内蒙古松树背金矿金矿物和载金黄铁矿成因矿物学特征及地质意义

吴俊[1],宋晓夏[1,2*],李海涛[3],李宁[1]

1.太原理工大学地球科学与测绘工程学院,山西 太原 030024;
2.太原理工大学原位改性采矿教育部重点实验室,山西 太原 030024;
3.山西石炭纪矿产勘查有限公司,山西 太原 030000

摘 要:内蒙古松树背金矿位于华北克拉通北缘乌拉山—大青山成矿带北部,矿区赋矿地层为太古宙乌拉山群,矿体为赋存在太古宙乌拉山群和早元古代糜棱岩化石英闪长岩中的含金石英脉。为了阐明该金矿的主要载金矿物和金矿物主要赋存状态,探讨松树背金矿床的成矿物质和成矿流体来源,通过对不同成矿阶段石英和硫化物进行岩相学观察,对金矿物和载金硫化物开展了EMPA主量元素、LA-ICP-MS微量元素和LA-MC-ICP-MS硫同位素测定。结果表明:松树背金矿为造山型金矿,其金矿物主要为自然金,以包裹金形式赋存于黄铁矿中,金矿物粒度以微粒—细粒为主,金成色为856.26~944.95,平均金成色为930.38;载金黄铁矿具有较低的Co/Ni比值(0.04~1.12)和较高的Cu/Au比值(0.01~3 052.68),通过Se元素半定量反演得到金成矿温度为365~583 ℃,表明成矿流体为中温还原性热液;S同位素测试结果表明,载金黄铁矿$\delta^{34}S$值为-2.91‰~-1.19‰,落入地幔/岩浆硫值区间,与太古宙乌拉山群硫值范围重叠,推断硫主要来源于太古宙乌拉山群和深部地幔岩浆。松树背金矿为受韧性剪切带控制的造山型金矿,成矿过程以变质流体为主,伴随深部岩浆热液的阶段性混入,成矿物质主要为太古宙乌拉山群与地幔岩浆的混合来源。

关键词:松树背金矿床;金矿物;载金黄铁矿;微量元素;硫化物硫同位素

中图分类号:P618.51 **文献标志码**:A **文章编号**:1005-2518(2026)04-0819-17 DOI:10.11872/j.issn.1005-2518.2026.04.070

引用格式:吴俊,宋晓夏,李海涛,等.内蒙古松树背金矿金矿物和载金黄铁矿成因矿物学特征及地质意义[J].黄金科学技术,2026,34(4):819-835.WU Jun,SONG Xiaoxia,LI Haitao,et al.Genetic Mineralogical Characteristics and Geological Significance of Gold Minerals and Gold bearing Pyrites in the Songshubei Gold Deposit, Inner Mongolia[J].Gold Science and Technology,2026,34(4):819-835.

金的赋存状态研究涵盖其物理形态、化学形式及其与载体矿物的共生关系,是揭示矿化过程的直接证据(饶峥等,2024)。例如卡林型金矿金在富砷黄铁矿中主要以不可见金的形态存在,而其中的As对金的富集起到促进作用(Barker et al,2009;Gopon et al,2019);热液金矿床中也新发现金以胶体纳米粒子形式运移和富集的成矿机制(Hannington et al,2019)。金矿物中各种不同的化学成分会因成矿过程而表现出明显的差异,例如:成矿过程载金矿物的溶解—再沉淀会导致其中Au/Ag比值的显著变化(Hastie et al,2020)。此外,金的赋存状态研究在选择性开采载金矿石和对金

收稿日期:2026-03-04;**修订日期**:2026-04-22

基金项目:山西省基础研究计划项目"磷灰石的原位微量元素和同位素对BIF型矿床铁质再富集过程的精细约束——以山西小寨铁矿为例"(编号:202203021212222)资助

作者简介:吴俊(2001—),男,河北保定人,硕士研究生,从事金矿床研究工作。E-mail:2023521155@link.tyut.edu.cn

*通信作者:宋晓夏(1967—),男,山西太原人,副教授,从事矿床地质研究工作。E-mail:songxiaoxia@tyut.edu.cn

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

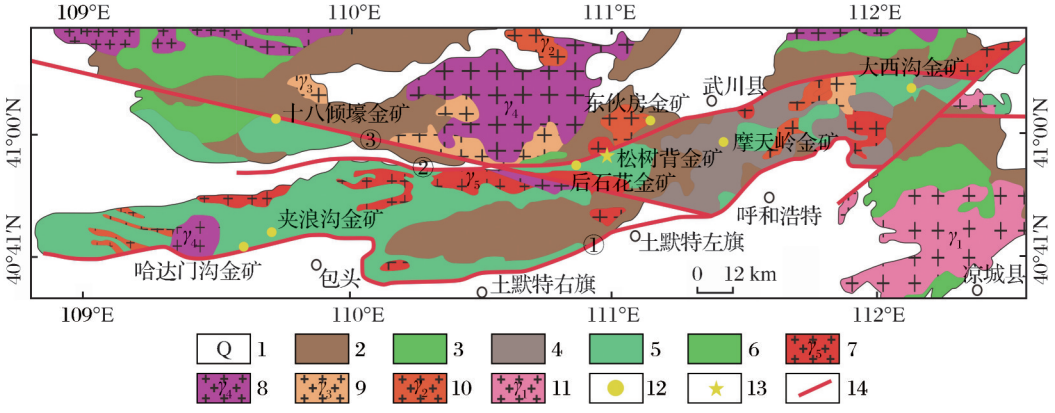
矿物的冶炼加工等方面具有重要意义，可以优化选矿方法，提高资源开采效率。

黄铁矿是金矿中普遍存在且关键的载金矿物，由于成矿流体环境的差异，其微量元素的组成和特征也会表现出很大的差异性，可用于反演成矿过程，为金矿床成矿作用提供间接证据。例如黄铁矿中Co/Ni比值的RSD，结合微观结构特征，可作为成矿流体沸腾的指标（Román et al，2019）；热液黄铁矿通常表现为Co/Ni比值大于1，是成矿过程中反映不同阶段不同程度的水岩相互作用的重要指标（Koglin et al，2009）。由于成矿流体环境的差异，其微量元素组成也会有很大的差异，因而常被用来反演矿化流体的物理化学性质，进而约束成矿过程和成矿作用。

华北克拉通是我国金产量最多的地区，其北缘是最为重要的金成矿带之一，赋存有大量的金矿资源，目前已探明160多处金矿点（Zeng et al，2020）。该区众多金矿床主要分布在乌拉山—大青山成矿带中，一般赋存在石英脉矿体和蚀变岩中，硫化物种类单一且含量较少（Hart et al，2002）。松树背金矿是乌拉山—大青山成矿带新发现的金矿，构造上受后石花—松树背韧性剪切带影响。已有研究表明，松树背金矿形成于华力西中期，是严格受构造控制的岩浆热液叠加型金矿床（王建宏等，2022）。然而，由于松树背金矿床以往工作主要为基础地质调查，缺乏系统的矿床学研究，制约了对其成矿物质和成矿流体来源、矿床成因类型的深入认识，限制了区域找矿勘查工作的科学部署，因此亟需开展针对性研究。为此，通过系统分析矿床中金矿物和载金硫化物特征，深入研究成矿流体性质和成矿物质来源，重点探讨金矿成矿机制与矿床成因，旨在为该区金矿成因研究及找矿勘查工作提供坚实的理论支撑。

1 区域地质背景

松树背金矿地处华北克拉通北缘乌拉山复背斜中部，是乌拉山—大青山矿集区内的金矿之一（图1）。截至目前，乌拉山—大青山成矿带内已发现十八倾壕、东伙房、摩天岭、大西沟和后石花等多处金矿床（点）（李政，2021）。区域内出露地层主要有中太古界集宁（岩）群、中太古界乌拉山（岩）群、早—中元古界二道洼群、中生界和第四系冲洪积沉积物。



1.第四系；2.中生界；3.中元古界；4.早—中元古界二道洼群；5.太古界乌拉山群；6.太古界集宁群；7.中生代岩浆岩；8.晚古生代岩浆岩；9.早古生代岩浆岩；10.元古宙岩浆岩；11.太古宙岩浆岩；12.金矿点；13.松树背金矿点；14.主要断裂（①-包头—呼和浩特断裂带；②-临河—集宁断裂带；③-固阳—土默特左旗断裂带）

图1 乌拉山—大青山地区大地构造位置及地质简图（修改自王梁等，2015）

Fig. 1 Geotectonic setting and simplified geological map of the Wulashan-Daqingshan area (modified after Wang et al，2015)

区域内发育乌拉山—大青山复背斜，呈EW向展布，其核部主要由乌拉山（岩）群片麻岩组成，受后期花岗岩侵入和断裂活动的影响，该背斜形态残缺不全。矿区主导断裂系统由北部乌拉山—大青山前缘断裂带和南部临河—武川—集宁断裂带构成，二者呈近EW向延展，其发育特征直接控制着

区内2组次级断裂(NW和NE向)的形成和分布。近EW向主断裂周边普遍发育规模、强度不均的角砾岩破碎区域和糜棱岩蚀变带。该区域岩浆作用活跃且分布广泛,活动时限贯穿太古宙至燕山期各构造阶段,受EW向构造格局约束,岩浆岩体规模差异显著;岩石类型以各类花岗岩(含钾长花岗岩、二长花岗岩和斜长花岗岩)为主,其次为闪长岩和正长岩。

区域内对金矿床起主要控制作用的构造为后石花—松树背韧性剪切带。该剪切带在区域上呈70°走向延伸,长度为30~50 km,宽度为200~500 m,主要由变形与退变程度不同的韧性剪切变质岩及其原岩残余块体组成。松树背矿区位于该韧性剪切带的糜棱岩化带中,其中发育闪长岩脉、花岗质岩脉、石英脉和辉绿岩脉等。

2 矿区地质特征

矿区内出露地层简单,主要为中太古界乌拉山群第一岩段和第二岩段、上侏罗统大青山组、下白垩统固阳组及第四系冲洪积砂砾石层,主要赋矿地层为中太古界乌拉山(岩)群和早元古代糜棱岩化石英闪长岩(图2)。

(1)中太古界乌拉山(岩)群:构成研究区基底的主要地层,广泛出露于东南部区域,在中部地带也有少量孤立的露头分布。该岩群第一岩组大理岩和角闪斜长片麻岩为主要组成岩石,同时还包含透辉黑云斜长片麻岩和含石墨矽线榴石黑云斜长片麻岩等,并常夹有石英岩层。第二岩组主要岩性为混合片麻岩。

