

东昆仑造山带东段色日金矿床地质特征及成因

张健¹, 张正虎², 李小亮³, 杨德⁴, 于小亮⁵, 李华^{5*}, 钱烨¹

(1. 吉林大学地球科学学院; 2. 青海省有色地质矿产勘查局第三地质勘查院; 3. 青海省有色地质矿产勘查局;
4. 青海省有色地质矿产勘查局第一地质勘查院; 5. 青海省地质调查局)

摘要:色日金矿床位于东昆仑造山带的昆中花岗岩隆起带, 隶属于沟里金多金属矿整装勘查区。色日金矿床主要赋矿围岩为印支期和华力西期中酸性侵入岩, 成矿主要受北北东向断裂控制。围岩蚀变主要有硅化、绢云母化、绿泥石化、碳酸盐化、高岭土化等。根据野外穿插关系, 将热液成矿期划分为3个阶段: 石英-黄铁矿阶段、石英-多金属硫化物阶段与石英-碳酸盐阶段。流体包裹体显微测温结果显示: 石英-黄铁矿阶段流体包裹体完全均一温度为308.50℃~355.10℃, 盐度为5.41%~12.31%; 石英-多金属硫化物阶段流体包裹体完全均一温度为276.90℃~312.70℃, 盐度为7.58%~9.47%; 石英-碳酸盐阶段流体包裹体完全均一温度为248.30℃~286.60℃, 盐度为5.25%~8.81%。综合分析认为, 色日金矿床成矿流体为中温、中盐度的NaCl-CO₂-H₂O体系。成矿阶段石英与方解石的C-H-O同位素分析结果显示, 成矿流体以岩浆水为主, 晚期有大气降水的加入。原位S同位素分析结果显示, 成矿物质主要来源于岩浆岩。色日金矿床为受构造和深部岩浆活动控制的中温热液脉型金矿床。

关键词:东昆仑造山带; 沟里; 色日金矿床; 流体特征; C-H-O同位素; 原位S同位素; 中温热液脉型

中图分类号: TD11 P618.51

文献标志码: A

文章编号: 1001-1277(2025)02-0062-10

doi: 10.11792/hj20250211

引言

东昆仑造山带位于中央造山带西部, 为柴达木地块与羌塘地块之间的俯冲-增生造山带^[1], 呈现多旋回复杂的历史演化过程。东昆仑造山带呈近东西向展布于北坡—鄂拉山一带, 由北向南发育昆北断裂、昆中断裂和昆南断裂3条深大断裂。因此, 前人将东昆仑造山带分为3个三级构造单元, 即昆北弧后裂陷带、昆中花岗岩隆起带和昆南复合拼接带^[2-3]。东昆仑造山带已发现40余处金矿床, 是中国重要的金矿化带, 也是有色金属勘查的重点地区之一。

位于东昆仑造山带东端的沟里金多金属矿整装勘查区是东昆仑造山带中重要的勘查区之一, 其内已发现果洛龙洼金矿床、瓦勒尕金矿床、按纳格金矿床等大型及中型金矿床^[4]。位于瓦勒尕金矿床北部的色日金矿床是新发现的金矿床, 其地理位置位于青海省都兰县香加乡和沟里乡内, 大地构造位置位于昆中花岗岩隆起带的雪山峰—布达汉布达华力西期—印支期钴、金、铜、稀有稀土成矿带东段^[5]。本文通过对

色日金矿床地质特征、流体包裹体岩相学特征、显微测温数据分析、C-H-O同位素与原位S同位素研究, 确定成矿流体与成矿物质来源, 厘定矿床成因, 为进一步找矿勘探提供支撑。

1 区域地质背景

东昆仑造山带位于青藏高原北缘, 柴达木盆地与巴颜喀拉地体之间, 东邻秦岭造山带, 西接阿尔金断裂(见图1), 是中央复合造山带的重要组成部分^[1,6]。该造山带内含有丰富的矿产资源, 已成为中国重要的金多金属成矿带之一^[7-10]。

东昆仑造山带位于原特提斯构造域与古特提斯构造域的结合部位, 经历了复杂的构造-岩浆活动, 完整记录了早古生代原特提斯洋和晚古生代—早中生代古特提斯洋的演化过程^[11-15]。昆中断裂和昆南断裂分别代表原特提斯洋和古特提斯洋的闭合边界。在空间上, 昆北弧后裂陷带与昆中花岗岩隆起带2大构造单元被近东西向昆中断裂分隔。岩浆岩在东昆仑造山带非常发育, 大致可分为2期, 且主要分布于昆

收稿日期: 2024-09-25; 修回日期: 2024-11-15

基金项目: 青海省级地质勘查专项基金项目(2023085029ky004)

作者简介: 张健(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为矿产普查与勘探; E-mail: 1164326963@qq.com

