

https://doi.org/10.3799/dqkx.2021.101



宁夏卫宁北山金场子金矿床流体来源及矿床成因:来自流体包裹体和 C-H-O 同位素证据

海连富^{1,2,3}, 刘安璐^{4*}, 陶瑞³, 白金鹤³, 宋扬³

1. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074
2. 固体矿产勘查国家级实验教学示范中心, 湖北武汉 430074
3. 宁夏回族自治区矿产地质调查院, 宁夏银川 750021
4. 中国地质大学逸夫博物馆, 湖北武汉 430074

摘要: 卫宁北山地区是宁夏境内最有望实现找矿突破的多金属矿成矿区之一, 已发现众多 Au、Ag、Cu、Pb、Zn、Fe、Co 等矿点或矿化点。金场子金矿是该地区已发现的最大的金矿床, 矿体主要赋存在前黑山组及中宁组内的层间断裂破碎带中, 呈东西向带状分布, 产状与地层近乎一致。区域上除少量闪长玢岩脉出露外, 岩浆岩不发育。为了探讨金场子金矿成矿流体性质、来源和矿床成因, 对研究区流体包裹体和 C-H-O 同位素进行了研究。金场子金矿床成矿热液期可划分为 4 个成矿阶段, 从早到晚分别是绢云母-黄铁矿-石英阶段(I)、黄铁矿-重晶石-石英阶段(II)、多金属硫化物-碳酸盐-石英阶段(III)和黄铁矿-碳酸盐阶段(IV), 其中 III 阶段为主成矿阶段。不同成矿阶段的流体包裹体有 4 种类型, 分别是水溶液包裹体、纯 CO₂ 包裹体、CO₂-H₂O 包裹体和含子晶多相包裹体。显微测温结果显示, 成矿流体的完全均一温度介于 171~396 °C, 主要集中于 180~270 °C, 盐度介于 1.30%~10.99% NaCl equiv, 密度为 0.24~0.78 g/cm³, 为中低温、低盐度、低密度的 CO₂-H₂O-NaCl 体系, 含有少量 N₂。热液期石英的 δD 值为 -66.0‰~-32.0‰, δ¹⁸O_{V-SMOW} 值为 +19.7‰~+22.6‰, 指示成矿流体为变质流体。C 同位素显示, 晚阶段(IV)方解石和菱铁矿的 δ¹³C 介于 -2.540‰~-0.736‰, 表明成矿流体中的 C 具有混合来源的特点, 奥陶系-石炭系陆源碎屑岩和碳酸盐岩的变质脱水作用形成的流体可能是金成矿流体的主要来源。成矿过程中流体发生了明显的不混溶现象, 是造成金沉淀的重要因素。矿床成因类型属造山型金矿。

关键词: 稳定同位素; 成矿流体来源; 矿床成因; 流体包裹体; 金场子金矿床; 卫宁北山。

中图分类号: P618

文章编号: 1000-2383(2021)12-4274-17

收稿日期: 2021-04-03

Source of Fluid and Genesis of Jinchangzi Gold Deposit in Weiningbeishan, Ningxia: Evidence from Fluid Inclusions and C-H-O Isotopes

Hai Lianfu^{1,2,3}, Liu Anlu^{4*}, Tao Rui³, Bai Jinhe³, Song Yang³

1. School of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
2. National Demonstration Center for Experimental Mineral Exploration Education, Wuhan 430074, China
3. Mineral and Geological Survey Institute of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750021, China
4. Yifu Museum of China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

基金项目: 宁夏回族自治区重点研发计划重大(重点)项目(No.2018BFG02013); 宁夏优秀人才支持计划项目(No.JTGC2019023); 宁夏自然科学基金项目(No.2021AAC03447)。

作者简介: 海连富(1989-), 男, 工程师, 博士研究生, 矿产普查与勘探专业。ORCID: 0000-0001-8149-4484. E-mail: hailianfu@163.com

* **通讯作者:** 刘安璐, E-mail: 3515669203@qq.com

引用格式: 海连富, 刘安璐, 陶瑞, 等, 2021. 宁夏卫宁北山金场子金矿床流体来源及矿床成因: 来自流体包裹体和 C-H-O 同位素证据. 地球科学, 46(12):4274-4290.

Abstract: The Weiningbeishan area is the most promising polymetallic ore target area in Ningxia, where numerous Au, Ag, Cu, Pb, Zn, Fe, Co, and other ore occurrences have been found. The Jinchangzi gold deposit is the largest gold deposit found in the area, and the ore bodies are mainly hosted in the intra-layer fault fractures, with an east-west distribution and near-uniform with the bedding. Magmatism is weak in this district, with several diorite porphyrite having been identified in exposures adjacent to the gold veins. In order to explore the nature, source and genesis of the ore-forming fluid of the Jinchangzi gold deposit, the fluid inclusions and C-H-O isotopes in the study area were studied. The ore-forming hydrothermal period of the deposit can be divided into 4 metallogenic stages, from early to late, they are sericite-pyrite-quartz stage (I), pyrite-barite-quartz stage (II), polymetallic sulfide-carbonate-quartz stage (III) and pyrite-carbonatite stage (IV), of which stage III is the main metallogenic stage. There are four types of fluid inclusions in the mineralization stage, which are aqueous solution inclusions, pure CO₂ inclusions, CO₂-H₂O inclusions and multiphase inclusions containing daughter crystals. The completely homogenous temperature of the ore-forming fluids is between 171–396 °C, the salinity is between 1.30%–10.99% NaCl equiv, and the density is 0.24–0.78 g/cm³, which are CO₂-H₂O-NaCl systems with medium-low temperature, low salinity, low density, CO₂ rich, and a small amount of N₂. The δD value of hydrothermal quartz is –66.0‰ to –32.0‰, and the δ¹⁸O_{V-SMOW} value is (+19.7‰)–(+22.6‰), indicating that the ore-forming fluid is metamorphic and the magmatism is not obvious. The C isotope shows that the δ¹³C of calcite and siderite in the late stage (stage IV) is between –2.540‰ and –0.736‰, indicating that C in the ore-forming fluid has the characteristics of mixed sources. The fluids formed by the metamorphic dehydration of Ordovician-Carboniferous terrigenous clastic rocks and carbonate rocks may be the main source of gold ore-forming fluids. During the ore-forming process, the fluids had an obvious immiscibility phenomenon, which was an important factor causing gold precipitation. The genetic type of the deposit is an orogenic gold deposit.

Key words: stable isotope; source of ore-forming fluid; genesis of ore deposit; fluid inclusions; Jinchangzi gold deposit; Weiningbeishan.

0 引言

卫宁北山地区位于宁夏中西部,大地构造位置位于北祁连造山带东段,北与华北陆块的阿拉善地块相接,东与鄂尔多斯地块毗邻(图 1a),属构造活动带与稳定地块交接部位的构造活动带边缘(霍福臣等,1989;翟裕生等,1999;潘桂棠等,2016;宁夏回族自治区地质调查院,2017)。该地区工作最早可追溯到 20 世纪 50 年代末,经过多轮系统性勘查工作,目前已发现包括金场子金矿、二人山铅银矿、黄石坡沟金矿、照壁山铁矿、新照壁山铁铜矿、大铜沟铜钴矿等在内的众多小型矿床或矿点(图 1b),以及多处物化探异常区,是宁夏境内多金属矿成矿条件最好、成矿迹象最多的地区之一(宋新华等,2010;尹秉喜等,2012;刘志坚,2013;吴文忠等,2013;王美芳,2015;李净等,2018;仲佳鑫等,2018;马秀军等,2018;海连富等,2020)。金场子金矿是卫宁北山地区最大的金矿床,其在 20 世纪 80 年代就有大量的金被采出,累计探明资源量已超过 2 t。

前人对金场子金矿床做了一系列研究工作,取得了不少成果(徐国风,1988;邱朝霞,1989;刘勇等,2010;艾宁等,2011;仲佳鑫等,2012;艾宁,2014;朱丹等,2015),但对于矿床成因还存在较大

争议。最早徐国风(1988)认为,金矿主要与石炭纪和泥盆纪沉积地层有关,成矿物质主要来源于围岩,为渗流热卤水—表生改造型金矿床。刘勇等(2010)和艾宁等(2011)通过采取地表与金矿关系密切的闪长玢岩脉,利用锆石 U-Pb 年代学方法获取了其年龄,分别为 147.2 ± 2.3 Ma 和 143~150 Ma,认为金矿主要与闪长玢岩脉有关,推测在研究区深部可能存在一个规模较大的中酸性岩体,该岩体就是金矿的矿源和中心。艾宁(2014)通过金矿流体包裹体研究认为,成矿流体为低密度、较高盐度、中—低温度、富 CO₂ 的 H₂O-CO₂-NaCl 流体,主要以大气降水为主,并混合了层间水。对矿床成因认识的不足直接影响到金矿的找矿突破以及下一步工作方向。为此,本文在详细野外工作基础上,对其矿物流体包裹体及 C-H-O 同位素进行了系统研究,探讨了金矿成矿流体性质、来源及矿床成因。

