

后龙门山构造带辛家咀金矿床载金矿物特征及成矿指示

张翼翔^{1,2}, 寇少磊^{1,2*}, 刘基^{1,2}, 王占彬^{1,2}, 杨伟^{1,2}, 潘元^{1,2}, 陈灏^{1,2}, 李磊^{1,2}, 高超^{1,2}, 刘栋^{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:辛家咀金矿是后龙门山构造带内新发现的一处具有中—大型找矿潜力的金矿床,前人对该矿床的研究取得了一定的成果,但缺乏矿物学的系统研究,导致成矿过程和机制认识不清。基于详实的野外地质调查,以载金矿物黄铁矿和毒砂作为研究对象,运用显微镜下观察、背散射电子图像和电子探针分析等方法,旨在查明载金矿物的矿物学特征,探讨金的赋存状态、成矿物理化学条件和矿床成因。研究结果显示,黄铁矿可划分为3个世代,分别为沉积成岩期(Py0)、成矿早阶段(Py1)和成矿主阶段(Py2),毒砂与主阶段黄铁矿共生。金以可见金和不可见金2种形式存在,可见金在成矿主阶段黄铁矿中以包裹金和裂隙金的形式赋存,不可见金的赋存状态存在差异,其中成矿早阶段黄铁矿中的金为纳米金(Au⁰),成矿主阶段黄铁矿含纳米金(Au⁰)和晶格金(Au⁺),毒砂中的金全部以晶格金(Au⁺)形式存在。辛家咀金矿床形成于硫逸度 $f(S_2)$ 为-13.3~-7.3的中高温、中深成环境,属受脆—韧性剪切带控制的造山型金矿床。

关键词:载金矿物;电子探针;金的赋存状态;造山型金矿床;辛家咀金矿床;后龙门山构造带

中图分类号:P618.51 文献标志码:A 文章编号:1005-2518(2025)05-0950-17 DOI:10.11872/j.issn.1005-2518.2025.05.069

引用格式:张翼翔,寇少磊,刘基,等.后龙门山构造带辛家咀金矿床载金矿物特征及成矿指示[J].黄金科学技术,2025,33(5):950-966.ZHANG Yixiang, KOU Shaolei, LIU Ji, et al.Characteristics and Metallogenic Indication of Gold-bearing Minerals of the Xinjiazui Gold Deposit in the Back-Longmenshan Tectonic Belt[J].Gold Science and Technology,2025,33(5):950-966.

黄铁矿和毒砂等金属硫化物是造山型、斑岩型和卡林—类卡林型等热液型金矿床的重要载金矿物(Deng et al, 2003; 杨立强等, 2014; 高永伟等, 2019),其晶体形态和微量元素在不同物理化学环境下存在一定的差异(Reich et al, 2005; 许杨等, 2021)。研究载金矿物的标形特征、形成温度、主微量元素含量及其相关性,可有效厘定金赋存状态、富集机理和成矿物理化学条件,对探讨金成矿过程和成矿机制具有重要意义(Qiu et al, 2020)。

龙门山陆内复合造山带夹持于上扬子地块、松潘—甘孜造山带、汉南—米仓山构造带、碧口地块和南秦岭造山带之间,自晚三叠世形成以来经历了多期构造活动,成矿条件有利。带内金矿大多分布于后龙门山构造带,即青川、平武和北川一带(王富东, 2015)。辛家咀金矿床是带内近几年新的找矿突破,初步推断金资源量为3.7 t,且矿体向西南延伸稳定,具有中—大型成矿远景。以往主要对该矿床的地质特征和地球化学特征进行了大量研究,并

收稿日期:2025-02-05;修订日期:2025-04-26

基金项目:中国地质调查局西安矿产资源调查中心项目“陕西宁强青木川—阳平关一带金多金属找矿靶区优选与评价”(编号:DD20230369)资助

作者简介:张翼翔(1996—),男,陕西西安人,工程师,从事矿产资源调查和矿床学研究工作。E-mail:875704571@qq.com

*通信作者:寇少磊(1989—),男,陕西西安人,工程师,从事矿产资源调查和矿床学研究工作。E-mail:529360664@qq.com

© Editorial Department of *Gold Science and Technology* (CC BY-NC-ND)

取得了一定的成果:(1)控矿构造为燕子砭—化石沟脆—韧性剪切带,金矿化受早期韧性剪切变形和后期脆性断裂的双重控制(刘基等,2022);(2)辛家咀金矿床成矿热液为中温、低盐度的NaCl-H₂O变质流体,成矿物质主要来自赋矿的茂县群(Liu et al, 2023;寇少磊等,2024);(3)通过热液独居石原位U-Pb定年,限定辛家咀金矿床的成矿时代为(206.9±2.5)Ma,属印支晚期(Liu et al, 2023);(4)H-O同位素和主成矿阶段黄铁矿Pb同位素分析结果与造山型金矿床成分相似,认为辛家咀金矿床属造山型金矿床(Liu et al, 2022)。然而,对辛家咀金矿床载金矿物特征和金的赋存状态缺乏系统研究,导致成矿过程和机制认识不清。

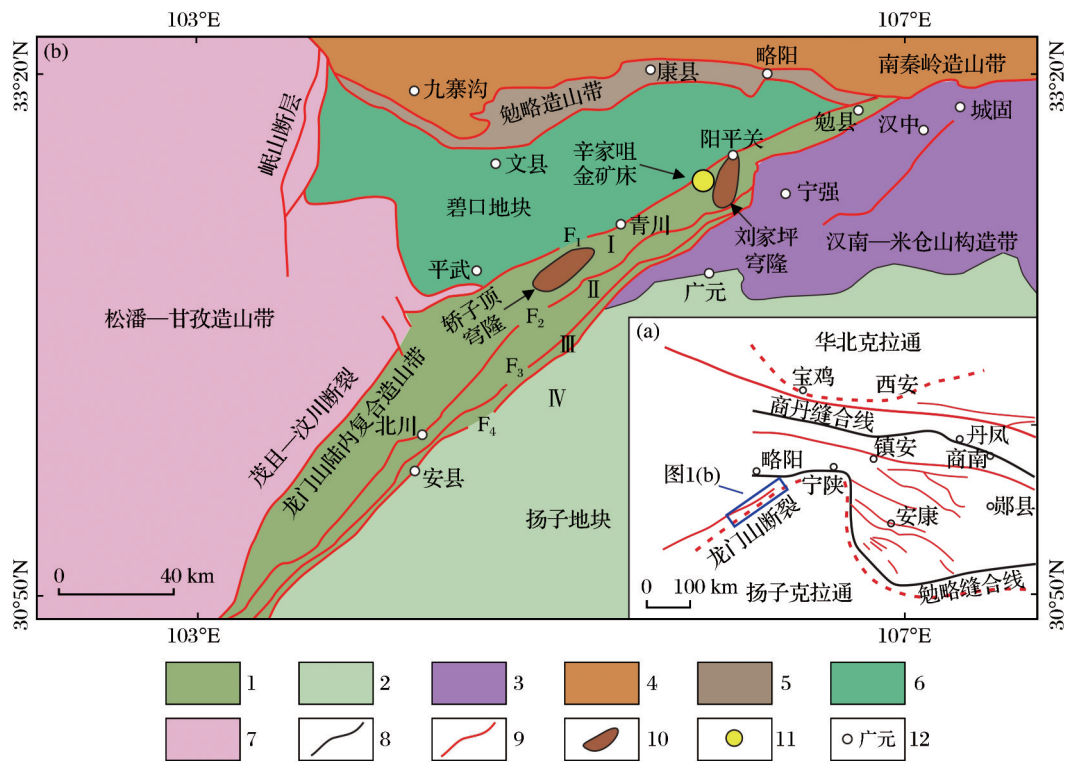
鉴于此,本文基于详细的野外地质调查,通过岩相学和矿相学研究,划分成矿阶段和矿物世代,并据此对不同世代黄铁矿和毒砂进行电子探针分

析,查明载金矿物元素组成特征和金的赋存状态,对成矿物理化学条件和矿床成因进行初步探讨,以为区域找矿提供理论依据。

1 区域地质背景

后龙门山构造带处于北川—映秀和青川—阳平关2个断裂带之间(图1),由基底岩系和沉积盖层组成。基底出露面积较小,沉积盖层以南华纪—早古生代的沉积岩为主,其中南华纪—早寒武世地层主要分布于刘家坪穹隆和轿子顶穹隆的边缘,奥陶纪地层分布于广元市陈家坝一带,志留纪地层分布在北川—映秀断裂北侧,出露面积最大,为后龙门山构造带主要地层单元(李佐臣,2009)。

区内金、铅锌、镍、铁和锰等矿产发育,发现了太阳坪、丁家林、董家院和黄泥坪金矿,以及刘家坪铜锌矿等,成矿地质条件优越(王占彬等,2022)。



F₁-青川—阳平关断裂;F₂-北川—映秀断裂;F₃-马家坝断裂;F₄-安县—都江堰断裂;I-后龙门山构造带;II-前龙门山褶皱冲断带;III-安县—都江堰断裂带;IV-前陆褶皱带;1.龙门山陆内复合造山带;2.扬子地块;3.汉南—米仓山构造带;4.南秦岭造山带;5.勉略造山带;6.碧口地块;7.松潘—甘孜造山带;8.构造单元界线;9.断裂;10.穹隆;11.辛家咀金矿床;12.地名

图1 龙门山造山带大地构造简图(修改自刘基等,2022;寇少磊等,2024)

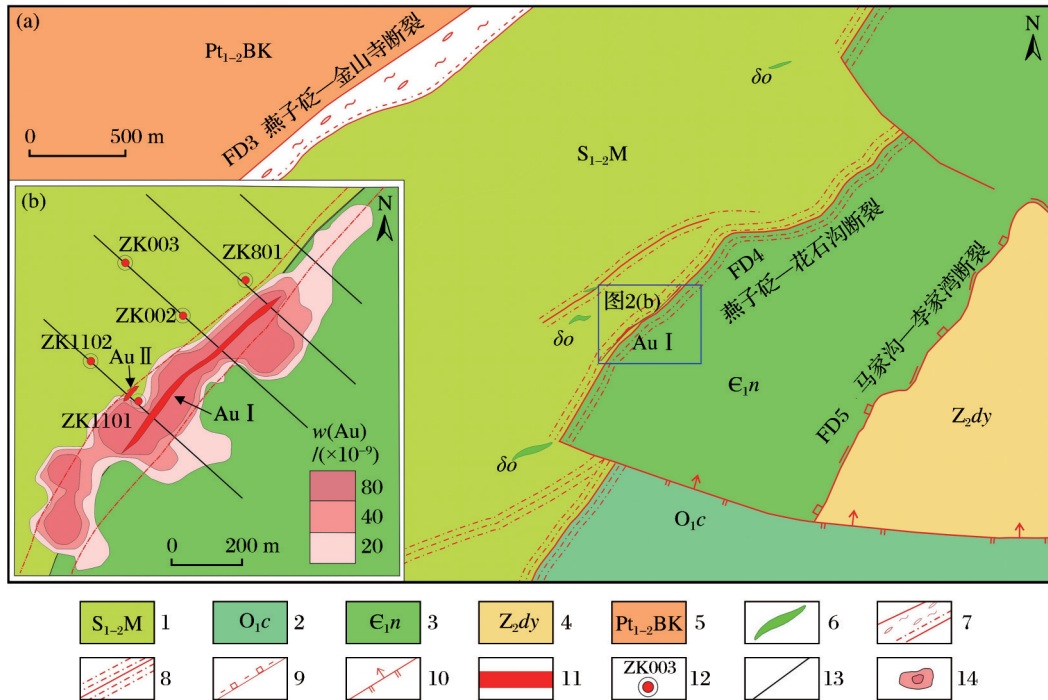
Fig. 1 Schematic diagram of the geological structure of the Longmenshan orogenic belt (modified after Liu et al, 2022; Kou et al, 2024)