(2)上侏罗统大青山组:该地层第一岩段在研究区内的出露面积较小,主要分布在中部的小榆树底沟附近。主要由含砾长石粗砂岩和细砂岩组成,局部夹粉砂岩及复成分砾岩。

(3)下白垩统固阳组:该地层是区内分布较为广泛的盖层之一,主要见于区域北部的后各此老、黄花滩等一带,主要成分为成熟度较低的砾岩。

(4)第四系:该地层主要分布于现代沟谷及低洼地带,由冲洪积作用形成。其物质组成主要为冲洪积成因的砂砾石层,是覆盖在基岩之上的表层松散沉积物。

后石花—松树背韧性剪切带是本矿区核心控矿构造,主导着区内的韧性变形活动。由其派生的次生断裂走向以NW向为主,倾向WS或近垂直,其中多贯入闪长岩脉、辉长岩脉和石英脉。填充石英脉断裂为当前主要赋矿部位。

矿区内岩浆岩主要为早元古代糜棱岩化石英闪长岩,中元古代石英闪长岩,二叠纪侵入的二长花岗岩和角闪斜长花岗岩,分别分布在矿区中部、西北部和北部。

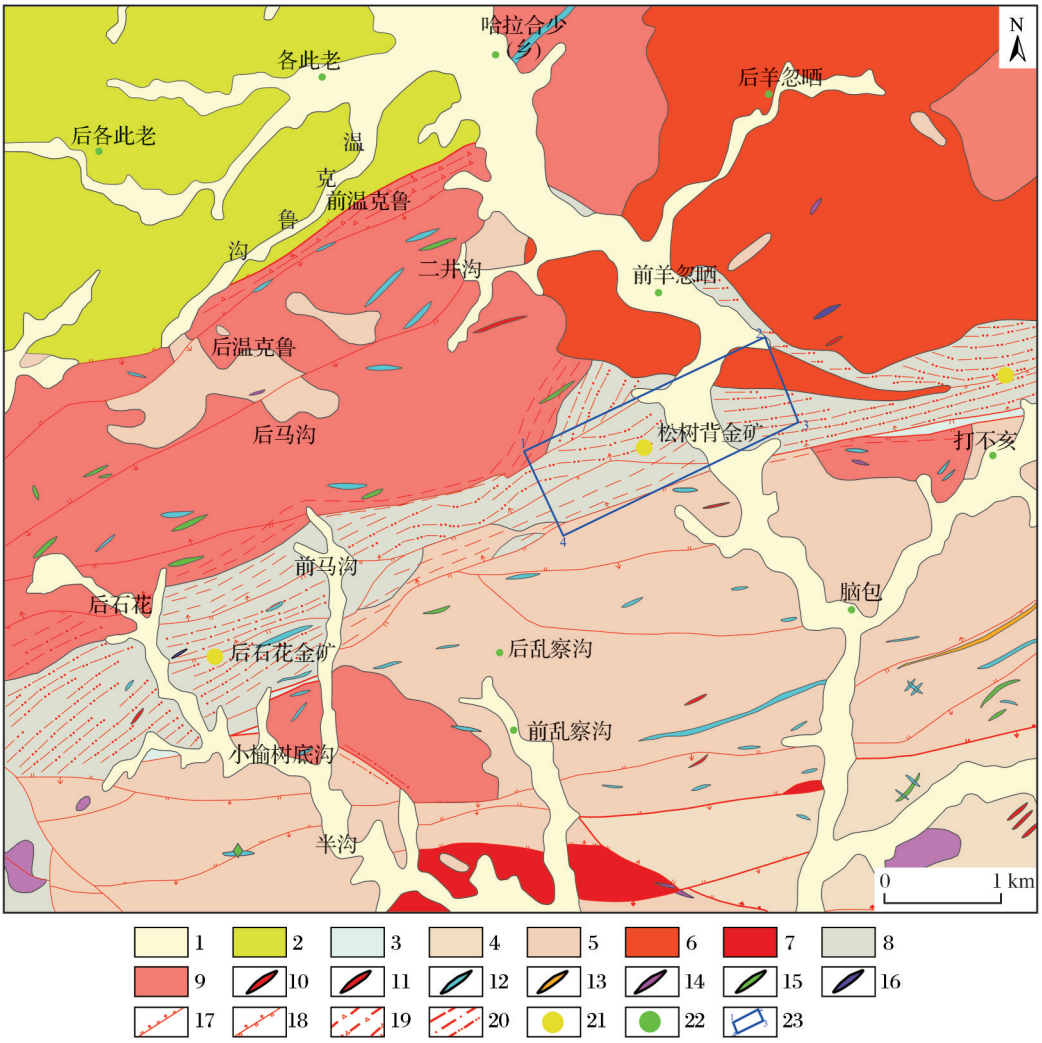
松树背金矿床的矿体以含金石英脉形式产出,赋存于中太古界乌拉山(岩)群和早元古代糜棱岩化石英闪长岩中。矿体呈脉状展布,走向约310°,倾向NW,倾角为44°~75°,沿走向和倾向的厚度及品位变化较大。石英脉矿石呈烟青—褐红色,质地致密,发育硅化、黄铁矿化及金矿化。硫化矿物组合以黄铁矿和黄铜矿为主,伴生碲化物及少量方铅矿,属于贫硫化物—金建造。围岩蚀变普遍,以绢云母化、绿泥石化和钾长石化为主(图3)。

根据矿下矿脉穿插关系及光学显微镜下观察到的矿物共生组合关系,可将松树背金矿床矿化划分为4个阶段:石英—黄铁矿阶段(Ⅰ)、石英—黄铁矿—金阶段(Ⅱ)、石英—多金属硫化物—金阶段(Ⅲ)和石英—碳酸盐阶段(Ⅳ)。其中,第Ⅲ阶段为金矿物主要成矿阶段(图4~图6)。

石英—黄铁矿阶段(Ⅰ):此阶段石英呈乳白色,他形粒状结构,表面较光滑,几乎不含金属硫化物,偶见黄铁矿呈星点浸染状分布[图4(a)]。

石英—黄铁矿—金阶段(Ⅱ):此阶段石英结晶较粗糙,颗粒粗大,划痕明显[图4(b)],除黄铁矿之外,镜下几乎见不到其他硫化物,可见自然金呈粒状赋存在黄铁矿裂隙、被石英包裹或呈粒间金出现。该阶段石英中黄铁矿在显微镜下为黄白色,表面较光滑,但常发育不规则裂隙[图4(g)、图6(a)]。

石英—多金属硫化物—金阶段(Ⅲ):此阶段石英呈烟灰色,结晶程度较差,颗粒较小,表面较粗糙,与黄铁矿、黄铜矿和方铅矿等硫化物共生,硫化物含量较多,镜下可见自然金[图4(c)、4(d)、4(h)、4(i)]。自然金大部分以粒状或细脉状包裹金赋存在黄铁矿中[图6(e)],少部分呈不规则粒状被包裹于石英颗粒内[图6(b)、6(f)],或在石英与黄铁矿的晶隙、石英与黄铜矿晶隙中以粒间金形式存在



1.第四系；2.固阳组；3.大青山组第一岩段；4.乌拉山群第二岩组；5.乌拉山群第一岩组；6.二叠纪二长花岗岩；7.中元古代石英闪长岩；8.早元古代石英闪长岩；9.角闪斜长花岗岩；10.花岗岩脉；11.花岗伟晶岩脉；12.闪长岩脉；13.正长斑岩脉；14.石英脉；15.辉绿岩、辉绿玢岩；16.碳酸盐脉；17.正段层；18.逆断层；19.构造破碎带；20.糜棱岩带；21.金矿点；22.乡镇；23.采矿区许可证范围及拐点坐标

图2 内蒙古武川县松树背金矿地质简图

Fig. 2 Simplified geological map of the Songshubei gold deposit in Wuchuan County, Inner Mongolia

[图6(g)、6(h)]。

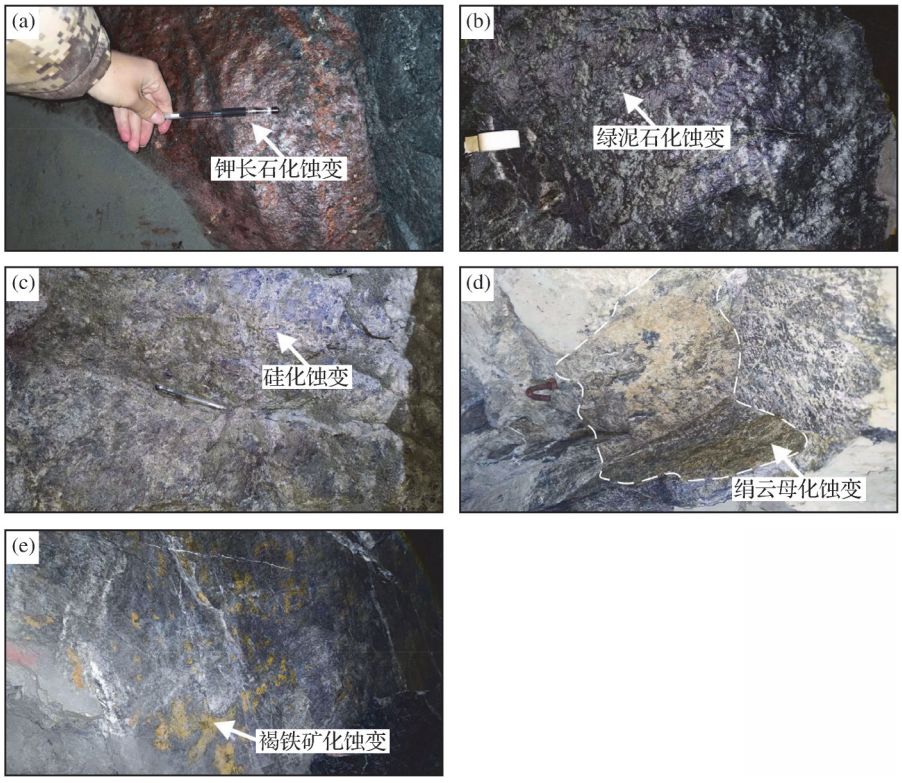
石英—碳酸盐阶段(Ⅳ)：在主成矿期形成的石英脉样品中，普遍发育穿切黄铁矿的石英—碳酸盐细脉，指示其形成时代晚于主矿化阶段，此阶段碳酸盐脉体内石英含量较少[图4(e)、4(f)]。

3 试验方法

本研究中测试样品采自松树背金矿不同深度的石英脉岩体，所采集样品为不同成矿阶段的矿石标本。本次研究对13个代表性石英脉矿石样品磨制了标准岩石光片和激光片进行镜下观察和试验研究，共磨制了38个矿物岩石光片和24个矿物岩石激光片。在显微镜下观察基础上，对样品分别开展了EMPA、LA-ICP-MS和LA-MC-ICP-MS测试。

金颗粒的电子探针测试分析工作由广州市拓岩检测技术有限公司完成，使用JXA-iSP100型仪器。试验条件如下：加速电压为15 kV，束流为20 nA，束斑直径为10 μm，基体校正采用ZAF法。