1 区域地质背景

如前所述,卫宁北山地区在大地构造位置上隶属于北祁连造山带东段,北接华北陆块的阿拉善地块南缘,东接鄂尔多斯地块西缘,为构造活动带与

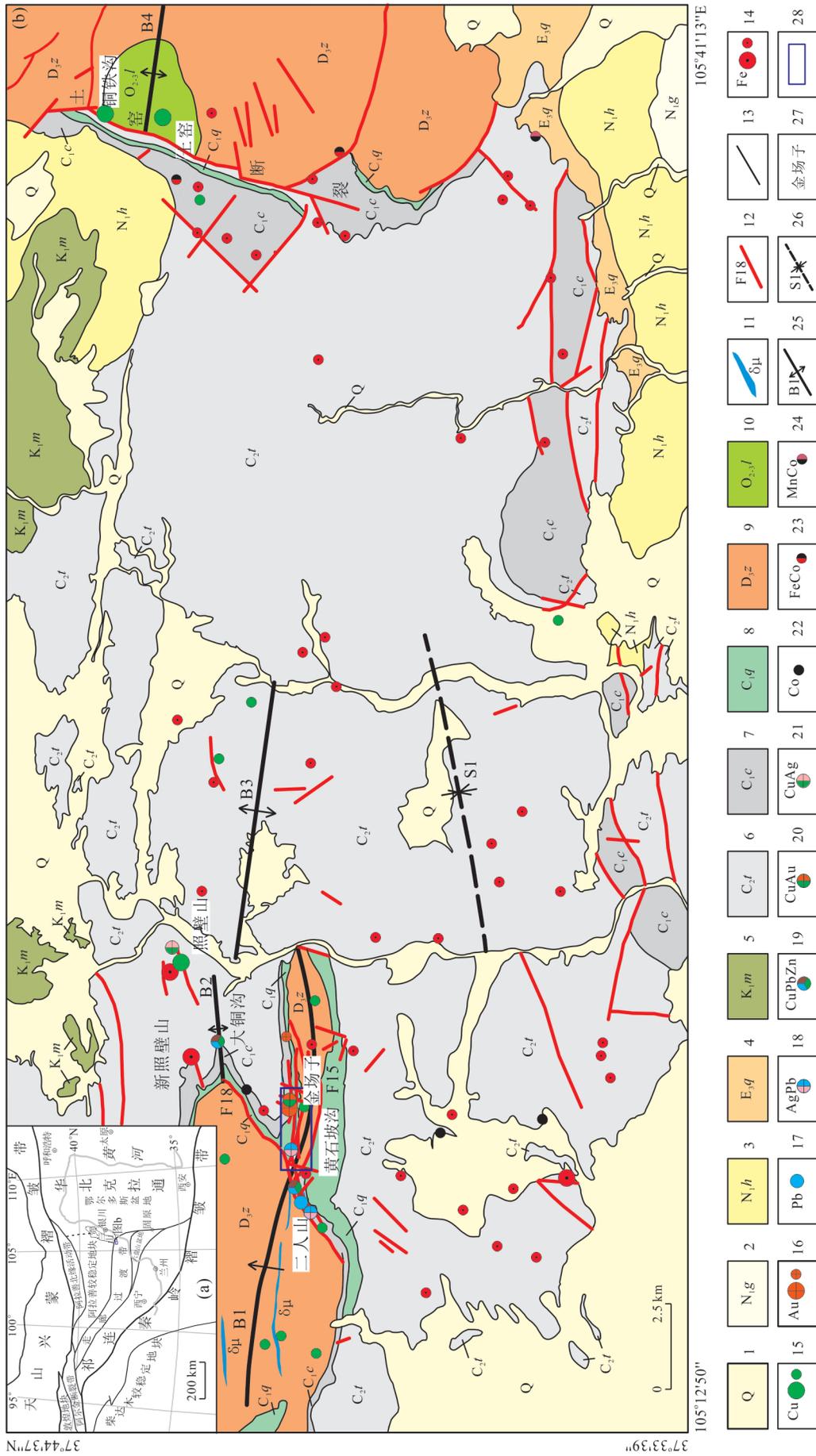


图 1 研究区大地构造位置(a)与区域地质及矿床(点)空间分布图(b)

Fig. 1 Tectonic location (a), regional geology and spatial distribution (b) maps of mineral deposits (points) in the study area

1. 第四系; 2. 新近纪干河沟组; 3. 新近纪红柳沟组; 4. 古近纪清水营组; 5. 白垩纪庙湖山组; 6. 石炭纪臭牛沟组; 7. 石炭纪土坡组; 8. 石炭纪前黑山组; 9. 泥盆纪中宁组; 10. 奥陶纪狼嘴子组; 11. 内长岭岩脉; 12. 断裂/断层及编号; 13. 地质界线; 14. 铁矿床(点); 15. 铜矿床(点); 16. 金矿床(点); 17. 铅矿点; 18. 银、铅、锌矿点; 19. 铜、铅、锌矿点; 20. 铜、金矿点; 21. 铜、金矿点; 22. 铜、银、铅、锌矿点; 23. 铁、钴矿化点; 24. 铁、钴矿化点; 25. 背斜轴及编号; 26. 向斜轴及编号; 27. 地名; 28. 金矿区位置; a. 据霍福臣等(1989), 郭佩等(2017) 修编; b. 据海连富等(2020) 修编

稳定地块的过渡部位(图 1a). 该区出露的地层主要为古生界, 其次为中、新生界. 早古生代本区在海侵作用下形成了深海相、半深海相、陆源碎屑物和泥质沉积. 早古生代石炭纪—二叠纪—中生代三叠纪本区连续沉积, 自下而上划分为前黑山组、臭牛沟组、土坡组、太原组、大黄沟组、红泉组和五佛寺组, 其中前黑山组、臭牛沟组为泻湖相—潮坪相沉积, 岩性主要为砾岩、砂岩、泥岩和砂岩、粉砂岩、泥岩组合, 是研究区主要的赋矿地层单元(图 1b).

区域上岩浆活动较弱, 仅在苦井沟、黄石坡沟、二人山、金场子等地零星分布闪长玢岩脉, 侵入于上泥盆统中宁组、下石炭统前黑山组和臭牛沟组之中. 脉体宽 1~6 m, 长数十至数百米, 规模大者多呈近东西向展布. 岩石普遍发生绿泥石化、绢云母化、高岭土化蚀变. 锆石 U-Pb 年代学研究获得的成岩年龄在 143~150 Ma(刘勇等, 2010; 艾宁, 2014).

卫宁北山地区是一个多构造复合区, 区域构造主体形迹以东西向为主, 发育一系列具弧形弯曲的倾斜复式背、向斜, 轴长 5~28 km, 宽数公里. 与矿化关系密切的褶皱为单梁山—骆驼山复式背斜. 区内断裂构造的走向在东西部略有差异, 西部以东西

向或近东西向为主, 东部以北西向、南北向为主, 多为走滑性质的逆冲断层.

2 矿区地质特征

矿区范围内出露的地层主要为上泥盆统中宁组、下石炭统前黑山组和臭牛沟组, 以及上石炭统土坡组(图 2). 中宁组为一套内陆湖泊相碎屑岩沉积, 岩性包括细粒石英砂岩、钙质细粒砂岩、泥质粉砂岩、泥晶灰岩、泥质粉砂质白云岩等. 前黑山组为一套滨浅海相—泻湖相陆源碎屑岩和碳酸盐岩沉积, 主要由石英质砾岩、石英砂岩、粉砂岩、灰岩、白云岩及石膏组成. 臭牛沟组下段以陆源碎屑岩和泥岩发育为特征, 上段则以泥页岩和灰岩发育为特征, 总体构成一个由陆源碎屑岩—碳酸盐岩组成的退积型沉积旋回. 土坡组主要出露在黄石坡沟—金场子背斜的两翼, 主要岩性为钙质石英砾岩、钙质粉砂岩、硅化石英砂岩. 地表见少量闪长玢岩脉出露, 脉岩侵入于中宁组、前黑山组及臭牛沟组地层中.

矿区主体构造线方向为近东西向, 构造形迹以褶皱、断裂为主. 近东西向的黄石坡沟—金场子复

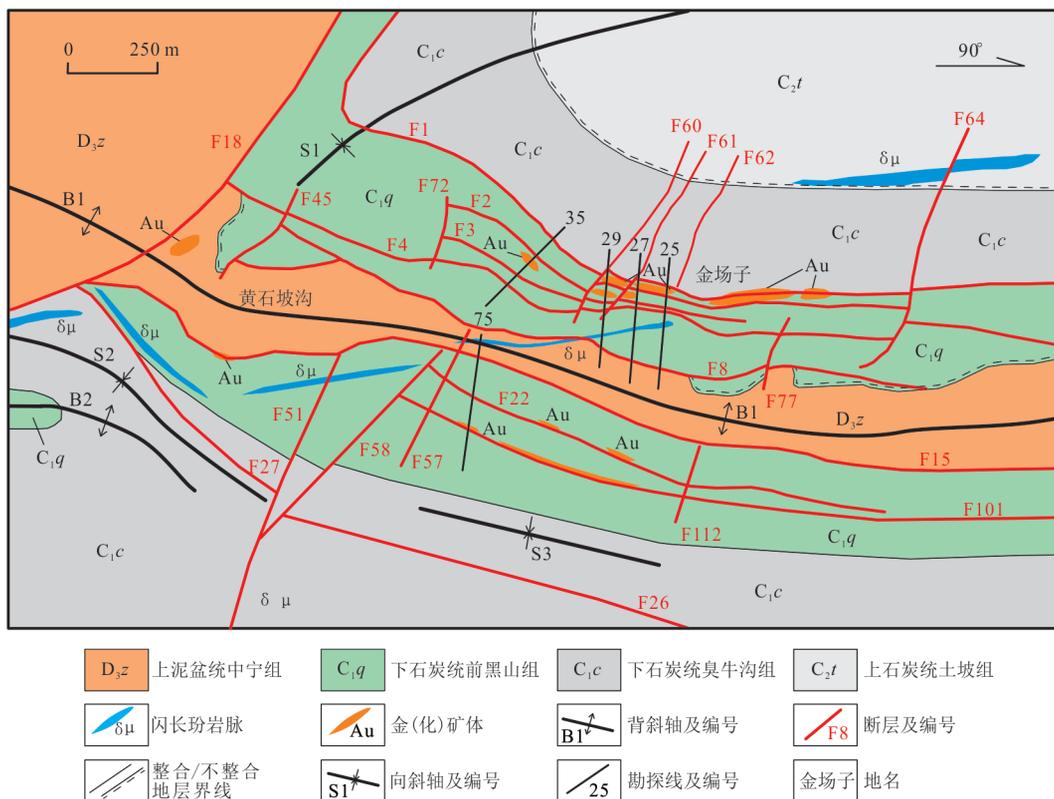


图 2 金场子金矿区地质简图(据艾宁, 2014 修编)

Fig. 2 Geological sketch map of Jinchangzi gold mining area (modified from Ai, 2014)

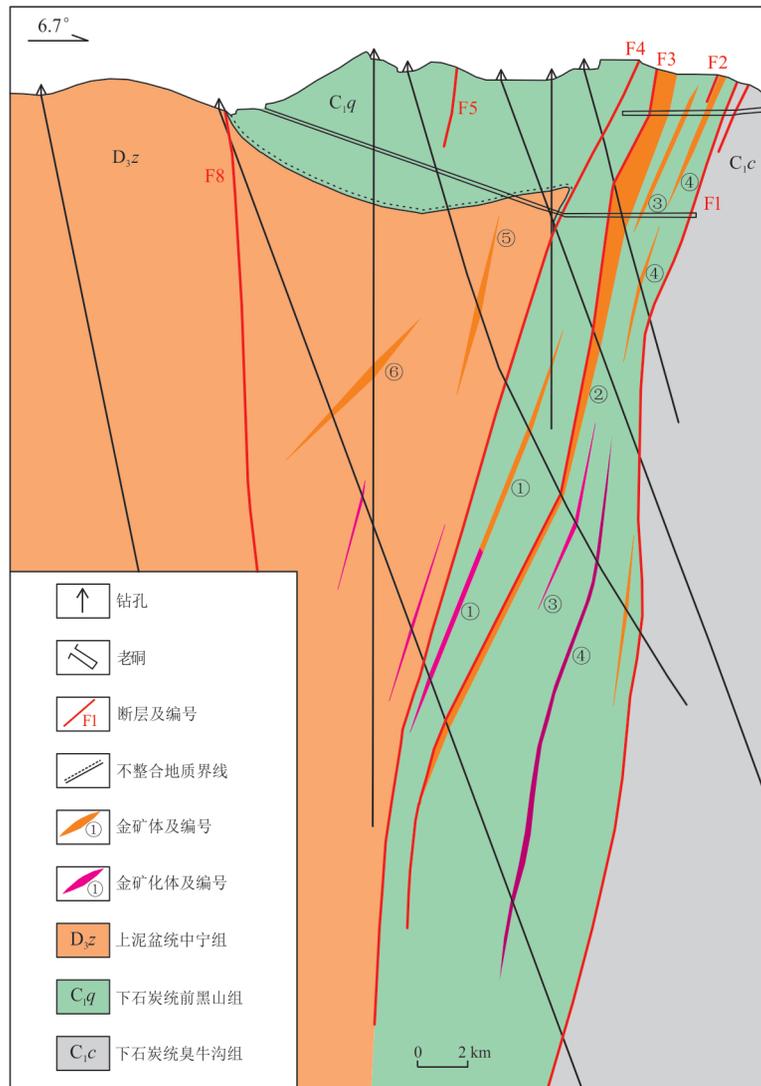


图3 25号勘探线剖面示意图

Fig.3 Schematic diagram of the cross-section of the No.25 exploration line
金矿化体圈定指标为0.5 g/t金品位;金矿体为1.0 g/t金品位;勘探线位置见图2

式背斜是矿区范围内的一级褶皱,枢纽近水平,核部地层受挤压应力较强导致产状近直立,向两翼逐渐变缓.该复式背斜两翼发育有黄石坡沟南带背斜、大铜沟向斜、金场子南带向斜、黄石坡沟南带向斜.矿区内断裂构造十分发育,以近EW向压扭性逆断层为主体,次为NE、NW、SN向断裂构造.