区内金矿床矿石类型以石英脉型和蚀变岩型为主,多分布于志留系茂县群内。

2 矿床地质特征

辛家咀金矿床位于后龙门山构造带北东段,区内出露地层由老至新依次为上震旦统灯影组(Z_2dy)、寒武系牛蹄塘组(ϵ_{1n})、奥陶系陈家坝组(O_1c)和志留系茂县群($S_{1-2}M$) [图2(a)],岩性包括白云岩、碳硅质板岩、硅质灰岩、碳质千枚岩夹岩屑砂岩、含铁菱镁矿斑点(绢云)千枚岩和粉砂质千枚岩。地层总体呈NE向展布,倾向NW,局部地区出现反倾。赋矿地层为寒武系牛蹄塘组碳硅质板岩

和志留系茂县群含铁菱镁矿斑点绢云千枚岩,金矿体主要分布于2套地层单元接触部位的脆—韧性剪切带内。区内断裂较发育,主要有燕子砭—金山寺断裂(FD3)、寒武系与志留系接触界面的燕子砭—花石沟断裂(FD4)、寒武系与震旦系接触界面的马家沟—李家湾断裂(FD5)和NW向断裂。燕子砭—花石沟断裂(FD4)是区内主要的控矿断裂,断裂走向呈NE向,倾向NW,倾角为 $60^\circ\sim 80^\circ$,控制了金矿体的空间展布及形态,且与土壤地球化学异常套合较好[图2(b)]。区内岩浆岩活动较弱,出露面积不大,主要发育石英闪长岩脉,最宽处可达30 m,围岩为含铁菱镁矿斑点绢云千枚岩,靠近围岩的岩脉发生云英岩化,可见少量黄铁矿化。



1. 志留系茂县群; 2. 奥陶系陈家坝组; 3. 寒武系牛蹄塘组; 4. 震旦系灯影组; 5. 碧口群; 6. 石英闪长岩脉; 7. 燕子砭—金山寺断裂; 8. 实测脆韧性剪切带; 9. 剥离断层; 10. 逆断层; 11. 金矿体; 12. 钻孔及编号; 13. 勘探线; 14. 1:1万 Au 元素土壤地球化学图

图2 辛家咀金矿床地质简图(修改自龚克礼等, 1989)

Fig. 2 Geological diagram of the Xinjiazui gold deposit(modified after Gong et al, 1989)

2.1 矿体特征

辛家咀金矿床共圈定2个金矿体,其中主矿体1条,盲矿体1条,矿体走向控制长度为70~560 m,厚度为0.61~11.28 m,控制斜深为53~316 m,金品位为 $1.0\times 10^{-6}\sim 15.4\times 10^{-6}$ 。受NE向脆—韧性剪切带控制,呈透镜状和扁豆状,沿构造展布具有膨大缩

小现象。

主矿体(Au I)主要呈脉状赋存于燕子砭—花石沟脆—韧性剪切带内,分布于志留系茂县群($S_{1-2}M$)和寒武系牛蹄塘组(ϵ_{1n})岩性界面附近(图2),矿体与围岩边界清晰。目前,矿体由9个钻孔和5个探槽控制,矿体走向控制长度为560 m,最

大斜深控制长度为316 m,赋矿标高为687~1 073 m。金矿体倾向为 $315^{\circ}\sim 320^{\circ}$,倾角为 $35^{\circ}\sim 65^{\circ}$,平均厚度为3.59 m,平均金品位为 2.74×10^{-6} 。其中,ZK003钻孔发现厚大矿体(图3),深部金矿脉出现品位变富、厚度变厚的趋势。截至目前,推断主矿体金资源量为3 720.04 kg。

源量为3 720.04 kg。

盲矿体(Au II)赋存在志留系含铁菱镁矿斑点千枚岩中,走向及倾向上延伸较短,呈透镜状,目前仅在ZK1102钻孔中出现(图3),厚度为5.67 m,平均金品位为 2.57×10^{-6} ,推断金资源量为33.57 kg。

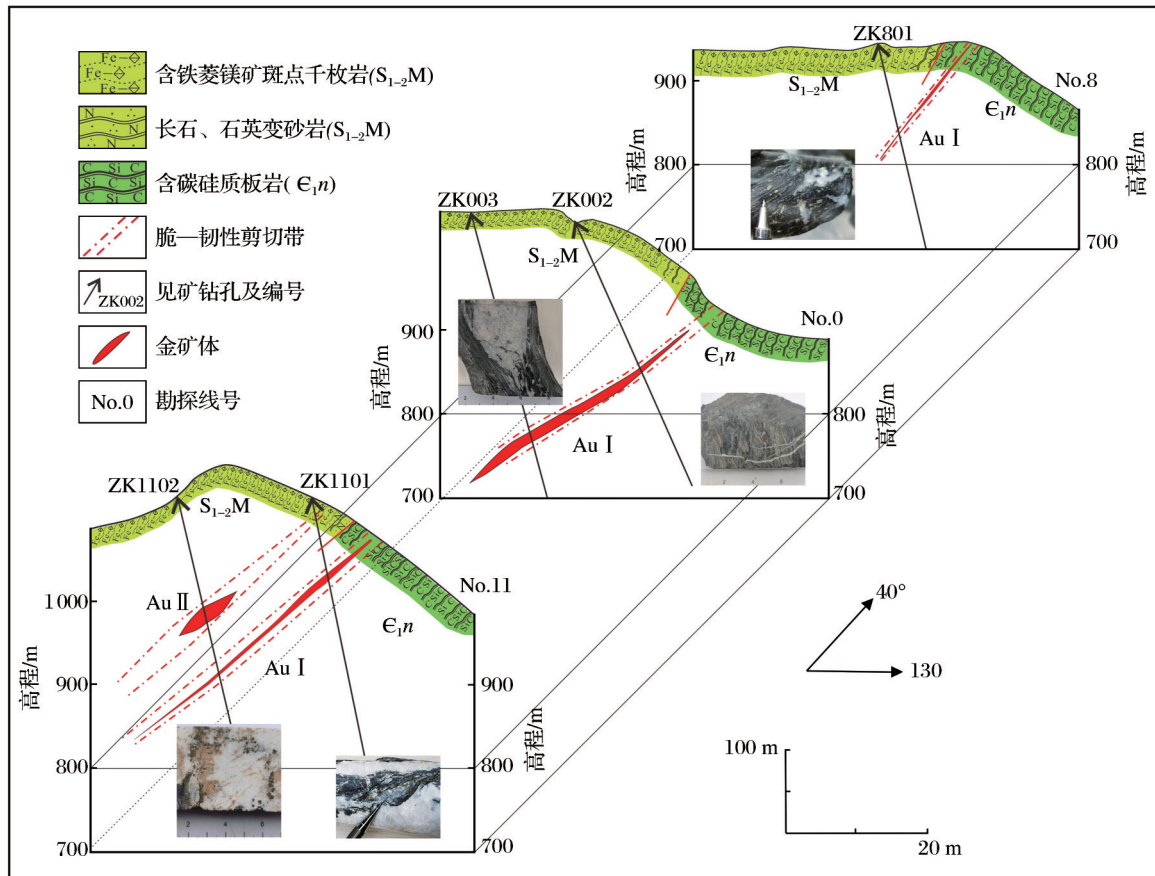


图3 辛家咀金矿床联合勘探线剖面图(修改自 Liu et al, 2024; 寇少磊等, 2024)

Fig. 3 Joint exploration line profile of the Xinjiazui gold deposit(modified after Liu et al, 2024; Kou et al, 2024)

2.2 矿石特征

矿石类型可分为石英脉型和蚀变岩型,其中石英脉型矿石最为常见。矿石中的金属矿物为黄铁矿、毒砂、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、褐铁矿和少量自然金;非金属矿物为石英、绿泥石、绢云母和方解石等[图4(a)~4(f)]。主要矿物结构为变草莓状[图4(g)]、自形一半自形粒状[图4(h)]、交代残余[图4(i)]和固溶体分离结构,矿石构造以脉状和蜂窝状为主。

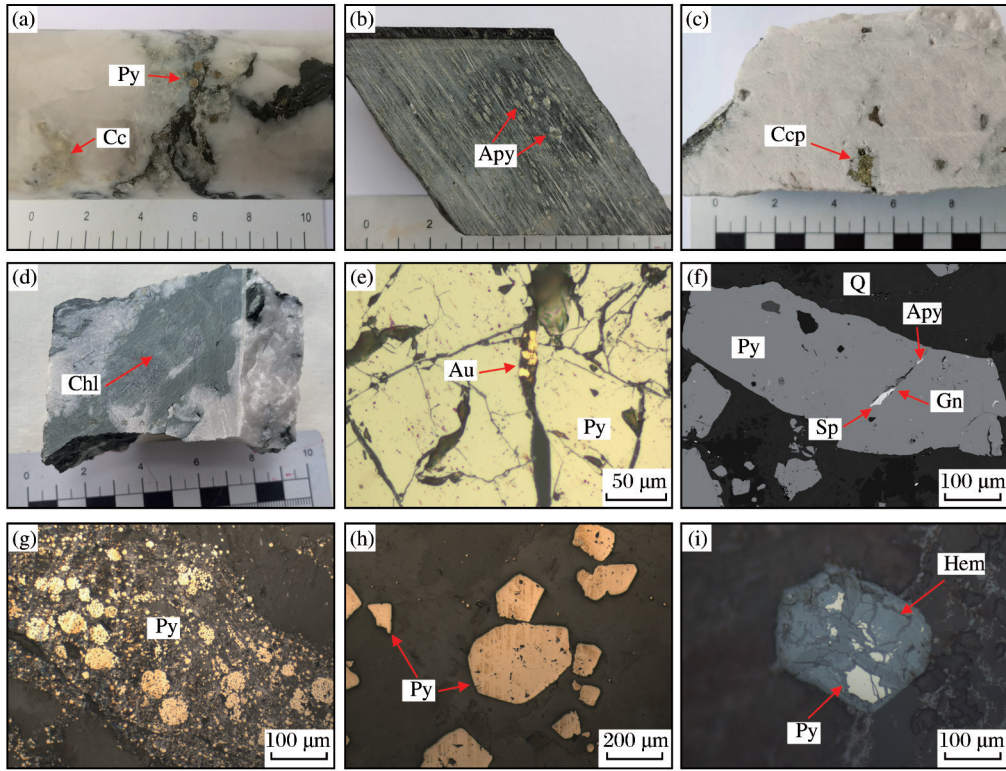
2.3 围岩蚀变和成矿阶段划分

辛家咀金矿区次级断裂发育,含矿热液主要沿破碎带内的次级断裂及裂隙活动,因此这些部位的

岩石蚀变强烈(魏立勇,2008)。矿区蚀变类型以硅化、黄铁矿化和毒砂矿化为主,其次为绢云母化、碳酸盐化、绿泥石化和褐铁矿化,局部发育黄铜矿化、方铅矿化和闪锌矿化等。其中,硅化、黄铁矿化和毒砂矿化与金矿化密切相关。

根据矿石中矿物共生组合特征、矿石结构构造和脉体间的切割关系,可将辛家咀金矿床成矿阶段划分为沉积成岩期、热液成矿期和表生氧化期,矿物生成顺序见图5。

热液成矿期是主成矿期,金的富集成矿是多次热液活动叠加的产物,根据野外和镜下观察,可将



(a)石英脉中发育黄铁矿化和碳酸盐团块;(b)毒砂矿化;(c)石英脉中发育黄铜矿化;(d)绿泥石化;(e)自然金嵌于黄铁矿裂隙中;(f)石英脉中发育毒砂、方铅矿和闪锌矿(背散射);(g)草莓状黄铁矿;(h)自形一半自形黄铁矿;(i)黄铁矿被氧化交代为赤铁矿,形成交代残余结构;
Apy-毒砂;Py-黄铁矿;Cc-辉铜矿;Ccp-黄铜矿;Chl-绿泥石;Au-自然金;Sp-闪锌矿;Gn-方铅矿;Hem-赤铁矿