黄铁矿微量元素LA-ICP-MS微区原位测试分析工作由广州市拓岩检测技术有限公司完成，使用



(a)围岩中红棕色粒状结构的钾长石化蚀变;(b)围岩中呈零散分布的深绿色鳞片状绿泥石化蚀变;(c)硅化使原岩(如花岗岩、片麻岩)被石英置换,形成致密的灰白—浅灰色硅化岩,部分被石英大量交代、重结晶而使局部带灰紫色调;(d)围岩中浅黄褐色鳞片状的绢云母化蚀变;(e)围岩中黄铁矿等硫化物在表生环境下氧化形成的黄褐色—铁锈色褐铁矿化集合体,呈浸染状或斑杂状分布

图3　松树背金矿围岩蚀变特征

Fig. 3　Alteration characteristics of surrounding rock in the Songshubei gold deposit

New Wave Research 193nm ArF 准分子激光剥蚀系统,兼配 Agilent 8900 四极杆型电感耦合等离子体质谱仪联用。准分子激光发生器产生的深紫外光束经过匀化光路聚焦于样品表面,激光束斑直径为 35 μm,频率为 6 Hz,能量密度为 3.5 J/cm^2。激光剥蚀过程中采用氦气作为载气、氩气作为补偿气,以调节灵敏度。

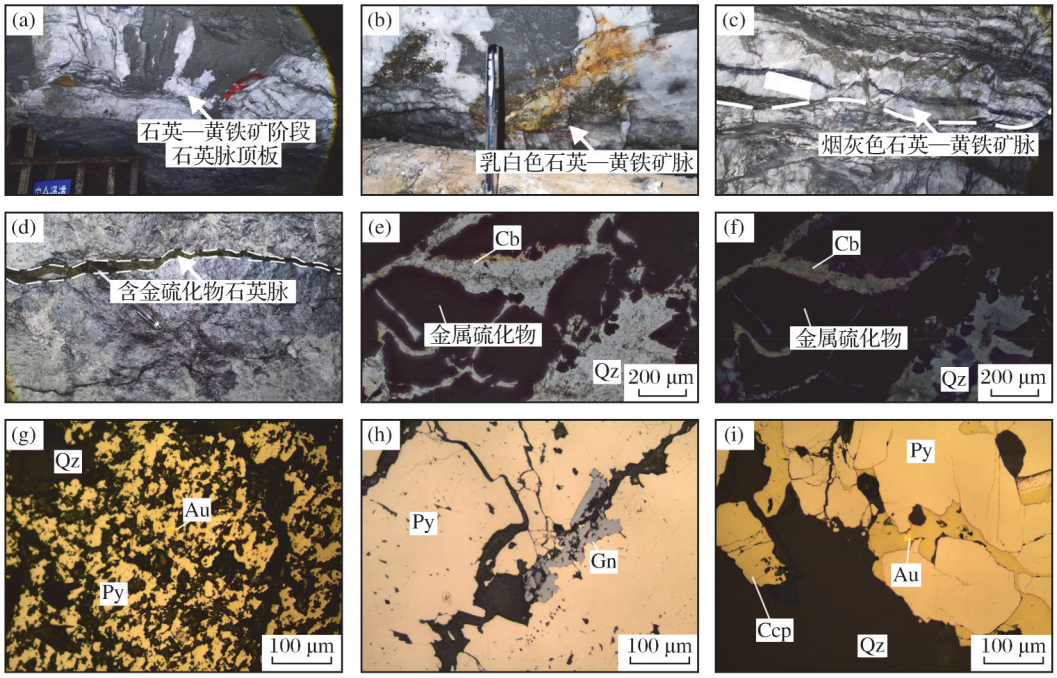
载金黄铁矿微区微量元素分析采用多外标总量归一法校正,标样包括 NIST SRM610、MASS-1 及黄铁矿标样,以 SRM 612 为监控样。单次时间分辨数据采集含 45 s 空白和 40 s 样品信号。离线数据处理使用 IOLITE 软件的 3D Trace Elements DRS 模块完成。

黄铁矿和黄铜矿的原位^{34}S 同位素 LA-MC-ICP-MS 分析工作由广州市拓岩检测技术有限公司完成,采用 New Wave Research 193nm ArF 准分子激光剥蚀系统与 Thermo Scientific Neptune Plus 多接收电感耦合等离子体质谱仪联用。能量密度为 3.5 J/cm^2,频率为 3 Hz,剥蚀束斑直径为 25~37μm,采用单点剥蚀模式,测试过程使用氦气作为载气。本次研究测试过程中使用“标准—样品—标准”交叉测试(SSB)法进行校正,每测 5 个样品测 1 次标样,选用基体匹配的黄铁矿 Balmat 作为外部标准($\delta^{34}S_{V-CDT}$=16.3‰±0.3‰)(Xu et al,2022)。

4　分析结果

4.1　金矿物的化学组成

对松树背金矿中 16 个典型金矿物进行了电子探针试验,结果表明金矿物中 Au 含量为 83.69%~95.09%,Ag 含量为 5.48%~14.08%,除主量元素之外,其余微量元素含量随 Au 含量变化不大,无明显线性规律(表1)。本次研究松树背金矿中金矿物 Au/Ag 比值为 5.96~17.16,平均比值为 14.92,说明金矿物中



(a)石英—黄铁矿阶段石英脉顶板;(b)石英脉型脉体,灰黑色围岩被早期含黄铁矿乳白色石英脉穿插;(c)黄铁矿化烟灰色石英细脉,呈近平行分布,充填于早期石英脉内部;(d)含金硫化物石英脉穿插灰黑色围岩;(e)(f)石英脉薄片中碳酸盐细脉穿插金属硫化物单偏光与正交偏光图;(g)Ⅱ阶段岩石光片中金矿物被黄铁矿包裹;(h)Ⅲ阶段方铅矿呈他形沿黄铁矿裂隙交代;(i)Ⅲ阶段黄铜矿呈脉状穿插黄铁矿,金矿物呈包裹金被包裹于黄铜矿中;Qz-石英;Au-金;Ccp-黄铜矿;Py-黄铁矿;Gn-方铅矿;Cb-碳酸盐矿物

图4　松树背金矿各成矿阶段矿脉、矿物特征

Fig. 4　Characteristics of veins and minerals in different metallogenic stages of the Songshubei gold deposit



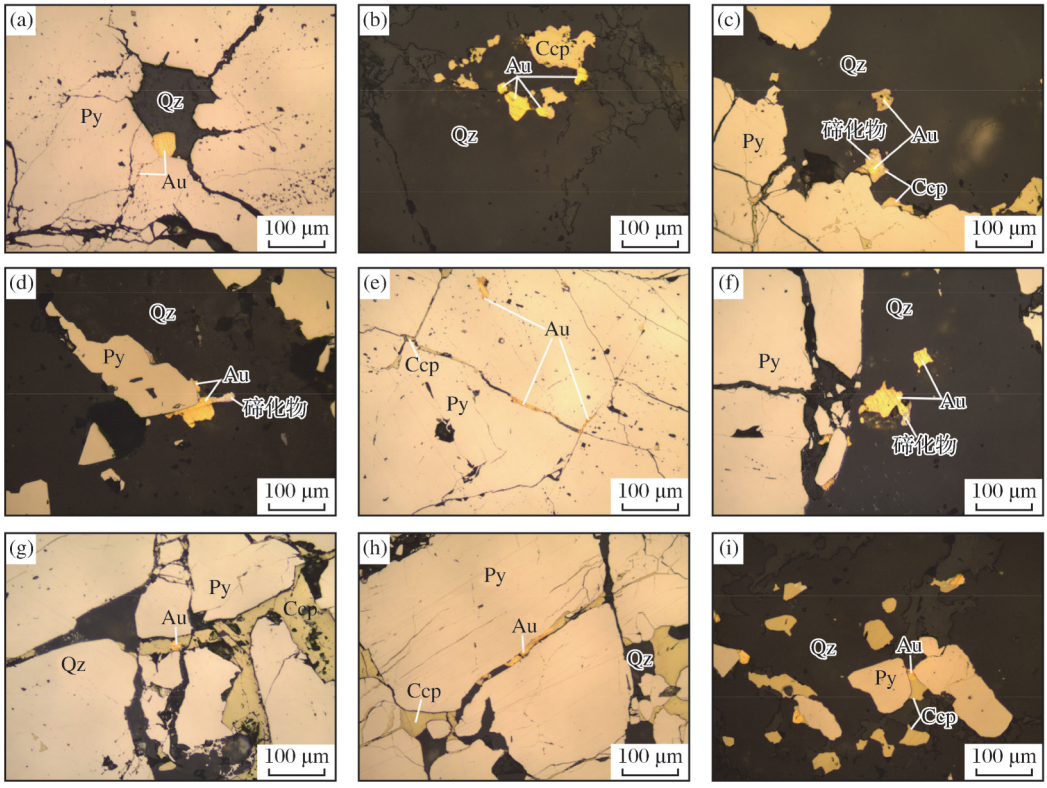
图5　松树背金矿床矿化阶段划分与矿物生成顺序

Fig. 5　Division of mineralization stages and minerals paragenetic sequence in the Songshubei gold deposit

Au含量较高,金矿物主要为自然金(Au含量大于80%)(赵永强等,2024)。金成色计算公式为:金成色=1 000Au/(Au+Ag)。计算结果表明,松树背金矿中金矿物金成色为856.26~944.45,平均金成色为930.38,金矿物金成色较高。

4.2　黄铁矿微量元素组成

黄铁矿微量元素测试分析结果如表2所示。黄铁矿中$w(Au)=0.02\times10^{-6}$~$6\ 331.34\times10^{-6}$,平均含



(a)黄铁矿与石英之间的粒间金;(b)石英中的包体金及石英与黄铁矿之间的粒间金;(c)金矿物被包裹于黄铜矿中及金矿与碲化物连生被包裹于黄铜矿中;(d)金矿物被包裹于石英中及金矿与碲化物连生被包裹于石英中;(e)金矿物呈粒状被包裹于黄铁矿中及呈脉状赋存在黄铁矿裂隙中;(f)金矿物呈不规则粒状被包裹在石英中;(g)金矿物呈浑圆粒状被包裹于黄铜矿中;(h)金与黄铜矿形成连生体赋存于黄铁矿裂隙中;(i)石英中的包体金及石英与黄铜矿之间的粒间金;Qz-石英;Py-黄铁矿;Ccp-黄铜矿;Au-自然金

图6　松树背金矿床石英脉型样品金矿物赋存状态显微照片

Fig. 6　Microphotographs of occurrence states of gold mineral in quartz-vein type samples of the Songshubei gold deposit

表1　松树背金矿石英脉样品中金矿物电子探针分析结果

Table 1　EPMA analytical results of gold minerals in quartz vein samples in the Songshubei gold deposit（%）