F1~F4是一组性质较为一致的走向近EW的断裂,在33勘探线以西走向变为NNW向,倾向北,倾角较陡,约70°~80°.该组均为区域近SN向挤压形成的近EW断层,断层均发育于能干性不同的岩性界面上.主要的构造形式包括褶皱、断层、节理和劈理.总体构造格架为受海西—印支期近南北向(NNE 10°左右)挤压形成的近东西向复式褶皱、逆冲断层及其伴生NE、NW向断裂和节理.

金场子金矿位于研究区中东部,矿体均分布于黄石坡沟—金场子复式背斜北翼.共圈出16个工业矿体,其中主矿体6个,分布在25~29勘探线上,分别为JKT1、JKT2、JKT3、JKT4、JKT5、JKT6号矿体.矿体主要赋存在前黑山组及中宁组内的层间断裂破碎带中,其产状、形态及分布主要受构造控制.矿体在平面上显示受地层层内破碎控制的特征,呈东西向带状分布,产状与地层近乎一致;在剖面上,矿体与层间断裂带空间上高度重合,形态以脉状、透镜状和层状—似层状为主,构造控矿明显(图3).除层间破碎带外,在褶皱的转折端部位和层间滑脱带也有金矿体的分布.矿体规模大小不一,矿体长度一般为40~300 m,厚度0.40~25.26 m,斜深10~300 m.矿体产状大部分向南倾,个别如JKT13、

表 1 金场子金矿主要金矿体特征

Table 1 Characteristics of main gold ore bodies in the Jinchangzi gold dopsit

矿体号	矿体位置	矿体产状		矿体形态	矿体规模(m)		矿体厚度(m)			矿体品位(g/t)		
		倾向	倾角		长度	斜深	最小	最多	平均	最低	最高	平均
JKT1	25线	180°	82°	透镜体	80	43	—	2.55	2.55	0.64	1.05	0.69
JKT2	25~35线	190°~234°	64°~76°	似层状	280	137~194	0.52	14.98	4.54	0.50	107.90	4.89
JKT3	25~41线	137°~234°	60°~86°	似层状	280	20~225	0.40	9.15	2.73	0.50	29.40	5.91
JKT4	25~41线	173°~228°	67°~84°	似层状	280	10~230	0.67	5.35	2.64	0.58	45.40	4.65
JKT5	15~29线	185°~200°	64°~83°	脉状	300	43~146	0.71	2.43	1.59	0.50	6.39	2.04
JKT6	17~19线	200°	72°	脉状	160	71~152	0.71	5.62	1.85	0.50	14.73	3.47
JKT7	19线	182°	65°	脉状	80	42	—	1.84	1.84	—	0.52	0.52
JKT8	19线	179°	61°	似层状	80	43	1.08	3.23	2.33	0.85	6.64	2.79
JKT9	19线	182°	79°	层状	40	16	—	1.00	1.00	—	22.78	22.78
JKT10	25~27线	265°	19°	似层状	160	195~300	1.15	25.26	11.52	0.52	3.51	1.32
JKT11	75线	13°	85°	透镜体	40	20	—	1.61	1.61	0.53	6.06	2.13
JKT12	76线	95°	66°	透镜体	—	—	—	1.00	1.00	—	2.57	2.57
JKT13	64线	40°	79°	脉状	—	—	—	0.80	0.80	—	0.95	0.95
JKT14	60线	345°	82°	脉状	45	150~155	—	1.97	1.97	—	6.21	6.21
JKT15	60线	345°	82°	脉状	50	235~240	—	1.22	1.22	—	1.02	1.02
JKT16	39线	165°	60°	脉状	—	—	—	1.00	1.00	—	0.59	0.59

JKT14和JKT15号矿体向北或北东倾,JKT12号矿体向东倾,JKT10号矿体向西倾;矿体倾角大部分较陡,一般为19°~86°。Au的品位为0.52~107.90 g/t,平均为3.90 g/t,其中JKT2矿体品位最高,最高达107.90 g/t,各矿体特征详见表1。该矿床金资源储量为2.05 t。

矿石类型分为两类:一类是氧化型矿石(图4a、4b),一类是原生型矿石(图4c)。矿石中金属矿物有自然金、黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、针铁矿、银黝铜矿、辉铜矿、黝铜矿、斑铜矿、铜蓝、孔雀石等(图5)。非金属矿物则有石英、方解石、重晶石和绢云母(图4c~4f)。矿区围岩蚀变规模较小,以中低温蚀变类型为主,主要包括硅化、绢云母化、黄铁矿化、碳酸盐化、重晶石化等(图4g~4i)。

根据矿物共生组合、脉体穿切关系及矿物出现的顺序,将金矿成矿过程划分为两期5个阶段,两期为热液期和表生氧化期,其中热液期进一步划分为4个成矿阶段(图6),从早到晚依次如下。

(1)绢云母—黄铁矿—石英阶段(I阶段):该阶段形成大量纯白色石英脉,含少量黄铁矿等硫化物。石英脉较完整,空间上厚度不稳定,局部厚度大,并包含较多围岩角砾,围岩与石英脉接触部位发育绢云母、绿泥石等蚀变。该阶段黄铁矿以自形五角十二面体为主,呈星点状分布于石英脉及石英脉两侧的蚀变围岩中。矿化较弱,一般不构成工业

矿体。

(2)黄铁矿—重晶石—石英阶段(II阶段):该阶段在部分石英脉的中心部位发育重晶石脉。重晶石脉在二人山、黄石坡沟较发育,但在金场子较少。从手标本看,重晶石脉在形成后受构造破碎形成大小不一的角砾,与重晶石脉共生的黄铁矿呈自形一半自形的粒状,以五角十二面体体为主,粒径为几毫米,镜下观察发现黄铁矿呈明显的环带结构,且黄铁矿粒度显著增大、变粗,存在明显的重结晶。该阶段石英脉较完整,黄铁矿较发育,绢云母化、绿泥石化减弱,但硅化增强。本阶段金的品位较低,局部有一定矿化。

(3)多金属硫化物—碳酸盐—石英阶段(III阶段):该阶段黄铜矿、闪锌矿、方铅矿、银黝铜矿、斑铜矿等沿裂隙充填成矿,与石英共生。石英较发育,主要呈烟灰色细脉—网脉状。该阶段为热液期主成矿阶段,金的品位相对较高,统计为0.005~4.440 g/t,主要以固溶体形式赋存在黄铁矿晶格中,抑或以微米级的硫化物包裹体形式存在。与前期矿化叠加,可形成富矿体。该阶段硅化、黄铁矿化、黄钾铁矾化较发育。

(4)黄铁矿—碳酸盐阶段(IV阶段):该阶段主要形成黄铁矿—方解石细脉或菱铁矿—黄铁矿脉,脉宽数毫米至几厘米,沿围岩裂隙和早期黄铁矿—重晶石—石英脉分布。黄铁矿以自形一半自形粒状

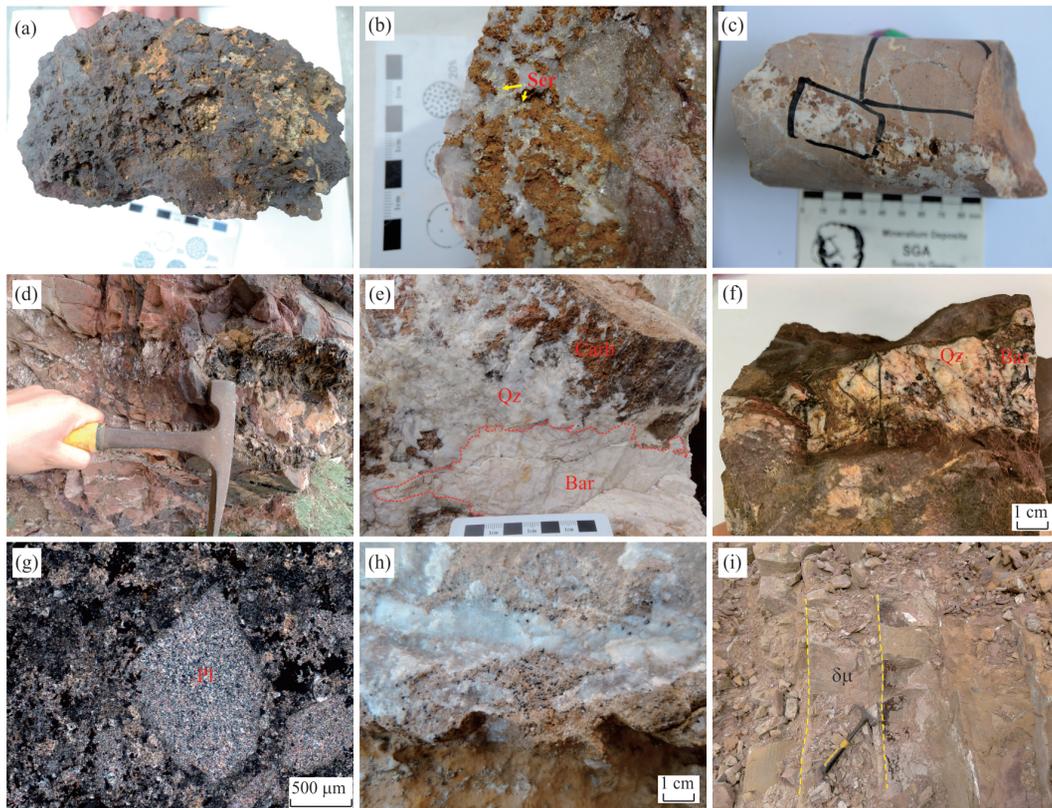


图4 研究区金矿典型矿石特征及围岩蚀变

Fig.4 Typical ore characteristics and wall rock alteration of gold mines

a. 氧化矿石(黄钾铁矾); b. 氧化矿石中残留的绢云母集合体; c. 硫化物-碳酸盐-石英脉; d. 顺层石英脉; e. 重晶石脉穿插早期石英脉; f. 重晶石交代早期石英; g. 闪长玢岩中绢云母化的斜长石斑晶; h. 石英脉旁侧的黄铁矿化、硅化; i. 闪长玢岩; Bar. 重晶石; Carb. 碳酸盐; Qz. 石英; Ser. 绢云母; $\delta\mu$. 闪长玢岩