*通信作者: 李华(1980—), 男, 高级工程师, 从事地质矿产勘查工作; E-mail: lhua05132024@163.com

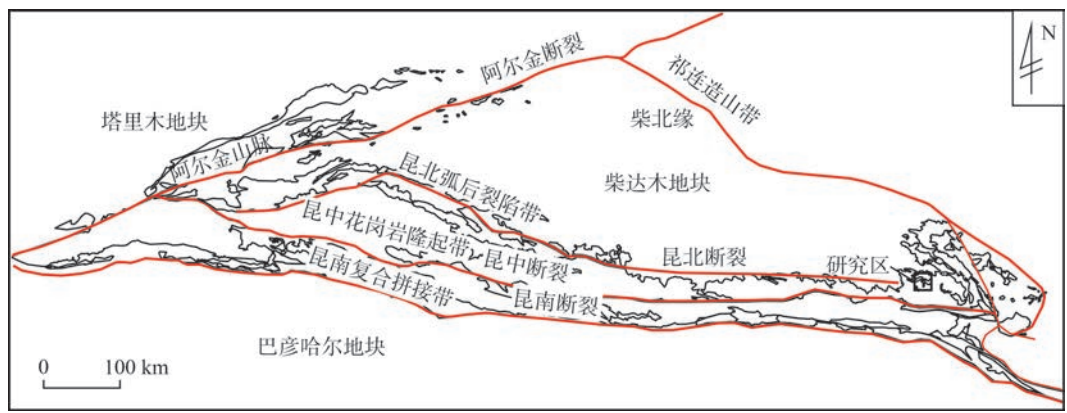


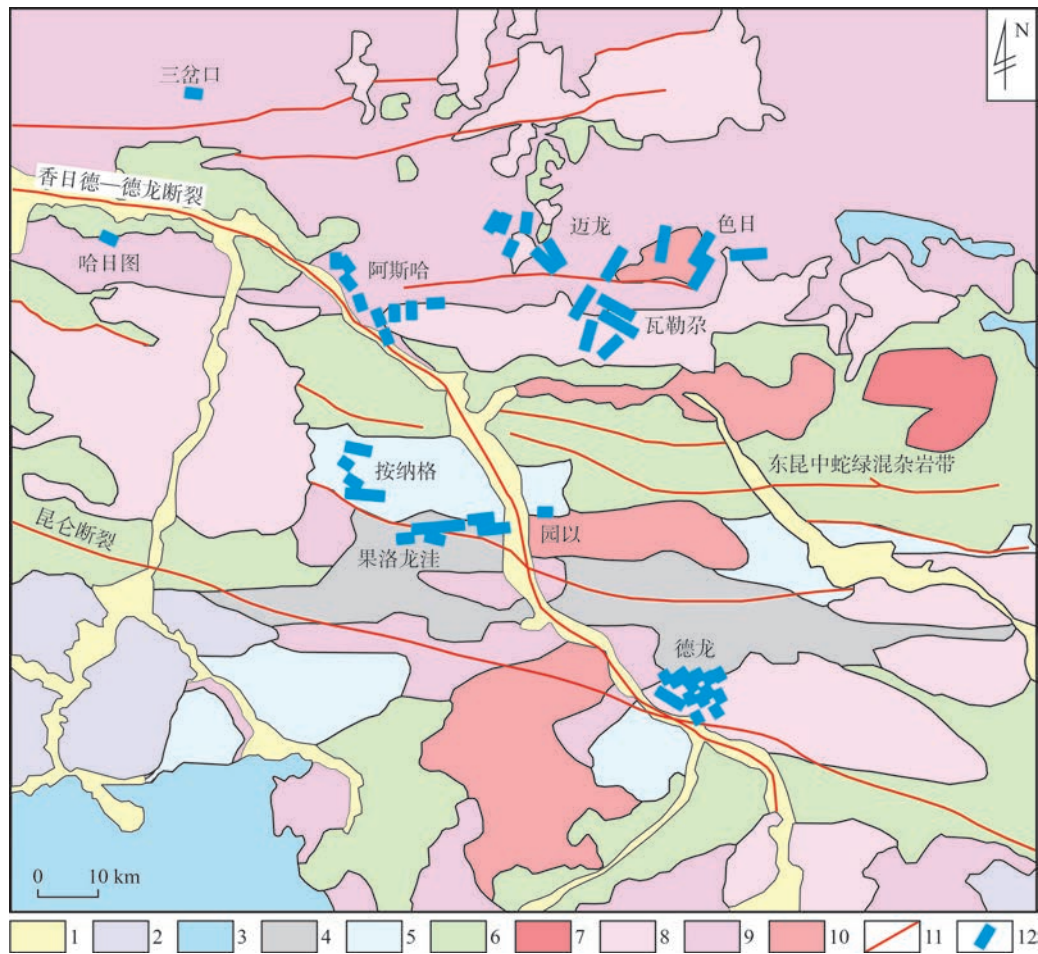
图1 东昆仑造山带构造简图(据文献[3]修改)

Fig. 1 Sketch of the structure of East Kunlun orogenic belt

北弧后裂陷带中,是原特提斯洋和古特提斯洋共同演化的产物^[16-17]。东昆仑造山带矿产资源丰富,成矿类型复杂,矿床类型主要包括脉状金矿床、脉状银铅锌矿床、斑岩型铜钼矿床和矽卡岩型铁多金属矿床。

区域地层隶属于东昆北地层分区和东昆南地层分区,出露较为齐全,除缺失新元古界、志留系、上侏罗统和白垩系外,其余时代的地层(古元古界到新生

界)均在区域上有不同程度的发育。古元古界金水口岩群作为东昆仑造山带的变质基底,在区域内大面积分布,是金多金属矿的重要赋矿地层;中元古界地层大面积分布于昆中断裂南侧的昆南复合拼接带中;古生界地层零星出露,主要位于昆中断裂附近;中生界地层在区域上大面积发育,以三叠系地层出露最为广泛(见图2)。



1—第四系 2—三叠系 3—二叠系中—上统 4—石炭系—二叠系下统 5—奥陶系—中—晚元古界 6—金水口岩群 7—燕山期侵入岩 8—印支期侵入岩 9—华力西期侵入岩 10—加里东期侵入岩 11—断裂 12—主要矿体

图2 沟里金多金属矿整装勘查区地质矿产简图(据文献[18-20]修改)

Fig. 2 Sketch of geology and minerals in the integrated exploration area of the Gouli gold polymetallic mine

区域主要经历了早古生代原特提斯洋与晚古生代—早中生代古特提斯洋2期构造演化过程,这2期构造演化造就了区域内复杂的构造-岩浆活动^[12-15]。区域构造主要包括断裂和褶皱。断裂为主干构造,呈近东西向—北北西向展布,且次级断裂发育,走向大多为北西向及北东向,具有多期活动的特点,控制了金银多金属矿的产出。

区域岩浆岩十分发育,其出露面积占全区面积的一半以上。岩浆活动从元古代持续到中生代,从构造-岩浆活动特点上看,晋宁期、加里东期、华力西期、印支期及燕山期的岩浆岩均有不同程度的发育。其中,华力西期与印支期花岗闪长岩、正长花岗岩及二长花岗岩等与金多金属矿的形成有着密切的联系^[17]。

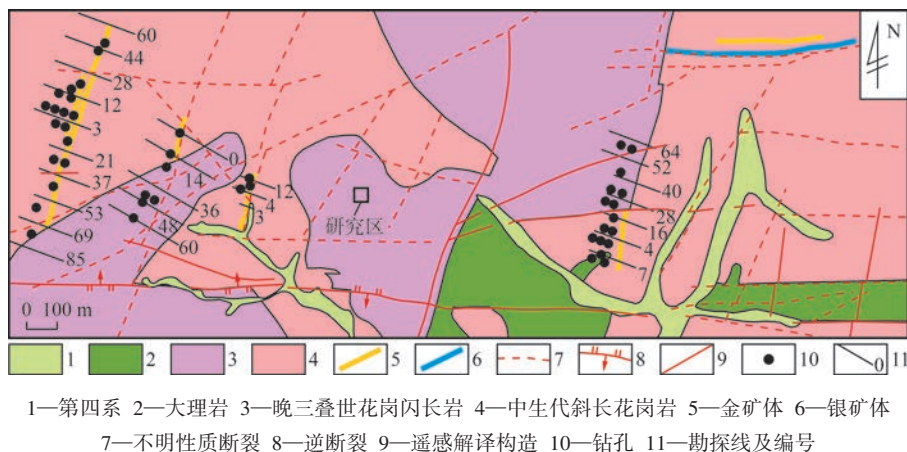


图3 色日金矿区地质简图

Fig. 3 Sketch of the Seri Gold District

2.1 矿体特征

Au VII-1 矿体为矿区内的典型金矿体,其沿倾向延伸稳定,规模大、品位高,具有非常好的找矿前景。该矿体位于 Au VII 含矿构造蚀变带内,地表由 7 个探槽 (21TC11、21TC22、21TC24、22TC03、22TC04、22TC06、22TC09)、5 个浅钻 (21QZ01、22QZ4601、22QZ2001、22QZ1501、22QZ9301) 和 6 个钻孔 (22ZK0401、22ZK2901、22ZK4501、22ZK6101、22ZK7701、22ZK2902) 控制,矿体呈脉状产出,走向北北东 (见图 4-a),倾向北西,倾角 $78^{\circ} \sim 85^{\circ}$ 。闪长岩及斜长花岗岩与闪长岩接触部位的含矿构造蚀变带是矿体的主要产出部位,其主要的蚀变类型包括硅化和高岭土化等,主要金属矿化为黄铁矿化与毒砂化。该矿体控制长约 2 500 m,宽 0.63 ~ 2.35 m,平均金品位 4.93 g/t,最高金品位 56.1 g/t,最大控制斜深 240 m。伴生银品位 6.22 ~ 183 g/t,铜品位 0.17 % ~ 4.38 %,铅+锌品位 0.79 % ~ 8.78 %,厚度变化系数 41.21 %,金品位变化系数 179.42 %。

Au IV-1 矿体与 Au VII-1 矿体相邻 (见图 4-b),同

2 矿区及矿床地质特征

色日金矿床位于昆中花岗岩隆起带内,侵入岩广泛出露,断裂纵横交错。地层出露较为单一,主要为古元古界金水口岩群的中高级变质岩,分布于南东部。矿区构造主要为断裂,其中,近东西向断裂、北东向断裂为区域构造,北北西向、北北东向断裂为不同等级的次级构造。北北东向断裂为最重要的控矿构造,控制了金矿体的产出,而近东西向构造则主要控制银矿体的产出 (见图 3)。岩浆活动强烈,以中酸性岩体为主,多呈岩株、岩脉产出,侵入时代以加里东期和印支期为主,均为矿区的主要赋矿围岩。其中,矿区中部的花岗闪长岩成岩时代为 223 Ma (钱烨等,未发表),该数据揭示色日金矿床的成矿时代不早于晚三叠世。