图4 辛家咀金矿床矿石特征

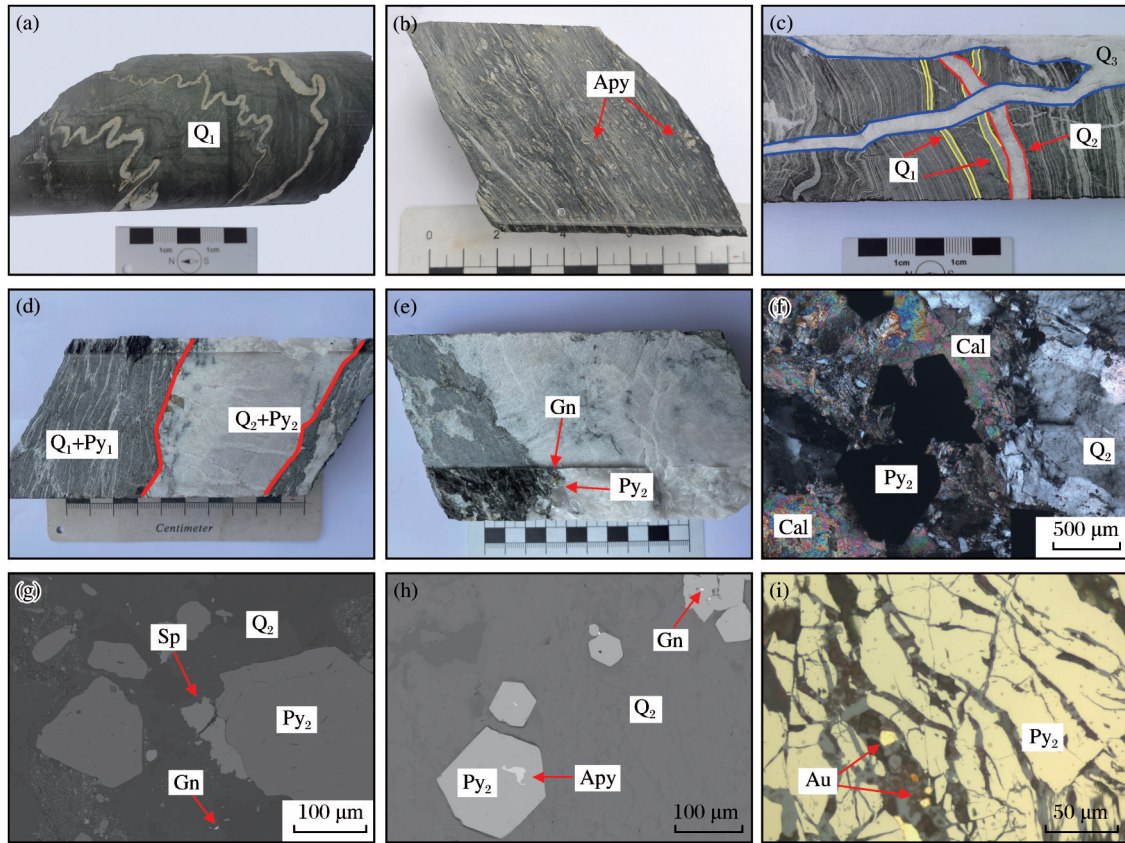
Fig. 4 Ore characteristics of the Xinjiuzi gold deposit

矿物名称	沉积成岩期	热液成矿期			表生期
		石英-黄铁矿阶段(I)	石英-方解石-自然金-多金属硫化物阶段(II)	石英-碳酸盐阶段(III)	
石英		丰富	正常	丰富	
黄铁矿		丰富	正常	少量	
毒砂			正常		
黄铜矿			少量		
方铅矿			少量		
闪锌矿			少量		
自然金		不确定	少量		
绢云母			少量		
铁白云石			少量		
方解石				少量	
褐铁矿				丰富	
赤铁矿				丰富	

图5 辛家咀金矿床不同成矿阶段矿物生成顺序

Fig. 5 Mineral generation sequence in different mineralization stages of the Xinjiuzi gold deposit

热液成矿期划分为3个阶段。石英—黄铁矿阶段(I):该阶段发育顺层黄铁矿—石英细脉,多随围岩发生揉皱变形,呈波浪状、蚊层状和蠕虫状[图6(a)],该阶段金矿化较弱。石英—方解石—自然金—多金属硫化物阶段(II):该阶段是成矿主阶段,存在大的石英单脉,脉体分割或包裹千枚岩碎块[图6(b)],且多以小角度切穿I阶段脉体[图6(c)、6(d)]。该阶段黄铁矿呈立方体状、团块状和浸染状分布,粒径为1~5 mm,镜下可见黄铁矿多与毒砂、方铅矿和闪锌矿等共生[图6(e)~6(h)],自然金多分布在该阶段黄铁矿裂隙中[图6(i)]。石英—碳酸盐阶段(III):该阶段热液活动减弱,脉体切穿早阶段和主阶段脉体[图6(c)],石英脉中发育碳酸盐团块,基本未见硫化物,标志着热液成矿期的结束。表生期发育在近地表1~2 m范围内,部分黄铁矿和黄铜矿等硫化物在长期的物理化学条件下被氧化成褐铁矿和孔雀石,形成一些蜂窝状和



(a)蠕虫状石英脉;(b)石英脉发育毒砂矿化;(c)主阶段石英脉切穿成矿早阶段石英细脉,二者被晚阶段脉体切穿;(d)主阶段黄铁矿—石英单脉切穿早阶段石英细脉;(e)石英脉中黄铁矿与方铅矿共生;(f)方解石与黄铁矿共生;(g)黄铁矿、方铅矿和闪锌矿共生;(h)石英脉中发育黄铁矿、毒砂和方铅矿;(i)自然金分布于主阶段黄铁矿裂隙;Q—石英;Apy—毒砂;Py—黄铁矿;Gn—方铅矿;Cal—方解石;Sp—闪锌矿;Gn—方铅矿;Au—自然金

图6 辛家咀金矿床矿物组合特征

Fig. 6 Mineral assemblage characteristics of the Xinjiazu gold deposit

土状矿石。

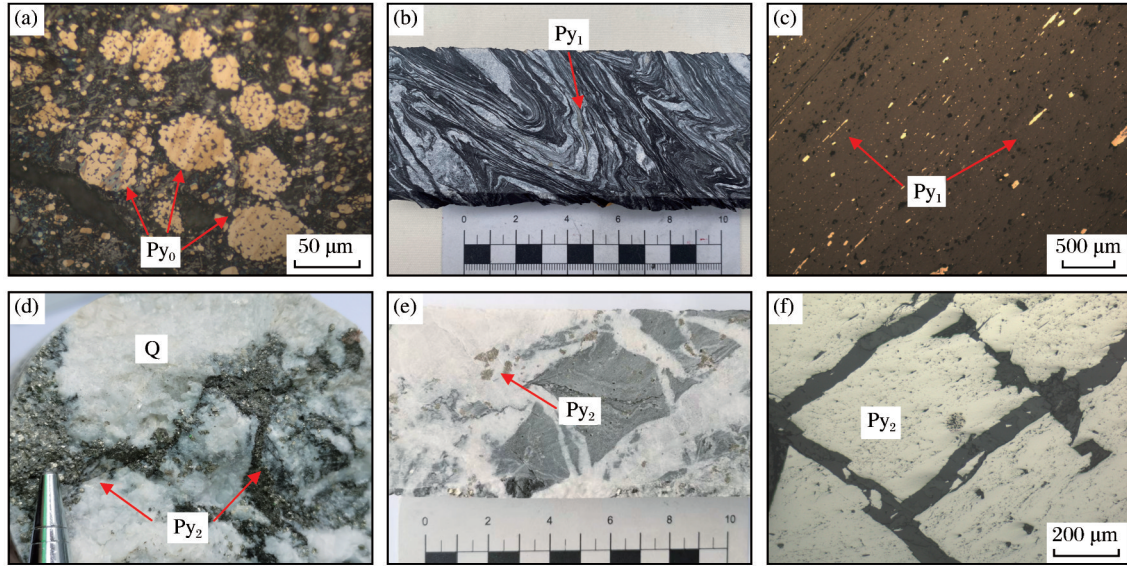
2.4 载金矿物特征

辛家咀金矿床主要载金矿物为黄铁矿和毒砂。其中根据黄铁矿组构、矿物共生组合可将其划分为3个世代,分别为沉积成岩期(Py0)、成矿早阶段(Py1)和成矿主阶段(Py2)。沉积成岩期(Py0):该阶段黄铁矿多呈草莓状和胶状结构,细粒黄铁矿粒径多在5 μm左右,集合体大小约为50 μm,主要分布在寒武系碳质板岩中[图7(a)]。根据徐国风等(1980)研究,还原沉积环境中形成的黄铁矿在早期通过细菌作用发育胶状结构,在成岩阶段会重结晶,形成草莓状黄铁矿。由此可知,沉积成岩期(Py0)黄铁矿在结构上与沉积环境形成的黄铁矿相一致;成矿早阶段(Py1)黄铁矿主要呈黄铁矿—石

英脉的形式产出,脉体产状与围岩产状一致,且随围岩发生了韧性剪切变形,黄铁矿粒径为10~30 μm,呈定向排列,且发生了拉长拔丝[图7(b)、7(c)];成矿主阶段(Py2)的黄铁矿粒径为50 μm~2 mm不等,分布在较宽石英脉中或石英脉与围岩的接触部位,呈集合体或立方体状,部分黄铁矿具有压碎结构,说明叠加了后期的脆性变形[图7(d)~7(f)]。自然金主要呈裂隙金和包裹金分布在该世代黄铁矿中。毒砂主要发育在成矿主阶段的石英脉中,呈菱形和立方体状[图8(a)~8(c)],粒径为3~5 mm,且与黄铁矿共生[图8(d)]。

3 样品采集及测试

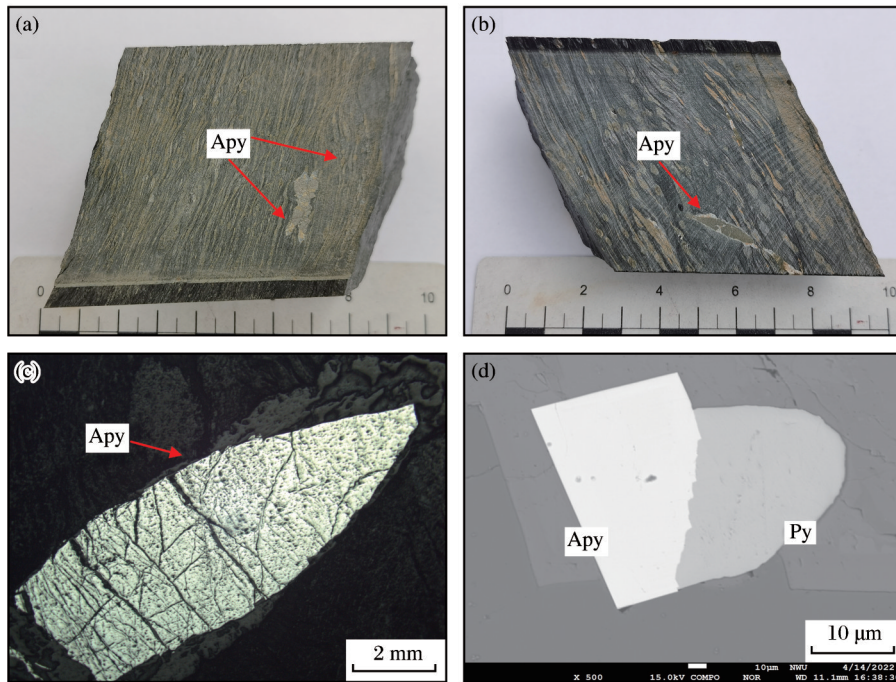
基于野外地表和深部揭露情况,对辛家咀金矿



(a) 沉积期草莓状黄铁矿; (b) 早阶段细粒黄铁矿随围岩发生揉皱; (c) 早阶段黄铁矿遭受剪切变形呈拉长拔丝状; (d) 主阶段立方体状黄铁矿; (e) 主阶段黄铁矿集合体; (f) 主阶段压碎结构黄铁矿; Py-黄铁矿; Q-石英

