               | 14                  | 208.4 | 2.82                  |

注:  $\delta^{18}O_{H_2O}$ 为计算值, 石英-水:  $1000\ln = \delta^{18}O_{\text{含水矿物}} - \delta^{18}O_{H_2O} = 3.38 \times 10^6 T^{-2} - 3.4$ (郑永飞, 2000)。

由表2可知,成矿过程中 $\delta D$ 组成值相对稳定, $\delta^{18}O$ 组成值具有逐渐降低趋势。表明不同成矿期矿石O同位素组成总体变化较小,并不存在从成矿早期到成矿晚期的O同位素飘移现象,然而如果成矿的热液源自同一系统,在漫长的成矿时期范围内,由于其

流经的范围广阔,与岩石间的相互作用(吴晓波等,2011)会不断加剧以及同其他来源的流体混合程度增加,O同位素的飘移现象是不可避免的。

## 2.2 S同位素特征

### (1)分析方法

S同位素分析测试中,先称取15mg硫化物单矿物粉末样品放置于真空石英管中,与氧化亚铜一起研磨搅拌均匀后,然后在达20%Pa真空状态下加热的条件下,当温度达980°C时,开始氧化反应发生,用冷冻法收集生成的SO<sub>2</sub>气体,用MAT251质谱仪分析测试,分析精度优于±0.2‰。

### (2)分析结果

本次于猪婆沟金矿床的2件二长花岗岩、6件矿石中的硫化物和1件围岩地层含黄铁矿碳酸盐脉硫化物进行S同位素组成测试分析,测试结果列于表3中。由表中数据可知,2件二长花岗岩中黄铁矿的 $\delta^{34}S$ 值为10.8‰~10.9‰;6件矿石中毒砂的 $\delta^{34}S$ 值为10.7‰~11.5‰,平均值为10.93‰;1件围岩地层含黄铁矿碳酸盐脉中黄铁矿的 $\delta^{34}S$ 值为4.5‰(表3)。

表3 猪婆沟金矿床岩石及硫化物采样信息和S同位素组成表

Tab. 3 Sampling information and S isotopic composition of ore and sulfide in Zhupogou gold deposit

| 样品原号     | 采样介质     | 矿物  | $\delta^{34}S_{V-CDT}$ (‰) |
|----------|----------|-----|----------------------------|
| ZBGB01-3 | 二长花岗岩    | 黄铁矿 | 10.8                       |
| ZBGB03-3 | 二长花岗岩    | 黄铁矿 | 10.9                       |
| ZBGB04-1 | 金矿石      | 毒砂  | 11.0                       |
| ZBGB05-1 | 金矿石      | 毒砂  | 10.8                       |
| ZBGB06-1 | 金矿石      | 毒砂  | 10.7                       |
| ZBGB07-1 | 金矿石      | 毒砂  | 11.5                       |
| ZBGB01-1 | 金矿石      | 毒砂  | 10.8                       |
| ZBGB02-1 | 金矿石      | 毒砂  | 10.8                       |
| ZK5303-1 | 含黄铁矿碳酸盐脉 | 黄铁矿 | 4.5                        |

研究区铜矿床不含硫酸盐矿物且含硫矿物组合主要以黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、毒砂等为主,说明硫的溶解类型以S<sup>2-</sup>为主,所以该地区热液中总硫同位素组成 $\delta^{34}S_{TS}$ 可以用以上硫化物的 $\delta^{34}S$ 平均值来代表(Ohmoto, 1972)。

## 2.3 Pb同位素特征

### (1)分析方法

在中科院青岛海洋所实验室完成各成矿期硫化



物及岩矿石全岩 Pb 同位素的分离提纯及测定, 同位素分析采用 ISOPROBE-T 热电离子质谱计进行测定, NBS981 未校正结果:  $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}=2.164\ 940\pm 15$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}=0.914\ 338\pm 7$ ,  $^{204}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}=0.059\ 110\ 7\pm 3$ , 全流程本底 Pb < 100 pg。

### (2) 分析结果

本次于 I-2、I-10 矿体采集 10 件样品 Pb 同位素测试结果见表 4 中。由表中数据可知, II 成矿阶

段的  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  值为 18.190~19.752,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  值为 15.596~15.722,  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  值为 38.282~39.465; III 成矿阶段的  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  值为 18.179~18.230,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  值为 15.593~15.597,  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  值为 38.309~39.230; 硫化物的  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  值为 18.179~18.198,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  值为 15.589~15.594,  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  值为 38.244~38.266。上述特征值表明猪婆沟金矿 Pb 同位素组成具有高度的均一性。