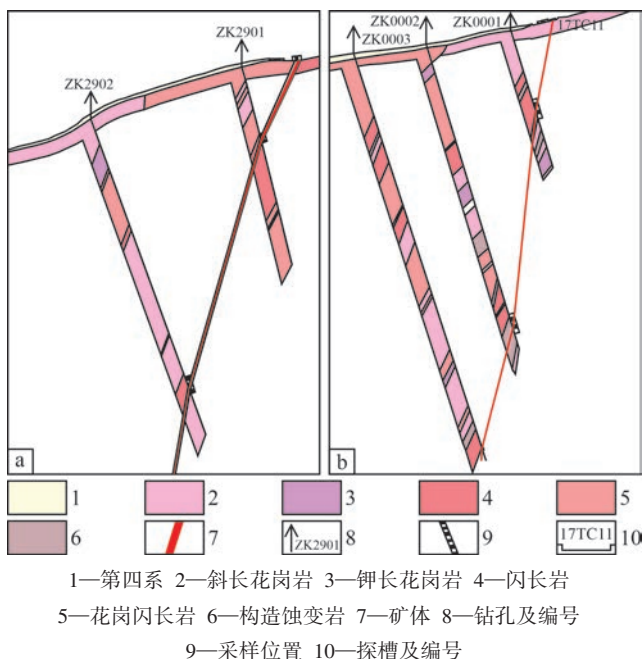


图4 色日金矿床29勘探线剖面图(a)与0勘探线剖面图(b)

Fig. 4 Cross-sections of the Seri Gold Deposit along Exploration Line 29 (a) and 0 (b)

样为研究区发育较为良好的矿体。矿体呈脉状产出，走向北北东，倾向北西，倾角 $78^{\circ} \sim 85^{\circ}$ 。Au IV-1 矿体控制长 800 m，最大控制斜深 580 m，真厚度 0.45 ~ 1.13 m，平均金品位 6.15 g/t，最高金品位 16.1 g/t。

2.2 矿石特征

通过光学显微镜对色日金矿床中的矿石成分进行观察，发现矿物组成较为简单。金属矿物以黄铁矿和毒砂为主，此外有少量黄铜矿、磁黄铁矿等(见图 5)。金属矿物生成顺序为黄铁矿、毒砂、黄铜矿、方铅矿。黄铁矿是重要的载金矿物，在矿石中分布最为广泛，主要沿岩石裂隙呈浸染状与细脉状分布，因受外力作用，部分黄铁矿具轻微破碎现象，晚期形成黄铁矿与石英和碳酸盐矿物呈脉状分布。脉石矿物主要为石英、方解石、绿泥石等。石英在热液成矿期各个阶段均有产出，常与金属矿物相伴生，后期与方解石等形成石英-碳酸盐细脉。色日金矿床矿石类型较为简单，主要为构造蚀变岩型，矿石结构以碎裂结构、自形一半自形粒状结构为主，矿石构造为浸染状构造、脉状构造和蜂窝状构造。

2.3 成矿期次与成矿阶段

根据野外地质观察，色日金矿床可划分为热液成矿期和表生成矿期。热液成矿期形成的主要矿石矿物有黄铁矿、毒砂、黄铜矿、银金矿等，脉石矿物主要有石英、绢云母、绿泥石等。根据野外穿插关系，可将热液成矿期划分为 3 个阶段：石英-黄铁矿阶段(第一阶段)、石英-多金属硫化物阶段(第二阶段)与石英-碳酸盐阶段(第三阶段)(见图 6、图 7)。表生成矿期在近地表受风化作用影响，原生金属矿物被氧化成褐铁矿和蓝铜矿等，该期成矿仅在近地表发育。

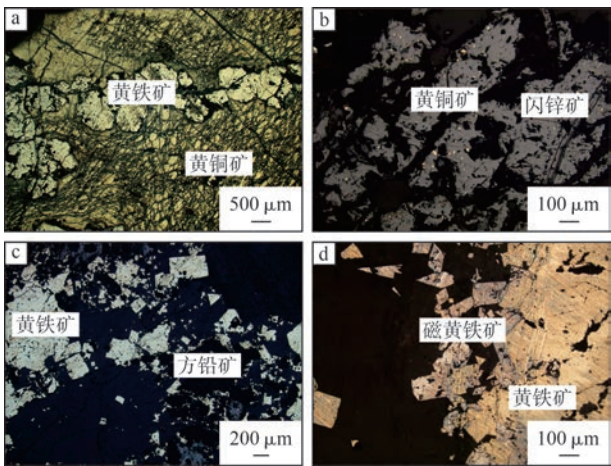


图 5 色日金矿床矿石镜下照片

Fig. 5 Microscopic images of ores from the Seri Gold Deposit

3 样品采集与测试方法

本文研究依靠主成矿阶段矿石的岩石学、矿物学及同位素地球化学的分析，样品主要来自地表探槽 22TC04、17TC11，以及钻孔 ZK2901、ZK0001。

在流体包裹体岩相学研究的基础上，对流体包裹体开展显微测温研究，确定其形成的物理化学条件及物质组成。流体包裹体测试工作在吉林大学自然资源部东北亚矿产资源评价重点实验室完成，流体包裹体岩相学研究使用仪器为德国 Zeiss Axiolab (10×50) 型显微镜，显微测温研究使用仪器为英国 Linkam THMSG-600 型冷热台，分析精度：低于 0 °C 时为 0.1 °C，温度高于 200 °C 时为 2 °C。

在核工业北京地质研究院，使用 MAT-253 质谱仪测定石英的 $\delta^{18}\text{O}$ 和流体包裹体水的 δD 。石英样品的 $\delta^{18}\text{O}$ 用 BrF_5 法进行分析，流体包裹体水的 δD 用 Zn 还原法^[21]进行分析。

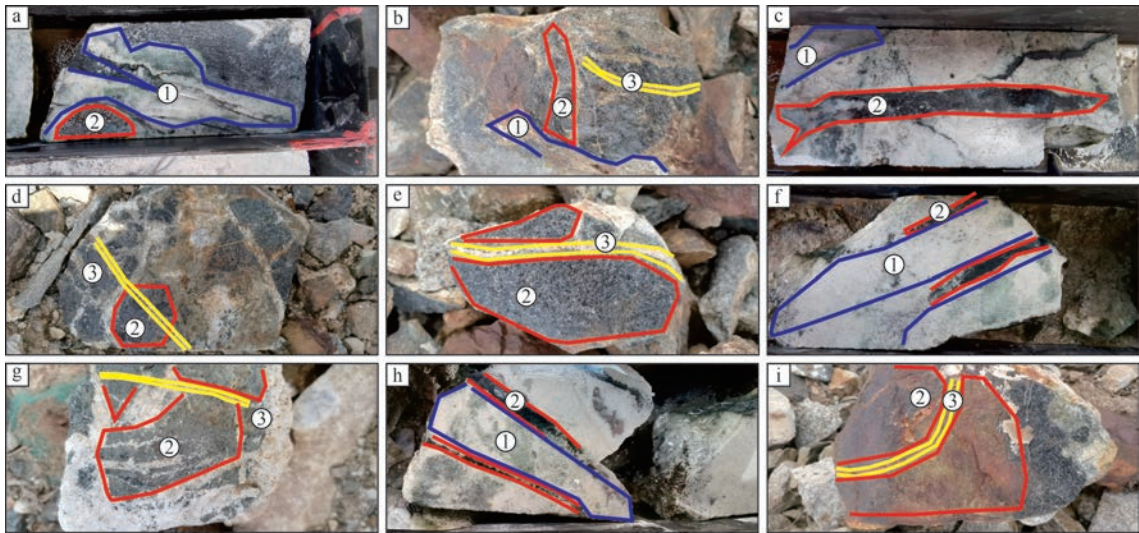


图 6 色日金矿床典型手标本照片及成矿阶段划分(①,②,③代表对应成矿阶段)