样品编号	成矿阶段	Au	Ag	S	Fe	Cu	Zn	As	Bi	Pb	合计	金成色
3z2-2-1-1	Ⅱ	95.09	5.59	0.07	0.28	0.01	0.01	0.00	0.06	0.02	101.11	944.50
3z2-2-2-2	Ⅱ	92.32	6.27	0.07	0.18	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	98.87	936.37
3z2-2-2-4	Ⅱ	93.12	6.03	0.06	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	99.40	939.21
5Z2-2-3-1	Ⅲ	93.32	6.03	0.05	0.06	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	99.47	939.29
5Z4-4-1-2	Ⅲ	92.56	5.84	0.10	0.63	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	99.14	940.61
5Z4-4-1-3	Ⅲ	83.69	14.05	0.09	1.22	0.00	0.00	0.00	0.03	0.03	99.11	856.26
5Z4-4-1-4	Ⅲ	92.35	6.72	0.07	0.60	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	99.77	932.16
5Z4-4-1-5	Ⅲ	94.02	5.48	0.07	0.01	0.04	0.00	0.01	0.00	0.00	99.63	944.95
5Z4-4-1-6	Ⅲ	94.16	5.65	0.05	0.04	0.00	0.03	0.00	0.01	0.00	99.94	943.40
5Z5-2-1-1	Ⅲ	91.75	6.43	0.04	0.14	0.32	0.00	0.00	0.00	0.00	98.68	934.53
5Z5-2-2-1	Ⅲ	93.88	6.01	0.05	0.77	0.33	0.02	0.00	0.00	0.05	101.11	939.81
5Z5-2-3-1	Ⅲ	93.66	5.91	0.04	0.05	0.18	0.01	0.00	0.00	0.00	99.85	940.65
5Z5-2-3-2	Ⅲ	94.26	6.07	0.03	0.12	0.26	0.00	0.00	0.00	0.00	100.73	939.54
5Z5-2-3-3	Ⅲ	94.25	6.26	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.54	937.73
5Z5-2-3-4	Ⅲ	93.77	6.12	0.03	0.00	0.05	0.00	0.01	0.03	0.00	100.01	938.74
5Z5-2-3-5	Ⅲ	93.24	6.17	0.03	0.14	0.26	0.00	0.00	0.00	0.00	99.83	937.93

表2 松树背金矿石英脉样品中载金黄铁矿分析结果

Table 2 Analytical results of gold-bearing pyrite in quartz vein samples from the Songshubei gold deposit（×10^{-6}）

样品编号	成矿阶段	Co	Ni	Cu	As	Se	Ag	Te	Au	Pb	Bi
1Z1-2-2-1	Ⅱ	179.95	195.62	74.45	-	5.13	15.09	33.64	3.73	453.62	92.93
1Z1-2-2-2	Ⅱ	280.43	291.46	254.76	-	3.37	0.25	1.83	0.08	3.75	2.34
1Z1-2-2-3	Ⅱ	350.76	422.60	160.45	-	4.57	8.35	13.81	0.37	830.71	49.30
1Z1-2-2-4	Ⅱ	187.68	271.87	15.04	-	3.29	0.37	2.24	0.08	10.65	4.81
3Z2-2-1-1	Ⅱ	4.97	14.41	13.47	-	-	28.82	161.72	19.21	113.83	40.47
3Z2-2-1-2	Ⅱ	5.77	13.82	5.57	-	-	1.01	5.01	0.50	3.89	0.90
3Z2-2-1-3	Ⅱ	5.83	19.91	3.74	-	-	0.94	1.12	0.25	1.34	0.64
3Z2-2-1-4	Ⅱ	15.65	56.03	9.10	-	-	7.86	23.95	4.55	8.66	10.46
3Z2-2-1-5	Ⅱ	11.22	47.95	5.24	-	2.32	8.82	13.49	4.75	3.35	2.72
3Z2-2-2-1	Ⅱ	18.99	55.34	7.63	-	3.51	2.06	6.24	1.08	5.24	1.64
3Z2-2-2-2	Ⅱ	14.88	38.74	5.35	-	2.99	0.66	4.59	0.34	2.87	1.15
3Z2-2-2-3	Ⅱ	10.59	39.27	24.28	-	3.76	206.56	862.73	633.29	58.21	191.46
3Z2-2-2-4	Ⅱ	5.64	23.36	8.66	-	3.31	10.49	57.16	26.95	7.42	13.58
3Z2-2-2-5	Ⅱ	9.92	34.05	6.32	-	4.45	0.24	2.99	0.18	2.11	0.68
3Z2-2-2-6	Ⅲ	1.56	15.78	38.28	-	3.24	191.32	553.81	347.63	88.70	104.40
3Z2-2-2-7	Ⅲ	3.92	26.96	33.09	-	4.66	301.75	719.48	504.35	292.40	142.01
3Z2-2-2-8	Ⅲ	4.75	15.50	41.05	-	3.73	849.73	1 415.21	1 609.68	434.84	326.18
3Z2-2-2-9	Ⅲ	1.79	14.48	25.41	-	3.57	332.72	879.84	751.21	84.25	180.69
3Z2-2-2-10	Ⅲ	1.86	16.99	52.88	-	5.64	509.44	2 102.72	2 840.40	137.45	653.89
4Z3-12-2-1	Ⅱ	1.54	30.95	46.15	-	14.04	0.09	2.27	0.06	3.18	2.03
4Z3-12-2-2	Ⅱ	3.02	35.48	66.97	-	15.07	7.50	14.80	2.04	189.96	20.31
4Z3-12-2-3	Ⅱ	21.62	80.72	23.34	-	19.76	0.06	1.13	0.02	2.96	0.74
4Z3-12-2-4	Ⅱ	55.16	113.77	277.59	-	16.80	24.63	311.09	5.58	500.46	517.56
5Z2-2-3-1	Ⅲ	43.67	758.18	216.61	2.07	3.44	1 465.11	4 662.59	3 157.23	1 147.16	1 242.07
5Z2-2-3-2	Ⅲ	52.15	1 515.93	15.45	-	4.03	73.40	238.79	129.97	24.14	86.60
5Z2-2-3-3	Ⅲ	13.52	955.74	15.01	-	7.09	39.02	104.08	45.31	29.67	23.47
5Z2-2-3-4	Ⅲ	0.82	179.85	24.07	-	4.96	251.86	609.05	418.83	53.28	82.36
5Z2-2-3-5	Ⅲ	12.46	681.62	14.50	-	4.96	26.72	74.13	21.44	19.59	26.48
5Z4-4-1-1	Ⅲ	62.37	225.25	4.17	-	5.24	8.46	25.24	14.26	3.10	4.54
5Z4-4-1-2	Ⅲ	831.70	702.49	16.16	1.90	4.70	16.51	76.58	4.45	69.89	15.85
5Z4-4-1-3	Ⅲ	1.90	122.87	54.61	-	3.19	332.37	1 506.03	444.06	1 752.48	146.70
5Z4-4-1-4	Ⅲ	3.26	401.84	9.16	-	7.05	40.81	402.55	39.21	439.24	40.10
5Z4-4-1-5	Ⅲ	2.81	105.34	2.00	-	2.95	1.82	42.11	0.21	37.45	20.52
5Z4-4-1-6	Ⅲ	2.21	27.94	7.79	-	5.27	0.69	2.72	0.52	2.44	1.04
5Z4-4-1-7	Ⅲ	4.33	42.92	37.25	-	6.71	2.35	5.72	2.18	0.80	0.51
5Z4-4-1-8	Ⅲ	9.51	52.05	121.84	-	6.55	743.65	999.64	618.46	201.19	62.18
5Z4-4-1-9	Ⅲ	5.80	41.09	349.69	1.08	6.91	3 586.31	5 862.23	4 456.00	1 673.55	630.85
5Z4-4-1-10	Ⅲ	4.50	28.36	5.82	-	5.05	12.15	35.57	11.39	24.61	2.98
5Z4-4-1-11	Ⅲ	5.93	79.61	48.21	-	9.17	817.54	1 964.50	1 537.86	166.53	312.64
5Z4-4-1-12	Ⅲ	1.63	68.29	192.63	1.74	13.10	3 763.48	6 409.54	4 542.06	1 438.42	707.01
5Z4-4-1-13	Ⅲ	2.09	69.40	199.85	1.16	11.84	4 022.93	7 238.46	6 207.50	2 001.31	1 037.25
5Z4-4-1-14	Ⅲ	4.37	113.61	205.33	2.47	22.19	2 237.31	8 023.13	6 331.34	8 985.58	1 171.77
5Z4-4-1-15	Ⅲ	4.22	62.54	70.03	0.86	9.41	1 558.72	2 718.50	2 183.84	673.99	406.42

注:“-”为低于检测限

量为858.66×10⁻⁶,指示黄铁矿是该矿床重要的载金矿物。除Au元素之外,w(Co)=0.81×10⁻⁶~861.70×10⁻⁶,平均含量为52.72×10⁻⁶;w(Ni)=13.82×10⁻⁶~1 515.93×10⁻⁶,平均含量为188.60×10⁻⁶;w(Pb)=0.80×10⁻⁶~8 985.58×10⁻⁶,平均含量为511.26×10⁻⁶;w(Bi)=0.51×10⁻⁶~1 242.07×10⁻⁶,平均含量为194.94×10⁻⁶。除此之外,还有一定量的Cu、Se、Ag和Te,平均含量分别为65.32×10⁻⁶、6.85×10⁻⁶、500.23×10⁻⁶和1 120.75×10⁻⁶。

4.3 原位微区S同位素组成

载金黄铁矿和黄铜矿的原位^{34}S同位素分析结果如表3所示。δ^{34}S值为-1.19‰~-2.91‰,总体变化不大,其中黄铁矿δ^{34}S值为-1.19‰~-2.91‰,平均值为-2.21‰;黄铜矿δ^{34}S值为-1.30‰~-2.88‰,平均值为-2.06‰。

5 讨论

5.1 金矿物的赋存状态

利用光学显微镜对磨制的石英脉样品激光片进行详细观察,共统计776粒金矿物。根据金矿物与其赋存矿物的空间接触关系得出松树背金矿物主要有3种赋存状态。(1)裂隙金:共发现130粒,占比为16.75%,金矿物主要以不规则粒状、长条状和细脉状形式赋存于黄铁矿和黄铜矿裂隙中[图6(e)、6(g)、6(h)],粒状金矿物大小主要集中在2~20 μm,脉状金矿物长度主要集中在5~30 μm;(2)包体金:共发现574粒,占比为73.97%,金矿物主要以圆粒状和麦粒状被包裹在黄铁矿中[图6(e)、6(i)],少部分被包裹在石英和黄铜矿中[图6(b)~6(d)、6(f)、6(g)],粒径大部分为2~20 μm,偶见20~30 μm;(3)粒间金:共发现72粒,占比9.28%,金矿物主要以不规则粒状赋存在黄铁矿与石英的间隙中[图6(a)]以及黄铜矿与石英的间隙之中[图6(b)、6(i)],粒径集中在2~10 μm,偶见粒径为10~20 μm。

