



引文格式: 贾彬, 张振, 魏立勇, 等. 南秦岭老君庙金矿床载金含砷黄铁矿矿物学研究及其地质意义[J]. 西北地质, 2026, 59(1): 110–129. DOI: 10.12401/j.nwg.2025110

Citation: JIA Bin, ZHANG Zhen, WEI Liyong, et al. Mineralogical Study of Gold-Bearing Arsenian Pyrite in the Laojunmiao Gold Deposit, South Qinling, and Its Geological Significance[J]. Northwestern Geology, 2026, 59(1): 110–129. DOI: 10.12401/j.nwg.2025110

南秦岭老君庙金矿床载金含砷黄铁矿矿物学研究及其地质意义

贾彬^{1,2}, 张振^{1,2,*}, 魏立勇^{1,2}, 吴欢欢^{1,2}, 唐明锋^{1,2}, 孟五一^{1,2}, 田映天^{1,2}, 王鑫^{1,2}

(1. 中国地质调查局西安矿产资源调查中心, 陕西 西安 710100;

2. 中国地质调查局金矿勘查技术创新中心, 陕西 西安 710100)

摘要: 老君庙金矿床是南秦岭造山带中近年新发现的一个中型金矿床, 位于公馆和青铜沟两个超大型汞锑矿床之间。金矿化主要赋存于上泥盆统西岔河组碎屑岩-碳酸盐岩中, 受地层和构造控制, 矿体沿 EW 向构造破碎带分布, 在断裂交汇部位矿化相对集中。关于金在矿物中的分布规律及矿床类型尚缺乏系统研究。基于野外地质调查、矿相学观察、背散射电子图像(BSE)及电子探针分析(EPMA)等方法, 查明老君庙金矿载金矿物的组分特征, 判断 Au 的赋存状态, 进而探讨矿床成因类型。研究结果显示, 老君庙金矿成矿过程分为沉积成岩期、热液成矿期、表生氧化期等 3 个期次。热液成矿期的金矿化以微细浸染型为主, 可划分为石英+含砷黄铁矿阶段(I); 石英+含砷黄铁矿+毒砂+闪锌矿阶段(II)和石英+方解石阶段(III)等 3 个成矿阶段。含砷黄铁矿和毒砂都是载金矿物, 但黄铁矿是主要的载金矿物, 沉积成岩期黄铁矿(Py1、Py2)和热液成矿期黄铁矿(Py3、Py4)均含金, 热液成矿期黄铁矿含金量性明显优于沉积成岩期黄铁矿, 且 Au、As 具有正相关关系。金主要以不可见金形式存在, 沉积成岩期黄铁矿中(Py1、Py2)Au 主要以纳米金粒(Au⁰)形式赋存; 而热液成矿期黄铁矿(Py3、Py4)和毒砂(Apy)中的金以晶格金(Au⁺)的形式赋存。老君庙金矿床的地质特征、成矿地质条件及金的赋存状态等与典型的卡林型金矿床相似, 与中国各成因类型金矿的 $\delta\text{Fe}-\delta\text{S}$ 、 $\delta\text{Fe}/\delta\text{S}-\text{As}$ 、 $(\text{Fe}+\text{S})-\text{As}$ 体系对比, 成矿期黄铁矿均落在卡林型金矿床区域内, 其成因类型应归属于卡林型金矿床。

关键词: 南秦岭; 老君庙金矿; 金的赋存状态; 电子探针; 载金硫化物; 卡林型金矿

中图分类号: P618.51

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2026)01-0110-20

Mineralogical Study of Gold-Bearing Arsenian Pyrite in the Laojunmiao Gold Deposit, South Qinling, and Its Geological Significance

收稿日期: 2025-05-26; 修回日期: 2025-08-24; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 自然资源综合调查指挥中心科技创新基金(KC2024007), 中国地质调查局项目“南秦岭旬北地区金锑找矿靶区优选与评价”(DD20230370)联合资助。

作者简介: 贾彬(1992-), 男, 工程师, 从事基础地质、矿产地质方面研究。E-mail: jiabin1913@163.com。

* 通讯作者: 张振(1987-), 男, 高级工程师, 主要从事矿产地质调查研究工作。E-mail: 545003457@qq.com。

© Editorial Office of *Northwestern Geology*. OA under CC BY-NC-ND

JIA Bin^{1,2}, ZHANG Zhen^{1,2,*}, WEI Liyong^{1,2}, WU Huanhuan^{1,2}, TANG Mingfeng^{1,2},
MENG Wuyi^{1,2}, TIAN Ying Tian^{1,2}, WANG Xin^{1,2}

(1. Xi 'an Mineral Resources Survey Center, China Geological Survey, Xi 'an 710100, Shaanxi, China; 2. Technology Innovation Center for Gold Ore Exploration, China Geological Survey, Xi 'an 710100, Shaanxi, China)

Abstract: The Laojunmiao gold deposit, located between the Gongguan and Qingtongou super-large Hg-Sb deposits, is a medium-size gold deposit recently discovered in the South Qinling Orogenic Belt. The gold mineralization mainly hosted in the clastic-carbonate rocks of the Upper Devonian Xichahe Formation. Controlled by stratigraphy and structure, the orebodies are distributed along the EW-trending structural fracture zone, and the mineralization is relatively concentrated at the intersection of faults. However, there is still a lack of systematic research on the distribution pattern of gold in minerals and the types of deposits. Based on field investigations, mineralogy observations, backscattered electron (BSE) imaging, and electron probe micro probe analysis (EPMA), the compositions of the gold-bearing minerals and the occurrence state of Au in the Laojunmiao gold deposit are determined, and the deposit's genesis was discussed. The results show that the mineralization process of the Laojunmiao gold deposit can be divided into three stages: sedimentary-diagenetic stage, hydrothermal mineralization stage, and supergene oxidation stage. The gold mineralization during the hydrothermal stage is predominantly fine-grained disseminated type, which can be subdivided into three substages: Quartz + Arsenic-bearing pyrite stage (I), Quartz + Arsenic-bearing pyrite + Arsenopyrite + Sphalerite stage (II), and Quartz + Calcite stage (III). Arsenic-bearing pyrite and arsenopyrite are both gold-bearing minerals, but pyrite is the primary gold-bearing mineral. Both sedimentary-stage pyrites (Py1 and Py2) and hydrothermal-stage pyrites (Py3 and Py4) contain gold. The gold content of hydrothermal-stage pyrites is significantly higher than that of sedimentary-stage pyrites, and there is a positive correlation between Au and As. Gold primarily exists as invisible gold. Au in sedimentary-stage pyrites (Py1 and Py2) occurs primarily as gold nanoparticles (Au^0); while gold in hydrothermal-stage pyrites (Py3 and Py4) and arsenopyrite (Apy) occurs as lattice gold (Au^+). The results indicate that the Laojunmiao gold deposit show similargeological characteristics, metallogenic conditions, and gold occurrence modes with typical Carlin-type gold deposits. Compared with the $\delta\text{Fe}-\delta\text{S}$, $\delta\text{Fe}/\delta\text{S}-\text{As}$, and $(\text{Fe}+\text{S})-\text{As}$ systems of various genetic types of gold deposits in China, the pyrite mineralization during the mineralization period all falls within the Carlin-type gold deposit region. Therefore, the Laojunmiao gold deposit could be classified as a Carlin-type gold deposit.

Keywords: South Qinling; Laojunmiao gold deposit; gold occurrence modes; electron probe microanalysis (EPMA); gold-hosting sulfides; Carlin-type gold deposit

矿石的物质结构、矿物共生组合特征是研究矿床成因的基础,深入探讨矿石结构特征与金的赋存状态,可为系统揭示金的富集机制、阐明矿床成因机制以及优化选冶工艺流程等方面提供关键理论依据(华曙光等, 2012; 范宏瑞等, 2018)。微细浸染型金矿的载金矿物主要是黄铁矿、毒砂,金常以“不可见金”形式赋存于含砷黄铁矿和毒砂等 Fe-As-S 矿物中(Joralemon, 1951; Grigore et al., 1999; 陈懋弘等, 2009; 葛战林等, 2023)。通过 Fe-As-S 矿物标型特征、元素含量变化及元素相关性分析研究,可以有效判断 Au 的赋存状态及其晶格占位情况,进而反演成矿流体性质和指示成矿物理化学条件,可以揭示金矿成矿过程、成因机制

和找矿信息(Reich et al., 2005; 严育通等, 2012a)。

南秦岭地区是中国造山型及卡林-类卡林型金矿床的集中区(图 1),区内赋存了一系列大型和超大型金矿床,如阳山、八卦庙、金龙山、寨上、马鞍桥等,目前已发现的金矿床超过 100 处(齐金忠等, 2003; 冯建忠等, 2003; Ma et al., 2020; Ding et al., 2021; 张家瑞等, 2024)。关于南秦岭金矿床尚存在造山型、卡林型及类卡林型等多种成因认识(毛景文, 2001; 华曙光等, 2012; Wu et al., 2018)。镇旬盆地是南秦岭成矿带中极具潜力的 Au-Hg-Sb-Pb-Zn 多金属成矿带(陈松岭等, 2001),前人对其开展过大量基础研究(张复新等, 2000; Zhang et al., 2014; 刘云华等 2016; Ma et al., 2020),

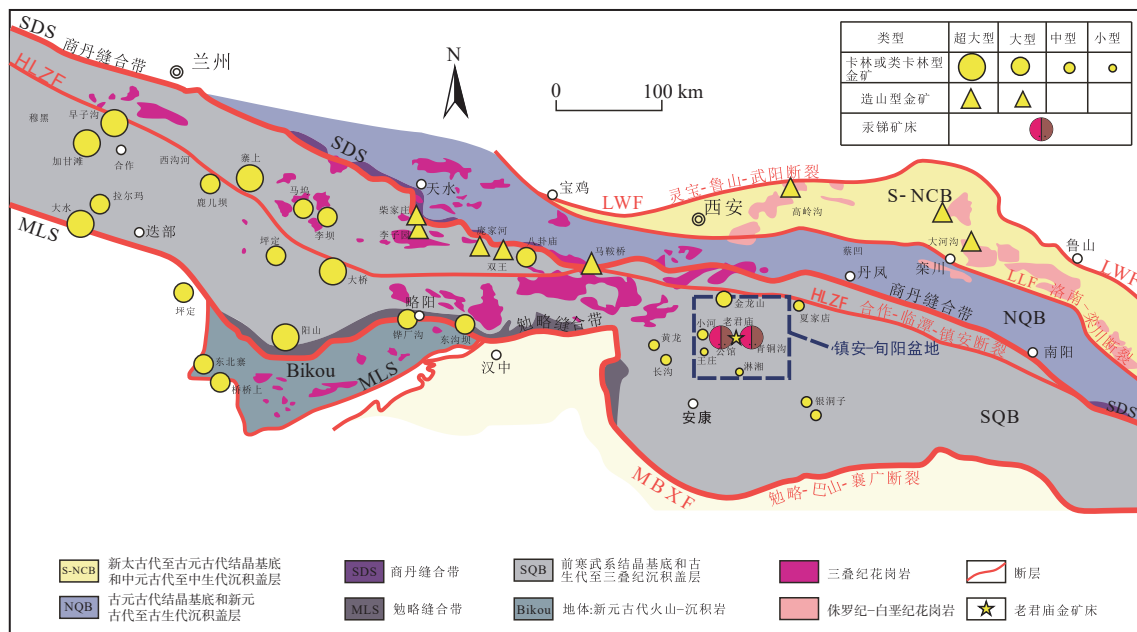


图1 秦岭造山带构造格局和矿床分布示意图(据 Dong et al., 2016; 马渊博, 2021 修改)

Fig. 1 Tectonic framework and mineral deposit distribution of the Qinling Orogenic Belt

盆地南侧发育以泗人沟、关子沟等为代表的志留系—中泥盆统热水沉积改造型铅锌矿床(刘天航等, 2021), 北部沿板岩镇断裂发育有金龙山超大型微细浸染型金矿床(杨宝利等, 2014), 盆地中部产出有公馆、青铜沟超大型汞锑矿, 近年来有小河、老君庙、王庄等金矿床新发现(孟五一等, 2021, 2024; 杨本昭等, 2024), 使此带逐渐成为一条重要的金汞锑成矿带。

老君庙金矿是近年来新发现的微细浸染型金矿床, 位于公馆、青铜汞锑矿之间, 具有中大型资源远景(图1)(杨本昭等, 2024)。目前, 矿区仍处于金找矿勘查阶段, 在矿石类型、控矿构造、成矿预测等方面开展了一些基础调查研究工作(杨本昭等, 2024; 徐晓辉等, 2024), 但对金在矿物中的分布规律尚未开展研究, 矿床成因还不明确。笔者在野外地质调查和矿相学观察的基础上划分不同成矿阶段, 通过分析矿石矿物特征, 结合岩相学显微鉴定、金属硫化物电子探针显微分析(EPMA), 查明老君庙金矿载金矿物的组分特征, 判断 Au 的赋存状态, 进而探讨矿床成因类型, 以期老君庙金矿床成矿规律研究及下步找矿工作提供一定的依据。

1 成矿地质背景

1.1 区域地质背景

秦岭造山带是中央造山带的重要组成部分, 是中

国大地构造格局的枢纽。其西部衔接昆仑(祁连)造山带与阿尔金造山带, 东部与大别—苏鲁造山带相接, 同时又是华北克拉通与扬子克拉通的过渡地带(图1)(张国伟等, 2001; Wu et al, 2013), 其地质演化历史复杂, 构造—岩浆活动强烈, 矿产资源丰富, 是中国重要的多金属成矿带之一(Liu et al., 2015; Dong et al, 2016; 姜寒冰等, 2023; 陈龙龙等, 2024; 周彬等, 2025)。