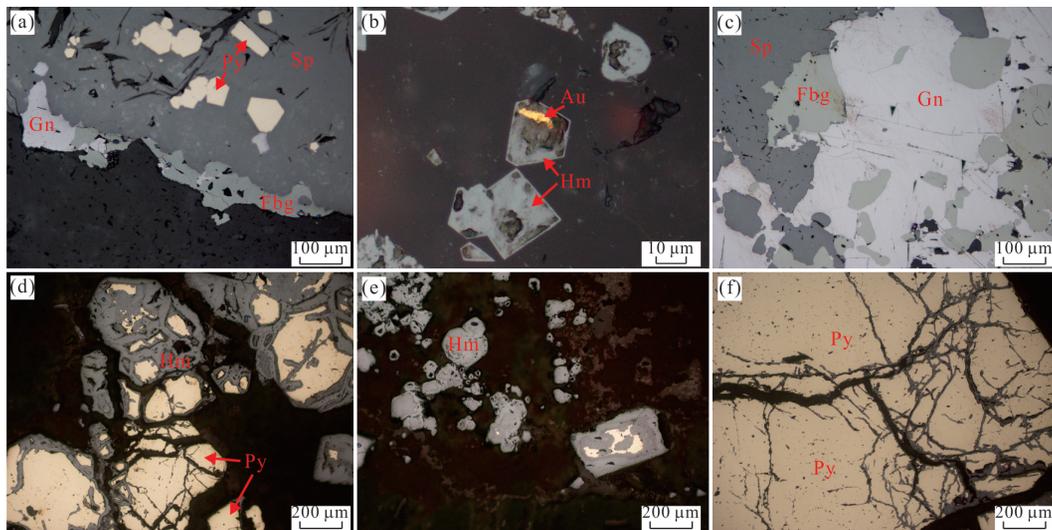


图5 矿石结构及金属矿物组成

Fig.5 Ore structure and metal mineral composition

a. 黄铁矿呈自形一半自形粒状结构; b. 自然金呈他形分布于赤铁矿裂隙中; c. 银黝铜矿交代方铅矿; d. 赤铁矿呈加大边分布在黄铁矿周围, 构成镶边结构; e. 黄铁矿被赤铁矿交代后的残余; f. 赤铁矿呈细脉状分布于黄铁矿中; Py. 黄铁矿; Sp. 闪锌矿; Gn. 方铅矿; Hm. 赤铁矿; Fbg. 银黝铜矿

矿物	绢云母-黄铁矿- 石英阶段	黄铁矿-重晶石- 石英阶段	多金属硫化物-碳酸盐- 石英阶段	黄铁矿-碳酸盐阶段
石英	██████████	██████████	██████████	
绢云母	██████████	██████████		
绿泥石	██████████	██████████		
自然金		██████████		
黄铁矿	██████████	██████████	██████████	██████████
黄铜矿			██████████	
闪锌矿			██████████	
方铅矿			██████████	
银黝铜矿			██████████	
斑铜矿			██████████	
黝铜矿			██████████	
辉铜矿			██████████	
菱铁矿				██████████
方解石				██████████

图 6 金场子金矿矿物生成顺序

Fig.6 Mineral generation sequence of the Jinchangzi gold deposit

为主,少部分呈细脉状或团块状分布于碳酸盐脉中.该阶段碳酸盐化较发育,硅化弱,矿化弱,金品位低.

3 流体包裹体研究

本次研究对金场子金矿热液期各成矿阶段(主要为 I~III 阶段)的 11 件石英样品进行了流体包裹体研究.先将这些样品磨制成厚度约 0.2 mm 双面抛光的薄片做岩相学观察,然后选取有代表性的包裹体进行激光拉曼探针分析和显微测温.

流体包裹体显微测温在中国地质大学(武汉)流体包裹体实验室利用 Linkam M DS600 显微冷热台完成.包裹体测试过程中,首先快速降温至 -120°C ,然后再以 $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升温至 -65°C ,恒温两分钟,然后以 $0.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升温至 -55°C ,之后以 $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升温至 30°C ,最后以 $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升温至 450°C .流体包裹体成分分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室利用显微激光拉曼光谱仪完成,仪器型号为 Renishaw RM-100,光源为氩离子激光器,波长 514.5 nm ,激光功率 20 mw ,束斑为 $1\text{ }\mu\text{m}$.选择部分有代表性的富 CO_2 包裹体和 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 包裹体进行激光拉曼探针分析.

3.1 流体包裹体岩相学

流体包裹体岩相学研究是包裹体信息有效性和最终包裹体成果得以合理解释的基础(卢焕章等,2004),前人在相关方面也做了大量研究和应用

(马旺等,2019;郭伟等,2020;李杰等,2021).根据显微镜下对各成矿阶段脉体石英中流体包裹体的观察,按室温条件下观察到的流体包裹体相态和成分,将研究区成矿期石英中的流体包裹体分为以下 4 类(图 7).

(1)水溶液包裹体(I型):此类包裹体主要见于成矿早阶段的石英中,呈椭圆形和长条形,长轴长度为 $3\sim 10\text{ }\mu\text{m}$,气液比较低,一般为 $5\%\sim 25\%$;气泡为圆形-椭圆形,无色,液相亦透明无色.有时也表现为纯水溶液包裹体(图 7a、7b).

(2)纯 CO_2 包裹体(II型):为纯气相(V_{CO_2})的 CO_2 包裹体,该类包裹体含量较多,颜色较深,边缘较黑,呈负晶形、长条形、椭圆形等形状,长轴长度介于 $2\sim 10\text{ }\mu\text{m}$,多与 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 型包裹体密切共生(图 7c).

(3) $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 包裹体(III型):此类包裹体较为发育,主要呈负晶形、长条形、椭圆形和不规则状,长轴长度介于 $5\sim 15\text{ }\mu\text{m}$, CO_2 相的体积分数介于 $35\%\sim 75\%$.根据 CO_2 的相态可进一步分为两类:一类在常温下表现为三相,即 $\text{L}_{\text{CO}_2}+\text{V}_{\text{CO}_2}+\text{L}_{\text{H}_2\text{O}}$,在室温下可呈现典型的“双眼皮”特征(图 7d);另一类在常温下表现为两相,即 $\text{V}_{\text{CO}_2}+\text{L}_{\text{H}_2\text{O}}$,在降温冷冻过程中会出现 CO_2 液相(图 7f).

(4)含子晶多相包裹体(IV型):此类包裹体较为发育,大小一般为 $6\sim 10\text{ }\mu\text{m}$,常为不规则状,与 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 型包裹体共生,子晶矿物较小,为 $0.5\sim$

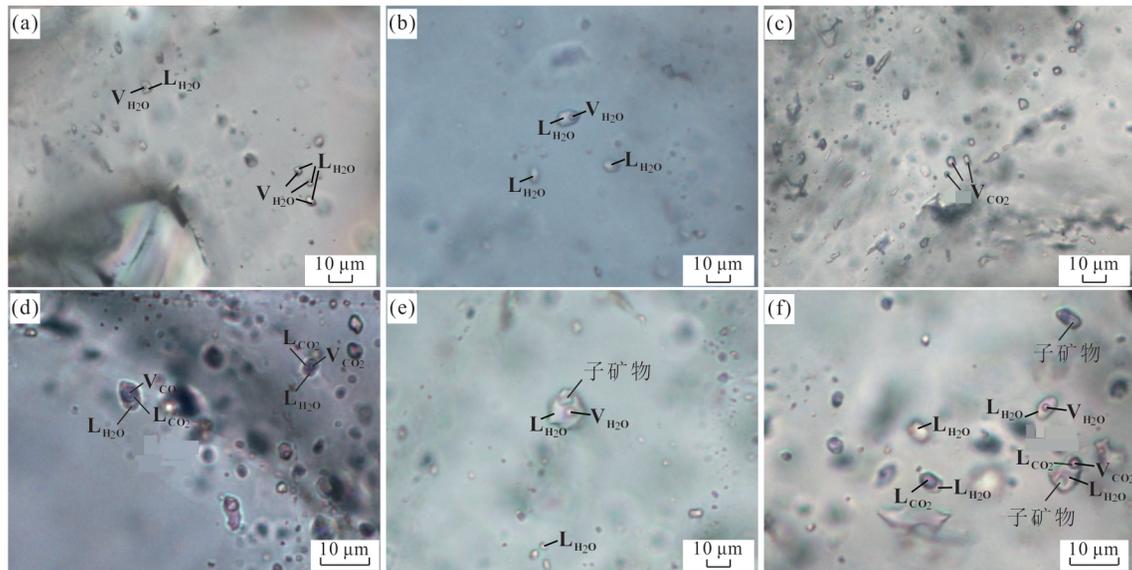


图7 成矿期石英中流体包裹体特征

Fig.7 Characteristics of fluid inclusions in quartz during mineralization

a. I 型:气液两相水溶液包裹体;b. I 型:气液两相水溶液包裹体与纯液相包裹体;c. II 型:纯 CO₂包裹体;d. III 型:富 CO₂三相包裹体;e. IV 型含子矿物多相包裹体;f. 多种类型包裹体共生;L. 液相;V. 气相;a 为 I 阶段;b 为 I ~ II 阶段;c, e 在各阶段都有;d 为 III 阶段;f 为 I 阶段

2 μm, 呈透明的类立方体, 部分晶体较大的子晶为方解石, 可能还含有石盐子晶(图 7e).

在成矿早阶段的石英中, 常见有 CO₂-H₂O 型包裹体、水溶液包裹体和含子晶多相包裹体共生的情况(图 7f).

3.2 流体包裹体显微测温结果

本次测温的样品均取自 I ~ III 阶段, IV 阶段黄铁矿-碳酸盐阶段流体包裹体不甚发育, 测试结果详见表 2.

水溶液包裹体测定冰点温度后, 利用经验公式(Hall *et al.*, 1988)或实验相图(Bodnar, 1993)确定对应流体的盐度; 测得均一温度后应用经验公式 $Q = a + bTh + cTh^2$ (a, b, c 均为无量纲参数)(刘斌和段光贤, 1987)求得流体密度. CO₂-H₂O 包裹体测出 CO₂ 笼形化合物消失温度, 通过 CO₂ 笼形化合物消失温度与盐度关系表(Collins, 1979)确定盐度, 再根据部分均一温度与 CO₂ 相密度关系图解(Shepherd *et al.*, 1985)求得 CO₂ 相密度.

成矿早阶段(I ~ II 阶段)的包裹体以 I 型为主, II 型和 IV 型虽有, 但相对较少. 测温结果显示(图 8, 表 2), I 型包裹体完全均一温度变化范围较大, 介于 171~396 °C, 主要集中在 180~270 °C, 冰点温度介于 -2.2~-7.4 °C, 盐度变化范围为 3.69%~10.99% NaCl equiv, 密度为 0.46~0.57 g/cm³.

多金属硫化物-碳酸盐-石英阶段(III 阶段)包裹体较发育, 主要以 III 型为主, 其他类型相对较少或不发育. III 型包裹体固相 CO₂ 初熔温度为 -61.5~-56.7 °C, 低于纯固相 CO₂ 初熔温度, 说明包裹体中除 CO₂ 外还含有其他气体组分. CO₂-H₂O 笼形化合物消失温度介于 7.0~9.4 °C, CO₂ 相的部分均一温度分别介于 19.5~30.5 °C (均一到液相)和 24.8~29.8 °C (均一到气相); 富 CO₂ 三相包裹体的完全均一温度为 187~350 °C, 主要集中在 190~270 °C. 包裹体的盐度变化范围为 1.30%~5.30% NaCl equiv, CO₂ 相的密度为 0.24~0.78 g/cm³(表 2).