图7 辛家咀金矿床不同世代黄铁矿手标本和镜下照片

Fig. 7 Hand specimens and microscopic photos of pyrite from different generations in the Xinjiazui gold deposit



(a)、(b) 毒砂手标本照片; (c) 镜下针状毒砂(反射光); (d) 黄铁矿和毒砂共生(背散射); Apy-毒砂; Py-黄铁矿

图8 辛家咀金矿床毒砂手标本和镜下照片

Fig. 8 Hand specimens and microscopic photos of arsenopyrite in the Xinjiazui gold deposit

床围岩和见矿钻孔进行样品采集,并在室内整理制片。通过矿相学分析,对矿石矿物形态、不同成矿阶段矿物组合特征及矿石组构进行系统研究,并进

一步对不同成矿阶段的黄铁矿和毒砂开展电子探针分析。电子探针分析工作在中国地质调查局西安地质调查中心实验室完成,仪器采用日本JEOL

JXA-8230型电子探针分析仪,运行条件如下:加速电压为20 kV,加速电流为10 nA,电子束斑为1 μm 。测试元素及检出限分别为: Au(1.108×10^{-6})、S(2.65×10^{-6})、Pb(1.268×10^{-6})、Ag(4.24×10^{-6})、Sb(4.76×10^{-6})、Te(5.49×10^{-6})、Se(3.30×10^{-6})、As(4.35×10^{-6})、Zn(5.97×10^{-6})、Cu(4.35×10^{-6})、Ni(3.51×10^{-6})、Co(3.07×10^{-6})和Fe(2.99×10^{-6})。

4 分析结果

4.1 黄铁矿主微量元素

黄铁矿电子探针分析结果显示,主量元素含量在3个世代黄铁矿中差别不大,沉积成岩期(Py0)黄铁矿中S和Fe的平均含量分别为53.46%和45.53%,原子个数比S/Fe为1.97~2.12(平均值为2.05),计算化学式为 $\text{Fe}_{0.47}\text{S} \sim \text{Fe}_{0.51}\text{S}$;成矿早阶段(Py1)黄铁矿中S和Fe的平均含量分别为54.18%和45.81%,原子个数比S/Fe为2.01~2.13(平均值为2.06),计算化学式为 $\text{Fe}_{0.47}\text{S} \sim \text{Fe}_{0.50}\text{S}$;成矿主阶段(Py2)黄铁矿中S和Fe的平均含量分别为52.89%和45.86%,原子个数比S/Fe为1.91~2.12(平均值为2.01),计算化学式为 $\text{Fe}_{0.47}\text{S} \sim \text{Fe}_{0.52}\text{S}$ (表1)。

根据前人研究,当S/Fe比值小于2时,称为硫亏损;当S/Fe比值大于2时,为铁亏损(严育通等,2012)。3个世代的黄铁矿S/Fe平均比值均大于2,说明辛家咀金矿床黄铁矿具有富硫贫铁的特点。Py0中As的含量为0~0.05%,平均值为0.03%,Py1中As的含量为0~0.18%,平均值为0.06%,Py2中As的含量为0~2.228%,平均值为0.95%,明显高于Py0和Py1。元素相关图显示,As与S原子百分数呈负相关[图9(a)],而As与Fe、S与Fe没有显著相关性[图9(b)、9(c)],暗示可能As替代部分S进入了黄铁矿晶格,沉积成岩期和成矿早阶段Co/Ni比值多数小于1,成矿主阶段Co/Ni比值多数大于1[图9(d)]。3个世代黄铁矿均含金,沉积成岩期黄铁矿中Au的含量为0.02%~0.12%,成矿早阶段黄铁矿Au的含量为0.01%~0.09%,成矿主阶段黄铁矿Au的含量为0.01%~0.24%。

4.2 毒砂主微量元素

毒砂电子探针分析结果见表2,其中 $w(\text{As})=40.21\% \sim 44.34\%$,平均值为42.55%; $w(\text{Fe})=34.10\% \sim$

36.18% ,平均值为35.26%; $w(\text{S})=20.02\% \sim 23.87\%$,平均值为22.22%,原子个数比S/As为1.06~1.36,平均比值为1.23。然而,毒砂理论成分为 $w(\text{As})=46.01\%$, $w(\text{S})=19.69\%$, $w(\text{Fe})=34.30\%$,As/S=2.34,分析结果偏离理论毒砂的成分,表现出毒砂富硫贫砷的特点。由元素相关性图[图10(a)]可以看出,As与S呈负相关关系,S与Fe、Au与As、S均无显著相关性[图10(b)~10(d)],暗示As同样可能替换部分S,进入毒砂晶格。 $w(\text{Au})=0 \sim 0.43\%$,平均值为0.14%,说明毒砂同样是重要的载金矿物。微量元素还有Pb(0~0.20%)、Ag(0~0.12%)、Sb(0~0.10%)、Zn(0~3.00%)、Cu(0~0.10%)、Ni(0~0.15%)和Co(0~0.19%)。

5 讨论

5.1 金的赋存状态

金的赋存状态是指金在矿石中的分布特征和存在形式,按不同的分类原则可进行不同分类,目前主流划分方案是以金的粒度来划分,可划分为“可见金”(粒度大于0.1 μm)和“不可见金”(粒度小于等于0.1 μm)两大类(Cook et al, 2013;李增胜等, 2013;张博等, 2018)。

对辛家咀金矿床金矿石样品进行显微镜下观察,只可在成矿主阶段金矿石中见到自然金,而电子探针测试结果表明,黄铁矿和毒砂中均含金。由此推断,辛家咀金矿床金的赋存状态有2种,一是以可见金的形式存在,二是以不可见金的形式分布在载金矿物中。

可见金在黄铁矿等多金属硫化物中主要有2种赋存方式:一是以粒状、脉状和树杈状的裂隙金分布在黄铁矿裂隙中[图11(a)~11(c)];二是以不规则粒状、浑圆状的包裹金嵌于黄铁矿中[图11(d)]。

不可见金在含砷黄铁矿和毒砂等金属硫化物中主要以纳米金(Au^0)和晶格金(Au^+)2种形式赋存。前人提出造山型金矿Au在含砷黄铁矿中的溶解度方程($C_{\text{Au}}=0.02 \times C_{\text{As}} + 4 \times 10^{-5}$),来判断金的赋存状态(Reich et al, 2005)。若数据落在金溶解曲线上方,金以纳米金(Au^0)的形式赋存;若数据落在金溶解曲线下方,则金以晶格金(Au^+)的形式赋存(陆

表1 辛家咀金矿床黄铁矿电子探针分析结果

Table 1 Results of electron microprobe analysis of pyrite in the Xinjiazui gold deposit (%)

成矿期次	样品编号	Au	S	Pb	Ag	Sb	Te	Se	As	Zn	Cu	Ni	Co	Fe	合计	化学式	
沉积成岩期	YDG-g1-2	0.12	53.68	-	0.07	-	-	0.04	0.02	0.09	0.27	-	0.09	46.06	100.42	Fe _{0.49} S	
	YDG-g1-3	-	52.13	-	0.02	-	-	0.01	-	-	0.03	-	0.11	46.09	98.39	Fe _{0.51} S	
	YDG-g1-4	0.12	53.40	-	-	-	-	0.04	0.03	-	-	0.01	0.07	45.02	98.69	Fe _{0.48} S	
	YDG-g1-5	-	53.12	-	-	-	-	-	-	0.04	0.09	0.02	0.01	45.61	98.99	Fe _{0.49} S	
	YDG-g1-6	0.02	53.54	-	-	-	-	0.03	0.01	-	0.01	0.09	-	45.81	99.52	Fe _{0.49} S	
	YDG-g1-7	-	54.30	-	0.06	-	-	0.01	0.05	0.04	-	-	0.07	45.77	100.31	Fe _{0.48} S	
	YDG-g1-8	-	53.61	0.04	0.06	0.05	-	0.07	0.02	-	0.15	-	0.03	45.61	99.64	Fe _{0.49} S	
	YDG-g1-10	-	53.89	-	0.04	-	-	0.03	0.05	0.89	0.04	0.03	0.02	44.31	99.28	Fe _{0.47} S	
	成矿早阶段	ZK1101-g5-1	-	53.71	0.07	-	-	-	0.03	-	0.01	0.04	0.01	0.07	45.91	99.84	Fe _{0.49} S
		ZK1101-g5-2	-	54.29	-	0.01	0.01	-	-	0.06	0.02	0.01	0.02	0.17	45.80	100.39	Fe _{0.48} S
ZK1101-g5-3		0.05	54.43	0.01	0.02	0.04	-	0.04	0.06	-	0.03	0.03	0.18	45.96	100.83	Fe _{0.48} S	
ZK1101-g5-4		0.07	53.19	-	-	-	0.02	0.02	-	0.03	-	0.06	0.08	45.19	98.66	Fe _{0.49} S	
ZK1101-g5-5		0.06	53.33	-	0.00	0.02	-	-	0.09	0.04	0.06	0.05	0.28	44.50	98.43	Fe _{0.48} S	
ZK1101-g11-1		-	54.03	0.05	-	-	0.02	-	0.05	-	-	0.28	0.05	45.58	100.05	Fe _{0.48} S	
ZK1101-g11-2		0.01	54.18	0.02	-	0.01	0.01	-	0.09	0.05	-	0.05	0.18	44.79	99.40	Fe _{0.47} S	
ZK1101-g11-3		-	54.05	-	-	0.02	-	-	-	0.08	-	0.05	0.11	44.96	99.27	Fe _{0.48} S	
ZK1101-g11-4		0.01	53.55	-	-	-	-	0.07	-	-	0.03	1.02	0.08	44.63	99.39	Fe _{0.48} S	
ZK1101-g12-1		0.03	54.57	-	0.02	-	-	-	0.16	-	-	0.12	-	46.17	101.08	Fe _{0.48} S	
ZK1101-g12-2		0.09	54.04	0.05	0.01	-	-	0.00	-	0.01	0.02	0.09	0.07	45.31	99.68	Fe _{0.48} S	
ZK1101-g12-3		0.01	54.44	-	-	0.02	-	0.05	0.07	0.03	0.03	0.17	0.06	45.56	100.44	Fe _{0.48} S	
ZK1101-g12-4		0.03	53.71	0.14	0.01	-	0.01	-	0.08	0.02	0.03	0.21	0.05	45.52	99.80	Fe _{0.48} S	
ZK1101-g12-5		-	54.23	0.07	-	0.01	-	0.07	-	0.02	-	0.04	-	45.83	100.28	Fe _{0.48} S	
ZK1101-g13-1		-	54.00	0.07	-	-	-	0.01	0.02	-	-	0.21	0.06	46.06	100.43	Fe _{0.49} S	
ZK1101-g13-2		0.02	54.32	-	0.01	-	0.01	0.06	-	0.04	0.03	0.09	0.06	45.73	100.35	Fe _{0.48} S	
ZK1101-g13-3		-	54.81	0.05	-	-	-	0.05	0.02	0.02	-	0.16	-	44.81	99.94	Fe _{0.47} S	
ZK1101-g13-4		-	54.53	0.06	-	-	0.03	0.06	0.08	0.06	-	0.12	0.08	46.22	101.23	Fe _{0.48} S	
ZK1101-g13-5		0.02	53.92	-	-	0.04	-	0.04	0.02	0.01	-	0.13	0.11	46.83	101.10	Fe _{0.50} S	
ZK1101-g13-6		-	54.59	0.01	-	-	0.03	0.09	0.08	-	0.06	0.26	0.07	46.47	101.65	Fe _{0.49} S	
ZK1101-g13-7		0.05	54.30	0.12	-	-	0.02	0.05	0.05	0.03	0.05	0.21	0.06	46.69	101.62	Fe _{0.49} S	
ZK1101-g13-8		0.05	54.77	0.02	0.01	0.03	-	0.04	-	-	-	0.12	0.04	46.02	101.10	Fe _{0.48} S	
ZK1101-g13-9		-	54.34	-	-	-	-	-	0.03	0.05	0.02	0.01	0.05	45.39	99.90	Fe _{0.48} S	
ZK1101-g13-10		0.03	54.51	-	-	0.03	-	0.06	0.02	-	0.01	0.05	0.07	45.66	100.43	Fe _{0.48} S	
ZK1101-g16-1		-	53.98	0.06	0.01	-	0.03	0.03	0.18	-	-	-	0.07	45.89	100.24	Fe _{0.49} S	
ZK1101-g16-2		0.01	54.19	0.14	-	0.03	-	0.07	0.07	-	0.02	0.08	0.04	46.26	100.91	Fe _{0.49} S	
ZK1101-g16-3		0.02	54.42	0.13	-	-	-	0.03	0.01	-	-	-	0.06	46.04	100.71	Fe _{0.48} S	
ZK1101-g16-4		0.05	54.30	0.12	0.02	-	0.01	-	-	0.01	0.02	0.01	-	45.69	100.24	Fe _{0.48} S	
ZK1101-g16-5		-	54.51	0.01	-	-	-	0.03	-	-	0.01	-	-	46.55	101.10	Fe _{0.49} S	
ZK1101-g16-6		-	54.33	-	0.01	-	0.04	-	-	0.01	0.01	-	-	46.47	100.88	Fe _{0.49} S	
ZK1101-g16-7	0.09	53.59	-	-	0.03	-	0.02	-	-	0.04	-	-	45.69	99.46	Fe _{0.49} S		
ZK1101-g16-8	0.03	54.43	-	-	0.01	-	0.09	-	-	-	0.04	-	46.09	100.71	Fe _{0.48} S		
ZK1101-g16-9	-	54.37	0.00	-	-	0.01	0.01	0.02	0.03	-	-	0.08	46.90	101.40	Fe _{0.49} S		
ZK1101-g16-10	-	54.27	-	-	0.03	-	-	-	-	-	0.04	0.06	46.56	100.95	Fe _{0.49} S		