综上所述,松树背金矿金矿物主要以显微金(0.2 μm~0.2 mm)形式存在,微粒金(2~20 μm)占比为81.18%,细粒金(20~200 μm)占比为18.82%,以微细粒为主,目前没有发现明金产出(冯岳川等,2023)。大量研究证实,若载金矿物以黄铁矿和黄铜矿等金属矿物为主,且自然金主要为包体金,则矿床形成深度通常为中深部(刘华南等,2016;杨永飞等,2019),据此可初步判断松树背金矿成矿深度并不低。

表3 载金黄铁矿和黄铜矿S同位素测试结果

Table 3 Sulfur isotope analytical results of gold bearing pyrite and chalcopyrite

样品编号	矿物名称	成矿阶段	δ^{34}S值/‰
3Z2-2-1-1	黄铁矿	Ⅱ	-1.46
3Z2-2-1-2	黄铁矿	Ⅱ	-1.19
3Z2-2-2-1	黄铁矿	Ⅱ	-2.32
3Z2-2-2-2	黄铁矿	Ⅱ	-2.38
3Z2-2-2-3	黄铁矿	Ⅱ	-1.62
3Z2-2-2-4	黄铁矿	Ⅱ	-1.95
5Z2-2-3-1	黄铁矿	Ⅲ	-2.91
5Z2-2-3-2	黄铁矿	Ⅲ	-2.83
5Z4-4-1-1	黄铁矿	Ⅲ	-2.68
5Z4-4-1-2	黄铁矿	Ⅲ	-2.37
5Z4-4-1-3	黄铁矿	Ⅲ	-2.21
5Z4-4-1-4	黄铁矿	Ⅲ	-2.13
5Z4-4-1-5	黄铁矿	Ⅲ	-2.51
5Z4-4-1-6	黄铁矿	Ⅲ	-2.43
5Z5-2-1	黄铜矿	Ⅲ	-2.35
5Z5-2-2-1	黄铜矿	Ⅲ	-2.03
5Z5-2-2-2	黄铜矿	Ⅲ	-1.89
5Z5-2-2-3	黄铜矿	Ⅲ	-1.30
5Z5-2-3-1	黄铜矿	Ⅲ	-1.90
5Z5-2-3-2	黄铜矿	Ⅲ	-2.88

5.2 成矿环境

黄铁矿化学式为FeS_2,所以S/Fe比值应为2,但实际中受水岩相互作用和流体沸腾等因素的影响,其比值略有波动,当S/Fe比值小于2时称为硫亏损,当S/Fe比值大于2时称为铁亏损(孙雨沁等,2020)。松树背金矿中所测载金黄铁矿S/Fe比值为1.90~2.08,平均比值为2.03,铁略亏损。黄铁矿微量元素种类和含量可以反映出成矿因素和地质条件,指示金矿床成因(郑卫杰,2016),例如黄铁矿在高温条件下富含Zn、Cu、As和Bi等亲铁亲石元素;中温条件下多见Ag、Au、Cu和Pb等亲铜元素;低温条件下As、Sb、Hg和Ag等高活动性亲铜元素含量较多,且不同条件下Co元素含量不同(张然等,2022)。松树背金矿样品中黄铁矿富含Cu、Au、Se、Pb和Bi等元素,而As和Sb等低温元素含量稀少甚

至低于检测限，且Co元素含量为0.82×10⁻⁶~831.70×10⁻⁶，指示成矿温度为中温。此外，作为热液金矿体系中最重要的载金矿物之一，黄铁矿的形成直接记录了热液活动的演化过程，其微量元素常被用于反演矿床形成环境和形成机制（Kouhestani et al，2017）。松树背金矿床中黄铁矿表现出略微富硫亏铁的特点，与传统变质热液造山型金矿特征稍有不同，本文利用黄铁矿微量元素拟合了Co/Ni比值和As/(Fe+S)图解（图7），作为判定松树背金矿成矿类型的辅助依据（严育通等，2012；李洪梁等，2019）。

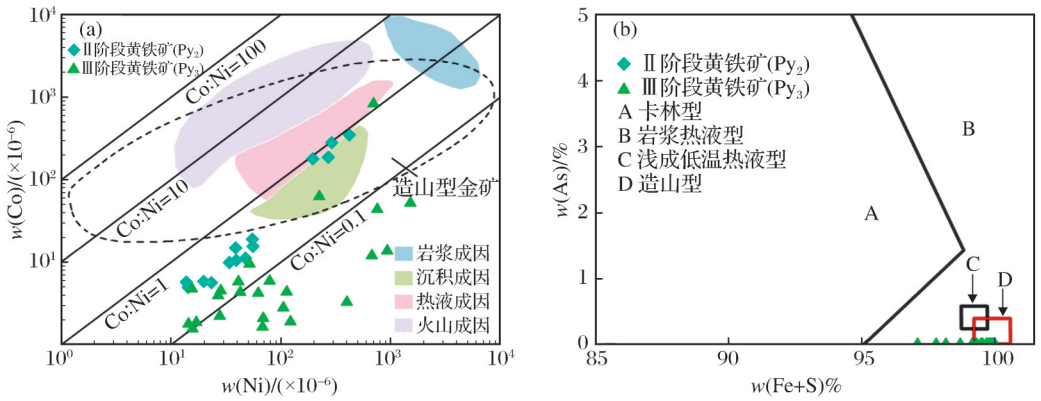


图7　松树背金矿床黄铁矿微量元素关系图解（a-底图据曹根深等，2023；b-底图据严育通等，2012）

Fig. 7　Trace elements relationship diagrams of pyrite in the Songshubei gold deposit

（a-base map according to Cao et al，2023；b-base map according to Yan et al，2012）

松树背金矿Ⅱ成矿阶段黄铁矿Co/Ni比值主要为0.1~1.0，主体落在沉积成因或变质成因区间，而Ⅲ成矿阶段黄铁矿Co/Ni比值多数小于0.1，仅有个别数据点落入0.1~1.0[图7(a)]。黄铁矿不同阶段Co/Ni比值均小于1.0，说明黄铁矿为沉积或变质成因，2个主要成矿阶段Co/Ni比值数据点的离散证实变质作用对Co和Ni元素的影响（雷万杉等，2017），表明黄铁矿主要为变质成因。从Ⅱ阶段到Ⅲ阶段Co/Ni比值的普遍降低可能是因为Ⅱ阶段的成矿流体为受岩浆热液混染的变质热液，温度相对较高，Co凭借较强的类质同象能力优先进入黄铁矿晶格，导致比值偏高；至第Ⅲ阶段，岩浆热液贡献显著减弱，流体转为以变质热液为主，温度降低，此时流体通过水岩反应萃取乌拉山群围岩中的Ni并随黄铁矿共沉淀，致使Co/Ni比值普遍降低至0.1以下。这一结果与S同位素从Ⅱ成矿阶段窄范围向Ⅲ成矿阶段变负变宽的演化趋势互为印证。Ⅱ成矿阶段到Ⅲ阶段Co/Ni比值的普遍降低，可能是因为成矿流体从Ⅱ阶段到Ⅲ阶段过程中，发生水岩反应导致温度降低，Ni更容易进入黄铁矿晶格中。此外，异常数据点的存在不排除是受热液成因影响。As/(Fe+S)图解中Ⅱ阶段的黄铁矿数据点全部落在代表造山型金矿的D区，Ⅲ阶段的黄铁矿数据点除落入造山型金矿区域之外，还有部分落入代表岩浆热液的B区[图7(b)]，指示松树背金矿床在成矿早期以变质热液为主，随着成矿阶段的进行，可能叠加了岩浆热液作用。此外，As作为低温元素，趋于向低温富集，越接近地表As含量越大，As/(Fe+S)图解中所有数据点皆向贫As区域富集，说明松树背金矿床成矿温度和成矿深度较大。

造山型金矿床的成矿流体温度通常为200~650 ℃，且成矿作用多集中在200~350 ℃（倪培等，2018；王庆飞等，2019）。在黄铁矿众多受温度控制的微量元素中，Se元素不受成矿流体氧逸度和pH值影响的同时，对成矿流体温度变化最为敏感，因此常用Se元素含量作为成矿温度指示剂（Deditius et al，2014），其在黄铁矿中元素含量与成矿温度的关系基本遵循$Se_{pyrite}=5\times10^{13}\times T^{-4.82}$的负相关线性关系（Keith et al，2018）。本文依据此公式对松树背金矿床的成矿流体温度进行半定量趋势反演，得到该矿床成矿温度范围为365~583 ℃，其中Ⅱ阶段成矿温度主要集中在374~583 ℃，而Ⅲ阶段成矿温度主要集中在365~550 ℃（图8），该结果与上文Co/Ni比值推测的Ⅱ阶段成矿温度比Ⅲ阶段高的结论相符，

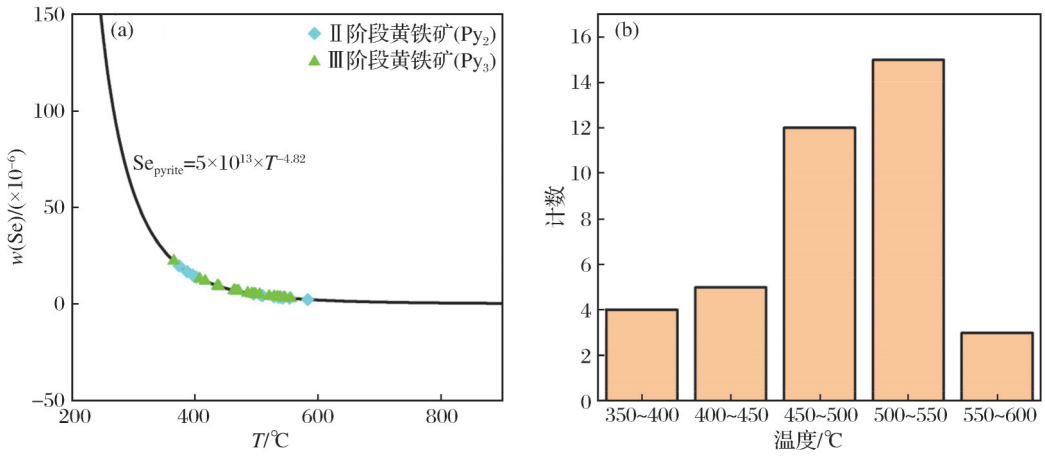


图8　松树背金矿床黄铁矿微量元素Se反演成矿温度图

Fig. 8　Diagram of ore-forming temperature inverted from Se trace elements in pyrite from the Songshubei gold deposit