南秦岭镇旬盆地位于秦岭造山带的南缘, 属扬子板块北缘与秦岭微板块结合带的关键构造部位(张国伟等, 2001)。区内广泛发育晚古生代地层, 主要出露地层为志留系、泥盆系浅变质碎屑岩—碳酸岩系列, 以泥盆系发育齐全, 分布最广(图2)。区内岩浆活动较弱, 区域构造线主要为 NWW—SEE 向, 地层展布与之基本平行, 南羊山断裂、佛坪—尖山沟口背斜是区域性构造。次级的田家山—南羊山复向斜、西岔河—砂碛沟复背斜、南羊山复向斜、公馆—回龙复背斜、北羊山复向斜及其相伴而生的次级断裂构造成为工作区的基本构造格架。其中, 南羊山断裂控制了区内沉降幅度及岩相变化(张国伟, 1995), 控制了区内金、汞、锑等多金属成矿, 构成了一条 Au-Hg-Sb-Pb-Zn 多金属成矿带(图2)(陈松岭等, 2001; 孟五一等, 2021)。

1.2 矿床地质特征

老君庙金矿床位于南秦岭褶皱带东段, 镇安—旬阳盆地中部(图2)。紧靠南羊山断裂北侧, 位于公馆—

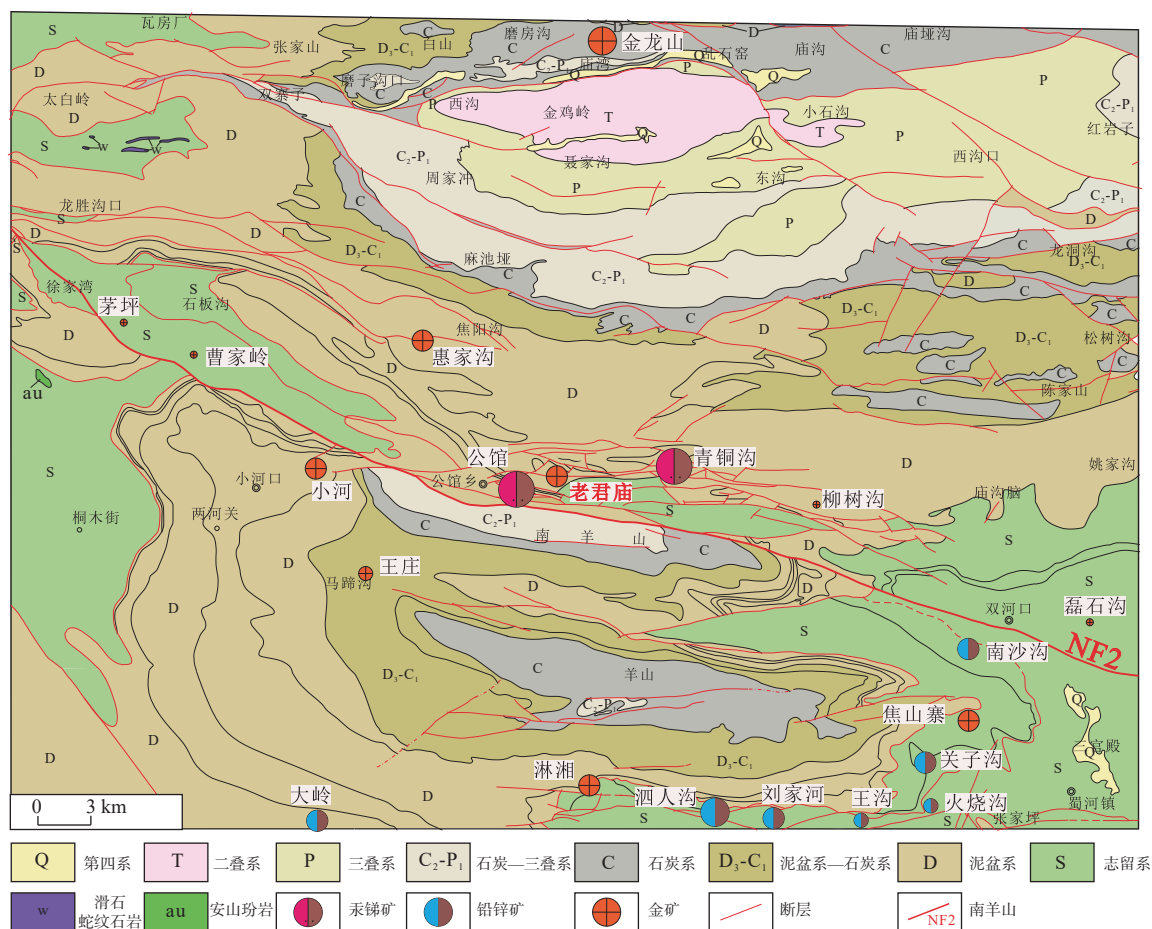


图2 南秦岭旬阳盆地金、汞、锑、铅、锌矿产分布图

Fig. 2 Spatial distribution of Au, Hg-Sb, and Pb-Zn deposits in the Xunyang basin, South Qinling Orogenic Belt

青铜沟超大型汞锑矿床之间,金矿(化)体受构造、岩性双重因素控制,与构造发育程度关系密切。矿区内出露地层主要为古生界志留纪—石炭纪(S-C)滨海海滩—浅海盆地相的碎屑岩—碳酸盐岩(图3)。老君庙金矿位于区域性仁河—双河复式背斜中部,双河公馆逆冲断裂带(南羊山断裂)的北部,区内次级褶皱、断裂构造极为发育,为汞锑金矿富集提供了充分的条件。矿体主要富集于公馆背斜核部或翼部,由于自北向南的强烈挤压,褶皱轴部发育密集的节理、破劈理及断裂构造,均是成矿的有利部位。其两翼地层由于挤压弯曲劈理集中发育,对矿化有一定控制作用。区内矿体的分布、发育与断裂构造关系十分密切,尤其以近EW向的剪切破碎带直接控制矿体的分布,一般在断裂带变宽部位、断裂交汇部位及产状变化部位矿化相对集中,矿体变宽、品位增高(图3)。矿区内构造叠加明显,特别是含矿层、褶皱与断裂复合部位,形成构造结,矿化更为富集。矿(化)体均赋存于下泥盆统西岔河组石英砂岩、石英杂砂岩、含燧石角砾石英砂岩、

燧石砂砾岩及层间断层破碎带及上、下盘附近 (徐晓辉等, 2024)。

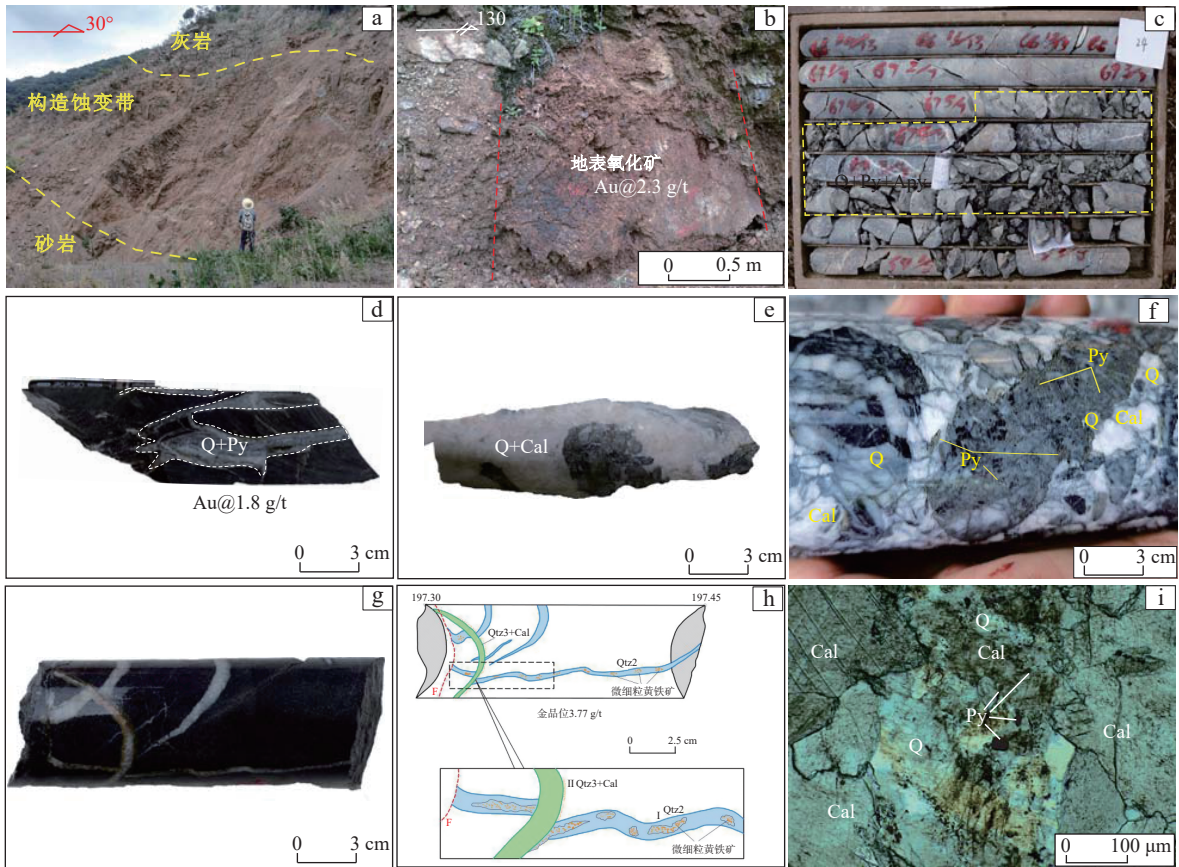
目前,老君庙金矿床已发现金矿(化)体 10 条,主矿体为 K15、K16 矿体,均为隐伏矿体,长度为 300~400 m,呈 NE 向展布,倾向 NW,平均倾角为 70°,深部由 ZK20601、ZK20801、ZK21201、ZK30201、ZK30401 钻孔控制,Au 品位为 0.93~3.75 g/t,平均为 2.07 g/t,矿体厚度为 2.53~23.16 m,平均为 11.64 m,最大控制斜深为 430 m(图 3),初步估算潜在金矿产资源已达中型规模(杨本昭等, 2024)。

老君庙金矿矿石类型主要为黄铁矿石英砂岩型、黄铁矿含砾砂岩型(图4)。矿石矿物组成以黄铁矿、毒砂为主,其次有少量的闪锌矿、磁黄铁矿、黄铜矿、黝铜矿和针铁矿(图5g、图5h);非金属矿物为石英、长石、绢云母、方解石、锆石、榍石、石墨等。矿石结构较为单一,以黄铁矿的自形粒状结构和半自形-他形粒状结构,毒砂的自形板状结构和针状结构为主(图5e),有交代自形晶结构,过渡生长结构、包含与半

表 1 老君庙金矿矿物生成顺序表

Tab. 1 Mineral paragenetic sequence of the Laojunmiao gold deposit

矿物	沉积-成岩期	热液成矿期			表生 氧化期
		石英-含砷 黄铁矿阶段(I)	石英-含砷黄铁矿 -毒砂阶段(II)	石英-方解石 阶段(III)	
石英	Qtz1	Qtz2			
绢云母					
黄铁矿	Py1	Py2	Py3	Py4	
毒砂			Apy		
闪锌矿					
黄铜矿					
黝铜矿					
磁黄铁矿					
方解石					
褐铁矿					



a. 矿体受 EW 构造蚀变带控制; b. 地表红褐色氧化矿; c. ZK20601 岩心中矿石特征; d. 黄铁矿含砾砂岩矿石中发育 Q+Py 细脉; e. 石英-方解石手标本; f. 角砾岩型矿石, 角砾为含黄铁矿硅化砂砾岩, 胶结物为石英和方解石; g、h. 石英-方解石穿切关系及素描图; i. 透射光下见方解石交代早期含矿石英脉; Py. 黄铁矿; Apy. 毒砂; Q. 石英; Cal. 方解石

图4 老君庙金矿典型矿体与矿石照片

Fig. 4 Photographs showing the ore bodies and ore specimens from the Laojunmiao gold deposit

确定其不同阶段金属硫化物微区成分及分布规律。

电子探针分析在中国地质调查局西安矿产资源调查中心实验室完成, 仪器为日本岛津 EPMA-1720HT 电子探针仪。工作条件为: 加速电压为 15 kV, 加速电流为 2×10^{-8} A, 束斑直径为 1 μm , 峰值计数时间为 10 s, 在 a 峰的一半时间内测量峰两侧的背景强度。

分析使用了黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、硒化铋、碲化锑及元素金、镍、钴和铬的实验室标准样品。各元素的分析相对误差在 2% 以内(表 2), 测试精度为 0.001%。数据均为 ZAF 基本校正数据。测试之前进行样品喷碳处理, 并在照片上记录相应的位置。分析元素为 S、Fe、As、Au、Se、Pb、Ni、Co、Ag、Cu。

表 2 黄铁矿和毒砂的 EPMA 测试条件

Tab. 2 EPMA Analytical Conditions for Pyrite and Arsenopyrite

序号	分析元素	分析晶体	特征 X 射线	计数时间 (s)		标样矿物	检出限 (10^{-6})
				峰位	背景		
1	As	RAP/CH1	Lb	10	5	FeAsS	521.54
2	S	PET/CH3	Ka	10	5	FeS ₂	102.87
3	Fe	LiF/CH4	Ka	10	5	FeS ₂	422.57
4	Au	PET/CH3	Ma	10	5	Au	664.46
5	Se	RAP/CH1	La	10	5	ZnSe	289.70
6	Pb	PET/CH3	Ma	10	5	PbS	513.33
7	Ni	LiF/CH4	Ka	10	5	Ni	515.78
8	Co	LiF/CH4	Kb	10	5	Co	2 573.04
9	Ag	PET/CH3	La	10	5	Ag ₂ S	229.84
10	Cu	LiF/CH4	Ka	10	5	CuFeS ₂	703.82

3 分析结果

3.1 载金硫化物显微特征

黄铁矿是老君庙金矿含量最多的硫化物, 既有沉积成因, 也有热液成因, 矿化体中的黄铁矿大部分受到热液改造具有典型的环带状结构, 根据矿物颗粒大小和结构构造, 将区内黄铁矿化大致分为 4 种。

(1)Py1: 草莓状黄铁矿(图 5a)或环带状黄铁矿核部(图 5c、图 5i)。显微境下表面呈麻点状, 背反射图像中为灰色, 颜色较深。草莓状黄铁矿一般分布在西岔河组砂岩中, 单颗粒呈圆形或椭圆形, 大小为 5~20 μm 不等, 一般聚集分布, 形成直径约为 20~50 μm 集合体。作为环带黄铁矿内核内部夹杂有机杂质且孔隙较为发育, 呈麻点状, 为沉积期黄铁矿被后期热液改造, 使其呈不规则状, 局部边界模糊, 大小为 10~40 μm 。