表 4 猪婆沟金矿床样品采样信息及 Pb 同位素组成表

Tab. 4 Lead isotopic composition of Zhubogou gold deposit

| 样号         | 阶段/产状 | $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ | 2 $\sigma$ | $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ | 2 $\sigma$ | $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ | 2 $\sigma$ | $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ | 2 $\sigma$ | $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ | 2 $\sigma$ |
|------------|-------|-----------------------------------|------------|-----------------------------------|------------|-----------------------------------|------------|-----------------------------------|------------|-----------------------------------|------------|
| ZBGB01-4   | II    | 18.639                            | 0.000 7    | 15.628                            | 0.000 6    | 38.458                            | 0.001 7    | 2.063                             | 0.000 04   | 0.838                             | 0.000 01   |
| ZBGB01-4-1 | II    | 18.412                            | 0.000 8    | 15.620                            | 0.000 8    | 38.423                            | 0.002 2    | 2.087                             | 0.000 05   | 0.848                             | 0.000 02   |
| ZK2702-2-1 | II    | 19.657                            | 0.000 7    | 15.717                            | 0.000 7    | 39.403                            | 0.002 0    | 2.004                             | 0.000 05   | 0.800                             | 0.000 01   |
| ZK2702-2-2 | II    | 19.752                            | 0.000 6    | 15.722                            | 0.000 6    | 39.465                            | 0.002 1    | 1.998                             | 0.000 06   | 0.796                             | 0.000 01   |
| ZBGB04-1   | II    | 18.190                            | 0.000 7    | 15.596                            | 0.000 6    | 38.282                            | 0.001 9    | 2.104                             | 0.000 05   | 0.857                             | 0.000 01   |
| ZBGB06-2   | III   | 18.230                            | 0.000 8    | 15.593                            | 0.000 8    | 38.230                            | 0.002 5    | 2.097                             | 0.000 07   | 0.855                             | 0.000 02   |
| ZBGB01-1   | III   | 18.179                            | 0.000 7    | 15.597                            | 0.000 8    | 38.309                            | 0.002 5    | 2.107                             | 0.000 05   | 0.858                             | 0.000 01   |
| Pb-5       | 毒砂    | 18.193                            | 0.000 7    | 15.592                            | 0.000 8    | 38.260                            | 0.002 4    | 2.103                             | 0.000 06   | 0.857                             | 0.000 02   |
| Pb-3       | 毒砂    | 18.198                            | 0.000 9    | 15.594                            | 0.000 9    | 38.266                            | 0.002 6    | 2.103                             | 0.000 05   | 0.857                             | 0.000 01   |
| Pb-4       | 毒砂    | 18.179                            | 0.000 7    | 15.589                            | 0.000 9    | 38.244                            | 0.002 4    | 2.104                             | 0.000 07   | 0.858                             | 0.000 02   |

注: 测试由中国科学院青岛海洋所中心实验室完成, 2016。

## 3 流体包裹体地球化学

### 3.1 样品选择

本次测试样品分别采自猪婆沟金矿 1682 中段平硐 PD3101 中 CM11、19、23、27、29 穿脉代表性矿脉 (I-2) 的典型含石英脉金矿石, 以及 ZK2702-1 闪长岩石英脉、ZK5303 黄铁矿化绿泥石英片岩石英方解石细脉等。需要说明的是, 由于多数流体包裹体过小, 无法进行测试, 为确保实验数据准确, 本次只研究便于观测的气液两相包裹体和含子晶三相包裹体, 最终选取了 3 件样品中大于 5  $\mu\text{m}$  的气液两相包裹体和含子晶包裹体作为测试对象进行观测。

### 3.2 流体包裹体岩相学

#### 3.2.1 寄主矿物特征

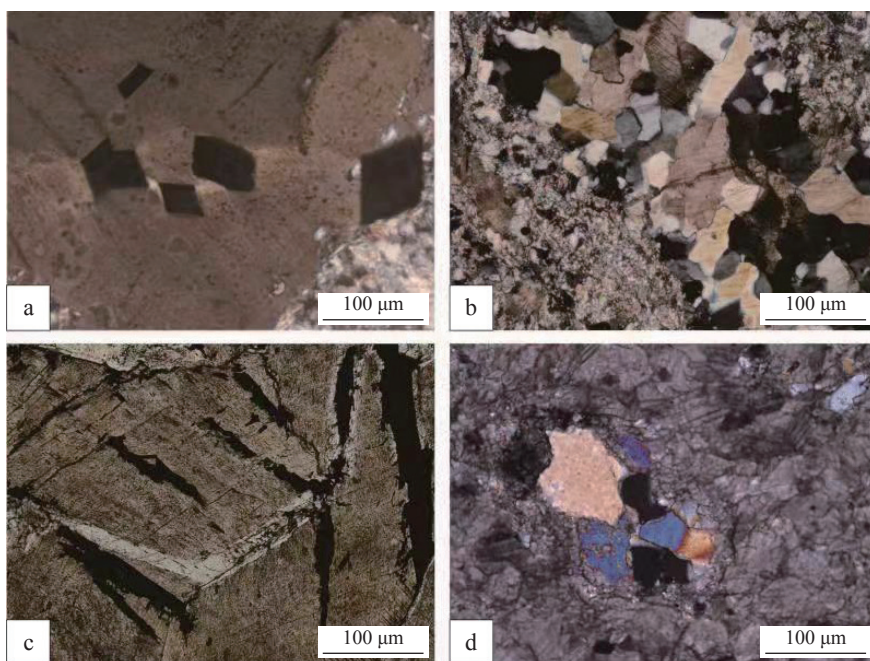
在进行流体包裹体岩相学研究时, 重点针对石英脉型矿石、赋矿的闪长岩、闪长玢岩中的石英脉和石英方解石脉。通过野外的观察, 依据客观地质证据, 对流体的先后顺序进行区分。在猪婆沟金矿区, 如猪婆沟金矿床流体包裹体寄主矿物显微照片 (图 2) 所示, 石英颗粒多为半自形-他形粒状, 脉状产出, 受构造作