3.3 激光拉曼探针分析

单个流体包裹体激光拉曼光谱分析结果(图 9)表明, 含矿石英脉中水溶液包裹体的液相成分以 H₂O 为主, 其他成分未检出; 气相成分也以 H₂O 为主, 含有少量 CO₂, 但在冷冻过程中无明显的 CO₂ 相变特征, 这可能是 CO₂ 含量过低所致. 纯 CO₂ 包裹体的气相成分为 CO₂, 有些含有 N₂, 但没有 H₂O 峰的显示; CO₂-H₂O 包裹体中 CO₂ 相的体积分数介于 35%~75%, 气相成分出现了 CO₂ 和宽泛的 H₂O 峰. 因含子矿物的多相包裹体的子矿物过小, 激光束斑的高能量导致子矿物发生移动, 绝大多数测试点未能获得矿物的拉曼特征峰, 个别测试点测得子矿物为方解石.

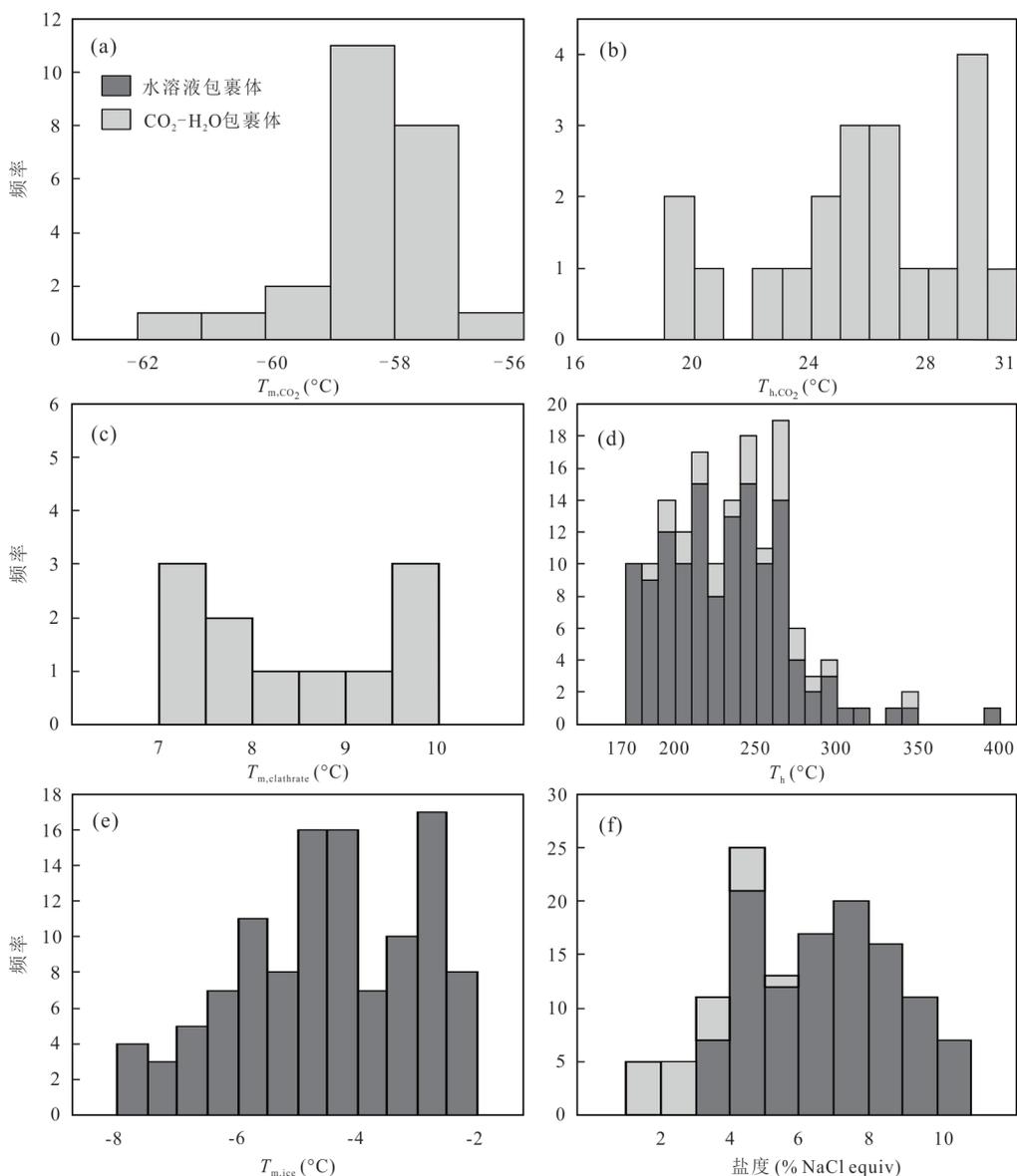


图 8 金矿床流体包裹体显微测温结果

Fig.8 Microscopic temperature measurement results of fluid inclusions in gold deposits

a.CO₂-H₂O包裹体 CO₂初熔温度;b.CO₂-H₂O包裹体 CO₂部分均一温度;c.CO₂-H₂O包裹体笼形化合物消失温度;d.水溶液包裹体和 CO₂-H₂O包裹体完全均一温度;e.水溶液包裹体冰点温度;f.水溶液包裹体和 CO₂-H₂O包裹体盐度

表 2 金场子金矿不同成矿阶段流体包裹体测温结果

Table 2 Temperature measurement results of fluid inclusions in different metallogenic stages of Jinchangzi gold deposit

成矿阶段	岩石类型	包裹体类型	$T_{m,ice}(^{\circ}C)$	$T_{m,CO_2}(^{\circ}C)$	$T_{m,clath}(^{\circ}C)$	$T_{h,CO_2}(^{\circ}C)$	$T_{h,total}(^{\circ}C)$	盐度 (%NaCl)	密度 (g/cm ³)
I~II	石英脉	I型	-2.2~-7.4	—	—	—	171~396	3.69~10.99	0.46~0.57
III	多金属硫化物 石英脉	III型	—	-61.5~-56.7	7.0~9.4	24.8~29.8	187~350	1.30~5.30	0.24~0.78

注: T_{m,CO_2} 为固相 CO₂的初熔温度; T_{h,CO_2} 为 CO₂的部分均一温度; $T_{h,total}$ 为完全均一温度; $T_{m,ice}$ 为冰点温度; $T_{m,clath}$ 为 CO₂-H₂O笼形化合物消失温度.

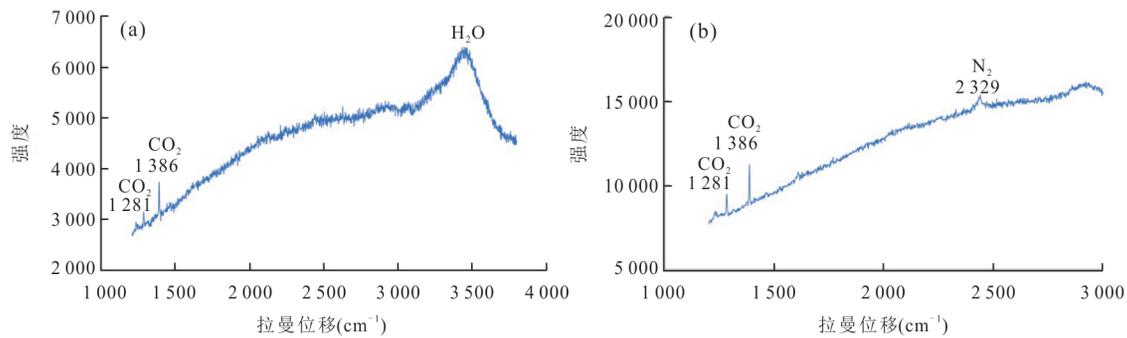


图9 金矿床流体包裹体激光拉曼分析结果

Fig.9 Laser Raman analysis results of fluid inclusions in gold deposits

a.CO₂-H₂O包裹体;b.纯CO₂-H₂O包裹体

4 稳定同位素研究

4.1 样品及分析方法

本文分析的C、H、O同位素样品均采自金场子金矿床的地表露头或钻孔中.首先对测试的岩矿石样品破碎过筛,然后在双目镜下挑选,粒度一般在60~80目,纯度优于99%,再将挑选出的单矿物在玛瑙钵中研磨成200目以下的粉末.

方解石与菱铁矿的C、O同位素测试在澳实分析检测(广州)有限公司完成,利用GVISO Prime II型稳定同位素质谱仪进行测定.¹³C以V-PDB为标准,¹⁸O分别以V-PDB和SMOW为标准,计算 $\delta^{18}\text{O}$ 时,采用Coplen *et al.* (1983)的公式 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}} = 1.03091 \times \delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}} + 30.91$.分析精度 $\delta^{13}\text{C}$ 好于0.05‰, $\delta^{18}\text{O}$ 好于0.10‰.测试结果列于表3.

石英H、O同位素测试在中国地质科学院同位素地质重点实验室,由MAT-253型质谱仪完成.采用热爆法测定H同位素组成,首先从样品中提取流体包裹体的水,然后用锌置换出水中的氢并对氢气进行质谱分析;O同位素分析则是将被测试样品先与BrF₃进行反应以获得O₂,纯化后的O₂再与碳棒反应生成CO₂,并用质谱仪测定其中的O同位素组成. δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 均以SMOW标准报出,氢同位素的分析精度为±1%,氧同位素的分析精度为±0.2%.测试结果列于表4.

4.2 碳同位素组成

金场子金矿床晚阶段(IV阶段)方解石和菱铁矿的 $\delta^{13}\text{C}$ 介于-2.5‰~-0.7‰之间.由于金场子金矿流体包裹体中未检测到CH₄,因此成矿流体中CO₂的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 与成矿流体的总体碳同位素组成

表3 金场子金矿床C-O同位素组成(‰)

Table 3 C-O isotopic composition of Jinchangzi gold deposit

样品号	测试矿物	$\delta^{18}\text{O}_{\text{矿物}}$	$\delta^{13}\text{C}$
J-3-2	碳酸盐	20.90	-1.033
J-3-4	碳酸盐	19.50	-0.736
JCZ-19-7	碳酸盐	21.70	-1.267
JCZ-19-20	碳酸盐	20.70	-1.077
JCZ-19-21	碳酸盐	23.20	-1.227
H-7	菱铁矿	15.87	-1.720
2501-23	菱铁矿	16.18	-2.540
2501-109	菱铁矿	18.42	-1.737

$\delta^{13}\text{C}_{\text{SC}}$ 近似.

4.3 氢、氧同位素组成

测试结果表明,3件成矿早阶段(I~II阶段)和4件主成矿阶段(III阶段)石英样品的 δD 值为-66‰~-32‰, $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 值为+19.7‰~+22.6‰,其中I~II阶段石英样品的 δD 值为-66‰~-48‰, $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 值为+20.7‰~+22.6‰;III阶段石英样品的 δD 值为-66‰~-32‰, $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 值为+19.7‰~+22.0‰.根据Clayton *et al.* (1972)提出的石英-水之间氧同位素的分馏方程,计算获得与成矿流体平衡的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 范围为10.3‰~13.3‰.艾宁(2014)测得金场子金矿的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 范围为8.39‰~15.80‰,认为成矿流体是大气降水混合了层间建造水.在 δD - $\delta^{18}\text{O}$ 图解上(图10),本文样品投点位置紧邻原生岩浆水的右侧,在变质水范围内,而艾宁(2014)的数据点投在原生岩浆水的下方,在变质水范围之外,呈现向大气降水演化的趋势.