Fig. 6 Hand-marked specimen photos and metallogenic stage division of the Seri Gold Deposit

(①,② and ③ stand for corresponding metallogenic stages)

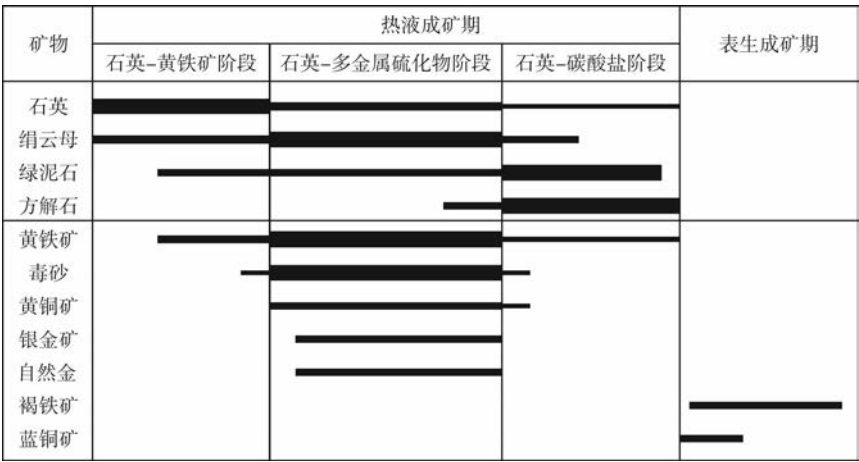


图7 色日金矿床成矿期次、阶段划分及矿物组合

Fig. 7 Division of metallogenic phases and stages, and mineral assemblages in the Seri Gold Deposit

方解石的C-O同位素分析工作在陕西地质调查实验中心完成,每个同位素样品质量大约为50 μg,采用Isoprime PrecisION IRMS(同位素比质谱仪)进行测试。 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 的分析误差分别小于0.1 ‰和0.06 ‰。

原位S同位素分析工作在北京科荟科技有限公司完成,测试仪器为Neptune Plus多接受等离子体质谱仪RESOLUTION SE 193 nm固体激光器。选择扫描后照片的合适区域,对硫化物进行点剥蚀,剥蚀直径20~30 μm,能量密度3 J/cm²,频率5 Hz。测试前,以硫化物标样为标准对仪器参数进行调试,确保其达到最佳状态。采用与样品相似的硫化物作为标样,以降低基质效应对测试结果的影响。通过使用标样-样品-标样交叉法进行质量歧视校正^[22],测试精度为0.73 ‰。

4 测试结果

4.1 流体包裹体岩相学

以热液成矿期3个阶段石英颗粒中的流体包裹体作为研究对象,主要涉及流体包裹体岩相学分析、显微测温等。通过对微观结构的分析,发现了大量不同形状的流体包裹体,以卵圆形和长条状为主,呈现紧密聚集,部分散落分布,没有明显的规律性。包裹体类型主要分为气液两相包裹体与含CO₂三相包裹体。

1)气液两相包裹体:该类包裹体在3个阶段均有大量分布,成分为气相水和液相水。包裹体粒径为5~13 μm,且以7~12 μm为主。气液两相包裹体占比为25%~55%。

2)含CO₂三相包裹体:该类包裹体主要存在于石英-黄铁矿阶段(第一阶段),成分包括气相CO₂、液相CO₂和液相水(见图8),粒径主要集中在8~12 μm。室温下二氧化碳的相界线比较模糊,最终大部分均一到液相。

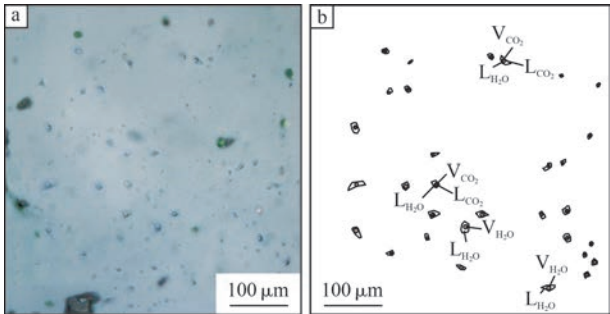


图8 不同景深下色日金矿床流体包裹体

Fig. 8 Fluid inclusions at various depths in the Seri Gold Deposit

4.2 流体包裹体完全均一温度、盐度

色日金矿床流体包裹体显微测温结果见表1。由表1可知,石英-黄铁矿阶段流体包裹体完全均一温度为308.50℃~355.10℃,平均完全均一温度为328℃,盐度为5.41%~12.31%,平均值为10.76%;石英-多金属硫化物阶段(主成矿阶段)流体包裹体完全均一温度为276.90℃~312.70℃,平均完全均一温度为292℃,盐度为7.58%~9.47%,平均值为8.40%;石英-碳酸盐阶段流体包裹体完全均一温度为248.30℃~286.60℃,平均完全均一温度为269℃,盐度为5.25%~8.81%,平均值为6.17%。

4.3 C-O同位素

对采自色日金矿床石英-碳酸盐阶段7件方解石样品进行C-O同位素分析,结果见表2。由表2可知, $\delta^{13}\text{C}$ 变化范围较小,而 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 、 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}$ 变化范围较大。其中, $\delta^{13}\text{C}$ 值为-2.97 ‰~-2.45 ‰,平均值为-2.72 ‰,极差为0.52 ‰; $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值为6.37 ‰~9.43 ‰,平均值为8.02 ‰,极差为3.06 ‰; $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}$ 值为-23.80 ‰~-20.84 ‰,平均值为-22.21 ‰,极差为2.96 ‰。

表 1 色日金矿床流体包裹体显微测温结果

Table 1 Microthermometry results of fluid inclusions in the Seri Gold Deposit

阶段	包裹体类型	数量	粒径/ μm	完全均一温度/ $^{\circ}\text{C}$	盐度/%	密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	压力/MPa	成矿深度/km
石英-黄铁矿阶段	气液两相包裹体	39	5 ~ 13	308.50 ~ 350.30	9.21 ~ 12.31	0.74 ~ 0.83	31.31 ~ 37.90	3.13 ~ 3.79
	含 CO_2 三相包裹体	27	8 ~ 15	320.70 ~ 355.10	5.41 ~ 7.48	0.80 ~ 0.89	27.55 ~ 33.27	2.75 ~ 3.33
石英-多金属硫化物阶段	气液两相包裹体	35	5 ~ 12	276.90 ~ 312.70	7.58 ~ 9.47	0.78 ~ 0.84	26.09 ~ 31.53	2.61 ~ 3.15
石英-碳酸盐阶段	气液两相包裹体	33	5 ~ 12	248.30 ~ 286.60	5.25 ~ 8.81	0.79 ~ 0.85	21.12 ~ 28.33	2.11 ~ 2.83

表 2 色日金矿床 C-O 同位素分析结果

Table 2 C-O isotope analysis results of the Seri Gold Deposit

样品编号	矿物	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}/\text{‰}$
22SR-B14-1	方解石	-2.78	8.39	-21.85
22SR-B14-2	方解石	-2.45	6.94	-23.25
22SR-B14-3	方解石	-2.63	8.69	-21.55
22SR-B14-4	方解石	-2.74	9.43	-20.84
22SR-B14-5	方解石	-2.80	9.04	-21.21
22SR-B14-6	方解石	-2.97	7.26	-22.94
22SR-B14-7	方解石	-2.66	6.37	-23.80

表 4 色日金矿床原位 S 同位素分析结果

Table 4 In-situ S isotope analysis results of the Seri

Gold Deposit

靶区编号	矿物	$\delta^{34}\text{S}/\text{‰}$
SR-1-01	黄铁矿	4.13
SR-1-02	黄铁矿	4.67
SR-1-03	黄铁矿	5.60
SR-2-01	黄铁矿	4.27
SR-2-02	黄铁矿	4.18
SR-2-03	黄铁矿	4.52