用影响, 波状消光特征显著, 少量石英颗粒发生次生加大现象与重结晶作用。其中, 主成矿期的石英细脉中伴生有大量的金属硫化物, 一定程度上影响了对流体包裹体的观察研究。成矿晚期的石英-方解石脉常穿插、叠加于成矿早期和主成矿期石英脉, 使得对于成矿晚期的流体包裹体研究困难较大。鉴于此特征, 在进行流体包裹体研究时, 区分原生、次生包裹体显得尤其重要。

#### 3.2.2 包裹体类型与分布

镜下所观察到的流体包裹体主要分为两类: 原生包裹体和次生包裹体。原生包裹体在石英和方解石颗粒中随机呈单个或群体产出, 形态上主要为椭圆形, 少数呈负晶形和不规则状。一般为 4~6  $\mu\text{m}$ , 少数可达 16  $\mu\text{m}$ 。而次生流体包裹体形成于主矿物结晶之后, 常沿石英中的裂隙、方解石中的解理发育, 呈条带状分布, 呈椭球状和不规则状, 一般为 2~4  $\mu\text{m}$ 。

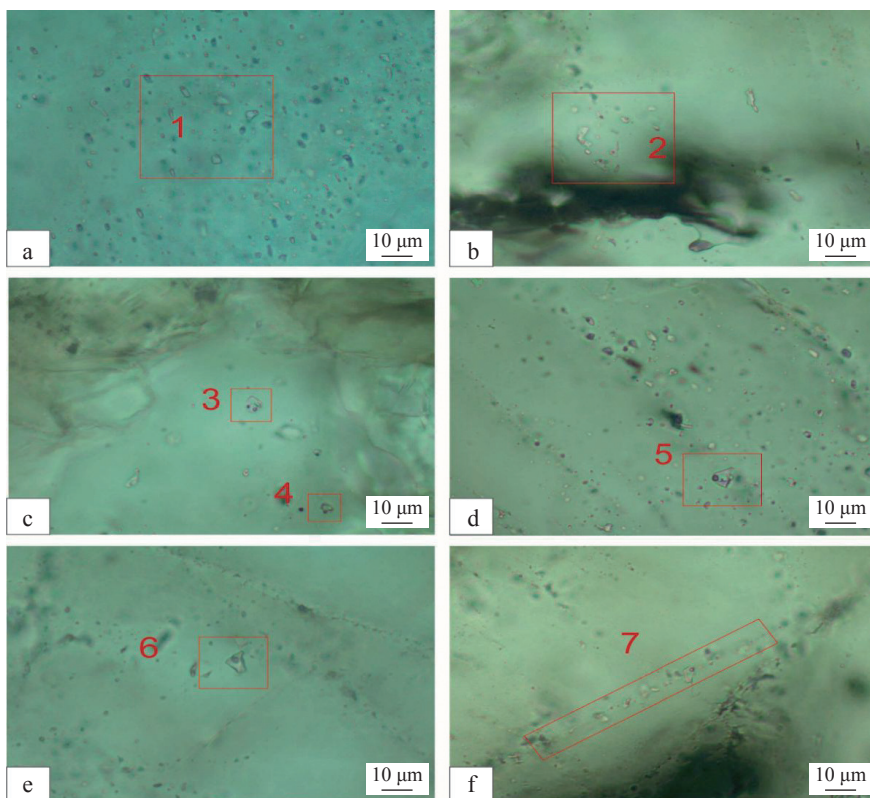
按照成分和常温下的相态, 猪婆沟金矿不同成矿阶段流体包裹体分为以下类型: 水溶液包裹体、含子晶水溶液包裹体 (洪树炯等, 2020)、纯  $\text{CO}_2$  包裹体、含  $\text{CO}_2$  包裹体, 包裹体大小及分布特征上还有一定差异 (图 3)。



a.多金属硫化物阶段石英脉,透光度较差,ZBG06-2; b.矿化闪长岩中石英细脉,石英重结晶现象,ZK2702-2;  
c.成矿晚阶段金属矿物沿方解石裂隙发育,ZK5303; d.石英方解石脉中,石英典型波状消光现象,ZK5303

图2 猪婆沟金矿床流体包裹体寄主矿物显微照片

Fig. 2 Micrograph of host minerals of fluid inclusions in Zhupogou gold deposit



a、b、e、f.多金属硫化物-石英阶段; c、d.黄铁矿-石英阶段; 1.椭圆形原生气液两相包裹体群; 2.不规则状原生气液两相包裹体群; 3、4、5.含子晶三相包裹体; 6. CO<sub>2</sub>三相包裹体; 7.线状分布的次生包裹体群