表 4 研究区金矿床 H-O 同位素组成(‰)

Table 4 H-O isotopic compositions of gold deposits in the study area

样品号	测试矿物	成矿阶段	$\delta^{18}\text{O}_{\text{矿物}}(\text{‰})$	温度($^{\circ}\text{C}$)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}(\text{‰})$	$\delta\text{D}(\text{‰})$	来源
JCZ-19-4	石英	I~II	20.7	259.8	11.2	-48.0	
J-3-4	石英	I~II	22.6	259.8	13.3	-66.0	
J-3-2	石英	I~II	20.7	259.8	11.2	-48.0	
E-1-4	石英	III	20.1	240.2	10.7	-32.0	本文
B6010-3	石英	III	19.7	240.2	10.3	-59.0	
2502-167-8	石英	III	20.3	240.2	10.9	-61.0	
2502-202	石英	III	22.0	240.2	12.6	-66.0	
JCZ-5	石英	—	19.17	261.6	10.69	-83.136	
JCZ-6	石英	—	17.86	240.5	8.39	-81.090	
JCZ-9	石英	—	19.02	299.9	12.07	-82.780	
JCZ-10	石英	—	19.19	242.8	9.83	-86.071	艾宁(2014)
JCZ-25-1	石英	—	19.65	282.8	12.05	-83.395	
JCZ-25-4	石英	—	18.85	281.8	11.21	-82.818	

注: $\delta^{18}\text{O}_{\text{fluid}}$ 由公式 $1000 \times \ln \alpha_{\text{quartz-water}} = 3.38 \times 10^6 T^{-2} - 3.40$ (Clayton *et al.*, 1972) 计算而来。

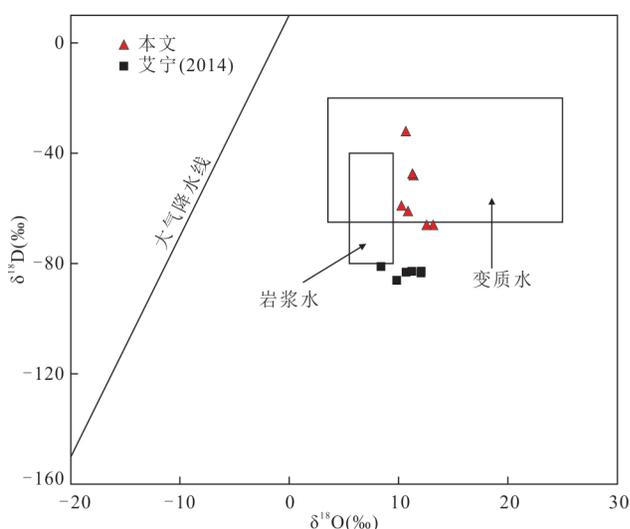


图 10 研究区金矿床 $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ 关系图(底图据 Taylor, 1974 修改)

Fig.10 $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ relationship diagram of gold deposits in the study area(modified from Taylor, 1974)

5 讨论

5.1 成矿流体性质及组成

根据金场子金矿流体包裹体显微测温结果,水溶液包裹体完全均一温度介于 $171\sim 396\text{ }^{\circ}\text{C}$, 主要集中于 $180\sim 270\text{ }^{\circ}\text{C}$, 富 CO_2 三相包裹体完全均一温度为 $187\sim 350\text{ }^{\circ}\text{C}$, 主要集中在 $190\sim 270\text{ }^{\circ}\text{C}$; 水溶液包裹体的盐度为 $3.69\%\sim 10.99\%$ NaCl equiv, 密度为 $0.46\sim 0.57\text{ g/cm}^3$; $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 型包裹体的盐度为 $1.30\%\sim 5.30\%$ NaCl equiv, CO_2 相的密度为 $0.24\sim$

0.78 g/cm^3 , 表明成矿流体具有中低温度、低盐度、低密度的特点. 水溶液包裹体液相成分以 H_2O 为主, 气相成分主要为 H_2O , 含少量 CO_2 , 纯 CO_2 包裹体的气相成分为 CO_2 , 有些含有 N_2 , $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 包裹体中 CO_2 相的体积分数介于 $35\%\sim 75\%$, 表明成矿流体富 CO_2 , 这与大多数造山型金矿床相似 (Groves *et al.*, 1988; 陈衍景等, 2007). 按照丰度值高低, 金场子金矿流体包裹体应为 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}\text{-NaCl}$ 体系.

排除不同期次包裹体叠加及颈缩泄露等后期变化因素, 在金矿热液期石英中发现存在不同 H_2O 、 CO_2 相比比例的包裹体, 局部还发育有含子晶的多相包裹体(图 7f). 显微测温发现, 富液相的水溶液包裹体与 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 包裹体有大致相同的均一温度, 表现出流体不混溶的特点. 此外, 激光拉曼探针分析表明, 流体包裹体气相成分除 CO_2 外还含有 N_2 (图 9b), 而 N_2 在相分离作用过程中倾向于向 CO_2 相富集, 这也表现出流体的不混溶性. 已有研究表明, 流体的不混溶作用可以使原先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, 从而破坏了体系原有的平衡状态, 导致某些有用组分沉淀并富集成矿, 如在金大量沉淀阶段形成的同生石英中, 往往发现有不混溶流体包裹体 (Craw *et al.*, 1993; 卢焕章等, 2004; 胡芳芳等, 2005), 物理化学实验研究也证实了流体不混溶有利于金的沉淀 (Bowers, 1991).

金场子金矿成矿流体的不混溶作用可能是导

致金沉淀成矿的重要原因,而导致流体不混溶的原因可能由构造减压引起.由于研究区构造环境由早期的挤压环境变为张性环境,原先处于深部的富含 CO_2 流体发生不混溶而形成相分离,从而破坏了体系原有的平衡状态,导致成矿元素发生沉淀.

5.2 成矿流体来源

流体包裹体是判别矿床类型、揭示成矿流体来源和演化的关键性依据(陈衍景等,2007),低盐度、富含 CO_2 包裹体被认为是变质热液系统的标志(Ridley and Diamond, 2000;陈衍景等,2007).前人关于研究区成矿流体来源的结论不尽相同.敬万林等(宁夏中卫县金场子金矿床控矿条件及成因研究报告,1987.宁夏地矿局矿产地质调查所,银川)根据与原生金矿化有关的方解石包裹体水的氧同位素组成,认为成矿热液完全不含岩浆水,此外根据研究区方解石和一部分重晶石包裹体液相成分与MVT铅锌矿和渗流热卤水成因的汞矿床中矿物包裹体液相成分相近的特点,提出了成矿热液主要为沉积岩地层水和大气水.艾宁等(2011)根据流体包裹体特征认为成矿流体是由大气降水和层间水混合,后经构造作用形成含矿热液,混合少量的岩浆热液.前人研究的争论点在于岩浆水是否参与成矿.而周志远等(1993.宁夏回族自治区中卫县金场子矿区及其外围金矿普查报告.宁夏地矿局矿产地质调查所,银川)认为,金矿成矿热液为中-低温的高盐度流体,属变质水,大气降水和岩浆水作用不明显.

本次对成矿期石英中流体包裹体研究表明,成矿流体基本属于中低温、低盐度的 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-NaCl}$ 体系,含有少量 N_2 ,与大多数造山型金矿相似(Groves *et al.*, 1988;陈衍景等,2007;王庆飞等,2019).H-O同位素组成落于变质水区域(图10).表5列出了主要地质体或碳储库的碳同位素组成,不同碳储库之间 $\delta^{13}\text{C}$ 差别较大(Faure, 1986;Hoefs and Sywall, 1997),使碳同位素能够成为示踪流体来源的重要手段之一.然而,各类碳储库都是由初始地球物质分异演化而来的,初始地球物质与现今地幔物质或碳质球粒陨石相似, $\delta^{13}\text{C}$ 为 -5% .当来自不同碳储库的 CO_2 混合在一起时,其 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 也往往集中在 -5% 左右.如此一来,成矿流体 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 约为 -5% 时,成矿流体来源有两种可能:(1)流体来自地幔或岩浆岩;(2)源自不同单元储库的流体混合(至少其中之一是碳酸盐岩).金场子金矿碳酸盐矿物的 $\delta^{13}\text{C}$ 介于 -2.540% ~ -0.736% ,低于海相碳

酸盐的 $\delta^{13}\text{C}$,高于其他类型碳储库的 $\delta^{13}\text{C}$ (表5),表明成矿流体中的C具有混合来源的特点,而且,沉积碳酸盐是必须的流体 CO_2 来源之一.考虑到含矿围岩前黑山组、臭牛沟组主要为一套滨浅海相-泻湖相陆源碎屑岩和碳酸盐岩沉积,主要由石英质砾岩、石英砂岩、粉砂岩、灰岩、白云岩及石膏组成.而区域上奥陶系、志留系地层也主要由陆源碎屑岩和碳酸盐岩组成,与碳同位素研究所揭示的流体源区岩性一致,这也与周志远等(宁夏回族自治区中卫县金场子矿区及其外围金矿普查报告,1993.宁夏地矿局矿产地质调查所,银川)的研究结果相同.

对矿物平衡体系 $\text{CaO-MgO-FeO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O-CO}_2$ 的热力学模拟计算表明,绿泥石等含水矿物、碳酸盐矿物及黄铁矿等在中地壳深度、 $460\sim 500\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下将发生分解并形成大量的低盐度、富 CO_2 的变质流体(Powell *et al.*, 1991; Elmer *et al.*, 2006; Evans *et al.*, 2010; Phillips and Powell, 2010).结合研究区构造演化特点,研究区基底为次深海斜坡相陆源碎屑-泥质沉积为主的浊积岩系,上覆一套陆相磨拉石建造,赋矿围岩主要为咸化泻湖-陆棚海沉积建造,这些地层在印支期的构造运动中,发生区域变质作用形成了成矿流体(霍福臣等, 1989;宁夏回族自治区地质调查院,2017),通过断裂系统上升到浅部层间破碎带、脆性破裂中形成矿化,压力骤降导致成矿流体氧化以及金的沉淀.

基于以上讨论,本文认为区域金矿化的成矿流体主要为变质水,奥陶系-石炭系陆源碎屑岩和碳酸盐岩的变质脱水作用形成的流体可能是金成矿流体的主要来源.

5.3 矿床成因

金场子金矿成矿流体为中低温、低盐度、低密度的 $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-NaCl}$ 体系,流体来源于地层岩石建造的变质脱水,具有变质流体的性质,岩浆水的特

表 5 主要碳储库的 $\delta^{13}\text{C}$ 组成

Table 5 $\delta^{13}\text{C}$ compositions of major carbon storage

碳储库类型	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}(\%$, 平均值或范围)	文献
大气 CO_2	-8或-7~-11	Hoefs and Sywall, 1997
淡水 CO_2	-20~-9	Hoefs and Sywall, 1997
岩浆系统	-30~-3	Hoefs and Sywall, 1997
海相碳酸盐	+0.5	Hoefs and Sywall, 1997
地壳总碳	-7	Faure, 1986
地幔总碳	-7~-5	Hoefs and Sywall, 1997

征不明显.根据 S 同位素组成(海连富等,未发表),金场子金矿硫同位素以壳源硫为主,地层为成矿作用提供了主要的成矿物质.