4.4 H-O 同位素

对采自色日金矿床的 4 件石英-多金属硫化物阶段石英样品进行 H-O 同位素分析,结果见表 3。由表 3 可知, δD 变化范围较大,而 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 变化范围较小。其中, δD 为 $-99.60\text{‰} \sim -78.20\text{‰}$,平均值为 -91.55‰ ,极差为 21.40‰ ; $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 为 $15.00\text{‰} \sim 15.20\text{‰}$,平均值为 15.10‰ ,极差为 0.20‰ ; $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值为 $8.11\text{‰} \sim 8.31\text{‰}$,平均值为 8.21‰ ,极差为 0.20‰ 。

表 3 色日金矿床 H-O 同位素分析结果

Table 3 H-O isotope analysis results of the Seri Gold Deposit

样品编号	$\delta\text{D}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{‰}$
23SR-B1	-93.70	15.20	8.31
23SR-B2	-78.20	15.00	8.11
23SR-B3	-94.70	15.20	8.31
23SR-B4	-99.60	15.00	8.11

4.5 原位 S 同位素

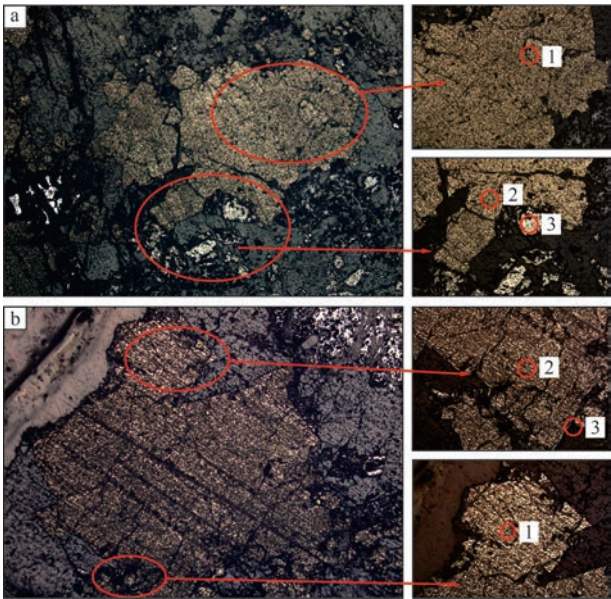
对采自色日金矿床的 6 件黄铁矿样品进行原位 S 同位素分析,结果见表 4,原位 S 同位素靶区图见图 9。由表 4 可知, $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $4.13\text{‰} \sim 5.60\text{‰}$ 。

5 讨论

5.1 成矿流体来源

5.1.1 流体包裹体分析

通过对流体包裹体显微测温结果进行分析,热液成矿期 3 个阶段流体完全均一温度分别为 $308.50\text{℃} \sim 355.10\text{℃}$ (集中在 $310\text{℃} \sim 355\text{℃}$)、 $276.90\text{℃} \sim 312.70\text{℃}$ (集中在 $280\text{℃} \sim 300\text{℃}$)、 $248.30\text{℃} \sim 286.60\text{℃}$ (集中在



a—SR-1 样品 b—SR-2 样品

图 9 原位 S 同位素靶区图(1,2,3 代表对应成矿阶段)

Fig. 9 In-situ S isotope target areas

(1,2 and 3 stand for corresponding metallogenic stages)

$250\text{℃} \sim 280\text{℃}$);盐度分别为 $5.41\text{‰} \sim 12.31\text{‰}$ (集中在 $9\text{‰} \sim 12\text{‰}$)、 $7.58\text{‰} \sim 9.47\text{‰}$ (集中在 $7\text{‰} \sim 10\text{‰}$)、 $5.25\text{‰} \sim 8.81\text{‰}$ (集中在 $5\text{‰} \sim 7\text{‰}$) (见图 10)。综合分析认为,色日金矿床成矿流体为中温、中盐度的 $\text{NaCl}-\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}$ 的流体体系。

主成矿阶段流体包裹体为气液两相包裹体,其完全均一温度为 $276.90\text{℃} \sim 312.70\text{℃}$,平均完全均一温度为 292℃ ,盐度为 $7.58\text{‰} \sim 9.47\text{‰}$,平均值为 8.40‰ ,成矿流体在演化过程中表现为温度和盐度逐

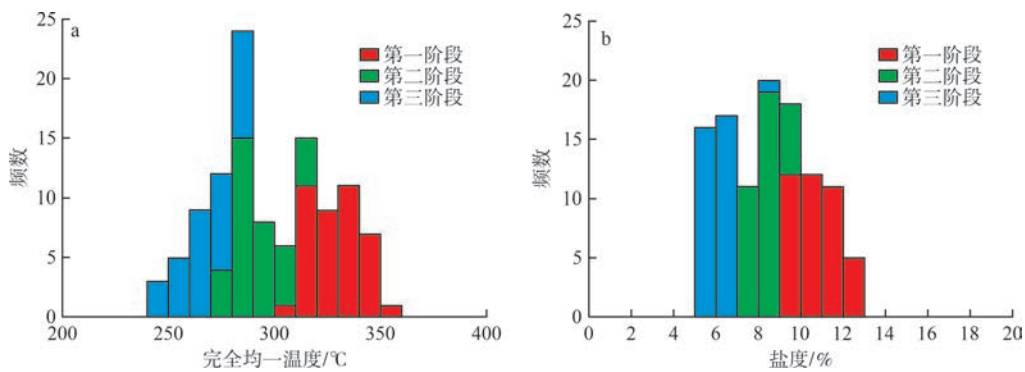


图10 色日金矿床流体包裹体完全均一温度和盐度直方图

Fig. 10 Histograms of full homogenization temperature and salinity of fluid inclusions in the Seri Gold Deposit

渐降低,而密度则略有升高。整体来看,矿区成矿流体具有中温、低盐度和低密度的特点。流体包裹体显微测温结果表明,成矿流体从早期到晚期的演化过程中,经历了温度和盐度的持续降低(见图11)。综合来看,在石英-黄铁矿阶段,流体表现出较高的温度和盐度;但随着流体逐渐上升,在石英-多金属硫化物阶段,流体的温度和压力降低导致了不混溶作用,由于不混溶作用使得富含 CO_2 的流体与原始流体发生了析出,这一过程中含金络合物的稳定性遭到了破坏,因此导致了金矿物与多种硫化物的形成;石英-碳酸盐阶段可能受大气降水-碳酸盐体系的影响,引起流体性质的进一步改变,如流体中温度和盐度进一步降低。

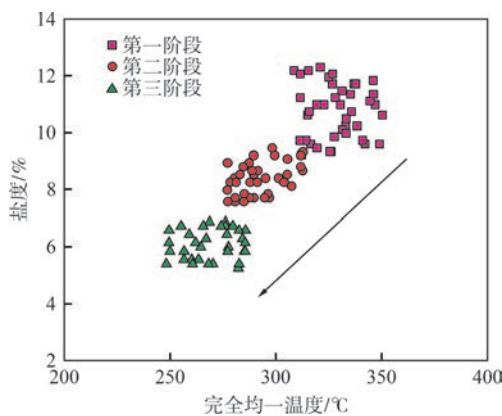


图11 色日金矿成矿流体完全均一温度与盐度双变量图

Fig. 11 Bivariate plot of full homogenization temperature and salinity of the ore-forming fluids in the Seri Gold Deposit

成矿压力和成矿深度在理解矿床成因中扮演重要角色,它不仅对于评价矿床的成矿潜力至关重要,而且也是构建矿床模型的关键要素。按照成矿压力公式 $P_1 = P_0 T_1 / T_0$, $P_0 = 219 + 2620w$, $T_0 = 374 + 920w$ (P_1 为成矿压力(MPa); P_0 为初始压力(MPa); T_1 为实测完全均一温度(°C); T_0 为初始温度(°C); w 为盐度(%))^[23]进行计算,得到压力值结果为:石英-黄铁矿阶段成矿压力为27.55~37.90 MPa,平均值为34.77 MPa;石英-多金属硫化物阶段成矿压力为26.09~31.53 MPa,平均值为28.44 MPa;石英-碳酸盐阶段成矿压力为