续表 1

成矿期次	样品编号	Au	S	Pb	Ag	Sb	Te	Se	As	Zn	Cu	Ni	Co	Fe	合计	化学式
	ZK802-g8	0.17	51.87	-	-	0.04	-	0.06	-	-	-	-	0.17	46.31	98.61	Fe _{0.51} S
	ZK802-g8-10	-	52.85	0.22	-	0.10	-	0.12	-	0.13	-	0.02	0.08	46.60	100.12	Fe _{0.50} S
	ZK802-g8-11	0.05	53.64	-	-	0.00	-	-	0.01	0.07	-	-	-	46.54	100.33	Fe _{0.50} S
	ZK802-g8-12	0.12	53.42	-	-	-	-	0.06	-	0.02	-	-	0.14	47.12	100.87	Fe _{0.50} S
	ZK003-g8-6	0.24	53.16	-	-	-	-	-	1.15	0.09	-	-	-	45.33	99.99	Fe _{0.49} S
	ZK003-g8-7	-	52.82	-	-	-	-	-	1.02	-	0.02	0.03	0.06	45.23	99.18	Fe _{0.49} S
	ZK003-g8-8	-	52.68	-	0.05	-	-	0.01	1.10	0.06	0.03	-	0.07	45.00	99.00	Fe _{0.49} S
	ZK003-g8-9	-	52.85	0.01	0.02	-	-	-	0.91	0.05	0.01	0.02	0.11	45.40	99.40	Fe _{0.49} S
	ZK802-g10	-	51.32	-	-	0.02	-	0.20	0.19	0.04	-	-	0.10	46.91	98.77	Fe _{0.52} S
	ZK003-g8-10	0.12	52.30	0.07	-	-	-	0.02	1.11	0.05	-	0.04	-	45.80	99.52	Fe _{0.50} S
	ZK003-g8-11	0.19	52.43	-	0.08	-	-	0.02	1.57	0.03	-	-	0.14	44.92	99.38	Fe _{0.49} S
成矿主阶段	ZK003-g8-12	-	52.72	0.13	0.08	-	-	-	1.21	-	0.01	0.04	0.06	45.05	99.30	Fe _{0.49} S
	ZK003-g8-13	0.07	52.90	-	-	0.04	-	0.01	1.03	-	0.03	-	0.05	45.15	99.28	Fe _{0.49} S
	ZK003-g9-1	0.22	53.65	-	0.07	-	-	0.06	-	0.01	0.01	0.06	0.08	47.38	101.52	Fe _{0.50} S
	ZK003-g9-2	0.10	53.80	-	0.06	0.04	-	0.01	-	0.04	-	0.05	0.07	46.84	101.01	Fe _{0.50} S
	ZK003-g9-4	0.07	52.25	-	0.09	0.01	-	0.05	0.01	0.06	-	0.16	0.07	46.22	99.00	Fe _{0.51} S
	ZK003-g9-5	0.14	51.93	-	-	-	-	0.05	0.09	0.01	0.03	0.03	0.09	46.98	99.35	Fe _{0.52} S
	ZK003-g11-6	-	52.83	-	-	0.06	-	-	1.18	0.13	-	-	0.08	44.85	99.14	Fe _{0.49} S
	ZK003-g11-7	0.10	53.89	-	-	-	-	-	1.08	0.04	-	-	0.06	44.36	99.52	Fe _{0.47} S
	ZK1101-g6-1	-	53.06	-	-	0.01	-	-	1.14	0.05	-	0.00	0.07	45.00	99.33	Fe _{0.48} S
	ZK1101-g6-2	-	53.18	-	0.02	0.02	-	0.10	1.17	-	-	-	0.09	46.35	100.92	Fe _{0.50} S
	ZK1101-g6-3	0.02	53.52	-	0.01	-	0.03	0.13	1.00	0.08	-	-	0.10	45.80	100.69	Fe _{0.49} S
	ZK1101-g6-4	0.01	52.75	-	-	-	0.02	-	2.23	0.01	0.03	-	0.04	45.41	100.49	Fe _{0.49} S
	ZK1101-g6-5	-	53.49	-	-	0.04	-	0.10	0.84	-	-	-	0.07	46.09	100.62	Fe _{0.49} S

注:“-”表示含量低于检测限

邦成等,2016)。通过投图,辛家咀金矿床黄铁矿和毒砂的数据分布于溶解曲线两侧(图12),沉积成岩期和成矿早阶段黄铁矿中金为纳米金(Au⁰),成矿主阶段黄铁矿中含纳米金(Au⁰)和晶格金(Au⁺),毒砂中的金全部以晶格金(Au⁺)形式存在。

元素相关图显示,黄铁矿和毒砂中As与S均呈负相关关系[图8(a),图9(a)],暗示着As可能以类质同象的方式取代S进入黄铁矿和毒砂晶格中,由于S和As原子半径不同,造成黄铁矿和毒砂晶格结构发生畸变,使其具备容纳金的能力(华曙光等,2012),导致成矿主阶段晶格金的富集。

5.2 成矿物理化学环境

毒砂中Fe-As-S的含量及矿物共生关系可以限定毒砂的形成温度,该方法被广泛应用于不同形成环境的热液矿床中(Kretschmar et al, 1976; Sharp et al, 1985)。将毒砂中As的原子百分数投于Fe-

As-S相图中,可获得其形成时的物理化学条件。根据表2计算出As原子百分数为28.4%~31.3%,估算出毒砂成矿温度为267~377℃,硫逸度 $f(S_2)$ 为-13.3~-7.3(图13),与寇少磊等(2024)使用包裹体测温获得的均一温度相似。

黄铁矿中Co和Ni含量及其比值是判断黄铁矿成因的重要指标之一,对成矿条件具有重要的指示意义(高永伟等,2019;寸小妮等,2023)。前人研究认为,热液成因黄铁矿Co/Ni比值大于1,沉积成因黄铁矿Co/Ni比值小于1(Bralia et al, 1979;沈关文等,2022)。也有学者研究发现造山型金矿床的成矿流体多属于变质热液,而变质热液形成的黄铁矿,其地球化学背景和物理化学条件更接近于沉积成因黄铁矿,故其Co/Ni比值也接近于1或者小于1(李红兵等,2005;曹根深等,2023)。电子探针数据(表1)表明,22组数据Co/Ni比值大于1;23组数据

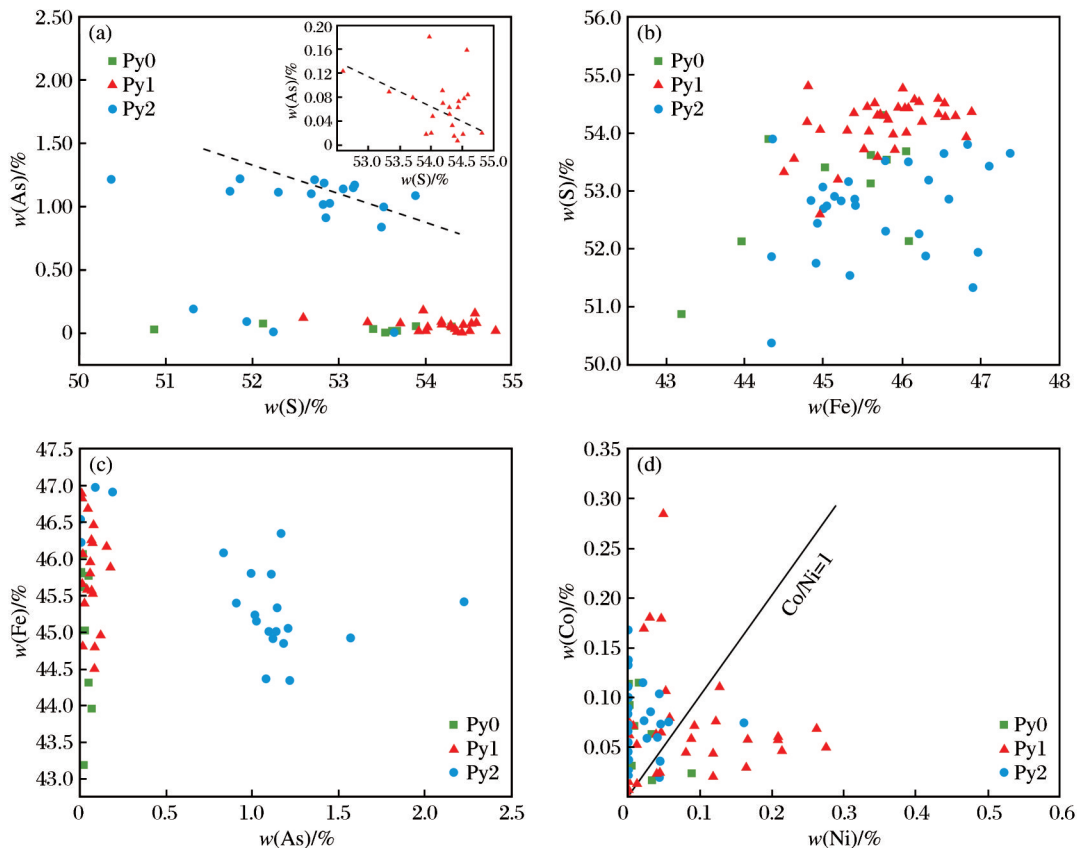


图9 辛家咀金矿床黄铁矿元素相关图

Fig. 9 Correlation diagram of pyrite elements in the Xinjiuzui gold deposit

Ni 含量低于检测限, Co 含量远大于 Ni, Co/Ni 比值远大于 1; 15 组数据 Co/Ni 比值小于 1; 6 组数据 Co 含量低于检测限, Ni 含量远大于 Co, Co/Ni 比值远小于 1。辛家咀金矿床沉积成岩期 Co/Ni 比值多数小于 1, 成矿早阶段 Co/Ni 比值一半小于 1, 可能与成矿流体主要来源于变质热液有关(寇少磊等, 2024), 成矿主阶段 Co/Ni 比值多数大于 1 [图 9(d)], 表明辛家咀金矿床黄铁矿应属于沉积—热液型。