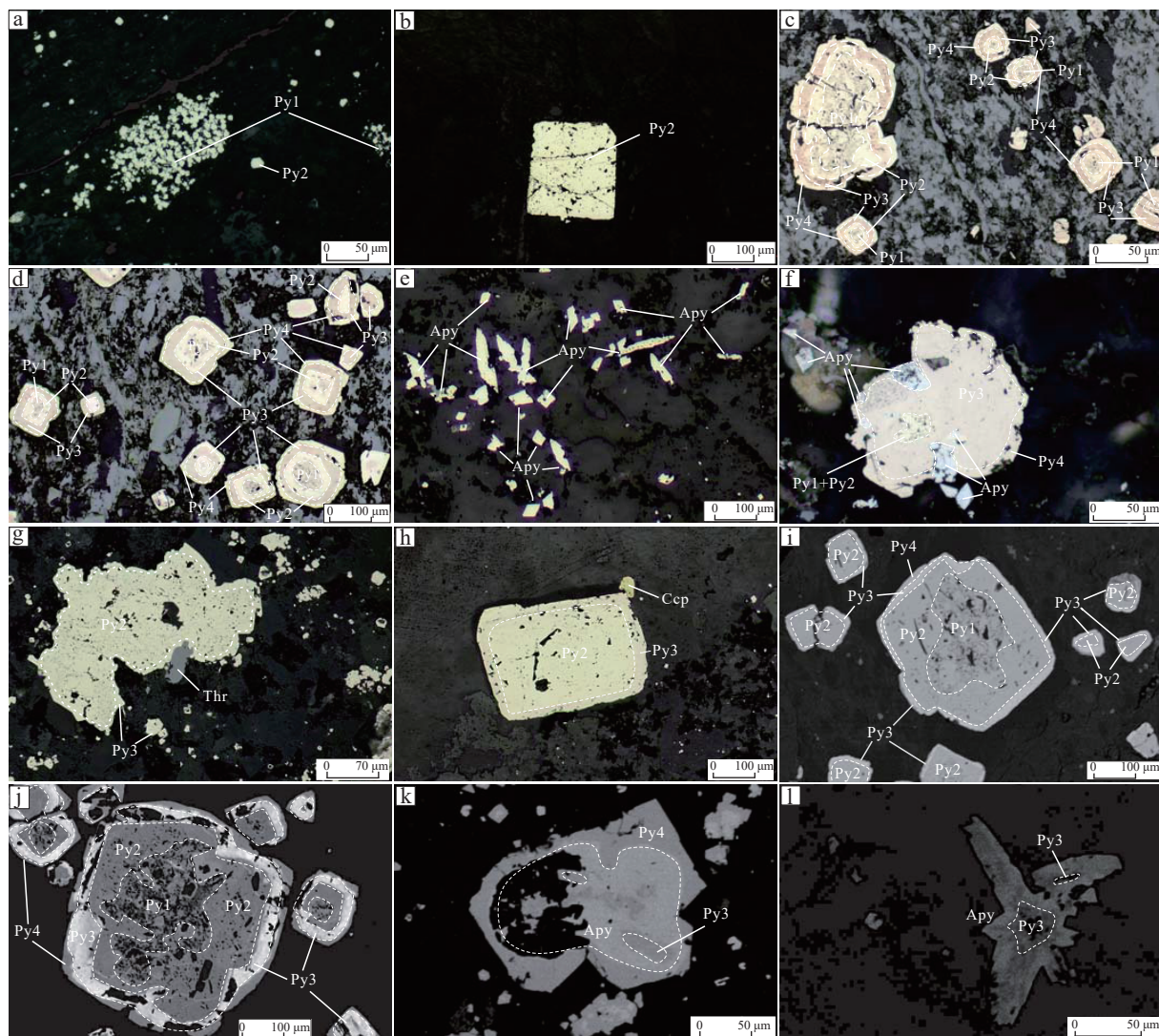
(2)Py2: 立方体黄铁矿(图 5b)或围绕 Py1 生长环带状黄铁矿的内环(图 5d、图 5j), 可能为经热液改造的同沉积成因黄铁矿。部分作为环带状黄铁矿的内环, 一般包裹核部的麻点状黄铁矿(Py1), 二者界线较为明显, 局部过渡, 表明 Py1 受热液改造程度较高。显微镜下表面光滑, 部分环带状黄铁矿没有核部

(Py1), 则 Py2 作为环带状黄铁矿的核部出现; 环带较宽, 大小为 10~110 μm 不等。背反射图像中为灰色, 颜色最深。

(3)Py3: 环带黄铁矿的中间环带或外环带、细粒状黄铁矿。部分与毒砂共生, 位于毒砂-黄铁矿集合体的核部(图 5l)。此阶段黄铁矿在 BSE 下相对亮度最高(图 5i、图 5g); 显微镜下表面光滑, 一般围绕 Py2 生长且与之界线清晰, 其间部分常有一暗色条纹间隔(图 5c)。个别含砷黄铁矿颗粒中未见内核(Py2, 也有可能薄片未切到矿物核部), 仅发育 Py3 和 Py4。自形一半自形, 大小为 0~110 μm 不等, 背反射图像中为灰白色, 颜色最亮(图 5g)。Py2 和 Py3 是环带中黄铁矿最主要的类型。

(4)Py4: 主要呈星点状或围绕前期环带状黄铁矿呈环带状, 作为环带状黄铁矿最外环, 宽度较窄, 大多数情况缺失, 较为图致密(图 5c、图 5g)。未观察到 Py4 与毒砂的生长关系, 显微镜下表面光滑, 一般围绕 Py3 生长, 部分可见直接围绕 Py2 生长的现象。

毒砂在老君庙矿石中含量较少, 一般毒砂呈半自形长柱状、矛头状(图 5e), 部分与黄铁矿形成集合体, 可见毒砂包裹 Py3, 部分穿插黄铁矿(Py3), 显微镜下表面光滑, 毒砂亮度由核部向外逐渐变亮, 类似环带



a~h. 显微镜下反射光照片; i~l. 电子探针下背散射照片; Py1. 沉积草莓状黄铁矿; Py2. 变质重结晶黄铁矿;
Py3、Py4. 热液期黄铁矿; Apy. 毒砂; Ccp. 黄铜矿; Thr. 黝铜矿

图5 老君庙金矿矿物结构的显微照片

Fig. 5 P Micrographs showing mineral textures of the Laojunmiao gold deposit

构造, 部分沿 Py3 晶体的边部生长或穿插 Py3(图 5f、图 5l), 亦可见 Py4 包裹毒砂, 或说明毒砂在主成矿阶段略晚于黄铁矿 Py3 形成, 略早于 Py4。背反射图像中为浅灰色, 大小为 10~40 μm。

3.2 载金硫化物化学组成

As、S、Fe 的面扫描显示明显的环带结果(图 6), As 面扫描中核部 Py1 和内环带 Py2 为暗色调, 中环带 Py3 为高亮色, 外部环带 Py4 为次高亮色, 说明 As 主要赋存于黄铁矿环带中。此外, 核部 Py1 高亮点分布不均匀, 也有一定的高砷亮点, 暗示核部也受到了一定的热液作用改造。这与点分析核部 Py1 和内环带 Py2 的 As 含量较低, 中环带 Py3 的 As 含量略有降

低特征基本吻合。S、Fe 的与 As 的环带正好相反, 高亮的内环带 Py2 和 Py4, 中环带 Py3 为次高亮, 反映其 S、Fe 含量明显降低, 而核部 Py1 有亮色色斑点, 表明核部的 S、Fe 含量也是不均匀分布的。Fe 与 S 类似, 但其对比度明显低于 S。

(1)Py1: 不含 As 或低 As, 高 S、Fe, As 含量为 1.24%, S 含量为 51.47%, Fe 含量为 45.63%。原子数 S/Fe 值平均为 1.96, 接近黄铁矿(FeS_2)的理论值 2, 有研究认为沉积黄铁矿 Fe/S 值与理论值接近(徐国风等, 1980; 辛明宇等, 2025)。因此, Fe、S 含量反映老君庙金矿床黄铁矿内核具有沉积成因特征, 对核部进行了 8 个点测试(核部杂质较多, 适合测点位置较少, 因

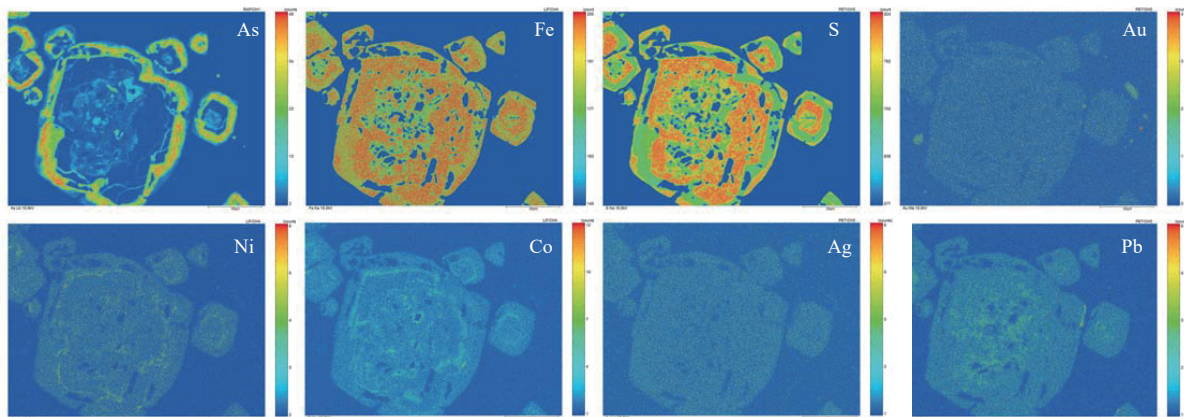


图6 老君庙金矿含砷黄铁矿的 EPMA 元素面图

Fig. 6 EPMA elemental distribution of arsenic-bearing pyrite from the Laojunmiao gold deposit

此测点较少), 仅有 1 个点 Au 含量大于检出限, 为 0.132%, 暗示核部也可能含金。

(2)Py2: 普遍表现为贫 As, 富 S、Fe, 各元素平均含量为, $\omega(\text{As})0.177\%$, $\omega(\text{S})52.58\%$, $\omega(\text{Fe})46.23\%$ 。对核部进行了 44 个点测试, 有 8 个测点 Au 含量大于检出限(Au 的检出限为 0.066), Au 含量为 0~0.095%, 平均为 0.022, 表明环带也富集一定含量的金。原子数 S/Fe 值平均为 1.98, 接近黄铁矿(FeS_2)的理论值(2), As、S、Fe 含量与核部 Py1 相似, 表明该期黄铁矿也主要为沉积成因。

(3)Py3: 特征与 Py2 基本相反, 表现为高 As, 低 S 和 Fe。其中, As 含量为 10.78%, 比 Py2 明显高出核部 1 个数量级, 说明有富砷热液活动, 形成含砷黄铁矿, S 含量平均为 45.48%, Fe 含量平均为 42.81%。44 个测点中有 10 个测点的 Au 含量大于检测限, Au 含量为 0~0.26%, 金的高值点高且明显多于核部, 说明环带是金的赋存部位。

(4)Py4: 其特征与 Py3 相似, 高 As, 低 S 和 Fe, 但 As 含量较 Py3 降低。其中, As 含量平均为 3.94%; S 含量平均为 49.922%, Fe 含量平均为 44.619%。20 个测点中有 4 个测点的 Au 含量大于检测限, Au 含量为 0.09%~0.114%, 平均为 0.102, 也反映出 Au 在黄铁矿外部环带明显富集。上述各种特征表明。环带黄铁矿(Py3、Py4)和核部黄铁矿(Py1、Py2)是不同成矿阶段的产物, 环带黄铁矿是热液成矿阶段形成的。

(5)毒砂(Apy)在老君庙矿石中含量较少, 26 个测点中有 8 个测点 Au 含量大于检测线, Au 含量为 0~0.193%。As 含量为 42.036%, S 含量为 22.725%, Fe 含量为 24.625%。

4 讨论

4.1 硫化物地球化学特征

老君庙金矿中载金矿物的结晶顺序大致为: 贫砷沉积成因或遭受热液改造黄铁矿(核部(Py1-Py2)→富砷黄铁矿环带(Py3)→毒砂(Apy)→黄铁矿外环带(Py4)。Au-As 图(图 7a)和 Au 含量柱状图(图 7b)显示, Py1、Py2 基本不含 Au 或含少量 Au, Au 在黄铁矿环带(Py3、Py4)及毒砂(Apy)中均有分布, Py3、Py4 及 Apy 中 Au 含量显著增加, 在含砷黄铁矿环带 Py3 最为富集, 指示黄铁矿和毒砂均是载金矿物。Au 的面扫描未发现与 As 环带相对应的高金环带, 亦未见金富集点(图中 Au 扫描高值区查证为锆石或榍石), 呈均质结构分布(图 6), 但黄铁矿颗粒位置与基质成像完全不同, 可清晰显示出黄铁矿结构形态, 进一步说明黄铁矿是载金矿物, 且环带内外均含有金。根据野外矿石矿物特征与黄铁矿相比, 毒砂分布较少, 主要在热液石英脉的边部少量分布, 一般占比较少(<0.5%)。因此, 黄铁矿是老君庙金矿的主要载金矿物。

老君庙金矿床中草莓状黄铁矿及环带状黄铁矿的核部(Py1 和 Py2)不含砷或低砷、区域局部含金(0~0.13%)(图 7a), 说明泥盆纪时期的沉积成岩作用可能在容矿地层形成了金的局部预富集。环带黄铁矿中由核部向外, As 含量总体呈先增加后降低的趋势(图 5j、图 6、图 7a), 这说明成矿热液特征是在不断变化的, Py2 之后, 观察到热液特征发生明显变化, 其特征是引入富含 As、Au、Fe 等元素的含矿热液流体。根据黄铁矿的生长结构和 As 含量的变化, 单颗粒黄