21.12~28.33 MPa,平均值为23.85 MPa。随着矿化的不断进行,成矿压力呈持续降低的趋势。

按照文献[24]中计算成矿深度及压力的方法,计算出色日金矿床成矿深度在石英-黄铁矿阶段为2.75~3.79 km,平均值为3.48 km;石英-多金属硫化物阶段为2.61~3.15 km,平均值为2.84 km;石英-碳酸盐阶段为2.11~2.83 km,平均值为2.38 km,属于浅成矿床。

5.1.2 C-O同位素约束

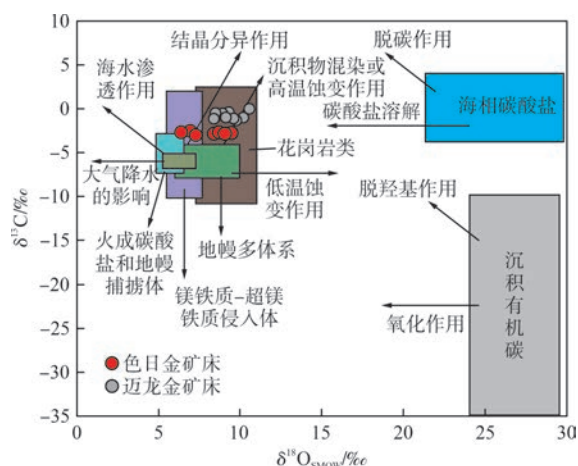
方解石在热液矿床的成矿过程中常常出现在晚期阶段,对于成矿流体的性质及演化过程方面的研究具有重要指示意义^[25]。基于此,以热液成矿期的方解石为研究对象,开展C-O同位素的测试分析,旨在为研究色日金矿床成矿流体的性质及演化过程提供理论依据。研究表明,C元素的来源主要有以下几种:①岩浆或深源物质;②海相碳酸盐;③岩体中的有机碳。其 $\delta^{13}\text{C}$ 分别为-9‰~-3‰、-4‰~4‰、-30‰~-15‰^[26-28]。

将色日金矿床矿石样品的C-O同位素测试结果投点到碳酸盐矿物的 $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 判别图解中,以此来判别矿床成矿流体的性质和演化过程,结果见图12。由图12可知,样品点主要落在了花岗岩区域附近,且总体具有向水平方向演化的趋势,表明其在成矿后期可能会受到了大气降水的影响,导致温度降低,与同地区迈龙金矿床(钱焯等,未发表数据)有着相似的流体特征。

5.1.3 H-O同位素约束

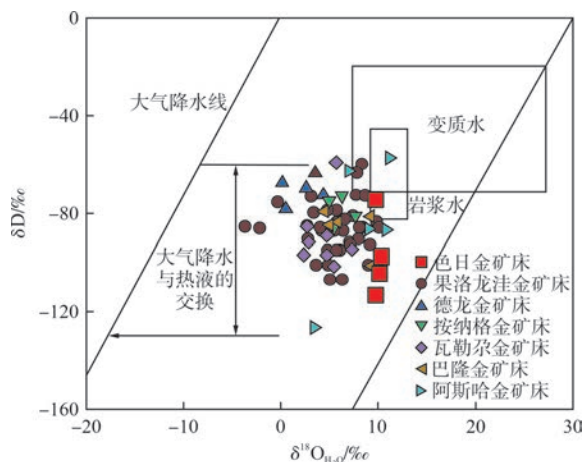
H-O同位素在用来分析成矿流体的性质与演化过程具有不可忽视的作用,在热液矿床的研究中具有重要的作用和指示意义。其中,岩浆水、变质水和大气降水具有不同的H-O同位素值,分别为 δD 为-85‰~-50‰, $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 为5.5‰~10‰; δD 为-65‰~-20‰, $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 为5‰~25‰; δD 为-190‰~-20‰, $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 为-24‰~2.0‰^[29-38]。

本文对色日金矿床热液成矿期石英-多金属硫化物阶段的石英颗粒进行了H-O同位素分析,其中, δD

图 12 色日金矿床 $\delta^{13}\text{C}-\delta^{18}\text{O}_{\text{SMO}}$ 判别图解 (据文献[29-30]改)Fig. 12 $\delta^{13}\text{C}-\delta^{18}\text{O}_{\text{SMO}}$ discrimination diagram of the Seri Gold Deposit

为 $-99.60\text{‰} \sim -78.20\text{‰}$, 利用 Clayton 的石英-水的氧同位素平衡分馏方程 ($1000\ln \alpha_{\text{矿物-水}} = 3.38 \times 10^6 T^{-2} - 3.40$) 和相对应样品中的石英流体包裹体均一温度计算 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$, 色日金矿床 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值为 $8.11\text{‰} \sim 8.31\text{‰}$ 。

色日金矿床所有矿石样品的 H-O 同位素测试结果投点于 $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 图解中, 以此来分析矿床成矿流体的性质和演化过程, 结果见图 13。由图 13 可知, 色日金矿床的主成矿阶段样品点主要落在了岩浆水的区域。结合前人对区域内典型金矿床 H-O 同位素的研究结果, 认为所有金矿床均有较为相似的 H-O 同位素组成, 投图点均位于岩浆水偏大气降水的范围内, 表明成矿流体以岩浆水为主, 在流体的演化过程中不断有大气降水的加入。其中, 果洛龙洼金矿床与阿斯哈金矿床流体的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 有升高的趋势, 表明其在成矿过程中的岩浆水比例有着逐渐上升的趋势。综合分析, 色日金矿床的成矿流体来源与区域内其他典型金矿床基本一致, 流体主要来源于岩浆水且后期有大气降水的混入。

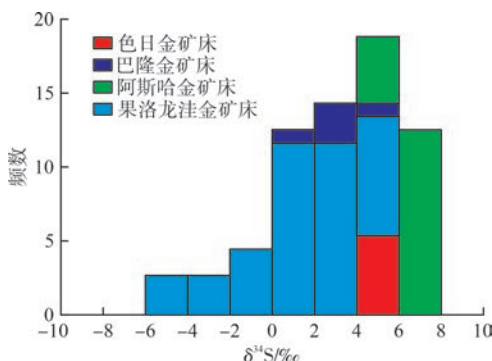
图 13 色日金矿床 $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 图解 (据文献[22]修改, 数据来自文献[11,15,33-38])Fig. 13 $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ diagram of the Seri Gold Deposit

5.2 成矿物质来源

一般认为, 矿床中金属硫化物的 S 同位素能够提供其初始含量信息, 是进行成矿物质来源示踪、研究成矿机制和矿床成因的重要手段^[39-40]。色日金矿床中金元素主要以固溶体的形式赋存于硫化物中, 因此 S 元素在金成矿作用中起到了重要作用。本文不仅对色日金矿床中黄铁矿的 S 同位素进行了分析, 并搜集了前人研究的果洛龙洼金矿床、巴隆金矿床、阿斯哈金矿床的 S 同位素分析结果进行对比。

在地球不同体系中 S 同位素的组成十分复杂, 主要有 3 种来源: ①地幔硫, 地幔是很多重要成矿物质的源区, 其 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $-3\text{‰} \sim 3\text{‰}$, 变化范围较小^[41]; ②地壳硫, 不同类型的地壳岩石具有差别较大的 S 同位素组成; ③混合硫, 该类 S 同位素具有混合来源特征。当成矿流体中含硫海水或海相硫酸盐时, 则其 $\delta^{34}\text{S}$ 值为正值; 当掺入了与陨石类似的硫同位素时, 则其 $\delta^{34}\text{S}$ 值接近 0; 当与沉积环境下的强还原性硫混合在一起时, 则其 $\delta^{34}\text{S}$ 值为负值。