不同地质条件下形成的黄铁矿, 其微量元素含量存在差异。例如高温环境形成的黄铁矿富含亲铁元素, Co 含量高于 $1\ 000 \times 10^{-6}$; 中温环境形成的黄铁矿含较多亲铜元素, Co 含量为 $100 \times 10^{-6} \sim 1\ 000 \times 10^{-6}$; 低温环境形成的黄铁矿富含高活动性亲铜元素, Co 含量低于 100×10^{-6} (刘英俊等, 1989; 张然等, 2022)。辛家咀金矿床 3 个世代黄铁矿的 Co 含量均较高, 分别为 0.023%~0.114%、0.043%~0.284% 和 0.036%~0.167%, 说明 3 个世代黄铁矿均形成于中

高温环境, 沉积成岩期(Py0)的形成温度低于成矿早阶段和成矿主阶段。

黄铁矿中的 $w(\text{Fe})/w(\text{As}+\text{S})$ 比值对于黄铁矿形成深度具有指示意义。通常浅成环境形成的黄铁矿该比值为 0.926, 中成环境为 0.863, 深成环境为 0.846 (葛战林等, 2023)。由表 1 计算得出, 辛家咀金矿床黄铁矿 $w(\text{Fe})/w(\text{As}+\text{S})$ 比值在沉积成岩期(Py0)为 0.821~0.884, 平均值为 0.852, 在成矿早阶段(Py1)为 0.817~0.868, 平均值为 0.845, 在成矿主阶段(Py2)为 0.807~0.911, 平均值为 0.855, 表明辛家咀金矿床黄铁矿主体形成于中深成环境。

5.3 矿床成因

辛家咀金矿床发育于后龙门山构造带燕子砭—花石沟脆—韧性剪切带中, 矿(化)体的产出严格受剪切带控制, 在韧性变形强、脆性断裂叠加部位往往发育高品位金矿石。金矿体赋存在志留系茂县群($S_{1-2}M$)中, 以石英脉型金矿石为主, 围岩蚀变

表2 辛家咀金矿床毒砂电子探针分析结果
Table 2 Results of electron probe analysis of arsenopyrite in the Xinjiazui gold deposit (%)

样品编号	Au	S	Pb	Ag	Sb	As	Zn	Cu	Ni	Co	Fe	合计	As/S	化学式
ZK003-g5-1	-	21.86	-	-	-	42.84	0.05	-	-	0.09	35.47	100.30	0.84	Fe _{0.93} As _{0.84} S
ZK003-g5-2	0.14	22.00	-	0.01	-	42.06	0.04	-	0.01	0.08	35.14	99.48	0.82	Fe _{0.91} As _{0.82} S
ZK003-g5-3	-	22.38	-	-	-	42.37	0.04	-	-	0.11	34.89	99.79	0.81	Fe _{0.89} As _{0.81} S
ZK003-g5-4	0.03	21.94	-	-	0.01	43.19	0.11	-	-	0.06	35.44	100.82	0.84	Fe _{0.92} As _{0.84} S
ZK003-g5-5	-	23.35	-	0.04	0.01	40.59	-	0.02	-	0.06	35.89	99.95	0.74	Fe _{0.88} As _{0.74} S
ZK003-g5-6	-	23.87	0.07	-	-	41.22	0.06	-	0.05	0.13	35.66	101.09	0.74	Fe _{0.85} As _{0.74} S
ZK003-g5-7	-	23.38	-	-	-	41.79	-	0.01	0.02	0.09	35.24	100.52	0.76	Fe _{0.86} As _{0.76} S
ZK003-g5-8	0.14	21.77	0.04	0.04	0.05	43.62	0.19	0.02	0.06	0.08	35.49	101.49	0.86	Fe _{0.93} As _{0.86} S
ZK003-g5-9	0.05	22.40	-	-	-	43.62	0.02	-	-	0.10	35.46	101.65	0.83	Fe _{0.90} As _{0.83} S
ZK003-g7-5	0.03	21.97	0.14	-	-	43.55	0.02	-	0.03	0.10	35.25	101.10	0.85	Fe _{0.92} As _{0.85} S
ZK003-g7-6	-	22.77	-	0.03	-	42.10	0.03	0.06	0.07	0.06	35.65	100.79	0.79	Fe _{0.89} As _{0.79} S
ZK003-g7-7	-	22.34	-	-	0.07	42.66	0.03	0.05	0.02	0.06	34.70	99.93	0.82	Fe _{0.89} As _{0.81} S
ZK003-g7-8	0.32	22.25	-	-	-	42.04	0.05	-	-	0.02	35.32	100.10	0.81	Fe _{0.91} As _{0.81} S
ZK003-g7-9	0.03	21.20	-	0.12	0.02	42.80	0.02	-	-	0.04	34.96	99.18	0.86	Fe _{0.94} As _{0.86} S
ZK003-g8-1	-	21.59	0.00	-	-	44.10	0.03	-	0.01	0.08	35.49	101.30	0.87	Fe _{0.94} As _{0.87} S
ZK003-g8-2	-	21.08	-	0.05	0.03	44.03	-	0.09	-	0.17	35.24	100.68	0.89	Fe _{0.96} As _{0.89} S
ZK003-g8-3	0.43	21.33	-	0.09	0.07	41.75	0.06	0.06	-	0.07	34.10	98.01	0.85	Fe _{0.93} As _{0.85} S
ZK003-g8-4	-	21.45	0.20	0.01	-	42.74	0.04	-	0.02	0.15	35.00	99.62	0.85	Fe _{0.93} As _{0.85} S
ZK003-g8-5	-	21.37	0.01	0.02	0.07	43.56	0.07	0.01	0.09	0.05	35.05	100.30	0.87	Fe _{0.94} As _{0.87} S
ZK003-g8-16	0.16	23.42	-	0.01	-	41.72	0.04	-	-	0.07	35.96	101.44	0.76	Fe _{0.88} As _{0.76} S
ZK003-g8-17	-	22.71	-	0.09	0.05	42.96	0.09	-	-	0.08	35.66	101.64	0.81	Fe _{0.90} As _{0.81} S
ZK003-g8-18	-	21.30	0.04	0.01	-	42.62	0.01	-	0.01	0.07	35.29	99.43	0.86	Fe _{0.95} As _{0.85} S
ZK003-g10-1	0.19	21.55	-	0.06	0.03	44.01	-	-	-	0.01	34.70	100.54	0.87	Fe _{0.92} As _{0.87} S
ZK003-g10-2	-	21.68	-	-	0.00	43.83	0.01	0.03	-	0.12	35.08	100.75	0.86	Fe _{0.92} As _{0.86} S
ZK003-g10-3	-	23.35	-	-	-	40.21	-	-	0.09	-	35.93	99.60	0.74	Fe _{0.88} As _{0.73} S
ZK003-g10-4	0.03	23.35	-	0.09	0.10	41.65	-	0.08	0.04	0.15	36.18	101.66	0.76	Fe _{0.89} As _{0.76} S
ZK003-g10-5	0.19	21.64	-	0.05	0.05	43.73	-	-	0.08	0.07	34.62	100.42	0.86	Fe _{0.91} As _{0.86} S
ZK003-g10-6	-	21.22	0.13	0.03	0.02	43.97	3.00	-	0.01	0.07	35.58	101.02	0.89	Fe _{0.96} As _{0.88} S
ZK003-g10-7	0.05	21.08	0.18	-	-	43.37	0.05	-	0.07	0.09	35.37	100.29	0.88	Fe _{0.96} As _{0.88} S
ZK003-g10-8	-	21.78	-	-	-	42.59	0.01	0.03	-	0.12	35.52	100.05	0.84	Fe _{0.93} As _{0.83} S
ZK003-g10-9	0.08	23.64	-	-	0.04	40.86	0.02	-	0.10	-	35.71	100.45	0.74	Fe _{0.86} As _{0.74} S
ZK003-g10-10	-	22.10	-	-	-	42.70	0.04	-	0.15	0.19	35.40	100.59	0.83	Fe _{0.92} As _{0.82} S
ZK003-g11-1	-	20.02	0.08	0.04	0.04	44.34	0.02	-	0.02	0.07	34.28	98.92	0.95	Fe _{0.98} As _{0.94} S
ZK003-g11-2	-	22.78	-	-	-	42.40	0.03	-	0.01	0.01	35.07	100.32	0.80	Fe _{0.88} As _{0.79} S
ZK003-g11-3	0.08	22.36	-	-	0.07	42.14	-	-	0.01	0.10	35.14	99.91	0.81	Fe _{0.90} As _{0.80} S
ZK003-g11-4	0.22	22.72	-	-	-	42.01	0.02	-	-	0.01	35.02	100.01	0.79	Fe _{0.88} As _{0.79} S
ZK003-g11-11	-	21.57	0.02	-	-	42.54	0.04	-	-	0.08	35.19	99.44	0.84	Fe _{0.93} As _{0.84} S
ZK003-g11-12	-	22.98	0.03	0.08	-	42.05	-	-	0.02	0.06	35.19	100.48	0.78	Fe _{0.88} As _{0.78} S
ZK003-g11-13	0.24	23.49	-	-	0.02	40.86	0.04	-	0.09	0.11	35.28	100.12	0.74	Fe _{0.86} As _{0.74} S
ZK003-g11-14	-	23.62	-	-	0.01	41.42	-	0.10	0.06	0.05	34.84	100.12	0.75	Fe _{0.84} As _{0.75} S
ZK003-g11-15	0.14	22.62	-	0.08	-	42.08	-	0.02	0.03	0.06	35.17	100.20	0.79	Fe _{0.89} As _{0.79} S