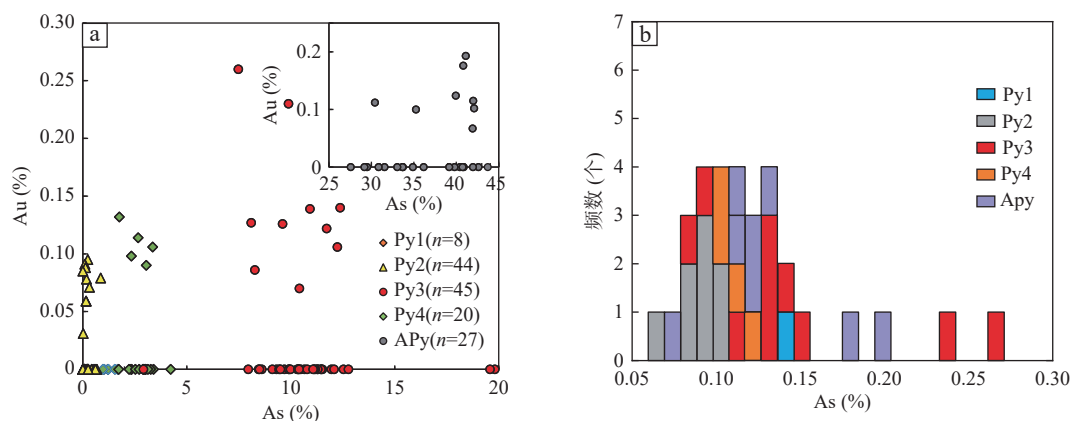


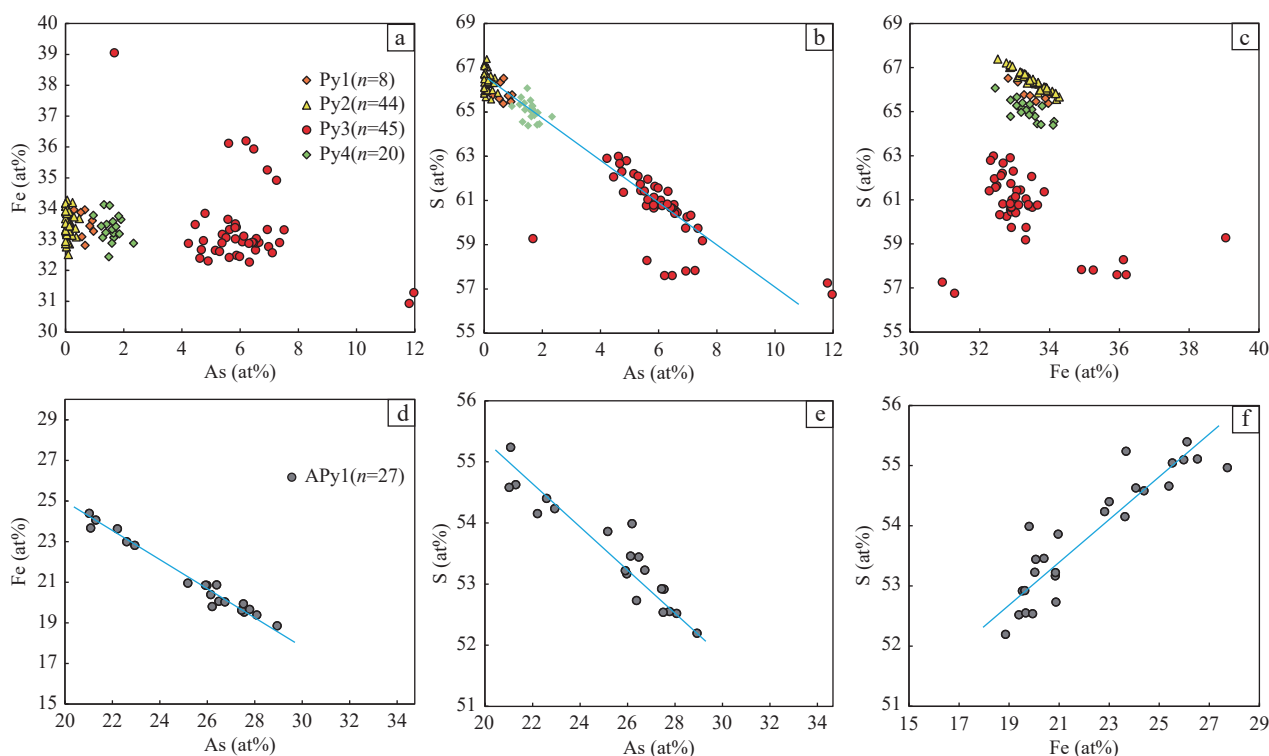
图7 老君庙金矿载金矿物 Au-As 关系图及 Au 含量分布图

Fig. 7 Au vs. As diagram and Au content distribution diagram of gold-bearing minerals in the Laojunmiao gold deposit

铁矿可分为核部贫砷黄铁矿(Py1和Py2)、富砷生长带Py3(含金)和较富砷外生长带Py4(含金)3个阶段。Fe含量在核部及环带变化不大,S含量在核部至环带边缘先减少后增加,Fe、S具有良好的协同变化特征,Fe的变化幅度小于S(图6、图8)。As的变化特征正好与S相反。Au与As具有同步变化的趋势,从核部到环带,As含量升高,Au含量随之升高,表现为正相关关系,说明砷对金的富集和沉淀具有重要作用。在毒砂中,Au与As、S也有弱正相关趋势(图7a)。环带

中As与S的空间分布状态规律,表明成矿流体早期为高温度的富As流体,围绕早期形成的低砷黄铁矿(Py1、Py2)的核心生长富As的中部环带(Py3);随着温度下降 H_2S 在流体中的溶解度逐渐增加,黄铁矿外围则形成高S低As边缘环带(Py4)。

在黄铁矿和毒砂的Fe(at%)、S(at%)、As(at%)关系图(图8)可以看出,不同世代的黄铁矿主元素组成有显著差异:沉积黄铁矿(Py1、Py2)S、Fe平均含量分别为52.41%、46.14%,原子个数比S/Fe值为1.92~



Py1、Py2. 沉积成岩黄铁矿; Py3、Py4. 热液期黄铁矿; APy. 毒砂; at%. 元素原子百分数

图8 老君庙金矿床载金矿物的元素关系图

Fig. 8 Element covariance diagram of gold-bearing minerals in the Laojunmiao gold deposit

2.07(平均值为 1.98), 计算化学式为 $\text{FeS}_{2.03}\text{FeAs}_{0.03}\text{S}_{1.98}$ (表 3), 接近黄铁矿的理想分子式。热液期黄铁矿(Py3、Py4)普遍含 As、S、Fe 的平均含量 46.75、43.10, 计算化学式为 $\text{FeAs}_{0.03}\text{S}_{1.93}\sim\text{FeAs}_{0.37}\text{S}_{1.67}$ (表 3), 总体具有富 As、贫 S、Fe 的特征。元素组分相关性分析显示, As 与 S 的原子百分数呈明显的线性负相关(图 8b), 而 As 与 Fe、Fe 与 S 之间不存在显著的相关性(图 8a、图 8c), 反映可能存在 As 替代部分 S 进入黄铁矿晶格

(沈关文等, 2022)。

毒砂中主元素组成变化较大, Fe 含量为 33.73%~37.90%(平均值为 35.90), As 含量为 27.56%~43.70%(平均值为 37.03), S 含量为 21.22%~37.90%(平均值为 32.92)。计算分子式为 $\text{FeAs}_{0.97}\text{S}_{1.10}\sim\text{FeAs}_{0.55}\text{S}_{1.52}$, 总体具有贫 As、S, 富 Fe 的特征, 指示毒砂形成的温度较低(Sharp et al., 1985; 员媛娇等, 2022)。元素组分相关性分析显示, As 与 S、Fe 原子百分数呈明显的线性

表 3 老君庙金矿床矿石中黄铁矿、毒砂电子探针分析结果(%)

Tab. 3 Electron probe microanalysis (EPMA) compositional data (%) for hydrothermal pyrite and arsenopyrite in ores from the Laojunmiao carlin-type gold deposit

样品编号	矿物	S	Fe	As	Au	Se	Pb	Ni	Co	Ag	Cu	合计	计算分子式
ZK602-1TZ1	Py1	50.72	45.89	1.20	—	0.04	0.14	0.07	—	—	—	98.37	$\text{FeAs}_{0.02}\text{S}_{1.92}$
ZK602-1TZ2	Py1	50.85	45.47	1.67	—	0.04	0.15	—	—	—	0.37	98.91	$\text{FeAs}_{0.03}\text{S}_{1.95}$
ZK602-1TZ3	Py1	50.70	45.61	0.52	—	—	0.13	—	—	—	0.21	97.58	$\text{FeAs}_{0.01}\text{S}_{1.94}$
ZK602-1TZ3	Py1	51.73	44.94	1.02	—	—	0.10	—	—	0.03	0.15	98.00	$\text{FeAs}_{0.02}\text{S}_2$
ZK602-1TZ3	Py1	51.87	44.56	1.22	—	—	0.04	—	—	0.07	0.14	98.07	$\text{FeAs}_{0.02}\text{S}_{2.03}$
ZK602-1TZ3	Py1	51.45	45.33	1.76	0.13	0.04	0.18	—	—	0.02	0.57	99.86	$\text{FeAs}_{0.03}\text{S}_{1.98}$
ZK602-2TZ2	Py1	52.27	47.01	0.97	—	0.05	0.17	0.29	0.57	—	—	101.38	$\text{FeAs}_{0.02}\text{S}_{1.94}$
ZK601-2TZ1	Py1	52.17	46.22	1.54	—	—	0.15	0.18	0.00	0.03	—	100.65	$\text{FeAs}_{0.02}\text{S}_{1.97}$
ZK602-1TZ1	Py2	50.34	45.73	0.43	—	—	0.14	—	—	—	0.11	97.01	$\text{FeAs}_{0.01}\text{S}_{1.92}$
ZK602-1TZ1	Py2	51.49	45.98	0.00	—	—	0.12	—	—	—	—	98.04	$\text{FeS}_{1.95}$
ZK602-1TZ2	Py2	51.04	45.46	0.85	0.08	—	0.08	—	—	0.04	0.10	98.07	$\text{FeAs}_{0.01}\text{S}_{1.96}$
ZK602-1TZ3	Py2	52.16	45.16	0.67	—	—	0.18	—	—	—	0.26	98.56	$\text{FeAs}_{0.01}\text{S}_{2.01}$
ZK602-1TZ3	Py2	52.62	45.80	0.21	—	—	0.19	—	—	—	0.11	99.17	FeS_2
ZK602-1TZ3	Py2	52.85	46.31	0.26	—	—	0.19	—	—	—	0.14	100.18	$\text{FeS}_{1.99}$
ZK602-1TZ3	Py2	53.67	46.48	0.42	—	—	0.16	—	—	—	0.22	101.28	$\text{FeAs}_{0.01}\text{S}_{2.01}$
ZK601-1TZ1	Py2	53.04	45.03	0.05	—	—	0.07	—	0.25	—	—	98.67	$\text{FeS}_{2.05}$
ZK601-1TZ1	Py2	52.91	45.19	0.24	0.09	—	0.14	—	0.67	—	—	99.36	$\text{FeS}_{2.04}$
ZK601-1TZ1	Py2	52.93	45.24	0.16	0.06	—	0.42	—	0.00	—	—	99.19	$\text{FeS}_{2.04}$
ZK601-1TZ1	Py2	53.05	44.58	0.17	0.08	—	0.08	0.45	0.64	—	—	99.10	$\text{FeS}_{2.07}$
ZK601-1TZ2	Py2	52.98	45.94	0.06	—	0.03	0.07	0.07	0.00	—	—	99.15	$\text{FeS}_{2.01}$
ZK601-1TZ2	Py2	53.19	45.35	0.00	—	0.04	0.24	—	0.24	—	—	99.15	$\text{FeS}_{2.04}$
ZK601-1TZ2	Py2	52.36	46.38	0.09	0.09	—	0.19	—	—	0.02	—	99.36	$\text{FeS}_{1.97}$
ZK601-1TZ2	Py2	53.33	46.19	0.06	—	—	0.16	0.06	—	—	—	100.05	$\text{FeS}_{2.01}$
ZK601-1TZ2	Py2	52.96	45.30	0.00	—	—	0.09	0.09	—	0.03	—	98.53	$\text{FeS}_{2.04}$
ZK601-1TZ2	Py2	52.87	45.71	0.07	—	0.06	0.20	0.00	—	—	—	98.94	$\text{FeS}_{2.01}$
ZK602-2TZ1	Py2	52.56	46.88	0.23	—	—	0.18	0.00	0.28	—	—	100.25	$\text{FeS}_{1.95}$
ZK602-2TZ1	Py2	53.34	46.59	0.07	—	—	0.09	0.05	0.75	—	—	100.99	$\text{FeS}_{1.99}$
ZK602-2TZ1	Py2	53.27	46.38	0.01	0.03	—	0.13	—	—	—	—	100.28	$\text{FeS}_{2.00}$
ZK602-2TZ1	Py2	52.99	46.10	0.23	—	0.03	0.25	—	—	—	—	99.80	$\text{FeS}_{2.00}$
ZK602-2TZ1	Py2	52.88	46.69	0.26	—	—	0.24	0.16	0.78	—	—	101.17	$\text{FeS}_{1.97}$
ZK602-2TZ1	Py2	52.20	47.46	0.10	—	0.05	0.23	0.06	—	0.02	—	100.26	$\text{FeS}_{1.92}$
ZK602-2TZ1	Py2	51.90	46.91	0.00	—	—	0.07	0.08	—	—	—	99.00	$\text{FeS}_{1.93}$
ZK602-2TZ1	Py2	51.79	46.17	0.06	—	0.06	0.27	0.09	—	—	0.08	98.91	$\text{FeS}_{1.95}$