色日金矿床及区域内典型金矿床金属硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 分布直方图见图 14。色日金矿床的 6 件硫化物样品的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $4.13\text{‰} \sim 5.60\text{‰}$ 。区域内的典型金矿床巴隆金矿床硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $0.7\text{‰} \sim 4.1\text{‰}$ ^[38], 果洛龙洼金矿床硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $-5.8\text{‰} \sim 5.2\text{‰}$ ^[11,42-43], 阿斯哈金矿床硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $5.0\text{‰} \sim 7.7\text{‰}$ ^[38,42]; 可以看出, 巴隆金矿床、阿斯哈金矿床、果洛龙洼金矿床与色日金矿床的 S 同位素相差较小, 且巴隆金矿床、果洛龙洼金矿床的 S 同位素主体部分略高于 0。前人研究表明, 果洛龙洼金矿床、阿斯哈金矿床和巴隆金矿床的成矿物质来源为岩浆来源, 色日金矿床的 S 同位素结果表明, 其为岩浆来源。

图 14 色日金矿床及区域内典型金矿床金属硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 分布直方图 (数据来自文献[11,37-38,42-43])Fig. 14 Histograms of metal sulfide $\delta^{34}\text{S}$ distribution in the Seri Gold Deposit and regional typical gold deposits

5.3 矿床成因

前人已经针对东昆仑造山带的成岩、成矿年龄开展了大量工作, 东昆仑造山带内金矿床成矿时间集中

于中一晚三叠世(200~240 Ma)^[33,44-47]与泥盆纪—石炭纪(320~420 Ma)^[13],分别对应古特提斯洋和原特提斯洋的演化^[38]。色日金矿床的主要赋矿围岩花岗岩的锆石 U-Pb 年龄为 223 Ma(钱烨,未发表数据)。巴隆金矿床、阿斯哈金矿床及瓦勒杂金矿床均以印支期中酸性侵入岩为赋矿围岩,成矿时间位于中一晚三叠世。该段时间中,由于古特提斯洋的俯冲及后续的碰撞、后碰撞过程,东昆仑造山带整体处于伸展的构造背景,产生了一系列北西向—东西向构造,矿液沿构造薄弱带上涌,形成各类金矿。

色日金矿床位于东昆仑造山带的沟里金多金属矿整装勘查区内,矿区内发育了大量印支期花岗岩,主要发育北北东向与近东西向断裂。色日金矿床赋矿围岩主要为晚三叠世花岗岩闪长岩,控矿构造为北北东向断裂,矿体呈脉状产于北北东向构造蚀变带中,构造蚀变带是矿液运移的通道和矿质沉淀的场所;矿床的形成与岩浆活动有着非常密切的关系,其为矿体的形成提供了物质来源与热源。根据野外穿插关系,将热液成矿期划分为 3 个阶段:石英—黄铁矿阶段、石英—多金属硫化物阶段与石英—碳酸盐阶段。表生成矿期在近地表受风化作用影响,原生金属矿物被氧化成褐铁矿和蓝铜矿等。该期成矿仅在近地表发育。

色日金矿床在石英—多金属硫化物阶段(主成矿阶段)流体包裹体完全均一温度为 276.90℃~312.70℃,平均完全均一温度为 292℃,盐度为 7.58%~9.47%,平均值为 8.40%,总体上为中温、中盐度的流体,成矿深度为 2.61~3.15 km,平均值为 2.84 km,属于浅成矿床。色日金矿床 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -2.97‰~-2.45‰, $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值为 6.37‰~9.43‰,表明其可能受到外在因素影响,其总体均显示在岩浆岩的区域内,且显示为水平的曲线,其后期受到大气降水的影响,导致温度降低并发生部分低温蚀变; δD 值为 -99.60‰~-78.20‰, $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值为 8.11‰~8.31‰,成矿流体来自于深部岩浆水; $\delta^{34}\text{S}$ 值为 4.13‰~5.60‰,其来源较为稳定,暗示成矿环境稳定, $\delta^{34}\text{S}$ 值接近岩浆来源的硫的变化范围,表明色日金矿床成矿过程中的硫主要来自于岩浆。综合分析认为,色日金矿床主要为热液成矿作用,成矿流体为中温、中盐度流体,成矿物质主要来源于岩浆,矿床成因类型为中温热液脉型金矿床。

6 结 论

1) 色日金矿床受构造控制,热液成矿期为主要成矿期,可分为石英—黄铁矿阶段、石英—多金属硫化物阶段与石英—碳酸盐阶段。

2) 色日金矿床成矿主成矿期的流体温度为 276.90℃~312.70℃,盐度为 7.58%~9.47%,总体表

现为中温、中盐度的体系特征,成矿深度估算为 2.84 km,为浅成矿床。

3) C-H-O 同位素及原位 S 同位素研究结果表明,成矿流体主要来源于岩浆水,成矿物质主要来源于岩浆。

4) 色日金矿床为中温热液脉型金矿床。

[参 考 文 献]

- [1] 许志琴,杨经绥,李海兵,等.中央造山带早古生代地体构架与高压/超高压变质带的形成[J].地质学报,2006,80(12):1793-1806.
- [2] 孙丰月,陈国华,迟效国,等.新疆—青海东昆仑成矿带成矿规律和找矿方向综合研究报告[R].长春:吉林大学地质调查研究院,2003.
- [3] DONG Y P, HE D F, SUN S S, et al. Subduction and accretionary tectonics of the East Kunlun orogen, western segment of the Central China Orogenic System[J]. Earth-Science Reviews, 2018, 186(1): 231-261.
- [4] 杨宝荣,张里斌,马忠贤,等.青海沟里地区金矿床地质背景研究[J].矿产勘查,2018,9(10):1920-1925.
- [5] 何俊江,张志强,李世恩,等.青海省色日金矿地质特征与找矿标志研究[J].中国锰业,2018,36(5):124-127,132.
- [6] 杨经绥,许志琴,马昌前,等.复合造山作用和中国中央造山带的科学问题[J].中国地质,2010,37(1):1-11.
- [7] DENG J, WANG Q F. Gold mineralization in China: Metallogenic provinces, deposit types and tectonic framework [J]. Gondwana Research, 2016, 36: 219-274.
- [8] 吴胜宝,孙国胜,李雪,等.青海沟里地区斜长角闪岩锆石 U-Pb 年代学、Lu-Hf 同位素特征及其指示意义[J].吉林大学学报(地球科学版),2024,54(3):862-876.
- [9] 张先福,吴树宽,赵立志,等.青海省都兰县哈图稀土矿床地质特征及成矿模式[J].黄金,2023,44(12):71-76,81.
- [10] 雷恩,韩世炯,庞小朋,等.青海省格尔木市妥拉海河超大型石墨矿床地球化学特征及其成因探讨[J].吉林大学学报(地球科学版),2023,53(3):853-865.
- [11] 王卓一,孙九达,张志强,等.青海省都兰县色日金银矿床地质、化探异常特征及地质意义[J].黄金,2023,44(2):73-77,94.
- [12] 莫宣学,罗照华,邓晋福,等.东昆仑造山带花岗岩及地壳生长[J].高校地质学报,2007,13(3):403-414.
- [13] 陈加杰.东昆仑造山带东端沟里地区构造岩浆演化与金成矿[D].武汉:中国地质大学(武汉),2018.
- [14] 国显正.东昆仑东段古特提斯中酸性岩浆活动与多金属成矿作用[D].武汉:中国地质大学(武汉),2020.
- [15] 赵旭.东昆仑造山带沟里地区构造岩浆转换与金成矿作用[D].武汉:中国地质大学(武汉),2020.
- [16] 王凤林.东昆仑东段阿斯哈—瓦勒杂地区金成矿机制研究及综合信息成矿预测[D].武汉:中国地质大学(武汉),2023.
- [17] 张纪田,张志强,孙国胜,等.青海沟里整装勘查区金矿成矿要素及预测意义[J].黄金,2021,42(7):11-16.
- [18] 王晓云,马忠贤,李文君,等.青海省沟里地区金矿地质特征及控矿因素分析[J].中国锰业,2017,35(6):45-48,54.
- [19] 付乐兵,魏俊浩,谭俊,等.东昆仑沟里整装勘查区脉状金矿床多级构造控矿规律[J].矿物学报,2015,35(增刊1):388-389.
- [20] 马冬,孙国胜,李雪,等.青海省都兰县沟里地区金矿床地质特征及成因[J].黄金,2022,43(11):13-18.
- [21] COLEMAN M L, SHEPHARD T J, DURHAM J J, et al. Reduction of water with zinc for hydrogen isotope analysis[J]. Analytical Chemistry, 1982, 54(6): 993-995.
- [22] YANG J J, YANG X K, LI J B, et al. Constraints on the genesis of the Shuangwang gold deposit in Qinling Orogen, central China: Evidence from in situ trace element and sulfur isotope [J]. Minerals, 2022, 12(8): 995.
- [23] 邵洁涟.金矿找矿矿物学[M].北京:中国地质大学出版社,