但与推断的该矿床成矿热液为中温的结论稍高,与前人所提出的造山型金矿床成矿温度热液模型略有出入(陈衍景等,2007;卢焕章等,2018)。这可能是因为Keith提出黄铁矿Se温度计回归曲线时,样品缺乏含量低于1×10^{-6}的数据,且在后续研究中得出Se含量在高温环境下与温度呈现一定的正相关关系,导致本矿床反演温度整体偏高,因此利用Se反演成矿流体温度的结果存在误差,不作为精确成矿温度使用,仅用于指示成矿温度的参考范围和两成矿阶段的相对温度高低与演化趋势,更准确的成矿温度数据需要对样品中成矿流体包裹体进行相关实验测试得出。

流体的化学性质不仅受温度控制,其pH值和氧化还原条件也起到关键作用。Te是一种对氧逸度高度敏感的元素,其在高氧逸度、中高温和中碱性条件下易溶于热液中,而在还原性、中低温和中酸性流体条件下更易沉淀,因此成矿流体中的氧逸度、温度和pH值等变化均会对成矿流体中Te的富集状态造成显著影响。在造山型金矿系统中,含矿热液与富Fe^{2+}围岩的水岩相互作用可引发一系列协同的物理化学变化,最终导致矿质沉淀。首先,围岩的氧化作用构成了反应的驱动力:Fe^{2+}被氧化为Fe^{3+},导致流体体系的氧逸度下降。这一氧化还原环境的改变,直接触发了Te的沉淀机制,使得流体中以高价态(+3、+4)溶解的Te被还原为低价态(−2),从而因溶解度骤降而沉淀析出。其次,硫化作用同步发生,硫化物的沉淀打破了成矿流体中原先稳定金硫络合物和金碲络合物的化学平衡,促使Au元素沉淀。此外,整个水岩反应过程还起到了流体缓冲剂的作用,将流体的酸碱度中和至近中性,这种酸碱度条件对金和碲的共沉淀尤为有利,是形成贵金属矿化的关键所在(刘家军等,2020;Keith et al,2020;Xue et al,2025)。松树背金矿载金黄铁矿中较高的Te元素含量和第Ⅲ成矿阶段所观察到的金碲化物沉淀指示了成矿流体属于弱碱性,成矿过程中发生水岩相互作用,使Ⅲ阶段的成矿流体氧逸度降低,转变为中酸性,导致成矿流体中的Te与Au被还原沉淀析出。因此,成矿流体为弱碱性,随着成矿过程中水岩相互作用和硫化作用的进行,逐渐变为中酸性。

同时,黄铁矿中微量元素的Cu/Au比值也可以反映出成矿流体的氧化还原状态,当Cu/Au比值小于1时,Cu^{+}和Au^{3+}与黄铁矿中的Fe^{2+}发生置换反应,导致成矿流体中的Cu^{+}和Au^{3+}进入黄铁矿晶格之中,此时反应式为$Au^{3+}+Cu^{+}\leftrightarrow 2Fe^{2+}$,成矿流体处于相对氧化的环境下;当Cu/Au比值大于1时,成矿流体中的Cu^{2+}直接与黄铁矿中的Fe^{2+}置换,此时流体处于相对还原的环境(曹根深等,2023)。松树背金矿的载金黄铁矿中Cu/Au比值整体为0.02~3 052.68,平均比值为136.11,虽然Cu/Au比值整体上大于1,但Ⅱ阶段与Ⅲ阶段数据点比值差异过大,推测随着成矿阶段的进行,晚成矿阶段流体氧化还原条件可能发生波动,推测是部分流体因混入大气降水或围岩氧化物质而局部氧化,促进了Au^{3+}的置

换作用，形成少量Au含量较高的黄铁矿，从而导致Cu/Au比值小于1的情况出现。因此推测松树背金矿成矿流体Cu主要以Cu^{2+}形式替代Fe^{2+}（图9），且松树背金矿的载金黄铁矿中碲化物的沉淀也能指示成矿流体整体上属于还原性流体。

综上所述，松树背金矿的成矿流体呈中温、弱碱性和还原性特征。Ⅱ阶段与Ⅲ阶段黄铁矿的地球化学差异，并非岩浆热液在不同阶段单独加入，而是岩浆热液自Ⅱ阶段早期即参与成矿，并在Ⅲ阶段以残留形式持续微弱叠加。Co/Ni比值图解和As/(Fe+S)图解主要反映流体主体性质以变质热液主导，整体成矿过程表现为早期变质热液为主、岩浆热液初始混入，晚期变质热液高度主导、岩浆热液残留微弱叠加，矿床主体为造山型金矿，并伴随深源岩浆流体的多阶段贡献。

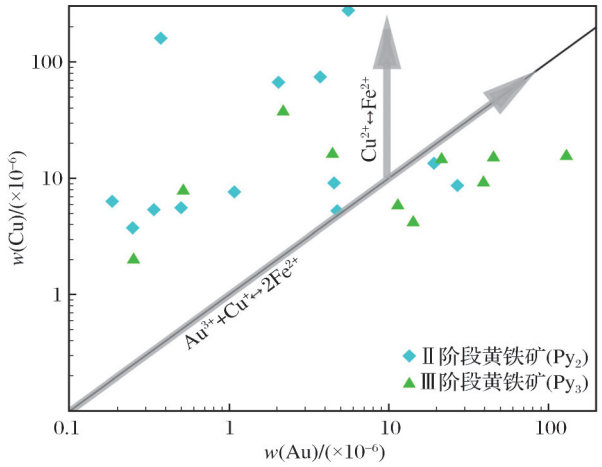


图9 造山型金矿床黄铁矿Cu替换机制（修改自Voute et al，2019）

Fig. 9 Substitution mechanism of Cu in pyrite from orogenic gold deposits（modified after Voute et al，2019）

5.3 成矿物质来源

对于多数金矿而言，载金硫化物中的S同位素可有效约束矿床中硫的来源，对于确定金矿床的成矿物质来源具有重要意义（薛仲凯等，2026）。已有的S同位素研究表明，矿床中硫的来源主要有四类（Ohmoto，1972）：地幔岩浆硫、同时期海水硫、地层硫和变质硫。本研究通过收集对比与松树背金矿在同一成矿区（带）或赋矿层位内哈达门沟、柳沟坝、东伙房、十八倾壕和常福龙沟等金矿床的S同位素数据（图10），发现各金矿$\delta^{34}S$值范围相近，指示区域赋矿地层对金矿床S同位素具有一定的控制作用（郎殿有等，1998；Nie et al，2002；李进文等，2003；梁一鸿等，2004；章永梅等，2011；侯万荣等，2014；赵洋等，2024）。

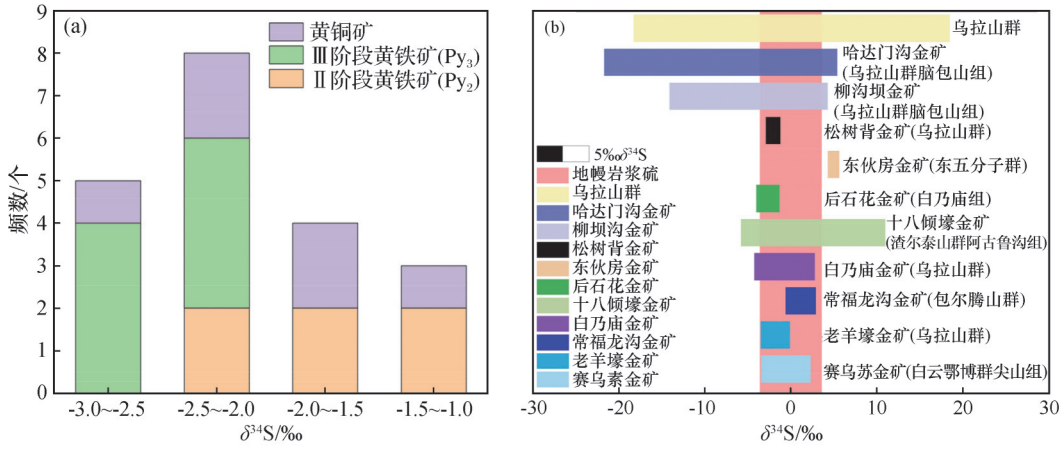


图10 松树背金矿床硫同位素图解（a）及其他矿床硫同位素对比图（b）

Fig. 10 Sulfur isotope diagram of the Songshubei gold deposit（a）and sulfur isotope comparison diagram with other deposits（b）

松树背金矿主要载金矿物为黄铁矿和黄铜矿等硫化物，没有发现硫酸盐类矿物，说明硫在成矿过程中主要以H_2S形式存在，因此硫化物中的S同位素数据可以近似代表成矿过程中S同位素组成（Ohmoto，1986）。松树背金矿床载金硫化物（黄铁矿和黄铜矿）$\delta^{34}S$值介于−2.91‰~−1.19‰，落入岩浆S同位素区间内，指示其硫源可能来自深部岩浆，这与经典造山型模型认为成矿物质来自赋矿围岩（如

绿岩)(Groves et al,1998;Large et al,2007),经变质脱挥发分过程释放成矿物质进入热液成矿系统的观点不一致。此外,对赋矿层位与松树背金矿相同的矿床进行研究得出金矿床中硫主要来自太古宙地层和深部岩浆。如章永梅等(2011)采用传统粉末法获得柳沟坝金矿热液黄铁矿$\delta^{34}S$值主要分布在-14.1‰~-4.3‰,认为成矿流体中的硫主要来源于岩浆和太古宙地层的混合硫;侯万荣等(2014)采用传统粉末法获得哈达门沟金矿热液黄铁矿$\delta^{34}S$值主要分布在-21.7‰~5.4‰,提出成矿流体中的硫具有太古宙地层和深部岩浆混合来源特征。

本次研究通过收集数据获得中太古界乌拉山群中的沉积黄铁矿原位$\delta^{34}S$值为-18.3‰~18.5‰(白阳等,2022),加上矿化石英脉周缘围岩普遍发生大规模褪色化蚀变的地质特征,暗示围岩为成矿系统贡献了硫(许可等,2022)。同时,松树背金矿床中普遍发育碲铋矿、碲铋铅矿等亲岩浆元素矿物,指示成矿作用与岩浆作用密切相关,岩浆热液为成矿系统提供了硫(孟亚群等,2024)。另外,此次原位$\delta^{34}S$值测定结果显示,成矿Ⅱ阶段黄铁矿$\delta^{34}S$值介于-2.38‰~-1.19‰窄区间,而成矿Ⅲ阶段黄铁矿$\delta^{34}S$值介于-2.91‰~-2.12‰,黄铜矿$\delta^{34}S$值介于-2.88‰~-1.30‰,两阶段$\delta^{34}S$值同时落入地幔岩浆硫和赋矿地层中太古界乌拉山群区间,但Ⅱ阶段$\delta^{34}S$值变化比Ⅲ阶段小。结合微量元素图解,推测Ⅱ阶段主要为变质流体与岩浆热液初始混合,成矿物质以变质流体携带的围岩硫为核心基底,岩浆热液提供了初始硫源与成矿介质,二者共同构成成矿初期的物质供给,为造山型金矿的核心成矿阶段奠定物质基础。到成矿Ⅲ阶段,其$\delta^{34}S$值向更负方向偏移,且分布范围拓宽,推测此时岩浆热液供给减弱,变质流体对围岩硫的萃取和富集成为主导,成矿物质以变质流体萃取的赋矿围岩硫为主导,岩浆热液仅残留微弱硫源贡献,是造山型金矿成矿物质的主要富集阶段。由此认为,松树背金矿床成矿硫主要来自太古宙地层和深部地幔岩浆。