续表 3

样品编号	矿物	S	Fe	As	Au	Se	Pb	Ni	Co	Ag	Cu	合计	计算分子式
ZK602-2TZ1	Py2	52.79	47.53	0.00	—	—	0.07	—	—	—	0.08	100.80	FeS _{1.93}
ZK602-2TZ1	Py2	52.60	47.56	0.00	—	—	0.23	—	—	0.05	—	100.50	FeS _{1.93}
ZK602-2TZ1	Py2	52.46	46.25	0.17	—	—	0.13	—	0.62	0.06	—	99.79	FeS _{1.98}
ZK602-2TZ1	Py2	52.56	47.13	0.19	—	—	0.22	0.10	—	0.04	0.12	100.54	FeS _{1.94}
ZK602-2TZ1	Py2	52.48	46.93	0.21	—	—	0.22	0.10	1.00	—	—	101.10	FeS _{1.95}
ZK602-2TZ1	Py2	52.90	46.77	0.00	—	0.03	0.10	0.17	0.37	—	—	100.55	FeS _{1.97}
ZK602-2TZ2	Py2	52.58	46.88	0.09	—	0.03	0.28	0.08	0.27	—	—	100.25	FeS _{1.95}
ZK602-2TZ2	Py2	51.80	46.49	0.15	—	—	0.15	—	—	0.03	—	98.83	FeS _{1.94}
ZK602-2TZ2	Py2	52.70	47.18	0.22	—	—	0.25	0.07	—	0.03	—	100.46	FeS _{1.95}
ZK602-2TZ2	Py2	53.04	46.42	0.13	0.09	—	0.16	0.10	0.28	—	0.13	100.34	FeS _{1.99}
ZK602-2TZ2	Py2	52.92	47.32	0.00	—	—	0.15	0.08	0.29	—	—	100.90	FeS _{1.95}
ZK602-2TZ2	Py2	53.14	46.18	0.00	0.09	—	0.08	—	0.96	—	—	100.56	FeS _{2.00}
ZK602-2TZ2	Py2	52.96	46.03	0.00	—	—	0.19	0.22	0.42	—	—	99.86	FeS _{2.00}
ZK601-2TZ1	Py2	52.60	46.83	0.54	—	—	0.12	—	0.38	0.05	0.09	100.61	FeAs _{0.01} S _{1.96}
ZK601-2TZ1	Py2	52.44	46.15	0.32	0.07	—	0.05	0.24	—	—	—	99.43	FeAs _{0.01} S _{1.98}
ZK601-2TZ1	Py2	52.69	46.35	0.23	—	—	0.28	—	—	—	—	99.81	FeS _{1.98}
ZK601-2TZ1	Py2	50.80	44.53	0.60	—	0.05	0.07	—	—	—	—	96.14	FeAs _{0.01} S _{1.99}
ZK601-2TZ1	Py2	52.52	46.13	0.00	—	—	0.17	0.18	—	—	—	99.54	FeS _{1.98}
ZK601-2TZ1	Py2	52.90	46.38	0.25	—	0.07	0.21	0.42	0.37	0.04	—	100.79	FeS _{1.99}
ZK602-1TZ1	Py3	45.49	42.76	9.31	—	0.04	0.20	0.32	—	0.04	0.68	99.14	FeAs _{0.16} S _{1.85}
ZK602-1TZ2	Py3	44.54	40.89	9.91	—	0.03	0.20	—	—	—	2.18	98.32	FeAs _{0.18} S _{1.90}
ZK602-1TZ2	Py3	43.59	41.81	12.53	—	0.05	0.12	—	—	—	0.34	98.78	FeAs _{0.22} S _{1.82}
ZK602-1TZ2	Py3	44.10	42.84	11.95	—	0.04	0.12	—	—	—	0.40	99.60	FeAs _{0.21} S _{1.79}
ZK602-1TZ2	Py3	43.07	42.23	12.76	—	0.08	0.20	—	—	—	0.36	98.99	FeAs _{0.23} S _{1.78}
ZK602-1TZ2	Py3	45.67	42.72	11.45	—	0.04	0.10	—	—	0.03	0.26	100.52	FeAs _{0.20} S _{1.86}
ZK602-1TZ2	Py3	44.55	42.14	11.29	—	0.08	0.15	—	—	—	0.43	98.99	FeAs _{0.20} S _{1.84}
ZK601-1TZ1	Py3	47.14	43.09	9.11	—	0.04	0.15	0.11	—	—	—	100.06	FeAs _{0.16} S _{1.91}
ZK601-1TZ1	Py3	46.62	42.49	9.89	0.23	0.06	0.09	—	—	—	—	99.68	FeAs _{0.17} S _{1.91}
ZK601-1TZ1	Py3	47.28	42.34	8.09	0.13	—	0.14	—	—	0.03	0.15	98.40	FeAs _{0.14} S _{1.94}
ZK601-1TZ1	Py3	46.16	42.38	10.47	—	0.05	0.07	0.10	—	—	0.16	99.51	FeAs _{0.18} S _{1.90}
ZK601-1TZ1	Py3	47.21	42.30	8.60	—	0.03	0.13	0.15	0.29	—	0.00	98.79	FeAs _{0.15} S _{1.94}
ZK601-1TZ2	Py3	47.59	43.20	8.27	0.09	0.03	0.13	—	—	—	0.28	99.76	FeAs _{0.14} S _{1.92}
ZK601-1TZ2	Py3	44.66	42.30	12.08	—	0.06	0.12	—	—	—	—	99.53	FeAs _{0.21} S _{1.84}
ZK601-1TZ2	Py3	47.40	43.36	9.43	—	0.10	0.06	—	—	—	—	100.38	FeAs _{0.16} S _{1.90}
ZK601-1TZ2	Py3	47.61	43.86	8.45	—	—	0.27	—	0.60	—	—	100.89	FeAs _{0.14} S _{1.89}
ZK601-1TZ2	Py3	44.86	42.52	11.51	—	—	0.19	—	—	—	0.11	99.28	FeAs _{0.20} S _{1.84}
ZK601-1TZ2	Py3	46.23	43.33	9.69	—	0.10	0.12	0.06	—	—	0.17	99.87	FeAs _{0.17} S _{1.86}
ZK601-1TZ2	Py3	46.12	44.18	10.41	0.07	0.06	0.13	—	—	—	—	101.07	FeAs _{0.18} S _{1.82}
ZK602-2TZ1	Py3	45.17	43.02	11.45	—	0.04	0.17	—	—	0.04	0.19	100.41	FeAs _{0.20} S _{1.83}
ZK602-2TZ1	Py3	45.37	42.86	11.29	—	—	0.05	—	—	—	0.09	99.83	FeAs _{0.20} S _{1.84}
ZK602-2TZ1	Py3	45.85	43.10	10.66	—	0.07	0.13	—	0.29	—	0.09	100.33	FeAs _{0.18} S _{1.85}
ZK602-2TZ1	Py3	46.20	44.45	10.38	—	0.03	0.13	0.11	—	—	0.11	101.56	FeAs _{0.17} S _{1.81}
ZK602-2TZ1	Py3	45.23	42.73	11.17	—	0.10	0.09	—	0.49	—	0.14	99.94	FeAs _{0.19} S _{1.84}
ZK602-2TZ1	Py3	46.25	43.50	10.31	—	0.03	0.16	0.11	—	—	—	100.45	FeAs _{0.18} S _{1.85}
ZK602-2TZ1	Py3	46.72	43.36	9.50	—	0.04	0.12	—	—	0.05	0.22	100.13	FeAs _{0.16} S _{1.88}

续表 3

样品编号	矿物	S	Fe	As	Au	Se	Pb	Ni	Co	Ag	Cu	合计	计算分子式
ZK602-2TZ1	Py3	46.17	44.54	9.90	—	—	0.23	0.05	0.45	—	0.10	101.65	FeAs _{0.17} S _{1.81}
ZK602-2TZ1	Py3	47.44	44.59	7.95	—	—	0.07	0.00	0.00	—	—	100.44	FeAs _{0.13} S _{1.85}
ZK602-2TZ1	Py3	46.57	44.73	8.49	—	—	0.13	0.00	0.00	—	0.10	100.26	FeAs _{0.14} S _{1.81}
ZK602-2TZ2	Py3	46.32	44.04	9.98	—	0.12	0.09	0.00	0.00	0.03	0.10	100.76	FeAs _{0.17} S _{1.83}
ZK602-2TZ2	Py3	45.85	43.51	10.79	—	0.05	0.12	0.00	0.00	—	0.17	100.62	FeAs _{0.18} S _{1.84}
ZK601-2TZ1	Py3	47.67	43.39	7.47	0.26	—	0.12	0.08	0.28	—	—	99.47	FeAs _{0.13} S _{1.91}
ZK601-2TZ1	Py3	46.19	44.19	10.34	—	—	0.00	0.00	0.00	—	0.25	100.97	FeAs _{0.17} S _{1.82}
ZK601-2TZ1	Py3	44.94	42.26	12.37	0.14	—	0.08	0.05	0.00	—	—	99.99	FeAs _{0.22} S _{1.85}
ZK601-2TZ1	Py3	45.96	43.26	11.12	—	0.09	0.21	0.06	0.00	0.03	—	100.94	FeAs _{0.19} S _{1.85}
ZK601-2TZ1	Py3	46.04	42.14	11.07	—	0.08	0.27	0.00	0.00	—	—	99.79	FeAs _{0.20} S _{1.90}
ZK602- 2-TZ1	Py3	38.60	40.22	19.81	—	0.10	0.18	0.00	0.57	—	—	99.49	FeAs _{0.37} S _{1.67}
ZK602- 2-TZ1	Py3	38.23	40.64	19.58	—	0.08	0.10	0.11	0.00	—	—	98.74	FeAs _{0.36} S _{1.64}
ZK601-2TZ1	Py3	43.94	41.79	12.24	0.11	0.08	0.24	0.00	0.00	0.03	—	98.42	FeAs _{0.22} S _{1.83}
ZK601-2TZ1	Py3	44.42	41.82	11.72	0.12	—	0.10	0.00	0.00	—	—	98.18	FeAs _{0.21} S _{1.85}
ZK602-1TZ2	Py3	45.25	41.64	10.92	0.14	0.06	0.18	0.00	0.00	0.04	0.38	98.61	FeAs _{0.20} S _{1.89}
ZK602-1TZ2	Py3	45.24	41.34	10.40	—	—	0.00	0.05	0.68	—	0.49	98.19	FeAs _{0.19} S _{1.91}
ZK602-2TZ1	Py3	46.19	42.79	9.60	0.13	—	0.09	—	—	—	—	98.79	FeAs _{0.17} S _{1.88}
ZK602-2TZ1	Py3	50.50	44.01	2.91	—	—	0.22	—	0.46	0.04	0.32	98.46	FeAs _{0.05} S ₂
ZK602-1TZ1	Py4	49.26	44.78	3.39	—	—	0.09	—	—	0.02	0.20	97.91	FeAs _{0.06} S _{1.92}
ZK602-1TZ1	Py4	48.94	45.06	2.34	—	—	0.14	—	—	0.04	0.18	96.82	FeAs _{0.04} S _{1.89}
ZK602-1TZ1	Py4	50.35	45.40	1.72	—	—	0.20	—	—	—	0.16	98.18	FeAs _{0.03} S _{1.93}
ZK602-1TZ1	Py4	49.31	45.00	3.26	—	—	0.11	—	—	—	0.11	97.93	FeAs _{0.05} S _{1.91}
ZK602-1TZ2	Py4	45.87	41.11	2.31	—	0.03	0.20	—	0.27	—	0.13	89.98	FeAs _{0.04} S _{1.94}
ZK602-1TZ2	Py4	50.48	44.56	3.01	—	0.04	0.09	0.11	—	—	0.11	98.63	FeAs _{0.05} S _{1.97}
ZK602-1TZ2	Py4	50.40	44.81	3.05	0.09	—	0.10	0.06	—	—	0.13	98.74	FeAs _{0.05} S _{1.96}
ZK602-1TZ3	Py4	51.00	44.98	3.03	—	—	0.18	—	—	—	0.18	99.65	FeAs _{0.05} S _{1.97}
ZK602-1TZ3	Py4	49.81	44.96	2.92	—	—	0.09	—	—	—	0.17	98.17	FeAs _{0.05} S _{1.93}
ZK602-1TZ3	Py4	50.61	44.93	2.99	—	—	0.17	—	—	0.03	0.15	99.07	FeAs _{0.05} S _{1.96}
ZK602-1TZ3	Py4	48.33	44.58	2.66	0.11	—	0.18	—	—	—	0.21	96.25	FeAs _{0.04} S _{1.89}
ZK602-1TZ3	Py4	51.45	45.12	2.33	0.10	—	0.21	—	0.25	—	0.12	99.65	FeAs _{0.04} S _{1.99}
ZK602-1TZ3	Py4	50.84	45.36	2.93	—	—	0.16	—	—	—	0.14	99.70	FeAs _{0.05} S _{1.95}
ZK602-1TZ3	Py4	50.72	45.20	2.22	—	0.04	0.28	—	—	—	0.15	98.83	FeAs _{0.04} S _{1.95}
ZK602-1TZ3	Py4	50.80	44.40	2.89	—	—	0.16	—	—	—	0.17	98.66	FeAs _{0.05} S _{1.99}
ZK602-1TZ3	Py4	50.17	45.03	3.12	—	—	0.27	—	—	—	0.17	98.98	FeAs _{0.05} S _{1.94}
ZK602-1TZ3	Py4	51.17	45.27	2.52	—	0.03	0.15	—	—	—	0.16	99.87	FeAs _{0.04} S _{1.97}
ZK602-1TZ3	Py4	50.60	45.02	3.36	0.11	—	0.05	—	—	—	0.24	99.77	FeAs _{0.06} S _{1.96}
ZK601-1TZ1	Py4	50.13	44.31	4.22	—	—	0.07	0.08	0.42	—	—	99.54	FeAs _{0.07} S _{1.97}
ZK601-1TZ1	Py4	51.49	44.04	2.71	—	0.04	0.16	—	—	0.05	—	98.61	FeAs _{0.05} S _{2.04}
ZK602- 2-TZ1	Apy	23.07	35.29	40.87	—	0.15	—	—	—	0.06	—	99.43	FeAs _{0.86} S _{1.14}
ZK602- 2-TZ1	Apy	23.49	35.36	40.41	—	0.14	0.05	—	—	—	—	99.46	FeAs _{0.85} S _{1.16}
ZK601-2TZ1	Apy	21.93	34.10	42.61	—	0.15	—	0.04	0.57	0.03	—	99.41	FeAs _{0.93} S _{1.12}
ZK601-2TZ2	Apy	22.24	34.60	42.10	0.10	0.12	0.13	—	0.00	—	0.11	99.39	FeAs _{0.91} S _{1.12}
ZK601-2TZ2	Apy	22.38	34.65	41.99	0.12	0.23	—	—	0.74	—	—	100.11	FeAs _{0.90} S _{1.12}
ZK601-2TZ1	Apy	22.13	33.97	41.96	—	0.13	0.11	0.05	0.00	—	—	98.35	FeAs _{0.92} S _{1.13}
ZK602-1TZ2	Apy	22.95	35.02	41.11	0.19	0.14	0.00	0.07	0.00	—	0.16	99.66	FeAs _{0.87} S _{1.14}