- 1988.
- [24] 张吉宽.脉状热液金矿垂向分带及深部预测(二)——垂向分带机理及深部预测[J].黄金地质,2000,6(4):46-52.
- [25] TAYLOR B E. Magmatic volatiles: Isotopic variation of C, H, and S[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 1986, 16(1): 185-225.
- [26] OHMOTO H. Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits[J]. Economic Geology, 1972, 67(5): 551-578.
- [27] VEIZER J, HOLSER W T, WILGUS C K. Correlation of $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ and $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$ secular variations [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1980, 44(4): 579-587.
- [28] 刘家军,何明勤,李志明,等.云南白秧坪银铜多金属矿集区碳氧同位素组成及其意义[J].矿床地质,2004,23(1):1-10.
- [29] 刘建明,刘家军,顾雪祥.沉积盆地中的流体活动及其成矿作用[J].岩石矿物学杂志,1997,16(4):341-352.
- [30] 孙景贵,胡受奚,沈昆,等.胶东金矿区矿田体系中基性—中酸性脉岩的碳、氧同位素地球化学研究[J].岩石矿物学杂志,2001,20(1):47-56.
- [31] 郑淑蕙,侯发高,倪葆龄.我国大气降水的氢氧稳定同位素研究[J].科学通报,1983,28(13):801-806.
- [32] TAYLOR H P. The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problems of hydrothermal alteration and ore deposition [J]. Economic Geology, 1974, 69(6): 843-883.
- [33] 肖晔,丰成友,李大新,等.青海省果洛龙洼金矿区年代学研究及流体包裹体特征[J].地质学报,2014,88(5):895-902.
- [34] 王冠.青海果洛龙洼金矿床地质特征及成因探讨[D].长春:吉林大学,2012.
- [35] 丁清峰,金圣凯,王冠,等.青海省都兰县果洛龙洼金矿成矿流体[J].吉林大学学报(地球科学版),2013,43(2):415-426.
- [36] 陶斤金.青海省安纳格金矿流体包裹体特征及矿床成因研究[D].长沙:中南大学,2014.
- [37] 黄啸坤.东昆仑巴隆—沟里地区金成矿作用与综合信息成矿预测[D].武汉:中国地质大学(武汉),2021.
- [38] 李碧乐,沈鑫,陈广俊,等.青海东昆仑阿斯哈金矿 I 号脉成矿流体地球化学特征和矿床成因[J].吉林大学学报(地球科学版),2012,42(6):1 676-1 687.
- [39] 曹国雄,高太忠,吴有民.堡子湾金矿同位素及稀土元素地球化学研究[J].地质地球化学,2000,28(1):10-15.
- [40] 杨毅.西藏冈底斯成矿带典型矿床硫同位素地球化学特征[D].成都:成都理工大学,2012.
- [41] CHAUSSIDON M, LORAND J P. Sulphur isotope composition of orogenic spinel lherzolite massifs from Ariège (North-Eastern Pyrenees, France): An ion microprobe study [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1990, 54(10): 2 835-2 846.
- [42] 岳维好.东昆仑东段沟里金矿集区典型矿床地质地球化学及成矿机理研究[D].昆明:昆明理工大学,2013.
- [43] 胡荣国,赖健清,张绍宁,等.青海省都兰县果洛龙洼金矿床地质地球化学特征[J].地质与勘探,2008,46(5):931-941.
- [44] 韩梓衡,韩世炯,曹成刚,等.青海贵德盆地扎仓沟花岗闪长岩成因及其地质意义——锆石 U-Pb 年龄、岩石地球化学及 Hf 同位素制约[J].吉林大学学报(地球科学版),2023,53(1):177-195.
- [45] 赵立翔,丁正江,张琪彬,等.胶东地区中生代花岗岩年代学、地球化学特征及与金银多金属成矿的关系[J].黄金,2024,45(4):57-64.
- [46] 刘晓敏,于森,李金涛,等.胶东石家金矿床成矿流体特征及矿床成因[J].黄金,2024,45(9):74-80.
- [47] 王学阳,杨言辰,刘志宏,等.长江中下游成矿带大金山地区综合信息找矿效果及深部找矿潜力分析[J/OL].吉林大学学报(地球科学版),1-16[2024-08-19]. <https://doi.org/10.13278/j.cnki.jjuese.20230239>.

Geological characteristics and genesis of the Seri Gold Deposit in the eastern part of the East Kunlun orogenic belt

Zhang Jian¹, Zhang Zhenghu², Li Xiaoliang³, Yang De⁴, Yu Xiaoliang⁵, Li Hua⁵, Qian Ye¹

(1. College of Earth Sciences, Jilin University;

2. The Third Geological Exploration Institute, Qinghai Nonferrous Metal Geological and Minerals Exploration Bureau;

3. Qinghai Nonferrous Geological Mineral Resources Exploration Bureau;

4. The First Geological Exploration Institute, Qinghai Nonferrous Metal Geological and Minerals Exploration Bureau;

5. Qinghai Geological Survey)

Abstract: The Seri Gold Deposit is located in the Kunzhong granite uplift belt of the East Kunlun orogenic belt and belongs to the Gouli gold polymetallic integrated exploration area. The main host rocks of the Seri Gold Deposit are Indosinian and Variscan intermediate-acidic intrusive rocks, and the mineralization is primarily controlled by NNE-trending faults. Host rock alterations include silicification, sericitization, chloritization, carbonation, and kaolinization. Based on field crosscutting relationships, the hydrothermal mineralization period is divided into 3 stages: quartz-pyrite stage, quartz-polymetallic sulfide stage, and quartz-carbonate stage. Microthermometric analysis of fluid inclusions indicates that the full homogenization and salinities are as follows: 308.50 °C–355.10 °C and 5.41 %–12.31 % during the quartz-pyrite stage, 276.90 °C–312.70 °C and 7.58 %–9.47 % during the quartz-polymetallic sulfide stage, and 248.30 °C–286.60 °C and 5.25 %–8.81 % during the quartz-carbonate stage. Comprehensive analyses suggest that the ore-forming fluid of the Seri Gold Deposit is a medium temperature, medium salinity NaCl–CO₂–H₂O system. C–H–O isotopic analysis of quartz and calcite from the mineralization stages indicates that the fluid was predominantly magmatic water, with late-stage contributions from meteoric water. In-situ S isotopic analysis shows that the ore-forming materials primarily originated from magmatic rocks. The Seri Gold Deposit is classified as a medium temperature hydrothermal vein-type gold deposit controlled by tectonics and deep magmatic activity.

Keywords: East Kunlun orogenic belt; Gouli; Seri Gold Deposit; fluid characteristics; C–H–O isotope; in-situ S isotope; medium-temperature hydrothermal vein type