根据区域地质演化史,早石炭世—中二叠世研究区处于陆内伸展演化阶段,石炭纪是华北陆块陆表海与古特提斯海连成一体的陆表海形成期,宁夏接受广泛海侵,但因海水不深,时进时退,沉积了早石炭世前黑山组、臭牛沟组滨浅海相碎屑岩—碳酸盐建造及晚石炭世—早二叠世的靖远组、羊虎沟组、太原组海陆交互相碎屑含煤建造,总体构成一个由陆源碎屑岩—碳酸盐岩的退积型沉积旋回(霍福臣等,1989;廖华瑞,1989;胡能高和杨家喜,1995;毛景文等,2005;刘金科等,2016).同时,区域上广泛发育奥陶纪地层,为一套浅水碳酸岩台地沉积和碎屑岩夹泥质沉积.即研究区内赋矿地层及其下伏地层均为富含碳酸岩的海相沉积地层.

海西运动晚期,宁夏地区泥盆世中宁组以及石炭纪—中二叠世地层受构造应力作用而产生褶皱变形,形成了平面上近东西向线状平行分布的褶皱,这些多数两翼产状基本对称,褶皱开阔,代表性褶皱有烟筒山背斜和卫宁北山东段褶皱组(霍福臣等,1989;艾宁,2014;张道涵等,2017).强烈的挤压造山作用使地壳增厚、地温梯度增加,在地壳深部造成古老基底的熔融,熔融流体向上运移至浅地表,形成了区域上从二人山—金场子范围内均有分布的小规模闪长玢岩侵入.该深部构造热事件同时促使石炭纪下伏地层发生变质脱水作用,形成含矿热液.由于区域上地层中富含碳酸岩,因而形成了富含 CO_2 的成矿流体.成矿流体向上运移至浅地表的过程中成矿流体的前锋引发水岩反应,形成围岩蚀变.由于围岩硅质碎屑岩的原岩性质不活泼,蚀变强度不大,蚀变类型不丰富,主要为硅化、黄铁矿化和绢云母化.成矿流体运移至浅地表,由于温度、压力骤然降低,流体发生不混溶作用,造成流体发生氧化,部分金沉淀下来,同时在区域上形成了显著的重晶石沉积(I~II阶段).成矿流体的继续上涌,形成了多金属硫化物—石英脉,此阶段形成的硫化物种类多、含量高,金也更富集(III阶段).

先成的石英脉硫化物矿石在富含游离氧的大气降水不断作用下迅速溶解和氧化,沿裂隙、粒间沉淀、交代,形成硅质褐铁矿.进一步氧化后,则形成有硅质褐铁矿隔板的蜂窝状或海绵状交代褐铁矿.氧化弱的地段,可见黄铁矿残留及微氧化带出

现.含金的原生黄铁矿一经氧化,产生强酸性溶液及由此而形成 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 等胶质流体,有利于金的溶解与迁移.黄铁矿的氧化导致其中赋存的金的释放.

结合研究区金矿严格受断裂构造控制,矿体主要赋存于南北向挤压形成的近东西向的断裂破碎带、褶皱的转折端部位和层间滑脱带中,矿体主要呈脉状、透镜状,围岩蚀变表现为碳酸盐化、绢云母化等特点,认为金场子金矿为造山型金矿.这也与国内较典型的胶东新城等造山型金矿矿床特点(王庆飞等,2019)较为相似.

6 结论

(1)金场子金矿热液期石英中流体包裹体包括水溶液包裹体、纯 CO_2 包裹体、 CO_2 - H_2O 包裹体和含子晶多相包裹体 4 类.成矿流体的完全均一温度介于 $171\sim 396\text{ }^\circ\text{C}$,主要集中于 $180\sim 270\text{ }^\circ\text{C}$,盐度介于 $1.30\%\sim 10.99\%$ NaCl equiv,密度为 $0.24\sim 0.78\text{ g/cm}^3$,为中低温、低盐度、低密度的 CO_2 - H_2O -NaCl 体系,含有少量 N_2 .

(2)热液期石英的 δD 值为 $-66.0\%\sim -32.0\%$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 值为 $19.7\%\sim 22.6\%$,指示成矿流体为变质流体,岩浆作用不明显. C 同位素显示,晚阶段(IV 阶段)方解石和菱铁矿的 $\delta^{13}\text{C}$ 介于 $-2.540\%\sim -0.736\%$,表明成矿流体中的 C 具有混合来源的特点,奥陶系—石炭系源碎屑岩和碳酸盐岩的变质脱水作用形成的流体可能是金成矿流体的主要来源.

(3)成矿过程中流体发生了明显的不混溶现象,这是成矿元素沉淀的重要因素.深部构造热事件促使石炭纪下伏地层发生变质脱水,形成含矿热液,金矿主成矿阶段为多金属硫化物—碳酸盐—石英阶段(III 阶段),其成因类型属于造山型金矿.

References

- Ai, N., 2014. Studies on the Geochemical and Geological Characteristics of Weiningbeishan Jingchangzi Gold Deposit (Dissertation). Northwest University, Xi'an (in Chinese with English abstract).
- Ai, N., Ren, Z.L., Li, W.H., et al., 2011. Metallogenic Epoch and Ore-Forming Types of Ore Deposits in Weiningbeishan Area, Ningxia. *Mineral Deposits*, 30(5): 941—948 (in Chinese with English abstract).
- Bowers, T.S., 1991. The Deposition of Gold and Other Metals: Pressure-Induced Fluid Immiscibility and Associated

- Stable Isotope Signatures. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55(9): 2417–2434. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(91\)90363-a](https://doi.org/10.1016/0016-7037(91)90363-a)
- Bodnar, R.J., 1993. Revised Equation and Table for Determining the Freezing Point Depression of H₂O-NaCl Solutions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57(3): 683–684. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(93\)90378-a](https://doi.org/10.1016/0016-7037(93)90378-a)
- Chen, Y.J., Ni, P., Fan, H.R., et al., 2007. Diagnostic Fluid Inclusions of Different Types Hydrothermal Gold Deposits. *Acta Petrologica Sinica*, 23(9): 2085–2108(in Chinese with English abstract).
- Clayton, R.N., O'Neil, J.R., Mayeda, T.K., 1972. Oxygen Isotope Exchange between Quartz and Water. *Journal of Geophysical Research*, 77(17): 3057–3067. <https://doi.org/10.1029/jb077i017p03057>
- Collins, P.L.F., 1979. Gas Hydrates in CO₂-Bearing Fluid Inclusions and Use Freezing Data for Estimation of Salinity. *Economic Geology*, 74:1435–1444.
- Coplen, T. B., Kendall, C., Hopple, J., 1983. Comparison of Stable Isotope Reference Samples. *Nature*, 302: 236–238. <https://doi.org/10.1038/302236a0>
- Craw, D., Teagle, D.A.H., Belocky, R., 1993. Fluid Immiscibility in Late-Alpine Gold-Bearing Veins, Eastern and Northwestern European Alps. *Mineralium Deposita*, 28(1):28–36. <https://doi.org/10.1007/bf00199007>
- Elmer, F.L., White, R. W., Powell, R., 2006. Devolatilization of Metabasic Rocks during Greenschist-Amphibolite Facies Metamorphism. *Journal of Metamorphic Geology*, 24(6): 497–513. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2006.00650.x>
- Evans, K. A., Powell, R., Holland, T. J. B., 2010. Internally Consistent Data for Sulphur-Bearing Phases and Application to the Construction of Pseudosections for Mafic Greenschist Facies Rocks in Na₂O-CaO-K₂O-FeO-MgO-Al₂O₃-SiO₂-CO₂-O-S-H₂O. *Journal of Metamorphic Geology*, 28(6): 667–687. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2010.00890.x>
- Faure, G., 1986. Principles of Isotope Geology (Second Edition). John Wiley & Sons, New York.
- Geological Survey Institute of Ningxia Hui Autonomous Region, 2017. Regional Geology of China. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Groves, D.I., Goldfarb, R.J., Gebre-Mariam, M., et al., 1988. Orogenic Au Deposits: A Proposed Classification in the Context of Their Crustal Distribution and Relation to Other Au Deposit Types. *Ore Geology*, 13(1–5):7–27. [https://doi.org/10.1016/s0169-1368\(97\)00012-7](https://doi.org/10.1016/s0169-1368(97)00012-7)
- Guo, P., Liu, C.Y., Han, P., et al., 2017. Geochronology of Detrital Zircon from the Lower-Middle Jurassic Strata in the Southwestern Ordos Basin, China, and Its Geological Significance. *Geotectonica et Metallogenia*, 41(5): 892–907(in Chinese with English abstract).
- Guo, W., Lin, X., Hu, S.H., 2020. Advances in LA-ICP-MS Analysis for Individual Fluid Inclusions and Applications. *Earth Science*, 45(4): 1362–1374(in Chinese with English abstract).
- Hall, D.L., Sterner, S.M., Bodnar, R.J., 1988. Freezing Point Depression of NaCl-KCl-H₂O Solutions. *Economic Geology*, 83(1): 197–202. <http://doi.org/10.2113/gsecongeo.83.1.197>
- Hai, L.F., Liu, J.K., Li, H.F., et al., 2020. Geological Characteristics and Prospecting Directing of Weiningbeishan Polymetallic Deposit, Ningxia. *Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition)*, 35(1):30–39(in Chinese with English abstract).
- Hoefs, J., Sywall, M., 1997. Lithium Isotope Composition of Quaternary and Tertiary Biogene Carbonates and a Global Lithium Isotope Balance. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(13): 2679–2690. [https://doi.org/10.1016/s0016-7037\(97\)00101-4](https://doi.org/10.1016/s0016-7037(97)00101-4)
- Hu, N.G., Yang, J.X., 1995. Geochemical Characteristics of the Helanshan Group Metamorphic Rocks. *Acta Mineralogica Sinica*, 15(1):104–110(in Chinese with English abstract).
- Hu, F.F., Fan, H.R., Shen, K., et al., 2005. Nature and Evolution of Ore-Forming Fluids in the Rushan Lode Gold Deposit, Jiaodong Peninsula of Eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 21(5):1329–1338(in Chinese with English abstract).
- Huo, F.C., Pan, X.S., You, G.L., et al., 1989. Introduction to Ningxia Geology. Science Press, Beijing(in Chinese).
- Li, J., Hai, L.F., Mu, C.X., et al., 2018. Geological Characteristics and Prospecting Direction of the Zhaobishan Iron Deposit, Ningxia. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 33(2): 243–247(in Chinese with English abstract).
- Li, J., Zhang, L.P., Song, M.C., et al., 2021. Formation Mechanism of Shuiwangzhuang Gold Deposit in Jiaodong Peninsula: Constraints from S-H-O Isotopes and Fluid Inclusions. *Earth Science*, 46(5): 1569–1584(in Chinese with English abstract).
- Liao, H.R., 1989. The Basic Characteristics of the Regional Geology of the Hui Autonomous Region of Ningxia. *Regional Geology of China*, 8(4): 26–35(in Chinese with English abstract).
- Liu, B., Duan, G.X., 1987. The Density and Isochoric Formu-