综上所述,松树背金矿为受韧性剪切带控制的造山型金矿,成矿Ⅲ阶段为主成矿期,金矿物以自然金为主,主要呈微粒—细粒包裹金形式赋存于黄铁矿内,部分见于石英和黄铜矿中。成矿流体以中温、还原性和弱碱性变质流体为主,兼有深部岩浆热液的阶段性叠加。成矿物质主要来源于中太古界乌拉山群和地幔岩浆。松树背金矿成因机制可能为:区域韧性剪切活动诱发变质脱水与岩浆热液活化,形成中温还原性含金流体;该流体沿剪切带向上运移过程中,持续萃取中太古界乌拉山群围岩中的金、硫等成矿物质,并在构造破碎带内因水岩反应、硫化作用及局部氧逸度波动导致金络合物失稳,金与黄铁矿、黄铜矿等硫化物共沉淀,最终形成以含金石英脉为特征的金矿床。

6 结论

(1)松树背金矿为造山型金矿,存在4个矿化阶段,其中第Ⅲ阶段为主成矿期,主要载金矿物为黄铁矿,其次是石英和黄铜矿,金矿物主要为自然金,粒径为细粒—微细粒,主要以粒状和细脉状包裹金形式赋存于石英脉黄铁矿中,金成色856.26~944.95,平均金成色为930.38。

(2)松树背金矿中黄铁矿呈变质成因与岩浆热液叠加的特点,略微富硫亏铁,成矿深度为中部,成矿流体具有中温、还原性和弱碱性的特点。

(3)松树背金矿载金硫化物$\delta^{34}S$值为-2.91‰~-1.19‰,与赋矿围岩中太古界乌拉山群和地幔岩浆S同位素组成近一致,推测成矿流体中的硫主要来源于地幔岩浆和太古宙地层。

参考文献(References):

Bajwah Z U, Seccombe P K, Offler R, 1987. Trace element distribution, Co∶Ni ratios and genesis of the big cadia iron-copper deposit, new south Wales, Australia[J]. Mineralium Deposita, 22(4):292-300.

Barker S L L, Hickey K A, Cline J S, et al, 2009. Uncloaking invisible gold: use of nanosims to evaluate gold, trace elements, and sulfur isotopes in pyrite from carlin-type gold deposits[J]. Economic Geology, 104(7):897-904.

Deditius A P, Reich M, Kesler S E, et al, 2014. The coupled geochemistry of Au and As in pyrite from hydrothermal ore deposits[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 140:644-670.

Gopon P, Douglas J O, Auger M A, et al, 2019. A nanoscale investigation of carlin-type gold deposits: an atom-scale elemental and isotopic perspective[J]. Economic Geology, 114(6):1123-1133.

Groves D I, Goldfarb R J, Gebre-Mariam M, et al, 1998. Orogenic gold deposits: a proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types[J].Ore Geology Reviews, 13(1/2/3/4/5): 7-27.

Hannington M, Garbe-Schönberg D, 2019. Detection of gold nanoparticles in hydrothermal fluids[J]. Economic Geology, 114(2): 397-400.

Hart C J, Goldfarb R J, Qiu Y M, et al, 2002. Gold deposits of the northern margin of the North China Craton: multiple Late Paleozoic-Mesozoic mineralizing events [J]. Mineralium Deposita, 37(3): 326-351.

Hastie E C G, Kontak D J, Lafrance B, 2020. Gold remobilization: insights from gold deposits in the Archean swayze greenstone belt, Abitibi subprovince, Canada[J]. Economic Geology, 115(2): 241-277.

Keith M, Haase K M, Chivas A R, et al, 2022. Phase separation and fluid mixing revealed by trace element signatures in pyrite from porphyry systems[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 329: 185-205.

Keith M, Smith D J, Doyle K, et al, 2020. Pyrite chemistry: a new window into Au-Te ore-forming processes in alkaline epithermal districts, Cripple Creek, Colorado[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 274: 172-191.

Keith M, Smith D J, Jenkin G R T, et al, 2018. A review of Te and Se systematics in hydrothermal pyrite from precious metal deposits: insights into ore-forming processes[J]. Ore Geology Reviews, 96: 269-282.

Koglin N, Frimmel H E, Lawrie Minter W E, et al, 2010. Trace-element characteristics of different pyrite types in Mesoarchaean to Palaeoproterozoic placer deposits[J]. Mineralium Deposita, 45(3): 259-280.

Kouhestani H, Ghaderi M, Large R R, et al, 2017. Texture and chemistry of pyrite at Chah Zard epithermal gold-silver deposit, Iran[J]. Ore Geology Reviews, 84: 80-101.

Large R R, Maslennikov V V, Robert F, et al, 2007. Multistage sedimentary and metamorphic origin of pyrite and gold in the giant Sukhoi log deposit, Lena gold province, Russia [J]. Economic Geology, 102(7): 1233-1267.

Nie F J, Jiang S H, Su X X, et al, 2002. Geological features and origin of gold deposits occurring in the Baotou-Bayan Obo district, south-central Inner Mongolia, People's Republic of China[J]. Ore Geology Reviews, 20(3/4): 139-169.

Ohmoto H, 1986. Stable isotope geochemistry of ore deposits [J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 16(1): 491-559.

Ohmoto H, 1972. Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits[J]. Economic Geology, 67(5): 551-578.

Reich M, Deditius A, Chryssoulis S, et al, 2013. Pyrite as a record of hydrothermal fluid evolution in a porphyry copper system: a SIMS/EMPA trace element study[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 104: 42-62.

Román N, Reich M, Leisen M, et al, 2019. Geochemical and micro-textural fingerprints of boiling in pyrite[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 246: 60-85.

Voute F, Hagemann S G, Evans N J, et al, 2019. Sulfur isotopes, trace element, and textural analyses of pyrite, arsenopyrite and base metal sulfides associated with gold mineralization in the Pataz-Parcoy district, Peru: implication for paragenesis, fluid source, and gold deposition mechanisms[J]. Mineralium Deposita, 54(7): 1077-1100.

Xu L, Yang J H, Xie L W, et al, 2022. Evaluation of plasma condition, concentration effect, position effect, and nickel-doping method on non-matrix-matched Fe isotopic analysis by femtosecond laser ablation multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 189: 106374.

Xue X F, Feng Y C, Tamer M T, et al, 2025. Comparison of gold precipitation processes between disseminated and quartz vein ores of orogenic gold deposits: insights from the Linglong gold field, Jiaodong Peninsula, China[J]. Ore Geology Reviews, 183: 106639.

Zeng Q D, Wang Y B, Yang J, et al, 2021. Spatial-temporal distribution and tectonic setting of gold deposits in the Northern margin gold belt of the North China Craton[J]. International Geology Review, 63(8): 941-972.

白阳, 张连昌, 朱明田, 等, 2022. 华北克拉通北缘三叠纪金矿床地质特征、物质来源与控制因素[J]. 岩石学报, 38(4): 993-1024. Bai Yang, Zhang Lianchang, Zhu Mingtian, et al, 2022. Geological characteristics, sources and controlling factors of the Triassic gold deposits in the northern margin of the North China Craton[J]. Acta Petrologica Sinica, 38(4): 993-1024.

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.

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[J].岩石学报,23(9):2085-2108.Chen Yanjing, Ni Pei, Fan Hongrui, et al, 2007. Diagnostic fluid inclusions of different types hydrothermal gold deposits [J].Acta Petrologica Sinica,23(9):2085-2108.

冯岳川,邓军,于皓丞,等,2023.胶东玲珑金矿田金的赋存状态及其对成矿过程的指示意义[J].岩石学报,39(2):377-392. Feng Yuechuan, Deng Jun, Yu Haocheng, et al, 2023. Gold occurrence and its indicative significance to mineralization process in Linglong gold district, Jiaodong gold province [J]. Acta Petrologica Sinica, 39 (2): 377-392.

侯万荣,聂凤军,张纯歌,等,2014.内蒙古哈达门沟金矿床地质特征及成矿作用探讨[J].地质学报,88(8):1549-1560. Hou Wanrong, Nie Fengjun, Zhang Chunge, et al, 2014. Study on geological characteristics and metallogenesis of the Hadamengou gold deposit in Inner Mongolia[J]. Acta Geologica Sinica,88(8):1549-1560.

郎殿有,李伟,1998.内蒙古乌拉山金矿带硫同位素特征研究[J].内蒙古地质,86(1):25-35. Lang Dianyou, Li Wei, 1998. Study gold ore belt sulfur isotopic characteristics in Wulashan, Inner Mongolia [J]. Geology of Inner Mongolia, 86(1): 25-35.

雷万杉,张严飞,刘亚剑,等,2017.豫西陆院沟蚀变岩型金矿床黄铁矿标型研究[J].地学前缘,24(2):176-185. Lei Wanshan, Zhang Yanfei, Liu Yajian, et al, 2017. Typomorphic characteristics of Au-bearing pyrites from Luyuangou altered gold deposit, western Henan Province [J]. Earth Science Frontiers,24(2):176-185.

李洪梁,李光明,2019.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,26(3):202-210. Li Hongliang, Li Guangming, 2019. Compositional characteristics of pyrite ore formed in the main metallogenic period of various types of hydrothermal gold deposits[J]. Earth Science Frontiers,26(3):202-210.

李进文,王存贤,侯万荣,等,2003.内蒙古白乃庙地区金矿成矿作用[J].现代地质,17(3):275-280. Li Jinwen, Wang Cunxian, Hou Wanrong, et al, 2003. Mineralization of gold deposits in the Bainaimiao area, Inner Mongolia[J]. Geoscience,17(3):275-280.

李政,2021.内蒙古哈达门沟金矿成矿流体特征及矿床成因探讨[D].北京:中国地质大学(北京). Li Zheng, 2021. Discussion on the characteristics of ore-forming fluids and genesis of Hadamengou gold deposit in Inner Mongolia [D].Beijing:China University of Geosciences.