续表 3

样品编号	矿物	S	Fe	As	Au	Se	Pb	Ni	Co	Ag	Cu	合计	计算分子式
ZK602-1TZ2	Apy	22.99	35.99	40.82	0.18	0.16	0.00	0.00	0.21	—	—	100.34	FeAs _{0.85} S _{1.11}
ZK602-1TZ2	Apy	23.89	34.98	39.94	0.12	0.23	0.10	0.06	0.40	—	—	99.73	FeAs _{0.85} S _{1.19}
ZK601-2TZ1	Apy	23.86	34.96	39.79	—	0.24	—	—	—	—	—	98.85	FeAs _{0.85} S _{1.19}
ZK601-2TZ1	Apy	24.30	35.86	39.17	—	0.14	0.17	0.04	0.00	—	—	99.67	FeAs _{0.81} S _{1.18}
ZK601-2TZ1	Apy	26.80	36.57	36.15	—	0.20	—	—	—	—	—	99.90	FeAs _{0.74} S _{1.28}
ZK601-2TZ1	Apy	26.74	36.31	35.25	0.10	0.17	—	—	—	—	—	98.57	FeAs _{0.72} S _{1.28}
ZK601-2TZ1	Apy	27.65	36.39	34.88	—	0.19	0.09	—	—	—	—	99.20	FeAs _{0.86} S _{1.27}
ZK601-2TZ1	Apy	28.38	36.99	33.70	—	0.15	0.11	—	—	0.04	—	99.36	FeAs _{0.68} S _{1.34}
ZK602-1TZ2	Apy	28.18	37.76	33.67	—	0.20	0.07	—	—	—	—	99.88	FeAs _{0.66} S _{1.30}
ZK602-1TZ2	Apy	28.57	36.71	33.05	—	0.18	0.11	—	—	—	—	98.63	FeAs _{0.67} S _{1.36}
ZK602-1TZ2	Apy	29.93	36.99	31.54	—	0.11	0.09	0.06	—	—	—	98.73	FeAs _{0.64} S _{1.41}
ZK602-1TZ2	Apy	30.21	37.41	30.85	—	0.21	0.12	—	—	—	—	98.80	FeAs _{0.61} S _{1.41}
ZK602-1TZ2	Apy	31.13	37.90	30.42	0.11	0.08	0.26	—	—	—	—	99.90	FeAs _{0.60} S _{1.43}
ZK602-1TZ2	Apy	31.05	37.82	29.50	—	0.14	—	—	—	—	—	98.52	FeAs _{0.58} S _{1.43}
ZK602-1TZ2	Apy	31.41	37.47	29.18	—	0.12	0.22	—	—	—	—	98.40	FeAs _{0.58} S _{1.46}
ZK602-1TZ2	Apy	32.92	37.47	27.56	—	0.15	0.13	—	0.20	—	0.14	98.57	FeAs _{0.55} S _{1.53}
ZK602-1TZ2	Apy	22.64	34.25	41.92	0.07	0.21	0.11	0.06	0.17	—	0.10	99.53	FeAs _{0.91} S _{1.15}
ZK602-1TZ3	Apy	21.22	33.73	43.70	—	0.27	0.05	0.00	—	0.02	—	99.00	FeAs _{0.97} S _{1.10}
ZK602-1TZ3	Apy	24.01	34.83	40.74	—	0.20	0.05	0.02	—	—	—	99.86	FeAs _{0.87} S _{1.20}

注：“—”表示低于检出限；Py1. 沉积草莓状黄铁矿；Py2. 变质重结晶黄铁矿；Py3、Py4. 热液期黄铁矿黄铁矿；Apy. 毒砂。

负相关(图 8d、图 8e), 而 S 与 Fe 之间存在显著的正相关性(图 8f), 暗示可能存在 As 替代部分 S 和 Fe 进入毒砂晶格(沈关文等, 2022)。

在 Fe-As-S 三元图解中(图 9), 沉积成岩期黄铁矿(Py1、Py2)中 As 含量较低, 投点接近理想组成, 热液期黄铁矿投点大致平行于 S-As 轴(图 9a), 可见 As 替代 S 进入黄铁矿的晶格, 也是含砷黄铁矿普遍低硫的原因(Deditius et al., 2014)。当黄铁矿中发生了 As 和

S 元素的类质同像替代时, 会使得黄铁矿的晶体结构变得不稳定, 处于亚稳定状态, 这时 Au 元素就会更容易进入黄铁矿晶格(Kusebauch et al., 2019)。热液毒砂(Apy)投点大致平行于 Fe-As 轴(图 9b), 可见 As²⁺替代 Fe 进入毒砂的晶格(Deditius et al., 2014), 也为晶格金的富集创造了先决条件。

4.2 金的赋存状态

金在矿石中的赋存状态及其分布与富集机制之

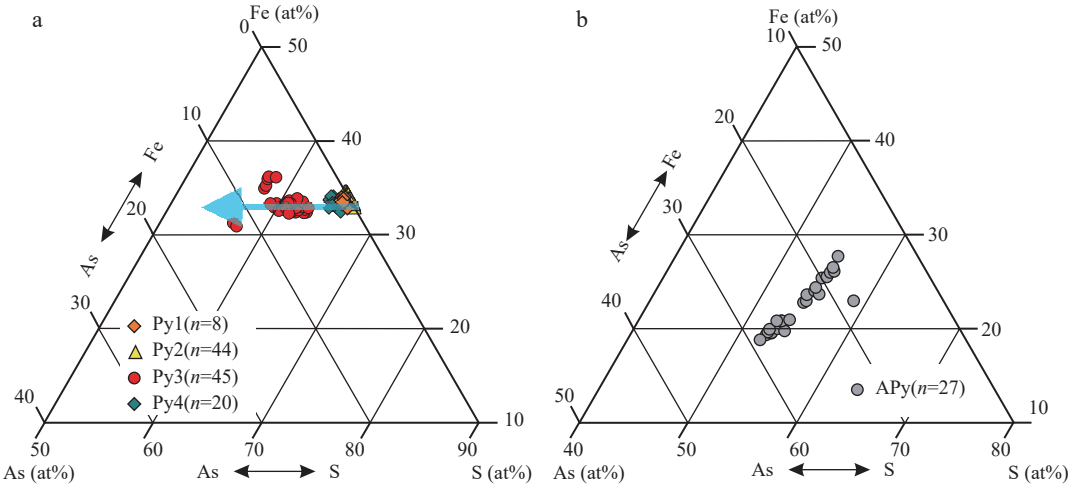


图9 老君庙金矿床黄铁矿、毒砂 Fe-As-S 三元图解

Fig. 9 Fe-As-S ternary diagram of the pyrite and arsenopyrite from the Laojunmiao gold deposit

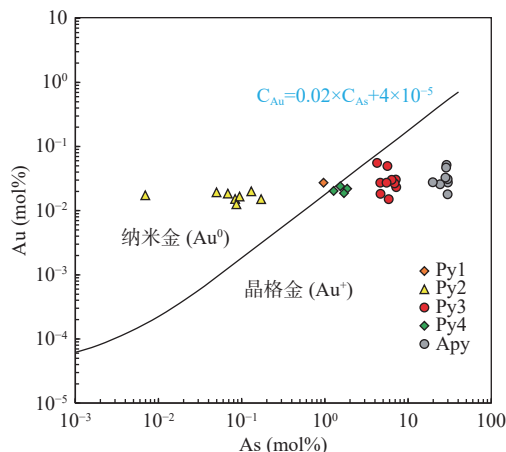
间存在紧密联系,这一研究不仅为研究金的矿化过程提供了关键信息,而且对深入探讨金矿床的成矿作用具有重大的科学意义。前人将金的赋存状态以粒度划分为可见金($> 0.1 \mu\text{m}$)与不可见金($< 0.1 \mu\text{m}$) (Cook et al., 1990; 张博等, 2018)。一般认为,不可见金主要赋存形式为晶格金(Au^+)或纳米金(Au^0) (Reich et al., 2005; 张博等, 2018; Liang et al., 2021)。

笔者对老君庙多个矿石光薄片进行高倍光学显微镜观察和 BSE 成像,均未发现可见自然金颗粒。大量硫化物的电子探针测点统计分析显示,无论是在含砷黄铁矿中,还是在毒砂中, Au 均出现部分测点高于或低于检出限的现象,且无异常高值点,说明金的分布具有不均匀性,可能存在金的富集点,但未形成“可见金”。金主要以不可见的晶格金(Au^+)或自然金纳米颗粒(Au^0)的形式赋存于金属硫化物中。

在含砷黄铁矿(及毒砂)中,存在一个固溶体 Au 的溶解度曲线: $C_{\text{Au}} = 0.02 \times C_{\text{As}} + 4 \times 10^{-5}$ (C_{Au} 和 C_{As} 分别代表 Au 与 As 的摩尔百分比浓度),是判别含砷黄铁矿(毒砂)中不可见金赋存状态的重要依据 (Reich et al., 2005; Deditius et al., 2014; 孙宁岳等, 2022)。位于该曲线下方区域的样品金以固溶体晶格金(Au^+)形式赋存,位于该曲线上方区域的样品点金则是以纳米金(Au^0)形式存在。笔者将老君庙金矿中载金硫化物的 As(%) 与 Au(%) 含量换算成摩尔百分比(mol%)浓度,投影在 $\lg\text{As}-\lg\text{Au}$ 图解中(图 10)。沉积成岩期黄铁矿(Py1、Py2)样品点落在金溶解度极限曲线上方区域,说明沉积成岩期黄铁矿中 Au 主要以纳米级自然金颗粒(Au^0)形式赋存;而热液成矿期黄铁矿(Py3、Py4)和毒砂(Apy)投点均落在金溶解度极限曲线的下方区域,说明 Au 在热液成矿阶段可能以固溶体金晶格金(Au^+)的形式赋存在热液黄铁矿和毒砂中。

4.3 成因认识

南秦岭老君庙金矿床的成矿地质背景、矿床地质特征、矿石结构特征、矿物共生组合、载金矿物特征和金的赋存状态及矿床地球化学特征等,显著区别于造山型金矿和类卡林型金矿 (Kerrick et al., 2000; 毛景文, 2001; 刘家军等, 2019; Gu et al., 2023; 薛仲凯等, 2025), 与典型的卡林型金矿床相似(表 4) (Hofstra et al., 2000; 陈衍景等, 2004)。具体包括: ①大地构造位置处于南秦岭晚古生代弧前盆地,赋矿岩系为泥盆系滨海海滩-浅海盆地相的碎屑岩-碳酸盐岩,含矿岩性主要为硅化的石英砂岩、石英砂砾岩。②矿区位于区



该图仅包含 Au、As 均大于检测限的数据

图10 老君庙金矿床黄铁矿、毒砂 Au-As 关系图
(拟合曲线据 Reich et al., 2005)

Fig. 10 Au vs. As diagram of the pyrite and arsenopyrite from the Laojunmiao gold deposit

域性仁河-双河复式背斜中部,双河公馆逆冲断裂带(南羊山断裂)的上盘北侧,矿体受次级断裂构造控制。③围岩蚀变类型主要有硅化、含砷黄铁矿-毒砂矿化、绢云母化和碳酸盐化、汞锑矿化(位于公馆汞锑矿中间)。常见的矿石构造为浸染状构造、脉状构造、角砾状构造、块状构造等。④金以纳米级自然金颗粒 Au^0 和晶格金 Au^+ 形式赋存于黄铁矿和毒砂中。⑤矿床形成于中低温、中低盐度的成矿环境(流体包裹体测温显示,成矿温度为 $235 \sim 275^\circ\text{C}$, 盐度为 $12.5\% \text{NaCl}_{\text{eq}} \sim 15.5\% \text{NaCl}_{\text{eq}}$, 未发表数据)。

成矿期黄铁矿和毒砂是从成矿流体中沉淀出来的热液矿物,它们的成分反映了成矿流体中元素的变化。由于电子探针的检测局限性,文中主要用黄铁矿和毒砂中的主元素(Fe、S、As)进行成分标型分析,以讨论矿床的成因类型(严育通等, 2012a, 2012b; 李洪梁, 2019)。黄铁矿作为热液金矿床中最为普遍且重要的载金矿物,其成分标型特征可反映大量矿床成因信息。各成矿类型金矿床成矿期黄铁矿 $\delta\text{Fe}-\delta\text{S}$ 、 $\delta\text{Fe}/\delta\text{S}-\text{As}$ 、 $(\text{Fe}+\text{S})-\text{As}$ 图都具有明显的分区特征,可作为判别热液金矿床成因类型的依据(严育通等, 2012a, 2012b; 李洪梁等, 2019)。

黄铁矿 S 和 Fe 质量分数理论值为 53.45% 和 46.55%, S/Fe(原子比)值为 2。根据前人研究,当 S/Fe 值小于 2 时,称为硫亏损,而 S/Fe 值大于 2 时为铁亏损(严育通等, 2012a),老君庙金矿成矿期黄铁矿(Py3、Py4) S/Fe 值平均值为 1.90,为硫亏损。有研究表明

表 4 老君庙金矿床与典型矿床类型成矿要素对比

Tab. 4 Comparison of metallogenic factors between the Laojunmao gold deposit and other typical deposit types