- lae for NaCl-H₂O Fluid Inclusions (Salinity ≤ 5 wt%) and Their Applications. *Acta Mineralogica Sinica*, 7(4): 345—352(in Chinese with English abstract).
- Liu, Y., Li, T.D., Wang, Y.B., et al., 2010. Geological Characteristics and Zircon SHRIMP U-Pb Data of Jinchangzi Dioritic Porphyrite Dykes in Zhongwei City, Ningxia. *Geology in China*, 37(6): 1575—1583(in Chinese with English abstract).
- Liu, Z. J., 2013. Metallogenic Characteristics of Weiningbeishan Au-Pb-Ag Polymetallic Deposit in Ningxia Province (Dissertation). Chengdu University of Technology, Chengdu(in Chinese with English abstract).
- Liu, J.K., Zhang, D.H., Wei, J.H., et al., 2016. Zircon U-Pb Age and Geochemical Characteristics of the Paleoproterozoic S-Type Granite in the Northern Part of Helanshan and Its Geological Significance. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 47(1): 187—197(in Chinese with English abstract).
- Lu, H.Z., Fan, H.R., Ni, P., et al., 2004. Fluid Inclusion. Geological Publishing House, Beijing(in Chinese)
- Ma, X.J., Hai, L.F., Mu, C.X., et al., 2018. Study of the Tectono-Lithofacies Mineralization Regularities and Prospecting of the Molymetallic Deposit in Weiningbeishan. *China Mining Magazine*, 27(Suppl. 2): 91—95(in Chinese with English abstract).
- Ma, W., Liu, Y.C., Yang, Z.S., et al., 2019. Characteristics of Ore-Forming Fluids of Lietinggang-Leqingla Pb-Zn-Fe-Cu-Mo Polymetallic Deposit in Tibetan: Evidence from Fluid Inclusions and Stable Isotope Compositions. *Earth Science*, 44(6): 1957—1973(in Chinese with English abstract).
- Mao, J.W., Xie, G.Q., Zhang, Z.H., et al., 2005. Mesozoic Large-Scale Metallogenic Pulses in North China and Corresponding Geodynamic Settings. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 169—188(in Chinese with English abstract).
- Pan, G.T., Lu, S.N., Xiao, Q.H., et al., 2016. Division of Tectonic Stages and Tectonic Evolution in China. *Earth Science Frontiers*, 23(6): 1—23(in Chinese with English abstract).
- Phillips, G.N., Powell, R., 2010. Formation of Gold Deposits: A Metamorphic Devolatilization Model. *Journal of Metamorphic Geology*, 28(6): 689—718. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2010.00887.x>
- Powell, R., Will, T.M., Phillips, G.N., 1991. Metamorphism in Archaean Greenstone Belts: Calculated Fluid Compositions and Implications for Gold Mineralization. *Journal of Metamorphic Geology*, 9(2): 141—150. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.1991.tb00510.x>
- Qiu, Z.X., 1989. The Features of Microgranular Gold Grains in the Oxidation Zone of the Jinchangzi Au-Deposit, Ningxia. *Geology and Prospecting*, 25(8): 39—42(in Chinese with English abstract).
- Ridley, J.R., Diamond, L.W., 2000. Fluid Chemistry of Orogenic Lode Gold Deposits and Implications for Genetic Models. *Reviews in Economic Geology*, 13: 141—162.
- Shepherd, T.J., Rankin, A.H., Alderton, D.H.M.A., 1985. A Practical Guide to Fluid Inclusion Studies. *Mineralogical Magazine*, 50(356): 352—353. <https://doi.org/10.1180/minmag.1986.050.356.32>
- Song, X.H., Yin, B.X., Yan, H., et al., 2010. The Relationship between the Aeromagnetic Weak Anomalies and the Polymetallic Ore Deposits (Ore Spots) in the Beishan Mountain, Weining. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 34(3): 289—293(in Chinese with English abstract).
- Taylor, H.P., 1974. The Application of Oxygen and Hydrogen Isotope Studies to Problem of Hydrothermal Alteration it and Ore Deposition. *Economic Geology*, 69(6): 843—883. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.69.6.843>.
- Wang, M.F., 2015. Indication of Heavy Minerals Anomaly of Beishan Area, Weining, Ningxia. *Resources & Industries*, 17(2): 55—59(in Chinese with English abstract).
- Wang, Q.F., Deng, J., Zhao, H.S., et al., 2019. Review on Orogenic Gold Deposits. *Earth Science*, 44(6): 2155—2186(in Chinese with English abstract).
- Wu, W.Z., Meng, F., Wang, H., et al., 2013. Research on Material Sources of Cobalt Abnormality in the Weining Beishan of Ningxia. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 44(4): 485—489(in Chinese with English abstract).
- Xu, G.F., 1988. Source of Mineralized Material of Transmissive Hot Brine-Supergene Reformation Type Gold Deposit from Jinchangzi in Ningxia, China. *Earth Science*, 13(2): 147—153(in Chinese with English abstract).
- Yin, B.X., Meng, F., Yang, Y., 2012. The Application of Geophysical and Geochemical Technology to the Prospecting for Polymetallic Deposits in Errenshan-Huangshipogou Area. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 36(6): 898—901(in Chinese with English abstract).
- Zhai, Y.S., Deng, J., Li, X.B., 1999. Regional Mineralization. Geological Publishing House, Beijing(in Chinese).
- Zhang, D.H., 2017. Tectono-Magmatic Evolution and Ore Genesis of Gold Deposit in Northern Helanshan (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan(in Chinese).

- nese with English abstract).
- Zhong, J.X., Li, H., Li, P., et al., 2012. Geological Characteristics, Ore-controlling Factors and Mineralization Law of Gold Ore in the North Mountain of Weining Area, Ningxia. *Northwestern Geology*, 45(3): 81–92 (in Chinese with English abstract).
- Zhong, J.X., Xu, G., Xiang, L.G., et al., 2018. Geological Characteristics and Metallogenetic Regularity of the Zhaobishan Iron Deposit in Beishan Area, Weining, Ningxia. *Northwestern Geology*, 51(1): 228–237 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, D., Liu, T.Y., Dai, X.Q., 2015. Processing and Inversion of Gravity and Magnetic Data in Jinchangzi-Errenshan Rock in the North Mountain of Weining Area, Ningxia. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 12(6): 766–771 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 艾宁, 2014. 宁夏卫宁北山金场子金矿矿床地质与地球化学研究(博士学位论文). 西安: 西北大学.
- 艾宁, 任战利, 李文厚, 等, 2011. 宁夏卫宁北山地区矿床类型及成矿时代. *矿床地质*, 30(5): 941–948.
- 陈衍景, 倪培, 范宏瑞, 等, 2007. 不同类型热液金矿系统的流体包裹体特征. *岩石学报*, 23(9): 2085–2108.
- 郭佩, 刘池洋, 韩鹏, 等, 2017. 鄂尔多斯盆地西南缘下一中侏罗统碎屑锆石 U-Pb 年代学及其地质意义. *大地构造与成矿学*, 41(5): 892–907.
- 郭伟, 林贤, 胡圣虹, 2020. 单个流体包裹体 LA-ICP-MS 分析及应用进展. *地球科学*, 45(4): 1362–1374.
- 海连富, 刘金科, 李海峰, 等, 2020. 宁夏卫宁北山多金属矿床地质特征与找矿方向. *湖南科技大学学报(自然科学版)*, 35(1): 30–39.
- 胡能高, 杨家喜, 1995. 贺兰山群变质岩的地球化学特征. *矿物学报*, 15(1): 104–110.
- 胡芳芳, 范宏瑞, 沈昆, 等, 2005. 胶东乳山脉状金矿床成矿流体性质与演化. *岩石学报*, 21(5): 1329–1338.
- 霍福臣, 潘行适, 尤国林, 等, 1989. 宁夏地质概论. 北京: 科学出版社.
- 李净, 海连富, 母彩霞, 等, 2018. 宁夏照壁山铁矿成矿地质特征与找矿方向. *地质找矿论丛*, 33(2): 243–247.
- 李杰, 张丽鹏, 宋明春, 等, 2021. 胶东水旺庄金矿床成矿机制: 来自 S-H-O 同位素和流体包裹体的制约. *地球科学*, 46(5): 1569–1584.
- 廖华瑞, 1989. 宁夏区域地质基本特征. *中国区域地质*, 8(4): 26–35.
- 刘斌, 段光贤, 1987. NaCl-H₂O 溶液包裹体的密度式和等容式及其应用. *矿物学报*, 7(4): 345–352.
- 刘勇, 李廷栋, 王彦斌, 等, 2010. 宁夏卫宁北山金场子闪长玢岩岩脉地质特征及 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄. *中国地质*, 37(6): 1575–1583.
- 刘志坚, 2013. 宁夏卫宁北山金、铅、银多金属矿成矿地质特征(博士学位论文). 成都: 成都理工大学.
- 刘金科, 张道涵, 魏俊浩, 等, 2016. 贺兰山北段古元古代 S 型花岗岩岩石地球化学、锆石 U-Pb 年代学及其地质意义. *中南大学学报(自然科学版)*, 47(1): 187–197.
- 卢焕章, 范宏瑞, 倪培, 等, 2004. 流体包裹体. 北京: 科学出版社.
- 马秀军, 海连富, 母彩霞, 等, 2018. 卫宁北山多金属矿构造岩相成矿规律与找矿研究. *中国矿业*, 27(增刊2): 91–95.
- 马旺, 刘英超, 杨竹森, 等, 2019. 西藏列廷冈—勒青拉铅锌铁铜钼矿床成矿流体特征: 来自流体包裹体及碳氢氧同位素的证据. *地球科学*, 44(6): 1957–1973.
- 毛景文, 谢桂青, 张作衡, 等, 2005. 中国北方中生代大规模成矿作用的期次及其地球动力学背景. *岩石学报*, 21(1): 169–188.
- 宁夏回族自治区地质调查院, 2017. 中国区域地质志·宁夏志. 北京: 地质出版社.
- 潘桂棠, 陆松年, 肖庆辉, 等, 2016. 中国大地构造阶段划分和演化. *地质前缘*, 23(6): 1–23.
- 邱朝霞, 1989. 宁夏金场子金矿床氧化带中微细金球特征. *地质与勘探*, 25(8): 39–42.
- 宋新华, 尹秉喜, 闫红, 等, 2010. 航磁资料在卫宁北山寻找多金属矿中的应用. *物探与化探*, 34(3): 289–293.
- 王美芳, 2015. 宁夏卫宁北山地区自然重砂异常特征及其找矿指示意义. *资源与产业*, 17(2): 55–59.
- 王庆飞, 邓军, 赵鹤森, 等, 2019. 造山型金矿研究进展: 兼论中国造山型金成矿作用. *地球科学*, 44(6): 2155–2186.
- 吴文忠, 孟方, 王红, 等, 2013. 宁夏卫宁北山钴异常的物质来源研究. *太原理工大学学报*, 44(4): 485–489.
- 徐国风, 1988. 论宁夏金场子渗流热卤水—表生改造型金矿床的矿源. *地球科学*, 13(2): 147–153.
- 尹秉喜, 孟方, 杨勇, 2012. 物化探技术在二人山—黄石坡沟多金属矿勘查中的应用. *物探与化探*, 36(6): 898–901.
- 翟裕生, 邓军, 李晓波, 1999. 区域成矿学. 北京: 地质出版社.
- 张道涵, 2017. 宁夏贺兰山北段构造—岩浆演化与金矿床成因(博士学位论文). 武汉: 中国地质大学.
- 仲佳鑫, 李欢, 李鹏, 等, 2012. 宁夏卫宁北山金场子金矿床地质特征与控矿因素分析. *西北地质*, 45(3): 81–92.
- 仲佳鑫, 徐刚, 向连格, 等, 2018. 宁夏卫宁北山地区照壁山铁矿床地质特征及成矿规律探讨. *西北地质*, 51(1): 228–237.
- 朱丹, 刘天佑, 代小强, 2015. 宁夏卫宁北山金场子—二人山岩体重磁资料处理解释. *工程地球物理学报*, 12(6): 766–771.