图3 猪婆沟金矿床石英脉中流体包裹体显微照片

Fig. 3 Micrograph of fluid inclusions in quartz vein of Zhupogou gold deposit

成矿早阶段样品中流体包裹体特别发育, 大多以不均匀、成群的状态分布, 包裹体的形态以椭圆形、负晶形和不规则等形状居多。主要以两相气液包裹体和含子晶三相包裹体形态出现, 以前者居多(图 3a、图 3b、图 3e、图 3f)。气液两相包裹体主要以液相为主, 液态填充度在 65% 左右, 该阶段流体包裹体较小, 大多为 2~5 μm, 少数为 6~12 μm。多数均一到液相, 少数均一到气相或在完全均一前爆裂。含子晶三相包裹体, 常温下可见由水溶液、气泡和固体子晶组成的 3 种相态, 盐水溶液的充填度变化较大。CO<sub>2</sub> 三相包裹体绝大部分由于体积太小, 无法进行精确的测温学研究, 只得到少量的冰点和均一温度。由于该阶段为猪婆沟金矿主要的成矿阶段, 对其中的气液两相包裹体和含子晶三相包裹体均开展了详细的测温学和地球化学研究。

成矿主阶段样品中流体包裹体数量较多, 以上

提到多种类型流体包裹体均可见及, 以气液两相包裹体(图 3c、图 3d)为主, 呈椭圆状或不规则状, 成群分布或以单个包裹体产出, 个体普遍较小, 一般为 2~5 μm, 偶尔可达 7 μm, 绝大多数包裹体均一为液相。含 CO<sub>2</sub> 包裹体则较少见且体积太小, 无法进行精确的测温学研究。因此, 本次工作仅对其中的气液两相包裹体开展了详细的测温学和地球化学研究。

3.3 流体包裹体显微测温

由于所采取的猪婆沟金矿样品中的流体包裹体均较小(多数 < 5 μm), 为了保证测温的准确性, 因此本次测温的流体包裹体粒径一般为 3~12 μm, 部分可达到 15 μm。用于本次测温的样品包括成矿早阶段、主成矿阶段。而成矿晚阶段(石英-方解石阶段)由于包裹体较小、包体片透明度差, 缺少有效数据, 没有加入接下来的讨论。具体显微测温结果见表 5。

表 5 猪婆沟金矿流体包裹体显微测温数据表

Tab. 5 Micro temperature measurement data of fluid inclusions in Zhupogou gold mine

| 样号                 | 寄主矿物 | 观察与测试的包裹体 |    |             | 冰点 T(°C)    | 盐度 (% NaCl <sub>eqv</sub> ) | 完全均一 T(°C)  | 密度 (g/cm <sup>3</sup> ) |
|--------------------|------|-----------|----|-------------|-------------|-----------------------------|-------------|-------------------------|
|                    |      | 类型        | 个数 | 相比          |             |                             |             |                         |
| 成矿早阶段(黄铁矿-石英阶段)    |      |           |    |             |             |                             |             |                         |
| ZK2702-1           | 石英   | V-L       | 23 | 5~20        | -20.1~-12.4 | 16.34~22.44                 | 165.4~268.6 | 0.894~1.047             |
|                    |      | V-L-S     | 5  | V5~10;S5~20 | -17.4       | 20.52                       | 148.6~289.4 | 0.922                   |
| 成矿主阶段(多金属硫化物-石英阶段) |      |           |    |             |             |                             |             |                         |
| ZBG05-3            | 石英   | V-L       | 10 | 5~20        | -5.3~-0.1   | 1.40~8.28                   | 131.2~285.3 | 0.874~1.012             |
| ZBG06-2            | 石英   | V-L       | 15 | V5~10;S10   | -5.2~-0.1   | 2.41~8.14                   | 128.9~208.1 | 0.928~1.035             |
|                    |      | V-L-S     | 3  | 5~10        | -4.8~-4.3   | 6.88~7.59                   | 141.3~198.6 | 0.945~1.034             |

3.3.1 成矿早阶段

成矿早阶段石英中的包裹体主要为气液两相包裹体和含子晶三相包裹体, 均为原生包裹体。含子晶三相包裹体仅测出一个冰点温度为 -17.4 °C, 气液两相包裹体的冰点温度为 -20.1~-12.4 °C。该阶段含子晶三相包裹体均一温度为 148.6~289.4 °C, 平均为 203.6 °C; 气液两相包裹体均一温度为 165.4~268.6 °C, 平均为 208.6 °C, 温度区间较大。在均一温度直方图(图 4)上, 呈正态分布样式, 说明数据可信度较好。均一温度峰值处于 180~220 °C, 属于中低温范围。

根据包裹体的冰点温度, 利用冰点-盐度关系表, 估算成矿早阶段流体盐度为 16.34~22.44% NaCl<sub>eqv</sub>, 平均 19.51% NaCl<sub>eqv</sub>, 属于高盐度范围。

3.3.2 主成矿阶段

主成矿阶段石英中包裹体主要为气液两相包裹

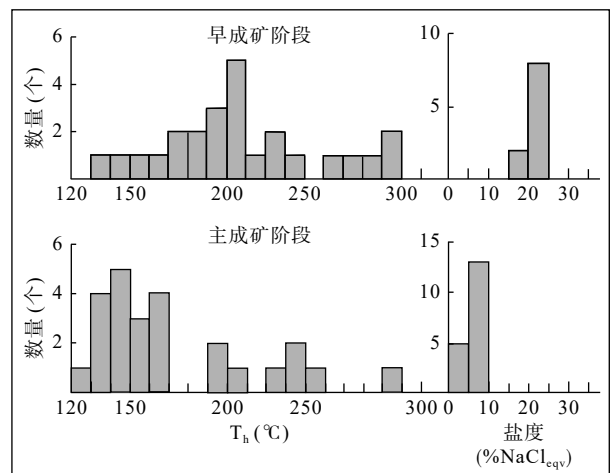


图 4 石英中流体包裹体均一温度、盐度直方图

Fig. 4 Histogram of homogenization temperature and salinity of fluid inclusions in quartz