对比项目	造山型金矿床	类卡林型金矿床	卡林型金矿床	老君庙金矿床
构造背景	造山带	碰撞造山带	弧后伸展区或造山带	碰撞造山带
赋矿围岩	变质地体	浅变质沉积建造	沉积地体	沉积建造
岩性控制	任意岩性	碳质千枚岩、钙质粉砂岩、 花岗斑岩	钙质粉砂岩	石英砂岩、石英砂砾岩
控矿构造	次级脆-韧性剪切带	剪切带和层间断层	层间或正断层	逆冲断裂带(南山山断裂)的 上盘北侧, 矿体受次级断裂 构造控制
矿区岩体	常见	常见	不常见	不常见
矿体形态	脉状、透镜状	脉状、似层状	脉状、浸染状	脉状、浸染状、透镜状
矿体边界	与围岩边界清楚	与围岩边界模糊	与围岩边界模糊	与围岩边界较为模糊
矿石类型	石英脉、蚀变岩	石英脉、蚀变千枚岩和蚀 变花岗斑岩	蚀变的沉积岩	石英脉、蚀变沉积岩
矿石矿物组合	以黄铁矿为主, 少量自然 金、黄铜矿、毒砂、磁黄 铁矿、方铅矿、闪锌矿	以黄铁矿和毒砂为主, 次 为磁黄铁矿、钛铁矿、辉 锑矿	以黄铁矿和毒砂为主, 次 为含砷黄铁矿、辰砂、雄 黄、雌黄、自然砷、 辉锑矿	以黄铁矿和毒砂为主, 次为 闪锌矿、黝铜矿和针铁矿, 矿区周边有汞锑矿
元素共生组合	Au-Ag-Pb(±As, Sb, Te, W, Mo, Bi, B)	Au-As-Sb-Bi-Pb(W, Zc, Ti)	Au-As-Sb-Hg-Ba(Se)	Au-As-Sb-Hg
脉石矿物	石英、铁白云石、方解石、 绿泥石、斜长石、绢云母、 电气石	铁白云石、石英、白云母、 绢云母、方解石等	石英、绢云母、方解石等	石英、方解石、绢云母等
蚀变类型	硅化、绿泥石化、黑云母 化、钠长石化、电气石化 及碳酸盐化	硅化、黄铁矿化、菱铁矿 化、绢云母化及碳酸盐化	硅化、黄铁矿化、绢云母 化及碳酸盐化	近矿围岩蚀变以硅化、绢云 母化及毒砂-黄铁矿化为主, 远端则碳酸盐化较强
金赋存状态	自然金	显微自然金	“不可见金”(固溶体金和 纳米自然金)为主, 也可见 少量显微自然金	“不可见金”(固溶体金和纳 米自然金)
主成矿温度	200~500℃	150~200℃	160~250℃	235~275℃
流体来源	变质流体为主	岩浆流体±建造水±变质水	建造水+大气降水	变质水+建造水+大气降水
物质来源	地层源±岩浆源	岩浆源	岩浆源±地层源	地层源
参考文献	Kerrich et al., 2000; 陈衍景等, 2004	孙树浩, 2009; 刘家军等; 2019; 薛仲凯等, 2025	Hofstra et al., 2000; 陈衍景等, 2004	本文实测(部分数据未发表)

δFe 和 δS 这 2 个参数代表在黄铁矿中 Fe 和 S 偏离理论值的程度, 可用如下公式进行求解(Cook et al., 2013, 严育通等, 2012a), 其中 Fe 和 S 代表质量分数。

$$\delta\text{Fe} = [(\text{Fe} - 46.55) / 46.55] \times 100 \quad (1)$$
$$\delta\text{S} = [(\text{S} - 53.45) / 53.45] \times 100 \quad (2)$$

依据公式求得 δFe 值为-12.16~-2.47, 平均值为-6.23。δS 值为-19.41~-3.64, 平均值为-11.28(表 2)。在 δFe-δS 图中(图 11a), 老君庙金矿热液期黄铁矿 δFe、δS 整体呈负值, 投点主要位于第三象限内, δFe 和 δS 分布比较分散, 表明 Fe 和 S 元素均出现较大亏损, 且更亏损硫。在 δFe/δS-As 图解中(图 11b), 样品

点均靠近原点, 反映更亏损硫。在(Fe+S)-As 特征图解中(图 12), 黄铁矿投点位于杂质含量较高的卡林型区域, 投点较分散, 元素含量变化较大。在 δFe-δS、δFe/δS-As、(Fe+S)-As 体系中, 与中国各成因类型金矿对比(严育通等, 2012a, 2012b; 李洪梁等, 2019), 老君庙成矿期黄铁矿均落在卡林型金矿床区域内(图 11、图 12)。因此, 系统对比分析美国内华达州与南秦岭地区典型卡林型金矿床的成矿地质背景、矿床地质特征、矿石结构特征、矿物共生组合、载金矿物特征和金的赋存状态及矿床地球化学特征, 认为老君庙金矿的成因类型应归属于卡林型金矿。

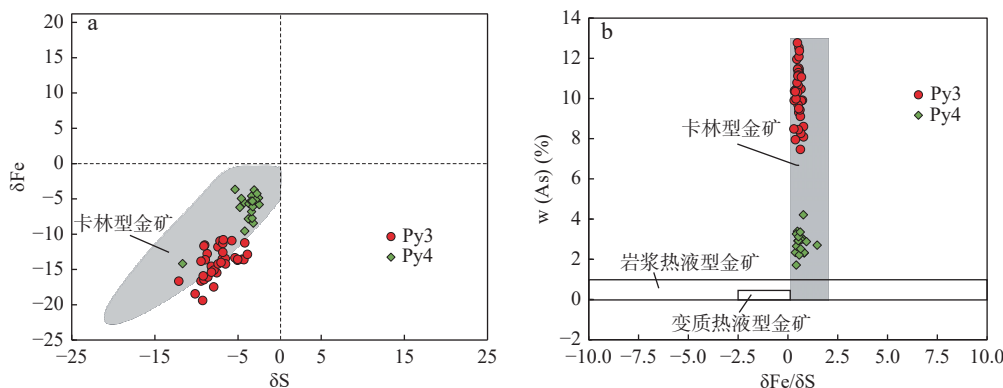


图11 老君庙金矿床成矿期黄铁矿主量成分标型特征图(底图据严育通等, 2012a, 2012b)

Fig. 11 Major-element plots for the pyrite during the mineralization stage in the Laojunmiao gold deposit

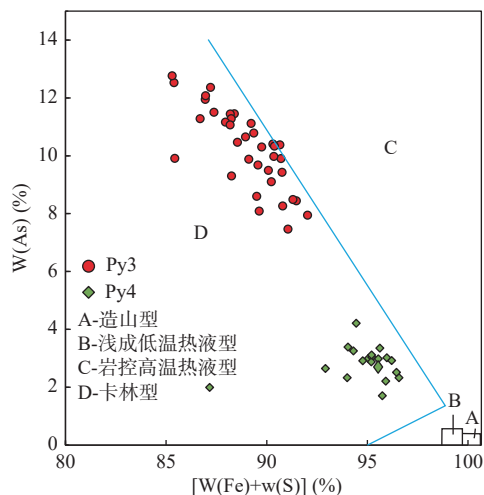


图12 老君庙金矿床成矿期黄铁矿(Fe+S)-As图
(底图据严育通等, 2012a, 2012b)

Fig. 12 (Fe+S) vs. As diagram for the pyrite of the mineralization stage in the Laojunmiao gold deposit

5 结论

(1)老君庙金矿主要经历沉积成岩期、热液成矿期、表生氧化期等3个时期,其热液成矿期可分为I-石英+含砷黄铁矿阶段(Ⅰ)、石英+含砷黄铁矿+毒砂+闪锌矿阶段(Ⅱ)、石英+方解石阶段(Ⅲ)。

(2)老君庙金矿床中,含砷黄铁矿和毒砂都是载金矿物,其中黄铁矿多具环带结构,是主要的载金矿物。载金矿物的结晶顺序为:贫砷沉积成因或遭受热液改造黄铁矿核部(Py1-Py2)→富砷黄铁矿环带(Py3)→毒砂(Apy)→黄铁矿外环带(Py4)。

(3)老君庙金矿床环带状黄铁矿核部(Py1-Py2)和环带(Py3、Py4)均含金,环带含金性明显优于核部。

此外,核部和环带As、Fe、S也存在很大差异,为不同时期的产物,且Au、As具有正相关关系。

(4)老君庙金矿未发现显微自然金颗粒,金主要以不可见金形式存在,沉积成岩期黄铁矿中Au主要以纳米金粒(Au^0)形式赋存;而热液成矿期黄铁矿(Py3、Py4)和毒砂(Apy)中的金以晶格金(Au^+)的形式赋存。

(5)老君庙金矿床的地质特征、成矿地质条件及金的赋存状态等与典型的卡林型金矿床相似,与中国各成因类型金矿的 $\delta Fe-\delta S$ 、 $\delta Fe/\delta S-As$ 、 $(Fe+S)-As$ 体系对比,成矿期黄铁矿均落在在卡林型金矿床区域内,其成因类型应归属于卡林型金矿床。

利益冲突声明(Conflict of Interests):

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献(References):

- 陈懋弘,毛景文,陈振宇,等.滇黔桂“金三角”卡林型金矿含砷黄铁矿和毒砂的矿物学研究[J].矿床地质,2009,28(5): 539-557.
- CHEN Maohong, MAO Jingwen, CHEN Zhenyu, et al. Mineralogy of arsenian pyrites and arsenopyrites of Carlin-type gold deposits in Yunnan-Guizhou-Guangxi “golden triangle” area, south-western China[J]. Mineral Deposits, 2009, 28(5): 539-557.
- 陈松岭,胡祥昭,邹海洋.陕西旬阳盆地金属矿床成矿条件及找矿前景[M].长沙:中南大学出版社,2001.
- 陈龙龙,唐利,沈彦谋,等.秦岭造山带栾川 Mo-W 矿集区和柞水-山阳 Cu-Mo 矿集区斑岩型矿床成矿差异性对比[J].西北地质,2024,57(2): 67-89.
- CHEN Longlong, TANG Li, SHEN Yanmou, et al. Comparison on

- Metallogenic Differences of Porphyry Deposits between Luan-chuan Mo-W and Zhashui-Shanyang Cu-Mo Ore-clusters in Qinling Orogenic Belt: Constraints of Magmatic Source and Metallogenic Conditions[J]. *Northwestern Geology*, 2024, 57(2): 67–89.
- 陈衍景, 张静, 张复新, 等. 李超. 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 and Carlin-like gold deposits in western Qinling Mountains and their metallogenic time, tectonic setting and model[J]. *Geological Review*, 2004, 50(2): 134–152.
- 范宏瑞, 李兴辉, 左亚彬, 等. LA-(MC)-ICPMS 和 (Nano)SIMS 硫化物微量元素和硫同位素原位分析与矿床形成的精细过程[J]. *岩石学报*, 2018, 34(12): 3479–3496.
- FAN Hongrui, LI Xinghui, ZUO Yabin, et al. In-situ LA-(MC)-ICPMS and (Nano)SIMS trace elements and sulfur isotope analyses on sulfides and application to confine metallogenic process of ore deposit[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2018, 34(12): 3479–3496.
- 冯建忠, 汪东波, 王学明, 等. 陕西凤县八卦庙超大型金矿床成矿地质特征及成矿作用[J]. *地质学报*, 2003, 77(3): 387–398+438.
- FENG Jianzhong, WANG Dongbo, WANG Xueming, et al. Metallogenic Geological Characteristics and Mineralization of the Baguao Superlarge Gold Deposit in Fengxian County, Shaanxi Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2003, 77(3): 387–398+438.
- 葛林, 顾雪祥, 章永梅, 等. 南秦岭柞水-山阳矿集区金盆梁金矿床载金硫化物矿物学特征及成矿指示[J]. *西北地质*, 2023, 56(5): 278–293.
- GE Zhanlin, GU Xuexiang, ZHANG Yongmei, et al. Mineralogical Characteristics and Metallogenic Indication of Gold-Bearing Sulfides in the Jinpenliang Gold Deposit, Zhashui-Shanyang Ore Cluster Area, South Qinling[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(5): 278–293.
- 华曙光, 王力娟, 贾晓芳, 等. 陕西镇安丘岭卡林型金矿金的赋存状态和富集机理[J]. *地球科学*, 2012, 37(5): 989–1002.
- HUA Shuguang, WANG Lijuan, JIA Xiaofang, et al. Occurrence and Enrichment Mechanism of Gold in the Qiuling Carlin-Type Gold Deposit, Zhen'an County, Shaanxi Province, China[J]. *Earth Science*, 2012, 37(5): 989–1002.
- 姜寒冰, 杨合群, 赵国斌, 等. 西秦岭成矿带区域成矿规律概论[J]. *西北地质*, 2023, 56(2): 187–202.
- JIANG Hanbing, YANG Hequn, ZHAO Guobin, et al. Discussion on the Metallogenic Regularity in West Qinling Metallogenic Belt, China[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(2): 187–202.
- 李洪梁, 李光明. 不同类型热液金矿床主成矿期黄铁矿成分标型特征[J]. *地学前缘*, 2019, 26(3): 202–210.
- LI Hongliang and LI Guangming. Compositional characteristics of pyrite ore formed in the main metallogenic period of various types of hydrothermal gold deposits[J]. *Earth Science Frontiers*, 2019, 26(3): 202–210.
- 刘家军, 刘冲昊, 王建平, 等. 西秦岭地区金矿类型及其成矿作用[J]. *地学前缘*, 2019, 26(5): 1–16.
- LIU Jiajun, LIU Chonghao, WANG Jianping, et al. Types and mineralization of gold deposits in West Qinling area[J]. *Earth Science Frontiers*, 2019, 26(5): 1–16.
- 刘天航, 高永宝, 魏立勇, 等. 陕西旬阳泗人沟铅锌矿床地质及 S、Pb 同位素地球化学特征[J]. *现代地质*, 2021, 35(6): 1597–1607.
- LIU Tianhang, GAO Yongbao, WEI Liyong, et al. Geological Characteristics and S-Pb Isotope Geochemistry of the Sirengou Pb-Zn Deposit in Xunyang, Shaanxi Province[J]. *Geoscience*, 2021, 35(6): 1597–1607.
- 刘云华, 李真, 周肃, 等. 南秦岭东沟—金龙山金矿地质特征、成矿时代及其地质意义[J]. *地学前缘*, 2016, 23(4): 81–93.
- LIU Yunhua, LI Zhen, ZHOU Su, et al. Geological characteristics, ore forming ages and geological significance of DonggouJinlongshan gold deposit, South Qinling belt[J]. *Earth Science Frontiers*, 2016, 23(4): 81–93.
- 马渊博. 南秦岭镇安旬阳盆地金、汞、锑矿床成矿作用研究[D]. 西安: 西北大学, 2021, 1–229.
- MA Yuanbo. Metallogenesis of gold, mercury and antimony deposits in the Zhen'an-Xunyang basin, South Qinling Orogen[D]. Xi'an: Northwest University, 2021, 1–229.
- 毛景文. 西秦岭地区造山型与卡林型金矿床[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2001, 20(1): 11–13.
- MAO Jingwen. Geology Distribution and Classification of Gold Deposits in the Western Qinling Belt Central China[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2001, 20(1): 11–13.
- 孟五一, 刘家军, 魏立勇, 等. 旬阳地区小河金矿硫铅同位素组成及地质意义[J]. *现代地质*, 2021, 35(6): 1587–1596.
- MENG Wuyi, LIU Jiajun, WEI Liyong, et al. Sulfur and lead isotope compositions of the Xiaohe gold deposit at Xunyang, Shaanxi Province, and its geological significance[J]. *Geoscience*, 2021, 35(6): 1587–1596.
- 齐金忠, 袁士松, 李莉, 等. 甘肃省文县阳山特大型金矿床地质特征及控矿因素分析[J]. *地质论评*, 2003, 49(1): 85–92.
- QI Jinzhong, YUAN Shisong, LI Li, et al. Geological Characteristics and Ore-controlling Factors of the Yangshan Giant Gold Deposit in Wenxian County, Gansu Province[J]. *Geological Review*, 2003, 49(1): 85–92.
- 孟五一, 张振, 高永宝, 等. 南秦岭新发现王庄金矿床矿物成分及其地质意义[J]. *西北地质*, 2024, 57(4): 157–169.
- MENG Wuyi, ZHANG Zhen, GAO Yongbao, et al. Material Com-