梁一鸿,张宏颖,2004.十八倾壕金矿床硫同位素组成的构造学意义[J].地质与勘探,40(6):1-4. Liang Yihong, Zhang Hongying, 2004. The structural significance of sulphur isotope composition in the Shibaqinghao gold deposit [J].Geology and Prospecting,40(6):1-4.

刘华南,刘家军,代鸿章,等,2016.内蒙古新地沟金矿床中金的赋存状态研究[J].中国地质,43(1):261-274. Liu Huanan, Liu Jiajun, Dai Hongzhang, et al, 2016. Modes of occurrence of gold in the Xindigou gold deposit, Inner Mongolia[J].Geology in China,43(1):261-274.

刘家军,翟德高,王大钊,等,2020.Au-(Ag)-Te-Se成矿系统与成矿作用[J].地学前缘,27(2):79-98. Liu Jiajun, Zhai Degao, Wang Dazhao, et al, 2020. Classification and mineralization of the Au-(Ag)-Te-Se deposits[J]. Earth Science Frontiers,27(2):79-98.

卢焕章,池国祥,朱笑青,等,2018.造山型金矿的地质特征和成矿流体[J].大地构造与成矿学,42(2):244-265. Lu Huanzhang, Chi Guoxiang, Zhu Xiaoqing, et al, 2018. Geological characteristics and ore forming fluids of orogenic gold deposits[J]. Geotectonica et Metallogenia,42(2):244-265.

孟亚群,李伟,毛景文,等,2024.沉积黄铁矿微量元素和硫同位素组成对黄金洞金矿床的成因约束[J].矿床地质,43(4):935-950. Meng Yaqun, Li Wei, Mao Jingwen, et al, 2024. Trace elements and sulfur isotopic composition of sedimentary pyrite on constraining ore genesis of Huangjindong gold deposit[J].Mineral Deposits,43(4):935-950.

倪培,迟哲,潘君屹,等,2018.热液矿床的成矿流体与成矿机制:以中国若干典型矿床为例[J].矿物岩石地球化学通报,37(3):369-394. Ni Pei, Chi Zhe, Pan Junyi, et al, 2018. The characteristics of ore-forming fluids and mineralization mechanism in hydrothermal deposits: a case study of some typical deposits in China[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry,37(3):369-394.

饶峥,赵立民,潘永盛,等,2024.江西石坞金矿床地质特征和金的赋存状态及对选矿工艺的指示意义[J].科学技术与工程,24(5):1789-1798. Rao Zheng, Zhao Limin, Pan Yongsheng, et al, 2024. Geological characteristics and gold occurrence state and its indicative significance for mineral processing technology in Shiwu gold deposit, Jiangxi Province[J]. Science Technology and Engineering, 24(5):1789-1798.

孙雨沁,于学峰,单伟,等,2020.胶东焦家断裂带3000 m深部矿化特征及金矿物赋存状态[J].地球学报,41(6):919-937. Sun Yuqin, Yu Xuefeng, Shan Wei, et al, 2020. Mineralization characteristics and modes of occurrence of

gold minerals at the depth of 3000 meters in Jiaojia fault zone, Jiaodong Peninsula[J]. Acta Geoscientia Sinica, 41(6):919-937.

王建宏,袁利东,王胜利,等,2022.松树背金矿矿体地质特征及开采技术条件研究[J].能源与环保,44(6):126-132. Wang Jianhong, Yuan Lidong, Wang Shengli, et al, 2022. Study on geological characteristics and mining technology conditions of Songshubei gold mine[J]. China Energy and Environmental Protection, 44(6):126-132.

王梁,王根厚,雷时斌,等,2015.内蒙武川后石花金矿床辉钼矿Re-Os同位素年龄及其地质意义[J].地质与勘探,51(3):422-431. Wang Liang, Wang Genhou, Lei Shibin, et al, 2015. Re-Os dating of molybdenites from the Houshihua gold deposit in Wuchuan County, Inner Mongolia and its geological significance[J]. Geology and Exploration, 51(3):422-431.

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[J].地球科学,44(6):2155-2186. Wang Qingfei, Deng Jun, Zhao Hesen, et al, 2019. Review on orogenic gold deposits[J]. Earth Science, 44(6):2155-2186.

许可,许德如,2022.江南造山带黄金洞金矿蚀变岩型金矿化形成机制研究[J].黄金科学技术,30(2):151-164. Xu Ke, Xu Deru, 2022. Study on the formation mechanism of altered rock type gold mineralization of Huangjindong gold deposit in Jiangnan Orogenic Belt[J]. Gold Science and Technology, 30(2):151-164.

薛仲凯,范堡程,李航,等,2026.西秦岭早子沟金矿床金赋存状态、成矿物质来源及矿床成因探讨[J].西北地质,59(1):44-59. Xue Zhongkai, Fan Baocheng, Li Hang, et al, 2026. Discussion on gold occurrence state, metallogenic material source and genesis of the Zaozigou gold deposit in west Qinling Orogenic Belt[J]. Northwestern Geology, 59(1):44-59.

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.

杨永飞,刘书生,聂飞,等,2019.四川木里梭罗沟金矿床流体包裹体研究及矿床成因[J].矿床地质,38(2):261-276. Yang Yongfei, Liu Shusheng, Nie Fei, et al, 2019. Fluid inclusion constraint on origin of Suoluogou Au deposit, Muli County, Sichuan Province[J]. Mineral Deposits, 38(2):261-276.

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.

章永梅,顾雪祥,程文斌,等,2011.内蒙古柳坝沟—哈达门沟金矿田稳定同位素地球化学研究[J].矿物学报,31(3):530-540. Zhang Yongmei, Gu Xuexiang, Cheng Wenbin, et al, 2011. Stable isotopic geochemistry of the Liubagou-Hadamengou gold deposit in Inner Mongolia[J]. Acta Mineralogica Sinica, 31(3):530-540.

赵凯,杨立强,李坡,等,2013.滇西老王寨金矿床黄铁矿形貌特征与化学组成[J].岩石学报,29(11):3937-3948. Zhao Kai, Yang Liqiang, Li Po, et al, 2013. Morphology and chemistry composition of pyrite in the Laowangzhai gold deposit, Ailaoshan orogenic belt, SW China[J]. Acta Petrologica Sinica, 29(11):3937-3948.

赵洋,王晓阳,李瑞红,等,2024.内蒙古东伙房金矿床黄铁矿硫同位素特征[J].地质论评,70(增刊1):180-182. Zhao Yang, Wang Xiaoyang, Li Ruihong, et al, 2024. Sulfur isotope characteristics of pyrite in Donghuofang gold deposit, Inner Mongolia[J]. Geological Review, 70(Suppl.1):180-182.

赵永强,王昆,许道学,等,2024.基于BPMA的胶东某含金矿石可选性试验研究[J].中国有色金属学报,34(8):2819-2830. Zhao Yongqiang, Wang Kun, Xu Daoxue, et al, 2024. Experimental study on selectability of gold ore in Jiaodong based on BPMA[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 34(8):2819-2830.

郑卫杰,2016.不同类型金矿黄铁矿微量元素和热电性标型特征[D].北京:中国地质大学(北京). Zheng Weijie, 2016. Trace elements and thermoelectricity typomorphic characteristics of pyrite in gold deposits of different types[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing).

Genetic Mineralogical Characteristics and Geological Significance of Gold Minerals and Gold-bearing Pyrites in the Songshubei Gold Deposit, Inner Mongolia

WU Jun[1], SONG Xiaoxia[1,2], LI Haitao[3], LI Ning[1]

1. *College of Geoscience and Surveying Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan* 030024, *Shanxi, China*;

2. *Key Laboratory of In-situ Property-improving Mining of Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan* 030024, *Shanxi, China*;

3. *Shanxi Carboniferous Mineral Exploration Co., Ltd., Taiyuan* 030000, *Shanxi, China*

Abstract: The Songshubei gold deposit is situated in the northern segment of the Wulashan-Daqingshan metallogenic belt, along the northern margin of the North China Craton. The ore-hosting strata within this mining region are identified as the Archean Wulashan Group. Gold-bearing quartz veins, which constitute the orebodies, are hosted within both the Archean Wulashan Group and the Early Proterozoic mylonitized quartz diorite. The formation and spatial distribution of these orebodies are predominantly governed by the Houshihua-Songshubei ductile shear zone. The primary wall-rock alterations observed in the area include sericitization, chloritization, and potassic feldspathization. The principal sulfide minerals present are pyrite and chalcopyrite, categorizing the deposit as a sulfide-poor gold type. This study aimed to identify the primary gold-hosting minerals and characterize the occurrence of gold to inform exploration and resource extraction strategies, as well as to investigate the genesis of the deposit, including the sources of ore-forming materials and fluids. To achieve these objectives, the research integrated petrographic observations of quartz and sulfides from various mineralization stages with in-situ geochemical analyses. These analyses included electron probe microanalysis (EMPA) for major elements, laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS) for trace elements, and laser ablation multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-MC-ICP-MS) for sulfur isotopes on gold minerals and gold-hosting sulfides. The findings reveal that the Songshubei gold deposit is an orogenic-type gold deposit. Four distinct stages of mineralization were identified, with the third stage being the primary ore-forming period, occurring at a moderate crustal depth. Gold is predominantly present as native gold, primarily in the form of inclusions within pyrite. The gold grain sizes range from fine to very fine, with no visible gold observed thus far. The fineness of the gold varies from 856.26 to 944.95, with an average of 930.38. The gold-bearing pyrites are notably enriched in mesothermal chalcophile elements, including Au, Ag, Cu, and Pb. They are characterized by low Co/Ni ratios (ranging from 0.04 to 1.12) and highly variable Cu/Au ratios (ranging from 0.01 to 3 052.68). Formation temperatures, as estimated using the selenium (Se) geothermometer, range from 365 ℃ to 583 ℃, suggesting precipitation from a mesothermal, reducing ore-forming fluid. In-situ sulfur isotope analyses of gold-hosting pyrite and coexisting chalcopyrite produced $\delta^{34}S$ values between -2.91‰ and -1.19‰. These values fall within the typical range for mantle/magmatic sulfur and overlap with the sulfur isotope signature of the Archean Wulashan Group. This overlap indicates a mixed sulfur source, originating from both the metamorphosed Archean Wulashan Group and deep-seated mantle or magmatic sources. In conclusion, the Songshubei gold deposit is classified as an orogenic-type gold deposit, controlled by ductile shear zones. Its ore-forming process is primarily dominated by metamorphic fluids, with episodic incursions of deep-seated magmatic hydrothermal fluids. The ore-forming materials are mainly derived from a mixed source comprising the Archean Wulashan Group and mantle magma.

Key words: Songshubei gold deposit; gold mineral; gold-bearing pyrites; microelement; sulfide sulfur isotope