体、含子晶三相包裹体,均为原生包裹体。含子晶三相包裹体的冰点温度范围为 $-4.8\sim-4.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;气液两相包裹体的冰点温度为 $-5.3\sim-0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。该阶段含子晶三相包裹体均一温度为 $141.3\sim198.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,平均为 $160.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;气液两相包裹体均一温度为 $128.9\sim285.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,平均为 $174.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在均一温度直方图(图4)上,峰值范围较宽,处于 $130\sim170\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。明显低于成矿早阶段,结合矿物共生组合,峰值范围较宽,充分印证了多金属硫化物沉淀的较宽温度区间,并且猪婆沟金矿的热液成矿期的金属矿物沉淀是具有延续性的。这也与镜下观察中,成矿早阶段与主成矿阶段金属矿物相互穿插、交代、熔蚀的现象相一致。

根据包裹体的冰点温度,利用冰点-盐度关系表,估算成矿主阶段流体盐度为 $1.40\sim8.28\%$  NaCleqv,平均为 $5.84\%$  NaCleqv。相比于成矿早阶段,盐度大大降低,与主成矿阶段大量金属矿物沉淀,石英相对比例减少的地质事实相符。

通过流体包裹体测温数据,可知猪婆沟金矿的热液成矿期也是一个温度降低、盐度降低,伴随大量金属矿物沉淀的过程。

### 3.4 流体包裹体成分特征

不同成矿阶段流体包裹体的激光拉曼原位分析结果(图5),3件样品49个包裹体激光拉曼光谱分析结果显示,气相成分较为常见者为 $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{SO}_2$ ,部分包裹体中含有微量的 $\text{CO}$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{C}_2\text{H}_4$ 、 $\text{C}_2\text{H}_6$ 等气体。其中,富 $\text{CH}_4$ 、 $\text{C}_2\text{H}_4$ 等还原性标志的烃类有机气体指示成矿流体为还原性质的热液体系。

## 4 矿床成因探讨

### 4.1 成矿物质来源

猪婆沟金矿床的矿石中S同位素为 $10.7\%\sim11.5\%$ ,类似于二长花岗岩S同位素为 $10.8\%\sim10.9\%$ ,而不同于含黄铁矿碳酸盐脉的S同位素值为 $4.5\%$ 。从图6中看出,岩浆硫值明显低于猪婆沟金矿床的 $\delta^{34}\text{S}$ 值,可能有大量变质岩或沉积岩的成矿物质混入(郑永飞,2000)。

猪婆沟金矿床的Pb同位素模式图(图7),显示出成矿物质主要来源于上地壳铅,形成于造山带环境。在 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 源区构造环境判别图上(图8),大量投影点落在上地壳、下地壳和富集地幔的交汇部位,足以说明与成矿有关的壳、幔之间的作用发生在