- position and Geological Significance of the Newly Discovered Wangzhuang Gold Deposit in South Qinling[J]. *Northwestern Geology*, 2024, 57(4): 157–169.
- 沈关文, 张良, 孙思辰, 等. 江南造山带万古金矿床含金硫化物组构与金沉淀机制[J]. *岩石学报*, 2022, 38(1): 91–108.
- SHEN Guanwen, ZHANG Liang, SUN Sichen, et al. Textures of gold-bearing sulfides and gold precipitation mechanism, Wanggu gold deposit, Jiangnan Orogen[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2022, 38(1): 91–108.
- 孙宁岳, 李国武, 申俊峰, 等. 黄铁矿精细结构与晶胞参数的关系及其标型意义[J]. *西北地质*, 2022, 55(4): 333–342.
- SUN Ningyue, LI Guowu, SHEN Junfeng, et al. Relationship between Fine Structure and Cell Parameters of Pyrite and Their Typomorphic Significance[J]. *Northwestern Geology*, 2022, 55(4): 333–342.
- 孙树浩. 中国川北甘南类卡林型金矿床[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009, 1–132.
- 辛明宇, 刘丽, 盛渊明, 等. 东秦岭北岭金矿床黄铁矿标型特征及成矿指示意义[J]. *西北地质*, 2025, 58(5): 75–86.
- XIN Mingyu, LIU Li, SHENG Yuanming, et al. Typomorphic Characteristics and Metallogenic Indicative Significance of Pyrite in Beiling Gold Deposit, East Qinling[J]. *Northwestern Geology*, 2025, 58(5): 75–86.
- 徐国风, 邵洁涟. 黄铁矿的标型特征及其实际意义[J]. *地质论评*, 1980, 26(6): 541–546.
- XU Guofeng, HAO Jielian. Characteristic Features of Pyrite and Their Practical Significance[J]. *Geological Review*, 1980, 26(6): 541–546.
- 徐晓辉, 崔小齐, 杨强晟, 等. 陕西旬阳老君庙金矿金的赋存状态研究[J]. *陕西地质*, 2024, 42(2): 56–63.
- XU Xiaohui, CUI Xiaoqi, YANG Qiangsheng, et al. Research on the occurrence state of gold in Laojunmiao gold mine in Xunyang, Shaanxi[J]. *Geology of Shaanxi*, 2024, 42(2): 56–63.
- 薛仲凯, 范堡程, 李航, 等. 镇旬盆地南缘淋湘金矿床流体来源及其成因探讨: C-H-O-Fe 同位素、磷灰石裂变径迹的证据[J]. *矿床地质*, 2025, 44(2): 413–431.
- XUE Zhongkai, FAN Baozheng, LI Hang, et al. Discussion on fluid source and genesis of Linxiang gold deposit in southern margin of Zhenxun Basin: Evidence from C-H-O-Fe isotope and apatite fission track[J]. *Mineral Deposits*, 2025, 44(2): 413–431.
- 严育通, 李胜荣, 贾宝剑, 等. 中国不同成因类型金矿床的黄铁矿成分标型特征及统计分析[J]. *地学前缘*, 2012a, 19(4): 214–226.
- YAN Yutong, LI Shengrong, JIA Baojian, et al. Geochemical characteristics and statistical analysis of pyrite in different types of gold deposits in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2012b, 19(4): 214–226.
- 严育通, 李胜荣, 张娜, 等. 不同成因类型金矿床成矿期黄铁矿成分成因标型特征[J]. *黄金*, 2012b, 33(3): 11–16.
- YAN Yutong, LI Shengrong, ZHANG Na, et al. Composition typomorphic characteristics and statistics analysis of metallogenic pyrite in gold deposits of different genetic types[J]. *Gold*, 2012a, 33(3): 11–16.
- 杨宝利, 赵玉锁, 郭晓东, 等. 陕西省镇安县金龙山金矿带控矿因素分析[J]. *矿床地质*, 2014, 33(S1): 1097–1098.
- YANG Baoli, ZHAO Yusuo, GUO Xiaodong, et al. Controlling Factors Analysis of Jinlongshan Gold Ore Belt in Zhen'an County, Shaanxi Province[J]. *Mineral Deposits*, 2014, 33(S1): 1097–1098.
- 杨本昭, 贾彬, 张振, 等. 南秦岭旬北地区汞锑金成矿带新发现一处中型金矿 (16.89t)[J]. *中国地质*, 2024, 51(3): 1076–1077.
- YANG Benzhaio, JIA Bin, ZHANG Zhen, et al. Discovery of a medium gold deposit (16.89 t) in the mercury–antimony–gold metallogenic belt in the Xunbei area of the Southern Qinling[J]. *Geology in China*, 2024, 51(3): 1076–1077.
- 员媛娇, 范成龙, 吕喜平, 等. 电子探针和 LA-ICP-MS 技术研究内蒙古浩尧尔忽洞金矿床毒砂矿物学特征[J]. *岩矿测试*, 2022, 41(2): 211–225.
- YUAN Yuanjiao, FAN Chenglong, LU Xiping, et al. Application of EPMA and LA-ICP-MS to Study Mineralogy of Arsenopyrite from the Haoyaoerhudong Gold Deposit, Inner Mongolia, China[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2022, 41(2): 211–225.
- 张博, 李诺, 陈衍景. 热液矿床金的赋存状态及研究方法[J]. *地学前缘*, 2018, 25(5): 251–265.
- ZHANG Bo, LI Nuo, CHEN Yanjing. Occurrence state of gold in hydrothermal deposits and related research methods[J]. *Earth Science Frontiers*, 2018, 25(5): 251–265.
- 张复新, 陈衍景, 李超, 等. 金龙山-丘岭金矿床地质地球化学特征及成因: 秦岭式卡林型金矿成矿动力学机制[J]. *中国科学 (D 辑: 地球科学)*, 2000, 30(S1): 73–81.
- ZHANG Fuxin, CHEN Yanjing, LI Chao, et al. Features of geologicgeochemistry of Jinlongshan-Qiuling gold deposit and its genesis in Qinling belt: dynamics on mineralizing process of Carlin type gold deposits of Qinling type[J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 2000, 30(S1): 73–81.
- 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 等. 秦岭造山带与大陆动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- 张国伟, 张宗清, 董云鹏. 秦岭造山带主要构造岩石地层单元的构造性质及其大地构造意义[J]. *岩石学报*, 1995, 11(2): 101–114.
- ZHANG Guowei, ZHANG Zongqing, DONG Yunpeng. Nature of Main Tectono-Lithostratigraphic Units of the Qinling Orogen: Implications for the Tectonic Evolution[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1995, 11(2): 101–114.
- 张家瑞, 高永伟, 张忠平, 等. 甘肃西秦岭地区重要金矿预测模

- 型的建立及资源潜力预测[J]. 西北地质, 2024, 57(5): 88–105.
- ZHANG Jiarui, GAO Yongwei, ZHANG Zhongping, et al. Building a Prediction Model for Resource Potential Forecast of Principal Gold Deposits in West Qinling Mountains of Gansu Province[J]. *Northwestern Geology*, 2024, 57(5): 88–105.
- 周彬, 朱毓, 高沛, 等. 秦岭造山带凤县–山阳地区富钴–镍钠长角砾岩年代学研究及地质意义[J]. 西北地质, 2025, 58(4): 174–196.
- ZHOU Bin, ZHU Yu, GAO Pei, et al. Geochronology Study and Geological Significance of Cobalt-Nickel-Rich Albite Breccia in the Fengxian-Shanyang, Qinling Orogenic Belt[J]. *Northwestern Geology*, 2025, 58(4): 174–196.
- Cook J N, Ciobanu L C, Meria D, et al. Arsenopyrite-Pyrite Association in an Orogenic Gold Ore: Tracing Mineralization History from Textures and Trace Elements[J]. *Economic geology and the bulletin of the Society of Economic Geologists*, 2013, 108(6): 1273–1283.
- Cook N J, Chrysosoulis S L. Concentrations of “Invisible Gold” in the common sulfides[J]. *The Canadian Mineralogist*, 1990, 28(1): 1–16.
- Deditius P A, Reich M, Kesler E S, et al. The coupled geochemistry of Au and As in pyrite from hydrothermal ore deposits[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2014, 140: 644–670.
- Ding L L, Zhu L M, Xiong X, et al. Genesis of the Maanqiao gold deposit in the western Qinling orogen, central China: Constraints from fluid inclusions and in-situ sulfur isotopes[J]. *Geochemistry*, 2021, 81(1): 125691.
- Dong Y, Santosh M. Tectonic architecture and multiple orogeny of the Qinling Orogenic Belt, Central China[J]. *Gondwana Research*, 2016, 29(1): 1–40.
- Grigore S, Stephen E, Kesler, et al. Geochemistry and textures of gold-bearing arsenian pyrite, Twin Creeks, Nevada; implications for deposition of gold in carlin-type deposits[J]. *Economic Geology*, 1999, 94(3): 405–421.
- Gu X, Zhang Y, Ge Z, Chen W. Mineralization and genesis of the orogenic gold system in the Kalamaili area, East Junggar, Xinjiang, northwestern China[J]. *GSA Bulletin*, 2023, 136(1–2): 461–486.
- Hofstra A H, Cline J S. Characteristics and models for Carlin-type gold deposits[J]. *Reviews in Economic Geology*, 2000, 13: 163–220.
- Joralemon P. The occurrence of gold at the Getchell mine, Nevada[J]. *Economic Geology*, 1951, 46(3): 267–310.
- Kusebauch C, Gleeson A S, Oelze M. Coupled partitioning of Au and As into pyrite controls formation of giant Au deposits[J]. *Science Advances*, 2019, 5(5): eaav5891.
- Kerrick R, Goldfarb R, Groves D, et al. The characteristics, origins, and geodynamic settings of supergiant gold metallogenic provinces[J]. *Science China Earth Sciences*, 2000, 43: 1–68.
- Liang Q L, Xie Z J, Song X Y, et al. Evolution of invisible Au in arsenian pyrite in carlin-type Au deposits[J]. *Economic Geology*, 2021, 116(2): 515–526.
- Liu J J, Liu C, Carranza E J M, et al. Geological characteristics and ore-forming process of the gold deposits in the western Qinling region, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 103: 40–69.
- Ma Y B, Zhu L M, Lu R K, et al. Geology and in-situ sulfur and lead isotope analyses of the Jinlongshan Carlin-type gold deposit in the Southern Qinling Orogen, China: Implications for metal sources and ore genesis[J]. *Ore Geology Reviews*, 2020, 126(): 103777.
- Reich M, Kesler S E, Utsunomiya S, et al. Solubility of gold in arsenian pyrite[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2005, 69(11): 2781–2796.
- Sharp Z D, Essene E J, Kelly W C. A re-examination of the arsenopyrite geothermometer: Pressure considerations and applications to natural assemblages[J]. *The Canadian Mineralogist*, 1985, 23(4): 517–534.
- Wu Y, Zheng Y. Tectonic evolution of a composite collision orogen: An overview on the Qinling–Tongbai–Hong'an–Dabie–Sulu orogenic belt in central China[J]. *Gondwana Research*, 2013, 23(4): 1402–1428.
- Wu Y F, Li J W, Evans K, et al. Ore-forming processes of the Daqiao epizonal orogenic gold deposit, West Qinling orogen, China: Constraints from textures, trace elements, and sulfur isotopes of pyrite and marcasite, and Raman spectroscopy of carbonaceous material[J]. *Economic Geology*, 2018, 113(5): 1093–1132.
- Zhang J, Deng J, Chen H Y, et al. LA-ICP-MS trace element analysis of pyrite from the Chang'an gold deposit, Sanjiang region, China: Implication for ore-forming process[J]. *Gondwana Research*, 2014, 26(2): 557–575.
- Zhang Y, Tang H S, Chen Y J, et al. Ore geology, fluid inclusion and isotope geochemistry of the Xunyang Hg-Sb ore field, Qinling Orogen, Central China[J]. *Geological Journal*, 2014, 49(4–5): 463–481.