注:“-”表示含量低于检测限

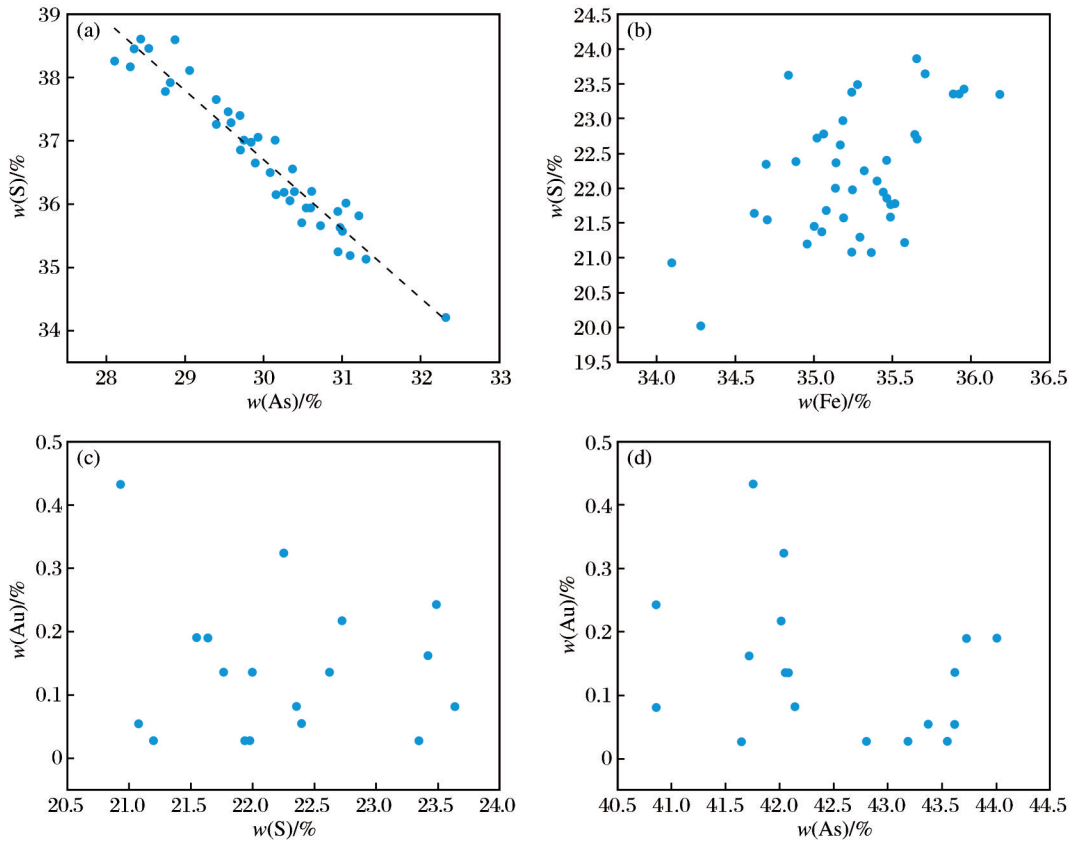
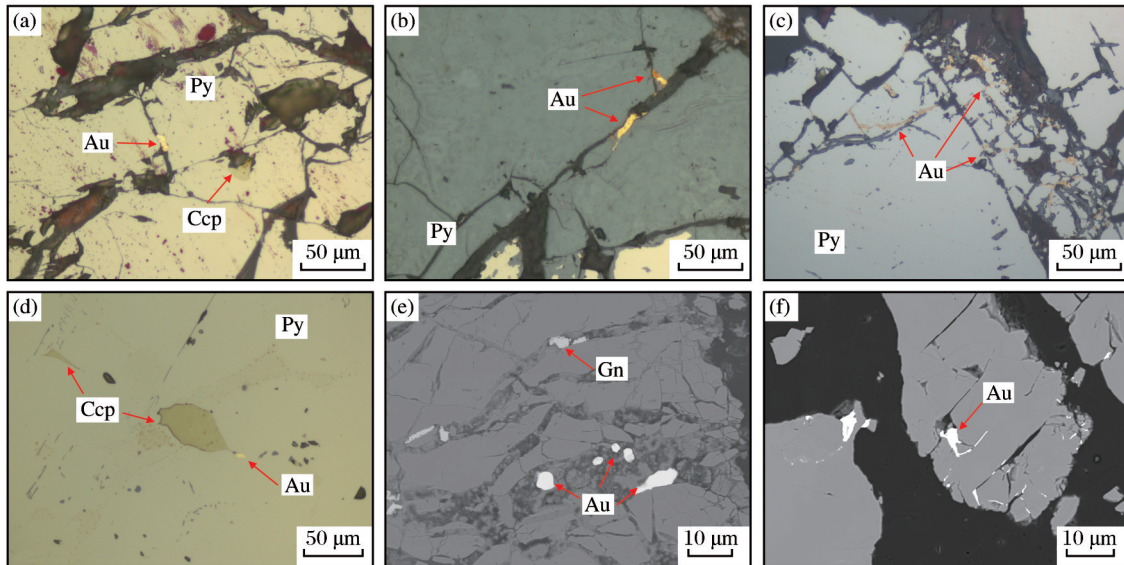


图 10 辛家咀金矿床毒砂元素相关图

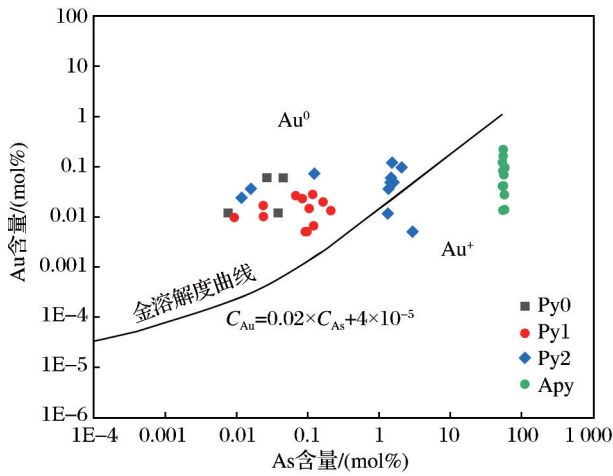
Fig. 10 Correlation diagrams of arsenopyrite elements in the Xinjiazui gold deposit



(a)、(b)黄铁矿中粒状裂隙金;(c)金以树杈状分布于黄铁矿裂隙中;(d)黄铁矿中包裹金;(e)自然金与方铅矿共生(背散射);(f)黄铁矿中自然金(背散射);Au-自然金;Ccp-黄铜矿;Gn-方铅矿;Py-黄铁矿

图 11 辛家咀金矿床金的赋存状态

Fig. 11 Occurrence of gold in the Xinjiazui gold deposit



Py0-沉积期黄铁矿;Py1-成矿早阶段黄铁矿;Py2-成矿主阶段黄铁矿;Apy-毒砂

图 12 辛家咀金矿床毒砂及黄铁矿 Au-As 关系图(据 Reich et al, 2005)

Fig. 12 Relationship diagram of Au-As of arsenopyrite and pyrite in the Xinjiazui gold deposit (according to Reich et al, 2005)

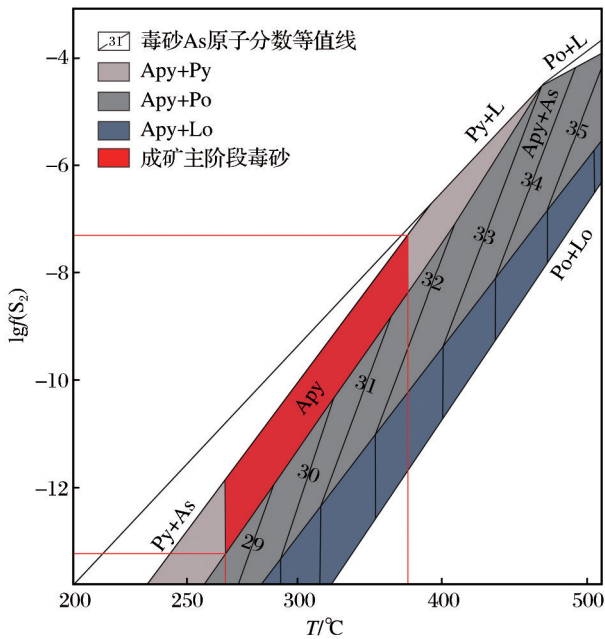


图 13 毒砂地质温度计的 $\lg f(S_2)$ - t 图解(据 Kretschmar et al, 1976; Sharp et al, 1985)

Fig. 13 $\lg f(S_2)$ - t diagram of arsenopyrite geothermometer (according to Kretschmar et al, 1976; Sharp et al, 1985)

包括硅化、黄铁矿化、毒砂矿化、碳酸盐化、绢云母化和绿泥石化等,金主要以晶格金和纳米金赋存于

黄铁矿和毒砂中,矿床形成于中高温、中深成环境。此外,成矿主阶段石英的 H-O 同位素表明成矿流体为变质流体,载金黄铁矿的 $\delta^{34}S$ 数据显示硫源主要为浅变质强变形的赋矿围岩, Pb 同位素特征显示与造山带铅相一致(Liu et al, 2022)。因此,对比后龙门山构造带典型脆-韧性剪切带型金矿床,结合地质和地球化学特征,认为辛家咀金矿床为受脆-韧性剪切带控制的造山型金矿床。

6 结论

(1)辛家咀金矿床成矿作用可划分为沉积成岩期、热液成矿期和表生期。其中,热液成矿期为主成矿期,可划分为石英-黄铁矿(I)、石英-方解石-自然金-多金属硫化物(II)和石英-碳酸盐(III)3个阶段。

(2)辛家咀金矿床主要载金矿物为黄铁矿和毒砂。其中,黄铁矿可划分为沉积成岩期(Py0)、成矿早阶段(Py1)和成矿主阶段(Py2)3个世代,毒砂主要与成矿主阶段黄铁矿共生。

(3)金矿物以可见金和不可见金2种赋存状态存在。可见金以包裹金和裂隙金的形式赋存于成矿主阶段黄铁矿和黄铁矿裂隙中;不可见金以纳米金(Au^0)和晶格金(Au^+)的形式存在,其中沉积期和成矿早阶段黄铁矿中金主要以 Au^0 的形式存在,成矿主阶段黄铁矿中金以 Au^0 和 Au^+ 形式存在,毒砂中全部以 Au^+ 的形式存在。

(4)辛家咀金矿床形成于硫逸度 $f(S_2)$ 为 -13.3~-7.3 的中高温、中深成环境,成因类型为受脆-韧性剪切带控制的造山型金矿床。

参考文献 (References):

- Bralia A, Sabatini G, Troja F, 1979. A reevaluation of the Co/Ni ratio in pyrite as geochemical tool in ore genesis problems [J]. Mineralium Deposita, 14(3): 353-374.
- Cook N J, Ciobanu C L, Meria D, et al, 2013. Arsenopyrite-pyrite association in an orogenic gold ore: tracing mineralization history from textures and trace elements [J]. Economic Geology, 108(6): 1273-1283.
- Deng J, Yang L Q, Sun Z S, et al, 2003. A metallogenic model of gold deposits of the Jiaodong granite-greenstone belt [J]. Acta Geologica Sinica-English Edition, 77(4): 537-546.