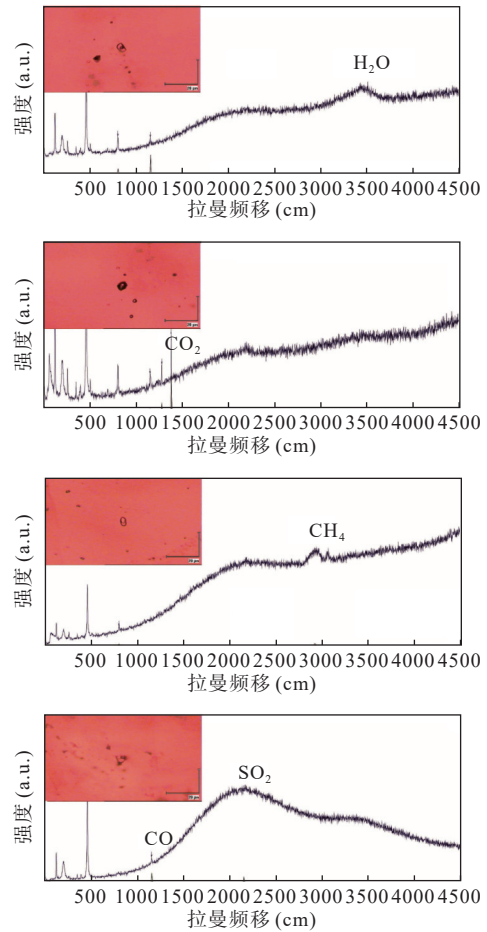


图5 猪婆沟金矿床流体包裹体激光拉曼光谱图

Fig. 5 Laser Raman spectra of fluid inclusions in Zhupogou gold deposit

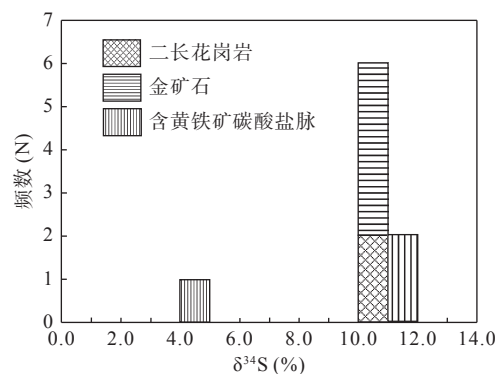


图6 岩、矿石硫化物同位素组成频率直方图

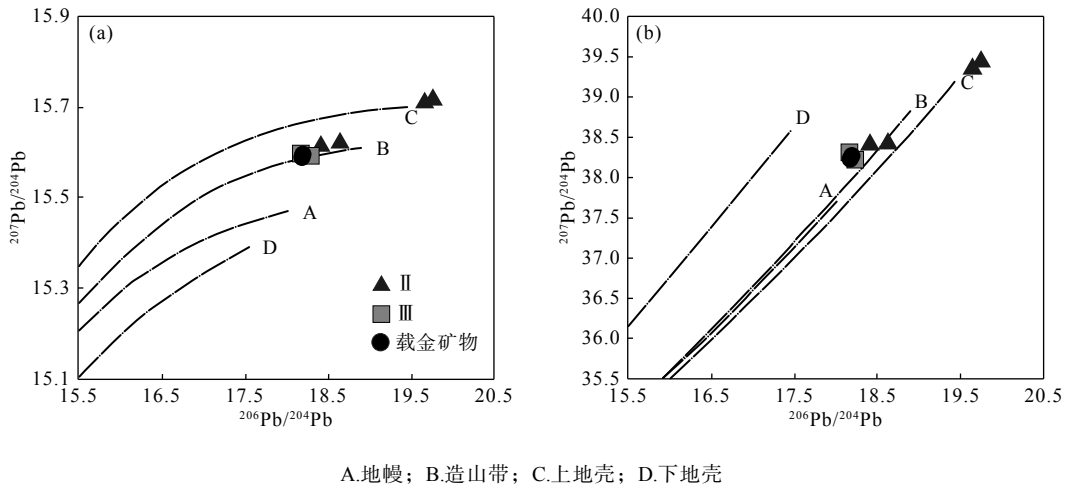
Fig. 6 Frequency histogram of isotopic composition of S-compounds in rocks and ores

下地壳与上地幔的界面处,在上升侵位的过程中受到上地壳物质的混染。

### 4.2 成矿流体来源及演化

从图9中看出,主成矿阶段(Ⅱ黄铁矿-绢云母-石英-金阶段、Ⅲ石英-绢云母-多金属硫化物-金阶段)





A.地幔; B.造山带; C.上地壳; D.下地壳

图7 猪婆沟金矿床 Pb 同位素模式图

Fig. 7 Pb isotope pattern of Zhupogou gold deposit

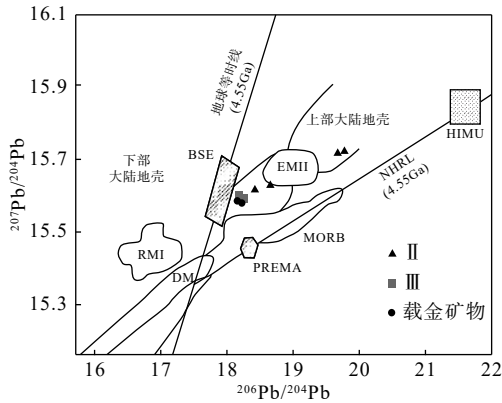


图8  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  源区构造环境判别图

Fig. 8 Discrimination diagram of tectonic environment of  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  source area

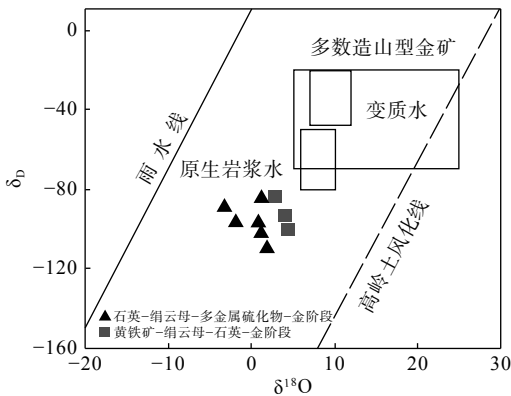


图9 猪婆沟金矿主成矿阶段  $\delta\text{D}$ - $\delta^{18}\text{O}$  组成图

Fig. 9  $\delta\text{D}$ - $\delta^{18}\text{O}$  composition diagram of main metallogenic stage, Zhupogou gold deposit

投影数据点均在原生岩浆水的左下方, III阶段明显的有向雨水线(大气降水)偏移靠近的趋势, 结合流体包裹体显微测温结果, 反应出该矿床的成矿流体来源于

原生岩浆水, 伴随着成矿作用演化的进行, 大气降水含量逐渐增多。

### 4.3 矿床成因演化

(1)中元古代至新元古代, 伴随 Rodonia 超大陆裂解, 西秦岭地区形成商-丹洋, 沉积了以秦岭岩群为代表的基底, 并爆发了多次的火山活动, 形成了李子园岩群火山-沉积岩系。

(2)早古生代末期, 区域构造运动, 李子园岩群和秦岭岩群发生区域叠加变质和区域变质作用, 使秦岭岩群中的金再次在热液变质作用下迁移到李子园岩群, 并与李子园岩群中的金元素在变质热液作用下活化(杨礼敬等, 2004)、迁移, 初步形成金的富集成矿。

(3)至晚古生代, 在西秦岭造山运动进入中晚期, 区域上发生韧脆性剪切作用, 从而叠加了构造热液作用, 导致早期初步富集的金元素再次活化, 迁移至构造虚脱部位交代成矿, 形成构造蚀变岩型金矿(杨礼敬等, 2004)。

(4)中生代早期, 西秦岭地区进入后碰撞造山伸展阶段, 印支运动促使区域发生了大规模的岩浆侵入活动, 岩浆期后热液和少量大气降水以及变质水构成成矿热液。从深部携带成矿物质向上迁移, 并从矿源层和蚀变岩型金矿中萃取大量的成矿物质, 沿韧脆性断裂剪切带和次级断裂迁移至构造虚脱部位迅速充填成矿(杨礼敬, 2004), 形成多金属硫化物型矿体和石英脉型金矿体。

综上所述, 猪婆沟金矿成因类型属沉积变质-岩浆期后热液叠加改造的构造蚀变岩型金矿床(杨礼敬等, 2004)。

## 5 结论

(1)猪婆沟金矿不同成矿阶段流体包裹体在类型、大小及分布特征上存在一定差异,成矿早阶段主要为两相气液包裹体和含子晶三相包裹体;成矿主阶段以气液两相包裹体为主。

(2)流体包裹体显微测温证实猪婆沟金矿的热液成矿期是一个温度降低、盐度降低,伴随大量金属矿物沉淀的过程。

(3)从H-O同位素特征分析,该矿床主成矿阶段的成矿流体来源于原生岩浆水,伴随着岩浆分异形成矿床的过程中,有大气降水的参与。

(4)猪婆沟金矿成因类型属沉积变质-岩浆期后热液叠加改造的构造蚀变岩型。

## 参考文献(References):

- 白彦祥,李伟,郑璇.猪婆沟金矿床成矿规律研究[J].大科技,2018,2:151-152.
- BAI Yanxiang, LI Wei, ZHENG Xuan. Study on metallogenic regularity of Zhubogou gold deposit[J]. Super Science, 2018, 2: 151-152.
- 陈衍景,张静,张复新,等.西秦岭地区卡林-类卡林型金矿床及其成矿时间、构造背景和模式[J].地质论评,2004,50(2):134-152.
- CHEN Yanjing, ZHANG Jing, ZHANG Fuxin, et al. Carlin like Carlin type gold deposits in the West Qinling Mountains and their metallogenic time, tectonic setting and model[J]. Geological Review, 2004, 50(2): 134-152.
- 冯建忠,汪东波,邵世才,等.西秦岭小沟里石英脉型金矿床成矿地质特征及成因[J].矿床地质,2002,21(2):159-167.
- FENG Jianzhong, WANG Dongbo, SHAO Shicai, et al. Metallogenic geological characteristics and genesis of Xiaoguoli quartz vein type gold deposit in West Qinling[J]. Mineral Deposits, 2002, 21(2): 159-167.
- 郭玲利.山东某金矿成矿物质来源与矿床成因模式分析[J].安徽地质,2016,26(3):194-197.
- GUO Lingli. Analysis of ore-forming material source and genetic model of a gold deposit in Shandong[J]. Anhui Geology, 2016, 26(3): 194-197.
- 胡晓隆,赵利利.对北秦岭太阳寺矿集区金矿成矿特征的初步认识[J].甘肃地质,2008,17(1):41-46.
- HU Xiaolong, ZHAO Lili. A preliminary understanding of the metallogenic characteristics of gold deposits in the taiyangsi ore concentration area of the North Qinling Mountains[J]. Gansu Geology, 2008, 17(1): 41-46.
- 洪树炯,袁万明,袁二军.东昆仑热液矿床的流体包裹体特征[J].中国矿业,2020,29(S02):241-244.
- HONG Shujiong, YUAN Wanming, YUAN Erjun. Characteristics of fluid inclusions in hydrothermal deposits in East Kunlun[J]. China Mining, 2020, 29(S02): 241-244.
- 洪百雄.甘肃天水金长沟金矿地质特征与找矿标志[J].甘肃科技,2016,32(18):35-39.
- HONG Baixiong. Geological characteristics and prospecting indicators of Jinchangou gold deposit in Tianshui, Gansu[J]. Gansu Science and Technology, 2016, 32(18): 35-39.
- 李康宁,张江苏,徐进,等.西秦岭甘南加滩金矿床流体包裹体及氢-氧-硫-铅同位素特征[J].地质通报,2023,42(6):941-952.
- LI Kangning, ZHANG Jiangu, XU Jin, et al. Fluid inclusions and H-O-S-Pb isotopic characteristics of the Jiagantan gold deposit in Gannan, West Qinling[J]. Geological Bulletin of China, 2023, 42(6): 941-952.
- 雷时斌,齐金忠.甘肃阳山金矿带地球动力学体制与多因耦合成矿作用[J].地质与勘探,2007,43(2):33-39.
- LEI Shibin, QI Jinzhong. Geodynamic system and polygenetic coupling mineralization in Yangshan gold belt, Gansu Province[J]. Geology and Exploration, 2007, 43(2): 33-39.
- 刘伟.甘肃天水猪婆沟金矿床同位素地球化学特征研究[J].矿产与地质,2020,34(1):64-72.
- LIU Wei. Study on Isotope Geochemical Characteristics of Zhubogou Gold Deposit in Tianshui, Gansu[J]. Mineral Resources and Geology, 2020, 34(1): 64-72.
- 齐金忠,袁士松,李莉,等.甘肃省文县阳山金矿床地质地球化学研究[J].矿床地质,2003,22(1):24-31.
- QI Jinzhong, YUAN Shisong, LI Li, et al. Geological and geochemical study of Yangshan gold deposit in Wen County, Gansu Province[J]. Mineral Deposits, 2003, 22(1): 24-31.
- 齐金忠,李莉,袁士松,等.甘肃省阳山金矿床石英脉中锆石 SHRIMP U-Pb年代学研究[J].矿床地质,2005,24(2):141-150.
- QI Jinzhong, LI Li, YUAN Shisong, et al. SHRIMP U-Pb chronology of zircon in quartz vein of Yangshan gold deposit, Gansu Province[J]. Mineral Deposits, 2005, 24(2): 141-150.
- 谭文娟,赵国斌,魏建设,等.黄河流域矿产资源禀赋、分布规律及开发利用潜力[J].西北地质,2023,56(2):163-174.
- TAN Wenjuan, ZHAO Guobin, WEI Jianshe, et al. Characteristics, Distribution and Utilization Potential of Mineral Resources in the Yellow River Basin[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(2): 163-174.
- 王洁明,董苏庆,雷群英.陕西金矿成矿规律与找矿靶区圈定[J].西北地质,2023,56(5):308-321.