- Kretschmar U, Scott S D, 1976. Phase relations involving arsenopyrite in the system Fe-As-S and their application [J]. *The Canadian Mineralogist*, 14(3):364-386.
- Liu J, Bao X S, Gao Y B, et al, 2022. Composition and geochemical characteristics of pyrite and quartz: constraints on the origin of the Xinjiuzui gold deposit, northwestern margin of the Yangtze Block, China [J]. *Minerals*, 12(6):688.
- Liu J, Bao X S, Kou S L, et al, 2023. LA-ICP-MS U-Pb geochronology and geological significance of two types of monazite in the Xinjiuzui gold deposit, northwestern margin of Yangtze Block, China [J]. *Ore Geology Reviews*, 161:105626.
- Liu J, Kou S L, Wang Z B, et al, 2024. Genesis of Xinjiuzui gold deposit: in situ geochemical constraints from arsenopyrite [J]. *Minerals*, 14(10):1031.
- Qiu K F, Yu H C, Deng J, et al, 2020. The giant zaozigou Au-Sb deposit in west Qinling, China: magmatic- or metamorphic-hydrothermal origin [J]. *Mineralium Deposita*, 55(2):345-362.
- Reich M, Kesler S E, Utsunomiya S, et al, 2005. Solubility of gold in arsenian pyrite [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(11):2781-2796.
- Sharp Z D, Essene E J, Kelly W C, 1985. A re-examination of the arsenopyrite geothermometer: pressure considerations and applications to natural assemblages [J]. *The Canadian Mineralogist*, 23(4):517-534.
- 曹根深, 张宇, 陈华勇, 2023. 造山型金矿床黄铁矿微量元素对成矿机制的指示 [J]. *岩石学报*, 39(8):2330-2346.
- Cao Genshen, Zhang Yu, Chen Huayong, 2023. Trace elements in pyrite from orogenic gold deposits: implications for metallogenic mechanism [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 39(8):2330-2346.
- 寸小妮, 薛玉山, 王瑜亮, 等, 2023. 陕西龙头沟金矿黄铁矿标型特征及其找矿意义 [J]. *黄金科学技术*, 31(1):64-77.
- Cun Xiaoni, Xue Yushan, Wang Yuliang, et al, 2023. Typomorphic characteristics and prospecting significance of pyrite in Longtougou gold deposit, Shaanxi Province [J]. *Gold Science and Technology*, 31(1):64-77.
- 高永伟, 王志华, 黎卫亮, 等, 2019. 热液型金矿床中的黄铁矿矿物学研究综述 [J]. *西北地质*, 52(3):58-69.
- Gao Yongwei, Wang Zhihua, Li Weiliang, et al, 2019. A review of pyrite mineralogy research in hydrothermal gold deposits [J]. *Northwestern Geology*, 52(3):58-69.
- 葛战林, 顾雪祥, 章永梅, 等, 2023. 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*, 56(5):278-293.
- Ge Zhanlin, Gu Xue-xiang, Zhang Yongmei, et al, 2023. Mineralogical characteristics and metallogenic indication of gold-bearing sulfides in the Jinpenliang gold deposit, Zhashui-Shanyang ore cluster area, south Qinling [J]. *Northwestern Geology*, 56(5):278-293.
- 龚克礼, 滕方孔, 刘开洪, 等, 1989. 碧口幅 1:20 万区域地质调查报告 (I48E020013) [R]. 兰州: 甘肃省地质矿产局.
- Gong Keli, Teng Fangkong, Liu Kaihong, et al, 1989. Report on the 1:200000 regional geological survey of Bikou (I48E020013) [R]. Lanzhou: Gansu Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources.
- 华曙光, 王力娟, 贾晓芳, 等, 2012. 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*, 37(5):989-1002.
- Hua Shuguang, Wang Lijuan, Jia Xiaofang, et al, 2012. Occurrence and enrichment mechanism of gold in the Qiuling carlin-type gold deposit, Zhen'an County, Shaanxi Province, China [J]. *Earth Science*, 37(5):989-1002.
- 寇少磊, 刘基, 王占彬, 等, 2024. 后龙门山构造带辛家咀金矿床成矿流体特征及其演化: 来自流体包裹体与 H-O 同位素的证据 [J/OL]. *现代地质*: 1-23. (2024-09-30). <https://link.cnki.net/doi/10.19657/j.geoscience.1000-8527.2024.117>.
- Kou Shaolei, Liu Ji, Wang Zhanbin, et al, 2024. Ore-forming fluid characteristics and evolution of the Xinjiuzui gold deposit in back-Longmenshan tectonic belt: evidences from fluid inclusions and H-O isotopes [J/OL]. *Geoscience*: 1-23. (2024-09-30). <https://link.cnki.net/doi/10.19657/j.geoscience.1000-8527.2024.117>.
- 李红兵, 曾凡治, 2005. 金矿中的黄铁矿标型特征 [J]. *地质找矿论丛*, 20(3):199-203.
- Li Hongbing, Zeng Fanzhi, 2005. The pyrite's typomorphic characteristics in gold deposit [J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 20(3):199-203.
- 李增胜, 朱笑青, 卢焕章, 等, 2013. 硫化物中“不可见金”的赋存状态研究进展 [J]. *地质科技情报*, 32(3):81-86.
- Li Zengsheng, Zhu Xiaoqing, Lu Huanzhang, et al, 2013. Advances and current problems in the study of the occurrence of “invisible gold” in sulfides [J]. *Geological Science and Technology Information*, 32(3):81-86.
- 李佐臣, 2009. 扬子地块西北缘后龙门山造山带(北段)物质组成、构造特征及其形成演化 [D]. 西安: 长安大学.
- Li Zuochen, 2009. Composition, structural characteristics and evolution of back-Longmenshan orogen (north section) in the northwest margin of Yangtze Block [D]. Xi'an: Chang'an University.

- 刘基,杨可,张晓星,等,2022.后龙门山造山带辛家咀金矿床地质特征及成因探讨[J].现代地质,36(1):378-388.
- Liu Ji, Yang Ke, Zhang Xiaoxing, et al, 2022. Geological characteristics and genesis of the Xinjiazui gold deposit in back-Longmenshan orogenic belt[J]. Geoscience, 36(1): 378-388.
- 刘英俊,孙承轅,崔卫东,等,1989.湖南黄金洞金矿床毒砂中金的赋存状态的研究[J].地质找矿论丛,4(1):42-49. Liu Yingjun, Sun Chengyuan, Cui Weidong, et al, 1989. Study on the occurrence of gold in arsenopyrite of Huangjindong gold deposit in Hunan Province[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 4(1):42-49.
- 陆邦成,余金杰,陈春生,等,2016.江苏仑山金矿床金的赋存状态和富集机理研究[J].现代地质,30(2):316-327. Lu Bangcheng, Yu Jinjie, Chen Chunsheng, et al, 2016. Research on occurrence and enrichment mechanism of gold in the Lunshan gold deposit, Jiangsu Province [J]. Geoscience, 30(2):316-327.
- 沈关文,张良,孙思辰,等,2022.江南造山带万古金矿床含金硫化物组结构与金沉淀机制[J].岩石学报,38(1):91-108. Shen Guanwen, Zhang Liang, Sun Sichen, et al, 2022. Textures of gold-bearing sulfides and gold precipitation mechanism, Wangu gold deposit, Jiangnan Orogen [J]. Acta Petrologica Sinica, 38(1):91-108.
- 王富东,王成辉,朱余银,等,2015.龙门山构造带金矿成矿潜力探讨[J].矿物学报,35(增刊1):243. Wang Fudong, Wang Chenghui, Zhu Yuyin, et al, 2015. Discussion on metallogenic potential of gold deposits in Longmenshan structural belt [J]. Acta Mineralogica Sinica, 35 (Suppl. 1):243.
- 王占彬,马承,杨可,等,2022.元素等量浓集概念及其应用——以陕西宁强县中坝矿区土壤测量异常解释为例[J].西北地质,55(2):271-283. Wang Zhanbin, Ma Cheng, Yang Ke, et al, 2022. The concept and application of element equivalent-concentrating: a case study for anomaly interpretation of soil survey from Zhongba mining area, Ningqiang County, Shaanxi Province [J]. Northwestern Geology, 55(2):271-283.
- 魏立勇,2008.陕川丁家林—太阳坪金矿带地质特征及成因探讨[D].西安:西安科技大学. Wei Liyong, 2008. Geological characteristics and genesis of the Dingjialing-Taiyangping gold metallogenic belt [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology.
- 徐国风,邵洁涟,1980.黄铁矿的标型特征及其实际意义[J].地质论评,26(6):541-546. Xu Guofeng, Shao Jielian, 1980. Typomorphic characteristics of pyrite and its practical significance [J]. Geological Review, 26(6):541-546.
- 许杨,蓝廷广,舒磊,等,2021.胶东三山岛金矿床黄铁矿As富集机制及其对金成矿作用的指示[J].矿床地质,40(3):419-431. Xu Yang, Lan Tingguang, Shu Lei, et al, 2021. Enrichment mechanisms of arsenic in pyrite from Sanshandao gold deposit (Jiaodong Peninsula, China) and implications for gold metallogenesis [J]. Mineral Deposits, 40(3):419-431.
- 严育通,李胜荣,贾宝剑,等,2012.中国不同成因类型金矿床的黄铁矿成分标型特征及统计分析[J].地学前缘,19(4):214-226. Yan Yutong, Li Shengrong, Jia Baojian, et al, 2012. Composition typomorphic characteristics and statistic analysis of pyrite in gold deposits of different genetic types [J]. Earth Science Frontiers, 19(4):214-226.
- 杨立强,邓军,王中亮,等,2014.胶东中生代金成矿系统[J].岩石学报,30(9):2447-2467. Yang Liqiang, Deng Jun, Wang Zhongliang, et al, 2014. Mesozoic gold metallogenic system of the Jiaodong gold province, Eastern China [J]. Acta Petrologica Sinica, 30(9):2447-2467.
- 张博,李诺,陈衍景,2018.热液矿床金的赋存状态及研究方法[J].地学前缘,25(5):251-265. Zhang Bo, Li Nuo, Chen Yanjing, 2018. Occurrence state of gold in hydrothermal deposits and related research methods [J]. Earth Science Frontiers, 25(5):251-265.
- 张然,肖志斌,付超,等,2022.胶东地区新立金矿中金矿物和载金黄铁矿成因矿物学特征及地质意义[J].岩矿测试,41(6):997-1006. Zhang Ran, Xiao Zhibin, Fu Chao, et al, 2022. Genetic mineralogy and geological significance of gold minerals and gold-bearing pyrites from the Xinli gold deposit in the Jiaodong area [J]. Rock and Mineral Analysis, 41(6):997-1006.

Characteristics and Metallogenic Indication of Gold-bearing Minerals of the Xinjiazui Gold Deposit in the Back-Longmenshan Tectonic Belt

ZHANG Yixiang^{1,2}, KOU Shaolei^{1,2}, LIU Ji^{1,2}, WANG Zhanbin^{1,2}, YANG Wei^{1,2}, PAN Yuan^{1,2}, CHEN Hao^{1,2}, LI Lei^{1,2}, GAO Chao^{1,2}, LIU Dong^{1,2}

1. Xi'an Mineral Resources Survey, 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: In recent years, substantial advancements have been achieved in the exploration of gold deposits within the Back-Longmenshan tectonic belt, which boasts a resource of approximately 50 tons. The Xinjiazui gold deposit, a newly identified site within this belt, exhibits medium to large prospecting potential. The gold deposits are predominantly located within the northeast-trending Yanzibian-Huashigou brittle-ductile shear zone, with the formation of ore bodies and mineralized bodies being stringently governed by these shear zones. The host rock primarily comprises iron bearing magnesite spotted phyllite and carbonaceous silica slate. The predominant ore type is quartz vein, and the mineralization alterations closely associated with gold include silicification, pyritization, and minor arsenopyritization. While previous researchers have made certain advancements in the study of this ore deposit, there remains a relative paucity of research focused on its mineralogical aspects. This study, grounded in comprehensive field investigations, concentrates on the gold-bearing minerals pyrite and arsenopyrite. Utilizing methodologies such as microscopic observation, back-scattered electron(BSE) imaging, and electron probe micro-analysis(EPMA), the research aims to elucidate the mineralogical characteristics of these gold-bearing minerals, investigate the occurrence state of gold, and determine the physical and chemical conditions of mineralization, as well as the genesis of mineral deposits. The findings indicate that the hydrothermal mineralization process can be categorized into three distinct stages: Stage I, characterized by quartz-pyrite formation; Stage II, defined by quartz-calcite-natural gold polymetallic sulfide, development; and Stage III, marked by quartz-carbonate, formation, with Stage II being identified as the principal mineralization phase. Pyrite is classified into three generations: the sedimentary diagenesis stage(Py0), the early mineralization stage(Py1), and the main mineralization stage(Py2), during which arsenopyrite coexists with the main stage pyrite. Gold is present in two forms: visible gold and invisible gold. Visible gold appears in the main mineralization stage of pyrite as encapsulated and fractured gold. The occurrence of invisible gold exhibits distinct variations. During the sedimentation and early mineralization stages, gold within pyrite is present as nano gold(Au⁰). In contrast, during the main mineralization stage, pyrite contains both nano gold (Au⁰) and lattice gold(Au⁺). In arsenopyrite, all gold exists exclusively as lattice gold(Au⁺). The Xinjiazui gold deposit was formed under medium-high temperature conditions at a moderate to considerable depth, with $f(S_2)$ values ranging from -8.5 to -4.5. When compared to typical ductile shear zone-type gold deposits in the Longmen shan orogenic belt, and considering the geological and geochemical characteristics, it is inferred that the Xinjiazui gold deposit is an orogenic gold deposit influenced by brittle-ductile shear zones.

Key words: gold-bearing minerals; EPMA; occurrence state of gold; orogenic gold deposit; Xinjiazui gold deposit; Back-Longmenshan tectonic belt