- WANG Jieming, DONG Suqing, LEI Qunying. Metallogenic Regularity and Prospecting Target Delineation of Shaanxi Gold Deposit[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(5): 308-321.
- 吴晓波, 吴军, 李昌寿, 等. 云南大坪金铜铅锌银多金属矿床地球化学特征[J]. *有色矿冶*, 2011, 27(4): 6-10.
- WU Xiaobo, WU Jun, LI Changshou, et al. Geochemical characteristics of Daping gold copper lead zinc silver polymetallic deposit, Yunnan[J]. *Nonferrous Metals Mining and Metallurgy*, 2011, 27(4): 6-10.
- 闫升好, 王安建, 高兰, 等. 大水式金矿床稳定同位素、稀土元素地球化学研究[J]. *矿床地质*, 2000, 19(1): 37-45.
- YAN Shenghao, WANG Anjian, GAO Lan, et al. Geochemistry of stable isotopes and rare earth elements in Dashui type gold deposits[J]. *Mineral Deposits*, 2000, 19(1): 37-45.
- 杨礼敬, 胡晓隆, 许亚玲. 柴家庄金矿成矿模式及找矿方向探讨[J]. *甘肃地质学报*, 2004, 13(2): 74-80.
- YANG Lijing, HU Xiaolong, Xu Yaling. Discussion on metallogenic model and prospecting direction of Chaijiazhuang gold deposit[J]. *Gansu Geological Journal*, 2004, 13(2): 74-80.
- 袁士松, 李文良, 张勇, 等. 甘肃省文县阳山超大型金矿床成矿作用及成矿模式[J]. *地质与资源*, 2008, 17(2): 92-101.
- YUAN Shisong, LI Wenliang, ZHANG Yong, et al. Mineralization and metallogenic model of Yangshan super large gold deposit in Wen County, Gansu Province[J]. *Geology and Resources*, 2008, 17(2): 92-101.
- 赵彦庆, 叶得金, 李永琴, 等. 西秦岭大水金矿的花岗岩成矿作用特征[J]. *现代地质*, 2003, 17(2): 151-156.
- ZHAO Yanqing, YE Dejin, LI Yongqin, et al. Characteristics of granite mineralization of Dashui gold deposit in West Qinling[J]. *Geoscience*, 2003, 17(2): 151-156.
- 张峻. 甘肃东沟金矿床地质矿化特征及找矿方向[J]. *甘肃地质*, 2008, 17(04): 45-50.
- ZHANG Jun. Geological mineralization characteristics and prospecting direction of Donggou gold deposit in Gansu Province[J]. *Gansu Geology*, 2008, 17(04): 45-50.
- 张复新, 季军良, 龙灵利, 等. 南秦岭卡林型—似卡林型金矿床综合地质地球化学特征[J]. *地质论评*, 2001, 47(5): 492-499.
- ZHANG Fuxin, JI Junliang, LONG Lingli, et al. Comprehensive geological and geochemical characteristics of Carlin like Carlin type gold deposits in the South Qinling Mountains[J]. *Geological Review*, 2001, 47(5): 492-499.
- 张复新, 王立社, 侯俊富. 秦岭造山带黑色岩系与金属矿床类型及成矿系列[J]. *中国地质*, 2009, 26(3): 694-704.
- ZHANG Fuxin, WANG Lishe, HOU Junfu. The black rock series and the types and metallogenic series of metal deposits in the Qinling orogenic belt[J]. *Geology in China*, 2009, 26(3): 694-704.
- 郑永飞. 稳定同位素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- ZHENG Yongfei. Stable isotope geochemistry [M]. Beijing: Science Press, 2000.
- Ohmoto H. Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits[J]. *Economic Geology*, 1972, 67: 551-578.